

観測地震動を入力とした地震応答解析による免震層水平剛性の推定手法

正会員 ○宮内智香*1 同 平井敬*2 同 永野康行*3

2. 構造—2. 振動—k. ヘルスモニタリング

免震層水平剛性, 時刻歴応答解析, 性能ばらつき, 経年劣化

1. 序論

免震構造は、地震発生前から十分な維持管理を行い、地震時およびその後の復旧復興において免震機能を十分に発揮できるように備えておく必要がある。しかし、免震層の性能に関わる免震層水平剛性にはばらつきがある。ただ、現在の免震建物の維持管理において免震層水平剛性が確認されることはない。現在確立している免震層水平剛性の推定手法としては、免震層の長期モニタリングによって免震層の性能ばらつきの傾向を調査する方法¹⁾や、ジャッキを用いて人工的に建物を自由振動させることで免震層水平剛性を推定する手法²⁾がある。ただ、これらは人的・時間的・経済的コストが大きく、ほとんど実施されない。本研究では自然現象である中程度の地震動（震度5弱相当の地震動）を活用し、低コストに免震層水平剛性を推定する手法を提案する。加速度計とけがき式変位計によって観測された地震動加速度波形と免震層最大変位の2つのデータのみを用いて、容易に免震層水平剛性を推定するものである。

れた免震層最大変位を比較し、対応する免震層水平剛性を推定結果とする。

本方法では1つの地震動によって免震層水平剛性を必ず推定できるとは言い難い。免震層最大変位と免震層水平剛性の関係の傾向が観測された地震動波形の周期特性によって異なるためである。図1から図2に模式図を示し、説明する。下限値 K_L から上限値 K_U の免震層水平剛性のばらつきの範囲で、免震層最大変位が単調な変化となる場合、1つの地震動記録で免震層水平剛性を推定することができる(図1)。しかし、免震層水平剛性の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である場合、免震層の水平剛性を推定するには2つ以上の地震動記録が必要である(図2)。加えて、けがき式変位計が動かず免震層最大変位を観測できない場合、本推定手法の対象外になる(図3)。以上のように、免震層最大変位と免震層水平剛性の関係によって免震層水平剛性の推定可否が異なる。本内容を確認するため、3章以降にて数値実験を実行した。

2. 推定手法の手順

設計時に作成される構造計算書に基づいて免震建物を多質点系としてモデル化する。加えて、免震層にけがき式変位計と加速度計を設置し、これらの準備をした状態で、中程度の地震動の発生を待つ。

中程度の地震動が発生すると、免震層最大変位と地震動加速度波形の観測データを得られる。多質点系モデルに地震動加速度波形を入力し、時刻歴応答解析を実施する。このとき、構造計算書に示されている免震層水平剛性を生じうるばらつきの上下限内で変化させながら、繰り返し時刻歴応答解析を行う。これにより、免震層水平剛性と免震層最大変位の間関係を把握する。これとけがき式変位計により観測さ

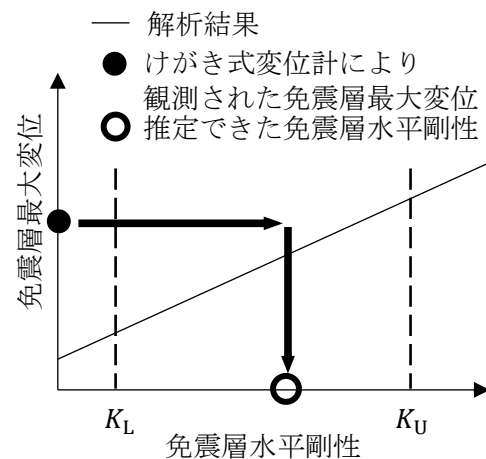


図1 免震層最大変位と免震層水平剛性の関係が単調な場合

Estimation Method for Horizontal Stiffness of Seismic Isolation Layer by Earthquake Response Analysis Using Observed Ground Motion

MIYAUCHI Tomoka, HIRAI Takashi and NAGANO Yasuyuki

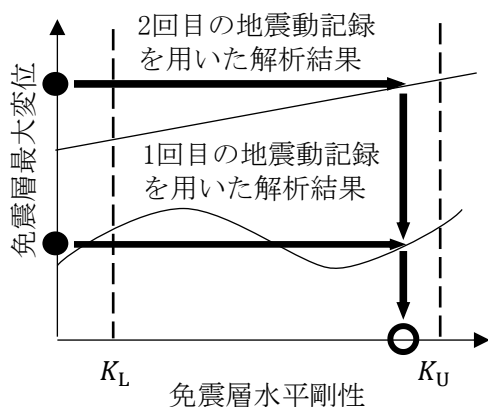


図2 免震層最大変位と免震層水平剛性の関係が非単調な場合

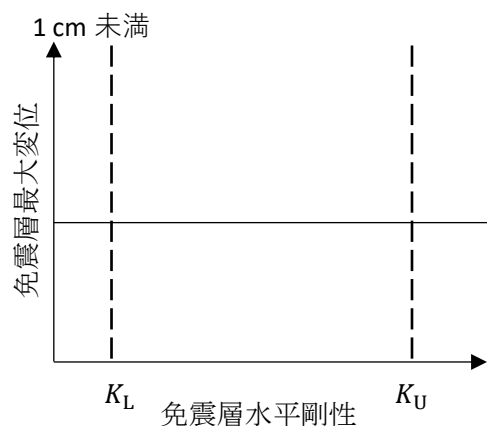


図3 免震層水平剛性のばらつきの範囲で免震層最大変位が極めて小さくけがき式変位計が動かない場合

3. 数値実験例

3.1 解析モデル

本解析では7階建て鉄筋コンクリート造の集合住宅を想定し、8質点系モデルを作成した。図4にモデルを、表1にパラメータの値をそれぞれ示す。上部構造の諸元はばらつかないと仮定し、一定の値で設定した。

表2に免震材料1基あたりの特性値を示す。本モデルにおける免震層は、水平剛性のみを有する天然ゴム系積層ゴム(以下NRB)が22基と、減衰作用のみをもつオイルダンパーの3基が設置されているモデルとした。ここで、設置する全ての免震材料の特性値が標準値であったとすると、免震層水平剛性 K は、NRBの1基あたりの水平剛性(標準値) 7.46×10^5 N/mに、設置する基数である22基を掛けて、 1.64×10^7 N/mであると算出することができる。本研究では、この免震層水平剛性 K の推定を目指す。

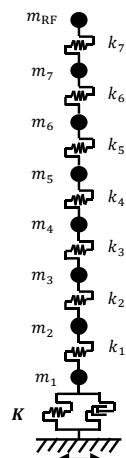


図4 モデル図

表1 上部構造の特性値

層	質量 10 ⁵ kg	水平剛性 10 ⁹ N m ⁻¹
RF	8.82	—
7	8.33	1.52
6	8.33	1.82
5	8.33	2.00
4	8.33	2.07
3	8.43	2.25
2	8.43	2.61
1	8.43	3.68

表2 免震材料の特性値(1基あたりの標準値)

種類	基数	水平剛性 10 ⁵ N m ⁻¹	減衰係数 10 ⁶ N s m ⁻¹
NRB	22	7.46	—
オイルダンパー	3	—	1.88

3.2 観測地震動(入力地震動)

時刻歴応答解析に使用した各地震動の詳細を表3に、各地震動の減衰定数0.03の変位応答スペクトルを、図5に示す。本研究において提案する推定手法では、中程度の地震動を活用して免震層水平剛性を推定することから、すべての地震動の最大速度が25 cm/sとなるようにスケーリングし、けがき式変位計が作動すると考えられる震度5弱以上となるように設定した。加えて、観測地震動の周期特性による本提案手法の適用性の違いを検討できるように、変位応答スペクトルのピーク周期が異なる地震動を選定した。

表3 観測地震動一覧と詳細

種	年	地震名	観測点	成分	震度階級
A	1940	Imperial Valley	El Centro	NS	5弱
B	2011	東北地方太平洋沖	古川三日町	NS	5強
C	1968	十勝沖	八戸	NS	5弱
D	1952	Kern County	Taft	EW	5弱

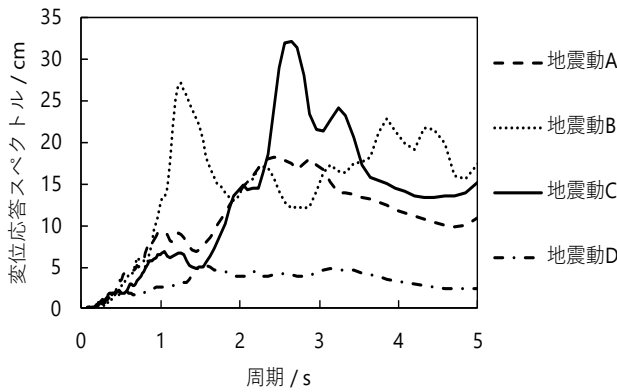


図5 入力地震動の減衰定数 0.03 の変位応答スペクトル

3.3 免震層水平剛性のばらつき範囲

表 4 に免震層水平剛性のばらつきの範囲を示す。製品カタログ³⁾によると、NRB の水平剛性は製造ばらつき、経年変化、環境温度変化を合わせて -15% から $+26\%$ の間でばらつく(表 4)。そのため、本数値実験においては前述の免震層水平剛性(標準値) $1.64 \times 10^7 \text{ N/m}$ に対して、表 4 における免震層水平剛性のばらつきの範囲(-15% である $1.39 \times 10^7 \text{ N/m}$ から $+26\%$ である $2.07 \times 10^7 \text{ N/m}$ の間)で変化させる。本数値実験では、同範囲のなかで免震層水平剛性を $1.00 \times 10^5 \text{ N/m}$ ずつ順次変更し、各免震層水平剛性に対して繰り返し時刻歴応答解析を行った。

表 4 免震層水平剛性のばらつきの範囲

水平剛性を変化させる要因		水平剛性の 変動範囲
製造ばらつき		$\pm 10\%$ 以内
経年変化		$+10\%$ 以内
環境温度変化	(+)側	$+6\%$ 以内
20℃から $\pm 20\text{℃}$	(-)側	-5% 以内
合計	(+)側	$+26\%$ 以内
	(-)側	-15% 以内

4. 数値実験例の結果

4.1 単調な場合

地震動 A を用いた解析により得られた免震層最大変位と免震層水平剛性の関係を図 6 に示す。本地震動に対しては、免震層最大変位は免震層水平剛性に対して単調増加となった。けがき式変位計によって免震層最大変位が 10.3 cm と測定された場合、免震層水平剛性は $1.8 \times 10^7 \text{ N/m}$ であると推定することが

できる。免震層最大変位と免震層水平剛性の関係が単調である場合、1 回の中程度の地震動発生によって免震層水平剛性を推定することができた。

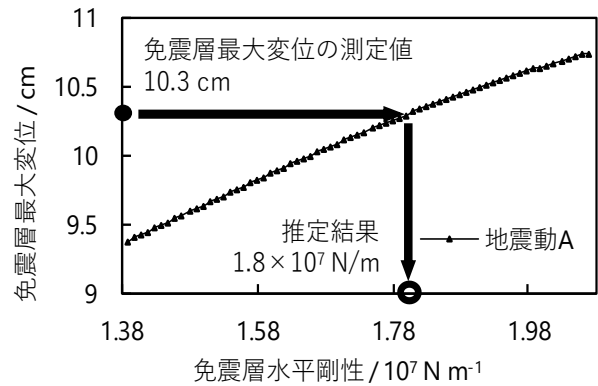


図 6 地震動 A を入力地震動としたときの免震層最大変位と免震層水平剛性の関係

4.2 非単調な場合

地震動 B を用いた解析により得られた免震層最大変位と免震層水平剛性の関係を図 7 に示し、地震動 C を用いた解析により得られた同結果を図 8 に示す。図 8 には地震動 B による結果もあわせて示した。いずれの地震動に対しても、免震層最大変位と免震層水平剛性の関係が非単調である。地震動 B が発生しけがき式変位計によって免震層最大変位が 13.3 cm と観測された場合、免震層水平剛性の候補は図 5 のように 2 つ出現し、特定できない。そこで、次に一地震動 C が発生したとき、けがき式変位計によって免震層最大変位が 11.0 cm と測定された場合、地震動 B による結果と組み合わせることで、免震層水平剛性は $1.8 \times 10^7 \text{ N/m}$ であると推定できる。免震層最大変位と免震層水平剛性の関係が非単調である場合、複数回の中程度の地震動発生によって免震層水平剛性を推定できた。

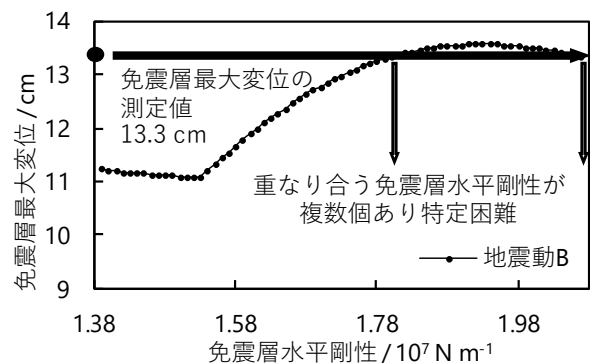


図 7 地震動 B を入力地震動としたときの免震層最大変位と免震層水平剛性の関係

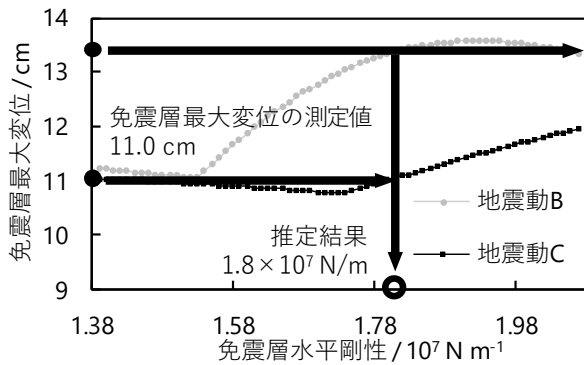


図8 地震動Cを入力地震動としたときの免震層最大変位と免震層水平剛性の関係と図5の比較

4.3 けがき式変位計が動かない場合

地震動Dを用いた解析により得られた免震層最大変位と免震層水平剛性の関係を図9に示す。この地震動に対しては、免震層水平剛性のばらつき範囲内で免震層最大変位が常に1cm未満という極めて小さい結果となった。このとき、実際にけがき式変位計の目視調査を行っても、免震層最大変位は正確に測定できないと考えられる。よって、本結果からは震度5弱以上の地震動が発生しても、免震層最大変位が極めて小さくけがき式変位計が動かない場合、本推定手法を用いることは困難であることが分かった。そのため、この状況で免震層水平剛性を推定するためには次の地震発生を待つ必要があることがわかる。

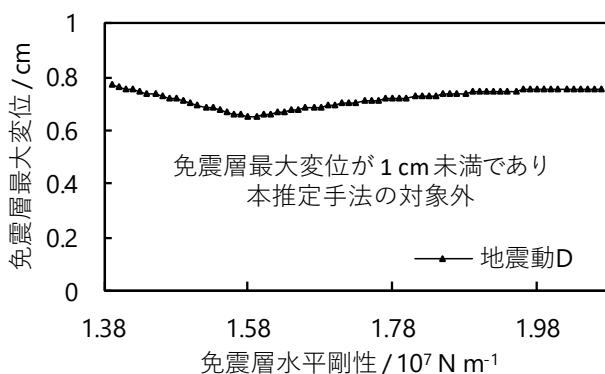


図9 地震動Dを入力地震動としたときの免震層最大変位と免震層水平剛性の関係

5. 結論

本研究では低コストかつ容易に免震層水平剛性を推定する新たな推定手法を提案した。加えて、数値実験を行うことにより提案手法の使用可否を検討した。

数値実験の結果、1回あるいは複数回の中程度の地震動発生によって経年後の免震建物における免震層水平剛性を推定できる可能性があることが明らかになった。一方で、免震層最大変位が極めて小さく、ほとんどけがき式変位計が作動していない場合には、本推定手法によって免震層水平剛性を推定することは困難であることも明らかになった。

本研究は数値実験による免震層水平剛性の推定手法の提案である。加えて、本研究のモデルは免震層に2つの免震材料しか設けていない、簡易化されたモデルを活用した。そのため、今後の課題としては、本推定手法を実建物に使用し、実際に免震層水平剛性の推定が可能であるのか検討するために、複数の免震材料を設置している建物を想定したモデルで、免震層水平剛性を推定する必要がある。さらに、数値実験のみならず、実建物においてモニタリングされた観測記録を用いて、本推定手法が適用可能であるのか検討していく必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ひょうご震災記念21世紀研究機構による研究調査助成事業「演繹と帰納の両面からアプローチによる減災都市に向けた革新的建築設計法」の助成を受けた。

(参考文献)

- 1) 高橋悟、金沢健司、北村春幸：免震建物を対象とした基礎版変形量の長期モニタリング、日本建築学会大会講演梗概集(北海道)、構造II、pp.69-72、2013年8月
- 2) 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共振観測、構造工学論文集、Vol.46B、pp.307-316、2000年3月
- 3) 株式会社ブリヂストン：建築免震用積層ゴム製品仕様一覧 2023 Vol.1、p.18、BRIDGESTONE(参照 2024年2月7日)

*1 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 博士前期課程
 *2 同大学大学院減災復興政策研究科 准教授・博士(工学)
 *3 同大学大学院減災復興政策研究科 教授・博士(工学)

Grad. Student, Grad. Sch. Dis. Res and Gov., Univ. Hyogo
 Assoc. Prof., Grad. Sch. Dis. Res and Gov., Univ. Hyogo
 Professor, Grad. Sch. Dis. Res and Gov., Univ. Hyogo