

## 戦-38 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：星隈順一， 塚淳一，  
岡田太賀雄

### 【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とする既設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、制震デバイスの性能評価のために必要な実験項目に関して整理するとともに、各種制震デバイスの地震時の動的挙動を調べるために、振動台実験を行った。

キーワード：橋，制震デバイス，性能評価法，振動台加振実験，解析モデル化

### 1. はじめに

制震は、構造物の減衰性能を高めて動的応答を低減することにより構造物の安全性を高めるものであり、これまで高層建築物等を中心に適用されてきている。橋に対しては、従来は耐震性の向上のために長大橋に適用された事例が多かったが、近年は、既設のけた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<sup>1)</sup>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。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することとした。今年度は、制震デバイスの限界状態や減衰特性を評価するために必要な実験に関して整理を行うとともに、こうした実験のうち、これまであまり実施されていない地震時の動的挙動に関する実験として、各種制震デバイスに対して、振動台加振実験を行った。

### 2. 制震デバイスの性能評価に関する実験

ここでは、図-1に示すフローのように制震デバイスの性能を適切に評価し、これをもとに設計上の安全余裕を考慮して、設計限界状態や設計モデル等を設定することを想定し、この性能評価に必要な実験を定めることとした。

上記の観点から考えると、実験は以下の2つに分類される。

- 1) デバイスの終局限界状態を評価するための実験
- 2) デバイスの各種依存性を評価するための実験

ここで、デバイスの終局限界状態を評価するための実験は、設計限界状態を適切に設定するために必要な実験である。これには、図-2に示す一方向単調載荷（プッシュオーバー）実験、変位振幅漸増繰り返し載荷実験、大変位の一定振幅繰り返し載荷実験等が考えられ、これにより、デバイスの終局限界変位を設定する。また、鋼材の履歴吸収エネルギーに期待するデバイスのように、降伏を超えるひずみを繰り返し受けることにより強度が低

下するタイプのデバイスに対しては、様々なひずみレベルに対する一定振幅繰り返し載荷実験により、図-3に示すような載荷繰り返しに対する限界特性に基づく設計限界値を設定することも必要である。

こうした実験による結果に基づき、終局限界状態だけでなく、デバイスの基本的な履歴特性、減衰特性等の力学的特性も得られるため、これにより基本設計モデルを構築する。

一方、デバイスのタイプやその素材の材質にもよるが、力学的特性が速度、温度、経験ひずみ、形状等に対する依存性を有する場合がある。これを設計に適切に取り込むために、別途これらに対する依存性評価実験が必要である。依存性評価実験では、設計において想定する範囲内で対象とする物理量を変化させた複数の実験から評価式等を求める。たとえば、速度依存性に関しては温度変化等による応答を想定する静的な実験から、地震によって生じる速度レベルにおける動的実験までを範囲とすることが考えられる。

以上の終局限界状態を評価するための実験、各種依存性を評価するための実験により、設計限界値と解析モデルが構築されるが、地震時の動的挙動の特性の把握及びこの解析モデルによって制震デバイスを適用した橋の地震応答が所定の精度で予測できるかを検証するために、振動台加振実験等を実施することが望ましい。

### 3. 振動台加振実験概要

#### 3.1 はじめに

上述のように、制震デバイスの性能評価のためには、地震によって生じる速度レベルにおける繰り返し載荷実験が必要と考えられるが、実際には実験施設の制約等によりこれまであまり実施されていない。また、地震時の動的挙動を調べるための振動台加振実験もあまり実施されていない。

そこで、ここでは、これまでの静的や準動的載荷実験による結果との比較による速度依存性の評価及びこうした実験に基づき設定されている解析モデルの妥当性の評価、さらに、デバイスの動的挙動、減衰特性の評価のために、各種制震デバイスに対して振動台加振実験を行うこととした。

#### 3.2 実験供試体

実験模型を図-4に、セットアップ状況を図-5に示す。本実験では、橋としての地震応答ではなく、デバイスの動的挙動に着目することとしたため、慣性質量を弾性支持するという1自由度系に近似可能なシンプルな構造系

に制震デバイスを設置することとした。慣性質量としては、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。慣性質量の全長は6110mm、幅は1830mmで、全重量は443kNである。加振によりデバイスに入力される慣性力を出来る限り大きくするために、ゴム支承の水平剛性については実験に支障のない範囲で軟らかくし、ゴム支承による水平荷重の分担を小さくした。使用したゴム支承を図-6に、その諸元を表-1に示す。また、図-7に175%ひずみ相当の変位におけるゴム支承1基あたりの履歴を示す。弾性支承として設計、製作したが、実際には履歴ループを描いており、非線形挙動する特性があることが分かる。

制震デバイスは、デバイスのせん断方向の変形により機能を発揮するタイプについては、図-8(a)のように模型の中央位置に設置し、デバイスの軸方向の変形により機能を発揮するタイプについては、図-8(b)のようにブラケットを介して設置した。ブラケットを用いるタイプについては加振軸方向である模型の長手方向と平行に設置した。

#### 3.3 制震デバイスの力学的特性

解析モデルの設定については、現状では統一的な手法がないところであるが、本実験で対象とした制震デバイスについては、開発者が独自に実施した実験等に基づき、設計用の解析モデルが提案されている。本実験に用いた制震デバイスの解析モデルの諸元を表-2に、またその荷重-変位関係とダンパーの設置状況を図-9に示す。デバイスA、Bはゴム系、デバイスC、Dは鋼材のせん断降伏系、デバイスE、Fはシリンダー系、デバイスG、H、Iは鋼材の軸降伏系のデバイスである。なおデバイスによっては、速度依存性を考慮してモデル化されるものや骨格曲線に2点の剛性変化点を有するトリリニアタイプによりモデル化されているものもあるが、図-9には簡単のため、バイリニアでモデル化した骨格曲線を示している。

ゴム系デバイスは、互いに類似した特性を有しており、初期剛性が15N/mm程度で2次剛性は1次剛性の10%となっている。これらの限界変位についてはデバイスA、Bに対してそれぞれせん断ひずみが250%相当、200%相当として設定されている。なお、ゴム系デバイスは、ひずみレベルに対する依存性があるため、応答ひずみのレベルにより水平耐力や剛性が変化するが、ここでは、限界変位相当の変位レベルに対する履歴形状を示している。

鋼材のせん断降伏系のデバイスは、2次剛性があるタ

イプ（デバイスC）と、降伏後は荷重が一定となるタイプ（デバイスD）の2種類である。デバイスCは等方硬化タイプの特性を有しており、解析モデルは変位振幅漸増実験における各変位振幅における最大点を結んだ線として与えられている。限界変位は、せん断ひずみが12%に相当する変位として与えられている。デバイスDは、降伏後の剛性はゼロとしてモデル化される。限界変位は設定されていないが、例えばせん断ひずみが10%とすると15mm程度、20%とすると30mm程度となる。

シリンダー系デバイスは、降伏後は荷重が一定となるようにモデル化されている。なお、シリンダー系デバイスは実際には速度依存性があり、速度が大きくなると減衰力も大きくなるが、ここでは一般に定格減衰力として設定される、速度が0.5m/secにおける減衰力を示している。また、シリンダー系は一般には繰り返し载荷による能力の低下はなく、終局変位は定義されないため、ここでは設計移動可能量を限界変位として示している。

鋼材の軸降伏系のデバイスG, H, Iについては、鋼材せん断降伏系のデバイスCと同様に、等方硬化タイプの特性があり、解析モデルは変位振幅漸増実験における各変位振幅での最大点を結んだ線として与えられているため、1次剛性の1.5~3%の剛性が2次剛性として考慮されている。限界変位は、デバイスG, H, Iに対して、軸ひずみがそれぞれ3%, 3.5%, 5%に相当する変位として与えられている。

### 3.4 計測項目と入力波

加振実験では、制震デバイスの地震時挙動を把握するために、慣性質量および振動台の加速度とともに、慣性質量および各デバイスの変位をレーザー変位計により計測し、各デバイス及びゴム支承への作用力をロードセルあるいは三分力計により計測した。

加振方向については、デバイス本体の動的特性の把握を目的としていることから、桁模型の長手方向のみとし、鉛直方向および直角方向については入力しないこととした。

入力波としては、静的载荷試験より得られた特性と地震時に想定される速度レベルでの特性を比較するための実験においては正弦波を、地震のようなランダム波に対する挙動の評価のための実験では地震波を用いた。

地震波については、文献2)に示されるレベル2地震動タイプIおよびタイプII地震動のII種地盤における設計加速度応答スペクトルに適合するように調整された地震波（標準波）を用いることとし、振幅については徐々に増加させていくこととした。ただし、タイプI地震動に

ついては振動台の能力的な制約のため、最後の10秒~5秒についてテーパをかけてゼロとなるように振幅を調整し、残り5秒についてはゼロとしている。図-10に振幅100%の波形を示す。なお、振動台の能力的な制約からタイプI地震動については振幅160%、タイプII地震動については120%の入力を最大値とした。

以上を踏まえて設定したデバイスごとの加振ケースの一覧を表-3に示す。

## 4. 実験結果

表-3に示したように、正弦波加振、地震動入力加振に対して、各デバイスごとに複数回の実験ケースを設定したが、ここでは、振動数1Hzと2Hzの正弦波加振、地震波タイプI、タイプIIを入力した加振に対して、各1ケースの結果を例として表-4、図-11に示す。図-11中の点線は、図-9に示した解析モデルを表している。ここで、振動数1Hzと2Hzの正弦波加振に対しては、これらの結果を比較して速度依存性の評価ができるように、これらの応答振幅が同程度となったケースの結果を、地震波タイプI、タイプIIを入力した加振に対しては、それぞれの最大振幅の加振ケースの結果を示している。

なお、速度は応答変位の時刻歴の差分から算出している。これより、デバイスに生じている最大速度については、ゴム系デバイスおよびシリンダー系デバイスで0.5~2m/sec程度、鋼材のせん断降伏系および軸降伏系のデバイスで0.3~0.6m/sec程度の速度が生じており、速度依存性を検証するための十分なデータが得られたことが確認できる。

ゴム系のデバイスAは、変位の小さいタイプI地震動による加振では解析モデルと差異が生じたが、これは、前述したようにせん断ひずみが250%（変位150mm）相当における解析モデルを示しているためであり、実験による変位が150mmに近い正弦波による加振では、解析モデルと実験結果はおおむね一致した。同じゴム系のデバイスBでは、全体として解析モデルよりも大きめの荷重が生じたことが分かる。

鋼材せん断降伏系のデバイスCは、等方硬化型の履歴を示しており、解析モデルは変位振幅の経験最大点を結んだ線におおむね相当している。同じ鋼材せん断降伏系のデバイスDは、1次剛性の値および降伏後の荷重が一定となる点など、実験結果と解析モデルは概ね一致している。

シリンダー系のデバイスE, Fは、速度依存性があるデバイスであり、解析モデルは速度が0.5m/secに対して

減衰力が設定されているため、これより速度が大きい場合には実験の方が大きな荷重が生じた。

鋼材軸降伏系のデバイス G, H, I については、いずれのデバイスも解析モデルに比べ荷重が大きくなる傾向がみられ、特にデバイスの圧縮方向となる正の領域の荷重が大きい結果となった。

## 5. まとめと今後の課題

制震デバイスの性能評価のために必要な実験項目に関して整理するとともに、制震デバイスを用いた橋梁の地震時挙動について検討するため、ゴム系、鋼材のせん断降伏系・軸降伏系、粘性体等が充填されたシリンダー系のデバイスを用いた振動台実験を実施し、動的挙動における減衰特性を把握した。

今後は、得られた実験結果の分析により、動的な実験結果と静的な実験結果の違いから速度依存性の評価をするとともに、静的載荷試験に基づき設定された解析モデルを用いた地震応答のシミュレーション解析を行い、応答の予測精度及びモデル化の妥当性の検証を行う。

また、デバイスに求められる要求性能およびその性能検証方法について具体化する予定である。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路(株)：長大橋における免震・制震デバイスの適用ガイドライン，2009.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.

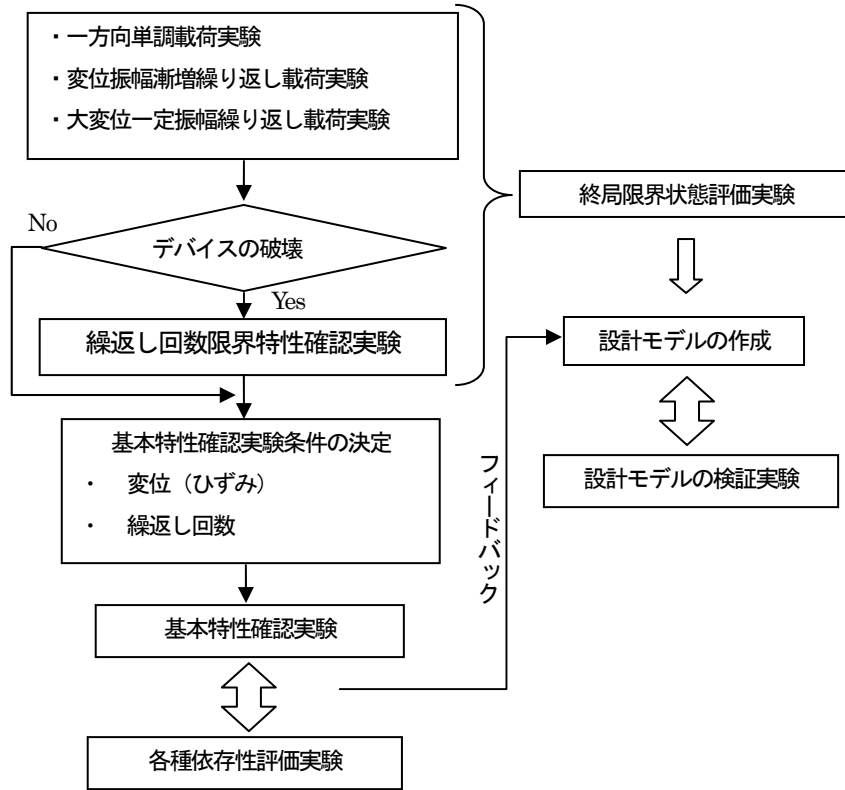


図-1 性能評価検証実験フロー

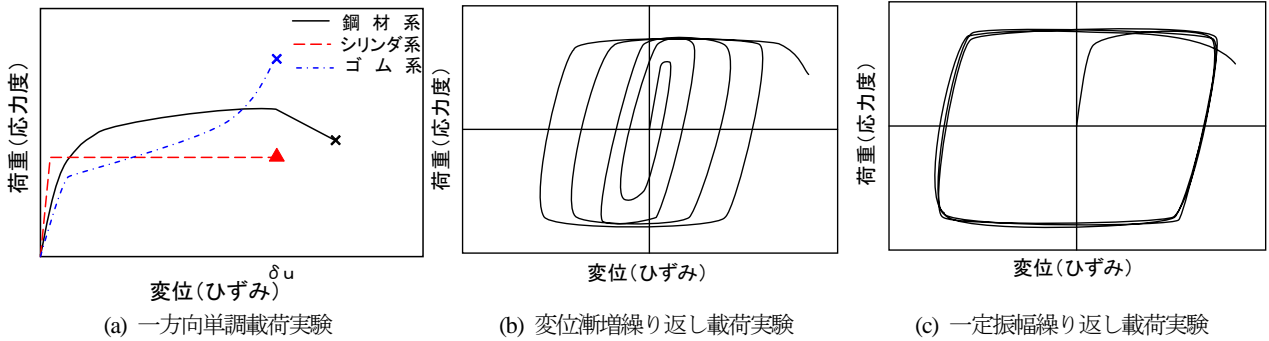


図-2 終局限界状態評価実験

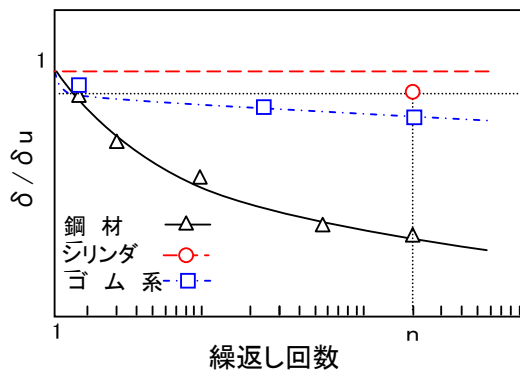


図-3 繰返し回数限界特性確認実験



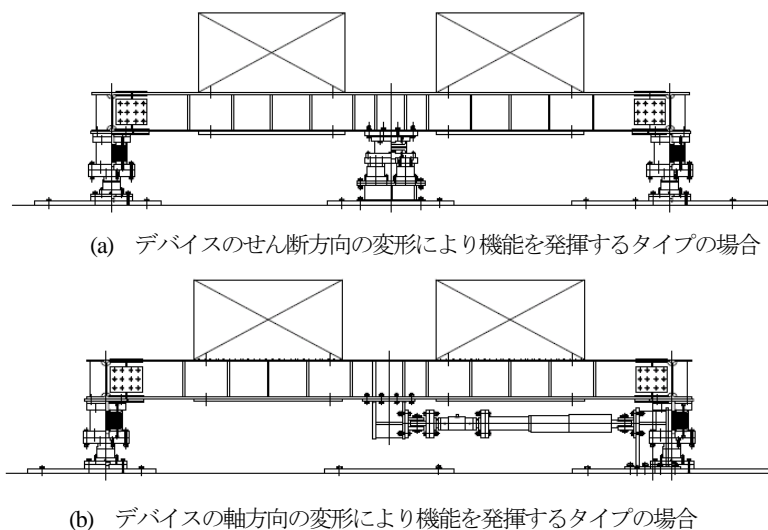


図-8 デバイスの設置方法

表-2 デバイスの解析モデル諸元

デバイス	デバイスのタイプ	解析モデル(バイリニアモデル)					限界変位 (mm)
		一次剛性 $k_1$ (kN/mm)	二次剛性 $k_2$ (kN/mm)	剛性比 $k_2/k_1$ —	降伏荷重 $F_y$ (kN)	降伏変位 $d_y$ (mm)	
A	ゴム系	14.66	1.08	0.074	68	4.64	150 (250%ひずみ相当)
B	ゴム系	17.33	1.73	0.100	84	4.85	120 (200%ひずみ相当)
C	鋼材せん断降伏系	226.00	7.64	0.034	226	1.00	19 (12%ひずみ相当)
D	鋼材せん断降伏系	133.90	0.00	—	225	1.68	(30) (20%ひずみ相当)
E	シリンダー系	90.00	0.00	—	100	1.11	150 (設計移動可能量)
F	シリンダー系	40.00	0.00	—	100	2.50	150 (設計移動可能量)
G	鋼材軸降伏系	168.30	2.86	0.017	200	1.19	20 (3.0%ひずみ相当)
H	鋼材軸降伏系	151.00	2.27	0.015	200	1.32	24 (3.5%ひずみ相当)
I	鋼材軸降伏系	149.50	4.49	0.030	200	1.34	50 (5.0%ひずみ相当)

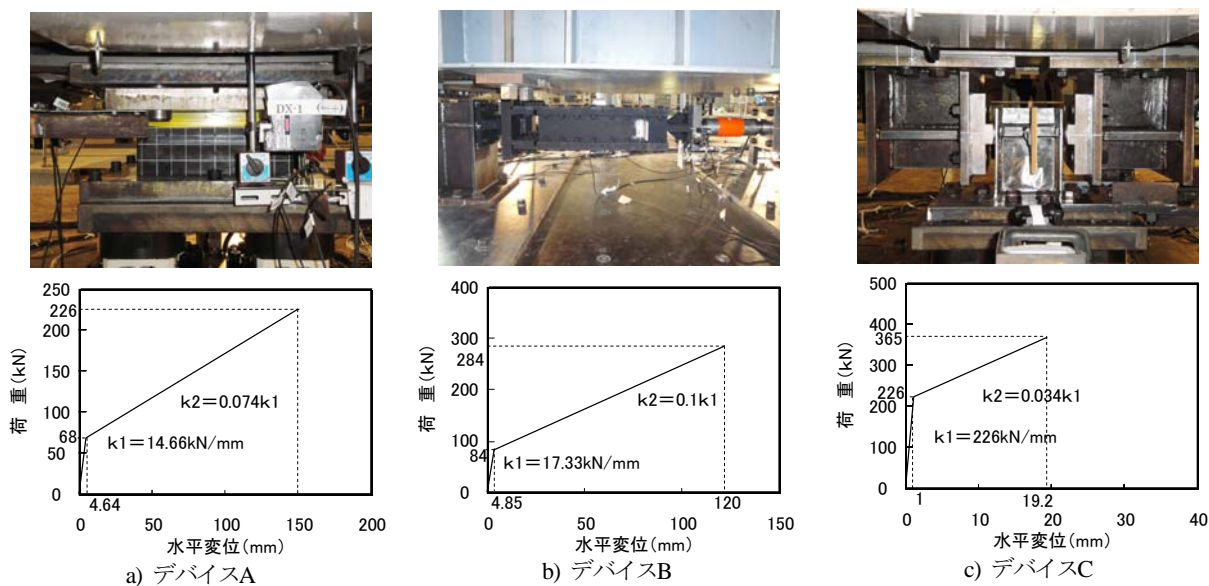


図-9 (1) デバイス設置状況と解析モデル



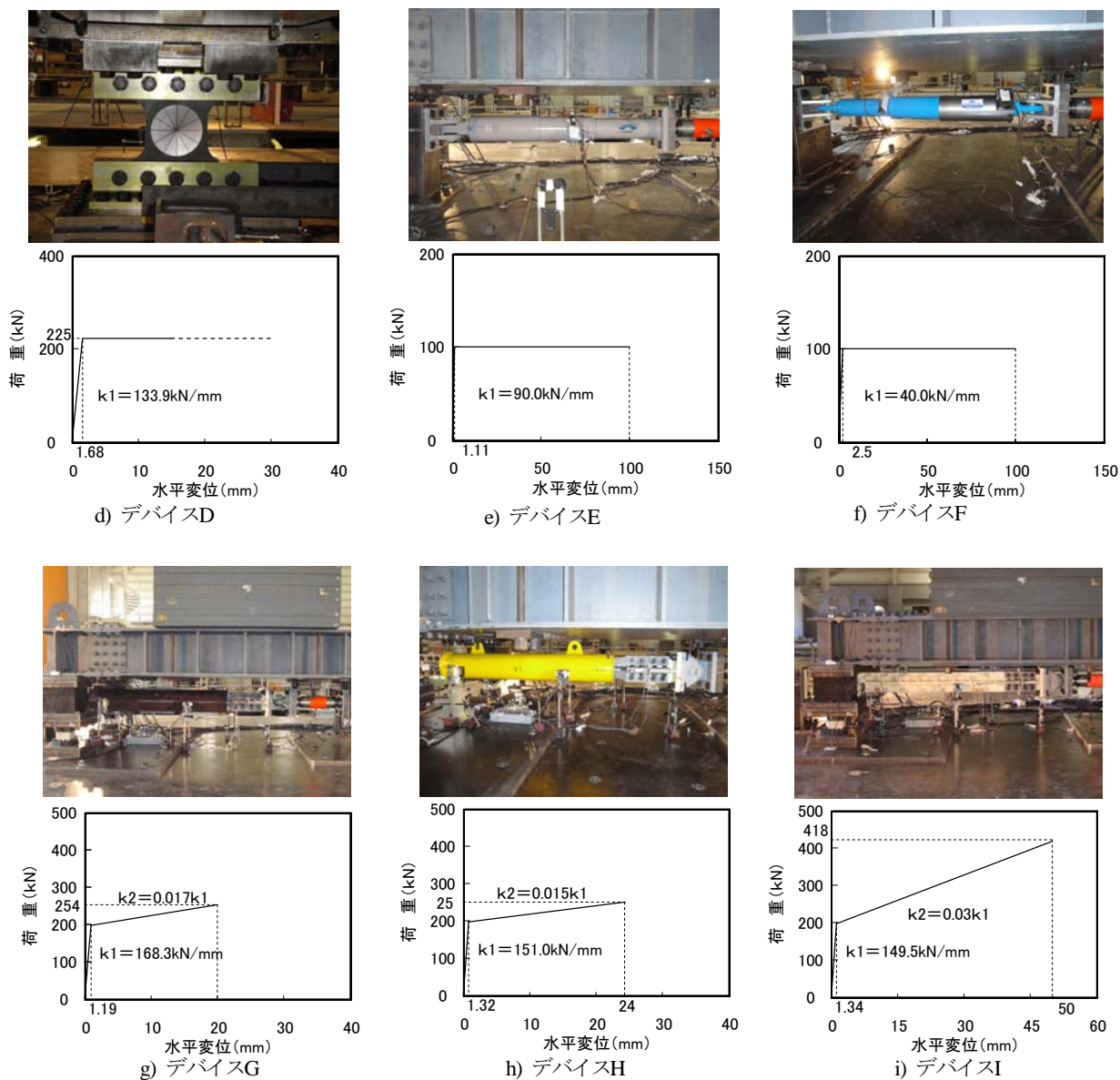


図-9 (2) デバイス設置状況と解析モデル

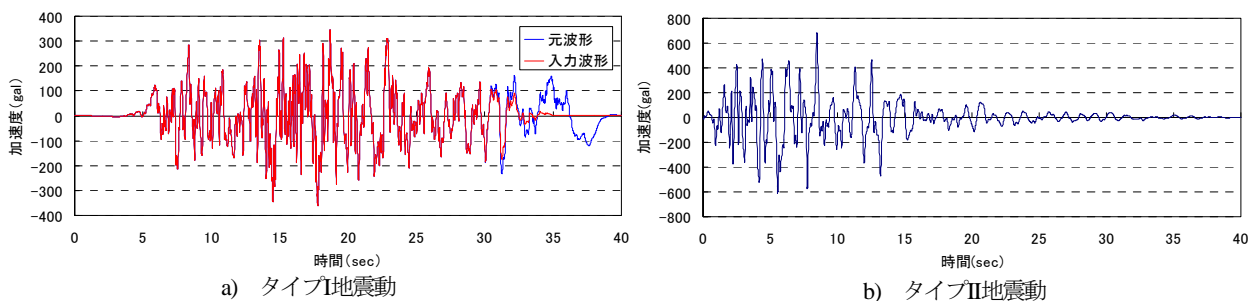


図-10 入力地震動 (振幅100%)



表-3 (1) ゴム支承のみの加振ケース

デバイス無し(ゴム支承のみ)				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
—	RB-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	RB-1-2	タイプ I	—	10%
	RB-1-3	タイプ I	—	30%
	RB-1-4	タイプ I	—	50%
	RB-1-5	タイプ I	—	70%
	RB-1-6	タイプ I	—	90%
	RB-1-7	タイプ II	—	10%
	RB-1-8	タイプ II	—	20%
	RB-1-9	タイプ II	—	30%
	RB-1-10	タイプ II	—	40%
	RB-1-11	タイプ II	—	50%
	RB-1-12	タイプ II	—	55%
	RB-1-13	タイプ II	—	60%
	RB-1-14	正弦波	1Hz	50gal
	RB-1-15	正弦波	1Hz	100gal
	RB-1-16	正弦波	1Hz	200gal
	RB-1-17	正弦波	1Hz	250gal
	RB-1-18	正弦波	1Hz	300gal
	RB-1-19	正弦波	0.5Hz	100gal
	RB-1-20	正弦波	0.5Hz	200gal
	RB-1-21	正弦波	0.5Hz	250gal
	RB-1-22	正弦波	0.5Hz	300gal
	RB-1-23	正弦波	0.5Hz	350gal
	RB-1-24	ホワイトノイズ	—	—

表-3 (2) デバイスAの加振ケース

デバイスA				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	A-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	A-1-2	タイプ II	—	50%
	A-1-3	タイプ II	—	100%
	A-1-4	タイプ II	—	105%
	A-1-5	タイプ II	—	110%
	A-1-6	タイプ II	—	115%
	A-2-1	ホワイトノイズ	—	—
	A-2-2	タイプ I	—	50%
	A-2-3	タイプ I	—	100%
	A-2-4	タイプ I	—	110%
	A-2-5	タイプ I	—	120%
A-2-6	タイプ I	—	130%	
A-2-7	タイプ I	—	150%	
A-2-8	タイプ I	—	160%	
A-2-9	ホワイトノイズ	—	—	
A-3-1	ホワイトノイズ	—	—	
A-3-2	正弦波	1Hz	300gal	
A-3-3	正弦波	1Hz	500gal	
A-3-4	正弦波	1Hz	500gal	
A-3-5	正弦波	1Hz	550gal	
A-3-6	正弦波	1Hz	600gal	
A-3-7	正弦波	1Hz	620gal	
A-3-8	ホワイトノイズ	—	—	
A-4-1	ホワイトノイズ	—	—	
A-4-2	正弦波	2Hz	300gal	
A-4-3	正弦波	1Hz	400gal	
A-4-4	正弦波	2Hz	350gal	
A-4-5	正弦波	2Hz	400gal	
A-4-6	正弦波	2Hz	450gal	
A-4-7	正弦波	2Hz	500gal	
A-4-8	正弦波	2Hz	600gal	
A-4-9	正弦波	2Hz	800gal	
A-4-10	正弦波	2Hz	900gal	
A-4-11	ホワイトノイズ	—	—	

表-3 (3) デバイスBの加振ケース

デバイスB				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	B-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	B-1-2	正弦波	0.5Hz	200gal
	B-1-3	正弦波	0.5Hz	250gal
	B-1-4	正弦波	0.5Hz	300gal
	B-1-5	正弦波	0.5Hz	350gal
	B-1-6	正弦波	0.5Hz	400gal
	B-1-7	正弦波	1Hz	400gal
	B-1-8	正弦波	1Hz	450gal
	B-1-9	正弦波	1Hz	500gal
	B-1-10	正弦波	1Hz	500gal
	B-1-11	正弦波	2Hz	400gal
	B-1-12	タイプ I	—	100%
	B-1-13	タイプ I	—	130%
	B-1-14	タイプ I	—	150%
	B-1-15	タイプ II	—	70%
	B-1-16	タイプ II	—	80%
	B-1-17	タイプ I	—	160%
	B-1-18	タイプ II	—	100%
	B-1-19	正弦波	1Hz	600gal
	B-1-20	正弦波	1Hz	650gal
	B-1-21	タイプ II	—	120%
	B-1-22	正弦波	2Hz	450gal
	B-1-23	正弦波	1.5Hz	400gal
	B-1-24	正弦波	1Hz	750gal
	B-1-25	正弦波	2Hz	500gal
	B-1-26	正弦波	2Hz	550gal
	B-1-27	ホワイトノイズ	—	—

表-3 (4) デバイスCの加振ケース

デバイスC				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	C-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	C-1-2	タイプ I	—	100%
	C-1-3	ホワイトノイズ	—	—
	C-1-4	タイプ I	—	100%
	C-1-5	タイプ I	—	130%
	C-1-6	タイプ I	—	160%
	C-1-7	正弦波	1Hz	500gal
	C-1-8	正弦波	1Hz	600gal
	C-1-9	正弦波	1Hz	700gal
	C-1-10	正弦波	1Hz	800gal
	C-1-11	正弦波	1Hz	840gal
	C-1-12	タイプ II	—	100%
	C-1-13	タイプ II	—	120%
	C-1-14	ホワイトノイズ	—	—
No.2	C-2-1	ホワイトノイズ	—	—
	C-2-2	タイプ I	—	160%
	C-2-3	タイプ I	—	160%
	C-2-4	タイプ I	—	160%
	C-2-5	タイプ I	—	160%
	C-2-6	タイプ I	—	160%
	C-2-7	ホワイトノイズ	—	—
No.3	C-3-1	ホワイトノイズ	—	—
	C-3-2	正弦波	1Hz	840gal
	C-3-3	正弦波	1Hz	840gal
	C-3-4	正弦波	1Hz	840gal
	C-3-5	ホワイトノイズ	—	—
No.4	C-4-1	ホワイトノイズ	—	—
	C-4-2	タイプ II	—	120%
	C-4-3	タイプ II	—	120%
	C-4-4	タイプ II	—	120%
	C-4-5	タイプ II	—	-120%
	C-4-6	タイプ II	—	-120%
	C-4-7	ホワイトノイズ	—	—
No.5	C-5-1	ホワイトノイズ	—	—
	C-5-2	正弦波	1Hz	800gal
	C-5-3	正弦波	1.5Hz	800gal
	C-5-4	正弦波	2Hz	800gal
	C-5-5	正弦波	1Hz	800gal
	C-5-6	正弦波	1Hz	800gal
	C-5-7	正弦波	1Hz	800gal
	C-5-8	正弦波	1Hz	800gal
	C-5-9	ホワイトノイズ	—	—

表-3 (5) デバイスDの加振ケース

デバイスD				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	D-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	D-1-2	タイプ I	—	100%
	D-1-3	タイプ I	—	130%
	D-1-4	タイプ I	—	160%
	D-1-5	タイプ I	—	160%
	D-1-6	タイプ I	—	160%
	D-1-7	タイプ I	—	-160%
	D-1-8	正弦波	1Hz	250gal
	D-1-9	正弦波	1Hz	500gal
	D-1-10	正弦波	1Hz	600gal
	D-1-11	正弦波	1Hz	650gal
D-1-12	ホワイトノイズ	—	—	
No.2	D-2-1	ホワイトノイズ	—	—
	D-2-2	正弦波	1Hz	620gal
	D-2-3	正弦波	1Hz	620gal
	D-2-4	正弦波	1Hz	620gal
	D-2-5	正弦波	1Hz	500gal
	D-2-6	ホワイトノイズ	—	—
No.3	D-3-1	ホワイトノイズ	—	—
	D-3-2	タイプ II	—	100%
	D-3-3	タイプ II	—	100%
	D-3-4	タイプ II	—	100%
	D-3-5	タイプ II	—	-110%
	D-3-6	タイプ II	—	-110%
	D-3-7	タイプ II	—	-110%
	D-3-8	タイプ II	—	120%
	D-3-9	タイプ II	—	120%
	D-3-10	ホワイトノイズ	—	—
No.4	D-4-1	ホワイトノイズ	—	—
	D-4-2	正弦波	2Hz	500gal
	D-4-3	正弦波	2Hz	620gal
	D-4-4	正弦波	2Hz	620gal
	D-4-5	正弦波	2Hz	620gal
	D-4-6	正弦波	2Hz	620gal
	D-4-7	ホワイトノイズ	—	—

表-3 (6) デバイスEの加振ケース

デバイスE				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	E-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	E-1-2	タイプ I	—	100%
	E-1-3	タイプ I	—	130%
	E-1-4	タイプ I	—	160%
	E-1-5	タイプ II	—	80%
	E-1-6	タイプ II	—	100%
	E-1-7	タイプ II	—	110%
	E-1-8	タイプ II	—	120%
	E-1-9	タイプ II	—	120%
	E-1-10	正弦波	1Hz	400gal
	E-1-11	正弦波	1Hz	450gal
	E-1-12	正弦波	1Hz	500gal
	E-1-13	正弦波	2Hz	400gal
	E-1-14	正弦波	2Hz	450gal
	E-1-15	正弦波	2Hz	500gal
	E-1-16	正弦波	2Hz	600gal
	E-1-17	正弦波	2Hz	700gal
	E-1-18	正弦波	2Hz	800gal
	E-1-19	正弦波	1.5Hz	400gal
	E-1-20	正弦波	1.5Hz	420gal
	E-1-21	正弦波	1.5Hz	430gal
	E-1-22	正弦波	1Hz	450gal
	E-1-23	ホワイトノイズ	—	—

表-3 (7) デバイスFの加振ケース

デバイスF				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	F-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	F-1-2	正弦波	1Hz	400gal
	F-1-3	正弦波	1Hz	450gal
	F-1-4	正弦波	1Hz	500gal
	F-1-5	正弦波	1Hz	525gal
	F-1-6	正弦波	1.5Hz	400gal
	F-1-7	正弦波	1.5Hz	430gal
	F-1-8	正弦波	1.5Hz	450gal
	F-1-9	正弦波	2Hz	600gal
	F-1-10	正弦波	2Hz	700gal
	F-1-11	正弦波	2Hz	800gal
	F-1-12	タイプ I	—	100%
	F-1-13	タイプ I	—	130%
	F-1-14	タイプ I	—	160%
	F-1-15	タイプ II	—	80%
	F-1-16	タイプ II	—	100%
	F-1-17	タイプ II	—	120%
	F-1-18	正弦波	2Hz	900gal
	F-1-19	正弦波	1.5Hz	500gal
	F-1-20	正弦波	1Hz	400gal
	F-1-21	正弦波	1.5Hz	400gal
	F-1-22	正弦波	2Hz	600gal
	F-1-23	タイプ I	—	100%
	F-1-24	タイプ II	—	80%
	F-1-25	ホワイトノイズ	—	—

表-3 (8) デバイスGの加振ケース

デバイスG				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	G-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	G-1-2	タイプ II	—	120%
	G-1-3	タイプ II	—	-120%
	G-1-4	タイプ II	—	120%
	G-1-5	タイプ I	—	160%
	G-1-6	タイプ I	—	160%
	G-1-7	タイプ I	—	160%
	G-1-8	正弦波	1Hz	750gal
	G-1-9	正弦波	1Hz	780gal
	G-1-10	正弦波	1Hz	800gal
	G-1-11	ホワイトノイズ	—	—
No.2	G-2-1	ホワイトノイズ	—	—
	G-2-2	タイプ I	—	160%
	G-2-3	正弦波	1Hz	800gal
	G-2-4	正弦波	1.5Hz	800gal
	G-2-5	正弦波	2Hz	800gal
	G-2-6	正弦波	1Hz	600gal
	G-2-7	タイプ I	—	160%
	G-2-8	タイプ II	—	-120%
	G-2-9	ホワイトノイズ	—	—
No.3	G-3-1	ホワイトノイズ	—	—
	G-3-2	正弦波	1Hz	800gal
	G-3-3	正弦波	1Hz	900gal
	G-3-4	正弦波	2Hz	900gal
	G-3-5	正弦波	1Hz	800gal
	G-3-6	正弦波	1Hz	600gal
	G-3-7	正弦波	1Hz	500gal
	G-3-8	ホワイトノイズ	—	—

表-3 (9) デバイスHの加振ケース

デバイスH				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	H-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	H-1-2	タイプ II	—	100%
	H-1-3	タイプ II	—	120%
	H-1-4	タイプ II	—	120%
	H-1-5	タイプ II	—	-120%
	H-1-6	タイプ I	—	160%
	H-1-7	正弦波	1Hz	800gal
	H-1-8	正弦波	1Hz	900gal
	H-1-9	正弦波	2Hz	800gal
	H-1-10	正弦波	2Hz	900gal
	H-1-11	ホワイトノイズ	—	—
No.2	H-2-1	ホワイトノイズ	—	—
	H-2-2	正弦波	1Hz	900gal
	H-2-3	正弦波	1Hz	900gal
	H-2-4	正弦波	2Hz	900gal
No.3	H-3-1	ホワイトノイズ	—	—
	H-3-2	正弦波	1Hz	800gal
	H-3-3	正弦波	1Hz	800gal
	H-3-4	正弦波	1.5Hz	800gal
	H-3-5	正弦波	1.5Hz	800gal
	H-3-6	正弦波	2Hz	800gal
	H-3-7	正弦波	2Hz	800gal
	H-3-8	正弦波	1Hz	800gal
	H-3-9	正弦波	1Hz	600gal
	H-3-10	正弦波	1Hz	700gal
H-3-11	ホワイトノイズ	—	—	

表-3 (10) デバイスIの加振ケース

デバイスI				
供試体	ケースNo.	入力波	振動数	振幅
No.1	I-1-1	ホワイトノイズ	—	—
	I-1-2	タイプ II	—	120%
	I-1-3	タイプ II	—	120%
	I-1-4	タイプ II	—	120%
	I-1-5	タイプ II	—	120%
	I-1-6	タイプ II	—	120%
	I-1-7	タイプ II	—	120%
	I-1-8	タイプ I	—	140%
	I-1-9	正弦波	1Hz	800gal
	I-1-10	正弦波	1Hz	850gal
No.2	I-1-11	ホワイトノイズ	—	—
	I-2-1	ホワイトノイズ	—	—
	I-2-2	正弦波	1Hz	900gal
	I-2-3	正弦波	1Hz	900gal
	I-2-4	正弦波	1Hz	900gal
	I-2-5	正弦波	1Hz	900gal
	I-2-6	正弦波	1Hz	700gal
No.3	I-2-7	ホワイトノイズ	—	—
	I-3-1	ホワイトノイズ	—	—
	I-3-2	タイプ II	—	120%
	I-3-3	タイプ I	—	160%
	I-3-4	正弦波	2Hz	900gal
	I-3-5	正弦波	1.5Hz	900gal
	I-3-6	正弦波	1Hz	900gal
	I-3-8	ホワイトノイズ	—	—

表-4 実験結果

デバイス	入力波	振動数	入力加速度	入力振幅	最大変位		最大荷重		最大速度	加振ケース
					+側	-側	+側	-側		
A	—	(Hz)	(gal)	(%)	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(m/sec)	—
	正弦波	1	620	—	144.3	145.0	184.8	188.2	1.14	A-3-7
	正弦波	2	900	—	144.8	149.2	217.3	220.1	2.30	A-4-10
	タイプ I	—	—	160	30.8	52.2	132.0	160.5	0.74	A-2-8
	タイプ II	—	—	110	89.4	98.8	196.8	204.6	1.22	A-1-5
B	正弦波	1	650	—	58.7	58.4	301.1	304.0	0.64	B-1-20
	正弦波	2	450	—	70.2	67.1	311.4	300.9	0.99	B-1-22
	タイプ I	—	—	160	23.7	30.7	192.1	229.5	0.47	B-1-17
C	タイプ II	—	—	120	58.2	59.7	310.3	336.3	0.94	B-1-21
	正弦波	1	800	—	16.0	13.4	345.8	342.9	0.31	C-5-2
	正弦波	2	800	—	12.8	12.9	349.6	352.4	0.38	C-5-4
D	タイプ I	—	—	160	4.0	4.0	262.1	268.6	0.33	C-2-3
	タイプ II	—	—	120	6.0	8.5	308.3	305.6	0.31	C-4-2
	正弦波	1	620	—	26.3	28.5	248.4	236.2	0.36	D-2-4
E	正弦波	2	620	—	30.4	27.9	237.1	231.2	0.49	D-4-3
	タイプ I	—	—	160	7.9	17.1	229.8	208.8	0.29	D-1-5
	タイプ II	—	—	120	24.7	28.3	239.4	233.6	0.38	D-3-8
F	正弦波	1	450	—	98.2	98.0	102.3	106.8	0.86	E-1-22
	正弦波	2	800	—	88.7	95.5	119.5	124.7	1.21	E-1-18
	タイプ I	—	—	160	32.5	58.6	102.1	104.0	0.54	E-1-4
G	タイプ II	—	—	120	85.7	103.8	115.7	122.6	0.96	E-1-8
	正弦波	1	525	—	112.8	112.0	122.6	116.4	0.99	F-1-5
	正弦波	2	900	—	107.9	108.3	129.7	124.4	1.43	F-1-18
H	タイプ I	—	—	160	30.0	62.3	104.9	102.0	0.54	F-1-14
	タイプ II	—	—	120	86.0	107.2	119.0	112.7	0.89	F-1-17
	正弦波	1	900	—	16.9	26.4	418.3	353.1	0.47	G-3-3
I	正弦波	2	900	—	19.6	28.8	430.8	355.3	0.58	G-3-4
	タイプ I	—	—	160	4.2	6.4	306.3	277.6	0.46	G-1-6
	タイプ II	—	—	120	8.4	10.4	353.5	318.0	0.42	G-1-4
H	正弦波	1	900	—	17.6	22.5	484.0	447.3	0.45	H-2-2
	正弦波	2	800	—	20.0	20.8	408.5	393.1	0.46	H-3-6
	タイプ I	—	—	160	4.2	4.1	315.5	294.2	0.29	H-1-6
I	タイプ II	—	—	120	5.0	6.4	410.6	373.4	0.29	H-1-4
	正弦波	1	900	—	18.4	28.6	456.8	359.0	0.44	I-3-6
	正弦波	2	900	—	22.5	27.1	415.1	356.3	0.55	I-3-4
I	タイプ I	—	—	160	1.1	7.1	318.4	278.3	0.32	I-3-3
	タイプ II	—	—	120	9.4	13.0	342.8	309.6	0.46	I-1-3

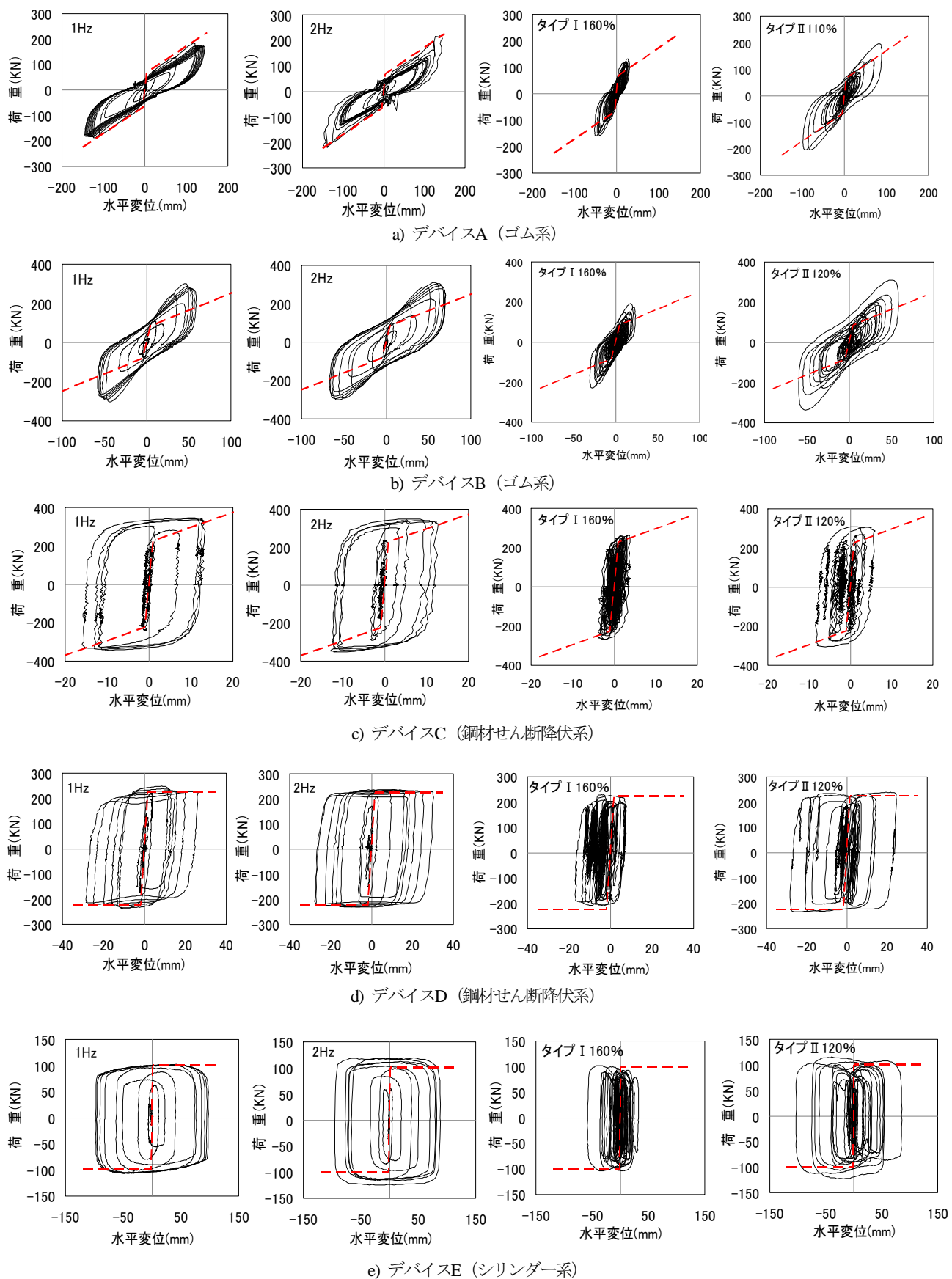
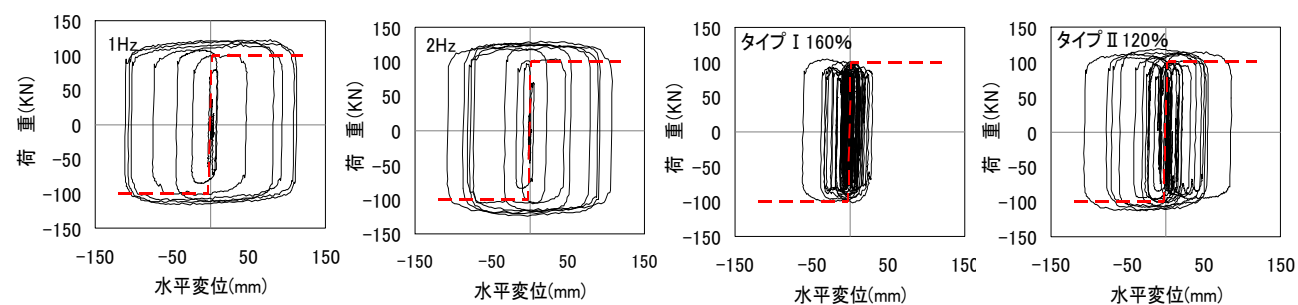
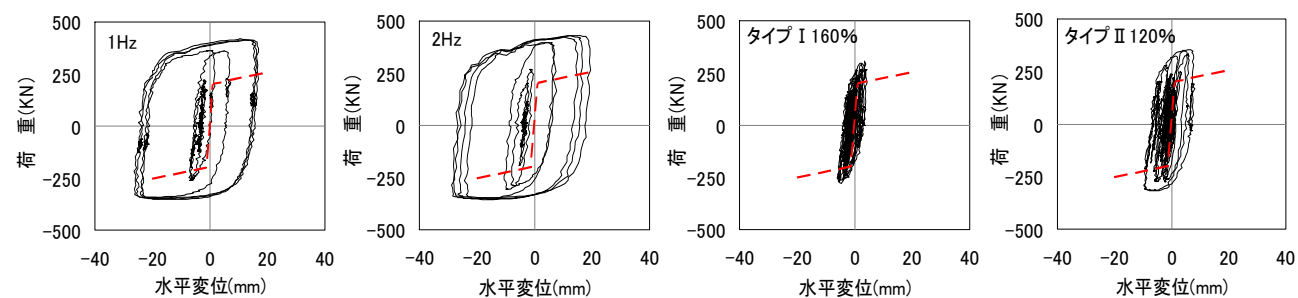


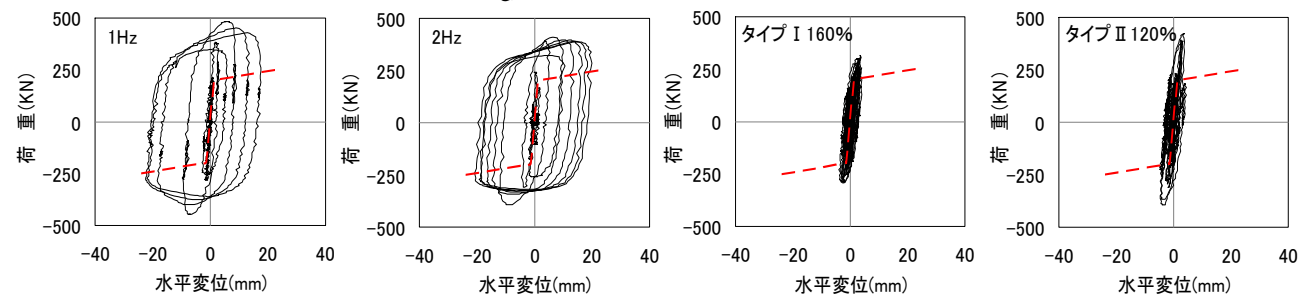
図-11 (1) デバイスの応答履歴曲線



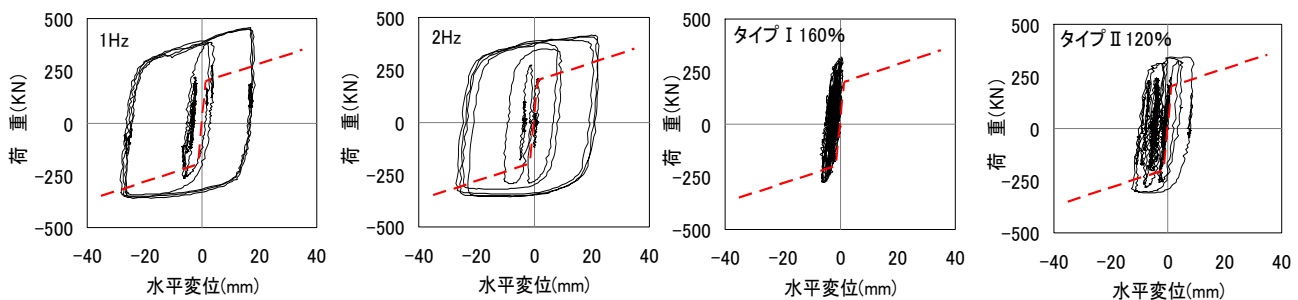
f) デバイスF (シリンダー系)



g) デバイスG (鋼材軸降伏系)



h) デバイスH (鋼材軸降伏系)



i) デバイスI (鋼材軸降伏系)

図-11 (2) デバイスの応答履歴曲線

## 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 Jun-ichi

OKADA Takao

**Abstract** : To develop the seismic design method for bridges using structural response control devices, it is necessary to develop the experimental procedure to evaluate the ultimate limit state and the damping performance, the mathematical modeling method for nonlinear dynamic analysis, the concept of maintenance strategy and the design details of connecting parts. In FY 2009, a performance verification method for structural response control devices was studied. Among the experimental verification methods, the experiment for the dynamic performance properties is one of the most important. Thus, a series of shake table tests for various kinds of devices including rubber dampers, viscous dampers and steel dampers was conducted.

**Key words** : bridge, structural response control device, shake table test, modeling method