

球面すべり支承 NS-SSB[®]の開発

～高面圧で周期のばらつきが小さい免震支承～

Development of Spherical Sliding Bearing
 ～New Base Isolation Resisting High Bearing Pressure with
 Narrow Variability of Periods at Base Isolation Layer～

中村 秀司 Hideji NAKAMURA
 建築・鋼構造事業部 鋼構造営業部
 セネラルマネジャー

西本 晃治 Koji NISHIMOTO
 建築・鋼構造事業部 設計技術部商品技術室
 シニアマネジャー

富本 淳 Atsushi TOMIMOTO
 建築・鋼構造事業部 鋼構造営業部
 免震デバイス営業室 マネジャー

抄 録

球面すべり支承は、凹状の球面の上を可動体が滑る振り子型の免震支承で、免震層の固有周期は球面半径で決まるため、一般的に用いられている積層ゴム系の免震支承に比べると、長周期化が容易で周期のばらつきも小さく、限界変形の拡大が容易である。しかし、これまで国内で製品化されている球面すべり支承は、鉛直荷重の支持面圧が積層ゴム系支承と同等であるため支承の外形サイズが大きくなり、殆ど普及していない状況である。そこで当社は従来の3倍程度の高面圧に対応できる球面すべり支承 NS-SSB を開発した。本稿では、NS-SSB の基本構造と各種性能確認実験に基づく基本性能について報告する。

Abstract

The spherical sliding bearing is a seismic isolator of pendulum type a slider moves on the concave spherical surface. The spherical sling bearing has advantages of extending the period of the base isolation layer easier and more stable than the rubber bearing because the period of the base isolation is determined by the spherical radius, and it is easy to expand the critical deformation. However, spherical sliding bearing is not popular in Japan because the allowable bearing stress of the spherical bearing is almost equal to the rubber bearing and the external size of the spherical one is larger than the rubber one. We have developed new spherical sliding bearing, hereinafter referred to as NS-SSB that can resist to high bearing stress of about three times the rubber bearing. This paper reports on the basic structure and the performance based on various experiments with the NS-SSB.

1 緒言

免震構造は積層ゴム支承等により周期を伸ばし、建物の応答を低減するもので、1994年の兵庫県南部地震以降、免震構造建物は増加し、2011年の東北地方太平洋沖地震においてもその効果が確認されている。近年、東海、東南海、南海地震等の強い揺れが

長時間継続する長周期長継続地震動の危険性が叫ばれ、免震システムとしてはより長周期で大きな限界変形が求められるようになり、積層ゴム系支承とすべり支承の併用が増えてきている。積層ゴム系支承の場合、免震層の周期はゴムの剛性と建物の重量で決まるため、ゴム材料のばらつきの影響を受ける。また、免震層の変形はゴムのせん断変形となるた

め、限界変形性能に積層ゴムの形状的制約を受ける。更に、物流倉庫等の積載荷重の比率が大きい免震建物の場合、積載の状況により免震層の周期が変動することが考えられる。

球面すべり支承はすべり板と呼ぶ凹状の球面の上を可動体が滑る振り子型の免震装置であり、固有周期は球面半径のみで決まるため、上載荷重の影響を受ける積層ゴムに比較すると、長周期化が容易である。また、限界変形も球面の外径寸法を単純に拡大することで延ばすことができる。更にすべり面の摩擦により減衰を確保できるため、基本的には他の減衰装置との組み合わせは不要で球面すべり支承のみで長周期化することができる。球面すべり支承は欧米等の海外では多くの実績があり^{1),2)}、国内でも製品化されているものの^{3),4)}、その実績は少ない。その理由の一つとしては、従来の球面すべり支承の外形寸法が積層ゴムに比べて大きくなるためと考えられる。球面すべり支承の外形寸法は、可動体外径に可動域を加えた寸法で決まるが、国内の球面すべり支承の場合、可動体の許容面圧が積層ゴムと同程度であるため、可動体の外径が積層ゴムと同程度となり、球面すべり支承の外形寸法としては積層ゴムに比べて可動域の分だけ大きくなることになる。そこで、当社は従来の3倍程度の高面圧とすることで外形サイズをコンパクトにした球面すべり支承 NS-SSB を開発した。本稿では、NS-SSB の基本構造と各種性能確認実験に基づく基本性能について報告する。

2 NS-SSB の概要

2.1 NS-SSB の基本構造

NS-SSB は、図 2.1 及び 2.2 に示すように、スライダと呼ぶ可動体の上下に凹形の球面状すべり板があるダブルペンデュラムと呼ばれる二面摺動タイプの球面すべり支承であり、その機構は従来のものと基本的には変わらない。すべり板はステンレス板を鏡面仕上げ相当に球面加工したものであり、コンケイブプレートと呼ぶ鋼板に取り付けている。スライダは鋼材の上下面をすべり板と同じ球面半径に加工し、その表面にすべり材を貼り付けている。従来の球面すべり支承はすべり板をステンレス板、

すべり材を PTFE(ポリテトラフルオロエチレン)樹脂とした組合せが多く、この樹脂強度によって、球面すべり支承の基準面圧(長期許容面圧に相当)は積層ゴム系支承等と同程度となっていた。そこで、高面圧下での摩擦力の安定性を実現するために、様々な基礎実験の結果、すべり材には樹脂ではなく、PTFE 織物と接着性を高めた高強度繊維の二重織物を使うこととした。これにより、NS-SSB の基準面圧は、積層ゴム支承やすべり支承等の従来の支承の中でも最大の基準面圧 20MPa の 3 倍の 60MPa とすることができた。この結果、スライダ径を小さくでき、更に上下二面で摺動させることで、NS-SSB の外径寸法を積層ゴム並みにコンパクトにすることができた。

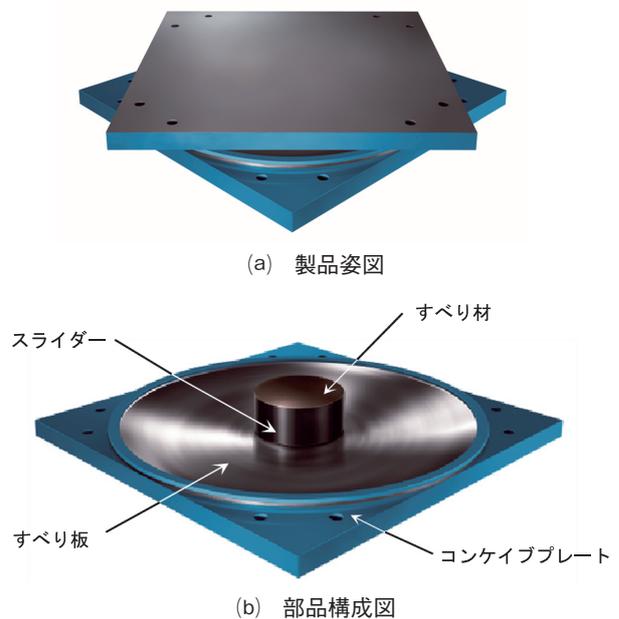


図 2.1 NS-SSB の概要
Fig2. 1 Outline of NS-SSB

2.2 NS-SSB の挙動

NS-SSB は地震時などの免震層間変位を受けると、図 2.2 に示すようにスライダが上下すべり板の球面に沿って回転しながら動く。この時のスライダの移動量は免震層変位の $1/2$ である。積層ゴム系支承の固有周期はゴムの剛性と上載荷重によって決まるが、球面すべり支承は振り子の原理でスライダが摺動するので、固有周期 T_0 は $2\pi\sqrt{(2R_s/g)}$ 、 g : 重力加速度、となり、球面半径のみで決まる。上載荷重の影響を受けないので積層ゴム

系支承に比べて容易に長周期化ができる。また、スライダの水平摺動に伴い、NS-SSBの上面は上方方向に変位が変動することになる。

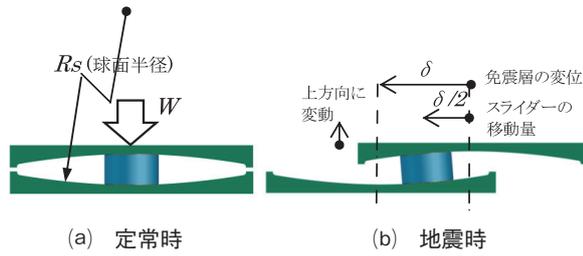


図2.2 NS-SSBの挙動
Fig2.2 Deformation of NS-SSB

2.3 NS-SSBの基本特性

NS-SSBはスライダがすべり面を摺動するときの摩擦力で減衰力を確保できる。その復元力モデルは理論的には図2.3に示すようにバイリニア型のモデルとなり、摩擦力 Q_d と2次勾配 K_2 で表される。

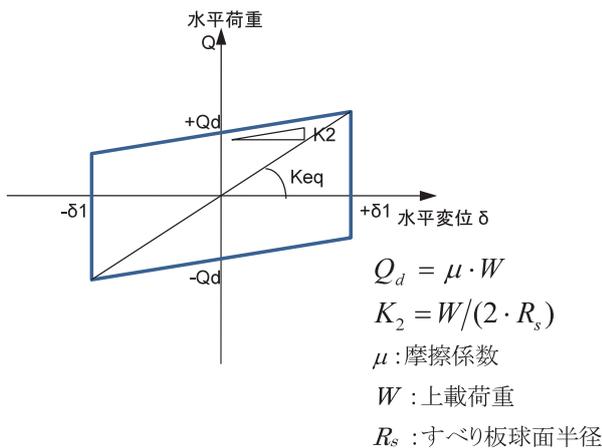


図2.3 NS-SSBの復元力モデル
Fig2.3 Hysteresis of NS-SSB

NS-SSBの製品仕様は次章以降に示す様々な性能確認実験の結果、以下の通りとなっている。

- 固有周期 : 4.5秒、6.0秒
- 基準面圧 : 60MPa
- 鉛直支持力 : 1,185~11,781kN
(基準面圧時)
- スライダ径 : φ200~φ500
- 限界変形 : 450~600mm
- 摩擦係数 : 0.047

3 実大試験体による基本性能確認実験

3.1 実験の概要

NS-SSBの摩擦履歴特性の基本性能を確認するために、実大試験体による性能確認実験を行った。

試験体のスライダ径はφ200~φ500まで100mmピッチの4種類で、球面半径 R_s は2500mm(固有周期4.5秒)の1種類とした。試験体はコンケイブプレートは同一のものを再使用し、スライダとすべり板を実験毎に取り替えて行った。試験体形状を図3.1に、試験体緒元を表3.1に示す。

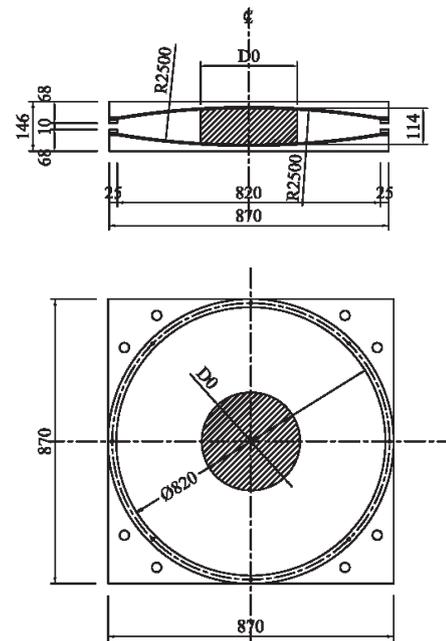


図3.1 実大試験体図
Fig. 3.1 Details of specimen

表3.1 試験体及び载荷諸元、実験結果

Table 3.1 Dimensions of specimen, parameters of loading and test results

試験体 No.	スライダ径 D0 (mm)	球面半径 Rs (mm)	二次剛性の固有周期 (sec)	面圧 (MPa)	鉛直荷重 (kN)	振幅 (mm)	载荷速度 (mm/sec)	摩擦係数 μ
200-1	200	2500	4.5	60	1,885	±180	20	0.0428
200-2					0.0434			
300-1	300				4,241			0.0411
400-1	400				7,540			0.0449
400-2				0.0454				
500-1	500			45	8,836	0.0481		
500-2		0.0490						

载荷には図3.2に示す鉛直・水平の二軸試験機を用い、基準面圧60MPa相当の鉛直荷重下での一定振幅繰り返し载荷とした。载荷条件としては、最

大速度20mm/secの正弦波加振で、振幅±180mm、サイクル数4回とした。φ500の試験体については試験機能力の制約から面圧を45MPaとしている。試験温度については特に管理せず雰囲気温度(24℃～27℃)のままとした。また、鉛直荷重はNS-SSBの水平変位に伴う支承上面の上下動に対して±10%程度の変動幅となるように制御した。载荷条件を表3.1に、試験状況を図3.2に示す。

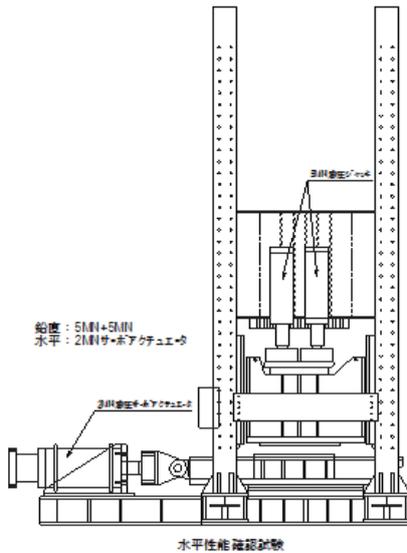


図3.2 実験概要
Fig. 3.2 Outline of experiment

3.2 実験結果

水平力をその時の鉛直荷重で除した摩擦係数と水平変位の関係を図3.3に示す。表3.1で示す摩擦係数は3サイクル目の正負Y切片の摩擦係数の平均値としている。摩擦係数は0.04～0.05となっており、1サイクル目から4サイクル目まで極めて安定した摩擦係数履歴が得られている。最大振幅付近で摩擦係数履歴が丸みを帯びるのは、速度が徐々に低下し、最大振幅で反転する影響と考えられる。また、静止摩擦による摩擦係数の跳ね上がりはいずれの試験体も確認されなかった。

$K_2' = 1 / (2Rs)$ で計算される設計2次剛性を図3.3の摩擦係数履歴に破線で示す。実験結果の履歴の傾き、即ち2次剛性は設計2次剛性とほぼ合っていることが確認できた。

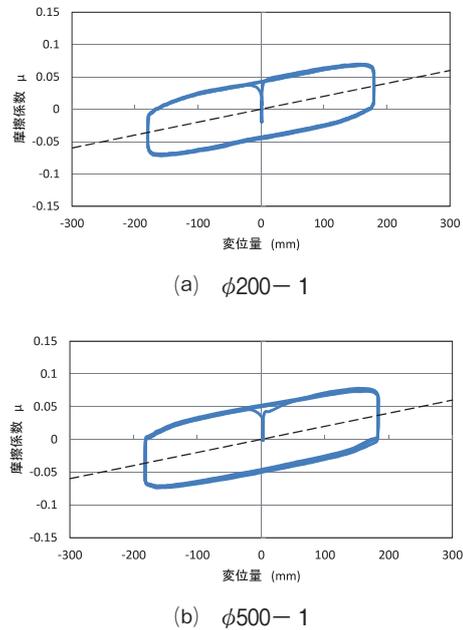


図3.3 摩擦履歴
Fig. 3.3 Hysteresis loops

4 実大試験体による限界変形性能確認実験

4.1 実験の概要

NS-SSBの限界変形性能を確認するために、実大試験体による性能確認実験を行った。

試験体は、スライダ径φ200、球面半径Rs=4500mm(固有周期6.0秒)の1体とした。試験体形状を図3.1に示す。

载荷には図4.2に示す当社所有の二軸試験機を用いて、基準面圧60MPa相当の鉛直荷重1885kN下での変位漸増振幅繰り返し载荷とした。最大速度20mm/secの正弦波加振で、最大振幅は限界変形の±600mm、各振幅でのサイクル数は1回とした。表4.1に载荷条件を示す。

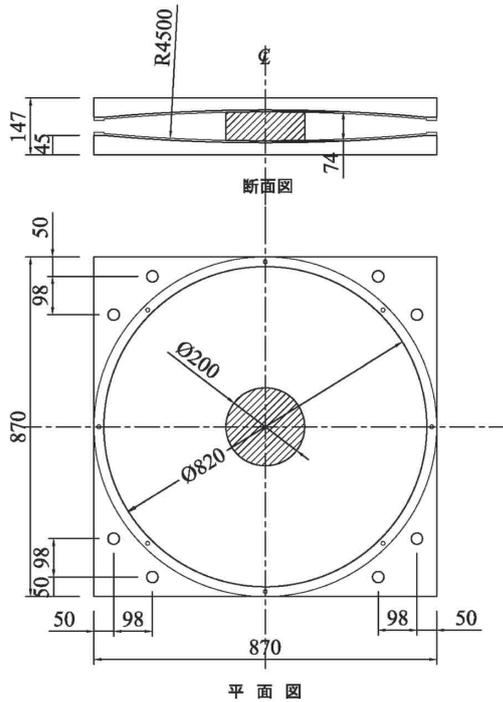


図 4. 1 実大試験体図
Fig. 4. 1 Details of specimen



図 4. 2 実験装置
Fig. 4. 2 Set-up of experiment

表 4. 1 载荷諸元
Table 4. 1 Parameters of loading

軸力 (面圧)	試験速度	振幅	試験周期	サイクル数
1,884kN (60MPa)	20mm/s	±50mm	15.7s	各 1
		±100mm	31.4s	
		±200mm	62.8s	
		±400mm	126s	
		±600mm	188s	

4.2 実験結果

水平力をその時の鉛直荷重で除した摩擦係数と水平変位の関係を図 4. 3 に、各振幅での正負 Y 切片

から求められる摩擦係数の平均値を表 4. 2 に示す。

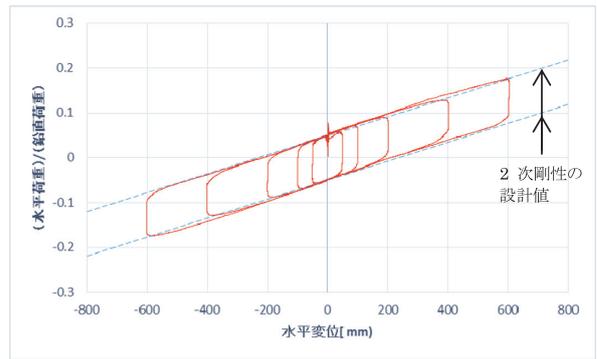


図 4. 3 履歴曲線
Fig. 4. 3 Hysteresis loops

表 4. 2 各振幅における摩擦係数結果
Table 4. 2 Coefficient of friction

振幅(mm)	50	100	200	400	600
摩擦係数	0.0513	0.0503	0.0491	0.0511	0.0512

限界変形600mmまで同様に安定した摩擦履歴を示しており、Y切片摩擦係数も0.049~0.051で安定している。また、2次剛性の設計値を図 4. 3 に破線で示しているが、実験結果はほぼ設計値通りとなっている。

5 縮小モデル試験体による各種依存性確認

5.1 実験の概要

NS-SSBの摩擦係数の速度、面圧、温度の各依存性確認及び繰り返し耐久性確認は、試験機能力の制約もあり、縮小モデル試験体による実験⁵⁾とした。更に、スライダの上下にすべり板がある二面摺動タイプのNS-SSBはスライダー中心に対してすべり板が点対称に動くため、上下の摺動面が同一状態であると仮定すれば摩擦係数は片面の摺動性能で評価でき、2次剛性については球面半径のみで決まるため、摺動面が一面の球面又は平面の試験体とした。一面摺動の場合、载荷速度、振幅とも二面摺動の場合の1/2となる。

縮小モデル試験体の形状を図 5. 1 に示す。スライダー径はφ70(実大の最小サイズφ200の約1/3)又はφ100(同1/2)とし、球面の場合の球面半径は実大試験体と同じ2500mm(固有周期4.5秒)とした。すべり板及びすべり材の仕様は実際の製品と

同じ仕様である。スライダの固定端側は、スライダがすべり板の球面に沿って回転するため球座とし、球座面はグリースを塗布して摩擦抵抗を極力排除した。

载荷には二軸試験機を用い、面圧60MPa、速度10mm/sec(二面摺動換算で20mm/sec)、振幅±100mm(同200mm)、温度20℃を基本条件とし、速度、面圧、温度をパラメータとして载荷条件を設定した。载荷条件一覧を表5.1に示す。速度及び面圧依存性確認実験では、それぞれ同一試験体で速度又は面圧の条件及び順序を変えながら実験を行った。

実験温度については、試験機全体をビニールシートで覆い、低温条件時(-10℃、0℃)にはドライアイスとスポットクーラーを用いて、高温条件時(20℃、40℃)にはヒーターを用いて、すべり板の摺動部近傍に設置した熱電対の計測温度が設定温度となるように管理した。また、スライダも実験前に恒温槽で設定温度に保ち、载荷直前に恒温槽から取り出して速やかにすべり板に設置して载荷を行った。

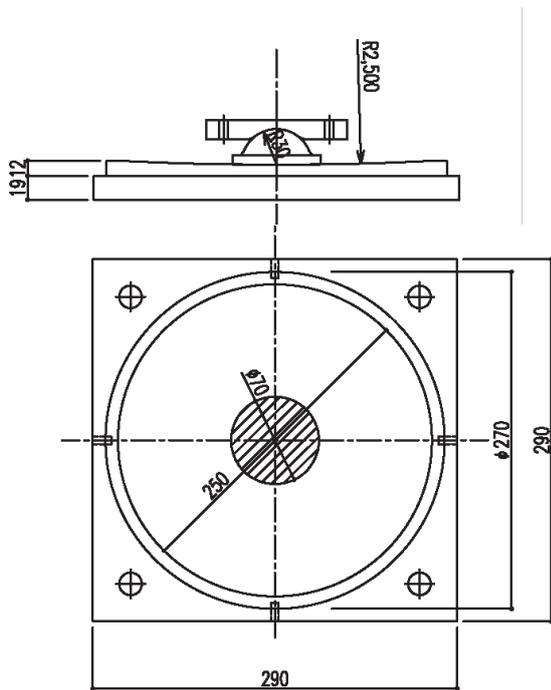


図 5.1 縮小モデル試験体
Fig. 5.1 Details of specimen

表 5.1 試験体及び载荷諸元、実験結果

Table 5.1 Dimensions of specimen, parameters of loading and test results

試験内容	スライダ径	試験条件					試験体数		
		面圧 (MPa)	速度 (mm/s) (二面)	振幅 (mm) (二面)	温度 (°C)	繰り返し回数			
速度依存性	φ100 (球面)	60	10 (20) 50 (100) 100 (200) 200 (400)	±100 (±200)	20	4	3		
		面圧依存性	φ70 (球面)	30	10 (20)	±100 (±200)	20	4	3
				60					
				90					
面圧依存性	φ70 (平面)	30	10 (20)	±100 (±200)	20	4	2		
		60							
		90							
		120							
温度依存性	φ70 (平面)	60	10 (20)	±100 (±200)	-10	4	2		
					0		3		
					20		4		
					40		1		
繰り返し耐久性	φ100 (球面)	60	200 (400)	±100 (±200)	20	150	2		

※()内は二面摺動換算時の条件を示す。

5.2 実験結果

実験結果の概要を次頁に示す。摩擦係数は3サイクル目の正負 Y 切片の摩擦係数の平均値で評価した。

(1) 速度依存性

二面摺動換算速度400mm/sの摩擦係数の平均値に対する各速度(二面摺動換算)での摩擦係数の変化率を図5.2に示す。本実験では二面摺動換算時の速度100~400mm/sの範囲では摩擦係数の変化は殆どなく、20mm/sで0.9程度に低下している。なお、別途実施した速度依存性確認実験でも、低速側の

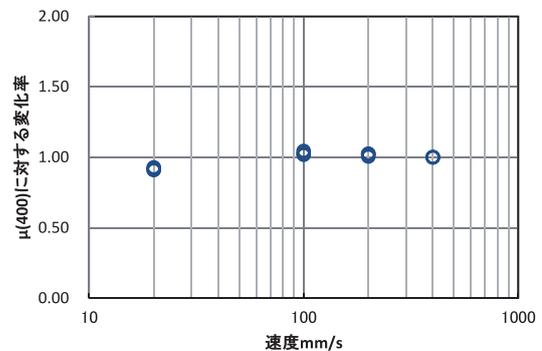


図 5.2 速度依存性
Fig. 5.2 Velocity dependence of friction

20~50mm/s で摩擦係数の低下率が0.4~0.8と大きくばらつくものの、200mm/s 超の範囲で摩擦係数の変化は殆どなく、実際の地震時の最大応答速度レベルでの摩擦係数が安定しているといえる。

(2) 面圧依存性

基準面圧60MPa の摩擦係数の平均値に対する各面圧での摩擦係数の変化率を図5.3に示す。摩擦係数は面圧の増加に対して低下し、基準面圧の1/2の30MPa で1.1倍、基準面圧の2倍の120MPa で0.8倍程度となっている。一般的な平面すべり支承や従来の球面すべり支承では、基準面圧の1/2で1.3~1.5倍程度、基準面圧の2倍で0.7倍程度であり、これらに比べると NS-SSB の面圧依存性は小さく、上載荷重の分布による免震層内での球面すべり支承個々の面圧の違いや、地震時の鉛直荷重変動による面圧の変動による摩擦係数の変化は小さく、安定した免震性能が得られる。

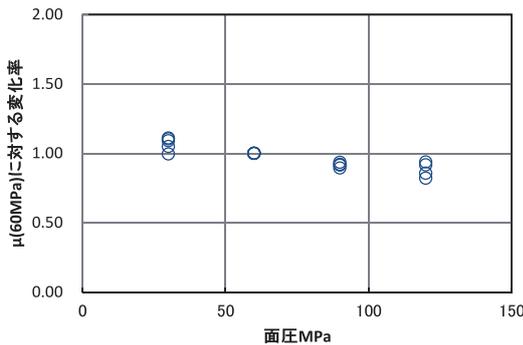


図5.3 面圧依存性
Fig. 5.3 Bearing stress dependence of friction

(3) 温度依存性

20℃の摩擦係数の平均値に対する各温度での摩擦係数の変化率を図5.4に示す。摩擦係数は温度に対して低下する傾向にあり、-10℃で1.4倍、40℃で0.85倍程度となっている。但し、これは20mm/sの低速での環境温度に対する摩擦係数の変化率であり、実際の地震動では摩擦熱によって摺動部の温度が上昇するため、低温側では環境温度の違いによる摩擦係数への影響は小さく、逆に高温側では摩擦係数が更に低下することになる。

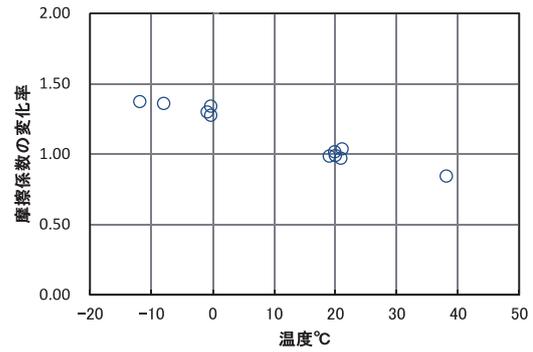


図5.4 温度依存性
Fig. 5.4 Temperature dependence of friction

(4) 繰り返し耐久性

繰り返し耐久性確認として、各種依存性確認試験と同様にφ100の一面摺動の縮小試験体を用いて、面圧60MPa、速度200mm/sec(二面摺動換算で400mm/sec)、振幅±100mm(同200mm)、温度20℃、150サイクルの連続加振実験を行った。本実験の累積摺動距離は二面摺動換算で120mであり、これは巨大地震に相当するL2地震動の1.5倍の入力に対する免震層の応答累積変位量の約7倍である。各サイクルの摩擦係数の推移を図5.5に示す。摩擦係数はサイクル数とともに緩やかに低下していくが、80サイクルを超えるとほぼ一定となり安定してくる。

本試験ではすべり板下面の温度も計測しており、その温度は繰り返しにより徐々に上昇し、試験終了時には140℃となった。前述の摩擦係数の温度依存性によると、温度上昇に伴い摩擦係数は徐々に低下していき、20℃に対する140℃の摩擦係数の低下率は温度依存性から外想した場合0.3程度となるが、実験では140℃でも初期の20℃時の摩擦係数に対して0.6程度の低下率に留まっている。これは、摩擦係数の温度依存性による低下と、繰り返しによってすべり材の摩耗することによる摩擦係数の増加が相殺され、結果的に安定していったものと考えられる。

縮小モデル実験ではあるものの、本実験の結果、NS-SSBは、累積摺動距離としては実際の地震動に対して十分な繰り返し耐久性を有しているといえる。

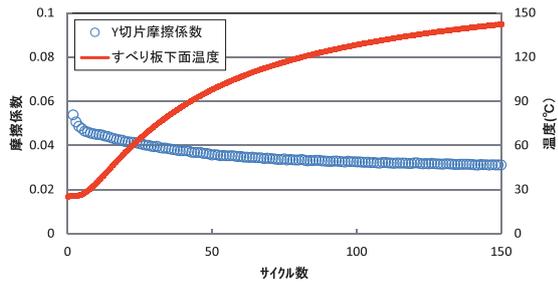


図 5.5 繰り返し耐久性

Fig. 5.5 Repeated durability of friction

6 結言

高面圧に対応できる球面すべり支承 NS-SSB について、実大試験体による性能確認実験を実施し、摩擦履歴特性及び限界変形の基本特性を確認した。また、縮小試験体を使った実験により、摩擦係数の各種依存性、繰り返し耐久性を明らかにした。

NS-SSB は当社設計施工プロジェクトでの採用が決まり、2014年8月に設置が完了している。今後は免震デバイス建築事業拡大のため、本部材の普及に努め、更には摩擦係数のバリエーションやスライダ径及び限界変形量の拡大など適用範囲の拡大や改良・改善を図っていく予定である。

※「NS-SSB」は新日鉄住金エンジニアリング(株)の登録商標です。
登録番号：5671985

参考文献

- 1) (社)日本免震構造協会：MENSIN No. 72, 2011年5月
- 2) (社)日本免震構造協会：MENSIN No. 85, 2014年8月
- 3) (社)日本免震構造協会：免震部材標準品リスト2009
- 4) 後藤航他：初期剛性を有する球面すべり支承(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003年9月
- 5) 免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説