

振動台実験との比較に基づく動的解析による 制震デバイスの応答予測精度の検証

崔準祐¹・堺淳一²・八ッ元仁³・星隈順一⁴

¹正会員 博（工） 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教
（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）

²正会員 博（工） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

³正会員 修（工） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

⁴正会員 博（工） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

近年、既設の桁橋や鋼製のアーチ橋、トラス橋等に制震デバイス等を適用し、耐震性向上を試みる耐震補強事例や新設橋の耐震性向上のために制震デバイスを活用する事例が増えてきている。制震デバイスとしては、様々な材料・構造を用いたタイプが開発されているが、各種デバイスの限界状態等の性能評価やこれを用いた橋の耐震補強、耐震設計に関しては、個々の橋梁に応じて個別に検討、適用されているのが現状である。また、制震デバイスの個々の減衰特性や速度、温度等に関する依存性については、一般には製品の開発者が制震デバイス単体あるいはその素材に対する強制変位による正負交番载荷実験等により検討し、これにより設計モデルが構築されている。このため、限界状態の設定の考え方や設計における安全余裕度に関する考え方が必ずしも統一されていないのが現状である。こうした背景から、制震デバイスの性能評価法や制震デバイス本体や取り付け部材の設計法も含めた制震デバイスを用いた橋全体としての耐震設計法の整備が必要である。

本研究では、著者らが実施した制震デバイスを用いた橋梁模型の振動台実験¹⁾に基づいてシミュレーション解析を実施し、制震デバイスの応答予測精度について検討を行った。対象とした制震デバイスは、ゴム系デバイス、鋼材せん断降伏系デバイス、シリンドラ系デバイス、鋼材軸降伏系デバイスであり、各デバイスの静的载荷実験により求められた解析モ

デルを用いてシミュレーション解析を行い、デバイスの応答の予測精度について検討を行った。また、制震デバイスの解析モデルを構築する上で、初期剛性、降伏荷重、2次剛性などは主要なパラメータとなることが考えられるため、これらをパラメータとした感度解析を行い、それらが解析結果に及ぼす影響について検討を行った。

2. 解析モデルおよび解析条件

(1) 実験供試体のモデル化

振動台実験のセットアップ状況を写真-1に示す。実験供試体は、できるだけ1自由度系に近似可能なシンプルな構造系にするため、H鋼を組み合わせた桁模型にカウンタウェイトを設置し、これを4隅に配置されたゴム支承により支持する構造とした。シミュレーション解析では、制震デバイスとゴム支承以外の部材は弾性体として挙動すると仮定して1質点系モデルを用いて解析を行うこととし、ゴ

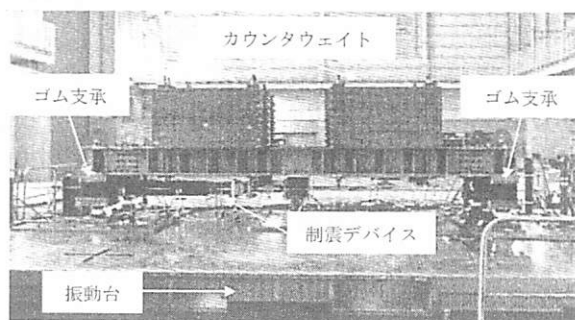


写真-1 振動台実験のセットアップ状況

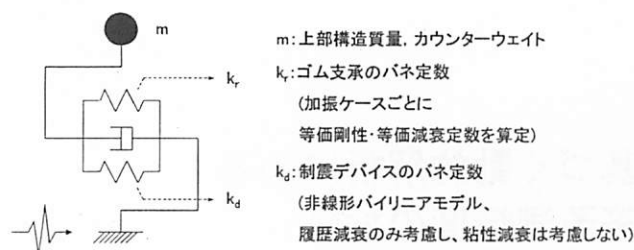


図-1 解析モデル

ム支承および制震デバイスに対してはバネ要素を用いてモデル化を行った。解析モデルを図-1に示す。

(2) ゴム支承のモデル化

本実験で用いたゴム支承はエネルギー吸収が期待できない支承を用いているため、一般には線形モデルとしてモデル化される。ここでは、制震デバイスのモデル化による応答の予測精度を検討することを目的としているため、制震デバイス以外の部材は可能な限り精度良くモデル化することが重要である。そこで、本解析では、各実験により得られたゴム支承のせん断変形量に応じ、ゴム支承のを等価線形化法によりモデル化することとした。ゴム支承の等価剛性および等価減衰定数の算定には、道路橋示方書・同解説V耐震設計編（平成14年3月）²⁾の免震支承の等価剛性と等価減衰定数の算定方法を用いることとした。

(3) 入力加速度

本シミュレーション解析に用いる入力加速度は、振動台の中央部に設置している加速度計から測定したものとした。その際、計測データをそのまま用いることとし、フィルター処理等は行っていない。

(4) 減衰モデル

本振動台実験で考えられる減衰としては、部材の粘性による粘性減衰、部材の塑性挙動による履歴減衰、接合部のすべり摩擦などによる摩擦減衰が挙げられる。本解析では、部材の接合は剛であると仮定し、摩擦減衰は考慮せず、制震デバイスの履歴減衰とゴム支承の粘性減衰のみ考慮し、後者については2.(2)に示したように加振ケースごとに算定した等価減衰定数に基づき、要素別Rayleigh型粘性減衰

$$C = \sum_{i=1}^j (\alpha[m_i] + \beta[k_i]) \quad (1)$$

ここに、 α 、 β ：減衰係数

$[m_i]$ 、 $[k_i]$ ：質量、剛性の各要素マトリックス

を用いて評価することとした（式（1））。

(5) 解析手法

本解析では、直接積分法（Newmark β 法、 $\beta=0.25$ ）により時刻歴応答解析を行うものとし、積分時間間隔は入力加速度の測定時間間隔と同一の0.005秒とした。

3. 検討対象制震デバイスおよび制震デバイスの検討モデル

(1) 検討対象の制震デバイス

本検討で対象とした制震デバイスを写真-2に示す。制震デバイスは、エネルギー吸収能を発揮する機構の違いにより様々なタイプがある。ここでは、ゴム材料に非線形特性を付加させ、せん断変形時にエネルギー吸収能を発揮するゴム系デバイス、板状の鋼材にせん断方向の変形を生じさせ、材料の塑性化によりエネルギー吸収能を発揮させる鋼材せん断降伏系デバイス、シリンダー内に封入した粘性体の特性によりエネルギー吸収能を発揮させるシリンダー系デバイス、鋼材に軸圧縮および引張方向の変形を生じさせ、材料の塑性化によりエネルギー吸収能を発揮させる鋼材軸降伏系デバイスの4タイプを対象とした。

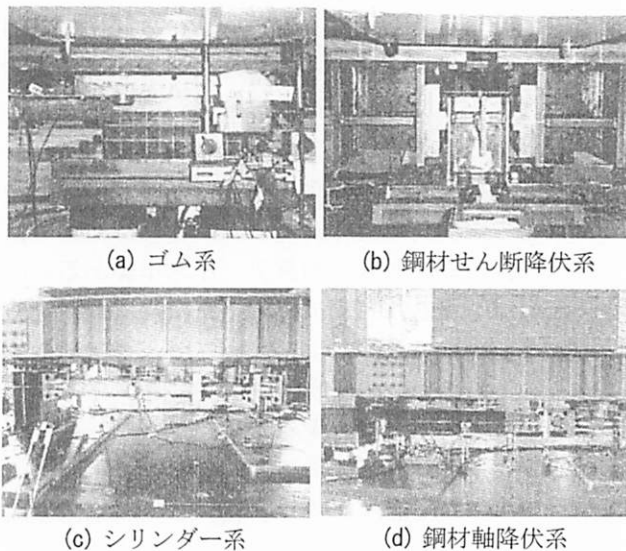


写真-2 対象とした制震デバイス

(2) 検討ケース

振動台実験では入力波形として正弦波と地震波（道路橋示方書・同解説V耐震設計編（平成14年3月）²⁾の標準波形タイプIとタイプII）を用いて、振幅を変化させた実験を行っているが、本シミュレーション解析における検討ケースとしては、表-1に示すようにデバイスの最大応答変位が設計限界変位

表-1 検討ケース

デバイス	実験No.	入力波	$\delta_{\max} / \delta_a$
ゴム系	1-5	タイプII実験地震波 振幅110%	0.66
	3-7	正弦波1.0Hz 6.2m/sec ²	0.97
	4-10	正弦波2.0Hz 9.0m/sec ²	0.99
鋼材せん断降伏系	4-2	タイプII実験地震波 振幅120%	0.44
	5-1	正弦波1.0Hz 8.0m/sec ²	0.83
	5-2	正弦波1.5Hz 8.0m/sec ²	0.82
シリンダー系	2-5	タイプII実験地震波 振幅120%	1.06
	4-6	正弦波2.0Hz 8.0m/sec ²	0.96
	5-4	正弦波1.0Hz 4.5m/sec ²	0.98
鋼材軸降伏系	1-2	タイプII実験地震波 振幅120%	0.89
	1-8	正弦波1.0Hz 7.5m/sec ²	1.16
	3-2	正弦波1.0Hz 8.0m/sec ²	1.29

※ $\delta_{\max}$: デバイスの最大変位、 δ_a : デバイスの設計限界変位

に近い3つのケースとし、正弦波2ケースと地震波1ケースを選定した。ここで、実験地震波による加震では、タイプIとタイプIIの地震動を入力した場合のうち、デバイスの応答の大きかった方を選んでいる。

(3) 制震デバイスの検討モデル

各デバイスの検討モデルの骨格曲線を図-2に示す。各デバイスのモデル1は、過去に実施された変位制御実験結果に基づいて作成したシンプルなバイリニアモデルである。このモデルを用いて各デバイスの振動台実験に対する再現解析を行い、実験結果と解析結果の比較をもとに、解析結果が実験結果に近く

なるように初期剛性、降伏荷重、2次剛性などのパラメータを設定した。各デバイスの検討モデル設定について、次に詳述する。

a) ゴム系デバイス

各検討ケースの振動台実験結果により得られたデバイスの最大変位を用い、過去に実施されたひずみ依存性確認実験により求められたせん断剛性の近似式に基づいてバイリニアモデルを作成した。このモデルをモデル1とする。モデル1を用いた解析結果と実験結果の比較は4. (1) a)に詳述するが、デバイスの変位応答が設計限界変位に近いケース3-7と4-10において、解析の変位応答が実験値より小さくなる結果が得られた。この結果に基づき、感度解析の検討モデルでは、解析の変位応答がより大きく評価されるようにするために、モデル1の降伏荷重を0.8倍したモデルをモデル2、モデル1の2次剛性を0.8倍したモデルをモデル3、モデル1の降伏荷重と2次剛性の両方を0.8倍したモデルをモデル4とした。

b) 鋼材せん断降伏系デバイス

変位制御実験結果に基づいて作成したバイリニアモデルでは、降伏荷重値に公称値を用い、2次剛性を設計限界変位に至ったときの点を結ぶ線の傾きとした。このモデルをモデル1とする。モデル1を用いた解析結果と実験結果の比較は4. (2) a)に詳述するが、全ての検討ケースで実験の変位応答より解析の変位応答が大きく得られた。この結果に基づき、

感度解析の検討モデルでは、モデル1の降伏荷重を1.2倍大きくしたモデルをモデル2、モデル2の初期剛性を1.2倍大きくしたモデルをモデル3、構成部材の降伏順を考慮し、2次剛性をモデル1の初期剛性の0.154倍、第2降伏荷重をモデル1の降伏荷重の1.2倍、3次剛性をモデル1の初期剛性の0.025倍したトリリニアモデルをモデル4とした。

c) シリンダー系デバイス

本デバイスは、速度の変化に伴いデバイスの力学的特性が変化するという速度依存性を有しており、定格速度に達すると定格抵抗力が得られるような機構となっている。解析モデルとしては、定格速度による繰り返し载荷実験結果に基づき、速度依存性は厳密に評価できないが簡便的にバイリニアモデルで表す

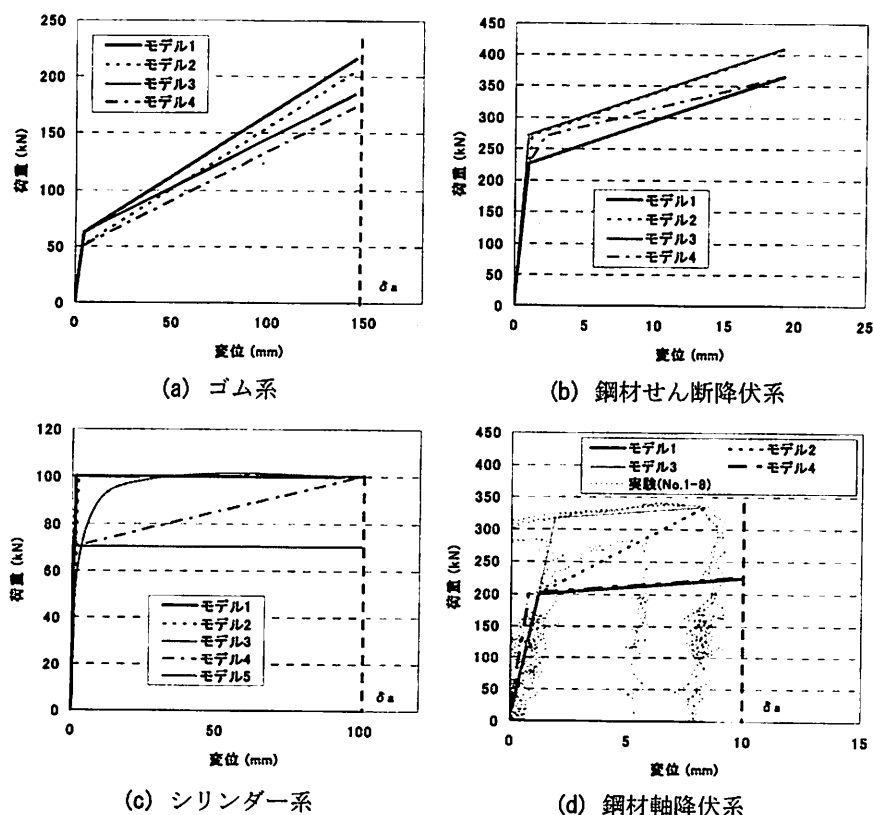


図-2 制震デバイスの検討モデル

ことが可能であり、このモデルをモデル1とした。モデル1を用いた解析結果と実験結果の比較は4。(3) a)に詳述するが、全ての検討ケースで変位応答、荷重応答ともに実験値より解析値が小さく得られた。この結果に基づき、感度解析の検討モデルでは、モデル1の初期剛性を0.5倍したモデルをモデル2、モデル1の降伏荷重を0.7倍したモデルをモデル3、モデル3の降伏点とモデル1の設計限界変位が生じたときの点を結ぶ線の傾きを2次剛性としたモデルをモデル4、速度依存性を考慮した速度累乗型モデルをモデル5とした。

d) 鋼材軸降伏系デバイス

変位制御実験結果に基づいて作成したバイリニアモデルをモデル1とした。モデル1を用いた解析結果と実験結果の比較は4。(4) a)に詳述するが、変位応答に関しては実験値より解析値が大きく、荷重応答に関しては実験値より解析値が小さくなる傾向が見られた。感度解析の検討モデルでは、最大変位応答が設計限界変位に最も近いケースNo.1-8の実験結果を基に、モデル1の2次剛性を約6.7倍大きくしたモデルをモデル2、モデル1の降伏荷重を約1.6倍大きくしたモデルをモデル3、モデル1の初期剛性を1.5倍大きくしたモデルをモデル4とした。

4. 動的解析によるデバイスの応答予測精度

各デバイスの荷重-変位関係（以下“デバイスの履歴”と記す）において、実験結果と解析結果の比較を図-3～図-7に示す。また、表-2は、デバイスの荷重、変位、累積エネルギーにおいて、実験結果と解析結果で最大値を比較したものである。デバイスごとの結果分析を以下に示す。

(1) ゴム系デバイス

a) モデル1の結果分析

No.1-5において、変位と累積エネルギーの最大応答に関しては解析値が実験値をそれぞれ4%、3%大きく推定しているが、解析値と実験値が比較的近似する結果であった。しかし、荷重応答に関しては解析値が実験値を23%小さく推定しており、解析値と実験値に差が見られた。これは、図-4 (a)のデバイスの履歴に示すように、実験では初期の履歴において剛性が大きくなるという特性が現れているが、解析モデルにはこの特性が反映されていないためと考えられる。

一方、No.3-7とNo.4-10においては、荷重応答に関しては解析値と実験値が比較的近似しているが、逆に変位応答に関しては解析値が実験値を24%、6%下

回る結果となった。

b) 感度解析の結果分析

・モデル1とモデル2（モデル1の降伏荷重を0.8倍したモデル）の比較

No.1-5とNo.3-7の場合、モデル1よりモデル2の最大変位が大きく得られた。変位応答の増加率は、No.1-5で10%、No.3-7で2%程度と大きくはないが、降伏荷重の変化によりデバイスの変位応答が大きくなることが確認された。一方、No.4-10の2.0Hz正弦波加振の場合は、変位応答の変化がほとんど見られなかった。

・モデル1とモデル3（モデル1の2次剛性を0.8倍したモデル）の比較

No.1-5とNo.3-7の場合、モデル1よりモデル3の最大変位が大きく得られた。変位応答の増加率は、No.1-5で1%、No.3-7で7%程度と、降伏後の2次剛性を小さくすることによりデバイスの変位応答が大きくなることが確認された。一方、No.4-10の2.0Hz正弦波加振では、モデル1よりモデル3の変位応答が小さくなる結果が得られた。

荷重応答に関しては、全ての検討ケースにおいてモデル1よりモデル3の応答が小さくなる結果となった。No.1-5で9%、No.3-7で7%、No.4-10で18%低下しており、2次剛性の変化はデバイスの変位応答より荷重応答に影響していることが確認された。

・モデル1とモデル4（モデル1の降伏荷重と2次剛性を0.8倍したモデル）の比較

No.1-5とNo.3-7では、モデル4のデバイスの変位応答がモデル1より大きくなり、変位応答の増加率はNo.1-5で12%、No.3-7で10%であった。一方、No.4-10の2.0Hz正弦波加振では、モデル1より変位応答が小さくなる結果が得られた。

荷重応答に関しては、全ての検討ケースにおいてモデル4の応答が最も小さく、モデル1に比べ10%～13%程度低下していることが確認された。

全ケースを通して、降伏荷重や2次剛性を下げることによりデバイスの変位応答が大きくなる傾向にはあったが、各パラメータがデバイスの応答に与える影響は、加振ケースによって異なる結果となった。

(2) 鋼材せん断降伏系デバイス

a) モデル1の結果分析

最大変位応答に関しては、解析値が実験値よりNo.4-2で24%、No.5-1で58%、No.5-2で90%大きくなる結果となった。一方、最大荷重応答に関しては、No.4-2で解析値が実験値より3%程度小さい結果となったが、No.5-1とNo.5-2では解析値が実験値よりそれぞれ19%、26%大きく得られた。

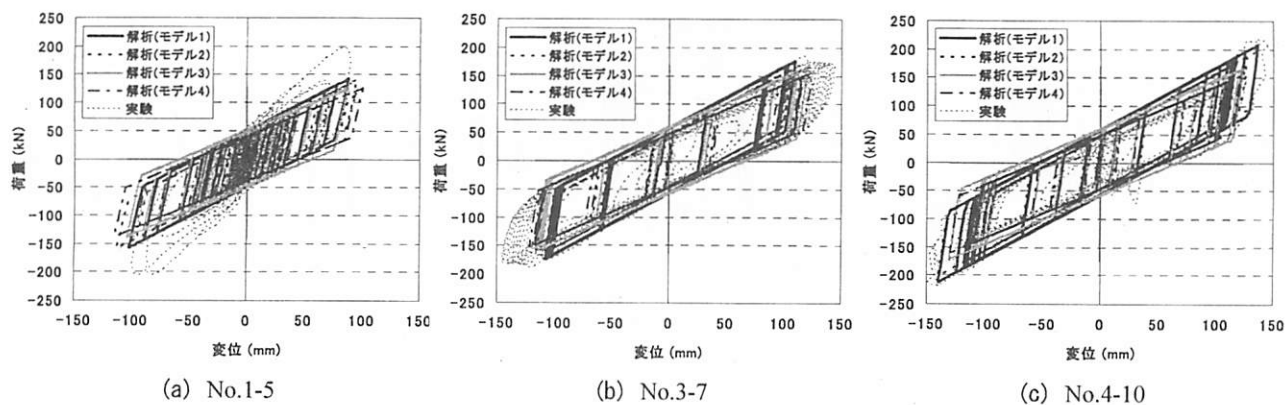


図-3 実験結果と解析結果の比較（ゴム系デバイス）

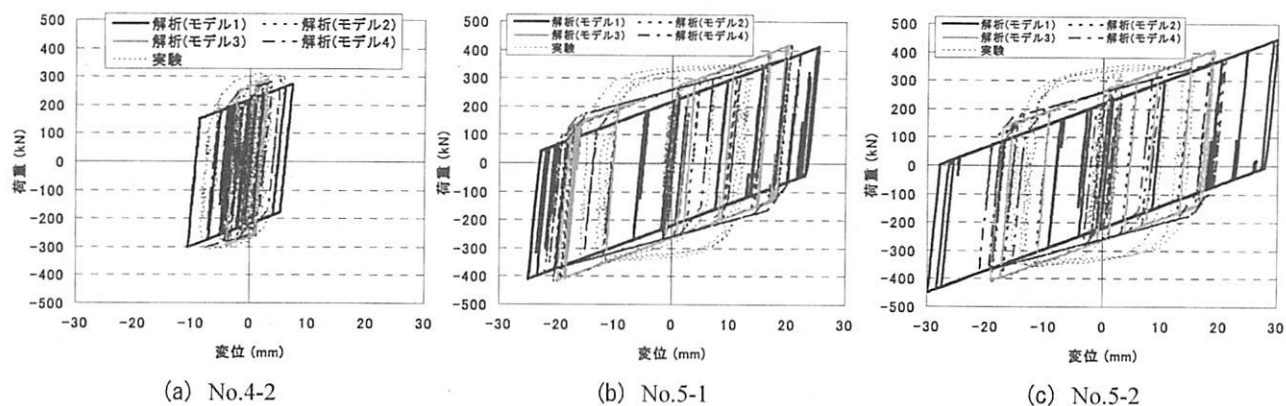


図-4 実験結果と解析結果の比較（鋼材せん断降伏系デバイス）

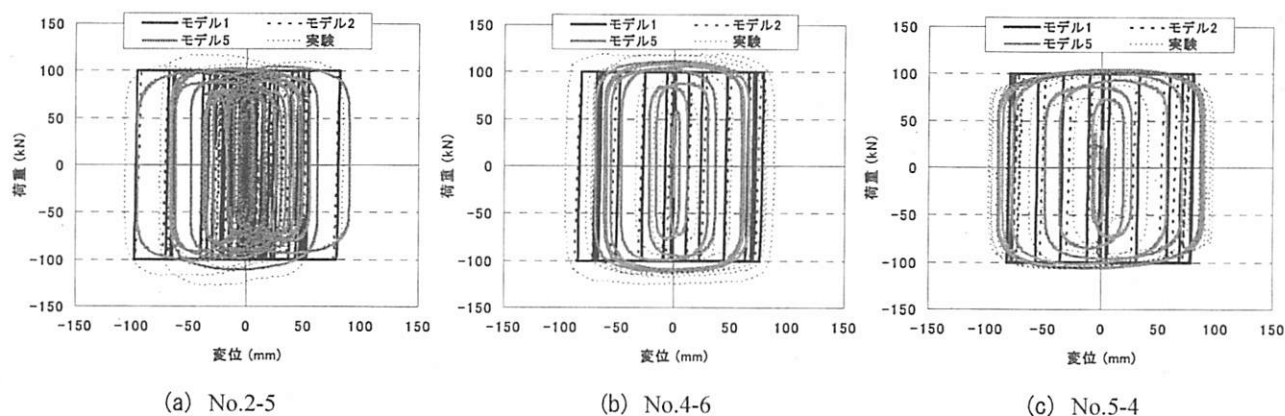


図-5 実験結果と解析結果の比較（シリンダー系デバイス モデル1, モデル2, モデル5）

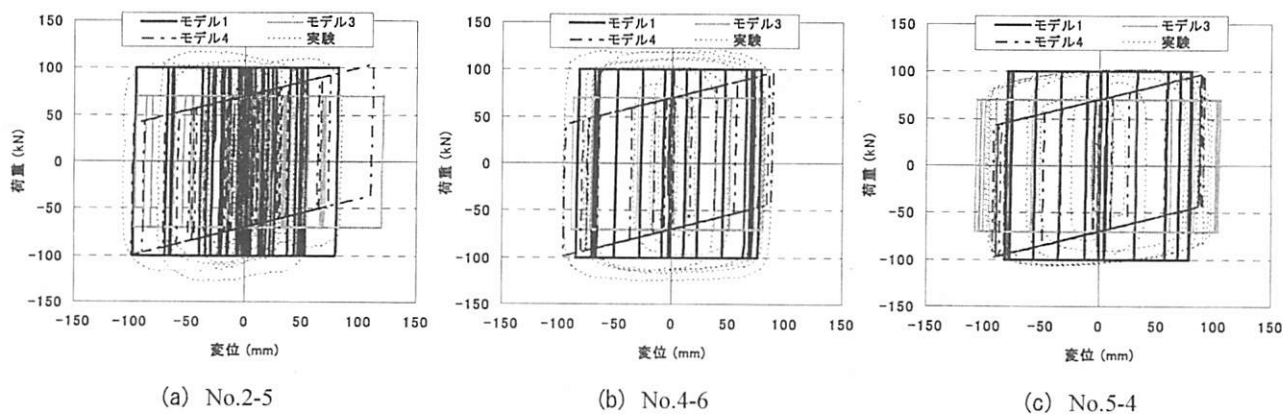


図-6 実験結果と解析結果の比較（シリンダー系デバイス モデル1, モデル3, モデル4）

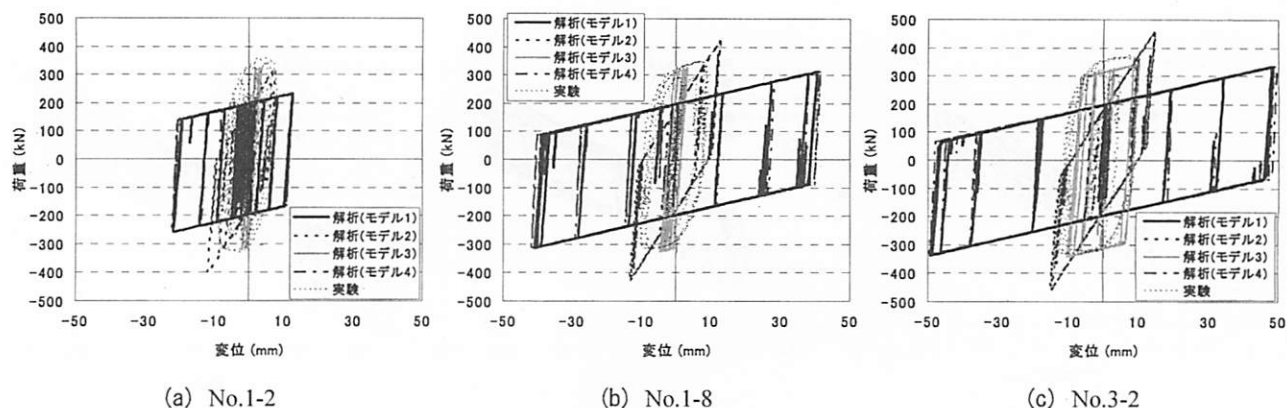


図-7 実験結果と解析結果の比較（鋼材軸降伏系デバイス）

表-2 最大応答値の比較

デバイス	検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kJ/mm)		
			実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
ゴム系デバイス	No.1-5 タイプII実験地震波 振幅110%	モデル1	205	158	0.77	99	102	1.04	94,740	97,719	1.03
		モデル2	205	159	0.78	99	113	1.14	94,740	88,329	0.93
		モデル3	205	138	0.68	99	104	1.05	94,740	101,185	1.07
		モデル4	205	138	0.67	99	115	1.16	94,740	91,872	0.97
	No.3-7 正弦波 1.0Hz6.2m/sec ²	モデル1	188	177	0.94	145	110	0.76	273,007	278,452	1.02
		モデル2	188	170	0.90	145	114	0.78	273,007	236,575	0.87
		モデル3	188	164	0.87	145	121	0.83	273,007	308,580	1.13
		モデル4	188	156	0.83	145	125	0.86	273,007	262,402	0.96
	No.4-10 正弦波 2.0Hz9.0m/sec ²	モデル1	220	212	0.96	149	140	0.94	203,462	330,001	1.62
		モデル2	220	201	0.92	149	140	0.94	203,462	270,094	1.33
		モデル3	220	172	0.78	149	130	0.87	203,462	313,600	1.54
		モデル4	220	160	0.73	149	129	0.87	203,462	256,250	1.26
鋼材せん断降伏系デバイス	No.4-2 タイプII実験地震波 振幅120%	モデル1	308	300	0.97	9	11	1.24	15,329	14,253	0.93
		モデル2	308	296	0.96	9	4	0.53	15,329	3,876	0.25
		モデル3	308	294	0.95	9	4	0.47	15,329	3,993	0.26
		モデル4	308	301	0.98	9	8	0.88	15,329	9,497	0.62
	No.5-1 正弦波 1.0Hz8.0m/sec ²	モデル1	346	413	1.19	16	25	1.58	56,273	82,711	1.47
		モデル2	346	421	1.22	16	21	1.29	56,273	69,925	1.24
		モデル3	346	417	1.20	16	20	1.26	56,273	68,954	1.23
		モデル4	346	384	1.11	16	22	1.39	56,273	77,368	1.37
	No.5-2 正弦波 1.5Hz8.0m/sec ²	モデル1	355	449	1.26	16	30	1.90	59,811	96,505	1.61
		モデル2	355	408	1.15	16	19	1.20	59,811	63,496	1.06
		モデル3	355	409	1.15	16	19	1.21	59,811	65,252	1.09
		モデル4	355	378	1.06	16	21	1.34	59,811	73,600	1.23
シリンドラ系デバイス	No.2-5 タイプII実験地震波 振幅120%	モデル1	127	100	0.79	106	98	0.92	191,167	172,726	0.90
		モデル2	127	100	0.79	106	96	0.91	191,167	174,834	0.91
		モデル3	127	70	0.55	106	121	1.14	191,167	167,799	0.88
		モデル4	127	104	0.82	106	112	1.06	191,167	159,289	0.83
		モデル5	127	111	0.87	106	96	0.90	191,167	181,331	0.95
	No.4-6 正弦波 2.0Hz8.0m/sec ²	モデル1	125	100	0.80	96	85	0.89	184,735	147,358	0.80
		モデル2	125	100	0.80	96	87	0.92	184,735	152,260	0.82
		モデル3	125	70	0.56	96	89	0.93	184,735	115,263	0.62
		モデル4	125	99	0.79	96	96	1.00	184,735	123,114	0.67
		モデル5	125	112	0.90	96	70	0.73	184,735	131,743	0.71
	No.5-4 正弦波 1.0Hz4.5m/sec ²	モデル1	107	100	0.94	98	82	0.83	222,025	195,482	0.88
		モデル2	107	100	0.94	98	77	0.78	222,025	178,905	0.81
		モデル3	107	70	0.66	98	108	1.10	222,025	196,650	0.89
		モデル4	107	98	0.92	98	93	0.95	222,025	169,912	0.77
		モデル5	107	105	0.99	98	90	0.92	222,025	233,431	1.05
鋼材軸降伏系デバイス	No.1-2 タイプII実験地震波 振幅120%	モデル1	358	259	0.72	9	22	2.44	25,182	26,789	1.06
		モデル2	358	404	1.13	9	12	1.33	25,182	16,166	0.64
		モデル3	358	323	0.90	9	4	0.42	25,182	1,347	0.05
		モデル4	358	259	0.72	9	22	2.48	25,182	27,037	1.07
	No.1-8 正弦波 1.0Hz7.5m/sec ²	モデル1	349	313	0.90	12	41	3.52	34,428	122,172	3.55
		モデル2	349	431	1.24	12	13	1.15	34,428	35,119	1.02
		モデル3	349	325	0.93	12	4	0.38	34,428	6,187	0.18
		モデル4	349	314	0.90	12	42	3.60	34,428	127,396	3.70
	No.3-2 正弦波 1.0Hz8.0m/sec ²	モデル1	370	337	0.91	13	49	3.81	41,976	154,346	3.68
		モデル2	370	464	1.25	13	15	1.17	41,976	42,015	1.00
		モデル3	370	341	0.92	13	10	0.79	41,976	31,088	0.74
		モデル4	370	336	0.91	13	50	3.84	41,976	158,227	3.77

実験ではデバイスの履歴が原点を中心に膨らんでいく形状となっており、鋼材のひずみ硬化による現象が見られたが、このひずみ硬化による現象に対してモデル1では2次剛性を与えることにより簡便的にモデル化しているため、実験結果と差が見られたと考えられる。

b) 感度解析の結果分析

・モデル1とモデル2（モデル1の降伏荷重を1.2倍したモデル）の比較

最大変位応答に関しては、モデル2の応答がモデル1よりNo.4-2で約58%、No.5-1で約18%、No.5-2で約37%小さくなる結果が得られたが、最大荷重応答に関しては、全ての検討ケースにおいてほとんど変化が見られなかった。降伏荷重の変化は、デバイスの荷重応答より変位応答に及ぼす影響が大きい。

・モデル2とモデル3（モデル2の初期剛性を1.2倍したモデル）の比較

全ての検討ケースにおいて、変位応答、荷重応答ともにほとんど変化が見られなかった。初期剛性の変化がデバイス応答に及ぼす影響は小さい。

・モデル1とモデル4（トリリニアモデル）の比較

最大変位応答に関しては、モデル4の応答値がモデル1よりNo.4-2で約29%、No.5-1で約12%、No.5-2で約30%小さくなる結果が得られたが、最大荷重応答に関しては、全ての検討ケースにおいてほとんど変化が見られなかった。トリリニアモデルの設定は、デバイスの荷重応答より変位応答に及ぼす影響が大きい。

(3) シリンダー系デバイス

a) モデル1の結果分析

全ケースにおいて、最大変位応答、最大荷重応答ともに解析値が実験値より小さくなる結果となった。最大変位応答に関しては、解析値が実験値よりNo.2-5で8%、No.4-6で11%、No.5-4で17%小さく得られた。最大荷重応答に関しては、解析値が実験値よりNo.2-5で21%、No.4-6で20%、No.5-4で6%小さく得られた。これより履歴の面積も実験より解析の方が小さくなるため、累積吸収エネルギーも解析の方が小さく評価されており、No.2-5で10%、No.4-6で20%、No.5-4で12%小さく推定している。

b) 感度解析の結果分析

・モデル1とモデル2（モデル1の初期剛性を0.5倍したモデル）の比較

最大変位応答において、モデル1とモデル2の応答差は、No.2-5で2%、No.4-6で3%、No.5-4で6%と僅かであり、初期剛性の変化がデバイスの応答変化に

及ぼす影響は小さいことが確認された。

・モデル1とモデル3（モデル1の降伏荷重を0.7倍したモデル）の比較

最大変位応答において、モデル3の応答値がモデル1よりNo.2-5で約24%、No.4-6で約5%、No.5-4で約32%大きくなる結果となった。加振波によって変位増加率は異なるものの、降伏荷重を小さくすることによりデバイスの変位応答が増加する傾向が確認された。

・モデル3とモデル4（モデル3の降伏点とモデル1の設計限界変位が生じたときの点を結ぶ線の傾きを2次剛性としたモデル）の比較

最大荷重応答において、モデル4の応答値がモデル3よりNo.2-5で48%、No.4-6で41%、No.5-4で40%大きく得られた。一方、最大変位応答に関しては、両モデルで7%～14%程度の応答差が見られているが、荷重応答に比べて変化幅は小さい。2次剛性の変化は、デバイスの変位応答より荷重応答に大きく影響することが確認された。

・モデル1とモデル5（速度累乗型モデル）の比較

最大荷重応答において、モデル5の応答値がモデル1よりNo.2-5で11%、No.4-6で12%、No.5-4で5%大きく得られた。一方、変位応答に関しては、No.2-5とNo.4-6ではモデル5の応答値がそれぞれ2%、17%低減する結果となったが、No.5-4ではモデル5の応答値が11%増加しており、加振波によって変位応答の変化の傾向が変わる結果となった。

(4) 鋼材軸降伏系デバイス

a) モデル1の結果分析

最大変位応答に関しては、解析値が実験値よりNo.1-2で2.44倍、No.1-8で3.52倍、No.3-2で3.81倍大きくなる結果となったが、最大荷重応答に関しては、解析値が実験値よりNo.1-2で28%、No.1-8で10%、No.3-2で9%小さくなる結果となった。

本デバイスは低降伏点鋼材を使用していることから実験ではひずみ硬化による現象が現れているが、モデル1では使用鋼材の公称値を降伏値とし、2次剛性を比較的低く設定しているため、実験結果とモデル1の解析結果に応答差が生じたと考えられる。

b) 感度解析の結果分析

・モデル1とモデル2（モデル1の2次剛性を約6.7倍したモデル）の比較

最大変位応答に関しては、モデル2の応答値がモデル1よりNo.1-2で約45%、No.1-8で約67%、No.3-2で69%小さくなる結果が得られ、2次剛性を大きく与えることによりデバイスの変位応答が小さくなる

ことが確認された。一方、最大荷重応答に関しては、モデル2の応答値がモデル1よりNo.1-2で約56%，No.1-8で約38%，No.3-2で約38%大きく得られており、2次剛性を大きく与えることにより最大荷重応答は増加することが確認された。本デバイスの解析モデルにおいて、2次剛性の変化は変位応答、荷重応答ともに大きな影響を及ぼすことが確認された。

・モデル1とモデル3（モデル1の降伏荷重を約1.6倍したモデル）の比較

最大変位応答に関しては、モデル3の応答値がモデル1よりNo.1-2で約83%，No.1-8で約89%，No.3-2で約79%小さくなり、降伏荷重の変化がデバイスの変位応答に大きな影響を及ぼすことが確認された。

また、モデル3では、実験結果を参考として降伏値を設定しているが、解析の場合デバイスが降伏後大きく塑性しない履歴が得られており、実験と差が生じる結果となった。

・モデル1とモデル4（モデル1の初期剛性を1.5倍したモデル）の比較

全ての検討ケースにおいて、変位応答、荷重応答ともにほとんど変化が見られなかった。初期剛性の変化がデバイスの応答に及ぼす影響は小さい。

5. まとめ

本研究では、制震デバイスに対する振動台実験を対象としてシミュレーション解析を実施し、制震デバイスの応答予測精度について検討を行った。ゴム系デバイス、鋼材せん断降伏系デバイス、シリンダー系デバイス、鋼材軸降伏系デバイスを対象とし、それぞれのデバイス毎にその開発者らが過去に実施した変位制御実験に基づいて提案されているバイリニアモデルを用いた場合の再現解析と、そのバイリニアモデルにおいて、初期剛性、降伏荷重、2次剛性などのパラメータを変化させた場合の解析結果への影響度合いの検討を行った。本検討により得られた知見を以下に示す。

(1) 変位制御実験に基づくバイリニアモデルを用いた解析によるデバイスの応答の予測精度

振動台実験において開発者らが提案する各デバイスの設計限界変位相当の変位が生じた実験ケースに対して解析を行ったところ、デバイスの種類によって応答の予測精度は異なるが、全般に実験結果と差が生じる結果となった。ゴム系デバイスの場合、全般に荷重応答、変位応答ともに解析値が実験値より小さく評価する結果となった。振動台実験では、1回目の履歴において荷重値が上昇する現象や繰り返

し荷重を受ける度にデバイスの剛性が徐々に低下し変位応答が大きくなる現象が見られたが、解析モデルにはこのような特性が反映されていないため、解析値と実験値の間に差が生じた。鋼材せん断降伏系デバイスや鋼材軸降伏系デバイスの場合は、低降伏点鋼材が用いられていることから、実験では、鋼材のひずみ硬化によりデバイスの履歴形状が繰り返し荷重を受ける度に徐々に膨らんでいく現象が見られた。しかし、解析では降伏値として公称値を用い、2次剛性には比較的低い値を与えたバイリニアモデルを用いており、解析の変位応答が実験値を大きく上回るなど、実験により得られたデバイスの応答と異なる結果となった。シリンダー系デバイスの場合は、速度依存性を厳密に評価できないバイリニアモデルを用いていることもあり、全般に荷重応答、変位応答ともに解析値が実験値を小さく推定する結果となった。

(2) 感度解析の結果

初期剛性をパラメータとした検討では、ほとんどのデバイスにおいて応答値の変化が見られず、初期剛性の変化がデバイスの応答に与える影響は小さいことが確認された。一方、降伏荷重や2次剛性をパラメータとした検討では、ほとんどのデバイスにおいて、デバイスの応答が大きく変化することが確認された。このことは、デバイスの解析モデルにおいて、降伏荷重や2次剛性はデバイスの応答に大きな影響を与える主要なパラメータであり、制震デバイスをを用いた橋梁の耐震解析においては、これらのパラメータ設定に十分注意が必要であることを意味している。すなわち、使用条件に伴う依存特性により制震デバイスに降伏荷重や2次剛性にある範囲のばらつきがある場合には、橋の耐震設計においてはそのばらつきを考慮した上で、橋の部材ならびに制震デバイスそれぞれの設計において安全側となるよう制震デバイスのモデル化手法を考える必要がある。

謝辞：本研究は、土木研究所と民間14社で実施した「橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究」の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (独)土木研究所ほか：橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究報告書 その1 制震ダンパーの動的挙動に関する振動台加振実験、共同研究報告書 第438号，2012.3
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.