大振幅応答を実現する震動台実験手法の構築と超高層建物の室内安全性

DEVELOPMENT OF SHAKING TABLE TEST TECHNIQUES TO REALIZE LARGE RESPONSES AND EVALUATION OF SAFETY OF A HIGH-RISE BUILDING

榎田 竜太^{*1}, 長江 拓也^{*2}, 梶原 浩一^{*3}, 紀 暁 東^{*4}, 中島 正 愛^{*5}

*Ryuta ENOKIDA, Takuya NAGAE, Kouichi KAJIWARA,
Xiaodong JI and Masayoshi NAKASHIMA*

To examine the performance of furniture in the top stories of high-rise buildings particularly under long-period ground motions, a full-scale shaking table test was conducted in E-defense. A mass-and-rubber system was designed to overcome the limitation of the shaking table. A five-story specimen with large stiffness was set on the rubber-and-mass system. It enables that different stories' responses are same and a lot of furniture experiments are carried out simultaneously. The waves generated from the inverse dynamic compensation were taken as inputs. The test results show that the large responses at the top stories can be reproduced reasonably. Through the shaking table test, physical data of furniture in high-rise buildings under long-period ground motions were obtained.

Keywords: Long-period ground motion, High-rise building, Floor response, Shaking table test, Furniture

キーワード：長周期地震動，超高層建物，床応答，震動台実験，家具什器

1. はじめに

海溝型の巨大地震によって長周期地震動が発生し，その地震動を受ける超高層建物は長時間，大振幅で揺れる可能性が指摘されている¹⁾．長周期地震動を受けて長時間揺れる超高層建物の室内において，家具什器は居住者に対する凶器と化することが危惧される．長周期地震動による超高層建物の応答を実規模で再現し，こうした室内の危険性を総合的に検証することは極めて重要な課題である．ここでは，家具什器のすべりや転倒等の現象を加速度や速度などを用いて工学的見地から評価しつつ，室内としての総合的な被害軽減対策を示すことが必要であるが，同時に，地震時における超高層建物の室内状況を忠実に再現した記録映像は防災教育における有力な資料としての価値をもつ．

2006 年度に長周期地震動による超高層建物の床応答を再現する震動台実験が行われた²⁾．そのなかでは，E-ディフェンス震動台の制約条件を整理し，積層ゴム支承を増幅システムとして用いることで，アキュムレータの放出油量を節約する実験システムを提案している．超高層建物内の非構造部材・家具什器の応答状況を総合的に検証するために，試験体内では事務所および住宅における室内状況が細部にわたって再現され，実験により貴重な資料が収集された．

ただし，この実験では，一時的な大振幅床応答が実現されたものの，実験における制約条件等から，これを長時間にわたって実現することはできず，床応答の忠実な再現までには至っていない．架具什器の地震時挙動を再現するためには，最大レベル振幅とその繰り返し回数，継続時間が重要であり³⁾，目標応答をできるだけ忠実に再現する必要がある．

本研究では，上記の実験で用いられた増幅システムよりも，更なる大振幅応答を可能にする新たな実験システムを構築する．さらに，室内の安全性という観点から床応答再現を合理的に達成すべく，複数の震動台入力波作成手法を与えられた制約条件のなかで比較，検討し，最適な入力波を用いて E-ディフェンス震動台実験を行う．

本論文の構成として，2 章では再現を目標とする応答と E-ディフェンス震動台の限界について説明する．3 章では目標応答を再現するための実験システムについて説明し，各種の制約条件を整理する．4 章において，制約条件に照らし合わせて目標応答を再現するための震動台への入力波を決定する．6，7 章では，決定された入力波を用いた E-ディフェンス震動台実験の床応答結果を検証する．8 章では，大振幅床応答が再現された試験体内の家具什器の挙動を考察する．

^{*1} 京都大学大学院建築学専攻 修士課程

^{*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 研究員・博士(工学)

^{*3} 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)

^{*4} 京都大学防災研究所 JSPS 研究員・博士(工学)

^{*5} 京都大学防災研究所 教授・Ph. D.

Graduate Student, Faculty of Eng., Kyoto University
Researcher, EERC, NIED, Dr. Eng.

Senior Researcher, EERC, NIED, Dr. Eng.

JSPS Researcher, DPRI, Kyoto University, Dr. Eng.
Prof., DPRI, Kyoto University, Ph. D.

2. 超高層応答再現と E-ディフェンス震動台

2.1 目標応答と想定 30 階建物の床応答

震動台実験で再現を目標とする床応答は、兵庫県に建つ超高層建物を想定した30階建物の最上層床応答である。長周期地震動を受ける想定建物の床応答は、地震応答解析⁴⁾から求められる。想定建物は既往の資料を参考に設計し、1次固有周期を2.8秒に設定した。解析には、想定南海地震に基づき兵庫県神戸市の市内沿岸部の東遊園地に予測される模擬地震動（以降、東遊園地波）を用いる⁵⁾。図1に東遊園地波の時刻歴波形を示す。東遊園地波の最大加速度は 2.5 m/s^2 であり、最大速度は 0.7 m/s である。継続時間は200秒以上であり、加速度応答スペクトル ($h=0.02$) は図2のように3秒から4秒の周期において大きな振幅を有する。NS方向では、想定30階建物の1次固有周期(2.8秒)付近で特に振幅が大きくなっており、 8.5 m/s^2 を超える。

図1 東遊園地波

図2 東遊園地波の加速度応答スペクトル

図3 目標応答加速度波形

解析の結果、想定した30階建物は、3階から10階にかけて最大層間変形角が 0.015 rad を超えて弾塑性挙動を示した。最上階の床応答変位は50~120秒の間にNS方向 1.24 m 、EW方向 0.93 m の最大振幅に達し、さらに120秒以降に約 0.50 m の振幅が多数回繰り返された。ここで、最大振幅を記録する50~120秒の応答を1次イベントと称し、120秒以後の応答を2次イベントと称す。本実験では、本研究が提案する増幅システムの限界に挑戦するために目標応答の最大変位を 1.50 m に設定する。具体的には、NS方向の応答加速度を $C_{NS}(=1.50 \text{ m}/1.24 \text{ m})$ 倍し、EW方向は $C_{EW}(=1.0)$ 倍とする(図3)。

2.2 E-ディフェンス震動台の基本仕様

E-ディフェンス震動台の水平方向の最大加速度、速度、変位は、それぞれ 9.0 m/s^2 、 2.0 m/s 、 1.0 m である。また、E-ディフェンス震動台のアクチュエーター放出限界油量は 20 kl である。目標応答の最大加速度・速度・変位は 5.08 m/s^2 、 2.60 m/s 、 1.50 m であり、目標応答の最大速度・変位はE-ディフェンスの震動台の限界を超えている。また、目標応答加速度を震動台で直接出力した場合に必要なアキュムレータ放出油量をE-ディフェンスの油量計算⁶⁾に従って算出すると、 333 kl (限界油量 20 kl の約16倍)に達する。震動台の制約条件とアクチュエーター放出限界油量から、目標応答を震動台への直接入力とすることはできない。

3. 実験システムと制約条件

3.1 試験体の設計

E-ディフェンス震動台の限界を超える応答を再現するために、本実験では震動台と5層の鋼構造架構⁸⁾である上部構造物の間に増幅システム(図4の斜線部)を組み込む。増幅システムは、径 1.0 m の積層ゴム支承4基で支える層を2段重ねとすることによって、積層ゴム支承単体の変形性能の2倍の変形性能を得る。5層の鋼構造架構はきわめて高い剛性を有しているため、上部構造物を剛体と仮定することができる(詳細は後述)。

図4 試験体

コンクリートスラブの質量と積層ゴム支承は以下のように設計した。まず、1層目の質量 m_1 と2層目の質量 m_2 が等しいと仮定し、1層目の剛性 k_1 を2層目の剛性 k_2 の1.5倍とする。これによって、1次モードの振動が卓越するときの各層間変位は等しくなる。本研究では上部構造物が 360 ton と推定されたため、コンクリートスラ

ブの質量も同様に 360 ton とした。また、増幅システムの各層剛性の目標値として、既往の研究²⁾を参考に $k_1=4.86$ kN/mm $k_2=3.24$ kN/mm と設定した。1 層目に G₀45 の天然ゴム（せん断剛性公称値 $G=0.45$ N/mm²）を用いた積層ゴム支承 4 基（積層ゴム外形 $\phi=1000$ mm, ゴム総厚 $H=285$ mm）を、2 層目に G₀30 の天然ゴム（せん断剛性公称値 $G=0.3$ N/mm²）を用いた積層ゴム支承 4 基（積層ゴム外形 $\phi=1000$ mm, ゴム総厚 $H=285$ mm）を採用した。水平剛性を $K=4 \cdot A \cdot G/H$ によって設定すると、1 層目の剛性は 4.96kN/mm になり、2 層目の 3.30 kN/mm になる。

積層ゴム支承の剛性は想定された最大変形 0.75m(ゴムのせん断変形に等しい)の 0.65 倍の変形時の割線剛性によって代表させる。上部構造物の質量は吊り上げ時に 395 ton と計測され、想定された質量よりも 35 ton 重くなった。静的実験結果および設計値、試験体吊り上げ時測定値に基づく本試験体の諸元を表 1 に示す。

表 1 試験体の質量と剛性

層	1	2	3	4	5	6	7
質量 (ton)	360.0	125.0	68.2	61.4	54.6	46.8	39.0
剛性 (kN/mm)	4.8	3.1	1423.6	1042.1	842.6	650.4	521.1

3.2 試験体のモデル化

試験体を設計する際に上部構造物を剛体と仮定したが、上部構造物は 5 層であるため、試験体は 7 質点系とみなされる。ここでは上部構造物を剛体として設定できることを確認する。本試験体をせん断 7 質点モデルとしたときの 1 次固有モード Φ_1 を用いて、i 質点目と j 質点目のモード形状差 Me_{ji} を式(1)のように定義する。このとき、震動台から i 質点までのモード形状を Φ_{1i} とする。

$$Me_{ji} = \frac{|\Phi_{1i} - \Phi_{1j}|}{\Phi_{1j}} \times 100 \quad (1)$$

式(1)によって得られる 2 質点目と 7 質点目のモード形状差 Me_{27} は僅か 0.35 % であり、上部構造物は相対的に剛体としてとらえることができる。したがって、上部構造物の各層（各床面積 108 m²）にほぼ等しい床応答が再現され、各種の家具什器に関する大規模実験を同時に実施することができる。また、上部構造物は剛強であるので、震動台実験によって上部構造物が損傷を受けることはなく、多数回の震動台実験に対応できる。

図 5 試験体モデルの伝達関数と想定 30 階建物の伝達関数

上部構造物とコンクリートスラブを剛体と見なし、せん断 2 質点モデルによって試験体をモデル化する。減衰定数は 3 % であると仮

定し、減衰モデルは剛性比例型とする。モデル化された試験体の伝達関数と想定 30 階建物の伝達関数を図 5 に示す。このモデルの 1 次振動数 f_1 は 0.32 Hz であり、想定 30 階建物の 1 次振動数との差は 0.04 Hz である。また、モデルの 2 次振動数 f_2 は 0.81 Hz である。

3.3 震動台と試験体に関する制約条件の整理

目標応答の最大変位と最大速度は震動台の限界を超えているが、目標応答の最大加速度は震動台の限界を超えていない。目標応答を再現するための入力加速度は制約条件に対して支配的ではなく、震動台の制約条件は最大速度と最大変位、およびアキュムレータの放出限界油量となる。

増幅システムの各層の変形がゴム径 1.0 m に接近すると、積層ゴム支承が座屈してしまう恐れがある。そのため、本実験では安全性を考慮して積層ゴム支承の許容最大変形をゴム径の 75 % に設定する。また、積層ゴム支承に過大な引張力を作用させることは望ましくない。本研究では積層ゴム支承に作用する引張力応力度 σ を 1 N/mm² 以下に抑えるため、積層ゴム支承の面積と引張応力度から積層ゴムの最大許容引張力 N を 770 kN ($N=\sigma \cdot A$) に設定する。

これらの試験体における制約条件とあわせ、実験システムとしての制約条件は以下のように整理できる。

- ① 震動台の最大速度、最大変位 (2.0 m/s, 1.0 m)
- ② アキュムレータの放出限界油量 (20 kl)
- ③ 積層ゴム支承の許容最大変形 (0.75 m)
- ④ 積層ゴム支承に作用する最大引張力 (770 kN)

3.4 再現された応答の評価と増幅システムの評価

再現された応答と目標応答に対する評価は、それぞれの応答の最大値の比較や、目標応答と再現応答の応答スペクトルの比較などが用いられる。しかし、応答の最大値の比較では、継続時間の長い多数回の繰り返しを評価できない。また、応答スペクトルの比較では、減衰の設定により誤差が変動する。時刻歴波形による評価が最も直接的であるが、時間のずれが結果に差異を与える。ここでは、波形の時間のずれに関わる位相にとらわれない周波数成分の振幅を用い、再現誤差 Er を目標応答・再現応答の加速度フーリエ振幅スペクトル S_{tar} ・ S_{rep} を用いて式(2)のように定義する。なお、本評価方法は、震動台そのものの加振性能評価⁷⁾にも採用されている。

一方、震動台によって消費される油量は震動台の累積変位と相関があり、震動台の累積変位が大きくなるにつれて消費油量も多くなる。本研究では震動台の累積変位をできるだけ抑えて必要油量を節約し、所定の大振幅床応答を実現するために増幅システムを導入した。その効果を評価するために、増幅率 C を震動台の累積変位 TD_{table} と目標応答が再現される層の累積変位 TD_{target} を用いて式(3)のように定義する。

$$Er = \frac{\sum (S_{rep} - S_{tar})^2}{\sum S_{tar}^2} \times 100 \quad (2)$$

$$C = \frac{TD_{target}}{TD_{table}} \times 100 \quad (3)$$

4. 目標応答再現の検証

4.1 基準化東遊園地波と応答増幅

まず、東遊園地波を単純に係数倍した入力波を試験体モデルに入力することで、提案する試験体の応答特性を検証する。NS 方向の

目標床応答を C_{Ns} 倍しているのと同様に東遊園地波の NS 方向を C_{Ns} 倍し、基準化遊園地 1 を作成する。表 2 に示すように基準化東遊園地波 1 の必要油量は 30 kl であり、限界油量を超えており、震動台への直接入力とすることはできない。ここでは試験体の応答特性を考えるうえで、必要油量を無視することとし、せん断 2 質点モデルに対する地震応答解析を行い、その結果を表 3 に示す。

表 2 制約条件と基準化東遊園地の要求量

東遊園地	振動台の制約条件			試験体の制約条件			
	変位	速度	油量	最大引張力(kN)		最大変形(m)	
	(m)	(m/s)	(kl)	1層	2層	1層	2層
限界	1.00	2.00	20.0	770	770	0.75	0.75
基準化1	0.49	0.73	30.0	320	780	1.07	1.13
基準化2	0.39	0.58	17.0	-327	259	0.71	0.75

表 3 基準化東遊園地の解析による最大応答値と再現性

東遊園地	変位(m)		速度(m/s)		加速度(m/s ²)		再現誤差(%)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
目標	0.93	1.50	1.54	2.60	3.31	5.43		
基準化1	1.05	2.38	1.87	4.43	3.60	8.53	47.71	76.43
基準化2	0.83	1.55	1.48	2.89	2.84	5.57	43.93	46.31

図 6 目標応答と基準化東遊園地波 2 の解析結果(Y 方向)

基準化東遊園地波 1 によって得られた最大床応答加速度・速度・変位は 8.54 m/s², 4.42 m/s, 2.38 m であり、目標応答の各最大値の 160% になっている。ほぼ弾性体の増幅システムに基準化東遊園地 1 をそのまま入力することは、弾塑性挙動を呈する想定 30 階建物よりも大きな増幅を与えることを意味している。このとき、基準化東遊園地 1 による応答値と制約条件を比較すると、上述した必要油量に加えて、積層ゴム支承の変形と引張力が試験体の制約条件を超えている。

基準化東遊園地波 1 の結果を参考にして、全積層ゴム支承の許容最大変形(0.75 m)を満たすように 0.79 倍した東遊園地波を基準化東遊園地 2 として作成する。新たに作成された基準化東遊園地 2 はすべての制約条件を満足する。最大基準化東遊園地 2 を用いたせん断 2 質点モデルの地震応答解析の結果(表 3)によると、得られた最大床応答加速度・速度・変位は 5.57 m/s², 2.89 m/s, 1.55 m であり、目標応答の最大値を実現している。ただし、図 6 に示すように基準化東遊園地 2 によって再現される応答は 60 秒付近で一時的に最大応答を生じ、それ以降の振幅は小さくなり、2 次イベントの振幅レベルを再現できていない。この結果も想定建物が弾塑性挙動するのに対して、本試験体がほぼ弾性体であることに由来している。

4.2 逆解析による補償入力波 A

目標応答と再現応答の再現誤差を小さくするため、目標応答と試験体の伝達関数(図 5)から、目標応答を再現するための入力波を逆解析によって求める。ここでは、IDCS 手法^{8),9)}を用いる。

大振幅応答の実現に寄与しない高振動数を試験体の 2 次振動数 f_2 (0.86Hz) 以上の振動数として、ローパスフィルタによってカットして求めた入力波を補償入力波 A1(図 7)と称す。ただし、油量計算によると、補償入力波 A1 の必要油量(37 kl)は限界油量を 17 kl 超えてしまう。さらに、すべての制約条件を満足するように、補償入力波 A1 にバンドパスフィルタ(0.3~0.5 Hz)を用いて求めた入力波を補償入力波 A2 と称す。これらの解析結果を比較し、補償入力波 A1, A2 の問題点を考える。

図 7 補償入力波 A1

図 8 目標応答と補償入力波 A1 の解析結果のフーリエ振幅スペクトル

表 4 制約条件と補償入力波 A の要求量

補償入力	振動台の制約条件			試験体の制約条件			
	変位	速度	油量	最大引張力(kN)		最大変形(m)	
	(m)	(m/s)	(kl)	1層	2層	1層	2層
限界	1.00	2.00	20.0	770	770	0.75	0.75
A1	0.70	0.41	37.0	-526	121	0.57	0.65
A2	0.17	0.40	19.0	-637	18	0.51	0.57

表 5 補償入力波 A の解析による最大応答値と再現性

補償入力	変位(m)		速度(m/s)		加速度(m/s ²)		再現誤差(%)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
目標	0.93	1.50	1.54	2.60	3.31	5.43		
A1	0.85	1.47	1.48	2.17	2.83	4.76	3.55	6.23
A2	0.52	0.83	1.13	1.78	2.52	3.87	21.35	16.79

補償入力波 A1 を用いてせん断 2 質点モデルの地震応答解析を行うと、図 8 のような結果が得られる。補償入力波 A1、A2 と制約条件との関係とその入力による応答の再現誤差を表 4 と表 5 に記す。

補償入力波 A1 では再現誤差 6 % で目標応答を比較的忠実に再現できている。補償入力波 A1 による震動台の累積変位は 43.3 m であり、2 層床の累積変位は 192.7 m である。式(3)を用いて増幅システムを評価すると、その増幅率 C_A は 445 % となる。増幅システムによって入力は 445 % も増幅されるが、補償入力波 A1 の必要油量は限界油量を超えてしまう。目標応答には元々の入力地震動である東遊園地波がもつ 3 秒を超える長周期成分（図 8）が含まれている。表 4 によれば、補償入力波 A1 による積層ゴム支承の各層の最大変形（1 層: 0.57 m, 2 層: 0.65 m）は、積層ゴム支承の許容最大変形に達していない。これは積層ゴム支承がさらに 0.10~0.15 m の変形をする余裕をもっていることを意味し、補償入力波 A1 では増幅システムの能力を最大限に活かされていない。フィルターによって上述の長周期成分をカットして作成したのが補償入力波 A2 であるが、この補償入力波 A2 はすべての制約条件を満足するものの、最大振幅は目標最大変位・最大加速度の半分程度にしか達しない。

5. 人工目標応答と補償入力波 B1

5.1 人工目標応答の作成

目標振幅の実現と必要油量を限界油量以内に収めるという課題を克服するために、震動台自身の累積変位をできるだけ抑え、積層ゴム支承の変形を最大限に利用する必要がある。例えば、入力波を試験体の 1 次振動数を持つ正弦波とすれば、試験体が効率的に共振し、積層ゴム支承の変形能力を最大限に利用でき、必要油量を合理的に節約できる。しかし、単純な正弦波では目標応答の 1 次イベントや 2 次イベント等の波形の骨格が持つ起伏を再現することはできない。ここでは、本試験体に対してより効率的な目標応答として、元々の目標応答の骨格曲線を拘束条件とした人工目標応答を作成する。具体的には、試験体の 1 次振動数 f_1 と同じ振動数を持った正弦波を、骨格曲線に従うように時刻歴で係数倍する。人工目標応答 $T_{art}(t)$ は上部骨格曲線 $S_1(t)$ と下部骨格曲線 $S_2(t)$ を用いると式(4)によって表され、図 9 のようになる。人工目標応答の最大加速度・速度・変位は 5.43 m/s², 2.69 m/s, 1.50 m である。

$$T_{art}(t) = \begin{cases} S_1(t) \sin(2\pi f_1 t) & \sin(2\pi f_1 t) \geq 0 \\ S_2(t) \sin(2\pi f_1 t) & \sin(2\pi f_1 t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

図 9 人工目標応答

5.2 補償入力波 B1 と解析による再現応答

人工目標応答に IDCS 手法を用いて入力波形を作成すると、補償入力波 B1（図 10）が得られる。補償入力波 B1 を用いてせん断 2 質点モデルの地震応答解析を行うと、図 11 のような結果が得られる。補償入力波 B1 と制約条件との関係とその入力による応答の再現誤差を表 6 と表 7 に記す。

図 10 補償入力波 B1

図 11 人工目標応答と補償入力波 B1 の解析結果のフーリエ振幅スペクトル

表 6 制約条件と補償入力波 B1 の要求量

補償入力	震動台の制約条件			試験体の制約条件			
	変位	速度	油量	最大引張力(kN)		最大変形(m)	
	(m)	(m/s)	(kl)	1層	2層	1層	2層
限界	1.00	2.00	20.0	770	770	0.75	0.75
B1	0.23	0.35	10.5	-259	315	0.71	0.75

表 7 補償入力波 B1 の解析による最大応答値と再現性

補償入力	変位(m)		速度(m/s)		加速度(m/s ²)		再現誤差(%)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
目標	0.93	1.50	1.54	2.60	3.31	5.43		
B1	0.88	1.41	1.62	2.66	3.19	5.20	0.01	0.14

表 6 では、補償入力波 B1 による積層ゴム支承の各層の最大変形（1 層で 0.71 m, 2 層で 0.75 m）になり、積層ゴム支承の変形能力を最大限に利用している。その結果、入力補償波 B1 による震動台の累積変位は 23.3 m になり、補償入力波 A1 による震動台の累積変位（43.3 m）より 20 m 少ない値を得ている。これによって、補償入力波 B1 のアキュムレータ放出油量は 10.5 kl となり、限界油量 20 kl の半分程度に抑えられる。補償入力波 A1 の結果と比べれば 1/4 程度で、増幅システムの効率を格段に高めている。補償入力波 B1 は

すべての制約条件を満足し、表 7 によれば、新たに設定した人工目標応答に対する再現誤差は約 0.1 %となっている。以上より、補償入力波 B1 を基本に実験を実施することとした。

6. 予備加振実験による入力波の調整

6.1 システム同定による試験体特性

図 12 試験体の全景

試験体の全景を図 12 に示す。試験体特性を把握するために大振幅の自由振動実験を実施した。一連の予備実験では、家具什器の損壊・損傷を防ぐために、本加振実験の前の家具什器を周辺架構に十分に固定した。試験体を効率的に応答させることを目的とし、解析モデルの 1 次振動数 $f_1=0.32$ Hz を参照し、震動台への入力波としては振動数 0.30 Hz の 1 周期正弦波を採用した。1 周期正弦波の加速度振幅を 1.5 m/s^2 としたときの、試験体の 2 層床応答は図 13 となり、積層ゴム支承の最大変形は 0.6 m に達した。システム同定による試験体の特性は表 8 のようになる。

表 8 試験体の特性

入力振幅 (m/s^2)	積層ゴム最大変形 (m)		振動数 (Hz)	減衰 (%)
	1層	2層	1次	1次
1.00	0.39	0.36	0.33	2.87
1.50	0.60	0.57	0.32	3.10

図 13 1 周期正弦波入力による 2 層床応答加速度

入力加速度振幅 1.5 m/s^2 の場合において、試験体の第 1 次振動数は約 0.32 Hz、減衰定数は約 3 %となり、減衰定数は試験体をモデ

ル化した際の値にほぼ一致した。このときの積層ゴム支承の層せん断力と変形の履歴を、本研究において設定した弾性モデル剛性ととも図 14 に示す。1 次モードが卓越する自由振動における、1 層と 2 層の積層ゴム支承の最大変形はほぼ等しく、試験体の 2 層床応答加速度と屋上の応答加速度の誤差は、式(2)から 0.06 %で、2 層床と屋上ではほぼ同じ応答が再現されている。解析で設定した剛性は 1 層目 4.80 kN/mm 、2 層目 3.14 kN/mm である。本加振の結果において得られた各変形レベルにおける割線剛性の平均値を参照すれば、1 層目が 4.48 kN/mm 、2 層目が 3.26 kN/mm であり、設定剛性の 0.93 倍 (1 層目) と 1.03 倍 (2 層目) である。このように、試験体は設計時に意図した性能を有し、同定された諸量も解析モデルにおいて想定した諸量にほぼ等しい。

図 14 1 周期正弦波入力による積層ゴム支承の履歴

6.2 補償入力波 B1 の実験結果

事前に補償入力波 B1 を震動台に入力し、所定の大振幅応答が再現されるかを確認した。補償入力波 B1 を用いた実験によって再現された応答と人工目標応答を図 15、図 16 に示す。表 9 に人工目標応答と再現された応答の再現性を示す。補償入力波 B1 によって再現された応答の 1 次イベントでは人工目標応答の 0.8 倍であり、2 次イベントでは人工目標応答の 0.7 倍となった。すなわち、人工目標応答を単純に逆解析した補償入力波 B1 によって再現された応答は人工目標応答に達しなかった。本研究では積層ゴム支承を弾性と仮定して解析用のモデルを設定したが、図 14 を参照すれば、実際の積層ゴム支承の剛性は、変形が 0.2 m 以上になると低下するなどの非線形性を示している。解析モデルを設定する際に無視した剛性変化等の影響が、目標応答実現に至らなかった主な原因である。

図 15 人工目標応答と補償入力波 B1 による実験結果 (Y 方向)

図 16 人工目標応答と補償入力波 B1 による応答のフーリエ振幅スペクトル

表 9 補償入力波 B1 による最大応答値と再現性

B1	変位(m)		速度(m/s)		加速度(m/s ²)		再現誤差(%)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
目標	0.93	1.50	1.54	2.60	3.31	5.43		
実験結果	0.71	1.24	1.37	2.18	2.82	4.22	28.97	29.51

7. 本加振実験における補償入力波 B2 の結果

家具什器の地震時挙動は最大振幅レベルとその繰り返し回数に大きな影響を受ける。そこで、補償入力波 B1 による予備実験結果を反映して 1 次イベント、2 次イベント別に入力振幅を調整した補償入力波 B2 を作成する。予備解析による検討を踏まえ、1 次イベントでは積層ゴム支承の変形が許容最大変形(0.75 m)を超えないように 1/0.8 (=1.25) よりも小さい 1.1 を乗じ、2 次イベント部分においては 1/0.7 (=1.4) をそのまま乗じることで入力波を作成し、本実験に採用した。このとき、アキュムレータ放出油量は 14.5 kl であり、制約条件を十分に下回っている。

本実験において、補償入力波 B2 を試験体に入力して得られた応答と目標応答を図 17 と図 18 に示す。また、表 10 に目標応答と再現された応答の再現性を示す。本実験による震動台の累積変位は 24.5 m であり、2 層床の累積変位は 214.7 m であった。式(3)を用いると、本研究の提案する増幅システムの増幅率 C_B は 876 % であり、これは補償入力波 A1 における C_A の約 2 倍に達している。この際に、1 層目の積層ゴム支承の最大変形は 0.75 m であり、2 層目の積層ゴム支承の最大変形は 0.70 m である。

図 17 人工目標応答と補償入力波 B2 による実験結果 (Y 方向)

図 18 人工目標応答と補償入力波 B2 による応答のフーリエ振幅スペクトル

表 10 補償入力波 B2 による最大応答値と再現性

B2	変位(m)		速度(m/s)		加速度(m/s ²)		再現誤差(%)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
目標	0.93	1.50	1.54	2.60	3.31	5.43		
実験結果	0.79	1.33	1.44	2.26	3.02	4.56	19.61	13.79

8. 家具什器の実規模実験

以降では、本実験において大振幅で長時間の床応答を与えられた室内の家具什器の挙動に着目し、室内安全性を考察する。

8.1 家具什器の配置

試験体の各階には各種の室内を忠実に再現した。2 階にはオフィスを模擬した 2 部屋を用意した。3 階には 2 段ベッドと子供用ベッドを設置し、4 階ではキッチン・食卓・居間を持つ一般住居を模擬した部屋を用意した。5 階には自動販売機とシステムバスを設置した。このなかで、オフィス、居間、キッチンを取り上げ、実験前の室内写真を図 19 に示す。

(a) オフィス (耐震対策あり) (b) オフィス (耐震対策なし)

(c) 居間 (d) キッチン

図 19 室内写真 (実験前)

大振幅床応答において、各室内は図 20 に示されるような被害を受けた。このように、多くの家具の転倒、すべり移動、飛散等の被害が見られるが、もしこれらの室内に実際に人がいた場合、家具什

器によって受ける被害は、命の危険に及ぶ可能性がある。仮に居住者に被害がなかったとしても、地震時にこのような光景を目の当たりにしながら、200 秒以上も続くような揺れを経験する居住者は恐怖におののき、後の避難行動を大きく阻害することも推測される。超高層建物内の地震時挙動をここまで鮮明、かつ総合的に再現した実験の例はなく、このような記録は防災教育を行ううえで非常に貴重な資料である¹⁰⁾。

(a) オフィス（耐震対策あり） (b) オフィス（耐震対策なし）

(c) 居間 (d) キッチン

図 20 室内被害の様子（実験後）

8.2 家具の転倒

ここでは、オフィス階に焦点を当ててより詳細な考察を試みる。1 部屋には転倒やすべり防止の耐震対策を施した机・ロッカー・本棚を、もう 1 部屋には、耐震対策を施していない机・ロッカー・本棚・キャビネットを設置した。また、このような大振幅応答を受ける室内ではキャスター付コピー機が室内でどのように動き、周辺にどのような影響を与えるかを把握するために、両方の部屋にコピー機を設置した。オフィス階では床材にはタイルカーペットを用い、家具を図 21 のように配置した。それら家具の諸元を表 11 に示す。

図 21 オフィス（試験体 2 階）

表 11 家具の諸元と転倒に関する実験結果

	No.	家具	W(mm)	D(mm)	H(mm)	Fb(Hz)	A ₀ (m/s ²)	転倒	
耐震補強あり	1	ロッカー(小)	900	515	1100	1.48	4.59	NO	
	2								
	3	ロッカー(大)	880	400	1790	1.16	2.19		
	4	ロッカー(小)	900	515	1100	1.48	4.59		
	5								
	6								
耐震補強なし	7	ロッカー(大)	880	400	1790	1.16	2.19	YES	
	8								
	9	キャビネット	900	515	1790	1.16	2.82	NO	
	10								
	11	書庫(2段重ね)	880	400	2200	0.61	1.78	YES	
	12								
	13	書庫(大)	600	400	1790	1.16	2.19		
	14	キャビネット	900	515	1790	1.16	2.82		
	15	書庫(2段重ね)	880	400	2200	0.61	1.78		
	16								
	17								
	18	書庫(小)	880	400	1100	1.48	3.56	NO	
	19								
	20								

『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』（以降、指針）³⁾によって推定される家具の短辺方向の転倒限界加速度 A_0 を表 11 に示す。家具の転倒は床応答の最大加速度と最大速度に影響を受け、両者が家具の転倒限界値を超えた場合に転倒が生じる。床応答の振動数 F_b が家具の形状から決まる境界振動数 F_0 より小さい場合は、転倒に関する判定は床応答の最大加速度に支配される。長周期で揺れる超高層建物の床応答は、この領域に入りやすく、床応答速度が転倒限界値を超えた後に、床応答加速度が転倒限界加速度に到達する。本実験においても床応答の振動数 ($F_b=0.3$ Hz) は、オフィス階に配置したすべての家具の境界振動数 F_0 よりも小さく、転倒の検討においては、床応答の最大加速度(表 10) と個々の家具の転倒限界加速度 A_0 を比較することになる。耐震対策が施されている家具の転倒限界加速度は、対策されていない場合の転倒限界加速度であり、2 段重ねにされた書庫の転倒限界加速度は既往の研究¹¹⁾を参考に算出した。

表 11 には実験によって家具に転倒が生じたかを合わせて示している（NO：転倒しなかった、YES：転倒した）。再現された応答の Y 方向の最大加速度は 4.31 m/s^2 、X 方向の最大加速度は 2.92 m/s^2 である。表 11 から、耐震対策のあるすべての家具は転倒しなかったことが確認できる。耐震対策が施されていない家具については 9 個が転倒し、残りの 5 個が転倒を免れた。配置された家具の転倒限界加速度と実際に再現された応答加速度を照らしあわせると、表 11 の No9~11、No19、No20 は、床応答加速度が指針による転倒限界加速度 A_0 を上まわっているが、実際には転倒していない。No9~11 が転倒しなかったのは、それ以前に転倒した家具によって支えられたからであり、他の転倒した家具によって支えられていなければ、No9~11 は転倒した可能性が高い。一方、No19 と No20 は、ビデオによる検証から、床応答加速度が 3 m/s^2 を越えたあたりからすべり始めたことを確認した。No19 と No20 は、このすべりによって転倒モーメントが減少し、転倒を免れたといえる。床応答加速度が 3 m/s^2 程度からすべりを生じたことに着目すれば、No19 と No20 のタイルカーペットに対する静止摩擦係数はおよそ 0.3 となり、指針によって想定されている金属とじゅうたんによる静止摩擦係数 0.2~0.5 と整合する。No19 と No20 の転倒限界加速度は、他の家具に比べて値が大きく、すべり時加速度を上回る。耐震対策のない居

室における個々の家具の挙動は、指針による転倒限界加速度とすべり時加速度に対応する摩擦係数を参照することによっておおよそ評価できる。

8.3 コピー機の挙動

長周期地震動を受ける超高層建物の最上層の床応答が再現された室内において、コピー機（図 22）の動きが最も衝撃的であった。オフィス階にある約 100 kg のコピー機はおよそ 2.5 m/s で室内を動き回り、室内の間仕切壁（LGS）に大きな穴を開けた。この実験時のコピー機の軌跡を図 23 に示す。コピー機が動き回ることによって、コピー機が周辺のデスクや椅子などを倒す光景が見られた（図 20 a）。このような場合に、人が地震時にデスク下に避難したとしても、コピー機による衝撃によって被害を受ける可能性がある。実験時のコピー機は周辺の壁やデスクに衝突し、最終的に転倒した。ここでは、コピー機の周辺に何も無い状態を仮定し、転倒しない場合のコピー機の挙動を解析によって検討してみる。この実験ではコピー機が床加速度 1 m/s^2 で動き出したので、キャスターのストッパーが効いていないコピー機の静止摩擦係数 μ を 0.1 とする。コピー機の解析では 100 kg の質量を持つ 1 自由度系モデルを用い、初期剛性を 100 kN/m に設定した完全弾塑性の履歴を与える。解析用入力波としては、実験で再現された長周期地震動を受ける超高層建物の床応答に加え、エルセントロ波（レベル 2：最大速度を 0.5 m/s に基準化）を受ける低層建物の床応答を採用する。エルセントロ波による床応答は固有周期 0.5 秒の 1 自由度弾性解析 ($h=0.02$) によって得られたもので、最大床応答加速度 13 m/s^2 ・速度 1.1 m/s は、それぞれ超高層建物の最大床応答値と比べると加速度で約 3 倍、速度で約半分となる。

図 22 コピー機

図 23 実験によるコピー機の軌跡

(1) 長周期地震動を受ける超高層建物内

(2) エルセントロ波を受ける低層建物内

図 24 解析による各種建物内のコピー機の軌跡

解析から得られたコピー機の軌跡を図 24 に示す。超高層建物の床応答を受けるコピー機の最大速度と最大変位は 2.45 m/s と 1.46 m に、また累積変位は 116.6 m に達した。一方、エルセントロ波を受ける低層建物のコピー機の最大速度と最大変位は 1.60 m/s と 0.30 m になり、累積変位は 14.3 m となる。超高層建物の床応答を受けるコピー機の最大速度はエルセントロ波を受ける低層建物の場合の 1.5 倍であるが、累積変位は 8.1 倍にもなる。このように、長周期地震動を受ける超高層建物内のコピー機の挙動は、長時間、広範囲に動き回ることによって特徴づけられる。

一方、コピー機のキャスターにはストッパーが付いていることが多く、そのストッパーを効くようにするだけで摩擦係数は 0.4 程度まで上昇する¹²⁾。摩擦係数 μ を 0.4 にして同様の解析を行うと、超高層建物の床応答を受けるコピー機の最大速度、変位は 0.05 m/s , 0.01 m に、累積変位は 5.5 m となり、ストッパーを効かせることにより、最大変位は約 1% に、累積変位は約 5% にまで減少する。超高層建物内では、コピー機の挙動に対するストッパーの影響が大きく、大振幅床応答によってもたらされるコピー機による被害は、ストッパーを使用することによって激減する。

9. まとめ

本研究では震動台実験によって超高層建物の応答を再現するために、震動台が固有に抱える制約条件を克服し得るシステムを考えた。径 1.0 m の積層ゴム支承 4 基で支える層を、極厚コンクリートスラブを介して 2 段重ねとする増幅システムの上に、床応答の再現する鋼構造架構を配し、積層ゴム支承単体の変形性能の 2 倍の増幅性能を意図した。

構築した実験システムに対する入力波の作成においては、現時点で考える 3 種類の手法を取り上げ、その特徴と実現性を総合的に比較検討した。振幅を単純にスケールする基準化東遊園地 2 によって再現される最大加速度・最大変位は目標値に達するが、長時間の大振幅応答を忠実に再現できない。目標応答をそのまま逆解析する補償入力波 A1 は、再現性の良い入力波を同定できるが、震動台自身の累積変位を抑えることができず、限界油量を超えてしまう。必要油量が限界油量以内に収まるようにした補償入力波 A2 では、再現される応答が最大加速度・最大変位は目標最大値の半分にしか達しない。これらを踏まえて、試験体の 1 次振動数 f_1 と同じ振動数を持った正弦波を目標応答の骨格曲線に即し時刻歴で係数倍する人工目標応答を作成し、人工目標応答を逆解析することによって補償入力波 B1 を作成した。これにより、実験システムの増幅特性を最大限に活かし、長周期地震動による超高層建物の長時間続く大振幅床応答を実現し、その必要油量を極めて効率的に減少させることができた。

実験においては、解析モデルの不確定性を踏まえ、補償入力波 B1 による予備実験結果に基づいて、さらに補償入力波 B1 の振幅を調整し、所定の目標振幅を長時間にわたって実現する補償入力波 B2 を作成した。これにより、室内の危険性につながる家具什器の挙動を実規模空間において総合的に記録することができた。再現された家具什器の転倒に関する検討を行い、耐震対策された家具什器が室内空間の安全性確保に大きく貢献することを示した。長周期地震動を受ける超高層建物内のコピー機の長時間、広範囲にわたって衝突

を繰り返す挙動についても考察し、ストッパーの有効性に言及した。こうした超高層建物の室内の忠実な再現映像は人々の防災意識を向上させる有効な資料となる。

本研究で構築した実験システムは、繰り返し使用することができる。その実験システム上で目標応答を合理的に再現するための手法について提案した。今後、本実験システムと手法を応用して、室内安全性に関する研究を継続的に行っていく予定である。

謝辞

本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。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (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. 11.
- 2) 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, No.628, pp1007-1014, 2008.6.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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震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.
- 7) 梶原浩一, 佐藤栄児, 田川泰敬: 実大三次元震動破壊実験装置 (E・ディフェンス) の加振性能と活用について, 運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No.9, pp.313-316, 2005.
- 8) 梶原浩一, 長江拓也, 福山國夫, 藤谷秀雄, 中島正愛: E・ディフェンス振動実験における 30 回床応答再現のための加振入力と実験結果 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 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.559-560, 2007.
- 9) 田川康敬, 福井和良, 低感度補償器を用いた非線形モデルの逆ダイナミックスの計算, D&D1994 講演論文集, pp.B185-B188, 1994.
- 10) 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, 加震実験映像, <http://www.bosai.go.jp/hyogo/movie.html>, (参照 2008-05-31)
- 11) 金子美香, 林康裕: 剛体の転倒限界に関する基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, No.479, pp.41-49, 1996.1.
- 12) 正月俊行, 翠川三郎, 大堀道広, 三浦弘之: 超高層建物におけるオフィス内の家具群の地震時シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.620, pp43-49, 2007.10.

(2008年6月9日原稿受理, 2008年11月19日採用決定)