

# 日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

## No.54

Feb.2025

---

特 集：阪神・淡路大震災から 30 年  
～震災時の経験とそこからの歩み～



<https://www.jaee.gr.jp/>

公益社団法人 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54号 2025年2月)

Bulletin of JAEE (No.54 Feb.2025)

## INDEX

### 巻頭言：

|                            |   |
|----------------------------|---|
| 本特集号について／浅井 竜也、久保 久彦 ..... | 1 |
|----------------------------|---|

### 特集：阪神・淡路大震災から30年

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 座談会：震災の記憶と地震工学の歩み ―入倉孝次郎先生、岡田恒男先生、濱田政則先生に聞く―<br>／聞き手 杉山 充樹、皆川 佳祐、浅井 竜也、久保 久彦 .....              | 2  |
| 講演会「阪神・淡路大震災から30年 ―地震工学の再定義と今後のアジェンダー」の開催報告<br>／高瀬 裕也、井上 和真、加藤 一紀、山本 健史、大村 浩之、森脇 美沙、上田 恭平 ..... | 8  |
| 強震観測 ～兵庫県南部地震から30年～／青井 真 .....                                                                  | 11 |
| 強震動予測および地震ハザード評価の発展／藤原 広行 .....                                                                 | 16 |
| 緊急地震速報の社会実装とその後の進展／干場 充之 .....                                                                  | 20 |
| 今も記憶に残る建築被害調査とその後の取り組み／中島 正愛 .....                                                              | 24 |
| 橋梁被害と技術開発／運上 茂樹 .....                                                                           | 28 |
| 地盤被害とその対策／安田 進 .....                                                                            | 33 |
| 機械被害とその対策／藤田 聡、古屋 治、中村いずみ、皆川 佳祐 .....                                                           | 37 |
| Eーディフェンスの建設とその成果／中埜 良昭 .....                                                                    | 41 |
| 地震防災におけるソフト対策の研究動向／目黒 公郎 .....                                                                  | 46 |
| 阪神・淡路大震災からの復興検証／室崎 益輝 .....                                                                     | 53 |

### 学会ニュース：

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 日本地震工学会・大会―2024開催報告／中嶋 唯貴 ..... | 57 |
|---------------------------------|----|

### お知らせ：

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| お知らせ .....                                                                                                                | 61 |
| 本学会に関する詳細はWeb上で／会誌への原稿投稿のお願い／登録メールアドレスご確認のお願い<br>／ご寄附のお願い／問い合わせ先<br>／ JAEE Newsletter 第14巻 第1号 (通算第41号) が2025年4月下旬に発刊されます |    |

### 編集後記

## 本特集号について

浅井 竜也

●東京大学生産技術研究所/会誌編集委員会 委員

／久保 久彦

●防災科学技術研究所/会誌編集委員会 委員

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震が引き起こした阪神・淡路大震災は、日本の地震工学と防災対策のターニングポイントとなりました。震災から30年を迎え、当時を経験した世代が引退していく一方、この震災を経験していない世代が地震工学の第一線を担うようになってきています。このような世代交代が進む中で、震災を契機とした地震工学分野の取り組みとその進展の流れを振り返り、その中での経験を次世代に語り継いでいくことは極めて重要だと考えます。そこで「阪神・淡路大震災から30年 ～震災時の経験とそこからの歩み～」と題した特集を今回企画しました。

まず地震工学分野で長年活躍し、日本地震工学会の会長も務められた入倉孝次郎先生、岡田恒男先生、濱田政則先生の三方にお越しいただいて、震災当時の経験、地震工学の変遷、そして今後の課題について伺いました。その座談会の模様を記事にまとめてお届けいたします。

今年1月に開催された講演会「阪神・淡路大震災から30年 – 地震工学の再定義と今後のアジェンダ –」について事業企画委員会より開催報告がなされました。本講演会では、地震、地盤、土木、建築、機械などの各分野の有識者による講演が行われ、パネルディスカッションでは分野横断的な連携について活発な議論が交わされました。

防災科学技術研究所の青井真氏には、震災後に整備が急速に進んだ強震観測網の発展とその防災への活用について概説いただきました。

防災科学技術研究所の藤原広行氏には、震災後30年にわたる、地震動予測・地震ハザード評価の取り組みに関して、地震調査推進本部の施策を軸に振り返っていただきました。

気象庁気象研究所の干場充之氏には、震災以降に導入された緊急地震速報について、導入までの流れやその後の進展についてまとめていただきました。

小堀鐸二研究所の中島正愛先生には、ご自身の体験も交えつつ、震災直後の建物被害調査やその後の取り組みについて執筆いただきました。

東北大学の運上茂樹先生には、土木構造物の中でも甚大な被害が生じた橋梁について、被害概要と耐震設計の変遷、今後取り組むべき課題について執筆いただ

きました。

東京電機大学の安田進先生には、液状化、河川堤防、盛土造成地といった地盤の被害とその要因、それらを踏まえて導入された対策について紹介いただきました。

東京電機大学の藤田聡先生・古屋治先生、東京都市大学の中村いずみ先生、埼玉工業大学の皆川佳祐先生には、高圧ガス、クレーン、昇降機などの機械について、被害概要とその後の耐震に関する発展、現在・今後の取り組みについて執筆いただきました。

防災科学技術研究所の中埜良昭氏には、実大三次元震動破壊実験施設「E-ディフェンス」について、震災を契機として整備された経緯や性能、運用開始後の各期の計画に応じた活用事例と今後の展望について紹介いただきました。

東京大学の目黒公郎先生には、震災による被害と得られた教訓、それらを踏まえて提案された総合的災害管理に関する概要や研究動向、実現に向けた具体的な手順等を紹介いただきました。

神戸大学の室崎益輝先生には、「阪神・淡路大震災からの復興検証」というタイトルで、大震災からの復興を多角的に評価いただきました。

本特集では、阪神・淡路大震災から30年の軌跡を辿り、地震工学と防災対策の進化を深く掘り下げました。過去の教訓を未来へつなぎ、新たな地震災害に立ち向うための一助となれば幸いです。



浅井 竜也 (あさい たつや)

東京大学生産技術研究所 基礎系部門、博士(工学)、専門分野：建築耐震工学、耐津波設計



久保 久彦 (くぼ ひさひこ)

国立研究開発法人 防災科学技術研究所 巨大地震災害研究領域 地震津波複合災害研究部門、博士(理学)、専門分野：強震動地震学

### 座談会：震災の記憶と地震工学の歩み —入倉孝次郎先生、岡田恒男先生、濱田政則先生に聞く—

聞き手

杉山 充樹 ／ 皆川 佳祐 ／ 浅井 竜也 ／ 久保 久彦

●大林組 会誌編集委員 ●埼玉工業大学 会誌編集委員長 ●東京大学 会誌編集委員 ●防災科学技術研究所 会誌編集委員

今から30年前に発生した阪神・淡路大震災は、日本の防災・減災対策に大きな教訓を残し、その後の地震工学の方向性に大きな影響を与えました。今回、地震工学分野で長年活躍し、日本地震工学会の会長も務められた入倉孝次郎先生、岡田恒男先生、濱田政則先生の三方にお越しいただいて、震災当時の経験、地震工学の変遷、そして今後の課題について伺いました。本記事では、その貴重な座談会の内容をお届けします。

—まず震災当時に感じたことについて教えてください。

入倉先生：

実務的に建築や土木に携わっている方にとっては、関西で地震が起きたということは非常に寝耳に水だったと思います。震災の直前に建築学会が一般向けのシンポジウムを大阪で行っていたのですが、関西は関東に比べて圧倒的に地震が少ないのに、なぜ同じ設計基準を要求するのかという話が出ていたくらいです。ただ地震学の見地から言うと活断層が地震を起こすということは既に分かっている、また関西には非常に活断層が多いことから、関西に地震がないというのはあり得ない、ということは科学的には当然のことでした。震災の直後にも、そういうことは前から分かっていたんだと地震学や地質学の先生が言われていました。しかしながら震災前の雰囲気としては、危ないから気をつけろということが皆さんに知れわたっていたわけではありませんでした。研究者にとっても1995年のあの日に起こるということは、身近に感じられなかったというのが率直な印象です。

岡田先生：

関西でそのような災害が起こったことは、私もちょっと意外に感じました。ただ一般論で言うと、恐れていたことが起こったなというのが第一印象でした。対策は進みつつあったんだけど間に合わなかった。

私がなぜ恐れていたかと言いますと、震災直前の5年間ぐらいは毎年の様に地震被害調査をやっていたんです。1990年にフィリピン、1992年にエジプト、1993年1月に北海道釧路沖、同年7月に北海道南西沖の地震が起こっている。そしてちょうど震災の1年前の1994



インタビュー風景

入倉先生(左)、岡田先生(中)、濱田先生(右)

年にはアメリカのノースリッジ地震、直前の1994年12月28日には三陸はるか沖地震が起こっているんです。これらの地震被害を見て、国内外を問わず耐震性の低い建物が存在していることを痛感していました。

もう一つ、1993年の北海道南西沖地震の後に、建物の地震対策の現状がどうなっているかという記事のある新聞で書きました。1番が地震を知る、2番が既存建物の耐震診断・耐震補強も含めて地震に強い町を作る、3番が被害を予測する、4番目が防災訓練をする、5番は避難をする、6番がパニックを防ぐ、7番が負傷者を救う、8番が応急危険度判定を含めて二次災害を防ぐ、9番が当面の生活を確保する、10番が町を復興する、そして被害原因を究明して元に戻って次の地震に備えるというものです。同じような話は、日本学術振興会の学術月報(1994年12月)や日本コンクリート工学協会のコンクリート工学(「建物の地震対策」、「建物の地震対策(続)」、1995年2月、11月)という雑誌でも書きました。心配していたのは僕だけじゃなくて、そういう原稿依頼があったりしたぐらいだから関係者は心配してたんですよね。だけど一般の人に広まっていなかったことは事実です。神戸でこんな地震が起こるなんて考えてもみなかったとかね。鉄筋コンクリートの建物なんて壊れると思っていなかったけど壊れるんですねって言った方がいたと聞きましたが、一般の人はそういう認識だったんだと思いますよ。確かに関西で起こることをあまり意識していなかったのは事実だけど、日本のどこかで何か起こるのではないかとい



う心配をしていた人は研究者にも行政の人にも結構いたと思います。直接の行動を十分には取れてなかったことは反省点ですね。

**濱田先生：**

震災当日は第1回日米都市防災会議が大阪で開催される予定であったため、前日の夜に新横浜から大阪に入って、早めに就寝してしまいました。翌朝5時46分、これまでに経験したことのないような激しい揺れに襲われました。最初は、関東地方に大地震が起こったのではないかと思いました。電話は通じていて、横浜の家に連絡を入れ、東京・横浜は無事だということで安心しました。日米都市防災会議会場には、アメリカからの参加者が集まっていて、防災会議を中止して日米で被害の共同調査しようということになりました。私も京都大学の教員とレンタカーで神戸に向かいました。最初に被害現場に突き当たったのは神戸市の深江地区の高速道路の倒壊現場でした。一本足のコンクリート橋脚が連続的に倒壊していて、我が目を疑いました。前年1994年にカリフォルニアで地震が発生して高速道路が倒壊しました。日本からも調査団が派遣され、「わが国の耐震設計はしっかりしているからこのようなことは起こらない」と言った団員もいました。私も同感でした。わずか1年後に、カリフォルニアで発生した被害を上回る被害が発生したことに衝撃を受けました。高速道路の被害現場にはマスコミがすでに集まっていて、一体これはどういうことだ、感想を言えと取り囲まれました。もう驚くばかりで何も言えなかったことを憶えています。関西でも大地震の発生の恐れが指摘されていたということなんですけども、耐震性の検証が十分でなかったのではと思います。



インタビュー中の濱田先生

—震災を受けていろいろなことを感じられたと思いますが、その感じたことを研究や実務にどう反映させていったのでしょうか。

**濱田先生：**

土木学会に基本問題検討会議という委員会を組織して、土木構造物の耐震性のあり方や設計法について議論しました。土木構造物の耐震性のあり方に関する基本方針を出しました。その一つは2段階の地震動に対する設計。従来は関東大震災などの記録を基にして設計震度を設定してきたのですが、それを遥かに上回るような地震動に対しても耐震性を照査しようという考え方です。非常に大きな地震動を考えることになりましたので、どこまで損傷を受けていいのか、構造物や施設の損傷をどこまで許容できるのか、いわゆる性能規定型設計が始まりました。今までの弾性設計を超えて、塑性域での残留変形を許す設計ということです。構造物そのものの機能もそうですし、構造物集合体として、システムの機能も重要です。基本方針に沿ってほとんどの土木構造物やライフラインの設計法が改定されました。橋梁をはじめとして、鉄道やガス、水道も全部変わり、レベル2地震動を考えようということになりました。そのとき問題になりましたのは、レベル2地震動をどう決めるのか、ということです。いろいろ議論がありましたが、神戸の海洋気象台での最大加速度が一つの基準となりました。それから弾性域を超えて設計するということになります。柱とか梁とかの部材は塑性域の挙動まで解析できます。構造物全体が塑性域に入ったときにどういう挙動をするか。塑性設計がほとんど進んでなかったため、その分野の研究が進められました。2段階地震動に対する設計法、性能規定型の設計法は国の防災基本計画に取り入れられて、多くの社会基盤施設の設計基準が改定されました。

**岡田先生：**

震災直後には建物の応急危険度判定の支援に関わりました。震災前日の1月16日午後には大阪で建物の応急危険度判定の国際シンポジウムを私がコーディネイターで開催したのですが、そこでは日本の状況に関する発表を、当時の建設省の担当の防災対策室長の方に依頼していました。しかも、応急危険度判定については1980年代の総合プロジェクトで建築と土木と一緒に開発しており、そのときの建築担当の防災対策室長が震災のときの住宅局長でした。震災時の住宅局のトップと担当者が応急危険度判定をよく知っている人だったのは非常にラッキーでした。地震が起こった日の午前中に私に連絡があり、建設省に行くと応急危険度判定をやるということで、その日のうちに準備が始まりました。1992年には静岡県と神奈川県ですでに応急危険度判定士の認定制度が出来上がっており、三陸は

るか沖地震の際には静岡県の評定士が応急危険度判定の試行をしていたこともあって準備が何とか間に合った。日本で初めての本格的な実施でしたから、大変でしたけどね。判定士を集めるのに講習会をたくさん開催しなければいけなかった。ただ、マスコミからは遅いじゃないかという批判もありました。一つの新聞だけが、にわか仕立てにしてはよくできたと書いてくれました。

それまでなかなか進まなかった応急危険度判定士の認定制度の普及が急速に進みました。同時に、1981年以前の、いわゆる旧耐震基準で建てられた建物の被害が深刻であったことがわかり、それらの耐震診断・耐震補強も全国的に促進されるようになりましたので、その支援にもあたってきました。

これも偶然ですが、1月1日から日本建築学会の副会長になったばかりのところ、すぐにその役職としての阪神・淡路大震災担当に任命されました。それで実施したことがいくつかあり、そのうちの一つに建築学会の中に特別委員会を立ち上げたことがあります。学会としての見解を提言しようということで、3年かけて1次、2次、3次という形で提言をまとめました。それから建築学会には災害委員会というのがありまして、調査は近畿支部中心にやっていただきましたので、私はその全体を見ていただけてありますけれども、個人的には文部省とタイアップして行った学校の調査には深く関わりました。

もう一つは、やはり基礎研究を学会としてもしっかりとやらないといけないということで、文部省に新しい研究費を出してもらいたいと相談を始めました。すると、土木と建築を統合した大きなプロジェクトなら通るかもしれないということなので土木学会の会長と相談して申請しました。結果として、土岐憲三先生を主査として、建築から私も入る形で、特定領域研究「都市直下地震による災害防止に関する基礎研究」という大型予算を取ることができました。僕は大学の定年が近かったので、こういう研究体制を支援するというのが使命かなと思いました。防災科学技術研究所のE-ディフェンス（3次元実大破壊実験施設）の計画や、理化学研究所の地震防災フロンティア研究センターの設立など、研究体制の支援には時間をかけて取り組んだつもりです。

最後に、実は日本地震工学会を設立しようというのも震災後の動きなんですよ。これについては特定領域研究でいろいろ交流があったことが非常に大きかったと思います。それまでは、地震工学関係の学会間の連携は震災予防協会という財団が担っていたんですが、



インタビュー中の岡田先生

予算があまりなく、会員制ではないので動きにくいということもあり、社団の地震工学会を作ろうということになりました。これはやはり阪神大震災の大きな教訓を生かした動きだったと思います。

#### 入倉先生：

地震学、特に強震動の研究者にとって、震災の前は大きな地震の記録が全くなかった。阪神・淡路大震災で何が変わったかということ、地震動の記録、特に強震動はやっぱり取らないといけないということ。日本はSMAC型強震計を世界に先駆けて作ったんですけども、それは紙媒体の記録だった。1990年代は、デジタル計器がようやくいろんな分野に取り入れられるようになって、日本でも阪神・淡路大震災を契機にデジタルの強震計というのが普及しました。もう一つの問題は、それまでは強震動記録は個人のものという考えで、ごくごく限られた先生しか使えなかった。自分で取らない限り記録が使えなかったんですね。それが変わった契機がやっぱり阪神・淡路大震災。

高密度強震動観測が研究だけでなく地震被害軽減のために必要だという国際的な取り組みは1978年以降行われていて、カリフォルニアではWilfred Iwan先生が提唱して地震断層の周りに強震計を置くことになり、1979年インペリアルバレー地震（Mw 6.5）では震源の極近傍域で記録が取れたんです。ところが日本ではそれができていなかったんですね。強震観測点を全国に1000点を置きましょうという計画を、防災科学技術研究所が中心となって、土木や建築の先生も集まって作ってたんですけど、全然予算が通らなかった。それが震災を契機にすぐに通って出来たのが、全国強震観測網K-NETですね。

地震学の研究者が集まって1960年に出したブループリントは地震予知を進めましょうというものでした。地震防災をするには予知さえすればいいということ





インタビュー中の入倉先生

で、当時は地震予知研究がすごく盛んでした。震災前までだと予知研究には予算がつくんですが、その周りの強震動研究にはほとんど予算がつかない。ところが1995年のときに予知できなかったということで、その考えがぐらつき始めた。震災後に地震調査推進本部ができたけど、最初は地震予知のための観測体制を充実させようと、高感度の地震観測やGPSによる地殻変動観測、活断層調査が中心に行われた。ただその中で、建築や土木などの工学研究者から、地震防災のためには、地震ハザードマップが重要だという意見が出され、そういうものを作るためにはやはり強震観測をしないとけないということになった。

阪神・淡路大震災で一番問題だったのは強震動記録がなかったことで、どんな地震だったか、なぜ家屋や高速道路が倒壊したか、直後にはわからなかったことです。ただこの地震の前から、地震や耐震工学の研究者が集まって関西に強震動観測が必要だということで、民間の事業者にかけあって、強震動の観測ネットワークを1994年頃に作っていたんですね。1995年には大阪から神戸にかけて10点だけ計器を設置していて、その一つが神戸大学にあって、震源域のすぐ近くで記録がとれた。そういう萌芽的な動きはあったのですが、国全体としてはなかった。震災の後、土木や建築の先生の要求もあって、ようやく強震動観測のネットワーク整備を行いました。

得られた強震記録は、強震動の研究、工学の研究につながるわけです。地震の前には残念ながらほとんどなかったけど、地震の後にそういう稠密強震動ネットワークの充実ができたというのが私にとっては一番大きなことです。

一震災後に進んだ分野と逆に今も課題が残っている分野について教えてください。

濱田先生：

塑性設計、構造物への外力と変形の関係が弾性域を超えて、残留変形が残る塑性域に入った場合の設計には多くの課題が残されていました。構造物がどう壊れていくのか。その解明のための一つの実験施設として、E-ディフェンスが建設されました。未だ十分に研究が進んでいるという状況ではないと考えています。

耐震設計法を発展させるために、地震で破壊された構造物や施設を中心に調査や研究を行ってきました。「なぜ壊れたか」という研究ばかりやってきたのです。「なぜ壊れなかったか」という研究をぜひ進めて頂きたいと考えています。能登半島地震では強烈な地震動に見舞われても多くの構造物が倒壊しなかった。橋脚の破壊も落橋もほとんど発生しなかった。強烈な地震動にどうして耐えたのか、そういう研究をしていただきたい。今までは、壊れたものばかりを調査してきました。その結果の一つとして設計震度が右肩上がりで増加してきました。壊れなかったものを調査していただいて、設計震度を下げていく。そのような視点をもって被害調査をしていただくのが重要だと考えています。

岡田先生：

お二人の先生が言われたことにコメントさせてください。濱田先生の「なぜ壊れなかったか」という研究を進めてもらうことには僕は賛成。壊れた建物を壊れたと証明するには、入力地震力を大きくすればできる。同じ方法で壊れていないやつを分析してみると壊れることになってしまうことがある。耐震診断を開発し、何点ぐらいあればいいかと検討していた際にも、理屈で言うと壊れるはずなのに、壊れていない建物があったり、その逆があったりしたのですが、壊れていない建物を診断したデータが少ないから境界が分からなくて困りました。それをぜひやってほしい。

もう一つ、入倉先生のお話に関連して、地表面の地震動観測データはたくさん採れるようになったけども、その記録どおりの地震波がそのまま建物の基礎に入るわけではないんですね。建物の基礎にどのくらい入ったかという記録が圧倒的に少ないわけです。だからそのギャップが埋まらない。これは前からいろいろな機会に言っていたことですが、建物の中にも地震計を付けてほしい。特に、公共の建物に地震計を付ける予算を出してほしい。

最近では構造物のヘルスマonitoringと言って主として民間の建物に地震計をつける事例が増えてきています。これはこれとしていいことなんだけど、民間の建

物ではデータが表に出て来にくい。しかも測定されたデータを使おうとすると、建物そのものの性質がわからないといけなく、建物のオーナーはそれを出すのは躊躇するのではないのでしょうか。ぜひ公共の建物にK-NETのように地震計をつけてくださいということ言ってるんだけど、残念ながらあまり実現していない。これについてぜひ地震工学会で声を上げてほしい。

それから、建物の基礎から上の性質は大分わかってきて、基礎の下地盤に入ってくる地震動の方も入倉先生のレシピなど研究が進んだ。だけど、この中間がわからないんですよ。だから今の建物は過剰な設計をしているものと不安なものが混在している。これは建築だけでは解決できないですね。今は地震工学会での交流が盛んになって、それぞれの領域での研究成果は互いに見えるようになってきたけど、それらを一つにして何かに生かすところまでには至っていないですよ。ぜひ地震工学会の将来の大きなテーマとして考えてほしい。

#### 入倉先生：

阪神・淡路大震災はわずか30年前だけれども、研究がガラッと変わった。大震災のもっとも大きな教訓は、やっぱりデータに基づいて研究しないといけないということ。土木や建築の先生は過去の震災経験から技術的に被害メカニズムを明らかにして、データがなくてもやれることがあるんですよ。ところが地震学の研究者はデータがなかったら何もできない。その意味では震災前の地震学は震源や震災のメカニズムは何もわかっていなかった。それが急速に30年間で変わったというのが大きな違いですね。

未だに重要だと思うんですけども、地震動の記録がない場合にどうするか。阪神・淡路大震災の前には大崎順彦先生による大崎スペクトルで重要構造物が設計されていたんですね。往々にしてあるんですけど、大地震の強震動がどうやってできたのかいまいちわかっていなくても経験的にこれさえ使えばいいというような形だったのではないかと思います。観測データと物理学をベースにしたシミュレーションで設計までなんとかしましょう、というようになったのは、やはり震災がきっかけでした。

この震災をきっかけに僕らが行ってきたのはフィジックスベースで、物理に基づく研究が王道リサーチだったけれども、これはもうオールドスタイルですね。今後発展させようとしたらそれだけだと限界がある。やっぱり今の時代はコンピューターサイエンスの発達で、AIを用いたディープラーニングとかを活用した新

たな研究が盛んになる必要がある。それだと必ずしも物理だけではなく、どのようにきちんとシミュレートするかということで現象解明が重要になってくる。

#### 岡田先生：

建物の耐震診断・耐震補強と応急危険度判定は阪神・淡路大震災の後に全国的に普及し始めましたけれども、これらは1970年代に想定東海地震対策の一環として静岡県で開始されていました。当時の県知事が、駿河湾を震源域とする大規模地震（想定東海地震）が明日来てもおかしくないという地震予知説を受けて対策を始めたので、静岡県内ではずいぶん進んでいたんですよ。その頃は地震発生1週間前には予知ができると期待していた人がたくさんいて、被害想定なんかも予知ができるという前提で進み始めました。ただ、それだけでは予知が外れた場合に困るということで、予知ができた場合とできない場合の2通りの被害想定を行うようになりました。それで、予知ができた場合とできない場合とでもすごく違いが出ましてね。予知できると死者数は10分の1になるとか。予知できるならすべての建物の耐震診断や耐震補強なんか必要なくて、避難所の建物だけで十分ではないかという極端な意見も出たくらいでした。でもそうはいかないから、我々は当たって半分、当たらなくて半分ぐらいの気持ちで、いずれにしても耐震対策はしなければいけないと受け止めて耐震診断・耐震補強の支援をしてきたんです。最近では予知できない方向になってきた感じはあるけども、気持ちとしてはやってほしい。やっていただくと、ものすごく建築の造り方も変わるかもしれませんからね。

#### 入倉先生：

今は内閣府から防災対策の情報を出すときに、何も準備しなかった場合の被害と、ちゃんと防災対策をした場合の被害を両方出すことになっています。そういう意味では岡田先生が言っている防災対策をちゃんとすればこれくらい減りますというのが報告書に載ってるんですよ。地震予知ができるかできないかっていう話が、防災対策をするかしないかということに変わっているのは良い傾向だと思います。

—最後にですが、将来を担う若い世代にどんなことを期待しますか。

#### 濱田先生：

防災対策で最も重要な課題は、構造物、特に家屋等



の完全倒壊を防いで、人命の損失を出来る限り減少させることにあると考えます。住宅・家屋の耐震化を進めなければなりません、問題はコストです。このことはわが国のみならず世界共通の課題です。出来る限り低コストの工法を開発して普及させていかなければなりません。このことをこれからの地震工学の発展を担う若い研究者・技術者にお願いしたいと思います。

#### 入倉先生：

地震学のグループは地震工学会ではマイナーな存在だと思います。地震工学会は地震学会とは雰囲気が違うってね。地震災害を減らそうと思ったら実践的に何が必要かというのは、僕も地震工学会で非常に学ぶことが多かったです。研究の最先端を探ればいいのか、いわゆる地震学の研究者の基本的な考えですよね。地震工学会に来ると、それがどういう場に役立つか役立たないかが問題になる。地震学の幅を広げるために、また新しい課題を探すためにも、地震工学は重要なんじゃないかと思っています。

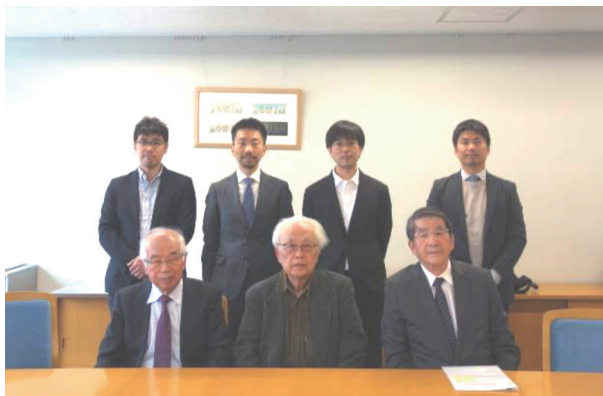
#### 岡田先生：

最近の建物の設計は、研究もそうですが、地震が起きたら構造物がどんなふうになるかっていう物理現象をあまり気にしてないように感じます。入倉先生のお話とは逆になってしましますが、僕はよく言うんだけど、耐震設計って物理だよ、その手段が計算だよって。要するに計算にばかりこだわる設計や研究が増えてきていて、一番最初の物理現象のところを忘れているんじゃないかと感じます。どうすればいいのかと考えてみると、そういうテーマに研究費が付きにくいのですね。これは研究費を出さない方の問題でもあるけど、出してもらえないから申請しないという負のスパイラルに入っている感じがします。こうやってこうしたらこんな結果が出ますという、カッコいい提案書が通りやすいように思います。しかし、どんな結果が出るかわからないけど、わかっていないからやるんだという提案もどしどししてもらいたい。わかっていないけど面白そうだな、何か役に立つかもしれないなというもののに予算がつくような仕掛けをどうやって作ればいいのかというのが、僕のこれからの仕事かと思っています。

もう少し抽象的なことを言うと、すぐ役に立つかどうかかわからないけども、いずれ役に立つような基礎的な研究をぜひ進めてもらいたい。特に耐震の問題みたいなものは一つの研究、一つのいい論文が書けたからといって、世の中がガラッと変わるような世界ではないんです。基礎的な研究がたくさん積み上がって、例

えば建築基準法の耐震基準が変わるのですね。だから小さな研究をみんなが積み重ねていくという努力が必要だと感じているんです。ぜひそういう方向で地震工学会でも議論が進んで実現していけばいいなと思います。

一日は貴重なお話を聴かせて頂き、ありがとうございました。



インタビュー後の記念撮影

2024年11月26日、建築会館にて  
文＝久保久彦

#### 入倉 孝次郎 (いりくら こうじろう)

1963年京都大学理学部物理学科卒。京都大学理学博士。京都大学防災研究所助手、助教授、教授、所長、京都大学副学長を歴任。専門は強震動地震学。

#### 岡田 恒男 (おかだ つねお)

1959年東京大学工学部建築学科卒。東京大学生産技術研究所教授・所長、芝浦工業大学工学部建築工学科教授、日本建築防災協会会長・理事長を経て、現在日本建築防災協会名誉顧問。日本学士院会員、工学博士。専門分野：建築構造物の耐震性評価。

#### 濱田 政則 (はまだ まさのり)

土木学会会長、産業施設防災技術調査会代表理事、アジア防災センター長、国境なき技師団会長、日本地震工学会会長、土木構造物の耐震設計法、補強工法の研究・開発に従事。

# 講演会「阪神・淡路大震災から30年 －地震工学の再定義と今後のアジェンダー」の開催報告

高瀬 裕也／井上 和真／加藤 一紀／山本 健史／大村 浩之／森脇 美沙／上田 恭平

●日本地震工学会 事業企画委員会

## 1. はじめに

令和7年1月24日に、(公社)日本地震工学会主催の講演会「阪神・淡路大震災から30年－地震工学の再定義と今後のアジェンダー」(以下、本講演会)を開催した。また、(公社)日本地震学会、(公社)土木学会、(一社)日本建築学会、(公社)地盤工学会、(一社)日本機械学会より後援いただいた。本稿では、本講演会の開催状況について報告する。

## 2. 講演会の概要

表1に本講演会の概要を示す。冒頭、高田毅士会長より本講演会の開催趣旨が説明された後、地震、地盤、土木、建築、機械の各分野において、阪神・淡路大震災での調査経験がある有識者をお招きして講演頂き、その後パネルディスカッションを実施した。閉会の挨拶は、次期会長に就任予定である東京科学大学・山中浩明先生よりいただいた。司会進行は、中村いずみ副会長が担当した。

表2に参加人数を示す。本講演会は、対面とオンラインのハイブリッド開催であり、現地参加46名、オンライン参加106名、さらに記者の方5名を加えた合計157名の方々にご参加いただいた。

表1 本講演会の概要

|    |                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 日付 | 令和7年1月24日                                                                                                                                                                                                                                          |
| 時間 | 13:00～17:30                                                                                                                                                                                                                                        |
| 場所 | 建築会館ホール                                                                                                                                                                                                                                            |
| 内容 | 13:00 開会の挨拶：高田毅士会長<br>13:05 講演会<br>地震 岩田知孝先生(京都大学名誉教授)<br>地盤 古関潤一先生(東京大学名誉教授)<br>土木 運上茂樹先生(東北大学教授)<br>建築 中埜良昭先生<br>(東京大学生産技術研究所教授)<br>機械 藤田聡先生(東京電機大学特別専任教授)<br>16:05 パネルディスカッション<br>17:05 質疑応答<br>17:20 閉会の挨拶：山中浩明先生<br>(東京科学大学教授)<br>司会：中村いずみ副会長 |

表2 参加者数

| 参加種別 | 参加方法  | 人数(名) |
|------|-------|-------|
| 一般参加 | 現地    | 46    |
|      | オンライン | 107   |
| プレス  | 現地    | 5     |
| 合計   |       | 158   |

(執筆 高瀬裕也)



開会の挨拶



岩田先生の講演



古関先生の講演



運上先生の講演



中埜先生の講演



藤田先生の講演

写真1 開会の挨拶と講演の様子

## 3. 講演内容

写真1に高田会長による開会の挨拶と各分野の講演の様子を示し、以下に各講演の内容を概説する。

### 3.1 地震

岩田知孝先生から、「1995年兵庫県南部地震後の強震動分野の発展と課題」と題してご講演いただいた。

兵庫県南部地震において強烈な地震動が形成された要因として、神戸側の震源断層破壊過程による速度パルス波と大阪堆積盆地を形づくる深い堆積層構造による地震動の増幅効果が解説された。

AK (After Kobe) 時代の強震動研究の成果として、地震調査研究推進本部（地震本部）の設立と強震観測網の充実が挙げられた。強震動研究の今後として、より多くの地震観測点の設置や強震動特性における地盤構造モデルを鍛える（新たな調査やその集約）、次世代に引き継いでいくような研究活動を継続していくことが肝要とのお考えを述べられた。

（執筆 井上和真）

### 3.2 地盤

古関潤一先生から、「兵庫県南部地震後の地盤工学分野の発展と課題」と題してご講演いただいた。

兵庫県南部地震では、それまでの想定を超える地震外力によって、臨海部では液状化とこれに伴う側方流動による甚大な被害が発生した。被害の調査・分析によって、各種地盤の液状化に伴う残留沈下や、側方流動の影響範囲、基礎構造物に作用する液状化地盤からの外力特性に関する重要な知見が得られている。

こうした知見を活かし、地盤分野においてもL2地震動に対応した設計法・評価手法が整備された。一例として比較的密な砂地盤の液状化強度評価や、修正物部岡部式による地震時土圧の評価などが紹介された。

また、被害状況の再現解析などを通して有効応力解析が普及したことや、当時施工されていた液状化対策や補強土工法等の有効性が確認されたことを契機に重要構造物への対策工法の活用が拡大していったことなどにも触れられた。一方で、「L1対応の液状化判定」、「切土・自然斜面の耐震設計」、「原型復旧の原則」といった課題が残されたことにも言及された。「原型復旧の原則」のように2004年以降「強化復旧」の考え方に変わり、その効果が見られるようになってきたものも存在するが、1995年以降の30年の間に発生した地震によって生じた新たな被害や、残された課題もある。これらについて、「液状化」、「盛土」、「切土・自然斜面」という切り口で概観し、解決すべき課題について共有化がなされた。

（執筆 加藤一紀）

### 3.3 土木

運上茂樹先生から、「兵庫県南部地震後の土木分野の発展と課題-土木技術者は問い続けているか？-」と題してご講演いただいた。

兵庫県南部地震における橋梁の被害の原因として、耐震設計で想定した以上の強烈な地震動を受けたことが被災の根本的な原因であり、特に、昭和55年道路橋示方書よりも古い時代の鉄筋コンクリート橋脚の主鉄筋段落とし部における曲げせん断破壊によって著しい被害が発生したとのご説明があった。また、この被害

が、損傷制御設計、性能設計の導入が進んだ契機であったとのことがあった。

最後に、土木技術者は事象を深く洞察し、「現状でいいのか」と問い続けなければならないとのコメントがあった。

（執筆 井上和真）

### 3.4 建築

中埜良昭先生から、「兵庫県南部地震後の建築分野の発展と課題」と題してご講演いただいた。

震災で得た教訓から、K-NETをはじめとする稠密な地震観測網の整備、E-ディフェンスのような実大構造物の破壊実験を可能とする三次元振動台の開発と運用、耐震改修促進法の制定・耐震補強プログラム実施による耐震化率の向上、崩壊を免れることを目的とするだけでなく損傷制御を目的とした性能設計の導入、目的に合わせた応急危険度判定・被災度区分判定・被害認定の運用などが行われるようになったことなどが、震災がもたらした変化と進展として解説された。

また、これからの地震工学研究・活動に期待することとして、地震被害調査を行う際の、web情報の活用、調査対象とデータの一元管理による効率化、分野を横断した連携による復旧支援、AI/ICT/IoTなどの先端技術を活用した研究展開、都市/地域のレジリエンスを目的として、デジタルツインによる大規模都市シミュレーションの活用と、空間の広がりへ復興に要する時間経過を加えて考慮した4Dでの議論の必要性などが挙げられた。

（執筆 山本健史）

### 3.5 機械

藤田聡先生から、「機械系耐震技術の歩みと今後の展望」と題してご講演いただいた。

まず火力発電設備関連耐震技術について、兵庫県南部地震以前の地震による火力発電設備の被害およびこれに伴う技術基準や設計指針の改定についてレビューされた。兵庫県南部地震による様々な被害事例と、震災後にL2地震に対応した設計法が確立されたことが説明された。また、LNGタンクやボイラー構造の縮小モデルに対する加振実験が行われ、従来型に対するエネルギー吸収型の耐震性能向上が実証されたことも紹介された。

免震・制振技術については、1984、85年に東京大学生産技術研究所で実施された免震積層ゴムの加力実験について主に紹介された。ゴムの破断まで載荷した例は現在でも稀少であり、非常に貴重な実験映像が示された。

昇降機の地震被害としては、ドアの損傷、ガイドレー



ルからの脱輪、ロープの引っ掛かりや損傷などが兵庫県南部地震で主に生じ、そのような被害事例に対応すべく昇降機の耐震設計基準が改訂された歴史について振り返られた。また、地震動下におけるメインロープの揺れについても説明があり、高層ビルにおいてはロープのテンションは他分野の技術者が想像する以上に緩いため、その分地震動を受けた際には大きな変位が生じるとのことであった。他にも、ご講演ではエスカレーター、クレーン、原子力発電設備の地震被害および耐震技術や、画像を用いた変位計測技術などの多岐にわたるトピックについて紹介がされた。

さいごに、機械分野は地震動・建築・土木・地盤との領域を超えた“システム・インテグレーション”の考えを持つことが重要であり、他領域との連携が特段重要になるとのコメントでご講演が締めくくられた。

(執筆 大村浩之、森脇美沙)

#### 4. パネルディスカッションの内容

写真2にパネルディスカッションの様子を示す。パネルディスカッションの冒頭、高田会長より趣旨説明と問題提起が行われた。阪神・淡路大震災をはじめとする過去の巨大地震の経験を踏まえ、高田会長は地震被害が予測の困難さ、広域性、そして災害の複合化といった多様な特徴を併せ持つことを指摘した。そのうえで、従来の地震工学の枠組みを超えた分野横断的な視点や分野間の連携の重要性を強調した。

この認識をもとに、議論は以下の2点に絞られて展開された。まず、「都市・地域社会の目指すべき目標を分野間で共有できるか」という点である。このテーマでは、各分野における不確実性の問題、都市システムとして必要な機能およびその要求性能の定義やレベル、さらには目標性能指向型地震工学の定義と共有方法について議論が深められた。また、各分野における専門知の深化に加え、分野横断的なつながりや対応の重要性も指摘された。

次に、「目標達成に向けた共通の枠組み(概念、アプローチ、プラットフォームなど)をどのように構築するか」という点である。この議論では、各分野におけるリスクマネジメントの現状や、シナリオの可能性と分岐を考慮したリスク評価の重要性が取り上げられた。また、「安全」の定義や国際的な共通基盤の構築に向けた取り組みについても議論された。さらに、阪神・淡路大震災以降に拡充された強震データが、理学と工学の連携を促進する共通基盤として新たな研究の可能性を切り開いたとの見解も示された。

パネルディスカッションでは、地震動、地盤、土木、

建築、機械など地震工学に関わるさまざまな分野の専門家が活発に意見を交わした。また、フロアからの意見も活発に寄せられ、研究者だけでなく、市民との連携の重要性も改めて強調された。講演会のテーマである「地震工学の再定義と今後のアジェンダ」に向けて、意義深い議論の場となっただけでなく、従来の地震工学を超えた新たな方向性を模索し続ける重要性を認識する貴重な機会となった。



写真2 パネルディスカッションの様子(古関先生は所用のため講演までのご参加であった。)

(執筆 上田恭平)

#### 5. おわりに

パネルディスカッションの終了後、現地参加の数名の方と質疑応答し、その後、山中先生より「兵庫県南部地震以降に地震工学の道を選んだポスト神戸世代の研究者・技術者から、デジタル世界を前提に物事を捉える世代の研究者・技術者に、新しい地震工学を切り開くことへの期待」などが述べられ、本講演会が閉会した。

本稿の末筆として、本講演会の開催にあたり、登壇者の先生方だけでなく、大堀道広副会長、室野剛隆監事、隈本邦彦理事、上田遼理事など、理事会の多くの方々に多大なるご協力をいただいた。また大変多くの皆様にご参加いただけたことで盛況な講演会になったと感じている。最後に、本講演会の準備から運営まで、ご尽力頂いた事務局、事業企画委員会の方々に深い謝意を表す。

(執筆 高瀬裕也)

# 強震観測 ～兵庫県南部地震から30年～

青井 真

●防災科学技術研究所 巨大地震変災害研究領域長

## 1. はじめに

6,400名以上の犠牲者を生じた阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震の発生から30年が経った。この地震は、大きな震災を伴った地震としては1948年福井地震以来47年ぶりに発生した地震であり、近代化し複雑化した大都市直下の大地震としては日本が初めて経験した地震であった。国内の地震として初めて震源断層近傍の強震動が記録され、その後の研究開発に大きな貢献を果たした。その後、様々な機関により多くの地震計や強震計が全国に設置され、平成16年（2004年）新潟県中越地震、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震、平成28年（2016年）熊本地震、令和6年能登半島地震など多くの貴重な観測記録が得られている。

強震観測データは理学、工学の関連学術研究や耐震性評価、ハザード評価などに欠かすことが出来ないだけでなく、近年の観測技術や通信環境の向上により、リアルタイムでデータが得られるようになり、緊急地震速報をはじめとする防災に関する即時情報として活用することで、起こりつつある地震被害の軽減という新しい役割が期待されている。本稿では主に、公的機関により全国的に展開されデータが公開されている強震観測網について、兵庫県南部地震以降の状況について概観する。

## 2. K-NET・KiK-net

1995年兵庫県南部地震では地震直後の迅速な状況把握という観点では様々な不備が浮き彫りになり、阪神・淡路大震災の経験を活かし震災の軽減のための地震調査研究を政府として一元的に推進するため、地震調査研究推進本部（以下、地震本部）が設置され、日本の地震調査観測は大きな転機を迎えた。防災科学技術研究所（以下、防災科研）は、以前からの強震観測事業推進連絡会議からの提言<sup>1)</sup>を受け、兵庫県南部地震後一年あまりで1,000点の地表強震観測点からなる全国強震観測網K-NET (Kyoshin NETwork)<sup>2)</sup>を構築し、1996年6月より運用を開始した。また、防災科研では鉛直アレー方式を採用し、700点弱の観測点からなる基盤強震観測網KiK-net (Kiban-Kyoshin network)<sup>3)</sup>も構築・運用している（図1上）。

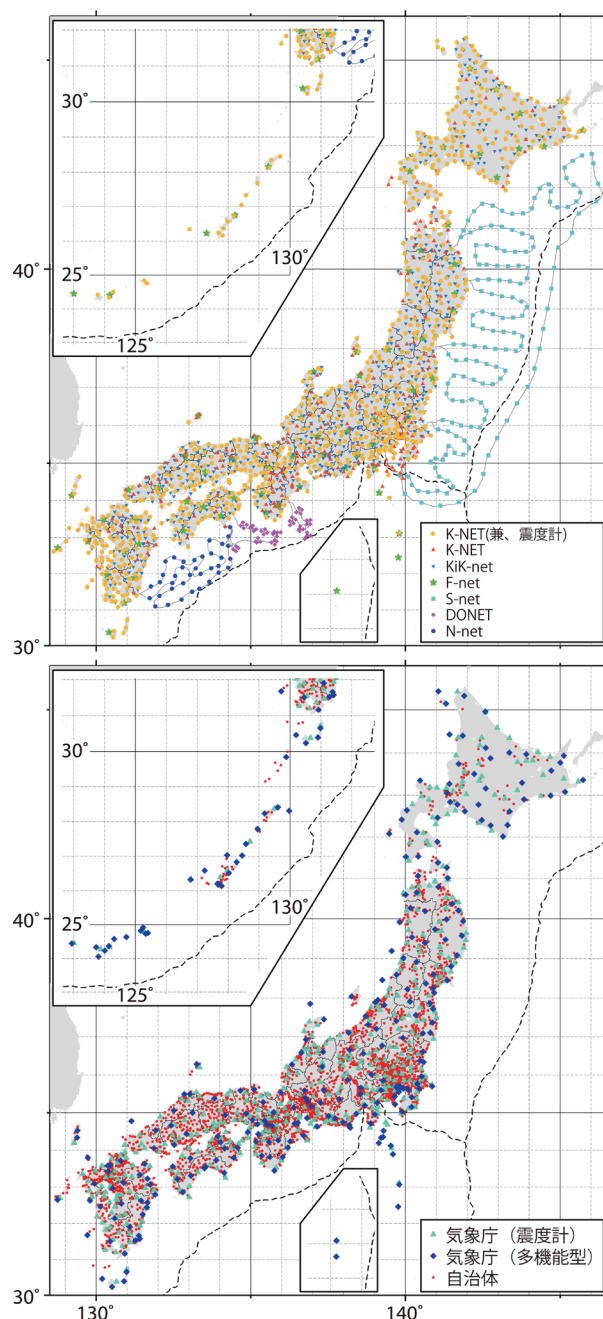


図1 (上) 防災科研の観測点配置図。丸印はK-NETのうち震度情報ネットワークシステムに組み込まれているものを示す。(下) 気象庁 (07型震度計と多機能型地震観測装置) 及び自治体 (震度計) の観測点配置図。



強震観測において最も重要なことは記録を確実に取ることであるが、それに加え近年では記録をより早く取得することの重要性が高まってきている。これらを実現するため防災科研では観測機器を独自に開発し、これまでに三世代にわたる機器を展開してきた<sup>4)</sup>。1996年から順次運用を開始した第一世代のK-NET95およびSMAC-MDKは、地震発生直後にデータセンター側からダイヤルアップすることによりデータを回収することで、地震発生直数日以内にインターネットでデジタルを公開するという、当時としては画期的な取り組みを可能とした<sup>2)</sup>。2003年度から更新を開始した第二世代のK-NET02/02AおよびKiK-net06は、気象庁の震度計検定に合格し正式に震度計としての機能を備え、その一部は後述する震度情報ネットワークに組み込まれるとともに、現地の観測機器が地震を自動的に検知し観測点側からのダイヤルアウト機能を付加することでデータ取得に掛かる時間を格段に短縮することに成功した。また、リアルタイム震度などの強震動指標や長周期地震動に関する指標を現地機器で計算し送信する機能を具備している。2012年度から更新を開始した第三世代のK-NET11/11AおよびKiK-net11/11Aは2011年東北地方太平洋沖地震などで経験した大地震発生時の厳しい観測状況に鑑み、直交三成分に加え斜交成分を計測する加速度計を加えた四成分観測を採用するなど、観測の信頼性をより高めるための取り組みが行われた<sup>5)</sup>。また、震災等に伴う広域停電の際に、限られたバックアップ用蓄電池からの給電を可能な限り効率的に使用することで、一週間程度は最低限必要な観測及び防災情報の伝送を可能としている。実際、平成28年(2016年)熊本地震や令和6年能登半島地震などでは、第二世代の機器ではリアルタイムに得ることができなかったと想定される震度情報が得られた。

大規模な観測網の展開により大震幅の強震動がしばしば取得されるようになったことから、第一世代では各成分2,000 galであった最大計測可能範囲が、第二・三世代ではそれぞれ4,000 gal・8,000 galに拡張された。

### 3. 気象庁による強震観測

気象庁による強震波形のデジタル収録は1988年の87型電磁式強震計に始まる。現在では大きく分けて、07型震度計によるものと多機能型地震観測装置によるものの2つがあり、島嶼部を含む全国に合計で約670観測点が設置されている<sup>6)</sup>(図1下)。多機能型地震観測装置は2003年10月より運用が開始され、全国に約270観測点が設置されており、加速度波形記録を収録するだけでなく、計測震度演算や緊急地震速報の解析に必要と

なる情報であるB-Δ演算<sup>7)</sup>を現地の観測装置の内部で処理する機能を備えている。2007年12月から運用が開始された07型震度計は全国に約400観測点が設置されており、計測震度だけでなく、加速度波形記録が有線の通信回線により気象庁に集約されている。これらの観測は、有線だけでなく衛星回線でバックアップされるとともに、非常用電源を備えるなど災害時にも観測を継続することが意識されたシステムとなっている。観測データは気象業務支援センターからDVD-ROMで提供されているほか、震度の大きな地震等の記録に関しては、気象庁のWebサイトで地震後にデータが公開される。

### 4. 震度情報ネットワークシステム

震度は防災対応の最も基本的な指標であり明治時代から体感により観測されてきたが、客観性や迅速性を高めるため、1996年には体感による観測が廃止され震度計による計測に完全に移行された。1995年兵庫県南部地震を契機に、迅速に市町村別の震度分布状況を把握し、応急対応に資する情報を得るための計測震度計を全市町村に設置する目的で、自治省消防庁(当時)による国庫補助事業として震度情報ネットワークシステムの整備事業が実施された<sup>8)</sup>。震度情報ネットワークシステムは、気象庁や防災科研が既に設置していた機器を活用するとともに、都道府県や政令市などの自治体が新たに震度計を設置し、これら三者の機器により構成されている。時期によって多少の増減はあるが、現在は、気象庁による07型震度計及び多機能型地震観測装置(約670点)と防災科研のK-NETの一部(約800点)に加え、自治体が設置している約2,900点の震度計により、合計で4,300台を超える震度計からなる大規模な全国ネットワークを構成しており、震度観測点数は1995年兵庫県南部地震以前の10倍以上に増加した<sup>9)</sup>。これらの震度計から得られる計測震度は一元化され、防災関連機関や報道機関などに提供される。震度情報ネットワークシステムはすべての市町村最低一台の震度計を設置することを原則としており、多くは市町村役場や公的施設などに設置されていることから、空間的に等間隔ではなく人口が多い地域の観測点密度が高い傾向にある。

自治体が設置している震度計の機種は様々であるが基本性能は類似しており、2009年頃から多くの自治体に導入された第2世代の震度計ではほぼ全ての機種で計測震度を記録するだけでなく、波形記録を収録する機能を備えている。ただし、通信環境やセンター機能の制限、また自治体にとっては必ずしも波形記録が



必要ではないなどの理由により、その扱いは様々である。気象庁では、2003年頃から大きな震度が記録された顕著な地震（現在は原則最大震度5強以上）に関しては自治体に波形データの回収を依頼し、Webサイト等で提供している。平成16年（2004年）新潟県中越地震の川口町（新潟県）や平成28年（2016年）熊本地震における益城町及び西原村（熊本県）における震度7の波形記録など貴重な震源近傍の強震動が記録され公開されている。更に1999年には、各種機関により運用されている強震観測網・震度観測網などと波形データの交換を可能とする大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムの、六大都市圏の拠点国立大学への整備が試みられた。なかでも、首都圏強震動総合ネットワーク（SK-net）は関東圏及びその周辺の自治体震度計を含む多くの機関の波形データを収集し、大学などの研究者に公開している<sup>10)</sup>。また、令和3年度事業により自治体震度計の機器の第三世代への更新と震度情報ネットワーク全体の機能強化が実施され、波形データの伝送機能が強化されたことを契機に、全国の震度計の波形データや様々な地震動指標を一元的に利活用するための検討例えば<sup>11)</sup>も始まっている。

## 5. 岩盤における強震観測

これまでに紹介してきた強震観測点の多くは、KiK-netの地中観測点を除けば、多かれ少なかれ表層地盤の影響を受ける環境下の観測であるといえる。電力中央研究所が運用している露頭岩盤上強震観測システム（RK-net）は、堆積地盤の影響を受けにくい露頭岩盤に約30点の強震観測点を設置している点で特徴的であり<sup>12)</sup>、震源破壊メカニズムの解明、堆積地盤への入力地震動の把握、耐震設計の検証を目的としている。また、多くの地点は1970年代半ばより順次設置されてきた観測を継続していることから、長期にわたり同一条件での観測データの蓄積がはかられている。

また、防災科研では、K-NETとKiK-netだけでなく、合計7つの観測網で構成される海陸統合地震津波観測網MOWLAS<sup>13)</sup>の一つである広帯域地震観測網F-net（Full-range Seismograph Network of Japan）<sup>14)</sup>（図1上）は、周期百秒以上に至る広帯域の地震波を良好に測定するために、STS-1やSTS-2などの広帯域地震計を長さ20-60 m程度の行き止まりの横坑（トンネル）の硬質岩盤上の設置台に設置している。これらの広帯域地震計は1 cm/s程度で飽和するため、VSE-355G3などの速度型強震計を併せて設置することで高ダイナミックレンジを達成している。現在、F-netは島嶼部を含む全国73点あり、全地点に速度型強震計が設置されている。

## 6. 港湾地域における強震観測

港湾に特化した強震観測としては港湾地域強震観測が挙げられる<sup>15,16)</sup>。この観測網は1962年に開始され、国土交通省港湾局などの港湾関係諸機関が参画し、港湾空港技術研究所が取り纏める形で実施されている。現在では全国61の港湾に153台の強震計が設置されており、これらのデータはWebサイトより公開されている。高層建築物の耐震設計に用いられている標準3波の1つである八戸波（1968年十勝沖地震の際の八戸港の記録）を取得したことで知られている。

## 7. 建物における強震観測

耐震工学の観点からは、地盤上だけでなく建物における強震観測が重要であるが、建物における観測は個別の所有者やその関係者により行われる場合が多く、地盤上における観測データほどオープンではない。その中であって、建築研究所の強震観測は公的機関により半世紀にわたり実施され、多くの顕著な地震についてデータが公開されている<sup>17)</sup>。建物の動的な挙動の解明を目的に、首都圏を中心に全国の主な都市に80余りの強震観測地点が配備されており、基本的に建物の頂部と基礎にセンサーが設置され、地盤と建物の相互作用の解析のため、近傍の地盤にもセンサーが設置されている地点もある。

## 8. 海域における強震観測

海域には人が居住せず沿岸を除けば建築物もないため、強震動による直接の被害はほぼないが、海域で発生する地震の地震動を震源近傍で捉えることにより断層破壊過程をはじめとするさまざまな震源に関する知見が得られることに加え、地震の早期検知という観点から、陸域の地震観測網を海域に延長することでより早く地震を捉え猶予時間を大きく稼ぐことが可能になるという防災上のメリットもある。日本において海域におけるケーブル式観測網に加速度型強震計が採用され始めたのは1990年代であり、2000年代に入り南海トラフにおける地震・津波観測監視システム（DONET）や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）など大規模な海域観測網の構築・運用されている（図1上）。また、M8クラスの巨大海溝型地震が近い将来発生すると懸念されている南海トラフ地震想定震源域の西側の海域は観測の空白域となっており、この空白域を解消するため当該海域において南海トラフ海底地震津波観測網N-netの構築が進められている<sup>18)</sup>。

2016年8月20日の三陸沖の地震（M6.4）では、陸域の観測網Hi-netに比べS-netでは約22秒早く地震波を捉え

ている。また、これら海域の観測網では地震計のみならず水圧計が設置されており、津波による水圧変動を観測することで津波波高を捉えることが可能である。今後このようなデータが活用され、懸念される海溝型巨大地震による地震・津波被害の軽減に役立つことが期待される。

## 9. その他の強震観測

首都直下地震の発生が懸念されている首都圏は日本の政治経済の機能が集中していることから、大都市の中でも特に詳細な地震動の把握の体制が望まれている。首都圏を中心とした関東地域の極めて稠密にカバーする観測網として、約300観測点からなる首都圏地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network、以下、MeSO-net)<sup>19,20)</sup>を挙げることが出来る。MeSO-netは、東京大学地震研究所、神奈川県温泉地学研究所、防災科研により構築され、現在では防災科研に移管され運用されている。首都圏中心部はMeSO-netにより観測点間隔2-10km程度の稠密な観測がなされており、強震動指標だけでなく地震動の時間履歴 (地震波形データ) もリアルタイムで得ることができる。

鉄道・高速道路・発電所・ガス・ダムなどにおいて各社によりライフラインの維持や地震発生時の状況把握や緊急停止などの制御などを目的に強震観測が行われている。たとえば、地震時にガスの供給を安全に停止することを目的にした東京ガスの超高密度リアルタイム地震防災システム (SUPREME) では自社供給地域に約4,000箇所の地震計を設置していたり、発電所においては地中・地盤・基礎・建屋に稠密に設置されている。このように目的に応じて特徴的な観測がなされているが、顕著な地震発生時に得られた貴重なデータは販売されているものや学会などを通じて提供されるケースもあり広く活用されている。

大学においては、当該地域の地震切迫性や地盤特性などを考慮し地域の研究課題を反映した観測が行われているほか、キャンパス内や自治体などと連携した強震観測が行われている。また、被害地震の際には機動性を生かした臨時強震観測が実施されている。

協議会形式での強震観測の例としては、兵庫県南部地震の震源近傍強震動を捉えた関西地震観測研究協議会 (CEORKA)<sup>21)</sup>のように、会費で30年以上の長年にわたり観測を継続している事例もある。

## 10. おわりに

強震観測は従来イベントトリガー方式と現地ため込み方式の組み合わせにより頻度の低い強震動を確実に

記録することに主眼が置かれてきた。1995年兵庫県南部地震以降の30年間の大きな進展として、観測機器の高度化・大容量化、通信環境を含むIT技術の進歩などに支えられ、確実性を損なうことなくリアルタイムの連続観測が可能となってきたことが挙げられる<sup>例え<sup>22)</sup></sup>。現在、強震連続観測データを防災情報としてより有効に活用する事を目指し、データの一部は緊急地震速報に活用されているほか、強震動指標に関しては強震モニタという形で誰もが今の揺れを知ることが可能なシステムとして公開されている。また、震源情報を用いることなく「揺れ」から「揺れ」を直接推定する手法の開発が行われており、新たな観測技術や解析技術を開発する重要性和有効性は今後ますます高まると考えられる。

これまで国内外の多くの先人の努力により長年にわたり強震観測が継続されることで貴重なデータが得られてきた。短期的な研究成果を挙げることが重要視される風潮があるが、新しい技術を取り入れつつも、同一地点において観測を継続し、兵庫県南部地震や熊本地震、東北地方太平洋沖地震のような極めて頻度の低い重要なイベントの強震動を確実に記録することも非常に重要である。

## 謝辞

本稿は、青井 (2017)<sup>23)</sup>をもとに執筆した。

## 参考文献

- 1) 強震観測事業推進連絡会議：強震計全国配置基本計画に関する報告書, 国立防災科学技術センター, 45 pp, 1988.
- 2) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), Seismol. Res. Lett., Vol. 69, pp. 309-332, 1998, doi:10.1785/gssrl.69.4.309.
- 3) Aoi, S., Kunugi, T., Nakamura, H. and Fujiwara, H.: Deployment of new strong-motion seismographs of K-NET and KiK-net, in “Earthquake Data in Engineering Seismology, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering”, Springer, Vol. 14, pp. 167-186, 2011, doi:10.1007/978-94-007-0152-6\_12.
- 4) 功刀卓、青井真、藤原広行：強震観測－歴史と展望－, 地震, Vol. 61, pp. S19-S34, 2009, doi:10.4294/zisin.61.19.
- 5) 功刀卓・中村洋光・鈴木亘・青井真：先進強震計と実時間強震動把握・地震早期警報, 日本地震学会2014年度秋季大会, B11-03, 2014.
- 6) 森脇嘉一：気象庁における強震観測, 地震 (ニュースレター部), Vol. 72(NL6), pp. 13-16, 2020.

- 7) 東田進也、小高俊一、芦谷公稔、大竹和生、野坂大輔：P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法，地震，Vol. 56, pp. 351-361, 2004, doi:10.4294/zisin1948.56.4\_351
- 8) 長尾一郎：震度情報ネットワークシステムの整備，日本地震学会ニュースレター，Vol. 10(3), pp. 24-25, 1998.
- 9) 気象庁：「阪神・淡路大震災」特設サイト，2024，[https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/1995\\_01\\_17\\_hyogonambu/index.html](https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/1995_01_17_hyogonambu/index.html) (参照2025-01-21)
- 10) 鷹野澄、上原美貴：首都圏強震動総合ネットワークSK-netにおけるデータ収集の現状，東京大学地震研究所技術研究報告，Vol. 20, pp. 1-10, 2014, doi:10.15083/00032140.
- 11) 防災科学技術研究所強震動観測データ利活用検討委員会：強震動観測データ利活用の促進に向けて（強震動観測データ利活用検討委員会活動中間報告書），2024.
- 12) 芝良昭、佐藤浩章：電力中央研究所露頭岩盤上強震観測システムRK-net，地震（ニュースレター部），Vol. 74(NL5), pp. 17-19, 2021.
- 13) Aoi, S., Asano, Y., Kunugi, T., Kimura, T., Uehira, K., Takahashi, N., Ueda, H., Shiomi, K., Matsumoto, T. and Fujiwara, H.: MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano, Earth Planets Space, Vol. 72, pp. 126, 2020, doi:10.1186/s40623-020-01250-x
- 14) 松本拓己、堀貞喜、松林弘智：広帯域地震観測－防災科研F-netの10年－，地震，Vol. 61, pp. S9-S18, 2009, doi:10.4294/zisin.61.9.
- 15) 野津厚、林公美、菅野高弘：港湾地域強震観測の概要，防災科学技術研究所研究資料，Vol. 264, pp. 29-32, 2005.
- 16) 野津厚、長坂陽介：港湾地域強震観測，地震（ニュースレター部），Vol. 73(NL2), pp. 22-25, 2020.
- 17) 鹿嶋俊英：建築研究所の強震観測，地震（ニュースレター部），Vol. 73(NL1), pp. 7-10, 2020.
- 18) Aoi, S., Takeda, T., Kunugi, T., Shinohara, M., Miyoshi, T. and Uehira, K.: Development and construction of Nankai Trough seafloor observation network for earthquakes and tsunamis: N-net, 2023 IEEE underwater technology (UT), IEEE, 2023, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10103206>.
- 19) 平田直、酒井慎一、佐藤比呂志、佐竹健治、瀬戸一起：「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」の概要，東京大学地震研究所彙報，Vol. 84, pp. 41-56, 2009.
- 20) Aoi, S., Kimura, T., Ueno, T., Senna, S. and Azuma, H.: Multi-data integration system to capture detailed strong ground motion in the Tokyo Metropolitan area, J. Disaster Res., Vol. 16, pp. 684-699, 2021, doi:10.20965/jdr.2021.p0684.
- 21) Kagawa, T., Iemura, H., Irikura, K. and Toki K.: Strong ground motion observation by the Committee of Earthquake Observation and Research in the Kansai Area (CEORKA), J. Jpn Assoc. Earthq. Eng., Vol. 4(3), pp. 128-133, 2004.
- 22) 強震観測事業推進連絡会議：記念シンポジウム「日本の強震観測50年」－歴史と展望－講演集，防災科学技術研究所研究資料，264, 242 pp, 2005.
- 23) 青井真：強震観測，地震（ニュースレター部），70(NL1), pp. 18-21, 2017.



青井 真 (あおい しん)

1996年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。地震津波火山観測研究センター長として、陸海統合地震津波火山観測網「MOWLAS」を統括。専門は、地震津波観測、強震動地震学、数値シミュレーション、即時予測。



# 強震動予測および地震ハザード評価の発展

藤原 広行

●国立研究開発法人 防災科学技術研究所 研究主監

## 1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震(M7.3)は、淡路島北部付近の深さ約16kmを震源とする内陸の活断層で発生した地震であり、兵庫県神戸市やその周辺地域に、死者6,434名、行方不明者3名、負傷者は43,792名、建物被害689,776棟など、被害総額は約10兆円におよぶ甚大な被害をもたらした。特に、神戸地域に出現した「震災の帯」など、強震動による建物被害が顕著で、我が国の地震防災対策に関して多くの課題を残した。兵庫県南部地震は、日本における地震防災対策の転換点となり、強震動予測、地震ハザード評価の研究にも大きな影響を与え、全国的な強震観測網の整備や地震動予測地図の作成などが開始された。

## 2. 全国強震観測網(K-NET)の整備

兵庫県南部地震は、それまでの強震観測のスタイルを変える転換点となった。兵庫県南部地震が発生する以前には、気象庁が実施している震度観測を除けば、日本全国を一律にカバーするような強震観測網は存在しなかった。強震観測は、行政、研究機関等が、個別の目的のために実施していたため、観測点が局在し、記録されたデータも非公開の場合が多く、貴重な観測記録が十分に利用できない状況が続いていた。日本における強震観測体制に対する反省がなされ、日本のどこで地震が発生したとしても必ず被害地域での記録が取得でき、しかも必要としている全ての人々が、それらの強震記録を自由に利用できる強震観測・データ流通システムを構築する必要性が認識され、防災科学技術研究所により、全国規模の強震観測網の整備が開始された。この結果構築されたのが、全国強震ネットワーク(K-NET)である。K-NETは、全国を約25kmメッシュで覆う約1,000カ所の強震観測網であり、1995年度補正予算により整備が認められ、1年足らずの期間で整備が進められ1996年6月より運用を開始した。

## 3. 地震調査研究推進本部の設立

地震に関する調査研究に関しては、その研究成果が国民や防災機関に十分伝達される体制になっていないとの指摘がなされた。このため、全国にわたる総

合的な地震防災対策を推進するため、議員立法により、1995年7月に地震防災対策特別措置法が制定された。同法に基づき、行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明確にし、これを政府として一元的に推進するため、政府の特別の機関として地震調査研究推進本部(以下では地震本部と呼ぶ)が、総理府に設置(現在は文部科学省に設置)された。地震本部は、1999年4月に、今後10年間程度にわたる地震調査研究の基本方針として、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策」(以下では総合基本施策と呼ぶ)を策定した。総合基本施策では、地震防災対策の強化、特に地震による被害の軽減に資する地震調査研究の推進を基本的な目標に掲げ、当面推進すべき地震調査研究として以下の4つを主要な課題とし、このために必要な調査観測や研究を推進するとした。その4つの課題とは、①活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成、②リアルタイムによる地震情報の伝達の推進、③大規模地震対策特別措置法に基づく地震防災対策強化地域及びその周辺における観測等の充実、及び④地震予知のための観測研究の推進であり、特に地震動予測地図の作成は、推進すべき主要課題の筆頭に掲げられた。

## 4. 地震動予測地図の作成

地震動予測地図は、人々の地震防災に対する意識の向上と地震災害の軽減に資するため、将来日本で発生する恐れのある地震による強い揺れを予測し、その結果を地図として表したものであり、地震本部が進める地震発生の長期的な確率評価と強震動の評価を組み合わせた「確率論的地震動予測地図」と、特定の地震に対してある想定されたシナリオに対する強震動評価に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」の2種類の性質の異なる地図から構成されている。2005年3月に最初の「全国を概観した地震動予測地図」が完成し公表された。その後毎年度、新たな評価結果を取り込むことにより更新が行われてきた。2009年7月には、それまでの10年間の検討の取りまとめとして、各種データの追加や作成手法の高度化により、約1kmメッシュ

で表現された地図が、約250mメッシュに細分化された表現になる等、大幅な改良が加えられると同時に名称も変更され、「全国地震動予測地図」として公表された。

## 5. 確率論的地震動予測地図

地震の発生及びそれに伴う地震動の評価は、現状では数多くの不確実な要素を含んでいる。こうした不確実性を定量的に評価するための技術的枠組みとして有力と考えられているのが、確率論的地震ハザード解析と呼ばれる手法である。確率論的地震動予測地図を作成するために、確率論的地震ハザード解析が採用されており、その大まかな手順は以下に示す通りである。

- ・地震調査委員会による地震の分類に従い、対象地点周辺の地震活動をモデル化する。
- ・モデル化した地震について、地震規模、震源域、地震の発生確率を評価する。
- ・地震規模と震源域が与えられた場合の地震動強さを推定する確率モデルを設定する。モデル化された各地震について、対象期間内にその地震により生じる地震動の強さがある値を超える確率を評価する。
- ・上記をモデル化した地震の数だけ繰り返し、それらの結果を足し合わせることで、全ての地震を考慮した場合に、対象期間内に生じる地震動の強さがある値を少なくとも一回を超える確率を計算する。

このようにして地点毎に地震動ハザード評価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち2つを固定して残る1つの値を求めた上で、それらの値の分布を示したものが「確率論的地震動予測地図」である。地震動の強さとしては、工学的基盤における最大速度に基づき地表での震度が評価されている。

防災科学技術研究所では、確率論的地震動予測地図の作成に資することを目的とし、2001年に確率論的予測地図作成手法検討委員会（委員長：翠川三郎）を立ち上げ検討を開始した。その検討を踏まえ、2002年には、山梨県地域を対象とした確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定）が公表され、2003年には、確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定－北日本）、2004年に確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定－西日本）が公表されるなど検討が進み、2005年に「全国を概観した地震動予測地図」が完成した。その後、毎年度、新たな長期評価結果や知見を取り込むことにより「全国を概観した地震動予測地図」の更新が行われてきた。2009年には、それまでの10年間の検討の取りまとめとして、大幅な改良が加えられると同時に名称も変更され、「全国地震動予測地図」として公表さ

れた。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)は、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。この地震は、「全国地震動予測地図」において考慮することができていなかった。この教訓を踏まえ、地震動ハザード評価の改良に向けて、特に確率論的な評価に関する検討が進められ、2012年及び2013年に「今後の地震動ハザード評価に関する検討」として公表された。それらの検討を踏まえて改良された「全国地震動予測地図 2014年版」が公表された。地震調査委員会による活断層の地域評価および海溝型地震の長期評価の公表を受けて「全国地震動予測地図 2016年版」、「全国地震動予測地図 2017年版」、「全国地震動予測地図 2018年版」、「全国地震動予測地図 2020年版」が公表された。さらに、耐震設計等における工学的利用に資することを目的として、地震動の応答スペクトルに関する地震動予測地図の作成に向けた検討が進められており、2022年には、「応答スペクトルに関する地震動ハザード評価（試作版）」が公表された。現在、2025年版の全国地震動予測地図の準備が進められている。

## 6. 震源断層を特定した地震動予測地図

発生確率が海溝型の地震と比較して小さな値となる活断層の地震に対する対策として、主要な活断層帯で発生する地震については、確率論的な地震ハザード評価に加えて、あるシナリオを想定し、詳細な強震動評価手法を用いた「震源断層を特定した地震動予測地図」が作成されている。「震源断層を特定した地震動予測地図」の作成においては、詳細な強震動評価手法としてハイブリッド法と呼ばれる地震波形の合成法が用いられている。ハイブリッド法は、複数の要素技術の組み合わせからなる複雑な波形合成法であるが、この手法を標準化し、誰が計算を実施しても同じ結果が得られることを目標とした手法の検討が行われ、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」が、地震調査委員会により作成されている。「レシピ」の開発に当たっては、文部科学省科学技術振興調整費「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究（2000年度～2004年度）研究代表者：入倉孝次郎」により、構造物の被害に直結する周期1秒前後のやや短周期域を含む広い周期帯域で強震動を高精度に予測するための震源像を、高精度化された地震波伝播特性に基づいて確立することを目的とし、新しい震源像の確立と定量的伝播特性モデルを統合化した強震動予測・被害予測のための方法論（強震動予測マス



ターモデル)の構築がなされた。防災科学技術研究所では、「レシピ」に従い個別断層帯ごとの強震動評価によるシナリオ地震動予測地図作成を、糸魚川－静岡構造線断層帯(北部、中部)の地震、南海トラフの地震、宮城県沖地震、森本・富樫断層帯の地震など特に発生確率が高いとされる主要断層帯の地震について実施してきた。さらに、2003年十勝沖地震、2005年福岡県西方沖の地震、2016年熊本地震を対象とした強震動予測手法の検証を実施されている。

2009年には、全国の主要活断層帯(110断層帯)の「震源断層を特定した地震の地震動予測地図」を一括して作成することを目的として、長期評価による活断層の地表長さから、従来の「レシピ」における過去の地震記録や詳細な調査に基づき断層面積から地震規模を設定する手法((ア)の手法)に加えて、一部の震源断層パラメータを簡便に設定する手法((イ)の手法)が追加された。これに基づき、全国の主要活断層帯に対して強震動評価が実施された。

その後も「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」は、新たに得られた知見に基づき改訂が継続的になされている。2016年には、長さが約80kmを超える長大な活断層に関する手法の一部見直しやスラブ内地震のための手法が新たに追加され、さらには、活断層で発生する地震に対して(ア)及び(イ)の手法の位置づけの説明が修正された。2017年には、関東地方を対象にした浅部・深部統合地盤構造モデルの構築に伴い、そのモデルに対応させるためレシピの地下構造モデルに関する記述の更新がなされている。また、2020年には、地盤増幅率に関する改定と計算式の修正がなされた。さらに、「レシピ」の今後の改善に資するため、2022年には、熊本地震の検証に関する中間報告が公表されている。

## 7. 強震動評価のための地盤モデル

強震動評価を物理モデルに基づいて定量的に行うためには、地下構造の物性値に関する情報が不可欠となる。強震動評価のためには、弾性波速度構造、特にS波速度構造を知ることが重要である。地下構造に関する情報の種類や多寡を反映して、強震動評価の観点からは、地下構造を大きく3つの領域、上部マントルから地震基盤(S波速度3km/s相当層)までの地殻構造、地震基盤から工学的基盤(S波速度400m/s～700m/s相当層)までの深部地盤構造、工学的基盤から地表までの浅部地盤構造に分けたモデル化が進められてきた。

深部地盤構造は、地震動の比較的長周期部分(周期1秒程度以上)の特性に大きな影響を与える地下構造

であり、差分法や有限要素法によるシミュレーションなどの決定論的手法により扱える周波数領域での地震動の計算において重要となる。浅部地盤のモデル化では、表層地質データやボーリングデータを用いて地盤モデルを作成することが基本となる。浅部地盤構造は局所的な変化が大きいため、モデル化には膨大なデータ収集が必要となる。現状では、広域での面的な評価が必要な場合には、簡便な表層地盤増幅率の評価法として、微地形分類データベースを利用した手法が用いられる場合も多く、全国を網羅した地形・地盤分類250mメッシュマップの作成も行われている。

強震動評価に必要とされる各種データを収集しモデル化するために、様々なプロジェクト研究が実施されてきた。経済活性化のための研究開発プロジェクト(リーディングプロジェクト)として実施された「高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト(2003年度～2007年度)研究代表者：早山徹」では、地震動の予測に必要なボーリングデータの収集などを実施するとともに、それらデータに基づく地盤増幅率の推定が行われた。さらに、文部科学省科学技術振興調整費「統合化地下構造データベースの構築(2006年度～2010年度)研究代表者：藤原広行」では、産業技術総合研究所、土木研究所、社団法人地盤工学会、東京工業大学、東京大学の協力の下で、地下構造に関する情報を国民共有の国家財産として位置づけ、データの散逸を防ぎ、誰もが利用可能なデータベースを構築することで、地下構造・地質情報に関する情報公開を促進し、これまでの調査による成果を広く社会に還元することを目的とし、表層から地球内部構造に至る地下構造の地球物理学的情報、地質学的情報を統合的に収集・管理し、広くデータ利用可能な仕組みとして、統合化地下構造データベースの構築が実施された。

こうした様々な機関の取り組みを踏まえ、地震本部の地下構造モデル検討分科会において、全国を対象とした深部地盤モデルの作成が進められるとともに、2009年9月には、「レシピ」の中に、地下構造モデルの作成法の記述が加えられた。さらに、関東地域を対象として、微地形区分に基づいて計算されていた表層地盤増幅率に代わるものとして、ボーリングデータの収集及び多数の微動探査を加えた手法による浅部・深部統合地盤モデルの研究が実施された。特に、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)のレジリエントな防災・減災機能の強化として実施された「リアルタイム被害推定・災害情報収集・分析・利活用システム開発(2014年度～2018年度)研究代表者：藤原広行」では、地表から工学的基盤付近までの浅部地盤モデル、工学



的基盤付近から地震基盤及び大深度構造までの深部地盤モデルを統合し、長周期から建物等の被害に直結する主要な周期帯域 (0.5 ～ 2秒) までの動的特性を説明できる 250m メッシュの広域地下構造モデルの構築が、関東地域及び東海地域において実施された。地盤モデル化においては、既往の地下構造情報に加え、高密度の微動探査データが実施された。地盤構造の動的特性を精度良く得るため、微動探査 (単点及びアレイ探査) が高密度に実施され、大量の微動観測データを安定的かつ効率的に管理するため、クラウド型解析システムが開発された。これら取り組みにより得られた知見を踏まえ、関東地域を対象とした強震動評価のための浅部及び深部の地盤モデルの改良が行われ、「地下構造モデル作成の考え方」及び「関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル (2017年版)」が公表されている。

## 8. 地震ハザード情報の利活用

「全国地震動予測地図」は、地震本部が実施してきた地震動ハザード評価の成果の集大成として位置づけられるものであり、地震活動モデルや震源断層モデル、及び地下構造モデル等の地図の作成に必要なデータまで含めると膨大な量の情報を含んでいる。防災科学技術研究所では、地震動予測地図の利用に関する検討の一環として、「地震動予測地図工学利用検討委員会」(委員長: 亀田弘行) を設置し検討を行ってきた。本委員会がまとめた報告書では、「地震動予測地図」を最終成果物としての地図そのものだけでなく、その作成の前提条件となった地震活動・震源モデル及び地下構造モデル等の評価プロセスに関わるデータも併せた情報群としてとらえることにより、「地震ハザードの共通情報基盤」として位置づけるべきとの提言がなされた。この提言を実現するために、防災科研では「地震動予測地図」の公開システムの開発を実施し、同報告書により提案された名称を採用し、「地震ハザードステーション J-SHIS」として、2005年5月より運用を開始した。WEB による地図情報の配信技術の急速な進歩に伴い、2009年には、最新の技術を取り入れたJ-SHIS システムの改良が実施された。さらに、東日本大震災の教訓を踏まえた地震動ハザード情報の提供手法の改良に向け、地震動ハザードに関する各種解説の追加、地点ごとのハザード情報をまとめた「地震ハザードカルテ」の作成機能の追加や API サービスの提供を含めたポータル化など、地震動ハザード情報の総合的な情報基盤としての位置づけを目指して J-SHIS 機能の向上に向けた開発が続けられている。

## 9. 地震ハザード情報の国際展開

2004年の「経済協力開発機構－グローバルサイエンスフォーラム会議 (OECD-GSF)」において構想が提案され、2006年に開催されたOECD-GSFにおいて兵庫行動枠組の優先事項に従い、世界の地震リスクを大幅に低減することを目的として、Global Earthquake Model (GEM) が設立された。2009年3月には、NPO法人としてGEM Foundationが組織され、イタリアのパヴィア市にある欧州地震工学センターに事務局本部が設立された。GEMのメンバーは数多くの国際団体・民間企業から構成されている。GEM が進める国際的な地震ハザード・リスク評価手法の開発に寄与し、国際化を図ることは、我が国でこれまで取り組んできた地震ハザード評価手法を国際的に展開するよい機会となり、国際的な貢献が期待できることから、防災科学技術研究所は、2012年9月にGEM運営委員会メンバーに正式に加入し、現在も活動を継続している。GEMは、世界全体を覆う地震ハザードモデルの構築を進め、2018年12月に完成し公表された。その後、2023年には改良版が公表されている。これらモデルは地域ごとに格差があり、統一的な基準に基づいて作成されたものとはなっていないために、グローバル・モザイクモデルと呼ばれている。グローバル・モザイクモデルの日本地域での地震ハザードモデルとしては、地震本部が公表している全国地震動予測地図の作成で用いられている確率論的地震ハザードモデルが実装されている。

## 10. おわりに

兵庫県南部地震後30年にわたる、地震動予測、地震ハザード評価の取り組みに関して、地震本部の施策を軸として振り返った。今後の研究のさらなる発展に期待したい。



藤原 広行 (ふじわら ひろゆき)

国立研究開発法人 防災科学技術研究所 研究主監博士 (理学)。京都大学理学部卒。1989年科学技術庁国立防災科学技術センター (現: 防災科学技術研究所) 入所。全国強震観測網K-NETの整備、全国地震動予測地図の作成、リアルタイム地震被害推定システムの開発などに従事。

# 緊急地震速報の社会実装とその後の進展

干場 充之

●気象庁気象研究所地震津波研究部 主任研究官

## 1. はじめに

地震動即時警報は世界各地で研究され、いくつかの国や地域では既に社会実装もされている<sup>1,2,3)</sup>。わが国でも、全国を対象とした即時警報は、2007年から気象庁からの「緊急地震速報」として発表されている。今日では、地震防災の柱の1つとみなされるようになった<sup>4)</sup>。本稿では、緊急地震速報の社会実装時とその後の進展について紹介する。

なお、厳密に言うと「緊急地震速報」とは気象庁が発する情報名でありいわば固有名詞である。他国で運用されているものなどを含めて一般的に呼称する場合には、地震動即時警報、あるいは、地震動即時予測、が使われることも多い。

## 2. 運用に至るまで

地震の発生をいち早く検知して警報を発すれば強く揺れる前に知らせることができる、という概念は、100年以上前の1800年代の後半には既にあったようである<sup>5,6)</sup>。地震波速度さえ未だ正確にわかっていなかった時期であることを考えると、かなり先進的であろう。ただし、当時の最新の通信技術は電信なので、実用化は難しかったようである。その後、1970-80年代には、コンピュータを用いた自動震源決定とその早期伝達のアイデア等が提唱され、1990年代になると、新幹線用のユレダス<sup>7)</sup>や、メキシコでは太平洋側で起こった地震を対象にメキシコシティに警報をだすSAS<sup>1)</sup>の運用が開始された。

一方、気象庁では1994年に全国の地震計が通信回線で結ばれ、また、1995年の阪神・淡路大震災後には、高感度地震観測網 (Hi-net) の整備が防災科学技術研究所 (以下、防災科研) により進められるなど、全国の地震観測をリアルタイムで行える環境が整ってきた。

2000年頃から、気象庁と鉄道総合技術研究所で共同研究が行われ、また、これとは独立に、防災科研でも研究開発が行われた<sup>7)</sup>。それぞれ、気象庁の地震観測網と防災科研Hi-netからのデータを用いている。ともに、震源位置とマグニチュード (以下、M) を即時に推定し、地震動予測式で各地の揺れを予測するという考えに則っている。その後、社会実装は気象庁が担うことになり、防災科研で開発された手法も含めて運用する

ことになった。ただし、この段階では、両者のルーチンをそれぞれ独立に走らせておき、出力 (震源位置とM) を比較してより妥当な方を選択する、という方式がとられた。

技術開発が進み、社会実装が見えてきたところで、緊急地震速報をどうやって伝えるか、の検討や、緊急地震速報を受け取った時に取るべき行動の周知、などの広報活動も本格化した。2007年3月の中央防災会議における首相発言<sup>8)</sup>「今後は、各所管分野において、緊急地震速報を有効に利活用するための方策について検討を進めていただくとともに、政府一体となって、国民への普及・啓発に取り組んでいただくようご協力をお願いしたい」もあり、社会実装には気象庁ばかりでなく他省庁や関係機関も含めて強力に推進された。現在、緊急地震速報はTVやラジオで放送され、また、携帯電話やスマホからの報知音で見聞きするケースが多いが、これらはこの時に関係各機関が積極的に進めた結果である。全国の学校でのパンフレットの配布や、運転免許証の更新時での周知など、多くの政府機関も巻き込んで進められ、NHKや携帯電話会社ではあの独特の報知音を工夫し、さらに携帯電話会社ではその地域にある携帯電話器に一斉通知が可能なメールの運用を始めた。もちろん、気象庁自身も全国の気象官署を動員し講演活動や街頭でのビラ配り、そして地方紙／地方局を含めたマスコミにも協力してもらって周知活動を行った。「気象庁の歴史上、最も大きな広報キャンペーン」と聞いたこともある。また、緊急地震速報の種類も、予測震度が5弱以上の時に発せられる「警報」と、Mが3.5以上または予測震度が3以上の時に発せられる「予報」の2種類で発表することが決まった。TV、ラジオ、携帯電話、スマホで報じられるのは「警報」である。なお、当時は、TV、ラジオが主たる「警報」の伝達媒体で携帯電話 (当時、スマホはあまり普及していなかった) は従たる媒体と考えられていたが、その後、むしろ携帯電話さらにはスマホが主媒体と考えられるようになっていく。

周知が図られるとともに、法的位置づけも明確化された。2007年10月の運用開始からやや遅れて12月に気象業務法が改正され緊急地震速報は「地震動の警報・予報」とされ、警報・予報の1つに加えられた<sup>9)</sup>。これ

により、自治体や公共機関で施策を推進する根拠が明確となり、とくに自治体等では議会に予算を認めてもらう強い理由になった。

### 3. 運用開始後東北地方太平洋沖地震まで

2004年2月からの試験提供や2006年8月からの先行提供を経て、2007年10月1日から一般提供が開始された。その後、半年ほどは震度5弱以上を予測する地震が発生しなかったため、最初の警報は、2008年4月28日の宮古島近海の地震(M5.2)で報じられた(ただし、実際に観測した最大震度は4である。また、これより前に2008年1月26日に能登地方の地震(M4.8)で震度5弱を観測したものの、予測震度は4だったので警報は報じられていない)。さらに、同年5月8日の茨城県沖の地震(M7.0)や6月14日の岩手・宮城内陸地震(M7.2)およびその余震などと続いていく。

2009年8月25日の千葉県東方沖の地震で震度5弱を予測し警報が報じられている。しかし、Mは4.1で観測された震度は0である。強い揺れどころか揺れ自体を感じる人もほぼいなかったと思われる。つまり完全な誤報と言える<sup>10)</sup>。これは、この前日(24日)に観測点でのソフトウェアの改修を行ったものの振幅のパラメータの設定が不適切で、人為的に誤って増幅させてしまったことによる。人為的なミスによる誤報のため、気象庁は関係機関に謝罪するとともに記者発表を行い幹部は頭を下げた。当日や翌日のTVや新聞では、この時の様子が放送／掲載されることになる。

その後、東北地方太平洋沖地震(以下、東北地震)の直前の2011年2月までの41か月の間に、17地震に対して警報を報じている<sup>11)</sup>。(これらは基準の震度5弱以上を予測したのだが)17地震のうち実際に5弱以上を観測したのは10地震、震度4が5地震、震度3が1地震、震度0が1地震(上記の2009年8月のM4.1)である。一方、警報を発していないが、実際には震度5弱以上を観測したのは7地震である。ただし、この7地震では、全て震度4を予測し実際の観測は震度5弱である。この時期には、(2009年8月のM4.1を除いて)極端な過大／過小予測はなかった。

このように、(極端ではないけれど)多少の過大／過小予測があり、1つの地震では誤報を報じているが、この時期の最大の課題は、このような技術的な事柄というよりも、むしろ、周知広報にあったと言えよう。気象庁が2008年12月に行ったアンケート調査<sup>12)</sup>でも、「緊急地震速報を知っていますか」との問いに、「知っている」との回答は全国平均で66%である。「緊急地震速報を知っていますか」と聞いても、「何ですかそれ？」

という回答が多かった印象がある。

### 4. 東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日に発生した東北地震(M9.0)とその余震は、緊急地震速報の技術的な弱点をあらわにした<sup>11)</sup>。広い震源域への対応と、連発する地震の判別である。2007年の運用開始時にも、これらの弱点があることは分かっていたものの、それらの解決は後の技術開発にゆだねられていた中での巨大地震の発生である。

最初の観測点で地震波を検知後、5.4秒後に最初の予報を発している。この時はM4.3と推定している。さらに、8.6秒(最初の観測点で地震波検知後、以下同じ)でM7.2と推定し予測震度が5弱の地点があったため東北地方に警報を発している。この時点では、S波はまだ陸域に達しておらず、また、揺れの大きさもいずれの地点でも震度2程度以下である。なので、東北地方には想定通りの機能を発揮したと言えるだろう。

その後、破壊の進展を追うように推定されるMも徐々に大きくなり、105.0秒後にM8.1と推定し、116.8秒後に一連の処理を終了している。しかし、この地震はM9.0なので過小推定であり、また、後の解析により、破棄継続時間が3分(180秒)前後あったことが分かっており、それから考えると、処理を終了するのが早すぎたと言える。気象庁のMは伝統的に周期6秒の変位計相当の最大振幅から推定されるので、周期が長い地震動が卓越する地震の規模を正確に見積もれない(いわゆる”Mの飽和”。M8.4程度が上限と言われている)。ちなみに、M9.0というのは、モーメントMで、伝統的な気象庁Mの推定方法とは異なる(伝統的な手法で推定したMは8.4)。このMの過小評価に伴い、震源域の広さも過小評価した。このため、関東地方から見ると震源域の端は実際よりも遠くに推定し、地震動予測式での断層最短距離を過大に見積もった。関東での予測震度は4であり、警報は報じられていない。実際には、茨城県や栃木県で震度6強を、また、東京都23区内でも震度5強を観測しており警報をだすべき強さであった。

本震の後数週間、かなり活発な余震活動が続いた。余震でも予測震度が5弱以上であれば警報が発せられる。2011年3月の一か月間に45地震、4月に26地震に対して出されている。東北地方や関東地方に住んでいる人は、一日に何回もTVや携帯電話からあの警報音を聞くことになった。前述のように東北地震前の41か月で全国で17地震であったことと比べると、かなり多い。余震活動はとても活発だったので、2つあるいは3つの余震が同時に発生することも度々あった。それも、震源域が広いゆえに離れた場所で発生した。単発の地



震では、P相とS相の時間がはっきりわかる場合でも、そのP相とS相の間に別の地震のP相やS相が重なると、どの地震のどの相かが判別しにくくなる。間違えると震源をうまく決められず、まったく見当違いのところに決めてしまう。また、2つの小さな地震を1つの大きな地震として処理してしまうこともある。この場合、Mの推定もうまくいかない。例えば、震度5強と予想して警報を発したものの、実際にはM1.3の地震であり、観測された震度は0という場合もあった。4月28日までの49日間で、70地震で警報を発しているが、観測された震度が2以下のものは17地震に及ぶ。東北地震前の41か月では、17地震に対して1地震（それも、人為的ミス）だったことと比べると、かなり多くの地震で過大な警報を出している。

さて、認知度については、東北地震からほぼ1年が経過した2012年2-3月に行った気象庁のアンケート調査<sup>13)</sup>によると、緊急地震速報を「知っている」という回答が87%となっている（前述のように、2008年の調査では66%）。（誤報を含めてではあるものの）実際に緊急地震速報を体験したということで、認知度が向上した面はあるだろう。このアンケートでは東北地震以降で最も印象に残っている地震についても尋ねている。東北地方では、2011年4月7日23時32分の宮城県沖の地震（M7.4）で最大震度6強を観測しており、多くの人にとっては印象に残っている地震だろう。「その時、何をしていましたか」の問いで、「寝ていた」と回答した人のうち、どのように緊急地震速報を見聞きしたかを尋ねたところ、62%の人が「携帯電話から」と答えている。これは、TVの7%に比べて圧倒的に多い。寝ているときにはTVの電源を落とすものの、携帯電話は電源を入れたまま枕元に置く人も多いと思われる。ちなみに、独立した調査調査（朝日新聞の2011年6月4日の記事。調査は2011年3月23-25日に首都圏で実施）によると、利用できて良かった携帯電話のサービスとして、1位がメール（58.4%）で2位が緊急地震速報（24.8%）であった（以下、ワンセグ放送が22.5%、ソーシャルメディア17.0%）。このような背景もあり、この頃から緊急地震速報の通信媒体として、TVやラジオよりも携帯電話（その後はスマホ）がより重要視されるようになっていったと思う。アンケートでは、さらに「速報は役に立っているか」とかなりストレートに尋ねており、東北地方では「役に立っている」が47%、「どちらかと言えば役に立っている」が43%で合わせて90%を超える。また、その理由として、「身を守れる」46%、「身構えることが出来る」85%、に加えて「安心できる／心構えができる」も44%と多く、実際の行動に結び付か

ないとしても、“心の準備”ができることで有益と捉えられていることがうかがえる。

## 5. 東北地方太平洋沖地震以降今日まで

東北地震やその余震活動であらわになった2つの課題、地震が連発する場合であっても正確な震源とMの推定、および広い震源域の場合の震度予測、への対応がその後の研究開発の柱と位置づけられることになった。これには2つのアプローチがはかられた。1つは、従来の戦略の発展系、①たとえ地震が多発していても適切に震源とMの決定ができるようにする、というアプローチと、もう1つは新しい考え方、②（震源とMを用いずに）揺れから揺れを直接予測する、というアプローチである。

この①についての改善点で重要な特徴の1つは、震源決定にも振幅情報を用いるようにしたことである。従来は、P波の着震時を用いて震源を推定し、その震源位置からの距離と観測された振幅を用いてMを推定する、といういわば2段階であった。これを、震源決定にも振幅を用いて1段階で行おうとするものである。これにより、振幅の小さなところに震源位置を誤推定してしまうことを避けることが出来る。この方法、IPF法<sup>14)</sup>は、2016年4月の熊本地震には間に合わなかったものの12月に気象庁の運用システムに導入された。さらに、2023年には、新しいIPF法（拡張IPF法）の運用が開始された。2節で述べたように従来は、気象庁観測網の約270観測点（2007年の運用以降、さらに防災科研の海底地震計網等の約220点が追加され計約490点）からのデータを用いているルーチンとHi-net（約780点）からのデータを用いる防災科研で開発されたルーチンが独立に走っており、それぞれの震源位置とMを比較してより妥当な出力値を選択する、という方式であった。拡張IPF法では、これらの気象庁観測網や防災科研海底地震計網等とHi-netの計1300点からのデータの両方を入力値として統一的に処理するようした。

また、②では、現時点での波動場を即時推定しそこから未来の波動場を予測する、という強震動の伝播に注目した考え方をを用いている。気象での数値予報の考え方を倣ったような方法である。この考え方を簡易的に適用したPLUM法<sup>15)</sup>は2018年3月に運用を開始した。気象庁の震度計の約670観測点を用いている。PLUM法では、予測点近傍の複数の観測点（現在は、予測点から30km以内）のいずれかで強い揺れが観測されると警報を報じる（この際に地盤増幅率は考慮している）。簡単に言えば、隣町に強い揺れがあったので我町にも間もなく来るだろう、という考え方である。S

波速度が3km/s程度であり、近傍30kmしか見ないことから、最大でも強い揺れの10秒前での警報となり猶予時間は少ない一方で、過小予測（いわゆる見逃し）は極めて少ない。また、震源位置や震源域の大きさ、破壊過程には依存しないので、東北地震の時の関東での震度の過小予測を回避できる。実際、2018年9月6日の北海道胆振東部地震（M6.7、最大震度7）では、地震動予測式では震度7を予測できないが、PLUM法により予測出来ている。さらに、2022年3月16日の福島県沖の地震（M7.4、最大震度6強）では、その2分前に発生したM6.1の影響でMをうまく推定できなかったものの、PLUM法により震度6強を予測した。

2023年2月には、緊急地震速報の発表基準に長周期地震動階級が追加された。長周期地震動階級で3以上（減衰定数5%の絶対速度応答スペクトルの1.6から7.8秒の間のいずれかの周期で、50cm/s以上に相当）が予測される場合も緊急地震速報が報じられようになった。なお、現在、長周期地震動の予測では、震源位置とMから地震動予測式を用いる方法<sup>10)</sup>で行われているのみで、PLUM法のような“揺れから揺れ”を予測する考え方は、まだ使われていない。

このように現在の運用では、①による震源位置とMの即時推定の方法で震度5弱以上、②による“揺れから揺れ”の方法で震度5弱以上、そして、長周期地震動階級で3以上、のいずれかひとつでも予測された場合に警報が発表され、TVやラジオ、スマホを介して報じられる。

## 6. おわりに

世界を見回してみると、日本の緊急地震速報のように不特定多数の利用者に発するものは、1990年代から始めているメキシコのほか、台湾では2014年から、米国西海岸では2018年から開始された。そのほかに、中国、韓国、インドネシア、トルコ、イスラエル、EU諸国などでも公的機関が動いていると聞いている。大なり小なり2007年から始めている日本の経験を参考にしているといっても良いだろう。

さて、1節で述べたように、2007年の運用開始前後にはかなり大掛かりな周知活動を行ったものの、実際に認知が高まったのは、東日本では2011年の東北地震、西日本では2016年の熊本地震が契機と思われ、「経験は最善の教師」の例だろう。TVやラジオでは、「緊急地震速報が発表されました」の後に、かつては「緊急地震速報とは何か」の解説があったが、今ではほとんど聞かなくなった。多くの人が知っている情報である。地震防災のための公共インフラ的な地位を確立したと言えるかもしれない。

## 参考文献

- 1) Cuellar, A., Espinosa-Aranda, J.M., Suarez, G., Ibarrola G., Uribe A., Rodríguez, F.H. and Frontana, B.: The Mexican Seismic Alert System (SASMEX): Its alert signals, broadcast results and performance during the M 7.4 Punta Maldonado earthquake of March 20th, 2012, in *Early Warning for Geological Disasters*, Springer, Berlin, Germany, pp. 71–87, 2014.
- 2) Chen, D.Y., Hsiao, N.C. and Wu, Y. M.: The earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 105, No. 2A, pp. 568–579, 2015.
- 3) Cochran E.S., Bunn, J., Minson S.E., Baltay, A.S., Kilb D.L., Kodera, Y. and Hoshiba, M.: Event Detection Performance of the PLUM Earthquake Early Warning Algorithm in Southern California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 109, No. 4, pp. 1524–1541, 2019.
- 4) 中央防災会議：防災基本計画 令和6年6月、2024、[https://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon\\_basicplan.pdf](https://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basicplan.pdf) (参照 2024-12-16).
- 5) Nakamura, Y. and Saita, J.: UrEDAS, the earthquake warning system: today and tomorrow, in *Earthquake early warning system*, Springer Berlin Heidelberg, New York, pp. 249–281, 2007.
- 6) 東田進也：アイデアは150年以上前に誕生！緊急地震速報実用化への道のり、Grasp, 2023, <https://www.magazine.mlit.go.jp/interview/vol46-b-1/> (参照 2024-12-16).
- 7) Horiuchi, S., Negishi, H., Abe, K. and Fujinawa, Y.: An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 95, No.2, pp. 708–718, 2005.
- 8) 内閣府：中央防災会議における内閣総理大臣発言（平成19年3月20日）、2007, [https://www.bousai.go.jp/jishin/cew/dai1kai/20070328besshi\\_sorihatugen.pdf](https://www.bousai.go.jp/jishin/cew/dai1kai/20070328besshi_sorihatugen.pdf) (参照 2024-12-16).
- 9) 気象業務法、[https://laws.e-gov.go.jp/law/327AC0000000165/#Mp-Ch\\_3](https://laws.e-gov.go.jp/law/327AC0000000165/#Mp-Ch_3) (参照 2024-12-16).
- 10) 気象庁：緊急地震速報（警報）の誤報について（第2報）、2009、<https://www.jma.go.jp/jma/press/0908/25b/200908251700.html> (参照 2024-12-16).
- 11) Hoshiba M.: Review of the Nationwide Earthquake Early Warning in Japan during Its First Five Years, in *Earthquake Hazard, Risk and Disasters*, Elsevier, Oxford, UK, pp. 505–529.
- 12) 気象庁：地震及び火山に関する防災情報の満足度調査調査結果、2009、[https://www.jma.go.jp/jma/press/0903/11a/20manzokudo\\_kekka.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/press/0903/11a/20manzokudo_kekka.pdf) (参照 2024-12-16).
- 13) 気象庁：「緊急地震速報の利活用状況等に関する調査」結果について、2012、<https://www.jma.go.jp/jma/press/1203/22c/manzokudo201203.html> (参照 2024-12-16).
- 14) 溜渕功史、山田真澄、Wu, S.: 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法、地震2、Vol. 67, No. 2, pp. 41–55, 2014.
- 15) Kodera, Y., Yamada, Y., Hirano, K., Tamaribuchi, K., Adachi, S., Hayashimoto N., Morimoto, M., Nakamura, M. and Hoshiba, M.: The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) method: a simple and robust seismic wavefield estimation approach for earthquake early warning, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 108, No.2, pp. 983–1003, 2018.
- 16) Dhakal, Y. P., Suzuki, W., Kunugi, T. and Aoi, S.: Ground motion prediction equations for absolute velocity response spectra (1–10s) in Japan for earthquake early warning, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 91–111, 2015.



干場 充之（ほしば みつゆき）

1986年京都大学卒。気象庁に入庁後、南カリフォルニア大学研究員、ミュンヘン大学客員研究員も経験し、気象庁地震火山部で課長補佐や気象研究所で研究部長、研究総務官を経て役降り後現職、博士（理学）、専門分野 地震動即時予測、地震波伝播



# 今も記憶に残る建築被害調査とその後の取り組み

中島 正愛

●(株)小堀鐸二研究所 代表取締役社長・京都大学名誉教授

## 1. はじめに

日本地震工学会誌編集委員会から、『阪神・淡路大震災（以下「あの震災」）から30年を迎え、当時を経験した世代が引退し震災を経験しない世代が第一線を担う今、震災を契機とした地震工学分野の取り組みとその進展について、自らの経験を次世代に語って欲しい』との依頼がありました。確かに私は、建築に関わり当時を経験しそして引退してゆく身にあるので、執筆依頼をお受けすることにしました。当時私が直接関わり、30年を経た今も鮮明に記憶しているいくつかの事項を中心に、以下「である調」でお話いたします。

## 2. 地震直後の日本建築学会被害調査

1995年1月17日の地震直後から、日本建築学会（以下建築学会）は建物系被害調査の実施の検討をはじめた。救出・復旧作業の進行、交通網の遮断等によって本格調査団の早期派遣は難しいと判断し、建築学会は近畿支部に対して、建物被害の概略をとらえる初動調査を依頼した。交通網の分断を考えると構造形式によって人を分けることは現実的ではないと判断し、阪神・淡路地域を6つの地区に分け、各地区を担当するグループを形成して（例えば京都大学防災研究所は神戸市中央区を担当）初動調査にあたった。初動調査団長には、当時大阪工業大学の竹内吉弘先生が、同調査団幹事には私がそれぞれ指名され、私は団長の下で、初動調査、調査速報の編集、速報会の開催の切り盛りに関わった。

1月24～26日の初動調査には全国各支部からも応援を得て、総勢107名が参加した。調査直後から速報会への準備を始め、2月10日と15日に、大阪と東京で被害調査報告会を開催した。両会場ともに定員の2倍を超す方々が会場にお見えになり（東京会場の定員は1,100名）、多くの方々には入場をお断りする事態となった。また速報会の準備と平行して、災害調査速報を出版する作業を始め、3月29日には「1995年兵庫県南部地震災害調査速報」を出版した。この震災は海外でも大きな関心呼び、その被害実態を早く知りたいという要請に応えるために、上記速報の英語版も作成することにして、4月19日に「Preliminary Reconnaissance Report of the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake」を出版した。初動調査の顛末については

文献1を参照されたい。

## 3. 建物被害からの教訓とその後の取り組み例

### 3.1 古い建物の崩壊、既存不適格、耐震診断と補強

初動調査で遭遇した、そして今も鮮明な記憶として残る光景は、「同じように見える建物、同じ区域にある建物でも、壊れ方は天と地ほど違う」・・・あの震災から「既存不適格建物」問題をつくづく思い知った。写真1はその象徴的な一例で、1995年1月18日の早朝（地震後調査に入った初日）神戸三宮交差点付近で撮ったものだ。一見似ている隣りあわせの2棟の建物で、一方（写真中央の建物）はその3階が消えてなくなっているのに対して、もう一方（写真左の建物）はしっかりと立っている。これと似た光景は被害地域の随所で見られた。「街は一日にしてならず」、旧い造り方（旧基準）では今我々が求める耐震性能には及ばない、耐震性能を診断して不十分であれば補強すべし、それを怠れば町全体としての地震防災の成就是不い。まぎれもなくこれが、あの震災から私が学んだ最大の教訓である。



写真1 神戸三宮駅南の被害例：真ん中の建物では3階が崩壊してしまったが、左の建物はしっかりと立っている（1995年1月18日朝、筆者撮影）。

耐震診断と耐震改修については、1977年に日本特殊建築安全センター（現：日本建築防災協会）から鉄筋コンクリート造を対象とした指針が策定され、以後1983年までに各構造種別の指針が整備された。あの震災を受けて、耐震診断・耐震改修をさらに促すべく、1995年10月には「建築物の耐震改修の促進に関する法



律（耐震改修促進法）」が制定された。その後も耐震改修に関わる複数の補助制度を設けるなど、耐震改修成就への息の長い努力が続けられている<sup>2)</sup>。

### 3.2 当時の耐震基準・規定の見直し

あの震災当時に使っていた（最新の）耐震基準や規定の見直しへの議論をもたらした、そして私が今も鮮明に記憶する被害を以下に3つ挙げたい。

まずRC造建物では、いわゆる「ピロティ形式」と呼ばれる建物の被害が顕著となり、震災前に使われていた構造規定の見直しに迫られた。1995年12月にはさっそく告示を改正し、「建築物の構造規定（1997年）」において、ピロティ層での層崩壊を避けるための構造計算法やピロティ層に係る構造規定が定められ、さらに「建築物の構造関係技術基準解説書（2007年）」で設計にあたっての詳細が示された。ピロティ形式の建物では、上層の連層耐震壁が負担する大きな水平力がピロティ層で柱に伝わるとともに、床スラブを介して周辺架構にも伝達されるという複雑な伝達機構を有している。現行の耐震設計でも適切にモデル化されているとはなお言い難いとの認識の下、最近になって建築学会構造委員会にWGを設け新たな検討に着手するなど、ピロティ形式の設計は一筋縄ではゆかない。

1995年以前の地震において、鉄骨造建物はRC造建物等に比べて総じて被害が少なかったところ、あの震災では、梁端溶接接合部の破断、ブレースの座屈、ブレース接合部の破断、柱脚の破断等が多数露見した。特に梁端溶接接合部の破断が比較的新しい建物にも散見されたことから、その原因と対策に着目した多くの研究開発が実施された。溶接部の破断特性、新しい接合形式・詳細、新たな部材や構造形式に至るまで、その検討は広範囲に及んだが、最も重視されたのは、入熱量やパス間温度に代表される溶接施工管理の徹底であった。これらの検討結果は順次実践に移されるとともに、複数の規準やガイドライン（「鋼構造接合部設計指針（2001年、建築学会）」、「鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説（2003年、建築研究所）」、「冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル（2008年、日本鉄鋼連盟）」等）が整備された。

臨海部では顕著な液状化や側方流動が多発し、杭基礎の破壊によって多くの建物が沈下・傾斜した。それまでの杭基礎耐震設計では、主として上部構造からの慣性力を考慮していたところ、あの震災による杭基礎被害から地盤変位の影響も無視しえないことが露わになった。一連の調査と検討を経て、「建築基礎構造設計指針（2001年、建築学会）」では、地盤変位を考慮し

た杭応力解析（応答変位法）が示されるに至った。とは言え現在に至るまで、一般的な確認申請建物では、応答変位法が使われることは稀で基礎構造については二次設計も要求されていない。

### 4. 地震被害調査の今昔

あの震災規模の被害が今のできごとであると仮定すれば、初動調査はどのようなものになるだろうかと思案することがある。30年を経た今、情報を収集・伝達する手段ははなはだしく異なる。当時なかった今の便利として、インターネットやスマートフォン（注：あの震災時は携帯電話もデジカメも未普及だった）が挙げられるが、当時の情報交換・発信の手間ひまは今ではとても信じられないし、海外との交信もまどろっこしいものだった。地震直後にカリフォルニア大学バークレー校の旧友J. Moehle教授から、被害情報提供への依頼があった。それに応えるために、初動調査終了直後に、「A Short Memo on Hyogoken-Nanbu」と題した10頁強の資料を彼にファックスした。なんと彼は、受け取ったファックスを、全米各地の地震工学関係研究者達にさらにファックスで転送したそうだ。今の世の中では信じられない光景は30年前の常識だった。

今は幾多の地震計やセンサーが世界中に展開されたおかげで、大地が動く様子や被害の様相の多くがデジタル化され、インターネットで高速で結ばれた多種多様なメディアを通じて即座に世界中に流れてゆく。言語においても自動翻訳技術や長い文章を手際よく要約する文章要約AIも格段に進歩した。一例を挙げると、令和6年能登半島地震勃発から僅か1週間後（2024年1月8日）に、地盤工学の泰斗である旧知のG. Gazetas教授（ギリシャアテネ工科大学）は、130頁（パワーポイント形式）を超す速報を出版、世界に向けて公表した<sup>3)</sup>。この報告は公表データ（日本全土を巡る地震観測網：K-NETやKiK-net等の記録、米国地質調査所による分析記録等）や、多様なメディアを通じて公表された写真・映像類、さらには各種メディアの記事に基づいたもので、わが国の研究者達がデータを彼に提供したものではない。

情報のデジタル化と即時送受信に代表される社会環境の変化は、30年前に要した大人数の現地集結と手作業による情報収集を不要にするものだろうか。先のGazetas教授の例にあるように、現地に行かずとも情報は得られるのか。「踏査（現地に足を運ぶ）」はこれから死語になってゆくのか、それとも現地に足を運ぶことによってこそ得られる情報はいつの時代でもあるのか。であればそれはいったい何なのか。地震後の被

害調査における「踏査」の意義とありようについては、現役の皆さんによってぜひご検討いただきたい。

## 5. 地震調査研究推進本部の設立と活動

あの震災直後に、わが国は地震調査研究推進本部（以下地震本部）を立ち上げた。地震本部のホームページは設立の経緯を次のように記している<sup>4)</sup>。『先の地震を受けて、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、地震防災対策特別措置法が議員立法によって制定された。地震に関する調査研究の成果が国民や防災を担当する機関に十分に伝達され活用される体制になっていなかったという課題意識の下に、行政施策に直結すべき「地震に関する調査研究」の責任体制を明らかにし、これを政府として一元的に推進するため、同法に基づき総理府に地震本部を設置（現・文部科学省に設置）することにした。』地震本部は、文部科学大臣を本部長とし、その傘下に、地震の長期評価、強震動評価、津波評価を推進する「地震調査委員会」と、関連予算調整、広報、調査観測計画、新たな科学技術を活用した地震調査研究を検討する「政策委員会」が置かれているが、私は2011年～2017年まで政策委員長職に就いて地震本部の活動に加わった。

地震本部の活動は、「地震の正体と実相を知るための観測や研究を実施して、地中や地面の揺れをできるだけ正確に予測する」を主軸とし、予算の多くを観測と調査に投入するので、理学地球惑星系の研究者達が活動の中心を担っている。とは言え、地震本部が関与するK-NETやKiK-netを始めとする多くの観測データ、震源・伝播・サイト特性を科学的に評価するための強震動予測手法、地震被害想定や設計用地震動の策定に有用な地震動予測レシピの提供は、建築耐震設計の高度化にまぎれもなく貢献している。

地震本部の活動も含め地震に関わるわが国の調査観測網は、世界でも類をみない質と量を誇っている<sup>5)</sup>。またこの調査観測から得られるデータは学術振興という立場から公開を原則とするので、前節でも触れたように海外の研究者・技術者も自由に使える利点がある。このような状況下、私が海外の研究者と会話すると、日本の地震観測網は素晴らしい、観測記録を活用して設計用地震力においてより精緻な評価ができる、なのに日本の耐震設計用地震力はこの40年間あまり変わっていないようだ、なぜか、という質問をたびたび受ける。

幾世紀にもわたる地震災害からの教訓に培われた国民感情、ハザードとしての地震力とリスク管理を考慮した耐震設計用地震力の違い、設計地震力を上げる代わりに抵抗力を増すことによって担保する安全性など、

彼らの不審に反駁する正当な理由はいくつもある。そしてわが国の耐震設計・施工は世界一強い建物を保証すると私は信じているけれども、理（ことわり）をもってわが国の耐震設計の立場を説いて彼らの共感を得ておかないと、わが国の「ガラパゴス化」がますます助長されてしまう、そしてそれはまずい・・・と私は思っている。わが国の耐震設計地震力が1981年以来あまり変わらない理由を、微かではあるけれども海外に伝えたいと思い立ち、いささかの所見をまとめた拙論を一昨年発表した<sup>6)</sup>。

## 6. 大型振動台実験施設の整備

あの震災を経て、地震防災に関わるハードな技術開発に資するべくさまざまな研究投資が図られたが、顕著な投資の一つに巨大振動台がある。あの震災で目の当たりにした建物やインフラ被害を繰り返さないためには、これらが崩壊に至る真相を知らねばならないとの認識の下、震災直後から「構造物破壊を再現できる超大型振動台施設（俗称：E-ディフェンス）」への議論が始まり、10年にわたる検討と設計・施工を経て、この施設は2005年1月に開設された。縁あって私は、開設から6年間にわたってE-ディフェンスの初代センター長を務めた。

あの震災で露見した数多くの構造物破壊に触発されて建設された経緯もあって、E-ディフェンス設立当初のミッションは、「あの震災でおきた未曾有の構造物破壊の再現とその分析に基づく『耐震設計の高度化』」にあった。開設以来、木造建物、RC造建物、RC橋脚、鉄骨造建物（写真2）等に対する一連の「崩壊実験」が矢継ぎ早に実施された。



写真2 E-ディフェンス：4層鉄骨造建物に対する崩壊実験：柱や梁が大きな損傷を受けた後、最後は1層が崩れ落ちた。（2007年9月27日、筆者撮影）



そのうちの一つは、築後25年を経たほぼ同一仕様の本造住宅2棟（実際に使っていたもの）に対する実験であった。一方の住宅は現状のまま、もう一方は耐震補強指針に沿って補強を施して、2棟を丸ごと振動台に載せて震度7相当の強烈な揺れを与えた。その結果、補強しなかった住宅が崩れ落ちたのに対して、耐震補強した住宅は十分に持ちこたえた。この実験によって、耐震補強による人命保護能力の飛躍的な向上が、これ以上ないほど鮮明に示された。

設立から数年が経つと、上記の崩壊現象の解明に加えて、生活や事業の継続（BCP）にも目配りする必要があるとの考え方が浸透してきた。そこで、家具・什器を含めた非構造部材の耐震性能評価や、非構造部材の被害軽減への方策とその検証を目的とした「機能性検証」も実験のレパートリーに加えられ、長周期地震動を受ける高層建物の上層階における家具・什器の揺れと動きの再現や、免震病院における医療機器の挙動と病院機能の維持能力の検証を目的とする実験が多数実施された。

他機関との共同研究や施設貸与を含め2023年末までに実施した130件を越す実験を通じて、耐震工学の高度化への貢献をめざしてきたこの巨大振動台施設も、誕生して20年が経とうとしている。設立以来「世界最大規模」という形容詞はEーディフェンスの枕詞であったけれど、まもなくこの言葉を、ほぼ完成して現在検証実験が進行中の中国天津大学が保有する巨大振動台に譲ることになる。この20年の間に実施した幾多の実験を通じて学んだ教訓や反省は多く、耐震研究コミュニティの大型耐震実験に対する考え方も変わっているだろう。またEーディフェンスを構成する各種装置類も老朽化に対応すべく順次更新してゆかなければならない。耐震工学と地震防災の将来を見据え、Eーディフェンスのような大型実験施設をこれからどの方向に導いてゆくべきか、現役の皆さんによってぜひご検討いただきたい。私自身も、ある国際学術誌の特別号で、大型耐震実験の「光と影」について、自省も込めて論考を認めた<sup>7)</sup>。

## 7. おわりに

本稿では、あの震災に関連して建築被害調査研究に参画した私が、30年を経た今も鮮明に記憶しているいくつかの事項、(1)地震直後の初動調査、(2)耐震基準・規定の見直し、(3)地震被害調査の変遷、(4)地震調査研究推進本部の設立、(5)大型耐震実験施設（Eーディフェンス）について、震災時の様子を振り返りながら、当時と現在の私の思いを綴りました。記述には、私が

直接関与した内容に限られるという偏りがあることをご了承ください。なお被害調査を踏まえた研究開発や、それに関連する基準や指針の改定・整備については、現在現役で活躍されている方々からも情報を提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 竹内吉弘、中島正愛：兵庫県南部地震初動調査の概要、建築雑誌、日本建築学会、Vol. 1337、pp.21, 1995.
- 2) 国土交通省：住宅・建築物の耐震化の現状と目標、2024、<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/content/001726323.pdf> (参照2025-01-16).
- 3) Garani, E. and Gazetas, G.: The MJMA 7.6 "Noto Peninsula" Japan Earthquake of January 1st 2024, GeoEngineers Without Borders (GeoWB), ISSMGE, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12972.85129>.
- 4) 地震調査研究推進本部：地震調査研究推進本部とは、<https://www.jishin.go.jp/about/introduction/> (参照2025-01-28).
- 5) Wald, D.: Personal Communication with Dr. David Wald (Primary developer of ShakeMap and ShakeCast at US Geological Survey), 2023.
- 6) Suzuki, A, Kusaka, A. and Nakashima, M.: Japanese attitudes toward risk control in seismic design in light of observation, prediction, and actual performance of building structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 52, pp.2378-2398, 2023, <https://doi.org/10.1002/eqe.3853>.
- 7) Hayashi, K and Nakashima, M.: Insights from large-scale shake table testing: Key criticisms and potential solutions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 54, pp. 604-617, 2025, <https://doi.org/10.1002/eqe.4271>.



中島 正愛 (なかしま まさよし)

学歴：1975年京都大学工学部建築学科卒業、1981年米国リーハイ大学大学院土木工学科修了、Ph.D.；職歴：建設省建築研究所、神戸大学、京都大学を経て現職；専門：建築耐震工学・地震防災；役職：京都大学防災研究所所長、日本建築学会会長、国際地震工学学会（IAEE）会長等を歴任。



# 橋梁被害と技術開発

運上 茂樹

●東北大学大学院工学研究科 教授

## 1. はじめに

1995年1月17日朝の衝撃は決して忘れない。被災された方々のそれは如何許りであったか想像を絶する。成人の日の振替休日明けの火曜の朝、ニュース報道を確認しないまま出勤、職場で重大事態の発生を初めて知り、非常体制に突入したことを鮮明に記憶している。

席に着いた途端、当時の建設省道路局国道第2課の岩崎泰彦課長補佐（その後、国土交通省九州地方整備局長、国土技術政策総合研究所長をご歴任）から電話。「阪神の被害を見たか、道路が壊滅的な被害を受けている、現地が大変な状況で今すぐ支援しなければならない、状況把握のための調査団を派遣する、川島一彦地下開発研究官（肩書当時、建設省土木研究所勤務時の直属上司、その後東京工業大学にご異動、現同名誉教授）に連絡せよ、被災原因究明の調査委員会に参加いただく専門家リストを大至急送れ、決定次第第1回委員会を開催する、準備せよ。」との指示があり、避難・緊急輸送に係るライフラインとしての役割を担う道路インフラの緊急対応が始まった。道路橋の落橋・倒壊被害は、1964年新潟地震で3橋、1983年宮城県沖地震で1橋しか発生していなかった中、ショッキングな映像となった阪神高速道路3号神戸線深江地区の630mに渡るピルツ橋の横倒し被害を始め、現実とは思えない壊滅的な被災情景が次々と飛び込んできた。

従来経験したことがなかったような強震動、それも数回の強烈な揺れによって、それまで何事もなく存在し、機能していた社会システム全てを一瞬で崩壊させるすさまじいエネルギーの放出であった。過去の数多くの激甚な震災経験を踏まえて進化してきたと考えられていた耐震技術によって構築された多くの構造物が被災、崩壊した。

地震工学、耐震工学に最大のインパクトを与えた被害地震となった「阪神・淡路大震災」の発生から30年という節目を迎え、改めて、当時の震災の教訓とともに、その後の地震工学研究と耐震技術開発の取り組みについて振り返ってみたい。被災したすべての社会インフラに対して様々な震災対応の取り組みがなされ、復旧・復興には国を挙げて大規模・広範な尽力がなされてきたことは周知と存するが、本文では、落橋・倒壊などの甚大な被害を受け、その被災原因の分析や緊

急復旧対応に筆者が関与することとなった「道路橋」を対象に、その耐震設計や耐震構造に係る技術進化を中心に振り返る。

## 2. 兵庫県南部地震が橋梁の耐震設計に与えた影響

「兵庫県南部地震を受けて、橋梁構造物の耐震技術はどう変わり、どう進化してきたのか？」

表1は、1923年関東地震以降の被害地震とその教訓をもとに開発、進化してきた橋梁構造物の耐震技術の歴史をまとめたものである<sup>1)~4)</sup>。表1は筆者がよく用いている年表であり、この歴史は先達技術者が過去の数多くの地震被害に立ち向かい、それを乗り越えるべく積み重ねられてきた努力の成果を表すものと考えている。兵庫県南部地震のインパクトを明確化するためにもその直前の技術状況を含めてその要所を振り返る。

### (1) 兵庫県南部地震の直前まで

橋梁の設計において地震の影響を具体的に考慮するようになったのは、2,000橋近い橋が被害を受けた1923年関東地震が契機となっている。橋台・橋脚等の設計に地震力に相当する静的な慣性力を作用させ、弾性解析に基づく「震度法と許容応力度法」が導入された。地震の影響を設計に考慮することによって、その後の地震被害橋数は劇的に減少していく。

1964年新潟地震では、砂質地盤の液状化に伴う落橋被害が生じた。この被害経験から「液状化に対する設計法（液状化判定法と基礎の設計法）」が開発され、さらに支承破壊後の上部構造の大変位による落下をできるだけ防ぐための「フェイルセーフ設計法（落橋防止構造）」が導入された。

1978年宮城県沖地震では、鉄筋コンクリート橋脚や支承部などに被害が集中するようになった。これは、基礎や下部構造が強化されてきた結果、次の弱点部となる部位に損傷が移行したものであった。こうした被害経験を踏まえ、鉄筋コンクリート橋脚のねばりを確保するための「じん性設計法」として、「せん断力に対する設計法、軸方向鉄筋の段落し部の設計法、配筋細目」などが充実してきた。

部材の破壊特性や変形性能の評価に関する一連の実験研究によって、「損傷が生じることを意識しない弾性設計法」から踏み出し、「大規模地震時には損傷が

進展する」が、その損傷程度を許容範囲内に収めるという「本格的なじん性設計法」が開発された<sup>5)</sup>。これは、「地震時保有水平耐力法」として1990年の道路橋示方書に規定された。ここでは、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震（後のレベル1地震動）、関東地震のような稀に起こる大きな地震（後のレベル2地震動）という2段階の設計地震動を考慮した「2段階耐震設計法」の考え方とともに、それぞれの設計地震動に対して、「健全性を損なわない」、「落橋などが生じない」といった「耐震設計において達成すべき目標性能を明示」した設計法が導入され、「性能設計法」の先駆けとなった。

## (2)兵庫県南部地震の直後

兵庫県南部地震は、1923年関東大震災以来最大の被害を引き起こした。強震観測が開始されてから世界的にみても経験したことのない大きな影響を及ぼす地震動で、従来の耐震設計で考慮されていた地震動レベルの2倍を超えるような強震動が広範囲で観測された。兵庫県南部地震による甚大な被害は、まさに、地震動に対する構造物の耐震設計法に重大な影響を及ぼし、これを大きく見直す契機となった<sup>6)</sup>。

震災直後、1995年1月20日に召集された第132回国会では、「兵庫県南部地震の緊急災害対策に関する件」が集中的、継続的に審議された。2月1日に開催された衆議院災害対策特別委員会<sup>7)</sup>においては、「関東大震災あるいは新潟地震、過去の大きかった地震と比べて、今回の地震はどのような規模のものであったのか。そして、あれだけの構造物が被害を受けた。それぞれの構造物の設計の考え方はどうであったのか。設計方針をどのように変えていこうとしておられるのか。（一部略）」との質疑が出されている。これまでの構造物の耐震設計ではどのような規模の地震を対象にどのような性能を期待していたのか、その上で今回の地震の規模がどの程度で、そしてこのような激甚な被害が発生した原因は何なのか、と問われたのであった。これに対して、「我が国の道路橋については、従来から関東大地震等の経験を生かしながら技術基準を定め、関東大地震クラスの稀に起こる地震に対しても落橋や倒壊が生じないことを目標に整備を行ってきた。今回の地震では震度7という我が国未曾有の大きな揺れが生じたとはいえ、高架橋に大きな被害が発生したことを重く受けとめている。道路橋については、地震工学、橋梁工学の専門家から成る震災対策委員会において被災原因の徹底的な究明を図り、必要な対策を講じることとしている。（一部略）」と説明された。

この専門家委員会が地震発生3日後に立ち上げられ

た「建設省兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会」である<sup>8)</sup>。委員長は岩崎敏男元建設省土木研究所長、委員は当時の我が国の地震工学・橋梁工学に係る学術・実務分野のリーダーであった家村浩和先生、池田尚治先生、大西有三先生、片山恒雄先生、亀田弘行先生、川島一彦先生、佐伯彰一先生、土岐憲三先生、藤野陽三先生が務められた。委員会では、地震動や被災状況の分析、被災メカニズムの検討とともに、耐震設計で検討すべき課題について検討され、地震発生約2ヵ月半後の3月30日に分析検討結果の中間報告がなされた。また、2月27日には被災した道路橋の復旧に適用するための基準「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様（復旧仕様）」<sup>9)</sup>が議論され、被害分析を踏まえた上での復旧設計方針が決定された。

委員会の中間報告書では、落橋等の甚大な被害は、「設計で想定した以上の強烈な地震動」を受けたことが被災の根本的な原因であったこと、特に昭和55年道路橋示方書よりも古い時代の「鉄筋コンクリート橋脚の主鉄筋段落し部における曲げせん断破壊」によって著しい被害が発生したことが報告された。同時に、1)設計地震力と橋の耐震性、2)構造部材の地震時の変形性能と動的耐力、3)動的解析の活用、4)免震設計、5)支承、6)落橋防止構造、7)液状化及びこれに伴う地盤流動、8)橋全体系としての耐震性、について今後の耐震設計に係る課題として検討を進め、技術基準の中に反映すべきことが提言された。

このような被害実態に関する専門的な分析結果と提言を踏まえ、兵庫県南部地震のような「内陸直下で起こるM7級の地震」による地震動が耐震設計において考慮すべき地震動として位置付けられた。橋全体系としてねばり強く地震に耐える構造を目指し、橋脚、基礎、支承等の各構造部材に対して「地震時保有水平耐力法」が適用されることになった。強地震に対して構造物の損傷の進展を追跡するための「動的解析法」、長周期化とエネルギー吸収性能の向上によって構造物の地震応答を低減させて耐震性の向上を図る「免震設計法」、液状化した地盤の側方への変位に対する「液状化に伴う流動化設計法」も導入された。また、地震による損傷を意図した適切な構造部位に誘導し、そこでエネルギー吸収を確実に図ることにより橋全体としての安全性を確保するという「キャパシティ・デザイン（損傷制御設計法）」の考え方も具体化した。さらに、相対的に耐震性の低い既設構造物の耐震性の向上を図るために、橋脚、支承、基礎の各部材、あるいは、橋梁全体系としての「耐震補強法・アップグレード技術」も開発、実用化された。

表1 橋梁構造物の地震被害と耐震技術開発の歴史(参考文献4)に加筆)

| 年 代       | 主な被害地震                                    | 道路橋の耐震設計関連規定                                            | 耐震技術開発                                                                                         |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|-----------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                           |                                                         | 耐震要求性能                                                                                         | 外的作用(地震作用)                                                                                                                                                          | 耐震設計法・性能照査法                                                                                              | 耐震構造・構造設計コンセプト                                                                                                                        |
| 1920(T9)  | 1923 (T12)<br>関東地震(M7.9)                  | 1929 (T15)<br>道路構造に関する<br>細則案                           | 関東地震による被害を<br>踏まえた仕様設計                                                                         | 大正12年関東地震相当<br>(水平震度0.1~0.3程度)                                                                                                                                      | 震度法と許容応力度法<br>(弾性設計・静荷重設計)                                                                               |                                                                                                                                       |
| 1930(S5)  |                                           | 1939 (S14)<br>鋼骨鉄筋設計示方書案                                |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 1940(S15) | 1948 (S23)                                |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 1950(S25) | 福井地震(M7.1)                                |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 1952 (S27)                                | 1956 (S31)<br>鋼骨鉄筋設計示方書                                 |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 1960(S35) | 十勝中地震(M8.2)                               | 1964 (S39)<br>鋼骨鉄筋設計示方書                                 |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 1964 (S39)<br>新潟地震(M7.5)                  |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 1970(S45) | 1971 (S46)<br>ワカサガ 地震(Mw6.6)              | 1971 (S46)<br>道路耐震設計指針                                  |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 1978 (S53)                                |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 1980(S55) | 宮城県中地震(M7.4)                              | 1980 (S55)<br>道路指針示方書<br>V耐震設計編                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 1983 (S58)                                |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 日本海中部地震(M7.7)                             |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 1989 (H元)                                 |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 1990(H2)  | 077 H-1地震(M7.1)                           | 1990 (H2)<br>道路指針示方書<br>V耐震設計編                          | ①中規模地震に対する健全性の確保<br>②大規模地震に対する致命的被害の防止                                                         | 2段階耐震設計法・2段階地震動<br>①ⅠaⅡ1地震動(中規模地震)<br>(震度0.1~0.3)<br>②ⅠaⅡ2地震動(関東地震相当の大規模地震)<br>(震度0.7~1.0)                                                                          | じん性設計法<br>(変形性能の照査)<br>震度法<br>(弾性設計)<br>地震時保有水平耐力法<br>(静荷重設計・震度法・RC構造物の塑性設計)                             | 液化化設計法(半定・基礎設計)<br>なれりて設計法(路床・止構造)<br>RC部材の設計法・配筋詳細<br>(せん断・筋径し等)<br>本格的なじん性設計法の導入<br>多層連続構造・地震時水平力分散構造・免震設計法の適用                      |
| 1995(H7)  | 1995 (H7)<br>兵庫県南部地震(M7.3)                | 1995 (H7)<br>道路橋の復旧仕様<br>1996 (H8)<br>道路指針示方書<br>V耐震設計編 | 耐震性能1~3<br>①中規模地震に対する健全性の確保(耐震性能1)<br>②大規模地震に対する安全性・使用性・修復性の確保(重要度に応じた耐震性能2,3)<br>耐震性能に応じた限界状態 | ②ⅠaⅡ2地震動(兵庫県南部地震のようなM7.5級内陸地震の追加)<br>(震度1.5~2.0)<br>断層変位<br>断層近傍地震動<br>(卓越強度の大きい)<br>ハズレ的(大規模地震)<br>個別断層・地震による地震動評価<br>長周期地震動の影響<br>津波の影響<br>内陸M8級直下地震<br>地震変位・斜面崩壊 | 地震時保有水平耐力法<br>(支保・橋脚・基礎等)<br>主要部材への適用<br>動的解析による照査<br>(非線形動的解析)<br>キャパシティデザイン<br>変位ベース設計法<br>静的設計から動的設計へ | 免震設計法の本格導入<br>構造部材(RC・鋼・その他)のねばり強い構造(じん性確保)のための構造細目<br>液化に伴う流動加減設計法<br>耐震性の低い既存構造物の耐震補強法(部材・全体系)<br>高性能構造(高強度材料等)活用<br>制震設計(ダンパー等)の活用 |
| 2000(H12) | 1999 (H11)<br>山口県地震(M7.4)<br>台湾集集地震(M7.3) |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 2003 (H15)<br>十勝中地震(M8.0)                 | 2002 (H14)<br>道路指針示方書<br>V耐震設計編                         | 仕様規定型基準から性能規定型基準へ(性能を満足する新材料・新構造の採用可能性の拡大)                                                     |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 2004 (H16)<br>新潟県中越中地震(M6.8)              |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 2007 (H19)<br>新潟県中越中地震(M6.8)              |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 2008 (H20)<br>中国四川大地震(Mw7.9)              |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 2010(H22) | 2010 (H22)<br>チリ地震(Mw8.8)                 | 2013 (H23)<br>道路指針示方書<br>V耐震設計編                         | 津波の影響を受ける橋の構造計画の考え方を規定                                                                         | 巨大地震・広域災害・巨大地震・波・長時間地震動・複合災害<br>②ⅠaⅡ2地震動(プレート境界型大規模地震の地震動の再評価)<br>(震度1.2~1.4)<br>2連断層地震<br>断層変位<br>斜面崩壊<br>地震災害                                                     | 本格的な信頼性設計法の導入<br>限界状態設計法                                                                                 | 津波の影響を受けにくい構造<br>地震変位に対し適用性の高い構造(ラーメン構造等)                                                                                             |
|           | 2011 (H23)<br>東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)           |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 2016 (H28)<br>熊本地震(M6.5,M7.3)             | 2017 (H29)<br>道路指針示方書<br>V耐震設計編                         | 本格的な性能規定化<br>部分係数設計法・維持管理手法に関する規定導入<br>斜面崩壊・断層変位・津波対策の考え方を規定                                   |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
| 2020(R2)  | 2021・2022(R3・4)<br>福島県地震(M7.3,M7.4)       |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 2023(R5)年<br>山梨・河内地震(M7.8,M7.5)           |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 2024(R6)年<br>熊本地震(M7.6,M6.6)              |                                                         |                                                                                                |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                       |
|           | 将来の大規模地震の発生への備え                           | 基準改定等を通じた社会実装                                           | レジリエンス性能(4Rコンセプト)<br>(人命第一・被害最小化・早期復旧・地域全体・社会システム全体の強靱化)                                       | マルチ・ハザード(オール・ハザード)(地震動・津波・地盤変位(断層変位・斜面崩壊)・その他外的作用のハザード評価、超過外力・複数回繰返し作用・複合作用)                                                                                        | マルチ・ハザード(オール・ハザード)設計法、レジリエンス性能設計法、シミュレーション能力強化(社会システム全体を含む大規模モデリング)、重要構造物のリスクベース設計、劣化損傷を考慮した構造リスク評価      | 被害最小化構造(ダメージフリー)、修復しやすい・迅速復旧構造、ABC(急速施工)構造、インテリジェント耐震構造(自己診断・自己修復構造)、状態把握(センサーモニタリング)、高耐久性構造                                          |



### (3)兵庫県南部地震のその後

兵庫県南部地震の経験を踏まえて、大きく進展した耐震設計法の基本的な考え方は現在まで継承されているが、その後の進展についても触れたい。表2は、兵庫県南部地震以降、国内外で発生し、橋梁構造物の地震対策に影響を与えた近年の代表的な被害地震とその特徴を整理したものである。近年は、特に地震発生のたびに従来経験したことがなかったような、あるいは、過去に発生した事象の繰り返しであってもその経験を大きく超えるような事象が次々と発生し、そこから新たな教訓が得られてきている。

表2 兵庫県南部地震以降道路や橋梁の地震対策に影響を与えた被害地震とその特徴

| 被害地震                                               | 特徴：新たな事象や教訓                                                                    |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1994 (平成6) 年 米国ノースリッジ地震<br>1995 (平成7) 年 兵庫県南部地震    | 過去に記録されていないような強い地震動                                                            |
| 1999 (平成11) 年 トルコ・コジャエリ地震<br>1999 (平成11) 年 台湾・集集地震 | 10m規模の極めて大きな地表断層変位                                                             |
| 2003 (平成15) 年 十勝沖地震<br>2004 (平成16) 年 新潟県中越地震       | 長周期地震動の影響<br>既設構造物の耐震補強の促進                                                     |
| 2004 (平成16) 年 スマトラ島沖地震                             | 30m規模の大津波                                                                      |
| 2008 (平成20) 年 岩手宮城内陸地震                             | 極めて大規模な斜面崩壊                                                                    |
| 2008 (平成20) 年 中国・四川地震<br>2010 (平成22) 年 チリ・マウレ地震    | M8級直下～M9級の大規模地震(広域多発災害)                                                        |
| 2011 (平成23) 年 東北地方太平洋沖地震                           | M9級の大規模地震と想定を超える大津波(地震、津波、原子力災害の複合災害)                                          |
| 2016 (平成28) 年 熊本地震                                 | 強震動(2回の連続地震：約28時間差)、大規模地盤災害                                                    |
| 2021 (令和3) 年、2022 (令和4) 年<br>福島県沖地震                | 同一地域におけるM7級地震(M7.3、M7.4)の繰返し発生による再度災害                                          |
| 2023 (令和5) 年 トルコ・シリア地震                             | 強震動(2回の連続地震：約7時間差)、極めて長距離に渡る大きな地表断層変位                                          |
| 2024 (令和6) 年 能登半島地震                                | 強震動・津波・火災マルチハザード、斜面・盛土など土砂災害多発、広域的な液化化災害、海岸部地盤隆起(復興途上半年後の観測史上最大豪雨による浸水・土砂複合災害) |

1999年トルコ・コジャエリ地震や台湾集集地震において多くの落橋被害を生じさせた「断層変位の影響」、2003年十勝沖地震において石油タンクの火災を引き起こした「長周期地震動」、2004年スマトラ沖地震そして2011年東日本大震災における「巨大津波」による多くの橋梁の流出被害、2008年岩手・宮城内陸地震や2016年熊本地震における「斜面崩壊等の地盤変状」による落橋被害等、従来には見られなかった新たな甚大な被害も続発した。2010年チリ地震や東日本大震災では、延長約500kmに渡る巨大断層に沿った広範囲の地域で被害が多発し、地震後の迅速な救援・復旧対応が困難になるような「広域多発災害」や、地震と津波あるいは原子力災害等が同時、連続、複合して発生する「複合災害」が大きな影響を及ぼした。

東日本大震災は、M9.0という海溝型巨大地震であり、太平洋側の広範囲の地域に継続時間の長い強震動を生じさせるとともに、その後に襲った巨大津波により死

者・行方不明者約2万人という激甚な被害を発生させた<sup>10)</sup>。複数の震源域が連動して破壊した巨大断層、原子力災害を含めた複合的な災害に対して、「設計レベルを超えるような外的作用(超過外力)」に対する備えやバックアップシステムの重要性が認識された。

2016年熊本地震では、2日間という短い時間内に隣接する異なる断層において、M6.5とM7.3の「2つの地震が連続して発生」し、非常に強い揺れ(震度7)がいずれも夜間に同じ地域を襲った<sup>11)</sup>。「斜面崩壊」に起因して発生したと推定される大規模橋梁の崩落、強震動と断層変位が同時作用した地盤変状の影響と推定される被害の発生等の教訓も得られた。

「津波、斜面崩壊及び断層変位の影響」は、それらのハザードの推定精度に限界のある事象でもあり、現時点ではこれらを直接的に設計に取り込む方法の確立までには至っていない。現状ではそれらの影響を受けないように架橋位置又は橋の形式の選定を行うこと、被災時の機能回復の方策とそれに必要な資機材の整備、道路網の多重化による被災時の補完性を確保できる路線計画など、地域の防災計画等とも整合するために必要な対策を講じるなど、ハード・ソフトの両面からの対策が求められている。

2022年3月、福島県沖でマグニチュード7級の地震が2年連続で発生し、道路橋の通行止めや新幹線の脱線などの重大被害が発生した。また、その約1年後に発生したトルコ・シリア地震では、連続して2回の大きな地震が発生し、震度7相当とも言われる強い地震動と10mクラスの地表地震断層が出現し、甚大な被害が引き起こされた。

2023年5月に珠洲市で震度6強を観測した地震に続き、2024年1月、能登半島地震が発生した。橋梁構造物については落橋などの重大な被害にまでは至っていないが、能登半島というアクセスが限定される地形・地域条件の中で、多くの盛土や斜面の崩壊などによって主要な道路ネットワークが寸断され、その復旧に多大な時間を要することになったことが大きな課題とされた<sup>12)</sup>。さらに、熊本地震以降、顕著にその影響が確認されるようになった複数回の大規模地震の連続発生や長期間継続する強い余震の発生、さらには復旧途上における記録的豪雨による多重・複合災害の発生など、様々な視点での備えの必要性が大きな教訓とされた。

現在、我が国では、南海トラフ巨大地震、首都直下地震、千島海溝地震等が高い確率で近い将来発生する可能性のあることが指摘されている。東京圏、名古屋圏、大阪圏といった高度に人口が集中し都市機能が集積した地域、情報化が発達し、交通・電力等ライフラ

インに極度に依存した都市構造、一方で高齢化・人口減少が進む地方が併存する現代社会の中で、可能な限りの被害の最小化と災害発生時の迅速な事後対応への備えが求められている。表1の下段には、将来の災害に備えるための数多い課題の中から一部をピックアップしたが、津波、斜面崩壊、断層変位などの超過外力とその連続発生や豪雨などの複合発生を含めたりスク評価法や構造設計法の開発など様々な災害要因に対応可能な「オールハザードアプローチ設計法」、地震時の構造物の望ましい挙動を確実に実現するための「損傷制御の信頼性向上」、そして今後の構造コンセプトとして、地震被害を受けない・受けにくい「ダメージフリー構造」、地震被害を自己検知・自己診断可能な「インテリジェント構造」、地震被害を受けても早期に復旧可能な「ABC(急速施工)構造」等の開発、そして、構造物それぞれの耐震性の向上のみならず、「地域全体・社会システム全体のレジリエンスの強靱化」に向けた技術開発に継続的に取り組んでいくことが求められている。

### 3. 地震レジリエンス強化サイクルの継続駆動

これまで多くの地震被害の経験から得られた教訓を1つ1つ克服しながら、より耐震性に優れた橋梁構造やその設計法を開発し、技術基準等への反映を通じて社会実装することを継続し、それによって地震に対する社会の安全性を向上させてきたと考える。筆者は、このサイクルを「地震レジリエンス強化サイクル」と呼んでいる。すなわち、地震によって被害が発生した場合には、なぜその被害が発生したのか、あるいは、なぜ被害が発生しなかったのかについて、強震観測データや構造特性面から分析し、その結果に基づき、これを解決するための必要な対策技術を研究・開発し、これを技術基準等への反映を通じて社会実装するというサイクルである。そして、新たに実装された耐震技術についても、次の地震を経験することによって、その効果を検証し、必要な技術の改良、あるいは、新たな技術を開発し、社会実装を繰り返すことによって被害の最小化に結び付けていくというものである。

従来観測されたことがなかったような強烈な地震動の発生を初めて経験した兵庫県南部地震以降30年間の中でも、極めて大きな地表地震断層の出現、巨大津波の襲来、大規模斜面崩壊等の地盤変状の発生、そしてこれらの事象が同時、連続、あるいは、複合的に発生しているのは前述の通りである。地震の発生サイクルに比較して非常に短い、この30年間という短期間でもこのような多くの新たな事象が確認され、人間社会に

おける実経験に基づく知識は非常に限られたものであることが再認識される。海外で発生した事象が我が国においてもそのまま再現される事例もあるなど、我が身にも降りかかる可能性のある自然現象として視野を広げて真剣に向き合う必要のあることも認識される。過去の歴史や経験に学ぶとともに、新たな災害事象の出現に対しても想像力と洞察力の感度を高めて備えることが不可欠となっている。まだ明らかにされていないような事象への注意とともに、災害事象への想像力と洞察力を高める視点から着実に地震レジリエンス強化サイクルを継続駆動していくことが重要と考える。

### 参考文献

- 1)(公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990.2、1996.12、2002.3、2012.3、2017.11.
- 2)(公社)日本道路協会：道路震災対策便覧(震前対策編)、pp.96-109、2006.9.
- 3)(公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編に関する参考資料、pp.1-15、2015.3.
- 4)運上茂樹：耐震設計の基本、建設図書、2020.8.
- 5)川島一彦：耐震工学、鹿島出版会、pp.195-210、2019.1.
- 6)川島一彦：地震との戦い：なぜ橋は地震に弱かったのか、鹿島出版会、2014.12
- 7)第132回国国会議録：<https://kokkai.ndl.go.jp/#/detail?minId=113204339X00319950201&current=374> (参照2024-01-28).
- 8)兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1996.12.
- 9)(社)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)、1995.2.
- 10)国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、国総研資料第646号、土研資料第4202号、2011.6.
- 11)国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告、国総研資料第967号、土研資料第4359号、2017.3.
- 12)国土交通省社会資本整備審議会道路分科会：<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001750194.pdf> (参照2024-01-28).



運上 茂樹(うんじょう しげき)

1985年旧建設省入省、土木研究所、国土交通省国土技術政策総合研究所、国研土木研究所を経て2017年より現職、博士(工学)、技術士(建設部門)、専門分野：橋梁の耐震設計



# 地盤被害とその対策

安田 進

●東京電機大学 名誉教授

## 1. まえがき

阪神・淡路大震災が発生した当時筆者は福岡市に住んでいた。年末の12月28日に発生した三陸はるか沖地震の現地調査結果を東京で報告するため、朝一番の飛行機で飛んだ。6時半に家を出る時には関西で地震が発生したとだけテレビが伝えていたが、9時半頃羽田でタクシーに乗ると、神戸が大変な状態になっているとのニュースが流れてきた。当然筆者の報告はどうでもよくなり、終了と同時に皆さん慌てて現地に出かけられた。

筆者は翌日の夜新幹線で大阪にはいて、翌々日宝塚から西宮にはいり、山陽新幹線の線路が宙づりになっている状況など見て回ったが、それ以上西へはとも行ける状態ではなかった。救急車のサイレンが鳴り続け火災の臭いが襲ってくるなど、大変な混乱状態であった。その夜大阪のホテルに泊まっていると、翌日（地震から3日後）の早朝NHKから電話がかかってきた。ポートアイランドの液状化に関して大阪放送局に来て欲しいとのことで、すぐ駆けつけた。そこでポートアイランドの映像を見せていただき、建物に何も被害がなく落ち着いている状況に関してコメントするように言われた。ここの中心地は地盤改良を施してあったことを知っていたので、その効果で周囲は液状化しても被害がなかったのであろうと話しておいた。録画終了後、大阪の天保山岸壁から小型船に乗せてもらってポートアイランドに向かった。途中で何気なく撮ったのが写真1である。



写真1 地震の3日後に撮ったLPガス基地の被害



写真2 ポートアイランドの岸壁の被害状況

ポートアイランドでは港が写真2のように大被害を受けていた。何とか上陸してNHKで話したことが間違いなかったことを確かめた。その後、三宮で中層ビルが甚大な被害を受けている状況や西宮港大橋のアプローチ橋が落橋して自動車も被害を受けている状況などを見た後、関西空港から福岡に戻った。その夜9時半からNHKスペシャル「都市直下型地震の衝撃」が放映された。その後、毎週のように神戸から大阪へ調査に出かけた。

まえがきが長くなったが、以下に地盤関係の被害と、その後の対応に関して述べてみたい。

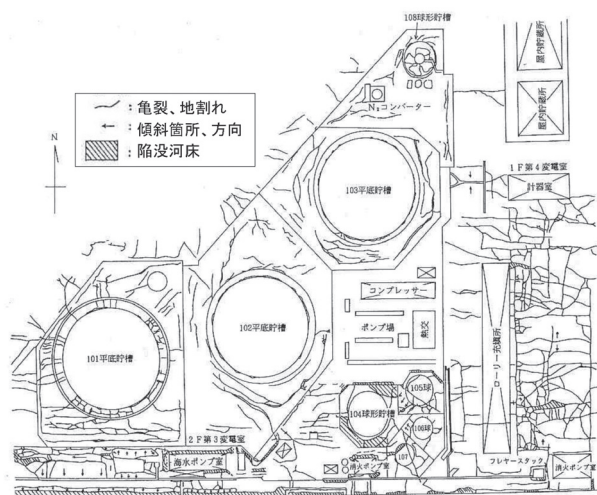
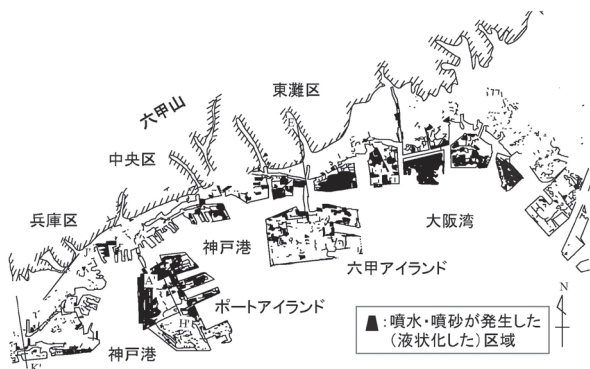
## 2. 埋立地・人工島の液状化と流動による被害

### (1) 神戸市から西宮市間で液状化した地区と液状化そのものによる建造物の被害

神戸市から西宮市にかけて、大阪湾の海岸線のすぐ背後に最大標高931.3mの六甲山が聳えている。そのため低地が少なく、図1に示すように海岸線に沿って埋立地が造られてきた。さらに、阪神・淡路大震災前にはその沖合にポートアイランドと六甲アイランドの2つの人工島が建設されていた。これらの建設にあたっては主に六甲山を削ったまき土が使われていた。この埋立土が液状化し、様々な被害を与えた。

この地区は工場や住宅地などに用いられていたため、液状化により多くの直接基礎の低層住宅や中層ビル、タンクなどが写真3に示すようにめり込み沈下しさらに傾いた。工場の敷地内でも機器の沈下など種々の被害が発生した。



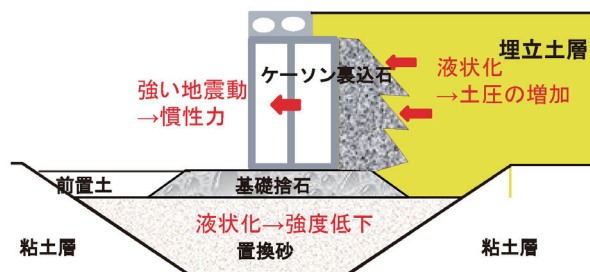


前述した写真1は、実は図2に示すLPガス基地<sup>1)</sup>を撮ったものであった。ここではヤード内全域で液状化し地割れも多数発生した。そして、101平底貯槽に接合している受払配管系の支持架台が液状化により沈下し水平方向に移動したため、フランジ接合部からLPガスが漏洩した。そのため、約70,000人の近隣住民が避難を余儀なくされた。

この地区は海岸から沖合にかけて海底が急に深くなり、また、海底の表層には軟弱な粘性土が堆積している。そこで埋立地や人工島の周囲の岸壁や護岸には主に図3に示すようなケーソン式の岸壁・護岸が用いられていた。粘性土を掘削して置き換えた砂にもさ土が用いられていた。そして、①置換砂の液状化に起因した強度低下、②埋立層の液状化による土圧の増加、③ケーソンの慣性力、に起因して岸壁・護岸が数mも海に向かって孕み出し、それに伴って液状化した背後地盤が写真4のように海に向かって流れ出す流動（側方流動とも呼ぶ）が発生した。

ポートアイランドでは岸壁や護岸が2～5 m程度も孕み出した。これに伴う背後地盤の水平変位量の分布に関して石原ら<sup>2)</sup>がクラックの幅と位置を測定し、図4に示すような分布となっていたことを明らかにした。これによると岸壁・護岸から100 m程度の範囲まで地盤が海に向かって流動していた。

岸壁・護岸背後地盤の流動にともなって埋設管や工場の地上配管は甚大な被害を受けた。また、直接基礎構造物では基礎が引っ張られ、杭基礎の構造物では杭基礎が破損する被害が発生した。阪神高速道路湾岸線の杭基礎のひび割れに関し、ボアホールカメラで詳しく調査された結果を図5に示す<sup>3)</sup>。護岸近傍の杭では杭頭部付近から盛土(埋立)境界まで最大幅2 mmの



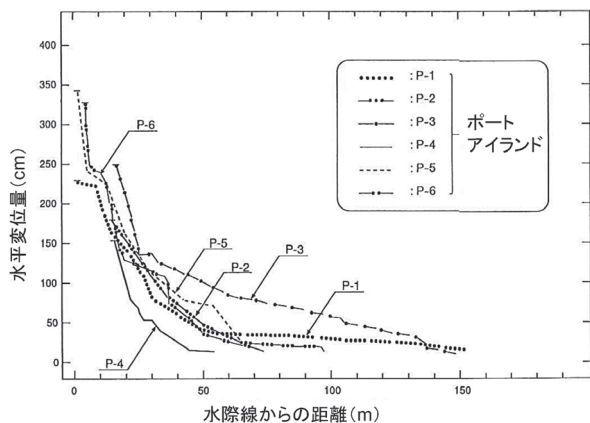


図4 岸壁・護岸背後地盤の水平変位量の分布<sup>2)</sup>

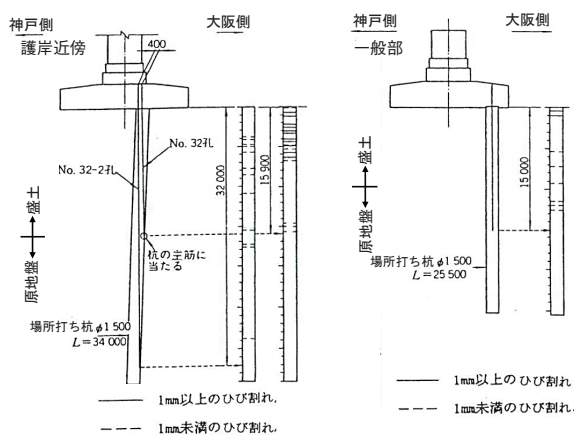


図5 阪神高速道路湾岸線の杭基礎のボアホールカメラによる調査結果(文献3)を簡略化)

はっきり確認できるひび割れが数本観察された。一般部の杭でもひび割れは杭頭部に加えて埋立層境界付近にも発生していた。ただし、近傍の杭基礎に比べて杭頭部を除き発生密度は少なく、損傷の程度は軽かった。

### (3) 地盤改良による対策効果

新潟地震以降種々の液状化対策工法が開発され、図1の地区でも住宅地や工場施設等に適用されてきていた。対策工法のうち最も多く用いられてきていたのはサンドコンパクション工法などの締固め工法であろう。一方、人工島を建設する場合には埋立土の荷重による海底の軟弱粘性土の圧密沈下を促進・軽減するために、サンドドレーンなどで地盤改良も行われていた。ポートアイランドでは図6(左)に示すように中心部を4種類の工法で改良し、その周囲は改良していなかった<sup>4)</sup>。その結果、図6(右)に示すように非改良部では液状化し、改良部では液状化しなかった。ただし、 $N$ 値と地盤の沈下量は各部で異なり、 $N$ 値が大きかった区域は沈下量が少ない結果となっていた。

### (4) 液状化および側方流動に関する地震後の対応

阪神・淡路大震災では神戸市などで大変強い地震動

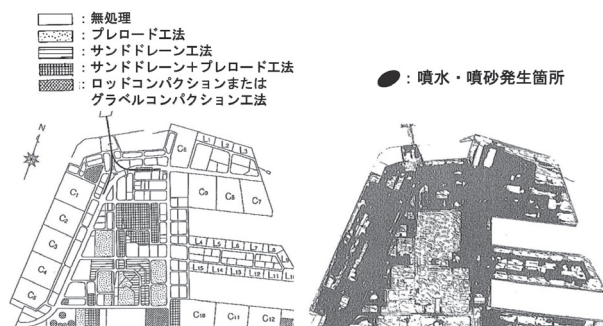


図6 ポートアイランド内の地盤改良範囲と噴水・噴砂発生箇所<sup>4)</sup>

を受けたため、耐震設計にこのように強い地震動をレベル2地震動として考慮するようになった。液状化の検討も同様で、例えば道路橋示方書ではレベル2地震動として、プレート境界型巨大地震(タイプI)と内陸直下型地震(タイプII)の2種類の地震動を設定することになった。液状化の判定方法もそれを考慮できるように地震後に見直しが行われた。そして、①レベル1地震動では液状化させないこと、②レベル2地震動では液状化しても損傷が致命的な被害が生じないこと、といった考え方で設計するようになった。レベル2地震動に対する検討では構造物の沈下量などを指標にした性能設計が行われ始めることになった。

また、岸壁・護岸背後地盤の流動に対する設計も行われるようになった。道路橋示方書では地盤の流動が与える影響として、i) 非液状化層については受働土圧、ii) 液状化層については流動圧、を基礎に作用させて検討する方法が導入された。

なお、このような流動に対し、阪神高速道路では増杭をして補強する対策が施された。一方、首都高速道路では流動による被害を受けそうな箇所を抽出し、護岸と杭基礎の間に銅管矢板を設けて、護岸が孕み出しても杭基礎が被災しないように対策が施された<sup>5)</sup>。

### 3. 河川堤防の被害

兵庫県から大阪府にかけての河川のうち最も大きな河川の淀川において、河口付近の西島、高見、西島の三つの地区で甚大な被害が発生した。なかでも、左岸下流域の西島地区は最も大きな被害を受けた地区で、延長約2kmにわたり堤防が最大3mも大きく沈下した。ただし、越水は生じなかった。被災後に行われた開削調査による堤防断面を図7に示す<sup>6)</sup>。堤外側のコンクリートブロックがずり落ちるように崩壊し、堤体はブロック状の形状を保ちながら陥没して、堤体や基礎地盤では局所的に大きな変形が生じた。また、地表には噴砂の痕跡も確認されていることから、基礎地盤の



液状化が被害の主要因と考えられている。

河川堤防は昔から築かれてきたこともあり、従来地震に対する設計や点検を行ってこなかった。これに対し、阪神・淡路大震災を契機に耐震点検が行われるようになった。この方法として、まず円弧滑りによる安定解析から堤防の沈下量を推定する方法が検討され、地震の影響として震度または液状化に起因した過剰間隙水圧を考慮する方法が導入された。また、レベル2地震動に対して二次元の有効応力法による動的解析や残留変形解析で沈下量を求めることが行われるようになった。それに基づいて既設の河川堤防の対策が施されてきている。

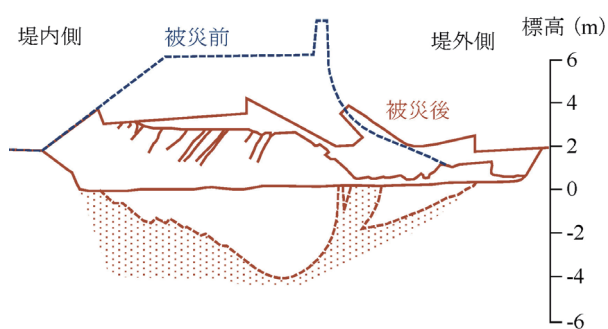


図7 淀川西島堤防の被災状況の開削断面図<sup>6)</sup>

#### 4. 盛土造成地の被害

六甲山の斜面には盛土造成されていた箇所もあり、自然斜面の崩壊と同時に盛土がすべる被害も発生した。そのうち最大の被害は西宮市仁川百合野町のすべりである。写真5に示すように、幅約100 m、長さ約100 m、深さ15 m、約10万 $\text{m}^3$ の土塊がすべって、下流側の13戸の家屋が倒壊し、34名の犠牲者が出た。そして、斜面上部にあった阪神水道企業団甲山浄水場の汚泥処理施設も全壊した。ここは浄水場の造成時に、当時の谷地形に盛土されていたと考えられている。

我が国では戦後の人口増加と核家族化に伴って、各地の丘陵地や台地を切り盛りして造成地が沢山造られてきた。これが1968年十勝沖地震あたりから被害を受け始め、1978年宮城県沖地震、1993年釧路沖地震と被災数が増加してきていた。ただし、阪神・淡路大震災では他の被害に比べて目立たなかった。ところがその後も増加したため、2004年新潟県中越地震を契機に宅地造成等規制法が改正になり、宅地耐震化推進事業が創設されて、全国の大規模盛土造成地の抽出が行われ、地盤調査をもとにした安定性の評価が行われるようになってきている。

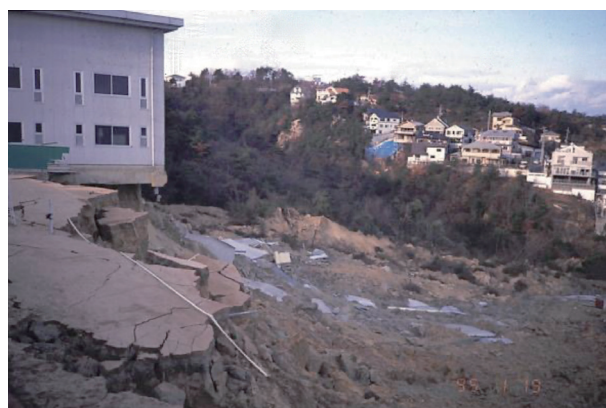


写真5 西宮市仁川の造成盛土の被害

#### あとがき

阪神・淡路大震災から16年後に発生した東日本大震災でも、東京湾岸の埋立地で広い範囲で同様に液状化したが、被害の様子はかなり異なった。岸壁・護岸の孕み出しとそれに伴う地盤の流動はほんの一部しか発生しなく、また、数多く建っているマンションで杭の被害はほとんど無かったようである。強い地震動が襲うと想定される首都直下地震での液状化被害に関し、阪神・淡路大震災の被害を頭に入れておく必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震対策に係る基礎・液状化分科会報告書、1996。
- 2) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H.: Soil characteristics and ground damage, Special Issue of Soils and Foundations, pp.109-118, 1996.
- 3) 阪神高速道路公団・(財)阪神高速道路管理術センター：埋立地盤の橋梁基礎構造物に関する震災調査研究、p.102., 1996.
- 4) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N.: Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction, Special Issue of Soils and Foundations, pp.99-107, 1996.
- 5) 小笠原政文、谷和弘、松尾隆志、坂本俊一：流動化における橋梁基礎構造物の設計手法に関する研究、土木学会論文集、No.645/3-50, pp.77-89, 2000.
- 6) 佐々木康：河川堤防の地震被害事例、地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集、pp.293-298, 1998.



安田 進(やすだ すすむ)

1975年東京大学大学院工学系研究科博士課程土木工学専攻修了。基礎地盤コンサルタンツ(株)、九州工業大学助教授を経て、1994年から東京電機大学理工学部教授。2018年定年後東京電機大学名誉教授。専門は地震地盤工学。



# 機械被害とその対策

藤田 聡

●東京電機大学  
特別専任教授

／古屋 治

●東京電機大学理工学部  
教授

／中村いずみ

●東京都市大学理工学部  
教授

／皆川 佳祐

●埼玉工業大学工学部  
准教授

## 1. はじめに

1995年1月17日（火）5時46分に発生した兵庫県南部地震は、マグニチュード7.3の直下型地震であり、短周期成分を多く含む非常に短時間の主要動が都市部を直撃することで、建物、インフラ、産業施設などに多大な被害が生じた。この地震により、従来の耐震設計手法の課題が浮き彫りになり、特に、機械分野では、直下型地震特有の強い揺れに対しての設備の機能維持に対する耐震性の脆弱な部分が露呈し、産業施設や都市機能に深刻な影響を与えた。結果として、機械系構造物の耐震安全性向上が重要な課題となり機械工学分野では様々な設備での耐震設計の高度化が鋭意進められ、多くの新しい技術や設計基準が改訂されてきた。

ここでは、兵庫県南部地震による地震被害を概観し、いくつかの代表的な機器・設備について、兵庫県南部地震前後での耐震設計の変遷、技術革新、新たに導入された耐震設計手法などをまとめることで阪神淡路大震災後30年のなかでの機械系耐震分野の取り組みや成果を明らかにし、今後のさらなる地震対策の向上に向けた専門知見を提供する。

## 2. 機械系地震被害

機械系構造物は、小型精密機器のような質量が軽量物から大型クレーンのような重量物まで幅広くあり、また、工作機械のような固有周期の短い剛体に近い構造物から配管のような比較的固有周期の長い柔軟構造物まで幅広く存在する。このため、多種多様な地震被害が生じる。一般に、多くの機械構造物は、建築・土木構造物と接合されているため、耐震設計上での異種構造物を介して間接的に励振される場合が多く地震被害が接合先の耐震性能に大きく依存する。さらに、機械構造物は、電気的あるいは機械的な何らかの機能を有しているため、構造的な被害よりも機能的な被害が深刻であり、設備単体の耐震性も重要であるが多数の設備が接続されたシステムとしての機能維持が重要になる。ここでは、兵庫県南部地震時の機械分野における地震被害例をまとめる。

### 2.1 高圧ガス分野

高圧ガス設備については、神戸市東灘区の液化石油

ガスの貯槽施設において、図1のようなLPガスの漏洩事故が発生した。ここでは、液状化により塔槽類、架構、配管ラック等の設備が移動し、設備間の配管系に過大な力が作用したため、フランジ部から各所でガス漏洩が発生した。その他にも、いくつかの事業所において図2に示すような貯槽の傾斜や不同沈下、図3のような配管結合部からのガス漏洩が生じた。円筒タンクにおいては、タンク特有の被害事例である象足座屈とダイヤモンド座屈が生じた。

事故調査結果を踏まえて耐震設計基準の見直しに対する提言がなされた。

- 1) 配管系の耐震化について可撓性を活用した柔設計が必要である
- 2) 防液堤等の被害状況を踏まえ適切な地盤液状化対策の必要がある
- 3) 地震後の非定常運転時に備え、保安電力の確保、計測制御系や非常時対処法の設備が必要である



図1 LPガス漏洩した受払配管系と漏洩箇所<sup>(1)</sup>



図2 地盤変状により傾斜した円筒タンク<sup>(1)</sup>



図3 配管接合部の損傷<sup>(1)</sup>



図4 円筒タンクの象足座屈とダイヤモンド座屈<sup>(1)</sup>

これらの提言を受けて、当時の通商産業省は、告示515号として公布されていた従来の「高圧ガス設備等耐震設計基準」の見直しを行い、1997年3月に告示143号として「基準」の改訂が行われた。

## 2.2 クレーン分野

クレーン分野では、コンテナクレーン、アンローダ、ジブクレーン、タワークレーンなど様々な種類のクレーンに被害が発生した。日本クレーン協会では、労働省と合同でクレーン耐震性検討委員会（委員長 鈴木浩平 東京都立大学名誉教授）を設置し、アンケート調査を含め被害調査を行った。図5にアンケートに基づくクレーンの種類別の被災割合を示す。被害概要として、天井クレーンでは、図6のように支持構造物である建築構造物の変形によるクレーンの落下が最も多い被害であり、脱輪や給電線設備の変形も生じた。ジブクレーンでは、センターフレームの座屈や亀裂による被害が多く発生し、図7に示すようにジブの折損が生じた。タワークレーンでは、ジブの損傷と変形が被害の約半数を占めた。コンテナクレーンでは、多くの脱輪が発生し、ほぼ全ての被害で脚部の座屈や変形による損傷が生じた。アンローダでは、護岸の崩壊や移動によりレールの湾曲・切断が生じた。また、転倒崩壊したアンローダではオペレータが被災する被害も発生した。

このような被害を受け、クレーン構造物における耐震設計基準が改正された。主な改正項目を次に示す。

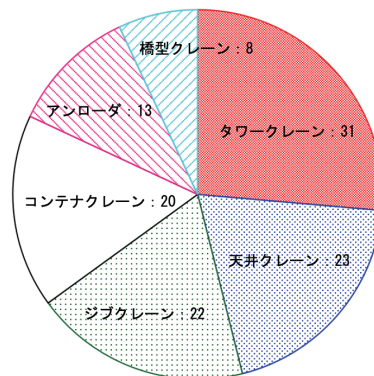


図5 アンケートに基づくクレーン種類別の被災割合



図6 建物損壊による天井クレーンの落下<sup>(2)</sup>



図7 ジブクレーンのジブ折損<sup>(2)</sup>

- 1) 静的震度法と修正震度法以外に応答スペクトル法（スペクトルモーダル法）と時刻歴地震応答解析法が含まれた
- 2) 設計震度を従来の許容応力設計法に対応したレベル1地震動のみならず、部材の塑性変形を許容したレベル1地震動の1.5倍程度のレベル2地震動に対する耐震設計法の基本的な考え方を示した
- 3) 移動式クレーンを除く全てのクレーン構造物で免震・制振技術を適用可能とした



## 2.3 昇降機分野

昇降機分野では、エレベーターにおいて図8のようにロープ類の引っ掛かり、レール等の変形、脱レールが多く発生した。また、これらに比べると件数は少なかったものの、人命に影響しうる被害として釣合おもりのおもりブロックの脱落も発生した。エスカレーターにおいては冠水、位置ずれ、欄干の破損等がみられたほか、エスカレーターの落下が1件発生した。

発生時刻が早朝だったために昇降機による人的被害は皆無であったが、上記の被害を受けて1998年に耐震設計指針が改定された。

- 1) おもりブロックの脱落防止対策を追加した
- 2) 機械室内の機器の転倒防止対策を強化し、設計用水平震度の見直しを行った
- 3) ロープ類引っ掛かり防止対策を強化した
- 4) エスカレーターに耐震設計基準を導入した



(a) ロープの損傷

(b) 釣合おもりの損傷

図8 エレベーターの被害<sup>(3)</sup>

## 2.4 原子力分野

兵庫県南部地震においては強震動が観測された地点に原子力関連施設が立地していなかったことから特段の被害はなかった。しかしこの地震を契機に大きく進展した地震学及び地震工学に関する調査研究の最新知見の取り入れを図り、2006年に原子力発電施設の耐震設計の基本方針である「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の大幅な改訂が行われた（以下、「新指針」）<sup>(4)</sup>。新指針では耐震設計に用いる地震動が従来のS1、S2地震動から基準地震動Ssとなったこと、耐震重要度分類の変更（従来のAs、A、B、CからS、B、Cへ）等多くの改訂がなされたが、大きな特徴の一つとして「残余のリスク」の概念が明示されたことが挙げられる。事業者には「残余のリスク」を合理的に実行可能な限り小さくするための努力を払うことが求められ、リスクの定量化と評価のため確率論的耐震安全評価（地震PSA）の活用が図られるようになった。

原子力分野の耐震設計・評価において大きな影響を及ぼした地震としては、2007年新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震が挙げられる。前者では柏崎刈羽原子力発電所において設計基準を超過した地震動が観測され、そのような地震動を受けた機器の健全性評価について多くの検討がなされた。後者では福島第一原子力発電所において深刻な事故を生じ、その後審査体制の抜本的な改革が行われるとともに、2013年には耐震・耐津波性能の要求強化、地震以外の自然災害やテロへの対応を含めた新たな規制要求（新規制基準）が施行されることとなった。

## 3. 被害を踏まえた機械系耐震分野の高度化

阪神淡路大震災の被害経験を踏まえ、機械工学分野では、水平方向とともに鉛直方向の地震入力を考慮した耐震設計、震度法以外の応答スペクトル法と時刻歴地震応答解析法など設計法の拡充、弾塑性領域を含めた耐震設計法の考え方、免震・制振技術の適用、複数の設備機器と配管系から構成されるシステムでの機能維持など現在の耐震設計法につながる高度化が急速に進められた。

日本機械学会では、主査 岩壺卓三 神戸大学名誉教授、幹事 藤田聡 東京電機大学 特別専任教授、安達和彦 中部大学教授（当時 神戸大学）として被害調査が取りまとめられ、また、従来の被害調査項目を踏まえた被害調査マニュアルや被災企業への被害項目のアンケート調査の基本フォーマットが構築された。これからの被害調査関連資料は、その後の大地震時の被害調査のたびにブラッシュアップされ現在に至っている。また、同学会では、震災直後に主査 清水信行 いわき明星大学名誉教授、幹事 藤田聡として「産業施設の耐震問題研究会」が部門研究会として発足し、機械分野以外の建築・土木・地盤・地震分野の第一線の研究者・技術者の方々に講演いただき、日頃触れることのない機械分野以外の専門領域の話題提供をいただくことで機械耐震分野はもちろん研究会に出席いただいた多くの関係者の専門知見の拡充に大きく貢献した。本研究会は、その後、いくつかの研究会と合併し耐震問題研究会として現在も積極的に活動を継続している。さらに、本研究会は、同学会での災害に関連する初の常設委員会となる「防災・減災委員会」の設置へと展開する。

## 4. 機械系耐震分野の現状

兵庫県南部地震による被害経験から耐震技術の高度化が進むなかで2011年に東北地方太平洋沖地震が生じ



た。日本機械学会では、地震直後より東日本大震災調査・提言分科会を組織し、7つのWG「機械設備の被害状況と耐震対策技術の有効性」「力学体系に基づく津波被害のメカニズムの理解」「被災地で活動できるロボットの課題の整理」「被災地周辺の交通、物流分析」「エネルギーインフラの諸問題」「原子力規格基準の課題と今後の方向性」「地震、原発事故等に対する危機管理」を設置した。当該分科会では、大震災に学ぶ機械工学のあり方に関する次のような提言を発信した。

- 1) 大規模システムのシステム・インテグレーション：大規模システム全体の弱点の抽出と信頼性を向上
- 2) デザインベースの考え方“Beyond”への対応：設計想定値や安全目標の考え方、および、それを超える事態が発生するリスクへの対処方法
- 3) リスクコミュニケーションの課題：リスクマネジメントとリスクコミュニケーションの推進
- 4) 継続的調査と規格・基準への展開、震災経験を次世代に引き継ぎ、若手研究者、技術者の人材の育成、および、大震災に関する調査結果の国際的な規格・基準への反映

現在、機械系耐震分野では、これらの提言をもとに重要施設での機器・設備の機能維持を含む耐震性の向上に努めている。その一環として、多くの建築・土木構造物への適用実績と性能検証が進んでいる免震・制振技術の石油精製施設や原子力施設など機械システムへの積極的な適用に向けた動きがある。

## 5. おわりに

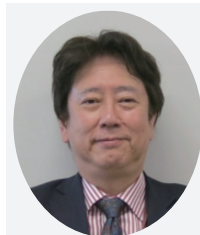
本報では、兵庫県南部地震での機械分野の地震被害を示すとともに、被害経験からの耐震設計の変遷、技術革新、新たに導入された耐震設計手法などについてまとめた。機械分野は、様々な設備や機器が耐震設計の対象となるため規格基準が種々定められているが、近年の大地震に対する被害経験から自然災害に対して機械工学分野の総合力を活かした対応が必要になっている。一方で、いずれの設備や機器も一般には、単独に地表面や基礎上に設置されることは少なく、建築、土木構造物に接合される場合が多い。この場合、接合方法などにより損傷程度が大きく影響を受けるため、機能維持を含めた耐震性向上の観点では、より積極的に他分野と連携し、接合部などに着目した規格基準や設計方法などの統合が必要である。

機械分野の耐震設計では、仕様設計から性能設計への転換期を迎えている。ここでは、応答、耐力、コストなどの総合的な観点からの合理性とともに高い信頼性のある設計のあり方を検討する必要がある。このた

め、設計対象の不確かさ幅を抑え、実耐力を精度良く把握することや免震・制振技術の積極的な機械システムへの導入も重要な位置付けになると考える。また、分野横断研究プロジェクトによる建築・土木・機械構造物の複合システム試験体を用いた振動台実験により新たな耐震設計方法の方向性や人材育成への展開が必要である。

## 参考文献

- (1) 伯野元彦監修、日本の自然災害 第2章地震被害の特徴、日本専門図書出版、pp.248-257、2010年。
- (2) クレーン耐震性検討委員会、阪神・淡路大震災のクレーン等への影響に関する報告書、日本クレーン協会、JCAR 10TA-1-1995、pp.1-66、1995。
- (3) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会、阪神・淡路大震災被害調査報告（機械編）、日本機械学会、pp.233-239、1998。
- (4) 前田洋介、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂について、日本地震工学会会誌第5号、pp.4-9、2007。



藤田 聡 (ふじた さとし)

1981年慶応義塾大学大学院工学研究科修士課程機械工学専攻修了、1987年東京大学にて工学博士の学位取得。東京大学生産技術研究所助手・講師を経て、1988年東京電機大学教員として現在に至る。専門分野：免震、制振技術の研究開発。機械構造物および昇降機の安全性向上技術の開発。



古屋 治 (ふるや おさむ)

1996年東京電機大学大学院博士後期課程修了、博士（工学）、東京都立高専、東京都市大学准教授を経て現職、専門分野：機械構造物の耐震、免震、制振技術開発、安全性評価。



中村 いずみ (なかむら いずみ)

1997年京都大学卒、防災科学技術研究所を経て現職、博士（工学）、専門分野：機器・配管系の耐震、強度評価。



皆川 佳祐 (みながわ けいすけ)

2007年東京電機大学にて博士（工学）の学位を取得。東京電機大学工学部助教、埼玉工業大学工学部講師を経て現職。専門分野：免震・制振装置の研究開発、機械構造物の耐震性評価、昇降機のダイナミクス及び安全性評価。

# Eーディフェンスの建設とその成果

中埜 良昭

●東京大学生産技術研究所 教授／

(兼) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 都市空間耐震工学研究領域長、兵庫耐震工学研究センター長

## 1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、近代都市を含む阪神淡路地域に甚大な被害をもたらし、地震国日本が今後解決すべき課題を様々な角度から投げかけた。筆者の専門である建築耐震構造分野においても例えば、①構造物に壊滅的な被害を生じさせた強烈な地震動（キラールパルス）の発生メカニズムやその特徴の解明、②構造物の破壊メカニズムと破壊過程の詳細な把握と追跡、③旧耐震規定により設計された既存構造物の耐震性能評価と耐震補強、④倒壊・崩壊防止に加えて地震後の機能維持や修復性能評価、⑤余震等の後続地震に対する安全性のチェック体制の整備（応急危険度判定や被災度判定等）、など、ハザードの把握、震前対策、震後対策にわたる広範な教訓を得た。とりわけ震源近傍で発生する極めて強い地震動により大きな構造被害が生じたことは、構造物の振動破壊の解明への関心を大いに高めることとなった。

## 2. Eーディフェンスの整備に至る背景

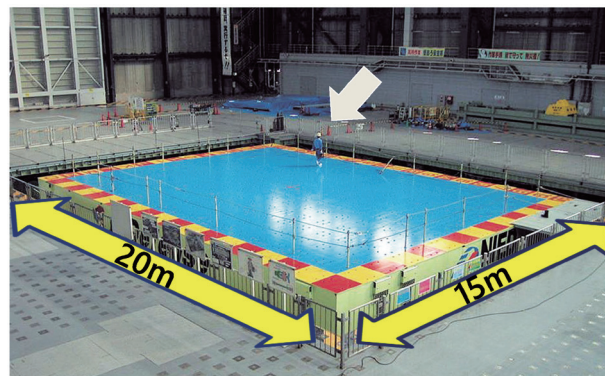
このような背景から、三次元地震動を受ける実大構造物の破壊実験を可能とする大型実験施設（実大三次元地震動破壊実験施設、愛称：Eーディフェンス）の建設構想が実現に向けて動き出した。その経緯と詳細は文献<sup>1),2)</sup>に詳しいが、概略は以下のとおりである。なお地震動等に対し加振台上に設置した構造物の動的挙動を再現する実験施設は一般に「振動台」と表記されるが、Eーディフェンスは実大構造物に対して1995年兵庫県南部地震をはじめとする実地震による揺れが再現可能であることから、あえて「震動台」としている。

まず、当時推進されていた防災科学技術に関する諸政策とこれに基づく研究開発基本計画をふまえ、1995年3月には科学技術庁研究開発局（当時）に地震防災科学技術推進検討会が設置された。そこでは早期に取り組むべき研究開発課題が整理され「阪神・淡路大震災等を踏まえた地震防災科学技術の推進方策について」として同年5月に報告され、その中で研究開発の実施上の留意点として、大型の耐震実験施設及び全国的な強震観測網の整備・充実の必要性が指摘されている。また11月には「地震防災研究基盤の検討に関する懇談会」が科学技術庁に設置され、1996年5月に「阪神・

淡路大震災を踏まえた地震防災研究基盤の効果的な整備の推進について」と題した報告書で大型三次元地震動実験施設の整備とともに、その機能・仕様、運用が提言されている。さらに航空・電子等技術審議会は科学技術庁長官の「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について」（諮問第24号）の諮問を受け、1997年9月には地震防災研究基盤の中核的施設として「大型三次元地震動実験施設」を位置づけることを答申している。その後、本計画は「実大三次元地震動破壊実験施設」と名称を変え、防災科学技術研究所（以下、防災科研）がその建設主体として、兵庫県、三木市、地元地域の協力のもと、2000年1月に現場工事着手、2005年3月に完成、以後その運用を三木市に所在する防災科研・兵庫耐震工学研究センターが担っている。

## 3. Eーディフェンスの性能諸元

Eーディフェンスの特徴は何とんでも実大構造物の破壊実験を可能とするその規模である。約6haの敷地に、中核となる震動台（写真1）が位置する実験棟を中心に、これを支える計測制御棟、加振動力の心臓部である油圧源棟、実験準備棟、屋外ヤード等が並ぶ（図1）。震動台は長さ20m、幅15m、高さ5.5m、質量775トンの鋼製箱型で、アキュムレータ蓄圧・油圧サーボ制御方式で駆動する水平各5台、鉛直14台の計24台の加振機が三次元継手で接続されている（図2）。また2011年東北地方太平洋沖地震で観測された長周期成分を含む継続時間の長い揺れを再現すべく、翌年



※台上の作業者(人)と比較するとその大きさがわかる

写真1 震動台全景



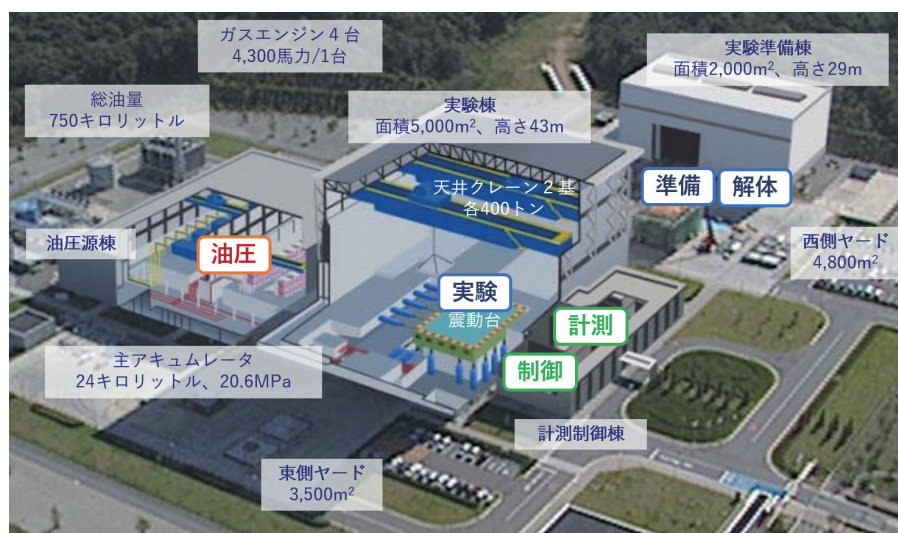


図1 実験施設配置概要



図3 ギネス記録認定証

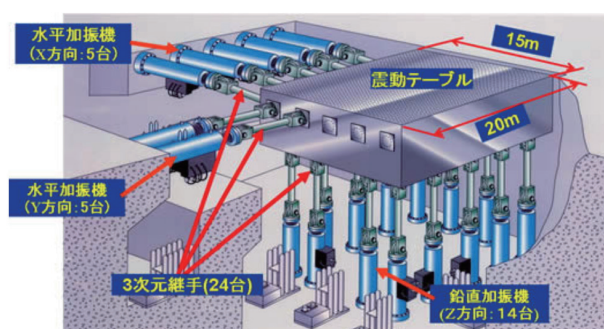


図2 震動台の基本仕様

にはアキュムレータの増設等を行っている。その加振能力は質量1200トンの構造物に対して水平・鉛直方向それぞれ最大加速度 $900 \text{ cm/s}^2$ ・ $1500 \text{ cm/s}^2$ 、最大速度 $200 \text{ cm/s}$ ・ $70 \text{ cm/s}$ 、最大振幅 $\pm 100 \text{ cm}$ ・ $\pm 50 \text{ cm}$ で(表1)、これにより1995年兵庫県南部地震JR鷹取波の1.3倍、2011年東北地方太平洋沖地震で観測された長時間の地震波が再現可能である。なお本施設はその規模からギネス世界記録に登録されている(図3)。

表1 加振性能

|        |                                                |                      |
|--------|------------------------------------------------|----------------------|
| 最大搭載重量 | 1,200 ton                                      |                      |
| 震動台面積  | $20\text{m} \times 15\text{m} = 300\text{m}^2$ |                      |
| 加振方向   | 水平<br>(前後・左右)                                  | 鉛直<br>(上下)           |
| 最大加速度  | $900\text{cm/s}^2$                             | $1,500\text{cm/s}^2$ |
| 最大速度   | $200\text{cm/s}$                               | $70\text{cm/s}$      |
| 最大変位   | $\pm 100\text{cm}$                             | $\pm 50\text{cm}$    |

#### 4. Eーディフェンスを活用した実験的研究の事例

Eーディフェンスにおける実験実施件数は2024年3月末現在で127件、平均7件弱/年である。その内訳は、防災科研独自の企画研究(自体研究と呼ぶ)が41件、外部機関との共同研究が34件、外部機関への施設貸与が52件である。防災科研では外部機関との連携による施設の利活用に積極的であることからその2/3が共同研究あるいは施設貸与である。これらの実験結果は可能なものについてはデータおよび映像が公開されている<sup>3), 4)</sup>。これらのデータは、物理的な破壊実験と両輪をなす数値震動台<sup>5)</sup>の開発、すなわち実験結果を解析的に再現する数値シミュレーション技術の精度検証と高度化、に極めて重要な情報を提供している。またこの間約260万時間の無事故記録を達成しており、再現性の高い上質な実験データを無事故で安定的かつ確実に蓄積・提供することは、確かな実験技術の確立と継承の観点からも重要な研究基盤技術である。

防災科研では2001年4月の独立行政法人化以降5年ごと(第3期中期計画まで)または7年ごと(第4期中長期計画以降)に研究所が達成すべき業務運営に関する目標を定め研究活動に取り組んでいる。Eーディフェンスにおける実験もその運用が始まった2005年度以降、これらの計画と呼応して、建物や社会基盤施設などの構造物の強靱化を目指した研究開発を展開してきた。これらは2022年度までの研究開発について文献<sup>6)</sup>にまとめられており、本稿ではその中の事例を中心に、時代を追っていくつか紹介したい。

##### 4.1 第1期及び第2期中期計画(2005, 2006～2010年度)

運用開始の初期においては、Eーディフェンス開発の契機となった実大構造物の強震時における詳細な破壊過程の再現とその解明、耐震性能評価や向上に着目



した実験が多く行われている。例えば、1981年以前に建設された木造住宅2棟を公募・選定して明石市内から移築し、補強の有無をパラメータに同時加振した事例(写真2)、低層RC造学校校舎を対象に入力逸散や耐震補強効果をパラメータとした事例(写真3)、1960年代および現在の技術基準で設計されたRC橋脚の事例(写真4)や液状化地盤における杭構造を対象とした事例などがある。また兵庫県南部地震では耐震診断・補強の重要性が改めて認識されたため、その補強効果を合わせて検証した実験が多いことも特徴である。



写真2 木造住宅の補強効果の検証実験(2005年)



写真3 RC造校舎の補強効果の検証実験(2006年)

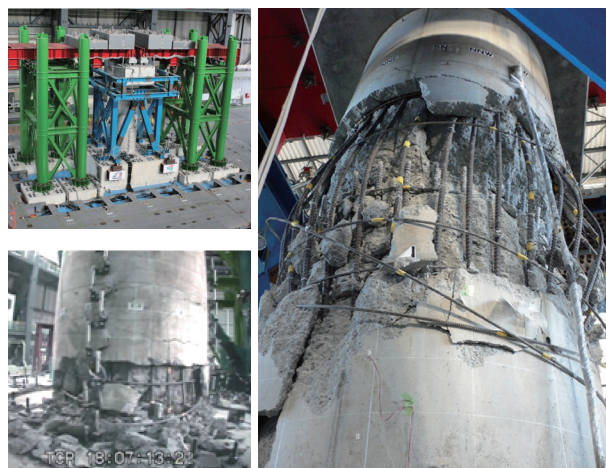


写真4 RC橋脚の破壊実験(2007～2008年)

#### 4.2 第3期中期計画(2011～2015年度)

第2期に引き続き破壊過程の解明に着目しつつ、大都市特有の高層建物や都市機能の維持を意識した実験が行われている。例えば1980年代ごろの設計施工による18層鉄骨造骨組の実験事例では南海トラフ地震を対象に崩壊まで加振し、想定した入力に対する崩壊余裕度を検証している(写真5左)。現行規定による10層RC造建物を対象とした事例では、震度6強相当の揺れに対しても倒壊には至らないものの柱梁接合部に補修や建て替えの検討を要する損傷が生じることを確認している(写真5右)。本実験シリーズでは2018年に接合部配筋詳細を改良した試験体で再度加振し、接合部に損傷が生じないことを確認することでその有効性を検証している。建物の構造的健全性を確保するためにはこれを支持する杭の破壊時挙動の解明も重要であり、杭の破壊実験(写真6)やRC造建物を支持した杭基礎および地盤を含む連成構造の実験が翌年度に行われ



写真5 高層建物の破壊実験  
(左：18層鉄骨造2013年／右：10層RC造2015年)



ている(写真7)。また東北地方太平洋沖地震において、ため池の決壊による人的被害が生じたことから、ため池を全国一保有する兵庫県との共同研究として遮水シート工法によるため池堤体の耐震実験という特徴ある実験も実施されている。

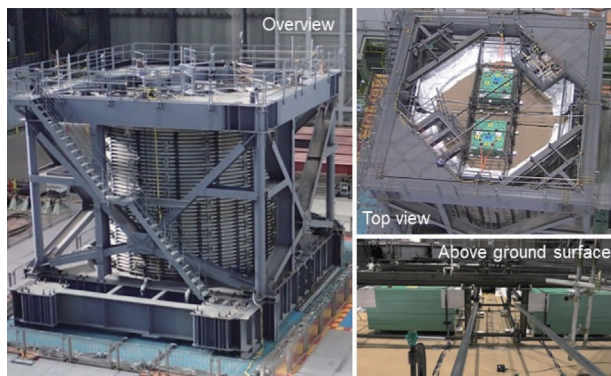


写真6 杭基礎構造の土槽震動実験(2015年)<sup>⑥</sup>

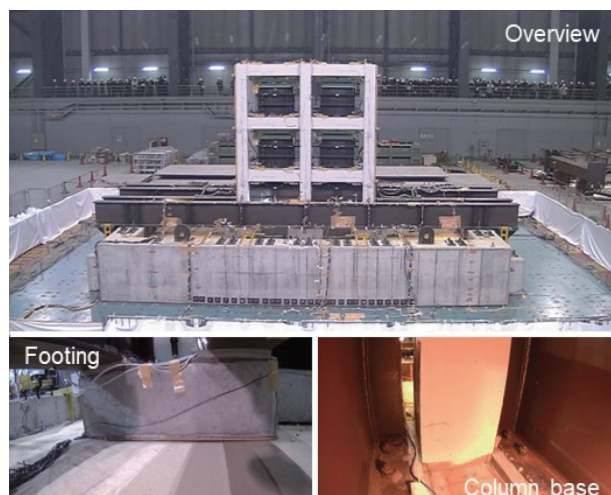


写真7 杭を有するRC造建物の破壊実験(2017年)<sup>⑥</sup>

#### 4.3 第4期中長期計画(2016～2022年度)

第4期に入ると、建物の機能維持能力の把握とその向上を目指した取り組みが本格化してくる。その前提となる崩壊余裕度の評価やその向上技術、前述の接合部配筋詳細を改良した10層RC造建物の事例に見られるような損傷制御や免震による応答制御技術の有効性の検証に加え、非構造部材の崩壊余裕度評価を含む実験も行われている。構造体の損傷低減が可能になると、機能維持や事業継続性の観点からは室内空間の損傷低減・制御の重要性がより高まる。そこで住宅、防災拠点、医療施設等を模擬した実大建物内に天井や間仕切り壁などの非構造部材、様々な設備・機器や家具・什器を配置した実験が行われている。渡り廊下を介して隣接する3層基礎免震病棟と4層耐震病棟の同

時加振実験(写真8)では、室内被害が免震病棟では大きく軽減されるのに対して耐震病棟では固定されていない機器類が大きく移動・転倒し発災直後の機能維持性能に大きな差が生じることが確認されている。なお本実験に先立ち2008年～2009年に実施された免震構造による病院建築を対象とした実験では、免震構造といえども苦手とする長期成分を含む地震動では機能維持が困難になる可能性もあることから、実験で得られた知見をまとめ「病院スタッフのための地震対策ハンドブック<sup>7)</sup>」として公表している。またカーテンウォール内蔵型センサ・アラートシステムを装備した10層鉄骨造試験体(写真9)では、カーテンウォールの変形から建物の層間変位を高い精度で推定できることを利用して、計測した地震応答から建物の被害状況を発光表示することで地震発生後の速やかな建物利用の可否、避難行動の判断に役立つ情報提供技術の研究開発に取り組み、現在は実建物に試験設置し社会実装に向けた検討を進めている。またこの実験では過去最高となる試験体内部空間の90%を共同研究実験や余剰空間貸与として有効活用している。



写真8 免震病棟と耐震病棟の同時加振実験(2019年)



写真9 10層鉄骨造試験体(2023年)



#### 4.4 第5期中長期計画(2023～2029年度)

これまでの一連の研究開発では、主として構造物単体(single structure)を対象に1回の地震(single event)に対する応答に重点を置き、いわば「個」を極める研究開発に主軸を置いてきた。その重要性は不易のものであるが、一方で南海トラフの巨大地震や首都直下地震のような広域・甚大な被害が危惧される災害時に日本がいち早く社会経済活動を復活・継続できることは極めて重要であり、そのためには様々な「構造物群」で構成される都市のレジリエンスを高めることが肝要であることは論を俟たない。

そこでE-ディフェンス実験が「都市」を対象とした本格的なレジリエンス強化に直結するよう、第5期さらにはその後(Beyond 第5期)も継続すべき研究開発目標として、都市空間内の構造物群(すなわち都市、multiple structures)へ、また都市を対象とすれば発災直後から復興に至る中長期間に経験するであろう複数回の地震(multiple events)へと対象を広げ、現在はまだ顕在化していない(すなわち未然の)課題や現象の解明、将来のリスク予測により予防や早期対応に寄与できる技術群を開発することを掲げた。すでに避難所や発災後の物流拠点としての利用が想定される大規模空間構造を対象とした安全性や残存性能の評価技術の開発を開始している。

しかしながらE-ディフェンスであっても都市そのものの直接的な破壊実験はできないため、E-ディフェンス実験と両輪をなす数値震動台との連携がますます重要となってくる。実験による構造物の挙動を高精度に再現するだけでなく、デジタル・ツイン空間において再現した都市のシミュレーションが様々なパラメータ変動に対してハイサイクル駆動できる技術の開発に向けて、質の高いデータを届けるべき人に、利用しやすい形で提供できるような工夫が必要である。

これらの課題は日本だけでなく地震国・地域に共通で解決すべきものも多く、これを実効ならしめるためにはE-ディフェンス実験や数値震動台シミュレーションの実施計画、これらのアウトプットの活用方法をグローバルに議論・共有するメカニズムがぜひとも必要であると考えている。

#### 5. おわりに

E-ディフェンス建設の経緯と震動台実験の事例を中心にその活動の概要を紹介した。

シミュレーション技術の高度化は今後ますますその重要性と必要性が高まることに間違いないが、実験的研究と解析的研究は独立するものではなく互いに補完

しあうものであり、その解析結果の信頼性を担保するエビデンスやデータを実験が提供するのとはもとより、シミュレーション精度を支配する重要なパラメータを明確にし、その適切な設定方法についての知見が得られるよう、実験計画のさらなる高度化にシミュレーションが積極的に寄与するなど、双方向のインタラクションも大いに期待したい。E-ディフェンスでの成果により都市のレジリエンス高度化に寄与する技術・知見がさらに充実するよう研究開発に取り組みたい。

#### 参考文献

- 1) 大谷圭一、小川信行、箕輪親宏、御子柴正、田村修次、中村いずみ：実大三次元震動破壊実験施設の開発(I)－建設計画と要素技術開発の概要－、防災科学技術研究所報告、第58号、1998、<https://doi.org/10.24732/nied.00001095>
- 2) 文部科学省：世界最大、三次元の震動台物語 - 国際的な地震防災研究拠点、[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/kaihatu/jishin/\\_icsFiles/afieldfile/2015/05/25/1242099\\_001.pdf](https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/_icsFiles/afieldfile/2015/05/25/1242099_001.pdf) (2024年12月閲覧)
- 3) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：E-Defense実験データアーカイブ(ASEBI)、<https://doi.org/10.17598/nied.0020>
- 4) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター：加震実験映像、<https://www.bosai.go.jp/hyogo/research/movie/movie.html> (2024年12月閲覧)
- 5) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：数値震動台プロジェクト、<https://e-simulator.bosai.go.jp/>
- 6) Nishi, R., Kawamata, Y. Enokida, R., Inoue, T. and Tabata, K.: E-Defense Shake Table Experiments Implemented by NIED and Collaborative Research Projects in 2005–2022. J. Disaster Research, 18(5), 492–512, 2023. <https://doi.org/10.20965/jdr.2023.p0492>
- 7) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：首都直下地震防災・減災特別プロジェクト、病院スタッフのための地震対策ハンドブック –あなたの病院機能を守るための身近な対策– <https://www.bosai.go.jp/hyogo/syuto-pj/outcome1.html> (2024年12月閲覧)



中埜 良昭 (なかの よしあき)

1984年東京大学工学部建築学科卒業、1989年同大学大学院建築学専攻博士課程修了、工学博士 同大学生産技術研究所 講師、助教授を経て現職 本会第16代会長 専門は建築耐震構造・耐津波構造

# 地震防災におけるソフト対策の研究動向

目黒 公郎

●東京大学大学院情報学環 学環長・教授

## 1. はじめに

地震をはじめとする災害や防災研究において、ハザードや被害の発生メカニズム、構造物被害やその対策など、いわゆるハードを対象とした研究ではなく、人間や社会の問題が研究対象となった最初は、一般的には1923年関東大震災と言われている<sup>1)~3)</sup>。朝鮮半島出身者を中心とした人々が、流言飛語によって撲殺された事件が社会的に大きな問題になったことが背景にある。しかし、その後は研究分野としてはあまり拡大せず、人文社会科学的なテーマがわが国において本格的に取り上げられるのは、阪神・淡路大震災以降だと考えられる。そこで本稿では、阪神・淡路大震災前後で、地震工学や地震防災研究におけるソフト面での研究動向に関して紹介する。また、著者の兵庫県南部地震発生当時の体験や思ったことなどについても言及したい。

## 2. 兵庫県南部地震の発生時に

早いもので、2025年1月17日で1995年の兵庫県南部地震から30年が経過した。この地震が、阪神・淡路地域に及ぼした様々な被害の総評を「阪神・淡路大震災」と呼ぶ。この地震のちょうど1年前の1994年1月17日の早朝に、米国カリフォルニア州のロサンゼルス市の郊外でM7クラス (Mw6.7) の地震が発生している。震源地の地名からのノースリッジ地震と名付けられたが、震源深さが14.6kmと浅かったので、局所的には激しい地震動が襲い、死者57名、負傷者約5,400人の人的被害が発生した。構造物被害としても、高速道路が崩壊するなど、米国史上経済的損害が最も大きな地震被害となった。

南海トラフに沿って巨大地震が100～150年の周期で発生することはよく知られている。直近では、1944年昭和東南海 (M7.9)、1946年昭和南海 (M8.0)、その前は1854年安政東海 (M8.4) と安政南海 (M8.4) (両者の間隔は31時間)、その前は1707年宝永地震 (M8.6の連動型) である。南海トラフ沿いでM8クラスの巨大地震が発生すると、100～150年の周期の前半は、関西地域では余震を除くと地震活動は沈静化する。後半になると、内陸で活断層がM7クラスの地震を数回起こし、その後にまたM8クラスの地震が発生する。昭和

の2つの地震はその前の安政や宝永の地震と比べて規模が小さいので、次の地震までの間隔は短めになると考えられる。仮に短めの周期として100年を仮定すると、1994年や1996年は、周期の前半の終了を意味する。ゆえに関西地域にはM7クラスの地震が襲う可能性が高いが、関西の人々は関東に比べて、地震に対しての意識や備えが不十分である。

兵庫県南部地震の前から、日本と米国の地震工学や地震防災の研究者が主催者を交代しながら、共同で国際会議 (日米都市防災会議) を開催していた。今回は日本がホストの順番であった。日本の研究者は、上述のような状況を踏まえて、ノースリッジ地震のちょうど1年後に、大阪でこの会議を開催することを決めた。係のあった著者は会議前日の1月16日には大阪に入り、翌日からの会議のために米国の研究者と事前の打ち合わせをし、夕食を食べて就寝した。翌朝、注意喚起の記者会見を行う予定の3時間ほど前の午前5時46分に、皮肉にも兵庫県南部地震が起こってしまった。

私は激しい地震動で目を覚ました。電話が輻輳すると思い、起きてすぐに、出産のために東京の実家に戻っていた妻に電話をし、無事と伝えたとともに、その後の予定などを伝えた。

上司の先生と話をしたうえで、当日の朝の7時前には同僚の先生とタクシーで神戸に向かった。同僚の先生の奥様のご実家が長田区にあったからだ。早朝は道路も混んでおらず、当日の午前中には、被災地のど真ん中に、その日の夜は、まわりが火事だらけの長田区の病院をベースに、被災地を一人で歩き回った (同僚の先生は奥様のご両親のお世話)。帰る交通手段もなく、被災地の中で数日間を過ごし、様々な状況を見聞きした。この経験は著者の防災研究者としての原体験になったが、この時に撮影した写真を用いて所属研究センターの英文ニュースレターの特集号として、世界150か国以上に配信した。これが日本の専門家による最初の英文報告になった。この後、神戸には足しげく通うことになったが、いろいろな出来事がつい先日のごとくのように鮮明に思い出される。

## 3. 阪神・淡路大震災の経験被害概要と教訓<sup>4)</sup>

阪神・淡路大震災から学んだ最大の教訓は、構造物



の耐震性の重要性、特に住家に関する既存不適格建物の問題である。理由は、人的被害(死者6,434名、行方不明者3名、負傷者43,792名)の大多数が住家被害(全壊が約10万5,000棟、半壊が約14万4,000棟、一部損傷が約39万棟)を原因とし、しかも救命救急活動では救うことのできなかった生命が多かったこと、延焼火災も揺れによる被害が本質的な原因であったこと、被害総額の6割以上も住家被害が占めていたことなどがある。

阪神・淡路大震災後に指摘された多くの問題(仮設住宅、ゴミ処理、被災者の心理的な問題や孤独死、地域の経済活動の低下、復旧・復興期の諸問題、・・・)の根本的な原因は、地震直後に発生した膨大な数の住家被害とそれによる5,500余人の死者の発生であり、これらを事前の対策で少なくできれば、これらの問題は顕在化しなかった可能性が高かったという点である。

#### 4. 阪神・淡路大震災の経験を経て

著者は学生時代には、大型のコンピュータを湯水のように使い、構造物や材料の破壊現象を追跡する解析手法の開発とその手法を用いた数値解析を研究テーマとしていた。幸いにして、研究室の先輩方の研究成果の蓄積もあり、私のタイミングで様々な環境が整い、多くの研究成果を挙げることができた。建物が健全な状態から変形し、クラックが入り、完全に崩壊するまでの過程を、連続して統一的に扱うことのできる解析手法を開発したが、破壊現象を取り扱った最大の理由は、構造物の破壊現象で人々が死傷するからである。そのメカニズムを理解すれば、被害を大幅に軽減でき

るのではないかと当時思っていたが、その認識は誤りであった。メカニズムが分かったところで、その理解に基づいた対策が実際に実施されなければ、何も変わらない。

阪神・淡路大震災の被災地で著者の目に焼き付いた現象と、この事実認識が、著者のその後の研究テーマを大きく変化させた。例えば、耐震性の不十分な既存不適格建物の問題を解決するには、技術的なアプローチのみでは不十分で、社会制度的なアプローチ、すなわちソフト対策が不可欠なことを痛感し、この分野の研究に取り組んだ。

図1は著者が阪神・淡路大震災の直後から考え、20周年の記念シンポジウムのパネリストになった際に指摘した「今後の課題」である。これらの多くもソフト対策に関係していることがわかる。

#### 5. 総合的災害管理(マネジメント)

防災に関して最も重要な法律は「災害対策基本法(以下では、災対法)」であり、その第一章(総則)の第二条の二において、「防災」が明確に定義されている。その定義は「防災は、災害を未然に防止し、災害が発生した場合における被害の拡大を防ぎ、及び災害の復旧を図ること」で、これによれば、防災は事前の被害抑止、直後の災害対応、事後の復旧を合わせた概念である。事前の抑止対策だけで100%の災害防止は無理なので、対応を含めて被害の影響を最小化したいという意味であるが、これは東日本大震災以降よく使われる「減災」と同じ意味であり、あえて減災などという必要はないし、むしろ人々に誤解を与えるとともにミス

地震防災の最終目的が地震被害の最小化であること言うまでもない。しかし多くの関係者が現状の問題点を踏まえた上で、それらの問題が何を原因として未解決なのかを分析し、それを解決する努力を十分してきただろうか。地震防災に関係する科学者や技術者が、そして行政関係者が、自分の枠の中だけで満足し、科学者は科学的メカニズムにだけ興味を示し、技術者は技術的な問題だけに取り組み、行政関係者は自分の所轄の議論に終始していないだろうか。自分たちの勝手な思い込みによる目的と社会からの期待の間にギャップはないか。自分の枠内の個別な問題が解決されれば、最終的な目的が達成されると勘違いしていないか。そうでないことをわかっているくせに、それを敢えて伏せて、「自分はまあこれをやっていればいいか、将来的には防災につながるのだから」などと言い訳していないか。原因分析の結果、それが政治力不足であれば政治力を持つ努力、経済的な問題であればその対策、制度上の問題であれば正しい制度設計に取り組もうとする意識改革が必要だ。私達はどんな仕事をしてようが、一納税者、一市民としての顔を持っている。その一市民としての立場から、自分のような仕事に従事する者に何を期待するか。この視点を常に持ち、それに答える努力と社会に通じる言葉を使った情報発信を続けていくことが重要である。以上のような認識の下、今後の効果的な防災対策の実現に向けて、特に重要と考えられるいくつかの課題や活動を以下に述べる。

- 阪神・淡路大震災の全体像の記録を残すこと(記録は、将来様々な角度から分析できる項目と内容を有するデータ構造であること)
- 従来型の個別基礎研究の継続的推進(以下で述べる課題は従来型の基礎的研究の上に成り立つ)
- 災害先行型の研究から対策先行型の研究への移行(起こった出来事に対する現象解明的な研究から、まだ発生していない現象を先読みし、その対策を講じるための研究に移行する)
- 防災関連制度の実効性、社会的影響、長期的効果などを定量的に評価する研究の推進(これがないと、総合性、統一性にかける制度になる。ローカルに近視眼的に一見良さそうだが制度的に真に防災に貢献する制度、納税者に説明責任を果たせる制度の実現のために必須である)
- 東海・当南海・南海地震の運動、首都直下地震後の復旧・復興期の大規模洪水被害などを想定した複合災害、融合災害に向けた研究推進体制の整備、研究の推進、研究成果の実社会への実装体制の整備
- 防災関連大学・学協会連携体制の整備、マスコミ、行政、政治家を巻き込んだ連携活動体制の整備
- 幼児から成人にいたる年代別の防災教育プログラムの整備
- 魅力ある防災ビジネスの創造と育成
- 21世紀型「いざ鎌倉システム」の整備(21世紀半ばまでに発生が危惧される首都直下地震、東海・当南海・南海地震などによる巨大地震災害発生時に想定される建設技術者の圧倒的な人材不足を補うシステム)、など

図1 阪神・淡路大震災20周年シンポジウムで著者が指摘した課題

リードする危険性がある。なお、災対法には災害のタイミングを地域の潜在的な問題解決の機会として有効活用する「より良い復興 (BBB: Build Back Better)」の概念が弱かったため、東日本大震災を踏まえて「復興法」が整備された。

上記を踏まえ著者は、防災が漢字の意味あいから、災対法の定義による本来の意味ではなく、事前の被害抑止のみと受け取られ易いこと、また復興の考え方が欠けていたことから、これらを合わせて、新しく「総合的災害管理: Comprehensive Disaster Management」という用語を提案した。「総合的災害管理」は、図2に示すように、「被害抑止」「被害軽減」「予知/予見と早期警報」の3つの事前対策と、「被害評価」「(緊急)災害対応」「復旧」「復興」の4つの事後対策を合わせた7つ(復旧と復興を合わせた場合は6つ)の対策によって、社会が被るハザードの障害を最小化するとともに、災害のタイミングを活用して被災地が有する潜在的な課題を改善し、以前よりも良い地域環境を実現しようというものだ。

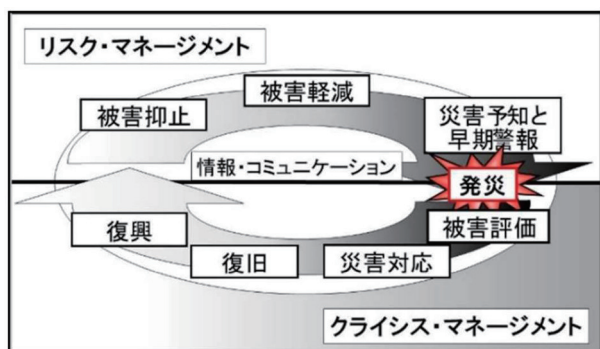


図2 総合的災害管理

まず初めの「被害抑止」は構造物の性能アップと危険な地域を避けて利活用する土地利用規制によって、そもそも被害を発生させない対策である。次の「被害軽減」は、被害抑止対策力だけでは賄いきれずに発生する災害に対して、事前の備えでその影響が及ぶ範囲を狭くしたり、波及速度を遅くしたりする対策である。具体的には、災害対応のための組織づくり、事前の復旧・復興計画や防災マニュアルの整備、日頃からの訓練などである。3番目として発災の直前にやるべきことは、「災害の予知/予見と早期警報」で、ここまでする事前対策である。

発災後にまずすべきことは「被害評価」で、被害の種類と規模、その広がりになるべく早く正確に把握することである。次がその結果に基づいた「(緊急)災害対応」である。この主目的は人命救助や2次災害の防止、被災地が最低限持つべき機能の早期回復である。ここには被災地の回復は入っていないので、「復旧」「復興」が必要になる。「復旧」は元の状態まで戻すことだが、その状態で被災したことを考えれば不十分なので、改善型の復旧としての「復興」が必要となる。図の中に「情報とコミュニケーション」が示されているが、これはいずれの対策を講じる上でも、適切な情報の提示とコミュニケーションが重要であることを示している。

## 6. 総合的災害対策のフェーズと研究動向の変化

ハザード別に、また時代とともに、わが国の防災研究がどのように変化したのかを、図3に考え方を示すように、一律の指標を用いて分析を試みた結果を紹介する。分析手法や用いたデータの詳細については、紙面の制約から文献4)に譲るとして、ここではごく簡単に

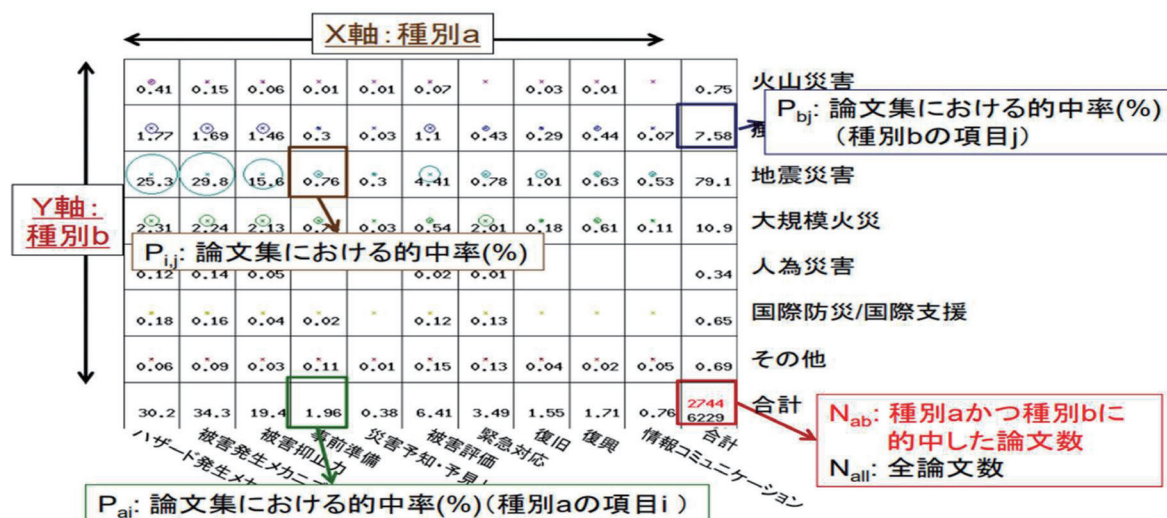


図3 研究報告におけるハザードと対策のフェーズによるウェイト(的中率)の考え方



概要を説明する。

古い時代の研究成果も対象としたいことから、東京大学の研究者を対象とし、CiNii ArticlesとJ-STAGE Journal@rchiveに収録される研究論文を対象に、分析を行った。まず、CiNiiとJ-STAGEに収録されている研究報告の中から、著者の所属組織が東京大学であるものを抽出し、その中で防災に関わるものをさらに選別した。その際には、日本自然災害学会監修による防災事典<sup>3)</sup>と学術用語集(地震学編)をベースに、防災に関わる1,392個のキーワードを用いた。これらのキーワードを、図3のX軸の「ハザードのメカニズム」から「情報コミュニケーション」までの10のカテゴリーと、Y軸の「火山災害」から「その他の災害」までの7つのハザードに分類し、それぞれの項目に入るキーワードを設定した。そのうえで、抽出された論文をテキストマイニングし、10×7の各欄にヒットするキーワード数から、全体の項目の中での各欄の項目のウェイトを計算した。その上で、各論文の10×7の各欄のウェイトを、対象とする全論文について足し合わせ、対象論文全体としてウェイトの分布量を求めた。これを図4に示すように、年代ごとに分けて比較するとことで、時代に

よる研究動向の変化を考察した。

本稿の冒頭では、いわゆるハードを対象とした研究ではなく、人間や社会の問題が検討された最初は、1923年関東大震災時の流言飛語の問題であると指摘したが、上述のような方法で抽出したデータベースには、1949年までの研究報告を対象とすると、ハザード別では、地震関係が58.8%と最大で、火山災害(25.0%)、風水害(16.3%)の順であるが、地震関係(津波災害含む)が最大を占める傾向はその後も変わらない。フェーズとしては、ハザード発生メカニズム(51.0%)、被害抑止対策(25.0%)、被害発生メカニズム(24.1%)で、他のハザードやフェーズの研究報告はなく、ソフトを扱ったものはない。研究報告の数は、時代とともに増加するが、ソフト防災を扱った研究が出現してくるのは、1950年～1959年以降(紙面の制約上割愛)であり、その数や比率は時代とともに少しずつ増加する。そして、1995年の阪神・淡路大震災前後の1990年～1994年と1995年～1999年の間で大きく変化し、地震災害に関しては、阪神・淡路大震災の後に、すべてのフェーズの研究報告が報告されることになる。しかし、主たる研究分野はハザードと被害の発生メカ

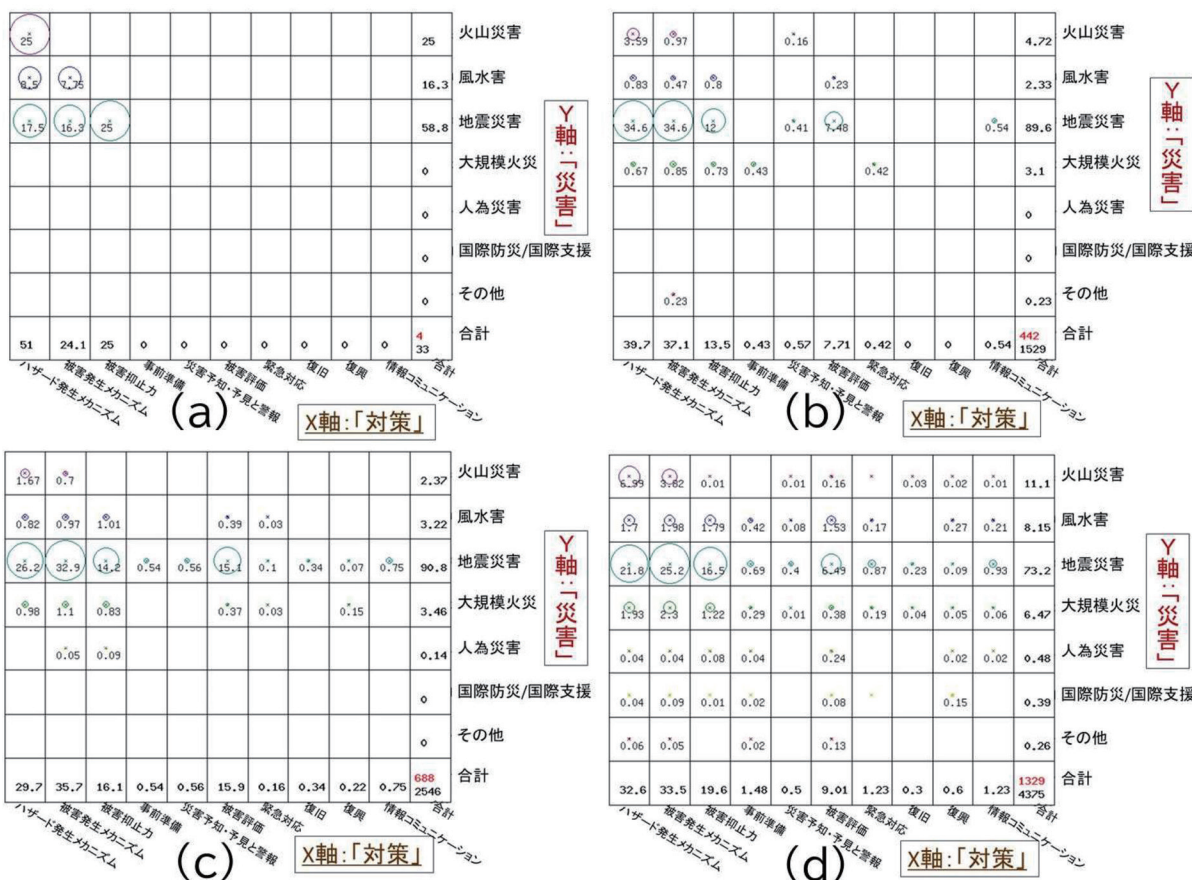


図4 東京大学の研究者による年代別研究報告におけるウェイト(的中率)の分布図  
(a)～1949年、(b)1990～1994年、(c)1995～1999年、(d)2005～2009年

ニズム、被害抑止対策、被害評価であり、これで地震防災研究の97%程度を占める。この中の被害評価はソフト的な研究が占める割合が大きい。

次に、日本地震工学会 (JAEE) の研究成果についても少し補足する。2007年の日本地震工学会大会梗概集 (発表論文252編) を対象として、上で説明した手法と同様の手法で分析した結果が図5である。これと同年の防災関連の各学会の年次大会梗概集の全論文を同様に分析した結果を比較し、ウェイトの大きな部分を抽出して示したのが図6である。

ソフト防災に関する研究は増えたとはいえ、JAEEの研究は日本自然災害学会と同様に、ハザード並びに被害発生メカニズムと被害評価に大きなウェイトがある。ソフト防災の研究割合が相対的に高い学会としては、地域安全学会や日本災害情報学会があげられる。

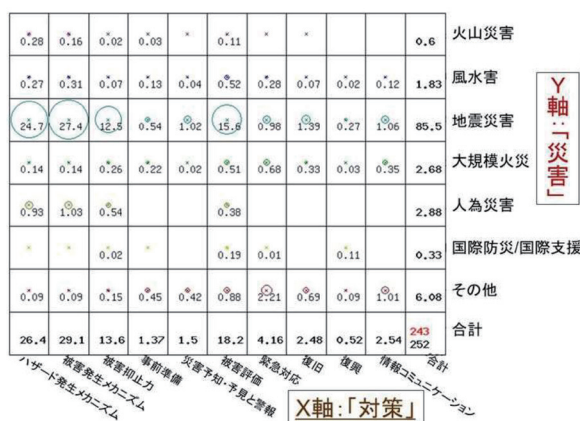


図5 JAEEの2007年の研究報告の内容の分析結果

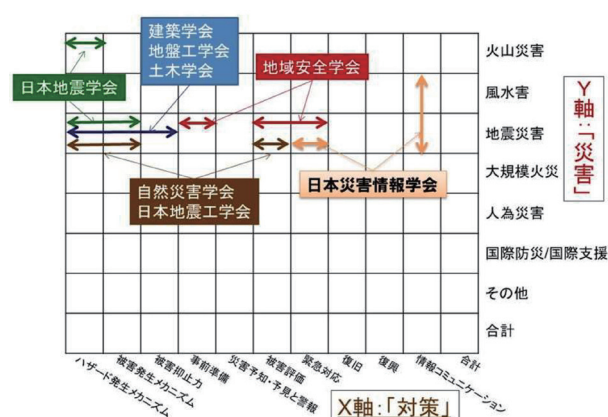


図6 災害関連8学会の的中率の高い箇所の分布

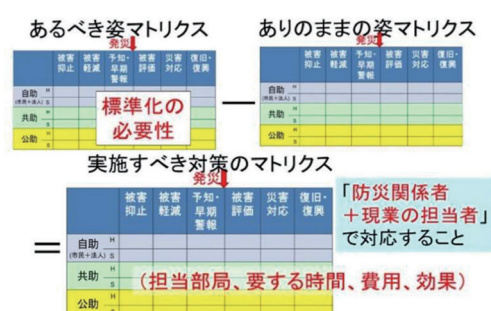
## 7. 総合的災害管理マトリクス

地震被害の軽減と発災時を地域問題解決の機会として有効活用するには、「総合的災害管理」で説明したフェーズごとの様々な対策を発災時までに、具体化しておくことが重要であることは言を俟たない。

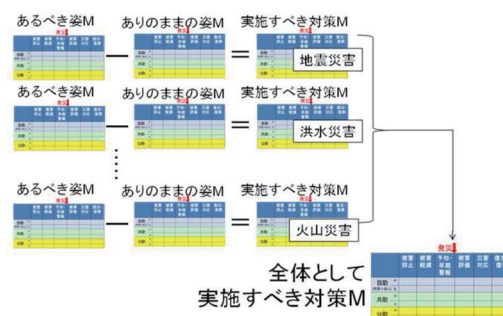
総合的災害管理を構成する「被害抑止」から「復興」までの各フェーズの対策と、防災の担い手である「自助・共助・公助」、さらにハード (主として構造物による防災対策) とソフト (構造物以外による防災対策) に分け、それぞれの担い手がどのフェーズに何を実施すればいいのかを示す「総合的災害管理マトリクス (図

|    |                | 被害抑止 | 被害軽減 | 予知・早期警報 | 被害評価 | 災害対応 | 復旧・復興 |
|----|----------------|------|------|---------|------|------|-------|
| 自助 | H<br>(市民+法人) S |      |      |         |      |      |       |
| 共助 | H<br>S         |      |      |         |      |      |       |
| 公助 | H<br>S         |      |      |         |      |      |       |

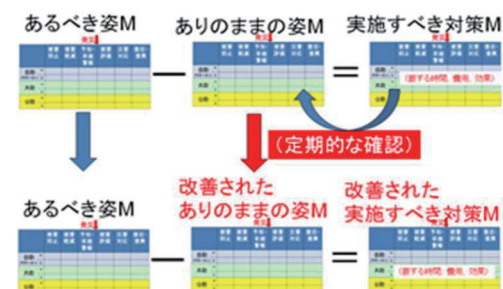
図7 総合的災害管理マトリクス



(a) 実施すべき対策マトリクスの求め方



(b) 全体として実施すべき対策マトリクス



(c) 効率的な防災計画の立案と実施のPDCAサイクル

図8 効果的な地域防災計画の立案と対策実施の方法



7)」を用いて、対策の立案と実施を検討する。すなわち、担い手別に実施すべき全ての個別対策を網羅した「あるべき姿」を表す対策マトリクス(M)と現在の対策の状況を評価する「ありのままの姿M」を用意し、両者の差分をとった「これから実施すべき対策M」を求めることから始まる(図8(a))。ハザード別に得られた「実施すべき対策M」の各対策項目に関して、実施に当たる担当者や組織(責任部局)、実施に要する予算と時間、達成時の効果を付加することで、対象地域ごとに、必要経費も時間も、そして効果も大きく異なることが明確になる。対象地域で対応が求められる各種のハザードに対して同様の作業を行い、これを統合する(図8(b))。こうすることで、利用可能な予算と時間が与えられると、その条件の下で最大の効果を実現する対策の組み合わせが抽出可能となり、これを一定期間実施する。これらのプロセスを複数年度の計画で実践することにより、PDCAのマネジメント・サイクルを実行でき、合理的な進捗管理を行うことができる(図8(c))。

## 8. 災害リスクの低減と災害レジリエンスの向上

「総合的災害管理」によって達成されるのが、「災害リスクの低減」と「災害レジリエンスの向上」である。「災害リスクの低減」とは、同規模のハザードに襲われた際に直後に発生する被害量を軽減する能力であり、これに貢献する主な対策は、「被害抑止対策」と「災害の予知・予見と早期警報」である。

一方「災害レジリエンス」とは、直後の被災状況から元の状態まで早期に回復(復旧)する能力、そして災害状況を地域の課題改善や解決の機会として有効活用し、被災地を災害の前よりも良い地域に変える(より良い復興:BBB)能力である。災害、特に大規模災害は、その災害の発生の有無に関わらず被災地が将来的に直面する潜在的課題を、時間を短縮して、より甚だしく顕在化させる特徴を有している。また、災害発生前の状態で被災したことを考えれば、原状回復としての復旧では不十分である。ゆえに、起こって欲しくはない災害であるが、起こってしまったことを前提にすれば、そのタイミングは対象地域が潜在的に有していた課題を改善したり解決したりできる貴重な機会ともいえる。さらに災害前は、平時の慣性力が大きいので、体制を大きく変えることは困難だが、災害後は、特に大規模災害の後には、大きな課題を改善できる可能性が高くなる。

「ソフト」の対策は、「ハード」の機能が確保されて初めて機能する。「ひとの生命」や「文化財」、ある種の

情報など、代替の利かないものは、ハードの対策で守る以外にない。兵庫県南部地震は発生時刻が早朝だったこともあり、犠牲者の87%が自宅の被害で亡くなった。また兵庫県監察医による死亡推定時刻では、地震直後の15分内が92%を占める。これは、補修や補強を含めて、事前のハード対策がない限り、人的被害の軽減は不可能だったことを示している。震後火事による焼死者についても、彼らのほとんどは倒壊した建物の中から逃げ出すことができずに犠牲者となっている。消防の問題を指摘する前に、構造物の問題があったことを認識しなくてはならない。内閣総理大臣への被害情報の早期伝達の問題や、自衛隊の出動体制の問題も同様である。

## 9. まとめ

著者は阪神・淡路大震災を経験し、構造物の耐震性の確保が地震防災上最重要であることを痛感した。つまり、ハード対策の重要性を再確認したわけであるが、一方でその実現には様々なソフト対策が不可欠であることも同時に痛感した。

総合的災害管理マトリクスを用いて、個別の対策の実現方法を探ってみると、例えば、地震防災で最も重要な既存不適格建物の耐震改修の促進は、自助によるハード対策の典型と考えられている。しかし、これを実現するには、まずは、既存建物の耐震性を適切に評価する必要があるが、これは専門家や行政などによるソフト対策と言える。また、耐震補強を推進するための支援制度なども重要だが、これも公助によるソフト対策である。低価格で効率のいい耐震補強技術の開発は、自助(建設業者)に求められる対策である。集合住宅などでは、住民によるコンセンサスづくりが不可欠であるが、これは共助によるソフト対策と言える。

緊急地震警報などは、災害の予知予見/早期警報のカテゴリーの公助によるソフト対策の典型であるが、これなども他の多くのステークホルダーによる様々な対策の結果として成立している。国土に高密度に配置される地震計ネットワークや通信設備は公助によるハード対策である。観測された地震動記録から、早期に震源の位置や規模を推定する手法は専門家や行政などによるソフト対策である。得られた情報を素早く、国民に伝える様々な手段は通信会社やメディアの対策であるし、配信された情報の正しい利用法の理解は、公助や自助のソフト対策である。

このように、最終的な出口が、自助・共助・公助のハードやソフトの対策であったとしても、その背景には、これを実現したり、有効活用するための他のス

テークホルダーによるハード・ソフト両面の対策が不可欠なことを踏まえると、災害対策の実現には、ハード・ソフトのバランスのとれた研究が不可欠であることがわかる。防災研究は学際研究である理由がここにある。この視点からすると、現在の研究領域の分布は、阪神・淡路大震災から30年が経過した現在においても、まだハードに偏在しているのではないかという印象をぬぐえない。

#### 参考文献

- 1) 速水滉: 流言蜚語の心理、『思想』第25号、11月号、pp.176-183, 1923.
- 2) 三宅雪嶺: 震災関係の心理的現象、『思想』第25号、11月号、pp.133-139, 1923.
- 3) 目黒公郎: 間違いだらけの地震対策、194ページ、旬報社、2007.
- 4) 近藤伸也・目黒公郎: 防災関連学会における研究分野の動向分析に関する基礎的研究、地域安全学会論文集 No.19, pp. 61-71, 2013.
- 5) 日本自然災害学会【監修】: 防災辞典、築地書館、2002.



目黒 公郎 (めぐろ きみろう)

1991年東京大学大学院博士修了(工学博士)、助手・助教授を経て2004年より教授、現在は東京大学大学院情報学環・学際情報学府 学環長・学府長、専門分野: 都市震災軽減工学、国際防災戦略論



# 阪神・淡路大震災からの復興検証

室崎 益輝

●神戸大学 名誉教授

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災から30年を迎えた。震災後の30年の節目ということで、改めて大震災からの復興を評価しておきたい。

## 2. 30年の意味

最初に、30年目に復興を検証する意味について触れておきたい。この30年は、世代交代の30年、復興積分の30年、社会変動の30年、教訓風化の30年という、4つの意味で捉えられる。

世代交代ということでは、震災を直接経験していない人々が約6割を占める状況にある。震災当時から復興を担っていたキーパーソンの中には亡くなった方も多く、その経験を次代にどう伝えるかが問われている。

復興積分（日々の苦しみとその苦しみが続く時間の積）ということでは、成果が見えるまでに時間がかかる復興の中長期的評価が可能となる。復興では、種から花を咲かせるに至るまでのプロセスが問われる。そのプロセスも含めての評価が求められる。

社会変動ということでは、社会の変化や災害の動向に応じ復興の課題や見方も変わってくる。能登半島地震が起きる前と後では、阪神・淡路大震災を見る眼が変わり、引き出される教訓が変わってくる。

教訓風化ということでは、震災体験の風化が進行し教訓を忘れてしまう。令和6年能登半島地震をみても明らかのように、耐震補強や事前備蓄といった大切な教訓が忘れられてしまう。

## 3. 阪神・淡路大震災教訓情報資料集/阪神・淡路大震災教訓情報資料集の概要<sup>1)</sup>

前述の風化を避けるためにも、この30年間の復興の概要を整理しておこう。

再建に相当な時間がかかったとはいえ、大規模な住宅供給と面的整備事業が比較的短期間に実施されている。とはいえ、生活再建が長期化したこと、コミュニティの崩壊がもたらされたこと、地域経済の衰退を招いたことなど、復興のあり方が厳しく問われている。

### 3.1 住宅再建

住宅再建では、約4.7万戸の仮設住宅を7カ月で、約7.5万戸の公的住宅を4年半で供給している。災害救助

法で推奨するタイムラインと比較すると、その供給の速度は著しく遅い。仮設住宅の建設の遅れが避難所における災害関連死を招き、公営住宅の建設の遅れが被災地からの人口流出を招いている。

仮設住宅や公営住宅の入居で抽選方式が採用されたことに加え、その多くが用地難ゆえに郊外に建設されたことから、既存コミュニティの崩壊につながっている。その一方、自力再建を余儀なくされた約10万世帯については、自力再建への公的支援が十分でなかったことから、被災地内での再建をあきらめ、地域外に流出した人が少なくなかった。

### 3.2 まちづくり

まちづくりでは、6地区33haの再開発事業、20地区256haの区画整理事業を含む、57地区約300haの面的整備事業が実施された。膨大な面的事業を、一部を除いて5～15年でやり切ったことは評価できる。とはいえ、その公的事业実施地域は被災地全体の2割程度で、事業が実施されなかった地域との復興格差が生まれている。

この整備事業では、第1段階で事業の区域や幹線道路などの大枠を決め、第2段階でまちづくり協議会等での合意形成で詳細を決めるという、2段階復興方式が採用されている。ただ、合意形成を疎かにした地域や強引な大規模開発に固執した地域では、復興の混乱を招いている。

### 3.3 生活再建

暮らしの復興では、ハードの復興あるいはインフラの復興だけでなく、ひとり一人の人間に着目した人間復興、被災者の暮らしに着目した生活復興が目指された。復興基金を活用して、約5万世帯に約1,400億円の生活支援金や自立支援金を給付している。生活援助員や生活復興相談員を介してのサポート、ふれあいセンターやまちの保健室を通してのサポートも積極的に行われている。

その一方で、震災障がい者や県外避難者などに対しては、その実態の把握が不十分であったこともあり、必要な支援を届けられていない。また、公営住宅等で孤立した高齢者への見守りが不十分で、1000人を超える孤独死を招いている。

### 3.4 減災態勢

施設整備やインフラ構築などのハード面の成果には

進化が見られなかったが、危機管理体制、広域応援体制システム、市民活動基盤などのソフト面の成果には進化が見られた。コミュニティの防災体制、復興基金制度、被災者支援制度の整備がはかられている。特定非営利活動促進法（NPO法）など市民活動を促すシステムもできている。

その一方で、行政の縦割りの弊害などは解消されないうちに今日に至っている。

#### 4. 復興検証の視点

30年にあたり、改めて教訓や課題を明らかにするための検証が求められる。そのための評価の視点と教訓の視角を提示しておこう。

##### 4.1 評価の視点

評価では、復興がどこまで達成されたか、どのように達成されたかをみる必要がある。前者では目標の到達度を、後者では復興の過程を問い直す必要がある。

##### 4.1.1 復興の目標に照らして

復興の目標は、被災からの回復をはかり自立を目指す、安全で安心できる社会を構築する、災害で問われた社会矛盾を改めるという、「回復」「安全」「変革」の3つに要約される。その目標がどこまで達成されたかを問い直さなければならない。

「回復」では、インフラ復興は比較的速やかにはかられたといえるが、生活復興は避難生活や仮設生活が長期にわたり被災者に苦難をもたらした。人間復興の重要性を痛感させられた。

「安全」では、建物の耐震性の強化、消防水利の整備、自主防災の強化がはかられたといえるが、耐震性のない老朽家屋の残存を許し、燃えやすい木造密集地の再生を許す結果となっている。

「変革」では、市民社会の基盤が開かれたといえるが、震災が問いかけた自然環境との共生や社会格差の是正、自律社会の形成などの課題は、未着手のまま残された。阪神疎水構想などは頓挫してしまった。

##### 4.1.2 復興の過程に照らして

阪神・淡路大震災では、復興の過程から学ぶべきところが多い。復興の過程では、後述する合意形成が最も大切だが、復興の基盤としての被災実態の調査、復興検証の実施、災害教訓の発信から、学ぶ点が多い。

被災調査では、火災被害、倒壊被害、人的被害、生活再建について丹念な調査が実施されている。火災原因や延焼動態に関する調査<sup>2)</sup>は、通電火災や焼け止まり線に関する貴重な知見を引き出している。50万棟の家屋の被災状況に関する調査<sup>3)</sup>は、地震動や地盤などと倒壊との因果関係を明らかにするとともに、復興事

業の優先度や方向性をはかる物差しになっている。死傷に関する調査は、死亡原因や震災障害を詳細に解明している。遺族からの聞き取り調査<sup>3)</sup>は、人的被害防止対策への貴重なヒントを与えてくれている。

復興検証では、復興のPDCAサイクルがしっかりと回されている。5年、10年、15年、20年といった節目に、繰り返し持続的に検証が行われている。その検証の総合性、国際性、自省性、協働性、提言性を、高く評価したい。国際性では、海外との受信と発信の交流に努めていること、自省性では復興の失敗や残された課題に言及していること、協働性ではNPOや企業の意見を積極的に吸収している。

教訓発信では、「場」「人」「記録」の仕組みを整備し、伝承をはかっている。「場」では、メモリアルセンターとしての「人と防災未来センター」の建設が、「人」では、震災語り部の育成と活用が、「記録」では、「1.17は忘れない～伝える」<sup>4)</sup>や「災害対策全書」<sup>5)</sup>などの発刊が、仕組みでは、「TeLL-Net」<sup>6)</sup>という国際伝承組織の整備が、はかられている。

##### 4.2 教訓の視角

教訓を体系的に引き出すには、復興を多角的あるいは相対的に捉える必要がある。

##### 4.2.1 光と影

まず、復興のプラス面だけでなくマイナス面をしっかりと見なければならない。住宅再建では、被災者生活再建支援制度やフェニックス共済制度などの、プラス面を強調しがちであるが、住宅再建や復興事業のフレームやタイムラインを明確にできなかったマイナス面を見逃してはならない。避難支援では、生活支援員の配置などのプラス面もあるが、非人間的な避難環境の改善を疎かにしてきたマイナス面が見逃せない。

##### 4.2.2 ハードとソフト

ハードウェアだけでなく、ソフトウェアやヒューマンウェアにも着目しなければならない。先に触れたように、阪神・淡路大震災ではハードよりもソフトに見るべき成果がある。その中でも特筆すべきこととして、復興の過程で後述するような無数の市民団体が生まれたことを指摘できる。防災教育の進展もはかられた。

##### 4.2.3 ローカルとグローバル

復興では、どうしてもローカルな課題や短期的な課題に眼が向きがちであるが、グローバルな課題や長期的な課題にも眼を向けなければならない。ローカルということでは、淡路島のような漁村や神戸市長田区のような木造住宅密集地域の特性を踏まえた復興をはかることが欠かせない。と同時に、地球温暖化などの国際的な課題やSDGsなどの基礎的な課題に取り組むこ



とが求められる。高齢化や過疎化など、社会全体の問題として復興に取り組むことも欠かせない。

#### 4.2.4 今日と明日

次の災害に備えるために教訓や課題を議論する前に、能登半島地震の被災地の再建のための議論をしなければならない。リアルタイムの復興検証を大切にしたい。明日のために防災庁をどうするかという議論も大切であるが、能登半島地震の被災者の自立をいかにはかるかという議論を、もっと積極的に展開しなければならない。

### 5. 復興30年の教訓

最後に以上の視点を踏まえて、阪神・淡路大震災から引き出される30年目の教訓を、明らかにしておきたい。ここでは、能登などの次の被災地に引き継いで欲しいと思い、あるべきプラスの教訓を提起しておこう。

#### 5.1 「地域主導」と参画協働

復興のプロセスでは、「地域主導」と「参画協働」が教訓のキーワードなる。

地域主導では、ボトムアップの復興が目指された。地方分権や県民本位が、復興の基本スローガンとされた。当時の貝原俊民・兵庫県知事は「復興の根源的なエネルギーは、被災地の人々の再建への苦闘のなかからしか湧き上がってこない」<sup>7)</sup>という基本認識のもとに、下からの復興を心掛けた。その結果として、地域の特色を活かした復興、自由な発想に基づく復興が導き出された。

「参画協働」では、地域と復興に関わる多様な主体の連携がはかられた。ビジョン作成や被災者支援などにおいて公民連携がはかられ、コミュニティや市民団体、民間企業の参画協働がはかられた。多様な団体が協議する場としてのラウンドテーブルが広範囲に設置され、パートナーシップの駆動力となっている。

#### 5.2 創造的復興と人間復興

復興のビジョンでは、「創造的復興」と「人間復興」がキーワードになる。

「創造的復興」は、当時の貝原知事によって提起された復興の羅針盤である。それまでの経済優先の社会やハード中心の社会を改め、21世紀に相応しい環境共生型あるいは生活重視型の社会構築をめざすものであった。そこでは、量的に焼け太る復興ではなく、質的に生まれ変わる復興が企図され、20世紀の機械文明から21世紀の環境文明に転換をはかることが目指された。その企図を受けて、環境優先社会や多文化共生社会の形成がはかられ、福祉文化社会や地方分権社会の構築が目指された。コレクティブハウジングなどの新しい住み方への挑戦もなされた。ところで、この変革

を目指す創造的復興は、時間不足と財源不足のために前に進まず、中途半端な結果にとどまっている。そのこともあって、その後の災害復興においては創造的復興の真意が歪曲され、従来型のハードな開発にお墨付きを与える免罪符になってしまった。

「人間復興」は、大震災の復興における最も大切な視点になった。それまでのインフラ復興から人間復興あるいは生活復興に、復興目標は大きくシフトした。甚大な被害と膨大な需要に、住宅再建支援やヒューマンケアが追いつかず、被災者が何時までも過酷な環境に放置されることになった。その中で、地域のインフラが回復しても人間の生活が回復しなければ、復興といえないことに気づかされた。被災者の見守りや高齢者のケアに力を入れる、生きがい仕事づくりやコミュニティ形成に力を入れるといった、ソフトウエアの充実強化が復興の基幹に据えられた。

#### 5.3 市民活動と減災文化

ソフト面の成果に関わる教訓のキーワードは、「市民活動」と「減災文化」である。

「市民活動」では、災害直後の被災者支援ボランティア活動は、日常的な社会創生ボランティア活動として発展した<sup>8)</sup>。無数の市民団体が生まれ、国際交流、芸術文化、生活福祉、まちづくりなどにおける主要な担い手となった。「アートエイド神戸」、「多文化共生センター」、「FMわいわい」、「神戸復興塾」、「しみん基金神戸」といった市民団体が、持続可能な社会形成の主力となって活躍している。その中で、震災3年後にNPO法が成立している。

「減災文化」は、安心につながる社会化された慣習や制度をいう。前述の市民活動の主流化も、減災文化そのものである。多文化共生、男女共同参画、自然環境教育、災害伝承活動、災害ボランティアなど、それまでの社会の価値観を大きく変える慣行が定着した。防災に関わる「防災甲子園」や「神戸ルミナリエ」などの取り組みも、減災文化として評価できる。

#### 5.4 復興基盤と支援制度

大震災で、減災や復興に関わる社会的なソフトインフラが創り出されている。そのソフトインフラに関わるキーワードが、「復興基盤」と「支援制度」である。復興基盤は、被災者や被災地の復興を支える社会的な手段やインフラをいう。支援制度は、被災地や被災者の自立を促すバックボーンになる法制度をいう。

生活援助員は、被災者に寄り添い見守りをはかるヒューマンインフラである。被災者支援のために、仮設住宅に「ふれあいセンター」、復興公営住宅に「コミュニティプラザ」が設置された。そのうちのコミュ

ニティプラザには、常駐の形で生活援助員が配置された。この生活援助員は、入居者の生活支援だけでなく、コミュニティ形成支援にも大きな役割を果たしている。この援助員は、地域密着型のサポーターの原型で、その後の「復興支援員」や「地域おこし協力隊」に引き継がれている。

復興基金は、復興事業の隙間を埋めるとともに、柔軟で迅速な対応を可能とするファイナンスインフラである。大震災の直後の4月にはいち早く、果実運用型の基金として設置されている。先に述べた生活援助員の派遣はもとより、商店街の活性化やボランティアの活動支援、住宅の建替えや修繕支援、被災者の自立支援など、多くの自主事業に活用されている<sup>7)</sup>。この基金は、被災者ニーズに臨機応変に応えうる、地域に密着し復興の自治を支えうるなどのメリットを有している。国の補助がなくとも支援ができ、弾力的に自由に使える復興基金は、2004年の新潟県中越地震でも大きな役割を果たしている。

住宅再建支援制度は、被災者の住宅の再建や修理を可能にするシステムインフラである。住宅再建支援のシステムが、公助と互助の両面で整備された。公助の制度としては「被災者生活再建支援法」<sup>8)</sup>が、共助の制度としては「住宅再建共済制度」が整備された。地震保険への加入という自助に加えて、公助と共助の支援金を受け取ることができ、住宅再建が容易になった。公助の制度では、住宅再建の公的助成を求める運動が立ち上がり、署名が2500万も集まった。この結果、私有財産には税金を使わないというタブーを打ち破って、全壊家屋には300万円を給付するという画期的な法律が生まれた。共助の制度では、市民が義援金の前払いの精神で保険金を積み立てておき、それを使って全壊家屋に600万円を還付するという互助的な制度がつくられた。

### 5.5 復興協議組織と中間支援組織

復興では、復興の推進役あるいは調整役としての組織が要る。この組織インフラに関わるキーワードとして、「復興協議組織」や「中間支援組織」<sup>7)</sup>をあげることができる。その代表例が、「まちづくり協議会」と「被災者復興支援会議」である。地域に根差した復興を進めてゆく過程では、まちづくり協議会という市民組織、被災者復興支援会議という中間組織が大きな役割を果たしている。

まちづくり協議会は、住民はもとより地域に関わる様々な人々や団体が参画し、異なる意見を戦わせながら合意形成をはかり、復興まちづくりを進めてゆく共同体である。そこでは、協力が実現される。阪神・淡路の被災地では100を超えるまちづくり協議会がされ、

住民主体のまちづくりが実現している。コミュニティを行政が後から支援し、コミュニティを専門家が横から支援することで、復興は大きく前に進む。

被災者復興支援会議は、被災者の思いや願いを復興の施策に反映させるために、第3者機関として震災半年後に設置されている。福祉、まちづくり、産業、マスコミ、雇用など多様な分野にまたがる専門家や有識者がそこに参画している。支援会議は、現場の声を聴くアウトリーチと施策を提言するアドボカシーを活動の両輪としている。アウトリーチで拾った声を取りまとめ、アドボカシーとして行政などに提言している。10年間にアウトリーチとしての井戸端会議を250回も開催している。支援会議の提言が被災者の生活復興課題の解決につながっている。

「中間支援組織」は、市民団体と行政をつなぎ、市民団体相互をつないで、支援力や市民力を高める組織をいう。被災者復興支援会議は、被災者と行政をつなぐということで中間支援組織に位置付けられる。「ひょうごボランティアプラザ」や「ひょうご市民活動協議会」なども中間支援組織として位置づけられる。中間支援組織は、市民団体のための市民団体ということができ、市民団体の人材育成や情報共有をサポートする役割も担っている。大震災が生み出した、重要な減災文化の一つである。

### 参考文献

- 1)内閣府：阪神・淡路大震災教訓情報資料集/阪神・淡路大震災教訓情報資料集の概要、1999。
- 2)日本火災学会：1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書、1996。
- 3)震災復興都市づくり特別委員会：阪神・淡路大震災被害実態緊急調査被災度別建物分布状況図集、1995。
- 4)阪神・淡路大震災復興フォローアップ委員会：1.17は忘れない～伝える(改訂版)、ぎょうせい、2016。
- 5)ひょうご震災記念21世紀研究機構：災害対策全書(全4巻及び別冊)、ぎょうせい、2011-2015。
- 6)世界災害語り継ぎネットワーク TeLL-Net：https://tell-net.jp/jp/ (参照2025-01-05)。
- 7)貝原俊民：大震災100日の記録―兵庫県知事の記録、ぎょうせい、1995。
- 8)コミュニティサポートセンター神戸：兵庫県NPO中間支援組織の20年、2015。



室崎 益輝(むろさき よしてる)

1967年京都大学卒、神戸大学教授、消防研究所理事長、関西学院大学教授、兵庫県立大学教授、火災学会会長、災害復興学会会長、消防審議会会長などを経て現職、日本火災学会賞、日本建築学会賞、NHK放送文化賞などを受賞、工学博士、専門分野：防災計画、復興計画



## 日本地震工学会・大会－2024 開催報告

中嶋 唯貴

●北海道大学大学院 工学研究院 准教授

### 1. はじめに

2023年は日本地震工学シンポジウム開催年であり、日本地震工学会・大会は開催はなく、2022年北海道以来の日本地震工学会・大会－2024が岐阜県じゅうろくプラザで、晴天に恵まれ12月とは思えない過ごしやすい気候の中、12月4・5日の2日間で開催されました。2日間の大会では、4日の開会式、基調講演を皮切りに、4つの発表会場において、一般発表会のほか、英語セッションが行われました。また、本会研究委員会による成果報告が公開セッションとして実施されました。一般発表会の発表形式としては、北海道大会に引き続き全てを口頭発表とし、熱心な討議が行われました。大会開催中、合計271名（正会員152名、法人会員7名、非会員23名、学生会員24名、学生非会員39名、招待講演者1名、企業展示参加者26名）の方々にご参加いただきました。参加いただいた皆様、開催にご協力いただいた皆様に感謝いたします。



写真1 基調講演・松島信一教授

### 2. 開会式・基調講演

大会初日には、開会式と基調講演、一般公演、企業フェアが開催されました。開会式では、中村いずみ副会長による開会あいさつが行われました。次いで、松



写真2 一般発表セッション会場

島信一教授（京都大学）による基調講演が行われました。ご講演「不確実性を考慮した南海トラフ沿いの巨大地震による構造種別ごとの建物被害推定－東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究重点推進研究－」では、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第3次）の推進について（建議）と拠点間共同研究の関係について、詳しく説明いただき、拠点間連携の成り立ちから、これまでの参加機関、参加の方法などに関し、ご紹介いただきました。

また、拠点間連携の中で進められている、巨大地震発生時の災害リスク評価の不確実性に関する研究について、（１）各研究分野における知見・モデルの不確実性を定量化、（２）それらの不確実性を考慮できるリスク評価の枠組みを構築する、（３）どの不確実性要因が全体のリスク評価の不確実性に寄与しているかを明らかにする、の3つの視点から、高知県と大阪府を対象としたリスク評価のばらつきに関する算定事例などの紹介していただきました。講演後には、今後の拠点間

表1 大会プログラム

4 th of December 於：じゅうろくプラザ（岐阜市文化産業交流センター）

| 2F ホール(A 会場)                                                  | 5F 中会議室 (B 会場)                     | 5F 小会議室1 (C 会場)                                   | 5F 第小会議室2 (D 会場)             |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
| 開会の挨拶・会長挨拶<br>(9:30-9:40)                                     |                                    |                                                   |                              |
| 基調講演：京都大学<br>松島信一 教授<br>(9:40-10:40)                          |                                    |                                                   |                              |
| A-11 地中構造物およびダム-1, 杭および基礎構造-1, 地盤と構造物の相互作用-1<br>(10:50-12:20) | B-11 震源特性-1<br>(10:50-12:20)       | C-11 免震・制振・ヘルスモニタリング-1<br>(10:50-12:20)           |                              |
| A-12 地盤と構造物の相互作用-2, 土木構造物<br>(13:30-15:00)                    | B-12 震源特性-2, 地下構造<br>(13:30-15:00) | C-12 免震・制振・ヘルスモニタリング-2<br>(13:30-15:00)           | D-12 社会問題-1<br>(13:30-15:00) |
| A-13 建築構造物-1<br>(15:05-16:35)                                 | B-13 地盤震動-1<br>(15:05-16:35)       | C-13 免震・制振・ヘルスモニタリング-3<br>(15:05-16:35)           | D-13 社会問題-2<br>(15:05-16:35) |
| A-14 建築構造物-2<br>(16:40-17:55)                                 | B-14 地盤震動-2<br>(16:40-17:55)       | C-14 免震・制振・ヘルスモニタリング-4, 原子力構造物-1<br>(16:40-17:55) |                              |

5 th of December 於：じゅうろくプラザ（岐阜市文化産業交流センター）

| 2F ホール(A 会場)                                           | 5F 中会議室 (B 会場)                            | 5F 小会議室1 (C 会場)                                    | 5F 第小会議室2 (D 会場)             |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|
| A-21 建築構造物-3<br>(9:15-10:45)                           | B-21 地盤震動-3<br>(9:15-10:45)               | C-21 原子力構造物-2, 機械設備系, 新しい構造・材料・その他<br>(9:15-10:45) | D-21 被害調査-1<br>(9:15-10:45)  |
| A-22 建築構造物-4<br>(10:50-12:20)                          | B-22 地盤震動-4<br>(10:50-12:20)              | C-22 English Session<br>(10:50-12:35)              | D-22 被害調査-2<br>(10:50-12:35) |
| A-23 建築構造物-5<br>(13:30-15:00)                          | B-23 地盤震動-5, 津波・歴史地震・その他<br>(13:30-15:00) |                                                    |                              |
| 地震による倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する研究委員会公開セッション<br>(15:30-17:00) | B-24 地盤の液状化・斜面崩壊<br>(15:05-16:35)         |                                                    |                              |
| 閉会式(17:00-)                                            |                                           |                                                    |                              |



連携の進むべき方向に関して熱い議論が交わされました。

### 3. 一般発表・若手優秀発表賞

1日目、2日目と4つの会場に分かれ、一般発表会が行われました。一般発表では、合計で25のオーラルセッションによる145編の発表がありました。大会のプログラムを表1に示します。そのうち、1つのセッションは英語セッションであり、英語による口頭発表が7編ありました。2022年度大会と比較すると、本大会においては建物構造と地盤振動の発表が多く社会問題や被害調査の発表が少なくなりました。一人当たりの発表時間を15分（発表12分・質疑3分）と長めに設定し、セッションの進行においては、多くの研究者、技

術者の方々がチェアパーソンを務めていただきました。また、若手優秀発表賞の審査にご協力いただきました。いずれのセッションにおいても皆さまのご協力もあり、活発な質疑応答が行われました。

また、これらの発表に基づき優秀な発表を行ったと認められた35歳以下の若手発表者11名の方に優秀発表賞を受賞されました。受賞者の一覧は表2になります。おめでとうございます。例年授賞式は大会内で実施していますが、本大会では学会期間中に授賞式を行うことができなかったため、受賞者には賞状が送付されます。次回大会においても、若手優秀発表賞の選考が行われる予定です。積極的な若手の皆様の投稿をお待ちしております。

表2 優秀発表賞受賞者（敬称略）

| Slot   | Paper No. | Title                                                                                                                 | Presenter                   |
|--------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| A-14-2 | 20240154  | ねじ固定式あと施工アンカーの引抜き耐力に関する実験                                                                                             | ○藤田康介（東京科学大学）               |
| A-21-6 | 20240019  | 構造設計検討や最適化のための地震時最大応答高速評価法                                                                                            | ○明橋弘樹（竹中工務店）                |
| A-22-2 | 20240118  | CLTパネルと太径ビスによる低層建築用ユニットシステムの開発                                                                                        | ○渡邊悠（東北大学）                  |
| B-13-2 | 20240100  | サイト特性のばらつきが二重スペクトル比に及ぼす影響についての検討                                                                                      | ○井上晏菜（東京都立大学）               |
| B-21-4 | 20240044  | 異常震域に着目した機械学習による震度予測の基本的検討                                                                                            | ○本田栞（竹中工務店）                 |
| C-11-2 | 20240093  | 限られた加速度計の地震応答観測記録に基づく建物各階の剛性低下率の推定手法の検討                                                                               | ○大野歩美（東北大学）                 |
| C-12-5 | 20240015  | 建物振幅に応じて性能が変化する非線形TMDの性能確認試験                                                                                          | ○渡井一樹（竹中工務店）                |
| C-14-5 | 20240094  | スライディングモード制御による免震構造物のセミアクティブ制御に関するリアルタイム・ハイブリッド実験による検証                                                                | ○影山史渡（神戸大学）                 |
| C-22-5 | 20240149  | APPLICABILITY STUDY OF A SWARM INTELLIGENCE ALGORITHM TO IDENTIFY THE PARAMETERS OF A SINGLE DEGREE OF FREEDOM SYSTEM | ○Munoz Flores Andre Alberto |
| D-12-4 | 20240115  | 衝突を考慮した人体の地震応答解析モデルによる地震時群衆避難シミュレーション                                                                                 | ○二本松景人（茨城大学）                |
| D-13-2 | 20240113  | 令和6年能登半島地震における生産施設の被害分析                                                                                               | ○大野達也（清水建設）                 |

#### 4. 地震工学技術フェア

企業参加による「地震工学技術フェア」も北海道大会に引き続き対面にて開催されました。地震工学に関連する各技術展示ブースに、多くの方が来訪され、有意義な情報交換の場となりました。地震計など最新の観測機器や解析システム、建物や水道管などの耐震化技術など、計測から解析、そして防災減災対策にいたる、地震工学関連の幅広い展示がおこなわれました。企業・団体の皆様は、以下の通りです。白山工業株式会社、(株)勝島製作所、ソナス株式会社、エースポイントシステムズ株式会社、タスク株式会社、株式会社東京測振、株式会社大林組、株式会社アーク情報システム、配水用ポリエチレンパイプシステム協会、テガラ株式会社、JIPテクノサイエンス株式会社(ブース番号順)。

#### 5. 公開セッション

地震による倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する研究委員会は、小山真紀委員長を中心に、2021年6月～2024年3月までの期間、消防・警察等の専門部隊向けの救助訓練プログラムに加え、地域住民向けの救助訓練プログラムについても検討開発を行っており、本大会において、本大会において、委員会活動の成果報告会として、『地震による倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する研究委員会 公開セッション』が開催されました。公開セッションでは、片寄圭一郎氏(岐阜大学)と四井早紀氏(東京大学)より、救助時間の実態把握や救助活動のシミュレーションについての研究発表が行われました。次いで、加古嘉信氏(株式会社減災ソリューションズ・上武大学)より、研究委員会の活動報告が行われました。これらの発表・報告を踏まえ、加古氏に小山真紀氏(岐阜大学)、阪本太吾氏(日本医科大学)・吉岡利征氏(明石市消防局)・中村昇一(明石消防局)を加え5名をパネラーとしたパネ



写真3 著者の発表の様子(Monitor Presentation)

ルディスカッションが行われました。

#### 6. 交流会

コロナ禍以来開催されていなかった懇親会が5年ぶりに復活し、じゅうろくプラザ一階レストラン「ラ・ローゼ・プロヴァンス」にて開催しました。参加者は60名を超えました。川瀬博先生による乾杯により交流会が開始され、大変活気のある歓談を経て、大堀道広副会長に会を閉めていただきました。

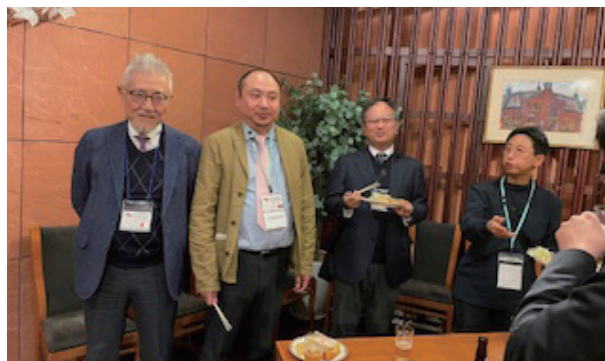


写真4 懇親会会場

#### 7. 最後に

大会にご参加くださいました皆様、また大会運営にご尽力いただきました大会実行委員会の委員の皆様、ならびに技術フェアにご出展いただきました企業の皆様に、深く感謝申し上げます。今回の年次大会が地震工学の発展に寄与するとともに、専門分野を超えた新たなネットワーク作りの一助となることを期待いたします。2025年度の大会は、丸山喜久大会実行委員長のもと、12月9・10日に沖縄県市町村自治会館で開催されます。次年度の大会にも積極な参加をどうぞよろしくお願いいたします。

#### 謝辞

本大会は、当大会は公益財団法人岐阜観光コンベンション協会にご支援をいただいております。記して謝意を表します。

#### 【日本地震工学会・大会-2024実行委員会】

中嶋唯貴(委員長、北海道大学)  
丸山喜久(副委員長、千葉大学)  
久世益充(岐阜大学)  
小山真紀(岐阜大学)  
小松真吾(島根大学)  
佐伯琢磨(神戸学院大学)  
野口達也(鳥取大学)  
戸田 薫子(日本地震工学会事務局)



## お知らせ

### ■ 本学会に関する詳細はWeb上で

#### 日本地震工学会とは

日本地震工学会は、建築、土木、地盤、地震、機械等の個別分野ではなく、地震工学としてまとまった活動を行うための学会として2001年1月1日に発足しました。その目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

#### ぜひ、皆様も会員に

本会では、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象とし、会員（正会員、学生会員、法人会員）を募集しています。本会の会員になることで、各種学会活動、日本地震工学会「JAEE NEWS」のメール配信、地震工学論文集への投稿・発表・ホームページ上での閲覧、講習会等の会員割引など、多くの特典があります。ぜひ皆様も会員に、ホームページからお申込みください。

「学会の動き」欄は、下記のホームページでご覧いただくことにしました。

日本地震工学会の会則、学会組織、役員、行事、委員会活動、出版物の在庫案内など最近の活動状況などの詳しい情報はホームページをご覧ください。ホームページには、学会の情報の他に、最新の地震情報、日本地震工学会論文集など多くの情報が掲載されています。ぜひご活用ください。

入会方法や入会後の会員情報変更の詳細は本会ホームページ中の「会員・各賞受賞者」の下の「入会案内」、「変更・退会手続」に記載されています。

日本地震工学会ホームページ <https://www.jaee.gr.jp/jp/>

### ■ 会誌への原稿投稿のお願い

日本地震工学会会誌では、「地域での地震防災に関する話題」、「地震工学に関連した各種学術会議・国際学会等への参加報告」、「興味深い実験や技術の紹介」、「当学会や会誌への要望や意見」等に関して、皆様からの原稿を募集しております。なお、投稿原稿は原則として未発表のものに限ります。また、「速報性を重視する内容（原則として年3回の発行であるため）」、「ごく限られた会員のみに関係する内容」、「特定の商品等の宣伝色が濃いもの」はご遠慮下さい。

投稿内容、投稿資格、原稿の書き方・提出方法等の詳細は、本会ホームページ中の「投稿・応募ページ」よりご確認ください。

日本地震工学会ホームページ 投稿・応募ページ <https://www.jaee.gr.jp/jp/contribution/>

## ■ 登録メールアドレスご確認のお願い

当学会では、会員の皆様のお役に立つ会員限定のニュースやセミナー情報をメールにて配信させていただいておりますが、メールが届かず戻ってしてしまうケースが散見されます。メールアドレスを変更された方、あるいは、このところ弊学会から1通もメールが届いていないという会員の方は、以下の方法で会員登録情報をご変更いただくか、事務局までご連絡いただきますようお願い申し上げます。

### 【会員登録情報のご変更方法】

日本地震工学会のWEBサイト (<https://www.jaee.gr.jp/>) の「会員ログイン」より、会員番号とパスワード(7桁例: 0000001)を入力してログインし、「登録情報の変更」を選択して登録情報をご変更ください。尚、会員番号またはパスワードがご不明な方は事務局までお問い合わせください。

## ■ ご寄附のお願い

日本地震工学会は、地震工学及び地震防災に関する学術・技術・教育の進歩発展をはかり、地震災害の軽減に貢献することを目的に、全ての事業を公益活動として推進しております。

2013年5月に「公益社団法人」格を取得し本会が「公益社団法人」として認められたことから、皆様方からの学会への御寄附に対して税制上の優遇措置が認められることとなりました。

本会が公益活動をさらに強化し、社会貢献活動を行っていくためには、財政強化が不可欠であり多くの方々のご寄附が必要です。是非とも皆様からのご支援をお願い申し上げます。

ご寄附をいただける方は、WEBサイト「公益社団法人 日本地震工学会 寄附のお願い」(<https://www.jaee.gr.jp/donation/>) をご参照のうえ、お申込みいただきますようお願いいたします。

(連絡先)

公益社団法人 日本地震工学会事務局

TEL : 03-5730-2831 E-MAIL : [office@general.jaee.gr.jp](mailto:office@general.jaee.gr.jp)

## ■ 問い合わせ先

不明な点は、氏名・連絡先を明記の上、下記までお問い合わせ下さい。

日本地震工学会 事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

TEL : 03-5730-2831 FAX : 03-5730-2830 電子メールアドレス: [office@general.jaee.gr.jp](mailto:office@general.jaee.gr.jp)





## JAEE Newsletter 第14巻 第1号 (通算第41号) が 2025年4月下旬に発刊されます。

4月発刊の第14巻第1号では、防災における市民向けメディア、書籍を特集し、防災教育を共創型の「共育」の視点からも再考するとともに、地震工学分野の開拓に挑む企業の若手研究者の座談会の開催を予定しております。

JAEE Newsletterは、日本地震工学会誌を補完し、タイムリーに情報発信する目的で2012年9月に創刊されました。2015年より、会誌と連携した情報発信を行うため、会誌と交互となる4月、8月、12月に学会のWebサイト上で発行しています。地震工学に興味を持つ一般の読者も意識したわかりやすい記事を通じて、地震工学と地震防災の一層の普及・発展を目指しています。

JAEE Newsletterについては以下のサイトで掲載しております。

<https://www.jaee.gr.jp/jp/stack/1925-2/>

最新号 (第13巻第3号) では、南海トラフ地震臨時情報に対する備えの共考をテーマに有識者、自治体、市民団体の方にご寄稿をいただきました。またダイバーシティ推進の観点から活躍中の女性研究者の方の座談会を開催しました。オンライン媒体による情報発信で、どなたでも閲覧できますので、ぜひご覧ください。

## 編集後記：

震災当時の状況やその後の発展について編集を行う中で、災害がいかに複雑で多様であるかをあらためて実感しました。災害の特性は場所や時が変わればさらに変化し、また、社会の高度化とともにより複雑化するものと思います。過去の被害をしっかりと教訓としながら、将来起こり得ることに想像力を働かせて、今後の災害を少しでも防ぐべく取り組んでいかなければならないと認識しました。

浅井 竜也(東京大学 生産技術研究所)

自分は2006年から2012年まで神戸大学で大学生・修士学生として過ごし、震災に関連するボランティアにも関わっていました。当事者の方々と接すると、その方の中では震災は終わっていないのだと感ずることが数多くありました。将来の震災で同じような苦しみを抱える人を減らしていくことについて、地震工学が、そして自分自身が、どのように貢献できるのかを改めて考えなければならぬと、今回の特集を通じて強く思いました。

久保 久彦(防災科学技術研究所)

## 会誌編集委員会

|     |       |             |    |       |             |
|-----|-------|-------------|----|-------|-------------|
| 委員長 | 皆川 佳祐 | 埼玉工業大学      | 委員 | 入江さやか | 松本大学        |
| 幹事  | 浅井 竜也 | 東京大学生産技術研究所 | 委員 | 大豊 晃祥 | IHI         |
| 幹事  | 久保 久彦 | 防災科学技術研究所   | 委員 | 北原 優  | 東京大学大学院     |
|     |       |             | 委員 | 小阪 宏之 | 戸田建設        |
|     |       |             | 委員 | 杉山 充樹 | 大林組         |
|     |       |             | 委員 | 田附 遼太 | 長谷工コーポレーション |
|     |       |             | 委員 | 土井 達也 | 鉄道総合技術研究所   |
|     |       |             | 委員 | 鍋島 国彦 | 神戸大学大学院     |
|     |       |             | 委員 | 仁田脇雅史 | 清水建設        |
|     |       |             | 委員 | 吉田 祐一 | 消防研究センター    |
|     |       |             | 委員 | 渡井 一樹 | 竹中工務店       |

日本地震工学会誌 第54号 Bulletin of JAEE No.54

2025年2月28日発行(年3回発行)

編集・発行 公益社団法人 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

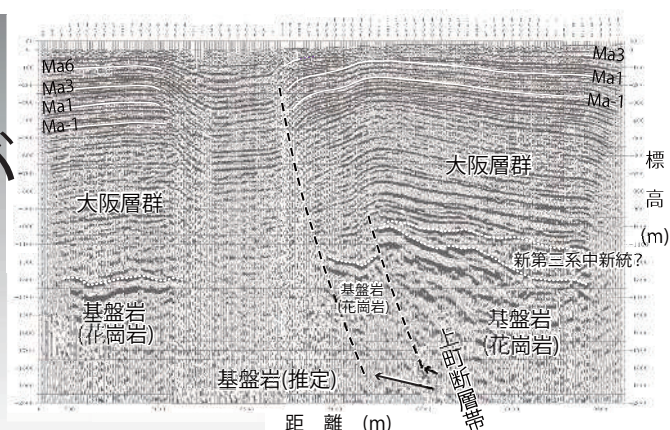
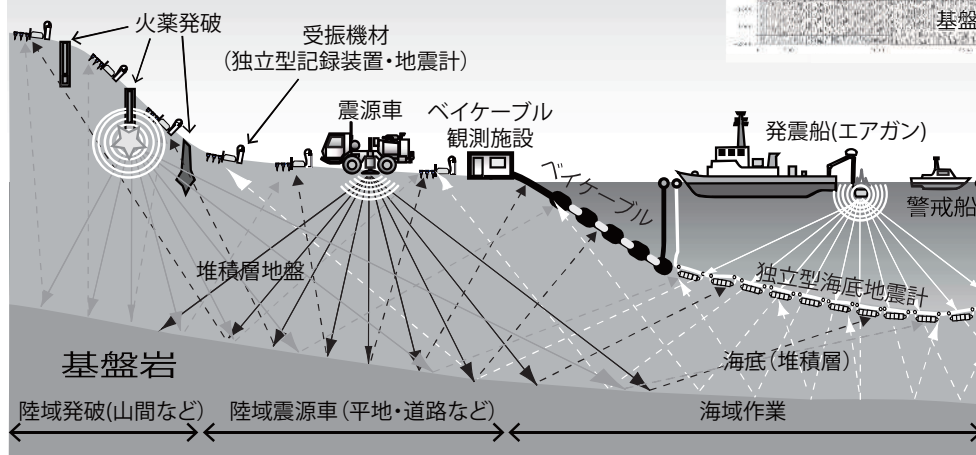
©Japan Association for Earthquake Engineering 2024

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



# 陸域から海域まで、 種々の反射法探査が可能！

↓ 反射法地震探査のイメージ図



↑ 反射法地震探査で得られる地下構造のイメージ例

調査の計画

↓  
計測作業

↓  
データ処理

↓  
地質解釈

一貫して  
お引き受け  
いたします。



株式会社  
**阪神コンサルタンツ**  
HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.

本店 奈良市大宮町 2-4-25  
大阪支店 大阪市西区土佐堀 1-3-20  
東京支店 東京都千代田区神田西福田町 4  
神戸支店 神戸市灘区深田町 4-1-1-653

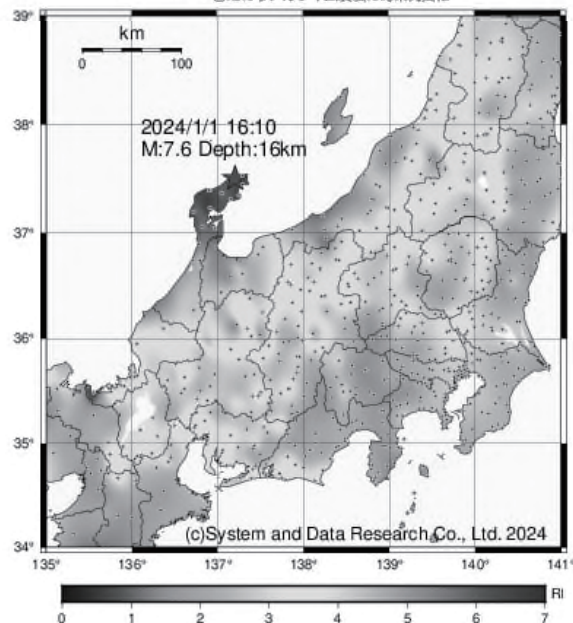
TEL:0742(36)0211  
TEL:06(6743)4211  
TEL:03(6206)8591  
TEL:078(821)1418

的確な危機管理に 世界最速のP波警報システム



**P 渡**

携帯型  
受信機



- P波警報**: P波検知後、最短0.1秒で警報を出力します。
- 容易に設置できる一体型**: 地震を感知する感震器と警報器が一体となっているので、設置も撤去も簡単にできます。ケーブルの引き回しは必要ありません。
- 長時間バッテリー稼働**: 内蔵バッテリーで約30時間の連続稼働が可能です。もちろん商用電源等でも稼働します。
- 携帯型受信機**: 本体からの警報を無線で受信し、パイプレーションとブザー音で、携帯者に知らせます。

被災地のレスキュー作業、復旧作業、工事現場等、屋外作業  
でお役に立ちます。

据え置き型としてもお使いいただくことができます。人が集まる劇場やイベント会場で、いち早く地震情報が把握できます。

●2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分 令和 6 年能登半島地震  
(M7.6)リアルタイム震度 RI の分布

●令和 6 年能登半島地震(M7.6)のリアルタイム震度(RI)  
と新しい指標“可能最大層変形角(PMDA)”他について



リアルタイム地震防災のパイオニア  
株式会社 システムアンドデータリサーチ  
<https://www.sdr.co.jp>

\*事業拡大につき人材募集中！





# Next Dimension

## 解析技術は一步先の次元へ

3次元非線形時刻歴応答解析プログラムTDAPⅢ、および3次元等価線形解析プログラムFDAPⅢにおいて、MPIによる大規模並列計算が可能な「TDAPⅢ Cluster Edition」、「FDAPⅢ Cluster Edition」を販売開始いたします。

### point 1

#### MPIを使った 大規模並列計算が可能に

MPI※による並列処理に対応。複数の計算機を用いて、大規模な3次元解析ができるようになりました。

※Message Passing Interface (並列コンピューティング利用のための標準化された規格)

### point 2

#### より大きなモデルを より速く計算可能に

これまで解くことができなかった大規模な3次元モデルの解析が可能となるだけでなく、計算時間も大幅に短縮できます。

### point 3

#### 既存の機能や入力データも そのまま利用可能

累計1,200ライセンス以上の導入実績のあるTDAPⅢ。既存のTDAPⅢ・FDAPⅢの機能※や入力データもそのまま利用できます。

※一部機能の制約あり

TDAP®ⅢおよびFDAP®Ⅲは、大成建設株式会社と(株)アーク情報システムが共同で開発した製品です。



株式会社 **アーク情報システム**

〒102-0076 東京都千代田区五番町4-2 東プレビル

TEL: 03-3234-9232

E-mail: [tdap@ark-info-sys.co.jp](mailto:tdap@ark-info-sys.co.jp)

受託解析、受託開発もご相談下さい

<https://www.ark-info-sys.co.jp/>

詳細はHPへ

アークTDAP3



TDAPⅢ  
FDAPⅢ





# 支える



# この国を

地盤情報を広い視野でとらえ、  
あらゆる分野で  
「創り」「支え」「守り」ます。高品質  
の地震・岩盤試験の提供により、  
インフラの整備、防災、維持管理で  
社会に貢献します。

## 巨大地震リスク に対する

## 適切な地盤評価と対策

基礎地盤コンサルタンツ株式会社は、最新の技術にもとづき、地震動の評価、液状化評価から対策の立案・設計施工管理・BCP・CSR支援までお客様の立場に立って実施いたします。

地質構造  
地盤の  
適切評価

地震動  
耐震解析  
液状化解析

対策コスト縮減  
・液状化対策  
・施設の補強

低コストで  
巨大地震リスク軽減  
=BCP(事業継続計画)  
=CSR(企業等の社会的責任)  
バックアップ

### 技術者募集

地盤・地質調査技術者  
土木設計技術者

若干名  
若干名

勤務地域など相談に応じる。経験・実績などの優遇有り。

募集担当：総務部

03-6861-8820

〒136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7 錦糸町プライムタワー12階

# Kisojiban

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 代表取締役社長 野村 英雄

<https://www.kiso.co.jp/>

本社 (03) 6861-8800 北海道支社 (011) 822-4171 東北支社 (022) 291-4191  
関東支社 (03) 5632-6800 中部支社 (052) 589-1051 関西支社 (06) 4861-7000  
中国支社 (082) 238-7227 九州支社 (092) 831-2511 海外事業部 (03) 6861-8885