

# テフロン被膜を形成した低摩擦型剛すべり支承の開発

## Development of Slide Bearing of Low Friction Type with PTFE Coating

小幡 達也 TATSUYA OBATA

鈴木 亨 TORU SUZUKI

中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI

近年の免震建築の高層化、高性能化に伴い、免震装置に求められる性能もより高度なものになっている。そこで高面圧に対応でき、かつ転がり系と同等の低摩擦の剛すべり支承を開発した。本装置はすべり材とすべり板の間にテフロン被膜を形成させることで低摩擦を実現している。実験によって、摩擦係数と各種依存性、鉛直性能、限界性能を検証した。その結果、本装置が高面圧（基準  $50\text{N}/\text{mm}^2$ 、最大  $100\text{N}/\text{mm}^2$ ）の下で安定した性能を発揮できることが確認できた。

キーワード：剛すべり支承、低摩擦係数、PTFE、高面圧、免震

Recently, as base isolated buildings are getting higher and improving in performance, devices for base isolation are also required higher performance. So the authors have developed a new slide bearing that can be used on the condition of high vertical pressure and have low coefficient of friction. The device consists of metal sliding plate with PTFE coating, and its horizontal and vertical characteristics including ultimate capacity have been verified by experiments. The results show excellent performance of the device, under high vertical pressures that are  $50\text{N}/\text{mm}^2$  in standard,  $100\text{N}/\text{mm}^2$  in maximum.

**Key Words:** Slide Bearing, Low Coefficient of Friction, PTFE, High Vertical Pressure, Base Isolation

### 1. はじめに

近年の免震建築では積層ゴム系支承とすべり・転がり系支承の併用によって長周期化をはかり免震性能を高めようとする傾向がある。また免震建築の高層化に伴い、免震装置に要求される性能は高性能化、高面圧化および低コスト化が望まれる状況にある。すべり系の装置においても転がり系と同等の低摩擦型の装置<sup>1)</sup>が見られるようになっている。こうした背景から筆者らは高面圧（ $50\text{N}/\text{mm}^2$ ）対応可能でかつ転がり系と同等の低摩擦型のすべり支承（Slide Bearing, 以下 SB と略記）を開発した。本装置は、構造的にシンプルであるため低コスト化の実現が可能である。本論では装置概要と性能確認試験の結果について報告する。

### 2. 装置概要

図-1 に本装置の概要図を、写真-1 に装置外観を示す。本装置は、土木分野で橋梁の支承として従来から用いられているものであり、高面圧を対象とした建築用装置と

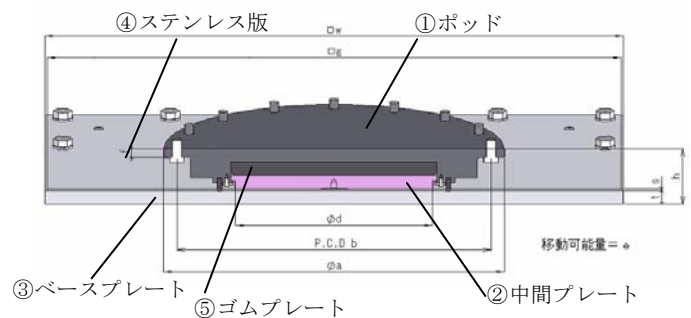


図-1 装置概要図



(a) ボッド・ゴムプレート



(b) 中間プレート



(c) ベースプレート・ステンレス板

写真-1 装置外観

表-1 試験体諸元 (SB240)

番号	部位名称	材質		記号	単位	数値
①	ポッド	SM490A	外径	a	mm	440
			取付ボルトPCD	b	mm	404
			フランジ厚さ	f	mm	12
②	中間プレート	SS400	外径	d	mm	240
			厚さ	-	mm	30
③	ベースプレート	SS400	厚さ	t	mm	16
			長さ	w	mm	1360×440
			長さ	g	mm	1350×430
④	ステンレス板	SUS316	厚さ	s	mm	2
			長さ	g	mm	1350×430
⑤	ゴムプレート	クロロプレンゴム	厚さ	h	mm	18
			装置高さ	h	mm	84
			ストローク	e	mm	±400
			全重量	-	kg	130



写真-2 中間プレート PTFE 塗布状況

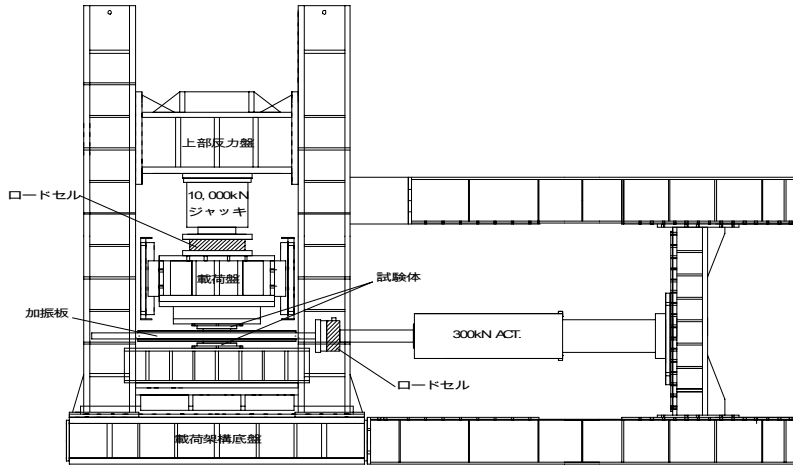


図-2 試験概要図

表-2 試験パラメータ

周期	振動数	振幅 (mm)			
		100	200	300	400
sec	Hz	100	200	300	400
2	0.5	31.4	—	—	—
4	0.25	15.7	31.4	47.1	—
6.7	0.15	9.4	18.8	28.3	37.7

※表中の値は正弦波加振における最大速度 (cm/sec) を表す

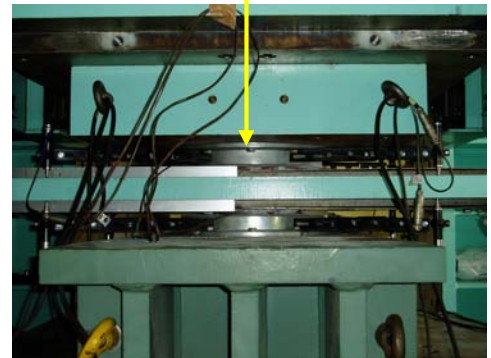
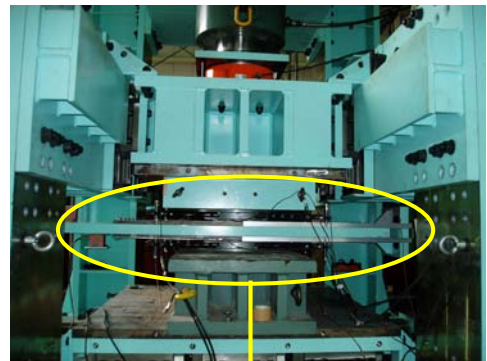
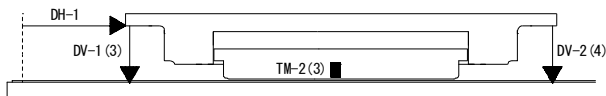


写真-3 試験状況



DH: 水平変位  
DV: 鉛直変位  
TM: 温度

図-3 変位・温度計測位置

するため、新たに構造および部材設計の見直しを行った。主要な構成部材は図-1 に示した 5 部材であり、円形のポッドに回転吸収のためのゴムプレートとすべり材である中間プレートをはめ込んだ構造である。相手材にはステンレス板を用いている。また、中間プレートにはテフロン (PTFE) 被膜の下地材として特殊焼結材をコーティングしている。中間プレートの摺動面に高純度の PTFE パウダーを塗布し (写真-2)、軸力をかけて加圧することで被膜状の PTFE を形成させる。

### 3. 試験概要

本装置の水平性能を確認することを目的とした動的加振実験および鉛直性能を確認することを目的とした静的載荷実験を実施した。表-1 に試験体諸元を、図-2 に試験概要図を示す。試験体は型番 SB240 (240 は中間プレートの外径を表す) を 3 セット (6 基)、ストロークは ±400mm とした。実験は 300kN ダイナミックアクチュエータに接続された加振板の上下に試験体 2 基を 1 セットとして配置し、10,000kN ジャッキにより鉛直軸力をかけた状態で水平加振を行った。表-2 に試験パラメータを示す。基準面圧を 50N/mm<sup>2</sup> (基準荷重 P<sub>0</sub> は 2,261kN) とし、1/2 の 25N/mm<sup>2</sup>、2 倍の 100N/mm<sup>2</sup> について性能を確認した。入力波は正弦波 5 サイクルとした。計測項目は水平荷重、装置とステンレス板の相対変位、

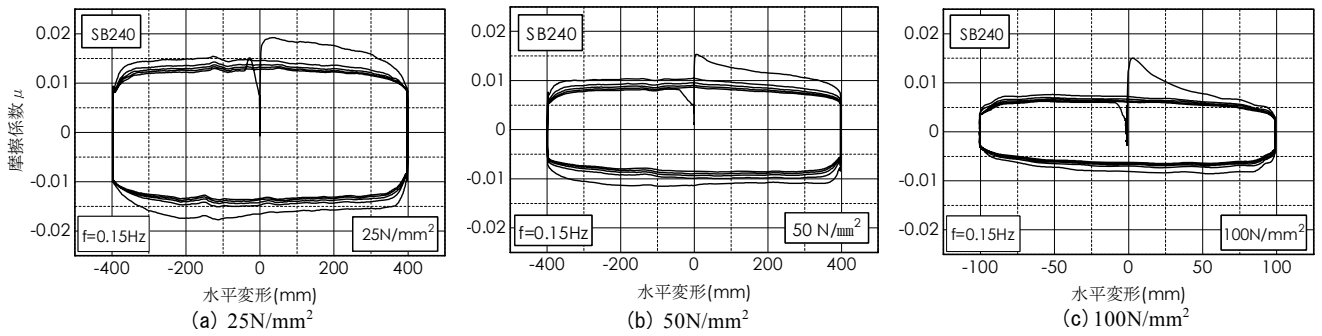


図-4 摩擦係数-変位関係

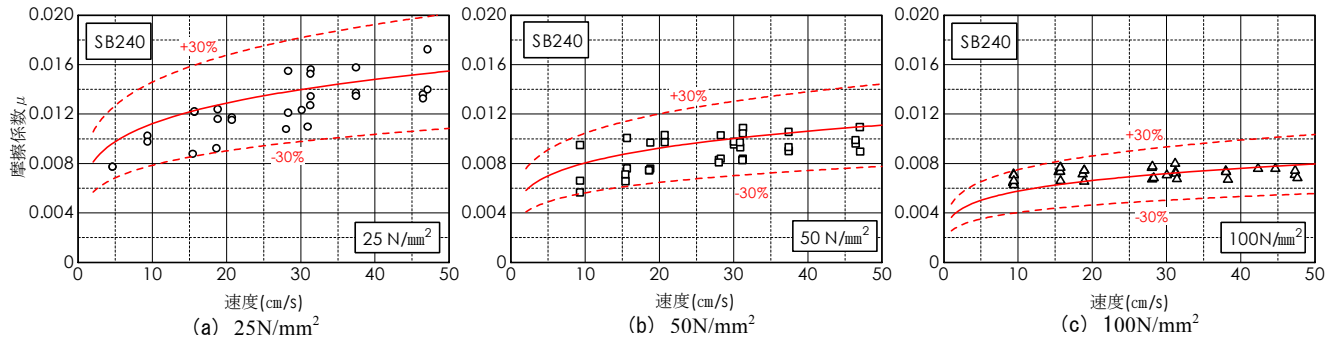


図-5 摩擦係数-速度関係

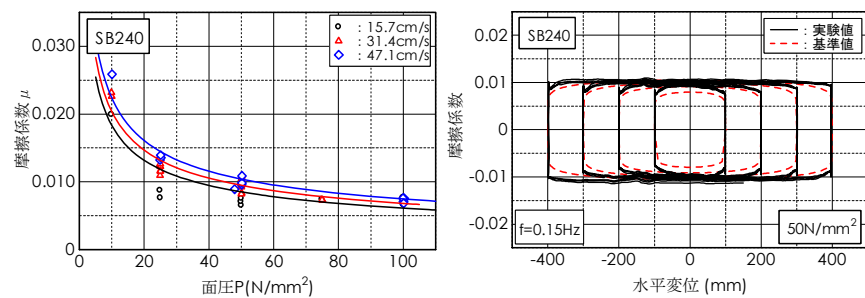


図-6 摩擦係数-面圧関係

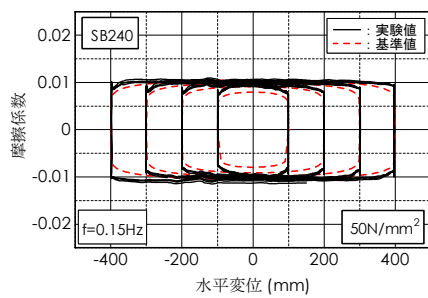


図-7 設計値と実験値の比較

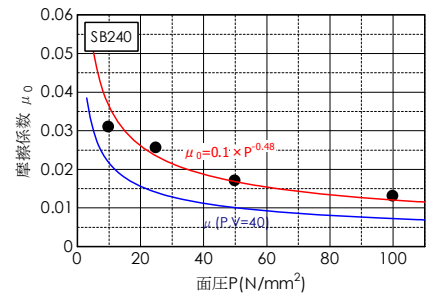


図-8 すべり出しの摩擦係数と面圧の関係

鉛直荷重，鉛直変位，中間プレートの温度とした。図-3 に変位と温度の計測位置を示す。なお，PTFE 被膜は経験した摺動距離に応じて徐々に磨耗していくため，摺動距離 34m（表-2 の全パラメータの累積距離）ごとに PTFE パウダーを再塗布して実験を実施した。

#### 4. 試験結果

##### (1) 履歴曲線

図-4 に面圧 25 N/mm<sup>2</sup>，50 N/mm<sup>2</sup>，100 N/mm<sup>2</sup>における代表的な摩擦係数-変位関係（履歴曲線）を示す。縦軸の摩擦係数は 1 相当りの水平荷重を鉛直荷重で除した値である。いずれもすべり出しは大きな値を示しているが，その後安定した履歴を描いている。

##### (2) 速度依存性，面圧依存性

図-5 に履歴曲線から得られた摩擦係数-速度関係を，図-6 に摩擦係数-面圧関係を示す。図中の摩擦係数は 3

サイクル目の値である。速度が速くなるに従い摩擦係数は大きく，面圧が高くなるに従い摩擦係数は小さくなる傾向にあった。これらの依存性をふまえると摩擦係数は式(1)で評価できる。

$$\mu(P, V) = 0.0332 \times P^{-0.48} \times V^{0.2} \quad (1)$$

ここに， $\mu(P, V)$ ：摩擦係数  $P$ ：面圧(N/mm<sup>2</sup>)

$V$ ：速度(cm/sec)

図-5，図-6 中の実線は式(1)を表している。以降，式(1)により得られる摩擦係数の値を基準値と呼ぶ。実験値の基準値に対するばらつきは±30%程度であった。図-7 は面圧 50N/mm<sup>2</sup>における履歴曲線において基準値と実験値を比較したものである。基準値は実験値をおおむね捉えており良い整合性が得られている。また，すべり出しの摩擦係数は基準値のおよそ 1.4 倍～2 倍の値であり，速度依存性は見られないが，面圧依存性は上記と同様の傾向が認められる。すべり出しの摩擦係数（各面圧の実験値の平均）と面圧の関係を図-8 に示す。

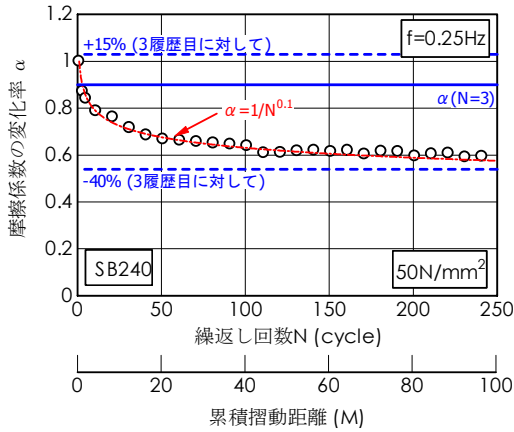


図-9 摩擦係数の変化率と繰返し回数の関係

表-3 繰返しに伴う摩擦係数の変化率

CYCLE	累積摺動距離 M	摩擦係数	3cycle目の 摩擦係数に 対する変化率	切片荷重 KN	中間プレート	
					温度 °C	温度上昇 °C
1	0.4	0.0109	1.15	24.6	10.3	0.0
3	1.2	0.0095	1.00	21.4	10.4	0.0
10	4	0.0087	0.92	19.5	11.1	0.8
40	16	0.0075	0.79	17.0	23.7	13.4
100	40	0.0069	0.73	15.9	35.2	24.9
200	80	0.0065	0.69	15.3	45.6	35.3
249	99.6	0.0069	0.72	16.2	48.9	38.6

(3) 繰返し依存性

本装置の繰返し依存性を確認するため面圧 50N/mm<sup>2</sup>, 振幅±100mm, 振動数 0.25Hz, 最大速度 15.7cm/sec の加振条件で繰返し 250 回の連続加振試験を行った。なお, 本試験においては PTFE の再塗布は行っていない。図-9 に摩擦係数の変化率と繰返し回数の関係を, 表-3 に繰返しに伴う摩擦係数と温度の変化を示す。摩擦係数は繰返し 100 回(摺動距離 40m)程度まで漸減し, その後はほぼ一定値を示している。3 サイクル目の値を基準とした時の摩擦係数の変化率は 1 サイクル目で 1.15, 10 サイクル目で 0.92, 100 サイクル目で 0.73, 250 サイクル目で 0.72 であった。繰返し 250 回までの摩擦係数の変化率は式(2)で表すことができる。

$$\alpha = \frac{1}{N^{0.1}} \quad (2)$$

ここに, α: 摩擦係数の変化率 N: 繰返し回数  
また, 中間プレートの温度(計測点 4 点の平均)は, 加振とともに上昇を続け, 繰返し 250 回での温度は約 49°C となり, 温度上昇は約 39°C であった。

(4) 傾斜試験

本装置に傾斜を与えた場合の影響を確認するために傾斜試験を行った。図-10 に傾斜試験の概要を示す。1/150 rad の勾配をつけたプレートを利用してポッドに強制的に傾斜を与えた状態で加振試験を行った。試験パ

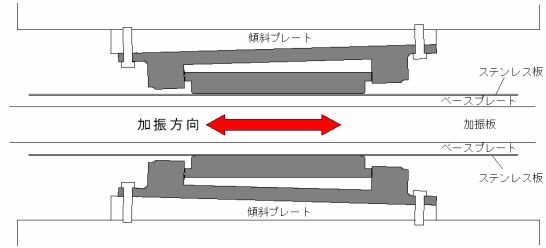


図-10 傾斜試験概要図

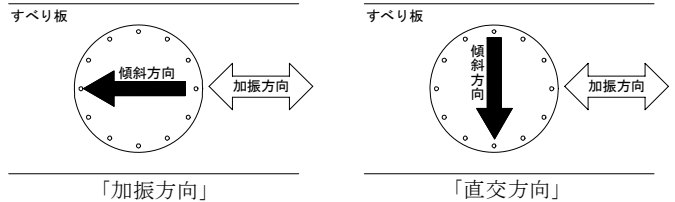


図-11 傾斜方向の説明図

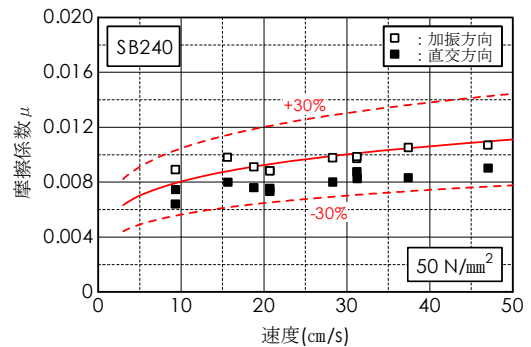


図-12 傾斜試験結果 (50N/mm<sup>2</sup>)

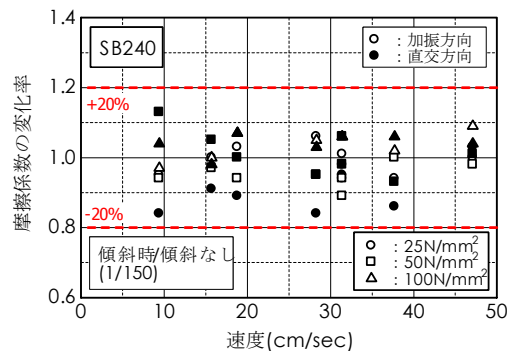


図-13 傾斜による摩擦係数の変化率

ラメータは傾斜方向(図-11 参照), 面圧 (25 N/mm<sup>2</sup>, 50N/mm<sup>2</sup>, 100N/mm<sup>2</sup>), および表-2 の速度とした。図-12 に面圧 50N/mm<sup>2</sup>における摩擦係数-速度関係を示す。図中の実線は基準値を示している。基準値に対するばらつきは±30%に納まっている。図-13 に傾斜を与えた場合の摩擦係数と, 傾斜のない場合の摩擦係数の比率を傾斜方向と面圧ごとに示す。変化率の範囲は 0.8~1.2 であり, 傾斜方向や面圧および速度による偏りは見られない。以上より, ゴムプレートの効果には方向性または面圧や速度への依存性はなく, 1/150rad の傾斜時における摩擦係数の変化率は+20%程度であることがわかる。

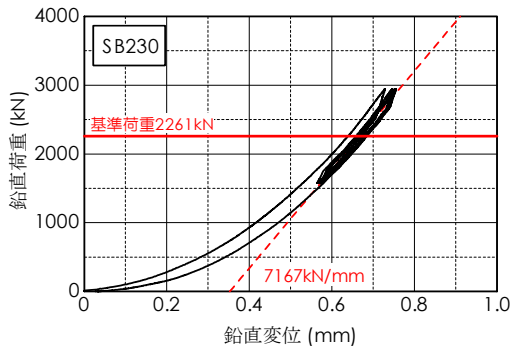


図-14 鉛直剛性

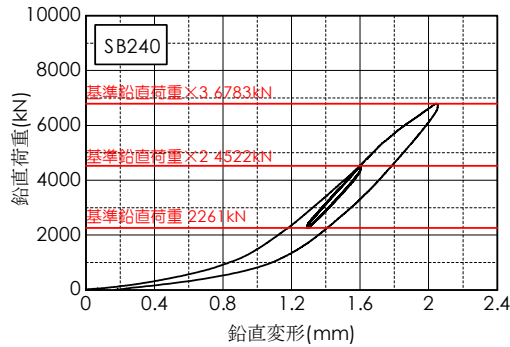


図-15 圧縮強度

(5) 鉛直剛性、圧縮強度

鉛直剛性を確認するため、基準荷重  $P_0=2,261\text{kN}$  の±30%での繰返し鉛直载荷を行った。図-14 に鉛直荷重—鉛直変位関係を示す。変位はポッド1基当たり4点計測し、図は4点の平均値である。 $P_0\pm 30\%$ の割線剛性は約7,200kN/mmであった。本装置の鉛直剛性  $K_v$  は式(3)によって求めることができる。

$$K_v = \frac{I}{\frac{I}{K_{pod}} + \frac{I}{K_{rubber}} + \frac{I}{K_{plate}}} \quad (3)$$

ここに、 $K_{pod}$ ：ポッドの剛性  $K_{rubber}$ ：ゴムプレートの剛性  $K_{plate}$ ：中間プレートの剛性  
また、 $K_{rubber}$  は次式で与えられる。

$$K_{rubber} = \beta \times \frac{A_r \times E_\infty}{t_r} \quad (4)$$

ここに、 $\beta=1.2$ ：実験から得られた補正係数  
 $A_r, t_r$ ：ゴムプレートの面積、厚さ  
 $E_\infty$ ：ゴムの体積弾性係数<sup>2)</sup>

式(3)、式(4)より  $K_v$  を求めると 7,272kN/mm となり、実験値ともおおむね対応する。

図-15 は基準荷重 2,261kN (面圧 50N/mm<sup>2</sup>) に対して3倍の 6,783kN まで鉛直载荷を実施した結果である。試験後に残留変位が生じていないことから各部材とも弾性

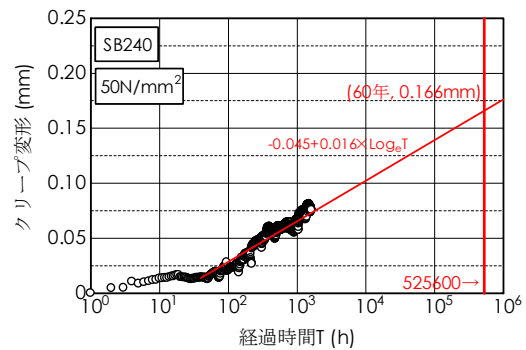


図-16 クリープ特性試験結果

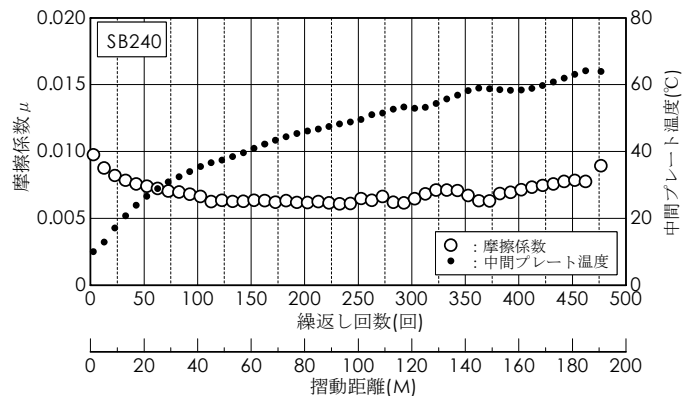


図-17 耐久試験結果

範囲にあるものと考えられ、この結果から基準荷重に対して3倍以上の安全率は確保できていると考えられる。

(6) クリープ特性

本装置のクリープ特性を把握するため、基準面圧 (50N/mm<sup>2</sup>) 下における長期鉛直载荷試験を行った。図-16 にクリープ変形と経過時間の関係を示す。試験の結果から、鉛直载荷から  $T$  時間経過後のクリープ変形量  $\delta_{cp}(T)$  は式(5)で予測できることがわかる。

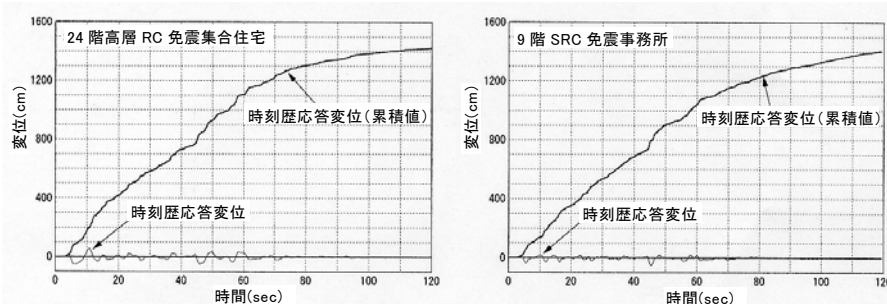
$$\delta_{cp}(T) = -0.045 + 0.016 \times \log_e T \quad (T \geq 100) \quad (5)$$

式(5)から 60 年後のクリープ変形量を予測すると 0.166mm である。これはゴムプレート厚さの 0.92%、装置全高の 0.2% と小さく、工学的には無視できる値であると考えられる。

(7) 累積摺動距離の限界値

a) 累積限界摺動距離の確認試験

本装置の中間プレートの摺動面には高純度のテフロン (PTFE) 被膜が形成されており、これにより低摩擦を実現している。しかし摺動に伴い、磨耗によって PTFE 膜厚が減少していき、最終的には中間プレートの地が露出することで荷重 (摩擦係数) が急激に上昇する状況が考えられる。そのため、本装置の水平方向の累積摺動距



(a) 24階高層 RC 造集合住宅

(b) 9階 SRC 造事務所

図-18 免震建物の地震時累積変位

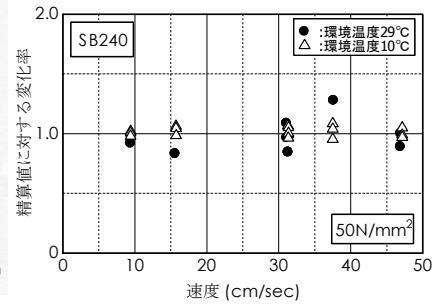


図-19 温度による摩擦係数の変化率

離の限界値を確認する必要がある。そこで、(3)の繰返し依存性の確認試験と同じ条件で、耐久試験を実施した。図-17に試験の結果を示す。試験は475サイクル(撓動距離190m)を超えたところで荷重の上昇が見られたため終了した。後半に若干荷重が上昇する傾向が見られるが、全体としては最後までほぼ一定の摩擦係数の値を維持している。試験終了後の目視で、中間プレートの撓動面とステンレス板に撓動方向の筋状の傷が認められた。このときの撓動距離は190mであり、試験終了の直前まで一定の摩擦係数を維持していることを考慮すると、限界値は200m程度であると考えられる。また、磨耗によるPTFE膜厚の減少は装置性能に大きな影響を与えないと考えられる。

b) 免震建物の地震時累積変位の検討

免震建物の地震時累積変位を、以下の2例について概略検討した。

- ① 24階高層 RC 造免震集合住宅
- ② 9階 SRC 造免震事務所

地震波はBCJ-L2原波の $V_{max}=75\text{cm/sec}$ (震度6強から震度7)を採用した。図-18に累積変位を示す。両建物ともに累積変位は約14mである。新潟県中越地震では、震度5~6クラスの余震が頻発したことから、一度の大地震において建物が経験する累積変位を上記変位の5倍程度と考えると約70mである。本装置の累積撓動距離の限界値は約200mであるから、今回検討した地震波による累積変位の2.5~3倍程度となる。

(8) 温度依存性

環境温度29°Cと10°Cの場合の摩擦係数の基準値に対する変化率を図-19に示す。温度による影響はほとんど見られない。また、図-17の耐久試験結果においても、試験体の温度は上昇し続けているにもかかわらず、摩擦係数は一定値を維持していることから、本装置に明確な温度依存性はないと考えられる。

5. まとめ

テフロン被膜を形成した低摩擦型剛すべり支承の性能確認試験を実施した結果、以下の事項を確認できた。

- ① 本装置の摩擦係数は速度と面圧に依存し、その値は式(1)で評価できる。
- ② 本装置の摩擦係数には繰返し依存性があり、繰返しに伴い摩擦係数は低下するが、繰返し100回程度で安定する。
- ③ 本装置に傾斜を与えた場合の摩擦係数の変化率は傾斜のない場合の+20%程度である。
- ④ 本装置の鉛直剛性は式(3)で評価でき、およそ7,200kN/mmである。
- ⑤ 本装置のクリープ特性は、60年後で0.2mm以下とわずかであり、工学的には無視できる。
- ⑥ 本装置の累積撓動距離の限界値は約200mであり、その距離はBCJ-L2原波( $V_{max}=75\text{cm/sec}$ )程度の地震による建物の累積変位の2.5倍~3倍にあたる。
- ⑦ 本装置に明確な温度依存性はない。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震部材構造品リスト-2005-、2005.1
- 2) 日本建築学会：免震構造設計指針、1993.12
- 3) 高塚ほか：テフロン（PTFE）被膜を形成した低摩擦型剛すべり支承の開発（その1）、日本建築学会大会学術講演会、2007
- 4) 小幡ほか：テフロン（PTFE）被膜を形成した低摩擦型剛すべり支承の開発（その2）、日本建築学会大会学術講演会、2007