

第1章 はじめに

1.1 研究の背景・目的

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整備していく必要に迫られているところと言える。

近年の地震動情報の高度化の結果、任意地点での地震動の特性がより詳細に明らかにされつつあるが、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、建築基準法のレベルに収まるか否か、疑問を持たざるを得ないものも見られるようになってきている。

一方、建築物に作用する地震力は、地表面上の地震動がそのまま建築物に入力すると見なした場合より、地盤 - 構造物の動的相互作用効果によって、かなり低減される場合のあることが知られている。

また、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、深刻な問題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。

以上の状況を鑑みると、建築物の地震入力及び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効果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効果についての理論的、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効果の実態を把握し、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、この種の地震記録は圧倒的に不足している。

そのため、本研究では、建築物での地盤 - 構造物の動的相互作用効果を把握、分析するための地盤 - 建築物の同時地震観測の拡充と、記録の収集、整理、分析に取り組むこととした。ここでの分析結果は建築物の地震入力と応答を評価するための耐震性能評価技術に反映されるものである。ただし、地震観測記録を多種多様な地盤条件と建築物の構造形式において、より幅広い地震入力のレベルで収集するには、限られた研究期間のみではなく継続的な建築物の地震観測が必要である。本研究により構築された地震観測体制と観測記録の分析手法が研究終了後も活用され、新しい情報と知見が得られ次第、耐震性能評価技術は、随時、検証又は改良されていくべきものと考えている

1.2 研究体制

以上に示す背景・目的の認識の下、国土交通省国土技術政策総合研究所では、平成 22 年度より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」（以下「総プロ」と呼ぶ）を実施することとした。また、これと同時に、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」を設置した。

「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

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

以上に示すように、本研究は、建築物の地震観測を研究の主体とするため、国土技術政策総合研究所では、プロジェクトの計画段階から、(独) 建築研究所及び(独) 都市再生機構に地震観測に係る共同研究実施を依頼した。本研究の成果はこれら 2 機関の建築物地震観測による記録に負う部分が極めて大きい。

なお、(独) 都市再生機構の建築物地震観測記録の整理分析は下記の共同研究委員会で行われたものである。

「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

1.3 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、目的、及び、研究体制を示す。

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と地震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、及び、4) 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を整理している。

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程度、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効果の影響を検討する。これら地盤 - 構造物の動的相互作用効果の出現の様相には、建築物階数、基礎形式等の条件に応じていくつかの特徴的なパターンが見出される。

第3章 地震観測記録に基づく超高層建築物の地震入力・応答評価

比較的軟弱な地盤に立地する超高層建築物を対象に、基礎構造形式に応じた地震入力の違いを地震観測記録に基づき分析する。特に、根入れが深い場合には回転入力の発生が予想されるが、通常の設計では無視されるその影響が超高層建築物にどの程度の影響を与えるのか等を検討する。

また、2011年の東北地方太平洋沖地震では、超高層建築物について広範な地域で地震記録が得られているので、地域による観測記録の比較を行い、長周期地震動の発現の様相等を検討する。

第4章 地震観測記録に基づく中低層建築物の地震入力・応答評価

地盤—構造物の動的相互作用効果が、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、地震記録に現れる動的相互作用効果の様相には、建築物階数、基礎形式等の条件に応じた特徴的なパターンが見出されるので、本章では、これらの条件下にあるものを代表する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、本研究において検討されたものである。また、建築物の地震入力については入力損失効果を考慮に入れた基礎入力動に関する既往の簡易予測法と地震記録とを対比することで、地震入力に対する基礎形式の違い等の影響を検討する。

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効果一般を問題とした場合の課題を述べる。

付録

付録Ⅰでは、国土技術政策総合研究所による地震観測に用いた地震観測機器の仕様等を示す。

付録Ⅱでは、第2章第2節及び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本研究で定めた整理項目に従い整理した結果を示す。

付録Ⅲでは、第4章第4節で取り上げた基礎入力動の簡易評価法を建築物15棟に適用した結果を、これらの地盤、基礎構造等の概要とともに示す。

別添

観測建築物9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) 地震観測記録の評価、解釈のための判断材料として用いる。

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。

なお、本報告では建築物名称をアルファベット 3 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、2010 年、B-2 分冊、p.21
- 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、2011 年、B-2 分冊、p.321
- 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、2011 年、B-2 分冊、p.323
- 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、2012 年、B-2 分冊、p.641
- 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、2013 年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2 分冊、pp.1-2.
- 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、2013 年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2 分冊、pp.3-4.
- 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、2013 年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2 分冊、pp.13-14.
- 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、2013 年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2 分冊、pp.17-18

第3章に関するもの

- 10) 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、2012年、B-2分冊、p.633
- 11) 古山田耕司、小豆畑達哉、井上波彦、新井洋、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2 直接基礎建築物のシミュレーションと入力評価、2012年、B-2分冊、p.635
- 12) 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、2012年、B-2分冊、p.637
- 13) 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、2012年、B-2分冊、p.639
- 14) 猿田正明、山本祥江、森川和彦、中西啓二、飯場正紀、小豆畑達哉、井上波彦：東北地方太平洋沖地震における超高層免震建物の挙動、日本建築学会技術報告集第19巻、第42号、pp.477-480、2013年6月

第4章に関するもの

- 15) 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、2013年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2分冊、pp.5-6.
- 16) 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、2013年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2分冊、pp.15-16
- 17) 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、2013年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2分冊、pp.29-30
- 18) 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、2013年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2分冊、pp.31-32
- 19) 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、2013年、日本建築学会学術講演梗概集 B-2分冊、pp.33-34
- 20) 岡野創、小豆畑達哉、井上波彦、飯場正紀、鹿嶋俊英、酒向裕司：観測記録から推測される地盤-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.