

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 －

TEST ON SEISMIC RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING
FOCUSING ON FURNITURE AND NON-STRUCTURAL COMPONENTS

－ Large scale test system based on E-defense shaking table －

長江拓也^{*1}, 梶原浩一^{*2}, 藤谷秀雄^{*3}, 福山國夫^{*4}
川辺秀憲^{*5}, 大西一嘉^{*6}, 城戸史郎^{*7}, 中島正愛^{*8}*Takuya NAGAE, Kouichi KAJIWARA, Hideo FUJITANI,
Kunio FUKUYAMA, Hidenori KAWABE, Kazuyoshi OHNISHI,
Shirou KIDO and Masayoshi NAKASHIMA*

Furniture and nonstructural components in high-rise buildings are subjected to intense seismic responses. To obtain physical data on their seismic behaviors, shaking table tests are conducted. A two-story frame is built on a concrete slab supported by rubber isolators. Cladding walls are fastened in the exterior frames. Furniture is placed on the sectioned floor. The design process of the test system is presented, and its vibration characteristics are considered. Preliminary seismic response analyses for a generic thirty-story building are conducted and referred to. Designed waves are input into the shaking table to produce the equivalent floor responses in the test system.

Keywords: *High-rise building, Floor response, Inter-story drift angle, Furniture, Nonstructural components*

高層建物, 床応答, 層間変形角, 家具, 非構造部材

1. はじめに

海溝型の巨大地震によって長周期成分の卓越した地震動が発生し、これにより高層建築物が長時間、大振幅で振動する可能性が指摘されている。¹⁾ 高層建物の地震時における大振幅床応答は、家具・什器を転倒、飛散させ、室内は居住者にとって極めて危険な状況に陥ることが危惧される。また、塑性化に伴う躯体の過大な変形により、外壁、内壁や天井等、建物を構成する非構造部材において損傷、損壊が予想される。

兵庫県と防災科学技術研究所は、2006 年度より、高層建物の大振幅応答問題について、振動台実験に基づく共同研究を展開している。兵庫県三木市に位置する実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）^{2), 3)} を利用するもので、対象とする項目は、i) 室内の家具・什器の挙動と対策方法、ii) カーテンウォール、ALC 外壁の損傷状況、iii) 石膏ボード間仕切り内壁の損傷状況、iv) 軽鉄下地吊り天井の損傷状況、iiv) 通信アンテナ、空調室外機等、屋外設置物の挙動と対策方法、と多岐に渡る。

本研究では、E-ディフェンス振動台を用いて、これらの内容を総

合的に検証する。本論では、兵庫県神戸市内沿岸部に想定される長周期地震動を用いた 30 階建て高層建物の応答解析結果を参照しつつ、実験システムを立案、構築し、その応答特性を考察する。

2. 既往の研究と提案システムの位置づけ

地震時高層建物の大振幅床応答を与える実験装置としては、居室を部分的に再現して家具の転倒など室内安全評価に特化するもの⁴⁾、揺れの大きさを体感することを目的としコンパクトさと高出力性能を達成するもの⁵⁾がある。これらは、アクチュエーターが取り付く従来型の振動台を用いず、新たな技術開発を試みたもので、それぞれの目的を達成し、高層建物の大振幅床応答の理解に大きな成果を得ている。

一方、従来型の振動台を前提として付加的な装置を準備し、実験システムの構築によって実構造物の挙動を近似する実験が行われている。^{6), 7), 8)} 本実験は、この類に属し、E-ディフェンス振動台を用いた実験システムを構築する方法で、高層建物の地震時床応答に相当する揺れの再現を試みる。

^{*1} 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・博士(工学)

Researcher, EERC, NIED, Dr. Eng.

^{*2} 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・博士(工学)

Senior Researcher, EERC, NIED, Dr. Eng.

^{*3} 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Prof., Kobe Univ., Dr. Eng.

^{*4} 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
客員研究員

Visiting Researcher, EERC, NIED

^{*5} 京都大学原子炉実験所 助教・博士(工学)

Assistant Prof., RRI, Kyoto Univ., Dr. Eng.

^{*6} 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・工博

Assoc. Prof., Kobe Univ., Dr. Eng.

^{*7} 兵庫県企画管理部災害対策局参事(建築技術担当)

Hyogo Prefectural Government

^{*8} 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
センター長・Ph. D.

Director, EERC, NIED, Ph. D.

現在までに多方向からの揺れを受ける高層建物内の事務所、住宅について、室内状況を細部にわたって再現し、非構造部材の応答状況および家具什物の散乱状況を総合的に検証した例はない。地震時における高層建物の室内状況を真実味のある映像として蓄積できれば、防災教育的価値の極めて高い資料になりうる。外壁等、非構造部材の耐震性に関する実験は、大規模なものまで実施されており⁹⁾、近年では修復経済性評価に対する考察¹⁰⁾も報告されている。ただし、非構造システムとして実規模架構内に組み込まれ、水平2方向に対して躯体変形が作用する振動台実験の例はない。

本研究では、こうした背景に基づき、高層建物内居室の内外を実大規模で再現しつつ、大振幅で長時間揺れる床応答と所定の層間変形を与える実験システムをめざす。

3. 長周期地震動を受ける高層建物の地震応答と振動台の制約条件

本研究では水平方向の揺れを対象とする。兵庫県神戸市内沿岸部に想定される長周期地震動を設定し、高層建物に対する地震応答解析から、床応答および層間変形角に代表される地震応答を抽出し、高層建物の床応答波と現状の振動台能力の関係を整理、考察したうえで、提案実験システムの設計を行う。

3.1 長周期地震動と高層建物の地震応答

(1) 想定する地震動と高層建物

兵庫県神戸市内沿岸部の東遊園地における長周期地震動を、想定南海地震に基づき設定する（以降、東遊園地波）。^{付録1, 11)~18)} 建物は神戸市を中心として兵庫県に存在する高層建物を考慮し、30階建て（高さ103m）とする。これらの条件から既往の資料^{19)~23)}を参考にした多質点系せん断ばねモデルによって地震応答解析^{付録2}を行う。図-1には地震動の減衰定数 $h=0.02$ における速度応答スペクトルを示す。周期が2秒を超えてから応答値が増大していき、長周期地震動の特徴が現れている。

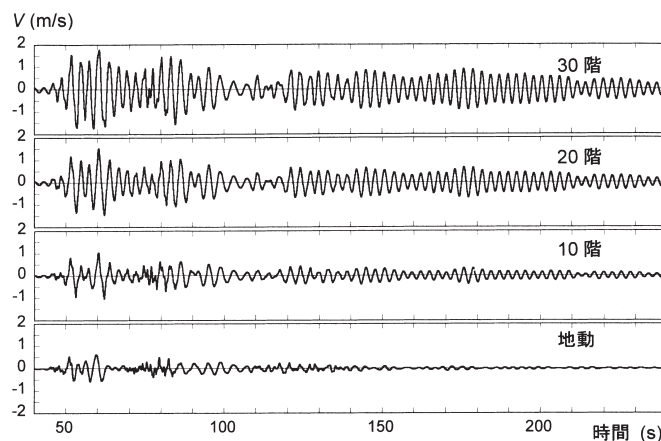
(2) 床応答

家具のすべり移動は床応答の最大速度と関連付けられる。²⁴⁾ 図-2には地動速度および建物の10階、20階、30階の床応答速度の時刻歴波形を示す。（地震が発生してから当該サイトに主要動が到達するまでの40秒間を省略して、40秒から波形を示す。）地震動は200秒に達する継続時間を有し、床応答波は上層部に行くほど増幅されている。20階、30階における床応答波は、地震動の振幅が小さくなる後半の100秒間にも最大振幅の60%に達する振幅を与えている。図-3は、NS方向およびEW方向の最大加速度 $A_{\max}$ 、最大速度 $V_{\max}$ 、

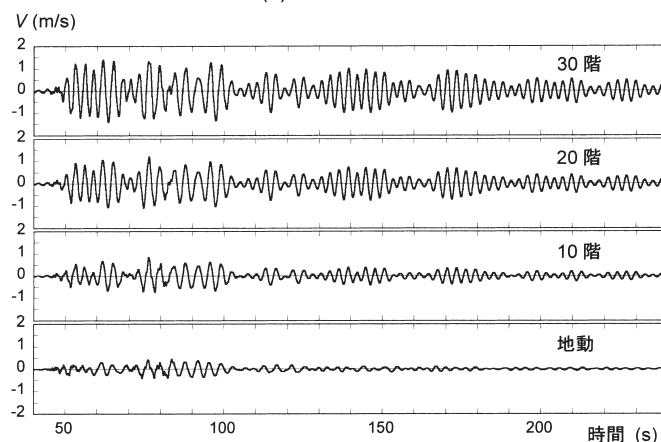
最大変位 $D_{\max}$ を絶対値で示している。高層階の最大レベル（図中の30階の平均値）は、最大加速度 $A_{\max}=4.2 \text{ m/s}^2$ 、最大速度 $V_{\max}=1.6 \text{ m/s}$ 、最大変位 $D_{\max}=0.92 \text{ m}$ となる。

(3) 層間変形角

高層建物の外壁は設計クライテリアとなる最大層間変形角（0.01 rad が一般的）を目標として、その追従性が与えられてきた。解析における最大層間変形角を図-4に示す。図-1において1次固有周期



(1) 東遊園地波 NS



(2) 東遊園地波 EW

図-2 入力地震動と30階建物の床応答

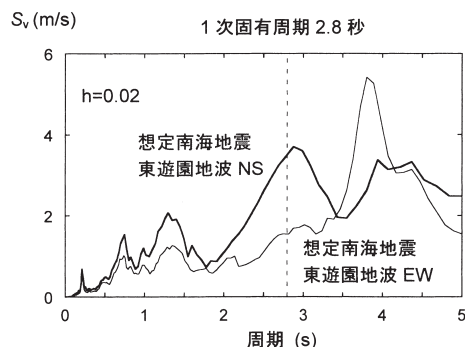


図-1 長周期地震動の速度応答スペクトル

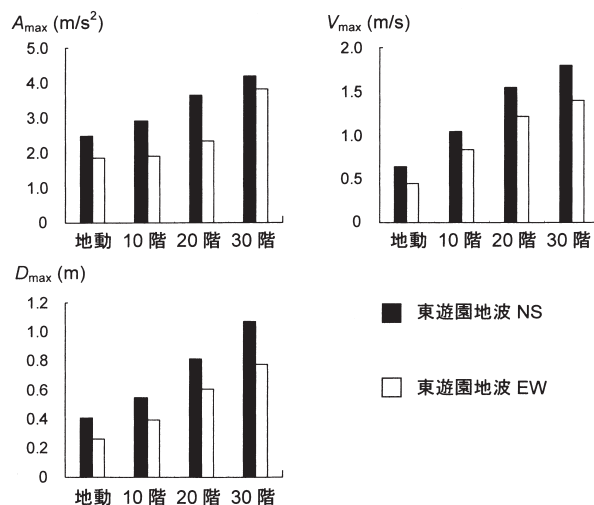


図-3 30階建物の床応答最大値

に対する応答値が大きい東遊園地波 NS の場合に最大で 0.017 rad (塑性率 2.1 に相当) に達している。

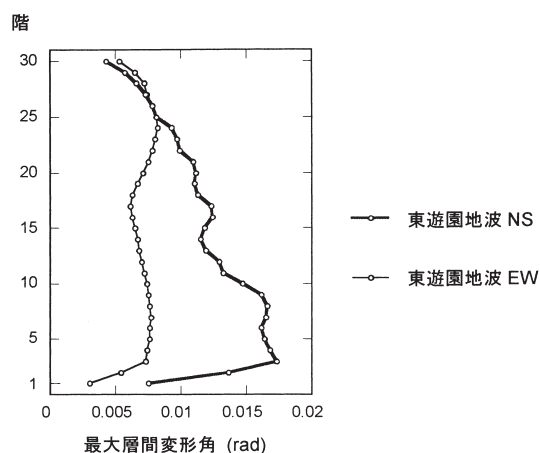


図-4 30 階建物の最大層間変形角

3.2 振動台の制約条件

国内 21 の機関における耐震実験用振動台の主要諸元をまとめた資料²⁵⁾から駆動方式を整理すると、半数以上の 12 件が油圧ポンプとアキュムレーターとの併用方式を採用し、9 件が油圧ポンプのみの方式を採用している。最大速度が大きくなるほど、また、多軸加振になるほど油圧ポンプとアキュムレーターとの併用方式を採用する傾向にある。E-ディフェンス振動台も、図-5 に示すように、アクチュエーターが水平方向に 10 台、垂直方向に 14 台装着されており、アクチュエーターにはアキュムレーターに蓄えられた圧油の放出によって加振力が与えられる。^{26), 27)}

E-ディフェンス振動台の水平方向最大加速度、速度、変位は、それぞれ 9.0 m/s^2 、 2.0 m/s 、 1.0 m である。しかし、こうした最大出力は、多数回繰り返しが保証されているわけではなく、アキュムレーターの放出油量の限界値と照らし合わせる必要がある。アキュムレーターの総放出油量は、加振中のアクチュエーターの伸縮速度を時間軸に対して積分し、シリンダー面積を乗じた流量をアクチュエーターの本数分加算する手順で求められる。^{付録 3}

図-6 は、図-2 における東遊園地波の地動および床応答の速度波形を積分して求めた水平 2 方向の総移動変位の和 (以降、総移動変位) を横軸とり、これらを振動台において水平 2 方向同時加振するときに必要なアキュムレーター放出油量を縦軸にとっている。その関係はほぼ線形にあり、床が長時間大振幅で動くことをあらわす総移動変位の増減が、アキュムレーター放出油量の増減と意味を同じくすることがわかる。限界油量との関係を具体的にみていくと、NS および EW の水平 2 方向の東遊園地波において限界量を 20 % 程度超える結果となっている。想定建物の高層階床応答波を振動台で直接再現する場合の放出油量は限界値の 10 倍にも達する。

継続時間が長い長周期地震動においては、振動台最大変位等の最大出力よりも、アキュムレーターの放出油量が支配的な制約条件となり、特に高層建物の床応答波を対象とする場合、振動台そのものの能力に頼るのではなく、振動台入力を増幅するシステムの導入が必要である。

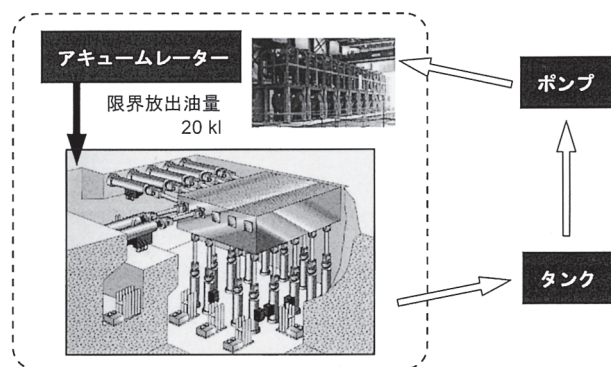


図-5 振動台アクチュエーターへの動力油供給システム

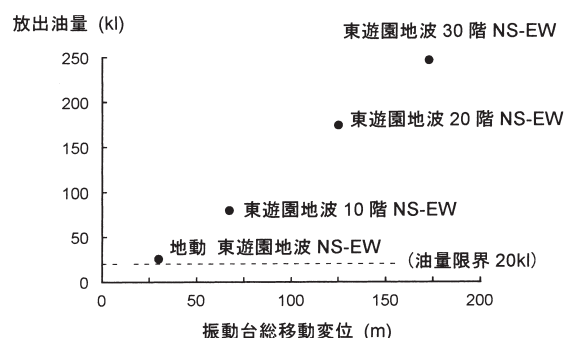


図-6 振動台総移動変位とアキュムレーター放出油量計算値

4. 試験体概要

4.1 実験システム

図-7 に本実験システムの概要を示す。実大寸法の切り出し鋼構造架構の試験部分を、大重量のコンクリートスラブ上に製作する。外壁における連層の影響を調べるために試験体架構部は 2 層構造とする。これを積層ゴムにより支持する。試験体の動的特性はコンクリートスラブと積層ゴムに支配され、その固有周期を目標とする床応答波の卓越周期と等価とすることで効率の良い応答増幅を図る。

システムとしての検証項目は、(a) 床応答増幅、(b) 層間変形角制御、(c) 床応答波形の再現性である。

家具の転倒・すべり移動は、最大加速度・最大速度と関連付けられる。²⁴⁾ 高層建物では特に大きな床応答速度に特徴を有し、(a) に関しては最大速度を中心に論ずる。層間変形角は外壁・内壁等の損傷に大きな影響を及ぼす最大値²⁴⁾を架構特性まで利用して制御する。

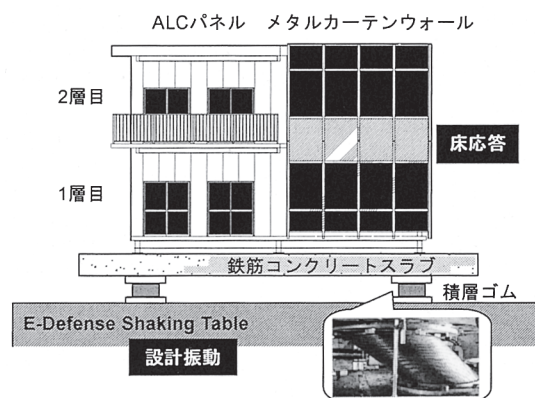


図-7 高層建物応答再現システム

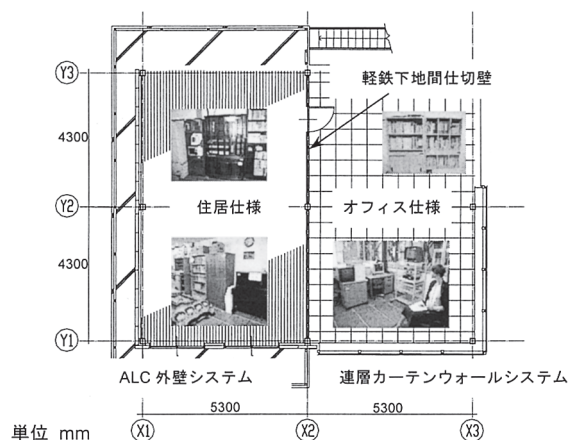


図-8 家具および非構造部材の状況

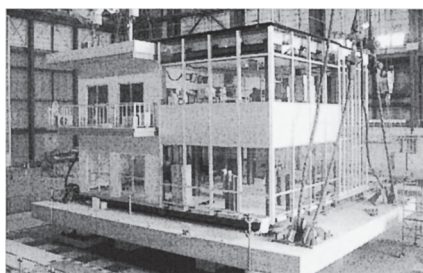


図-9 試験体の全景（振動台上設置直後）

4.2 家具および非構造部材

家具什器は2層目の床上に設置して、その挙動を観察する。図-8に2層目床の平面配置図を示す。図-9に試験体の全景を示す。外壁、家具什器はX1通りからX2通りまでを住居仕様、X2通りからX3通りまでをオフィス仕様とする。住宅側におけるALC外壁システムにはロッキング構法²⁴⁾を採用し、各層のALCパネルはベランダと張り出しスラブ間に挟まれる形式とする。オフィス側におけるカーテンウォールシステムには、2層にわたり取り付けられた方立てにガラスをはめ込む、標準的のノックダウン方式²⁴⁾を採用する。2層目室内は軽鉄下地の内壁仕上げとし、住居側とオフィス側は石膏ボード一枚張りの軽鉄下地内壁により区切る。各区画内には、軽鉄下地吊り天井を取り付ける。

4.3 構造設計

(1) 固有周期と床応答

架構部とコンクリートスラブの総重量 $M=612\text{tf}$ を、G03の天然ゴ

ム（せん断剛性公称値 $G=0.3\text{ N/mm}^2$ ）を用いた積層ゴム4基で支える。安定性および想定振幅レベルから、積層ゴム外径 $\Phi=1000\text{mm}$ 、ゴム総厚 $H=285\text{mm}$ の積層ゴムを採用し、層の水平剛性は $K_h=4\cdot A\cdot G/H$ として与えられる（ A はゴムの断面積）。表-1には、積層ゴムの静的水平載荷試験に基づく層としての各変形レベルに応じた割線水平剛性 K_h と、等価1次固有周期 $T_{eq}=2\pi(M/K_h)^{0.5}$ を示す。設計に際しては積層ゴムの変形を基準とする。振動台とコンクリートスラブの相対変位の最大値 $RD_{\max}$ をもとに、最大速度 $RV_{\max}$ および最大加速度 $RA_{\max}$ を設定することで目標とする値の実現性を確認する。

$$RA_{\max}=2\pi\cdot(1/T_{eq})\cdot RV_{\max} \quad RV_{\max}=2\pi\cdot(1/T_{eq})\cdot RD_{\max} \quad (1)$$

積層ゴムの加振制限変形を外径の85%、およびゴムのせん断ひずみ300%に相当する変形850mmとすると、このときの各床応答最大値は、 $RV_{\max}=1.94\text{ m/s}$ 、 $RA_{\max}=4.44\text{ m/s}^2$ となる。これら値は、図-3における高層階の床応答最大値に相当している。

表-1 床応答最大値の関係

$RD_{\max}$ (mm)	K (kN/mm)	T_{eq} (s)	$RV_{\max}$ (m/s)	$RA_{\max}$ (m/s ²)
71 (25%)	4.34	2.4	0.19	0.51
143 (50%)	3.60	2.6	0.35	0.84
285 (100%)	3.13	2.8	0.65	1.46
850 (300%)	3.20	2.7	1.94	4.44

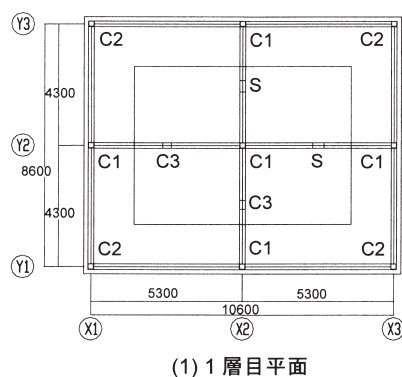
$RD_{\max}$ 仮定される最大相対変位、()はゴムのせん断ひずみ

$RV_{\max}$ $RA_{\max}$ 式(1)の関係から求められる最大相対速度、最大加速度

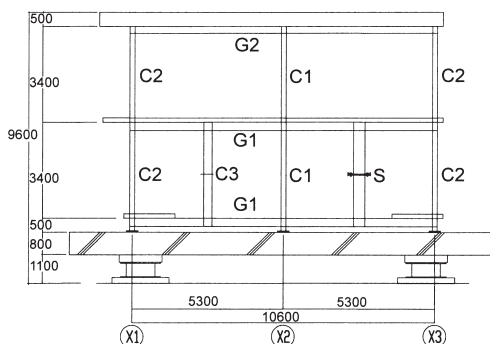
(2) 最大層間変形角

最大層間変形角は地震応答解析において得られた図-4の値のうち、最大レベルを目標とする。躯体は、階高、スパンを実寸法としたうえで、設計用荷重によって所定の変形角を弾性範囲内で実現する鋼構造である。図-10に架構図を示す。表-2に使用した鋼材を示す。梁は母材降伏強度から計算した降伏強度 M_y を、柱は部材実験により確かめられた最大強度 $M_{\max}$ を示している。層間変形は、柱の弾性変形を主に利用しており、相対的に梁が強い構造である。過大な層間変形は階中央で分離する片持梁ストッパーSにより抑制し、柱は部材角0.1radまで耐力を保持できる幅厚比、軸力比²⁸⁾としている。

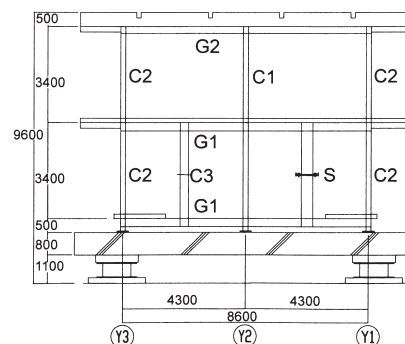
基本となる試験体弾性モデル（せん断ばねモデル）を図-11に示す。コンクリートスラブ上の架構のせん断剛性は、弾性フレームモデルに対する静的解析から求めた。2次の固有周期は0.8秒程度となるが、このモードが励起される程度は弱く^{付録4}、また、長周期帯に大きな力を有す地震動を想定することから、表-1の制限内最大応



(1) 1層目平面



(2) Y2通り架構



(3) X2通り架構

図-10 試験体架構図

単位 mm

答加速度 $RA_{\max}=4.44\text{ m/s}^2$ が試験体に一樣に生じると仮定し、2 層目床以上の質量に乗じて求まる層せん断力を層剛性と階高で除すと、1 層目、2 層目ともに最大層間変形角は 0.017 rad となる。

表-2 架構における使用鋼材

記号	鋼材種別	M_y (kN・m)	$M_{\max}$ (kN・m)
C1	□-175×175×12 (STKR400)	-	199
C2	□-175×175×9 (STKR400)	-	136
C3	H-294×200×8×12 (SN490B)	281	-
S	H-400×200×8×13 (SN490B)	438	-
G1	H-294×200×8×12 (SN490B)	281	-
G2	H-244×175×7×11 (SN490B)	187	-

M_y : 母材降伏強度 σ_y と断面係数 Z_y の積から算出した降伏強度

$M_{\max}$: 単純梁2点載荷曲げ実験による最大強度

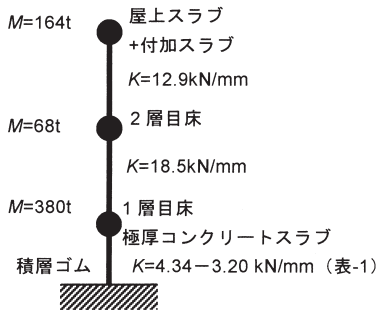


図-11 試験体弾性モデル（せん断ばねモデル）

5. 試験体加振

実験においては、逆解析に基づき比較的小振幅の床応答において応答波形の再現性を検証する「レベル1加振」と、想定する揺れの強さを重視する「レベル2加振」の2つのシリーズを設定する。レベル2加振では、アキュームレータの油量制限から逆解析による波形の忠実な再現は困難と判断し、先に述べた検証項目に関連する「最大床応答速度」、「最大層間変形角」を中心に応答特性を考察する。

(1) レベル1加振の方針

波形再現を検証する振動台入力波は、30階建物応答波を基準化して設定される目標波形に、試験体2層目床の応答波形が近似することをめざす。表-1に示すように、ゴムのせん断ひずみが100%を下回る小振幅時において積層ゴム剛性は相対的に高い。ここでは表-1を参照して、積層ゴム層の剛性を 4.34 kN/mm として周期を 2.4 秒 とする弾性モデル（図-11）を用い、逆解析から振動台入力波形を求める。逆解析においては、応答倍率の小さいモードに対応する固有振動数付近に反応して入力波に高い加速度成分が含まれるのを抑える目的で、ローパスフィルターを介在させる。

30階建物応答波の卓越周期は建物の1次固有周期である 2.8 秒 であるため、この時間軸を修正して 2.4 秒 と 2.8 秒 の比である 0.84 倍し、試験体の想定周期と目標波の卓越周期を一致させる。逆解析において求められる入力波の変位応答スペクトルにおいて、想定周期 2.4 秒 付近の最大変位がゴムのせん断ひずみ 100% 程度に相当するよう、目標波の加速度振幅は 0.3 倍に縮小する。図-12に得られたレベル1加振用の設計入力波における変位応答スペクトルを示す。目標応答波の傾向を反映するため、設定した周期 2.4 秒 付近の応答レベルが NS と EW で近くなっており、その点で図-1の東遊園地波（こ

の場合は時間軸を圧縮する前の 2.8 秒 における関係を参照）と傾向が異なる。それよりも長い周期帯の成分は、30階建て建物解析、試験体逆解析を通じて、東遊園地波の特徴が引き継がれている。^{注1}

(2) レベル2加振の方針

大振幅を想定し周期 2.8 秒 の弾性システム（表-1）によって、30階建物応答波に対する逆解析から入力波を与えた場合、必要とされるアキュームレータ放出油量は限界値の 1.8 倍に達する。

レベル1加振用入力波の変位応答スペクトルは、本試験体の周期範囲で右上がりの傾向にあり、レベル2加振では、この入力波を漸増し、積層ゴムの性質に起因する周期の伸びとの相乗効果で所定の最大振幅を生じさせる。図-12に示すレベル2加振用の振動台入力波は、レベル1加振用の振動台入力波を増幅したもので、変形レベルから想定される周期 2.8 秒 付近において最大応答変位が積層ゴムの加振制限変位に達しており、これを採用する（増幅倍率 2.3 倍）。

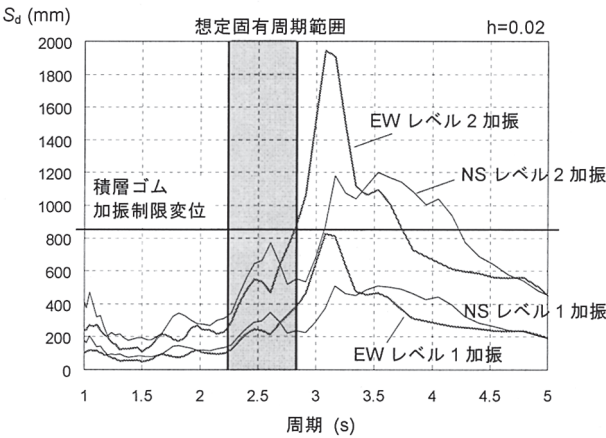


図-12 入力波の変位応答スペクトルと固有周期範囲

ここで、上記、アキュームレータ放出油量が限界値の 1.8 倍となる場合を基準にレベル2加振の必要油量を考える。アキュームレータの放出油量は、振動台の総移動変位に比例するとみなす。目標波の時間軸を 0.84 倍していることにより、振動台総移動変位は時間圧縮率の2乗倍である 0.64 倍となる。さらに修正目標波を 0.3 倍したレベル1加振を 2.3 倍するので、最終的に $0.64 \times 0.3 \times 2.3 = 0.45$ 倍を、限界に対する 1.8 倍の値に乘じることができる。結果、レベル2加振に必要な油量は限界値の 0.8 倍程度と評価される。

6. 実験結果

(1) レベル1加振の実験結果

図-13(1-1)、(1-2)に NS 成分に対する目標波と実験結果を、図-13(2-1)、(2-2)に EW 成分における目標波と実験結果を、それぞれ床絶対速度 V の時刻歴波形で示す。図-14に目標波と実験床応答波に対する加速度応答スペクトルを示す。

図-13の波形において、実験値は 100 秒 手前で応答が小さくなりその後 100 秒 以上にわたって応答が継続するなど目標とする波形の特長を良くとらえている。 60 秒 付近の相対的に大きな振幅時に最大速度の実験値が目標値を上回るのは、周期の伸びによって応答値が増大するという入力波の特性が出たためである。

図-14の加速度応答スペクトルにおいては、目標とする床応答波の卓越周期がほぼ 2.4 秒 となり、その付近の形状もよく一致してい

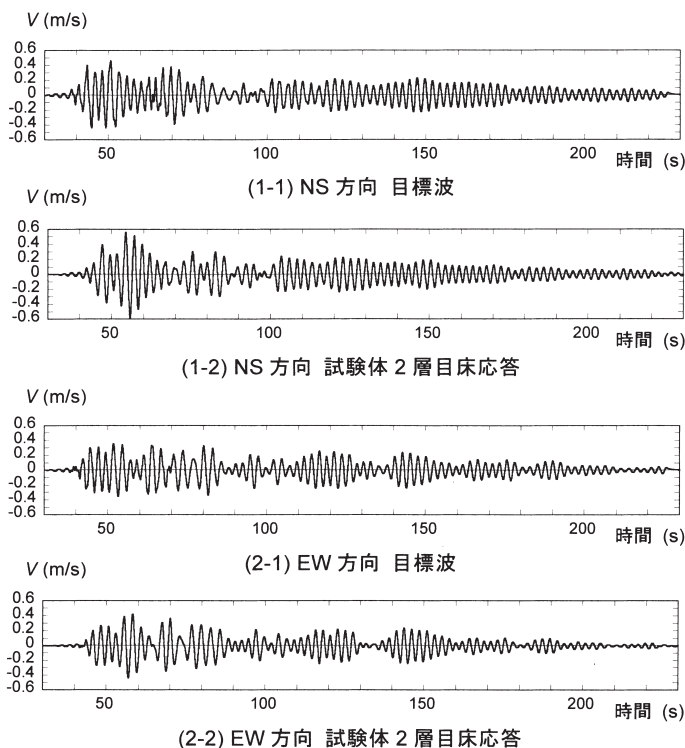


図-13 レベル 1 加振における床応答速度の時刻歴波形

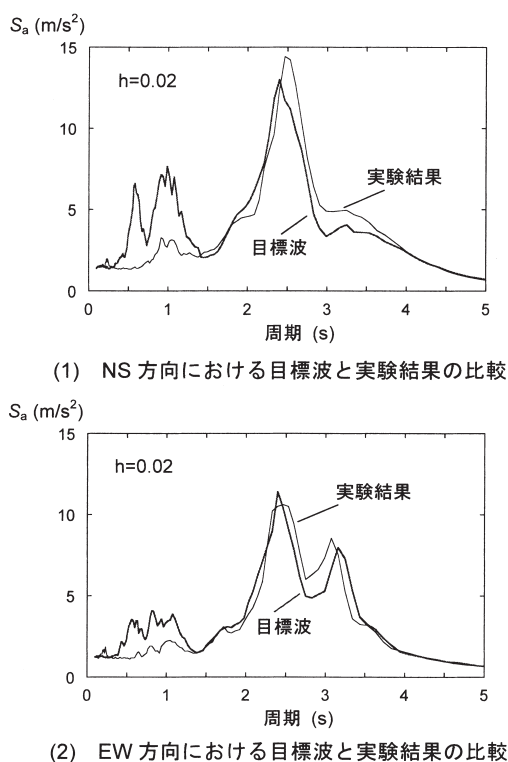


図-14 レベル 1 加振における 2 層目床の加速度応答スペクトル

る。目標波においては想定建物の 2 次固有周期付近でスペクトルに山が見られるが、実験結果は 2 次モードの影響が小さく 1 秒付近のスペクトルはなだらかである。周期が 0 に近づくと同程度の値（最大加速度振幅に相当）に収束する。EW 方向において 3 秒を越える付近の山は、東遊園地波に含まれた卓越周期が現れたものである。

(2) レベル 2 加振の実験結果

(i) 応答性状と最大応答値

床絶対速度の時刻歴波形を図-15 に示す。最大値は NS 方向において 1.47 m/s、EW 方向において 1.75 m/s であり、表-1 の積層ゴムの加振制限変形に対応する値 1.94 m/s の 76% と 90% に達している。図-3 を参照すれば、その値は高層階の最大レベルに相当している。床応答波に対する加速度応答スペクトルを図-16 に示す。床応答のピークから想定された 2.8 秒付近に卓越周期が位置している。

図-12 のスペクトルにおいて、周期が 2.8 秒付近では EW 方向のほうが NS 方向よりも応答値が大きくなっており、この関係が実験における床応答の最大値にも現れている。周期の伸びを利用して目標最大振幅の発生を試みる方針を反映して、振幅が大きくなると周期が伸びさらにスペクトル特性から振幅が大きくなるという相乗効果が顕著な部分と、そうでない部分の差が大きくなっている。特に EW 方向の実験結果は 100 秒程度までの振幅とそれ以降の振幅に大きな差が生じる結果となった。

図-17 には 1 層目の層間変形角の時刻歴を示している。最大層間変形角は、NS 方向において 0.013 rad、EW 方向において 0.015 rad となった。積層ゴムの加振制限変形時に想定された 0.017 rad と比較すると、それぞれ 76% と 88% で、その関係は上記床応答の関係を反映している。層間変形角の時刻歴は図-15 の床応答と同様の特徴を示し、想定される 1 次周期にしたがって繰り返し与えられる。

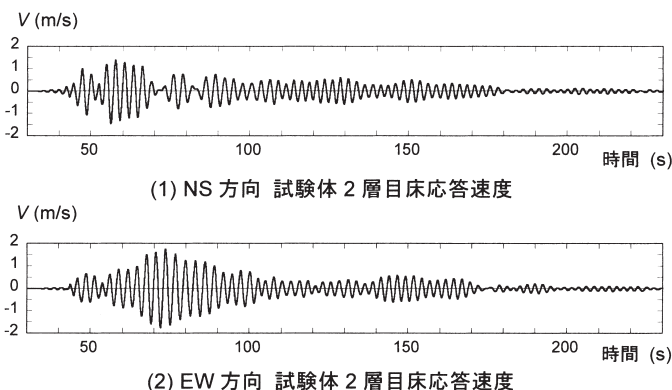


図-15 レベル 2 加振における床応答速度の時刻歴波形

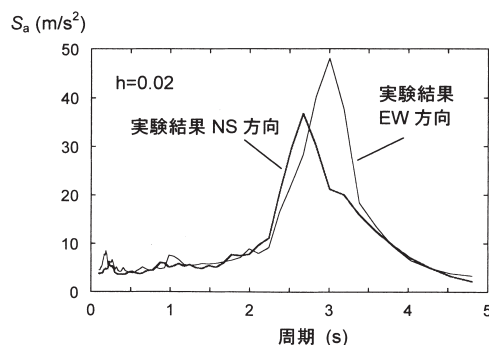


図-16 レベル 2 加振における 2 層目床の加速度応答スペクトル

(ii) 2 方向加振と床の総移動変位

図-18 は、NS-EW の 2 方向オービットを床の絶対変位 D および層間変形角に対して示している。2 層目床の応答変位には積層ゴムのせん断変形が支配的で、最大振幅は設計において設定された最大振

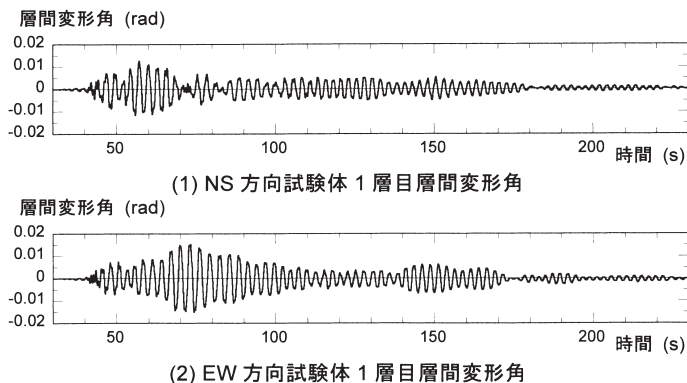


図-17 レベル 2 加振における層間変形角時刻歴波形

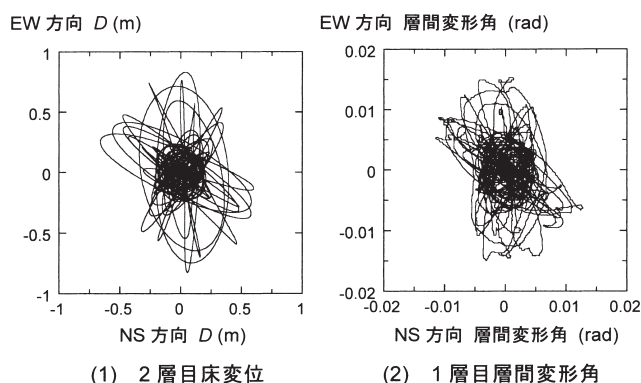
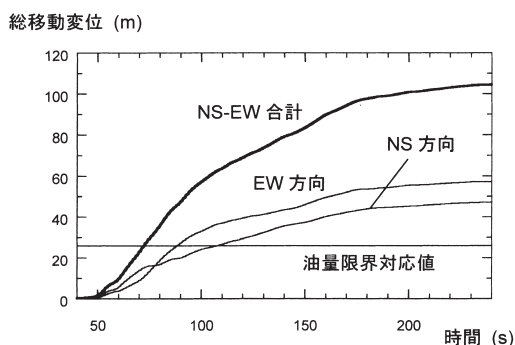


図-18 レベル 2 加振における水平 2 方向オービット



幅レベルに近い。本実験システムの上部架構は弾性範囲内で所定の変形角を生ずるよう設計されており、2 方向オービットにおいても層間変形は床応答変位と対応した形状を示している。

図-19 は、横軸の時間軸に対して、縦軸に 2 層目床の総移動変位をとっている。主要な揺れの開始から 150 秒間にわたって床の移動変位は上昇し続け、継続時間の長い床応答を再現できている。最終的に試験体 2 層目床における総移動変位は 100 m を超えている。アキュムレーターの放出油量の限界値から逆算される振動台の総移動変位 26 m を、本実験システムを使わないときの振動台制約条件とすれば、本実験システムは主要な揺れの開始から 20 秒程度でこの値に到達し、継続時間 200 秒程度において振動台の制約条件の約 4 倍の床総移動変位を生じさせている。

一方、図-6 を参照すれば、実験における床総移動変位は、想定 30 階建物の 10 階と 20 階の中間程度で、時間軸の圧縮から入力波の総移動距離を短くした手段等の問題点は、さらに検証が必要である。

7. まとめ

本研究では E-ディフェンス振動台を用いて高層建物応答問題について非構造部材、家具什器の挙動に焦点を当てる実験を実施した。高層建物内居室の内外を実大規模で再現する本提案実験システムは、積層ゴムに支えられる大重量コンクリートスラブの上に 2 層の鋼構造架構を作製し、これを実規模試験架構とするもので、積層ゴムにおける応答増幅を期待できる。

大振幅を目指した加振においては、床応答振幅および層間変形角が、想定する高層建物の固有周期にしたがって長時間繰り返され、応答値は所定の最大レベルをばば満足した。その際、床の総移動変位は、振動台で再現できるレベルを大きく超えた。

床応答波形の忠実な再現は、実験システムを弾性モデルに置換して逆解析から同定される設計入力波によって可能であることを、比較的小振幅の加振実験により確かめた。大振幅床応答波形の再現に関しては、アキュムレータの油量限界が主たる制約条件となる。この制限内で合理的に波形を作製する手法については継続して検討を進めており、稿を改めて報告したい。

本試験体内に組み込まれた非構造部材等の応答性状については次報において報告する予定である。

謝辞

研究の推進にあたって、「E-ディフェンスを活用した減災対策推進委員会（委員長：岡田恒男 東京大学名誉教授）」の委員各位から貴重なご助言をいただきました。実験に際して、(社)カーテンウォール・防火開口部協会、ALC 協会、板硝子協会、兵庫県立東播工業高校、兵庫県立生活科学研究所、独立行政法人建築研究所、(株)日本ピアノサービス、(株)東邦レオ、(株)サイテック、(株)桐井製作所、昭和電線デバイステクノロジー(株)、(株)高階に多大な協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (社)土木学会、(社)日本建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言、2006 年 11 月 20 日
- 松森泰造、白井和貴、壁谷澤寿海：大型振動台による鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の耐震性に関する研究—実大 6 層試験体と 3 次元振動台実験結果の概要—、日本建築学会構造系論文集、No.612, pp.207-214, 2007.2
- 山田哲、前澤将男、森利弘、島田侑子、佐藤英児、秋山宏：エネルギー入力に着目した実大振動台破壊実験施設性能確認試験の評価、日本建築学会構造系論文集、No.612, pp.207-214, 2007.2
- 斉藤大樹、高橋徹、小豆畑達哉、野口和也、箕輪親宏：大振幅の揺れを再現可能とする大ストローク振動台の開発とその性能検証実験、日本建築学会学術講演梗概集、B-2, pp.473-474, 2006
- 福和伸夫、佐武直紀、原徹夫、太田賢治、飯沼博幸、鶴田庸介、飛田 潤：長周期構造物の応答を再現するロングストローク簡易振動台の開発、日本建築学会技術報告集、第 25 号, pp.55-59, 2007
- 山口路夫、山田哲、前田泰史、萩原みき、竹内徹、成川匡文、中島正愛、和田章：実構造物の地震時挙動を再現する実大振動台実験手法の提案—制振ダンパーを組み込んだ鋼構造骨組の耐震性—その 1、日本建築学会構造系論文集、No.541, pp.179-186, 2001.3
- 秋山宏、山田哲、箕輪親宏、寺本隆幸、大竹章夫、矢部喜堂：慣性加力装置を用いた鋼構造要素の実大振動台実験方法、日本建築学会構造系論文集、No.505, pp.139-146, 1998.3
- 秋山宏、山田哲、松本由香、田中宏志、三山剛史、寺田岳彦：冷間成形角形鋼管柱の実大振動台実験、日本建築学会構造系論文集、No.521, pp.133-140, 1999.7
- 崎山格、横木光一郎、斉藤隆幸、永井昌志、深沢優、伊藤弘、西田和生、坂本功：一日米共同大耐震実験研究（鉄骨造）58—鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験（その 9、その 10）、日本建築学会大会学術講

演梗概集, A, pp.201-206, 1989.10

- 10) 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛: 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証, 日本建築学会構造系論文集, No.614, pp.139-147, 2007.4
- 11) 川辺秀憲, 釜江克宏: 破壊伝播速度が東南海・南海地震の強震動予測結果に与える影響, 海溝型巨大地震を考える-広帯域強震動の予測 2-シンポジウム論文集, 土木学会・建築学会 巨大地震災害対応共同研究連絡会 地震動部会, pp.91-94, 2006.2
- 12) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 強震動評価部会: 南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について (中間報告), 2001.
- 13) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業 (株) 技術研究所報, pp.61-70, 1996.
- 14) 宮腰研, 他: 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化 (その 3), 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, 185-188, 1999.
- 15) 堀川晴史, 他: 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の 3 次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No.3, pp.225-259, 2003.
- 16) Hori, T., et al.: A numerical simulation of earthquake cycles along the Nankai Trough in southwest Japan: lateral variation in frictional property due to the slab geometry controls the nucleation position, Earth and Plan. Sci. Lett., 228, 215-226, 2004.
- 17) 川辺秀憲, 釜江克宏: 大阪平野における長周期地震動評価のための最適な Q 値の推定, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, p1458-1461, 2006.
- 18) 神戸市, (財)建設工学研究所: 神戸の地盤データベース「神戸 JIBANKUN」, 神戸の地盤研究会, 1999.
- 19) 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—, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, pp.305-306, 1999
- 20) 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, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, pp.307-308, 1999
- 21) 市村将太, 福島東陽, 寺本隆幸: 超高層鋼構建造物の弾性設計用パラメータに関する研究 (その 1) 各パラメータの定式化, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, pp.867-868, 2000
- 22) 福島東陽, 市村将太, 寺本隆幸: 超高層鋼構建造物の弾性設計用パラメータに関する研究 (その 2) 各パラメータの関係, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, pp.869-870, 2000
- 23) 独立行政法人建築研究所: 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, 2005
- 24) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 日本建築学会, 2003
- 25) 大型三次元振動実験施設 技術検討委員会: 大型三次元振動実験施設技術検討報告書, 1998
- 26) 市川常雄, 日比昭: 油圧工学 機械工学基礎講座 18, 朝倉書店, 1997
- 27) ラプラス研究会: 機械・構造物の振動-その工学的対策と解析手法-, 養賢堂, 1989
- 28) 倉田真宏・中島正愛・吹田啓一郎, 固定柱脚を想定した角型鋼管柱の大変形繰返し載荷実験, 日本建築学会構造系論文, No.598, pp.149-154, 2005.12
- 29) 藤谷秀雄, 川辺秀憲, 長江拓也, 福山國夫, 梶原浩一, 中島正愛, 城戸史郎: 想定南海地震時の神戸市東遊園地における強震動予測と既往観測記録との比較 高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験 - その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.553-554, 2007
- 30) 長江拓也, 福山國夫, 藤谷秀雄, 梶原浩一, 中島正愛: 30 階建物の床応答と応答変形に関する時刻歴地震応答解析 高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験 - その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.555-556, 2007

付録 1 東遊園地における地震動計算

地震動計算に用いた地下構造モデルは, 大阪盆地の内側と外側に分け, 盆地の内側は宮腰・他(1999)¹⁴⁾ および堀川・他(2004)¹⁵⁾をもとにモデル化している。盆地の外側の領域は, S 波速度 3.2 km/s の基盤岩が露頭していると仮定して, フィリピン海プレート上面の形状は hori et. al. (2004)¹⁶⁾を参照した。減衰 (Q 値) は, 既往の研究 ¹⁷⁾から S 波速度 (単位: m/s) の 1/2 に比例すると

仮定し, 上限を 1000 とした。地震動予測地点の工学的基盤以浅の地下構造は近傍のボーリング探査結果 ¹⁸⁾を基に設定した。想定南海地震の震源域は, 地震調査研究推進本部のモデル ¹²⁾を基に設定し, 震源パラメータは地震調査研究推進本部のケース 2 のモデル値とした。

付録 2 地震応答解析モデル

解析においては, 1 次固有周期 $T_1=h(0.02+0.01\alpha)$, $\alpha=0.7$ から, 2.8 秒を設定し, 各層同質量のせん断ばねモデルにおける剛性と質量の関係を決める。このとき, 各層の弾性剛性分布は, A_i 分布から求まる層せん断力分布を基本とし, 1 階, 2 階は基礎の影響を加味してそれぞれ 1.8 倍, 1.3 倍に割り増す。層せん断力-層間変形関係を図-2 に示す。弾性限, 降伏限に基づくトリリニア骨格曲線で, 各層の設計用層せん断力係数 $C_{design,i}$ を標準せん断力係数 $C_0=0.25$, A_i 分布, 振動特性係数 $R_i=0.345$ により定め, その 1.2 倍, 2.0 倍を弾性限, 降伏限とする。第 1 剛性低下率, 第 2 剛性低下率は, 0.7, 0.1 である。履歴は Masing 則に従う。内部減衰は瞬間剛性比例型とし, 減衰定数を弾性 1 次固有周期に対して 2 %とする。

付録 3 アキュームレーターの放出油量計算

水平 2 方向, 鉛直 1 方向の各加振機 i の速度 $\dot{x}_{ia}(t)$, $\dot{y}_{ia}(t)$, $\dot{z}_{ia}(t)$ から各加振機の供給流量 $q_{ia}(t)$ を計算し, 各加振機の供給流量を合算し, 全加振機供給流量 $Q_a(t)$ を計算する。

$$q_{ia}(t)=A_i|\dot{x}_{ia}(t)| \quad (i=1,2,\cdots,5)$$

$$q_{ia}(t)=A_i|\dot{y}_{ia}(t)| \quad (i=6,7,\cdots,10)$$

$$q_{ia}(t)=A_i|\dot{z}_{ia}(t)| \quad (i=11,12,\cdots,24)$$

$$Q_a(t)=\sum_{i=1}^{24}q_{ia}(t) \quad (i=1,2,\cdots,24)$$

$q_{ia}(t)$: 時刻 t における加振機 i の供給流量

$Q_a(t)$: 時刻 t における全加振機供給流量

A_i : 加振機 i のシリンダー面積 (同一)

アキュームレーターから放出すべき油量は, 加振機供給流量と主油圧ポンプ吐出流量の差から計算される。

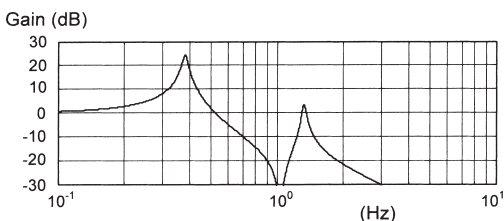
$$\Delta V=\int_0^T(Q_a(t)-Q_s)\cdot dt$$

Q_s : 主ポンプ吐出流量

ΔV : アキュームレーター放出油量

付録 4 試験体の周波数伝達特性

試験体を図-11 のようにせん断ばねモデル (積層ゴム層の剛性 3.20 kN/mm) に置換したときの振動台と 2 層目床との周波数伝達特性を付図-1 に示す。1 次固有周期に対応する 0.36Hz 付近は 20dB を超えるゲインを示すが, 2 次固有周期に対応する 1.2Hz 付近は 0dB 程度で, 入力に対する応答倍率という意味では 1 次と 2 次では 20 倍程度の差を有することになる。



付図-1 試験体の周波数伝達特性

注 1 周期の長い波の成分

30 階建物の時刻歴応答解析, および試験体の逆解析を通じて絶対加速度をもとに床応答を評価した。そのため, 30 階建物解析において建物の 1 次固有周期よりも長い地震動の成分はそのまま 30 階建物の床応答の波に反映され, また, 逆解析のときの振動台入力波には同様に試験体の 1 次固有周期よりも長い床応答波の成分が反映された。したがって, 図-7 のスペクトルにおいて, 周期の長い帯域では, 振動台入力波と地震動 (東遊園地波) が似た特徴を有している。

(2008 年 1 月10日原稿受理, 2008 年 3 月11日採用決定)