軸力伝達機構を有する粘弾性ダンパーシステムを用いた工法開発に関する研究

(その1. 粘弾性ダンパーシステムに対する二軸載荷試験の結果)

A STUDY ON DEVELOPMENT OF VISCO-ELASTIC DAMPER SYSTEM INCLUDING AXIAL FORCE TRANSFER MECHANISM METHOD

(Part.1 Result of biaxial loading tests)

山下忠道 — * 1 川端 淳 — * 2
二宮正行 — * 3 犬伏徹志 — * 2
田中和宏 — * 4 服部 学 — * 4

Tadamichi YAMASHITA — * 1 Jun KAWABATA — * 2
Masayuki NINOMIYA — * 3 Tetsushi INUBUSHI — * 2
Kazuhiro TANAKA — * 4 Manabu HATTORI — * 4

キーワード:

制震補強, 軸力伝達, 摩擦係数, 粘弾性ダンパー, 二軸載荷試験

Keywords:

Seismic retrofit, Axial force transfer, Friction coefficient, Visco-elastic damper, Biaxial loading tests

Existing outer-frame type seismic retrofitting cause problems of daylight, escape route and diminishing property values.

Authors propose that outer-frame type seismic retrofitting of Visco-Elastic Damper including Axial Force Transfer Mechanism Method solve these problems. This damper system has features that can bear sustained axial force and variable axial force, and focus shear deformation on Visco-Elastic Damper.

Authors confirmed performance of this damper system by biaxial loading tests, and verified the appropriateness of numerical analysis model for damper system.

1. はじめに

近年、多様な補強工法が採用される中、居住可能な状態での補強検討が増えている¹⁾²⁾。しかしながら、耐震補強、制震補強ともにブレースタイプ³⁾⁵⁾が主流で補強検討の際には、採光や避難経路の確保といった問題が生じる。また、既存建物の耐震性能を向上させることを目的として補強したにもかかわらず、上記の理由で資産価値や賃料の低下を伴ってしまう事例が見受けられる。そこで、著者らはこのような問題を解決するために、図1に示すようなアウトフレーム制震補強工法を提案している⁶⁾⁷⁾。この制震補強に用いられる図2に示す粘弾性ダンパーシステムについては、アウトフレームの長期軸力や変動軸力を負担する軸力伝達機構を有し、建物各階に生じるせん断変形を粘弾性ダンパーユニットに集中させることで、地震時のエネルギーを吸収することに特徴がある。

本論文では、この軸力伝達機構を有する粘弾性ダンパーシステム(以下、ダンパーシステムと称す)について、ダンパーシステムの実大二軸載荷試験により、その性能を確認するとともに本ダンパーシステムの数値解析モデルを提案し、その妥当性について検証した。

2. ダンパーシステムの概要

本ダンパーシステムは、粘弾性体がせん断変形することで地震入力エネルギーを吸収するダンパーユニットと両端が球状となっている軸力伝達機構を組み合わせた図2のような構成となっており、軸力伝達機構は軸力を負担しながら水平力に対してほとんど抵抗しない。すなわち、地震時には建物各階でのせん断変形を粘弾性ダンパーユニット(以下、粘弾性ダンパーと称す)に集中させて、粘

弾性体が大きな履歴ループを描くことにより地震入力エネルギーを吸収する。尚、本ダンパーシステムの粘弾性ダンパーは、比較的溫度依存性が小さい特徴を有しており⁸⁾、外気温に影響を受ける部位に設置しても安定した復元性を得ることが可能である。本ダンパーシステムは、図1に示すような中高層住宅の外側に新たなフレームを施工し、その柱部中央に設置する。また、既存建物と新設フレームとは、増設スラブにより一体化を図るアウトフレーム工法である。

図1 工法の概要(構造図)

図2 ダンパーシステムの概要

本稿の内容の一部は参考文献6)、7)で既に発表したものを含んでいる。

¹⁾ ㈱構造計画研究所西日本設計部 博士(工学)
(〒541-0047 大阪市中央区淡路町3-6-3)

²⁾ ㈱構造計画研究所西日本設計部

³⁾ ㈱エム・イー・エム一級建築事務所

⁴⁾ 住友ゴム工業(株) ハイブリッド事業本部

¹⁾ West Japan Structural Design Dept., Kozo Keikaku Engineering Inc., Dr. Eng.

²⁾ West Japan Structural Design Dept., Kozo Keikaku Engineering Inc.
Mizuno Engineering Management Inc.

⁴⁾ Hibrid Rubber Products HQS., Sumitomo Rubber Industries Ltd.

3. 軸力伝達機構部の性能実験

3.1 試験体の概要

表 1 試験体寸法

部材名称	材質	寸法	備考
軸力伝達機構	軸力負担部	先端部球径D1 : 160mm 軸径D2 : 120mm 長さL(先端部球の中心間距離) : 1050mm(圧縮方向試験体) 750mm(引張方向要素試験体) 先端平面部の直径D3 : 77.5mm	軸力負担部材と各受け皿の接触面にはグリースを塗布
	上受け皿	接触面内径d1 : 160.5mm 上受け皿上部内径d2 : 140mm 上受け皿上部板厚t : 30mm	
	下受け皿	接触面内径d1 : 160.5mm	
取付けボルト	強度区分10.9	M30×8本

(a) 圧縮方向試験体

(b) 引張方向試験体

図 3 試験体概要(軸力伝達機構部)

軸力伝達機構部のみの試験体詳細を表 1 ならびに図 3(a) (b)に示す。軸力伝達機構は、軸力負担部材、上受け皿、下受け皿およびそれらを取付けるボルトから構成されている。また、軸力伝達機構は圧縮引張の両方向に軸力を負担するが、本実験で用いた二軸試験機が鉛直下向きの荷重でしか与えられないため、引張時に軸力伝達機構の荷重が作用する上受け皿を逆さに設置し、鉛直下向きの荷重を上受け皿に与えることで、軸力伝達機構が引張方向の軸力に対して、同じ作用力となる要素試験を実施した。

軸力負担部材は、軸径φ120mm、先端部の球径φ160mm、先端球部

の芯間距離 1050mm および 750 mmとし、材質は、機械用炭素鋼を焼きなまし処理した S45C-N 材(降伏点 345N/mm²以上)を用いた。

上受け皿、下受け皿共に、軸力負担部材と同じ材質を用い、円柱状の鋼材から内側に軸力負担部材の先端部の球と十分な接触面を得るため内径φ160+0.5mm 以内の球面加工を行った。また、上受け皿は組立時に軸力負担部材を囲うため円柱状の鋼材を半割にした形状となっている。尚、軸力負担部材と各受け皿の接触面には、摩擦抵抗を低下させるため、一般用リチウム石けんグリースを塗布した。取付けボルトは、強度区分 10.9 の M30(有効断面積 ; 561mm²)を 8 本配置し、引張方向の設計最大軸力 2000kN に対して締付力 150N/mm²時に安全率 1.5 以上となる設計を行った。

3.2 加振概要

図 4 試験機概要

図 4 に示す二軸試験機(鉛直方向 ; 5MN 静的ジャッキ×2 台、水平方向 ; 2MN アクチュエータ(最大速度 20mm/s))を用いて加力・加振を行った。試験項目は、圧縮(方向)試験と引張(方向)要素試験であり、各載荷条件を以下に説明する。

- (1) 圧縮試験 : 鉛直荷重毎 (500kN、1000kN、1500kN、2000kN) に水平振幅±30mm を周波数 0.02Hz、0.1Hz の各 2 サイクルおよび各 4 サイクルの正弦波加振を計 8 ケース。
- (2) 引張要素試験 : 鉛直荷重毎 (500kN、2000kN) に水平振幅±30mm を周波数 0.02Hz、0.1Hz の各 2 サイクルおよび各 4 サイクルの正弦波加振を計 4 ケース。

荷重は鉛直方向の静的ジャッキおよび水平方向のアクチュエータに接続するロードセルにより測定し、水平変位は試験体の上部プレートと下部プレートの水平変位を試験機外部より設置した接触型変位計により測定した。さらに、軸力負担部材に発生する応力度を確認するため、圧縮試験は歪みゲージを図 3(a) に示す部材高さ中央部の直交 2 方向の 2 箇所(Sa、Sb)に貼り測定した。

3.3 実験結果

(1) 軸力伝達機構の復元力(摩擦)特性

図 5(a)～(d)に軸力伝達機構部の圧縮試験により得られる復元力特性を示す。また、上受け皿の引張要素試験の復元力特性を図 6(a) (b)に示す。

同じ鉛直荷重条件を与えた図 5(a)～(d)と図 6(a) (b)を比較した場合、図 5 の圧縮試験に対して、図 6 の引張要素試験では 0.1 Hz の加振時において試験機の制御能力により水平変位が少ないものの 0.02Hz の加振時では、図 5 における圧縮試験とほぼ同様の復元力特性が得られている。図 7 に、図 5(a)～(d)および図 6(a) (b)から得られた復元力の切片荷重と図 3 に示す Sa、Sb 点にて測定された応力度

に軸力負担部材の中央部の断面積を乗じた軸力の平均値より求めた摩擦係数を示す。

図5 軸力伝達機構の復元力特性(圧縮方向試験)

図6 軸力伝達機構の復元力特性(引張方向要素試験)

図7 鉛直荷重と摩擦係数の関係

図8 軸力負担部材の応力度

これらの結果から、軸力伝達機構部の摩擦係数を評価した場合、軸力負担部材に対する上受け皿と下受け皿の接触面積(固定度)が異なり、鉛直荷重による作用力の相違はあるものの、軸力負担部材と各受け皿の接触面の仕上げと塗布したグリースの効果により、概ね0.020~0.025の範囲と均一な摩擦係数が得られている。

(2) 軸力負担部材の応力度

図8(a)~(d)に圧縮試験(鉛直荷重:500、1000、1500、2000kN)の0.1Hz水平加振時における軸力負担部材中央で測定された部材の応力度(歪み量に鋼材の弾性係数:206×10³N/mm²を乗ずること算出)を示す。

これらの図より、軸力負担部材中央の応力が鉛直荷重1500kN、2000kN時において、図3(a)に示す加振方向側面のSa点では応力度の変動が確認され、軸力伝達機構部に生じる摩擦抵抗の増大により、軸力負担部材中央に曲げ応力が発生しているものと考えられるが、部材に使用した鋼材の降伏点345N/mm²に対する応力度の最大は半分程度の値であるため実用上問題ない範囲であると考えられる。

4. 粘弾性ダンパーシステムの性能実験

4.1 試験体の概要

表2 試験体寸法

部材名称	材質	寸法	備考
粘弾性ダンパーユニット	天然ゴム系 高減衰ゴム	粘弾性体の幅Br : 400mm 粘弾性体の高さHr : 400mm 粘弾性体の厚さtr : 15mm 粘弾性体の総数Nr : 2層	4ユニット使用
軸力伝達機構	軸力負担部材	S45C-N 先端部球径D1 : 160mm 軸径D2 : 120mm 長さL(先端部球の中心間距離) : 1050mm 先端平面部の直径D3 : 77.5mm	軸力負担部材と各受け皿の接触面にはグリースを塗布
	上受け皿	S45C-N 接触面内径d1 : 160.5mm 上受け皿上部内径d2 : 140mm 上受け皿上部板厚t : 30mm	
	下受け皿	S45C-N 接触面内径d1 : 160.5mm	
取付けボルト	強度区分10.9	M30×8本

図9 試験体概要(粘弾性ダンパーシステム)

本ダンパーシステムの概要を表2ならびに図9に示す。前節の軸力伝達機構部の両側に2ユニットずつ、合計4ユニットの粘弾性ダンパーを配置する。粘弾性ダンパー1ユニットの諸元は、せん断面積400mm×400mm×2層(1ユニットあたりのせん断面積:320000mm²)、厚さは15mmとする。また、本ダンパーシステムは、規準温度20℃で300%変形時に約1000kN(1ユニットあたり250kN)の減衰力を発揮する。尚、粘弾性ダンパーの接合は、フィラープレートを通じて高力ボルトによる摩擦接合を行った。

4.2 加振概要

表 3 载荷条件

载荷方向	载荷方法	载荷時刻歴 $\delta(t)$	鉛直荷重	振幅	周波数または速度
面内方向	定常载荷		$P_V = -1000\text{kN}, -2000\text{kN}$	$\delta_{\text{peak}} = \pm 7.5\text{mm}, \pm 15\text{mm}, \pm 30\text{mm}, \pm 45\text{mm}$	0.1Hzまたは0.05Hz
	非定常载荷		$P_V = -2000\text{kN}$	$\delta_{\text{peak}} = 15\text{mm}$ El Centro, Taftの2地震応答波	最大速度 20mm/s
面外方向	定常载荷		$P_V = 0\text{kN}$	$\delta_{\text{peak}} = \pm 10\text{mm}, \pm 15\text{mm}, \pm 20\text{mm}, \pm 25\text{mm}, \pm 30\text{mm}, \pm 35\text{mm}, \pm 40\text{mm}$	0.1Hzまたは0.05Hz

写真 1 試験写真

加振実験は前節と同様、二軸試験機を用いることとし、水平変位算出についても前節と同様、上部プレートと下部プレートの測定結果により得ることとした。また、水平方向加振は粘弾性体が大きくせん断変形する面内方向(定常载荷試験および非定常载荷試験)と粘弾性体のせん断変形がほとんど期待できない面外方向(定常载荷試験)の試験を行った。各载荷条件を説明する(表 3)。

(1) 面内方向試験：

- (a) 定常载荷試験：鉛直荷重(1000kN、2000kN)および水平振幅($\pm 7.5\text{mm}, \pm 15\text{mm}, \pm 30\text{mm}, \pm 45\text{mm}$)をパラメータとして加振周波数を振幅 $\pm 30\text{mm}$ 未満の場合は 0.1Hz、振幅 $\pm 30\text{mm}$ 以上の場合は 0.05Hz で 4 サイクルの正弦波加振を計 8 ケース。
- (b) 非定常载荷試験：鉛直荷重(2000kN)にて、建物設置時における地震応答の非線形挙動を確認するため、24 階建の建物(固有振動数 0.35Hz)に El Centro NS, Taft EW の各波が入力されたときの 1 階応答波形⁹⁾の最大振幅を粘弾性体厚さの 100%にあたる 15mm に調整し、継続時間を 2 倍(120sec)にした载荷を計 2 ケース。

※本報告では、粘弾性ダンパシステムの基本的な挙動を確認するため、静的载荷に近い条件での加振が中心である。今後、本ダンパシステムの速度依存性を精度よく把握するため、中・高速度領域を中心とした動的载荷試験を行う予定である。

(2) 面外方向試験：

定常载荷試験：鉛直荷重なし(0kN)として、面外方向(粘弾性ダンパシステムの鋼材部分)における弾性限変形を確認するため、軸力伝達機構部の摩擦抵抗を除いた条件(摩擦力によるエネルギー吸収(荷重と変形)が生じるため、鉛直荷重をゼロとする)により、振幅 $\pm 10\text{mm}$ ～ $\pm 40\text{mm}$ をパラメータとして、加振周波数 0.1Hz または 0.05Hz で 4 サイクルの正弦波加振を計 7 ケース。

また、実験時のゴム内部温度は、粘弾性ダンパーの外側鋼板フランジ中央部の孔より熱電対をゴム厚さの中央部狙いで差込み測定した。尚、定常载荷試験開始時のゴム温度は $39^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ であり、非定常载荷試験開始時のゴム温度は約 30°C であった。

4.3 実験結果

(1) 面内方向試験

図 10 定常载荷試験の復元力特性

図 11 非定常载荷試験の復元力特性

図 10(a)～(d)は、定常载荷試験より得られた各振幅時における加振周波数 0.1Hz (振幅 $\pm 7.5\text{mm}$ 、振幅 $\pm 15\text{mm}$)および 0.05Hz (振幅 $\pm 30\text{mm}$ 、振幅 $\pm 45\text{mm}$)の復元力特性を示す。

これらの図より、水平振幅が大きくなるにつれて紡錘型の安定した履歴特性を示していることが確認できる。また、鉛直荷重が 2000kN と 1000kN の復元力特性について比較すると前節で評価した軸力伝達機構部の摩擦抵抗分が付加されていることが確認できる。図 11(a), (b)に非定常载荷試験として、24 階建の建物における 1 階応答変位波形による荷重－変形関係を示す。これらの図より、定常载荷試験と同様に地震応答波形のような非定常载荷においても、地震応答波形の非線形性に依存することなく安定した履歴特性を示すことが確認できる。

(2) 面外方向試験

図 12 に振幅毎の定常载荷試験で得られた復元力特性を示す。この図より、面外変形 $\pm 40\text{mm}$ 振幅では、粘弾性ダンパーを取付ける部材の塑性化にともない履歴を描く復元力となる。また、面外変形 $\pm 35\text{mm}$ 以下の変形においては、わずかに履歴面積のある復元力特性を示

すが、この現象は面外変形時に粘弾性ダンパーの接合ボルトや試験体取付部にすべりなどが確認されなかったことから、粘弾性体の面外せん断変形により履歴を描いたものと判断できる。

図 12 定常载荷試験の復元力特性

5. ダンパーシステムの復元力特性のモデル化

5.1 モデルの概要

表 4 三要素モデル係数一覧

弾塑性要素	骨格曲線	$\tau = 0.32 \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} ^{0.38}$
	再降伏曲線	$\tau = 0.11 \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} ^{0.38}$
	除荷勾配	$K_u = (0.32 - 0.11 \varepsilon^{0.38}) / ((1 - \varepsilon) \gamma_{\max}^{0.62})$ $\varepsilon = 0.94 \gamma_{\max}^{0.73} / (\gamma_{\max}^{0.73} + 0.01)$
	第二分枝 勾配直線	$\tau = (0.32 - 0.11 \varepsilon^{0.38}) / ((1 - \varepsilon) \gamma_{\max}^{0.62})$ $\pm (0.32 - (0.32 + 0.11 \varepsilon^{0.38}) / (1 + \varepsilon)) \gamma_{\max}^{0.38}$
弾性要素		$\tau = 0.10 \gamma_{\max}^{-0.66} \gamma \quad (\gamma_{\max} > 0.005)$
		$\tau = 3.30 \gamma \quad (\gamma_{\max} \leq 0.005)$
粘性要素		$\tau = 9.36 \times 10^{-2} \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} ^{0.25}$
非定常 载荷用 の係数	初期剛性の 反力の増大	$\beta_1 = 1.2$
	弾塑性要素 の係数	$\alpha_1 = 0.8 \alpha^2 + 0.2$
	弾性要素 の係数	$\alpha_2 = 1.0$
	粘性要素 の係数	$\alpha_3 = 0.85 \alpha^{0.35} + 0.15$

図 13 ダンパーシステムモデル概要

本ダンパーシステムにおける水平方向の復元力特性の数値解析モデルは、図 13 のモデル概要に示す軸力伝達機構部のモデルと粘弾性ダンパーのモデルを並列モデルとして扱う。軸力伝達機構部の数値解析モデルは、軸力伝達機構部の性能実験により得られた摩擦係数に応じた鉛直荷重を掛けることで摩擦抵抗力を求める。一方、粘弾性ダンパーの復元力特性は、振幅や速度が連続的に変化する非定常载荷においても精度よく復元力特性を模擬するために谷他¹⁰⁾が提案した変位に依存する弾塑性要素と弾性要素、速度に依存する粘性

要素の三要素並列モデルを用いる。また、本粘弾性ダンパーのモデル係数の一覧を表 4 に示す。尚、表 4 の粘性要素、非定常载荷用の弾性要素の係数については、本粘弾性ダンパーに用いている粘弾性体の性能確認試験を行い、付録 1 に基づき前述の論文に示す値から係数を調整した。

5.2 実験値との比較

(a) 粘弾性ダンパーのみ (b) ダンパーシステム

図 14 定常载荷における復元力特性の比較

(a) 粘弾性ダンパーのみ (b) ダンパーシステム

図 15 非定常载荷における復元力特性の比較 (El Centro NS)

(a) 粘弾性ダンパーのみ (b) ダンパーシステム

図 16 非定常载荷における復元力特性の比較 (Taft EW)

鉛直荷重が 2000kN 時の本ダンパーシステムの復元力特性について、粘弾性ダンパー単体(三要素モデルのみ)の数値解析モデルと粘弾性ダンパー単体のモデルに本実験で得られた軸力伝達機構部の摩擦力を考慮したダンパーシステム全体(三要素モデルに摩擦力を足した)の数値解析モデルとの比較を図 14 (a) (b) (定常载荷)、図 15 (a) ~ 16 (d) (非定常载荷)にそれぞれ示す。

これらの図より、軸力伝達機構部の摩擦力を考慮していない粘弾性ダンパー単体の数値解析モデルでは、実験で得られた定常载荷時や建物応答を想定した非定常载荷時の復元力特性と比較して、全ての変形範囲で荷重曲線が小さくなっており、その再現性も低い。しかしながら、軸力伝達機構部の摩擦力を考慮したダンパーシステム全体の数値解析モデルでは、本実験で示された変形範囲内において、復元力特性を精度よく再現できており、補強対象となる中高層共同

住宅での想定される限界層間変形角が 1/150～1/125 程度とすれば、本数値解析モデルの妥当性と適用範囲については問題がないものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、軸力伝達機構部およびダンパースステムの二軸載荷試験により、その性能を確認するとともに、本ダンパースステムの復元力特性に関するモデル化の提案を行った。

- 1) 軸力伝達機構の摩擦係数は、鉛直荷重の増大による影響はあるものの、0.020～0.025 程度の安定した値となっている。
- 2) 本ダンパースステムの復元力特性は、鉛直荷重の大きさにかかわらず紡錘型の安定した履歴曲線を描く。
- 3) 本ダンパースステムは、面外変形±35 mm以下において弾性域であり、面外方向に大きな変形性能が要求される純ラーメン構造にも適用できる。
- 4) 粘弾性ダンパーの三要素モデルと軸力伝達機構部の摩擦モデルを足し合わせた本ダンパースステムの数値解析モデルは、地震応答波のような非線形性の強い挙動に対しても精度良く復元力を模擬できる。

尚、本研究において性能を確認したダンパースステムについては今後、ダンパースステムを内蔵した架構実験や既存フレームとの接合部実験を行い、工法全体の検証を順次行っていく予定である。

謝辞

本研究にあたり、本ダンパースステムの設計および組立方法に関して西松建設 犬丸直明氏のご協力を頂きました。ここに記して御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築構造技術者協会：構造レトロフィット特殊耐震・免震・制震改修の事例，建築技術，2001. 6
- 2) 耐震総合安全機構監修：耐震改修事例 50 工期、コストの実態から診断、設計、施工ノウハウまで，日経 BP，2007. 9
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課：既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル枠付き鉄骨ブレースによる補強」，財団法人日本建築防災協会，2003
- 4) 久保田正春，石丸辰治，新谷隆弘，秦一平：増幅機構を用いた制震構造システムに関する研究，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp253～256，1998
- 5) 北嶋圭二，上田英明，緒方翼，中西三和，安達洋：摩擦ダンパーを用いた制震レトロフィット技術の研究・開発，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp189～194，1998. 11
- 6) 田中和宏，服部学，川端淳，二宮正行，犬伏徹志，山下忠道：軸力伝達機構を有す粘弾性ダンパースステムの開発（その 1. 粘弾性ダンパースステムの概要），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）C-2，pp635～636，2010. 9
- 7) 川端淳，二宮正行，田中和宏，服部学，犬伏徹志，山下忠道：軸力伝達機構を有す粘弾性ダンパースステムの開発（その 2. アウトフレーム制震補強工法への適用），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）C-2，pp637～638，2010. 9
- 8) 建築技術性能証明評価概要報告書：「超高減衰型粘弾性ダンパースステム（改定）」，SRI ハイブリッド株式会社，日本建築総合試験所，2009. 5
- 9) 笠井和彦，寺本道彦，大熊潔，所健：粘弾性体の温度・振動数・周波数依存性を考慮した構成則（その 1 線形領域における温度・振動数依存性のモデル化），日本建築学会構造系論文集，第 543 号，pp77～86，2001. 5
- 10) 谷翼，辻聖晃，吉富信太，竹脇出，松本達治：高硬度ゴム粘弾性体の極微小変形から大変形までのひずみ・振動数依存性のモデル化，日本建築学会構造系論文集，第 629 号，pp1079～1086，2008. 7

付録 1 粘弾性ダンパーの三要素モデル係数の調整

本研究で用いた粘弾性体のせん断面積が 40mm×40mm、厚さ 8mm の材料試験体にて図 1A に示すような一軸二面せん断試験を行い粘弾性体の粘性要素および弾性要素の低減係数について検討を行っている。尚、載荷条件は、粘性要素の検討については、粘弾性体の厚さに対して±300%振幅（4 サイクル）の三角波加振を 0.01mm/s～200mm/s の計 6 ケースで行い、弾性要素の低減係数の検討については、粘弾性体の厚さに対して±10%～±300%～±10% 振幅（各振幅 2 サイクル）の漸増漸減載荷を周波数 0.01Hz、0.1Hz の計 2 ケースで行った。

図 1A 一軸二面せん断試験

(1) 粘性要素

各試験より得られた復元力特性の切片荷重について、0.01mm/s を静的載荷として各振幅時の 0.01mm/s 載荷との差を「付加される切片荷重」として算出し、その値を粘弾性体の断面で除して「付加される切片応力」とした。また、図 2A に示すその時の速度である歪み速度との関係について最小二乗法により近似式(1A)を求め、粘性要素の応力-歪み速度式を決定した。

$$\text{粘性要素：} \quad \tau_3 = 0.0936 \cdot \dot{\gamma}^{0.25} \quad (1A)$$

図 2A 粘性要素

(2) 弾性要素の低減係数

各試験より得られた復元力特性の等価剛性について、(1)と同様に 0.01Hz を静的載荷として「付加される剛性」を算出し、最大振幅 300%歪みを経験することによる「付加される剛性」の低減率を求めた。「付加される剛性」の低減率を弾性要素の低減係数 α_2 とし、図 3A の縦軸に α_2 、横軸に経験最大振幅 α_{max} と変位が反転する歪み α_{re} の割合 α （ $\alpha = \alpha_{max} / \alpha_{re}$ ）を示す。この図より付加される剛性に低減がほとんどないので、 $\alpha_2 = 1.0$ とした。

図 3A 弾性要素の低減係数

[2011 年 1 月 20 日原稿受理 2011 年 5 月 10 日採用決定]