

Eーディフェンスを用いた 長周期地震動を受ける耐震補強超高層建物の震動台実験

1. 背景・研究概要

太平洋沿岸のプレート境界において、マグニチュード8クラスの巨大な地震の発生確率が高まっています。その巨大地震によって、ゆっくり揺れる成分に力を有する長周期地震動が陸地に伝わり、周期の長い超高層建物群を強く揺さぶります。本研究では、Eーディフェンスを利用する震動台実験により、長周期地震動を受ける超高層建物の耐震性を検証します。試験体は、超高層ビルで最も多く建設された高さ80m程度の鉄骨造建物をモデル化します。図1に示すように、下層階の骨組を震動台上に製作し、上層階部分はコンクリートの錘と積層ゴムで表現します。想定している長周期地震動を震動台に入力すると、試験体が超高層建物と同様に共振します。

2007年度(2008年3月)に、1980年代以前に建てられた超高層建物の骨組を対象とした第1シリーズの実験を実施しました。長周期地震動を受けた際の被害状況を調べたところ、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ことがわかりました。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ります。このような場合には、ダンパーを組み込む耐震補強が効果的と考えられます。

2009年9月における第2シリーズの実験では、試験体の骨組部分にダンパーを組み込む耐震補強を施し、期待される技術の効果を調べました。また、梁の根元に溶接接合補強を加えて、骨組自体の耐震性を増す効果を調べました。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と家具固定等による防止効果を調べました。

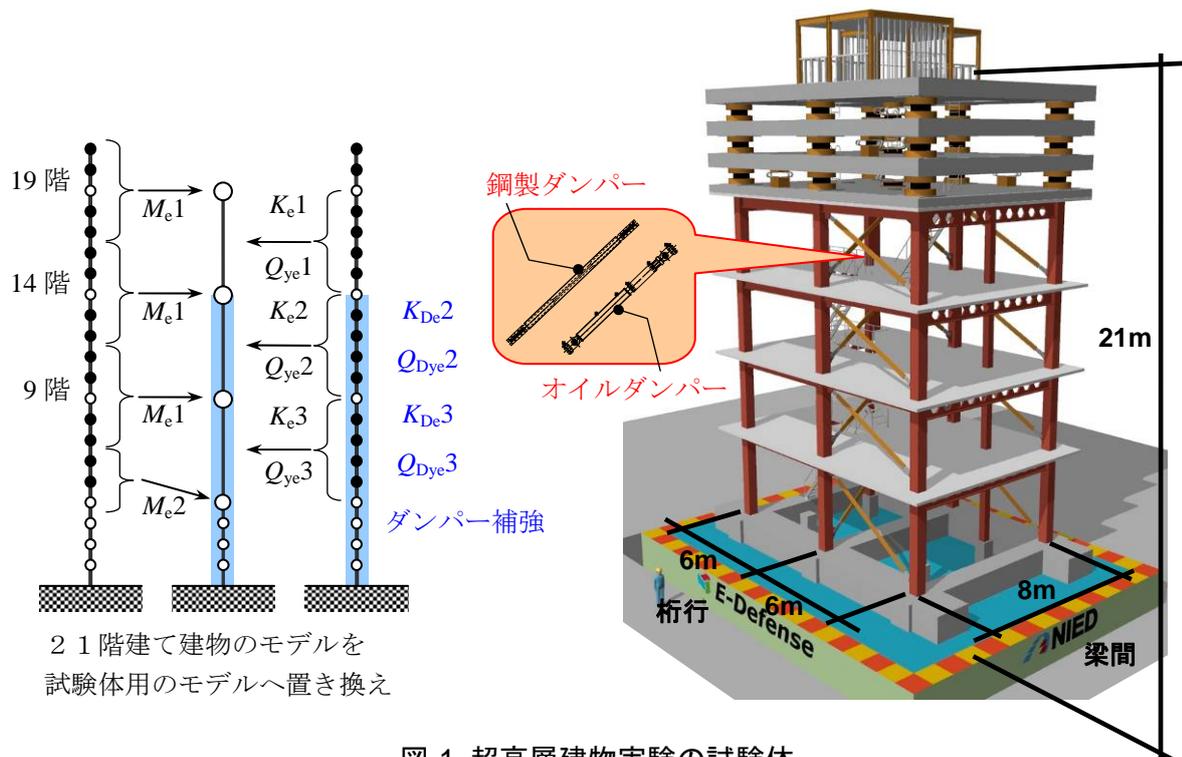


図-1 超高層建物実験の試験体

2. 試験体計画

試験体の概要は以下のとおりです。

- ・ 試験体の構造・規模 鉄骨造4層骨組+コンクリート錘と積層ゴムのモデル部
(高さ80m, 21階建て超高層建物を模擬)
- ・ 試験体の大きさ 長辺方向14m, 短辺方向10m, 高さ21m
- ・ 試験体重量 1200t
- ・ 制振ダンパー ① 鋼製ダンパー
② オイルダンパー

図-2に示すように、まず、第1シリーズの実験と同じ鉄骨造の骨組を製作しました。図-3に示すように、そこにダンパーの取り付け部、および梁の根元の耐震補強を、改修工事を想定して現場施工しました。



(a)鉄骨の建て方

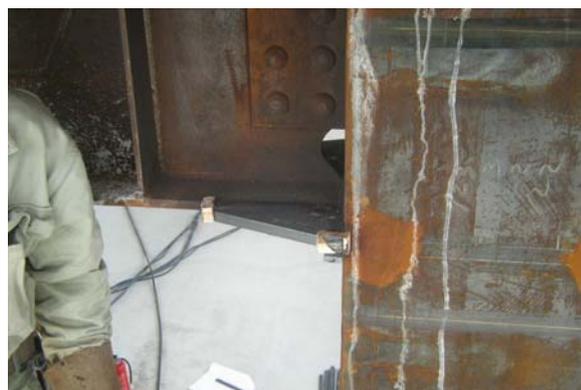


(b)梁の根元の現場溶接

図-2 試験体骨組の製作（1980年代以前の建物詳細に準拠）



(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-3 現存する建物の耐震改修を想定した補強工事

3. 加振計画

一連の実験では、制振ダンパーの配置を以下のように設定して、制振ダンパーの効果を複数の視点から考察することとしました。

- 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 制振ダンパーの無い場合

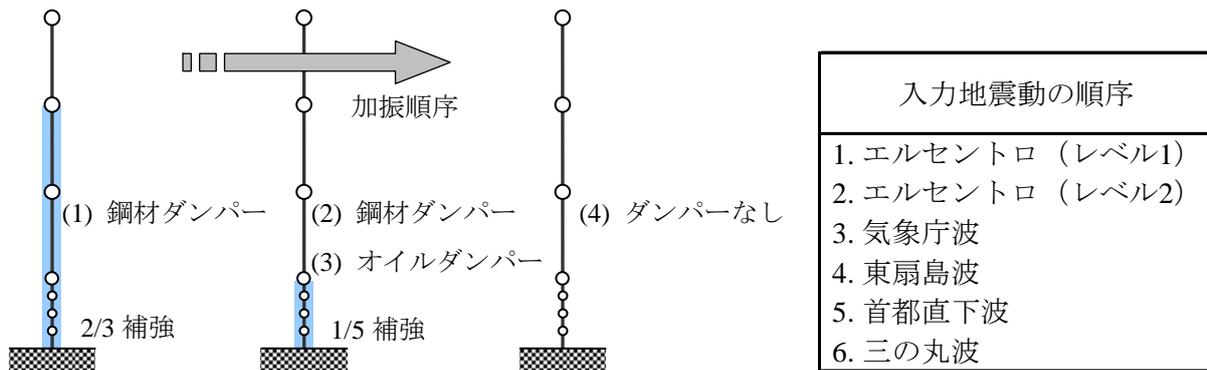


図-4 制振ダンパーによる補強条件と入力地震動

4. 実験内容

4. 1 試験体

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-5に示します。下層骨組内にブレース型の鋼製ダンパーを組み込みました。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倍としました。さらに、コンクリート錘と積



試験体全景



コンクリート錘間の積層ゴムと等価ダンパー



骨組内の鋼製ブレースダンパー

図-5 シリーズ① 鋼製ダンパー2/3補強試験体

層ゴムからなる上層部は、3層のうち下の2層に鋼製ダンパー（下層骨組と比べるとダンパーの剛性比および強度比が半分程度となる）を組みました。骨組と合わせて21階建て建物の下14階を補強したことになります。

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ている状態にしました。

シリーズ③、オイルダンパー1/5補強

シリーズ②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6に示すように、一般的なブレース型のオイルダンパーを取り付けました。

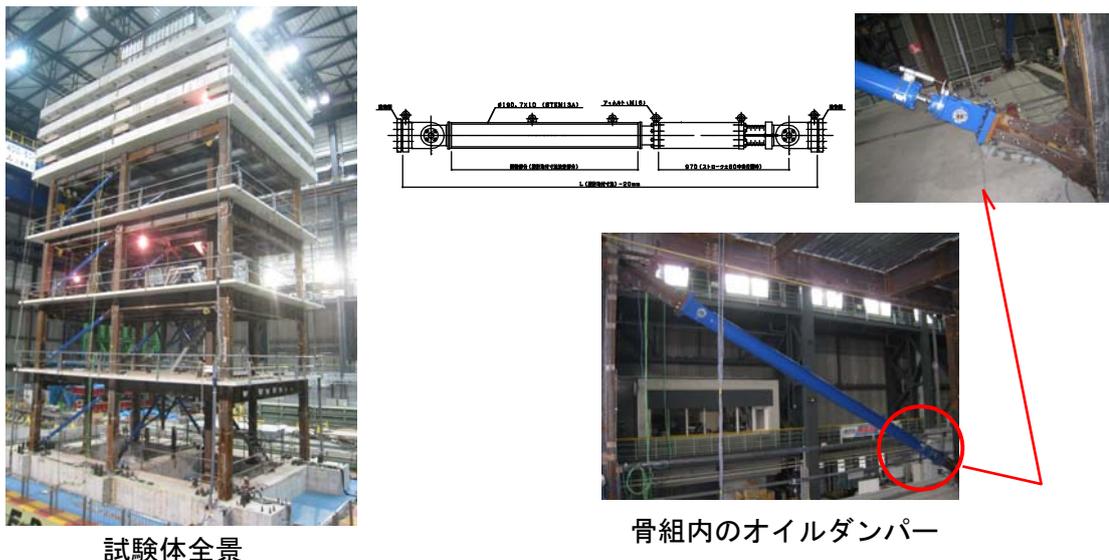


図-6 シリーズ③ オイルダンパー1/5補強試験体

4. 2 三の丸波入力時の応答結果

以降では、三の丸波のEW方向成分を入力した桁行方向の加振結果について述べます。

(1) 固有周期と入力エネルギー

三の丸波EW方向の最大速度応答スペクトルを図-7に示します。そのなかに、各シリーズの1次固有周期の値を書き込みました。1次固有周期の値は、三の丸波を入力した際の

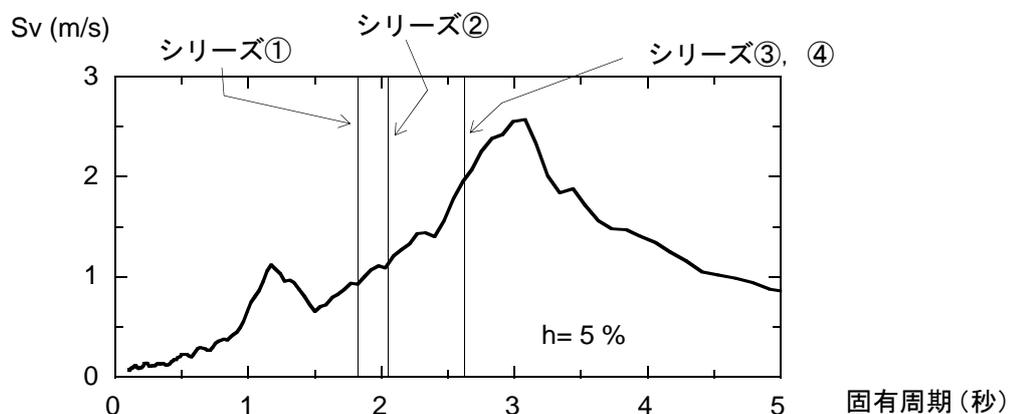


図-7 三の丸波の最大速度応答スペクトルと各シリーズの1次固有周期

基礎と屋上の伝達関数から求めました。ダンパーを入れないシリーズ④，オイルダンパーを骨組に入れたシリーズ③は，2.6秒となりました。鋼製ダンパーを組み込む場合は，その影響で周期が短くなります。鋼製ダンパーを骨組（1/5補強）に入れたシリーズ②は2.0秒，鋼製ダンパーを骨組とコンクリート鍾間（2/3補強）に入れたシリーズ①は1.8秒となりました。三の丸波のスペクトル形状と本試験体の周期帯の関係から，試験体の周期が短くなるとスペクトル振幅は小さくなります。

図-8に各加振における試験体への総エネルギー入力を示します。シリーズ④の値に比べると，シリーズ①の値は半分程度となり，上記のスペクトル振幅の傾向が実験結果に反映されました。

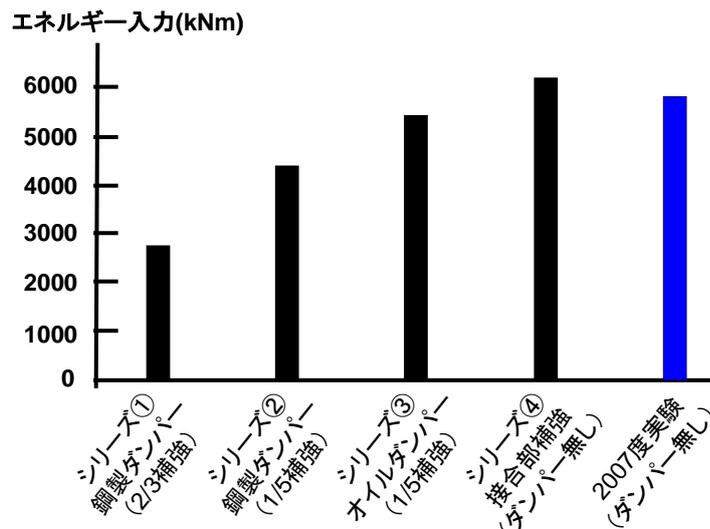


図-8 三の丸波で加振したときの各シリーズにおける総エネルギー入力

(4) 鋼製ダンパーを組み込んだ場合における高さ方向の変形分布

ダンパーが無い2007年度実験と鋼製ダンパーを組み込んだシリーズ①，②の実験結果（2/3補強，1/5補強）を比較します。図9は，三の丸波で加振したときの高さ方向の変形分布です。2007年度実験の場合に，一番大きな変形が生じた2層目の最大変形角は0.018radとなりました。シリーズ②の場合は，その下層部における値を1/3

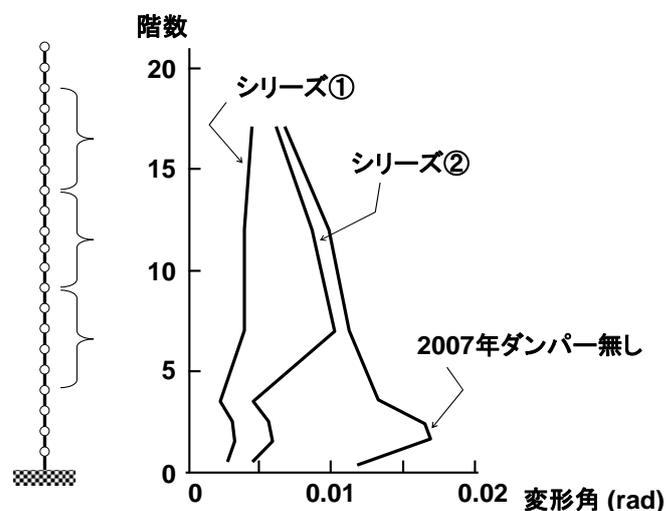


図-9 三の丸波を受けたときの高さ方向の変形分布（鋼製ダンパー）

程度とし、変形を効率的に抑えています。ただし、ダンパーを入れていない上層部分の値に大きな変化はなく、ダンパーが無くなる層から急に变形が大きくなる分布形状になりました。シリーズ①の場合は、補強の範囲が大きく变形分布が一様になりました。2007年度実験に対して最大値が1/6程度まで抑えられています（総エネルギー入力量が小さくなった影響をうけて、値は特に小さくなっています）。

(5) 骨組内におけるダンパーのエネルギー消費

骨組内にダンパーを設置した場合の応答状況を見ます。シリーズ②の鋼製ダンパー、シリーズ③のオイルダンパーによって、骨組2層目の最大変形角は、それぞれ0.06rad, 0.09radになりました。そのとき、ダンパーがエネルギーを消費した効果を支配率として図-10に示します。ダンパーの無い2007年度実験と比較すると、ダンパーを組み込むことで骨組の消費するエネルギーの割合を1/3以下にしたことがわかります。すなわち、骨組が消費しなければいけなかったエネルギーをダンパーが肩代わりし、骨組の損傷を抑制したことになります。ダンパーの種類で比較すると、オイルダンパーを入れた場合は、鋼製ダンパーを入れた場合よりも層間変形角が1.5倍程度大きいため、骨組が消費するエネルギーの割合が相対的に大きくなりました。一方でモデル化上層部のエネルギー消費の割合は小さくなり、変形が大きいところでダンパーを使うと、エネルギー消費効率が上昇し、ダンパーの入っていない上層部分の損傷もある程度小さくすることが示唆されました。

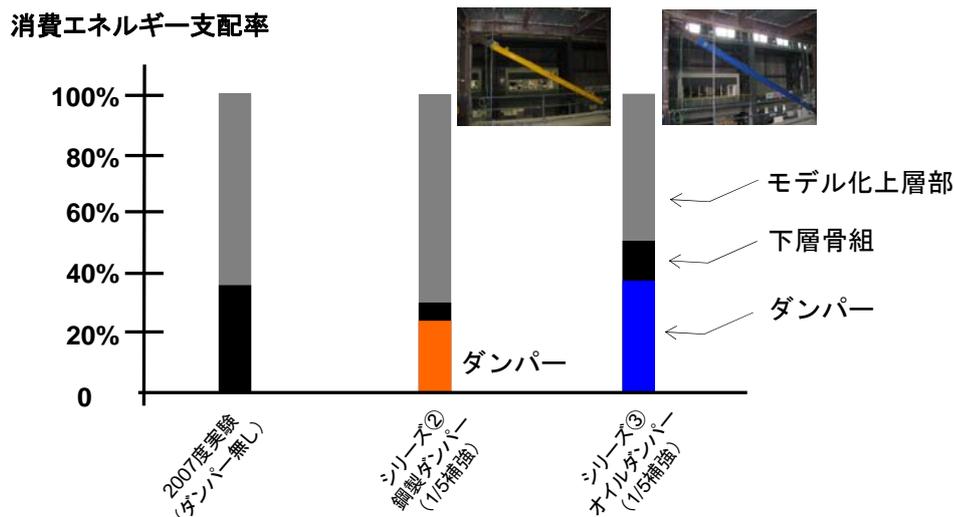


図-10 三の丸波を入力したときのエネルギー消費支配率

(3) 居室に関する実験と屋上の床応答

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居室の被害を検証しました。各シリーズにおいて、以下の種類の居室に対して映像を収録しました。

- シリーズ① 三の丸波 : オフィスビル, 会議室 (対策あり, なし)
- シリーズ② 三の丸波 : オフィスビル, 会議室 (対策あり, なし)
- 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)

ダンパーの影響で各シリーズの床の揺れは異なり、シリーズ①→シリーズ②→シリーズ③

③→シリーズ④順番で大きくなります。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、対策がある・なしの違いを与え、被害の程度を比較しました。図1 1に居室の状況と方向を示します。図1 2に各シリーズにおいて記録された屋上の加速度波形と、それらを積分して求めた速度波形と変位波形を整理します。試験体の桁行方向であるY方向を示します。図1 3に、X方向-Y方向に対する水平2方向の動きを示します。室内の詳細や被害等に関する観察記録は、資料2に記します。

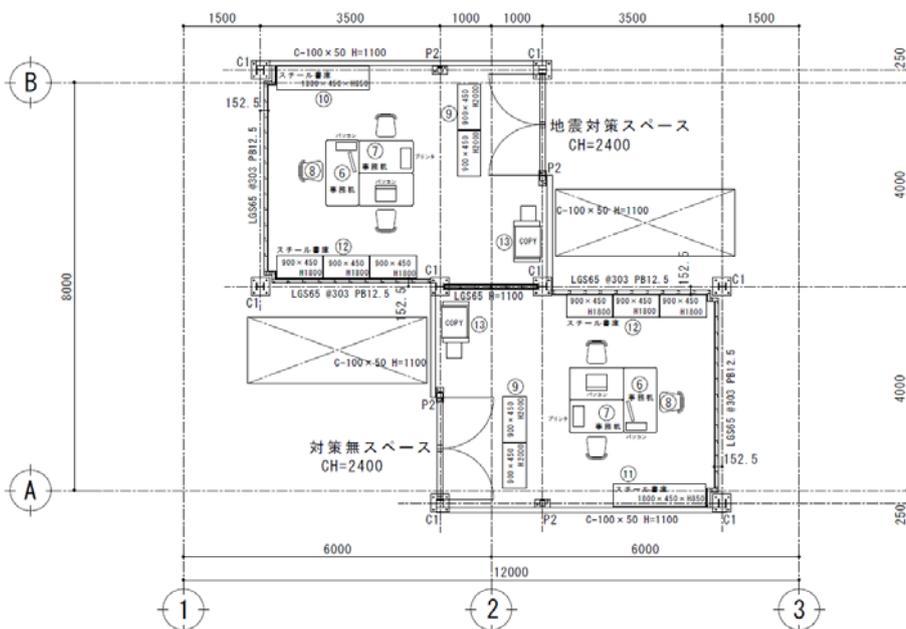
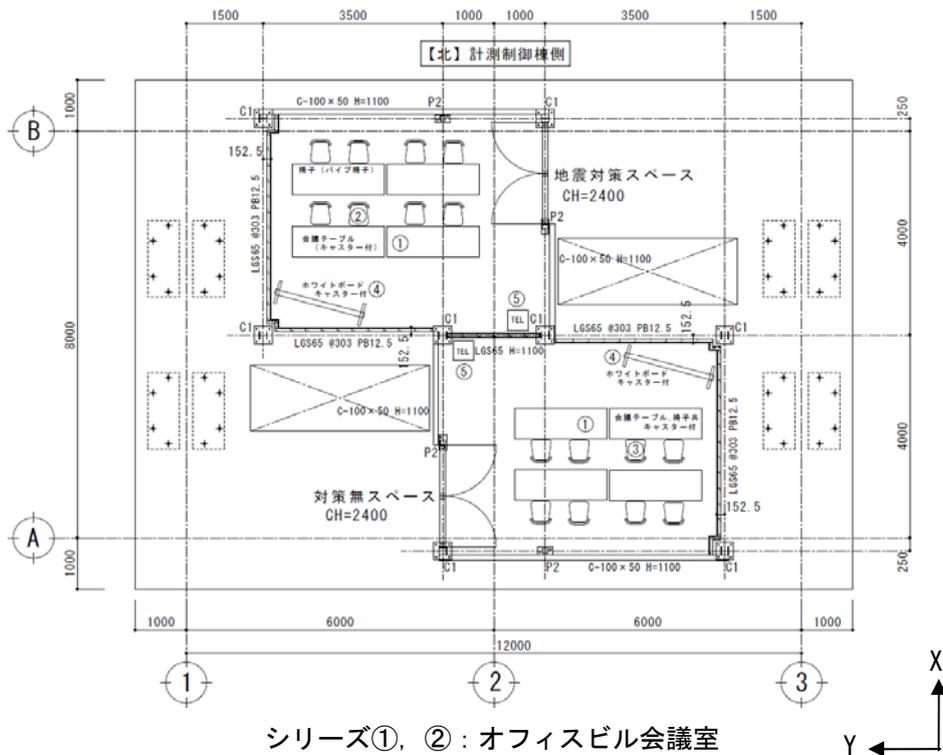
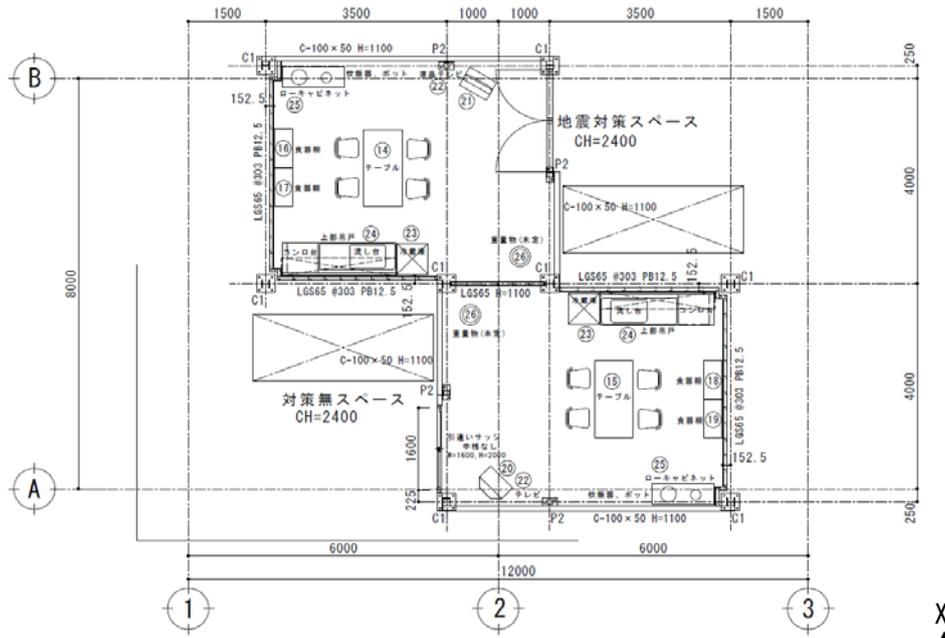


図-11(1) 試験体屋上ペントハウス内の配置



シリーズ④：共同住宅，ダイニングキッチンスペース

図-11(2) 試験体屋上ペントハウス内の配置

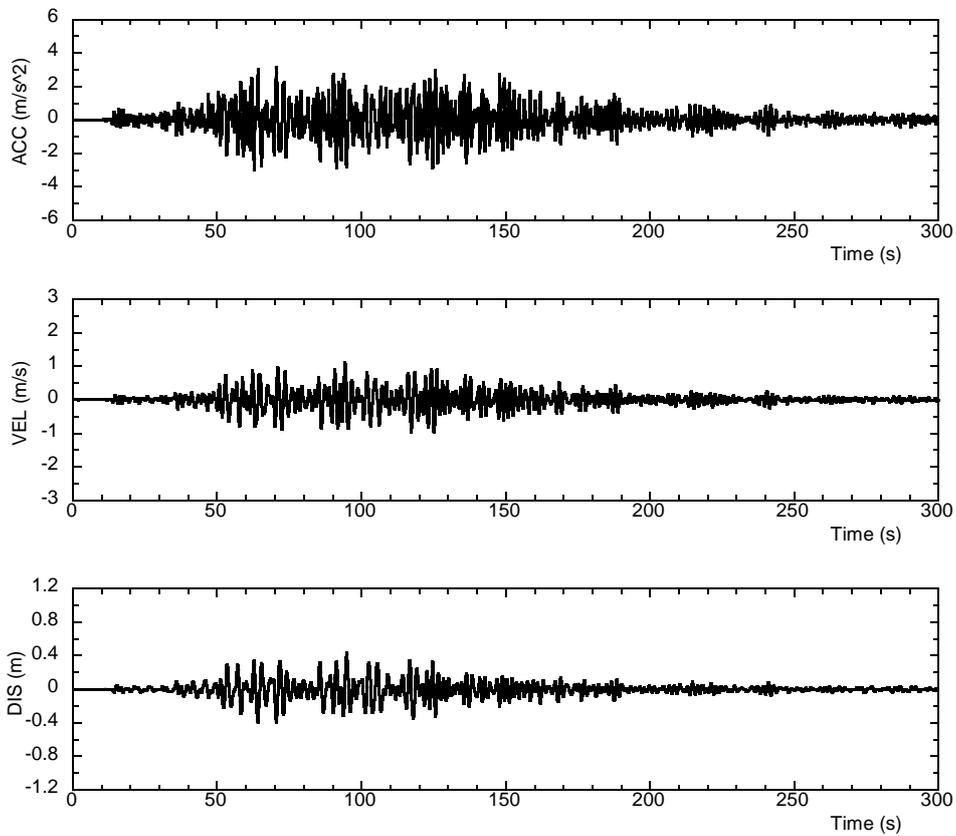


図-12(1) シリーズ①，床応答の時刻歴波形（Y方向）

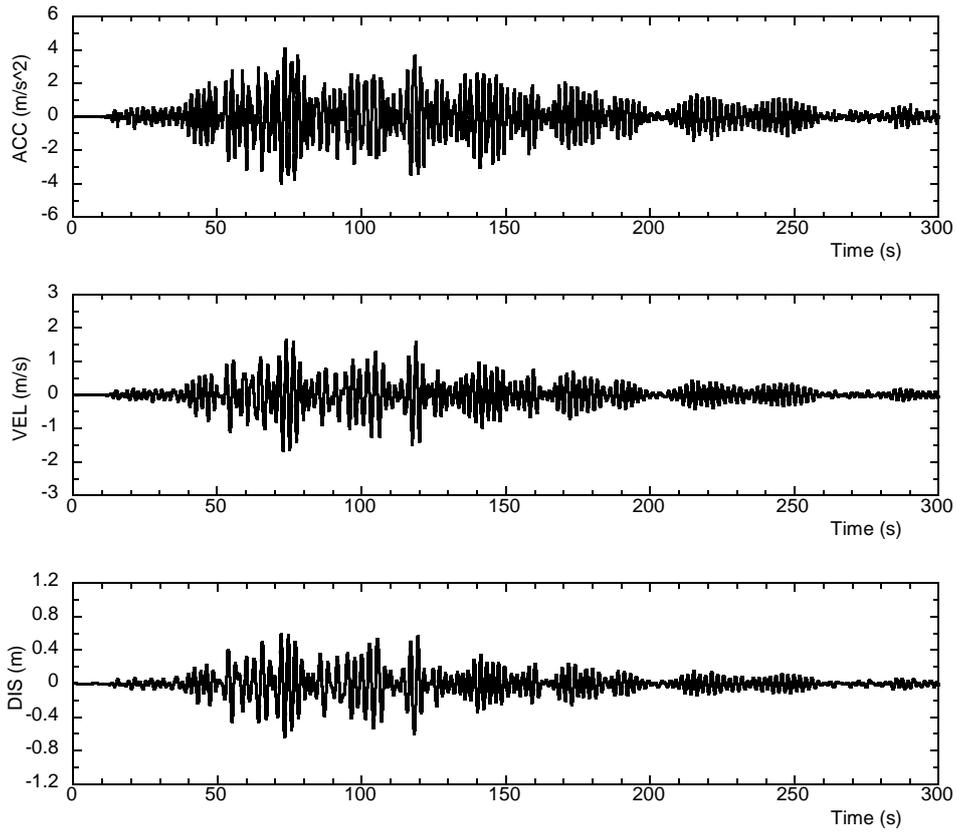


図-12(2) シリーズ②, 床応答の時刻歴波形 (Y 方向)

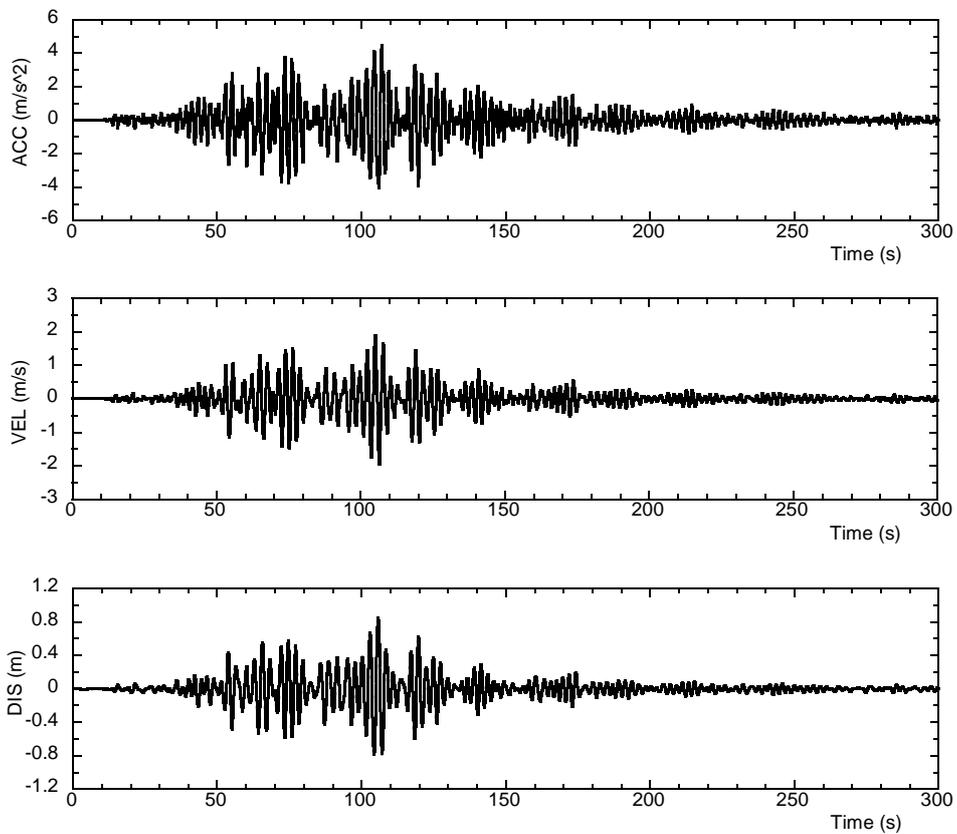


図-12(3) シリーズ③, 床応答の時刻歴波形 (Y 方向)

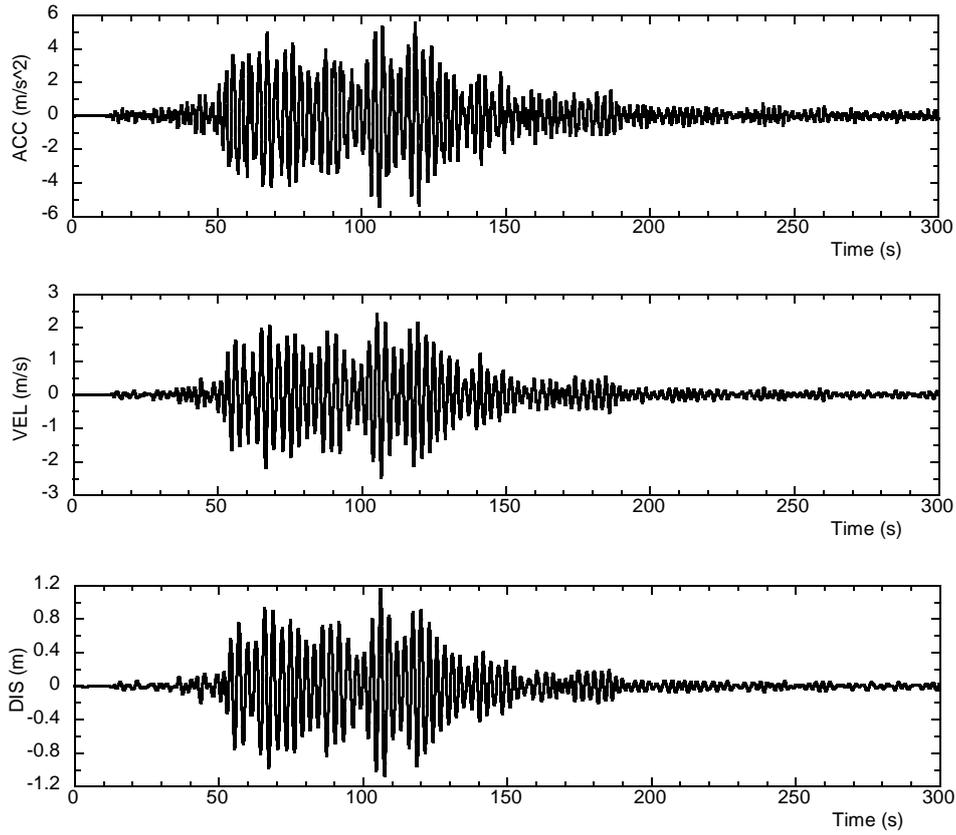


図-12(4) シリーズ④, 床応答の時刻歴波形 (Y 方向)

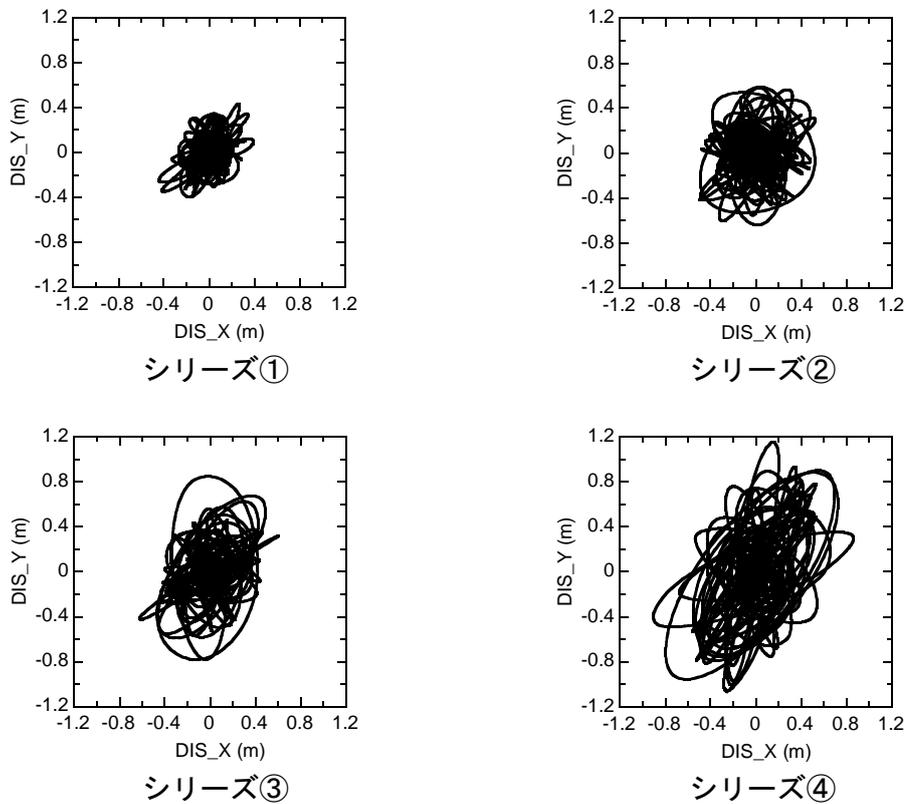


図-13 X 方向-Y 方向に対する水平 2 方向の動き