公益社団法人 日本地震工学会
Japan Association for Earthquake Engineering

JAEE NEWSLETTER

第 34 号

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 4 F
TEL 03-5730-2831
FAX 03-5730-2830
Website: https://www.jaee.gr.jp/jp/

編集　日本地震工学会 情報コミュニケーション委員会
委員長　多幾山 法子
委員　上田 遼　篠原 崇之　松田 頼征　田中 裕人　巽 信彦　宮津 裕次　中村 亮太　久保 智弘

2022 年 12 月 28 日 発行

CONTENTS

■SPECIAL TOPICS ……2

特集／レジリエンス－地震後の取り組み－

モニタリング分野におけるキーワード：17WCEE での議論から
倉田 真宏（京都大学防災研究所）

衛星情報を活用した建物群の被災判定技術に関する基礎研究
向井 智久（国土技術政策総合研究所　建築研究部　評価システム研究室）

実在鉄骨造体育館の構造部材を対象とした構造性能評価に向けて
涌井 将貴（新潟工科大学工学部工学科）

地震後の非構造部材の損傷判定について
清家 剛（東京大学大学院新領域創成科学研究科）

■JAEE COMMUNICATION …… 11

「連載コラム」 鯰おやじのおせっかい……武村 雅之（名古屋大学 減災連携研究センター）

Insights into the liquefaction of gravelly soils
Matthew Gapuz CHUA (University of Tokyo)

■JAEE CALENDAR …… 14

■会誌刊行案内、編集後記 …… 15

SPECIAL TOPICS

■特集／レジリエンスー地震後の取り組みー

強靭さ、対応・復帰する能力などの意味を持つレジリエンスは、東日本大震災から特に注目されるようになり、事前の防災から事後の減災に至るまで様々な研究がされています。そこで今月号は発災直後の被害把握という観点から、京都大学の倉田真宏先生にはQuincy Ma准教授との議論、国土技術政策総合研究所の向井智久様には衛星情報を活用した被災度判定技術、新潟工科大学の涌井将貴先生にはIoT技術を活用したひずみ計測、東京大学の清家剛先生には非構造材の損傷判定についてご寄稿いただきました。

モニタリング分野におけるキーワード：17WCEEでの議論から

倉田 真宏（京都大学防災研究所）

2021年9月に開催された第17回世界地震工学会議では、若手・中堅主体のBrain Stormingセッションが設けられ、分野をリードする研究者を国外から招待して国内の研究者と特定分野の現状と将来を議論する機会があった。“Super advanced exploration, simulation, and monitoring” セッションにおいて、Monitoringについてオークランド大学Quincy Ma准教授と対談する機会を得たので、この場を借りて議論の内容を紹介する。

Ma博士と私は､医療機関の脆弱性評価やモニタリングシステムに関する研究を共同で進める旧知の仲である。30代半ばでニュージーランド地震工学会の会長を務めた彼は、大学人としての顔だけでなく、工学分野全般の先端センシング分野における起業家を支援する財団のファンドマネージャーの一面を持つ。

対談でのキーワードは、1) センシング、2) アルゴリズム、3) 適用事例、4) 技術・方法論的課題、であった。

センシング手法は多岐に渡るが、高密度観測を志向したスマホ、長期変位計測に適した光ファイバーSOFO（Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques）、光学式層間変位計、画像などを利用したコンピュータービジョン、GPSについて、アルゴリズムの開発や適用事例などを取り上げた。

個人所有のスマホを利用する取り組みはCitizen Sensorsとも呼ばれ、誰でも・どこでも、というユビキタス概念に通じる。スマホに組み込まれているセンサーが強震観測に使える精度を有するか、という検討は10年来の歴史がある。現在は各端末で得られたデータをオンライン自動処理して利用者に配信するCloudsourcing Platformの構築が技術開発の中心になっており、建物の振動観測や車載方式で道路橋の状態評価に利用した事例などがある。後者では対象が非定常振動を異なる時刻に計測するため、アルゴリズムに工夫が必要である。UCバークリーを中心にニュージーランドでも試験運用が進む緊急地震速報システムMyShake[1)]も同様の発想に基づくが、コミュニティーにリアルタイムで危険を知らせることに主眼が置かれている。観測波形に機械学習アルゴリズムを適用して、計測振動が地震に起因するかを自動判別する手法が興味深い。

その他のセンサーでは、SOFO光ファイバーによる変位計測は長期間の計測に適していることから、土木建築を問わず各種構造物への適用が進んでいる。光学式層間変位計は振動台実験等で観測精度が実証され、加速度に基づく変位推定に代わる存在として今後の実適用が期待される。また画像認識技術は、PythonベースのOpenCVなどオープンソースコードを利用して簡単に技術に

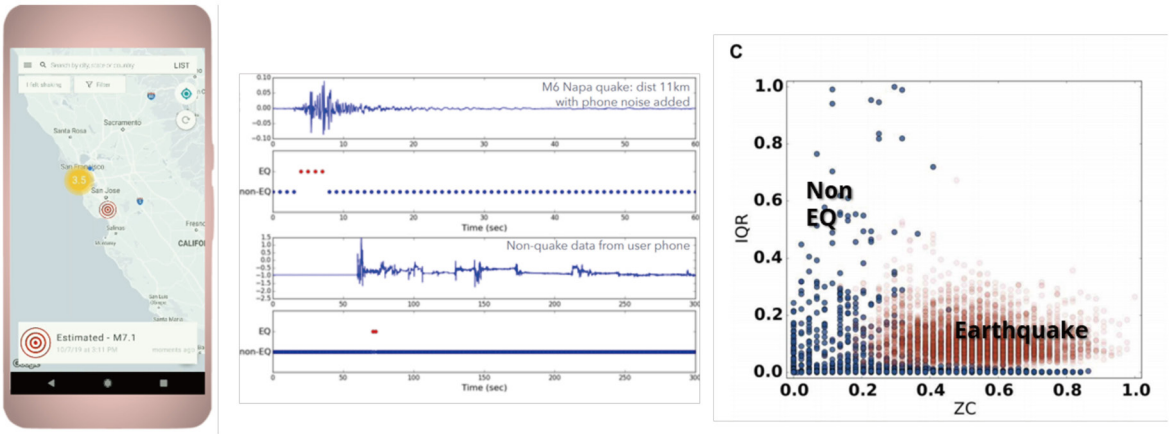

図1　MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond[1)]

SPECIAL TOPICS

触れられることも研究分野での利用が進んでいる。GPSは地震学分野で広く利用されてきたが、精度の向上により長大構造物の適用が進んでいる。

今後の課題については、サイバー・物理空間連携のゴールとして期待されるデジタルツインシティ、損傷評価から影響予測への情報翻訳、状態判別における閾値の設置、などを議論した。

デジタルツインシティについては、構造物情報＋入力地震動観測情報を応答解析モデルに入れて被害情報をリアルタイムに計算する従来の手法、構造物のモニタリング情報を結び付ける方法の開発が進んでいる。Fidelity（現物をどこまで段階的に表現しているか）や確度の異なるモデルを組み合わせるために、機械学習による予測手法が提案されている。例えば、機械学習を用いて近似した評価関数を利用して予測値の探索を高速化する試みがある。

損傷評価から影響予測への情報翻訳については、現場で利用されるモニタリング情報とは？という命題への回答が難しい。手順としては、損傷把握、残存性能評価、復旧手順の見通しの3つの階層が考えられる。図2に筆者らが2022年12月にE-Defenseで実施した鉄骨病院実験[2)]の様子と、医療現場の事業継続性計画から作成した地震後の対応表を示す。経過時間により必要とされる情報は異なり、非構造部材や室内被害を含めて、どの程度の性能が残されているのか、復旧までの道筋（手順、時間、コスト、資源）を考慮した役立つ情報の提供が望まれている。また、筆者らの研究チームでは医療機関を対象にモニタリング情報の利用方法を継続的に議論しているが、システムの維持管理意欲を持続させるために、平時にも活用できる仕組みづくりが求められる。今後の技術革新が期待される分野である。

最後に、閾値の設定はモニタリングにおける永遠のテーマともいえるだろう。設計時の限界状態や管理許容値などに基づく方法[3)]が一般的であるが、設計時の目標には安全係数が多重にかかっている可能性もあり、実際の構造物の情報と判定結果が乖離する状況もありえる。法的に問題となることはなくても、大規模災害時などに事前に定めたプロトコルに従って行動できるのか、閾値の設定はファジーさが残る問題として議論を続ける必要を感じる。

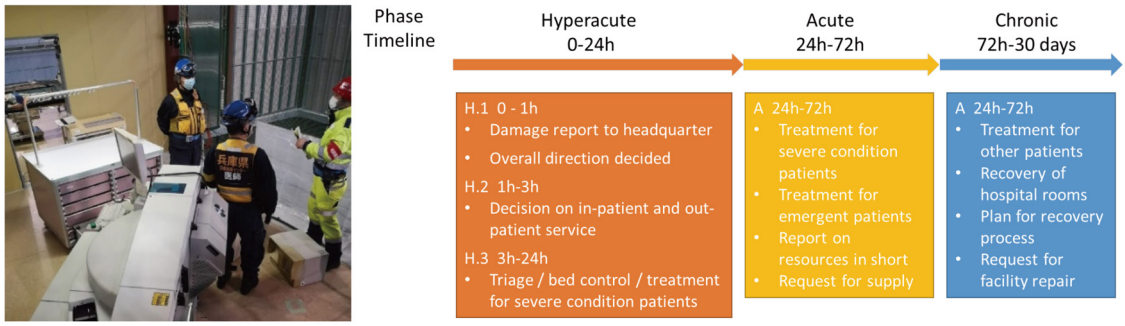

図２　医療現場に提供できるモニタリング情報とは？

参考文献：

1. Kong, Q., Allen, R., Schreier, L., & Kwon, Y. (2016). MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond. Science Advances, 2(2), e1501055. doi: 10.1126/sciadv.1501055
2. Kurata, M., Kawamata, Y., Kanao, I., Ohtsuru, S., Fujita, K., Matsuo, S., Kojima, K., Cho, K., Tsutsumi, T., Aida, S., Akazawa, M., Saburi, K, Nishitani, A. “2020 E-Defense Test for Integrated Structural, Nonstructural and Functionality Assessment of Medical Facilities,” 12th National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Salt Lake City, 2022.6
3. 構造物のモニタリング技術，4章　構造モニタリングの基礎知識：判断，コロナ社，2020.1

SPECIAL TOPICS

衛星情報を活用した建物群の被災判定技術に関する基礎研究

向井 智久（国土技術政策総合研究所　建築研究部　評価システム研究室）

1. はじめに

大きな災害後には被災エリアの建物群の迅速な復旧が社会経済やコミュニティ活動等にとって極めて重要であることから、建物群にセンサを取付け、災害時の被災情報の迅速な把握のための研究開発が盛んに行われている。一方、我が国では衛星技術の利活用が推進されている状況にあり、衛星測位情報を活用した準天頂衛星システム（みちびき）がサービスを開始しており、各分野においてこれらの位置情報の活用法が展開されている状況[1)]にある。具体的にはみちびき信号を受信できる携帯端末、腕時計、ETC車載器等の製品から、無人農機や除雪機、自動運転技術や路面状況検知技術等への展開が図られ、社会実装に向けた活動が精力的に行われている。そのような中、建築構造分野においては、現状大地震が発生した後に応急危険度判定が訓練された判定士によって実施されているが、その実施に長い期間を要することから、適切な強震観測とそれを用いた迅速な判定が必要とされ、その適切さを審査する技術評価[2)]が2021年より開始されている。この分野における既往の研究としては、複数の民間企業等により加速度計を用いた被災判定システムが構築されている一方、加速度積分により種々の変位を算定する場合において留意すべき課題も存在しており、直接構造物の変位を計測する際に衛星測位技術の活用の余地がある。また将来、当該センサがあるエリアの多点に設置される場合を想定すると、市街地そのものの揺れの事象やそれによる面的な被害状態の迅速な把握も視野に入れた検討がなされることが予想されるが、その際の共通の指標に「時刻」がある。衛星から取得される時刻は高精度かつ唯一のものであり、地震による市街地内の建物群の揺れの状況の正確な把握において有用である。

そのような状況を踏まえ本研究は、災害後迅速な対応が求められる災害拠点建物群の早期復旧に資する衛星情報を活用した被災判定自動化技術の開発を目的とし、次の研究項目を実施したため、それらを紹介する。

（1）高精度時刻同期型加速度計とGNSSセンサが災害時に連動する自動計測装置の開発

（2）計測データから被災情報等を評価する手法の開発

2. 各研究テーマ

2.1 高精度に時刻同期された加速度計とGNSSセンサが災害時に連動する自動計測装置の開発

本技術は、加速度計とGNSSセンサのそれぞれの計測精度の検証に加え、それらをシステム化し建物に設置した際に適切に稼働することを確認する必要がある。前者は文献3で地震時における建物応答変位の評価精度を検証しているため、それらを参照頂くとして、本報では後者について概説する。本検討では、各国の衛星信号を屋内に伝送できるGNSS測位センサと加速度計との連携を基盤技術と位置づけている。具体的には、地震が発生した時点で加速度計がその揺れ情報をGNSS測位センサへ伝送すると同時に両者が計測を開始し、計測対象建物の揺れの収束時点で再度その情報をGNSS測位センサへ伝送することで両者が計測を終了し、計測データを管理サーバに送信する一連の自動化システム（図1参照）を提案し、実際に複数の庁舎や共同住宅に導入

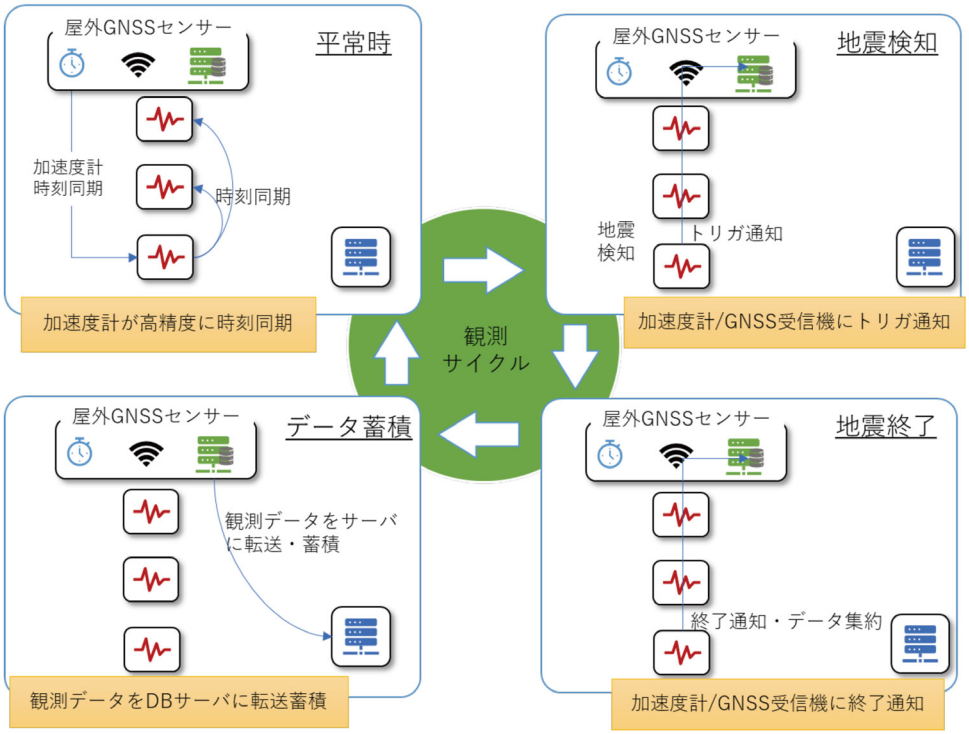

図1　加速度計とGNSSセンサが連動して稼働するシステムイメージ

し、それらが適切に動作することの検証を継続している。そのうち 1 棟では実際の地震観測を震度 3 以下の揺れで複数回観測が成功していることを確認している。

2.2 計測データから被災情報等を評価するアルゴリズム開発

本技術は大きく分けて 2 項目を実施した。それは 1) 実大構造実験によって損傷した RC 造架構試験体を対象とした被災判定技術[4]の提案、2）ある街区に建設された建物群を想定した場合の被災判定技術[5]に関する検討である。

前者は図 2 に示す通り、①地震時の最大応答変形を把握し、②モデル化された建物の非線形増分解析を実施し、③部材の降伏変形を用いて部材塑性率を算定し、④部材塑性率から部材損傷度を算定することで、⑤その部材損傷度から建物被災度の算定を行う方法の構築を目的としている。そのために実建物の部材の損傷状態や被災状態を正確に判定し、被災状態と建物構造特性の相関性を明確にすることが必要である。そこで、過去に実施された 2 体の実大 5 層架構試験体の実験結果を用いて、各架構試験体の損傷状態とおおよそ整合した被災判定結果を算定できる手法を示した。

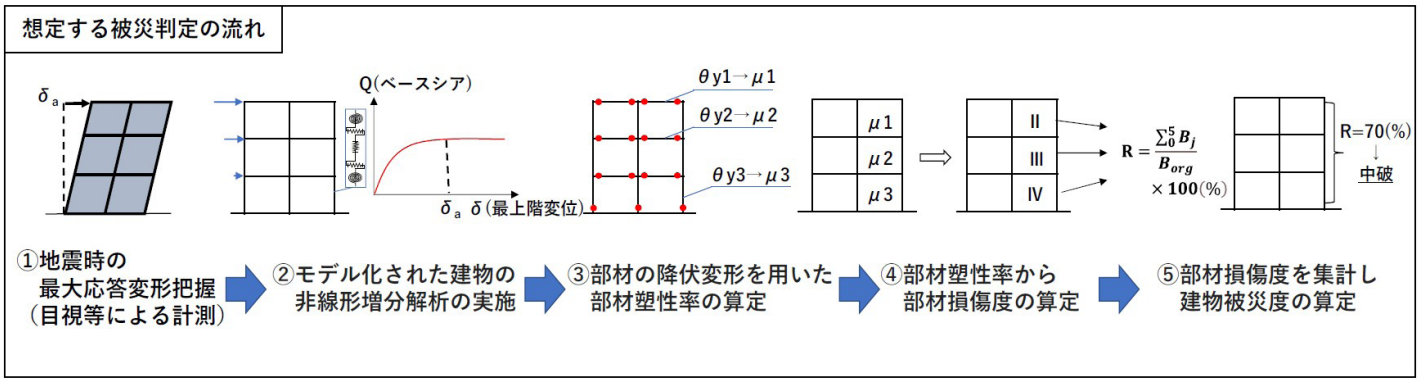

図 2　想定する被災判定の流れ

後者は、街区における建物群の地震に対するレジリエンス性能を議論することを目的として、単体建物および建物群の耐震レジリエンス性能の算定モデル（図 3、4 参照）を示した。ここで耐震レジリエンス性能とは単体建物の安全性と修復性を評価する指標として定義することとし、RC 造標準架構モデルの耐震安全性を評価するために耐震性能残存率と、修復性を評価するために理想的な修復時間[6]をそれぞれ算定し、耐震レジリエンス性能を算定した。また当該建物群の耐震レジリエンス性能については単体建物の耐震性能残存率 $r_i(t)$ に加え、個々の建物が街区にもたらす影響度を考慮するできよう、規模の大きい建物の被害が街区にもたらす影響が大きいとし、延床面積を考慮した式 (1) で建物群の耐震性能 $R(t)$ を定義する。

$$\boldsymbol{R(t)} = \frac{\sum(\boldsymbol{r_i(t)} \times \boldsymbol{A_i})}{\boldsymbol{A_{sum}}} \qquad (1)$$

ここで A_i：耐震性能残存率 r_i における建物の延床面積、Asum：街区内建物の総延床面積

上記定義に基づき、本検討で用いる街区の耐震レジリエンス性能を式 (2) で算定する。

$$\boldsymbol{R_b} = \int_{t_s}^{t_s+t_1} \boldsymbol{R(t)dt} \Big/ \int_{t_s}^{t_s+t_1} \boldsymbol{100\,dt} \qquad (2)$$

ここで t_1：復旧目標時間（日）

図 4 の $R(t)$ と経過時間の関係で、上式の分母は黄色部分、分子は青斜線部分を表す。本検討では被災前の評価を行うため、地震後に要する調査時間 t_s を考慮せず、調査後 t_1(日) までの耐震性能残存率の保有率とする。なお、本検討では復旧目標時間 t_1=7(日) と仮定し、R_b を算出した。なお前節で示したセンサなどによる被災判定システムを用いることで t_s にその効果を直接反映できる。

SPECIAL TOPICS

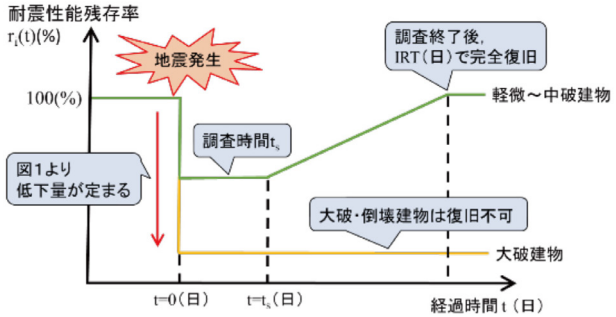

図３　単体建物の耐震レジリエンス性能

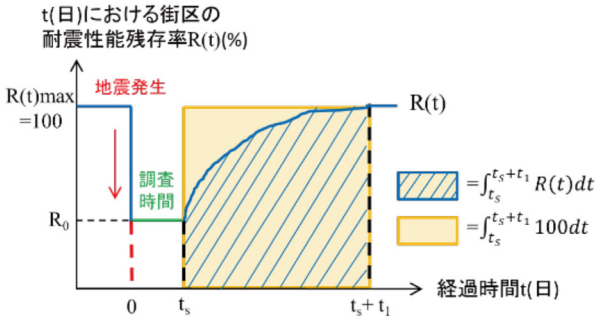

図４　建物群の耐震レジリエンス性能

3. まとめ

本稿では、災害後迅速な対応が求められる災害拠点建物群の早期復旧に資する衛星情報を活用した被災判定自動化技術の開発を目的として実施した 2 つの研究項目を紹介した。今後、衛星の小型化を含め当該技術はますます我々の生活と密接に関連してくることが予想され、建築・土木を問わず耐震構造や災害の分野においても多くの影響を及ぼすことが想定される。本研究で示したようなセンサを用いた被災判定システムとして、より洗練されたものが研究開発され、それらがある一定数普及する段階まで到達すれば、多くの観測データや被災判定結果が世の中に多く存在する状態となる。その来るべき時に向けて建物群で構成される街区における建物群の耐震性能を考える時に来ていると思う。

謝辞：本検討は、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP2.0）国家レジリエンスの強化「衛星データ等即時共有システムと被災状況解析・予測技術の開発」および科研費課題番号 20H00293 基盤研究 (A)（一般）「災害拠点建物群の早期復旧に資する衛星情報を活用した被災判定自動化技術の開発（R2-4）」の一環として実施した。関係各位に謝意を表します。

参考文献：

1）内閣府宇宙開発戦略推進事務局：みちびきの活用、https://qzss.go.jp/usage/、2022 年 11 月確認
2）日本建築防災協会：応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステム技術評価、https://www.kenchiku-bosai.or.jp/evaluation/monitoring/、2022 年 11 月確認
3）向井智久、田嶋一之、室井翔太：全球測位衛星システムを用いた建物の計測技術、コンクリート工学、Vol.60、No.3、pp.255-261,2022.3
4）吉田まほ子、向井智久、衣笠秀行：壁付き部材の損傷度の違いが耐震性能残存率に与える影響、日本コンクリート工学会年次論文集 vol44、pp193-198、2022.7
5）利根川洸一、向井智久、衣笠秀行：街区における複数建築物の耐震安全性と早期復旧性を考慮した耐震性能評価手法に関する基礎的研究、日本建築学会 2020 年度大会（関東）学術講演梗概集 pp.437-438、2020.9
6）衣笠秀行、向井智久：建築物の地震後機能回復性の観点からの損傷評価指標、日本建築学会構造系論文集第 84 巻 757 号ｐ .425-435、2019.3

SPECIAL TOPICS

実在鉄骨造体育館の構造部材を対象とした構造性能評価に向けて

涌井 将貴（新潟工科大学工学部工学科）

近年、実建物を対象とした構造ヘルスモニタリングの実施例が増えてきているものの、ひずみの計測を実施した例は限られている。建築物を対象としたひずみ計測が実施されない理由の一つとして、動ひずみ計測装置が高価であることが考えられる。これに対し、近年、進歩が著しい IoT 技術を活用することで、計測装置の低コスト化が期待できるものの、計測精度や長期計測の安定性などに課題がある。そこで本研究では、ひずみ計測による構造性能や応答挙動の把握の可能性を検討するため、実在鉄骨造体育館の柱や梁に半導体ひずみゲージを貼付し、小地震時の応答を計測した。一般的な動ひずみ計測では 1 点あたり数万円程度の費用が必要となるが、本研究では IoT 技術を活用することで、従来の 1/10 程度のコストで計測装置を製作し、計測に用いている。

図 1 に計測概要と計測結果を示す。計測対象は新潟県内の鉄骨造体育館であり、基礎が鉄筋コンクリート造、上部構造が鉄骨造、梁間方向は山形ラーメン構造、桁行方向はブレース構造となっている。図上段の示すように梁間方向の 1 構面を対象として、左右の柱頭 2 箇所および 1 階床に加速度計測ユニットを 1 台ずつ設置し、柱 4 断面、梁 6 断面の計 10 断面に半導体ひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは、各断面の H 形鋼フランジの内側に計 4 枚ずつ貼付している。1 つのセンサユニットは、1 つの Raspberry Pi Zero WH と MEMS 加速度センサ、あるいはひずみセンサが接続されている。ひずみ計測ユニットは 1 ユニットで 4 点計測できるため、1 断面の 4 点を 1 ユニットで計測している。計測データは、各センサユニットから Wi-Fi 経由で MQTT プロトコルを通じて、随時サーバーに送信される。各加速度センサユニットおよびひずみ計測ユニットは、NTP クライアントが作動し、秒単位以下での時刻同期は取られており、データはタイムスタンプとともにサーバーに送信される。またインターネット経由で、リアルタイムに計測データを確認することができるようになっている。ひずみ計測ユニットは、完全に同時刻でデータ計測ができず、ミリ秒以下ではあるものの若干の時刻ずれが生じるため、計測データを時刻歴のまま処理することが困難である。詳細は割愛するが、ここでは周波数解析後のスペクトルから曲げモーメントを算出することにしている。

図中段に加速度記録から算出した相対加速度およびひずみ記録から算出した曲げモーメントのフーリエ振幅スペクトルと、相対加速度と曲げモーメントの位相差分を示している。相対加速度と曲げモーメントはどちらも 1.5Hz 付近と 4Hz 付近の 2 か所でピークが確認された。位相差分を見ると、1.5Hz 付近では位相はばらついており相関が確認されなかったが、4Hz 付近では相対加速度と曲げモーメントが安定して逆位相となっており、相対加速度と曲げモーメントが比例関係にある。この結果をもとにスペクトルから単位変形時の曲げモーメント分布を算出したのが図下段である。図中の数値は、梁および柱の両端接合部節点における値を示しており、計測結果においては計測断面の値を用いて線形補間して算出している。計測結果から算出した柱梁接合部における柱と梁の曲げモーメントはほぼ一致し、梁の 3 断面で計測された曲げモーメントは左右ともほぼ直線となっている。全体の分布形状は計算結果と同様となっていることからも、安定した結果が得られている。一方、柱脚においては、回転バネとした計算値は計測値のほぼ倍であり、構造計算で想定した柱脚の固定度は実状と大きく異なっている可能性が示された。

以上から、安価な計測装置による実在鉄骨造体育館を対象とした地震応答時のひずみ計測によって、構造部材の応力評価を行える可能性を示した。ただし、今回の計測においては、既存の鉄骨造体育館を対象としたため、ひずみゲージを貼付するための足場の設置、電源を確保するための電気工事など、ある程度大がかりな作業が必要となった。一方、新築の建物であれば施工時にセンサの設置を考慮して作業が行えるため、既存建物に設置するのに比べて費用も削減できると思われる。対象建物の計測は今年で 4 年目となるが、このような長期的な計測事例が増えることで、新築する建物への計測装置設置に対するハードルが下がり、広く普及することを願っている。またデータ分析方法や停電時の電源確保などに課題はあるものの、災害時における定量的で即時性のある構造性能評価によって、安全な避難所の確保、復旧工事の合理化などに資することが可能であるものと考えている。

SPECIAL TOPICS

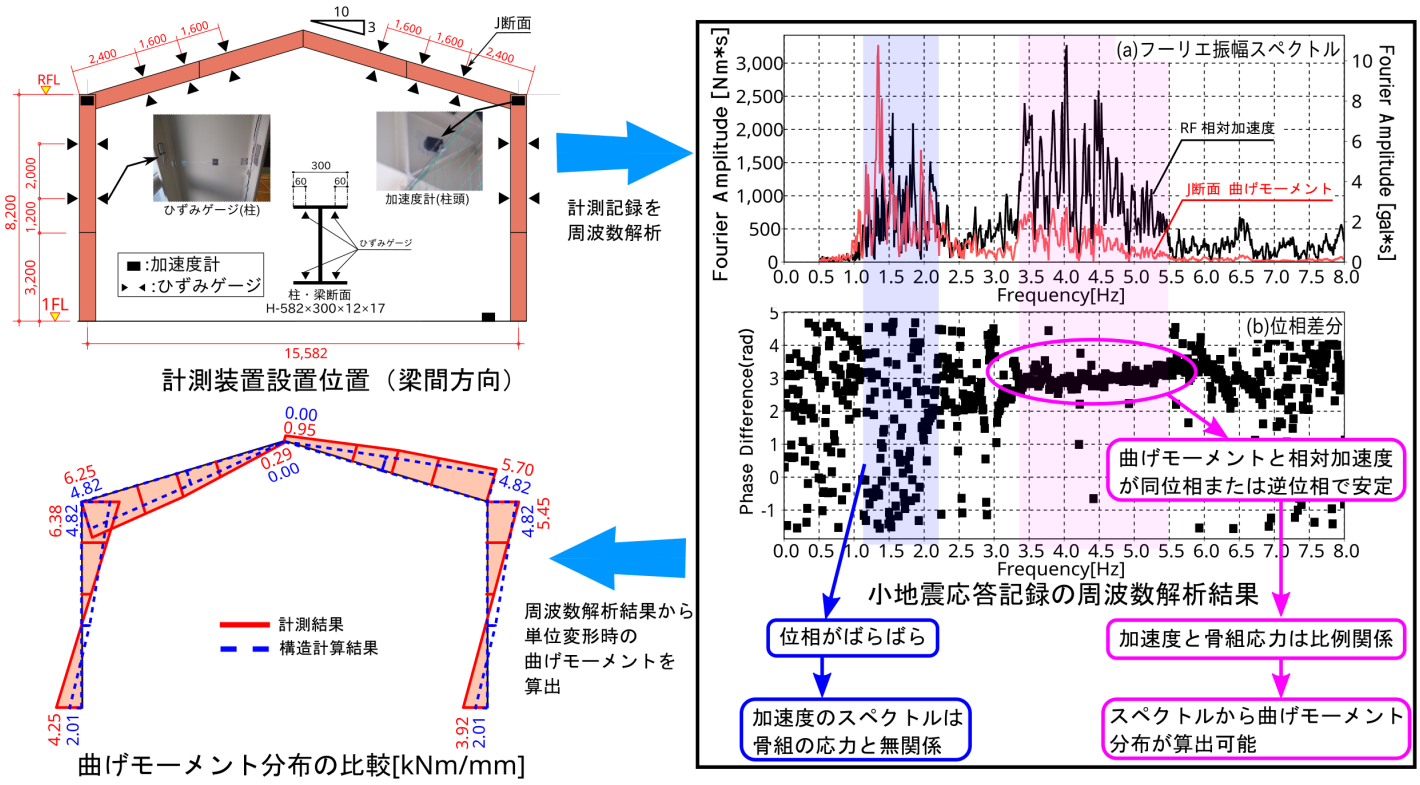

図１　計測位置と計測結果

SPECIAL TOPICS

地震後の非構造部材の損傷判定について

清家 剛（東京大学大学院新領域創成科学研究科）

はじめに

これまで建物の地震被害は、構造の被害が発生しないことに重点が置かれていた。しかし 2011 年の東日本大震災では、天井や外壁などの非構造部材の被害が目立った。とくに天井は人命を損ねるような被害が発生し、高いところにある重い吊り天井に対して建築基準法による厳しい規制が行われるようになった。さらに 2016 年の熊本地震では、避難所となるべき総合体育館が天井等の落下で使用できない事態が多数発生し、建物の継続使用が着目されている。

地震直後に建物を使うためには、建物や空間が安全に継続使用できるのか、判定を行わなければならない。しかし、仕上げ材である非構造部材の損傷は、構造躯体より判定が難しい。

本稿では非構造部材の損傷判定について、課題と現在の取り組みについて紹介していく。

非構造部材の被害の実態と課題

熊本地震では、自治体が管理する総合体育館の多くで天井が落下するか、もしくは落下の恐れ有りと判断され、避難所として機能しなかった。（写真１）その代わり東日本大震災以降天井撤去等の対策をとっていた学校の体育館が、避難所の役割を担った。しかし、そこでも残っていた天井等でいくつかの軽微な被害が発生し、使用禁止や一部の場所を立ち入り禁止にする対応がとられていた。（写真２）

このような避難所としての使用の可否は、応急危険度判定によって決められている。しかし、応急危険度判定のマニュアルには、構造の被害についての判定基準は明確に示されているが、天井や外壁の非構造部材については、目視による判定以上のことが示されていない。また、天井や外壁においては、地震後の目視で確認できないところで被害が発生している可能性がある。例えば天井の脱落のメカニズムは、E- ディフェンスの実験等の結果を見ると、最初にクリップの外れが発生し、それが広がって脱落に至るということがわかっている。そのため、脱落していない天井でも、クリップが外れていないかといった天井の裏側の状況を、確認する必要がある。しかし高いところにある天井に対しては、下から見上げるしかなく、点検口などから裏側が見えたとしても、全体が見渡せないなどの状況が多く、判定が難しい。したがって、現状では、目視で損傷があるかどうかを観察し、躯体の損傷程度などを考慮して、総合的に判断するしかないのである。

外壁においても、打診することで浮き等の有無を確認するなどの手法がとられるが、高所には足場がないと手が届かない。要するに天井でも外壁でも高いところにある危険な非構造部材ほど、判定が難しいということになる。そのため、これらを解決するための技術開発の取り組みが、いくつかはじまっている。

写真１　熊本地震で天井が落下した総合体育館

写真２　熊本地震における学校体育館天井の軽微な被害

SPECIAL TOPICS

非構造部材の損傷判定方法の検討

非構造部材の損傷判定方法には様々な方法があるが、ここでは現時点で天井の診断可能性のある技術について清家研究室で検証している実験を紹介し、診断方法の今後を考えるための情報提供としたい。

現在東京大学柏キャンパスに構築した鉄骨の躯体に、一部天井を設置した試験体を製作し、構造と非構造のそれぞれの耐震性について、いくつか実験を行っている。（写真 3）その中で、天井部分にクリップを外すなどの損傷を発生させ、さらに人力で加振することによって損傷を拡大させて、それがどの程度診断できるかを確認している。

写真３　鉄骨の躯体に天井を設置した試験体

ここで検証した診断の方法は、画像情報の取得、形状の計測、振動特性の計測である。まず、画像情報の取得としては、一般的に設置される可能性の高い防犯カメラ、天井裏診断のための各種カメラ（広角カメラ・360° カメラ・サーモグラフィーカメラ・内視鏡カメラ）、小型ドローンによる撮影などを試した。形状の計測ではレーザー距離計による天井の変位測定、レーザー照射計による天井のたわみの測定などを行い、振動特性については加速度計を設置して、耐震性の低下に伴う変化について確認した。

実験の結果、診断のための課題としては、観察に関するものと損傷に関するものがあることがみえてきた。観察に関する課題については、画像情報取得の場合は、天井裏の損傷を正確に確認できるかという点が重要になる。そもそも点検口等からカメラを挿入可能か、ドローンを入れることができるか、といったことが課題としてある。実験ではうまくできたが、一般的なホール等の天井裏は多くの設備の配管等があり、それらをよけて画像情報がどの程度取得できるかというと、かなり難しい。しかし、カメラの小型化、ドローンの高性能化などで解決できる可能性はあると考えている。一方で形状や振動特性の計測は、実験ではある程度うまくいったが、そもそも事前にデータを取得しておく必要があり、それが現場で実践できるのかが難しそうである。事前にデータを取得し地震直後にも計測するといった場合と、日常的なモニタリングとして天井の高さや振動特性を観察するといったことも考えられるが、いずれも建物の維持管理体制に関わることになる。

もうひとつの損傷に関する課題は、損傷の確認ができてもそれがどの程度危険なのかを把握するだけの知見がまだないという点である。今のところ、地震後にクリップの外れが見つかれば危ないという判断はできるが、一つなら使用禁止なのか、3 つ以上なら使用禁止なのかということを判断するだけの実験等が行われてこなかったのである。とりあえずクリップが外れていたら立ち入り禁止ということでいいのではないか、という考えもあるが、軽微な被害の場合にどのように判断するのか、今後の検証が必要だと考えている。

以上、本稿では非構造部材の損傷の判定について、現状の一端を紹介したが、まだまだこれからの分野だと言うことは分かっていただけたかと思う。関心のある方々と是非研究を発展させていきたい。

JAEE COMMUNICATION

連載コラム　鯰おやじのおせっかい

連載コラム、「鯰おやじのおせっかい」。武村雅之先生（名古屋大学）の連載コラム第 29 号をお届けします。

その 29 関東大震災から 100 年、第 1 回　関東地震の震源解明

2023 年は 1923（大正 12）年に関東大震災が発生してから 100 年を迎える年である。本シリーズでもたびたび関東大震災に関する事柄を紹介してきたが、記念の年にちなんで、あらためて関東大震災がどのような災害であったかを 4 回シリーズでまとめてお話することにした。第 1 回目は震災を引き起こした関東地震の震源解明の歴史についてである。

図 1 は関東地震の震源断層と揺れ（震度）の分布である [武村 (2003)]。この図ができたのが 2003 年ころで震災から 80 年後のことである。地震発生直後の約 10 年間で地震観測記録や被害調査結果がまとめられたが、まだ地震の正体もわからない時代だった。震源の正体が地下の断層でその性質を決めるのに地球を取り巻くプレート運動が大きな関りをもつことが分かったのが約 50 年後、この時点で関東地震の断層モデルが提案された。断層面の詳細な動きやそれに連動する揺れの研究が開始されるまでにはそれからさらに 20 年の歳月が流れた。

私が関東大震災の研究をはじめて約 30 年が経過するが、30 年前がほぼその時期にあたる。1992 年 12 月 15 日のことである。岐阜地方気象台で今村式 2 倍強震計による記録を発見した。当時、関東地震の完全な記録は日本にはほとんどないと言われていたから、その感動はひとしおだった。岐阜測候所では、同地震計による観測は 1915（大正 4）年から行われ、その鮮明さは当時の岐阜測候所の高い技術レベルを表している（図 2）。記録はさらに連続して 4 枚、次々に起こる余震を 9 月 3 日の朝 9 時頃まで記録していた。これで今までいい加減に決められていた地震規模を示すマグニチュードも本来の定義にしたがってきちんと決められる。また、まったく分らなかった本震直後の余震活動も解明できる。マグニチュード 8 クラスの巨大地震の直後の余震活動がこれほどよく分かるのは近年でも稀なことである。

さっそくコピーを取らせてもらおうと記録紙の箱を抱えて台長室へ。その時の藤沢台長の驚きは相当なもので，目を丸くして記録紙を見られ「こんなすごい記録があったなんて全く知らなかった。私にも一枚コピーをください。」と興奮気味におっしゃった。先日 30 年ぶりに気象台を訪れた際、私がとったそのコピーも大切に保管されていた。

その後の調査によって、全国の 5 地点で振り切れない地震記録が見つかり、さらに地震前後の測量結果から断層すべりの分布なども推定された。また揺れに関する体験談の分析なども進み、その結果、現在までにわかっている関東地震の地震像をまとめたのが図 3 である。

本震は 11 時 58 分 32 秒に松田付近（本震の震央位置）の地下ですべりがはじまり 3 ないし 5

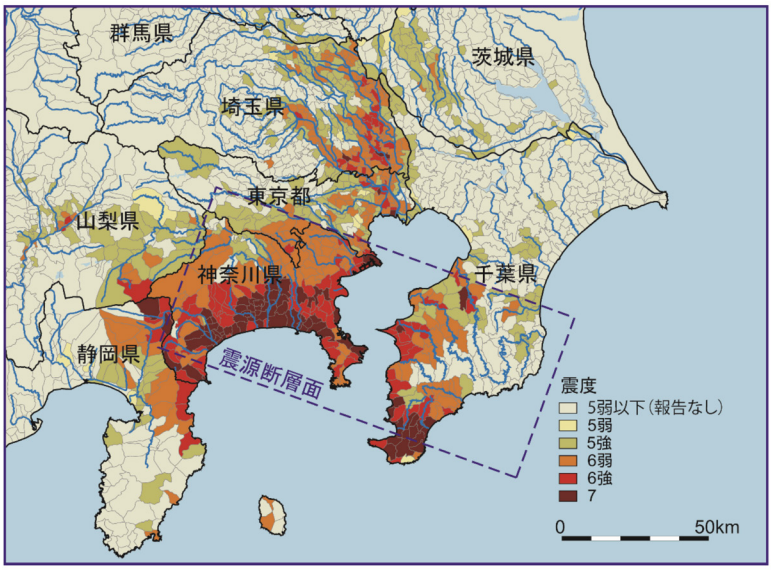

図 1　関東地震の震源断層と木造住家の全潰率から求められた震度分布 [武村 (2003) に加筆]

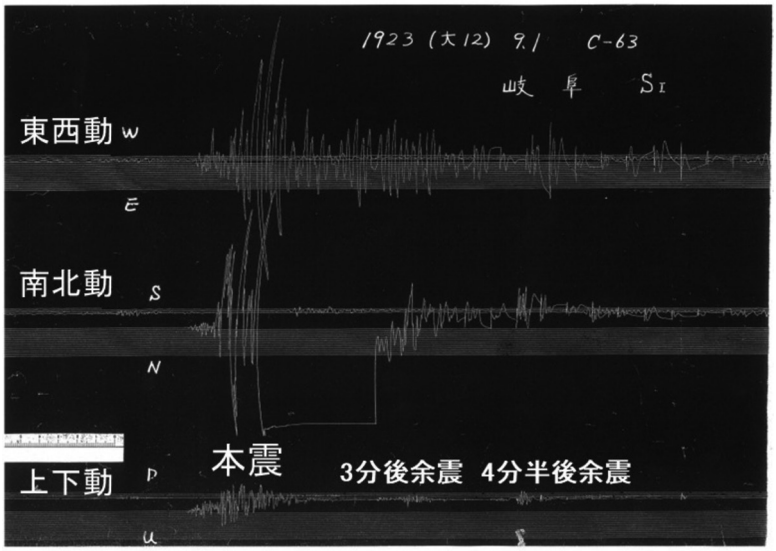

図 2　岐阜測候所の今村式 2 倍強震計で観測された本震の記録 [岐阜地方気象台蔵に加筆]

秒後に小田原付近で第一の大きなすべり（第一イベント）を起こし、その後東に移って 10 秒から 15 秒後に三浦半島付近で第二の大きなすべり（第二イベント）を起こした。その後すべりは房総半島方面にまで広がり、すべりはじめから約 1 分間で終了した。

マグニチュードは M8.1 である。余震は、本震のはじまりから約 3 分後の 12 時 1 分に東京湾北部で M7.2 の余震（A1）が発生、さらに 4 分半後の 12 時 3 分に神奈川県西部で M7.3 の余震（A2）が発生した。その後、12 時 48 分に M7.1 の余震（A3）が東京湾の木更津付近で発生、翌 9 月 2 日の 11 時 48 分に房総半島南東沖で M7.6 の最大余震（A4）、同日 18 時 27 分に九十九里浜沖で M7.1 の余震（A5）が発生している。この地震は 1987 年 12 月 17 日に発生した千葉県東方沖地震（M6.7）と、観測波形の形状が大変良く似ていることから、類似の地震であると思われる。さらに翌年 1 月 15 日にはいわゆる丹沢地震（A6）M7.3 が発生した。まさに首都圏直下地震が立て続けに起こっていたことが分かる。最近の研究から図 1 の震度分布は本震から 5 分以内に発生した A1 と A2 の余震の影響も含まれたものであることも分かっていている [神田・加藤 (2019)]。

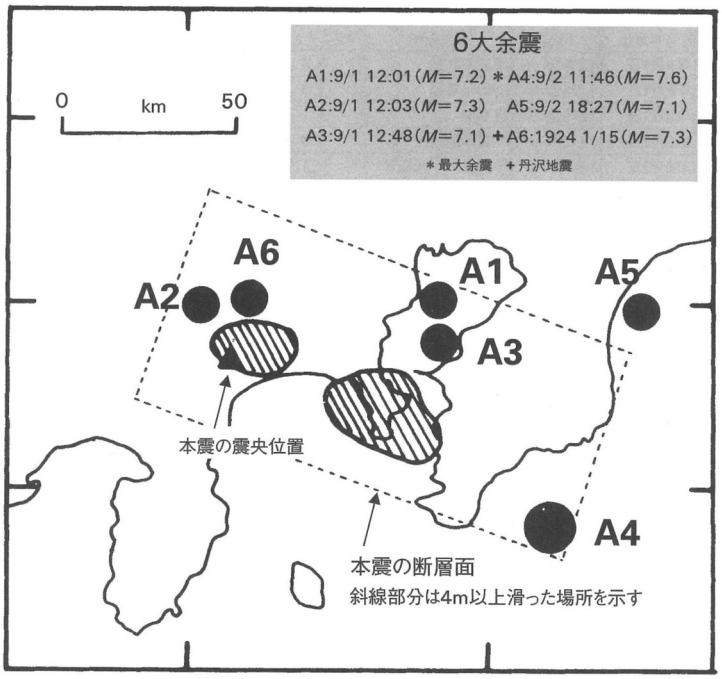

図 3　関東地震本震の震源断層で大きく滑った部分と M7 以上の 6 大余震の震源位置 [武村（2003）]。大きく滑った部分は Wald and Somerville(1996)、本震の震央は浜田 (1987) による。

地震発生から何年もあとにこのような詳細な地震像がわかったのは、震災当時に人々が後世のためにと苦労して地震記録や被害資料などを残してくれていたからに外ならない。2003 年に書いた著書の最後に、「これら過去の記録の価値は、記録が取られた時が最低で、その後の学問や技術の進歩によって価値がどんどん上がってゆくという視点が、日本では学者も含め国民全体に欠けているように思われる。」と述べたが、現在、そのような状況が多少なりとも改善されていることを祈りたいものである。

参考文献

武村雅之，2003，『関東大震災－大東京圏の揺れを知る』，鹿島出版会，139pp.

神田克久・加藤研一，2019，震度インバージョン解析による首都直下の歴史地震の強震動生成域と短周期レベル，日本地震工学会論文集，19，6，91-104.

Wald, D.J. and P.G.Somerville, 1995, Variable-slip rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan Earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, Bull.Seism.Soc.Am., 85, 159-177.

浜田信生，1987，1923 年関東地震の’震源深さ’について，験震時報，50，1-2 号別冊，1-6.

JAEE COMMUNICATION

Insights into the liquefaction of gravelly soils

Matthew Gapuz CHUA（University of Tokyo）

Liquefaction is a phenomenon where saturated soil behaves as a liquid due to loss of effective stress. The 1964 earthquakes in Niigata and Alaska have triggered immense research interest in the field of liquefaction. For decades, most of the current research has been focused on sandy soils. In contrast, gravelly soils have been regarded as non-liquefiable because of their high permeability and large particle sizes. However, gravelly soils have also been found to have liquefied in the past. Liquefaction may occur when drainage is impeded by the presence of impermeable layers in the strata or if a pavement is built over the gravelly soil deposit. A list of case studies of gravelly soils liquefying around the world has been presented in [1]. The cases varied widely from 15-92% gravel content (GC). The average GC was found to be around 30%. Average grain size was around 6.4mm. Furthermore, these case studies were observed in both natural and artificial fills, flat and sloping ground, small to large deformation, and high to slow shear wave velocities. Therefore, it is important to also understand the behavior of gravelly soils.

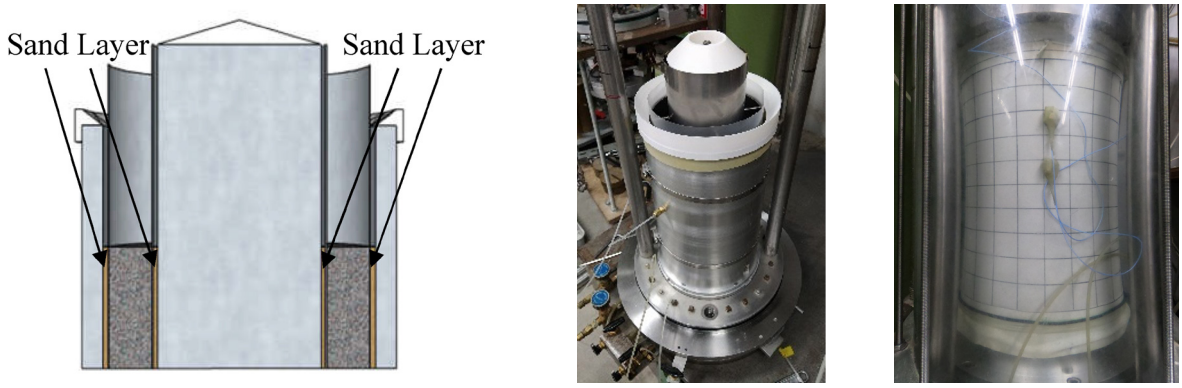

Figure 1 Schematic diagram and picture of membrane penetration elimination method

Several challenges have been encountered in the study of gravelly soils. For example, it has been difficult to test them in the laboratory due to their large particle size which require consideration for membrane penetration. In this this study, membrane penetration was eliminated using a thin sand layer as shown in Fig. 1 [2]. A series of undrained cyclic torsional shear tests were conducted on a large size hollow cylinder torsional shear apparatus to study different sand-gravel mixtures [1]. This machine is capable of applying torsional simple shear which is more representative of the real field condition than traditional triaxial testing. Test cases varied from 0 to 70% GC. A comparison of stress strain curves for GC=0% and GC=30% are shown in Figs. 2 & 3. The results showed that there was only marginal increase in the liquefaction resistance ($Nc\gamma_{DA=7.5\%}$) from pure sand up to 30% GC (Fig. 2). However, gravels showed a slower rate of strain development at larger strains (Fig. 3). This meant that even though sands and gravels had equivalent liquefaction resistance in the lower strain region ($Nc\gamma_{DA=7.5\%}$), gravels were still more resilient at the larger strain regions. This also reinforces why the average GC was 30% in the case studies. At higher GC, samples showed stronger resistance to strain development, but not to a degree that impedes the occurrence of liquefaction. The results suggest that gravelly soils are also susceptible to liquefaction and further research is needed to properly evaluate them.

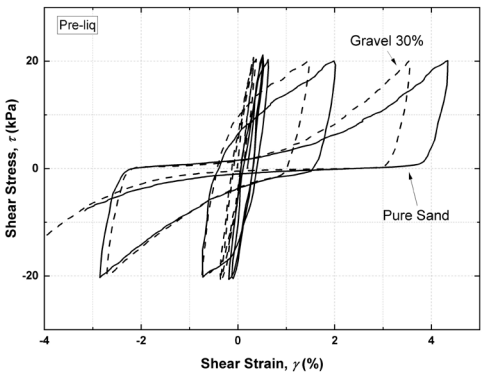

Figure 2 Stress-strain curve up to γ_{DA}=7.5%

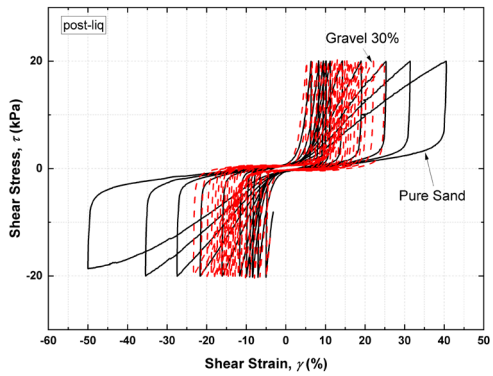

Figure 3 Stress-strain curve after γ_{DA}=7.5%

References:

1. Chua MG, Shiga M, Kiyota T, Katagiri T (2022) Effect of gravel content on the undrained cyclic behavior of gravelly sands in torsional shear tests. Bull Earthq Resist Struct Res Center, Inst Ind Sci Univ Tokyo 55:1–9
2. Chua MG, Kiyota T, Shiga M, et al (2022) Effect of Membrane Penetration on the Undrained Cyclic Behavior of Gravelly Sands in Torsional Shear Tests. Proc 4th Int Conf Perform Based Des Earthq Geotech Eng (Beijing 2022) 52:1467–1474. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11898-2_128

JAEE CALENDAR

日本地震工学会の行事等

○第 13 回震災予防講演会

日時：2023 年 2 月 3 日（金）13:30 ～ 16:30
場所：パシフィコ横浜・アネックスホール G 会場
詳細：https://www.shinsaiexpo.com/yokohama/seminar2023/

○第 16 回日本地震工学シンポジウム（16JEES）

日時：2023 年 11 月 23 日（木）～ 25 日（土）
場所：パシフィコ横浜ノース（横浜市）
詳細：https://confit.atlas.jp/guide/event/jees2023/top

日本地震工学会が共催・後援・協賛する行事等

○地震防災フォーラム 2022（協賛）

主催：関西地震観測研究協議会
日時：2023 年 1 月 24 日（火）
場所：オンライン
詳細：http://www.ceorka.org/

○日本地震工学会（JAEE）とタイ王立工学会・土木工学部門（EIT）との学術研究シンポジウム

主催：日本地震工学会、タイ王立工学会・土木工学部門
日時：2023 年 1 月 27 日（金）
場所：バンコク・タイ王
詳細：https://www.jaee.gr.jp/jp/event/calendar/

○ Eighth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering（IALCCE 2023）

主催：International Association for Life-Cycle Civil Engineering
日時：2023 年 6 月 11 日～ 15 日
場所：ミラノ工科大学
詳細：https://ialcce2023.org/

○安全工学シンポジウム 2023（協賛）

主催：日本学術会議総合工学委員会
日時：2023 年 6 月 22 日（木）、23 日（金）
場所：日本学術会議講堂および会議室
詳細：https://www.anzen.org/html/submission.html

その他関連学協会の行事等

○情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-E プロジェクト）第 2 回研究フォーラム～先端研究と産業界の接点～

主催：文部科学省
日時：2023 年 1 月 24 日（火）
場所：オンライン（Zoom）
詳細：https://star-e-project-2023.eventcloudmix.com/

○ 2nd International Workshop on Energy-Based Seismic Engineering

主催：Faculty of Engineering of the University of Porto
日時：7 月 3 日（月）～ 6 日（木）
場所：Faculty of Engineering of the University of Porto
詳細：https://paginas.fe.up.pt/~ebse/

会誌刊行案内、編集後記

日本地震工学会誌 No.48（2023 年 2 月末）が発行されます。

地震工学分野では様々な形で途上国への国際協力が行われてきておりましたが、2020 年からの COVID-19 禍で国際的な人の往来が制限されるようになり、ひとつの節目を迎えたような印象があります。今年（2022 年）に入ってから国際的な人の往来が徐々に再開され、国際協力を再び活発化させていくタイミングにあることから、日本地震工学会誌第 48 号の特集テーマは「地震防災分野における途上国への国際協力（仮）」としました。本特集では､様々な立場（国際機関･研究機関･大学･学生団体等）や地域（アジア・欧州・南北アメリカ等）で国際協力に関わっておられる方々に寄稿をお願いしており、個々の活動の内容や、COVID-19 禍や文化の違い的な意味での苦労話、人材育成の重要性などについて触れて頂く予定です。

（会誌編集委員会　第 48 号幹事　小阪 宏之／松川 和人）

編集後記

本年 3 月に福島沖地震が発生し、東北新幹線が全線運転再開までに 1 か月ほどを要しました。10 月に発刊された日本地震工学会誌でも当地震の特集が取り上げられ、その被害・復旧状況やそこから見出される課題に関心を寄せた方は多かったと思われます。

今回の NEWSLETTER では「レジリエンス — 地震後の取り組み —」と題して、4 名の方々にご寄稿いただきました。著者の皆様にはご多忙の中ご寄稿いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

発災直後の被害把握に関する最新研究と課題を分かり易く説明していただき、私も編集作業をしながら勉強させていただきました。今後も幅広い視点から地震工学に関する情報を NEWSLETTER から発信していく所存です。ご意見、ご感想など賜れれば幸いです。

第34号編集担当　松田 頼征

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 4 F
TEL 03-5730-2831
FAX 03-5730-2830
Website: https://www.jaee.gr.jp/jp/

Copyright (C) 2022 Japan Association for Earthquake Engineering
All Rights Reserved.
＜本ニュースレターの内容を許可なく転載することを禁じます。＞