

積層ゴムすべり支承の摩擦力－変位特性とそのモデル化

Characteristics of Sliding Friction-displacement in Laminated Rubber Sliding Support and the Modeling

水田洋司^{*1}・橋本晃^{*2}・龍谷幸二^{*2}・田中健司^{*3}・金山亨^{*4}

Yoji Mizuta・Akira Hashimoto・Kouji Ryuutani・Kenji Tanaka・Toru Kanayama

*1 工博 九州産業大学教授 工学部都市基盤デザイン工学科(〒813-8503 福岡市東区松香台2丁目3-1)

*2 (株) 千代田コンサルタント 九州支店技術部 (〒810-0041 福岡市中央区大名1丁目15-33)

*3 (株) ビービエム 設計技術部 (〒000-0000 東京都中央区新川2丁目13-9)

*4 (株) 構造計画研究所 耐震技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5-3)

In laminated rubber sliding support proposed in this paper, it takes charge of role of an elastic support and an energy absorption by sliding friction; that is to say, it works to some horizontal force as an elastic support, and sliding of the rubber plane is started when the force is exceeded, and the laminated rubber sliding support absorbs the energy. The sliding is generated between the upper surface of laminated rubber support and bridge clearance plane (concrete, steel), and the horizontal energy is absorbed in that time of friction. In this paper, a series of experimental result and analytical modeling on friction coefficient of laminated rubber sliding support are described, and examined for practical application.

Keyword : laminated rubber sliding support, sliding friction-displacement, elastic support, experimental result, analytical modeling, friction coefficient

1. 序論

橋梁に使用されるゴム支承は鉛直荷重を支え、水平方向の力に抵抗して水平方向へ変形する弾性支承と水平方向のエネルギーを吸収する免震支承に分けることが出来る。弾性支承には積層ゴム支承があり、免震支承には高減衰積層ゴム支承・鉛入り積層ゴム支承¹⁾や機能分離支承^{2), 3)}がある。機能分離支承は水平変形を受け持つ積層ゴム支承部と水平方向のエネルギーを吸収するすべり部に機能が分離されている。

免震支承には積層ゴム支承の中心部に鉛を着装されたものや高減衰ゴムを用いたものが使用されており、多くの橋梁で使用実績がある。免震支承の設計法はすでに確立されており、例えば文献1)がある。機能分離支承の研究には、例えば文献2), 3)が有り、いずれの研究でもすべり部は支承上面にPTFE板が使用され、桁下面には金属板を取り付けて、PTFE板と金属板のすべり摩擦でエネルギーを吸収している。

本論文で提案している積層ゴムすべり支承は、これを橋

梁に用いた場合の経済性と支承回りの簡素化を目的として、積層ゴム支承が弾性支承の役目とすべり摩擦によるエネルギー吸収の役目を担う。すなわち、ある水平力(P_y)までは弾性支承として働き、 P_y を越えると支承のゴム面が滑り出してエネルギーを吸収する。すべりは積層ゴム支承上面(ゴム)と桁下面(コンクリート、鋼)との間で発生し、その時の摩擦で水平エネルギーを吸収する。前報⁴⁾ではゴムとコンクリート板の代表的なすべり実験結果をモデル化して、数値計算によりすべり支承使用時の減衰効果を地震応答解析から確かめた。本報では積層ゴムすべり支承の摩擦係数に関する一連の実験結果と履歴解析モデル化について述べ、実用化について検討している。今回の実験では摩擦係数の安定化を図るために積層ゴム支承のすべり面にスリットを入れたものを用いている。スリットを入れることにより、水平荷重－変位関係が安定した形状を描くようになった。履歴曲線は50回程度のループでも安定した曲線を描いており、履歴ループのモデル化が可能になった。まず、積層ゴムとコンクリートの摩擦力－変位実

験について述べ、実験から得られる摩擦係数の知見を明らかにしている．次に、実験結果のモデル化について述べ、積層ゴムすべり支承のモデル化を行っている．最後に、積層ゴムすべり支承の履歴特性を用いて数値解析モデルを作成し、実験値との比較検討から、積層ゴムすべり支承の摩擦力－変位特性のモデル化が精度良く出来ることを示した．

2. 摩擦力－変位実験

2. 1 実験概要

積層ゴム支承が上部構造の死荷重を支持した状態で地震時の水平変位を受けることを想定して実験を実施した．そこで、積層ゴム支承の上面被覆ゴムとコンクリートとの接触面を強制的に滑動させた場合の摩擦力－変位特性を得るために、2軸試験機により鉛直荷重と水平荷重を作用させて水平力と水平変位を測定した．

試験装置は鉛直アクチュエータ（2000kN）と水平アクチュエータ（400kN）を備えた2軸の試験機を使用した．試験機の概略構造を図2.1に示す．

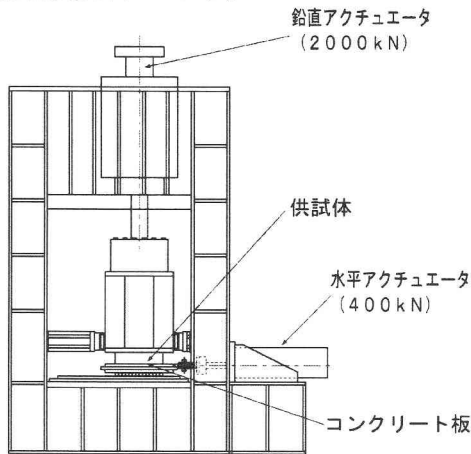


図2. 1 試験装置

2. 2 実験内容

(1) 積層ゴム支承

実験に使用する供試体は設計面圧を 3Mpa から 8 Mpa 程度と設定し、平面形状（a×b）が 300mm×300mm で各々の供試体での1層のゴム層厚が 19mm, 9mm, 6mm からなる 3層構造である．各ゴム層間は厚さ 2.3mm の内部補強板で仕切られ上下面は厚さ 12mm の鋼製補強板で挟まれており、さらに 3mm のゴムで被覆されている．ここに、式（1）で表される1次形状係数Sは 3.95, 8.33, 12.50 の3種類である．供試体の形状を図2.2に、諸元を表2.1に示す．

また、被覆ゴムにスリットを設けないすべり面が平坦な供試体の場合すべり始めの水平荷重にバラツキがあることが判ったため、すべり出すときの水平荷重を安定させる目的で図2.3、写真1に示すようなスリットを設けている．

$$S = \frac{a \times b}{2(a + b) \times te} \tag{1}$$

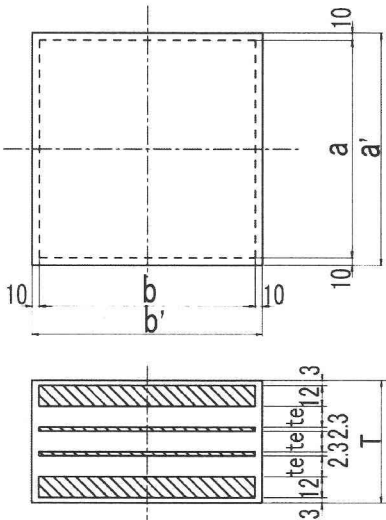


図2. 2 供試体形状

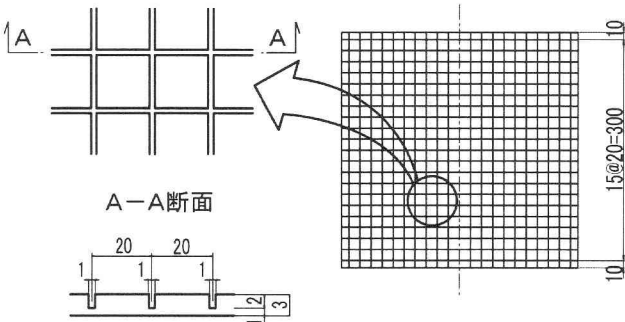


図2. 3 供試体滑動面のスリット形状



写真1 供試体

表2. 1 供試体諸元

供試体形状 No		No. 1	No. 2	No. 3
a	mm	300	300	300
b	mm	300	300	300
a'	mm	320	320	320
b'	mm	320	320	320
te	mm	19	9	6
n	層	3	3	3
Σte	mm	57	27	18
T	mm	91.6	61.6	52.6
Go	N/mm ²	1.0	1.0	1.0
形状係数：S		3.95	8.33	12.50

Go：ゴムのせん断弾性係数

(2) 試験条件

表 2.2 に示す試験条件で、鉛直荷重、水平荷重、鉛直変位、水平変位を測定することによって摩擦係数の速度依存性、面圧依存性、繰返し回数（累積すべり量）依存性について調べた。ここに、面圧は積層ゴム支承の許容支圧応力度が 7.85Mpa (80kgf/cm²) であることから 3.0Mpa、5.0Mpa、8.0Mpa の 3 段階とし、载荷振動数は 0.10Hz から 2.00Hz の 7 段階で振幅±100mm の正弦波を加振した。また、この時の繰返し回数は 50 回とした。なお、コンクリート板は木製型枠を使用して複数個製作し、積層ゴムすべり支承およびコンクリート板のすべり面は载荷ケースごとに新しい面を使用した。

2. 3 実験結果

図 2.4 に面圧 5Mpa 一定で 1 次形状係数 S=3.95、8.33、12.5、振動数が 0.1Hz、1.0Hz、2.0Hz の実験結果を示す。これは、横軸に水平変位を取り縦軸に水平荷重を取った履歴曲線である。また、面圧 5Mpa、1 次形状係数 S=8.33、振動数が 1.0Hz の実験状況写真 2 に示す。1 次形状係数が小さい S=3.95 の供試体では、せん断剛性が小さいことから、ゴムのせん断変形が载荷された変位に追従し、弾性変形が卓越しているため大きな履歴特性が得られていない。これに対して、S=8.33、12.5 の供試体ではすべり現象が生じ大きな履歴ループが得られた。また、被覆ゴムにスリットを設けたため、図 2.4 に示すように比較的安定したすべり性状が得られた。なお、図中の原点付近で振幅の小さい履歴部分がある実験結果があるが、これは試験機の油の吐出量

が不足し所定の振幅量を与えることができなかったためである。

図 2.5 に 1 次形状係数 (S=8.33) と振動数 (1.00Hz) が一定で面圧が 3.0Mpa、5.0Mpa、8.0Mpa の実験結果を示す。これによると、3 供試体はほぼ同様の履歴ループを描いているが、水平荷重を鉛直力（面圧）で除した摩擦係数に着目すると、面圧の増加と共に摩擦係数は低下していると言える。

供試体すべり面の実験前後での表面温度を非接触温度センサーで測定した。測定位置および測定結果を図 2.6、図 2.7、表 2.3 にそれぞれ示す。実験前後での表面温度の上昇量は供試体中央部（図中 A 点）で大きく、振動数が小さくなるほどそれは高くなっている。また、これは後に 3.2 で述べる摩擦係数の速度依存性と傾向が一致する。

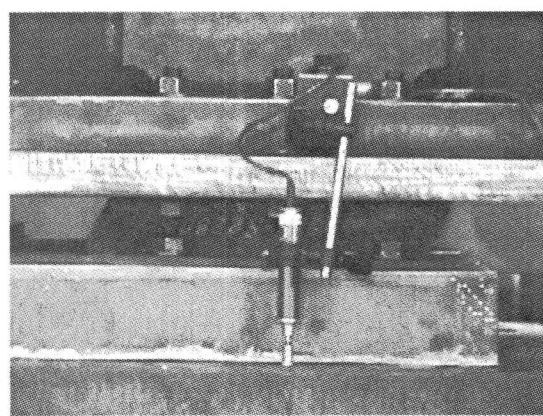


写真 2 実験状況

表 2. 2 試験条件

振動数 Hz (sin波)	面圧 Mpa	鉛直荷重 kN	振幅 mm	繰返し回数 cycle	使用供試体		
					NO. 1	NO. 2	NO. 3
0.10	3.00	270	±100	50			
	5.00	450			○	○	○
	8.00	720					
0.50	3.00	270	±100	50			
	5.00	450				○	
	8.00	720					
0.75	3.00	270	±100	50			
	5.00	450				○	
	8.00	720					
1.00	3.00	270	±100	50		○	
	5.00	450			○	○	○
	8.00	720				○	
1.25	3.00	270	±100	50			
	5.00	450				○	
	8.00	720					
1.50	3.00	270	±100	50			
	5.00	450				○	
	8.00	720					
2.00	3.00	270	±100	50			
	5.00	450			○	○	○
	8.00	720					

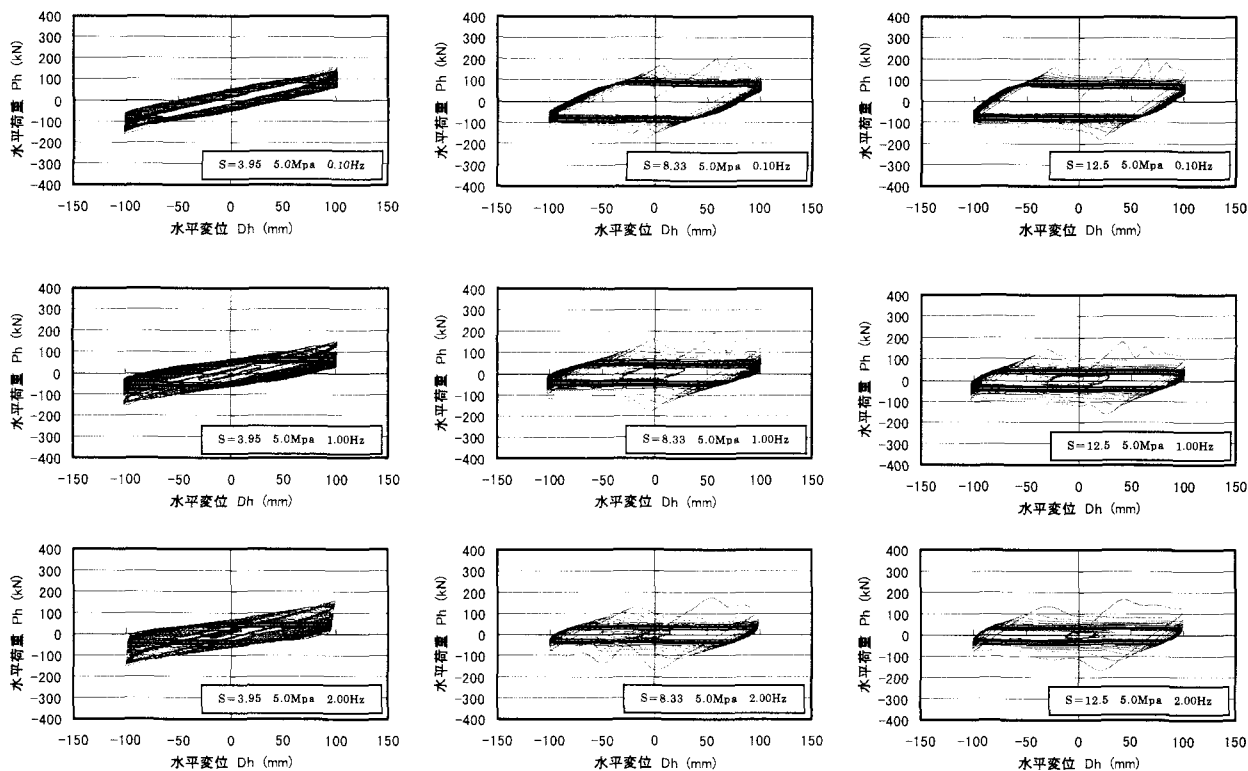


図 2. 4 摩擦力—変位関係図 (面圧 5.0MPa 一定)

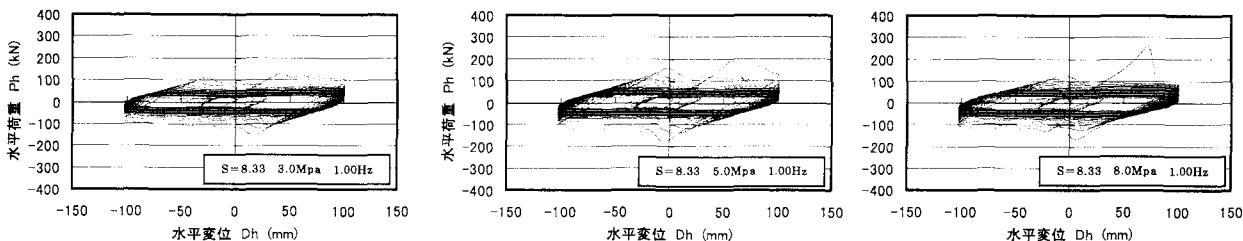


図 2. 5 摩擦力—変位関係図 (1 次形状係数, 振動数一定, 面圧変化)

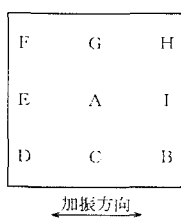


図 2. 6 表面温度測定位置

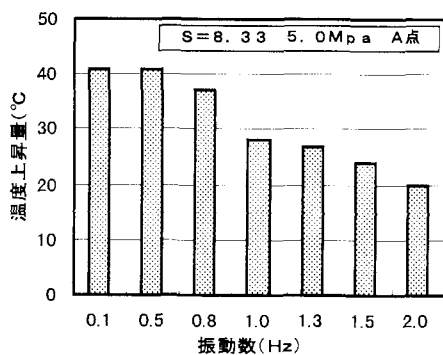


図 2. 7 表面温度上昇量

表 2. 3 供試体表面温度

振動数 Hz	面圧 Mpa	供試体 No	測定 時期	表面温度 (°C)								
				A	B	C	D	E	F	G	H	I
0.10	5.00	1	試験前	28	28	28	28	28	28	28	28	28
			試験後	49	44	46	43	45	43	46	42	45
		2	試験前	34	34	34	34	34	34	34	34	34
			試験後	75	70	72	68	74	66	70	66	59
		3	試験前	29	29	29	29	29	29	29	29	29
			試験後	85	77	81	72	74	69	76	74	80
0.50	5.00	2	試験前	34	34	34	34	34	34	34	34	34
			試験後	75	70	72	68	74	66	70	66	59
		2	試験前	29	29	29	29	29	29	29	29	29
			試験後	66	62	65	59	65	61	63	63	65
		3.00	試験前	30	30	30	30	30	30	30	30	30
			試験後	62	54	60	55	61	55	56	49	55
1.00	5.00	1	試験前	32	32	32	32	32	32	32	32	32
			試験後	56	49	52	47	51	49	52	49	51
		2	試験前	33	33	33	33	33	33	33	33	33
			試験後	61	60	61	58	63	60	60	62	61
		5.00	試験前	34	34	34	34	34	34	34	34	34
			試験後	62	52	61	58	64	58	59	57	65
1.25	5.00	2	試験前	31	31	31	31	31	31	31	31	31
			試験後	60	57	59	58	61	56	58	59	60
		2	試験前	31	31	31	31	31	31	31	31	31
			試験後	58	55	56	53	56	53	55	52	56
		1.50	試験前	34	34	34	34	34	34	34	34	34
			試験後	58	56	57	54	56	55	55	53	55
2.00	5.00	1	試験前	29	29	29	29	29	29	29	29	29
			試験後	49	44	46	43	45	43	45	45	45
		2	試験前	33	33	33	33	33	33	33	33	33
			試験後	53	50	52	50	53	52	51	50	51
		3	試験前	30	30	30	30	30	30	30	30	30
			試験後	50	46	48	47	50	48	48	49	48

3. 実験結果のモデル化

3.1 累積すべり量と水平荷重

実験結果から得られた履歴ループより、支承の累積すべり量が水平荷重に及ぼす影響を調べた。図 3. 1 は縦軸に水平荷重の絶対値を、横軸に履歴ループの中からゴムのせん断弾性変形部を取り除いた累積すべり量としたものである。ここに、1 次形状係数 $S=8.33$ 、面圧 5.0 Mpa 、振動数 1.00 Hz である。この図より、すべり支承の繰り返し载荷毎にすべり始めの静止摩擦状態とすべり中の動摩擦状態が存在することが判る。また、その夫々の状態においてすべりの累積移動量の増加に伴い水平荷重の絶対値が減少している様子が判る。その他の実験結果も同様である。

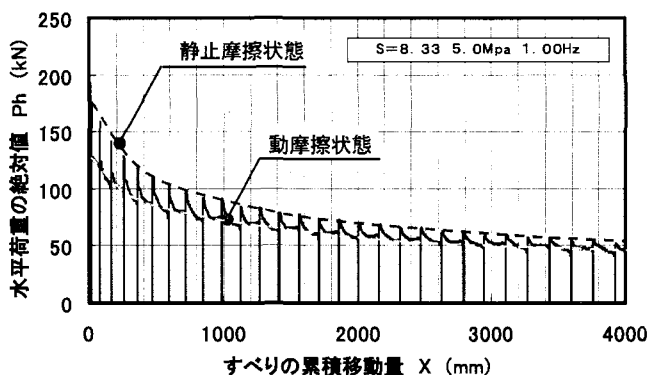


図 3. 1 すべりの累積移動量－水平荷重

3.2 摩擦係数の速度依存性

静止摩擦の状態と動摩擦の状態について载荷振動数毎に整理したものをそれぞれ図 3. 2, 図 3. 3 に示す。ここに、1 次形状係数を $S=8.33$ 、面圧を 5.0 Mpa とした実験結果について、縦軸に水平荷重の絶対値を鉛直荷重で除した摩擦係数、横軸に累積すべり量を取り、図示したものである。これらの図より、载荷振動数の増加に伴い静止摩擦係数、動摩擦係数共に減少することが判る。

各振動数毎の実験結果を式 (2) の指数関数で近似する。

$$\mu_0 = A \cdot x^B \quad (2)$$

ここに、 μ_0 : 面圧 5 Mpa における静止または動摩擦係数

X : 累積すべり量 (mm)

x : 累積すべり量の変換値で、実験結果から

$$x = X + 20 \text{ (mm)} \quad \text{と仮定した。}$$

A, B : 係数

各振動数毎に算出した近似式の係数 A と B は载荷速度の 2 次関数とすると良く近似することができる。その結果を図 3. 4, 図 3. 5 に示す。ここで、载荷振動数は後の解析プログラムに組み込むことを考慮して振幅 $\pm 100 \text{ mm}$ の正弦波 1 サイクル間の平均すべり速度 $v \text{ mm/sec}$ で表している。ここに、平均すべり速度は振幅の 2 倍 (200 mm) と振動数との積とした。

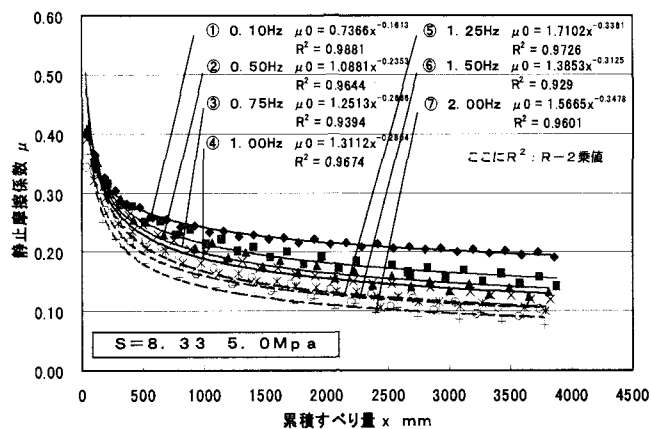


図 3. 2 静止摩擦係数の速度依存性

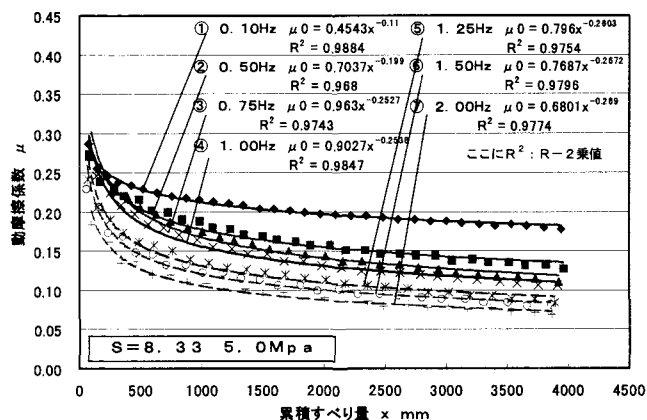


図 3. 3 動摩擦係数の速度依存性

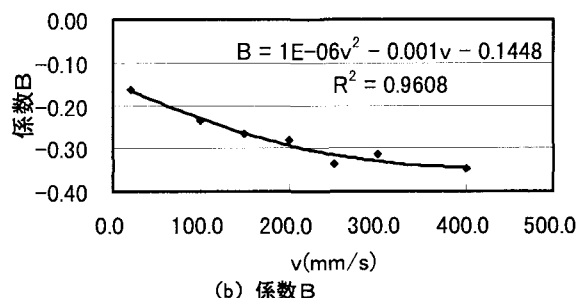
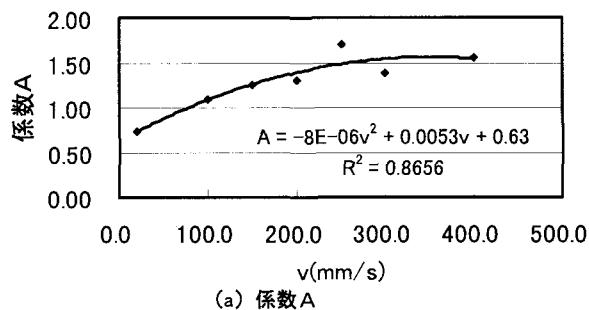


図 3. 4 静止摩擦係数の速度依存性

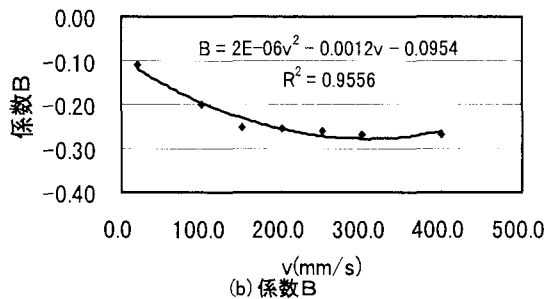
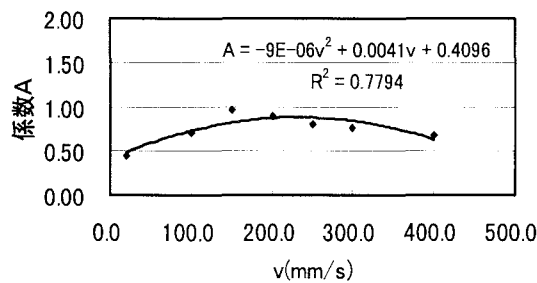


図 3. 5 動摩擦係数の速度依存性

3. 3 摩擦係数の面圧依存性

静止および動摩擦の状態について面圧毎に整理したものを図 3. 6, 図 3. 7 に示す。ここに, 1 次形状係数を $S=8.33$, 载荷振動数を 1. 0Hz とした実験結果について, 縦軸に摩擦係数, 横軸に累積すべり量を取り図示している。これらの図より, 面圧の増加に伴い静止摩擦係数, 動摩擦係数ともに減少することが判る。また, 面圧が小さい 3. 0 Mpa の実験結果では水平アクチュエータの押し側 (変位+方向) と引き側 (変位-方向) とで交互に摩擦係数が大小となっており, 図 3. 6 の①, 図 3. 7 の①にバラツキが生じている。

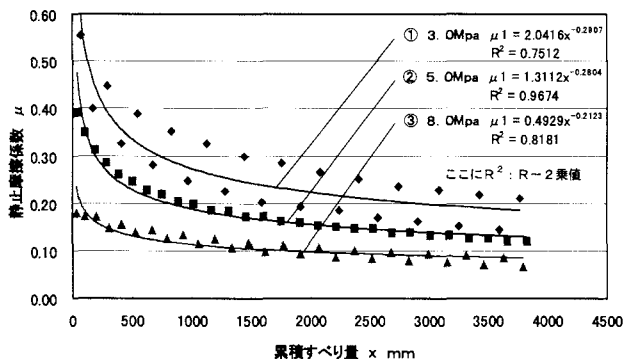


図 3. 6 静止摩擦係数の面圧依存性

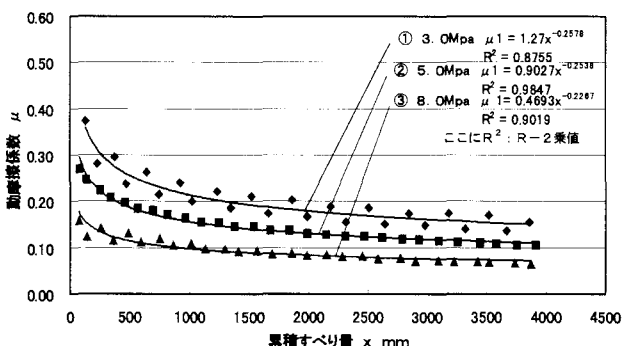


図 3. 7 動摩擦係数の面圧依存性

各面圧毎の実験結果を式 (3) の指数関数で近似する。

$$\mu_1 = C \cdot x^D \quad (3)$$

ここに, μ_1 : 载荷振動数 1. 0Hz における静止または動摩擦係数

X : 累積すべり量 (mm)

$x = X + 20$

C, D : 係数

つぎに, 5Mpa での摩擦係数を基準値として, 3. 0Mpa, 8. 0Mpa の摩擦係数を基準値との比 (r) で表す。この比 (r) と面圧 (P) とは式(4)の指数関数で良く近似することができた。その結果を図 3. 8, 図 3. 9 に示す。

$$r = E \cdot e^{F \cdot P} \quad (4)$$

ここに, P : 面圧 (Mpa)

E, F : 係数

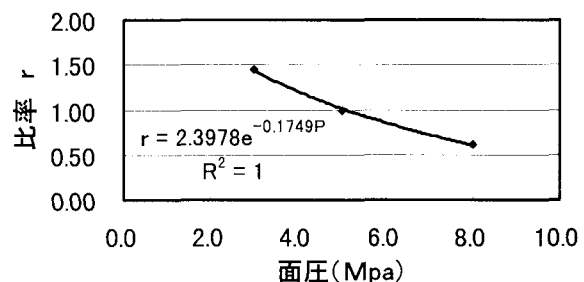


図 3. 8 静止摩擦係数の速度依存性

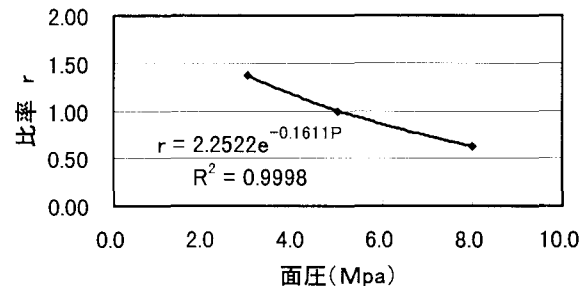


図 3. 9 動摩擦係数の速度依存性

以上, 载荷速度依存性と面圧依存性を考慮した静止摩擦係数と動摩擦係数の式は式(2)と式(4)との積としてそれぞれ式(5), 式(6)で表すことができる。また, これらの式を図化したものを図 3. 10, 図 3. 11 に示す。

$$\mu_s = A_s \cdot x_0^{B_s} \cdot E_s \cdot e^{F_s \cdot P} \quad (5)$$

ここに, μ_s : 静止摩擦係数

X : 累積すべり量 (mm) ($0 \leq X \leq 4000$)

P : 面圧 (Mpa) ($3.0 \leq P \leq 8.0$)

v : すべり速度 (mm/sec)

$x_0 = X + 20$

$A_s = -8.0E-6v^2 + 0.0053v + 0.6300$

$B_s = 1.0E-6v^2 - 0.0010v - 0.1448$

$E_s = 2.3978$

$F_s = -0.1749$

$$\mu_a = A_a \cdot x_0^{B_a} \cdot E_a \cdot e^{F_a \cdot P} \quad (6)$$

ここに μ_a : 動摩擦係数

X : 累積すべり量 (mm)

P : 面圧 (Mpa)

v : すべり速度 (mm/sec)

$x_0 = X + 20$

$A_a = -9.0E^{-6}v^2 + 0.0041v + 0.4096$

$B_a = 2.0E^{-6}v^2 - 0.0012v - 0.0954$

$E_a = 2.2522$

$F_a = -0.1611$

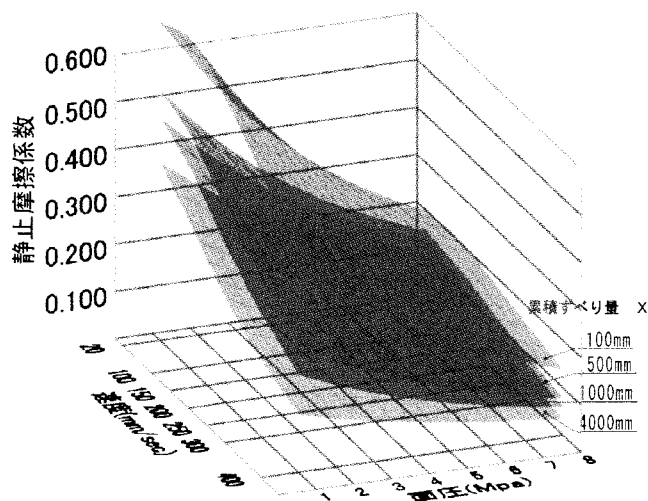


図3. 10 静摩擦係数

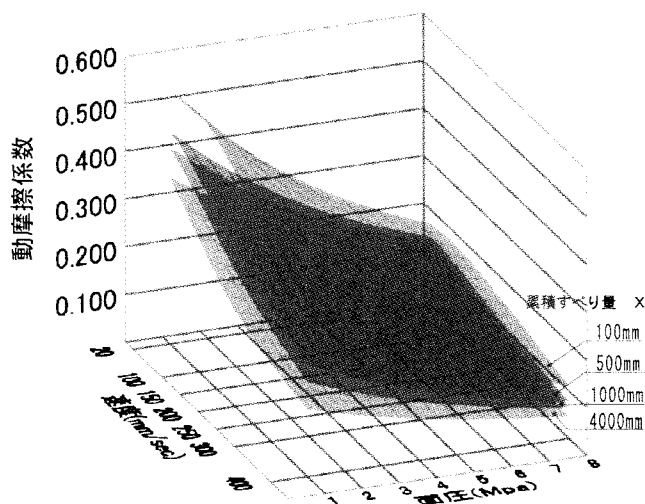


図3. 11 動摩擦係数

4. 履歴解析モデル

4. 1 履歴ループモデル

積層ゴムすべり支承の実験結果より、地震時に発生するすべり支承の摩擦抵抗力は、支承にかかる面圧、支承表面と接地面との相対速度に依存していることが分かった。また、交番載荷を繰り返すことにより、静止摩擦係数、動摩擦係数が徐々に低下して行く現象も確認された。これらの依

存性に関して定式化を行い、すべり挙動を制御する履歴モデルを作成した。今後、この履歴モデルを時刻歴応答解析に用いることを目的として動的解析プログラムRESP-Tへ組み込んだ。

図 4.1 にすべり支承(摩擦)を概念的に表した要素モデルを、図4.2にすべり支承の履歴特性を表す概念図を示す。

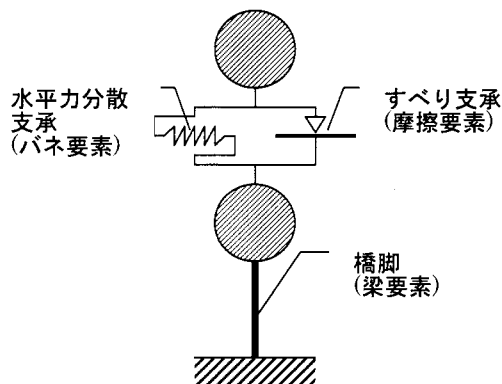


図4. 1 すべり支承(摩擦)要素モデル

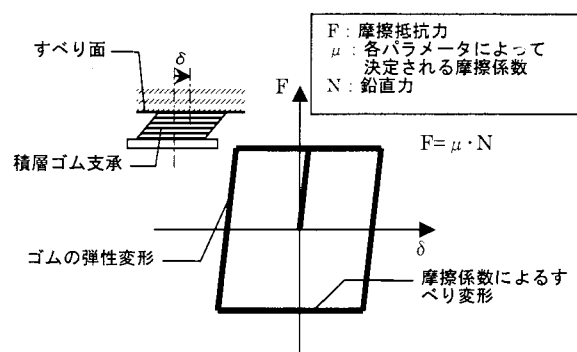


図4. 2 履歴ループモデル

4. 2 運動方程式への組み込み

組み込みにあたってはバネモデルですべり支承の履歴特性を表現するのではなく、運動方程式内で発生する力の項(摩擦抵抗力F)として評価することにした。これは、すべり支承を完全バイリニアのバネモデルで表現する場合、そこで評価されるバネ剛性が剛性マトリクスに反映されることにより、固有周期に影響を与えることに加え、減衰をレーリー減衰等の剛性比例型で評価する場合にも影響を受けることになる。すなわち、固有周期および応答解析中の減衰が正しく評価されないため、実際の橋梁とは全く違った振動モデルを解くことになる可能性があるからである。したがって、支承と桁の間に相対速度が発生した場合のみに力が生じるような要素モデルを想定し、それを用いて振動モデルとした。摩擦抵抗力を組み込んだ運動方程式は式(7)で表される。

$$M^{t+\Delta t} \ddot{U} + C^{t+\Delta t} \dot{U} + K^{t+\Delta t} U = {}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} F \quad (7)$$

ここに、 M ：質量マトリクス

C ：減衰マトリクス

K ：剛性マトリクス

$\ddot{U}, \dot{U}, U$ ：加速度, 速度, 変位ベクトル

$\{F\}$ ：外力(地震力)

$\{F_f\}$ ：すべり支承に生じる摩擦抵抗力

ここでは、動的解析プログラムに組み込んだルーチンを検証するためにこのプログラムを用いて強制変位入力で解析を行った。解析結果と実験結果との比較を図4.3に示す。ここに、実験結果は1次形状係数を $S=8.33$ 、面圧 5.0Mpa 、載荷振動数を 0.10Hz の時であり解析結果は実験結果を良く再現できている。

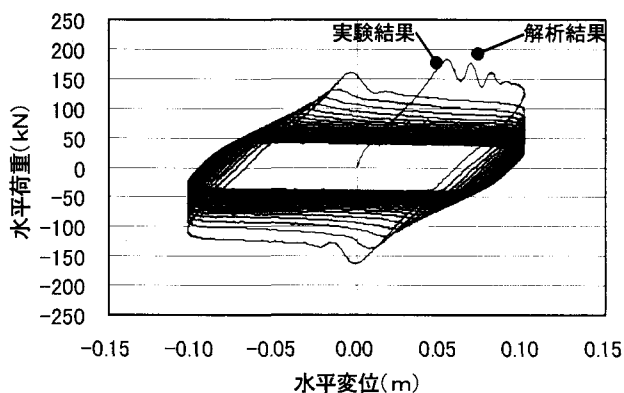


図4.3 解析と実験の比較

5. 結論

本論文では、積層ゴムすべり支承を橋梁の機能分離構造に利用することを目的として、積層ゴムとコンクリートとの摩擦力－変位実験を実施し、静止摩擦係数と動摩擦係数の累積すべり量、載荷速度、面圧による依存性を数値化することができた。以下、にここで得られた知見を示す。

①積層ゴム支承のすべり面にスリットを入れたすべり摩擦の実験で安定した履歴ループ（水平荷重－水平変位関係）を得ることができた。

②1次形状係数が小さい積層ゴム支承は弾性変形が卓越しているため小さな履歴ループを描くが、比較的1次形状係数が大きいものでは大きな履歴ループが得られる。

③静止摩擦係数、動摩擦係数は累積すべり量の増加に伴い小さくなり指数関数で近似できた。

④静止摩擦係数、動摩擦係数は載荷速度が大きくなるほど小さくなり、指数関数で近似できた。

⑤1次形状係数 $S=8.33$ 、載荷振動数 1.0Hz の実験より、静止摩擦係数、動摩擦係数は面圧が大きくなるほど小さくなるが判った。

⑥静止摩擦係数および動摩擦係数の累積すべり量、載荷速度、面圧による依存性を動的解析プログラムに組み込み実験結果を良く再現することができた。

今後、積層ゴムすべり支承を橋梁に設置した場合の減衰効果について機能分離支承や免振支承を設置した場合と比較検討の予定である。

参考文献

- 1) 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル（案），（財）土木研究センター，1992年1月。
- 2) 岡本晋 他3名：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，No.507/I-30，pp.167～177，1995年1月。
- 3) 伊津野和行 他2名：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年7月。
- 4) 水田洋司，橋本晃：ゴムとコンクリートのすべり摩擦を利用したすべり支承とその減衰効果，構造工学論文集，Vol.49A，pp.611～621，2003年3月。

（2004年9月17日受付）