

各種すべり材の摩擦特性に関する基礎的研究

炭村 透¹・鶴野禎史²・北澤理仁³

¹正会員 修（工） 川口金属工業株式会社 技術本部開発部（〒332-8502 埼玉県川口市宮町18-19）

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

³非会員 川口金属工業株式会社 技術本部開発部（〒332-8502 埼玉県川口市宮町18-19）

1. はじめに

近年、すべり摩擦支承の摩擦特性に関する研究が盛んに行われており、機能分離型支承など、すべり支承の摩擦減衰を積極的に利用した免震装置の研究開発も進んでいる^{1,2)}。

従来、鋼製可動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）とステンレス板との組み合わせが一般的であり、過去の研究もこの組み合わせによるものがほとんどであった。鋼製可動支承において、すべり材の許容支圧応力度は30MPaと規定されており、従来の研究もこのような高面圧下でのものが多かった。これに対し、近年、ゴム支承の使用の増加に伴い使用するケースが増えているすべりゴム支承の場合、ゴムの平面形状に合わせたすべり材を使用するケースがほとんどであり、すべり材に生じる平均支圧応力度もゴム支承の許容圧縮応力度である8 MPa程度と小さい。しかし、このような低面圧下におけるすべり摩擦支承の摩擦特性に着目して行われた研究は少ないのが現状である。また、すべり材の種類も道路橋支承便覧³⁾に示される繊維補強型PTFEのデータがほとんどであった。

本研究では、数種類のすべり材を用意し、低面圧下で用いられるすべりゴム支承、および高面圧下で用いられる鋼製可動支承（密閉ゴム支承板支承：BP-B支承と呼ぶ）を対象とし、すべり材の持つ摩擦特性の各種依存性について検証した。

2. 試験の概要

(1) 供試体

供試体は、試験機面板の大きさ及び試験機能力を考慮し、鋼製可動支承として反力800kN相当のBP-B

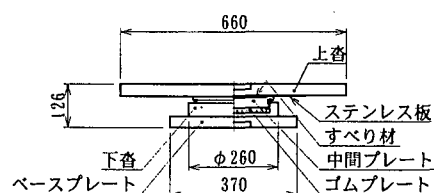


図-1 供試体 A

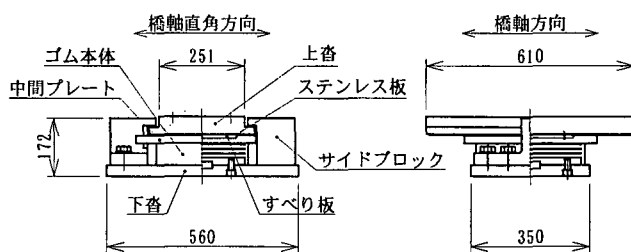


図-2 供試体 B

支承、すべりゴム支承として反力500kN相当の変位拘束型すべりゴム支承を用いた。ここで、変位拘束型すべりゴム支承とは、従来のすべりゴム支承がゴムのせん断変形を伴ったすべり挙動を示していたのに対し、サイドブロックで水平移動を拘束された中間プレートを設けることにより、ゴムにせん断変形が生じないようにしたものである。供試体の形状を図-1、2に示す。なお、試験に用いたすべり材のサイズは、供試体Aは直径190mmの円形で、供試体Bは250mm×250mmの正方形である。

(2) すべり材

本研究では、すべり材として、表-1に示す4種類のPTFEとナイロン系のポリアミド樹脂を用いた。表中、PTFE-Aは従来鋼製可動支承に用いられてきた二硫化モリブデン5%およびグラスファイバー15%を充填したPTFE板を示し、PTFE-Bはグラスファイバーを20%充填したPTFE板、またPTFE-Cはカ

表-1 すべり材の組み合わせ

すべり材	相手材
PTFE-A	SUS316
PTFE-B	
PTFE-C	
純PTFE	
ポリアミド	SUS304+フッ素樹脂

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	630mm/sec

表-3 基本特性試験における試験条件

載荷荷重	供試体A 20MPa相当 (=567kN) 供試体B 5MPa相当 (=313kN)
加振水平変位	±100mm
加振周波数	0.5Hz (=314mm/sec)

ーボンファイバーを充填したPTFE板を示す。相手材は、PTFEとの組み合わせの場合は長期防錆性能の優れたステンレス板（SUS316）との組み合わせとし、ポリアミド樹脂との組み合わせの場合は、ステンレス板に表面処理としてフッ素樹脂コーティングを施したものをを用いた。なお、ステンレス板表面の仕上げの程度は、樹脂コーティングをしない場合、JIS G 4305に示されるNo.2B相当とし、樹脂コーティングをする場合は、ステンレス板表面の荒さは $Rz=2\mu$ 以上とし、フッ素樹脂 20μ 以上をコーティングしたものをを用いた。

(3) 試験機

本試験は、2000kN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。

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。

表-3において、載荷荷重は死荷重反力相当として求めたものである。すなわち、供試体Aはすべり材の許容支圧応力度を30MPaとして、全反力における死荷重反力比率を65%程度として求めたものであり、供試体Bはゴム支承本体の許容圧縮応力度を8MPaとして、同様に求めたものである。加振回数は10回とし、得られた履歴曲線から摩擦係数を求め、2～10

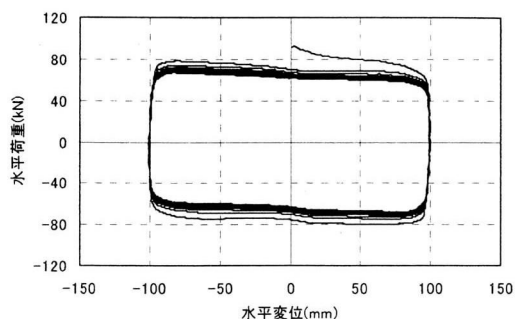


図-3 履歴曲線の一例（PTFE-A, 0.1Hz）

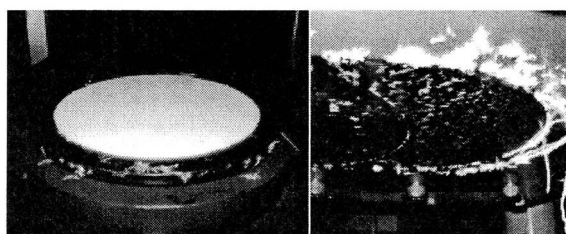


図-4 純PTFEの試験後の状況

回の平均値を当該供試体の基本特性値とした。

(2) 速度（周波数）依存性試験

速度（周波数）による摩擦特性の依存性を確認するための試験は、各供試体の死荷重反力に相当する鉛直荷重を載荷した状態で、水平変位±100mmを0.01, 0.1, 0.5, 1.0Hz（最大速度はそれぞれ0.63, 6.3, 31.4, 63cm/sec）の各周波数で10回加振した。得られた履歴曲線から摩擦係数を求め、2～10回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

面圧による摩擦特性の依存性を確認するための試験は、供試体Aは面圧5, 10, 20, 30MPaに相当する鉛直荷重（それぞれ141.8, 283.5, 567.1, 850.6kN）を、供試体Bについては面圧3, 5, 8, 10MPaに相当する鉛直荷重（187.5, 312.5, 500, 625kN）を載荷した状態で、水平変位±100mmを周波数0.5Hzで10回加振した。得られた履歴曲線から摩擦係数を求め、2～10回の平均値を当該条件における特性値とした。

4. 試験結果

(1) 基本特性試験

基本特性試験の結果から得られた履歴曲線の一例を図-3に示す。なお、PTFE-Bと純PTFEについては、供試体Aを用いた高面圧条件下では、図-4に示すよ

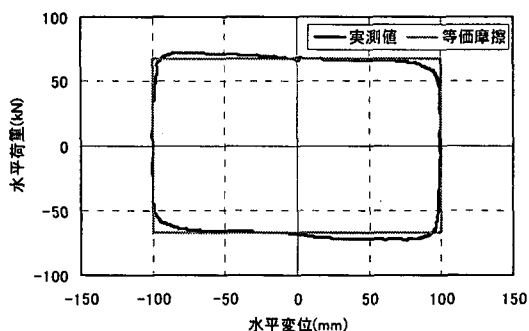


図-5 等価摩擦係数の模式図

うにすべり材の損傷が激しく、試験を実施できなかった。

摩擦係数の算定に当たっては、道路橋の免震設計法マニュアル（案）⁴⁾において、水平荷重－水平変位曲線の切片荷重（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提案されている。しかし、本研究においては、履歴曲線の面積（履歴吸収エネルギー）と等価となる理想化された摩擦力を(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

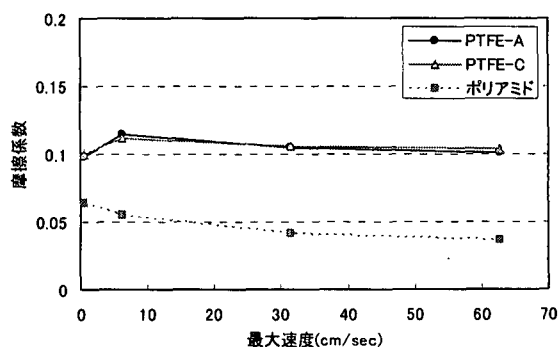
P ：鉛直載荷荷重（kN）

(2) 速度（周波数）依存性試験

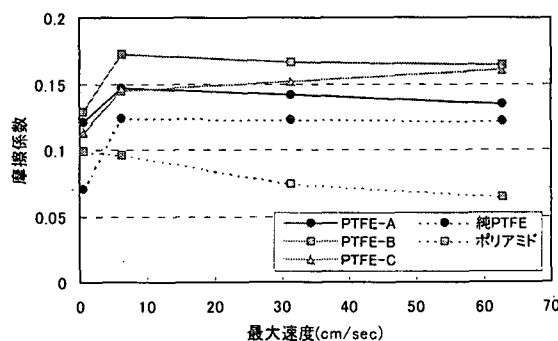
供試体Aおよび供試体Bにおける各すべり材の速度依存性試験結果を表-4に示す。表中に示される速度は、正弦波で加振した場合の最大速度を示す。また、供試体Aおよび供試体Bにおける各すべり材の最大速度と摩擦係数との関係を図-6に示す。これまでの研究報告等⁵⁾によれば、PTFEとステンレス板との組み合わせによるすべり支承は、一般に低速度領域では摩擦係数は低く、ある速度以上では高く、ほぼ安定した摩擦係数を示すことが知られている。図-6において、両供試体ともPTFE系すべり材ではすべり速度0.6cm/secから6cm/secにかけて摩擦係数は増加する傾向を示すが、その後63cm/secにかけて

表-4 速度（周波数）依存性試験結果

材質	周波数 (Hz)	最大速度 (cm/s)	摩擦係数	
			供試体A	供試体B
PTFE-A	0.01	0.6	0.098	0.121
	0.1	6.3	0.114	0.146
	0.5	31.4	0.105	0.141
	1	62.8	0.101	0.135
PTFE-B	0.01	0.6	—	0.129
	0.1	6.3	—	0.172
	0.5	31.4	—	0.166
	1	62.8	—	0.165
PTFE-C	0.01	0.6	0.100	0.113
	0.1	6.3	0.112	0.145
	0.5	31.4	0.106	0.152
	1	62.8	0.103	0.161
純PTFE	0.01	0.6	—	0.071
	0.1	6.3	—	0.123
	0.5	31.4	—	0.123
	1	62.8	—	0.122
ポリアミド	0.01	0.6	0.064	0.099
	0.1	6.3	0.055	0.096
	0.5	31.4	0.042	0.075
	1	62.8	0.037	0.064



(a) 供試体 A

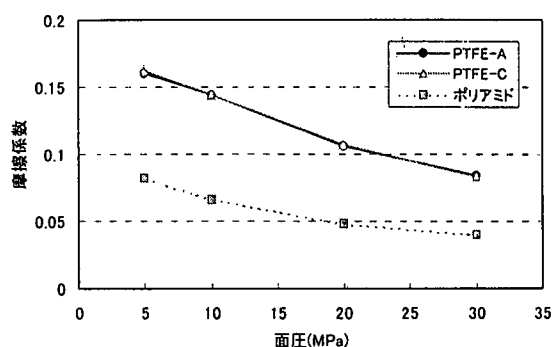


(b) 供試体 B

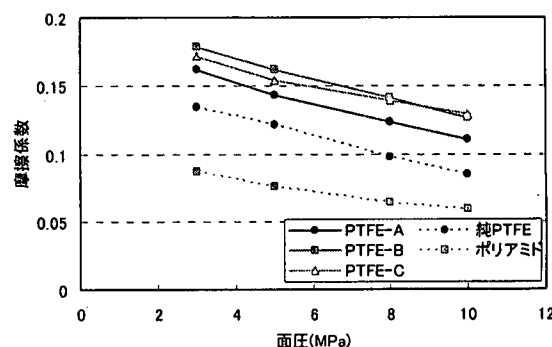
図-6 各すべり材の速度依存性

表-5 面圧依存性試験結果

材質	面圧 (MPa)	摩擦係数		材質	面圧 (MPa)	摩擦係数	
		供試体 A	供試体 B			供試体 A	供試体 B
PTFE-A	3	—	0.162	純 PTFE	3	—	0.134
	5	0.160	0.143		5	—	0.121
	8	—	0.123		8	—	0.097
	10	0.144	0.110		10	—	0.084
	20	0.106	—		20	—	—
	30	0.084	—		30	—	—
PTFE-B	3	—	0.178	ポリアミド	3	—	0.087
	5	—	0.162		5	0.082	0.076
	8	—	0.140		8	—	0.064
	10	—	0.126		10	0.066	0.059
	20	—	—		20	0.048	—
	30	—	—		30	0.040	—
PTFE-C	3	—	0.171	ポリアミド	3	—	0.087
	5	0.162	0.154		5	0.082	0.076
	8	—	0.139		8	—	0.064
	10	0.144	0.129		10	0.066	0.059
	20	0.107	—		20	0.048	—
	30	0.083	—		30	0.040	—



(a)供試体 A



(b)供試体 B

図-7 各すべり板の面圧依存性

緩やかに摩擦係数が減少する傾向を示している。これは、10回の加振による発熱に対し、速度が早くなるに従い、構成部品等による放熱が抑えられるため、蓄熱により温度が上昇し摩擦力が低下したと考えられる。

これに対し、ポリアミドでは、速度が増加するに従い摩擦係数は緩やかに低下しており、PTFE系のすべり材とは異なる速度依存特性を有していると考えられる。

(3) 面圧依存性試験

供試体Aおよび供試体Bにおける各すべり材の面圧依存性試験結果を表-5に示す。また、供試体Aおよび供試体Bにおける各すべり材の面圧と摩擦係数との関係を図-7に示す。

表-5において、同面圧である10MPa時における両供試体の摩擦係数を比較すると、全ケースにおいて供試体Aの方が供試体Bよりも高い値を示している。これは、すべり面の面積、形状による影響と考えられる。また、図-7において、すべてのすべり材で面圧が増加するに従い摩擦係数が減少する傾向を示している。各供試体における基準面圧（供試体A：20MPa、供試体B：5MPa）時に対する摩擦係数の変動率は、PTFE系では供試体Aにおいて+52～-22%、供試体Bにおいて+13～-30%であった。また、ポリ

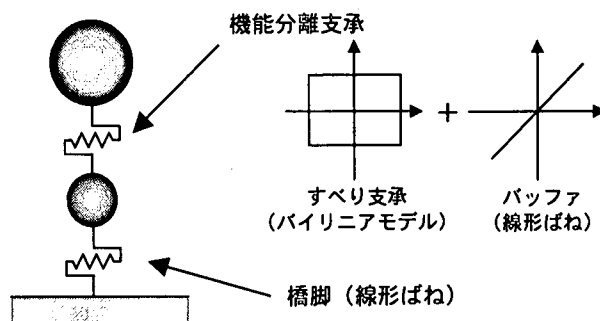


図-8 解析モデル

アミドでは、供試体Aにおいて+70～-17%、供試体Bにおいて+15～-30%であった。

5. 摩擦減衰の効果

ここまでの試験結果から、面圧条件の違いはあるものの、0.03～0.18程度の範囲内での摩擦係数が得られている。摩擦力は、摩擦減衰として評価すると、動的解析時に地震応答を低減できると考えられる。ここでは、摩擦係数の違いが橋梁の応答に与える影響について検証するために、一例として簡単な動的解析を行った。

解析の対象モデルは、T型単柱橋脚を想定し、図-8に示すように2自由度系でモデル化した。モデルの諸元は、参考文献6)を参考に与えた。支承部に

表-6 摩擦係数 0.05, バッファ固有周期 2 秒時の
最大応答値

上部構造		支承		橋脚
加速度 (cm/s^2)	変位 (cm)	変位 (cm)	荷重 (kN)	荷重 (kN)
526	21.4	19.9	1472	3634

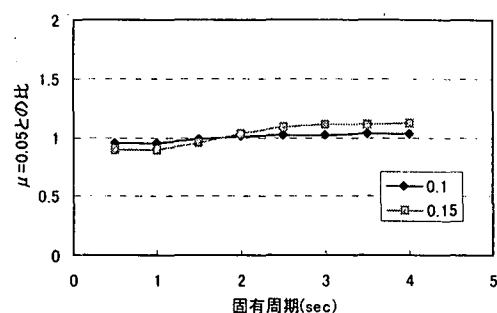
は、すべり支承とばね機能をもつバッファを併設した機能分離型支承を想定した。すべり支承の履歴復元力特性は、バイリニアモデルで表現した。橋脚は RC 橋脚を想定し、非線形性を無視して、線形部材とした。橋脚の固有周期（支承条件を固定としたときの固有周期）を 0.5 秒とし、バッファの固有周期を 0.5～4 秒まで 0.5 秒刻みで変化させた。すべり支承の摩擦係数は、試験結果を参考に 0.05, 0.1, 0.15 の 3 通りを仮定した。入力地震波は、Ⅱ 種地盤に対するタイプⅡ地震波の標準波形⁷⁾を用いた。

図-9は、摩擦係数 0.1, 0.15 時における最大応答値と摩擦係数 0.05 時における最大応答値との比と、バッファの固有周期との関係を示したものである。上部構造の変位や支承の相対変位は、摩擦係数が高くなるにつれて小さくなっており、摩擦による減衰効果が顕著に現れている。支承部の応答荷重や、橋脚のせん断力は、すべり支承の摩擦係数が高いほど大きな応答値を示すと考えられるが、バッファの固有周期が 1.5 秒以下の領域では、逆に摩擦係数が高いほど、応答が小さくなっている。これは、高い摩擦係数を設定したことにより、すべり支承部の履歴減衰効果が発揮されたことによるものと考えられる。

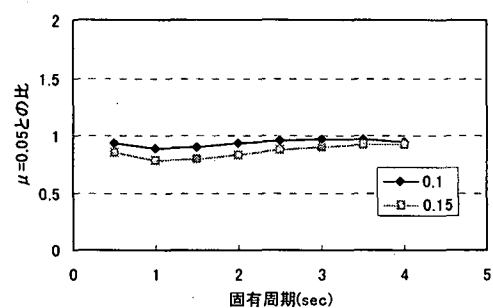
このように、橋梁の条件や地震動の特性によっては、摩擦係数の違いによる摩擦減衰の効果が異なることも考えられる。変位制限を目的に、バッファに硬いばね剛性を持たせることも考えられるが、下部構造への入力を遮蔽するために、摩擦係数の小さなすべり材を用いても、バッファのばね剛性の影響により逆に応答が大きくなる可能性もある。このようにすべり材の種類を選定するにあたっては、橋梁における要求性能（最大応答加速度、最大応答変位等）を満たす最適条件を見つけだすことが重要であり、適切な摩擦係数を有するすべり材を選定する必要があると考えられる。

6. まとめ

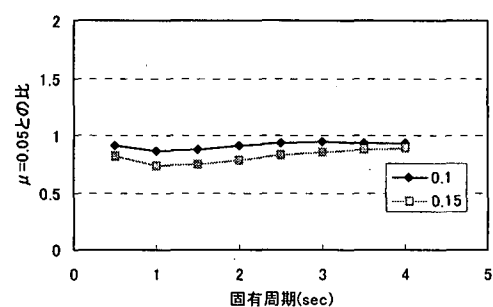
本研究では、すべり摩擦支承に用いるすべり材として PTFE 系すべり材 4 種類とナイロン系すべり材 1 種類の合計 5 種類の材料を対象として、2 種類の供試



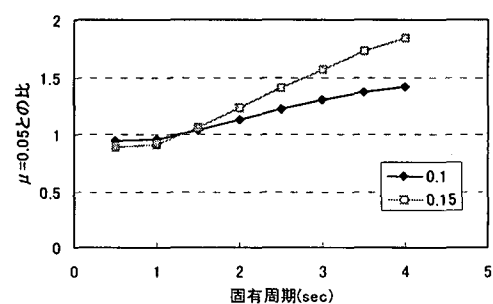
(a) 上部構造の加速度



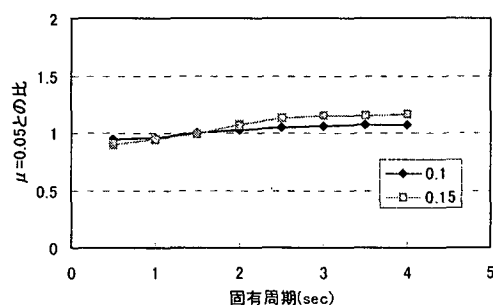
(b) 上部構造の変位



(c) 支承の相対変位



(d) 支承の荷重



(e) 橋脚のせん断力

図-9 最大応答値の比

体（BP-B支承，すべりゴム支承）を用いて速度依存性および面圧依存性についての検証を行った。試験の結果，以下のような知見が得られた。

- 1) 純 PTFE およびグラスファイバー入り PTFE は，耐久性に問題があると考えられる。
- 2) 速度依存性において，PTFE は，0.6cm/sec の低速度では摩擦係数は小さく，6cm/sec 以上の速度では摩擦係数は高い傾向を示し，速度が速くなるに従い減少する傾向を示す。また，ポリアミドは，速度が速くなるに従い摩擦係数は低下する傾向を示す。
- 3) 面圧依存性において，PTFE，ポリアミドともに面圧が増加するに従い，摩擦係数は低下する傾向を示す。
- 4) 5 種類のすべり材に対して試験を行った結果，すべり材の種類により 0.03～0.18 の摩擦係数を有することが確認できた。
- 5) すべり材の種類を選定するにあたっては，橋梁構造物の挙動を把握し，応答加速度及び応答変位などに着目した最適条件を見つけ，適切な摩擦係数を有するすべり材を選定するのが望ましい。

参考文献

- 1) 伊津野和行，袴田文雄，中村一平：機能分離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) 森下宣明，前野裕文，鵜野禎史，森重行雄，冢木徹彦，竹内孝徳：鋼製支承とダンパーとの組合わせによる機能分離支承の特性試験，土木学会第 56 回年次学術講演会 I -A225，2001.10
- 3) 社団法人日本道路協会：道路橋支承便覧，1991.7
- 4) 財団法人土木研究センター：建設省 道路橋の免震設計マニュアル（案），1992.3
- 5) 岡本晋，藤井俊二，尾崎大輔，M.C.Constantinou，P.C.Tsopelas：すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No507/ I -30，pp.167-177，1995.1
- 6) 社団法人日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3
- 7) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002.3