

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

海溝型等の巨大地震の発生がかなりの確率で予想される中、建築物に対する安全確保をより確実なものとするため建築物への地震入力と応答をより精度良く予測することの必要性が以前にも増して高まっている。近年、地震観測網の整備や地震学の進展に伴い、地盤の揺れそのものの地震動に関する情報は高度化されつつあるが、これに対応させて建築物の地震入力と応答をより精度良く予測するための耐震性能評価技術も改めて点検、整備していく必要に迫られているところと言える。

実際の建築物の地震入力と地震応答には、地盤-構造物の動的相互作用が影響するため、単純な基礎固定の仮定の下に、地表面の地震動を直接入力して評価した場合は、かなり様相の異なる場合が多い。近年に観測又は予測された地震動の中には、建築物に単純に作用する地震力として置き換えると、通常の耐震設計で想定するレベルを上回る場合も見られるが、地盤-構造物の動的相互作用によって、建築物に作用する地震力は、かなり低減される場合のあることは周知のところである。

事実、今日では、これまでの地震の経験から、地表で観測される地震動の強さから予測される中低層建築物の被害と実際に観察される建築物被害の食い違いが、建築物の耐震性能評価を考える上で無視し得ない現象として認識されている。その要因としては、建築物の設計耐力上の余裕度の効果のほか、地盤-構造物の動的相互作用による建築物の地震入力・応答低減効果も大きな要因として考えられることは明らかである。

以上の状況に鑑みると、建築物の地震入力と応答をより精度よく評価するための耐震性能評価技術の展開のためには、建築物での地盤-構造物の動的相互作用の評価が改めて重要な課題となっているところと言える。

地盤-構造物の動的相互作用についての理論的、解析的研究は、現在、相当な域に達していることは周知の通りである。しかしながら、実際の建築物において、地盤-構造物の動的相互作用の実態を把握し、また、今後、理論的、解析的研究を検証、展開していくには、地盤-建築物の同時地震観測による記録の収集・分析が必要となるが、現時点では、この種の地震観測記録は圧倒的に不足している。

このような状況の下、国土交通省国土技術政策総合研究所(国総研)では、2010年度より4年計画で総合技術開発プロジェクト「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」(総プロ)を実施することとなった。本プロジェクトは、地盤-建築物の同時地震観測記録の分析等に基づき、建築物の地震入力、応答に対する地盤-構造物の動的相互作用の影響を把握し、これらに関する評価技術を点検、整備していくことを目的とした。ただし、プロジェクト期間内で観測・収集される地震観測記録には限界があるので、プロジェクト終了後も地震観測は継続して実施し、また、ここで検討、構築された地震観測記録の整理・分析方法等に基づき、地震入力、応答に関する評価技術は、将来的にも、引き続き、点検、整備していくべきものと想定した。

本プロジェクトの前提となる地盤-建築物の同時地震観測は、国総研のみで実施することはほ

ば不可能であったことから、2009年のプロジェクトの計画段階から、国総研より、(独)建築研究所(建研)^{注1)}、及び、(独)都市再生機構(UR 都市機構)に、共同で、建築物の地震観測記録を収集、分析することの依頼がなされた。これにより、国総研、建研及びUR 都市機構の三者による地震観測に関する共同研究体制が構築された。

一方、建研では、1950年代から建築物の地震観測を一貫して実施しており、地盤 - 建築物の同時地震観測も主要なテーマの一つとしてきた。このような地震観測の取り組みの中で、建研においては、総プロが着手されたのを機に、基盤研究「建物を対象とした地震観測」(2009～2011年度)及び「建物の強震観測とその利用技術」(2012～2014年度)により、国総研及びUR 都市機構と連動して、これまでの観測記録と地震観測点の情報を整理し直し、その結果を、本共同研究を通し総プロに提供するとともに、総プロにて検討された観測記録の整理、分析方針と方法を、建研による今後の建築物の地震観測に取り入れていくこととした。

本書は、地盤 - 建築物の同時地震観測に基づく以上の共同研究の成果を、「地震観測に基づく地盤 - 建築構造物の動的相互作用に関する研究」と題し報告するものである。

注1) 建築研究所は、2015年4月より、独立行政法人より国立研究開発法人に組織変更されているが、本書では2014年3月当時の組織名である独立行政法人建築研究所又は(独)建築研究所と記すことにする。

1.2 研究体制

前節に示したように、国総研により、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」が計画されたのを機に、国総研、建研、及び、UR 都市機構の三者により、建築物の地震観測に関する共同研究体制が構築された。

また、総プロが開始されたのと同時に、プロジェクトの方向性、取りまとめ方針を検討するため、下記の「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委員会」が設置された。

「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委員会」

主査：

久保 哲夫 東京大学 名誉教授

委員：

飯場 正紀 (独)建築研究所研究専門役

鳥井 信吾 (株)日建設計構造設計部門 副代表

久田 嘉章 工学院大学建築学部 教授

福山 洋 (独)建築研究所構造研究グループ長

福和 伸夫 名古屋大学減災連携研究センター長 教授

協力委員：

鹿嶋 俊英 (独) 建築研究所国際地震工学センター 主任研究員
小山 信 (独) 建築研究所構造研究グループ 上席研究員
中川 博人 (独) 建築研究所構造研究グループ 研究員
田沼 毅彦 (独) 都市再生機構技術研究所

専門委員：

岡野 創 (株) 小堀鐸二研究所

幹事：

小豆畑 達哉 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部 室長
新井 洋 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部 主任研究官
井上 波彦 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部 主任研究官
向井 昭義 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部長

(注) 組織名と所属及び役職は、2014年3月当時のもの

本委員会には、地震観測に関する共同研究のメンバーも参加し、地震観測記録と地震観測点の情報を本委員会に提供するとともに、ここでの検討に基づく意見、方針を踏まえ、地震観測記録の整理、分析に取り組んだ。

なお、UR都市機構の建築物の地震観測については、UR都市機構と複数の民間会社が共同で実施していることから、これら民間会社を含めた下記の委員会を設置して、当委員会メンバーの協力の下に、地震観測記録の収集、整理及び分析作業を実施した。

「地震観測記録に基づく建築物の設計用地震力評価に関する研究委員会」

主査：

田沼 毅彦 (独) 都市再生機構技術研究所

委員：

小豆畑 達哉 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部
飯場 正紀 (独) 建築研究所
井川 望 (株) 鴻池組技術研究所
池田 隆明 飛島建設(株)技術研究所
井上 波彦 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部
鹿嶋 俊英 (独) 建築研究所
金子 知宣 (株) UR リンケージ
北堀 隆司 (株) UR リンケージ
久保田 雅春 飛島建設(株)
小山 信 (独) 建築研究所
鈴木 史朗 (独) 都市再生機構

高瀬 裕也	飛島建設(株)技術研究所
中對 浩之	(独)都市再生機構
保井 美敏	戸田建設(株)技術研究所
山本 健史	戸田建設(株)技術研究所
渡辺 一弘	(独)都市再生機構

(注) 組織名と所属及び役職は、2014年3月当時のもの

1.3 研究の目的・意義

地盤 - 構造物の動的相互作用は、慣性の相互作用と入力との相互作用に分けられる。慣性の相互作用は、地震時に構造物に生じる慣性力を仲介として地盤と構造物が干渉し合う現象¹⁾であるが、これに伴い建築物に以下の特性変化をもたらされる²⁾。

- 1) 地盤ばねの効果による固有周期の伸び
- 2) 地下逸散減衰の効果による減衰定数の変化

入力との相互作用は、基礎が地動を拘束するために生じる現象であり¹⁾、これにより構造物に入力される地震動は、地表面の地震動よりも一般には小さくなる。すなわち、入力損失効果が得られる。

これらは、地盤と構造物の相対的なかたさの違い、杭、根入れの有無等により複雑に変化する。

本研究は、このような地盤 - 構造物の動的相互作用について、地震観測記録に基づき実態を把握し、建築物の地震入力と応答に与えるその影響度合いについて検討することを目的とする。

2000年(平成12年)に公布制定された限界耐力計算では、これら地盤 - 構造物の動的相互作用の影響の評価を可能としている。すなわち、限界耐力計算の詳細を定めた技術基準告示(平12建告第1457号)において、慣性の相互作用に関しては、地盤ばねの影響を考慮する場合の固有周期の調整係数 r と等価粘性減衰定数 heq の評価式が規定されている。また、入力との相互作用に関しては、建築物の根入れ深さに応じた相互作用係数 β' が規定されている。これにより基礎入力動は地表の地震動より低減される。

ただし、高さ60m以下の建築物の構造計算では、今日なお、基礎固定の解析仮定に基づく保有耐力計算が主に使用されていることもあり、地盤 - 構造物の動的相互作用が実際の構造計算で考慮されることは少ない。また、限界耐力計算の規定についても、慣性の相互作用に関しては、表層地盤が大きく非線形化するような地震動に対して基礎構造周囲の局所的な非線形性を無視する等のいくつかの仮定が含まれており、入力との相互作用に関しても本書第4章で示すように、現行の相互作用係数 β' に代わるより実際の現象に即した評価法が提案されている等、今後の検討の余地を残している。

このような状況の下、地震観測に基づく研究の意義の一つは、現在の構造計算の方法では十分考慮されていない現象の影響を検討するための実測データの取得と分析にあると考えられる。このようなデータ取得のため、本研究では、まず地震観測点の拡充に取り組む。地震観測データの取得と分析には、長期にわたる継続的な取り組みを要すると考えるが、本研究では研究期間内に

得られた範囲でデータを分析する。

また、実際の構造計算において、必ずしも地盤 - 構造物の動的相互作用が考慮されていない現状に鑑みた場合、観測記録に基づき、どのような建築物が地盤 - 構造物の動的相互作用の影響を受け易いかを示し、また建築物の地震入力と応答に対するその影響度合いについて、得られた記録の範囲内でも分析例を提示していくことは、より厳しい設計条件となり得る巨大地震に対する被害想定や耐震設計を検討する上で有益な情報になると考えられる。構造計算において、地盤 - 構造物の動的相互作用を無視する場合、その影響が大きい建築物では、一般に構造性能に余裕度が含まれるようになる。そのため、観測記録の分析結果を参照し、このような動的相互作用の影響が大きいと示唆、分類される建築物では、これを考慮することで、より適切な被害想定と合理的な耐震設計を行うことが可能となる。このように、被害想定をより適切なものとするため、また、設計を合理的なものとしていくため、地盤 - 構造物の動的相互を考慮する方向性が考えられ、本研究は、その際の考慮の仕方の判断に資する情報を提供する。

1.4 本書の構成

本書の構成は、以下の通りである。

第1章 はじめに

本章であり、研究の背景、研究体制、及び、研究の目的と意義を示す。

第2章 建築物地震観測と観測記録の整理結果

本研究で検討対象とした観測建築物一覧(共同研究期間内に拡充した観測点を含む)と地震観測記録の整理項目を示す。

本研究では、建築物内と建築物周辺地盤で同時に地震観測が実施されているものを対象としている。整理項目は、1) 建築物・地盤・観測条件に関するもの、2) 観測地震に関するもの、3) 加速度、速度の最大値及び計測震度に関するもの、4) 固有周期に関するもの、及び、5) 建築物の振動特性に関するもの(フーリエスペクトル比等)に大別される。また、2011年東北地方太平洋沖地震での記録が観測されている場合には、これも整理項目に加え記録を整理することになっている。

さらに、本章では地震観測記録の整理結果を示し、建築物区分に応じた地盤 - 構造物の動的相互作用効果の影響の有無、様相を把握する。具体的には、周辺地盤地表(GL)から建築物最下階(BASE)または建築物最上階(TOP)、あるいは建築物最下階から最上階への伝達特性に対応する各種フーリエスペクトル比(BASE/GL, TOP/GL, TOP/BASE)等に着目し、そこに現れる地盤 - 構造物の動的相互作用の影響を検討する。これら地盤 - 構造物の動的相互作用の出現の様相には、建築物階数、基礎形式等の条件に応じた特徴が見られる。

第3章 地盤-構造物の動的相互作用の分析

地盤 - 構造物の動的相互作用が、特に中低層建築物の地震入力、応答にどのように影響するか、地震観測記録に基づき分析する。第2章に示される通り、地震観測記録に現れる動的相互作用の様相には、建築物階数、基礎形式等の条件に応じた特徴が見出されるので、本章では、これらの

特徴に応じて、いくつかの観測建築物を選択して検討対象としている。建築物の地震入力・応答の分析については、同定に基づく方法とシミュレーションに基づく方法を用いる。同定に基づく方法は、より直接的に地震観測記録を用いるもので、本研究において新たに検討されたものである。

第4章 基礎入力動の簡易評価

基礎入力動に関する既往の簡易評価法と地震観測記録とを対比し、既往の簡易評価法の妥当性を検証するとともに、入力損失に対する基礎形式の違い等の影響を検討する。簡易評価法としては、基礎構造の根入れ深さに基づく方法と、基礎構造の根入れ深さと表層地盤の1・2次卓越振動数での変位分布に基づく方法の2つを取り上げている。また、入力損失に対する杭の効果を考慮するため、これを等価な根入れ深さとして評価する方法を試行的に検討している。

第5章 まとめ

本研究による結論をまとめる。本研究で対象とした地震観測建築物は、各実施機関において今後とも継続して実施される予定である。本研究成果の想定される活用方法を示すとともに、これらの活用効果を今後の地震観測で発展させていくために必要な今後の課題、及び、より広く地盤-構造物の動的相互作用一般を問題とした場合の課題を述べる。また、地震観測体制を継続的に実施していくための方策や課題についても考察する。

付録 I

(独)建築研究所による地震観測点一覧(地盤に地震計を設置していないものを含む)、及び、本研究で地震観測に用いた地震観測機器の仕様等を示す。

付録 II

第2章第3節で取り上げた建築物12棟について、これらの地震観測記録を第2章第2節で定めた整理項目に従い整理した結果を示す。

別添

観測建築物7棟の地震応答解析結果を示す。地震応答解析の目的は以下である。

- 1) 地震観測記録の整理結果の評価、解釈のための参考資料として用いる。
- 2) 地盤-構造物相互作用系の地震応答解析結果と観測結果とを比較して、モデル化及び解析手法の妥当性や解析と実現象との整合性を検証する。

本書では地震観測記録の分析を主題としており、地震応答解析におけるモデル化等の妥当性検証まで本文での目的に含めていないが、地震応答解析の結果は、地震観測記録の分析のための参考資料として有益と考え、これらを別添として示している。なお、ここでの地震応答解析には、(株)小堀鐸二研究所に協力頂いた。

本書では建築物名称をアルファベット3文字又は4文字で記号化している。建築物と記号との

対応については、第2章表2.1-1の地震観測建築物一覧(免震以外:49棟)、及び、表2.1-2の地震観測建築物一覧(免震:9棟)を参照されたい。

また、本研究の実施において得られた成果については、随時、論文等に発表している。これら既発表論文等は以下の通りである。

【本研究に関する既発表論文等】

第2章に関するもの

- 1) 小豆畑達哉、西山功、井上波彦、石原直、向井昭義、飯場正紀、鹿嶋俊英：建築物の地震観測に基づく設計用地震力の検討について、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、p.21-22、2010.9.
- 2) 井上波彦、小豆畑達哉、飯場正紀、渡辺一弘、田沼毅彦、保井美敏：2011年東北地方太平洋沖地震において液状化した区域における板状建築物の地震観測結果 その1) 建築物と地震観測の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、p.321-322、2011.8.
- 3) 小豆畑達哉、井上波彦、飯場正紀、渡辺一弘、田沼毅彦、保井美敏：2011年東北地方太平洋沖地震において液状化した区域における板状建築物の地震観測結果 その2 地震観測結果の報告、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、p.323-324、2011.8.
- 4) 保井美敏、飯場正紀、田沼毅彦、渡辺一弘、鈴木史朗、小豆畑達哉、井上波彦、山本健史：軟弱地盤に建つ超高層RC造集合住宅の地震観測 その3 地盤特性と基礎入力動、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、p.641-642、2012.9.
- 5) 保井美敏、山本健史、小豆畑達哉、飯場正紀、井上波彦、田沼毅彦、渡辺一弘：2011年東北地方太平洋沖地震において液状化した区域における板状建築物の地震観測結果(その3:地盤と建物の応答性状の変化)、日本地震工学会大会・2012梗概集、pp.140-141、2012.11.
- 6) 小豆畑達哉、井上波彦、鹿嶋俊英、飯場正紀、小山信、岡野創：地震観測に基づく杭基礎建物の地震入力・応答評価 その1 研究目的と地震観測概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.1-2、2013.8-9.
- 7) 鹿嶋俊英、小山信、飯場正紀、小豆畑達哉、岡野創：地震観測に基づく杭基礎建物の地震入力・応答評価 その2 6階建RC建物の強震観測、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.3-4、2013.8-9.
- 8) 北堀隆司、田沼毅彦、小豆畑達哉、井上波彦、飯場正紀、井川望、保井美敏、山本健史、池田隆明、久保田雅春、高瀬裕也、金子知宣、渡辺一弘：地震観測に基づく鉄筋コンクリート造集合住宅の地震入力と応答評価 その1 観測対象建物及び応答特性の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.13-14、2013.8-9.
- 9) 保井美敏、山本健史、小豆畑達哉、飯場正紀、井上波彦、田沼毅彦、北堀隆司、渡辺一弘：地震観測に基づく鉄筋コンクリート造集合住宅の地震入力と応答評価 その3 液状化地盤に立地した建築物の周期特性の時間変動、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.17-18、2013.8-9.
- 10) 井上波彦、小豆畑達哉、新井洋、飯場正紀、鹿嶋俊英、小山信、中川博人、田沼毅彦：地震観測記録に基づく建物の地震入力と地震応答の検討 その1 観測対象建物と観測記録の概要

日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.941-942、2014.9.

第3章に関するもの

- 11) 岡野創、小豆畑達哉、飯場正紀、鹿嶋俊英：地震観測に基づく杭基礎建物の地震入力・応答評価 その3 観測記録から推定される入力と慣性力相互作用による応答低減効果、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊、pp.5-6、2013.8-9.
- 12) 古山田耕司、小豆畑達哉、井上波彦、飯場正紀、鹿嶋俊英、酒向裕司：非線形現象が生じた地震観測建物の動的相互作用解析 その1 液状化地盤に建つ杭支持建物の事例、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.29-30、2013.8-9.
- 13) 安達直人、小豆畑達哉、飯場正紀、鹿嶋俊英、上田遼、岡野創：非線形現象が生じた地震観測建物の動的相互作用解析 その2 建物にひび割れが生じた杭支持建物の事例、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.31-32、2013.8-9.
- 14) 秀川貴彦、小豆畑達哉、飯場正紀、鹿嶋俊英、安達直人、岡野創：非線形現象が生じた地震観測建物の動的相互作用解析と入力損失評価 その3 直接基礎建物の事例、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.33-34、2013.8-9.
- 15) 岡野創、小豆畑達哉、井上波彦、飯場正紀、鹿嶋俊英、酒向裕司：観測記録から推定される地盤-構造物の動的相互作用による建物応答低減効果、日本建築学会構造系論文集、第79巻、第696号、pp.237-246、2014.2.
- 16) 岡野創、小豆畑達哉、井上波彦、山添正稔：低層杭支持 RC 造建物の地震観測記録から推定される相互作用効果 その2 地盤ばねの周波数依存性を考慮した同定による分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.5-6、2014.9.
- 17) 小豆畑達哉、井上波彦、岡野創、鹿嶋俊英：地震観測記録に基づく建物の地震入力と地震応答の検討 その2 低層建物における相互作用効果の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.943-944、2014.9.

第4章に関するもの

- 18) 井川望、小豆畑達哉、飯場正紀、田沼毅彦、北堀隆司、保井美敏、山本健史：地震観測に基づく鉄筋コンクリート造集合住宅の地震入力と応答評価 その2 入力損失の簡易評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.15-16、2013.8-9.

別添に関するもの

- 19) 井上波彦、飯場正紀、小豆畑達哉、岡野創、酒向裕司、古山田耕司：地震観測記録に基づく超高層建築物の入力評価 その1 研究内容および建築物の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、p.633-634、2012.9.
- 20) 酒向裕司、小豆畑達哉、新井洋、井上波彦、岡野創、上田遼：地震観測記録に基づく超高層建築物の入力評価 その3 連壁基礎と杭基礎建築物のシミュレーションと入力評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、p.637-638、2012.9.
- 21) 小豆畑達哉、飯場正紀、井上波彦、岡野創、酒向裕司、上田遼：地震観測記録に基づく超高

- 層建築物の入力評価 その 4 基礎構造形式が入力損失と建築物応答に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、p.639-640。2012.9.
- 22) 古山田耕司、小豆畑達哉、井上波彦、飯場正紀、鹿嶋俊英、酒向裕司：非線形現象が生じた地震観測建物の動的相互作用解析 その 1 液状化地盤に建つ杭支持建物の事例、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.29-30、2013.8-9.[再掲、12)に同じ]
- 23) 安達直人、小豆畑達哉、飯場正紀、鹿嶋俊英、上田遼、岡野創：非線形現象が生じた地震観測建物の動的相互作用解析 その 2 建物にひび割れが生じた杭支持建物の事例、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.31-32、2013.8-9.[再掲、13)に同じ]
- 24) 秀川貴彦、小豆畑達哉、飯場正紀、鹿嶋俊英、安達直人、岡野創：非線形現象が生じた地震観測建物の動的相互作用解析と入力損失評価 その 3 直接基礎建物の事例、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.33-34、2013.8-9[再掲、14)に同じ]
- 25) 山添正稔、小豆畑達哉、井上波彦、岡野創：低層杭支持 RC 造建物の地震観測記録から推定される相互作用効果 その 1 建物のシミュレーション解析と基礎入力動の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.3-4、2014.9.

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築構造力学の最近の発展 - 応力解析の考え方 - 、1987
- 2) 国土交通省建築研究所：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景、ぎょうせい、2001