

実大震動台実験に基づく地震時の建物応答と室内被災状況に関する研究

名古屋大学工学部社会環境工学科
建築学コース 飛田研究室 松下卓矢

1. 研究の目的と背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、長周期成分を多く含んだ継続時間の長い揺れの影響を受け、首都圏の高層ビルでは、天井の落下やスプリンクラーの損傷による散水、室内での書籍等の落下・散乱、間仕切壁の変形によるドアの開閉の障害等が発生した。過去の被害調査でも重量のある家具や情報機器が不適切な固定のため転倒し、長期間にわたってオフィス機能が停止した例も報告されている。

人口の多い大都市では、建物の安全性が確保されていれば、地震後も建物利用者が建物内で待機することにより、その後の混乱や被害の拡大を軽減できると考えられる。近い将来の発生が懸念されている東海・東南海・南海地震も長周期成分を多く含む地震動であることが予想され、特に高層建物において室内の安全性を確保することは重要である。

そのため、本研究ではE-ディフェンスにおける実大震動台実験の結果を基に、地震時の建物応答と室内の家具の挙動を分析した上で、今後の啓発に繋げていく。

2. E-ディフェンス実験概要

試験体モデル概要とセンサー配置を図1に、加震項目を表1示す。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、鋼構造・高さ120m・地上30階相当の高層建物を再現し、1Fでは6階相当、3F(コンクリートスラブ)では17階相当、4F、P1Fではそれぞれ27階、28階相当の床応答が発生する。同12日の試験体は縮約層の上下階を鉄板で緊結し、中低層の建

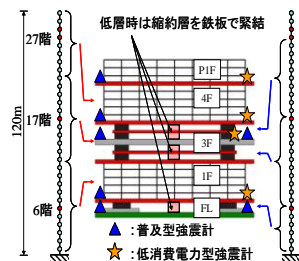


図1 モデル概要とセンサー配置



写真2 360度カメラ外観

表1 加震スケジュール

高層モデル		低層モデル
2011/10/4	2011/10/7	2011/10/12
ホワイトノイズ	ホワイトノイズ	ホワイトノイズ
JMA神戸25%	西新宿余震75%	西新宿余震330%
西新宿本震50%	西新宿余震330%	JMA神戸25%
西新宿本震100%	ホワイトノイズ	JMA神戸50%
西新宿余震150%		JMA神戸75%
ホワイトノイズ		ホワイトノイズ



写真1 試験体外観

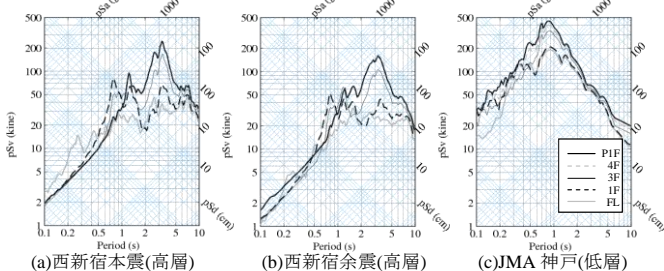


図2 各階床応答トリパタイトスペクトル

物を想定している。室内は、1Fと4Fは東側にオフィス、西側に住居空間があり4FオフィスはOAフロアである。また、住居空間の北側の家具は未固定で南側の家具は固定されている。P1Fはオフィスの他、移動式書庫やサーバールームが設置されている。

センサーは強震計(加速度計)を各層及び震動台表面の南東と北西に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、各層の北東に3Dカメラを、4Fのオフィスに室内全体を撮影できる360度カメラを設置し、地震時の被災状況をPCによる遠隔操作で記録した。その外観を写真2に示す。

加震波は東北地方太平洋沖地震本震と、その約30分後に茨城県沖で発生した余震を西新宿で観測した波(西新宿本震、西新宿余震)及び、兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された波(JMA神戸)を使用する。図2の各階応答スペクトルのように西新宿本震は長周期成分を多く含み、西新宿余震は本震に比べ短周期成分も多く含まれている。JMA神戸は卓越周期が約1秒の短周期地震動である。また、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. 試験体の加振時応答の分析

3.1 試験体の基本的振動特性の分析

試験体の基本的振動特性を確認するため、地震波加震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。低層モデルでは短辺方向の1次ピークは2.15Hzで長辺方向は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それぞれ検討し、図3、図4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。

3.2 履歴ループによる構造損傷の評価

各モデル長辺方向の地震波加震前後の履歴ループを図5に示す。高層モデルのP1Fでは、ループが乱れていて適切な評価が出来なかったが、1F、3F、4Fでは剛性は5~10%減少していて、固有振動数の変化から計算した剛性の変化量11%とおおよそ対応している。低層モデルでは1Fでは剛性が約50%減少していて、3F、4F、P1Fでは約10%減少している。固有

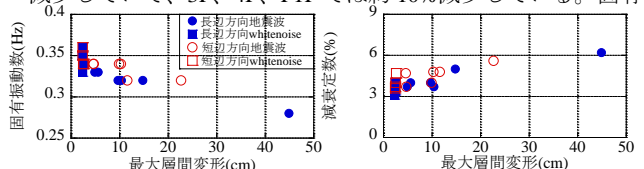


図4 固有振動数及び減衰定数と層間変形の関係(高層モデル)

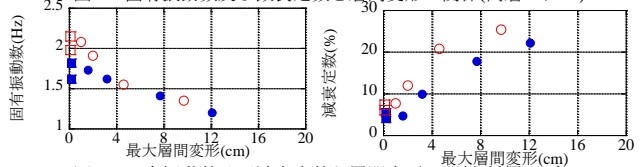


図5 固有振動数及び減衰定数と層間変形の関係(低層モデル)

振動数から剛性を計算すると 21%減少している。高層モデルでは積層ゴムの軟化、低層モデルでは上下層の連結部分の鉄板やコンクリートスラブが塑性化したことが影響したと考えられる。

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は、西新宿余震 330%、JMA 神戸 50%、JMA 神戸 75%の加震で多くの室内被害が見られた。被害の様子を図 6 に示す。西新宿余震 330%では、高層階で固有周期 3 秒前後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、JMA 神戸のような短周期で加速度の大きい地震動ではより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。

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。

$$A_{cr} = Bg / H \quad F_e < 15.6 / \sqrt{H} \quad (1)$$

$$A_{cr} = 10B(2\pi F_e) / \sqrt{H} \quad F_e \geq 15.6 / \sqrt{H}$$

例として写真 2 のキャビネットの転倒の理論式と実際の家具挙動の関係を図 7 に示す。未固定とねじ固定の二種類あり、その設置状況を図 6 に重ねて示す。未固定状態では理論式付

近の JMA 神戸 50%と JMA 神戸 75%で転倒している。それに対して、ねじ固定を施した場合には理論式の安全側にある JMA 神戸 50%で転倒していない。しかし、必ずしも理論式で転倒と未転倒が判定できるわけではない。

また、理論上では大きく水平移動してしまう家具でも、耐震支持することで、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。

5. シミュレーションソフトによる室内被害状況の可視化

360 度カメラで撮影した地震時室内状況の展開写真とシミュレーションソフトの映像を写真 3、図 8 にそれぞれ示す。現段階では長周期と短周期の揺れの違いによる家具の挙動の違いを再現するに留まっているが、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用いて室状に則した挙動を再現することで、室内被害の予測と防止に繋げていくことが望まれる。また、シミュレーション結果を用いたヘッドマウントディスプレイ表示などの体感映像作成への発展についても検討している。

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することに成功した。

今後の課題としては、より精度の高いシミュレーションソフトを用いて室内の被災状況をさらにリアルに再現し、高度なインターフェイスを用いて映像と床応答とを関連させながら一般向けに啓発を行っていくことがあげられる。

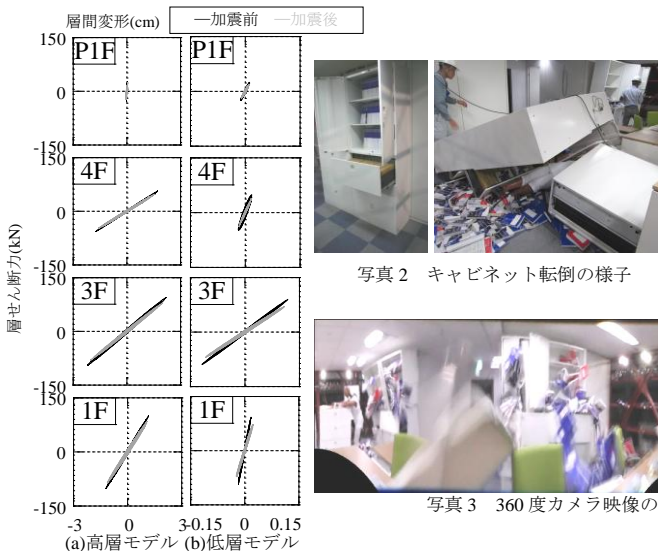


図 5 加震前後の履歴ループ比較



写真 2 キャビネット転倒の様子



写真 3 360度カメラ映像のスナップショット(JMA 神戸 75%加震中)



図 8 シミュレーションソフトの様子



図 6 実験での被害概要

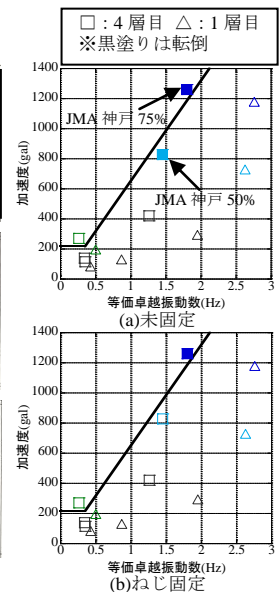


図 7 キャビネットの転倒式