

2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録による 免震建物の応答特性

境 茂樹^{*1}・加藤貴司^{*1}・片山喜隆^{*2}

2011年東北地方太平洋沖地震では、複数の免震建物で強震観測記録が得られ、基礎および上部建物の加速度波形の分析結果から免震効果が確認された。一方、日本免震構造協会の建物調査報告によると、いくつかの免震建物で鉛ダンパーや鋼材ダンパーの免震装置に亀裂や残留変位の被害が確認され、地震後の免震装置の残余耐力の評価が課題となった。ダンパー被害を受けた免震建物の中には、罫書き式変位計を有している建物もあったが、強震観測が行われていないため、地震動を受けている際の応答性状は明らかにされていない。そこで、本論文では、代表的な特性の異なる2つの強震観測記録（K-NET水戸、K-NET古川）を用いて、2質点系の解析モデルを用いたパラメトリック・スタディを行い、免震建物の振動特性と入力地震動特性の違いが、免震建物の応答に与える影響について考察を行った。また、免震装置の鉛ダンパーの疲労について、レインフロー法を用いた累積損傷度を評価し、入力地震動特性の累積損傷度に与える影響を示した。

キーワード：免震建物，2質点系解析モデル，パラメトリック・スタディ，レインフロー法，累積損傷度

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、複数の免震建物で強震観測記録が得られ、基礎および上部建物の強震記録の分析結果から免震効果が確認された¹⁾。筆者らも、水戸市に建つ高層免震建物において強震観測記録の分析結果から、良好な免震効果を確認している^{2),3),4)}。一方、日本免震構造協会の建物調査報告¹⁾によれば、いくつかの免震建物で鉛ダンパーや鋼材ダンパーの免震装置で亀裂や残留変位の被害が確認された。これらの被害を受けた免震建物の中には、罫書き式変位計を有している建物もあったが、地震観測が行われていないために、地震動を受けている際の免震建物の応答性状は明確にはされていない。

そこで、本論文では、代表的な特性の異なる2つの強震観測記録（K-NET水戸、K-NET古川）を用いて、2質点系の解析モデルによるパラメトリック・スタディを行い、入

力地震動特性が免震建物の応答に与える影響について考察を行った。また、免震装置の鉛ダンパーの疲労について、レインフロー法を用いた累積損傷度を評価し、入力地震動特性の累積損傷度に与える影響を示した。

なお、本論文は、第13回世界免震制振会議で発表した論文⁴⁾の一部を和文にまとめ直したものである。

2. 解析モデル

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動を受ける免震建物の免震層と上部構造の応答を評価するため、小倉らの研究⁵⁾に習い、図-1に示す2質点系モデルによる解析的な検討を行った。その際、上部構造は弾性と仮定し、免震層は積層ゴムと履歴型ダンパーの復元力特性を合わせたバイリニア型の復元力特性を与えた。減衰定数は、免震層を固定とした時の1次固有振動数に対して、上部構造を

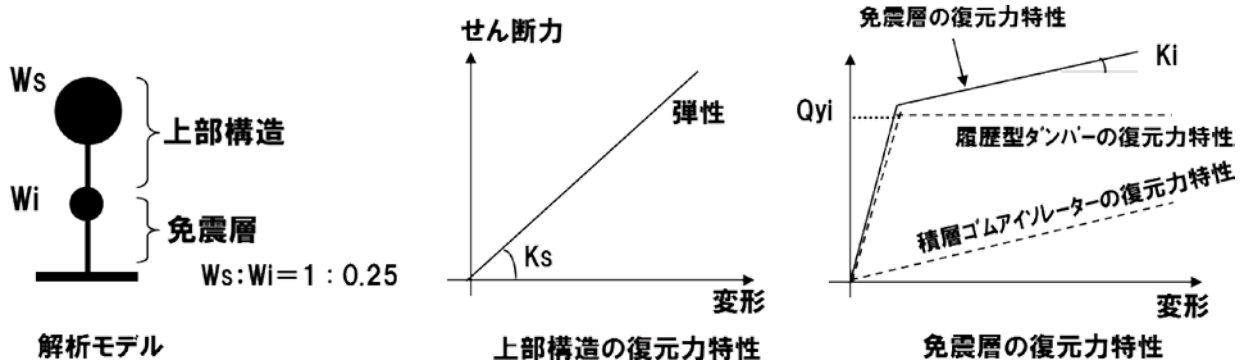


図-1 2質点系の検討モデルとパラメータ

*1 建築研究第一部 *2 技術統括部

2%, 免震層を 0% とし, 剛性比例型とした。

パラメトリック・スタディを行う際の変動パラメータは, 上部構造の固有周期 T_s と免震層の降伏せん断力係数 C_i , 降伏後周期 T_i とした。パラメータ諸元を表-1に示す。

また, 解析に使用した入力地震動は, 防災科学技術研究所の強震観測網で得られた K-NET 水戸 (IBR006 EW) と K-NET 古川 (MYG006 EW) の 2 波を用いた。K-NET 水戸は短周期に優勢な成分を有する地震動記録 (PGA = 787cm/s², PGV=30cm/s), K-NET 古川は周期 3 秒~4 秒の長周期成分が卓越する地震動記録 (PGA = 572cm/s², PGV=89cm/s) である。これらの擬似速度応答スペクトルを図-2に示す。

表-1 解析時のパラメータの諸元

上部構造	固有周期 T_s	0.0~5.0sec, 0.2秒きざみ
免震層	降伏せん断力係数	$C_i = 0.03, 0.05$
	降伏後周期	$T_i = 3.0, 4.0, 5.0 \text{ sec}$

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{W_s}{g \cdot K_s}} \quad C_i = \frac{Q_{yi}}{W_s + W_i}$$

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{W_s + W_i}{g \cdot K_i}} \quad T_{i0} = 0.5 \text{ sec}$$

3. 免震建物の応答結果

2 質点系モデルによる応答結果を図-3に示す。図-3 (a) は上部構造の固有周期 T_s に対する免震層の応答変位を示し, 図-3 (b) は T_s に対する加速度応答の結果を示す。免震層の応答変位は, K-NET 水戸では T_s によらず, また, 免震装置の特性 C_i, T_i にも依存せず 5~10cm の安定した応答変位を示すのに対し, K-NET 古川では, T_s が短いほど応答変位が大きい傾向を示し, また, C_i が小さいほど大きい傾向を示す。特に, T_s が 1.0 秒以下において,

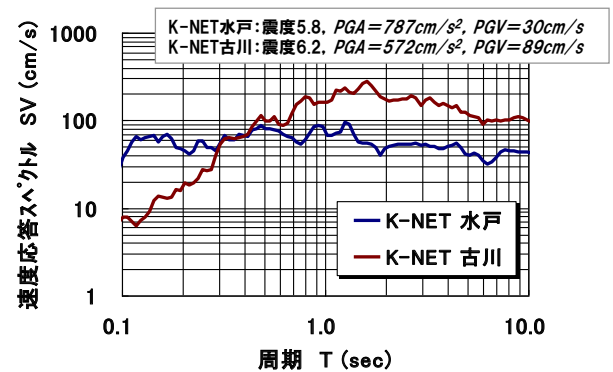
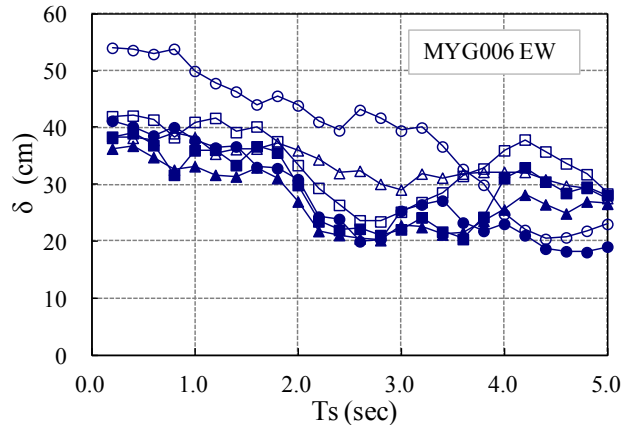
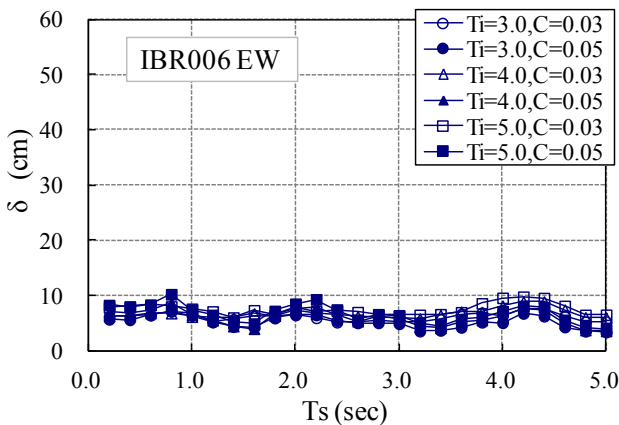
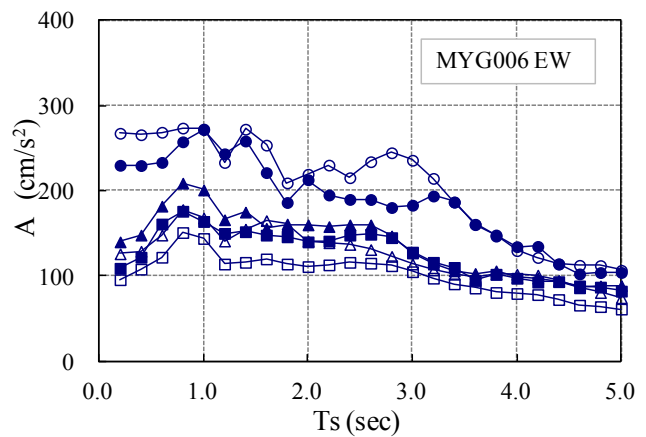
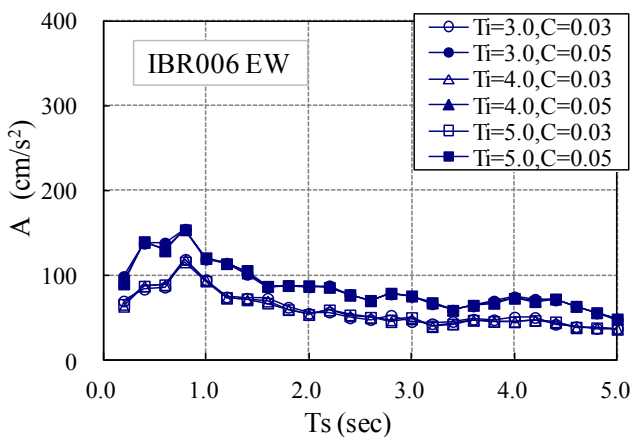


図-2 入力地震動の擬似速度応答スペクトル



(a) 免震層の応答変位 (左: K-NET 水戸, 右: K-NET 古川)



(b) 上部建屋の応答加速度 (左: K-NET 水戸, 右: K-NET 古川)

図-3 応答解析結果

Ti = 3.0 秒, Ci = 0.03 の場合の応答変位は 50cm 以上となり, 初期の免震建物ではクリアランスが不足し, 擁壁と衝突する可能性があると考えられる。

また, 図-3 (b) に示す上部建屋の応答加速度の結果も, 免震層の応答変位の結果と同様の傾向を示し, K-NET 水戸では免震層のパラメータに依存せず応答加速度が 50 ~ 150cm/s² で安定しているのに対して, K-NET 古川では, 応答加速度が 100 ~ 280cm/s² 程度と大きくなり, 免震装置のパラメータによる変動も大きい。

特に, Ts = 3 秒以下において, 免震層の降伏後周期 Ti = 3.0 秒の場合は, Ti = 4.0 秒, 5.0 秒の場合に比べて応答加速度が 2 倍程度大きくなった。

以上のことから, 短周期が優勢な K-NET 水戸の地震動は, 免震建物の特性によらず安定してその効果を発揮するのに対し, 周期 3 ~ 4 秒の長周期成分が優勢な K-NET 古川の地震動では, 免震建物の特性によって応答が過大になり, 擁壁とのクリアランスの検討など, 設計に十分な配慮が必要であることが分かった。

4. 免震装置の累積損傷度評価

東北地方太平洋沖地震では, 一部の免震建物の鉛ダンパーや鋼材ダンパーなどの免震装置に亀裂や残留変位の被害が生じた建物が確認されている¹⁾。そこで, 前項の 2 つの地震動を受けた免震建物について, 前項の 2 質点系モデル解析による応答変位の結果を用いて, 免震層の累積損傷度を評価した。

免震層の累積損傷度評価は鉛ダンパーの疲労を対象とし, (1) 式, (2) 式で評価する¹⁾。ここで, D は累積損傷度, N_{di} は i 番目の振幅で鉛ダンパーが破断する繰返し回数を表し, n_i は i 番目の振幅の繰返し回数を表す。鉛ダンパーが破断する振幅の繰返し回数 N_d は, 図-4 に示す繰返し振幅を受ける鉛ダンパーの破断試験結果に基づく, 直線の回帰式から求められる。なお, 本検討で算定する繰

返し振幅は, レインフロー法^{6),7)}による全振幅 (レインフロー振幅: Δ) を用いて評価する。

$$D = \sum \frac{n_i}{2N_{di}} \leq 1 \quad (1)$$

$$N_d = 1.38 \times 10^6 \left(\frac{\Delta}{2} \right)^{-1.83} \quad (2)$$

また, 累積損傷度の評価は, K-NET 古川の観測点の近くに建ち, 実際に東北地方太平洋沖地震により鉛ダンパーに損傷を受けた免震建物の構造特性を参考にして, 前項の 2 質点系モデルのパラメータを Ts = 0.6 秒, Ti = 3.0 秒, Ci = 0.03 のケースとし, このケースによる K-NET 水戸および K-NET 古川の地震動を入力とする免震層応答変位を用いた。

図-5 は, 免震層応答変位を用いてレインフロー法により算定したレインフロー振幅の頻度分布を示す。図の左の縦軸は, 振幅の各区間の発生頻度分布を示し, 右の縦軸は振幅の大きい区間からの累積頻度分布 (%) を示す。この結果, K-NET 水戸では, レインフロー振幅が 12cm 以下の区間のみに現れるのに対し, K-NET 古川では振幅の出現頻度が多く, 60cm を越え 100cm までの大振幅の区間にも数回の発生が認められ, 20cm を越える振幅の頻度が全体の 10% 程度を占めた。

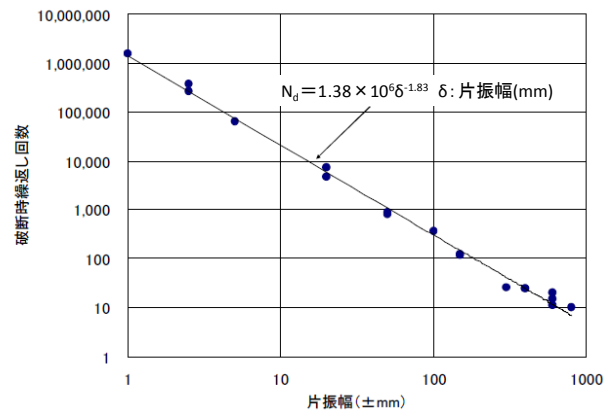


図-4 加振振幅と破断時繰返し回数の関係

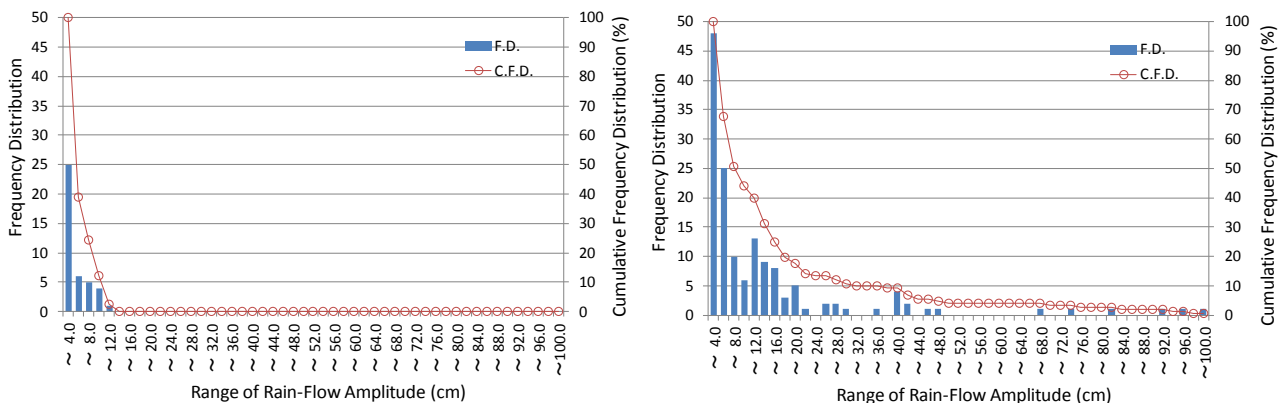


図-5 繰返し振幅の頻度分布 (左図: K-NET 水戸, 右図: K-NET 古川)

表-2 免震層の累積損傷度

	K-NET 水戸 EW	K-NET 古川 EW
D 値	0.006	0.256

2つの入力地震動による、本ケースの累積損傷度D値の結果を表-2に示す。この表の結果から、K-NET 水戸によるD値は0.6%と小さいのに対し、K-NET 古川によるD値は25.6%と非常に大きい結果となった。なお、このD値は鉛ダンパーの破断に対する累積損傷度であり、亀裂発生に対するD値はもっと大きくなることや、過去に受ける地震動や余震を考慮すると、このような入力地震動を受ける鉛ダンパーを用いた免震建物では、疲労について十分な検討が必要と考えられる。

5. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の2つの強震観測記録(K-NET 水戸, K-NET 古川)を用いて、2質点系の解析モデルを用いたパラメトリック・スタディを行い、入力地震動特性が免震建物の応答に与える影響について検討を行った。

そして、長周期成分が優勢な地震動は、短周期成分が優勢な地震動に比べて、免震層応答変位や上部構造の応答加速度、免震装置の累積損傷度に与える影響が大きいことを示した。従って、免震建物の設計においては、建設サイトの入力地震動特性に十分配慮することが重要である。

謝 辞

本論文の作成において、防災科学技術研究所によるK-NETの強震記録を使用しました。関係者に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 一般社団法人日本免震構造協会 応答制御建築物調査委員会：報告会 東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査, 2012.
- 2) 加藤貴司, 境茂樹：2011年東北地方太平洋沖地震による水戸市に建つ高層免震建物の地震観測記録, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 625-626, 2011. 8
- 3) 境茂樹, 加藤貴司, 田中靖彦, 片山喜隆: 東北地方太平洋沖地震による超高層免震建物の地震時挙動, ハザマ研究年報, Vol. 43, 2011.
- 4) S. Sakai, T. Kato, Y. Katayama : Dynamic Response Properties of Base Isolated Building during Seismic Motions of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 2013.
- 5) 小倉桂治, 川端一三, 小室務, 征矢克彦, 寺崎智宏: 高層免震建物の地震応答特性に関する検討, 日本建築学会技術報告集, pp. 47-51, 1997. 12
- 6) 日本材料学会編: 機械・構造系技術者のための実用信頼性工学, 養賢堂, 1987.
- 7) 遠藤達雄, 安在弘幸: 簡明にされたレインフローアルゴリズム「P/V 差法」について, 材料 第30巻, 第328号, pp. 89-93, 1981

Dynamic Response Properties of a Base-Isolated Building during Seismic Motions of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

Shigeki SAKAI, Takashi KATO and Yoshitaka KATAYAMA

JSSI's findings reported the example of a base-isolated building where a lead damper and steel material damper that constituted the isolation device were damaged, and the problem in the structural design of the isolation device that received long-time repetition amplitude caused by the large-scale earthquake was clarified.

Therefore, to examine the influence of the characteristics of input motions on the dynamic responses of a base-isolated building, we performed parametric studies by a 2-mass system model using the representative strong ground motion records, K-NET Mito (IBR006) and K-NET Furukawa (MYG006). We showed the influences that induced the response displacements of the isolated floor and response accelerations of the superstructure, due to the characteristics of input ground motions under different ground conditions.

In addition, the cumulative damage ratio of the isolation device was evaluated by Miner's law, and we calculated the frequency distributions of the repetition amplitude of the relative displacements of the isolated floor using the Rain Flow Algorithm. The results revealed the cumulative damage ratio by MYG006 was 40 times larger than the IBR006 value. Therefore, it is very important to consider the characteristics of seismic ground motion in the structural design of a base-isolated building.
