

すべり摩擦支承の振動台実験に関する解析的検証

中谷 武弘^{*1} 廣瀬 彰則^{*2} 高橋 良和^{*3} 家村 浩和^{*4}

¹正会員 工修 中央復建コンサルタンツ株式会社 橋梁系グループ（〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4丁目11-10）

²正会員 博（工）中央復建コンサルタンツ株式会社 橋梁系グループ（同 上）

³正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

⁴正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科（同 上）

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、地震時反力分散型ゴム支承構造が一般化した。ゴム支承の肥大化が要因となり、現在道路橋では免震ゴム支承や機能分離型支承¹⁾が採用される事例が増加している。さらに、機能分離型支承構造の鉛直支持機能を有する支承のすべり摩擦による減衰効果に関する研究が活発化し、この効果を期待する設計事例が増加してきている。

しかしながら、すべり摩擦効果に対する構造の動的挙動ならびに動的照査手法は未だ確立されたとは言えず、設計段階においては施行錯誤的に動的解析を実施しながら設計しているのが実情である。

ここでは、すべり型免震支承モデルを対象として実施された振動台実験によって得られた動的挙動を検証し、逆解析することにより、すべり摩擦支承を有する橋梁に対して実施する動的解析照査における未解明な諸条件を考察する。

2. すべり摩擦支承を有する上部工模型を用いた振動台実験結果の分析

(1) 振動台実験の概要

本研究の基礎資料とした実験結果は、京都大学防災研究所の大規模強震応答実験装置（振動台実験）を用いて行われた実験により得られたものである。

本実験では、実橋を基に、重量、慣性力作用位置、支承形状を振動台の規模（5m×3m）に合わせてモデル化した図-1に示す上部工模型²⁾を用いている。この上部工模型の4隅にすべり摩擦支承が1基ずつ配置され、短辺方向に配置されたすべり支承間に1基のゴム支承が配置されている。なお、ゴム支承には鉛直力が作用しない構造となっており、鉛直力はすべり支承の4基で支持する構造となっている。

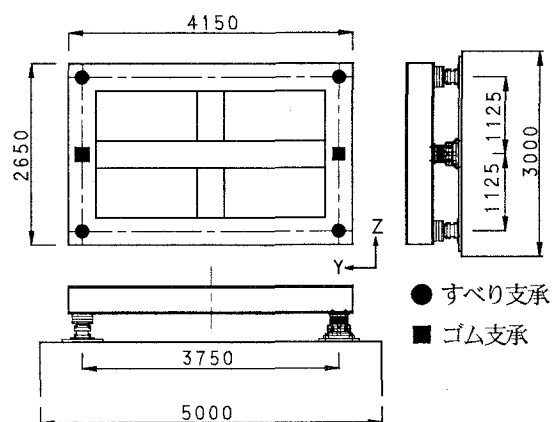


図-1 振動台実験に用いた上部工模型とゴム支承

表-1 実験モデルの諸元

モデルケース	case1	case2
実橋との相似率	10.69	10.69
実橋の固有周期	1.1s	3.0s
供試体架台重量	98kN	98kN
滑り材寸法 (PTFE)	φ50mm	φ50mm
ゴム支承	せん断弾性係数	1.2N/mm ²
	平面寸法	270mm×270mm
	総ゴム厚	40mm
	水平剛性設計値	1875kN/m/個
入力地震波	実験ケース	case1-I case1-II case2-I case2-II
	入力波形 (道示)	II-1-1 II-2-1 II-1-1 II-2-1
	振幅調整	80% 70% 95% 90%

また、実験は、同一の上部工模型を用いて、5種類のすべり摩擦支承と3種類のゴム支承との組み合わせにより9種類のモデルを対象としている。これらと12種類の入力波形³⁾を組み合わせると計81ケースの実験が行われているが、本解析では、支承の規模が極端に異なる2ケースを対象モデルに抽出した。解析に用いた実験モデルの諸元は表-1のとおりである。これら2ケースの対象モデル全体のすべり支承の摩擦抵抗とゴム支承の水平剛性を合計した剛性

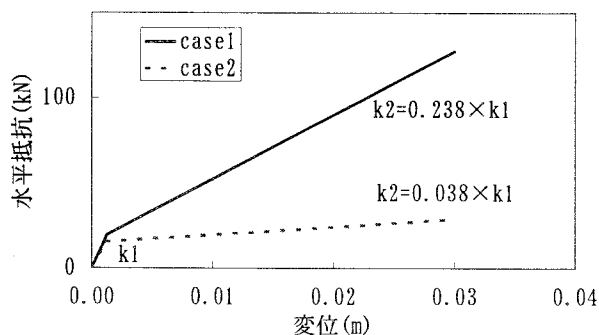


図-2 実験ケースの水平剛性

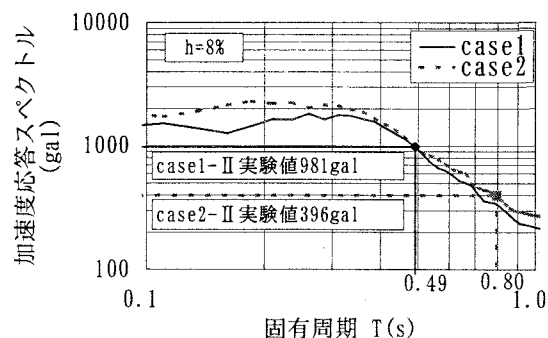
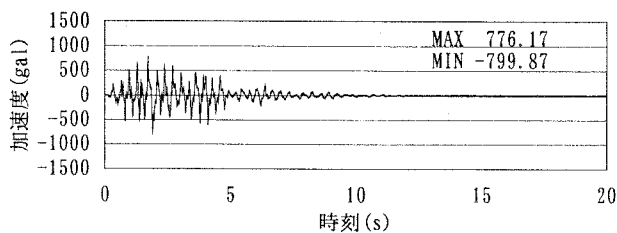
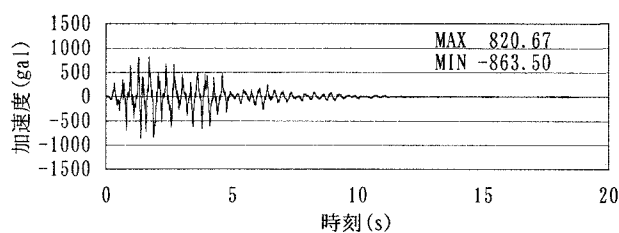


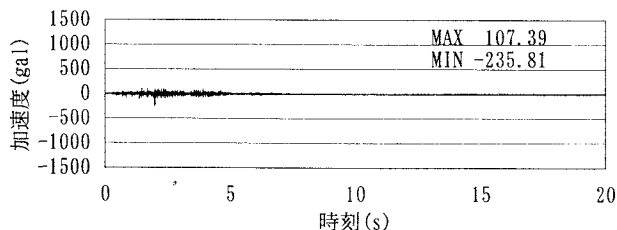
図-5 加速度応答スペクトル



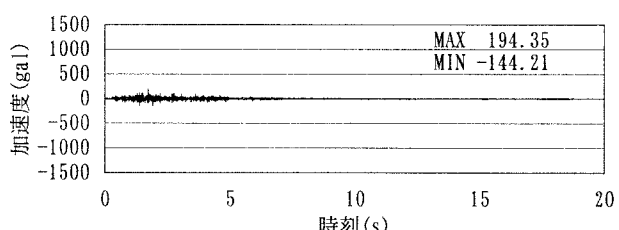
(a) 橋軸直角方向(Z方向)



(a) 橋軸直角方向(Z方向)



(b) 鉛直方向(Y方向)



(b) 鉛直方向(Y方向)

図-3 振動台加速度(case1-II)

図-4 振動台加速度(case2-II)

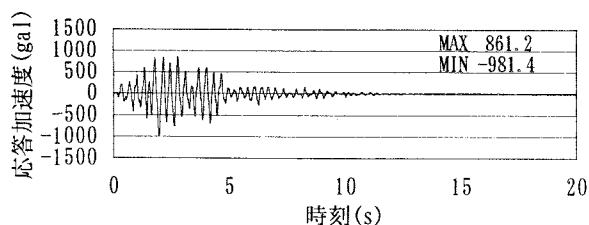


図-6 上部工模型の応答加速度(case1-II)

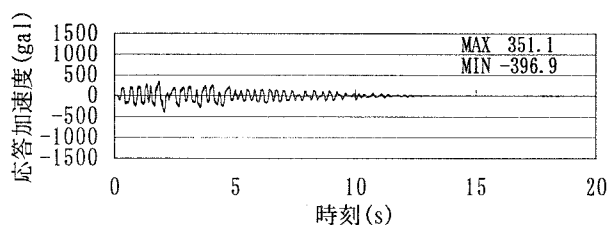


図-7 上部工模型の応答加速度(case2-II)

は図-2に示すとおりである。ここで、 k_1 はすべり支承の初期剛性とゴム支承の水平剛性を合計したものであり、 k_2 はゴム支承のみの水平剛性を示すが、case1はゴム支承の剛性がすべり支承の摩擦抵抗に比べて大きいケースであり、一方のcase2は、ゴム支承の剛性が小さいケースであることがわかる。

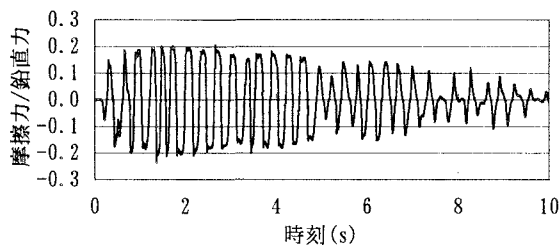
時刻歴応答解析による分析・評価は、これら2ケースに対して各々2種類の波形をZ方向に入力した実験結果を対象としており、I種地盤を想定したケースをcase1-I、case2-I、II種地盤を想定したケースをcase1-II、case2-IIとして表している。

(2) 実験結果の分析

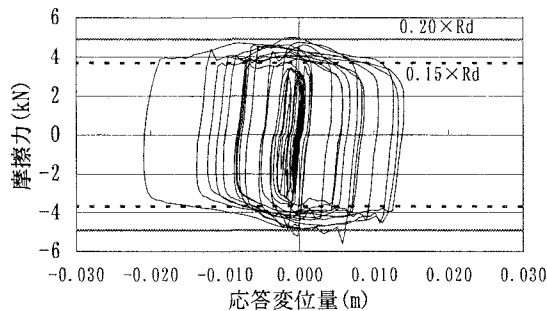
すべり摩擦支承の解析条件を設定する上で重要となる不確定要素としては、履歴特性、摩擦係数などが挙げられるが、解析で必要となるこれら諸条件を実験結果から分析した。

a) 履歴特性

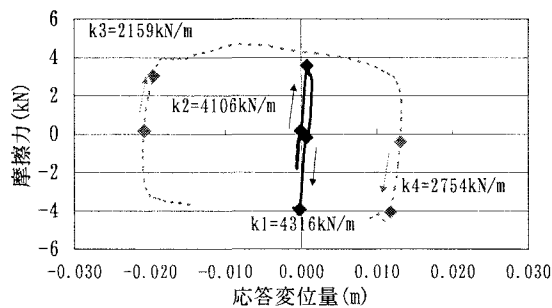
case1-II、case2-IIの実験において振動台で測定された時系列応答加速度を図-3、図-4に、水平方向の加速度応答スペクトルを図-5に示す。また、図-6にcase1-IIの上部工模型の応答加速度、図-7にcase2-IIの応答加速度を示す。ここで、case1の応答加速度は各ピークとも鋭角状を呈していることから、摩擦による影響が小さいことがわかる。また、case2は摩擦の影響により固有振動と考えられる振



(a) すべり支承の摩擦係数

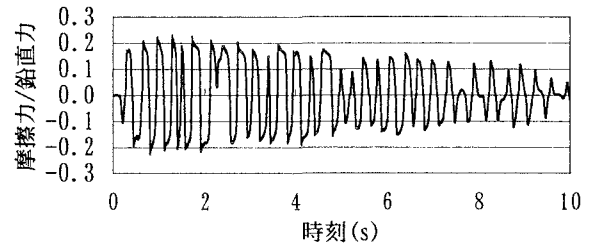


(b) すべり支承の水平抵抗

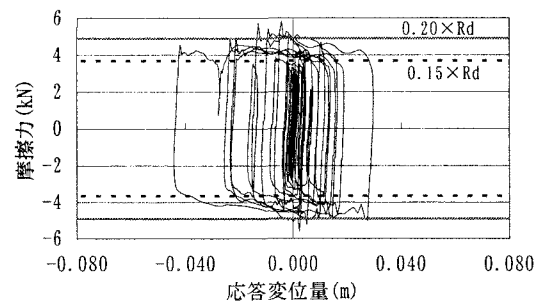


(c) すべり支承の初期剛性

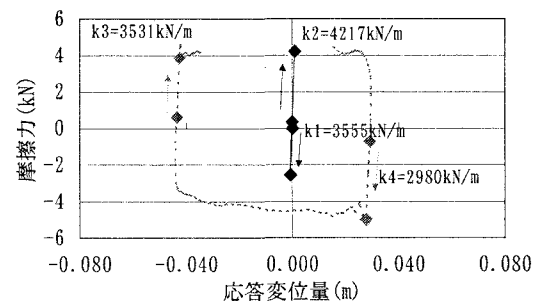
図-8 すべり支承の水平力～変位履歴図 (case1-II)



(a) すべり支承の摩擦係数



(b) すべり支承の水平抵抗



(c) すべり支承の初期剛性

図-9 すべり支承の水平力～変位履歴図 (case2-II)

動とは異なる挙動を示していることがわかる。

最大応答加速度は、case1-IIでは981gal、case2-IIでは396galであり、図-5に示す加速度応答スペクトルから推定すると、実験ケースの固有周期は、摩擦減衰の影響にもよるが、case1が0.5秒程度、case2が0.8秒程度となる。

図-8にcase1-II、図-9にcase2-IIの実験で測定されたすべり支承の摩擦力/鉛直力の時系列図、水平力と水平変位量の関係図を示す。摩擦力に関しては、死荷重反力(Rd)の15%～20%程度の範囲内を推移していることがわかるが、図-8(a)、図-9(a)に示すとおり、2ケースとも振動の初期段階では摩擦係数が0.2程度を推移しているものの、徐々に摩擦係数が減少していく状態がわかる。この現象は、速度による影響と考えられるが、正弦波加振による実験結果でも振幅の繰返しにより摩擦係数が減少する傾向を示しており、摩擦熱の影響も考えられる。

また、図-8(c)、図-9(c)から、2ケースともすべり支承の1次勾配については、初期変位発生時と最大変位発生時において大きな差はなく、概ね

3,000kN/m前後であることがわかる。

b) 摩擦係数の設定

摩擦係数については、すべり速度や面圧に対して依存性があることが確認されており、家村らの研究⁴⁾では式(1)を提案し、応答速度の増加に伴い摩擦係数は増加し一定値に収束すること、面圧の増加に伴い摩擦係数は減少することを確認している。

$$\mu = \frac{F}{PA} = s'(1 - e^{-nV}) \frac{1 - e^{-kP}}{P} + \alpha \quad (1)$$

ここで、 V はすべり速度、 P は面圧、 s' 、 n 、 k 、 α は材料パラメータである。

速度・面圧と摩擦係数の関係は、すべり支承の構造ごとに異なる特性を有することから⁵⁾、本実験モデルを対象として振動台実験で正弦波を水平加振した結果に基づき、最大摩擦力が概ね一致するように(1)式の材料パラメータを同定した。この結果、 s' に0.4934、 n に0.0740、 k に2.4332、 α に0.150を採用した。これにより得られた速度・面圧と摩擦係数の関係を図-10に示す。

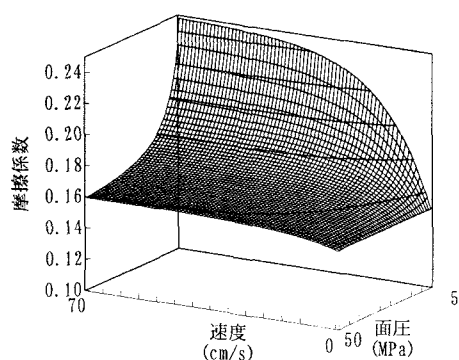


図-10 速度・面圧の依存性を考慮した摩擦係数

表-2 解析条件

積分法	Newmark β 法 ($\beta=1/4$)	
積分間隔	1/1000秒	
減衰マトリクス	剛性比例減衰 (すべり支承：無視)	
等価減衰定数	架台(形鋼)	0.02
	ゴム支承	0.08
	すべり支承	0

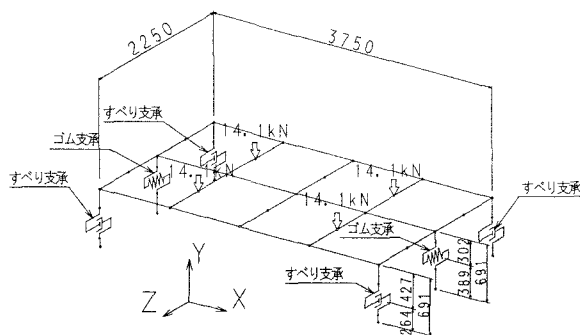


図-11 解析モデル

3. 実験結果を踏まえた逆解析による解析条件の検討

(1) 解析条件

時刻歴応答解析において設定した条件は表-2に示すとおりである。解析ソフトには、DYNA2E((株)CRCソリューションズ)を使用した。

a) 骨組みモデル

解析に用いた骨組みモデルは、面圧に依存する摩擦係数を取扱う検討への対応を踏まえて、上部工模型を可能な限り再現できるように、図-11に示す立体骨組みモデルを用いた。

b) 固有値解析と減衰

固有値解析の結果を表-3に、振動モード図を図-12に示す。本検討では立体骨組みモデルを用いて

表-3 固有値解析結果(case1:ゴム支承減衰8%)

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	有効質量比			減衰率
			X方向	Y方向	Z方向	
1	3.072	0.326	100.0%	0.0%	0.0%	0.080
2	3.074	0.325	0.0%	0.0%	100.0%	0.080
3	4.410	0.227	0.0%	0.0%	0.0%	0.080
4	18.781	0.053	0.0%	96.6%	0.0%	0.007
5	27.241	0.037	0.0%	0.0%	0.0%	0.012

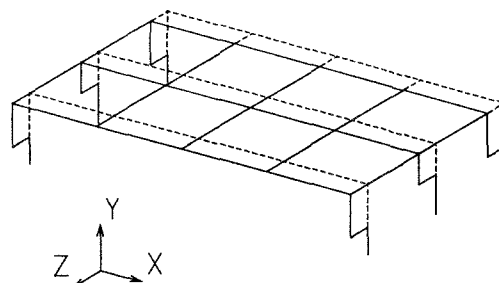


図-12 振動モード図(2次モード)

表-4 応答解析時におけるすべり支承に対する粘性減衰の有無による最大変位量への影響

		case1-II	case2-II
時刻歴応答解析時の すべり支承の減衰	考慮	13.8 mm	10.2 mm
	無視	24.4 mm	39.5 mm
実験値		20.9 mm	44.2 mm

表-5 固有値解析比較結果(2次モード)

		case1		case2	
		固有振動数	減衰率	固有振動数	減衰率
ゴム支承 減衰定数	2%	3.074 Hz	0.0200	1.099 Hz	0.0200
	4%		0.0400		0.0400
	6%		0.0600		0.0600
	8%		0.0800		0.0800
すべり支承 初期剛性	無視	3.074 Hz	0.0800	1.099 Hz	0.0800
	等価剛性	3.268 Hz	0.0705	1.577 Hz	0.0391
	実験値	5.843 Hz	0.0217	5.564 Hz	0.0032

いるが、水平方向の剛性を有する部材は支承のみであり、加振方向の卓越振動数は一つとなる。このため、減衰行列は水平1次の固有振動数と減衰率を基準値とした剛性比例減衰⁶⁾により作成した。水平1次振動に基づき剛性比例減衰を設定すると、上下方向の振動に対して過大な減衰を与えることもあるが、本ケースの場合、上下方向の振動は小さく、この影響は小さいと考えている。

ここで、すべり支承の水平剛性はゼロであり、減衰性能を有しない構造と考えられることから、すべり支承の要素には粘性減衰を考慮せずに要素毎に個々に減衰定数⁷⁾⁸⁾を設定した。すべり支承の減衰性能に対する時刻歴応答解析による検証結果を表-4に示すが、すべり支承に粘性減衰を考慮した場合には応答変位量を過少評価することがわかる。

表-6 固有値解析時におけるすべり支承初期剛性の最大
応答変位量への影響

固有値解析時の すべり支承初期剛性		case1-II	case2-II
	無視	24.4 mm	39.5 mm
	等価剛性	25.3 mm	41.3 mm
	実験値	37.9 mm	41.6 mm
実験値		20.9 mm	44.2 mm

表-7 ゴム支承の減衰定数に関する試験結果

せん断ひずみ率		0.10	0.25	0.70	1.75
等価減衰 定数 (%)	平均値	9.88	8.63	6.28	5.43
	最大値	9.00	8.20	5.90	5.20
	最小値	11.10	8.90	7.00	5.60

表-8 速度・面圧依存性の摩擦係数をモデル化した解析結果

摩擦係数の設定方法	最大応答変位量 (mm)		最大応答速度 (m/s)		最大応答加速度 (gal)		すべり支承最大面圧 (Pa)	
	case1-II	case2-II	case1-2	case2-2	case1-2	case2-2	case1-2	case2-2
速度面圧依存 2方向加振	24.3	39.2	0.411	0.524	1114	396	16.37	14.58
速度面圧依存 1方向加振	24.4	39.5	0.415	0.524	1088	382	16.01	13.86
摩擦係数一定 ($\mu=0.20$)	24.0	41.3	0.398	0.539	1102	403	16.13	14.41
実験値	20.9	44.2	—	—	981	396	13.87	14.45

また、固有値解析におけるすべり支承の設定の違いによる固有振動数と減衰率への影響を表-5に示すが、すべり支承の剛性を無視したケースが、図-5に示した固有周期との差が小さいことを確認し、粘性減衰を設定する際に実施する固有値解析においては、すべり支承の剛性を無視した解析モデル⁹⁾を用いた。固有値解析におけるすべり支承の剛性の違いに対する時刻歴応答解析による検証結果を表-6に示すが、ゴム支承の減衰の影響が大きいcase1-IIでは、すべり支承の剛性の増加に伴い応答変位量が大きくなり、実験値と大きく異なる結果となっている。

ゴム支承の等価減衰定数については、道路橋支承便覧において、せん断ひずみに応じて異なることが示されている。使用したゴム支承と同材質の支承8基を対象とした減衰試験により得られた表-7の結果においてもその傾向を確認できる。解析対象としたcase1-IIとcase2-IIの最大せん断ひずみは、各々52%、21%であり、表-7の平均値を直線補間すると、減衰定数はcase1で約7.2%、ケース2で約8.8%となることから、本解析ではゴム支承の等価減衰定数を8%とした。なお、ゴム支承の減衰定数については、別途2%~8%¹⁰⁾の範囲で影響解析を実施した。

c) 入力地震波

上部工模型全体の動的挙動を再現するために、時刻歴応答解析に用いる入力波形には、振動台に入力した加速度波形ではなく、振動台で直接測定された応答加速度を使用した。case1-II、case2-IIの実験で測定された振動台の応答加速度は、各々図-3、図-4に示したとおりであり、各ケースにおいて入力加速度は異なっている。ここで、面圧・速度に依存する摩擦係数を用いた解析では、上下方向の加速度の影響が及ぶことから、水平1方向(Z方向)と上下

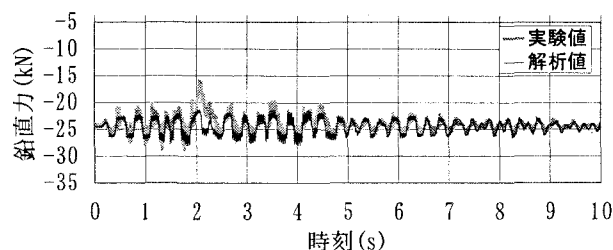


図-13 すべり支承の鉛直力変動(UD無 case2-II)

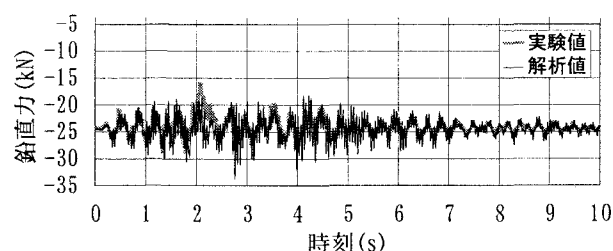


図-14 すべり支承の鉛直力変動(UD有 case2-II)

方向(Y方向)の2方向に加速度を入力した。

d) すべり摩擦支承の初期剛性

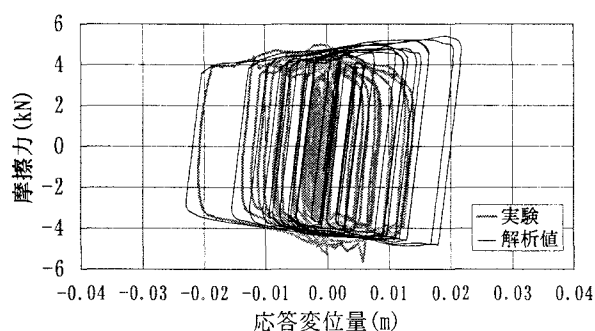
時刻歴応答解析におけるすべり支承の初期剛性は、実験結果の分析に基づき、3,000kN/m/基とした。

(2) 解析結果

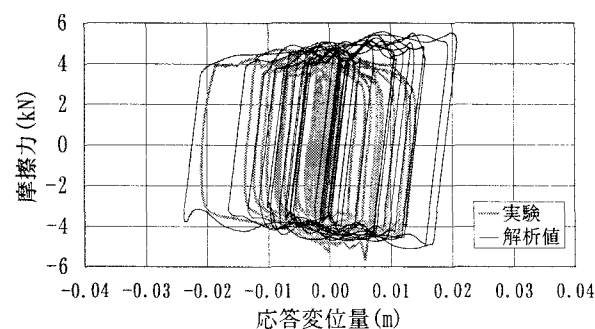
解析結果を表-8に示すが、応答変位量に着目するとcase1では実験値より約15%大きな変位量が発生し、一方case2では実験値より約10%小さい変位量となっているが、概ね実験値に近い結果を得た。

また、上下方向加速度の有無により、支承に作用する鉛直力は図-13、図-14に示すように異なるものの、表-8から鉛直力の変動は応答水平変位量に大きな影響を及ぼしていないことがわかる。

case1-II、case2-IIのすべり支承の摩擦力と変位量

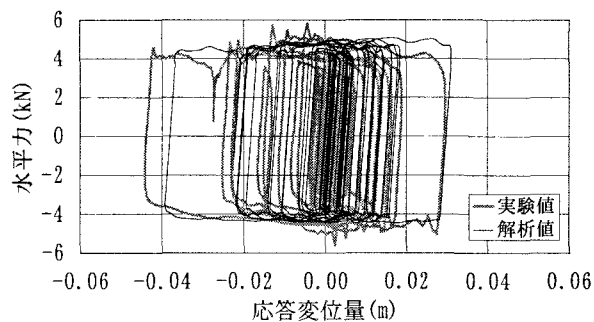


a) 上下方向加速度無(1 方向加振)

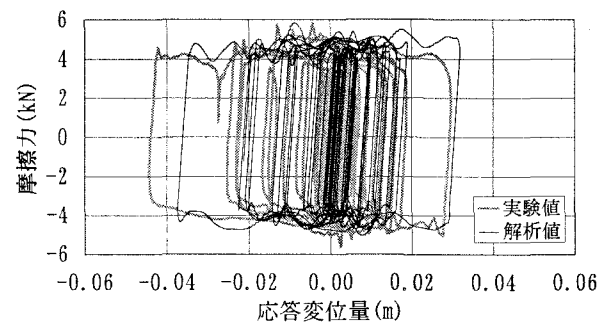


b) 上下方向加速度有(2 方向加振)

図-15 すべり支承の摩擦抵抗と応答変位 (case1-II)



a) 上下方向加速度無(1 方向加振)



b) 上下方向加速度有(2 方向加振)

図-16 すべり支承の摩擦抵抗と応答変位 (case2-II)

表-9 解析結果

項 目	変数	最大応答変位量 (mm)		最大応答速度 (m/s)		最大応答加速度 (gal)		すべり支承最大面圧 (Pa)	
		case1-II	case2-II	case1-II	case2-II	case1-II	case2-II	case1-II	case2-II
ゴム支承減衰 h_B ($\mu=15\%$ 一定)	2%	45.7	42.9	0.883	0.546	1853	349	19.03	13.73
	4%	36.8	42.3	0.726	0.543	1522	348	17.91	13.73
	6%	30.1	41.6	0.607	0.539	1276	348	17.05	13.73
	8%	27.0	41.0	0.516	0.535	1167	350	16.42	13.73
すべり摩擦支承 初期剛性比 ($h_B=8\%$) ($\mu=0.15$ 一定)	0.5	28.4	42.0	0.537	0.549	1219	354	16.57	13.74
	1.0	27.0	41.0	0.516	0.535	1167	350	16.42	13.73
	2.0	26.3	40.5	0.503	0.530	1137	347	16.37	13.73
	5.0	26.0	40.0	0.498	0.527	1128	345	16.36	13.74
	10.0	26.0	39.6	0.496	0.526	1126	344	16.37	13.74
摩擦係数 ($h_B=8\%$)	$0.00 \times R_d$	47.2	62.9	0.584	0.572	1779	299	18.53	13.45
	$0.10 \times R_d$	32.5	40.1	0.657	0.529	1326	295	17.13	13.50
	$0.15 \times R_d$	27.0	41.0	0.516	0.535	1167	350	16.42	13.73
	$0.20 \times R_d$	24.0	41.3	0.398	0.538	1100	400	16.05	13.95
	$0.25 \times R_d$	20.0	—	0.323	—	998	—	15.64	—
実験値		20.9	44.2	—	—	981	396	13.87	14.45

の履歴図を図-15, 図-16 に示すが, 履歴図は, 比較的精度良く実験における挙動を再現している。

4. 簡易摩擦係数を用いた解析モデルによる検討

摩擦係数は面圧や速度の変動により変化するが, これらの摩擦係数は使用する支承構造に固有のものであり, 設計段階でこれらを厳密に反映することは困難である。このため, ここでは簡易的に摩擦係数

を死荷重反力に対して一定値として扱い, 実験値との検証を行うほか, 諸条件の影響解析を行った。

(1) 影響解析による解析条件の検証

各種影響解析の結果を表-9 に示す。ここでの解析では, ゴム支承の減衰定数を 8%, 摩擦係数を 0.15 一定値とした条件を基準ケースとしている。

a) ゴム支承の減衰定数

ゴム支承の等価減衰定数について 2~8%の範囲で影響解析を実施した。影響解析による最大変位量は

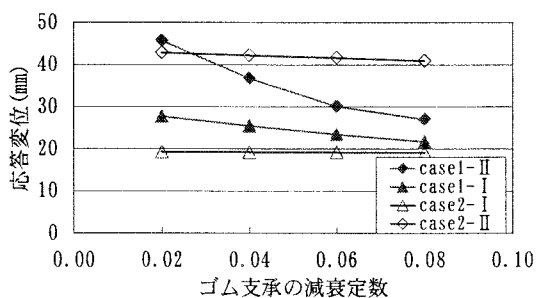


図-17 ゴム支承の減衰定数と最大応答変位量

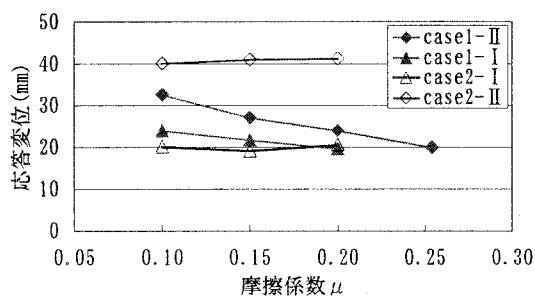


図-18 摩擦係数と最大応答変位量

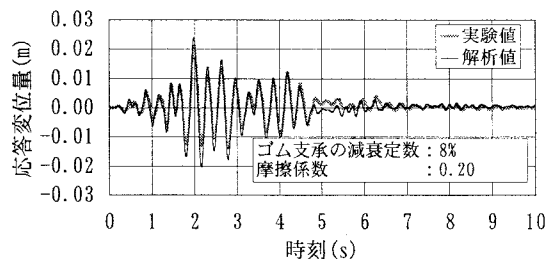


図-19 時系列応答変位の解析結果と実験値(case1-II)

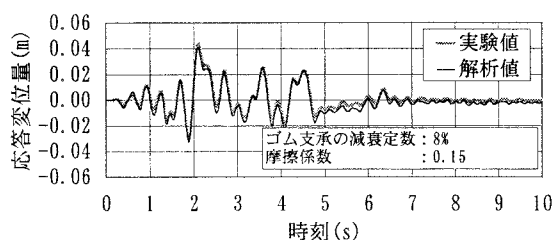


図-20 時系列応答変位の解析結果と実験値(case2-II)

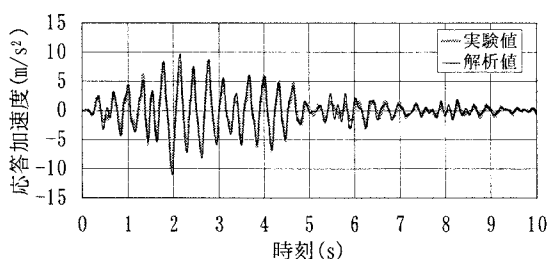


図-21 応答加速度の解析結果と実験値(case1-II)

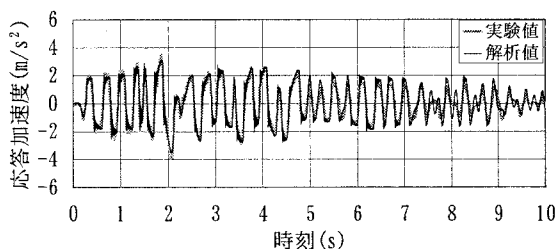


図-22 応答加速度の解析結果と実験値(case2-II)

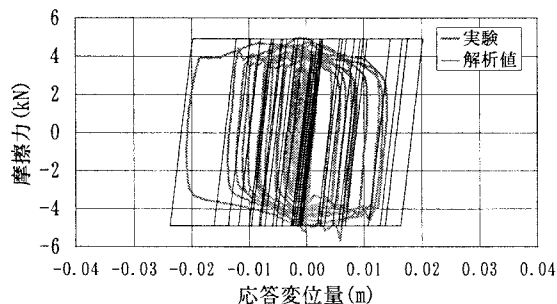


図-23 すべり支承の水平力と変位(case1-II)

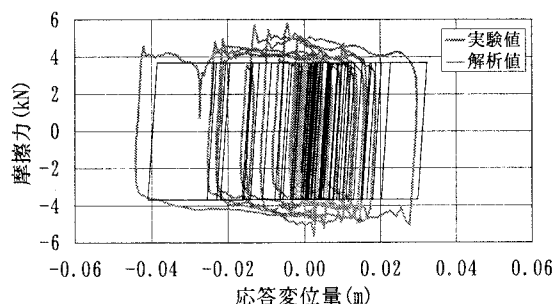


図-24 すべり支承の水平力と変位(case2-II)

図-17 に示すとおりである。図-2 に示したとおり case1 はゴム支承の剛性が支配的であるため、ゴム支承の等価減衰定数が最大応答変位量に大きな影響を及ぼす結果となっており、減衰定数の増大に伴い応答変位量は減少する傾向を示している。一方、case2 は、ゴム支承の剛性よりもすべり支承による摩擦抵抗の方が支配的であることから、等価減衰定数の変化に伴う影響は小さく、各解析ケースとも実験値に近い結果を得た。

実橋の固有周期は case1 の 1.1 秒に近い実例が多いことを踏まえると、動的解析における支承の減衰定数は、変位量のみならず応答加速度に対しても重要な要因となることがわかる。

b) 時刻歴応答解析に用いるすべり支承の初期剛性

時刻歴応答解析におけるすべり摩擦支承の初期剛性について、実験から得た初期剛性 ($k_1=3,000\text{kN/m}$) に対して、1/2～10 倍の範囲で変化させて、影響解析を実施した。本検討で設定した剛性範囲内で結果を比較すると、変位量の差は case1 では 9%、case2 では 6%程度と僅かであり、初期剛性が解析結果に及ぼす影響は小さいことがわかる。

c) 摩擦係数

摩擦係数が死荷重反力 (R_d) に対して一定であると想定して、摩擦係数を 0.10～0.25 の範囲で変化させて影響解析を実施した。解析による最大応答変位量は図-18 に示すとおりである。

すべり摩擦支承の剛性に比べてゴム支承の剛性が大きい case1 においては、摩擦係数の増大に伴い変位量が減少する結果となっている。一方、case2 においては、摩擦係数の変動による応答変位量への影響は小さい。

なお、すべり支承の摩擦抵抗を期待しないケース（摩擦係数 0）と摩擦係数 15% のケースを比較すると、case1-II、case2-II において、各々 57%、65% に変位量が小さくなっており、すべり支承の摩擦抵抗により、双方とも同様の変位制御の効果が現れていることがわかる。

(2) 簡易摩擦係数による解析結果と実験値の検証

前述までの解析検討において得た結果から、解析条件を設定し、応答変位量、応答加速度など、動的挙動について実験結果と解析結果を比較検証した。

case1、case2 各々の時系列応答変位図を図-19、図-20 に、時系列応答加速度図を図-21、図-22 に、すべり支承に作用する摩擦力と応答変位図の履歴図を図-23、図-24 に示す。これら結果から、簡易的に一定値の摩擦係数としても、比較的精度良く実験の挙動を再現できることがわかる。

5. まとめ

振動台実験で得られた挙動を分析し逆解析を行い、実験値と解析値を検証するとともに、動的解析における解析条件を検討した。この結果、すべり摩擦支承を有する構造物の解析条件の設定方法として下記の知見を得た。

- ・減衰マトリクスは、すべり支承要素を無視した固有値解析により算出される減衰率を用いて、すべり支承要素の粘性減衰を無視して作成することにより、比較的精度良く実挙動を再現できる。
- ・摩擦係数は、速度と面圧に依存するが、死荷重反力に対して一定の摩擦係数として扱った解析においても、変位量や加速度等の応答値を精度良く再現できる。
- ・また、摩擦係数は時系列的に減少するが、加速度が最大となる時点付近の摩擦係数を設定することにより実験結果を再現できる。
- ・すべり支承の摩擦抵抗とゴム支承のバランスによっては、すべり摩擦支承の減衰性能よりもゴム支承の減衰定数等の性能が全体挙動に大きな影響を及ぼす可能性がある。
- ・時刻歴応答解析における、すべり支承の初期剛性が、応答変位量に及ぼす影響は小さい。

6. おわりに

本解析検討では両極端に異なる支承モデルによる実験を対象としたが、今後支承形状の異なる他の実験に対しても同様の解析検討を行い、今回得られた知見を検証するほか、実橋を対象としたゴム支承とすべり摩擦支承の構造的なバランス等の検討を通じて、効果的なすべり摩擦免震システムや変位制御のあり方について検討していく予定である。

7. 謝辞：本研究の実施にあたっては、立命館大学伊津野教授から貴重なご指導、ご助言を戴いた。また、ビービーエム（株）合田氏、配野氏からは支承に関する貴重なデータ提供を戴いた。ここに記して謝意を表する。

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, pp. 233-244, 2000.
- 2) 京都大学大学院工学研究科：滑り型免震橋梁の振動台実験受託研究成果報告書, 2003.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 4) 家村浩和、高梁良和、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、土木学会地震工学論文集, p. 267, 2003.
- 5) 藤田亮一、森敦、金治英貞、伊津野和行：すべり免震支承システムのモデル化および地震動入力条件の違いが橋梁応答に及ぼす影響、第 7 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 427-430, 2004.
- 6) 日本建築学会：建築物の減衰, 2000.
- 7) 西森孝三、足立幸郎：部材減衰を直接的に考慮したレーリ減衰使用による動的解析法、第 4 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 109-114, 2000.
- 8) 矢部正明：粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答に与える影響(その 2)、第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁構造等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 421-432, 2003.
- 9) 矢田部浩、運上茂樹：すべり摩擦免震構造物の動的解析における減衰モデルと摩擦減衰力の取り扱い、土木学会第 59 回年次学術講演会, pp. 787-788, 2004.
- 10) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧, 2004.