
論 文

球面すべり支承とU型鋼材ダンパーの 組み合わせによる免震構造建物の 地震応答の向上

Seismic Response of Isolated Structure by Combination of
Spherical Sliding Bearing and U-shaped Steel Damper

酒井 快典 Yoshinori SAKAI
都市インフラセクター 営業本部 鋼構造営業部
免制震デバイス営業室マネジャー

山口 慎吾 Shingo YAMAGUCHI
都市インフラセクター 営業本部 鋼構造営業部
免制震デバイス営業室マネジャー

山口 路夫 Michio YAMAGUCHI
都市インフラセクター 建築本部 設計技術部
構造設計室長

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

球面すべり支承は振り子の原理を利用した免震支承で、免震装置に求められるすべての機能「支持、復元、減衰、絶縁」を有するため、単一で免震層を構成できる。一方で、その履歴特性は摩擦力による滑り出し荷重と球面半径による2次剛性から決まる剛塑性のバイリニア形状を有するため、滑り出し荷重以下の水平力では免震効果を発揮できず耐震構造と同様の挙動を示すことになる。上部構造の剛性や入力地震波によっては、応答加速度や応答せん断力が過大になる場合がある。その改善策として、低摩擦タイプ球面すべり支承とU型鋼材ダンパーの組合せを考案した。地震応答解析により応答改善効果を検証した結果について報告する。加えて、球面すべり支承とU型鋼材ダンパーの組合せの特徴を活かしたその他適用事例についても触れる。

Abstract

Spherical sliding bearing is seismic isolation bearing that use the principle of a pendulum, and since this have all the functions required of a seismic isolation device. On the other hand, the hysteresis characteristic in the case of only spherical sliding bearing has a rigid-plastic bilinear shape determined by the sliding load due to the frictional force and the secondary stiffness due to the spherical radius, so it shows the same behavior as the earthquake-resistant structure under the horizontal force below the sliding load. Depending on the stiffness of the upper structure and the input seismic waves, the response acceleration and shear force may become excessive. So, this paper shows the combination of a low-friction type spherical sliding bearing and a U-shaped steel damper. This paper reports on the result of the response improvement effect by seismic response analysis. In addition, other application examples that take advantage of the characteristics of this combination are also mentioned.

1 緒言

当社は2014年に球面すべり支承(Spherical Sliding Bearing, 以降 NS-SSB)¹⁾を開発し、その採用台数は9000台に達している(2023年11月現在)。NS-SSBは、振り子の原理を利用した鋼製の免震支承であり、単一装置で免震層の長周期化が可能であることに加え、特殊摩擦材により高面圧で安定した摩擦減衰を期待できる。コンパクトな装置であることから免震層築造に必要な躯体寸法・数量や掘削土量の最小化などの利点がある。国内免震市場では、中低層住宅やオフィス、積載荷重の変動が大きな物流倉庫等を中心に受け入れられてきた。

NS-SSB 単一の場合の履歴特性は摩擦力による滑り出し荷重と球面半径による2次剛性から決まる剛塑性のバイリニア形状を有するため、滑り出し荷重以下の水平力では耐震構造と同様の挙動を示すことになる。上部構造の剛性や設計に用いる入力地震波によっては、応答加速度や応答せん断力が過大になる場合がある。そのため、重要な医療機器やサーバーラックの保全のために応答加速度制限が設定される病院やデータセンター等の建物において、NS-SSB 単体で応答加速度制限を満たすには、極力摩擦係数を下げ、応答変位を大きくし免震層の周期を延ばすことによって上部構造に生じる応答加速度を低減する手法を取る必要があった。一方、建築計画や建設敷地によっては、隣地との関係等でクリアランスを大きくすることができず、応答加速度制限を満たすために必要な応答変位を許容できない場合もある。このような課題から、応答加速度を満足しながら極力応答変位を小さくすることが可能なシステムの考案が必要となった。

本稿では、応答加速度や応答せん断力を低減する手法として、低摩擦タイプ NS-SSB と U 型鋼材ダンパー(以降、免震 NSU ダンパー)を組み合わせた免震システムを考案し、地震応答解析により効果の検証を行った。その内容を報告する。

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と上下に配したダブルペンデュラムタイ

プの球面すべり支承(図2.1)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。地震時にはスライダが球面上を摺動することにより建物の固有周期を長周期化し、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の機能を兼ね備える免震支承である。

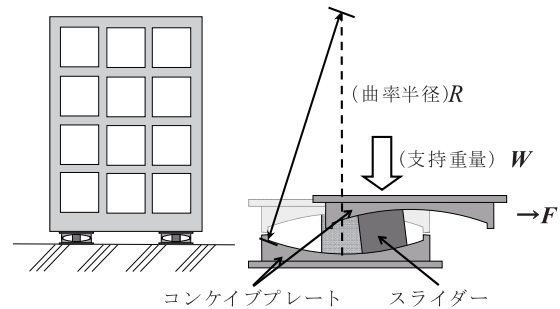


図2.1 球面すべり支承の概要
Fig. 2.1 Feature of Spherical Sliding Bearing

NS-SSB の履歴モデル^{1), 2)} は図2.2に示すようにバイリニア型となり、摩擦力 Q_d と2次剛性 K_2 で表される。基準面圧 60N/mm^2 、温度 20°C 、速度 400mm/sec 、振幅 $\pm 200\text{mm}$ の3サイクル目(以下、基準状態と称す)における摩擦係数 μ は 0.043 (中摩擦タイプ)と 0.013 (低摩擦タイプ)の2種類がある。また、2次剛性 K_2 を決定するすべり板球面半径 R_s についても 4500mm (接線周期 6.0 秒)と 2500mm (接線周期 4.5 秒)の2種類がある。

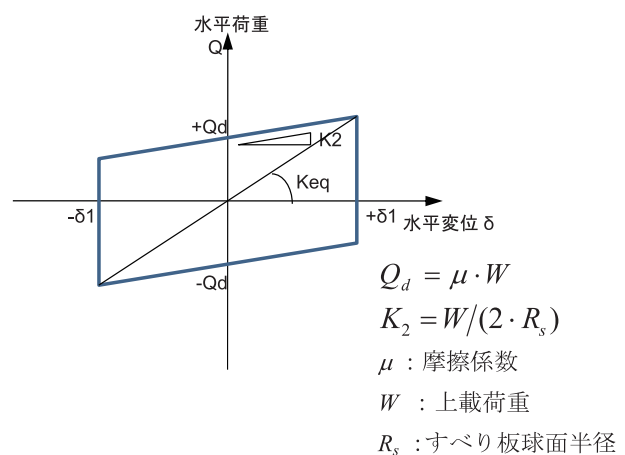
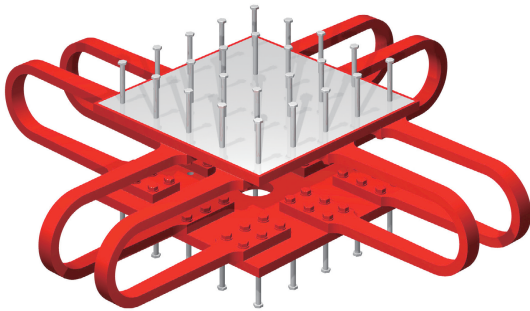


図2.2 NS-SSB の履歴モデル
Fig. 2.2 Hysteresis of NS-SSB

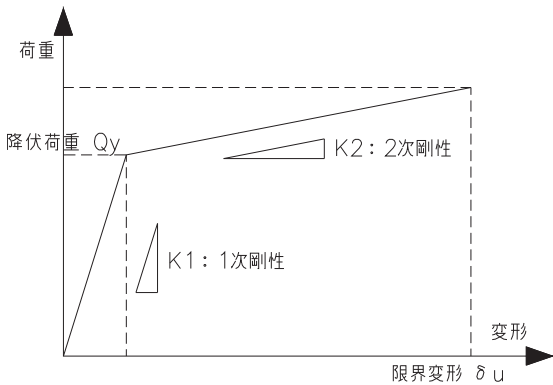
3 免震 NSU ダンパーの概要

3-1 概要

図3.1a)に示す免震 NSU ダンパーは、圧延鋼材 (SN490B)を加工した鋼製ダンパーで、地震時に安定した復元力特性で地震エネルギーを吸収し、免震建物の揺れを早期に抑える。360度全ての方向に対し、ほぼ同等の履歴特性を示すため、全方向に対して図3.1b)に示すバイリニア型の履歴モデルで定義することが可能である。また、温度や振動数の依存性もほとんどなく、疲労特性にも優れている³⁾。



a) 姿図



b) 履歴モデル

図3.1 免震 NSU ダンパーの概要
Fig. 3.1 Feature of U-shaped steel damper

3-2 NS-SSB との併用を想定した高さ変更試験

NS-SSB は摺動面が球面をしているため、水平変位時に鉛直上向きにも変位が生じることになる。免震 NSU ダンパーと NS-SSB を併用するときには、NS-SSB の水平変位に応じて免震 NSU ダンパーの高さが変動する。表3.1に、NS-SSB の水平変形と高さ変化の関係を示す。ここでは代表的な型式 NSUD55Rx4(限界変形850mm, 降伏荷重 Q_y : 307kN, 1次剛性 K_1 : 9,500kN/m, 2次剛性 K_2 : 160kN/m)を用いて、はじめから高さを一定の高さ

に保った状態で試験を行う。実建物で NS-SSB と免震 NSU ダンパーを併用した場合、水平変形するにともなって免震 NSU ダンパーは徐々に高さが高くなることになるが、本試験では最大変形時に生じる最大高さを与えた試験を行っているため、実際よりも厳しい条件を与えている。NSUD55R の限界変形850mm 時の NS-SSB4.5秒タイプおよび6.0秒タイプの鉛直上方向への高さ変化を考慮して、試験体の高さは、+75mm, +40mm を用いることとする。NSUD55R のダンパー部の高さは、374mm であるため、高さの+20%, +11%に相当する。

表3.1 SSB の水平変形と高さ変化の関係

Table3.1 Relation between horizontal deformation and height change of NS-SSB

水平変形 (mm)	T=4.5秒タイプの高さ変化 (mm)	T=6.0秒タイプの高さ変化 (mm)
200	4.0	2.2
400	16.0	8.9
600	36.1	20.0
800	64.4	35.6
850(※)	72.8	40.2

※850mm は NSUD55R の限界変形

試験における確認項目は、①限界変形850mm における破断までの繰返し回数、②降伏荷重、1次剛性の変化である。

载荷には、図3.2に示す建築技術開発センターの圧縮せん断試験機(最大荷重: ±1000kN(鉛直・水平とも)、最大ストローク: ±1200mm, 最大速度: 20mm/sec.)を用いる。载荷プログラムは、各タイプの限界変形量までの漸増载荷の後、その限界変形量での定振幅繰返し载荷を行うものとし、漸増载荷では、1cm×3サイクル、3cm, 5cm, 10cm, 以降10cm ずつ限界変形量まで振幅を増大させる。漸増载荷での各振幅における繰返し回数は1サイクル、定振幅繰返し载荷においてはダンパーが破断するまで载荷を行う。また、载荷方向を図3.3に示す。水平試験時は、高さ方向変位を一定とし、ビームを固定する。

試験から得られた1次剛性、降伏荷重とその規定値に対するばらつき、および、定振幅繰返し载荷試験での破断に至るまでの繰返し回数を表3.2に示す。なお、表3.2中の破断に至る繰返し回数は漸増载荷試験による疲労損傷度から限界変形850mm における定振幅繰返し回数を算出し、加算した結果で

表3.2 試験結果
Table3.2 Test result

試験体 No.	型式名	加力方向	繰返し加力振幅 (mm)	試験結果					規定値との比較 (試験結果 / 規定値)				
				繰返し破断回数			1次剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	降伏荷重 (kN)	1次剛性		降伏荷重	
				漸増載荷試験 (±850mm 換算)	定振幅試験 ±850mm	合計				規定値 (kN/m)	規定値に対する比	規定値 (kN)	規定値に対する比
1	UD55Rx4(+75mm)	A	±850	3	4	7	8629	160	306	9500	307	0.91	1.00
2	UD55Rx4(+75mm)	B			10	13	8583	160	294			0.90	0.96
3	UD55Rx4(+45mm)	A			4	7	9361	160	314			0.99	1.02
4	UD55Rx4(+45mm)	B			9	12	9539	160	305			1.00	0.99

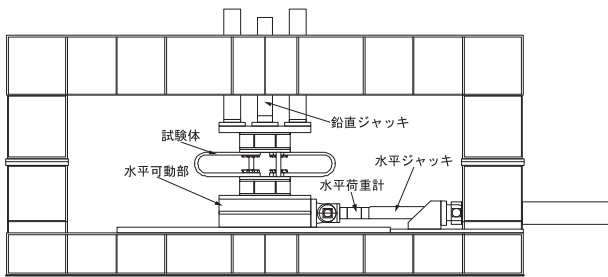


図3.2 試験装置図
Fig. 3.2 Equipment of Test

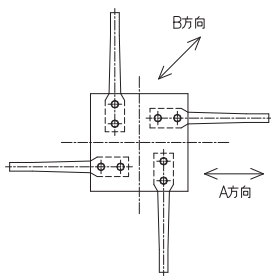


図3.3 荷重方向
Fig. 3.3 Loading Direction U-shaped steel damper

ある。免震材料の品質基準による降伏荷重及び1次剛性のばらつきは±15%であり、共にこの範囲内との結果となっている。また、品質基準において限界変形850mmにおける繰返し破断回数は5回以上と定められているが、いずれの試験体においても、5回を上回っている。

NS-SSB との併用が可能である結果になっていると考えられる。

4 物流倉庫の設計事例

本稿で紹介する免震システム(NS-SSB+免震NSUダンパー)を適用した設計例の概要を以下に示す。

4-1 建物概要

本建物はマルチテナント型の大型物流施設である。南北にランプウェイを有しており、各階にトラック等の車両が直接アプローチすることができる。倉庫部分の平面形状は短辺125m、長辺200mの整形であり、基準スパンは12m×10m、基準階高は6.6mである。

表4.1 建物概要
Table4.1 Building overview

設計/施工	日鉄エンジニアリング
建物用途	物流施設
階数	6階建て(※6階部分は塔屋)
建築面積	約25,900㎡
延べ面積	約121,900㎡
建物高さ	約39.5m
構造種別	鉄骨造
架構形式	ブレース付きラーメン構造
基礎形式	杭基礎

4-2 構造計画

本建物はBCPの観点から基礎免震構造を採用した。ランプウェイと倉庫は構造的に分離せず、床スラブおよび鉄骨部材で一体化し、建物全体を免震化している。上部構造は鉄骨造とし剛性を確保するためブレース付きラーメン構造とした。また、工期短縮、重量低減による免震装置・基礎費用の削減を目的として免震層上部の1階床フレームについても鉄骨造を採用している。

免震システムは「NS-SSB(低摩擦タイプ)+免震NSUダンパー」を採用し、免震NSUダンパーを合計30基配置した。免震NSUダンパーは免震層に偏心が生じないように平面的にバランスよく配置している。積層ゴムによる免震システムの場合、建物の固有周期が建物重量に依存するため、倉庫内の積載物の有無により建物の免震性能が変化してしまう。一方、NS-SSBは振り子の原理を用いた免震装置のため、建物の重量変動に対する固有周期への影響が

ほとんどない。そのため、共用期間中に建物重量（積載重量）が大きく変動するマルチテナント型の物流施設に対して安定した免震効果を発揮することが可能である。

表4.2 免震装置概要

Table4.2 Overview of seismic isolation device

	製品記号	台数
NS-SSB (低摩擦タイプ)	NSSSB-L60-250-550	32
	NSSSB-L60-350-550	34
	NSSSB-L60-400-550	28
	NSSSB-L60-450-550	120
	NSSSB-L60-500-550	36
免震 NSU ダンパー	NSUD55R×8	30

4-3 耐震性能目標と振動解析モデル

極めてまれに発生する地震動(レベル2地震動)に対する上部構造ならびに免震部材の耐震性能目標を表4.3に示す。時刻歴応答解析に用いる地震動は、観測波3波、告示波3波を採用した。設計用地震波一覧と地震波のトリパタイトグラフを表4.4、図4.1にそれぞれ示す。図4.4に示すように、本建物の免震層最大変形時の等価周期は4.28~5.27秒である。なお、余裕度検討レベルとして相模トラフを震源とする大正型関東地震に対しても検討しているが本稿では割愛する。

時刻歴応答解析における振動系モデルは等価せん断質点系モデルとし、減衰は部材内部粘性減衰を仮定し剛性比例型の1次モードに対して2%とした。等価せん断質点系モデルは、倉庫棟と2つのランプウェイをそれぞれ独立させた3本串団子モデルと、1本串団子モデルの2ケースを検討した(図4.2)。1本串団子モデルは、剛性の高い倉庫棟側に全ての地震力が流れた場合を想定したもので、各質点は倉庫棟とランプウェイの合計重量、バネは倉庫棟のみの剛性を採用している。

表4.3 耐震性能目標(レベル2)

Table4.3 Seismic performance target (Level2)

地震 応答	上部構造	
	免震 部材	球面すべり 支承
部材 応力	上部構造	
	免震 部材	球面すべり 支承

表4.4 採用地震波一覧(レベル2)

Table4.4 List of seismic waves (Level2)

地震波	最大加速度 cm/s ²	最大速度 cm/s	
観測波	EL Centro NS	510.0	50.0
	TAFT EW	496.9	50.0
	Hachinohe NS	335.8	50.0
告示波	神戸位相	569.5	90.2
	八戸位相	511.5	85.1
	乱数位相	462.4	69.7

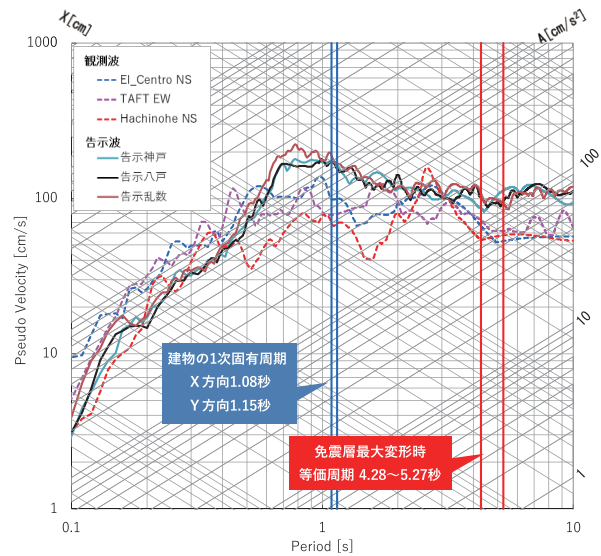


図4.1 設計用地震波トリパタイトグラフ

Fig. 4.1 Tripartite graph of design earthquake motion

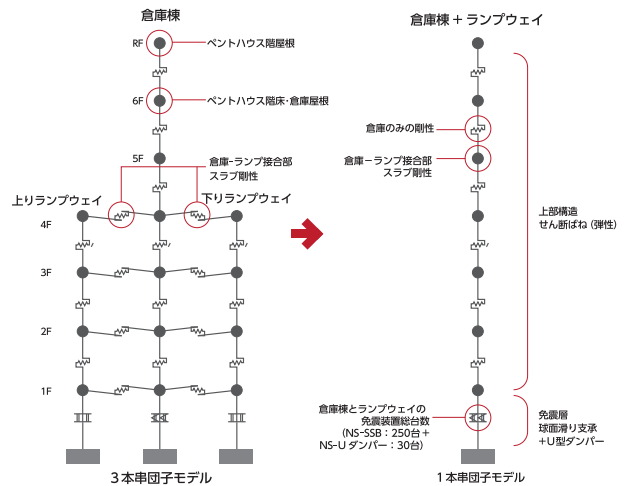


図4.2 振動解析モデル

Fig. 4.2 response analysis model

4-4 時刻歴応答解析結果

ここから時刻歴応答解析結果を記す。代表して1本串団子モデルの結果のみを示す。

最初に、免震装置選定段階で実施した免震 NSU ダンパー台数によるパラスタ結果を示す。免震

NSUダンパーはNSUD55R×8(降伏荷重 $Q_y=614$ kN/台, 一次剛性 $K_1=19,000$ kN/m, 二次剛性 320 kN/m)とし, ダンパー台数を2台ずつ増やし応答解析を行った。図4.3に免震NSUダンパー台数と免震層の最大層間変位, ベースシア係数の関係を示す。ダンパー台数を増やすことで応答変位は小さくなる一方, ベースシア係数は上がる傾向が確認できる。ダンパー台数が30台を超えたあたりから応答変位の低減効果が落ちるため, 最終的に免震NSUダンパーは30台配置することにした。免震層の最大応答変位は 445 mmであり, 温度応力による変位, 施工誤差, 余裕代等を考慮し, NS-SSBは限界変形 550 mmの製品を採用した。

図4.4に免震層の復元力特性を示す。建物重量に

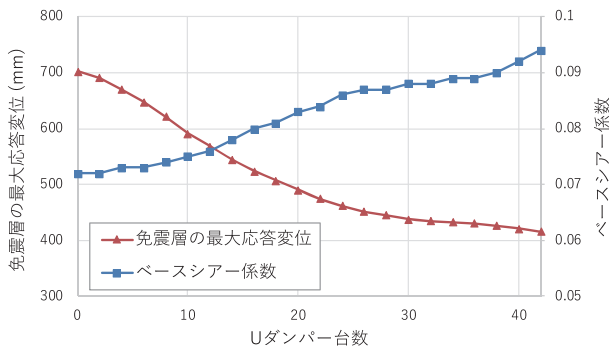


図4.3 ダンパー台数によるパラスタ結果
Fig. 4.3 Parametric study result by the number of U-dampers

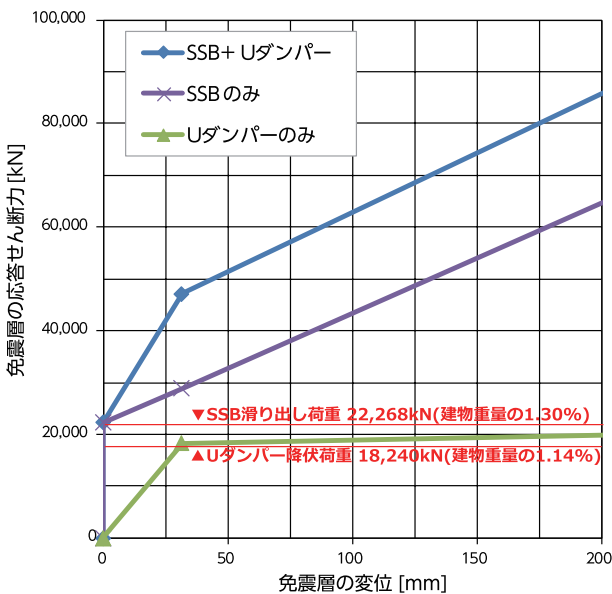


図4.4 免震層の復元力特性(免震装置の性能ばらつき標準, 基準状態)
Fig. 4.4 Restoring force characteristics of seismic isolation layer

対する免震装置の降伏荷重をダンパー量と定義した場合, 免震NSUダンパー30台のダンパー量は 1.14% に相当する。NS-SSB(低摩擦タイプ)の摩擦係数は $\mu=1.30\%$ (免震装置の性能ばらつき標準, 基準状態)であるため, 免震層全体のダンパー量としては両者を合計し約 2.4% となる。

図4.5に免震層の応答履歴の一例を示す。NS-SSBは速度依存性を有していることから, 実際の履歴ループは丸みを帯びた形状になる。

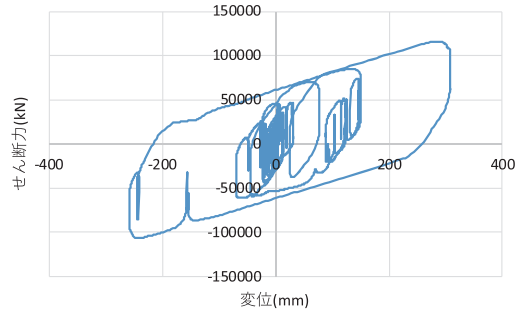


図4.5 免震層の履歴ループ(告示波: 神戸位相)
Fig. 4.5 Hysteresis loop of seismic isolation layer

ここで, 免震層をSSBのみで構成した場合との応答結果を比較する。NS-SSBだけのケースは中摩擦タイプと低摩擦タイプの2種類を混合し, 標準時, 基準状態の平均摩擦係数が $\mu_{ave}=2.4\%$ になるように低摩擦と中摩擦の割合を調整している。免震装置の性能ばらつき+側(装置剛性が大きい場合)における応答加速度の比較を図4.6に示す。なお, PH階の重量はR階に合算している。NS-SSBだけのケースと比較し, NS-SSBと免震NSUダンパーを併用した場合の応答加速度が $1/2$ 程度に低減されていることが確認でき, 折版屋根のR階を除き, 応答加速度 250 cm/s²以下を実現している。

5 その他建物用途への適用事例

NS-SSB+免震NSUダンパーの免震システムは, 応答加速度や応答せん断力への要求が厳しい建物用途のほか, 以下のようなケースで採用されるケースが増えている。

5-1 寒冷地における免震建物への適用

寒冷地で免震建物を計画する場合, 低温下での免震装置の性能ばらつきが問題になることがある。例

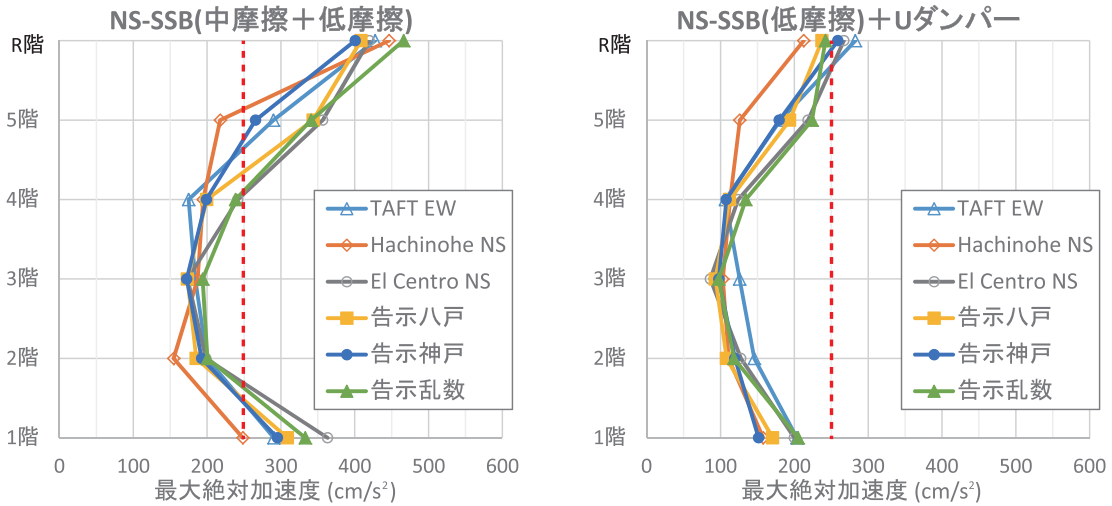


図4.6 応答加速度の比較
Fig. 4.6 Comparison of response acceleration

例えば積層ゴムの場合、構成材料であるゴムは温度が低いと硬化する性質があるため、低温となる冬期は免震装置の剛性が上がり、免震効果が薄れてしまう。

一方、NS-SSBは、すべての温度帯で温度依存性がほとんどない(図5.1)。また、免震NSUダンパーについても過去の実験から温度変化による周期、一次剛性、降伏荷重等への影響は十分小さく無視することが可能である。つまり、NS-SSB+免震NSUダンパーの組合せの場合、低温領域においても性能が安定しており、環境温度に依存することなく安定した免震効果を発揮することができる。

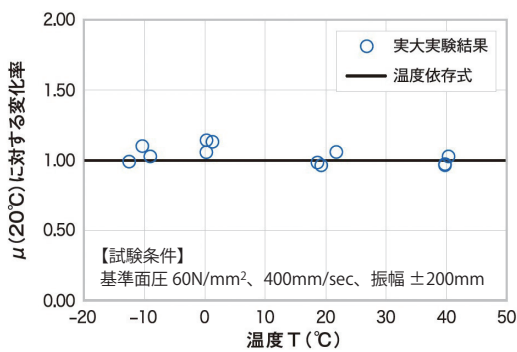


図5.1 NS-SSBの温度依存性(低摩擦タイプ)
Fig. 5.1 Performance dependence of NS-SSB on temperature (Low friction type)

5-2 半導体製造工場への適用

半導体などの精密機器が入る建屋では、免震層に0.0数μm~0.数μmの変位が生じることで精密機

器に悪影響が生じる可能性が指摘されている。NS-SSBは剛塑性系の免震装置であり、初期剛性が高いため微振動(数Hz程度、数cm/s²の水平加速度)で水平変位が生じることが無い。また鉛直剛性が高いため、内部で生じる振動に対する鉛直性能も良好である。NS-SSB(低摩擦タイプ)+免震NSUダンパーによる免震システムとすることで地震時の応答加速度や応答せん断力の抑制も可能である。半導体製造工場のほか、微振動を嫌う光学顕微鏡などを設置する研究施設向けの免震システムとしても有効である。

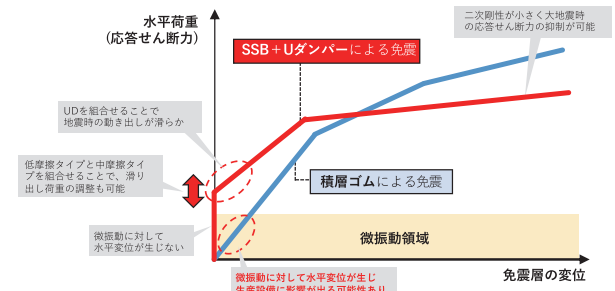


図5.2 NS-SSB+免震NSUダンパーによる免震層の微振動対策
Fig. 5.2 Micro-vibration countermeasures for seismic isolation layer by NS-SSB + U-Damper system

6 結言

以上より、NS-SSBと免震NSUダンパーを用いた免震建物について、以下のことが明らかとなった。

- ・低摩擦タイプ NS-SSB と免震 NSU ダンパーを用いた免震建物は NS-SSB 単体(中摩擦タイプと低摩擦タイプを併用)を用いた建物よりも、応答加速度を低減可能である。
- ・NS-SSB と免震 NSU ダンパーともに温度依存性がほとんどないため、極低温領域での性能が安定しており、環境温度に依存することなく安定した免震効果を発揮することが可能である。
- ・NS-SSB と免震 NSU ダンパーによる免震システムとすることで、初期水平剛性及び鉛直剛性の高い免震システムの構築が可能のため、半導体製造工場や微振動を嫌う光学顕微鏡などを設置する研究施設向けの免震システムとしても有効である。

参考文献

- 1) 中村秀司, 西本晃治, 富本淳; 球面すべり支承 NS-SSB の開発, 新日鉄住金エンジニアリング技報 vol. 7, 2016年
- 2) 球面すべり支承 NS-SSB 低摩擦タイプ, 新日鉄住金エンジニアリング技報 vol. 9, 2018年
- 3) 吉敷祥一, 大河原勇太, 山田哲, 和田章; 免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集73巻624号, 2008年