

球面すべり支承NS-SSB®の開発

Development of Spherical Sliding Bearing

西 本 晃 治*
Koji NISHIMOTO中 村 秀 司
Hideji NAKAMURA脇 田 直 弥
Naoya WAKITA

抄 録

球面すべり支承 NS-SSB® は、凹状の球面の上をスライダーを滑らせることで建物周期の長周期化と摺動時の摩擦抵抗による減衰により地震応答を抑制する免震装置であり、安定した固有周期、容易な長周期化の実現、免震層のコンパクト化、という特長を持つ。NS-SSB の基本構造と特長について紹介し、実大実験等に基づく基本性能の検討結果及び熱伝導解析による摩擦特性の検討結果を示した。

Abstract

The spherical sliding bearing, “NS-SSB™”, is a seismic isolation device which reduces the response of the structure by the earthquake motion for its slider moves on the spherical surface of the concave plate to lengthen the natural period of the structure and its friction for damping. “NS-SSB” has advantages to realize stability and lengthen of natural period easily, and reduce the isolation layer of structure. This paper describes the basic structure of “NS-SSB” and its performance based on various experiments and thermal conductivity analysis.

1. 緒 言

2011 年東北地方太平洋沖地震でも確認されたように、近年、長周期長継続地震動の危険性が注目され、免震システムはより長周期で大きな限界変形が求められており、長周期化を目的として積層ゴム系支承とすべり系支承の併用が増えてきている。しかし、積層ゴム系支承は限界変形性能に形状の制約があり、免震層の周期もゴム材料のばらつきの影響を受ける。また、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。

球面すべり支承は凹状の球面の上をスライダーが滑る振り子型の免震装置で、球面による復元力と滑り面の摩擦による減衰性能を併せ持つ。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べて長周期化が容易であり、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。球面すべり支承は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、国内の球面すべり支承は許容面圧が積層ゴムと同等であるため、支承の外形寸法が積層ゴムに比べてスライダーの可動域分大きくすることが考えら

れる。そこで、新日鉄住金エンジニアリング(株)は従来の 3 倍程度の高面圧とすることで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。NS-SSB は 2014 年に物流倉庫の免震支承として初採用されて以降、物流倉庫や集合住宅への採用実績が増えつつある。本稿では、NS-SSB の基本構造と特性について紹介し、実大試験等に基づく水平性能の確認及び熱伝導解析による検討結果について報告する。

2. NS-SSBの概要

2.1 NS-SSB の基本構造

NS-SSB は、図 1 及び図 2 に示すように、スライダーの上

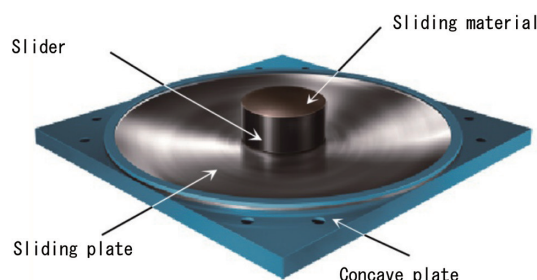


図 1 NS-SSB の概要
Outline of NS-SSB

* 新日鉄住金エンジニアリング(株) 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 東京都品川区大崎 1-5-1 〒141-8604

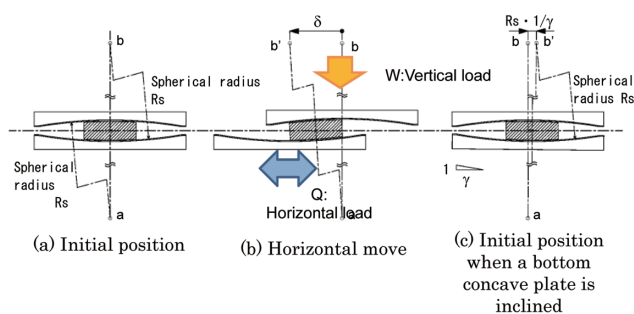


図2 NS-SSB の挙動
Deformation of NS-SSB

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である。すべり板はステンレス鋼板を鏡面仕上げ相当に球面加工したもので、コンケイブプレートと呼ぶ鋼板に取り付けている。スライダはすべり板と同じ球面半径に加工した上下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、すべり材をポリテトラフロロエチレン (PTFE) 樹脂としたものが多く、この樹脂の強度によって基準面圧 (長期許容面圧に相当) が積層ゴム系支承等と同程度となっていたが、NS-SSB では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、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 の基準面圧を従来の支承の基準面圧 20MPa 程度の約3倍となる 60MPa を実現し、平面寸法を従来の支承並みにコンパクトにすることができた。

2.2 NS-SSB の挙動と摺動特性

NS-SSB は免震層間変位を受けると、図2 (b)に示すようにスライダが上下すべり板の球面に沿って動く。スライダの位置は水平変位に応じて移動した上下球面半径の中心間 (a~b') を結ぶ直線上にあり、その移動量は免震層間変位の 1/2 となる。

NS-SSB の摺動特性として、積層ゴム系支承の固有周期がゴムの剛性と上載荷重によって決まるのに対し、NS-SSB の二次剛性の固有周期 T_0 は振り子の原理により、 $2\pi\sqrt{(2R_s/g)}$ 、

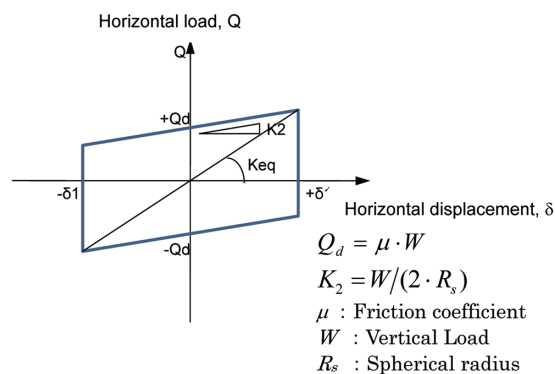


図3 NS-SSB の復元力モデル
Hysteresis of NS-SSB

g : 重力加速度となり、球面半径 R_s のみで決まる。また、その減衰力の履歴モデルは理論的には図3に示すようにバイリニア型のモデルとなり、摩擦係数 Q_d と球面半径に応じた二次勾配 K_2 で表される。摩擦係数は速度、面圧、温度依存性を持つ。

NS-SSB は、図2 (c)に示すように上下のコンケイブプレートが傾いても傾斜角に応じてスライダの位置が移動するだけで摺動特性は変化しないため、設置面の施工精度による影響を受けにくく、また、基礎梁を省略し、地震時に杭頭回転角が生じる杭頭免震工法に適している。

3. NS-SSBの性能確認試験

3.1 実験の概要

NS-SSB は図4の新日鉄住金エンジニアリング所有の2MN 二軸試験機を用いて、図5に示す実大試験体による様々な性能確認試験により、その水平性能を確認している。以下に性能確認試験の一部を紹介する。

3.2 基本性能確認試験

NS-SSB の摩擦係数等の基本性能を確認するために、スライダ径 150mm ~ 600mm、球面半径 $R_s = 2500$ mm, 4500mm (二次剛性の固有周期 4.5 秒, 6.0 秒) の実大試験体に



図4 実験装置
Set-up of experiment

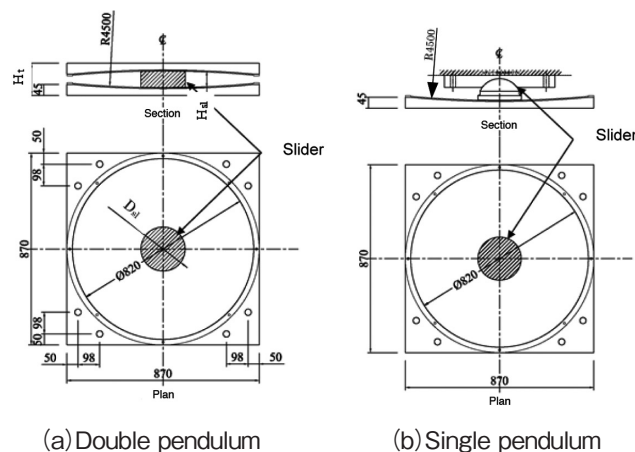


図5 実大試験体図
Details of test specimen

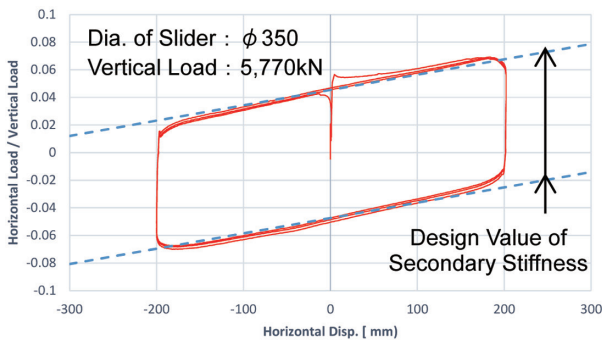


図6 履歴曲線
Hysteresis loop

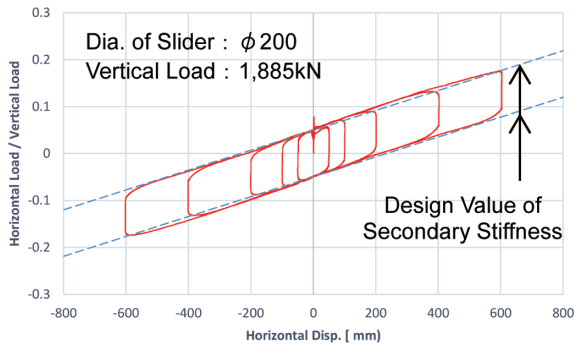
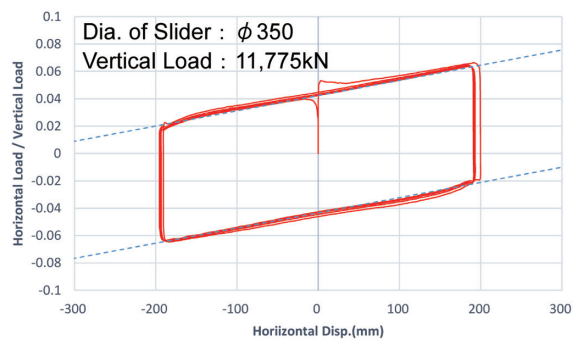


図7 履歴曲線
Hysteresis loop

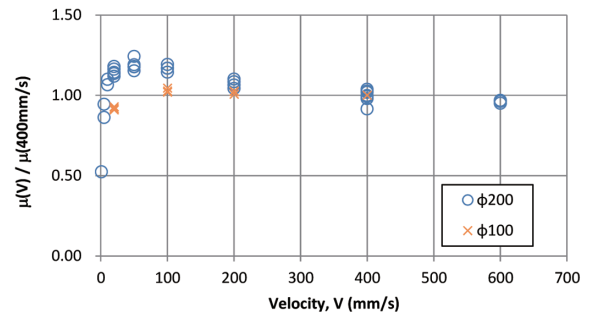


図8 速度依存性
Velocity dependence of friction

よる試験を行った。載荷は基準面圧 60MPa 相当の鉛直荷重下での定振幅繰り返し正弦波加振とし、鉛直荷重はスライダ径に応じて 1060kN～16960kN、最大速度は 20mm/s、振幅±200mm、4 サイクルとした。試験結果の一例として 350mm 径と 500mm 径の試験の履歴曲線（水平荷重をその時の鉛直荷重で除した値と水平変位の関係）を図6に示す。本加振条件では温度条件にもよるが摩擦係数は概ね 4%～5%程度で、安定した摩擦履歴となっている。また、球面半径で決まる二次剛性もほぼ設計値と合っている。

3.3 限界変形確認試験

NS-SSB の限界変形性能を確認するために、200mm 径、球面半径 $R_s=4500\text{mm}$ の実大試験体による限界変形 600mm まで確認試験を行った。載荷は基準面圧 60MPa 相当の鉛直荷重 1885kN 下での変位漸増振幅繰り返し正弦波加振とし、最大速度 20mm/s、最大振幅±600mm、各振幅でのサイクル数は 1 回とした。図7に履歴曲線を示す。限界変形 600mm まで同様に安定した摩擦履歴を示しており、二次剛性もほぼ設計値と合っている。

3.4 各種依存性確認試験

NS-SSB の各種依存性については、既往文献⁹⁾で示しているが、これらはスライダ径 70mm 及び 100mm の縮小試験体による試験結果であったことから、実大試験体による速度・面圧依存性及び繰り返し耐久性確認試験を行っ

た。

(1) 速度依存性

試験体は、試験機の軸力制御上、シングルペンデュラムタイプとし、スライダ径 200mm の実大試験体 9 体とした。載荷は基準面圧 60MPa 相当の鉛直荷重 1885kN、振幅±100mm（ダブルスライダ換算で±200mm）、繰り返し回数 4 回の定振幅繰り返し正弦波加振とし、載荷速度を 0.5～300mm/s（ダブルスライダ換算で、1～600mm/s）の 9 水準とし、各試験体で複数の速度条件の試験を行った。また、載荷開始時の雰囲気温度及びすべり板表面温度が $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ となるように温度管理を行っている。

3 サイクル目の摩擦係数（摩擦履歴の Y 切片の値）について、ダブルスライダ換算速度 400mm/s の時の実験値の平均値に対する各速度の実験値の比率を図8に示す。摩擦熱による温度上昇と熱伝達の関係により 50mm/s をピークとする依存性となっており、これは後述の熱伝導解析の結果の傾向と一致する。20mm/s と 100mm/s の結果は既往実験の結果と差異が出ているが、これはスライダ径によってスライダ面積に対する摺動面積の比による摩擦熱の分配の違いによるものと考えられる。

(2) 面圧依存性

試験体はスライダ径 350mm を 5 体、500mm を 1 体とし、載荷は最大速度 20mm/s、振幅±200mm、繰り返し回数 4 回の定振幅繰り返し正弦波加振とし、面圧を 350mm 径については 15, 30, 60, 90, 120MPa の 5 水準、500mm 径については 5, 10, 30, 60MPa の 4 水準とした。3 サイ

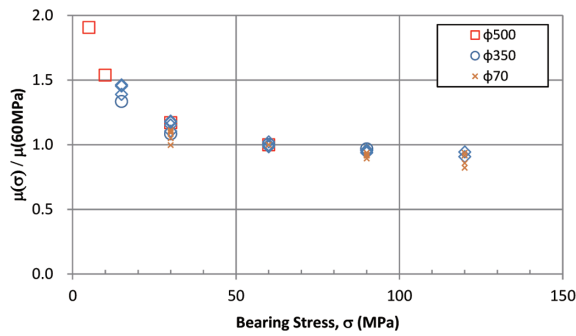


図9 面圧依存性
Bearing stress dependence of friction

クル目の摩擦履歴の Y 切片の値（摩擦係数）について、基準面圧 60 MPa 時の実験値の平均値に対する各面圧の実験値の比率を図 9 に示す。実大実験による面圧依存性は、既往の縮小試験体での 30 MPa～120 MPa の実験結果と概ね良い対応を示している。

(3) 繰り返し耐久性

既往の実験では 100 mm 径の縮小試験体による連続繰り返し加振試験により繰り返し耐久性を確認したが、スライダ径 200 mm の実大試験体で、レベル 3 相当の 1 回の地震による最大累積摺動距離相当として $\pm 200 \text{ mm} \times 25$ サイクル = 20 m を 1 セットとした 10 セットの断続繰り返し試験を行った。加振速度は 20 mm/s である。図 10 に摩擦係数の推移を横軸を累積摺動距離として示す。25 サイクルの連続加振の中では摩擦係数は摩擦熱により徐々に低下する

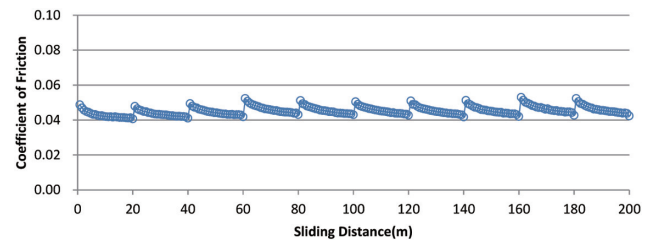


図 10 繰り返し耐久性
Repeated durability of friction

が、インターバルを置いた次の载荷では摩擦係数はほぼ元に戻る。しかし断続载荷の繰り返しによりすべり材が摩耗するため、僅かであるが摩擦係数は増加し、10 セット目の摩擦係数は 1 セット目に比べて約 8% 増となっている。

4. 熱伝導解析による摩擦特性の検討

4.1 熱伝導解析の概要

前章において実大試験体による各種性能確認試験結果を示したが、試験装置の能力上、実大サイズでの動的性能の確認には限界がある。そこで、すべり材の材料の摩擦係数と温度の関係と NS-SSB の摩擦係数の初期値を設定することで熱伝導解析により縮小試験体による繰り返し実験の温度及び摩擦係数の履歴を評価する手法を確立した。その熱伝導解析手法は文献⁶⁾に詳述している。解析モデル及び環境条件は図 11 に示すように摺動面を平面とした解析モデルで、上下面を断熱境界、側面は自然熱伝達面としている。

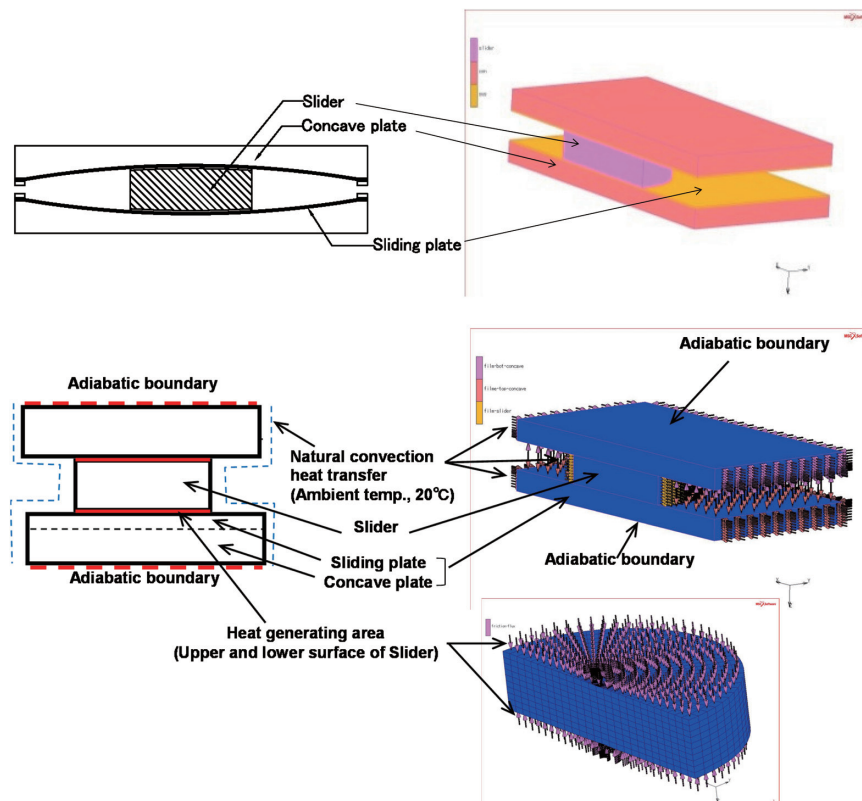


図 11 熱伝導解析モデル
Thermal conductivity analysis model

摩擦係数は摩擦面の温度、速度及び劣化を考慮した下式による。

$$\mu(\theta, v, L) = \mu_{20}^{400} \{1.13 * e^{-0.006\theta}\} * \{1 - 0.50 * e^{-0.030v}\} * W(L)$$

ここで、

μ_{20}^{400} : 面圧 60MPa, 初期温度 20℃, 速度 400mm/s の初期摩擦係数, 0.062

θ : 温度 (℃)

v : 速度 (mm/s)

$W(L)$: 摺動距離 L (mm) に応じた劣化の影響を表す係数
 $= 1.0 (L \leq 8000)$

$$= 1.0 + 0.2 * (L - 8000) / 52000 (8000 \leq L \leq 60000)$$

熱伝導解析により、スライダ径 150mm～500mm の速度 400mm/s 時の摩擦特性と、200mm 径での速度依存性について検討を行った。

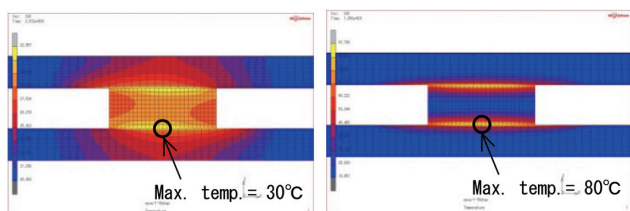
4.2 解析結果

(1) 载荷速度と温度上昇

図 12 にスライダ径 200mm の初期温度 20℃, 速度 20mm/s 及び 400mm/s, 振幅±200mm の正弦波繰り返し摺動の 4 サイクル目の温度分布を示す。速度 20mm/s の場合は载荷時間が長いので摩擦熱がスライダ中心部やベースプレートに伝達して全体的に温度が高くなり、3 サイクル目では摺動面は約 10℃ の上昇となっている。速度 400mm/s の場合は逆に载荷時間が短いのでスライダの摺動面だけが温度上昇し、3 サイクル目では摺動面は約 60℃ の温度上昇となっている。

(2) スライダ径の影響

図 13 に各スライダ径毎の初期温度 20℃, 速度 20mm/s 及び 400mm/s, 振幅±200mm の繰り返しによる 3 サイクル目摩擦係数を示す。速度 20mm/s の場合はスライダ径による影響は殆どないが、速度 400mm/s の場合は径が小さくなると僅かであるが摩擦係数が大きくなる傾向が表れる。これはスライダの面積に対して摺動面積の比が大きくなり、摩擦熱が分配されてしまうからである。そのため、3.4(2)で示した速度依存性において、100mm 径と 200mm 径の差異がでたものと考えられる。逆に 200mm 径以上では 20mm/s と 400mm/s の比率は殆ど変わらないので、実大サイズで試験可能な 200mm 径で動的特性が確認できれば他の実大サイズの 20mm/s の試験結果から 400mm/s の摩



(a) 20mm/s, ±200mm (b) 400mm/s, ±200mm
 図 12 3 サイクル後の温度分布
 Temperature distribution after 3 cycles

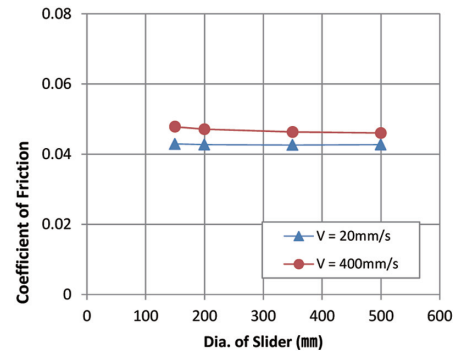


図 13 スライダ径と摩擦係数の関係
 Diameter of slider and friction coefficient

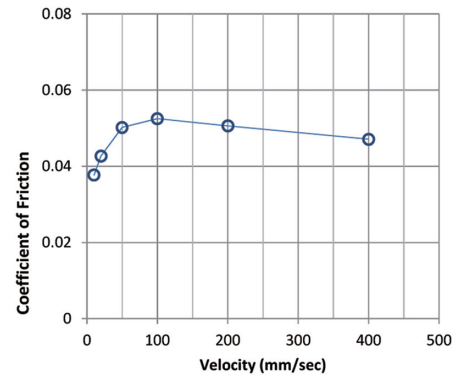


図 14 速度依存性
 Velocity dependence of friction

擦係数を推定することができる。

(3) 速度の影響

図 14 に 200mm 径スライダにおける 3 サイクル目摩擦係数と速度との関係を示す。本解析でも速度 400mm/s の摩擦係数に対し、50mm/s～200mm/s の中間速度の摩擦係数が大きくなっており、3.4(2)で示した 200mm 径の実大試験体による速度依存性の試験結果と同様の傾向となることが確認できた。

5. 結 言

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試験を実施し、摩擦履歴特性、限界変形性能、摩擦係数の各種依存性及び繰り返し耐久性を明らかにした。また、熱伝導解析により実大サイズの動的性能についても確認することができた。

本年 4 月に熊本地震が発生したこともあり、今後益々建物の免震化が増えてくると考えられる。NS-SSB は、免震層の長周期化が容易でコンパクト化が可能、積载荷重の変動に対し免震性能が安定といった特長を活かし、本部材の普及に努めると共に、摩擦係数のバリエーションや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。

参考文献

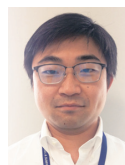
- 1) (社)日本免震構造協会：MENSHIN. (72), (2011.5)
- 2) (社)日本免震構造協会：MENSHIN. (85), (2014.8)
- 3) (社)日本免震構造協会：免震部材標準品リスト. 2009 年
- 4) 後藤航 ほか：初期剛性を有する球面すべり支承. (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2003 年 9 月
- 5) 中村秀司 ほか：球面すべり支承 NS-SSB の開発. 新日鉄住金エンジニアリング技報. 6, (2015)
- 6) 中村秀司 ほか：球面すべり支承 (SSB) の熱伝導解析による摩擦特性の検討. (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2016 年 8 月



西本晃治 Koji NISHIMOTO
新日鉄住金エンジニアリング(株)
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
東京都品川区大崎1-5-1 〒141-8604



中村秀司 Hideji NAKAMURA
(株)中村構造研究所



脇田直弥 Naoya WAKITA
新日鉄住金エンジニアリング(株)
建築・鋼構造事業部 設計技術部
商品技術室 マネジャー