

建物モデルの振動実験とシミュレーション解析の精度

池 永 昌 容*

Shake table test of Building structure and Accuracy of simulation analysis

Masahiro IKENAGA*

1. はじめに

建築構造物の地震時挙動を把握する手法として、建物モデルによる振動実験が挙げられる。振動実験は規模によって用いる試験体は異なり、たとえば世界最大の振動台であるE-ディフェンスを使った実物大建物から、手のひらサイズの小さな振動模型まで様々なものがある。実際の建物を作る場合には、柱や梁など建物のどの部位が破壊されるかなどの詳細な実験結果が得られるが、実験コストなどの問題から実施は極めて困難である。

小型施設を用いた振動試験においては、構造物を小型化・単純化して試験体を作成する事が多い。この場合、柱・梁・床といった様々な要素から構成される建築構造物を、単純な1つのマスとバネ、そしてダッシュポットの振動モデルに置き換えて実験する。ただし試験体を小型化した場合、実物大の建物では無視することができる摩擦などの影響が相対的に大きくなるため、実験が可能な範囲内で大きい試験体を作る必要がある。

本解説では、縮小試験体を用いて行った振動実験を紹介し、その実験結果と数値シミュレーション解析結果との比較から、建築構造分野における実験と解析の精度について紹介する。

2. 建築構造物の振動実験

2.1 試験体について

図1に本報で解説する振動実験で用いる試験体写真

を、図2に立面図、表1に試験体諸元を示す。試験体は免震建物を縮小模型にしたもので、下部のレール部分が大きく可動することで免震建物と類似した特性で振動する。

免震構造物は建物下部にリニアガイドと言われるレールや積層ゴム支承と言われる水平方向に柔らかい装置を配置することで免震層を構成し、免震層を大きく動かす代わりに上部の建物に作用する地震動を軽減する構造物である¹⁾。本試験体では上部構造に鋼製フレームを組んでいるが、簡単のために建物部分は斜めに入れた筋交いで動かないようにしている。また免震層にはレールを用いており、固有周期3.21秒と実際の一般的な免震構造物と同程度の固有周期としている。

建築構造物の硬さを示す試験体剛性は、試験体左部に設置された板バネによって再現している。この板バネは、建物モデルから水平力を受けると曲げ変形を受けつつ、その曲げ剛性によって建物モデルに復元力を加えることで、水平方向に試験体剛性に等しいバネ剛性を発揮する。

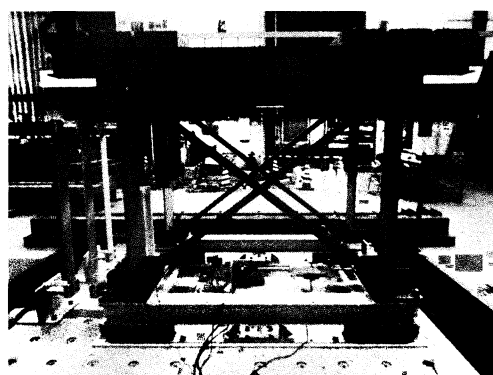


図1 縮小建物試験体の写真

原稿受付 2018年10月26日

*環境都市工学部 建築学科 准教授

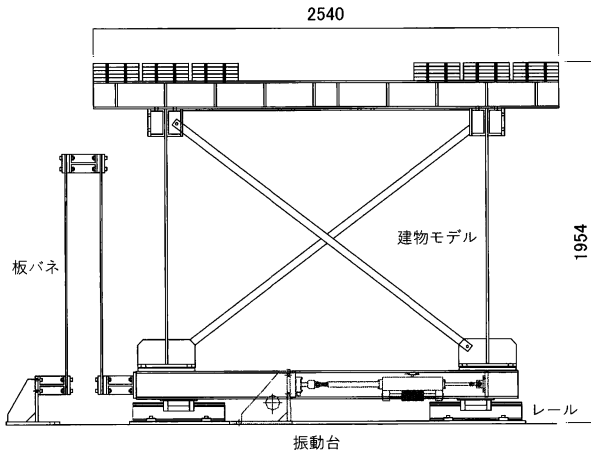


図2 試験体立面図

表1 試験体諸元

試験体重量	mf	2.79トン
試験体剛性	kf	10.68kN/m
固有周期	T	3.21秒
レール摩擦力	Fs	0.04kN

また免震構造物では、免震層の変形を抑制するためにオイルダンパーと言われる減衰装置が用いられる(図3)。この装置は減衰力が速度に依存し、建物の揺れが大きく速度が大きくなると、大きな力を発揮して地震時の揺れを抑える特性がある。実験ではこのオイルダンパーも免震層に導入し、その性能も確認した。なおオイルダンパーの性能は、実物大免震構造物において発揮される性能と同程度の性能を本縮小型試験体に対して発揮されるように、性能を調整して製作したものを用いた。

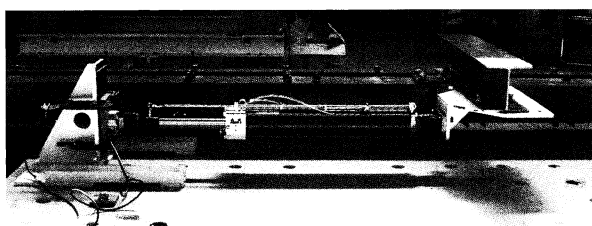


図3 オイルダンパー

2.2 計測装置

振動実験では各部位の変位と加速度、そしてダンパーの減衰力を測定する必要がある。図4にそれぞれの応答値を測定するための装置を示す。

(a) レーザー変位計

図中の黒いセンサーヘッドからレーザー光を出し、その光を白いターゲットに当てることで反射させ、反

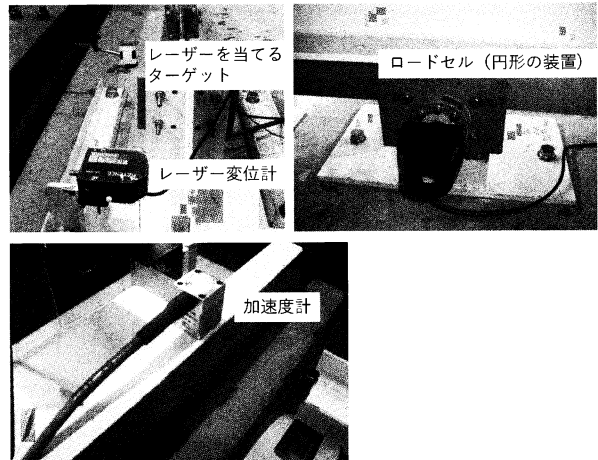


図4 計測装置

射光をセンサーヘッドで受光することでセンサーヘッドからターゲットまでの距離を測定する。試験体では免震層の動く方向にレーザー変位計を設置し、免震層変位を測定する。

(b) 加速度計

センサーが加速度を感知するため、加速度を計測したい場所に両面テープなどで貼り付けて使用する。今回の実験では振動台と免震層の上部にそれぞれ貼り付けることで、入力される地震動加速度と、免震層上部の加速度を計測している。

(c) ロードセル

図に示す円形の装置で、圧縮力もしくは引張力が作用することで生じる装置の歪を計測し、そこから作用した力を計測する装置である。本実験ではダンパーの端部に取り付けることで、ダンパーが発揮する減衰力を計測する。

2.3 振動実験の概要

実験では、振動台を過去に観測された地震動の加速度で振動させることで、免震試験体を揺らして地震時挙動を再現する。ただし振動台の性能による限界があるため、観測地震動加速度に適切な倍率を乗じて振動実験を行うことが多い。本解説で示す振動実験は東北大学所有の大型振動実験装置で行った実験で、入力地震動として1995年兵庫県南部地震、神戸海洋気象台記録を40%にした地震動を用いる。図5に入力地震動の加速度時刻歴を示す。

3. 解析手法

数値解析のために、試験体を元にした建物の解析モデルを図6のように構築する。この解析モデルに対する運動方程式を導き、そこから時刻歴応答解析を行う。まず質点に働く力は、以下の4種類となる。

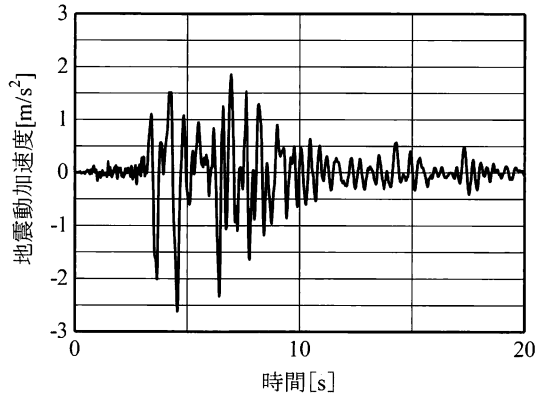


図5 振動実験で入力した地震動加速度

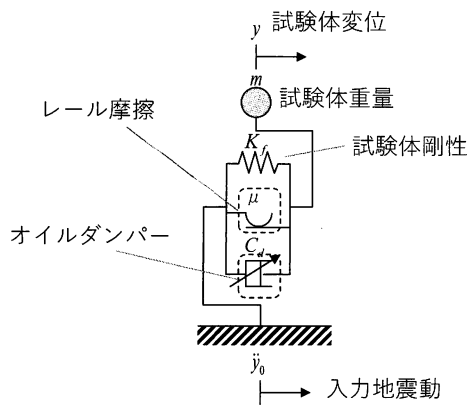


図6 解析モデル

$$\text{復元材による復元力 } F_f = K_f y \quad (1)$$

$$\text{ダッシュポッドによる減衰力 } F_d = C_d \dot{y} \quad (2)$$

$$\text{すべり支承による減衰力 } F_s \quad (3)$$

$$\text{慣性力 } m(\ddot{y} + \ddot{y}_0) \quad (4)$$

質点に働く力の動的な釣り合いを考えると、d'Alambertの原理より、次式が導かれる。

$$m(\ddot{y} + \ddot{y}_0) - F_f - F_s - F_d = m(\ddot{y} + \ddot{y}_0) - K_f y - F_s - C_d \dot{y} = 0 \quad (5)$$

これを応答増分表現でかきかえると、

$$m(\Delta \ddot{y} + \Delta \ddot{y}_0) - K_f \Delta y - \Delta F_s - C_d \Delta \dot{y} = 0 \quad (6)$$

ただし、 Δ は任意のステップ n とその次のステップ $n+1$ の差分で、次式で計算される。

$$\begin{cases} \Delta y = y_{n+1} - y_n \\ \Delta \dot{y} = \dot{y}_{n+1} - \dot{y}_n \\ \Delta \ddot{y} = \ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_n \\ \Delta \ddot{y}_0 = \ddot{y}_{0n+1} - \ddot{y}_{0n} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)は建物変位 y に対する微分方程式であり、 y

について解くことで建物変位が計算できる。建築分野では、この微分方程式の開放として平均加速度法の仮定^{2), 3)}が頻繁に用いられる。

$$\dot{y}_{n+1} = \dot{y}_n + \frac{\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1}}{2} \Delta t \quad (8)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{\dot{y}_n + \dot{y}_{n+1}}{2} \Delta t = y_n + \dot{y}_n \Delta t + \frac{\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1}}{4} \Delta t^2 \quad (9)$$

式(8)、(9)を増分表記すると、次式が得られる。

$$\Delta \dot{y} = \dot{y}_n \Delta t + \frac{1}{2} \Delta \ddot{y} \Delta t \quad (10)$$

$$\Delta y = \dot{y} \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{y}_n \Delta t^2 + \frac{1}{4} \Delta \ddot{y} \Delta t^2 \quad (11)$$

式(6)に式(10)、(11)を代入すると、式(12)～(14)が導かれる。

$$\Delta y = \frac{m \left(-\Delta \ddot{y}_0 + \frac{4}{\Delta t^2} \dot{y}_n + 2 \ddot{y}_n \right) - \Delta F_s + 2 C_d \dot{y}_n}{K_s + \frac{2}{\Delta t} C_d + \frac{4}{\Delta t^2} m} \quad (12)$$

$$\Delta \dot{y} = \frac{2}{\Delta t} \Delta y - 2 \dot{y}_n \quad (13)$$

$$\Delta \ddot{y} = \frac{4}{\Delta t^2} \Delta y - \frac{4}{\Delta t} \dot{y}_n - 2 \ddot{y}_n \quad (14)$$

式(12)の右辺に着目すると、右辺はすべて n ステップ目の応答値と入力地動加速度 \ddot{y}_0 、そしてその他は定数で表現されている。このことから、次の瞬間である $n+1$ ステップ目の応答値は、式(7)を用いることで、現在までの応答値と応答の増分量によって計算される。

4. 実験結果とシミュレーション解析結果

図7に実験結果とシミュレーション解析結果を示す。建築構造物の振動実験においては、変位、加速度、ダンパー力などが重要になる。

変位は建物変位であるため、実際の建築設計では変位を法律で定められた値未満にすることが求められる。また加速度は地震時の建物内部の居住性や家具・物品の転倒に関連するため、こちらも抑制することが望まれる。ダンパー力については、大きすぎると建物本体に大きな力を加えることになり、建物本体や取り付け部が損傷する危険性があるため、ある程度の大きさに限定させて設計するのが一般的である。

以上の知見をふまえて図7の加速度に着目すると、加速度最大値は 0.4 m/s^2 程度となっており、入力地震動加速度の最大値に比べて $1/6$ 程度に低減されている。このことから、試験体の免震層は十分に機能を果たしていると判断できる。

一方で変位とダンパー力については入力地震動自体

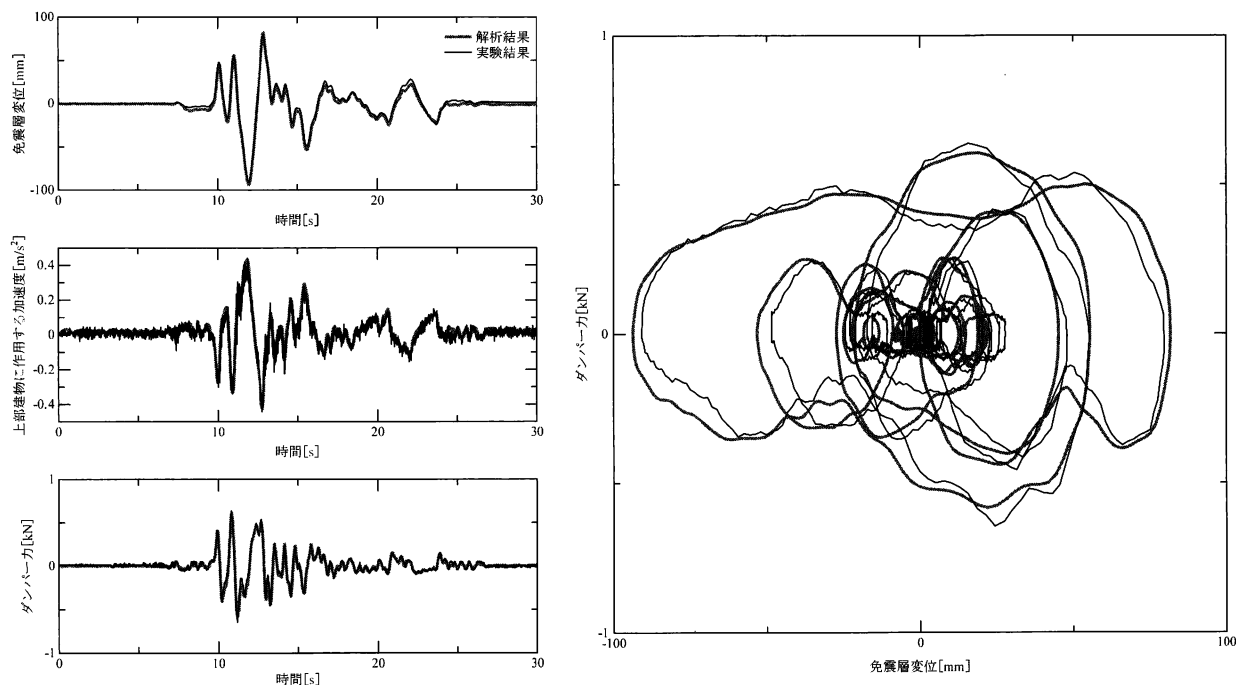


図7 振動実験結果とシミュレーション解析結果

が縮小されているため判断は難しいが、一般的な免震構造物の最大免震層変位が300mm程度を想定することを考慮すると、良い実験結果と判断することは可能である。

実験結果とシミュレーション解析結果を比較すると、30秒間を通してその波形は非常によく合致しており、平均加速度法を用いた数値解析シミュレーションの妥当性を示している。

5. まとめ

本報では建築構造物の地震時挙動を検証するために、地震動を再現する振動台と縮小建物モデル試験体を用いた振動実験を示した。またその振動実験に対するシミュレーション解析についても解説し、その妥当性を実験結果と比較することで検討した。その結果、

縮小免震建物試験体の振動実験では免震層が十分な性能を発揮する結果を得た。また建築構造分野で広く用いられる平均加速度法を用いることで、振動実験結果を非常に精度良く評価することができることを示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針—第3版—，日本建築学会，2001
- 2) 日本建築学会関東支部：学びやすい構造設計シリーズ 免震・制震構造の設計，技報堂出版，2007
- 3) 柴田明德：最新耐震構造解析—第2版—，森北出版，2003