

地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究

(その 10) 室内被災状況のモニタリングとシミュレーション(家具転倒評価から安全対策へ)

正会員 ○松下 卓矢^{*1} 倉田 和己^{*1} 飛田 潤^{*1} 護 雅史^{*1}
 福和 伸夫^{*1} 長江 拓也^{*2} 吉澤 睦博^{*2}

実大振動台実験 シミュレーション技術 モニタリング
 家具 ヘッドマウントディスプレイ

1. はじめに

本論では(その 9)において構築した環境で、実大振動台実験の加振時に試験体内部で床応答と同期して収録した映像を活用することで、試験体の振動性状と地震時の室内状況を関連づけて分析する。また、その映像と比較しながら、物理演算シミュレーションソフトのパラメータの検討を行うことで、よりリアリティのあるシミュレーション映像作成の技術の発展を目指している。

2. E-ディフェンス実験概要

2011 年 10 月 4 日、7 日の試験体は、コンクリートスラブと積層ゴムを用いて高層建物を再現し、同 12 日の試験体は縮約層の上下階をプレートで固定し、低層の建物を再現した。以下、高層モデル、低層モデルとする。室内は、オフィス、住居空間、書庫及びサーバルームが忠実に再現にしており、家具は固定と未固定のものがある。

センサーは強震計(加速度計)を各層及び震動台上面の南東と北西に 1 台ずつと、コンクリートスラブの北西にさらにもう 1 台の計 11 台設置した。また、各層にビデオカメラを設置し、地震時の被災状況の映像を波形とともに記録した。

加振波は 2011 年東北地方太平洋沖地震本震と、その余震(西新宿本震、西新宿余震)及び、1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での観測記録(JMA 神戸)を使用した。また、各実験日の初めと終わりには試験体の固有周期の変化を確認するため、微弱振幅のホワイトノイズ加振を行った。

3. 試験体の基本的振動特性の分析

地震波加振前のホワイトノイズ加振時の伝達関数を確認すると、高層モデルでは長辺方向と短辺方向のピークは非常に近接しており、応答倍率は 1 次ピーク(0.35Hz)では P1F が、2 次ピーク(0.89Hz)では 3F、3 次ピーク(1.39Hz)では 1F が卓越する。低層モデルの 1 次ピークは、短辺方向は 2.15Hz であり、長辺方向は 1.82Hz である。また、試験体の固有振動数及び減衰定数と層間変形の関係を各モデルについて図 1、図 2 に示す。それぞれのモデルについて、固有振動数及び減衰定数に振幅依存性の影響が見られる。著者らがこれまで E-ディフェンス実験で試

みてきた構造モニタリング¹⁾に加えて、室内状況モニタリングを一体のシステムとして整備することの有効性が示された。

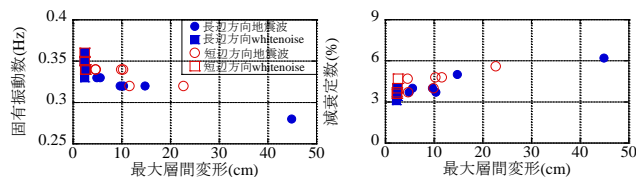


図 1 固有振動数及び減衰定数と層間変形の関係(高層モデル)

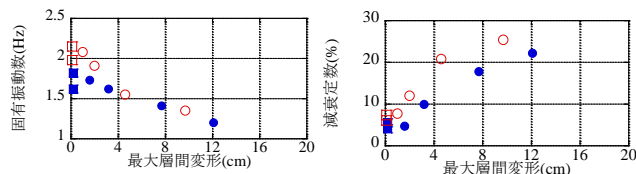


図 2 固有振動数及び減衰定数と層間変形の関係(低層モデル)

4. 加振時の室内被害状況の評価

今回の E-ディフェンス実験での西新宿余震と JMA 神戸の最大スケールでの加振時の室内被害概要を図 3 に示す。西新宿余震では、高層階で固有周期 3 秒前後の長周期の応答が大きく増幅して、背の高い家具の転倒や滑りやすい家具が大きく水平移動した。一方、JMA 神戸では、比較的短周期成分が卓越し、加速度が大きいことから多くの家具が転倒した他、書籍や天井の落下及びボルトやバンドなどの家具固定器具の破損なども見られた。

これらの家具に対して、家具の転倒限界加速度の式²⁾と収録した映像を用いて、床応答の卓越振動数、最大加速度と転倒に至る経緯の関係について検討を行った。家具転倒式は転倒加速度を A_{cr} 、等価卓越振動数を F_e 、家具の幅を B 、高さを H 、重力加速度を g として(1)式を用いる。

$$\begin{aligned} A_{cr} &= Bg / H & F_e < 15.6 / \sqrt{H} \\ A_{cr} &= 10B(2\pi F_e) / \sqrt{H} & F_e \geq 15.6 / \sqrt{H} \end{aligned} \quad (1)$$

例として写真 1 の本棚の転倒限界加速度と実際の家具挙動の関係を図 4 に示す。必ずしも転倒限界加速度を境界に、転倒の有無が決定されるというわけではなく、特に短周期側においてそのばらつきは顕著である。これを映像で見てみると、瞬時に転倒する例や、ロッキング運動を繰り返した後、転倒に至ったものなど転倒の仕方が様々であることが確認できる。また、転倒していない例

でもロッキング運動をして倒れそうになった例があることも分かった。

また、理論上では大きく水平移動してしまう家具でも、耐震固定することで、移動を制限できることが確認できた。ただし、OAフロアや間仕切壁は固定対象としては不十分であり、固定器具が外れてしまう例や、粘着テープの強度が低く、テープが剥がれて転倒する例も見られた。

このような知見は、その9の360度のパノラマ映像を用いて、各家具の転倒の様子を詳しく観察することで、得られたものである。

5. シミュレーションソフトによる再現の検討

本研究では、物理エンジンを搭載し、ゲーム開発ツールとして用いられるUnityを用いてシミュレーションを行う。その映像を図5に示す。本研究ではシミュレーションのために一部の家具のおおまかな形状、質量、摩擦係数を計測しており、これらの値と実際の映像を基に家具のモデルのパラメータを設定した。また、入力地震動はE-ディフェンス実験で記録した波形データを用いる。

パラメータスタディの結果、椅子や複写機などのキャスター付きの動きやすい家具については、実測よりもやや小さい摩擦係数を、机やキャビネットなどの動きにくい家具については実測よりやや大きい摩擦係数を設定し、質量については両者とも実測に近い値を入力することで実挙動に近い動きを再現することができた。

ただし、衝突時の剛体の変形やカーペットへのめり込みなどを反映できておらず、実現象を完全に再現できてはいないが、単独で行うことが難しいシミュレーションによる地震時の家具の転倒予測に対して、映像と比較しながらパラメータの設定を検討するという方法を用いることにより、リアリティのあるシミュレーション映像の作成の可能性の検討を行うことができた。この方法で、家具と床条件の組み合わせに応じて経験的に摩擦係数を与えることで、様々な状況下でのシミュレーションを即座に行うことが出来ると考えられる。

また、作成した映像を、ヘッドマウントディスプレイなどを用いて、一般に普及、啓発を行なっていくことで、説得力のあるプレゼンテーションを行うことも可能であると考えられる。

6. まとめと今後の展望

本論では、E-ディフェンス実験を通して各層の床応答と室内状況を同時に記録することで、試験体の振動特性とともに地震時の家具の挙動を把握し、シミュレーションへ発展させる可能性を検討できた。

今後の展望として、設定するパラメータの更なる検討を重ね、実際の挙動により近い映像をシミュレーション

で再現して、防災啓発活動へとフィードバックさせることが挙げられる。

■ 大きく移動 ■ 転倒



(a)西新宿余震 330%加振(高層モデル) (b)JMA 神戸 75%加振(低層モデル)

図3 実験での室内被害概要

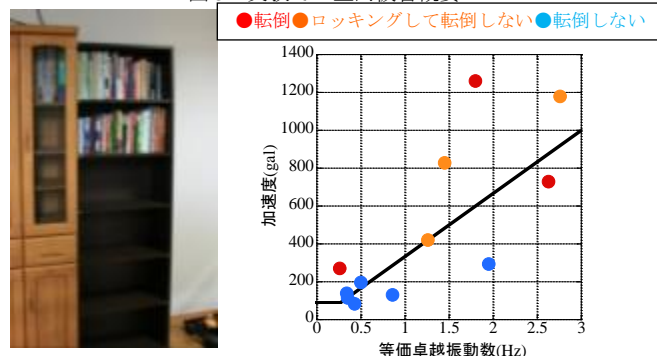


写真1 本棚

図4 本棚の転倒評価式



図5 E-ディフェンス実験の室内被害を再現したシミュレーション結果
謝辞

宇田晃氏(有限会社アシストコム)には、Unity について貴重なご助言を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平田悠貴ほか：強震計と光ファイバセンサによる鋼構造試験体の地震応答と損傷の評価(その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, vol.B-2, pp.543-546, 2009.
- 2) 金子美香、林康裕：地震時の剛体の転倒限界と移動量に関する検討, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.451-458, 1997 年 3 月

*1 名古屋大学

*2 (独)防災科学技術研究所

*1 Nagoya Univ.

*2 National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention