

履歴型制震デバイス組込み構造の耐震性向上に関する解析的検討

Analytical approach on seismic resistance capacity of structures with hysteretic seismic control devices

本田 誠*・森下邦宏**・井上幸一**・平井 潤**・阿比留久徳***

Makoto Honda, Kunihiro Morishita, Koichi Inoue, Jun Hirai and Hisanori Abiru

*工修 三菱重工業株式会社 技術本部 広島研究所 鉄構・土木研究室 (〒730-8642 広島市中区江波沖町 5-1)

**博(工) 三菱重工業株式会社 技術本部 広島研究所 鉄構・土木研究室 (〒730-8642 広島市中区江波沖町 5-1)

***博(工) 三菱重工業株式会社 技術本部 広島研究所 所長室 (〒733-8553 広島市西区観音新町 4-6-22)

The seismic resistance design methods using several seismic response control devices have been investigated since Hyogo-ken nanbu earthquake. As these seismic response control devices, the authors have proposed hysteretic brace (damper brace), shear panel damper and friction damper, and confirmed applicability to architectural and civil structures. However comparison of seismic response reduction of structures with each device was not conducted. In this paper, the analytical hysteretic models corresponding to each device were proposed and the effect on response reduction was studied in analytical approach. The results indicated that seismic responses of structures with each device could be reduced to optimal response by adjusting stiffness and yield force of devices and structures.

Key Words : hysteretic seismic response control devices, seismic response analysis, modeling of devices, response reduction

キーワード: 履歴型制震デバイス, 地震応答解析, 解析モデル化, 応答低減

1. 緒言

兵庫県南部地震以降, 各種構造物の耐震性向上に関して多くの機関で研究が行われ, 様々な耐震性向上対策が検討, 提案されている. その内の一つである免震化工法は, 既に建築, 土木分野で広範囲にわたり適用されている. また, その他の方法として, 構造物内に損傷を集中させる部材(制震デバイス)を適切に配置し, その部材に地震時のエネルギーを吸収させ, 主たる構造の健全性を確保する方法がある. これは, 建築分野においては損傷制御という思想に基づいた方法であり^{1),2)}, 近年, 耐震性向上対策として主流となりつつある. 一方, 土木分野においても, この工法を用いた橋梁構造などの耐震性に関する検討が実施されており, アーチ橋, トラス橋などの中, 長大橋に対する検討が実施されてきている^{3)~9)}.

また, これらに適用するための安定したエネルギー吸収性能を有する制震デバイスの研究も多く実施されており, 履歴型ダンパーとしては, 鋼材の塑性履歴エネルギー吸収能力に期待した鋼材ダンパー(軸降伏型, せん断降伏型など)^{10)~13)}, 鉛の金属塑性ひずみエネルギー吸収能力に期待した鉛ダンパー, 摩擦力を利用した摩擦ダンパ

ー^{14)~16)}などがあり, その他, 粘性減衰型ダンパーとして, 粘性流体のせん断抵抗を利用した粘性ダンパー(一般的なオイルダンパーなど), 高分子系などの粘弾性体のせん断変形抵抗を利用した粘弾性ダンパーなどが一般的に用いられている.

著者らも, この制震デバイスを利用した耐震性向上に関する研究を実施し, まず, 制震デバイスのうち, 鋼材ダンパーとして, 軸降伏座屈拘束型ダンパー(以下, ダンパーブレース)^{12),13)}, およびせん断降伏型ダンパー(以下, せん断ダンパー)¹⁶⁾に関して, その設計法に関する検討, 実験的検証を実施してきた. さらにダンパーブレースについて, 土木構造物への適用例として橋梁への適用性を検討し, その応答低減効果を解析的, 実験的に検証してきた^{6)~9)}. また, 摩擦ダンパーについても実機レベルでの静的, 動的載荷実験, 縮小模型を用いた振動実験を実施し¹⁶⁾, その履歴特性, 制震デバイスの信頼性, 建築物への適用性等に関する検証を実施してきた. しかし, これらの各制震デバイスを同一構造に組込んだ場合の応答性状の比較, 制震デバイスの特性を変化させた場合の応答への影響に関するパラメトリックな検討は実施していない.

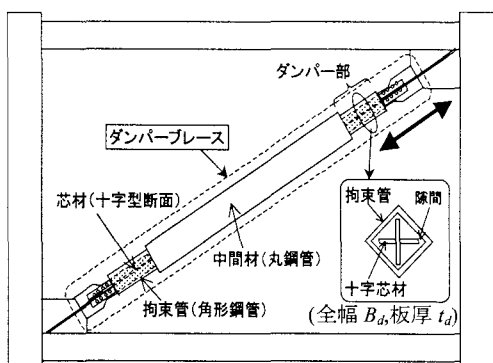


図-1 ダンパーブレース構造

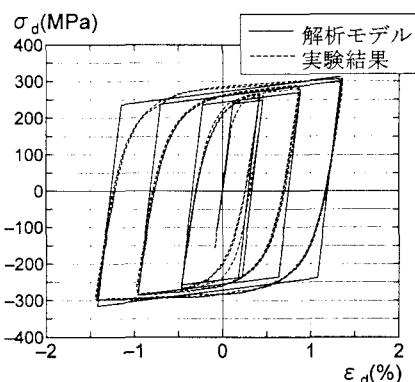


図-2 ダンパー部履歴特性と解析モデル履歴の比較

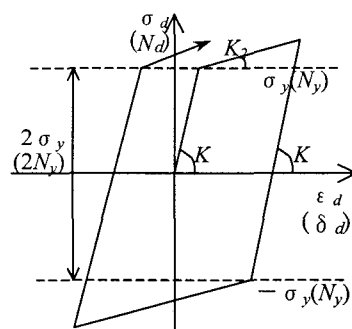


図-3 解析モデル化

そこで本論文では、これらの各制震デバイスの解析モデルを提案するとともに、その解析モデルの妥当性を振動実験結果^{9),16)}との比較に基づき検証した。さらに、これらの制震デバイスをトラス構造物に適用した際の地震時の応答低減効果、および制震デバイスの特性を変化させた場合の応答に対する影響に関して、パラメトリックな解析的検討を実施した。

2. 制震デバイス

本論文では、前述のように(1)ダンパーブレース^{12),13)}、(2)摩擦ダンパー¹⁶⁾、(3)せん断ダンパーの3種類の履歴型制震デバイスを対象として検討を行った。これらはすべてトラス斜材として、あるいはトラス斜材に追設する装置として構造物に組み込むことで、柱、梁で構成されたフレームの相対変位を履歴エネルギーとして吸収するものである。まず、ここで取り扱う制震デバイスの構造概要を示し、次に、載荷実験で得られた履歴特性およびその履歴特性の解析モデル化について示す。

2.1 ダンパーブレース

図-1にダンパーブレースの構造を示す。ダンパーブレースは、鋼材の弾塑性特性を利用した軸降伏座屈拘束型の履歴ダンパーであり、通常、トラス構造の斜材部分に挿入される。また、作用軸力に対して軸降伏して弾塑性エネルギーを吸収する芯材(十字型断面:降伏応力 $\sigma_y=235\text{MPa}$ 級の低降伏点鋼、断面積 A_d)、芯材と隙間をあけて設置され、圧縮力に対して芯材が降伏後に横倒れ座屈、ねじれ座屈するのを拘束する拘束管(角形鋼管)およびブレース部材の両端に配したダンパー部材(芯材+拘束管)をつなぐ中間材(丸鋼管)により構成されている。これより、圧縮側に対しても引張降伏状態と同様に荷重低下の生じない安定した弾塑性挙動を示す。ダンパーブレースの降伏軸力 N_y は次式により算定される。

$$N_y = A_d \times \sigma_y \quad (1)$$

図-2に文献13)にて実施した繰返し載荷実験結果のダンパー部の履歴特性を破線で示す。図-2の縦軸は平均軸応力 σ_d (軸力/断面積)、横軸は平均軸ひずみ ε_d (軸変

位/ダンパー長さ)であり、安定した弾塑性エネルギー吸収性能を示していることがわかる。

この履歴特性に対する解析モデル化としては、図-3の軸力 (N_d) –軸変位 (δ_d) 関係に示すように、降伏軸力 N_y で降伏し、2次剛性 K_2 として弾性剛性 K の1/50となるバイリニア型の復元力特性を仮定し、硬化則としては等方硬化則を適用した。また、除荷剛性は弾性剛性と同一とした。図-2中に解析モデルの履歴を実線で示している。これより、履歴中の折曲がり点での履歴形状の差は生じているが、各履歴ループの形状は概ね対応がとれている。ただし、上記の2次勾配については、十字芯材の幅厚比の設定により $K_2=1/100\sim 1/50$ (幅厚比 $B_d/(2t_d)=9\sim 6$ に対応)程度となることが実験的に確認されているが、ここでは幅厚比6に対応する1/50として設定したものである。

2.2 摩擦ダンパー

図-4に摩擦ダンパーの構造を示す。本論文で対象とする摩擦ダンパー¹⁶⁾は、複数の摺動板およびスライド板で構成されており、スライド板群と摺動材板群は互いに交互に重ね合わされ(摩擦面数 n)、各板群中央にあけた孔に通した締付けボルトとナットにより板群を締め付ける(締付け力 N_B)ことにより板群間に発生する摩擦力 P を調整する機構になっている。このとき板群間が相対的に移動できるように、スライド板群の孔は装置のストロークを考慮した長孔になっている。フレームの相対変位は、接合用ブレースを仲介しスライド板群に伝達され、スライド板群と摺動材板群の相対変位に現れる。

摩擦面への使用材料としては、スライド板にはステンレス鋼(SUS304)を、摺動板表面には銅合金系の焼結材料を用いている。ステンレス鋼の表面粗さを適宜設定(JIS規格で3.2~6.3s)することで、摩擦係数 $\mu=0.15\sim 0.2$ の静摩擦力と動摩擦力の差異が小さい安定した摩擦力を得られることがオリジナルの特性として確認されている。摩擦力 P は次式により算定される。

$$P = N_B \times \mu \times n \quad (2)$$

図-5に文献16)にて実施した載荷実験結果のうち、摩擦力–相対変位関係を示す。これより、往行時、復行時ともにほぼ同一の摩擦力が得られており、摺動中の摩擦

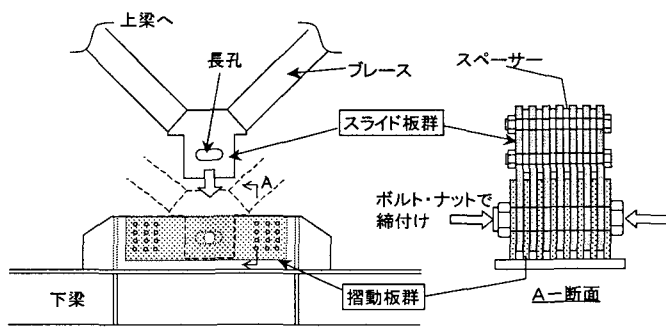


図-4 摩擦ダンパー構造

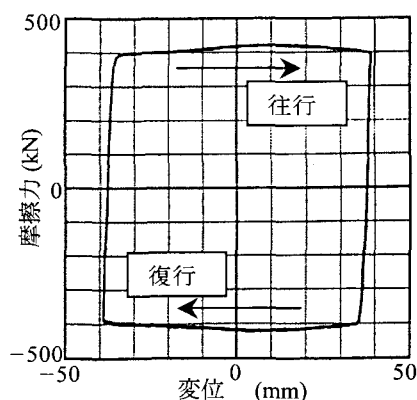


図-5 摩擦ダンパー履歴曲線

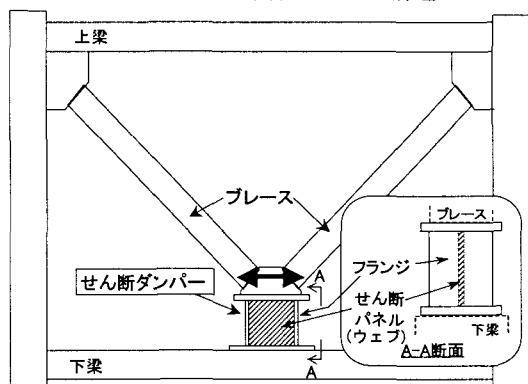


図-6 セン断ダンパー構造

力の変動もあまり大きくないことがわかる。

摩擦ダンパーは作用力が摩擦力に達した直後から相対変位を生ずる完全弾塑性に近い挙動を呈するので、解析モデルとしては摩擦力 P で折れ曲がるバイリニア型の完全弾塑性特性として仮定した。

2.3 セン断ダンパー

図-6 にせん断ダンパーの構造を示す。せん断ダンパーはせん断降伏するウェブ(降伏応力 $\sigma_y = 235\text{MPa}$ 級(せん断降伏応力 $\tau_y = 136\text{MPa}$)の低降伏点鋼、ウェブ断面積 A_w)とウェブの形状を保持するためのフランジで構成されたH型断面部材である。ウェブが早期に降伏し、その時点ではフランジは降伏しない諸元として設計されている。また、降伏せん断力 Q_y は次式により算定される。

$$Q_y = A_w \times \tau_y \quad (3)$$

載荷実験より得られた履歴曲線を図-7 に破線で示す。縦軸、横軸はそれぞれ降伏せん断力 Q_y 、降伏変位 δ_y で除した無次元量を示す。これより、ダンパーブレース、摩擦ダンパーと同様に安定したエネルギー吸収性能を有していることが確認できる。

次に、この履歴特性に対する解析モデル化は、文献 11) を参照して、図-8(a)に示すようなひずみ硬化型の履歴特性とした。この履歴モデルでは、弾性剛性 K および除荷剛性は同一とし、図-8(a)中の破線で示す折曲がり点推定直線に達すると塑性化して 2 次剛性 K_2 の直線上を進む。この 2 次剛性 K_2 は弾性剛性 K (無次元量で表示している

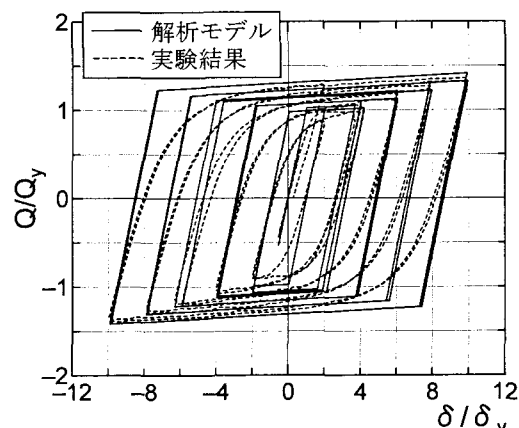
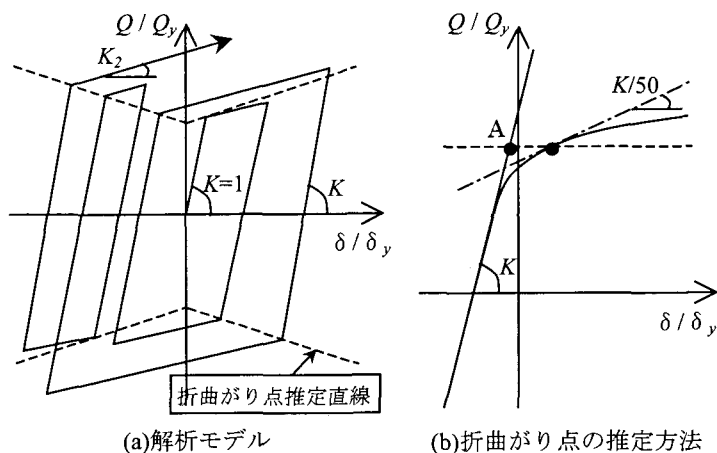


図-7 セン断ダンパーの履歴特性と解析モデル履歴の比較



(a)解析モデル

(b)折曲がり点の推定方法

図-8 セン断ダンパーの解析モデル化

ので $K=1$ となる) の $1/100$ とした。また、折曲がり点推定直線は次の方法により求めた。まず、図-8(b)のように、実験結果での履歴曲線上で逐次接線剛性を算定し、その剛性が弾性剛性の $1/50$ となる点を折曲がり荷重として設定し、弾性剛性上でこの荷重に対応した点(図中 A 点)を折曲がり点として求めた。この折曲がり点を漸増載荷実験の各振幅の履歴ループで求め、それを直線近似することで折曲がり点推定直線を式(4)のように設定した。

$$\frac{Q}{Q_y} = 0.0327 \frac{\delta}{\delta_y} + 0.967 \quad (4)$$

図-7 中に解析モデルの履歴を実線で示しているが、ひずみ硬化に伴う荷重上昇を良く表現できている。

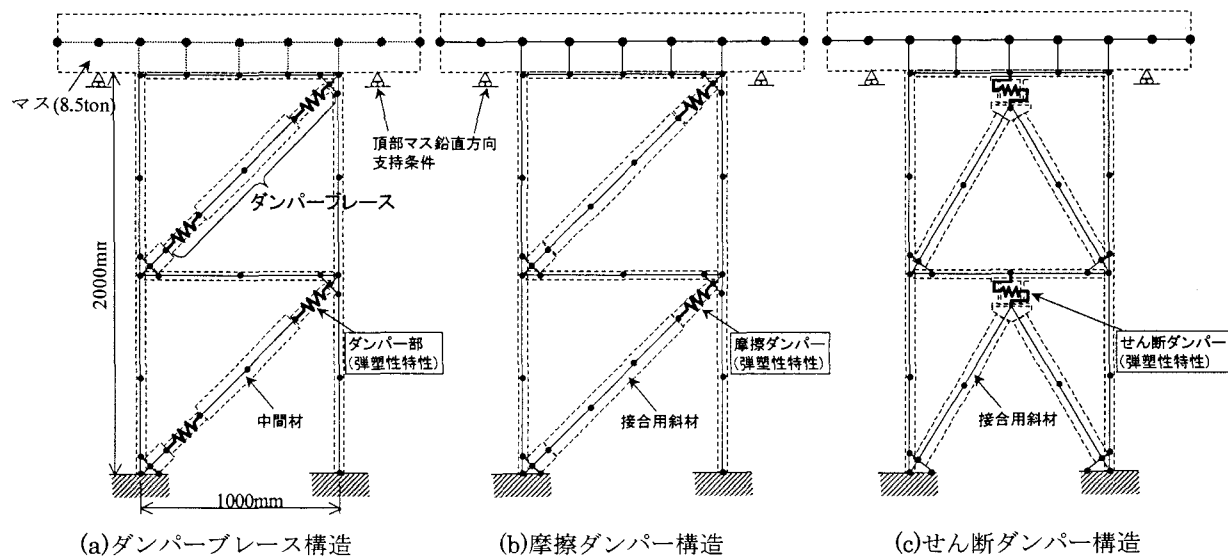


図-9 解析モデル

3. 履歴モデルの妥当性検証

2 章のように提案した制震デバイスの履歴モデルは、準静的載荷実験の履歴特性を良く表現している。しかし、地震のような非定常外乱に対しては、その履歴は複雑なものとなるため、地震応答に対する履歴モデルの妥当性を検証しておく必要がある。そこで、鋼材ダンパーについてはダンパーブレースを例として採り挙げ、文献 9) に示すダンパーブレース組込み構造模型に対して実施した動的地震応答実験結果と弾塑性解析結果との比較を行った。また、履歴特性が鋼材ダンパーとは異なる摩擦ダンパーについては、文献 16) に示す動的地震応答実験結果との比較を行い、履歴モデルの妥当性を検証した。地震応答解析は、直接積分による時刻歴応答解析にて行った。

3.1 解析モデル

解析モデルを図-9 に示す。ダンパーブレース組込み構造、摩擦ダンパー組込み構造の解析モデルは、文献 9), 16) の地震応答実験で用いた縮小模型(高さ 2000mm, 幅 1000mm, 頂部マス 8.5ton)をモデル化したものである。柱、梁は角型鋼管 50×50×3.2mm (STKR400) としている。また、同図中には、4 章で用いるせん断ダンパー組込み構造の解析モデルも示している。図中には縮小模型の概略構造を破線で示しており、●印がモデル節点を示す。摩擦ダンパーは図-4 の構造とは異なるが、図-9 のように軸力が直接、摩擦力として作用する構造としている。

ダンパーブレースのダンパー部要素、摩擦ダンパー要素、せん断ダンパー要素は、2 章でモデル化した弾塑性の履歴特性を有するばね要素とし、その他の部材は弾性はり要素としてモデル化した。拘束条件としては柱基部を固定とし、頂部マスは実験時の条件に合わせて鉛直方向固定、水平方向可動の条件とした。減衰については、縮小模型に対して行った弾性範囲内での自由振動実験結果から得られた対数減衰率を用い、 $h=2\%$ と評価されたの

で、弾性部材はすべて $h=2\%$ と設定した。弾塑性要素については履歴減衰の影響が大きくなることが想定されるので、 $h=0\%$ としてモデル化した。

各制震デバイスの特性、およびそれぞれを組み込んだ構造モデルの固有周期を以下に示す。降伏荷重については、各構造での降伏層せん断力がほぼ同じになるように設定している。

○ダンパーブレース (ダンパー部要素の弾塑性特性)

- ・降伏軸力 $N_y=10.2\text{kN}$ (1.04tf)
- ・弾性剛性 $K=35.3\text{kN/mm}$ (3.60tf/mm)
- ・2 次剛性 $K_2=K/50=0.71\text{kN/mm}$ (0.07tf/mm)
- ・中間材寸法 丸鋼管 $\phi 60.5 \times 3.2\text{mm}$ (STK400)
- ・固有周期 $T=0.29$ 秒

○摩擦ダンパー

- ・摩擦力(軸力) $P=9.8\text{kN}$ (1.0tf)
- ・接合用斜材 丸鋼管 $\phi 60.5 \times 3.2\text{mm}$ (STK400)
- ・固有周期 $T=0.18$ 秒

3.2 入力地震波

入力地震波としては、道路橋示方書標準波¹⁷⁾の I-II-1 および II-II-1 の 2 波を用いた。ただし、解析での入力地震加速度波形は、地震応答実験時に模型基部で計測された計測加速度波形を用いた。

入力地震加速度波形の例として、I-II-1 で最大加速度 280Gal, II-II-1 で最大加速度 200Gal の場合の加速度波形を図-10 に示す。また、これらの波形に対応した $h=2\%$ の場合の加速度応答スペクトルを図-11 に示す。図-11 中には各解析モデルの固有周期も示している。

3.3 解析ケース

解析ケースは、地震応答実験に合わせて、ダンパーブレース組込み構造、摩擦ダンパー組込み構造ともに表-1 に示す 5 ケースとした。それぞれ、3.2 に示した地震加速度波形の最大加速度を調整して設定したものである。

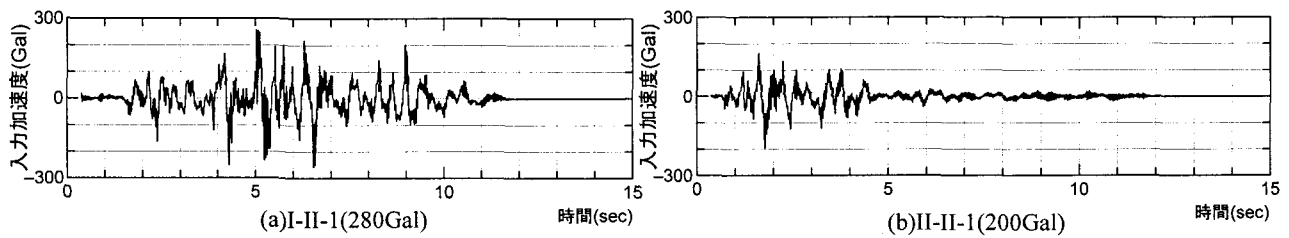


図-10 入力地震加速度波形

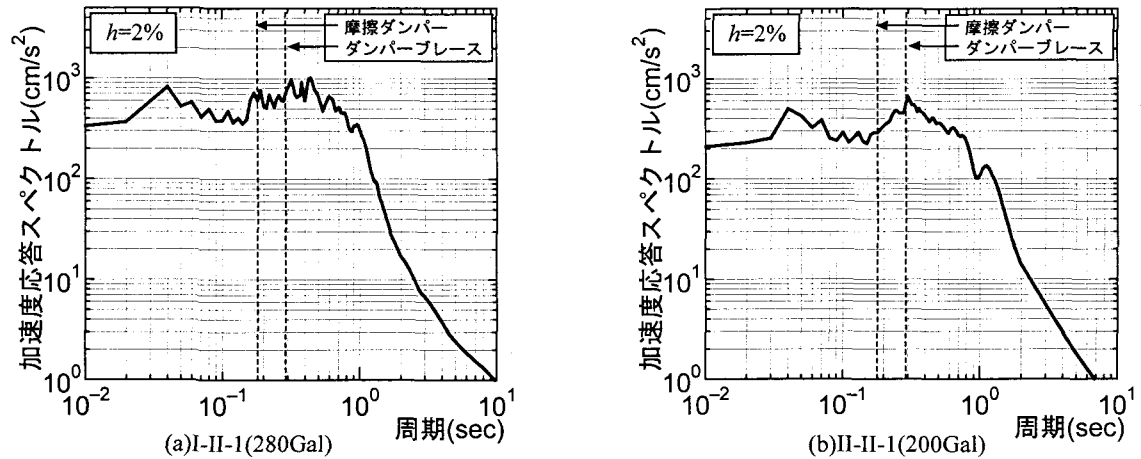


図-11 加速度応答スペクトルの比較

表-1 解析ケース

ケース	1	2	3	4	5
地震タイプ	I	I	I	II	II
地震レベル	L1	L2	L3	L1	L2
入力最大加速度	138	230	280	127	200

* 加速度単位 : Gal

表-2 解析結果と実験結果の比較

				ダンパーブレース			摩擦ダンパー		
ケース	地震 タイプ	地震 レベル		最大加速度 (cm/s ²)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)	最大加速度 (cm/s ²)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)
1	I	L1 (138Gal)	実験値	131.2	6.71	0.25	96.9	3.02	1.21
			解析値	125.6	7.00	0.05	85.0	2.59	1.21
			解析／実験	(0.96)	(1.04)	(0.20)	(0.88)	(0.86)	(1.00)
2		L2 (230Gal)	実験値	176.1	15.78	0.29	118.9	9.57	0.71
			解析値	165.0	13.58	1.12	121.3	8.74	1.07
			解析／実験	(0.94)	(0.86)	(3.88)	(1.02)	(0.91)	(1.50)
3		L3 (280Gal)	実験値	181.3	19.02	1.44	130.2	13.29	1.43
			解析値	174.9	14.91	1.55	135.3	11.86	0.09
			解析／実験	(0.96)	(0.78)	(1.08)	(1.04)	(0.89)	(0.06)
4	II	L1 (127Gal)	実験値	133.4	6.58	0.12	93.2	3.07	0.93
			解析値	119.9	6.14	0.69	90.5	3.19	0.99
			解析／実験	(0.90)	(0.93)	(5.76)	(0.97)	(1.04)	(1.06)
5		L2 (200Gal)	実験値	162.5	12.26	0.30	122.7	9.28	1.60
			解析値	153.9	11.45	1.16	119.4	8.25	1.63
			解析／実験	(0.95)	(0.93)	(3.88)	(0.97)	(0.89)	(1.01)

また、表-1 に示すように、以下では、地震タイプとして I, II と表記し、最大地震加速度に対応したレベルとして L1, L2, L3 と称する。

3.4 地震応答解析結果と実験結果の比較

地震応答解析結果と実験結果の比較のうち、表-2 にモデル頂部の応答変位、応答加速度の最大値、残留変位の比較を示し、実験結果に対する解析結果の比率をとった

グラフを図-12 に示す。また、応答波形の例として、ダンパーブレース組込み構造についてはケース 2、摩擦ダンパー組込み構造についてはケース 5 の解析結果と実験結果の比較を図-13、図-14 に示す。図には頂部マスの応答変位、応答加速度波形の比較、ベースシャー応答変位履歴の比較、および制震デバイスの履歴特性の比較として、ダンパーブレース構造については上側ブレースのダンパー部の軸力-軸変位関係、摩擦ダンパー構造につい

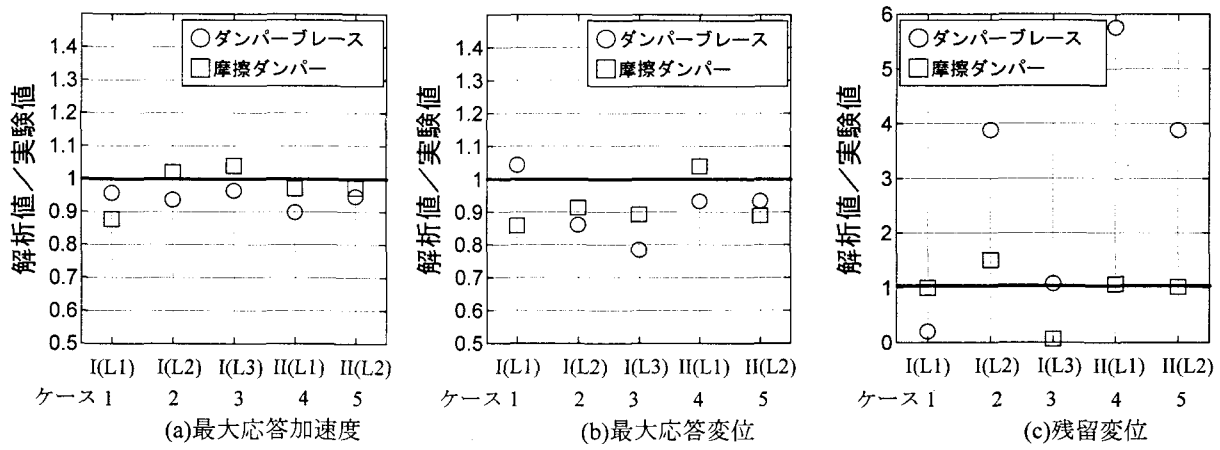


図-12 最大応答値、残留変位の比率

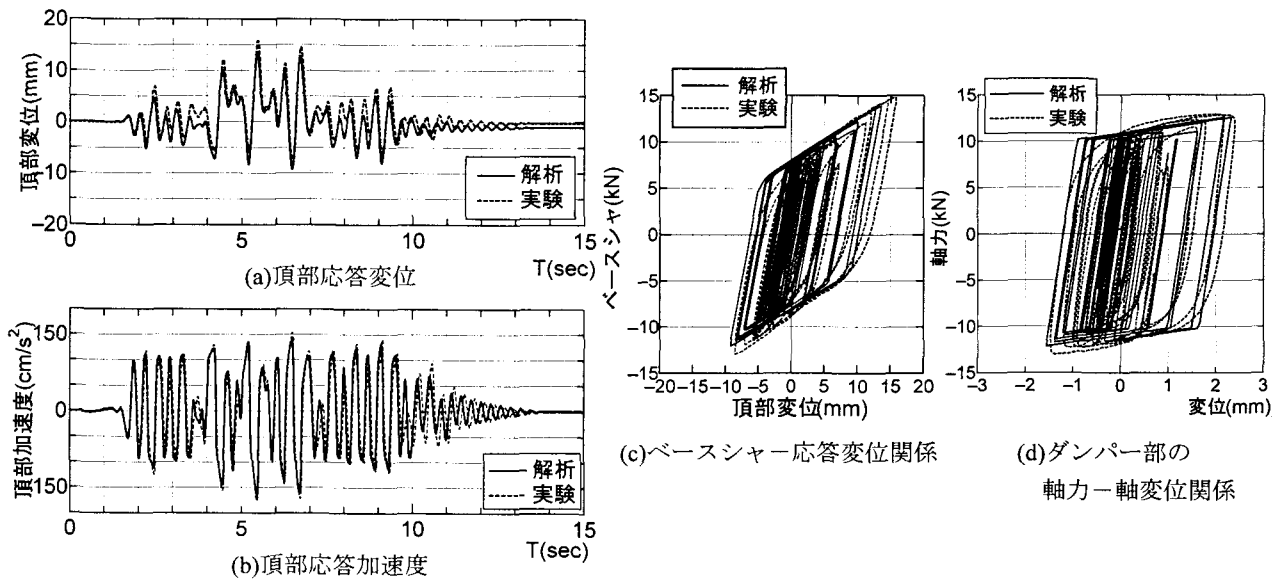


図-13 解析結果と実験結果の比較(ダンパーブレース構造, ケース2, タイプI, L2)

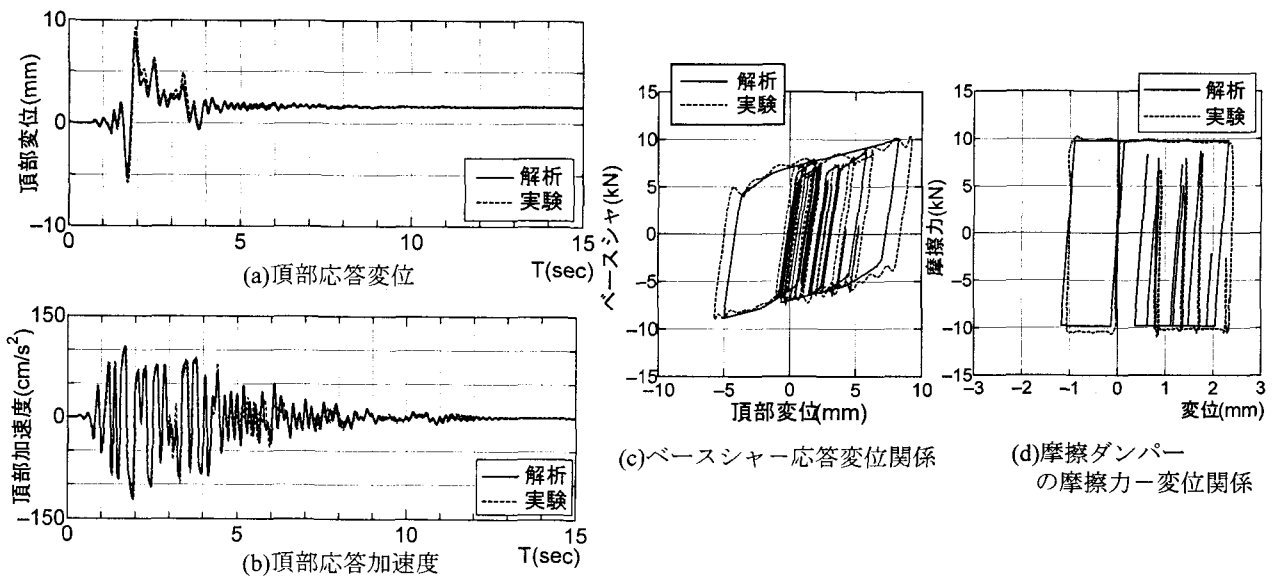


図-14 解析結果と実験結果の比較(摩擦ダンパー構造, ケース5, タイプII, L2)

ては上側ブレースのデバイス摩擦力-相対変位関係の比較を示す。図中の破線は実験値、実線は解析値を示す。

図-13、図-14の比較より、ダンパーブレース構造、摩擦ダンパー構造ともに、実験結果と解析結果の応答性状は良く一致していると言える。また、制震デバイス履歴曲線の比較からも、変位、荷重ともに良く実験結果を表現できている。制震デバイスの吸収エネルギー量については、図-13のダンパーブレースでは解析結果が327.0 kN・mm、実験結果が322.2 kN・mmとなり、図-14の摩擦ダンパーでは解析結果が65.6 kN・mm、実験結果が70.2 kN・mmとほぼ対応がとれる結果となった。

また、表-2、図-12から、実験結果に対する解析結果の最大応答値の比率は、応答加速度で-10%～+5%程度、応答変位で-20%～+5%程度の範囲となっており、ばらつきはあるが概ね対応がとれているものと考えられる。一方、残留変位については、実験結果に対する解析結果の比率のばらつきが大きくなっているが、これは残留変位が最大応答変位と比較すると非常に小さい値であり、その値を用いた比率として評価しているためである。

以上の結果より、本履歴モデルの妥当性が確認できたので、以降ではこれらの履歴モデルを用いて解析的検討を行う。

4. 制震デバイス構造の応答低減効果

ここでは、2章に示した3種類の制震デバイスの応答低減効果について解析的な検討を行う。ただし、応答値を定量的に比較するため、3章の解析モデルとは異なり、降伏層せん断力および弾性固有周期を合わせたモデルとした。基準構造は3章に示したダンパーブレース組込み構造とし、摩擦ダンパー、せん断ダンパー組込み構造については、接合用斜材の断面諸元を調整して弾性固有周期を0.29秒に合わせた。よって、弾性応答解析結果はすべてで同じとなる。各デバイス諸元を以下に示す。

○ダンパーブレース（ダンパー部要素の弾塑性特性）

- ・降伏軸力 $N_y=10.2\text{kN}$ (1.04tf)
- ・弾性剛性 $K=35.3\text{kN/mm}$ (3.60tf/mm)
- ・2次剛性 $K_2=K/50=0.71\text{kN/mm}$ (0.07tf/mm)

○摩擦ダンパー

- ・摩擦力(軸力) $P=9.8\text{kN}$ (1.0tf)

○せん断ダンパー

- ・降伏せん断力 $Q_y=7.0\text{kN}$ (0.71tf)
- ・弾性剛性 $K=17.9\text{kN/mm}$ (1.83tf/mm)
- ・2次剛性 $K_2=K/100=0.18\text{kN/mm}$ (0.018tf/mm)

固有周期はすべて同一で $T=0.29$ 秒である。

地震応答解析は、各制震デバイス組込み構造に対して表-1に示す5ケースを実施した。また、それぞれに対して応答低減効果を示すための弾性地震応答解析も行った。

4.1 制震デバイス構造の地震応答性状の比較

3種類の制震デバイスの地震応答性状の比較を行うため、解析結果のうち、ケース2、ケース5の地震応答解析結果の比較を図-15、図-16に示す。応答波形については3種類とも、制震デバイスの違いによる大きな変化は見られず、応答変位波形での振動中心のシフトによる残留変位も同様の傾向を示した。ただし、応答変位波形において、ダンパーブレース構造と摩擦ダンパー構造は類似した応答性状を示しているが、せん断ダンパー構造のみ最大値、最大値の発生時刻などが若干異なる傾向を示している。これは、制震デバイスのモデル化による影響が出ているものと考えられる。

4.2 制震デバイス構造の地震応答低減効果の検討

次に、応答低減効果の比較を行う。表-3に弾性解析結果に対する弾塑性解析結果の比率(応答低減率)を示し、図-17に横軸に解析ケース、縦軸に最大応答の低減率をとった図を示す。ただし、残留変位については弾性解析では発生しないため、残留変位/モデル高さ(2000mm)の無次元量を示している。

これらより、応答加速度についてはすべてのケースで低減する結果となり、地震タイプによらず、弾性応答最大値の20～40%まで低減している。また、地震レベルの増加に伴い低減率は小さくなる傾向を示した。

一方、応答変位については、応答低減率は0.9～1.3程度の範囲でばらつく結果となり、弾性応答結果よりも増加するケースも見られた。しかし、せん断ダンパーについては検討した5ケースで、すべてほぼ低減率が1.0以下となる結果となり、応答変位の低減効果が明確に見られた。ダンパーブレース、摩擦ダンパーについては、地震動タイプ別に見ると、タイプⅠ地震動に対してはほぼ同程度の低減率を示し、地震レベルによる変化もあまり大きくない結果となったが、タイプⅡ地震動に対しては、摩擦ダンパーの方が低減率が大きい、すなわち弾性応答変位よりも応答変位が大きくなる傾向を示し、かつ地震レベルの増加に伴い、低減率も増加する結果となった。

残留変位については、せん断ダンパーのケース5を除いて地震レベルの増加に伴い増加する傾向を示しているが、すべてのケースで高さの1/1000程度以下におさまっている。

以上の結果より、今回検討した構造諸元、入力地震動に対しては、最大応答加速度すなわちベースシャの低減効果は、検討した3種類の制震デバイスで大きな差はなかった。最大応答変位の低減率については、せん断ダンパーではすべてのケースで大きな変化がなく弾性応答以下におさまる結果となり、ダンパーブレース、摩擦ダンパーでは各ケースでの低減率の変化は同様の傾向を示したが、地震動タイプにより応答低減率は変化することがわかった。

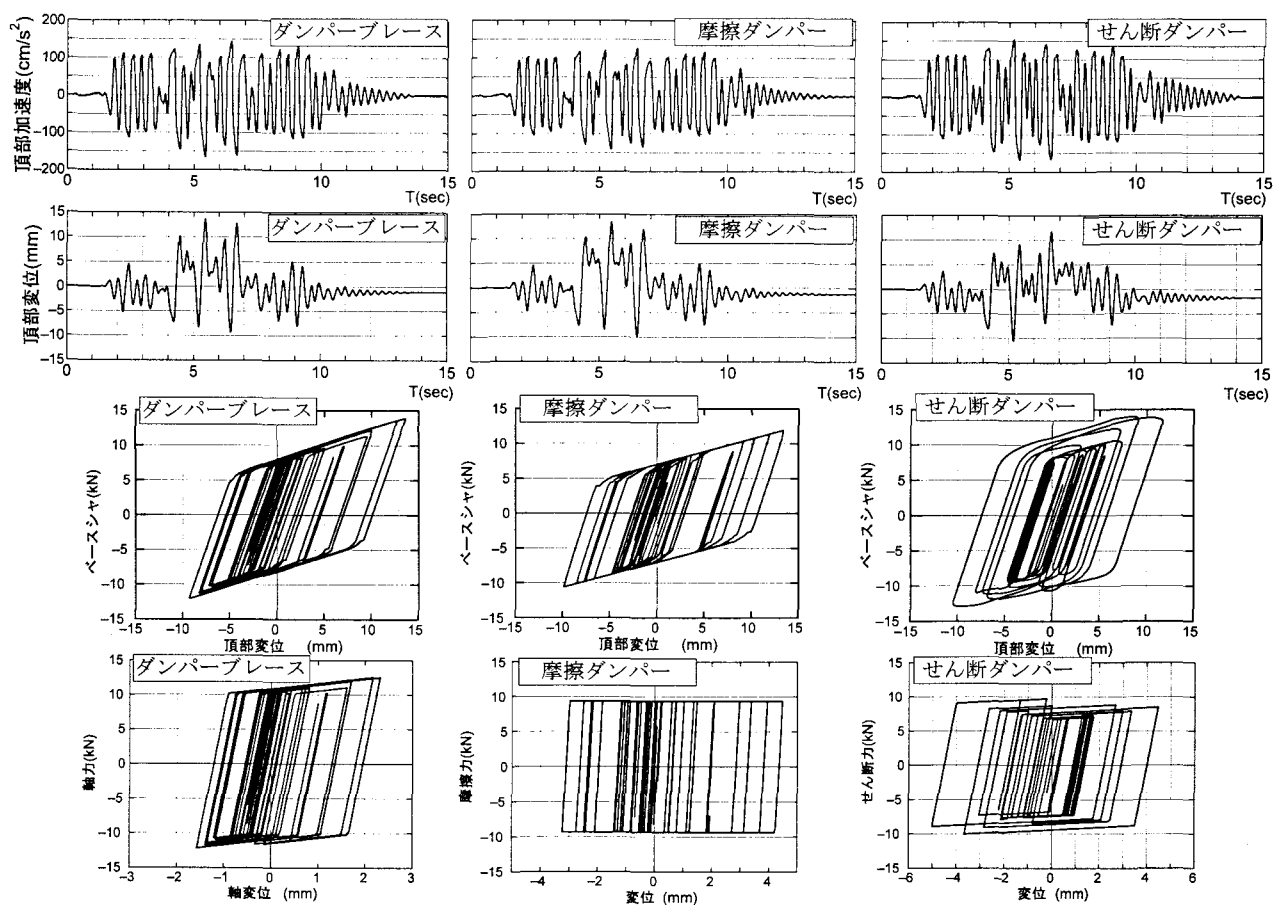


図-15 ケース 2 の比較(タイプ I, L2)

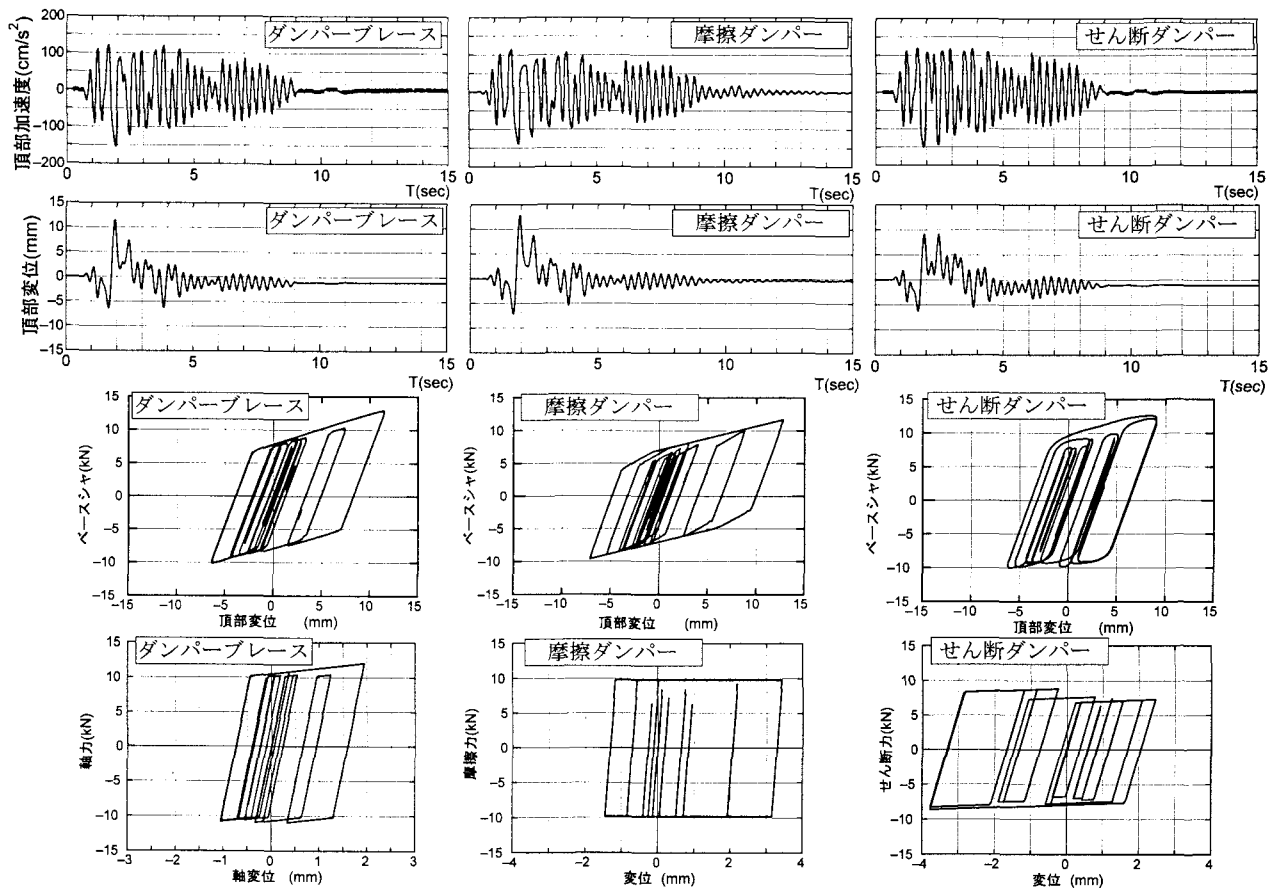


図-16 ケース 5 の比較(タイプ II, L2)

表-3 各ケースの応答低減率

			ダンパーブレース			摩擦ダンパー			せん断ダンパー			
ケース	地震 タイプ	地震 レベル		最大加速度 (cm/s ²)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)	最大加速度 (cm/s ²)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)	最大加速度 (cm/s ²)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)
1	I	L1 (138Gal)	弾性	317.5	6.58	—	317.5	6.58	—	317.5	6.58	—
			弾塑性	125.6	7.00	0.05	105.0	7.18	0.74	121.9	6.78	0.09
			弾塑性/弾性	(0.40)	(1.06)		(0.33)	(1.09)		(0.38)	(1.03)	
2		L2 (230Gal)	弾性	595.9	12.45	—	595.9	12.45	—	595.9	12.45	—
			弾塑性	165.0	13.58	1.12	142.0	13.41	1.21	166.6	11.08	1.72
			弾塑性/弾性	(0.28)	(1.09)		(0.24)	(1.08)		(0.28)	(0.89)	
3		L3 (280Gal)	弾性	648.2	13.52	—	648.2	13.52	—	648.2	13.52	—
			弾塑性	174.9	14.91	1.55	148.3	14.85	1.58	177.32	13.19	2.13
			弾塑性/弾性	(0.27)	(1.10)		(0.23)	(1.10)		(0.27)	(0.98)	
4	II	L1 (127Gal)	弾性	295.6	6.13	—	295.6	6.13	—	295.6	6.13	—
			弾塑性	119.9	6.14	0.69	107.0	6.99	0.82	124.1	6.09	0.79
			弾塑性/弾性	(0.41)	(1.00)		(0.36)	(1.14)		(0.42)	(0.99)	
5		L2 (200Gal)	弾性	477.8	9.93	—	477.8	9.93	—	477.8	9.93	—
			弾塑性	153.9	11.45	1.16	139.0	12.75	0.39	149.99	9.07	1.06
			弾塑性/弾性	(0.32)	(1.15)		(0.29)	(1.28)		(0.31)	(0.91)	

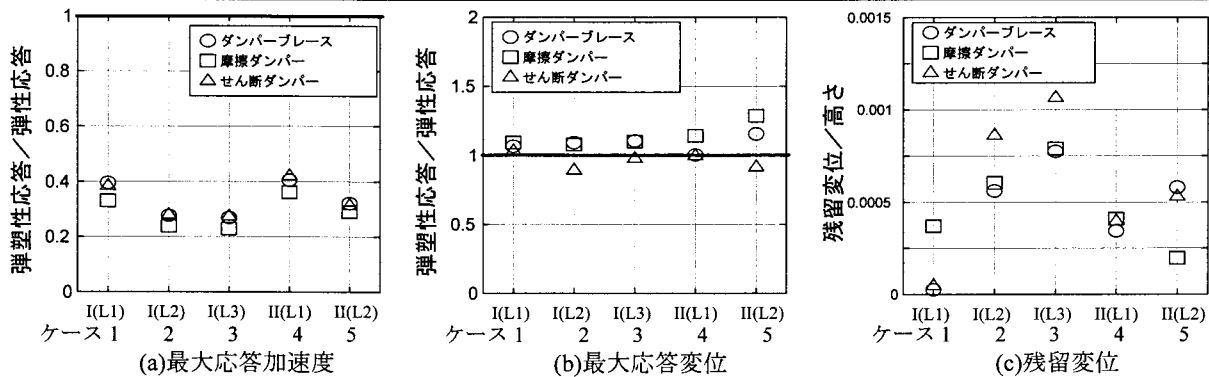


図-17 応答低減効果の比較

5. 制震デバイス特性の変化の影響検討

4章では、同一の構造、地震入力動に対して各制震デバイスを構造物に組み込んだ場合のそれぞれの応答性状の比較、応答低減効果の比較を行った。次に、構造全体としての履歴特性の変化が応答に及ぼす影響を調べるため、下記の2つの値を変更したパラメータスタディを行い、応答値の変化を求めた。

(1) 降伏荷重の変化

(2) フレーム剛性の変化

(ベースシャ-変位関係での2次勾配の変化)

上記の特性変化は、(1)降伏荷重の変化については、制震デバイスの降伏荷重のみを変化させて応答に対する影響を調べた。4章までで用いた降伏荷重を基準降伏荷重とし、この基本降伏荷重の0.3倍～3.5倍の範囲で値を変化させた。

(2)フレーム剛性の変化については、4章で示した基本諸元でのフレームのせん断剛性を基準フレーム剛性とし、その0.5倍、2倍の3ケースを考えた。

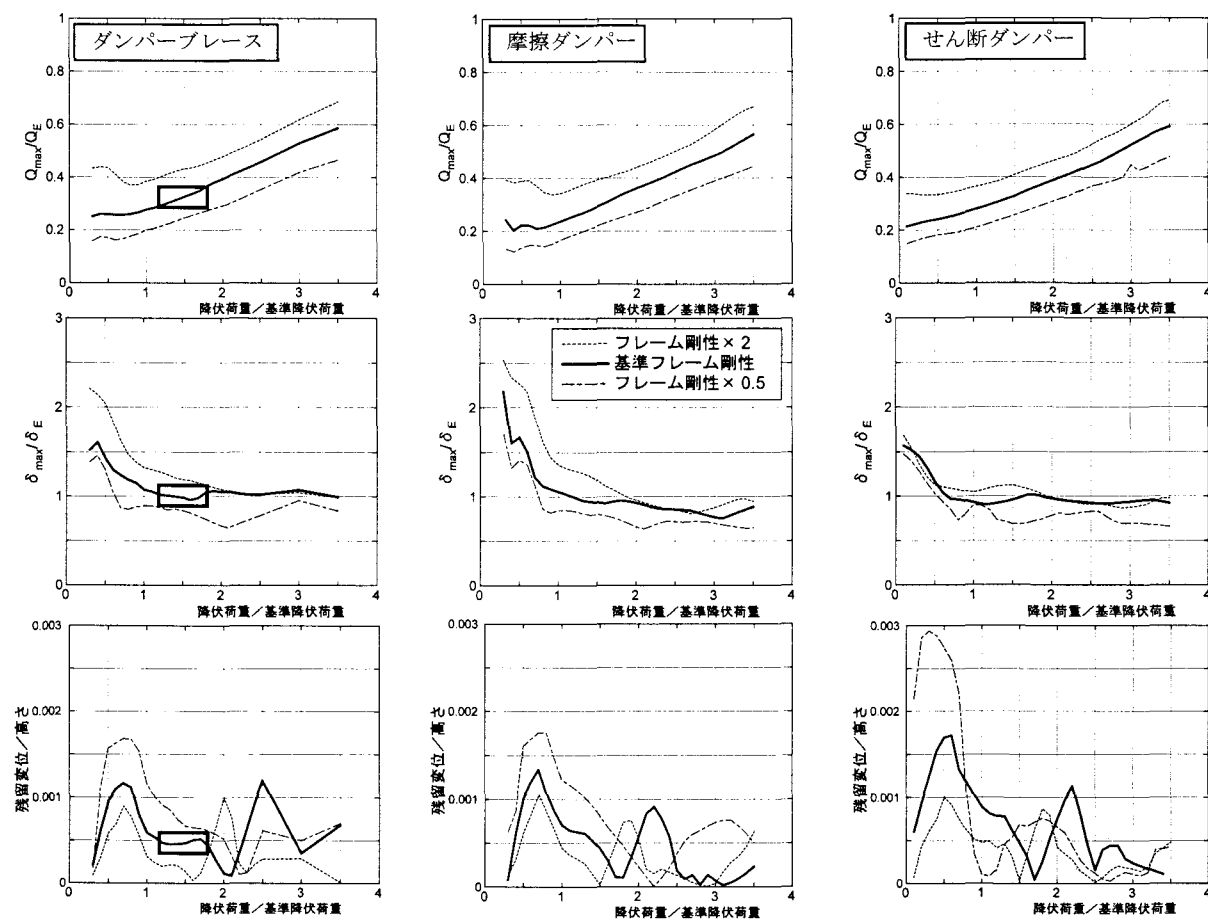
また、入力地震動としては、タイプI、タイプII地震動のL2レベル（それぞれ230Gal、200Gal）を用いた。

パラメータスタディ結果のうち、ベースシャ、応答変位の弾性応答に対する比率 (Q_{max}/Q_E , δ_{max}/δ_E)、およ

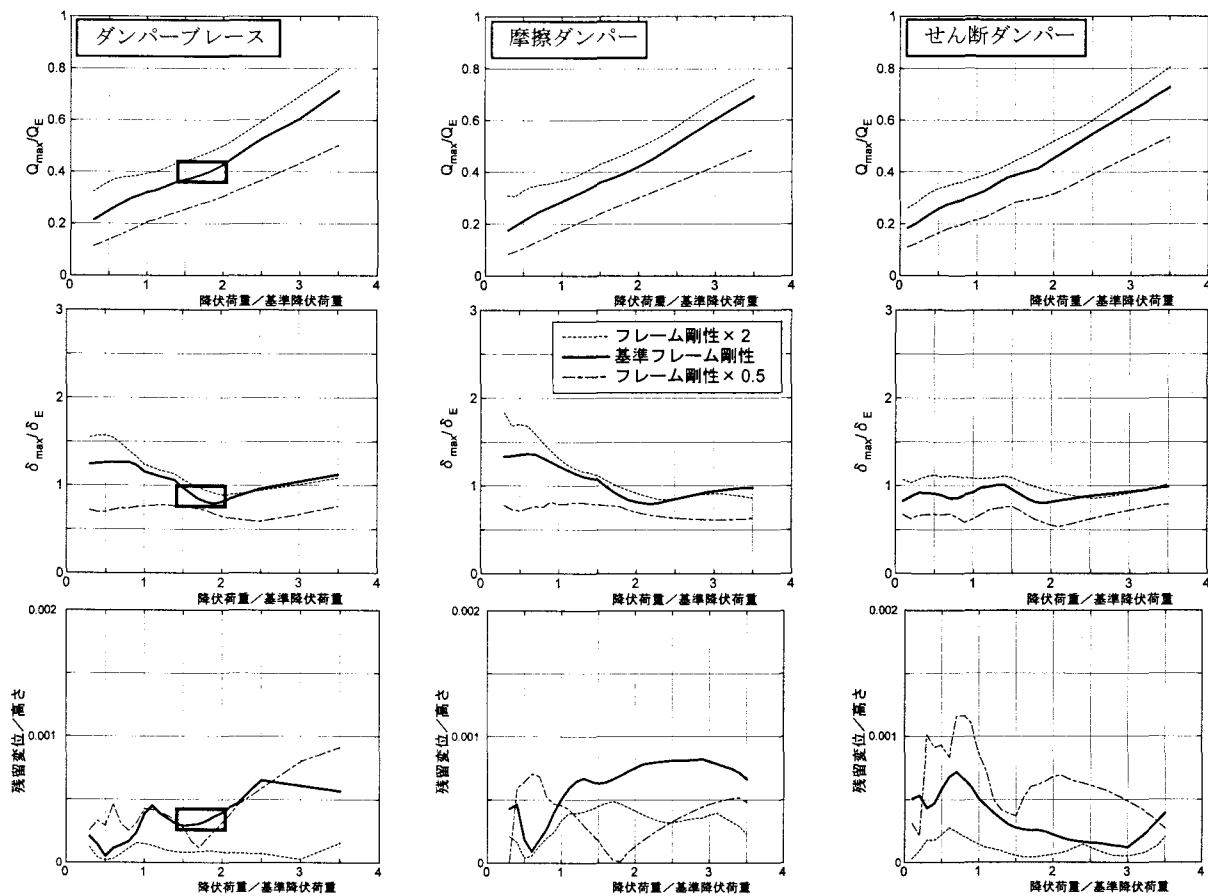
び残留変位/高さの比率を図-18に示す。ただし、弾性応答値はフレーム剛性を变化させた各構造に対して実施した弾性応答解析結果を用いている。図の横軸は降伏荷重/基準降伏荷重を、縦軸は上記の各応答を示している。また、図中の太実線が基準フレーム剛性に対する結果を、一点鎖線は0.5倍の結果を、破線は2倍の結果を示している。

これらの結果より、検討範囲においては、ベースシャ-応答低減率 Q_{max}/Q_E は、すべてのケースで1.0を下回っており（弾性解析結果以下）、降伏荷重が増加するほど、ベースシャは単調かつほぼ線形に増加する傾向を示した。さらにフレーム剛性が増加するほど、ベースシャは増加する結果となっている。また、剛性変化がベースシャに対して与える影響は、各制震デバイスで大きな変化は見られなかった。地震波タイプの違いの影響としては、タイプII地震動の方が応答低減率が大きくなる、すなわち弾性応答からの低減効果が少ない結果となった。

一方、応答変位については、降伏荷重を増加させるほど小さくなる傾向を示しているが、変化は非線形的であり、降伏荷重が大きくなると応答低減率の変化は小さくなっている。特徴として、応答変位低減率 (δ_{max}/δ_E) については、降伏荷重の変化に伴い1.0を下回る、すなわち弾性応答以下になっている領域があることである。



(a) ケース 2 (タイプ I, L2, 230Gal)



(b) ケース 5 (タイプ II, L2, 200Gal)

図-18 降伏荷重、フレーム剛性の応答に対する影響

フレーム剛性の変化に関しては、フレーム剛性を低下させるほど低減率は小さくなる、すなわち弾性応答よりも小さくなる傾向を示した。地震動タイプの違いについては、ベースシャの傾向と異なり、タイプⅠ地震動の方が応答低減率が若干大きくなる結果となった。また、ここで検討している基準降伏荷重の2.0倍より大きい範囲であれば、フレーム剛性の違いによらず3種類のデバイスの応答変位低減率はほぼ1.0以下となった。

残留変位については応答の増減に明確な傾向が出ていないが、せん断ダンパーでは他の2つの制震デバイスに対する結果と異なり、基準降伏荷重を下回る領域で入力地震タイプによらず残留変位が増加する結果となった。また、全体的な傾向として、フレーム剛性を大きくする方が（復元力特性の2次勾配を大きくする）残留変位は抑えられる傾向を示した。

以上の結果を踏まえると、検討した範囲での構造諸元に対しては、降伏荷重を大きくすると、ベースシャ低減率は線形的に増加し、逆に応答変位低減率は非線形的に減少して一定値に近づく傾向を示すので、応答変位低減率が一定値に近くなる範囲が、応答変位を抑制でき、かつベースシャの増加も抑えた領域となる。つまり、できるだけ応答変位を低減でき、ベースシャの増加も小さく、かつ残留変位を抑えられる領域が、適切な設計領域であると考えられる。

例えば、図-18に示すケース2、ケース5のダンパーブレース基準剛性構造に対する結果においては、それぞれ□印で囲った範囲では、応答変位低減率は1.0程度、ベースシャの低減率が0.2~0.4程度で、かつ残留変位が小さめに抑えることができる。入力地震動を2タイプ考慮した上で設計する場合を想定すると、図-18(a)、(b)の□印が重なる範囲、ここでは基準降伏軸力の1.5倍程度の降伏軸力に設定した場合が適切な設定ということになる。

ただし、柱部材の応力などはモーメントの影響も大きくなるため、ベースシャだけでなく、応答変位によっても大きく異なるので、実設計においては、それぞれの低減効果を考慮した上でダンパーブレースの特性などを設定する必要がある。また、本論文は、単純なトラス構造に対する検討であり、実構造物のように複数のモードが連成する場合などには、それらの影響を考慮した上での更なる検討が必要である。

6. まとめ

本論文では、近年、構造物の耐震性向上対策として用いられるようになっていく制震デバイスを活用した耐震構造に関する解析的研究を行った。まず、その制震デバイスとして、ダンパーブレース、摩擦ダンパー、せん断ダンパーに着目し、その履歴特性の解析モデルを提案して、解析モデル化の妥当性を検証した。次に、各制震デバイスを組込んだ構造物の地震応答解析結果より、その

特徴、応答低減効果などを検討し、さらに、制震デバイスの降伏荷重、剛性などの復元力特性の変化が構造物の応答性状に及ぼす影響について、パラメトリックな検討を行った。まとめると以下のようである。

- (1) ダンパーブレース、摩擦ダンパー組込み構造に対する地震応答実験結果と弾塑性解析結果の比較より、両履歴モデルの妥当性を確認したとともに、解析手法の妥当性も検証できた。
- (2) せん断降伏型ダンパーを含めた3種類の制震デバイス組込み構造（同一の降伏荷重）の地震応答解析結果より、すべての制震デバイス構造に対して、地震タイプによらず、地震レベルの増加に伴い、ベースシャの弾性応答に対する低減率は小さくなる傾向を示した。
- (3) 一方、応答変位の低減率は、ダンパーブレース、摩擦ダンパーについては地震レベルの増加に伴い、大きくなる（弾性応答を上回る）傾向を示したが、せん断ダンパーの場合、地震レベルによる変化が少なく、低減率はほぼ1.0以下となった。
- (4) 降伏荷重、柱、梁フレーム剛性を变化させたパラメータスタディの結果、検討範囲内では、すべての制震デバイス構造で、ベースシャは弾性応答以下におさまる結果となったが、降伏荷重の増加に伴いベースシャは線形的に増加し、フレーム剛性が大きい方がベースシャも大きくなる傾向を示した。
- (5) 応答変位については、弾性応答を上回るケースがほとんどであるが、降伏荷重の増加に伴い、非線形的に減少して一定値に近づく傾向を示した。さらに、この一定値に近い範囲では、弾性応答以下に抑えられる領域もあることが確認できた。
- (6) 残留変位については、降伏荷重の変化に対する明確な傾向が得られなかったが、フレーム剛性を増加させる方が、残留変位は小さくなる傾向を示した。
- (7) 上記の降伏荷重、剛性のパラメータの変化による応答への影響を考慮すると、応答変位低減率が一定値に近くなる降伏荷重の範囲が、応答変位を抑制でき、かつベースシャの増加も抑えた領域となりうる。また、残留変位も抑えられるようなフレーム剛性を設定することで、制震デバイスの適切な設計が可能であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ダンパーブレース組込み構造の模型地震応答実験においては、東京工業大学 川島一彦教授より多大なる御教示を受けました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 和田 章, 岩田 衛, 清水敬三, 安部重孝, 川合廣樹 : 建築物の損傷制御設計, 丸善株式会社, 1998.
- 2) 日本鋼構造協会 鋼材倶楽部: 履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法, 1998.
- 3) 野中哲也, 宇佐美勉, 吉野広一, 坂本佳子, 鳥越卓志: 上路式アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究, 土木学会論文集 No.731/I-63, pp.31-49, 2003.4.
- 4) 野中哲也, 宇佐美勉, 坂本佳子, 岩村真樹: 上路式鋼トラス橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究, 構造工学論文集 Vol.49A, pp.531-542, 2003.3.
- 5) 金治英貞, 北沢正彦, 鈴木直人: 長大ゲルバートラス橋の耐震補強に関する地震応答解析と損傷制御設計, 土木学会既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム, pp.107-114, 2002.11.
- 6) 岡 俊蔵, 増田伊知郎, 古川謙一郎, 井上幸一, 明神久也: 各種ダンパを適用した鋼橋の耐震性向上法, 第5回 耐震補強・補修技術, 耐震診断技術に関するシンポジウム講演会論文集, pp.31-38, 2001.7.
- 7) 井上幸一, 明神久也, 増田伊知郎, 中出 収: 軸力降伏型鋼製ダンパを適用した鋼橋の耐震性向上法, 第5回地震時保有水平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.43-50, 2002.1.
- 8) 四條利久磨, 森下邦宏, 川島一彦, 浦辻和幸, 田中昭人: ダンパーブレースによる新王渡橋(仮称)の耐震性向上, 土木学会 第58回年次学術講演会講演概要集, pp.65-66, 2003.9.
- 9) 森下邦宏, 井上幸一, 川島一彦, 阿比留久徳, 平井潤, 本田誠: ダンパーブレース組込み橋梁の動的地震応答実験, 土木学会論文集に投稿中.
- 10) 佐伯英一郎, 前田泰史, 中村秀司, 緑川光正, 和田章: 実大アンボンドブレースに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第476号, pp.149-158, 1995.
- 11) 金子洋文他, 幅厚比の小さい極低降伏点鋼せん断パネルの力学特性(その2 繰返し履歴のモデル化), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.745-746, 1997.
- 12) 村瀬良秀, 森下邦宏, 井上一朗, 立山英二: 両端に軸降伏ダンパーを組込んだ長尺ブレースの座屈拘束条件(その1)設計法, (その2)模型実験, 平成11年度建築学会近畿支部研究報告集, pp.293-300, 1999.
- 13) 森下邦宏, 村瀬良秀, 井上一朗, 立山英二: 両端に軸降伏ダンパーを組込んだ長尺ブレースのダンパー部復元力特性試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.903-pp.904, 2000.9.
- 14) 小野聡子, 中平和人, 辻岡静雄, 井上一朗: アルミ容射摩擦ダンパーの静的および動的履歴特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.41B, pp.1-8, 1995.3.
- 15) 木村 充, 東端泰夫, 井ノ上一博, 中山信雄, 高橋賢司: ボルト式摩擦ダンパーの実験的研究(その1)~(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1992~1994.
- 16) 森下邦宏, 平井 潤, 本田 誠, 井上幸一: 複数摺動面を有する摩擦型ダンパーの実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第574号, pp. 61-68, 2003.12.
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3.

(2003年9月12日 受付)