構造架構と非構造部材の実験評価および包括的耐震性能評価への展開

1. 序論

構造躯体の耐震安全性が向上した昨今の建築群では、 構造安全性が脅かされるよりも早期の段階で非構造部材 の損傷被害が生じうる。莫大な補修費用の発生や、建物 機能の停止による損害は、資産価値や継続使用の観点か らも重大な打撃であることから、現代では建築物に対し 構造部材と非構造部材を含めた耐震性能評価手法を整備 することが求められている。そこで本研究では等価線形 化法による構造架構の応答および床応答スペクトルによ る設備機器の応答評価を通じて、建物性能値の超過確率 に基づく性能評価体系へのそれぞれの実装と展開に資す ることを目的とした分析を実施し、これらを一気通貫し た建築物の包括的な損失評価の潮流を推進することを目 的としている。

2. 多層骨組の床応答モード分析と設備機器応答評価

2.1 実験の概要

E-ディフェンスで実施された 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 床応答評価分析を行うことで、中 高層建物において無視できない高 次モード成分を動的データから算 定し、床吊り設備機器に対する床 応答スペクトル構成要素の同定を 実施した。両試験体の概要比較を 表1に示す。



図1 試験体全景

表1 試験体概要の比較

	2010年4層RC試験体	2015年10層RC試験体
設計基準	鉄筋コンクリート造構造計算規準(2010) 2007年版建築物の構造関係技術基準解説書	
基礎条件	基礎固定	基礎固定
終局状態	柱梁接合部の損傷 壁脚の圧壊	柱梁接合部の損傷
1次設計Co	0.20	0.20
2次設計Ds	0.30 (Frame)	0.30 (Frame)
	0.35 (Wall)	0.35 (Wall)
総重量[kN]	3541	8196
設計基準強度Fc	27 N/mm ²	27~42 N/mm ²
固有周期[sec]	0.45 (Frame)	0.85 (Frame)
	0.34 (Wall)	0.58 (Wall)

2.2 床応答分析に基づくモード同定

骨組床応答変位を用いて、刺激関数を算定し、振動モ ードを同定する手法として(1)最大変位法(2)剛性マトリ クス法(3)滝澤・壁谷澤による手法³⁾の3つを1次モード において比較した結果を図2に示す。3手法は良好に一 致し、以降では高次モード同定のため(3)を用いることが できることを示した。 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 博士課程 前期課程2年 長江研究室 吉川 拳人



2.3 等価1自由度系にみる架構全体の応答性状

(3)を用いたモード刺激関数に基づいて動的縮約式を 適用した結果、図 3 のように固有振動数の異なる等価 1 自由度系応答を抽出できた。Sa-Sd 関係を応答スペクト ルに示せばそれぞれのモードにおいて振幅の異なる傾向 が入力されたスペクトル特性と整合した。



2.4 床応答に対する設備機器の応答性状評価

前章における床吊り設備の弾塑性応答および応答スペクトル法による評価検証に基づき、床応答スペクトルの 算定式⁴⁾と実験値に基づく比較を行った。上述の2010年 4 層骨組実験では、現設備耐震設計施工指針類などに準 じた設備機器・配管の耐震実験を併せて行い、損傷防止 性能と地震後の設備機能確保に向けた検証が平山ら⁵⁾に



(a)試験体全景

(b)各種設備機器 (c)吊りボルト破断

図4 試験体全景および設備耐震実験

よって実施された(図4)。137kgのビルマル室内機では、 クリップ固定の斜材が全て外れ、吊りボルトが根元で破 断し、機器自体が落下している。

2.5 床応答スペクトルに基づく吊り設備応答の評価

図 5 は 25%、50%加振の結果である。建築設備耐震設計・施工指針において規定されている設備機器の応答倍率 K2=1.5 が設計用地震力として規定されているが、壁方向の卓越周期 0.3-0.6 秒では、スペクトル振幅はその 2 倍を超えている。すなわち、床吊り機器に対して、震度5 強の 25%加振の時点で 0.5G に相当する水平力が加わったことが確認できる。同図、石原ら⁴⁾による床応答スペクトル算定式を引用し、重ねて示すことで、実建物応答における床応答と設備応答の倍率を地震応答スペクトルから直接評価することが可能であることを確認できた。



3. 床吊り非構造部材の非線形応答評価

前節では床に支持される設備機器の応答加速度につい て検証を行ったが、それを踏まえ、本節では部材変形も 同様に応答スペクトル上で評価することができる。地震 時には許容応力度に留まらず弾塑性応答を示すことを、 床吊り給水配管を対象とした SESTEC 振動台実験により 検証した。



図6 試験体全景と床吊り給水配管

3.1 試験体の概要

本実験の試験体の概要を図6に示す。全景に示される ように2つの独立した振動台の上に並べた梁せい鋼フレ ーム架構の梁フランジに径12mmの鋼ロッドを通し、深 さ40mm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386 kg(管内水を含む)の円形配管 を300mmまたは600mmの吊り材で吊り下げた。吊り 材が支持する総重量は溝形鋼を含めた410kgとなった。

3.2 実験結果に基づく応答スペクトル法の適用性

図7では縦軸に給水管上の記録加速度、横軸に相対変 位をとり、履歴を描いた。耐震支持なしの条件では吊り 長さ 600mm の条件において顕著な振幅がみられ、弾塑 性域に至る変位応答を示していることを確認した。同図 に吊りボルトの両端が全塑性モーメントに達した際の水 平耐力 Pmaxを点線で示すと、履歴の耐力相当の評価であ る。さらに上部水平梁の記録加速度に対する最大応答ス ペクトル(Sa-Sd フォーマット)を重ねた。いずれの履歴も ピークがスペクトルに対応する際の減衰定数 hsp を求め たところ 0.3-0.4 程度であり、適切な減衰評価の下応答ス ペクトル法に基づく応答推定の妥当性が確認できる。

3.2 数値解析による吊り部材の弾塑性応答評価

吊り材端部の塑性化に基づき、上下端の剛塑性ばねと 弾性棒で構成される3次元モデルを構築し、時刻歴応答 解析を実施したところ、最大変位の評価として良好に対 応することを示し、非構造部材における応答スペクトル 法適用においては弾性に留まらないことを検証した。



図7 加速度 Sa-変位 Sd フォーマットと弾塑性解析

4. 等価線形化法に基づく架構全体の減衰評価検証

RC 骨組の降伏点の提案におけ る減衰の精緻化の一環として、 2020 年 10 月 E-ディフェンスで 実施された5 層 RC 造骨組の振動 台実験の試験体全景を図 8 に示 す。本試験体は災害拠点建築物 を想定し外周に部材せいを大き



図8 試験体全景

くした剛性の高い柱梁をもつ、災害拠点建築物を想定し た設計が実施され、浅井らのはこの振動実験結果に基づ き、より実情に近い降伏変位評価手法を提案している。 この実験分析を通して、等価線形化法に基づく架構全体 の減衰評価手法の検討を行った。

4.2 床応答分析および損傷評価

R1 加振ではひび割れ発生に伴う剛性低下が下層階に



生じ、R2 加振では多くの部材で主筋降伏により大幅に剛 性が低下した。R3 加振および R4 加振では概ね最大耐力 を維持しながら変形がさらに進行したが、各階比較的大 きなループを描いており、図9に示すような梁崩壊型メ カニズムの形成を確認した。

4.3 等価粘性減衰定数の算定

以上の検討により得られた Sa-Sd 関係に基づく履歴減 衰定数 heq を架構の代表変位 Sd に対して図 10 に示す。 また、性能曲線を等価な折れ線モデルに置換した際に得 られる降伏変位を用いた塑性率から、RC 定常ループに 対する算定式を用いた減衰を重ねた。同図には、実験値 に基づく部材端における減衰の足し合わせとして直接的 に算定する手法も用いて比較した。いずれの減衰曲線も 実験結果による履歴減衰を良好に下限包絡するが、折れ 線化による手法では骨組の耐力上昇などの要因により降 伏変位の評価に誤差が生じやすく、架構全体の減衰を変 形に応じて適切に評価するためには、部材減衰の積算手 法を用いることとした。



5. 手法検討プロトタイプ建物による包括的性能評価

構造骨組応答と設備応答の分析を通して、10 層鋼構造 オフィスビル(図 11)を想定した手法検討用プロトタイプ 建物に対し包括的な耐震性能評価を試みる(図 12)。



図 11 プロトタイプ建物

図 12 性能評価体系

架構の検証は図 13 に示すような 3 パターンで実施し た。短辺方向の MRF-Core 架構は内コア構造で応力を負 担する設計とされているが、本節では鋼製座屈補強ブレ ース(以下 BRB ダンパー)を内スパンに持つ長辺方向のみ を対象とし、BRB ダンパーの有無が建物全体の損失に与 える影響を比較した。解析モデルは床スラブを含む実建 物性状を模すため過去の実験を引用し⁷、降伏後剛性倍



率を 10%として静的増分解析および時刻歴応答解析を 実施した(図14)。BRBダンパーによる連層曲げ変形モ ードが塑性化部降伏前の 1/200 変形ステップで顕著に表 れており、剛性比は MR-F に比べて 1.48 倍、フレーム強 度とブレース強度の比は 5:3 となった。時刻歴応答解析 における等価1 自由度系の Sa-Sd 関係では BRB ダンパ ーによる剛性の上昇他、履歴吸収エネルギーが増大する 傾向が見られた。この履歴吸収エネルギーの関係を比較 する際、前節で示したような各部材端の降伏を反映し、 部材減衰を積算する手法を採用し、架構の変形と減衰増 大の関係を図 16 の黒実線に示し、履歴減衰プロットと の比較を行った結果、良好に対応していることを確認し た。同図に部材ごとの減衰増大の内訳を示しているが、 BRB-F モデルの梁端が吸収するエネルギーが MR-F モデ ルよりも小さいが、これは BRB ダンパーによる梁端回 転角の拘束効果によるものであり、先述の曲げ変形モー ドの原因となっていると考えられる。



得られた減衰曲線をもとに、FEMA-P695の地震動群を 用いて地震強度を漸増させ、それぞれの最大応答点を応 答スペクトル法によって推定する。漸増応答スペクトル 法によって架構の各層最大層間変形角(SDR)および各床 最大応答加速度(PFA)を推定した結果は、制振機構による 変形制御と同時に床応答加速度の増幅が見られ、その割 合はいずれも 1.5 倍程度である。



漸増応答スペクトル法による応答推定結果 図 17

架構の漸増解析結果に基づき、損失解析プログラム EaRL⁸⁾を用いて損失コストを評価した結果を図 18 に示 す。フラジリティおよびコスト関数については本論では マクロな損失関数 %を引用し、床応答工学量から直接的 に損失コストを評価できるモデルを用いている。どちら のモデルにおいても小地震においては天井などの PFA 依存の非構造部材による損失が支配的であるが、架構の 変形が進むにつれて間仕切壁などの SDR 依存の非構造 部材による損失コストが上回る傾向にある。BRB ダンパ ーを擁する架構では変形が抑制されるため、IM=1.0G す なわち 2000 年に一回起きるとされる地震強さに対して SDR 依存の非構造部材コストが MR-F に対して 0.53 倍 にまで低減することができることがわかる。これは図19 に示す高さ方向の部材種別ごとの損失コスト分布を参照



しても同様である。さらに、MR-F 架構では変形増大に 伴い構造部材の修復コストが生じることで総修復コスト は BRB-F 架構に対して 1.48 倍を示す結果となった。 構造部材と非構造部材という分類で見れば構造部材修復 コストは非構造部材修復コストに対して非常に小さい割 合であることも示している。

6. 結論

本論では非構造部材の耐震性能を含む建物全体の包括 的な性能評価を実施した。骨組応答計算は非構造に与え るインテンシティを正確に求めるためのものであって、 骨組そのものが損傷して修復コストに与える影響は、相 対的に断然小さく、非構造材の評価体系の整備が鋼構造 建物の耐震性評価の信頼性に直結することを示すことが できた。

参考文献

- 長江拓也他:4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型 1) 振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 669 号, pp 1961-1970, 2011
- 梶原浩一他: E-ディフェンスを用いた 10 階建て鉄筋コンクリー 2) ト造建物 (2015) の三次元震動台実験 その1~5、日本建築学会大 会学術講演梗概集,構造 II, pp.863-872, 2016
- 滝沢春男:梁崩壊型靱性架構の動的機構形成における定モード成 3) 分の抽出,構造工学論文集, vol. 36, pp.245-258, 1990
- 4) 石原直,元結正次郎,脇山善夫:床応答スペクトルの 略算法に基 づく非構造部材等の設計用地震力,日本建築学会技術報告集,48 号, P 511, 2015-06
- 平山昌宏, 松森泰造: E-defense における設備機器・配管実験, 2011 5) 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011
- 浅井竜也, 勅使川原正臣, 楠浩一, 稻井栄一, 長江拓也, 高橋愛, 6) 吉川拳人, 諏訪田晴彦, 向井智久:RC 造建物の振動減衰性状評価方 法の検討 その27 降伏変形評価手法の提案,2021 年度日本建築学 会学術講演会, 2021.9
- 松宫智央,中島正愛,吹田啓一郎,劉大偉,周鋒,福本直晃: 実 7) 大鋼構造ラーメン の繰り返し載荷挙動に対して 弾塑性数値解析 がもつ予測精度 -実大 3 層鋼構造骨組 を用いた耐震性能実証実 験 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 69 巻, 第 585 号, pp.215-221 2004.11
- 8) Elkady, A., Lignos, D.: EaRL-Software for Earthquake Risk, Loss and Lifecycle Analysis, SoftwareX, Vol. 12, 2020.
- 9) Athanasios N. Papadopoulos, Dimitrios Vamvatsikos, Athanasia K. Kazantzi: Development and Application of FEMA P-58 Compatible Story Loss Functions, Earthquake Spectra, September 2018



図 19 部材種別による損失コスト高さ分布