

# E-ディフェンス実験にみる都市建物の地震被害例

長江 拓也

●独立行政法人防災科学技術研究所 減災実験研究領域兵庫耐震工学研究センター

## 1. はじめに

1970年代以前に建てられた耐震性能の劣る建物に対して耐震改修を促進することが、来たる大地震における建物被害を軽減するために必要不可欠である。一方で、複数の大都市が同時に被災するというシナリオも視野に、以前にも増して都市の回復力が重要視されている。本稿ではこの視点を踏まえ、多岐にわたるE-ディフェンス実験の中から「長周期地震動と超高層建物」および「直下型地震と近年の鉄筋コンクリート造建物」にテーマを絞って地震応答性状と構造骨組の損傷状態を紹介し、その被害を軽減する方法に関する検証もしくは考察を述べる。そして、E-ディフェンスにおける取り組みを今後の展開も見据えて述べる。

## 2. 長周期地震動と超高層建物

### 2.1 現在の知見と想定から問題点を指摘する実験

2007年度に行われた超高層鋼構造建物の骨組の耐震性能を検証した実験内容を図1に示す。超高層建物の鋼構造骨組を部分的に製作し、錘とバネから構成される上部装置を設置することで、部分骨組に超高層建物の揺れが加わる実験システムを採用した<sup>1)</sup>。設計にお

いては高さ80mの超高層建物を想定した。柱と梁の接合詳細には、1970年代の設計資料に見られる特徴をできるだけ再現した。実験では、3秒付近の周期帯に大きな威力をもつことで注目されていた名古屋三の丸地区における予測地震動（東海・東南海地震を想定）を主に入力した。その加振において、実験システムは2秒を超える周期で3分以上揺れ続けた。骨組は何度も繰り返しゆがみ、梁の端部に塑性ひずみが累積した。実験は骨組が終局状態に達したと判断されるまで続けられ、最終的に全体の約1/5の梁端が破断した（図1(b)）。

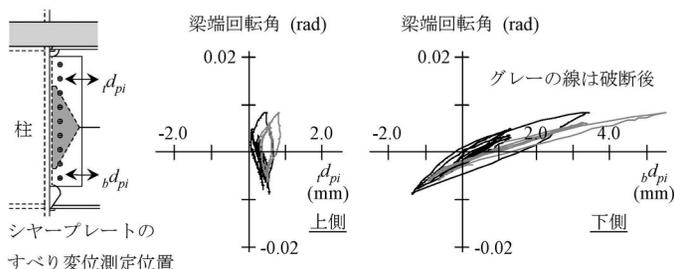
その中でもウェブをボルト接合した現場溶接接合形式の梁の端部には早期に破断が生じた。図1(c)にウェブボルト接合部の変形性状を示す。床スラブの存在によってシヤープレートの下側に大きなすべりが生じている。ウェブの応力伝達が小さく、梁下フランジの負担が増大し破断に至った。ここで対象とした梁端接合部は、現在の日本建築学会指針（鋼構造接合部設計指針）の規定値（接合部強度比1.35以上）を下回っている。すなわち、いま設計すればこのような接合詳細にならないが、そのような知見を有していない時代に設計、建設された既存の超高層建物にはこのような接合



(a) 超高層鋼構造建物の骨組を部分的に再現



(b) 加振状況と破断した梁端の加振後の様子



(c) 問題となる変形特性とフランジ破断が表現された計測

図1 長周期地震動を受ける超高層鋼構造建物の骨組の耐震性能

部が存在している。さらに外力としても近年想定されるようになった長周期地震動が相手となる問題である。あらたな知見と想定を踏まえた再評価が必要であることを指摘した実験と言える。

一方、ビデオ観察によると明らかに梁下フランジが分離し耐震性能を喪失した梁端でも、図1 (b)のように、揺れが終わると破断面が塞がるため、その発見は困難となる。地震を受けた後に建物の損傷度、安全性を確認する作業は多くの問題と絡み合ってくる。筆者も参加する日本建築学会の長周期建物地震対応小委員会においては、こうした問題を慎重に検討している。例えば、都市全体が大地震に襲われた後に、余震に対する安全性も踏まえ、超高層建物内に存在する膨大な数の人を外に出すのか留まらせるのかという判断は容易でない。そこまでの被害が生じなくても、補修の必要性など事業継続に関わる問題について判断するためには骨組の損傷評価が必要となる。こうした背景のもと、本実験では、地震時の床応答記録、地震後の振動特性における有意な変化を特定するモニタリング技術について検証を行い、その有効性を確認した<sup>2,3)</sup>。図1 (c)のような比較的ミクロな計測によって損傷状態をより具体的に評価する手法の開発にも取り組んだ<sup>4)</sup>。今後は各建物の事前解析による評価も併せ、こうした技術を効果的に適用していくことが期待されている。

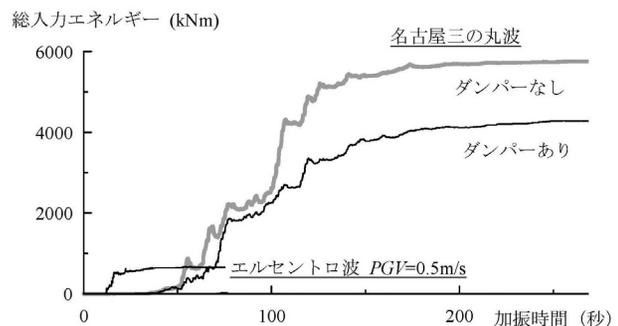
## 2.2 対策の効果を実証する実験

第二弾として2009年度に行われた実験<sup>5)</sup>の内容を図2に示す。2007年度と同様の実験システムの骨組内にダンパーを設置し (図2 (a))、一連の加振を通して損傷抑制効果を検証した。ここでは、事前検討<sup>6)</sup>において現実的と判断された骨組強度の20%程度を負担できるダンパー量が採用された。図2 (b)は縦軸に加振時間に対する総入力エネルギーをとっている。名古屋三の丸波を受ける場合には長時間にわたって入力エネルギーが増大し続け、エルセントロ波の場合に比べ7~10倍の量に達した。ダンパーを設置した場合には骨組内においてダンパーが早い段階から降伏し紡錘形の履歴を描き (図2 (c))、骨組に対してそのエネルギー消費が約70%を占めた。結果、梁の端部で消費していたエネルギー (累積塑性ひずみ) が大幅に減少し (図2 (d))、骨組をほぼ無損傷の状態に留めることができた。

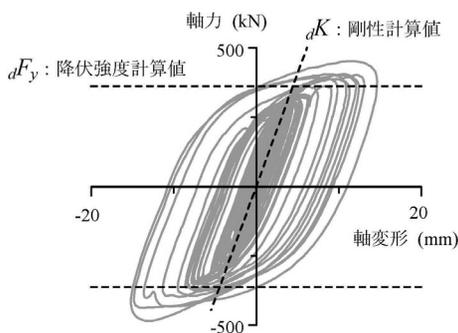
本実験では名古屋三の丸波入力時に、鋼製ダンパーの設置による短周期化が原因で入力エネルギー自体も減少した。一方、元の周期が3秒を超える場合にはその短周期化によって逆に入力エネルギーが増大する<sup>6)</sup>。これは、盆地の深さと密接に関わる長周期地震動の周期特性に起因するもので、超高層建物の耐震性は各都市で予測される長周期地震動の周期特性に応じて評価されることとなる。



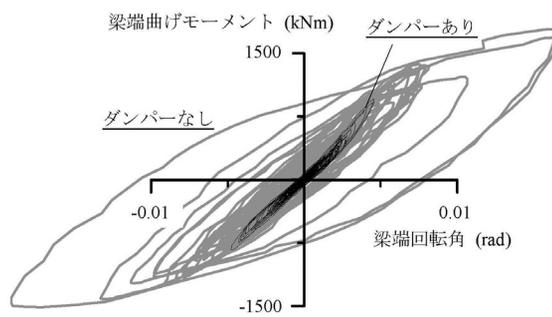
(a) ダンパーの取り付け状況



(b) 総エネルギー入力の比較



(c) ダンパーの応答履歴(名古屋三の丸波)



(d) 梁端部の応答履歴(名古屋三の丸波)

図2 長周期地震動を受ける超高層鋼構造建物に対するダンパー補強

### 3. 直下型地震と鉄筋コンクリート造建物

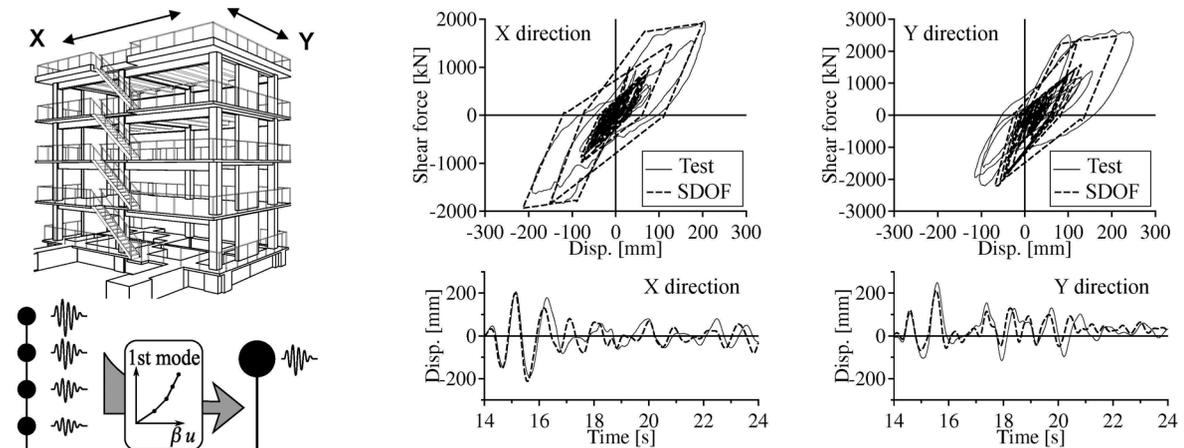
#### 3.1 新耐震設計法に基づく建物の評価と損傷

1995年の兵庫県南部地震においては、鉄筋コンクリート(RC)造建物の倒壊や大破が、新耐震設計法が導入される1981年以前に建てられた建物に多く認められた。一方、新耐震設計法に移行してから30年以上が経ち、今後はこの種の建物が都市のストックの大部分を占めるようになる。ここでは新耐震設計法により設計された4階建てRC造建物の実験<sup>7)</sup>について述べる。その内容を図3に示す。X方向が純フレーム構造、Y方向が連層耐震壁フレーム構造であり、柱、梁および壁は新耐震設計法で最も変形能力が高いと評価されるAランクに分類され、その評価に従って建物の保有水平耐力(各部材が曲げ降伏して達するメカニズム時強度)が設定された。具体的には建物重量に対する1階の水平耐力の比(ベースシヤール係数)を0.3-0.4に設定した。各部材が変形能力に期待できるので大地震については粘りで耐える方針に基づく設計になる。

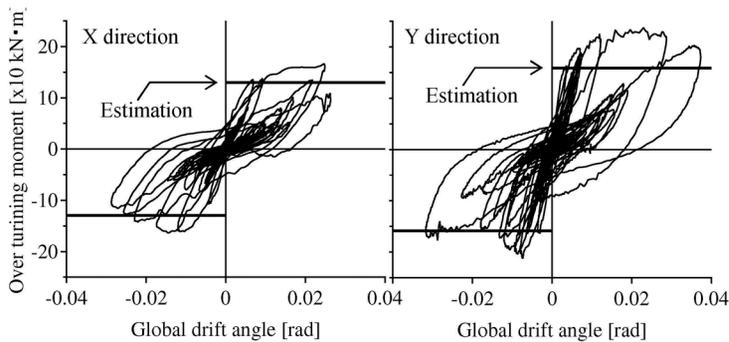
実験では、兵庫県南部地震において観測された地震動(JMA-Kobe波)を100%で入力した場合にX方向、Y

方向のいずれも最大層間変形角が0.03 radを上回った。まず、そのときの1次モード成分を抜き出して1自由度(SDOF)解析による再現性を考察する(図3(a))。骨格曲線は実験で得られた力と変位の関係にフィッティングした。履歴則のルールにはTakeda Modelを採用した。X方向、Y方向ともに変位の時刻歴波形がよく一致していることが分かる。次に、その後の加振も含めて、高次モードの影響が小さい転倒モーメントと全体変形角の関係を取り、設計で一般的に用いられる強度式から計算した保有水平耐力と比較する(図3(b)、ここで強度式には要素試験によって得られた材料強度を反映している)。計算値に対する実験値の比は、X方向で1.2、Y方向で1.5であった。以上から新耐震設計法に基づくRC造建物について、適切な解析用モデルにより時刻歴数値解析が地震応答を大変形領域まで合理的に評価できるということ、および一般的な強度式において評価される保有水平耐力が実際の耐力に対して上記程度のマージンを安全側に有していることが確認された。

一方、骨組が地震時に粘りを発揮するとその変形に見合った損傷を被ることになり、実験では図3(c)に示



(a) 数値解析による地震応答の再現



(b) 一般強度式に基づく保有水平耐力評価



(c) 純フレーム構造で問題となる柱梁接合部の破壊モード

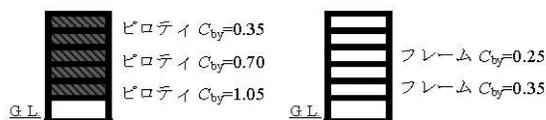
図3 新耐震設計法に基づくRC造純フレーム構造と連層耐震壁フレーム構造に対する実験

すように、補修の難しい柱梁接合部に重度の損傷が集中する結果となった。

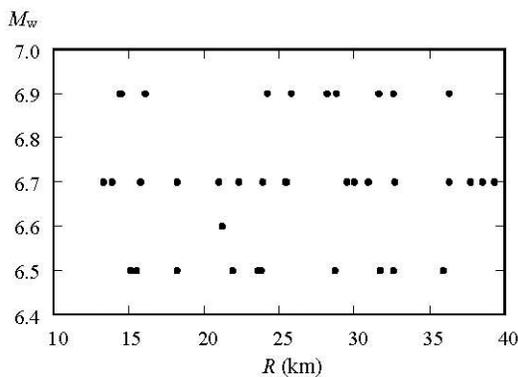
### 3.2 都市に求められる建物と耐震性能

現在の設計では、評価の信頼性の観点から容易にメカニズムを設定できるように、腰壁、袖壁等を柱と梁から分離する構造スリットを設けることが多い。

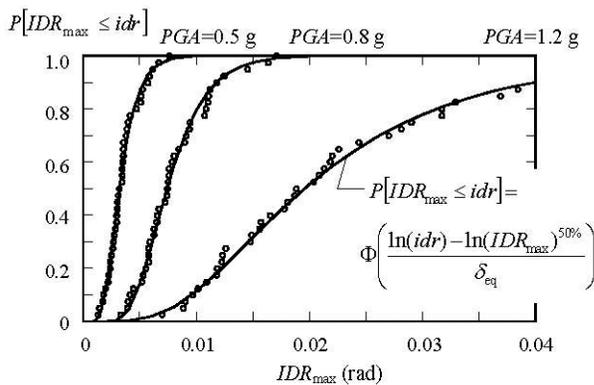
1階が駐車場等のオープンスペースになるピロティ構造は特に都市のマンションにおいて需要が高いが、兵庫県南部地震での1階層崩壊が問題視され、上層部の壁を構造スリットで切り離す措置がとられてきた。しかしこの場合、実験のように大きな変形が骨組全体に生じ大規模な補修が必要になるという問題が危惧される。ここでは、内陸地震を想定し地震ハザードに基づく確率評価<sup>8),9)</sup>を通してこの問題を考察してみる。ピロティ構造とその壁の無いフレーム構造のモデル建物を用意し(図4(a))、それぞれの構造形式に現実的なメカニズム強度時ベースシヤール係数 $C_{by}$ を設定した。



(a) モデル建物とメカニズム時ベースシヤール係数



(b) モーメントマグニチュードと震源距離

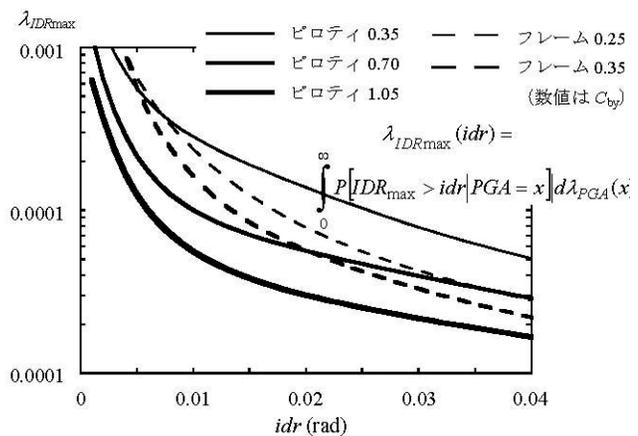


(c) 解析結果の累積分布 (ピロティ  $C_{by}=1.05$ )

履歴則はTakeda Modelとした。図4(b)に入力地震動を示す。サイトの地盤は15<N値<50で、モーメントマグニチュード $M_w$ が6.5~6.9、サイト震源間距離 $R$ が13~40 kmという条件の40個の地震動を採用した。

解析では40個地震動を最大加速度PGAで基準化し0.1 g刻みで漸増させて、各PGAに対する解析値を統計処理した。図4(c)には代表的な解析結果について最大層間変形角 $IDR_{max}$ をプロットし、対数正規分布でフィッティングしている。PGAに対する分布は対数標準偏差にして0.4~0.6というばらつきを持つ。この値も評価に組み込みPGAのハザードカーブ(日本建築学会荷重指針)から解析結果を展開すると図4(d)に示す最大層間変形角に対する年間超過度数 $\lambda_{IDR_{max}}$ のハザードカーブが求まる。 $\lambda_{IDR_{max}}$ を再現期間にして述べれば、設計限界として広く用いられる最大層間変形角0.01 radに対する再現期間は、ピロティ構造で $C_{by}=1.05$ の場合1785年、フレーム構造で $C_{by}=0.35$ の場合618年である。つまり、ピロティ構造は適切な強度があれば修復性に有利になりうる事が示されている。さらに柱の変形性能評価を反映すると、このとき1階の柱の限界変形角が0.03 rad以上であれば、ピロティ構造の終局限界状態に対する50年超過確率は0.9%と算定される。その目標性能に対する1階の柱の耐震設計は高強度せん断補強筋の適用などによって十分可能である。

今後は修復性等の観点からも有利な構造形式の開発が都市の回復力を高めるために求められる。例として2006年度には、壁付きRC造建物の高い剛性と強度を活用することで基礎すべりに伴う入力低減が期待できる構造形式の高耐震性能が実証された<sup>10)</sup>。実績となるデータを取得し耐震工学研究の新たな展開を切り開くことはE-ディフェンスがめざす方向性の一つである。



(d) 最大層間変形角のハザード(年間超過度数)カーブ

図4 都市において需要の高いピロティ構造の耐震性能に関する考察

#### 4. 地震被害軽減へのアプローチ

E-ディフェンスにおける実験映像はホームページ上で公開されており(図5)、それらが地震防災活動の場でも利用されている。1970年代に建てられ耐震補強の対象となる建物に関する実験<sup>10)</sup>では、破壊状況と補強効果を対比する実験が実施された。RC造のみでなく鉄骨造においても、特に破壊メカニズムについて映像は高い説明力と説得力を発揮する<sup>11)</sup>。そのような背景のもと、地震被害の軽減対策の普及に直接的に展開されることを意図した一連の実験が建物内の安全性および機能保持をテーマにして実施された。

兵庫県南部地震を経験した兵庫県(災害対策課)と協働した2006年度の超高層建物の室内被害に関する実験<sup>12)</sup>では、実験システムの構築、内部空間の忠実な再現に基づき家具什器の転倒、飛散およびガラス窓の損壊等による被害様相を現出させ、こうした被害の映像を実記録として公開した。一連の研究成果は、都府県研究会(東京都、大阪府、兵庫県、新潟県、静岡県、愛知県、徳島県)等の活動によって、自治体講習用の防災資料として編集が進められた(図6)。



図5 ホームページ上で公開されている動画

4階建てRC造病院を対象とした実験では、建物の高さ方向に対する建築計画の傾向を反映して各階にX線撮影室、手術室、病室等が設定され、関連する設備機器類とともに室内状況が再現された<sup>13)</sup>。耐震構造および免震構造に対して、名古屋三の丸波とJMA-Kobe波を用いた加振が実施され、医療関係者等が考えていなかった地震被害の様相を浮き彫りにした。成果は、医療施設の地震対策の必要性和対策方法に関する「啓発ビデオ、大地震への備え - 機能保持をめざして -」および「病院スタッフのための地震対策ハンドブック(図7)」等として取り纏められ、ホームページやYouTube防災科研チャンネルを通して広く公開されている。

2011年度における超高層建物の内部空間、天井設備等の機能に着目した実験<sup>14)</sup>では、東京大学地震研究所が運用する首都圏地震観測網(MeSO-net)において東北地方太平洋沖地震に際して観測された記録を、東京湾北部地震時の首都圏での想定震度6弱~6強に調整して入力波とした。地震学分野における最新の知見と連携することで、想定地震に対する被害様相をより具体的に捉え、これを起点として対策の普及、被害の予防につなげる取り組みは今後のE-ディフェンス実験のあり方を強く示唆するもので、今後は多岐の内容に対してこのような連携に基づく実験が期待されている。



図6 都府県共同研究会



図7 病院スタッフのための地震対策ハンドブック

## 5. まとめ

1970年代以前に建てられた耐震性能の劣る建物に対して耐震改修を促進することが、地震による建物被害を軽減するために必要不可欠である。一方で、新耐震設計法による建物群や、超高層建物群についても、大規模な補修を必要とする損傷を被ることが危惧される。建築の問題についていえば、E-ディフェンスでは今後、修復性や機能保持に着目した工学研究がより活発に推し進められると考えている。家具、機器類、天井等の内部空間被害のように対策の徹底、普及が、被害の軽減により深く関わる課題に関しては、実験ごとに社会に還元する道筋をつけた体制が敷かれる。建物の用途を絞りアウトリーチを見定めた病院実験に習うプロジェクト計画も今後増えていくと考えている。

## 参考文献

- 1) 長江拓也、鍾育霖、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、pp.1163、No.640、2009.6
- 2) 飛田潤、福和伸夫、平田悠貴、長江拓也：普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷のモニタリング実大震動台実験における高層建物試験体の震動特性評価、構造工学論文集、Vol.56B、pp.229-236、2010.3
- 3) 尾野勝、金澤健司、飯野夏輝、佐藤大樹、北村春幸、長江拓也：実大震動台実験における高層鉄骨造建物の地震損傷検知、日本建築学会構造系論文集、pp.775、No.662、2011.4
- 4) 仁田佳宏、西谷章、星野祐美、長江拓也、中島正愛：マイコンセンサー端末による柱梁溶接部のE-Defenseにおけるモニタリング実証実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.161、2010.7
- 5) 佐藤大樹、長江拓也、大内隼人、島田侑、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、齊藤大樹、福和伸夫：長周期地震動を受ける超高層建物の鋼製ダンパーによる制振改修に関するE-ディフェンス振動台実験、日本建築学会構造系論文集、pp.1639、No.667、2011.9
- 6) 島田侑、佐藤大樹、長江拓也、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、齊藤大樹、福和伸夫、日高桃子：超高層建物の下層階に部分配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討－長周期地震動を想定した耐震改修－、日本建築学会構造系

論文集、pp.549、No.649、2010.3

- 7) 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、No.669、pp.1961、2011.11
- 8) C. Allin Cornell and Helmut Krawinkler: Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment, PEER Newsletter Vol. 3, No. 2, Spring 2000
- 9) 長江拓也、中島正愛、吹田啓一郎：層降伏する鉄筋コンクリート造ピロティ建物の耐震性能－確率論的評価を通して－、日本建築学会構造系論文集、pp.123、No.610、2006.12
- 10) 壁谷澤寿一、壁谷澤寿海、松森泰造、壁谷澤寿成、金裕錫：実大3層鉄筋コンクリート建物の振動実験、日本建築学会構造系論文集、No.632、pp.1833、2008.10
- 11) 福本早苗、長江拓也：構造実験授業におけるE-ディフェンス実験映像と人力加力実験の効果、日本建築学会技術報告集、No.33、pp.795、2010.6
- 12) 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、pp.1007、No.628、2008.6
- 13) 佐藤栄児、酒井久伸、福山國夫、古川幸、鎌田崇義、寛淳夫、小林健一、井上貴仁、中島正愛：医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験－震災時における都市施設の安全性・機能性評価－、日本建築学会構造系論文集、pp.771、No.650、2010.4
- 14) 吉澤睦博、長江拓也、福山國夫、井上貴仁、梶原浩一、齊藤大樹、福和伸夫、北村春幸、中島正愛：E-ディフェンスによるオフィス建物の地震時機能損失に関する実験的研究、日本建築学会(シンポジウム)東日本大震災からの教訓、これからの新しい国づくり、2012.3



## 長江 拓也

独立行政法人防災科学技術研究所  
減災実験研究領域兵庫耐震工学研究  
センター 主任研究員。博士(工学)。  
文部科学省首都直下プロジェクトに  
おける超高層建物実験、防災科学技  
術研究所 米国NEES共同研究にお  
ける高耐震コンクリート系建物実験に  
従事。2012年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。