

「巨大地震等に対する建築物の応答推定精度向上に資する入力地震動及び構造解析モデルの高度化技術に関する研究」(平成25年度～平成27年度)評価書(事後)

平成28年5月20日(金)
建築研究所研究評価委員会
委員長 深尾 精一

1. 研究課題の概要

(1) 背景及び目的・必要性

近年の地震(例えば1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震)では、地震観測技術の向上と観測点数の増加も相まって、告示スペクトルを上回る地震動が数多く観測されている。しかしながら、地震観測点近傍に建つ、新耐震基準で設計された建築物には倒壊等の大きな被害は見られていない。その原因として、建築物への入力地震動は、動的相互作用や根入れ効果により地表面の地震動よりも短周期成分が低減される場合があること、建築物が有する各層の保有水平耐力は、床スラブの効果、材料強度の余裕、強度評価式の余裕などによって、設計慣習による予測値よりもかなり向上する傾向があること等が考えられている。一方、長周期地震動に関しては、告示スペクトルを上回る地震動は2003年十勝沖地震のK-NET 苫小牧などしか記録されていないが、2011年東北地方太平洋沖地震で震度3の大阪でも長時間継続した地震動に超高層建築物が共振し被害が生じたことから、今後発生が予想される連動地震で告示スペクトルを大きく上回る長周期地震動が予測されている地域、地点では、多数回繰り返し作用する長周期地震動により超高層建築物や免震建築物が共振して、設計での想定よりも大きな応答変形を生じる可能性がある。そこで建築研究所では、重点的研究開発課題「長周期建築物の耐震安全性対策技術の開発(H21-22)」、「長周期地震動に対する超高層建築物等の応答評価技術の高度化(H23-24)」を実施して長周期建築物の限界性能の明確化と応答予測技術の高度化に取り組み、内閣府や地震調査研究推進本部から出される震源や地下構造に関するデータに基づいて長周期地震動を算定する手法「長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法」を整備し、構造実験を実施して構造種別や使用される部材の違いによって建築物が有する保有水平耐力は既往の設計慣習による予測値より向上する場合や低下する可能性があることを確認した。

以上のように実際の建築物の耐震性は、設計において安全側として無視されてきた正の効果(余裕度)やデータ不足により見落とされていた正負の効果によって設計での想定とは一致しないことが考えられる。本課題ではこれらの正負の効果の定量的な評価が可能となるように、設計で用いるモデルより精確な応答解析モデルを用いて入力と応答の両面から検討し、今後発生が予想される大地震動に対する建築物の応答の高精度予測を可能とする手法(地震応答評価技術の高度化)を提示することを目的とする。

本課題の成果は、個々の建物の耐震性能を詳細に評価し、防災対策の選択的・効率的な実施も可能とする。従って、今後の発生が想定される東海・東南海・南海の連動地震や首都直下地震等への対策に直接反映されるものであり、緊急に実施すべき課題といえる。また、耐震性能を詳細に予測する手法は、耐震診断手法の高度化、住宅性能表示制度の耐震等級を明示的に説明するツール、地震被害想定の高精緻化などへの反映も期待される。

(2) 研究開発の概要

設計においては安全側として無視されてきた動的相互作用等効果、床スラブの効果、材料強度の余裕、強

度評価式の余裕などの効果や、データ不足により十分に解明が成されてこなかった正負の効果について、定量的な評価が可能な精確な応答解析モデルを用いて入力と応答の両面から検討し、今後発生が予想される大地震動に対する建築物の応答を高精度で予測する手法（地震応答評価技術の高度化）を提示することを目的とする。なお本課題で実施するサブテーマは、1）長周期建築物と2）一般建築物に分かれ、それぞれで「入力地震動」と「構造解析モデル」について検討が行われる。さらに「構造解析モデル」は、「RC造」、「鉄骨造」、「木造」に分かれて検討が行われるが、構造解析モデルの高度化については長周期建築物や一般建築物に限らず、各構造で共通する課題であることから、これら2つのサブテーマの検討を一緒に実施し、効率化を図ることとする。

サブテーマ 1) 超高層および免震建築物の地震応答評価技術

前課題「長周期地震動に対する超高層建築物等の応答評価技術の高度化」の成果を踏まえ、新たに検討が必要となった課題に引き続き取り組む。

- ・設計用長周期地震動の設定では、今後新たに震源が詳細に評価される巨大地震を対象とした地震動評価を実施する。
- ・RC系超高層建築物の安全余裕度評価のための検討では、RC系超高層建築物の床スラブの有効幅の取り方や、復元力特性モデルの履歴減衰の大きさなどが解析結果に及ぼす影響について検討を実施する。
- ・鉄骨系超高層建築物の応答・損傷評価では、梁端部の疲労曲線を用いた損傷評価方法の妥当性の検証、及びCFT柱やハンチ梁など、現在の鉄骨系超高層建築物で塑性化が想定される部材の疲労性能のデータの取得を実施する。
- ・免震建築物の応答評価は、多数回繰り返しによる免震部材の特性変化の影響を取り込んだ、免震建築物の安全性検証法提案に向けたデータ蓄積と検討を実施する。

サブテーマ 2) 一般建築物の地震応答評価技術

- ・設計用入力地震動の設定手法の高度化では、総プロ「地震動情報の高度化に対応した建築物の耐震性能評価技術の開発」で確認されている動的相互作用等による入力低減効果を、地震応答評価技術へ取り込む。入力低減効果などを考慮して、内閣府、地震調査研究推進本部から出される地震動、被害想定で用いている地震動のレベルを検討する。
- ・RC造建築物の地震応答評価技術の高度化は、通常の解析で用いられる仮定と実現象との差異について、既往の知見に基づき定量的評価を実施する（2カ年）。建築物全体の地震応答に大きな影響を及ぼす事項、既往の知見では評価が困難なものを対象に、実験的検討を実施する（3カ年）。
- ・鉄骨造建築物の地震応答評価技術の高度化は、床スラブによる梁の横座屈の拘束効果や塑性変形性能に及ぼす影響について整理し、実験等の検討を行う。また、地震動の特性（直下型、海溝型）と構造物の特性（構造形式や床スラブ）が鉄骨造建築物の梁端部の破断や骨組の崩壊に及ぼす影響について、振動台実験等で検討を行う。
- ・木造建築物の地震応答評価技術の高度化は、応答予測のモデル化の方法・精度（耐力壁・非耐力壁、仕上材）と応答予測結果の精度についての整理を行い、実験により検証する。
- ・上記の検討により得られた成果に基づいて、各種構造の地震応答評価技術の高度化を図り、さまざまな地震動に対する合理的な安全性評価手法の構築に資する技術資料として取りまとめる。取りまとめた技術資料を適用した応答解析を実施し、基準法で設計された一般建築物が持つ耐震性余裕度の事例検討を行う。

(3) 達成すべき目標

上述のとおり、本課題で実施するサブテーマは、1）長周期建築物と2）一般建築物に分かれ、それぞれで「入力地震動」と「構造解析モデル」について検討が行われる。さらに「構造解析モデル」は、「RC造」、

「鉄骨造」、「木造」に分かれて検討が行われる。以下に示すように、それぞれの検討において地震応答評価技術のより一層の高度化に資する技術資料をまとめる。

サブテーマ 1) 超高層および免震建築物の地震応答評価技術

- ・地域の地震活動やサイト特性、建物特性に応じた長周期地震動特性評価の高度化に資する技術資料
- ・RC系超高層建築物の大変形領域における応答性状予測に関する技術資料
- ・鉄骨系超高層建物の長周期地震動に対する応答評価と梁端部やCFT柱の損傷評価方法に関する技術資料
- ・免震材料の多数回繰り返し試験法と、時刻歴応答解析、及び、加速度応答スペクトルによる免震建築物の応答評価法に関する技術資料

サブテーマ 2) 一般建築物の地震応答評価技術

- ・設計入力地震動の設定手法を高度化する技術資料
- ・一般建築物(RC造)の地震応答評価技術を高度化する技術資料
- ・一般建築物(鉄骨造)の地震応答評価技術を高度化する技術資料
- ・一般建築物(木造)の地震応答評価技術を高度化する技術資料
- ・一般建築物の高度化された地震応答評価事例

(4) 達成状況

サブテーマ 1) 超高層および免震建築物の地震応答評価技術

①地域の地震活動やサイト特性、建物特性に応じた長周期地震動特性評価の高度化に資する技術資料

発生が懸念されている南海トラフ沿いの巨大地震を対象に、内閣府で検討された宝永地震、安政東海地震の震源データ・差分法による推計結果を参照しつつ、経験式によって全国の長周期地震動の検討を行った。地震基盤から工学的基盤までの深部地盤構造で求まるS波速度の伝播時間(Tz)に基づいた長周期地震動評価を適用し、擬似速度応答スペクトル(pSv)の卓越周期とレベルに基づいた長周期地震動のゾーニングを行った。

これらの成果は、長周期地震動特性評価の高度化に資する技術資料としてまとめた(長周期地震動のゾーニングの作業過程は、取り纏めて建築研究資料として公表する予定)。成果の一部は、国土交通省が実施した「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案について」に反映された。また成果の一部(計算に必要な係数等)は、建築研究所のwebサイト「長周期地震動の予測手法(<http://smo.kenken.go.jp/long/>)」にて公開している。

②RC系超高層建築物の大変形領域における応答性状予測に関する技術資料

RC造超高層建築物の地震応答予測に影響を及ぼす各種要因について解析的な検討を実施し、過去に行った20層RC造建築物の震動台実験結果と比較して、それらの影響度合いを評価した。解析パラメータは、スラブの効果、復元力特性のスリップ性状、P-Δ効果、地震波の連続入力等である。主な検討結果は次のとおりである。

P-Δ効果を考慮することによって大変形領域での変位、せん断力応答ともに増大し、実験結果により近づく傾向が見られた。スラブ寄与率は層せん断力応答に影響したが、変位応答への影響は明確ではない。また、変位応答にはスリップの有無、P-Δ効果が大きく影響した。地震波の連続入力の方が単独入力よりも応答変形が大きくなる傾向が見られたが、さほど顕著ではなかった。

これらの成果は、RC造超高層建築物の大変形領域における地震応答予測に関する技術資料として取りまとめた。

③鉄骨系超高層建物の長周期地震動に対する応答評価と梁端部やCFT柱の損傷評価方法に関する技術資料

鉄骨系超高層建物の長周期地震動に対する応答評価方法として、モデル化の方法(部材レベルモデル、質

点系モデル)と計算方法(レインフロー法、等価繰返し回数考慮、等)により、4つの応答評価方法を提案した。地震応答解析によりこれらの評価方法の計算精度を相互比較し、実務への適応性を確認した。

建築基準整備促進事業の共研によって、CFT柱を有する梁端部の損傷評価方法として、梁端接合部の設計用疲労曲線を提案した。また、CFT柱の多数回繰返し性能を明らかにし、損傷評価方法を提案した。

これらの成果は、鉄骨系超高層建物の長周期地震動に対する応答と損傷の評価方法に関する技術資料として取りまとめた。

④免震材料の多数回繰返し試験法と、時刻歴応答解析、及び、加速度応答スペクトルによる免震建築物の応答評価法に関する技術資料

実大鉛ダンパーの動的多数回繰返し実験より、2方向加振に対する限界累積変形量又は累積吸収エネルギー量は1方向加振に対する場合より低下する等の特性を確認した。また、免震材料のこれまでの実験結果の分析から、免震材料の多数回繰返し特性を明らかにするための必要要件を、建築基準法第37条に基づく指定建築材料の認定のための基準に反映できる形で整理した。

時刻歴応答解析における免震部材の特性変化(繰返し依存性)の組み込み方法として、解析の各ステップで特性変化を考慮する詳細法と主要時刻での吸収エネルギーから包括的に特性変化を考慮する略算法を提案し、略算法による場合は、詳細法と同等又は安全側の評価が得られることを確認した。さらに、簡略な手法として加速度応答スペクトルとエネルギースペクトルに基づく応答評価手法を検討し、時刻歴応答解析との比較により、検討手法の妥当性を確認した。

これらの成果は、免震部材の多数回繰返し特性と免震建築物の応答評価法に関する技術資料としてまとめた。成果の一部は、国土交通省が実施した「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案について」の検討において活用された。

サブテーマ 2) 一般建築物の地震応答評価技術

①設計用入力地震動の設定手法を高度化する技術資料

入力地震動の振幅レベルを変えて、基礎入力動および建築物の地震応答に及ぼす杭又は基礎根入れの影響および地盤の非線形性の影響について検討し、解放工学的基盤に作用する地震動が大きくなると地盤が非線形化して周期が長くなること、入力動に対する建物応答性状は建物と地盤の振動数の関係により変化することを確認した。この検討成果の一部は建築研究資料No. 167として公表した。

また、地盤一杭一上部構造が連成する系の地震時挙動を把握するために、せん断土槽を用いた模型振動実験および3次元FEMによるシミュレーション解析(等価線形解析)を実施し、上部構造の応答性状や杭頭縁基礎の杭頭応力が杭基礎と比較して大きく低減されることを確認した。

これらの成果は、設計用入力地震動の高度な設定に関する技術資料としてまとめた。ただし、上記の(地盤非線形性を含む)動的相互作用効果の設計への活用および内閣府等の被害想定で用いている(主に短周期側の)地震動の検討については、時間的な制約から十分に達成していない。今後、別課題の中で引き続き検討していく。

②一般建築物(RC造)の地震応答評価技術を高度化する技術資料

過去に行った20層RC造建築物の震動台実験では、慣用的な手法による計算値に比べて強度が大きく上昇し、履歴減衰が非常に小さい復元力特性が得られた。そのため、建築基準整備促進事業S6(共同研究)とも連携し、柱、梁、床スラブからなる複数の部分架構試験体に対する静的加力実験を実施し、大変形領域における構造特性について検討した。パラメータは梁せい、スラブ下端筋の定着方法、梁主筋量等である。実験の結果、強度に寄与する床スラブ有効幅は従来の設計慣行(およそ1m)より大きく、層間変形角1/100に達する辺りでは全幅有効と評価する方が妥当という結果を得た。本成果は、「2015年版建築物の構造関係技基準解説書」に反映した。

一方、履歴復元力特性は従来の研究データと同じような紡錘形となり、震動台実験で観測された小さな履

歴性状は再現できなかつた。本研究の結果からは、震動台実験の履歴性状は、その実験に特有の性状であった可能性が高い。

また、RC 造建築物の終局安全性を議論するためには、柱の限界性能を把握しておく必要がある。そのため、地震時に大きな変動軸力を受ける外側柱を対象に加力実験を実施し、最大耐力を越えた大変形領域での構造性能、破壊性状等について検討した。軸力比を $-0.09 \sim 0.35$ とした基準試験体では層間変形角8%で所定の軸力を保持できたが、軸力比を大きくした試験体、繰返し回数を増やした試験体、低い強度の帯筋を使用した試験体では軸力保持能力が低下し、軸崩壊限界変形が小さくなることを確認した。

以上の成果は、大変形領域におけるラーメン架構の構造特性評価に関する技術資料として取りまとめた。

③一般建築物(鉄骨造)の地震応答評価技術を高度化する技術資料

建築基準整備促進事業との共研によって、梁ウェブ継手効率の影響、引張ブレース構造の塑性変形性能、床スラブが梁の横座屈を補剛する効果を明らかにした。また、鉄骨造接合部のディテールが、建物の耐震性能に及ぼす影響に関して、資料の収集を行い、設計、施工上の留意点等を取りまとめた。

部材の疲労曲線を用いた損傷評価方法の有効性を検討するため2011年東北地方太平洋沖地震の際に東北大学1Fで得られたNS成分記録(長継続時間地震)と1995年JMA Kobe NS(直下型地震)を用いて、ラーメン構造(梁端接合部)試験体とブレース構造試験体の倒壊までの振動台実験を行った。実験の結果、梁端接合部試験体では、長継続時間地震動により梁端部が疲労的に破断する現象が確認され、梁部材の疲労曲線を用いた損傷評価方法の有効性が確認された。

これらの成果は、鉄骨造建築物の高度な地震応答評価に関する技術資料として取りまとめた。

④一般建築物(木造)の地震応答評価技術を高度化する技術資料

大変形時の木造建物の応答評価技術を向上させるため、地震動特性と建物の耐震性能をパラメータとした解析及び振動台実験を実施した。建物の最大応答を引き起こす地震動の周期成分とその強さは、建物の耐力によって変化することを確認した。

また、地震後の耐震性能残存率を評価する方法の妥当性を、時刻歴応答解析と振動実験により確認した。

これらの成果は、木造建築物の高度な地震応答評価に関する技術資料として取りまとめた。

⑤一般建築物の高度化された地震応答評価事例

RC造建築物に関する設計上の余裕が実応答に及ぼす影響の検討については、時間的な制約から十分に達成していない。今後、別課題の中で引き続き検討していく。

鉄骨造建築物に関して、地震動特性(直下型、長継続時間型)や地震動のレベル(極稀地震の1.0倍、1.5倍、2.0倍)に応じた有効な設計方法について、4層及び9層の試設計建物を対象にした地震応答解析を行った。解析の結果、ダンパーの付加や梁の高強度化により、梁端部の損傷度の低減が確認され、梁端部の破断を防止した適切な設計が可能であることを示した。

木造建築物について、地震被害推定の高度化を目的とした建物群モデルを提案するため、地震動特性と建物耐力をパラメータとした解析及び振動台実験を実施した。提案する建物群モデルに観測地震動を入力して被害率を算出し、実被害率と比較しその妥当性を確認した。

2. 研究評価委員会(分科会)の所見と建築研究所の対応(担当分科会名:構造分科会)

(1) 所見

- ① 短い期間の中で多面的な検討が行われており、十分な成果が得られている。研究成果として得られた技術的知見は、今後の耐震設計、耐震性能評価および被害想定に活かされるものと評価する。基準の改定に向けて更なる研究の継続が望まれる。
- ② 地盤との相互作用は従来からの課題で大変難しい問題だと思われる。実験のデータだけでなく、実際の中低層建物を対象とした地震応答データの蓄積など息の長い研究を期待する。
- ③ 基準法・告示レベルを超える地震動に対して建物被害を高い精度で予測することは、社会的にも重要な

課題である。超高層建物等および一般建築物の地震応答評価を高精度に行うために、有効な成果と評価できる。今後の課題としては、動的相互作用等による入力低減効果について、実用的評価法の確立が望まれる。実験およびシミュレーションによるアプローチだけでなく、実建物および地盤に加速度センサー等を多く設置して、多数の観測データによる解析・評価を行う等のアプローチも必要ではないか。

- ④ 現行の耐震基準の課題がもう少し明解に示されることが望ましい。従来の建物と近年の建物の実力の違いを勘案して設計基準のあり方を考えられたい。入力評価の研究成果の結果、入力は過小であることが明らかになりつつある。耐力評価の技術向上が耐震的実力低下につながらないことに留意する必要がある。又、地震地域係数の見直しも今後の課題と考えられる。
- ⑤ 「建築物の耐震性能」とは何か、に関して社会全般に説明していくという方向性を常に持ちながら継続的に研究されることが望まれる。

(2) 対応内容

所見①への対応

今後も研究を継続し、将来の基準改定に資するデータの把握に努めて参りたい。

所見②、③への対応

現状の建物への強震観測を継続して着実に実施して参りたい。多数の観測データによる検討のために必要な、安価な地震計・センサーおよび観測システムの導入については、管理費用の確保等の課題があるが、引き続き検討して参りたい。

所見④への対応

いただいた所見の視点に配慮しつつ、今後も新規課題や別の課題において設計用入力動の評価および構造物の応答評価に関する検討をして参りたい。

所見⑤への対応

社会への適切な情報発信という観点に留意しながら、今後も建築物の耐震性能に関する研究を継続して参りたい。

3. 全体委員会における所見

地盤との相互作用や、基準法・告示レベルを超える地震動に対して、建物被害の高精度予測は非常に重要な課題である。短い期間の中で多面的な検討が行われており、十分な成果が得られているため、分科会の評価を支持し、全体委員会の評価としたい。

なお、シミュレーションや実験だけでは、個別の条件により異なる影響があるので、データの集め方の工夫が必要であるという意見や、現行の耐震基準の課題をもう少し明解に示されたい、建物の耐震性能とは何かということを中心として社会に説明してほしい、という意見があった。

4. 評価結果

- A 本研究で目指した目標を達成できた。
- B 本研究で目指した目標を概ね達成できた。
- C 本研究で目指した目標を達成できなかった。