

建築研究資料

Building Research Data

No. 170

April 2016

免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物 の地震応答性状への影響に関する研究

Research on Characteristics of Isolators and Dampers under Multi-cyclic
Earthquake Motions and Effects on Response of Seismically Isolated Buildings

飯場正紀、長島一郎、日比野浩、竹中康雄、近藤明洋、中西啓二
猿田正明、山本雅史、嶺脇重雄、小豆畑達哉、井上波彦

Masanori Iiba, Ichiro Nagashima, Hiroshi Hibino, Yasuo Takenaka, Akihiro Kondo,
Keiji Nakanishi, Masaaki Saruta, Masashi Yamamoto, Shigeo Minewaki,
Tatsuya Azuhata and Namihiko Inoue

国立研究開発法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

National Research and Development Agency, Japan

はしがき

平成 15 年に発生した十勝沖地震では、震央から 250km 離れた苫小牧市内で、長周期地震動によって石油タンクが被災し、社会的に大きな関心を集める結果となった。また、平成 23 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震により、都心の高層建築物が長時間揺れ続けたことは記憶に新しい。最近の地震動予測研究の進捗により、南海トラフを震源域とする巨大地震により、東京、名古屋、大阪などの大都市圏のある大規模堆積平野で長周期地震動が強く励起され、免震あるいは超高層建築物などの長周期構造物に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されている。

建築研究所ではこのような課題に対応するために、平成 21 年度から個別重点研究課題「長周期地震動に対する超高層建物および免震建物の耐震性能評価技術の開発（平成 21～22 年度）」および「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 23～24 年度）」を行い、設計用長周期地震動の作成手法や、RC 造、鉄骨造等の超高層建築物および免震建築物の応答評価技術等の検討を行ってきた。

これらの個別重点研究課題における、免震建築物の長周期地震動に対する応答性状の評価等については、国土交通省建築基準整備促進事業の調査事項「12 免震建築物の基準の整備に資する検討（平成 21 年度）」（事業主体：清水建設、小堀鐸二研究所、日本免震構造協会）および「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討（平成 22～24 年度）」（事業主体：大成建設、鹿島建設、清水建設、竹中工務店）との共同研究として進めた。建築研究所は、本共同研究における調査研究の計画策定、研究成果の取りまとめに関して主たる役割を果たした他、実験や解析等に関しても事業主体とともに研究を行い、長周期地震動に対する免震材料の多数回繰り返し特性の評価および免震建築物の地震時挙動の解明に向けた検討を行った。

本資料は、上記の建築基準整備促進事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」および「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」において、平成 21 年度～24 年度の 4 カ年で実施した調査の報告書を再構成し、4 年間の調査内容全体をわかりやすくなるように取りまとめたものである。建築基準整備促進事業を実施いただいた事業主体の方々に対して、4 年間の調査検討に対する多大なる貢献と本資料の出版へのご了解とご協力いただいたことに、厚く御礼申し上げます。

本資料が、長周期地震動に対する免震建築物の構造設計者、免震材料の製造会社の技術者および耐震安全性の評価を行う性能評価機関等において、免震建築物の地震応答評価のための基礎資料として有効に活用され、これまで以上に信頼性と構造安全性の高い免震建築物の建設に役立てられることを期待する。

平成 28 年 4 月
国立研究開発法人 建築研究所
理事長 坂本雄三

免震部材の多数回繰り返し特性と

免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究

飯場正紀¹⁾、長島一郎²⁾、日比野浩²⁾、竹中康雄³⁾、近藤明洋³⁾、中西啓二⁴⁾、
猿田正明⁴⁾、山本雅史⁵⁾、嶺脇重雄⁵⁾、小豆畑達哉⁶⁾、井上波彦⁷⁾

概 要

免震建築物が長周期地震動を受けた場合に、免震部材の繰り返し特性に関する知見が、必ずしも十分蓄積されているとは言えないのが現状である。

このような背景の下、長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証法確立に向けた基礎的知見を蓄積することを目的として、既往文献による免震部材の繰り返し特性の調査、免震部材の多数回繰り返し動的実験と免震建築物モデルの地震応答解析を行った。ここでは、以下の項目に着目し、検討を行った。

- 1) 免震部材の実状調査によるエネルギー吸収性能等の整理
- 2) 免震部材の縮小試験体を用いた多数回繰り返し動的実験による、繰り返し特性の整理とモデル化
- 3) 大型震動台を用いた免震部材の実大試験体の多数回繰り返し動的実験による、1方向加振・2方向加振特性および限界変形特性などの整理
- 4) 免震部材の多数回繰り返し依存性を考慮した、質点モデルの地震応答解析の実施と免震層の応答変形・応答せん断力および免震部材の吸収エネルギー・累積変形などの評価
- 5) 東京および大阪に建設されている免震建築物の各1棟の地震観測記録とシミュレーション解析結果の整理

1)北海道大学(元建築研究所) 2)大成建設 3)鹿島建設 4)清水建設 5)竹中工務店 6)建築研究所 7)国土交通省国土技術政策総合研究所

Research on Characteristics of Isolators and Dampers under Multi-cyclic Earthquake Motions and Effects on Response of Seismically Isolated Buildings

Masanori Iiba¹⁾, Ichiro Nagashima²⁾, Hiroshi Hibino²⁾, Yasuo Takenaka³⁾, Akihiro Kondo³⁾, Keiji Nakanishi⁴⁾, Masaaki Saruta⁴⁾, Masashi Yamamoto⁵⁾, Shigeo Minewaki⁵⁾, Tatsuya Azuhata⁶⁾ and Namihiko Inoue⁷⁾

Abstract

A huge earthquake along the Nankai trough will highly probably occur in near future. At that time, there are earthquakes with long period and long duration in large-scale plains on the large sedimentation basin. Under the earthquake motions, seismically isolated buildings have a large displacement and a lot of repetitions at isolated layers.

Characteristics of isolators and dampers for seismically isolated buildings under large deformations and multi-cycle earthquake motions are not clear and experimental data are not accumulated.

Surveys for repeated characteristics of isolators etc. based on past research results, experimental researches of isolation devices under multi-cycle earthquake motions and earthquake simulations of isolated models are conducted, in order to accumulate the experimental data and clarify the safety evaluation of the seismically isolated buildings.

Following points are focused.

- 1) Performance of isolation devices for energy absorbing characteristics
- 2) Characteristics of isolation devices under multi-cycle repetitions based on dynamic experiments of scaled models and modelling of these characteristics
- 3) One dimensional and two dimensional characteristics of isolation devices under multi-cycle repetitions based on dynamic experiments of full-scale models through the large-scale facility
- 4) Response evaluation of displacement and shear force at isolated layers and energy absorbing amounts of the isolators and dampers, based on the earthquake response analysis of isolated models considering the effects of multi-cycle repetitions
- 5) Achievement for earthquake observation system of two seismically isolated buildings in Tokyo and Osaka, summary of the observed data and execution of earthquake response analysis

1) Hokkaido University (Formerly, Building Research Institute) 2) Taisei Corporation 3) Kajima Corporation 4) Shimizu Corporation 5) Takenaka Corporation 6) Building Research Institute 7) National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT

目次

はしがき	
概要	i
ABSTRACT	ii
第 I 部 はじめに	
1 背景・調査項目と調査目的	I-1
2 調査項目の内容	I-1
3 調査体制	I-2
4 本資料の概要	I-9
第 II 部 免震部材のエネルギー吸収性能に関する既往の知見	
第 1 章 長周期地震動に対する免震部材の特性評価に関する検討	II-1. 1-1
1.1 長周期地震動の免震性能評価に関する実状調査	II-1. 1-1
1.1.1 長周期地震動に対する免震建築物の検討課題	II-1. 1-1
1.1.2 免震建築物に関する既往の研究	II-1. 1-2
1.1.3 免震部材に関する既往の研究	II-1. 1-3
1.1.4 地震応答解析に関する既往の研究	II-1. 1-3
1.1.5 応答評価に関する既往の研究	II-1. 1-4
1.2 免震部材のエネルギー吸収性能評価	II-1. 2-1
1.2.1 積層ゴム支承	II-1. 2-1
1.2.2 弾性すべり支承	II-1. 2-4
1.2.3 鋼材ダンパー	II-1. 2-8
1.2.4 鉛ダンパー	II-1. 2-13
1.2.5 オイルダンパー	II-1. 2-16
1.2.6 エネルギー吸収性能の比較	II-1. 2-18
1.3 外力特性に関する情報収集・検討	II-1. 3-1
1.3.1 検討用入力地震動	II-1. 3-1
1.3.2 検討用建物	II-1. 3-6
1.3.3 応答解析結果	II-1. 3-8
1.3.4 免震部材のエネルギー吸収に対する検討	II-1. 3-12
1.4 免震部材のエネルギー吸収性能評価・試験方法の考え方	II-1. 4-1
1.4.1 エネルギー吸収性能評価	II-1. 4-1
1.4.2 エネルギー吸収性能評価のための試験方法の考え方	II-1. 4-68
1.4.3 既存の実験施設の実態調査	II-1. 4-75
1.5 まとめと課題	II-1. 5-1
1.5.1 まとめ	II-1. 5-1
1.5.2 課題	II-1. 5-3

第Ⅲ部 免震部材の特性評価と応答評価

第1章 免震部材実験によるエネルギー吸収性能の評価	Ⅲ-1. 1-1
1.1 目的	Ⅲ-1. 1-1
1.2 全体方針	Ⅲ-1. 2-1
1.3 実験内容	Ⅲ-1. 3. 1-1
1.3.1 天然ゴム系積層ゴム	Ⅲ-1. 3. 1-1
1.3.2 鉛プラグ入り積層ゴム	Ⅲ-1. 3. 2-1
1.3.3 高減衰ゴム系積層ゴム	Ⅲ-1. 3. 3-1
1.3.4 弾性すべり支承（高摩擦）	Ⅲ-1. 3. 4-1
1.3.5 弾性すべり支承（低摩擦）	Ⅲ-1. 3. 5-1
1.3.6 鋼材ダンパー	Ⅲ-1. 3. 6-1
1.3.7 鉛ダンパー	Ⅲ-1. 3. 7-1
1.3.8 オイルダンパー	Ⅲ-1. 3. 8-1
1.3.9 粘性ダンパー	Ⅲ-1. 3. 9-1
1.4 まとめ	Ⅲ-1. 4-1
第2章 免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価(1)	Ⅲ-2. 1-1
2.1 目的	Ⅲ-2. 1-1
2.2 全体方針	Ⅲ-2. 2-1
2.3 免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その1）	Ⅲ-2. 3. 1-1
2.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム	Ⅲ-2. 3. 1-1
2.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム	Ⅲ-2. 3. 2-1
2.3.3 天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー	Ⅲ-2. 3. 3-1
2.3.4 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー	Ⅲ-2. 3. 4-1
2.3.5 天然ゴム系積層ゴム+オイルダンパー	Ⅲ-2. 3. 5-1
2.3.6 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）	Ⅲ-2. 3. 6-1
2.3.7 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー	Ⅲ-2. 3. 7-1
2.4 まとめ	Ⅲ-2. 4-1
第3章 免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価(2)	Ⅲ-3. 1-1
3.1 目的	Ⅲ-3. 1-1
3.2 全体方針	Ⅲ-3. 2-1
3.3 免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その2）	Ⅲ-3. 3. 1-1
3.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム	Ⅲ-3. 3. 1-1
3.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム	Ⅲ-3. 3. 2-1
3.3.3 天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー	Ⅲ-3. 3. 3-1
3.3.4 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー	Ⅲ-3. 3. 4-1
3.3.5 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）	Ⅲ-3. 3. 5-1
3.3.6 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー	Ⅲ-3. 3. 6-1
3.4 まとめ	Ⅲ-3. 4-1

第IV部 長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価(1)

第1章 震動台を用いた実大免震部材の構造実験(その1)	IV-1. 1-1
1.1 目的	IV-1. 1-1
1.2 実験手法の提案	IV-1. 2-1
1.2.1 実験条件の設定	IV-1. 2-1
1.2.2 実験手法の選定	IV-1. 2-3
第2章 多数回繰り返し荷重を受ける実大免震部材の構造実験(その1)	IV-2. 1-1
2.1 実験計画	IV-2. 1-1
2.1.1 試験体	IV-2. 1-1
2.1.2 加力治具と試験体設置	IV-2. 1-2
2.1.3 加力計画	IV-2. 1-4
2.1.4 安全上の留意点整理	IV-2. 1-7
2.1.5 計測計画	IV-2. 1-9
2.1.6 防護計画	IV-2. 1-9
2.1.7 実験方法	IV-2. 1-10
2.1.8 実験スケジュール	IV-2. 1-13
2.2 実験手法の検証	IV-2. 2-1
2.2.1 免震部材への鉛直軸力導入	IV-2. 2-1
2.2.2 加力波形と加力精度	IV-2. 2-4
2.2.3 加力治具の性能	IV-2. 2-7
2.3 実験結果	IV-2. 3. 1-1
2.3.1 弾性すべり支承(高摩擦)	IV-2. 3. 1-1
2.3.2 オイルダンパー	IV-2. 3. 2-1
2.3.3 天然ゴム系積層ゴム(静加力試験)	IV-2. 3. 3-1
2.4 まとめと課題	IV-2. 4-1
2.4.1 まとめ	IV-2. 4-1
2.4.2 課題	IV-2. 4-3
2.5 参考資料	IV-2. 5. 1-1
2.5.1 E-ディフェンス震動台実験データに基づく変位制御の精度検討	IV-2. 5. 1-1
2.5.2 震動台の加振継続時間について	IV-2. 5. 2-1
2.5.3 実大試験体・実験治具図面・実験治具計算書	IV-2. 5. 3-1
2.5.4 水平・鉛直2軸載荷時の分力計荷重分布に関するFEM解析結果	IV-2. 5. 4-1
2.5.5 試験体図面	IV-2. 5. 5-1
2.5.6 試験架台図および試験体取付図	IV-2. 5. 6-1
2.5.7 計測計画詳細	IV-2. 5. 7-1
2.5.8 座標変換の基礎式	IV-2. 5. 8-1
2.5.9 加振波の例	IV-2. 5. 9-1
2.5.10 フレーム応力度	IV-2. 5. 10-1

第V部 長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価(2)

第1章 震動台を用いた実大免震部材の構造実験(その2)	V-1. 1-1
1.1 目的	V-1. 1-1
1.2 実験条件の設定	V-1. 2-1
第2章 多数回繰り返し荷重を受ける免震部材の構造実験(その2)	V-2. 1-1
2.1 全体実験計画	V-2. 1-1
2.1.1 加力計画、計測計画、加振計画および安全対策	V-2. 1-1
2.1.2 防護計画	V-2. 1-1
2.1.3 実験スケジュール	V-2. 1-1
2.1.4 実験手法の検証	V-2. 1-3
2.2 実大部材実験の実施	V-2. 1-1
2.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム	V-2. 2. 1-1
2.2.2 高減衰ゴム系積層ゴム	V-2. 2. 2-1
2.3 まとめと課題	V-2. 3-1
2.3.1 まとめ	V-2. 3-1
2.3.2 課題	V-2. 3-4

第VI部 繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法の検討

第1章 免震部材特性のモデル化と簡易応答評価手法の検討	VI-1. 1-1
1.1 目的	VI-1. 1-1
1.2 全体方針	VI-1. 2-1
1.3 解析結果	VI-1. 3. 1-1
1.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム	VI-1. 3. 1-1
1.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム	VI-1. 3. 2-1
1.3.3 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー	VI-1. 3. 3-1
1.3.4 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承(高摩擦)	VI-1. 3. 4-1
1.3.5 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承(低摩擦)+粘性ダンパー	VI-1. 3. 5-1
1.4 まとめ	VI-1. 4-1

第VII部 免震建築物の地震観測と公表観測記録の整理・分析

第1章 免震建築物の地震観測	VII-1. 1-1
1.1 目的	VII-1. 1-1
1.2 免震建築物の地震観測体制	VII-1. 2-1
1.3 観測免震建築物の地震観測記録の分析とシミュレーション解析	
1.3.1 観測記録の整理	VII-1. 3. 1-1
1.3.2 観測免震建築物のシミュレーション解析	VII-1. 3. 2-1
1.4 南海トラフの巨大地震における観測免震建築物のシミュレーション解析	VII-1. 4-1
1.5 まとめ	VII-1. 5-1

第2章 公表観測記録の整理・分析	VII-2. 1-1
2.1 観測記録の収集	VII-2. 1-1
2.2 観測記録の整理・分析	VII-2. 2-1
2.3 まとめ	VII-2. 3-1
第3章 東日本大震災の本震・余震観測記録に基づく免震建築物の地震時挙動の分析.	VII-3. 1-1
3.1 検討方針	VII-3. 1-1
3.2 本震・余震による免震層の累積変位等の整理	VII-3. 2-1
3.3 まとめ	VII-3. 3-1
第Ⅷ部 まとめと課題	VIII-1
1 まとめ	VIII-1
2 課題	VIII-5

謝辞

