日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.15
Oct.2011

東日本大震災 特集号

巻頭言：会誌“東日本大震災特集号”の刊行にあたって

座談会：東日本大震災を考える

特　集：被災地の実態と課題

（被災地からの声）

追悼文：カリフォルニア大学バークレイ校

Joseph Penzien 名誉教授のご逝去を悼む

JAEE
http://www.jaee.gr.jp/

一般社団法人 日本地震工学会
Japan Association for Earthquake Engineering

〒108-0014東京都港区芝5-26-20建築会館
Tel:03-5730-2831　Fax:03-5730-2830

日本地震工学会誌（第15号 2011年10月）

Bulletin of JAEE（No.15 October.2011）

INDEX

巻頭言：

会誌“東日本大震災特集号”の刊行にあたって／川島　一彦 …… 1

座談会：

東日本大震災を考える…… 2

特集：被災地の実態と課題

東北地方太平洋沖地震：地殻変動と余震等の見通し／田所　敬一…… 19
東北地方太平洋沖地震で観測された強震動
　／青井　　真、功刀　　卓、鈴木　　亘、森川　信之、中村　洋光、藤原　広行…… 25
東日本大震災を経験して　－地震動と建物被害を中心として－／源栄　正人…… 29
液状化・造成地の被害の特徴と課題／若松加寿江 …… 33
土木構造物・宅造地の液状化被害と課題／東畑　郁生、田口　雄一、青山　翔吾、大坪　正英 …… 37
東日本大震災による上水道の被害と復旧の課題／鍬田　泰子…… 41
津波と鉄筋コンクリート造建築物の被災／松冨　英夫…… 45
海岸保全施設の被災とそのメカニズムと対策について／有川　太郎…… 49
津波による建築物の被害形態と作用荷重の推定／壁谷澤寿一…… 53
地震動による鉄筋コンクリート造建築物の被害／谷　　昌典…… 57
東日本大震災と多発する天井落下被害／川口　健一…… 61
東日本大震災における超高層・免震建築物の挙動／斉藤　大樹 …… 65
橋梁被害に対する耐震設計法向上と耐震補強の有効性／川島　一彦…… 69
鉄道橋の被害／高橋　良和…… 73
津波による橋梁被害／幸左　賢二…… 75
平成23年東北地方太平洋沖地震による港湾施設被害／菅野　高弘 …… 79
「防災教育」と「3.11での成果」／田中　礼治 …… 85
首都直下地震時における帰宅行動と帰宅困難／大佛　俊泰…… 89
想定を越える大津波からの避難の実態（山田町の事例）／後藤　洋三 …… 93
原子力発電所の安全に対する地震工学の課題／亀田　弘行…… 97

（被災地からの声）…… 103

仙台平野の巨大津波／柴田　明徳
発生頻度の低い巨大地震・津波対応の議論を／風間　基樹
想定内と想定外―誰にとって？／吉田　　望
東北地方太平洋沖地震後の耐震設計／浅里　和茂
建物の地震被害と構造技術者の役割について／迫田　丈志
3.11 東日本大震災に被災して思ったこと／沼尻　靖久
茨城県ではなぜ史上まれにみる激甚で広範囲な災害が起きたのでしょうか？／安原　一哉
防災に安全率を用いることの危険性／境　　有紀
311地震と留学生⇔「隠れている防災教育の盲点」／薛　　松濤
「地域とともにある学校づくり」の実現に向けた地震工学研究の社会貢献／佐藤　　健

追悼文：

カリフォルニア大学バークレイ校Joseph Penzien名誉教授のご逝去を悼む／川島　一彦 …… 108

ニュース：

東日本大震災国際シンポジウムの開催について…… 110

編集後記

巻頭言

会誌“東日本大震災特集号”の刊行にあたって

川島　一彦
●東京工業大学教授、日本地震工学会会長

3月11日は9月1日、1月17日と並んで、我が国の震災史上、歴史に残る日となりました。東日本大震災により亡くなられたり未だに行方不明になられている2万人近い犠牲者の霊に対して衷心より哀悼の念を捧げると同時に、物心両面にわって甚大な被害を受けられた被災者の皆様に心よりお見舞いを申し上げる次第です。自然の猛威を前にして、人間の非力さをまざまざと実感すると同時に、津波の脅威を目の当たりにし、2004年インド洋津波地震のすさまじさを報道等で繰り返し見ていたにもかかわらず、それが自分達にも及ぶ可能性があることに思い至らなかった洞察力のなさを思い知った地震工学の専門家も多数おられることと思います。

百聞は一見に如かずと言いますが、逆に言うと、人間は見たことのない現象は信じられないものだということです。同じ思いは1995年兵庫県南部地震の時にも抱きました。ほんの短い時間スパンの中から私たちがのぞき見ることのできた世界と現実の非常に長い時間スパンの中で起こる猛烈な自然災害の間には大きな乖離があることを2回の経験で思い知らされたのです。

しかし、今回の大震災では地震動による構造物、施設の被害は全般的に限定的であったと言ってよいと思います。これは現在までの各種の震前、震後対策が功を奏したことが大きな要因の一つだと考えられます。現在までの地震対策が地震動に対する被害の軽減には大きく寄与したということは、現在まで私たちがやってきたことは決して間違っていなかったということです。しかし、新しい課題がいくつも突きつけられました。

地震工学および地震防災に関する学術・技術の進歩発展をはかり、これによって地震災害の軽減に貢献することを目的とする日本地震工学会にとって、今回の大震災の教訓を最大限にくみ取り、問題を整理し新たな研究、技術開発に取り組んでこれを将来の地震災害の軽減、防除に役立てることが、私たちに課せられた使命であります。震災は東日本大震災で終わるわけではありません。近い将来、首都圏直下地震、東海、東南海、南海地震等の発生が危惧されています。このほかにも今回の地震のように予想されなかったところに起こる大地震もあると覚悟しなければなりません。地震工学の専門家が貢献すべき役割にはきわめて大きいものがあります。

こうした思いから、今回、日本地震工学会としては初めてとなる震災特集号（会誌増刊号）を刊行することとしました。会員各位のご協力により、日本地震工学会にしかできない幅広い領域の震災情報をタイムリーに取り入れることができました。本震災特集号が東日本大震災の本質を少しでも正しく会員の皆様にお伝えできることを願っています。

末尾になりましたが、短時間の間に原稿執筆にご協力いただきました執筆者の皆様、会誌編集委員会の斉藤大樹編集委員長をはじめご関係の皆様のご尽力に心から感謝する次第です。

平成23年10月

座談会

東日本大震災を考える

◆ **日　時**：平成23年8月19日㈮　10:00－12:00
◆ **場　所**：建築会館（東京・港区／日本建築学会役員室）
◆ **出席者**：島崎　邦彦：東京大学名誉教授、日本活断層学会会長
今村　文彦：東北大学教授、日本自然災害学会前会長
和田　　章：東京工業大学名誉教授、日本建築学会会長
若松加寿江：関東学院大学教授、日本地震工学会副会長
川島　一彦：東京工業大学教授、日本地震工学会会長（聞き手兼任）

１．今回の震災を経験して、何を思ったか？

川島：それでは、最初に、皆様から、東日本大震災を経験して何を思われたかという視点で話をお伺いしたいと思います。今回の地震はＭ９という巨大地震であったわけですが、まず、島崎先生から、地震に関してお聞かせください。

川島一彦 氏

島崎：当日は、本震、最大余震ともに東京神谷町の高層ビルの11階で揺れを感じましたが、最大余震の時には、また来たか、もう勘弁してくれという感じでしたね。外に出ると人があふれて地下鉄は止まり、タクシーは拾えないという状況でした。

地震後すぐに感じたことと、しばらく経ち、経緯を振り返ってみて考えたことと２つあります。地震後すぐ思ったことは、地震本部長期評価部会の部会長として日本海溝沿いの地震の長期評価をやってきた訳ですが、そこにはＭ９という地震は予測されていないわけで、今まで我々がやってきたことのどこが間違ったのかという反省と、被災者に申し訳ないという気持ちです。

その時には西暦869年の貞観地震について審議中で、この成果をもっと早く発表できるように、もっと効率的に審議できなかったのかと思いました。

プレートテクトニクスの考え方によれば、プレート境界の固着状況は地域で異なり、Ｍ９の地震が起こるのは沈み込むプレートの年代が比較的若い地域に多いと考えられています。また、Ｍ９の地震はプレートの動きが速い所に起こると言われてきましたが、それは単にプレートの動きが速いと発見が容易であり、プレートの動きがゆっくりだと発生間隔が長いため、発見しにくいということだけの違いだということが2004年スマトラ地震で分かってきたのです。しかし、まだ昔の考え方が残っていて、日本海溝は最もプレートの年代が古い地域ですからＭ９の地震が起こることに思い至らなかったのです。

島崎邦彦 氏

福島県沖では1938年にＭ７1/2程度の地震が立て続けに起こりましたが、少なくとも江戸時代の歴史記録を見る限りは大きな被害を起こした地震はありません。これを長期予測でどう捉えるかは難しくて悩んだのですが、過去の経験がそのまま続くと考えて評価したため、福島ではあまり揺れないという結果が出てしまいました。今回、これが誤りであることははっきりした訳で、大変残念だと思っています。我々の考え方の枠組みを基本的に検討すべきであったのですが、不十分なままに時間を過してしまったのです。

福島県沖ではプレート境界の固着が弱いと想定していました。上田先生や金森先生が1970年代に提唱されたことです。最近数年ですが、ＧＰＳの観測結果はそのことを示していました。特に、Ｍ６後半の地震が起こると、地震自体によるズレは小さいのですが、その後それよりも大きな余効変動が起こる（ズレがゆっくり起こる）という状況が見られました。これは固着が

弱いとの想定通りでした。しかし、今回の地震でこれが逆転したことは、非常にショックでした。今からさかのぼると、最近数年間のデータがおかしかったのであって、それまでのデータを見るとプレート境界は固着していたのです。ＧＰＳが使われ出してまだ初期の段階であったため、まだよく分かっていないと思い、その後、固着が小さくなったということで、考え方が良かったのかなと思っていたのです。今回の地震でこれが逆転しました。

2005年宮城県沖で地震が起こり、これが宮城県沖地震としては中途半端な地震であったので、その後、文科省により重点観測計画として系統的な調査が行われた結果、貞観地震に関していろいろ分かってきました。これを長期評価に取り入れようとして審議がほぼ終了しつつあるところであったのです。今回の地震が起こる前に、この結果を活かせなかったことは残念なことでした。なお、2005年の宮城県沖は1936年宮城県沖地震と同じ大きさだという金森先生他の論文があって、これが誤りであることを示す等、長期評価の審議に時間がかかりました。1936年の宮城県沖地震の波形をしらべると、震源の北の観測点では2005年の波形と良く似ているのですが、震源の南では1936年の方がはるかに大きいのです。

川島：少し時間が経った現在、どのように考えておられるかについて伺いたいと思います。

島崎：少し経ってから地震の正体が分かってくると、地震科学の新しい扉が開いたのだと思っています。これまで、十勝沖地震、宮城県沖地震等、プレート境界で起こる地震のことはよく分かっていると思っていましたが、それは一段下の地震を見ていたのであって、本当のプレート境界の沈み込みというのは、今度の地震で初めて目の当たりにしたのだということです。日本の海底観測が進んできた結果、明らかになったわけです。これまでもＭ９の地震は他の箇所では起きていましたが、十分な観測ができていなかったので、その実態がよく分かっていなかったのです。

今回の地震では海底が何十ｍも動くということを目の当たりにして、これこそがプレートの沈み込みそのものであり、プレート境界の沈み込み帯における一番上位で最重要な地震が起きたことが分かったのです。これまでは、それよりも下位のマイナーな地震を見ていて、これがプレート境界の地震だと我々は思い込んでいたのですね。

少し話は飛びますが、活断層の地震では地震により地表が大きく変形して、後でトレンチ調査すると、何年頃にどのくらいズレたかということが分かります。ところが、活断層では後にトレンチを掘ってもわからないようなマイナーな地震が起こるのです。例えば、2004年新潟県中越地震では活断層の位置で地表がずれていますが10cm程度と小さいのですね。しかし、トレンチ調査をすると２ｍといった非常に大きなズレが、過去の地震で生じたことがわかります。トレンチ調査で分かる1級の活断層の地震とそれ以外のマイナーな地震があるのです。活断層ではマイナーな地震も含めて長期評価をしなければならないと考えていたのです。

我々が地表と同様に海底調査したとすると、たとえばこれまでの十勝沖地震でも海底は変形していますが、ブロードな変形ですからたぶん分からないだろうと思います。海溝の詳細な調査結果はまだ出ていませんが、今度の地震では非常に大きな変形をしているわけですから、将来海底面でトレンチ調査をすれば、明確に分かる地震であったわけです。すなわち、活断層の地震と思っていたのが海溝で言えば今回の地震であって、活断層の下位の地震、すなわち地表で痕跡が認められない地震が、実は我々がプレート境界の地震だとこれまで考えてきた地震に相当するのです。海溝で起こるこの非常に大きな変形は陸地から遠いため、従来捉えられていませんでした。一番本質的な現象が捉えられていなかったという反省とともに、これからは新しいプレート境界の地震の科学が進んでいくと思っています。海溝付近で起こる地震では地震動はそれほど強くありませんが、非常に大きな海底の変形が起こることによって大きな津波が起こります。今まで「津波地震」（専門用語で、揺れは小さいが津波が大きい特殊な地震）という一言で片付けられてきた、このような地震が大変重要です。

災害軽減に関しては、これまでやってきたことは決して無駄ではなかったのですが、次に述べるように、残念ながら地震学から防災関係者に情報が伝わりませんでした。科学者としては、これまで生きてきたおかげでプレート境界の沈み込みの実態を見ることができ、幸せだと思っています。

長期評価では津波地震について予測をしていました。2002年7月の報告書では、日本海溝では津波マグニチュードMt8.2くらいの津波地震がどこでも起こると予測したのです。我々の長期評価の報告書は、その時は知りませんでしたが、2002年2月土木学会原子力土木委員会の津波評価の報告書とは矛盾していました。「既往最大で、その地域で過去に繰返し発生したと

思われる地震で、かつ断層モデルがはっきりしている地震を取り上げるべきだ」というのが原子力土木委員会の考えでした。その後、中央防災会議の方で日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会が設置され、津波の被害想定に用いる地震が議論されました。長期評価の考え方と原子力土木委員会の考え方があり、最終的に原子力土木委員会の方が採用されたのです。私は反対したのですが、非常に無力で反対意見はとおらず、そのような流れになってしまったのです。日本海溝の北の方では1896年明治三陸地震が繰り返すが、南の方では津波地震は起こらないという想定ですね。このため、防波堤も牡鹿半島の先端くらいまでは津波対策ですが、それから南は高潮対策でつくられています。津波をまるきり考えていなかった、無防備の場所に津波が襲ったというのが今回の地震だったのです。

今から言っても詮無いことかもしれませんが、あのときに長期評価の考え方を取り入れて、「これまで地震が起こっていなかった地域にも大きな津波を伴う地震が起こりますよ、日本海溝のどの地域でも津波地震は起こりますよ」という考え方を採用していれば、被害をかなり軽減できた可能性があります。もっとも、防災関係者に対策の必要性をどこまで説得できたかは分かりません。国の政策に対し、我々の反対意見を通せなかったことは残念です。

座談会後、東電では2008年夏に地震本部の長期評価に従って福島第一原発での津波を計算し、浸水高10.2m、遡上高15.7mとの結果を得たとの報道がありました。地震本部の長期評価は地震学的には不十分であったものの、防災の観点からは、十分役に立つものであったと思います。今も引き続く原発災害や、津波で亡くなられた多くの方々を考えると、本当に残念ですし、憤りを感じます。（島崎）

2002年の長期予測では、日本海溝の津波地震の津波マグニチュードを1896年明治三陸地震の値を用いて8.2としました。その後、2003年に阿部先生が論文を書かれてそれを8.6に直されたのですね。その時点で我々もマグニチュードを見直すべきであったのですが、いったん発表してからこれを直すのは、そんなに急に変えられても困るという政府の無謬主義とか防災関係者の都合等いろいろあり、変えづらいということで、何かの機会に変えようとしてそのままになってきた経緯があります。

阿部先生の論文をきちんと読むと2003年の時点で9.0という数値が出ているのですね。阿部先生はこの値はあまりにも大きいということから、海外の験潮記録に基づく8.6を採用されました。津波マグニチュード9.0がどこから出てくるかをよく読んでみると、三陸の遡上高の平均値から来ているのです。日本に対する影響の大きさを考えればこの9.0を使うべきです。十分科学的に詰めればそこまでいけたかもしれませんが、いろいろ不十分のままに過ぎてしまいました。

川島：地震科学の新しい扉が開いたということですね。内陸の活断層の地震でもトレンチを掘るとズレが大きいが、最近の地震ではそれほどズレは大きくないということは、将来、もっと規模の大きな内陸活断層の地震が生じ得るということですか？

島崎：そうですね。駿河湾の北の富士川河口断層では、非常に間隔が長いが起こるとズレは10mとかとんでもなく大きくなるため、評価が難しかったことを思い出します。この断層や国府津-松田断層は、海溝が陸に入ってくる所に位置します。これまでは異常だと思っていたのですが、今回の地震を見てみると異常ではないかもしれないということで、もう一度よく考えてみる必要があると思っています。

川島：巨大地震というと1707年宝永地震とか1854年安政東海地震、南海地震を思い浮かべるのですが、こういう巨大な地震も今回の地震から見ると位置づけが変わる可能性があるのですか?

島崎：少なくとも1707年宝永地震に関しては位置づけが変わると思います。これまでは連動と考えていましたが、恐らく津波地震が含まれていた可能性が高いと思います。歴史地震に関しては震度と津波のデータしか無いわけですが、震度から見ると決してM9のように大きくはならないのです。しかし、津波が四国西部や九州で非常に高かったのは事実です。ということは、海溝沿いに非常に大きな変形が起きて、これにより津波は大きかったが、地震動がそれほど大きくなかった可能性があります。それが陰に隠れて見えていなかったということだと思います。

川島：従来矛盾があっても分からなかったことが、今回の地震を経験し、説明できるという方向に大きく地震学が変わってくるということですね。

島崎：そう思います。今回の津波は、長い波長によっ

て広い浸水域を伴う貞観型と、高い波高で破壊力のある明治三陸型とが、同時に発生しました。中央防災会議では、500年間隔地震と呼ばれる、北海道の十勝沖～根室沖で津波の浸水域が広い地震が、津波被害の想定で取り上げられました。今回の地震により、北海道では津波対策が本格化するようですが、あれも浸水域が広いだけでなく、恐らく明治三陸型津波を伴っていたのではないかと思います。15m以上の高いがけに津波堆積物が見つかっています。今回の地震とよく似た広い浸水域と高い津波を伴った地震だと思われます。そういう意味では津波マグニチュードを使えばM 9という値が出てきても不思議はありません。このように津波に関しては、高さと浸水域の広さをきっちり分けて考えることが重要です。また、海溝型地震に関しては、震動と津波とをきっちり分けて想定することを考えていく必要があります。

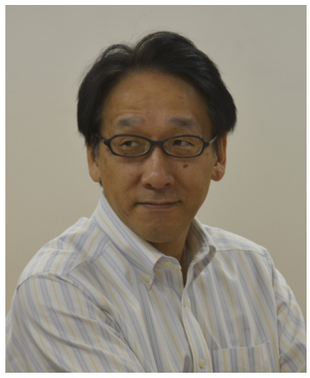
川島：最近の地震動としては1995年兵庫県南部地震による地震動が建築や土木施設に強烈な影響を与えたわけですが、これを大きく凌ぐ、長周期地震動も伴った規模の大きな内陸活断層の地震が生じ得るということでしょうか。

島崎：活断層の中でも富士川河口断層のようなプレート境界断層や糸魚川-静岡構造線断層帯や中央構造線断層帯のように長大で特別変位が大きい地震を除くと、他の断層では変位が大きいといっても数mであって、10mということはありませんし、断層の長さもそれほどありません。このため、長周期地震動は主として海溝型地震によって生じると考えて良いと思います。

川島：島崎先生、ありがとうございました。それでは、今回の地震では大規模な津波により大きな被害が出ましたが、今村先生から津波に関してお聞きしたいと思います。

今村：巨大地震津波の大災害の時代に入ったと実感しています。2004年には歴史上最悪のスマトラ地震によるインド洋津波が発生し、昨年には2010年チリ地震・津波が生じました。巨大地震、広域災害に対する対策のさらなる重要性を感じておりました。この時点で三陸においてM9の大地震が起こるとは考えていませんでした。今もどのように整理したらよいか悩んでいるところです。

地震発生当日は、気象庁の勉強会に参加した後でして、東京で今回の地震を体験しました。いきなり横揺れで３分ほど揺れたため、最初は東海地震が起こったのかと思いました。インターネットで三陸沖に震源があると知ったのですが、海上保安庁の潮位計をリアルタイムで20分ほど見ていて、宮古、釜石、女川で潮位が１ｍを超えて２ｍも引いていき、これはとんでもない津波が三陸沿岸にやってくると知って、体が震える思いがしました。


今村文彦 氏

次に、内閣府でNHKによる名取川をはさむ仙台付近の空撮を見たのです。道路や河川の位置、田んぼの様子などは、毎月行っているフィールドであるため、地形、道路、住居さらには住民の姿も思い起こせるほどよく知っており、とても現実のこととは思えず、ショックでした。揺れの直後から家族や学生の安否確認をしようとしたのですが、全くできませんでした。私が外に出ているときに大震災が起こった場合の対応として、大いに反省すべき点です。自分自身も帰宅困難者になってしまいました。その後、テレビ局の取材を受け、緊急地震調査委員会に参加し、都内に宿泊して翌日仙台に戻れました。

翌日は、ヘリで飛び広域に津波が襲ったことを目の当たりにしました。その後は、2次的な影響で燃料確保ができず、現地調査しようにもガソリンが無くて、どうしようもありませんでした。緊急車両も制限され、日々、困った状況に追い込まれたのです。

現在も、津波の評価とこれをどのように防災に取り組むかに関して困難さを感じることがよくあります。今回の地震の発生前から869年貞観地震について調査し、今回の津波浸水域に近い浸水域であったことが分かっていたのです。これをどのように防災に位置づけたらよいかを迷っていました。今回の津波に対応するためには膨大な施設や対策が必要になるわけで、これにどのように取り組むべきかが重要です。

津波対策としては、既往最大で行くのか可能最大で行くのかの判断が重要であると思っております。当時は、まだ既往最大が防災のコンセンサスであったように思います。津波対策すべき地震を選定する際には繰返し性、切迫性を中心にターゲットを絞っていくのですが、これではカバーできない地震に対してどのような情報やメッセージを残すのか、今後の課題だと思っ

ています。このためには、従来の専門性の枠を超えていろいろな分野と協力して行く必要があります。

川島：今村先生、ありがとうございました。今回の地震では液状化をはじめとする地盤災害が著しかったのですが、これについて若松先生に伺いたいと思います。

若松：地盤に関連した災害として、東北地方沿岸の地殻変動に伴う広域地盤沈下の問題、仙台市を中心にした宅地造成地のすべり・崩壊があげられます。これらの問題も未だ復旧・対策が進んでおらず大変深刻ですが、今日は時間の関係もあり、液状化に絞ってお話しさせていただきます。

私も、地震直後は津波被害に目を奪われていましたが、地震２日目頃から、地盤工学会のメンバーから関東地方の液状化調査の速報が寄せられるようになりました。これは、東京電機大学の安田進教授の呼びかけで立ち上がった液状化情報連絡会で、調査速報や入手した情報をメールで情報共有し、調査範囲の空白域や重複をなくそうとするのが目的でした。地盤変状は特に復旧が早く、液状化発生の大切な証拠である噴砂はあっという間に片付けられ、地割れもすぐに埋められてしまいますので現地調査も時間との勝負です。今回は、計画停電とガソリン不足で「足」を奪われていましたので、皆さん困られていたのでしょう。連絡会の賛同者もだんだん増えていきました。このメールのやり取りによって広域に大規模な液状化が発生していることが徐々にわかっていきました。

現時点で、今回の地震による液状化の特徴を私なりにまとめると、まず、第一に「広域な液状化発生」です。液状化が発生した地域は、岩手県から神奈川県まで南北約500kmの範囲に及んでいます。これまでのところ、岩手、宮城、福島、山形の4県および関東地方の1都6県の合計144の市区町村で液状化が確認されています。本震の震央から最も遠い液状化地点は千葉県南房総市池之内という所で約440kmです。この最も遠い液状化地点までの震央距離は、地震のマグニチュードに比例していますので、Mw9.0から見ると、特異な距離ではありません。広域に液状化が発生した最近の地震として、1995年兵庫県南部地震があげられますが、この地震では、四国北東端から大阪市にかけての南西－北東方向の100km余りの範囲に液状化が発生しました。これと比較すると、今回の地震による液状化は５倍の広がりを持つことになります。

第二の特徴として、震度５強程度でも高密度に液状化が発生したことです。東京湾沿岸の浦安市から千葉市にかけての埋め立て地帯では、震度5弱～5強とそれほど大きな震度ではありませんでしたが高密度に噴砂が発生しました。特に、浦安市の約3/4を占める埋立地では、地盤改良をしていない地区はほぼ全面的に液状化したと言っても過言ではないように思います。兵庫県南部地震の時には、地盤改良をしていない埋立地で最大、全面積の約30％が液状化しました。この時の神戸市の埋立て地域の震度が、震度6（1996年9月までの旧気象庁震度階級）でしたから、今回の液状化の発生密度は、これを凌ぐものだったと言ってよいと思います。震度5強の地域で、これほどまでに高密度に液状化を生じた理由として、地盤が弱いということももちろんですが、地震動の継続時間が長かったことがあげられます。兵庫県南部地震をはじめとして、一般の地震の大きな揺れは十数秒でしたが、今回はその10倍にも及ぶ長く大きな揺れが継続しました。震度5強程度の揺れでも、繰り返し長く揺すられ続けることにより、高密度に液状化が発生するに至ったと考えられます。

若松加寿江 氏

第三の特徴として、過去の地震と全く同じ場所で液状化が起きる「再液状化」が多く確認されたことです。同じ地域で大地震はそう頻繁には起こらないため、同じ場所で再液状化が確認された事例は、これまで全国で150地点と多くはありませんでした。今回の液状化被害地域である千葉県・茨城県南部や宮城県では、1987年千葉県東方沖地震、1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部地震などで液状化が発生した記録が残されており、その正確な位置も明らかになっています。今回液状化が報告された地点と過去の液状化の履歴地点を照合した結果、70箇所以上で再液状化を確認しました。今回の地震により「一度液状化した場所は地盤が締まり再び液状化は起こらない」というのは誤解だということがはっきり証明されました。

川島：若松先生、ありがとうございました。次に、和田先生からお伺いしたいと思います。

和田：地震の際には、新宿の雑居ビルにいて、揺れているときに骨組の変形も分かるほどで、死ぬかと思

和田　章 氏

いました。TVは見ていなかったし、津波が起きていることも知らなかったものですから、被害にあったのは自分だとばかり思っていました。その夜は帰宅難民になってしまいました。

寺田寅彦先生や吉村昭さんの本を読んでみると、今回の地震被害と同じことを書いてあります。液状化については、あんなところに土地を買う人の側に問題があると思っているのですが、対策をすれば住んでもいいと言っている専門家がいるとするなら、とんでもないことです。大きなビルを建てるなら杭を打てますが、木造住宅に杭を打つなど、建物に使う材料と杭の長さを考えると、技術的にばからしいことです。

東京にこんなに大勢の人を誰が集めたのか、あんな所に家を建てなければならなくなったのは誰なのかが問題で、液状化対策されていなかったからいけないなどと言う必要はないと思っています。

仙台では津波については貞観地震の重要性が分かっていたわけですから、つらいのですが、三陸海岸については吉村先生の書かれたことと全く同じなので、それほどの大昔ではありません。ここに家を建てた人や住んでいた人たちが問題だし、これを許して家を造った大工さん、建築関係者全員にも責任があるし、行政もあのような処に住むのは止めなさいといっていたのか言っていなかったのか気になります。

防潮堤を作れば住んでよいといったのは人間の欲で、釜石など1200億円もかけて防波堤を造り、さらに、海岸を埋め立てていました。人間の欲が生んだ災害かと感じています。これからは丘の上に住めばよいと言われていますが、寺田寅彦先生が昭和8年の津波の直後に言われていることです。日本には過疎地が沢山ありますから、無理に危ない地域にみんなで住む必要はないと思います。

説得力という点から考えてみると、1000年前に地震が起こっていることが明らかになったらそのことを社会に指摘すべきですが、次にここに地震が起こるのは100年、200年先かもしれないわけですね。島崎先生は「生きているうちに今回の地震を目の当たりにして科学者としては良かった」と言われましたが、先生の弟子が言い続け、その次の弟子が言い続け、やっと地震が来た時に、100年前の先生の指摘は正しかったことが分かる。地震の前に、島崎先生が指摘したとして、政府や国民が原発を止めるかが問題ですね。“津波と人間”という本の中で寺田寅彦は、五風十雨のように5日に一回風が吹き、10日に一回雨が降るように地震が来れば、地震災害は無くなると言っています。滅多に来ないから災害が生まれると書かれているのですが、本当にその通りだと思います。

石原都知事は日本人の我儘な生活、災害への備えの甘さについて“自然が戒めた”と言われているが、その通りだと思っています。

建築にかかわる先輩や仲間達も含めて、われわれにも責任があると言っています。地盤工学会などは液状化対策をすればよいと昨日の新聞にも書かれているが、問題はそんな危険な所を造成したことにあり関係者全員がもっと反省しないといけないのではないかと思っています。

川島：和田先生、ありがとうございました。それでは私の番ですが、もう16年が経ちましたが、兵庫県南部地震を経験してつくづく思ったのは、よく「百聞は一見に如かず」と言いますが、逆に言いますと、人間は見たことのない現象は信じられないものだということです。文献に被害があったとの記述があっても、現実に被害を見ないと同じ被害が繰り返すとはなかなか信じられないし、また、自信を持って被害を伝えていくことができない。私の最初の地震被害調査は1978年伊豆大島近海地震でした。その次は1978年宮城県沖地震ですが、あの時には、被害を探すというのが適切な表現で、被害が見つかると、良かったと思うような状況でした。しかし、兵庫県南部地震の時には、被害を受けなかった施設を探す方が難しかったことで、質的に違うのだということを理解しました。

3月11日には、若松先生と一緒にクライストチャーチ地震の被害報告会のため東大生研の3階のホールにいました。発表会の最中に緊急地震速報があり、確か震度３が来るとアナウンスがあったのです。私は最前列にいたので、会場の状況を撮る良いチャンスだと思って立ち上がり後ろを振り返って会場の写真を撮っていたのです。最初は、皆さんおとなしく座って待っていたのですが、やがて震動が大きくなると、上を見たり横を見たりされて、そのうちに上からスピーカーがガシャガシャ音を立て、ほこりがぱらぱら落ち出すと、皆総立ちになり、一部の方たちは逃げ出そうとドアに殺到する等、緊迫した状態になり、報告会は中止せざるを得ませんでした。怖かったですね。

我々の世代は、1995年兵庫県南部地震が来るまで、

本当の強烈な地震を体験せずに、過ごしてきたのだと思っています。兵庫県南部地震を経験して、地震観ががらりと変わった訳ですが、強烈な今回の地震を経験して、来るべき、東南海・南海地震、首都圏直下地震の時代が本当にやってくるのだと思いました。過去の地震による被害をよく調べて、同種の地震の発生に対して備えていかなければならないと思いました。1989年ロマプリータ地震の後に、カリフォルニア州交通局は「時間との戦い」という報告書を出して、地震対策を早急に進めていく必要性を強調しています。日本も時間との戦いの時代に入ったのではないかと感じました。

２．津波及びこれによる被害

川島：現地に行くと、道路にここから津波浸水危険という表示があったり、津波の石碑があると、まさにそこまで津波が来ているんですね。今までの経験を活かしていれば、津波被害が防げたのではないかと思うのですが。

今村：地域的には2つあり、分けて考えなければなりません。まず、三陸沿岸では1611年慶長三陸地震、1896年明治三陸地震、1933年昭和三陸地震と、同じ規模の津波が繰り返していたので今回の地震でも津波の影響は過去の津波地震と大きく違っていなかったと言ってよいと思います。もちろん被害を繰り返してしまった所はありますが、減災できた地域も多くあります。一方、石巻から南の沿岸部の仙台平野では津波の頻度が1桁違っていたので、貞観地震や慶長地震では一部には津波が来たという痕跡はあるのですが、防災対策を実施していく上では地震津波の重要性は視野には入っていなかったのです。

一方、今回の津波は甚大な破壊力を持ち、海水のボリュームが大きいという特徴を持っています。石巻から南部では三陸沿岸に比較すると広域的に浸水し、致命的な被害がでました。三陸側と比較すると、人的、経済的な被害は2倍くらいになっています。

島崎：中央防災会議では1896年明治三陸地震の高さを計算し、どのくらいの浸水高になるかを検討したのですが、今回の地震の津波の高さが想定の2倍以上の地域、すなわち、陸前高田市から南の地域なのですが、全体の犠牲者のうち78％がその地域で遭難されているのです。したがって、明治三陸地震に学んでいるところがあって、それによる被害軽減はかなりあったと思って良いと思います。今回の地震で被害が大きかったのは、明治三陸地震よりも今回の地震の方が津波が高かった地域で、この高さの比が1.8倍以上の地域というと大槌までが入るのですが、こうした地域では明治三陸地震では経験しなかった高い津波によって大きな被害が生じたのです

和田：過去の経験が生きているという意味は、うまく住民が逃げたということですか?

島崎：その通りです。人的な被害の軽減ですね。

川島：防潮堤は土構造物で、波をかぶるともろく壊れてしまうのですね。建物とか橋梁などでやっているように、主要部に鉄筋コンクリート構造を取り入れて越流しても粘り強い防潮堤を造るとか、多段の防潮堤とか、波どうしをぶつけて水勢を殺すといった方策はどのように考えられているのですか。

今村：過去には、沿岸域に集落がすでに存在しており、ゾーニングを含めて、防災のまちづくりを実施することは難しく、さらに、それを守るために防潮堤を造ることのできる場所や面積が限られていました。海岸保全施設については、費用対効果もあり、津波の波力は認識していましたが、これに耐える構造になっていなかったのです。今回の地震では甚大な被害を受けてしまいましたから、地域のプランニングから始まって、本来住むところ、施設で守るべき所を一から議論し、多重防除も検討すべきだと思います。働く場の制限も必要でしょう。構造的に重要なのは、ねばり強いといいますか、仮に越流しても何とかも持ちこたえられる防潮堤ですね。このような機能を持たせるかが重要だと思っています。

川島：越流しても、防潮堤が多段的に配置されていれば津波対策として効果はあるのですか。

今村：その通りです。到達時間の遅延と最大流速に関しては何割か低減できるでしょう。しかし、数十ｋｍの幅の津波が数キロの範囲の陸地を襲うのですから、破壊力は大きいですね。

和田：今回の地震では工場等、各種の建物が広範囲に失われたわけですが、失ったものの再建を誰がサポートすべきかを考えるべきだと思うのです。中国のように元気な国では、四川地震の被災地は復旧され、同じ

写真１　仙台港での津波浸水エリア(今村氏提供)

写真２　気仙沼市での移動船舶と津波火災(今村氏提供)

地区に新しい学校などが完成しているそうですが、日本ではGDPの2倍の借金があり、今回の震災復旧でも20兆円以上が必要だと言われています。防潮堤はもともと国が造ったものですから、国が直すのは当然かもしれませんが、個人の家などが被害を受けて発生した仮設住宅の建設や工場等の復旧等、本来は住まなければよい所に住んでいたために生じた被害であるのに、なぜそれを災害だといって税金でカバーしなければならないかと疑問に思うのです。液状化による住家の復旧でも、公的な支援をもらっている人がいますね。私は自己責任の問題だと思います。これから東京に大きな地震が起きて甚大な被害が生じた際には、誰も支えようがないのではないかと思っています。これから、人はどこに住むべきか、どのような構造のものを造っていくかという視点で考えないと、今までと同じ考えでは日本が保たないのではないかと思います。

川島：日本とドイツは面積が37万平方キロでほぼ同じなのですが、ドイツでは国土の80%以上は平坦な安定した土地であるのに対して、日本では国土の80％が山地で、平坦な土地のほとんどが軟質な沖積氾濫原からなる低地です。日本人は基本的に農耕民族ですから、日本人が住みたい所は高地ではなく低地なのですが、沖積低地では地盤が軟らかく、地震が起こると液状化も生じるし、構造物は被害を受けやすく、地震災害の温床になっているわけです。この意味で日本はドイツに比較して大きなハンディーとでも言うべき弱点を抱えています。

しかし、日本人は、これまで営々と国土に手を加えてこのハンディーをある程度は乗り越え、ようやく現在の日本を造り上げてきました。この視点で考えると、地震災害が起こった場合に費用負担を誰がするかの議論は大切ですね。すべてを個人負担にするのは厳しすぎるかもしれませんし、そもそも個人がどこまで自然災害のリスクを知っていたかも微妙です。浦安で家を買われた方たちが購入時に液状化のリスクに関してどこまで説明を受けていたかというと、たぶん、こうしたことを聞いておられなかったのだと思うのです。利便性に魅力を感じてお買いになった方たちが、今回の地震で突然、液状化で大きな被害を受け、その怒りをどこに向けたらよいかわからないという点が重要な問題だと思います。

和田：浦安については、ディベロッパーの責任かもしれませんね。地震後、東北の一関に泊まったのですが、住むところはまだまだあります。無理に三陸や津波に襲われた仙台の沿岸地区に住まなくても良いと思うのです。東京都内では1時間半かけて通勤している人はたくさんいます。漁師さんが朝1時間かけて通勤しても良いのですよ。寺田寅彦先生が随筆を書いた頃は誰も車を持っていなかったでしょう。現在は皆さん、車を持っているのですから、無理に浜の近くに住まなくても良いのではないかと思っています。

今村：復興計画で重要な点は、現在の予測では今後人口が半減する箇所が多数あるという点です。今後の人口減少を考えて、住み方と利用の仕方を考えないといけない。

和田：これから人口が減少することを考えると、あの浜の利用は止めようとか、ハーバーだけにしておいて隣から車で通おうとか、あなたはもっと安全なところ

写真３　津波から数日後の被災地（Miyamoto International提供）

に引っ越しなさいとか、いろいろな発想があってよいと思います。

川島：先ほど、既往最大とか可能最大とかの話が出ました。今後、南海、東南海地震も起こると考えられていますが、今村先生としては、今後、津波に対してはどのような方策が一番よいとお考えですか？

今村：まだ私としては答えが出ていないのですが、2段階で考える必要があると思います。最初の段階では既往最大で、これに対しては経験もありますから、これに基づいて施設も造り、総合防災でしっかりやろうと。2番目は可能最大でかなり大きなものを考え、これにもある程度備えることだと思います。命を守るためどうするかという具体案になると、いろいろ課題・問題があって、現在のところまだ答えが出ていないと思います。

島崎：２段階は単純過ぎると思います。もっと多段的に考えるべきだと思うのです。一番重要なのは人の命を守ることなので、一番大きい地震に対しては、命だけは守り、財産はすいません、あきらめてくださいというしかない。それをどうするかという点から考え始めなければならない。大槌のように、コミュニティーの核となる施設が失われてしまうようでは話になりません。想定を多少超えるような津波でも安全な場所をまず確保する必要があります。そこにはあらゆるインフラが整備されていて、どんなことが起きてもそこだけは守れるようにしたコミュニティーがないと、どうしようもないと思います。それより低いところに、生活ゾーン、商業、産業ゾーン。最も低い漁業ゾーンは、防波堤で頻度の高い津波からは守る等、多段的な計画を立てていく必要があるのだと思います。

川島：多段階の津波レベルに対して性能目標を明確にすることだと思いますね。地震動に対する設計では、レベル1として中小の地震に対しては機能保持、まれにしか起こらないレベル2地震動に対しては崩壊防止を目標にしているわけです。もっとそれを多段階にして、国民からも分かるように、どういう津波に対してどのコミュニティーの生活をどこまで守るかという目標をしっかり立てることが重要ではないでしょうか。

想定が難しい自然災害に対して、解析ではある対策が必要だと思っても、それは過大ではないかと周囲から言われると、それ以上主張できなくなってしまう瞬間がありますね。あのときにもっと主張しておけば良かったと、地震後に技術者が悔恨の念を持つといったことがよくあるのではないでしょうか。そういう意味では、既往最大という考え方は、自分の考え方の正当性を主張する上で、大きな支えになります。

道路橋の耐震設計では、1995年兵庫県南部地震後の復旧において地震動をどのようにすべきかが大きな議論になりました。私は兵庫県南部地震で生じた地震動を使おうと提案したのですが、そんな大きな地震力を使うのは非常識だという批判がある有力な大学教授からあったのです。しかし、実際に生じた地震動を復旧に使わないのはおかしいじゃないかという当時の建設省の技術系トップの鶴の一声で、兵庫県南部地震で実際に生じた地震動がレベル２（タイプII）地震動として耐震基準に取り入れられたのです。大きな地震が生じた後、既往最大という考え方は今までの方式を大きく改めるためには有効だと思いました。それがないと、

技術コミュニティーの中でさえ、地震力を増加させる必要性を説明できないことがありますから。

ただし、既往最大で今後もよいかが重要で、これに関しては地震の評価の責任が大きいのですが、島崎先生、いかがでしょうか。

島崎：我々地震を見ている者は長期間に起きている現象を大変短いウィンドウでみているという基本的認識が必要で、ある時に地震が起きたということは、偶然ではなく必然的にそこに起きたのです。ですから、1回しか地震が起きていないから繰返し性が認められないという理由で排除する論理はやっぱりおかしかったと思うのです。プレートテクトニクスに従ってプレートのベルトコンベヤーが回っている限りは、そこにひずみがたまるのだから、繰返して地震が起こるのです。

「津波地震は日本海海溝のどこでも起こります」と我々が言ったことがどこまで正当かという点が議論になってくるのですが、日本海溝の海底地形を見ても北と南で大きく違っていないわけですから、これは北と南では同じことが起こると考えざるを得ないのです。1896年明治三陸地震は津波波形から谷岡さんと佐竹さんが海溝付近で起きたことを明らかにしました。また、データは不十分ですが、1611年慶長の津波の時も地震動が小さいので津波地震と考え、やはり海溝付近で発生したと評価しました。位置は岩手県沖～宮城県沖かもしれません。また、1677年延宝地震も津波地震と推定されていて、房総から磐城にかけて津波が襲来しています。我々はこれも海溝付近で発生したとしました。プレートテクトニクスの考えに従えば、この三つの津波地震が起こっていない地域でも、津波地震が発生すると考えるのが自然だと思います。ただ、それぞれの震源の位置が不確定なので、日本海溝のどこでも次の津波地震が起こると考えたのです。これを防災関係者に渡す段階になると、どうして見たこともない地震が起こるといえるのかということで、なかなか対策につながらない向きがあります。

今村：対策につながらないもう一つの理由は費用対効果で、どこまで投資しようかというマネージメントが残念ながらまだ十分ではなかったのです。

島崎：そこで出てくるのは、どこまで守るかという思想ですね。防災関係者を見ていると、すべてを守ろうと、すごい意欲をお持ちなのですね。今回のよう地震の時にはそれは無理なんで、大事なものは何か、最後はどこを守るのかを考えないといけないと感じています。

今村：同じことを我々は原発事故の時に感じまして、津波高さを既往最大で評価してきて、この原子炉がどのような状態になったら機能能停止するかという評価が足りなかった。福島で評価すると津波は15mということになってきて、「15mの津波の可能性はあるのか？

また、これに対する対策は可能かどうか」という、逆からの評価が無かったという反省があります。

川島：原発事故の問題は特別な問題を含んでいますが、普通の津波対策で重要なのは人命ですね。人命に対する危険性があると分かっているけれど、費用の点から対策が打てないという解はあるでしょうか？　そこでは対策ができないから、他の地点に移ってくださいということはありますが。1人の命は地球より重いという出口のない議論は無意味と思いますが、対策が打てない場合には、他の対策を見えるようにしないと、国民から納得して頂けないのだと思いますが。

今村：国交省では事業の評価がありますが、人命に関わる防災事業でさえ人の命をB/Cで認められないことがあります。人命の価値が見込まれていませんから。それで本当によいのかという問題がありますね。突き詰めると、避難というのは個人の判断になりますから、いろいろシステムを向上しても最後は個人のジャッジの問題になり、どのように個人の意識を高めるかも含めて一般論では扱えない問題があります。

川島：津波に対していかに多段的に対応するかが重要ですね。技術的に津波の勢いをうまく殺す等、うまい方法はあるのでしょうか。

今村：一つはピロティー構造で津波を逃がすということですね。田老地区で我々が学ぶ点があります。1933年昭和三陸地震の後に田老が再興するのですが、その時には既存の街を守るためにL字型に防潮堤を造ったのです。たとえ津波が来てもL字型ですから、うまく津波を分けられたのです。まともに津波を受けることは無かったのです。しかし、戦後になって人が増えて、L字型防潮堤に外側に宅地造成された結果、津波を向かい打つ形に新たに防潮堤を造ったのです。X字型になりました。しかも、河川の箇所に造ったので、軟弱地盤なのです。

川島：防潮堤はX状ですから、私も構造的に変だと思いました。内側の防潮堤は残っていますが、外側の防潮堤がすべてやられているのですね。専門家の意見がうまく入らなかったのでしょうか。

今村：それはよくわかりません。ただ、構造的にまずいことは分かっていても、宅地開発のためには、それが必要だという判断だったのではないかと思いますが。

川島：私の研究室では毎年夏に現場見学をかねて1泊して研究室旅行に出かけるのです。今年はある工事現場でモノ作りを見てから九十九里町の海の家に宿泊したのです。宿舎に着くとすぐ、学生が今夜もし津波が起こったらどうしようかと言い出したのです。そこで、学生と私で緊急時にはどこに避難するかを自転車で見て回ったのですが、九十九里町のあたりは平坦で、どこにも避難できる高台などありません。かろうじて3階建ての小学校が見つかりました。三陸地方の津波被害を見ると、3階建てでは不十分だと思ったのですが、そこしか避難できそうな所はないのです。ところが、その小学校まで海の家から2.5kmあるのです。徒歩だと30分は必要でしょうから、避難できるかと考え込んでしまいました。学生を預かっていましたから。

幸い、地震が起こることなく翌日になり、海の家の従業員に聞いてみると、3月11日には海の家当たりには50cmほどの高さまで津波が来たというのです。海岸を走ってみると、海岸に面し眺望のよいコテージ風の家が多数建て売りになっているのです。日本ではこういう箇所がいっぱいあるわけですから、津波対策は重要ですね。

３．液状化及びこれによる被害

川島：それでは、次に液状化による被害の方に移ろうと思います。若松先生、液状化及びこれによる被害についてご紹介ください。

若松：今回の液状化により、これまでの地震による液状化と同様、堤防・盛土道路、港湾などのインフラも大きな被害を受けましたが、何と言っても、数が多かったのは戸建て住宅の被害とライフライン被害です。液状化による建物の被害棟数は、現時点では、国や自治体からは公表されていません。NHKが関東地方の自治体を通じて調べた集計（2011年7月7日報道）では、液状化の被害を受けた住宅などの建物は、関東地方の1都5県で23,712棟（千葉県18,065棟、茨城県5,377棟、埼玉県180棟、東京都48棟、神奈川県40棟、栃木県2棟）とのことです。この数字は、恐らく被災者生活再建支援法の対象となった被災家屋数で、実際の被害数はさらにこれを大きく上回ると推定されます。

住宅などの被害の特徴の一つとして、沈下量が従来に比べて並外れて大きかったことがあげられます。直接基礎の戸建て住宅の沈下量は東京湾岸の埋立地では、最大50cm程度、我孫子市布佐、稲敷市、香取市など利根川沿岸の地区では1mに達する家屋もありました。家屋が地中に沈み込むタイプと、敷地地盤全体が低下するタイプが認められました。沈み込むタイプは液状化地盤の支持力低下により起こり、これまでにも10 ～ 20cm不同沈下した事例は見かけました。しかし、今回のように50cmとか1mとかいう沈下量には初めて出会いました。今後、色々と調査・研究が行われていくと思いますが、堆積厚さ最大50cmにもおよぶ多量の噴砂により地下に空洞ができこれを埋めるように地盤が圧縮されて、敷地地盤全体が低下したと推定されます。また、液状化した層が横方向に移動する側方流動が河岸などで生じたことも、地盤沈下量を大きくした要因と考えられます。

一方、杭基礎の建物の沈下・傾斜は今のところ聞いていません。1974年に建築基礎構造設計基準に液状化予測の項目が追加され、1988年に出た建築基礎構造設計指針には液状化地盤中の杭の設計法が明示されました。これに従って設計・施工していたことが功を奏したと考えられます。ただし、液状化により大きく沈下した地盤と建物との間に最大50cmの段差を生じ、ライフラインの建物への引き込み部分で破損したり、建物への出入りに支障をきたしたりした被害が多数見られました。宅地地盤が50cmも1mも沈下して降雨時に宅地内から排水ができずに少しの降雨で浸水するなどの２次被害が発生しています。

液状化によるライフライン施設の被害は、多岐にわたっています。管路が破損しただけでなく、浄水場や下水処理場などの基幹施設に大きな被害を受け、復旧の遅れの原因となりました。例えば浦安市などでは、杭基礎のマンション自体は無被害だったのに水道や下水道の管路が液状化で被害を受けたために長期間使えなかった地区もあり、多くの市民の日常生活に大きな支障をきたしました。噴砂によって排水溝が詰まった、地盤沈下や下水管の浮き上がりによって下水の勾配が逆になり、下水に排水できなくなったなどの被害が多発したことも、今回の液状化による被害の特徴の

一つとしてあげられます。

また、工学分野では余り話題にはなっていませんが、今回の液状化は、関東平野の穀倉地帯である千葉県から茨城県の利根川流域での農業被害が深刻で、農地の陥没・噴砂による砂漠化、揚水機場、排水機場、パイプライン、排水路被害が発生しています。今年は稲の作付けが行えなかった水田も少なくなく、また、噴砂で土壌が変わってしまったことから、植えても稲が枯れてしまったなどの事態も起きています。

和田：地名についてですが、仙台では緑ヶ丘といわれる地名が危ないといわれています。新しい地名ですよね。

若松：はい、緑のつく地名は過去の地震でも液状化や滑りによる地盤災害が多数発生しています。今回も、白石市緑が丘、鹿嶋市緑ヶ丘、春日部市緑町で液状化が起きています。緑ヶ丘に限らず、例えば今回の液状化被害地の例を挙げると、旭ヶ丘、桜ヶ丘、南光台、南台、寿山というように、どれもイメージの良い地名ばかりですが丘陵地帯の造成地です。丘陵は地山で地盤が良いと一般には思われていますが、沢や谷筋を埋めた部分は液状化が起こりやすい場所の一つです。2003年の十勝沖地震でも、震央から250㎞離れ震度4でしたが、札幌市の美しが丘の造成地で局所的に液状化被害が起こりました。さきほど申し上げた春日部市緑町は造成地ではありませんが、ここでは、1923年の関東地震でも著しい液状化被害が発生しています。緑町は1970年代までは「川久保」という地名でした。「川の窪地」という意味で、その名が示すとおり旧河道なのです。イメージの良いネーミングに騙されてはいけませんね。地名に着目して地盤の善し悪しを探るという方法は一般の人にもわかりやすいと思います。

和田：市民にわかりやすくということで、昔は地名で危険だということを表していたんですね。モラルのあるエンジニアだと、そういった場所を地盤改良してビルや戸建を建築することはやめましょうと言いますが、発注者はその工事をやってくれる人を探して建築するでしょうね。ウォーターフロントにも高層のRCビルが建てられていますが、塑性変形を許して建てているので、エレベーターは止まってしまい、水は出ない。エンジニア全体が人々のためにいいことをしているのか疑問ですね。

今村：今回、津波の場合も土地規制や建築規制という話が出て、昭和津波やチリ津波の時にも規制をかけているエリアがあり、罰則規定もあったのですが、なかなか実行されず、建物を建てることを容認してしまったという経緯があります。

川島：昔、名古屋の旧輪中地帯では、屋根の下にボートがつるされている家がありました。これは堤防が氾濫した際の避難に使うためのもので、住民が自衛手段を取っていたのです。技術が進歩するとともに市民は技術を信頼し、堤防は壊れないとか、地震や津波、液状化にも専門家が対応してくれているから大丈夫に違いないと思って住んでいるのですね。技術が進歩した結果、昔は造れなかった場所に高層ビルを建てることができるようになってきているのですが、安全が検証されている訳ではないものもあるでしょう。技術の進歩に伴い、市民が自ら身を守ることの重要性に対する意識が薄らいできてしまっている良い例ですね。

若松先生が言われていましたが、専門家が市民に話をするといっても、なかなか難しいですよね。液状化を説明するといっても、過剰間隙水圧、有効応力を知らない市民の方に説明できますか。砂が噴きますよとかいったことしか言えないのではないでしょうか。経済についてはかなり詳しい専門用語が新聞にも載っていますが、工学系の用語で社会に知られているものはあまりにも少なくて、市民との共通言語がないのです。マスコミにも工学系出身の記者が少ないこともありますし、小学校や中学校でも教えていません。工学系の用語を教育に組み込んでいく必要があるのではないでしょうか。

若松：先生自身がまず知識がありませんから、わかりやすい教科書と先生のための解説本を専門家がわかりやすく書くことが必要でしょうね。

和田：土木学会が刊行された防災の漫画本などは有効だと思いますが。

川島：そうですね、わかりやすい本は重要ですね。ただ、新聞やテレビをみている一般の市民からすると、例えば、地震動の強さとして「ガル」などは多少は聞いたことがある程度ではないでしょうか。気象庁震度はよく浸透しているでしょうが、耐震設計には使えません。加速度応答スペクトルは重要であるにもかかわらず、誰もわかりませんよね。加速度応答スペクトルなどと呼ばずに、「構造物の加速度」とか、もっと市民にわかりやすいような表現に学会や専門家が合意して

1987年千葉県東方沖の地震

2001年東北地方太平洋沖地震

写真４　千葉県匝瑳市吉崎浜における再液状化の事例（写真左手の方向に滑り、遊歩道に段差ができた）
（若松氏提供）

直していくということが大事だと思います。

先ほどの若松先生のお話の中で、液状化は繰り返すということですが、一度地震があると締め固まってよいのではないかという話も伺いますが。

若松：浦安市では1987年の千葉県東方沖の地震で、美浜、海楽、入船などで局所的に液状化が起こり、今回の地震でもさらに広範囲に大規模な液状化が起きました。このため、再液状化という観点から調査をしていますが、関東地方では70箇所以上で再液状化を確認しています。再液状化というのは、同じ地域・地区内で２回液状化が起こったというのではなく、全く同じ場所で液状化が起こった、つまり同じ地層が液状化したと思われる事例を再液状化と言っています。今回、現地調査をして驚いたことは、1987年の地震で、その地区ではここで液状化が一番著しかったという場所が、今回の地震でもやっぱり一番大きな被害を受けているのです。地割れの起きた場所ですとか、被害の様相もとても似ています。茨城県稲敷市では1987年で沈下した門柱が今回も更に沈んだという事例がありました。また、千葉県匝瑳市の起伏のある広い公園で、前回すべりを伴った液状化が発生しましたが、今回も滑った方向や位置が全く同じでした（写真４）。一度液状化が起こったところでは締め固まって液状化が起きないのではないかと思われている方も多くおられますが、これは大きな誤解だということが今回はっきりしました。今後大きな余震の心配もありますし、震央の位置によっては本震を上回る被害が発生して、家屋の沈下がさらに進むお宅もあるかもしれませんので注意していただく必要がありますね。

４．地震動及びこれによる被害

和田：メディアは津波と原子力のことしか放送せず、少し遅れて液状化被害です。建築構造物も色々なものが壊れていて、建物が倒壊して亡くなった方がいなかったらよいと思いますが、天井の落下、内壁や外壁の倒壊等の被害がありました。一般的に、地震を受ける建物の被害の状況はもぐらたたきの様相で、面を打たれたら胴、胴を打たれたら小手というように防御していくと、最後は全身が鎧・兜で覆われたようになってしまいます。今は二次的な部材が「小手」と打たれてしまいました。

我々は、建築物の設計に今回の地震動の3倍くらいの設計応答スペクトルを考慮しているのですが、今回の地震でも、先に述べたように東京で死ぬかと思うほど揺れました。今回の地震動の3倍強い地震動が来ると、本当に死んでしまうかもしれません。今の普通の建て方では建物は大丈夫ではないと感じています。

川島：そのビルは、新耐震前の設計ですか？

和田：そうだと思います。都内の高層ビルにしても前後左右に50cm、全振幅で1mも揺れたわけですから、もし、今回の3倍の強度の地震動がきたら相当なものですよね。品川周辺の女性ばかりが勤めるビルでは、地震の最中に多くの悲鳴があがったとのことです。このような状態ですから、免震構造を広めていく必要があります。

建築では、2000年の法律で、新しい設計法が提案され、そこには縦軸に応答加速度、横軸に応答変位を示したスペクトルと建物の荷重～変形曲線の関係が示さ

れています。このスペクトルを用いて地震動の強さを調べたところ、1秒以下の短周期では大変大きな応答加速度となり、壊れようとして構造物の周期が伸びると、その応答加速度スペクトルはとても小さくなってしまうのです。力のレベルでは約100ガルですから、設計震度で0.2相当の強度を持っていれば建物が倒れることはない。短周期が大きいだけだったため、今回の地震は運がよかったと思います。

先ほど、地震の強さを何で表したらよいかという話で応答スペクトルがでましたが、これが地震動強度を表すためにわかりやすいと思います。あと、継続時間も重要です。建物で亡くなったり怪我をされた方が少なかったのは、揺れの時間が長く、安全に逃げた後に、天井等が落ちたりしたためだと考えます。ただ、長く揺れたために天井が落ちたのかもしれません。液状化も加速度や速度だけでなく長く揺れたことも影響していると思います。

写真５　地震による天井の脱落
（独立行政法人建築研究所提供）

川島：津波による建物の被害はどう見ておられますか？

和田：木造建物は土台や基礎にアンカーしていないのと、木材料が水より軽いので、あの津波の勢いではなかなか持たないでしょう。鉄骨構造ならいいかというと、外壁も内壁もみんな吹き飛ばされました。RC構造は倒れているものもありますが、残っている方が多いわけですから、転倒自体はあまり問題ではなく、地下でも造りもっとヘビーにするか、ピロティ構造にでもすればもっとよいと思います。

建物では全体の25%程度が構造本体の費用で、残りの75%は設備やジュータン、照明、壁紙等の内装の費用です。したがって、津波にやられた後、建物が残ったからといっても、片付けてもう一度住めるようにするには、また、75%の費用がかかるのです。私は基本的には、海のそばに家を建てることはやめた方がいいと思っています。

どうしても海の近くに住みたいと思えば、避難ビルを造ればよいと数日前まで考えていました。しかし、津波の後、気仙沼では石油タンクが倒れて火事になり、また、1896年明治三陸地震、1933年昭和三陸地震、1993年北海道南西沖地震でも同様に火事が起こりました。津波と火事はリンクしていることは専門家にとっては常識だと言われています。そうなると、避難ビルを造ることはよいとしても、周りが火の海となることを考えると、避難ビルを10階建位にし、周囲に鉄板のスカートでも配置して、周りが火の海になっても大丈夫というビルを造らなければならなりません。普段生活しているところに、火のついた油や瓦礫がくると燃え移ってしまう。こう考えると、避難ビルに逃げればよいというのも怪しいので、やはり津波に襲われる海岸近くには住まないのが一番よいと思います。

私は津波は「波」だと誤解していたのです。寺田先生は「津浪」と書いておられるのですね。波のように来るのかと思っていたら、水面が上がるんですね。津波に耐える、迎え撃つというのも大事ですが、いったん津波が防潮堤を超えてしまったら、勢いはなくとも海の底になってしまいますよね。建築で耐えるのも、防波堤で耐えるのも、大変かなと思います。だから、津波に襲われるところに住まないのが一番良いのです。

川島：土木構造物には色々な種類のものありますから、私は橋梁を中心にお話ししたいと思います。現地に行ってみて思ったことですが、1978年宮城沖地震と比べて被害が少ないと感じました。当初は、K-NETの記録から加速度応答スペクトルを計算すると、周期0.2秒付近では大きいのですが、周期1.0秒くらいになると0.3g程度でしか無く、これが被害の少なかった原因と思っていました。しかし、K-NETや気象庁の記録をよく見てみますと、涌谷や古川、仙台の軟弱地盤上の強震記録では周期1.0秒付近で1 ～ 2g弱程度の応答が出ているのですね。源栄正人先生も東北大学で1978年の宮城県沖地震と今回の地震動を比較すると、今回の方が大きいと言われています。

橋梁の設計は1990年を境に抜本的に変わっています。建築でいう新耐震ですね。震度法一本槍だったのが、地震時保有耐力法が入り、設計地震力もレスポンスで最大1gまでを考え、さらに1995年兵庫県南部地

震後はこれによる断層近傍地震動を取り入れて最大2gのレスポンスを考えるようになったのです。また、過去の地震で被害が大きかったのは、橋脚と支承なのですが、橋脚に関しても、じん性設計が1990年以降導入され、配筋方法が抜本的に改良されましたし、支承に関しても被害を受けやすい鋼製支承から減衰性能のある高減衰積層ゴム支承や鉛プラグ積層ゴム支承を含めて、積層ゴム支承系に切り替えられてきました。また、落橋防止構造の設計地震力も引き上げられました。

1978年宮城県沖地震に比較して今回の地震では橋梁の被害が全般的に少なかったのは、こうした耐震基準の大幅な向上が原因だと考えています。その証拠に、1990年以降の技術基準で設計された橋やこれに基づいて耐震補強された橋では、従来、被害の大部分を占めていた橋脚や支承の被害を含めて、ほとんど被害は生じませんでした。これに対して、昔からの基準で設計されたままで、耐震補強されていなかった橋では、依然として、定着長不足の主鉄筋段落し部のせん断破壊や鋼製支承の破断、ローラー支承におけるローラーの逸脱、アンカーボルトの抜け出し等の被害が見られました。

今後の問題としては、海洋性巨大地震といっても今回の地震による地震動は橋の固有周期帯域では兵庫県南部地震よりも小さいわけで、これから起こりうる規模の大きい内陸直下型の断層近傍地震動に対する対応でしょう。依然としてこのような問題は残っているのだと思います。

また、従来は構造系としての橋の安全性の確保ばかりを見てきましたが、ドライバーの安全性も大きな問題です。橋脚の変形性能が向上し、積層ゴム支承で支持するようになった結果、桁の応答変位は大きくなったわけです。車の走行性は大丈夫かという点も考えなければなりません。

それから津波に関してですが、鉄道橋と道路橋の被害には大きな違いがあります。鉄道橋では基礎からの流出がかなりありそうですが、道路橋では基礎から流出した橋はないのです。鉄道橋は戦前に造られたものも多く、かつ鉄道橋は道路橋に比べて上部構造が軽いため基礎があまり深くまで入っていないためではないかと考えています。

道路橋でも多数の橋で桁が流されています。落橋防止構造や橋軸直角方向の桁移動用サイドブロックなどに被害を受けていない橋があることから、桁は直接上流側に流されたのではなく、いったん津波によって持ち上げられてから上流側に流されたのだと思います。上流側に200~400mも流され、ばらばらの残骸になった橋もありますから、非常に津波の力が大きかったことがわかります。このため、地震動に対して取り付ける落橋防止構造を津波によって桁が持ち上げられないように上下方向に取り付けることが有効だと考えています。「津波落橋防止構造」です。コストは安いのですが有効な方法であると思っています。もちろん、このようにすると、下部構造の負担が増えますから、この負担に耐えられない下部構造は補強が必要です。まずは桁が津波によって持ち上げられないようにすることが重要だと思います。

５．最後に一言

川島：最後に、皆様から一言ずつ、将来に対するメッセージをお願いします。

島崎：これだけ大きな地震が起きて、その影響で色々な地震が起きていますが、今後もしばらくこの状態が続くと思います。我々もどの地震が起こるということはわかりませんが、際立って発生確率が増加している断層については長期評価で申し上げています。ある線で区別できるわけではなく、灰色の断層もあります。全体的にみれば確実に地震前に比べて地震活動が増えており、余震や誘発地震のためだと思います。今後もしばらくこの状態が続くことは間違いありませんので、それに対して備えていただくために、どう一般の人と防災のコミュニケーションを取るのかということが課題だと思っています。

例えば仙台には、長町-利府線という活断層があり、いつ地震が起こってもおかしくない状況にあります。しかし、「それよりも宮城県沖地震という切迫性が高い地震があるから、とりあえずこれに対して対策することが重要で、これにより長町-利府線断層帯に対しても多少は効果がありますよ」と防災担当者に言われると、我々もそうかなあといった形で引き下がってきました。果たしてそれで本当にいいのかと思っています。言われるだけではなく、言い返さなければいけないのではないか。こういった場所は仙台だけではなく、立川断層のある東京も含め多くの地域でも同様です。まれだが、起こるとものすごいことが起きてしまうということを一般の方達にどう伝えるかが大事です。お互い地震列島でどうやって生きていったらいいのかというリスクコミュニケーションが大事です。

マスメディアを頼ると不十分なので、独自の情報発信をする必要があります。少なくとも１割程度の

方は、意識が高いので、それらの方には届く可能性があります。まだ十分普及はしていませんが、インターネットなどの可能な手段があるわけで、そういう手段で訴えて、意識の高い人から呼びかけていく。本来は中間層を動かすことが重要ですが、そこまでは難しいでしょう。でもあきらめないで、独自に情報発信していくことが必要だと思っています。

川島：それでは、次に今村先生にお願いします。

今村:二点申し上げたいと思います。まず、最初は我々の発想の逆転が必要だということです。我々は積み重ねて評価してきましたが、これだけではどうしても対応できないことがあります。先ほど原子力のことについて述べましたが、重要な機能停止する場所が特定されると、それを守るためにどうするかという逆の方法が必要です。これらが相まって有効な対応ができると思われます。

二つ目は、人材育成です。若い世代に期待をしています。今の学生さんや小中高の生徒さんが今回の震災をどのようにとらえて、何を知ろうとしているのかに大変関心があります。彼らが自ら何かをしたいという志を持ってくれることを期待し、それを支援したいと考えています。わが国では自然災害と共生することが重要です。そのために何が必要なのか一緒に考えていきたいと考えています。

川島：若松先生、お願いします。

若松：今回の地震の被災地である東日本では、市民の土地に関する意識が、大きく変わってきたと感じています。今までのような利便性重視から、安全性志向の市民が増えてきたのではないかと思いますし、今後「のど元過ぎても」土地の安全性への関心が高まり続けることを願っています。「宅地造成等規制法」や「都市計画法」などで、宅地を造成する事業者に対し液状化対策を義務付けるような法改正も必要でしょうし、平成11年に制定された住宅の品質確保の促進等に関する法律（略称「品確法」）で、土地や地盤の品質もこの法律の対象とすべきとの声も上がっています。

しかし、土地や地盤の品質は、対象となる土地の周囲の地形・地質・地下水条件にも影響され適正な評価が難しい場合が多数あり、法整備で全てがカバーできるとは到底思えません。公的な取り組みと共に、市民の土地の安全性への関心の高さが、「不良品」の土地が売買されることへの大きな抑止力になると考えます。そのために、われわれ専門家としては、技術開発面で努力するだけでなく、市民、行政、ディベロッパーなどに、平易な言葉で啓蒙活動や情報発信をすることが重要と感じます。

私は、今回の震災後、日本建築学会住まいづくり支援建築会議の活動の一環として「液状化被害の基礎知識」というサイトの作成・公開に携わりました。この

極めて稀な災害への対処

- **Locations**
  国土計画、都市計画、交通、まち作り、建設地の選択、建築の種類に応じた建設地、どこに暮らすか
- **Structures**
  防波堤、防潮堤、堤防、道路、鉄道、建築物などの強さ
- **Operations**
  地震学の研究、予測、警報、避難訓練、敏速な避難
- **Risk transfer**
  国内に複数の工場を持つ、港湾施設、船舶、工場などの被害を保険などによって分散する

サイトも、今後、市民の要望に答えて内容を追加・改良していかねばならないと思いますが、日本地震工学会をはじめとして各学会でも、それぞれの専門性を生かしてこういう取り組みが求められているように思います。

川島：和田先生、お願いします。

和田：土木構造物に比べて建築構造物は、住宅から企業、工場、色々な石油プラント等も含め、プライベートな機関が所有しているため、被害情報を隠そうとしがちです。ゼネコンや設計事務所もオーナーから話さないでほしいと言われると、守秘義務がありますから被害情報を表にできません。「Lessons learned from 東日本大震災」ということが大切で、自分の所有する建物等の被害を秘密にしたいオーナーや設計者も、その建物を建てるためにゼロから研究して、過去のことを勉強せずに建てたのではなく、関東地震や兵庫県南部地震等、過去の地震の教訓の上で行われているのです。「あなたの被害も次の教訓のために出してほしい」ということを強く言っていこうと思っています。特に、エレベーターや天井の被害、プラントの被害等は表に出てきません。３月末に仙台の石油プラントに行きましたが、肝心なところは見せてくれません。したがって、皆が被害情報を共有することが、次の同種の地震被害を防止するために重要であることを、学会として主張していきたいと思っています。

また、非常に稀にしか起こらないような巨大津波に対してどうするかというと、防波堤や防潮堤、津波避難ビル等で対応するとして、最も重要なのはどこに人が住むかということです。また、避難訓練を実施したり「てんでんばらばらに逃げましょう」ということをやってみることが大切です。また志津川町のように道にどちらに逃げなさいと避難経路を示している場所もあります。全部の町で行われているわけではないのですが、こうした対応はすぐにできると思います。

次に壊れたものや失ったものを誰が補うのかを考えなければなりません。また将来壊れたら国が負担してくれるというのでは、誰も本気になって対策を考えません。100％あなたの負担でというのは難しいでしょうが、まじめに考えなければなりません。英語で「Structure、Location、人々のOperation、Risk Transfer」と言って、保険をかける方法もあれば、工場を二つ持ち、一方が流されたら他方に営業を移すとかを真剣に考える必要があります。今日はリスクを許容した議論をしているわけですが、被害が起こったらすべて税金で補うというのはおかしいと思います。

川島：ありがとうございます。私も一言。今までの地震被害を見ると、構造設計が間違ったから被害があったという例はまれで、ほとんどは設計外力が過小であったために、起こるべくして起こった被害が多いと思います。もちろん、構造細目が不十分で生じた被害はありますが、これらを対応した上での話です。

外力の中で地震外力は特殊な位置づけにあると思います。普通、外力というのは十分に安全側にあるように設定されるべきもので、例えば、常時荷重で構造物が壊れるということはまずあり得ません。ところが、地震外力は設計に与える影響が大きいのに、本当はもっと大きいことを知りながら、まれにしか生じないという理由で低めに設定され続けてきているのです。

地震外力にはもっと大きいものがあり、それを考えると構造物のコストはここまで上がるというメニューを示し、どれがよいかを利用者に選択させるという性能明示型設計をもっと前面に持ってくるべきだと思うのです。対応が難しいレベルの地震外力は見ないことにし、対応可能な地震外力だけを考慮してモノを造り、これを上回る地震外力が起こると、「想定外」と呼ぶのは間違いです。現実を直視しなかっただけで、言い逃れになってはだめなのです。

ただ、地震外力の中には現状の技術では対応できないものがあります。例えば、1999年台湾集集地震のように9mもの断層変位が生じたら、現在の技術では対応は困難です。しかし、このようなことは国民にも明らかだと思います。こうなると天災なのです。現実に起こり得る地震外力と技術的に対応可能な地震外力を表に出しながら、性能目標を明らかにし耐震設計することが重要だと思います。

川島：それではこれで座談会を終えたいと存じます。本日は、皆様お忙し中を御出席頂きまして、大変ありがとうございました。

特　集

東北地方太平洋沖地震：地殻変動と余震等の見通し

田所　敬一
●名古屋大学大学院環境学研究科地震火山・防災研究センター

1．はじめに

東北地方太平洋沖地震は、日本海溝から西に向かって東北日本の下へ沈み込んでいる太平洋プレートと、東北日本を乗せている北米プレートとの境目（プレート境界）が、沈み込みの方向とは逆向きのすべり（破壊）を起こして発生した、典型的な海溝型地震である。東北地方の太平洋岸、特に三陸海岸は、869（貞観11）年、1611（慶長16）年、1793（寛政5）年、1896（明治29）年、1933（昭和8）年にその沖合で発生した地震、さらには海外で発生した1960（昭和35）年のチリ地震によって、これまで幾度となく大規模な地震による津波の被害を受けてきた地域である。三陸海岸の沖合で発生したこれらの地震は、すべてM（マグニチュード）8クラスであった。ところが、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、これらの地震よりもさらに一回り大きい規模のM9.0という国内観測史上最大の超巨大地震であった。世界的に見ても、1900年以降では、1960年チリ地震（M9.5）、1964年アラスカ地震（M9.2）、2004年スマトラ島沖地震（M9.1）に次ぐ４番目に大きな地震（1952年カムチャツカ地震も同じマグニチュード）である。

地震の規模がこのように大きくなったのは、地震時にプレート境界がすべった範囲が広かったことと、そのすべり量が大きかったことが原因である。そのため、広範囲で大規模な地殻変動が観測された。東北地方の太平洋沿岸では、地殻変動のために満潮時に海水が住宅地に流れ込むという被害も生じている。

本稿では、東北地方太平洋沖地震の際のプレート境界面上のすべりと地殻変動について概観した後、今後の余震や他地域における地震への影響の見通しについて述べる。

2．プレート境界面上のすべりと地殻変動

図１は、国土地理院の稠密GPS観測網であるGEONET[1,2]、および、海上保安庁によって実施されている海底地殻変動観測[3]で捉えられた、東北地方太平洋沖地震による地殻変動の様子である。陸上で観測された最大の地殻変動は、牡鹿半島の先端における水平変位約5.3m、上下変位（沈降）約1.2mであった。震央付近の海底面では、約24mもの水平変位と約3mの上下変位（隆起）といった、さらに大きな地殻変動が観測されている。

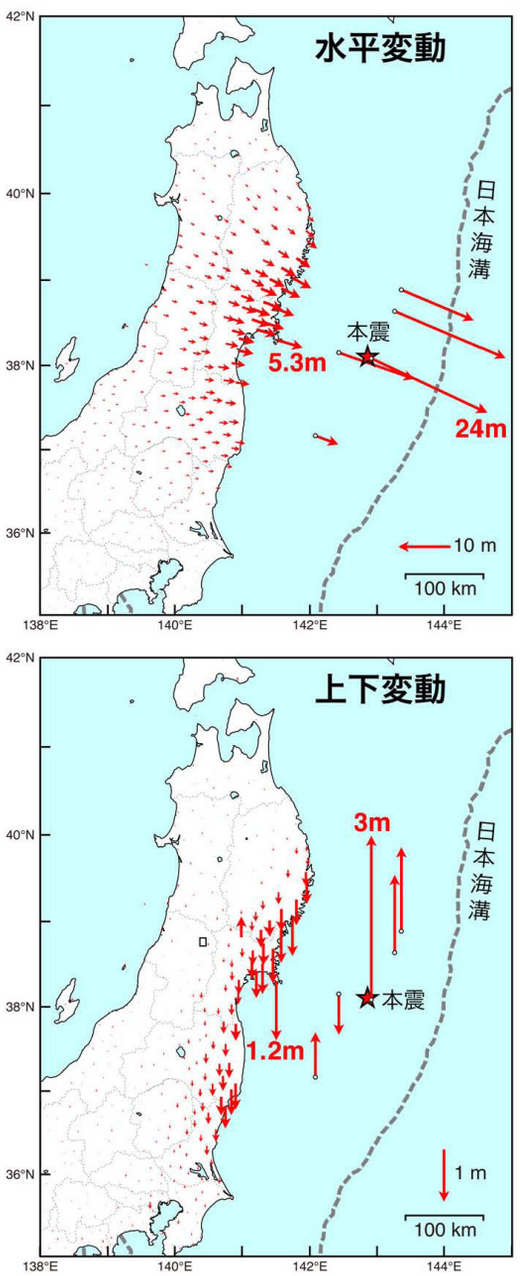


図１　東北地方太平洋沖地震による地殻変動

観測された地殻変動のデータをもとに逆解析を行う

と、地震時にプレート境界面上でどれだけのすべりが生じたかを計算することができる。その結果の概略[4,5]を図２に示した。なお、地域名は地震調査研究推進本部・地震調査委員会[6]による。すべり量が大きかった領域は、①「三陸沖中部」から「宮城県沖・三陸沖南部海溝寄り」、②「福島県沖」から「茨城県沖」、さらには③「三陸沖北部から房総沖の海溝寄り」の一部にまで広がっている。このうち、③の領域にあたるプレート境界のごく浅部で最大のすべり量が推定されており、その大きさはおよそ60mである。この領域での大きなすべりが、今回の高い津波を生じさせたと考えられている。

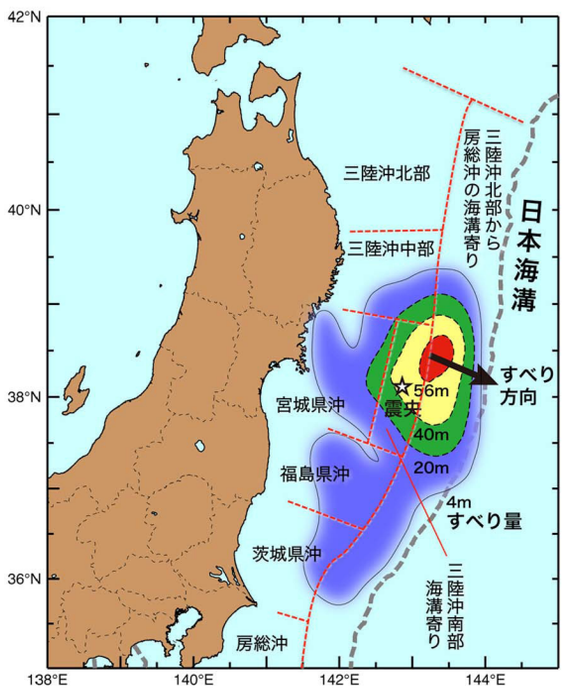


図２　プレート境界面上のすべり分布

すべり量が大きかった領域のサイズは、およそ南北400～500km×東西200kmであり、この領域全体ですべり量を平均すると20m程度となる。これらの数値は、一般的に成り立つ以下の関係式(1)～(3)から計算される値と調和的である：

$\log L = 0.5M - 1.9$ ……(1)

$W = L / 2$ ……(2)

$\log D = 0.5M - 3.2$ ……(3)

ここで、Lは断層の長さ（km）、Wは断層の幅（km）、Dは平均すべり量（m）、Mはマグニチュードである。こういう観点からすれば、東北地方太平洋沖地震は、ふつうのM9の地震であったと言える。

図２に示した地殻変動データから得られたすべり分布は、あくまでもプレート境界のすべりが最終的にどこまで広がったかを示しているものであり、時間とともにどのように進展したかは分からない。一方、地震波形を見ると、破壊の時間発展が推定できる。防災科学技術研究所の地震観測網であるF-netおよびKiK-netで記録された地震波形を東北地方の北から順に並べてみると、振幅の大きな地震波が３回にわたって放射され、それらが伝播してゆく様子が見て取れる[7]。このような振幅の大きな地震波の放出は、３つの領域が連鎖的に破壊したと考えれば辻褄が合う。すなわち、最初の破壊が開始してから40-50秒程度後に２つ目の破壊が始まり、さらにその後40-50秒程度経過して３つ目の破壊が始まったのである。これら３つの破壊が生じた領域は、上述の地殻変動から推定されたすべりの領域①、②、および③と概ね対応しているようである。

このように複数の領域が次々と破壊して発生した地震というのが東北地方太平洋沖地震の姿である。日本海溝沿いのプレート境界は、過去の地震の起こり方などの知見から図２のように予め領域分けがなされていた。基本的には、各領域は単独で地震が起こる（各領域内で地震が起こる）と考えられていた。ところが、複数の領域が一緒に地震を起こしてしまった。これが、東北地方太平洋沖地震は「連動型の地震」であったと言われる所以である。

写真１　沿岸近くにおける地表面の沈降の様子

３．東北地方太平洋岸での沈降

東北地方の太平洋沿岸では、満潮時に海水が住宅地に流れ込む被害が生じている。写真１は、2011年6月8日に海岸線から約500m内陸に入った石巻市塩富町で撮影した海岸から繋がる水路の写真である。撮影したのは干潮の頃であるが、それでも周囲の道路とほぼ同じ高さに水面が来ている。おそらく、満潮時には道路に水が溢れるのであろう、水路の端には土嚢が積まれている。この地点が地震前に比べて沈降しているのは

明らかである。満潮時の浸水被害は「地盤沈下」の影響であると報道されることもあるが、例えば地下水の過剰な汲み上げなどによる一般的な地盤沈下とは原因が異なる。図１から分かるように、東北地方の太平洋岸は、地震によって軒並み沈降している。プレート境界でのすべりによって生じたこの地殻変動こそが、浸水被害を招いている原因なのである。

そもそも、なぜプレート境界でのすべりによって東北地方の太平洋沿岸が沈降したかと言うと、それには、地震時にすべった断層（プレート境界）の位置と傾斜角、そしてすべりの方向が関係している。東北地方太平洋沖地震の際には、東北日本の東方の海底下に位置する傾斜角約10～20度の断層ですべりが生じた。そのすべりは、断層を挟んだ上側（上盤側）が東方向、そして斜め上方に向かう逆断層運動であった。このような断層運動のため、断層の西に位置する東北日本の地下では物質が減ることになる。そうすると、東北日本の地表は沈降せざるを得ないのである。単純に考えれば、断層に対して上側に位置する東北日本は隆起すると思われがちだが、特に断層の傾斜が緩い場合に上盤側の一部に沈降の領域が存在することが、逆断層のすべりによる地殻変動の特徴である。

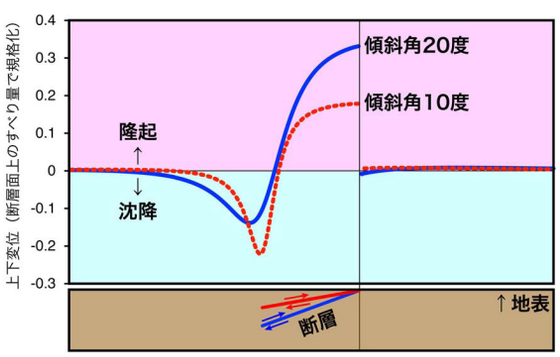


図３　逆断層運動による地表の上下変位

地下の断層ですべりが生じた際の地表における地殻変動は、「食い違いの弾性論」に基づいたモデル計算で容易に求めることができる。食い違いの弾性論とは、半無限弾性体に切り込みを入れて、切り込みの両側をずらした場合の変形に関する理論である。この考えに基づいて計算した傾斜角10度と20度の逆断層に対する地表の上下変位を図３に示す。断層の傾斜が緩い場合、上盤側全体が隆起するわけではなく、沈降の領域が一部存在する。さらに、図３のように断層の傾斜が極端に緩い場合は、断層の下端付近で沈降の量が最大となる。東北日本の沿岸部は、この沈降の領域に位置しているのである。地震時に沈降した地域は、その後次第に隆起しているが、１年くらいの短期間で回復する可能性は低いと考えられる[8]。

南海トラフ沿いで発生する南海地震も、東北地方太平洋沖地震と同じく緩い傾斜角のプレート境界が逆断層運動を起こして発生する地震である。684（天武天皇13）年に発生した南海地震の様子が記された日本書紀には、「土佐国では田畑約十平方キロが沈んで海となった」との記述がある。この高知の海岸線が沈降したのも今回と同じ理屈であり、東北地方の沿岸部で見られる沈降は、何も今回の地震に限った特異な現象ではないのである。

４．余震の見通し

大きな地震が発生した際には、その地震時の断層すべりによって、震源となった断層（プレート境界）と同一の面上や、そのごく周辺に新たにひずみが加わる。このひずみを解消しようとして地震が数多く起こる。これが厳密な意味での余震である。

余震の数$n(t)$は、時間tとともに急激に減少する。その減少のしかたは、式(4)の改良大森公式に従う。

$$n(t)=\frac{K}{(t+c)^p} \quad （K、c、p：定数） \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

一般にpは1よりもやや大きい場合が多い。余震の数は時間とともに急激に減少するとは言え、本震から10日後には1/10に減少するが、さらに1/10に減少するのには100日もかかる。したがって、余震活動はなかなか終息しないのである。気象庁のデータ[9]に基づくと、東北地方太平洋沖地震の余震も式(4)の形に従って日に日に減少している。

余震の数とともに、余震の規模（M）も徐々に小さくなる傾向がある。余震に限らずある一定の地域で起こる地震の規模別頻度（$n(M)$）は、式(5)で表されるグーテンベルグ・リヒターの法則に従う。

$$\log n(M)=a-bM \quad （a、b：定数） \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

簡単に言ってしまえば、大きな地震は少なく、小さな地震は多いということになる。一般に$b\approx1$であるから、マグニチュードが１だけ大きくなると、その地震数は約1/10になる。グーテンベルグ・リヒターの法則からすれば、規模の大きな余震が起こってしまえば、その後、大規模余震は徐々に起こりにくくなる。

表１　東北地方太平洋沖地震の大規模余震

発生日時	M	最大震度
3月11日15時 8分	7.4	5弱
3月11日15時15分	7.7	6強
4月 7日23時32分	7.1	6強
7月10日 9時57分	7.3	4

東北地方太平洋沖地震の場合、表１のように、本震直後からM7を超える大規模な余震が既に４つ起こっている（2011年8月末現在）。よって、M7クラスの大規模な余震は、本震直後に比べると起こりにくくなっているはずである。ただし、統計的に大規模余震が起こる確率が下がっているというだけで、その可能性がゼロだというわけではない。

何年後まで大規模な余震が起こる可能性があるのかに言及するのは難しい。2004年末に発生したスマトラ島沖地震（M9.1）は、東北地方太平洋沖地震と規模がほぼ同じで、地震のタイプも同じ海溝型地震であるため、この地震が参考になる。スマトラ島沖地震の後には、本震発生から５年以上を経過してもM7を超える大規模余震が発生している（表２）。東北地方太平洋沖地震についても、その震源域のごく近傍では、少なくとも５年程度はM7台の余震が発生する可能性があると考えておく方が良いだろう。

表２　スマトラ島沖地震の大規模余震

発生年月日	M	本震からの経過時間
2004年12月26日	7.2	当日
2005年 7月24日	7.2	７ヵ月
2008年 2月20日	7.4	３年２ヵ月
2009年 8月10日	7.5	４年７ヵ月
2010年 5月 9日	7.2	５年４ヵ月
2010年 6月12日	7.5	５年５ヵ月

５．震源域の隣の領域における地震への影響

大規模な海溝型地震が発生すると、厳密な意味での余震とは別に、震源域と同じプレート境界の隣接した領域で、やはり大規模な海溝型地震が発生することがある。スマトラ島沖地震（M9.1）の後には、その震源域のすぐ隣で３ヵ月後にM8.6の海溝型地震が発生した。同じプレート境界に沿ったさらにその先の領域にまで目を向けると、約２年９ヵ月後にM8.5とM7.9、約５年10ヵ月にM7.7の海溝型地震が発生している。この例をお手本にすると、やはり最低でも５年くらいは本震の震源域の南北に隣接した領域でM8に近い大地震への警戒が必要であろう。

2003年に北海道の南方海域で十勝沖地震（M8.0）が発生した。苫小牧の石油タンクで火災が発生したこともあり、ご記憶の方も多いのではないだろうか。この地震も今回と同じく、プレート境界のすべりによる典型的な海溝型の地震であった。十勝沖地震の後に、「余効変動」とよばれるゆっくりとした地殻変動が捉えられた[10]。この余効変動の原因は、十勝沖地震の震源域の周りのプレート境界がゆっくりとすべる「余効すべり」とよばれる現象であったと考えられている。十勝沖地震の余効すべり域はしだいに広がっていった。そして、十勝沖地震から１年２ヵ月後に、余効すべり域の東隣のプレート境界でM7.1の地震（釧路沖の地震）が発生した（図４）。十勝沖地震→余効すべり→釧路沖の地震を一連の活動と見なすと、十勝沖地震の余効すべりによって釧路沖の地震が引き起こされた（余効すべりは釧路沖の地震の準備過程であった）とも考えられる。

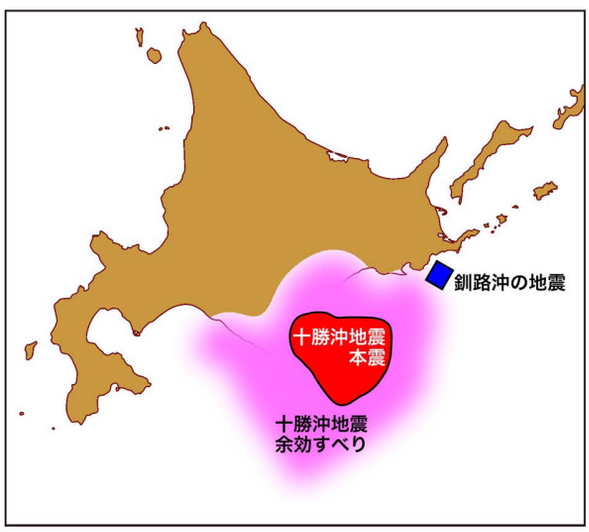


図４　十勝沖地震と釧路沖の地震

余効変動は、十勝沖地震のみならず、大地震の後には普遍的に観測されている。東北地方太平洋沖地震の後にも、図５に示すように、GEONETによるGPS観測でゆっくりとした変動（余効変動）が捉えられている[1,2,11]。余効変動が大きい地域と東北地方太平洋沖地震時の地殻変動（図１）が大きかった場所とは棲み分けている。余効変動が極端に大きい地域は、地震時の地殻変動が大きかった地域の南側、銚子を中心とした茨城県から千葉県北部のあたりである。このことから、東北地方太平洋沖地震の震源域のさらに南側のプレート境界で、地震後にゆっくりとした余効すべりが生じていると推定される。国土地理院によると、2011年8月末現在で、銚子沖のプレート境界面上におけるすべり量は約1mに達している[11]。先述の釧路沖の地震の例を考慮すると、現在生じている余効すべりが房総半島東方沖の準備過程となって新たな地震が発生するかもしれない。なお、銚子の東方沖では、延宝5（1677）年にM8程度の地震が発生し、現在の茨城県や千葉県などで津波による死者も出ている。

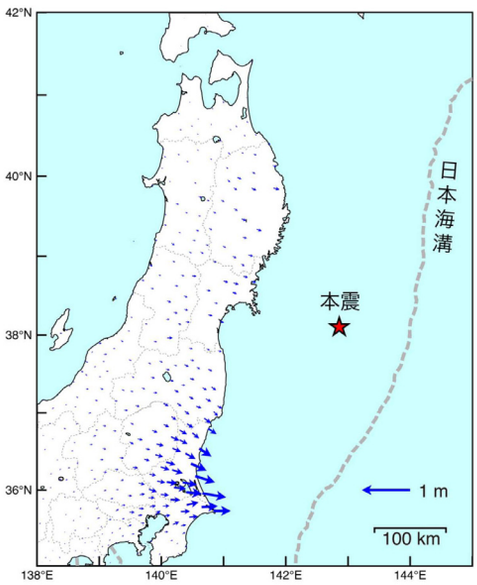


図５　東北地方太平洋沖地震後の余効変動

６．内陸での地震の誘発

東北地方太平洋沖地震の発生直後から、日本列島の東半分を中心に、震源域から遠く離れた場所でも内陸の上部地殻において地震活動が活発になった。表３に挙げたM6を超える地震もその仲間である。これらの地震は、本震ですべったプレート境界面とは異なる内陸の断層で発生したものであるため、厳密な意味での余震とは区別して「誘発地震」とよばれる。東北地方太平洋沖地震発生直後から3月31日までに深さ20km以浅で発生したM1.5以上の地震の分布を図６に示す（震源データは気象庁による）。表３に挙げた地震のほかにも、四角で囲った領域では小さな地震が密集して、あるいは、線状に並んで分布している。これらが誘発された地震群である。

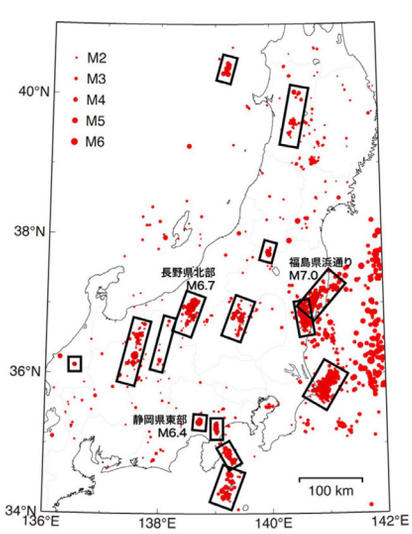


図６　内陸で誘発された地震

表３　内陸での大規模誘発地震

発生日	発生場所	M	最大震度
3/12	長野県北部	6.7	６強（栄村）
3/15	静岡県東部	6.4	６強（富士宮市）
4/11	福島県浜通り	7.0	６弱（いわき市他）

断層面にはたらく応力を図７のように剪断応力（τ）と法線応力（σ_n；正しくは、間隙水圧を差し引いた有効法線応力）で表現すれば、τは断層面をすべらせる働きをし、σ_nは断層面のすべりを妨げる働きをする。したがって、断層面をすべらせるには、τが大きくなるか、σ_nが小さくなればよい。他地域で発生した地震によって断層面上のτやσ_nが変化すれば、その断層面がすべりやすくなり、地震が誘発されやすくなる。τやσ_nがどれだけ変化するかは、断層の場所、断層の向き・傾斜、断層運動のタイプによって異なる。したがって、実際に誘発地震が起こるかどうかは、個々の断層によって異なる。

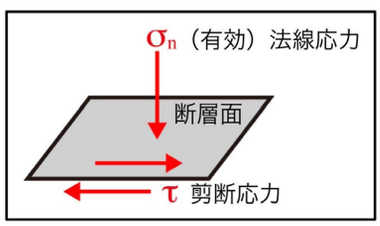


図７　断層面にはたらく応力

東北地方太平洋沖地震時のプレート間のすべりが非常に大きかったため、本震の震源域から遠く離れた場所にまで地殻変動が及んでいる。その影響で断層面上のτやσ_nが変化し、遠くでも誘発地震が発生したと考えられる（このほか、東北地方太平洋沖地震の表面波が通過することによって励起された地震も報告されている[12]）。特に小地震の誘発地震群は、その並びがほぼ南北であり、しかも、時間とともに震央の並びが南北に進展していった。また、東西方向に引っ張りの力がかかって発生したことを示す正断層型の震源メカニズムが数多く見受けられる。これらのことを考慮すれば、誘発地震の主たる要因は、東北地方太平洋沖地震の際のプレート境界面上のすべりによって東北日本が東へ引っ張られ、その結果として南北を向いた面上でのσ_nが小さくなったことであると考えられる。さらに、箱根、日光、焼岳などの火山地域で活発な誘発地震活動が見られる。火山地域のように地殻の強度が極端に弱い場所では、誘発地震が起こりやすいのであろう。地殻の強度を調査することも、地震調査研究として重要な項目のひとつである。

東北地方太平洋沖地震から時間が経過していることもあり、本震のすべりによる誘発地震は終息に向かっている。しかし、余効すべりは現在も継続している。現在までに誘発地震が発生していなくても、今後、余効変動の影響を受けて地震が誘発される断層もあると考えられる。東北地方太平洋沖地震と同様に、三陸沖のプレート境界で発生した1896年の明治三陸地震の際には、その約２ヶ月半後に陸羽地震（M7.2）が岩手と秋田の県境付近で発生した。また、1944年の東南海地震の発生から１ヵ月あまり後には、三河湾に面する三ヶ根山の近くで三河地震（M6.8）が発生した。これらの地震のように、今後、特に東日本の内陸部でM7クラスの地震が誘発される可能性は否定できない。M7クラスの地震が直下で発生した場合、震度６強の揺れに見舞われる地域が出るだろう。震源の直上や地盤の特に悪いところでは、震度７になることも予想される。兵庫県南部地震（M7.3）が好例である。震度が６弱を超えると、耐震性の低い木造家屋は倒壊するおそれがあり、新たな地震災害が懸念される。

７．おわりに

本稿では、東北地方太平洋沖地震の影響を受けて発生する地震を1) 厳密な意味での余震、2) 震源域と同じプレート境界の隣接した領域における地震、3) 内陸での誘発地震の３つに分けて今後の見通しを論じた。これらのうち、1) と2) の地震は日本海溝沿いのプレート境界で発生する地震である。これらを一括りにすれば、日本海溝沿いのプレート境界では最低でも５年程度は大規模な地震が起こる可能性があると考えておいた方が良いであろう。

西南日本では、南海トラフの巨大地震（東海・東南海・南海地震）が今後必ず発生する。歴史を紐解くと、南海トラフの巨大地震が、東北地方太平洋沖地震と同じく連動型であったという事例が見受けられる。揺れの割には津波が大きかった地震（津波地震）も発生しているし、内陸での誘発地震も発生している。そもそも、南海トラフの巨大地震が起こる基本的なしくみは、東北地方太平洋沖地震と全く同じである。東北で起こったことを決して他人事と考えるべきではない。

参考文献

1) Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire: Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, Nature, Vol. 475, No. 7356, pp. 373-376, 2011.

2) The Advanced Rapid Imaging and Analysis, Preliminary GPS early postseismic displacement data (version 0.3) for March 11, 2011 M9 Japanese earthquake, ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/usrs/ARIA/, 2011.

3) Sato,M.,T. Ishikawa, N.Ujihara,S.Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada: Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, Science, Vol. 332, No. 6036, pp. 1395, 2011.

4) Ito, T., K. Ozawa, T. Watanabe, and T. Sagiya: Slip distribution of the 2011 Tohoku Earthquake inferred from geodetic data, Earth Planets Space, Special Issue: First Results of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, 2011.

5)国土地理院：東北地方太平洋沖地震の陸域及び海域の地殻変動と滑り分布モデル：http://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html、2011.

6) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について、pp. 16、2002.

7) Yoshida, K., K. Miyakoshi, and K. Irikura: Source process of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake inferred from waveform inversion with long-period strong-motion records, Earth Planets Space, Special Issue: First Results of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, 2011.

8)国土地理院：東北地方太平洋沖地震後の地殻変動指数・対数関数近似（Q3）、第192回地震予知連絡会、2011.

9) 気象庁：「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」について（第55報）、http://www.jma.go.jp/jma/press/1109/08e/201109081600.html、2011.

10) Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire and Y. Hatanaka: Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw 8 Tokachi-oki earthquake in Japan, Earth Planets Space, Vol. 56, No. 7, pp. 675-680, 2004.

11) 国土地理院：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の地震後の変動と滑り分布モデル（暫定）：http://www.gsi.go.jp/cais/topic110314-index.html、2011.

12)Yukutake, Y., R. Honda, M. Harada, T. Aketagawa, H. Ito, and A. Yoshida: Remotely triggered seismicity in Hakone volcano following the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, Special Issue: First Results of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, 2011.

東北地方太平洋沖地震で観測された強震動

青井　　真、功刀　　卓、鈴木　　亘、森川　信之、中村　洋光、藤原　広行
●防災科学技術研究所

１．はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード（M）９という日本周辺で発生した地震としては有史以来最大規模のものであった。東北地方に沈み込むプレートに沿った全長400 - 500kmの長大な断層のずれに伴う津波、地震動、液状化などによりもたらされた被害[1)]は、死者1万6千人以上、建物の全半壊30万棟以上（2011年10月11日現在）と甚大なものであった。今回の地震は、海域である断層直上では強震計による観測はなされていなかったものの、断層に沿って稠密な観測網により強震記録の得られた世界で初めてのM ９クラスの地震である。本稿では防災科学技術研究所（以下、防災科研）の運用する地震観測網により明らかになった東北地方太平洋沖地震の特徴について報告する。

２．観測された強震データ

北海道から九州にいたる1200点以上のK-NET及びKiK-net観測点[2), 3)]で地震動が記録され（図１）、特に岩手県から千葉県にかけての20観測点で1gを超える加速度が記録された。観測された最大の加速度はK-NET築館 (MYG004) における2933 gal（3成分合成）であり震度７であった（図２）。また、余震や誘発された地震[4)]も数多く起こっており、それらの中には震源が本震に比べて陸域に近い地殻やスラブ内で発生したM ７クラス地震もあり、震度６強ないし６弱の揺れにより死者が出るなど大きな被害[1)]を生じている。

K-NET築館を含め、東北地方の多くの観測点の記録には明瞭な波群が二つ認められ、両者の時間間隔は地点によらず概ね40秒程度であることから、大きなすべりが断層面上の比較的近い場所で二度起きたことが示唆される（図３）。ただし、多くの観測点において、二つの波群の振幅は加速度波形（短周期）では同程度であるのに対し、速度波形（長周期）では二つ目の波群の振幅が数倍大きいなど、性質が異なる点もある。また、震源域南部に位置する観測点では、福島沖を震源とする三つ目の波群が認められる。

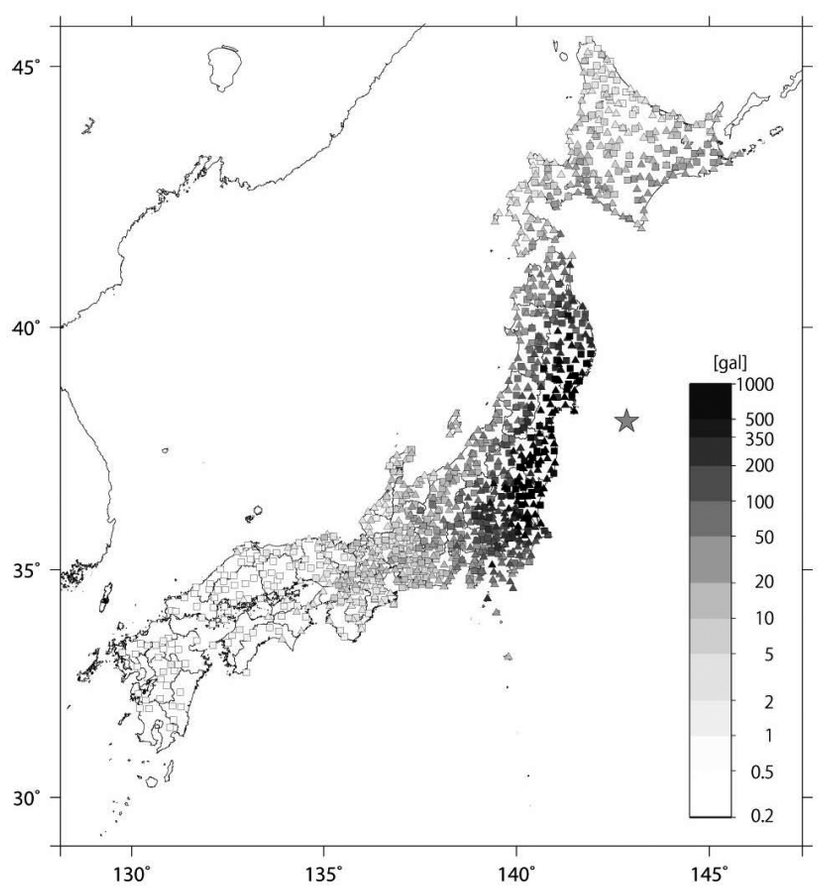


図１　K-NET（△）及びKiK-net（□）で観測された最大加速度分布

青森県から千葉県のK-NET・KiK-netの36観測点の強震波形を用いてマルチタイムウィンドウ線型波形インバージョン法により断層破壊過程を推定した結果（図３）、宮城県の沖合海溝寄りに大きなすべりがあり、最大すべりは48mとなった[5)]。震源インバージョンで推定された各小断層の震源時間関数を断層面全体で足し合わせると、前述の速度波形に見られる二つの波群に対応するピークが見られ、その振幅は後者の方が5倍ほど大きい。また、理論的なグリー

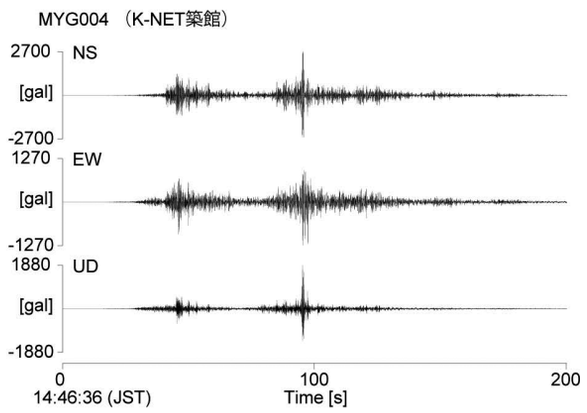


図２　K-NET築館（MYG004）観測点で記録された加速度記録

ン関数を用いた波形インバージョンでは解析が困難な短周期帯における震源モデル推定結果[6]では強震動生成域はより陸に近い場所に推定されており、地震波の放射パターンには周波数依存性があったことが示唆される。

今回の地震はマグニチュードが大きかったことから極めて多くの余震を伴っており、逆断層タイプだけでなく、本震以前には比較的珍しかった正断層タイプを含め様々なメカニズムの地震が発生している。このうち、プレート近傍で発生した本震に比較的似たメカニズムの余震の分布[7]は震源インバージョンにより推定された大きなすべりの領域とは相補的な関係にある。このことは、本震時に大きくすべった領域においては、プレート境界面における余震が少ないことを意味する。

３．地震動の長い継続時間

今回の地震の地震動の特徴として、広域にわたって揺れが大きかったことに加え、その継続時間が長かったことが挙げられる[8]。震度が時間と共に成長していく様子を見るために逐次的に震度を求める近似アルゴリズムであるリアルタイム震度[9]により1/100秒毎に計算した震度の時間発展を図４に示す。震源に比較的近かったK-NET仙台観測点（MYG013、震央距離170 km）では、震度１で揺れ始めてから６強に達するまでに約30秒の時間があった。また、より震源から離れたK-NET日立観測点（IBR003、震央距離約260 km）におけるその時間は１分以上に及び、さらに、震度５弱以上の揺れが１分間以上に渡って継続した[10]。今回の地震の場合は断層サイズが巨大で破壊継続時間も長かったために、時空間的な断層破壊の不均質の影響が震度の成長過程に顕著に表れ、このように継続時間の長い地震動を生成した。特に、関東地方に大きな揺れを

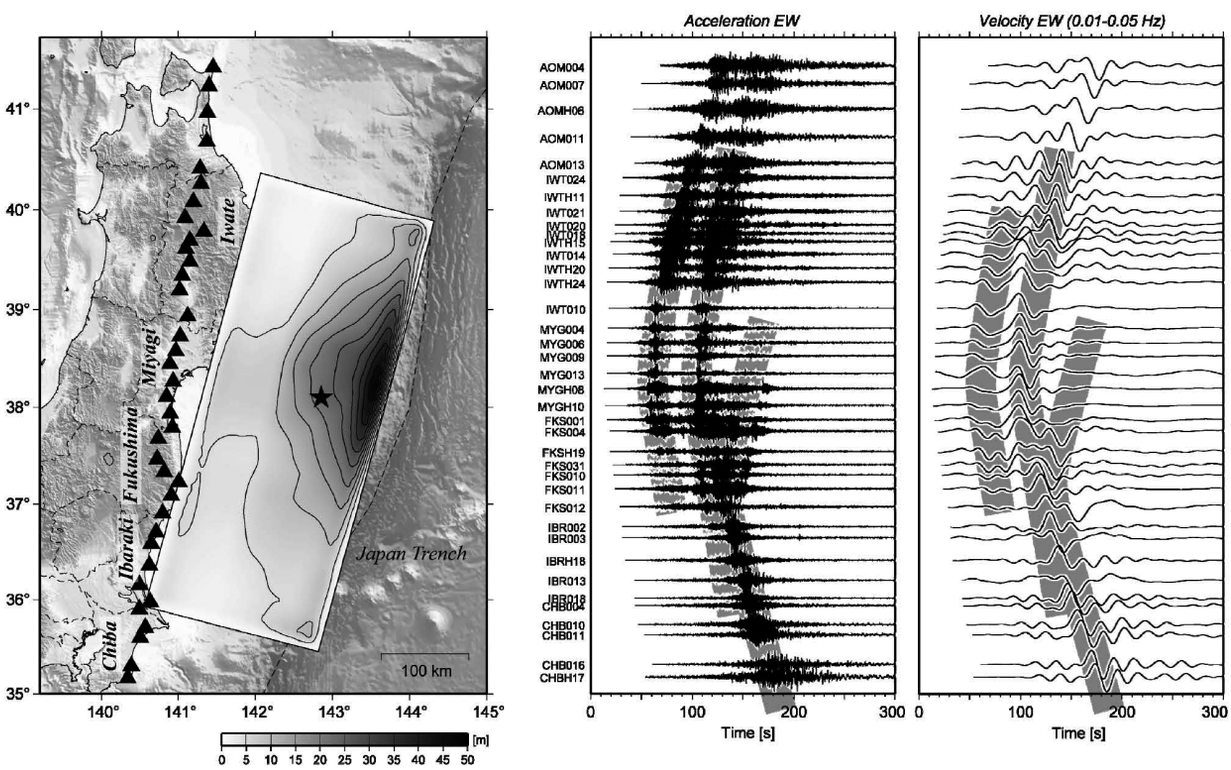


図３　（左）断層すべりモデル[5]及び、（中）加速度と（左）速度（0.01-0.05Hzバンドパスフィルター）の東西成分のペーストアップ。ペーストアップは左図に△で示したK-NET及びKiK-netの観測点のデータを用いて緯度毎に並べ、太灰色で顕著な三つの波群を示した。

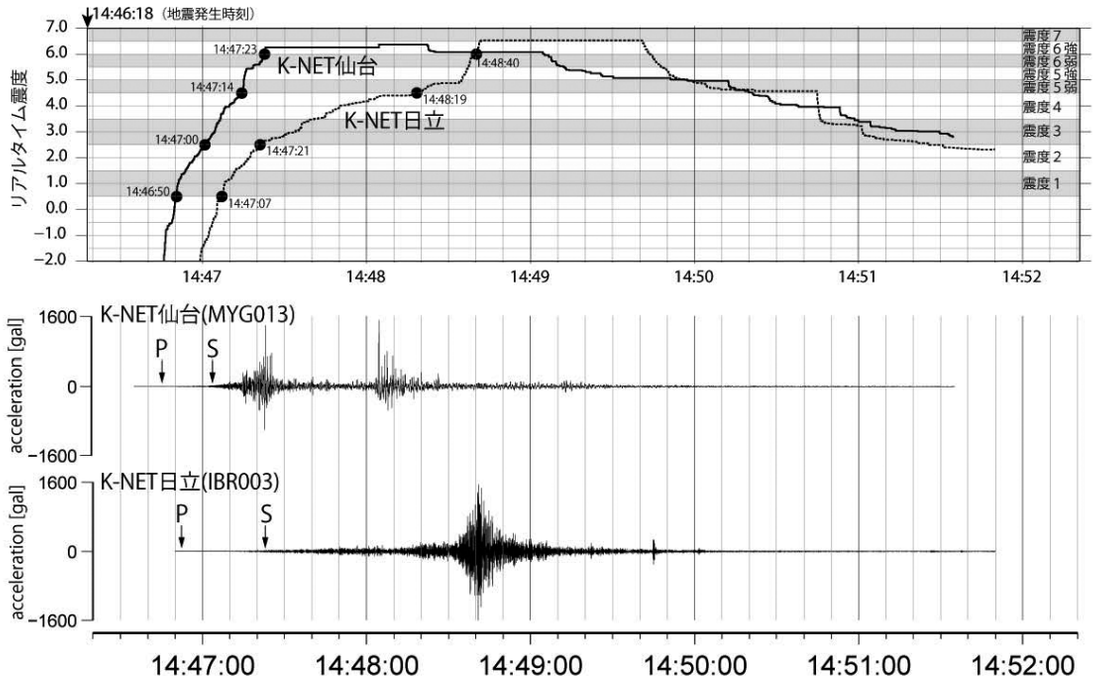


図４　（上）K-NET仙台及び日立における震度の時間発展。両地点において震度1、3、5弱、6強に達した時刻を示した。
（下）仙台及び日立において観測された加速度波形の南北成分。

もたらした断層南部の破壊は、破壊開始から約100秒以後に発生しており、関東平野の厚い堆積層によるトラップ効果と相まって、結果として比較的震央から離れた関東地方に極めて継続時間の長い地震動をもたらした。

４．距離減衰

K-NET及びKiK-netにより観測された最大加速度・速度と距離減衰式の比較[11]を図５に示す。マグニチュード９まで適用できる距離減衰式はこれまでに提案されていないので、観測された最大加速度あるいは最大速度と司・翠川の関係式[12]を外挿して示した。図５の左および中央の図における観測値は、0.1 ～ 10Hzのバンドパスフィルターを通して求められている。震源距離

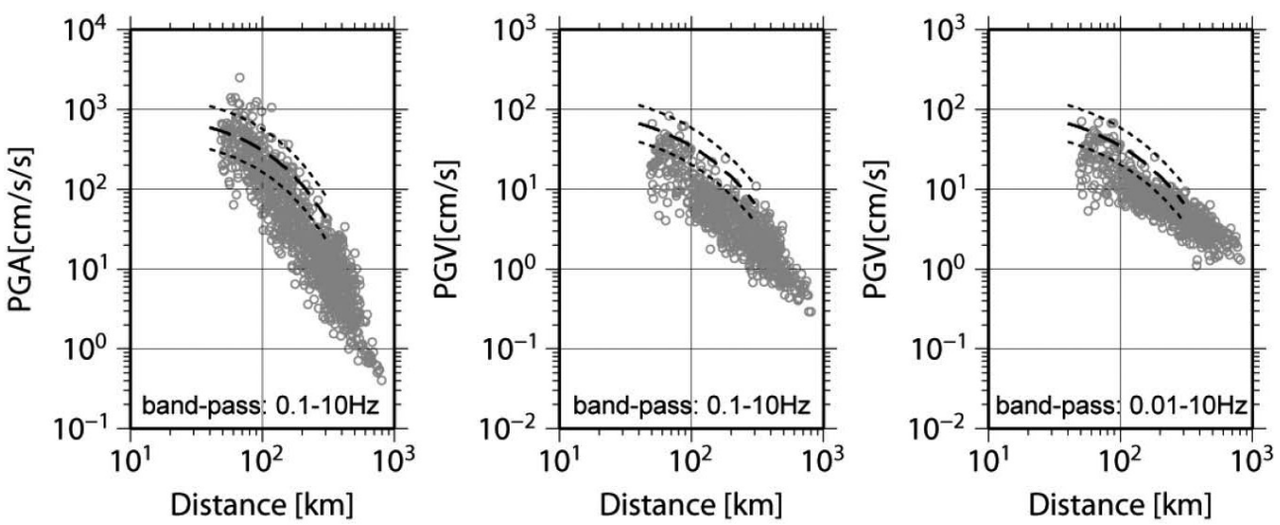


図５　最大加速度及び最大速度の観測値の距離減衰。左図は地表における最大加速度、中央及び右図はS波速度が600 m/sの工学的基盤相当に変換した最大速度を示した。ここでの最大加速度、最大速度はいずれも水平動二成分のうちの大きい方の値を用いている。左及び中央図は0.1 - 10 Hzの、右図は0.01 - 10 Hzのバンドパスフィルターを施している。図中に示した波線及び点線は、司・翠川[12]による距離減衰式及びその標準偏差を、Mw 9.0まで外挿したものである。断層最短距離は、図３に示した断層モデルを用いて計算した。

図６　KiK-net志津川(MYGH12)観測点の被害状況

が100㎞以内での最大加速度は観測値と関係式が対応しているが、それ以外は観測された値が関係式よりも小さい。最大加速度の関係式では震源距離が短い地点での振幅の頭打ち項の影響が強いため、マグニチュードが大きくなっても関係式の値はそれほど大きくならない。一方、最大速度や遠方の地点ではマグニチュードが大きくなるほど関係式の値も大きくなる。このことは、地震動強さがマグニチュードに対して飽和する可能性があることを示唆している。図５の右図は、バンドパスフィルターの低周波数側のカット周波数を0.01Hzとした最大速度を示している。震源距離が100㎞よりも遠方では明らかに右図の最大速度が中央の図での値よりも大きくなっており、今回の地震では、周期10秒から100秒という非常に長い周期帯においても大きな振幅の地震動が観測されていたことがわかる。

５．地震による観測網への影響

今回の地震に伴い、防災科研が観測データの受信・処理・公開を行っているデータセンタのあるつくば市においても震度６弱に見舞われ、直後に停電が発生したり建物への立ち入りが制限されるなど、数日にわたりセンター機能に障害が出た。また、岩手・宮城両県の計５観測点においては津波で観測小屋自体が流失するなど施設が直接的な被害を受けるとともに（図６）、東北地方を中心とする多くの観測点においては通信回線断や停電などによりデータの取得が途絶したり不安定になった。大災害を伴う地震の発生時という、防災上最も地震データが重要な状況下における観測継続の困難さがあらためて明らかになった。

参考文献

1）消防庁: http://www.fdma.go.jp/bn/2011/detail/691.html, 2011.

2）Kinoshita, S.: Kyoshin net（K-NET）, Seismol. Res.Lett., 69, 309-332, 1998.

3）Aoi, S., et al.: Deployment of new strong motion seismographs of K-NET and KiK-net, Earthquake Data in Engineering Seismology, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering, 14, 167-186, Springer, 2011.

4）武田哲也・木村尚紀: 2011年東北地方太平洋沖地震後に誘発された内陸地震, 日本地球惑星科学連合2011年大会, MIS036-P94, 2011.

5）Suzuki, W., et al.: Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data, Geophys. Res. Lett., in press, 2011.

6）Kurahashi S. and K. Irikura: Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 571-576, 2011.

7）Asano Y. et al.: Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 669-673, 2011.

8）青井真・他: 東北地方太平洋沖地震の揺れの成長と強震モニタ,科学, 81, 10, 1065 – 1067.

9）功刀卓・他: 震度のリアルタイム演算法, 地震2, 60, 243-252, 2008.

10）リアルタイム震度は過去1分間の最大値を保持するため、地震動が小さくなってもすぐには値が小さくならない。そのため、継続時間を考察する場合には概ね1分程度差し引いて考える必要がある。

11）森川信之・藤原広行: 平成23年東北地方太平洋沖地震（Mw=9.0）の強震動記録に基づいた新たな距離減衰式, 日本地震学会2011年秋季大会予稿集, B22-09, 2011.

12）司宏俊・翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70, 1999.

東日本大震災を経験して
－地震動と建物被害を中心として－

源栄　正人
●東北大学大学院工学研究科

１．はじめに

3月11日14時46分に発生した東日本大震災では、津波災害を中心に多くの犠牲者を出したが、地震動による被害も数多く発生している。今回の地震は、宮城県域にとっては、過去の地震被災地を襲った巨大地震であったと位置付けられる。3分に及ぶ強震動は1978年宮城県沖地震を上回る大きさであり、各地に大きな振動被害をもたらした。

ここでは、筆者がこれまで実施してきた仙台市を中心とする宮城県域の地震動特性と建物被害に関する調査・分析結果について紹介する。

２．東日本大震災における地震動特性

（１）観測された大加速度記録

今回の地震では、防災科研の観測網や気象庁の観測網など国の観測網の他に、仙台地域では、筆者らの東北大学災害制御研究センターの観測網や東北工業大学の観測網で貴重な強震観測記録が得られている。最大水平加速度2,700ガルで震度7を記録したK-NET築館の周辺では、震度の割に極めて被害が少なかった（全壊３棟）。これは、0.3秒以下の周期成分が卓越した地震動で建物を変形させるパワーがなかったことに起因する。建物被害を論じる場合の地震動の指標として計測震度を用いることは必ずしも適切ではない。

また、筆者は、K-NET築館の大加速度記録を分析し、水平加速度の最大値発生時刻近傍における水平動に奇数倍調波成分、上下動に偶数倍調波成分が確認できることから浮き上がり振動の可能性を示唆した[1)]。K-NET仙台（水平最大加速度1,517ガル）では、液状化による観測小屋の傾斜（南北方向の傾斜角2°）が確認された。強震計の設置位置、設置方法は要検討である。

（２）仙台市域の強震動特性

筆者らの東北大学災害制御研究センター（ＤＣＲＣ）では、仙台市内の公共建築物を中心に建物の１階（幾つかは最上階との同時観測）で強震観測を行っており、今回の地震で貴重な記録が得られている[2)]。観測点配置を地形・地質とともに図１に示す。

本震時の最大加速度は300ガル～840ガルの範囲、最大速度は30cm/s ～ 80cm/s程度となっており、仙台市北部の固い岩盤に表層地質が堆積した観測点で大きな加速度値を示している。これらの観測点における卓越周期は0.4秒から0.7秒の短周期成分であった。

図２には、仙台市東部の沖積平野にある若林区卸町地区や太白区長町地区における南北方向の観測記録の速度応答スペクトルを工学基盤の揺れとして位置づけられる仙台駅前のスペクトルと比較して示す。図中には、告示スペクトルもあわせて示してある。

地震動特性の違いによるスペクトル特性は顕著であり、これは地盤条件の違いによるものである。

卸町地区では、1秒以下の周期成分が2倍以上増幅していること、長町地区では1秒の周期成分が仙台駅前の4倍近く増幅し、5％の速度応答スペクトルで300cm/sにも達する揺れであったことが分かる。また、3秒の周期成分も卓越しており、深部地盤構造の影響で仙台駅前に比べて2倍以上のスペクトル値である。

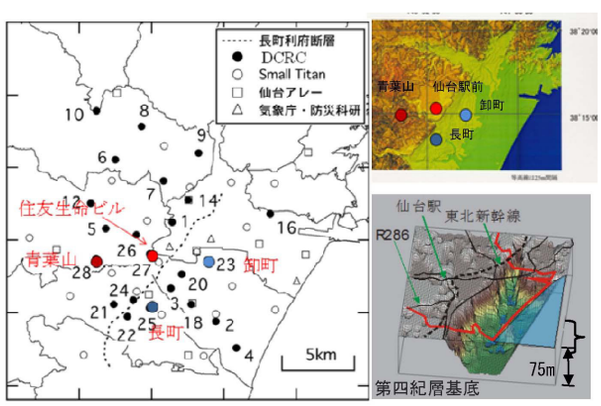


図１　ＤＣＲＣ強震観測網の観測点位置と地形・地質

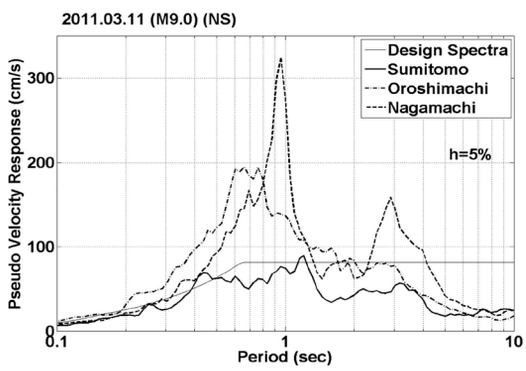


図２　仙台駅前と卸町・長町の応答スペクトルの比較

（３）青葉山丘陵地における地震動の増幅特性

今回の地震で大きな被害を受けた東北大学工学部の人間・環境系建物の入力地震動特性を仙台駅前の住友生命ビルと比較することは重要である。今回の地震と1978年宮城県沖地震の青葉山丘陵地の増幅特性について比較検討する。

図３には、今回の地震と1978年宮城県沖地震において青葉山の人間・環境系建物１階で観測された強震記録の南北方向成分を示す。図４には、２つの地震における南北方向の応答スペクトルを示すとともに、仙台駅前のスペクトルと比較して示す。

これらの図より、丘陵地の1秒付近の周期成分は今回の地震でも、1978年宮城県沖地震での2倍強増幅していることが分かる。これらの地形による増幅効果は建築構造物の耐震設計/耐震診断・補強に反映する必要があろう。

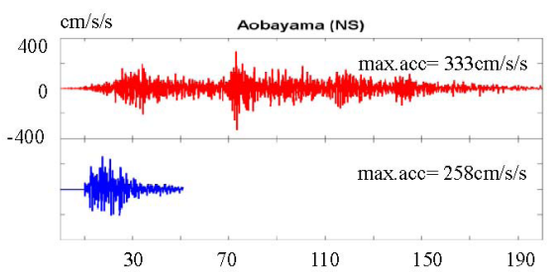


図３　建物１階における南北方向の強震観測記録
（上）今回の地震、（下）1978年宮城県沖地震

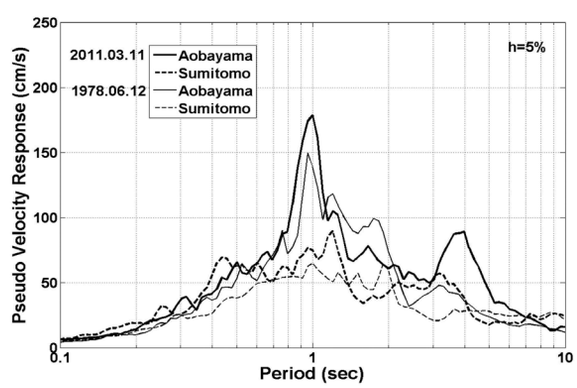


図４　速度応答スペクトル（実線：青葉山、点線：仙台駅前）

３．東日本大震災における建物被害の構造被害

（１）東北大学青葉山キャンパスの建物被害

東北大学工学部建築学科の卒業生にとっては、「学びの館」である青葉山キャンパスの人間・環境系研究棟（ＳＲＣ造9階建、1969年築）がセットバックした3階部分の4つの隅柱すべての柱脚部で大破した（写真１）[3]。また、この建物の強震観測記録の分析により倍調波成分の励起を確認し、3階床面から上部が浮き上がり振動を起こしていたことを示唆した[4]。

この建物は、1978年宮城県沖地震を経験し、2000年秋～2001年春にかけて耐震改修した。3階部分の梁間方向（南北方向）の構造耐震指標Is値は、改修前は0.54、改修後には0.84となった。改修後は、2005年宮城県沖の地震や2008年岩手宮城内陸地震を経験した。

図５には、今回の地震により観測された9階の南北方向の観測記録波形を1978年宮城県沖地震における観測記録と比較して示す。継続時間の長さの違いは一目瞭然である。図６には、9階における観測記録の南北方向の速度応答スペクトルを1978年の地震におけるスペクトルと比較して示す。同図には図４に示した１階の応答スペクトルも合わせて示している。この図より、1秒の周期成分によって9階建の建物が共振し、大きく増幅していること、1978年宮城県沖地震の際よりも、周期が伸びていることが分かる。筆者らは、第１波群による変位応答は1978年の時よりも小さく、第2波群で1978年を上回る変形量となったことを分析してい

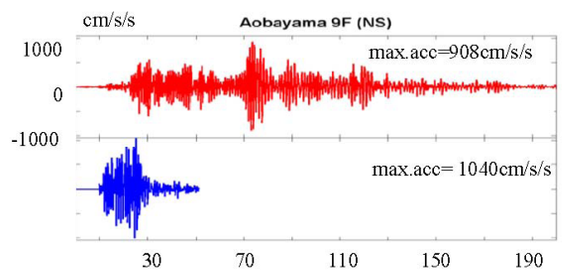


図５　建物９階における強震観測記録
（上）今回の地震、（下）1978年宮城県沖地震

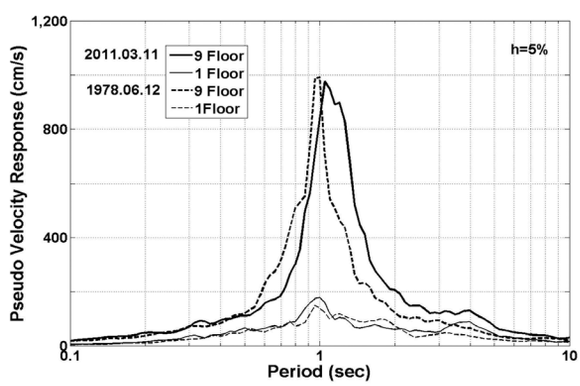


図６　今回の地震と1978年宮城県沖地震の応答スペクトル比較（梁間方向）

写真１　妻壁両端隅柱の柱脚部の被害状況[3]

る[3]。なお、青葉山キャンパスでは、人間・環境系研究棟のほかにも8階建、9階建の建物が大きな被害を受けており、青葉山丘陵地の1秒付近の卓越周期に共振したことが被害をもたらした大きな要因の一つであると判断できる。

（2）1978年宮城県沖地震の被災地区の被害

前述のように仙台市東部の沖積平野部にある若林区卸町地区では、洪積台地にある仙台駅前に比べ大きな揺れであった(図２参照)。

卸町地区では3月11日の本震において、流通団地338棟のうち倒壊建物は2棟であった（写真２）。4月7日の余震で5棟に拡大した。この地区は1978年宮城県沖地震で数多くの建物が全半壊した被災地区である。倒壊した建物はいずれも新耐震設計施行以前の建物（1969年築）であり、1978年の宮城県沖地震を経験している。蓄積した損傷の評価が重要である。

（3）明暗分けた1978年宮城県沖地震の杭基礎被害建物

1978年の地震で被害を受けた２つの杭基礎建物、一つは宮城野区のＳマンション（ＳＲＣ14階建）、もう一つは、長町の郡山市営住宅（ＳＲＣ11階建）の被害状況調査を行った。いずれも「Ｌ字型」でエキスパンション・ジョイント（Exp. J）を介して2棟で構成される集合住宅である。前者の1棟は大きく傾斜、各階のExp. Jの間隔として測定された傾斜角は本震で1/56、4月7日の余震で1/45になった（写真３）。一方の長町の郡山市営住宅は、1978年の地震で傾斜したが、基礎の耐震補強[5]を行った建物であり、今回の地震では1秒付近の地震動の大きな増幅（図２参照）にもかかわらず補強の効果により構造上の被害は無かった。

（4）その他の特筆すべき建物被害

仙台市若林区で新耐震設計施行以降に建てられたＲＣ造4階建（杭長26m）が傾斜した（傾斜角1/30）（写真５）。杭基礎の損傷による傾斜と思われる。上部構造に損傷は見られなかった。建物周辺には噴砂やマンホールの浮き上がり、電柱の沈下など液状化による現象が見られた。

仙台市宮城野区の大規模造成地の急傾斜盛土部に建つ東西方向に細長い平面プランのＲＣ造建物である。5階建ての住宅棟（杭基礎）と３つの階段棟（杭基礎）で構成されている。階段棟と住宅棟は基礎が分離されており、10㎝間隔のExp. Jで結ばれている。南北方向に強い地震動で、この方向に弱軸を持つ階段棟が傾斜し（写真６）、強軸の階段棟の傾斜は無かった。住宅棟は、段差のある基礎部の被害、梁の損傷、非構造壁の

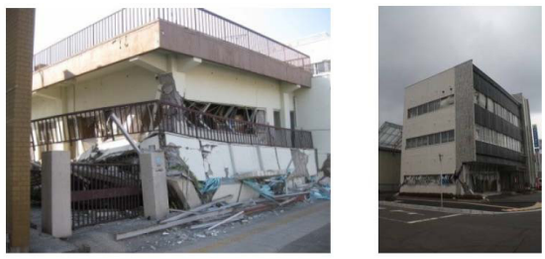


写真２　仙台市卸町地区の倒壊建物

写真３　傾斜したＳＲＣ造14階建のＳマンション
（左）全景（右）Exp. J部の開き

写真４　基礎の補強効果により構造被害が無かった仙台市太白区の市営住宅

写真５　傾斜したＲＣ造４階建て杭基礎建物
（左）全景（右）沈下した南東端柱脚部

写真６　傾斜盛土部の建つＲＣ造杭基礎建物の被害状況
（左）階段棟の傾斜　（右）段差部の被害

せん断破壊などの被害を生じた。設計段階における地震時の構造物内や構造物間の適切な相対変位量評価の必要性を指摘したい。

４．非構造材等の被害

構造物の地震対策では、主体構造の安全確保はもちろんのこと，建物全体の機能を含めた安全性能の向上を図ることが求められる。今回の地震では、集合住宅の雑壁の破損や，劇場ホールや体育館の天井の落下事故，空調・照明などの設備機器の損傷などにより，建物の機能が損なわれた事例が数多く見られた。

特に、大空間を有する構造物であるホールや大型店舗の天井材の落下により犠牲者を出した。

写真７には、筆者が視察した天井材落下被害の中から仙台市内のホールの天井被害状況である。

筆者らは、このホールの屋上における常時微動測定により、2.3Hz付近の1次振動モードは水平動と同等の上下動を伴うこと、上下動による大きな卓越振動数が5.5Hz付近に存在することを確認している。

このような構造物では、例え横揺れの入力に対しても屋根面には大きな上下動が誘発される。天井材の耐震設計においては、この上下動に対する配慮と、横揺れに対しては十分なクリアランスの確保が必要である。天井材の落下被害状況を見ると、上下動に対する耐力不足と水平動による非構造材同士の衝突が主な原因となり、被害が拡大したと考えられる。非構造材の上下動に対する荷重設定は甘いと言わざるを得ない。一般構造物の耐震基準とは異なった基準が必要であり、揺れの特殊性に対応するような設計態勢の見直しが求められる。

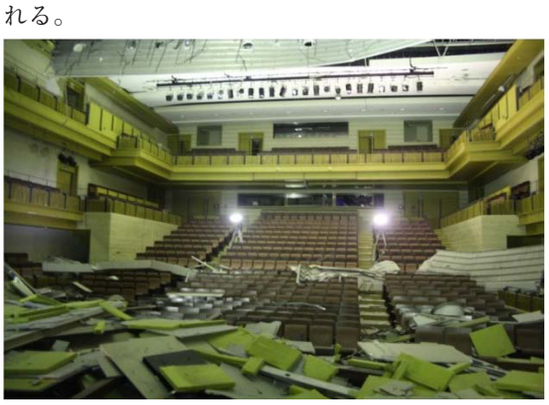


写真７　仙台市太白区の文化センターホールの天井材の落下

５．まとめ

本報告では、東日本大震災による地震動特性と建物被害について報告した。建築構造物の地震対策に関しては、耐震基準の変遷と既存不適格建物の耐震改修・補強の普及促進により耐震性が向上したことは事実である。今後、より地震に強い都市・建築に向けて、今回の地震における振動被害の教訓を以下に示す。

１）地震動の地盤条件による差は顕著である。耐震設計・耐震診断／補強における適切な考慮が必要であり、サイスミック・マイクロゾーニングの重要性が高まった。

２）継続時間の長い地震動における大振幅での繰り返しや数多く発生する余震に対する耐震要素の健全性評価の必要性が指摘される。

３）過去の地震や今回の地震で被災した建物の残存耐震性能の適切な評価法の確立が望まれる。

４）構造躯体ばかりでなく、非構造材・設備の耐震性とのバランス、基礎構造と上部構造のバランスなど建物全体の総合的耐震対策に対する配慮が必要である。

５）事業継続計画の観点から、直接被害ばかりでなく、間接被害に対する配慮も今後益々必要となる。

最後に、筆者の愛読書である寺田寅彦の随筆集の中から、『天災と国防』（昭和9年）の一節を引用する。

「人間の団体（国家や国民）と称するのは有機的結合が進化し、その内部機能の分化が著しく進展すると、有機系の有る一部の損害が系全体に対して甚だしく有害を及ぼす。一小部分の障害が全系統に致命的となりうる。これに対し単細胞動物のようなものでは個体を切断しても各片が平気で生命を維持することができる。高等動物になると融通が効かなく針一本での打ち所次第では生命を失うようになる。」

解説するまでもないが、複雑化した社会、過度に分化した社会の脆さを指摘している。現在でも当てはまる。

参考文献・参考資料

1) 源栄正人、地震動と建物被害の関係、東北大学による東日本大震災３ヶ月報告会、2011年6月

2) 大野晋・源栄正人、2011年東北地方太平洋沖地震とその余震における仙台 市内の強震動特性、日本地球惑星科学連合2011年度連合大会、MIS036-P72 、2011

3) 源栄正人他、2011年東北地方太平洋沖地震における被害建物の地震前後の振動特性の変化、日本建築学会大会学術講演集、2011年8月

4) Tsoggerel Tsamba and Masato Motosaka Investigation of dynamic behavior of damaged 9-story building during the 2011 off Pacific Coast Tohoku Earthquake,日本地震工学会、2011-年次大会概要集、2011

5) 志賀敏男、コンクリート杭と地震、コンクリート工学Vol.18, No.8, 14-21, 1980.

液状化・造成地の被害の特徴と課題

若松加寿江
●関東学院大学工学部社会環境システム学科

1．はじめに

東北地方太平洋沖地震では、地震直後、津波による被害および原子力発電所の被害が大きく報じられた。しかし、日時の経過と共に、液状化や造成地・土構造物の崩壊など地盤破壊による被害が深刻であることが明らかになってきた。液状化は、関東地方の東京湾岸および利根川沿岸地域を中心に甚大な被害をもたらした。東北地方では、液状化が主原因の被害は少なかった。一方、造成地被害は仙台市を中心に多数発生し、応急対策は講じたものの復旧工事は未着工で住民達が不安な生活を強いられている。

液状化と造成地被害以外では、利根川水系および北上川、鳴瀬川水系などの多数の河川堤防に被害を生じた。また、福島県須賀川市の藤沼貯水池のアースダムが決壊し、8名の死者・行方不明者を出した。

本稿では、本地震による液状化と造成地の被害を中心に、被害の特徴と課題について現時点で明らかな範囲で報告する。

2．液状化の特徴

今回の地震による液状化の特徴をあげると次のようになる。

(1) 広域な液状化発生

液状化が発生した地域は、図1に示すように、岩手県から神奈川県まで南北約500kmの範囲（岩手、宮城、福島、山形の4県および関東地方の1都6県の合計145の市区町村）に及んでいる。海岸に山地・丘陵が迫っている東北地方では東西方向の広がりが狭く、広大な関東平野では海岸からの距離が100kmの内陸部でも液状化が生じている。本震の震央から最も遠い液状化地点は千葉県南房総市池之内の約440kmである。この距離は、地震のマグニチュードに比例している。これまでに震央から最も遠くまで液状化が及んだ記録は1946年の南海地震（M_J8.0）の377kmであり[1]、今回の地震のマグニチュードがMw9.0であることを考慮すると、440kmは特異な距離ではない。

近年、広域・高密度に液状化が発生した地震として1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）があげられる。この地震では、四国北東端から大阪市にかけての南西－北東方向の100km余りの範囲に液状化が生じた。これと比較すると、今回の地震による液状化は５倍の広がりを持つことになる。

(2) 震度５強でも高密度に液状化

東京湾沿岸の浦安市から千葉市にかけての埋め立て地帯では、震度5強とそれほど大きな震度ではなかったにも関わらず、高密度に液状化が発生した。特に、浦安市の約3/4を占める埋立地では、地盤改良をしていない地区は全面的に液状化したと言っても過言ではない。

既往の地震においては、ごく少数の例外を除いて震度5強以上の地域で液状化が生じていた[1]。今回は、これまでの傾向と整合するものの、震度5強の地域でかつてなかったほど高密度に液状化を生じた。その理由の一つとして地震動の継続時間が長かったことがあげられる。兵庫県南部地震をはじめとして、一般の地震の強い揺れは十数秒であり、今回はその10倍にも及

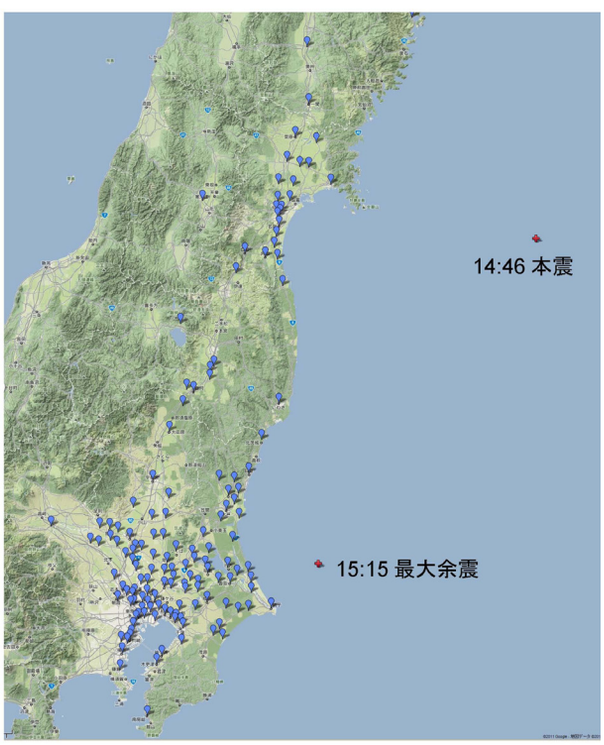


図１　東北地方太平洋沖地震で噴砂が確認された市区町村の分布（アイコンの位置は市区町村役場の位置で、噴砂地点の位置ではない。Google Mapを利用）

ぶ長く強い揺れが継続した。震度5強程度の揺れでも、繰り返し長く揺すられ続けることにより、高密度な液状化が発生するに至ったと考えられる。

(3) 莫大な量の噴砂と地盤沈下

地震動の継続時間は、噴砂量や地盤の沈下量にも影響を及ぼした。今回の地震では、噴砂の厚さは厚いところで50cm、地盤の沈下量は、東京湾岸埋立地で最大50cm程度、利根川沿岸で1m以上にも及んだところがある。このような沈下量は、地盤が液状化した後、圧縮されたことによってのみ生じた沈下とは考えにくい。莫大な砂が地表に噴き出したことにより地中の空洞が埋まり、地盤沈下が生じたものと思われる。また、一部の地区では液状化した層が横方向に移動する側方流動が生じたことも沈下量が過大であった要因としてあげられる。

(4) 臨海部の埋立地や内陸部旧水部に液状化が集中

液状化の発生は、東京湾岸の戦後の埋立地や、内陸部の利根川などの旧河道や旧湖沼の埋立地に特に集中した。また、茨城県鹿嶋市・神栖市では、砂利採掘跡地の埋戻し地盤で、千葉県旭市では砂鉄の採掘跡地の埋戻し地盤で広範囲に液状化が発生し、戸建て住宅に甚大な被害を及ぼした。また、丘陵地帯の造成地の谷埋め盛土部分でも液状化被害が発生している。今回顕著な液状化が発生した場所は、過去の液状化の履歴から液状化が発生しやすいと指摘されている土地条件の所であった[2)]。

(a) 1987年千葉県東方沖の地震（庭先のトラックが噴砂で埋もれる。電柱が垂直に沈下して2～3mの高さになり、道路は冠水）

(b) 東北地方太平洋沖地震（写真(a)と同じ場所の電柱が大傾斜し、道路や農地は冠水。写真(a)のトラックがあった敷地の住宅（写真左端）は約1m沈下。3月12日稲敷市撮影）

写真１　稲敷市六角の液状化被害

(5) 再液状化の発生

同じ地域で大地震は頻繁には起こらないため、同一場所で再液状化が確認された事例は、これまで150地点と少なかった[1)]。今回の液状化被害地域である千葉県から茨城県にかけての地域および宮城県では、1987年千葉県東方沖の地震、1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部の地震などで液状化の記録があり、その詳細な位置も判明している。筆者が過去の液状化履歴に着目して調査した結果、東京湾岸埋立地、利根川沿岸、房総半島、旧北上川沿岸、鳴瀬川沿岸など70箇所以上で再液状化が確認された。写真1は、再液状化の一例であるが、ここはもと沼地で、1958年に利根川の浚渫砂で埋め立てた地区である。

３．液状化による被害

今回の液状化により、主に次の構造物等に被害を生じた。

・戸建て住宅・小規模建築物
・ライフライン（上水道・下水道・ガス・電気）
・堤防・盛土道路
・港湾
・農地・農業施設

液状化による建物の被害棟数は、国や都道府県からはまだ公表されていない。NHKが関東地方の自治体を通じて調べた集計[3)]では、液状化の被害を受けた住宅などの建物は、関東地方の1都5県で23,712棟（千葉県18,065棟、茨城県5,377棟、埼玉県180棟、東京都48棟、神奈川県40棟、栃木県2棟）とのことである。この数字は、恐らく被災者生活再建支援法の対象となった被災家屋数で、実際の被害数はさらにこれを大きく上回ると推定される。

住宅などの被害の特徴の一つとして、沈下量が従来に比べて並外れて大きかったことがあげられる。直接基礎の戸建て住宅の沈下量は東京湾岸の埋立地では最大50cm程度、我孫子市、稲敷市、香取市など利根川沿岸の地区では1mに達する家屋もあった。

液状化対策を講じてあった戸建て住宅団地では、噴砂もほとんど認められず、家屋の被害も報告されていない。また、杭基礎の建物の沈下・傾斜も今のところ報告されていない。1974年に日本建築学会による建築

基礎構造設計規準に砂地盤の液状化に関する項目が追加され、1988年刊行の設計指針では、地盤の液状化判定法および液状化地盤中での杭の設計法が明示された。これに従って設計・施工していたことが功を奏したものと考えられる。ただし、液状化により大きく沈下した地盤と建物との間に最大50cmの段差を生じ、ライフラインの建物への引き込み部分で破損したり、建物への出入りに支障をきたす被害が多数見られた。

４．造成地の地盤変状による被害

今回の地震では、関東地方で液状化による被害が著しかったのに対して、東北地方では仙台市を中心にして造成宅地のすべり・崩壊による住宅の被害が多発した。図2に、宮城県における主な被害宅地の分布を示す。

仙台市が実施した被災宅地危険度判定の結果[4]によれば、被災した宅地の数は、調査を実施した全3,880宅地中、合計2,000箇所以上（危険宅地1,210、要注意宅地1,802）にも及んでいる。宮城県以外では、福島県福島市・いわき市・須賀川市、茨城県東海村・鹿嶋市・香取市、千葉県我孫子市などで造成地の被害が報告されている。

東北地方、中でも仙台市に造成地被害が集中した原因として、第一に地形・社会的背景があげられる。東北地方は海岸近くまで山が迫り、関東平野のような広大な平地は存在しない。仙台市は東北一の人口集中地域であり、人口の増加と共に丘陵地帯を切り盛り造成して宅地を生産せざるを得なかった背景がある。宅地の開発は1960年頃より進められてきており、東京湾岸に埋立地が急増したのと同時期である。

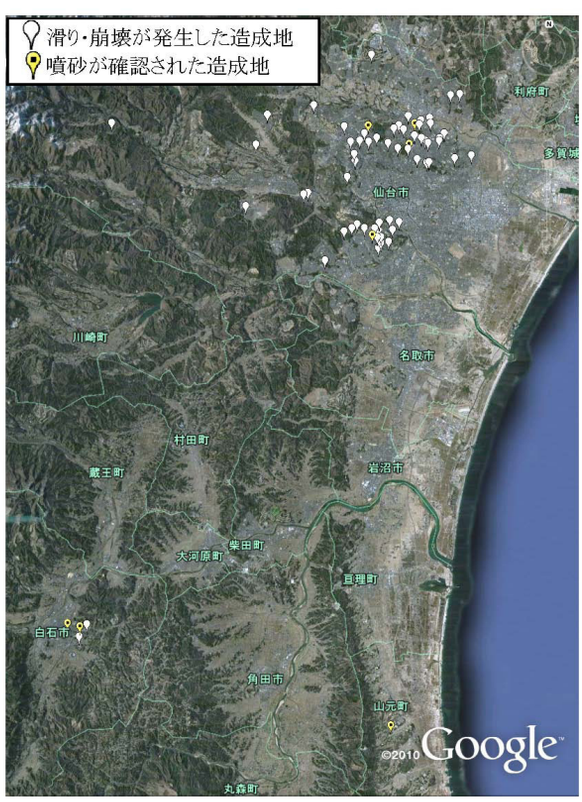


図２　宮城県における主な被害造成地の分布

５．造成地の被害の特徴

丘陵など傾斜地を造成した宅地の被害には、地すべり、谷埋め盛土滑落・崩壊、腹付け盛土滑落・崩壊、などがある。今回は、腹付け盛土の被害も見られたが、谷埋め盛土の被害が圧倒的に多かった。また、谷埋め盛土の造成地では、噴砂が確認された地区もあった。図2では、噴砂が見られた造成地の記号を変えて示している。地盤被害の主原因とは断定できないものの、液状化が関与して被害を増大させた可能性がある。関東地方では、千葉県香取市府馬[5]、我孫子市柴崎台[6]、茨城県東海村須和間南台団地[7]、鹿嶋市緑ヶ丘[8]において、造成地内で噴砂が確認されている。

被害を受けた造成地は、造成年代が1960年代の古い造成地が多く、1978年の宮城県沖地震で被災した造成地が、再び被災した例も見られた。宮城県白石市では、1978年宮城県沖地震の際に被害を受けた造成宅地が再び被害を受けた。1978年地震の後このエリアは緑地となり、斜面下部には集水井2基、表面排水工、蛇篭土留め壁が施工されていた。今回の地震により、写真2に示すように斜面上部と中部に大規模な亀裂が生じ、斜面が滑動したが、対策工の周辺では変状は認められなかった。

仙台市太白区緑ヶ丘は、1957 ～ 1962年に造成された住宅地である[9]。1丁目、3丁目、4丁目では、1978年の宮城沖地震の際に大きな被害を受けた。1丁目と3丁目は、1978年の地震後、崩壊地は緑地や公園にされ鋼管抑止杭と地下水位低下工法を併用した対策が行われた。4丁目については、旧地形の勾配が緩いため２次災害の危険性は極めて少ないと判断され、抑止工は施工されず、暗渠併用水路工が施工されたのみであった[9]。

今回の地震では、緑ヶ丘1丁目は、対策工が効を奏し盛土全体の滑動崩落を防ぐことができた。しかし、3丁目と4丁目は、それぞれ100戸程度が被災した。また、1978年には被害が報告されていない2丁目でも玉石積み擁壁に変状がみられ、擁壁背後の宅地が被災した。

3丁目と4丁目では、沢地形の造成盛土部に被害が集中しており、盛土が広い範囲で滑動したと推定される。緑ヶ丘3丁目の3号緑地と4号緑地では、1978年の亀裂と位置も方向も全く同じ亀裂を今回も生じていた。対策工の効果については、抑止工が施工されていなかっ

写真２　白石市緑が丘の亀裂と滑り（ブルーシートで覆われているのは大きな亀裂）

写真３　仙台市青葉区折立5丁目における地すべり末端部の擁壁の崩壊

たら被害がさらに拡大した可能性がある。

1978年の地震では被害が報告されていない造成地で、今回地盤変状が甚大な地区の一つとして、仙台市青葉区折立5丁目があげられる。この地区は、旧谷地形を埋立て造成した谷埋め盛土部に位置する。盛土地盤はいずれも旧谷地形の下流方向に向かって最大2m移動しており、このため、ひな壇状の宅地区画を隔てる擁壁や道路に著しい変状を生じた（写真３）。

６．まとめと今後の課題

東北地方太平洋沖地震による液状化発生地域と被害の特徴を既往の地震による液状化と比較しながら概観した。液状化は南北500kmにも及ぶ極めて広域で発生し、戸建て住宅やライフラインへの被害が特に甚大であった。その一方で、液状化対策を講じてある地盤や杭基礎の被害はほとんど報告されておらず、対策が一定の効果を上げたものと思われる。

液状化に関わる第一の課題は、戸建て住宅の液状化対策である。現在、住宅の新築を行う場合、地盤調査としてスウェーデン式サウンディング試験が行われるのが一般的であるが、この調査のみでは液状化発生の判定はできない。電気式静的コーン貫入試験など、液状化判定ができる簡易な地盤調査法の普及が望まれると共に、新築・既設戸建て住宅に対する安価な液状化対策工法の開発が急がれる。また、市民や行政に対して液状化に関わる土地の良否の見分け方の知識の普及も重要である。

造成宅地の被害に関しては、一宅地内での部分的な変状による被害も見られたが、盛土地盤の広域的なすべり・移動に起因する家屋被害が仙台市を中心に極めて多数発生した。このような広域に発生する被害を防止・復旧するには、個人でできる対策範囲を超えており、何らかの形で行政が関与した恒久的な対策工の施工が望まれる。ただし、個人資産の形成に資する支援はできないという公的支援の原則と地域の安全性の確保を、限られた公的財源の中でどのようにバランスさせて実現していくかに関しては、未だ多くの課題が山積している。また、宅地耐震化工法や危険宅地判定手法の確立も緊急の課題である。

参考文献

1) 若松加寿江：日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版会, 2011
2) 若松加寿江：東北地方太平洋沖地震による液状化現象, 建築防災2011.10 pp.1-8, 日本建築防災協会, 2011.
3) NHK千葉放送局：2011年7月7日17時48分ニュース
4) 仙台市：被災宅地危険度判定の結果, http://www.city.sendai.jp/d01/1198958_1433.html, 2011.6.15
5) 古関潤一・宮下千花：千葉県北部周辺での地盤災害_2011.6.27（第6報）, http://soil.iis.u-tokyo.ac.jp/Investigations-j.htm#Tohoku2011
6) 古関潤一ほか：千葉北西部周辺の被害2011.8.1（第１報）, http://soil.iis.u-tokyo.ac.jp/Investigations-j.htm#Tohoku2011
7) 茨城大学工学部都市システム工学科 防災・環境地盤工学研究室：東北地方太平洋沖地震地盤被害調査報告書（速報版：その8）, http://www.jiban.or.jp/file/file/saigai_ibadaigeo201104n08-2.pdf
8) 鍬田泰子・片桐信：水道施設の被害, 土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, http://committees.jsce.or.jp/report/node/43
9) 河上房義ほか：宮城県沖地震による盛土の被害、土と基礎26-12, pp.25-31, 1978.

土木構造物・宅造地の液状化被害と課題

東畑　郁生／　田口　雄一　　／青山　翔吾、大坪　正英
●東京大学教授　　●株式会社不動テトラ　　●東京大学大学院

１．はじめに

東日本大震災では、東北地方から関東地方にかけて、広域かつ多数の被害が発生した。広域と多数という特徴は、その後の救援と復旧・復興に多くの困難をもたらした。ここでは、地震に伴う液状化による被害と今後に向けての課題について述べる。

２．地震による液状化被害

2.1　河川堤防

基礎地盤が旧河道の堆積物など液状化しやすい土質から構成されていると、地震時には河川堤防に大変形が起こりやすい。このことは広く認識されていて、耐震性の点検にも考慮されて来た。写真１もそのような事例であり、天端の沈下と基礎の側方流動が起きた。このようなタイプの被害に加え、写真２のように基礎地盤が液状化しない粘性土から成っている場合にも、堤体に大変形の発生した例が数多く報告されている。このような事例は堤体内液状化あるいは閉封飽和域の液状化という呼称が与えられており、締め固められた堤体が基礎の軟弱粘土地盤を圧密して沈下し、その際に堤体の土砂がゆるんで液状化しやすくなる、と解釈されている。表面からの雨水浸透が堤体内に滞留するか、もしくは粘土地盤に沈みこんだ部分が地下水面下に入り込むことによって、ゆる詰め土砂の飽和度が上昇すると思われる。このような現象を耐震対策において考慮するためには、堤体内部の状況を迅速に調査する技術が必要である。なお従来から天端沈下量は堤防高さの75％を越えない、という経験的知識があったが、それは今回も正しいことが認められた。

写真１　旧河道堆積物から成る基礎の地盤液状化に起因する河川堤防の被害（那珂川にて）

写真２　堤体内液状化による被害例（鳴瀬川堤防にて）

2.2　住宅地

大規模な埋め立て地と丘陵部の宅地造成地の双方で、住宅地の液状化が発生した。写真３は地形分類上は湖が戦後の干拓で農地化されたところであるが、近年になってさらに盛土され、この盛土部分が液状化したものと考えられる。住宅の沈下と傾斜が著しい。

同様の被害は東京湾沿岸でも広範囲に発生し、地盤の耐震技術では十分考慮されて来なかった問題を提起した。それは、個人資産である住宅の防護、特に既存住宅の補強である。そのような技術が無いわけではないが、費用が高額であり、たまに安価な技術を宣伝している場合には、施工品質の低さが指摘されている例もある。安全にはコストがかかることを市民に理解していただきたいが、他方、個人住宅では液状化対策は

写真３　埋め立て造成住宅地の液状化被害（茨城県）

写真４　谷埋め盛土の液状化被害（仙台市北部にて）

行わず、沈下と傾斜を補修しつつ、将来再度の液状化が起きた場合でも、被害を容易に補修できる体制を残しておくことが、現実的な対応と思っている。

谷を埋めて造成した住宅地でも液状化の痕跡が認められた。写真４がその例で、ここは元来丘陵地の谷を流れる渓流であった。周辺地域と合わせて造成が行われた際、あまり締め固めが行われなかったものと思われる。結果として液状化が発生し、筆者らの現地踏査時（３月末）には、都市ガス管の補修作業が盛んに行われていた。

2.3　街路

地震直後に東京湾岸の埋立地を踏査したとき、もっとも印象深かったのは、歩道における下水マンホールの浮上であった（写真５）。また浦安市内の一部では、歩道面が甚だしく持ち上がった例も見られた（写真６）。

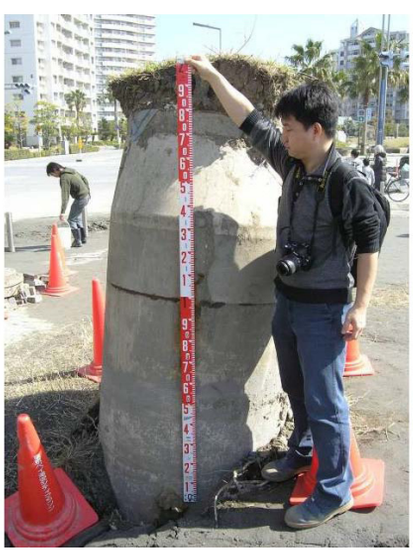


写真５　マンホールが２m浮上した例

写真６　歩道面の持ち上がり

写真７　浦安市内の幹線道路の地震直後の状況

写真６のような現象の発生機構はよくわからない。しかし多くの場合、背後に盛土や建築物があって沈下しているので、基礎の液状化砂が側方へ押し出されて軟らかい歩道の舗装面に向かって押し上って来た可能性がある。もう一つの可能性は、剛性の高い車道の舗装が遥動して歩道を座屈させたことであるが、写真6から車道を挿んで反対側の歩道には変状が無く、はっきりしたことはわからない。

浦安市内の幹線道路は、一部は基礎が締め固められており、他は鉱さいを敷きこんであり、いずれも交通を遮断するほどの液状化被害は、免れた（写真7）。このことは緊急対応や復旧において重要であった。

３．液状化に対する年代効果

3.1　埋立年代と液状化被害の関連性

液状化の調査結果から、東京湾周辺では、自然地盤や江戸時代に埋め立てられた地盤は液状化が発生しておらず、明治・大正時代以降に埋め立てられた地盤で液状化が発生していることがわかった。また、古い地盤の方が新しい地盤より液状化の被害程度は軽いように感じられた。ここで、液状化の有無及びその程度は、噴砂や沈下の有無とその量により判断している。埋め立てられた時期により液状化の有無や程度に差が生じ

たことを、年代効果と呼んでいる。その原因は未だ不明であるが、その度合を評価する方法を今回の地震体験から構築することは、可能かもしれない。そこで、東京湾周辺の埋立地である東京都江東区周辺及び千葉県浦安市における液状化の調査結果と既存データを用い、年代効果の検証を行った。以下にその結果を示す。

3.2　埋立地の土質

図１に、浦安市の埋立地における土質柱状図として、左側に今回の地震で液状化しなかった地点、右側に液状化した地点の柱状図を示す。どちらも地表面から深度方向へ順に、若い表土と浚渫埋土層、沖積砂質土層、沖積粘性土層が堆積している。またN値の分布にも大差が無い。このことから、液状化発生の有無には土質やN値以外の要因が含まれていると考えられる。

液状化地点の柱状図を見ると、深度8m付近の沖積砂質土層のN値は20以上を示しており、非常に硬質であるため、それより上部で液状化が起こったと考えられる。また、調査結果から埋立地以外では液状化が見られなかったことから、主に埋土層が液状化したと考えられる。

図２に、浦安市で採取した噴砂の粒度試験結果を示す。図には、液性限界･塑性限界試験の結果も示している。同図より、噴砂した土は細粒分を30 ～ 45％程度含んでいる砂質土であることがわかる。しかし、これだけの細粒分を含んでいるにも拘わらず、液性限界･塑性限界試験の結果は非塑性を示した。これは、ポンプ式浚渫船を用いて埋立てが行われたことが一因であると考えられる。ポンプ式浚渫船を用いる場合、カッターにより原地盤を掘削したものをポンプで吸引して圧送し埋立てを行う。その際、原地盤に含まれる粘土やシルト分が浮泥となって埋立区域外へ流出したりする[8]。埋土に含まれる細粒分には、カッターで掘削することで破砕された砂の粒子も含まれているものと推測され、これが非塑性を示した原因であろう。

このことは、液状化の予測にも影響する。例えば、砂の液状化抵抗は、細粒分含有率F_Cに大きく影響されるため、それによる補正を行う。だがこれは細粒分が粘着力を持つことが前提であり、今回のように非塑性である場合、F_Cによる補正を行わない方が実現象に近いかもしれない。

3.3　埋立年代が液状化に及ぼす影響

図３に、拘束圧による補正Ｎ値N_1と地震時せん断応力比Ｌとの関係を示す。同図内にはN_1と動的せん断強度比Ｒとの関係[1)]を表す曲線も示している。調査

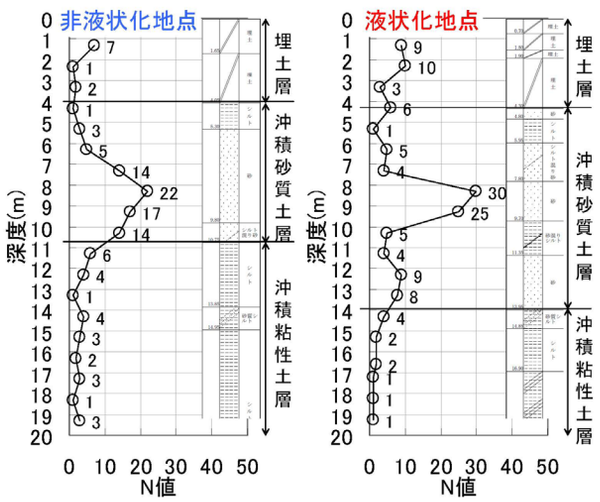


図１　浦安市埋立地の土質柱状図（関東の地盤[3)] より）

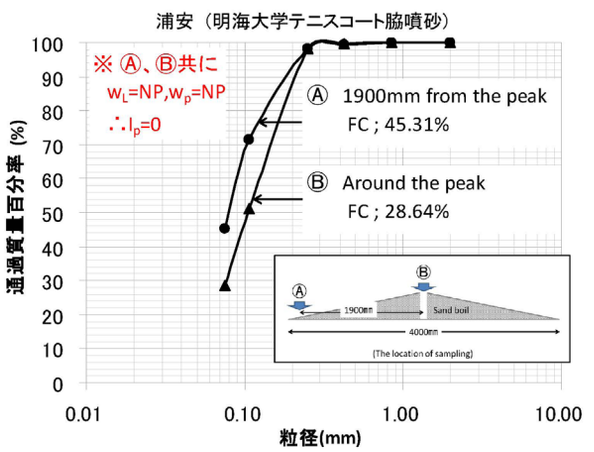


図２　浦安市における噴砂の粒径加積曲線

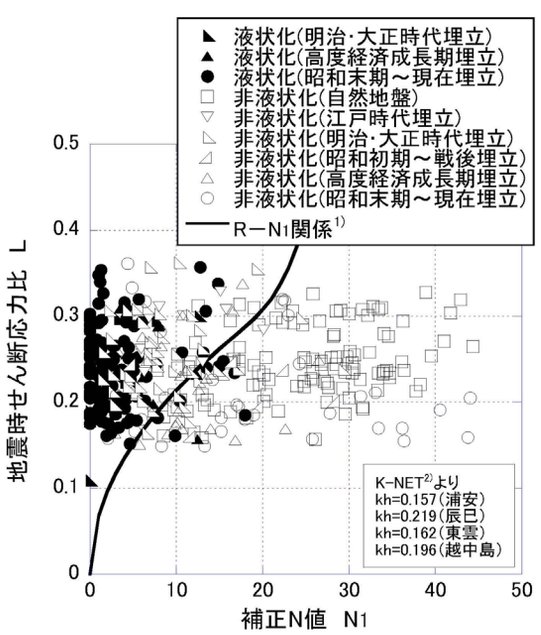


図３　補正Ｎ値N_1と地震時せん断応力比Lの関係

の時に液状化と非液状化を確認した地点で、既存のボーリングデータ[3),4),5)]を利用してN_1を計算した。

埋立地は埋土層、埋立地以外の場所は自然の沖積層に対して計算を行い、液状化した地点は液状化抵抗率F_Lの深さ方向最小値を、液状化しなかった地点はF_Lの深さ方向最大値を、埋立年代毎に分けて図３に示した。ここで、F_Lを計算する際、3.2項で述べたことを考慮し、埋土層についてはF_Cによる補正を行わず、沖積土層についてのみF_Cの補正を行った。計算式は「道路橋示方書･同解説」に示される式とし、水平震度k_hは各ボーリング位置から最も近い計測点における観測値[2)]を用い、土質条件は各ボーリングの土質試験結果とし、それが得られていない所は推定値[1)]を用いた。

Lは荷重、Rは抵抗であるので、理論上はLがRより小さい場合に液状化の可能性が低く、逆にLがRより大きい場合には液状化の可能性が高い。しかし実際に液状化した地点（図３中の黒い記号）でもLがR（図３中の曲線）より小さくなる場合があり、これは高度経済成長期以降の埋立地において見られる。また、実際に液状化しなかった地点（図３中の白抜き記号）でも、LがRより大きい場合があり、これは明治･大正時代以前の埋立地や自然の沖積地盤で多く見うけられた。つまり、年代が古い地盤では、液状化するはずのところで液状化していない地点があり、逆に埋立年代が新しい地盤では、液状化しないはずのところで液状化している地点があり、液状化に対して地盤の年代が影響していると思われる。

年代効果をさらに詳しく調べるため、図３で示した各点の液状化安全率F_L[1)]と埋立年代の関係を図４に示す。液状化しなかった地点のF_Lは１よりも大きいはずだが、実際には1以下である箇所があり、埋立ての年代が古いほどその割合は増えている。逆に液状化した地点のF_Lは1以下であるはずだが、実際には1より大きくても液状化した箇所があり、埋立て年代が新しいほどその割合は増えている。このことから、埋立年代が古いほど液状化に対する強度は大きくなるということが言える。また、液状化の可能性の大小を判断する境界は、実際には$F_L=1$ではないかもしれない。液状化した地点は液状化安全率F_Lの最小値を、液状化しなかった地点はF_Lの最大値をプロットしたので、液状化の境界は、液状化しなかった地点のF_Lより下方に（図４中の下向き矢印）、且つ、液状化した地点のF_Lより上方（図４中の上向き矢印）にあると考えられ、図４に示すような破線の位置に実際の境界があると推測される。

このように、液状化に対して年代効果が影響していることがわかったが、そのメカニズムについては明らかになっておらず、その解明が必要である。

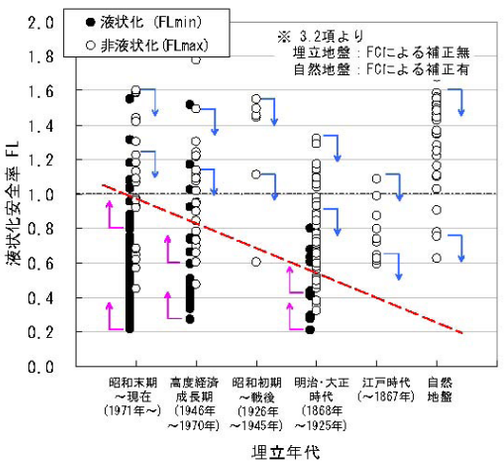


図４　液状化抵抗に及ぼされる地盤の年代の効果

４．おわりに

今回のようなマグニチュードの大きい地震の性質として、震動継続時間の長いことが挙げられる。その継続時間は、最強部分だけ取り出してみても50秒、全体としてみると150秒以上にも及ぶ。この間に作用した地震力の繰返し載荷回数は数10から100以上である。多くの設計指針に記載されている液状化判定方法では、これほど多くの繰り返し載荷回数は想定されておらず、液状化発生の判定のみならず液状化発生後にも載荷が続くことによる被害拡大においても、今後の重要な技術課題である。今後、今回のような液状化の被害を受けないために何らかの対策が施されることになるだろうが、そこで液状化の危険を精度良く把握することが必要となる。そのために、3章で述べた年代効果も含めて、設計指針における新たな検討が必要である。

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書･同解説　V耐震設計編，pp.120 ～ 125,349 ～ 362，2002
2) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク K-NET (http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/)
3) 地盤工学会：関東の地盤，2010
4) 東京湾周辺地帯の地盤 建設省計画局東京湾総合開発協議会編，1969
5) 千葉県地質環境インフォメーションバンク (http://wwwp.pref.chiba.lg.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index)
6) 東京都港湾局：図表で見る東京臨海部，pp.246 ～ 259
7) 遠藤：東京都臨海部における埋立地造成の歴史，地学雑誌，pp.785 ～ 801，2004
8) 酒井：新体系土木工学 78-2 土地造成(下) 埋立

東日本大震災による上水道の被害と復旧の課題

鍬田　泰子
●神戸大学大学院工学研究科

1．東日本大震災による上水道の被害概要

東北地方太平洋沖地震ならびその後の長野県や新潟県で発生した地震によって水道施設は被害を受け，全国で最大225万戸、187市町村（3月25日）で断水の影響が生じた（厚生労働省の報告[1]に基づく）。図１は厚生労働省の断水情報に基づいて全戸断水、一部断水の市町村の分布を示したものである。気象庁の震度分布と比較すると、震度5弱以上の市町村では断水が発生している。過去の揺れによる地震災害では2週間近く経過すると通水するが、今回の地震では津波で壊滅的な被害を受けた沿岸部の市町村を別にして、2週間を経過しても断水が解消されなかった。さらに、4月以降の余震によって再び断水になる市町村も発生した。

図２は宮城県内の市町村の断水解消過程を示したものである。県内では地震後2週間はほとんど通水しておらず、2週間目以降は急激に断水が解消する地域と、徐々に解消する地域に分かれる。前者については、配水管の被害が少なく、上位系の基幹施設が復旧することで断水がすぐに解消したものと考えられるが、後者では基幹施設の復旧だけでなく、下流の施設・管路にも被害が出ているものと考えられる。

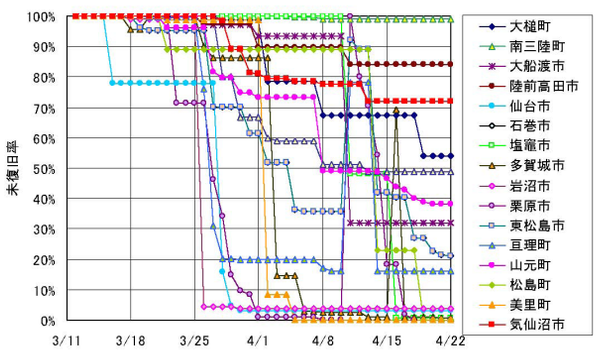
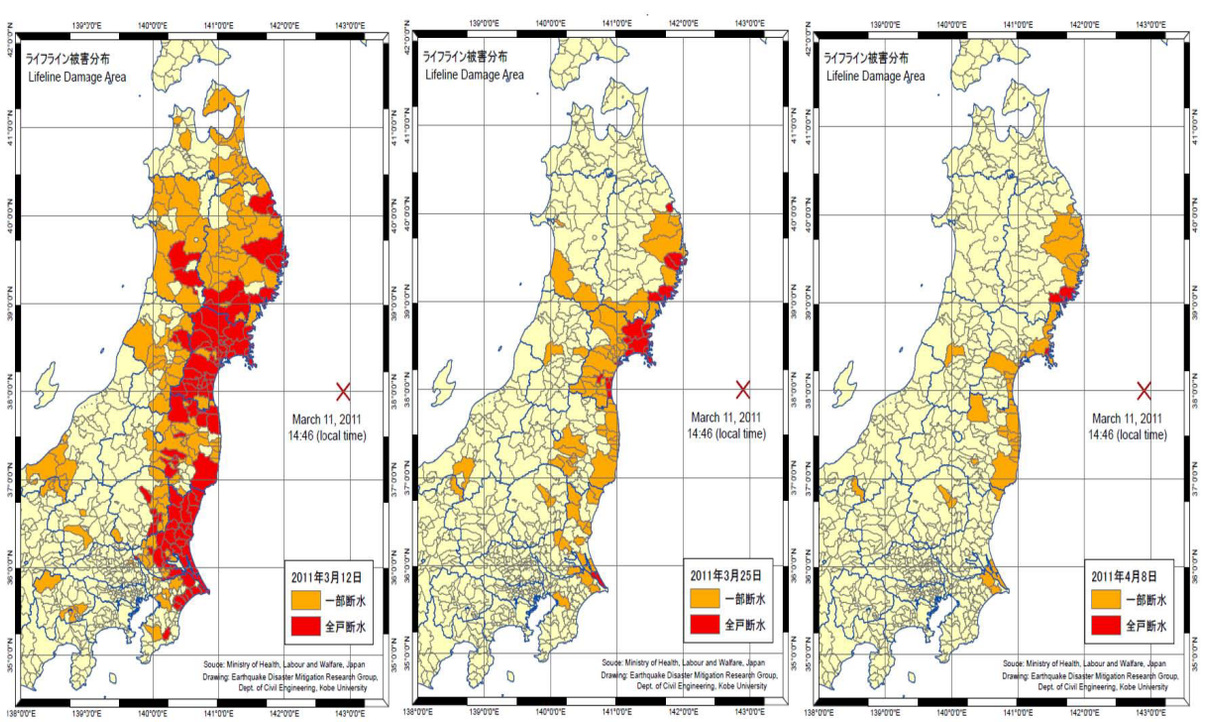


図２　宮城県内の断水解消過程（参考文献1に基づく）

2．上水道施設の構造的な課題

(1)　管路の耐震性

後述する鰐川浄水場と岩手県の配水池を除いて施設の震動による被害はほとんど見られなかった。一方、



(a)　地震から１日後（3 月 12 日）　(b)　地震から２週間後（3 月 25 日）　(c)　地震から４週間後（4 月 8 日）

図１　地震後の市町村の断水分布（厚生労働省の発表資料[1]に基づき神戸大学で作図）

被災地の配水管被害件数は現在整理されているが、各市町村の断水解消状況やヒアリングできた現地の水道技術者の話から考察すると、兵庫県南部地震の神戸市の配水管被害と比較して全体的に軽微であった。その一方で、本震や余震で基幹管路となる大口径管路に被害が発生し、広範囲に断水を引き起こした。宮城県中央部～南部一帯の17市町に用水供給している仙南・仙塩広域水道では、15ヵ所の被害の内、14ヵ所が管路継手によるものであった。中でも漏水被害は伸縮可とう継手に多く、伏せ越し部やコンクリート保護工の周辺継手に集中していた。図３は仙南・仙塩広域水道の浄水場近くで、送水管の伏せ越し部手前の口径2,400mmの伸縮可とう継手が抜けた様子である。図４は、4月7日の余震で漏水した口径1,200mmの伸縮可とう継手で、両側固定部の間が沈下したものとみられる。この他に、口径500mm以上の溶接鋼管の溶接部からの漏水も発生している。

宮城県大崎市の北屋敷水管橋では、橋脚基礎周辺での河川堤防のすべりに伴い、橋脚が傾き、伸縮可とう継手が抜けている。一方、茨城県水戸市の那珂川水管橋では、管軸直角方向の地震応答に対して支承が損傷し、伸縮可とう継手で脱管するなどの被害も発生した。管路口径の大きい水管橋では供給停止による影響も大きいため、地震動の特徴も踏まえながら早急な対策が必要である。

管路の剛性が変化する部分や異形部などは応力集中が発生しやすいことは以前から知られているが、大口径管路を対象とした異形部の挙動や可とう継手の適応範囲については今回の被害メカニズムを明らかにするとともに、合理的な地震対策が必要となる。

さらに管路の耐震性の課題の一つとして、本震の直後から新潟や長野、静岡で内陸地震が発生する他、4月7日には本震と同レベルの地震動をもつ余震が発生している。宮城県大崎市の余震による配水管被害件数は、本震による被害件数とほぼ同じである。地震被害の甚大さから応急的な復旧に留まっている箇所も多いが、巨大地震後の余震に対して被害が拡大しない復旧方法・二次災害防御方法についても検討すべきである。

(2)　液状化対策

千葉、茨城県の水道施設・管路被害の主要因となった広域液状化は、海岸や河川周辺に水道施設をもつ事業体にとって早急に検討すべき課題といえる。茨城県鹿行広域水道の浄水施設であった鰐川浄水場では、施設一帯で液状化が発生し、ポンプ棟などの構造物周りでは液状化により路面が沈下し（図５）、共同溝は50cm近く浮上し、沈下した周辺地盤との間に1m近く段差が生じた（図６）。構造物との取り合い部には伸縮可とう管が配置されていたが、伸縮余裕を超える周辺地盤の沈下が発生したため、伸縮代分が伸び、さらに隣接する継手で脱管した。施設外の道路では顕著な

図３　仙南・仙塩広域水道高区幹線
SPφ2400可撓継手の抜け

図４　仙南・仙塩広域水道低区幹線
SPφ1200可撓継手の抜け

図５　鰐川浄水場ポンプ室周りの液状化による地盤沈下

図６　鰐川浄水場上水施設側の共同溝の浮上

図７　液状化による水道・下水管の浮上
（潮来市日の出）

図８　旭市蛇園地区の防火水槽(40m^3)の浮上

液状化が確認されず、構造物周りの表層の埋戻土が液状化したものと考えられている。

施設以外にも、東京湾沿岸や利根川流域の沿岸部の宅地では液状化によって管路網が被害を受けている。例えば、利根川流域では茨城県潮来市日の出、神栖市掘割、鹿嶋市深芝、千葉県旭市後草・蛇園、香取市佐原・新島が挙げられる。潮来市日の出では、図７に示すように水道・下水の管路が液状化による噴砂とともに浮上・露出している。液状化の可能性が高い宅地造成地へは可とう材質管路を優先採用するのも対策の一つといえる。また、図８に示すように地下貯水槽が液状化によって浮上している事例がある。香取市佐原の液状化地域において浮上しなかった貯水槽もあり、浮上対策の効果について確認する必要がある。

液状化が発生しやすい地盤特性や想定地震に対する液状化判定についての既往の知見に併せて、長時間繰り返される震動や、数時間以上かけて進行する液状化の沈下・流動プロセス、広域に液状化が発生した場合の共同溝や水槽類などの地下構造物の挙動など明らかにすべき課題は山積している。

(3)　津波対策

今回の沿岸部の津波により水道システムには、次の3つの被害パターンで被災している。一つは、地上施設の津波被害である。水道管路・施設の多くは地中にあるが、河川横断部の水管橋や橋桁の添架管は地上にあるため、津波の河川遡上のときに被災した。宮城・岩手では水道事務所も浸水している。二つ目の被害は、津波による地盤の洗掘である。先の鰐川浄水場は津波の被害を受けなかったが、近隣まで津波が浸水した。沿岸部では液状化と津波による洗掘が複合的に作用することがあり、沿岸部の構造物について津波による被害程度を液状化と区別しながら整理する必要がある。三つ目の被害は、津波浸水による水源の塩害である。岩手県では沿岸部で塩害が発生している。水道の津波対策は港湾・河川管理者とともに実施されるべきものであるが、管路流出時の仮設配管や塩害時の水処理対策など緊急時の対応については早急に検討できる。

３．水道システムとしての機能的な課題

今回の地震で震度7を観測した地域もあったが、数週間断水した事業体の多くは震度5弱から震度6強の地震動が観測された地域であり、地震動からみれば激震地とはいえない地域である。前述した断水解消のプロセスからも明らかなように復旧活動が進まず、完全に休止している期間が1、2週間継続した。

長期断水の要因の一つとして、停電の影響が大きい。北関東から東北地方の太平洋側にかけて地震後少なくとも2、3日は通電しなかった。自家発電装置を備えていても、1日以上の停電に対応できる事業体は少ない。防災上重要な施設には複数の配電系統が整備されているが、広域災害になった場合には複数の電力系統が全て供給停止に陥る可能性がある。さらに水道施設内の稼働状況、配水状況は遠隔監視されているが、停電すれば被害把握業務自体が難しくなる。一度送配水を停止し、空になった配水池や大口径の管路に充水するには一日オーダーの時間を要する。今回の地震で明らかになったことは、停電期間にも限界値があり、それを超えると水道システムの早期復旧が困難になることである。長期停電になると各施設や機器だけでなく、組織全体にも波及し、災害対応のシナリオ自体を変えなければならない。現在ある災害対応のシナリオにも新たな災害対応シナリオとして拡充すべきである。

要因のもう一つには、被災事業体の多くが広域用水事業の受水事業体であり、用水供給の大口径送水管路が被害を受けたために広域にその断水の影響を受けたことが挙げられる。図９は宮城県南部に用水供給している仙南・仙塩広域水道の送水管網図を示している。

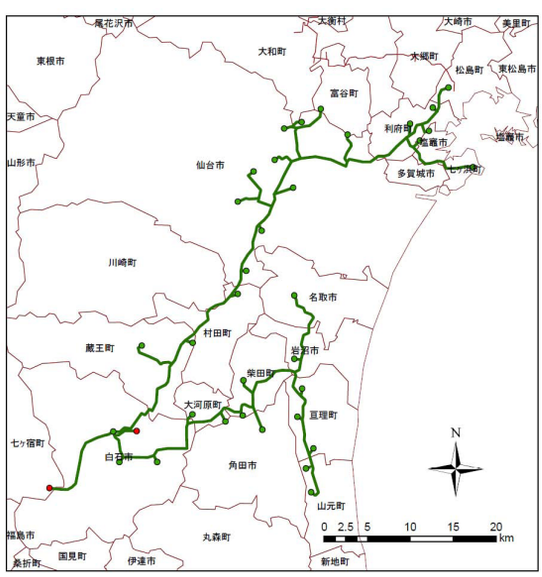


図９　仙南・仙塩広域水道の送水管網図
（HP[2]に基づき作図）

複数の自己水源を有している事業体もあるが、６～7割近くの水は広域水道からの受水に頼っている。大口径管路の被害が供給元近くであったこと、一度空になった大口径管路に充水するまでに時間を要したこと、基本的に用水供給管路系は単純な樹形モデルで冗長性が低かったことなどの要因が重なったといえる。広域

災害ゆえに、広域用水の水道システムと市町村内の水道システムが二重に連動してエンドユーザーの断水に波及した。限られた水資源を活用するために広域な用水供給事業は全国的に進んでいる。冗長性を持たせた広域水道幹線のグランドビジョンの構築とともに、受水事業体においては用水の供給停止リスクを十分理解した上で自己水源の維持管理を進める必要がある。

水道システムの冗長性、災害時の機能性についての問題は、用水供給のシステムだけではなく、市町村内の配水管路網にも課題はある。水道システム拡張時に旧システムの脆弱な管路を管路網に組み入れたばかりに、その脆弱な管路が今回の地震で被害を受け、下流の新しいシステムに影響を与えている。また、いくつかの簡易水道を連結させた配水システムでは、段階的な給水再開時に通常とは異なる水の流れが発生し、配水流の監理・制御に支障を来たしていた。施設の維持管理において、経済的に負担の少ない施設更新は日常的な運営・経営には良いが、災害時にも必ず良い方向には現れないことが、今回の被害・復旧事例で明らかになったといえる。

災害時のバックアップシステムとして配水池に設置されている緊急遮断弁については、自動・手動の操作方法に違いがあるものの、稼動して応急給水のための水を確保した事業体が多く、神戸以降の教訓が活かされたといえる。また、災害時や渇水時を想定して建設されている隣接する市町村の配水管を結ぶ緊急連絡管については、一部の地域で利用されたことはあったが、広域災害時に隣接する市町村も被災したため、水融通がそれほど図られなかったといえる。

４．広域地震災害における支援・復旧対応

神戸や新潟の地震における教訓から、水道事業体では大都市間の災害時緊急応援体制の締結や県支部、地方支部の災害時情報収集・復旧支援組織の確立が進められてきた。しかし、今回の地震では、県代表、地方支部代表の事業体はともに被災したために本来であれば情報集約するはずが、それらの役割を十分に果たせないでいた。大都市間では予め被災した場合に支援する協定が締結されていたが、地震直後の調整で支援する市町村が変更されたこともあった。今回の広域地震災害を経験し、県レベル、地方支部レベルの災害対応は内陸地震の災害規模であれば可能であるが、広域災害には機能できない。広域災害であることを判断できた段階で、復旧に必要な情報集約・情報発信機能を情報網が確立している拠点に移すなど、柔軟に切り替えることが重要となる。

図10は地震後の派遣自治体数と給水車数の推移[1)]を示している。日本水道協会によって調整が行われたが、実際に現地に派遣された給水車数はピーク時で約350台であった。事業体規模によって給水車所有数、派遣可能数が制約されるが、給水車をもつ給水人口50万人以上の都市ではほぼ派遣していた。

配水区域一帯の液状化地域の復旧では、本管復旧する地域と地上仮設配管する地域に分かれた。早期復旧のためには、本管を地上配管で構築し、通水して落ち着いた段階でそのまま埋設する方法も考えられる。仮設配管のノウハウについては、復旧が落ち着いた段階で検討する余地がある。この他、復旧対応に関する課題については、復旧にあたる技術職員の不足がある。市町村合併によって水道技術職員が削減され、少数の職員で広域の水道被害の確認から復旧までを対応している市町村が多かった。災害時の職員不足は、全国の市町村が抱える問題である。災害応援体制を効率よく動かすとともに、地域の水道技術職員の災害対応能力を養うことも重要である。

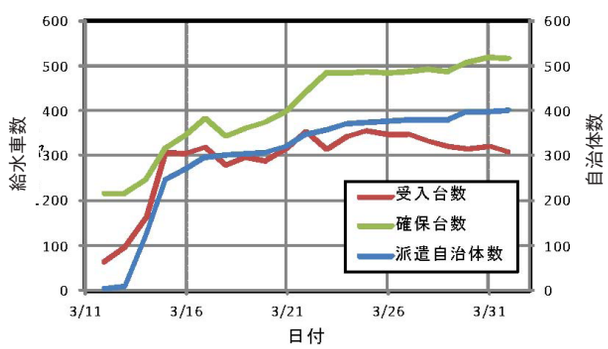


図10　地震後の応急給水派遣自治体数と給水車数

注

本稿は、「土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書　第10章水道施設の被害」から一部抜粋・追記したものである。地震被害の詳細は報告書を参考にされたい。

参考文献

1) 厚生労働省：平成23年（2011年）東日本大震災の被害状況及び対応について（第1報から第49報）、http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000014j15.html (2011.4.16アクセス)
2) 仙南・仙塩広域水道事務所：仙南・仙塩広域水道用水供給事業のあらまし（http://www.pref.miyagi.jp/ss-kousui/index.htm）(2011.4.16アクセス)

津波と鉄筋コンクリート造建築物の被災

松冨　英夫
●秋田大学大学院工学資源学研究科附属地域防災力研究センター

1．はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により大災害が発生した。とりわけ、津波による被害が大きなものとなった。

地震の規模はM9.0と推定されている。震源域は三陸沖から茨城県沖で、三陸沖中部地震、宮城県沖地震、福島県沖地震、茨城県沖地震とこれらの沖側に位置する三陸沖から房総沖の一部の地震が連動したと推定されている。過去、この海域で起きた地震としては869年貞観地震や1896年明治三陸地震のM8.5程度が最大規模である。M8.5は日本における最大規模でもあった。これらの地震エネルギーは今回の地震の1/6程度である。

2005年以来、毎年1月1日を基準として、この海域で30、50、100年以内に発生する地震の規模と確率が国の地震調査研究推進本部から公表されている（2011年1月1日を基準とした改訂版が2011年6月9日に公表された）[1)]。三陸沖北部や宮城県沖、福島県沖、茨城県沖、そして三陸沖から房総沖におよぶ海溝寄りの地震が想定されていたが、これらの地震エネルギーの合計は今回の地震エネルギーの1/8程度である。しかも、三陸沖地震と福島県沖地震、茨城県沖地震などの連動は想定されていなかった。

実は今回と同じ経緯の地震と津波がある。2004年北スマトラ沖地震とそれに伴う津波である。北スマトラ沖で知られていた最大の地震規模はM8.5であり、その後M9.0の地震が発生し、インド洋大津波を伴った。過去のこの教訓が今回に生かせなかったことは残念である[2)]。

本稿では今回の津波に的を絞り、その概要と津波による鉄筋コンクリート造建築物の被災について述べる。

2．津波

波源に直面した青森県の八戸市、岩手県の野田村、宮古市、釜石市、大船渡市、福島県の相馬市では引き初動の津波であった。津波警報は地震後3分に発令され、その後いずれの海岸でも20分以上の避難時間があった。

津波来襲時の潮位を基準とした津波の浸水高と遡上高を図１に示す。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによるもので[3)]、三陸のリアス式海岸で20 m程度、仙台の平滑な海岸で10 m程度の高さである。1896年明治三陸地震津波、1933年昭和三陸地震津波と2011年東北地方太平洋沖地震津波の高さの比較を図２

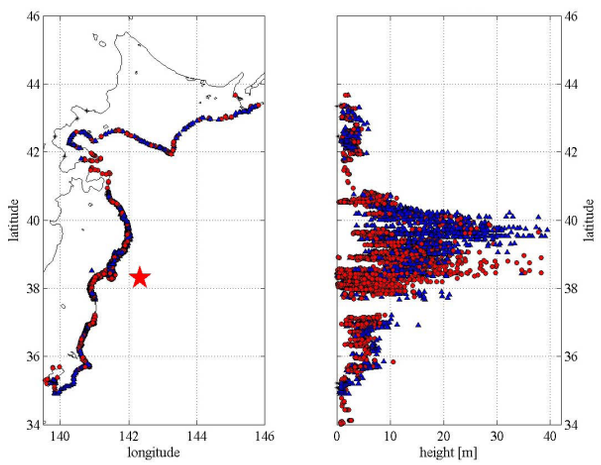


図１　東北地方太平洋沖地震津波の浸水高（●）と遡上高（▲）

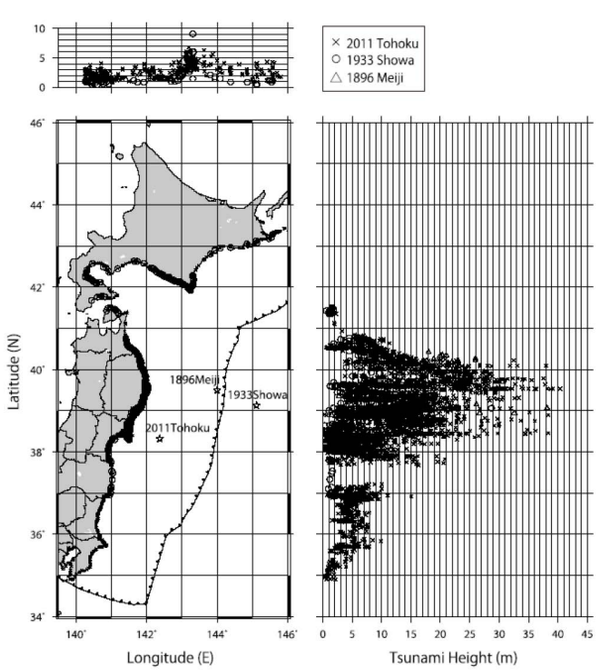
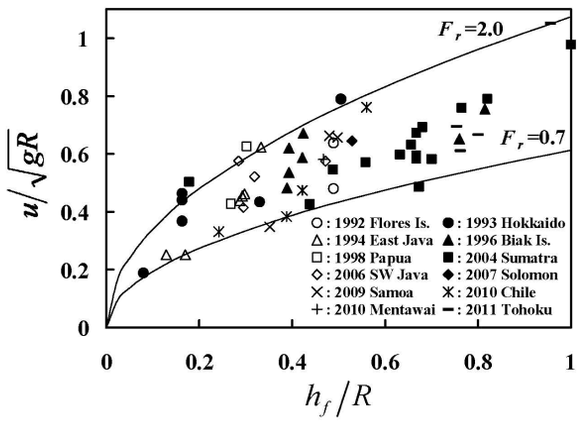
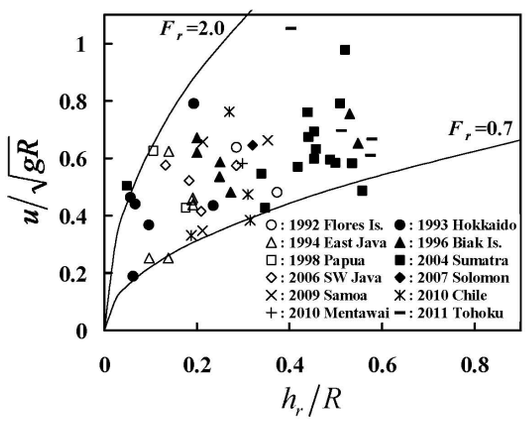


図２　明治三陸地震津波（△），昭和三陸地震津波（○）と東北地方太平洋沖地震津波（×）の比較



(a) 前面水深を浸水深とした場合



(b) 背面水深を浸水深とした場合

図３　氾濫流速と浸水深の関係

に示す[4]。この図の解釈では、防波堤や防潮堤といった防災施設の防浪効果、鉄筋コンクリート造建築物の防浪効果、漂流物の抵抗効果を考慮する必要がある。局所的な現象を除けば、防災施設や建築物は浸水高を低くする効果、漂流物は高くする効果を持つからである[5]。

1983年日本海中部地震津波のとき、波状段波となって来襲する津波が話題となった[6]。津波の来襲形態として砕波段波があるが、波状段波形成時の津波は砕波段波形成時のものに比べて一般に小さい。

岩手県北部の野田海岸では1波目から波状段波が認められた。1波目より2波目が大きかった。宮古市田老でも天端高T.P. 10 mの防潮堤を越えない津波の後に越える津波が来襲した。仙台海岸や相馬沖の水深38 m付近では2波目以降で波状段波が認められた。

三陸海岸では、津波が巨大で、入射津波と戻り津波が同じところを通ったためか、または滞留したためか、建築物前・背面浸水深h_f、h_rに顕著な差が認められなかった。図３に補正前の氾濫流速uと建築物前・背面

写真１　基礎杭といっしょに70 mほど流され，横転した4階建てビル（宮城県女川町）

写真２　津波で被災した蒲生浄化センターポンプ場（宮城県仙台市）

浸水深の関係を示す[7]。図中、Rは前面浸水深の測点やその近傍での津波来襲時の海面からの浸水高や遡上高、gは重力加速度である。－が今回の地震津波（宮城県仙台海岸など）で得られたもので、氾濫流速はこれまでと同傾向である。

仙台海岸を大規模に氾濫する津波写真から津波氾濫流に関する認識が深まった。砂丘を越える氾濫流のMach角からフルード数が1.4程度に達したこと、河川洪水流と同様に縦渦が形成されること、氾濫流は水深の浅い先端部に追いつこうとすることで流れやすいように流れていること、などである。

津波防災の機能を有する施設は防波堤や防潮堤、河川水門ばかりではない。仙台海岸には貞山堀のような津波氾濫流に直交する水域や海岸林があったが、津波が巨大すぎて津波減勢効果は十分ではなかった。

今回の津波の特徴の一つは初期波形にある。先ず陸側の海域で相対的に波高の小さな津波が発生し、その

後沖側の海域で波高の大きな津波が発生したと考えられている[8]。これは今後の東海、東南海、南海地震の連動や他地域での連動地震による津波初期波形の想定に影響を与えることになろう。

今回の津波災害の特徴の一つは巨大津波が多くの近代的な街を襲ったことである。その結果、木造の建築物はほとんどが流出し、鉄骨造や鉄筋コンクリート造の建築物が残った。ただし、鉄筋コンクリート造の建築物にしても、津波の浸水深に比べて高さや奥行きが十分でないものは移動や転倒の被害を受けた（写真１）。また、原子力発電所ほどは目立たないが、深刻な問題が発生した。我々の日々の生活に直接かかわる下水処理場の被災である（写真２）。岩手県、宮城県、福島県の多くの下水処理場が稼動停止の状態である。

３．鉄筋コンクリート造建築物の被災

1933年昭和三陸地震津波以来、事業所や公共施設を想定して、防潮堤の役割を担わせた防浪ビルの考えがある。防浪ビルは背後地への津波の浸入を減らすばかりでなく、短期の避難場所としての機能を持つ。しかし、津波の浸水深に対して防浪ビルはどのくらいの高さや奥行きがあればよいかといった指針はない。鉄筋コンクリート造に比べて鉄骨造の建物は、壁が壊れやすいために防浪効果こそ落ちるが、避難ビルとして有効であることが今回の津波で証明された。

津波に対して安全・安心を確保するには宅地の高地移転が理想である。しかし、高地移転先が確保できない場合などもあり、低平地では中規模の津波に対処するため、強度を向上させた防潮堤などの津波防災施設の整備が重要である。そして、防災施設の整備にあたっては継続性を考慮する必要がある。防災施設はいずれ改修が必要となり、過大な整備は整備水準の維持を難しくする。防災・減災に対する工夫も生まれ難くする。巨大津波や大津波に対しては、防災施設に頼らず、防災体制の強化や防災まちづくりの推進により、迅速な高地への避難が第一義である。どうしても近場に高地が確保できない場合に限り、水没せず、壊れない防浪ビルや避難ビルの設置を考えるべきである。

津波の浸水深h、建築物の高さHと建築物の被災（浸水は除く）の関係を図４に示す。岩手県野田村から宮城県岩沼市にかけて行った現地調査で得たものである。5階建て以上の鉄筋コンクリート造建築物で傾斜を含め、移動や転倒したものはなかった。水没していないもので移動や転倒したものもなかった。これらは貴重な事実であるが､たまたま5階建て以上で水没したものがなかったと考えるべきである。

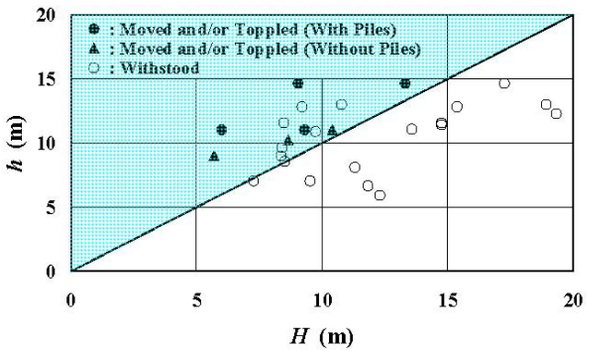


図４　津波の浸水深h，建築物の高さHと建築物の被災の関係（●：移動や転倒（基礎杭あり），▲：移動や転倒（基礎杭なし），○：持ちこたえる）

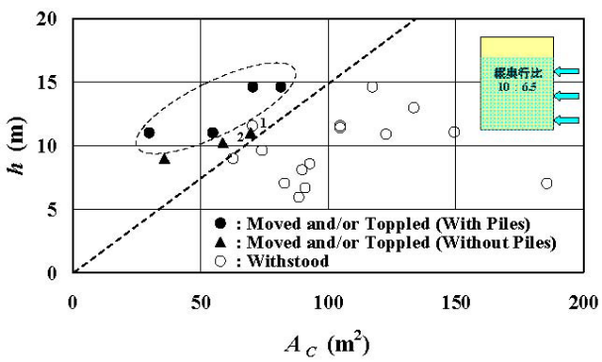


図５　津波の浸水深h，氾濫方向の建築物の縦断面積A_Cと建築物の被災の関係（●：移動や転倒（基礎杭あり），▲：移動や転倒（基礎杭なし），○：持ちこたえる）

水没しながら、持ちこたえたものもある。被災には建築物の立地・配置状況、壁面における窓や戸の占有割合、根入れ深さ、屋内・床下空気の抜け易さ、建築物周囲の舗装有無、基礎杭の有無、液状化などが関係していよう。これらの影響の検討が今後の課題である。

津波の浸水深、氾濫方向の建築物の縦断面積A_Cと建築物の被災の関係を図５に示す。基礎杭の有無で、建築物の被災浸水深に違いが認められる。単位面積当たりの自重が大きいときに基礎杭を設けると考えれば、この違いは当たり前である。氾濫方向の建築物の縦断面積で被災、持ちこたえるがよく分類されることも判る。参考までに、番号1を付した○データの氾濫流が当たる壁面積に対する窓面積の割合は26%、番号2を付した▲データの窓面積の割合は5%である。

「平坦な陸上を氾濫する平面二次元的な津波の波圧は静水圧分布」という見解がある[9]。一方、「動圧が無視できず、波圧は非静水圧分布」という見解もある[10]。非静水圧分布の理由の一つとして、建築物前面下部における下に凸の流線（遠心力）が考えられる。水没し、津波が越流する場合は建築物背面上部における上に凸の流線も建築物の被災に関係しよう。

４．おわりに

今回の大震災を受け、防災に関する日本最高の意志決定機関である中央防災会議（内閣府）が防災基本計画を含め、地震動推定・被害想定のあり方などの見直しを行うことが決まった。地震調査研究推進本部（文部科学省）もまだ一部の地域に限定であるが、地震の長期評価の改訂を行うことを決めた。都道府県レベルでも、秋田県を代表例として、想定地震や被害想定の見直しを開始した。市町村レベルでも、地域防災計画やハザードマップ、避難場所などの見直しを開始している。国民レベルでは、災害観ばかりか、生活観、人生観が変わった人は多いと思われる。

最後に、今回の大震災で亡くなられた方々にお悔やみを、被災された方々にお見舞いを申し上げます。

参考文献

1) 地震調査研究推進本部：地震に関する評価、http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm、参照2011-9-17.
2) 松冨英夫：地震と津波、河川文化を語る会講演集、その20、日本河川協会、pp. 283-365, 2006.
3) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：東北地方太平洋沖地震津波情報共有サイト、http:// www.coastal.jp/ttjt/、参照2011-9-17.
4) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：2011年東北地方太平洋沖地震津波に関する合同現地調査報告、津波工学研究報告、第28号、2011。（印刷中）
5) 相馬崇志、東　美樹、松冨英夫：移動床下の漂流物を伴う氾濫流、土木学会論文集B2（海岸工学）、Vol. 67, No. 2, pp. 311-315, 2011.
6) 首藤伸夫：秋田県北部海岸における日本海中部地震津波、第31回海岸工学講演会論文集、pp. 247-251, 1984.
7) 松冨英夫、飯塚秀則：津波の陸上流速とその簡易推定法、海岸工学論文集、45巻、pp. 361-365, 1998.
8) 佐竹健治、酒井慎一、藤井雄士郎、篠原雅尚、金沢敏彦：東北地方太平洋沖地震の津波波源、岩波科学、Vol. 81, No. 5, pp. 407-410, 2011.
9) 例えば、朝倉良介、岩瀬浩二、池谷　毅、高尾　誠、金戸俊道、藤井直樹、大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第47巻、pp. 911-915, 2000.
10) 松冨英夫：津波氾濫流による流体力への動圧の寄与と漂流物の衝突力の確率分布、土木学会論文集B2（海岸工学）、Vol. 65, No. 1, pp. 836-840, 2009.

海岸保全施設の被災とそのメカニズムと対策について

有川　太郎
●港湾空港技術研究所

１．海岸保全施設の被害と被災メカニズムの検討

今回の津波では、海岸堤防、津波防波堤など多くの海岸保全施設が被害を受けた。これらの多くは、防潮堤、防波堤の設計を超えた津波が来襲したため破壊したと考えられる。ここでは、海岸堤防と津波防波堤の被災状況と被災メカニズムを検討する。

１．１　海岸堤防

海岸堤防には、さまざまなタイプの構造がある。図１は、その一例を示しており、主には、中詰め砂等を前面、天端面、背面の3方で囲むタイプの傾斜型堤防と、自重により支えられた直立型のタイプにわけられる。

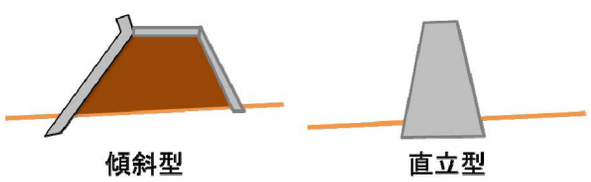


図１　海岸堤防の種類の例

写真１は、岩手県宮古市田老の堤防の被害の様子を示したものである。田老の堤防は傾斜型堤防であり、現場の被災状況から、前面の堤体が海側に向かって倒れていたことがわかった。田老町の天端高さは海面から約10mであり、来襲した津波の高さは堤防の前で約15mであった（図２参照）。

津波の来襲の様子は上空からも撮影されていたが、堤防を越えて堤内地に浸水し、多くの背後構造物を破壊した。一方で堤防であるが、越流することにより、背面の土盛りが洗掘を受け、コンクリート版がバランスを失い破壊され、前面の壁面の強度が失われ、引波によって破壊される。場合によっては、押波によっても破壊されることもあると考えられる。図３は、そのときの推測される被災メカニズムを示したものである。背後が津波の越流によって洗掘され、そうすることにより、乗っていたコンクリート版が流出され、中の砂が掘られて全体が破壊されると推測される。田老では、その後引波時において、前面の壁体が海側に倒されたものと考えられる。

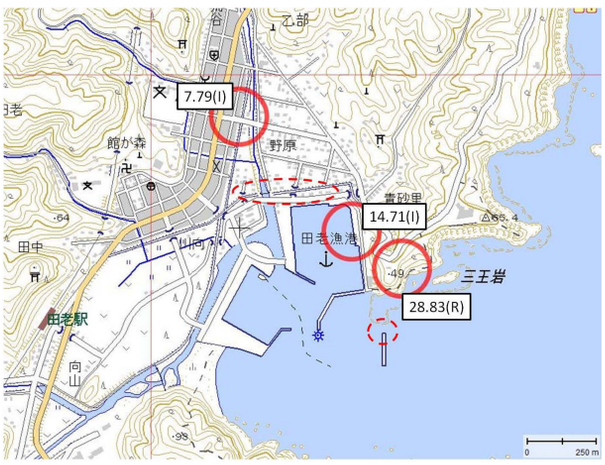


図２　田老町における津波高さ

写真１　田老の防潮堤（右海側，4月15日撮影）

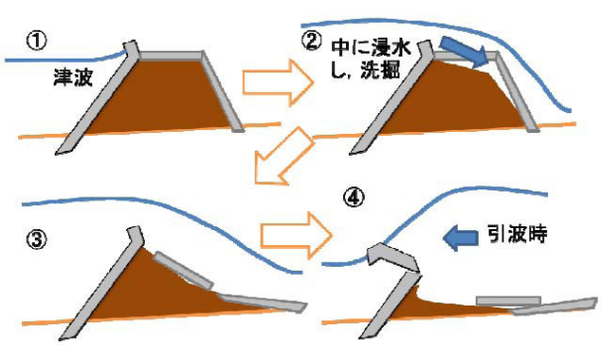


図３　傾斜型堤防の裏法尻からの洗掘からの被災メカニズムの例

写真２は、岩手県大槌町の堤防の被害である。大槌町では、直立型の堤防であった。図４は、直立型の被災パターンを示したものである。パターン１、パターン２は押波時に生じるもので、パターン３は引波時に生じるものである。パターン１は、越流することによって、陸側の地盤が洗掘され、それによって、安定性を失い倒れていくものである。大槌町では、パターン1と2を組み合わせたような被害になっており、これは、押波時に倒れたと推測される。

写真２　大槌町の堤防被害（左海側，4月8日撮影）

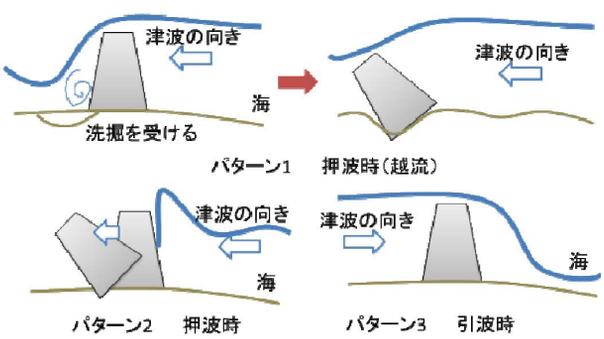


図４　直立型海岸堤防の被災パターン

１．２　防波堤

防波堤もかなり破壊された。一般的に津波防波堤は、沖側にあることで、湾の中に入ってくる津波の流入を防ぐ効果がある。防波堤は、構造としては、図５のように、ケーソンと呼ばれるコンクリートの箱とマウンドと呼ばれる比較的大きな石から構成されている。

写真３は、釜石にある津波防波堤が、津波により破壊された様子である。もっとも深い場所で水深63メートルにもあり、倒れている防波堤は数万トンの重さにもなる。この釜石では防波堤の半分は、津波によって、マウンドの下まで流され、半分は写真のようにマウンドの上で傾いた状態となった。図６は、ナローマルチビームを用いた防波堤開口部周辺における深浅測量結果である。開口部における潜堤や北堤ケーソンがところどころ歯抜けになって落ちている状況がわかる。

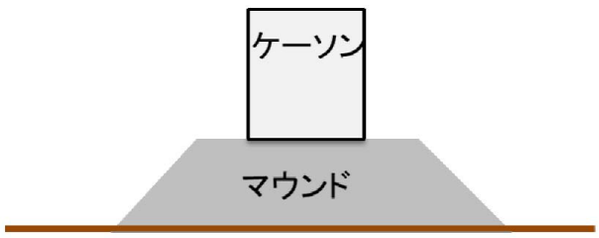


図５　一般的な防波堤の構造

マウンドの下まで滑落した防波堤は、津波が防波堤を超え、越流が生じたときに防波堤前面と背面の水位差が生じ、そのまま流されたと考えられ、一方、傾いたものは、マウンドの石が津波の流速によって洗掘されたことが原因と考えられる。

このように想定を大きく超えた津波が防護施設に来襲したことで、思わぬ越流が生じ、それによって、防波堤、海岸堤防が多く破壊されたものと考えられる。今後は、越流が生じても倒れにくくなるような粘り強い防護施設の技術開発が課題である。

写真３　釜石湾口防波堤が津波により破壊された様子
（2011年6月20日撮影）

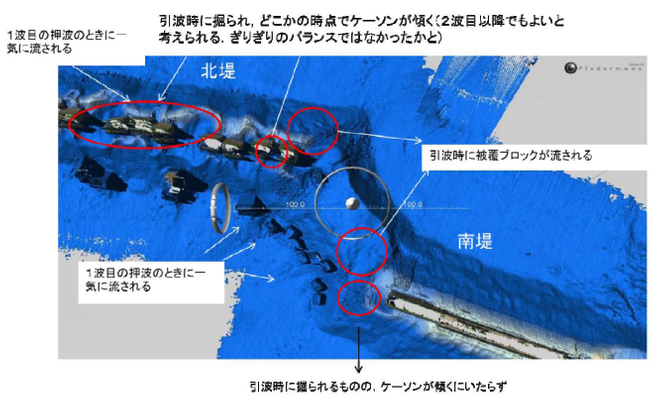
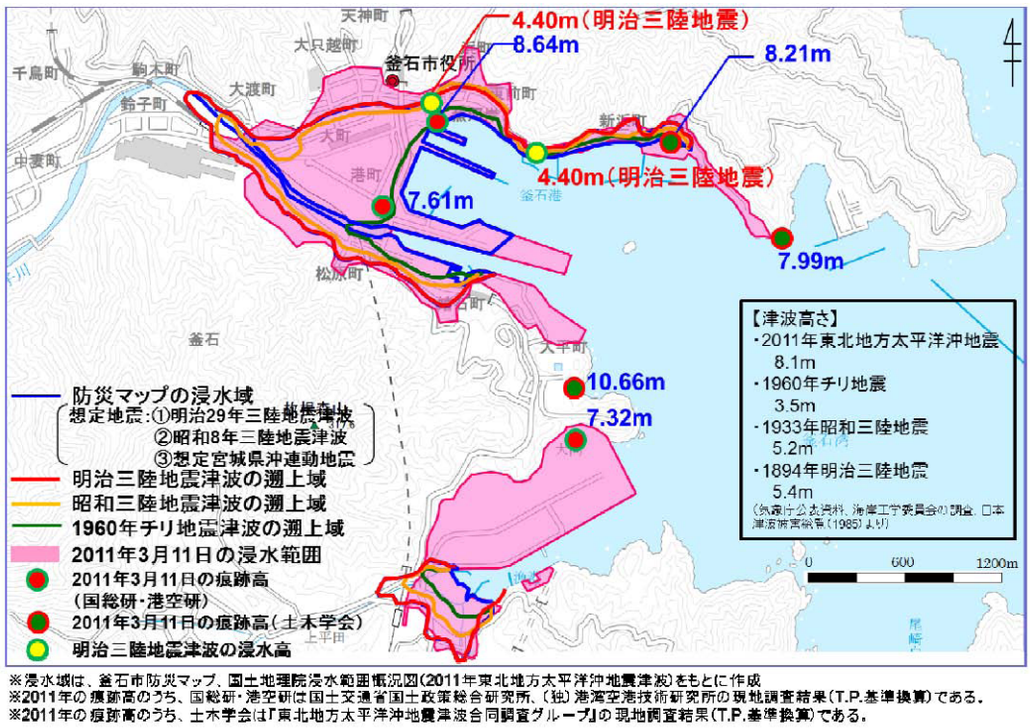


図６　釜石湾口防波堤の開口部周辺における深浅測量結果



※浸水域は、釜石市防災マップ、国土地理院浸水範囲概況図(2011年東北地方太平洋沖地震津波)をもとに作成
※2011年の痕跡高のうち、国総研・港空研は国土交通省国土政策総合研究所、(独)港湾空港技術研究所の現地調査結果(T.P.基準換算)である。
※2011年の痕跡高のうち、土木学会は「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」の現地調査結果(T.P.基準換算)である。

図７　既往津波の遡上域との比較

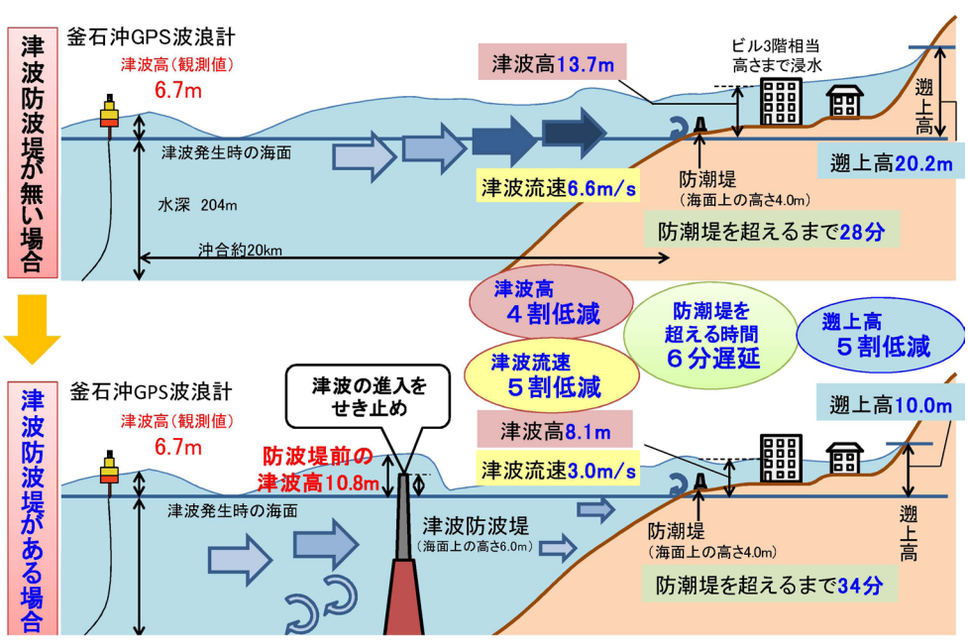


図８　釜石における防波堤・堤防の防護効果

１．３　防護効果

防波堤、海岸堤防による防護効果を、釜石を例に検討した。図７は、釜石市の湾口防波堤内における津波の浸水状況と過去の浸水状況を比較したものである（国土交通省まとめ）。明治三陸津波の遡上域ならびに昭和三陸の遡上域と比較し、大きな差はなく、遡上域における津波の高さは、明治三陸津波で5.4m、今次津波では8.1mとなっていることがわかる。

今次津波はどの程度防護されたかを、現地観測ならびにシミュレーション結果から示したものが、図８である。仮に防波堤・堤防がないと仮定した場合、遡上した津波の最大高さは20.2mになると試算されるが、防波堤・堤防があることによって10.0mに抑えていることがわかる。また、堤防を越える時間が防波堤・堤

防が無い場合と比較して6分長くしたと試算された。

このように、海岸保全施設が完全に破壊されなければ減災としての機能を発揮することがわかる。

２．設計の方向性とまちづくり

２．１　設計津波レベルの定義と設計方針

海岸保全施設の効果が発揮されることはわかったものの、津波のレベルによっては、津波の浸入を完全に阻止するためには、非常に大きな堤防を作らないといけないこともわかる。そのため、すべての人命を守ることを前提とし、主に海岸保全施設で対応する津波のレベルと海岸保全施設のみならずまちづくりと避難計画をあわせて対応する津波のレベルの二つを設定することを土木学会では提案している。前者は海岸保全施設の設計で用いる津波の高さのことで、数十年から百数十年に1度の津波を対象とし、人命及び資産を守るレベル（以下、津波防護レベル）である。後者は津波防護レベルをはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベル（以下、津波減災レベル）である。ただし、地震発生後に来襲する津波に対して避難の要否を予測することは現時点の技術では困難なので、地震発生後は必ず避難しなければならない。表1にそれらの考え方をまとめたものを示す。

また、津波防波堤が設置され、海岸堤防と合わせて津波対策が二段構えになっている地域では、施設の復旧・更新・維持にかかる費用を勘案したうえでそれぞれの施設の防護レベル津波・減災レベル津波に対する役割を明確にし、複合システムとしての効果が最大となるように施設設計を検討すべきである。

津波防護レベルを超えると津波が越流するようになり、堤内に浸水を許すようになる。一方で、防護レベルを津波が超えた瞬間に海岸保全施設が破壊したり、一部が倒壊したりすると、その防護効果が急激に小さくなり、被害が一気に拡大する。そうなった場合、避難する時間も急に短くなり、人命にも大きな影響を及ぼすことが想定されるため、防護レベルを超えても海岸堤防等が瞬間的に破壊しないようにすることで、防護効果の減少度合いを緩やかにする必要があり、それを、ここでは構造物の粘り強さと定義することとする。

防波堤についてその一例を図９に示す。図９ではケーソンの後ろに捨石を置き、越流による洗掘を防止するとともに、ケーソン自体が滑動しないための重しとして機能させるものである。このようにすることで、設計した津波のレベルよりも若干大きな津波までケーソンが滑動するのを防ぎ、かつ、破壊に至るまでの時間を稼ぐという粘り強さを実現することで、急激な破壊を防止する。このようなアイデアを施設ごと、場所ごとで提案していくとともに、定量的に評価する手法について検討することが今後の課題となる。

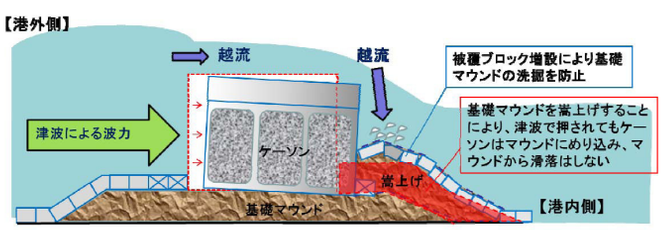


図９　防波堤における粘り強さのイメージ

２．２　粘り強さ

表1　海岸保全施設の設計方針

津波レベルの名称	定義	防護目標	計画・設計
津波防護レベル（L1）	数十年～百数十年に１回の頻度で発生すると考えられる津波	・人命を守る ・財産を守る ・経済活動の継続 ・発災直後に必要な沿岸部の機能の継続	堤内地の浸水を防止するよう計画・設計
津波減災レベル（L2）	津波防護レベルをはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波	・人命を守る ・経済的損失の軽減 ・大きな二次災害の防止 ・早期復旧	堤内地の浸水を許すが、破壊・倒壊をしにくくし、被害が拡大しないよう計画・設計

津波による建築物の被害形態と作用荷重の推定

壁谷澤寿一
●（独）建築研究所 構造研究グループ

１．はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では東北地方沿岸部をはじめ広範囲で津波が発生し、一部の地域では10mを超える非常に大きな浸水深が計測されている。これらの地域では木造のみならず、鉄筋コンクリート造や鉄骨造であっても構造的な被害を受けた建築物が確認されている。

独立行政法人建築研究所と国土交通省国土技術政策総合研究所は地震発生後約3週間が経過した3月30日から津波による建築物の被害調査を開始した[1)]。本調査は総勢27名の津波被害調査班を構成し、津波避難ビルや津波荷重に関する国内外の基規準を収集するとともに、3回に及ぶ現地調査において、合計で約100棟の建築物や工作物等の調査を実施した。

本稿では津波による建築物の被害調査に基づき、構造種別毎の被害形態を分類し、建築物に作用する津波波力及び構造物耐力を比較した結果について示す。

２．津波による建築物の被害形態

2.1 鉄筋コンクリート造建築物の津波被害

鉄筋コンクリート（以下、RC造）建築物において、主架構が崩壊し、人命を失う可能性を有する大きな被害には以下のような事例が挙げられる。

(1) 層崩壊

建築物の１階の柱が柱頭・柱脚で曲げ破壊し、層崩壊した事例が２階建ておよび平屋の建築物に見られた。 これらの建築物はラーメン構造であるが、柱間にはコンクリートブロックの壁が多く設けられている。なお、本調査において津波の作用方向に耐力壁を有する建築物および３階建て以上の建築物では１階の層崩壊は確認されていない。

(2) 転倒

建築物の転倒の被害が、４階建て以下の建築物において見られた。転倒した建築物においては、何れも最大浸水深が建築物の高さを上回っている。転倒建築物は直接基礎のものが多いが、中には杭基礎のもので杭が引き抜かれているものも見られた。 また、同程度の規模の建築物でも、比較的開口が少ないものに転倒例が多く見られたことから、外壁の開口の大きさが転倒に大きく影響したと考えられる。

(3) 部分的崩壊

柱および外壁をRC造、屋根をS造とする議会場や体育館などの大空間構造物において、S造の屋根が脱落し、片持ち形式となったRC造の柱や壁などが面外方向に崩落する被害が見られた。

(4) 洗掘による傾斜

津波が作用した際に、建築物の隅角部に強い水流が作用し、洗掘による大きな穴が開けられた跡が多く見られた。直接基礎を有する低層建築物では、洗掘による穴に建築物が倒れ込み傾斜したものが見られたが、杭基礎の建築物においては杭頭が露出するものの建築物の傾斜は確認されなかった。

(5) 壁の面外破壊

開口が津波の入射面よりも、水流が抜ける側で小さくなる場合、水流が抜ける構面に圧力が集中し、壁のコンクリートにひび割れが生じて外側に大きくはらみ、壁筋が破断する事例が見られた。本被害は厚さ120mmでシングル配筋を有する耐震壁に多く見られた。

図１　ＲＣ造建築物の主架構の被害事例

2.2 鉄骨造建築物の津波被害

鉄骨造（以下､S造）建築物において、主架構が崩壊し、人命を失う可能性を有する大きな被害には以下のような事例が挙げられる。

(1) 露出型柱脚の破壊による移動・流失

S造建築物の露出型柱脚部において、アンカーボル

ト、ベースプレート、柱とベースプレートとの溶接部等が破断し、建築物が移動・流失する被害が見られた。敷地には基礎と柱脚部の一部が残されているが、建築物自体は敷地外へ移動して行方が分からないような状態のものが多い。

(2) 柱頭接合部の破壊による移動・流失

1階または2階の柱頭接合部で破壊により移動・流失した建築物が見られた。特に根巻き形式や埋め込み形式の柱脚で、柱脚部耐力が大きいとこの種の被害が生じやすいと考えられる．その中でも下フランジが取り付くダイアフラムと1階柱との溶接部で破壊することで柱の断面が露出している事例が多く、また、2階床レベルの梁であるH形鋼のフランジが引き裂かれていた建築物も確認された。

(3) 転倒

RC造建築物と同様に転倒した建築物が見られた。躯体と基礎が一体で転倒する建築物と1階柱の脚部引抜け及び座屈により大きく傾斜した被害が見られた。

(4) 層崩壊

2階建てS造建築物の中には１階または部分的に層崩壊している被害事例が見られた。

(5) 残留変形

構造躯体のみが残存するS 造建築物では躯体全体の残留変形が確認されるものも多かった。特に山形ラーメン架構などで大きな残留変形を生じながらも倒壊には至らなかった建築物が見られた。

図２　Ｓ造建築物の主架構の被害事例

2.3 木造建築物の津波被害

木造建築物の津波による被害形態は最大浸水深が大きく関係していると考えられる。最大浸水深が4m程度以上（＝木造住宅では2階床高さ以上に相当）の場合、2階建までの木造建築物で残存している例はほぼ皆無であった。被害形態としては基礎と土台のみを残し上部構造が流失、あるいは土台も流失し基礎のみ残る例などが多数確認された。 一方、最大浸水深が1 ～ 2m程度の場合は、ほとんどの木造建築物が残存していた。構造躯体に被害が生じているものは、漂流物の衝突によるものと考えられる。

３．非木造建築物の構造耐力と津波作用荷重の比較

3.1 検討方法

内閣府「津波避難ビル等に係るガイドライン」[2)]では津波波圧を静水圧と仮定して、津波作用荷重を算定している。本仮定に基づき、中埜らは2004年スマトラ島沖地震の津波被害調査を行い、静水圧荷重が構造物耐力に達する浸水深（構造物耐力相当時の浸水深）を算定し、「計測された浸水深」に対する割合（以下、水深係数aと呼ぶ）を評価し津波作用荷重を推定している[3)]。検討結果では残存した構造物と崩壊した構造物の境界は概ね水深係数aが2.5 ～ 3.0であったと報告されている。

本章では計測された浸水深が10 mを超過する地域に立地する3棟の非木造建築物を例として、同様の方法により水深係数を算定した結果を示す。なお、計測浸水深は三陸地方においては構造物周辺で計測された痕跡深さの最大値、仙台平野においては背面または側面で計測された痕跡深さを計測浸水深と定義している。RC造建築物の単位面積重量は低層が多いことを勘案し、14 kN/m^{2}としている。丸鋼の降伏応力度は294 N/mm^2、コンクリート圧縮強度は21 N/mm^{2}とする。また、鉄骨の降伏応力度は300 N/mm^{2}とし、露出柱脚・根巻き柱脚等の種類に応じた柱脚部の剛性・耐力を設定することはせず、剛接合と仮定する。また根巻き柱脚のコンクリート部分の立ち上がり高さは無視する。

3.2 層崩壊した純フレームＲＣ造建築物の計算例

図３に示す建築物は岩手県陸前高田市に所在するRC造２階建てであり、柱４本で構成される純ラーメン柱梁構造物である。柱間には梁間方向にコンクリートブロック壁が設けられている。床平面は7.0×5.0 m、階高3.0 m であり、桁行方向に層崩壊している。建築物妻面に開口は見られず、開口による作用荷重の軽減はほぼ無かったと考えられる。また、屋根面にパラペットの痕跡が見られたが早期に崩壊したと考え、津波受圧面に考慮していない。周辺建築物の痕跡等から周囲の浸水深は14 mであった。柱断面は400×400 mmであり、主筋は丸鋼(8φ22)であった。

式(1)より柱曲げ終局モーメントMyを算定し、１階柱の柱頭柱脚に降伏ヒンジを仮定して算定される構造物

耐力は418 kNであり(式(2))、これは層せん断力係数に換算すると0.39となる。また、耐力を耐震１次診断法により計算すると640 kNであり、上記耐力より大きくなる。静水圧分布を仮定した場合に構造物耐力に相当する浸水深h_{eq}は3.94 (m)である。当該建築物の計測浸水深は14(m)であるため、本建築物における水深係数aは0.28となる。

$$M_y = 0.8 a_t \sigma_y D + 0.5ND(1 - N/bDF_c) \quad (1)$$

$$Q_u = (2M_y/H) \times 4 \quad (2)$$

$$Q_f = 0.5\rho g W h_{eq}^2 \quad (H > h \text{の場合}) \quad (3)$$

$$h_{eq} = 3.94\,(m) \quad (4)$$

ここで、Q_f: 静水圧荷重、Q_u: 構造物耐力、h_{eq}: 構造物耐力相当時の浸水深、H: 建物高さ、ρ: 水密度、g: 重力加速度、W: 建築物幅、M_y: 柱終局曲げモーメント、a_t: 引張筋断面積、σ_y:主筋降伏応力度、D: 柱せい、B: 柱幅、N:軸力、Fc: コンクリート圧縮強度とする

図３　層崩壊した純ラーメンＲＣ造建築物

3.3 残存したＲＣ造建築物の計算例

図４に示す建築物は岩手県南三陸町に所在するRC造４階建ての町営住宅であり、津波避難ビルに指定されている。床平面は階段室を除くと11×33.4 mであり、建築物高さは14.3 mである。津波計測された浸水深は約16 mであった。津波は建築物の梁間方向に作用している。本建築物に作用する津波荷重は窓や扉などの開口により低減しうると考えられる。そこで、本検討では開口による低減係数を、(低減係数)＝１－(見付面積の開口率)と定義した。津波作用荷重は、無開口時の静水圧荷重に当該低減係数を乗じたものとしている。

本建築物は壁式RC構造であるため、構造物耐力は耐震診断法[4)]により算定した。通常、耐震一次診断法では両側柱付き耐震壁については平均終局せん断応力度を3 N/mm^{2}としているが、本検討では壁式構造における柱型の無い壁についても同等の平均終局せん断応力度を仮定している(式(5))。本建築物の層せん断力係数は2.09であり、静水圧分布を仮定した場合に構造物耐力に相当する浸水深は21.94 mである。当該建築物の計測浸水深は16 mであるため、本建築物における水深係数aは1.37となる。

$$Q_u = \tau_u \times A_w \quad (5)$$

$$Q_f = \zeta \rho g W (h_{ew} H - 0.5H^2) \quad (H < h_{eq} \text{の場合}) \quad (6)$$

$$h_{eq} = 21.94\,(m) \quad (7)$$

ここで、τ_u: 耐震壁の終局平均せん断応力度(=3N/mm^2)、A_w: 1階壁総断面積、ζ: 開口低減率(=1-(開口率))、他の記号は前節までの記号と同様とする

図４　残存した壁式ＲＣ造建築物

3.4 残存したＳ造建築物の計算例

図５に示す建築物は岩手県陸前高田市に所在するS造３階建て建築物であり、残存しているが外装材はほぼ全て剥落している。主架構は1×5スパンであり、床平面は21×7 m、建築物高さは10.5mである。柱は角型鋼管で□-300×12 (厚さは仮定している)、梁はH型鋼 H－400×200×7×11 (ウェブ・フランジ厚は仮定している)である。柱脚は根巻きであるが、基礎まで柱断面が続くと仮定している。２階までの梁降伏メカニズムを仮定し、仮想仕事法から得られる梁間方向１構面当りの耐力は460 kNとなる。

被災後のS造建築物では図5に示すように外装材がほぼ全て剥落しており、どの時点で外装材が破壊されたか推定できない。そこで、本検討では外装材が比較的残っている状態とほぼ骨組のみとなった状態を考えて、開口率を0.3および0.8の２種類を設定した。静水圧分布を仮定した場合に構造物耐力に相当する浸水深は

6.12 m (開口率 0.3)、11.5 m (開口率 0.8)である。当該建築物の計測浸水深は14(m)であるため、本建築物における水深係数aは0.44から0.82の間となる。

$$(p+2p)\times H_1\theta+3p\times H_2\theta=(4M_{pc}+2M_{pb}) \quad (8)$$

$$Q_u=6p\times 6=2660kN \quad (9)$$

$$Q_f=0.5\zeta\rho gWh_{eq}{}^2 \quad (H>h\text{の場合}) \quad (10)$$

$$h_{eq}=6.12(m)\ (\zeta=0.7),\ 11.5(m)\ (\zeta=0.2) \quad (11)$$

ここで、M_{pc}: 柱全塑性モーメント、M_{pb}: 梁全塑性モーメント、H_1: 2階床高さ、H_2: 3階床高さ、他の記号は前節までの記号と同様とする

図5　骨組が残存したS造建築物

4．被害建築物から推定される津波作用荷重

現地調査を実施した層崩壊および残存したRC造建築物について、計測浸水深と水深係数aの関係を図6に示す。構造物耐力はすべて耐震1次診断式で求め、津波作用構面における開口による津波荷重の低減を考慮している。

計測された浸水深10m以下では1棟の建築物が倒壊している。本建築物の水深係数aは1以下である。一方、aが1より小さいにも関わらず、残存した建築物も1棟確認された(※1)。本建築物は津波荷重が作用する側面に大きな開口を有し、建物内部に水が回りこんだため津波荷重が小さくなったと考えられる。

計測された浸水深が10mを超過する地域では水深係数aが1より小さいにも関わらず、残存した建築物が多数確認された。これは静水圧分布を仮定していること、最大浸水深時には流速が大きくならないことなどに起因していると推察される。検討結果より計測浸水深が10mを超える地域では安全側評価となるが、建築物に作用した津波荷重は概ね計測浸水深の静水圧荷重(水深係数aが1)と対応していた。

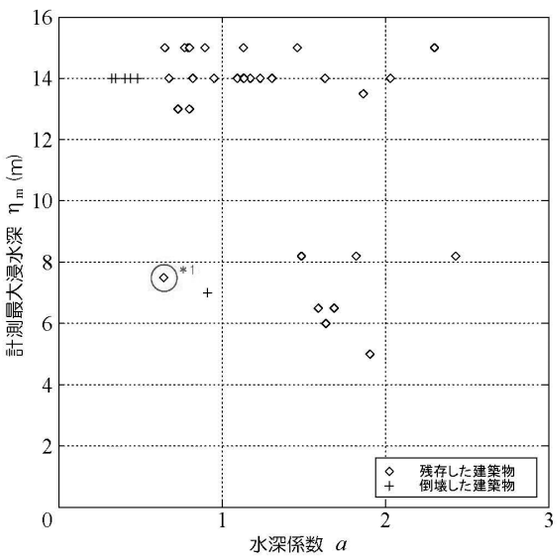


図6　水深係数aと建築物被害の関係

5．おわりに

本稿では現地調査を実施した建築物について構造種別ごとに被害形態を分類し、津波作用荷重と構造物耐力を比較した検討事例について示した。また、調査建築物に基づき本震災で建築物に作用した津波作用荷重を推定している。検討結果において「計測された浸水深」に対する「構造物耐力相当時の浸水深」の割合は既往の研究で指摘されている値より低い場合であっても残存した建築物が確認された。今後、本検討結果を踏まえ、遮蔽物･開口･流速などが津波作用荷重に与える影響などを詳細に考慮する方法について検討を進めることとしている。

【謝辞】
本検討は国土交通省国土技術政策総合研究所および独立行政法人建築研究所の現地調査結果に基づき、国土交通省建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」において実施された。また、南三陸町役場には建築物に関する貴重な情報を提供頂いた。関係各位に記して謝意を表します。

【参考文献】

1) 建築研究資料 第132号、国土技術政策総合研究所資料第636号：平成23年5月平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 調査研究(速報) (東日本大震災)、2011
http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html
2) 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン、2005
3) 中埜良昭、朴珍和: 構造耐力との比較に基づく2004年スマトラ島沖地震津波による津波荷重の評価(その2) 津波荷重と構造耐力の比較検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2005
4) (財)日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説、2001

地震動による鉄筋コンクリート造建築物の被害

谷　　昌典
●（独）建築研究所

１．はじめに

国土交通省国土技術政策総合研究所と独立行政法人建築研究所では、2011年東北地方太平洋沖地震の発生直後より、被害パターンの分類及び整理を目的として、現地被害調査を継続的に実施してきた[1)]。本稿では、岩手、宮城、福島、茨城、栃木の各県において震度6弱以上が観測された地点の都市部を主な調査対象として実施した、鉄筋コンクリート（RC）造（鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造を含む）建築物の被害調査結果について報告する。

２．構造被害の分類

今回の地震では、東北地方から関東地方にわたる広い範囲で様々な被害が確認された。しかし、各地で観測された大きな震度から見れば、総じて被害はさほど大きくなく、構造被害は顕著ではなかった。ただし、仙台市若林区や須賀川市などでは、かつて水田や堀であったという地域で構造被害が比較的集中して見られたことから、地盤条件が被害の発生に関係した可能性がある。なお、今回の調査で見られたRC造建築物の構造被害は、そのほとんどが過去の地震被害においても観察されたものと同様のものであり、被害パターンは次のように分類できる。

(1) 1階の層崩壊

写真１に示すように、ピロティ形式の建築物の1階柱がせん断破壊して、捩れ変形を伴って落階するという被害が見られた。また、ピロティ形式ではない建築物でも、1階柱のせん断破壊により層崩壊した被害が見られた。

(2) 中間階の層崩壊

写真２は、柱がせん断破壊して軸力保持能力を喪失し、3階建ての2階部分が層崩壊した建築物である。この建築物では、3階の一部も大破しており、1階の柱にもせん断破壊が生じていた。他にも、3階建てで2階にのみ短柱を有する建築物で、2階が層崩壊した事例もあった。

(3) 柱のせん断破壊

腰壁や袖壁が取り付くことで短柱化した柱のせん断破壊が散見された（写真３(a)）ほか、一部のせん断補強筋の少ない長柱でもせん断破壊が確認された。また、1階柱において、基礎から立ち上がった主筋の段落とし部を起点とするせん断破壊（写真３(b)）も見られた。

(4) RC造柱脚部や連層耐力壁側柱脚部の曲げ破壊

柱の脚部や連層耐力壁の脚部の曲げ破壊により、コンクリートの圧壊、主筋の座屈及び破断といった被害が見られた（写真４）。

(5) SRC造露出柱脚のアンカーボルトの抜け出しや主筋の座屈

SRC造の露出柱脚において、写真５に示すようなアンカーボルトの抜け出しや主筋の座屈等の被害が見られた。これは、ベースプレート直下の断面にひずみが集中して、アンカーボルトの抜け出しと鉄筋の引張降伏が発生し、その後の圧縮により座屈したものと推測される。この状態からさらに引張が作用すると、鉄筋の破断が生じる可能性も高い。

(6) 境界梁のせん断破壊や付着割裂破壊

並列する連層耐力壁を連結する境界梁に、写真６に示すようなせん断破壊や付着割裂破壊が生じていた。損傷は中央部に設けられた近接する2つの開口付近に発生していた。

(7) 建築物の傾斜

4階建て及び14階建て建築物に傾斜の被害が見られた。原因としては、地盤変状や杭の損傷等が考えられるが、より詳細な調査が必要である。

(8) 塔屋の損傷・傾斜

塔屋の一部の損傷・破壊や、それによる傾斜の被害が見られ、写真７のように損傷した塔屋の一部が屋上に落下した事例もあった。

(9) 耐震補強された建築物の損傷

枠付き鉄骨ブレースが取り付いた柱にせん断ひび割れが発生した事例（写真８）が見られた。また、過去の地震でせん断破壊し、その後、応急補強された極短柱が再び同様の被害を受けた建築物（写真９）もあった。しかし、調査した範囲では、耐震補強された建築物はほとんど被害を受けていないか、ごく軽微な被害に留まっていたと考えられる。

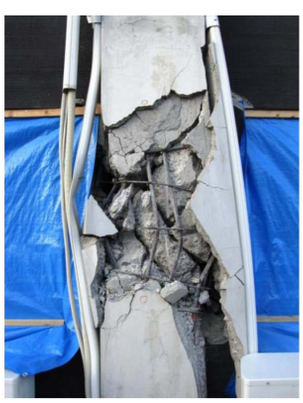
以上の被害が確認されたのは、主に旧耐震基準（1981年5月以前）により設計された建築物である。現

行耐震基準で設計された建築物で被害を受けたものは少なく、確認された被害としては、(5)の被害や、柱梁接合部のせん断ひび割れ、コンクリート打継部の水平ひび割れなどの損傷が挙げられる。なお、1995年兵庫県南部地震で見られた以下に示す構造被害は、これまで調査した範囲では確認されていない。

・現行耐震基準により設計されたピロティ建築物のピロティ層の層崩壊
・中高層建築物の中間層崩壊
・転倒
・鉄筋圧接部の破断
・体育館におけるプレキャスト屋根の落下

写真１　1階で層崩壊した建築物

写真２　中間階で層崩壊した建築物



(a) 短柱のせん断破壊

(b) 主筋段落とし部を起点とするせん断破壊

写真３　柱のせん断破壊

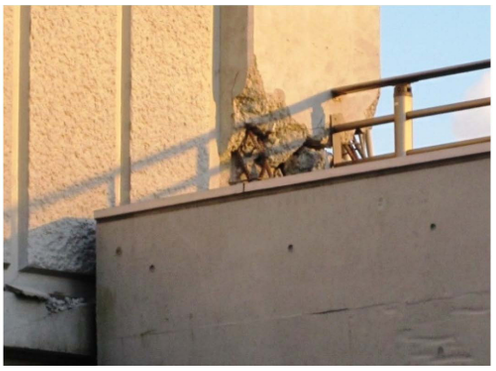


写真４　連層耐力壁側柱脚部の圧壊

写真５　SRC造柱脚ベースプレート付近の主筋座屈

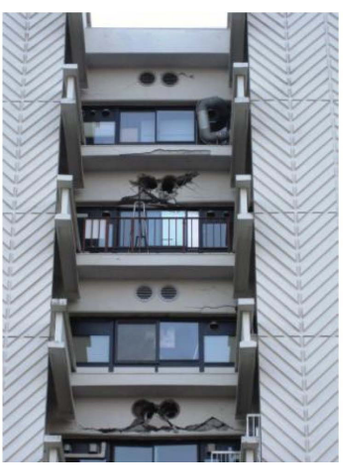


写真６　開口付境界梁の損傷

写真７　塔屋の損傷及び落下

写真８　鉄骨ブレースが取付いた柱のせん断ひび割れ

写真９　応急補強した柱の被害状況

３．非構造被害の分類

今回の調査で確認されたRC造建築物における非構造被害のパターンを以下に示す。

(1) 袖壁付き柱の袖壁脚部の曲げ破壊

写真10に示すような、袖壁付き柱の袖壁脚部の端部圧壊が見られた。この袖壁部分は、設計上は非構造部材として構造耐力上は無視していた可能性が高いため、ここでは非構造部材の被害に分類した。ただし、今後、袖壁付き柱を積極的に構造部材として考慮するような場合には、このような被害が生じる可能性があることを念頭に置いて設計する必要がある。

(2) 集合住宅の非構造壁の損傷

マンション等の都市型集合住宅の玄関回りの非構造壁やベランダ側の方立て壁などに、せん断ひび割れやせん断破壊の被害が見られた（写真11）。この被害は、旧耐震基準による設計や現行耐震基準による設計に関わらず、何れの年代の建築物にも比較的多く見られた。一部の建築物においては、玄関ドアの開閉ができなくなっており避難上の支障が生じた上に、無理矢理こじ開けた後は締まらなくなり防犯上の問題も生じている。

(3) 外装材の損傷・落下

構造部材の被害が生じていない建築物においても、仕上げモルタルやタイル等の外装材の損傷や落下の被害が多く見られた。これらの被害も、旧耐震基準による設計や新耐震基準による設計に関わらず、何れの年代の建築物にも多く見られた。

(4) 屋上突出物の傾斜や脱落

看板や屋上水槽などの屋上突出物に傾斜や脱落などの被害が見られた。

(5) ブロック塀・石積み塀の倒壊

石積み塀やコンクリートブロック塀の倒壊が、非常に多くの地域で見られた。

写真10　2階袖壁脚部の損傷

写真11　非構造壁のせん断破壊

４．RC造庁舎建築物の被害

地震動による重大な構造被害は比較的少なかったにも関わらず、旧耐震基準で建設された市役所等のRC造庁舎建築物で、継続使用できなくなるほどの大きな被害を受けた事例が見られた。今回の調査では、このような庁舎建築物を対象に、被災度区分判定を含む詳細調査を実施した。調査対象及び被災度区分判定結果

は表１に示す通りで、全て立ち入り禁止措置が取られていた庁舎建築物である。被害の程度には差があるものの、重大な被害を受けた建築物が多く存在していることが分かる。表1に示す全ての建築物が､せん断補強筋に関する規定が強化された1971年以前の建設であるが、そのほとんどは、耐震診断が未実施であったか、耐震診断で構造耐震指標I_Sが構造耐震判定指標I_{S0}を下回ったにもかかわらず耐震補強は未実施であった。

ここで、本年1月に国土交通省が発表した資料[2)]から、住宅及び防災拠点となる公共施設等（以下、公共施設等）の耐震化率について、今回調査した岩手、宮城、福島、茨城、栃木の各県と全国平均のデータをまとめたものが図１である。このデータの対象がRC造に限定されていない点や、ここで言う公共施設等には、庁舎以外にも避難場所に指定された文教施設や警察署、消防署、一部の病院等が含まれる点[3)]に注意されたいが、福島、茨城、栃木における公共施設等の耐震化率は全国平均を10%以上下回っており、住宅の耐震化率に比べても大幅に低い値となっている。また、全国的に見ても、公共施設等の耐震化率が住宅に比べてやや低いことが分かる。このような現状や前述の庁舎建築物の被害状況も踏まえると、災害時に拠点として機能すべき公共施設等に対する耐震改修の必要性が改めて認識される。

表１　調査対象としたRC造庁舎建築物

	都道府県	建設年	耐震診断	被災度
A	岩手県	1963	済*1	大破
B	栃木県	1961	未	小破
C	福島県	1970	済*2	大破
D		1968	済*2	小破
E		1967	済*2	小破
F		1960	済*2	大破
G	茨城県	1958	未	中破
H		1966	未	中破
I		1964	未	大破
J		1969	済*3	中破

*1 2003年三陸南地震で被災した後に応急補強済、
*2 I_S値がI_{S0}以下、*3 耐震補強済

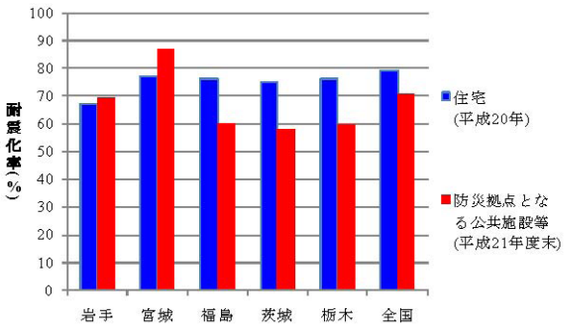


図１　住宅及び公共施設等の耐震化率
（文献2）を元に作成）

５．まとめ

東北地方太平洋沖地震でRC造建築物に発生した地震動による構造及び非構造の被害パターンを分類し、その概要を示した。今回の調査で見られたRC造建築物の構造被害は、そのほとんどが過去の地震被害においても観察されたものと同様のものであった。また、災害時に拠点として機能すべき市役所等のRC造庁舎建築物が大きな被害を受けた事例が確認されており、これらに対する耐震改修の必要性が改めて認識された。

なお、本報告は次に示す調査者により実施した調査結果を元に作成した。

福山洋（建築研究所）、加藤博人（同）、壁谷澤寿一（同）、菅野俊介（同）、諏訪田晴彦（国土技術政策総合研究所）

参考文献

1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）調査研究（速報）(http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html)
2) 国土交通省：耐震化の進捗について（1月21日大臣会見参考資料）、2011.1
3) 総務省消防庁国民保護・防災部防災課：防災拠点となる公共施設等の耐震化推進状況調査報告書、2010.9

東日本大震災と多発する天井落下被害

川口　健一
●東京大学　生産技術研究所

1．序

「間に合わなかった。」

地下鉄の明治神宮前駅で地震に遭い、地上に出て携帯電話のワンセグのニュースで情報を得ていた私は、天を仰いだ。東北地方の非常に大きな地震だ。高所設置の天井や照明音響機器などの落下で大勢の人々が死傷するのは必至だ、と思ったからだ。

2．過去からの知見

地震時に吊り天井や照明器具が落下し非常に危険な状態となることは、1970年代から指摘されて続けている[1)]。その後の大きな地震の報告書でも、毎回同様な指摘がなされてきている[2,3,4,6,7,8,10,11)]。

私自身は1995年の阪神大震災の折に，大スパンを有する集客施設(公共ホールや体育館等)を調査し、その被害を表1のように分類した[4)]。その結果、この種の建物では構造被害は軽微であって、倒壊したものはほとんど無く、それに比して天井や設備機器などの落下被害が深刻である事が明らかであった。以来16年以上、体育館等の大スパンを有する集客施設は耐震補強よりも高所設置の非構造材の改善の方が緊急性が高い、と指摘し続けてきた。

3．耐震補強は本質的解決にならない

その間、非構造材、特に天井などの仕上げ材の落下事故等の調査を続けていると、非常に重要な事実が見えてくる。それは、天井材等の落下事故は、地震がなくても頻繁に発生している、という事実である。体育館やプール、駅などで、ある日突然、天井が落下するという事故が日常的ともいえる頻度で報告されているのである。しかも日本だけでなく、海外の非地震国でもニュースになるような事故として報告されている[9)]。当然、このような落下事故は天井裏に斜め材を設置するような耐震補強では防ぐ事はできない。

さらに重要な事実は、地震時の天井落下でさえも、よく見ると斜め材設置の耐震補強では防げないケースがかなり存在しているという事である。

天井等の仕上げ材の工法は、高度成長からバブル期にかけて施工性重視で発達してきた。非構造材であるから自重以外の重量を支える必要も無く、安全性が問

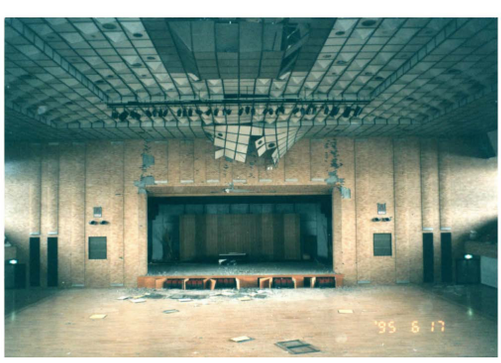


図１　阪神・淡路大震災時の天井材落下被害

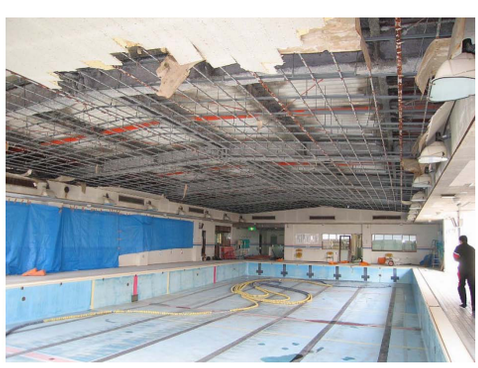


図２　非地震時の天井落下事故

表１　阪神・淡路大震災時に大スパンを有する集客施設に共通に見られた被害[4)]

分類	鉄骨ブレース材の破断や座屈	支承部の損傷	組み立て部材の座屈や破断	プレキャストコンクリート屋根梁の被害	高所設置の非構造材の被害
概要	屋根面ブレース鉛直ブレースの座屈、破断等の損傷。余震を経ても建物倒壊に至ったものなし。	鉄骨とRC部材の接続部周辺。アンカーボルト周辺のコンクリート等の損傷脱落。余震を経ても建物倒壊に至ったものなし。	ラチス材、立体トラス等の座屈、破断等の損傷。余震を経ても建物倒壊に至ったものなし。	置屋根式で掛かり代の少ないものでは、深刻な倒壊被害があった。多数の死傷者が出る可能性があったが、早朝の為、死傷者はなかった。（阪神・淡路大震災以降は同構造形式の重大被害の報告無し。）	天井材や仕上げ材、設備機器の落下被害→内部空間が非常に危険な状態になった。多数死傷者出る可能性あったが早朝の為死傷者なし。避難所機能喪失。イベント中止、営業活動停止、工場停止等による経済損失も大きい。

図３　栃木県内中学校体育館の被害

図４　同　ビスの頭抜けによる天井ボードの落下

われる機会も少ないまま、発達してきた。その結果、広まったのが石膏ボードや軽カル板に代表される、安くて性能の良い材料であった。しかし、この石膏ボードなどを中心に発達してきた工法は、安全性という点では非常に弱点の多いシステムとなっている。その脆弱性は、石膏ボードのような重たくて脆い材料を高所に長期にわたって支持し続けるだけの信頼性を期待できるようなものではない。さまざまな外乱で落下する可能性と弱点を持っている。地震はその外乱のひとつに過ぎない。

そもそも「耐震」の発想は、損傷は許すが倒壊を極力防ぐ、というものである。高所設置の天井材は、ボード等が１枚落ちても大惨事につながる可能性がある。天井材落下は「耐震補強」の発想に馴染まない問題なのである。

４．東日本大震災

今回の震災でも、大スパンを有する集客施設の被害は、津波の被害を除くと、概ね表１に類型化される。そしてやはり非常に多くの天井材や照明器具などの落下被害が報告されている。文部科学省の6月末の調べでは1600棟以上の学校施設で天井落下が報告され、同じく400以上の学校施設で照明落下などが報告されている。

学校体育館は避難所として使われる場合も多いが、同時に、内部には様々な吊りものがある。天井が吊り天井の場合は、損傷落下する例も多い。照明器具の落下も頻繁に見られる。今回被災した図３の栃木県内の中学校体育館は中央に向かって傾斜した上がり天井で、天井高が15m～19mあった。地震時、300人以上の生徒が卒業式の練習で列を成して座っていた中、初め小さな揺れが続き、次いで大きな揺れと共に天井ボード、照明カバー等が落下した。天井板は有孔石膏ボード板で、ビスの頭抜けによって20枚以上が落下。生徒は両脇のギャラリーの下などへ避難したが、避難途中でこれらの落下物が当たり約20名が病院へ搬送された。中にいた教職員によれば「学校体育館は避難所にもなる場所なので、体育館の外へ避難するということは全く考えなかった。」とのことである。天井板のビスの頭抜けは斜め材設置の耐震補強では防げない。照明カバーは簡易な着脱式のものの外れが原因である。このような落下事故を防ぐには天井直下に落下防止ネットを張っておくことが最も有効である。

図５　仙台メディアテーク7階の天井落下被災状況
（インターネット上Websiteより）

図６　茨城空港エントランスホール天井落下の瞬間
（NHKニュース画像より）

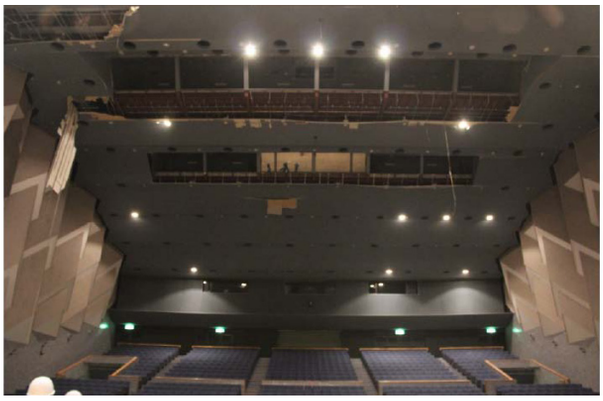


図７　宮城県内公共ホールの音響天井落下被災状況

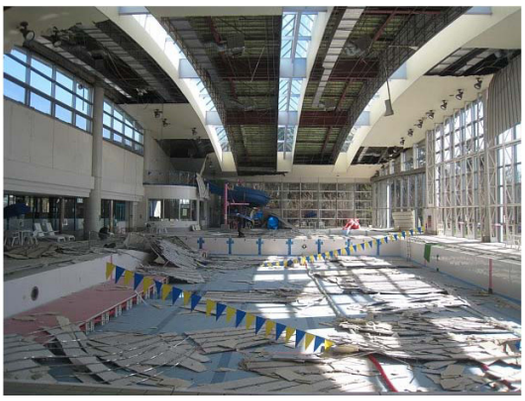


図８　栃木県内公共プールの天井落下被害

５．ビデオ映像と東日本大震災

最近は携帯電話でもビデオ撮影ができるため、今回の震災に関しても非常に多くの映像データ、特にビデオ映像がインターネット上に公開されている。このような中には地震時の天井の様子や落下の状況まで撮影されているものがある。

仙台メディアテークという有名な公共建築の場合、最上階での地震時の状況を撮影したビデオがインターネット上に掲載公開されており、吊り天井の揺れる様子が克明に記録されている。この建物は構造的な被害はほとんど無かったが、最上階7階では広範囲にわたり天井落下が発生した。ビデオはたまたま天井落下を免れた箇所で撮影されている。メディアテークは各階のスラブが鋼板製であるため天井の吊ボルトに特殊なディテールが採用されているが、天井の挙動はほぼ、単純な振り子に近いと考えてよい。天井の吊り長は各階でそれぞれ異なっており、ちょうど7階のみが建物の固有周期と吊り天井の固有周期がちょうど一致していた。その結果、選択的に7階にのみ被害が発生したと考えられている。

ビデオ映像では、天井が非常に大きな振幅で揺れている様子や、地震の後半で奥の部屋では天井落下が発生している状況などを観察することができる。地震初期から人が立っていられないほどの大きな揺れが長時間続き、天井落下被害はその地震の後半で発生しているらしいこと、同じ階でも被災状況が場所によって異なることなどが分かる。

茨城空港ではNHKのカメラによって天井落下の映像が克明に記録され、ニュース映像として繰り返し放映された。茨城空港は2010年3月11日に開港したため、ちょうど開港一周年記念イベントが行われており、取材に来たNHKクルーがエントランスホールをバックに理事長にインタビューをしているところであった。その取材最中に地震が発生し、異変を察知したカメラマンが天井にカメラを向けたところ、まさに天井落下が発生したのである。天井落下の瞬間がこれほど克明に記録される事も珍しい。

映像からは、地震の強さは人が十分立っていられる程度であったこと、また、異変を感じて避難する時間も充分あったことなどがわかる。天井落下発生は地震発生後しばらくしてからであり、天井が周辺壁との衝突を繰り返してから、その部分を起点として全体的な落下に至っていく順序もはっきりと分かる。

私の研究室では、この映像から天井板の落下速度を読み取り、直下に人がいた場合の最大衝撃荷重を推測している。結果は、脳挫傷以上の重篤な傷害を負っていた可能性が高いというものであった[13)]。

６．地震波と天井被害

今回の地震による落下被害を調査していて気が付く点は、以下の2点である。

１．集客施設の利用時間帯に発生しているため天井落下被害による負傷者が出ているが、落下の被害件数の割に負傷者数は少ないようである。

２．天井面全体の広範囲にわたる落下被害が多く見られるようである。

これらの被害の特徴は、客観的な資料で確認されたものではなく、あくまで私の経験に基づく感想だが、今回の地震波の特徴と関連があるように感じている。

１に関して、被害調査を行っている中で繰り返し聞く話は、地震の前半で危険を察知し避難している場合が多いという事実である。宮城県内のホールでは曲面形の音響天井が大きく落下しているが、約600名の観客は地震の途中でホール外へ避難し、数名の軽傷者被害で済んでいる（図７）。栃木県内のプールではアーチ形の天井が大面積にわたり落下したが、天井落下の危険を察知した監視員が約20名の利用者を無事避難させている(図８)。いずれも上記１，２の特徴が現れている。

地震波に関しては、他の記事で詳細に取り上げられると思うので、ここでは深くは触れないが、今回の地震は、主要動の継続時間が非常に長く、最初のピーク波が到達するまでの前半部分は数十秒から2分近くかかっている。この長い地震動は、今回さまざまな被害をもたらしたと考えられるが、吊り天井の場合は建物の固有周期のフィルターを介して、卓越周期のはっきりした定常波に近い成分と地動とが重なり天井へ入力し続けていたと考えられる。吊り天井の挙動は、この長い定常加振によって振幅が増し、様々な部材へ変形や損傷が蓄積進行したところへ、ピークの強震動が訪れたことによって、一挙に脱落に至ったように解釈できる。

従って、落下被害は天井面全体に及んだが、避難時間があったため被害者は少なく済んだのではないか、と考えている。

7．今後と対策そして安全安心を阻むもの

冒頭に繰り返し述べたように、耐震補強では天井の落下被害を根本的に解決する事はできない。天井等の落下被害の直接原因となっている外力は、重力である。従ってこの被害を根本的に解決するには、天井材そのものを軽量で柔らかいものに替えていくことが最も効果的である。自重を軽くすることで、落下の危険性も地震力も格段に減らすことができ、さらに人を傷つける事故も根本的に解消することができる。柔らかい素材にすれば、地震時の変形に追従することができるため損傷落下することもなくなる。石膏ボードに代表される固くて重たい現在の天井材は、これらの点で完全に劣っており、高所設置する材料として、そもそも問題が大きい。柔らかい材料にはグラスウールや膜材料などがあるが、今後さまざまな材料が登場することが期待される。

高度成長期やバブル期に多数建設された大型建築物の内装材は既にかなり劣化が進んでいるものも多く、わずかな外乱で脱落しやすくなっているものも多い。既存の天井材の落下被害を防ぐ最も有効な方法は、落下防止ネットの設置である。狭くて危険な天井裏に入って斜め材などを設置したり、補強材を追加するような方法に比べ、落下防止ネットは施工も容易であり、確実性も高い。地震以外の落下も確実に防ぐことができる。

上記の対策は、よく考えれば誰しも簡単に分かる事であり、実行可能である。これを阻む最も大きな障害の一つは「原状復帰」の原則である。東北地方は頻繁に大きな地震に見舞われている。しかし、そのたびに漫然と「原状復帰」を繰り返している施設が多いのである。我々が過去に調査した天井落下を発生した公共体育館やプールでも、同じ箇所の天井落下が発生したのはこれで4度目、という施設もあった。そういう復旧方法にしか行政が補助金を出さないのである。私の研究室では阪神・淡路大震災で天井等が被災した約40施設の公共ホール等を14年後に再調査した[12]。ほとんどの施設が原状復帰で元通りに復旧したのみであった。即ち、同じ地震が再来すれば、また同じ被害が発生するということである。

私たちが、「真の安全安心」を実現していこうと考えるのであれば、このような状況を変えていかなければならない。21世紀に入って10年。これが最も厄介である。最も大きな障害は、行政側の旧い考え方や慣行、時代に合わせて変えにくい法律、さらには硬直化してしまった技術者集団のオーソリティの考え方そのものにある場合が多いのである。

参考文献

1) 深尾精一:1978年伊豆大島近海地震による体育館の天井落下について，日本建築学会大会学術講演梗概集pp.541-542, 1978.
2) 1978年伊豆大島近海地震災害調査報告，日本建築学会　1980.
3) 1994年北海道東方沖地震災害調査報告・1994年三陸はるか沖地震災害調査報告,日本建築学会,1996.9.
4) 阪神・淡路大震災調査報告　建築編－3　シェル・空間構造　日本建築学会他　丸善，1997年.
5) 川口健一，古川立子:大スパン構造物内部の大型懸垂物の動的挙動に関する研究，平成10年度京都大学防災研究所研究集会，空間構造の耐震性能・評価をどう進めるか？論文集，pp.35-46, 1998.
6) 2001年芸予地震災害調査報告　日本建築学会　2001.
7) 2004年新潟県中越地震震災調査速報　平成16年12月, 東京大学生産技術研究所川口研究室
8) 福岡県西方沖地震震災調査報告, 平成17年4月　東京大学生産技術研究所川口研究室
9) 川口健一:「危険をはらむ大規模施設の非構造材」建築ジャーナルNo.1095, pp.68-70, 2005.12.
10) 川口健一,吉中進,大塚彩,片山慎一朗: 新潟県中越地震と同中越沖地震における大規模集客施設内部の非構造材(吊り天井)被害の比較, 日本建築学会技術報告集, 第14巻,第27号,pp.73-78, 2008.6.
11) 荻芳郎, 川口健一, 大矢俊治, 片山慎一朗, 熊谷祥吾, 櫻井重喜: 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震または2008年7月24日の岩手県沿岸北部の地震による大規模集客施設の非構造材被害, 日本建築学会技術報告集, Vol. 16, No. 33, pp. 821-826, 2010. 6.
12) 1995年1月17日兵庫県南部地震報告書被災14年後フォローアップ調査,東京大学生産技術研究所川口研究室,2009年8月.
13) 大場，川口，中楚: 2011年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下に関する調査報告　その1，その2，日本建築学会大会学術講演公害集構造B-1 , 759－762, 2011年.

東日本大震災における超高層・免震建築物の挙動

斉藤　大樹
●独立行政法人建築研究所

1．はじめに

2011年3月11日に発生したマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震では、東京で震度5弱を観測し、新宿や湾岸地区に建つ超高層建築物が長い時間揺れたことが話題になった。一方、震源から700km以上離れた大阪の震度は3であったが、地上55階建ての大阪府咲洲庁舎において32基のエレベーターが全て停止し、うち4基で閉じ込め事象が発生したほか、天井の落下などの被害が発生した[1)]。震度が小さい大阪で特定の超高層が大きく揺れたのは長周期地震動によるものと考えられている。

免震構造は1995年兵庫県南部地震以降、急速な普及を見せ、震源に近い宮城県や山形県にも免震構造を採用した建築物が数多く存在している。国土交通省国土技術政策総合研究所及び独立行政法人建築研究所は、6月初旬にこれらの県内にある免震建物の実地調査を行った。居住者へのヒアリングや観測データから、全ての免震建物において建築物に入力する地震力が軽減され、上部構造に損傷が生じていないことが確認された。一方、免震部材やクリアランス部等に損傷が見られた。

2．東北地方太平洋沖地震における超高層建物の揺れ

建築研究所では、1957年以来、建築物を対象とした強震観測を行っている[2)]。3月11日の東北地方太平洋沖地震では、北海道から関西の54か所の観測地点で強震記録を採取した（図１）。このうち、仙台、東京、大阪に建つ超高層建物3棟で得られた最大加速度値を表１に示す。いずれの記録も高層階ほど値が大きい。図２にはそれぞれの最下層で得られた記録の速度応答スペクトル（水平1成分のみ）を示す。仙台や東京の記録では周期0.5秒程度から10秒程度まで広い周期帯域で強い速度応答となっており、超高層だけでなく低層から超高層まで大きく揺れる地震動であったと考えられる。一方、大阪では周期6 ～ 7秒にピークがあり、超高層だけが揺れる典型的な長周期地震動であった。大阪府咲洲庁舎に設置された地震計の記録から求めた変位波形（図３）を見ると、52階では1階の揺れの20倍近い揺れが発生しており、10分以上も揺れが続いている。庁舎の固有周期は約6秒であることから、長周期地震動に共振して揺れが拡大したものと考えられる。

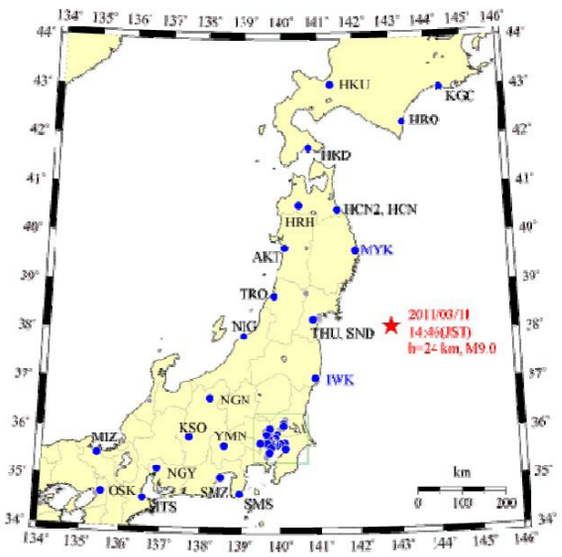


図１　記録が取れた建築研究所の強震観測点[2)]

表１　超高層建築物の強震記録

観測地点	階数 構造 建物高さ(m)	震源距離 (km)	計測震度	位置	最大加速度 (cm/s²)		
					H1	H2	V
仙台	15階建て 鉄骨造 62.5	175	5.2	B2F	163	259	147
				15F	361	346	543
東京	37階建て RC造 118.8	385	4.4	01F	87	98	41
				18F	118	141	64
				37F	162	198	108
大阪	55階建て 鉄骨造 256.0	769	3.0	01F	34	24	80
				18F	41	39	38
				38F	86	56	18
				52F	130	85	12

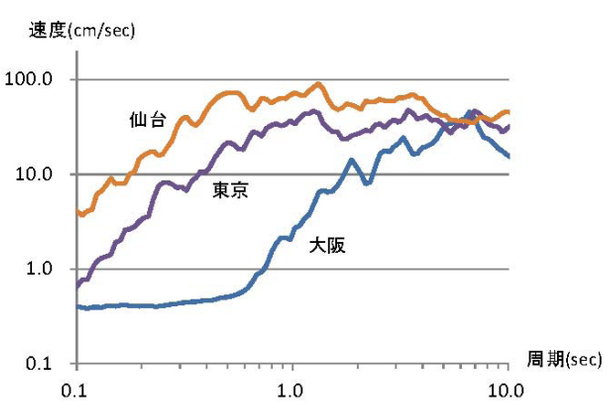


図２　最下階の記録の速度応答スペクトル

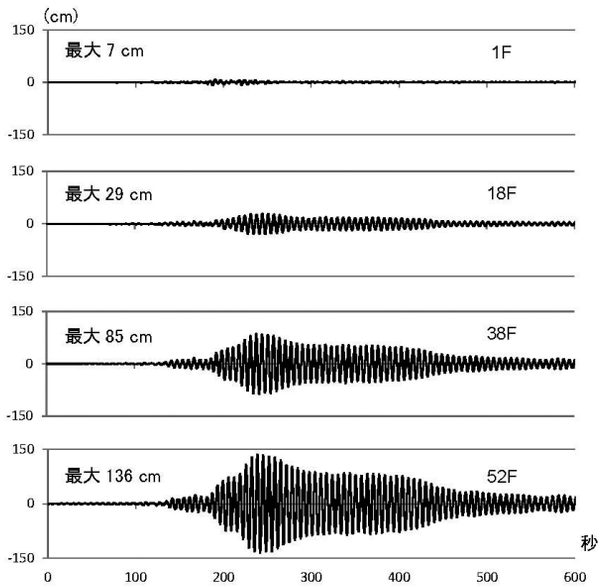


図３　大阪府咲洲庁舎の変位波形

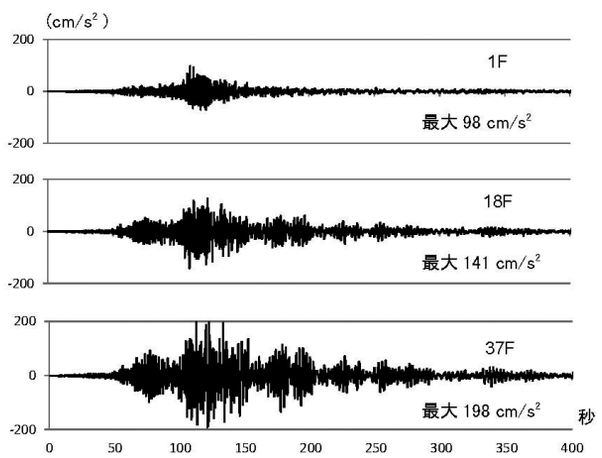


図４　東京37階建て集合住宅の加速度波形

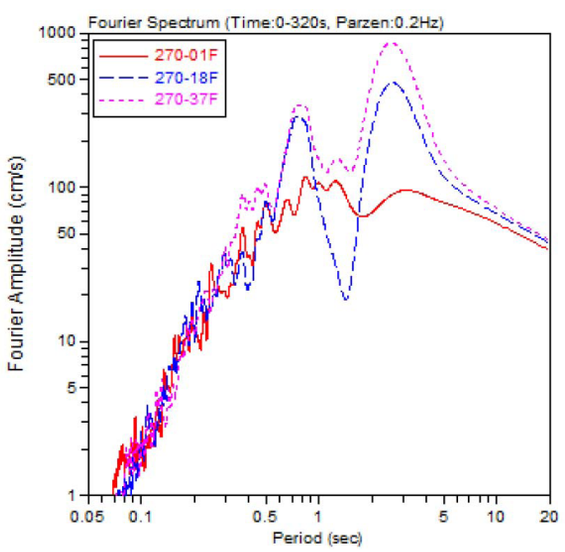


図５　各階の記録のフーリエスペクトル

次に、東京都中央区に立つ37階建て超高層集合住宅について、東北地方太平洋沖地震で観測された加速度波形を図４に示す。また、図５には各階の加速度記録のフーリエ振幅スペクトルを示す。18階および37階の加速度波形のスペクトルには2つのピークがあり、周期2.5秒の1次モード成分だけでなく、周期0.7秒の2次モード成分も多く含まれていることがわかる。地震後に管理組合が行った被害調査（図６）によると、4階から30階の中間階で住戸の玄関周りの仕上げコンクリートのひび割れや剥落等の軽微な被害が多く発生しており、このことからも2次モードの揺れが発生して中間階が大きく揺れたことが推察される。また、揺れの大きさを筆者らが提案する行動難度曲線[3]（図７）にプロットしてみると、37階では行動が乱れる程度の揺れだったと考えられる。

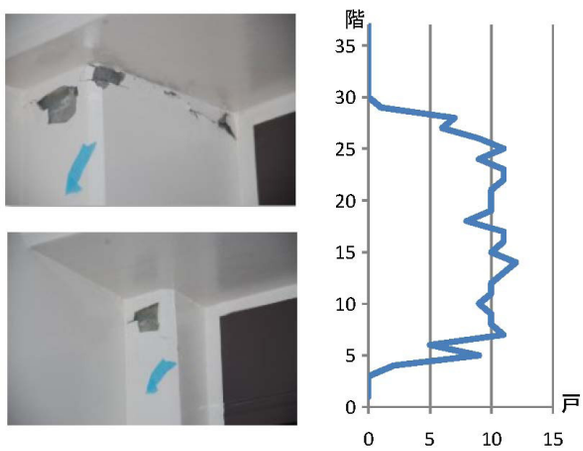


図６　被害写真と各階の被害発生戸数
（写真および調査結果は管理組合から提供して頂いた）

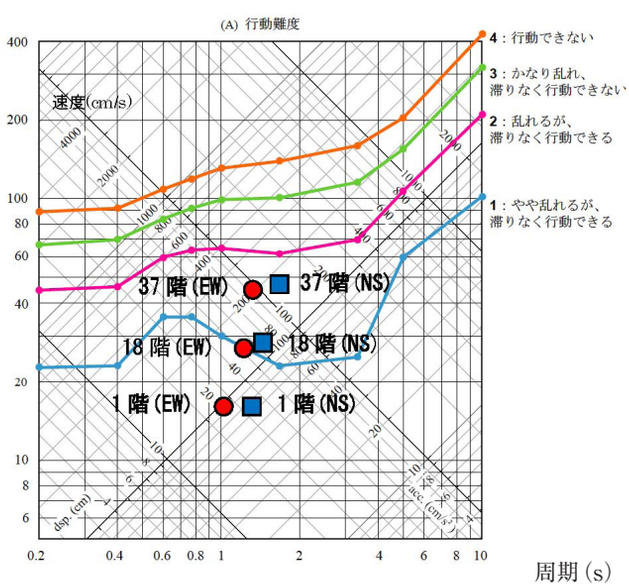


図７　行動難度曲線[3]

３．東北地方太平洋沖地震における免震建物の揺れ

(1) 調査の概要：調査対象は表2に示す17棟で、うち6棟（C, D, E, F, J, L）は免震建築物に関する告示（平成12年建設省告示第2009号）に基づき建設されたものである。また、山形県内の1棟（P）を除き、すべて宮城県内に位置している。本震の際の震度は、震度4（P）、震度5強（M, Q）、震度6弱（A ～ H, N, O）、震度6強（I ～ L）である。

表２　調査対象の免震建築物

	用途	上部構造		免震層構成*
		形式	階数	
A	事務所	SRC	9	HRB
B	倉庫	S	1	HRB
C	共同住宅	RC	14	NRB, LD, SD-U
D	共同住宅	RC	12	LRB, SD-U
E	共同住宅	RC	15	LRB, ESB
F	共同住宅	RC	10	HRB, ESB
G	救急施設	RC	6	LRB, ESB
H	事務所	RC	18	NRB, ESB
I	宿泊施設	RC	12	NRB, LD, SD-L
J	救急施設	S	3	LRB, SB, OD
K	医療機関	RC	5	LRB, RB, OD
L	救急施設	RC	3	LRB, ESB, SD-U
M	医療機関	S	6	NRB, RB+SD-U, SD-U, ESB
N	救急施設	RC	3	NRB, ESB, OD
O	医療機関	RC	4	NRB, LRB, ESB, SD-L
P	医療機関	RC	10	NRB, LD, SD-L
Q	医療機関	SRC	4	LRB, SB, OD

*) NRB：天然ゴム系積層ゴム支承、LRB：鉛プラグ入り積層ゴム支承、HDR：高減衰積層ゴム支承、ESB：弾性すべり支承、SB：転がり支承、LD：鉛ダンパー、SD-U：U型鋼材ダンパー、SD-L：ループ型鋼材ダンパー、OD：オイルダンパー

(2) 被害調査結果：現地調査は、外観の目視調査に加えて、建築物の所有者・使用者へのヒアリングを実施した。いずれの免震建築物も上部構造の損傷や設備配管等の被害は生じていなかった。ただし、免震層及び周辺の目視調査の結果、免震部材について以下のような状況が確認された（写真１～写真５）。

・鉛ダンパーのひび割れ（C, I, P）
・鋼材ダンパーのゆがみ、塗装の剥がれ、取付ボルト緩み等（C, I, L, M, P）
・津波による免震層の冠水（B, N）
・高減衰積層ゴム支承の鋼材部分のさび（B）
・弾性すべり支承のすべり面の傷（L）

さらに、以下のような被害も見られた（写真６～写真９）。

・エキスパンション部カバーのずれ、破損、脱落（A, E, F, J, N, P）
・免震層の鉛直クリアランス部目地材のずれ、剥がれ（A, K）
・周囲地盤の沈下等の変状及び段差（A, C, E, I, J, K）
・設備機器及び什器の滑動、転倒等（M）

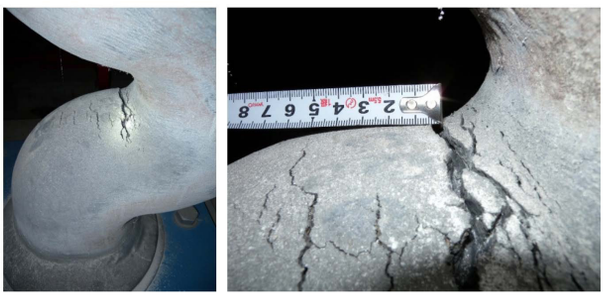


写真１　鉛ダンパーのひび割れ及び拡大図（C）

写真２　鉛ダンパーのひびの割れ（I）

写真３　鋼材ダンパーの塗装のはがれと変形（L）

写真４　支承の鋼材部分のさび（B）

写真５　すべり面の傷（L）

写真６　カバーの破損（A）

写真７　スライド部の破損（J）

写真８　天井部カバーの脱落（A）

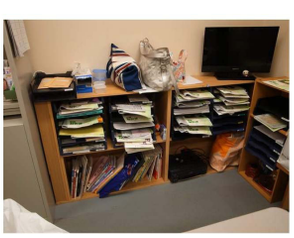


写真９　転倒したままの棚（M）

エキスパンション部やクリアランス部の損傷には、設計上想定した被害の範囲である場合と、そうでない場合があるが、建築物の機能上の支障を生じないものとすべきである。また、一部の鉛ダンパーの断面欠損（ひび割れ）の発生、鋼材ダンパーの表面塗装の剥がれや残留変形、沿岸部での免震部材の取り付け部表面のさびの発生、免震層の津波による冠水の影響等に関しては、今後適切な維持管理を行って常に状況を把握しておくことが必要である。なお、調査結果の詳細は速報[4]にまとめられている。

最後に、筆者が調査をした被害事例を紹介する。鉛ダンパーの取り付け部においてコンクリートが破壊する損傷が発生している（写真10）。この免震建築物は神奈川県にあり、本震の際の周辺の震度は4であった。また、エキスパンション部に10cm程度の移動の痕跡が見られた。破壊状況から、地震時にベースプレートに曲げモーメントが働いてスタッドボルトに引張力が働き、コンクリートの付着破壊またはコーン破壊が生じたと考えられる。同様の問題は、2005年福岡県西方沖地震の被害報告[5]でも指摘されており、鉛ダンパーの取り付け部の適切な設計が求められる。

写真10　鉛ダンパーの取り付け部の損傷

(3) 免震建築物の地震時挙動：今回調査した建築物のうち、8棟に罫書き式の変位計が設置されており、本震時の挙動と思われる軌跡を確認できた。その多くで最大変位は原点から20cm前後の数値となっていたが、中には40cmを超える変位が計測された建築物（L）もある（写真14）。また、ヒアリングでは、30cm程度の変位を確認したと報告のあった建築物もある（I）。さらに、加速度計を設置していたものが3棟（A, H, P）あり、うち2棟で入手した記録によれば、表３に示す通り免震層の上下で約40% ～ 60%に最大加速度の数値が低減されていることが分かる。

写真11　東南約18cm（A）

写真12　東南約21cm（B）

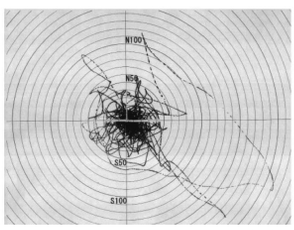


写真13　東南約21cm（E）

写真14　北約40cm（L）

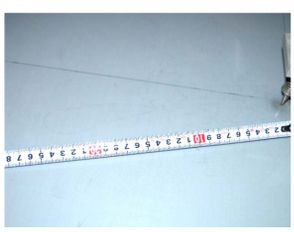


写真15　西約25cm（M）

写真16　東西約25cm（N）

表３　免震層上下の加速度（単位gal）（　）内は比率%

	A建築物		H建築物	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
免震層下	250.8 (100.0)	289.0 (100.0)	310.8 (100.0)	225.8 (100.0)
免震層上	143.7 (57.3)	120.5 (41.7)	173.0 (55.7)	142.9 (63.3)

４．まとめ

今回の東北地方太平洋沖地震では、超高層、免震とも安全性に影響するような深刻な構造被害はなく、優れた耐震性を実証した。しかし、建築物の機能に支障をきたすような非構造部材や設備の被害、免震部材等の損傷が見られ、超高層建築物では長周期地震動の影響が確認されるなど、課題が浮き彫りになった。

参考文献

1)「咲洲庁舎の安全性等についての検証結果」大阪府総務部、平成23年5月

2) 建築研究所の強震観測ホームページ
http://smo.kenken.go.jp/ja

3) 高橋徹ほか“長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案”、日本建築学会学術講演梗概集. B-2, 構造II, 2007

4) 宮城県、山形県における免震建築物の状況（速報）（国総研・建研）http://www.kenken.go.jp/

5) 日本建築学会「2005年福岡県西方沖地震災害調査報告」

橋梁被害に対する耐震設計法向上と耐震補強の有効性

川島　一彦
●東京工業大学

１．なぜ地震動による橋梁被害は限定的であったか？

まだ、公開されていない被害がある等、依然として東北地方太平洋沖地震による被害の全貌が明らかになっているわけではないが、今回の地震では地震動による橋梁被害は比較的限定的であったことは間違いない。一方、1978年宮城県沖地震では、宮城県全域に著しい被害が生じた。この違いは1990年を境とする橋梁の耐震設計法の大幅な向上と、1995年兵庫県南部地震を契機として現在までに実施されてきた耐震補強によるものと考えられる。以下､これについて示したい。

２．耐震技術基準の変遷

1978年宮城県沖地震当時の橋梁の多くは1964年道路橋示方書もしくはそれ以前の技術基準で設計されていた。この当時には、震度法による耐震計算法しかなく、1971年道路橋耐震設計指針以降は液状化に対する判定法や落橋防止構造の規定はあったが、慣性力の算定は単純橋を前提とした方法であり、橋脚のせん断破壊に対する判定が緩く、また、変形性能に対する規定も不十分なものであった。

これに対して、1990年道路橋示方書では、土木構造物で初めて地震時保有耐力法が導入され、レベル2、タイプI地震動が取り入れられ、RC橋脚の変形性能の照査が開始された。これは、大地震時に現実に生じ得るレベルの地震動に対して非線形域の橋脚の特性を考慮して耐震性を照査することを可能とし、従来､「耐震設計といえば震度法」と言われてきた土木構造物の耐震設計に抜本的な改革を促したものであった。また、設計振動単位の概念が導入され、連続橋としての慣性力の算定法が導入された。さらに、1990年ごろから、免震設計の導入が試験的に開始され、これに伴って、LRBやHDRを含む積層ゴム支承が使用され始めた。

さらに、1996年道路橋示方書では、1995年兵庫県南部地震により神戸で生じた地震動を基本にレベル2､タイプII地震動が導入され、落橋防止構造の強化、免震設計や積層ゴム支承の導入、液状化及び流動化に対する耐震対策等が取り入れられた。

その後、主鉄筋段落としのある約3万橋脚に対して、耐震補強が実施され、さらに、鋼製支承を積層ゴム支承に入れ替えたり落橋防止構造の強化が図られてきた。

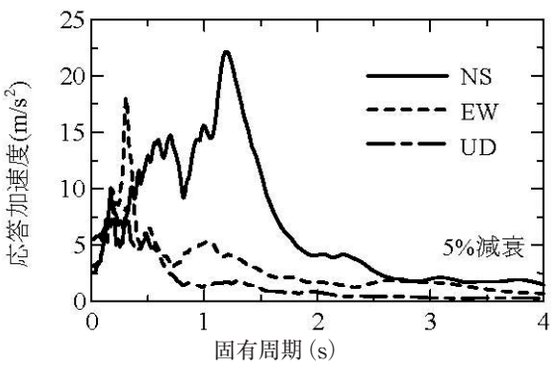


図１　大崎市古川三ヶ日町(JMAによる)

以上のように、1978年当時の橋梁が準拠していた耐震基準に比較し、1990年以降の耐震基準では大幅に耐震性の強化が図られ、耐震補強プログラムも地道に実施されてきていた。

３．地震動の比較

1978年宮城県沖地震による被害と東北地方太平洋沖地震による被害を比較する上で重要な点は、両者の地震動強度の比較である。仙台およびその北部地区でK-NETとJMAによって得られた強震記録を見ると、今回の地震では周期0.2s付近で卓越する地震動が多い。特に震度7を記録し、最大加速度が27m/s^2 (NS成分)と大きかった築館市では周期0.2sで加速度応答スペクトルは130m/s^{2}に達したが、建物を含む構造物被害はほとんど生じなかった。地震のたびごとに指摘されているように、気象庁震度階と構造物被害の関係があてにならないことを示している。

しかし、図１に示す大崎市古川三ヶ日や、その他、涌谷町新町、石巻等、軟弱地盤上では、周期1s付近で10m/s^{2}程度の加速度応答スペクトルになっており、1978年宮城県沖地震による地震動よりも大きいと見ることができる。

４．補強され、無被害であった橋の例

千代大橋は国道4号線が広瀬川を横架する箇所に1965年に建設された9径間単純橋である。写真１に示

写真１　P6の被害(1978年宮城県沖地震)

写真４　落橋寸前であった支承下橋脚頂部の被害
(1978年宮城県沖地震)

写真２　東日本大震災後の橋脚

写真５　ピン支承固定部の被害

写真３　無被害であった積層ゴム支承

写真６　破断や座屈が生じたトラス上横斜材

すように、1978年宮城県沖地震では橋脚の躯体と横ばりの継ぎ目で橋脚の全周にわたって鉄筋の座屈、コアコンクリートの損傷を生じた。低鉄筋断面によく生じる被害である。写真２に示すように、地震後にはRC巻き立て工法で補強され、さらに車線拡幅のため橋脚の両側に独立した2基の橋脚を設け、さらにこれらを一体として繊維補強モルタルで巻き立てた構造となっていた。さらに、写真３に示すように、当時の鋼製支承を積層ゴム支承に取り替え、1996年基準に準拠した落橋防止構造が設置されていた。これらが功を奏し、今回の地震では全く被害を受けなかった。

天王橋は国道45号線が旧北上川を横架する箇所に1959年に架設されたトラス橋である。1978年宮城県沖地震において、写真４に示すようにピン支承を支持する壁式橋脚の上端が大きく損傷し、落橋寸前となった。支承縁端距離が不十分であったために生じたものである。地震後、RC巻き立てにより橋脚断面を広げて復旧された結果、写真５に示すように今回の地震では橋脚には被害を生じなかった。

ただし、トラス構造そのものと支承部は耐震補強されていなかったため、写真６に示すようにトラス上横斜材の破断、座屈やトラス下横斜材の破断が生じた。また、ピン支承では写真５に示したようにアンカーボルトが抜け出し、沓座モルタルが剥離している。ピン、

ローラー支承は断面が大きいため、安全であると誤解されがちであるが、支承が高いため大きなモーメントが作用しやすく、ピンの破断、ローラーの抜け出し、アンカーボルトの抜け出し等の被害が常に過去の地震で生じている。このような支承は早急に積層ゴム支承に取り替えるべきである。

写真７　桁端を支持する橋脚のせん断クラック
(1978年宮城県沖地震)

写真８　ラーメン橋脚端部のローラー支承
(1978年宮城県沖地震)

写真９　完全に逸脱したローラー
(向こう側と手前のローラー支承)

閖上大橋は1974年竣工の中央ヒンジ型3径間連続PCラーメン橋とその前後のPC単純桁橋から構成されている。1978年宮城県沖地震では写真７に示すようにRC橋脚にせん断破壊が生じるとともに、写真８に示すようにラーメン橋の端部支承でローラーの抜け出しとこれに伴う路面の沈下が生じた。地震後、橋脚はRC巻き立てにより復旧されたため、今回の地震では被害を受けなかった。しかし、支承については、ほぼ1978年宮城県沖地震と同じ個所で写真９に示すように、ローラーが完全に逸脱した。

５．従来型の被害を生じた橋の例

旧基準によって設計され、耐震補強されていない橋では依然として従来型の被害が生じている。たとえば、岩手県地方道の藤橋では今回の地震(余震)によって主鉄筋段落とし部で写真10に示すようにせん断破壊した。これは1995年兵庫県南部地震による橋梁の大被害をもたらした被害原因である。このため、写真11に示すよ

写真10　主鉄筋段落し部で破壊した藤橋（(独)土木研究所構造物メインテナンス研究センター星隈氏による）

写真11　H型鋼により緊急対策

写真12　積層ゴム支承と落橋防止構造

写真13　支承部

うにH鋼で応急補強し、RC巻き立てによって補強されつつあった。

6．無被害であった新基準によって新設された橋

以上に対して、1990年以降の地震時保有耐力法によって設計された橋梁では被害はほとんど生じなかった。三陸自動車道の新天王橋は前述した旧天王橋の200m程上流側に1990年基準に基づき設計され、2003年に竣工した橋であるが、写真12に示すように橋台部の積層ゴム支承や落橋防止構造には被害は生じていない。

北上川を横架する東松島大橋は2002年基準に基づいて設計され、2007年に竣工した橋であるが、写真13に示すように、支承部を含めて被害は生じていない。

7．積層ゴム支承の被害

以上に示したように、1990年代から急速に普及してきた積層ゴム支承は従来の鋼製支承の地震被害を低減させるために有効であったが、積層ゴム支承にも気になる被害が生じている。一例をあげると、国土交通省によって1996年道路橋示方書に基づき設計され、2001年に竣工し、NEXCO東日本によって維持管理が行われている仙台東部道路では、写真14に示すように桁端を支持する1支承線上の積層ゴム支承がすべて橋軸直

写真14　積層ゴム支承の橋軸直角方向への破断
（NEXCO東日本提供）

角方向に破断して、約0.5m水平方向にずれ、破断した上部ゴム支承が下部ゴム支承から逸脱した結果、約0.5mの段差が生じた。支承の破断は鋼板とゴム間の接着がはがれる形で生じており、通常見られない被害である。

この他にも数橋で類似の被害が生じており、被害原因を究明していく必要がある。大量に製作すると質の悪い積層ゴム支承が出てくる可能性がある。品質管理も含めて、設計、製作両面から検討する必要がある。

8．まとめ

東北地方太平洋沖地震による地震動の被害は1978年宮城県沖地震に比較して明らかに限定的であったが、この主たる理由が1990年以降の耐震設計技術の向上と地道な耐震補強にあることを示した。

しかしながら，ここには紹介できなかったが首都圏では岩手～茨城県よりも地震動が小さかったにもかかわらず、各種の被害が生じている。本来被害を受けやすい震動しやすい橋が岩手～茨城県には少なかったことも、今回の地震で被害が限定的であった原因である。

1995年兵庫県南部地震による神戸での地震動が現在の耐震設計におけるレベル2、タイプII地震動の基本となっているが、橋の固有周期帯域でこれをさらに凌ぐ地震動もすでに観測されてきており、地震動自体の評価も重要である。

いずれにしろ、地道な耐震技術の開発と耐震補強の実施が道路の安全性を確保する上で有効であった。

謝辞

被害調査に際し、お世話になった国土交通省東北地方整備局、NEXCO東日本の他、西岡勉、高橋良和、秋山充良、渡邊学歩、古賀裕久、松崎裕、田村敬一、運上茂樹、星隈順一氏等の皆様に心からお礼申し上げます。

鉄道橋の被害

高橋　良和
●京都大学防災研究所

１．はじめに

2011年3月11日午後2時46分、三陸沖を震源とするマグニチュード9の地震が発生した。著者らは、3月13日から16日にかけて宮城県、岩手県に入り、東北新幹線等構造物の振動による被害調査を行った。また3月29日から4月3日まで、土木学会地震工学委員会被害調査団（団長：川島一彦東京工業大学教授）として、主に津波被害域における構造被害調査を行うとともに、引き続き東北新幹線の被害調査も行った。

東北地方太平洋沖地震の被害域は広範囲にわたり、特に津波による被害が甚大であった。一方で、地震動の強さに比べ、振動による構造被害は多くはない印象がある。これは兵庫県南部地震以降、精力的に耐震補強および耐震設計法の改良が進められ、その効果が発揮されたものと考えられる。東北新幹線高架橋においても、耐震補強済の柱には致命的な被害は発生しなかった。一方で、耐震補強されていなかった構造物に数多くの被害が報告されているのも事実である。本稿では、特に振動による鉄道橋被害について、代表的な事例を報告する。

２．東北新幹線と過去の地震被害

東北新幹線は1982年に開業し、2011年現在、東京～新青森間を結んでいる。建設当時の設計基準は、「全国新幹線網建造物設計標準（東北、上越、成田用）1972(S47.6)」であり、耐震設計基準については、「建造物設計標準　鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物、プレストレストコンクリート鉄道橋1970(S45.3)」が適用されていた[1)]。

1978年2月20日に発生した宮城県沖地震により、建設途上であった東北新幹線は被害を受けた。支承の被害が中心であるが、ラーメン高架橋の柱、中層はりのひび割れなどが確認された[2)]。2003年5月26日に発生した三陸南地震により、東北新幹線は水沢江刺―盛岡間の高架橋柱にせん断破壊を含む大きな損傷が発生した。その後、2004年の新潟県中越地震で上越新幹線高架橋にも大きな被害が発生したこともあり、2004年より5カ年計画にて、新幹線高架柱の耐震補強計画が実施された。東北新幹線高架橋の51,100本の柱のうち、せん断破壊先行型と判定された12,500本が補強の対象となり、2007年までに工事が完了している。引き続き、2009年より第2期の耐震補強計画が始まり、曲げ破壊先行型の耐震補強が進められている。

３．東北新幹線第１中曽根高架橋（振動被害）

第１中曽根高架橋は、東京より約456km地点の北上―新花巻間に位置する全長約350mの高架橋であり、1978年に建設された。本高架橋は、両端にゲルバー桁を有する一層ラーメン高架橋であり、長さ35mの４径間ラーメン（R1～R3）と長さ25mの３径間ラーメン（R4～R9）の９つのラーメン構造とそれをつなぐゲルバー桁から構成されている。柱には耐震補強された形跡はなく、本高架橋は2004～2008年のせん断破壊先行型柱に対する耐震補強計画の対象外であった。

主な被害は、ラーメン構造の端部柱に集中して発生した。代表的な被害として、写真１、２に示すような軸方向鉄筋が提灯状に座屈し、軸力支持能力を喪失するほどの甚大な被害を受けたR7端部柱が挙げられる。

写真１　第１中曽根高架橋(R7)の全体写真

写真２　第１中曽根高架橋(R7)端部柱の破壊状況

その結果、鉛直方向に最大74mm沈下した。

本高架橋はラーメン構造であるため、柱の崩壊が即ち構造の崩壊につながらない。しかし、軸力支持能力を喪失するほどの破壊がどのようなメカニズムで発生したかを検討することが重要である。R7端部柱だけみると、柱上部の打ち継ぎ面が明確に確認できるため、これが損傷の起因となったとみることもできるが、本高架橋の損傷で特徴的なことは、他の端部柱でもみられるように、コアコンクリートが破壊面を特定することが困難なほど玉石状に破砕されていることである[3)]。またR2-5などでは、柱上部から斜め方向の損傷も確認できる。以上より、R7端部柱の破壊は写真３のように進展したと推定する。まず、端部柱上部にR2-5のようなせん断ひび割れが発生した後、継続時間の長い地震動によりひび割れ部が繰り返し載荷を受け、コアコンクリートが玉石状になるほど破砕し、その後帯鉄筋が外れることにより、破砕されたコアコンクリートの脱落、軸方向鉄筋の座屈が発生したと考える。

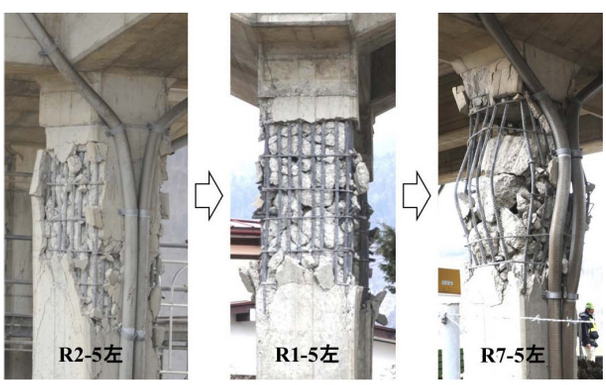


写真３　Ｒ７端部柱の破壊進展メカニズムの推定

４．長町駅付近の東北新幹線と在来線高架橋

東北本線長町駅周辺は、東北新幹線と在来線が並走している。この長町駅周辺の東北新幹線RC1層ラーメン高架橋は2004～2008年のせん断破壊先行型柱に対する耐震補強計画の対象外であった。一方、在来線高架橋は2007年に竣工した1層RCラーメン高架橋であり、新しい耐震設計基準で建設されたものである[4)]。両高架橋にほぼ同じ地震動が作用したと考えられる。

東北新幹線高架橋の被害は端部柱に集中し、せん断によりかぶりコンクリートが剥落し、内部のコアコンクリートも相当に損傷した柱もある（写真４）。一方、東北本線のラーメン高架橋には、わずかな曲げひび割れが残留している程度であり、斜めひび割れは確認されなかった。現行の耐震基準では、柱は十分なせん断補強鉄筋を持つことに加え、東北新幹線と異なり、地中梁を持たない構造であり、地中梁のある東北新幹線ラーメン高架橋よりも、高架橋の固有周期は大きいことも在来線高架橋の損傷が小さかった一因の可能性もある。

写真４　長町地区の新幹線高架橋（手前）と在来線高架橋

５．まとめ

鉄道橋の耐震補強は着実に進められるとともに、耐震技術に関する知見も高まり、新しい耐震基準による構造物には甚大な被害は発生しなかった。一方で、ここでみられるような無補強柱の損傷は、2003年三陸南地震や2004年新潟県中越地震でも繰り返し発生している。また、今回の地震被害調査によると、過去の被害があった高架橋の周辺で再び損傷が発生していることも少なくない。補強計画においてせん断破壊先行型と判定されず、せん断補強が見送られた部材で生じた損傷の原因を分析し、この種の部材に対する補強対策を迅速に進める必要がある。

参考文献

1) 日本国有鉄道盛岡工事局：東北新幹線工事誌　有壁・盛岡間、1982
2) 土木学会：2003年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析、コンクリートライブラリー No.114、2004
3) 高橋良和・後藤浩之：2011年東北地方太平洋沖地震による第１中曽根高架橋の被害、第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2011
4) 秋山充良・高橋良和：2011年東北地方太平洋沖地震による鉄道高架橋の被害、第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2011

津波による橋梁被害

幸左　賢二
●九州工業大学

１．橋梁被害概要

東日本大震災においては300を超える橋梁が津波により流失や大規模洗掘の被害が発生している。表１に管理者ごとのＡランク損傷（使用不可能）橋梁を示す。国道9、県道14、鉄道橋梁101など合計300橋梁を超える橋梁で大きな被害が発生している。市町村道について、公式発表のデータはないが、グーグルなどの衛星写真により少なくとも200橋を超える大規模損傷の発生が確認されている。

ついで、被害部位（上部工、下部工、土工部）ごとの発生損傷度を著者らによって実施された2004年スマトラ沖地震の結果と対比する。図１はスマトラ島西海岸の26橋梁の被害部位である。図２は今回の津波による国管理の12橋梁の被害部位である。図１、２より上部工では多くのＡランク損傷が発生しているが、これらはすべて津波作用による桁流失によるものである。下部工では、桁流失が発生したものの一部に橋脚の流失も発生しているが、比率的には小さい。これに対して土工部には数多くのＡランクが発生しているが、これは橋台背面部の洗掘による被害である。以上のように10mを超える津波被害が発生した両地域における橋梁被害部位は、ほぼ共通しており、桁の流失と背面盛土洗掘による被害が支配的であると考えられる。

表１　大規模損傷橋梁数

Type of Bridge	Number of Bridges Washed Away
Railroad	101
National Road	9
Prefectural Road	14
City or Town Road	More than 200
Total Numbers	More than 324

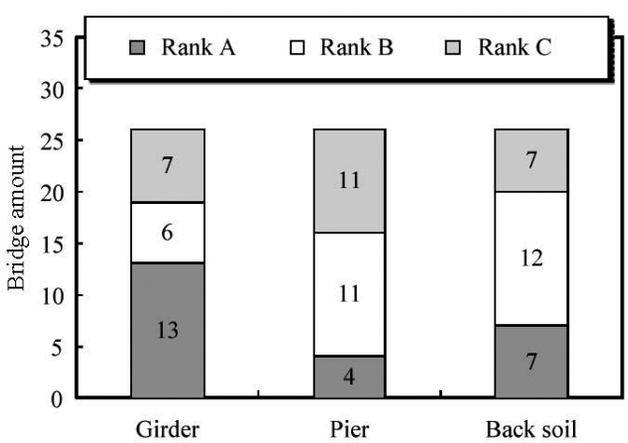


図１　スマトラ沖地震における橋梁損傷ランク

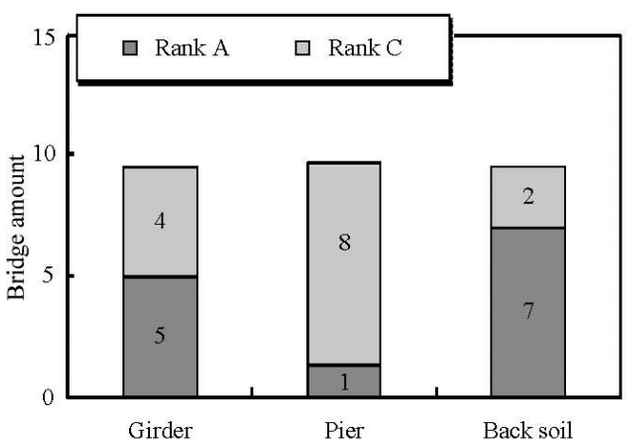


図２　東日本大震災における橋梁損傷ランク

２．津波高さ・津波速度

東日本大震災での津波は地震発生後30分程度の時間で到達している。海岸線より内陸部5km付近まで到達し、北上川では河口より40kmも遡上したと報告されている。気象庁の潮位観測所では広範囲な地域で高い津波が観測されている。例えば、宮古では8.5mを超える最も高い津波が、大船渡では8.0m以上、相馬では7.3m以上が観測されている[1)]。構造物に与える作用力を評価するためには、津波高さだけでなく津波速度を評価することが重要である。ここでは、南三陸町や仙台市内で観測された12個のデータを用いて流速を測定した[2)]。測定方法は、図３に示すように撮影された2地点をグーグルの位置図にプロットし、2地点間の距離を津波上のがれきが進むに要する時間で割ることによって求めている。12個所は南三陸町と仙台市内の河

川および陸上遡上地点である。図４に12地点の流速分布を示すが、最大で7.0m/s、平均で5.4m/sとなっており、各地点における速度の差異は比較的小さい。同様に10mを超える津波が観測されたバンダアチェ市の測定データでは2個所で5.0m/s程度の値が報告されており、ほぼ同様の値となっている。

３．歌津大橋による被害状況

代表例として南三陸町の国道45号の歌津大橋の損傷状況を以下に示す。図５、６に示すように、桁長14.4～40.7mの３種類の桁タイプから成っており、中央付近のS3～S10桁が流失している。桁流失に伴う桁の直角方向移動量は、中央部のS8で41m、S5～S7で28mと大きく、両サイドのS1、S2、S11、S12では桁移動は発生していない。また、S3～S4、S5～S7はPCケーブルで変位を制限する構造となっているが、図７に示すようにPCケーブルには損傷が見られず、流失しているが桁同士は一体の構造となっている。これに対してS8、S9、S10は移動制限のPCケーブルが破断するとともに、桁はいずれも仰向けに倒れている。以上のことから、湾中央部付近では特に大きな津波流速が発生し、これに伴い大きな移動が発生したと考えられる。一方、橋脚本体については、大きな損傷は認められなかったが, 図８に示すように桁移動を制限する鋼製ブラケットやコンクリート製せん断キーに大きな損傷が見られ

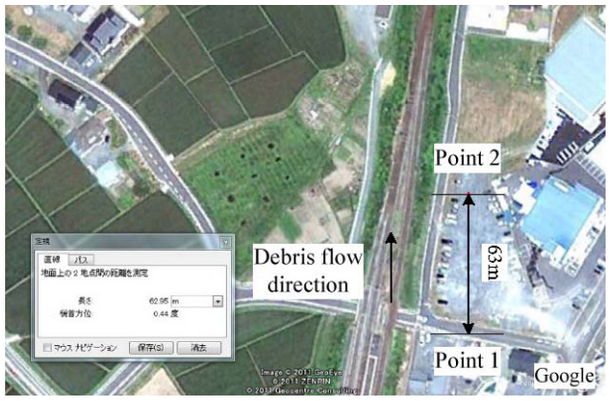


図３　地点5におけるがれきの移動距離

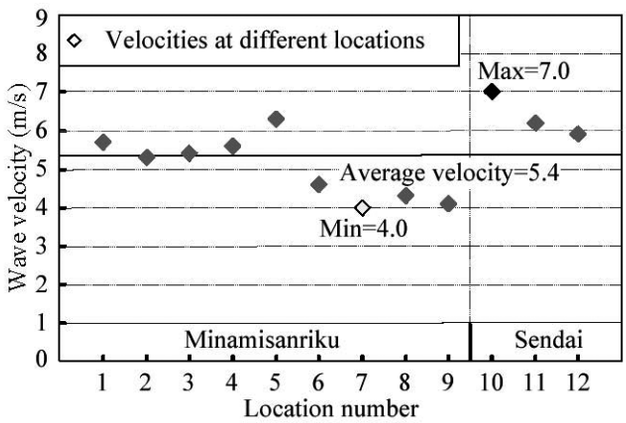


図４　津波流速算出結果

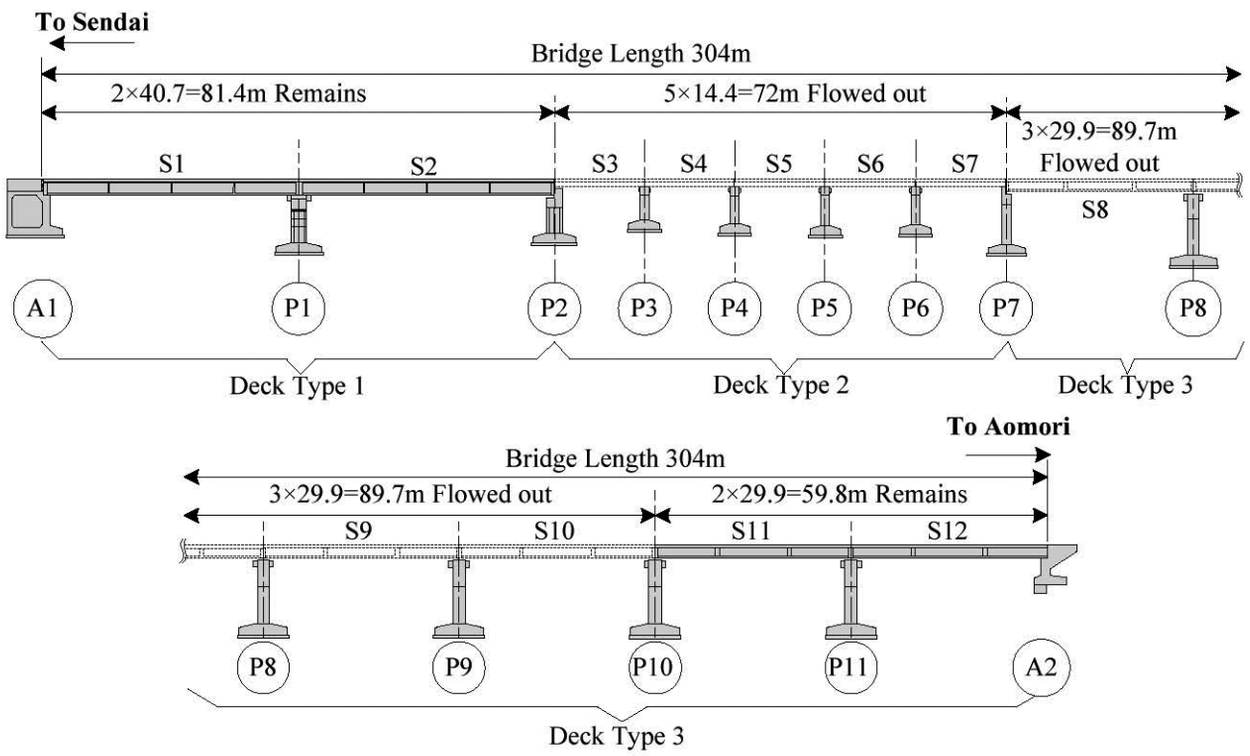


図５　歌津大橋側面図

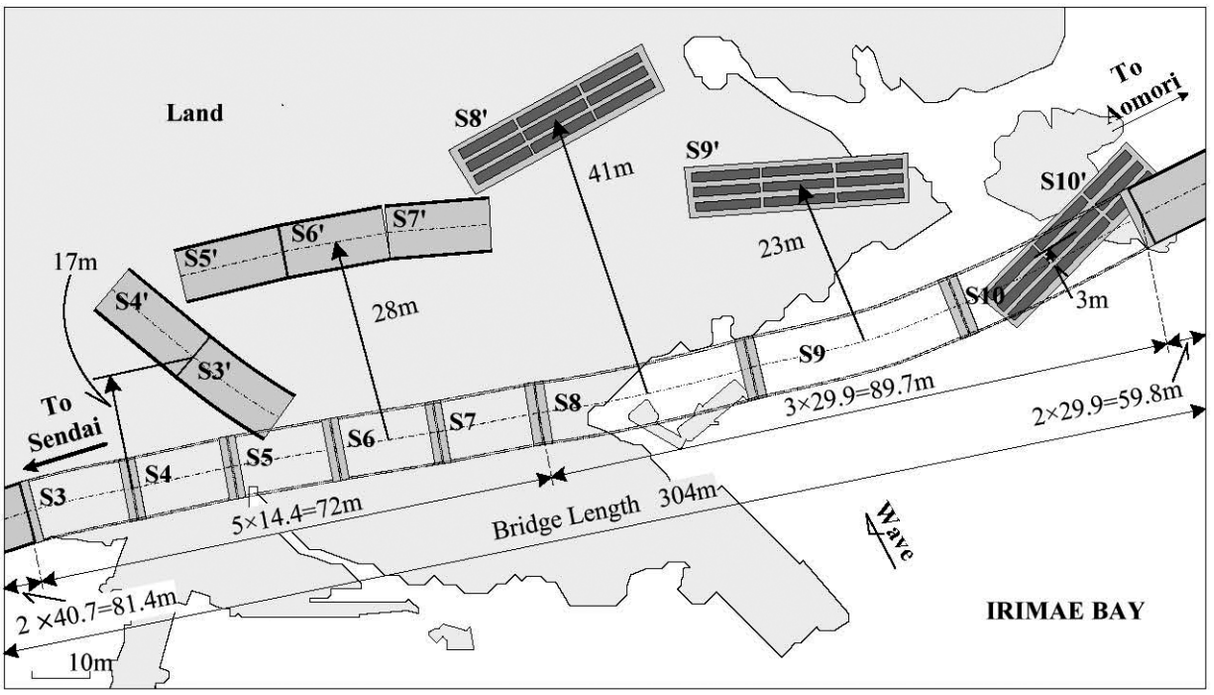


図６　歌津大橋損傷状況

るものが多かった。

４．簡易分析

ここでは、代表的道路橋梁について、抵抗力作用力比を求め、道路橋の桁損傷度との関係を示す。
評価式を以下に示す。

$$\beta = \frac{S}{F}$$

$$F = \frac{1}{2}\rho C_d V^2 A$$

$$S = \mu W$$

ここに、
β：桁抵抗力作用力比
F：桁に作用する力
S：桁の抵抗力

既往の実験値から、V=6m/s、μ=0.6と仮定して、代表的橋梁のβ値を求める。また、損傷度については、桁流失したものをA、桁移動などの中程度の損傷B、軽微な損傷をCとしている。

図９に対象橋梁のβ値およびスマトラ沖地震の分析により得られたβ値を示す。過去すでに報告されているように､スマトラ沖地震においては、β値と損傷度には相関性があり、損傷ランクAでβの平均値が0.8、損傷ランクBで1.9、損傷ランクCで2.2と損傷ランクA

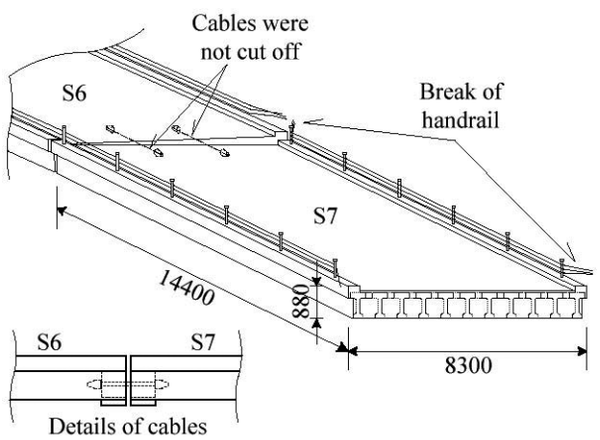


図７　S6,S7桁の損傷状況

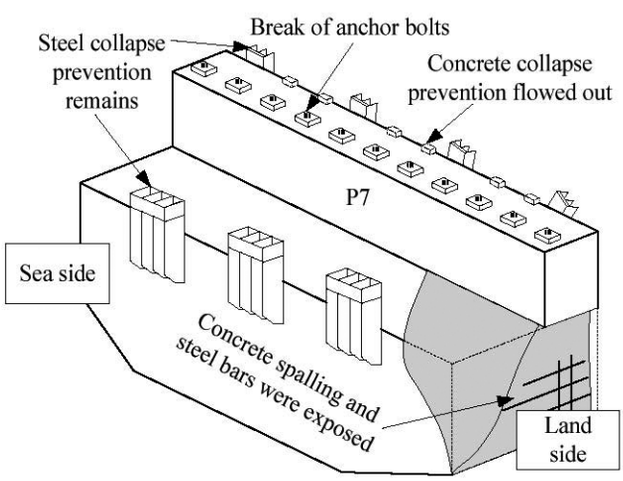
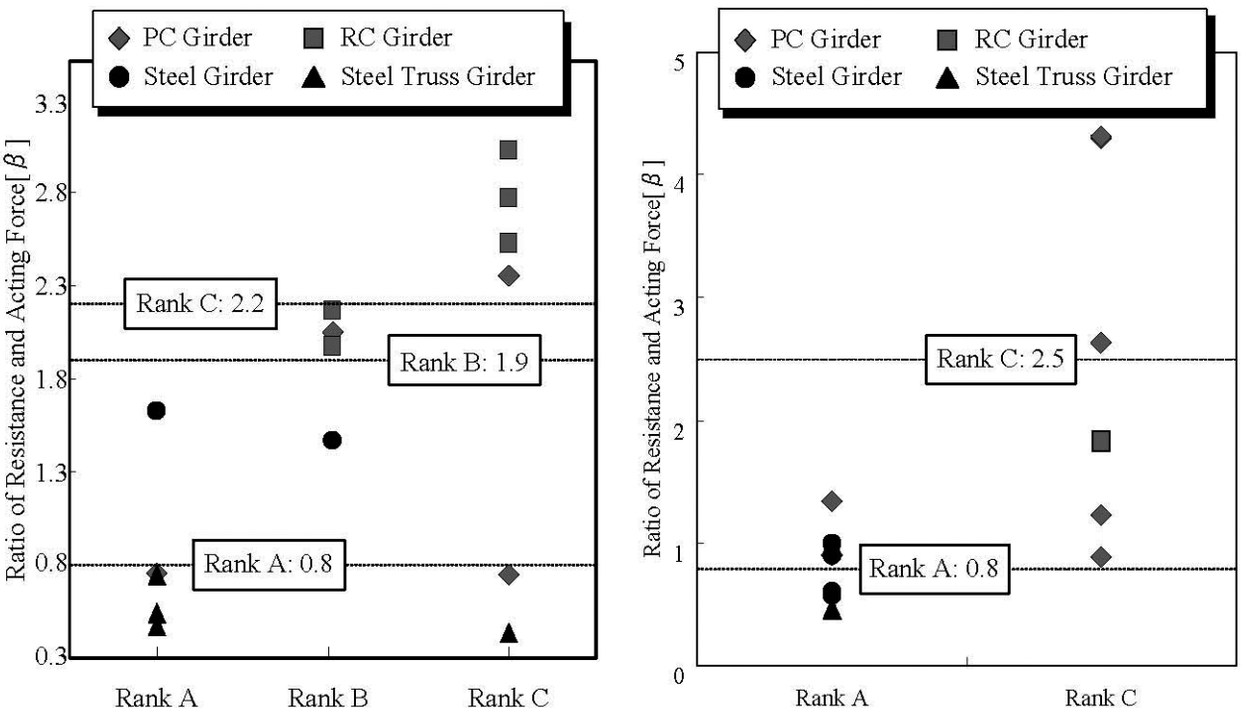


図８　P7橋脚の損傷状況



a.スマトラ沖地震　　b.東日本大震災

図９　損傷ランクとβ値の関係

とＣでは2.5倍もの差異が発生している。同様の手法で今回調査した代表的橋梁をプロットすると、損傷ランクＡ（桁流失）では1.2、損傷ランクＣ（桁移動なし）ではばらつきが大きいものの、平均値では3.9と約3倍の差異が発生しており、β値が損傷度を表す重要な指標であることが分かる。

５．まとめ

橋梁の損傷状況をスマトラ沖地震による被害状況と対比させ、概説を加えた。その結果、損傷部位、損傷度（桁作用力抵抗力比）には同様の傾向が得られ、10mを超える津波による橋梁被害には明確な共通性が認められた。今後さらに詳細な分析データを加えることによって、有効な対策工の提案に向けて検討する予定である。

参考文献

1) Japan Meteorological Agency (JMA): The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Quick Report #25), Strong 105 Reference Material 4 by the Subcommittee for Evaluation of Strong Ground Motion, the Earthquake Research Committee, 2011.

2) Li FU, Kenji KOSA, Hideki SHIMIZU and Tatsuo SASAKI, Damage Analysis of Utatsu Bridge Affected by Tsunami due to Great East Japan Earthquake, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2011. 7

3) 幸左賢二、二井伸一、庄司学、宮原健太：スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析、構造工学論文集 Vol.56 A, pp.454-463, 2010.3.

平成23年東北地方太平洋沖地震による港湾施設被害

菅野　高弘
●港湾空港技術研究所

１．はじめに

海と陸の境界に位置する港湾施設の被害について、調査時点においては、地震と津波の両者が作用した結果としての残留状態の被害を調査することになる。津波については岩手県と宮城県の県境を中心として北は宮古、南は相馬付近で特に高く10m以上の痕跡高となっている。三陸地方の海岸保全施設は、主に明治三陸津波(1896年)を既往最大として整備が進められていることが多いが、岩手県南部より南の地域では、約2倍近くの痕跡高が観測され、いわゆる「想定外」の津波が来襲したことになる。一方、地震被害については、地震規模が大きかったことから地震動の継続時間として数分から3分間程度作用した結果、施設に被害が発生している。本報告では、港湾施設被害の概要について、地震と津波の複合被害の観点から報告する。

２．地震による被害の概要

２－１．地震動観測記録の概要

東北地方太平洋沖地震では、港湾地域強震観測網により、全国30の港湾で合計70の強震記録が得られた。港湾の数より強震記録の数の方が多いのは、同一港湾内の複数箇所で記録が得られている場合や、同一箇所の地表と地中で記録が得られている場合があるためである。なお、観測された強震記録のディジタルデータはhttp://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htmで公開されている。

東北地方太平洋岸で得られた強震記録の加速度波形を図1 ～図3に示す。いずれの記録も非常に継続時間が長いことが特徴である。また、釜石から仙台周辺の港湾で特に顕著なのは、波形がふた山からなり、途中でいったん揺れが収まったかのように見えることである。また、小名浜港の地表では1400Galを越える非常に大きな最大加速度が観測された（図3）。この値は、今回の地震でK-NET（Kinoshita、1998）の築館観測点で観測された最大加速度2700Galには及ばないものの、港湾地域強震観測網が記録した最大加速度としては過去最大である。小名浜港の地表の波形で1400Galを記録している部分の前後を拡大すると、スパイク状のピークとなっており、密な砂地盤のサイクリックモビリティー（例えば井合他[1)]）を示した可能性が高い。

これらの記録のうち、地表で得られたもののフーリエスペクトルを図4 ～図6に示す。これらの図では、過去に港湾施設に大きな被害をもたらした地震動の代表例として、1995年兵庫県南部地震の際、神戸港ポー

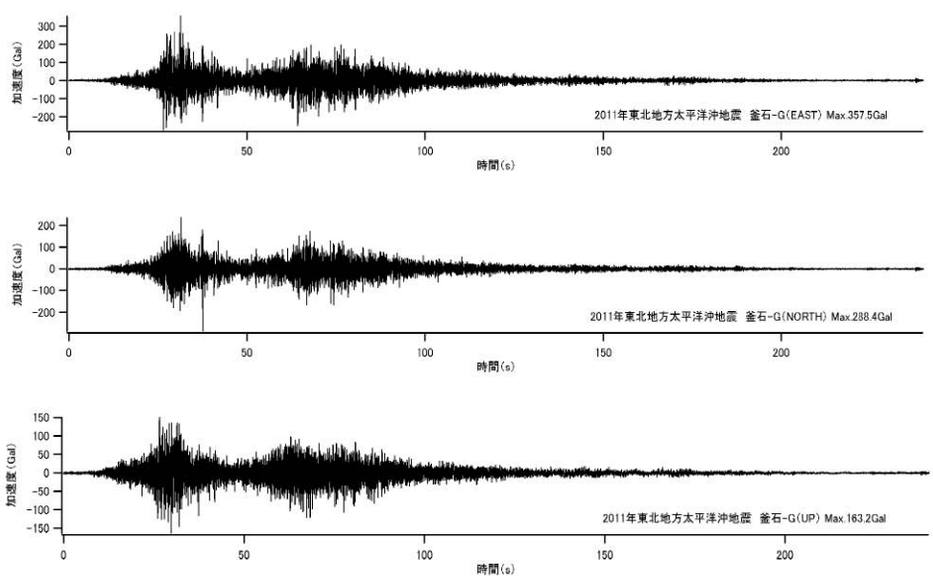


図１　釜石港の地表（釜石-G）において観測された加速度波形

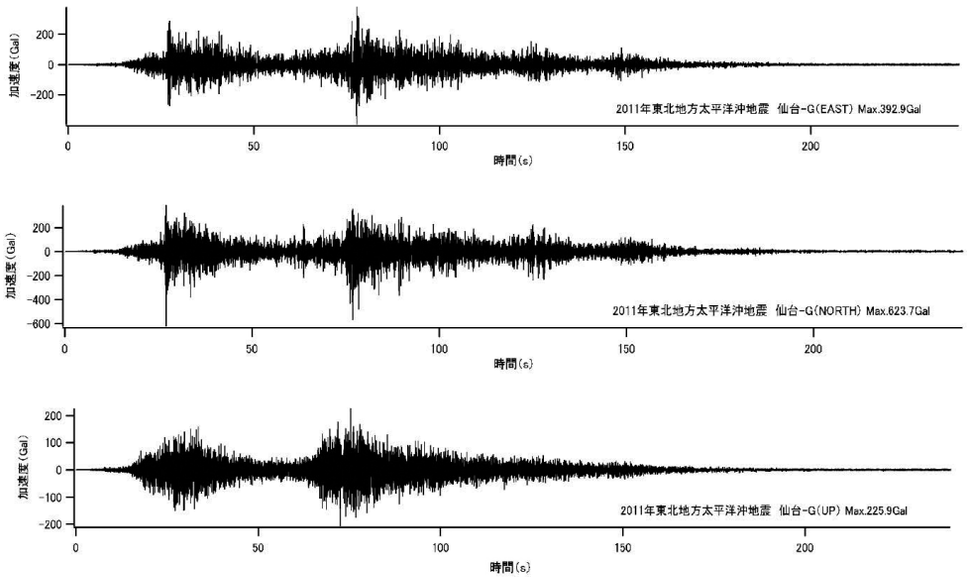


図２　仙台塩釜港（仙台港区）の地表（仙台-G）において観測された加速度波形

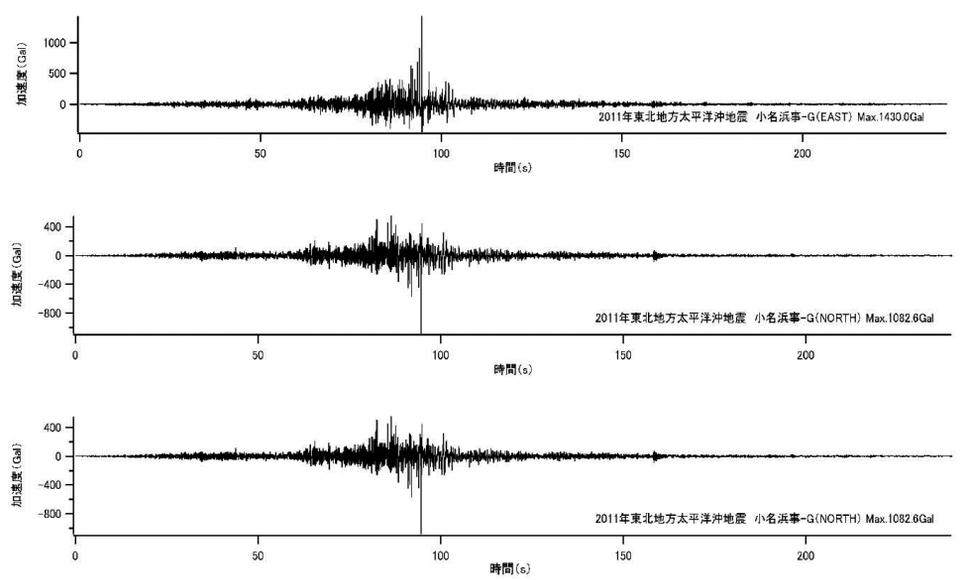


図３　小名浜港の地表（小名浜事-G）において観測された加速度波形

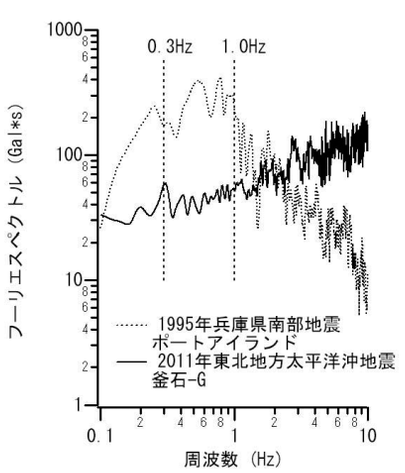


図４　釜石港のフーリエスペクトル

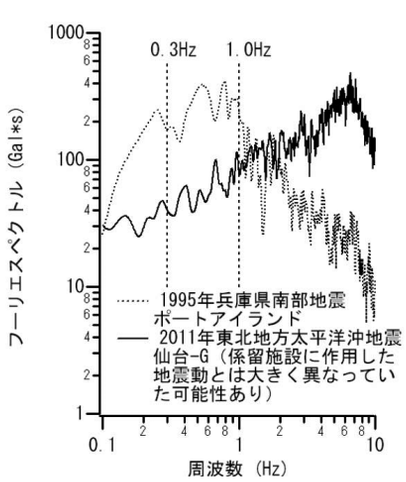


図５　仙台港のフーリエスペクトル

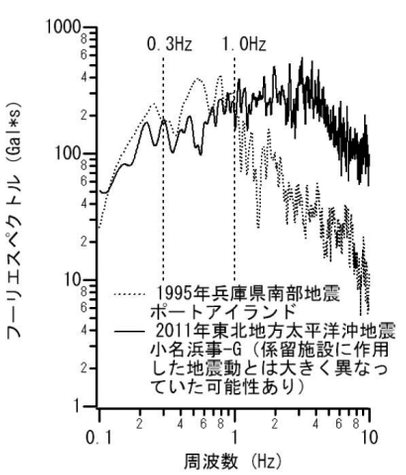


図６　小名浜港のフーリエスペクトル

トアイランドの地表で観測された地震動のフーリエスペクトルとの比較を行っている。これらのフーリエスペクトルは、水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウインドウを適用したものである。

一般的に港湾構造物に対しては0.3-1Hz程度の周波数成分が最も影響を及ぼしやすいと考えられる（例えば野津他[2)]）。フーリエスペクトルから、今回の記録は港湾構造物に対して影響の大きい周波数成分が少なく、小名浜事-Gの記録は、最大加速度がポートアイランドの記録（341Gal）と比較して大きかったが、港湾構造物に対して影響の大きい周波数成分はポートアイランドの記録より少なかったと言える。ただし、地震動はサイト特性の影響を大きく受け、狭い範囲でも大きく変化することには留意が必要である。

２－２．地震による被害の概要[3)]

港湾施設の主要な施設の一つとして、岸壁が挙げられる。岸壁は海と陸の境界を形成し、対象船舶に応じて設計水深が異なるが、船舶の接岸のため直立壁であることが特徴と言える。このため、構造体への作用としては、海側から水圧、波圧が作用する。特に潮位変動に伴う水圧変化が約12時間周期で作用する。一方、陸側からは地下水位に起因する水圧、土圧が作用する。地下水位は概ね潮位変動と調和的に変化するが、地盤の透水性の関係から位相がずれるために構造体への作用としては陸側と海側の水位差に起因する水圧が作用することになる。

既往の地震による被害（津波が発生しなかった地震、津波高が比較的小さかった地震）の特徴としては、岸壁のはらみ出し、背後地盤の沈下が挙げられる。はらみ出しについては、岸壁端部の変位量が岸壁中央部と比較して小さく、緩やかな弧を描くことが多い。はらみ出し量と調和的に背後地盤の沈下量が大きくなる傾向にある。同一の断面構造を有することから、背後地盤や基礎地盤の土質が均一であればこの様な形態となることが多い。

(1)青森県・岩手県の港湾施設被害

八戸港、久慈港においては、地震動による被害は確認されず、津波による漂流物が港湾荷役施設（ガントリークレーン、アンローダー等）に損傷を与えたものが確認された。釜石港、大船渡港においても、津波被害は大きなものであったが、地震動に起因する被害としては、ケーソン背後において数センチ程度の段差が発生したものが挙げられる程度である。過去に観測された1968年十勝沖地震や1994年三陸はるか沖地震などの記録と比較して、本地震は小さいものであった。

図７　大手ふ頭
荷捌ヤード舗装の損傷

(2)宮城県・福島県・茨城県の港湾施設被害

石巻港においては、津波被害が顕著であり地震動による被害を特定することは困難である。岸壁法線の直線性が保たれている施設が多いことから大規模な液状化が発生した可能性は低いと考えられるが、一部荷捌きヤード部で沈下・舗装の損傷・舗装のめくれが確認された。舗装が健全な部分では大きな変状は確認されないことから、地震前から舗装に何らかの損傷が有った部分が、津波によって舗装版がめくれ上がり、路盤・路床部が洗掘され損傷したものと考えられる。

仙台塩釜港仙台港区においても、津波被害が顕著である。各岸壁の法線の直線性は概ね保たれており、エプロン、荷捌ヤード舗装部の損傷は余り無く平坦性が保たれていた。一般的に液状化現象が発生すると、構造の接合面や舗装面の弱点から噴砂が発生し、舗装面が不均一に沈下することが多いことから、大規模な液状化が発生したとは考え難い。但し、近隣の旧海岸線付近において、余震時に液状化が発生した噴砂痕が確認されている。仙台港は、掘込港湾であり、海浜部の緩い砂層を除くと砂丘部は比較的良好であり密な砂層で構成されている。このため、地震による被害は比較的軽微だったものと考えられる。

高砂ふ頭は鋼管矢板式岸壁で、西側の延長270mの1号岸壁（-12m）と東側の延長330mの2号岸壁（-14m）からなる。2号岸壁は耐震強化岸壁である。耐震強化岸壁には求められる要求性能から2種類有り、「緊急物資輸送」に対応する岸壁（高松ふ頭に整備されており、地震直後から供用が可能であった。）と、「幹線貨物対応」（コンテナ物流の長期間の停止に伴う経済損失を軽減する目的で設置）であり、2号岸壁は後者に相当し、「修復性」が求められている施設である。

2号岸壁ではバース延長の中央付近で概ね20cm程度のはらみ出しが見られた。クレーンのレールはゆるや

図８　高砂ふ頭海側レール部

図９　高砂ふ頭陸側レール部

かに蛇行しており、海側レール基礎が幾分海側に傾斜していた。海側レールと矢板上部工間において図8のような沈下、空洞が確認された。海・陸レール間ではエプロン舗装版が40 ～ 70cm程度沈下（図9）しており、エプロン舗装版下に空洞が認められた。舗装版が70cm沈下した地点の空洞部分の地盤高さは、舗装版上面から130cm程度であった。空洞の平面的な広がりは確認できなかったが、海側レールから陸側5mの地点においても同程度の深さの空洞が確認された。東端偶角部では、地盤が2m以上沈下（または土砂流出）しており、潮位変動に伴い土砂の流失が継続的に続いている状態であった。

岸壁背後のマーシャリングヤードについては、散乱するコンテナや、津波によると思われる堆積物のために、舗装面の変状を詳細に調べることが困難であった。２号岸壁は整備前に船溜まりとして供用されていた部分であり、仙台港区の他の岸壁が掘込港湾（１号岸壁も含む）であるのに対して、岩ズリで埋立てられており、地震時の揺すり込み沈下や粒子破砕について調査・研究・検証が必要と考えられる。1号岸壁では、クレーンレール間の地盤が10cm程度沈下していたが、ほぼ健全であり、砂丘部を掘削していることが、2号岸壁との被災程度の差として現れたものと考えられる。2号岸壁の設計は、性能設計体系の導入前の基準で設計されており、液状化し難い岩ズリで埋め立てを行うことで耐震性の確保を図ったものであり、既往地震による矢板式岸壁の被災形態とは大きく異なり、矢板等の構造体に顕著な変状が見られなかった。しかし、性能設計の観点から当該岸壁の被災を検証すると、岸壁としての機能を回復するためには相当期間の復旧工事を要することから、同様の施設を新基準に基づき設計する際には、液状化の有無に加えて、埋立材（岩ズリ）の地震時挙動を十分考慮する必要が示唆された。

当該岸壁は、矢板等の構造体に大きな変状が無いことから、大規模な復旧工事を必要とはならず数カ月で復旧、供用再開の見込みである。

相馬港は、福島県相馬市に位置する重要港湾のひとつであり、福島県北部、宮城県南部および山形県南部の物流を担っているとともに、相馬共同火力発電所（石炭火力発電所）が立地したエネルギー港湾の位置付けにある。

1号ふ頭において、鋼矢板岸壁(-5.5m)の法線の直線性は確保されているが、図10に示すように隅各部において矢板継手が破損し開口しており、土砂の流失、エプロン舗装版に亀裂、沈下がみられる。一般的に地震のみによる被害の場合は、潮位変動に伴う土砂の吸い出し現象によって、背後のエプロン部に損傷・沈下が発生するが、津波作用も大きく影響しているものと考えられる。破損範囲は隅角部から28m×17mの三角形の形状を示しており、陥没量は1.7m程度である。地震時に裏埋土に液状化が生じ開口した可能性が大きいが、その後の津波の作用により洗掘が生じたため大規模な変状となったものと想定される。鋼矢板岸壁(-7.5m)の全長390mのうち、約140m区間で緩やかに矢板がはらみ出しているが、一カ所だけで矢板継手が破損しており開口（図11）している。開口部より裏埋土が流失しており、幅30m×15mの範囲で舗装版が破損、最大2.8m程度陥没している。当該地点においてタイ材（タイワイヤー）の破断が確認されているが、他の区間250mは概ね直線性を保ったまま若干はらみ出している。地震時に液状化が発生し、舗装面に損傷が発生したことが想定されるが、これに津波の作用が加わり被害程度を大きくしたものと考えられる。特に破損地点背後にサイロ２棟が建設されており、サイロ間の位置で破損していることから、津波の引波時に当該地点の流速が大きくなり、洗掘されるとともに、水圧差・波圧によりタイ材が破断した可能性も否定できない。2号ふ頭においても同様の被害（図12）が発生している。

図10　矢板岸壁（1号ふ頭）
隅角部の破損状況

図11　矢板岸壁（１号ふ頭）
直線部分の破損状況

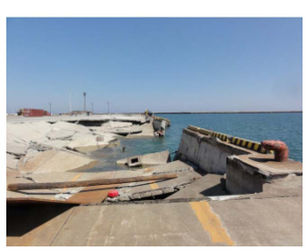


図12　矢板岸壁（2号ふ頭）の破損状況

3号埠頭は、現在整備中であり、津波作用によりパラペットや上部工が転倒・破損・陸側に移動している。また、偶角部のケーソン１函が海中に移動（図13）している。八戸港等で観測されたように、津波が当該構造物周辺で大きく流れを変えることから基礎部（基礎地盤および捨石）が洗掘を受け、不安定な状態になったものと想定され、引き波時に大きく移動したものと考えられる。

図13　隅角部ケーソンの倒壊 図14 アンローダーの被災状況

5号ふ頭は、相馬共同火力発電所の専用施設であり、十分な調査は出来なかったが、地震時に石炭運搬船が2隻接岸しており１隻が荷役中であった。図14の右側２機の連続式アンローダーが石炭運搬船の船倉内から石炭を揚炭中であった。他の１隻は接岸中では有ったが、荷役作業は実施していなかった。強震動に伴い荷役機械オペレータが避難、津波警報発令に伴い石炭運搬船が離岸作業に着手したが、水位上昇に伴い石炭運搬船が浮き上がったため、右側2機のアンローダーの揚炭部が引きちぎられ船倉内に落下、アンローダー本体は陸側に倒れ込み、本来水平であったブームが鉛直になった状態となっている。揚炭部を船倉に積んだまま、当該船舶は沖合に避難できたとのことである。接岸中の石炭運搬船は陸側に流されて座礁、船体が破損している。この様な事例は、茨城県内の港湾においても発生している。

小名浜港は福島県いわき市小名浜に位置する、福島県最大の港湾であり、物流とともに港湾施設のリニューアルによる観光拠点の位置付けにもある。3号ふ頭の矢板式岸壁(-10m)は石炭用アンローダーが設置されている。図15に示すように岸壁法線が最大50cm程度はらみ出しており、海側レールと陸側レール間のエプロン舗装版が30cm程度沈下している。陸側レール背後において1.0m程度の段差が発生している。地震時に

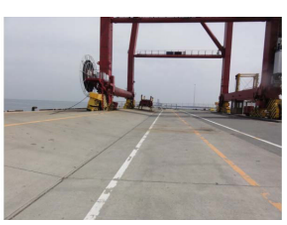


図15　3号ふ頭の段差　　図16　大剣ふ頭の変状

液状化が発生したことにより、岸壁が変位し、過剰間隙水圧の消散による沈下が発生したものと考えられる。ふ頭先端の隅角部は津波による洗掘および潮位変動による吸出しにより大きく陥没している。大剣ふ頭のケーソン式岸壁(-10m) コンテナバースでは、法線の直線性は概ね保たれており、最大20cm程度はらみ出している。海側レール基礎とエプロンの境界部に亀裂

図17　第2ふ頭重力式岸壁(-7.5m)隅角部　　図18　第4ふ頭重力式岸壁(-10m)隅角部

図19　第4ふ頭重力式岸壁(-12m)背後　　図20　北埠頭重力式岸壁(-12m)レールの湾曲

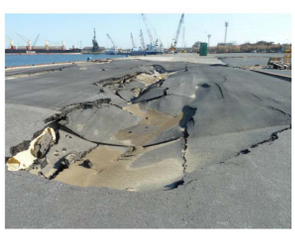


図21　南公共埠頭地区岸壁(-7.5m)

が認められ、エプロン舗装版（無筋コンクリート）がケーソン肩を中心として背後が沈下したため、境界部で浮き上がりが生じている。陸側レールが支持層に根入れされた直杭基礎であることから、エプロン海側・陸側に段差が生じている。コンテナクレーンの海側脚が変形（図16)していることからレールスパンが拡大していると考えられる。最近のエプロン舗装（無筋コンクリート）は強度が高いようであり、図16のように舗装版の目地部分で変形はするが、版自体の自重には耐えることが出来ているようで大きく破損することが無い。しかし、エプロン部舗装が無筋コンクリートである場合、地震による壁体の海側への変位、裏埋土の沈下（液状化や揺すり込み沈下など）に伴う空洞について、空洞調査を実施することが望ましい。

茨城県内の港湾においても、相馬港・小名浜港と同様の被害形態となっており、例えば、茨城港日立港区のケーソン式岸壁の偶角部が図17、18に示すように大きく損傷を受けている。これらの原因も、地震時に若干海側へ移動したケーソンに対して、港内に侵入した津波の強い流れによって基礎部（捨石マウンドおよび基礎地盤）が洗掘され不安定になったためにケーソン

が転倒したものと考えられる。

図19は、ケーソン上部と背後地盤間にまたがって設置されているエプロン舗装版の状況である、小名浜港と同様の被害形態となっている。

茨城港常陸那珂港区においては、図20のようにケーソン式岸壁に設置されたコンテナクレーンレールがケーソンブロック毎の変位差により屈曲した。ケーソン式岸壁のはらみ出し量の出入りとして見ると、10cm程度の凸凹であり、軽微な被害と判断できコンテナクレーンを用いない緊急物資輸送用の船舶の接岸・荷役であれば当該岸壁は供用可能である。一方、コンテナクレーンを用いた荷役を実施することは難しい。この様に、各施設に求められる要求性能の観点から、今回の被害の見直しが必要と考えられる。

鹿島港は、仙台港と同様に掘込港湾であり、地震による被害は比較的軽微であったことから、エプロン部に若干のクラックが生じる程度であった。但し、図21に示すように、南公共埠頭地区の一部で大きな変状が発生している。変状箇所は、旧「神の池」を埋立して建設されていることから、当該地点地下の腐植土層・粘土層の上に埋立を行った影響により、大規模な陥没が発生したものと考えられる。

3．おわりに

本報告は、今回の地震･津波災害の調査結果の速報である。現地調査の結果から、今後の研究課題が示唆されたものと考えている。住民の命を守るため避難することは津波防災の基本であり、迅速に確実に避難手段を提供するためのさらなる調査研究が必要と考えている。また、地震の発生を防止することが困難であることから、迅速な復旧復興を考えた防災対策が重要と考えられる。地震被害について着目してみると、青森県・岩手県の港湾においては、地震動の特性からも港湾施設が被害を受け易い周波数帯（0.3Hz ～ 1Hz程度）と比較して比較的短周期成分が卓越したため、地震動による被害程度は小さかったものと考えられる。一方、宮城県・福島県・茨城県の港湾施設では液状化現象の発生が確認されており、施設被害が大きかった。また、過去の地震動のみによる被害形態と比較して、異なった被害形態が散見され、地震動が作用した後に津波が作用した複合的な被害が確認されており、土砂等の洗掘や流失に伴う施設の不安定化、さらに、津波の波圧や圧力差など流体に起因する被害が発生したものと想定される。地震と津波の複合被害については今後の研究課題と考えられる。

従来、裏埋め土が液状化すると岸壁の被害が甚大になるとの経験から、液状化が懸念される場合に、「液状化する」「液状化しない」という判定を実施し、原則的に裏埋土等の液状化対策を実施してきた。このような対策の効果により多くの施設は、構造部材の破壊や大規模な変状状態には至らず、構造の安定性は確保できたと判断される。一方、今回の地震動による被害の事例をみると、「液状化しない」材料として裏込め等に用いられた岩ズリ（岩砕）が圧縮し、沈下を生じ、結果として段差やエプロン部に大規模な空洞が生じるなどの事例がみられた。このように、施設の要求性能を確保できない可能性があるという事例が確認された。今後、構造物の性能確保の観点から既存施設の耐震性を再評価する必要性が示唆されたものと考えられる。構造構成部材（地盤材料を含む）の動的特性の把握に基づく耐震性能照査手法の再検証・高度化も必要と考えられる。

仙台塩釜港仙台港区、鹿島港には、旧海岸線付近に形成された砂丘部を掘削して建設された掘込部の港湾施設がある。これに隣接した埋立部の港湾施設や、一部沼を埋立てた港湾施設では、掘込部と比較すると被害程度が大きかった。施設整備前の微地形情報、地盤情報や地震動のサイト増幅特性を積極的に評価することにより、耐震性の高い新規施設整備や既存施設の耐震性の再評価に活用できるものと考えられまた、本報告が港湾施設被害であることから触れなかったが、仙台空港においては、耐震対策の一環として液状化対策を施工中であった。滑走路部分・誘導路部分を横断する地下道等の周辺地盤に液状化の可能性があるため、改良工事が進められおり、工事実施済みの滑走路部分で効果が確認され、3月16日に大型輸送機による緊急物資輸送が開始された。事前に耐震性を評価し対策を講じることの重要性が再確認された事例と考えられる。

参考文献

1) Iai, S., T. Morita, T. Kameoka, Y. Matsunaga and K. Abiko: Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-oki earthquake, Soils and Foundations, Vol.35, No.1, 1995, pp.115-131.
2) 野津厚・井合進・一井康二・沼田淳紀：ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の周波数成分、レベル2地震動に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト、2000年8月、pp.311-318.
3) 高橋重雄他：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No.1231、2011年、200p.

「防災教育」と「3.11での成果」

田中　礼治
●仙台市八木山防災連絡会会長、東北工業大学客員教授

1．本報の内容

本報は次の2項目について具体的に事例を述べたものである。

① 防災教育の必要性
② 3月11日での成果

2．防災教育の必要性

防災教育のないところに防災活動の成果は存在しないというのが結論である。ここでは、具体的な防災教育の事例として、仙台市立八木山中学校（以下八木山中学校）の事例を示しておく。八木山中学校の防災教育は八木山防災連絡会と連携して行っている。

2.1　八木山防災連絡会について

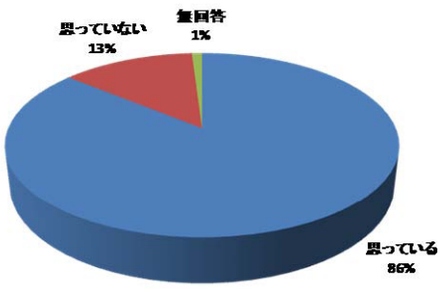
八木山地区は仙台市南西部の丘陵地にある住宅地である。人口がほぼ1万2千人である。八木山防災連絡会は八木山地区の防災を目的として2006年に設立された団体である。八木山防災連絡会では地域防災は地域の全員が協力し合って活動しないと成り立たないと考えている。地域の全員とは、大人は勿論だが若者も入る。中学生は立派な地域住民の一員なので、八木山防災連絡会には八木山中学校も参加している。

2.2　八木山中学校の生徒の防災意識調査

地域住民と若者が共同で防災活動を行う場合、若者が防災についてどのような意識を持っているのかを知っておくことは大切なことである。そこで、八木山中学校の生徒の防災意識に関してアンケート調査を行った。アンケート結果から分かるように、八木山中学校の生徒は防災意識が高く、かつ機会があったら地域防災活動に参加してもよいという意識を保有していることが分かった。

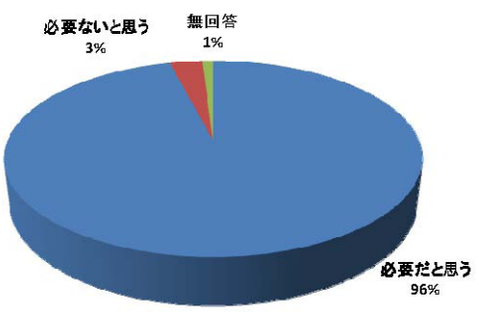
［設問1］あなたは、地域住民の1人だと思っていますか。

地域住民の1人だと思っている生徒が86％いることが分かった。86％の生徒が地域住民の１人であると思っていることは、若者と一緒に地域防災活動が可能であることを示していると考えてよい。



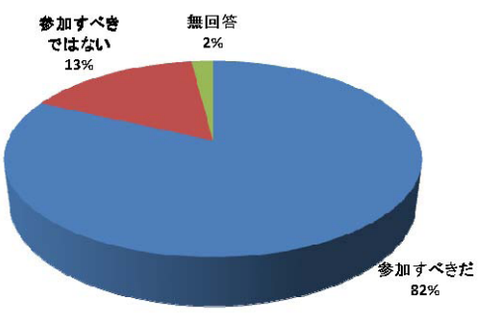
［設問2］あなたは、地震対策が必要だと思いますか。

生徒の96％が必要だと思っていることが分かった。生徒たちの地震に対する意識の高さがわかる。



［設問3］地域の防災活動に若者も参加すべきだと思いますか。

生徒の82％が若者も参加すべきだと考えていることが分かった。若者は地域防災活動に参加してもよいと考えていることがわかる。即ち、地域防災活動に若者の参加が十分期待できると考えられる。



2.3　八木山中学校での防災教育

アンケート調査結果から考えて八木山中学校の生徒には十分地域防災活動に参加してもらえるものと考えた。そこで、中学校と相談し、防災教育を行うことにした。防災教育の目的は、次の2項目である。

①　自分の命を守る防災教育
②　助け合う心を育成する防災教育

a)　自分の命を守る防災教育

自分の命を守る防災教育としては「木造住宅の耐震診断授業」を行うこととした。木造住宅の耐震診断授業と自分の命を守る防災教育の関係は次のようである。

1995年の阪神大震災では木造住宅の倒壊により多くの方々が亡くなられたことはデータとして残っており、中学生は社会、理科などの教科でも習う。木造住宅を通して、地震時に自分の命を守ることの重要性を教えることにした。

木造住宅の耐震診断授業

木造住宅の耐震診断授業の内容は次の3段階により構成されている。

①導入　　②展開　　③まとめ

「導入」では、地震がなぜ発生するのか、そのメカニズムを教える。次に地震によってなぜ様々な被害が発生するのかを教える。また木造住宅が何故地震によって倒壊するのかなど、地震による木造住宅の被害について学習する。またそれらの被害によって生命・財産を失うことを示すと同時に、自分の生命・財産を自分で守ることの重要性を教える。さらに、木造住宅の地震に対する強さを耐震診断をやることによって知ることができること、その木造住宅の耐震診断を学ぶことによって「地震に強い安全安心なまちづくり」の世代継続をしていかなければならないことなどを教える。

「展開」では、木造住宅の耐震診断のやり方を学習する。木造住宅の具体的な例を示し、その例に示された木造住宅について耐震診断を行い、生徒全員に均一な学習ができるように心掛ける。

「まとめ」では、耐震診断の授業内容について再確認し、耐震診断を用いて地震に強い木造住宅を造ることができることを教える。また、学校で学んだ知識を地域防災に役立てられること、役立てて欲しいことを教える。授業状況を写真1に示した。授業を行う講師は八木山防災連絡会ハウスドクター並びに仙台市太白区職員である。

写真１　授業状況

b)　助け合う心を育成する防災教育

助け合う心を育成する防災教育としては「地域住民とのコミュニケーションづくりのための授業」を行うことにした。地域住民とのコミュニケーションづくりのための授業と助け合う心を育成する防災教育の関係は次のようである。若者が地域防災活動に参加しようとすれば、当然のこととして地域の方々と会話をし、コミュニケーションをとる必要がある。そのためには若者に地域住民とのコミュニケーションの取り方を教えておく必要がある。地域住民とのコミュニケーションづくりのための授業はそのためのものである。

助け合うということは防災にとって大切なことである。助け合うには、中学生同士が助け合うということもあるが、地域の方々と助け合うことも重要である。地域の方々と助け合うためには地域住民とのコミュニケーションが欠かせない。自分の命を守ることを目標にした「木造住宅の耐震診断授業」だけでは、地域住民との防災コミュニケーションづくりには不足していると思われるので、「地域住民とのコミュニケーションづくりの授業」を行うことにした。この授業は学校で行う授業（3回）および八木山防災連絡会の方々との防災懇談会の実施の2つから構成されている。授業は10人程度の中学生を対象に行っている。その理由は何かが起こった時には意欲のある生徒が中心になって他の生徒に呼びかけて十分活動できるのではないかと考えているためである。学校での授業は放課後に行った。授業の内容は表1の通りである。また、写真2、写真3には防災連絡会の方々との防災懇談会の状況を示した。この授業の指導は八木山防災連絡会に参加している東北大学教育学部の谷口和也准教授が行った。

表１　防災授業の全体構成

回	授業内容
第１回	本ミッションの説明 ディスカッション「ちがいのちがい」
第２回	ロール・プレイ・ゲーム「避難所運営組織をつくろう」 三極ウェッビング「援助の広がり」
宿　題	地図をつくろう「車椅子の眼から」「お年寄りの眼から」「猫の眼から」 「中学生の眼から」
中間報告	地図づくりの中間報告会
第３回	ディスカッション「ぼくたちの防災アジェンダ」
防災 談話会	八木山防災連絡会の方々と中学生の防災に関する談話会を開催

写真２　中学生と地域の方々との防災懇談会(1)

写真３　中学生と地域の方々との防災懇談会(2)

３．3月11日での成果

3月11日の東日本大震災では、八木山地区も被害を受けた。避難者も多数出た。写真4に八木山地区避難所の1例を示す。

写真４　八木山地区避難所の一例

八木山中学校で行った防災教育は次のような成果を発揮したと考えている。

①　自分の命を守る防災教育

授業を受けた中学生には死者並びに大きな怪我人は出なかった。防災教育の効果があったと考えている。

②　助け合う心を育成する防災教育

避難所が開設されそこに救援物資が集まったものの、多くの高齢者が不自由な避難所暮らしを避け、自宅で過ごすこととなった。しかし、ライフラインがストップした中では、高齢者にとって給水車から水を運ぶのも一大事であった。当初、目立ったボランティア活動を行っていなかった中学生であるが、3月21日、翌日の卒業式を目の前にして学校清掃のボランティアを、自主的に「中学生同士のネットワーク」に乗せて募集をかけたところ、写真5に示すように300名を超える人数がボランティアとして集合した。その中で、地域のお年寄りへのボランティアを再度募ったところ、100名近くの中学生が登録した。この中学生たちは、地域の町内会役員や民生委員と一緒に、高齢者への物資運びのボランティアとして、地域のために尽くすこととなった。その中心となったのが、「地域住民とのコミュニケーションづくりのための授業」を受けた生徒であった。このようなことから考えて、助け合う心を育成する防災教育は十分成果を発揮したものと考えている。

写真５　ボランティアを希望して自主的に集まった中学生

４．まとめ

仙台市立八木山中学校で行っていた防災教育は3月11日の東日本大震災において大きな成果を上げたのでその実績を報告した。

今回の八木山中学校の防災教育から、これまであまり明瞭でなかった次の2項目が明確になったことを考えている。

①防災教育を受けた中学生は地域の大人がしっかり指導すれば中学生は真剣に災害活動に参加し、活動することが分かった。このことは、地域の大人の指導力が問われていることを意味しており、中学生と共同で活動したいと思ったら、大人も真剣に活動する必要がある。

②中学生が地域での災害活動を行う場合、中学校の指示では参加できないことが分かった。理由は地域の防災活動で生徒に何かが起こった場合、学校で責任が取れないことによる。それ故、中学生が地域の災害活動に参加する場合には保護者の責任で参加してもらうことになる。その場合、地域の防災組織がしっかりとしていないと保護者の信頼を得られず、中学生は参加しないという結果になる。そうならないよう自主防災組織などの地域の防災組織はしっかりとした体制を組み、日常から地域の方々の信頼を得るようにしておく必要がある。中学生が災害活動に参加することについて保護者の賛同が得られるかが心配だと考えている方が多いのではないかと思うが、アンケート調査によると90％以上の保護者は中学生が災害活動に参加することについて賛同していることを申し添えておく。

首都直下地震時における帰宅行動と帰宅困難

大佛　俊泰
●東京工業大学

1．はじめに

昨今、首都圏では帰宅困難者問題が大きな関心を集めている。事実、東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）の発生直後には、首都圏の鉄道網は完全に麻痺し、特に、都心部に滞留していた多くの人々が帰宅困難な状況に陥った。

帰宅困難者問題については、中林[1),2)]が古くからその重要性に着目し、先駆的な研究を試みている。東京都は、この研究をベースとして、発災時に滞留している地点から自宅までの帰宅距離（直線距離）を用いて帰宅困難者数の推計を行っている[3)]。しかし、大地震発生時における人々の具体的な帰宅行動は、帰宅しようとする意思（帰宅意思）に大きく依存していると思われる。さらに、この帰宅意思は、帰宅距離だけでなく、発災時刻や人々の属性、同居家族の安否情報にも大きく依存している可能性がある[4)]。また、仮に、強い帰宅意思を持っていても、実際に帰宅できるか否かは、年齢や性別によって異なる体力・運動能力に依存しているとも考えられる。

従来までは、膨大な数に及ぶ帰宅困難者の量そのものに関心が寄せられ、帰宅途中で直面する可能性のある問題や危険性については、十分に議論されてこなかった。本稿では、徒歩で自宅に向かう都市内滞留者の帰宅行動をシミュレーションモデルにより記述し、首都直下地震時における人々の帰宅行動についての基礎的な考察を試みる。具体的には、まず、大地震発生当日に都市内滞留者が自宅に向かおうとする確率（帰宅意思率）を記述する「帰宅意思モデル」について述べ、次に、帰宅途中の体力限界による帰宅断念や日没影響による帰宅断念等を組み込んだ「帰宅行動モデル」について述べる。さらに、これらのモデルを統合して、首都圏において大地震が発生した際の帰宅行動に関するシミュレーションを実行する。

2．帰宅意思モデルについて

(1)帰宅意思に関する調査

大地震発生当日の行動に関する意識調査（Webによるアンケート調査）を実施した[5)]。調査では、回答者が発災時の居場所を具体的にイメージしやすいように、日常的に利用している鉄道駅（自宅からの距離が異なる４駅）に滞留していることを想定してもらい、その地点からの帰宅意思について尋ねた。発災時刻を3通り（8時・12時・18時）設定し、大地震発生日に最終的に向かう場所（最終目的地）について尋ねた。また、同居家族のいる人については、家族の安否情報の有無別にも回答してもらった。

(2)帰宅意思モデルの基本構造

アンケート調査の結果をもとに、ニューラルネットワーク（三層パーセプトロン）を用いて帰宅意思率を記述するモデル（帰宅意思モデル）を構築した。具体的には、「発災時刻」、「同居家族の安否情報」、「性別」、「年齢」、「帰宅距離」に関する情報を、帰宅意思に影響を及ぼす要因と考え、「入力信号」とした。一方、大地震発生当日の最終目的地が自宅であるか、自宅以外であるかを「教師信号」とし、誤差逆伝播法（error back propagation method）を用いて学習を実行し、出力信号と教師信号との誤差自乗和に0.001％以上の減少がみられなくなった時点で学習を終了させた[6)]。

(3)帰宅意思率の特徴

帰宅意思モデルを用いて推定した、属性別・状況別の帰宅意思率の例を図１に示してある。図から以下の特徴を読み取ることができる。

①同居家族の有無別・発災時刻別にみると、8時と12時はほぼ同程度であるが、18時になると帰宅意思率は大きく低下する。また、同居家族がいる人の方が単身者よりも帰宅意思は高いことがわかる。

②発災時刻別・家族の安否情報の有無別にみると、帰宅距離が長い場合、家族と連絡が取れないときの方が帰宅意思率は高く、家族の安否情報が帰宅意思に大きく影響することがわかる。しかし、帰宅距離が短い場合には、むしろ逆の傾向にある。これは、自宅付近の避難場所で同居家族と落ち合おうとする回答による。

③家族の安否情報の有無別・性別にみると、女性よりも男性の方が帰宅意思率は高い。特に、家族の安否が確認できない場合の男性は、帰宅距離が長くても帰宅意思は非常に高いことがわかる。

④発災時刻別・年齢別にみると、10歳代は他の年齢に比べて帰宅意思は極端に低い。避難場所となること

の多い学校等にそのまま留まろうとする意識が現れていると考えられる。また、幼少期の家族を持つ割合の高い40歳代の人の帰宅意思が最も高く、帰宅意思の高低には、同居家族の詳細なプロフィールが影響していることを示唆している。

３．帰宅行動モデルについて

(1)帰宅行動モデルの概要

実際の帰宅行動について検討する上で、以下の点は重要である。①たとえ強い帰宅意思を持っていても、体力的な限界から途中で帰宅を断念してしまうケースがある。②帰宅途中で日没時刻となってしまい、帰宅を諦めるケースがある。③帰宅行動を開始するタイミングは、日没による帰宅断念者数や道路（歩道）の混雑状況に大きく影響する。④歩行速度は、歩行者密度に応じて大きく変化する。以下では、上記の①～④の視点を踏まえて、帰宅行動のシミュレーションモデルを構築する。

(2)体力不足による帰宅断念のモデル化

徒歩帰宅者の属性（性別・年齢）をjで、帰宅距離を変量X ($X \geqq 0$)で表す。帰宅距離がXの徒歩帰宅者が、帰宅途中で体力的に帰宅困難となってしまう確率を$P_j(X)$とすると、$P_j(X)$は属性jの歩行可能な限界距離（歩行可能距離）x ($x \geqq 0$)の確率密度関数$p_j(x)$を用いて、次のように表現することができる。

$$P_j(X) = 1 - \int_X^{\infty} p_j(x)dx \quad \cdots\cdots (1)$$

しかし、アンケート調査から得られたデータでは、確率密度関数$p_j(x)$を安定的に推定することができないので、次のように考える。

アンケート調査では、大地震発生日における１日の歩行可能距離について尋ねている。このデータから求めた属性別の歩行可能距離の平均値x_jと、体力・運動能力調査のデータ[7]から求めた体力得点の平均値y_jとの関係を調べると、両者間には比較的良好な線形関係が確認された。そこで、この関係を利用して帰宅距離Xを歩いて帰るために必要な体力得点$Y(X)$を回帰式から推定した。次に、属性別の体力得点の確率密度関数$f_j(y)$は、全国レベルの調査に基づくもので、安定的に推定されていることから、この確率密度関数$f_j(y)$と先の体力得点$Y(X)$を用いれば、体力的に帰宅困難となる確率$P_j(X)$は次式から推定することができる。以下ではこれを「体力モデル」と呼ぶことにする。

$$P_j(X) = 1 - \int_{Y(X)}^{\infty} f_j(y)dy \quad \cdots\cdots (2)$$

体力モデルを用いて、徒歩帰宅中に帰宅を断念すると推定された場合には、帰宅距離Xに確率1-$P_j(X)$を乗じて、帰宅を諦めてしまうまでに歩いた歩行距離を推定する。この値を用いれば帰宅を断念した地点の位置座標を求めることができる。

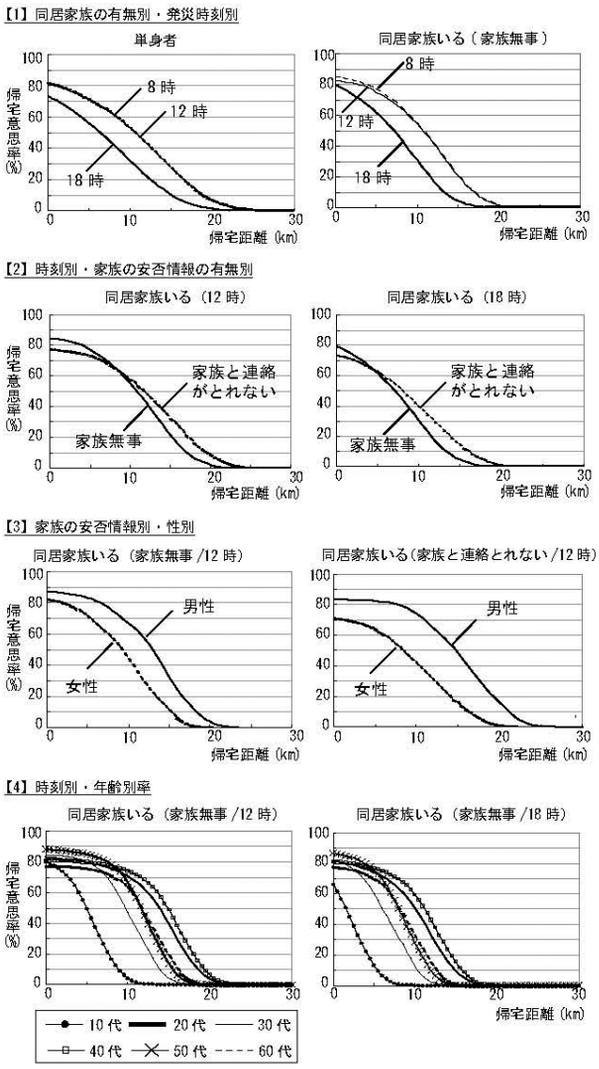


図１　属性別・状況別の帰宅意思率の例

(3)日没による帰宅断念のモデル化

発災時刻12時と18時の帰宅意思率に見られる大きな差は、日没により帰宅意思が大きく低減することを示している。そこで、12時と18時の帰宅意思率の差を12時の帰宅意思率で除して得られる値を、日没のために帰宅を断念してしまう確率と考えた。以下ではこれを「日没モデル」と呼ぶことにする。このモデルを用いて、徒歩帰宅中に帰宅を断念すると推定された場合には、体力モデルと同様に、帰宅を断念した地点の位置座標を求めることができる。

(4)帰宅開始時間のモデル化

過去に発生した大地震時における避難開始時間（地震発生から避難行動を開始するまでの時間）[8]を参考

に、帰宅開始時間は、ポアソン分布に従うものと考えモデル化した（この他にも、(a)全員が一斉に避難を開始するケースや、(b)帰宅開始時間を計画的に遅らせるケースなどを想定し、シミュレーション分析を試みたが、紙面の都合上、ここでは割愛した）。

(5)歩行速度のモデル化

歩行速度に関しては、歩行者密度が0 ～ 1.5人/㎡の範囲では4 km/h（自由歩行）であり、6.0人/㎡以上において0.4 km/h、1.5 ～ 6.0人/㎡の範囲では、直線的に歩行速度が歩行者密度に応じて逓減するという簡便な歩行速度モデル[9]を採用した。ここでは、道路交通センサスデータから取得した歩道幅員と交差点間の道路長から歩道面積を算出し、この値で歩行者数を除することで歩行者密度を算出している。

４．帰宅行動シミュレーションの実行

(1)シミュレーションの概要

平成10年東京都市圏パーソントリップ調査（PTデータ）を用いて、首都圏におけるすべての都市内滞留者（自宅内滞留者を除く）を抽出し、帰宅行動シミュレーションを実行した。シミュレーションの概要を図２に示してある。まず、帰宅意思モデルに滞留者の属性（性別、年齢）や同居家族の有無、帰宅距離などを入力し帰宅意思率を求め、帰宅する意思があるか否かを推定した。このとき、滞留地点から居住地点への帰宅経路（最短経路）と帰宅距離に関しては、道路ネットワークデータを用いて求めた。次に、帰宅意思がないと推定された人については、体力モデルを用いて、(a)体力的な限界から帰宅しようとしない人と、(b)体力的には帰宅できるが、あえて帰宅しない人に分類した。また、帰宅意思のある人については、帰宅行動モデルを用いて帰宅行動をシミュレートした。体力や日没の影響で、帰宅途中で帰宅を断念すると推定された帰宅断念者については、帰宅を断念した地点の位置座標（帰宅断念者の滞留地点）を推定した。

(2)帰宅断念者について

体力的な限界で帰宅を断念する人の属性構成比率を図３に示してある。男女ともに50歳代と60歳代が過半数を超えている。50歳代の帰宅意思は比較的高いものの、体力的な限界から途中で帰宅断念に陥る可能性の高いことが現れている。

図４には、発災からの経過時間別に体力的な帰宅断念者のプロフィールを示してある。若年者よりも高齢者の方が、また、男性よりも女性の方が、早い段階で帰宅を断念してしまう傾向が現れている。

体力と日没の影響によって帰宅を断念する人々の空

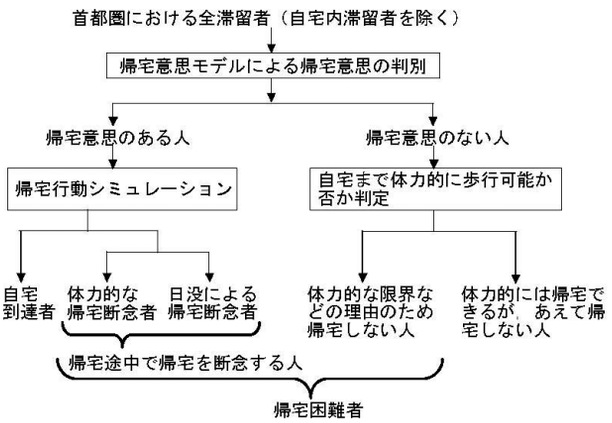


図２　帰宅行動シミュレーションの概要

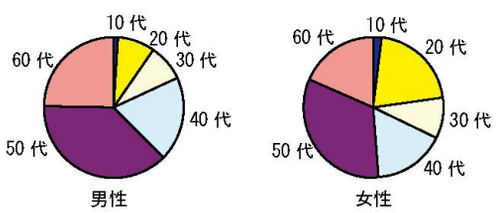


図３　体力による帰宅断念者の属性

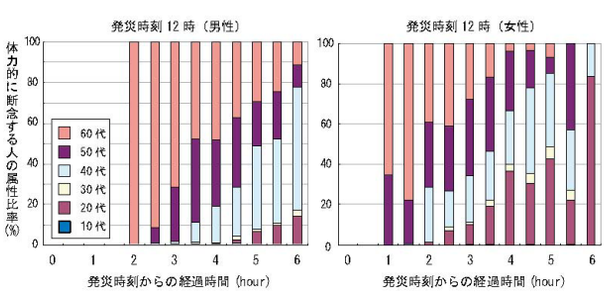


図４　体力による帰宅断念者の時間変化

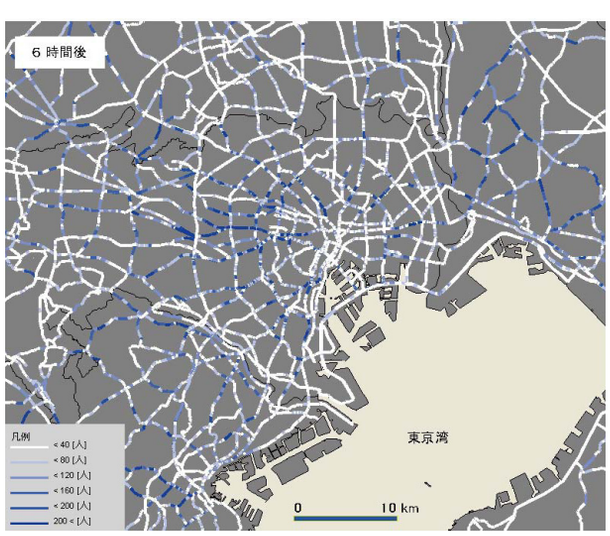


図５　体力と日没による帰宅断念者の空間分布

間分布を図５に示してしてある（地震発生６時間後の状態）。都心から郊外に向けてのびる幹線道路、特に、主要鉄道沿いの幹線道路において、帰宅断念者が多数発生することが見て取れる。こうした幹線道路については、仮設トイレや救援物資のステーションの設置など、帰宅行動をサポートする対策について重点的に検討しておくことが必要であると考えられる。

(3)帰宅困難者数について

地震発生からの経過時間別に、都市内滞留者の状態遷移を求め、発災時刻12時の例を図６に示してある。自宅外に外出している人が多い昼間に発災した場合、帰宅困難者数が最も多くなる（午後２～３時に最大となる）。体力や日没の影響で帰宅困難となる人の全帰宅困難者数に対する割合は、それほど高いとは言えないが、発災後6時間後には十万人以上もの人々が帰宅断念の状態に陥ると予想される。

(4)徒歩帰宅者と火災危険度との関係

東京都都市整備局は各町丁目の火災危険度を５段階で評価している[10]。この評価値をもとに、火災危険度マップを作成し、徒歩帰宅者の時空間分布をオーバーレイした（図７）。多くの就業地が集積する都心部では、建物の不燃化と耐震化が進んでおり、比較的安全な地域であると考えられている。これに対して、都心から5 ～ 15kmの帯状の地域には、依然として木造密集市街地が多く残存しており、悪条件が重なると、市街地大火に進展する危険性を孕んでいる。徒歩帰宅者のシミュレーション結果を見ると、もともと安全な都心部の地域に滞留していた大量の就業者が、市街地火災の危険性の高い地域を通過して帰宅することが現れている。地域の被災状況や市街地火災の進展状況に関する情報を入手できずに、闇雲に帰宅を開始することの危険性については、十分に理解されるべきである。市街地火災の状態は、時々刻々と変化することから、帰宅を開始した時点には安全でも、帰宅途中で火災が進展し、巻き込まれてしまう可能性も否定できない。帰宅者が避難者に転じて、地域内を逃げ惑う事態も発生し得ると考えられる。

５．まとめ

本稿では、帰宅距離や発災時刻、滞留者の属性（年齢や性別）、家族の安否情報を考慮しながら、都市内滞留者の帰宅意思を記述する「帰宅意思モデル」について述べた。さらに、滞留者が自宅まで徒歩で帰宅する過程を記述する「帰宅行動モデル」について述べた。さらに、これら二つのモデルを統合して、首都直下地震時の帰宅行動シミュレーションを行った。帰宅困難者や帰宅断念者の時空間分布を求め、地域防災計画を支援するための基礎的考察を試みた。

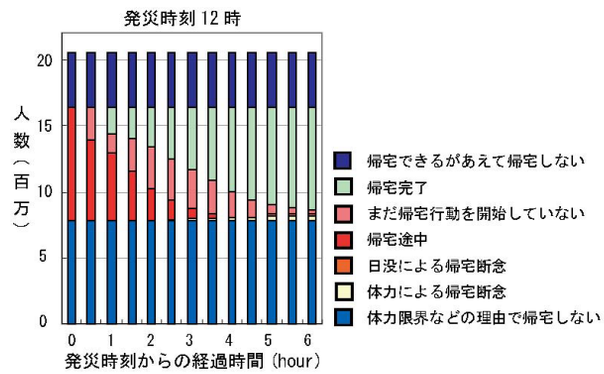


図６　都市内滞留者の状況遷移

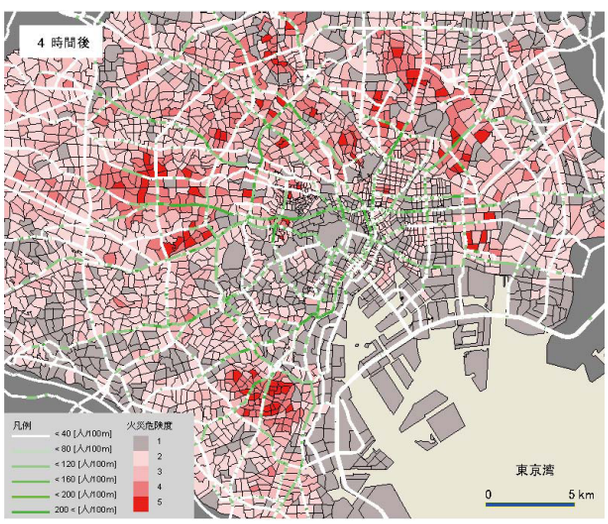


図７　火災危険度と徒歩帰宅者の空間分布

参考文献

1) 中林一樹：地震による都市的災害の様相に関する基礎的考察 : (4)パーソントリップデータによる帰宅困難者と家族離散状況の推計、日本建築学会大会学術講演梗概集(F)、pp.361-362、1985
2) 中林一樹：地震災害に起因する帰宅困難者の想定手法の検討、総合都市研究、pp.35-75、1992
3) 東京都：首都直下地震による東京の被害想定報告書-手法編8、2006
4) 岩田昌之・熊谷良雄：大都市地震時における都心地区での滞留者数推計と仮泊可能性に関する研究：東京銀座地区を事例として、地域安全学会論文集、No.4、pp.191-200、2002
5) 田中　怜・大佛俊泰：アンケート調査に基づく大地震発生時の帰宅意思について、日本建築学会大会学術講演梗概集(F-1)、pp.591-592、2007
6) 熊沢逸夫：学習とニューラルネットワーク、森北出版、1998
7) 文部科学省：平成18年度体力・運動能力調査報告書、2006
8) 西田幸夫：関東大震災における火災延焼と避難について、「歴史　地震」、24、166、2009
9) 内閣府（防災担当）：帰宅行動シミュレーション手法について、中央防災会議・首都直下地震避難対策等専門調査会（第10回）資料２、2008
10) 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査報告書（第６回）、2008
11) 大佛俊泰：大地震時における都市内滞留者の帰宅意思と帰宅行動、日本建築学会計画系論文集、No.634、pp.2679-2687、2008

想定を越える大津波からの避難の実態（山田町の事例）

後藤　洋三
●東日本大震災津波避難合同調査団（山田町）

１．はじめに

東日本大震災では地震は日中に発生し大きな揺れが体感されてから大津波の到達まで30分の時間があった。しかも、岩手や宮城の沿岸部住民は津波の脅威を習知していたはずである。それでも2万人に近い住民が津波から逃げ遅れ命を落とした。

何故なのか、その実態を調査し、要因を分析して今後の防災対策に生かし、教訓を整理して後世に語り継いでいく必要がある。多くの研究者技術者がその思いを共有したが、避難の調査は必然的に被災者に接して辛い体験を聞きだす調査である。そのため、被災者への負担軽減を第一の目的として東日本大震災津波避難合同調査団（団長：今村文彦東北大教授）が任意参加で結成され、調査グループ間の重複を避け情報を交換しながら調査を行うことになった。ここで報告する山田町（岩手県下閉伊郡）の事例は、その調査団の中で山田町を担当したグループの報告である。

２．山田町と被害

山田町は北に宮古市、南に大槌町が隣接する典型的な陸中海岸の町で、2011年3月1日の人口は19270人。山田湾と船越湾に面し、主な産業は養殖漁業とその水産加工である。山田町の主な居住区は入江毎に、中央地区、大沢、織笠、船越、田の浜、大浦、豊間根（内陸）と別れ、概して地域内の結びつきが密接である。

図１　山田町を構成する主要地区

船越と田の浜では昭和三陸津波のあとで高台移転が行われたが、人口増加に伴い集落が海岸方向にスプロールしてきた経緯がある。

9月1日時点の町役場の調査データによると、津波による死亡者（認定死亡者を含む）726人、行方不明者51人となっている。人口比はおよそ４％となるが、何らかの避難行動を取らなければ危険が及んだ行政区を死亡率１％以上と定義して、その行政区内の人口12504人と死亡者数で計算すると人口比はおよそ6%となる。全壊家屋は2789戸（町役場5月20日集計）、その5%は津波ではなく火災によると推定される。震度は5弱で揺れによる被害は見当たらない。

仮設住宅は1940戸建設され、避難所は8月末で全閉されている。

３．調査の方法

5月の予備調査から9月の3次調査まで、のべ70人日のメンバーが現地入りし、避難所、仮設住宅、被災域周辺住宅を訪ねて用意した調査票を元にインタビューするいわゆる半構造化調査を行った。1人30分を目途としたが多くの被災者は協力的で、話が1時間を超えることもあった。町民200名にインタビューし、町役場、消防署、消防団、教育委員会にもヒヤリングを行った。図２がインタビューを受けた人の年齢分布を山田町全体のそれと比べたもので、50 ～ 70代に偏りがある。性別は山田町の全人口で男48%、女52%に対しインタビューを受けた人は男41%、女59%であった。

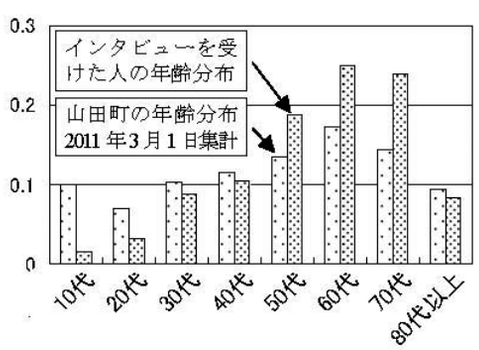


図２　インタビューを受けた人の年齢分布

４．調査結果

調査内容は多岐にわたるが、ここでは基本的な津波避難対策とされている項目に着目して結果を紹介する。

(1)「揺れたらすぐ避難」したか？

山田町の場合、津波は地震発生後38分で防潮堤を越えている。そこで、直ぐ逃げたか、どのような状態になってから逃げたかを聞いた結果が図３である。

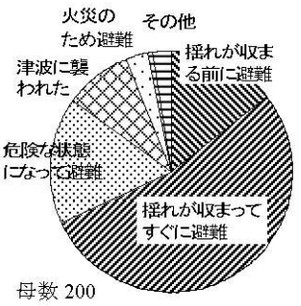


図３　避難したか否か

危険な状態になってから避難した人が16%、避難せぬまま津波に襲われた人が9%である。これは生存者に聞いた結果であるから、逃げ遅れたか逃げられなかった人の割合はこれより多いと考えられる。

(2)「津波てんでんこ」は実行されたか？

では直ぐに避難しなかった人達は何をしていたのであろうか。図４が複数回答可で避難を始めるまでに何をしたか聞いた結果である。何もしていないと答えた17%の人は真っ直ぐに逃げたのであろう。しかし、外出先から一度自宅に戻った（外出していた人の49%）、自宅からまず家族を迎えに行った、或いは近隣の人に声を掛け避難を手伝っていた、などの人が26%を占めている。自宅にいた人は様子を見に行き、荷物をまとめ、片付けをし、戸締まりをしている。

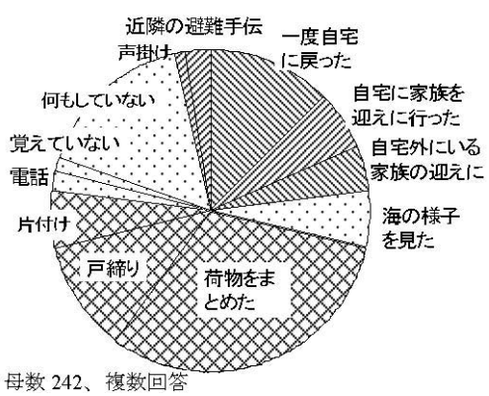


図４　避難を始めるまでに何をしたか

図５は地震発生から津波到来まで何分くらいあると思っていたかを聞いた結果である。経験後の回答のためアジャストされている可能性があるが、無回答、考えたことがない、を除いた残りの約半数、すなわち全体の1/4が20分以上あると思っていた。そして、津波が来る時間までに、身近な人を助け、大切な物を持ち出そうとする行動を取っている。

図６はヒヤリングより得た典型的な避難行動図である。「てんでんこ」とはほど遠い行動を取っている。

一方、最初から10mを越える津波が来ると判っていたら、あるいは防潮堤が無くて津波が来るのが見えていたら、周囲にかまわず自分の身の安全を第一とする行動を取ったであろう、と漏らす人もいた。

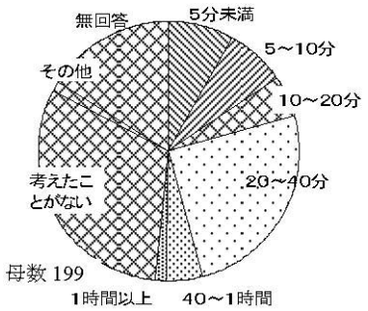


図５　津波到来まで何分有ると考えていたか

図６　生徒を自宅に送り父を迎えに行っている

(3)「情報」は素早い避難に役立ったか？

一方、直ぐ避難した人はどのようにして情報を得たのか。山田町は地震の直後に停電しテレビからの情報入手は困難だった。

防災無線による緊急警報は4回放送され、2回目（地震発生から8分後）と3回目（25分後）では大津波警報が発令され予想津波高さが3mであること、4回目（31分後）では「避難指示」が発令されていることが放送されている。山田町には100箇所の防災無線屋外拡声器と200~300台の室内受信機が配置されていた。

図７はどの時点で大津波警報が発令されているのを知ったかで、45%の人が避難する前に聞いている。それを何処から聞いたかが図８である。防災無線が53%であり、次

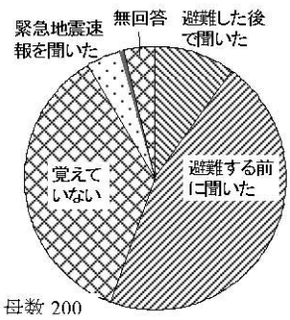


図７　大津波警報を何時 聞いたか

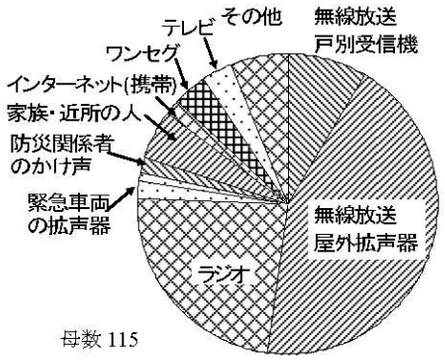


図８　避難前に大津波警報が出されているのを何処から聞いたか？

図９　大津波警報から何を聞き取ったか？

いでラジオであるが、近隣や防災関係者からの声かけとパトカーや消防車からの呼びかけが計9%、個人情報端末が5%あることが注目される。

聞き取った内容を問うた結果が図９である。予想津波高さを聞いたとする人が23%いてその58%が3mと答えていたが、誤答も多く、事後の質問なので曖昧な記憶がアジャストされている可能性がある。また、無回答が多いのは大津波警報が何を意味するか良く伝わっていないからであろう。また、防災無線による放送は冗長に聞こえ、急いで逃げようとしているときには落ち着いて聞いておれない、と言う意見もあった。

図10は何をきっかけに避難しようと決断したかを聞いた結果である。55%の人が大きく異常に長い揺れを感じて津波が来ると判断し避難を開始している。大津波警報や避難指示を聞いて避難を決断した人は10%に限られる。山田町の場合、防災無線で大津波警報が伝えられたのは8分後であるから、素早く避難した人の大部分は、周囲からの情報を待たずに自ら判断して行動したと推定される。

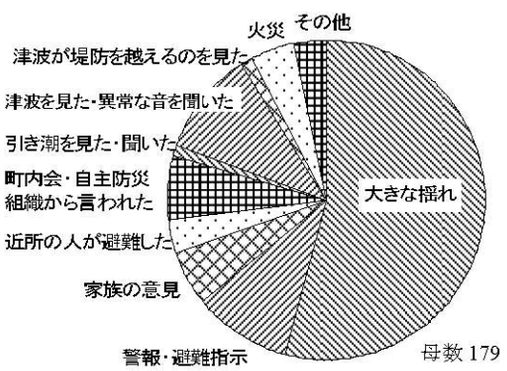


図10　避難を始めた最も大きな理由

(4)「自動車避難」は自粛されたか

図11がどのような手段で避難したかを尋ねた結果である。53%が徒歩であるが、防災無線が自動車を使わないよう呼びかけたにもかかわらず、自動車による避難が36%を占めた。足の弱い家族の避難に自動車が使われた例が多く聞かれ、家族の避難を支援するために早く自宅へ戻るのにも自動車が使われているので、一律に自動車の使用を規制すると、助かる命を奪いかねない。また、自動車は移動できる財産であり、カーラジオは情報源であり、防寒具や紙おむつなども運べ、避難所生活が始まってからも必要な生活用具である。

図12は車で避難した人達に渋滞状況を聞いた結果である。83%の人が渋滞に遭わずに走り抜けているが10%が渋滞に巻き込まれている。インタビューによれば、渋滞したのは山田町を南北に縦貫する国道45号線上の数カ所で、大部分は短時間であり津波が来るまでに解消したようである。しかし、山田中央地区から大沢地区に抜ける大きな交差点では停電で信号が消え渋滞が長引いて車ごと流される被害が出ている。

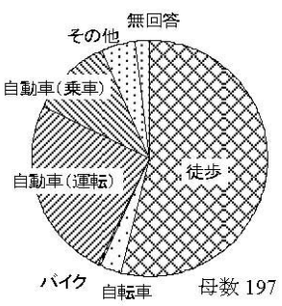


図11　避難の方法

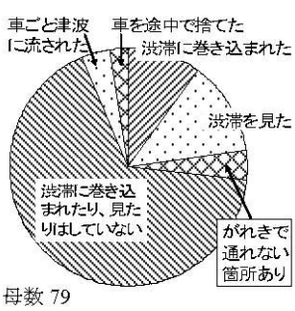


図12　渋滞に遭ったか

(5)「防災訓練・教育」の効果

図13は防災訓練の参加状況と避難開始の速さとの関係をそれぞれの避難者数で正規化して比較した結果である。ほぼ毎年参加している人は避難が早い傾向が見られ、まったく参加していない人は危険に直面するま

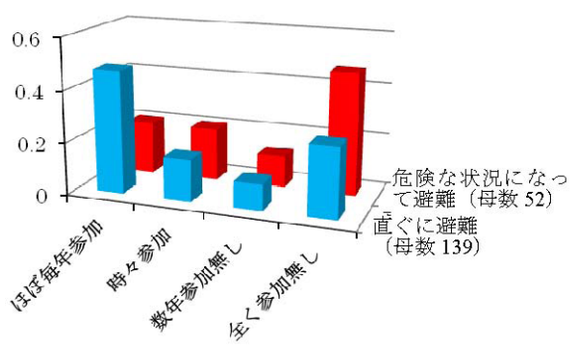


図13　防災訓練参加状況と避難開始の速さ

で避難しない傾向が見られる。

一方、防災訓練で避難の際に守るべき規範を養うことの難しさを示したのが図14である。防災訓練に毎年参加している人達に車の使用を控える傾向が見られるが、全体としては明瞭な傾向は見られない。

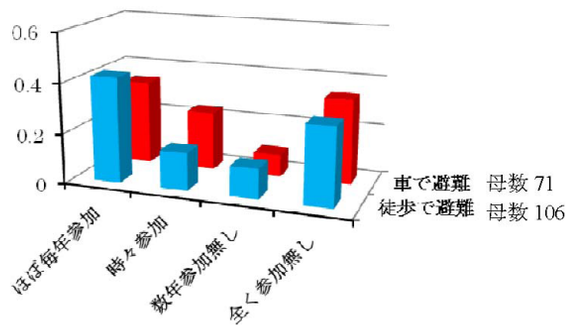


図14　防災訓練参加状況と車使用

(6)「過去の被災経験」の影響

過去の被災経験やその伝承は警戒心を高める材料となる一方で、「あの時の津波はここまで来なかった」という慢心材料にもなる。その事例が図15に明瞭に現れている。この地域では昭和35年の津波が川を遡って被害を拡大しており、昨年のチリ地震津波でも同じ現象が目撃されている。そのため、川沿いの住民は警戒心が強く、今回の地震でも素早く高台に避難した。しかし、同じ地区でもやや標高が高い丘の麓の住民はそこまで津波は来ないと慢心して避難しなかったため、予想を越える大きな津波に巻き込まれて命を落とした。

黒丸が死亡者の出たお宅（在宅あるいは一時帰宅により 70%が自宅起点で避難）、白丸は避難所

図15　死亡者行方不明者が出た自宅の分布

(7)「防潮堤」の効果

防潮堤は、たとえ大津波に越流されたとしても、避難の時間を稼ぎ、流勢を落として被害を軽減する効果がある。しかし、倒壊した場合は一気に被害を拡大する。図16は早川地区（船越第12地割）の事例で、防潮堤の倒壊により津波がふくろ谷の奥まで一気に進入したと考えられる。この谷の住居は跡かたなく破壊され、死亡者の出た家屋を示した挿絵から分かるように壊滅的な被害が出た。

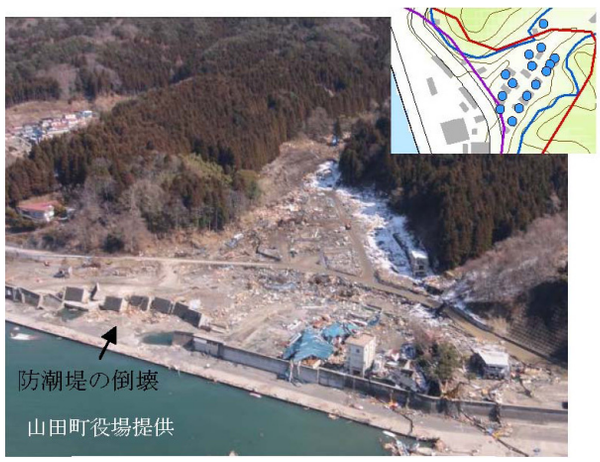


図16　防潮堤の崩壊と壊滅した集落

5．結び

1) 足の弱い人が周囲からの呼びかけを退けて自宅の2階に避難し被災した例がある。揺れたら避難、津波てんでんこ、自動車不使用、等のかけ声だけでは解決できない避難の実態がある。

2) 一人でも多くの命を救うには、沖合にGPS津波潮位計を展開し沿岸自治体に直結させた津波直前警報システムを確立すべきである。

3) 過去の事例に基づいたハザードマップはその適用に当たって十二分な説明が必要である。

6．謝辞

調査に協力いただいた山田町の皆様と町役場の皆様にお礼申し上げる。亡くなられた方のご冥福を祈り、町の早く確かな復興を心より祈念する。

この調査は科学技術振興機構の「国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)」の支援を受けた。また、土木学会よりも一部支援を受けている。

東日本大震災津波避難合同調査団（山田町）名簿

中林一樹（明治大学）団長	佐藤誠一（日本工営）
後藤洋三（東大地震研究所）	鈴木　光（消防科学総合センター）
市古太郎（首都大学東京）	関谷直也（東洋大学）
田中　努（エイト日本技術開発）	仲村成貴（日本大学）
三上　卓（群馬高専）	長谷川庄司（JICA）
阿部郁男（富士常葉大学）	福岡淳也（エイト日本技術開発）
池田浩敬（富士常葉大学）	バンバンルディアント（和光大学）
磯打千雅子（日本ミクニヤ）	森田博之（地圏総合コンサル）
宇治田 和（ランドブレイン）	柳原純夫（奥村組）
小川雄二郎（東大生産技術研）	山本一敏（パシフィックコンサル）
紙田和代（ランドブレイン）	

原子力発電所の安全に対する地震工学の課題

亀田　弘行
●京都大学名誉教授

１．はじめに－技術論の前提とすべき状況認識

東日本大震災は、青森県から千葉県にわたる地震動災害、圧倒的な規模で来襲した巨大津波災害、そして福島第一原子力発電所の事故と、三重苦の災害をもたらした。その規模と社会的影響の深刻さは、戦後日本が被ったどの災害をも凌駕する。その中で本稿は、東日本大震災における原子力発電所の状況をふまえ、そこから提起されるべき地震工学的課題を整理しようとするものである。

福島第一原発の事故により、原子力事業そのものの存立基盤が社会的に問われている。決して起こしてはならない事故が発生した以上、それは当然のことであり、最終的に国民の選択に委ねられるべき課題である。

日本が今後も原発の運営を続けるには、地震・津波安全の正しい工学技術だけでなく、技術を正しく運用する仕組みが不可欠である。この点、福島第一原発事故の教訓が、技術論だけでなく経営と規制の仕組みに及ぶべきとの多くの指摘（例えば文献1)）は正当である。これに応える包括的な意思決定の枠組が明確な形を取らない限り、原発に対する国民の信頼を回復することはできないし、諸外国からも日本には原子力は安心して任せられないと評価されることとなろう。いまその境界線上を歩いていると考えるべきである。

この前提のうえで、筆者は、温室効果ガスを排出しない大規模エネルギー源という特質を持つ原発に依存する選択肢を回避するべきではないと考えている。同時に、現実に存在する原発の安全について、震災の教訓をふまえた十分な技術的枠組が提示され、実行されねばならない。

以上の認識を基礎に、以下本稿では、東日本大震災における原発の挙動をふまえ、原子力発電所の地震・津波対策技術のあるべき枠組を論ずる。討議は筆者の専門とする地震工学・リスク論を基礎に展開するが、地震工学と津波工学の連携による新たな技術的枠組の構築を重視する。

２．東日本大震災における原発の状況について

(1) 原子力発電所の挙動概要

被災地内には、女川（東北電力)、福島第一と福島第二（東京電力)、および東海第二（日本原子力発電）の４原発が存在した。地震動とそれに続く津波に対する挙動を簡単にまとめると表１のとおりである。福島第一は全交流電源と崩壊熱除去系の機能喪失を引き金に、炉心溶融を含む過酷事故に陥った。他の3プラントは、部分的に浸水などの影響を受けながら、最終的に冷温停止を達成した。詳細については他の資料（例えば文献2)）によられたい。

表１　東日本大震災における原子力発電所の挙動

＋福島第一
1 号機：　460MW (1971-)
2 号機：　784MW (1974-)
3 号機：　784MW (1976-)
4 号機：　784MW (1978-)
5 号機：　784MW (1978-)
6 号機：1,100MW (1979-)
＊1～3 号機：営業運転中
- 地震動を感知し自動停止
- 地震により外部電源喪失／非常用ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ発電起動
- 津波により非常用ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ発電機および補機冷却用海水ﾎﾟﾝﾌﾟ機能喪失
- 過酷事故ｼﾅﾘｵが進行

＊4～6 号機：定期点検中
4 号機：使用済燃料ﾌﾟｰﾙ冷却障害
5, 6 号機：冷温停止

＋東海第二
1,100MW (1978-)
- 営業運転中
- 地震動を感知し自動停止
- 外部電源一時停止
- 冷温停止を達成

＋女川
1 号機：524MW (1984-)
2 号機：825MW (1995-)
3 号機：825MW (2002-)
＊ 全号機：営業運転中
- 地震動を感知し自動停止
- 外部電源一時停止
- ｻｲﾌｫﾝ効果による浸水と補機冷却熱交換室への流入
- 全号機冷温停止を達成

＋福島第二
1 号機：1,100MW (1982-)
2 号機：1,100MW (1984-)
3 号機：1,100MW (1985-)
4 号機：1,100MW (1987-)
＊ 全号機：営業運転中
- 地震動を感知し自動停止
- 外部電源4回線中1回線が機能維持し電源供給継続
- 補機冷却用海水ﾎﾟﾝﾌﾟ3基、非常用ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ発電機2基が機能維持、他は冠水により機能喪失
- 全号機冷温停止を達成

(2) 地震動および津波の大きさ

東日本大震災を起こした東北地方太平洋沖地震の震源域は、岩手県沖から茨城県沖に至る南北500km、東西200kmの領域に及び、これまで固有地震的に扱われたプレート間の４つの地震域と、海溝沿いに連なる「津波地震」発生域が連動した巨大な断層破壊であった[4]。

被災地内の原発サイトにおいて、原子炉建屋基礎版での観測加速度は女川2号機における607galが最大であった[2]。これを含め、観測された地震動は、概ね2006年に改訂された耐震設計審査指針[3]に準拠して設定された基準地震動と同レベルにあった。福島第一と女川では若干超過した場合があるが、その範囲は2% ～26%増である。もちろん、地震動が構造物に及ぼした

具体的影響に関する調査は十分になされねばならないが、入念に耐震設計された構造物が一般的に持つ耐震裕度からみて、原発で問題となる短周期帯域については、地震工学的に大きな問題をはらむ数値とは考え難い。これほどの巨大地震でも地震動が基準地震動の領域に収まるのは、震源域の広がりが巨大であっても、特定地点での地震動は最も近いアスペリティーに支配されるという、多重震源による地震動の理解が今回の広域連動巨大地震にも当てはまることを示している。

これに対し、津波波源は、陸側に近いプレート間の地震と、海溝側で20mを超える断層破壊を生じた「津波地震」が連動したことにより[5]、これまで予測されたいかなる津波をも超える巨大な津波を発生させた。これが被災地の原発に影響を与え、特に福島第一原発の過酷事故につながった。

これほど広域・巨大な断層破壊(mega thrust)は地震学でも予想外の事態とされ、人智の及ばざるところとの見方もある。しかしながら、全体の巨大さの中で、個別の部分震源はこれまでの地震学や津波学の範疇内にあり、津波の高さもこれを基礎に説明されている[4),5)]。問題は、これほどの広域連動破壊を予測できなかったことである。工学的ハザード評価ではこうした状況を注意深く反映する必要がある。そこでは、明確な物理的知見とともに、将来の不確定性を統合的に組み込むリスク論的判断が不可欠である。

(3) 原発の挙動から汲み取るべき教訓

次節以降で地震工学的課題を論ずる前提として、以下に3項目の基本的教訓を掲げる。今回の事故の経験を経て、同様の事故を絶対に再来させないために必須の要件と考えるものである。

1) リスク概念の徹底：

工学的には「設計外外力(beyond-design hazard)」の領域における安全担保の問題である。規制基準では、2006年に改訂された原子力発電所の耐震設計審査指針[3)]（以下、耐震指針）において「残余のリスク」として位置づけられた。運用はまだ限定的であるが、地震動に対する原発の安全性向上に重要な役割を持つ概念である。津波に対してもこの概念は適用されるべきものであるが、同指針の津波に関する記述は原則的で簡単なものであり、原発の津波対策にリスク概念を浸透させる取組みは、いくつかの重要な技術的成果[6),7)]にかかわらず、地震動対策における取組に比べて、歩みが緩慢であったと言わざるをえない。そこに3.11巨大津波が来襲した。津波対策へのリスク論導入が後れをとったことは痛恨事であり、筆者を含む工学の側の反省と再検証が必要である。

リスク論は、「想定外」の外力に無防備になるのを防ぐためにこそ意義がある。今後も続くであろう我が国の巨大地震・津波対策において、リスク概念を徹底する基本姿勢が不可欠である。

2)「科学的想像力」の受容（災害文化の現代的深化）：

東北地方北部の三陸地方は明治(1896)、昭和(1933)、チリ(1960)と、繰り返し津波被害を受け、津波に対する地域の災害文化を形成してきた。このことは、女川原発1号機の敷地高さ14.8mの決定に繋がったと考えられ、さらに、貞観津波(869)を対象とする初の組織的な津波堆積物調査[8)]という、歴史を遡る科学的検証へと進んだ。すなわち、地域の災害文化だけでなく、組織の安全文化が重要な役割を果たす。

一方、近代において巨大津波の経験を持たない南仙台平野から福島県に至る東北地方南部では、津波に対する災害文化が育ちにくかったとされる。しかしながら、現代はさらに深い科学的方法を持つ。明治三陸津波を起こした「津波地震」と呼ばれるタイプの地震の震源断層は「三陸沖から房総沖の海溝寄り」という南北800kmの帯域の中にあり、この中のどこでも同様の津波地震が起こりうることが地震調査委員会の長期評価で指摘され[9)]、中央防災会議専門部会でも提起された（経緯は文献10)参照）。この指摘が現実の防災対策に取り入れられなかった理由は不明であるが、データに残っていない現象は将来も無いという、データ至上主義に囚われた可能性を想起させる。この地域の原発サイトの津波予測にも深く関わる事項である。われわれは、長期の再現期間を持つ巨大現象に対して、科学的基礎があれば実例のデータが無くともそれを現実に想定する「科学的想像力」を持たねばならない。工学的には、健全な「外挿の論理」を持つことである。災害文化を現代的に深化させることでもある。リスク概念を適用する際のリスクモデルは、科学的想像力が十分に発揮されたものでなければならない。

3) 行動の迅速性：

自然は待ってくれないという冷厳さをこの震災ほど感じたことはない。貞観津波が広く福島県まで及んだ[11)]ことが明らかにされ、数値シミュレーションにより定量評価された[12)]矢先のことである。最終的な研究論文の形をとる前に、科学的情報は専門家の間では種々の形で発信される。原発の事故では、「間に合わなかった」の弁明は許されない。新しい知見に素早く対応する行動の迅速性について、これまでと異なる規範を持つことが強く要請される。具体例

として、東海第二原発で海水ポンプエリアの側壁嵩上げ工事がほぼ完了していたことが今回の津波を部分的浸水に食いとめたことは銘記されるべきであろう。

3．地震・津波対策に関する地震工学的課題

(1) 地震工学的課題概観

福島原発の事故を踏まえ、我が国に稼働する他の原子力発電所の緊急安全対策に関する指示[13]が原子力安全・保安院から発せられた。これは、全交流電源喪失等の緊急状態に陥った場合にも過酷事故を起こさないアクシデントマネジメント(AM)への備えとして重要であるが、同時に、原発が地震動と津波の作用下でそのような緊急状態に陥らないシステム信頼性を確保することこそ肝要であり、それが本稿の主題である。そのために、以下のような地震・津波工学的課題が早急に達成されなければならない。

1)被災地の原発の被害状況明確化：各原発における構造・機能被害の詳細、特に、津波のみの影響か、地震動と津波の複合的影響かを、明確にする[14]。

2)津波対策の包括的技術体系の確立：津波対策の要は非常用電源、崩壊熱除去系、炉心冷却注水系の機能を守ることにある。そのために必要な耐津波工学を確立する（4.で詳述）。

3)地震動対策と津波対策の連携：近地津波では、強震動の直後に津波が来襲する。すなわち、地震動と津波による複合被害となる。これまで地震工学と津波工学の連携は必ずしも十分ではなかった。両者が連携する総合的技術体系を構築すべき。

4)リスク概念に基づく評価体系の確立：リスク論の重要さは2.(3) 1)に述べた。それはシステムとしての原発の信頼性を担保するために、現在活用できる唯一の評価概念である。評価手法として、地震PSA (Probabilistic safety assessment: 確率論的安全評価) が中心的役割を果たす。次節(2), (3)で具体的に論ずる。

(2) リスク概念導入の系譜：耐震指針改訂(2006)－地震PSA学会標準(2007)－新潟県中越沖地震(2007)－東日本大震災(2011)の技術課題

原子力施設へのリスク概念導入のための研究開発は、我が国では1980年代来の歴史を持つが、2006年9月の耐震指針の改訂[3]において、初めて安全規制の枠組に取り入れられ、「残余のリスク」の考えが導入された。その意義を概念的に示すと、図１のように、決定論的設計によるベンチマーク保証と、設計地震動を超える領域で残余のリスクが十分小さいことの保証により、システム全体の安全性を確保する体系を構成することにある。さらに、設計地震動を超える領域で、個別プラント要素の余裕性能を表す耐震裕度と残余のリスクをフラジリティーの概念を通して結合することにより、決定論的設計とリスク論的評価を同一の土俵で整合性を持って議論することができる[15]。

残余のリスク評価では、地震PSAが中心的な方法論となる。耐震指針の改訂と並行して作成が進められた地震PSA実施のための日本原子力学会標準が2007年9月に刊行され[16]、実用化の基盤が整備された。

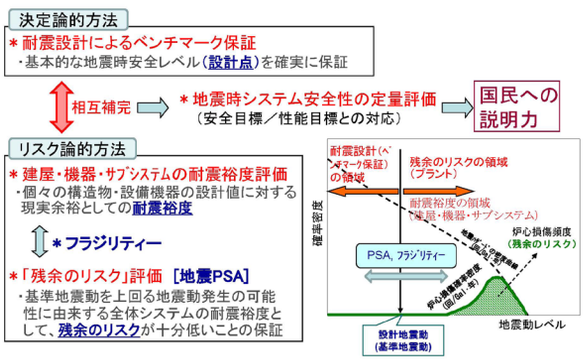


図１　地震工学的観点からみた安全確保の体系

指針改訂の翌年（2007年7月）に発生した新潟県中越沖地震において、柏崎刈羽原子力発電所が設計地震動（旧指針）の3倍を超える地震動を受けたこと、その状況下で全号機が冷温停止を達成した経験は、残余のリスク評価が現実の課題であることを如実に示し、地震PSAの役割への認識が進んだ。

原発の地震・津波安全評価にリスク論を導入する意義の根幹は、設計値を超過する外力への対処にあり、将来の事象に係る不確定性に定量的・体系的に対処することである。この点、改訂された耐震指針では、基準地震動の超過確率参照という前進はあったが、残余のリスク評価の本格実施は義務化されず[17]、現実への適用は活発ではなかった。津波リスク評価への取組が地震動課題よりさらに遅れたことは前述のとおりである。しかし現実は、新潟県中越沖地震(2007)、東日本大震災(2011)と、相次いで問題を突きつける。PSAを用いるリスク管理の本格導入が急務である。

(3)「地震・津波PSA」の本格導入を

PSAによるリスク評価は、

i) ハザード（地震動／津波）レベル別の発生頻度

ii) プラント要素の機能損傷確率（ハザードレベルの関数）：フラジリティー

iii) 事故シナリオの組合せ

の３つの項目に関するたたみ込み積分(Convolution)

を求めることにより行われる。

PSAの効用は第一に、図１で説明したように、原子力発電所の全体システムの安全性に関する定量的な尺度を提供することで、安全目標等、安全の規範を討議するための基盤として有効である。第二に、評価の結果を逆解析的に分解することにより、影響度が高い事故シナリオおよびそれらに関連する機器・設備を同定し、重要度評価を行えることである。これにより、地震・津波への事故対策全体の整合性を確実にし、かつ費用対効果からも的確な選択を行うことに寄与する。

地震PSAはすでに実用段階の整備[16]が行われているのに対し、津波を発生させる波源断層はすべて海底にあり困難を伴うものの、これまでの科学的観測と理論に加え、地質調査等による古津波研究の成果を合わせ、津波ハザード評価手法の基盤はすでに形成されている[6)~12)]。これを基礎に本格的な津波PSAを構築しなければならない。その動きは東日本大震災を契機に加速され、日本原子力学会により津波に対する確率論的リスク評価の実施基準作成が進行中である。

さらに重要なことは、地震動の影響を受けた直後に津波が来襲する海岸立地プラントのリスク評価では、地震PSAと津波PSAを個別的に扱うのではなく、時間的推移を考慮して両者が連携する評価手法が求められる。また、地震・津波により同一サイトの複数の原子炉が同時に影響を受ける多数基立地のリスク評価[18]において、ユニット間の相関は地震動より津波の影響下でより強くなると考えられることから、多数基立地のPSAが重要となる。これらの課題を合わせ、「地震・津波PSA」の体系に統合化することが肝要である。

４．「耐津波工学」構築の提言

筆者は津波工学を専門とするものではないが、東日本大震災における海岸構造物の被害、福島第一原発における構造物・機器の機能喪失をふまえ、原子力発電所の津波対策について、構造工学的観点から試論を述べる。それは、耐震工学に対比される「耐津波工学」の構築を提言するものである。

(1) 基本方針－「クリフエッジ」の解消

福島第一原発の津波被害で顕著な様相は、非常用ディーゼル発電機や補機冷却用海水ポンプなどの重要な安全機器が浸水により機能停止したことである。すなわち、これらの機器の津波に対するフラジリティー曲線は図２(a)のように、浸水即機能停止というステップ関数状になっており、その形状から「クリフエッジ」効果と呼ばれる。この状況では、設計津波を超える領域における残余のリスクは極めて大きいものとなる。

これに対する方策として、構造工学的防護によりフラジリティーを図２(b)のような滑らかな曲線、すなわち「スムーズ・フラジリティー」と呼ぶべき状況に変えること、または、図２(c)のようにクリフエッジを十分な安全域に引き上げることが、津波に対する残余のリスク低減策の要となる。

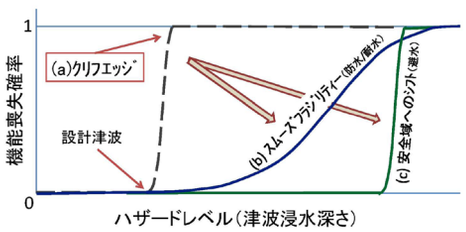


図２　クリフエッジ解消の方策

(2) 津波の外力作用－浸水深さ、衝撃的波力、持続波圧、浮力

津波リスクを論ずるとき、まず津波の水位が問題とされることが多い。浸水被害（写真１）の観点からその重要さは論をまたないが、津波被害はこれにとどまらず、津波先頭部で受ける強大な波力（衝撃段波波圧、サージフロント波圧）下での構造破壊（写真２）、膨大な海水の移動により長時間続く持続波圧 (押し波、引き波) 下での構造損傷と基礎の洗掘（写真３）、浮力による構造損傷と移動（写真４）など、さまざまな外力作用を持つ[20),21)]。建屋・設備・機器の設置場所や設置状況、特に津波の波力を正面で受けるか否か等の条件により、適切な対策技術が用いられるべきである。

写真１　福島第一原発の浸水（東京電力）

写真２　波力による防潮堤防水扉の破壊（宮古）

写真３　洗掘による防潮堤の転倒（釜石市・両石）

写真４　浮力による重油タンクの浮上・移動（東北電力）

(3) 水の流動性の問題

水はその流動性により、圧力差と通路があればどこへでも侵入する。女川原発はその敷地高ゆえに津波による直接の浸水を免れたが、サイフォン効果により海水ポンプ室とトレンチを経由して原子炉建屋地下の一部が浸水した[2)]。水の流動性の課題は、2007年の柏崎刈羽原発において、内部からの溢水経路の同定問題に現れていたが、東日本大震災による津波の影響ははるかに大規模な外部からの浸水である。浸水経路の同定と対策を重要な課題に位置づけるべきである。

(4)「耐津波工学」の提言－防水・耐水・避水の枠組

以上の考察から、原発の津波対策は、浸水対策から動水学的対策まで、状況に応じて種々の技術を適切に組み合わせるべきである。これまでの津波学と津波工学が果たした役割は大きく、津波のメカニズムや津波による波力など、ハザードに関わる重要な成果がとりまとめられている[19)~21)]。これを受けて、構造工学的に津波対策を体系化する「耐津波工学」の構築が要請される。主眼はクリフエッジ問題の解消にある。

そのための個別技術はすでに機械、建築、土木等の工学分野に豊富に存在すると考えられる。さらに必要な技術開発を加えて、耐津波工学の枠組に体系化することが重要である。そのために、３項目からなる基本技術要素の枠組を以下に提案したい。

+[スムーズ・フラジリティーの実現]

1) 防水 (Water Proof)－水との接触を絶つ：水との接触を最も避けるべきは電気系統の設備･機器である。安全機能を担う注水系の制御盤、スイッチボード、計測系、海水ポンプ駆動用モーター、非常用ディーゼル電源などがその対象となる。その方法として、水密カバー、水密隔壁、絶縁シールの防水強化、防水ケーブル/コネクター、海水侵入路の水密化などの技術手段が考えられる。

2) 耐水 (Structural Resistance)－波力に耐える：来襲する津波の正面に曝される設備・機器は、津波の波力に耐え、洗掘を受けないことが重要である。特に、海底地形の影響で波状段波が形成される場合の衝撃段波波圧が強大とされる[19),20)]。現在、多くの原発で計画されている津波防御の防潮壁／防潮堤において、十分な耐水性能を確保するために、構造体、基礎、根固めを強固にすることが重要である。

写真５　普代川河口の防潮水門
（越流した津波で検査用桁が折損するも、本体は健全）

写真５は東日本大震災直後の防潮水門である。巨大津波の波力に十分に耐える構造の一例である。

防潮堤以外では、比較的低所に設置される海水ポンプ系、取水塔、主要屋外配管、非常用燃料タンク、さらに原子炉建屋・タービン建屋の耐水扉などが、耐水性を確保すべき重要な設備に挙げられる。浮力に抵抗するための基礎構造も含まれる。

+[安全域へのシフトの実現]

3) 避水 (Dry Siting)－水から逃げる：いかなる津波も到達し得ない高所に設備・機器等を設置することである。避水策の対象となるのは、非常用ディーゼル電源、非常用資機材の収納庫、安全上重要な制御機器など、場所は、地形上の高台、軽量設備には建屋の上層階などが考えられる。また、新設プラントの場合、敷地高の決定は重要な避水策的判断である。

防水・耐水・避水のオプションを的確に組み合わせ、可能な津波対策の柔軟性を高めることは、本稿で提唱する耐津波工学の役割である。これにより、プラントごとに異なる条件に応じた総合的な津波対策の構築、多様な手段の併用によるリスク低減、などの目標達成に資することとなる。

耐津波工学は、今後整備されるべき原発の「耐津波設計」の技術基盤となり、また津波PSAにおけるフラジリティー評価の基礎となる。これはさらに、図１に示した確定論的設計と残余のリスク評価の連携を、津波対策においても実現させるための共通基盤となる。

５．耐震設計と耐津波設計の連携を

福島第一原発の事故は、非常時に原子炉の安全を確保する「止める・冷やす・閉じこめる」機能が、深層防護のフロント系だけでなく、非常用電源や最終ヒートシンクなどのサポート系に深く依存する事実を再確認させた。耐震設計では、「耐震重要度」の形で重要なプラント要素の耐震設計を手厚く行う体系が成立している。この論理を耐津波設計に適用し、重要度が高いプラント要素には十分な耐津波工学的対策（クリフエッジの解消）を施す枠組が必要である。また、プラントは津波来襲の前に地震動の影響を受けるので、耐震と耐津波の観点から整合性ある体系が求められる。こうした検討が、地震・津波PSAの本格導入とともに、実務の場で進むことを期待する。

６．むすび

筆者の研究活動はもともと土木耐震工学を出発点とし、地震工学とリスク論を主要な研究手段として、地震ハザード論、ライフライン地震工学、防災情報システム論、防災技術の情報基盤などの研究を行ってきた。原子力分野では、日本原子力研究所（当時）の地震リスク研究(1985-2001)および原子力発電技術機構(NUPEC)／原子力安全基盤機構(JNES)における地震PSA研究の討議（1994 -)、耐震指針検討分科会での討議（2002-2006)、最近では、日本地震工学会の「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」での地震工学研究ロードマップの構築（日本原子力学会と連携)、国際原子力機関 国際耐震安全センター(IAEA-ISSC)における地震安全プロジェクト(EBP)の推進、などの活動を通して、原子力発電所の地震安全に関する技術課題に関わってきた。これらの経験を基礎に、東日本大震災と福島第一原発の事故という現実に直面して半年、自身の経験と多くの人々との討議を通して形成してきた概念を本文にとりまとめた。

本稿は、東日本大震災をふまえた原発の安全課題につき、主として地震工学とリスク論の観点から問題提起したものである。IAEA閣僚会議への日本国政府の報告には、包括的で的確な28項目の教訓（文献2) XII）が掲げられている。今後それらが着実に実行されることを切望するものであり、そのための基礎論のひとつとして、本稿がいささかでも貢献できれば幸いである。

本稿の内容は、筆者が専門とする地震工学とリスク論のほかに、地震学、津波工学、システム安全(原子力、機械) などの諸分野にまたがる。そこでは、日頃のこれら多分野の専門家との討議が大きな源泉となっており、分野を超える交流の重要さを改めて痛感させる。

これらの分野の方々から、本稿についても多くの貴重なご意見を頂いた。記して深謝の意を表する。

参考文献

1) IAEA (International Atomic Energy Agency), “IAEA International fact Finding Expert Mission of the Nuclear Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami, 24 May - 1 June 2011, Mission Report, 16 June 2011 (http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf)
2) 原子力安全に関するＩＡＥＡ閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－、原子力災害対策本部、2011.6. (http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html) ／英語版は(http://www.kantei.go.jp/foreign/kan / topics/201106/iaea_houkokusho_e.html)
3) 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針、原子力安全委員会、2006.9. (http://www.nsc.go.jp/taishinkojo/index.htm)
4) 島崎邦彦：超巨大地震、貞観地震と長期評価、科学、Vol.81, No.5, pp.397-402, 2011.5.
5) 佐竹健治・酒井慎一・藤井雄士郎・篠原雅尚・金沢敏彦：東北地方太平洋沖地震の津波波源、科学、Vol.81, No.5, pp.407-410, 2011.5.
6) H. Sugino, Y. Iwabichi, M. Nishio, H. Tsutsumi, M. sakagami, and K. Ebisawa, Development of Probabilistic Methodology for Evaluating tsunami Risk on Nuclear Power Plants, CD-ROM Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 12-17 October 2008, Paper 15-0035.
7) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法（案)、2009.3.
8) 阿部　壽・菅野喜貞・千釜　章：仙台平野における貞観11年（869年）三陸津波の痕跡高の推定、地震、第43巻、pp.513-525、1990.
9) 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について、地震調査研究推進本部地震調査委員会、2002.7.31 (http://www.jishin.go.jp/main/chousa/ 02jul_sanriku/tenpu.pdf)
10) 島崎邦彦：震災後の地震発生予測、アジア時報、2011.6.
11) 今泉俊文・石山達也・原口　強・宮内崇裕・後藤秀昭・島崎邦彦：東北地方太平洋沿岸における地質調査、宮城県沖地震における重点的調査観測（平成19年度）成果報告書、pp.107-132、2008.5.
12) 行谷佑一・佐竹健治・山本　滋：宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における869年貞観津波の数値シミュレーション、活断層・古地震研究報告、No.10, pp.1-21, 2010.
13) 東京電力株式会社福島第一・第二原子力発電所事故を踏まえた他の発電所の緊急安全対策の実施について、原子力安全・保安院、2011.3.30. (http://www.meti.go.jp/press/20110330004/20110330004.html)
14) 主要設備の被害状況リスト、東北電力ﾎｰﾑﾍﾟｰｼﾞ (http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afieldfile/2011/05/30/ab5.pdf)
15) 亀田弘行・高田毅士・吉田　望・中村　晋・中村英孝：原子力発電所施設に関する地震工学研究ロードマップ構築に向けて、第13回日本地震工学シンポジウム、2010.11.
16) 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2007、日本原子力学会、2007.9.
17) 耐震指針検討分科会の見解、原子力安全委員会、原子力安全基準・指針専門部会、2006.5. (http://www.nsc.go.jp/anzen/sonota/kettei/20060919-32.pdf)
18) K. Ogura, N. Nojima, H. Kameda, and K. Hibino, “Development of Level 1 Seismic PSA Method for Multi-Unit Site”, Proceedings of 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE19), May 16-19, 2011, Chiba, Japan.
19) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術、2002.2.
20) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：津波評価手法の高精度化研究、土木学会論文集B, Vol.63, No.2, pp.168-177, 2007.6.
21) 首藤伸夫・佐竹健治・松冨英夫・今村文彦・越村俊一 編：津波の辞典、朝倉書店、2007.11.

被災地からの声

今回の東日本大震災の特集号では、被災地に居る会員の方々に寄稿を募り、
・地震被害の教訓や今後の復興に望む事項
・今回の震災に日本地震工学会が貢献すべき事項
・今後の大規模地震に対して地震工学の技術者がすべき事項
など、自由な意見を書いて頂きました。寄稿して頂いた方々には感謝いたします。今後も、会員の皆様が震災に対して感じたことや伝えたいことを掲載する企画を続けていきたいと思います。

（会誌編集委員長　斉藤大樹）

仙台平野の巨大津波

東北大学名誉教授
柴田　明徳

東日本大震災の巨大津波は予想をはるかに超えるものであったと言われている。特に、仙台平野のように出入りの少ない海岸で、このように大きな津波を予想していた人々は殆どいなかったと思う。しかし、歴史を詳しく振り返れば、これは正しくなかった。

仙台在住の郷土史家である飯沼勇義氏は、仙台平野に襲来した巨大津波の歴史について長年にわたり研究を続け、16年前の1995年にその成果「仙台平野の歴史津波－巨大津波が仙台平野を襲う！」を仙台の宝文堂から出版された。そこには、今回の大津波が見事に予測されている。869年の貞観津波は三代実録によりよく知られているが、1611年の慶長津波については、歴史資料の不足によりあまり知られることがなかった。氏は今回の津波で被災し、避難所生活を続けながら、新著「３・１１　その日を忘れない。」を鳥影社から出版された。一読をお勧めしたい。

また、東北大学理学部の箕浦幸治教授は、10年前の2001年に、東北大学広報誌「まなびの杜」16号で「津波災害は繰り返す」と題して、表層堆積物の調査からこの3000年に3度の巨大津波が来襲していることを科学的に明らかにし、貞観から1100年の時を経て、その再来を強く警告された。本年9月の「学士會会報」第890号に詳説を寄せておられる。

防災科学に関わる者は、関心を狭い領域だけに限ることなく、科学と社会を含めた大きな広い視野を持ちつつ、絶えざる研鑽を積むことが求められる。

発生頻度の低い巨大地震・津波対応の議論を

東北大学 大学院工学研究科
土木工学専攻 教授
風間　基樹

被災を受けた自治体において復興方針素案作成のお手伝いをしてきた。半年が過ぎて少しずつ冷静に考えることができるようになってきた。自身が仙台に住んでおり、震災の影響を受けていることもあって、専門家として客観的発言ができていたかどうか反省を含め自問している。専門家にはその復興方針を客観的に判断することが期待されている。しかし、原案方針と違う意見や、地域の集団移転など当事者の生活に直接かかわる判断をする場合には、考えていることが言えない雰囲気がある。先だって、ある自治体の復興方針の検討会議の場で、津波に対する多重防護策としての県道の盛土のかさ上げ案に対して疑問を呈した。その実効性自身に疑問がある上に（整備しても越水を完全に防げない、海側の浸水深が逆に高くなる、海面上昇・地殻変動の可能性から将来に渡って性能が担保されるか不明）、数百年から千年に一度の津波対策と普段の生活に不便さ（内水氾濫、土地利用の制限、景観など）とのバランスがとれていると思えなかったからである。発生頻度が数百年から千年オーダーの巨大地震・津波への対応については、学会レベルでももっと深く議論し、国民的な合意を形成する必要がある。

想定内と想定外 ー誰にとって？

東北学院大学 工学部環境建設工学科
教授
吉田　望

最近、想定内、想定外という言い方をされることが多い。私の専門分野についてこれを考えてみると、ほとんどが想定内である（大きい地震の発生は私の分野ではないので数えていない）。たとえば、仙台市では2000戸近くが造成地盤の変状に伴い被害を受けているが、これについては仙台市近くの技術者であれば常識的なことで、私も講演のたびにその可能性を話してきた。また、千葉県の埋立地で大規模な液状化が発生したことが話題になっているが、私は2年ほど前に海溝型巨大地震に対する液状化予測に関する論文を書き（日本地震工学会論文集、第9巻、第3号）、従来の液状化判定でFLが2までは液状化することを指摘している。

ところで、このような情報がどこまで届いているのか疑問に思った。たとえば仙台市では78年の地震と前と同じ位置に亀裂が入り、同じ家が壊れている。しかし、住民は前の被害を知らない。液状化についても地震後になってやっと論文が着目され始めている。

つまり、私たちのイメージしている想定内と一般の人の想定内には大きな違いがある。このギャップをどのように埋めていくのかが私たちの課題の一つのように思える。

東北地方太平洋沖地震後の耐震設計

日本大学 工学部建築学科 教授
浅里　和茂

やはり私たちは地震を見くびっていたのかもしれない。日本大学工学部のキャンパスは福島県郡山市にあり、揺れによる被害は小さかったものの、精神的なものも含めたその後の影響は大きなものがある。これまで福島県沖を震源とする大きな地震は少なく、専門家たちは「静かな地震」などその少ない理由を探していたが、やはりそれは誤りであった。巨大地震発生の時間的スパンは人間の感覚とはやはり相容れないものなのだろう。

今回も建築構造における新耐震設計法は恐らく有効に機能したと考えられるが、太平洋沿岸部はその検証さえ難しく、現在も立ち入りを拒んでいる地域さえ存在する。そして津波に対しては全く想像もせず、原発事故に至っては耐震設計以前の問題である。福島県内において耐震化に微力ながらも役立とうとしてきた自分がいかに無力な存在であったか、被災地の当事者となってしまうと被害の大小に関わらず身動きがとれなくなることも思い知らされた。一度覆された自分自身の価値観を再構築する必要を感じるとともに、今後は振動だけを問題にするのではない広い意味での耐震設計が総合的に成立するよう、裾野の広い技術者、研究者が揃う地震工学の果たす役割は大きいのではないかと考えている。

建物の地震被害と構造技術者の役割について

東北大学大学院 工学研究科
都市・建築学専攻 助教
迫田　丈志

3/11 14:46東北大学青葉山キャンパス総合研究棟（13階建）の12階にて被災した。安否確認、応急危険度判定、被害調査から感じた“構造技術者の役割”の一つは性能周知義務である。私の知る限り、新耐震建物の構造被害は殆ど見られず、また耐震補強した建物の倒壊もなかった。しかし、地震直後に新しいマンションで怯えた人々は大勢いた。二次壁がせん断破壊し、ドアや窓の開閉にも障害を期し、避難階段Exp.Jは衝突してコンクリートが破損し、鉄筋が露出した。補強建物でもせん断ひび割れや建物沈下等が生じた。この程度の被害は仕方ないという一方で、無被害の建物も多く、損傷した建物はクローズアップされた。耐震設計時から、地震の規模と損傷程度について考え、使用者に周知されるべきであった。計算や施工の誤差はあるものの、建物の性能を適切に評価し、使用者が納得していなければならない。これが、性能設計が可能な現在の構造技術者の役割だと思う。使用者は性能を選択でき、地震被害が想定より小さければ皆幸せである。無被害建物からは設計法の利点、被害建物からも性能設計の成果が発信される。今後も積極的に性能設計を取り入れ、性能表示と使用者への周知によって減災と構造技術の発展に努めたい。

3.11 東日本大地震に被災して思ったこと

ビルガードシステム研究所
環境・構造部 部長
沼尻　靖久

3.11 茨城県つくば市で被災しました。

東日本大震災でつくば市は震度6弱、死傷者14名、家屋被害1724件、塀損壊849件、道路損壊297件、上下水道破損212件でした。（H23.6.1現在）

地震発生時RC構造の診療所におり保守をしていました。停電のため電子カルテが使えなくなり休診となりました。現在、ほとんどの医療用機械は電気を使うので蓄電池や自家発電を持たない所は診療に支障がでます。今後蓄電池や自家発電装置等を購入しやすくする必要があります。

自宅の14階のマンション1階では壁にはひび割れが入り、余震も続いていたので不安な気持ちでした。被害は7階から12階の中間階がひどく、エキスパンションジョイント付近では平面計画のL字になっている交差部分が壊れていました。14階ではエアコンの室外機が15cm程度ずれていました。地震後余震が多くひび割れが増えており構造耐力の低下が心配です。

同市の実家では、ブロック塀が10ｍくらい倒れていました。人的被害はありませんでしたが、ブロックも固まりとなるとかたづけるのが大変でした。

福島第一原子力発電所の事故で、放射性物質が飛散し、その結果、屋外にいた多くの国民が被曝し農作物、水産物も汚染されたことは残念なことです。福島第二原子力発電所キャスクで入力地震動の床応答を設計したことがあるのですが、原発の設備機器については耐震性を再検討したほうがよいのではないかと思います。

今後、沿岸の地震で陸路が断たれた場合は海上からの救助法とその整備を考えるべきだと思います。

茨城県ではなぜ史上まれにみる激甚で広範囲な災害が起きたのでしょうか？

茨城大学名誉教授
安原　一哉

東北三県は津波災害、関東地方は液状化災害が顕著であることは、マスコミでは頻繁に取り上げられますのでよく知られていますが、茨城県では何があったのか詳細はあまりよく知られてないようです。しかし、県北では津波災害、県南では液状化災害で代表されるように、“何でもあり”の状況でした。東海原発も決して安全ではなかったといわれています。さらに、これも東北地方ではとりわけ顕著だった沿岸域での地盤沈降も起きています。茨城県は地震を含めて災害の少ない安心な県だと行政も住民も信じていました。そこに油断があったのかもしれません。しかし、茨城県北部は活断層の空白地帯です。にもかかわらず、いったい、なぜこんなことになったのでしょうか？またこれからどのような防災・減災対策を講じていけばよいのでしょうか？地震工学会は、土木学会、建築学会や地盤工学会などと連携してこのことに対して答えが得られるよう、メカニズムの解明に総力を挙げてほしいと思います。さらには、地球温暖化に伴う気候変動との複合的な災害も懸念されています。地球は最も悪いシナリオの中に行きつつあるような気がします。災害科学に係る学問分野間やコミュニティ間の連携が必要ではないでしょうか。地震工学会は領域の垣根を取り払った災害低減に対する横糸の役割をぜひ果たしてほしいと思います。

防災に安全率を用いることの危険性

筑波大学 システム情報系 教授
境　　有紀

いろいろ思うことがある中で、よく用いられる安全率の考え方を防災に用いることの危険性を感じている。例えば、今回、津波で多くの人命が奪われてしまった原因は、想定を越える津波高さなど様々あるが、大きな揺れを感じ津波警報が出たにもかかわらず避難しなかった人が非常に多かったのは間違いないだろう。そうなってしまうのは、これまで津波警報が出たにもかかわらず、大した津波は来ないということが繰り返されてきたからである。これは、津波警報が出ずに大きな津波が来るということを避けるために、警報の精度の不足を安全率でカバーしているからだろうが、津波警報が出ても、大した津波は来ないということが繰り返されれば、人間どうしても、津波警報が出ても津波なんか来ないとなってしまう。警報の精度を上げる努力をするのはもちろんだが、現状では、海岸近くで大きな揺れを感じたら、津波警報を確認してる暇などなく、とにかく急いで高台に避難、でも、実際に津波が来るのは10回に1回で、9回の無駄足を踏むことが大事という防災教育しかないと思う。これは、緊急地震速報や震度算定法も同じで、現状の精度や使い方の正しい理解がなければ、逆に被害を拡大させることにもなりかねない。

311地震と留学生⇔「隠れている防災教育の盲点」

東北工業大学 工学部建築学科 教授
薛　　松濤

311地震時に仙台にいました。耐震を専門としているので、地震直後からカメラを持って仙台市内を数周し、宮城県庁にも行き、その後、親に頼まれて面倒を見ている留学生の安全確認に東北大学の片平キャンパスに行きました。そこでかなり人数の中国人留学生と会い、その時の出来事でした。

日本の生活に慣れて言葉も上手い学生も多いのですが、当然ながら殆ど話せない学生もいます。私はその時に会ったのは、まだ日本語の話せない留学生でした。彼らは地震の後、停電のため大学から帰され、一度、各自で自宅に帰りました。しかし、夜になって明りもなく、電話が通じず話のできる人もいないので、余震が続く中で怖くて落ち着かず、キャンパスに戻るしかなかったというのです。

その留学生たちは、「逃げてください」や「避難してください」といわれてもわからないし、防災関係の知識はゼロに近いのです。たとえば、目の前に避難所があっても、自分が入っていいかどうかの判断はつかないし、食料があっても自分が貰っていいかどうかも分からないのが実情でした。

片平キャンパスには避難所はありませんが、発電機が動き電気がついている割と新しい建物があり、キャンパス中の人がそこに集まっていました。耐震が専門の私から見ても、その建物が避難所として適切かどうかすぐにはわかりませんでしたが、とりあえず留学生たちをそこに案内し、一晩過ごせるようにしました。避難所の食べものをもらって食べてもよいことを教えてから、他の留学生などの知人を探しに、片平キャンパスを出ました。

このとき感じたのは、留学生を含む外国人の防災教育や災害対応体制の重要性です。新規に来日した留学生に対しては、日本での生活指導の一環として、災害への備えや非常時の対応を徹底することが必要と考えられます。

「地域とともにある学校づくり」の実現に向けた地震工学研究の社会貢献

東北大学 准教授
佐藤　　健

東日本大震災では多くの子どもたちが津波の犠牲になった。未来を担う子どもたちを災害から守るためには、学校だけでなく家庭や地域が一体となった生きる力を育む災害安全教育の実践が必要である。その実践は、災害に強い安全・安心な持続可能な地域社会の構築につながる。

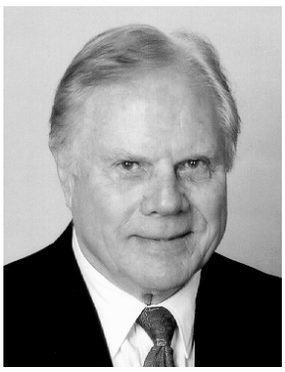
文部科学省では、この震災を受けて、学校が地域の人々と目標を共有化した「地域とともにある学校づくり」を積極的に推進しようとしている。今、まさに「地域の教育力」が問われている。ただし、地域の教育力がマイナスの効果とならないような注意も必要である。地域住民のその土地での災害経験は貴重ではあるが、自分自身の経験を超える災害に対するイメージを持つことが一般に容易ではない。時として経験が仇となる場合も決して少なくない。それだけに、人間の世代交代の周期と、低頻度巨大災害の発生周期とが大きくかけ離れていることを再認識できる。

今後、この震災の教訓を生かして、学校安全計画の策定や見直しが進められる。その際の学会や会員の社会的責任として、災害学理の究明に加えて、研究成果の教育現場への普及や積極的な社会還元も期待されていると考える。

追悼文

カリフォルニア大学バークレイ校Joseph Penzien名誉教授のご逝去を悼む

川島　一彦
●日本地震工学会会長



米国における地震工学研究の草分け的存在であったカリフォルニア大学バークレイ校名誉教授Joseph Penzien先生が平成23年9月19日にお亡くなりになりました。Penzien先生のご経歴や業績については日本地震工学会の会員であるカリフォルニア大学バークレイ校のStephen Mahin教授から米国地震工学会（EERI）に掲載予定の原稿を送っていただきましたので、こちらをご覧いただきたいと思います。Penzien先生は国際的に広く知られた地震工学の専門家でありましたが、アジア圏、中でも日本に多くの知己を持ち、日本の地震工学の発展に終生暖かいまなざしを注いでくれた方でありました。内藤多仲、金井清、武藤清、岡本舜三、大久保忠良、渡部丹氏らとの親交が深く、地震工学の発展に時代に即した息吹を吹き込んできた日本人の慧眼に敬意を抱かれておられました。“地震工学を勉強するなら日本に行くのがよいよ”というのが口癖で、私も何回かお話を伺ったことがあります。

平成23年7月下旬に心臓弁の取り替えという大手術をされ、その直前に電話でお話を伺ったのが最後になってしまいました。“手術後、体力が回復する8月中旬以降に遊びにおいで”と言われていて、その通り、手術後まもなく、ご自分で車を運転するまでに回復されておられました。私は10月中旬に渡米する用件があったため、その際にお目にかかろうと思っていました。

ところが、平成23年9月15日にご自宅の庭でつたを刈り込んでいる最中に転倒し頭を強打されました。当日、夕方までは問題なかったようなのですが、その後、容態が急変し、9月17日の段階で危篤状態になられ、9月19日朝にお亡くなりになられました。86歳のご生涯でした。9月27日にご家族等近親者に見守られてご自宅近くのカリフォルニア州Lafayette市墓苑に埋葬されました。ご家族のお許しを得て、私も10月中旬に渡米した際、墓参をしてきました。

EERIの弔辞にあるように、Penzien先生をしのぶ会が平成23年11月12日午後5時～ 8時にカリフォルニア大学バークレイ校で開催されることになっています。

最後に、パーソナルになり過ぎることを承知の上で、Penzien先生の愛弟子である米国科学財団Chi Liu博士がPenzien先生の4人のご遺族に送った言葉をつけておきます。Chi Liu博士と同じ思いを抱かれる方が多いと思われるためです。

Bob/Donna/ Karen/Charlene:

Thanks for informing me that Joe is buried close to Jeanne your mother in Lafayette Cemetery. He is now resting in peace and comfort with the woman of his love, no more work, no more travel away from home, no more any other distraction. I know that is what he wants and that is also what you and we want.

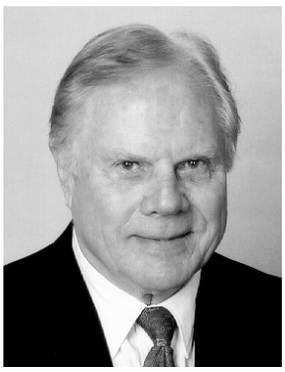
I also know Joe wants his children to move on to continue your happy and dynamic lives, be good persons, and raise and love your children like what he did.

Penzien先生のご冥福を心からお祈りする次第です。

Obituary

Joseph Penzien, 1924-2011

(EERI Newsletter, October 2011 Volume 45, Number 10 より抜粋)



Joseph Penzien, an Honorary Member of the Architectural Institute of Japan and the US Earthquake Engineering Research Institute (EERI), and a world renowned pioneer in the field of earthquake engineering, passed away on September 19, 2011, at Kaiser Permanente Medical Center in Redwood City, California. During his remarkable career, he received awards, including EERI's highest honor, the George W. Housner Medal, in 1993, and was EERI's Distinguished Lecturer in 2000, for which his topic was "Earthquake Engineering for Transportation Structures: Past, Present, and Future."

The only one of eight siblings to attend college, Joe took 2 1⁄2 years to earn a Ph.D. from the Massachusetts Institute of Technology, and then embarked on a 35-year academic career (1953-1988) at the University of California, Berkeley (UCB). He was instrumental in developing the teaching program in structural dynamics and earthquake engineering that many considered the best in the world. Because of his ability to foster a spirit of collaboration, his tenure was characterized by groundbreaking research on a wide variety of topics, such as characterization of ground motions (including the concept of their principal axes), inelastic response of buildings, soil-structure interaction, stochastic response of structures, and earthquake engineering of tunnels, offshore oil-drilling platforms, and bridges.

At UCB, he was founding Director of its Earthquake Engineering Research Center (EERC), and played a major role in developing the shaking table, dedicated in 1972, that was the forerunner of those that now exist in many countries. He spearheaded long-lasting cooperative research programs with Japanese colleagues. His 1975 book, Dynamics of Structures (co-authored with Ray Clough), was translated into several languages and was a major influence on subsequent textbooks. After retiring from UCB, Joe co-founded, with Wen Tseng, International Civil Engineering Consultants (ICEC) in Berkeley.

Highlights of Joe's distinguished career are recounted in his 2004 EERI oral history, available at http://www.eeri.org/site/images/projects/oralhistory/penzien.pdf.

A celebration of his life is being planned Saturday, November 12, 2011, from 4:30-8:00 PM at the Faculty Club at UC Berkeley. For more information, and to express your thoughts with his family and friends, visit http://peer.berkeley.edu/events/2011/09/celebration-of-life-for-joseph-penzien/. In lieu of flowers, Joe's family will be establishing a scholarship in his honor. Further details on contributing to this scholarship fund will be available on the above website.

ニュース

東日本大震災国際シンポジウムの開催について

One Year after 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake
-International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake -

2012年3月3日（土）、4日（日）
建築会館ホール他会議室（東京都港区芝5-26-20）

主　催　一般社団法人日本地震工学会、社団法人日本建築学会、公益社団法人土木学会、
公益社団法人地盤工学会、一般社団法人日本機械学会、公益社団法人日本地震学会
後　援　国土交通省、文部科学省、環境省、日本学術会議、国土交通省国土技術政策総合研究所、
独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人港湾空港技術研究所、独立行政法人土木研究所、
独立行政法人建築研究所、財団法人電力中央研究所

1）開催趣旨

東日本大震災は観測史上世界第6位に相当するマグニチュード9.0の超巨大地震によってもたらされ、死者行方不明者約2万人という我が国の震災史上で1923年関東大震災、1995年兵庫県南部地震とならぶ甚大な被害を生じました。我が国は国際的にも地震災害が多発し、過去の幾多の苦い震災経験を踏まえて、世界でも最も地震研究や各種震災対策が進んだ、いわば世界のお手本の国です。その我が国で生じた大規模災害であることから、震災危険度にさらされている世界各国から、地震被害の実態や今後の日本の復興方策に関心が寄せられています。

我が国は国際的な情報発信が不十分であるとの指摘を受けることが多いのですが、今回の震災に際しては、我が国からの情報発信を正しく行ない、地震災害に苦しむ世界の国々と情報共有していくことが、世界の地震工学を推進する上で重要であると同時に、これを実施する責務が我が国にはあります。

このような考え方から、東日本大震災からほぼ1年後の2012年3月3日（土）、4日（日）に、国際シンポジウム（One Year after 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake -International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake -（東日本大震災から1年―日本の超巨大地震から何を学ぶかに関する国際シンポジウム））を開催することになりました。

国際シンポジウムの開催は、一般社団法人日本地震工学会、社団法人日本建築学会、公益社団法人土木学会、公益社団法人地盤工学会、一般社団法人日本機械学会、公益社団法人日本地震学会の6学会が担当し、日本地震工学会が幹事学会となります。

また、国土交通省、文部科学省、環境省、日本学術会議、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人港湾空港技術研究所、独立行政法人土木研究所、独立行政法人建築研究所、財団法人電力中央研究所の後援が得られることになっています。

シンポジウムに先立ち、平成24年3月1日(木)、2日(金)には現地視察を実施予定です。

2）シンポジウムテーマと論文投稿

国際シンポジウムでは、1）地震、2）地震動、3）津波、4）液状化、5）被害の実態（① 液状化による土構造物の被害、② 建物の被害、③ 交通施設の被害、④ ライフライン施設の被害、⑤ 機械系施設、電力施設の被害、⑥ 火災、⑦ 住民の被害、避難、⑧ 復興、⑨ その他）、6）システムとしての問題点と教訓、将来へのメッセージ等を対象としています。

シンポジウムはすべて英語で行い、発表論文は論文集（CD-ROM）として刊行されることになっています。

論文投稿の手順は以下の通りです。

（1）アブストラクトの提出期限：平成23年11月15日
（2）アブストラクト採否の連絡：平成23年11月30日
（3）論文投稿期限：平成24年2月1日

3）ウェブページ

国際シンポジウムの詳細については、以下のウェブを見てください。

http://www.jaee.gr.jp/event/seminar2012/eqsympo/Great_East_Japan_EQ_Symposium.pdf

会員の皆さんの参加と積極的なご支援をお願い申し上げます。

編集後記：

年に2回（1月末・7月末）の発刊となる日本地震工学会の会誌ですが、東日本大震災の甚大な被害を受け、定例の発刊とは別に、震災特集号を刊行することと致しました。本特集号では、「被災地の実態と課題」をテーマに多くの御寄稿を頂きました。大変お忙しいなか、御執筆を頂き、著者校正等にも細かにご協力してくださいました先生方に感謝申し上げます。

東日本大震災の被害記録を整理する中から、解決するべき多くの課題が浮かび上がってきました。これから様々な分野が連携し、解決していかなければなりません。また、その一方で、これまで発展し続けてきた耐震工学が、被害軽減に寄与したことも事実であり、過去の経験が生かされていることがわかりました。

次号発刊は3月頃を予定しております。震災から一年を経て、機械・建築・土木・地震の各分野から横断的に被災後の復旧活動とこれからの復興、また今後の地震防災などを題材とした東日本大震災に関する特集を企画しております。斉藤委員長のもと、これからも発信力のある会誌編集に努めていく次第でございますので、今後とも御期待頂きたく存じます。

千葉　一樹（東京理科大学）

会誌編集委員会

委員長	斉藤　大樹	建築研究所
幹　事	近藤　伸也	東京大学
幹　事	千葉　一樹	東京理科大学
幹　事	皆川　佳祐	埼玉工業大学
委　員	井澤　　淳	鉄道総合技術研究所
委　員	椛山　健二	芝浦工業大学
委　員	紺野　克昭	芝浦工業大学
委　員	芝　　良昭	電力中央研究所
委　員	副島　紀代	大林組
委　員	津田　健一	清水建設
委　員	中村いずみ	防災科学技術研究所

日本地震工学会誌　第15号　Bulletin of JAEE　No.15

2011年10月31日発行（年２回発行）
編集・発行　一般社団法人 日本地震工学会
〒108－0014　東京都港区芝５－２６－２０　建築会館
TEL　03－5730－2831　FAX　03－5730－2830

©Japan Association for Earthquake Engineering 2011
本誌に掲載されたすべての記事内容は、日本地震工学会の許可なく転載・複写することはできません。
Printed in Japan