

地盤配管設備等の非構造部材を含む3階建て住宅の機能を検証するE-ディフェンス実験 (首都圏レジリエンスプロジェクト)

その1. プロジェクト概要と本実験の位置づけ

正会員○ 井上 貴仁^{*1}, 同 山田 祥平^{*2}, 同 柏 尚稔^{*3}
同 林 和宏^{*4}, 同 長江 拓也^{*5}

べた基礎, 振動台実験, 土槽,
基礎滑動, ロッキング, 損傷モニタリング

1. 首都圏レジリエンスプロジェクト

「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト(2017年度~2021年度)」では, 都市機能維持の観点から, 官民一体の総合的な事業継続や災害対応, 個人の防災行動等に資するデータの収集・整備をめざしている。サブプロジェクト(c)「非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備(研究統括: 早稲田大学 西谷章, 防災科学技術研究所 梶原浩一)」では, 都市の中核をなす建物の機能維持に基づく事業継続や生活確保, 損傷評価と修復に基づく速やかな回復, 住宅密集地域における保全等を目的としている。

この中の, 研究項目①「簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定」では, 簡易で安価な普及型センサのデータや既設の広域地震観測網の情報などを統合することを視野に, 住宅密集地域の広域被害推定手法等の研究開発を行う。具体的には, E-ディフェンス実験によって, 非構造部材を含む住宅としての損傷過程, 機能損失を評価する。また, 崩壊に至るまでの挙動と各種センサから得られるデータを関連づけることを試みる。

首都圏レジリエンスプロジェクトは, 文部科学省研究開発局地震防災研究課が推進しており, 過去の大大特プロジェクト, 首都直下プロジェクト, 激甚災害プロジェクトの後継に当る。また, 本実験は E-Defense and NHERI facilities に基づく日米共同研究課題に指定されている^{出典)}。

2. 非構造実験に関する当該実験の位置づけと方針

防災科学技術研究所では, 実験データ公開システム ASEBI(http://www.bosai.go.jp/hyogo/asebi/dataopen_1.html)において, 過去実験データを公開しており, 「科学研究, 教育又は行政目的における」活用が可能となっている。この中では特に, 超高層建物の内部空間, 非構造材の被害, 機能損失に焦点を当てたサブストラクチャ実験^{1), 2)}の開発と実践の内容が複数用意されている。実骨組の実験においては, 付加的に配管設備類を具備した例^{3), 4)}が確認できる。これらの実験では主に, オフィス系仕様の家具什器, 内外装材, 給排水管, 空調設備, 情報機器等が使用されており, 各種損傷過程, 配管圧力変動等が記録されている。また, 損傷モニタリング用センサの導入による挙動

把握の試みは一部, 非構造評価も念頭に実施されている。

本課題では実大木造住宅を対象とし, 地盤上に施工されるべた基礎を忠実に再現する。そして, 機能検証用に各種地中配管を埋設する。具体例として, 上流側を本管に接続した引き込みガス管を準備し, 上流側は本管に, 下流側は建物に拘束される条件を与える。各種配管はシステムキッチン等の全住宅システムへと接続され, 実物に近い住宅機能を対象として, 地震時のモニタリング技術を検証する。本課題では主に, 簡易で安価な手法として次のセンサ機器類を用いる計画である: 1) MEMS 型地震計, 2) スマートフォン, 3) 感震ブレーカー等

国内外のいずれにおいても, 地盤上の実建物に配管システムを導入し, 内部機能との相関を含め耐震性を検証した例は見当たらない。このような非構造部材の条件再現の中で, 多岐にわたるセンシングシステム, モニタリング技術を検証した実験例はない。

3. 構造実験に関する当該実験の位置づけと方針

都市機能の維持・回復のための調査・研究プロジェクト⁵⁾(2012年度~2016年度)では, 都市の基礎をなす施設が完全に崩壊するまでの余裕度の定量化と, 地震直後の健全度を即時に評価し損傷を同定する仕組みの構築を研究課題と設定し, 高層鉄骨造建物や RC 造建物などを対象としたE-ディフェンス実験を実施している。同プロジェクトで提案, 開発された建物健全度モニタリングシステムは, 試験体の構造損傷進展性状を精度良く評価できることを確認^{6), 7)}している。本実験では, こうした技術の検証実績を重ねることも意図している。

本プロジェクトでは, 既往のE-ディフェンス実験データを活用した包括的分析・評価を研究開発の手段としている(研究項目⑤責任者: 西谷章)。本研究項目①では, 過去のE-ディフェンス実験で公共性の高い木造実験について, 分析の統合を試み, 先に述べた研究開発目標に対する成果の充実をめざす。

過去の木造住宅に関するE-ディフェンス実験の代表的な内容について, 表1にまとめる。いずれの実験も完全崩壊含め, 強度低下に至る終局限界を確認したもので, ここでは各実験を最大強度時ベースシヤ係数により概観

E-Defense test on functionality of three-story residential houses including underground pipe lines (Metropolitan resilience PJ) Part.1
Overview of the project and perspectives of the E-Defense test

Takahito INOUE, Syohei YAMADA, Hisatoshi KASHIWA
Kazuhiro HAYASHI, Takuya NAGAE

する。1970年代に建てられた住宅に関する大大特A実験、大大特C実験の場合、この値は約0.6であり、補強された大大特B実験、大大特D実験では、1.0付近まで強度が上昇している。2005年当時の構造仕様を採用した性能検証実験では約1.5を得ている。2009年の3層国交省1実験、4実験では、耐震等級2および耐震等級1の条件で約1.0および約0.9を得ている。

本実験では、住宅密集地域の新築に採用されるケースが多くなってきた3階建てを採用することとした。耐震等級は2もしくは3としておくことで、ベースシヤ係数にして1を上回る終局強度を与える。こうした強度条件は徐々に一般化すると想定する。図1に予定する試験体を示す。表1の実験では、土台より下を剛とみなせ、振動台入力が基礎入力に相当する条件である。大大特D実験については、発泡スチロール人工地盤内に埋め込む形で布基礎を施工した条件であるが、応答加速度から見ると、基礎上

の値は、人工地盤上の値の1.2倍程度に増幅されていた。本実験では、図2に示すように、土槽内の地盤上にべた基礎を施工する条件とし、基礎下における、滑動、ロッキングについて精密計測する。2棟の実験とし、振動台に直下地震の記録波を3次元入力する。上記に対して、もう一方は、RC造平板基板上にべた基礎を直接施工する条件とし、複雑な現象解明に資する比較検証を計画する。

4. まとめ

プロジェクトと本実験の位置づけ、方針を述べた。

謝辞

本稿含む一連の報告は、平成29年度「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト/サブプロジェクト(c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」の一部である。

出展

i) <https://www.designsafe-ci.org/facilities/nco/partnerships/nied/>

参考文献

- 1) 長江拓也, 梶原浩一, 藤谷秀雄, 福山國夫, 川辺秀憲, 大西一嘉, 城戸史郎, 中島正愛: 家具および非構造部材に着目する高層建物の地震応答再現実験-E-ディフェンス振動台による実規模実験システム-, 日本建築学会構造系論文集, 628号, pp 1007-1014, 2008
- 2) 吉澤睦博, 福山國夫, 井上貴仁, 梶原浩一: 大規模振動実験によるオフィスビルの室内被害に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 730号, pp 2013-1171, 2016
- 3) 長江拓也, 鍾育森, 島田侑, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 齊藤大樹, 北村春幸, 福和伸夫, 日高桃子: 超高層建物の耐震性能を検証する実架構実験システムの構築-E-ディフェンス振動台実験-日本建築学会構造系論文集, 640号, pp 1163-1171, 2009
- 4) 長江拓也, 田原健一, 福山國夫, 松森泰造, 塩原等, 壁谷澤寿海, 河野進, 西山峰広, 西山功: 4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 669号, pp 1961-1970, 2011
- 5) 中島正愛, 吹田啓一郎, 高橋元美, 西山峰広, 勝俣英雄, 梶原浩一, 小鹿紀英: 「高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発」の全体計画と概要, 日本建築学会大会梗概集, pp. 967-968, 2013.8
- 6) 森井雄史, 岡田敬一, 白石理人, 杉本浩一, 寺田岳彦, 佐藤俊明, 飛田潤: 地震直後における建物健全性評価のための限られた階の加速度記録に基づく建物全層応答推定評価手法-鉄骨構造18層試験体の振動台実験結果に基づく検討-, 日本建築学会構造系論文集, 730号, pp.2045-2055, 2016.12
- 7) 船原英樹, 柴田景太, 長尾俊昌, 佐藤貢一, 長島一郎, 林和宏, 河又洋介, 田村修次: 杭の損傷モニタリング技術検証のためのE-ディフェンス実験, 第51回地盤工学研究発表会, Vol.51, pp.1279-1280, 2016.9
- 8) 坂田一史, 三宅辰哉, 平野茂, 河合直人, 腰原幹雄, 箕輪親宏, 五十田博: 震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験 その5被災後に補修された建物の性能(被災復旧実験), 日本建築学会大会梗概集, pp. 377, 2006.9
- 9) 榎本敬大, 坂本功, 河合直人, 箕輪親宏, 河合直人, 五十田博, 腰原幹雄: 震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験 その8移築補強・無補強試験体実験の目的と概要, 日本建築学会大会梗概集, pp. 381, 2006.9
- 10) 福本有希, 腰原幹雄, 榎本敬大, 河合直人, 五十田博, 清水秀丸: 震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験 その21C棟の耐震性能, 日本建築学会大会梗概集, pp. 479, 2007.8
- 11) 荒木康弘, 福本有希, 腰原幹雄, 河合直人, 五十田博, 清水秀丸, 榎本敬大: 震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験 その22D棟の耐震性能, 日本建築学会大会梗概集, pp. 479, 2007.8
- 12) 河合直人, 榎本敬大, 大橋好光, 井上貴仁, 五十田博, 稲山正弘, 藤田香織: 木造3階建て軸組構法住宅の設計法と震動台実験 その1全体概要, 日本建築学会大会梗概集, pp. 229, 2010.9

表1 過去木造住宅実験の終局強度

	タイトル (文献)	最大層Cb (概算)
1	性能検証 ⁸⁾	1.51
2	大大特A ⁹⁾	0.62
3	大大特B ⁹⁾	0.96
4	大大特C ¹⁰⁾	0.67
5	大大特D ¹¹⁾	1.11
6	3層国交省1 ¹²⁾	1.01
7	3層国交省4 ¹²⁾	0.90



図1 震動台上の試験体 (2019年2月予定)

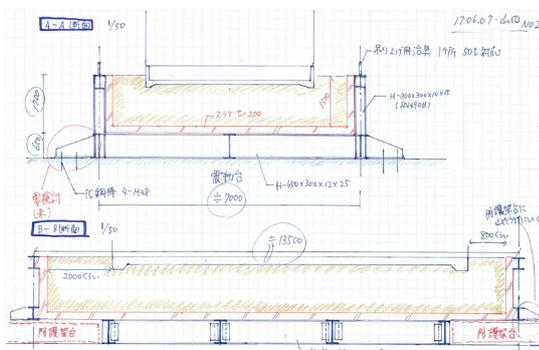


図2 土槽内地盤上のべた基礎 (設計過程)

*1 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター副センター長・工博
 *2 日建設計・修士(工学)
 *3 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官・博士(工学)
 *4 豊橋技術科学大学 助教・博士(工学)
 *5 名古屋大学 減災連携研究センター 准教授・博士(工学)

*1 Deputy Director, HEERC NIED, Dr. Eng.
 *2 NIKKEN, M. Eng.
 *3 NILIM, Dr. Eng.
 *4 Assistant Prof., Toyohashi UT, Dr. Eng.
 *5 Associate Prof., Nagoya U, Dr. Eng.

地中配管設備等の非構造部材を含む3階建て住宅の機能を検証するEーディフェンス実験 (首都圏レジリエンスプロジェクト)

その2. べた基礎下の摩擦挙動に関する要素実験

正会員○ 上段 聖也*¹, 同 西 峻汰*², 同 長江 拓也*³
同 山田 祥平*⁴, 同 柏 尚稔*⁵, 同 林 和宏*⁶, 井上 貴仁*⁷

べた基礎, 振動台実験, 摩擦特性
モルタル, 鋳鉄, 鋼

1. はじめに

木造住宅の上部構造の耐震性能の標準が向上してきている。具体的には、壁量の確保により剛性と耐力が高い。海外、特に米国において、木造住宅に対して高い余力を持たせる研究活動が活発化している¹⁾。地震時における基礎下でのロッキングや滑動は、上部構造の地震応答特性に大きな影響を与える可能性がある。同時に、基礎位置においてガス管、給排水管への強制変位が予測される。本稿では、モルタル間摩擦の振動台実験について報告する。同実験の、鋼・モルタル間、鋳鉄・モルタル間摩擦の資料²⁾も合わせることで、包括的に考察する。

2. モルタル間の摩擦実験概要

図1に実験想定モデルを示す。実験方法は、上部構造と基礎を模擬した47.6 kgの鋼板錘(図2)とモルタル製の接触要素(図3)からなる上部ユニットを、振動台に固定された受け側のモルタル板上に設置し、平滑な設置面上での摩擦特性を調べた。モルタルとしては、中強度(ECMセメント使用, 47.2N/mm²)と高強度(Uグラウト使用, 63.3N/mm²)を準備し、実験では、中強度同士、高強度同士の組み合わせにおいて、モルタル強度の影響を検討する。面圧については、想定3層木造住宅のべた基礎の面積に対する平均面圧から直径125 mm (0.014 N/mm²)

を決定した。実際の地震応答時における面圧集中等を考慮し、直径30, 50, 100 (0.221, 0.080, 0.021 N/mm²)を加えて4種類とした。木造住宅の基礎下には通常、防湿目的のポリエチレンシートが敷かれることから、本実験においては、その影響も確かめることとし、接触要素にポリエチレンシートを張り付けた条件を準備した。各実験終了時には、モルタル面を紙やすり(表面粗さNo.240)によって研磨し、ウェス(アセトン使用)によって清掃した。計測には、三軸加速度計と巻込型変位計を使用した。

3. 実験条件と最大静止摩擦係数(モルタル同士)

振動台実験では振動数2.5 Hzの正弦波を用いた。入力加速度を徐々に大きくしていき、滑動の開始状況を観察しながら、7-9 m/s²において一定に保った。試験体で計測された加速度からすべり面に作用するせん断力を求め、これを上部ユニットの全重量で除した値を μ と表記する。すべり出し時の μ を最大静止摩擦係数、すべり進行時における μ を動摩擦係数として評価する。

図4に実験から得られた最大静止摩擦係数と面圧(直径)の関係を示す。最大静止摩擦係数は、0.52~0.82に分布しており、面圧(直径)の違いによる顕著な傾向は見られない。一方、高強度のプロット(四角)が中強度のプロット(三角)を0.1程度下回る傾向が見られる。また、丸とひし形のプロットに注目すると、基準面圧においてポリエチレンシートがすべり面に介在することで、基準面圧の場合に、0.1程度上昇する傾向がみられる。

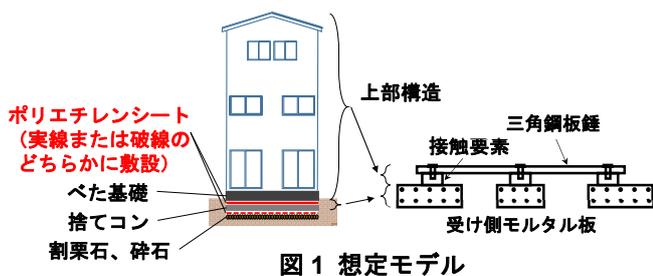


図1 想定モデル

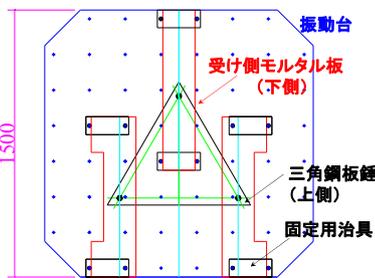


図2 試験体(振動台上鳥瞰)



図3 接触要素

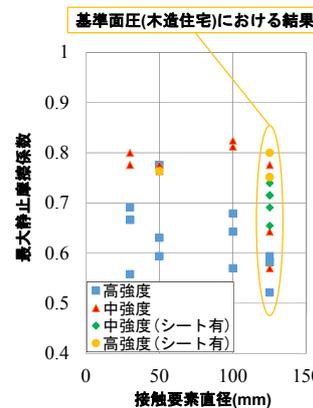


図4 実験結果(モルタル同士)

表1 最大静止摩擦係数の平均値

	中強度	高強度
モルタル同士	0.66	0.57
シートを挟んだ場合	0.70	0.77

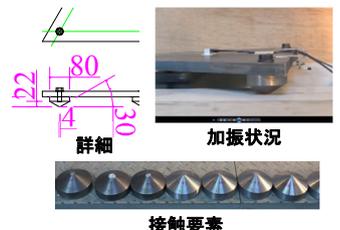


図5 鋼と鋳鉄の実験

E-Defense test on functionality of three-story residential houses including underground pipe lines (Metropolitan resilience PJ)

Part.2 Component tests on friction behavior beneath mat foundation

Seiya UWADAN, Ryota NISHI, Cem YENIDOGAN

Takuya NAGAE, Syohei YAMADA, Hisatoshi KASHIWA, Kazuhiro HAYASHI, Takahito INOUE

4. モルタル同士、鑄鉄(鋼)モルタル間の摩擦性状比較

鑄鉄製、鋼製の接触要素(図5)を用いた、鑄鉄・モルタル間、鋼・モルタル間の摩擦実験結果を含めて、摩擦性状を考察する。べた基礎と捨てコンの間に、鑄鉄板、鋼板を挟む条件を想定している。詳細は文献2)を参照されたい(面圧は5.8-32.9N/mm²)。

鋼・モルタル間に関して、一般的なSS400については、約0.6を考えれば良いようである。鑄鉄・モルタル間のすべり進行時の摩擦係数は安定し、約0.2である。鑄鉄の摩擦係数が小さくなるのは、鑄鉄が炭素含有量3.2%と多く、鑄鉄内に黒鉛として析出しているためである。

モルタル同士において、すべり進行時の摩擦係数が変動する程度は、鋼・モルタル間と同程度である。滑動領域の一部にひっかき痕が確認されたことから、材料としての不均一性が滑りを繰り返す条件下において、局所的な傷として現れたと考えられる。ポリエチレン素材は、摩擦係数を下げる目的で用いられこともあるが、モルタル面の間に介在させた場合、当初の最大静止摩擦係数は下がり、その後、不安定な履歴性状を示した。本実験ではポリエチレンシートが、すべりの繰り返しによって破れ、重なり、押し付けられるなどの現象が認められ、動摩擦係数の不安定さの原因になったと考えられる。

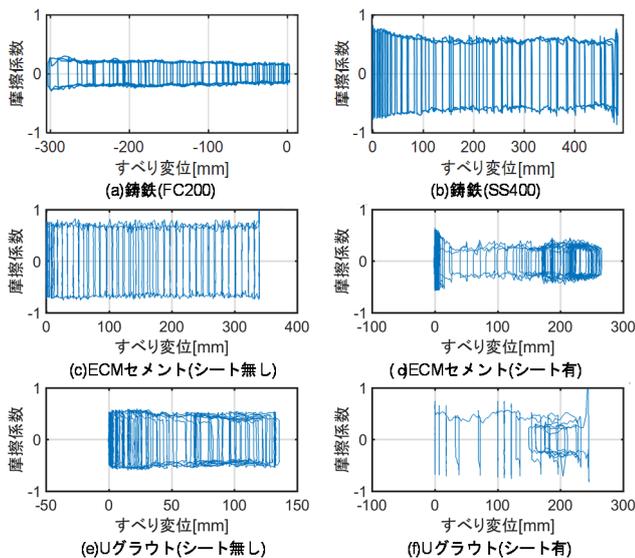


図6 接触要素の材質が異なる場合の摩擦特性(応答履歴)

5. 振動台実験結果と数値解析モデル再現

図6において、摩擦履歴は、剛塑性とみなせる。数値解析モデルでは、剛塑性の代わりに剛性の非常に高い完全弾塑性の履歴を採用した。実験結果より数値解析モデルで用いる摩擦係数は最大値、最小値を記録した実験と等価すべり振幅が等しくなるように0.202, 0.52, 0.66, 0.80と設定した。図7は実験結果と数値解析を比較したものであ

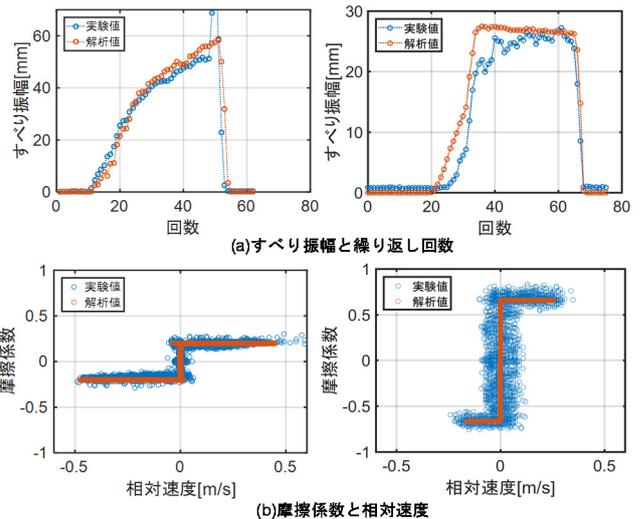


図7 実験値と数値解析(左)鑄鉄(右)ECMセメント

る。設定された最大静止摩擦係数において同等のすべり挙動が生じるモデルが作成された。

6. まとめ

べた基礎を表現するEーディフェンス実験の事前検証のために、摩擦に関する要素実験を実施した。同一条件下で実施した、鑄鉄支承、鋼支承を介在させた場合の摩擦性状も合わせて考察することで、また、数値解析モデルによる検討を加えることで、実験資料を総合的に考察できた。ポリエチレンシートの存在は、当初において、最大静止摩擦係数を若干上昇させ、すべりの繰り返しによる不安定履歴を招くことが分かった。Eーディフェンス実験計画に際して考慮すべき主要項目を下記に示す。

- (1)木造住宅の基礎下の水平移動をモルタル水平面によるモルタル同士のすべり条件で表現すると、最大静止摩擦係数は、0.52~0.80程度となる。
- (2)ポリエチレンシートの介在により、当初の最大静止摩擦係数は、0.70(中強度モルタル)、0.77(高強度モルタル)と大きくなる。
- (3)摩擦性状に剛塑性の特徴がある場合、剛性を非常に高くした完全弾塑性履歴を用いることで、数値解析モデルにおいてすべり振幅を適切に評価できる。

謝辞

本稿含む一連の報告は、平成29年度「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト/サブプロジェクト(c)非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」の一部である。

参考文献

- 1) Amber Dance: Stanford engineers build, test earthquake-resistant house, Stanford Report, October 16, 2014
- 2) 西峻汰, 長江拓也, 榎田竜太, 福和伸夫, 平井敬: 鑄鉄柱脚および鋼柱脚のすべり摩擦性状に関する振動台実験, 日本建築学会大会梗概集, pp. 557, 2017.9

*1 名古屋大学大学院環境学研究所・大学院生
 *2 名古屋大学大学院環境学研究所・大学院生
 *3 名古屋大学防災連携研究センター・准教授・博士(工学)
 *4 日建設計・修士(工学)
 *5 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官・博士(工学)
 *6 豊橋技術科学大学 助教・博士(工学)
 *7 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター副センター長・工博

*1 Grad. Student, Environmental Studies, Nagoya Univ.
 *2 Grad. Student, Environmental Studies, Nagoya Univ.
 *3 Associate Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.
 *4 NIKKEN, M. Eng.
 *5 NILIM, Dr. Eng.
 *6 Assistant Prof., Toyohashi UT, Dr. Eng.
 *7 Deputy Director, HEERC NIED, Dr. Eng.

地盤配管設備等の非構造部材を含む 3 階建て住宅の機能を検証する E-ディフェンス実験

(首都圏レジリエンスプロジェクト)

その 3. 数値解析に基づくべた基礎挙動予測

正会員 ○西 峻汰*1 同 上段 聖也*2 同 長江 拓也*3 同 山田 祥平*4
 同 柏 尚稔*5 同 林 和宏*6 同 井上 貴仁*7

ASEBI, 動的漸増解析, 基礎すべり

1. ASEBI 公開の 3 層木造住宅データと解析

本プロジェクトのサブプロ(c)-研究項目 1 では, 3 層木造住宅を対象とした。ここでは, 2009 年に実施の 3 階建て木造実験 (図 1) を参照し, 骨組変形と基礎変位におよぼす影響を数値解析により考察する。骨組のモデル化には, ASEBI(http://www.bosai.go.jp/hyogo/asebi/dataopen_1.html) において公開される実験データを使用した。基礎の変位については, 水平方向の滑動のみを対象とし, ロッキングについては, 無視する条件である。



図 1 3 階建て木造住宅実験 (2009)

2. 評価対象骨組の実験データ分析

3 階建て木造軸組構法住宅試験体の立面図を図 1 に示す。実験では, この面に向かって直交方向の一軸加振が採用された。各試験体の概要と共通の仕様を表 1 と表 2 に示す。本検討で対象としたのは, 耐震等級 2 の構造規定を満足する試験体 1, および耐震等級 1 の構造規定を満足する試験体 4 である。入力波概要を図 2 に示す。限界耐力計算における第二種地盤の加速度応答スペクトルに適合する継続時間 20 秒の人工地震波を基準とし, これに倍率を乗じたものとしている。報告書等¹⁾によれば, 試験体 1 は, 基準相当の 90%加振の入力波で十分な安全性を示したが, 加振 160%時に耐力壁が破壊して崩壊した。試験体 4 は 112.5%加振に対しては, 層間変形角の最大値が 1/46 rad であり, 崩壊を生じなかった。150%加振に対しては 1/8 rad という大きな値を示した。ビデオ観察では, 1 次モード応答が骨組損傷に伴う変形増大に寄与していた。ここでは, 2 棟に対する各加振の加速度と変位のデータに基づき, 1 次モード応答を抜き出して評価した (図 3)。1 次モード形状では, 損傷の集中によって, 1 層変形が突出していく傾向が示されている。1 自由度縮約後の代表加速度 ${}_1Sa$ と代表変形角 ${}_1Sd/{}_1H$ (${}_1Sd$: 代表変位, ${}_1H$: 等価高さ) の関係

では, 試験体 1 と試験体 4 のいずれも終局強度時変形角が約 0.02 rad で, その後に強度低下 (負勾配) を伴う。図 4 には, 履歴形状から求めた各サイクルの等価減衰定数を変形角に対してプロットしている。5%加振の小さな応答

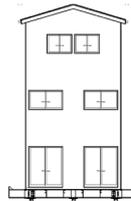


図 1 試験体立面図

表 1 試験体の共通仕様

項目	仕様	
構造、階数	木造軸組構法 3階建て	
質量 (Kg)	1階	10509.7
	2階	10632.0
	3階	6238.5
	総質量	27380.2
高さ	8.4m (1階あたりの階高2.8m)	
床面積	10.1m×4.55m (1階あたり)	

表 2 試験体概要

試験体	特徴	耐力壁量
試験体 1	建築基準法による最低基準の1.25倍以上の耐震性能を有する。	耐震等級2
試験体 4	耐震性能に関して建築基準法による最低基準に適合するもの。	耐震等級1

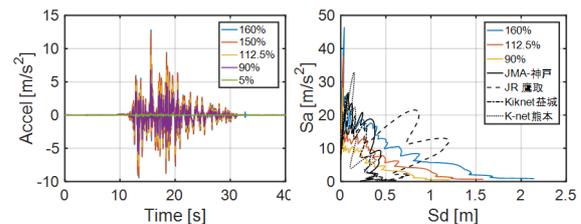


図 2 入力波(左:時刻歴,右:Sa-Sd曲線)

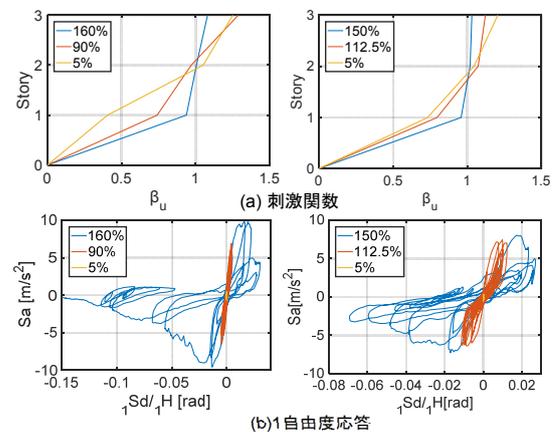


図 3 実験の 1 次モード応答評価 (左: 試験体 1, 右: 試験体 4)

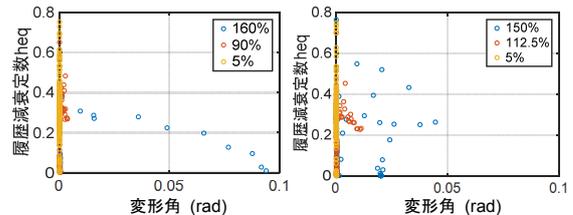


図 4 等価減衰定数 (左: 試験体 1, 右: 試験体 4)

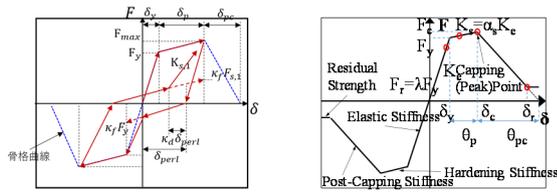


図5 Ibarra-Medina-Krawinkler modelの定義

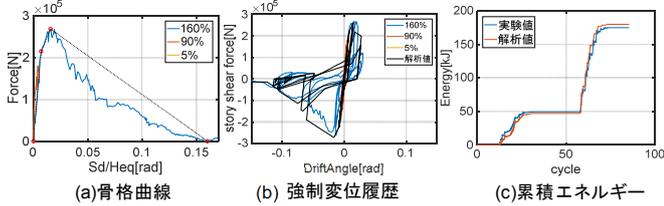


図6 実験と解析比較

履歴では、十分な精度で評価することは難しい。0.005 rad から 0.02 rad (負勾配前) の領域を見ると、試験体 1 は約 0.3 に集まっている。試験体 4 は、約 0.3 を中心にしてばらつきが見られるが、繰り返し変形下でのピンチングと強度劣化の影響が出たものである。

3. 骨組の数値解析モデル

繰り返し変形の影響、ピンチングや強度劣化を適切に表現する解析モデルとして、IMK Pinching Model²⁾ を OpenSees より選択した (図 5)。各パラメータの決定では、骨格曲線においては、各加振の負勾配を直線で評価し、実験の変位履歴を与えた静的繰り返し解析において、総累積エネルギーが最も近くなる値を採用した (図 6)。こうしたキャリブレーションにより、実験結果を良好に再現できた (図 7)

4. 骨組・基礎モデルの解析評価

本検討では、直下地震の記録波を統計的、連続的に評価する漸増地震応答解析(IDA)^{2),3)}を用いる。解析概要を図 8 に示す。解析には、上記、1 自由度の骨組モデルに対し、基礎下の摩擦係数-すべり関係に剛塑性モデルを用いた 2 質系せん断バネモデルとする (基礎の質量を上部骨組の 1/3)。「その 2」の実験結果に基づき、各種条件の摩擦係数を設定した。減衰定数は 5% (瞬間剛性比例) とした。FEMAP695 地震動 44 波⁴⁾ (PGA=0.5g を Amp.ratio=1) を用いた。解析結果を図 9 (試験体 1) および図 10 (試験体 4) のに示す。いずれも $\mu=0.8$ では、基礎すべり変位は小さく基礎固定条件とほぼ同じ解析結果である。赤色の中央値曲線に注目すると、試験体 1 では、 $\mu=0.66$ において頭打ちが見られ Amp.ratio=2 のとき 0.017 rad に、 $\mu=0.52$, $\mu=0.20$ では 0.010 rad, 0.005 rad となった。試験体 4 では $\mu=0.52$ において頭打ちが見られ 0.012 rad となった。基礎すべり変位の中央値曲線は線形に近く、試験体 1 の Amp.ratio=2 における値は、 $\mu=0.52$ で 0.10 m, $\mu=0.20$ で 0.25 m となった。

*1 名古屋大学大学院環境学研究所・大学院生
 *2 名古屋大学大学院環境学研究所・大学院生
 *3 名古屋大学減災連携研究センター・准教授・博士 (工学)
 *4 日建設計・修士 (工学)
 *5 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官・博士 (工学)
 *6 豊橋技術科学大学 助教・博士 (工学)
 *7 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター副センター長・工博

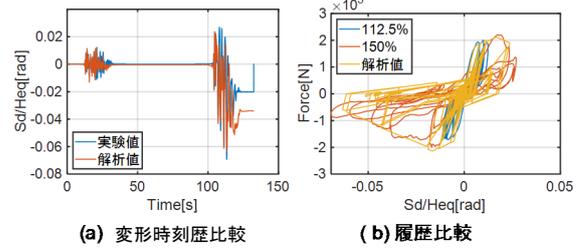


図7 動的解析比較

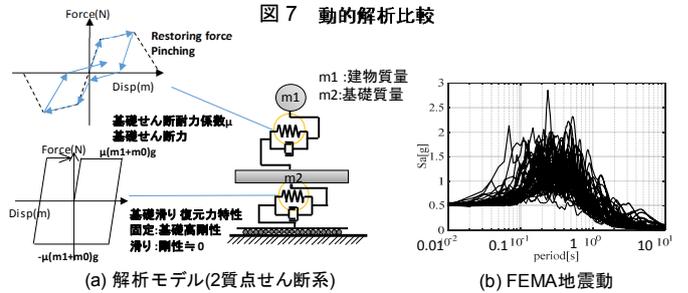


図8 解析モデルと入力地震動群

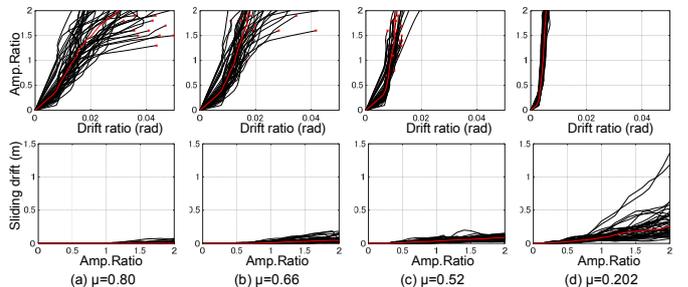


図9 試験体1のIDA (上図: 骨組変形角, 下図: 基礎すべり変位)

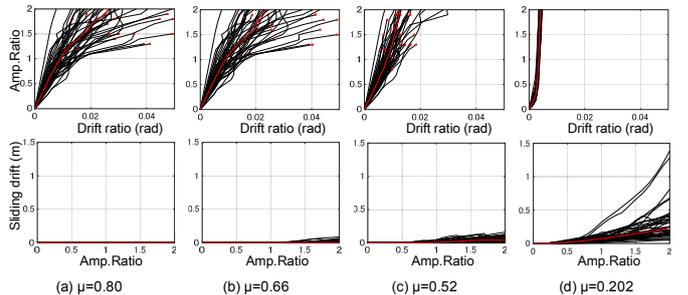


図10 試験体4のIDA (上図: 骨組変形角, 下図: 基礎すべり変位)

5. まとめ

住宅実験に導入する基礎の影響を解析により考察した。

謝辞

本稿含む一連の報告は、平成 29 年度「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト/サブプロジェクト(c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」の一部である。本検討では、貴重な実験データを利用させていただきました。関係された皆様に感謝の意を申し上げます。

参考文献

- ASEBI, 3 階建て木造軸組工法の設計法検証に関する実験, 実験概要と結果および実験報告書
- Ibarra L.F., and Krawinkler, H. (2005). "Global collapse of frame structures under seismic excitations", Rep. No. TB 152, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA.
- Ryuta Enokida and Takuya Nagae: Seismic Damage Reduction of a Structural System based on Nontraditional Sliding Interfaces with Graphite Lubrication, Taylor & Francis Group, LLC, Journal of Earthquake Engineering, Jan 2017
- Quantification of Building Seismic Performance Factors ,FEMA P695

*1 Grad. Student, Environmental Studies, Nagoya Univ.
 *2 Grad. Student, Environmental Studies, Nagoya Univ.
 *3 Associate Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.
 *4 NIKKEN, M. Eng.
 *5 NILIM, Dr. Eng.
 *6 Assistant Prof., Toyohashi UT, Dr. Eng.
 *5 Deputy Director, HEERC NIED, Dr. Eng.

地盤配管設備等の非構造部材を含む 3 階建て住宅の機能を検証する E-ディフェンス実験 (首都圏レジリエンスプロジェクト)

その 4 損傷モニタリング

木造住宅 砂地盤 モニタリング
センサ 損傷検知

正会員 ○林和宏* 同 山田有孝**
同 佐藤栄児***

1. はじめに

本報では、同名報告その 1 で計画する E-ディフェンス実験に導入予定の、木造住宅損傷モニタリングシステムの概要を示す。木造住宅の耐震性能モニタリングに関しては、地震前後の建物固有周期など動特性の変化から損傷検知をめざす手法^{[1],[2]}などが古くから検討されてきた。これに対し、建物に常設の強震計記録から地震時の最大変形量等を算定することで、高精度の損傷度推定を試みる手法^[3]などが提案されている。

本研究では、E-ディフェンス実験に用いる砂地盤-RCベタ基礎-木造住宅の連成系試験体を対象に、近年開発された、LAN ネットワークを利用する安価な地震計、スマートフォン、感震ブレーカー等を用い、加振時の加速度記録に基づく建物損傷モニタリングシステムの構築とその性能検証を行う。

2. 損傷モニタリングシステムの概要

本研究では、図 1 に示す IT 強震計、図 2 示すようなスマートフォン、図 3 に示す感震ブレーカーを E-ディフェンス実験試験体に取り付け、加振時の振動記録から建物の損傷度推定を試みる。表 1 は、実験で使用予定の上記 3 デバイスの概要一覧である。また図 4 に各デバイスのセンサ部取り付け位置を示す。

2.1 IT 強震計

本研究で使用を想定する IT 強震計 (図 1) は、おおよそ 10cm 角の正方形で、ネットワーク LAN ケーブルによって通信と給電 (PoE) の双方を行う。実験では、木造住宅の各階 (4 点) に加えて、土槽地表面と震動台上にも IT 強震計を設置する。この IT 強震計は、ネットワーク内にあるサーバー機と SNTP による時刻同期を行っており、多点の 100Hz サンプリング加速度記録の取得が可能である。

実験では、IT 強震計で得られた加速度履歴の積分から各計測点の変形量を算出し、上下 2 点の変形量を階高で除すことで、加振中の木造住宅の最大層間変形角を同定する。試験体の木造住宅については、予め倒壊解析ソフトウェア “wallrat^[5]” を用いた事前解析を実施し、架構の損傷限界層間変形角と安全限界層間変形角を算定しておく。実験時には、加速度記録に基づく最大層間変形角が上記の閾値を超えるか否かで、建物の損傷度 (安全、要注意、危険の 3 段階) を判定する損傷モニタリングシステムの運用を計画する。

上記の損傷モニタリング手法の概念は、既往研究でも提案されたものである。本研究は、①最終的に崩壊にまで至らしめる木造住宅の振動破壊実験に同手法を適用してその精度を検証すること、②実物住宅と同じく地盤上に建てられた架構の連成系地震応答を修得すること、の 2 点を特徴としており、肝心な木造住宅の地震損傷度推定に必要な最低限のセンサ設置位置や、取得記録の分析方法を実験結果から検討する。

2.2 スマートフォン

近年、急速に普及しているスマートフォンには、MEMS 加速度計、CPU、メモリ、バッテリー、表示ディスプレイ



図 1 IT 強震計 図 2 スマートフォン^[4] 図 3 感震ブレーカー

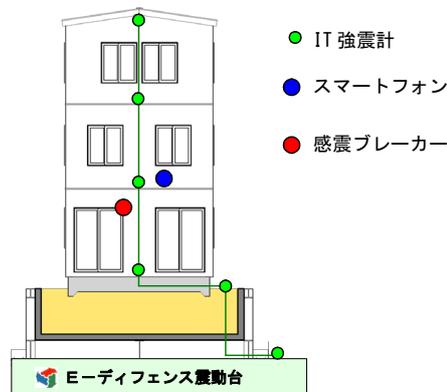


図 4 試験体へのセンサ部取り付け位置概要

表 1 各デバイスのセンサ部情報

	IT 強震計	スマートフォン	感震ブレーカー
大きさ (mm)	95 × 95 × 72	123 × 59 × 6	50 × 107 × 60
加速度センサ	MEMS	MEMS	MEMS
計測軸数	3 軸	6 軸	3 軸
計測レンジ (gal)	±2450	±2000	±2000
ノイズレベル	0.1gal 以下	2gal 程度	10gal 程度

がそろっており、これ一台で完結したモニタリングシステムとなりえる。本研究では、図4に示すように木造住宅の2階床面（付近）にスマートフォン1台を設置し、加振による建物損傷のモニタリングをめざす。

前節にも示すように、加速度記録に基づき層間変形角を評価する場合、対象階の上下へのセンサ配置が最善であるが、これは観測記録間の時刻同期がとれていることが前提となる。スマートフォン等の携帯端末は、NTPによる時刻補正を行っているものの、100Hzサンプリングのデータでは多点記録間の完全同期は期待できない。本研究では、対象階（過去の木造住宅被災状況に鑑み、対象階を1階とした）の上階床面に設置したスマートフォンの加速度記録のみを用いて、等価一質点系の周波数領域における逆応答解析から層間変形角を評価する。

ここでは、加速度波形から同定した固有角振動数 ω_0 、減衰 h をパラメータとして、下式に示す等価1質点モデルの周波数伝達関数を用いて相対変位 $H(\omega)$ を求める。

$$H(\omega) = \frac{-\omega_0^2 + 2h\omega_0\omega}{\omega_0^4 + 4h^2\omega_0^2\omega^2} \quad (1)$$

実験では、上式に基づく最大層間変形角と前節に示した2閾値を比較することで、建物の損傷度（安全、要注意、危険の3段階）を判定し、その結果をスマートフォン画面に表示（図5）する。

2.3 感震ブレーカー

阪神淡路大震災を契機に開発・普及が進んだ感震ブレーカーは、近年、そのセンサ部にMEMS加速度計を用いたモデルが登場している。本研究では、感震ブレーカーをセンシングデバイスと位置付け、住宅の損傷モニタリング機能付与の可能性を検討する。実際の戸建て住宅に準じて、実験では木造住宅の1階天井付近（図4）にMEMS加速度計を内蔵した感震ブレーカーを設置する。

当該感震ブレーカーについては、既に個別の振動台実験（図6）を実施しており、0.5Hz～10Hz程度の領域で高感度加速度計と同程度の評価が得られることを確認している。実験では、ブレーカーをどういった工法で建物躯体のどの部材に取付ける（固定する）のが良いか、損傷がある程度進展する中で正しくモニタリングでき範囲はどの程度かに着目して、データを収集する。

3. まとめ

木造住宅を対象としたE-ディフェンス実験において、IT強震計、スマートフォン、感震ブレーカーをセンシングデバイスとした、建物損傷モニタリングシステムを導入し、特に下記の点に着目してその性能を検証する。



図5 スマートフォンによる被災度判定結果イメージ

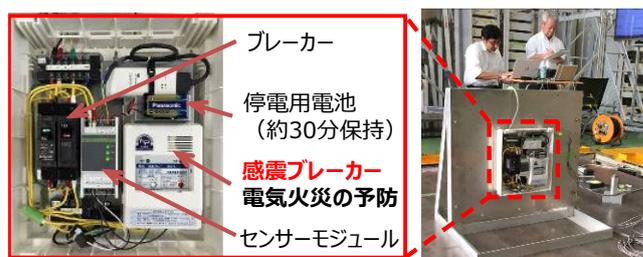


図6 感震ブレーカーの振動台実験

- 1) 地盤付きの連成系地震応答を対象とした場合でも、提案する建物損傷モニタリングが可能かどうか。
- 2) 時刻同期された多点の加速度記録がない場合でも、精度の良い損傷モニタリングは可能かどうか。
- 3) 住宅の損傷がある程度進展する中で、センサデバイスはこういった設置位置や取付方法を選べば、正しくモニタリングできるか。

謝辞

本研究は、平成29年度「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト サブプロ(c)非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」の一部として行われた。また、本報の感震ブレーカーに関する知見は、日東工業（株）開発本部 鈴木宏氏、松尾昌幸氏よりご提供いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 井田祥子・森雄史・新居藍子・林康裕：伝統的木造住宅の振動特性変化に基づく構造ヘルスマニタリング、日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.49-52, 2008.06.
- 2) 中村優香・武綾佳・三田彰：出力誤差の動特性に着目した木造住宅の損傷評価手法に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.693-694, 2009.08.
- 3) 森井雄史・岡田敬一・白石理人・杉本浩一・寺田岳彦・佐藤俊明・飛田潤：地震直後における建物健全性評価のための限られた階の加速度記録に基づく建物全層応答推定評価手法 - 鉄骨構造 18層試験体の振動台実験結果に基づく検討 -, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.730, pp.2045-2055, 2016.12.
- 4) <https://support.apple.com/ja-jp/iphone>
- 5) <http://www.nilim.go.jp/lab/idg/nakagawa/wallstat.html>

*豊橋技術科学大学大学院

**白山工業株式会社

***防災科学技術研究所

*Toyohashi University of Technology

**Hakusan Corporation

***National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience