

「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」

(平成23年度～平成24年度) 評価書 (事後)

平成25年 7月19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

2003年十勝沖地震においては、苫小牧の石油タンクが長周期地震動に共振しスロッシング現象により浮き屋根が揺動し火災が発生した。また、2004年新潟県中越地震では、首都圏において長周期地震動が長時間にわたって継続する強震記録が観測され、超高層建築物のエレベーターケーブルの一部が切断する被害も発生した。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震では、東京のみならず震度3の大阪でも超高層建築物が長周期地震動に共振し、エレベーターの閉じ込め、スプリンクラー破損による水浸し、天井ボードや壁面パネルの損傷等が発生した。このような長周期地震動については、地震の発生機構や伝播機構に関する研究が進み、解析的にも再現することが可能になってきた。

このような中、建築研究所では、2009～2010年度に、「長周期建築物の耐震安全対策技術の開発」を実施し、「長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法」を整備した。なお、2009年には地震調査研究推進本部地震調査委員会から、想定東海地震、東南海地震、および宮城県沖地震を対象とした「長周期地震動予測地図」試作版が公表された。これは、将来の様々な想定地震の長周期地震動を予測していくための第一歩として位置づけられていることから、先の成果である「長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法」は、今後地震調査研究推進本部から公表される長周期地震動予測地図に関する新たな技術情報等を取り入れて、適宜更新を図っていく必要がある。

一方、長周期地震動に対しては、超高層建築物や免震建築物といった固有周期の長い建築物が共振し、設計での想定よりも大きな応答変形が生じる可能性がある。また、長周期地震動においては、多数回の繰り返し地震動が作用するが、そのような場合の限界状態は必ずしも明確ではなく、応答の状態予測や、応答制御技術を用いる場合の目標の設定にも不確かさが存在するのが現状であり、地震応答時の損傷予測技術の高度化も望まれる。

本課題では、超高層建築物や免震建築物の長周期地震動に対する耐震安全対策の信頼性向上を目的とし、限界性能の明確化、地震応答予測技術の高度化、および応答制御技術の評価基準の明確化を目指した検討を行う。

本研究の成果は、指定性能評価機関の業務方法書等として超高層建築物等の評価に反映され、また一方で、技術基準解説書や各種ガイドラインなどに反映されることで、構造設計の実務に供される。

(2) 研究開発の概要

本課題では、超高層建築物や免震建築物における地震時応答評価や安全性評価に必要な技術的知見の収集やとりまとめを行う。設計用地震動の作成手法の検討および超高層建築物（鉄筋コンクリート(RC)系超高層建築物、鉄骨系超高層建築物）や免震建築物の構造性能・限界性能の実験による確認、多数回繰り返し長周期地震動に対する応答予測技術の高度化、および地震応答低減への制震効果などの研究を実施する。建築基準整備促進事業（基整促）との共同研究を行い、基整促の成果も取り入れた検討を行う。

以下の4つのサブテーマを設定する。

- サブテーマ（１） 長周期地震動を考慮した入力地震動作成手法の高度化
- サブテーマ（２） RC系超高層建築物の地震応答評価技術及び制御技術の高度化
- サブテーマ（３） 鉄骨系超高層建築物の地震応答評価技術及び制御技術の高度化
- サブテーマ（４） 免震建築物の地震応答評価技術および制御技術の高度化

サブテーマ（１）では、平成22年度までの個別重点課題において整備を行った「長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法」を基に、2011年東北地方太平洋沖地震における多くの地震観測記録の分析結果および内閣府による検討や地震調査研究推進本部から出される長周期地震動予測地図に関する新たな技術情報や震源、地下構造に関する最新データを取り入れて、作成手法の高度化を図る。

サブテーマ（２）、（３）および（４）では、それぞれRC系、鉄骨系超高層建築物および免震建築物が多数回繰り返し長周期地震動を受けた場合の、限界性能の明確化、地震応答予測技術の高度化、および応答制御技術の評価基準の明確化による耐震安全対策の信頼性向上を目指した検討を行う。

RC系超高層建築物に関する研究では、既往の限界変形性能評価法を整理するとともに、部分架構試験体（補修後の試験体も含む）の多数回繰り返し載荷実験を行い、部材の剛性・強度・変形性能を把握する。また超高層縮小模型の振動台実験（基整促27-1で実施）結果とシミュレーション解析結果を比較し、応答解析手法の適用性を検討する。

鉄骨系超高層建築物に関する研究として、部材、接合部および実大レベル架構の多数回繰り返し載荷実験を行い、部材等の限界変形性能をまとめ、超高層の解析モデルによる長周期地震動に対する応答解析を行い、応答変形や累積損傷等を評価する。また2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた超高層建築物の応答解析を実施し、観測記録との対応を検討する。さらにダンパーで補強する場合について、既存建築物部分の応答塑性率を考慮した設計限界変形等に関する結果を取りまとめる。

免震建築物に関する研究では、多数回繰り返し実験により、免震部材の特性変化や限界性能を明確にするとともに、免震建築物の地震応答に及ぼす免震部材の特性変化の影響や免震層での衝突や衝突防止時の上部構造や室内の応答性状を取りまとめる。

（３）達成すべき目標

超高層建築物や免震建築物が多数回繰り返し長周期地震動を受けた場合の、限界性能、地震応答評価手法、応答制御技術の評価基準を明確化し、技術の妥当性に関する審査の判断基準に資する下記の技術資料を提供する。

- 1) 長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法（更新版）
 - ・「新たな対象地震等を含む設計用長周期地震動」
 - ・「設計用長周期地震動作成手法の適用方法」
- 2) RC系超高層建築物の長周期地震動に対する応答性能評価および応答制御技術評価に係る技術資料
 - ・「限界性能評価に関する技術資料」
 - ・「地震応答予測技術に関する技術資料」
 - ・「応答制御技術の評価基準に関する技術資料」
- 3) 鋼構造超高層建築物の長周期地震動に対する応答性能評価および応答制御技術評価に係る技術資料
 - ・「限界性能評価に関する技術資料」
 - ・「地震応答予測技術に関する技術資料」
 - ・「応答制御技術の評価基準に関する技術資料」
- 4) 免震建築物の長周期地震動に対する応答性能評価および応答制御技術評価に係る技術資料
 - ・「免震材料の多数回繰り返し特性および多数回繰り返し試験条件に関する技術資料」
 - ・「長周期地震動に対する免震材料のモデル化と免震建築物の地震応答に関する技術資料」
 - ・「免震建築物の衝突時と衝突防止時の建物応答や室内応答に関する技術資料」
 - ・「戸建住宅の免震層応答変位の低減に向けた速度可変型オイルダンパーの有効性に関する技術資料」

(4) 達成状況

各サブテーマにおける研究の達成状況は、下記にまとめられる。

サブテーマ(1) 長周期地震動を考慮した入力地震動作成手法の高度化

a) 新たな対象地震等を含む設計用長周期地震動の提案

前課題で提案した入力地震動作成手法に基づく国交省対策試案に対する募集意見(パブコメ)への対応、2011年東北地方太平洋沖地震における地震観測記録の活用および太平洋プレートおよび南海トラフで発生する地震の距離減衰特性とサイト特性の違いを踏まえ、評価モデルの精度を向上させる検討を行い、入力地震動作成手法を改良した。また経験的手法の不確定性(ばらつき)については、平均的なものとそれに一定のデータのばらつき(推定誤差)を考慮した手法となっている。この提案手法を用いて、内閣府が最近提案した南海トラフにおける最大級の地震(3連動モデルおよび4連動モデルにおける地震)による主要地点の長周期地震動を作成した。

さらに作成地震動による超高層建築物、免震建築物の応答解析により、応答レベルを把握し、地震動のばらつきなどの地震動設定に関わる要因の分析を行い、長周期地震動の評価手法をとりまとめた。

b) 設計用長周期地震動作成手法の適用方法に関する提案

長周期地震動の作成に関連し、種々の適用条件すなわち、震源位置・大きさ、地盤条件による、水平・上下方向各成分について応答スペクトル特性、エネルギースペクトル特性および時刻歴特性への影響について検討した。さらに、現在利用可能な広域の深い地下構造データに基づいて、任意地点の長周期地震動を評価する手法を提案した。これらの成果により、長周期地震動の作成方法が実務設計により効率的な適用が可能となると考える。

サブテーマ(2) RC系超高層建築物の地震応答評価技術および制御技術の高度化

a) 限界性能の明確化

RC系超高層建築物の立体部分架構(柱、梁、柱・梁接合部)を模した縮小試験体に対する多数回繰り返し加力実験の実施、および、ひび割れが発生した当該試験体をエポキシ樹脂・PCMで補修し、再度同様の载荷を行って構造性能を把握した。その結果、①降伏に達する以前にスラブ全幅が耐力に寄与すること、②層間変形角2%程度までは多数回繰り返し加力によっても耐力劣化は生じないこと、③変形角2%を超える領域においても安定した紡錘形の履歴復元力特性を示すことなどの知見が得られた。また補修後の試験体では、剛性等は補修前よりもやや劣化するものの、耐力は原試験体の最大耐力まで回復することを確認した。

b) 地震応答予測技術の高度化

超高層20層RC造縮小模型に対する震動台実験を基準として地震応答解析を実施し、現在一般的に使用されている設計・解析手法を用いることで、レベル2の応答変形角(1/100rad.) 辺りまでは応答性状をほぼ適正に評価できることを確認したが、それを超えるような大変形領域では実験結果との相違が明らかになった。大変形領域で実験と解析が異なった要因として、床スラブの有効幅の取り方や履歴減衰の大きさなど、建築物の耐力評価や履歴復元力特性モデルの設定など解析上の仮定によるものと推定される。これらの問題はRC系超高層建築物に限ったものではないが、未だ十分に解明されていない課題であり更なる検討が必要である。

c) 応答制御技術の評価基準の明確化

上記b)の検討に用いた解析モデルに履歴型(鋼材系)ダンパーを取り付け、同じ入力地震動に対する応答性状を比較し、最大応答を低減できることを確認した。

サブテーマ(3) 鉄骨系超高層建築物の地震応答評価技術および制御技術の高度化

a) 限界性能の明確化

柱、梁部材および柱梁接合部および実大レベルの架構の多数回繰り返し载荷実験を実施し、部材レベルと架構レベルの実験結果を比較し、多数回繰り返し時の限界塑性変形性能について取りまとめ、梁部材と柱部材の破断までの限界繰り返し回数に関する設計用疲労曲線を提示した。特に梁端部につ

いては、スカラップの有無等により限界繰り返し回数に明確な差が表れる結果が得られた。この設計用疲労曲線を用いて、時刻歴応答解析による梁（柱）の最大塑性率と累積塑性変形倍率から簡略的に損傷度を評価する方法を提案した。時刻歴応答解析に基づいた、鉄骨系超高層建築物の耐震安全性を評価するために有効な方法である。

b) 地震応答予測技術の高度化

現在検討されている設計用の長周期地震動に対して、鉄骨系超高層建築物の地震応答がどの程度のレベルに成るか明らかにするために、既存の建築物の解析モデルの復元力特性を平均化した標準的な応答解析モデルを提案し、最大応答変形や損傷のレベルを検討した。

また、2011年東北地方太平洋沖地震で強震記録が観測された鉄骨系超高層建築物について、観測記録を用いた応答解析を行ない、損傷レベルを把握するとともに、観測された加速度記録との比較を行った。その結果、通常の応答計算で用いられている2%初期剛性比例型の減衰の設定では、応答が小さく評価されることが明らかとなった。

長周期地震動に対する超高層建築物の耐震安全性を評価する場合には、標準的な応答解析モデルを用いた応答解析結果の利用や減衰定数の設定に関する知見は有益なものになると考える。

c) 応答制御技術の評価基準の明確化

既存の鉄骨系超高層建築物が、長周期地震動に対して応答変形や損傷が大きくなり、耐震安全性が確保できないような場合にはダンパー等で耐震改修する必要がある。耐震改修の例として、履歴型ダンパーを用いる場合を想定して、1層1スパンの鉄骨造骨組の多数回繰り返し載荷実験を行い、ダンパーで補強した場合としない場合の試験体の荷重-変形関係や梁端部破断までの限界繰り返し回数の比較を行った。この実験結果から、ダンパーで補強した建築物の梁端部も補強しない場合と同様の疲労性能であり、ダンパー付き建築物にも梁端部の疲労曲線を用いた設計が可能であることが明らかとなった。

サブテーマ（4） 免震建築物の地震応答評価技術および制御技術の高度化

a) 限界性能の明確化

1) 免震部材の多数回繰り返し特性の明確化

多数回繰り返し荷重を受ける免震材料の限界性能として、免震層の累積変位100mを満たすことを想定し、(独)防災科学技術研究所の大型震動台（E-ディフェンス）を利用して、実大免震支承（積層ゴム支承、弾性すべり支承）の動的加振実験を実施した。その結果、多数回繰り返し（エネルギー吸収による温度上昇）による降伏荷重・摩擦係数等の低下特性が明らかとなった。長時間継続する地震動に対する免震支承の特性が捉えられたことにより、免震技術者や実務設計者に参考となる知見が得られた。ただし高温時の実大免震ゴム支承では、過去の知見には見られない特性（高温時の力学特性）が確認され、その原因究明が必要である。

また免震部材は大臣認定が必要なことから、試験条件（繰り返し数、振幅など）の設定や基準値の評価に向けた、十分な実験資料をそろえることができた。

2) 擁壁等への免震層の衝突による上部構造と室内の安全性

免震層変位が設計クリアランスを上回り、擁壁等に衝突する場合の応答性状に関して、衝突シミュレーションと衝突再現実験を行い、上部構造の加速度応答と室内家具・人の挙動（移動・転倒・衝突など）を取りまとめた。衝突による室内安全性について、実験的に検証した例は極めて少ないことから、貴重な成果となった。

b) 地震応答予測技術の高度化

免震部材の多数回繰り返し実験およびその他の実験結果に基づき、免震部材のモデルを作成し、応答計算に組み込める形とした。免震支承・ダンパーの種類による繰り返し特性の免震建築物の地震応答への影響について取りまとめた。免震部材の力学特性のモデル化は、実験結果を経験式として表した方法や構成材料の熱容量・熱伝導等に基づく方法などを提案し、地震動の入力エネルギーに伴う特

性変化を考慮した免震建築物の時刻歴応答計算が可能となった。また時刻歴応答計算への組み込みを簡易化した方法（等価な特性で代表させる方法）などの提案も行った。

c) 応答制御技術の評価基準の明確化

1) 免震層の衝突回避(応答低減)による構造体・室内の安全性

免震層の応答を低減するために、オイルダンパーを設置し、ダンパー量をパラメータとした応答解析を実施した。衝突時および回避時の応答結果から、免震層の応答低減と上部構造および室内の応答性状との関係をまとめた。

2) 戸建免震住宅における免震層の応答低減手法の提案

速度可変型オイルダンパーを利用して、戸建免震住宅の免震層の応答を低減させる手法の有効性をまとめた。パッシブ型で特性が変化するオイルダンパーの研究はほとんどなく、貴重な成果となった。

2. 研究評価委員会（分科会）の所見とその対応（担当分科会名：構造分科会）

（1）所見

- ①東北地方太平洋沖地震発生以前から進められていた研究に、同地震による様々な現象の解明の研究を加えて、現時点における最新の知見を得ている。特に、地震動の性質と建物の特性に応じた応答の両面からの研究を行っている点で、独法建研の総合的な力が発揮されている。
- ②今までの知見の少ない、大変形領域や多数繰り返し载荷における構造物の問題点が明確にされることは意義があると考えられる。2年間で十分な成果が得られている。
- ③外部機関との連携が積極的に行われ、連携による成果も十分である。
- ④研究成果の活用が具体的に掲げられており、実際の設計への反映すべき資料の取りまとめが予定されているようで、期待する。
- ⑤研究成果の発表状況は十分である。むしろ査読付き論文のファーストオーサーに建築研究所の方が少ないのではないかと懸念される。論文に対する建築研究所の寄与率がわかる資料があったほうがよい。研究成果を査読論文として、発表されることを期待する。
- ⑥地震学を専門とする研究者がより巨大な地震動を提案されているが、そのまま受け入れると設計という行為が成立しないことも考えられる。どこまでを想定すべきは大きな問題であり、建築界でのコンセンサスを作れるような研究活動を望みたい。
- ⑦計画時点で、「技術の高度化」というテーマに対して、その目標は、「技術資料の作成」といった形式的なものではなく、もっと具体的な設定をすることが望まれる。
- ⑧サブテーマ内の個々の研究テーマの関連性を示してほしい。例えば、サブテーマ（4）の a) 擁壁等への衝突と建物の安全性と c) 免震層の衝突回避による建物の安全性では、ほぼ同じテーマを掲げながら対象が異なるものに対する研究となっている。サブテーマがかなり大きなテーマとなっているので、個々の研究テーマの目的とテーマ間の関連性を明らかにしなければ、目標を達成したかどうかの評価ができない。研究成果は総合的に充分であると評価するが、目標を達成したかどうかの評価をするとどのようになっているかわからない。

（2）対応内容

所見⑤に対する回答

建築基準整備促進事業（基整促）で行った地震動評価や実験結果等に関する発表は、基整促の事業主体である大学関係者や民間会社等の研究者が第一著者なる場合が多くなっているが、建築研究所の研究担当者も共同研究として研究の方向付けや研究作業を分担しており、成果達成に大きく貢献している。特に、技術基準等へ反映するための作業は建築研究所の研究担当者が主体的に行っている。今後、研究成果を建築研究資料等にまとめると共に、審査論文への投稿も進めて参りたい。

所見⑥に対する回答

2011年東北地方太平洋沖地震の発生を踏まえ、南海トラフで発生する地震において、地震断層の設定により、かなり大きな地震動が発生することが提案されている。建築界でどのような地震動を設定する必要があるかについては、まだ十分な議論がなされていないのが現状である。長周期・長時間継続する地震動及び建築物の対策については、今後国土交通省等で検討される予定であり、協力して対応したい。

所見⑦、⑧に対する回答

既往研究成果の整理と実験結果の蓄積により、大振幅での多数回繰り返される荷重に対する部材特性や限界値の設定の設定に資する検討（限界値の明確化）、また地震応答の評価については、既往研究成果や本研究の検討結果に基づいて、長周期・長時間継続する地震動における超高層・免震建築物の応答をより精度よく算定するためのモデル化に資する検討（応答予測技術の高度化）を行った。さらに超高層・免震建築物の応答が大きくなることを踏まえた状態とダンパー等による補強による応答低減した状態の比較等の検討（応答制御技術の評価基準の明確化）を行った。研究の成果を上記の下線部の3項目でまとめたために、1つのつながりある研究がわかりにくい説明となっていた。

今後、達成すべき目標（アウトプット）については、具体的な研究成果を記述するよう努めたい。またサブテーマの内容が大きなテーマであったため、研究計画段階では少し抽象的な表現になっていたことに対しても、研究の内容をよりわかり易く説明できる資料となるよう努めたい。

これらの技術的知見（技術資料）が、指定性能評価機関の業務方法書等として超高層建築物等の評価に反映され、また技術基準解説書や各種ガイドラインなどに活用されることで、構造設計の実務に供される状況を目指したい。

3. 全体委員会における所見

このテーマは超高層建築物や免震建築物など、固有周期が長い建物に対する長周期地震動に関する研究である。東北地方太平洋沖地震の前から進められている研究であるが、東北地方太平洋沖地震で得られた膨大なデータを活用して精力的な研究が行われており、本研究で目指した目標を達成出来たという分科会の評価を支持し、全体委員会の評価としたい。

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。