

【研究ノート】

## 観測地震動と免震層最大変位に基づく免震層水平剛性の推定手法

宮内智香<sup>1</sup>，平井敬<sup>2</sup>，永野康行<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，大学院生

<sup>2</sup> 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，准教授 博士（工学）

<sup>3</sup> 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，教授 博士（工学）

本研究の目的は，巨大地震発生前後において，免震建物の免震層の水平剛性を定量的かつ容易に評価する新たな手法を構築することにより，減災と早期復興に寄与することである．中地震発生時に加速度計とけがき式変位計によって観測された地震動記録と免震層最大変位を用いて，免震層水平剛性を推定する手法を提案する．観測地震波を入力地震動とした時刻歴応答解析により水平剛性のばらつきと免震層最大変位の関係を算出する．本関係とけがき式変位計による免震層最大変位が一致する水平剛性を推定結果とする．本研究では1回または複数回の中地震による地震動記録と免震層最大変位の観測により，免震層の水平剛性を推定できる場合があることが例示された．

キーワード：減災，早期復興，免震建物，中地震

### 1. 序論

竣工直後の免震構造は，建築基準法に基づいた構造計算や時刻歴応答解析などによって安全性を担保している<sup>1)</sup>．これまで宮内ら<sup>2)</sup>は，免震構造の設計時における免震材料の性能ばらつきに対する上部構造の応答のばらつきについて検討し，通常設計時の性能ばらつきに関しては安全側で考慮されていることを明らかにしている．しかし，経年後の免震構造の安全性に関しては，地球温暖化により環境温度変化が設計段階の温度を超える可能性や，建物竣工後の巨大地震の経験による経年変化を考えると安全であるとはいえない．そのため安全性を維持できているのか容易に調査する必要があるといえる．ただ，モニタリングにより免震層の性能を推定する手法<sup>3)</sup>やジャッキを用いて自由振動させることにより，性能を推定する方法<sup>4)</sup>などはあるが，これらの方法には観測するための複数の装置にかかる費用，調査を行うための準備期間が必要となる．そのため，本研究では経年後の免震層の水平剛性を容易に推定する手法として，加速度計と変位計による地動加速度と免震層最大変位の観測結果を用いた新た

な推定手法を提案し、今後の巨大地震発生前における減災と地震発生後における早期復興に寄与することを目的とする。

## 2. 推定手法

本研究では、免震層に設置した加速度計による地震動記録とけがき式変位計による免震層の最大変位応答から免震層の水平剛性を推定する方法を提案する。本手法では免震建物をモデル化し、免震層の水平剛性を生じうるばらつきの上下限内を必要な精度で順次変化させ、中地震による免震層最大変位を時刻歴応答解析によって算出する。これにより、水平剛性と免震層最大変位の関係を算出し、本関係とけがき式変位計による免震層最大変位が一致する水平剛性を推定結果とする。

同方法では1回あるいは複数回の地震動観測によって経年後の免震層水平剛性を推定できる可能性がある。図1のように水平剛性の下限値  $K_L$  から上限値の  $K_U$  の範囲で免震層最大変位が単調な変化であるとき、1回の地震動記録で水平剛性を推定することができる。しかし、図2のように性能ばらつきの範囲で免震層最大変位の傾向が非単調な変化の場合、図3のように免震層最大変位と水平剛性の関係に変化が見られない場合については推定困難であり、図4のように複数回の地震動観測を行う必要がある。以上のように、モニタリングにより得られた地震動記録と免震層最大変位から経年後の免震層の水平剛性を推定する手法を提案する。

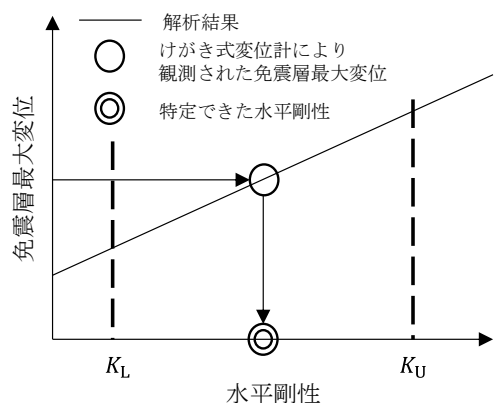


図1 単調な変化の場合（推定可能）

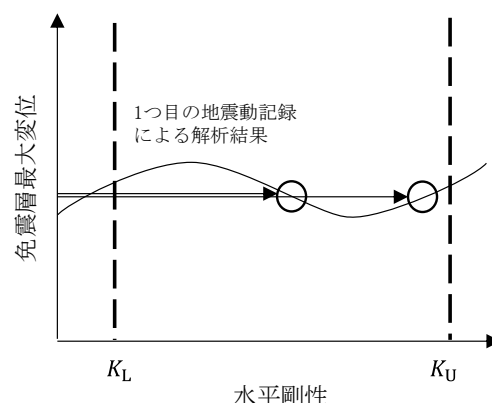


図2 非単調な変化の場合（推定困難）

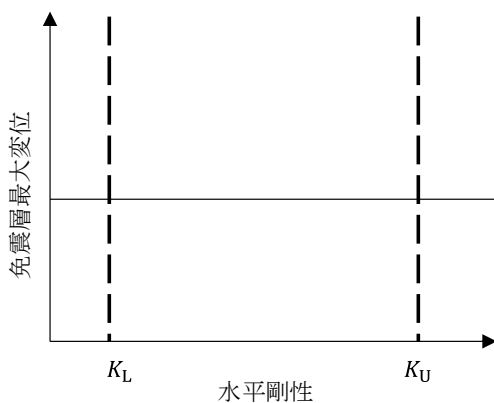


図3 変化がない場合（推定困難）

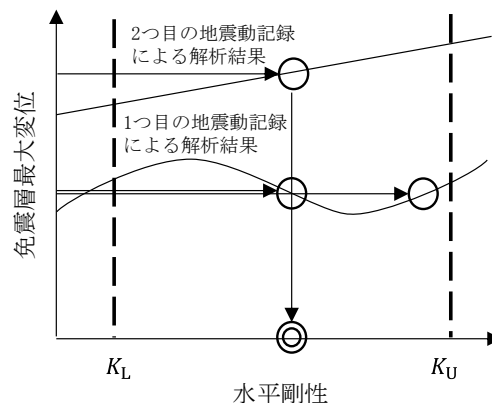


図4 複数回の地震観測による推定

## 3. 例題

本研究における対象は7階建てRC免震建物の多質点系モデル<sup>5)</sup>である。表1に入力地震動とした観測地震波の詳細を示す。まずは観測地震波①から④を入力地震動とし、免震層の水平剛性を生じうるばらつきの上下限内を必要な精度で順次変化させ、時刻歴応答解析を実行し、免震層最大変位を算出した。これにより水平剛性と免震層最大変位の関係を算出した。図5, 6, 7に加速度計で観測された観測地震波①から④による解析結果を示す。第2章に示した3つの場合分けと同じ結果を得ることが出来た。そのため、1回あるいは複数回の中地震の加速度データと免震層最大変位のデータで免震層水平剛性を推定できる可能性を証明することが出来た。

次に、実際の建物では地震動の周期特性が異なっても地下構造により変位応答スペクトルが似てしまうことで、推定困難であるのではないかと考えた。そこで、山本ら<sup>6)</sup>の地下構造モデルと同様のモデルを作成し、位相の異なる3つの告示波を作成した。上部構造のモデルは前段落におけるモデルと同じものを使用し、作成した3つの告示波を観測地震波⑤, ⑥, ⑦として時刻歴応答解析を行い、本推定手法が適用可能性を検討した。得られた水平剛性と免震層最大変位の関係を図8に示す。本解析結果より変位応答スペクトルが似た入力地震動を用いても、水平剛性と免震層最大変位の関係が地震動ごとに傾向の異なるグラフとなったことから、本手法により実際の建物での水平剛性の推定も可能であるという結果を示すことができた。

表1 入力地震動（観測地震波）の詳細

観測地震波 No	観測波と位相	詳細
①	El Centro 1940 NS	
②	2011 年 東北地方太平洋沖地震における 宮城県大崎市古川三日町での強震記録 NS	観測波の最大速度を $25 \text{ cm s}^{-1}$ に スケーリングしたもの
③	八戸 1968 NS	
④	Taft 1952 EW	
⑤	八戸 1968 NS 位相 <sup>※</sup>	
⑥	Kobe JMA 1995 NS 位相 <sup>※</sup>	地盤の地震応答解析により 作成した告示波
⑦	乱數位相 <sup>※</sup>	

※位相はユニオンシステム社における Shake Pro - L に導入されている位相

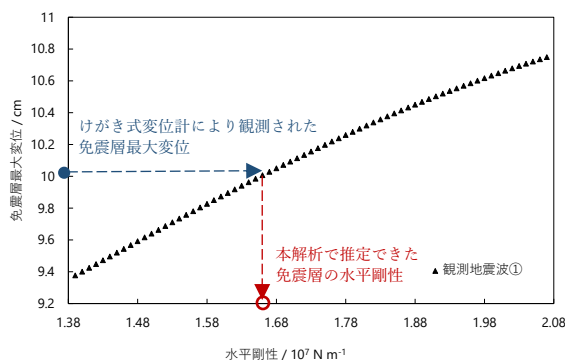


図5 観測地震波①による  
水平剛性と免震層最大変位の関係

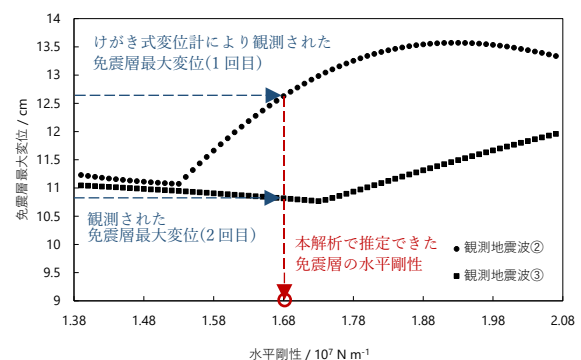


図6 観測地震波②③による  
水平剛性と免震層最大変位の関係

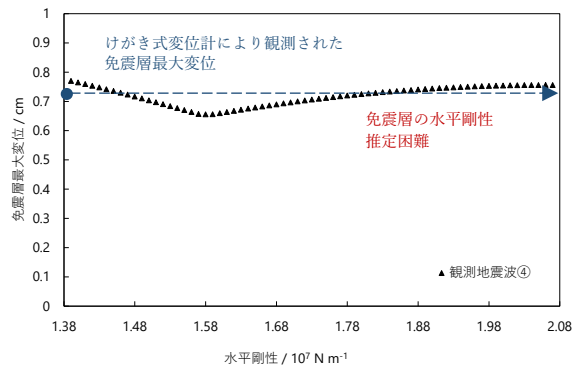


図 7 観測地震波④による  
水平剛性と免震層最大変位の関係

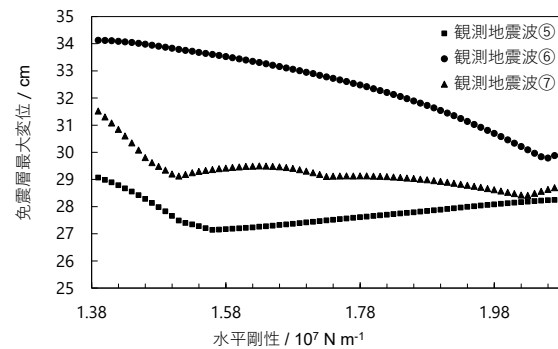


図 8 観測地震波⑤から⑦による  
水平剛性と免震層最大変位の関係

#### 4. 結論

本研究では、中地震発生時において加速度計で観測された地震動記録とけがき式変位計で観測された免震層最大変位を用いて免震層の水平剛性を推定できることを、数値実験を用いて示した。

本推定手法の提案は、平常時の免震建物の維持管理による巨大地震発生前の減災、そして地震発生後の免震建物の免震層水平剛性を容易に推定することにより早期復興に寄与するといえる。

しかし、本研究では水平剛性のばらつきのみを検討した。したがって、減衰や復元力特性を持つモデルに対しても同手法が適用できるか検討する必要がある。そのため、今後は東京電機大学における千住キャンパス 1 号館の上部構造モデル<sup>6)</sup>と実際の観測データを用い、本手法を実際の建物に適用できるか検討する。これにより、本推定手法を確立させ、免震建物の適切な維持管理に貢献し、減災復興に寄与することを目指す。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本免震構造協会 (JSSI) : 免震構造 (第2版) 一部分材の基本から設計・施工まで一, オーム社, 2022
- 2) 宮内智香, 水島靖典 : RC建物を対象とした免震装置の性能ばらつきによる建物の応答分布に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.574-575, 2023
- 3) 菱沼崇宏, 田才晃, 鏡畑友樹, 楠浩一, 吉田純人 : リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 (その27: 免震建物における性能曲線の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.965-966, 2015
- 4) 長谷川泰稔, 飛田潤, 福和伸夫, 八木茂治, 北村敏也 : 実大免震建物の振動実験と強震観測, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.307-316, 2000
- 5) 宮内智香, 平井敬, 永野康行 : 観測地震動と免震層最大変位に基づく免震層水平剛性の推定手法, 第16回日本地震工学シンポジウム梗概集, 全8頁, 口頭発表Day1-G414-16, 2023.11.23
- 6) 山本剛, 藤田聡, 原田公明, 中溝大機, 皆川佳祐, 井山義信 : 地震観測記録の分析に基づく振幅依存性を考慮した東京電機大学東京千住キャンパス1号館の振動解析モデルの構築, 日本地震工学論文集, 第18巻, 第1号, pp.89-103, 2018

Note:

## **Estimation of Horizontal Stiffness of Isolation Layer Based on Observed Earthquake Ground Motion and Maximum Displacement of Isolation Layer**

Tomoka Miyauchi<sup>1</sup>, Takashi Hirai<sup>2</sup>, Yasuyuki Nagano<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Graduate Student

<sup>2</sup> Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Associate Professor, Dr. Eng.

<sup>3</sup> Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Professor, Dr. Eng.

### **Abstract**

The purpose of this study is to establish a new method for quantitatively and easily evaluating the performance of seismic isolation layers in seismic isolation structures before and after a large earthquake, thereby contributing to disaster mitigation and early recovery. This study proposes a method for estimating the horizontal stiffness of an isolation layer using records of seismic motions and the maximum displacement of the isolation layer for small and moderate earthquakes observed by an accelerometer and a displacement transducer. A seismic isolation building was modeled and the maximum displacement of the isolation layer due to small and moderate earthquakes was simulated by varying the upper and lower limits of the variation in the horizontal stiffness of the isolation layer with the necessary accuracy. The horizontal stiffness that matches these calculated results for the maximum displacement of the isolation layer using a displacement transducer is used as the estimated result. This study shows that the horizontal stiffness of seismic isolation devices can be estimated in some cases by using seismic records of one or multiple small-to-moderate earthquakes and observation of the maximum displacement of the isolation layer. However, some cases cannot be estimated.

**Keywords:** Disaster reduction, Disaster recovery, Seismic isolation structure, Moderate earthquake