

# 板バネと粘弾性体を用いた鉄骨仕口制振システムの開発(その2)

## Passive Control System for Column-Beam Connection Using Bending Plate and Visco-Elastic Material (Part 2)

関谷 英一\*1      伊藤 真二\*2      檜原 健一\*3      小坂橋 裕一\*4  
Eiichi Sekiya      Shinji Ito      Kenichi Katagihara      Yuichi Koitabashi  
榎本 信隆\*4      風間 宏樹\*4      小堀 徹\*4  
Nobutaka Kashimoto      Hiroki Kazama      Toru Kobori

### 要旨

日建設計との共同研究により板バネと粘弾性体を用いた鉄骨仕口制振システムを開発し、昨年度の技術研究報告にて、その概要や実験結果等を報告した。本報告では、開発した制振システムを組み込んだ建物の簡便な設計法として、限界耐力計算を利用することにより、板バネ・粘弾性体のエネルギー吸収特性を静的解析のみによって評価する手法を提案する。また、設計例を通して提案した設計手法における付加減衰定数の算出方法、および限界耐力計算における評価方法の妥当性を確認する。

キーワード：制振構造 限界耐力計算 設計例 板バネ 粘弾性

## 1. はじめに

低層鉄骨造建物や軽量鉄骨造建物について、仕口部分をピン接合として変形量を確保し、板バネ、粘弾性体および剛体より構成されたダンパーを付加する制振システムを開発し、昨年度の技術研究報告にて、その概要、基本性能について述べた。そこでは、ダンパーの単体実験および実大フレームによる振動台実験によって、本制振システムの力学特性を明らかにするとともに、制振効果を確認した。

本報告では、まず、本制振システムを組み込んだ建物の簡便な設計法を提案する。具体的には現行法規に則り限界耐力計算の手法を利用することにより、ダンパーの板バネ・粘弾性体のエネルギー吸収特性を、振動解析を行うことなく静的解析のみによって評価する手法の提案を目的としている。また、粘性系のダンパーによる減衰定数の算出は、複素固有値解析による場合が一般的であるが、本手法では提案したダンパーの特性を考慮した近似式を用いることにより、静的弾性解析のみによって容易に等価減衰定数を算出し、ダンパーによるエネルギー吸収効果を考慮することができる設計法である。

さらに提案した設計法を用いて、本制振システムを適用した2階建鉄骨造建物の設計例について示し、付加減衰定数の算出方法、限界耐力計算での評価方法の妥当性を確認する。

## 2. 板バネのモデル化

本システムのモデル化には、板バネの剛性特性および粘弾性体の減衰特性の二つをモデル化する必要がある。図1に示すように、解析時には板バネの回転剛性は計算の簡便化のため、方杖の軸剛性によってモデル化する。その際、方杖の初期剛性  $K_B$  は、実験より求めた加力位置での  $P$ - $\delta$  関係を、アーム長さの違いを考慮し、(1)式により変換する。板バネの回転剛性はバイリニア特性とし、その特性は実験結果および解析結果(図2)に基づき、部材角が  $1/120$  を折れ点とし、その後の第二勾配は  $0.08K_B$  として定義する(圧縮・引張の平均)。

$$K_B = \frac{P}{\delta} \left( \frac{\ell_2}{\ell_1} \right)^2 \quad (1)$$

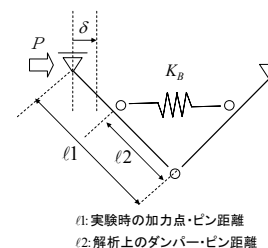


図1 方杖によるモデル化

\*1 東京本店 建築設計部

\*2 技術研究所 建築技術研究部門

\*3 建築本部

\*4 ㈱日建設計

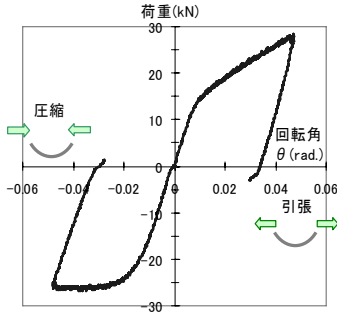


図2 静的増分実験結果

### 3. ダンパー単体の減衰定数の算出

減衰係数  $C$  のダンパー単体を周波数  $\omega$  で定常加振した時の  $F-\delta$  の関係は、図3に示すような右肩上がりの履歴曲線を描くが、その時の  $K'$  を貯蔵剛性、 $K'' (=C\omega)$  を損失剛性、 $K^*$  を複素剛性と呼ぶ。ここで、損失係数  $\eta$  は(2)式によって定義される。またダンパーの吸収エネルギー量  $\Delta W$  は、最大変形  $u_{max}$  を用いて(3)式によって表すことができる<sup>1)</sup>。

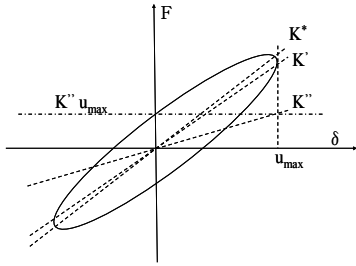


図3 ダンパー単体の履歴曲線

$$\eta = \frac{K''}{K'} \left( = \frac{C\omega}{K'} \right) \quad (2)$$

$$\Delta W = \pi C \omega u_{max}^2 = \pi \eta K' u_{max}^2 \quad (3)$$

$K'$  および  $\eta$  はダンパー単体によって決められる値であるので、特定の外力下においてダンパーの最大変形量  $u_{max}$  がわかればそのダンパーが1サイクルで吸収するエネルギー量が算出できる。

### 4. 建物全体の減衰定数の算出

本ダンパーシステム単体の等価減衰定数  $h_{eq}$  および損失係数  $\eta$  は、実験結果よりそれぞれ算出しているが、設計時にはこれを建物全体の等価減衰定数  $h_{eq}$  に変換する必要がある。一般に等価減衰定数はシステム全体の歪エネルギー  $W$  と吸収エネルギー  $\Delta W$  の比から(4)式のように求めることができる。特定の外力下における建物全体の歪エネルギーは、各階

ごとの変形が独立した純せん断系と仮定できるとすると、 $i$  層の層せん断力  $Q_i$  と層間変形  $\delta_i$  から(5)式によって算出することができる。

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (4)$$

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} Q_i \delta_i \quad (5)$$

このときダンパーを  $K_B$  の剛性を持つ方杖としてモデル化することで、その外力時にそれぞれのダンパーの最大変形量  $u_{max}$  が算出できる(図4)。これは、(1)式により算出された  $K_B$  を、ダンパーの貯蔵剛性  $K'$  と見ていることを意味するが、最大変形時の静的な力の釣り合いのみを考えれば(位相差は無視できるものとする)、そのときの分担率は適切に評価できると考えられる。その結果を用いることでダンパー1つあたりの吸収エネルギーは(3)式より算出することができる。建物全体の吸収エネルギーはそれらを足し合わせることで計算できるので、建物全体としてのダンパーによる付加減衰定数  $h_{eq}$  は(6)式より求まる。

本計算法は、弾性範囲での解析であるため振幅に対する依存はないが、外力分布には依存することになる。ここでは、 $A_i$  分布で一次モードを概ね模擬できる建物を対象としているが、その他の場合にも振動モードを適切に評価し、外力分布として考慮することによって、適切な減衰定数の算出が可能である。

$$h_{eq} = \sum_{p=1}^K \left( \pi \eta_p K_p' u_p^2 \max \right) \times \left( 4\pi \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} Q_i \delta_i \right)^{-1} \quad (6)$$

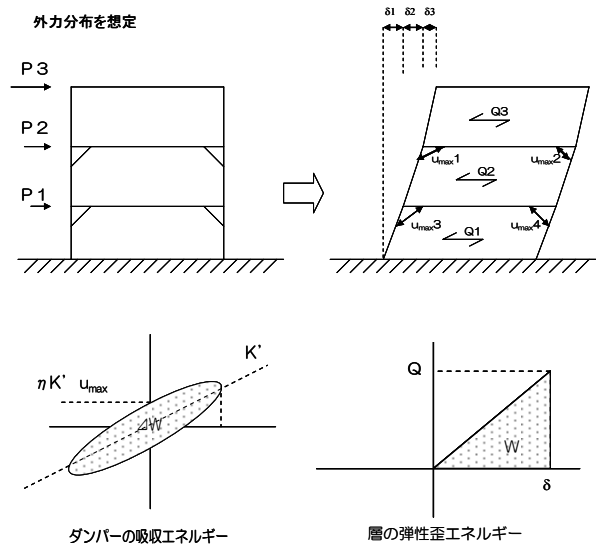


図4 静的加力による  $h_{eq}$  の算出

### 5. 限界耐力計算に基づく減衰の評価

以上の静的弾性解析によって算出された粘弾性による減衰定数  $h_{eq}$  は、限界耐力計算の安全限界時の付加減衰として計算法に則り 0.8 倍して<sup>2)</sup>構造減衰に加え、 $Fh$ (減衰補正係数)を算定することで、応答低減効果として考慮することができる。また、板バネの塑性化によるエネルギー吸収効果は、バイリニア型の復元力特性を有する方杖として建物に組み込み、そのモデルを静的増分解析し建物全体の  $Q-\delta$  関係を算

出することで、フレームの塑性率と同様に、板バネの塑性吸収エネルギーによる応答低減効果を考えることができる。

設計の手順をフローチャートにして図5に示す。ここで提案した設計法は基本的に限界耐力計算による計算法であり、本システムの主なターゲットである振動解析を行わないような小規模建物に関して、複雑な解析を行うことなくダンパーのエネルギー吸収による応答低減効果を取り入れることができる簡便な設計法を提案できた。

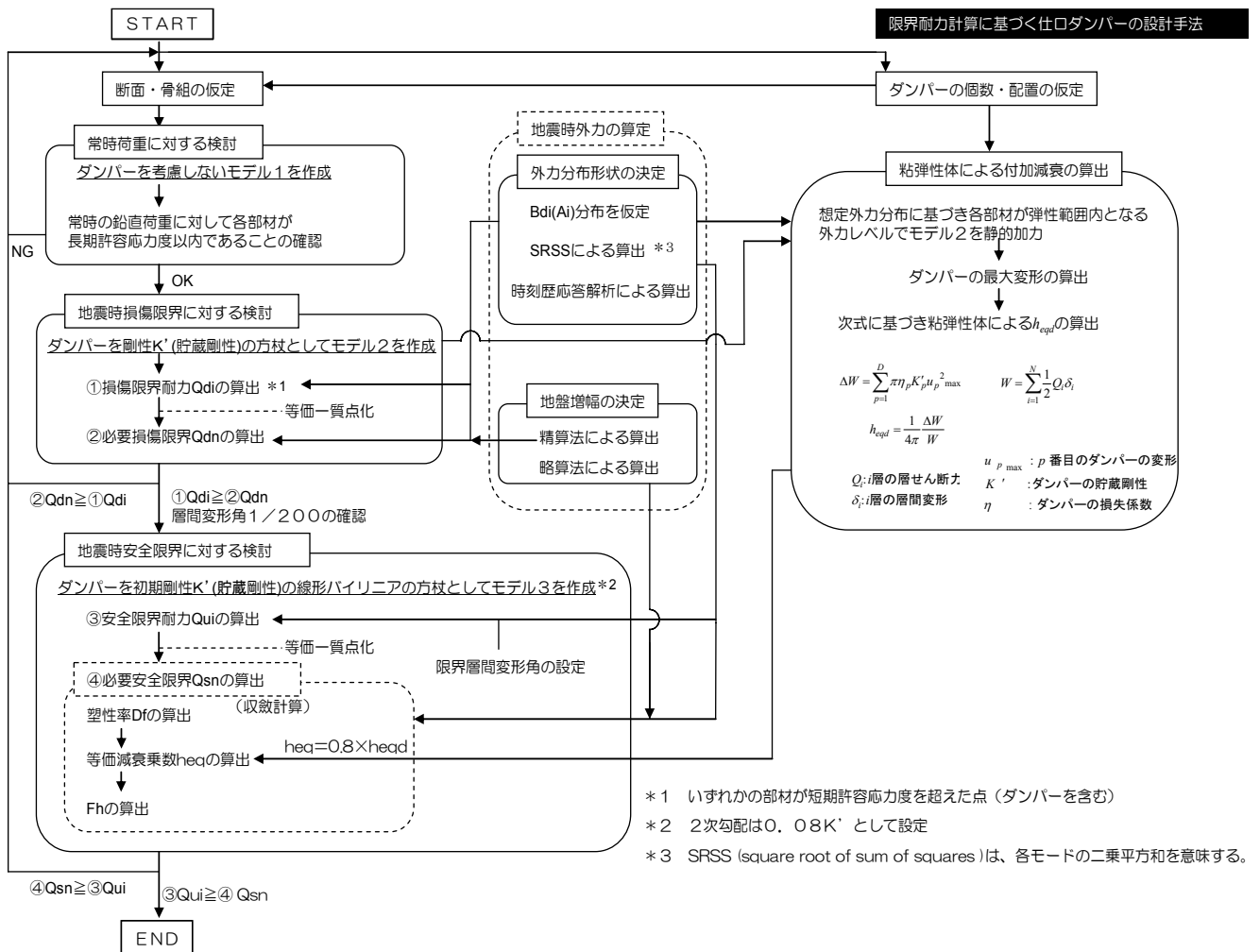


図5 設計法のフローチャート

## 6. 試設計

本章では提案した設計法を用い、本制振システムを適用した2階建鉄骨造建物の設計例について説明する。

### 6.1 検討モデル

設計例として、図6に示すような2階建鉄骨造建物を用いる。ラーメンモデルでは、2通り、4通りの間柱 M1 は、地震時せん断力を負担しないものとしている（部材は表1参照）。また、以下のような2つのダンパーモデルを作成し、ラーメンモデルと構造性能を比較する。

- ・ダンパーモデル1：2階大梁端部を全てピン接合とし、本制振システムを導入したモデル
- ・ダンパーモデル2：本制振システムを用いた仕口部、柱梁を剛接合とした仕口部を併用したモデル

なお、ダンパーモデルでは、間柱 M1 の柱脚を剛接合とし、地震時層せん断力を負担するものとした。部材はラーメンモデルに同じとしている。表2に建物重量、許容応力度等計算における地震力( $C_0=0.2$ )および風荷重を示す。

### 6.2 ダンパーのモデル化

ダンパーは、バイリニア型の復元力特性を有する弾性要素と、線形の減衰要素を並列配置した Kelvin-Voigt モデルでモデル化した。各諸元は PL-12mm、半径 200mm のダンパーを想定し、実験をもとに初期剛性を  $K_1=235\text{kN/cm}$ 、降伏後接線剛性を  $K_2=0.08K_1$ 、減衰係数は損失係数を  $\eta=0.4$  ( $h_{eq}=20\%$ ) として定めた。なお、ダンパーは長期応力を負担しないものとしてモデル化している。

表1 部材リスト

柱	C1	□-200×200×9(BCR295)
	M1	H-150×150×7×10(SS400)

梁	RF	H-250×125×6×9(SS400)
	G1	H-300×150×6.5×9(SS400)
	G2	300×600(FC24)

表2 建物重量、地震力 ( $C_0=0.2$ )、風荷重

階	層重量		地震荷重		風荷重	
	$W_i$ (kN)	$W_i/A$ (kN/m <sup>2</sup> )	$C_i$	$Q_{ei}$ (kN)	$Q_{wx}$ (kN)	$Q_{wy}$ (kN)
2	209.2	1.72	0.27	56.1	11.9	35.8
1	439.5	4.22	0.20	129.7	27.2	81.7

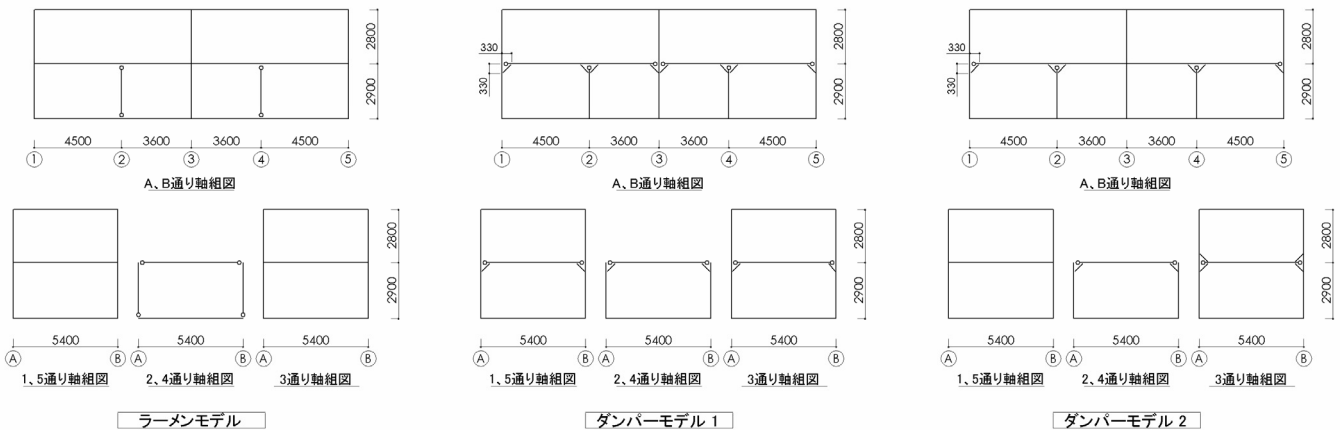
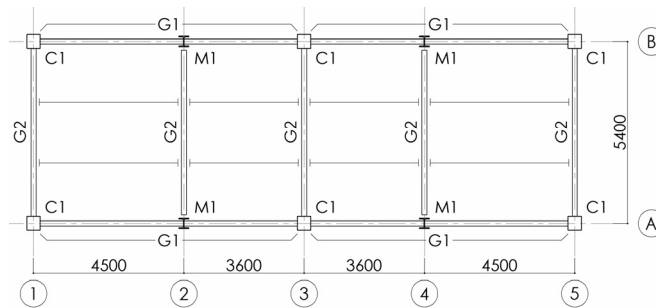


図6 検討モデル概要

### 6.3 ダンパーによる付加減衰定数の算定

表3に各モデルの固有周期および、ダンパーモデルにおけるダンパー（減衰要素）の付加減衰定数の算定結果を示す。なお、弾性要素の履歴減衰は、主架構の履歴減衰とともに考慮することとしている。

表3 固有周期・等価減衰定数

	ラーメン		ダンパー1		ダンパー2	
	X	Y	X	Y	X	Y
固有周期 (sec)	0.505	0.490	0.630	0.616	0.537	0.494
$h_{eq}$ (略算法)	—	—	3.38	2.95	1.59	1.36
$h_{eq}$ (複素固有値) <sup>*</sup>	—	—	3.30	2.90	1.52	1.32

※ 複素固有値解析による付加減衰定数(%)

ダンパーモデル1、2とも、提案した略算法による付加減衰定数は、複素固有値解析における付加減衰定数とほぼ同じ値を示しており、位相差を考慮していない静的な荷重状態からの略算でも精度良く付加減衰定数を求めることが出来ることが分かる。

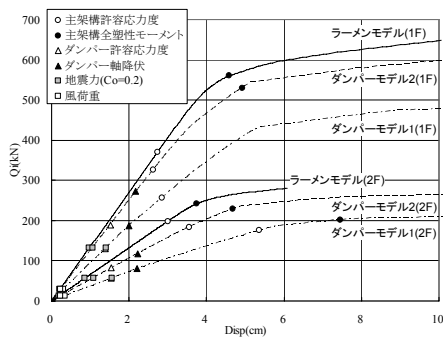
### 6.4 検討結果

図7に各モデルの復元力特性を示す。図中には、地震力(C<sub>0</sub>=0.2)・風荷重、また各層で主架構・ダンパーのいずれ

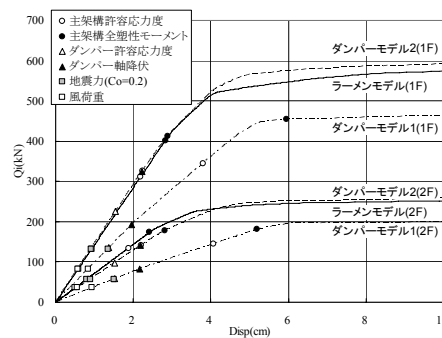
かの部材が許容応力度および全塑性モーメント・降伏軸力に達する点を示している。ダンパーモデルでは主架構より先にダンパーが降伏しており、ダンパーモデル1では地震力時にダンパー許容応力度を若干上回っている。

図8に限界耐力計算における検討結果を示す。限界耐力計算では計算法に則り、第4章で求めたダンパー（減衰要素）の付加減衰定数の0.8倍を、主架構の内部粘性減衰5%および主架構・ダンパー（弾性要素）の履歴減衰に加算することにより、応答低減率を求めた。ダンパーモデル1では付加減衰が大きいものの架構の剛性が低いため、ラーメンモデルよりも変形(S<sub>d</sub>)が大きくなっている。一方、ダンパーとラーメンを併用したダンパーモデル2では、固有周期、応答値ともラーメンモデルとほぼ同等の性状を示している。また、ダンパーモデル1では損傷限界が稀に発生する地震時スペクトルを下回っている。

図9に、ダンパーモデル(Y方向)における限界耐力計算および時刻歴応答解析結果の比較を示す。時刻歴応答解析においては、極めて稀に発生する地震時の加速度応答スペクトルをもとに作成した地震波を採用した。図より、ダンパーモデル1、2とも、限界耐力計算における応答結果とほぼ同等の値を示しており、限界耐力計算における付加減衰の評価法が妥当であることが分かる。

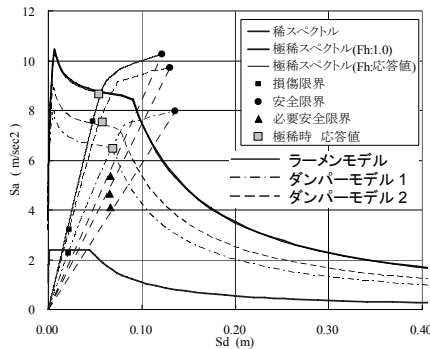


(1) X方向復元力

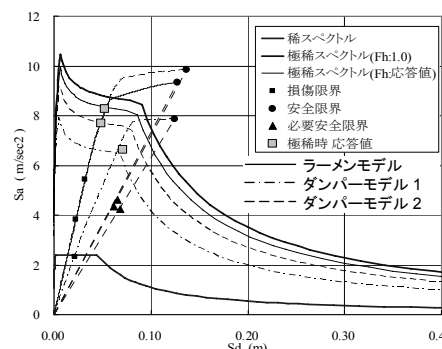


(2) Y方向復元力

図7 復元力特性



(1) X方向



(2) Y方向

図8 限界耐力計算

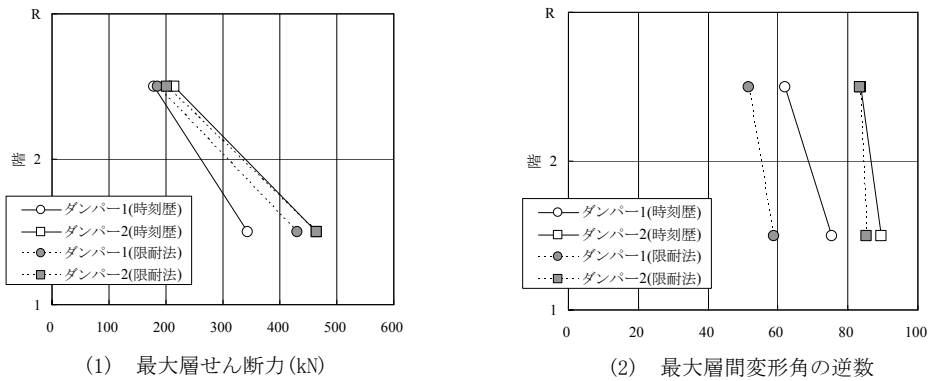


図9 時刻歴応答解析結果と限界耐力計算応答値の比較

## 7. まとめ

開発した制振システムを組み込んだ建物の簡便な設計法を提案した。限界耐力計算の手法を利用することにより、ダンパーのエネルギー吸収特性を、静的解析のみによって評価する手法を提案した。この手法は振動解析を行わないような小規模建物に関して、複雑な解析を行うことなくダンパーのエネルギー吸収による応答低減効果を取り入れることができる簡便な設計法である。

また、提案した設計例を通して、本制振システムを採用した鉄骨造建物における設計手法を示し、付加減衰定数の算出方法、限界耐力計算での評価方法の妥当性を確認した。さら

に、本制振システムを採用することにより、建物に減衰を付与しながら純ラーメン架構造物と同等の応答性状を得ることを示した。

### 参考文献

- 1) 日本地震構造協会 編：JSSI パッシブ制振構造設計・施工マニュアル，第二版，2005.9
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課 他 編：2001年版 建築物の構造関連技術解説書，2001.3

本報告は(株)日建設計と(株)鴻池組の共同研究成果であり、2007年日本建築学会大会学術講演梗概集 21404, 21405 をまとめ、一部加筆したものである。