

大型橋梁耐震実験における滑り支承の動摩擦係数測定と その特性

高橋 良和¹・植田 健介²・右近 大道³

¹正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

²独立行政法人土木研究所 交流研究員（〒305-0031 茨城県つくば市南原1-6）

株式会社ビービーエム 技術本部（〒104-0033 東京都中央区新川2-13-9）

³正会員 独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震研究センター
（〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21）

1. はじめに

E-ディフェンスにおいて実施された実大サイズの鉄筋コンクリート橋脚模型に対する大型橋梁耐震実験では、模型橋脚に慣性力を集中させるために端部橋脚上に、橋軸方向には可動で、橋軸直角方向には固定となる支承が採用されている。2007年度に行われた1970年代に建設された主鉄筋段落としのない柱基部曲げ破壊タイプの橋脚模型の実験（C1-1実験）では、この可動支承に作用する荷重を測定していなかったが、その後の解析により、この可動支承の摩擦係数の大きさが模型橋脚の再現解析に大きな影響を与えることが明らかとなった。2008年度の実験では、三分力計を設置して可動支承に作用する力が測定されたが、可動支承の基本特性を確認す

るために動摩擦係数測定実験が行われた。

ここでは、今後の模型橋脚の解析に可動支承の摩擦の影響を考慮できるよう実施された動摩擦係数測定実験および大型橋梁耐震実験結果の一部を紹介すると共に、結果に見られる特性に対する考察を示すことを目的とする。

2. 支承構造

可動支承の組立立体図を図-1に構造断面図を図-2に示す。下沓に円形のすべりゴム支承（以後荷重支持板）の固定も兼ねた上揚力止めが、シンボウにより鉛直軸回りには拘束しない形で取付けられ、シンボウの上に荷重支持板が載せられている。荷重支持板の外側には上揚力止めとの隙間を埋める形で

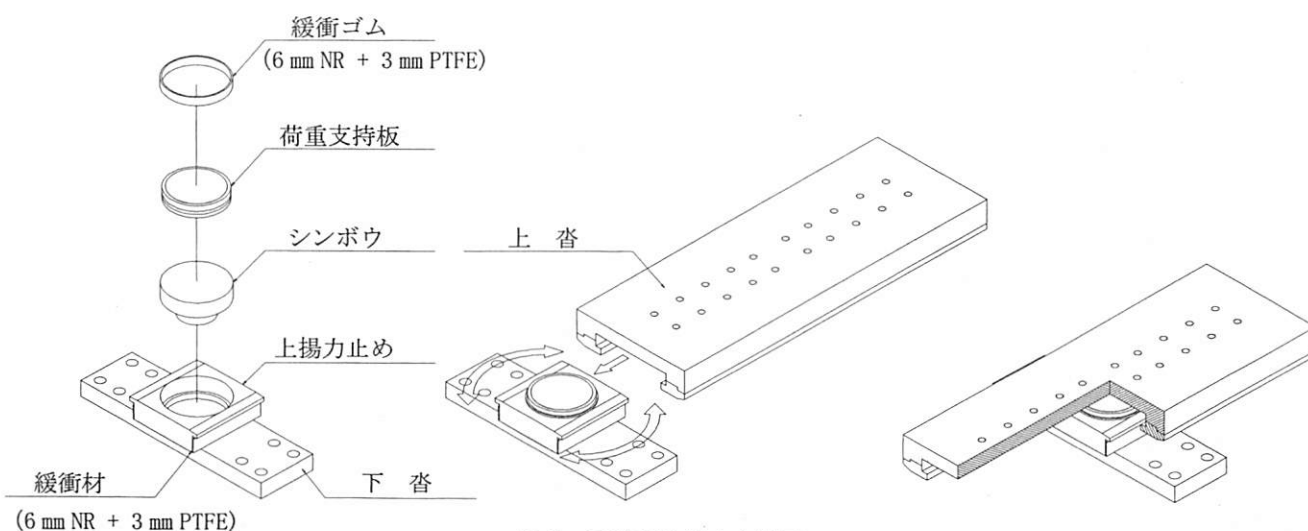


図-1 可動支承組立立体図

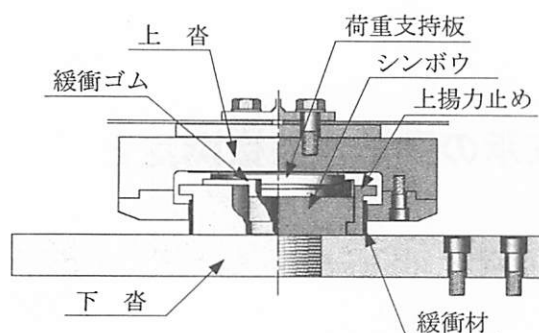


図-2 構造断面図

6 mm の天然ゴムと 3 mm の PTFE 板を貼り合わせた緩衝ゴムが被せられ、この状態で接触面にステンレス板の貼られた上沓が荷重支持板の上に上揚力止めを抱き込むような形で設置される。

支承機能としては、橋軸方向には荷重支持板上面の PTFE 板と上沓下面のステンレス板との間で滑動し可動、橋軸直角方向には上揚力止め側面と上沓フック部が接触することで固定となる。接触部には上揚力止めの側面に 6 mm の天然ゴムと 3 mm の PTFE 板を貼り合わせたものが、PTFE 板を接触側となるように貼り付けてある。鉛直軸回りについては上揚力止めがシンボウを軸に回転することで拘束しないような構造となっている。

3. 動摩擦係数測定実験

(1) 実験方法

実験は鉛直荷重 10000 kN、水平荷重 400 kN (動的) の 2 軸試験機を使用して行った。試験体は可動支承の装置としての動的特性を確認するため、荷重支持板単体ではなく上沓から下沓まで含む可動支承全体を試験機に設置し、上沓を固定して鉛直荷重を載荷した状態で下沓側を橋軸方向に加振した。大型橋梁耐震実験で用いる 2 体について、それぞれ以下の実験条件で実験を行った。

(2) 実験条件

実験は各種依存性を確認するために変位実験、面圧実験、速度実験および既存データとの比較のため

表-1 実験条件

実験名	面圧 (N/mm ²)	鉛直荷重 (kN)	水平振幅 ± (mm)	加振 振動数 (Hz)	最大速度 (cm/sec)
変位実験 (D)	6.3	450	24	0.625	9.42
			120	0.125	
			240	0.0625	
面圧実験 (P)	6.3	450	100	0.15	9.42
	7.2	515			
	8.1	580			
	20	1414			
速度実験 (V)	6.3	450	100	0.15	9.42
				0.75	47.10
				1	62.80
				1.5	94.20
その他実験 (O)	12	848	100	0.15	9.42
				0.5	31.40

のその他実験を行った。水平加振波形は正弦波の 11 波である。表-1 に実験条件を記す。

a) 変位実験

変位実験は、鉛直荷重と加振最大速度を変化させずに 9.42 cm/s とし、振幅を変化させて行った。ここで載荷される鉛直荷重は、C1-1 実験における鉛直荷重で、これを基本として速度実験の際にも使用している。また、最大変位 240 mm は C1-1 実験の応答変位と試験機の性能から定めた。

b) 面圧実験

面圧実験は、加振最大速度を 9.42 cm/s として変化させずに、鉛直荷重を C1-1 実験の鉛直荷重である 450 kN、また、C1-1 実験以降で想定されている最大荷重の 580 kN と、それ以外に面圧を 7.2 N/mm²、20 N/mm² とした場合で行った。

c) 速度実験

速度実験は、基本荷重を載荷した状態で加振最大速度を変化させて行った。加振最大速度の 94.2 cm/s は、C1-1 実験の応答速度と試験機の性能から定めた。

d) その他実験

荷重支持板の既存データと比較するために、実験条件を合わせたその他実験を行った。

(3) 実験結果

実験結果より、各実験条件における No. 2 試験体の荷重-変位関係を図-3～図-6 に示す。また結果のまとめを表-2 に、また摩擦係数について整理したものを図-7～図-9 に示す。図-7 および図-8 には、京都大学防災研究所における振動台実験¹⁾と、独立

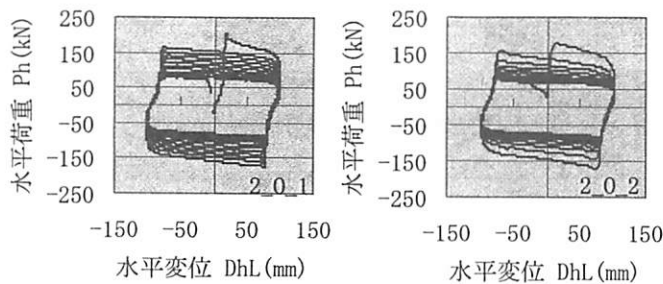


図-3 その他実験 (左から 0.15, 0.5 Hz)

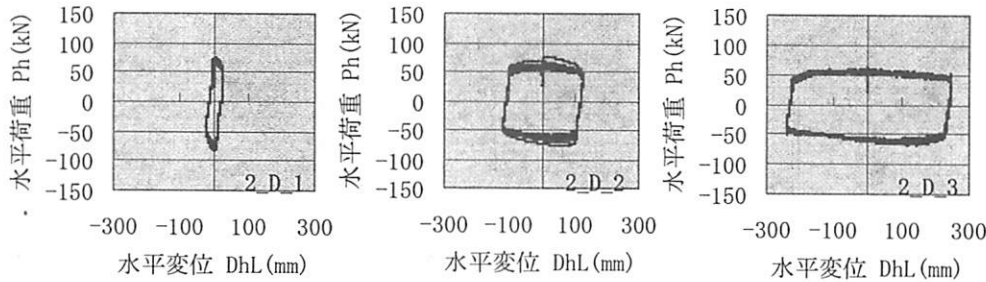


図-4 変位実験 (左から片振幅 25, 120, 240 mm)

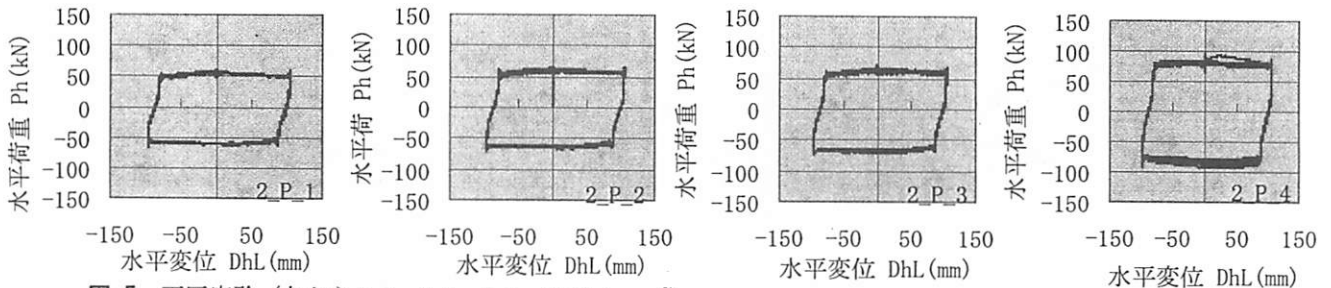


図-5 面圧実験 (左から 6.3, 7.2, 8.1, 20 N/mm²)

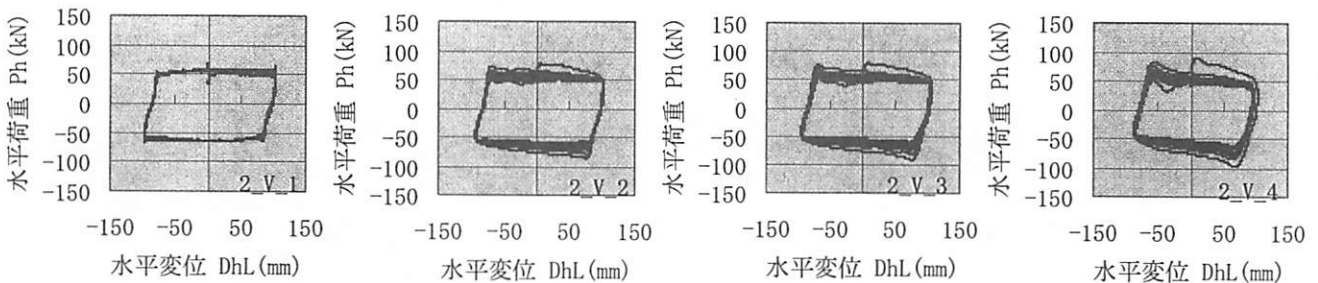


図-6 速度実験 (左から 0.15, 0.75, 1.0, 1.5 Hz)

行政法人土木研究所における共同研究²⁾による摩擦係数の面圧・速度に関する依存性を考慮した評価式を用いて算出したグラフも記載した。

a) 変位実験

図-7を見ると変位実験では、振幅が大きくなるに従い摩擦係数が小さくなる傾向が確認できる。この傾向は独立行政法人土木研究所における共同研究の報告書³⁾でも確認されており、報告によると変位による依存性 (報告書では摺動距離依存性) は、加振速度にも関係するとなっている。これは滑り面に発生する熱による影響が関係していると思われる。

b) 面圧実験

面圧依存性については、図-8を見るとわかるように、既往の研究と同様、面圧が高くなると摩擦係数が小さくなるという結果となった。ただし、摩擦係数が二つの評価式よりも4割から5割程度小さい値となっている。実験で鉛直荷重は、加圧ボックスを介して試験体に載荷され、この加圧ボックスは試験機の4本の柱に設置されたガイドレールに沿って上下する構造となっている。実験の際、加圧ボックスがガイドレールとの遊間内で振り子のような動きをしたために滑り面に角度を与える形になった。図-10に2体目面圧実験の面圧20 N/mm²のときの鉛

表-2 実験結果

実験名	実験条件			実験結果			
	面圧 (N/mm ²)	水平振幅 ± (mm)	加振振動数 (Hz)	摩擦係数(平均)			
				1体目	(実験No.)	2体目	(実験No.)
変位実験 (D)	6.3	24	0.625	0.156	(1_D_1)	0.136	(2_D_1)
		120	0.125	0.126	(1_D_2)	0.127	(2_D_2)
		240	0.0625	0.111	(1_D_3)	0.119	(2_D_3)
面圧実験 (P)	6.3	100	0.15	0.111	(1_P_1)	0.128	(2_P_1)
	7.2			0.107	(1_P_2)	0.115	(2_P_2)
	8.1			0.103	(1_P_3)	0.114	(2_P_3)
	20			0.052	(1_P_4)	0.058	(2_P_4)
速度実験 (V)	6.3	100	0.15	0.114	(1_V_1)	0.126	(2_V_1)
			0.75	0.122	(1_V_2)	0.123	(2_V_2)
			1	0.119	(1_V_3)	0.114	(2_V_3)
			1.5	0.120	(1_V_4)	0.115	(2_V_4)
その他実験 (O)	12	100	0.15	0.133	(1_O_1)	0.120	(2_O_1)
			0.5	0.110	(1_O_2)	0.098	(2_O_2)

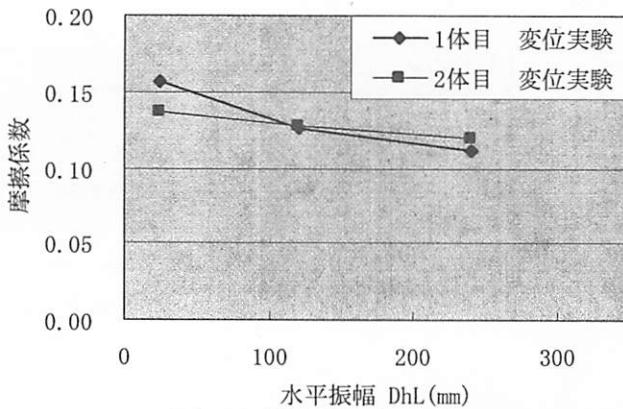


図-7 摩擦係数と水平振幅の関係

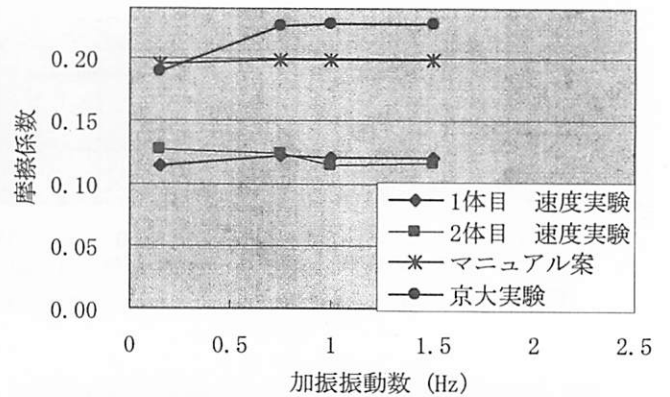


図-9 摩擦係数と加振振動数の関係

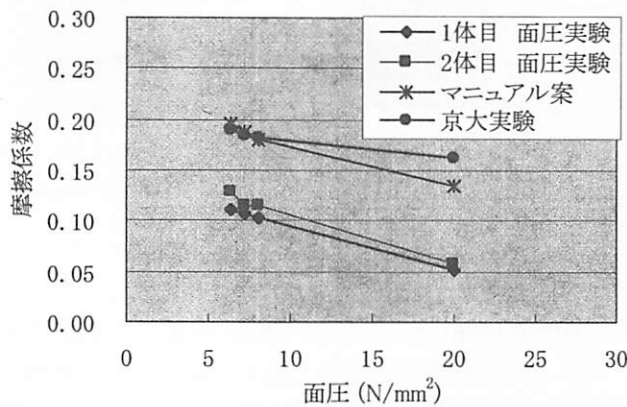


図-8 摩擦係数と面圧の関係

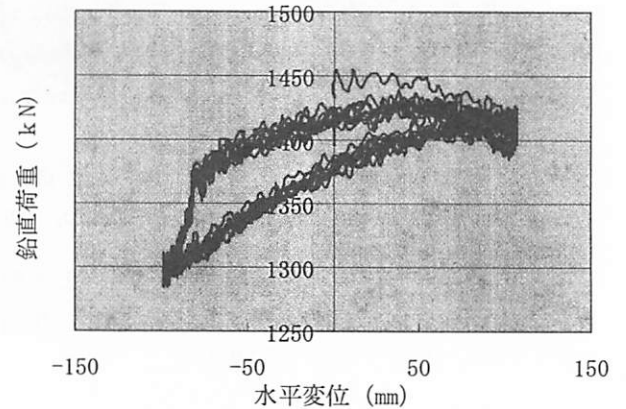


図-10 実験No. 2_P_4の鉛直荷重

直荷重の履歴を示す。滑り面の角度の影響が鉛直荷重の変動として現れていることが確認でき、特に水平変位正から負への向きの加振の際に大きく変動していることがわかる。この傾向は実験全体にわたって見られるが、摩擦係数の算出は2波目から11波目の水平変位ゼロ付近における摩擦係数の平均として

いるため、実験結果の摩擦係数が二つの評価式よりも小さくなったと考えられる。

c) 速度実験

速度に関する依存性については、E-ディフェンスにおける実地震波レベルの加振を対象に実験条件を設定していたこともあり、図-9にあるように実

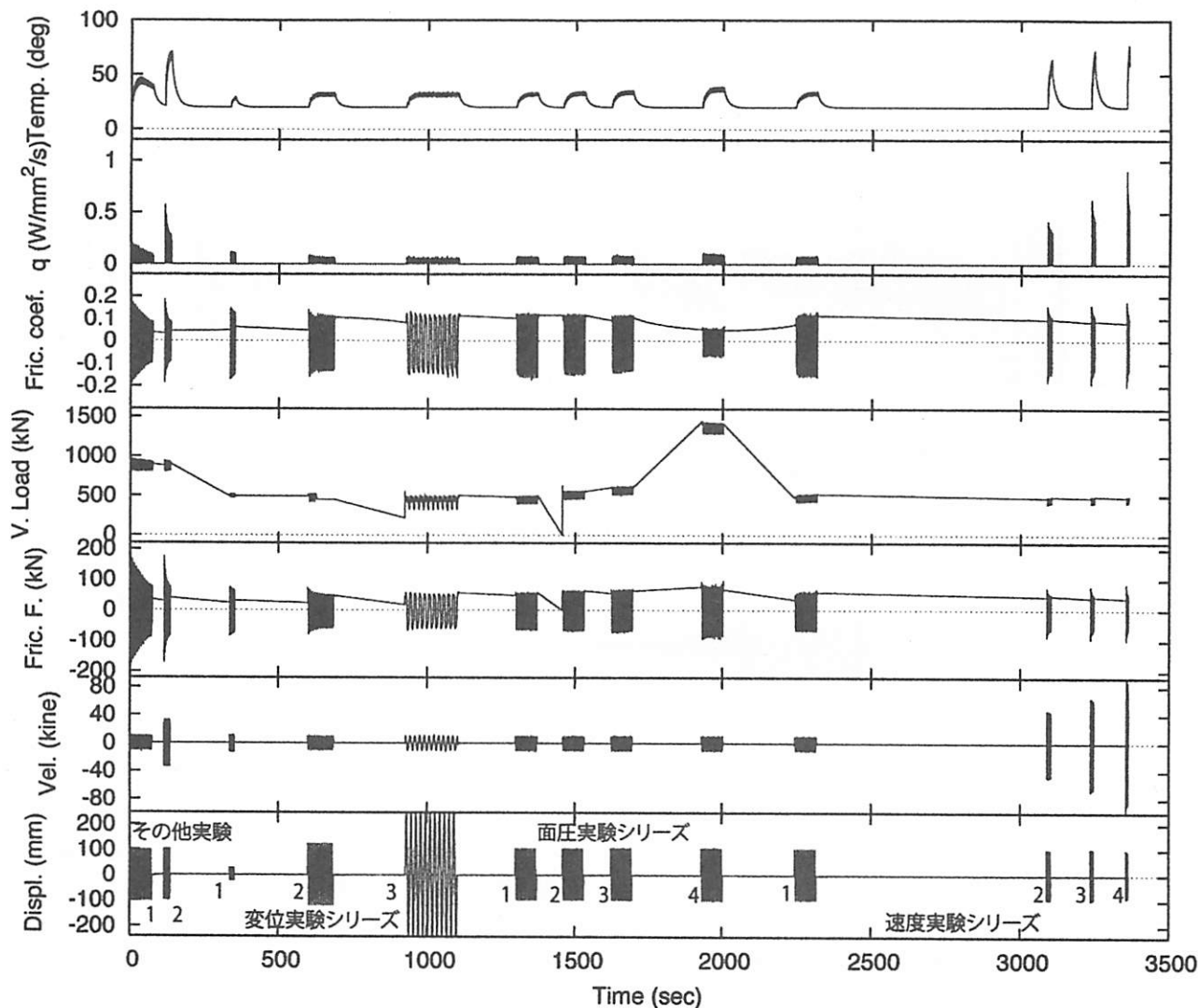


図-11 温度解析結果 (No. 2 試験体)

験条件内における摩擦係数の変動は殆どなかった。摩擦係数の値が小さいことは、前述と同様の原因と考えられる。

(4) 温度解析

図-3～6 の荷重-変位関係をみると、図-3 のその他実験や図-6 の速度実験においては振幅を繰り返すごとに荷重が低下し、その後安定するという履歴となっている。これは滑り面における熱の影響が考えられるため、温度解析によりその評価を試みた。No. 2 試験体について、各実験条件の開始時間が記録されている。一連の実験を载荷順に並べたものを図-11 下部に示す。

荷重-変位履歴より単位時間・単位面積当たりに摩擦面に入力される熱量 (flux) q ($\text{W}/\text{mm}^2/\text{s}$) を算出する (図-11 上から 2 番目)。これより、その他実験シリーズ、速度実験シリーズが、他の実験条件に比べて支承滑り面に導入される熱量が大きいことがわかる。また载荷直後に熱量が最大になった後、

徐々に減少していることが確認できる。この熱量を用い、支承の諸元、材料特性を参考に载荷面の温度を計算する⁴⁾と、図-11 上のようなになる。本解析では、放熱する位置の設定で温度の絶対値は変化するものの、熱量が小さいケースでは温度は振動直後に定常状態に達するのに対し、熱量が大きなケースでは加振中に温度が一気に上昇していることが分かる。また振動終了後、温度は減少し、この解析の例では次の加振時までには雰囲気温度まで低下している。摩擦係数の減少傾向と温度を比較した場合、定常状態にある時刻では摩擦係数はほぼ一定であるのに対し、急激に温度が上昇している時刻では摩擦係数は大きく減少している。

摩擦係数の速度依存について、摩擦面の温度別に記号を分けたものを図-12 に示す。温度が高くなるにつれて全体的に摩擦係数が小さくなっており、温度上昇により接触部のせん断強度が低下し、摩擦係数が小さくなる傾向を読み取ることができる。ただし、文献 4 において実施したほど温度による差が明

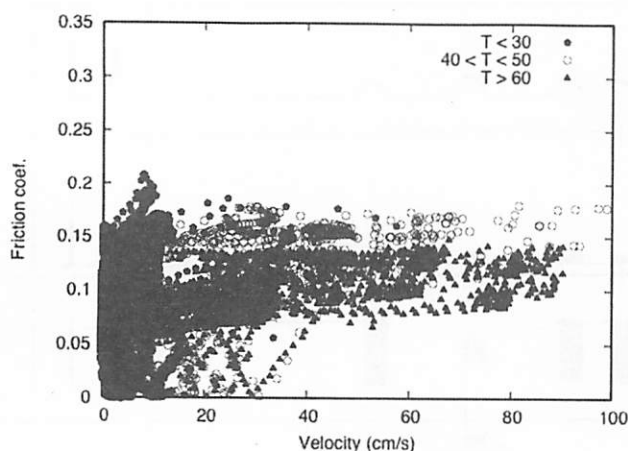


図-12 摩擦係数の速度依存性

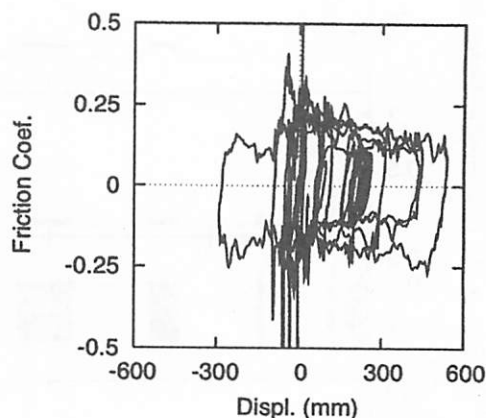


図-13 E-ディフェンス実験における履歴

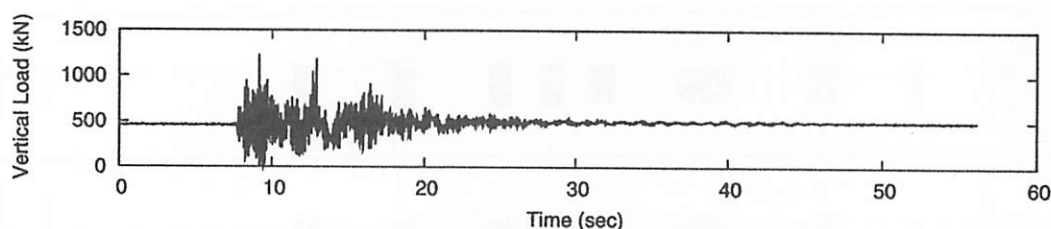


図-14 鉛直荷重時刻歴

確ではなく、さらなる検討が必要である。

4. E-ディフェンス実験における挙動

E-ディフェンスにおける橋梁耐震実験では、滑り支承の下に8つの三分力計が設置され、さらに端部橋脚上で桁との相対変位が計測されている。2008年10月2日の実験より、滑り支承の摩擦係数-変位関係を図-13に示す。支承履歴は動摩擦係数計測実験に比べて大きく変化するところがあるものの、これは鉛直荷重がゼロになる時刻(図-14)にあたることによるものであり、おおむね0.15～0.2程度の摩擦係数を有する剛塑性型履歴を示していることが確認できる。

5. まとめ

本論では、E-ディフェンスにおける実大レベルの橋梁模型を用いた震動台実験において用いられる滑り支承の動摩擦係数特性を取りまとめたものである。動摩擦係数計測実験では、摩擦係数が0.1～0.14程度であり、従来の検討結果より小さめの値となった。同支承をE-ディフェンス実験において用いた結果で

は、摩擦係数が0.15～0.2程度となり、動摩擦係数計測実験よりやや大きめの値となったが、履歴形状は安定した剛塑性型を示した。今後大きく速度や面圧が変化するE-ディフェンス実験結果を評価する必要性はあるものの、事後解析を実施する上で必要な情報を提供できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和: 各種依存性を考慮した滑り型免震支承の数値解析モデルに関する一考察, 応用力学論文集, Vol.8, pp.701-708, 2005.8
- 2) 独立行政法人土木研究所と民間8社による共同研究報告書: 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「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マニュアル(案)」, 共同研究報告書整理番号第351号, 2006.10
- 3) 独立行政法人土木研究所と民間8社による共同研究報告書: 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), 共同研究報告書整理番号第320号, 2005.7
- 4) 高橋良和, 長瀬浩明: 温度依存性に着目した摩擦支承モデルの一考察, 第11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, 2008.1.