

橋脚の塑性化に伴う支承部の回転変形追従性能と すべり摩擦特性に関する実験的研究

石山昌幸¹，原田孝志¹，姫野岳彦²，宮崎充³，牛嶋昭夫⁴，今井隆⁵

¹正会員 日本鑄造（株）エンジニアリング開発部商品開発グループ（〒210-9567 川崎市川崎区白石町 2-1）

²正会員 川口金属工業（株）技術本部技術一部開発課（〒332-8502 埼玉県川口市宮町 18-19）

³正会員 オイルレス工業（株）研究開発本部 要素機器研究室（〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000）

⁴三協オイルレス工業（株）プラント事業部技術課（〒183-0036 東京都府中市日新町 1-1-5）

⁵正会員 （株）ビービーエム技術審査管理部（〒104-0033 東京都中央区新川 2-13-9）

1. はじめに

兵庫県南部地震以降，道路橋支承に対する要求性能はレベル2地震動に対しても，その機能が安定して発揮できることが求められており，また同時に，ゴム支承技術の確立により，地震時水平力分散構造や免震設計法が広く普及し，大規模地震時には橋脚基部に，ある程度の塑性化を許容しつつ，構造系全体として地震力を受け持つ耐震設計法が一般化されてきている¹⁾。しかしながら，ゴム支承を用いた構造系の場合，地盤条件や周期特性，構造条件などからその適用範囲が限定されることや，支承に機能が集約されているため支承本体が過大となるなどの問題点を含んでいることも事実であり，そのような点を改善した新しい構造の検討が積極的に進められつつある²⁾。

すべり支承とゴムバッファを用いた機能分離型支承等の地震力遮断機構の検討はその一例であり，これまでも多くの研究報告がなされている^{例えば 3)}。ただし，既往のすべり支承に関する研究事例は動的な摩擦特性の評価，特に面圧や速度などの载荷条件に対する依存性に着目したものがほとんどであり，支承部の基本性能である回転追従性能に焦点をあてたものは少ないのが現状である。

この支承部の回転追従性能は，従来，常時の活荷重用作用時における上部構造のたわみによる変位を吸収することに主眼がおかれており，一般には桁端支点部で $1/150\text{rad}$ （約 0.38° ）程度が見込まれている⁴⁾。このような比較的小さな回転挙動に対しては既に実

験的な性能検証等⁵⁾が行われているが，支承部の回転変形は常時荷重に対してのみではなく，大規模地震時に橋脚が塑性化し，その基部に回転変形が生じると，橋脚天端および支承部にも相応の回転角が付加されるものと考えられる。実際に，ゴム支承を有するRC橋脚への繰返し载荷実験において，橋脚基部の塑性化に伴い，支承部には $1/20 \sim 1/12\text{rad}$ （ $2.9 \sim 4.8^\circ$ ）程度の非常に大きな回転角が計測されているとの報告⁶⁾もなされている。

このような地震力と回転変形の同時载荷状態における性能評価については，ゴム支承を対象とした検討事例^{7),8)}などは数例見られるものの，すべり支承については，大きな回転角への追従性および回転追従時におけるすべり摩擦特性の安定性検証等は実施されていない。そこで，本研究では大地震時に橋脚が塑性化した場合の回転角を考慮したすべり支承の特性評価を行うことを目的として，最大 5° （ $\approx 1/11\text{rad}$ ）の回転角までを想定した回転追従性能の検証およびすべり摩擦特性の計測等を行った。ここでは，それらの検証結果について報告する。

2. 橋脚の塑性化に伴う回転変形量

(1) 変形状態

図-1に示すように，上部構造に慣性力 H が作用すると，支承部および橋脚天端には水平変位 δ_b ， δ_p が，橋脚基部には回転角 θ_p が生じ，このとき，支承部には回転角 θ_b が付加されることになる。また，実際には基部の回転角 θ_p だけでなく，その上部の

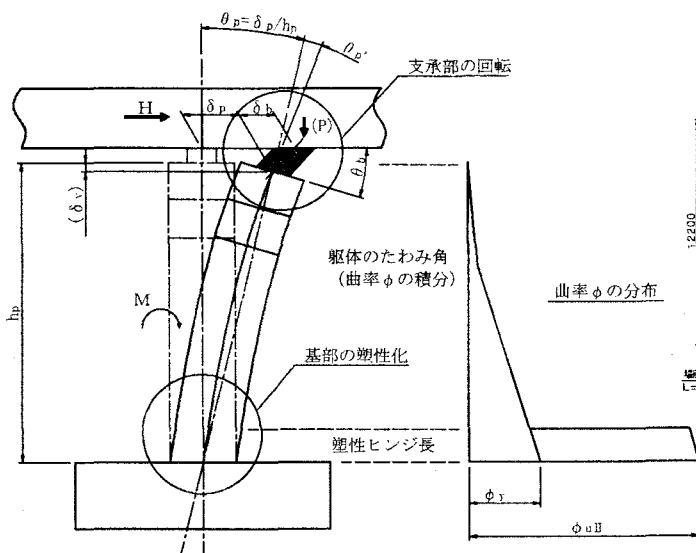


図-1 橋脚の塑性化に伴う支承部の回転変形

表-1 簡易計算（式(2)）による回転角（ θ_b [rad]）

		橋脚天端での変位量 δ_p (m)			
		0.100	0.200	0.300	0.400
橋脚高 h_p (m)	10	1/100	1/50	1/33	1/25
	15	1/150	1/75	1/50	1/37
	20	1/200	1/100	1/66	1/50
	25	1/250	1/125	1/83	1/62

橋脚躯体のたわみ回転角が累積されて（ θ_p' ）， θ_b が決定される．そのため，精緻な計算では，橋脚の曲率分布を高さ方向に積分することにより θ_p ， θ_p' を求め，式(1)により， θ_b を求める必要がある．

$$\theta_b = \theta_p + \theta_p' \quad (1)$$

なお，図-1のような変形状態を考えた場合には，支承部の回転変形以外にも，橋脚天端高さには δ_v の高低差が生じることになるため，支承が負担する上部構造反力に変動が生じる可能性も考えられるが，本検討では，簡略化のため，純粋に回転変形による影響のみに着目することとしている．

(2) 支承部に生じる回転変形量

すべり支承の回転性能を検証するために，以下の試算により想定する回転角の設定を行った．

まず，橋脚の回転角（＝支承部の回転角）は，

$$\theta_b \approx \theta_p \approx \frac{\delta_p}{h_p} \quad (2)$$

により近似できると考え，表-1に示すように橋脚高さ h_p を10m～25m，橋脚天端での水平変位 δ_p を10～40cmと広範囲に仮定し，回転角 θ_p （＝ θ_b ）の試

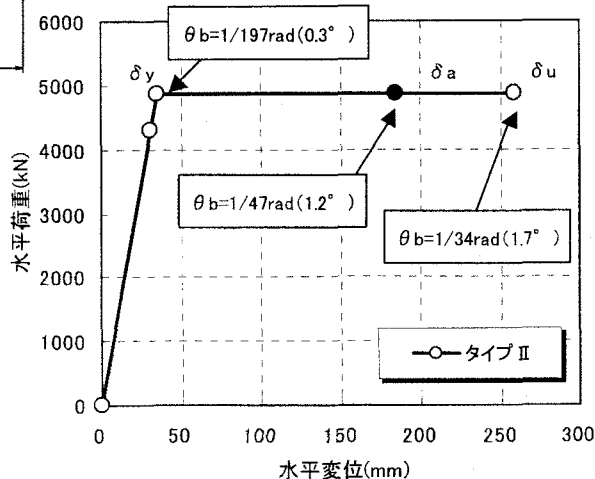
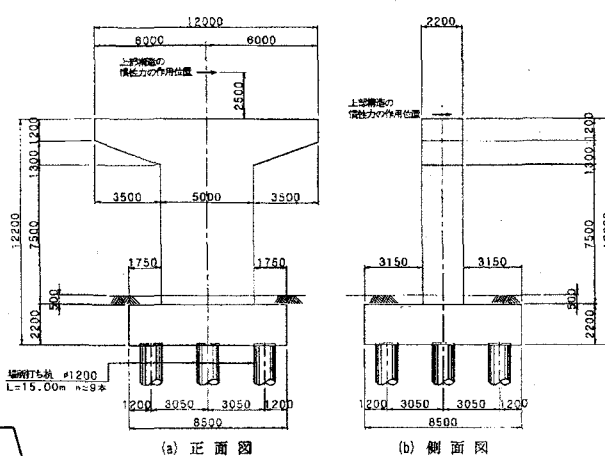


図-2 橋脚モデルにおける回転角 θ_b の試算結果

算を行った．

次に，詳細な検討を行うために，一般的な都市内高架橋を想定した橋梁モデルとして，文献9)を参考に，図-2のような橋脚形状におけるP- δ 関係を求め，終局時 δ_u ，降伏時 δ_y ，設計上の許容変形時 δ_a に対する回転角を，塑性ヒンジ長より上部側のたわみ角 θ_p' を考慮して試算を実施した．その結果，支承部の最大回転角は1/25rad程度であり，この他は，前述したRC橋脚の載荷実験で計測されている値（1/20～1/12rad）よりも小さな回転角であることが分かる．

以上のことから，本文では，便宜的に5°（=1/11rad）の回転角までを想定して性能評価を行うこととした．この条件を満足できれば，多くの一般的な橋梁では十分に要求性能を満たすことができると考えられる．

3. すべり支承の回転追従性能

(1) 実験供試体

供試体は，「すべり系支承を用いた地震力遮断機

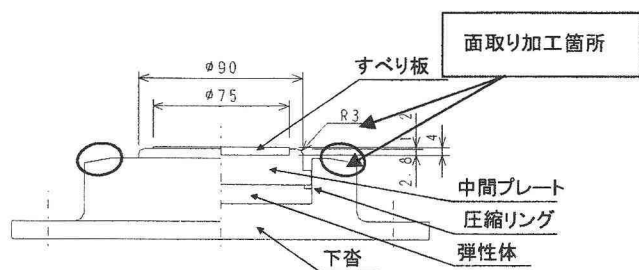


図-3 供試体図面

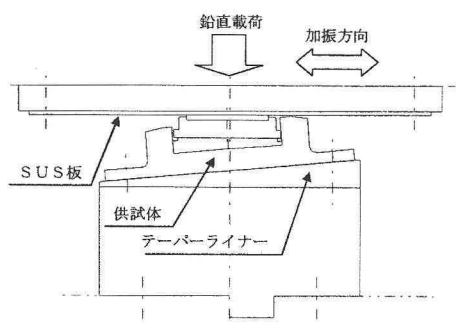


図-4 試験概要図

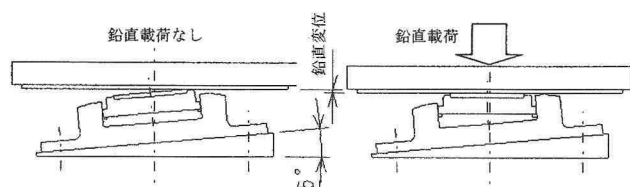


図-5 鉛直変位測定概要

構を有する橋梁の免震設計法の開発」の共同研究²⁾で提案されている何種類かのすべり支承のうち密閉された弾性体(ゴム)で回転機能を受け持つ支承板支承を用いた。本支承の基本構造を図-3に示す。水平移動は上沓とすべり板間とのすべりで、回転機能は密閉された弾性体の圧縮変形で行うものである。供試体の諸元は、すべり板にφ75mmの充填剤入りPTFE、すべり板の相手面はSUS316の鏡面仕上げとした。また、支承が5°回転したときの各部材の干渉をさけるため、下沓の上面に面取り加工を施した。

(2) 試験方法

回転追随性能と面圧の関係を把握するため、供試体下面に、テーパライナーを設置することにより、5°の角度をつけて鉛直および水平方向に加振可能な二軸荷重試験機により試験を実施した。(図-4)。

鉛直荷重の荷重は88kN(面圧20N/mm²:死荷重相当)に設定したが、その間、22kN(面圧5N/mm²)、44kN(面圧10N/mm²)の2ケースにおいて、すべり



写真-1 載荷前

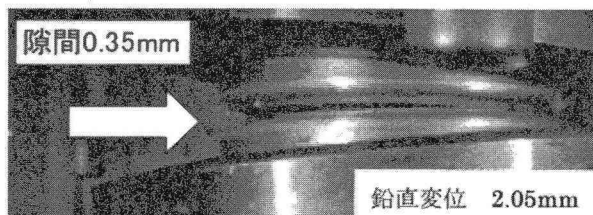


写真-2 面圧5N/mm²載荷時



写真-3 面圧10N/mm²載荷時

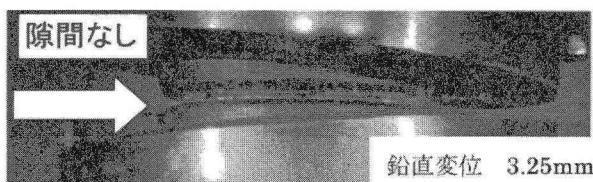


写真-4 面圧20N/mm²載荷時

板(PTFE)とその相手面(SUS)の接触状況に関する写真撮影を行い、隙間が存在している場合には、すきみゲージで計測を行うこととした(図-5)

(3) 回転追随性能の検証

各鉛直荷重でのすべり板と相手面(SUS板)間の状況、隙間及び鉛直変位の計測結果を写真-1~4に示す。写真は、すべり板の相手面が鏡面仕上げのため、SUS面に下沓側の中間プレートなどが写っているが、矢印で示す部分が接触面となる。接触面の隙間は、面圧を上げるに従い狭くなり、面圧20N/mm²時には、隙間は完全に無くなった。

ここで、弾性体の体積を一定として中間プレートが弾性体上面の中心で回転すると考えた場合、計算上の鉛直変位は3.22mmとなる。この計算値と鉛直変位の実測値とを比較をすると、面圧5N/mm²、10N/mm²では、中間プレートと弾性体の間や、すべり面と相手面との間に変位の差分の隙間が存在していると考えられるものの、面圧20N/mm²において

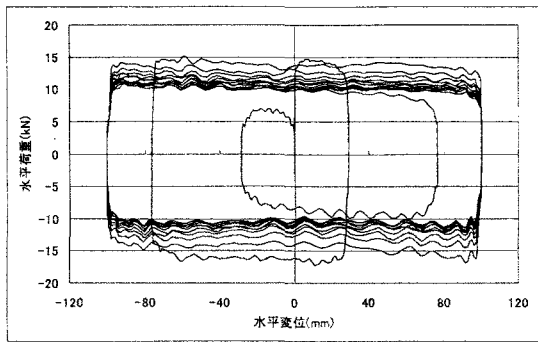


図-6 支承設置角度0° 履歴曲線図

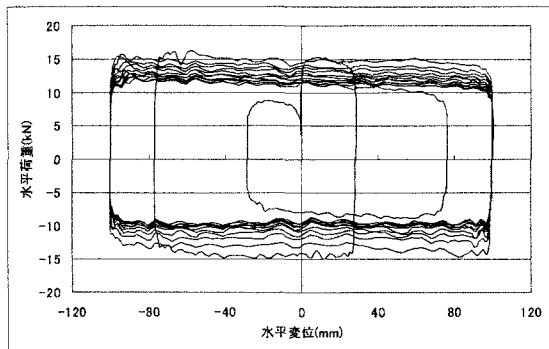


図-7 支承設置角度5° 履歴曲線図

は、弾性体上面のほぼ中心で回転しているものと思われる。よって、面圧が 20N/mm^2 程度载荷されている状態であれば、各部の隙間は無くなり、中間プレートが 5° の角度にも追従するものと考えられ、このことから、橋梁用支承の場合、常に死荷重相当が载荷されていることをふまえると、実際の回転挙動時には支承部の追従性能不足に伴う肌すき等は発生せず、良好な回転追従性能を有しているもの判断できる。

4. すべり支承の回転変形時の摩擦特性

(1) 実験供試体

前項と同様な仕様で計測を実施することとし、詳細諸元についても、すべり板には $\phi 75\text{mm}$ の充填剤入り PTFE、すべり板の相手面には SUS316 の鏡面仕上げを採用した同一供試体とした。

(2) 試験方法

1) 各速度における角度依存性試験

大地震時に橋脚が塑性化した時の支承部の挙動を要素試験で再現することは非常に困難である為、ここでは、支承設置角度を 5° 、 3° 、 1° 、 0° の4ケースで任意に設定し、各角度における回転追従性能の検証、およびすべり摩擦特性の計測等を行うこと

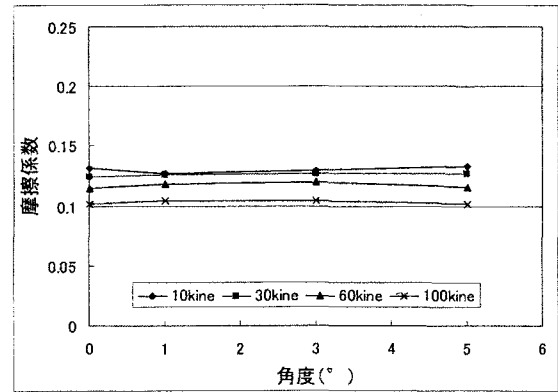


図-8 各速度における角度と摩擦係数の関係

とした。具体的には図-5のように、供試体下面にテーパーライナーを設置することにより、各角度設定をし、二軸载荷試験機により水平加振を行った。鉛直载荷は 88kN (面圧 20N/mm^2 : 死荷重相当)、水平加振波形は正弦波とし、最大速度換算で、10kine、30kine、60kine、100kineの4ケースを設定し、振幅 $\pm 100\text{mm}$ で11回加振を行い、その際の水平荷重を測定した。摩擦係数の算出にあたっては、2波目～11波目の10波形における y 切片荷重の平均値として評価することとした。また、すべり板の損傷の確認の為に、各試験前・後にすべり板の突出量の測定を行った。

2) 各面圧における角度依存性試験

1) と同様に、供試体下面にテーパーライナーを設置することにより、すべり面間に角度をつけて二軸载荷試験機を用いた計測を行った。速度は、60kineとし、支承設置角度は、 0° と 5° の2ケースとした。载荷荷重は、面圧で 5N/mm^2 (鉛直荷重 22kN)、 10N/mm^2 (鉛直荷重 44kN)、 20N/mm^2 死荷重相当 (鉛直荷重 88kN) の3ケースとし、加振波形は、正弦波とした。各面圧での加振は、振幅 $\pm 100\text{mm}$ で11回加振を行い、そのときの水平荷重を測定して摩擦係数を算出した。

(3) すべり摩擦特性の検証

1) 各速度における角度と摩擦係数の関係

支承設置角度 0° での履歴曲線図を図-6に、支承設置角度 5° での履歴曲線図を図-7に示す。また、本供試体の各速度における角度と摩擦係数の関係を図-8に示す。

この結果、各速度において、支承設置角度の変化による摩擦係数の変化は見られなかった。よって、すべり板を傾斜させた場合、偏圧によりすべり板の高面圧となる箇所は摩擦係数が小さくなり、低面圧

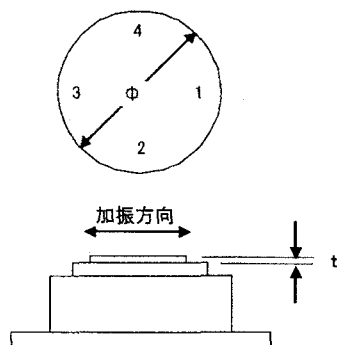


図-9 すべり板の突出量測定位置

表-2 各試験前・後のすべり板の突出量測定結果

		単位(mm)				
角度	計測位置	試験前	10kine後	30kine後	60kine後	100kine後
0°	1	1.4	—	—	—	1.4
	2	1.35	—	—	—	1.35
	3	1.5	—	—	—	1.45
	4	1.6	—	—	—	1.55
1°	1	—	1.35	1.35	1.35	1.35
	2	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	3	—	1.4	1.4	1.4	1.4
	4	—	1.5	1.5	1.5	1.5
3°	1	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	2	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	3	—	1.4	1.4	1.4	1.4
	4	—	1.5	1.5	1.5	1.5
5°	1	—	1.3	1.3	1.3	1.25
	2	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	3	—	1.4	1.4	1.4	1.4
	4	—	1.5	1.5	1.5	1.5

となる箇所は摩擦係数が大きくなるものの、すべり板全体の摩擦係数で考えると支承設置角度0°の値と同等となるものと考えられる。

本試験前・後のすべり板の突出量測定結果を図-9、表-2に示す。試験前・後のすべり板の突出量についても、大きな変化は認められず、また、供試体全体を見ても損傷はなかった。

2) 各面圧における角度と摩擦係数の関係

本供試体の各面圧における角度と摩擦係数の関係を図-10に示す。各面圧とも支承設置角度の変化による摩擦係数の変化は見られなかった。よって、中間プレートが追従しない状態ですべり板に偏圧がかかる場合においても、1)の結果と同様に、支承設置角度0°の値と同等となるものと考えられる。

(4) 安定性評価

本研究で得られた摩擦特性について検証を行うために、式(3)、(4)に示す摩擦特性評価式¹⁰⁾を用いることとした。この評価式では、トライボロジー理論により摩擦力の主たる発生要因は材料の真実接触面積の結合（凝着）部をせん断するために必要な力であると考え、すべり材料の接触機構をモデル化している。また、PTFE中に充填される繊維補強材（ファ

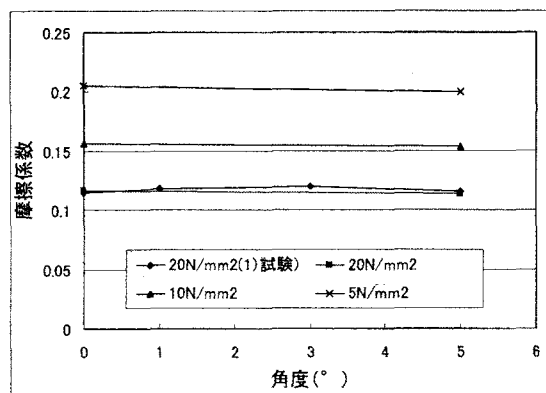


図-10 各面圧における角度と摩擦係数の関係

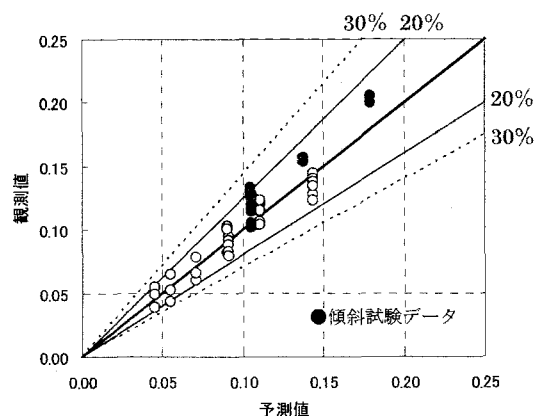


図-11 回転の有無による比較
(評価式による推定精度)

イバー材)の影響を考慮したパラメーター設定等が可能となっている。

$$\mu(\sigma) = \alpha \{ S_p (1 - V_f) + S_f V_f \} \times \pi K^{\frac{2}{3}} \sigma^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\mu(\sigma, v) = \mu(\sigma) (1 - e^{-av}) + \mu_0(\sigma) e^{-av} \quad (4)$$

ここで、 μ ：摩擦係数、 σ ：面圧、 v ：速度、 S_p, S_f ：PTFE および充填材のせん断強度、 V_f ：充填材の配合比率、 K ：材料のヤング率・ポアソン比から求まる定数、 α ：材料の表面性状を表す係数、 a ：速度依存性を定める係数、 μ_0 ：緩速特性としての摩擦係数である。

この評価式の各定数の設定を、今回、試験を行った供試体と同一の材料の組み合わせで計測を実施している既往のデータ（全36点）をもとに、回帰分析²⁾により同定を行った。この結果、得られた摩擦特性評価式は下式のようにになる。

$$\mu(\sigma, v) = 0.332 \sigma^{-0.384} (1 - e^{-0.475v}) + 0.147 \sigma^{-0.384} e^{-0.475v} \quad (5)$$

今回計測を行った傾斜を有するケースでの試験結果を含めた全試験データと式(5)の評価式による予測値との比較を図-11に示す。この結果、全データの

分布傾向と傾斜を有するケースの試験データとでは有意な差は認められず、材料の製造上、試験の計測上で十分に起こりえるばらつきの範囲内にあるものと判断できる。したがって、橋脚が塑性し支承に回転が生じた状態における摩擦特性は、回転が生じていない状態の特性と同等であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、すべり支承の回転性能に着目して、最大 5° の傾斜を与えた状態に対する回転追従性およびすべり摩擦特性の変化等について検討を行った。その結果、得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 本供試体の場合、すべり板の面圧が 20N/mm² 程度（死荷重相当）であれば、密閉ゴムによる回転機構により 5° の角度まで追従可能であることが確認された。
- (2) 支承部に最大 5° の回転が生じている状態においても、そのときの摩擦特性は回転変位を考慮しない場合の値とほぼ等しい結果が得られ、非常に安定した特性を有していることが確認された。また、この安定性は、載荷速度および載荷面圧が変化しても影響を受けないことが分かった。
- (3) 傾斜を有するケースにおけるすべり試験前後において、すべり板が大きく摩耗することはない、また、供試体全体としても損傷は認められなかった。このことにより、本研究で大地震に橋脚が塑性化した場合の回転角を考慮したすべり支承の特性評価に用いた本支承では、地震時において十分な回転性能を有していると考えられる。

6. 謝辞：本研究を行うにあたって、官民共同研究「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に関する共同研究」の委員の方々から多大なるご協力・ご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002.
- 2) (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)，オイルレス工業(株)，川口金属工業(株)，三協オイルレス工業(株)，日本鑄造(株)，(株)ピーピーエム：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
- 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，pp.233-244，2000.7
- 4) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 5) 原田孝志，牛島昭夫，鶴野禎史，平石敏明：密閉ゴム支承板支承の耐久性に関する研究（2），土木学会第59回年次学術講演会，I-514，pp.1025-1026，2004.9.
- 6) 庄司学，川島一彦，斎藤淳：免震支承とRC橋脚がともに塑性化する場合の免震橋の耐震性に関する実験的検討，土木学会論文集，No.682，I-56，pp.81-100，2001.7
- 7) 三山剛史：積層ゴムの上下面に回転角を与えた場合の力学性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.556，pp.43-50，2002.6
- 8) 姫野岳彦，運上茂樹：橋脚の塑性化によって生じるゴム支承の回転変形に関する一考察，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.407-410，2003.1
- 9) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1998.3
- 10) 姫野岳彦，運上茂樹：支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討，土木学会地震工学論文集，Vol.27，No.145，CD-ROM，2003.1