

日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.46

Jun.2022

特 集：機械工学と地震工学の融合



<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46号 2022年6月)

Bulletin of JAEE (No.46 Jun.2022)

INDEX

巻頭言：

特集「機械工学と地震工学の融合」について／皆川 佳佑、小穴 温子 1

特集：機械工学と地震工学の融合

都市機能維持のための昇降機技術／藤田 聡 2
On the Use of Seismic Passive Control Systems in Industrial Facilities
／ Fabrizio Paolacci、Daniele Corritore、Stefano Caprinuzzi 7
AIによるAMD制御システムの開発／青山 優也 11
災害初期対応機関におけるドローンの活用／内山 庄一郎 15
熊本地震で被災した宇土市役所内のロボットによる調査／藤井 賢志 19
UAV、AIとIoTを用いた橋梁損傷検知のDX／党 紀 23

学会ニュース：

第12回震災予防講演会の報告 ―首都直下地震と都市防災―／宮腰 淳一 27

研究委員会報告：

強震動評価のための深部地盤モデル化手法の最適化に関する研究委員会およびESG研究会開催報告(終了)
／松島 信一、林田 拓己、地元 孝輔、佐藤 浩章、津野 靖士 29
津波荷重の評価技術と体系化の心得に関する研究委員会(終了)／有川 太郎 32
津波避難に対する工学的検討手法活用の環境整備に関する研究委員会(終了)／甲斐 芳郎 34
地震による倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する研究委員会(経過)／小山 真紀 36
地中構造物に作用する地盤反力に関する研究委員会(経過)／鈴木 崇伸 38

学会の動き：

行事 40
会員・役員の状況 41
出版物在庫状況 44
お知らせ 46

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11巻 第2号(通算第33号)が2022年8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

特集「機械工学と地震工学の融合」について

皆川 佳祐

●埼玉工業大学 准教授/会誌編集委員 幹事

／小穴 温子

●清水建設(株)/会誌編集委員 幹事

机の上に一報の論文がある。「工場の震害に就て」¹⁾と題されたその論文は、今からおよそ100年前の1924年に機械學會誌に掲載されたもので、1923年の関東地震における工場の被害を調査、分析したものである。配管やタンク等、各種機械構造物の地震被害を調査し、理論的な分析をしており、今読んでみても学ぶべきことが多い。また、論文タイトルの下には「大正十二年十月二十八日第九十五回講演會に於て」とあるので、地震発生から2ヶ月と経たずにまとめたものなのであろう。このように、我が国の工業化以降初めて経験した大地震である関東大震災においても、機械工学において地震は積極的に取り組むべき重要な課題だったことがわかる。

20世紀中頃以降は、原子力発電所の耐震設計が機械工学分野における地震工学の重要な位置を占めた。大型の振動台により各種設備の耐震試験が実施され、耐震設計や耐震性能評価に関して高度化が図られた。現在では多くの一般機械構造物で耐震設計が行われ、地震工学を専門とする技術者以外でも耐震設計は身近なものになっている。

また、1980年代初頭には免震床が実用化され、その後、建築物にも適用されて、免震・制振装置の研究開発も機械工学と地震工学の融合を促進させた。建築物等に設置されることの多い免震・制振装置ではあるが、装置自身は機械であり、多種多様な機械工学的アプローチが取り入れられていることは言うまでもない。

近年では、ロボットや小型無人航空機(ドローン、UAV)等の機械技術が目覚ましい発展を遂げており、従来は分野を異にすることが多かった地震・建築・土木の分野の研究・技術開発においてもそれらの活用が目立つようになってきた。例えば、構造物・設備機器に対する制御技術の高度化による機能維持性能の向上、ドローンの活用による建築・土木構造物の維持管理の省力化・効率化、人間が立ち入ることが困難な場所の調査の実現とそれに伴う安全性の確保などが挙げられ、現在、地震工学分野の新たな可能性の扉をまさに開いている最中にある。このような機械工学と地震工学の技術の融合は、災害大国日本における防災・減災対策を加速させ、さらなる技術革新を生む可能性をはらんでいると言えるのではないだろうか。

そこで本特集では、機械系技術を利用した最新の学際的研究や技術開発ならびにその適用事例について紹介する。また、構造物や耐震システムの地震時応答制御など、従来から国内外で取り組まれている機械工学と地震工学の融合技術の進化についても紹介する。

はじめに、「機械工学と地震工学の融合」を体現され続けている代表的な研究者のお一人である東京電機大学・藤田聡先生に、地震や風などの外乱に対するエレベーターの機能維持性能の現状と課題について解説していただいた。続いて、本会誌として初めて海外からのご寄稿となるRoma Tre University・Fabrizio Paolacci先生には、ヨーロッパの工業プラントにおける地震時パッシブ制御技術の事例を紹介していただいた。大林組・青山優也氏には、人工知能を用いて各種振動を学習させたAMD (Active Mass Damper) という新しい制御システムの開発について紹介していただいた。防災科学技術研究所・内山庄一郎氏には、災害初期対応におけるドローンの活用に関して、その現状と課題を解説していただいた。千葉工業大学・藤井賢志先生には、各種カメラや3Dスキャナーを搭載したロボットによる、2016年熊本地震で被災した宇土市役所内の調査についてご執筆いただいた。埼玉大学・党紀先生には、内閣府SIPの取り組みの一環である、UAVによる撮影と深層学習を用いた橋梁の自動損傷検知についてご紹介いただくとともに、デジタルトランスフォーメーション(DX)の観点から今後の展望について触れていただいた。いずれの記事も、今後の発展が期待される大変興味深い内容になっているので、ぜひ皆様にご一読いただければ幸いです。

最後に、ご執筆いただいた皆様、編集委員会を代表してここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 竹中二郎:工場の震害に就て、機械學會誌、27巻85号、pp.349-369、1924



皆川 佳祐 (みながわ けいすけ)

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



小穴 温子 (おあな あつこ)

清水建設(株)技術研究所。2018年東京理科大学大学院博士後期課程修了、博士(工学)。専門分野は強震動予測、設計用入力地震動評価などの地震工学。

都市機能維持のための昇降機技術

藤田 聡

●東京電機大学 特別専任教授

1. はじめに

日本の耐震技術は世界に誇るべきものであり、大地震時においてもその構造健全性は概ね確保できていると評価できる。また、1980年代初頭に始まった免震構造技術の研究開発は、大地震時における当該建物／機械構造物の機能維持性能を飛躍的に向上させた。すなわち、地震入力に対する上部構造物の設計自由度を拡大するとともに、建物内部の機器、什器等の損害を最小限に食い止め、建物自体の保有する機能を地震時／後にも維持することが可能になったと考える。耐震設計技術は多くの機械設備耐震設計がそうであるように、「構造強度の確保」から「機能維持」を前提としたものに変貌しつつあると筆者は感じている。本稿では、昇降機を対象としてその現状と将来について紹介させていただく。

2. 機能維持性能が要求される背景

現在、建物のさらなる超高層化を目指した建設計画が進んでおり、2023年には東京都港区の虎ノ門・麻布台地区に高さ約330mの超高層建物が、2027年には、東京駅前に390メートルの超高層建物が完成する予定¹⁾であり、安全性と利便性のより一層の向上が望まれている。

一方、現在世界的に、ISO 37120都市性能²⁾、ISO 37153都市インフラ性能³⁾に関する基準に沿って、都市機能の維持／安全性を評価する流れがあると考えられる。また、都市のレジリエンスを高め、持続可能な開発目標 (SDGs) の11.2項 (*) の達成のために、現時点のエレベーターよりも地震、火災、冠水等の災害に強く、災害後早期に使用可能なエレベーターとすることによって、災害時及び災害後に利用者が安全に、安心してエレベーターを利用できることが求められていると思料する。

超々高層建物への中間避難階の設置とエレベーターの火災時避難利用なども、「都市の価値・安全性」を高めることにより、災害時の安全性に関して高い評価を得ることを目的に、海外では積極的に推し進めて技術的優位性を確保しようとしているように感じられる。火災時避難エレベーターの海外での実施例が増加しているのも、この流れの証左であると言っても過言ではない。欧米での実施例、そして上海の上海中心や韓国ロッテタワーの防災対策の実施例など、こうした流れ

がますます盛んになるのではないかと感じる⁴⁾。ヘルスマonitoring技術を含む耐震設計・防災安全設計自体は日本が最高レベルであることは疑いのないところだが、発生する地震レベルとその発生頻度の関係から、リスク評価としては低い評価となることも考えられることから鋭意検討すべき重要な課題であると思う次第である。

一方、利用者側からの要求／意見としては次のような興味深いものがあった。2019年3月に開催された、「第24回日本災害医学会総会・学術集会(日本学術会議防災学術連携体特別セッション)」において、『地震時／地震後の昇降機健全性(長周期地震動に対する対策)』⁵⁾と題する講演を行ったが、会場からは「安全性はともかく、とにかく動かしてほしい」、「病人の搬送にはエレベーターは欠かせない」といった意見が多く出た。こうした現場の方々からの意見、要求に少しでも応えるべく検討を進めないとならないと改めて思った。

地震・火災・冠水といった災害を考える上で、特に世界有数の地震国である日本では、地震の随件事象としてこれらの発生を考えなければならないと考える。こうした災害に対して現実的な改善方法を提案する際には、決して机上の空論ではなく、建築、機械、電気、制御、通信といった専門知識を高次元で融合し、開発することが必須となる。

具体的には、地震時に建築物の揺れと共振しにくい仕様のエレベーター(特に超高層建物ではロープなどの長尺物)、災害(地震、火災等)後に早期復旧が可能であるエレベーター、災害(地震)を早期に感知して退避するエレベーター、災害(火災)時の避難、救助に利用できるエレベーター等によって、災害時の安全性及び利便性の向上を図ることが可能になると考える。

また、エレベーターが設置される建築物の機械室、昇降路、乗場等の建築仕様について、災害時のエレベーターの使用、災害後にエレベーターの早期復旧ができるような構造要件とは何かを検討する必要もある。

これら要求性能を満足する仕様を満たすためには、エレベーターの安全性確保のために得られる情報の活用や構造モニタリング等他部門との積極的な連携を図らなければならないが、これを実現すれば都市安全性評価においても国際競争力の強化につながると考える。

(*)11.2：2030年までに、脆弱な立場にある人々、女性、子供、障害者及び高齢者のニーズに特に配慮し、公共交通機関の拡大などを通じた交通の安全性改善により、全ての人々に、安全かつ安価で容易に利用できる、持続可能な輸送システムへのアクセスを提供する。(総務省仮訳2019年8月版)

3. 機能維持性能向上に向けての課題

先に述べたように、災害時／後の都市機能を維持するためには建築物内の縦動線を安全に・快適に確保可能なエレベーターの開発が欠かせないものとなる。2011年東北地方太平洋沖地震では、東日本地域から関東圏、北陸、中部圏までの広い地域で、建築物とともに建築設備であるエレベーター、エスカレーターに大きな損害が生じた。特に超高層建物が乱立する東京においては、エレベーターロープが大きく揺れ復旧に多くの時間を費やした。また、2016年4月に発生した熊本地震の際にも直線距離で900kmほど離れているにもかかわらず、発生した長周期地震動により超高層ビルは大きく揺れ、多くのエレベーターが地震管制運転により停止し、点検・再起動に多くの時間を費やしたことは記憶に新しい。そこで、都市機能維持と利用者の利便性を向上するための技術開発が必要となるものを以下に列挙する。

3. 1 エレベーター閉じ込め事象の回避技術の開発

2018年6月18日に発生した大阪府北部地震(M=6.1、最大震度6弱)の際に指摘された、いわゆる「エレベーター閉じ込め事象」発生メカニズムの詳細分析と対策法の開発が急務である。当該地震においては、直下型地震時の強震動に起因するエレベーター機器の損傷・誤動作による閉じ込め事象が発生しており、その発生メカニズムを明確にするために、振動台を用いた加振実験を実施し、当該機器類の限界耐力並びに機能限界を明確にするとともに、標準的な解析評価モデルを構築し、設計時に事前に評価することが重要である。

3. 2 中間避難階の設置による安全性の向上技術の開発

超高層／超々高層建物においては、地震時(特に長周期地震動発生時)に建物とエレベーターロープの共振による応答振幅が過大となり(残念なことに安全率を確保した条件下ではロープと建物の固有周期は近接してしまうことから周期が長いほど揺れ幅が大きくなる)、昇降路壁や昇降路内機器への衝突等によるロープの引っ掛かりや損傷が懸念される。そのため、地震時管制運転によりエレベーターは安全停止するものの、再起動にあたってはロープ等の引っ掛かり等の目視点検が必要となり、その復旧には多くの時間を要してしまう。現時点では、負剛性を支持点に付与することで

ロープに生じる定在波を成長させずにロープの共振を抑制する極めて興味深い制振手法が提案⁹⁾されているものの、実用化には至っていない。そこで、海外の超々高層建物において多くの実施例がある中間避難階のようなエレベーターの乗り継ぎポイントを設け、少なくとも一系統だけは低・中昇降行程のエレベーターを設置することでロープ系の固有振動数が高くなり、ロープの建物との共振振幅は効果的に抑制される^{7)~15)}。海外における実施例では、その主たる目的は火災時の避難に中間避難階を用いるものであるが、わが国においては地震の随件事象として火災発生を考えると、中間避難階同士を繋ぐ低中昇降行程のエレベーター群を設置する必要があるとも考える。加えて、地震後の再稼働のための点検作業において、保守員が当該エレベーターを用いることができるため、作業効率が高まり早期復旧が可能となる。

3. 3 モニタリング技術の高度化技術の開発

上述した「機能維持性能を向上させたエレベーター」実現のための基本概念を満足する機能・性能をシステム実装することを技術的基盤に据えることで昇降機の災害時健全性は向上するものと考えられる。しかしながら、これらの要求性能を満足させるためには、現在にも増して様々な情報の高度利用が欠かせない。災害時／後のエレベーターの早期運行を可能にするためには、エレベーターの安全性確保のため機器側情報の活用に加え、設置される建物側のモニタリング情報を活用する必要があるが、これらを融合したシステムは現在開発されていない。すなわち、これを実現するためには、地震時管制運転の精度を向上させ、地震時／後あるいは火災などの災害発生時の運転可否の判断、そして再起動可否の判断を確実に行う必要がある。そのためには、エレベーターに関わる情報に加え、建物損傷度合を精度良く推定しうる建物モニタリング情報を活用することが肝要である。エレベーターシステムを構成する諸技術、すなわち機械・電気・制御技術に加えて建物構造健全性の評価技術の高度利用が不可欠となると考える。例えば、地震発生時には、エレベーター側で収集した加速度、変位等の情報に加え、建物の各階応答加速度、応答変位等の情報から直ちに情報分析を実施し、建物-エレベーターの損傷度合いを分析し運行可否の判断をリアルタイムに行うことが必要である。これには必要なハードウェア実装のみならず、判断のアルゴリズムを精緻化し実際の運行に適用できるソフトウェアの開発も必須となる。これが実現できれば都市安全性評価においても国際競争力の強化につながると考える。

以上に述べたように現時点で実現可能な安全対策技術を高度化し組み合わせることで、災害時／後の機能

維持性能が確保できると考える。様々な情報を高度に統合利用することで、安全性に十分配慮した上で自動復旧運転レベルの閾値を上げることが可能となり、災害(地震、火災等)後に早期復旧が可能であるエレベーター、災害(地震)を早期に感知して退避するエレベーター、災害(火災)時の避難、救助に利用できるエレベーター等が実現する。

4. 現在進行中の技術開発状況

前章までに述べた「都市機能維持」の観点から現在実施されている「大地震時におけるエレベーターの閉じ込め防止に関する検討」について簡単に紹介する。

4. 1 国土交通省令和3年度 建築基準整備促進事業「P14 大地震時におけるエレベーターの閉じ込め防止に関する検討」の概要

建築基準法においては、地震時にエレベーターの利用者がかご内に閉じ込められることがなく速やかに避難ができるよう、地震時等管制運転装置の設置を義務付けている。しかしながら、これまでに発生した大地震である東北地方太平洋沖地震、熊本地震、大阪府北部地震等においては、閉じ込めが広い範囲で多数発生した。特に、平成30年6月18日(月)午前7時58分に発生した大阪府北部を震源とする地震(最大震度6弱)では、エレベーターについて次のような被害が確認された。運転休止が近畿2府3県(滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県)を中心として、和歌山県、三重県、愛知県、岐阜県、福井県、香川県にわたる範囲において約63,000台発生した。そのうち、近畿2府3県において346台の閉じ込めが発生した^{16)、17)}。

また、今後、首都直下地震が起これると最大1.7万人の閉じ込め事故が発生することが想定されている。このため、一般財団法人日本建築設備・昇降機センターと学校法人東京電機大学は国土交通省令和3年度建築基準整備促進事業「P14 大地震時におけるエレベーターの閉じ込め防止に関する検討」を受託し、次の①及び②の内容を検討することとした¹⁸⁾。

① 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

地震時の建築物全体の揺れによる、昇降路の壁の変形、破壊、エレベーターの乗場の戸と隣接する壁との衝突等による戸開閉障害、スイッチ及びセンサ類の故障等による閉じ込め等の発生要因を分析し、対策の立案及び対策効果を実験等によって検証する。

② 閉じ込め対策としての仮復旧診断領域拡大の検討

地震後の閉じ込め等対策として、①の検討結果をもとにエレベーターの運行に関係する建物関係情報とエレベーター関係情報との共有化等により、自動診断仮復旧運転の領域拡大を図る。

4. 2 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

地震時の被害事例の実態調査を熊本地震、大阪府北部地震などに関しても2021(令和3)年度に改めて実施した。調査台数約12万台のうち、復旧作業を要した台数は2,274台と約1.83%であった。竣工年1998年以降では調査台数が約8万台、そのうち復旧作業要の台数は1,323台と約1.65%であり、竣工年度の新しい(耐震設計基準の新しい)ものの方がその割合は低減していることがわかった(表1参照)。

表1 建設地点の震度別調査台数(復旧作業要の台数)

建設地点の計測震度	全年代	1998年以降
3.5未満	12,514(17)	6,940(13)
3.5以上4未満	25,404(47)	14,676(24)
4以上4.5未満	25,866(82)	16,611(51)
4.5以上5未満	30,124(477)	20,516(281)
5以上5.5未満	19,135(688)	13,712(425)
5.5以上6未満	8,604(748)	6,139(409)
6以上	1,240(210)	890(120)
全地域	124,144(2,274)	80,142(1,323)

また、建物の用途は、住宅、事務所が多く、エレベーターの昇降行程は、半数以上が20m以下であった(表2、3参照)。なお閉じ込めが実際に発生し復旧作業をしたエレベーターのほか、閉じ込めは発生しなかったものの復旧作業要のエレベーターは乗客が乗っていたら閉じ込めが発生した可能性が高いと考えられることから、本事業の閉じ込め抑制の検討は、全ての復旧作業要のエレベーターを対象とした。

表2 建物用途別の調査台数(復旧作業要の台数)

	全年代	1998年以降
事務所	25,202(418)	12,821(230)
住宅	50,902(656)	33,232(391)
宿泊	4,290(117)	2,230(49)
医療・福祉	11,751(258)	9,089(170)
学校	6,186(72)	4,898(46)
商業・物販	8,191(317)	5,440(202)
工場	4,949(80)	3,452(50)
文化・スポーツ	4,476(77)	3,108(38)
駐車場	517(25)	306(14)
交通機関・通路	2,155(70)	1,769(59)
その他・不明	5,525(184)	3,797(74)

表3 昇降行程別の調査台数(復旧作業要の台数)

	全年代	1998年以降
20m 未満	70,219 (1,181)	49,302 (721)
20-40m	34,766 (673)	20,492 (372)
40-60m	6,420 (146)	4,762 (101)
60-100m	4,449 (100)	3,300 (70)
100m 以上	2,310 (37)	1,660 (23)

4. 3 単体実験(施錠装置単体を加振し、その振動特性を把握するための実験)

閉じ込め要因分析で、震度6弱以下、1998年以降の物件について、閉じ込めの可能性があった復旧作業要のエレベーターの故障状況は、故障要因が不明のものを除くと、(a)「エレベーターが最寄階又は目的階まで走行不可」の割合が最も多く約58%であり、次いで(b)「乗場の戸の戸開不可」が約23%、その他、(c)建物の破損が約19%であった。

大阪府北部地震等において特に問題視された、エレベーターの戸の壁との衝突等による戸開閉障害、スイッチ及びセンサー類の故障等による閉じ込め等の発生要因を分析した。戸スイッチの過大な振動入力による一時的な開路現象がエレベーターの走行停止状態を招いた要因の一つであるとの報告¹⁵⁾もあることから、その機能限界を実験的に調査した。図1は実験供試体と振動台上に設置した様子を示す。加振方向は、図1に示す水平平行方向、水平直角方向並びに上下方向で、入力加速度振幅を漸増させた正弦波(3~10Hz)と地震観測記録模擬波(以下地震波とする)を入力した。各点の加速度、変位、スイッチの電圧を計測することで開路現象を明確にした。

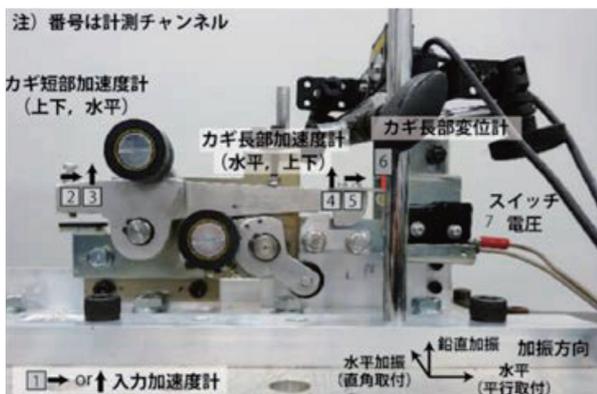


図1 振動台上に設置された戸スイッチの例

正弦波水平加振、平行取付の条件では、多くの施錠装置でスイッチの接点が開く開路事象を確認した(入力加速度10.6~31.2m/s²)。入力加速度と入力振動数の開路現象への影響を図2に示す。正弦波水平加

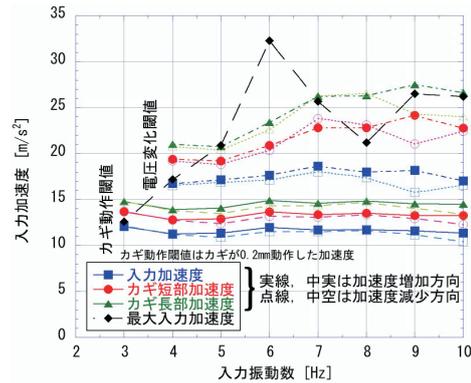


図2 入力加速度と入力振動数の開路現象への影響

振、直角取付の条件では、基本的にはスイッチの接点が開く事象は見られなかった。また正弦波鉛直加振の条件では、全ての施錠装置でスイッチの接点が開く開路事象を確認した(入力加速度6.0~38.0m/s²)。地震波水平加振、平行取付の条件では、スイッチの接点が開く施錠装置を確認した(入力加速度16.1~29.3m/s²)。地震波は瞬間的に大きな加速度が働くので、正弦波に比べてスイッチの接点が開く時の入力加速度が大きい場合が多かった。スイッチの接点挙動に対する周波数の影響は小さく、加速度の影響が大きいと考えられた。なお、加振中スイッチは開閉を繰り返し、加振後には接点は閉じた状態に戻り、施錠装置に損傷は見られなかった。このことから、カギ部をスイッチの接点に押付ける力を強めると、スイッチの接点が開く時の入力加速度が増加することが確認された。

4. 4 今後の検討課題

2021年度に要因分析した発生頻度の高い閉じ込め事象を対象に、2022(令和4)年度にはエレベーター実機を用いた大型振動台によるシステム実験を実施する。実験設備の制約から「長尺物の引掛り、破損」の評価は難しいため、これを除き多かった故障要因について再現を行う。「建物の破損」はシステム実験での再現はできないが、建物の層間変位やその他要因に関しては、被害事例の実態調査結果を精査し同時に発生しているエレベーター機器の故障状態と照らし合わせて閉じ込めへの影響を精査することで地震時/後の機能維持性能向上のための知見を得ることを目的としている。

5. おわりに

地震、台風、火災といった災害時/後にエレベーターが機能を維持し継続運行可能な状態を保つ、あるいは早期復旧が可能になれば、建物内の縦動線を安定して確保できることになり、建物機能健全性の向上につながる。また、これは当該建物のBCP策定上も有利に働くものとする。我が国は地震・台風といった災

害の発生確率が高く、これらの事象を設計条件としてきたため、耐震・耐風工学のレベルは世界有数の水準に達しているものと考えられる。しかしながら、確率論的評価が標準的に行われる欧米の設計思想に照らし合わせると、都市性能、都市インフラ性能の観点からは決して満足のいく水準に達していないことが懸念される。なぜならば、ここ数年で発生した地震や台風、大雨による洪水等で建物の鉛直方向の動線確保は度々失われているからである。

本稿では、こうした観点からエレベーターの機能維持性能の向上が建物自体の機能維持性能向上に大きく寄与することについて述べるとともに、最近の研究の動向について紹介した。これらの技術を実現するためには、詳細かつ多岐にわたる調査、検討、研究開発が必要となるが、建物の超高層化が急速に進んでいる現状に鑑みて、喫緊の課題と云えると思料する。

謝辞

なお、本稿では、国土交通省令和3年度 建築基準整備促進事業「P14 大地震時におけるエレベーターの閉じ込め防止に関する検討」での成果を一部紹介させていただきました。ここに、国土交通省をはじめ、当該事業に携われた法人、大学、企業関係者に感謝します。特に、地震による被害調査へのご協力を頂いたエレベーター会社及びエレベーター保守会社並びに単体実験用に施錠装置のご提供を頂いたエレベーター会社の各位に対し、改めて感謝の意を評します。

参考文献

- 1) ITmediaビジネスONLINE、日本一の330メートル高層ビル、森ビルが着工「超高層」は今後10年で大きく変化(2019-8)
<https://www.itmedia.co.jp/business/articles/1908/22/news092.html>.
- 2) ISO 37120: 2018, Sustainable development of communities - Indicators for city services and quality of life.
- 3) ISO 37153:2017 Smart community infrastructures- Maturity model for assessment and improvement.
- 4) 下秋元雄、藤田 聡: 中間避難階を利用したエレベーターの安全性向上作の提案(その2 火災時等の避難への応用)、建築設備&昇降機、(財)日本建築設備・昇降機センター、No.145、2020年5月、pp.26-35.
- 5) 藤田 聡: 地震時/地震後の昇降機健全性(長周期地震動に対する対策)、第24回日本災害医学会総会・学術集会、防災学術連携体 特別セッション、2019年3月18日.
- 6) 強風や地震発生時のエレベーターの運行休止頻度を低減し、安定運行を実現「高層ビル向けエレベーター用「ロープ制振装置」を開発」、三菱電機NEWS RELEASE、開発No.1911、2019年2月7日、
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2019/pdf/0207-b.pdf>.
- 7) 志村勇太、中島拓哉、藤田 聡、皆川佳祐: 昇降機

ロープ挙動評価システムに関する基礎的研究、日本機械学会Dynamics & Design Conference 2014 USB論文集、(2014-8)、437.pdf.

- 8) 志村勇太、藤田 聡、皆川佳祐: 昇降機ロープの振動挙動評価システムに関する研究、日本機械学会昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩 技術講演会講演論文集、(2016-1)、.pdf.
- 9) 志村勇太、中島拓哉、藤田 聡、皆川佳祐: 昇降機ロープ挙動評価システムに関する基礎的研究、日本機械学会Dynamics & Design Conference 2014 USB論文集、(2014-8)、437.pdf.
- 10) 志村勇太、藤田 聡、皆川佳祐: 昇降機ロープの振動挙動評価システムに関する研究、日本機械学会昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩 技術講演会講演論文集、(2016-1)、.pdf.
- 11) 田中寛也、藤田 聡、田中和宏、小川要一: ロープ挙動解析による昇降機耐震設計評価手法の高度化に関する研究、日本機械学会Dynamics & Design Conference 2016 USB論文集、(2016-8)、.pdf.
- 12) 田中寛也、石井麻美、藤田 聡、田中和宏、小川要一: 高層ビルの中間乗換え階を利用したエレベーターロープの振動挙動に関する基礎的研究、日本機械学会Dynamics & Design Conference 2017 USB論文集(2017-8)、240.pdf.
- 13) 田中寛也、石井麻美、藤田 聡、田中和宏、小川要一: リスク情報を用いた中間乗換え階によるロープ応答低減の有効性検討に関する基礎的研究、日本機械学会 技術講演会 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩(2018-1).
- 14) 玉城涼子、藤田 聡、石井麻美、田中和宏、志岐知洋: リスク情報を用いたエレベーターロープの安全性評価に関する基礎的研究、日本機械学会2018年度年度大会DVD-ROM論文集、(2018-9)、J1010105.pdf.
- 15) 玉城涼子、藤田 聡、田中和宏、志岐知洋、岡村茂樹: リスク情報を用いた中間乗換え階によるエレベーターロープの応答低減に関する基礎的検討、日本機械学会 技術講演会 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩(2019-1).
- 16) 国土交通省住宅局建築指導課、エレベーターの地震対策についての取り組みについて(報告)、2020年7月14日、<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001354002.pdf>.
- 17) 森田由佳: 大阪北部地震を踏まえたエレベーターの地震対策、建築設備&昇降機、(財)日本建築設備・昇降機センター、No.144、2020年3月、pp.21-26.
- 18) <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/content/001480577.pdf>



藤田 聡 (ふじた さとし)

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

On the Use of Seismic Passive Control Systems in Industrial Facilities

Fabrizio Paolacci

● Professor, Roma Tre University,
Rome, Italy

/ Daniele Corritore

● PhD, SAFEPLANT srl, Rome, Italy

/ Stefano Caprinuzzi

● PhD, SAFEPLANT srl, Rome, Italy

1. Introduction

During the last twenty years several natural disasters occurred: Kobe earthquake (Japan, 1995), Izmit earthquake (Turkey, 1999), Gujarat earthquake (India, 2001), Tokachi-Oki earthquake (Japan, 2003), Katrina tornado earthquake (United States, 2005) and Tohoku earthquake (Japan, 2011). Those events highlighted how natural disasters can cause considerable damages to industrial plants. This evidenced the need to adjust the risk analysis because of natural events, and to improve the actual design rules which often do not take into account natural actions to industrial plants.

The historical analysis, carried out on certified databases (MARS, MHIDAS, EPA) showed that accidental events which have a natural beginning, such as earthquakes, even though they have a relatively modest frequency, often caused serious consequences. Both scientists and competent authorities agree on the necessity to improve the knowledge about the effects that some strong natural phenomena can have on industrial activities in order to improve the management of emergencies in case of crisis.

For these reasons, in Europe, several research have recently carried out with the aim to analyze the seismic responses of components of industrial process plants and the study of applicability of innovative systems for their seismic protection.

In this paper, the components of an industrial plant are analyzed and classified; then the main damages caused by earthquakes are highlighted and, after pointing out the vulnerabilities of industrial plants to earthquakes, the most suitable passive control techniques (PCT) are identified. As case-study, in this work the use of Tuned Mass Damper (TMD) for reducing the response of an oil separation column is investigated.

2. Definition of the problem

Industrial plants are complex systems, and it is just the complexity of such a kind of layout, with all its numerous connections, equipment and components, together with the complexity of their functions that make them particularly vulnerable (local vulnerability) to earthquakes ¹⁾.

Activities carried out in the process plants can also be arranged in series, which means that process activities are realized with specific sequence and surrounding conditions. The “failure” of even a single element can therefore get the whole system out of order. This is of fundamental importance for the seismic vulnerability of the entire plant ²⁾.

Among events that can cause serious accidents to industrial plants, seismic action must be potentially considered one of the most important ones. As a matter of fact, in Italy about 30% of industrial plants with major-accident hazards are in areas with a high seismic risk. In addition, in case of a seismic event, the earthquake can induce the simultaneous damage of more apparatus, where effects can result amplified because of the unsuccessful working of safety systems or because of the simultaneous generation of multiple accidental chains ³⁾.

For these reasons, during the last years, to increase safety against earthquakes, PCT have been developed, which are based on the concept of reducing the seismic action instead of increasing the strength ⁴⁾. These techniques that for civil constructions are nowadays considered as a consolidated alternative design tool, can also be used for seismic protection of industrial structures.

Unfortunately, a few applications to plant components have been realized, whereas many research project highlighted their importance ⁵⁾. In the last decade, some single and isolated applications for plants with major-accident hazards have been realized, especially regarding the isolation of medium and large sized tanks at their basis ⁶⁾. For this reason, in this paper the applicability of a such techniques is investigated aiming at providing general applicability criteria.

3. Structural classification and applicability of PCT

The experience derived from observing damages caused to industrial plants by past earthquakes is very useful to identify the most exposed components and what consequences their damage could generate. In the following, the main apparatus of process industrial plants will be gathered and collected into a restricted number of classes and the main observed damages will be analyzed. Moreover, an effort on recognize

which PCT could be considered more suitable has been done for each identified structural group. A more extended analysis can be found in Paolacci et al. (2013) ¹⁾.

Slim vessels. Cylindrical vessels, with a high ratio height/diameter (between 5 and 30, and even higher) belong to this category. Among them, on the basis of their process function and the system of constraints to which they are subjected, it is possible to identify: Vertical cylindrical vessels which are directly anchored to foundations and free along the height, which include distillation columns and many reactors: Vertical cylindrical vessels which include very slender columns such as stacks and flare: Horizontal cylindrical vessels, supported by two or more saddles connected to a foundation platform as pressurized storage tanks and shell-and-tube heat exchangers.

As far as vertical slim vessels are concerned, the most frequent damages in case of seismic event are the anchor bolts failure at the foundation due to the excessive actions, and the loss of contained fluids because of the failure of connected flanges due to excessive relative displacements. The technique of seismic protection which appears as the more suitable for the slim vessels is the dissipative coupling between adjacent structures. For example, a distillation column is typically associated to a service frame and the dissipative connection between the two structures could be very effective in reducing the seismic action ¹⁾.

On-ground squat equipment. Such equipment have similar dimensions in the three space directions and are characterized by heavy masses; the main category of structures belonging to this group is the large cylindrical steel storage tanks with a height/diameter ratio between 0.2 and 2. The roof can be welded to the shell (fixed conic roof) or floating over the contained liquid. The operating volume varies from some tens to 200,000 m³.

The typical damages associated to these structures are related to buckling phenomena of the wall (elephant foot buckling, sloshing buckling) or to failure of the tank bottom-wall joint. But other possible damages and accidents are possible, especially due to excessive sloshing motion, even in presence of a floating roof, which can cause liquid overtopping and fire due to the crash between roof and wall. During 1999 Izmit and 2003 Tokachi-oki earthquakes most of the tanks were destroyed for excessive sloshing motion. For the buckling damages the base isolation can be very effective as already shown by tens of theoretical works and experimental investigations ⁷⁾. Unfortunately, the damages

due to excessive sloshing movements cannot be reduced by base isolation technique. A possible reduction of this effects could be obtained inserting a Tuned Column Mass Damper system into the roof. Alternatively, very recently a solution based on the Metamaterial application like metafoundation has been proposed, which seems very promising ⁸⁾.

Squat equipment supported by columns. This category includes: a) Spherical storage vessels, essentially used for pressure liquefied gases. They are generally elevated with respect to ground, using steel columns placed along the circumference and welded to the shell at the equatorial level and normally linked each-other by diagonal braces, b) Vertical large storage vessels for cryogenic liquefied gases (LNG); their configuration is similar to that of the large atmospheric storage vessels for liquids above mentioned, but their walls are realized by a double shell, in the inner-space of which an efficient thermal insulation is located, their bottom is anchored to a concrete plate, supported by short reinforced concrete columns, c) Process furnaces and steam boilers. Such equipment have the function to heat or vaporize large amounts of liquid products, according to the chemical process demand. Process furnaces are structures with generally large size, with few standardized shapes, mainly cathedral-type and vertical cylinder. These furnaces are kept elevated from the ground by means of short columns, usually reinforced concrete columns, according to the location of burners that requires pipes and space for maintenance. For these components, the collapse is mainly due to the soft-story phenomenon caused by the shear failure of the short columns. The collapse of chimneys is also possible, as well as the detachment of pipes and of the internal wayward covering.

For this kind of structures, the use of seismic isolation appears effective, with the only problem to increase the relative displacement between the apparatus and the connected pipes, which could compromise the integrity of connected pipelines; even the use of dissipative bracings can be effective. These devices reduce accelerations and displacements, but in some cases, they can result invasive and can limit the efficiency of the protected component. In some situations, for example for spherical vessels, a dissipative coupling can be used by a rigid auxiliary truss structure. Also, in this case there is the inconvenience to have an intervention which can be too much invasive. Finally, for furnaces, as an alternative to isolation, an improved technique for reduction of the stresses could consist in designing the

eventual overstanding chimney in order to use it as a Tuned Mass Damper.

Piperack and piping systems. Pipelines connect all equipment involved in the process, transferring the fluids within the plants; as above mentioned, in a large refinery, hundreds kilometers of pipe-ways of different size are installed, and they are mainly realized with steel, but in some cases also with ceramics, glass, concrete, etc., if a specific resistance to corrosion is required. Metallic pipes themselves are not particularly vulnerable to seismic actions ⁹⁾, but they can suffer the effects of differential displacements, which could be not compatible with the pipe deformations. They can also be damaged because of the collapse of the supporting structures.

To reduce the seismic response of this kind of structures, dissipative bracings or dissipative coupling may be easily used. Moreover, to avoid damages to critical components (pipes, compressors, pumps, vessels ...) supported by framed structures, the technique of the floor isolation can also be used. In this way it is possible not only to reduce stresses in the structure, but also to reduce stresses in the supporting structures. Also, in this case it is necessary to take care of the unavoidable relative displacements due to the high deformability of the isolation system.

4. Analysis of a representative case study

In this section an example of use of PCT for the seismic control of industrial is presented and discussed. In particular, the use of TMD for seismic control of a oil separation column typically present in an upstream plant is presented and discussed. The column is 25 m high, with a diameter of the vessel of 3 m. The vessel is welded on a skirt that is anchored in turn at the RC foundation with steel anchors. The numerical models of the columns is presented in Fig. 1 along with the position of the TMD. The TMD system is composed by 3 masses of 0.7 tons/each connected to the column with a stiffness of about 20,000 N/m, mutually placed at 120° in plane and located at about 20 m from the ground.

The design of the TMD has been performed by using a risk-based design approach ¹⁰⁾. The columns is located in the south of Italy whose seismic hazard curve is presented Fig. 2.

The PSHA conducted to derive the hazard curve has also been used to evaluate the UHS corresponding to the return period for Safe Shutdown Earthquake (SSE) limit state that is $T_r=1950$ years, allowing the selection of a set of 7 accelerograms by using the compatibility rules prescribed

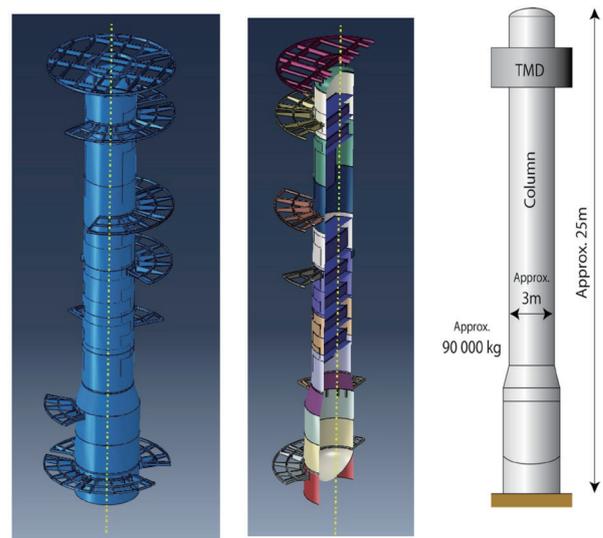


Fig.1. Numerical model of column and position of TMD

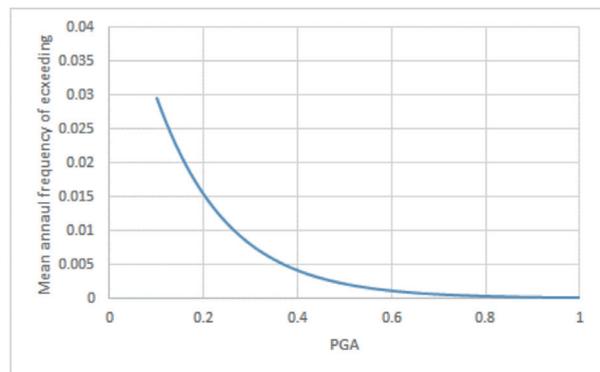


Fig. 2 Hazard curve

by the Eurocode 8. These accelerograms have been used to perform time-history analysis and evaluate the effectiveness of the proposed PCT system.

From the analysis a reduction of about 25% in base shear is obtained, with a similar result also for the displacement at the top of the columns, as reported in Table 1. Moreover, a good control of the rotation of the flanged joints of the pipes connected to the columns has been obtained with a reduction of the same order to those of Table 1.

Table 1 – Summary of the seismic response quantities

	Top Displ. (m)	Base Shear (kN)
W/O TMD	0.214	1600
With TMD	0.169	1200

There is also a hidden advantage in using the TMD with respect to traditional rehabilitation solutions. In fact, traditional solutions could entail the modification of some

structural and non-structural parts of the columns like welding operations on the vessel or modification of the pipe-column connection or the modification of the pipe's layout. TMD can be easily placed on the several platforms typically present along the height of the column and connect using simple bolted connections.

5. Conclusions

In this work the earthquake effects on industrial plants with major-accident hazards has been analyzed and the use of PCT solutions have been investigated. Typical equipment and components of hazardous industrial plants, like refineries, were identified, and their seismic vulnerability was analyzed. This allowed identifying the most critical elements both in terms of seismic vulnerability and consequences, providing a general guideline for identifying critical conditions. Subsequently, the applicability of PCT systems for seismic risk reduction and resilience enhancement of industrial was investigated, completing the above guideline with the most proper mitigation strategies. Finally, a preliminary study about the applicability of TMD for the seismic rehabilitation of an oil separation column. The TMD has been optimized by using a Risk-based approach, whose effectiveness has been demonstrated by using a refined modeling of the column and time-history analysis. Despite the slenderness of the column a reduction of about 25% of the base-shear and displacement has been obtained.

References

- 1) Paolacci, F., Giannini, R., De Angelis, M. : Seismic response mitigation of chemical plant components by passive control systems, *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, Vol.26, Issue 5, pp.879-948, 2013. DOI:10.1016/j.jlp.2013.03.003
- 2) Caputo, A. C., Paolacci, F., Bursi, O. S., Giannini, R. : Problems and perspectives in seismic QRA of chemical process plants for decision making, *Journal of Pressure Vessel and Technology*, Vol.141, Issue 1, 2019. DOI: 10.1115/1.4040804.
- 3) Alessandri, A., et al. : Probabilistic Risk Analysis of Process plants under Seismic loading based on Monte Carlo Simulations, *Journal of Loss Prevention in the process Industries*, Vol.53, pp.136-148, 2018. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.12.013
- 4) Housner, G. W., et al : *Structural Control: Past, Present and Future*, ASCE J. of Eng. Mech., Vol.123, pp.897-971, 1997.
- 5) Minagawa, K. and Paolacci, F. : *Passive Control Techniques for Seismic Protection of Chemical Plants*, Proceedings of the ASME PVP 2019., Vol.8: Seismic Engineering, August 3, 2020.
- 6) Tajirian, F. F. : Base isolation design for civil components and civil structures, Proceedings, structural engineers world congress, San Francisco, California, July, 1998.
- 7) De Angelis, M., Giannini, R. and Paolacci, F. : Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests, *Earthquake Engng Struct Dyn*, Vol.39, pp.377–396, 2010. DOI: 10.1002/eqe.945
- 8) Basone, F., Wenzel, M., Bursi, O. S. and Fossetti, M. : Finite locally resonant Metafoundations for the seismic protection of fuel storage tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.48(2), pp.232–252., 2019. DOI: 10.1002/eqe.3134
- 9) Corritore, D., Minagawa, K. and Paolacci, F. : Application Of Risk-Based Design Methodology To Tuned Mass Damper, Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels & Piping Conference June 12-16, 2021.
- 10) Nardin, C., Bursi, OS, Paolacci, F, Pavese, A, Quinci, G. : Experimental performance of a multi-story braced frame structure with non-structural industrial components subjected to synthetic ground motions, *Earthquake Engng Struct Dyn.*, 2022; 1–24. DOI:10.1002/eqe.36



FABRIZIO PAOLACCI

Associate Professor in Structural Engineering at University of “Roma Tre” – Department of Engineering. Expert in risk and resilience assessment of civil and industrial structures. Chairman of several international commissions of seismic engineering and author of more than 150 scientific journal and conference papers.



DANIELE CORRITORE

PhD in Civil Engineering and Associate Researcher at the University of “Roma Tre”. Large experience in industrial and civil construction with particular emphasis on risk assessment and seismic protection strategies.



STEFANO CAPRINOZZI

Graduated in Civil Engineering at University of “Roma Tre” defending a thesis entitled “Assessment of seismic vulnerability of piping system”. Marie Skłodowska-Curie Actions PhD at the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of the University of Ljubljana with a thesis entitled “Seismic response of steel tanks with floating roofs”.

AIによるAMD制御システムの開発

青山 優也

●株式会社大林組 技術研究所 主任

1. はじめに

近年、AIの発展は目覚ましく、画像認識をはじめとして産業界での実用例も増えている。建築構造分野においても、構造設計や振動制御に適用しようとする研究開発が活発化している。AIの一種である強化学習¹⁾は非線形の場合を含む一般的な制御則を試行錯誤的に学習する枠組みであり、ゲーム戦略の獲得やロボットの制御で成功を取めている。囲碁や将棋などのゲームにおいては人間を上回る成績を出しているものも多く出てきているが、発展途上の分野であり、建設業界のみならず産業界における実用例はほとんどない。

一方、各種外乱に起因する建築物の水平振動や、床の上下振動を低減させる有効な手法として、Active Mass Damper(AMD)が知られている。AMDは、対象構造物に取り付けた重りを能動的に動かすことで対象構造物の振動を低減する技術である。AMDの制御則として理論的知見に基づいた多くの手法が提案されているが、中でも最適制御と呼ばれる線形手法が広く実装されてきた²⁾。

本稿では、AMDを対象とした制御則を、強化学習により獲得する研究について紹介する。強化学習を用いることで、シミュレーションの段階で装置の特性や実際の環境などを加味して学習することができる。そのため、従来の理論に基づく方法を適用した場合よりも、より実際の環境に適応した制御則の獲得を期待できる。本稿においては、ブリッジ(3.1節で詳述)の歩行振動を対象として、シミュレーションにおけるAMDの制御則の獲得および性能評価と、獲得した制御則の実機への適用結果について報告する。

2. 強化学習の概要

2.1 強化学習

強化学習とは、エージェント(AI)が環境(制御対象)との相互作用を通じて最適な行動規則を獲得するた



図1 強化学習の概要

めの枠組みである。強化学習の概要を図1に示す。各時刻 $t=0,1,2,\dots$ において、エージェントは環境の状態 s_t を観測し、方策 $\pi(a_t | s_t)$ (AIの行動規範) に従って行動 a_t を選択する。環境は現在の状態 s_t と行動 a_t に基づいて次の状態 s_{t+1} に遷移し、エージェントは報酬 $r_t=r(s_t, a_t, s_{t+1})$ を受け取る。エージェントは、割引率 γ で割引いた将来に渡る累積報酬 $\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(s_t, a_t, s_{t+1})$ の期待値を最大にする方策を獲得することを目標とする。

2.2 強化学習アルゴリズム

強化学習アルゴリズムは多数提案されているが、本報では2.2.1～2.2.3項に示すQ学習、Deep Q-network(DQN)、Actor-Critic法(AC)を用いた3つの検討について報告する。

2.2.1 Q学習 状態 s_t において行動 a_t を選択したときに将来に得られる累積報酬の期待値を、行動価値関数 $Q(s_t, a_t)$ で表す。行動価値関数を環境との相互作用から推定できれば、 $\operatorname{argmax}_{a_t} Q(s_t, a_t)$ によって最適な行動を選択できる。Q学習は行動価値関数をテーブルで表現する。行動価値関数 $Q(s_t, a_t)$ はBellman方程式に基づく(1)式の更新則によって推定される。

$$Q(s_t, a_t) = (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha \{ r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}) \} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ は学習率である。

2.2.2 Deep Q-network(DQN) 状態が離散かつ有限であれば行動価値関数をテーブルで表現できるが、状態が連続の場合は関数近似器が必要である。Deep Q-network(DQN)では行動価値関数をニューラルネットで近似し、ニューラルネットのパラメータ θ を(2)式で定義する損失関数 $L(\theta)$ の最小化によって推定する。

$$L(\theta) = E \left[\left\{ r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}; \theta) - Q(s_t, a_t; \theta) \right\}^2 \right] \quad (2)$$

ここで、 θ' は更新前のパラメータであり、損失関数の計算においては固定する。

2.2.3 Actor-Critic法(AC) DQNの行動選択は a_t に関する行動価値関数の最大化を必要とするが、行動が連続値を取る場合、この最適化計算は時間がかかる。この問題を避けるため、Actor-Critic法(AC)では行動価値関数だけでなく方策 π もニューラルネットで表現され、そのパラメータは行動価値関数を最大化するように更新される。行動価値関数の推定は、Q学習およびDQNの場合と同様にBellman方程式に基づく方法によって行われる。Actor-Criticは行動選択時の最大化計算が不

要であり、連続的な行動に適している。

3. シミュレーションによる学習

3.1 制御対象モデル

制御対象モデルは、大林組技術研究所本館テクノステーションの連絡通路であるブリッジ³⁾とする。ブリッジのスパンは14mであり、中央部にリニアモータで駆動するAMDが設置されている。ブリッジおよび装置の概要を図2に、諸元を表1にそれぞれ示す。ブリッジは1次モードが支配的であるため、AMDのマスを含め2質点の振動モデルに置き換え、2階常微分方程式を解くことによりシミュレーションを行った。

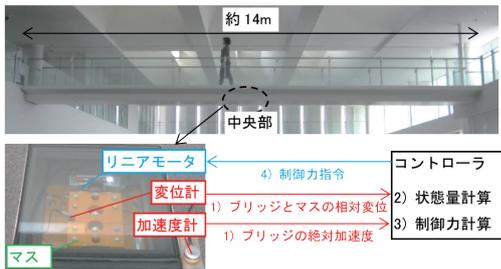


図2 ブリッジおよび装置の概要

3.2 学習方法

2章に示すQ学習・DQN・ACを用いて制御則の学習を行った。3.1節に示す制御対象モデルに対して、各種条件を表2のように設定した。Q学習の制御力は-100N, 0N, 100Nの3段階、DQNの制御力は-100N, -50N, 0N, 50N, 100Nの5段階とし、ACの制御力は、最大出力が100Nとなるように出力層に非線形関数を適用した。学習時の加振波は、インパルス波、実際の歩行時の計測データから逆算した歩行加振波⁴⁾、ブリッジの固有周波数と同じ周波数の正弦波の計3波とした。歩行加振波の時刻歴波形を図3に示す。以降、強化学習により学習したモデルを強化学習モデルと称する。

表1 モデル諸元

ブリッジ	1次固有周波数	4.1 (Hz)
	減衰定数	2.4 (%)
	質量	9.0 (ton)
マス	1次固有周波数	3.0 (Hz)
	質量比(マス/ブリッジ)	0.92 (%)

表2 各種条件

エージェント	AMDのコントローラ
環境	3.1節に示す制御対象モデル
行動 a_t	時刻 t においてリニアモータに出力する制御力
状態 s_t	時刻 t におけるブリッジ・マスの状態量
報酬 r_t	応答低減効果に応じた値

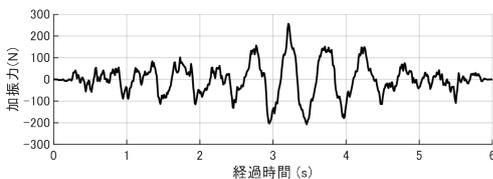


図3 歩行加振波の時刻歴波形

4. シミュレーションによる検証

強化学習モデルの制振性能を検証することを目的として、表3に示す8つのモデルをシミュレーションにより比較した。強化学習モデルの比較対象として、1.非制振、2.TMD、3.最適制御(最適変位フィードバック制御則²⁾)を用いた。ここで、最適制御については、強化学習モデルと条件を揃えるために制御力を100Nで頭打ちにする処理を行った。

4.1 強化学習手法の比較

学習波をインパルス波に固定し、学習アルゴリズムをQ学習・DQN・ACとしたモデル(表3の4~6)および、比較用モデル(表3の1~3)を比較した。インパルス波・歩行加振波入力時の各種時刻歴応答波形を図4に示す。また、ブリッジ加速度の1/3オクターブ分析⁵⁾結果を図5に示す。ここで、同図中のV-〇〇は知覚確率を表している。

いずれの加振波に対しても、ブリッジの固有周波数である4Hz付近のピークは強化学習モデルが最適制御よりも小さくなっており、最適制御を上回る制振性能が確認できる。また、3種類の強化学習モデルの中ではDQNが最もピークが小さい。他方で、Q学習・DQNでは制御力が離散であることから、制御力の切り替わりに伴う加速度波形の乱れが見られる。これにより、1/3オクターブ分析の歩行加振波入力における高周波領域で増幅が見られる。一方、最適制御・ACは制御力が連続であることからこのような増幅は見られず、より安定した制御となっている。

4.2 学習波の影響

学習アルゴリズムを4.1節において高周波領域で増幅が見られなかったACに固定し、学習波をインパルス波・歩行加振波・正弦波としたモデル(表3の6~8)および、比較用モデル(表3の1~3)を比較した。4.1節と同様に、インパルス波・歩行加振波入力時の各

表3 比較モデル一覧

モデル	学習アルゴリズム	学習波	概要
1.非制振	—	—	マスを固定した場合
2.TMD			同質量のマスで、最適同調式による最適剛性・減衰を与えたパッシブモデル
3.最適制御			最適制御フィードバック制御則の変位にかかる重み係数を調整したモデル
4.Q学習	Q学習	インパルス波	Q学習により学習した, 7350ステップにおけるモデル
5.DQN	DQN	インパルス波	DQNにより学習した, 22000ステップにおけるモデル
6.AC(インパルス)	AC	歩行加振波	AC法により学習した, 12000ステップにおけるモデル
7.AC(歩行加振波)			AC法により学習した, 49000ステップにおけるモデル
8.AC(正弦波)			AC法により学習した, 41000ステップにおけるモデル

種時刻歴応答波形を図6に、ブリッジ加速度の1/3オクターブ分析結果を図7にそれぞれ示す。図7に示す1/3オクターブ分析より、正弦波で学習したモデルが最もピークを抑えられており、前節のDQNよりも小さく抑えられていることが確認できる。

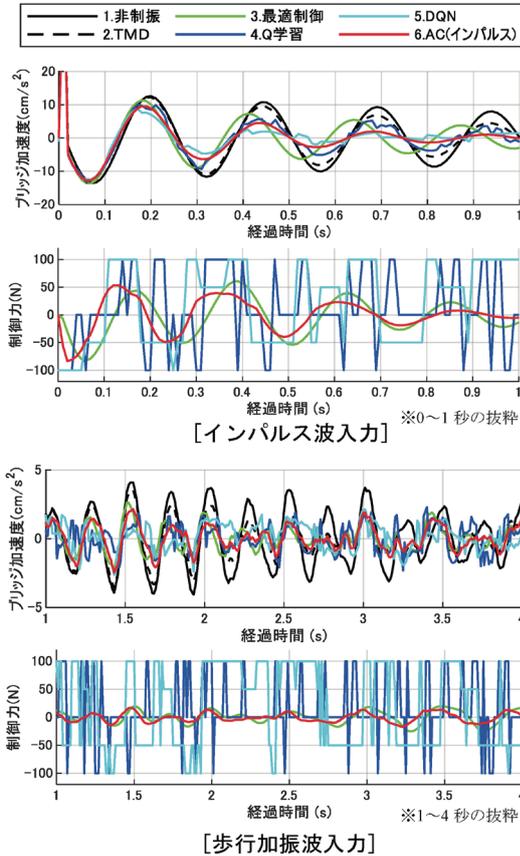


図4 シミュレーション結果の時刻歴波形 (学習アルゴリズムを変化させた場合)

4.3 強化学習モデルの考察

図4および図6に示す制御力より、強化学習モデルは最適制御よりも早いタイミングで制御力を発揮していることが多く、結果として振動を素早く抑えていることが確認できる。これは、最適制御は線形かつ装置特

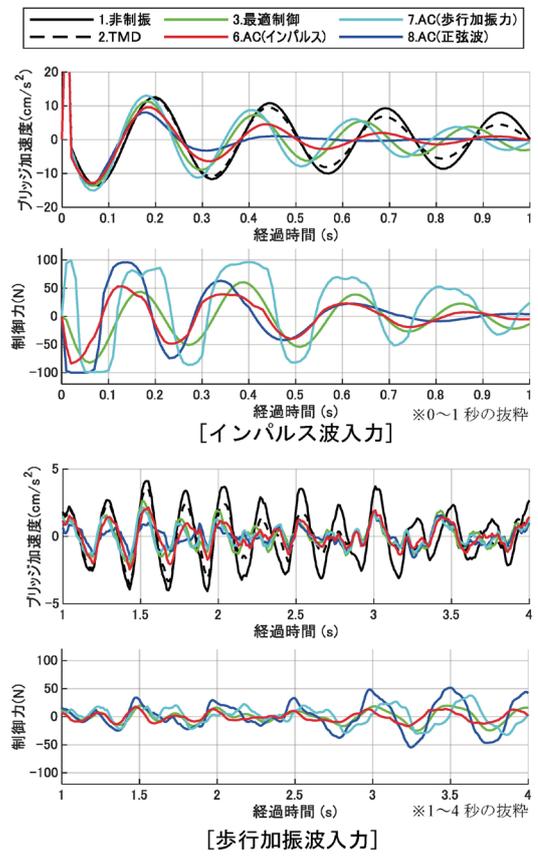


図6 シミュレーション結果の時刻歴波形 (学習波を変化させた場合)

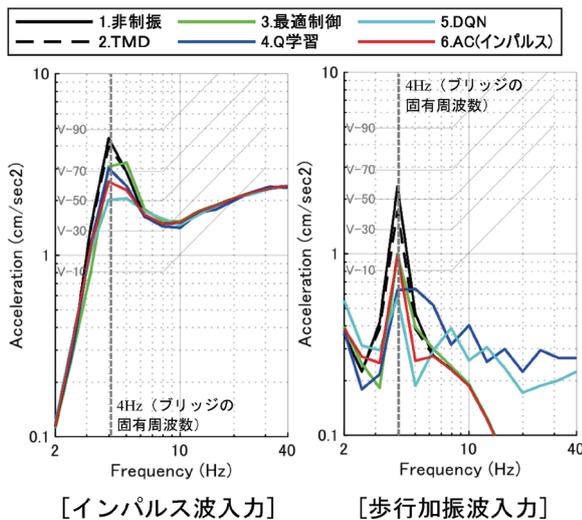


図5 シミュレーション結果の1/3オクターブ分析 (学習アルゴリズムを変化させた場合)

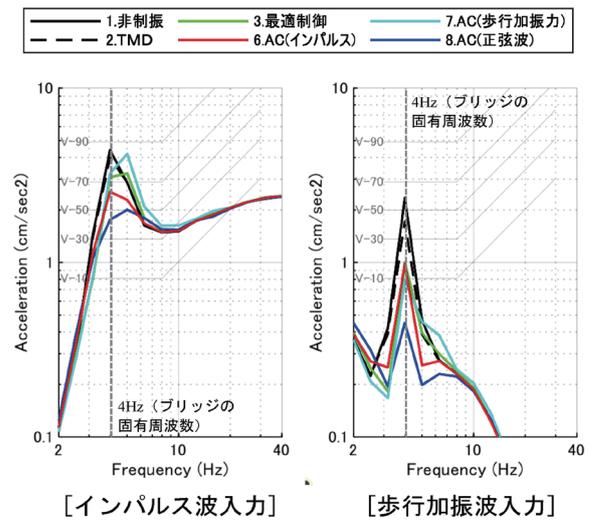


図7 シミュレーション結果の1/3オクターブ分析 (学習波を変化させた場合)

性を考慮しない条件で制御力を求めているのに対して、強化学習モデルは制御力の非線形性や装置特性等の実際の環境を加味して学習したため、これらに起因する各種制約の中で最大制御効果を発揮するように学習できたものと考えられる。

5. 実機による実験

5.1 実験の概要

3章で得られた強化学習モデルおよび比較用モデルを実機に適用し、人力で加振することにより制振効果を確認した。強化学習モデルは、Q学習・DQNおよびACの中で最も制振性能が優れていた正弦波により学習したモデルを用いた(表3の4・5・8)。加振は、比較のために、上記のそれぞれのモデルについて、以下の1)、2)による2ケースの加振を実施した。

- 1) 踵加振 ブリッジ中央部において、踵で加振する。数秒おきに5回加振し、これを1セットとする。
- 2) 歩行加振 ブリッジの端から端まで約14mを一人で歩行する。1往復を1セットとする。

なお、試験におけるバラつきを低減するために、各ケース複数回の平均値を採用している。

5.2 実験結果

計測したブリッジの加速度波形について、1/3オクターブ分析を行った。ケース毎の平均値をプロットした結果を図8に示す。

踵加振に対しては、Q学習・DQN・ACともに最適制御を上回る結果であり、シミュレーションによる分析と同様の傾向であった。一方、歩行加振に対しては、DQN、ACはシミュレーションによる分析と同様の傾向であったが、Q学習は最適制御よりも劣る結果であった。これは、Q学習の制御力の切り替わりが多く、リニアモータの制御力出力における時間遅れの影響や、積分時のノイズ処理における時間遅れの影響を受けたものと考えられる。また、Q学習・DQNは高周波の増幅が見られるのに対して、ACは増幅が少ないことも、シミュレーションによる分析と同様の傾向である。

6. まとめ

ブリッジの歩行振動を制振対象としたAMDの制御則を、強化学習アルゴリズムであるQ学習・DQN・ACにより学習した。また、学習した制御則の有効性を、シミュレーションにより確認した。更に、ブリッジについては実機に実装する実験を行い、制振性能を確認した。

AIの一種である強化学習の研究および振動制御への適用は黎明期にあり、既往制御の性能を大きく上回る

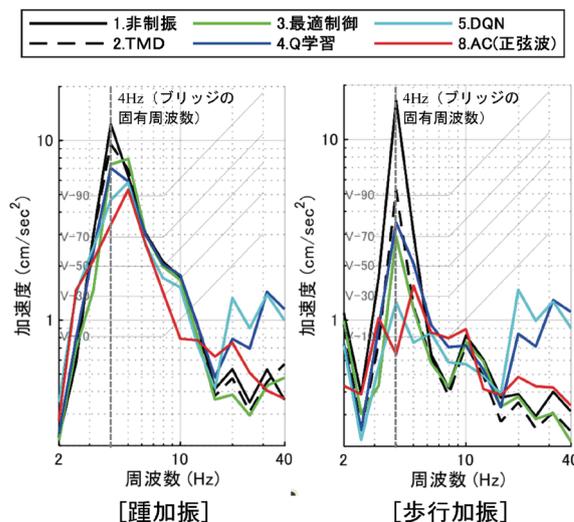


図8 実験結果の1/3オクターブ分析

全く新しい制御を生み出す可能性を秘めている。一方で、AIについては思考プロセスがブラックボックスである問題が指摘されており、高い安全性が求められる建築物への恒久的な実適用にあたっては、詳細に安定性を検証していく必要があると考える。

謝辞

本研究の実施にあたり、Laboro.AIの椎橋徹夫CEO、吉岡琢氏、中野達之氏、加藤修氏より貴重なご意見・ご協力を賜りました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森村哲郎：強化学習、講談社、305p、2019.
- 2) 日本建築学会：建築構造物の振動制御入門、349p、2010.
- 3) 武田篤史他：常温硬化型高じん性高強度モルタル「スリムクリート®」の屋内ブリッジへの適用、大林組技術研究所報、No.74、10p、2010.
- 4) 石川理都子他：実測データに基づく歩行加振力評価手法の提案、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、pp.391-392、2011.
- 5) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説、132p、2004.



青山 優也 (あおやま ゆうや)

2014年神戸大学大学院工学研究科建築学専攻修士課程修了、株式会社大林組入社。免制振・吊り天井等の制振・振動制御技術の諸研究開発に携わり現在に至る。

災害初期対応機関におけるドローンの活用

内山 庄一郎

●国立研究開発法人防災科学技術研究所 自然災害情報室室長

1. はじめに

本稿では自然災害発生直後の初期対応におけるドローン活用の現状と課題を紹介し、この分野で求められるセンシング技術や機械技術について考察する。「防災」には時系列として平時の予防、災害発生直後の初期対応、復旧、復興の4つの大きなフェーズがあり、それぞれの段階で多様な主体が、異なる専門性を持って活動を展開している。近年、ロボットやドローン（無人航空機）等の機械技術が活躍しつつある中で、防災のさまざまなフェーズにおける機械技術の応用が期待される。一方で、情報が少ない中で災害状況把握と人命救助を行う初期対応フェーズについては、消防、自衛隊、警察、海上保安庁など、危険地での活動訓練を受けた公的専門機関によってのみ行われてきた。この特殊性のため、初期対応フェーズの活動実体や課題が、研究者や企業に必ずしも理解されているとは限らない。加えて、検索（※）・救助活動における人海戦術の割合はまだまだ大きく、活動の迅速化・効率化、安全の確保に向けた最新の科学技術や知見の投入が期待される。

筆者は、ドローンの災害状況把握技術としての活用に向けて、2013年より全国の消防機関や自衛隊、自治体とともに、実災害での活用に関する運用の実践と知見を蓄積してきた。これらの成果として、災害対応へのドローンの活用に必要な知識体系、および現場活動のための情報ツール（Web地図システム）の概念である「GEORIS（ジオリス）構想¹⁾」を構築・開発し、2022年度中にその一部が民間企業より全国の消防機関等に商業展開される予定である。このように災害状況把握技術に注力してきた一方、センシングや機械技術そのものの応用については、現場でのニーズ把握にとどまるのみであった。社会に役立つ技術を作るには、その技術が求められる状況の明確かつ具体的な理解が欠かせない。そこで本稿では、対応が長期化、大規模化しがちな土砂災害を例として、その初期対応の具体的な活動像を提供し、ひいては高度な機械技術、センシング技術を持つ読者に対し、その応用可能性を問いかけてみたい。

※救助活動において、要救助者が存在する場所を推定・探索する行為を検索と呼ぶ。搜索と同義。

2. 消防機関で利用されるドローンの性能

2021年6月現在、全国の724の消防本部のうち383本部（52.9%）がドローンを活用している²⁾。多くが民生用で100万円未満、ペイロード（積載物）として光学カメラ、光学ズームカメラ、サーモカメラを搭載あるいは交換可能なものである。近年では、ドローンの機体とカメラの双方に防水性能等級3以上（IPX3）を備えることが必須性能として求められる²⁾。必要に応じて付加する機能として、プログラムによる自動航行機能や、物件（物資などの積荷）の搬送・投下機能を備えることが望ましいとされる²⁾。自動航行機能は、災害直後の迅速なオルソ画像（写真地図）の作成を想定したものである（オルソ画像については、内山（2022）³⁾を参照されたい）。

消防機関で利用されるドローンの性能の一例として、2022年度に総務省消防庁（以下、消防庁）から、全国の一部の消防機関に供給・配備されたACSL社の小型空撮ドローンを挙げる（表1）。

表1 消防機関で活用される小型ドローンのスペックの例（ACSL（2022）⁴⁾から抜粋）

寸法（アーム展開時）	637mm×560mm（プロペラ含む）
最大離陸重量	2,000g
最大飛行時間	25分（標準カメラ搭載、風速8m/s条件）
最大伝送距離	4km（障害物や電波干渉がない場合）
防塵・防水性能	IP43
標準カメラ	動画4K対応、静止画2,000万画素
機能	自動飛行、画像トラッキング、3方向センサによる衝突回避
セキュリティ対策	フライトログ・撮影データ漏洩防止、通信暗号化

現状のほとんどの消防機関では、この例に近い性能の電動マルチコプターを運用していると考えて相違な

い。小型のマルチコプターは、低騒音でダウンウォッシュの影響が小さく、地上で活動する部隊への影響が少ない。さらに、垂直離着陸とホバリングによって狭隘地でも運用が可能であり、Li-Poバッテリーを動力とするシステムは、プロペラ、モーターなどの推力系の整備性も高い。このクラスの機体の多くがそうであるように、消防機関でも光学・赤外カメラによる短時間飛行での情報収集が主たる用途として想定されている。運用においては、飛行時間が短く飛行場所の付近まで機体、備品、運航チームを輸送する必要があるために、機体サイズが機動性を制約する。一般的なサイズの指揮車両（8人乗り程度のバン）や消防防災ヘリの貨物スペースに機体を積みなければ出動もできない。また、小型電動ドローンの多くはモーター推力が小さく、平均風速が10m/sを超える環境や突風が吹く環境で安全に運用できる機体は多くはない。さらに、同様の理由により、重量物の搬送や無線中継、照明、危険斜面の監視などの長時間の滞空を伴う活動は難しい。

3. 土砂災害における初期対応の流れ

土砂災害では、情報収集と検索活動により要救助者・行方不明者の人数と位置を特定・推定し、同時に二次災害リスクを明らかにして現場で活動する隊員の安全を確保した上で、救助活動の要否、救出方法、優先順位を判断し救助活動を実施する（図1）。

情報収集は大別して要救助者に関するものと、活動場所の評価に関するものとの2種類がある。前者は119番通報の内容に加えて、同居者、周辺住民、消防団員、目撃者等へのヒアリングによって行う。警察や自治体が有する情報の参照や避難所での聞き取りも並行して実施する。活動場所の評価に関する情報には、気象情報、ハザードマップ、災害前の航空写真、災害後のドローン撮影写真、消防防災ヘリによる上空からの写真・映像と報告、地上隊の目視による危険情報の報告などがある。

続く検索活動では、情報収集で明らかにされた土砂災害の種類（崖崩れ、土石流、地すべり）、土砂の流出地点、流出方向と範囲、土砂の水分量、流木や瓦礫の量、住家の被害状況、道路の通行可否といった災害状況に加えて、要救助者の被害状況とその発生位置を検討し、要救助者がいる可能性が高い場所を絞り込む。要救助者の被害様相としては、上層階や屋上への垂直避難による取り残され、在宅中の家屋の倒壊や流出、家屋の低層部や車両への閉じ込め、屋外にいた場合には土砂流に巻き込まれるといった状況が予測される。

検索活動は、地上から目視と隊員による呼びかけで

行う表面検索、要救助者がいる可能性の高い住家内部に進入して行う空間検索、重機なども活用し瓦礫や土砂を撤去して行う最終検索の順に実施する。要救助者が土砂や家具に圧迫されるなどして声が出せない状況も想定されるため、車両、ヘリコプター、呼びかけなどを停止させるサイレントタイムを定期的に設ける。要救助者の携帯電話の番号が分かれば、電話をかけて呼び出し音を探すこともある。空間検索では、瓦礫等の奥に閉じ込められている要救助者を検索するため、状況に応じて、内視鏡のような画像装置、地中音響、電磁波、二酸化炭素などの探査装置、サーモカメラなどを用いる。また、隊員の進入にあたっては、瓦礫除去や障害物の破壊・撤去作業、進入路を安定させる支柱の設置を行う。ここまでの活動で全ての要救助者を発見できない場合、最終検索として大規模に土砂や瓦礫を除去した上で再度全域の検索を行う。



図1 土砂災害における現場活動の流れ

4. 土砂災害初期対応における現場活動の課題

4.1 情報収集と検索活動の課題

土砂災害では、消防車両が現場に進入できず、地上からの限られた目線では十分に情報収集が行えないために、災害全体像を早期に把握することが難しい（図2）。さらに、広域で同時多発する傾向があり⁵⁾、その場合、消防力（リソース）が分散する。消防防災ヘリの数は限られるため、同時多発すると速やかに上空からの情報支援を受けられるとは限らない。平成26年8月豪雨による広島市の土石流災害では、各地で同時に発生した土石流により住宅が流失し、大量の土砂によって道路が埋まったために、地上から被災箇所へのアクセスも難しく、道路や建物などのランドマークも失われ、既存の地図が使えない状況となった⁶⁾。

検索活動では、要救助者・行方不明者の特定に時間を要する。都市部でも地方でも、自治体の住民情報と居住実態が異なることは特別なことではない。加えて、居住者であっても発災時に不在であった者や、外部からの訪問者も存在するため、要救助者の特定には時間がかかる。続く空間検索と最終検索では、情報が少ない場合、要救助者がいる可能性が高い場所の絞り込みが難しいことも頻繁に課題となる。

初期対応フェーズでは、土砂の流出が拡大か収束かその傾向が不明な中での活動を強いられるため、安全監視員等の配置と退避路・退避場所の確保が課題にな

る。例えば土石流の場合、秒速10mで流下するとして、活動場所から600m上流部に安全監視員や監視装置を配置できた場合、60秒以内に移動可能な退避場所の設定が必要になる。こうした対策は、現場の状況が分からない情報収集の段階から必要となるため、夜間や地上アクセスが著しく制限されるような現場状況では、救助活動の開始までに長時間を要することもある。



図2 土砂災害発生直後の現場の状況(2018年7月撮影、株式会社ライズ伊木則人氏提供)
大量の土砂や瓦礫が道を塞ぎ、あふれた水がアスファルトを侵食しながら濁流となって流れている

4.2 救助活動の課題

流出した土砂、瓦礫、被災車両が障害となり、車両で現場にアクセスできない場合、遠距離であっても資機材を人力で搬送しなければならない。これらの障害物の多くは、人力では撤去が困難な重量物であり、さらに撤去後の置き場所の確保や廃棄場所までの搬送も同時に課題となる。

救助活動を行う隊員個人レベルでは、降雨による視界不良に加えて会話も不明瞭となることや、ぬかるみの移動やその中での重量物の扱いが想像以上に難しく、心身を疲労させる。これらに加えて、停電と通信途絶による後方支援の負担増や、切れた電線や太陽光パネルからの漏電による感電、ガス漏れ等による事故のリスクも常時抱えた中での活動となる。

重量物の撤去作業には、建設機械等の重機が用いられる場合がある。平成30年7月豪雨では民間事業者の重機が投入されたが、先述の通り土砂災害の現場は二次災害のリスクが高く、平時の工事現場とは異なる安全管理が求められることから、重機オペレータの統制にも課題が生じる。また災害後に、重機のレンタル費用、燃料代の負担者の問題、災害によるものか重機によるものか定かではない建物等の破損に対する補償問題が生じることも多い。

4.3 現場活動の情報資機材

情報収集と検索活動では、要救助者および二次災害リスクを含めた活動場所の評価に関する膨大な情報を扱う(図3)。これらは隊員個人の無線機によるコミュニケーションと、白地図への情報集約というアナログな手法によって行われる。無線コミュニケーションには、口頭での情報伝達のために情報が正確に伝わらない、聞き逃しが生じる、現場活動から手が離せず無線対応ができない、あとで振り返って情報を確認できないなどの課題がつきまとう。また、白地図への情報集約を担う指揮隊では、個々の隊員や外部組織からの大量の報告を集約し、地図を更新し続ける労力が大きいことや、時間経過に伴って大量に情報が書き込まれたホワイトボードの読みにくさ、煩雑な手書き情報の外部組織等へ情報共有の困難さが課題となっている。

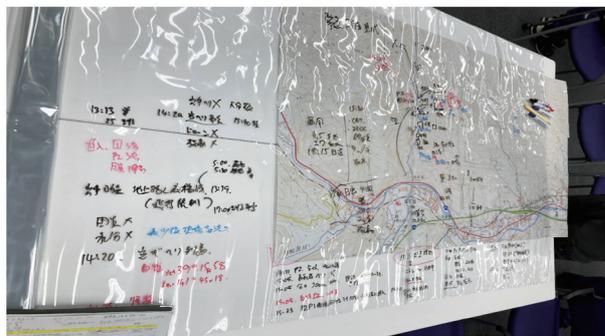


図3 林野火災図上訓練で情報が書き込まれた白地図(画像提供:釜石大槌地区行政事務組合消防本部)
各小隊から異なるタイミングで、時には同じタイミングで無線報告される情報を白地図に書き込むため、時間が経過すると記載される量が膨れ上がり、書いた本人以外は読み取りが困難な地図になる

4.4 新技術に対するコスト負担と運用の課題

これらの課題はいずれも、土砂災害時の現場活動において毎回切実なものである。一方で、個々の消防本部の単位で見ると、土砂災害は5年から10年に一度、大規模なものでは現役時に1度あるかといった発生頻度であるために、土砂災害に対応する資機材の導入コストに対する行政上の説明の難しさ、土砂災害の活動経験の蓄積や知見の伝達が課題となる。これらの課題は、消防機関が基礎自治体の一部局であることが、自治体単独でのコスト負担、有用な知見の全国普及を難しいものとしている側面もある。

5. ドローンの活用と現場のニーズ

現在普及しているドローンの基本性能(2章)で実施できるものとして、情報収集の課題(4.1)に対する活用が先行している。筆者が開発したGEORIS構想

も、災害時の安全運航、空間情報の活用、自然災害時の着眼点の知識体系であり、消防学校やドローンスクールでは習得できないドローンによる情報収集技術に着眼したものとなっている。一方で、無人ロボットとしてのドローンの活用可能性は、情報収集だけにとどまらない。救助活動の課題(4.2)の空間検索で挙げた資機材だけでは実際には十分ではなく、瓦礫や土中の要救助者の呼吸や心音などのバイタルサインの検出や、土中の人体の存在そのものの検出、要救助者の携帯電話の電波発信源の検知といった、要救助者の位置を直接的に特定する技術は、現場の大きなニーズといえる。さらに、要救助者の特定では人口動態に関するもの(4.1)や、隊員の身体能力の限界(4.2)、利用頻度の低い最新技術の平時における活用や新技術の導入に関する社会コストの負担、知見の普及・教育の難しさ(4.4)など、幅広い分野に対して課題とニーズが存在することを示した。

では、仮にこうした特殊な用途に貢献する技術を開発したとして、社会に受け入れられるのだろうか。卑近な例で恐縮だが、筆者は平成26年8月広島豪雨の土石流災害において、日本で初めて災害直後のドローン撮影によるオルソ画像を作成し「搜索支援地図⁷⁾」として広島市消防局に提供し、検索活動に大いに活用された。それから7年後の2021年、令和3年7月熱海市伊豆山土石流災害でオルソ画像の有効性が注目され、翌2022年、消防庁ではオルソ画像を作成するためのドローンおよび写真測量ソフトウェアを消防機関に配備することが決定されたように、技術の有用性の認知には時間がかかるが、社会に受容されることもある。

消防機関に限らず、災害初期対応に当たる機関においては、火災や救急といった日常の緊急事態対応に加えて、今後発生が確実視される国難級災害⁸⁾への対応も求められることを考慮すると、今回取り上げた土砂災害の初期対応における諸課題は、他の自然災害や大規模災害にも適応可能なニーズにもなるだろう。

6. まとめ

土砂災害の初期対応フェーズを例として、災害直後の情報収集、検索活動、救助活動の実情と課題を紹介した。そこではまだアナログ的な手法が主であることや、最新の機械技術、センシング技術が十分に活用されているとはいえない状況があることを説明した。

機械によって人間には難しいことの補助や、センサーによる人間の知覚能力の補強を通じて、安全、安心で豊かな社会の発展に貢献することは、誰もが望む方向性であろう。読者の有する高度な知見をもって、

科学技術の投入の余地が大きいこの分野に対する挑戦の幅を広げるきっかけとなるならば、これに勝る喜びはない。

参考文献

- 1) 内山庄一郎：ドローン地産地防プロジェクト一人に着目した災害初期対応ソリューションー、建設工業調査会、ベース設計資料、Vol.186、pp.28-31、2020.
- 2) 消防庁：消防本部における災害対応ドローンの更なる活用推進について(通知)、
https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/040331_drone.pdf、2020.
- 3) 内山庄一郎：オルソ画像作成の基礎、災害対応におけるドローンの有効活用に向けた勉強会(第1回)、2022年2月4日、防災科学技術研究所、
<http://id.nii.ac.jp/1625/00002381/>、2022.
- 4) ACSL：小型空撮ドローン(SOTEN).
<https://product.acsl.co.jp/product/post-369/>、2022.
- 5) 内山庄一郎：災害対応の初期フェーズにおける無人航空機の活用-平成30年7月豪雨における広島県での搜索支援地図の作成事例-、防災科学技術研究所主要災害調査報告、Vol.53、pp.175-189、
<https://doi.org/10.24732/nied.00002158>、2020.
- 6) 内山庄一郎、須貝俊彦：平成26年8月豪雨による広島市土石流災害の被害の特徴、自然災害科学、Vol.38(特別号)、pp.57-79、2019.
- 7) 内山庄一郎、井上公、後藤秀昭、中田高、井田康之、梅田篤：平成26年8月豪雨による広島土石流災害における空撮写真を用いた搜索支援地図の作成、CSIS DAYS 2014、A10、2014.
- 8) 「レジリエンス社会」をつくる研究会・高島雄哉編著：しなやかな社会の実現～きたるべき国難の先に、日経BPコンサルティング、2022.



内山庄一郎

(うちやま しょういちろう)

1978年宮城県仙台市生まれ。博士(環境学、東京大学)。2003年より現職。ドローンによる災害状況把握技術の開発と社会実装に従事。地すべり地形分布図(2014年完了)、災害事例データベース(2012年)、防災科研クライシスレスポンス(現bosaiクロスビュー、2012年)の設計と構築を行った。著書「必携ドローン活用ガイド」など。

熊本地震で被災した宇土市役所内のロボットによる調査

藤井 賢志

●千葉工業大学 教授

1. はじめに

本稿では、筆者が2016年6月に千葉工業大学未来ロボット技術研究センター（以下fuRoと表記）主席研究員の吉田智章氏、同研究員の西村健志氏ならびに同所長の古田貴之氏とともに関わった（旧）宇土市役所本庁舎（図1。以下、本庁舎と表記）に対し行った件につき話題提供のため紹介する。なお、予めお断りしなければならないが、筆者自身の専門は建築構造であり、表題にあるロボットどころか機械工学は全くの門外漢である。加えて記すならば、被害調査で用いたロボットについては文献¹⁾で、本庁舎の被害状況ならびに経緯その他については文献^{2)~5)}で報告済みである。従って、本稿で紹介するものの詳細については参考文献を参照されたい。



図1 旧宇土市役所本庁舎（2016年4月撮影）⁴⁾

2. 調査概要

調査で用いたロボットは、千葉工業大学未来ロボット技術センター（fuRo）で開発された災害対応型移動ロボット「櫻壺號」である（図2）。以下、文献¹⁾より要約する形でロボット「櫻壺號」の概要を記す。「櫻壺號」は、2011年東北太平洋沖地震の際の福島原子力発電所での事故の際の内部調査のために開発されたロボットの改良版である。この「櫻壺號」は、6本のクローラーにより、階段やがれき上を移動可能な走行性能を有する。最大階段昇降角度は45°である。

本調査では、「櫻壺號」には操作用の小型CCDカメラ4台に加え、観察・記録用に全天球カメラ2台に小型

広角カメラ2台、二次元ならびに三次元レーザー scanner を搭載した。

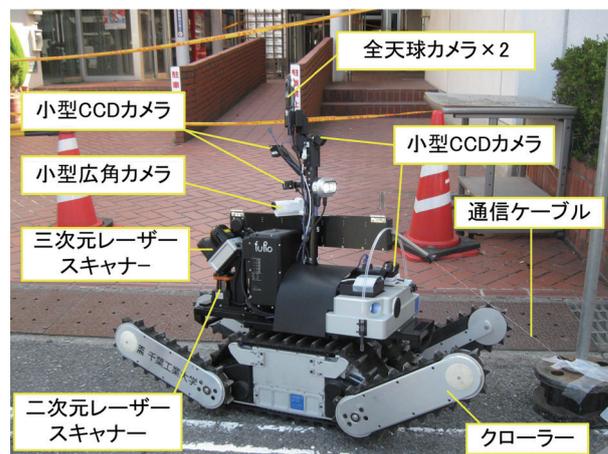


図2 災害対応型移動ロボット「櫻壺號」⁴⁾

本調査では、本庁舎の外にロボットの操作卓を設け、そこから遠隔操作することで内部調査を行った。操作卓とロボットの通信は、有線の通信ケーブル（全長250m）で行った。本調査は2016年6月14日の午後から、市の担当者の立ち合いの下で行われた。調査時間は約100分、走行距離は約250mであった。その間に記録した静止画は、全天球カメラで約700枚、小型広角カメラで約7000枚、レーザー scanner の記録データのデータ量は100分間で3GBとなった。

3. 調査結果

3. 1 内部画像

図3～図5に、全天球カメラにより記録された内部画像（360度のパノラマ写真）を示す。図3は、階段棟の1～2階の間の階段部分、図4は事務棟4階の中柱付近、図5は事務棟5階である。ここで、画像の中央部はロボットの後方右方向、両端は前方左方向に対応する。次いで図6～図8に、小型広角カメラにより記録された内部画像を示す。図6は、事務棟4階の側柱付近、図7は階段棟5階廊下付近、図8は事務棟5階である。

本調査では、ロボット操作者がfuRo研究員の西村健志氏、画像の主な閲覧者が市の担当者と筆者、と異なっているため、限られた調査時間内に可能な限り広

い視野の画像を記録する必要があった。その観点からは、本調査で用いた全天球カメラと小型広角カメラは、非常に有効であった。



図3 全天球カメラによる画像(2階階段)⁴⁾



図4 全天球カメラによる画像(4階)⁴⁾



図5 全天球カメラによる画像(5階)



図6 小型広角カメラによる画像(4階)

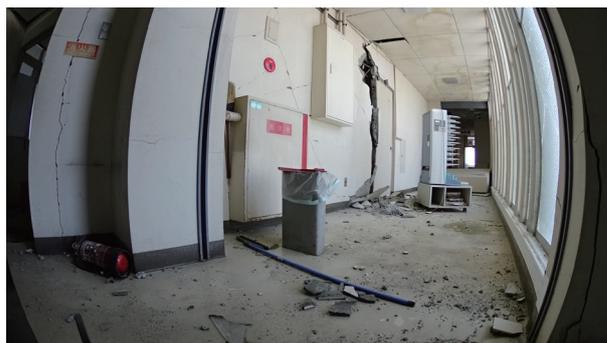


図7 小型広角カメラによる画像(5階)⁴⁾



図8 小型広角カメラによる画像(5階)

次いで図9に、カメラデータより作成されたCGを示す。

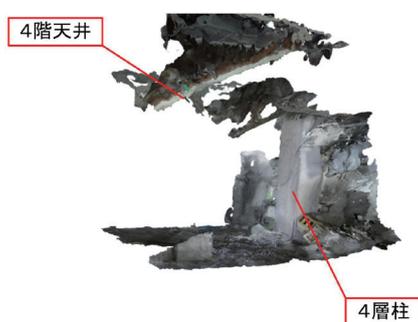


図9 カメラデータより作成されたCG⁴⁾

3. 2 計測データ⁴⁾

図10に、3Dスキャナーによる計測データより作成した事務棟4階柱ならびに天井面を含む部分のCGを示す。同図に示すように、計測結果から事務棟4階天井が下がっている状況を可視化することができた。なお、計測により得られた、図4の4階中柱付近での天井高は1500mm程度であった。ここで、図面によると4階事務室部分の天井高は2600mmであったことから、中柱の軸方向への縮み量は1100mmと推定される。一方、ロボット操作用に搭載されていた傾斜計による、5

階床の傾斜角は平均で6度程度であった。従って、(中柱の縮み量1100mm)/(事務室部分のスパン8900mm) = 0.12を床の傾きと見なすと約7度となることから、傾斜計による5階床の傾きの平均値と、4階中柱付近の天井高の計測値より推定した中柱の縮み量の推定値は、概ね符号していると判断できる。

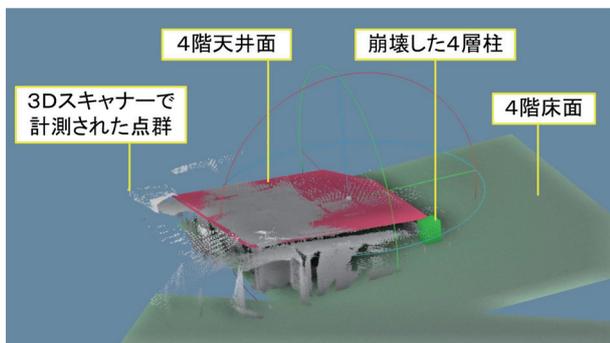


図10 3Dスキャナーによる計測データより作成した事務棟4階部分のCG⁴⁾

4. ロボットを用いた被害調査における課題

以上、既に報告済み^{1)~4)}の内容に基づき、2016年に筆者が経験したロボットによる被害調査を振り返ってみた。以下に、本調査で感じた課題等を記す。

4. 1 調査計画の制約条件

以下に、本調査の計画時の制約条件を記す。

- ロボットと操作卓の間を、有線で通信する必要がある。
- 1回あたりのロボットの調査可能時間は、2時間以内である。
- ロボットにはドアの開閉機能はない。

まずa)に関しては、予備調査の段階で、本庁舎内に入るとロボットに搭載した無線機の電波が操作卓で観測できず、無線を用いた遠隔操作ができないことが判明した。加えてb)は、ロボットに搭載しているバッテリーの容量から定まった。なお、c)は「櫻壺號」のつくり上、不可能である。

このことから、本調査では調査ルートを「来た道を戻る」ようにして、かつケーブル長の制約(250m)で支障がないように計画する必要があった。加えて、調査可能時間が限られていることから、調査すべきターゲットを絞る必要があった。そのため本調査では、外観調査で落階が確認されている事務棟4階部分の調査を第1の目標とした。

なお、調査中にケーブルの切断によりロボットが通信不能になる可能性もあったことから、ほぼ同等の構成を搭載したロボット「櫻式號」も準備をしていた。万一の場合には、「櫻式號」が無線電波の届くところ

まで「迎えに行って」ロボット間で通信を行うことで、「櫻壺號」を回収することも意図していた。本調査では、幸いにもこうした事態には至らなかった。

以上より、ロボットで内部調査を行う際には、対象建造物の図面など詳細な情報をもとに事前に計画を練ることが必要であると考えられる。本調査の場合、幸いにも本庁舎の図面を早い段階で得ることができたことが、トラブルなく調査を終えられた要因であると考えられる。もちろん、予定していた調査ルートでドアがある(閉まっている)ことがなかった等の「運」に助けられたところもあると考えている。

4. 2 ロボットによる様々な計測の可能性

本調査で使用したロボット「櫻壺號」では、操作用の傾斜計が搭載されていた。これを使うことで、5階床の傾斜角を知ることができた。加えて、3Dスキャナーによる計測結果から、軸方向崩壊した事務棟4階中柱付近での天井高が1500mmであることがわかった。これと設計当初の図面から読み取れる天井高(=2600mm)から、中柱の縮み量が1100mmであることがわかった。一方、調査後しばらくたって、筆者が「測れば良かったのに。惜しいことをした。」と思うものも少なくない。その一つが、層の残留変形角である。通常の(人間さんによる)被害調査では、下げ振りを使えば建造物の残留変形角を計測できる。例えば矩形断面の柱のコーナーの線に着目して、上端を柱のコーナーの線にあてて下げ振りをぶら下げ、下端が柱のコーナーの線からどれだけ離れているかを測れば、下げ振りの長さ(=高さ)を用いて残留変形角の概算値を知ることができる。しかしながら、本調査では、4層の残留変形を知ることはできなかった。図10にすでに示したように、3Dスキャナーによる計測データからCGが作成できたのだから、そのデータを使えば4層の残留変形を知ることも可能ではないか、と筆者も(調査後しばらくしてから)考えた。問題は、「どこの点を基準に考えればよいか」が全くわからなかった、という点である。つまり、ロボットによる計測データは膨大にあるものの、どこどこを測って(どの高さで割って)傾きを出せばよいか、全く見当がつかなかったのである。

ほか、ロボットに微動計を積んでおいて計測を行う、ということも考えられる。

4. 3 調査後のデータ整理

調査を行えば整理をするのが当たり前、といえば全くその通りであるが、筆者の体験から判断するに、ロボットを使った調査は通常の被害調査とは別のノウハウが必要と考える。

本調査では、全天球カメラは8秒に1回のペースで画像記録を行った。記録した静止画は、前述の通り全天球カメラで約700枚、小型広角カメラで約7000枚である。これを対象構造物のどこのどの方向で記録したのか、を対応づけるのは非常に膨大な作業となる。例えばこれを電子データとしている図面に自動的に対応づけられないかとか、あるいは画像から構造部材やほかの非構造部位の損傷を自動で判別できないか、とか様々な「ないものねだり」が出てくる。そう考えると、やはりロボットだけではなく、周辺の技術開発的なものも必要と考えられる。

謝辞

初めに、この地震で被災された熊本県・大分県の皆様に対し、謹んでお見舞い申し上げます。本報告は、fuRo (吉田智章主席研究員、西村健志研究員、古田貴之所長)ならびにMr. サンデー (フジテレビ・関西テレビ)との共同撮影を元とした調査結果である。本報告の作成に際し、宇土市役所の皆様にはご多忙中、資料のご提供等の多大なご協力を賜りました。加えて本文図3～図10は吉田智章氏よりご提供いただいた。なお、図9と図10は、著者の責任で加筆したものである。ここに関係各位に謝意を示すとともに、被災地の一日も早い復興を祈念します。

参考文献

- 1) 吉田 智章、西村 健志、藤井 賢志、古田 貴之：クローラ型移動ロボット“櫻壺號”を利用した宇土市庁舎の調査、第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集、RSJ2016AC2U1-07、2016.9.
- 2) 藤井 賢志、吉田 智章、西村 健志、古田 貴之：平成28年熊本地震で被災した宇土市役所市庁舎の被害状況と分析、日本地震工学会・大会—2016梗概集、2016.9.
- 3) 藤井 賢志：ロボットを活用した建築物の被害調査、建築雑誌、日本建築学会、Vol. 132、No. 1697、pp.36-37、2017.4.
- 4) 藤井 賢志：地震被害を受けた建築物のロボットによる内部調査と分析、コンクリート工学、Vol. 56、No. 1、pp.51-54、2018.1.
- 5) 日本建築学会：2016年熊本地震災害調査報告、pp.184-187、2018.6



藤井 賢志 (ふじい けんじ)

1995年明石工業高等専門学校卒業、1998年東京大学卒、2003年同大学院修了、2007年千葉工業大学助教、准教授を経て現職、博士(工学)、専門分野：建築耐震構造

UAV、AIとIoTを用いた橋梁損傷検知のDX

覚 紀

●埼玉大学理工学研究科 准教授

1. はじめに

2020年代に入り、UAV（小型無人航空機）、AI、IoTなどの世界を動かす技術が、地震工学、構造工学分野にも大きく影響している。特に、最近では、UAVやロボットを用いた構造物の点検、深層学習による損傷検知、IoTセンサーなどの安価なデバイスを用いた高密度地震観測、構造ヘルスマonitoring (SHM)などの技術が活発に検討され、多くの場合、実証実験や実用段階に入っている。このように、インフラの維持管理、地震などの災害に対する都市から地方までのレジリエンスに機械分野、情報分野、電気分野の技術を積極的に取り入れる動きが見られる。

さらに、5G、6G、量子コンピュータ、メタバース、Mixed Reality (MR)などの新技術により従来の構造物の維持管理や地震工学における大きな変化、すなわちデジタルトランスフォーメーション (DX)も期待されている¹⁾。

本稿では、これらの多くの実用的な手法と技術の中で、特に著者が関わった、UAV点検、画像から損傷検知するAI手法、UAVの自律飛行による点検、UAV画像から構造物の3次元モデルの構築に関する最新の事例を紹介し、橋梁等インフラ構造物のこれからのDXへの展開を説明する。

2. UAVによる橋梁の点検と損傷検知

2015年に、経済産業省より「ロボット新戦略」が公表された²⁾。これは、インフラの維持管理におけるロボット技術の活用率のKPIとして、2020年ごろまでに、国内の重要インフラ・老朽化インフラの20%で、センサー、ロボット、非破壊検査技術等を活用する目標を掲げており、インフラの維持管理における革新的技術の活用への期待が大きかった。その後、第1期戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)の対象課題であるインフラ維持管理・更新・マネジメント技術において、UAVやロボットなどを活用する点検手法が活発に検討されており、実証実験などが多く行われている。

海外においても、特にUAVを活用した点検、画像診断に関する関心が高く、実用レベルでの実証実験の結果、その安全性と利便性が評価されている。UAVやロボットから撮影された解像度の高い動画や写真から、

画像処理手法、特に深層学習などを用いた手法により、損傷検知や損傷程度を自動判定する技術が求められている。

UAVによる橋梁点検技術は、図1に示すように、人が近づくことのできない多くの場所に対して、UAVで自由な角度のさまざまな視覚的情報や打撃音、赤外線画像を取得し、それらを用いて、橋梁の損傷や劣化を発見、監視し、状態を把握、診断、理解するための技術である。

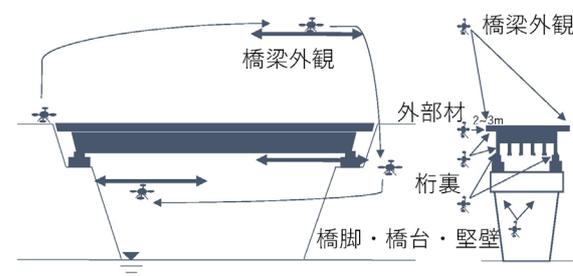


図1 UAVによる橋梁の点検

さらに、近年では、深層学習を用いた手法が飛躍的な発展を遂げており、幅広い分野で活用されている。橋梁等インフラ構造物の損傷検知においては、畳み込みニューラルネットワーク (CNN)が最も検討された基礎的な手法の一つである。CNNでは、デジタル写真のようなピクセルで構成された行列に対して、複数の小さいサイズ(3x3や5x5など)のフィルターをかけて、その特徴を抽出するものである。複数の畳み込み層、サイズを圧縮するプーリング層の繰り返しによって、画像の中にある特徴量が抽出され、最後に、畳み込み層から得られた特徴量を全結合層に入力し、事前に定めた各クラスに分類を行う。すなわち、CNNは画像の分類問題に特化した手法である。これを用いる損傷検知では、まず検知する損傷の分類、例えば腐食、ひび割れなどを設定し、それぞれの分類の画像を数多く用意することが必要である。

CNNによる写真分類を行う場合、UAVを用いて、まず実際の橋梁で撮影したフレーム1枚のみを抽出し、横方向20分割、縦方向10分割して、200枚の小さい写真とした。これらの小さい写真アレーを最良モデルにより診断し、可視化した結果を図2に示す。

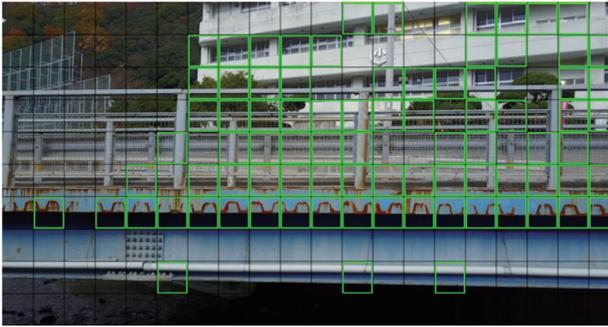


図2 CNNによる損傷検知

UAV画像を細かく分割すれば、精度は上がるが、細かく分割しすぎると画像分類できる情報量が足りなくなるため、その効果が限定的となる。また、画像の分割が細かいほど、腐食は鋼材にあること、ひび割れはコンクリートやゴム支承にあることなど、AIが全体的な雰囲気や場面を読み取れなくなる。

そこで、全体を見ながら、局部を分類することをセグメンテーション (Segmentation) と呼び、その手法として、逆畳み込みや全畳み込み (FCN) がある。FCNが最初に提案された後も複数の改良方法があり、本研究はそのうちのU-Net、Mask R-CNNおよびDeep LabV3+などのモデルを使用した。

一例として、Instance Segmentationの手法としてよく知られているMask R-CNNの訓練結果を図3に示す。同じ橋梁に対して、より効果的で、細かい境界線に沿って、損傷領域を画像より認識することができた。



図3 Mask R-CNNによる腐食認識

しかし、Segmentation手法を使うときには、画像をピクセル単位にし、損傷を表記するアノテーション作業が必要となる。作業者の経験や損傷に対する認識の違いによって、マーキングされる領域に違いが生じることや、作業に多大な労力がかかることがデメリットとなっている。将来的には、作業を効率化して、高精

度に損傷を検知する手法を開発していく必要がある。

近年では、物体検出 (Object Detection) 手法が迅速に増えており、高い性能と軽量化が同時に実現しているモデル、例えばFaster R-CNN、SSD、YOLO (9000、v3、v4、v5など) が提案され、自動運転、UAVの自律飛行制御分野への適用が期待されている。橋梁等インフラ構造物では同一写真で複数種類、複数箇所の損傷を同時に検出する課題において、YOLOが実用可能であった場合、UAV点検と同時に用いることにより点検の大幅な時間短縮、人件費削減につなげることができると考える。

YOLOの最新モデルであるYOLOv5sを用いて、前述のAI損傷検知と同じデータベースを用いて、訓練を行った最良モデルの結果を図4に示す。図を見ると、YOLOv5sを用いることで、高精度な損傷検出結果を示している。なお、このYOLOv5sでは一般のスマートフォンやJetson NanoなどのIoTデバイスでもリアルタイムに実施することができる軽いモデルであり、ピクセルレベルに達していないが、損傷領域をボックスで囲んで指示することができ、将来的には点検ロボットや、UAVなどを制御して自律的に損傷箇所に向かって飛行することなども期待される。

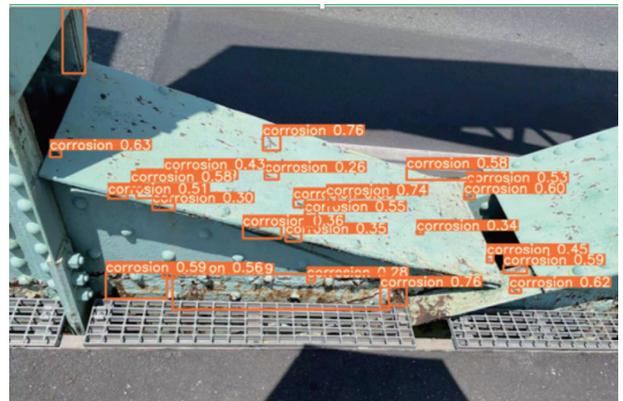


図4 YOLOv5sによる橋梁の損傷検知

3. UAVの自律飛行による点検

自律飛行UAVとは、パイロットがUAVの飛行に積極的に関与せず、遠隔操作で監視して、どうしても必要な場合にのみ操縦するUAVを指す。自律飛行タイプの中でも、一般的なものは、GPSを搭載したタイプである。GPSの位置情報を使ったナビゲーションによって、自律的にプログラミングされた飛行を可能にする。

最も汎用的な手法として、図5に示しているように、予め設定したウェイポイント (Waypoint) を通過するルートを自律的に飛行させる方法である。これらのウェイポイントを事前に1回設定、もしくは現地記録

しておくことで、その後何回も飛行することができる。そして、毎回の飛行では安定して同じ箇所、同じ高さ、同じ角度と同じ距離の同質画像を確保することができる。このような点検の利点としては、1回設定された飛行ルートを再現することができ、同じ飛行ルートで撮影された画像により、時間経過に伴う損傷の変遷を比較することが容易、そして、操縦することが安心などの利点が挙げられる³⁾。

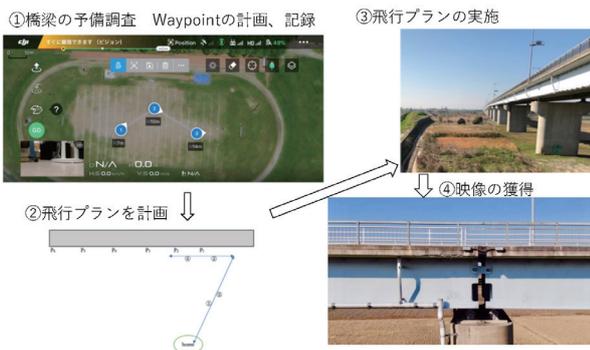


図5 自律飛行によるUAV橋梁点検

4. UAV映像による3次元モデルの構築 (SfM)

近年、従来のデータ管理手法である2次元の図面から設計から施工、そして維持管理までのデータを3次元に行うBIMやCIMが提唱されている。構造物の3次元モデル化は、数値解析などの力学モデル、設計、生産、施工まで革新的に管理するほか、災害やレジリエンスにも大きな価値を見出すことが期待されている。

既存の構造物では設計当時の資料が少なく、BIMなどの3次元モデルを作成するのに、多大な労力がかかる。従来では3Dレーザースキャナーなどを使えば、計測点周辺の構造物を3次元点群として収録することができるが、橋梁の場合、河川や谷を渡る場所では安定した足場が少ないことが難点である。このような場合は、UAVで2次元画像を撮影し、Structure from Motion (SfM) 手法、すなわち一連の画像から物体の3次元モデルを構築する手法を利用すると便利である。

橋梁のSfMについて、その概要を図6に示す。対象橋梁構造物に対して、まず様々な角度から一定のオーバーラップ率を持った写真を撮影する。実際に手操縦は煩雑のため、一般的には事前に設定したルートで自律飛行することがより均一で便利に画像を収録することができる。次に、これらの収集された写真をアライメントして、最終的に3次元点群を生成してメッシュされたモデルを構築する。ここでは最近の事例として、2022年3月に発生した福島県沖地震で、支承や伸縮装置などに被害を受けた福島県伊達市の伊達橋⁴⁾

において、被害橋梁のアーカイブとして撮影されたUAV写真から構築されたモデルを図7に示す。

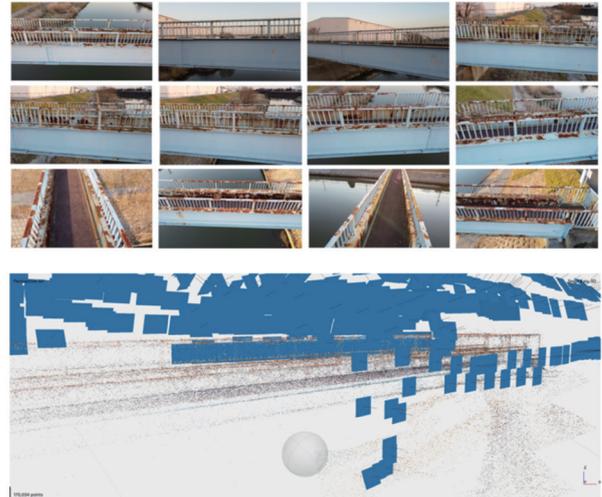


図6 UAV SfMによる橋梁3次元モデルの構築

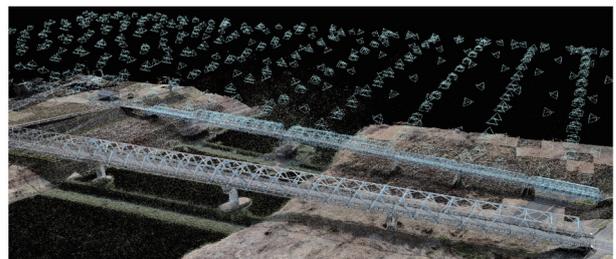


図7 地震被害を受けた伊達橋の3次元モデル

5. インフラ施設の維持管理DX

近年の落橋事故では、橋梁等のインフラ構造物の点検と調査の質のみならず、点検の頻度も大事であることを提示している。現在では、日本や海外で1年や5年に1回実施する点検や調査の代わりに、図8に示すように、UAVおよび車載スマホなどの簡易な手法を用いて、週単位で橋梁の上下面のスキャンを実施し、損傷劣化などをスクリーニングすることが可能となっている。

このように高頻度のスクリーニングを実施することにより、台風、大雪や地震などの直前、直後のデータ

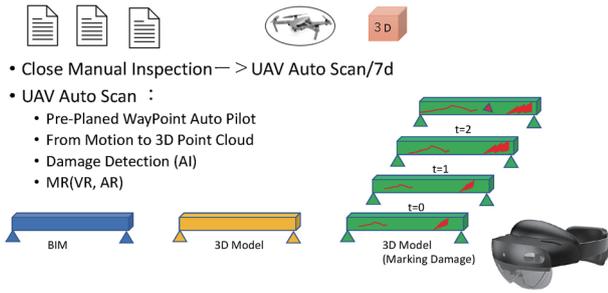


図8 橋梁維持管理のデジタルプラットフォーム

もタイムカプセルとして保管され、急激な劣化進行も早急に検知することができるため、橋梁維持管理手法のDXの一案として考えられる。

前述したUAVの自律飛行を定期的実施することで、高頻度かつ低コストに3次元情報を入手することができる。さらに、Mask R-CNNなどの2次元画像の損傷検知とSfMを融合することにより、図9に示すように損傷の3次元分布データも得られる。

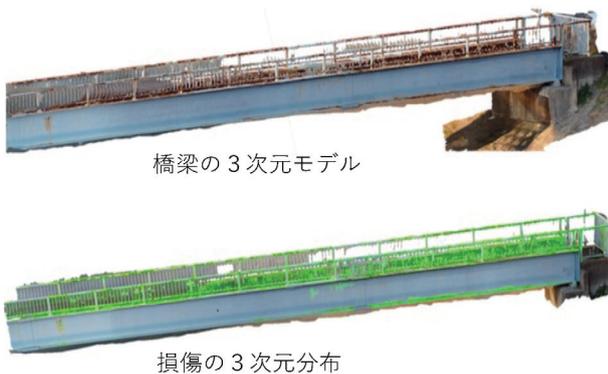


図9 橋梁の3次元モデル(上)と損傷の3次元分布(下)

最後に、Hololense2などのMRあるいはAR、VRのプラットフォームにデータを表示、表記、編集するユーザインタフェース (UI) が構築できれば、将来的にはこのような3次元的な構造物の維持管理ができると予想する。このようなデジタルプラットフォームは、図10に示すように、今までのUAV自律飛行による画像の取得、3次元モデルの構築、AIによるピクセルレベルの損傷検知、そしてMR上におけるデータの重ね合わせの手順で構築することができる。今後、個々の手順における手法の高度化と検証を実践していくことが重要である。

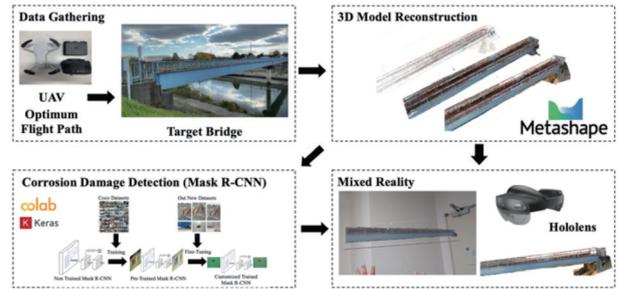


図10 デジタルプラットフォームの構築

6. まとめ

本稿では、機械工学と地震工学の融合事例として、UAVを用いた橋梁点検、損傷検知、自律飛行、3次元モデルの構築などの最新技術を紹介した。さらに、今後の発展として、これらの要素技術を総合的に運用して、インフラ構造物の維持管理のためのDXの一予想を説明した。今後の地震工学分野における展開も期待できれば幸いである。

参考文献

- 1) 経済生産省：中堅・中小企業等向け「デジタルガバナンス・コード」、pp.1-2、2022。
- 2) 経済生産省：ロボット新戦略—ビジョン・戦略・アクションプラン、pp.71-78、2015。
- 3) 党紀、菊池 高博、全 邦釘、史 紀元：橋梁自動点検のためのUAV自律飛行に関する基礎的検討、AI・データサイエンス論文集、Vol.1 (J1)、pp.623-633、2020。
- 4) 党紀、王欣：福島沖県沖地震被害調査報告橋梁の地震損傷 (速報第二報)、
https://www.jaee.gr.jp/jp/disaster/20220316fukushima_off_eq/、2022。



党 紀 (とうき)

2006年中国東南大学修士課程修了して、日本に留学。2010年愛知工業大学で博士後期課程修了。2011年京都大学特別研究員を経て、2013年から埼玉大学助教に赴任し、2020年より現職。研究分野は橋梁耐震、維持管理。

第12回震災予防講演会の報告 — 首都直下地震と都市防災 —

宮腰 淳一

●清水建設

1. はじめに

本会では、地震工学および地震防災に関する学術・技術の進歩発展を図り、地震災害軽減のための普及活動の一環として、毎年震災予防講演会を開催している。

今年は、新型コロナウイルス感染症による首都圏でのまん延防止重点措置が適用される中、感染対策を十分にとったうえで、2022年2月4日（金）にパシフィコ横浜・アネックスホールにて開催した。今回の講演会は、2021年10月7日の千葉県北西部の地震によって東京都内では2011年の東日本大震災以来の震度5強が観測されたことを受けて、「首都直下地震と都市防災」と題して、本会事業企画委員会震災予防講演会WG主査の宮腰淳一氏（清水建設技術研究所）、廣井悠氏（東京大学大学院工学研究科教授）、武村雅之氏（名古屋大学減災連携研究センター特任教授）の3名の方にご講演頂いた。会場は市民や自治体の防災関係者、大学や民間の研究者等、定員に近い100名ほどの参加者が集まった。

2. 講演会の概要

震災予防講演会WG委員の佐々木透氏（鹿島建設技術研究所）による司会ではじまり、宮腰淳一氏より震災予防講演会の開催経緯と主旨説明がなされ、続いて今回の講演会の講師の紹介がなされた。



写真1 司会の佐々木氏

最初に、宮腰淳一氏より「首都直下地震の概要と都市構造」と題した講演があった。まず、2021年10月7日の千葉県北西部の地震を含めた首都直下地震の概要

が紹介された。首都圏では、関東大震災のようなマグニチュード8クラスの地震だけでなく、マグニチュード6クラスの地震が数年に1度程度発生していることが紹介された。つぎに、現在の首都圏の都市構造の概要として、関東大震災前から現在までの今昔マップ、および鉄道、高速道路、超高層建物の変遷が述べられた。その際、1960年代と現在の丸の内の建物群の比較や、60m以上の超高層建物の密集度等も紹介された。



写真2 宮腰氏の講演

つぎに、廣井悠氏より「近年の大都市部における地震被害に学ぶ—2021年10月の千葉県北西部の地震等を例に—」と題した講演があった。ここではまず、2021年10月7日の千葉県北西部の地震の被害による教訓についてご紹介いただいた。そこでは、震度5強では帰宅困難者の問題はあまり大きくなく、この地震による教訓の積み上げおよび普遍化は難しいと述べられた。一方、過去の地震からの教訓の積み上げは重要であるとの考えから、関東大震災からの教訓がどのように積み上がっているかについて、地震火災を中心にご紹介いただいた。そこでは、1923年の関東大震災に加えて、2011年の東日本大震災、2016年熊本地震、2016年の糸魚川大規模火災の被害やその様相等を比較された。とくに、糸魚川大規模火災での延焼・避難シミュレーションを示しながら、被害の様相を詳細に紹介された。また、現在の市街地がどの程度安全になっているかについて、出火率、延焼、消防、避難という観点から解説された。つぎに、地震火災では火に囲まれないように避難することが原則であるとしたうえで、今

後発生が予想される首都直下地震や南海トラフ巨大地震における地震火災被害は、関東大震災や阪神淡路大震災と比べてどの程度であるかを、会場の聴衆と一緒に5つの選択肢から選んでみることを行った。この試みはとてもよく、聴衆一人一人が我が事として考えることができたと思う。最後に、都市の防災力を向上させるプラスの要因の一つとして「科学技術の進展」を挙げ、災害連関図といった因果関係のツリー構造をつくり想像力をつけること等が重要であることを強調された。



写真3 廣井氏の講演

最後に、武村雅之氏より「大正12年関東大震災後の帝都復興事業に学ぶ」と題した講演があった。まず、関東大震災の被害を概観したうえで、東京の大改造である帝都復興事業について紹介された。この事業では、震災の反省を踏まえ、耐震・耐火を大前提として、私的利益保証のためではなく公的な事業として国をあげて帝都復興をなしとげること、官民一致で「帝都として恥ずかしからぬ都市の建設」をすること、東京は帝都として品格をもたなければならず日本固有の都市美の帝都を建設する必要があることが掲げられていたことを、文献等を引用しながら説明された。実際、総額7億2450万円（現在の貨幣価値で約4兆円）の事業費をかけて東京中心部の基盤が整備され、その後の震災にも関わらず、道路、橋梁、公園等多くが引き継がれて現在にいたっていることが紹介された。とくに道路については、「将来、地下鉄が通じる可能性が多いところは幅員を27m以上とすること」として工事された道路は、現在その通りになっていることが紹介された。一方、現在の東京は、目先の利益にとらわれて長期的なビジョンのない「とりあえず」の街づくりとなっていると指摘された。具体的には、道路や橋梁を覆う首都高速道路、林立する高層ビル、臨海部の埋立地での住宅建設等が挙げられた。このような都市でひとた

び地震が発生すると、関東大震災以上の被害を受ける恐れがあると指摘された。最後に、都市に対して、何を目標としてそれらをどのように使っていくかという哲学(考え方)が重要で、「日本に哲学なし」ではなく「日本に哲学あり」にしたいと締めくくった。



写真4 武村氏の講演

3. おわりに

本講演会への参加者からは、オンライン開催が多い中、対面かつ「地震防災」をテーマに継続開催している講演会はとても大切であり、今後の企画にも期待するとコメントを頂いた。大変有難いコメントであり、今後も継続的に開催できるように努力したい。

本会では、地震災害の軽減に向けた普及活動の一環として、こうした講演会を継続的に企画し、一般市民の防災対策のきっかけ作りをしていきたいと考えている。本講演会で取り上げて欲しいテーマやご要望等があれば、事業企画委員会へご連絡いただきたい。

最後に、講演会の講師ならびに開催にご協力頂いた関係者の方々に心から謝意を表する。



写真5 会場風景

強震動評価のための深部地盤モデル化手法の最適化に関する研究委員会およびESG研究会開催報告

松島 信一

●京都大学防災研究所
教授

／林田 拓己

●建築研究所
主任研究員

／地元 孝輔

●香川大学創造工学部
准教授

／佐藤 浩章

●電力中央研究所
上席研究員

／津野 靖士

●鉄道総合技術研究所
主任研究員

1. はじめに

「強震動評価のための深部地盤モデル化手法の最適化に関する研究委員会」（以下、本委員会）は、2019年度に設置されてから3年間活動を行ってきた。本委員会の設置期間は2020年度までの2年間の予定であったが、本委員会が学術的部分を担っていた、「第6回表層地質が地震動に与える影響（ESG）に関する国際シンポジウム（以下、ESG6）」が新型コロナウイルス感染症対策のために2021年3月から2021年8月に開催が延期されたため、2021年度末まで設置が延長された。本委員会の活動については年度毎に報告を行ってきた^{1),2)}。また、本委員会を含め2011年以降に関連する研究委員会で行った活動についても報告されている³⁾。ESG6については、日本地震工学会誌43号^{4)~7)}に詳しく報告されている。さらに、第17回世界地震工学会議（17WCEE）において、本委員会が中心となって提案した、これまでのESG研究およびESG国際シンポジウムでのブラインドプレディクションに関する議論を行うためのセッション（Special Session）「2021 Kyoto Symposium for the 6th Effects of Surface Geology on Seismic Motion (ESG6): Reflections on Past and Upcoming ESGs and the State-of-the-Art/-Practice」において日米仏豪から8名が発表を行い、議論を行った。

ここでは、本委員会を締めくくる活動として実施した、ESG研究会「ESG6の国際ブラインド予測結果からESG研究の将来を考える」を中心に報告する。

2. ESG研究会報告

2.1 概要

2022年3月31日に、本委員会主催の研究会「ESG6の国際ブラインド予測結果からESG研究の将来を考える」（以下、本研究会）を開催した。本研究会は、2021年8月30日～9月1日に開催されたESG6において実施された国際ブラインド予測を通して浮き彫りになった今後のESG研究の課題について議論を深めることを目的とした。現地会場（京都大学東京オフィス）とオンラインのハイブリッド形式にて開催したところ、会員・非会員あわせて68名（会場参加：11名、オンライン参加：57名）の参加があった。研究会ではまず、松島委員長による主旨説明の後、ESG6におけるブラインド

予測参加者の結果に関して2名の委員より概要の報告があった。その後、ブラインド予測参加者4名に各々の解析内容・結果に関して紹介していただき、2名の委員よりESG6後に追加で実施した調査・解析に関する報告を行った。最後に、一連の講演内容を踏まえた総合討論を行った。

2.2 国際ブラインド予測の概要

ESG6では、熊本市内の強震観測点（KUMA）を対象サイトとして、以下の予測を行った。

- ・KUMA周辺で実施した微動アレイ探査・表面波探査記録を用いた一次元地下構造モデルの推定（BP1: 10か国28チーム参加）
- ・KUMAおよび近郊の岩盤サイト（KU.KMP1）の中小地震記録を基にした2016年熊本地震の余震（弱震動）シミュレーション（BP2: 5か国15チーム参加）
- ・KU.KMP1で記録された熊本地震の前震・本震記録を基にした、KUMAにおける前震・本震時の強震動シミュレーション（BP3: 5か国14チーム参加）

2.3 国際ブラインド予測から得られた知見

地元孝輔委員より、参加者より提出されたBP1の結果に関する報告が行われた。微動・表面波探査記録から推定されたRayleigh波分散曲線の形状は多くの参加者間で類似しており、推奨地下構造モデルによる理論値とも概ね調和的であったことが紹介された。推定されたS波速度構造に関しては、深さ50mまでの地盤に関しては参加者間の差異が小さい一方で、深部地盤に関しては大きなばらつきがあったことが報告された。

津野靖士委員より、BP2・BP3の結果に関する報告があった。最大振幅、継続時間、フーリエ振幅スペクトル、擬似応答スペクトル等に関して、参加者による予測のばらつきが一定の範囲内に収まっており、地震動の再現性が総じて良好であったことが紹介された。

2.4 ブラインド予測参加者による講演

鈴木晴彦氏（応用地質株式会社地震防災事業部）により、BP2の地震動予測に際し、経験的グリーン関数法を用いることで観測記録の特徴を良好に説明することができたとの報告があった。その一方で、BP1で推

定した地下構造モデルを地震動予測に用いた際には、1秒以上の長周期成分の予測が過小評価になるとの指摘があった。

早川崇氏（清水建設技術研究所）により、本震時の強震動を三次元有限差分法と等価線形解析法のハイブリッド法（接続周期：2秒）により推定したところ、予測波のスペクトル振幅が全体的に過小評価となり、短周期側は等価線形解析法の改良、長周期側は用いる震源モデルの検証が必要になるとの認識が示された。工学的基盤入射波の算出の際には、観測点KU.KMP1の記録が本震の地震動継続中に途絶えたことから、KUMA近傍にある気象庁の震度観測点（EEB）記録が用いられていた。

小阪宏之氏（戸田建設株式会社技術開発センター）からは、設計用入力地震動算出時のスキームに沿った実務上の観点から、BP3では経験的グリーン関数法と波数積分法のハイブリッド法により工学的基盤波を合成し、逐次非線形応答解析を行った結果が紹介された。早川氏と同様、計算波の振幅が短周期・長周期成分ともに過小評価となる結果が得られたとの報告があった。

長嶋史明氏（京都大学防災研究所）により、BP1においては、従来の微動アレイ探査法を用いた他の講演者と異なり、微動水平上下スペクトル比（H/V）から擬似的な地震動H/Vを推定し、拡散波動場理論によって地盤構造を推定するアプローチが採られていたことが紹介された。地震動予測には地震基盤における推定波が用いられ、BP3では等価線形解析が用いられていた。周期2秒前後を除き、広い帯域で観測記録を良好に再現する結果が得られていた。なお、長嶋氏も観測点EEBを基盤入射波の推定に用いていた。

2.5 追加分析結果報告

山中浩明委員（東京工業大学環境・社会理工学院）より、「テストサイトにおける補完的な地震観測および地盤探査」と題した報告があった。KUMAの周辺20点で実施した半年間にわたる稠密地震観測および表面波探査結果、KU.KMP1周辺で実施した地震観測および微動・表面波探査結果に関して紹介があった。KUMAとPS検層実施地点では表層付近のS波速度が10%程度異なる可能性があること、「岩盤サイト」であるKU.KMP1においても表層地盤（風化層）による増幅の影響が現れることが確認された。

津野委員より、「テストサイトの地震データ分析による地震動特性評価」と題した報告があった。KUMAで観測された多数の地震動記録を分析したところ、50gal以上の地震動が観測される場合にサイト増幅特

性が変化することが確認された。地盤の減衰構造を同定後、等価線形解析により強震動を計算したところ、本震ではKUMAにおける再現波の最大振幅が過小評価となり、入力に用いたKU.KMP1の本震中の記録停止が影響している可能性が高いことを指摘した。

2.6 総合討論

研究会参加者による総合討論を行った。今回のブラインド予測では全体的に良質な微動および強震記録が配布され、多くの参加者が良好な結果を得た一方で、以下の課題が明らかとなり、今後のESG研究において重要になるとの指摘があった。

- ・岩盤サイト・地中記録に潜在するサイト特性の評価
- ・PS検層の信頼性：初動読み取り誤差の影響で、極表層のS波速度が過小評価になる可能性
- ・深部地盤構造推定技術の改良の必要性
- ・観測波形の再現性が高い／低い周期帯の把握とその理由の検証
- ・今後のブラインド予測の方針：今後も未公開の強震記録が得られるのか？地震動の面的予測等への方針転換も必要か？

2.7 謝辞

年度末日の開催であったにも関わらず、本研究会にご参加いただいた皆様に感謝申し上げます。なお、ブラインド予測で用いた地震記録はJR九州および九州大学のご提供によるものです。本研究会の企画運営の事務作業を担当いただいた日本地震工学会小松康典事務局員にも、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また、オンライン参加者のうち、比較的若手の方2名に参加した感想を寄稿して頂きました。最後にそれらを掲載します。

3. おわりに

本委員会では、2021年度には強震動評価のための深部地盤モデル化手法の最適化に関する研究成果の発信のために、17WCEEでのSpecial Sessionのオーガナイズ、ESG6の開催のための学術的支援およびESG研究会の主催を行った。

参考文献

- 1) 松島信一：強震動評価のための深部地盤モデル化手法の最適化に関する研究委員会、日本地震工学会会誌、第40号、pp.39-40、2020。
- 2) 松島信一・佐藤浩章・津野靖士：強震動評価のための深部地盤モデル化手法の最適化に関する研究委員

- 会、日本地震工学会誌、第43号、pp.37-38、2021.
- 3) 佐藤浩章・松島信一・津野靖士：ESG研究委員会におけるこの10年、日本地震工学会誌、第44号、pp.2-5、2021.
- 4) 川瀬博：ESG国際JWGの活動の歴史とESG6、日本地震工学会誌、第43号、pp.3-6、2021.
- 5) 松島信一・佐藤浩章・津野靖士・東貞成：ESG6の学術プログラムの紹介、日本地震工学会誌、第43号、pp.7-9、2021.
- 6) 山中浩明・津野靖士・地元孝輔：2016年熊本地震の強震動のブラインド予測、日本地震工学会誌、第43号、pp.10-14、2021.
- 7) 工藤一嘉：JWG-ESG発足時の経緯と余録、日本地震工学会誌、第43号、pp.15-20、2021.

ESG研究会に参加した感想

鉄道総合技術研究所 森脇美沙

2022年3月31日に、「ESG6国際ブラインド予測結果からESG研究の将来を考える」研究会が開催されました。本研究会の主旨は、昨年「第6回表層地質が地震動に及ぼす影響に関する国際シンポジウム (ESG6)」の一環で行われた熊本市の強震観測点における2016年熊本地震の観測強震記録に関する国際ブラインド予測について、その後の調査観測や分析から得られた新たな知見を共有し、将来のESG研究の在り方について議論するというものでした。私は表層地盤構造の推定や強震動予測に関する知識や技術をこれから習得したいと考えており、本研究会に参加しました。

はじめに、ESG6で行われたブラインド予測の概要と、参加者が提出した予測結果の検証のために行われた、強震観測点周辺でのボアホール調査等についてご説明いただきました。次に、ブラインド予測参加者が提出した予測結果の概要と、それらの分析を通じて得られた知見についてご説明いただきました。続いて、ブラインド予測参加者の方々による成果紹介がありました。その後、熊本平野のテストサイト周辺における追加現地調査で得られたデータの分析結果についてご説明いただきました。最後の総合討論では、今後のESG研究の方向性などについて活発な意見交換がなされました。

本研究会を通して、地盤構造や強震動波形の推定には様々な手法やアプローチがあり、非常に多様性に富んでいることがわかりました。今後は、それぞれの手法について、メリットやデメリット等を把握した上でどの手法を採用するのがよいのか判断することや、分析から考察までの一連を実践することができるよう、

自分の知識や理解を深めていきたいと思います。また、今後もブラインド予測に挑戦する機会があれば、ぜひ参加してみたいです。

最後に、本研究会を企画・運営していただいた強震動評価のための深部地盤モデル化手法の最適化に関する研究委員会の皆さま、ならびにご講演いただいた皆さまに厚く御礼を申し上げます。

電源開発株式会社 森 勇太

地下構造の推定や地震動の評価について、「用いるデータ及び計算手法が色々ある中、それぞれのルートから最終的に計算される地下構造や地震動評価はどの程度違うのだろうか」という疑問を持っていました。そんな中、ESG6で国際ブラインド予測が実施され、更なる結果の分析・報告会があることを知り、参加しました。

今回のESG6で実施された、地下構造の推定 (step1) 及び強震動の評価 (step2&3) の各チームの評価の分析結果の報告によると、step1とstep2&3で参加チームが一部異なりますが、地下構造の深部構造はばらつきが大きく各チームの色が出ていたのに対し、最終的な地震動の予測結果はおよそ1/1.5～1.5倍の範囲内に入る結果となった点は、興味深く感じました。実務者視点として参加されたチームの報告もありましたが、その方々の多くは地下構造を介さない観測記録を用いた手法を地震動評価に採用しており、その辺りに地下構造の推定 (step1) で実務者の方々が感じている推定結果への不確実性・不安のようなものが表れているような印象を受けました。

また、最後の討論の時間では、「今回のブラインド予測結果から、各手法の有効周期帯を整理できれば、今後のESG研究につながるのでは」という観点で活発な議論がありました。手法の有効性検証には今回のようなブラインド予測が有効と思われませんが、多くの観測記録が即時公開される中で、ブラインド予測に使える丁度良い記録が中々ない点が課題として出ていました。今後ESG研究への理解が深まり、趣旨に賛同した企業から多くの記録が提供されるようになれば、ブラインド予測の実施によりESG研究はますます活発になると思いました。

今回の報告会を受け、私も一企業に勤める一人として、微力ながらその一端を担っていければと強く感じましたので、その思いを胸にESG研究にかかわっていきたくと思います。

津波荷重の評価技術と体系化の心得に関する研究委員会

有川 太郎

●中央大学 教授

1. はじめに

本委員会は、2004年のスマトラ沖地震で発生した津波(インド洋大津波)を契機に、津波被害・災害に対する軽減策を検討する委員会として2005.8～2008.5(第1期)に「津波災害の軽減方策に関する研究委員会」(委員長 松富英夫)が発足され、2008.6～2011.5(第2期)に「津波災害の実務的な軽減方策に関する研究委員会」(委員長 松富英夫)、2011.6～2014.5(第3期)に「津波対策とその指針に関する研究委員会」(委員長 松富英夫)と続いた。

一方で、2011年東日本大震災を受けて国内外で津波荷重に関して室内実験や数値計算による研究が多数実施されている。このような背景のもとに、様々な構造物に作用する津波荷重について、既往の実験および数値計算の知見を整理することを目的として2015.6～2019.5(第4期)に「各種構造物の津波荷重の体系化に関する研究委員会」が発足された。その活動を引き継ぎ、津波荷重に関する指南書をまとめようという目標で、本研究会が2019.6～(第5期)より発足され2022.3まで活動し、心得の骨子を限定的に公表した。メンバーは以下の通りである。

表1 研究会メンバー

氏名	所属
有川 太郎(委員長)	中央大学
木原 直人(幹事)	電力中央研究所
浅井 竜也	名古屋大学
池谷 毅	東京海洋大学
井上 修作	竹中工務店
大家 隆行	パシフィックコンサルタンツ
奥田 泰雄	建築研究所
奥野 峻也	構造計画研究所
鳴原 良典	防衛大学
庄司 学	筑波大学
館野 公一	鹿島建設
中埜 良昭	東京大学
長谷部 雅伸	清水建設
松富 英夫	秋田大学
渡部 真史	南洋工科大学

2. 心得の骨子

2.1 目次構成

目次としては、以下のとおりとなる。

1. はじめに
2. 本心得の適用範囲
3. 津波波力(先端部)
4. 津波波力(非先端部)
5. 津波波力(越流)
6. 漂流物
7. 洗掘
8. 津波シミュレーション技術に関する知見

8章においては、2020年12月に実施された17WCEEにおけるブラインドコンテストの結果を基に記載されたものとなっており、最新の知見を含めた。

2.2 適用範囲

施設に作用する津波荷重の評価は、どのように津波が発生し、どのように伝播し、そのように氾濫(遡上)し、どのような流れの状態の評価対象施設に到達、流下するかを予測された上で実施される。したがって、図-1に示すような津波の発生、伝播、氾濫について様々なシナリオを考え、評価することが求められる。各過程において評価に当たっての確認点および留意点がある。これら一連の評価のうち、特定の過程での評価技術を対象とした技術資料が学協会から出版されている。例えば土木学会原子力土木委員会¹⁾では、波源～沿岸域での津波波形にかけての評価技術が纏められている。本心得は、図1に示すシナリオのうち、最も下流に位置する「陸上施設に作用する荷重」の評価を適用範囲とする。

2.3 津波シミュレーション技術に関する知見

津波の発生メカニズムは一般に理解が進んでいるが、津波の遡上・伝搬・浸水過程を精度良く予測する技術の開発研究は依然行われている。津波シミュレーションは非線型長波モデル、Boussinesqモデル、3次元モデル、SPHモデルなど様々な手法が提案されているが、その陸上遡上や波力の再現精度を具体的に比較・検証した事例はない。そこで、2021年に仙台市で行われた第17回世界地震工学会議(17WCEE)では、津波遡上お

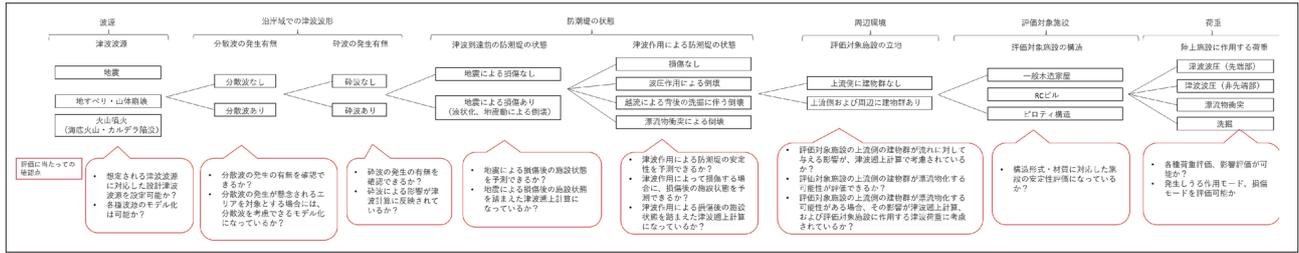


図1 津波の遡上、伝播、氾濫シナリオ

および作用の評価に関するブラインドコンテストを開催した²⁾。コンテスト参加者には、主催者から提供される情報を基にした水位、浸水深、流速、建物やタンク模型に作用する波圧の評価が求められた。提出された予測値を統計的に分析することで、津波数値計算結果の不確実性を定量化した。詳細はKihara et al. (2021)³⁾、Watanabe et al. (in submitted)⁴⁾に記載されている。

3. 今後の展開

3.1 心得の公開に向けて

次期委員会を継続して立ち上げる予定をしており、そこにおいて、いよいよ、心得(技術集)として公開する予定である。それにあたり、それぞれの章における最新の知見を研究している学識経験者をお呼びし、講義いただき、研究会を進めていく予定である。もし、ご興味をもたれた方は、参加したい!とご連絡いただければ幸いです。

3.2 巨礫メカニズムの解明に向けて

本研究委員会は、コロナ禍となる前は、ほぼ毎年度、日本の島にある巨礫を巡って現地見学を行い、そのメカニズムの解明を議論するという試みを行ってきた。

直径数メートルもの巨礫が巨大津波により海から打ち上げられることがあり、これらは津波石と呼ばれ、世界各国の沿岸域で報告されている⁵⁾。日本沿岸部においても、津波石はいくつかの地域で見つけることができる。日本国内でこの津波石研究が最も盛んに行われている地域が琉球列島である。例えば宮古島の北西部にある下地島には高さ12.3 m崖上に帯岩と呼ばれる重量が約2500tの巨礫が堆積しており、年代測定結果から1771年明和津波以前に打ち上げられた可能性も否定できないことが指摘されている⁶⁾。

このように世界各国に点在する巨礫を調べ、まとめて、どのような波力が作用したのかということを経験集を踏まえて明らかにしていくことができれば、将来の津波対策にとっても有益になると考えられ、一つ一つ収集していきたい。

4. おわりに

第5期までおよそ17年弱であり、インド洋津波より巨大津波による津波荷重というものは何かということを追及しており、次期において、いよいよその知見を公開したいと考えている。そのうえで、適切な外力設計とは何か?というようなどころに対し、少しでもその知見が活かされるよう努力をしていきたい。

参考文献

- 1) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会：原子力発電所の津波評価技術、2016。
- 2) Arikawa, T., Kihara, N., Watanabe, M., Tsurudome, C., Hasebe, M., Shigihara, Y., Asai, T., Ikeya, T., Inoue, S., Matsutomi, H., Nakano, Y., Okuda, Y., Okuno, S., Ooie, T., Shoji, G. and Tateno, T.: Blind Prediction Contest for Tsunami Inundation And Impact, Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering, 2021.
- 3) Kihara, N., Arikawa, T., Asai, T., Hasebe, M., Ikeya, T., Inoue, S., Kaida, H., Matsutomi, H., Nakano, Y., Okuda, Y., Okuno, S., Ooie, T., Shigihara, Y., Shoji, G., Tateno, T., Tsurudome, C. and Watanabe, M.: A Physical Model of Tsunami Inundation And Wave Pressures for an Idealized Coastal Industrial Site, Coastal Engineering, Vol.169, Issue 103970, 2021.
- 4) Watanabe, M., Kihara, N., Arikawa, T., Tsurudome, C., Hosaka, K., Kimura, T., Hashimoto, T., Ishihara, F., Shikata, R., Morikawa, D.S., Makino, T., Asai, M., Chida, Y., Ohnishi, Y., Marras, S., Mukherjee, A., Cajas, J.C., Houzeaux, G., Paolo, B.D., Lara, J.L., Barajas, G., Losada, Í. L., Hasebe, M., Shigihara, Y., T. Asai., T. Ikeya., Inoue, S., Matsutomi, H., Nakano, Y., Okuda, Y., Okuno, S., Ooie, T., Shoji, G. and Tateno, T.: Validation of Tsunami Numerical Simulation Models for an Idealized Coastal Industrial Site, Coastal Engineering Journal (in submitted).
- 5) 渡部真史, 清野聡子, 徳永正吾, 藤原和弘, 有川太郎: 沖ノ島における高波起源の巨礫分布の水理学的検討、土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.I_1165-I_1170, 2020.
- 6) Goto, K., Kawana, T. and Imamura, F.: Historical and Geological Evidence of Boulders Deposited by Tsunamis, Southern Ryukyu Islands, Japan, Earth Science Reviews, Vol.102, Issue 1, pp.77-99. 2010.

津波避難に対する工学的検討手法活用の環境整備に関する研究委員会

甲斐 芳郎

●株式会社J建築検査センター

1. 委員会設立目的

2018年に設けられた「大規模津波からの避難における諸課題に対する工学的検討手法およびその活用に関する研究委員会」の成果として、実際の自治体やその傘下の防災組織と協力し研究に必要なデータの収集を行い、それらを用いた避難シミュレーション解析結果を現地に提示することで、津波避難における課題解決の支援を行うことができた。一方で信頼性のあるシミュレーション解析を確立するためには、そのヴァリデーションに必要な基礎データの整備が必須であることが明らかになってきた。

そこで、先の委員会と同様に、津波避難の実態調査、避難シミュレーション、避難対策などの専門分野にかかわる研究者を総合し、これらを横断する形で避難に対する工学的で合理的な検討を行い、その検討結果の実社会での活用を促すことを目的に2020年に本委員会を設立した。

2. 活動概要

上記目的を達成するために避難シミュレーション部会、内水氾濫避難データベース部会、津波避難データベース部会の3部会の体制を作成し、委員会立上げの条件として中笠前会長をはじめ理事会に約束していたヴァリデーションデータベースの構築と公開に向けての活動を進めることとした。

実際の委員会活動は、コロナ禍のなか委員会の会合はリモート開催に限られ、具体的な委員会活動を対外的に広報しての委員募集を十分に行うこともかなわず、極めて限定的な活動を強いられることとなった。その結果、活動成果として構築したデータベースの公開を実現することはかなわなかった。しかしながら、以下に示すように、避難シミュレーションのヴァリデーションに必要なデータを現地で実際に収集活動を行い、収集したヴァリデーションデータを活用した科学的解析ツールとしての避難シミュレーションの活用方策を明確にしたことで一定の成果は得ることができたと考えている。

3. 避難シミュレーションの活用方策の検討

2. で紹介した通り、避難シミュレーションの位置

づけを明確するために、津波や洪水避難に対し、現時点において可能なことは何かを検討した。

検討手法として、2018年7月豪雨で氾濫した岐阜県関市武儀地区を対象に(図1参照)、河川氾濫からの避難シミュレーション(降雨予測→洪水計算→氾濫計算→避難シミュレーション)を例とした。



図1 対象領域

3. 1 システムの概要

計算システムの全体像を図2に示す、降雨予測のモデルとしてWRF¹⁾を用い、WRFで算出した予測降雨を用いて行う河川計算には、山地流出と洪水氾濫計算を一体的に解析できるRRIモデル²⁾を用いる。また、RRIモデルで計算した時系列の浸水深データを元に、避難速度や群衆ポテンシャルなどの属性を個々に設定できるマルチエージェント型避難モデル³⁾を用いて避難シミュレーションを行った。



図2 計算システムの全体像

3. 2 河川水位予測

WRFの予測雨量を用いて集水域の境界における河川流量を求め河川水位ならびに、浸水計算を実施した。

図3にその例を示す。聞き取り調査を行った「まぶち(51,195)」前では、氾濫開始が2018/7/5/ 6:50UTCとなっており、集水域からのピーク流量と避難対象領域にピーク雨量が重なることで、河川水位の急激な立ち上がりが生じたことが示され、状況は定性的には、聞き取り状況と一致していると思われる。

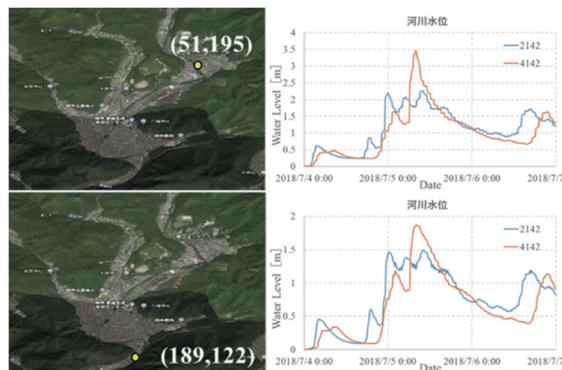


図3 避難対象領域の河川水位の時系列

3. 3 避難検討

ランダムに人を1000人配置した。避難者の初期歩行速度は、1.0 m/s に設定した。危険水位となる時刻は解析開始から20時間後、また氾濫開始水位となる時刻が30時間後であるため、危険水位から氾濫開始水位に達する前後で避難開始時刻の設定を行った。

最寄りの避難所まで最短経路を選択して避難した場合、危険水位に達した20時間後時点で避難を開始する事で、浸水被害に遭わずに避難する事ができている。一方、氾濫水位に達した30時間後時点で避難を開始した場合、2%程度、洪水に遭遇(死亡者と定義)しており、危険な状態であることがわかった。



図4 解析終了時における死亡者位置

図4は、氾濫水位に到達した時点で避難を開始した場合における、解析時間終了後の死亡者の位置について示したものである。破線で囲まれた部分は氾濫水位に達した時点で浸水が生じていたため、その付近にいた避難者が最寄りの避難所に向かう途中で浸水被害に遭い死亡していた。そのため、そのような避難者が避

難所に向かう際には、予測浸水到達時間を活用して浸水遭遇を回避した避難経路を選択し、避難する事で被害の低減が見込める可能性があることがわかる。本検討から、現時点においては、シミュレーションを用いて、このような脆弱性評価に活用できると考えられる。

4. おわりに

ヴァリデーシオンデータベースの構築と公開をまだ達成していない状況ではあるが、データの収集とそのデータの内容からヴァリデーシオンを行ったのちの避難シミュレーションの位置づけについて考えてみたい。

人間の避難行動には心理的側面が大きく影響する為か、避難シミュレーションについては懐疑的な見方をする研究者も少なくない。確かに、個々人がいつ避難行動を始めるのか、そもそも避難行動を開始してくれるのかはシミュレートする範囲とはしていない。しかしながら避難行動も物理行動である限り、人間行動において物理的側面に支配される部分が多くを占めることは間違いない。ヴァリデーシオンデータとして収集を行っている避難に関わるデータは、災害時や避難訓練における個々の人間の行動であり、どのような状況でも個々人が普遍的に同一の行動を行うとは考えにくい。集団全体の行動として全く異なる現象が起これば考えにくい。このようにヴァリデーシオンデータに裏付けられた避難シミュレーションをその特性を適切に踏まえてどのように社会で活用していくのかを考える時期に来ているのではないだろうか。

防災計画の策定においても、策定した計画の有効性の検証に役立てることは重要な役割となるだろう。検証で明らかにしたい項目を見極め、その目的に相応しいヴァリデーシオンデータの構築にも努める必要もあるだろう。

義務化された防災教育に対しても、有効なツールとなる必要があるだろう。ボードゲームの要素を取り込んだDIGのような防災教育ツールが既に開発されているが、今後は避難シミュレーションの技術を取り入れたよりインターアクティブなツールを作り出していくことができるだろう。

参考文献

- 1) Skamarock, W. C., and Coauthors : A description of the Advanced Research WRF version 3. , NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 113 pp.,2008.
- 2) 佐山敬洋・岩見洋一、降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用、土木技術資料、56-6、2014
- 3) 有川太郎、大家隆行：数値波動水槽と連成した避難シミュレーションによる避難行動特性についての検討、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.71、No.2、pp. I_319-I_324、2015.

地震による倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する研究委員会

小山 真紀

●岐阜大学流域圏科学研究センター 准教授

1. 委員会の設立

2016年に発生した熊本地震では、消防・警察・自衛隊・地域住民などを中心に倒壊家屋からの救助活動が多数行われた。このように、日本の地震災害では倒壊家屋からの救助活動が必要となる蓋然性が高い。倒壊家屋からの救助活動を安全かつ的確に実践するためには、構造物の危険度評価・応急補強に関する知識や、自己安全確保と閉所・暗所・騒音などの劣悪環境下で活動するための知識、要救助者の容態評価・安定化に関する知識などが必要となり、地震工学、建築工学、環境工学、災害医学などの学際的観点からのアプローチに基づく実践的な救助訓練プログラムの開発が求められる。特に一般の地域住民については、適切なプログラムが存在しないまま救助活動を行っている現状がある。本研究委員会は、消防・警察等の専門部隊向けの救助訓練プログラムに加え、地域住民向けの救助訓練プログラムについても検討、開発を行うことを目的として2021年6月に設置された。

上記の目的を果たすため、委員は建築系研究者のみでなく、土木系、救助系、医療系、情報工学系、地域防災系など広範囲の研究領域から参画している。各委員の所属は以下の通りである。

小山真紀(岐阜大学流域圏科学研究センター)、井上潤一(山梨県立中央病院)、加古嘉信(上武大学ビジネス情報学部スポーツ健康マネジメント学科：元警察庁)、片岡克己(スリーエムジャパン イノベーション株)、阪本太吾(日本医科大学付属病院)、佐藤史明(千葉工業大学創造工学部)、清水秀丸(椋山女学園大学生生活科学部生活環境デザイン学科)、関文夫(日本大学理工学部土木工学科)、田所諭(東北大学大学院情報科学研究科)、中島康(都立広尾病院)、沼田宗純(東京大学生産技術研究所)、宮里直也(日本大学理工学部建築学科)、吉村晶子(名城大学理工学部環境創造学科)、四井早紀(立命館大学理工学部環境都市工学科)

2. 警察庁による熊本地震の救助活動調査

2016年に発生した熊本地震では、警察部隊における救助活動について警察庁が包括的な調査を実施した¹⁾。本研究委員会メンバーの加古は、調査当時の所属が警

察庁警備局であり、中心的な役割を果たしている。

この調査は、層崩壊を伴う倒壊建物で警察が主導した救助活動(39現場：生存42人、心肺停止18人)を対象としている。救助活動に関する詳細なデータは救助部隊しか知り得ないため、救助活動に関する調査分析を行うためには救助部隊の所属組織が主体的に調査を実施することが必要である。また、救助活動の主体となる組織や別の災害での救助活動を含めた調査分析を行う際には、共通の調査票を用いることが望ましいことから、当該調査では、警察部隊以外の部隊や他の地震での調査にも活用できることを企図して調査票が開発された²⁾。調査項目は現場の基礎情報、現場臨場、現場関係者からの情報収集、活動現場からの危険要因、倒壊建物外からの呼び掛け、要救助者へのアプローチ、接触時の要救助者の状況、医師・救急救命士との現場連携、挟まれ・圧迫の解除、倒壊建物内からの搬出、引継ぎ・搬送、転進、活動時間、現場活動を振り返った所感の14項目である。なお、報告書作成にあたり、調査データを今後の救助関連研究に広く活用できるようにするため、調査票の附録に全調査データを掲載して公開したことも特筆に値する。

当該調査では、救助活動のプロセスを①事案認知～現場到着、②現場到着～反応確認、③反応確認～倒壊建物進入、④倒壊建物進入～要救助者接触、⑤要救助者接触～搬出開始、⑥搬出開始～搬出完了の6つに分類しており、閉じ込め空間の狭隘度が高い場合や閉じ込め者が梁などで圧迫されている場合、救助活動の困難度は上昇し、特に④と⑤で顕著になることを明らかにした。

その後の研究では、要救助者の下部に空間を確保できれば救助所要時間を大きく短縮できることが明らかになり³⁾、実際の救助訓練の現場設定にも反映された。



図1 熊本地震後の訓練ユニット設定例⁴⁾

一連の調査分析結果は、特に警察部隊の救助訓練設定に反映され、実際の現場状況を反映した訓練が可能となった(図1)。

3. 委員会活動

本研究委員会では、上述の警察庁による調査で得られた知見を踏まえた現場設定のあり方の解明、ドローンやロボットを活用した救助技術の開発、今後の地震災害における救助主体を越えた調査の支援、一般住民向け救助訓練プログラムの開発、および救助に関する多様な分野の人間が情報共有、連携を行うプラットフォームの構築を目指している。

委員会活動は、2021年7月に活動を開始し、おおむね月に1度の定例研究会を開催している。これまで、倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する各委員の研究内容について共有、意見交換を進めてきている。以下に各回のテーマについて記す。

- 第1回(2021/7/27)：本委員会設置に関わるこれまでの取り組み状況
- 第2回(2021/8/24)：研究委員会の進め方について
- 第3回(2021/10/4)：熊本地震における警察庁調査結果の訓練ユニットへのフィードバック
- 第4回(2021/11/9)：救助活動に関連するロボット研究の動向
- 第5回(2021/12/21)：最近の自然災害と人為災害の動向、災害救助訓練施設の設計コンセプト
- 第6回(2022/1/25)：実務者研究会の企画
- 第7回(2022/2/25)：INSARAG(International Search and Rescue Advisory Group)における構造評価専門家の位置づけと構造評価、国際緊急援助隊(JDR)における現状

4. 実務者研究会の開催

倒壊家屋からの救助活動に関わる分野は、医療、救助、建築学、土木工学、情報工学、地域防災など多岐にわたっている。しかしながら、救助の実務においてこれらの分野を横断する情報共有の場はこれまであまり整備されてきていない。救助活動を担う組織や人としては消防、警察、自衛隊、消防団、地域住民などが考えられるが、単発の訓練での連携や現場での連携はあるものの、救助活動主体の組織を横断して、救助活動の実状やあり方まで踏み込んだ情報共有ができるような場も整備されてきていない。

このような状況を踏まえ、本研究委員会の活動の一環として、救助活動に関する分野横断プラットフォームの構築を目指した実務者研究会を開催した。研究会

は「地震による倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する実務者研究会」と題して、2022年3月21日にオンラインで開催した。当研究会は第1回ということもあり、JDRの指導者や各地で救助訓練プログラムについて取り組んでいる人などを中心に声掛けを行い、委員を含めて50名の参加を得た。

参加者アンケートからは、▼現在行われている救助部隊の訓練はJDRの訓練に準拠したもの(木造家屋からの救助というよりは、コンクリート構造物からの救助を想定)が多いことや、▼住民向けの救助訓練では倒壊家屋を模した場所から要救助者を救出する設定になっているが、構造評価・安定化に関する訓練を実施しておらず二次災害を誘発しかねない状況となっているという研究会内での指摘に同意する内容が得られた。

住民向け訓練について補足すると、アメリカの市民災害対応チーム(The Community Emergency Response Team(CERT))向けテキストでは、構造被害のある建物には入ってはいけない、と明記されている一方で、日本の住民向け救助訓練では、十分な安全管理対策についての訓練がなされないまま、構造被害のある建物からの救助を行うような訓練が実施されているのが現状である。

5. 今後の予定

引き続き、月1回程度の定例研究会と実務者研究会の実施を行う。また、全国的な救助訓練の実状調査を実施することを予定している。

参考文献

- 1)警察庁：熊本地震における警察の救助活動に関する調査分析、2017.
- 2)加古嘉信・吉村晶子・小山真紀・宮里直也・関文夫・中島康・佐藤史明：熊本地震における木造倒壊建物からの救助活動に関する研究～実態調査手法の開発と現場状況の傾向分析～、日本地震工学会論文集、第20巻、第2号、pp.58-78、2020.
- 3)加古嘉信・吉村晶子・小山真紀・宮里直也・関文夫・中島康・佐藤史明：救助活動の困難度を構成する要因に関する研究－2016年熊本地震における木造倒壊建物からの救助活動実態データを用いて－、地域安全学会論文集、No.36、pp.65-73、2020.
- 4)吉村晶子・宮里直也・関文夫・清水秀丸・小山真紀・佐藤史明：災害警備訓練施設の計画設計検討、熊本地震における警察の救助活動に関する調査分析、寄稿、pp.202-217、2017.

地中構造物に作用する地盤反力に関する研究委員会

鈴木 崇伸

●東洋大学 教授

1. はじめに

地中に埋設された構造物（パイプ、トンネル、ボックスカルバートや基礎構造など）は、構造物と地盤の相対変位量に応じて作用する反力が変化する。地盤反力として地盤の弾性的性質を近似した弾性ばねモデルや、弾塑性的性質を近似したバイリニアモデル等がある。地盤ばねの設定方法には、様々な考え方があり、設計者が対象とする構造物や地盤の変位量などの条件により使い分けているのが現状であり、構造種別や作用する外力により変わるため統一的な評価とはなっていない。また最近では3次元の有限要素法が実用化され地盤と地中構造物の一体解析も可能になりつつあり、既往の地盤反力との整合性を明確にしておく必要がある。

近年においては、地盤沈下、地盤震動といった数十センチメートルの変位から、液状化による側方流動や断層変位といった数メートルの変位を対象とすることが増えてきており、地盤反力が主たる外力であることから統一的な考え方が望まれている。本研究委員会では、地中構造物に作用する地盤反力のこれまでの知見を整理して差異を明確にするとともに、地盤条件や構造物条件、外力の条件を反映した統一的な地盤反力の評価法の確立を目指すこととしている。

2. 土と構造物の相互作用問題

地中構造物には死荷重として自重の他に土圧が作用し、また活荷重として地表荷重が作用する。地震時には土と構造物の挙動が異なることに起因する表面力が活荷重として作用する。地震時の相対変位による表面力を地盤反力と定義する。地中に建設される構造物の解析や設計では、土と構造物の挙動を結合して考える必要がある。土と構造物の一体解析を行うか、両者を分離して相互作用の力学モデルを使って解析する方法がある。

相互作用の力学モデルは構造物の変形特性により異なるが、はりモデルの場合、分布力あるいは分布バネが多く採用されている。これらの力学モデルは地盤のパラメータと構造物のパラメータを含む。相互作用が問題とされる構造物にはフーチングや杭などの基礎構造物、トンネルや管などの地下構造物、擁壁などの抗土圧構造物などがあげられる。

3. 地中構造物の地盤反力特性の課題

相互作用の力学モデルは構造物の解析モデルによって決まる。構造物をはりモデルとする場合、土の弾性的性質を表す分布バネが用いられており、相対変位が大きくなると分布バネの降伏を考える場合もある。構造物をシェルモデルとする場合にも、バネが用いられるが、単位面積当たりのバネであり、はり解析の分布バネとは基本的に異なることになる。バネ値の設定は加力実験による荷重-変位関係を用いることが多い。

地盤と構造物を3次元有限要素モデルとすると一体解析が可能であるが、地盤と構造物の境界面の力学モデルが必要とされる。また地盤の変形パラメータを決める必要がある。バネ値の設定は地盤の弾性定数から決める方法や実験値から決める方法があり、混乱が見られる。特に地盤の変位量が大きくなると地盤反力特性の評価が難しいのが現状である。

図1に地盤反力のイメージ図を示す。地盤反力 R は地盤変位 δg と構造物変位 δs の相対変位に比例する。式で表すと $R=K(\delta g-\delta s)$ であり、地震時の地盤変位 δg は地震工学分野の知見に基づき、構造物変位 δs は構造工学分野の知見、比例係数 K は地盤工学分野の知見となる。式は簡単であるが、地震工学、構造工学、地盤工学の融合問題となり、適切かどうかの判断は難しい問題といえる。たとえば地震外力となる地盤変位 δg を大きく設定しても、比例係数 K を小さく見積もれば地盤反力は小さくなり、構造物変位も小さくなる。逆の操作も可能であり、適切な評価が望まれる。

単純な線形条件にパラメータを2個追加してバイリニアとすると、問題はさらに複雑になる。図2にバイリニアとした地盤反力特性を示すが、地盤変位 δg の非

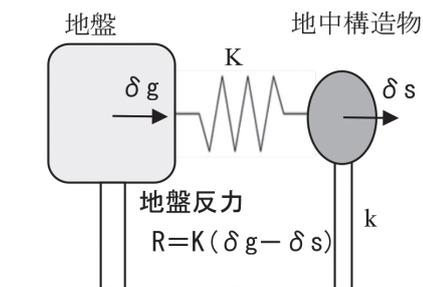


図1 地盤反力のイメージ

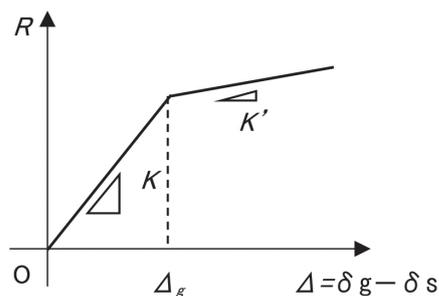


図2 複雑化した地盤反力

線形性、構造物変位 δs の非線形性も条件に加えて解析する問題では何が支配要因になっているか解釈が難しい。一方で設計支援ソフトにおいてはバイリニアでもさらに多くのパラメータを持つ場合であっても入力条件に従って自動的に計算結果はでてくるのが現状である。

4. 解析法の未来

21世紀に入ってコンピュータの性能が飛躍的に向上し、有限要素法をはじめとした構造解析技術も急速に発展している。CGも改善されて何となくあっているような計算結果が簡単に得られるようになった。地震工学分野でも有限要素法を使った解析が推奨されるようになり、地盤の弾塑性まで扱う市販ソフトが使われるようになってきている。ただし動的解析はひずみレベルによりせん断剛性を低下させる等価剛性法が一般的となっている。

地盤の有限要素法解析において弾塑性解析あるいは剛塑性解析のV&V (verification & validation) が進めば、実験の代用とすることができ、これまでの経験的な設計式を高精度化できる可能性がある。しかし土は複雑な力学的性質であるため、汎用の有限要素法解析の延長では十分な精度があるかはわからない。土はひずみレベルや載荷速度、水の影響によって力学的特性が変化する材料であり、鉄やコンクリートのように簡単ではない。ひずみレベルが 100μ 程度以下ならば弾性、 100μ から1%程度は弾塑性、1%以上ではせん断破壊を前提とした剛塑性とする考え方が定着している。土圧の計算をとっても、鉛直は土被り圧(γH)、水平は静止土圧係数を考えて低減する考え方が一般であるが、構造物が入るといろいろな公式が提案され、何を指針によることになる。また載荷速度や水の影響に関しても、排水、非排水の強度の問題になって非常に複雑な問題となる。構造物も加えた相互作用の問題となると土木の中の分野横断領域となり、研究者の数も少なく、古い設計の考え方が改訂されることなく

現在に至っているように思われる。

5. 課題の整理に向けて

地中構造物の地盤反力の問題はたいへん厄介な問題であり、また致命的な事故も起きていないため前例主義が一般的になっている。そのため昭和時代の設計からあまり変わっていないことになるが、ソフトは進化してかなり高度な計算ができるようになってきている。そこで地盤-構造物の相互作用の問題に関して令和の新しい展開を目指すことを目的として研究委員会を企画した。

このことに興味のある研究者が集まって意見を出し合い、今後の方向性が示せば、有意義な研究会の成果になると考える。表1に現時点(2022年4月時点)のメンバーを示す。土と構造物の相互作用問題は土木建築の地震工学者の間で長年扱ってきた問題であり、研究の方向性を明確にすることを目的として研究会を行っている。研究会の様子は学会のホームページに公開しているので、興味のある方はぜひ見ていただいて忌憚のない意見を寄せてほしい。

表1 研究会メンバー (2022年4月時点)

●委員長	鈴木 崇伸 (東洋大学)
●副委員長	楢田 泰子 (神戸大学)
●委員	小野 祐輔 (鳥取大学)
	岩田 克司 ((株) エイト日本技術開発)
	鈴木 剛史 (積水化学 (株))
	長谷川 延広 (JFEエンジニアリング (株))
	坂下 克之 (大成建設 (株))
	副島 紀代 ((株) 大林組)
	大室 秀樹 (配水用ポリエチレンパイプシステム協会)
	山田 岳峰 (鹿島建設 (株))
	柴坂 昌紀 ((株) フソウ)
	西岡 英俊 (中央大学)
	Talebi Farzad (京都大学)
	志波 由紀夫 (無所属)
	五十嵐 徹 (ニュージェック)
	古川 愛子 (京都大学)



行事

本会主催・共催による行事

2021年4月～2022年3月

日程	行事名	
2021年5月11日	オンライン講習会「機械学習・深層学習のプログラミング講習と地盤工学での事例紹介」	主催
2021年5月25日	日本地震工学会創立20周年記念式典	主催
2021年8月30日～9月1日	第6回ESG国際シンポジウム (ESG6)	主催
2021年9月26日～10月2日	第17回世界地震工学会議 (17WCEE)	主催
2021年11月30日～12月1日	日本地震工学会・大会-2021	主催
2021年12月3日	日本地震学会「強震動予測－その基礎と応用」第20回講習会	共催
2022年1月24日	E-ディフェンス 室内空間における機能維持に関する震動台実験見学会	主催
2022年2月3日～4日	第26回震災対策技術展・学会展示	主催
2022年2月4日	第12回震災予防講演会「首都直下地震と都市防災-」	主催
2022年3月11日	第7回理論応用力学シンポジウム	共催

後援・協賛による行事

2021年4月～

2021年8月16日～27日	計算力学の基礎～有限要素解析の論理的把握をもたらす製品信頼性向上～	後援
2021年8月28日～9月5日	第9回 首都防災ウィーク	後援
2021年9月13日～17日	Dynamics and Design Conference 2021	協賛
2021年9月15日	地震防災フォーラム2021	協賛
2021年9月16日、17日	第41回地震工学研究発表会	後援
2021年9月21日～23日	第34回計算力学講演会	協賛
2021年10月7日、8日	液状化解析の専門技術講習会	後援
2021年10月18日	地盤の地震応答解析－秋の講習会2021	後援
2021年12月3日	シンポジウム「大振幅地震動に対する耐震性能評価」	後援
2021年12月7日	液状化に関する各種基準・指針の現状の講習会	後援
2021年12月9日、10日、16日	2021年度 計算力学 (CAE技術者) 資格認定事業	協賛
2022年2月3日～4日	第26回「震災対策技術展」横浜	後援
2022年3月2日	実務者のための土と基礎の設計計算演習講習会	後援
2022年5月22日～6月3日	日本地球惑星科学連合2022年大会	協賛
2022年6月9日～10日	防災防犯総合展2022	後援
2022年6月29日～7月1日	安全工学シンポジウム2022	協賛
2022年9月5日～8日	Dynamics and Design Conference 2022	協賛



会員・役員の状況

(1) 会員数 (2022年5月24日現在)

名誉会員	40
正会員	987
学生会員	52
法人会員	105

新入会者 (2021年6月18日～2022年5月24日までに承認の方)

正会員：

渡部 真史	(中央大学)
桑原 光平	(損害保険料率算出機構)
小杉 慎司	(株式会社日立製作所)
岸 俊甫	(株式会社フジタ技術センター)
四井 早紀	(立命館大学)
杉山 佑樹	(公益財団法人 鉄道総合技術研究所)
羽場 一基	(大成建設株式会社)
大西 耕造	(岡山大学大学院)
渡辺 搖	(日本原燃株式会社 青森共生本社)
張 海仲	(神奈川大学)
中野 富夫	(一般財団法人 日本建築総合試験所)
金田 惇平	(東電設計株式会社)
塩田 哲生	(四国電力株式会社)
Sun Jikai	(京都大学)
青木 崇	(国立研究開発法人 防災科学技術研究所)
清水 智	(応用地質株式会社)
井上 洋	(JIP テクノサイエンス株式会社)
堀 高峰	(国立研究開発法人海洋研究開発機構)
郷右近英臣	(北陸先端科学技術大学院大学)
橋本 拓磨	(清水建設株式会社)
隈元 崇	(岡山大学)
植村 佳大	(京都大学大学院 工学研究科)
金澤 健司	(電力中央研究所)
本山 紘希	(防衛大学校)
道口 陽子	(原子力規制委員会 原子力規制庁)
内田 淳	(株式会社近計システム)
杉本 純也	(損害保険料率算出機構)
Bulbul Yunus Emre	(CEYEMBU Arch. & Eng.Ltd.Co.)
篠山 大輝	(一般財団法人 電力中央研究所)
後藤 源太	(株式会社高速道路総合技術研究所)
浜瀬戸和子	(エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社)
藤井 中	(株式会社竹中工務店 技術研究所)
森 幹尋	(日本工営株式会社)
小林 実央	(東京ガスネットワーク株式会社)

学生会員：

西村 武	(鳥取大学大学院)
Hasan Mdkhairul	(東京大学)
本井 響貴	(大阪工業大学大学院)
坂出 潤弥	(東京理科大学)
富田 愛	(東京理科大学)
小山 裕輝	(慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科)
川端 佑弥	(京都工芸繊維大学大学院)
飯泉 貴博	(筑波大学)
白井 貴裕	(明治大学理工学研究科建築・都市学)
柏木 大知	(東京大学大学院)
松橋 求	(東京電機大学大学院)
諸井 優太	(東京電機大学)
坪井 稜太	(東京電機大学大学院)
李 尚元	(東京大学大学院)
松本 和樹	(福井大学 文京キャンパス)
Keshavarz Mohammadreza	(Geotechnical Research Institute)
真島 僚	(豊橋技術科学大学大学院)

法人会員：

株式会社フソウ
株式会社塚本

(2) 名誉会員 (2022年5月24日現在) 五十音順

青山 博之	家村 浩和	石原 研而	和泉 正哲	井上 範夫	入倉孝次郎	岩崎 敏男
太田 裕	大町 達夫	岡田 恒男	小谷 俊介	片山 恒雄	亀田 弘行	川島 一彦
河村 壮一	北川 良和	北村 春幸	工藤 一嘉	久保 哲夫	國生 剛治	後藤 洋三
小長井一男	坂本 功	笹谷 努	柴田 明德	鈴木 浩平	鈴木 祥之	高田 至郎
武村 雅之	土岐 憲三	伯野 元彦	濱田 政則	原 文雄	安田 進	吉田 望
吉見 吉昭	芳村 学	若松加寿江	和田 章	渡辺 孝英		

(3) 法人会員 (2022年6月17日現在) ご入会順

【特級】	東京ガスネットワーク株式会社	株式会社 構造計画研究所
大成建設株式会社	株式会社 I H I	北海道電力株式会社
清水建設株式会社	株式会社 エイト日本技術開発	公益社団法人 日本水道協会
鹿島建設株式会社	日本工営株式会社	株式会社 三菱地所設計
【A級】	株式会社長谷工コーポレーション	株式会社 NTTファシリティーズ
一般社団法人 日本建築学会	大阪ガスネットワーク株式会社	株式会社 安藤・間
株式会社 熊谷組	株式会社 勝島製作所	日本原燃株式会社
株式会社 フジタ	一般社団法人 地域微動探査協会	株式会社 アーク情報システム
株式会社 大林組	【C級】	サンシステムサプライ株式会社
株式会社 竹中工務店	五洋建設株式会社	株式会社 日本構造橋梁研究所
戸田建設株式会社	一般社団法人 静岡県建築士事務所協会	株式会社 クボタケミックス
電源開発株式会社	一般財団法人 日本建築設備・昇降機センター	株式会社 東京測振
東日本高速道路株式会社	東洋建設株式会社	大阪ガス株式会社
エグジビジョンテクノロジー株式会社	一般社団法人 日本建築構造技術者協会	株式会社 プリヂストーン
公益財団法人 鉄道総合技術研究所	東急建設株式会社	西日本旅客鉄道株式会社
大日本コンサルタント株式会社	一般社団法人 構造調査コンサルティング協会	株式会社 小堀鐸二研究所
【B級】	中部電力株式会社	東海旅客鉄道株式会社
一般財団法人 日本建築防災協会	日本原子力発電株式会社	オイレス工業株式会社
東京鉄鋼株式会社	一般財団法人 国土技術研究センター	株式会社 オリエンタルコンサルタンツ
国立研究開発法人 防災科学技術研究所	東邦ガスネットワーク株式会社	株式会社 シーエスエンジニアズ
東亜建設工業株式会社	一般財団法人 電力中央研究所	西部ガス株式会社
一般社団法人 プレハブ建築協会	一般財団法人 地域地盤環境研究所	京葉ガス株式会社
株式会社 ニュージェック	基礎地盤コンサルタンツ株式会社	三谷セキサン株式会社 東京支店
飛鳥建設株式会社	株式会社 システムアンドデータリサーチ	みらい建設工業株式会社
東京電力ホールディングス株式会社	一般財団法人 日本建築総合試験所	配水用ポリエチレンパイプシステム協会
株式会社 建設技術研究所大阪本社	株式会社 福田組	株式会社 不動テトラ
国土交通省 国土技術政策総合研究所	株式会社 安井建築設計事務所	昭和電線ケーブルシステム株式会社
中央復建コンサルタンツ株式会社	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社	株式会社 ミエルカ防災
東電設計株式会社	株式会社 日建設計	株式会社 四国総合研究所
株式会社 長大	株式会社 篠塚研究所	株式会社 浅沼組
危険物保安技術協会	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所	西日本技術開発株式会社
株式会社 東京建築研究所	株式会社 阪神コンサルタンツ	株式会社 M T - N E T
損害保険料率算出機構	一般社団法人 日本ガス協会	株式会社 オルテック
九州電力株式会社	一般社団法人 日本免震構造協会	株式会社 フソウ
東日本旅客鉄道株式会社	北陸電力株式会社	株式会社 塚本
白山工業株式会社	株式会社 大崎総合研究所	
中国電力株式会社	東北電力株式会社	

(4) 2022年度 役員一覧

会長	※清野 純史	京都大学
副会長	東 貞成	電力中央研究所
副会長	※藤田 聡	東京電機大学
副会長	※松岡 昌志	東京工業大学
理事(総務)	※西村 拓也	清水建設
理事(総務・会員)	小林 実央	東京ガスネットワーク
理事(会計・会員)	※古屋 治	東京電機大学
理事(会計)	山田 岳峰	鹿島建設
理事(情報/広報)	入江さやか	松本大学
理事(情報/IC)	多幾山法子	東京都立大学
理事(学術・調査研究/国際)	※池田 隆明	長岡技術科学大学
理事(学術・調査研究/論文)	※能島 暢呂	岐阜大学
理事(情報/会誌)	※鳥澤 一晃	関東学院大学
理事(事業/大会)	※市村 強	東京大学
理事(事業/大会)	楠 浩一	東京大学地震研究所
理事(事業/16JEES)	小檜山雅之	慶應義塾大学
理事(事業/企画・調査研究)	※近藤 伸也	宇都宮大学
理事(事業/企画)	井上 和真	群馬工業高等専門学校
監事	※五十田 博	京都大学
監事	※末富 岩雄	エイト日本技術開発

※：就任 2021年5月25日

無印：就任 2022年5月24日

(5) 2022年度 委員会・部会 および研究委員会

将来構想委員会	委員長 東 貞成 (副会長・電力中央研究所)
地震災害対応委員会	委員長 池田 隆明 (理事・長岡技術科学大学)
地震被害調査関連学会連絡会	委員長 池田 隆明 (理事・長岡技術科学大学)
情報コミュニケーション委員会	委員長 多幾山法子 (理事・東京都立大学)
会誌編集委員会	委員長 鳥澤 一晃 (理事・関東学院大学)
国際委員会	委員長 池田 隆明 (理事・長岡技術科学大学)
I A E E事務局支援委員会	委員長 池田 隆明 (理事・長岡技術科学大学)
大会実行委員会	委員長 楠 浩一 (理事・東京大学地震研究所)
研究統括委員会	委員長 松岡 昌志 (副会長・東京工業大学)
・地震による倒壊家屋からの救助訓練プログラムに関する研究委員会	委員長 小山 真紀 (岐阜大学)
・地中構造物に作用する地盤反力に関する研究委員会	委員長 鈴木 崇伸 (東洋大学)
・津波荷重評価の体系化の心得を取り纏める研究委員会	委員長 有川 太郎 (中央大学)
論文集編集委員会	委員長 能島 暢呂 (理事・岐阜大学)
事業企画委員会	委員長 近藤 伸也 (理事・宇都宮大学)
功績賞選考委員会	委員長 清野 純史 (会長・京都大学)
功労賞選考委員会	委員長 清野 純史 (会長・京都大学)
論文賞選考委員会	委員長 松岡 昌志 (副会長・東京工業大学)
論文奨励賞選考委員会	委員長 能島 暢呂 (理事・岐阜大学)
優秀発表賞選考委員会	委員長 楠 浩一 (理事・東京大学地震研究所)
名誉会員選考委員会	委員長 清野 純史 (会長・京都大学)
選挙管理委員会	委員長 山田 岳峰 (理事・鹿島建設)
役員候補者推薦委員会	委員長 松岡 昌志 (副会長・東京工業大学)



出版物在庫状況

刊行図書

2022.05.24現在

刊行日	題名	在庫	頒布価格(税込み)		
			会員	非会員	学生会員
2006.06.20	性能規定型耐震設計現状と課題 (性能規定型耐震設計研究委員会編 / 鹿島出版会)	○	¥3,520	¥3,520	¥3,520
2014.03.01	東日本大震災合同調査報告 共通編1 地震・地震動 (日本地震工学会発行 / 丸善出版発売)	○	¥6,600	¥8,800	¥6,600
2015.01.15	東日本大震災合同調査報告 原子力編 (日本地震工学会発行 / 丸善出版発売)	○	¥7,700	¥9,900	¥7,700

資料集・報告書

2001.05.29	エルサルバドル地震・インド西部地震講演会	△	¥1,000	¥1,500	¥1,000
2003.01.31	第7回震災対策技術展「地震調査研究の地震防災への活用」	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000
2003.02.07	第7回震災対策技術展「第2回国土セイフティネットシンポジウム-広域・高密度リアルタイム地震ネットワーク構築へ向けて」	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000
2005.04.04	2004年12月26日スマトラ島沖地震報告会梗概集	△	¥1,000	¥1,500	¥1,000
2007.03.01	地震工学系実験施設の現状と課題 平成18年度報告書	○	¥3,000	¥4,000	¥2,000
2007.10.26	基礎-地盤系の動的応答と耐震設計法に関する研究委員会報告「基礎と地盤の動的相互作用を考慮した耐震設計ガイドライン」(案)	△	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2007.11.20	実例で示す木造建物の耐震補強と維持管理	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2008.04.11	セミナー-強震動予測レシビ「新潟県中越沖地震や能登半島地震などに学ぶ」資料	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2008.04.22	セミナー-地震発生確率-理論から実践まで-	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2008.05.31	津波災害の軽減策に関する研究委員会報告書(平成20年5月)	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2009.02.23	セミナー(第2回)「実務で使う地盤の地震応答解析」資料	△	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2009.04.14	セミナー-構造物の地震リスクマネジメント-	△	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2011.10.21	講演会「東日本大震災の津波被害の教訓」	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2011.12.14	「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」報告書	○	¥8,000	¥10,000	¥8,000
2012.03.04	One Year after the 2011 Great East Japan Earthquake	○	¥3,000	¥3,000	¥1,500
2012.11.08	Proceedings of the first International Symposium on Earthquake Engineering	○	¥6,000	¥10,000	¥6,000
2013.01.24	東日本大震災と南海トラフの巨大地震	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2013.02.15	東北地方太平洋沖地震の地震動と地盤に関する国内ワークショップ	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2013.10.23	システム性能を考慮した産業施設諸機能の耐震性評価研究委員会報告書	○	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2014.03.20	原子力安全のための耐津波工学に関するシンポジウム	△	¥3,000	¥4,000	¥2,000
2014.07.31	津波対策とその指針に関する研究委員会報告書	△	¥5,000	¥7,000	¥3,000
2015.03.31	原子力安全のための耐津波工学-地震・津波防御の総合技術体系を目指して-	○	¥10,000	¥12,000	¥10,000
2015.05.15	2014年長野県北部の地震に関する調査団報告	○	¥3,000	¥5,000	¥1,500
2016.03.31	「首都圏における地震・水害等による複合災害への対応に関する委員会」最終報告書	○	¥3,000	¥5,000	¥1,500
2016.03.31	津波などの突発大災害からの避難の課題と対策に関する研究委員会報告書	○	¥3,000	¥5,000	¥1,500
2017.02.03	第7回震災予防講演会「熊本地震に学ぶ首都圏の地震防災」	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000
2017.05.26	システム性能を考慮した産業施設諸機能の耐震性評価(Phase2)研究委員会報告書	○	¥3,000	¥4,000	¥1,000
2017.11.11	「強震動評価の為に表層地盤モデル化手法」講演会	○	¥7,000	¥10,000	¥3,000
2018.02.09	第8回震災予防講演会過去の大震災の復興から学ぶ地震防災	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000
2018.03.19	シンポジウム南海トラフ巨大地震の広域被災に備える減災活動の現状と将来	○	¥5,000	¥7,000	¥2,000
2018.03.30	地域の災害レジリエンス評価に関する研究最終報告書	○	¥3,000	¥4,000	¥1,000
2019.02.08	第9回震災予防講演会 近年の豪雨災害の教訓と震災予防	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000
2019.02.22	各種構造物の津波荷重の体系化に関する研究委員会	△	¥2,000	¥3,000	¥1,000
2019.03.04	シンポジウム 現代都市の複合システムにおける性能設計と耐震性能評価	○	¥5,000	¥7,000	¥2,000
2019.06.27	日本地震工学会セミナー「実務で使う地盤の地震応答解析」	○	¥8,000	¥12,000	¥2,000
2019.09.30	原子力発電所の地震安全の原則-地震安全の基本的な考え方とその実践による継続的安全性向上-	△	¥5,000	¥7,000	¥3,000
2019.10.21	平成28年(2016年)熊本地震とESG研究シンポジウム資料	○	¥6,000	¥9,000	¥3,000
2020.02.07	第10回震災予防講演会 直下地震と地震防災	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000
2021.03.18	第11回震災予防講演会 生誕150周年記念 今村明恒と関東大震災-震災予防講演会40回のルーツ-	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000
2022.02.04	第12回震災予防講演会 首都直下地震と都市防災-	○	¥1,000	¥1,000	¥1,000

○在庫あり △在庫僅か

定期刊行物

2010.11.17	第13回日本地震工学シンポジウム (DVD版)	○	¥5,000	¥10,000	¥3,000
2014.12.06	第14回日本地震工学シンポジウム (DVD版)	○	¥5,000	¥10,000	¥3,000
2018.12.06	第15回日本地震工学シンポジウム (USB版)	○	¥5,000	¥10,000	¥3,000
2005.11.21	日本地震工学会大会-2005 梗概集	○	¥6,000	¥10,000	¥2,000
2008.11.03	日本地震工学会大会-2008 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2009.11.12	日本地震工学会大会-2009 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2011.11.10	日本地震工学会大会-2011 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2012.12.01	日本地震工学会大会-2012 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2013.11.12	日本地震工学会大会-2013 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2015.11.19	日本地震工学会大会-2015 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2017.11.13	日本地震工学会大会-2017 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2019.09.19	日本地震工学会大会-2019 梗概集	○	¥5,000	¥10,000	¥2,000
2021.06.30	日本地震工学会誌No. 43 特集：2つの国際会議 (ESG6,17WCEE) 開催に向けて ～開催延期とコロナ禍を乗り越えて～	○	¥2,000	¥3,000	¥2,000
2021.10.31	日本地震工学会誌No. 44 特集：日本地震工学会の研究委員会の活動 ～東日本大震災以降の展開～	○	¥2,000	¥3,000	¥2,000
2021.02.28	日本地震工学会誌No. 45 特集：第17回世界地震工学会議 (17WCEE) を終えて	○	¥2,000	¥3,000	¥2,000

○在庫あり △在庫僅か

※送料は別途実費でいただきます。

強震記録データ

2022.05.24現在

題 名	在庫	頒布価格 (税込み、送料込み)
兵庫県南部地震における強震記録データベース	○	●大学等公共機関 40,000円 ●民間機関 80,000円
東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所における強震データ全地点全記録等<改訂版>	○	●日本地震工学会 ＜個人会員(正会員・学生会員)＞：6,000円 ●日本地震工学会<法人会員>：14,000円 ●非会員(個人利用)：10,000円 ●非会員(法人利用)：22,000円
中部電力(株)浜岡原子力発電所における「2009年8月11日駿河湾の地震」の観測記録	○	●日本地震工学会会員(正会員・学生会員)：3,000円 ●日本地震工学会会員(法人会員)：6,000円 ●非会員(個人)：5,000円 ●法人(非会員)：10,000円
東京電力(株)福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所において観測された平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震の本震記録<改訂版>	○	●日本地震工学会<(正会員・学生会員)>：5,000円 ●日本地震工学会<法人会員>：10,000円 ●非会員(個人利用)：10,000円 ●非会員(法人利用)：20,000円
東北電力(株)女川原子力発電所における「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の加速度時刻歴波形データ	○	●日本地震工学会<(正会員・学生会員)>：5,000円 ●日本地震工学会<法人会員>：10,000円 ●非会員(個人利用)：10,000円 ●非会員(法人利用)：20,000円
東北電力(株)女川原子力発電所における「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の余震等の加速度時刻歴波形データ<追加>	○	●日本地震工学会<(正会員・学生会員)>：5,000円 ●日本地震工学会<法人会員>：10,000円 ●非会員(個人利用)：10,000円 ●非会員(法人利用)：20,000円
日本原子力発電(株)東海第二発電所における「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の加速度時刻歴波形データ (CD-ROM)	○	●日本地震工学会<(正会員・学生会員)>：5,000円 ●日本地震工学会<法人会員>：10,000円 ●非会員(個人利用)：10,000円 ●非会員(法人利用)：20,000円
「南関東・福島県太平洋沿岸における岩盤の鉛直アレー観測網「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の本震・余震等の加速度時刻歴波形データ」	○	●日本地震工学会<(正会員・学生会員)>：5,000円 ●日本地震工学会<法人会員>：10,000円 ●非会員(個人利用)：10,000円 ●非会員(法人利用)：20,000円



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11巻 第2号(通算第33号)が2022年8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。

過去のJAEE Newsletterについては以下のサイトで掲載しており、最新号(第11巻 第1号)では、「リスク情報と活用技術の最前線」をテーマに3名の先生にご寄稿いただきました。JAEE Newsletter は、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。

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

■ 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

編集後記：

本号では、機械工学と地震工学のコラボレーションに焦点を当てた特集を企画しました。これら二つの分野に限らず、学際的境界領域への進出は、分野間の着眼点の違いから気づきを得たり、新たな価値を生み出したりする可能性を秘めていると思います。今回の特集記事の中では、そのような領域でご活躍の皆様には様々な取り組み内容をご紹介いただきました。地震工学研究開発の新たなステージへの進出を窺えたように感じます。読者の皆様におかれましても、ご自身の専門分野のみならず、周辺分野の方々の取り組みを知るきっかけにさせていただけたら幸いです。最後に、ご多用のところご協力いただきました執筆者の皆様、そして滞りなく工程を進めていただきました編集委員の皆様にご心より感謝申し上げます。

小穴 温子(清水建設)

機械工学分野においては、近年の度重なる地震災害を背景に、地震対策の目的がこれまでの人命を守るためのものから日常生活を維持するためのものに変化してきているように感じます。また、日本機械学会では、これまで各専門分野に分かれていた防災関連の組織を学会直下にまとめた「防災・減災委員会」が2019年に発足し、地震工学関連の活動が益々活性化している最中です。そのような中、本号では「機械工学と地震工学の融合」という特集を組ませていただきました。機械工学以外を専門とする方からも寄稿いただき、日本地震学会ならではの特集になったかと思えます。原稿を執筆頂いた方々にはこの場をお借りして感謝申し上げます。また、海外の研究者から原稿を執筆頂いたことは本特集の大きな特徴になりました。日本の慣習を受け入れて頂いた執筆者はもちろんのこと、執筆者との調整や英文原稿の編集、レイアウト、校正にご尽力頂いた関係者の皆様にご感謝申し上げます。

皆川 佳祐(埼玉工業大学)

会誌編集委員会

委員長 鳥澤 一晃 関東学院大学

幹事 小穴 温子 清水建設

幹事 皆川 佳祐 埼玉工業大学

委員 入江さやか 松本大学

委員 大野 卓志 高圧ガス保安協会

委員 木下 貴博 竹中工務店

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 平井 敬 名古屋大学減災連携研究センター

委員 松川 和人 東京大学生産技術研究所

委員 宮津 裕次 東京理科大学

委員 湯山安由美 電力中央研究所

委員 和田 一範 鉄道総合技術研究所

日本地震工学会誌 第46号 Bulletin of JAEE No.46

2022年6月30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 2022

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