

多層骨組の床応答評価と配管設備の耐震性確保に向けた振動台実験分析

名古屋大学工学部環境土木建築学科建築学コース

長江研究室 吉川拳人

1. 研究の背景と目的

1981 年 6 月から導入された新耐震設計法によって、昨今の建築群では構造躯体の安全性が脅かされるより早期の段階で非構造部材の損傷被害が生じる可能性が高まっている。1995 年兵庫県南部地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震では設備機器の被害が建物の継続使用性の喪失、莫大な修繕費用を生むことがクローズアップされた。そこで本研究では、建物床に支持される横引き配管設備を対象とした地震時挙動を解明し、配管設備と高次モードの関係を考慮した多層骨組の床応答評価手法の検討を目的とする (図 1)。

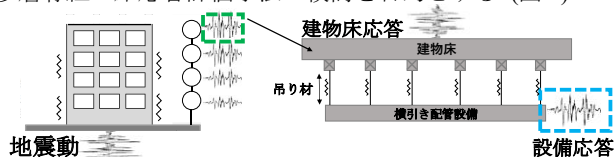


図 1 建物床応答と設備応答

2. 水道連結型スプリンクラーへの床応答伝達

2.1 2 層ユニットハウス加振実験

2019 年 12 月に、つくばの防災科学技術研究所の大型振動台を利用し、軽量鉄骨フレームを積層した 2 層 2 連のユニットハウスを加振する実験を行った。屋上床の小梁下に直交方向の 1.6 cm 角形鋼管の角バーが溶接され、前田バルブ社の提供による水道連結型スプリンクラーを設置し、建物応答と水道連結型スプリンクラーの応答を観測した。

2.2 実験結果

南西棟に関して、1 回目の JMA 神戸波 100% で最大層間変形角 0.027 rad、2 回目の 100% 加振では 0.033 rad を記録し、柱脚の塑性化が観測された。ユニットハウス屋上床応答と同位相での振動がスプリンクラーヘッドでも確認され、伝達関数から得た床応答に対するヘッドの固有周期 0.038 秒を床応答スペクトルと比較すると、スペクトルでは 2570 cm/s²、スプリンクラーの最大応答値は 3060 cm/s² となった。



図 2 2 層ユニットハウス実験 (2019.12 参加)

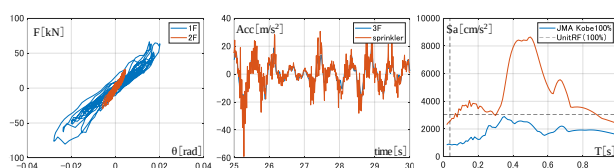


図 3 履歴性状

図 4 応答伝達

図 5 固有周期

3. 横引き配管設備の応答予測

3.1 SESTEC 給水配管耐震措置実験

2019 年 10 月に、釜山で実施された SESTEC (Seismic Simulation Test Center) の振動台を利用した実験に参加した。振動台に剛強な鋼フレームを計 6 体並べ、フレームの梁に入力地震動が損失なく伝達されるようなテストシステム (図 6) を用意した。梁成 300 mm の H 形鋼を用いたフレーム架構の梁フランジに径 12 mm の鋼ロッドを通し、深さ 40 mm の溝形鋼にボルトで緊結することによって、溝形鋼上に固定された総重量 410 kg の配管を吊り下げた。

3.2 力学モデルの仮定と応答予測

鋼フレームに入力された床応答に対する配管の応答スペクトルに、表 1 に示す力学モデル⑦の固有周期を用いて弾性応答とスペクトルの関係を図 8 に示す。実験結果から JMA 神戸波 100% 加振において、300 mm 吊り材で 15 mm、600 mm 吊り材で 131 mm、200% 加振においてそれぞれ 67 mm、291 mm を観測しており、残留変形がそれぞれ 30 mm、11 mm で確認された (図 9)。固定端に塑性ヒンジが同時形成された場合の水平耐力を概算し、応答スペクトルと比較したが、最大変位との関係を鑑みて過小評価であると考えられる。展望として耐震支持を含めた配管設備の弾塑性応答を分析し、横引配管に対する応答スペクトル法による分析の妥当性を検討する。



図 6 給水配管耐震措置実験 (2019.10 参加)

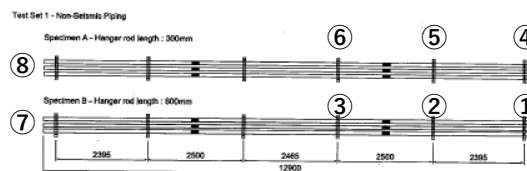


図 7 給水配管伏図

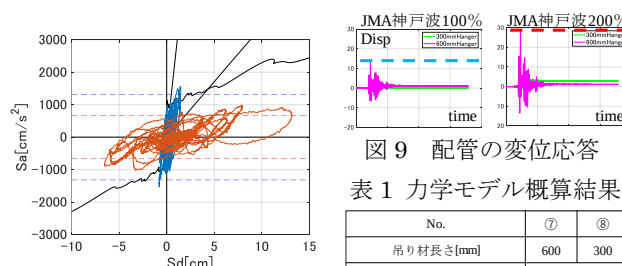


図 8 配管の応答スペクトル

図 9 配管の変位応答

表 1 力学モデル概算結果

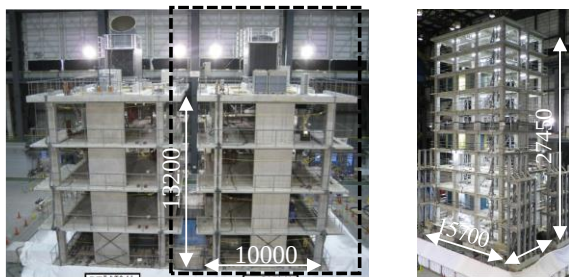
No.	⑦	⑧
吊り材長さ [mm]	600	300
質量 m [kg]	410.8	
剛性 k [N/m]	69555	556444
固有周期 T [s]	0.483	0.171
水平耐力 [N]	2707.6	5414.4

4. 多層骨組の床応答評価

4.1 E-Defense による 4 層 RC 実験および 10 層 RC 実験

E-Defense で実施された 2010 年 4 層 RC 実験¹⁾と 2015 年 10 層 RC 実験²⁾のデータを用いて多層骨組の床応答評価分析を行った。4 層 RC の純フレーム方向には JMA 神戸波 EW 成分、10 層 RC の純フレーム方向には NS 成分が入力され、50%加振以降で弾塑性応答を確認し、層間変形角はそれぞれ 1 層目の 0.033 rad、4 層目の 0.031 rad で最大となった。

建物床の変位応答から滝沢が提案し壁谷澤が展開した手法³⁾を用いて 3 次までモード抽出し、図 12 に示すような刺激関数を算出した。刺激関数を用いて等価質量および等価高さを算出し、全質量に対する等価質量の割合は 100%加振時 4 層フレーム方向で 1 次から 90.3%、8.36%、1.23%、10 層フレーム方向で 78.5%、9.66%、6.41%となった。設備機器と高次モードの関係を検討するため、基礎からの相対評価とした代表加速度を各層に振り分けた床応答を絶対値としてスペクトル表示した結果が図 13 (a) となる。各次モードの卓越周期でフィルタリングされ、耐震壁方向において、振り分けた各次モードの相対加速度を再度足し合わせた床応答スペクトル (b) を元のスペクトルと比較した相関 (c) と、残余モード成分の欠落を鑑みれば床応答スペクトルのモード抽出は適切であると考えられる。2 次モードでは 4 階床、3 次モードでは 7 階床での応答が最大ピーク値となった。



(a) 4 層 (2010.12) (b) 10 層 (2015.12)

図 10 多層 RC 造骨組実験データの利用

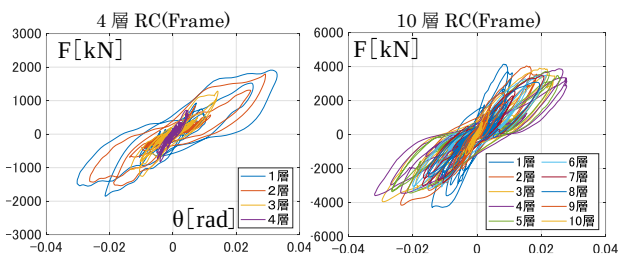
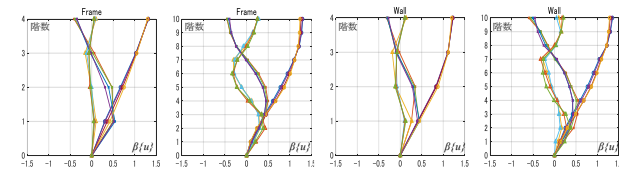
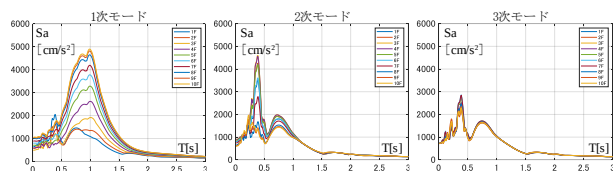


図 11 履歴性状

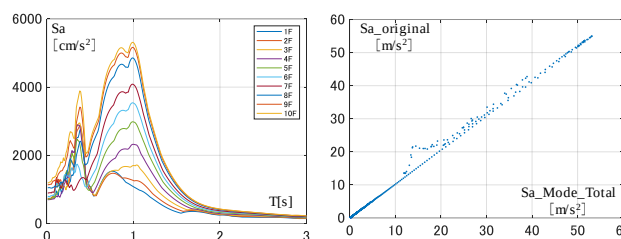


(a) 純フレーム方向 (b) 連層耐震壁方向

図 12 モード形状抽出



(a) モード分解



(b) モード間合成

(c) 相関

図 13 モード分解スペクトル (Wall)

4.2 多層骨組の応答スペクトルと設計用標準震度

ユニットハウス、4 層 RC、10 層 RC の屋上床における JMA 神戸波 50%に対する床応答スペクトルを実験データから算出し、図 14 に示す。固有周期 0.46 秒まではユニットハウスでの床応答が最大となり、0.39 秒で 6849 cm/s^2 となる。長周期側に移行するにつれ 4 層 RC、10 層 RC での卓越が大きくなり、それぞれ 0.67 秒で 5674 cm/s^2 、0.89 秒で 3214 cm/s^2 となった。この応答スペクトルから得た最大応答水平加速度を重力加速度で除することで水平震度と同様の計算をした。建築設備指針⁴⁾は 1 次振動モードを安全側に定数倍して包絡させた床応答推定式⁵⁾を採用し、床応答倍率 K_f を概略値で定め、本指針が対象とする 400 cm/s^2 程度を想定した基準震度 K_0 にかけ合わせることで設計用標準震度を定めている。最上階における耐震クラス S を対象として、3 節で用いた配管設備を想定した分析結果と比較したところ、600 mm 吊り材においては危険側の評価、300 mm 吊り材に対しては概ね安全側の評価となった。

5. 結論

本研究では、配管設備本体の応答分析および重要な因子となる建物床応答を設備耐震の観点から実験データ分析により評価した。今後の展望としては、数値解析モデルの作成による静的増分解析から、設備機器に有効な高次モードを考慮した解析手法を検討する。

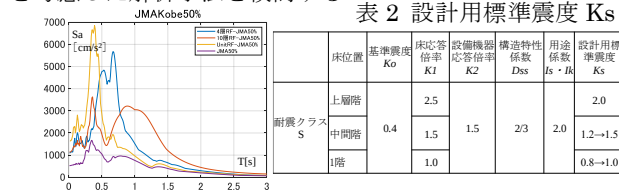


図 14 屋上床応答

表 2 設計用標準震度 K_s

床位置	基準震度 K_0	床応答倍率 K_1	設備機器応答倍率 K_2	構造特性係数 D_{ss}	用途係数 $f_s \cdot f_k$	設計用標準震度 K_s
上層階	2.5	1.5	1.5	2/3	2.0	2.0
中間階	0.4	1.5	1.5	2/3	1.2~1.5	1.2~1.5
1階	1.0	1.0	1.0	2/3	0.8~1.0	0.8~1.0

表 3 設計用標準震度 (●は危険側評価)

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
固有周期 [s]	0.33	0.41	0.41	0.48	0.12	0.15	0.17
50%加振時 応答水平震度 [-]	4層RF 3.04	3.28	3.28	2.35	1.91	1.71	1.96
10層RF	3.04	2.67	2.67	3.2	1.49	1.55	1.53
UnitRF	5.79	6.24	6.24	6.75	2.55	2.3	2.64

参考文献

- 長江拓也、田原健一、福山國男、松森泰造、塩原等、壁谷澤寿海、河野進、西山峰広、西山功：4 階建て鉄筋コンクリート造建築物を対象とした大型震動台実験、日本建築学会構造系論文集 2011.11
- 土佐内優介、佐藤栄児、福山國夫、井上貴仁、梶原浩一、塩原等、壁谷澤寿海、長江拓也、福山洋、壁谷澤寿一、向井智久：大型震動台による 10 階建て鉄筋コンクリート造建築物の三次元振動実験、日本建築学会構造系論文集 2018.8
- 渡辺明紀、壁谷澤寿海：鉄筋コンクリート純フレーム構造の地震応答変形量に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、1990
- 『建築設備耐震設計・施工指針 2014 年版』：日本建築学会、2014
- 木村晋悟、寺本隆幸：地震時の床応答に関する研究その 3、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000