

## 3.2 長周期地震動による被害軽減対策の研究開発

### 3.2.1 被害軽減対策技術を組み込む高層建物実大架構試験体の震動実験

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

首都圏で長周期地震動が発生した場合、多大な被害の発生が想定される高層建物を対象にし、その耐震性能評価および被害軽減を目的として、長周期地震動が高層建物にもたらす被害を国民に明らかにする。また、本実規模実験で検証される実践的な応答低減手法に関する研究成果を建築関連団体と連携し指針を取りまとめるとともに、各種業界と本研究成果を共有し、安心・安全な高層建物の広い普及を最終目標とする。

##### (b) 平成 21 年度業務目的

本年度は、既存高層建物の安全性確保、高機能性確保の観点から、長周期地震動を受ける高層建物の地震時応答評価や効率的な応答低減技術に関わる検討・検証を行うため、E-ディフェンスを活用した実験を実施する等、架構の損傷評価、応答低減技術による損傷軽減効果の定量的評価および機能保持・避難性等に関わる研究開発を進め、安心・安全な高層建物の広い普及のための基礎データを得る。

都市に長周期地震動が発生するとき、それを受ける超高層建物群は長時間にわたって強く揺さぶられる。骨組の損傷、家具の転倒や非構造材の損壊など建物全体としての被害を未然に防ぐ取り組みが極めて重要である。

今までに、日本の都市に立つ超高層建物が長周期地震動を実際に受けたことはない。そうしたなかで、被害の様相と応答低減対策の効果、すなわち対策の根拠と目処について、E-ディフェンスを用いる大規模実験のデータは、技術者のみでなく、一般社会に対して強い説得力を持つ。

本研究では、応答低減技術が組み込まれた高層建物を模擬した試験体を平成 19 年度の実験で用いたモデルをベースとして製作する。また、E-ディフェンスによる震動実験を実施し、試験体挙動に関するデータを計測することで、応答低減効果について評価を行う。さらに、それらを今後できるだけ速やかに社会に示すことをめざす。

##### (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	主任研究員	長江 拓也
	客員研究員	福山 國夫
	主任研究員	梶原 浩一
	企画室長	井上 貴仁
	センター長	中島 正愛

## (2) 平成 21 年度の成果

### (a) 業務の要約

平成 19 年度に補強対策のない既存の鉄骨造超高層建物を対象とした E-ディフェンス振動台実験を実施した。平成 21 年度は、その実験手法をベースに、補強を施した下層の鉄骨造骨組と、高層階の揺れを受ける室内に関する実験を実施した。対策が無ければ、骨組には梁が根本で破断するなど重度の損傷が生じる。そこに、「鋼製ダンパー」、「オイルダンパー」、「柱梁接合部溶接補強」を組み込み、補強対策の効果を分析できる実験データを取得した。また、家具や機器を固定するなど対策を施した室内とそうでない室内を用意して、室内対策の効果を分析できる実験データを取得した。

### (b) 業務の成果

#### 1) 無補強の場合の被害

平成 19 年度に補強対策のない鉄骨造超高層建物を対象とした E-ディフェンス振動台実験を実施した。図 1 にコンセプトを示す。今までに建設された超高層建物を調べて、数の多い高さ 60-100 m の超高層建物を代表するように、高さ 80 m の超高層建物を対象とし

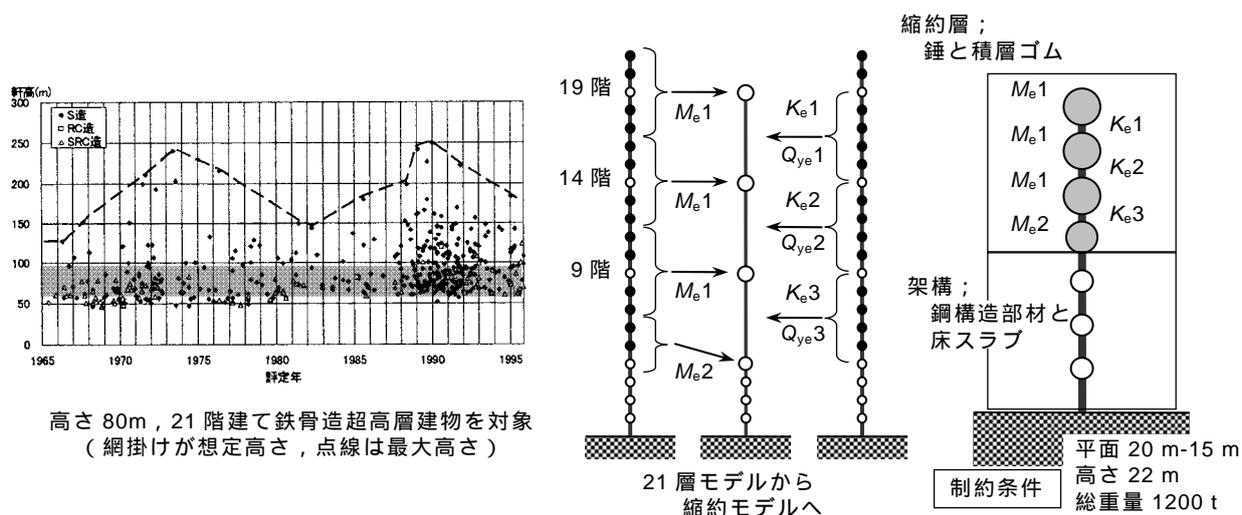


図 1 試験体用モデル



図 2 試験体の作製状況

た<sup>1),2),3)</sup>。ここでは、できるだけ本物に近い骨組の保有性能を調べることをめざし、振動台の能力を最大限に活かす実験手法を採用した。鉄骨造の実骨組を下層部分として用意し、のこりの部分はコンクリート錘と積層ゴム、鋼製ダンパーで表現することとした。剛性分布や強度分布は、設計資料による数値モデルをもとに決定した。

試験体の製作状況を図2に示す。鉄骨造骨組の場合、柱と梁の接合部には、工場で溶接されるタイプと現場で溶接されるタイプがある。超高層建物が建設され始めた当初1960年代は、工場において溶接したものを現場で組み立てる手順が多く採用されたが、合理性と経済性の観点から、現場において溶接する方式が次第に増えていった。骨組には、工場溶接接合部、現場溶接接合部の両方を組み込んだ。現場溶接は、溶接作業者に実際の条件を再現して作業してもらった。

組み上がった試験体に対して実施した、ホワイトノイズ波による予備加振の結果を図3に示す。試験体の基礎と屋上の伝達関数から得られた試験体の1次固有周期は2.1秒であり、想定した80mの建物のもつ1次固有周期に相当する。試験体のモード形状も、当初設定した21層モデルとよく対応することが確認された。

地震入力波として、首都圏に予測される長周期地震動である東扇島波（HOG）、東海地方に予測される長周期地震動である三の丸波（SAN）を採用した<sup>4),5),6)</sup>。合わせて、設計用地

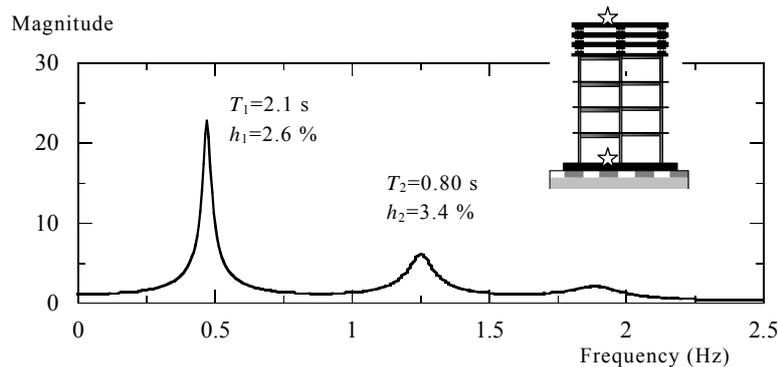


図3 予備実験で得られた実験システムの伝達関数

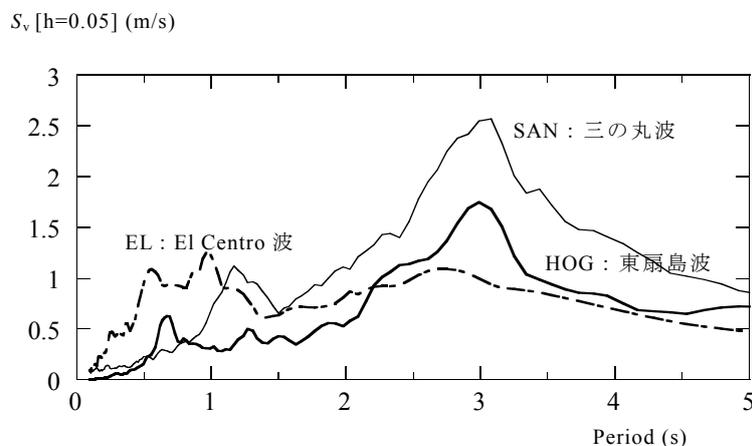


図4 入力地震動の最大応答スペクトル

震動である、最大速度を 0.5 m/s に調整した El Centro 波 (EL) を採用した。いずれも水平 2 方向の同時加振である。図 4 には、試験体の桁行方向 (2 スパンの長手方向) に入力した方向の最大速度応答スペクトルを示す。

2 階の層間変形角の履歴を図 5 に示す。従来の設計は、最大層間変形角を 0.01 rad より小さく収めることをめざしていた。El Centro 波の最大値は、それよりも 1 割ほど小さい。東扇島波の最大値は、それを若干超し、三の丸波の最大値は 1.7 倍程度となった。長周期地震動を受ける超高層建物の骨組は、設計で考えられていた変形の数倍もの大変形を一気に受けるのではなく、設計で考えられていた値の 1.5 倍程度までの変形を何度も繰り返し受ける。この観点から総エネルギー入力を比較したところ、El Centro 波を基準に比較すると、東扇島波は 4 倍、三の丸波は 9 倍に及んだ。この関係が、骨組に累積する塑性変形

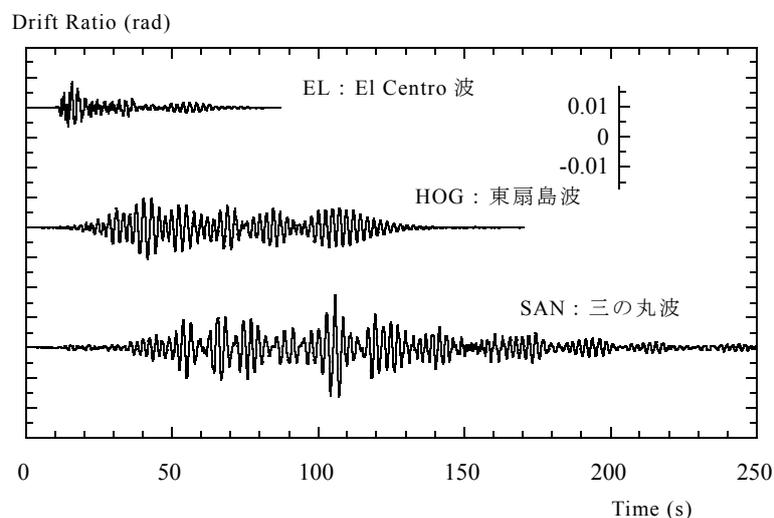


図 5 骨組の層間変形角履歴

量に反映される。

三の丸波を入力したときの骨組の様子を図 6 に示す。梁の根元が降伏し、そこに変形が集中した。床スラブの存在によって、下フランジにおいてひずみが増幅する。破断しなかった工場溶接接合部の下フランジ付近をサーモグラフィによって記録した図は、三の丸波による加振において揺れ始めから 40 秒後の様子である。下フランジのスカラップ付近に温度の上昇が確認できる。この温度上昇は累積ひずみと高い相関を示すことが知られている。骨組に与えられたエネルギーのほとんどは梁の根元の降伏による塑性歪エネルギーによって消費された。そのなかでも、ほんのわずかな区間 (フランジのスカラップ長さ程度) に累積ひずみが集中したことがうかがえる。

三の丸波を入力したとき、12ヶ所の現場溶接接合部のうち 3ヶ所において梁の根元の下フランジが破断した。図 7 にその状況を示す。梁の端部に多数回の繰り返し変形が与えられた後に破断が生じ、下フランジが引っ張られる正曲げの耐力が尽きている。工場溶接接合部の場合は、三の丸波の加振をさらに 2 回加えたところで、おなじく梁の根元の下フランジが 12ヶ所のうち 2ヶ所で破断した。破断までに累積した塑性変形量で比較すると、工

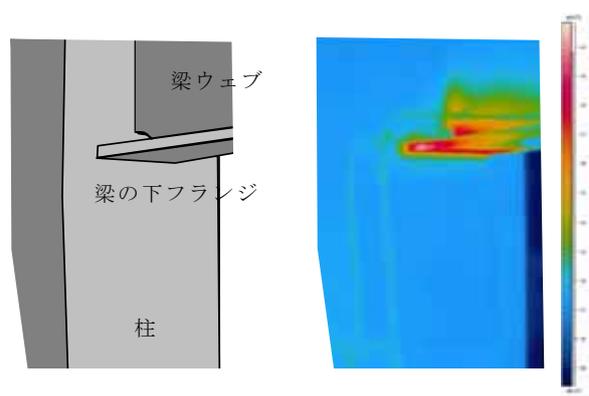


図 6 梁降伏する骨組みと破断しなかった工場溶接接合部の温度上昇

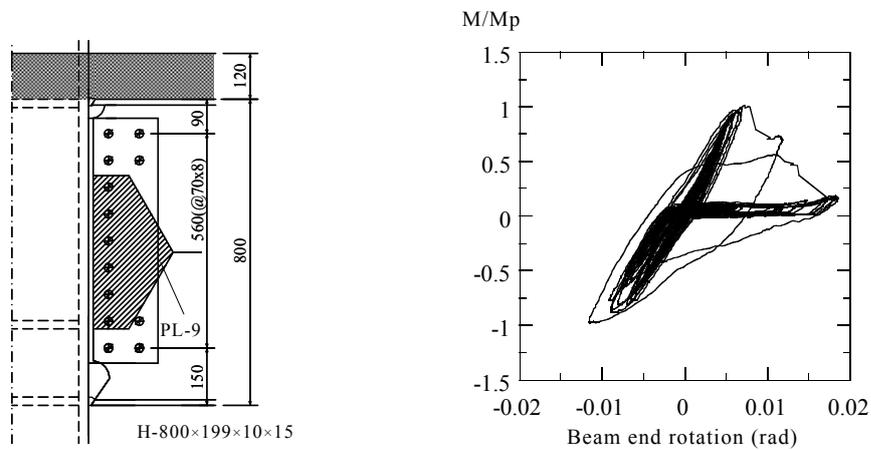


図 7 下フランジが破断した現場溶接接合部

工場溶接接合部は現場溶接接合部の約 5 倍の変形能力を有していた。現場溶接接合部の下フランジ側のスカラップ形状は、フランジ付近で特に狭く、歪集中に対して不利な条件である。また、ウェブをボルト接合しているため、そこでの応力伝達効率が悪く、フランジに応力が集中する。こうした力学条件に加え、現場溶接接合部としての悪条件が重なる。今回、UT 検査において不合格になるような欠陥は確認されなかった。しかし、ウェブをまたぐ溶接繋ぎが不可避で、UT 検査の確さも相対的に低いとされるのがスカラップ周りである。多くの因子が重なって、現場溶接接合部の変形性能が工場溶接接合部の変形性能よりも劣ることとなった。

三の丸波を受けた試験体の床の 2 方向の動きを図 8 に示す。1 階での床の動きが試験体の屋上では数倍に増幅される。ここで、19 階に相当するそこでの被害シナリオを考える。

家具が転倒する条件を図 9 に示す。家具は転倒するとき、底の角が床加速度による慣性力で浮き上がり、重心位置が回転中心を超える。重心位置が回転中心を超えるためには、家具を押し続ける効果、すなわち床速度が問題になる。家具の角が浮いても、細かな振動ではガタガタするだけである。超高層建物の場合は、大きな振幅によって床速度が十分大きくなり、一旦、家具の角が浮くとそのまま一気に倒される傾向にある。図 9 における

形状比  $B/H$  は、その値が小さいと細長く角が浮きやすいことを意味する。Y 方向に生じた最大加速度は  $4.9 \text{ m/s}^2$  で、形状比  $0.49$  のものまで角が浮く条件になる。すなわち、レンジや洗濯機のようなものを除き、一般的な家具は、軒並み転倒することになる。

摩擦係数を仮定して、慣性力により家具等がすべる現象を解析してみる。キャスター付きの家具の場合は、相当する摩擦係数に置換すると  $0.1$  を下回る。家具と床の材質が木質

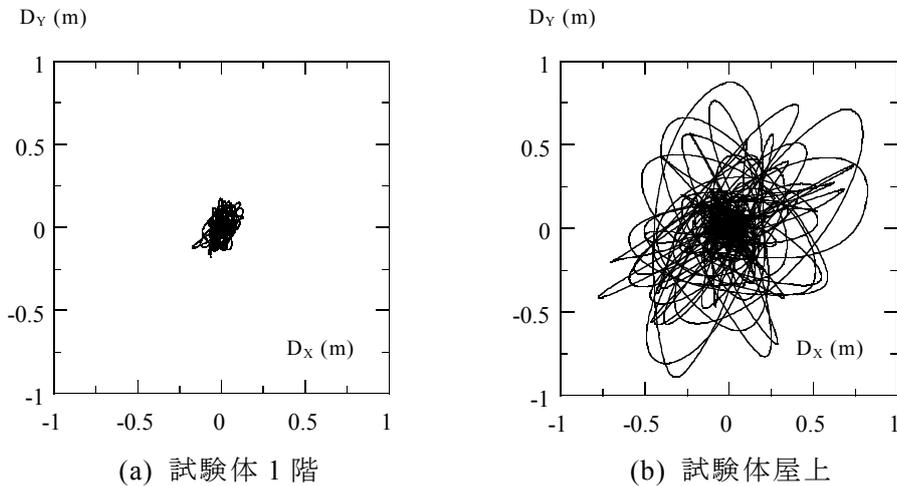


図 8 床移動の水平 2 方向オービット

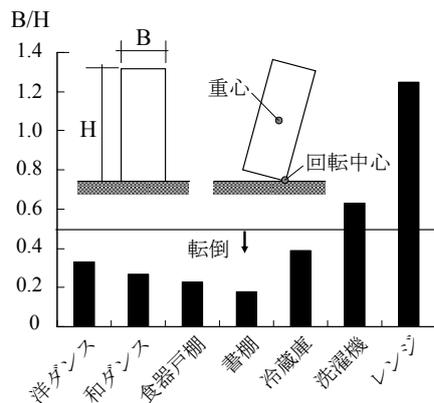


図 9 加速度による家具の転倒条件

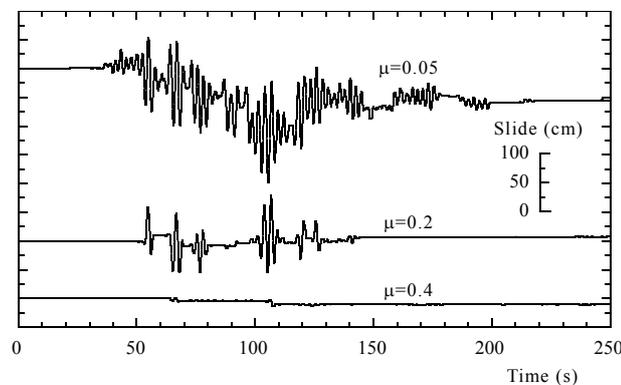


図 10 数値解析による家具や機器のすべり

の場合や、金属系の家具とPタイルの組み合わせの場合にも、摩擦係数は0.1、0.2といった小さな値なる。Y方向の解析結果を図10に示す。摩擦係数が0.2の場合に1m程度の振幅で、数回往復する。キャスターを想定した摩擦係数0.05の場合は、そのような往復を90秒以上続けながら片方に4mも移動することになる。ただし、こうした状況が室内全体に起きた場合の被害の様相を総合的に表現する映像等は平成19年度実験で取得できておらず、解析だけによる予測では防災啓発用資料として強い説得力に欠けるものであった。

## 2) 被害対策の補強を組み込む21年度実験

平成19年度の実験結果に鑑みれば、長周期地震動を受ける鉄骨造の超高層建物は、現場で溶接された梁の根元が、何度も繰り返し変形することに耐え切れず、破断する等の損傷を被る可能性がある。上層階の室内では、一般的な家具が軒並み転倒し、条件によっては数メートルも移動を繰り返す。平成21年度の実験では、こうした被害に対する対策方法を考え、19年度に実施した実験手法をベースとした試験体に組み込むことで、それらの効果を検証する。図11に実験の概要を示す。骨組の損傷被害を抑制するためには、骨組の変形を小さく抑えて、多数回の繰り返し塑性変形が生じないようにする必要がある。そこで、下層部の骨組部分にブレース型の「鋼製ダンパー」、「オイルダンパー」を実際に組み込み、



(a) 試験体全景



(b) 室内（屋上ペントハウス内）



(c) ブレース型ダンパー



(d) 接合部溶接補強

図11 平成21年度の実験概要

その効果を検証する。条件の悪い現場溶接接合部に関しては、補強を施す必要もでてくる。そこで、柱梁接合部には、「ハンチなどによる溶接補強」を施し、ダンパーの無い状態で性能を検証する。想定建物の19階の揺れが出現する試験体屋上には、オフィスおよび住宅を模擬した部屋を設置し、室内に生じる危険な現象を検証するとともに、「家具の固定等」による被害の防止効果を調べる。

#### a) 試験体と加振計画

図12に示すように、まず、平成19年度と同様に鉄骨造骨組を製作した。検証対象となる柱と梁の接合部は全て現場溶接接合とした。ただし、実際の改修工事を想定して、制振ダンパーの取り付け部、および梁の根元の耐震補強を現場施工しておく。ダンパーは工場で作成して(図13)、その骨組にそれぞれ取り付けた。

実験の概要を図14に示す。一連の実験では、ダンパーの配置条件を以下のように設定して、実験ごとに取り外し、交換することで、それらの効果を検証する。シリーズ①、②、③、④の実験順序とし、最終的にダンパーの無い状態で実験をおこなう。

- シリーズ① 想定建物全階数のうち、2/3の範囲の階に鋼製ダンパーを組み込んだ場合
- シリーズ② 想定建物全階数のうち、1/5の範囲の階に鋼製ダンパーを組み込んだ場合
- シリーズ③ 想定建物全階数のうち、1/5の範囲の階にオイルダンパーを組み込んだ場合
- シリーズ④ 制振ダンパーのない場合



(a) 制振ダンパー取り付け部の現場溶接



(b) 梁の根元の耐震補強

図12 現存する建物の耐震改修を想定した補強工事



(a) 鋼製ダンパー



(b) オイルダンパー

図13 工場におけるダンパーの製作

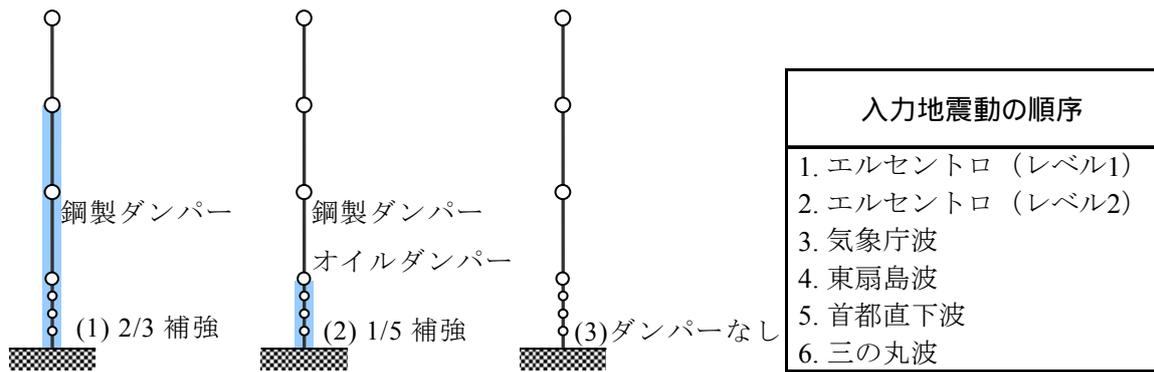


図14 制振ダンパー補強の概念加振順序

b) 実験手順

i) シリーズ①、鋼製ダンパー2/3 補強

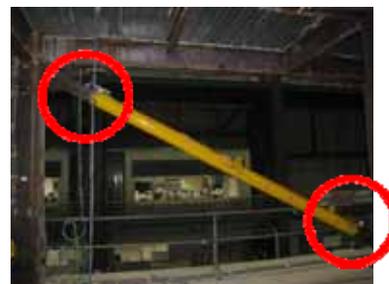
シリーズ①の実施状況を図 15 に示す。下層骨組内に実物のブレース型の鋼製ダンパーを組み込む。ブレース型ダンパーの諸元を表 1 に示す。骨組の水平剛性に対するダンパーの水平剛性の比は約 2 倍、全体の水平強度に対する、ダンパーの強度の比は約 0.25 倍とす



(a) 試験体全景



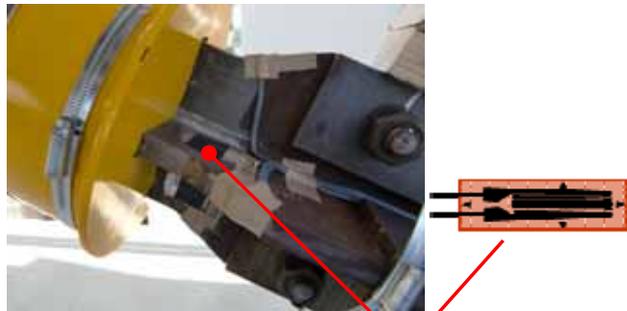
(b) 上層部分の積層ゴムと等価ダンパー



(c) 鋼製ブレースダンパー



(d) 塑性化部の変形を測定



(e) 弾性歪から力を測定

図 15 シリーズ①, ② : 鋼製ダンパー2/3, 1/5 補強試験体

表 1 鋼製ダンパーの力学諸元一覧

(a) 縮約層の等価ダンパー

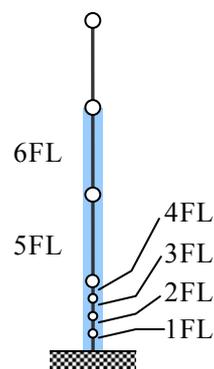
FL	$dF$ (kN)	$k_1$ (kN/m)	$k_2$ (kN/m)	$d_u$ (m)
6	112	5920	100	0.0189
5	168	8880	150	0.0189

$dF$ : 降伏せん断力,  $k_1$ : 初期剛性,  $k_2$ : 2次剛性,  $d_u$ : 弾性限変形

(b) 骨組のブレースダンパー

FL	$L_c$ (m)	A (mm <sup>2</sup> )	$dF$ (kN)	$d_u$ (m)	$dF'$ (kN)	$d_u'$ (m)	$d_k$ (kN/m)
2-4	1.78	1280	384	0.0047	324	0.0056	81571
1	1.88	1280	384	0.0050	307	0.0063	76360

$L_c$ : 塑性化部長さ, A: 芯材断面積,  $dF$ : 降伏軸方向耐力,  $d_u$ : 降伏軸方向変形  
 $dF'$ : 降伏水平方向耐力,  $d_u'$ : 降伏水平方向変形,  $d_k$ : 等価剛性



る。コンクリート錘と積層ゴムからなる上層部分には、3層のうち下の2層にモデル化した鋼製ダンパーを組み込む。下層骨組と比べるとダンパーの剛性比および強度比は50%程度である。コンクリート錘と積層ゴムからなる上層部分の各層は、骨組5層分に相当するので、下層骨組と合わせて21階建て建物の下14階を補強することになる。ダンパーに働く力は弾性部に歪ゲージを4枚貼付し計測された歪の平均値から、断面積とヤング係数を乗じて計算する。塑性化部の変形は両端部に配した変位計によって測定する。

ii) シリーズ②、鋼製ダンパー1/5補強

シリーズ①において設置してあった上層部分（コンクリート錘間）のダンパーを取り外し、骨組部分にブレース型の鋼製ダンパーが設置される状態とした。

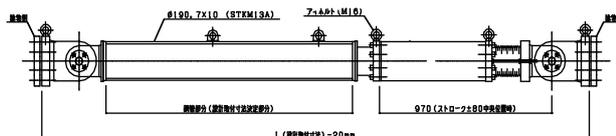
iii) シリーズ③、オイルダンパー1/5補強

シリーズ②の実験において設置してあった骨組部分の鋼製ダンパーを取り外し、図16に示すように、ブレース型のオイルダンパーを取り付けた。オイルダンパーに働く力は、軸部に歪ゲージを4枚貼付し、歪の平均値にオイルダンパーの単体試験結果より得られた校正値を乗じて求める。ダンパーの軸方向変位は、端部に配した変位計から直接測定する。図17にオイルダンパーの要素実験結果を示す。事前に指定された力学諸元をほぼ実現できている。なお、オイルダンパーのリリーフ荷重は、鋼製ダンパーの降伏荷重とほぼ同等となるものを選択した。

1次粘性係数	C1	125 kN・sec/cm
2次粘性係数	C2	8.5 kN・sec/cm
リリーフ荷重	dFy	400 kN
リリーフ速度		3.2 cm/sec



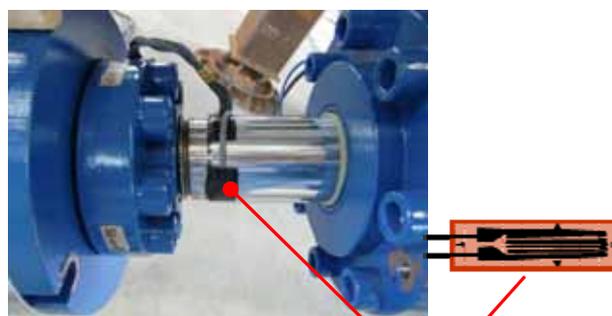
(a) 試験体全景



(b) ブレース型オイルダンパー



(d) ダンパーの変位を測定



(e) 弾性歪から力を測定

図 16 シリーズ③： オイルダンパー1/5 補強試験体

b) 実験結果

実験結果について、骨組の変形とエネルギー吸収、ダンパーのエネルギー吸収、梁端接合部の歪緩和と塑性変形能力、モニタリング技術による破壊現象の同定等は、他の項にて詳細に報告される。ここでは、試験体全体の挙動を対象として、ダンパーの減衰効果と家具の固定対策による被害の軽減について述べる。

i) 構造減衰

試験体の減衰定数  ${}_s h$  を下式より算出した。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^7 h_{eqi} \cdot W_i}{\sum_{i=1}^7 W_i}, \quad h_{eqi} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W_i}{W_i}$$

ここで、 $\Delta W_i$  は  $i$  層の 1 サイクル間の消費エネルギー、 $W_i$  は  $i$  層の最大ポテンシャルエネルギーである (図 4 参照)。本報では  $h_{eqi}$  は 3 層の層間変形  $\delta_3$  が最大となった時刻での各層の  $\Delta W_i$ 、 $W_i$  を用いて算出した。

「シリーズ①：H-2/3」、「シリーズ②：H-1/5」、「シリーズ③：V-1/5」、そして「平成19年度実験：F-07」の全加振に対して求めた、減衰定数と3層の最大層間変形との関係を図17に示す。図中に示す点線、 ${}_d\delta_y$ は鋼製ダンパーの降伏変形を水平方向に直した値であり、1/400、1/200そして、1/100は層間変形角を表している。F-07では、1/200までは減衰定数はおよそ0.04程度で一定であるが、1/200を超えると主架構が塑性化して大きなエネルギーを吸収する状況が、減衰定数が増加していく傾向に表れている。 ${}_d\delta_y$ 未達の層間変形では、F-07とH-1/5の減衰定数に大きな違いは見られないが、層間変形が大きくなるにつれ、H-1/5の実架構部分のダンパーが降伏することで、減衰定数が増加する。H-2/3では、ダンパー量が多いことが反映されて、H-1/5よりも減衰定数の増加が顕著である。V-1/5では、鋼製ダンパーの効果があまり見られない層間変形が小さい範囲から減衰が相対的に大きく、オイルダンパーが小さい振幅から減衰を付与することが確認できる。

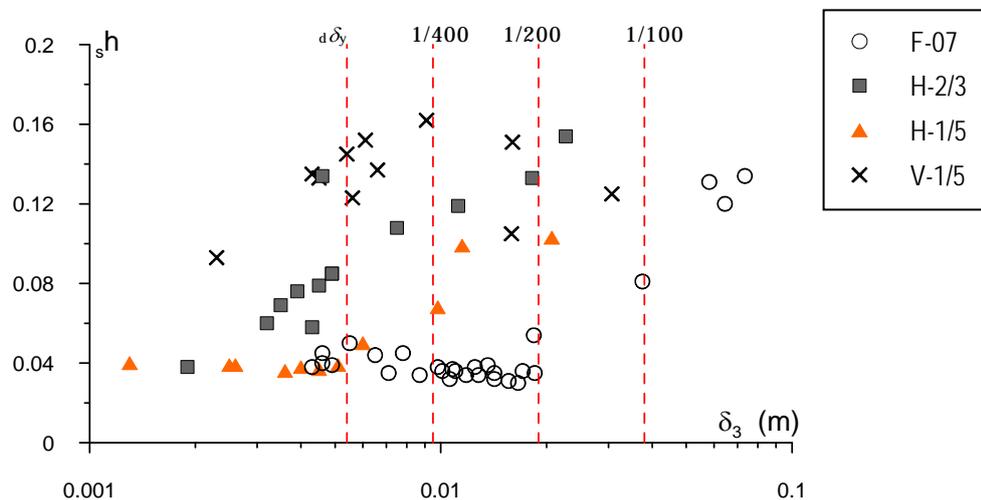


図17 減衰定数と最大層間変形の関係

#### ii) 室内被害の様相と対策の効果

試験体の屋上にはペントハウスを用意して、高層階の揺れをうける以下の居室の被害を検証した。いずれの場合にも、家具等を同様に配置した2種類の居室を用意し、一方の居室を対策のある状態、もう一方をない状態とした。

- ・シリーズ③ 三の丸波：オフィスビル、ワークスペース（対策あり、なし）
- ・シリーズ④ 三の丸波：共同住宅、ダイニングキッチンスペース（対策あり、なし）

図18にオフィスビル、ワークスペースの室内状況を示す。ここでは、オフィス内にある備品等が一つの空間の中でどのように振舞うかが問題となる。各室内に準備した備品は、事務机×3、キャスター付椅子×3、スチール書庫×5、スチールキャビネット×1、コピー機×1、事務机の上にはデスクトップ型パソコン×1、ノート型パソコン×1、プリンター×

1である。利便性を考えたレイアウトを再現し、オフィスで頻繁に見られる、仕切り・目隠し用の書庫を配置した。高さ約2m 書庫を2つ並べ、前後に空間がもたせた（壁に沿っていない）。対策のない場合は、書籍を詰めてそのまま置いた状態とした。その対策として、向かって左側の書庫は、L形金具に粘着性耐震マットを貼り付けて、L形の内側が書庫と接着し底部が床と接着することで、底部を固定した。右側の書庫は、L字金具とネジで底部を固定し、上部を突っ張り棒（4本）で押さえつけた。突っ張り棒は、天井材のビスの位置を確認し裏に軽鉄下地がある場所を選んだ。

対策のないコピー機のキャスターにはロックをかけず、フリーの状態とした。対策された部屋では、金具に粘着性耐震マットを貼り付け、これでキャスターを挟み込むことで、付加的なストッパーとした。壁に沿う3つの高さ約1.8mの書庫について、対策のない室内では、書庫内部に書籍やファイル等を設置し、書庫の上部に書類の入った段ボールを敷き詰めた。対策された部屋では、向かって左側の書庫は、L形金具に粘着性耐震マットを貼り付け、書庫の基部を固定した。中央と右側の書庫は、上部を壁面へ、また底部を床面へL字金具でネジ留めした。書庫の上にもものを置かず、書籍の量も余裕を持たせ下のほうへ配置した。また、書類の飛び出し対策として、突っ張り棒・ゴムバンド・チェーンを幅方向に渡した。

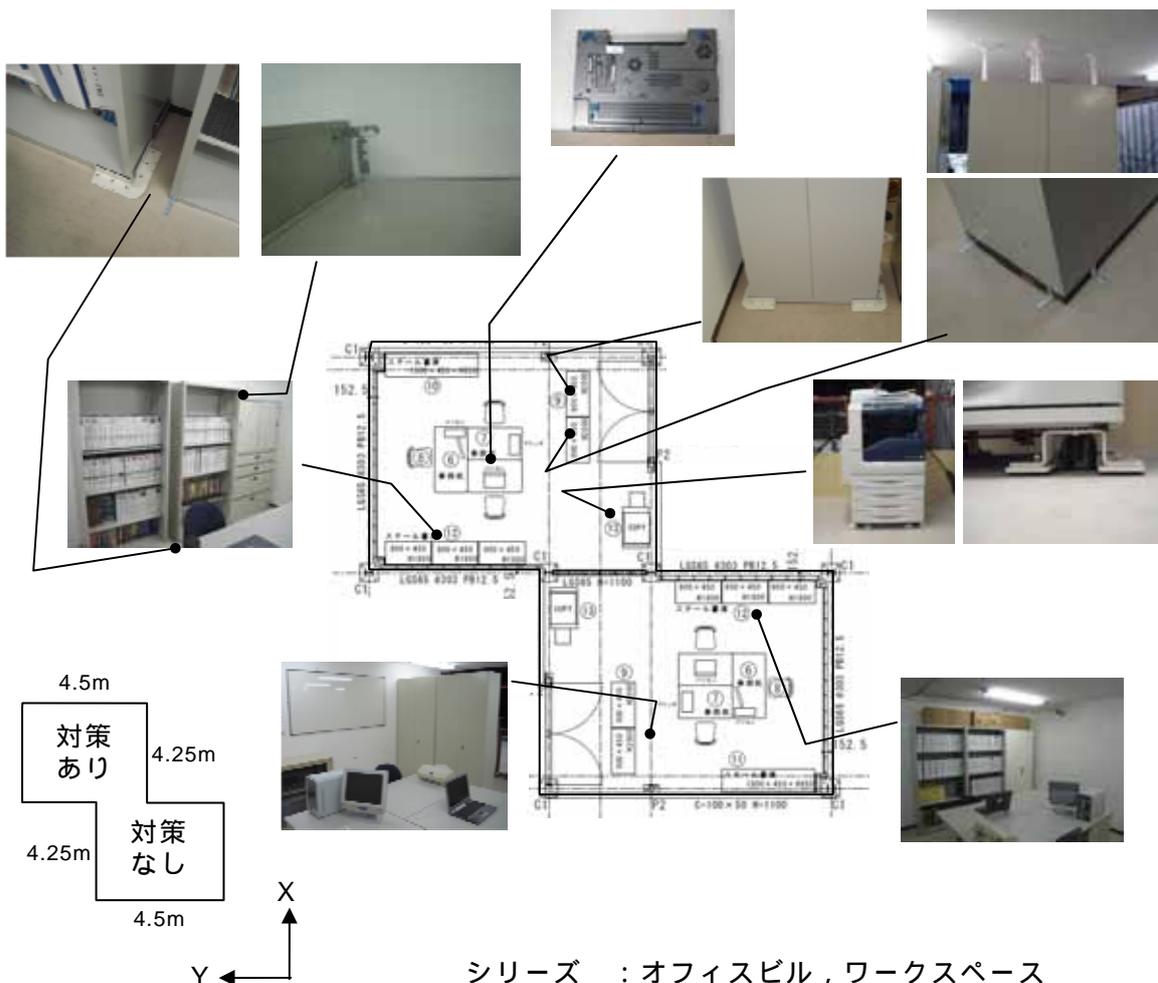


図 18 試験体屋上ペントハウス内の配置

事務机の上には、デスクトップ PC・ノート PC・プリンターを設置した。それらの転倒・移動対策として底面に粘着性耐震マットを貼り、事務机に固定した。事務机の足にも同様のマットを貼り床に固定した。

図 19 に共同住宅、ダイニングキッチンスペースの準備状況を示す。家族が集い長い時間を過ごす場所でのどのような被害が生じるか、という点を意識した。室内に準備した家具は、一般的な家庭で用いられている冷蔵庫、食器棚×2、ローボード、テレビ、テレビ台、4人掛け用食卓テーブル、キッチン流し台、炊飯器、オーブントースター、電気ポット、観葉植物である。対策のない場合、ダイニングテーブルとイスを、木製フローアと木製家具における条件（摩擦係数 0.1 から 0.3）で設置した。対策された部屋では、ダイニングテーブルは底部へ粘着性耐震マットを直接貼り付けた（2cm のマットを 16 枚）。イスの足は付属のマットが付いた状態とした。一般的に冷蔵庫の底面後方部分には移動しやすいようにキャスターが付いており、対策のない場合はそのような冷蔵庫をキャスターフリーの状態を設置した（キャスターロック機能は付いていない）。対策された部屋でも同様のキャスター付きの冷蔵庫を設置したが、L 形金具に粘着性耐震マットを貼り、冷蔵庫底面と床面を固定した。扉には市販されている飛び出し防止ベルトを取り付けた。

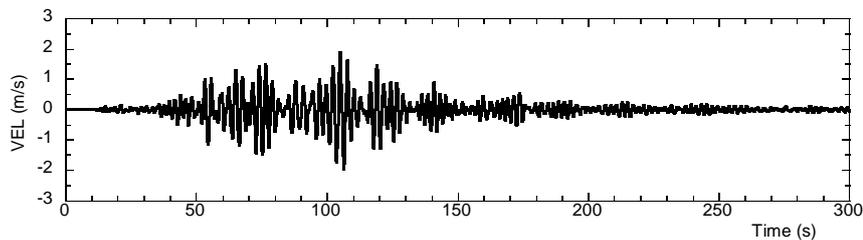
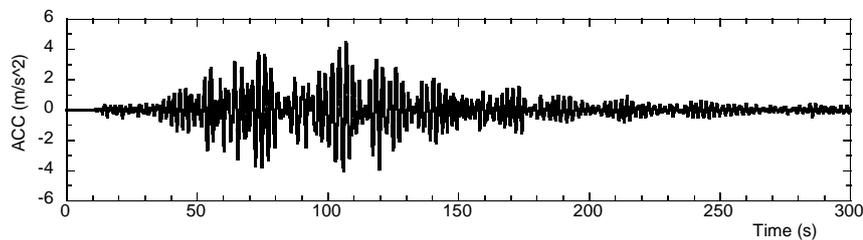


シリーズ : 共同住宅, ダイニングキッチンスペース

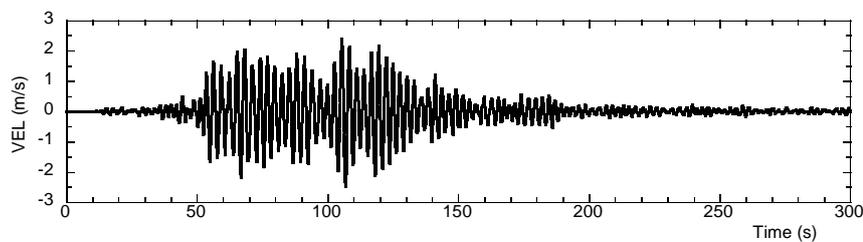
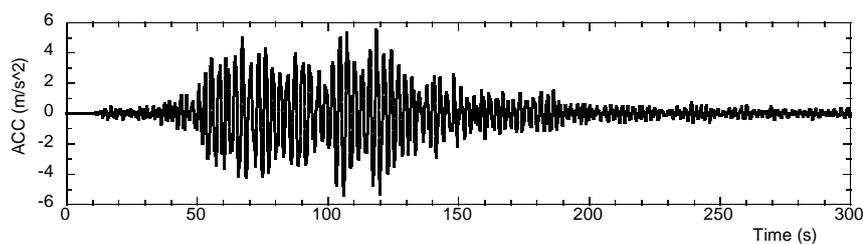
図 19 試験体屋上ペントハウス内の配置

テレビ台・液晶テレビ共に底面へ粘着性耐震マットを貼り付けた。対策のない部屋ではキャスター付のテレビ台の上に 29 インチのブラウン管テレビを設置した。台のキャスターはロックせずフリーの状態とした。部屋の奥には一般的な上下 2 段に分かれた食器棚を 2 つ並べて設置した。なかには食器類を収納した。固定対策として、向かって右側の白色の食器棚は、天板部と壁を転倒防止ベルトと L 字金具をネジで固定し、上段と下段は金物とネジで固定した。左側の食器棚には下段底部に粘着性耐震マットを貼り付けた L 形金具を取り付け、上段との間には直接マットを貼り付けた。扉には市販されている飛び出し防止ベルトを取り付けた。ローボードの底面にマットを直接貼りつけ床に固定した。設置物全てに粘着性耐震マットを直接貼りつけた。鉢皿・植木鉢共に粘着性耐震マットを直接貼り付けた。

図 20 に、各シリーズの三の丸波入力において記録された屋上の加速度波形、それらを積分して求めた速度波形を示す。ここでは、Y 方向の結果を示す。



(a) シリーズ③, 床応答の時刻歴波形 (Y 方向)



(b) シリーズ④, 床応答の時刻歴波形 (Y 方向)

図 20 床加速度と速度

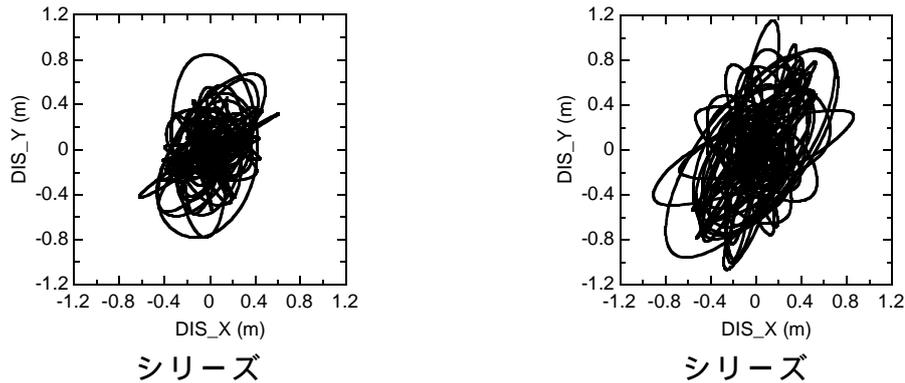


図 21 X方向-Y方向に対する水平2方向の動き

図 21 に、X 方向-Y 方向に対する水平 2 方向の動きを示す。シリーズ③はダンパーの影響がみられる。

図 22 にオフィスビル、ワークスペースの実験状況を示す。対策のない部屋では仕切り・目隠し用の書庫は、揺れ始めから 10 秒後に転倒し、後ろの空間をつぶした。キャスター付きのいす、コピー機は長時間部屋中を走り回り、別の設置物や壁に衝突繰り返した。特に重さ約 200kg のコピー機は、周りに多くの損傷を与え、その衝撃力が重なり、揺れ始めから 80 秒後に、上部の複写部分との接合部分で折れて 2 つに分解した。壁に沿う書棚も転倒し、事務机の上に衝突した。棚の上の段ボールの内容物、書棚内の書類が散乱した。対策された部屋では、全ての書庫に移動や転倒は生じなかった。書類が落下、飛散することは無かった。机の上の機器も移動しなかった。

図 23 に共同住宅、ダイニングキッチンスペースの実験状況を示す。上下 2 段に分かれた食器棚上段が揺れ始めから 10 秒後に転倒しテーブルに衝突した。続いて下段も移動し、転倒した。割れた食器類が散乱し、移動することで室内に広がった。キャスター付きのテレビ台が室内を走り回り、周りに衝突を繰り返した。しばらくしてテレビが滑落した。その後もテレビ台は部屋中を走り回った。ローボード上の設置物は全て滑り落ち散乱した。冷蔵庫は、前後左右に走り回り、ドアの開閉が揺れとともに繰り返され、内容物が散乱した。そして揺れ始めから 70 秒後に転倒した。加振直後に横にあった食器棚が倒れ、大きく移動した。室内に準備した家具は転倒後も、移動を繰り返した。

以上の実験内容は、極めて厳しい高層階における室内被害を総合的に表現しており、また、対策によって、被害が激減する様子も明らかにしている。実験では、多くのビデオカメラを設置し、映像を取得した。現在、音響も含まれる映像ファイルとしてインターネットを通じて、<http://www.bosai.go.jp/hyogo/movie.html> から簡単にダウンロードできる。これらが、防災啓発等の実践的な場面で活用されることが期待できる。



(a) 対策なし



(b) 対策あり

図 22 揺れ始めから 80 秒後の室内の様子 (シリーズ③)



(a) 対策なし



(b) 対策あり

図 23 揺れ始めから 80 秒後の室内の様子 (シリーズ④)

映像の入手先→<http://www.bosai.go.jp/hyogo/movie.html>

### (c) 結論ならびに今後の課題

都市に長周期地震動が発生するとき、それを受ける超高層建物群は長時間にわたって強く揺さぶられる。骨組の損傷、家具の転倒や非構造材の損壊など建物全体としての被害を未然に防ぐ取り組みが極めて重要である。今までに、日本の都市に立つ超高層建物が長周期地震動を実際に受けたことはない。そうしたなかで、平成 22 年度は応答低減対策の効果に焦点を当てて、E-ディフェンスを用いる大規模実験を実施した。取得された実験データは、ダンパーによる揺れの制震効果、接合部補強による骨組の変形能力向上、家具の固定対策等による室内空間の安全性向上に分類でき、技術者のみでなく、一般社会に対して、対策の根拠と目処に関する強い説得力を持つ資料に展開できるものである。

### (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、C-1、pp. 307-308、1999
- (2) 市村将太、福島東陽、寺本隆幸：鋼構造超高層建築物の設計用パラメータに関する研究—その 1 剛性分布・固有周期・ベースシャー係数—、C-1、pp. 305-306、1999
- (3) 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
- (4) 佐藤俊明・壇一男：関東地震による首都圏の広帯域強震予測、免震構造設計指針、日本建築学会、pp. 263-274、2001
- (5) 土方勝一郎、植竹富一、金谷淳二、真下貢、早川崇、渡辺基史、佐藤俊明：想定東海地震の東京湾岸における長周期地震動予測、日本建築学会構造系論文集、No. 617、pp. 55-62、2007. 7
- (6) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成—想定地震による強震動予測—改訂版、2005

### (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	国際・国内の別
Large Scale Shaking Table Tests for High-Rise Buildings - New Challenges of E-Defense, 口頭発表	Takuya Nagae, Kouich Kajiwara, Takahito Inoue, Masayoshi Nakashima	ACES Workshop (Advances in Performance-Based Earthquake Engineering)	July 2009	国際、Greece
Large Scale Shaking Table Tests for High-Rise	Takuya Nagae	Turkish-Japanese Earthquake	November 2009	国際、Turkey

Buildings – A New Challenge of E-Defense 口頭発表		Workshop		
E-Defenseの実験結果からみる長周期地震動が構造物に及ぼす影響 口頭発表	長江拓也、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛	日本地震工学会誌	2010年1月	国内
E-Defense Shaking Table Tests for High-Rise Buildings Subjected to Long-Period Ground Motions 口頭発表	Takuya Nagae, Kunio Fukuyama, Kouich Kajiwara, Takahito Inoue, Masayoshi Nakashima	The University of Tokyo Symposium on Long-Period Ground Motion and Urban Disaster Mitigation	2010年3月	国内
E-Defenseにおける超高層建物実験 口頭発表	長江拓也、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛	日本建築学会（研究協議会）高機能社会に求められる建築構造と構造委員会が果たすべき役割	2009年8月	国内
大地震を受ける超高層建物の被害様相 — E-ディフェンス振動台実験 — 口頭発表	長江拓也	新都心の地域減災セミナー・プレワークショップ 基調報告工学院大学BCPプログラム開発委員会／都市減災研究センター	2009年6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	国際・国内の別
Seismic Resistance Capacity of High-Rise Buildings subjected to Long-Period Ground Motions : E-Defense Shaking Table Test	Y. Chung, T. Nagae, T. Hitaka, M. Nakashima	Journal of Structural Engineering, ASCE	June 2010	国際

マスコミ等における報道・掲載  
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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### **(3) 平成 22 年度業務計画案**

既存建物の設計資料を保有性能と地理的条件等の視点から整理する。これらの分析結果と過去のEーディフェンス実験結果を組み合わせ、日本における高層・超高層建物群の耐震性能の評価を進める。安心・安全な高層建物の広い普及のため整備するガイドラインの骨子案をまとめる。