

粘弾性ダンパーを用いた軽量鉄骨住宅用制振構法の開発

大木 洋司¹⁾, 笠井 和彦²⁾, 坂田 弘安³⁾, 和田 章⁴⁾

- 1) 東京工業大学 建築物理研究センター, ooki@serc.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 建築物理研究センター, kasai@serc.titech.ac.jp
- 3) 東京工業大学 建築物理研究センター, hsakata@serc.titech.ac.jp
- 4) 東京工業大学 建築物理研究センター, wada@@serc.titech.ac.jp

1. はじめに

国民が生活基盤としている戸建住宅の耐震性を高めることは、都市全体の安全性を引き上げるために不可欠である。約 2500 万戸といわれる戸建住宅の中でも、軽量鉄骨を用いたプレファブ住宅は比較的高い耐震性をもつと考えられてきたが、現在は格段に性能の高い免震・制振構造の導入など、新たな技術的展開が図られている。免震住宅に関する研究は数多くなされており、鉄骨系住宅では既に普及段階にある。しかしながら制振住宅の研究については、高層建築とは対照的に非常に短い周期をもつ構造であるが、これに対する減衰効果を検討した研究は少なく、とりわけ軽量鉄骨造を対象としたものは、ほとんど見あたらない。

我が国の現状は、住宅の性能で保証されているのは倒壊に対する安全性が基本であり、大地震後の機能保持までを必ずしも保証していない。倒壊に対する安全は、建物の変形能力を高める一方で、建物自体の損傷によるエネルギー吸収などに期待しており、すなわちこれは、人命保護は可能としても、国民にとって重要な財産である住宅を保護する観点からは矛盾する。住宅にダンパーを有する制振壁を有効に設置することで、上述の地震後の機能保持が可能となり、建物の耐震性能を飛躍的に向上させることができる。

よって本研究では、これまでに積み上げた定量的評価手法^{1,2)}に基づいて制振壁を設計し、実大試験体による実験を行い、その性能を確認する。

2. 軽量鉄骨制振架構

2.1 ダンパーの概要

本研究で制振架構に用いるダンパーとして、イソプレン・スチレン系粘弾性ダンパーを想定した^{1,2)}。図 1 は典型的な履歴ループである。

粘弾性ダンパーは鋼板に貼り付けた粘弾性体にせん断変形を与えることでエネルギー吸収を行う。材

料に用いたイソプレン・スチレン系粘弾性体は、小振幅で楕円、大振幅でバイリニア型の履歴を示す特徴をもち、これにより、ダンパーに支持部材へ過大な力を伝達せず、なおかつエネルギー吸収を大きくする効果がある。筆者らの一部は、この材料の構成則を開発しており、ある温度、振動数での正弦波入力歪に対して、ダンパーの（貯蔵）剛性、損失係数を計算できる評価式を提案している。

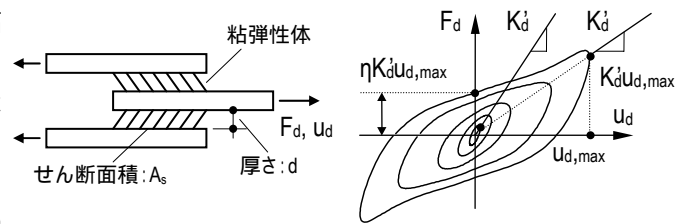


図 1 軽量鉄骨架構に用いる粘弾性ダンパーおよび典型的な履歴

2.2 ダンパーと支持材剛性の制振性能への影響

図 2 は、従来の軽量鉄骨ブレース架構である。この架構の規格は住宅メーカーによって決められており、許容せん断力 13.2 kN、保有水平耐力 21.1 kN である。

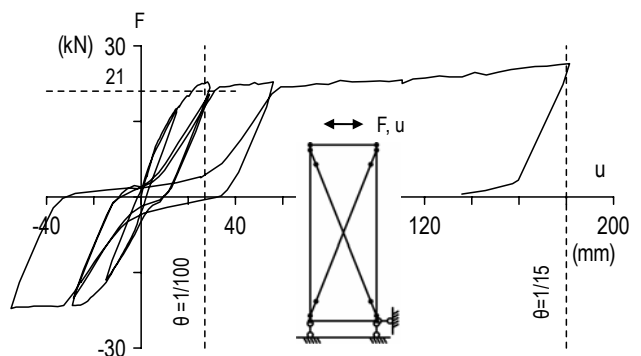


図 2 従来ブレース架構の荷重 - 変形履歴

ただし、実際に引張側ブレースが降伏に至るのは、後者の荷重であり、よって本論文では 21.1 kN を従来ブレース架構の降伏せん断力 F_y と定義する。

実験結果によれば、初期に圧縮側ブレースの初期張力が抜けて剛性が低下し始め、層間変形角 1/100 でブレース降伏に至り、履歴はスリップ型となる。

ダンパーの適用によって架構の性能を向上するにあたり、架構の幅・高さ・奥行のサイズはそのまま、降伏力を 21 kN とし、エネルギー吸収能力と初期剛性の両方を高めることを考える。制振架構全体に適切な剛性とエネルギー吸収能力を与えるためには、その支持部材となる架構各部に適切な剛性が必要である⁷⁾。架構各部剛性の影響を検討するため、従来架構のブレースを粘弾性ダンパーに変更し、層間変形角 1/100 での履歴を解析によって得る。さらに各部剛性を 2 倍にした場合についても検討する。図 3 は解析モデルである。ダンパー以外の部材の断面積、断面 2 次モーメントは規格値から、 $\hat{K}_v, \hat{K}_c, \hat{K}_h$ 等の剛性は実験から得た。ここに「 $\hat{\quad}$ 」は、要素長さ方向の剛性を意味する。以後、剛性、力、変形について、「 $\hat{\quad}$ 」は局所での定義、「 \wedge 」が無い場合は水平方向での定義とする。

結果を図 4 に示す。各部剛性が小さい場合、その

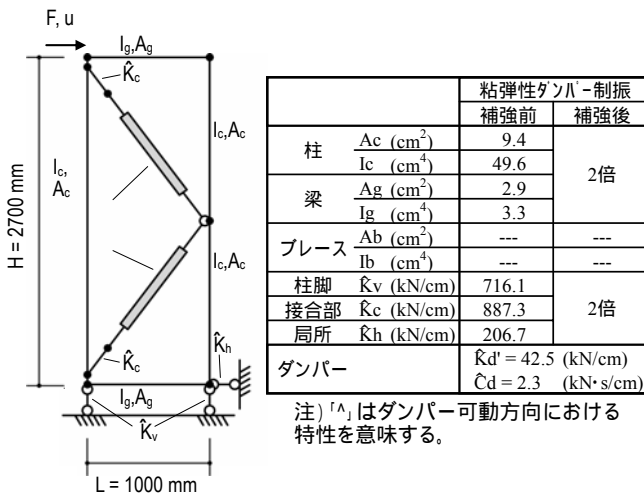


図 3 粘弾性ダンパー制振架構の数値解析モデル

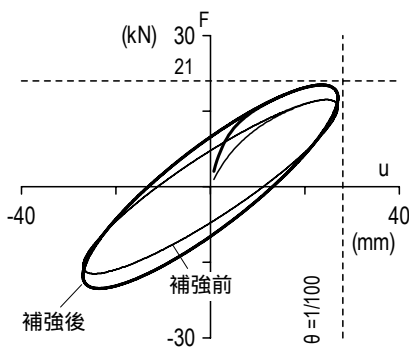


図 4 粘弾性ダンパー制振架構の層せん断力 - 層間変形

弾性変形が大きくなって相対的にダンパー変形は減少し、架構剛性、エネルギー吸収は低下することがわかる。

そこで、従来のブレース架構の各部剛性を改善し（詳細は 3.1 節）、実験から補強後の剛性を得た。さらには、架構の柱と梁のみの状態でのせん断剛性が、概ね無視できることを確認した。すなわち、図 3 に示すダンパーを付加した軽量鉄骨架構では、層せん断力を直列に伝達するシステムが形成されることを意味する。これを図 5 に示すが、ダンパーに並列な小さな剛性の要素は無視し、架構各部がダンパー支持材となっている。各部の直列剛性をまとめて支持材剛性 $K_b (= 2.70 \text{ kN/mm}$, 実験より得た) とすると、前述の通り、各部剛性が小さい場合に、層間変形に占めるダンパー変形の寄与も小さくなり、よってエネルギー吸収が小さくなることが理解できる。

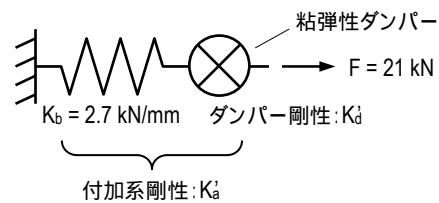


図 5 軽量鉄骨制振架構を模擬する簡易なモデル

2.3 ダンパーの決定

従来ブレース架構と同じ力 $F = 21 \text{ kN}$ を、層間変形角 1/200 で与える制振架構を設計する。

粘弾性ダンパーの面積の決定方法について述べる。過去の振動台試験体³⁾で、従来ブレース架構が一般的な住宅の固有振動数を与えたとし、重量 65 kN、剛性 2.56 kN/mm (ブレース架構 2 体分) より固有振動数 3.1 Hz を得て、温度を 20 °C と想定する。粘弾性ダンパーと支持部材からなる付加系 (直列系) の剛性 K_a' は以下のように与えられる⁴⁾。

$$\text{付加系剛性 } K_a' = \frac{\{(1 + \eta_d^2)K_d' + K_b\}K_d'K_b}{(K_d' + K_b)^2 + (\eta_d K_d')^2} \quad (1)$$

$$\text{目標: } K_a' = F/(H/200) = 1.56 \text{ kN/mm}$$

目標値は付加系の層間変形角 1/200 での等価剛性を意味する。また式(1)中、 η_d = ダンパー損失係数、 K_d' = ダンパー貯蔵剛性、 K_b = 支持材剛性 (2.70 kN/mm)。今、 $\eta_d = 0.9$ を初期値として式(1)に与え、 K_d' の 2 次方程式を解くと、 $K_d' = 2.62 \text{ kN/mm}$ 。図 5 よりダンパー水平変形 $u_d = F/K_d' = 8.0 \text{ mm}$ 、さらにブレース角余弦 0.62 からダンパー軸方向変形 $\hat{u}_d = 8 \times 0.62 = 5.0 \text{ mm}$ である。

ここで粘弾性体厚 $d=2.0\text{ mm}$ を与えると、ダンパー1本のせん断歪 $\gamma_d = (\hat{u}_d/2)/d = 2.5/2 = 1.25$ 、これより 3.1 Hz , 20°C の条件とあわせ、評価式⁵⁾よりダンパー貯蔵剛性率 $G' = 30.0 \times 10^{-5}\text{ kN/mm}^2$, $\eta_d = 0.84$ が得られる。これは仮定した $\eta_d (= 0.9)$ と概ね一致した。この場合は、付加の損失係数は 0.32 で、等価減衰定数はその $1/2$ 、つまり 0.16 と評価できる⁴⁾。

ブレース角余弦 0.62 と下式よりせん断面積 A_s を得る。ただし、ダンパー貯蔵剛性 K'_d は直列の2本分であるから、ダンパー1本ではその2倍となる。

$$2K'_d = G'A_s/d(0.62)^2 \quad (2)$$

$$A_s = 2d \cdot K'_d / G'(0.62)^2 = 90878\text{ mm}^2 \quad (3)$$

上記のようにダンパー1本のせん断面積 A_s が得られたが、使用する鋼管径と長さの都合上、 $A_s = 80000\text{ mm}^2$ 以上を適用するのが困難であったため、 80000 mm^2 をせん断面積として採用した。

3. 制振架構の動的载荷実験

3.1 制振架構と载荷装置

ここでは、提案した制振架構に対して、動的に層間変形を与える実験を行い、その力学的特性について検討する。ブレース型粘弾性ダンパーを適用した制振架構を、以下、試験体 V とする(図6)。図7に粘弾性ダンパーの詳細を示す。粘弾性ダンパーでは、粘弾性体が直径の異なる2本の鋼管の間に溶着されている。また2章に述べた通り、軽量鉄骨架構を補強するために、柱を $C-60 \times 40 \times 10 \times 3.2$ から $C-60 \times 45 \times 15 \times 4.5$ へ変更し、

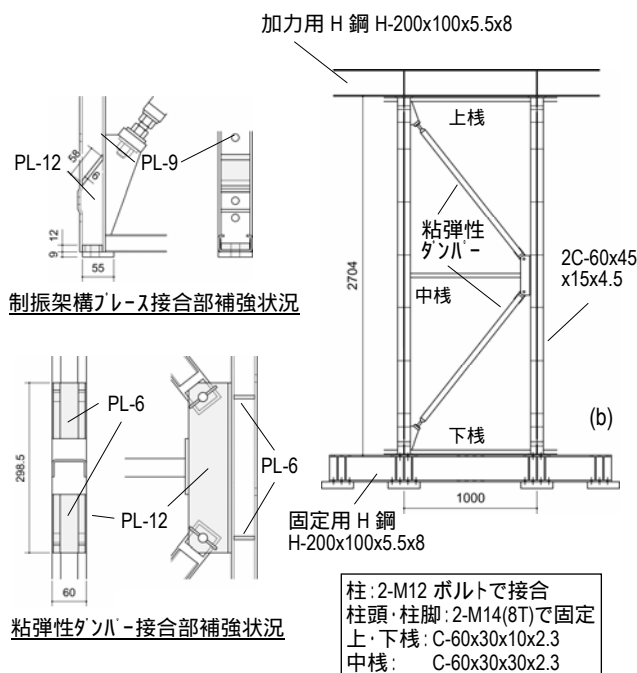


図6 粘弾性ダンパー制振架構試験体

柱脚の 9 mm 鋼板と基礎を接続する $M14$ ボルトに、 12 mm 鋼板を座金として追加している。

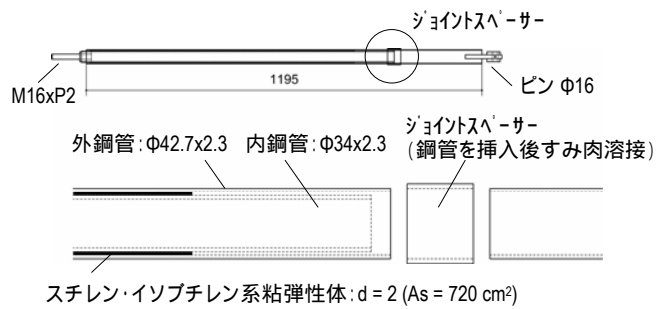


図7 粘弾性ダンパー詳細

その他、ブレース接合部の軽量形鋼が、力の伝達によって変形しないように、 $6, 9\text{ mm}$ の鋼板をスチフナとして溶接している(図6)。図12は、制振架構に層間変形を強制変形として与えるための加力装置であり、架構を構面が水平となるように伏せた状態で加振する。架構の柱脚は $M14$ ボルト(8T)で反力壁に、柱頭も同じく $M14$ ボルトによって H 形鋼に固定されており、高速アクチュエータがこれに接続される。この H 形鋼は、試験体の構面外への動きのみが拘束されている。

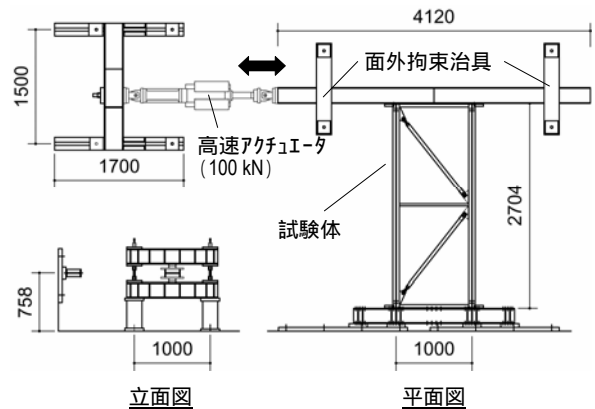


図8 加力装置

3.2 計測および载荷計画

図9に試験体の計測の詳細を示す。制振架構の各部の変形分担を詳細に分析するため、各部の層間変形に対する寄与を算定し、適合条件を満たすことをチェックできるように変位計を設置している。層せん断力はアクチュエータのロードセル L1、層間変形は D2-D4 である。またダンパー変形は D9 (粘弾性は D10 も含む)、ダンパー力はダンパーに連なる鋼管ブレース部分に歪ゲージ (S1, S2) を貼り、鋼管のヤング係数と断面積を用いて力に変換した。

表1は载荷計画である。各载荷の最大層間変形の増大に伴い、加振振動数を変化させている。なお加

振は振動数を一定にして，目標値に達するまで振幅を漸増し，目標振幅を3回繰返す。振幅は，層間変形角 1/400 から 1/50 まで行い，1/200 および 1/100 の後に，履歴性状の変化の有無を，その 1/2 の振幅で確認する。

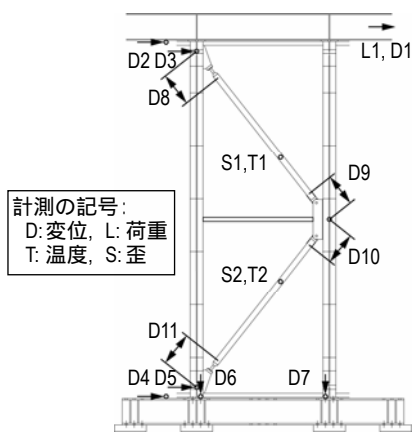


図9 計測計画

表1 载荷計画

载荷順序	1	2	3	4	下段へ 続く
層間変形角	1/400	1/300	1/200	1/400 ⁽²⁾	
振幅 (mm)	6.8	9.0	13.5	6.8	
振動数 (Hz)	3.1	3.1	3.1	3.1	
载荷順序	5	6	7	8	
層間変形角	1/150	1/100	1/200 ⁽²⁾	1/75	
振幅 (mm)	18.0	27.0	13.5	36.1	
振動数 (Hz)	3.1	2.1	3.1	1.6	

3.3 動的载荷実験結果

図10に，試験体V(粘弾性ダンパー)の層せん断力 - 層間変形の典型的な履歴を示す。試験体の履歴は楕円形を示し，従来ブレース架構の履歴(図2参照)に比較してエネルギー吸収に優れている。最大せん断力は層間変形角 1/100 の第1サイクルで約 30 kN，これ以降の振幅で 23 kN となった。第1サイクルの力の上昇は粘弾性材料の特徴である。それ以降は，従来ブレース架構の降伏力 21 kN，設計目標値通りの結果となった。温度上昇は 1/75 の载荷でも 2~3 °C に抑えられた。

また，紙幅の都合，省略したが，1回目と2回目の 1/200 载荷の結果はほとんど変化しておらず，小振幅からエネルギー吸収に優れ，なおかつ架構の損傷が小さいことがわかった。

さらに，文献2にて提案した粘弾性ダンパーの時刻歴解析モデルを用いて，本制振壁の実験を再現した(図10破線)。ちなみに文献2では，モデルの適用範囲は粘弾性体の歪が 300 %rad までであったが，本実験は強制変形を制振壁に与えるため粘弾性体には最大で 500~600 %rad のせん断変形が生じ，結果，元のモデルが示すよりもダンパーのエネルギー吸収

は大きくなる。これは粘弾性体内部の結合が一時的に切れることによると解釈されており⁴⁾，本報で用いる解析モデルにはその効果をさらに組み込んだモデルである。

すべての場合において，解析は実験とよく一致している。特に，粘弾性材料を扱う上で注意が必要とされる，加振初期の荷重上昇までもが解析によって再現できている。これによって，ダンパーに接合する部材へ伝達する力が予測できるため，制振壁の合理的な設計に有用となる。

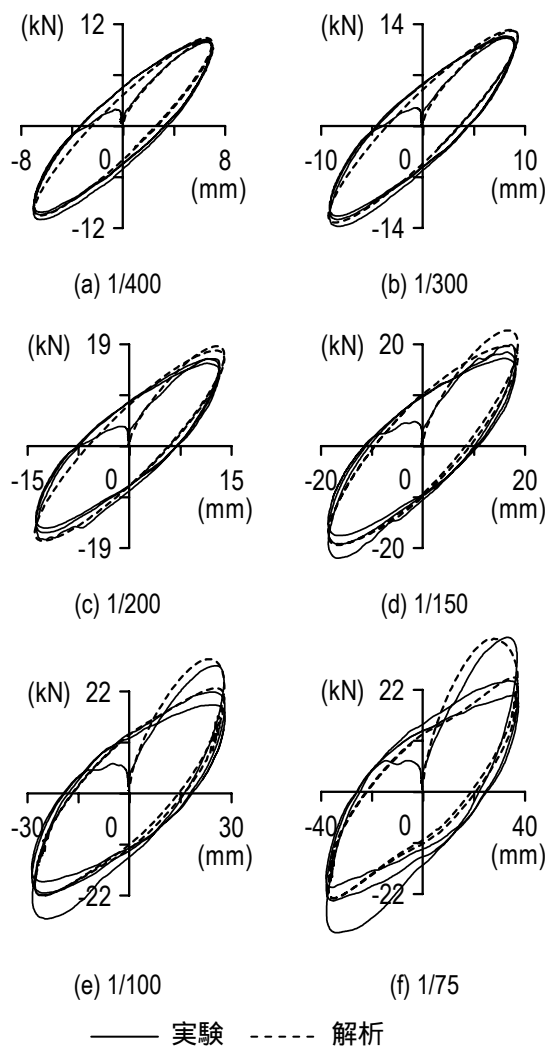


図10 制振壁動的载荷実験の再現 (F vs. u)

4. 一質点制振構造の設計法

4.1 応答低減率と制振性能曲線

住宅の耐震架構は図2に示したように，スリップ型の復元力特性を示す。粘弾性ダンパーをもつ制振架構を楕円履歴に置換し，システム全体の復元力特性を図11に示すように近似する。

笠井，川鍋が提案した弾塑性系と粘性系の並列となるシステムの応答予測法⁵⁾と同様の手順で，本研究で対象とするシステムの変位，加速度の低減率を

図式化した性能曲線を作成する。擬似加速度スペクトル S_{pa} 一定であるような理想的な応答スペクトルを考えると、制振構造の変位低減率 R_d 、擬似加速度低減率 R_{pa} はそれぞれ式(4)のように表される。

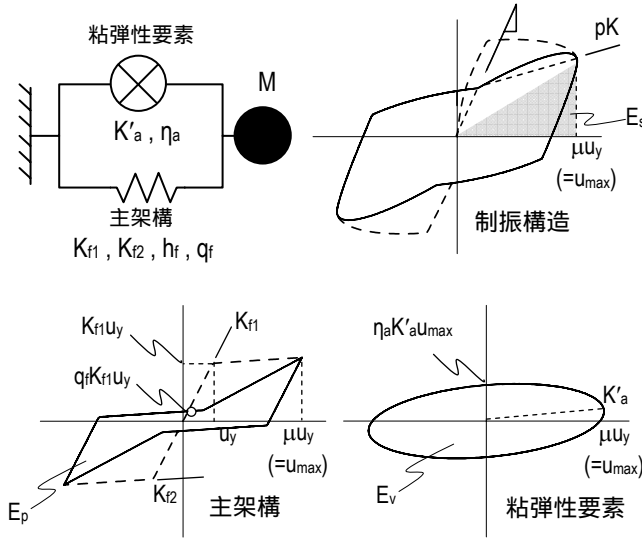


図 11 一質点制振構造とその復元力特性

$$R_{pa} = D_h \frac{T_f}{T_{eq}} \frac{T_{eq}/T_f + T_0/T_f}{2}$$

$$R_d = D_h \frac{T_{eq}}{T_f} \frac{T_{eq}/T_f + T_0/T_f}{2} \quad (4a, b)$$

式(4)中のパラメータについては、下式より求められる。

$$D_h = \sqrt{\frac{1 + \alpha h_0}{1 + \alpha h_{eq}}} \quad , \quad \alpha = 25 \text{ (実地震波)} \quad (5)$$

$$T_0/T_f = \sqrt{K_{f1}/(K_{f1} + K'_a)} \quad (6)$$

$$T_{eq}/T_0 = \sqrt{\frac{\mu}{1 + p\mu - p}} \quad (7)$$

$$h_{eq} = \beta \left[\frac{(1+q)^2}{2p\mu} \ln \left(\frac{1+p\mu-p}{\mu} \right) + \frac{(\mu-1)(1-p)(1-q^2)}{2\pi\mu^2(1+p\mu-p)} \right]$$

$$+ \frac{h_0}{\mu} \left\{ \frac{\sqrt{\mu(1+p\mu-p)} + p - 1}{p} + \ln \left(\frac{\sqrt{p\mu} + \sqrt{1+p\mu-p}}{\sqrt{p+1}} \right)^{\frac{p-1}{p\sqrt{p}}} \right\} \quad (8)$$

$$h_0 = h_f + \eta/2 \quad (9)$$

$$\beta = 1.11 + 0.56q - 0.67q^2 \quad (10)$$

$$p = (K_{f2} + K'_a)/(K_{f1} + K'_a) \quad , \quad q = q_f \quad (11)$$

式(4)は、粘弾性要素の主架構に対する損失剛性比 K''_a/K_{f1} と損失係数 η_a の関数で表現できる。ここで、主架構の最大塑性率 μ および q_f を仮定し、 K''_a/K_{f1} 、 η_a をさまざまに設定すれば性能曲線が描ける。図 12 に、与条件 S_{pa} 一定、 $\mu = 2$ 、 $q_f = 0.2$ の場合の性能曲線を示す。性能曲線を用いれば、制振構造の諸元値が具体的に決まらない段階で、各諸元値と応答の関係が視覚的に把握できることから、効率の良い設計が可能となる。

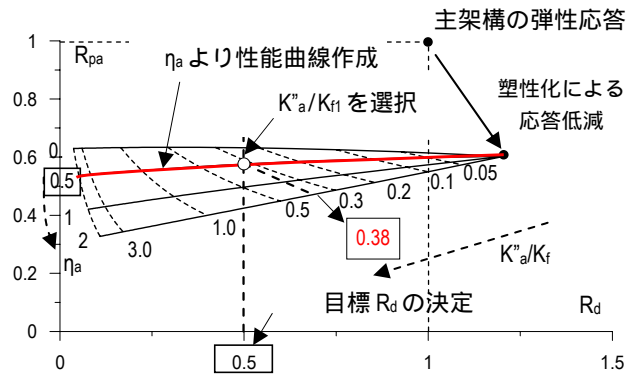


図 12 制振構造の応答低減性能曲線 (S_{pa} 一定、 $\mu = 2$ 、 $q = 0.2$) および制振設計の手順

4.2 制振設計手順

ここでは、性能曲線を用いた制振設計法の手順を述べる。まず、主架構の各諸元値、応答スペクトル、要求性能（目標変位 u_{ig} ）を決定する。手順は図 3 にも図示する。

主架構の T_f 、 h_f を用いて、応答スペクトルから弾性応答を算出。変位を u_{el} 、層せん断力と Q_{el} とする。 u_{ig} と u_{el} より、目標変位低減率 $R_d (=u_{ig}/u_{el})$ を算出。粘弾性要素の η_a および与条件 $\mu_{ig} (=u_{ig}/u_y)$ を用いて、式(4a, b)より性能曲線を作成。

性能曲線から目標 R_d を満たす K''_a/K_{f1} を選択する。 K''_a/K_{f1} 、および K_{f1} より粘弾性要素の付加量が決定する。粘弾性要素の特性値に振動数依存がある場合は収斂計算になる。

4.3 時刻歴応答解析による検証

$M = 0.1 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$ 、 $K_{f1} = 43.86 \text{ kN}$ 、 $h_f = 0.05$ 、 $q_f = 0.2$ 、 $T_f = 0.3 \text{ s}$ の諸元値を持つ主架構を想定する。 K_{f1} に対して、 $K''_a/K_{f1} = 0.1, 0.3, 0.5$ 、 $\eta_a = 0.3, 0.5, 1.0$ 、目標塑性率 $\mu_{ig} = 2, 4$ とした制振設計を行う。入力地震波は、八戸 EW、JMA 神戸 NS、東北大学 NS 成分波の位相特性を持つ模擬地震波および BCJ-L2 波の 4 波とした。各地震波に対する主架構の弾性応答を求め、設計されたシステムの最大応答を性能曲線より予測した。また、設計を行った各システムの諸元値を用いて、時刻歴応答解析を行った。予測値と解析値をそ

それぞれ主架構の弾性応答値で基準化し, 図 13 に横軸を解析値, 縦軸を予測値として一覧する。予測値は解析値とよい対応を示す。

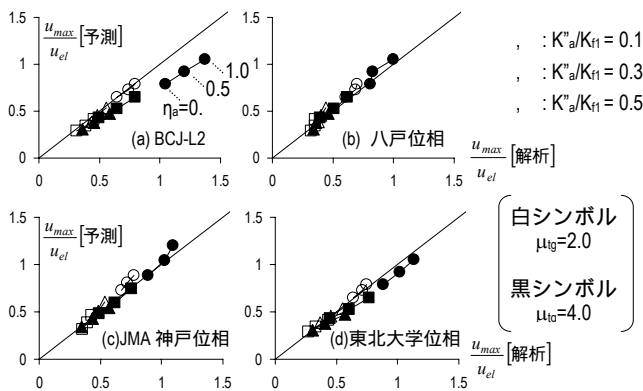


図 13 性能曲線を用いた最大変位の予測精度

5. まとめ

パッシブ制振技術を軽量鉄骨造へ展開し, 動的載荷実験を通して, その有効性を検証した。以下にまとめる。

- (1) 従来ブレース架構を改良した制振架構は, 架構各部の剛性が全体剛性やエネルギー吸収に影響することを, 数値解析を用いて示した。また, 制振架構の全体剛性は, ダンパーと各部剛性(支持材剛性)が直列に連なるモデルによって単純化でき, これに基づくダンパーの設計法について示した。
- (2) 粘弾性ダンパー制振架構の動的載荷実験を行い, その挙動について検討した。従来ブレース架構は概ね層間変形角 1/100 で損傷が始まる一方, 制振架構はエネルギー吸収や変形性能に優れている。
- (3) 粘弾性ダンパー制振架構の挙動は, 独自に開発したダンパーの数値解析用モデルによって, 高い精度で再現が可能である。
- (4) 応答スペクトルに基づく制振構造の性能曲線を提案した。制振架構を付加することによって得られる変位, 加速度の応答低減率を, これによって簡易に予測可能であり, 合理的な制振設計ができる。

参考文献:

- 1) 笠井和彦, 大木洋司, 雨宮健吾, 木村勝彦: イソブチレン・スチレン系のブロック共重合体からなる粘弾性材料の構成則(その1:小歪領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第569号, pp.47-54, 2003年7月
- 2) 大木洋司, 笠井和彦, 雨宮健吾, 木村勝彦: イソブチレン・スチレン系のブロック共重合体からなる粘弾性材料の構成則(その2:大歪領域における温度・振動数・振幅依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第617号, pp.77, 2007年7月
- 3) 大木洋司, 笠井和彦, 和田章, 緑川光正, 横山重和, 岩崎啓介: 軽量鉄骨住宅の制振: 架構動の実験, 振動台実験および解析的検証, 東京工業大学パッシブ制振構造シンポジウム 2004, pp.202-218, 2004年11月
- 4) パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, (社)日本免震構造協会, 2005年9月
- 5) 笠井和彦, 川鍋佳史: 粘性減衰・履歴減衰を併用する構造における動的特性と地震最大応答の簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第591号, pp.43-51, 2005年5月

付録: 粘弾性材料の疲労性能

図 A(a)に示す試験体を用いて, スチレン・イソブチレン系粘弾性体の疲労試験を行った。使用する試験体は, 薄い鋼板で材料を挟んだ一面せん断方式である。同図(b)はダンパーの加振装置, 同図(c)はそれを用いた疲労試験結果である。ダンパーの疲労寿命は文献4が示す要求性能を十分に満たす結果となった。

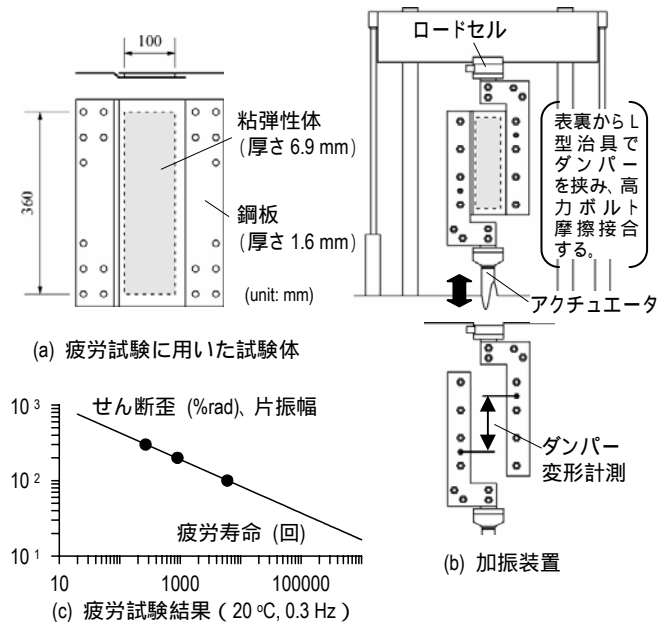


図 A 粘弾性材料の疲労試験