

2 波連続する地震動に対する残留変位の傾向と超過確率図の提案

Proposal of Exceedance Probability Charts for Residual Displacement under Two Consecutive Ground Motions

○佐野結香³, 阿久戸信宏¹, 秦一平¹, 郭鈞桓²

*Yuika Sano³, Nobuhiro Akuto¹, Ippei Hata¹, Kuo Chunhuan²

Abstract : This study examines residual displacement of seismic isolation structures under two consecutive ground motions. A single-degree-of-freedom shear model with rubber bearings, sliding bearings, and oil dampers is analyzed through time-history simulations. Residual displacement after the first and second motions is statistically evaluated. Based on mean and standard deviation, exceedance probability charts are proposed to show the likelihood of exceeding the JSSI 50 mm criterion during consecutive ground motions.

1. はじめに

近年では、長周期地震動の発生に加えて、短期間で連続的に発生する地震^[1]が頻発している。免震構造においては、摩擦特性に期待したすべり支承材の使用^[2]も多く、地震動終了後の残留変位の発生が課題の1つとされている。そのため、連続して地震動が入力された場合の残留変位の推移についての把握は重要である。

以上を踏まえて本研究では、免震構造における免震層の部材配置を想定して、部材の支持割合に応じた免震層性能と残留変位の関係についてシミュレーション解析を実施して分析し、残留変位の推移および JSSI 基準^[3]の残留変位 50mm を超える超過確率図を提案する。

2. 検討対象モデルおよび入力地震動

本検討では、免震層の部材配置を想定して、ブリジストン社製^[4]の高減衰ゴム系積層ゴム (HDR : HH100X6R) もしくは鉛プラグ挿入型積層ゴム (LRB : LH100G4) と弾性すべり支承 (SK : SK100G4) の組み合わせおよびオイルダンパー (OD) を用いた検討を行う。これらの部材が有する特性およびモデル図を Fig.1 に示す。HDR と LRB については、ひずみ依存性と累積吸収エネルギーによる水平性能の低下^{[5][6]}を考慮する。SK と OD については、各種依存性を考慮しない。

免震層内における部材の支持割合の違いによるパラメータの変化傾向と残留変位の推移について検討するため、HDR もしくは LRB と SK の組み合わせで免震層を構成し、その支持割合 (全体設置台数に対する HDR と SK, または LRB と SK の支持比率) の関係を Fig.2 に示す。なお、この時のモデル質量は支承材の推奨長期軸力から換算した質量の合計値として、OD については、免震層全体の復元力特性における初期剛性に対して 2%, 5%, 10%の粘性減衰定数を付与することとする。

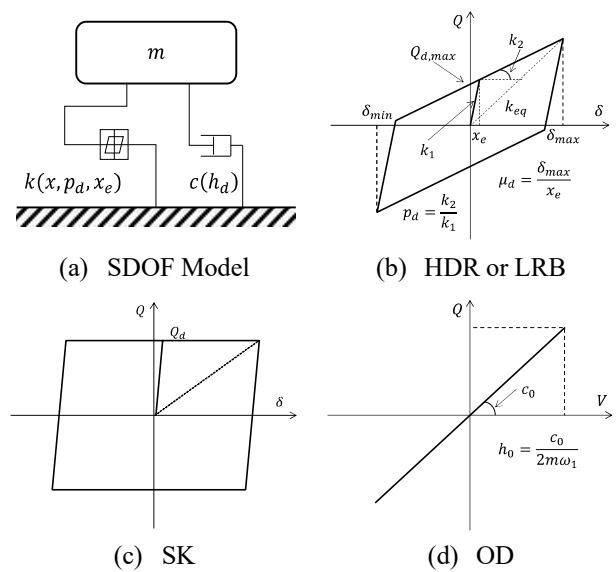


Fig.1 Overview of SDOF Model and Hysteretic

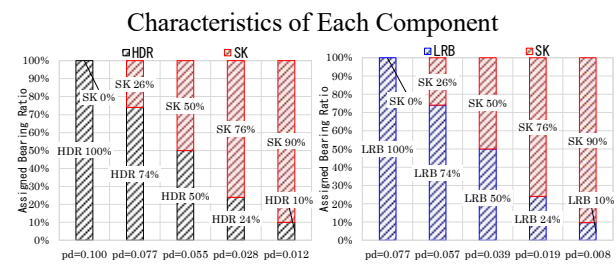


Fig.2 Relation between the Assigned Bearing Ratio and Bilinear Coefficient

入力地震動は、Fig.3 に示す静岡地域、大阪地域、中京地域、関東地域における設計用長周期地震動 SZ1, OS1, CH1, KA1, および 1995 年の兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で記録された JMAKobe-NS 波と、日本建築センター模擬波 (基盤波) BCJ-L2 (倍率 2 倍) の 6 波を使用し、それぞれ 2 波連続として入力する。さらに、熊本地震の NS 成分と EW 成分の 1 波目 (2016 年 4 月 16 日 益城町) と 2 波目 (2016 年 4 月 16 日 益城町) を連続で入力する。

1 : 日大理工・教員・建築 2 : 日大理工・専任職員・建築 3 : 日大理工・院 (前)・建築

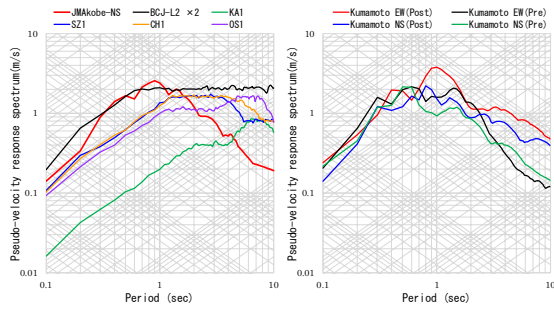


Fig.3 Pseudo Velocity Response Spectrum of the Input Ground Motions

以上の1質点系せん断モデルと入力地震動を用いて時刻歴応答解析を実施し、1波目と2波目の応答変位の収束時における残留変位 R_d を取得する。

3. JSSI 基準値を超える超過確率図の提案

時刻歴応答解析により得られた残留変位 R_d の分布特性を統計的に把握するために、各地震動における残留変位 R_d の平均値 μ と標準偏差 σ の最大値を用いて、バイリニア係数 p_d 別にまとめた結果を Fig.4 に示す。また、平均値 μ の近似曲線(実線)と $\mu \pm \sigma$ の近似曲線(破線)の分布範囲を図中に示す。なお、それぞれの図中には各バイリニア係数 p_d (式中の x) と残留変位 R_d (式中の y) の傾向を累乗近似でまとめた曲線式と決定係数を示す。この式は、バイリニア係数 p_d と残留変位 R_d の間に累乗関係が存在することを示しており、バイリニア係数 p_d が小さいほど残留変位 R_d が急激に増加する傾向にあることが確認できる。

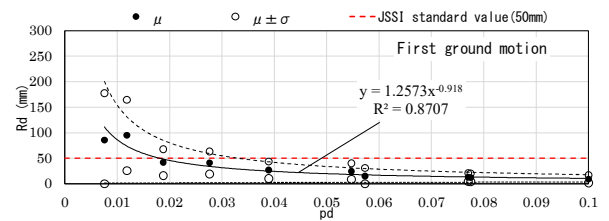
特に、バイリニア係数 $p_d = 0.02$ 程度以下の範囲においては平均値 μ の累乗近似曲線(図中の実線)が JSSI 基準の 50mm を超えていることが確認できる。さらに、2波目においては、1波目の残留変位の影響もあり、バイリニア係数 $p_d = 0.03$ 以下の範囲において JSSI 基準値の 50mm を超えており、かつ、 $\mu \pm \sigma$ の範囲も増大していることから、巨大地震が連続的に入力される場合には、残留変位の増大およびばらつきが大きくなる傾向となることが確認できる。

Fig.4 に示した各バイリニア係数 p_d に対する残留変位 R_d の平均値 μ と標準偏差 σ の分布に基づき、バイリニア係数 p_d による JSSI 基準値の残留変位 50mm (閾値) を超える確率 $P(R_d > 50)$ (超過確率) を算出する。(1) 式に算出式を示す。なお、各バイリニア係数 p_d に対する残留変位 R_d は、平均値 μ と標準偏差 σ を持つガンマ分布の累積分布関数 $f(x; k, \theta)$ に従うと仮定する。

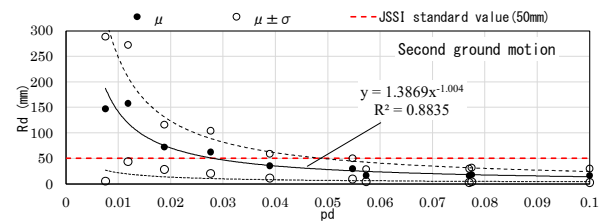
Fig.5 にバイリニア係数 p_d 別の結果を基に算出した超過確率図を示す。超過確率は、定められた閾値 (JSSI 基準値) を上回る確率を表す。バイリニア係数 p_d の値が低下するほどに超過確率が上昇する傾向が確認できるとともに、1波目経験後に2波目を経験すると超過確率はさらに上昇することが確認できる。

$$P(R_d > 50) = 1 - f(50; k, \theta) \quad (1)$$

$\theta = \frac{\sigma^2}{\mu}$	$k = \frac{\mu^2}{\sigma^2}$
---------------------------------	------------------------------



(a) Residual displacement in the first ground motion



(b) Residual displacement in the second ground motion

Fig.4 Relation between the Mean and Standard Deviation of Residual Displacement for Bilinear Coefficient

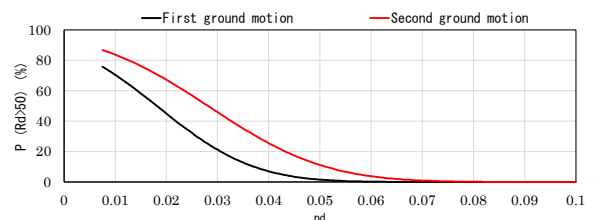


Fig.5 Exceedance Probability Chart of 50 mm Residual Displacement Based on Bilinear Coefficients

4. まとめ

本研究では、連続地震動に対する残留変位の傾向と JSSI 基準値の 50mm を超える超過確率図を提案した。

5. 参考文献

- 内閣府, 防災情報ページ, 特集1 平成28年熊本地震-内閣府防災情報のページ, https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h28/83/special_01.html, 2025.9.29 閲覧
- 一般社団法人 日本免震構造協会, 2023年度データ集積結果, 2025.6
- 一般社団法人 日本免震構造協会, 免震建物の維持管理基準 2022【維持管理計画に役立つ問題事例と推奨事例および点検技術者の役割】, 2022.5
- ブリヂストン: 免震ゴム (建築用), 基本構造と製品ラインナップ https://www.bridgestone.co.jp/products/dp/antiseismic_rubber/product/, 2025.01.30
- ブリヂストン: 長周期地震動に対する免震材料の性能変化 (ブリヂストン高減衰ゴム系積層ゴム支承), 日本建築センター, 評定書, BCJ 評定-IB0010-01, 2017.3
- ブリヂストン: 長周期地震動に対する免震材料の性能変化 (ブリヂストン鉛プラグ挿入型積層ゴム支承), 日本建築センター, 評定書, BCJ 評定-IB0012-01, 2017.5