
論 文

NS-SSB 振動台実験報告

～球面すべり支承を用いた3層免震建屋の振動台実験報告～

NS-SSB Shake Table Test ～Shake Table Test Of Three-Story Frame Isolated With Spherical Sliding Bearing (NS-SSB)～

山崎 伸介 Shinsuke YAMAZAKI
都市インフラセクター 建築本部 設計技術部
商品技術室 シニアマネジャー

渡辺 厚 Atsushi WATANABE
都市インフラセクター 建築本部 設計技術部
商品技術室 シニアマネジャー

抄 録

防災科学技術研究所(つくば)にある大型耐震実験施設で実施した球面すべり支承(NS-SSB)を適用した免震建屋の振動台実験結果について報告する。免震建屋は総重量約600 kNで、支承1基当たりの支持面圧は平均約70MPaと実際の高面圧時を再現した。NS-SSBは2種類のタイプ、すなわち、低摩擦タイプ、中摩擦タイプそれぞれについて検討した。実験は主に各種観測地震動の繰り返し加振を行い、支承が供用期間中に受ける設計繰り返し地震動をはるかに超える過酷なものであった。実験の結果、NS-SSBは十分な耐久性と免震効果を発揮し、これまでの検討結果を裏付けるものであった。

Abstract

This Paper describes about the results of a shaking table test of a seismic isolation building to which a spherical sliding bearing (NS-SSB) was applied. The test was conducted at a large-scale seismic test facility of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience located at Tsukuba, Japan. The average support pressure at the bearing was about 70 MPa which could reproduce the full loading of actual building design condition. Low friction type and medium friction type of NS-SSB were used for the bearings. Several level 2 class seismic ground motions were input which were far exceeding the expected occurrence number that the actual building is to encounter during the design period. As a result of the experiment, NS-SSB showed a large robustness, and the seismic isolation performance was quite well which validate the evaluation having conducted in the past.

1 緒言

当社が独自開発した球面すべり支承(Spherical Sliding Bearing, 以降 NS-SSB)¹⁾は、2014年のリリース以降販売を順調に伸ばしており、採用件数は約6400台に達している(2022年8月現在)。NS-SSBは、振り子の原理と、特殊摩擦材による高面圧で安

定した摩擦減衰を期待でき、長周期化とコンパクト化が容易なことから、これまで積層ゴム支承が主体となっていた国内免震市場に受け入れられた。

NS-SSBの性能検証については、当初、当社が保有する大型二軸せん断試験装置を用いて、主に静的な実物大載荷試験によって行ったが、その後、アメリカカリフォルニア州立大学サンディエゴ校(以

降、UCSD)において、さらに動的な性能検証も行いその信頼性を高めてきた^{2)~6)}。これら一連の検討が、設計者にも評価され今日に至っている。

しかしながら、NS-SSBを用いた免震建屋の設計地震動に対する免震性能については、各種依存性など製品性能パラメータを用いた解析的な検討によっているところが大きく、E-ディフェンスにおける低摩擦タイプを用いた実験検討例^{7,8)}があるものの、支承面圧が実際の建築構造物と比較して小さく、支承の検証を目的とした免震建屋の免震性能について、これまで直接実施する機会がなかった。

今回、NS-SSBを用いた免震建屋の振動台実験を防災科学技術研究所(つくば)にて実施する機会に恵まれた。本報告では、各種地震動に対するNS-SSBの免震効果についての検証結果について報告する。

2 NS-SSBの概要

NS-SSBはSUS板を配置した球面状のコンケイブプレートに上下に配したダブルコンケイブタイプの球面すべり支承(図1)であり、特殊摩擦材を両面に設置したスライダが鉛直荷重を支持するとともに、地震時に球面上を摺動することにより上部建屋の固有周期を長周期化し、地震の固有周期から乖離して入力地震動を低減させるとともに、地震エネルギーを摩擦熱に変換消散し応答変位を減衰させる。すなわち、NS-SSBはアイソレーターとダンパーを兼ね備える高機能な免震支承である。

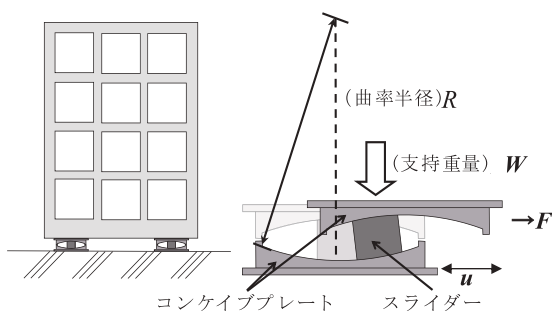


図1 球面すべり支承の概要
Fig. 1 Feature of Spherical Sliding Bearing

図2に、ダブルコンケイブタイプの球面すべり支承について、水平載荷時の力の釣り合いを示す。

ここで、下および上のコンケイブプレートの曲率

半径を R_1 , R_2 , スライダ高さを h , 時刻 t の鉛直支持荷重 $W(t)$, 水平荷重 $F(t)$, 摺動面の摩擦係数およびスライダとの相対変位をそれぞれ, $\mu_1(t)$, $\mu_2(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$, スライダとコンケイブプレート面に発生する摩擦力および法線方向の力をそれぞれ, $F_{f1}(t)$, $F_{f2}(t)$, $S_1(t)$, $S_2(t)$ とすると, 下コンケイブプレートの力の釣り合いより, 式(1), (2)が得られる⁹⁾。

$$W(t) + F_{f1}(t) \sin \theta_1(t) - S_1(t) \cos \theta_1(t) = 0 \quad (1)$$

$$F(t) - F_{f1}(t) \cos \theta_1(t) - S_1(t) \sin \theta_1(t) = 0 \quad (2)$$

また、相対変位 $u_1(t)$ は式(3)で表される。

$$u_1(t) = (R_1 - h/2) \sin \theta_1(t) \quad (3)$$

式(1), (2), (3)より曲率半径が十分大きいとして, 式(4)が得られる。

$$F(t) = F_{f1}(t) + \frac{W(t)}{R_1} u_1(t) \quad (4)$$

同様にして、上コンケイブプレートの力の釣り合い式(5)が得られる。

$$F(t) = F_{f2}(t) + \frac{W(t)}{R_2} u_2(t) \quad (5)$$

また、支承全体の水平方向変位は式(6)で表せる。

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (6)$$

式(4), (5)を式(6)に代入すると式(7)が得られる。

$$F(t) = \frac{R_1 F_{f1}(t) + R_2 F_{f2}(t)}{R_1 + R_2} + \frac{W(t)}{R_1 + R_2} u(t) \quad (7)$$

NS-SSBでは、上下の曲率半径は $R_1 = R_2 = R$ で等しく、摩擦係数も $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ と同一であり、変位 $u(t) = 0$ の時、式(8), (9)が得られることから、式(7)は式(10)で表される。

$$F_{f1}(t) = \mu_1(t) W(t) \quad (8), \quad F_{f2}(t) = \mu_2(t) W(t) \quad (9)$$

$$F(t) = \mu(t) W(t) + \frac{W(t)}{2R} u(t) \quad (10)$$

以上より、NS-SSB稼働時の復元力特性は図3に示すようにバイリニアで近似され、切片荷重 Q , 二次剛性の接線周期 T , 重力加速度 g , 二次剛性 K とすると次の関係式が得られる。

切片荷重 $Q = \mu(t)W(t)$ (11),

二次剛性の接線周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{2R}{g}}$ (12),

二次剛性 $K = \frac{W(t)}{2R}$ (13)

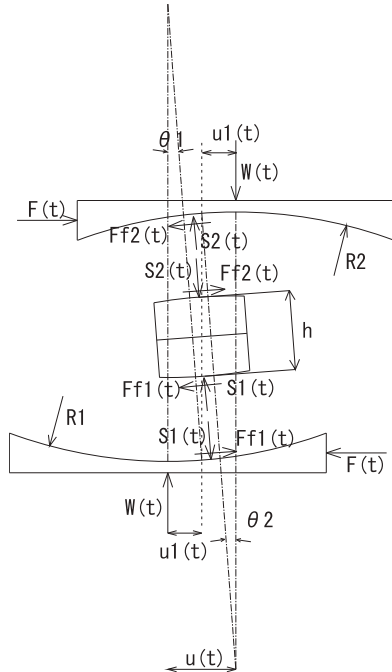


図2 ダブルコンケイブタイプ力の釣り合い
Fig. 2 Equilibrium of Internal Force

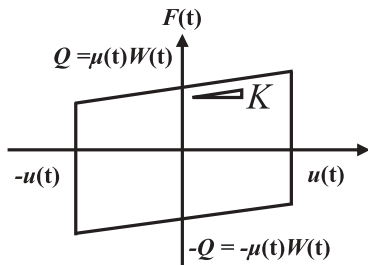


図3 復元力特性
Fig. 3 Hysteresis Curve of NS-SSB

ここで、実際の摩擦現象は単純なクーロン摩擦理論には抛らず、時々刻々の摩擦面温度、面圧、速度に依存する。設計上は、これらの各種依存性を考慮した上下限の摩擦係数を考慮することや、あるいは、汎用時刻歴応答解析に各種依存性を取り込み評価してきている。

依存性を考慮した摩擦係数 $\mu(t)$ は、これらを考慮した式(14)で表すことができる。

$$\mu(t) = \alpha(t) \times \beta(t) \times \gamma(t) \times \mu_0 \quad (14)$$

ここで、 μ_0 はNS-SSBの基準摩擦係数で、基準速度400mm/sec、基準面圧60MPa、規定振幅±200mm、基準温度20度、正弦載荷3cycle目の水平荷重を鉛直荷重で除したy切片平均値で定義する。 $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 、 $\gamma(t)$ は、速度 $v(t)$ 、温度 $\theta(t)$ 、面圧 $\sigma(t)$ による依存係数を表す。なお、本検討における実験値と計算値の比較(4-3節)においては、温度 $\theta(t)$ は、概ね一定とし、また、繰り返し摺動に伴う摩擦面温度上昇による摩擦係数の低減は考慮しない。中摩擦、低摩擦タイプの依存性については表1に示す^{10), 11)}。なお、これらの依存性については、当社富津研究所内の二軸せん断試験装置を使用した試験やUCSDにおける大型載荷試験機によりその妥当性を検証してきている。

表1 NS-SSBの各種依存係数
Table1 Friction Dependencies of NS-SSB

	中摩擦タイプ	低摩擦タイプ
基準摩擦係数	$\mu_0 = 0.043 \pm 0.01$	$\mu_0 = 0.013 \pm 0.007$
速度依存式	$\alpha(t) = 1.0 - 0.55 \times e^{-0.019v(t)}$	$\alpha(t) = 1.03 - 0.55 \times 1.5^{-0.018v(t)}$
温度依存式 ^{※1}	$\beta = 1$	$\beta = 1$
面圧依存式 ^{※2}	$\gamma(t) = 2.03 \times \sigma(t)^{-0.19} + 0.068$	$\gamma(t) = 20 \times \sigma(t)^{-0.9} + 0.5$

※1 環境温度による影響無しとし第4-3節における計算値との比較においては温度による依存性は考慮しない
※2 $\sigma(t) = W(t) / A_s$, A_s : スライダー断面積

3 実験概要

実験は、防災科学技術研究所(つくば)が所有する大型耐震実験装置を利用して行った。主な実験の目的は、①中摩擦、低摩擦タイプ実用高支持面圧時の免震性能把握、②計算値と実験値、応答解析の検証のほか、振動台実験ノウハウの蓄積などである。

3-1 試験体

免震建屋の概要を図4、7に示す。免震建屋は4本の柱基部を球面すべり支承により支持された、スパン2000mm×6000mmの3層構造である。1~3階各層の鉄骨重量はそれぞれ67.7kN、44.1kN、25.5kNであり、全体重量137.3kNである(表2)。

免震建屋には鉄製の錘を積載し実際の建屋重量および積載重量を再現している。錘の配置状況を図5に示す。24.5kNの鉄製の錘を1層床に9枚、2層床に9枚の計18枚を均等に並べ、錘の総重量は441kNとなる。実際の物流倉庫などの免震建屋の積載重量

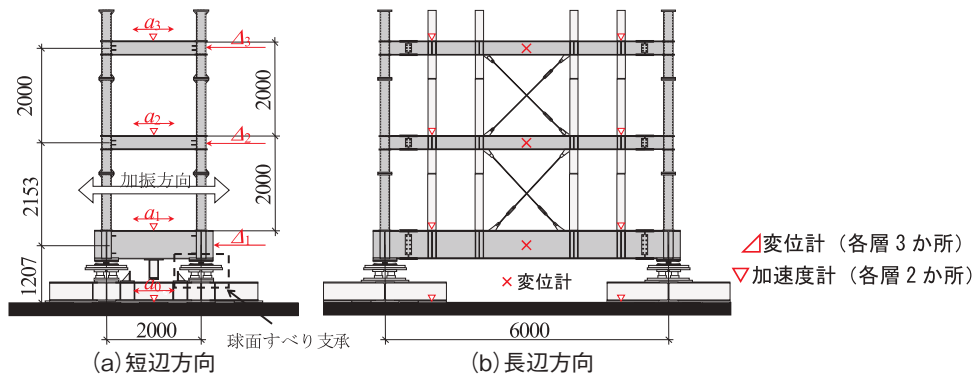


図4 免震建屋概要と計測
Fig. 4 Frame Structure and Measurement Points

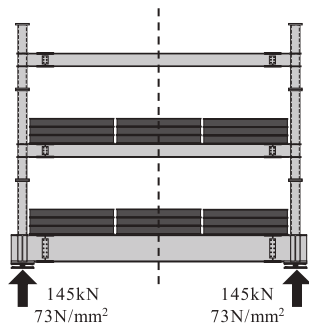


図5 錘の配置状況
Fig. 5 Steel Weight Loading Condition

表2 免震建屋重量
Table2 Weight Condition of Frame Structure

	鉄骨 kN	錘 kN	各層計 kN
1層	67.7	220.5	288.2
2層	44.1	220.5	264.6
3層	25.5		25.5
合計	137.3	441	578.3

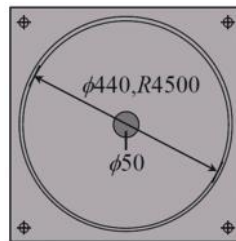
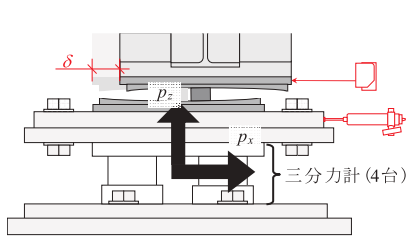


図6 球面すべり支承の概要と支承周りの計測
Fig. 6 NS-SSB and Measurement Devices

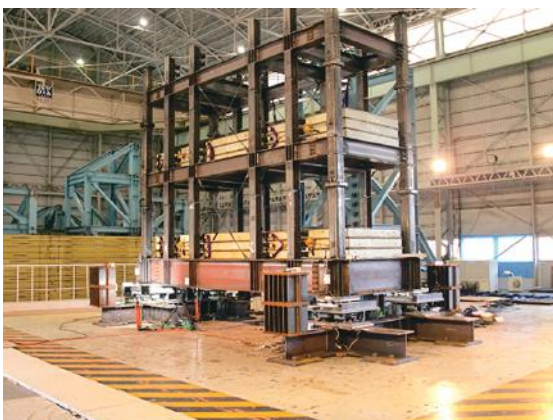


図7 免震建屋外観(写真)
Fig. 7 Frame Structure with Steel Weight



図8 球面すべり支承設置状況(写真)
Fig. 8 NS-SSB Under the Frame Structure

割合(約50%)と比較すると大きいものとなった。また、各支承の鉛直支持荷重は、145kN(73MPa)となり、基準面圧60MPaよりも20%ほど大きな面圧となった。なお、構造骨組はL2地震動に対して弾性範囲に収まるように設計している。

球面すべり支承の概要を図6、8に示す。支承のコンケイブプレートの球面部外径は $D = 440\text{mm}$ 、曲率半径 $R = 4500\text{mm}$ 、スライダー直径 $D_{sl} = \phi 50\text{mm}$ で、設計限界変形は $\delta_{max} = 390\text{mm}$ となり、二次剛性の接線周期は6.0secとなる。支承は、低摩擦、中摩擦タイプの2種類を使用し^{10),11)}、各試験体は、事前の出荷試験を行った。計測した摩擦係数の平均値については、表3中に数値を記載する。なお、低摩擦、中摩擦タイプそれぞれの各支承は、実験途中で一切交換することなく全ての加振を同一の支承を用いて実施している。

3-2 入力地震動

入力地震動および試験条件を表3に示す。地震動は神戸NS波、八戸EW波、BCJ-L2波、エルセントロNS波の4種類とした。神戸NS波は短周期成分を含む地震動であり、八戸EW波、BCJ-L2波、エルセントロNS波は長周期成分を含む地震動である。また、地震動は振動台の最大振幅制限(220mm)を考慮して、0.1~0.3Hzのハイパスフィルターをかけ、実験ケースに応じて加速度倍率を変更し最大速度が25~75kineとなるように調節して与えた。各地震動の速度応答スペクトルとNS-SSBの等価固有周期の関係を図9に示す。加振方向は、載荷条件の影響が出やすくなるように短辺方向(図4(a))に加振した。

なお、実験装置には入力地震動を正確に再現するフィードバック機能が備わってないため、同じ入力条件でも、建屋支承条件等により、実際に振動台上で観察される加速度の大きさは若干異なった。

表3 入力地震動および試験条件
Table3 Input Ground Motion and Test Condition

	出荷試験平均値		支承面圧	地震動	
	低摩擦	中摩擦	平均値	種類	最大速度
二次剛性の接線周期 6.0(s)	0.0157	0.0507	73N/mm ²	神戸NS波	25kine
					50kine
				八戸EW波	25kine
					50kine
				BCJ L2波	25kine
					50kine
				エルセントロNS波	25kine
					50kine

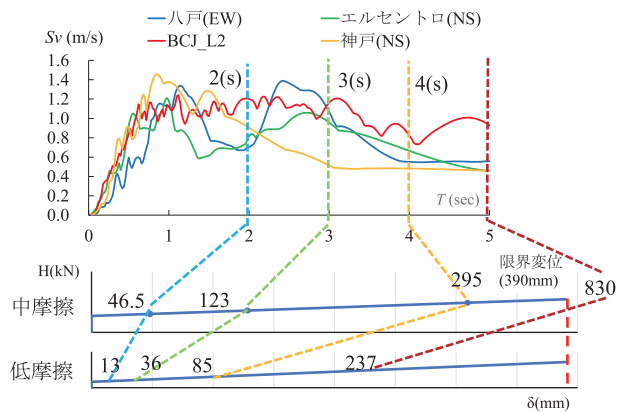


図9 入力地震動速度応答スペクトルとNS-SSB等価固有周期の関係
Fig.9 Velocity Response Spectra and Equivalent Period of NS-SSB

3-3 計測方法

各球面すべり支承の基部には4台の三分力計が設置され、水平二方向および鉛直方向荷重について計測した(図6)。変位は、各層の長辺方向のспан中央位置(図4)、および1層の柱架節点位置について加振水平方向の変位を振動台上から計測した(図6)。また、球面すべり支承の上下のコンケイブプレートの変位の差から支承相対変位 δ を算出した(図6)。加速度計は、振動台上、各層それぞれ2点に設置し、平均加速度を算出した(図4)。

4 実験結果

実験結果は、最も大きな入力地震動における結果、すなわちに神戸NS波 75kine、八戸EW波 50kine、BCJ-L2波 50kine、エルセントロNS波 50kineについて述べる。なお、計測値については、振動台上のノイズを消去するため10Hzのローパス

フィルターをかけた。

4-1 応答加速度

図10, 11には低摩擦タイプ, 中摩擦タイプそれぞれの振動台上の入力加速度(黒線)と免震建屋1階の応答加速度時刻歴波形(赤線)を示し, それぞれの最大および最小加速度について*印で位置を示し数値を記載している。

図10より, 低摩擦タイプの免震建屋1階の応答加速度は, 入力加速度に対して大きく低減していることがわかる。神戸NS波 75kine, 八戸EW波 50kine, BCJ-L2波 50kine, エルセントロNS波 50kineそれぞれの最大入力加速度絶対値 6.188m/sec^2 , 3.272m/sec^2 , 4.719m/sec^2 , 4.335m/sec^2 に対して, 建屋1階のそれは, それぞれ, 0.374m/sec^2 , 0.544m/sec^2 , 0.545m/sec^2 , 0.415m/sec^2 と概ね約 $1/10$ 以下となっている。

一方, 図11より中摩擦タイプでは, それぞれの最大入力加速度絶対値 5.848m/sec^2 , 3.169m/sec^2 , 4.393m/sec^2 , 4.165m/sec^2 に対して, 建屋1階のそれは, それぞれ, 1.479m/sec^2 , 1.501m/sec^2 , 1.447m/sec^2 , 1.413m/sec^2 と概ね約 $1/3$ 以下に低減されており, 低摩擦タイプほど低減効果は大きくないものの十分な免震効果を発揮していることがわかる。

いずれも最大応答加速度の発生時は, 入力加速度が最大となる時点と相違しており, 総じて, 入力加速度が最大となる時点より早い時点で最大の応答を示している。

図12には, 建屋1階の最大応答加速度を振動台上の最大入力加速度で割った応答倍率と振動台上の最大入力加速度の関係について示す。図12より, 低摩擦タイプ, 中摩擦タイプともに最大入力加速度が大きくなるに従い, 応答倍率が小さくなっており, 特にその低減割合(破線の傾き)は中摩擦タイプで大きいことがわかる。これは, 中摩擦タイプでは, 入力加速度が小さいと支承の滑りが十分起きず, 入力加速度が大きくなるに従い滑り変位が大きくなり, 長周期化による免震効果を発揮してくるためであると考えられる。

図13には振動台上($h=0\text{mm}$)の入力最大加速度と建屋高さ方向の最大応答加速度を示す。低摩擦タイプにおいては, 1層目($h=1200\text{mm}$)から3層目($h=5400\text{mm}$)まではほぼ等しい応答加速度となっており, 概ね1質点系の挙動を示していると考えられる。一方, 中摩擦タイプにおいては, 1層目と2層目の最大応答加速度は概ね等しくなっているが, その低減の割合は低摩擦のものより小さく, また, 3層目の応答加速度は若干大きくなっていることがわかる。また, 低摩擦, 中摩擦タイプともに, 入力加速度の大きさが変わっても1層目の応答加速度の大きさは概ね一定である。よって, 入力加速度の大きさが大きいほど応答低減効果が大きいことになり, 前述の図12の説明を補足するものである。

4-2 水平荷重-変位履歴曲線

図14, 図15(黒線)には, 低摩擦タイプ, 中摩擦タイプそれぞれの加振方向の慣性力と免震建屋1階中央部の変位の履歴曲線を示す。ここで, 慣性力については各層の慣性力の総和であり免震支承の応答水平荷重と等価となる。

図14, 図15(黒線)の低摩擦タイプと中摩擦タイプを比較すると, 低摩擦タイプでは水平変位が大きい, 水平荷重は小さいものとなっている。いずれのタイプも図3で示したバイリニア型を基本とした履歴曲線となっているが, 低摩擦タイプにおいては, 特に神戸NS波, 八戸EW波においては, 水平変位が比較的小さい範囲において, 水平荷重が一部大きな軌跡を描いているところがある。

4-3 水平荷重の理論計算値との比較

図14, 図15(赤線)は, 2節で述べたNS-SSB摩擦材の依存性を用いた応答水平荷重の理論計算値を示す。これは, 実験から得られた建屋中央部1階の水平変位時刻歴とロードセルから得られた支承鉛直荷重時刻歴, およびそれらから時刻歴の速度, 面圧を算出し, 基準摩擦係数 μ_0 として表3に示す出荷試験で得られた摩擦係数を用いて算出した。

低摩擦タイプでは実験値と計算値とで概ね一致しているが, 中摩擦タイプでは計算値の方が実験値より総じて若干小さい値となっている。これは, 計算値においては, 基準摩擦係数 μ_0 を正弦波載荷した3

cycle 目の摩擦係数で定義し算出しており、摩擦熱の発生による繰り返し依存性(1cycle 目の y 切片摩擦係数は低摩擦タイプでは3cycle 目の約1.1倍、中摩擦タイプでは約1.3倍で中摩擦の方が繰り返し依存性が大きい。)について考慮していないためと考えられる。

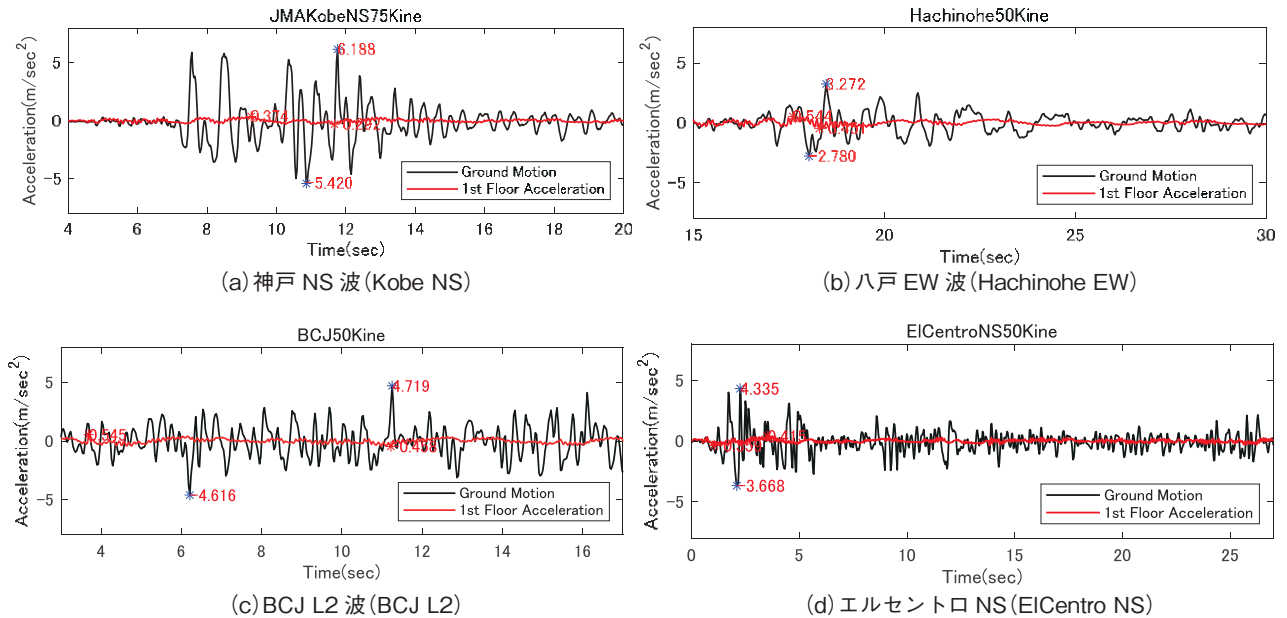


図10 低摩擦タイプ振動台(入力)加速度と免震建屋1階応答加速度時刻歴波形
 Fig. 10 Low Friction Type Input Acceleration and Acceleration Response of 1st Floor of Frame Structure

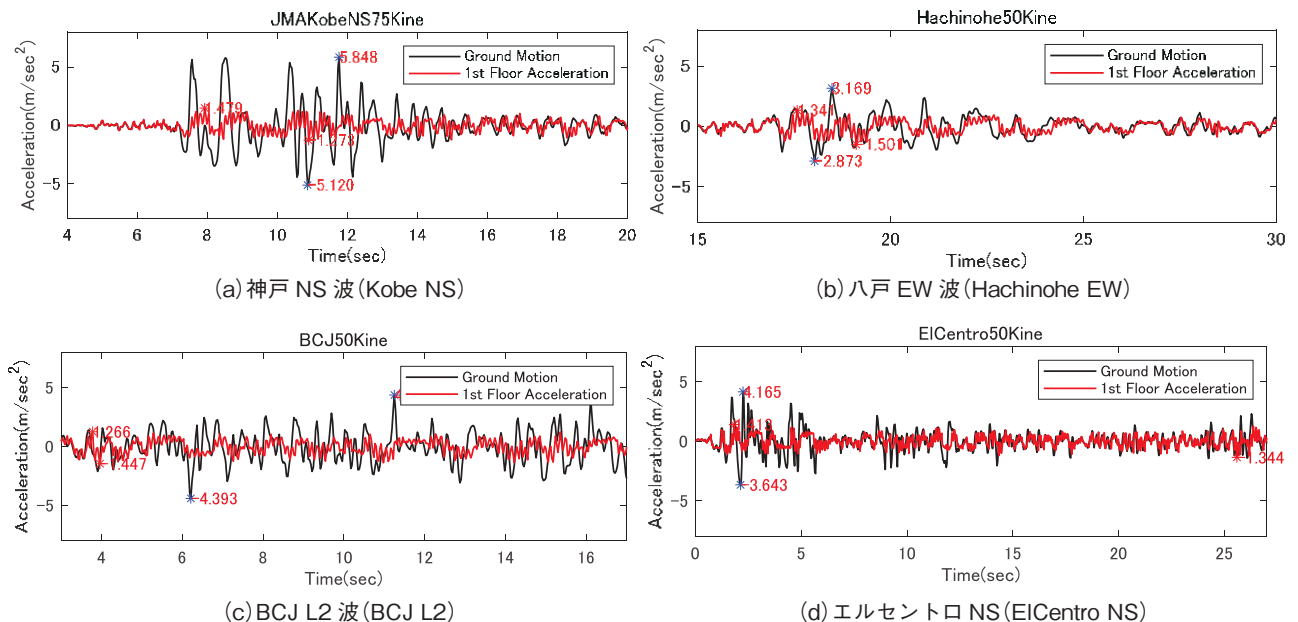


図11 中摩擦タイプ振動台(入力)加速度と免震建屋1階応答加速度時刻歴波形
 Fig. 11 Middle Friction Type Input Acceleration and Acceleration Response of 1st Floor of Frame Structure

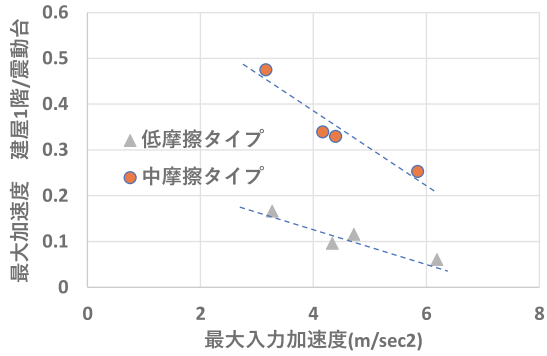


図12 最大入力加速度と最大加速度応答倍率の関係
Fig. 12 Maximum Acceleration of Input Wave and Reduction Rate of Response Acceleration at 1st floor

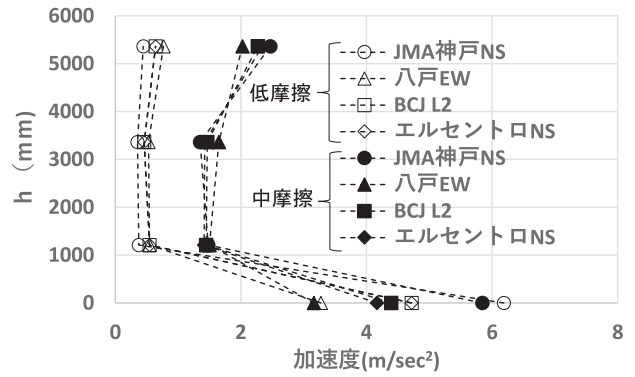
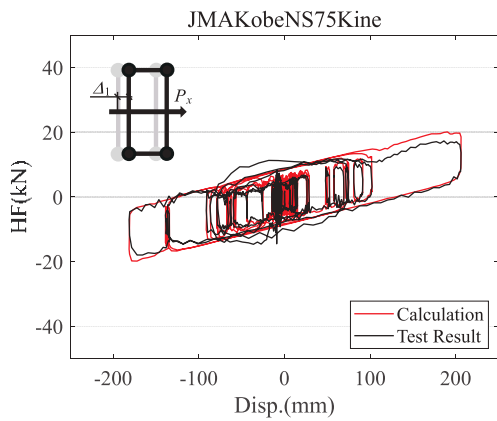
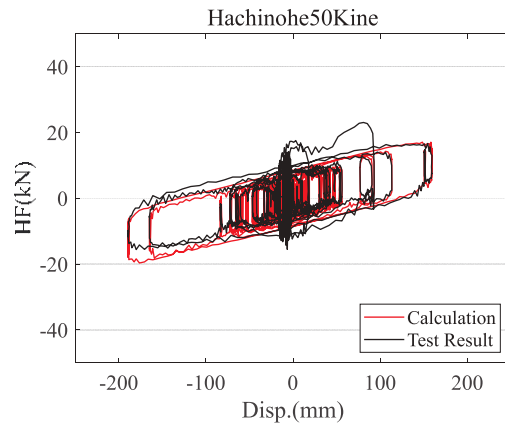


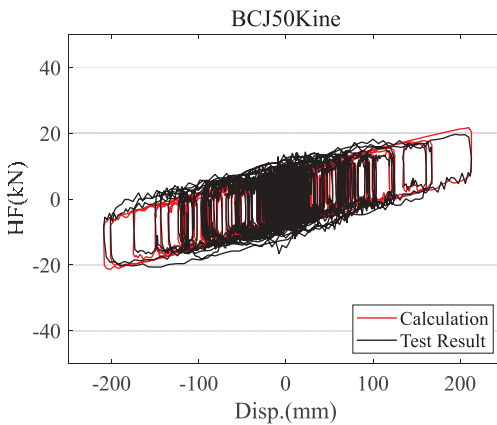
図13 最大加速度の高さ方向の分布
Fig. 13 Maximum Acceleration at Each Floor



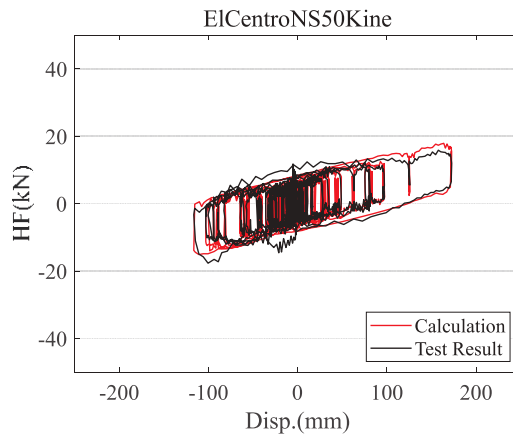
(a) 神戸 NS 波 (Kobe NS)



(b) 八戸 EW 波 (Hachinohe EW)



(c) BCJ L2 波 (BCJ L2)



(d) エルセントロ NS (EI Centro NS)

図14 低摩擦タイプ水平荷重-水平変位履歴曲線(実験値黒線, 計算値赤線)
Fig. 14 Low Friction Type Horizontal Force-Displacement Curve (Black Line: Test Results, Red Line: Numerical Calculation)

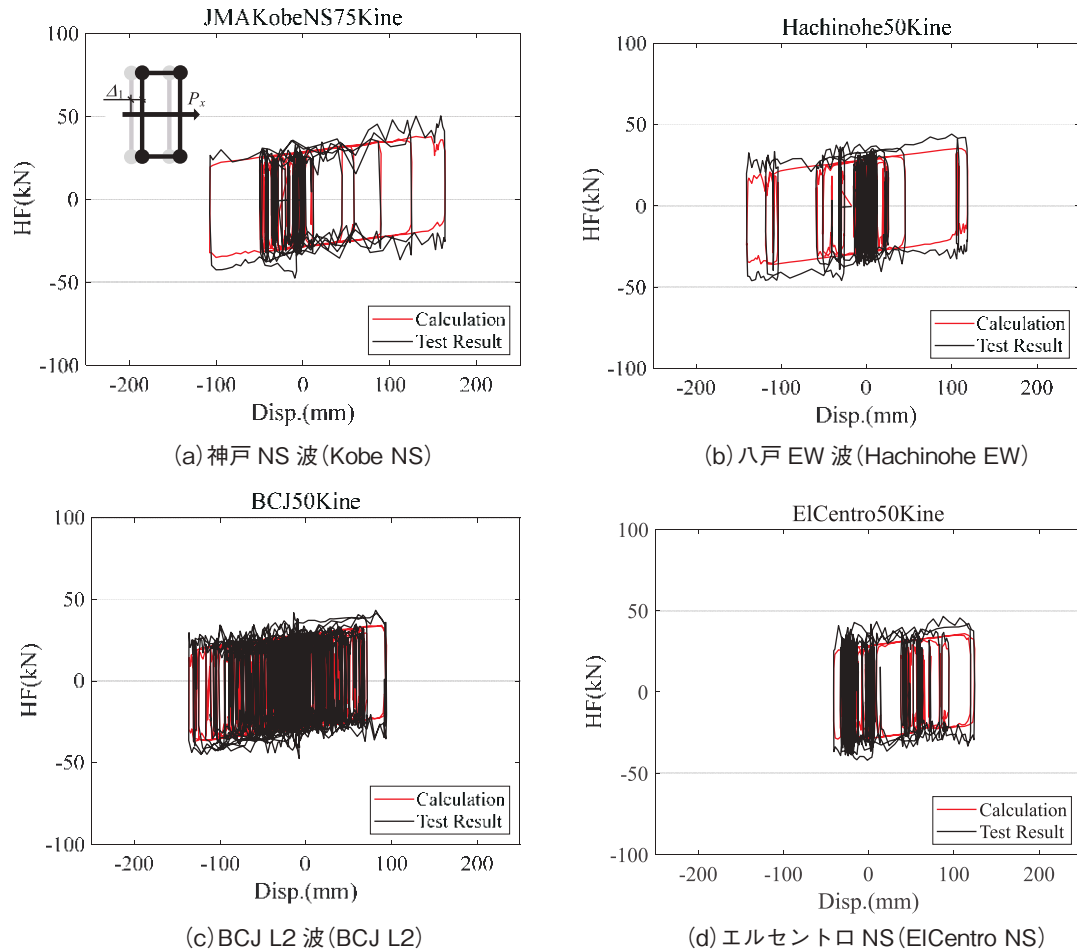


図15 中摩擦タイプ水平荷重—水平変位履歴曲線(実験値黒線, 計算値赤線)
 Fig. 15 Middle Friction Type Horizontal Force–Displacement Curve (Black Line: Test Results, Red Line: Numerical Calculation)

5 解析検証

5-1 解析モデル

実験結果について、文献^{5), 6), 12)}において報告された NS-SSB 時刻歴応答解析モデルを用いて検証する。特長として、支承の復元力特性を、すべり出し前の微小な弾性変形すなわち降伏曲面による摺動判定を備えたバネモデル(図16)により表現し、さらに、繰り返し载荷に伴う、摩擦摺動熱の上昇による摩擦係数の低減を考慮した点である。

具体的には、Newmark β 法を基本とした数値積分を用い、各時間ステップにおいて、更新した等価剛性を用いて応答加速度を更新する。また、その際に、降伏曲面に対してすべり有無を判断する。

摩擦係数については、各解析ステップにおいて、前述の速度依存、面圧依存を考慮する。また、SSB

の摺動により発生する摩擦熱については、コンケイブ中央部に設けたスライダーと等価な面積となる参照領域($r_{contact}$: 接触判定半径)に対して、接触摺動時の熱流束を計算(式15)し、接触しない時の放熱による温度低減も考慮して解析上の接触面温度を数値的に再現する(式16)。なお、この解析上の接触面温度については測定不可能であるため、摩擦係数を算出する際に使用する温度依存式(17)については、熱伝導解析により実験結果と整合が得られるようにパラメータを更新したものである¹³⁾。これらの依存性を用い、式(18)により、時々刻々の摩擦係数を算出する。ここで、パラメータCは時刻ゼロにおける滑り出し直前の摩擦係数で過去の実験結果から求めた推定値⁵⁾である。

本応答解析モデルを用いて、神戸 NS 波 75kine、八戸 EW 波 50kine それぞれの加振時における振動

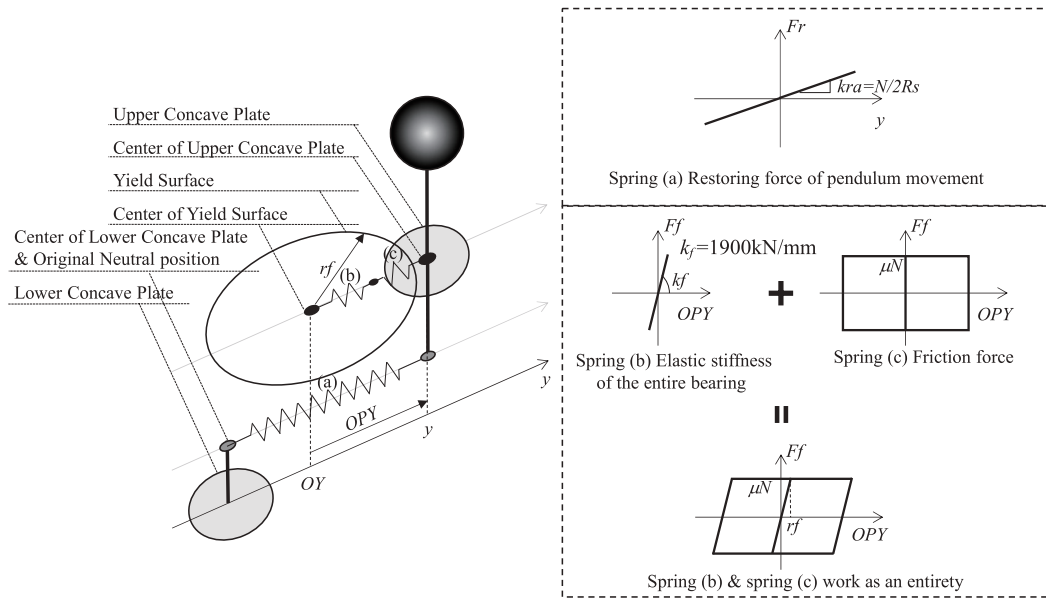


図16 摺動判定を考慮したバネモデルによる復元力モデルの構築⁵⁾
 Fig. 16 Analysis Model Considering Stick-Slip Behavior

台上で記録された加速度を入力加速度として時刻歴応答解析を実施した。

$$q(t) = \begin{cases} \mu(t) p(t) \frac{v(t)}{2} & \text{if } \delta \leq \sqrt{\pi \cdot r_{\text{contact}}^2} / 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta T(t) = \frac{\sqrt{D}}{k\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{q(t-\tau) d\tau}{\sqrt{\tau}} \quad (16)$$

$$\beta = 1.13 \times \exp(-0.007 T) \quad (17)$$

$$\mu(t) = C \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \quad (18)$$

$$C = 0.013 (\text{低摩擦タイプ})$$

$$= 0.0075 (\text{中摩擦タイプ})$$

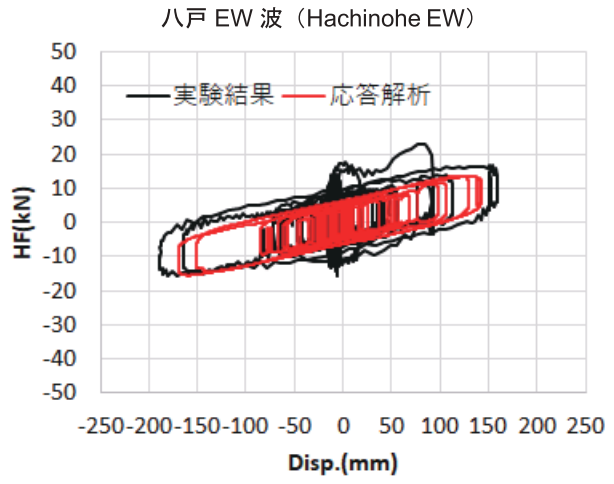
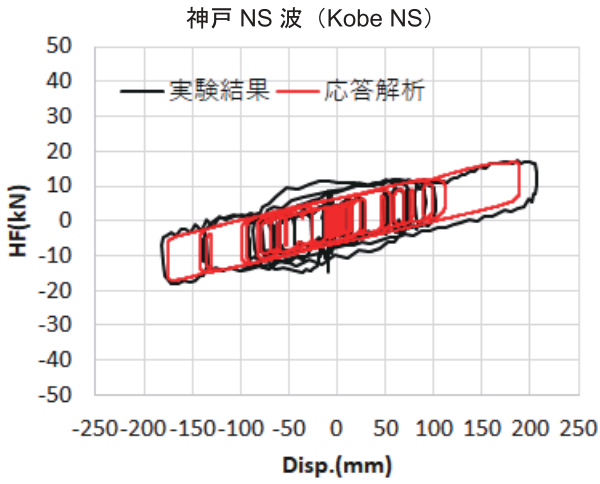
5-2 解析結果

図17, 18には低摩擦タイプ, 中摩擦タイプそれぞれの時刻歴応答解析結果について, a) 水平荷重-水平変位履歴曲線, b) 時刻歴変位, c) 時刻歴水平荷重それぞれについて(赤線)で示し, 実験結果(黒線)と比較している。

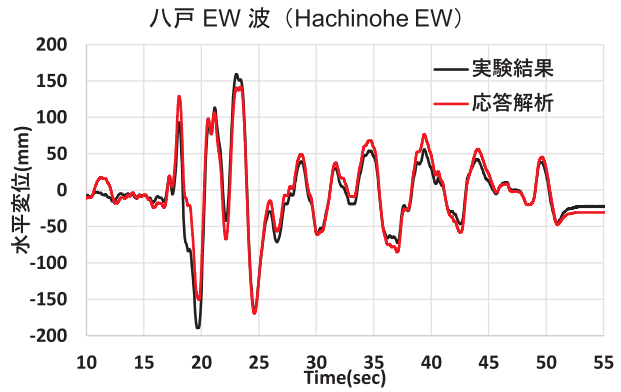
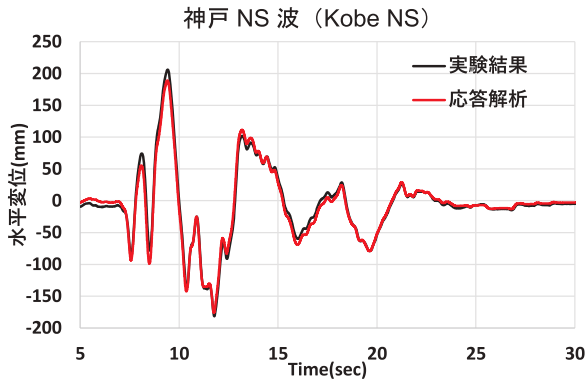
図17の低摩擦タイプにおいては, 神戸NS波, 八戸EW波ともに概ね, 応答解析結果と実験結果は良く一致したものとなっていることが分かる。a) 水平荷重-水平変位履歴曲線においては, 変位が小さい初期の段階において実験値の水平荷重が解析値より大きくなっている。これは, b) 時刻歴変位およ

びc) 時刻歴水平荷重の結果より, 初期の滑りがほとんど発生していない時期においては, 実験結果の水平荷重が応答解析結果より大きくなっていることから, すべり発生初期時の解析による再現性ととの相違であるといえる。また, 最大変位に対しては, 解析値が若干小さな結果となっていることがわかる。

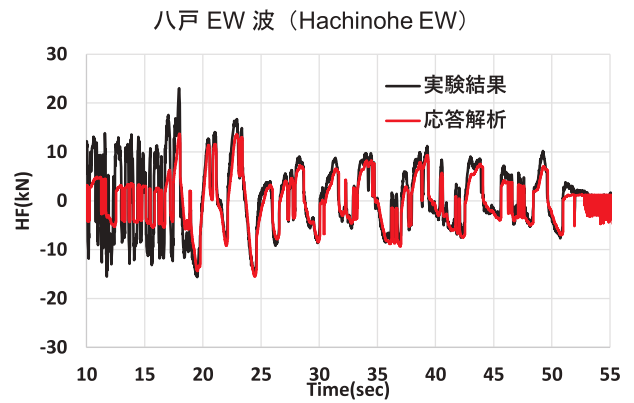
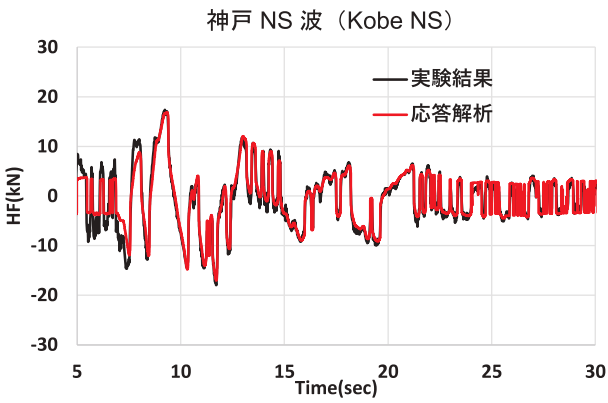
図18の中摩擦タイプにおいても, 神戸NS波, 八戸EW波概ね応答解析結果と実験結果は良く一致したものとなっていることが分かる。特に, a) 水平荷重-水平変位履歴曲線においては, 4-3節で求めた計算結果と比較して, 解析値と実験値の水平荷重がより近い値となっていることがわかる。b) 時刻歴変位においては, 実験結果においては, 前の試験の実験開始時の残留変位の影響が見られるが, 概ね同じ軌跡が得られている。c) 時刻歴水平荷重の結果においては, 応答解析結果の再現性はかなり高いといえることができる。



a) 水平荷重 - 水平変位履歴曲線
a) Horizontal Force Displacement Curve

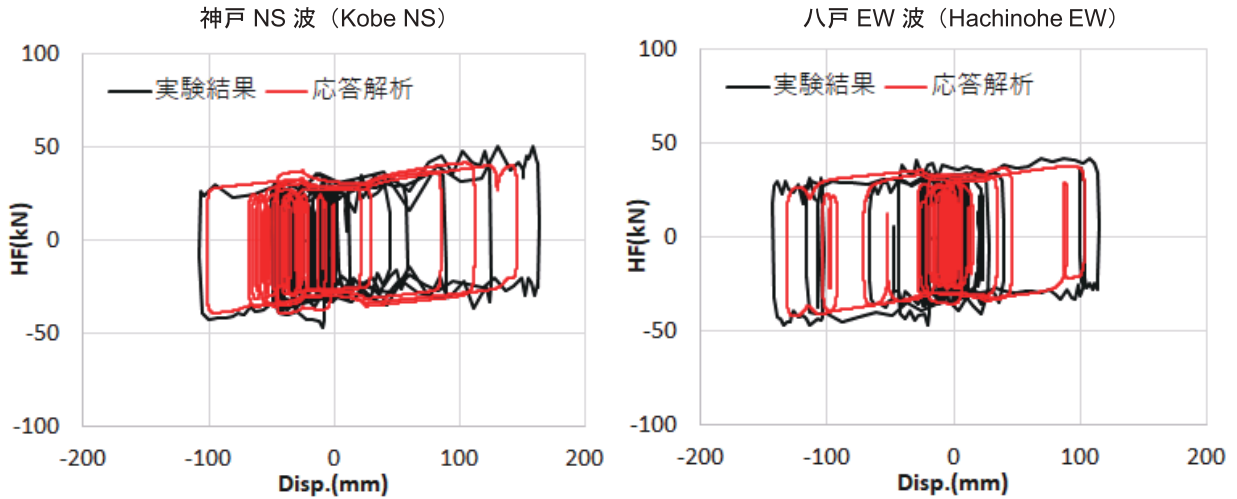


b) 時刻歴変位
b) Time History of Displacement

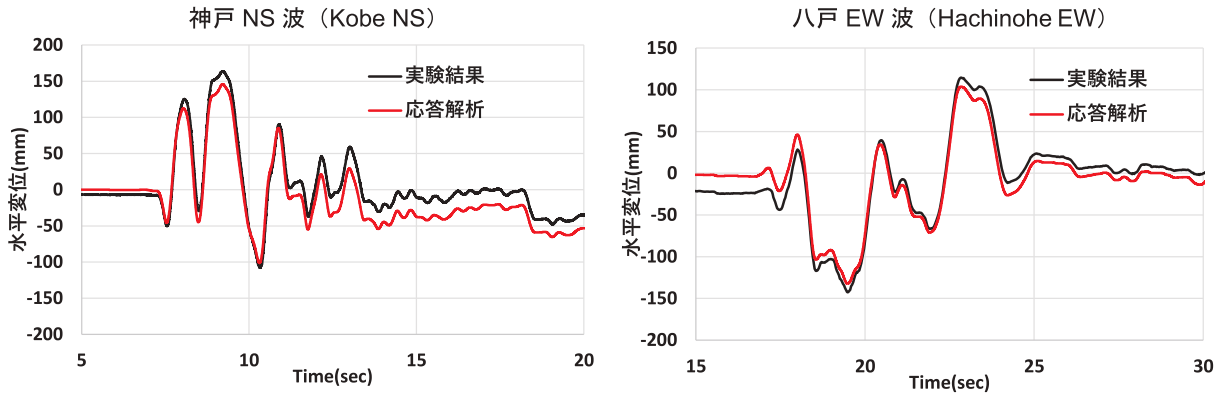


c) 時刻歴水平荷重
c) Time History of Horizontal Force

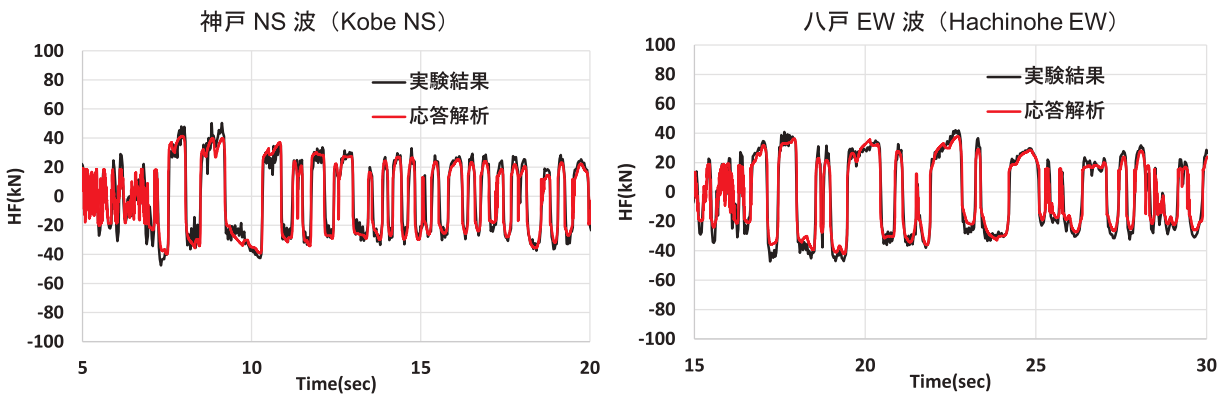
図17 低摩擦タイプ時刻歴応答解析結果(実験値黒線, 解析値赤線)
Fig. 17 Low Friction Type Time History Response Analysis Results (Black Line: Test Results, Red Line: Response Analysis)



a) 水平荷重 - 水平変位履歴曲線
a) Horizontal Force Displacement Curve



b) 時刻歴変位
b) Time History of Displacement



c) 時刻歴水平荷重
c) Time History of Horizontal Force

図18 中摩擦タイプ時刻歴応答解析結果(実験値黒線, 解析値赤線)

Fig. 18 Medium Friction Type Time History Response Analysis Results (Black Line: Test Results, Red Line: Response Analysis)

6 結言

以上より、NS-SSBを用いた免震建屋の振動台実験より以下のことが明らかとなった。

- ・低摩擦、中摩擦タイプの球面すべり支承を用いた実用高面圧時を再現した振動台実験を実施した結果、支承が供用期間中に受ける設計繰り返し地震動をはるかに超える過酷な実験にもかかわらず、NS-SSBの十分な耐久性と免震効果を確認できた。
- ・低摩擦、中摩擦タイプとも入力加速度が大きくなるほど最大入力加速度に対する応答倍率が小さく、特に、中摩擦においてはその傾向が大きいことが確認できた。
- ・低摩擦、中摩擦タイプともに建屋1層目から3層目まで応答加速度は概ね等しく低減している。また、低摩擦タイプについては、各層の最大応答値がほぼ等しく、概ね1質点系に近い挙動となっていることが推察できる。
- ・支承の水平荷重-水平変位履歴特性について、依存性を考慮した水平荷重計算値は、低摩擦タイプでは、実験値と概ね同等であったが、中摩擦では少し小さな結果となった。これは、計算値においては、基準摩擦係数を正弦波載荷した3cycle目の摩擦係数で定義しており、摩擦熱の発生による繰り返し依存性(1cycle目の y 切片摩擦係数は低摩擦タイプでは3cycle目の約1.1倍、中摩擦タイプでは約1.3倍)について考慮していないためと考えられる。
- ・NS-SSB時刻歴応答解析モデル SSB時刻歴応答解析モデルを用いた応答解析結果においては、実験値と概ね整合することが確認できた。

7 謝辞

本研究は、東大山田研究室、東工大吉敷研究室および防災科学技術研究所との共同研究^{14)~16)}の成果を基にした研究報告であり、関係者に対して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中村秀治, 西本晃治, 富本淳: 球面すべり支承 NS-SSB の開発, 新日鉄住金技報405号, 2016年
- 2) Li Jiaxi, Yamada Satoshi, Kishiki Shoichi, Yamazaki Shinsuke, Watanabe Atsushi, Kentaro Minowa: Full-scale dynamic test of Double Concave Friction Pendulum Bearing part 1. Experiment, part 2. Experiment result, 日本建築学会 関東支部研究報告集, 2019年3月
- 3) 山田哲, 李家熙, 吉敷祥一, 山崎伸介, 渡辺厚, 寺嶋正雄: 免震構造用球面摩擦滑り支承の実大動的2方向載荷実験その1実験の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020年9月
- 4) 李家熙, 山田哲, 吉敷祥一, 山崎伸介, 渡辺厚, 寺嶋正雄: 免震構造用球面摩擦滑り支承の実大動的2方向載荷実験その2実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020年9月
- 5) Li J., Kishiki S., Yamada S., Yamazaki S., Watanabe A., Terashima M.: Energy-Based Prediction of the Displacement of DCFP Bearings. Appl. Sci. 2020, 10, 5259.
- 6) Li, J., Kishiki, S., Yamada, S., Yamazaki, S., Watanabe, A., Nishimoto, K.: Comparison of Analysis and Experimental Results of DCFP Bearings under Bidirectional Excitation, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021年9月
- 7) 赤澤資貴, 佐分利和宏, 倉田真宏, 山崎伸介, 松尾真太郎, 河又洋介: 球面すべり支承を用いた3層免震建屋のEディフェンス震動台実験 Part1設計概要と全体挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021年9月
- 8) 山崎伸介, 倉田真宏, 赤澤資貴, 佐分利和宏, 松尾真太郎, 河又洋介: 球面すべり支承を用いた3層免震建屋のEディフェンス震動台実験Part2球面すべり支承の動的性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021年9月
- 9) Daniel M. Fenz, Michael C. Constantinou: Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings, Technical Report MCEER-08-0007, March6, 2008
- 10) 西本晃治, 中村秀治, 長谷川久巳, 脇田直弥: 球面すべり支承(SSB)の実大試験体による面圧・速度依存確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016年8月
- 11) 西本晃治, 脇田直弥, 長谷川久巳, 中村秀司: 球面すべり支承(SSB)低摩擦タイプの実大性能確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017年8月
- 12) Masashi Nitawaki, Shoichi Kishiki, Takanori Ishida, Koji Nishimoto, Atsushi Watanabe, Satoshi Yamada: Experimental and analytical Study on Spherical Sliding Bearing Subject to Bidirectional Excitation Part 1. Experimental results and verification of analytical model, Part 2. Effect of horizontal bidirectional excitation and vertical excitation, 日本建築学会 関東支部研究報告集 2018年3月
- 13) 山崎伸介, 渡辺厚, 西本晃治, 山田哲, 李家熙, 吉敷祥一: 球面すべり支承(SSB)の長周期地震動に対する実験および解析検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019年9月
- 14) 山崎伸介, 酒井一至, 中牟田晃基, 吉敷祥一, 山田哲, 渡辺厚, 青木崇: 球面すべり支承を用いた3層免震構造骨組の振動台実験 その1実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2022年9月

- 15) 酒井一至, 中牟田晃基, 吉敷祥一, 山崎伸介, 山田哲, 渡辺厚, 青木崇: 球面すべり支承を用いた3層免震構造骨組の振動台実験 その2実験結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2022年9月
- 16) 中牟田晃基, Jiayi Li, 山田哲, 酒井一至, 吉敷祥一, 渡辺厚, 山崎伸介: 球面すべり支承を用いた3層免震構造骨組の振動台実験 その3解析結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2022年9月