東北地方太平洋沖地震の公表観測記録等に基づく免震建築物の特性と挙動

PERFORMANCE OF SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS IN THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE BASED ON DATA OF PUBLISHED REFERENCE

米田春美 ——— * 1 高岡栄治 ——— * 2
欄木龍大 ——— * 3 飯場正紀 ——— * 4

Harumi YONEDA ——— * 1 Eiji TAKAOKA ——— * 2
Ryota MASEKI ——— * 3 Masanori IIBA ——— * 4

キーワード：
東北地方太平洋沖地震, 免震, 観測記録

Keywords:
The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Seismically isolated structures, Observed record

Based on published reports, data of 65 of seismically isolated buildings about design information and earthquake observation results were collected in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Performance of seismically isolated buildings was investigated. Earthquake motions, responses of accelerations were in the range of $6\sim756\text{cm/s}^2$. The acceleration responses of superstructures were at most 250cm/s^2 . The maximum displacement responses of isolator were about 24cm. Cumulative displacements were 100 times as large as maximum displacements.

1. はじめに

免震建築物は1980年代に実用化されて以来、免震層の特性を把握し、性能を検証するため、数多くの建物で地震観測が行われている。これら観測記録に基づき、これまでに、大地震時における応答低減効果が確認されている^{例え 1)}。また、中小地震時には、免震層の特性が設計時とは異なる場合²⁾や、入力に対する上部構造の応答倍率が大きくなる場合があること³⁾などが報告されている。このように個々の免震建築物については観測データが蓄積されてきているが、同一の地震における複数個所の観測記録を比較した研究はあまり見られない。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では東日本の広範囲で震度5弱以上を観測し、免震建築物の地震観測記録がさまざまな文献等で公表されている。本報告では、これらの文献等から地震観測結果を収集し、網羅的にまとめることにより、本震時における免震建築物の挙動の傾向を分析した。

2. データの内容

東北地方太平洋沖地震の本震時における免震建築物の地震観測結果を、表1に示す出典^{4)~36)}から収集した。収集対象は加速度記録が公開されている物とした。対象となる建物の総数は65棟であった。調査対象の建物の建設地(都道府県)の内訳を図1に示す。東京都が23件と最も多く、宮城県と神奈川県が8件が続く。図1中の「その他」は北海道、新潟県、山梨県、静岡県、兵庫県である。地方別では、関東地方が42件、東北地方が12件である。竣工年を文献³⁷⁾に従って第1期から第4期までの4つの年代に分類し、図2に示す。免震改修の場合は改修年とした。日本における免震建築物全体における割合と同様に本調査でも第4期が最も多い。一方、第1期の割

表1 出典と棟数

出典	棟数
建築研究所強震観測 ⁴⁾	6 (6)
国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所調査報告書 ^{5), 6)}	9 (7)
2011、2012年度日本建築学会大会梗概集 ^{7), 8)}	28 (24)
Web ページ ^{9)~17)}	23 (22)
日本免震構造協会応答制御建築物調査委員会 ¹⁸⁾	21 (16)
その他(協会誌、各社技術研究所報等) ^{19)~36)}	58 (43)
合計	65

() 内は他の出典と重複する数。複数の出典で重複している。

合は免震建築物全体では1%程度である³⁸⁾が、本調査では8%と比較的多い。建物用途の内訳を図3に示す。免震建築物全体では共同住宅が約半数を占める³⁹⁾が、本調査では庁舎を含む事務所が最も多く、研究所や文教施設も比較的多い。支承材の内訳を図4に示す。天然ゴム系積層ゴム単独(ダンパーを併用)が最も多く、天然ゴム系積層ゴムとすべり支承との併用が続く。また、セミアクティブ免震は2件含まれる。

軒高と設計周期との関係を図5に示す。出典に軒高および設計周期の記載がない場合、別の文献^{40)~44)}および一般財団法人日本建築センター機関誌「ビルディングレター」⁴⁵⁾に記載の値を採用した。設計周期が複数レベルある場合、レベル毎に示した。設計周期は軒高が高くなる程長くなる傾向がみられるが、高さ40m以上ではその傾向が小さくなる。竣工年と設計周期との関係を図6に示す。竣工年が新しいほど、設計周期が長くなる。理由としては、積層ゴムの高面圧化や上部構造の高層化等が考えられる。1990年前半の免震建築物には、レベル2で設計周期が2秒以下の建築物も含まれる。

^{*1} 欄木中工務店技術研究所 研究員・博士(工学)
(〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

^{*2} 鹿島建設(株)建築管理本部 課長・博士(工学)

^{*3} 大成建設(株)技術センター 主任研究員・工修

^{*4} (株)建築研究所構造研究グループ 主席研究員・博士(工学)

^{*1} Researcher, Research and Development Institute Takenaka Corporation, Dr. Eng.

^{*2} Manager, Building Construction Management Division, Kajima Corporation, Dr. Eng.

^{*3} Senior Research Engineer, Technology Center, Taisei Corporation, M. Eng.

^{*4} Senior Research Fellow, Dept. of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

3. データの分析

3.1 入力加速度

各建設地の入力加速度（免震層より下の加速度）波形をみると、宮城県と岩手県では主要動が2回あるが、関東以西では1回である。青森県と福島県ではその中間的な時刻歴波形であった。一例として各地の時刻歴を文献(24)、(33)、(46)から引用して図7に示す。観測

図1 建設地（都道府県）

図2 竣工年

図3 建物用途の内訳

図4 支承材の内訳

図5 軒高と設計周期

図6 竣工年と設計周期

図7 加速度時刻歴（免震層下）

記録時間は5分程度またはそれ以上継続する記録が多い。

擬似速度応答スペクトルの例を文献(24)、(33)、(46)より引用して図8に示す。仙台市やつくば市では、速度一定域において50cm/s程度、ピークでは80~100cm/s程度である。福島第一原子力発電所ではピークが200cm/sを超えていた。茨城県以外の関東においては30~40cm/s程度である。文献(24)でつくば市と新潟市が比較されており、震央距離はほぼ等しいが、断層最短距離が異なるため、時刻歴波形や応答スペクトルが大きく異なることが示されている。

震央距離と入力加速度の最大値との関係を図9に示す。観測値が2方向で得られている場合、大きい方の値とした。入力加速度は6~756cm/s²と幅広い。震央距離350kmを境界に250cm/s²を超えるデータとそれ以下とに大きく分けることが出来る。東北地方と茨城県のデータは全て震央距離350km未満に含まれている。以降、250cm/s²未満の2点を除いた震央距離350km未満を「(東北・茨城)地域」、350km以上を「(東北・茨城)地域以外」とする。

上下方向の入力加速度は最大で446cm/s²である。(東北・茨城)地域では120cm/s²を超え、(東北・茨城)地域以外では一部を除き、120cm/s²以下であった。

3.2 応答加速度

免震層直上階および観測位置の中での最上階（以降、直上階および最上階）の加速度（以降、応答加速度）の最大値と入力加速度の最大値との関係を図10に示す。観測値が水平2方向で得られている場合、応答加速度は入力加速度が大きい方の方向の値とした。直上階、最上階共、入力より小さくなる建物が多い。最上階でも概ね250cm/s²で頭打ちとなり、入力加速度が大きくなるほど応答低減効果が大きくなる傾向が見られる。入力加速度が100cm/s²程度と比較的小さい場合、最上階が入力より若干増幅する建物も見られた。一方、入力加速度が300cm/s²程度でも増幅している建物がある。これは、設計周期2秒未満の初期の免震建物であるが、最上階では隣接の同規模耐震建物の半分以下に応答が低減されている(10)等。

入力加速度の最大値と直上階の応答倍率（=応答加速度÷入力加速度）の関係を支承材で分類して図11にプロットした。支承材の分類は図4の太枠で示す項目を用い、NRBについては特に流体系ダン

図8 擬似応答速度スペクトル

図9 震央距離と入力加速度 (水平)

図10 入力加速度と応答加速度 (水平)

図11 入力加速度と直上階応答倍率 (水平)

図12 入力加速度と応答倍率 (上下)

図13 変位履歴

図14 入力加速度と免震層変位

(a) (東北・茨城)

(a) (東北・茨城)

図17 最大変位と累積変位

(b) (東北・茨城)以外

(b) (東北・茨城)以外

図16 設計周期と直上階応答倍率

パーを併用した場合を区別した。セミアクティブ免震2件はいずれもNRBと流体系ダンパーの併用であり、さらに区別して示す。これらは入力加速度が比較的小さくても、応答倍率が小さくなっている。

図12に上下方向の入力加速度の最大値と応答倍率の関係を示す。応答倍率は直上階では概ね1前後であるのに対し、最上階では0.74~4.3とばらつき、特に入力加速度が小さいほどばらつきが大きい。上下免震建物が1件含まれており、応答倍率は最も小さくなった。

3.3 免震層変位

変位履歴の例を文献(18),(29),(33)より引用して図13に示す。大半は(c)のようにランダムな軌跡を描くが、(a)や(b)のように1周期大きく動き、真円に近い軌跡や1方向に大きい軌跡を描く物もあった。(a)仙台市では90度の位相差でXY方向に同程度の地震動が、(b)福島第一原子力発電所はEW方向が特に大きい地震動が作用したためと考えられる。変位履歴は、変位計や加速度の積分によって算出されたものが多いが、同時にけがき計が設置されている建物もあり、

けがき計で変位の概要がわかることが確認されている(47)等。

入力加速度と免震層変位の各最大値の関係を図14に示す。免震層変位は入力加速度に従い大きくなる傾向が見られ、最大で24cmであった。NRBと流体系ダンパーの併用では、入力が比較的小さくても変位が10~15cm程度とやや大きくなる傾向が見られた。

3.4 設計周期との関係

設計周期と免震層変位の最大値および直上階の応答倍率の関係を地域別に図15,16に示す。設計周期が複数レベル示されている場合、観測された免震層変位に近い変位で算出された周期を選んだ。設計周期が長い程、免震層変位は大きくなり、直上階の応答倍率は、若干小さくなる傾向が見られた。図16(b)の周期4秒付近で増幅している建物があるが、これは入力加速度が20cm/s²以下と小さかったためと考えられる。

3.5 累積変位

最大変位と累積変位との関係を図17に示す。本調査では最大で

22m であった。累積変位は最大変位の 50～200 倍の範囲に分布しており、平均して 100 倍程度となっている。最大変位と同様に、NRB と流体ダンパーの併用では、入力加速度が比較的小さくても累積変位がやや大きくなる建物もあった。

4. まとめ

東北地方太平洋沖地震における免震建築物の地震観測記録を収集し、65 棟のデータが得られた。入力加速度（免震層下の加速度）は $6 \sim 756 \text{ cm/s}^2$ の範囲であった。一方、上部構造の加速度は 250 cm/s^2 で頭打ちとなり、入力が大きいくほど応答低減効果が大きくなる傾向が見られた。免震層変位は最大で 24cm であった。累積変位は最大変位の約 100 倍となった。免震層変位は入力加速度に従い大きくなるが、特に天然ゴム系積層ゴムと流体ダンパーの併用の場合、入力が 100 cm/s^2 前後と比較的小さくても最大変位や累積変位が大きくなる建物もあった。

謝辞

国、自治体、民間等での公表された地震観測記録を利用させていただきました。一部の観測結果については、直接データを開示していただきました。謹んで謝意を表します。

本報告は、国土交通省平成 23 年度建築基準整備促進事業「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」で実施した内容の一部をまとめたものである。（社）日本免震構造協会内に設置された本委員会（委員長：北村春幸、東京理科大学）傘下の地震観測 WG（主査：飯場正紀、建築研究所）にて内容についてご審議頂きました。地震観測 WG の委員に感謝いたします。

参考文献

- 1) 長田他：免震建物の兵庫県南部地震による効果：郵政省 WEST ビル建築研究所の強震観測、日本建築学会学術講演梗概集、pp.631-632、1995.8
- 2) 栗山他：神奈川大学 23 号館(免震棟)の地震の挙動：その 3. 地震観測記録による動的解析結果、日本建築学会学術講演梗概集、pp.571-572、2002.8
- 3) 米木他：免震装置が異なる建築物の地震観測結果の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.611-612、2001.9
- 4) 建築研究所の強震観測 <http://smo.kenken.go.jp/ja/>、(参照 2012/10/3)
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第 1 次調査、2011.8
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告、2012.3
- 7) 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2011.8
- 8) 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2012.9
- 9) 東京電力ホームページ、<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11092910-j.html>、(参照 2012/10/3)
- 10) 清水建設ホームページ、<http://www.shimz.co.jp/theme/earthquake/effect.html>、(参照 2012/10/3)
- 11) 大成建設ホームページ、http://www.taisai-net.com/solution/taiseis_eye/871vn7000001579e.html、(参照 2012/10/3)
- 12) 竹中工務店ホームページ、<http://www.takenaka.co.jp/news/2011/07/03/index.html>、(参照 2012/10/3)
- 13) 鴻池組ホームページ、<http://www.konoike.co.jp/et/detail/000562.html>、(参照 2012/10/3)
- 14) 芝浦工業大学ホームページ、<http://www.eq.db.shibaura-it.ac.jp/Mensin/index.shtml>、(参照 2012/10/3)
- 15) 神奈川大学ホームページ、http://f303176.yb12.kanagawa-u.ac.jp/TEDCOM/3_eqdata/index.htm、(参照 2012/10/3)
- 16) 東北地方太平洋沖地震による神奈川県内の震度分布・観測記録 <http://www.serc.titech.ac.jp/~kasailab/acceleration.pdf>、(参照 2012/10/3)
- 17) 第 97 回建築物理研究センター講演会「東北地方太平洋沖地震における建物強震記録」、<http://www.serc.titech.ac.jp/~kasailab/20110927/sercseminar20110927.html>、(参照 2012/10/3)
- 18) 日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書、2012.1
- 19) 秦一平：駿河台・船橋キャンパスの地震観測結果（特集号 2011 年東北地方太平洋沖地震被害調査報告）、日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル (125)、pp.67-70、2011.8
- 20) 川島他：東北地方太平洋沖地震における関東地域の免震建物の挙動：三井住友建設技術開発センター報告、第 9 号、2011.9
- 21) 森下他：地震観測結果に基づく免震構造物の動特性について、前田建設技術研究所報 Vol.52、2011.10
- 22) 山本雅史：観測記録に基づく免震建物の評価、竹中技術研究報告、No.67、2011.12
- 23) 井川他：東北地方太平洋沖地震における地震観測建物の観測記録、鴻池組技術研究報告、p.45-48、2011.7
- 24) 上他：免震建物の地震観測－2011 年東北太平洋沖地震における免震建物の地震応答－、奥村組技術研究年報 No.37、pp.57-62、2011.8
- 25) 半澤他：2011 年東北地方太平洋沖地震における東京湾沿岸の免震構造物の挙動、清水建設研究報告、第 88 号、2012.1
- 26) 欄木他：東北地方太平洋沖地震における免震・制振建物の効果観測記録の分析に基づく免震・制振効果の検証、大成建設技術センター報、第 44 号、pp.05-1-8、2011.12
- 27) 鹿島他：2011 東北地方太平洋沖地震における免震建物の挙動、振動技術第 24 号、pp.9-13、2011.10
- 28) 猿田他：2011 東北地方太平洋沖地震における東北大学免震実証試験建物の挙動、振動技術第 24 号、pp.14-16、2011.10
- 29) 山本雅史：東北地方太平洋沖地震における免震建物の観測記録、振動技術第 24 号、pp.17-21、2011.10
- 30) 高橋他：阿佐ヶ谷「知幹館」、MENSIN、No.73、pp.15-18、2011.8
- 31) 古澤他：東北地方太平洋沖地震における免震構造の観測記録と居住者のアンケート調査及び応急点検、MENSIN、No.73、pp.23-28、2011.8
- 32) 仲山他：岩手県立中部病院、MENSIN、No.74、pp.14-17、2011.11
- 33) 土方他：東北地方太平洋沖地震における福島原子力発電所「免震重要棟」の挙動について、MENSIN、No.75、pp.21-26、2012.2
- 34) 小室他：仙台 MT ビル、MENSIN、No.75、pp.35-38、2012.2
- 35) 平成 22 年度 国土交通省建築基準整備促進事業 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 調査報告書、2011.3
- 36) 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、日本建築学会、2011.7
- 37) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007
- 38) 日本免震構造協会運営委員会：2010 年度免震制振建物データ集積結果、MENSIN No.73、pp.29-33、2011.8
- 39) 田中他：国内免震建物データベース構築と現状分析、日本建築学会技術報告集、第 17 巻(第 35 号)、pp.79-84、2011.2
- 40) 広野他：高密度強震観測に基づく免震建物の立体振動特性の分析と分析支援ツールの開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp.965-966、2007.8
- 41) 大森他：免震構法開発に関する研究（その 3 技術研究所研究等の免震構法）、日本建築学会大会梗概集、PP.727-723、1990.10
- 42) 広瀬他：日本大学理工学部駿河台校舎 5 号館の免震改修、MENSIN No.60、pp.7-11、2008.5
- 43) 大竹他：免震建築紹介 芝浦工業大学豊洲キャンパス-軟弱地盤に建つ L 字型免震建築物の構造設計、MENSIN、No.50、pp.4-8、2005.11
- 44) 藤波他：免震建築訪問記 慶應義塾大学（三田）南館、MENSIN、No.54、pp.23-28、2006.11
- 45) 日本建築センター：ビルディングレター、1987～2000
- 46) 平成 23 年度 国土交通省建築基準整備促進事業 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 調査報告書、2012.3
- 47) 山際他：多点同時地震動観測記録に基づく超高層免震建物の地震応答性状の考察、日本建築学会学術講演梗概集 B-2、pp.333-334、2011.8

[2012 年 10 月 16 日原稿受理 2012 年 11 月 30 日採用決定]