

すべり系支承を有する免震橋梁の振動台実験

遠藤和男¹・岡田太賀雄¹・運上茂樹²

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、積層ゴム系の免震支承を用いて橋梁の長周期化と高減衰化により地震力の低減と耐震性の向上を図る免震構造が一般的に採用されるようになってきたが、地盤・構造条件などからその適用範囲が限定されることやゴム系の免震支承が一般に割高であること等から橋全体としてのコスト縮減までには至らない場合がある。一方、最近では、コスト縮減を目的とした機能分離型の支承構造¹⁾として、すべり摩擦型の支承（以下、すべり系支承）と水平力を受け持つゴムバッファ構造を組み合わせた支承構造が採用される事例が増えつつある。

しかしながら、すべり系支承の摩擦係数には速度、面圧等の各種依存性があることが確認されており^{例え}ば²⁾、さらに、軸力の変動あるいは地震動の入力方向により摩擦力が変化するため、これら摩擦係数の各種依存性や摩擦力の変化がすべり系支承を用いた免震橋梁の応答性状に影響を与えることが考えられるが、これら影響については十分に明らかにされていないのが現状である。

このような背景から、本研究では、すべり系支承を用いた免震橋梁の地震時挙動を明らかにすること

を目的として、3次元大型振動台を用いて桁一支承の上部構造を対象（橋脚は含めない）とした橋梁模型の加振実験を実施した³⁾。本文では特に、材料の異なるすべり系支承の摩擦特性について考察する。

2. 実験供試体

本実験に使用する供試体は、特定の橋梁を対象としないが、一般的な橋梁（実橋）を縮尺したものとした。対象とした実橋の諸元は、「道路橋耐震設計に関する資料」⁴⁾の「2. 鉄筋コンクリート橋脚を用いた場合の設計計算例」を参考に設定した。相似側は、すべり系支承面圧の相似比を1として、表-1のように設定した。また、支承部の軸力変動に着目した既往の振動台実験⁵⁾を参考に、上下地震動及びロッキングに起因する軸力変動の比を実橋と一致させるため、桁幅/重心高さを実橋と供試体で合わせた。相似比は、三分力計の定格容量、振動台の加振限界性能、カウンターウェイト保有量から $S=7$ とした。実橋、実験供試体の概略の諸元を表-2に示す。

実験供試体の基本構成は、橋桁を模擬したH鋼、すべり系支承4つ及びゴムバッファ2つからなる上部構造モデル（橋脚は含めない）とし、重心高

表-1 相似則

物理量	設定方法	相似比
(基本条件) 面圧=1、長さ=1/S (不変量) 重力加速度、密度、ゴムせん断弾性係数		
桁重量	面圧×面積	1/S ²
桁質量	桁重量/重力加速度	1/S ²
ゴムバッファばね定数	ゴムせん断弾性係数×面積/厚さ	1/S
ゴムバッファ周期	$\sqrt{(\text{桁質量}/\text{ゴムバッファばね定数})}$	1/ $\sqrt{S}$
時間	周期	1/ $\sqrt{S}$
速度	長さ/時間	1/ $\sqrt{S}$
加速度	速度/時間	1
慣性力	質量×加速度	1/S ²
変位	慣性力/ゴムバッファばね定数	1/S
面圧	桁重量/面積	1

表-2 実橋及び実験供試体の諸元

	実橋	実験供試体	備考
橋軸方向支間長	40m	5.71m	1/7
主桁間隔	10m	1.43m	1/7
上部工分担重量/橋脚当たり	6,306kN	901kN	1/7
上部工分担重量/すべり系支承当たり	3,158kN	455kN	1/7
上部工（橋桁）重量 ²⁾	6306*2=12,612kN	257kN	1/7 ²
ゴムバッファばね値/橋脚	23,536kN/m	3362kN/m	1/7
ゴムバッファ寸法 ³⁾	2,600*2,600*286mm	371*371*41mm	1/7
すべり系支承径 ⁴⁾	Φ460mm	Φ66mm	1/7
固有周期	1.04sec	0.393sec	1/ $\sqrt{7}$
重心高さ	2.2m	0.314m	1/7

¹⁾1橋脚当たり2つのすべり支承と1つのゴムバッファを想定

²⁾連続橋中間の2径間分を想定

³⁾設計変位:500mm、設計変位時せん断ひずみ:175%、せん断弾性係数G:1N/mm²とした場合

⁴⁾設計面圧:20 N/mm²とした場合

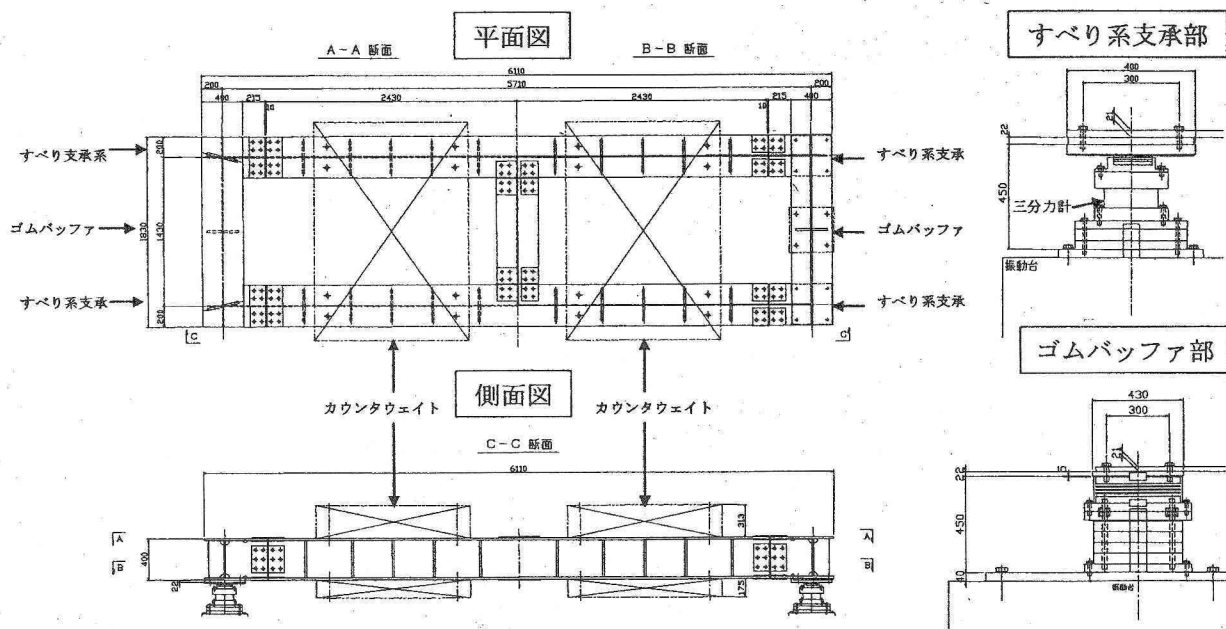


図-1 実験供試体一般図

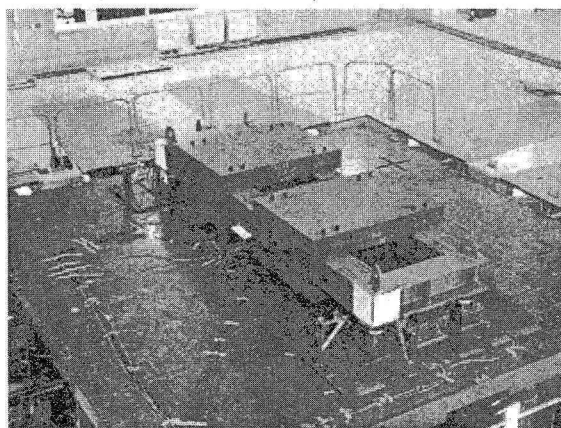


図-2 実験供試体全景

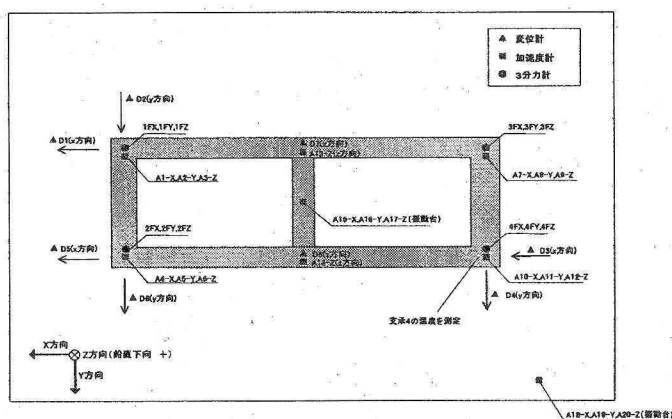


図-3 計測装置配置図

表-3 すべり系支承タイプ及びゴムバッファ

タイプ	すべり材	相手材	設計面圧	目標 摩擦係数	組合せたゴムバッファ (数値は設計値)
1	充填材入り PTFE	SUS (No. 3以上)	12N/mm ²	0.15程度	反力分散ゴム支承 (RB) K=3333kN/m
2	充填材入り PTFE	SUS (鏡面仕上げ)	20N/mm ²	0.1程度	
3	焼結金属系 すべり材	SUS (No. 2B相当)	15N/mm ²	0.25程度	
4	AFRP (繊維強化熱 硬化性樹脂)	SUS (フッ素樹脂 コート)	20N/mm ²	0.05程度	鉛プラグ入りゴム支承 (LRB) K1=17770kN/m K2=2734kN/m Qd=76.4kN (有効せん断ひずみ100%時)

表-4 加振ケース

ケース	水平方向 (X方向)			鉛直方向 (Z方向)		
	入力波 [*]	加振レベル		入力波 [*]	加振レベル	
		支承	最大加速度 (cm/sec ²)		支承	最大加速度 (cm/sec ²)
1	正弦波 周期: 0.5sec 波数: 10波	タイプ1	425	正弦波 周期: 0.5sec 波数: 10波	タイプ1	400
		タイプ2	350		タイプ2	400
		タイプ3	650		タイプ3	—
		タイプ4	1000		タイプ4	400
2	正弦波 周期: 0.5sec 波数: 10波	タイプ1	425	正弦波 周期: 0.5sec 波数: 10波	タイプ1	400
		タイプ2	350		タイプ2	400
		タイプ3	—		タイプ3	—
		タイプ4	850		タイプ4	400

* 正弦波10波の前にはそれぞれ6波分のデュービーを付加し、計22波としている。

さを調整するためにカウンターウェイトをH鋼の上下から挟み込んで固定した。本実験に用いたすべり系支承は、表-3 に示す材料、摩擦係数の異なる4種類とした。また、ゴムバッファは、タイプ1~3のすべり系支承に対しては同一の反力分散ゴム支承を組み合わせ、低摩擦型であるタイプ4のすべり系支承に対しては鉛プラグ入りゴム支承を組み合わせた。実験供試体の一般図と全景をそれぞれ図-1、図-2に示す。

3. 実験手法

本実験における計測項目は、図-3 に示すように、変位8点、加速度20点、荷重12点とした。荷重は、各すべり系支承下面に三分力計を設置し、すべり面に生じる荷重を計測した。入力地震動は正弦波として、表-4に示す2ケースの加振を4タイプの支承に対してそれぞれ実施した。正弦波の周期は、極力大きな応答を発生させ、高速域でのすべり系支承の摩擦特性の確認を行うため、実験供試体のゴムバッファ

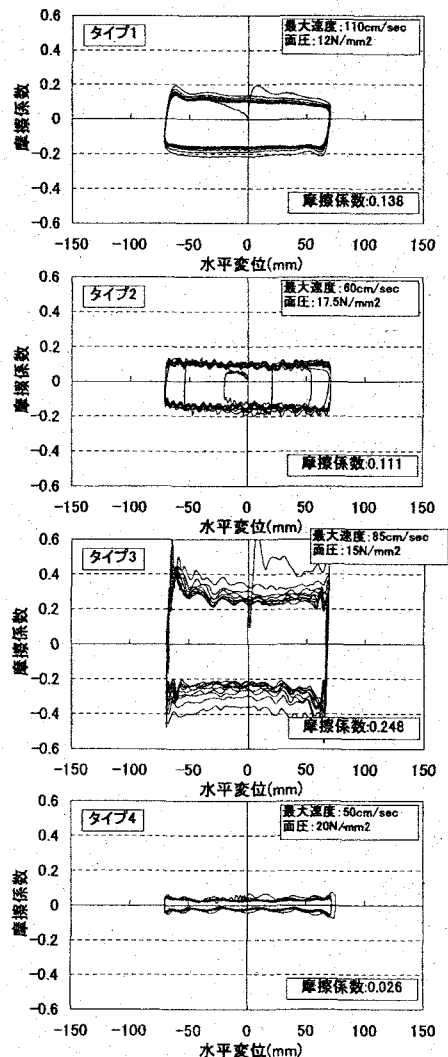
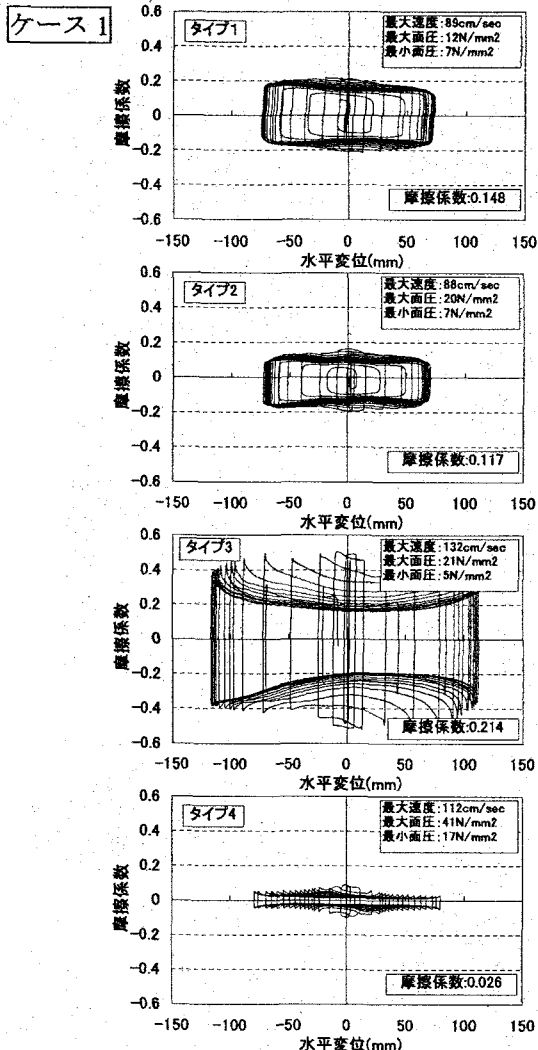


図-6 摩擦係数-変位関係 (特性試験)

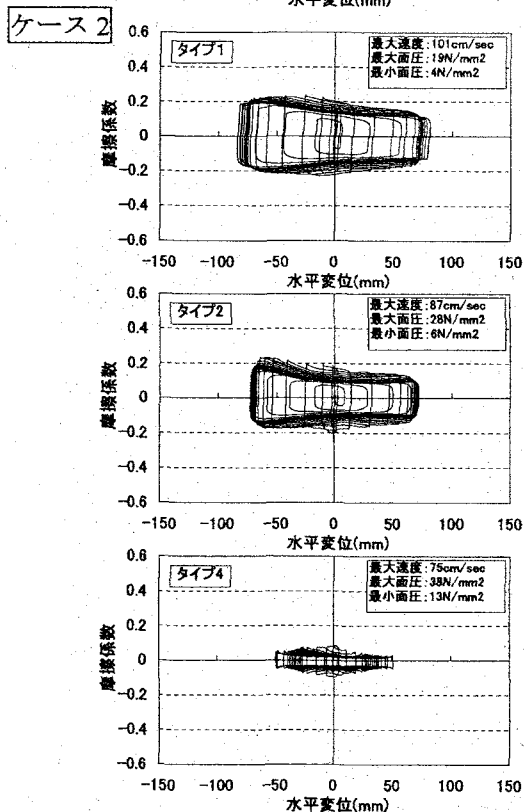


図-5 摩擦係数-変位関係 (振動台実験)

ア剛性 (設計値) から算出される橋桁の固有周期 (0.39sec) に近い値で 0.5sec とした。加振レベルは、振動台及び桁の実際の応答値が不明であったため、加振レベルを序々に上げていき、応答変位が目標値 (ゴムバッファのせん断ひずみ 150% = 72mm 程度) もしくは三分力計の定格容量 (圧縮: 150kN、引張: 浮き上がりが発生させない) に達した時点で加振レベルの増加を打ち切る方法としたため、支承タイプ毎に加振レベルが異なっている。なお、タイプ 3 に対しては、上下動を作用させることにより三分力計の定格容量を超過する恐れがあったため、ケース 2 は実施していない。また、振動台の特性上、振動台上で計測された実際の加振レベルは、指令した加振レベル (表-4 中の数値) と比較して平均 1 割程度大きくなっている。

4. 実験結果及び考察

図-5 に各支承タイプの摩擦係数-変位関係を示す。

充填剤入り PTFE と SUS の組合せであるタイプ 1、タイプ 2 では、それぞれ滑り出しの摩擦係数 0.2、0.15 程度から加振回数の増加に伴い減少し、0.15、0.1 程度に漸近する結果となった。上下動の無いケース 1 では、摩擦係数-変位関係はほぼ矩形に近いものの、速度がゼロとなる矩形の角に若干の丸みを有している。これは主に、摩擦係数が速度ゼロ付近で低下し、速度約 5cm/sec 以上でほぼ一定になるという速度依存性²⁾によるものと考えられる。また、上下動のあるケース 2 では、負側変位時に摩擦係数が大きくなる台形形状となった。これは、水平・鉛直方向を同位相で振動台を加振（正負符号は図-3 参照）したため、負側変位最大時に面圧が最小となり、面圧の低下に従い摩擦係数が増加するという面圧依存性²⁾によるものと考えられる。

焼結金属系すべり材と SUS の組合せであるタイプ 3 では、タイプ 1、2 と同様に、摩擦係数が滑り出しから加振回数の増加に伴い減少し、一定値に漸近する結果となった。また、変位最大付近で摩擦係数 0.4 程度、変位ゼロ付近で 0.2 程度と大きく鼓状の形を示した。これは主に、摩擦係数が速度ゼロ付近で最大で速度の上昇と共に低下するという速度依存性²⁾によるものと考えられる。

AFRP（繊維強化熱硬化性樹脂）と SUS の組合せであるタイプ 4 では、他タイプと同様に、滑り出しの摩擦係数 0.05 程度から加振回数の増加に伴い減少し、0.03 程度に漸近する結果となった。摩擦係数-変位関係の形状は、タイプ 3 と同様に速度依存性の影響²⁾を受けて鼓状となった。

また、振動台試験実施前に実施した二軸試験機による特性試験結果（振動台実験ケース 1 の速度、面圧条件に近いものを抜粋）を図-6 に示す。図-5（ケース 1）との比較により、スロースタートを行っていないタイプ 1、3、4 において、主に慣性力の影響によるものと思われる加振 1 回目の摩擦係数が局所的に大きくなる傾向が見られ、また、速度依存性の大きいタイプ 3 において発生速度の小さい特性試験で摩擦係数が 15%程度大きくなったが、振動台試験結果とほぼ同等の結果を示した。なお、振動台実験の摩擦係数は加振回数 7-16 回目の Y 切片の平均値、特性試験の摩擦係数は加振回数 2-11 回目の Y 切片の平均値としている。

5. まとめ

- (1) 充填剤入り PTFE と SUS（タイプ 1、2）、焼結金属系すべり材と SUS（タイプ 3）及び繊維強化熱硬化性樹脂と SUS（タイプ 4）を組合せたすべり

系支承の摩擦特性を確認した。その結果、正弦波加振による摩擦係数-変位関係は、タイプ 1、2 はほぼ矩形に近い形状を示したが、タイプ 3、4 は速度が大きくなると摩擦係数が低下するという鼓状の形状となった。また、何れのすべり系支承もすべり距離の増加に伴い摩擦係数が減少し、次第に一定値に漸近する傾向が見られた。

- (2) 振動台実験より得られた摩擦係数-変位関係は、実験実施前に実施した二軸試験機による特性試験結果とほぼ同等であった。

謝辞：本研究は、(独)土木研究所ならびに民間 8 社で実施している共同研究「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発」の一環として実施した内容であり、関係各位に謝意を表します。また、本実験で使用した三分力計は京都大学大学院家村浩和教授より借用したものであり、ここに記して謝意を表します。

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、2000. 7
- 2) 玉木利裕、小川一志、河東鎬、鵜野禎史、比志島康久：摩擦減衰型免震装置の摩擦特性に関する実験的検討、鋼構造年次論文報告集、第 7 巻、pp. 89-94、1999
- 3) (独)土木研究所、(株)構造計画研究所、パシフィックコンサルタンツ(株)、八千代エンジニアリング(株)、オイレス工業(株)、川口金属工業(株)、三協オイルレス工業(株)、日本鑄造(株)、(株)ビービーエム：すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書(その 1)、2005. 7
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、丸善、1997
- 5) 家村浩和、高橋良和、柳川智史、日比雅一：支承部軸力変動に着目した滑り免震橋梁の振動台実験、第 26 回地震工学研究発表会、2001. 8
- 6) 炭村透、鵜野禎史、中山隆弘、大倉幸三、山本利弘：高摩擦係数を有する焼結金属系すべり材の基礎的研究、第 8 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. 97-102、2005. 2
- 7) 宮崎充、金治英貞、高田佳彦、東谷修、荒水照夫：長大トラス橋の床組免震構造におけるすべり免震支承の設計と性能、第 8 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. 121-128、2005. 2