

3.2.2 高層建物実大架構実験試験体の設計と予備解析

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

高層建物は、基準化地震動に対する地震応答解析に基づき躯体の剛性・強度等が照査されており、一定レベルの構造性能を有すると考えられるが、現在までに海溝型の巨大地震に伴う長周期地震動を経験したことはなく、被害を具体的に評価しうる資料はない。長い継続時間において躯体に大きな塑性変形が多数回加われば、柱梁接合部等に破断のような重大な損傷が生じる可能性があり、建物としての安全性の低下が危惧される。

このような背景の基、高層建物の損傷に至るまでの応答問題を明らかにするため、実大規模震動台実験を計画する。

(b) 平成 19 年度業務目的

E-ディフェンス震動台は $20 \times 15\text{m}$ の平面をもち、最大積載荷重 1200t である。実験棟内クレーン有効高さ等の関係から試験体高さは 22m 程度が上限となる。すなわち、既存高層建物のうち件数が多い高さ約 80m を想定すれば、その $1/4$ 程度が試験体に許される高さである。

高層建物を想定する試験体を考えたとき、仮に、 80m の高層建物を単純に $1/4$ に縮小して高さを制限内の 20m にするならば、その縮小率にしたがって変化する物理量の相似比を考えて、付加質量で応力度を調整し、さらに時間軸の圧縮によって地震動と固有周期の関係をそろえることになる。この場合、固有周期は $1/2$ 倍となり、地震動の時間軸を $1/2$ 倍に圧縮するため、床応答変位、床応答速度はそれぞれ、 $1/4$ 、 $1/2$ となる。損傷評価をめざすモニタリング技術の開発において、こうした実状と大きく異なる床応答実験結果に基づく検証は合理的でない。また、地震応答時における部材の応力レベルは実物のものとそろえたとしても、構造躯体の破壊現象に寄与する梁端接合ディテール（溶接手法、スカラップ形状、ボルトを用いる混用接合など）の再現は困難である。内壁や設備配管等においても、個々の構法に使用される細部の部品やクリアランスの組み合わせを再現することはできない。

本実験では、高層建物を単純に縮小するのではなく、高層建物を部分的に切り出し、この架構に長周期地震動を受ける高層建物と同等の地震応答を与える実験システムを構築することで、上記の問題に回答を与える試験体を設計する。

実施面においては、大規模な実験システムを震動台上で構築するための各詳細、作製手順、工事計画までを立案し、試験体設計に組み込むことで、実験の実現を可能にする。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター	研究員	長江 拓也
	客員研究員	福山 國夫
	主任研究員	梶原 浩一

東京理科大学	教授	北村 春幸
名古屋大学	教授	福和 伸夫
建築研究所	上席研究員	斉藤 大樹
京都大学	准教授	日高 桃子

(2) 平成 19 年度の成果

(a) 業務の要約

試験体の対象として、高層建物の平均的な規模として地上 21 階、高さ 80m の建物を想定した。高層建物下層部の構造躯体を表現する架構の上に、免震用積層ゴムと大重量コンクリートスラブを配して高層建物の長い固有周期と大きな下層階層せん断力を再現できる実験システムを設計した。試験体基礎に入力される長周期地震動に対して、高層建物と同等の床応答、変形を生じるように、架構部分と積層ゴム・コンクリートスラブ構造の剛性バランス、降伏強度バランスを設定した。予備解析において、静的なプッシュオーバー解析を行い、塑性化に伴って変化する強度バランスを考察した。

さらに、試験体の製作、震動台上への移動、震動台上での組立、解体、屋外への搬出までの総合的な工事計画を立案し、E ディフェンス実験の完遂を支えた。

(b) 業務の成果

1) 実験システム（縮約モデル）の基本コンセプト

E-ディフェンス震動台は 20×15m の平面を持ち、最大積載荷重 1200t である。実験棟内クレーン高さ等の関係から試験体高さは 22m 程度が上限となる。

本実験では以下に関する知見の取得を目的とする。

- ア) 長周期地震動を受ける高層建物の応答性状
- イ) 1980 年以前の初期に用いられた構造躯体の耐震性
- ウ) 強震観測から損傷評価するモニタリング技術
- エ) 非構造部材の損傷と修復性

これらを踏まえ、構造躯体の破壊現象に寄与する梁端接合ディテールの再現、内壁や設備配管等の再現を意図する実験システムを構築する。高さ約 80m、21 階建て建物を想定し、E-ディフェンスにおける制約条件に従って試験体を設計する。

図 1 に試験体概要を示す。鋼構造架構は高層建物下層階を模擬し、そのうえに大重量コンクリート錘と積層ゴムを中高層階の縮約として配することで長周期化をはかる。試験体基礎に入力される長周期地震動に対して、高層建物と同等の床応答、変形を生じるシステムの基本コンセプトを以下に示す。

[基本 21 層モデル]

21 質点のせん断ばねモデルを考えて、降伏時ベースシヤ係数、剛性分布、強度分布等の再現から想定建物と同等の応答特性を与える。各値には統計資料¹⁾、²⁾を参照し平均的な値を採用する。

- ）全体の重量が 1200t を下回るように試験体の重量を与え、等質量の 21 質点モデルを設定する。

-) 1次固有周期 $T1$ は建物高さ h との関係 $0.03 \cdot h$ から 2.4 秒となるように各層せん断ばねの剛性を与える。高さ方向の剛性分布は A_i 分布をもとづく。
-) 標準せん断力係数 $C0$ は 0.3 で、設計用ベースシヤ係数 Cb は $T1$ に反比例する。せん断ばねはトリリニア骨格曲線を持つ。その形状を定義する際の第一折れ点 $Cby1$ および第二折れ点 $Cby2$ は、それぞれ $1.4 \cdot Cb$ および $2.0 \cdot Cb$ である。 $T1=2.4$ 秒とすれば $Cb=0.12$ 、 $Cby1=0.17$ 、 $Cby2=0.24$ となる。
-) 高さ方向の強度分布は A_i 分布をもとに与えられる。

[21層モデルから縮約7層モデルへ]

21層モデルの上層部を縮約し、縮約層におけるモデル骨格曲線を導出する。

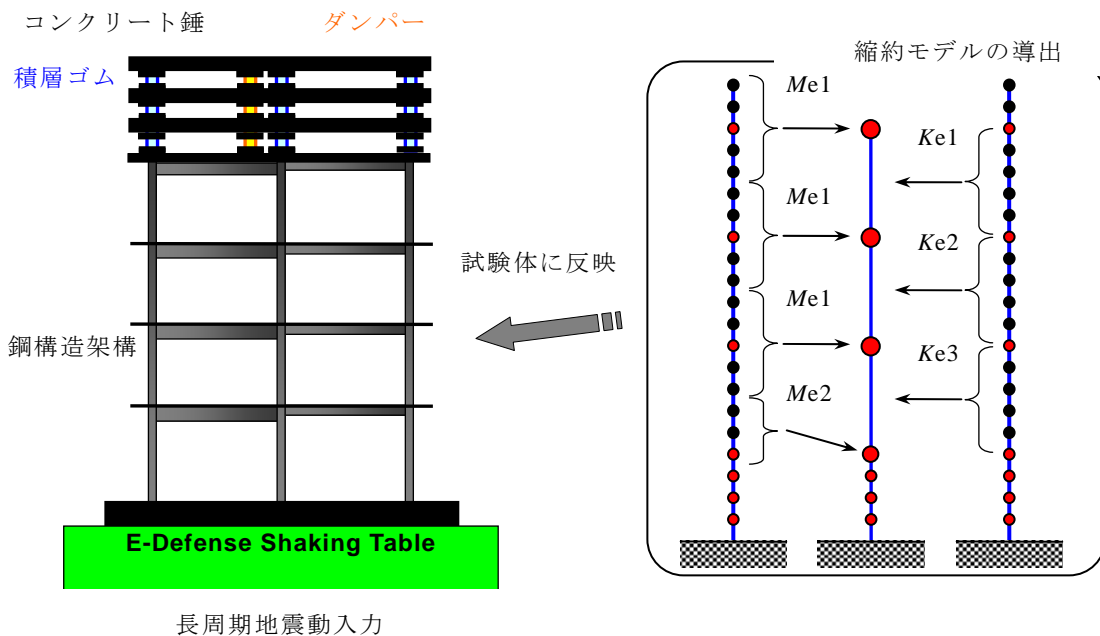


図 1 提案試験体の概要

-) 21 質点せん断ばねモデルの上部 5 層の質量を縮約後 3 質点のそれぞれに与える。
-) 縮約層の剛性は該当する 5 層の各層剛性を直列に結合して評価する。
-) 縮約層の強度は該当する 5 層の各層強度の平均として与える。

このとき、縮約層の試験体コンクリート錘は 21 層モデルの 19 層、14 層、9 層を代表する。

2) 試験体設計

試験体を図 2 に示す。試験体の主要な諸元を表-1 に示す。以下では設計手順を示し、前述の i) から vii) に従い得られたモデルの骨格曲線とプッシュオーバー解析結果を比較する。

a) 架構部

[断面設計]

架構平面は桁行方向 2 スパン、梁間方向 1 スパンで、部材断面は、(i)、(ii)、(iii) に従い、 $C0=0.3$ に対する許容応力度設計により決定される。設計時に梁のスラブ合成効果は剛性に考慮し、強度については無視する。

[構造特性]

解析において、柱、梁は線材置換し、材端にバイリニアの弾塑性回転ばねを配す。各降伏強度は、材料強度の公称値を 1.1 倍して与えられる全塑性モーメント M_p を適用する。梁剛性にはスラブの影響を考慮する。降伏強度は既往の実験を参照して与えられる平均的な値から正曲げのみ 1.4 倍とし³⁾、部材降伏後の 2 次剛性は初期剛性の 6%⁴⁾ を与える。解析結果のうち 1 層目、3 層目における層せん断力係数と層間変形角の関係を示す。スラブによる強度上昇により、部材降伏時の強度がモデル骨格曲線の第一折れ点を上回る。第一折れ点に対応する層の強度上昇は 1.2 倍程度であるが、第二折れ点に対応する強度は、同程度である。

b) 縮約層

[基本設計]

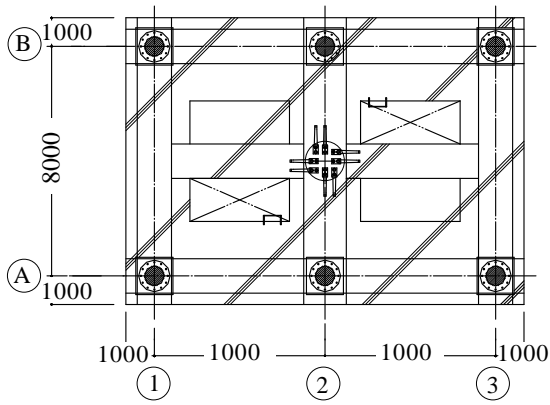
コンクリート錘間の変形特性は、「6 基の単体積層ゴム」と、「ダンパー⁵⁾と積層ゴムの直列に組む装置」を並列に組み込むことで、剛性低下とエネルギー吸収を擬似的に与える。ここで、「ダンパーと積層ゴムの直列に組む装置」を塑性化装置と称す。塑性化装置の強度と剛性は、ダンパーと積層ゴムにより調節される。

縮約層の剛性は、「1) 縮約モデルの基本コンセプト」の vi)、vii) の手順に従って与えられる縮約層のモデル骨格曲線を基本とする。設計にはスラブによる強度上昇の影響が考慮されていないので、層として第一折れ点の降伏強度を 1.2 倍に割り増す。

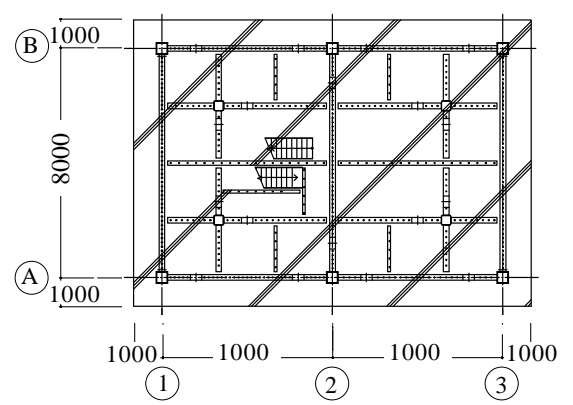
また、第一折れ点以降は二次勾配を維持する。設計で考えられてきた 0.01 rad 程度までは、先に述べた 21 層モデルに準じた強度バランスおよびエネルギー消費バランスを維持し、それよりも大きな変形領域では、下層がメカニズム降伏により相対的に弱くなり、変形増大が試験体架構において卓越するシステムとする。

[単体積層ゴムと塑性化装置]

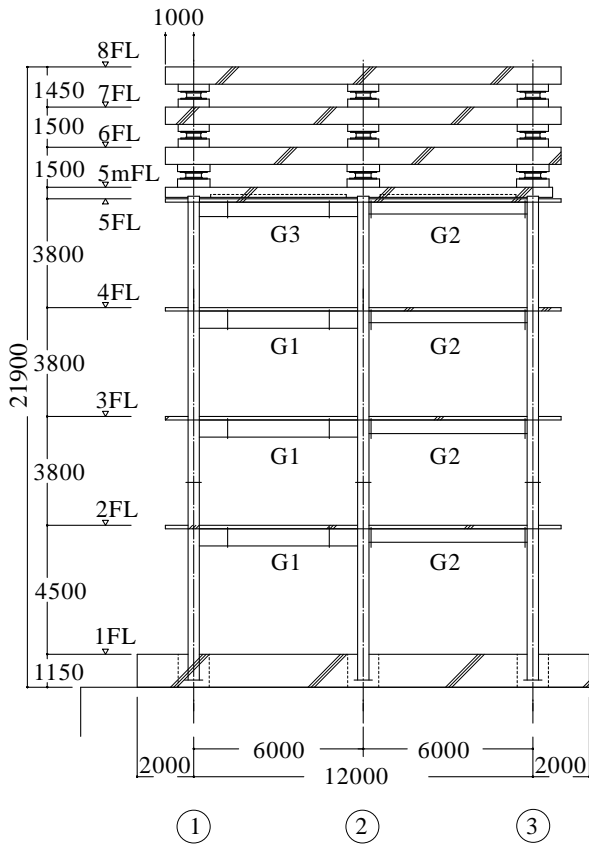
塑性化装置のダンパー降伏後の剛性を 0 と見なせば、その後の剛性は 6 つの単体積層ゴムの剛性によって与えられる。本試験体では、初期剛性低下率が 0.6 程度²⁾ となる骨格曲線を縮約層に与えるように強度・剛性バランスを決定した。縮約層のモデル骨格曲線と、プッシュオーバー解析の結果を図 3 に示す。縮約層の関係は、5 層分の階高にて層間変形を除いた変形角としている。



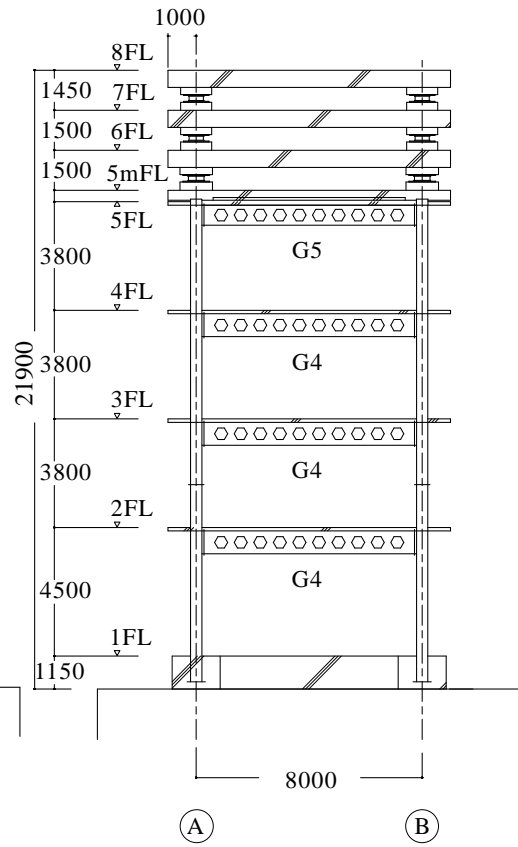
(a) 5mFL 伏図



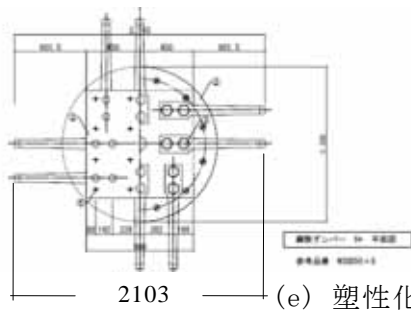
(b) 2FL 伏図



(c) A 通り軸組図



(d) 1 通り軸組図



(e) 塑性化装置 (6FL)

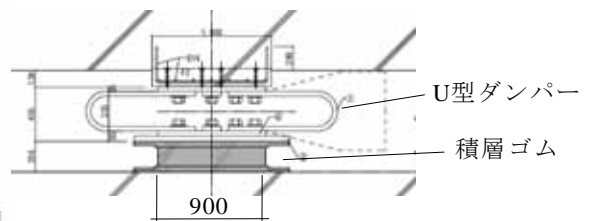


図 2 試験体

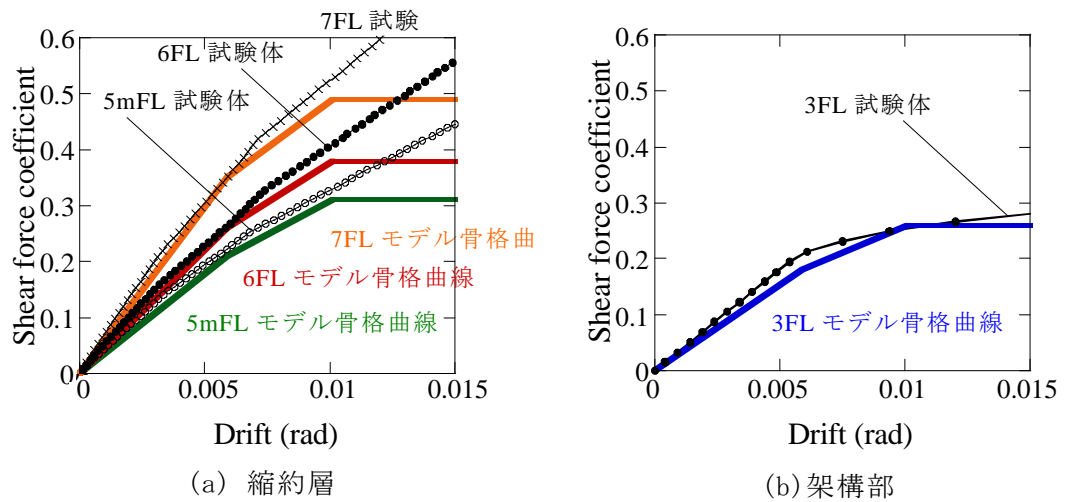


図 3 プッシュオーバー解析

表 1 試験体諸元一覧

(a) 試験体重量

層	重量 t	層	重量 t
8F	180	4F	53
7F	195	3F	53
6F	195	2F	56
5F,5mF	166	1F	221

総重量 1119 t

(b) 架構部材

柱 (SM490A)	□400x25
梁 (SM490A)	G1 H600x200x9x19
	G2 H400x200x8x13
	G3 H500x200x9x16
	G4 H800x199x10x15
	G5 H650x199x9x14

(c) 単体積層ゴム

層	ゴム外径 mm	G N/mm ²	ゴム総厚 mm
7	500	0.39	124
6	600	0.44	117
5	600	0.59	135

柱中心位置に縮約各層計 6 基

(d) 塑性化装置

ゴム外径 mm	G N/mm ²	ゴム総厚 mm	U型ダンパー
800	0.59	90	NSUD50x6
900	0.59	90	NSUD50x8
1100	0.59	90	NSUD55x8

縮約各層中央に 1 組

3) 試験体製作工事

試験体の製作は、屋外で行った。下層の鋼構造架構部と縮約層の各コンクリート錘を分離して製作し、これらを実験棟内に移動し、震動台上でくみ上げる計画とした。

図 4 に示すように、試験体の基礎は、鉄筋コンクリート構造とし、柱脚を固定柱脚とするとともに、屋内への移動、クレーンによる吊り上げにおいて、十分な強度と剛性を持つように断面と配筋を決めた。

この上に、試験体下層部の鋼構造架構を組み立て、各層のスラブ打設等を実施して下層部分が完成した。

図 5 に示すように、別途、縮約層のコンクリート錘を製作した。積層ゴムを介して、各層が連結できるように、下層の架構の柱と同じスパンで所定のコンクリート台座を設けた。

図 6 に示すように、最大 1000t の重量を移動することができるキャリアーが下層架構部の基礎下に入りこみ、リフトアップ後に実験棟内へ移動した。各コンクリート錘も同様の手順で実験棟内に移動した。

実験棟内において、下層架構部を大型クレーンで吊り震動台上に設置した。コンクリート基礎に用意された柱まわりの孔に PC 鋼棒を配し、基礎と震動台を十分なプレストレス力で緊結した。図 7 に示すように、その上に、順次、コンクリート錘を吊り上げ、積層ゴムおよび中央の塑性化装置を介して、縮約層を組み上げた。

図 7(b) に示すように、震動台の短手方向が試験体梁間方向、長手方向が試験体桁行方向となる。図 8(a) に示すように、1 スパンの試験体梁間方向はト型の柱梁接合部によって架構が形成されている。一方、2 スパンの試験体桁行方向は、図 8(b) のように中央の十型の柱梁接合部と、側柱のト型接合部によって架構が形成されている。側柱のト型接合部は、梁間方向と桁行方向で梁せいが異なり、また桁行方向がブラケット付きの工場溶接、梁間方向がウェブをボルト接合する現場溶接となる。図 8(c) に内側から見た両方向の接合部を示す。

図 9 に縮約層を連結する単体積層ゴムと塑性化装置を示す。単体積層ゴムは下層の架構における 6 本の柱芯上に各層 6 個配されている。塑性化装置は、図 9 に示すように、免震ダンパーとして用いられる U 型ダンパー⁵⁾と積層ゴムを直列に連結しこれをひとつのユニットとして、剛性とエネルギー吸収能力を与えている。縮約各層の中央に 1 個配置した。

図 10 に、下層の架構に組み込まれた非構造部材等を示す。配管、非構造間仕切壁は、実規模の階高とスパンを有する架構に、通常の状態に従って取り付けられており、実験において発生する地震応答変形をうけるなかでの損傷過程を検証できる。



(a) 鉄筋コンクリート基礎の配筋とコンクリート打設準備



(b) 鉄筋コンクリート基礎の完成



(c) 下層架構部の建て方

(d) 下層架構部の完成

図4 下層の鋼構造架構部の製作



図5 縮約層コンクリート錘の完成状況



図6 下層架構部の移動



(a) 縮約層の組立状況



(b) 試験体全景

図7 震動台上における試験体



(a) 梁間方向のト型接合部



(b) 桁行方向の十字型接合部



(c) 工場溶接と現場溶接が直行する柱梁接合部

図 8 下層の鋼構造架構部



(a) 単体積層ゴム



(b) 塑性化装置（積層ゴムとダンパーの直列）

図 9 縮約層の積層ゴムとダンパー



(a) 配管



(b) 間仕切壁

図 10 下層の鋼構造架構内に組み込まれた実非構造部材

(c) 結論ならびに今後の課題

E-ディフェンスを用いる大規模実験の可能性を飛躍的に拡大させる新しい実験システムを、長周期地震動を受ける高層建物の耐震性という社会において極めて重要なテーマを通して考案した。高層建物下層部の構造躯体を表現する架構の上に、免震用積層ゴムと大重量コンクリートスラブを配して高層建物の長い固有周期と大きな下層階層せん断力を再現できる試験体を具体的に設計した。

試験体の作製手順から組立までを考慮して実施面から試験体の詳細、工事手順を立案した。

(d) 引用文献

- 1) 福島東陽・市村将太・寺本隆幸：超高層建物の基本的特性の時系列的変化、日本建築学会大会学術講演梗概集、1999. 9.
- 2) 建築研究所：長周期地震動による建築物への影響及び対策技術に関する研究報告書、2005. 2.
- 3) 松宮智央・吹田啓一郎・中島正愛・劉大偉・周峰・溝渕裕也：大変形繰返し載荷下における鋼梁の履歴特性に及ぼす RC 床スラブの影響 RC 床スラブ付き鋼構造部分構造実大実験、日本建築学会構造系論文集、第 598 号、pp141-147、2005. 12.
- 4) 松宮智央・中島正愛・吹田啓一郎・劉大偉・周峰・福本直晃：実大鋼構造ラーメンの繰返し載荷挙動に対して弾塑性数値解析がもつ予測精度 実大 3 層鋼構造骨組を用いた耐震性能検証実験、日本建築学会構造系論文集、第 585 号、pp215-221、2004. 11.
- 5) 新日本製鉄（株）：カタログおよび技術資料

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国内・外の別
実験システムの提案と設計 高層建物の耐震性評価に関するE-ディフェンス実験—その2 口頭発表	福山 國夫、 鍾 育霖、島田 侑、長江拓也、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	広島大学 2008年度日本建築学会大会（中国）	2008年9月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所 （雑誌等名）	発表時期	国内・外の別
なし				

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果 （記事タイトル）	対応者氏名	報道・掲載機関 （新聞名・TV名）	発表時期	国内・外の別
なし				

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 20 年度業務計画案

なし

