

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

宮崎充¹・金治英貞²・高田佳彦³・東谷修⁴・荒水照夫⁵

¹正会員 オイレス工業株式会社 免制震カンパニー技術開発部（〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000）

²正会員 工修 阪神高速道路公団 大阪建設局建設企画部設計課
（〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16）

³正会員 工修 阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

⁴正会員 工修 日立造船株式会社 設計本部橋梁設計部（〒550-0002 大阪市西区江戸堀2丁目6-33）

⁵正会員 工修 オイレス工業株式会社 免制震カンパニー技術開発部
（〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000）

1. まえがき

長大橋のレベル2地震動に対する地震時性能向上策として、道路面である床組構造を免震化させる方法（以下、「床組免震構造」）がひとつの有効な手法とされている¹⁾。また、その装置としてはゴム支承系とすべり支承系に大きく分類できるが、ここでは、既設橋梁への適用の観点から既存支承の設置空間を考慮し、支承高の低いすべり支承を鉛直支持装置とする「すべり免震支承システム」に着目している。つまりここで対象としたのは、「すべり免震支承システム」を用いた「床組免震構造」である。前者のすべり免震支承システムは、兵庫県南部地震以降、採用されはじめた構造²⁾であり今では機能分離支承のひとつの形態としても整理可能である^{3),4),5)}。なお、米国では AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design においてすべり免震支承（sliding isolation bearings）の基準化がすでに進んでおり、1991年版の免震設計仕様ガイド発行時点からすべり免震支承の適用事例が増加している背景のもと、1999年版ではこの詳細内容が追加されている現状にある⁶⁾。このガイドには、材料規定から品質試験に至るまでかなり詳細にすべり免震支承の記載がなされている。

わが国における一般橋に関するすべり免震支承に関する研究は、兵庫県南部地震以前から岡本らによって実施されており、従来のテフロン系すべり材とステンレスの摩擦による免震機能に関して、実験的あるいは解析的成果が明らかとされている⁷⁾。これらの材料を用いた摩擦係数は約0.1を基準に、面圧や速度依存性のために多少変動することが知られて

いる。また、一般橋では、摩擦係数は高いほどその免震効果が高いとされている。

しかしながら、今回対象とした床組免震構造は、主構造の中の床組のみを免震化させるものであり、これまでの橋脚に支持された上部構造を免震化させる構造とは異なる。このため、設計上、すべり免震支承に要求される性能も異なることが予想された。対象とした橋梁は、阪神高速道路湾岸線の港大橋であり、橋長980m（側径間235m＋中央径間510m＋側径間235m）のゲルバートラス橋である。また、免震化される床組重量は全橋の約40%であり、主構軸力低減効果を期待する場合、従来のものより低摩擦のすべり免震支承が要求されることがわかった^{1),8)}。図-1に対象とした床組免震構造とすべり免震支承を示す。

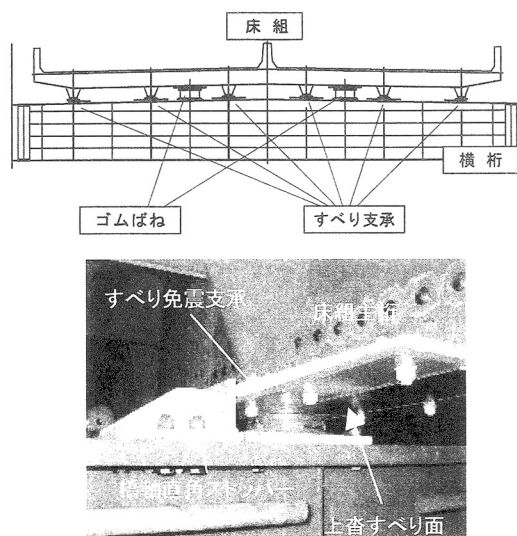


図-1 対象とした床組免震構造とすべり免震支承

このすべり免震支承は、本構造用に開発されたものであり、摩擦係数0.05程度の低摩擦の接触面を有するものである。以下、これらの特徴的な設計概要を述べるとともに、対象すべり免震支承の性能試験による検証結果を報告する。

2. 設計概要

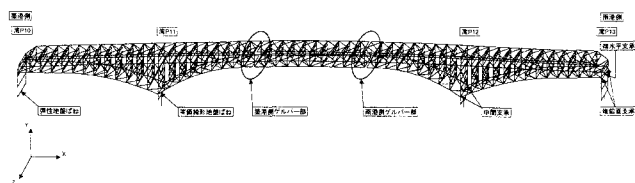
(1) 床組免震構造概要

元構造の鋼床版桁（床組）は、固定-可動条件の支承板支承（以下、BPA 支承）でトラス横桁上に支持された構造となっており、今回の設計入力地震波に対しても応力超過することが確認された。なお、兵庫県南部地震時においてもこれらの支承に多くの損傷がみられており床組が橋軸方向に振動していたことが確認されている。このような状況のもと、全橋応答低減を可能にしかつ支承補強をも回避できるすべり支承を用いた免震化構造を考えるに至った。

このシステムの特性は、すべり材の摩擦係数と水平荷重分散装置であるゴムばねの剛性に依存することはよく知られており、一般橋については種々の解析や設計試算が行われている。しかしながら、本橋は一般橋のすべり免震と異なり、重量の大きな主構の中の一部である床組が免震化されるために本橋特有の解析が必要となった。これは、免震化される構造重量の橋梁全体重量に対する比が、一般橋と対象橋梁で大きく異なることに起因するためである。

(2) 全体解析

すべり免震支承システムに対する地震時要求性能は、対象橋梁の3次元全橋モデルを用いた時刻歴応答解析によって決定した。各部材は梁要素としてモデル化を行い、上弦材、下弦材、斜材、横桁、横支材の両端はすべて剛結合とした。対傾構、上横構、下横構の両端はピン結合として、軸力のみを伝達する部材としてモデル化した。解析モデルはすべて弾性部材としてモデル化している。図-2 に解析モデル図を示す。



	X	Y	Z	θ_x	θ_y	θ_z
	橋軸	鉛直	橋直	橋軸回り	鉛直回り	橋直回り
中間支承	固定	固定	固定	固定	固定	自由
端水平支承	自由	自由	固定	自由	自由	自由
端鉛直支承	自由	固定	自由	自由	自由	自由

図-2 解析モデルと拘束条件

ここでは、簡便化のため床組の免震バネをすべり免震支承とゴムばねを複合させた図-3 のような等価剛性ばね（ K_{eq} ）としてモデル化して、主構を線形要素とした全体系での時刻歴応答解析を実施した。そして、主構の弾性ひずみエネルギーの総和と、床組支承の最大相対変位量の平均の関係を求め、構造全体系における床組免震の有効性、つまり、主構部材の応力およびひずみの低減効果をマクロで評価した。なお、すべり支承の摩擦係数（ μ ）は下式で算出した。

$$\mu = \pi \cdot h_{eq} K_{eq} u_e / 2Rd \quad \text{式(1)}$$

ここで、 h_{eq} は等価減衰、 K_{eq} は等価剛性、 u_e は最大変位、 Rd は死荷重反力である。

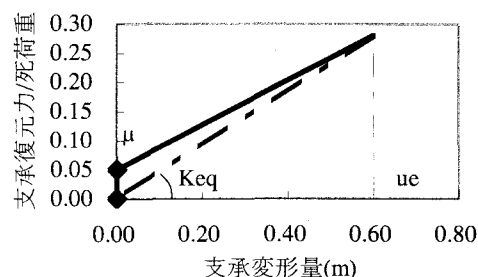


図-3 免震システム骨格曲線

図-4 に内陸型適合波を入力波形に用いたひずみエネルギーと支承相対変位量との関係を示す。この結果から、床組周期が 2.8 秒以上が要求され、かつその場合、摩擦係数が低いほど主構のひずみエネルギーを低減させることがわかる。ここで床組変位量の制限から床組周期として 3.0 秒、摩擦係数の最適目安値として約 0.04~0.06 を選択するに至った。

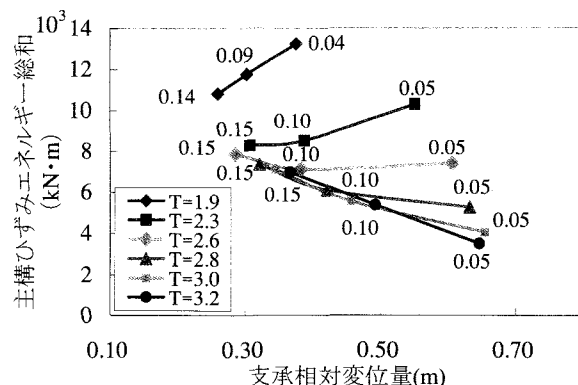


図-4 床組周期（ T ）と摩擦係数（図中数字）の組み合わせによる応答への影響

(3) すべり免震支承の要求性能

摩擦係数が 0.04～0.06 という低摩擦のすべり支承の材料は、橋梁の支承として採用されたことがなく、他分野においても希である。床組免震ではすべり支承の摩擦により減衰効果を得ることから、この摩擦係数は重要な要素となる。対象橋梁の床組は、地震時速度及び死荷重反力が大きく変動することから、安定した減衰効果を得るためには速度・反力変動条件下においても、摩擦係数が安定することが望ましい。一方、耐久性に着目すると、床組は鋼床版桁であることから常時反力（死荷重＋活荷重）は死荷重のみの反力に比べて約 3 倍となり、許容支圧応力度は常時死荷重反力の 3 倍とする必要がある。また、すべり免震支承の構造特性より供用期間（50 年相当）の摩耗量は 1mm 以下とする必要がある。

これらの要求性能をまとめたものを表-1 に示す。

表-1 すべり支承の要求性能

動的性能	摩擦係数	0.04～0.06
	平均速度	500～600mm/sec
	死荷重	端支点：180kN
	常時反力	中間支点：310kN
耐久性能	死荷重	端支点：270kN
	最大反力	中間支点：470kN
	常時反力	端支点：550kN
	損失量	中間支点：930kN
		1mm(50年使用時)

(4) すべり免震支承の構造と材料選定

すべり免震支承は、既設 BPA 支承高さ以内に収める必要があることから、必要な鉛直力支持機能、および橋軸方向すべり移動機能を満足する構造として「ポット式すべり免震支承」を用いることとした。

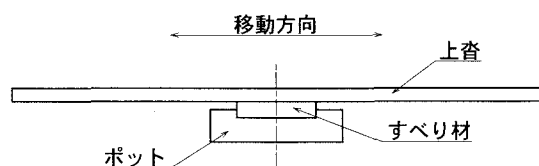


図-5 ポット式すべり免震支承

ポット式すべり免震支承は上査下面とすべり材上面がすべり面となる構造であり、摩擦係数はこれにより決定する。従って摩擦係数の検証は上査下面とすべり材について行う。一方、鉛直力は上査→すべり材→ポットと作用するが、上査及びポットは鋼材を用いることから許容耐力はすべり材の支圧耐力で決定される。表-2 および表-3 にすべり材の許容支圧応力度の目安値を 30N/mm²、60N/mm²とした時のす

べり材径と常時及び地震時面圧の関係を示す。

表-2 $\sigma_{ba}=30\text{N/mm}^2$ 時のすべり材面圧

		端支点	中間支点
すべり材径		155mm	200mm
鉛直反力	常時(死荷重＋活荷重)	550kN	930kN
	地震時 死荷重標準	180kN	310kN
	死荷重最大	270kN	470kN
面圧	常時(死荷重＋活荷重)	29.1N/mm ²	29.6N/mm ²
	地震時 死荷重標準	9.5N/mm ²	9.9N/mm ²
	死荷重最大	14.3N/mm ²	15.0N/mm ²

表-3 $\sigma_{ba}=60\text{N/mm}^2$ 時のすべり材面圧

		端支点	中間支点
すべり材径		110mm	145mm
鉛直反力	常時(死荷重＋活荷重)	550kN	930kN
	地震時 死荷重標準	180kN	310kN
	死荷重最大	270kN	470kN
面圧	常時(死荷重＋活荷重)	57.9N/mm ²	56.3N/mm ²
	地震時 死荷重標準	18.9N/mm ²	18.8N/mm ²
	死荷重最大	28.4N/mm ²	28.5N/mm ²

すべり面の材料に関しては、一般的に橋梁用支承のすべり材として用いられている材料に、新規に支承メーカーを中心に開発された材料を含めて、計 3 タイプのすべり材・上査相手面の組み合わせについて検証することとした。この基本選定のあたり、すべり材と上査相手面との速度、面圧等による摩擦特性の影響が重要な要素となることから、すべり材寸法 $\phi 60\text{mm}$ 程度の試験体を用いて、支承部に着目した要素特性試験を実施することとした。

(5) 基本性能

摩擦係数は二軸せん断試験機による一方向往復運動（正弦波使用）から得られた鉛直荷重 P と水平荷重 H により算定することを基本とした。

$$\mu = H/P \quad \text{式(2)}$$

ここで、速度依存性が高い材料では図-6 の左図のような履歴となることから、このような材料につ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： F より摩擦係数を求める。

$$F = E/S \quad \text{式(3)}$$

$$\mu = F/P \quad \text{式(4)}$$

ここで、 F ：等価摩擦力、 E ：履歴吸収エネルギー、 S ：1 サイクルの移動（変位）量である。

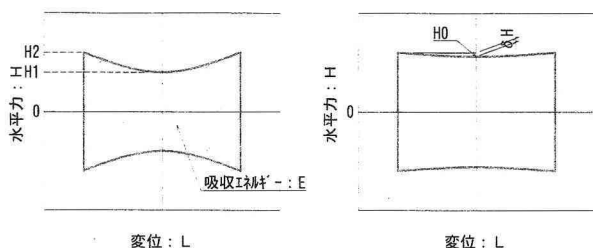


図-6 摩擦係数模式図

表-4 に材料 1～3 の摩擦係数算定結果を示す。なお試験機の性能より、ここで示す摩擦係数は速度 600mm/秒（一部 800mm/秒）までのものである。なお、摩擦係数の算出は 10 回加振を基本とし、2～9 回の各サイクルによって得られた値の平均値を当該材料の摩擦係数とした。

表-4 材料 1～材料 3 の摩擦係数

速度 (mm/sec)	10	100	150	200	300	400	500	600	800
材料 1									
$\sigma = 10\text{N/mm}^2$	0.059	0.161	---	0.162	---	---	0.272	---	0.316
$\sigma = 20\text{N/mm}^2$	---	0.114	---	0.115	---	---	0.101	---	0.101
$\sigma = 30\text{N/mm}^2$	0.054	0.095	---	0.085	---	---	0.079	---	0.042
材料 2									
$\sigma = 10\text{N/mm}^2$	0.074	0.089	---	0.072	0.064	0.057	0.053	0.049	---
$\sigma = 20\text{N/mm}^2$	0.060	0.066	---	0.067	0.046	0.040	0.035	0.033	---
$\sigma = 30\text{N/mm}^2$	0.054	0.056	---	0.043	0.035	0.030	0.027	0.027	---
材料 3									
$\sigma = 10\text{N/mm}^2$	0.093	---	0.061	---	0.045	---	0.038	0.035	---
$\sigma = 20\text{N/mm}^2$	0.084	---	0.048	---	0.042	---	0.040	---	---
$\sigma = 30\text{N/mm}^2$	0.075	---	0.037	---	0.026	---	0.021	0.019	---

材料 1 は面圧 20～30N/mm² において摩擦係数は安定し、速度による影響もほとんどないものの、摩擦係数そのものが大きく、対象橋梁の床組免震のすべり免震支承としては不適当である。材料 2 及び材料 3 は材料 1 に比べて摩擦係数の面圧・速度依存性が高いが、摩擦係数そのものは地震時の平均速度領域（500～600mm/秒）で概ね 0.02～0.04 程度であり、対象橋梁の床組免震のすべり免震支承として適用可能であると判断される。

面圧については、面圧 20N/mm² の試験結果が、摩擦係数の変動が少なく比較的安定しており、また、要求性能に近いことから、20N/mm² を採用することとした。また、同一面圧、同一速度で、すべり径を変化させて要素試験を行ったところ、径が大きいほど摩擦係数が低下する結果となった。

基本性能をまとめると、①面圧が増加するほど摩擦係数が低下する、②速度が増加するほど摩擦係数が低下する、③寸法（直径）が増加するほど摩擦係数が低下する、である。なお、これらの基本性能確認試験のほかに吸水性を考慮した過酷な加圧試験を行い、最終的に材料 2 を選択するに至った。以下に、この材料の概要および性能確認試験結果を述べることとする。

3. すべり部材概要

図-7 にすべり部材の概要を示す。すべり材はエポキシ樹脂とアラミド繊維を用いた繊維強化熱硬化樹脂を用いている。このエポキシ樹脂とアラミド繊維の組み合わせは高強度であることから耐震補強など広範囲な用途で使用されている材料だが、すべり性を良くするために PTFE と複合させている。また、すべり面には固体潤滑材をコーティングし、さらに金属系すべり支承のように固体潤滑材をプラグ状にして埋め込み処理をおこなっている。使用している固体潤滑材は数十年にわたり橋梁等を支え続けている実績のある材料で、主に低速高荷重の条件や、水中や雨がかりなどの油脂が洗い流されてしまうような特殊環境下で使用される。

上査相手面は SUS 材にフッ素樹脂コートをしたものである。このコートは PTFE を用いており耐候性、耐水性が高く、また耐熱樹脂を使用することにより高速摺動で懸念される熱についても 250℃ の耐熱性を持っている。

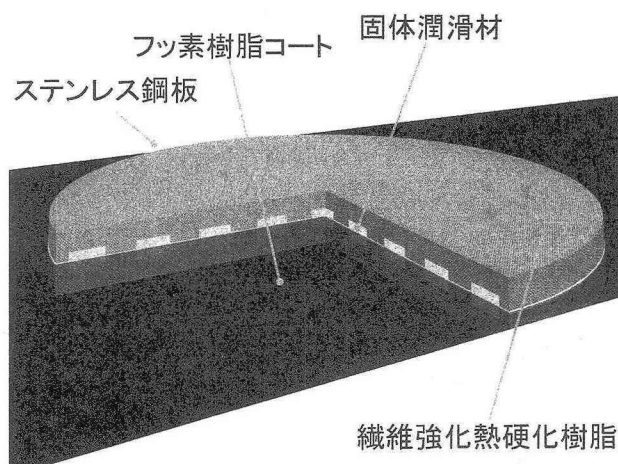


図-7 すべり部材概要

4. 性能確認試験項目

本すべり部材の性能を確認するために、面圧・速度依存試験、高速加振試験、低速加振試験などを行い、また繰返し耐久試験、促進劣化試験、限界圧縮試験、耐候性試験によって、想定される限界条件においても支承機能が損なわれないことを確認した。

本論文では、面圧・速度試験（高速加振試験含む）、促進劣化試験、限界圧縮試験について報告する。

5. 試験概要

(1) 面圧・速度依存試験

すべり支承の重要な特性である摩擦係数の面圧依存性・速度依存性を確認するとともに、通常の二軸試験機では行えない高速領域における特性も確認した。

(2) 促進劣化試験

一般的な塩水噴霧試験は本すべり免震支承の摺動部のような樹脂材料から構成されている部材にはそぐわないので、紫外線と水分の劣化サイクルを使用するサンシャインウェザーメータを用いて暴露試験を行い、暴露前後における摺動特性を確認した。

(3) 限界圧縮試験

支圧能力は支承にとって重要な要素のひとつであることから、本支承に用いられている材料の中で最も強度の低いすべり材について限界圧縮試験を行い、許容支圧応力度を確認した。

を、600mm/sec～2000mm/secの速度範囲については高速加振試験機を製作し使用した。また、限界圧縮試験では3000kN二軸試験機では載荷荷重が不足することから、40000kN二軸試験機を使用した。3000kN二軸試験機を図-8に、高速加振試験機、暴露試験機を図-9、図-10に示す。(500kN二軸試験機および40000kN二軸試験機の図は3000kN二軸試験機と構造が同じなので省略する)

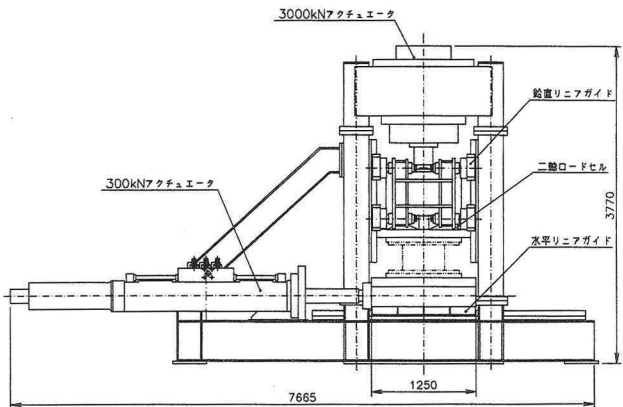


図-8 3000kN二軸試験機

6. 試験体

各試験に用いた試験体を表-5に示す。

表-5 試験体概要

すべり材	
材質：繊維強化熱硬化樹脂	
形状：	
面圧・速度依存試験	
φ 40mm×12mm,	φ 60mm×12mm
φ 100mm×13mm,	φ 200mm×13mm
促進劣化試験	
φ 60mm×12mm	
限界圧縮試験	
φ 100mm×5mm,	φ 200mm×5mm
上杓相手面	
材質：SUS316+フッ素樹脂コート	
形状：	
面圧・速度依存試験	
600mm×210mm×2mm	
800mm×200mm×2mm (高速加振試験)	
促進劣化試験	
220mm×100mm×2mm	
限界圧縮試験	
なし	

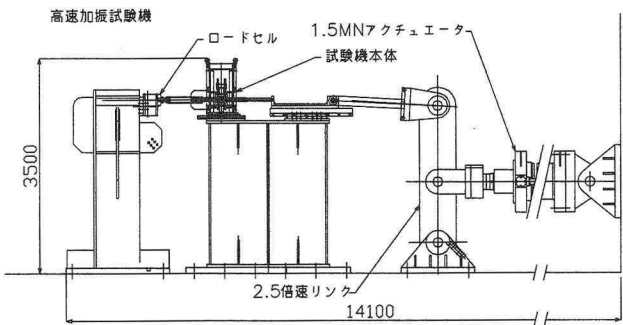


図-9 高速加振試験機

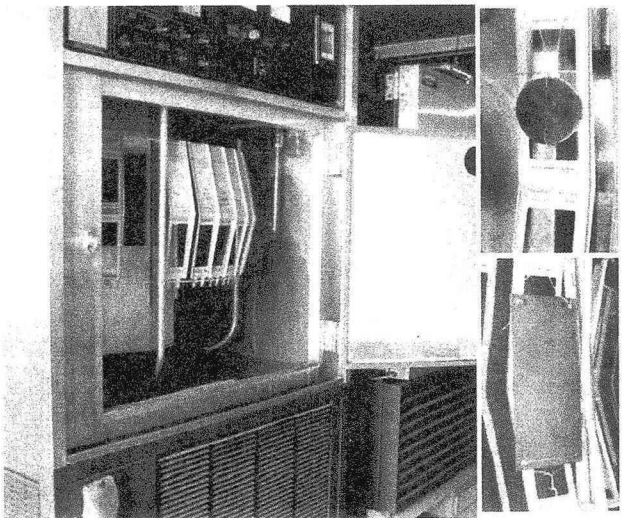


図-10 サンシャインウェザーメータと試験体取付状態

7. 試験装置

速度10mm/sec～600mm/secの範囲の摩擦係数の計測には500kN二軸試験機もしくは3000kN二軸試験機

8. 試験方法

(1) 面圧・速度依存試験

試験はすべり材の支圧応力度 $2\sim 60\text{N/mm}^2$ ，加振速度 $10\sim 2000\text{mm/sec}$ の範囲で行った。

加振回数は10回とし，各回の履歴曲線より摩擦係数を算定， $2\sim 9$ 波の摩擦係数の平均値を特性値とした。

(2) 促進劣化試験

劣化前に摺動試験を行い摩擦係数を測定，劣化後に再度同じ条件で摩擦係数を測定し，劣化前後の摩擦係数を比較する。

a) 暴露条件

暴露はJISK7350に基づき行った，暴露条件を次に示す。

- ・暴露サイクル : 12分降雨/120分
- ・ブラックパネル温度 : 63°C
- ・相対湿度 : 50%
- ・総暴露時間 : 501時間

b) 摺動試験

暴露前後に行った摺動試験の条件を次に示す。また摩擦係数の算定は面圧・速度依存と同じ方法で行った。

- ・加振振幅 : $\pm 50\text{mm}$
- ・加振波形 : 正弦波
- ・加振速度 : 100mm/sec
- ・加振面圧 : 10N/mm^2
- ・加振波数 : 10波

(3) 限界圧縮試験

すべり材を穴深さ 3mm のホルダーに取付け，面圧 16N/mm^2 まで手で載荷を行う。手動載荷後，正弦波で $16\sim 333\sim 16\text{N/mm}^2$ の載荷を1回行う。

すべり材をホルダーから取り外しすべり材の中心および中心と外縁の中間点付近4箇所，計5点の厚みを測定し平均した値を厚みとする。

9. 試験結果

(1) 面圧・速度依存試験

代表的な履歴曲線を図-10～図-13に，試験結果から面圧 $20, 40, 60\text{N/mm}^2$ の試験結果をまとめた物を図-14に示す。

摩擦係数は常時支圧応力度において概ね $0.02\sim 0.07$ の範囲にあることを確認した。

また，摩擦係数は面圧・速度依存性を持ち，面圧の増加もしくは速度の上昇に伴って下がる傾向があり，速度 1000mm/sec 以上の高速においては依存性が小さくなることが分かった。

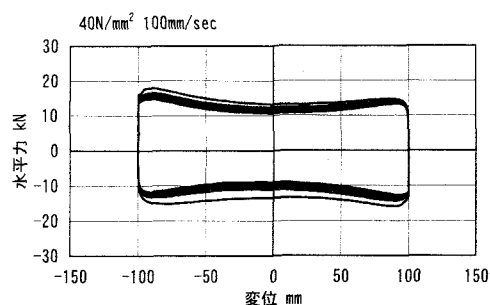


図-11 履歴曲線(面圧 40N/mm^2 速度 100mm/sec)

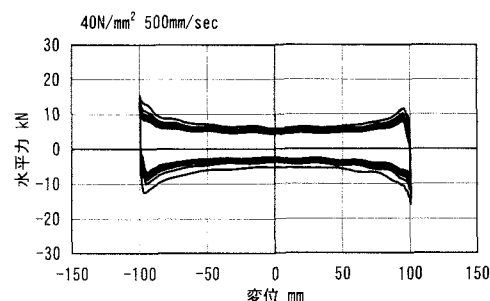


図-12 履歴曲線(面圧 40N/mm^2 速度 500mm/sec)

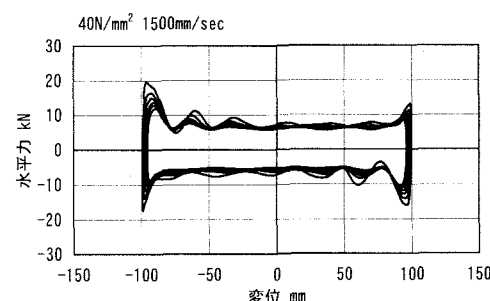


図-13 履歴曲線(面圧 40N/mm^2 速度 1500mm/sec)

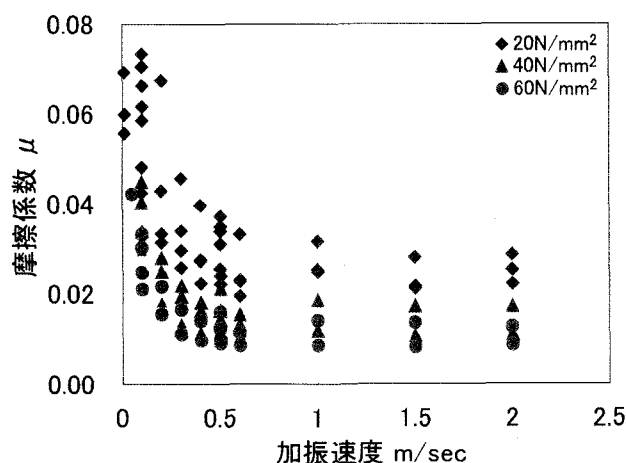


図-14 摩擦係数の速度依存性

(2) 促進劣化試験

暴露前後の摩擦係数を表-6に、履歴曲線を図-15、図-16に示す。暴露前後で摩擦係数が若干低減したが、僅かの変化であることから、摺動特性に問題がないことを確認した。

表-6 暴露前後の摩擦係数

	暴露前	暴露後
摩擦係数 μ	0.104	0.098

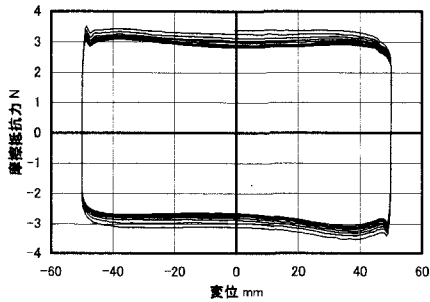


図-15 暴露前の履歴曲線

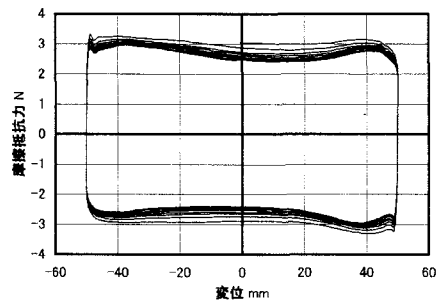


図-16 暴露後の履歴曲線

(3) 限界圧縮試験

代表的な履歴曲線を図-17に、試験結果をまとめた表を表-7に示す。

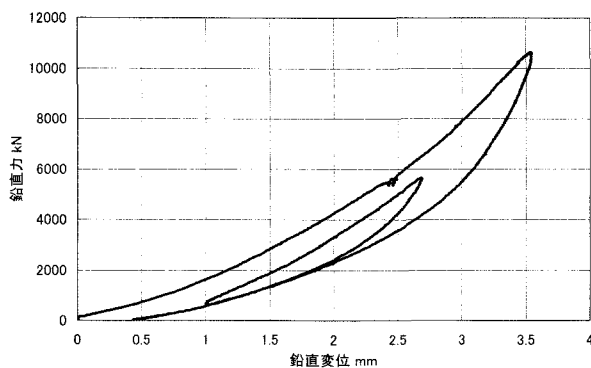


図-17 限界圧縮試験の履歴曲線 (φ200-②)

表-7 すべり材厚さの変化

口径	試験体番号	厚み		変化量 %
		载荷前 mm	载荷後 mm	
φ100	①	5.17	5.14	-0.58
	②	5.01	4.97	-0.80
	③	5.16	5.11	-0.97
φ200	①	5.10	5.09	-0.20
	②	4.99	4.96	-0.60
	③	4.79	4.78	-0.21

試験後の最大厚さ変化量はφ100で0.05mm、φ200で0.03mm、であり、試験前の厚みに対する変化率は最大1%程度であった。ここで、残留鉛直変位が総厚の20%を限界状態とし、限界状態となる载荷荷重の30%を許容支圧応力度と考えた場合、許容支圧応力度は100N/mm²以上となることから、本支承は十分な支圧能力を持つことを確認した。

9. まとめ

すべり免震支承システムを用いた床組免震構造を採用した港大橋では、床組周期を2.8秒以上とし、すべり免震支承の摩擦係数が低いほど主構のひずみエネルギーを低減できることがわかった。

新規に開発したすべり部材を含む3タイプの材料について選定試験を行い摩擦係数が低く支持能力の高い、すべり材に繊維強化熱硬化樹脂を、上相手面にフッ素樹脂コートをしたステンレス鋼板を用いた組み合わせを採用した。

すべり免震支承の性能を確認するために行った試験の中で、面圧・速度依存試験では摩擦係数の面圧依存性、速度依存性を確認するとともに、高速、高面圧で摺動試験を行うことで、過酷な使用条件においても支承機能が維持できることを確認した。耐久性についてはサンシャインウェザーメータを用いた促進劣化試験により確認を行い、また支圧能力については、通常のすべり支承では考え難い高面圧条件下で強度の確認を行い十分な支圧強度を持つことを確認した。

以上、床組免震構造に繊維強化熱硬化樹脂とフッ素樹脂コートを用いたすべり免震支承を使用することで、レベル2地震動に対して港大橋が有効に性能向上を図れることを確認した。

参考文献

- 1) 金治英貞，高田佳彦，鈴木直人，美濃智広，東谷修，大濱浩二：長大ゲルバートラス橋の損傷制御耐震補強策と応答低減効果，土木学会地震工学論文集，2003.11
- 2) 吉川実，金治英貞，宇野裕恵：兵庫県南部地震により被災した既設PC高架橋の免震復旧構造，土木学会第1回免震・制震コロキウム講演論文集，1996.11
- 3) 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
- 4) 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，1999.11
- 5) 阪神高速道路公団：すべり免震支承システムの設計手引き（案），2003.5
- 6) 土木学会 地震工学委員会 地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会：米国カリフォルニア州の長大橋の耐震補強と日米設計法の比較，第5回 橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会資料，2002.10
- 7) 岡本晋：すべり方式免震支承を有する橋梁の地震応答特性に関する研究，学位論文，1995.3
- 8) 高田佳彦，浜田信彦，金治英貞：長大ゲルバートラス橋の床組免震化における低摩擦係数型すべり支承の特性検討，第25回日本道路会議論文集，2003.11