

研究委員会 コンクリート構造物の性能評価型耐震設計法の日米比較に関する研究委員会

塩原 等*1・楠 浩一*2・壁谷澤寿一*3・三木朋広*4・中村 光*5・藤倉修一*6

要旨：米国においては、2000年代より ASCE 7 や ACI318 など建築構造の耐震設計基準が非線形時刻歴地震応答解析の耐震設計に対応するように協調して改定が進められ、それらを補完するために、コンクリート構造物の各種の技術資料と、実務設計者向けの解説書が次々と公開された。その結果 2010 年代には、性能型耐震設計が実用化され、カリフォルニア州では鉄筋コンクリート超高層住宅の建設ブームが起こった。本研究委員会では、米国における鉄筋コンクリート構造のための非線形時刻歴地震応答解析における耐震設計の実務における現状を、試設計例や基準及び関連技術資料により日米を比較し相違点や共通点を検討することを目的として 2023 年度と 2024 年度に活動を行った。本報告ではこの研究委員会の活動の概要について報告する。

キーワード：地震応答解析, 性能評価型, 耐震設計, 非線形, モデル化, 耐震規定

1. はじめに

米国では、2000 年代に入り実務用の建築構造物の耐震基準に初めて非線形時刻歴地震応答解析の利用が取り入れられた。2010 年代にはこれが発展を遂げて、性能型耐震設計法として新築建築構造物の実務への導入が進み、今ではカリフォルニア州のロスアンゼルスやサンフランシスコでコア壁構造による鉄筋コンクリート造の超高層建物の建設のブームが起こっている。

これに対して、我が国における建築構造物への非線形地震応答解析の実務への活用ははるかに古い。1960 年代より質点系モデルを採用して独自の発展を遂げ、1990 年代には建設省総合技術開発プロジェクトにより、鉄筋コンクリート造への拡張方法が示され、二方向純ラーメン鉄筋コンクリート構造の超高層住宅のブームを先導した。しかしコンピューターの性能が飛躍的發展を遂げた 2000 年代以降も、長周期地震動が考慮されるようになった以外、技術的な革新や変更はない。日本と米国の非線形時刻歴地震応答解析の実務への活用方法の違いが顕在化してきている。おそらく日本では、過去に非線形地震応答解析技術の困り込みが進み、それらを活用する技術者によるオープンな議論が極めて少なく、将来に向けて設計の方法をどのように発展させていくべきかを検討する社会的インセンティブが欠如している。また、非線形時刻歴地震応答解析の利用について建築・土木分野を通じた議論も全く行われてこなかった。

表-1 委員会構成 (五十音順)

委員長 幹事	塩原 等 (東京大学名誉教授)
	壁谷澤 寿一 (東京都立大学)
	楠 浩一 (東京大学)
	中村 光 (名古屋大学)
	藤倉 修一 (宇都宮大学)
委員	三木 朋広 (神戸大学)
	秋山 充良 (早稲田大学)
	池田 周英 ((株)竹中工務店)
	伊佐 政晃 (阪神高速道路 (株))
	伊藤 央 ((株)久米設計)
	鹿島 孝 ((株)三菱地所設計)
	川口 和広 (JIP テクノサイエンス (株))
	楠原 文雄 (名古屋工業大学)
	小室 努 (大成建設 (株))
	迫田 丈志 ((株)堀江建築工学研究所)
	眞田 靖士 (大阪大学)
	高橋 智也 (大成建設 (株))
	高橋 良和 (京都大学)
	長江 拓也 (名古屋大学)
	村松 晃次 (大成建設 (株))
渡部 龍正 (東電設計 (株))	
協力委員	Garrett R. Hagen (Degenkolb Engineers)
	Parham S. Pirzadeh (Degenkolb Engineers)
	西田 智康 (大成建設 (株))

*1 東京大学名誉教授 工学博士 (正会員)

*2 東京大学地震研究所 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京都立大学 都市環境科学研究科建築学域 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*5 名古屋大学 大学院工学研究科土木工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

*6 宇都宮大学 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 教授 博士 (工学) (正会員)

このような現状に鑑み、本研究委員会（表-1）では、我が国の将来への耐震設計技術の向上と国際協調に資することを目的として非線形地震応答解析を耐震設計に適用する実務の現状についての日米比較を行った。

2. 米国の性能型耐震設計の現状

米国においては、2000年代より ASCE 7¹⁾ や ACI 318²⁾ など建築構造の耐震設計基準が非線形時刻歴地震応答解析の耐震設計に対応するように協調して改定が進められ、併せてコンクリート構造物の各種の技術資料や実務設計者向けの解説書が次々と公開されている³⁾。その結果 2010 年代以降、非線形時刻歴地震応答解析を用いる耐震設計が実用化され実務に適用されるようになり、新築の建築物に関する性能型耐震設計といえはこのことを指すように考えられる状況となっている。2020 年代に入った現在においても ASCE 7¹⁾ や ACI318²⁾ の非線形時刻歴地震応答解析に関する規定を成熟させるための改訂が引き続き進められている。

2.1 新築建物の耐震設計基準と入力地震動

米国の ASCE 7¹⁾ の最新版は 2022 年に改訂されたもので、新築の建築物の最低基準を定めている。ASCE 7¹⁾ の非線形時刻歴地震応答解析による耐震設計は、MCE_R 地震動（倒壊を考慮する最大クラスの地震動）に相当する加速度時刻歴を入力し、倒壊の有無を調べて、入力した加速度時刻歴の数に対する倒壊するケースの数の割合をもって倒壊確率とする性能評価型となっている。倒壊を判定する際に使われる MCE_R 地震動のレベルは、減衰 5% の最大加速度地震応答スペクトルで表され、ASCE 7¹⁾ の中で地震のハザードマップに規定されている。スペクトルの形状によって地盤条件が考慮される。構造物の固有周期の範囲で MCE_R 地震の最大加速度応答スペクトルの目標値に良くフィットするように、実観測地震動に一定の倍率を乗じるなどの方法で補正を加えて 11 波以上の入力加速度の時刻歴を作成し、地震応答解析に用いる。

2.2 入力地震動と地震応答解析

非線形時刻歴地震応答解析法は、設計が終わった構造物を部材をモデル化の基本要素とする非線形の三次元解析モデルで用い、部材に適切な非線形復元力特性を仮定して行う。すべての地震動入力において、塑性化を許容する部分においては変形が許容変形レベル内にあり、塑性化を許容しない部分においては応力が信頼強度を超えないこと、さらに倒壊確率が目標以下であることを確認する耐力設計法が用いられる。非線形時刻歴地震応答解析法は、適用にあたって高さや建物の不整形などによる制限を受けない。しかし、地震応答解析により、部材の非線形挙動のモデル化が適切であることが確かめられている範囲で挙動することを確認しなければならない。そのた

め、その判定のクライテリアに関して技術資料や実験資料が完備している部材により構成されるものに限られ、現状ではおのずから適用範囲には限界がある。しかし将来の研究開発により、これらの適用範囲が拡張される余地も残されている。非線形時刻歴地震応答解析法は、基礎絶縁部材を有する建物、エネルギー吸収機構部材を有する建物の耐震設計の場合にも同じ原則に基づき適用される。

2.3 層間変形角の制限

非線形時刻歴地震応答解析法を適用する場合、既に述べたように倒壊確率が規定の値以下であり、かつ部材に生じる塑性変形量や応力が適切な範囲内であることを確認する他に、構造種別によらない最大層間変形角の制限が設けられている。最新の ASCE 7¹⁾ においては、11 波以上の入力において、全ての床レベルにおいて、当該床の水平変位を地表からその床までの高さで除した平均層間変形角の平均値が、次の式で求められる限界変形角の値 R を下回るものとしている。さらに、平均層間変形角の最大値は平均値の 150% を超えてはならないこととしている。

$$R = 4.71 - 0.0234 h_n \quad (\%) \quad (1)$$

ここに、 R ：限界変形角(%)で $0.03 h_n$ を下回る場合には $0.03 h_n$ とする、 h_n ：建物高さで単位は m。

2.4 部材の力学特性と構造ディテール

部材の構造詳細の規定は、ASCE 7¹⁾ が構造種別ごとに、他の規格団体（例えば鉄筋コンクリート構造では米国コンクリート工学会、鋼構造では米国鋼構造協会など）が策定する基準の適用が指定されている。例えば鉄筋コンクリート造で耐震構造システムが特別靱性骨組の場合には、ACI 318²⁾ の第 21 章耐震規定に示された特別靱性骨組用の柱、梁、耐震壁、柱梁接合部など、部材種別ごとに決められた耐震規定を守ることが必要となる。

部材の非線形の力学特性のモデル化を定める方法は、本来は ACI 318²⁾ に記述されることが望ましいが最新の ACI 318²⁾ の記述は不十分で今後の改訂が予定されている。そこで現時点では ASCE 7¹⁾ には、ASCE 41⁴⁾ という既存建築物の耐震診断・耐震補強に関する基準を引用し、そこに定められた部材の非線形の力学特性のモデル化を適用するよう求めている。

2.5 各種の技術資料の公開

ACI の研究委員会の一つである ACI 374 委員会は、鉄筋コンクリート造建築物の性能評価型耐震設計に必要とされる技術資料を収集・作成することを目的とした活動をしている。2017 年に、“An ACI Handbook - Compilation of Performance-Based Seismic Design Recommendations and Standards HB-12 (17)” という技術レポート³⁾ を刊行して

いる。この出版物は、構造設計の実務者が、鉄筋コンクリート構造の非線形時刻歴地震応答解析と性能型耐震設計法に慣れ親しみ必要な最新の知識を体系的に得るために目を通しておきたい重要な技術資料をリスト化し、要約を試みたものである。本委員会では、主としてこのリストに含まれる技術資料を中心に調査を行なった結果を報告している。

3. RC10層建物による日米の耐震設計の比較

本研究委員会の活動の大きな柱の一つは、非線形時刻歴地震応答解析による耐震設計の試設計を通じて日米の方法を相互に理解することである。報告書では第2章にその内容を具体的に述べている。ここではその概要について述べる。

3.1 日米ワークショップ開催の経緯

日米ワークショップの目的は、構造設計実務における非線形時刻歴地震応答解析の耐震設計の設計基準を国際的な観点から分析し（具体的には米国との比較）、問題点の抽出と改善方策の提案を行うことである。試設計の対象とする構造物は、国立研究開発法人防災科学技術研究所実大三次元震動破壊実験施設(E-Defense)において2015年に実施された実大10層鉄筋コンクリート造建物の振動台実験を参考に、日米双方の実務の実情に合わせて、構造システムや材料強度及び断面を設定し、それぞれの現行の耐震設計基準を適用して行った。

2023年9月に開催された第1回日米ワークショップで、日本と米国の実務者チームによる日米の性能評価型耐震設計の比較を行うことに合意した。日本側からは本委員会の委員が、米国側からはACI 374委員長を務めるGarret R. Hagan氏率いるDegenkolb Engineersが、それぞれ試設計を担当した。2024年6月にはJCI年次大会の開催中に松山で第2回日米ワークショップが開催され日米の試設計の結果が報告された。

3.2 試設計建物

日本側と米国側の平面伏図および軸組図を図-1および図-2に示す。また、平面上での日本側と米国側の解析モデル建物の比較を図-3に示す。日本側は実大振動台実験に於いて4枚の連層耐震壁を計画した。これに対し、米国側は建築上の内部空間確保を考慮し、両妻面2か所に連層耐震壁を集約している。両国の試設計の検討状況を確認し、日米間の共通点や相違点についての相互理解を深めることを主目的に、第2回日米ワークショップを2024年6月26日～27日に開催した。RC10層建物の日本と米国の設計例について報告された。

3.3 入力地震動

日本側の試設計では、いわゆる時刻歴応答ルートでの耐震設計に準拠して記録波3波および人工地震波3波を用

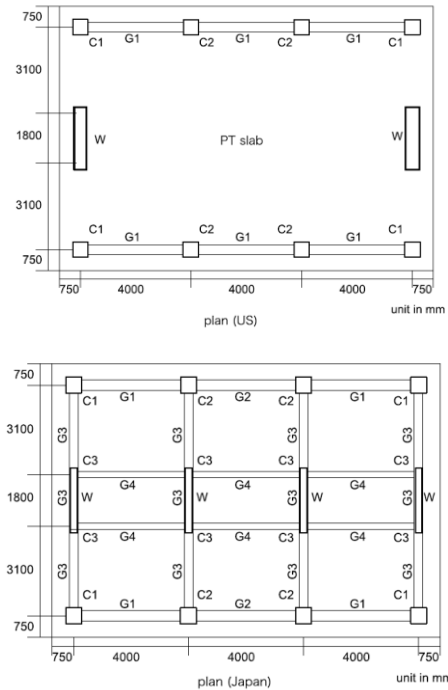


図-1 試設計平面伏図（上：米国，下：日本）

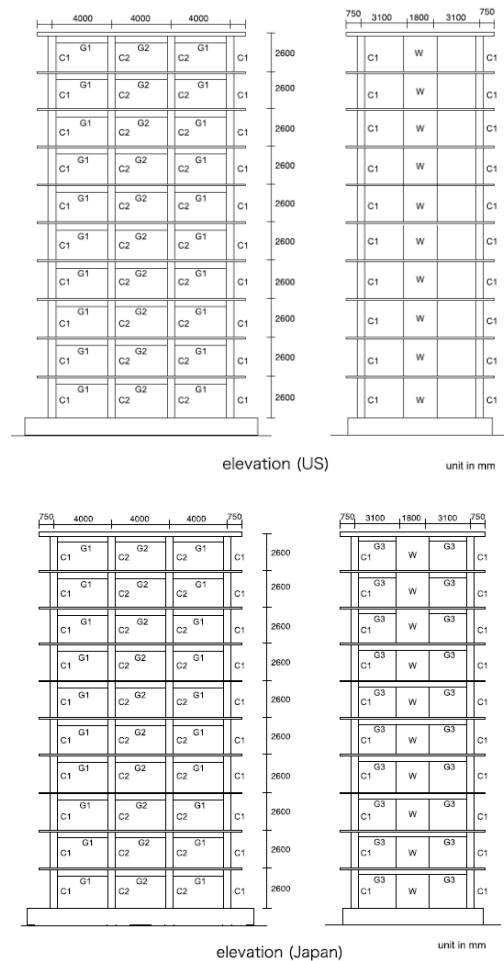


図-2 試設計立面図（上：米国，下：日本）

いて、レベル1の設計（損傷限界）およびレベル2の設計（安全限界）の検証を実施した。記録波の基準化は、建物の固有周期に関わらず最大応答速度がレベル1およびレベル2に対し、それぞれ0.25m/secおよび0.50m/secになるように倍率を設定している。また、人工地震波のターゲットスペクトルは、レベル1とレベル2の比率を1対5として、保有水平耐力計算において求められる耐力の比率と整合を図っている。

米国側の試設計では、非線形時刻歴応答解析を用いる耐震設計において、ASCE 7¹⁾の規定により入力地震動の数をできるだけ大きくすることとしている。倒壊するケースが1以下であることをもって建物の倒壊確率が10%以下であることを確認するために、11波が必要となる（なお、現在では、特に高層建物では高次モードの影響が大きいため、22波を用いている。11波のセットを短周期領域でスケールリングし、別の11波のセットを長周期領域でスケールリングしている）。地震動のスケールリングについては、3種類（①Amplitude Scaling, ②Spectral Matching, ③Hybrid Approach）の方法がある。今回の米国の試設計例では、当初Amplitude Scalingを行っていたが、短周期領域でターゲットスペクトルを大きく上回る地震動となったため、Hybrid Approachに切り替えて検討が行なわれた。図-3にその11波のターゲットスペクトルと、入力地震動の弾性最大加速度応答スペクトルを示す。

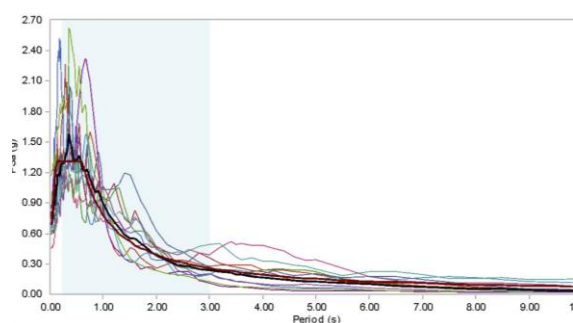


図-3 米国側の入力地震動11波（基礎固定入力）

3.4 日本側の試設計

日本側の試設計（短周期の中低層建物）において、非線形時刻歴応答解析を用いた性能評価型の設計を行うと、保有水平耐力計算により設定した場合の断面設定では設計クライテリアを満足せず、これを満足させるためには、保有水平耐力を必要保有水平耐力のほぼ倍にする程度に断面寸法を増大させ、材料強度もアップする必要が生じることとなった。なお、変形に関するクライテリアを緩和することにより、日米で当初に合意した断面設定値と概ね同等となる設計になった。日本における時刻歴応答解析は高層建物を主な対象としてきた経緯があり、中低層建物を時刻歴応答解析によって設計する場合、保有水

平耐力計算による設計法を用いた場合とは設定される断面に大きな乖離があることが確認された。

変形制限に関して日本側の試設計では、レベル1の地震動に対して最大応答層間変形角が1/200以内とすることおよびレベル2の地震動に対して最大応答層間変形角が1/100以内とすることとしている。また、レベル2に対しては層の塑性率を2.0以下、部材の塑性率を4.0以下としている。これらの変形制限により、部材断面寸法や材料強度を当初より引き上げるようになった。

日本における性能評価型の耐震設計では、保証設計における各部材の余裕度の値については明確に定められておらず、材料強度の上昇や静的応力と動的応力の差異などを勘案して構造設計者が決定している。また、業務方法書に“適切に”仮定や設定を行うこと、と記載されているため、設計者によって判断がばらついているものも多い。例えば静的漸増弾塑性解析における地震力の各階分布形状の設定でレベル1とレベル2の各応答解析結果をどのようにフィードバックしているかなどには規定がない。

3.5 米国側の試設計

米国の試設計では、ASCE 7¹⁾の等価な静的水平力を地震力とする従来の設計に基づく場合、フレーム架構は低減係数Rファクターを8と、壁架構はRファクターを6として、塑性領域での応答に期待し、あらかじめ低減した水平力に対しフレーム架構の解析を行い、断面設計を行う。しかし、今回の米国側の時刻歴応答解析を用いた性能評価型の試設計では、ASCE 7¹⁾に従来の一般的な設計法（Rファクターを用いた設計法）で断面と配筋を定めたところ、地震応答が大きくなり、米国側で当初設定していた架構ではクライテリアを満足できなくなり、設計方針の変更が行われた。

変形制限に関して米国側の試設計では、時刻歴応答解析の変形制限は、入力地震動のターゲットスペクトルを静的入力地震動のスペクトルの1.5倍とするMCE_Rの複数の地震動に対して、複数の地震動による応答値の平均値で検討しているとともに、倒壊確率のクライテリアをリスクカテゴリーに応じて定めている。米国の構造設計者は、慣例的に応答層間変形角3%は崩壊限界、応答層間変形角2%は機能回復限界と考えている。また、弾性範囲を応答層間変形角1.5%以下と想定している。

米国における性能評価型の耐震設計では、立体フレームモデルを用いた時刻歴応答解析を実施しているため、等価な静的用の外力分布に置換することは行われていない。また、塑性変形に期待する部材(Deformation-controlled actions)に関しては、耐力低下を考慮した骨格曲線と許容限界変形を部材種別ごとに定められている。

表-2 報告書の目次

序
1. RC 構造物の米国の性能型耐震設計の現状
1.1 はじめに
1.2 現行の米国の構造設計基準の体系
1.3 米国の建物の耐震設計基準の変遷
1.4 米国の新築建物の耐震設計基準と非線形時刻歴地震応答解析
1.5 非線形時刻歴地震応答解析法による性能型耐震設計の実用化
1.6 確率論を取り入れた耐震性能表示法の実用化
1.7 橋梁構造の耐震設計における非線形時刻歴地震応答解析の利用
1.8 まとめ
2. 日米の方法による RC10 層建物の非線形時刻歴地震応答解析による耐震設計の比較
2.1 全体概要
2.2 日米の試設計の要旨
2.3 質疑応答・討議
2.4 まとめ
3. 橋梁構造についての実務の米国の現状と日本の現状
3.1 入力地震動の選択と適切な倍率の設定
3.2 適用範囲と自由度・モデル化
3.3 地震応答量や崩壊モードの不確定性
3.4 性能表示との連携
3.5 機構設計と保証設計
3.6 モデル化と構造実験の取り扱い
3.7 設計の品質管理
3.8 解析ソフトウェア
3.9 ゴム支承, 免震支承, ダンパー
4. 建築物についての実務の米国の現状と日本の現状
4.1 設計のクライテリアと荷重
4.2 適用範囲と自由度・モデル化
4.3 地震応答量や崩壊モードの不確定性
4.4 性能表示との連携
4.5 機構設計と保証設計
4.6 モデル化と構造実験の取り扱い
4.7 設計の品質管理
4.8 解析ソフトウェア
4.9 免震・制振
5. 日米比較とそこから考えらえる将来に向けての課題

4. 報告書の概要

本委員会では、報告書（表-2）において、現在の米国の実務との比較を念頭において、日米の試設計とそれらの比較をした他、米国における非線形時刻歴地震応答解析の耐震設計の実務における各種の規定を取り上げ日本と対比しながら、設計のフィロソフィーの違いを俯瞰的に理解するための資料とした。報告書の目次は、表-2の通りである。日米の試設計の詳しい結果も、報告書に示されている。

5. まとめ

本委員会の成果により、日米でそれぞれ非線形時刻歴地震応答解析を用いた耐震設計がどのように信頼性が確保されているかを俯瞰的に理解するのに役立つ資料が得られ、将来に向けた課題が明らかにされることができると考えている。

6. 謝辞

本委員会の活動における米国側の試設計例の作成において、Degenkolb Engineers の Garrett R. Hagen 氏と Parham S. Pirzadeh 氏に全面的な協力を得た。報告書における米国側の設計は、彼らの協力なしには不可能であった。ここに心から謝意を表す。

参考文献

- 1) American Society of Civil Engineers: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-22). ASCE, 2022, 985pp.
- 2) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI318-19/ACI318R-19). American Concrete Institute, 2019.
- 3) ACI Committee 374: An ACI Handbook - Compilation of Performance- Based Seismic Design Recommendations and Standards HB-12 (17), 2017.
- 4) American Society of Civil Engineers: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-23). American Society of Civil Engineers, 2023, <https://doi.org/10.1061/9780784416112>.