

「地盤特性を考慮した建築物の耐震設計技術に関する研究」（令和1年度～令和3

年度）評価書（終了時）

令和4年4月6日（水）
建築研究所研究評価委員会
構造分科会長 田才 晃

1. 研究課題の概要

（1）背景及び目的・必要性

建築物と地盤を対象とした強震観測は、これらの地震時の挙動を実際に観測することにより、建築物の動的な特性や耐震性能に関する知見を収集し、耐震設計技術の向上に資することを目的としている。建築研究所は1957年から建築物と地盤を対象とした強震観測を行っており、これまで多くの記録を蓄積し、我が国の耐震建築基準の基礎となっている貴重な研究成果を挙げている。

近年、大地震に対する建築物の設計（いわゆる2次設計）について、上部構造だけでなく、基礎構造においても、その社会的な必要性が高まっている。とくに、杭基礎の建築物では、大地震時には地盤変位や建築物と地盤の動的相互作用など1次設計では考慮していない事象の影響を無視できないため、地盤を考慮した建築物の耐震設計技術が不可欠となる。杭基礎の設計法は、1995年兵庫県南部地震による液状化被害を契機として研究が飛躍的に進展し、地盤と杭を弾性支承上の梁にモデル化して建物慣性力と地盤変位を作用させる応答変位法が標準的な手法として用いられるようになった。しかし、その設計用の地震外力として、建物慣性力と地盤変位の位相差を如何に考慮するか、建物の地下部分の慣性力（従来の地下震度に近い概念）を如何に設定するか、これらへの動的相互作用の影響を如何に評価するか、など未解決の課題が残されている。

（2）研究開発の概要

建築研究所の観測網で得られる建築物と地盤の強震記録ならびに令和3年度から稼働する遠心力載荷装置を用いた振動台（以下、遠心振動台）を最大限に利活用して、強震記録のシミュレーション解析や建築物と地盤の縮小模型振動実験に基づいて、地盤を考慮した建築物の耐震設計技術の開発を推進するため、次のサブテーマ（1）（2）の検討を実施する。

サブテーマ（1）建築物と地盤の強震観測

建築研究所が全国に展開している強震観測網の維持管理及び効率化を図り、強震記録の収集と整理、および分析を行う。また、長周期構造物や地盤と建物の相互作用系など社会的要請に応えた観測体制の強化を行う。得られた観測成果は、インターネットや出版物、研究発表を通じて迅速に公開する。

サブテーマ（2）杭基礎の設計用地震外力の合理化

応答変位法による杭応力評価に用いる設計用地震外力について、建物慣性力と地盤変位の位相差、地下部分の慣性力、これらへの動的相互作用の影響を如何に評価するか、解析と実験の両面からデータを蓄積・分析・整理し、杭基礎の耐震設計技術の向上に資する成果として総括する。得られた成果は、論文等の学会発表など、学術的・社会的に広く公表する。

（3）達成すべき目標

サブテーマ（1）建築物と地盤の強震観測

強震観測網の安定した稼動と、観測網の充実・効率化。強震観測記録や分析結果から構成されるデータベースの公開。

サブテーマ（２）杭基礎の設計用地震外力の合理化

- 1：建物慣性力と地盤変位の位相差および地下部分の慣性力に関する動的相互作用メカニズムの解明
- 2：1を踏まえた動的相互作用を考慮した設計用地震外力としての建物慣性力と地盤変位の組合せの方法および地下部分の慣性力の設定の方法の提案
- 3：1～2の成果の学術的・社会的公表

（４）達成状況

サブテーマ（１）建築物と地盤の強震観測

強震観測網の維持管理では、老朽化や作動不能になっていた大阪第一合同庁舎及び東雲合同宿舎の観測装置の更新を行った。また、庁舎の廃止や機器の効率的配置の観点から、新潟市庁舎、国立国会図書館新館、宮崎県庁の観測を取りやめた。一方、庁舎の耐震改修に伴いいわき市庁舎及び広島合同庁舎の観測を休止している。

観測記録については、平成31年4月以降令和3年12月までに500地震1870強震記録の収集整理を行い、データベース化を行った。公開データベースについてはほぼ月に一度のペースで更新を行い、得られた強震記録を公開した。また、2019年6月18日山形県沖の地震(M=6.7, h=14km), 2019年8月4日福島県沖の地震(M=6.4, h=45km), 2021年2月13日福島県沖の地震(M=7.3, h=55km), 2021年3月20日宮城県沖の地震(M=6.9, h=59km), 2021年10月6日岩手県沖の地震(M=5.9, h=56 km), 2021年10月7日千葉県北西部の地震(M=5.9, h=75 km)及び2022年01月22日日向灘の地震(M=6.6, h=45 km)では強震観測速報を発行し、ウェブに掲載した。更に、強震記録の分析結果については、日本建築学会大会、国際会議等で公表・発表を行っている。

加えて、日本建築学会や日本鉄鋼協会、BRICなどの委員会や研究会に参加し、情報の収集を行った。またBRIC若手研究会の活動と協働し、6階建てツーバイフォー実験住宅に設置した多様なMEMSを用いたセンサーと従来型の高性能の強震計と比較観測を行い、観測記録の精度や機器の信頼性について検討を行った。

サブテーマ（２）杭基礎の設計用地震外力の合理化

1. 建物慣性力と地盤変位の位相差および地下部分の慣性力に関する検討

高知2棟の地震観測記録を用いて、建物と地盤の水平動スペクトル比を再現できる建物－地盤連成系スウェイモデルを同定し、動的相互作用の大小と位相差の大小が対応する可能性を示した。また、竹中技研に発注した弾性論3次元FEMおよび薄層法による基礎入力動と地盤ばねを適用した地震応答解析を行い、その結果が観測記録と概ね整合することから、モデルの妥当性を確認した。

令和2年度まで、遠心実験装置の新設と運用の初動に忙殺された。令和3年度は、不足する実験機器等の施設整備や建屋改修工事を行う中、本課題の実験は2回の機会を得た。しかし、大地震動の地盤応答として現実性に欠けるデータだったため、平成27年度に国総研から大林技研に発注した同様の遠心実験のデータを借用して分析した。地震観測記録と同様に、遠心実験データでも、建物慣性力と地盤変位との間に位相差が見られた。

地震観測記録と遠心実験データの分析から得られた建物慣性力－地盤変位の位相差と建物周期／地盤周期、建物－地盤連成系周期との関係を、基礎根入れの浅い／深いに分けて検討した。基礎根入れの大小、周期の大小と位相差の大小との間に相関性はあるように見えた。ただし、これらのパラメタから位相差を推定する経験式を導くには、未だデータがパラメタの範囲を十分に網羅できていないと思われる。位相差を推定する経験式を構築できれば、杭基礎設計における建物慣性力と地盤変位の組合せを位

相差の簡単な三角関数により提案できるのではと想像している。

地下部分の慣性力については、地下部分の重量×加速度の最大値 A_{max} の形による表現が設計上の扱いがよいと考えている。前述の遠心実験データの範囲では、 A_{max} の値として、地中（基礎底深さ）加速度を用いると、実験結果から求めた値に比較的近くても下回る場合が多く見られた。このため、現時点では、過剰な場合も多くあろうが A_{max} の値として（現行の基礎指針と同じ）地表加速度を用いることが設計上は適切ではないかと想像している。

2. 2016年熊本地震の住宅被害甚大地域の強震動評価

設計で想定すべき地震外力の明確化に資するため、益城町中心部の3地点で種々の地盤調査を行い、防災科研 KiK-net 益城（Site K）の鉛直アレイ強震記録を用いて、4月16日EW方向の強震動の再現解析（1次元有効応力解析）を行った。その結果、Site K 観測記録の速度と変位を良好に再現でき、また、大破・倒壊率が最大の宮園で $PGV1.6m/s$ 、大破・倒壊ゼロの古川で $PGV1.0m/s$ と推定された。これらは、従来は工学的基盤として扱われる地層を含む表層地盤の非線形応答特性（S波速度構造と動的変形特性）と散乱減衰の組合せによるものである可能性を示した。さらに、2階建て木造住宅を模擬した建物の簡易的なモデルを用いて、再現強震動に対する地震応答解析を行い、建物の耐力（降伏ベースシヤ係数）が0.2-0.8程度の間分布すると仮定して、大破・倒壊の実際の分布と調和的な解析結果を得た。この成果は令和3年度の建研講演会で発表した。

2. 研究評価委員会（分科会）の所見（担当分科会名：構造分科会）

（1）研究開発の成果

- ① 計画2年目に新設の汎用大型装置を使って実施予定だった実験が、装置の建設遅延により最終年度の実施となり、結果の十分な吟味に影響したのではないかと推察されます。
- ② やや不足している感は否めないと思います
- ③ サブテーマ1、2とも概ね目指した目標を達成できたと評価できる。
- ④ 色々な制約がある中でも地震観測網の維持を図り、観測結果を広く提供している。また、非常に高度な実験手法である遠心実験に挑戦するとともに、地盤構造物相互作用について地震観測結果を基に検討した。

（2）研究成果の発表状況、外部機関との連携等

- ⑤ 論文、学会発表、講演会、シンポジウムでの発表、雑誌、機関紙への投稿等、研究成果の発表は多くの媒体を通じて行われています。最終年度の成果についても同様に行われることが求められます。
- ⑥ 研究の遂行では、外部機関と連携して、組織的に行われています。
- ⑦ 他機関との連携（特に、予算が少なくても良い大学）との推進は行うべきと考えます。
- ⑧ 強震観測記録については、貴重なデータであり、特に建物内での観測記録は民間での記録がほとんど公表されない中大変貴重なので、広報を行い広く活用していただくことが大切だと思います。
- ⑨ 建築学会など多くの学会での論文発表、および雑誌寄稿がなされている。ただし、建研の人材に偏り、広がり欠ける。

（3）総合所見

- ⑩ 強震観測は、国の研究機関として重要な課題であり、弛まぬ観測網の稼働、充実、効率化が行われており、データベースとして公開されています。データベースは他の研究課題でも活用されているのみならず、統計的に示された強震観測ウェブのアクセス状況、強震記録の提供状況から、耐震工学、地震学の発展に貢献していることが窺えます。
- ⑪ 杭基礎の設計用地震外力の合理化では、動的相互作用の影響を考慮した建物慣性力と地盤変位の組合せ方法、地下部分の慣性力の設定方法素案が提示されており、成果と認められます。ただし、基礎入力動と地盤の相互作用のモデルを解析的に検証した際の地震動の大きさは実用的観点から適切であったか、遠心実験から得られた結果の信頼性が十分でなかったことの原因の検証、外部組織を

（地盤特性を考慮した建築物の耐震設計技術に関する研究）

含めた研究体制のさらなる拡充など、明確にすべき点、改善すべき点の解決が求められます。

- ⑫ 地震観測については、是非、継続をしていただきたいと思います。地震観測データを公表可能な観測システムを、維持していただくことは、建築研究所の大きなミッションだと思います。また、大阪の観測建物は、上町台地上にあっても、南海トラフ地震の被害検証には不十分です。是非、梅田や福島周辺でお考えください。
- ⑬ 一方、基礎・地盤については、遠心載荷装置の信頼性の高い動作確認は重要なミッションだったはずで、極めて残念です。また、一般社会に還元可能な成果を出していただきたいと思います。散乱減衰の評価や3次元FEMを使った評価を行わないといけなような研究成果を国民の大部分は望んでいません。
- ⑭ 建築物と地盤の強震観測については、継続的な活動で地道に活動が継続されている。記録の利用(記録の利用申請者数や提供記録数)は特にこの3年間で増加の傾向が認められないので、さらなる広報などにより広く利用していただけるように努力してはいかがでしょうか。また、釧路合同庁舎のように、工学的基盤(杭先端位置)も含めた地震観測は民間では難しいので、建築研究所としてぜひ多く観測点数を確保して公表していただければと考えます。
- ⑮ 杭基礎の設計用地震外力の合理化については遠心力載荷装置の稼働が遅れたこともあり、今回の報告でも遠心力載荷装置を用いた成果には結びついていない。その原因については明確にしておく必要がある。また、動的相互作用を考慮した設計用地震外力としての建物慣性力と地盤変位の組み合わせ方法および地下部分の慣性力の設定方法の提案については、明確な提案には至ってはいないため引き続きの検討が必要であると思われる。
- ⑯ 地震観測網の維持は制約が多い中、建研は長年、有益な観測結果を社会に提供してきた。この研究課題の期間内でも同様である。ただし、一般にはこの重要な研究努力は知られていない。建研が音頭を取って学会を動かすなどにより、地震観測の意義を一般に伝えていただきたい。また、地震観測結果の提供先と連携を図り、どのように活用されているかをモニタリングすることも有用と思われる。
- ⑰ 非常に高度な実験手法である遠心実験を実施するところまで到達したことは評価できるが、実験データとしては得られたものが低い価値になったのは残念である。巨額の国費を投入して設置した遠心実験装置であるので、適切に運用できるよう、実験データを見直し、改善策を立案し、次期の研究課題にて検証を行っていただきたい。改善の立案に当たっては細かいノウハウの取得が必要と思われる。先行して遠心実験装置を導入した研究機関に対してヒアリングを行ったり、その機関にインターンを派遣し、遠心実験を経験することも必要であろう。地盤構造物相互作用については、遠心実験の代わりに急遽、実施した研究項目であり、やや深みにかけてしまったのは残念である。

(参考) 建築研究所としての対応内容

・ 所見への対応

サブテーマ(1) 建築物と地盤の強震観測

所見⑦及び⑧：強震観測記録の公開については、より広く使っていただける様に、機会をとらえ広報に努めてまいります。

所見⑫：観測地点の配置については随時見直しを行っているところですが、ご意見を踏まえ、特に南海地震の影響の大きな地域での観測地点の効率化を図りたいと思います。

所見⑫、⑭、⑯：強震観測は新たな課題に引き継がれるので、その課題の下、継続的な維持管理、観測の効率化、記録のさらなる活用を目指し取り組んでゆきます。

サブテーマ(2) 杭基礎の設計用地震外力の合理化

所見⑦、⑨：基礎地盤分野の次年度からの新たな課題では、建研の客員研究員の先生方(東工大、東北大、大阪大ほか)にサブリーダーとして研究推進体制に加わっていただき、また、ゼネコンとの共同研究を企画するなどして、他機関との連携に努めて参ります。

所見⑪、⑬、⑮、⑰：地震観測記録から同定した相互作用モデルの解析検証は、今後も地震観測を継続し、大きな地震動が得られれば、行って参りたいと思います。また、遠心実験から得られた結果の信頼性が十分でなかったことの原因は、今後、追加の実験とデータ分析を行って、必ず検証して参ります。その際、遠心载荷装置を現有し、稼動している外部機関等の研究者へのヒアリングや、技術ノウハウの提供・指導を受けられるよう、並行して努めて参ります。

所見⑮、⑰：建物慣性力と地盤変位の組合せと地下部分の慣性力の設定方法は、今後、後継の課題を新たに立てて、引き続き検討を行い、具体的な方法を示して明確に提案できるよう努めて参りたく思います。

3. 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。