

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：34517

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420575

研究課題名(和文)高精度地震応答シミュレーションによる日本式、米国式ラーメン構造の耐震信頼性評価

研究課題名(英文) Evaluation of Seismic Reliability of Japanese and U.S. Type Moment-resisting Structures by Detailed Seismic Response Simulation

研究代表者

田川 浩之 (TAGAWA, Hiroyuki)

武庫川女子大学・生活環境学部・准教授

研究者番号：60422531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：日本と米国等の諸外国では、一般に異なる架構形式で建物が設計される。日本では均一型、米国では分離型ラーメン構造であり、それらが地震動を受けた時の応答ならびに崩壊メカニズムは異なることが想定される。本研究では、これら異なる架構形式を対象に、汎用非線形有限要素解析プログラムを用いて、梁要素とシェル要素による実用的な異種混合型の有限要素モデルによる高精度な地震応答シミュレーションを実施し、倒壊に至るまでの挙動を再現した。特に、米国式の鉄骨ラーメン構造では、鉛直荷重支持骨組の脆弱なところを起点にして、建物全体が倒壊していく現象が観察された。

研究成果の概要(英文)：Typical steel moment-resisting frame structure in Japan is designed so that almost all frames resist vertical and horizontal loading simultaneously. In contrast, typical steel moment-resisting frame structure in the United States and many other countries in seismic regions consists of seismic and gravity frames. Structures with different framing systems are likely to exhibit different seismic response and collapse mechanism when subjected to earthquake ground motions. In this study, precise seismic simulation up to complete collapse was conducted with general-purpose finite element analysis program to evaluate quantitatively seismic reliability of Japanese and U.S. type steel moment frame structures. Particularly, the phenomenon in which complete collapse starts to occur around the weak region of gravity frames was observed.

研究分野：建築構造

キーワード：日本式、米国式ラーメン構造 均一型、分離型ラーメン構造 地震応答シミュレーション 非線形有限要素解析 梁要素、シェル要素 耐震信頼性評価 崩壊メカニズム 倒壊余裕度

1. 研究開始当初の背景

日本と米国などの諸外国では、一般に異なる架構形式で建物が設計される。日本では、図1に示すように、X、Y両方向のI形鋼梁が角型鋼管柱に剛接合され、殆ど全ての柱、梁が鉛直荷重と水平荷重を同時に支える、均一型ラーメン構造である。一方、米国などの諸外国では、図2に示すように、鉛直荷重を主に支持する鉛直荷重支持骨組と、水平荷重を主に支持する耐震骨組から構成される、分離型ラーメン構造である。これらの全く違う架構形式の鉄骨ラーメン構造では、地震時における挙動や崩壊メカニズムは異なることが想定される。ところが、コンピュータの性能や構造解析プログラムの機能の制約などにより、これまで倒壊に至るまでのシミュレーションは殆ど実施されておらず、倒壊に至るまでの挙動については殆ど未解明であった。



図1 日本式の鉄骨ラーメン構造

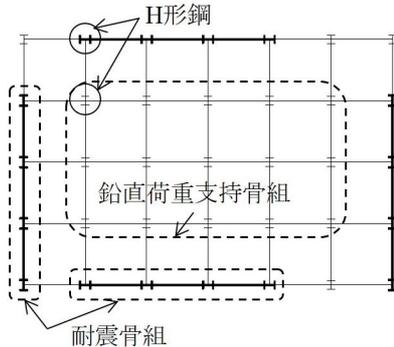


図2 米国式の鉄骨ラーメン構造

2. 研究の目的

本研究の目的は、日本式、米国式の異なる架構形式に対して、倒壊に至るまでの挙動を数値シミュレーションにより明らかにし、それらの崩壊メカニズム、崩壊余裕度、耐震信頼性を定量的に評価することである。そのための前段階として、梁要素とシェル要素による異種混合型の有限要素解析モデルの妥当性について検証する。また、米国型の鉄骨ラーメン構造における鉛直荷重支持柱材は多層建物を高さ方向に貫く心棒としての役割を担うことが想定されるため、心棒効果について基本的な検討を行う。

3. 研究の方法

本研究の具体的な方法を、項目ごとに以下に示す。

(1) 心棒効果の基本的な検討

多質点バネ系モデルである、図3に示す「混合せん断+曲げ棒モデル」を用いる。混合せ

ん断+曲げ棒モデルは、米国式の鉄骨ラーメン構造を対象に、梁材にピン接合された鉛直荷重支持柱材による心棒効果を定量的に評価するために提案された。耐震骨組はせん断棒と曲げ棒の成分に分けてモデル化され、鉛直荷重支持骨組の柱材はそのまま曲げ棒に加えられる。なお、時刻歴非線形応答解析にはFortranによる自作プログラムを用いる。

(2) 異種混合型の有限要素モデルの検証

本研究では、梁要素とシェル要素による異種混合型の実用的な有限要素モデルをシミュレーションに用いる。米国式ラーメン構造に対するモデル化の一例を図4に示す。片持柱、柱-梁、柱-梁-床スラブの部分架構、実大4層鉄骨(S)ラーメン構造¹⁾、連層耐震壁付き実大4層鉄筋コンクリート(RC)構造²⁾を対象に、梁要素のみでモデル化した場合と、適宜シェル要素も配置した場合で応答に差異が生じるかどうか確かめ、異種混合型の有限要素モデルの妥当性を検証する。

(3) 日・米架構形式の倒壊シミュレーション

日本式、米国式の3層鉄骨ラーメン構造を仮想振動台上に並べて設置し、同じレベルの地震加速度を入力し応答を算出し、比較、検討する。最終的に倒壊現象が起こるまで、地震加速度の入力レベルを漸増させ、崩壊メカニズム、崩壊余裕度を明らかにする。

(4) 日・米架構形式の耐震信頼性評価

日本式、米国式の異なる架構形式に対して多数の地震応答解析を行うことで耐震信頼性を定量的に明らかにする。なお、(2)~(4)のシミュレーションには、汎用非線形有限要素解析プログラムを用いる。

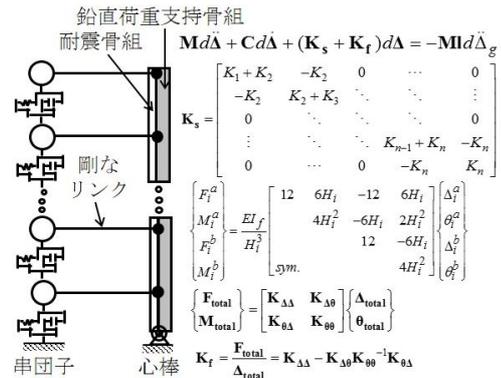


図3 混合せん断+曲げ棒モデル

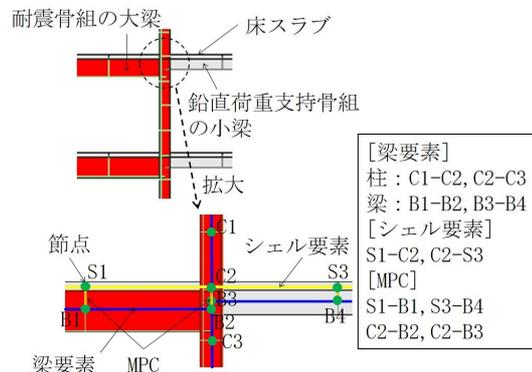


図4 梁要素とシェル要素によるモデル化

4. 研究成果

(1) 心棒効果の基本的な検討

4層S造，RC造を簡略化した混合せん断+曲げ棒モデルで，心棒の曲げ剛性を変化させて，非線形動的解析を実施した．せん断棒の各層の水平ばねの履歴復元力特性をS造の場合はバイリニア，RC造の場合は剛性，強度劣化型でスリップ現象と履歴損傷を考慮できる履歴復元力特性を設定した．心棒はS造では鉛直荷重支持柱，RC造では連層耐震壁などを想定しており，その材料特性を弾性と仮定している．S造，RC造ともに，心棒の曲げ剛性が増加するに従い，図5に示すように，変形集中率(DCF)が1.0に漸近することが分かる．したがって，柱材，とくに米国式ラーメン構造においては鉛直荷重支持柱材が地震時に弾性状態を保持できれば，特定層への変形集中を緩和する心棒効果が期待できることが示された．

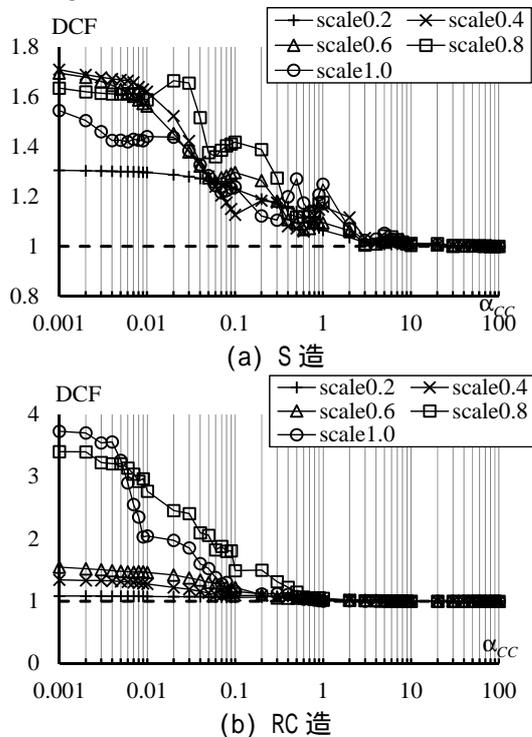


図5 変形集中率(DCF)の解析結果

(2) 異種混合型の有限要素モデルの検討 片持柱

局部座屈を再現するために，図6に示すように，局部座屈の発生が想定される柱脚部にシェル要素を配置する．断面の平面保持を仮定し，梁要素とシェル要素の接合断面内の節点どうしを多点拘束条件式(MPC)で結合する．シェル要素を配置することで，図7に示すように，局部座屈の現象を再現できることがわかる．梁要素だけでモデル化した場合，図8に示すように，柱脚部で全塑性モーメント M_p に到達後，ひずみ硬化により強度が増加し続けるが，柱端部にシェル要素を配置することで局部座屈に起因する強度劣化を再現できることを示した．また，梁要素の断面分割数について検討し，10とした場合に十分な精度で計算できることを確認した．

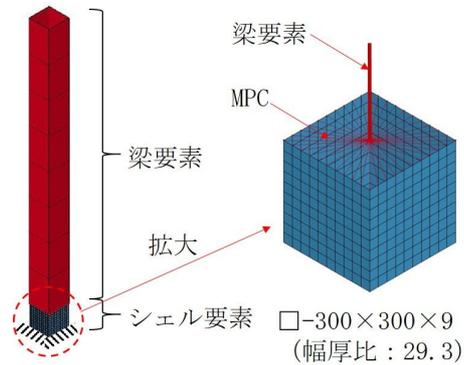


図6 片持柱の有限要素モデル

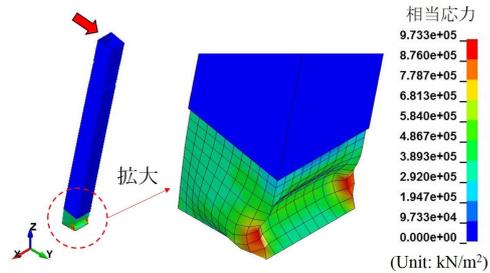


図7 局部座屈の再現

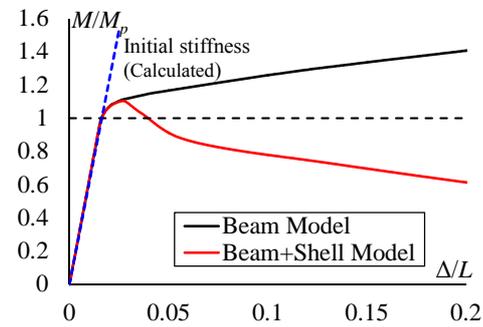


図8 片持柱の荷重-変形関係

柱-梁，柱-梁-床スラブの部分架構

柱-梁部分架構の有限要素モデルを図9に示す．梁要素だけでモデル化した場合は，図10に示すように，塑性化後も強度が増加し続けるが，梁端部にシェル要素を配置した場合は，梁端部の局部座屈により強度が低下する．シェル要素とMPCを配置することで，柱梁接合部の剛域を考慮することができ，梁要素のみのモデルよりも初期剛性が大きく，剛域以外の柱，梁部材の曲げ，せん断変形を考慮した計算式と一致することを確認した．

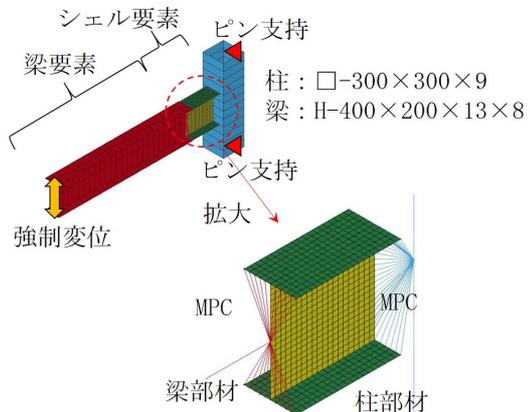


図9 柱-梁部分架構の有限要素モデル

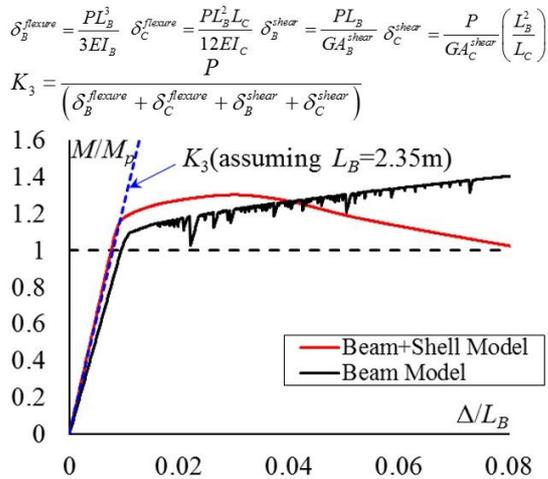


図 10 柱-梁部分架構の荷重-変形関係

柱-梁-床スラブ部分架構の有限要素モデルを図 11 に示す．床スラブをシェル要素でモデル化し，梁部材上のシェル要素の節点と梁要素の節点を MPC で結合する．図 12 に示されるように，床スラブを加えることで，柱-梁部分架構と比較し，初期剛性と耐力が増加する，すなわち，合成梁効果が再現できることが示された．ただし，使用した汎用有限要素解析プログラムで，陰解法を用いた場合に，薄肉シェル要素に適用できる適切なコンクリートの非線形材料構成則が実装されていないため，床スラブのコンクリートを弾性としている．そのため，正，負載荷方向でほぼ対称となる挙動が得られている．コンクリートの引張りひび割れを考慮すると非対称になるので，この点は今後の課題としたい．

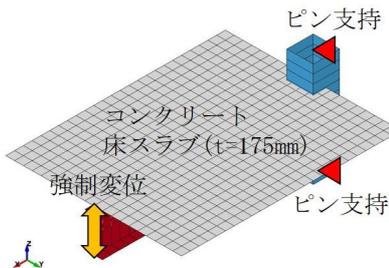


図 11 柱-梁-床スラブの有限要素モデル

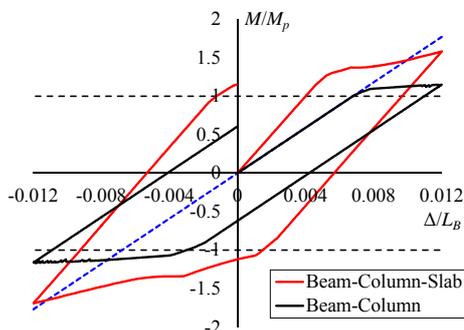


図 12 柱-梁-床スラブの荷重-変形関係

実大 4 層鉄骨ラーメン構造¹⁾

実大 4 層鉄骨ラーメン構造の有限要素モデルを図 13 に示す．各層の柱材と大梁は 8 等分割し，最下層の柱端部にシェル要素を配置する．外壁はモデル化せずに，建物全体の重

量を試験体と合わせるため，床スラブのコンクリートの密度を割り増している．その結果，解析で得られた固有周期は実験値とほぼ一致する．シェル要素を配置することで，図 14 に示すように，柱端部での局部座屈，さらには，図 15 に示すように，最下層の層崩壊による建物全体の倒壊現象が再現された．柱材を梁要素のみでモデル化した場合は，図 16 に示すように，倒壊しないが，最下層柱端部にシェル要素を配置した場合は，倒壊が再現されることが示された．

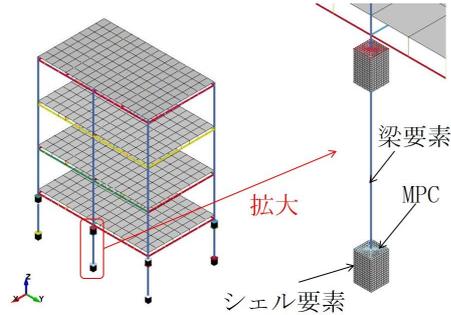


図 13 実大 4 層鉄骨建物の有限要素モデル

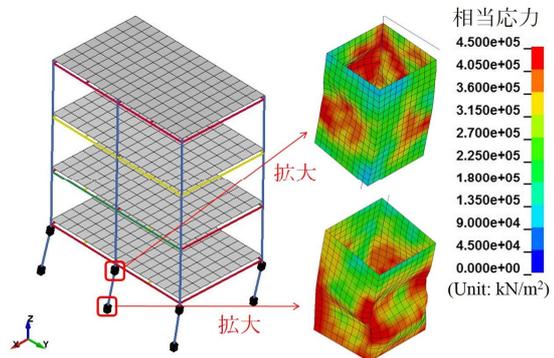


図 14 最下層の柱端部における局部座屈

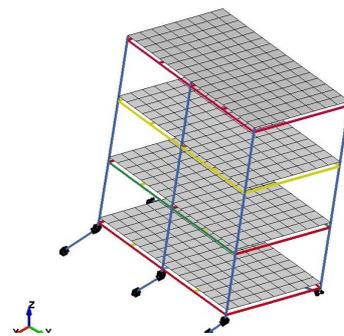


図 15 最下層の層崩壊による倒壊現象の再現

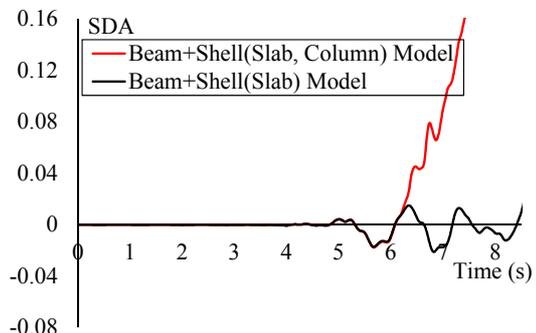


図 16 最下層の Y 方向層間変形角の時刻歴

実大 4 層鉄筋コンクリート構造²⁾

連層耐震壁付きの実大 4 層 RC 構造の有限要素モデルを図 17 に示す。RC 梁、柱部材は鉄筋を断面内の正確な位置に配置できるファイバー梁要素でモデル化し、連層耐震壁と床スラブはシェル要素でモデル化し、柱、梁部材と MPC で結合している。このモデルに対して地震応答シミュレーションを実施した。変形図と相当応力の分布を図 18 に示す。また、実験結果との乖離があるので、今後の課題としたい。

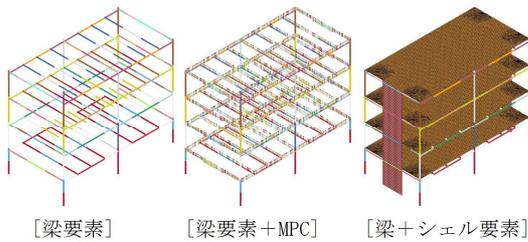


図 17 実大 4 層 RC 構造の有限要素モデル

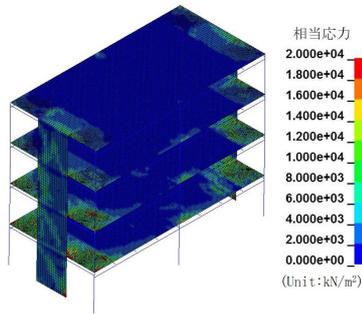


図 18 実大 4 層 RC 構造の相当応力分布

(3) 日・米架構形式の倒壊シミュレーション
 仮想震動台上に設置した日本式、米国式の 3 層鉄骨ラーメン構造の有限要素モデルを図 19 に示す。床スラブはシェル要素、柱、梁部材は梁要素でモデル化し、大梁と床スラブが接する部位のシェル要素と梁要素の節点同士を MPC で結合している。柱、梁の各部材は 8 等分している。兵庫県南部地震の観測波相当の 60%の地震加速度を入力した時の最下層の X 方向層間変形角の応答を図 20 に示す。米国型の層間変形角は 1.92%であるのに対し、日本型は 0.85%に留まっている。この時点で米国型の耐震骨組の柱、梁材端部で全塑性モーメントに達する。80%の地震加速度を入力した場合の最下層の X 方向の層間変形角の時刻歴応答を図 21 に示す。米国型ラーメン構造は倒壊した。米国型の鉛直荷重支持柱の曲げモーメントの分布を図 22 に示す。曲げモーメントは全塑性モーメント(785.8kN・m)に達している。さらに、100%加振では、図 23 に示すように、日本型、米国型の両方が倒壊した。米国型鉄骨ラーメン構造では、鉛直荷重支持柱材が曲げモーメントを受けて塑性化を起し、くの時のように折れ曲がり、建物全体の倒壊を引き起こす。想定していたよりも小さな地震加速度で倒壊したため、今後、その原因を照査する。

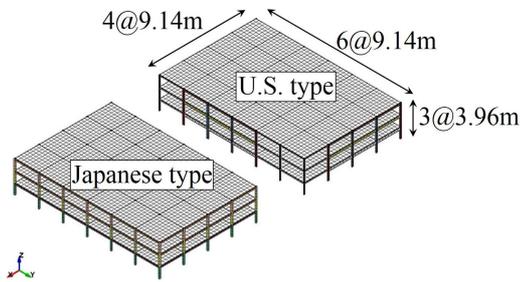


図 19 日・米架構形式の有限要素モデル

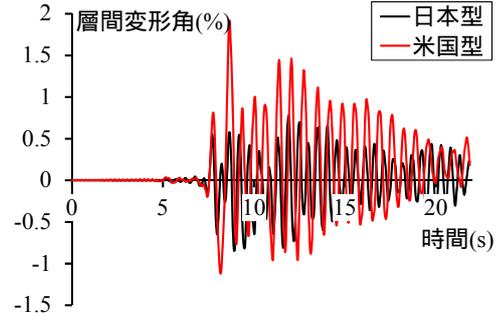


図 20 最下層の X 方向層間変形角 (60%加振)

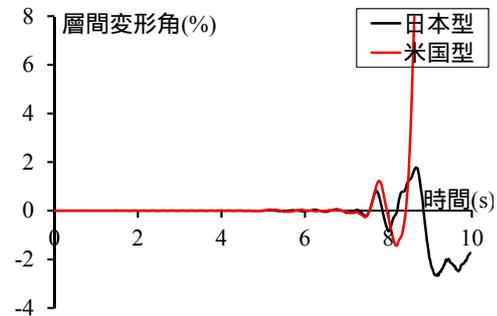


図 21 最下層の X 方向層間変形角 (80%加振)

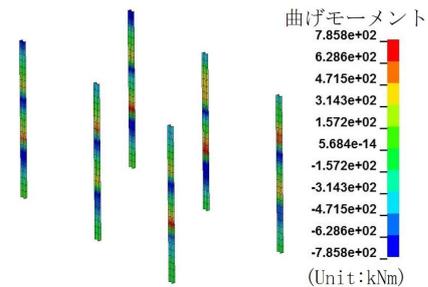


図 22 鉛直荷重支持柱の曲げモーメント分布

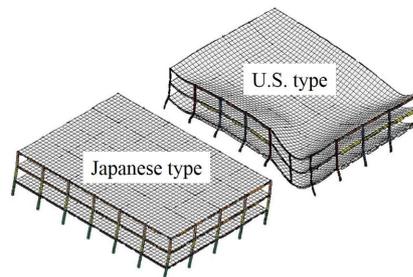


図 23 倒壊シミュレーション結果(100%加振)

(4) 日・米架構形式の耐震信頼性評価

下式で表される確率論的アプローチに基づき、日本式、米国式の鉄骨ラーメン構造の信頼性評価を実施した。

$$v(DV) = \int \int \int G < DV \mid DM > dG < DM \mid EDP > dG < EDP \mid IM > d\lambda(IM)$$

検討結果の概略を以下に示す。

多数の地震動データに対する加速度応答スペクトルを算出し、それに対する回帰解析を行い、地震動強さの年間超過確率 $\lambda(IM)=\lambda(S_a)$ を算出した。

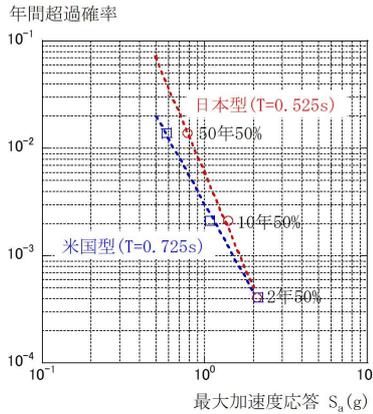


図 24 加速度スペクトルのハザード関数

多数の地震動データに対して、動的漸増解析を実施した。地震動強さ S_a に対する工学的要求パラメーター（EDP）の超過確率 $G<EDP|S_a>$ を算出した。最終的に倒壊が起こるまで地震動強さを漸増させ、崩壊メカニズムを明らかにした。

X方向	日本型				米国型			
	倍率	S_a (g)	SDA(%)	SDA(%)	倍率	S_a (g)	SDA(%)	SDA(%)
0.20	0.48	0.37	0.49	0.88	0.20	0.26	0.20	0.50
0.40	0.96	0.68	0.99	1.11	0.40	0.53	0.39	1.00
0.60	1.44	0.85	1.48	1.92	0.60	0.79	0.58	1.51
0.80	1.91	2.67	1.97	-	0.80	1.05	4.17	2.01
1.00	2.39	-	2.47	-	1.00	1.31	-	2.51

図 25 動的漸増解析の一例

地震動強さの年間超過確率と動的漸増解析結果を用いて、様々な EDP に対する年間超過確率を下式で算出した。

$$\begin{aligned} v(EDP) &= \int G < EDP | IM > d\lambda(IM) \\ &= \int G < SDA | S_a > d\lambda(S_a) \\ &\approx \sum G < SDA | S_a > \cdot \lambda(S_a) \cdot \Delta S_a \end{aligned}$$

部材の保有変形能力の確率的な実験データを用いて、部材崩壊の年間超過確率を下式により算出した。

$$\begin{aligned} APE(fail) &= \sum \left\{ P \left[S_a - \frac{\Delta}{2} < X_i < S_a + \frac{\Delta}{2} \right] \cdot p_f(S_a) \right\} \\ &\cong \sum \left\{ \frac{dH(S_a)}{dS_a} \cdot \Delta \right\} \cdot \int_0^{\infty} [1 - F_s(r) | S_a] f_R(r) dr \end{aligned}$$

参考文献

- 吹田ら：震動台実験の概要と弾性応答特性-実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その1-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.635, 2009.1
- 長江ら：4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.669, 2011.11

5. 主な発表論文等
[学会発表](計7件)

田川浩之, 松本優里, 杉浦徳利, “多層建物を高さ方向に貫く心棒の制振効果:(その1)心棒の支持条件による制振効果の違い”, 日本建築学会大会, 2017.8.31~9.3, 広島工業大学(広島県広島市)

松本優里, 田川浩之, 杉浦徳利, “多層建物を高さ方向に貫く心棒の制振効果:(その2)五重塔の塔身を貫く心柱による制振効果”, 日本建築学会大会, 2017.8.31~9.3, 広島工業大学(広島県広島市)

田川浩之, 松本優里, 杉浦徳利, “多層建物を高さ方向に貫く心棒による制振効果:鉄骨造、鉄筋コンクリート造、木造五重塔における心棒効果”, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2017.6.24~25, 大阪保険医療大学(大阪府大阪市)

Tagawa, H., Nagae, T., MacRae, G., “Collapse Simulation of U.S. and Japanese Type Steel Moment-Resisting Frame Structures using Practical Macro Models”, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017.1.9~13, Santiago, Chile
Tagawa, H., Nagae, T., MacRae, G., “Seismic Simulation of Japanese and U.S. Type Steel Moment-Resisting Frame Structures: Macro-Modeling with Beam and Shell Elements”, 4th Archi-Cultural Interactions through the Silk-road, 2016.7.16~17, Kamikoshien Campus, Mukogawa Women’s University (兵庫県西宮市)

Tagawa, H., Ohsaki, M., Yamashita T., Miyamura, T., Kohiyama, M., “Detailed Finite Element Analysis of Concrete-Filled-Tube Column using E-Simulator with Extended Drucker-Prager Model considering Tension Crack and Compression Damage in Concrete”, 12th World Conference on Computational Mechanics, 2016.7.24~29, Seoul, Korea

田川浩之, 大崎純, 山下拓三, 宮村倫司, 小檜山雅之, “E-Simulator による引張りひび割れと圧縮破壊を考慮した拡張 DP 材料構成則を用いた CFT 柱の詳細有限要素解析”, 第 21 回日本計算工学講演会, 2016.5.31~6.2, 新潟コンベンションセンター(新潟県新潟市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

田川 浩之 (TAGAWA, Hiroyuki)
武庫川女子大学・生活環境学部・准教授
研究者番号: 60422531

(2)研究分担者

長江 拓也 (NAGAE, Takuya)
名古屋大学・減災連携研究センター・准教授
研究者番号: 90402932