

高摩擦係数を有する焼結金属系すべり材の基礎的研究

炭村 透¹・鵜野禎史²・中山隆弘³・大倉幸三⁴・山本利弘⁵

¹正会員 川口金属工業株式会社 技術本部技術二部（〒530-0012 大阪市北区芝田2-6-23）

²正会員 川口金属工業株式会社 技術本部技術一部（〒332-8502 埼玉県川口市宮町18-19）

³フェロー 広島工業大学教授 工学部建設工学科（〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1）

⁴フェロー 株式会社ヒロコン 第一技術本部（〒733-0036 広島市西区観音新町1-7-62）

⁵正会員 株式会社リョーセンエンジニアズ 技術計算センタ

（〒733-0036 広島市西区観音新町1-20-24）

1. はじめに

近年、すべり系支承の摩擦力を減衰力として評価し、構造物の地震応答の低減を期待する設計手法が広まりつつある。また、その摩擦特性について、実験的・解析的に検討する研究も数多く行われている¹⁾。

従来、すべり系支承に用いられるすべり材としては、PTFE（四フッ化エチレン樹脂板）とステンレス板を組み合わせたものが一般的であり²⁾、過去の研究もこの組み合わせを対象としたものがほとんどであった。そして、これまでの研究によれば、この組合せによるすべり支承の摩擦係数は0.10程度であり、減衰性能としては、高減衰ゴム支承や鉛プラグ入りゴム支承などの免震支承と同程度またはそれ以下であるといえる。したがって、すべり系支承の摩擦減衰を積極的に期待した設計を行う場合、さらに高い摩擦係数を有するすべり材の開発が要求されることが考えられる。高摩擦係数を有するすべり材の一つとして、二輪車、四輪車、鉄道などのブレーキに用いられる樹脂系あるいは金属系の車両用ブレーキ材が挙げられる。

そこで、本研究では、すべり材として車両用ブレーキ材の一種である焼結金属系ブレーキ材に着目し、摩擦係数の速度と面圧への依存性、および地震時や常時の温度変化などに対する摩擦係数の安定性、すべり支承としての耐久性について実験的検証を行い、すべり系支承のすべり材としての有効性について検討を行った。

2. 試験の概要

(1) 供試体

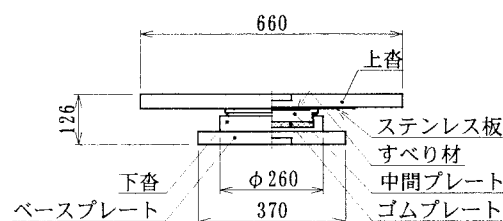


図-1 供試体の形状および寸法

表-1 各すべり材の比重および硬さ

	比重	硬さ
すべり材A	6.4	72 (30X)
すべり材B	4.2	62 (15X)
すべり材C	4.0	65 (15X)

供試体としては、試験機面板の大きさおよび試験機能力を考慮し、反力800kN相当の鋼製支承（密閉ゴム支承板支承：BP-B支承）を用いた。BP-B支承は、下査に設けられた円筒内にゴムプレートと、その上に設けられた中間プレートにより上部構造の回転に対し追随できる機構を有している。また、後述するすべり材を中間プレートの上に設置し、上下部構造間の相対変位を、すべりにより吸収するようにした。このため、すべり材にはほぼ全面にわたり均等に支圧応力度が作用すると考えられる。供試体の形状および寸法を図-1に示す。なお、試験に用いたすべり材は、直径190mm、厚さ4mmの円形である。

(2) すべり材

本研究では、すべり材として、焼結金属系ブレーキ材3種類を用いた。各すべり材は、銅（Cu）を主成分とし、摩擦特性を変化させるため他の金属（Ni, Sn, Znな

表-2 試験機能力

最大鉛直荷重	2000kN
最大水平荷重	±400kN
最大水平変位	±200mm
最大加振速度	63cm/sec

表-3 基本特性試験における試験条件

載荷荷重	200kN(面圧7MPa相当)
加振水平変位	±100mm
加振最大速度(周波数)	47cm/sec(0.74Hz相当)
加振サイクル数	10サイクル

表-4 低速試験機能力

最大鉛直荷重	500kN
最大水平荷重	±100kN
最大水平変位	±28mm

ど)の含有比率を変化させたものである。表-1にすべり材の比重および硬さを示す。なお、表中の硬さはロックウェルスーパーフィシャル硬さである。相手材は、長期防錆性能の優れたステンレス板(SUS316)である。なお、ステンレス板表面の仕上げの程度は、JIS G 4305に示されるNo.2B相当とした。

(3) 試験機

試験は、最大鉛直荷重が2000kNの二軸載荷試験機を用いて行った。試験機能力の一覧を表-2に示す。試験に当たっては、鉛直方向に対し荷重制御を行い、水平方向に対しては変位制御を行った。また、入力波形は正弦波とした。

3. 試験方法

(1) 基本特性試験

各すべり材の基本特性を確認するための試験条件を表-3に示す。ここで、載荷荷重の大きさは、予備試験の結果、安定して0.3以上の高い摩擦係数を得られる条件として設定したものである。加振速度については、道路橋の免震設計法マニュアル(案)⁴⁾(以下、免震マニュアル案と呼ぶ)において規定されている加振水平変位(±150mm)と加振周波数(0.5Hz)より求められる正弦波加振時における最大速度に合わせることにした。また、水平変位の大きさは、後述する速度依存性試験において、免震マニュアル案に規定されている周波数0.5Hzの前後に試験条件を設定したため、試験機の最大速度を

考慮して±100mmとした。加振サイクル数は10サイクルとし、得られた履歴曲線から摩擦係数を求め、免震マニュアル案の規定にもとづき、4～10サイクルの平均値を当該供試体における摩擦係数の基本特性値とした。

(2) 速度依存性試験

摩擦係数の速度に対する依存性を確認するための試験では、供試体に面圧7MPa相当の鉛直荷重を載荷した状態で、水平変位±100mm、加振最大速度1, 15, 30, 47, 63cm/sec(加振周波数は、それぞれ0.02, 0.24, 0.47, 0.74, 0.99Hz)による正負繰返し載荷を行った。加振サイクル数は10サイクルとし、得られた履歴曲線から摩擦係数を求め、4～10サイクルの平均値を当該条件における特性値とした。

(3) 面圧依存性試験

摩擦係数の面圧に対する依存性を確認するための試験では、面圧7, 14, 21, 28MPaに相当する鉛直荷重(それぞれ200, 400, 600, 800kN)を供試体に載荷した状態で、水平変位±100mm、加振最大速度47cm/sec(加振周波数0.74Hz)で10サイクル加振した。得られた履歴曲線から摩擦係数を求め、4～10サイクルの平均値を当該条件における特性値とした。

(4) 50サイクル高速繰返し載荷試験

レベル2クラスの地震による繰返し載荷に対する摩擦係数の安定性とすべり支承としての耐久性を確認する目的で、50サイクル繰返し載荷試験を行った。試験条件は、表-3に示す条件による基本特性試験と同様とし、同試験を5シリーズ連続で行うことにより計50サイクルの加振とした。なお、本試験は表-1に示したすべり材Cに対してのみ実施した。

(5) 6000サイクル低速繰返し載荷試験

桁の温度変化などによる常時の水平繰返し載荷に対する摩擦係数の安定性とすべり支承としての耐久性を確認する目的で、6000サイクルの低速繰返し載荷試験を行った。試験条件は、面圧7MPa相当の鉛直荷重を供試体に載荷した状態で、水平変位±28mm、加振最大速度0.12cm/sec(加振周波数0.0067Hz)とした。なお、試験では表-4に示す能力を有する低速試験機を用いた。試験前後、および加振サイクル数1000サイクルごとに、表-3に示す条件による基本特性試験を行い、摩擦係数の変動について検証した。なお、本試験もすべり材Cに対してのみ実施した。

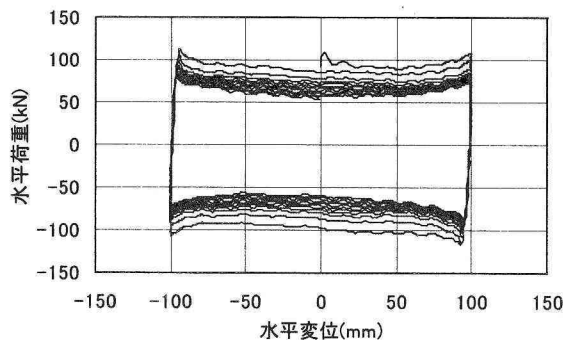


図-2 焼結金属系すべり材の荷重－変位曲線

表-5 各すべり材の基本特性

	平均摩擦係数
すべり材A	0.31
すべり材B	0.30
すべり材C	0.36

4. 試験結果

(1) 基本特性試験

基本特性試験の結果を表-5に示す。また、基本特性試験から得られた荷重－変位曲線の一例を図-2に示す。荷重－変位曲線は、水平荷重が変位が0の付近で小さく、最大変位付近で大きくなっており、鼓のような形状を示している。本試験は、正弦波で加振しているため、加振速度は水平変位が0の付近で最も高速となり、最大変位付近で最も低速となる。したがって、このことから本すべり材の摩擦係数は、速度依存性を有していると考えられる。

なお、摩擦係数の算定に当たっては、免震マニュアル案では、履歴曲線の切片荷重（水平変位が0の時点の水平荷重）を載荷鉛直荷重で除して算出する手法が示されている。しかし、本研究では、摩擦力のなす仕事が履歴曲線の面積（履歴吸収エネルギー）と等価となるようにモデル化した摩擦力を(1)式より算出し、これを(2)式に示すように載荷鉛直荷重で除したものを当該供試体の摩擦係数と定義した。

$$F = \frac{E}{S} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{F}{P} \quad (2)$$

ここに、 F ：摩擦力（kN）

E ：履歴吸収エネルギー（kN・mm）

S ：1サイクルの移動変位量（mm）

μ ：摩擦係数

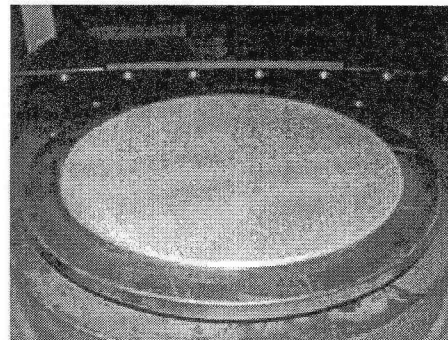


図-3 基本特性試験前のすべり材

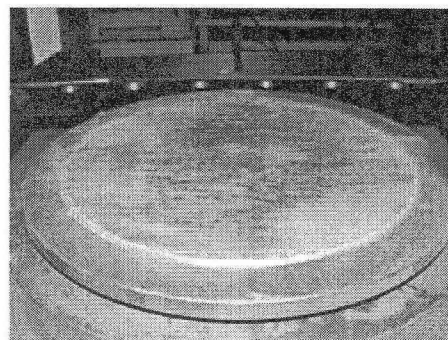


図-4 基本特性試験後のすべり材

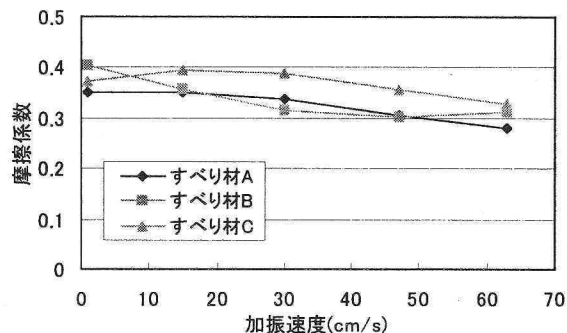


図-5 速度依存性試験結果

P ：載荷鉛直荷重（kN）

表-5より、すべり材A、Bは平均摩擦係数約0.3を、すべり材Cは0.36を示しており、一般的なすべり材に比べると高い摩擦係数を有していることがわかる。

(2) 速度依存性試験

各すべり材における速度依存性試験結果をグラフ化したものを図-5に示す。なお、図中の加振速度は、正弦波で加振した場合の最大速度を示す。各すべり材共に、加振速度が速くなるにしたがい摩擦係数はおおむね低下する傾向を示している。基本特性試験時の速度である47cm/secを基準とした場合、摩擦係数はすべり材Aでは+15～-8%、すべり材Bでは+33～0%、すべり材Cでは+11

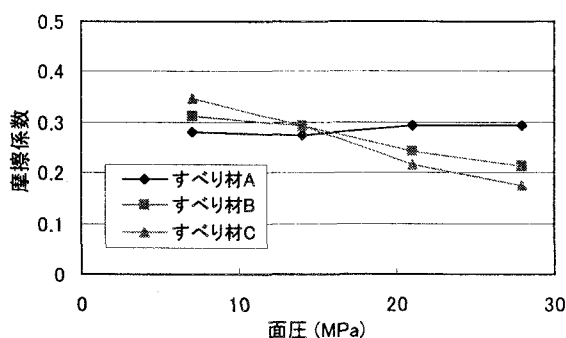


図-6 面圧依存性試験結果

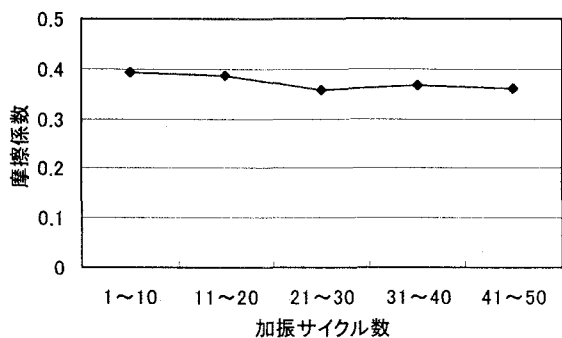


図-7 50サイクル高速繰返し载荷試験結果

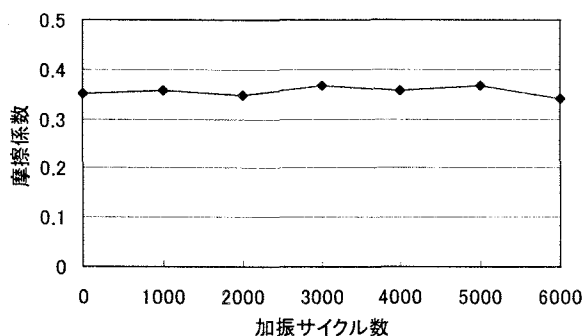


図-8 6000サイクル低速繰返し载荷試験結果

～7%の範囲で変化している。

(3) 面圧依存性試験

各すべり材の面圧依存性試験結果をグラフ化したものを図-6に示す。前述したPTFEの場合、面圧の増加に伴い摩擦係数は低下する傾向を示すが、すべり材Aは面圧依存性が小さく、0.28前後の摩擦係数で安定している。しかし、すべり材BおよびCは、PTFEと同様に面圧が高くなるにしたがい摩擦係数は低くなる傾向を示している。基本特性試験時の面圧である7MPaを基準とした場合、摩擦係数は、すべり材Aでは+4～-3%、すべり材Bでは0～-31%、すべり材Cでは0～-50%であった。

(4) 50サイクル高速繰返し载荷試験

50サイクル高速繰返し試験結果をグラフ化したものを図-7に示す。加振サイクル数の増加に伴い、摩擦係数は

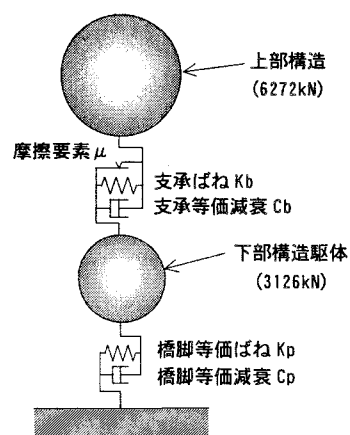


図-9 解析モデル

表-6 解析モデルのパラメータ

	ばね定数 (MN/m)	減衰定数	摩擦係数
支承	30.31	0.04	① $\mu=0.33$ ②速度依存
下部構造	151.55	0.15	—

やや低下する傾向が見られる。これは、繰返し加振に伴うすべり材の発熱などの影響であると考えられる。しかし、1シリーズ目(1～10サイクル時)を基準とした摩擦係数の低下率は、最大でも9%程度であり、変動は小さいと考えられる。また、試験後のすべり材には、有害な損傷などは見られなかった。

(5) 6000サイクル低速繰返し载荷試験

6000サイクル低速繰返し試験結果をグラフ化したものを図-8に示す。図より、繰返しによる摩擦係数の変動はほとんど見られず、試験開始前を基準とした変化率は±4%程度であることがわかる。また、試験後のすべり材には、有害な損傷などは見られなかった。したがって、桁の温度変化など常時の繰返し载荷に対するすべり支承の安定性、耐久性は十分であると考えられる。

5. 地震応答解析による検討

(1) 解析概要

実験結果をふまえ、本焼結金属系すべり材を実設計に適用するのに際し、式(1)、(2)から算出される摩擦係数について、地震応答解析によって検討を行った。解析モデルは、図-9に示す一橋脚を模した単純な2自由度系モデル⁹⁾である。地盤と下部構造を結合するばねについては、地盤-基礎-橋脚系を想定し、本来、非線形特性を有するばね定数や減衰定数を、等価なばねと減衰定数

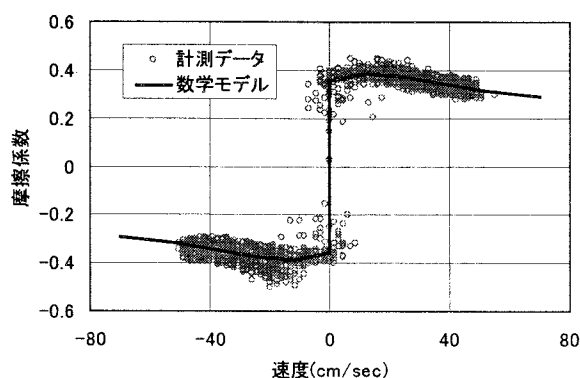


図-10 摩擦係数の速度依存性モデル

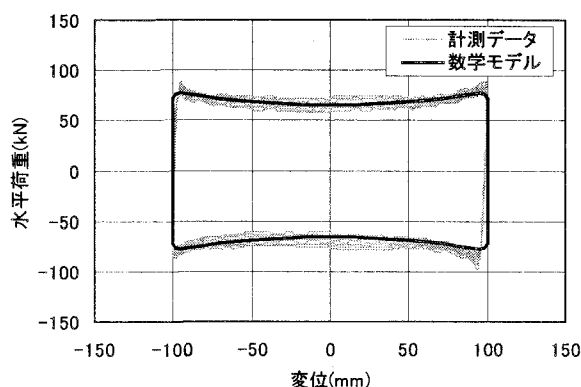


図-11 数学モデルと実験結果との比較

表-7 最大応答値一覧

		入力地震波			3波平均	ケース1/ ケース2
		2-1-1	2-1-2	2-1-3		
支承部相対変位 (mm)	ケース1	72	65	40	59	0.98
	ケース2	80	66	35	60	
支承部相対速度 (cm/s)	ケース1	64	64	67	65	0.98
	ケース2	73	62	65	67	
上部構造加速度 (cm/s ²)	ケース1	664	636	512	604	0.89
	ケース2	765	710	550	675	
下部構造変位 (mm)	ケース1	41	38	33	37	0.90
	ケース2	46	43	35	41	

で代用した。また、上下部構造間には、支承ばねと粘性減衰を表すダッシュポット、さらに摩擦要素を設けた。各部の減衰定数については、道路橋示方書⁹⁾を参考に、支承部に0.04、橋脚に0.15（非線形域に入る場合の値）を設定した。入力地震波は、レベル2タイプⅡのⅠ種地盤用波形の3波である。ただし、地震応答解析の結果、支承部の最大応答速度が試験時の最大値（63cm/sec）程度となるように、入力地震波の最大加速度を低減した。

(2) 摩擦要素のモデル化

摩擦要素については、式(1)、(2)で算出した摩擦係数を一定値として用いたケース（ケース1）と、摩擦係数の速度依存性を考慮したケース（ケース2）の二通りを考えた。また、すべり材としては、最も高い摩擦係数を示したすべり材Cを対象とした。その際、ケース1の摩擦係数としては、すべり材Cの速度依存性の試験結果から、最速条件時（最大速度63cm/sec）の値である $\mu=0.33$ を設定した。また、ケース2の摩擦係数については、図-10に示すように実験結果のデジタルデータをもとに定めた数学モデルを使用した。

(3) 解析結果

各入力地震波による、支承部相対変位、相対速度、上部構造加速度、下部構造変位の最大応答値の一覧を表-7に示す。解析の結果、摩擦係数として速度依存性を考慮する場合と、一定値を与えた場合の応答値の違いを入力地震波の3波平均値と比較すると、支承部の相対変位、相対速度については2%程度の差しかなく、ほぼ同程度の応答値を示していると考えられる。しかし、上部構造の加速度や下部構造の変位については10~11%ほどの差が出ており、支承部の相対応答値と比較すると、両者の差は若干大きくなっている。このことから、支承部の相対応答値のみに着目すると、摩擦係数を式(2)から算出しても、実用的にはほぼ妥当であるといえる。しかし、上部構造の加速度や下部構造の変位については、式(2)ではエネルギーを等価に与えたことにならず、危険側の評価を与える可能性がある。

6. まとめ

本研究では、すべり摩擦支承に用いるすべり材とし

て、高摩擦係数を有するブレーキ材3種類の材料を選び、摩擦係数の速度、面圧依存性および地震時、常時のその安定性、耐久性について、実験的に検証を行った。さらに、本支承を有する橋梁モデルに対する数値解析も行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 基本摩擦特性試験の結果、いずれのすべり材も0.3以上の摩擦係数を有していることが確認できた。
- 2) 速度依存性において、いずれのすべり材も速度が速くなるにしたがい摩擦係数がやや低くなる傾向を示した。
- 3) 面圧依存性において、すべり材 A については依存性はほとんどみられなかった。これに対し、すべり材 B および C では、面圧が増加するにしたがい、摩擦係数はやや低下する傾向を示し、その変化率はすべり材 C の方が大きかった。
- 4) 摩擦係数については、すべり材 C が面圧 7MPa の時に 0.36 と最も高いものの、面圧依存性も大きい。これに対し、すべり材 A は、摩擦係数は 0.3 程度であるが、面圧依存性も小さく、安定した性能を発揮すると思われる。
- 5) 50 サイクル高速繰返し載荷試験および 6000 サイクル低速繰返し載荷試験の結果、すべり材 C については、地震時、常時ともに高い耐久性、安定性を有してい

ることが確認できた。

- 6) 摩擦係数の速度依存性は、支承部の相対応答値のみに着目すると、摩擦係数を式(2)から算出しても、実用的にはほぼ妥当であるといえる。しかし、上部構造の加速度や下部構造の変位については、式(2)ではエネルギーを等価に与えたことにならず、これらを精度良く評価するためには、摩擦係数に関する速度依存性を考慮した解析を行う必要性も考えられる。

参考文献

- 1) 伊津野和行, 袴田文雄, 中村一平: 機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究, 土木学会論文集, No.654, I-52, pp.233-244, 2000.7
- 2) 炭村 透, 鵜野禎史, 北澤理仁: 各種すべり材の摩擦特性に関する基礎的研究, 第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.397-402, 2003.1
- 3) (社) 日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.4
- 4) (財) 土木研究センター: 建設省 道路橋の免震設計マニュアル (案), 1992.3
- 5) (社) 日本道路協会: 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料, 1997.8
- 6) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3