

弹性すべり支承用耐火被覆システムの開発

水野 敬三^{*1}・倉本 真介^{*2}・道越 真太郎^{*1}・関 清豪^{*2}・佐藤 芳久^{*3}・谷田貝 健^{*2}
磯部 共伸^{*2}・亀田 龍吉^{*4}

Keywords : elastic sliding bearing, fire protection, tolerance to displacement, loading fire test, deformation capacity

弹性すべり支承、耐火被覆、変位追従、載荷加熱試験、変形性能

1. はじめに

免震装置を建物の中間階に設置する場合、免震装置を設置した柱は耐火構造としての耐火性能を担保する必要がある。積層ゴム支承や LRB 支承、高減衰ゴム支承等の免震装置では耐火構造の大蔵認定を取得した耐火被覆システムが商品化されている。一方、弹性すべり支承では下フーチングにステンレス板と鋼板を組合せた大型のすべり板が設置され、火災時に熱がすべり板を介してすべり材(PTFE)と支承ゴムに伝わる影響が確認されていないため、耐火性能評価方法が確立されていない。このため、現在は弹性すべり支承を建物中間階に設置する場合、耐火設計ルート C によってボードタイプの耐火被覆を適用している。しかし、このシステムには被覆が大型になる、弹性すべり支承に近接して壁がある場合には地震時の変位で被覆材が壁に衝突して損傷する可能性がある、地震後に変位が残留した場合には隙間ができ耐火性能が低下する、点検時の分解・清掃作業が困難であるといった欠点がある。そこで当社は、すべり支承本体を極力小型の耐火被覆とし、下フーチングに設置されるすべり板には、地震時にすべり支承が水平に変位した時や地震後に変位が残留した場合にも耐火性能が保たれるように柔軟性のある被覆材を設置した弹性すべり支承用耐火被覆システム(以降、本システムと称す。)(写真-1)を考案した。本報では、本システムの常温時における変位追従性、火災時のすべり支承鉛直荷重支持能力、および火災後のすべり支承変形性能等に関する実験結果を報告する。

* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

* 2 設計本部構造グループ

* 3 東北支店設計部

* 4 建築本部技術部建築技術部



写真-1 弹性すべり支承用耐火被覆システム分解時の様子
Photo.1 Fire protection system for elastic sliding bearing

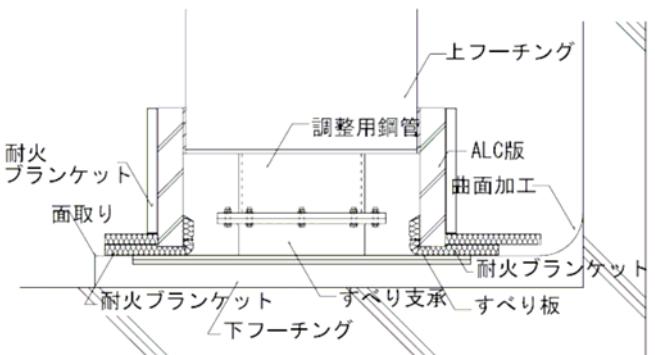


図-1 弹性すべり支承用耐火被覆システムの構成
Fig.1 Layout of fire protection system for elastic sliding bearing

2. 耐火被覆システムの構成と特徴

図-1 に本システムの構成、図-2 に従来のボード系被覆タイプと本システムの比較を示す。本システムでは弹性すべり支承本体を厚さ 120mm の ALC 版で囲い、すべり板は厚さ 50mm の生体溶解繊維(主成分 SiO₂)

をシリカクロスで包装した耐火ブランケットで被覆しており、ALC版と耐火ブランケットは上フーチングと一体となって挙動する。耐火ブランケットは柔軟に変形するので、本システムと壁の離隔距離を縮めることができる。また、地震後に変位が残留した場合でも耐火ブランケットをすべり板より大きくしてあるので、耐火ブランケットからすべり板がはみ出さず、耐火性能を保つことができる。また、耐火ブランケットを複数のピースとして取付や分解の際の施工性を向上させている。このように、本システムはコンパクトな納まりで柔軟性のある耐火ブランケットを用いることにより、常温時の変位追従性と火災時のすべり支承鉛直荷重支持能力を確保できるようにしている。

3. 変位追従性実験

3.1 試験体および実験方法

図-3に変位追従性実験装置図を示す。本システムの水平変位に対する追従性を確認するために変位追従性実験を実施した。試験体は厚さ300mmのコンクリートブロックにすべり板を打込んだ下フーチングと弾性すべり支承に本システムを施した上フーチングで構成されている。弾性すべり支承の大きさは本システムの変位追従性に影響ないので、試験体には後述する載荷加熱試験と同じ大きさの支承を用いた。下フーチングの2辺には実際の建物で本システムに壁が近接した場合を想定した模擬壁を設置した。模擬壁と下フーチングとの入隅部はモルタルで凹曲面に仕上げ、すべり支承が壁方向に移動した場合には耐火ブランケットが壁に沿って円滑に滑り上がる形状とした。下フーチングのその他の2辺の角部は曲面に面取りを行い、生体溶解繊維を包装したシリカクロスが擦れても損傷し難い形状とした。実験では、下フーチングと模擬壁を固定した状態で、油圧ジャッキを用いて上フーチングに強制変位を与えた。強制変位のパターンは下フーチングに対して 0° , 45° , 90° それぞれの方向に $\pm 600\text{mm}$ の変位量で2往復させた。このとき、最大変位時と変位復元時における耐火被覆材の変形を観察した。

変位量 $\pm 400\text{mm}$ 用のシステムについても同様の実験を行った。

3.2 実験結果

写真-2に変位量 $\pm 600\text{mm}$ の変位追従性実験の状況を示す。初期状態から近傍にある壁に沿って耐火ブランケットが滑り上がる様子、下フーチングから耐火ブランケットが垂れ下がる様子、および垂れ下がりから

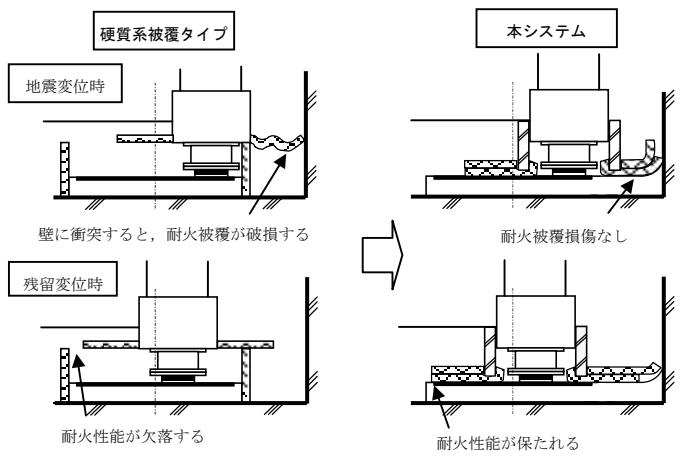


図-2 ボード系被覆タイプと本システムの比較
Fig.2 Comparison of board-type fire protection and new system

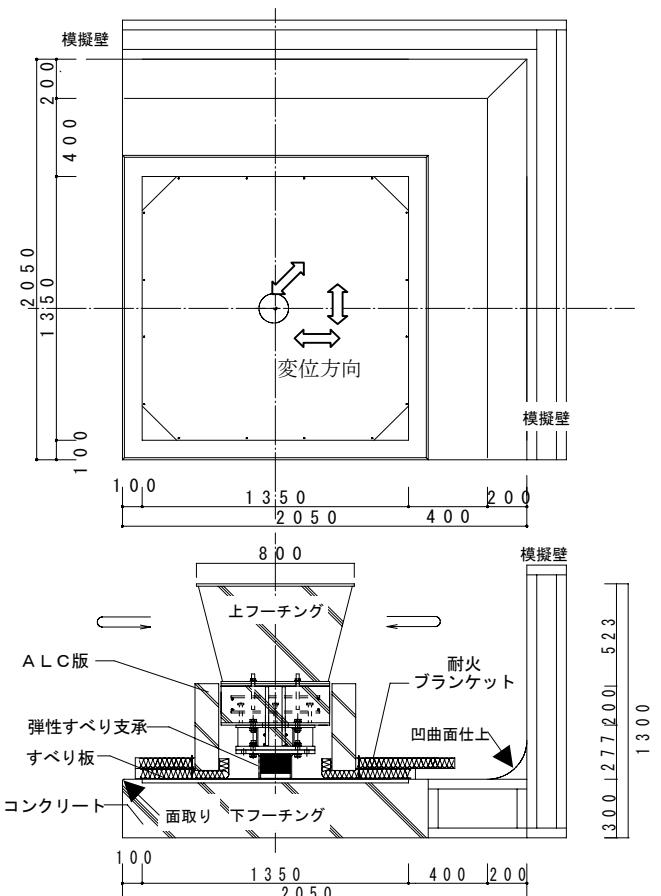


図-3 変位追従性実験装置図
Fig.3 Displacement tolerance test setup

初期状態に復元する様子を確認した。実験後の生体溶解繊維を包装したシリカクロスには、下フーチング角部との摩擦による損傷は見られなかった。また、変位を原位置に戻した状態では、耐火ブランケットとすべり板との間には浮きは無く、初期の被覆状態が復元されていた。この結果は変位量 $\pm 400\text{mm}$ 用のシステムの実験でも同様であった。

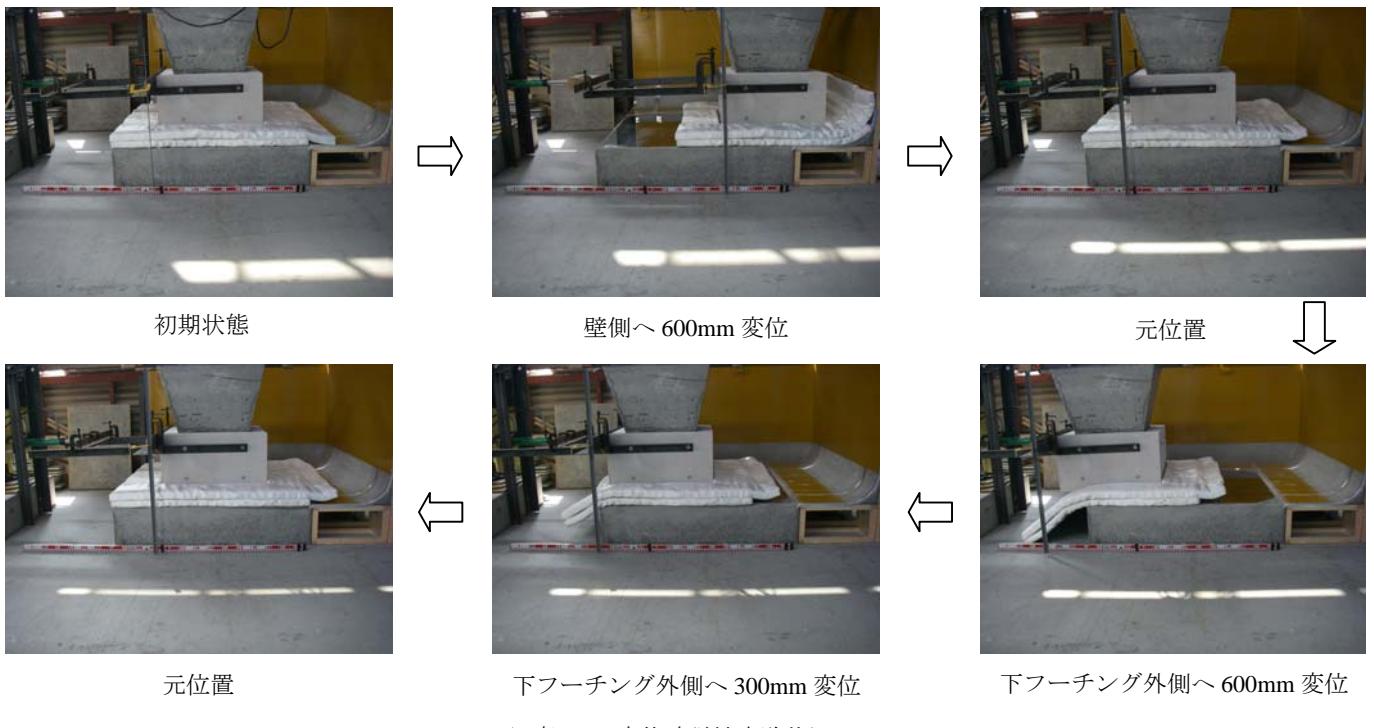


写真-2 変位追従性実験状況
Photo.2 Displacement tolerance test

4. 載荷加熱試験

4.1 試験体

写真-3に試験体設置状況、表-1に試験体に用いた弾性すべり支承の諸元を示す。弾性すべり支承は直径が小さい程、加熱面積に対する熱容量が小さくなり、温度上昇が大きくなる。また、ゴム層の総厚が厚い程、軸方向(鉛直方向)の収縮量が大きくなることを考慮して、建物に用いられる支承のうち、径が最小で総厚が最も厚いと考えられるΦ150mm、ゴム総厚40mmの弾性すべり支承を試験体とした。弾性すべり支承の上には上部RC構造を模擬したRCブロックを設置し、さらに珪酸カルシウム板とセラミックファイバーで耐火被覆した高さ調整用鋼管(Φ600mm×t50mm)を加力治具として設置した。下フーチングはすべり板の側面はコンクリートが100mm被覆される形状とし、耐火ブランケットはすべり板から35mm突出する寸法とした。試験時のALC版とコンクリートの含水率は、それぞれ同一



写真-3 試験体設置状況 (載荷加熱試験)
Photo.3 Loading fire test setup.

表-1 試験体に用いた弾性すべり支承の諸元
Table.1 Specification of elastic sliding bearing

せん断剛性率 G N/mm ²	支承径 mm	ゴム厚			S1	S2	S1・S2	高さ H mm	試験面圧 N/mm ²	断面積 mm ²	試験荷重 kN
		1層厚 mm	層数	総厚 mm							
0.78	150	2.0	20	40	18.8	3.8	70.3	148.8	18	17671	318

養生した試料を用いて測定し、ALC版が 1.7wt%，コンクリートが 3.8wt% であった。また、試験時のコンクリートの圧縮強度は 26.9N/mm^2 であった。

4.2 支承面圧の設定

実際の免震建物で使われる支承面圧は支承毎に異なるが、試験における支承面圧は最大値を想定して設定した。具体的には積層ゴム部限界圧縮強度とすべり材部の限界圧縮強度を比較し、小さい方の値に 0.3 を乗じた値である 18N/mm^2 を試験時の支承面圧とした。この値は、平成 12 年建設省告示第 2009 号で規定される支承の長期許容応力度に相当する。

4.3 試験方法

図-4 に試験体温度測定位置を示す。加熱炉内に設置した試験体には、試験体下部に設置した油圧ジャッキで所定荷重 318kN (面圧 18N/mm^2)を載荷した。その後、ISO834 標準加熱温度曲線に準拠して 3 時間加熱した後、21 時間の空冷を行い、載荷は 24 時間続けた。試験中は炉内温度の他に、図-4 に示すすべり板 (No.1～No.15)，支承ゴム部 (No.16～No.19)，高さ調整用鋼管表面と内部 (No.20～No.24)，およびALC版裏面 (No.25～No.40) の温度を測定した。さらに載荷荷重と試験体鉛直方向変位も測定した。データは加熱開始から試験終了まで、1 分間隔で測定した。

4.4 試験結果

4.4.1 温度、荷重および変位測定結果

表-2 に試験体各部の最高温度、図-5～図-7 に試験体各部の温度、図-8 に載荷荷重、図-9 に試験体鉛直方向収縮量の測定結果を示す。加熱中の炉内温度は位置によるバラツキは殆どなく、ISO834 標準加熱温度曲線に沿っていた。弾性すべり支承の表面温度は加熱開始 60 分以降から上昇し始め、最高 114°C に達した。すべり板の表面温度は支承から 350mm 離れた周辺部で最高 152°C 、支承の直近で最高 105°C となった。加熱開始から試験終了までの間、載荷荷重は一定であり、試験中、弾性すべり支承の鉛直荷重支持能力は確保されていた。また、下フーチングから上フーチング上端までの試験体の軸（鉛直）方向収縮量は最大で 0.15mm 、収縮速度は $0.69\text{mm}/\text{分}$ 、試験終了までの膨張量は 1.31mm であった。仮に免震層階高 h を 1500mm とし、これを柱の高さと想定した場合、耐火構造の認定取得のための性能評価判定基準値は許容収縮量 15mm ($= h/100$)、許容収縮速度 $4.5\text{mm}/\text{分}$ ($= 3h/1000$) となる。本試験で得られた測定結果は、これらの判定基準を十分に満たすものであった。

4.4.2 加熱後の試験体の状況

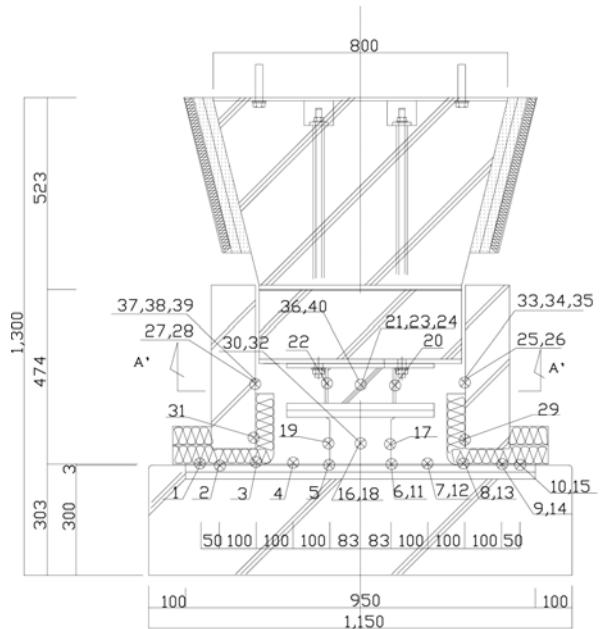


図-4 試験体温度測定位置
Fig.4 Temperature measuring points of specimen

表-2 試験体各部の最高温度
Table.2 Peak temperatures at each point of test model

すべり板表面		すべり支承	調整用鋼管	ALC裏面
周辺部	支承直近			
152°C	105°C	114°C	119°C	198°C

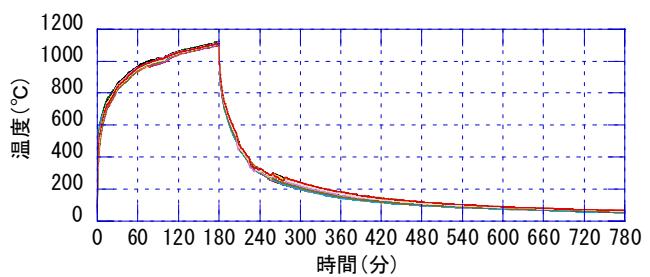


図-5 炉内温度
Fig.5 Furnace temperature time histories

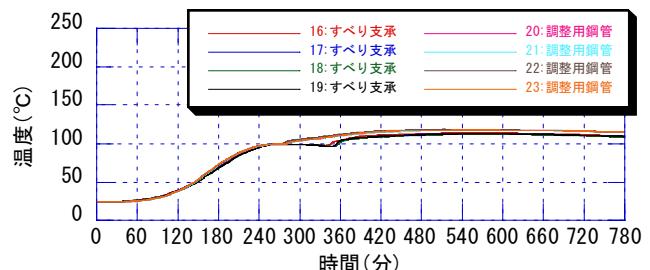


図-6 弾性すべり支承と調整用鋼管の表面温度
Fig.6 Elastic sliding bearing and steel pipe temperature time histories

写真-4 に加熱後の弾性すべり支承の様子を示す。加熱後の弾性すべり支承には外観上の顕著な変化は無く、すべり材、被覆ゴム、さび止め塗装共、試験前と

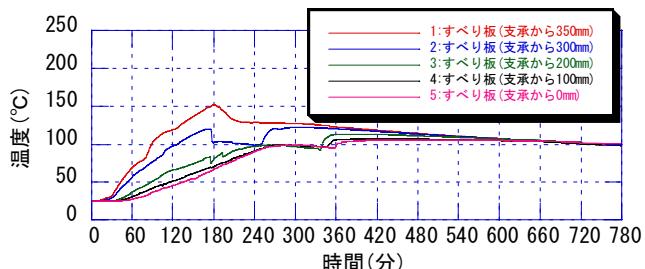


図-7 すべり板温度
Fig.7 Sliding plate temperature time histories

同じ状態であった。ALC版には裏面に貫通するひび割れは生じていなかった。生体溶解纖維を包装していたシリカクロスやシリカファイバーを用いた縫製糸も焼損せずに縫製状態が保たれていた。試験後のALC版目地部では幅が1.5mm程度の隙間が生じていたが、耐火ブランケットにより塞がれている状態であった。試験後のすべり板は、ALC版から発生した蒸気と共に生体溶解纖維の成分である酸化マグネシウム(MgO)や酸化カルシウム(CaO)がすべり板上に堆積・乾燥したと考えられる白粉が付着していたが、残留歪は認められず平面を保っていた。

5. 加熱後の弾性すべり支承の継続使用性

ISO834標準加熱温度曲線に準拠した3時間の載荷加熱試験の結果、弾性すべり支承側面における最高温度は114°Cであった。この温度は本すべり支承の積層ゴムについてメーカーが実施している促進老化試験の加熱温度である100°Cを上回っているため、加熱後の水平剛性変化率のデータが無い。また、載荷加熱試験後のすべり材とすべり板には残留歪は認められなかったものの、白粉が付着しており、加熱前と状態が異なっていた。このような状態の弾性すべり支承が火災後の火害調査および補修工事を想定した期間において、継続使用が可能であるかを検討するために、水平加力試験と圧縮試験を実施した。さらにはすべり材とすべり板については、清掃作業を想定した場合の変形や平面度の測定を行った。これらの試験および測定は載荷加熱試験の47日後に実施した。

5.1 弾性すべり支承変形性能の測定

5.1.1 水平加力試験

(1) 試験方法

写真-5に水平加力試験の様子、表-3に試験条件、図-10に試験実施位置を示す。すべり板は火災後のメンテナンスを想定して白粉を除去した後、紙やすりで

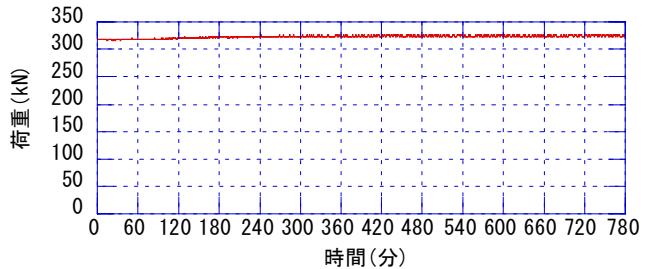


図-8 載荷荷重
Fig.8 Load time history

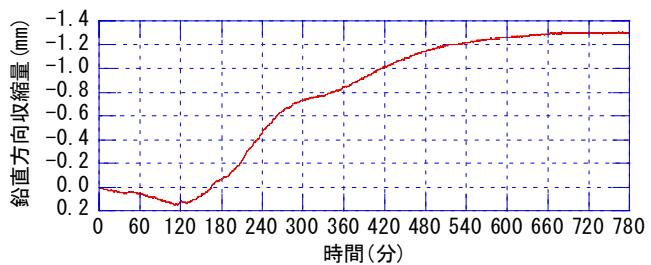


図-9 試験体の軸(鉛直)方向収縮量
Fig.9 Axial (vertical) deformation time history

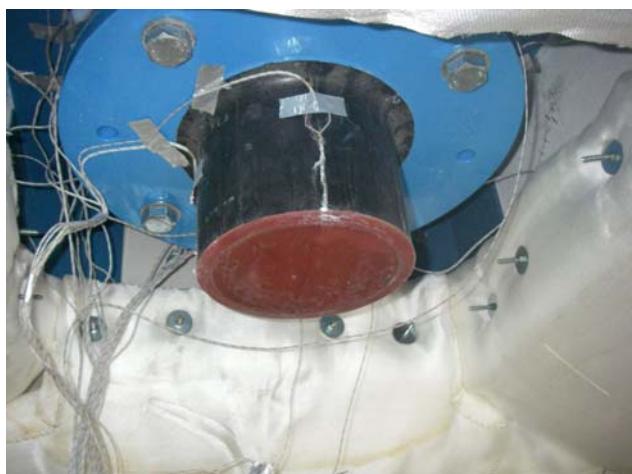


写真-4 加熱後の弾性すべり支承の様子
Photo.4 Post-heating surface of elastic sliding bearing

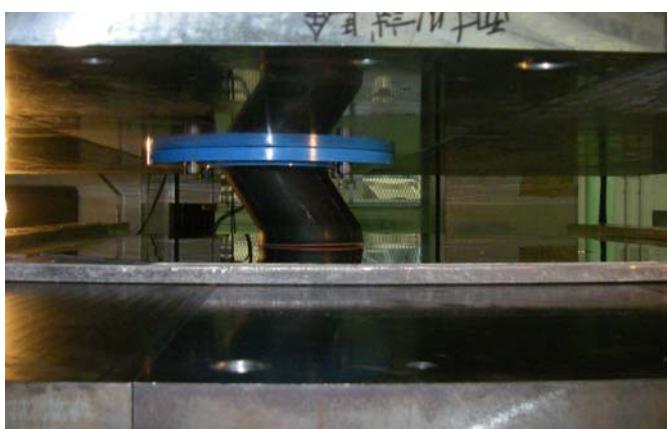


写真-5 水平加力試験の様子
Photo.5 Horizontal loading test

磨き、有機溶剤(トルエン)で清掃した。一方、すべり材にも写真-4に示すように白粉が付着していたが、建物設置時においては清掃できないため、試験体でも白粉は除去しなかった。

試験は加熱中に弾性すべり支承が載っていたすべり板中央部①、次に最も熱の影響を受けた周辺部2箇所②、③の順に実施した後、再度①でストロークと最大速度を大きくし、往復回数を2倍に増やして実施した。試験面圧は載荷加熱時の試験体の収縮量が大きくなるように試験体のアスペクト比を大きくしたことを考慮して 7.5N/mm^2 に設定した。試験では弾性すべり支承にこの面圧をかけた状態で変位波形を正弦波で与えて水平方向に加力し、このときの水平変位と水平荷重を測定した。

(2) 試験結果

図-11に加熱前と加熱後における水平変位と水平荷重の関係を示す。弾性すべり支承のせん断ばね定数は加熱前の 0.354kN/mm に対して加熱後は試験条件によって $0.296\sim0.305\text{kN/mm}$ と小さくなかった。また、最大摩擦係数は加熱前の0.097に対して、加熱後は0.115～0.148と大きくなかった。

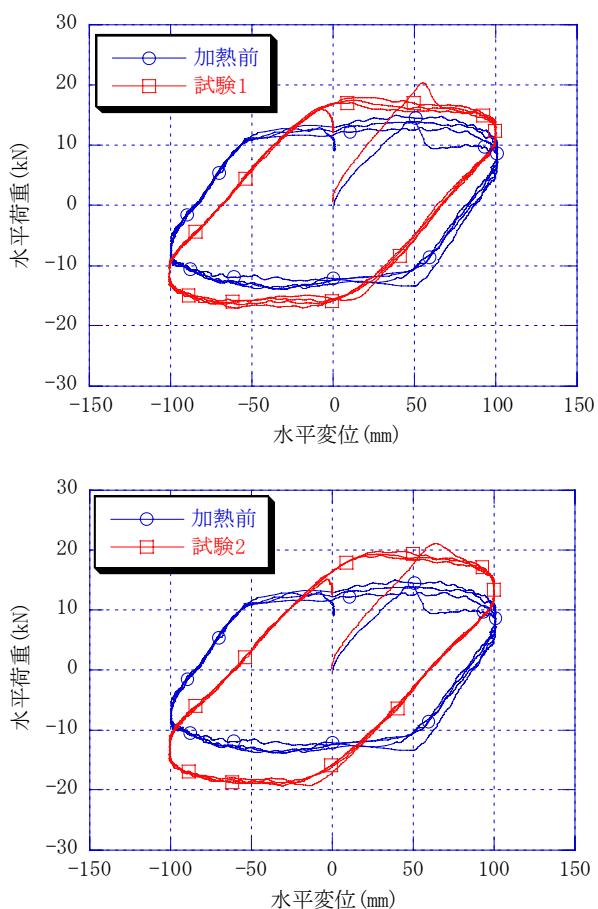


図-11 水平変位と水平荷重の関係（加熱前後の比較）
Fig.11 Comparison of load-displacement relationships (pre and post-heating)

表-3 水平加力試験条件

Table.3 List of horizontal loading test case

	実施位置	ストローク	往復回数	最大速度
試験1	①	$\pm 100\text{mm}$	4	4mm/s
試験2	②	$\pm 100\text{mm}$	4	4mm/s
試験3	③	$\pm 100\text{mm}$	4	4mm/s
試験4	①	$\pm 200\text{mm}$	8	10mm/s

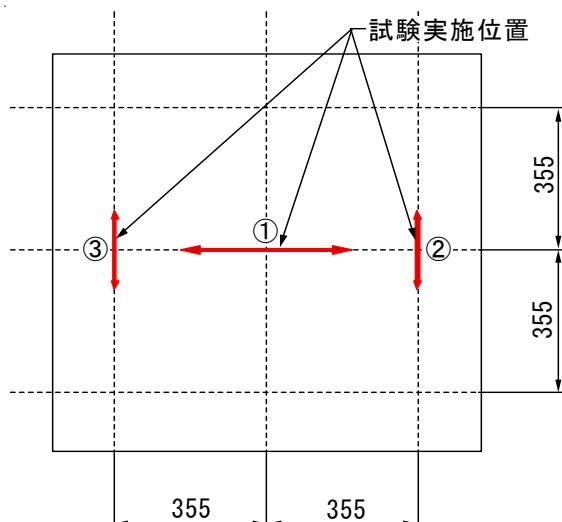


図-10 水平加力試験実施位置
Fig.10 Testing positions of horizontal loading test

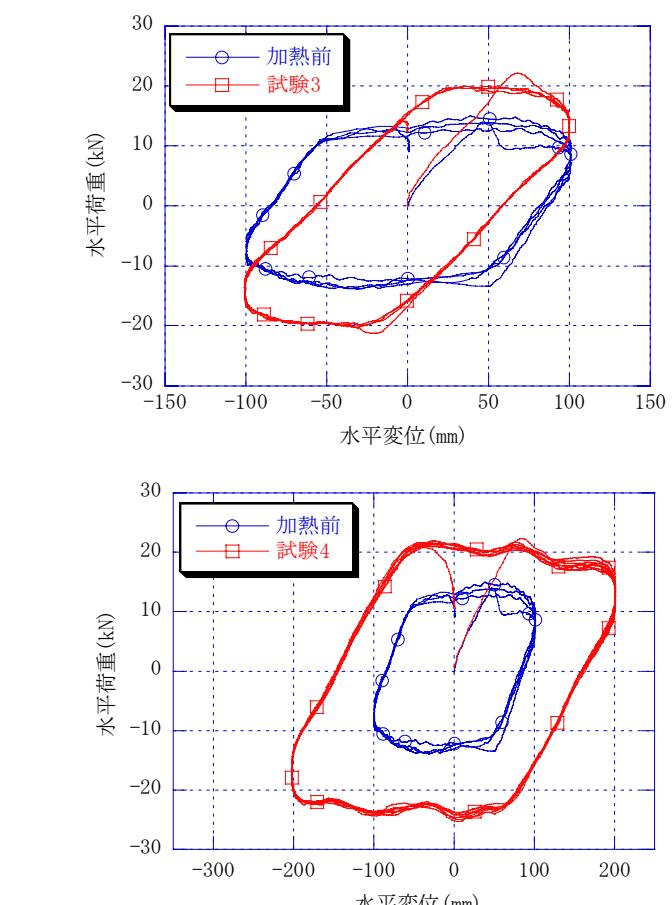


図-10 水平加力試験実施位置
Fig.10 Testing positions of horizontal loading test

5.1.2 圧縮試験

表-4 に加熱前と加熱後の圧縮ばね定数の測定結果、図-12 に加熱前と加熱後の圧縮変位量と鉛直荷重の関係を示す。圧縮試験では基準面圧を 15N/mm^2 、荷重振幅を $15\text{N/mm}^2 \pm 30\%$ とした。加熱後の圧縮ばね定数は、加熱前に比べて 33% 増となった。

5.2 すべり材とすべり板の変形測定

表-5 にすべり材とすべり板の加熱前後における平面度の比較、表-6 にすべり材とすべり板の加熱前後における表面粗さの比較を示す。へこみは弾性すべり支承とすべり板の接触面に対して凹の変形を表し、そりは凸の変形を表す。すべり材のへこみとそりの値は加熱後の方が加熱前よりも大きくなつたが、全ての方向においてメーカーの出荷判定基準以下であった。また、すべり板のへこみも加熱後の方が加熱前よりも大きくなつたが、その値は 135° 以外の方向では出荷判定基準以下であった。

すべり材の表面粗さを 5 箇所で測定した結果、加熱後の方が加熱前よりも大きくなつたが、何れもメーカーの出荷判定基準以下であった。一方、すべり板の表面粗さを 9 箇所で測定した結果、加熱後の方が加熱前

表-4 圧縮試験測定結果
Table.4 Results of compression test

項目	加熱前	加熱後
圧縮ばね定数 (kN/mm) (比率)	315.1	419.4 (1.33)
圧縮ひずみ量 (荷重振幅区間)	0.492	0.378

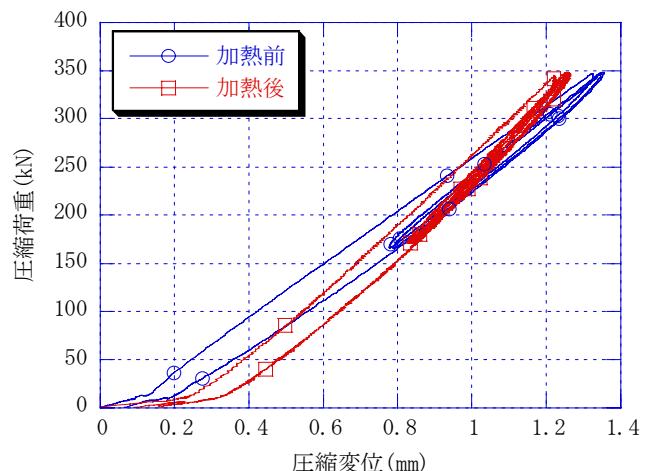


図-12 圧縮変位と圧縮荷重の関係
Fig.12 Vertical load-displacement relationships

表-5 加熱前後の平面度の比較
Table.5 Comparison of flatness at pre and post-heating

	出荷判定基準		へこみ				そり			
			0°	45°	90°	135°	0°	45°	90°	135°
すべり材 の平面度 (mm)	へこみ 0.1mm 以下 そり 0.2mm 以下 (長さの $1/1000$ 以下)	加熱前	0.01	0.04	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01
		加熱後	0.04	0.06	0.05	0.04	0.10	0.08	0.09	0.08
すべり板 の平面度 (mm)	へこみ 0.92mm 以下 そり 1.9mm 以下 (長さの $1/1000$ 以下)	加熱前	0.70	0.25	0.70	0.30	—	—	—	—
		加熱後	0.70	0.85	0.90	0.95	0.35	0.40	0.45	0.45

表-6 加熱前後の表面粗さの比較
Table.6 Comparison of surface roughness at pre-/post-heating

	出荷判定基準	加熱前	加熱後
すべり材表面粗さ 平均粗さ Ra	Ra $10\mu\text{m}$ 以下	5.66	8.42
		6.15	8.07
		4.69	9.07
		7.15	8.24
		7.20	7.77
すべり板表面粗さ 平均粗さ Ra (最大粗さ Rz)	Ra $3\mu\text{m}$ 以下	0.60	0.05 (0.56)
		0.60	0.08 (0.72)
		0.60	0.05 (0.61)
		0.80	0.08 (1.05)
		0.50	0.23 (1.90)
		0.60	0.12 (1.61)
		0.50	0.13 (0.89)
		0.60	0.15 (1.44)
		0.80	0.06 (0.71)

よりも小さくなっていた。これはすべり板の付着物を取り除くためにすべり板を紙やすりで磨いたためと考えられる。また、弾性すべり支承の寸法を測定した結果、加熱後は厚さが変化比率で最大0.6%程度薄くなっていたが、径は加熱前と変わらなかった。

5.3 弾性すべり支承の継続使用について

今回、載荷加熱試験を行った弾性すべり支承では、積層ゴムの温度がメーカーが実施している促進老化試験の加熱温度である100°Cを超えたことから、本すべり支承の積層ゴムは設計想定よりも老化が促進されたことは十分に考えられる。このため、本すべり支承を設計耐用年数の期間、継続使用することは保証できない。しかし、載荷加熱試験の47日後に実施した水平加力試験の試験条件（試験4：変位±200mm、最大速度10mm/s）の範囲内では免震性能は保持されており、加熱前と比較して著しい低下は生じていない。特に試験1のケースでは水平剛性14%減、摩擦係数19%増と変動は小さかった。また、加熱後のすべり材とすべり板のへこみやそり、表面粗さは、ほぼメーカーの出荷判定基準以下であったことから、これらの変形が免震性能に支障をきたすとは考え難い。

以上のことから、本システムを適用した弾性すべり支承は、ISO834標準加熱温度曲線に準拠するような3時間の火災に曝されても、水平加力試験の試験条件に納まるような規模の地震であれば、その免震性能は発揮されると考えられる。ただし、この免震性能は加熱後47日経過した弾性すべり支承で確認したものである。

6. まとめ

今回、開発した弾性すべり支承用耐火被覆システムの変位追従性実験、載荷加熱試験を実施し、さらに加熱後の弾性すべり支承の変形性能とすべり材、すべり板の変形について試験・測定を行った結果、以下のこととが確認できた。

- ①本システムは層間変位量±400mmおよび±600mmに対して、耐火ブランケットが弾性すべり支承に近接した壁に衝突あるいは下フーチングからはみ出しても、耐火ブランケットは柔軟に変形し、変位に対する追従性がある。また、弾性すべり支承が原位置に戻った場合には、耐火ブランケットとすべり板の間には隙間は発生せず、復元性もある。
- ②本システムを適用した弾性すべり支承免震装置を含む柱は、ISO834の標準加熱温度曲線に準拠した3時間の載荷加熱試験において鉛直荷重支持能力を保持しており、試験体高さを1500mmとした場合の許容収縮量15mm($=h/100$)および許容収縮速度4.5mm/分($=3h/1000$)の判定基準を満たす耐火性能を有する。
- ③本システムを適用した弾性すべり支承がISO834の標準加熱温度曲線に準拠した3時間の加熱を受けた後の変形性能やすべり材、すべり板の変形測定によって、火災後補修時の弾性すべり支承の一時的な継続使用に対して構造安全性を検討するためのデータが得られた。

これらの実験および試験結果に基づき、本システムの施工要領書を整備した。今後は、本システムの実施物件への適用を進めていく。