

硬化型復元力と回転慣性質量を組み合わせた 変位抑制型免震構造の最適化に関する研究

北海道大学大学院 射場 淳

1. はじめに

長周期構造物である免震建物が長周期地震動を受けることで、共振現象による免震装置の損傷や擁壁への衝突が想定され、極限事象への対応が必須となっている¹⁾。この問題に対処すべく硬化型復元力(High-Static-Low-Dynamic stiffness (以降, HSLDS と表記))と回転慣性質量を従来の免震建物に組み込んだ変位抑制型免震構造を提案し、検討を行う。本研究で想定する硬化型復元力は変位の3乗の項に依存して復元力を生じさせることで変位を抑え込む。一方で、変位に応じて接線剛性が増大するため固有周期が低下する恐れがある。そこで、回転慣性質量により固有周期の長周期化を図る。これにより、変位抑制型免震構造は多種多様な地震動に対して設計想定範囲内に応答変位を抑えつつ、免震化による応答加速度低減も図る。これまでの研究²⁾では、実大変位スケールでの定量的な検討がなされておらず、最適化に関する検討もなされていない。この状況に鑑み、本論文では実大変位スケールの変位抑制型免震構造を作製し、振動台実験を実施することで実験と時刻歴応答解析の整合性を確認する。さらに、解析から変位抑制型免震構造の振動特性の把握を行い、最適化を行う。

2. 振動台実験

2.1 免震試験体

免震試験体は、従来の免震建物を想定したSモデル(Standard structure)、Sモデルに回転慣性質量を備えたRモデル(Rotational inertia)、Sモデルに硬化型復元力を備えたNモデル(Nonlinear)、Sモデルに回転慣性質量と硬化型復元力を備えたNRモデルの4つのモデルを設定できるように設計した。再現した免震試験体全体像をFig.1に、免震試験体の諸元をTable 1に示す。本研究の硬化型復元力では、文献³⁾と同様に、試験体の可動方向における変位の3乗に依存した復元力が生じるようにモデル化した。硬化型復元力は線形の剛性による復元力と変位0.25 mで一致するように設計した。回転慣性質量は、ボールねじにより試験体の直線方向の動きをフライホイールの回転運動に変換させる機構とした。仮想質量の大きさは装着するフライホイールの円盤枚数により調節可能であり、試験体本体と同等の質量効果が生じるように設計した。

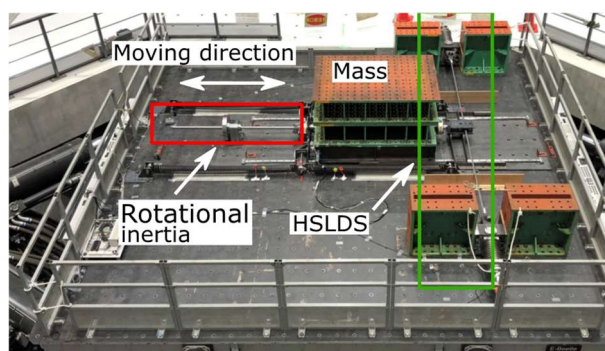


Fig.1 Specimen of seismic isolation model

Table 1 Parameters of S model

Parameter	Value
Movable area of specimen	±740 mm
Mass	4038 kg
Linear stiffness	13597 N/m
Natural period of the S model	3.4 s
Damping	3~5 %
Friction	100 N

2.2 実験方法

振動台実験はS,R,N,NR各モデルに対してスイープ加振と地震波加振を実施した。

スイープ加振により各モデルの基本特性として共振曲線を求める。硬化型復元力を備えたモデルの応答はスイープ加振の掃引方向によって応答が異なるヒステリシス特性が確認される。そのため、スイープ加振は加振振動数が低振動数から高振動数に変化する加振(Low ⇒ High)と高振動数から低振動数へ変化する加振(High ⇒ Low)の2パターンを行った。

地震波加振は最大速度値を $V_{max}=0.5$ m/sに基準化したEl Centro NSを用いた。El Centro NSの擬似応答スペクトルを4章のFig. 5に示す。

2.3 実験結果

スイープ加振によって求められた共振曲線および地震波加振の結果は、それぞれ次章のFig. 3, Fig.4で解析結果と比較して示す。

3. 解析モデルの構築および解析による実験の再現

3.1 解析モデル

Fig.2の1質点の解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行った。Table 2に解析モデルの諸元を示す。解析モデルの力学特性は大型免震試験体にスイープ加振を行い、測定した線形の剛性、硬化型復元力

の剛性を、摩擦力は試験体を静的に加力して測定した値を反映させた。回転慣性質量による仮想質量、および各装置の粘性減衰はスイープ加振と地震波加振による時刻歴応答波形の合わせこみにより決定した。

3.2 実験と時刻歴応答解析の比較

(1) スイープ加振

Fig.3 に各モデルのスイープ加振の実験と時刻歴応答解析結果を比較して示す。横軸は S モデルが共振数比 1 で共振点が生じるように基準化した。

実験と時刻歴応答解析から非線形要素を有する N, NR モデルでは、非線形系に特有の 1 つの振動数比に対して 2 つの安定解が存在する振動数領域が確認された。本実験では線形モデルの S, R モデルにおいてヒステリシス特性が確認された。原因として、試験体の摺動部のガイドレールで発生する摩擦による影響と推測される。解析モデルには摩擦要素を反映させたことにより摩擦による非線形挙動も時刻歴応答解析から再現できていた。また、各モデルにおいて各加振の共振点を越えた後の共振曲線には応答の乱れが確認できる(例えば、S モデルであれば低振動数から高振動数へ変化する加振において振動数比 1.1 付近の応答)。この乱れは応答が急激に変化した際に自由振動が生じ、振動数比の推移と共に消えていく一連の流れによるものである。時刻歴応答解析では、この応答の乱れも忠実に再現されていることが確認できる。

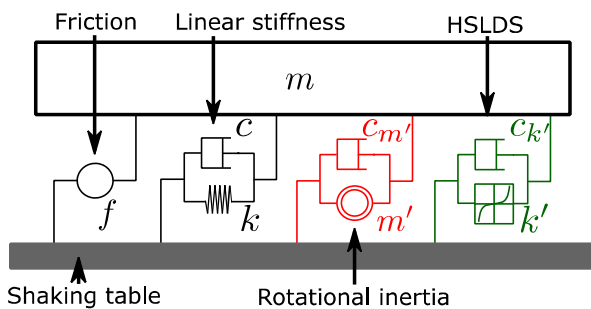


Fig. 2 Analysis model

Table 2 Parameter of the analysis model

Parameter	Value
Mass, m	3950 kg
Linear stiffness, k	13597 N/m
HSLDS, k'	182947 N/m ³
Virtual mass of rotational inertia, m'	4300 kg
Friction, f	100 N
Viscous damping coefficient, c	248 N·s/m
Viscous damping coefficient of rotational inertia mass, $c_{m'}$	260 N·s/m
Viscous damping coefficient of HSLDS, $c_{k'}$	300 N·s/m

スイープ加振では各モデル、各加振において時刻歴応答解析から実験結果を良好に再現できていた。

(2) 地震波加振

Fig.4 に S, R, N, NR 各モデルに対する El Centro NS 加振の実験と時刻歴応答解析を比較して示す。各モデルの実験と時刻歴応答解析による時刻歴応答波形はほぼ一致しており、地震波加振においても実験と時刻歴応答解析の整合性の確認ができた。

4. 変位抑制型免震構造の最適化と応答評価

本章では、時刻歴応答解析から変位抑制型免震構造の最適化を行い、応答についての考察と建物の固有周期を変化させた場合の検証を行う。

4.1 硬化型復元力と回転慣性質量の最適解の探索

解析モデルの諸元を Table 3 に示す。免震クリアランスは 0.75 m を想定する。硬化型復元力は 0.25 m で線形剛性による復元力と一致する時を 1 とし、基準化する。回転慣性質量は仮想質量が試験体本体の質量と同等となる時を 1 とし、基準化する。

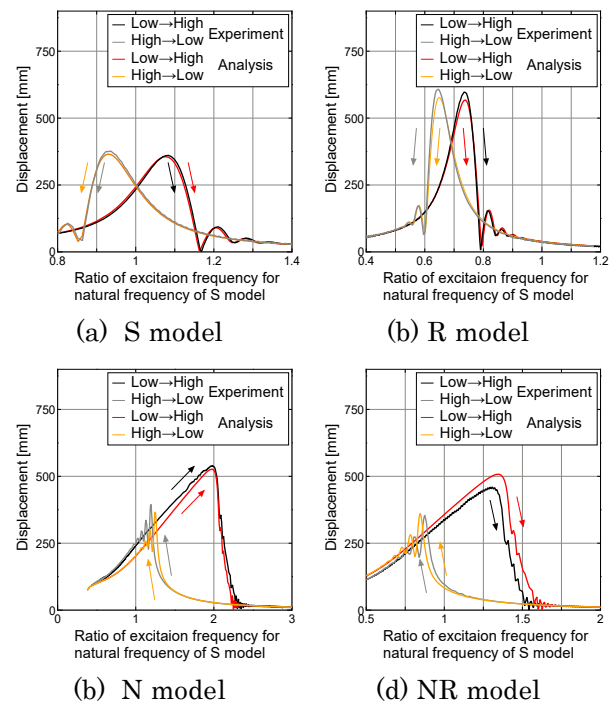


Fig. 3 Comparison of resonance curves

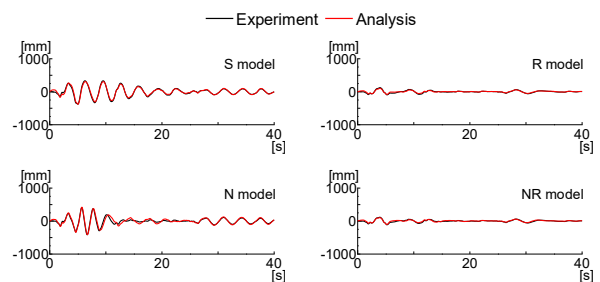


Fig. 4 Comparison of time history response displacement for El Centro NS

初めに、硬化型復元力と回転慣性質量のパラメータを変化させ、地震波加振によるパラメータごとの最大応答変位と最大応答加速度で評価する。変位については免震クリアランス 0.75 m で基準化し、加速度については地震波ごとに S モデルの最大加速度で基準化する。入力波は基準 3 波(L2 相当)に加え、告示波 3 波(L2 相当)、長周期長時間地震動の基整促波 4 波、パルス性地震動として JMA Kobe NS と KMM004 EW(熊本地震)など多様な地震動を選別した。入力倍率は 0.5, 1, 1.5 の 3 パターンで検証した。擬似応答スペクトルを Fig.5 に示す。Fig.6 に 12 波の地震波を入力した際の、パラメータごとの最大応答変位と最大応答加速度を示す。

次に、Fig.6 の目的関数を最大変位と最大加速度にして、応答に対する硬化型復元力と回転慣性質量のパレート解を求める。Fig.7 に各モデルの応答およびパレート解、最適解(Fig.8 で求める解)を示す。続いて、Fig.8 に Fig.7 から求めた入力倍率ごとのパレート解を変位と加速度に関するクライテリアと共に重ね描く。変位についてのクライテリアは 1 以下として、加速度は 2 以下とする。つまり、12 波

による入力に対して、免震クリアランス範囲内に変位が収まり、かつ加速度は S モデルの 2 倍以内に抑えられる条件を抽出する。Fig.8 から入力倍率が上がるにつれて条件が絞られていることが分かる。入力倍率 1 および 1.5 ではクライテリア内かつパレート解である硬化型復元力と回転慣性質量のパラメータはそれぞれ 0.5 と 0.3 である。倍率 0.5 の場合はパレート解ではないもののクライテリアを満たすため、この解を最適解として定める。

4.2 応答に関する考察

主に変位は KMM004 EW に、加速度は JMA Kobe NS によって最大応答が決定づけられていた。上記の 2 波に着目して応答についての考察を行う。

Table 3 Parameter of the analysis model

Parameter	Value
Mass, m	3950 kg
Linear stiffness, k	13597 N/m
Natural period, T	3.39 s
Nonlinear stiffness ratio	0.0-2.0 (0.1increments)
Virtual mass ratio γ	0.0-2.0 (0.1increments)
Viscous damping, h	10 %

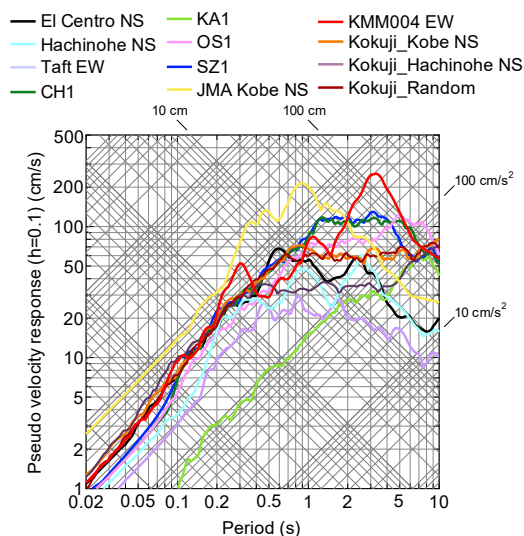


Fig. 5 Pseudo response spectrum ($h=0.1\%$)

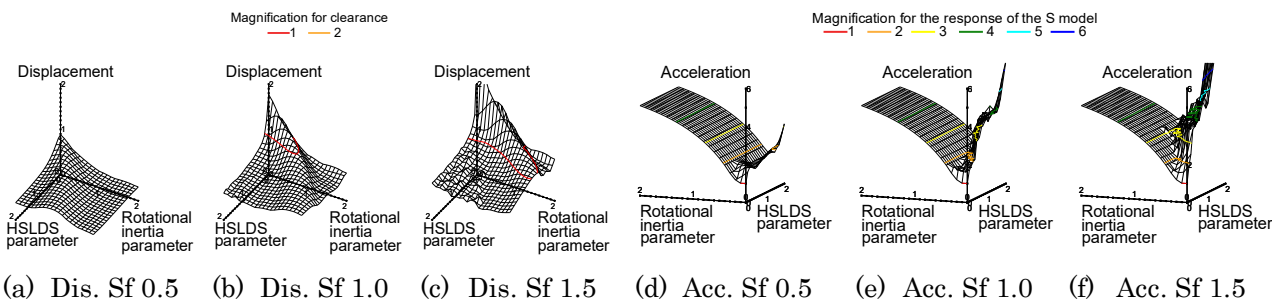


Fig. 6 Maximum for each parameter to all seismic excitation (Sf: Scaling factor)

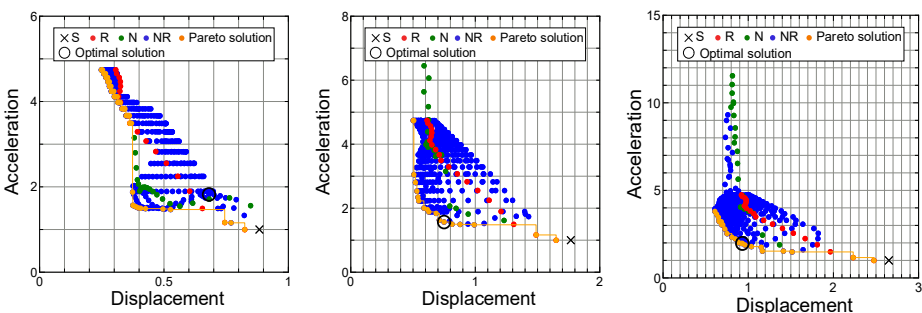


Fig. 7 Pareto solution for maximum displacement and acceleration

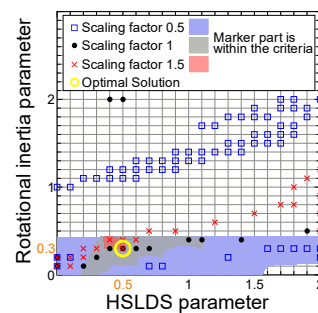


Fig. 8 Extraction of optimal solution

回転慣性質量のパラメータが 0.3 の R モデルを $R_{0.3}$ 、硬化型復元力のパラメータ 0.5 の N モデルを $N_{0.5}$ 、回転慣性 0.5、硬化型復元力 0.3 の最適化した NR モデルを NR* とする。S, $R_{0.3}$, $N_{0.5}$, NR* モデルに入力倍率 1.5 の KMM004 EW を入力した際の時刻歴応答波形を Fig.9 に示す。 $N_{0.5}$, NR* モデルの応答は S, $R_{0.3}$ モデルの半分以下に抑えることができています。25 s 以降の各モデルの応答では、S モデルに対して $N_{0.5}$, NR* モデルは応答周期が短くなり、それ以降の応答のピークがあまり変化していない。KMM004 EW の卓越周期は 3~4 s であり、S モデルの固有周期は 3.39 s であるため、S モデルでは共振により応答が増大している。Fig.10 に Fig.9 の変位に対するフーリエスペクトルを示す。Fig.10 から $N_{0.5}$, NR* モデルでは 0.2~0.5 Hz にかけて応答の山が複数確認できる。硬化型復元力は変位が増大すると接線剛性を増大させ、応答変位に応じて固有振動数を高振動数側にシフトすることで変位を抑制できると推察される。Fig.6 の(d)(e)(f)および Fig.8 において、仮想質量を約 0.4 以上に設定すると JMA Kobe NS により、少なくとも回転慣性質量による影響で S モデルに対しての応答加速度が 2 倍以上となっている。ここで、Fig.11 に減衰 h が 10 % の R モデルの調和振動に対する絶対加速度応答倍率 $|H(\omega)|$ を示す。横軸 ζ は対象物の固有振動数に対する加振波の振動数で表した振動数比である。仮想質量が 0 のときに振動数比 1 で共振点が生じるように基準化する。Fig.11 から、高振動数比では、対象物の実質量に対する仮想質量を表した仮想質量比 γ が大きくなるにつれて絶対加速度応答倍率が 1 に漸近していることがわかる。仮想質量比を大きく設定すると JMA Kobe NS のような高振動数側で卓越する地震動に対して免震による加速度低減効果を十分に発揮できなくなる可能性がある。

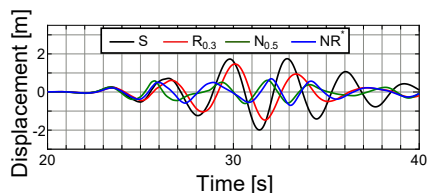


Fig. 9 Time history response for KMM004 EW

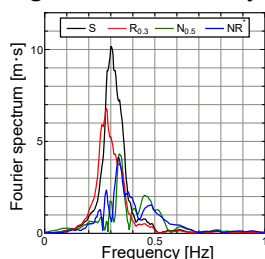


Fig. 10 Fourier spectrum for Fig. 9

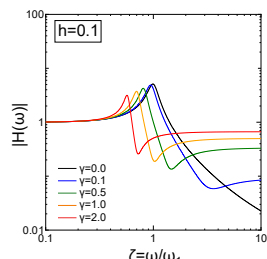


Fig. 11 Acceleration response magnification

4.3 固有周期を変化させた場合の応答

S, $R_{0.3}$, $N_{0.5}$, NR* モデルの固有周期を 0~4 s に変化させた場合の 12 波による地震波加振を行った。Fig.12 に固有周期ごとの各モデルの最大応答変位と最大応答加速度を示す。入力倍率 1 として、変位と加速度はこれまでの検討と同様に基準化した値で評価する。変位については、固有周期 0~4 s の NR* モデルで免震クリアランス範囲内に抑えることができています。S モデルと $N_{0.5}$ モデルを比較すると硬化型復元力を備えることで、固有周期 2~4 s で高い変位抑制効果を確認できる。加速度については、 $N_{0.5}$ と NR* モデルの応答を比較すると回転慣性質量を備えることで、固有周期によらず応答加速度を低減することができています。固有周期 0~3.3 s までの NR* モデルでは、S モデルの応答の 1.5 倍範囲内に抑えることができています。

5. まとめ

従来の免震建物に硬化型復元力と回転慣性質量を備えた変位抑制型免震構造を実大変位スケールの免震試験体として再現し、振動台実験を実施した。また、時刻歴応答解析から変位抑制型免震構造の最適化および振動特性の把握を行った。得られた知見は以下の通りである。

1. 変位抑制型免震構造に対して本研究で構築したモデルの時刻歴応答解析の妥当性がある。
2. 免震建物に硬化型復元力を備えることで変位抑制が可能である。
3. 硬化型復元力を単体で備えるよりも回転慣性質量と併用すると、広範囲の固有周期の免震建物において応答加速度の低減が可能である。

参考文献

1) 日本建築学会：東日本大震災から 10 年—建築振動分野の課題と展望—, 2020.12.4 2) 射場淳, 他：硬化型復元力と回転慣性質量を組み合わせた変位抑制型免震構造に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.67B, pp.539-548, 2021.3 3) 渡辺宏一, 他：強非線形要素と大質量比の仮想質量要素を組み合わせた振動制御に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 722 号, pp.675-683, 2016.4

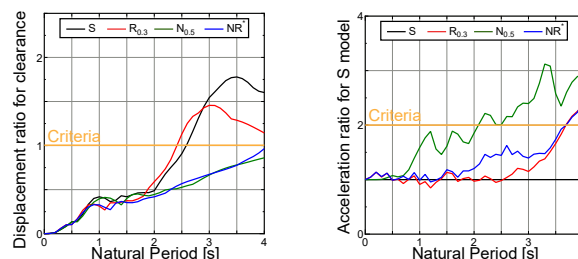


Fig. 12 Response spectrum for each model