

μVisダンパーシステムの減衰性能評価と適用効果に関する検討

Investigation of damping performance evaluation and application effect of μVis damper system

鈴木 公平*1、中尾 貞治*2、津之下 睦*3、伊藤 万里*4

1. はじめに

粘弾性ダンパーは、微小な変形から大変形まで幅広く減衰効果を発揮するデバイスであり、歪に対して線形挙動を示すものと非線形挙動を示すものに大別される。前者の履歴ループは滑らかな楕円形を描き、後者の履歴ループはバイリニア型に近似した形となる¹⁾。線形挙動を示す粘弾性ダンパーは、変形に比例して荷重が増加するため、大きな外乱の作用時にはダンパーの周辺部材に過大な付加応力を与えることが危惧される。また、粘性材料による粘性減衰要素を多く含んでいることから、速度依存性と温度依存性を有している。

一方で、摩擦ダンパーは、二次勾配を持たない剛塑性型の履歴ループを描き、一般的にその性能は速度や温度に依存することがない¹⁾。また、摩擦荷重は摩擦係数と摩擦面を押し付ける力（ボルトの締付け力など）により一定値に調整することができるため、設計時に過大な応力を見込む必要もない。しかしながら、摩擦荷重に達するまでは減衰効果を発揮することが無く、風揺れや小規模な地震ではダンパーとしての機能を果たさない。

上記のような各デバイスのメリットを活かしつつデメリットを消失することを目的として、粘弾性ダンパーと摩擦ダンパーを直列に接合した複合型ダンパーを開発した。本複合型ダンパーは、取付けブラケットを介して上下大梁間に接合される間柱制振システム「μVisダンパーシステム」として、2017年10月に一般財団法人日本建築総合試験所より建築技術性能証明を取得²⁾している。

本稿では粘弾性ダンパー、摩擦ダンパーの各々の減衰

性能に関する実験による検証の結果を示す。また、これらを直列に接合した複合型ダンパー（以下、μVisダンパー）の実大動的加振試験結果から、解析モデルとの比較検討結果について報告する。更に、数値解析的な検討に基づき、μVisダンパーの適用効果に関する検討結果を報告する。

2. 技術の概要

図-1にμVisダンパー、図-2にμVisダンパーシステムの姿図を示す。

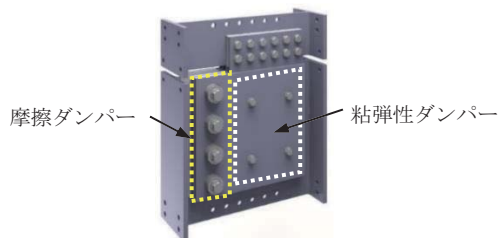


図-1 μVis ダンパー

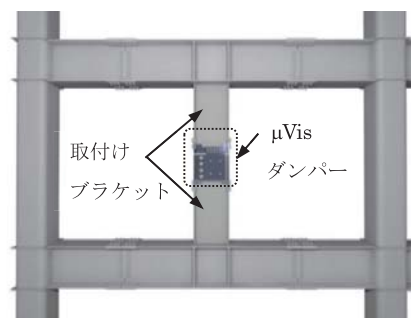


図-2 μVis ダンパーシステム

*1 SUZUKI Kohei : 株式会社コンステック 研究開発本部 構造ソリューション部 部長
*2 NAKAO Sadaharu : 株式会社コンステック 研究開発本部 構造ソリューション部 課長
*3 TSUNOSHITA Atsushi : 株式会社コンステック 研究開発本部 構造ソリューション部 主任
*4 ITO Mari : 株式会社コンステック 研究開発本部 構造ソリューション部

μ Visダンパーは、粘弾性ダンパーと摩擦ダンパーが直列に接合される。その機構は、ダンパーに生じる変形および荷重が小さい時には粘弾性ダンパーのみが稼動するが、一定の荷重に達した後は摩擦ダンパー部が稼動し始める（図-3参照）。よって、風揺れや小規模な地震時には粘弾性ダンパー、中大地震時には摩擦ダンパーが地震エネルギーを吸収することができ、あらゆる振幅に効果を発揮するデバイスである。また、図-4には μ Visダンパーの履歴ループの概念を示すが、摩擦ダンパーの摩擦荷重を利用して、粘弾性ダンパーが過大な減衰力を発揮しないよう頭打ちにすることができ、周辺部材に過大な付加応力を与えることを防止する効果が期待できる。

粘弾性ダンパーに用いる粘弾性体は、アクリル系粘弾性体「VEM ISD111H」である。摩擦ダンパーに用いる摩擦材は、フェノール系摩擦材であり摩擦係数0.3（製造ばらつき ± 0.1 以内）を有する材料である。

ダンパーのラインナップは200kN～1,000kNの全7種類である。一例として、図-5に1,000kNタイプの μ Visダンパーを示す。ダンパーの最大減衰力は摩擦ダンパーの締付けボルト数および摩擦面数の増減によって決定される。なお、5章に示す μ Visダンパーの実大動的加振試験には、図-5に示す1,000kNタイプの試験体を用いている。

3. 粘弾性ダンパーの減衰性能

3.1 動的特性

粘弾性ダンパーの動的特性を評価するため、温度依存性、振動数依存性、歪依存性の検証を目的とした動的加振試験を行った。以下に試験の内容とその結果を示す。

(1) 粘弾性ダンパーの性能試験概要

図-6に動的加振試験に用いた試験体を示す。2面せ

ん断型の試験体で、50mm×50mm×5mm厚の粘弾性体を使用した（せん断面積50cm²）。载荷は正弦波加振とし10サイクル加振を行った。試験パラメータは、以下の温度、振動数、せん断歪である。

- ・温度 : 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃
- ・振動数 : 0.10Hz, 0.30Hz, 1.00Hz, 3.00Hz
- ・せん断歪 : 10%, 50%, 100%, 200%, 300%

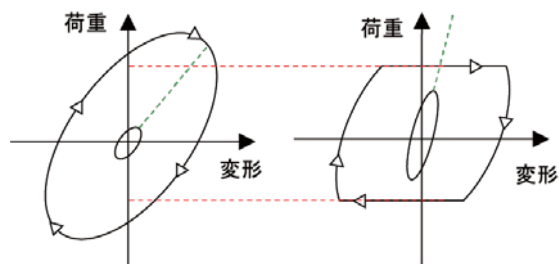
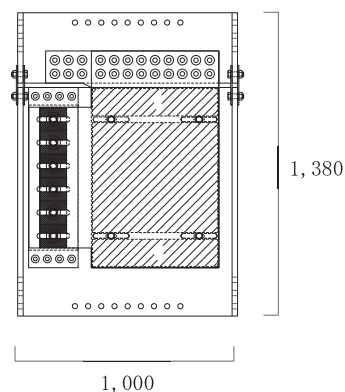


図-4 履歴ループのイメージ



最大減衰力	: 1,000kN
粘弾性体厚さ	: 3mm
粘弾性体総面積	: 25,650cm ²
重量	: 約950kg

図-5 μ Vis ダンパー 1,000kN タイプ

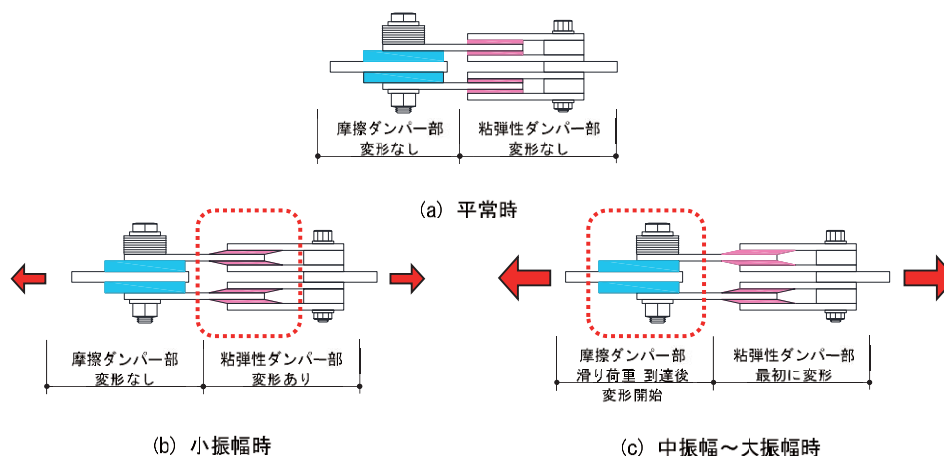


図-3 μ Vis ダンパーの基本原理

試験の実施状況を写真-1に示す。試験体の上部を固定し、下部を油圧アクチュエータに固定した。ロードセルは、フレーム上部に設置した。なお、試験体は温度管理用の断熱効果の高い箱の中に収められており、ヒーターおよび液体窒素により温度管理を行った。

(2) 試験結果

温度、振動数、せん断歪をパラメータとした動的加振試験より得られた応力-せん断歪曲線を、図-7～図-9に示す。

粘弾性体の動的特性は、図-10に示す貯蔵せん断剛性 G' 、損失係数 η を用いて評価する。貯蔵せん断剛性 G' は得られた応力-せん断歪曲線の傾きで表される。また、損失係数 η は貯蔵せん断剛性 G' に対する損失剛性 G'' の比で表される。図-11、12に温度、振動数をパラメータとした時の貯蔵せん断剛性 G' と損失係数 η の推移を示す。

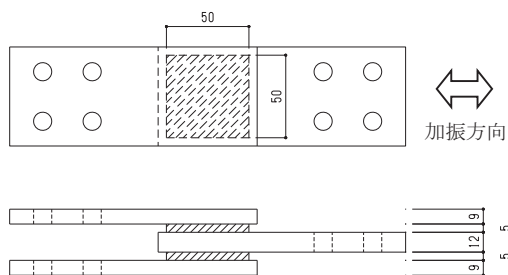


図-6 動的加振試験に用いた試験体



写真-1 試験状況

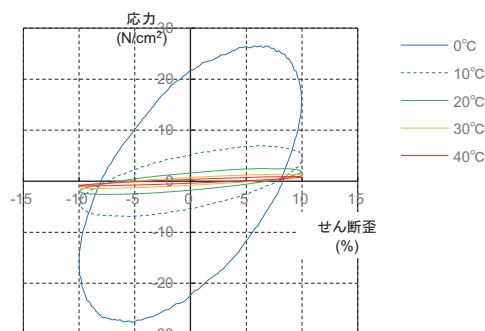


図-7 温度依存性（振動数 0.30Hz, せん断歪 10%）

図-7、8および図-11、12からわかるように、低温・高振動数時には、貯蔵せん断剛性 G' と損失係数 η は高い値を示すが、高温・低振動数時には貯蔵せん断剛性 G' と損失係数 η は低い値となる。また、図-9より本粘弾性ダンパーは、せん断歪に対して概ね線形挙動を示しており、依存性が小さいことが確認できる。

3.2 終局状態

本粘弾性体は、材料自体が有する自己接着力により鋼板へと貼り付けられるが、粘弾性体と鋼板はこれにより強固に接着されており、材料破壊が生じる前に鋼板から剥離しないことが実験で確認されている。以下に終局状態を検証する試験の内容とその結果を示す。

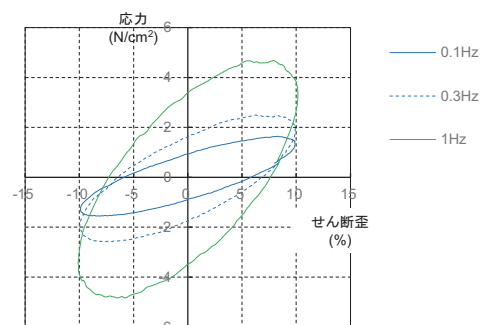


図-8 振動数依存性（温度 20℃, せん断歪 10%）

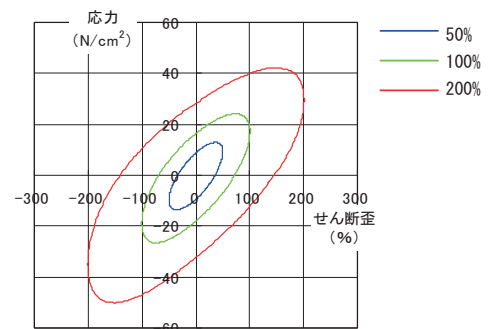


図-9 せん断歪依存性

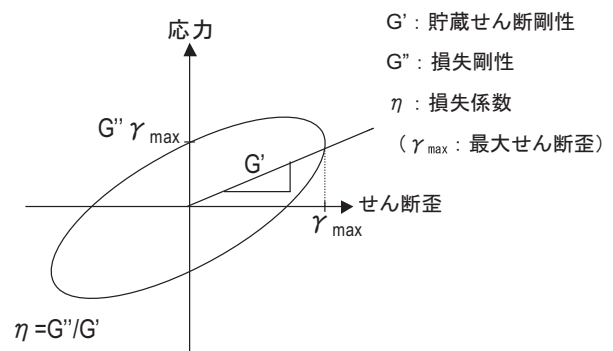


図-10 貯蔵せん断剛性と損失係数

(1) 終局状態検証試験の概要

終局状態の検証試験に用いる試験体は、前節で示した試験体と同様である（図-6参照）。図-13に载荷方法を示す。最初に初期载荷をせん断歪50%程度で実施し、初期特性を把握する。次に、破壊に至らせるため3サイクルの大振幅载荷を行った後、初期载荷と同じ条件の確認载荷試験を行い性能値の確認を行う。破壊の判定条件は、貯蔵せん断剛性 G' について、初期载荷の値に対して確認载荷の値が80%以下まで低下することとして定義した。これは、粘弾性体の持つ自己接着力により、亀裂が生じても材料特性に大きな変化が生じにくいためである。試験パラメータは、次に示す温度、振動数である。

- ・ 温度 : 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃
- ・ 振動数 : 0.10Hz, 0.30Hz, 1.00Hz, 3.00Hz

(2) 試験結果

図-14に破壊せん断歪と破壊応力の関係を示す。粘弾性体の破壊は、破壊せん断歪、応力のどちらか一方で決定づけられることはなく、両者に依存していることがわかる。また、本試験において、破壊に至るまで粘弾性体の剥離は生じないことを確認した。

4. 摩擦ダンパーの減衰性能

4.1 動的特性

摩擦ダンパーの摩擦荷重は振動数や振幅に依存しない

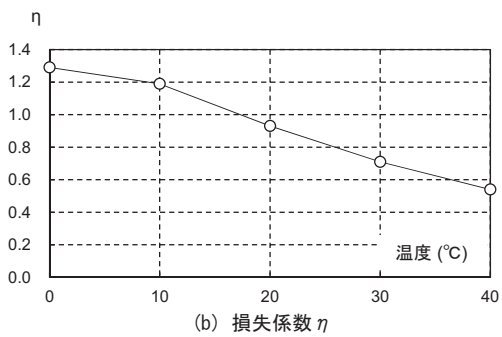
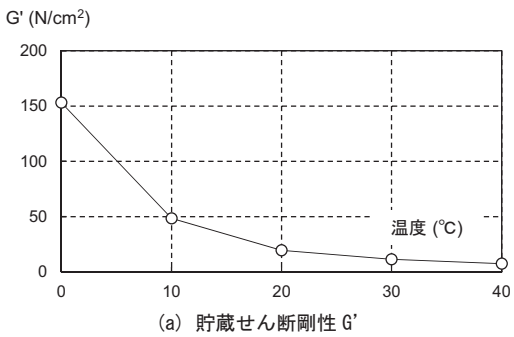


図-11 温度依存性（振動数 0.30Hz, せん断歪 10%）

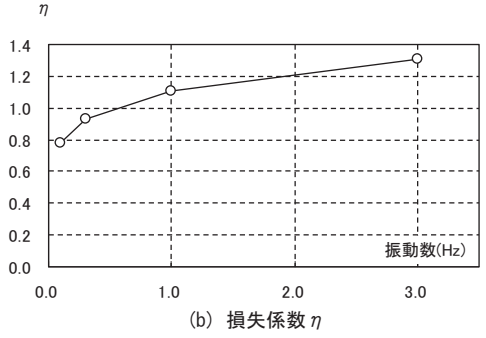
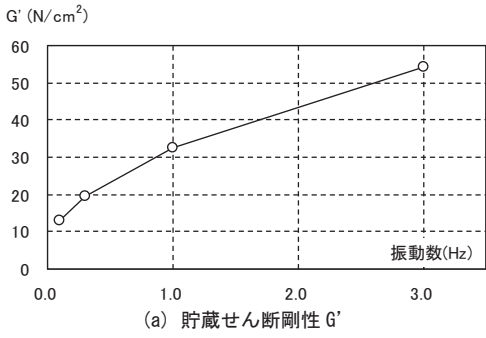


図-12 振動数依存性（温度 20℃, せん断歪 10%）

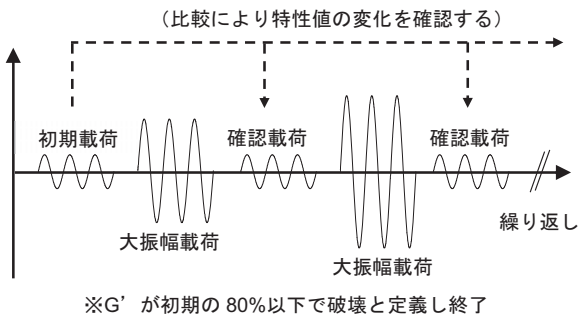


図-13 载荷方法

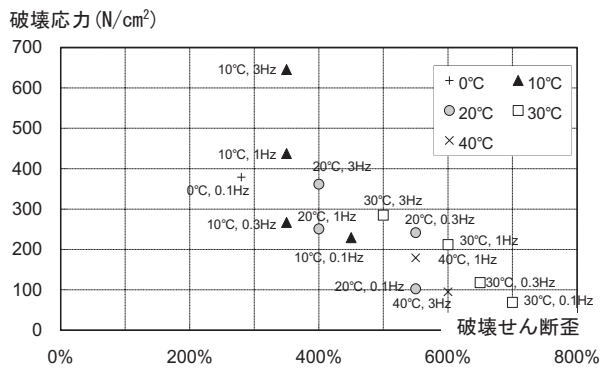


図-14 破壊せん断歪と破壊応力の関係

のが一般的であり、設計上これらの影響は無視できる場合が多い。摩擦ダンパーは摩擦面が滑り、摩擦熱に変換してエネルギーを吸収するため、デバイスの耐久性は摩擦面の疲労特性に依存する部分が多い。本章では、これらの特性を確認するための検証試験について記す。

(1) 摩擦ダンパーの性能試験概要

検証に用いる摩擦ダンパーは、図-15に示す2面摩擦型の試験体である。1面あたりの摩擦材試験片の形状は、図-16に示すように摩擦材22.5mm×73mm×2.2mm厚を2.3mm厚の下地鋼板に熱硬化系接着剤で2枚貼り付けたものである。

一般的に摩擦ダンパーの荷重-変形関係は、図-17に示すように剛塑性型の履歴ループとなる。これは、摩擦面が滑り始める摩擦力に達するまでは装置自体の弾性変形により弾性挙動を示し、摩擦力に達するとその荷重を保持したまま滑り挙動を示すためである。

本試験における载荷方法を図-18に示す。正弦波加振とし各振幅5サイクルの加振を行った。摩擦ダンパーの材料特性値は摩擦荷重と摩擦係数で表される。本試験では、摩擦荷重の特性値は $F_1 \sim F_9$ の平均値とし、動摩擦係数の特性値は式(1)より摩擦荷重毎に算出した $\mu_1 \sim \mu_9$ の平均値とした。式(1)において、 N はボルト軸力である。摩擦荷重に対応する試験パラメータは、以下の振動数、振幅である。

$$\mu_i = F_i / 2N_i \quad (i = 1 \sim 9) \quad (1)$$

- ・ 振動数：0.20Hz, 0.33Hz, 0.50Hz, 1.00Hz, 2.00Hz, 3.00Hz
- ・ 振幅：10mm, 20mm, 30mm

(2) 試験結果

試験結果のうち、振動数0.33Hz、1.00Hzの荷重変形関係について図-19に示す。振動数によらず一定の摩擦荷重を保持し、剛塑性型の履歴ループを示していることが確認できる。なお、本試験は全て同一の試験体で行っており、摩擦ダンパーの総摺動距離は1,200mmとなる。

次に、振動数、振幅の各条件から加振の最大速度を算出し、最大速度と摩擦係数および摩擦荷重の関係を図-20に示す。摩擦係数および摩擦荷重は加振速度によらずほぼ一定の値を示しており、摩擦ダンパーは速度に依存しないことを確認した。

4.2 疲労特性

摩擦ダンパーの疲労特性を確認するため、連続加振試験と断続加振試験の2種の試験を行った。これらの試験は、長時間続く地震動や多数回繰り返し生じる地震動を想定したものである。以下に各試験の概要と結果を示す。

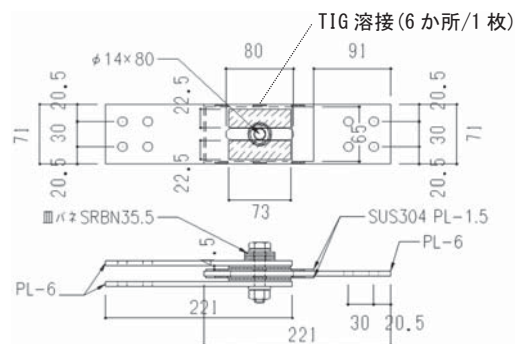


図-15 摩擦ダンパーの性能確認試験体

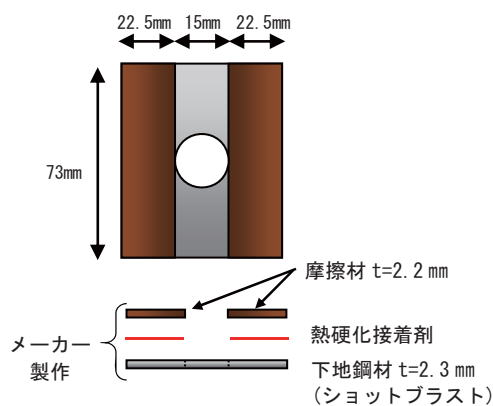


図-16 摩擦材試験片

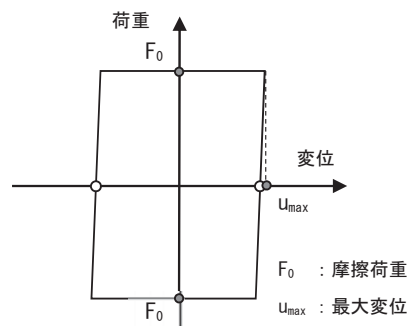


図-17 摩擦ダンパーの荷重-変形関係

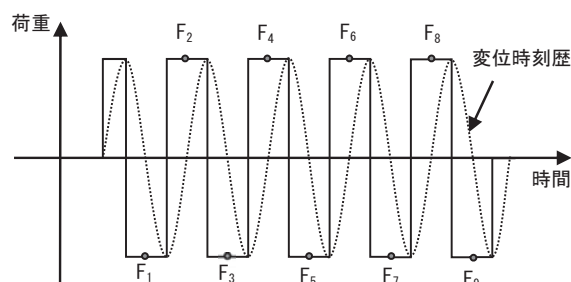


図-18 载荷方法

(1) 連続加振試験

試験体は前節のものと同一形状である（図-15参照）。
 载荷条件は、振動数0.25Hz、振幅20mmの正弦波加振とし、150サイクル（600sec.）を3セット载荷した。これより、摩擦ダンパーの総摺動距離は約36,000mmである。図-21に加振試験結果による摩擦荷重の時刻歴変化を示す。

1セット目のサイクルにおいて初期の摩擦荷重からの変動は $\pm 15\%$ 以内である。2セット目以降の载荷においては、初期の摩擦荷重はやや低くなるものの、最終サイクルまでの変動は $\pm 15\%$ 以内である。2セット目以降に初期の摩擦荷重が低くなる要因としては、摩擦材の磨耗によるボルトの軸力低下と考えられる。これに対して載

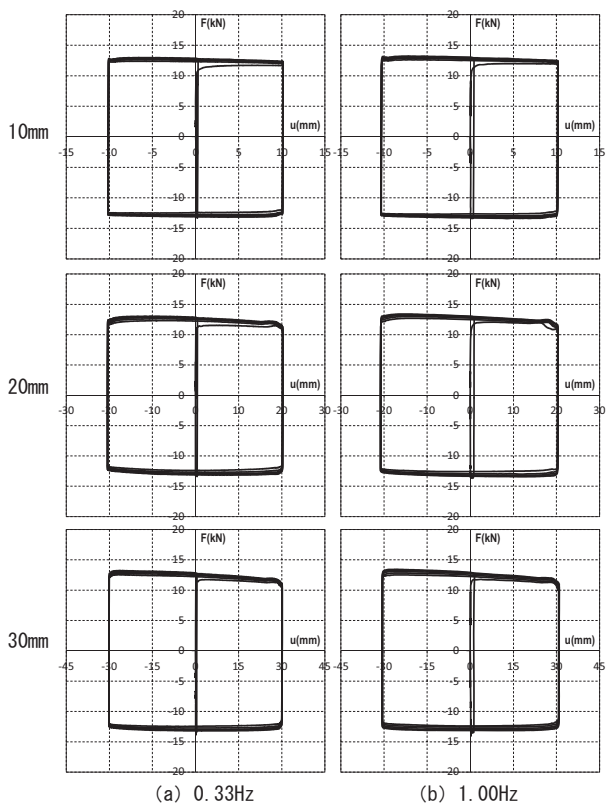


図-19 試験結果（摩擦材の荷重変形関係）

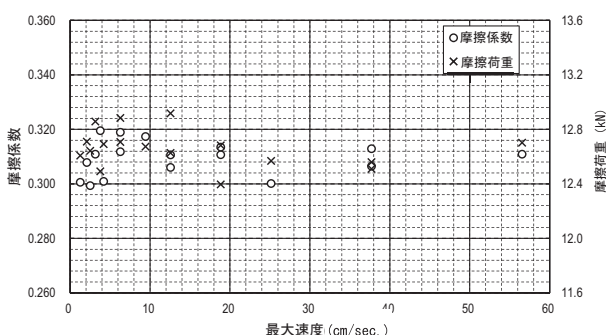


図-20 摩擦材の速度と材料特性値の関係

荷中に荷重が回復しているが、これは温度上昇に伴う鋼材および摩擦材の熱膨張によってボルト軸力が増加し、初期の軸力低下分を相殺していると考えられる。

(2) 断続加振試験

試験体は連続加振試験と同一形状である。载荷条件は、振動数2.0Hz、振幅20mmの正弦波加振とし、10サイクルの加振を断続的に繰り返し、計300サイクル加振する。

図-22に10サイクルごとの摩擦荷重の平均値を示す。繰り返し回数が増加するごとに摩擦荷重も少しずつ低下する傾向が見受けられるが、その低下量は僅かである。摩擦荷重の低下は、連続加振試験と同様に摩擦材の磨耗によるボルトの軸力低下の影響と考えられる。10サイ

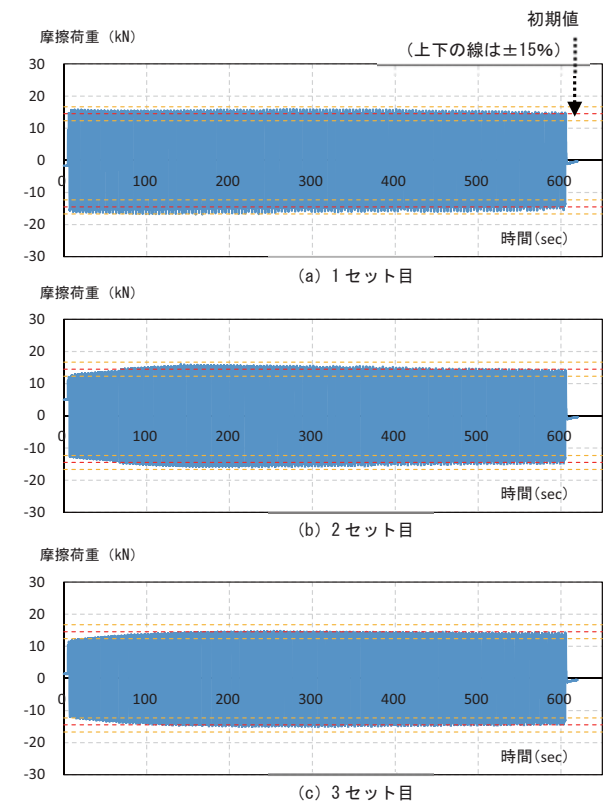


図-21 連続加振における摩擦荷重の時刻歴変化

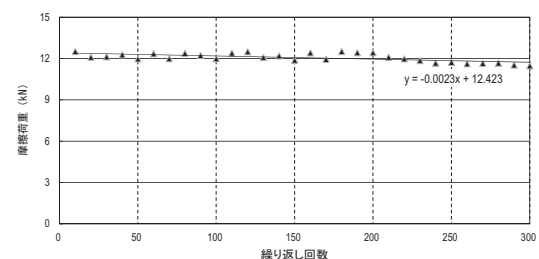


図-22 断続加振における摩擦荷重の時刻歴変化

クルごとの断続加振であるため、連続加振のように温度上昇による軸力変動は生じにくい状態であったと考えられる。摩擦ダンパーの総摺動距離は約24,000mmとなり、多数回繰り返す地震動を想定しても十分な疲労特性を有していると判断できる。

5. μ Vis ダンパーの減衰性能と解析モデル

5.1 動的特性

粘弾性ダンパーと摩擦ダンパーを直列に接合した μ Vis ダンパーの動的性能を確認するため、実大試験体を用いた動的加振試験を行った。

(1) μ Vis ダンパーの試験概要

図-23に試験体設置状況、写真-2に試験写真を示す。動的加振試験に用いた試験体は、図-5に示した1,000kNタイプの μ Vis ダンパーであるが、本試験体専用の加振

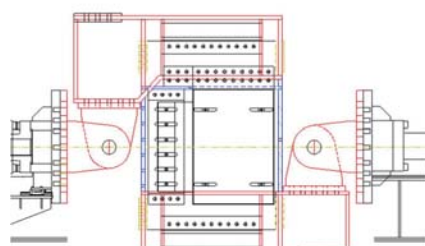
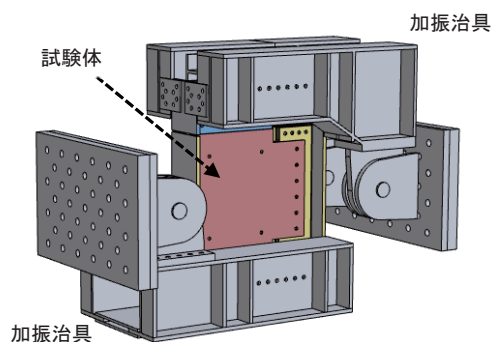


図-23 試験体設置状況



写真-2 試験写真

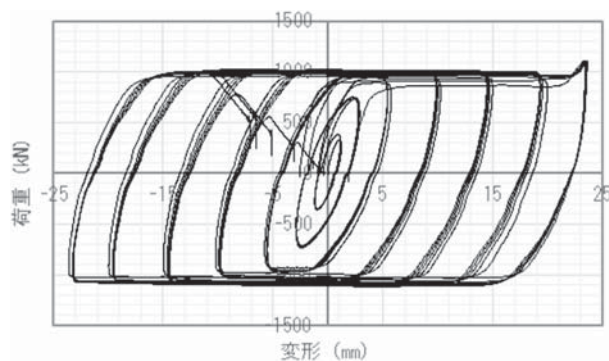
治具を用いてダンパーを縦置きに設置し、動的アクチュエータを用いて加振を行った。载荷条件は、正弦波加振による漸増载荷とし、各変位ステージにおいて5サイクル载荷した。振動数は0.50Hzおよび1.00Hzの2パターンを設定した。表-1に振動数と変位ステージの関係を示す。なお、载荷時の室温は約20度であった。

(2) 試験結果

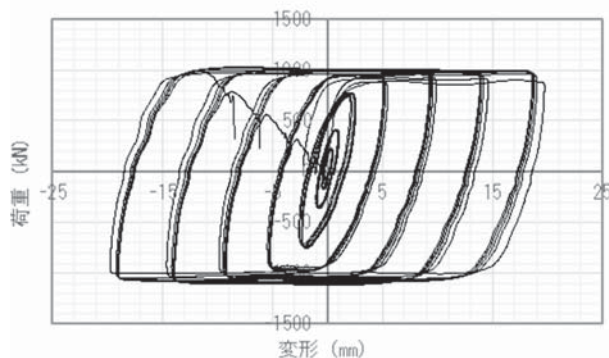
図-24に振動数0.50Hzおよび1.00Hzの荷重-変形関係を示す。低振幅領域では粘弾性体が楕円形状の履歴ループを描き、摩擦ダンパー稼動後は振幅によらず1,000kNで荷重が頭打ちになっていることが確認できる。これより、複合型ダンパーは想定どおりに粘弾性ダンパーおよび摩擦ダンパーが稼動し、小振幅から大振幅まで効率良くエネルギー吸収できる機構であると判断した。

表-1 振動数と変位ステージの関係

f (Hz)	変位ステージ (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
0.50	1.0	2.5	5.0	10	15	20	25
1.00	0.5	1.0	2.5	5.0	10	15	20



(a) 周波数0.50Hz



(b) 周波数1.00Hz

図-24 実大試験の結果

5.2 解析用力学モデル

μ Visダンパーの解析用力学モデルは、粘弾性ダンパーと摩擦ダンパー各々の力学モデルを設定し、それらを直列に接合したものである。摩擦ダンパーの力学モデルは二次勾配を持たない剛塑性型のバイリニアモデルで容易にモデル化できるが、粘弾性体の力学モデルはKelvin-Voigtモデルであり、各パラメータを適切に設定する必要がある。以下に、粘弾性ダンパーと μ Visダンパーのモデル化について示す。

(1) 粘弾性ダンパー

本粘弾性体を用いた粘弾性ダンパーは、歪依存性が少なく、楕円形状の応力-歪曲線を描くことからKelvin-Voigtモデルを用いてモデル化することができる。ダンパー剛性 K'_d 、粘性係数 C_d は、笠井らが提案する分数次導関数モデル³⁾を用いて式(2)、(3)で表される。なお、分数次導関数モデルでは、温度 θ (°C)、角振動数 ω (rad./sec.)における貯蔵せん断剛性 G' および損失係数 η は、式(4)、(5)で表される。なお、これらの詳細および試験結果との整合性については文献³⁾を参照されたい。

$$K'_d = G' A_s / t \dots\dots\dots (2)$$

$$C_d = \eta K'_d / \omega \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

A_s : 粘弾性体のせん断面積

t : 粘弾性体厚さ

ω : 角振動数

$$G' = G \frac{1 + ab\omega^{2a} + (a+b)\omega^a \cos(a\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2a} + 2a\omega^a \cos(a\pi/2)} \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta = \frac{(-a+b)\omega^a \sin(a\pi/2)}{1 + ab\omega^{2a} + (a+b)\omega^a \cos(a\pi/2)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$a : a_{\text{ref}} \lambda^a$$

$$b : b_{\text{ref}} \lambda^a$$

$$\lambda : \exp[-p_1(\theta - 20)/(p_2 + \theta - 20)]$$

本粘弾性体のパラメータ値

$$a_{\text{ref}} : 4.09 \times 10^{-5}$$

$$b_{\text{ref}} : 2.481$$

$$a : 0.5779 \quad G : 6.022 \text{ N/cm}^2$$

$$p_1 : 13.93 \quad p_2 : 85.35$$

(2) μ Visダンパー

図-25に μ Visダンパーの解析用力学モデルを示す。前節で示した1,000kNタイプの実大動加振試験の結果に基づき、解析用力学モデルの整合性を検証した。加振試験は振動数0.50Hzと1.00Hzについて行っているが、ここでは代表して振動数1.00Hzの結果について比較を行う。表-2に示す環境温度 θ は加振試験時の実測値であり、解析用力学モデルにもこの値を反映する。なお、摩擦ダンパーの取付剛性 K_b は(6)式より算出し、 $K_b = 1,600 \text{ kN/mm}$ とした。

$$K_b = F_y / (u_d u_{ve} u_s) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

F_y : 摩擦荷重 = 1,000kN

u_d : 加振試験時の上下ブラケット間変位

u_{ve} : 加振試験時の粘弾性ダンパー変位

u_s : 加振試験時の摩擦ダンパー変位

図-26に μ Visダンパーの荷重-変形関係について、試験結果と解析結果の比較を示す。粘弾性ダンパーのみが稼動する小さい変形領域、および摩擦ダンパーが稼動する大変形領域において、履歴ループの形状、剛性および摩擦荷重について精度良く評価できることを確認した。

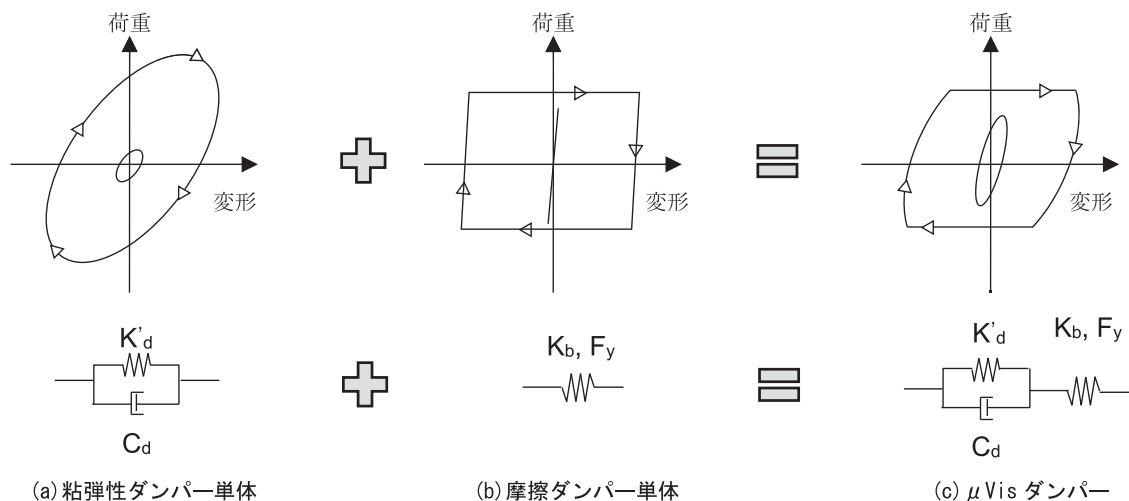


図-25 ダンパーの解析モデル

6. 適用効果の検証

6.1 検証方針

μ Visダンパーは、粘弾性ダンパーと摩擦ダンパー両者の特長を兼ね備えたダンパーである。つまり、微小変形時には粘弾性ダンパーがエネルギー吸収を担い、大変形時には過度な付加応力によって周辺部材に悪影響を及ぼさないように摩擦ダンパーが稼動して荷重を頭打ちにしながエネルギー吸収を行う機構である。本章では、このような特長を持つ μ Visダンパーの適用効果を検証することを目的として、粘弾性ダンパー単体および摩擦ダンパー単体を設置したフレームと μ Visダンパーを設置したフレームの動的挙動の比較を行った。特に、微小変形時のエネルギー吸収効果、ならびに大変形時にダンパーからの付加応力が周辺部材に及ぼす影響に着目して比較検討を行った。

6.2 解析概要

(1) 解析モデル概要

図-27に解析モデルの概要、表-3に各ダンパーの諸元を示す。解析モデルは鉄骨造3層の平面フレームモデルとし、 μ Visダンパーを設置したCase1、粘弾性ダンパーを設置したCase2、摩擦ダンパーを設置したCase3の3種の解析ケースにて比較検討を行った。間柱形状の3連層で設置しており、取付けブラケットはBH-600x300x19x22の断面を有するものとした。なお、Z2～Z4層には付加

質量として50,000kgを積載した。

(2) 解析方法

解析方法は、Newmark β 法($\beta=0.25$)による直接積分法を用いた時刻歴応答解析とした。解析プログラムは、「SNAP ver.7/株構造システム」を用い、解析演算刻みは1/2000秒とした。

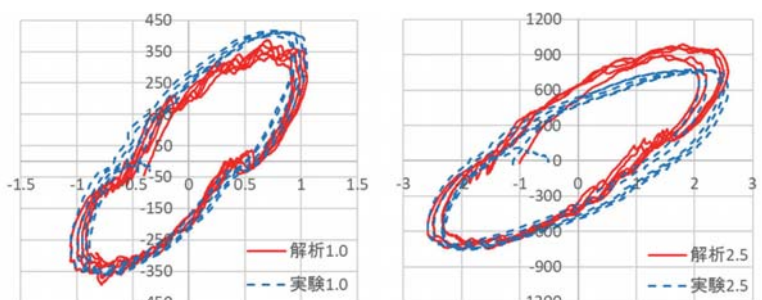
図-28に部材系解析モデルの概念図⁴⁾を示す。なお、図中の凡例において、 μ Visは μ Visダンパー、VEは粘弾性ダンパー、Fric.は摩擦ダンパーを表し、以降全ての図において同様である。梁部材は材端を曲げばね、中央をせん断ばねモデルとして設定した。柱および取付けブラケットは曲げモーメントと軸方向力の相互作用を考慮するためMSモデルとし、中央をせん断ばねモデルとして設定した。また、柱梁接合部および間柱梁接合部のパネル部は回転ばねモデルとして設定した。曲げばねおよびMSモデルに使用する軸ばねおよびパネル部の回転ばねは、全て標準パイリニアモデルの復元力特性を有するものとした。また、解析時にダンパーに設定する温度は20度とした。

表-3 ダンパー諸元

Case No.	デバイス	粘弾性		摩擦
		厚さ t (mm)	せん断面積 A_d (mm ²)	
Case1	μ Visダンパー	3	458,200	200
Case2	粘弾性ダンパー	3	458,200	-
Case3	摩擦ダンパー	-	-	200

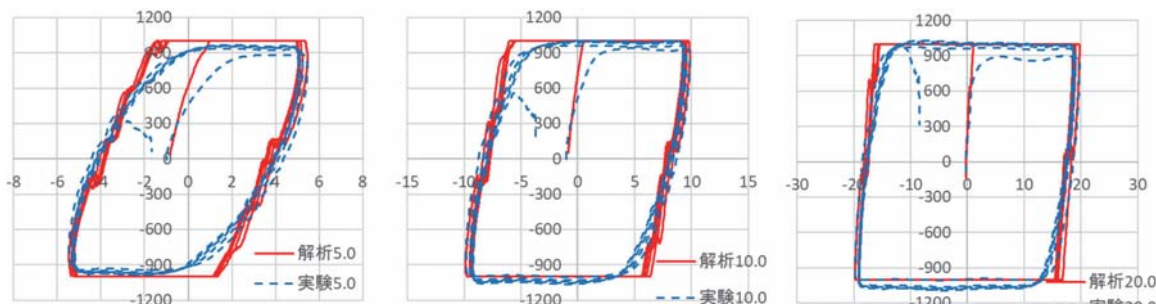
表-2 加振試験時の環境温度

周波数	変位 (mm)	温度 (°C)
1.0Hz	0.5	20.6
	1.0	20.6
	2.5	20.6
	5.0	20.8
	10.0	21.0
	15.0	21.1
	20.0	21.4



(a) ダンパー変形-1.0mm

(b) ダンパー変形-2.5mm



(c) ダンパー変形-5.0mm

(d) ダンパー変形-10.0mm

(e) ダンパー変形-20.0mm

図-26 1.00Hz 加振の実験結果と解析結果の比較

本解析では、検証目的を勘案し、各解析ケースにおける各階の層間変形角が同一となるよう解析条件を設定した。最初に、図-29に示す周波数1.00Hzの加速度漸増正弦波Wave1とこれを2倍割り増したWave2の2種の入力波形をCase1の解析モデルのZ0層に与え、時刻歴応答解析を行った。次に、Case1の解析結果から算出されたZ1～Z4層の応答相対変位の時刻歴波形を、Case2およびCase3のZ1～Z4層に直接入力し、時刻歴応答解析を行った。なお、入力波形とした漸増正弦波は、変位ステージLv.1～Lv.10までを各3サイクル繰り返したものである。

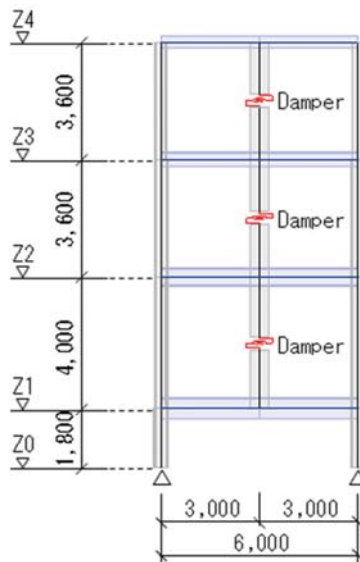


図-27 解析モデルの概要

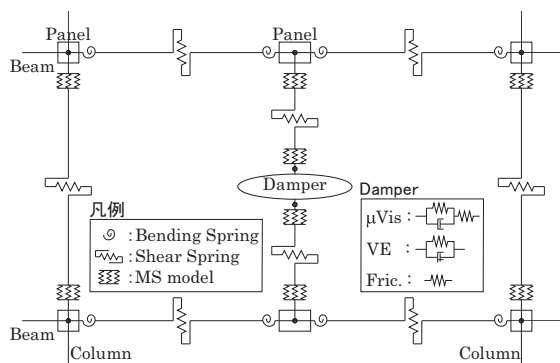


図-28 部材系解析モデルの概念図

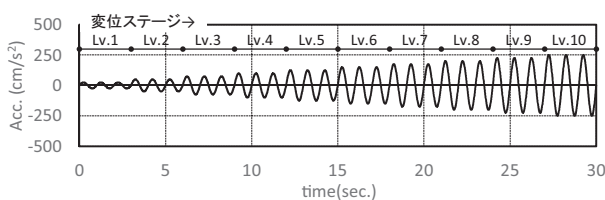


図-29 漸増正弦波

6.3 検証結果

(1) ダンパー履歴とエネルギー消散

図-30に各階の最大層間変形角 R を示す。前節に示した通り、層間変形角は各解析ケースともに同一の値である。Z1-Z2間で最大値を示し、Wave1では $R=1/340\text{rad.}$ 、Wave2では $R=1/96\text{rad.}$ であった。Z1-Z2間の階高は4,000mmであるため、層間変形 δ はWave1で11.8mm、Wave2で41.7mmとなる。

ここで、最大層間変形角が最も大きくなるZ1-Z2間に着目し、図-31にダンパーの減衰力と変形の関係を示す。小振幅時のWave1では、 μVis ダンパーは変位ステージLv.8まで粘弾性ダンパーとして稼動し、Lv.9に摩擦荷重に達する。摩擦荷重に達してからは、二次勾配を持たないために変形が進展する。摩擦ダンパーは、Lv.6まで弾性変形を繰り返すが、Lv.7において摩擦荷重に達し、変形が進展する。粘弾性ダンパーは、その性能通りに変形と荷重の関係が線形となっている。大振幅時のWave2では、 μVis ダンパーと摩擦ダンパーの比較を行うと、Lv.4までは μVis ダンパーが摩擦荷重に達していないため、履歴形状が明確に異なっている。Lv.5以降は若干ながら傾きに相違はあるものの、概ね同様の履歴形状を示している。それに対して、粘弾性ダンパーは線形型で楕円形状の履歴形状を示し、その減衰力は900kN弱まで達しており、ダンパー変形は他のダンパーの約1/3程度である。

ダンパーの履歴形状から得た知見を踏まえ、図-32にZ1-Z2間の各ダンパーの時刻歴エネルギー消散を示す。Wave1では、 μVis ダンパーが最もエネルギーを消散している。Lv.8までは粘弾性ダンパーと同様に推移するが、Lv.9以降は摩擦ダンパーが稼動し、粘弾性ダンパーとの差異が大きくなっている。摩擦ダンパーは、摩擦荷重に達するLv.7まではエネルギーを消散しないため、累積の消散量は最も低い結果となった。Wave2では、 μVis

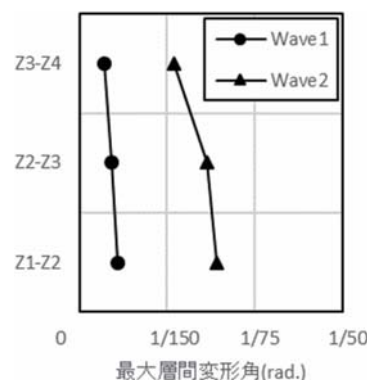


図-30 各階の最大層間変形角

ダンパーと摩擦ダンパーがほぼ同様の傾向を示している。特に、両者が摩擦荷重に達するLv.5以降（摩擦ダンパーはLv.4以降）は、粘弾性ダンパーとの差異が大きくなる結果となった。粘弾性ダンパーは一定の剛性を保つため変形が進展しないのに対し、 μ Visダンパーと摩擦ダンパーは摩擦荷重に達すると変形が急激に進展し、履歴面積が大きくなるためである。

(2) フレームの応力・塑性化状態

図-33にWave2においてZ1-Z2間が最大層間変形角になる時刻のCase1（ μ Visダンパー設置）とCase2（粘弾性ダンパー設置）の曲げモーメント図を示す。なお、Case3（摩擦ダンパー設置）は、Case1と同様の傾向を示すため除外した。図中の数値は曲げモーメント値を示しており、下線付き数値は梁の曲げモーメント値で

ある。また、赤丸は塑性ヒンジを表している。フレームの部材端部における曲げモーメント値は、Case1の方が小さく収まっている。Z1-Z2間に着目すると、Case1では弾性範囲内であるが、Case2ではZ1、Z2層の梁端部に塑性ヒンジが生じている。更に、Case2では、間柱梁接合部周辺の曲げモーメントが大きくなっており、図-34に示すように間柱梁接合部周辺の梁の部材角 θ_B が反時計回りに増大する。これに伴い取付けブラケットも部材角 θ_C を持って反時計回りに回転するため、ダンパーの変形が進展しない要因となっている。

7. おわりに

粘弾性ダンパーと摩擦ダンパーを直列に接合した複合型ダンパー「 μ Visダンパー」の減衰性能について動的

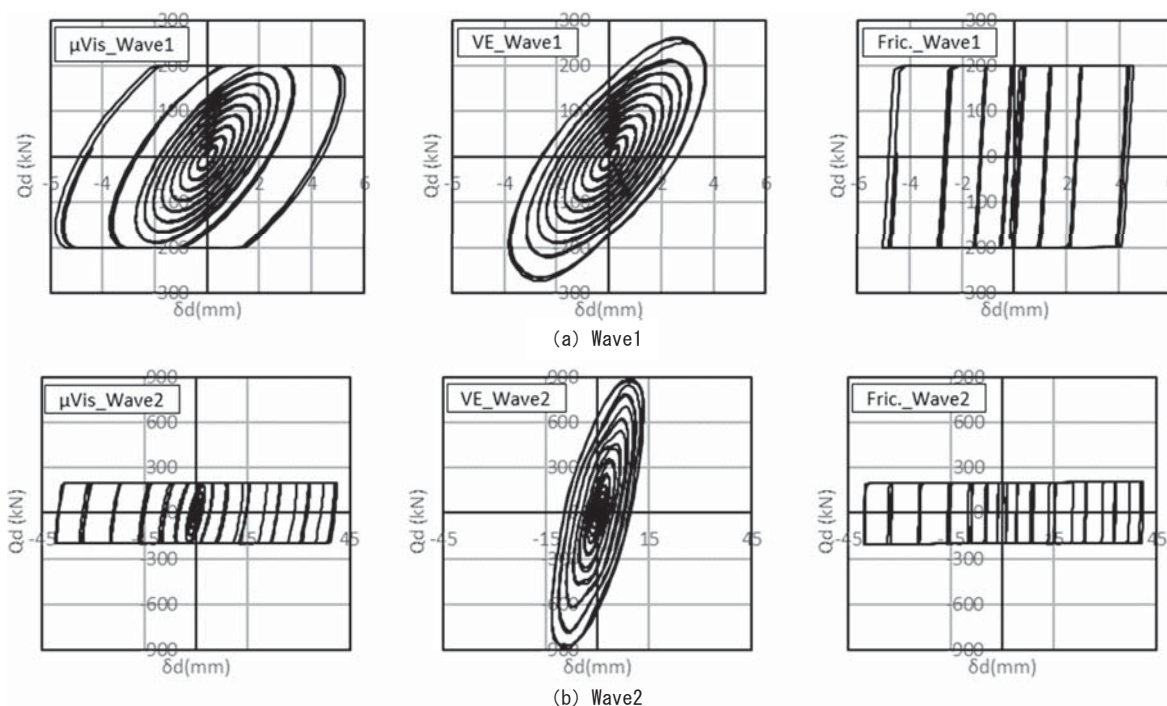


図-31 ダンパーの減衰力と変形

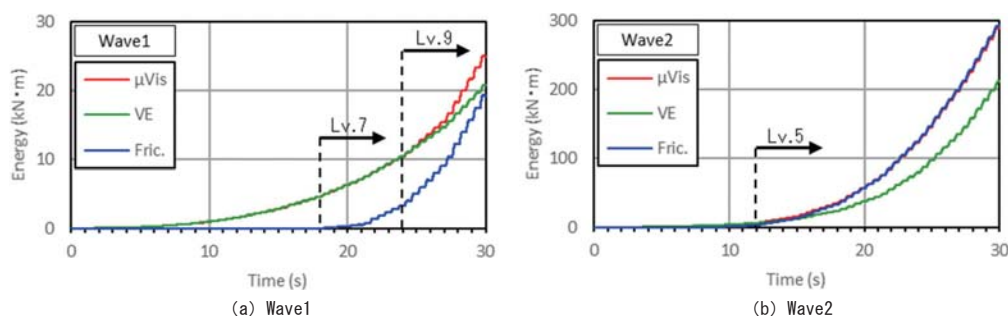


図-32 ダンパーのエネルギー消散 (Z1-Z2 間)

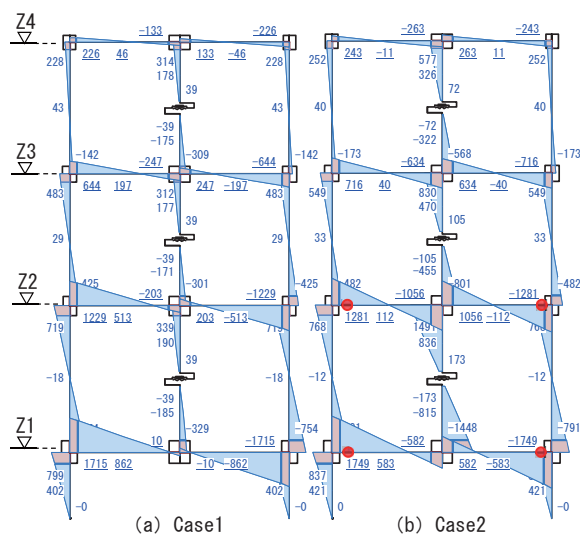


図-33 曲げモーメント図

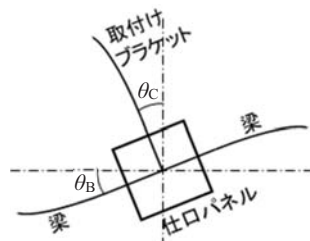


図-34 間柱接合部周辺の変形イメージ

加振試験に基づく検討を行った。また、 μ Vis ダンパーを間柱形状で柱梁フレーム内に設置した「 μ Vis ダンパーシステム」の適用効果について、数値解析に基づく検討を行った。これらの検討によって得られた知見を以下に示す。

- 1) μ Vis ダンパーに使用する粘弾性ダンパーの貯蔵せん断剛性 G' と損失係数 η は、温度と加振振動数に顕著に依存するが、せん断歪に対しては線形挙動を示す。これより、粘弾性ダンパーの減衰性能は温度と加振振動数に依存し、せん断歪には依存しないことを確認した。また、粘弾性ダンパーの終局状態は粘弾性体の凝集破壊で決定付けられ、鋼材と粘弾性体の剥離は生じないことを確認した。
- 2) μ Vis ダンパーに使用する摩擦ダンパーの摩擦係数は、加振速度によらず一定の値を示す。これより、摩擦ダンパーの減衰性能は速度に依存しないことを確認した。また、長時間継続する振幅や多数回繰り返し生じる振幅に対しても優れた耐久性を有することを確認した。
- 3) μ Vis ダンパーの実大動的加振試験結果から、低振幅領域では粘弾性体が楕円形状の履歴ループを描き、摩擦ダンパー稼動後は振幅によらず1,000kNで摩擦荷重が頭打ちになることを確認した。これより、

μ Vis ダンパーは想定どおりに小振幅から大振幅まで効率良くエネルギー吸収できる機構であると判断した。

- 4) μ Vis ダンパーは、粘弾性体の力学モデルである Kelvin-Voigt モデルと摩擦ダンパーの力学モデルである剛塑性型のバイリニアモデルを直列に接続して模擬化することによって精度良い数値解析が可能である。
- 5) 数値解析に基づく μ Vis ダンパーの適用効果の検討結果から、 μ Vis ダンパーは粘弾性ダンパー単体、摩擦ダンパー単体と比較して小振幅から大振幅までエネルギー吸収効率の高いダンパーであると判断した。
- 6) μ Vis ダンパーは荷重を頭打ちにできるため、粘弾性ダンパー単体と比較して周辺部材へ与える付加応力が小さいことを確認した。また、摩擦荷重に達して摩擦ダンパーが稼動した後はダンパーの変形が進展し、大きな履歴面積を描くことができる。

【参考文献】

- 1) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第3版, 大應, 2013.11
- 2) 一般財団法人日本建築総合試験所： μ Vis ダンパーシステム—粘弾性体と摩擦材の複合型ダンパー—, 建築技術性能証明評価概要報告書, 2017年10月30日, GBRC 性能証明 第17-25号
- 3) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健：粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則（その1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化）, 日本建築学会構造系論文集 第66巻 第543号, pp.77-86, 2001年5月
- 4) 鈴木公平, 中尾貞治, 津之下睦, 高島英幸：非線形型粘弾性ダンパーを有する間柱型制振架構の減衰性能評価と動的挙動, 日本建築学会構造系論文集 第83巻 第745号, pp.373-383, 2018.3

【執筆者】

*1 鈴木 公平
(SUZUKI Kohei)*2 中尾 貞治
(NAKAO Sadaharu)*3 津之下 睦
(TSUNOSHITA Atsushi)*4 伊藤 万里
(ITO Mari)