

日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.51

Feb.2024

特集：関東大震災から100年を経て考える、
これからの地震工学・地震防災



<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51号 2024年2月)

Bulletin of JAEE (No.51 Feb.2024)

INDEX

巻頭言：

本特集号について／大野 卓志、横山 遼	1
---------------------------	---

特集：関東大震災から100年を経て考える、これからの地震工学・地震防災

震災と防災教育～これまでの歩みとこれからの課題～／佐藤 健	2
強震動観測データの利活用／森川 信之、岩城 麻子、藤原 広行	6
システムを活用した千葉県の地震・津波防災対策 ／吉岡 薫、五十嵐光嗣、潮崎 翔一、竹内 織洋、高橋 成実、大井 昌弘、浅尾 一巳	10
災害時の情報インフラの過去、現在、未来と課題／廣井 慧	14
共同住宅の震災デジタルツイン開発を目指して／梶原 浩一	18
柔構造を確実な技術とするために ～実大動的免震試験機 E-アイソレーション～／高橋 良和	22
長周期地震動と超高層建築物の地震防災／久田 嘉章	26
第16回日本地震工学シンポジウム特別セッション 事前Webアンケートからみる「NEXT関東大震災」の災害イメージ ／入江さやか、廣井 悠、東 貞成	30

学会ニュース：

第16回日本地震工学シンポジウムの開催報告 ／久田 嘉章、小檜山 雅之、永野 正行、松島 信一、阿部 慶太	36
関東大震災の史跡・遺跡をたずねて ／第16回日本地震工学シンポジウム運営委員会 行事・企画部会	42
淑徳与野高等学校での出前授業／加藤 一紀、井上 和真、近藤 伸也	46
「E-ディフェンス震動台実験見学会」報告 コンクリートブロック塀耐震性能の検証実験／田端 憲太郎	48

追悼文：

岩楯 敏広先生を偲んで／當麻 純一	50
-------------------------	----

お知らせ：

お知らせ	51
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 ／JAEE Newsletter 第13巻 第1号(通算第38号)が2024年4月下旬に発刊されます／問い合わせ先 ／ご寄附のお願い	

編集後記

本特集号について

大野 卓志

●高圧ガス保安協会/会誌編集委員会 委員

／横山 遼

●株式会社青島設計/会誌編集委員会 委員

関東大震災から100年を迎え、会誌49号では「関東大震災から100年－過去を振り返る－」と題し、関東大震災に焦点を当て、「日本地震工学会」という特色を活かして、理学・工学・情報学・史学等の多角的に過去を振り返り、首都圏を襲う将来の大地震に対して今の日本社会は立ち向かうことができるのか、そのような地震災害の防災・減災に対して我々地震工学関係者は十分に貢献できているのか、そして今後何ができるのかについて特集したところです。

関東大震災から100年が経過した現在においては、100年前より複雑・多様化した社会において災害リスクも複雑化しているとも言われていますが、地震工学・地震防災技術も飛躍的に進歩し、特に、電子計算機、情報システム、情報通信などの技術は100年前と比較すると、目覚ましく発達しています。

会誌51号では、関東大震災から100年を機に、新しい技術を用いた地震工学や地震防災として、震災と防災教育、強震観測データの利活用、津波予測システム、災害時の情報インフラ、震災デジタルツイン開発、新しい実験施設(E-Isolation)、長周期地震動と超高層建築物の地震防災、「NEXT関東大震災」の8稿を取り上げ、新しい技術や未来について考えるきっかけとしたいと思います。

東北大学の佐藤健先生には、防災教育の現状と課題について、関東大震災の発生から100年の時を隔てても共通する防災教育のコンセプトの一つである「郷土愛を育む」ということや防災教育の最新動向について解説頂き、今後の展望についてご執筆頂きました。

防災科学技術研究所の森川信之氏には、強震観測データの利活用について、日本におけるこれまでの強震観測データの利活用事例とその成果について、強震動予測及び地震ハザード評価の観点からご解説いただき、今後の展望についてご執筆頂きました。

千葉県の吉岡薫氏には、津波予測の現状について、千葉県の津波浸水予測システム(日本海溝海底地震津波観測網を用いた津波予測情報配信システム)、地震被害予測システム(震度計やK-NETの観測データを基に、千葉県全域の揺れを想定し、市町村や字単位ごとに被害を予測するシステム)を活用した取組をご紹介頂きました。

京都大学の廣井慧先生には、災害時の情報インフラの重要性と災害時に顕在化する問題について、情報インフラと利用者の観点からご執筆頂きました。

防災科学技術研究所の梶原浩一氏には、高度化かつ複雑化する社会を維持・継続していくための新たなアプローチとして、デジタル技術を中心に据え、実空間の多次元な情報により、地震被害とその影響を評価する共同住宅の震災デジタルツインの開発についてご紹介頂きました。

京都大学の高橋良和先生には、新しい実験施設である実大免震試験機(E-Isolation)について、関東大震災以降の耐震構造研究の進展を概観しながら、研究責任者として、開発の狙いと特徴をご執筆頂きました。

工学院大学の久田嘉章先生には、関東大震災当時には存在しなかった超高層建築物について、設計基準や長周期地震動、現在の防災対策という観点から、これまでの地震防災の経緯と今後の課題についてご紹介頂きました。

松本大学の入江さやか先生には、関東大震災に対するアンケートについて、改めて関東大震災を振り返るとともに将来発生するであろう「NEXT関東大震災」に焦点を当て、年齢や専門分野によって、「NEXT関東大震災」の被害像に違いがあることを可視化し、ご紹介頂きました。

関東大震災から100年の節目をきっかけに、現在とこれからの地震工学、地震防災について特集しました。本誌でご紹介したものは一部であり、皆様の活動の一つ一つが将来の地震工学を支える重要な柱であると同時に、複雑・多様化した現代においては、各々の活動の連携が重要であると思います。

本誌を編集中の令和6年1月1日に発生した令和6年能登半島地震で被災された皆さまに心からお見舞い申し上げます。



大野 卓志 (おおの たかし)

高圧ガス保安協会 保安技術部門、博士(工学)、専門分野：機械分野の耐震問題



横山 遼 (よこやま りょう)

株式会社青島設計 構造設計室、修士(工学)、専門分野：建築構造設計

震災と防災教育～これまでの歩みとこれからの課題～

佐藤 健

●東北大学災害科学国際研究所 教授

1. はじめに

大震災の経験と教訓は、学校教育に大きな影響を及ぼしてきた。本稿では、関東大震災、阪神・淡路大震災、東日本大震災の3つの大震災を通して、震災が学校における防災教育に与えた影響について概観する。

折しもこれまで3回開催された国連防災世界会議は、いずれも日本開催であり、3つの大震災と関連性が強い都市が開催地となってきた。第1回は1994（平成6）年の横浜市、第2回は2005（平成17）年の神戸市、そして、第3回は2015（平成27）年の仙台市である。

そこで、関東大震災については横浜市、阪神・淡路大震災については神戸市、東日本大震災については仙台市を取り上げ、主に防災教育副読本の内容等を通して、各々の防災教育のコンセプトの比較を試みる。

表1 横浜市教育研究会による答申¹⁾

一、 皇祖尊崇の念を一層深からしめること
二、 国家的観念を一層深からしめること
三、 人類相愛の思想を高潮すること
四、 立憲的法治国民としての組織的訓練に努めること
五、 我家族制の特徴を闡明し一家親和の実を挙げしめること
六、 一層質実剛健の精神を振作すること
七、 儉素力行の美風を涵養すること
八、 不屈堅忍の精神を強からしめること
九、 進取奮闘の気象を作興しめること
一〇、 軽挙盲動を慎み熟慮断行の美風を養成すること
一一、 責任感犠牲的精神の涵養をなすこと
一二、 正義の観念を強からしめること
一三、 公德を重んずるの念を高潮すること
一四、 公益を進むるの念を深からしめること
一五、 秩序を重んずるの習慣を養成すること
一六、 報恩感謝の念を洒養すること
一七、 愛市の念を深からしめること
一八、 科学尊重の念を昂めること
一九、 純真なる宗教的芸術的情操の陶冶をなすこと

2. 横浜市に見る関東大震災後の教育課題

関東大震災で甚大な被害を蒙った横浜市において、当時の横浜市長が横浜市教育研究会に対して、「震災後の精神教育上特に留意すべき事項」を諮問した。その答申が表1に示した内容である¹⁾。

諮問が精神教育となっていることから、答申の内容も「道徳」に関する内容でそのほとんどが占められている。現代においても、身近な共助や公助を含む助

け合いによって災害を乗り越えることが重要視されてはいるものの、表1の内容は、関東大震災発生当時の時代背景を色濃く反映しているものと考えられる。

3. 神戸市に見る阪神・淡路大震災後の教育課題

神戸市の防災教育副読本「幸せ運ぼう」の中学校用²⁾について、目次構成を表2に示す。ただし、引用した改訂版が東日本大震災の発生後のものだったため、東日本大震災に関連した内容を除いて示すこととした。

表2 幸せ運ぼうー中学校用ーの構成²⁾

こんなことがあった

- 過去が光って見えるとき（震災の被害の様子）
- 金木犀と共に（家族や友人、人との絆）
- わたしたちの町、神戸（震災の被害の様子）
- 語りかける目（かけがえのない命）
- 生きる（地域を愛する心、神戸を愛する心）

命を守る

- 神戸で地震は起こる（災害発生のメカニズム）
- 神戸を襲った三大水害（神戸の災害の歴史）
- 人は必ず忘れる（神戸の災害の歴史）
- 災害列島（さまざまな自然災害）
- 自然のサインを見逃すな（災害発生のメカニズム）
- あっ火事だ！（防災・減災への取組）
- 万が一に備える（みんなにできる防災）
- 見直そう住まいの安全（みんなにできる防災）
- いざというときの応急処置法（体を守る）
- 災害時の食に備えよう（生き抜く知恵）

共に生きる

- 1つの力（生きることへの希望とたくましさ）
- 心に寄り添う（感謝の心、思いやりの心）
- 善良な魂をつなげましょう（家族や友人、ひととの絆）
- ある婦人との出会い（ボランティアの心）
- 慰霊と復興のモニュメント 1.17希望の灯り（かけがえのない命）
- 復興にかける思い（経済への影響と復興の歩み）
- ボランティアの輪（ボランティアの心）
- 「しあわせ運べるように」そして「あすという日が」（感謝の心、思いやりの心）

大まかな全体構成としては、震災の実態、自然のハザード理解、防災に関する知識と技能、ボランティアを含む助け合いの精神、そして復興により構成されている。道徳的な「感謝の心」や「思いやりの心」といった内容は、約70年の時を隔てても横浜市教育研究会による答申との共通点である。また、「郷土愛を育む」

内容もまた、神戸市の防災教育副読本と横浜市教育研究会による答申とで共通性がみられ、本稿での主要な着眼点ともなっている。

また、兵庫県教育委員会は、阪神・淡路大震災の発生から10年間の防災教育について総括している。特に、子どもたちに自らの生活と災害とを結びつけて考えさせることをねらいとして、地域の素材を生かした教材開発に取り組んできた中で、残された課題を整理している。その抜粋を表3に示す³⁾。教職員がローカルな地域素材を収集し、教材化することは容易なことではなく、学校教育を支援する多様なステークホルダーとの協働が極めて重要であることを示唆している。

災害研究や防災実践に関わる大学人や企業人であっても、居住地においては高度かつ多様な専門性や強みを持った地域住民の一人であることから、地域住民または保護者の立場で地元の学校における防災教育の推進に上手に関わる機会が増えることを期待したい。

表3 地域素材を生かした防災教育の課題³⁾

<p>教材化の難しさ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 地域内で課題に適した素材が見つげにくい(小学校)。 ● 地域にある様々な素材について情報が収集されていない(中学校)。 <p>教員の意識等に関する課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 地域素材を教材化するにあたり、専門的知識が不足している(小学校) <p>地域の理解・協力に関する課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 体験的な学習を行う環境づくりを地域と協力してどのように進めるか(小学校)。

4. 仙台市に見る東日本大震災後の教育課題

仙台市の防災教育副読本「3.11から未来へ」の中学校用について、目次構成を表4に示す⁴⁾。大まかな全体構成としては、震災の実態、復興、自然のハザード理解、防災に関する知識と技能、ボランティアを含む助け合いの精神、地域社会への貢献から構成されている。阪神・淡路大震災発生からの時の隔たりが約20年ということからも、神戸市の防災副読本の内容と大きな相違は感じない。

仙台市の場合でも前述した横浜市や神戸市の場合と同様に、道徳的な「感謝の心」や「思いやりの心」といった内容が確実に入っている。また、その掲載割合は、自然のハザード理解などと比べて少なくなく、むしろ多い状況がある。また、副読本の章や節のタイトルには直接、表現されていないものの、「郷土愛を育む」内容もまた含まれており、神戸市の防災教育副読本や横浜市教育研究会による答申との共通性と言える。

表4 3.11から未来へ(中学校)⁴⁾

<p>第1章 東日本大震災の記憶</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 東北地方太平洋沖地震発生 ● 復興に駆ける ● 一步一步 力強く 語り部として <p>第2章 復興への歩み</p> <ul style="list-style-type: none"> ● とともに育つ ● 約束 ● 勇気と希望を持って ● 助け合うってすばらしい ● 花と緑で人々に笑顔を ● 絆を力に ● 仙台市の復興状況を知ろう <p>第3章 地震のメカニズム</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 世界でも自然災害のリスクが高い日本 ● 3.11の地震を科学の目でとらえよう ● 地震に備えよう ● 仙台平野 災害の歴史を学ぼう ● 古典に残る災害を読んでみよう <p>第4章 自助につながる判断・行動</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 一人一人が災害に備える ● 自分を守る ● 様々な自然災害に備える ● 家庭でできる災害への備え ● 災害心理について学ぼう ● 知っておきたい心肺蘇生の方法とAEDの使用 ● 心の健康を守るために <p>第5章 共助の一翼を担う</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 心を満たす食べ物を届ける ● 地域の一員として ● 1.17から3.11へ ● 心に寄り添う ● がんばれ日本! 世界は日本と共にある <p>第6章 資料</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 防災知識をチェックしよう ● 学びの窓・東日本大震災の記録 ● 仙台の自然災害年表・復興年表

5. 学校安全の推進に関する計画

東日本大震災の発生後の平成24年4月に、最初の「学校安全の推進に関する計画」が閣議決定され、この先、概ね5年間にわたる学校安全の推進に関する施策の基本的方向と具体的な方策が示された。本稿では、推進方策の一つである「家庭、地域、関係機関等との連携・協働による学校安全の推進」に特に着目する。

平成29年3月に閣議決定された「第2次学校安全の推進に関する計画」では、「近年、学校が抱える課題が複雑化・多様化しているが、学校や教職員がそれら全てを担うことは困難であることから、家庭や地域と連携・協働した教育活動の推進が不可欠である」と課題と方向性が示されている。

また、令和4年3月に閣議決定された最新の「第3次学校安全の推進に関する計画」においても、「家庭や

地域との連携・協働」は、学校の防災管理、防災教育のいずれにおいても重要性が増す一方である⁵⁾。第3次の計画を通して、たとえ学校教育であっても、防災教育は学校や教職員だけが担う教育活動ではもはやなくなってきていることが、表5に示すような文部科学省が示す具体的な方策からも確認することができる。

学校を取り巻く多様なステークホルダーが「地域の教育力」を発揮すること（支援力）と、それらを上手に活用する教職員の受援力の両方が、家庭や地域との連携・協働に基づいた防災教育の促進に必要となる。

表5 第3次学校安全の推進に関する計画の抜粋⁶⁾

地域の災害リスクを踏まえた実践的な防災教育の充実 防災教育は、単に生命を守る技術の教育として狭く捉えるのではなく、どのような児童生徒等の資質・能力を育みたいのかという視点から「防災を通じた教育」と広く捉えることも必要である。（中略）児童生徒等の主体性や社会性、郷土愛や地域を担う意識を育む効果や、地域と学校が連携して防災教育に取り組むことを通じて大人が心を動かされ、地域の防災力を高める効果も期待される。 学校における教育手法の改善 コミュニティ・スクール（学校運営協議会制度）や地域学校協働活動などの学校と地域の連携・協働の仕組みの活用、民間企業・団体等が提供する教育プログラムの活用など、様々な教育資源を活用することが重要である。

6. コミュニティ・スクールと学校防災

家庭や地域との連携・協働に基づいた防災教育の取組を持続可能とすることもまた重要な課題となる。そのためには、何らかのフレームワークの存在が有効である。その一つが、コミュニティ・スクール（学校運営協議会制度）の活用である。ここでは、防災教育として単に何を行うかということだけではなく、どのように行うかという視点からの議論となる。前述した学校安全の推進に関する計画においても、具体的なキーワードとして、コミュニティ・スクールの活用が明記されている。

ここで、コミュニティ・スクールとは、学校と地域住民等が力を合わせて学校の運営に取り組むことが可能となる「地域とともにある学校」への転換を図るための有効な仕組みとして、文部科学省が推進している。コミュニティ・スクールでは、学校運営に地域の声を積極的に生かし、地域と一体となって特色ある学校づくりを進めていくことができる。法律（地方教育行政の組織及び運営に関する法律第47条）に基づいて教育委員会が学校に設置する学校運営協議会には、主な役割として次の3つがあり、協議会メンバーは強い権限を持つ。

- 校長が作成する学校運営の基本方針を承認する
- 学校運営に関する意見を教育委員会又は校長に述べることができる
- 教職員の任用に関して、教育委員会規則に定める事項について、教育委員会に意見を述べることができる

なお、コミュニティ・スクールは、防災推進のためだけに導入されるわけではないものの、例えば、横浜市立北綱島小学校の事例のように、学校経営計画の重点取組分野として「防災教育」が位置付くことにより、校長や積極的な教職員が異動しても学校運営協議会の総意として重点取組分野から外さない限り、取組は継続されることになる。事実、横浜市立北綱島小学校では、校長が3代変わった10年間で、その取組は減退せずにもむしろ発展を遂げていることが確認されている⁶⁾。

7. 防災教育チャレンジプランの最新動向

防災教育チャレンジプランは、防災教育チャレンジプラン実行委員会、内閣府（防災担当）、防災科学技術研究所が主催している。全国の地域や学校で防災教育を推進するためのプランを募集し、そのプランの準備・実践に当たっては発生する経費への支援や、実現に向けた防災教育チャレンジプランアドバイザーによるアドバイスなどの支援を行っている。

阪神・淡路大震災発生後の2004年に開始して以来、多くの実践プランが、新たに防災教育を始める学校・団体等にとっては良いモデルとなり、全国の防災教育の教材や手法開発に大きく貢献してきている。2024年度からは、「新・防災教育チャレンジプラン」として再スタートした。

また、前述した「第3次学校安全の推進に関する計画」も踏まえ、2023年9月に横浜国立大学で開催された「ぼうさいこくたい2023」において、防災教育チャレンジプラン実行委員会が企画したセッションテーマは、「学校・地域連携を高める防災教育～コミュニティ・スクールを基盤とした展開」であった。学校の防災教育にフォーカスし、レジリエンスを高める防災教育の在り方について意見交換を行った。文部科学省だけでなく、内閣府（防災）もまた、コミュニティ・スクールに期待と関心を寄せていることがわかる。コミュニティ・スクールの取組は、学校側から見れば、地域とともにある学校づくりの取組となるが、地域側から見れば、学校とともにある地域づくりの取組となり、本質的な連携や協働の取組は全く同じことである。

8. おわりに

関東大震災の発生から100年の時を隔てても共通する防災教育のコンセプトの一つとして、「郷土愛を育む」ことについて着目した。郷土愛を育むためには、ローカルな地域に根差した防災教育が有効であり、その実践にあたっては、「地域の教育力」を発揮することが成否を分けることについても述べた。地域に根差した防災教育が豊かな教育実践であるほど、そこからの学びは、道徳的なことだけでなく、自然と地域社会との関係性、すなわち災害リスクの理解につながるような学びの広がりを持つことができる。このことに関連して、2人の有識者による東日本大震災発生後の防災教育に対する考え方を紹介する。

一人目は、南哲（神戸大学名誉教授）であり、「防災教育を考える中で、防災教育は郷土を理解し、郷土を愛する教育であると実感した。（中略）これからの防災教育は、先ず自分の住んでいる所の自然災害の危険を十分に理解し、対策を講じる事によって、安全安心を確保する。その上で、自然環境のより良き活用を考える。災害多発列島に住む資格が問われている。（後略）」と言及している⁷⁾。

二人目は、藤岡達也（滋賀大学教授）であり、「地域の災害発生の危険性を学ぶことは、自然と地域とのかかわりを学ぶことにもつながる。ハザードマップなどで、地域の危険性を考えるのは重要なことではあるが、地域を災害の可能性があるという捉え方だけで見るのは避けたい。そもそも自然には二面性があり、地域の自然環境は災害だけでなく、さまざまな恩恵を与えてきた。むしろ日常は、この恩恵の部分の方が大きい。古くから、地域の人たちは自然を活用し、また自然と闘ってきている。（中略）このような地域の再発見につながる活動を通じて、地域への愛着や誇りを育成することができる。（後略）」と述べている⁸⁾。

普遍性のある災害や防災の一般論を、現在、住んでいるローカルな地域に如何に適用できるかが問われる中で、学校における地域に根差した防災教育（Place-Based Education for Disaster Risk Reduction）の実践と展開は、これからの新たなトライアルであり、事前のリスク低減のための学校教育への国民参加を期待したい。

参考文献

- 1) 岸本 肇：学校と教育から見た2つの震災－関東大震災と阪神大震災の比較考察－、東京未来大学研究紀要、3巻、pp. 1-8、2010.
- 2) 神戸市教育委員会：幸せ運ぼう 中学校用、2013.
- 3) 兵庫県教育委員会：震災を越えて－教育の創造的復興10年と明日への歩み－、2005.
<https://www2.hyogo-c.ed.jp/hpe/uploads/sites/3/2023/03/2-2shou-3setu-1.pdf> (参照2024-01-05)
- 4) 仙台市教育委員会：令和4年度仙台市防災教育副読本 3.11から未来へ 中学校、2022.
- 5) 文部科学省：第3次学校安全の推進に関する計画について、2022.
https://www.mext.go.jp/content/20220325_mxt_kyousei02_000021515_01.pdf (参照2024-01-05)
- 6) 佐藤 健、桜井愛子、小田隆史ほか：コミュニティ・スクールにおける学校防災の推進モデル～横浜市立北綱島小学校の事例～、自然災害科学、Vol.40、No.2、pp. 175-190、2021.
- 7) 南哲：防災教育は日本の緊急課題－東日本大震災を機に防災国家建設を－、教育展望、第57巻、第8号、pp.45-49、2011.
- 8) 藤岡達也：地域・家庭と協働した防災教育・防災訓練にどう取り組むか、月間教職研修、2011年11月号、pp.28-31、2011.



佐藤 健（さとう たけし）

1989年3月、東北大学大学院工学研究科建築学専攻修士課程修了、(株)フジタ、宮城工業高等専門学校建築学科助手、東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター講師、准教授を経て2012年4月より現職、博士(工学)、専門分野：学校防災、地域防災

強震動観測データの利活用

森川 信之

●防災科学技術研究所 主任研究員

／岩城 麻子

●防災科学技術研究所 主任研究員

／藤原 広行

●防災科学技術研究所 部門長

1. はじめに

日本における地震計による地震による揺れの観測は、後述するように1923年関東地震の変位計による波形記録が得られているように100年以上にわたる歴史がある。また、加速度強震計による観測が開始されてからも70年以上が経過し、多くの強震動観測記録が蓄積されてきた。

本稿では、日本におけるこれまでの強震動観測データの利活用事例とその成果を概観するとともに、今後のさらなる利活用の促進に向けて何が必要であるかについて著者らの主観も含めて述べたい。なお、本稿では著者らが専門とする強震動予測、地震ハザード評価の分野にかかわる内容が中心となっており、強震動観測データの利活用について網羅できていないことをご了承ください。

2. 日本の強震観測

地震による揺れを機械的に記録する地震計は、19世紀末に開発され、最初の地震計は東京大学に設置された。東京大学に設置された地震計には、振り切れながらも1923年関東地震の記録が残されており、復元が試みられている^{1),2)}。東京での記録は、震源断層の直上に近く震源断層までの距離も20km~30km程度しかないと考えられ、マグニチュード8クラスの海溝型巨大地震による記録としては貴重なものである。

日本初の本格的な加速度強震計であるSMAC型強震計による観測は1953年に開始され、日本全国に強震計の設置が進められた。1995年兵庫県南部地震を契機として、防災科学技術研究所のK-NETやKiK-net、気象庁および地方公共団体(自治体)の震度計の設置が進められ、日本全国を高密度に網羅する強震観測網が整備されたことにより、観測点数ならびに取得される記録数が飛躍的に増加した。その結果、2003年十勝沖地震では世界で初めて1000以上の観測点で強震動記録が得られ、2011年東北地方太平洋沖地震は、1000以上の多数の強震動記録が得られた世界最大規模の地震である。また、2016年熊本地震では、地表に現れた断層から2km程度以内の断層ごく近傍での記録も得られている。気象庁および地方公共団体の震度計、防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの観測点数は、2023

年末現在でそれぞれ671点および2903点³⁾、1039点および692点⁴⁾となっており、これらだけで5000点を超えている。さらには50年以上にわたって観測を継続している港湾空港技術研究所や国土技術政策総合研究所などの公的な機関や電力、ガス、鉄道などライフライン関連をはじめとして、民間企業による観測も多く行われている。このように、現在の日本の強震動記録は量的にも質的にも世界最大級であると言える。1950年代以後の強震観測の歴史については工藤⁵⁾や功刀ほか⁶⁾に詳しいので、そちらを参照願いたい。

3. 強震動観測データ利活用の事例

震源において発生した地震動が地球内部を通り、観測点まで伝播して強震動観測データとして記録される。すなわち強震動観測データには震源断層における破壊過程や伝播してきた地下構造に関する情報が含まれている。多くの地震に対して強震動観測データを用いた震源インバージョン解析が実施されるようになったことで、震源断層における複雑な破壊過程が高解像度で推定されることが可能となった。これにより、震源破壊過程に関する理解が進み、断層すべりの物理的モデルや地震規模(モーメントマグニチュード)と震源断層面積との経験的な関係などが構築されるようになった。また、地下構造、特に地震波速度構造と地震動の増幅(あるいは減衰)特性の把握とともに地下構造モデルそのものの構築が進んだ。これらの地震に関する科学的な知見の蓄積の結果、強震動予測のための震源断層のモデル化手法、地下構造のモデル化の手法が、強震動計算と計算結果の妥当性確認の手法とあわせて「レシピ」としてまとめられるに至っている⁷⁾。また、最大加速度やスペクトルの周期(あるいは周波数)ポイントにおける振幅などの「強震動指標」については、強震動観測データから直接求められる地震動予測式があり、強震動予測において経験的手法として用いられる。近年における観測データの大幅な増加に伴い、回帰式の複雑化だけでなく、機械学習などによって式の形を定めずに求められるモデルも構築されるようになってきている。

2003年十勝沖地震において震源から200km以上離れた苫小牧地域において石油タンク火災の被害が発生し

たことにより、その原因となった「長周期地震動」に関する研究が推進された。また、2016年熊本地震において、震源断層のごく近傍で得られた強震動観測データにより、現行の強震動予測手法において震源断層ごく近傍への適用に対しての新たな課題も明らかとなった⁸⁾。現在、改良に向けた検討が進められているが、強震動予測手法や地下構造モデルの検証や改良には強震動観測データは欠かせない。

日本の耐震設計基準は、1923年関東地震を受けて1924年に市街地建築物法改正で世界に先駆けて盛り込まれたのが最初とされ、その後、1946年南海地震、1948年福井地震の経験を踏まえて1950年に建築基準法が制定された。さらに1964年新潟地震、1968年十勝沖地震を受けて1971年に、1978年宮城県沖地震を受けて1981年にそれぞれ改正された。建築基準法の制定・改正にはこれらの地震における強震動観測データが貢献している。また、高層建築物の耐震設計においては1968年十勝沖地震における港湾空港技術研究所の八戸港観測点における強震動観測記録が動的解析用地震動として現在でも活用されている。地震防災・減災を進めるためには、地震によってどのような揺れが生じるかだけでなく、その揺れによってどのような被害が生じ得るのかまで知る必要があるが、実際に被害が生じた強震動観測データはほとんど得られていない。そのため、防災科学技術研究所のE-ディフェンスをはじめとした振動台実験が建築構造物の破壊メカニズムの解明や耐震性能評価を目的として行われているが、その入力地震動として、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の観測記録などが用いられている。このとき、実際の観測記録の振幅を何倍あるいは何分の1かに変えて入力することも行われている。

また、2004年新潟県中越地震における川口町（新潟県震度計）など、実際に震度7が観測された強震動観測データは地震動体験シミュレーターで用いられ、地震に対する防災意識の向上に貢献している。

情報・通信技術が急速に発達した近年、地震発生後数分から数時間後で強震動観測データが収集できるシステムも構築されるようになってきた。それにより、発震直後に地震の揺れによる建物被害の推定も行われるようになってきており、保険分野などの企業等において地震被害とその影響の早期把握、対応方針の検討などに活用されている。このような被害推定には面的な地震動分布の推定が必要となるが、1995年の阪神・淡路大震災以降に国及び地方公共団体によって設置、整備が進められた震度情報ネットワークのような高密度・多数の観測点による強震動観測データと地盤

モデルに基づく地震動の揺れやすさデータが全国的に整備されたことがこのことを可能としている。このような事例は、強震動観測データの分析によって将来発生する地震に対する事前の対策につなげるための活用だけでなく、地震が発生した直後の対応にも強震動観測データ活用の幅が広がってきていることを表している。

4. さらなる利活用の促進に向けて

上述のように、強震動観測データは様々な場面での利活用が行われており、公開されている波形データそのものだけでなく、波形より算出される計測震度、最大加速度やスペクトルなどの地震動強さ指標による活用事例も少なくない。また、公開されている強震動観測データのほとんどは、気象庁による震源情報（地震発生日時、震源位置、マグニチュード）と観測点位置情報については波形データのファイル内に記載されているが、活用する上ではそれ以外の震源情報や観測点情報が必要とされることが少なくない。

震源情報としては、世界で共通に用いられるモーメントマグニチュード (Mw) が挙げられる。Global CMTプロジェクトにおいて、全世界で発生する1976年以後のおおむねMw5.5以上の地震についてのカタログが整備、追加されており、それに基づいてISC-GEMは1894年から2019年までのカタログを整備している。日本でも気象庁が1991年以後のおおむねMw4.5以上の地震について、防災科学技術研究所のF-netが1997年以後のおおむねMw3（海域、島しょ地域はMw4）以上の地震についてのカタログが整備され随時追加されている。また、震源から観測点までの距離（断層最短距離）を点震源として仮定して表現することが適切ではない震源近傍の記録が得られている地震や巨大地震における震源断層パラメータ（断層長さ、幅、走向、傾斜など）も特に強震動予測において必要とされる。日本列島周辺で発生する地震は、地殻内地震と海溝型地震の大きく二種類に分類される。地殻内地震は浅い内陸を震源とすることが多いのに対して、海溝型地震は太平洋側海域を震源とすることが多く、伝播経路特性が異なる。海溝型地震についてはさらに沈み込む海洋プレートと陸側プレートの境界で発生するプレート間地震と沈み込むプレート内部で発生するプレート内地震に分けられるが、プレート内地震は同規模のプレート間地震と比べて、観測される地震動が主に周期1秒以下の短周期域において強いことが知られている。そのため、これらの地震の種類分類は、強震動予測モデルの改良や適用において必要となる。

観測点情報として、地震計の特性と強震計の設置場所（地表か、地中か、建物内か、建物内でも何階か、など）の情報は強震動観測データの分析において必要となる。また、観測期間（開始日、終了日）は特定の地震について記録の有無を確認できるなどデータ検索に有用な情報である。これらについては、提供される波形データには含まれていなくても提供機関で別途公開されていることがほとんどである。地震動は観測点周辺の地盤構造により大きな影響を受けるため、ボーリング調査が実施され、土質、P波およびS波速度や密度などの情報が直接得られている観測点であれば、それらの情報は地盤構造と地震動の関係を理解するための貴重な情報となる。一方で、近年の観測記録の充実によって、日本全国の地盤構造モデルやシームレス地質図が作成されており、ボーリング調査等が実施されていない観測点であってもこれらのモデルからVs30（表層30mの平均S波速度）や地震基盤面までの深さなどの地下構造に関連する指標値や地質を知ることができる。また、観測点における微動観測データや強震動観測データから求められる観測点の揺れやすさに関する情報は、地下構造モデルの改良や地震発生直後の面的な地震動分布推定の高精度化に有用である。

時刻歴波形データは情報量が多く、データ量（ファイルサイズ）が大きくなることもあり、利活用においては強震動指標が活用されることも多い。日本では気象庁による震度が一般的に用いられるほか、工学的には最大加速度や最大速度が用いられてきた。一方で、構造物の被害は単にこれらの指標だけでなく地震動の周期特性と関係していることが明らかとなってきている。日本では減衰定数5%の加速度応答スペクトルが用いられることが多いが、長大な構造物に対しては減衰定数がより小さい1%などの応答スペクトルが必要とされることがある。また、応答ではなく地震動そのものの周期特性を表すフーリエスペクトルが用いられることもある。水平動の最大振幅については長い間、二成分の大きい方や幾何平均が用いられることが多くあったが、地震計の設置方位に依存しないベクトル合成値（RotD100）やRotD50のような指標が考慮されるようになってきていることに加え、上下動を考慮する重要性も認識されつつある。

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域である日本海溝沿いだけでなく、南海トラフ沿いや千島海溝沿いのマグニチュード9クラスの地震、内陸の活断層における中央構造線断層帯や糸魚川－静岡構造線断層帯全体が同時に活動するマグニチュード8クラスの地震が発生する可能性が科学的にもあり得ることが示され

ている。日本国内では世界的に見れば豊富な強震動観測データをもとに、多くの地震動予測式が提案されてきたが、巨大地震や震源断層ごく近傍の予測結果には大きなばらつきが見られる。これまで日本では、公開データに直接含まれていない付加的な震源や観測点に関する情報の関連付けは個々の利用者で行い、それぞれのデータベースが構築されてきた。その結果、同一地震、同一観測点の記録であっても、データベースによって異なるモーメントマグニチュードや断層最短距離が採用されている。極端な例であるが、2003年十勝沖地震のMwは、防災科学技術研究所のF-netによるモーメントテンソル解析結果で7.9と推定されているのに対して、世界的に広く使われているGlobal CMTでは8.3と推定されており、0.4もの違いが生じている。巨大地震や震源断層ごく近傍における地震動予測式間に見られる大きなばらつきは、強震動観測データの数が十分でないというだけでなく、データベースの違いによるところも大きく、共通のデータベースに基づく予測式の構築が必要とされる。また、今後蓄積され続ける膨大な量の様々な機関から提供される強震動観測データを利用者ごとに個別にデータベース化していくことは非効率な作業であり、少子高齢化が進む日本において共通の強震動データベースを構築することが必須であり、あわせて観測点に関する情報も充実させることが利活用の幅を広げる上で重要であると考えられる。比較的規模の小さい地震や震源から遠い観測点の記録であっても伝播経路に関する情報は含まれており、これらの地震動が小さい観測記録を活用することにより、観測点の揺れやすさや地下構造モデルの高度化につながることを期待される。世界の地震の10%以上が発生している日本における強震動観測データはすでに海外でも多く利用されているが、このような共有化された強震動データベースは、日本国内だけでなく世界的にもさらに活用されることが期待できる。

戦後の高度経済成長により超高層ビルなどの長大な構造物や新しい埋め立て地における宅地開発などが進められてきたが、巨大地震においてこれらがどのようなのかを事前に予測するには、現状では実際に得られている記録が少ないこともあり不確実なことが多い。高密度な強震観測網によって得られた観測データから、2016年熊本地震など最近の地震においても震源断層ごく近傍の強震動に関する新たな知見が得られている。地震防災、減災を進めるためには強震動予測における不確実さを低減していくことが必要であるが、そのためには、予測モデルの改良、検証するためのデータが欠かせない。繰り返し発生するとされる巨

大地震の間隔は、短くても海溝型プレート間地震で数100年、活断層では数1000年とされる、次の地震がどこで発生するかを予測することができない中で今後発生する大地震による記録を確実に得るためには、強震動観測の継続は必要不可欠である。

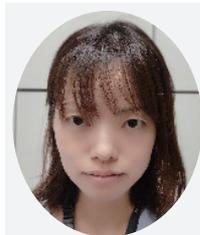
参考文献

- 1) 横田治彦、片岡俊一、田中貞二、吉沢静代：1923年関東地震のやや長周期地震動 今村式2倍強震計による推定、日本建築学会構造系論文報告集、No. 401、pp. 35-45、1989.
- 2) 翠川三郎、三浦弘之、山田真：ユーイング円盤記録式強震計による1923年関東地震の記象の解析 その2 地震計の特性の検討に基づく地道の推定、日本地震工学会論文集、Vol. 22、No. 1、pp. 16-35、2022.
- 3) 気象庁：震度観測点、<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/intens-st/> (参照2024-01-12).
- 4) 防災科学技術研究所：防災科研K-NET, KiK-net、https://doi.org/10.17598/NIED_0004.
- 5) 工藤一嘉：強震観測—現状と展望—、地震2、Vol. 47、pp. 225-237.
- 6) 功刀卓・青井真・藤原広行：強震観測—歴史と展望—、地震2、Vol. 61、pp. S19-S34、2009.
- 7) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）、2020、https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yoso_kuchizu/recipe.pdf (参照2024-01-12).
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会：2016年熊本地震（MJ7.3）の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について（中間報告）、2022、<https://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/pdf/20220314kumamoto.pdf> (参照2024-01-12).



森川 信之 (もりかわ のぶゆき)

2001年北海道大学大学院修了、防災科学技術研究所研究員を経て現職、博士（理学）、専門分野：強震動予測、地震ハザード評価。



岩城 麻子 (いわき あさこ)

2011年京都大学大学院修了、防災科学技術研究所研究員を経て現職、博士（理学）、専門分野：強震動予測、地震ハザード評価。



藤原 広行 (ふじわら ひろゆき)

1989年京都大学大学院理学研究科中退、博士（理学）。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。

システムを活用した千葉県の地震・津波防災対策

吉岡 薫 / 五十嵐光嗣 / 潮崎 翔一 / 竹内 織洋

●千葉県 副主査 ●千葉県 副主査 ●千葉県 副主査 ●千葉県 技師

高橋 成実 / 大井 昌弘 / 浅尾 一巳

●防災科学技術研究所 上席研究員 ●防災科学技術研究所 主任研究員 ●防災科学技術研究所 契約研究員

1. はじめに

東に日本海溝、南に相模トラフが位置する千葉県は過去幾度となく大きな地震や津波による被害に見舞われてきた。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、本県の成田市と印西市において最大震度6弱を記録し、東京湾沿岸の埋立地等で液状化による被害が発生した。さらに、同地震に伴い発生した津波により旭市で死者14名（関連死を含む）、行方不明者2名という人的被害が出るなど、1923年の関東大震災以降で最も甚大な被害であった。

東北地方太平洋沖地震の震源域の南側（千葉県銚子沖から房総半島南東沖の日本海溝沿い）では、破壊が及んでいないことから、千葉県房総半島沖の範囲を震源とする地震・津波の発生が懸念されている。

そのため、本県では、県や市町村における津波に対する災害対応の迅速化を目的に、津波発生直後に浸水域や浸水深等の津波に関する詳細な情報を予測する津波浸水予測システムを2018年に構築した。津波の予測情報は、県の防災担当者に配信するとともに、気象業務法に基づく気象庁長官の許可を取得し、24時間体制で県内4市町（勝浦市、鴨川市、いすみ市、一宮町）への配信を行っている（令和4年6月28日付許可第229号）。

本報告では、千葉県津波浸水予測システム等の各種システムを活用した取組を紹介する。

2. S-netを用いた千葉県津波浸水予測システム

2.1 S-netについて

東北地方太平洋沖地震後、(国研)防災科学技術研究所では津波被害の軽減に資するため、津波即時予測と緊急地震速報の高度化を目的に、北海道沖から房総沖までの日本海溝沿いに地震計と水圧計からなる「日本海溝海底地震津波観測網（通称S-net）」を構築した。S-netは、光ケーブルを海底に敷設して観測点を数珠つなぎにするインライン式のシステムであり、これを東日本太平洋沖の約25万平方kmの海底に150の観測点を配置したものである^{1),2),3)}。

2.2 千葉県津波浸水予測システムの構築

2.2.1 システムの概要

千葉県津波浸水予測システムは、S-netの全150地点

のうち宮城県沖から千葉県房総半島沖の範囲にある計62地点の地震・津波データを使用している。

津波の予測手法は、Baba et al. (2014)⁴⁾の手法、及び同手法を高度化させたTakahashi et al. (2017)⁵⁾の手法に準拠したものであり、S-netの観測値と後述するデータベースを照らし合わせ、①津波高の20cm超過時刻（分単位）、②最大津波高（1cm単位）、③津波浸水域、④津波浸水深（1cm単位）を予測情報として配信するシステムである（図1）。なお、利用者への予測情報の配信は、誤報を防ぐため、①気象庁が本県沿岸への津波警報または大津波警報を発表した場合、②それらを発表する要因となった地震の震源位置の確認の二つを配信条件としている。

南海トラフ地震による被害の発生が懸念されている和歌山県や三重県では、南海トラフ周辺の海底に展開された地震・津波観測監視システム（DONET）を用いて、本県と同様のシステムを運用している^{例えば、6)}。

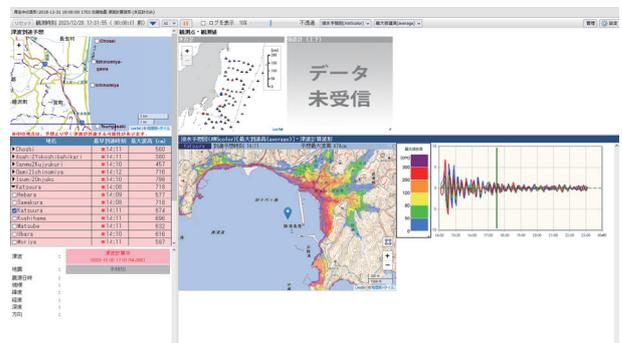


図1 津波浸水予測システム（津波モニター）

2.2.2 システムのデータベース構築

本県のシステムに用いるデータベース構築のため、岩手県沖から千葉県南東沖の日本海溝沿いと相模トラフ沿いの範囲に、表1で示す条件で2614ケースの断層モデルを設定し、シミュレーションを実施した。また、津波評価を行う地点として、人口が多い地区や重要施設（学校や病院等）前面の水深5m付近に、1市町村あたり複数の沿岸評価点を設定した。

津波シミュレーションは、Baba et al. (2014, 2015, 2016)^{7),8),9)}による津波計算コードJAGURSを用い、主に表2に示す計算条件を与えている。このシミュレーションにより、システムのデータベースとして、断層

モデルごとのS-net各観測点と沿岸評価点の津波波形、浸水マップ等を作成している。

表1 対象断層の設定条件

項目	設定値
Mw	7.6、7.9、8.2、8.5
深さ	5km（日本海溝軸外側：8km）、20km
傾斜	5°、15°、25°（日本海溝軸外側：45°一律）
走向	日本海溝または相模トラフに沿う方向

表2 津波シミュレーションの主な計算条件

項目	主な計算条件
計算時間長	地震発生から発生後9時間まで
計算間隔	0.05秒
地殻変動	断層モデルから Okada(1992) ¹⁰⁾ の手法により地殻変位量を算出
潮位条件	T.P.+0.00m
粗度係数	0.025
構造物等	揺れによる構造物破壊を考慮し、施設無し条件。また、河川の流量は見込まない。

2.2.3 S-net観測データの特性を踏まえた津波予測

S-net観測データは、設置深度に応じて異なるノイズレベルが含まれている。また、一部の観測点データは、潮汐以外の水圧変動や、地震発生時に見られる自然現象では説明が困難な水圧変動が含まれることが知られている（例えば、気象庁（2017）¹¹⁾）。本県のシステムで津波予測を行うためには、これらの特性とその影響を把握した上で、適切に予測ができるように対策を行う必要がある。

そのため、本県のシステムでは、津波が発生していない期間のS-net観測データとシステムによる処理の動きから、S-net観測データの特性について、①短周期のノイズ、②数秒から数分のノイズ、③数10分から数日のノイズ等、いくつかのグループに分類した。その上で、これらノイズを抑える処理や閾値を設定することにより、システムが誤って津波予測を行わないような対策を行っている。また、単独で混入するノイズ対策も導入しており、県内の潮位データと比較し、予測情報との整合性を確認する体制も構築している。

2.3 配信システムのクラウド化・アプリの作成

本県で開発した津波浸水予測システムは、当初、県と市町村を専用線で結ぶ県の防災情報システムネットワークに接続された限られた端末でのみ予測情報の閲

覧をできるようにしていた。しかし、市町村との図上訓練での検証により、地震発生直後、県や市町村の防災部局は休みなく入る連絡への対応等で多忙となるため、自席や出先などで予測情報を閲覧することが重要であることがわかった。

そこで、本県では、インターネット経由で津波の予測情報を利用者に伝達する配信システムを開発した。このシステムは、S-netの観測値と予測情報、サーバの稼働状況を3秒毎にクラウドに転送し、利用者はWebブラウザを用いて、どこからでも予測情報にアクセスすることができる。また、クラウドを用いることにより、1,000ユーザー以上への同時配信と平時の通信費用やサーバスペックの最適化が可能となる。なお、津波予測の配信先は、県の防災関係者に限定している。

配信システムでは、iOSやAndroid用のアプリ版も開発している。アプリ版では、津波予測時に利用者へ通知がされるほか、基盤地図や浸水図、予測波形を予めダウンロードすることにより通信量を抑えることが可能となり、津波発生時の通信錯綜に対応している。

また、現場で活用しやすいように市町村役場、津波避難ビル・タワー、津波避難場所などランドマークとなる場所をアイコン表示する機能も備えている。

津波浸水予測システムには、津波シミュレーションにより訓練用地震のS-net時系列データを用意しており、津波予測を模擬する訓練機能を用いて、配信システムと連携した訓練で活用することができる。

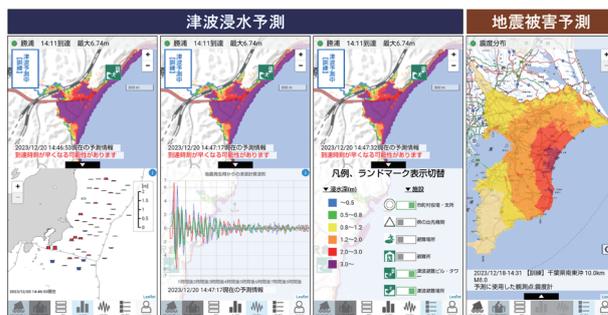


図2 アプリ画面（スマートフォン）

3. 千葉県における地震・津波に関する各種システム

3.1 地震被害予測システム

地震発生時、その地震動による県内の被害状況をはかり知ることは極めて困難である。だが、その大まかな被害状況を予測し、それに見合う初期対応を速やかに実行できれば、県や市町村における災害対策がより実効性のあるものとなる。

本県では、初動体制の確立を目的に、(国研)防災科学技術研究所との共同研究により「地震被害予測シ

システム」を開発・運用している。このシステムは、実際に県内各所に設置された震度計やK-NETで観測した計測震度データを基に、250mメッシュごとに千葉県全域の揺れを想定し、市町村や字単位ごとに被害を予測するものである。同システムには、地盤増幅データや建物区分データ等が基礎データとして事前に登録されており、千葉県全体の震度分布や液状化危険度、建物被害、人的被害、避難者数等を予測し、その情報を市町村と共有することができる(図3)。

本システムで予測された情報は、2.3節で述べたアプリ版でも確認することができ、県・市町村の防災担当職員が庁舎を離れている場合も、その情報を確認することができるようになっている。

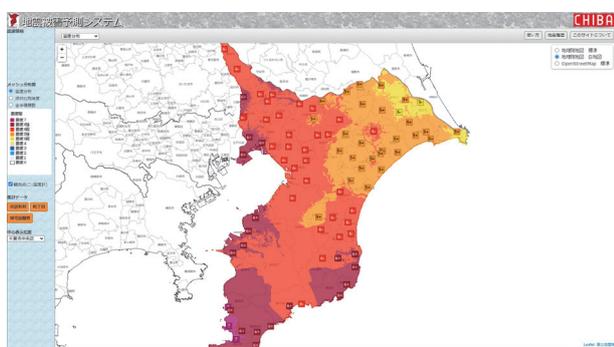


図3 地震被害予測システム

3.2 津波VR映像

本県では、災害を疑似体験することにより、発災時の早期避難等の行動を促すことを目的に、災害体験のVR動画を2019年度に作成した。映像は、松戸市にある千葉県西部防災センターや防災フェアにおいて、VRゴーグルで疑似体験することが可能であり、津波編と豪雨編について、それぞれ大人の視点と子供の視点で作成されている。

津波編と豪雨編の360°映像は、千葉県の公式YouTubeチャンネルにも公開しており、津波編は250万回再生を超える反響となっている。



図4 津波VR映像とそれへのリンクURLのQRコード

4. システム等の活用状況

地震被害・津波浸水予測システムは、県や市町村が

実施する津波避難訓練や津波に対する図上訓練で活用している(2022年10月の勝浦市と共催した津波避難訓練、2023年1月の鴨川市と共催した図上訓練等)。

訓練では、県と市町村の災害対策本部が予測情報を共有し、救助部隊の展開や避難物資等の応援要請に早い段階から共通認識を持って対応できることが確認された。

5. 今後の展望

津波浸水予測システムは、S-net観測点でのリアルタイムの水圧値の変化から津波予測を随時更新する。この仕組み上、震源域がS-net観測点を挟んでより沖側にあるときには、沿岸に津波が近づくとつれ、複数のS-net観測点で水圧変化を検知し、精度良くモデルの絞り込みが行われる。しかしながら、震源域がS-net観測点より沿岸に近い場合は、S-net観測点で津波を検知する前に津波が到達することも考えられる。また、相模トラフ沿いの巨大地震など震源域がより沿岸に近い、もしくは陸域に及ぶ場合には陸域の隆起沈降の影響を大きく受け、浸水域の予測の振れ幅が大きくなる。

引き続き予測手法の改良に取り組むと共に、本システムによる予測の特性を説明会や訓練等を通じて利用者と共有し、地震被害予測システム等と組み合わせて自治体の防災対応への実効性のある実装を図っていく。

謝辞

千葉県津波浸水予測システムの開発にあたっては、(国研)防災科学技術研究所、(国研)海洋研究開発機構、三重県庁、和歌山県庁の皆様から多くの御指導・御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 金沢敏彦：日本海溝海底地震津波観測網について、地震ジャーナル、No. 55、pp. 28–33、2013.
- 2) 金沢敏彦：日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) 日本地震工学会誌、No. 28、pp. 24–27、2016.
- 3) 植平賢司：日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) の最初の成果、地震ジャーナル、No. 64、pp. 99–16、2017.
- 4) Baba, T., Takahashi, N. and Kaneda, Y.: Near-field tsunami amplification factors in the Kii Peninsula, Japan for Dense Oceanfloor Network for Earthquakes and Tsunamis (DONET). Mar Geophys Res, 35, pp. 319–325, 2014.
- 5) Takahashi, N., Imai, K., Ishibashi, M., Sueki, K., Obayashi, R., Tanabe, T., Tanazawa, F., Baba, T. and Kaneda, Y.: Real-Time Tsunami Prediction System Using

DONET. Journal of Disaster Research, vol. 12, pp. 766–774, 2017.

- 6) 石橋正信、馬場俊孝、高橋成実、今井健太郎：DONET観測情報を活用した津波予測システムの社会実装－和歌山県の事例－、自然災害科学、No. 37-1、pp. 125-142、2018.
- 7) Baba, T., Takahashi, N. and Kaneda, Y.: Tsunami inundation modeling of the 2011 Tohoku earthquake using three-dimensional building data for Sendai, Miyagi Prefecture, Japan. Tsunami Events and Lessons Learned, Advances in Natural and Technological Hazards Research. vol. 3, pp. 89–98, 2014.
- 8) Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y., Ando, K., Matsuoka, D. and Kato, T.: Parallel Implementation of Dispersive Tsunami Wave Modeling with a Nesting Algorithm for the 2011 Tohoku Tsunami. Pure and Applied Geophysics. Vol. 172, pp. 3455–3472, 2015.
- 9) Baba, T., Ando, K., Matsuoka, D., Hyodo, M., Hori, T., Takahashi, N., Obayashi, R., Imato, Y., Kitamura, D., Uehara, H., Kato, T. and Saka, R.: Large-scale, high-speed tsunami prediction for the Great Nankai Trough Earthquake on the K computer. The International Journal of High Performance Computing Applications, vol. 30, pp. 71–84, 2016.
- 10) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 82, pp. 1018–1040, 1992.
- 11) 気象庁：第14回「津波予測技術に関する勉強会」の概要について、2017、
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami/benkyokai14/index.html> (参照2023-12-04).



吉岡 薫 (よしおか かおる)

2014年千葉県に入庁。2020年度まで防災危機管理部に所属し、地震被害想定などの地震・津波防災に関する業務を担当。2017～2020年にかけて津波浸水予測システムの開発に携わった。



五十嵐 光嗣 (いがらし みつとぐ)

2013年千葉県に入庁。2018～2022年度に防災危機管理部に所属し、地震・津波防災に関する業務を担当。津波浸水予測システムの開発・運用に携わった。



潮崎 翔一 (しおざき しょういち)

2016年千葉県に入庁。2019年度から防災危機管理部に所属し、津波浸水予測システムの運用及び津波予報業務許可の申請に係る業務を担当。



竹内 織洋 (たけうち おりひろ)

2022年千葉県に入庁。津波浸水予測システム及び地震被害予測システムの運用を担当。



高橋 成実 (たかはし なるみ)

1996年千葉大学自然科学研究科修了、博士(理学)。1996年海洋研究開発機構に入所、地殻構造研究、海底地震観測、津波予測システム開発に従事、2016年防災科学技術研究所に移籍。海域観測網の運用とデータ解析、防災対策への貢献を進めている。



大井 昌弘 (おおい まさひろ)

東京大学大学院工学研究科修了、博士(工学)、2002年から防災科学技術研究所において、自然災害のハザード・リスク評価に関する研究に従事。千葉県との共同研究において地震被害予測システムの開発を担当。

浅尾 一已 (あさお かずみ)

1991年千葉県に入庁。阪神・淡路大震災を契機に地震対策課に異動。1997～2019年まで防災部局に所属。その間、活断層調査・地下構造調査・地震被害想定調査・防災啓発などの業務に従事する。2019年から防災科学技術研究所に所属。

災害時の情報インフラの過去、現在、未来と課題

廣井 慧

●京都大学防災研究所 准教授

1. 災害対応における情報インフラの重要性

関東大震災が発生した1923年は日本で電話サービスが開始されて約30年が経過し、全国に情報インフラが築かれつつある最中だった。この震災では、6割以上の設備が焼失、大破し、壊滅的な被害を受けたものの、これをきっかけとして災害時を見据えた情報インフラの在り方が大きく見直された¹⁾。その後の昭和、平成時代の多くの災害を経験するたびに見直しと改善が繰り返され、今では当時と比べものにならない堅牢な情報インフラへと成長してきた。現代では、これまでの災害経験をもとにした耐災害性を備えた新たな技術が次々と導入されている。しかし、こうした努力で、災害に強い情報インフラが確実に構築されているとは言い切れない。なぜなら、これまで、見過ごされてきた弱点や、これまでの情報インフラにはなかった新たな弱点が、災害時には大きな問題に発展する可能性があるからだ。本稿では、情報インフラを、電話やインターネット、情報システムを含む、人や個人のコミュニケーションを下支えするためのシステムと定義し、その重要性和災害時に顕在化するであろう問題について確認していきたい。

Federal Emergency Management Agency (FEMA: アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁) の2018-2022 Strategic Plan²⁾では、“Helping people before, during, and after disaster”をミッションとし、それを達成するための手段のひとつとして“Improve continuity and resilient communications capabilities”を掲げている。ここでいうcommunicationという言葉は、人、組織のコミュニケーションだけでなく、それを媒介するコミュニケーションシステムを指す。それではなぜ、情報インフラのcommunications capabilitiesに着目する必要があるか、主要な記述をみていくと、

- ・個人、組織や政府機関は、技術的につながっており情報インフラに依存していること
- ・そこには固有のリスクがあり、その相互依存関係と潜在的な連鎖的影響を理解しなければならないこと
- ・通信能力を失った場合の影響を評価して、対応活動が中断しないよう、脆弱性に対処しなければならないこと
- ・そうしないと、住民は効果的かつ確実な意思疎通ができず、政府の支援は最も必要などころに向けられな

いこと

・low-technology (最新ではないもしくは低レベルの技術)は脅威であり、この脅威はインシデントの影響を拡大し、連鎖的に大きな影響を引き起こす可能性があること

が述べられている。

日本でも、科学技術基本計画第5期からSociety5.0が提唱され、社会のデジタル化が推進されるに伴い、情報インフラは急速に進展している。このような背景で、情報インフラは、全体像の把握すら容易ではないほどに高度かつ複雑なネットワークへと進化を続けている。この複雑化した高度なネットワークは、FEMAの指摘と同様に、人も組織も情報インフラも相互に依存し合っている。そういったところに脆弱性が残ると、連鎖的に大きな影響へ発展しかねない。それでは、Society5.0の発展・普及を前に、情報インフラはどのように変わり、具体的にどのような問題を抱えているのか、順に考えていく。

2. 情報インフラの構成

はじめに、情報インフラの過去、現在、未来として、音声通話の電話サービスを例にとり、従来とこれからの情報インフラが、どのように変わり、災害時にはどのような影響があるのか、整理する。

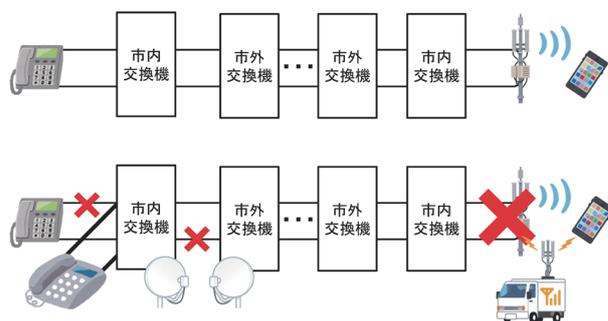


図1 従来の公衆交換電話網(総務省資料³⁾を元に作成)

図1上は、従来の情報インフラである公衆交換電話網を簡略化した図である。階層に応じて交換機があり、固定電話や携帯の基地局と有線で繋がっている。この公衆交換電話網においては災害時の復旧は、片方の電話からもう一方の電話までの回線のどこかが切れてし

まったときに、切れたところをつないで、回線を繋ぎ直す、という非常にシンプルな考え方が基本となる(図1下)。例えば、地震による建物の倒壊、電信柱の損壊で電話線が切断された場合は、避難所に臨時電話を置く(別の場所で電話機ごと回線を繋ぎ直す)、市内交換機と市外交換機の間のカペルが切れてしまったというときは衛星を介す、一部を無線通信に置き換えて回線を作り直すなどという対応が講じられてきた。図の中心に近ければ近いほど、影響を受ける利用者数が多い重要度の高い設備になる。そういった重要度の高い設備には、予め回線や設備を冗長化しておき、接続が維持できるよう図られている。

それでは、現在～未来の情報インフラはどのように変わっていくのか、IP化の例として、NTT東日本とNTT西日本で、2024年1月から計画されているIP網への移行を例にとる。この移行は、これまでの公衆交換電話網の設備維持の限界や光ファイバ等のSociety 5.0の実現に必要なインフラの整備が進んだことから実施される。これは、基本的には、交換機がルータに置き換わると説明される(図2)。我々、利用者からすると、電話機は変換装置でIP信号に変換されて、ルータを介してIP網へ接続するため、単に交換機がルータに置き換わっただけのようにも見える。

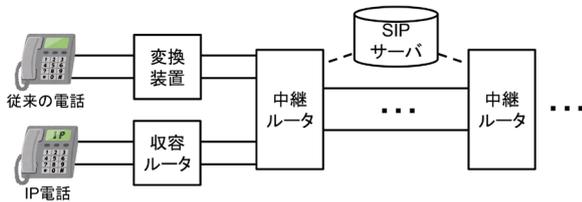


図2 移行後のIP網(総務省資料³⁾を元に作成)

しかし、この図には記されていない箇所で大きな変化がある。図2に記載されるルータはハードウェアの装置であって、ネットワーク上での端末から端末のデータ交換を可能にする。ルータ上のレイヤに、通話をコントロールするアプリケーションが存在する。そのため、交換機がルータに置き換わるのではなく、交換機という概念がなくなり、その機能は仮想化されて、アプリケーションが担う。アプリケーションは多数の複雑に分散化されたソフトウェアモジュールで構成される。重要なのは、今後の情報インフラは、物理的なシステムに加え、たくさんのソフトウェア群が動いて成立する、重層構造になっているという点である。

このような重層構造は音声通話だけではなく、インターネット通信にも共通する。もちろん通信事業者はこの構造を認識し、重要通信の確保や早期復旧策

を考えている。しかしそれだけではなく、この情報インフラの利用者側も、このような重層構造があると知ることが重要であり、災害対策を考えていくうえでは、我々利用者もこれからの情報インフラに対する認識を新たにすることが必要である。なぜそのような必要があるかを特に重要な情報サービスについて問題を取り上げてみたい。

3. 災害時に関する情報インフラの全体像

災害時に利用が想定される情報インフラの全体像を図3に示す。現代の複雑な情報インフラにおいて特に災害時に問題となる箇所は、FEMAのStrategic Planでも指摘されていた、情報サービスの相互依存関係だろう。その相互依存関係にある箇所を図示したものが図3内の黒色矢印となる。では、なぜ相互依存が問題となるのか、情報サービスのうち、特に重要と思われる、重要通信(濃灰色四角)、自治体の災害対応に使われる情報サービス(薄灰色四角)について順に述べる。

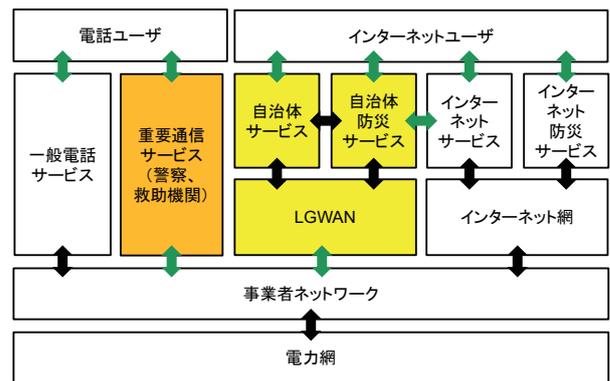


図3 災害時に関する情報インフラの全体像

3.1. 重要通信の問題

重要通信とは、電気通信事業法に基づき定められた、110番、118番、119番の緊急通報、防災関係機関等に配備される優先電話を指す。これらの通信は人命もしくは災害対応上、疎通確保が重要命題となる。音声通話が主力であった時代には、災害時に通信の集中による大規模な輻輳が発生し、重要通信以外の通信を規制することによる重要通信の優先的確保や通信設備の安定的運用が図られていた。このような輻輳制御のしくみは現代のIP網にも取り入れられ、重要通信をできるだけ疎通させるしくみとなっている。

輻輳制御は災害対応において非常に重要度の高い措置である。しかし、このような措置が図られているとしても重要通信が確実に繋がるわけではないことを忘れてはならない。それではここから、重要通信に関わる問題で主要なものを順に説明する。第一に輻輳制御

でも解消されないアクセス集中があることが挙げられる。輻輳制御は市内交換機で行うため市内交換機に接続する前の段階で輻輳している場合、緊急通信を優先的に疎通させる措置を取ることはできない。これは、ローカルな地域で通信が集中する場合に起こり得ることで、特定の市内交換機のエリアや、特定の基地局のカバーエリアで一度に多くの人が電話をかけるなどの状況で想定される。

第二に、輻輳制御はソフトウェア上の措置であり、物理的な故障には対応可能ではない。つまり通信網に物理的な故障が起きた場合は重要通信であっても繋げることができなくなってしまう。電話局の倒壊が起きた場合は、その周辺一帯で重要通信も他の通信も利用ができなくなる。東日本大震災では電話局の全壊が16ビル、浸水が12ビルで起きている⁴⁾。さらに、電話局の倒壊が起きるほどの被害がない地域であっても、電話線、電柱、住宅への引き込み部分、電話機等は、建物が倒壊するレベルの地震であれば、物理的な損壊がある可能性が高い。そのため広範な地域で、発生直後はもちろん復旧までの間、利用が叶わなくなると予想される。

第三に、IP網への移行によりボトルネックが見えにくくなっていることが言える。2章で述べたように、近年の情報インフラは、多重構造になっており、なかでもアプリケーションは機能が細かく分散化されている。そのため、構成図を見ただけでは、ハードウェア上のボトルネックを明確に判断することが難しくなってしまう。こうした状況は災害以外の障害からも読み取ることができる。例えば、2022年にはKDDIのIP網で2日半に渡り、通信障害が発生した。全国で約3,000万回線が影響を受け、音声通話やデータ通信がつながりにくくなり、物流等にも影響が出た。この事例からわかるように、複雑な情報インフラでは、事前にボトルネックに気がつくことや障害発生時の原因究明が非常に難しく、復旧まで長期化する傾向にある。

このような状況の発生は、現時点では事前の予測や防止をすることができない。しかし、緊急通信などの、我々が被災者となった場合に利用する可能性の高い重要サービスも、強い地震や津波によって、物理的な設備そのものが使えなくなってしまう地域があり、利用者からすると電話をかけることすらできなくなってしまうこと、さらには復旧までには相当時間かかり、重要通信においてもそれは変わらないことを念頭において関連する対応策を検討する必要がある。

3.2. 地方公共団体の接続性の確保

地方公共団体は組織内・組織間のネットワークとし

て総合行政ネットワーク (Local Government Wide Area Network: LGWAN) というセキュアなネットワークを利用している。災害発生時の行政業務を継続的に行うため、LGWANそのものは堅牢なシステムが採用されているが、一部の接続性に問題が起きる可能性がある。ここでは、特に住民にサービスを提供する、LGWANからインターネットへの接続性や地方公共団体からLGWANへの接続性に関する2つの懸念に触れる。

ひとつめは、迂回経路の物理的冗長性である。LGWANは重要設備であるため基本的に利用経路は冗長化されている。しかし、この冗長化が実質的にはなされていない可能性を指摘したい。例えば通信事業者やプロバイダを冗長化するため、2種類の契約を行ったとする。しかし、異なる事業者を選択し冗長化したつもりが、実際は同じケーブルが使われている、同じ通信ビルに繋がっているなど、アプリケーション部分では冗長化されているが物理的に冗長化されていない可能性がある。こうしたいわば脆弱な冗長化は、近年の情報インフラが重層化され、アプリケーションで動作することの問題点と言える。これは、地方公共団体ではしっかりと冗長化し、通信事業者は通信責務をしっかりと果たしているにも関わらず、責任範囲の明確でない、気付かれにくい箇所でこのような状況となってしまうという点で特に厄介な問題といえるだろう。

ふたつめが、代替設備の切り替えについてである。最近では通信断絶時の、代替設備として、衛星回線を用意しているところも多い。しかし、災害発生時に代替設備を運用させるためには入念な準備が必要となる。特に、情報システムに関連する代替設備への切替は多大な時間を必要とすることも多く、切替手順まで含めて、しっかりと用意がされているのか、機材を準備しただけになってしまっていないか、というのは重要な観点となる。

3.3. 被災者一人ひとりにとって望ましい防災対応

最後の問題として、被災者一人ひとりにとって望ましい防災対応を情報インフラでサポートすることに着目したい。これまでの災害対応は、災害時の情報インフラを考える時、影響度の大きい設備を守ることに重きが置かれていたように思う。それは、災害対応として中心にある根幹の重要な設備を守ることが非常に重要であること、一人ひとりのサポートにまで手を回せない技術的な難しさが背景にあった。

しかし、本質的には、災害時の情報インフラは人命を守るためにあり、そのコミュニケーションを媒介することが最重要使命である。情報インフラの設備を守

り通信を疎通させることももちろん継続すべきことではある。同時に、近年の技術発展を契機として、被災者一人ひとりにとって望ましい防災対応が可能な情報インフラとは何かを考え、目指していくことが必要ではないだろうか。情報インフラの目指すべき方向性のひとつとして例えば、被災者一人ひとりを行政が認識し、通信がこれをサポートすることが好ましい。今やタクシーや企業の広告も消費者をトラッキングして一人ひとりを認識し、最適なコンテンツ配信を行なっている。このような一人ひとりの認識は技術的には可能であり、同様なしくみの開発構築を災害時の情報インフラにおいても目指していくべきと考える。

さらに、これまでの設備中心の考え方を一新して、被災者一人ひとりのアクセス保証にまで踏み込むことの重要性を指摘したい。情報インフラが被災して、根幹の設備は守れたとしても、電話線や電話機など被災者に近い設備の損壊で情報アクセスができなくなることは、規模の大きい地震であればあるほど、どうしても起きてしまう。まずは、そのような状況になることを知り、その上で災害対応を考えることが重要である。同時に、このような情報インフラの利用が長期にわたって困難となる状況であっても、一人ひとりの情報アクセスやコミュニケーションが可能となるよう推進していくことが、これからの情報インフラに必要な方向性であるだろう。

4.まとめ

本稿では、災害時の情報インフラの重要性と災害時に顕在化する問題について、情報インフラと利用者の観点から考察した。特に、人命を守る観点から緊急性の高い重要通信や地方公共団体の接続性を主に述べたが、Society5.0時代における企業活動・経済活動・人の社会活動を考えると、本稿で取りあげた以外にもまだまだ多くの問題が残されている。

現代では、企業や経済、人の活動は既にInformation Technology：ITを中心に構成されている。関東大震災があった大正から平成にかけて、通信機器や情報システムは、電話やコンピュータが専用に備えられ、通信や計算の必要がある時に情報のやりとりを行ったり、データとプログラムを設定して計算したりするもので、手段のひとつとして活用されていた。しかし、今では企業や経済、人の活動は、効率や速度を向上させるためITをベースとしてその上に構成されている。このようなIT社会で、ITを中心に構成する、IT化された防災は同じような効果が見込めるのではないかと思う。

これまでは技術的な限界もあって、情報インフラ

は疎通の問題だけを捉えていて、その上に構成される様々なコミュニケーション活動は情報インフラの観点からはあまり顧みられなかった。しかし、情報インフラはコミュニケーション活動をサポートすることが本来の目的であり、最も重要な役目である。Society5.0の発展とともに、情報インフラのあるべき姿をもう一度考え直し、災害時のコミュニケーション活動についてできること、目指すべきことを意識改革する必要性を問題意識として最後に共有したい。

参考文献

- 1) 通信省: 通信事業史 第4巻, 通信協会, 1944
- 2) Federal Emergency Management Agency: 2018-2022 Strategic Plan, 2018, https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-03/fema-strategic-plan_2018-2022.pdf (参照 2023-12-10)
- 3) 総務省: 固定電話網の円滑な移行, https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/telephone_network/index.html (参照 2023-12-10)
- 4) NTT東日本: 東日本大震災における復旧活動の軌跡, https://www.ntt-east.co.jp/info/detail/pdf/shinsai_fukkyu.pdf (参照 2023-12-10)



廣井 慧 (ひろい けい)

2014年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士 (メディアデザイン学)。名古屋大学未来社会創造機構特任助教、同大学工学研究科助教を経て、2020年から京都大学防災研究所准教授。防災情報システム、災害情報の時空間解析の研究に従事。

共同住宅の震災デジタルツイン開発を目指して

梶原 浩一

●国立研究開発法人防災科学技術研究所 特別研究員

1. はじめに

日本は頻繁な自然災害に見舞われる国であり、社会の急激な変化とともに社会基盤施設の長大化、情報通信技術の進展・普及、そして少子高齢化が進んでいる。この高度化かつ複雑化する社会を維持・継続していくためには、新たなアプローチが求められる。

その一環として、デジタル技術を中心に据え、実空間の多次元な情報により、地震被害とその影響を評価する共同住宅の震災デジタルツイン（以下、ここではデジタルツイン）を開発するための探索研究を進めている¹⁾。

本稿では、開発に向けた研究の背景と方針、システム構成とユースケースの概要、開発と利活用での課題について、研究過程での状況を述べる。

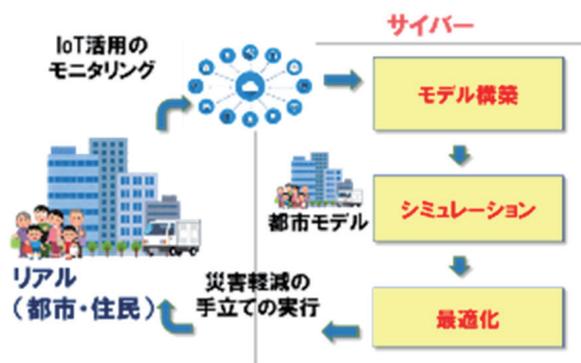


図1 都市を対象としたデジタルツイン

2. 背景と方針

我が国は阪神・淡路大震災（1995年）、東日本大震災（2011年）、熊本地震（2016年）など、大規模で甚大な被害をもたらした地震に見舞われてきた。近い将来には、南海トラフ地震や首都直下地震などの大規模な地震も想定されており、さらにそれ以降の年月を経ても、日本の地震が無くなることはない。この地震に備えるためには、社会の変化に応じて、被害を極力低減し、かつ、迅速な復旧を可能にする「強レジリエントな社会」のための方策を具備しなくてはならない。

その方策では、地震動の想定から発生事象の予測、影響の理解、さらには対応策の定量的な効果評価を含む確かな選択をする必要がある。そのための手段としてデジタルツインが注目される。このデジタルツイン

は、IoT活用のモニタリング機能を通じて実空間のリアルな変化を捉え、仮想空間のモデルに反映し更新することで、地震時の実空間の挙動・事象をシミュレーションできる（図1）。そこで、この開発での基本方針として、以下を掲げている。

(1)地震リスクの理解への活用

・住民が地震のリスクを理解し、それに基づいて適切な対策を講じることが重要である。

(2)「我が事」としての事前情報の提供

・住民に対して、地震リスクや事前の備えに関する情報を分かりやすく提供することを目指す。

共同住宅の震災デジタルツインは、物理的な事象だけでなく、共同住宅の防災計画、地域全体の防災計画の策定に加えて、経済的側面からの強レジリエント化への貢献が期待できる（図2）。

ここで、デジタルツインの対象を「共同住宅」に選定した理由であるが、我が国の居住世帯のある住宅5,366万戸の44%を占め、東京都では71%（2018年度）²⁾ など、都市部では更に高い割合を占めていることと、社会を構成する生活基盤であるためである。



図2 震災デジタルツインにより実現が期待される強レジリエントな社会

3. デジタルツインの構成

本研究で目指す震災デジタルツインの構成は、図3に示される。想定地震動(a)と対象建物モデル(b)を準備し、建物地震応答と構造損傷を評価する(c)。住民は地震直後に避難し、発災後には躯体損傷に応じて共同住宅から退去するかどうかを判断する。国土交通省は、共同住宅の再生と活用に関する勉強会で、地震

防災の技術について検討した³⁾。勉強会では、共同住宅の生活維持に関するエレベーターを含む重要な3つの要素が指摘された(d-1、d-2、d-3)。これらの要素を建物地震応答により評価し、周辺状況(eほか)も含めて住民の行動を評価する(f)。さらに、震災デジタルツインが提供する情報を統合的に可視化し(g)、様々な防災サービスへの活用を促進する。

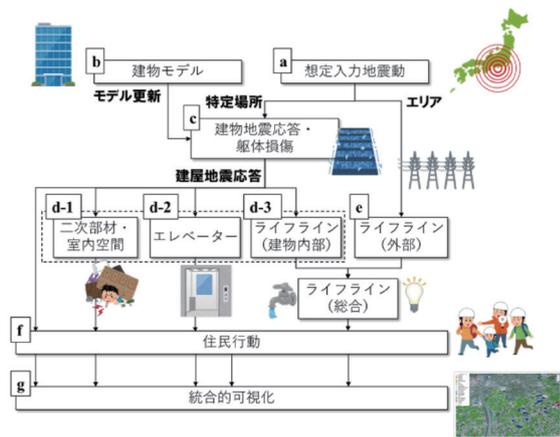


図3 震災デジタルツインの構成

3.1 不確実性への対処

震災デジタルツインは、共同住宅の地震被害における様々な要因によるばらつき(不確実性)を対象としている。不確かさには、事象そのものに固有な「偶然的な不確かさ」(Aleatory uncertainty)と、データの不完全さから生じる「認識的不確かさ」(Epistemic uncertainty)がある⁴⁾。これらの不確かさに対処するための技術的要素を簡便に記載する。

3.2 想定地震動

地震被害予測において、想定地震動の予測には大きな不確かさがあった。ここでは、共同住宅のサイトにおける地震シナリオの不確かさに対処する方法を提案する。

多様な断層破壊シナリオに対する地震動を生成する必要があるが、計算負荷の問題から一つ一つのシナリオに対して波動場シミュレーションを行うのは現実的でない。そのため、リーズナブルな計算負荷で多数の入力地震動波形を生成する手法を提案する。具体的には、震源位置、断層・地下構造モデル、評価地点位置、評価地点の地盤モデルから複数の地震動時刻歴波形を生成し、これをWavelet Packet (WP) 変換で特徴量に変換する。次に、これらのWP変換結果をオートエンコーダにより次元圧縮し、地震動波形を表現する「潜在変数」を作成する。この潜在変数の確率分布を推定するため、例えばImaiの方法⁵⁾を検討した。推定した確率

分布に従った潜在変数のサンプルを生成し、これを逆WP変換して地震動波形サンプルを生成する。これにより、「偶然的な不確かさ」を定量化する取り組みを行う。

3.3 建物モデル

共同住宅の地震応答シミュレーションには、建物の数値モデルが必要である。建物は通常、設計図書の情報に基づいて作成されるが、施工のばらつきや経年変化などにより特性が変化することも考えられ、シミュレーション結果と整合しないことが想定される。建物モデルは各層の質量や柱・梁の剛性、動的な挙動での減衰などのパラメータで表現される。本研究では、これらのパラメータを的確に決定するため、実建造物の振動計測で得られた応答波形を用いる手法を提案する。この建物同定では、パラメトリックなシステム同定手法(例えば⁶⁾)とノンパラメトリックな機械学習手法の検討がある。建物モデルを更新することを可能とし、「認識的不確かさ」を減少させる取り組みとなる。

3.4 建物振動解析

建物躯体被害や二次部材・設備の損傷を予測するには、詳細な非線形有限要素法(FEM)解析が必要となる。しかし、これには多くの計算時間とコストがかかる。また、地震被害リスクの評価には多数の地震動波形に対する繰り返し計算が必要となる。そこで、地震応答シミュレーションの高速化を目指し、部材ユニットを代理モデルで置換して計算負荷を低減する手法を提案している。具体的には、代理モデルを再帰型のニューラルネットワークとして定義し、詳細FEMで行った载荷解析の結果を用いて機械学習を行う。これにより、シミュレーションの計算負荷を削減し、「認識的不確かさ」を減少させ、多数のシミュレーションにより「偶然的な不確かさ」を定量化することが可能となる。

3.5 地震被害リスクの表現

従来の地震被害リスク評価では地震フラジリティ曲線が一般的であったが、この方法は損傷に関する様々な特性を一つのパラメータにまとめるため、損傷確率にばらつきがあった。近年では、例えば、地震動をオートエンコーダで次元圧縮し、それを説明変数として使用する手法がある。地震デマンド⁷⁾を表現するためにガウス過程回帰とベイズ最適化を用い、地震デマンドの応答曲面を生成する。これにより、単純な単一パラメータによるばらつきを減少させ、特定の地震動に対する地震デマンドを求めることが可能となる。

4. デジタルツインのユースケースの概要

震災デジタルツインは、共同住宅の地震防災に関わるステークホルダーに、発生する可能性のある事象を

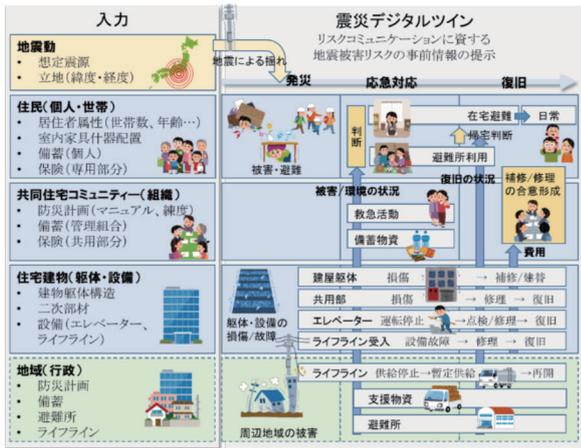


図4 震災デジタルツインのアウトプットイメージ

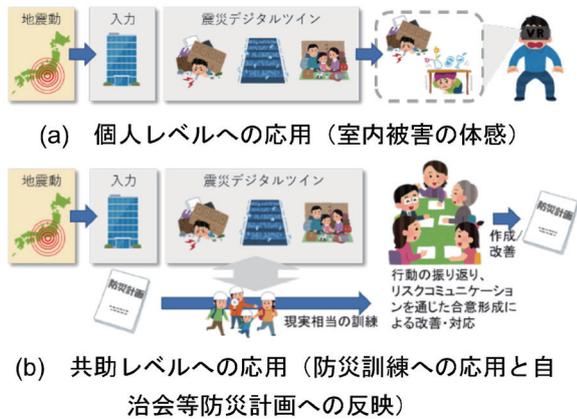


図5 震災デジタルツインのユースケース(地震被害の再現)



図6 震災デジタルツインのユースケース(地震リスクの評価)

網羅した地震被害リスクを提供し、「我が事」として実感できる事前情報を伝える。また、災害リスクコミュニケーションを促進することで、自助・共助・公助による防災行動を奨励し、強靱な社会を構築することを目指している⁸⁾。これらの地震発生後の被害予測だけでなく、応急対応から復旧までのタイムラインを

評価できることが重要となる(図4)。

震災デジタルツインは、様々なユースケースが考えられる。例えば、特定の地震動に対する被害再現において、個人は震災デジタルツインを使って家具の移動や転倒などの室内被害を予測し、VRを通じて実際に体感する(図5)。これにより震災を身近なものと感じ、被害状況を理解し、防災意識が向上する。

共同住宅全体では、震災デジタルツインを活用して全体の被害状況を予測し、それに基づいた防災訓練を実施する。住民が災害を実感し、リスクコミュニケーションを通じて防災計画を策定・改善できるよう支援する。また、別のユースケースでは震災デジタルツインを用いて地震被害リスクを定量的に評価し、それに基づいて意思決定を可能とする。共同住宅全体では、防災対策の効果を地震被害リスクで示し、対策実施の費用対効果を定量的に示すことで、合意形成を支援する(図6)。

5. デジタルツイン開発での課題

探索研究の過程であるが、今後の研究計画を視野に入れ以下を記載する。

(1) 全体システム構築での課題:

デジタルツインは、様々な技術を統合した全体システムとなる。技術開発では要素技術に焦点を当てがちであるが、全体システムを見据えた研究が不可欠と考える。将来の展望を考慮した小規模な全体開発であっても、システムの発展と活用に寄与すると考える。

(2) 利活用におけるシステムの複雑化の課題:

震災デジタルツインの利活用において、システムの使いやすさと理解しやすさを確保するため、シンプルなインターフェースやユーザーフレンドリーなデータの可視化手法の開発が不可避である。住民がシステムを有効に利用できるような教育プログラムやトレーニングの提供も重要である。

(3) データ取得利用での課題:

共同住宅のデータを収集する際の適切なセンサー配置や正確なデータ取得は住民のプライバシー保護やデータセキュリティの観点から慎重に検討されるべきである。プライバシー保護を重視したセキュアなデータ収集手法と住民への十分な説明・協力が求められる。

(4) 法的・倫理的課題:

デジタルツインの構築に伴い法的な制約や倫理的問題が浮上する。プライバシーの法的規制やデータの適切な取り扱いが必要である。透明性のあるプライバシーポリシーの策定や法令遵守の確保、そして住民への説明と信頼構築が重要な課題となる。

(5) 住民への教育と啓発:

デジタルツインの効果的な活用には住民の理解と協力が不可欠である。しかし、住民のデジタル技術への理解が不十分な場合も想定される。ワークショップやセミナーを通じた教育プログラムと、コミュニケーション手段を活かした啓発活動が必要と考える。

(6) すべての住民への活用:

共同住宅には多様な住人がおり、支援が必要な方々やコミュニケーションが不自由な住人も存在する。デジタルツインをすべての住民が利用できるような方法を模索し、障がいのある方々を含む全住民に対する課題に本格的に取り組む必要がある。

(7) デジタルツインの目標解決の活用での課題:

デジタルツインが目標設定とそれを達成するための具体的な方策や必要な対応事項を提案できるようにすることが必要である。デジタルツインの結果をフィードバックし、深層学習により目標達成の方策を誘導する機能などの手法の具備が必要と考える。

6. まとめ

本稿では、住民の震災に対する理解を深め、具体的な事前の備えに繋がることを指向した、共同住宅の震災デジタルツインの開発について述べた。これにより、災害リスクコミュニケーションを促し、自助・共助・公助による効果的な防災行動を醸成し、強靱な社会の構築を目指すものである。

今後の計画では、その具体的な活用方法をユースケースとして提示し、共同住宅住民や管理組合などに積極的に伝え、必要な情報やその提供方法に関する意見を集約する。また、これらのフィードバックを元に、震災デジタルツインの開発仕様を柔軟に調整する。

次の研究ステージに向けては、賛同いただける関係者や有識者、関係機関の方々の参画をいただき、計画を進めていきたい。引き続きのご支援とご協力を賜りますようお願い申し上げます。

謝 辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI22H2「共同住宅の震災デジタルツインによる強レジリエント社会実現」の支援を受けた。また、本報告の内容は、東京大学空間情報科学研究センター 関本義秀教授、東京大学大学院工学系研究科 小泉秀樹教授、東京電機大学工学部 藤田聡教授、埼玉工業大学工学部 皆川佳祐准教授、防災科学技術研究所 堀内敏彦招聘研究員と本プロジェクトに参画する研究者各位の議論が反映されている。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Horiuchi, T., Kajiwara, K., Yamashita, T., Aoki, T., Yashiro, T., Sekimoto, Y., Koshihata, M. and Koizumi, H.: Study Concept on the Development of An Urban Cyber Physical System for Enhancing the Capability to Respond to Large-Scale Earthquakes, Journal of Disaster Research, Vol. 16, No. 2, pp. 287-297, 2021. doi:https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0287
- 2) 総務省報道資料：平成30年住宅・土地統計調査 住宅数概数集計 結果の要約、2019、https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2018/pdf/g_youyaku.pdf (参照2023-08-09).
- 3) 国土交通省：共同住宅ストックの再生のための技術の概要(防災性)、持続可能社会における既存共同住宅ストックの再生に向けた勉強会とりまとめ、技術情報別紙5、2012、https://www.housing-stock.com/tech_info/disaster-measures/pdf/00.pdf (参照2023-08-09).
- 4) Der Kiureghian, A. and Ditlevsen, O.: Aleatory or epistemic? Does it matter?, Struct. Safety, Vol. 31, No. 2, pp. 105-112, 2009. doi:https://doi.org/10.1016/j.jstrusafe.2008.06.020
- 5) Imai, R., Kasui, N., Iwaki, A. and Fujiwara, H.: A Sample Generation of Scenario Earthquake Shaking Maps via A Combination of Modal Decomposition and Empirical Copula toward Seismic Hazard Assessment, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 111, No. 6, pp. 3341-3355, 2021. doi:https://doi.org/10.1785/0120210086
- 6) Enokida, R. and Kajiwara, K.: Simple Piecewise Linearisation in Time Series for Time-Domain Inversion to Estimate Physical Parameters of Nonlinear Structures, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 27, No. 10, 2020. doi:https://doi.org/10.1002/stc.2606
- 7) 山下拓三、岩城麻子、藤原淳、藤原広行：ガウス過程回帰とベイズ最適化による地震デマンドの応答曲面の構築、日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集、pp.353-354、2023.
- 8) 多田健太、大津山堅介、廣井悠：分散避難を考慮したSP調査に基づく避難選択行動に関する研究~川崎市直下地震を想定した高津区・宮前区を対象に~、都市計画論文集、Vol.58, No.3, pp. 1392-1399、2023.



梶原 浩一 (かじわら こういち)

東北大学大学院工学研究科にて建築学を専攻。振動制御に関する研究を専門とし東京大学より博士(工学)を授与。2000年より当時の科学技術庁防災科学技術研究所にて、実大三次元振動破壊実験施設(E-ディフェンス)の建設に従事。これまで123課題の実大・大規模試験体の実験とプロジェクト研究の推進に携わり現在に至る。

柔構造を確実な技術とするために ～実大動的免震試験機 E-アイソレーション～

高橋 良和

●京都大学 教授

1. はじめに

2023年4月、日本最大の動的免震試験機となるE-アイソレーションが、世界最大の震動台である防災科学技術研究所E-ディフェンスの隣で供用を始めた。本試験機は、SIP第2期「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」の研究開発課題として、京都大学・東京工業大学・免震研究推進機構が共同で「高精度荷重計測機構を有する動的試験機を活用した解析法の開発」を提案し、その研究開発・社会実装の一環として設置されたものである^{1)~3)}。本稿では、関東大震災以降の耐震構造研究の進展を概観しながら、SIP研究責任者の立場から、本装置開発の狙いと特徴を紹介したい。

2. 関東大震災のインパクト（柔剛論争）

1923（大正12）年に発生した関東大震災は、経験的ではなく工学的に設計された多くの建築・土木構造物にも甚大な被害をもたらした。アメリカ式の鉄骨造である丸の内ビルディングなどが大きな変形のために仕上げ材や設備配管などが甚大な被害を受けたのに対し、佐野利器が1914（大正3）年に提案していた震度法の考え方により耐震計算を行った耐震壁を有する日本興業銀行ビルは大震災に耐えた、という教訓は、大震災後の耐震構造の方向性を決定づけた。建物の水平剛性を高めて固有周期を短く設計することで、地震との共振を避けようとする考え方（剛構造）の推進である。関東大震災の翌年、市街地建築物法が改正され、日本で初めての耐震規定として震度法（水平震度0.1）が採用され、耐震計算が義務づけられた。一方、土木分野においては、1926（大正15）年に内務省土木局が道路構造に関する細則（案）を通過し、建設所在地に於ける最強地震力を設計に考慮することが加えられたが、その震度の大きさについては言及されていない。1939（昭和14）年の鋼道路橋設計示方書において、水平震度0.2、鉛直震度0.1を標準とすることが定められた。

一方、建築物の固有周期を伸ばして地震との共振を避けるのがよいとする柔構造が真島健三郎により提唱され、剛構造派と「柔剛論争」と呼ばれる大論争が昭和初期まで続いた。柔構造も地震との共振を避けようとする振動理論による主張であるが、剛構造の建物は地震により被害が生じることで次第に周期が伸び、地

震の周期に近づいて危険であることを指摘し、あらかじめ建物の周期を地震の周期よりも長くなるように設計しようというものである。これに対し、剛構造派であった武藤清は、関東大震災の主要動は1秒程度であるが、主要動後半に周期2~3秒程度の波があり、柔構造で設計すれば共振を起こして危険である、などの反論がなされた。

当時は低層の建物を設計することが前提であったこと、また地震動の周期特性などが不明であったこともあり、柔構造の実現性は高くなく、建築主流派であった剛構造へと収束していく。関東大震災は耐震構造としての剛構造の採用に大きなインパクトを与えた。

3. 柔構造の展開と免震・制振構造

1940~50年代において、地震計による記録が数多く観測されるようになり、地震動に関する理解が進むとともに、高度経済成長に伴い都市の土地の有効利用が必要となり、建物の高層化が求められるようになった。構造技術や計算機技術も向上したことにより、柔構造に基づく高層建物の構造設計が可能となり、日本最初の超高層ビルとなる霞が関ビル（高さ147m）が、武藤清による設計指揮のもと、1968（昭和43）年に竣工した。

1970年代後半より、構造物への地震力、地震エネルギーを低減するため、免震支承やダンパーなどの免震・制振に関する技術開発が進展した。免震構造は「構造物の固有周期を地震動の特性より長くするとともに、地震の入力エネルギーを免震部材で吸収すること」、制振構造は「構造物に入力した地震エネルギーをダンパーなどエネルギー吸収部材（制振部材）で吸収すること」により、「梁、柱など構造本体によるエネルギー吸収（すなわち損傷）を不要にしよう」とする構造である。これらはともに柔構造の思想に基づく技術であり、1983（昭和58）年に日本最初の免震建物が、1991（平成3）年に免震橋梁が竣工した。免震・制振構造は、1995（平成7）年の阪神・淡路大震災を契機に急速に拡大し、単に大地震から人命を保護するだけでなく、地震後の機能継続を可能とする構造として、ますますその重要性が高まっている。

4. 免震・制振技術における課題

超高層ビルや長大橋梁などの大型構造物で採用される免震支承では、1基で3,000トンを超える鉛直荷重を支持するものもあるなど、免震・制振構造の大型化が進み、使用される免震・制振部材は年々多様化かつ大型化している。免震・制振構造は、その地震時性能を構造物に組み込まれた少数の免震・制振部材に委ねており、柔構造として成立するためには、免震・制振装置の確実な動作はもちろん、高い信頼性が求められる現状にある。

免震部材の試験は、実大また実速度での荷重が望ましいものの、試験機の制約より、縮小モデルまた静的荷重が用いられることが多い。しかしながら、縮小・静的試験は実大・動的試験より良い性能が出る傾向がある。この理由は、多層の薄いゴムと銅板を完全接着させる必要がある免震積層ゴムの製造過程において、縮小体に比べ、実大では全面の完全接着が難しく、大型化するほど安定した性能を確保することが難しいこと、また免震部材のエネルギー吸収性能は試験体の発熱の影響を受けやすいことにある。免震・制振部材の大型化するにつれ、縮小・静的試験結果から実大・動的の結果を推定する方法の信頼性は低下しつつあるといえる。

一方、土木分野では、2011年東日本大震災や2016年熊本地震において、免震支承が破断する被害が複数の橋で発生した。また建築分野においては、免震・制振部材の検査データ改ざん問題が発生している。免震・制振技術は、不確実性が高い地震災害に対応するための有力な方法論であることは疑う余地がないが、地震後の供用性を高めるため免震・制振部材を取り巻くこれらの事象は、不都合な真実として、しっかりと向き合う必要がある。その対策の一つとして、日本の過酷な地震に対応した実大免震装置に対する動的試験の実施や、製造会社以外の第三者機関による性能認証を可能とする、大型動的試験機の整備が重要であるという機運が高まってきた。

5. SIP研究開発としての試験機技術開発

長大橋や超高層ビルを支持する免震部材は数千トンの大鉛直荷重を支持するため、大鉛直荷重下で高速度・大変形の動的加力試験を実施しなければならない。このためには、試験体を水平に高速で変形させるための加振台が必要になるが、加振台を振動させる水平アクチュエータには、試験体の反力に加え、加振台と鉛直アクチュエータ間の摩擦力、加振台の慣性力も同時に作用する(図1)ため、計測した水平荷重から除去す

ることは容易ではない。米国カリフォルニア大学サンディエゴ校に設置されている実大免震試験機SRMDでは、事前に試験体を設置していない状態での加振結果に基づいて摩擦特性をモデル化し、この影響を除去しているものの、その除去方法は開示されていない。また実大試験に対応するために加振台が大型化しているため、慣性力も大きい。このように水平方向には、計測したい試験体のせん断力に加え、特性が複雑な摩擦力と慣性力が混在しているが、加振台を動かす水平動的ジャッキに設けられた荷重計測器によって水平荷重を計測しているため、試験体そのものに作用しているせん断力を直接リアルタイムで計測することができないという重要な技術的課題があった。

上記の課題を解決するため、京都大学・東京工業大学・免震研究推進機構が共同で取り組んだSIP研究では、免震部材の水平力は、加振台とは逆側に設けた反力梁に取り付けた荷重計測器によって直接計測する新たな荷重計測機構(図2)を開発した。このような機構は、過去にも鉛直荷重が大きくない実験では用いられた事例^{例えば4)}などはあったが、SIPでは1万トン級の

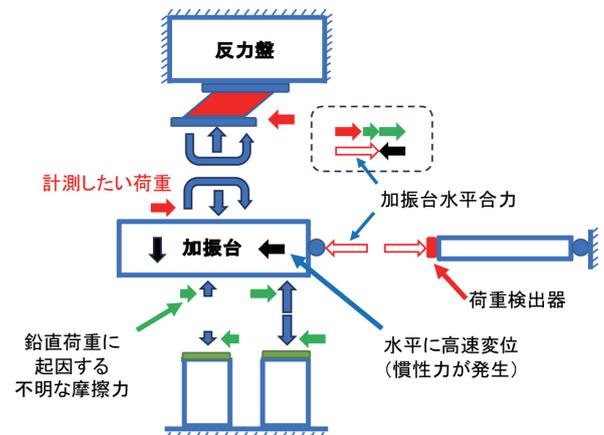


図1 従来の大型動的加力試験機における荷重検出機構

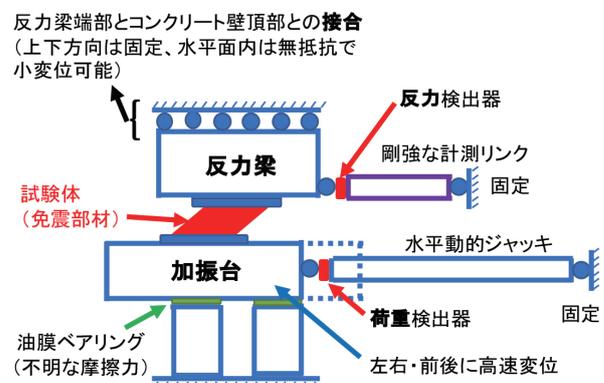


図2 反力梁側の荷重計測機構

鉛直荷重でも動作可能な荷重計測機構を目指し、小変形でも線形性が高いことを検証した積層ゴム支承⁵⁾を反力梁と剛強なコンクリート反力壁との間に挿入し、PC鋼より、試験体の水平力の99%程度は計測リンクの荷重検出器で直接計測し、残り1%程度が反力梁支持構造で負担する(変位を計測することで負担荷重算出可能)よう設計、実装し、検証実験を実施してきた。そしてSIP研究期間が終了した2023年4月より、日本最大の動的加力試験機E-アイソレーションとして、その一般供用が始まった。

6. E-アイソレーションの特徴

E-アイソレーション(写真1、2)は、試験体に最大鉛直荷重3,000トン(動的)載荷し、最大変位 $\pm 1.2\text{m}$ 、最大速度 0.8m/s での一軸動的加振が可能な日本最大の動的加力試験機である。



写真1 E-アイソレーション外観

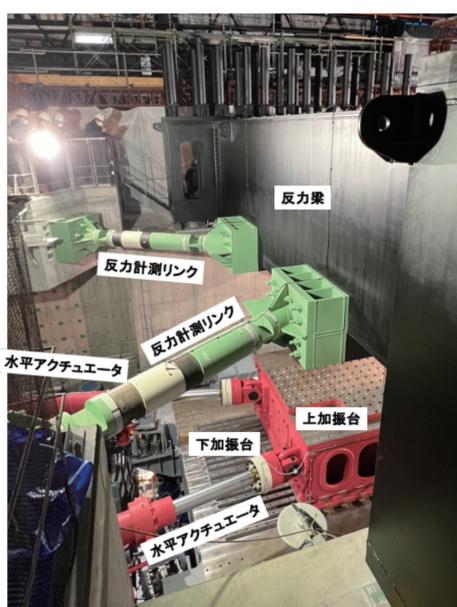


写真2 E-アイソレーションの加力・荷重計測機構

反力梁に設置された反力計測リンクで加振台に生じる摩擦力や慣性力の影響を受けない、正しい試験体の水平力をリアルタイムに知ることができる荷重計測機構の動的加振時性能を検証するため、 $\phi 1200\text{mm}$ の建築用実大積層ゴム支承(せん断弾性係数 0.29MPa)を設置し、定格面圧 15MPa (鉛直荷重 $1,693\text{トン}$)を載荷し、せん断ひずみ 200% 振幅で 2.5Hz の正弦波正負交番試験を行った事例を図3、4に示す。従来試験機のように水平アクチュエータで計測した荷重は、摩擦の影響を受けて剛塑性型の履歴、また慣性力の混入による振動が計測される(図3)のに対し、開発した荷重計測機構は大鉛直荷重の実験でも有効に摩擦力や慣性力を除去できている(図4)ことが分かる。製品検査のような使い方をされる場合、試験後直ぐに正しいデータとともに製品を出荷でき、結果、工期を短縮できるという社会的効果、産業分野へのメリットがある。

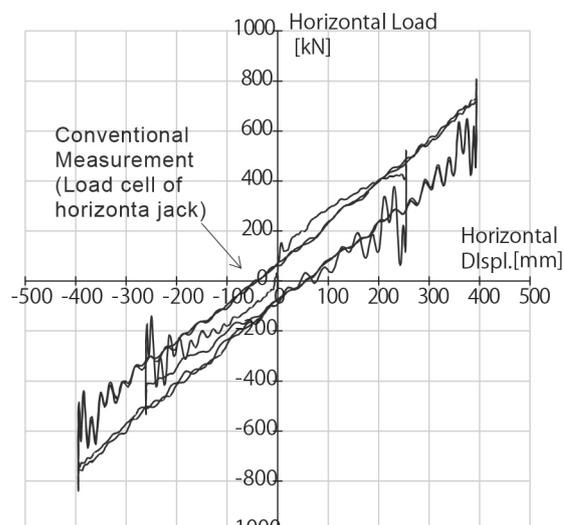


図3 従来型荷重計測による荷重-変位履歴関係

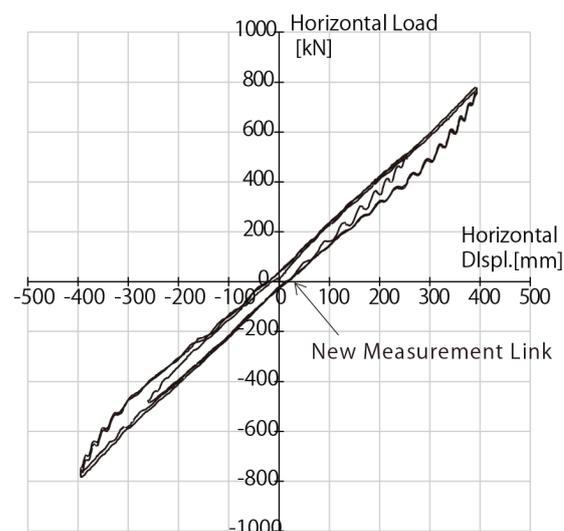


図4 反力計測リンク計測による荷重-変位履歴関係

E-アイソレーションでは、リアルタイム計測の恩恵により、加力試験と数値解析をリアルタイムで連動させる実時間ハイブリッドシミュレーションの実施が可能であり、既に数例の実時間ハイブリッドシミュレーション⁶⁾を実施している。φ1200mmの免震支承（弾性）10基で支持している2層免震建物に告示波（Hachinohe EW位相）の地震動を入力した際のレベル1応答をシミュレーションするため、建物を支持する免震積層ゴム支承1基をE-アイソレーションに設置して実験モデルとし、建物は数値モデルとして、その地震時応答を実時間ハイブリッドシミュレーションした結果における免震層の応答を図5に示す。(a)が純解析、(b)がハイブリッドシミュレーション結果であり、良好な実験が実施できていることが分かる。

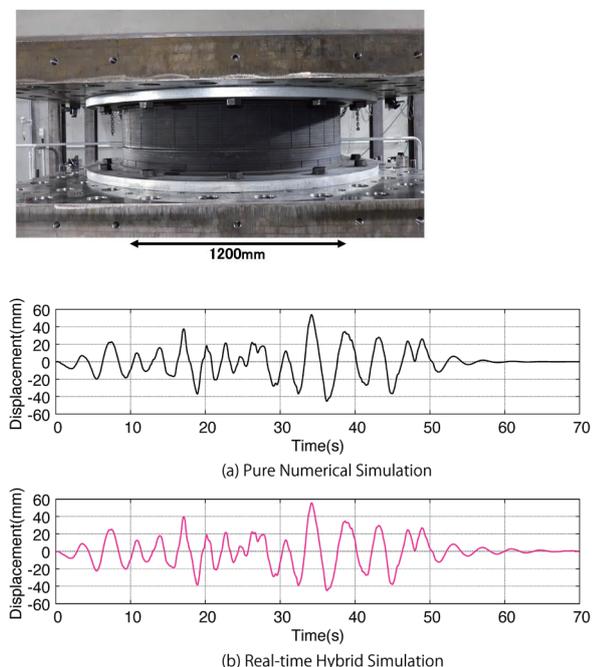


図5 実時間ハイブリッドシミュレーション結果の一例

7. 将来への期待とまとめ

E-アイソレーションは、2023年6月より本格的に運用が開始され、実大免震部材の質の高い動的挙動の蓄積が始まっている。従来より実大免震試験機の開発、およびこれを用いたシミュレーション技術開発を進めていた米国・中国・台湾等で進む先進的実験手法の開発に、ようやく我が国は並ぶとともに、計測技術の革新によって一歩先にリードすることができたと考えている。

E-アイソレーションを第三者機関として、免震・制振部材の性能認証を行うことで、我が国が土木・建築分野において世界の中で現在競争力を有する免震・制

振技術の優位性を維持し、さらなる高みへと押し上げることが期待される。また、世界最大三次元震動台であるE-ディフェンスに併置されE-アイソレーションが、さらにスーパーコンピュータを組み合わせた地震工学大型研究インフラとして機能させることで、我が国の地震工学分野における教育研究レベルを世界トップレベルに維持・強化することが期待される。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：国立研究開発法人防災科学技術研究所）によって実施した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Takahashi, Y., Takeuchi, T., Kishiki, S., Yoneda, M., Wada, A., E-Isolation-High-performance dynamic testing installation for seismic isolation bearings and damping devices, International Journal of High-rise buildings, Vol. 12, No. 1, pp. 1-13, 2023.
- 2) 高橋・竹内・吉敷・篠崎・米田・梶原・和田：E-Isolation：免震支承・制振部材の高性能実大動的試験機, MENSIN, No. 121, pp. 25-37, 2023
- 3) 高橋良和：実大免震試験施設「E-アイソレーション」の紹介、橋梁と基礎、Vol. 57, pp. 56-27, 2023.
- 4) 笠井和彦・坂田弘安・米華さとみ：粘弾性ダンパーを組み込んだ木質架構の動的挙動に関する実験研究、パッシブ制振構造シンポジウム2001, pp.203-212, 2001
- 5) 高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験施設の開発と実現（その1～17）、日本建築学会大会、2023.
- 6) 上田・植村・高橋・竹内・吉敷・米田・和田：高精度荷重計測機構を有する実大免震試験機の開発とハイブリッドシミュレーション機能、土木学会全国大会年次学術講演会、CS10-126、2023



高橋 良和（たかはし よしかず）

1994年京都大学卒、京都大学助手、准教授を経て現職、博士（工学）、専門分野：土木工学・耐震工学

長周期地震動と超高層建築物の地震防災

久田 嘉章

●工学院大学建築学部 教授

1. はじめに

本報告では長周期地震動と超高層建築物（高さが60mを超える建築物）の地震防災に関する経緯を概観し、今後に向けた課題を述べたい。

2. 柔剛論争から超高層建築物へ

2.1 1923年関東大震災と柔剛論争

明治以降、欧米から鉄骨造や鉄筋コンクリート造等の近代建築物が導入され、都市域の建築物の用途や高さ等を規制する市街地建築物法と都市計画法が1920年に施行された。当初は耐震規定がなく、高さが住居地域で65尺（約20m）、その他の商業地域等で100尺（約31m）に制限された。その後、1923年関東大震災で、浅草凌雲閣（高さ52m）の崩壊や耐震壁を導入した日本興業銀行の軽微な被害などの実状を踏まえて、1924年に市街地建築物法が改正された。地震荷重（震度0.1の水平力）が導入され、耐震壁等による「剛構造」が耐震設計の基本となった。一方、伝統木造の高層建物である五重塔では地震により倒壊した例が無いことなどから、海軍省の真島健三郎は、建物は柔らかくして地震力を受け流す「柔構造」の有利さを主張し、剛構造を主導した東大の佐野利器や武藤清らと論争となった¹⁾。武藤は「柔構造」を否定した理由の一つに、建物を長周期化すると長周期地震動と共振する可能性を指摘している。図1に示すように関東大震災の際、東大地震研究所の今村式2倍変位計で周期数秒以上の長周期地震動が観測されており、長周期地震動が当時から懸念されていたことは注目に値する。但し、この記録は振幅が振り切れており、巨大地震時の強震波形の詳細は不明であった。1930年代後半には真島の引退と、戦争に向かう混乱とともに柔剛論争は収束した。

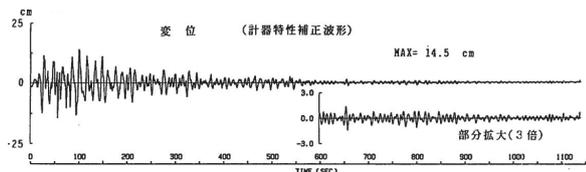


図1 1923年関東地震による東京市・本郷で観測され、振り切れた振幅を還元した今村式2倍変位記録²⁾

2.2 戦後の高度成長と超高層建築物

1948年福井地震（M7.1）の大被害を経て、1950年に

建築基準法が制定された。高さ制限（31m）は継続されたが、1950年代後半から高度成長期になると都市域の建物の高層化への社会的な要望が高まった。当時は米国で開発された強震計による強震記録の蓄積が進み、日本でも1953年にSMAC型強震計が開発され、強震記録が得られ始めた。さらに電子計算機による建物の地震応答解析も可能となっていた。その結果、図2に示すように1940年エルセントロ波に代表される「標準観測波」では、周期1-2秒程度以上の長周期域では応答加速度（地震荷重）が低減し、建物の高層化による「柔構造」が理論的に実現可能であることが明らかになった。実際、超軟弱地盤のメキシコ市で1956年に竣工したラテンアメリカ・タワー（44階建鉄骨造、構造高さ166m）³⁾は、1957年のGuerrero地震（ M_w 7.6、震源距離約260km）などの大地震でも無被害であった。これらを背景として、1961年に特定街区制度、1963年に容積地区制度が創設され、1965年には建築物の高さ規制が廃止された。霞が関ビル（地上36階、高さ147m）は特定街区制度の適用第一号であり、地震応答解析による耐震設計が行われた超高層建築物として1968年に竣工した。その「柔構造」の理論を主導したのは、かつて否定論者であった武藤清であった。巨大地震による長周期地震動の特性は不明であったが、「余裕度をもって設計する」こととされた⁴⁾。一方、強風や中小地震時には揺れを抑え、強震時には剛性を低下させて制振ダンパーとして機能する「スリット壁」⁴⁾を導入したことは特筆すべき工学的判断である。

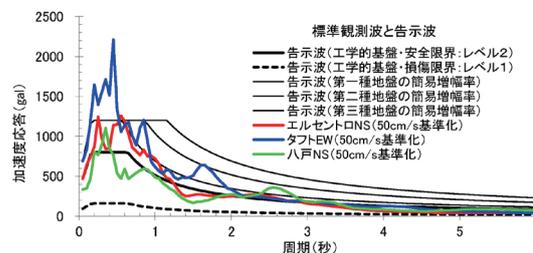


図2 標準観測3波（エルセントロ・タフト・八戸波の最大速度振幅を50 cm/sに規準化）と告示波による加速度応答スペクトル（5%減衰）

3. 様々な長周期地震動と超高層建築物

1960年代後半から、短周期が卓越する「標準観測波」とは異なる様々なタイプの「長周期地震動」が観測さ

れ、超高層建築物の対策が求められた。

3.1長周期・長時間地震動と高層建築物

1968年十勝沖地震 ($M_w8.2$) の際、八戸港湾において周期約2.5秒が卓越する強震記録 (八戸波) が観測された。これを契機に「やや長周期地震動 (現在の長周期・長時間地震動)」の研究⁵⁾が始まり、八戸波は設計用地震動の「標準観測波」に加えられた (図2を参照)。その後の研究で、「やや長周期地震動」は関東平野に代表される堆積平野・盆地の厚い堆積層・沖積層内で増幅する表面波が主要成因であることが明らかになった。「標準観測波」は超高層建築物の設計用地震動としてその後も使用され続けたが、1995年阪神・淡路大震災を契機とした2000年の建築基準法改正で図2に示す「告示波 (建設省告示第1461号)」が導入された。その応答スペクトルは、数十年に一度程度の中規模地震動 (損傷限界: レベル1) と数百年に一度程度の大地震動 (安全限界: レベル2) の二つのレベルの設計用応答スペクトルであり、新たな設計用地震動の「標準波」として現在では必ず使用される。但し、全国一律で最低基準の地震動であり、継続時間も60秒程度と短く、関東平野などの堆積盆地における巨大地震による長周期地震動としては不十分である。

一方、1980年代になると、長周期地震動により高層建築における様々な被害が報告され始めた。1983年日本海中部地震 ($M7.7$) や1984年長野県西部地震 ($M6.8$) では、東京・新宿の超高層建築でも大きい揺れが観測され、エレベータの管制ケーブルの切断や閉じ込め事故が起こっている。一方、1985年メキシコ地震 ($M_w8.0$) では震源から約390kmも遠方のメキシコ市で周期2~3秒の長周期地震動が卓越し、多数の中高層マンションが倒壊し、1万人近い死者を生じた。一方、前述のラテンアメリカ・タワーでは地盤の卓越周期を避けて設計しており、ほぼ無被害であった。

長周期地震動が我が国で広く知られるようになったのは、2003年十勝沖地震 ($M8.0$) による苫小牧のナフサタンクの延焼火災である。これを契機に日本建築学会・内閣府・国交省等で南海トラフ巨大地震による3大都市圏の超高層建物への対策への検討が行われた。2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_w9.0$) では、各地で長周期地震動が観測され、超高層建築が大きく揺れ、非構造部材等に様々な被害が発生した。特に震源から約770km近くも離れた大阪・咲州庁舎 (S造55階、高さ256m) の大きな揺れと様々な被害が目撃された⁹⁾。

3.2 南海トラフ・相模トラフ巨大地震と長周期地震動

2016年に内閣府は南海トラフ巨大地震による長周期地震動に関する報告書を公開し、それを受けて国土交

通省は関東・静岡・中京・大阪地域内の関係団体あてに超高層建築等の安全対策の通知を行った⁷⁾。そこでは長周期地震動として、安政東海地震モデル ($M_w8.6$) と宝永地震モデル ($M_w8.9$) を用いて、図3に示す関東・静岡・中京・大阪地域における設計用地震動が示されている。特に静岡・中京・大阪の湾岸地域では、現行の告示スペクトル (レベル2) の最大で2倍の振幅レベルを考慮した設計用地震動を用いて、超高層建築物の安全対策を検討することが求められている。

一方、相模トラフ巨大地震による長周期地震動に関しては、現在、内閣府・国交省において同様の検討が実施中である。ここでは関連する話題として、首都圏で想定される長周期地震動に関する観測記録の復元と地震動シミュレーションの事例を紹介する。まず観測記録として、1923年関東大震災の際、東大地震研究所では図1の復元波形に加えて、振り切れたユーイング式変位計による記録の復元が行われている⁸⁾。図4に速度応答スペクトルの比較を示すが、いずれの結果も振幅レベルは100 cm/sを下回る程度である。但し、当時の地震計の詳細なパラメータ (ドラムの回転速度、固有周期、減衰など) は不明であり、地震動レベルに関しては不確定性のあることに注意が必要である。

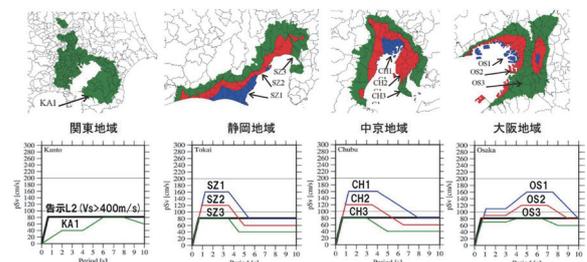


図3 南海トラフ巨大地震による長周期地震動を対象とした国土交通省の長周期通知 (技術的助言) に示された地域と擬似速度応答スペクトル⁷⁾

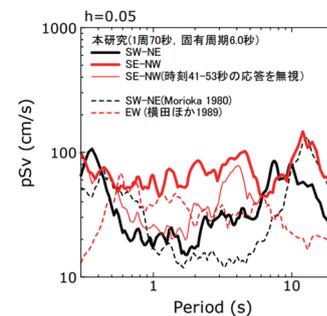


図4 1923年関東地震の際、東京・本郷で観測され、復元された変位記録による擬似速度応答スペクトル (「本研究」とMoriokaはユーイング式、横田他は図1の今村式の変位計)⁸⁾

次に相模トラフ巨大地震による長周期地震動のシミュレーション例を紹介する⁹⁾。図5はフィリピン海ブ

レートの上面に位置する想定震源断層の領域で、S1は1923年大正関東地震 (CS1、 M_w 7.9)、S1+S2は1703年元禄関東地震 (CS12、 M_w 8.3) の震源断層に相当し、さらに想定最大規模の地震 (CST123D、 M_w 8.6) も使用している。破壊開始点は大正関東地震を再現するS1領域の西側 (W点) に加え、中央部の南端 (C点) などを設定した。破壊伝播速度や断層すべり角などに揺らぎを与え、差分法による周期3秒以上で計算した。図6に東京都庁における速度応答スペクトル (平均と標準偏差、5%減衰) の例を示す。CS1地震の破壊開始点がWの場合、図4の再現記録とほぼ同等の100cm/sの振幅レベルである。一方、開始点がCの場合は断層破壊の伝播が東京に近づく指向性効果のために振幅レベルが大きく増大する。さらにCS1、CS12、CST123Dと地震規模が大きくなるほど、震源断層面がより近いほど (神奈川県などでは) 振幅レベルは増大する。一方、その後の長周期地震動評価¹⁰⁾では、全体的に振幅レベルは小さめに評価され、図4の観測結果に整合する結果を示している。但し、正確な強震記録がないために正解は不明であり、震源・地盤モデルの不確実性も考慮すべきである。首都圏の多くの地域の長周期地震動は、告示波のレベル2地震動を大きく上回る可能性があり、高層建築物としては、「余裕をもって対策を行う」という工学的判断が必要であると思う。

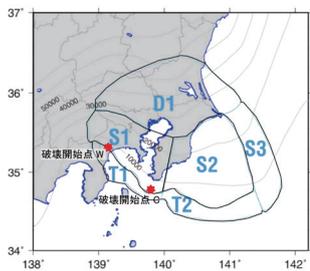


図5 相模トラフの巨大地震の震源モデル⁹⁾

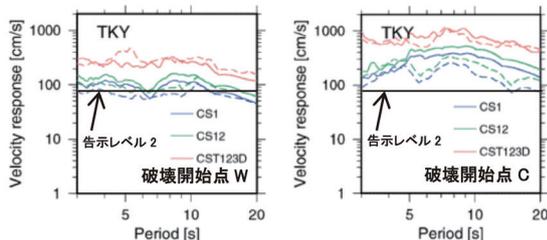


図6 地震規模と破壊開始点の違いによる東京都庁における速度応答スペクトル (平均と標準偏差)⁹⁾

3.3 活断層帯地震近傍の長周期地震動と断層変位

超高層建築物にとって最も深刻な強震動は、大規模な活断層帯地震近傍の大振幅のパルス波状の長周期地震動である。図7に擬似速度応答スペクトルの観測例

を示すが、告示波のレベル2地震動に比べて、長周期帯域で数倍もの大きな振幅レベルを示している。

活断層近傍の大振幅地震動には、図8に示すように「指向性パルス (Forward Directivity Pulse)」と「フリグステップ/パルス (Fling Step/Pulse)」の2種がある¹¹⁾。まず、指向性パルスの典型例は1995年兵庫県南部地震 (M_w 7.3) の神戸市の強震動である。横ずれ断層による震源断層の近傍では、断層破壊の伝播が進行する観測点において、断層面に直交する向きに指向性パルスが発生する。兵庫県南部地震では深さ数kmより深い地震発生層内の震源断層において、複数個の強震動生成域 (またはアスペリティ) から周期1秒程度の大振幅パルスが発生した。これが神戸市の阪神高速や多数の老朽建物の倒壊などの甚大な被害を生じさせた一因と考えられている。

現在の米国の高層建築物等の設計用地震動では、活断層帯近傍 (M_w 7以上で15km以内など) の場合、地震規模や断層距離など類似な条件で、かつ指向性パルスを含む11個の強震記録を使用することが求められている¹²⁾。一方、日本では設計者が自主的にサイト波を策定して考慮することが期待されているだけで、指向性パルスへの配慮は義務化されていない。

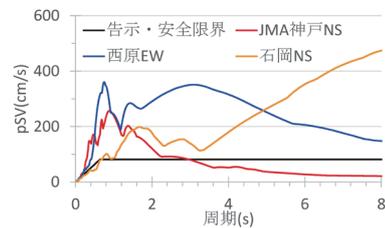


図7 活断層帯地震近傍で観測された大振幅地震

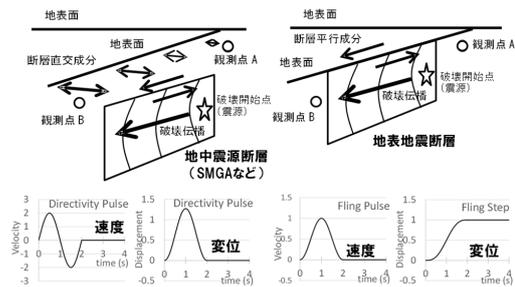


図8 横ずれ断層と近傍の大振幅地震動の模式図¹¹⁾
(左：指向性パルス、右：フリグパルス/ステップ)

大規模な地表地震断層が出現した場合、その近傍では断層変位に起因する「フリグステップ/パルス」が発生する。典型例は、1999年台湾・集集地震、2016年熊本地震、2023年トルコ・シリア地震などで観測されている。図8に示すように、その速度波形は片振幅の長周期パルス (フリグパルス) となり、変位波形は断

層変位による永久変位を含むステップ関数状の波形（フリングステップ）となる。さらに地表地震断層の直上では、断層変位への対策も必要になる。写真1に示すように縦ずれ断層では、建築物は大きく傾斜する。但し、写真のような低層の「剛構造」であれば、倒壊する可能性は低く、修復などの対策が可能である。一方、縦長の超高層建築物や免震建築では、最悪な場合には倒壊に至る可能性も検討が必要である。活断層帯地震の発生確率は極めて低く、断層変位の影響範囲も限定されているが、該当する場合には活断層や地盤の調査を行い、施主や住民等にリスクを説明するなど、慎重な対応を検討すべきである。



写真1 1999年台湾・集集地震の際、逆断層変位すべりの直上で大きく傾斜した3層RC造住宅（左）と修復後の様子（右）

4. おわりに

本報告では、現行の告示レベル2地震動を凌駕する可能性のある様々な長周期地震動を紹介した。数千年以上に1度程度と極めて可能性が低いが過酷な大振幅地震動は余裕度検証用のレベル3地震動として、設計クライテリアを設定するなどの対策が求められる。

最後に地震防災に関する追加項目を紹介したい。まず大半の建物では使用期間中に経験するのは中小規模の地震動である点を指摘したい。超高層建築物の場合、レベル1地震動を用いて、構造部材だけでなく、非構造部材（間仕切り壁、設備機器や内外装材、昇降機、家具・什器など）の被害を最小限に抑え、早期の修復可能性を高めることも重要である。

またハード対策による被害低減に加えて、想定を超える被害が出た場合のソフト対策も必須である。現在の超高層建築物では消防法により防火・防災計画と防災訓練が義務化されている。但し、実際は平時の火災を想定した通報・初期消火・避難の計画と訓練が主な内容である。大地震時には、館内に同時多発する様々な被害（小火、閉じ込め、負傷者など）が生じ、特に高層階では誰も助けに行けないため、同じ階の住民による自助・共助が必須になる¹³⁾。特に人口稠密な中心市街地等では大群衆による混乱が予想され、帰宅・避難せず在館待機するなどの機能継続性が求められている。

災害後の復旧に関しても、区分所有が複雑な分譲集

合住宅などでは対応が極めて困難になる。例えば、超高層建築は応急危険度判定の対象外であり、さらに主に非構造部材に多数の被害が想定されるが、全壊・全損と判定されないと公的な生活再建費や地震保険等の資金は殆ど期待できない。このため、自力での再建が必要となるが、平時でも一般に修繕積立金等は不十分であり、震災後に多額の復旧資金を徴収することに管理組合の合意を得ることは困難になる。今後は集合住宅向けの持続可能な体制の整備などが必要になる。

最後に、今後は水害や土砂災害など複合災害の対策も重要である。高い耐震・耐火・耐水性能を備えた超高層建築であれば、平時は地域のコミュニティー施設として、非常時には水害時避難ビルや避難場所・避難所など地域の重要施設として期待でき、その場合は公的な支援も受けやすくなる。今後は工学だけでなく、関連分野を横断した対策が求められている。

参考文献

- 1) 株式会社ストラクチャー：柔剛論争の顛末 <https://www.structure.jp/column9/column9.html> (参照2023-12-27)
- 2) 横田治彦ほか：1923年関東地震のやや長周期地震動：今村式2倍強震計記録による推定、日本建築学会構造系論文報告集、401巻、pp35-45、1989
- 3) Zeevaert, L. and N. M. Newmark: Aseismic design of Latino American Tower, Proc. WCEE, 1956
- 4) 太田外氣晴、座間信作：巨大地震と大規模構造物—長周期地震動による被害と対策、共立出版、2005
- 5) 日本建築学会：強震動におけるやや長周期成分について、第4回日本地盤震動シンポジウム、1976
- 6) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震で何が起こったか、第39回日本地盤震動シンポジウム、2011
- 7) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について、2016
- 8) 翠川三郎ほか：ユーイング円盤記録式強震計による1923年関東地震の記象の解析、その2地震計の特性の検討に基づく地動の推定、日本地震工学会論文集 第22巻、第1号、pp16-35、2022
- 9) 地震本部：長周期地震動予測地図作成等支援事業、平成24年度成果報告書、2012
- 10) 地震本部：長周期地震動 評価2016年試作版—相模トラフ巨大地震の検討—、2016
- 11) 久田嘉章：～震源近傍の強震動～指向性パルスとフリングステップ～、日本地震学会ニュースレター、第70巻、第6号、pp18-21、2018
- 12) ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 2017
- 13) 久田嘉章：耐震の入口と出口の話—強震動と地震防災—、SEINWEB (NTTファシリティーズ)、2015 <https://www.sein21.jp/TechnicalContents/Hisada/Hisada0101.aspx> (参照2023-12-27)



久田 嘉章 (ひさだ よしあき)

工学院大学建築学部教授（工学博士）。1984年早稲田大学理工学部建築学科卒業。工学博士。早稲田大学とUniv. of Southern California助手、工学院大学の専任講師・助教授を経て、2003年より教授。専門は地震工学、複合災害防災。

第16回日本地震工学シンポジウム特別セッション 事前Webアンケートからみる「NEXT関東大震災」の災害イメージ

入江さやか

●松本大学地域防災科学研究所 教授

／廣井 悠

●東京大学先端科学技術研究センター 教授

／東 貞成

●電力中央研究所 研究アドバイザー

1. はじめに

2023年は関東大震災からちょうど100年の節目に当たることから、第16回日本地震工学シンポジウム(16JEES)のテーマは「関東大震災から100年を経て今後100年の地震工学を考える」とされた。これを踏まえ、16JEES運営委員会の行事・企画部会では、特別セッション「関東大震災を通してみる未来の都市災害と防災～都市は強靱になったのか～」を企画し、改めて関東大震災を振り返るとともに、将来発生するであろう「NEXT関東大震災」に焦点を当てることにした。

この100年、東京を中心とした首都圏は大きく変貌し、100年前には存在しなかった社会インフラ、情報インフラに支えられており、産業構造や人口構造も異なったものになっている。地震工学の発展により強化したのものもあれば、新たな脆弱性も生まれている。関東大震災に匹敵する大規模地震が首都圏を襲ったとき、どのような被害が起き得るのか、それにどう対応するのか、分野横断的に議論するのが目的である。なお、本稿ではこの災害を、「NEXT関東大震災」とする。

行事・企画部会の特別セッション班(本稿の筆者3名)は、既存の関東大震災のイメージにとらわれず、闊達な議論を行うためのベースとするため、16JEESの主催12学会の会員を対象に事前にWebアンケートを行った。研究者の専門分野や年齢により、「NEXT関東大震災」の被害像の相違や、分野の間で見落とされている課題があるのではないかと考えたからである。本稿では、事前アンケートの分析結果と特別セッションの概要を紹介する。

2. 事前Webアンケート

2.1 アンケートの実施

アンケートはGoogle Formを用いて2023年3月14日から4月14日の1か月間で実施した。各主催12学会のメーリングリストや、16JEESの運営委員を通じて協力を呼びかけ、101人から回答を得た。アンケートは17問で、選択式の質問のほか、自由回答の質問も設けた。記名・無記名は選択できるようにした。

2.2 回答者の属性

回答者の属性は表1の通りである。所属する組織は、半数近くが「大学・研究機関」だったが、「民間企業」

の回答者も3割程度あった。

年齢は、50代が33人で最も多く、次いで40代(26人)、60代(25人)だった。30代は6人、20代は2人で、今後の地震工学を担う若い世代の声を拾いきれなかったのは残念であった。

専門分野(複数回答)は、「地震」が41人で最も多く、次いで「建築(26人)」「地域防災(23人)」「土木(18人)」で、「地盤」「情報」「火災」「都市計画」「機械」など幅広い分野から回答を得た。

表1 アンケート回答者の属性

所属	大学・研究機関	48
	行政機関(国・都道府県・自治体)	3
	ライフライン事業	2
	通信事業	1
	民間企業	32
	メディア	1
	その他	14
年齢	20代	2
	30代	6
	40代	26
	50代	33
	60代	25
	70代	6
	80代以上	3
専門分野 (複数回答)	建築	26
	土木	18
	地震	41
	火災	6
	地盤	13
	情報	7
	機械	2
	都市計画	7
	地域防災	23
	その他	14

2.3 アンケート結果

本アンケートと特別セッションでは「NEXT関東大震災」を、「1923年の関東地震と同様のハザードが発生した場合に想定される災害」と定義した。

アンケートの前半では、「地震動による住家被害(全壊棟数)」「住家倒壊が要因の死者・行方不明者」「火災による住家被害(焼失棟数)」「火災による死者・行方不明者」「急傾斜地崩壊・液状化・津波(地震動・火災以外)による住家被害(全壊)」「急傾斜地崩壊・液状化・津波(地震動・火災以外)による住家被害が要因の死者・行方不明者」「産業施設(工場等における建物倒壊や火災)における死者・行方不明者」について質問した。

質問にあたっては、各質問には参考情報として、(a) 1923年関東大震災の被害データ、(b)内閣府による被害想定データ（大正関東地震タイプのイベント発生時、一部は都心南部直下地震Mw7.3発生時）を示し、それらを上回るか、下回るか、選択肢（5択）で回答を求めた。

2.3.1 住家被害と人的被害

「地震動による住家被害（全壊棟数）」については、約75%が100年前の関東大震災より大きくなると回答した（図1）。「住家倒壊が要因の死者・行方不明者」についても、50%が100年前より大きくなると回答した（図2）。

回答者属性とのクロス集計を行ってみると、全壊建物数については、建築・土木・地盤の分野の専門家は「内閣府想定よりも住家被害は少なくなる」と回答した人の割合が高い。死者・行方不明者については、年齢が高いほど「100年前よりも死者・行方不明者が多くなる」と考える傾向がみられた。

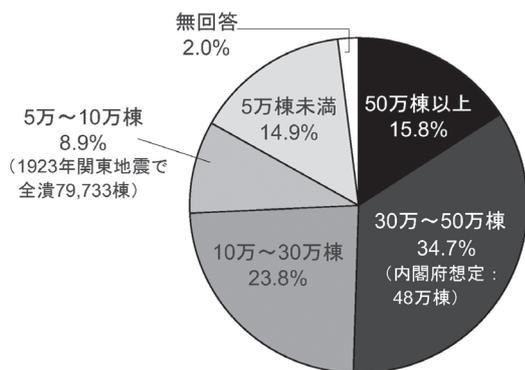


図1 「地震動による住家被害（全壊棟数）」の想定

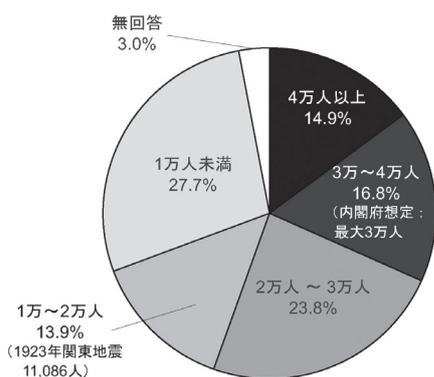


図2 「住家倒壊が要因の死者・行方不明者」の想定

2.3.2 火災と人的被害

「火災による住家被害（焼失棟数）」については、約50%の専門家が「100年前よりも多くなる」と回答（図3）。さらに、焼失棟数については、年齢が高いほど「100年前よりも多くなる」と考える傾向がみられた。火災

の専門家は半分以上が焼失棟数は「内閣府想定以上」と回答していた。

一方、「火災による死者・行方不明者」は、75%以上の専門家が「100年前よりも減少する」と回答した（図4）。また、50%以上の専門家が「内閣府想定よりも少なくなる」と回答した。ただし、年齢層が高くなるほど、「100年前よりも死者・行方不明者が多くなる」と回答し、火災・都市計画の専門家は「100年前以上になる」と回答した人が多かった。

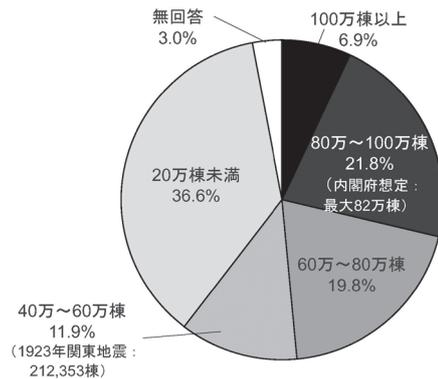


図3 「火災による住家被害（焼失棟数）」の想定

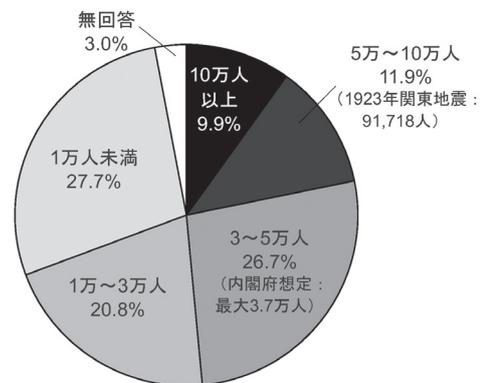


図4 「火災による死者・行方不明者」の想定

2.3.3 急傾斜地・液状化・津波による建物被害と人的被害

「急傾斜地崩壊・液状化・津波（地震動・火災以外）による住家被害（全壊）」については、50%以上の専門家が「内閣府想定以上」と回答。また年齢が高いほど、「建物被害が多くなる」と考えている（図5）。

「急傾斜地崩壊・液状化・津波（地震動・火災以外）による住家被害が要因の死者・行方不明者」については、約75%が「100年前よりも多くなる」と回答（図6）。他方で、建築・土木・地盤の専門家は「内閣府想定よりも少なくなる」との回答が多い傾向がみられた。

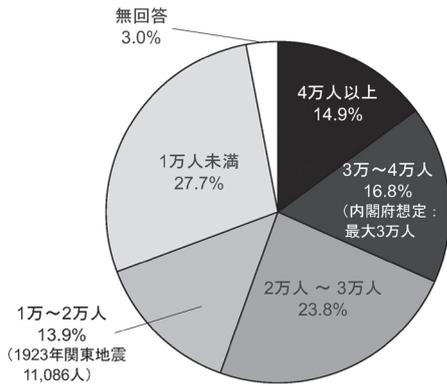


図5 「急傾斜地崩壊・液状化・津波による住家被害(全壊)」の想定

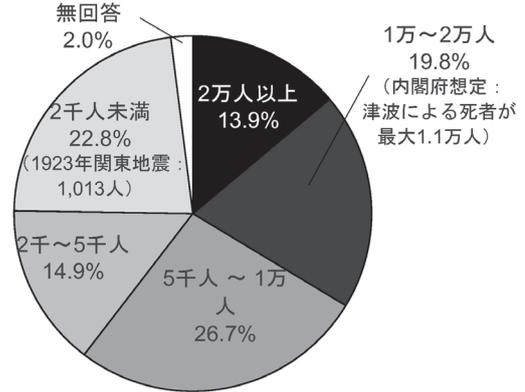


図6 「急傾斜地崩壊・液状化・津波による住家被害が要因の死者・行方不明者」の想定

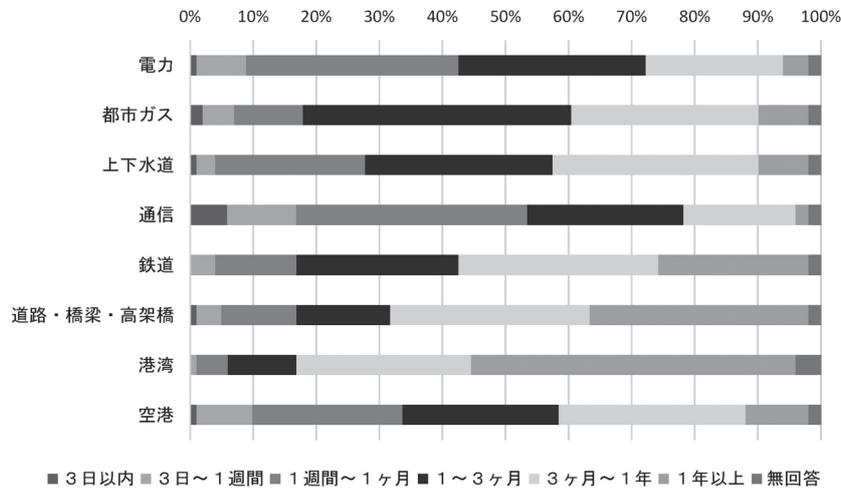


図7 「ライフライン・交通の復旧」の想定

2.3.4 ライフライン・交通機能の復旧

アンケートの後半には、ライフラインや交通に関する質問を設けた。「電力」「都市ガス」「上下水道」「通信」「鉄道」「港湾」「道路、橋梁・高架橋」の機能が9割程度まで復旧するのに、どのくらいの期間を要するか質問した。こちらも参考情報として、2.1で示した内閣府の被害想定を示した。結果は図7の通りである。

「電力」「都市ガス」「上下水道」「通信」については、比較的短期間で復旧を想定している回答者が多いが、「港湾」については51.5%が「1年以上」と想定し、「道路、橋梁・高架橋」については34.7%が「1年以上」と回答した。

2.3.5 懸念される被害や影響

さらに、建物被害や直接的な人的被害、ライフライン被害以外で「懸念される被害や影響」を24項目提示

し、最大5項目を選択する質問を設けた。その結果が次ページの表2である。

「生活物資の不足(58.8%)」と「医療の機能不全(52.9%)」の2項目が目立って多く、次いで「帰宅困難者への対応(37.6%)」「社会経済活動の機能不全(29.4%)」「複合災害の発生(28.2%)」「道路の閉塞による避難や救援・消防活動への支障(25.9%)」などであった。

自由記述においては、建設・土木の現場における人材や資材の不足が復旧を阻害することへの懸念や、避難所や仮設住宅の不足、自助と共助の不足による地域防災力の低下、高層住宅の非構造部材被害などを指摘するコメントが寄せられた。

表2 NEXT関東大震災で懸念される被害や影響
(複数回答)

生活物資の不足	58.8
医療の機能不全	52.9
帰宅困難者への対応	37.6
社会経済活動の機能不全	29.4
複合災害の発生(台風、大雨、洪水、火山噴火等)	28.2
道路の閉塞による避難や救援・消防活動への支障	25.9
国力の低下	24.7
長周期地震動による高層ビル等への影響	23.5
災害廃棄物の処理	22.4
エレベータ内閉じ込め	20.0
災害関連死の発生	18.8
危険物・コンビナート施設の被害	18.8
行政の災害応急対策等の機能不全	18.8
保健衛生、防疫、遺体処理等の機能不全	17.6
造成宅地の被害	14.1
災害時要援護者(要配慮者)の避難やケア	11.8
交通機関(鉄道・道路など)における人的被害	10.6
治安の悪化	10.6
地下街・ターミナル駅における混乱	9.4
在留外国人や来訪外国人の避難やケア	8.2
大規模集客施設等における混乱	4.7
文化財の被害	3.5
堰堤・ため池等の決壊	3.5
海岸保全施設・河川管理施設の沈下等	2.4
無回答	1.2

(%)

2.3.6 都市は強靭になったか？脆弱になったか？

アンケートの最後には「1923年関東大震災のときに比べて、総合的にみて現在の首都圏は大地震に対して強靭になったと思いますか」という問いを設けた。これに対する回答は図8の通りである。

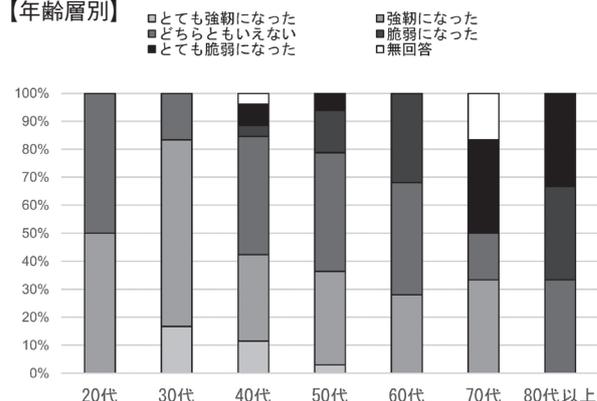
年齢が高くなるほど「脆弱になった」とする傾向が明らかである。また、専門分野が土木・機械・都市計画の回答者は「強靭になった」とする回答が多い一方で、地震・火災・地域防災の回答者は「脆弱になった」が多く、理学やソフトの分野の研究者ほど厳しい見方をする傾向がうかがわれる。

3. 16JEES特別セッション

3.1 特別セッションの概要

特別セッションは、16JEES会期中の11月24日の午後で開催した。本稿の冒頭に述べた通り、1923年の関東大震災を振り返った上で、今から100年後を見据えて、関東大震災に匹敵する大規模地震による揺れ・津波・地盤変状などが首都圏を襲ったとき、どのような被害

【年齢層別】



【分野別】

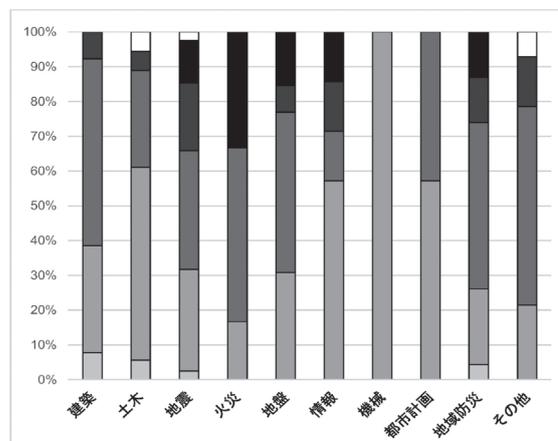


図8 都市は強靭化したか？脆弱化したか？

が起き得るのか、それにどう対応するのかを分野横断的に議論することが目的である。メインのG404の会場に230人、その他の部屋での中継視聴、オンライン参加をあわせると260人余りが参加した。

冒頭、行事・企画部会特別セッション班の東から趣旨説明を行い、同班の廣井がアンケート調査結果を報告した。

3.2 特別講演

特別講演では、武村雅之氏(名古屋大学特任教授)が「関東大震災の真相とその後の東京：震源、被害そして復興から」と題して、30年にわたる調査研究の成果を1時間半にわたり講演した。武村氏は「関東大震災を経験しながら、現在の東京が再び地震に怯えなければならないのは、▽郊外の木造密集地域の形成▽大規模なゼロメートル地帯の形成▽首都高速道路による水辺破壊▽都心部の容積率緩和による高層ビルの林立▽湾岸埋立地の高層住宅の孤立問題があると指摘。「品格あるまちづくりを目指した関東大震災後の復興事業の理念を思い起こし、今こそ東京を地震に強い街に造り変えていかなければならない」と訴えた。

3.3 パネルディスカッション

パネルディスカッションでは、川口健一氏（東京大学教授）は建築、楢田泰子氏（神戸大学教授）はインフラ、中林一樹氏（東京都立大学名誉教授）は都市計画、関谷直也氏（東京大学教授）は災害情報や行政対応、丸谷浩明氏（東北大学教授：事前収録動画による話題提供）は経済被害・BCP、福和伸夫氏（名古屋大学名誉教授）は地方から見た首都圏と、それぞれの視点から議論していただいた。コーディネーターは、特別セッション班の入江が務めた。

3.3.1 登壇者からの話題提供

最初のパートでは、各登壇者から「NEXT関東大震災で懸念される被害とその対策」について、話題提供していただいた。

川口氏は、体育館など高所設置の非構造部材、特に鉄骨建物の最上階の天井、屋外の非構造部材（看板、サインボード等）の耐震対策が見落とされているとした。建物の耐震性を高めても、非構造部材の被害で建物の機能維持ができなくなるリスクがあると指摘した。

楢田氏は、東京の特殊性は「地上にも地下にも人が密」であると述べ、高層建築物の閉じ込めや孤立、高架橋の被害、地下鉄を含む鉄道の駅間停車などが懸念されるとした。エネルギー・インフラ高依存からの脱却、自律した生活・事業への転換を図り、経済性重視の東京一極集中の「密」から脱却することが必要だと指摘した。

関谷氏は、地震で都市部の大規模火災が発生した場合の対応が認知されていないとし、火災時の広域避難場所への避難と通常の避難の違いを認識している人は非常に少ないと述べた。また、関東大震災や東日本大震災では被災地からの「広域避難」が行われたが、政府の首都直下地震ではこうした広域避難対策が検討とされていないと指摘した。

丸谷氏は、経済被害・BCPの観点から東京の都市構造の特殊性に着目し、勤務時間帯に発災すれば都心から郊外への帰宅や脱出に3日間を要し、夜間・休日に発災すれば郊外から都心部への参集が危険になると指摘した。東京以外の拠点で中枢機能を代行できるBCPが必要だが、まだ十分ではないと述べた。

中林氏は、地震で自宅を失ったり、ライフライン障害が長引き、自宅での生活ができなくなれば、高齢者の災害関連死のリスクが高まるが、現在の首都直下地震の想定には「災害関連死」が盛り込まれていないと指摘した。高齢化社会における「災害関連死」対策こそ、今後取り組むべき課題であると強調した。

福和氏は、地方から見た東京は人口集中や関東大震

災の教訓の忘却、都市のスプロール化、沖積低地への市街地の拡大、古い宅地造成地、高層化などリスクが増大している一方で、独居世帯も多く、災害に対応する地域力が低下していると指摘した。

3.3.2 アンケート結果をどう見るか

アンケート結果についてもコメントをいただいた。「次の関東大震災でも首都直下地震でも、東日本大震災と同様に『想定外』という言葉がガンガン出てくるのではないか」（中林氏）、「アンケートではモノの被害を中心に質問しているが、復興まで考えれば『社会に対するダメージ』がどのくらいかという視点も必要」（川口氏）、「阪神・淡路大震災を体験している年代は地震の揺れによってモノが壊れるということを知っている。若い年代はそれがないので、回答に差が出ているのではないか」（楢田氏）、「関東大震災で起きた火災からの避難や流言などの経験が、ソフト対策として現在に引き継がれていない。土木・機械・都市計画の専門家が『強靱になった』とみている一方で、地震・火災・地域防災の専門家が『脆弱になった』とみているのは、そうした部分が現れているのではないか」（関谷氏）、「私は専門家の方が悲観的にみているという印象を受けた。公共事業を手掛けている土木と、コスト競争をしている建築では、現状認識が多少異なっている点がユニークだと思った」（福和氏）など、年齢や分野で差が出た要因などについて、多様な視点から分析がなされた。

3.3.3 都市は強靱になったのか？

後半では、特別セッションのテーマである「都市は強靱になったのか？」という問いを登壇者に投げかけた。

「さまざまな耐震技術で物理的な被害は少なくなると思うが、復旧に必要な資源が不足し、復旧にかかる時間がどんどん延びていくのではないか。また、インフラの復旧が優先され、個人の住宅が復旧するまでそうとう時間がかかるのでは」（楢田氏）、「日本は格差社会に向かっており、地震の後、復興ができたとしても、より格差の広がった社会になっているのではないかと懸念している」（川口氏）、「社会学では都市は人が集まるほど脆弱になると考えられている。加えて、都市に集まる人が、都市の脆弱さや関東大震災の教訓、火災からの避難の仕方などを知らないことで、さらに脆弱性が増してしまう」（関谷氏）、「2022年の東京都の被害想定では、建物や火災の被害率は下がっており、ハードは安全になってきている。一方で高齢化が進み、災害時要配慮者が増え、コロナ禍もあいまって隣近所のつきあいやコミュニティが希薄化し、社会は脆弱化

している。地震の後で、被害のないタワーマンションの一室で孤独死している高齢者が見つかる、そんなイメージだ」(中林氏)、「タワーマンションなどの建物については、命は守れるかもしれないが、使い続けられるかという点では少し心配だ。東京に人口が集中し、Hazardも vulnerability も exposure も高まっていることを認識し、安全なまちづくりをすべき」(福和氏)など、この100年間の耐震技術の進展でハード面では強靱になってはいるが、コミュニティや避難などのソフト面や復旧プロセスに不安材料があるとするコメントが多かった。

3.3.4 これから何をすべきか？

特別セッションの最後に、ここまでの議論を踏まえて「NEXT関東大震災に向けてこれから何をすべきか」を各登壇者に聞いた。

まず川口氏は、「関東大震災100周年 日本建築学会提言—日本の建築・まち・地域の新常态」の内容を紹介し、「これからすべきことは、幸福で健康で長生きできる社会に向かって最適解を見つけていくこと。具体的には、少ない投資で復興費用を格段に減らす工夫、眼前に山積する課題に対して最小限の投資で皆が幸せな社会を実現する最適経路を見つける研究が求められている」とした。

楢田氏は「地震防災を進めていくのはお金も時間もかかるが、帝都復興院総裁の後藤新平が『文装的武備論』で示したように、災害への備えをいかに日常のシステムに付加させるかということを考えてほしい」と述べた。

関谷氏は「関東大震災で起きたような火災や情報の途絶や、広域避難の必要性などを、現実的な課題として知っておく、考えておくことが一番重要ではないか」と指摘した。

中林氏は「事前復興」研究の重要性を挙げ、「後藤新平は関東大震災翌日の9月2日に『帝都復興の議』を書き上げたが、東京市長時代に東京大改造、事前復興のイメージをもっていたのでそれができた。今度東京が被災したら、どんな東京に戻すのか、それを今から考えておくべき」と強調した。

福和氏は「われわれ技術者は、歴史や社会の勉強を少しおろそかにしていたかもしれない。社会を知り、時間軸の歴史をきちんと見ながら技術の開発をしていくことによって、これからの地震災害に向き合っていくのではないかと結んだ。

特別セッションの閉幕にあたり16JEES運営委員長の久田嘉章氏(工学院大学教授)が「関東大震災から100年、日本の社会は拡大してきたが、これからは縮小

に向かう。その中で、地震防災の目標に向かってどれだけ各分野の力を結集していけるか、そのために日本地震工学シンポジウムがある。今回の議論をぜひ生かしてほしい」と総括した。

4. まとめ

短期間で実施したアンケート調査であったが、年齢や専門分野によって、NEXT関東大震災の被害像に違いがあることを可視化できたのは、一定の意義があると考えている。また、自由記述では、土木・建築に関わる人的・物的リソースの不足など、現在の被害想定には反映されていない課題も提示された。今年度から内閣府でも首都直下地震の被害想定や防災対策の見直しが始まっている。このアンケート結果と特別セッションでの議論が、NEXT関東大震災や首都直下地震の防災対策について議論を深めていく一助になれば幸いである。

最後に、アンケート調査にご協力をいただいた12学会のみなさま、特別セッションにご登壇いただいたみなさまに改めて御礼を申し上げる。



入江 さやか (いりえ さやか)

1987年一橋大学社会学部卒業、2022年東京大学学際情報学府修士課程修了。読売新聞社、(株)日本総合研究所などを経て2000年にNHK入局。報道局社会部、災害・気象センター、放送文化研究所などで災害報道に携わる。2022年より松本大学地域防災科学研究所教授。専門は、災害報道・災害情報。



廣井 悠 (ひろい ゆう)

1978年10月東京都文京区生まれ。名古屋大学減災連携研究センター・准教授等を経て2021年8月より現職。博士(工学)、専門は都市防災、都市計画。平成28年度東京大学卓越研究員。JSTさきがけ研究員(兼任)。



東 貞成 (ひがし さだのり)

電力中央研究所・研究アドバイザー。1985年早稲田大学理工学部卒業、1991年東京大学理学系研究科博士課程修了、同年電力中央研究所入所、現在に至る。博士(理学)。専門：応用地震学、地盤震動。

第16回日本地震工学シンポジウムの開催報告

久田 嘉章

●工学院大学
運営委員会委員長

／小檜山 雅之

●慶應義塾大学
幹事長、総務・会場部会長

／永野 正行

●東京理科大学
学術部会長

／松島 信一

●京都大学
行事・企画部会長

／阿部 慶太

●日本大学
国際部会長

1. シンポジウムの趣旨

日本地震工学シンポジウム (Japan Earthquake Engineering Symposium; 以下、JEES) は1962年に第1回が開催され、以来4年に一度開催される地震工学分野における我が国最大の研究集会であり、世界地震工学会議 (World Conference on Earthquake Engineering; 以下、WCEE) の中間年に開催されています。前回のJEES (15JEES、仙台市) は2018年の開催でしたので、本来は2022年の開催予定でしたが、コロナ禍により17WCEE (仙台市) が2020年から2021年に延期されたのに伴い、16JEESも1年遅れての開催となりました。

16JEESは、(公社)日本地震工学会を幹事学会として、(一社)日本建築学会、(公社)土木学会、(公社)地盤工学会、(一社)日本機械学会、(公社)日本地震学会、(一社)地域安全学会、(一社)日本活断層学会、日本災害情報学会、日本災害復興学会、日本自然災害学会、さらには今回から(公社)日本都市計画学会を新たに加えた計12学会の共同主催で行われました。さらに、国・自治体等の計8団体による後援、(公財)大林財団による助成、さらに計19の団体による協賛を頂きました。

2023年は奇しくも関東大震災の100周年であり、今回は「関東大震災から100年を経て、今後100年の地震工学を考える～過去に学び、複合化する激甚災害に備えた持続可能な社会を目指して～」をテーマとして、会場も関東大震災で甚大な複合災害が発生した横浜市での開催としました。口頭・ポスター発表による一般論文セッションに加えて、様々な分野を横断した計15のオーガナイズドセッション、英語による国際セッションのほか、関東大震災からの100年を振り返り今後100年の地震工学・防災を展望する特別セッション、および、海外からの招聘講演者を交えた国際基調講演セッションを開催しました。また22団体による技術展示や懇親会、初の試みとして主催12学会による会長懇談会を開催しました。さらに1923年関東大震災に関連する史跡・遺跡マップを発行し、痕跡を巡るエクスカージョンも実施しました。前回と同様に、若手優秀発表者を選抜し、さらに、シンポジウム開催後には査読付き論文としての日本地震工学会論文集で特集号を編集します。

2. 概要

16JEESは2023年11月23日(木)～25日(土)の3日間、横浜市西区みなとみらいのパシフィコ横浜ノース (写真1) 4階において開催されました。また、続く11月26日(日)に1923年関東地震の痕跡を巡るエクスカージョンが実施されました(本号「関東大震災の史跡・遺跡をたずねて」を参照)。発表された論文は表1のとおり合計612編、また参加者数は表2のように982人でした。

シンポジウムは初日の9時から久田嘉章運営委員会委員長の開会挨拶(写真2)、主催学会を代表して日本地震工学会高田毅士会長の挨拶で始まりました。

表1 講演数・発表論文数

項目	講演数
論文あり講演数	609
内、口頭発表／ポスター発表	479/130
内、一般第一著者／学生第一著者	421/188
内、一般セッション／オーガナイズドセッション	386/223
論文なし招待講演数	4
特別セッション 特別講演／パネリスト講演	1/6
国際基調講演セッション 論文あり／なし	3/1

表2 参加者数

項目	人数	参加費
論文発表 第一著者 (一般)	408	25,000円
同 (学生)	188	15,000円
招待講演	13	
一般参加 (早期事前割引登録)	192	15,000円
(非割引／現地登録)	103	17,000円
(無料、招待含む)	45	
学生参加 (早期事前割引登録)	24	15,000円
(非割引／現地登録)	9	17,000円



写真1 会場 (パシフィコ横浜ノース)



写真2 開会式で挨拶する久田運営委員会委員長

3. 論文発表等

3.1 発表論文の概要

16JEESでは、13JEES以降の方式に倣い原則査読無しとし、地震工学・地震防災に関する論文のほか、幅広い範囲の自然災害に関わる研究論文を募集しました。1人当たりの講演数は基本的に1題としましたが、後述するオーガナイズドセッション(OS)のオーガナイザーからの依頼による発表、「OS15 2023年トルコ地震緊急報告」での発表を含む場合は、最大2編の講演を可能としました。

一般セッションの分野別の発表件数、OSのカテゴリ別の発表件数を、それぞれ表3、表4に示します。一般セッション386編、OS 223編、合計で609編の論文発表が行われました。この発表数は、前々回(第14回)の430編、前回(第15回)の395編を大幅に上回ったのはもちろんのこと、第13回の583編をも上回り、ここ数回で最大級の規模になったと言えます。査読はありませんでしたが、日本地震工学会論文集に16JEES特集号・OS特集号を設け、査読付き論文として投稿を推奨いたします。

一般セッション、OSを含む口頭発表は8会場(2日目のみ6会場)で行いました(写真3)。午前、午後でそれぞれ2つのセッションを設け、1セッションあたり7件の発表を基本としました。3日間の延べセッション数は76となりました。口頭発表一件当たりの配分時間は、発表8分質疑4分の合計12分としました。地震・地震動関係のセッションで参加者が入りきれない状況が続くなどの課題もありましたが、いずれの会場も概ね活況であったかと思えます。

3.2 オーガナイズドセッション

今回のシンポジウムでは、過去最大規模の15のOSが企画された点が特徴です(表4)。地震工学に限定されない「複合化する激甚災害に備えた持続可能な社会を目指して」にふさわしいセッションが企画されました。その結果、全体の論文数の4割弱に相当する223編がOSに集まりました。また、21件の招待講演を含めバラエティに富んだ企画が提供されました。2023年2月に発生したトルコ・シリア地震を受け、現地調査、分析を速報的に紹介する「OS15 2023年トルコ地震緊急報告」を急遽企画いたしました。この結果、26件の発表が行われ、16JEESがトルコ・シリア地震に関する最新の情報交換の場ともなりました。

下記に示す各OSのオーガナイザーの皆様には、企画、運営にご尽力いただきました。御礼申し上げます。

【OS1】小林正人(明治大学)、福喜多輝(清水建設)、松田和浩(名城大学)、【OS2】吉見雅行(産業技術総合

表3 一般セッションの分野別の発表件数

カテゴリ	発表合計	口頭発表	ポスター発表
a. 自然現象(地震動、地下構造、地盤、津波、歴史地震ほか)	96	54	42
b. 構造物(地震応答、構造実験、耐震設計、免震、制振、耐震補強、相互作用ほか)	209	183	26
c. 社会問題(ライフライン、災害情報、リスクマネジメント、防災計画、復興計画ほか)	45	28	17
d. 被害調査・分析など	36	29	7
計	386	294	92

表4 OSのカテゴリ別の発表件数

カテゴリ	発表合計	口頭発表	招待講演	ポスター
OS1 免震・制振技術の継承と革新：レジリエントな社会を目指して	54	38	3	16
OS2 断層変位を考える	14	12	—	2
OS3 多発する地震時の盛土被害にどう対処したらよいのか？	27	24	(1)	3
OS4 歴史的建造物の地震対策を考える	11	11	(2)	—
OS5 強震動研究25年の進展	15	13	4	2
OS6 ESG研究の現在の到達点と将来展望	10	8	—	2
OS7 原子力施設の設計基準を超える事象に対する地震安全確保の考え方	3	3	3	—
OS8 地震と洪水のマルチハザード	6	6	—	—
OS9 災害対応訓練のあり方に関する検討	13	10	1	3
OS10 巨大地震に伴う大規模火災研究の現在地と今後	7	7	4	—
OS11 海溝型巨大地震の予測情報をめぐる防災対策とリスクコミュニケーション—「わかりにくさ」に向き合う—	12	12	2 (1)	—
OS12 地震災害レジリエンスに資する建物モニタリング技術	6	6	—	—
OS13 危機耐性：理論構築、技術開発から実装まで	12	12	—	—
OS14 国際セッション	7	7	—	—
OS15 2023年トルコ地震緊急報告	26	16	—	10
計	223	185	17(4)	38



写真3 口頭発表の様子

研究所)、庄司学(筑波大学)、田中信也(東電設計)、美原義徳(鹿島建設)、【OS3】安田進(東京電機大学)、橋本隆雄(国士舘大学)、大矢陽介(港湾空港技術研究所)、【OS4】古川愛子(京都大学)、橋本隆雄(国士舘大学)、【OS5】山中浩明(東京工業大学)、能島暢呂(岐阜大学)、【OS6】佐藤浩章(電力中央研究所)、松島信一(京都大学)、上田恭平(京都大学)、【OS7】高田毅士(JAEA)、山崎達弘(元IAEA)、笠原直人(東京大学)、【OS8】田村和夫(神奈川大学)、二瓶泰雄(東京理科大学)、【OS9】小山真紀(岐阜大学)、加古嘉信(上武大学)、【OS10】西野智研(京都大学)、村上正浩(工学院大学)、【OS11】山岡耕春(名古屋大学)、入江さやか(松本大学)、【OS12】肥田剛典(茨城大学)、中嶋唯貴(北海道大学)、向井洋一(神戸大学)、【OS13】本田利器(東京大学)、秋山充良(早稲田大学)、野津厚(港湾空港技術研究所)、高橋良和(京都大学)、庄司学(筑波大学)、【OS14】濱田純次(竹中工務店)、三宅弘恵(東京大学地震研)、上田恭平(京都大学)、倉田真宏(京都大学)、【OS15】小野祐輔(鳥取大学)、楠浩一(東京大学)、飛田哲男(京都大学)、倉田真宏(京都大学)

3.3 ポスターセッション

ポスターセッションの発表件数は一般セッション、OS合わせて計130件となりました。口頭発表中心の構成としたため、口頭発表の479件よりは少ないですが、それでも前回第15回とほぼ同数となっております。

ポスターセッションは2会場に分け、それぞれ大体半数に分け、昼、夕方の時間に40分間のコアタイムを設定しました。ポスターセッションを実施した2会場にはドリンクコーナーを設けるとともに、休憩用の椅子とテーブルを用意しました。1つの会場は技術展示ブースと同一空間とし、ポスターを見終わった参加者が技術展示ブースやドリンクコーナーを回遊できるように工夫をしました。密を避けるため、ポスター前は比較的ゆとりのあるスペースとしておりましたが、コアタイムには多くの人が集まり活発な議論を行っていました(写真4)。

3.4 若手優秀発表賞

JEESでは、日本の地震工学の将来を担う若手地震工学者の研究を応援するため、15JEESより35歳以下の方を対象に若手優秀発表賞を設けています。16JEESでは、表5に示す29名の優秀発表賞(審査対象者の約12%)を決定いたしました。受賞者の皆様にはお祝い申し上げます。また、審査を行っていただきました皆様には心より御礼申し上げます。



写真4 ポスターセッションの様子

表5 16JEES若手優秀発表賞受賞者リスト

論文番号	受賞者氏名(所属)
Day1-G403-23	梅村 亮(電力中央研究所)
Day1-G404-03	劉 虹(東京理科大学)
Day1-G404-12	志賀 正崇(長岡技術科学大学)
Day1-G404-24	鈴木 有美(大阪大学)
Day1-G416-06	北牧 さくら(工学院大学大学院)
Day1-G417-12	中辻 綾香(京都大学)
Day1-G417-28	西本 昌(大成建設株式会社)
Day2-G414-06	四井 早紀(東京大学)
Day2-G414-10	印南 千尋(日本大学)
Day2-G416-04	鍋島 国彦(神戸大学)
Day2-G418-14	友部 遼(東京工業大学)
Day2-G419-10	後藤 源太(株式会社高速道路総合技術研究所)
Day3-G403-25	春日井 秀俊(工学院大学)
Day3-G414-05	赤木 翔(三菱電機ソフトウェア株式会社)
Day3-G415-12	山木 誠也(建設技術研究所)
Day3-G416-16	大笹 航汰(室蘭工業大学)
Day3-G417-05	沢津橋 雅裕(電力中央研究所)
Day3-G417-12	伊吹 竜一(鉄道総合技術研究所)
Day3-G418-09	月岡 桂吾(鉄道総合技術研究所)
Day3-G418-19	木村 春里(東京工業大学)
Day3-G418-20	市川 大颯(京都大学)
Day3-G419-04	中田 幹久(大林組技術研究所)
Day3-G419-27	Jie Shen (Kyoto University)
Day1-C2-PA18	飯田 朋美(小堀鐸二研究所)
Day1-C1-PB04	上村 諒(トヨタ自動車)
Day2-C1-PB13	松澤 旺大(東京理科大学)
Day2-C2-PB19	Pan Da(広島大学)
Day3-C1-PB09	土肥 裕史(文部科学省)
Day3-C1-PB11	周 宇廷(京都大学大学院工学研究科)

4. 特別セッション

シンポジウム2日目(2023年11月24日(金))の午後に、16JEESのメインテーマについて議論するために「関東大震災を通してみる未来の都市災害と防災～都市は強靱になったのか～(Future of Urban Disaster and Disaster Prevention from Perspectives of the 1923 Great Kanto Earthquake –Has Urban Areas become more Resilient? –)」と題する特別セッションを催しました。メインのG404の会場で230人、その他の部屋での中継をあわせると260人余りが参加されました。本セッションでは関東大震災を振り返った上で、今から100年後を見据えて、関東大震災に匹敵する大規模地震による揺れ、津波、地盤変状などが首都圏を襲ったとき、どのような被害が起き得るのか、それにどう対応するのかについて分野横断的に議論を行うために、特別講演とパネルディスカッションを実施しました。

東貞成氏(電力中央研究所研究アドバイザー)から趣旨説明があったのち、本題に先立ち、1923年関東地震と同様の地震が発生したら首都圏ではどのような被害が想定されるか、各分野の皆さんがどのような感覚を持たれているのかについて実施した事前アンケートの分析結果について廣井悠氏(東京大学教授)から報告がありました。続いて、特別講演では、武村雅之氏(名古屋大学特任教授)より、「関東大震災の真相とその後の東京：震源、被害そして復興から」と題した講演があり、関東大震災の全容および復興過程の説明とそれに照らした現代の問題点についての指摘がありました(写真5)。パネルディスカッションでは、入江さやか氏(松本大学教授)がコーディネーターとなり、5名のパネリスト、川口健一氏(東京大学教授)、鎌田泰子氏(神戸大学教授)、中林一樹氏(東京都立大学名誉教授)、関谷直也氏(東京大学教授)、丸谷浩明氏(東北大学教授：事前収録動画による話題提供)、福和伸夫氏(名古屋大学名誉教授)を迎えて、関東大震災の頃と比べて都市(首都圏)が強靱化したかどうか、将来に向けた課題について活発に議論しました(写真6)。最後に、16JEES運営委員会委員長の久田嘉章氏(工学院大学教授)よりまとめがありました。なお、本セッションについては本号「第16回日本地震工学シンポジウム特別セッション事前Webアンケートからみる「NEXT関東大震災」の災害イメージ」に詳細な記事が掲載されていますので、そちらも参照してください。

5. 国際基調講演セッション

シンポジウム2日目(2023年11月24日(金))の午前に、「今後の100年を見据えた地震防災や強靱化のため



写真5 武村雅之氏による特別講演の様子



写真6 パネルディスカッションの様子

に必要な研究者や技術者の国際的な協力(International Collaboration between Researchers and Engineers for Earthquake Disaster Reduction and Resilience Building for the Next 100 Years)」と題する国際基調講演セッションを催しました。会場での参加者約70名、オンラインでの参加者35名をあわせ約100名の方に参加頂きました。

本セッションでは、日本地震工学会(JAEE)が学術協定を締結している、インドネシア地震工学会(IEEA)、台湾地震工学会(CTSEE)、国家地震工程研究中心(NCREE、台湾)、タイ王立工学会・土木工学分野(EIT)から、Prof. I Wayan SENGARA(バンドン工科大学教授、IEEA会長)、Prof. Chung-Che CHOU(国立台湾大学教授、CTSEE/NCREE会長)、Prof. Pennung WARNITCHAI(アジア工科大学教授、EIT会長)をお招きするとともに、日本地震工学会高田毅士会長(日本原子力研究開発機構リスク情報活用推進室室長、東京大学名誉教授)に加わって頂き、基調講演とパネルディスカッションを実施しました。

高瀬裕也氏(室蘭工業大学准教授)による司会で始まり、現在実施または今後計画している各学会での事業と、学会間連携に関して将来を踏まえ考えているこ

とを中心に上記の先生方より基調講演(写真7)を頂きました。その後のパネルディスカッション(写真8)では、楠浩一氏(東京大学地震研究所教授)がモデレーターとなり、パネリストより、本セッションのメインテーマである「今後の100年を見据えた地震防災や強靱化のために必要な研究者や技術者の国際的な協力」という観点からの意見を述べて頂きました。最後に、清野純史氏(京都大学教授)より、講演頂いた先生方に記念品を贈呈し、本セッションは閉会となりました。基調講演、パネルディスカッションともに、今回参加した学会間の連携を進めていく上で、意見および情報を交換する有益な場となりました。なお、オンライン配信に関しては、隈本邦彦氏(江戸川大学教授)に多々ご尽力頂きました。ここに深謝を申し上げます。



写真7 基調講演の様子



写真8 パネルディスカッションの様子

6. 主催12学会会長懇談会

JEESの初の試みとして主催12学会の会長を招待した懇談会を2日目の昼食時に開催しました。都合のつく9つの学会から参加を頂き(うち3つは代理出席)、さらに国際基調講演セッションに海外から招聘した3名

の学会長(前出)、16JEESから運営委員会委員長と幹事長、および、国際部会長、JAEE事務局長の計16名での開催となりました(写真9)。議題として、初めに次回JEESの幹事学会がJAEE、委員長・幹事長は土木学会が担当とすることを審議し承認を得ました。続いて各学会から学会概要や最近の取組みを紹介頂き、その後、懇談を行いました。会員減への対応や若手会員の確保、論文等のデジタル化や国際対応、中小規模の学会の事務の共有化など様々な意見交換が行われました。今後も分野を超えた連携が必要との共通認識が得られ、懇談会は有益であったとの声を頂きました。



写真9 会長懇談会の参加者

7. 懇親会

2日目18時半～20時に会場3階のG314+G315において、国際基調講演セッション講演者や特別セッションパネリストなどをお招きして懇親会が行われました。参加者数は、一般88名、学生10名、招待者13名の計111名で、久田運営委員会委員長の乾杯の挨拶で歓談がスタートしました(写真10)。



写真10 懇親会の様子

3年余り続いたコロナ禍が落ち着いたこともあり、地震工学に関わる様々な分野の研究者・技術者などの久々の有意義な交流の場となりました。歓談中、松島信一行事・企画部会長より来場受付時にプログラムと一緒に配布された関東地震ゆかりの地を巡るための史跡・遺跡マップの紹介(写真11)があり、最後は主催学会を代表してJAEE高田会長の挨拶で締めくくられました。



写真11 史跡・遺跡マップを紹介する松島部会長



写真12 技術展示の様子



写真13 協賛団体のロゴ入りカップ

8. 技術展示

ポスター発表会場の一つ、G401+402では22団体・28ブースの技術展示が催され、研究開発成果や地震防災の取り組み、地震工学関連技術・製品が紹介されました。体験型の展示(写真12)も複数あり、多くの参加者が説明員の方々の話に耳を傾けていました。

会場では協賛団体の支援で行われたドリンクサービス(写真13)もあり、ポスター発表のコアタイムを中心に多くの来場者がありました。出展団体からぜひ次回も参加したいとの高評価をいただきました。

9. おわりに

大正関東地震から100年の節目となる年に16JEESが無事、盛会に開催することができました。会場では多くの参加者が集い、活発に議論が交わされ、地震工学の発展と地震災害の軽減を目指す熱意が伝わってきました。

16JEESではこれまでよりもさらに国際化に踏み込みましたが、今後、日本の地震工学コミュニティが世界を先導するうえでJEESは重要な役割を果たし続けることでしょう。次回17JEESは2026年に開催予定です。皆様のまたのご参加を心から期待申し上げます。

謝辞

16JEES運営委員会は、学術、行事・企画、国際、総務・会場の4部会構成で、日本地震工学会を中心に12の主催学会から参加した委員55名で構成されました。コロナ禍が続く2年前から準備に取りかかりましたが、対面で多くの来場者を迎えて開催することができ、委員一同、安堵しています。後援いただいた、内閣府政策統括官(防災担当)、文部科学省、国土交通省関東地方整備局、気象庁、神奈川県、横浜市、一般社団法人防災学術連携体、独立行政法人国立科学博物館、助成いただいた公益財団法人大林財団、協賛いただいた16団体の皆様に心から感謝申し上げます。また、16JEESの企画・運営でご支援いただいた防災ログ東條孝明氏、適切な助言と事務作業をご担当くださった日本地震工学会の戸田薫事務局長と事務局員の皆様に厚く御礼申し上げます。

関東大震災の史跡・遺跡をたずねて

第16回日本地震工学シンポジウム運営委員会 行事・企画部会

1. はじめに

第16回日本地震工学シンポジウム(16JEES)では、メインテーマである「関東大震災から100年を経て、今後100年の地震工学を考える～過去に学び、複合化する激甚災害に備えた持続可能な社会を目指して～」を踏まえ、関東大震災に関連する参加者向けの行事を企画しました。11月24日(金)午後開催した特別講演およびパネルディスカッション、そして会期後の11月26日(日)に開催した、神奈川県内の関東大震災の史跡・遺跡をめぐるエクスカーションです。また、16JEESが開催された神奈川県内には、多数の関東大震災に関連する遺構が残されており、現在に残る関東大震災の史跡・遺跡マップを作成し、16JEES来場者の皆様に配布いたしました(図1)。

本稿では、関東大震災の史跡・遺跡をたずねてと題して、エクスカーション及び配布した史跡・遺跡マップについてご報告いたします。なお、特別講演およびパネルディスカッションについては、別稿にて詳細を報告していますので¹⁾、そちらをご覧ください。

2. 史跡・遺跡マップ

武村雅之先生(名古屋大学特任教授)に神奈川県下の史跡・遺跡について情報をご提供いただき^{2,3,4)}、16JEES運営委員会、行事・企画部会のメンバーで事前に神奈川県全域の史跡・遺跡について視察を行い、マップに掲載する箇所を選定しました。16JEESの会場であるパシフィコ横浜ノースから気軽に回っていただける、大岡川復興橋梁巡りコース、パシフィコ横浜近傍一筆書きコース、横浜港-山下公園散策コースの横浜周辺3コースと、本稿でご報告するエクスカーションで実際に回ったエクスカーションコース、休日に足を伸ばして回っていただけるような、三浦半島コースの計5コースを掲載しました。ここでは、後ほどご紹介するエクスカーションコースを除いた、横浜周辺コースと三浦半島コースの概要を紹介します。

・横浜周辺コース

横浜には、1859年の横浜港開港以来の近代建築や西洋館、土木遺産が多く残されています。関東地震をくぐり抜けてきた当時の建造物も多数現存しており、マップでは旧川崎銀行横浜支店や旧横浜居留地48番館



図1 史跡・遺跡マップ

等を掲載しましたが、それ以外にも多くの遺構が残されています。観光地として有名な山下公園は、関東大震災で生じた瓦礫を埋立てて造られ、横浜の復興のシンボルとなりました。横浜市を流れる大岡川では、関東地震の揺れによって多くの橋梁が落橋し、その後の火災でも多くの被害を受けました。史跡・遺跡マップでは、中村川との分岐よりも下流に位置しており、復興過程で架け替えられて、2023年現在でも現役の橋梁として使われている橋梁⁹⁾を掲載しました。それぞれの橋梁でデザインが異なり、竣工時の銘板が設置されています(写真1)。



写真1 山王橋に記された復興局建造の銘板

・三浦半島コース

三浦半島では、歴代の関東地震による隆起海岸の痕跡が多数残されています。諸磯の隆起海岸は、歴代の関東地震によって、海中にあった穿孔貝の巣穴が地表に露出している様を見る事が出来ます。馬の背洞門も同様の隆起海岸の痕跡で、大正の関東地震以前は洞門が海中にありましたが、現在では陸上で洞門となっています(写真2)。油壺の験潮所では、隆起に伴う海面の低下を記録しており、現在も残る旧建屋では、基礎部分が海上に露出しています。第三海堡は、1921年に30年の難工事の末完成しましたが、関東地震によって崩壊し、海中に没してしまいました。暗礁化して海難事故の要因となったため、現在は引き上げられて展示されています。観音崎灯台は、1922年の浦賀水道を震源とする地震によって初代の灯台が倒壊し、2代目灯台が1923年3月に竣工しましたが、わずか半年後の関東地震によって大きな被害を受けました。現在は3代目の灯台が建っており、中を見学する事も出来ます。海岸沿いには、2代目灯台の台座が残されています。各箇所同士は離れていますが、いずれの場所も、キャンプ場や総合公園のそばにありますので、ご旅行の際には是非お立ち寄りいただければと思います。



写真2 現在の馬の背洞門

図1の史跡・遺跡マップにつきまして、16JEES現地参加者の方には、製本したものをお配りしましたが、16JEESのホームページより高解像度版のダウンロードが可能ですので⁶⁾、16JEESに参加された方はもとより、参加されていない方も是非お手に取っていただければ幸いです。また、事前の視察の段階で、掲載した箇所以外にも多数の史跡・遺跡を回ってきましたので、いずれどこかで公開出来ればと考えています。

3. エクスカーション

・概要

16JEESの会期終了翌日である11月26日(日)に、1923年関東地震の痕跡を巡るエクスカーションを実施しました。対象地域は神奈川県南部(平塚～根府川)です。ここは関東地震の震源断層直上で、震度7相当の揺れが襲った地域です。液状化痕跡や被災建造物が残されており、土石流に襲われた地区も点在するほか、関東地震と同様な地震の繰返しを示す地形も存在します。エクスカーションではこうした地域を巡り、1923年関東地震への理解を深めることを狙いとしてしました。

実施に先立って、行事・企画部会メンバーで視察を行いました。最終的に、平塚駅集合、小田原駅解散という片道ルートを設定し、渋滞回避と移動時間の最小化を図りました。案内地は道が細く駐車スペースもないため、中型バス1台での実施としました。参加可能人数が少なくなり、参加は抽選とせざるを得ませんでした。少なからぬ方々にご不便をおかけしてしまったことをお詫び申し上げます。最終的には直前のキャンセルもあり、参加者13名、運営委員4名、案内者1名の計18名での実施となりました。

エクスカーションルートは平塚駅南口→旧相模川橋脚→馬入橋橋梁跡→湘南平→大磯照ヶ崎海岸→根府川

駅周辺としました。このルートで、液状化、構造物被害、海岸隆起、土砂災害が観察できます。土砂災害の専門家で歴史にも造詣の深い小長井一男先生（東京大学名誉教授）を案内人としてお迎えしました（写真3）。

参加者には、案内地の見どころを示す資料を配布しました（写真4）。実行委員が全体の資料を、小長井先生には根府川駅周辺の地すべりに関する資料、および平塚・大磯周辺を扱った歌川広重の東海道五十三次や古写真の説明資料をご作成・持参いただきました。これらの資料で参加者の理解も深まったと思います。



写真3 車内で説明する小長井一男東大名誉教授

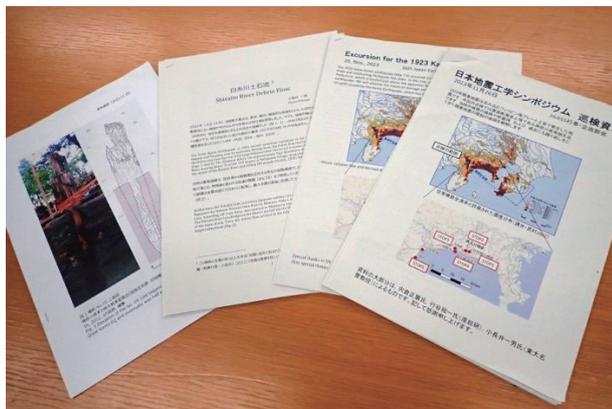


写真4 当日配布資料（英語版も作成）

・案内地点および当日の様子

・旧相模川橋脚

1923年関東地震および翌年の丹沢地震での液状化により水田の地下から出現した木製橋脚で、天然記念物と国史跡に指定されています。源頼朝が渡り初めをした鎌倉時代の橋に比定されています。精巧なレプリカが再現展示されており、現物は地下に保存されています。現地の説明板や当時の地形模型を見ながら、往時に思いを馳せました。

・馬入橋

馬入橋は東海道および鉄道が相模川を渡河する地点にあり、1923年関東地震では全橋が壊れ重大な交通支

障を生みました。現在は鉄道橋3橋と国道1号線の橋がありますが、鉄道橋の間に2列の橋脚基礎が残っています。これが関東地震で全壊した鉄道橋の遺跡です。エクサカーションでは、遺跡を遠望し、河川敷に残る橋脚基礎を観察しました。石積+コンクリート製基礎の上に煉瓦造の橋脚が載っている構造を観察しながら、被災原因についての議論が交わされました（写真5）。



写真5 馬入橋の被災橋脚基礎を観察する参加者

・湘南平

湘南平は平塚の西にある標高180 mの台地です。頂上は広い平坦面で、公園と展望台が設けられています。ここは約12万年前の波食棚で、関東地震のような地震の繰返して隆起してできたものと考えられています。展望台から目に映る範囲は全て1923年関東地震の震源域であり、関東地震のスケールを肌で感じられるスポットです。当日は曇りで風が冷たい状況でしたが、昼食をとりながら、三浦半島から伊豆半島までの湘南海岸および神奈川県南部地域を遠望しました。

・大磯照ヶ崎海岸

大磯海岸は湘南平の南にあり、関東地震で岩礁が隆起して現れた場所です。地震当時の岩礁のほとんどは港湾整備で失われていますが、西側にわずかに岩礁が残っています（写真6）。また、照ヶ崎海岸周辺には数



写真6 大磯照ヶ崎海岸に残る隆起岩礁

段の海成段丘面が残っています。これらを合わせ、隆起運動の連続を説明しました。大磯照ヶ崎海岸への道中では、小長井先生の案内で、東海道五十三次「平塚縄手道」「大磯」と同じ景色も楽しみました。

・根府川周辺

根府川周辺は1923年関東地震で最大の犠牲者を出した土砂災害が発生した場所です。根府川駅背後で発生した地すべりに、停車直後の列車とホームでの迎えの人々が巻き込まれ、130名余りが犠牲になりました。また、駅の西に位置する根府川集落を大規模な土石流が襲い、159戸中70戸が埋没し、289名が犠牲となりました。エクスカージョンでは根府川駅を起点に、根府川集落の遠望→大震災慰霊碑→白糸川橋梁→釈迦堂（土石流に埋まった磨崖釈迦如来：写真7）と巡りました。この根府川周辺に関しては、小長井先生の著書「地盤は悪夢を知っていた」⁷⁾に基づく詳細な資料を基に説明をしていただきました。根府川駅の1番線が無い話、現在の土石流対策について、白糸川鉄橋の橋脚基礎のうち現存する部位はどこか、など多くの話をしながら歩きました。現場を実際に見て歩くことで、関東地震最悪の土砂災害への理解を深めていただけたと感じています（写真8）。



写真7 土石流に埋まった釈迦堂内部



写真8 根府川周辺での見学の様子

4. おわりに

16JEES開催中の暖かい気候とは打って変わって、当日は肌寒く時折小雨も降る生憎の天気となりましたが、予定通りの行程で無事エクスカージョンを終えることができました。参加された方々、案内いただいた小長井先生に感謝申し上げます。案内資料の作成にあたっては、産総研の宍倉正展氏、行谷祐一氏の資料を基にしました。資料英訳に際してはDeepLを用いました。感謝申し上げます。

エクスカージョンで巡った地点は史跡・遺跡マップにも掲載しています。ドライブがてら1923年関東地震への理解を深めるのはいかがでしょうか。

参考文献

- 1) 入江さやか、東貞成、廣井悠：関東大震災に対するアンケート、日本地震工学会誌第51号、pp. 30-35、2024.
- 2) 武村雅之、都築充雄、虎谷健司：神奈川県における関東大震災の慰霊碑・記念碑・遺構その1、JSPS KAKENHI 25350496、2014.
- 3) 武村雅之、都築充雄、虎谷健司：神奈川県における関東大震災の慰霊碑・記念碑・遺構その2、JSPS KAKENHI 25350496、2015.
- 4) 武村雅之、都築充雄、虎谷健司：神奈川県における関東大震災の慰霊碑・記念碑・遺構その3、JSPS KAKENHI 25350496、2016.
- 5) 関東大震災の跡と痕を訪ねて 今に残る震災復興橋、https://www5d.biglobe.ne.jp/~kabataf/kantoujisin-ishibumi/yokohama_fukkou_hashi/fukkou_hashi3.htm (参照2023-12-11).
- 6) 第16回日本地震工学シンポジウムホームページ 史跡・遺跡マップ、https://confit.atlas.jp/guide/event/jees2023/static/Historicsites_Ruins_Map (参照2023-12-11).
- 7) 小長井一男（執筆代表）：地盤は悪夢を知っていた、土木学会「地盤と地形に刻まれた地震・災害痕跡データの公開促進小委員会」編、210p、2021.

淑徳与野高等学校での出前授業

加藤 一紀

●株式会社大林組技術本部技術研究所
副主任研究員

井上 和真

●群馬工業高等専門学校環境都市工学科
准教授

近藤 伸也

●宇都宮大学社会基盤デザイン学科
准教授

1. はじめに

事業企画委員会では、地震工学の担い手不足や、学生会員が正会員へ移行する際に退会していくといった諸課題に対応するため、中学生・高校生（非会員）や、大学生・大学院生（学生会員）、若年研究者・技術者を対象とした新たな企画の検討・実施を行ってきた。

一例として、2022年12月16日、日本地震工学会・大会-2022において、会員向けに「学生と若手技術者・研究者の交流サロン～地震工学のキャリア形成～」を開催している¹⁾。これは、学生や若手技術者・研究者が、お互いに地震工学分野におけるキャリア形成を考える場を設けることを目的として実施したものである。

一方で、2020年以降、新型コロナウイルスが猛威を振るい、対面でのイベント実施が制限される中、特に非会員向けの新企画の実施が困難な状況が続いていた。

2023年5月8日から新型コロナウイルス感染症の感染症法上の位置づけが5類感染症となったことで、対外的に対面でのイベント実施がしやすい環境となってきた。こうした変化を受け、地震工学を広く知ってもらい、この分野を志す人を増やすことを目的とした企画実施を、委員会内で改めて検討してきた。

そのような中、今般、淑徳与野高等学校において、学生に向けた地震工学に関する情報提供の機会を得ることができた。同校では例年、高校1、2年生を対象とした学生の進路選択のための「エンカレッジ講座」が実施されており、本出前授業はその1コマ（80分）において2023年10月12日に実施したものである。

本稿では、実施概要と受講者の反応について報告する。

2. 授業の概要

授業の流れと各項目の概要、ねらいを表1に示す。地震工学を身近に感じてもらうため、厳密さよりもわかりやすさを重視し、高校までの学習内容（数学・物理等）とのつながりも意識した内容とした。

「エンカレッジ講座」での出前授業が決まった当初から、80分という時間の中で一方的な座学とならないよう体験的な内容を盛り込むことや、大学への進路選択を考える高校1、2年生が対象であったため、大学で学べることなどを紹介することを考えた。

体験的な内容としては紙ぶるる²⁾を作製し、簡易的な加振装置を用いて作製した模型を揺する時間を盛り込むこととした。

進路情報については、近年は進学先だけでなく、その後のライフワークバランスまで見据えた進路選択を考える女子高校生もいるとの事前情報から、地震工学に近い分野で活躍する女性技術者・研究者の情報がまとめられているサイト^{例えば3)}の紹介なども盛り込むこととした。

表1 授業の概要とねらい

●プロローグ	10分
・自己紹介：経歴や地震工学分野へ進んだ動機を話し、受講者の進路選択の参考としてもらう。	
・マインドセット：バイアスを排除し、効果的な対策を考えるためには定量的な分析が必要であることの認識づくり。	
●地震被害を減らすためにできる4つのこと	15分
・対策として①場所的対策、②構造的対策、③運用的な対策、④リスク移転の切り口で考えてみる。この内、地震工学と関わりの深い①～③について理解を深めてもらう。	
・場所的対策として地震の起きない場所に住むことが可能か考えてみる。その際、地震と震災の違いや直近の震源マップなどで地震について理解を深めてもらう。	
●模型を使った耐震補強と補強のメカニズム	25分
・構造的対策として、「紙ぶるる」の作製と、加振装置を用いた応答の確認から耐震補強を体験・理解してもらう。	
・補強の種類（耐震、免震、制振）とそれぞれのメカニズムについて理解を深めてもらう。	
●既往地震と地震工学	15分
・運用的な対策として、BCPや避難訓練だけでなく、構造物の設計基準を策定することの重要性を認識してもらう。	
・過去に発生した地震を通して、耐震設計がどのように変遷してきたか、地震被害と併せて概略を知ってもらう。	
●ハードとソフト	10分
・ハード対策は重要である一方で限界があることを知ってもらう。	
・ソフト対策も重要であることをEーディフェンスの加振実験の映像を通して感じてもらう。	
●進学先や進路先	5分
・地震工学を学ぶことができる学科を知ってもらう。	
・地震工学に関係の深い進路先を知ってもらう。	
・女性技術者・研究者の働き方に関する情報があることを知ってもらう。	

3. 受講者の反応

授業の様子を写真1、2に示す。同じ時間帯に複数用意されている講座から、学生が選んで参加する形式であったため、参加した15名の学生は、興味を持って授業に耳を傾けていた。

進路選択に際して真摯に向き合っている様子が、紙ぶるるの作製や、授業後の個別質問などにおける積極性に現れており、アウトリーチとしての今回の出前授業に一定の手ごたえを感じた。

授業後に実施した5段階評価のアンケート結果を抜粋して図1に示す。15人中13人が、「元々、地震や地震工学、防災に興味があった」と回答してはいるものの、内容・満足度共に良好な回答を得ることが出来た。

自由回答欄では、以下のような回答がみられた。

- ・ぶるるが面白かった。
- ・xの格子がどれほど大事なのか分かった。
- ・現象を数式に持ち込むところに感動した。
- ・行ってみたいと思った学部・学科が増えた。
- ・私は文系なので(中略)三助のところやソフト対策をしっかりやっていきたいです。
- ・弾性領域をもっと知りたいと思った。

以上のように、受け止め方の多様さはもちろんのこと、今勉強していることの活用場のイメージや、今



写真1 授業の様子



写真2 「紙ぶるる」作製の様子

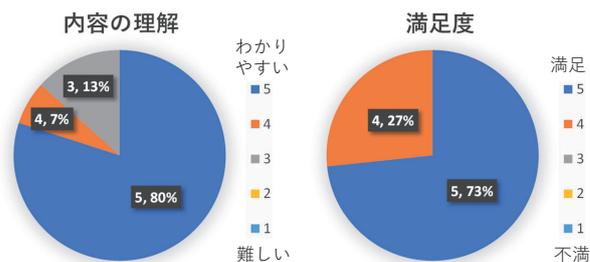


図1 事後アンケート結果 (N=15)

後の進路選択について具体的な視座を持つことが出来た学生もいたようである。

他方で、情報量が多かったという感想や、今回カバーしきれなかった内容(津波、具体的な仕事の内容等)を詳しく知りたいといった意見も寄せられた。

4. 結びに

地震工学分野を志す人を少しでも増やすことを目的とした出前授業を実施し、高校生に対して目的に沿った情報提供が出来たように思う。今後も継続的に実施するためには課題は多いが、機会の創出も含めて取り組んでいきたいと考えている。

一方で、こうした「湯船にお湯をためる活動」も栓がしまっていなければ、十分な効果を発揮しない。地震工学を学び始めた学生や若手技術者・研究者が、学会発表だけでなく、もっとこの分野にのめり込みたいと思えるような場の創出も重要なテーマである。

この点については、会員の皆様のご協力も得ながら企画・実施していきたいと考えている。

謝辞

今回、貴重な機会を与えていただいた淑徳与野高等学校の皆様、特に小嶋恵子様、渡邊雄一様、藤波茜様に感謝申し上げます。また紙ぶるるを揺らすための簡易的な加振装置、電動ぶるるをお貸出しいただいた戸田建設様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本地震工学会：日本地震工学会誌、No.48、P.39、2023.2.
- 2) 名古屋大学福和研究室：かみぶるる、http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/data/labofT/bururu/family/paper_bururu/html/kamibururu.html(参照2023-12-18).
- 3) (一社)土木技術者女性の会：Civil Engineerへの扉、https://www.womencivilengineers.com/ce2017_ebook/?pNo=1(参照2023-12-18).

「Eーディフェンス震動台実験見学会」報告 コンクリートブロック塀耐震性能の検証実験

田端 憲太郎

●国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門 副部門長

1. はじめに

日本地震工学会では、地震工学に関連する国内の実験施設の知識を深めるため、防災科学技術研究所（防災科研）の実大三次元震動破壊実験施設「Eーディフェンス」において実施される震動台実験の見学会を2009年度より定期的に開催しています。2023年度は、補強コンクリートブロック造の塀（以下「ブロック塀」と記載します。）等の試験体を対象とする実験の見学会を2023年10月16日に開催しましたので、本稿にて報告します。

2. Eーディフェンスの概要

Eーディフェンスは、実際の地震動を三次元で再現する面積300 m²の震動台（写真1）により質量1,200トンの実物大規模の構造物の破壊現象を観測することができる世界最大の実験施設であり、防災科研・兵庫耐震工学研究センター（兵庫県三木市）に所在します。1995年阪神・淡路大震災をきっかけとして整備が進められ、2005年に運用を開始し、2023年12月末までに125件の実験を実施しました。

3. 実験の概要

見学を行った実験は、防災科研と大林（株）との共同研究の一環として実施したものです。この研究において対象としたブロック塀は、住居、学校などの敷地境界においてプライバシーの確保、防犯、防火などのため、全国に膨大な数が設置されています。過去の地

震において、数多くのブロック塀が倒壊等の損傷を生じており、塀の損傷による人的・物的な被害や、損傷したブロック塀による交通障害とそれに起因する避難行動や応急対策・復旧活動への支障などの被害を多数引き起こしています。現在、ブロック塀は建築基準法に基づいて施工されていますが、現行基準を満たしていない古い塀も多く存在しています。地震時におけるブロック塀による人的・物的被害や地震後の交通障害・活動への支障を低減するためには、ブロック塀の耐震性能や安全性を担保することは重要です。Eーディフェンスでの実験では、建築基準法適合・不適合のブロック塀、新たな工法として建築基準法不適合のブロック塀に補強を施した塀、新たな技術を導入したブロック塀など9種類の試験体に対して設計用地震波や観測地震波を入力する加振を行い、それぞれの試験体の耐震性能や安全性を検証しました。

震動台上に設置された試験体（写真2に示す①～⑨）の特徴は以下のとおりです。

- (1) 建築基準法施工令に準拠して控え壁を設置したブロック塀（試験体③）
- (2) 建築基準法不適合の、差し筋による施行がなされたブロック塀（試験体④）
- (3) 新たな補強工法として、控え壁の代わりに鋼製支柱による補強を施したブロック塀（試験体①）
- (4) 新たな技術を導入した工法として、異形棒鋼による配筋をガラス繊維強化プラスチックに替えて施工したブロック塀（試験体②）、ボイドを用いて壁体重量を軽量化する新しい工法による鉄筋コンクリート組積造ブロック塀（試験体⑥）
- (5) ブロック塀の弾性強度等を確認するための試験体（試験体⑦）、土の変形を考慮して塀の基礎形

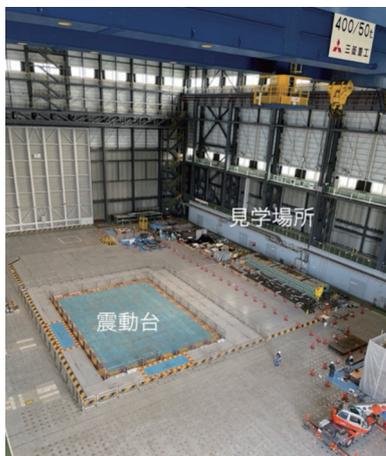


写真1 Eーディフェンスの震動台と見学場所



写真2 震動台上の試験体（加振前）

状、根入れ深さ、変形性能を考察するための試験体(試験体⑧⑨)

(6) 壁仕上げを部分的に施し、シャッターを設置したエクステリアゲート(試験体⑤)

これらの試験体に対して実験では、1940年インペリアルバレー地震時のエルセントロにおける観測地震波のNS方向の位相を用いて平成12年建設省告示第1461号の規定に基づき作成された設計用地震波(告示波)による水平一方向(震動台長手方向)加振の後に、1995年兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台における観測地震波(JMA神戸波)による水平・鉛直の三方向加振を行いました。震度6強に相当する告示波を入力する加振により、建築基準法に適合しないブロック塀(試験体④)は基礎より上部が転倒し倒壊に至りました(写真3)。一方、建築基準法に適合したブロック塀や新たな工法を導入したブロック塀には、告示波や震度6強に相当するJMA神戸波を入力した加振において顕著な損傷は観察されなかったことから、これらの耐震性能を実証すると共に、新たな工法の有効性を確認することができました。この実験結果を基に、研究ではブロック塀の動的挙動の分析や新たな工法の有効性のさらなる評価に取り組む見込みです。

4. 見学会の様子

見学会には全国各地からの36名の方にご参加いただきました。ご参加の方には見学場所の実験棟2階(写真1の右)から、告示波による加振により建築基準法不適合のブロック塀の倒壊やその他の試験体が倒壊に至らずそれぞれに応答する様子をご覧いただきました(写真4)。実験を見学した後、実験棟に隣接する計測制御棟内にてE-ディフェンスを活用した研究開発の説明や質疑応答を行い、多くの方から多種多様なご質問をいただきました(写真5)。また、今回の見学会では実験を見学した後、E-ディフェンスの隣地に新設された、一般財団法人免震研究推進機構が運用する実

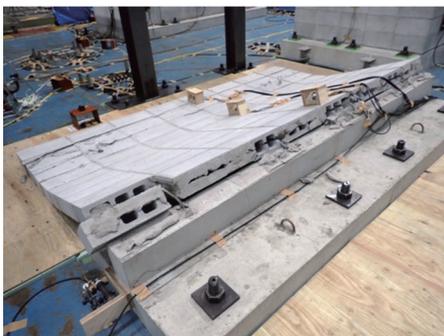


写真3 加振により倒壊した建築基準法不適合のブロック塀(試験体④)



写真4 実験見学の様子



写真5 質疑応答の様子

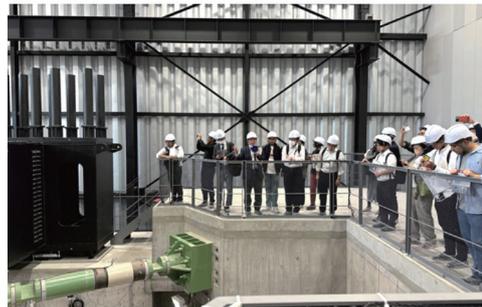


写真6 実大免震試験機見学の様子

大免震試験機をご見学いただく機会も設けました(写真6)。

謝辞

見学会の開催にあたり、パシフィックコンサルタンツ(株)青木梓様、足利大学・王欣准教授(事業企画委員会委員)、防災科研・大村浩之特別研究員・阿部弘招へい技術員・木下悦子専門職ほかE-ディフェンスの関係の方々には準備段階から当日に至るまで多岐にわたりご対応いただきました。研究を担当する防災科研・福井弘久特別研究員、佐藤栄児主任研究員、河又洋介主任研究員には指導・助言、資料提供など協力をいただきました。また、実大免震試験機の見学にあたりご対応いただいた一般財団法人免震研究推進機構の関係の方々には様々にご協力をいただきました。これらの皆様に厚くお礼申し上げます。

岩楯 徹広先生を偲んで

當麻 純一

●地震予知総合研究振興会専務理事 日本地震工学会正会員

日本地震工学会の正会員である岩楯徹広先生（首都大学東京名誉教授・首都大学東京OU特任教授・上海交通大学客員教授）が2023年11月19日にご逝去されました。ここに謹んで岩楯先生のご冥福をお祈り申し上げます。

先生は、東京オリンピックが開催された1964年の4月に東京都立大学工学部土木工学科に入学、1970年3月に同大学院工学研究科修士課程を修了、同年4月（財）電力中央研究所（電中研）に入所され、研究・教育人生のスタートをきられました。後年、先生はよくご自身の研究・教育人生を大きく三つの段階に分けてお話になっておられました。

（1）第一段階

電中研時代は、電力会社の水力・火力・原子力発電所の建設や現場での耐震に係る諸問題に取り組み、地震観測・現場実験・振動台模型実験・解析を通じて解決に当たられました。この間、先生は「地中構造物の耐震性に関する研究」で東京都立大学から工学博士の学位を授与されました（1984年12月）。また、米国電力研究所（EPRI）に駐在され（1985年～1986年）、原子力耐震分野でEPRIとの共同研究などに従事されました。

さらに、耐震技術の新しい展開先として、地中構造物の限界状態設計法の研究に大きく貢献され、その成果は「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」（土木学会原子力土木委員会：1992年9月）として刊行されました。

（2）第二段階

1994年に電中研から東京都立大学に移られた先生は、直後に発生した1995年1月の阪神・淡路大震災を「地震・地盤工学の一端を担う私にとって、原点に立ち返って地震・耐震研究を始める千載一遇の機会となり、その追究は神様が与えてくれた最大のミッション（使命）となった」と振り返られておられました。すなわち、先生は直ちに地震被害調査と模型振動実験と解析により、被害原因の研究に取り組みました。土木学会地震工学委員会では地下構造物の耐震に係る専門委員会の委員長として、産官学の専門家を結集して問題解決と合理的な地震対策の取りまとめに尽力されました。



学生時代から続けられた空手道（奥様ご提供）

大学においては、多くの留学生を含む学生の教育・研究指導にあたられ、中国西安交通大学、上海交通大学などの国際共同研究も進められ、中国の文化遺産の耐震性評価や、四川大地震の被害調査などにも尽力されました。こうした活動を通じて、研究室から多くの博士、修士、学士を輩出されました。

（3）第三段階

首都大学東京を定年ご退職のあと名誉教授、上海交通大学客員教授として日本と中国の学部・大学院学生の研究・教育指導に当たられるとともに、首都大学東京オープンユニバーシティ（OU）で、近年まで社会人を対象とした教育活動に熱心に取り組まれてきました。また、日本地震工学会のスペシャルアドバイザーとして、社会人や市民からの要請に応じて地震防災の講演活動も精力的になさってこられました。

私は多くの仕事で一緒させていただきました。先生の魅力のひとつは、磁石のように周りから人が集まり、自然体で仕事を進められるところでした。それは研究者や学生にとどまらず、たとえば、現場作業員さんたちとも隔てなく交流し、意気投合し信頼を得て、おかげさまで現場がとてもスムーズに進むことが幾度もありました。

先生は長年親しまれた空手道での挨拶「押忍！」を好んで会話や随筆での絶妙のタイミングに使われました。ここに、感謝を込め先生に贈る言葉として、「押忍！」を捧げます。

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」よりご確認頂けます。

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きっ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。

■ JAEE Newsletter 第13巻 第1号 (通算第38号) が2024年4月下旬に発刊されます。

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/stack/1925-2/>

最新号(第12巻 第3号)では、特集「地震工学におけるリアルとデジタルの融合」において、有識者の皆様から最新の研究内容等をご寄稿いただきました。また、JAEE COMMUNICATIONにおいて、若者に着目した企画「地震工学者のたまごたち」をスタートいたしました。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。

■ 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



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。是非とも皆様方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

編集後記：

関東大震災から100年の節目を迎え、「現在、そして未来の地震工学」について考える良い機会ということで本号の特集を組みました。100年前に比べて、現代社会は多様化・複雑化しているため、地震防災・減災、災害対応等は様々なことへの対応が求められています。一方で、地震工学も100年前に比べて飛躍的に進歩しており、構造物の耐震化は進み、情報通信技術を用いた様々な技術等も開発されています。また、本学会の強みでもある各分野間の連携ということも進められています。南海トラフ巨大地震、首都直下地震等で甚大な被害想定がなされていますが、現在の英知を結集し、悲観することなく立ち向かうことができると考えております。

最後に、本号編集中の1月1日に発生した能登半島地震で被災されました皆様に心よりお見舞い申し上げますとともに、地震の対応等でご多忙のところ、記事をご執筆いただきました執筆者の皆様、編集にご尽力いただきました編集委員の皆様に厚く御礼申し上げます。

大野 卓志 (高圧ガス保安協会)

本誌第49号(前々号)では、関東大震災から100年と節目の年となるため、多角的に震災を振り返る特集が企画されました。続編となる本号では、震災から100年を経て進歩した地震工学やその未来に焦点をあてた企画としました。分野横断的である本学会の強みを活かし、各分野の第一線でご活躍される方々から貴重な記事をご執筆をいただくことができました。この特集が、今後起こりうる南海トラフ巨大地震をはじめとした災害にどう向き合っていくか考える一つのきっかけとなれば幸いに存じます。

ご多忙のところご執筆いただいた執筆者の皆様、編集にご尽力をいただいた大野様をはじめ編集委員の皆様、及び本誌のレイアウト編集いただいたビクウェブの菊地様に心より感謝申し上げます。

最後になりますが、2024年1月1日に発生した能登半島地震で被災されました皆様に心よりお見舞い申し上げます。

横山 遼 (株式会社青島設計)

会誌編集委員会

委員長	皆川 佳祐	埼玉工業大学	委員	浅井 竜也	東京大学生産技術研究所
幹事	大野 卓志	高圧ガス保安協会	委員	入江さやか	松本大学
幹事	横山 遼	青島設計	委員	北原 優	東京大学大学院
			委員	久保 久彦	防災科学技術研究所
			委員	小阪 宏之	戸田建設
			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	中村 武史	電力中央研究所
			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	藤井 中	竹中工務店

日本地震工学会誌 第51号 Bulletin of JAEE No.51

2024年2月29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