

戦-55 制震機構を用いた橋梁の耐震設計法に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 23

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星 限 順一、堺 淳一、
八ツ元 仁

【要旨】

制震デバイスによる橋の耐震性向上については、従来は長大橋に対する事例が多かったが、近年は、鋼アーチ橋や鋼トラス橋をはじめ、既設の桁橋の耐震補強への事例が増えてきている。しかし、制震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、基準等が整備されておらず、制震デバイスの性能評価法及び制震デバイスを用いた橋の耐震設計法の整備が急務となっている。本研究は、これらの技術の確立を目的としており、本年度は、過年度に実施した制震デバイスの振動台実験に対しシミュレーション解析を行い、デバイスの応答予測精度について検討を行った。

キーワード：橋、制震デバイス、振動台実験、シミュレーション解析、解析モデル

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、粘性体を用いたシリンダー系、ゴムの減衰によるエネルギー吸収に期待するゴム系、鋼材の降伏によるエネルギー吸収に期待する鋼材降伏系など、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、基準等が整備されておらず、個々の橋梁に応じて個別に検討、適用されている。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載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の耐震設計法の整備が急務となっている。

本研究は、制震デバイスの性能評価法及び制震デバイスを用いた橋の耐震設計法の確立を目的としており、過年度には、制震デバイスの動的挙動および

速度の依存性を評価するため、振動台実験を実施した。ゴム系デバイス 2 種、鋼材せん断降伏系デバイス 2 種、シリンダー系デバイス 2 種、鋼材軸降伏系デバイス 3 種を対象に、正弦波および地震波入力による加振実験を行った。各デバイスに対し、振動台実験により得られたデバイスの履歴特性と静的載荷により求められた解析モデルとの比較を行った。

こうした振動台実験結果に対し、今年度には、各デバイスの静的載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った。まず、振動台実験結果とシミュレーション解析結果の比較により、デバイスの応答の予測精度について検討を行った。また、これら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

2. 1 実験供試体のモデル化

振動台実験のセットアップのイメージ図を図-1に示す。本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、1 質点系モデルを用いて解析を行うこととした。解析モデルを図-2 に示す。本解析では、1 質点系モデルを用いることとし、ゴム支承および制震

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。

2. 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を期待しない支承であるため、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、ゴム支承の非線形性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）¹⁾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。この手法によれば、免震支承を有効設計変位に対する等価線形化モデルとしてモデル化する場合には、線形バネ要素でモデル化し、荷重-変位履歴から等価剛性と等価減衰定数を与えることになる。しかし、本実験では、加振ケースごとにゴム支承のせん断変形量が異なることから、ゴム支承の等価剛性と等価減衰定数を加振ケー

スごとのせん断変形量に応じて求めることとした。

ゴム支承の等価剛性および等価減衰定数の具体的な算定方法を以下に示す。

- 1) 加振ケースごとに振動台実験結果からゴム支承の荷重-変位関係を求める。
- 2) 最大応答の発生点を+側と-側でそれぞれ読み取り、両点を結ぶ線の傾きにより等価剛性 (K_B) を求める。
- 3) 履歴形状からゴムの変形量 (U_{be})、降伏荷重 (Q_d)、1次剛性 (K_1)、2次剛性 (K_2) を求め、式 (1) に基づいて等価減衰定数 (h_B) を算定する。

$$h_B = \frac{2Q_d \{u_{Be} + Q_d / (K_2 - K_1)\}}{\pi u_{Be} (Q_d + u_{Be} K_2)} \quad (1)$$

以上により求めたゴム支承の等価剛性および等価減衰定数を用いたモデル化の妥当性は、制震デバイスを設置していない(ゴム支承のみのセットアップ)加振ケースに対するシミュレーション解析により、確認した。その結果は、3. に示す。

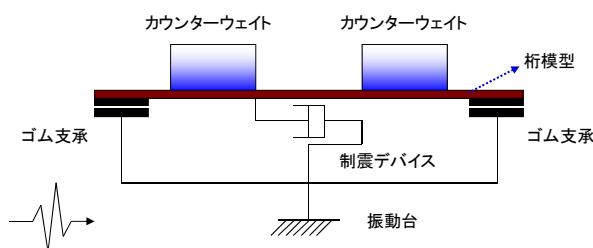


図-1 振動台実験のセットアップのイメージ図

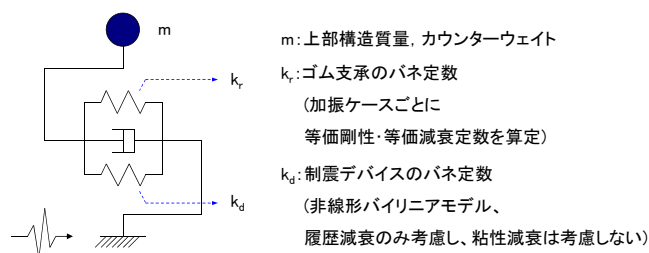


図-2 解析モデル（1質点系モデル）

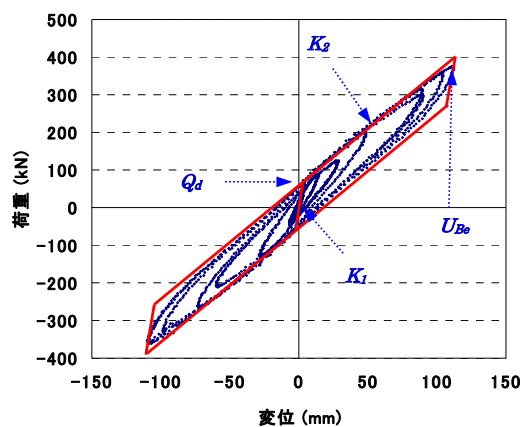
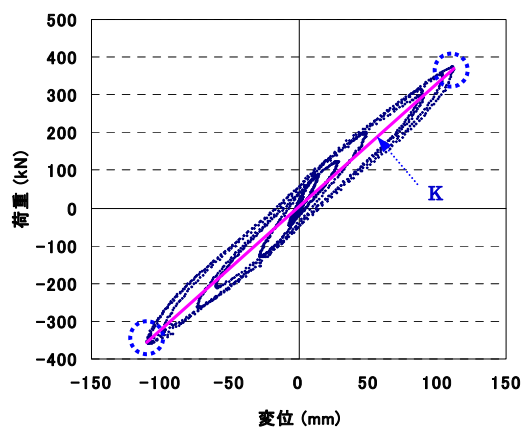


図-3 ゴム支承の等価剛性および等価減衰定数の算定に必要なデータ

2. 3 入力加速度

本シミュレーション解析に用いられた入力加速度は、振動台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。入力加速度の測定位置を図-4に示す。

2. 4 減衰モデル

本振動台実験で考えられる減衰としては、一般に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による履歴減衰とゴム支承の粘性減衰のみ考慮し、後者については要素別 Rayleigh 型粘性減衰を用いて評価することとした(式(2))。ゴム支承の粘性減衰については、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を用いた。

$$C = \sum_{i=1}^j (\alpha[m_i] + \beta[k_i]) \quad (2)$$

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

2. 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。なお、解析ソフトは、DYNA2E(Ver.7.2、CTCソリューションズ)を用いた。

3. 振動台実験に用いたゴム支承のモデル化が解析精度に及ぼす影響

3. 1 概要

2.2に示したゴム支承のモデル化が解析精度に及ぼす影響を評価することを目的とし、制震デバイスを設置していない(ゴム支承のみのセットアップ)加振ケースに対してシミュレーション解析を行った。表-1に検討ケースを示す。ホワイトノイズ加振ケースを除いた全加振ケースに対してシミュレーション解析を実施し、桁模型の変位応答に着目して解析結果と実験結果の比較を行った。

3. 2 検討ケースにおけるゴム支承の等価剛性および等価減衰定数の算定

まず、各加振ケースにおいてゴム支承の等価剛性および等価減衰定数を算定した。算定方法は、2.2に

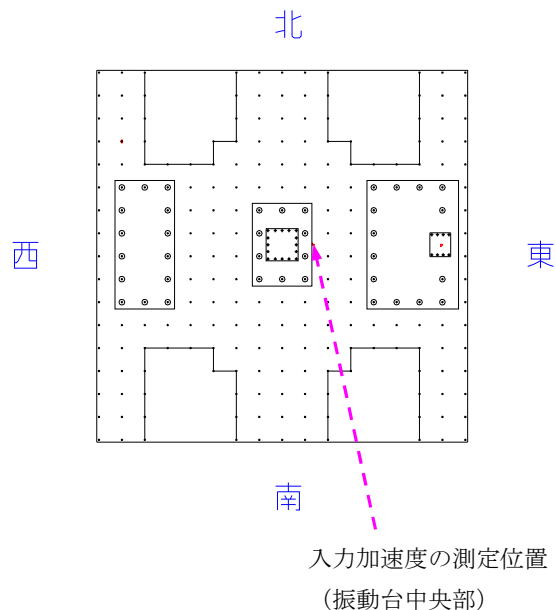


図-4 入力加速度の測定位置

表-1 検討ケース(No.1は除く)

実験No.	入力波	加振条件	ゴム支承の最大せん断ひずみ(%)
1	ホワイトノイズ	0.05m/sec ² で50Hz	1.2
2	タイプⅠ地震波	振幅10%	2.8
3	タイプⅠ地震波	振幅30%	6.4
4	タイプⅠ地震波	振幅50%	16.1
5	タイプⅠ地震波	振幅70%	35.3
6	タイプⅠ地震波	振幅90%	63.2
7	タイプⅡ実験地震波	振幅10%	6.3
8	タイプⅡ実験地震波	振幅20%	16.1
9	タイプⅡ実験地震波	振幅30%	31.9
10	タイプⅡ実験地震波	振幅40%	51.0
11	タイプⅡ実験地震波	振幅50%	75.8
12	タイプⅡ実験地震波	振幅55%	88.7
13	タイプⅡ実験地震波	振幅60%	102.3
14	正弦波1.0Hz	0.5m/sec ²	3.8
15	正弦波1.0Hz	1.0m/sec ²	10.4
16	正弦波1.0Hz	2.0m/sec ²	34.4
17	正弦波1.0Hz	2.5m/sec ²	56.1
18	正弦波1.0Hz	3.0m/sec ²	85.1
19	正弦波0.5Hz	1.0m/sec ²	7.4
20	正弦波0.5Hz	2.0m/sec ²	19.1
21	正弦波0.5Hz	2.5m/sec ²	28.6
22	正弦波0.5Hz	3.0m/sec ²	39.1
23	正弦波0.5Hz	3.5m/sec ²	49.8

示したとおりである。検討ケースごとの算定値を表-2に、図-5と図-6にゴム支承のせん断ひずみと等価剛性の関係およびゴム支承のせん断ひずみと等価減衰定数の関係をそれぞれ入力波別にプロットした結果を示す。等価剛性と等価減衰定数には入力波によって多少のばらつきは見られるものの、ゴム支承のせん断ひずみが大きくなるにつれて等価剛性、等価減衰定数ともに小さくなる傾向が確認できる。

3. 3 解析結果と実験結果の比較

図-7、図-8 は、地震波と正弦波加振ケースのうち4 ケースずつを例に、桁模型の時刻歴変位応答の解析結果と実験結果の比較をそれぞれ示した結果である。No.2、No.7 のように加振振幅が小さくゴム支承のせん断変形が小さいケースにおいては、解析結果と実験結果に差が見られる。この理由は、ゴム支承がほとんど変形せずゴム支承の履歴形状が明確に現れないため、等価剛性と等価減衰定数の算定に誤差

が生じやすいためと考えられる。ただし、その他のほとんどの加振ケースにおいては、解析結果が実験結果によく近似していることが確認できた。したがって、2. 2 に示したゴム支承の等価剛性と等価減衰定数の算定方法は、本シミュレーション解析を行う上で妥当であると判断し、4. の制震デバイスを設置した加振ケースのシミュレーション解析では、同方法に基づき各加振ケースの実験結果からゴム支承の等価剛性と等価減衰定数を算定することとした。

表-2 ゴム支承の等価剛性と等価減衰定数

実験No.	入力波	せん断ひずみ (%)	等価剛性 (kN/m)	減衰定数
2	タイプ I 地震波 振幅10%	2.8	3,696	0.19
3	タイプ I 地震波 振幅30%	6.4	2,408	0.14
4	タイプ I 地震波 振幅50%	16.1	1,676	0.14
5	タイプ I 地震波 振幅70%	35.3	1,190	0.10
6	タイプ I 地震波 振幅90%	63.2	984	0.09
7	タイプ II 実験地震波 振幅10%	6.3	2,040	0.16
8	タイプ II 実験地震波 振幅20%	16.1	1,418	0.12
9	タイプ II 実験地震波 振幅30%	31.9	1,188	0.11
10	タイプ II 実験地震波 振幅40%	51.0	1,007	0.08
11	タイプ II 実験地震波 振幅50%	75.8	949	0.08
12	タイプ II 実験地震波 振幅55%	88.7	910	0.08
13	タイプ II 実験地震波 振幅60%	102.3	879	0.08
14	正弦波1.0Hz_0.5m/sec ²	3.8	2,065	0.20
15	正弦波1.0Hz_1.0m/sec ²	10.4	1,610	0.13
16	正弦波1.0Hz_2.0m/sec ²	34.4	1,080	0.12
17	正弦波1.0Hz_2.5m/sec ²	56.0	925	0.10
18	正弦波1.0Hz_3.0m/sec ²	85.1	852	0.09
19	正弦波0.5Hz_1.0m/sec ²	7.4	1,666	0.15
20	正弦波0.5Hz_2.0m/sec ²	19.1	1,241	0.12
21	正弦波0.5Hz_2.5m/sec ²	28.6	1,110	0.12
22	正弦波0.5Hz_3.0m/sec ²	39.1	1,007	0.10
23	正弦波0.5Hz_3.5m/sec ²	49.8	949	0.09

※表記の等価剛性値は、ゴム支承1個当たりの値である。

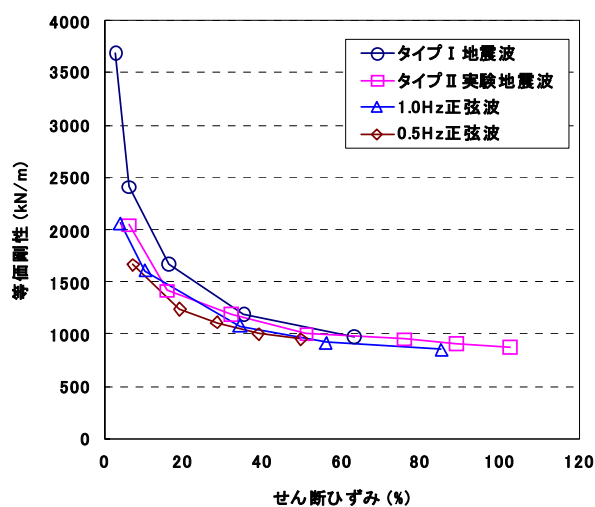


図-5 ゴム支承のせん断ひずみと等価剛性の関係

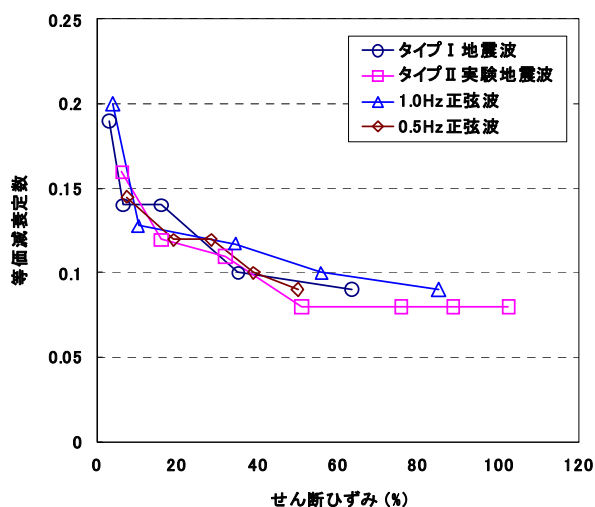
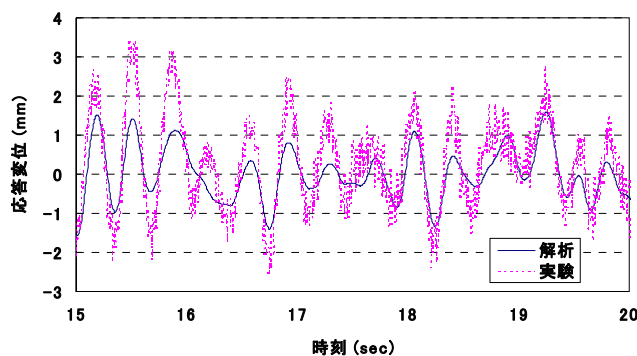
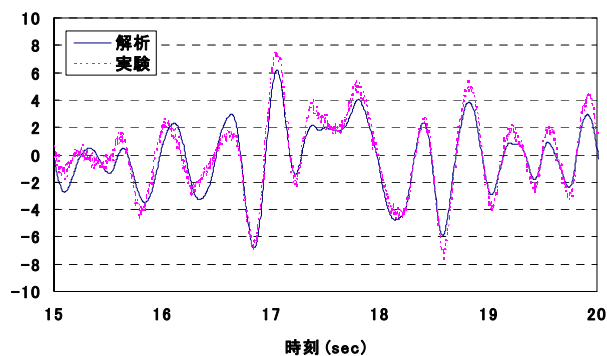


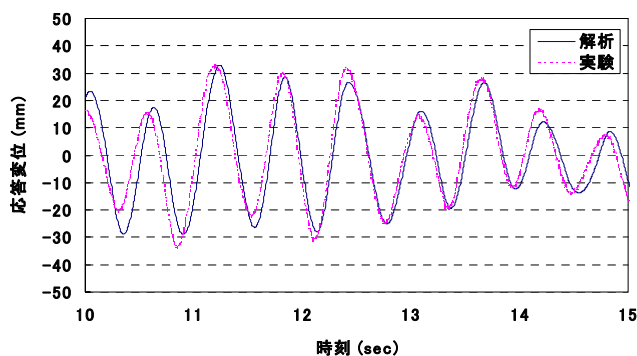
図-6 ゴム支承のせん断ひずみと等価減衰定数の関係



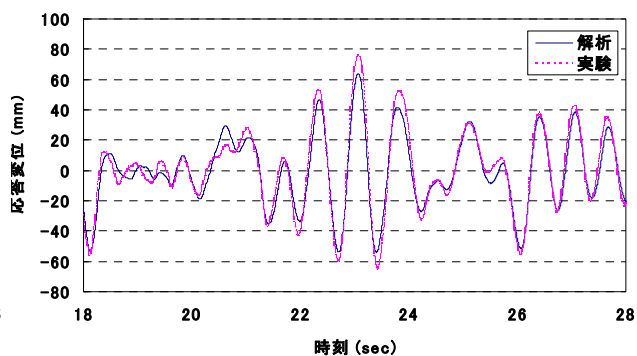
(a) No.2 (タイプ I 地震波_振幅 10%)



(b) No.3 (タイプ I 地震波_振幅 30%)

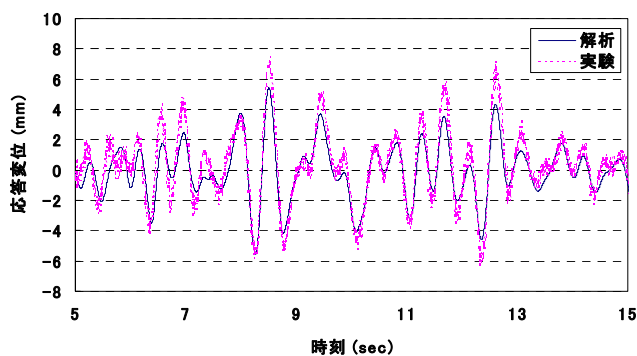


(c) No.5 (タイプ I 地震波_振幅 70%)

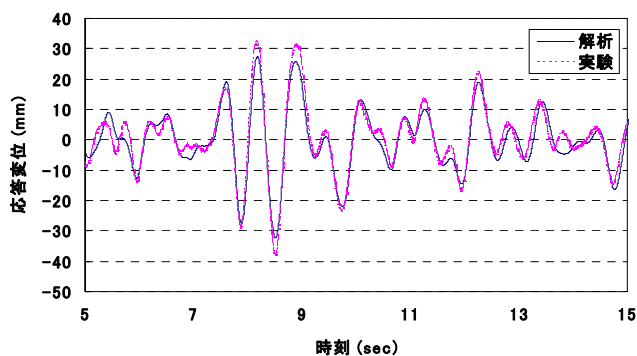


(d) No.6 (タイプ I 地震波_振幅 90%)

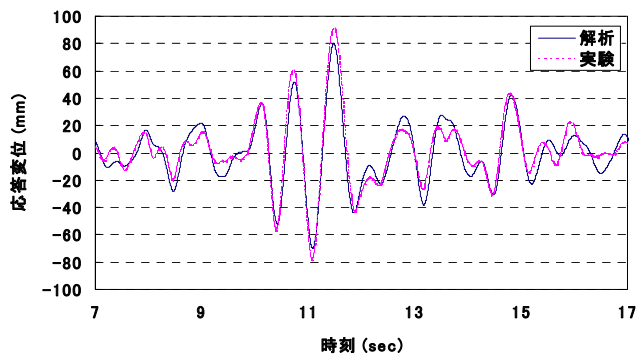
(1) タイプ I 地震波



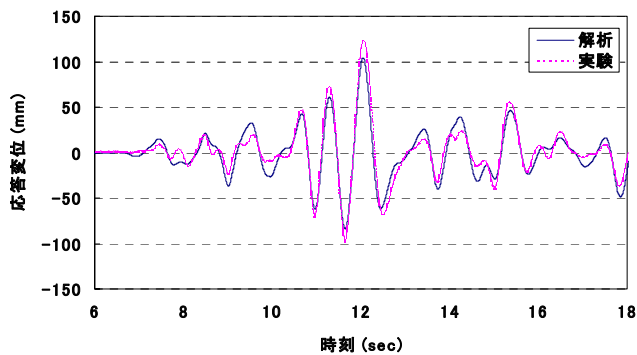
(a) No.7 (タイプ II 実験地震波_振幅 10%)



(b) No.9 (タイプ II 実験地震波_振幅 30%)



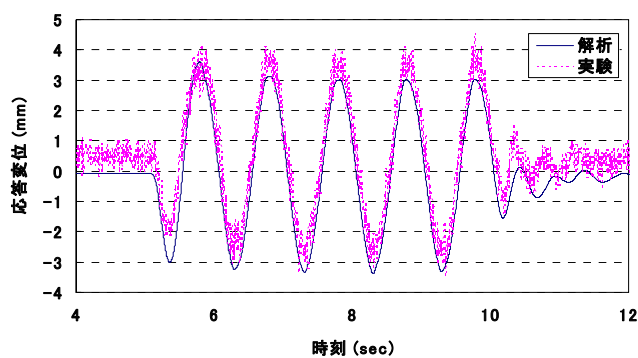
(c) No.11 (タイプ II 実験地震波_振幅 50%)



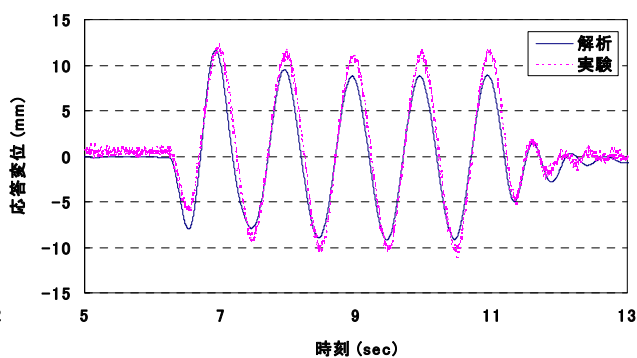
(d) No.13 (タイプ II 実験地震波_振幅 60%)

(2) タイプ II 地震波

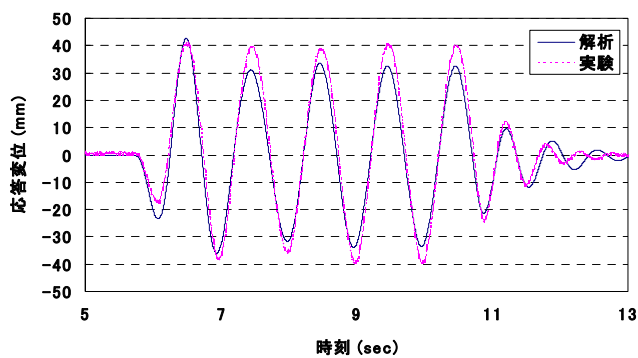
図-7 地震波入力に対する桁模型の時刻歴変位応答の比較



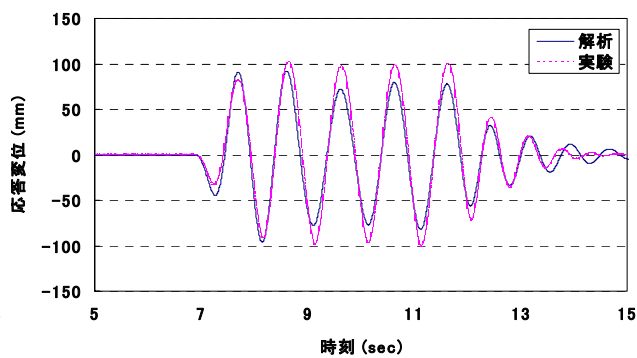
(a) No.14 (正弦波 1.0Hz_0.5m/sec²)



(b) No.15 (正弦波 1.0Hz_1.0m/sec²)

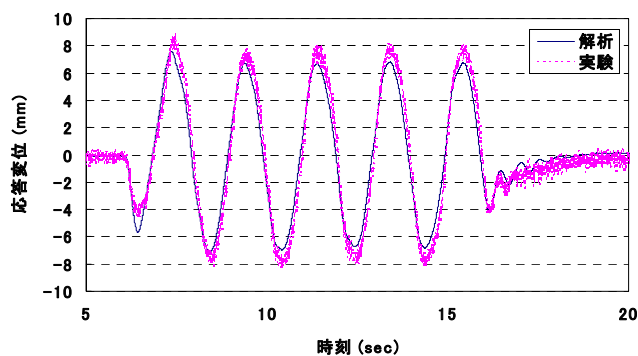


(c) No.16 (正弦波 1.0Hz_2.0m/sec²)

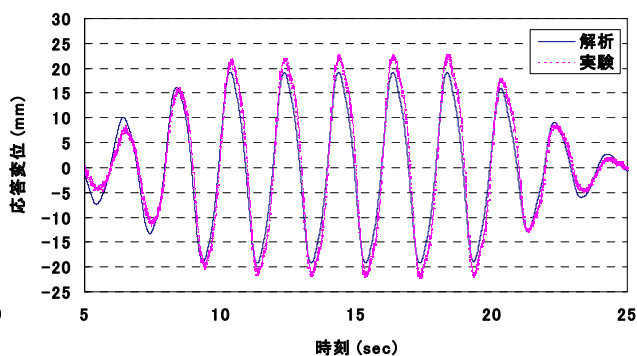


(d) No.18 (正弦波 1.0Hz_3.0m/sec²)

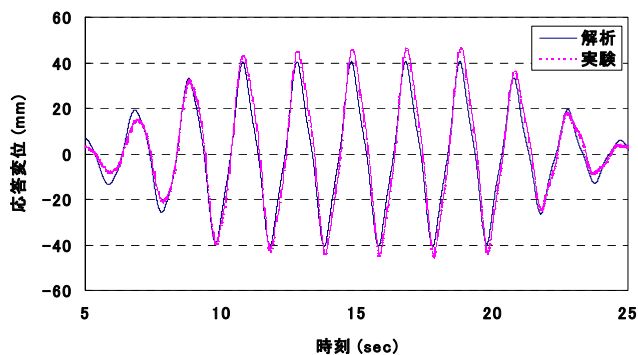
(1) 正弦波 1.0Hz



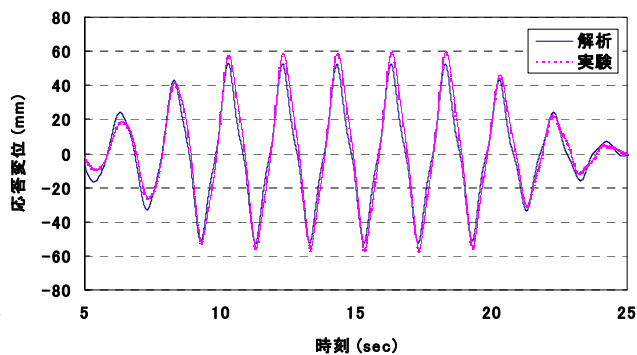
(a) No.19 (正弦波 0.5Hz_1.0m/sec²)



(b) No.20 (正弦波 0.5Hz_2.0m/sec²)



(c) No.22 (正弦波 0.5Hz_3.0m/sec²)



(d) No.23 (正弦波 0.5Hz_3.5m/sec²)

(2) 正弦波 0.5Hz

図-8 正弦波入力に対する桁模型の時刻歴変位応答の比較

4. シミュレーション解析によるデバイスの応答予測精度

4. 1 検討ケースの選定

検討ケースは、デバイスの最大応答変位が設計限界変位に近い3つのケースとし、正弦波2ケースと実験地震波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を入力した場合のうち、応答の大きい方を選んでいる。各デバイスの検討ケースを表-3に示す。

4. 2 各デバイスの検討モデルの設定

各デバイスの検討モデルの骨格曲線を図-9に示す。ここでは、応答予測精度に及ぼす力学的特性のパラメータの影響を調べることを目的とし、初期剛性、2次剛性、降伏荷重をパラメータとした感度解析を行うこととした。そのうち、各デバイスのモデル1は、過去に実施し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シミュレーション解析を行い、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上記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。

4. 2. 1 ゴム系デバイスA

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、過去に実施し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4.3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 No.3-7 と No.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。

4. 2. 2 ゴム系デバイスB

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、過去に実施した変位制御実験および温度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4.3に詳述する

表-3 検討ケース

デバイス	実験No.	入力波	$\delta_{\max} / \delta_a$
ゴム系A	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
ゴム系B	1-21	タイプⅡ実験地震波 振幅120%	0.50
	1-24	正弦波1.0Hz 7.5m/sec ²	0.75
	1-26	正弦波2.0Hz 5.5m/sec ²	0.75
鋼材せん断降伏系A	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
鋼材せん断降伏系B	2-2	正弦波1.0Hz 6.2m/sec ²	0.87
	3-5	タイプⅡ実験地震波 振幅110%	0.90
	4-3	正弦波2.0Hz 6.2m/sec ²	0.95
シリンダー系A	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
シリンダー系B	3	正弦波1.0Hz 5.0m/sec ²	0.97
	10	正弦波2.0Hz 8.0m/sec ²	0.98
	16	タイプⅡ実験地震波 振幅120%	1.07
鋼材軸降伏系A	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
鋼材軸降伏系B	1-5	タイプⅡ実験地震波 振幅120%	0.51
	1-9	正弦波2.0Hz 8.0m/sec ²	0.96
	3-2	正弦波1.0Hz 8.0m/sec ²	0.82
鋼材軸降伏系C	3-2	タイプⅡ実験地震波 振幅120%	0.44
	3-4	正弦波2.0Hz 9.0m/sec ²	0.97
	3-5	正弦波1.5Hz 9.0m/sec ²	0.94

※ $\delta_{\max}$: 振動台実験により生じた最大変位

※ δ_a : 開発者らが提案する設計限界変位

が、振動台実験の履歴をみると、繰り返し荷重を受ける度にデバイスの2次剛性が徐々に低下しながら変位応答が伸びていき、No.1-24、No.1-26では実験の最大変位がモデル1の解析結果を上回る結果となった。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0.8倍したモデルをモデル2、モデル2の2次剛性を1.2倍したモデルをモデル3、モデル1の初期剛性を0.8倍したモデルをモデル4とした。

4. 2. 3 鋼材せん断降伏系デバイスA

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4.3に詳述するが、全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、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。

4. 2. 4 鋼材せん断降伏系デバイス B

過去に実施した変位制御実験により得られたデバイスの履歴を基に作成したバイリニアモデルをモデル 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 4.3 に詳述するが、全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 の降伏荷重を 0.8 倍したモデルをモデル 2、モデル 1 の初期剛性を 0.8 倍したモデルをモデル 3、モデル 2 の 2 次剛性を設計限界変位が生じたときの点と降伏点を結ぶ線の傾きとしたモデルをモデル 4 とした。

4. 2. 5 シリンダー系デバイス A

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、定格速度に達したら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載荷実験結果に基づき、簡便的にバイリニアモデルで表すことが可能であり、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 に詳述するが、全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

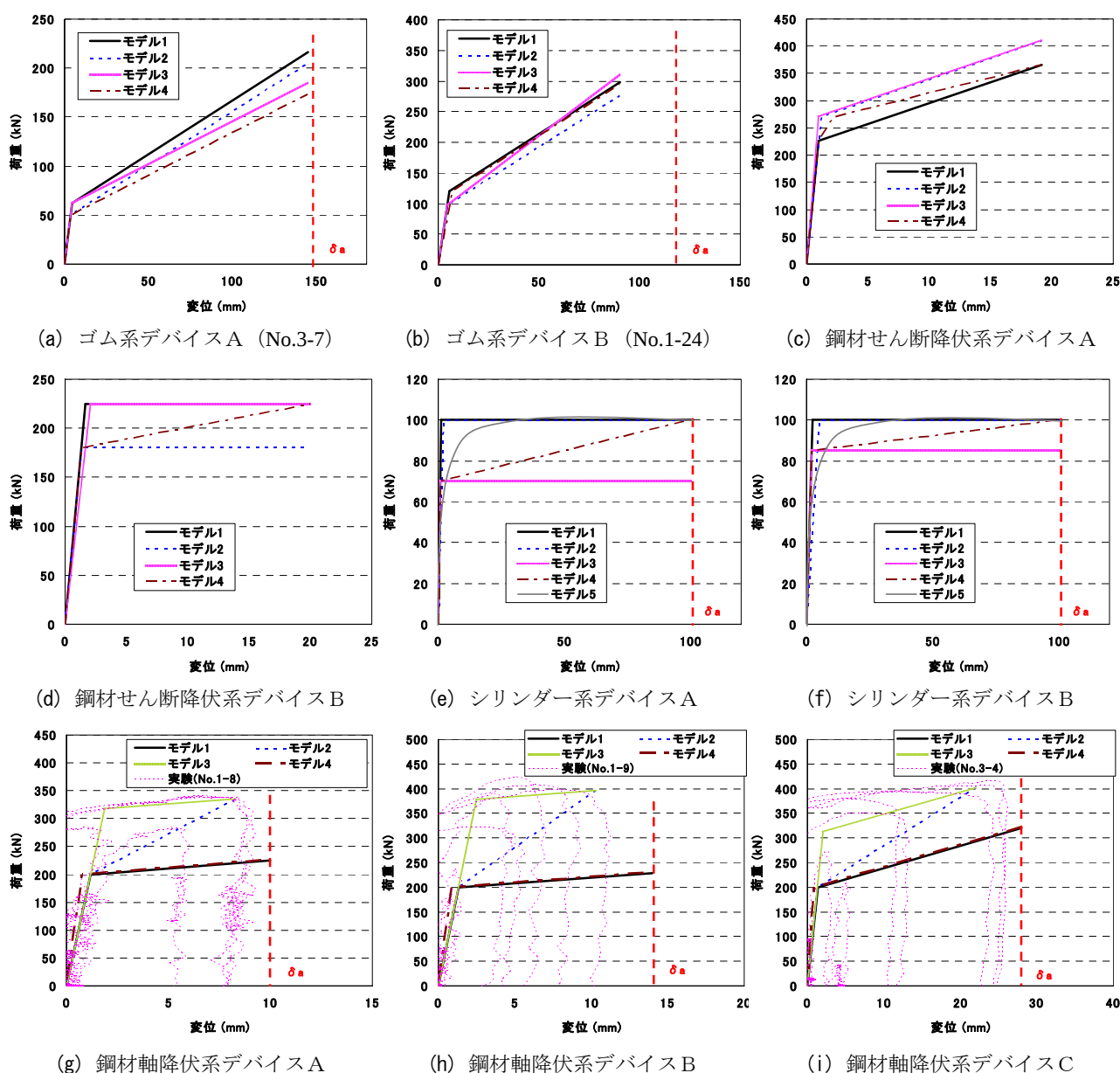


図-9 各デバイスの検討モデル

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、速度依存性をモデル化した速度累乗型モデルをモデル 5 とした。

4. 2. 6 シリンダー系デバイス B

本デバイスでは、シリンダー系デバイス A と同様に、定格速度による繰り返し載荷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 4.3 に詳述するが、全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 0.85 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、速度依存性をモデル化した速度累乗型モデルをモデル 5 とした。

4. 2. 7 鋼材軸降伏系デバイス A

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、モデル 1 を用いた解析結果と実験結果の比較は 4.3 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. 2. 8 鋼材軸降伏系デバイス B

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、モデル 1 を用いた解析結果と実験結果の比較は 4.3 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.1-9 の実験結果を基に、モデル 1 の 2 次剛性を約 9.6 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 1.9 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. 2. 9 鋼材軸降伏系デバイス C

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、モデル 1 を用いた解析結果

と実験結果の比較は 4.3 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確認された。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.1-9 の実験結果を基に、モデル 1 の 2 次剛性を約 2.2 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. 3 解析結果と実験結果の比較

デバイスの荷重-変位関係（以下“デバイスの履歴”と記す）と桁模型の時刻歴変位応答において、全デバイスの実験結果と解析結果の比較を図-10～図-20 に示す。また、表-4 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。

4. 3. 1 ゴム系デバイス A

1) 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 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-10 (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を反映し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、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。

2) 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%程度とわずかであったが、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僅かながら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。

4. 3. 2 ゴム系デバイス B

1) モデル 1 の結果分析

最大変位応答に関しては、No.1-21 で解析値が実験値より 5%程度大きい、No.1-24 と No.1-26 では、解析値が実験値より 11%～12%程度小さい結果が得られた。一方、最大荷重応答に関しては、3 加振ケースともに解析値が実験値より小さくなっており、No.1-21 で 21%、No.1-24 で 17%、No.1-26 で 13%解析値が実験値を下回る結果となった。

2) 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

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.1-21 で約 14%、No.1-24 で約 5%、No.1-26 で約 13%と大きくなる結果となった。最大荷重応答に関しては、ほとんど変化が見られなかった。本デバイスの解析モデルにおいて、降伏荷重の変化は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 2 次剛性を 1.2 倍したモデル) の比較

最大荷重応答に関しては、モデル 3 の応答がモデル 2 より No.1-21 で約 11%、No.1-24 で約 6%、No.1-26 で約 20%大きく得られた。変位応答に関しては、No.1-21 と No.1-24 ではモデル 2 よりモデル 3 の応答値がそれぞれ 3%、8%小さく得られたが、No.1-26 ではモデル 3 の応答値が 9%大きい。

No.1-26 を除き、2 次剛性を大きくすることにより荷重応答が大きく、変位応答が小さくなる傾向にあることが確認された。

・モデル 1 とモデル 4 (モデル 1 の初期剛性を 0.8 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、荷重応答ともに両モデルの応答差はほとんど見られず、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。

4. 3. 3 鋼材せん断降伏系デバイス A

1) 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。

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。

2) 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: 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

の初期剛性を 0.025 倍したモデル) 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。

4. 3. 4 鋼材せん断降伏系デバイス B

1) 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.2-2 で 30%、No.3-5 で 46%、No.4-3 で 65%小さく得られた。最大荷重応答に関しても、解析値が実験値より No.2-2 で 11%、No.3-5 で 6%、No.4-3 で 11%小さく得られており、全ケースで変位応答、荷重応答ともに解析値の方が小さく評価された。

本デバイスでも鋼材せん断降伏系デバイス A と同様に鋼材のひずみ硬化による影響が現れているが、モデル 1 では変位制御実験結果に基づいて降伏荷重を定め、降伏後の剛性を限りなく 0 に近い値を与えた完全弾塑性バイリニアモデルでモデル化しているため、実験結果との差が生じたと考えられる。

2) 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

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.2-2 で約 3.2 倍、No.3-5 で約 2.4 倍、No.4-3 で約 3.3 倍大きくなり、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大きく増加することが確認された。

・モデル 1 とモデル 3 (モデル 1 の初期剛性を 0.8 倍したモデル) の比較

全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 2 とモデル 4 (モデル 2 の 2 次剛性を設計限界変位が生じたときの点と降伏点を結ぶ線の傾きとしたモデル) の比較

荷重応答に関しては、両モデルの応答差はほとんど見られなかったが、変位応答に関しては、モデル 2 よりモデル 4 の最大応答が No.2-2 で 18%、No.3-5 で 8%、No.4-3 で 1%と小さく得られており、2 次剛性の変化はデバイスの変位応答に影響を及ぼすことが確認された。

4. 3. 5 シリンダー系デバイス A

1) 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。

2) 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. 3. 6 シリンダー系デバイス B

1) 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.3 で 10%、No.10 で 6%、No.16 で 10% 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.3 で 15%、No.10 で 21%、No.16 で 16% 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り、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.3 で 10%、No.10 で 18%、No.16 で 8% 小さく推定している。

2) 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.3 で 7%、No.10 で 4%、No.16 で 2%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。

・モデル1とモデル3（モデル1の降伏荷重を0.85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.3 で約 14%、No.10 で約 2%、No.16 で約 2% 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.3 で 16%、No.10 で 17%、No.16 で 17% 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 3%～6% 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.3 で 4%、No.10 で 6%、No.16 で 3% 大きく得られた。一方、変位応答に関しては、No.3 と No.16 ではモデル5の応答値がそれぞれ 20%、4% 増加しているが、No.10 ではモデル5の応答値が 21% 低減しており、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. 3. 7 鋼材軸降伏系デバイスA

1) 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次剛性を比較的強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。

2) 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% 小さくなっており、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。

4. 3. 8 鋼材軸降伏系デバイスB

1) 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.1-5 で 3.35 倍、No.1-9 で 3.65 倍、No.3-2 で 4.45

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.1-5 で 34%、No.1-9 で 28%、No.3-2 で 23%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 の解析結果に差が生じたと考えられる。

2) 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 9.6 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.1-5 で約 54%、No.1-9 で約 66%、No.3-2 で約 75%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.1-5 で約 62%、No.1-9 で約 73%、No.3-2 で 44%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 1.9 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.1-5 で約 88%、No.1-9 で約 93%、No.3-2 で約 93%小さくなっており、降伏荷重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。

4. 3. 9 鋼材軸降伏系デバイス C

1) 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.3-2 で 1.69 倍、No.3-4 で 2.53 倍、No.3-5 で 2.12 倍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.3-2 では解析値が実験値より 23%小さく得られたが、No.3-4 と No.3-5 ではそれぞれ 21%、4%解析値が実験値を上回る結果となった。

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 の解析結果に差が生じたと考えられる。

2) 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 2.2 倍したモデル）の比較

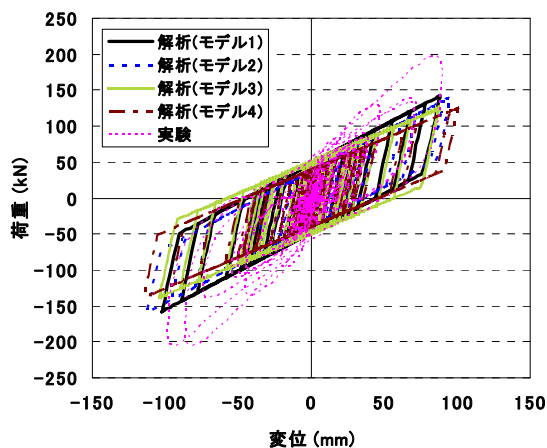
最大変位応答に関しては、モデル 2 の応答値がモデル 1 より No.3-2 で約 21%、No.3-4 で約 44%、No.3-5 で約 34%小さくなる結果が得られ、2 次剛性を大きく与えることにより変位応答が小さくなることが確認された。一方、最大荷重応答に関しては、モデル 2 の応答値がモデル 1 より No.3-2 で約 21%、No.3-4 で約 12%、No.3-5 で約 22%大きく得られており、2 次剛性を大きく与えることにより最大荷重応答は増加することが確認された。本デバイスの解析モデルにおいて、2 次剛性の変化は変位応答、荷重応答ともに大きな影響を及ぼすことが確認された。

・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

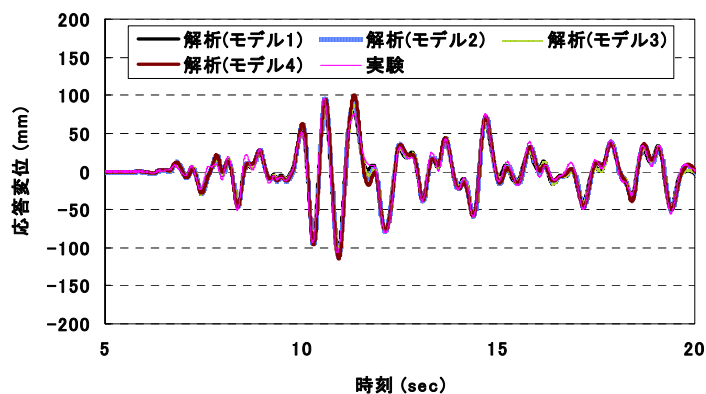
最大変位応答に関しては、モデル 3 の応答値がモデル 1 より No.3-2 で約 84%、No.3-4 で約 74%、No.3-5 で約 48%小さくなっており、降伏荷重がデバイスの変位応答に大きな影響を及ぼすことが確認された。また、モデル 3 では、実験結果を参考として降伏値を設定しているが、解析の場合デバイスが降伏後大きく塑性しない履歴が得られており、実験と差が生じる結果となった。

・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。

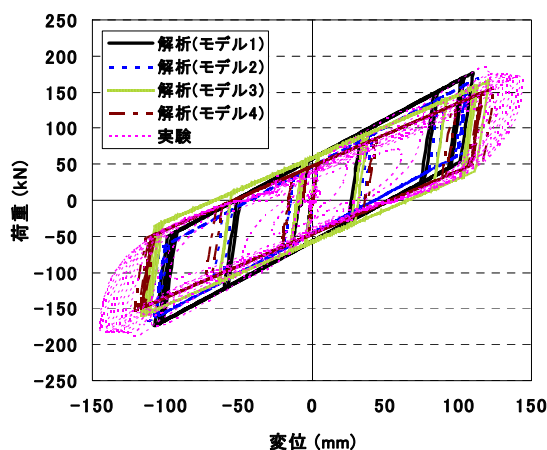


(a) デバイスの履歴

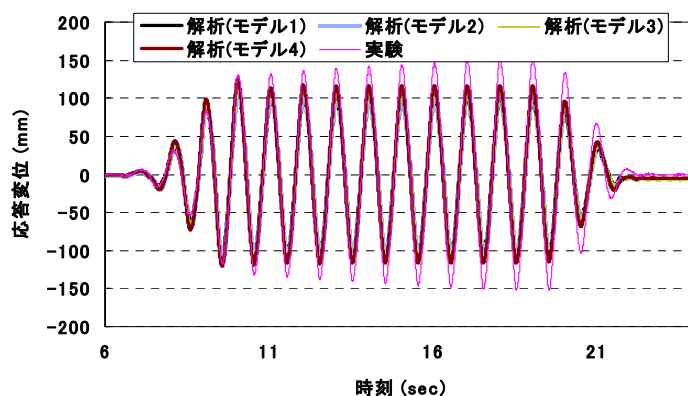


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.1-5 (タイプII実験地震波_振幅 110%)

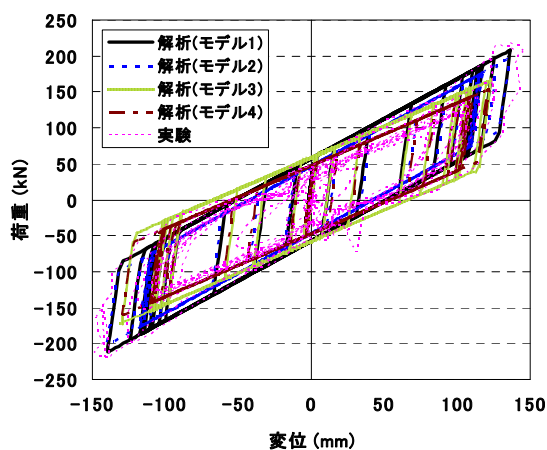


(a) デバイスの履歴

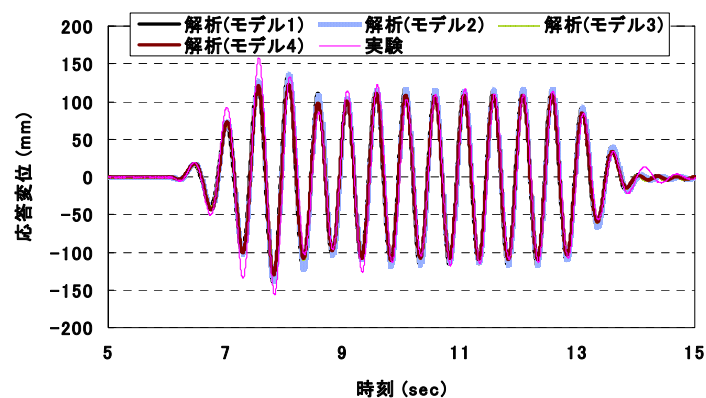


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.3-7 (正弦波 1.0Hz_6.2m/sec²)



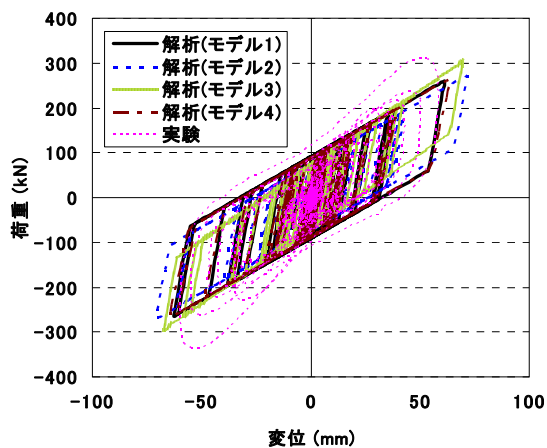
(a) デバイスの履歴



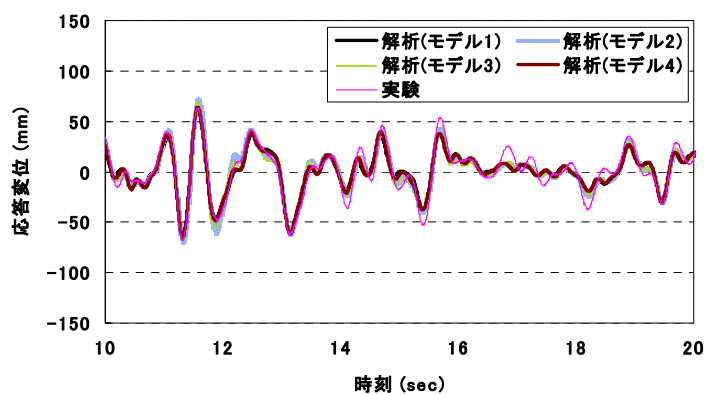
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.4-10 (正弦波 2.0Hz_9.0m/sec²)

図-10 実験結果と解析結果の比較 (ゴム系デバイスA)

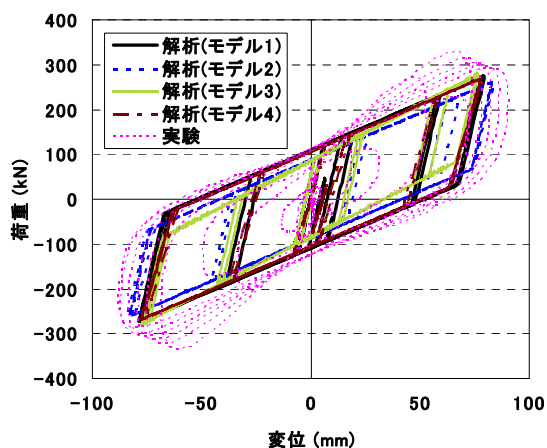


(a) デバイスの履歴

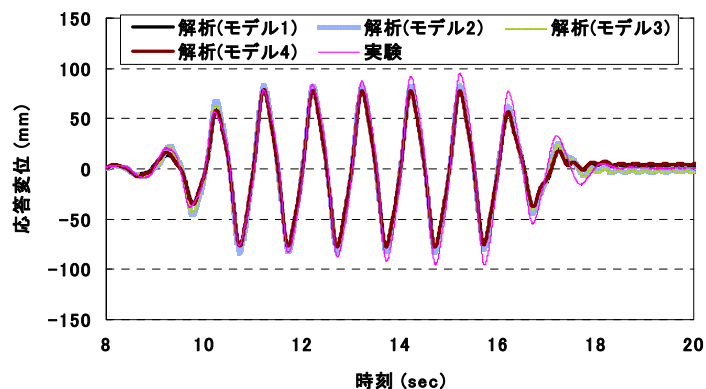


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.1-21 (タイプⅡ実験地震波_振幅 120%)

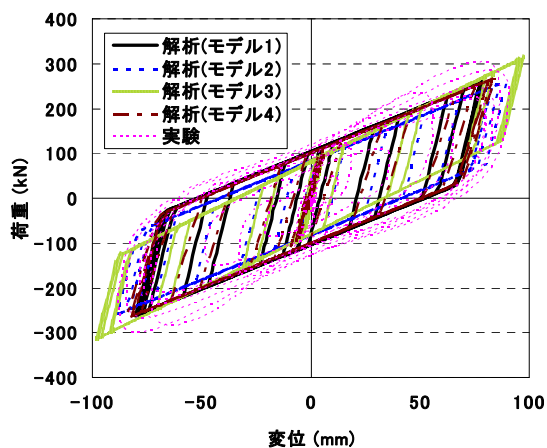


(a) デバイスの履歴

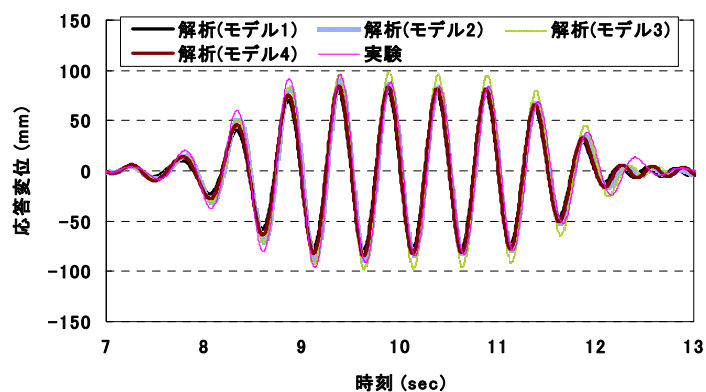


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.1-24 (正弦波 1.0Hz_7.5m/sec²)



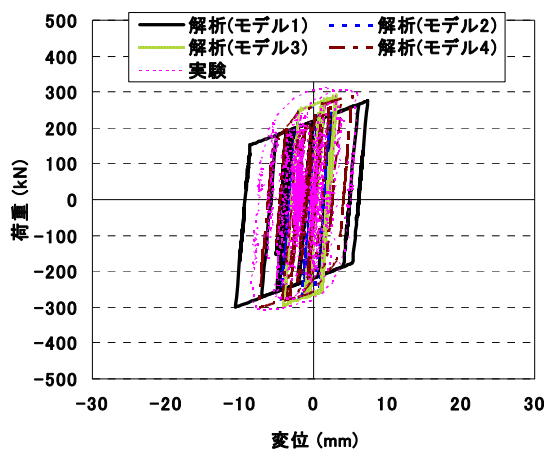
(a) デバイスの履歴



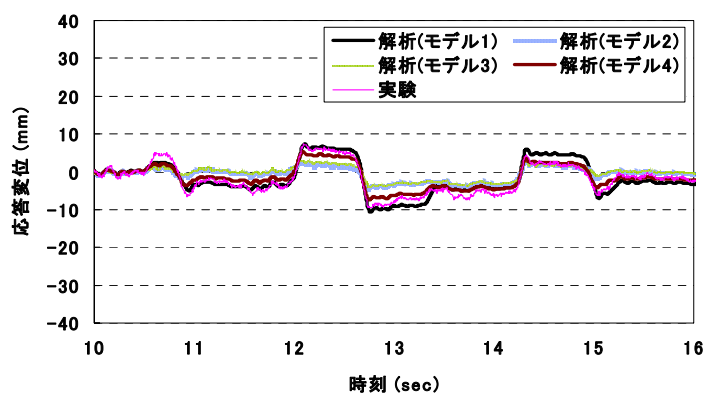
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.1-26 (正弦波 2.0Hz_5.5m/sec²)

図-11 実験結果と解析結果の比較 (ゴム系デバイスB)

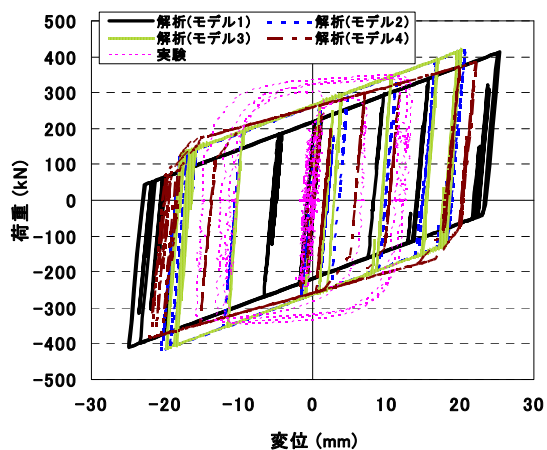


(a) デバイスの履歴

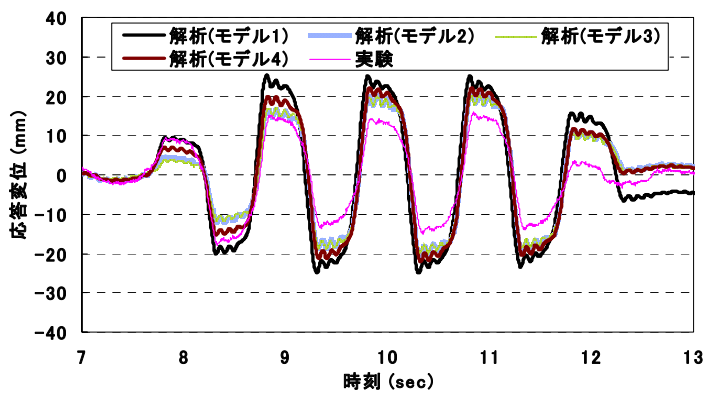


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.4-2 (タイプII実験地震波_振幅 120%)

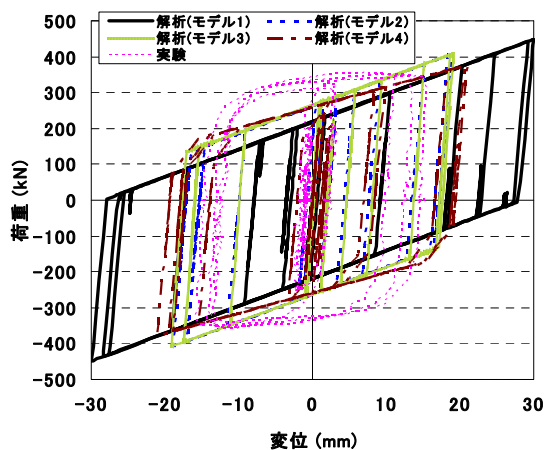


(a) デバイスの履歴

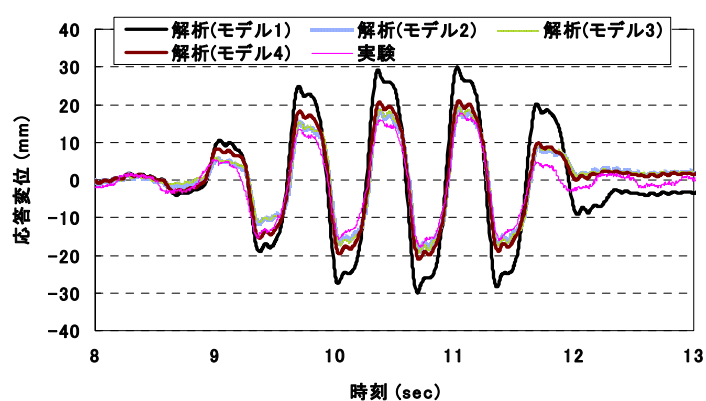


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.5-1 (正弦波 1.0Hz_8.0m/sec²)



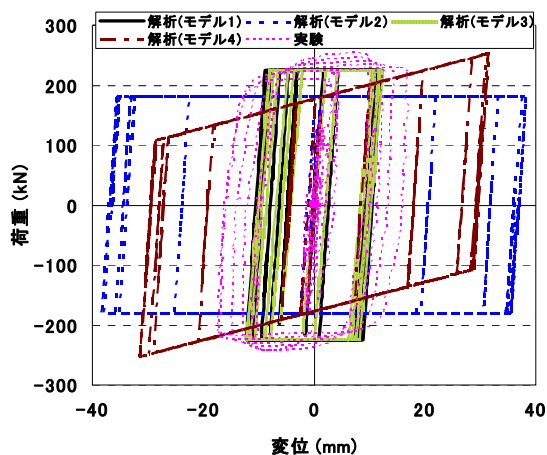
(a) デバイスの履歴



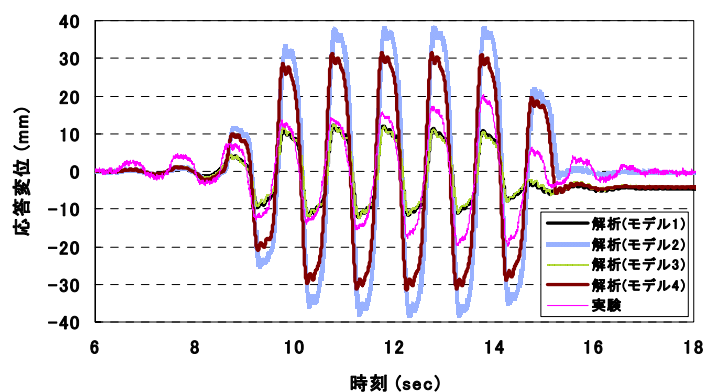
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.5-2 (正弦波 1.5Hz_8.0m/sec²)

図-12 実験結果と解析結果の比較 (鋼材せん断降伏系デバイスA)

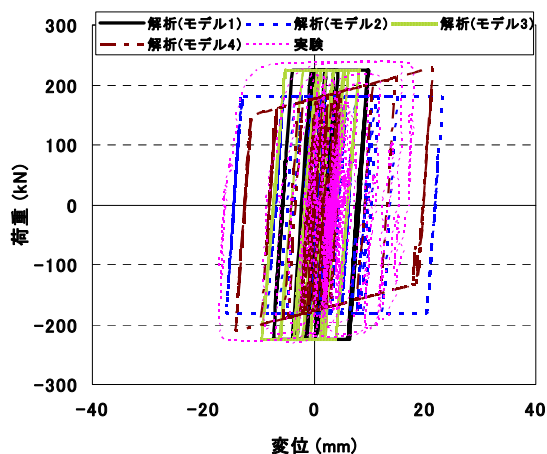


(a) デバイスの履歴

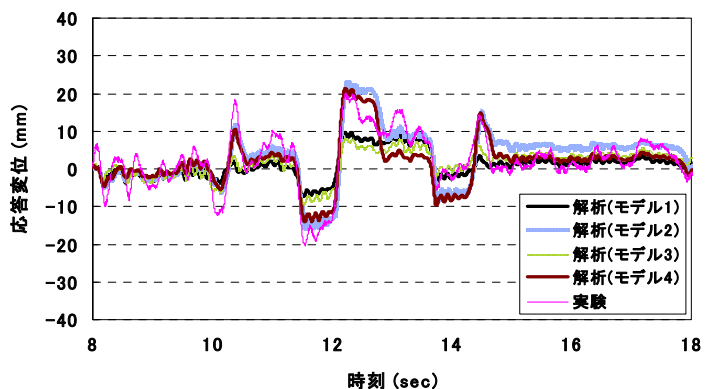


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.2-2 (正弦波 1.0Hz_6.2m/sec²)

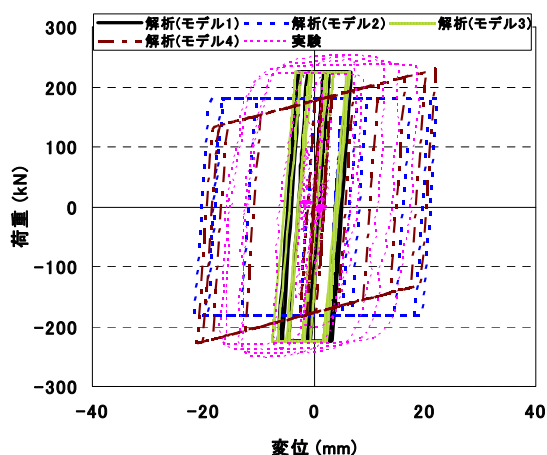


(a) デバイスの履歴

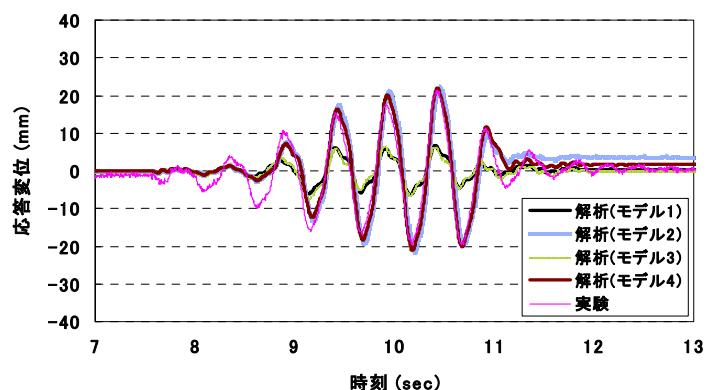


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.3-5 (タイプII実験地震波_振幅-110%)



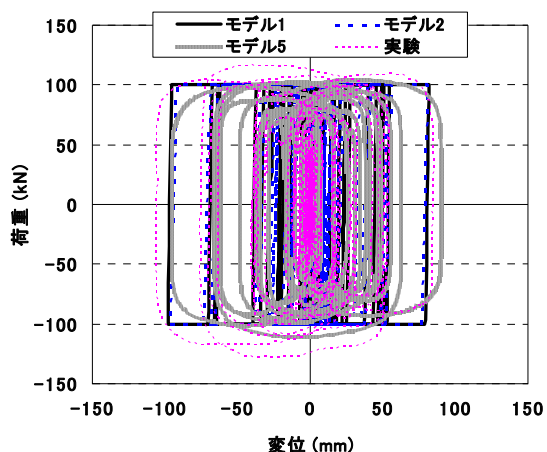
(a) デバイスの履歴



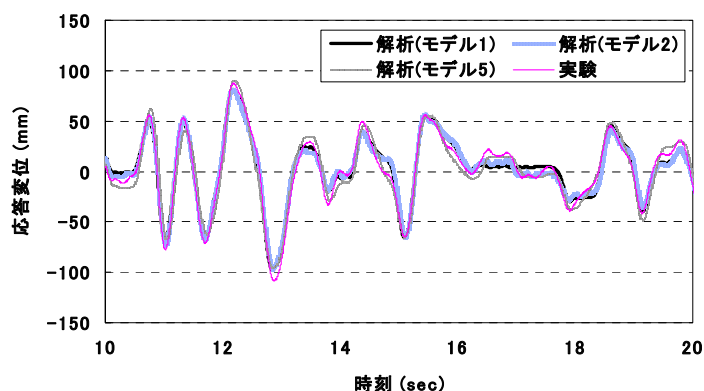
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.4-3 (正弦波 2.0Hz_6.2m/sec²)

図-13 鋼材せん断降伏系デバイスB

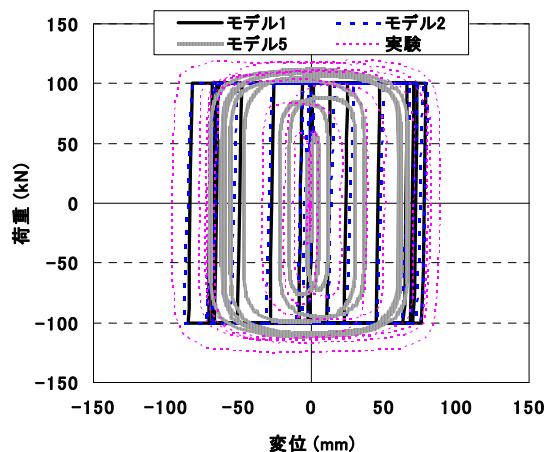


(a) デバイスの履歴

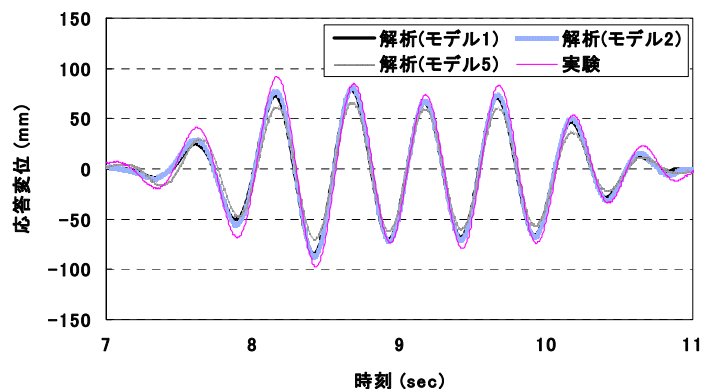


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.2-5 (タイプII実験地震波_振幅 120%)

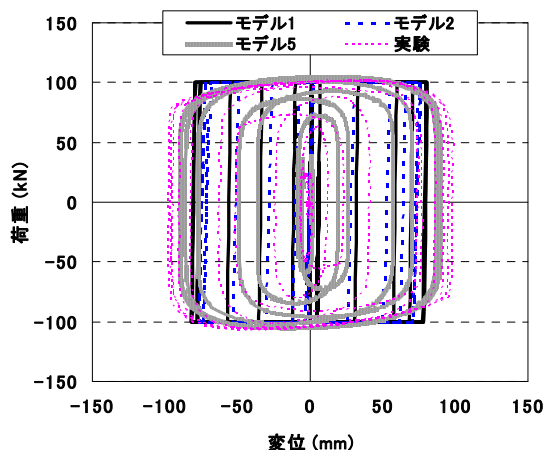


(a) デバイスの履歴

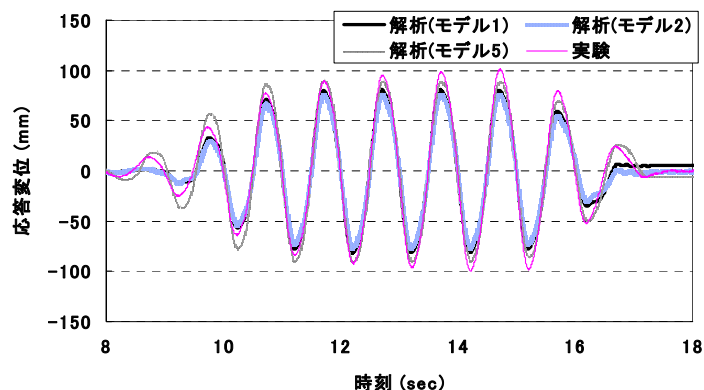


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.4-6 (正弦波 2.0Hz_8.0m/sec²)



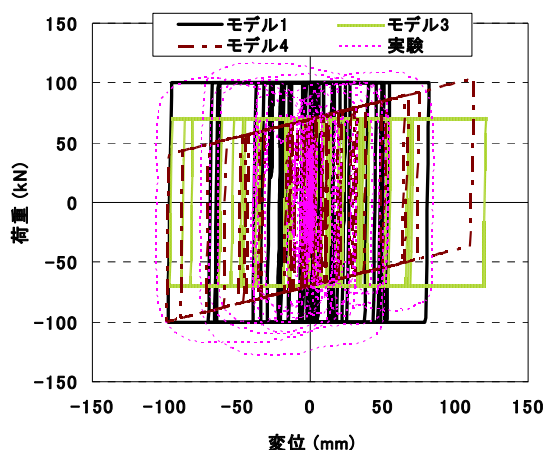
(a) デバイスの履歴



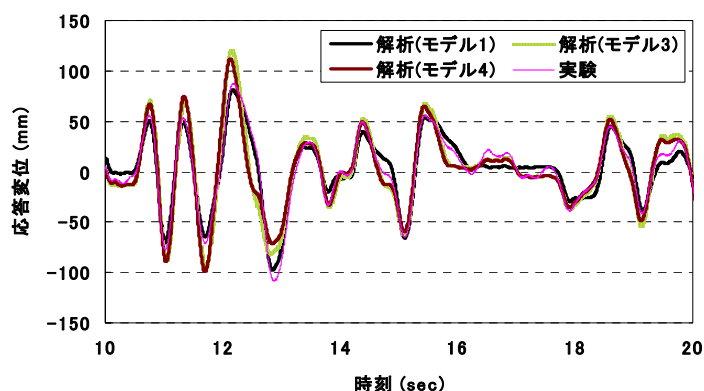
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.3-4 (正弦波 1.0Hz_4.5m/sec²)

図-14 実験結果と解析結果の比較 (シリンダー系デバイスA_モデル1、モデル2、モデル5)

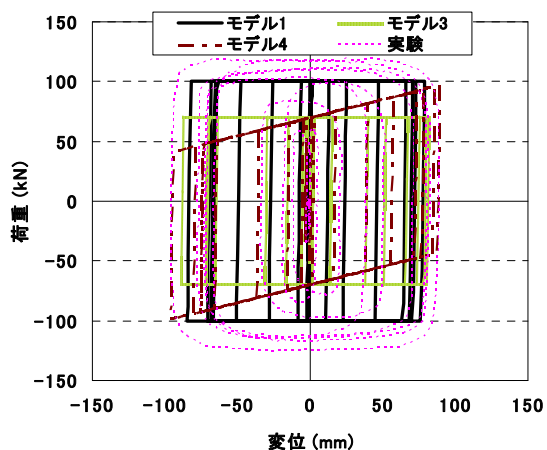


(a) デバイスの履歴

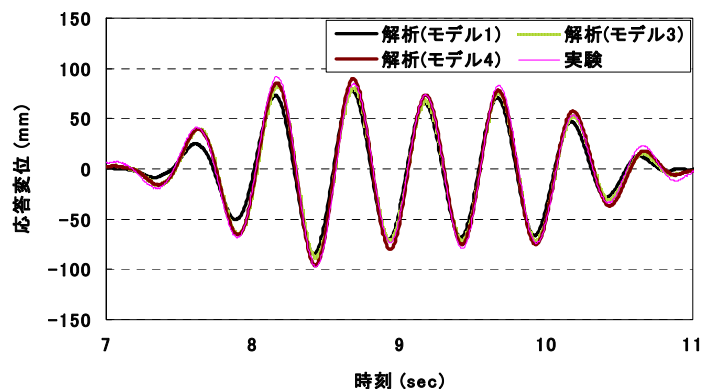


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.2-5 (タイプⅡ実験地震波_振幅 120%)

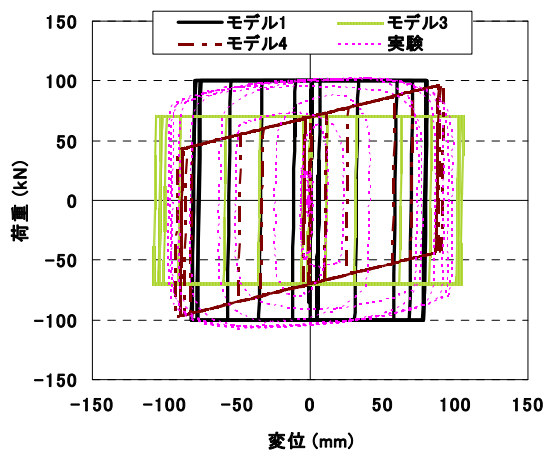


(a) デバイスの履歴

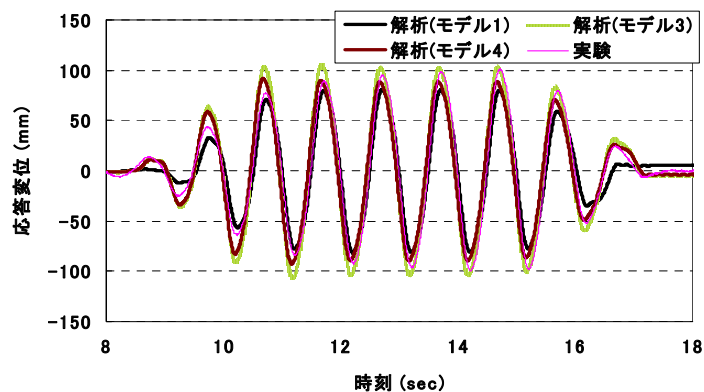


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.4-6 (正弦波 2.0Hz_8.0m/sec²)



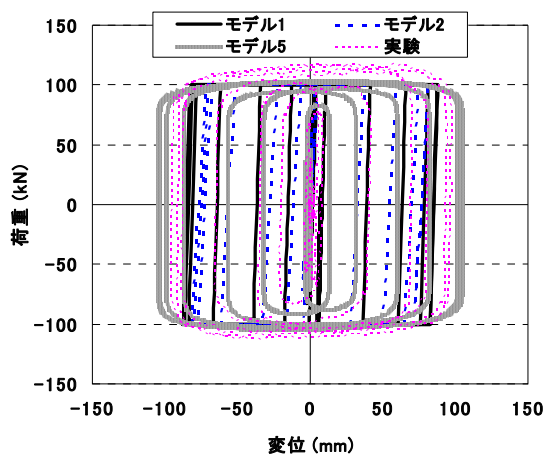
(a) デバイスの履歴



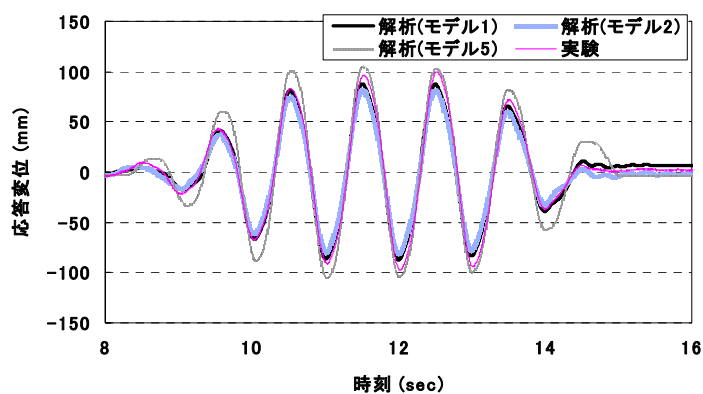
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.3-4 (正弦波 1.0Hz_4.5m/sec²)

図-15 実験結果と解析結果の比較 (シリンダー系デバイスA_モデル1、モデル3、モデル4)

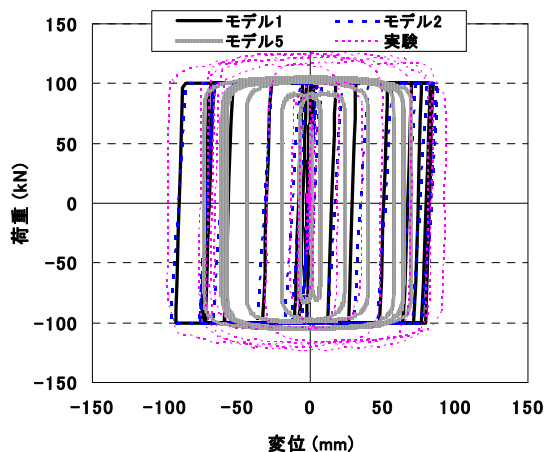


(a) デバイスの履歴

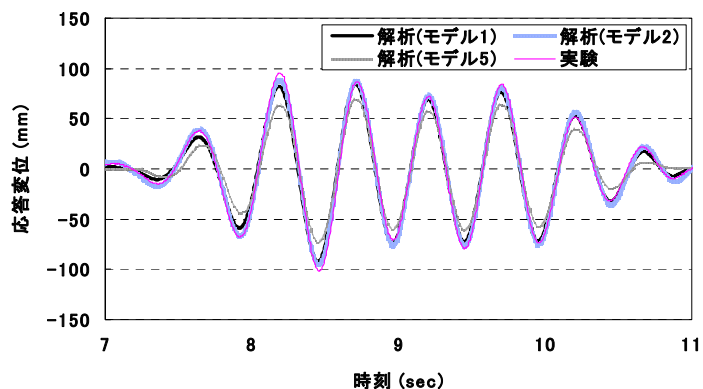


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.3 (正弦波 1.0Hz_5.0m/sec²)

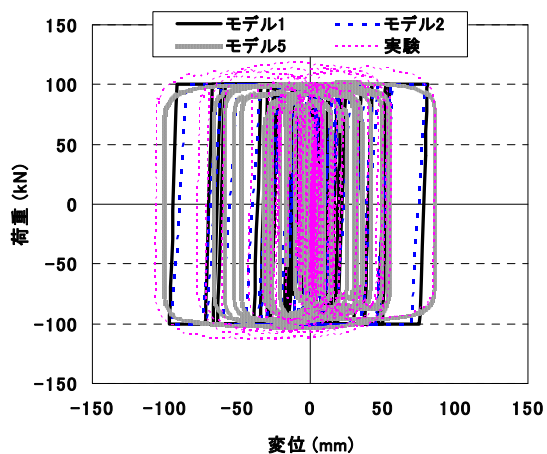


(a) デバイスの履歴

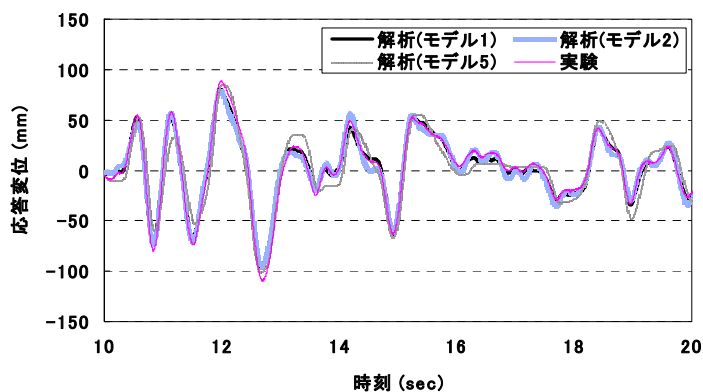


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.10 (正弦波 2.0Hz_8.0m/sec²)



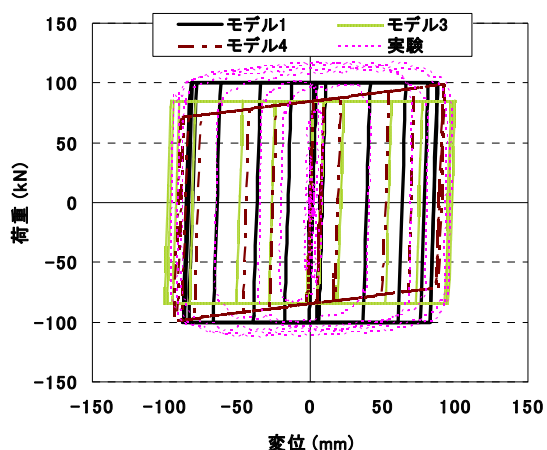
(a) デバイスの履歴



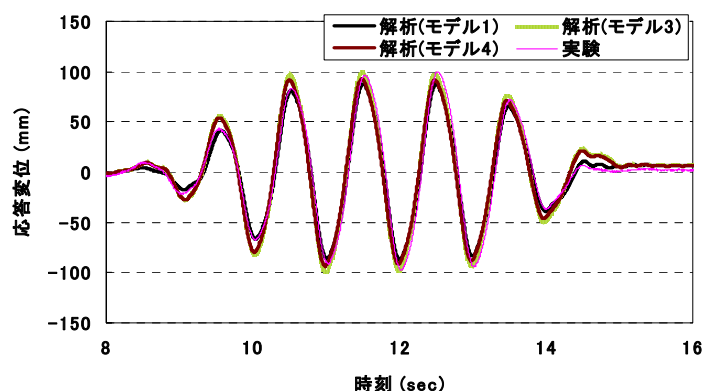
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.16 (タイプⅡ実験地震波_振幅 120%)

図-16 実験結果と解析結果の比較 (シリンダー系デバイスB_モデル 1、モデル 2、モデル 5)

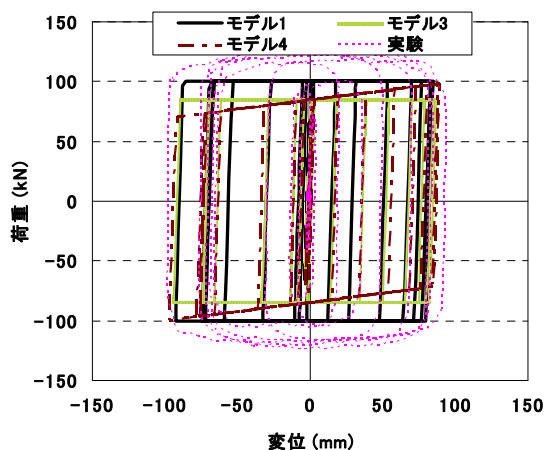


(a) デバイスの履歴

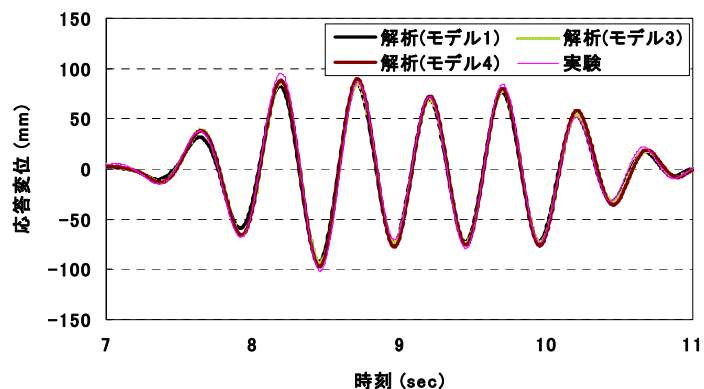


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.3 (正弦波 1.0Hz_5.0m/sec²)

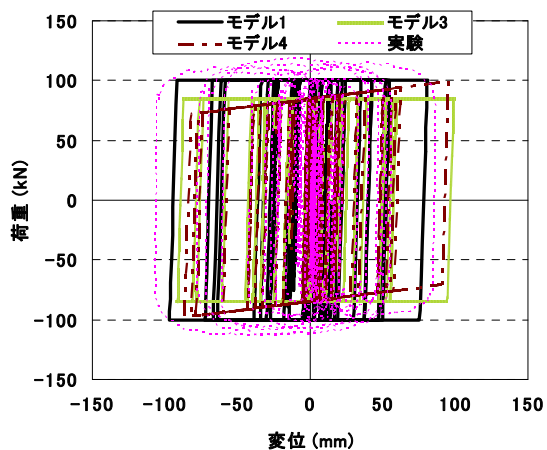


(a) デバイスの履歴

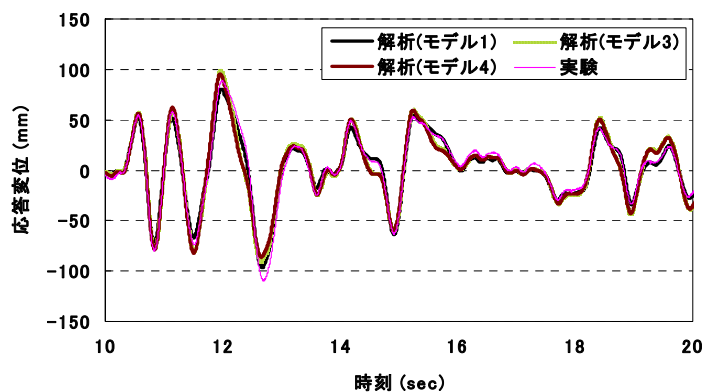


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.10 (正弦波 2.0Hz_8.0m/sec²)



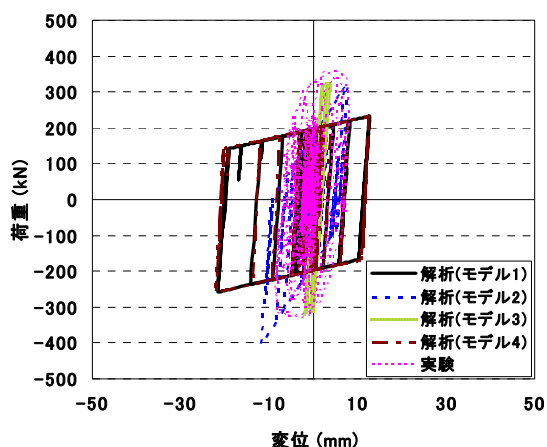
(a) デバイスの履歴



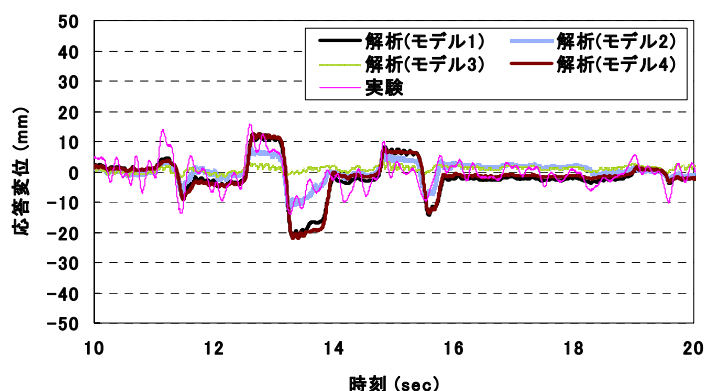
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.16 (タイプⅡ実験地震波_振幅 120%)

図-17 実験結果と解析結果の比較 (シリンダー系デバイスB_モデル1、モデル3、モデル4)

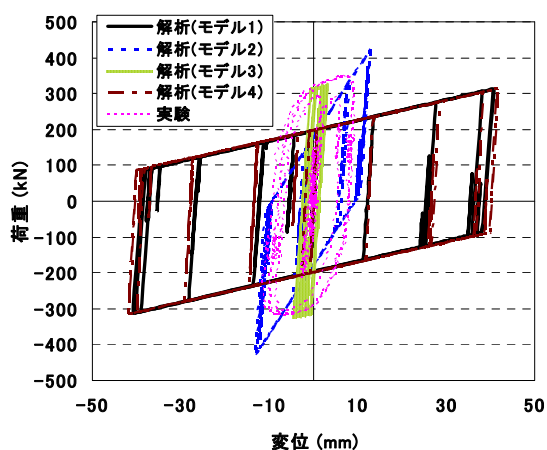


(a) デバイスの履歴

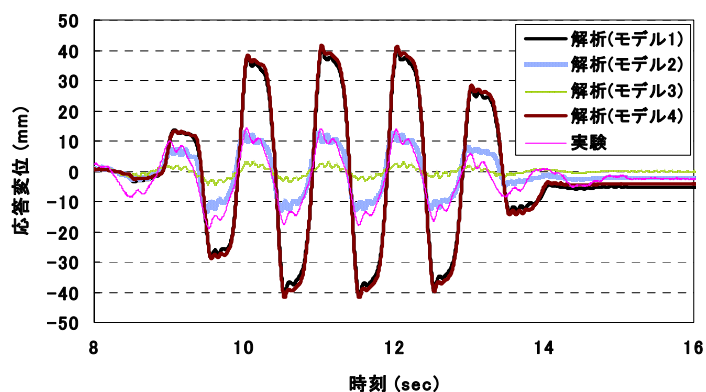


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.1-2 (タイプII実験地震波_振幅 120%)

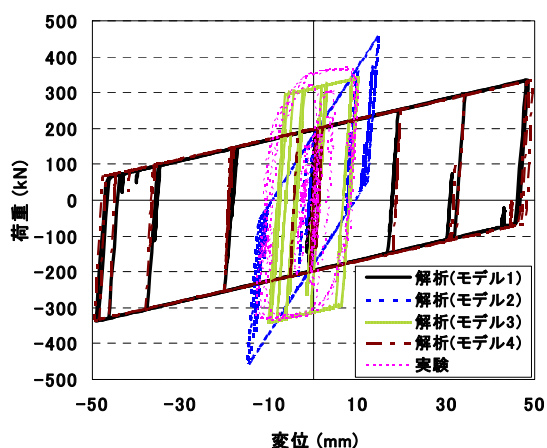


(a) デバイスの履歴

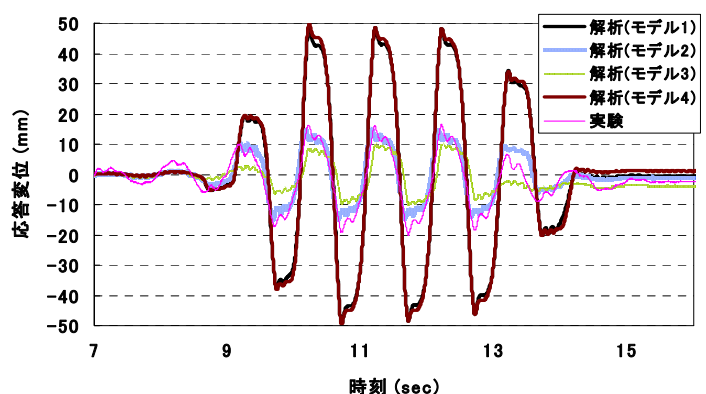


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.1-8 (正弦波 1.0Hz_7.5m/sec²)



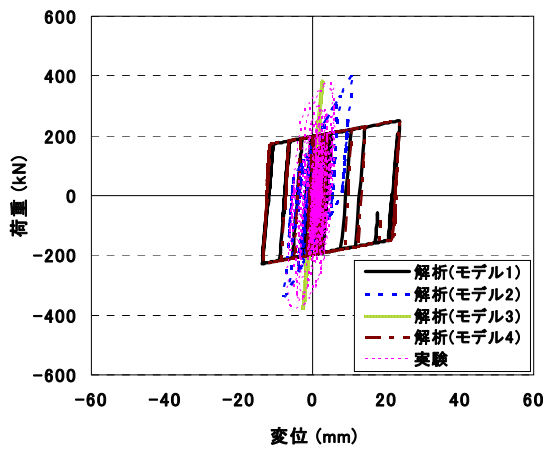
(a) デバイスの履歴



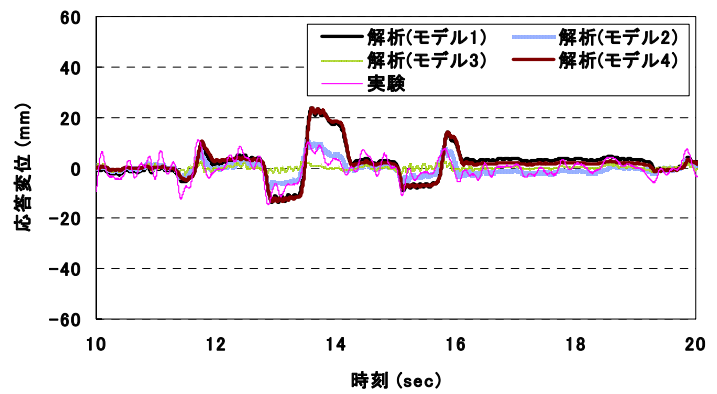
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.3-2 (正弦波 1.0Hz_8.0m/sec²)

図-18 実験結果と解析結果の比較 (鋼材軸降伏系デバイスA)

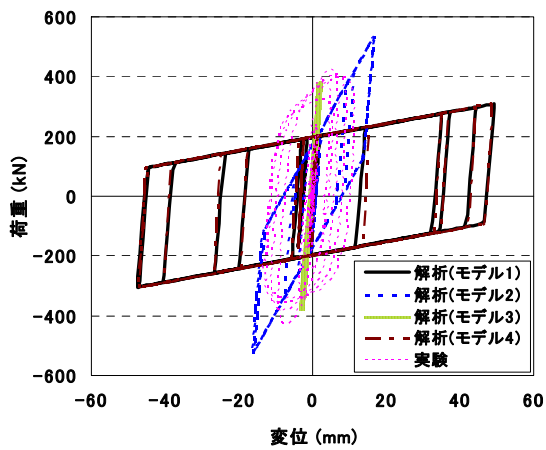


(a) デバイスの履歴

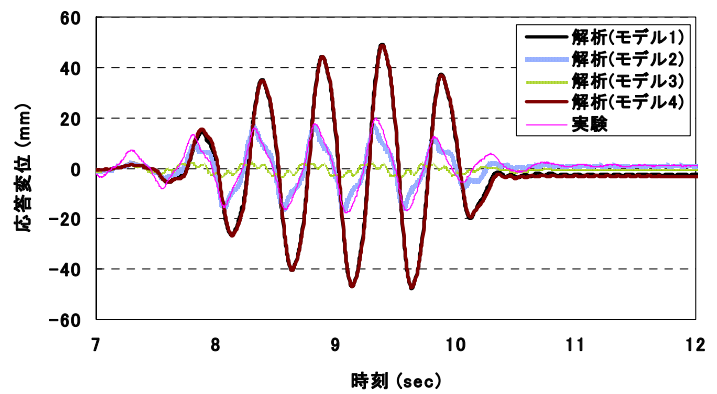


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.1-5 (タイプII 実験地震波_振幅-120%)

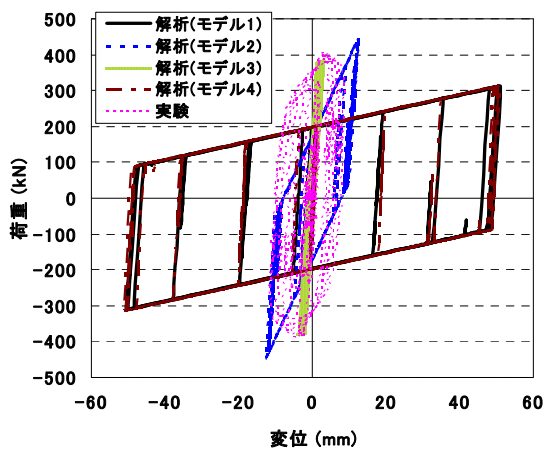


(a) デバイスの履歴

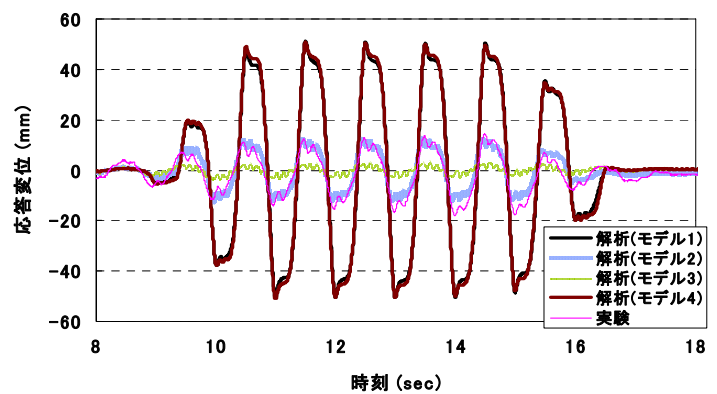


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.1-9 (正弦波 2.0Hz_8.0m/sec²)



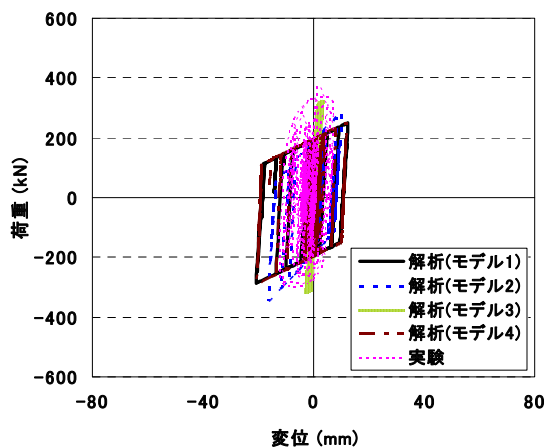
(a) デバイスの履歴



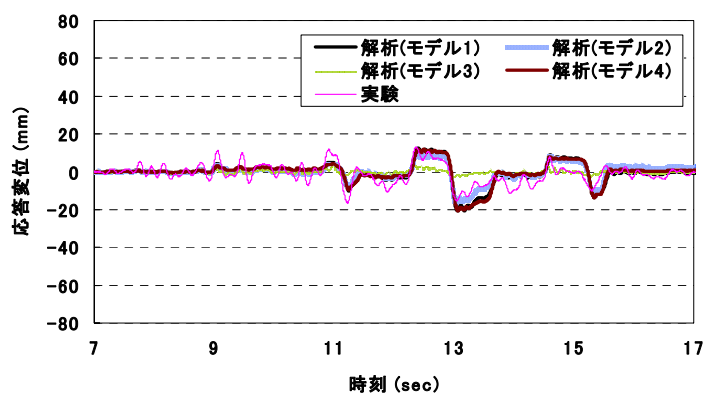
(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.3-2 (正弦波 1.0Hz_8.0m/sec²)

図-19 実験結果と解析結果の比較 (鋼材軸降伏系デバイスB)

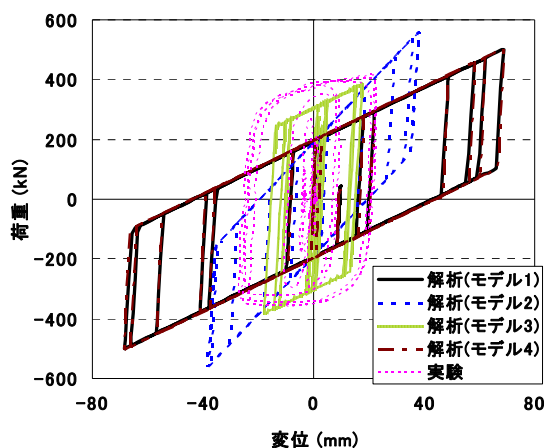


(a) デバイスの履歴

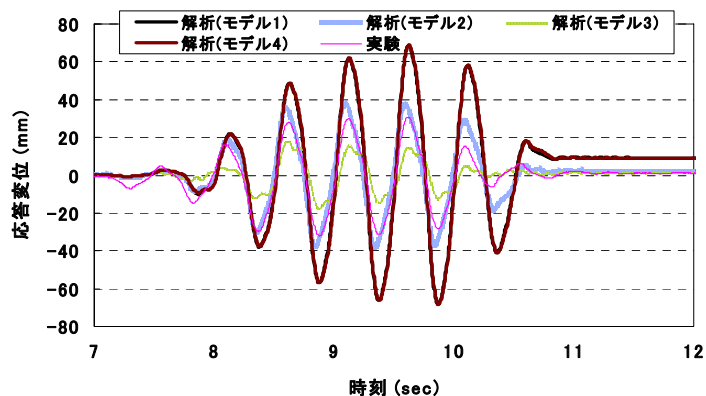


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(1) No.3-2 (タイプII実験地震波_振幅 120%)

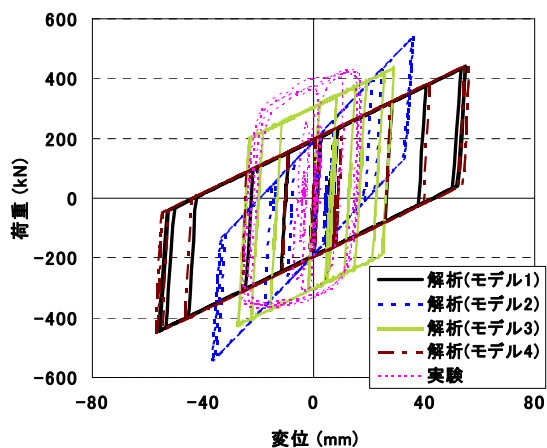


(a) デバイスの履歴

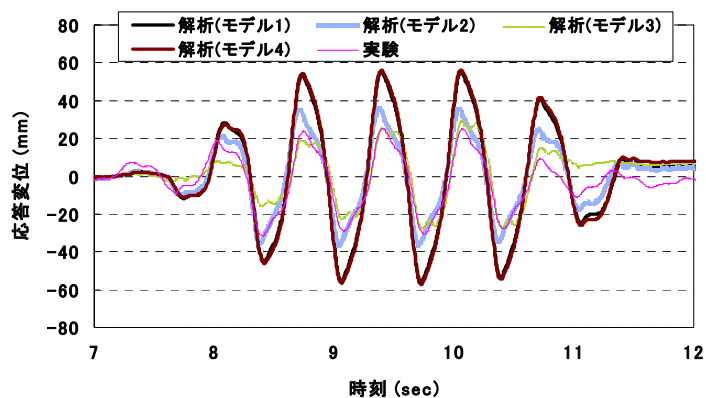


(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(2) No.3-4 (正弦波 2.0Hz_9.0m/sec²)



(a) デバイスの履歴



(b) 桁模型の時刻歴変位応答

(3) No.3-5 (正弦波 1.5Hz_9.0m/sec²)

図-20 実験結果と解析結果の比較 (鋼材軸降伏系デバイスC)

表-4 最大応答値の比較

(1) ゴム系デバイスA

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
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

(2) ゴム系デバイスB

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
No.1-21 タイプⅡ 実験地震波 振幅120%	モデル1	336	266	0.79	60	63	1.05	136,300	114,016	0.84
	モデル2	336	272	0.81	60	72	1.20	136,300	111,251	0.82
	モデル3	336	303	0.90	60	70	1.16	136,300	105,708	0.78
	モデル4	336	269	0.80	60	65	1.09	136,300	113,228	0.83
No.1-24 正弦波 1.0Hz7.5m/sec ²	モデル1	334	275	0.83	90	80	0.88	263,256	214,146	0.81
	モデル2	334	264	0.79	90	84	0.93	263,256	192,226	0.73
	モデル3	334	279	0.84	90	77	0.85	263,256	171,488	0.65
	モデル4	334	270	0.81	90	79	0.87	263,256	200,761	0.76
No.1-26 正弦波 2.0Hz5.5m/sec ²	モデル1	303	262	0.87	90	80	0.89	238,818	196,126	0.82
	モデル2	303	261	0.86	90	90	0.99	238,818	182,665	0.76
	モデル3	303	314	1.04	90	98	1.08	238,818	200,403	0.84
	モデル4	303	268	0.88	90	85	0.93	238,818	200,967	0.84

(3) 鋼材せん断降伏系デバイスA

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
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

戦-55 制震機構を用いた橋梁の耐震設計法に関する試験調査

(4) 鋼材せん断降伏系デバイス B

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
No.2-2 正弦波 1.0Hz6.2m/sec ²	モデル1	254	225	0.89	17	12	0.70	60,960	46,740	0.77
	モデル2	254	180	0.71	17	38	2.20	60,960	149,072	2.45
	モデル3	254	225	0.89	17	12	0.72	60,960	44,202	0.73
	モデル4	254	253	1.00	17	32	1.81	60,960	121,518	1.99
No.3-5 タイプⅡ実験地震波 振幅-110%	モデル1	240	225	0.94	18	10	0.54	40,430	9,404	0.23
	モデル2	240	180	0.75	18	23	1.29	40,430	28,570	0.71
	モデル3	240	225	0.94	18	9	0.52	40,430	10,236	0.25
	モデル4	240	228	0.95	18	21	1.19	40,430	26,918	0.67
No.4-3 正弦波 2.0Hz6.2m/sec ²	モデル1	253	225	0.89	19	7	0.35	52,719	14,384	0.27
	モデル2	253	180	0.71	19	22	1.18	52,719	50,030	0.95
	モデル3	253	225	0.89	19	7	0.39	52,719	13,450	0.26
	モデル4	253	230	0.91	19	22	1.16	52,719	48,729	0.92

(5) シリンダー系デバイス A

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
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

(6) シリンダー系デバイス B

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
No.3 正弦波 1.0Hz5.0m/sec ²	モデル1	118	100	0.85	97	88	0.90	161,559	144,884	0.90
	モデル2	118	100	0.85	97	82	0.84	161,559	126,165	0.78
	モデル3	118	85	0.72	97	100	1.03	161,559	150,421	0.93
	モデル4	118	99	0.84	97	94	0.96	161,559	140,388	0.87
	モデル5	118	104	0.88	97	106	1.09	161,559	193,453	1.20
No.10 正弦波 2.0Hz8.0m/sec ²	モデル1	127	100	0.79	98	93	0.94	193,636	159,575	0.82
	モデル2	127	100	0.79	98	96	0.98	193,636	166,581	0.86
	モデル3	127	85	0.67	98	94	0.96	193,636	142,306	0.73
	モデル4	127	100	0.78	98	97	0.99	193,636	146,425	0.76
	モデル5	127	106	0.83	98	73	0.75	193,636	129,233	0.67
No.16 タイプⅡ実験地震波 振幅120%	モデル1	119	100	0.84	107	97	0.90	188,743	173,931	0.92
	モデル2	119	100	0.84	107	95	0.89	188,743	173,097	0.92
	モデル3	119	85	0.71	107	99	0.92	188,743	172,257	0.91
	モデル4	119	99	0.83	107	95	0.89	188,743	168,782	0.89
	モデル5	119	103	0.87	107	101	0.94	188,743	166,773	0.88

(7) 鋼材軸降伏系デバイスA

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
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

(8) 鋼材軸降伏系デバイスB

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
No.1-5 タイプⅡ 実験地震波 振幅120%	モデル1	380	251	0.66	7	24	3.35	21,152	29,196	1.38
	モデル2	380	407	1.07	7	11	1.53	21,152	14,985	0.71
	モデル3	380	379	1.00	7	3	0.40	21,152	840	0.04
	モデル4	380	252	0.66	7	24	3.35	21,152	29,351	1.39
No.1-9 正弦波 2.0Hz8.0m/sec ²	モデル1	427	309	0.72	13	49	3.65	46,346	138,879	3.00
	モデル2	427	534	1.25	13	17	1.24	46,346	45,513	0.98
	モデル3	427	380	0.89	13	3	0.25	46,346	1,644	0.04
	モデル4	427	308	0.72	13	49	3.62	46,346	140,725	3.04
No.3-2 正弦波 1.0Hz8.0m/sec ²	モデル1	408	313	0.77	12	51	4.45	44,767	235,360	5.26
	モデル2	408	450	1.10	12	13	1.11	44,767	47,840	1.07
	モデル3	408	381	0.93	12	4	0.33	44,767	4,118	0.09
	モデル4	408	314	0.77	12	51	4.43	44,767	239,462	5.35

(9) 鋼材軸降伏系デバイスC

検討ケース	モデル	荷重 (kN)			変位 (mm)			累積吸収エネルギー (kNmm)		
		実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験	実験	解析	解析/実験
No.3-2 タイプⅡ 実験地震波 振幅120%	モデル1	374	287	0.77	12	21	1.69	28,765	27,266	0.95
	モデル2	374	347	0.93	12	16	1.33	28,765	23,537	0.82
	モデル3	374	319	0.85	12	3	0.28	28,765	2,094	0.07
	モデル4	374	289	0.77	12	21	1.68	28,765	26,852	0.93
No.3-4 正弦波 2.0Hz9.0m/sec ²	モデル1	415	502	1.21	27	69	2.53	119,764	209,145	1.75
	モデル2	415	560	1.35	27	38	1.41	119,764	119,427	1.00
	モデル3	415	384	0.92	27	18	0.66	119,764	58,547	0.49
	モデル4	415	505	1.22	27	69	2.54	119,764	213,316	1.78
No.3-5 正弦波 1.5Hz9.0m/sec ²	モデル1	429	445	1.04	26	56	2.12	101,177	182,258	1.80
	モデル2	429	545	1.27	26	37	1.39	101,177	117,770	1.16
	モデル3	429	434	1.01	26	29	1.10	101,177	102,058	1.01
	モデル4	429	452	1.05	26	57	2.17	101,177	189,968	1.88

5. まとめ

本年度は、平成 21 年度に土木研究所において実施した制震デバイスの振動台実験に対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 2 種、鋼材せん断降伏系デバイス 2 種、シリンダー系デバイス 2 種、鋼材軸降伏系デバイス 3 種を対象とし、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感度解析を実施した。本検討により得られた知見を以下に示す。

5. 1 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。本実験では、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、速度依存性を評価できないバイリニアモデルを用いて解析を行ったことから、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。

5. 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。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2002.
- 2) 岡田太賀雄、運上茂樹：制震ダンパーによる橋梁の地震応答低減効果に関する解析、土木技術資料 Vol.51、No.7、pp.14-17、2009.

Development of seismic design method for bridges using structural response control devices

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2008-2011

Research Team : Bridge and Structural Technology
Research Group

Author : HOSHIKUMA Jun-ichi

SAKAI Junichi

YATSUMOTO Hitoshi

Abstract : To develop the seismic design method for bridges equipped structural seismic response control devices, it is necessary to study the experimental protocol to evaluate the ultimate limit state and the damping performance of the devices, the mathematical modeling method for nonlinear dynamic analysis, the maintenance strategy for the devices and the design details of connecting portions between the devices and their attachments.

In FY 2010, the analytical simulation for the shake table tests of dissipation devices which have been conducted in FY 2009 were carried out. At first, the analyses using the analytical models based on static loading tests of dissipation devices were conducted. In addition, the parametric analyses using various analytical models were conducted considering the yield force, displacement, stiffness of dissipation devices as parameters. Based on these analytical results, modeling method and required performance of the devices were discussed.

Key words : bridge, dissipation device, shake table test, simulation analysis, analytical model