

格子材の剛度が異なる格子型制振壁システムの載荷実験

Experimental study on behavior of lattice damping wall system with the different lattice stiffness

○鈴木 壮^{*1} 濱野 真行^{*2} 鈴木 琢也^{*3} 薩川 恵一^{*4}
Soh SUZUKI^{*1} Masayuki HAMANO^{*2} Takuya SUZUKI^{*3} Keiichi SATSUKAWA^{*4}

ABSTRACT Lattice damping wall system using torsional steel tubes is studied., Circular steel tubes at crossing position of vertical and horizontal members in this system absorb seismic energy by torsional deformation. Former study is expressed in the formula for evaluating elastic stiffness considered lattice members. However, the case of different lengths about lattice members is not proposed. So, this study proposes the formula for evaluating elastic stiffness in the case this system has the different lengths. Then, validity of the formula is verified by experiment.

Keywords : 制振壁, 鋼管, 振り, せん断降伏耐力, 載荷実験

Damping wall, Steel tube, Torsion, Shear yield strength, Static loading test

1. はじめに

円形鋼管に繰返し振りモーメントを加えた場合、鋼管全断面積がせん断変形することにより安定的なエネルギー吸収をすることが知られている。また、円形鋼管はシェル状であるため平板にせん断力を加える場合に比べて、大きなひずみに対して座屈しにくいという利点を有している。これらの特性を活かして、円形鋼管の振れ変形を利用したダンパーの提案が行われている^[1,2]。

既往の研究では、図1のような円形鋼管(以下、鋼管)の特性を活かした格子型制振壁システム(以下、本システム)の提案が行われている。本システムは鉛直材及び水平材(以下、格子材)を格子状に配置し、交差部に鋼管を挿入している。本シ

ステムに水平力を加えた場合、格子材が十分な剛度を有しておれば、変形は鋼管に集中し配置したすべての鋼管が同じ振り角を生じることとなる。鋼管の振り挙動が安定的であれば、本システムは安定的なエネルギー吸収能力を発揮するであろう。

文献[3]では、本システムの鋼管単体における性能について評価しており、複数の鋼管を配置した場合の検討は行われていない。また本システムの弾性剛性の評価において、格子材を剛としているため鋼管の振り剛性のみで評価している。しかし、格子材も弾性体であるため変形が発生し弾性剛性を正確に評価できない。

そこで文献[4]では、複数の円形鋼管を配置した場合の本システムの載荷実験及び数値解析を行い、設置した各鋼管がほぼ同じ履歴挙動を示すことを明らかにしている。また、鋼管の振り変形に加え、格子材の曲げ変形及びせん断変形を考慮した弾性剛性評価式及び全塑性耐力評価式の2式を提案し、実験結果及び解析結果により評価式の妥当性を示している。しかし、提案された評価式は格子材における鋼管間距離を同一としているため、鉛直材と水平材で鋼管間距離を変え、格子材の剛度を変えた場合の検証は行われていない。

そこで本研究では、文献[4]で示された2つの評価式を、剛度の異なる格子材で構成された場合を考慮した式に修正し、載荷実験によりその妥当性を検証することを目的とする。

^{*1} 准会員 (学生)

学士(工学) 愛知工業大学大学院 工学研究科
建設システム工学専攻

(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

^{*2} 愛知工業大学 工学部建築学科 元学生

(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

^{*3} 第1種正会員

博士(工学) 竹中工務店 技術研究所

(〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

^{*4} 第2種正会員

博士(工学) 愛知工業大学 工学部建築学科
教授

(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

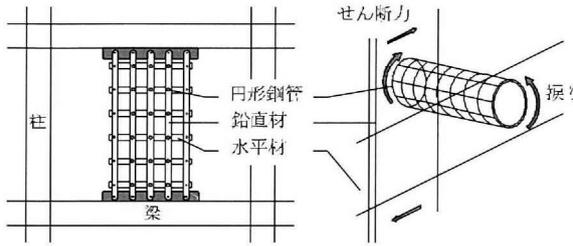


図1 提案する格子型制振壁システム

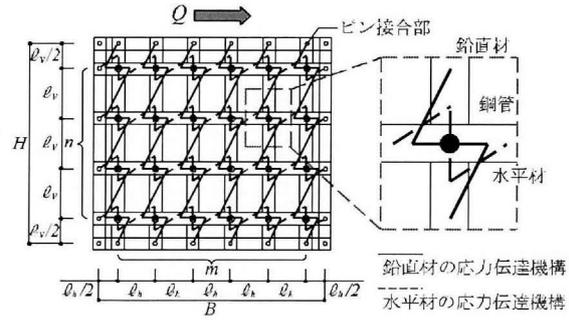


図2 本システムの応力伝達機構

2. 本システムの全塑性耐力評価式と弾性剛性評価式の導出

2.1. 本研究で提案する本システムの検討モデル

図2に本システムの応力伝達機構を示す。●は鋼管，○はピン接合部を示す。実線は鉛直材，点線は水平材の応力伝達機構を示す。

格子材の上下左右を剛な部材で囲み，格子材と剛な部材はピン接合する。既往の研究^[4]では，鋼管間距離を同一としているが，本研究では，鉛直方向と水平方向で鋼管間距離を変え，格子材の剛度が異なる場合を検証するため，鋼管間距離は鉛直方向を l_v ，水平方向を l_h とする。また鋼管が負担する振りモーメントが均一となるように各格子材において，鋼管間の部材中央が反曲点となるように，鋼管とピン接合部との距離は各鋼管間距離の半長とする。水平材の本数を n 本，鉛直材の本数を m 本とし，鋼管総数は $n \times m$ 個とする。壁高さを H ，壁幅を B とする。

2.2. 本システムの全塑性耐力評価式の導出

本システムの全塑性耐力評価式を導出する。図3(a)に全塑性耐力評価式の導出モデルを示す。格子材を剛と仮定した場合，鋼管の振り角 θ と壁のせん断変形角 $\gamma_{h(\theta)}$ が等しくなる。壁のせん断力 ${}_cQ_h$ と水平変位 $\delta_{h(\theta)}$ の積で求まる外部仕事と，鋼管の振りモーメント M_t と振り角 θ との積で求まる内部仕事による力のつり合いは式(3)で表される。本研究で使用する記号のパラメータは巻末に示す。

$$\theta = \gamma_{h(\theta)} \quad (1) \quad \delta_{h(\theta)} = H \cdot \theta \quad (2)$$

$${}_cQ_h \cdot \delta_{h(\theta)} = n \cdot m \cdot M_t \cdot \theta \quad (3)$$

式(1), (2), (3)より本システムの壁のせん断力 ${}_cQ_h$ は式(4)で表される。

$${}_cQ_h = \frac{\sum M_t}{H} = \frac{n \cdot m \cdot M_t}{H} \quad (4)$$

鋼管単体の全塑性振りモーメント ${}_cM_{tp}$ は式(5)で表される。式(4), (5)より本システムの壁の全塑性耐力 ${}_cQ_{hp}$ は式(6)で表される。

$${}_cM_{tp} = 2\pi \cdot \left(\frac{D'}{2}\right)^2 \cdot t \cdot \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

$${}_cQ_{hp} = \frac{n \cdot m \cdot {}_cM_{tp}}{H} \quad (6)$$

2.3. 本システムの弾性剛性評価式の導出

次に本システムの弾性剛性評価式を導出する。以下の手順により行う。

- ① 格子材を剛として，円形鋼管の振り変形から壁の水平変位 $\delta_{h(\theta)}$ を導出する。
- ② 円形鋼管及び水平材を剛として，鉛直材の曲げ変形及びせん断変形から壁の水平変位 $\delta_{h(l)}$ を導出する。
- ③ 円形鋼管及び鉛直材を剛として，水平材の曲げ変形及びせん断変形から壁の水平変位 $\delta_{h(v)}$ を導出する。
- ④ ①～③で導出した水平変位の合計を壁全体の水平変位 δ_h として，壁のせん断力 ${}_cQ_h$ との関係から壁のせん断剛性 ${}_cK_y$ を導出する。

- ① 円形鋼管の振り変形による壁の水平変位 $\delta_{h(\theta)}$

図3(a)に導出モデルを示す。鋼管単体に生じる回転剛性 $k_{h(\theta)}$ は式(7)で表される。

$$k_{h(\theta)} = \frac{\pi \cdot G \cdot D'^3 \cdot t}{4h} \quad (7)$$

壁のせん断力 ${}_cQ_h$ と鋼管の振り変形による壁の水平変位 $\delta_{h(\theta)}$ の関係は式(8)で表され，壁のせん断剛性 ${}_cK_{h(\theta)}$ は式(11)で表される。

$${}_cQ_h = {}_cK_{h(\theta)} \cdot \delta_{h(\theta)} \quad (8)$$

$${}_cQ_h = \frac{n \cdot m \cdot k_{h(\theta)}}{H^2} \delta_{h(\theta)} \quad (9) \quad H = n \cdot l_v \quad (10)$$

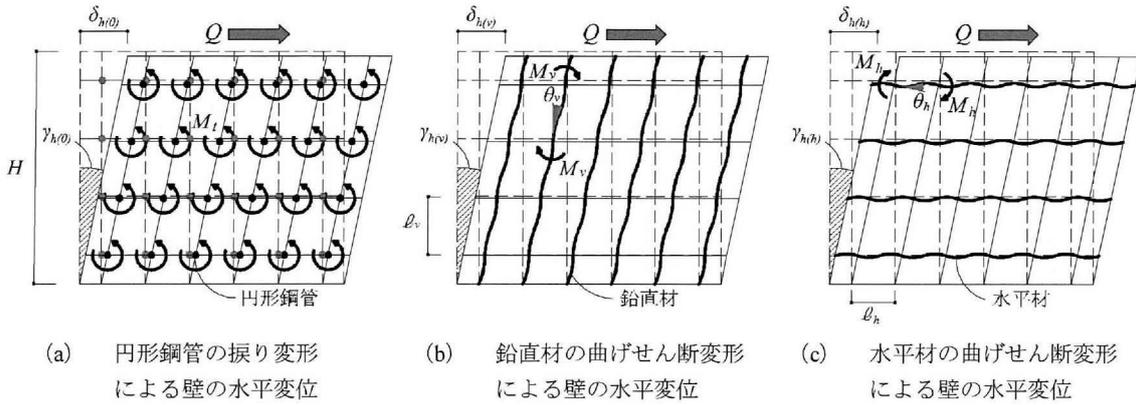


図3 本システムの全塑性耐力評価式と弾性剛性評価式の導出

$${}_c K_{h(\theta)} = \frac{m}{n\ell_v^2} \cdot k_{h(\theta)} \quad (11)$$

② 鉛直材の曲げ変形及びせん断変形による壁の水平変位 $\delta_{h(h)}$

鉛直材の曲げ変形を考える。図3(b)に導出モデルを示す。鋼管間の部材の曲げ変形、鉛直材の曲げ変形をそれぞれ導出し、壁のせん断力 ${}_c Q_h$ と水平変位 $\delta_{h(v)}$ の関係を導出する。各鋼管間の部材の端部モーメント M_v と回転角 θ_v の関係は式(13)で表され、鋼管間の部材の内部仕事は式(14)で表される。

$$\theta_v = \frac{M_v \cdot \ell_v}{6EI} \quad (12) \quad M_v = \frac{6EI}{\ell_v} \theta_v \quad (13)$$

$$2 \cdot M_v \cdot \theta_v = 2 \cdot \frac{6EI}{\ell_v} \theta_v^2; \theta_v = \frac{12EI}{\ell_v} \theta_v^2 \quad (14)$$

壁全体での曲げ変形を考える。鋼管間の部材の回転角 θ_v と壁全体での回転角 $\gamma_{h(v)}$ は等しいことから、内部仕事と外部仕事の関係は式(16)で表される。なお鋼管とピン接合部の長さは鋼管間の部材長さの半長であり、鉛直材1本での鋼管間の部材が n 本であり、鉛直材 m 本が並列配置されていることから、鋼管間の部材は $n \times m$ 本である。式(10), (15), (16)より、壁のせん断力 ${}_c Q_h$ と水平変位 ${}_m \delta_{h(v)}$ の関係は式(17)で表される。

$$\theta_v = {}_m \gamma_{h(v)} = \frac{m \delta_{h(v)}}{H} \quad (15)$$

$${}_c Q_h \cdot {}_m \delta_{h(v)} = n \cdot m \cdot \frac{12EI}{\ell_v} \cdot \frac{1}{2} \theta_v^2 \quad (16)$$

$${}_c Q_h = \frac{m}{n} \cdot \frac{12EI}{\ell_v^3} \cdot {}_m \delta_{h(v)} \quad (17)$$

次に、鉛直材のせん断変形を考える。鉛直材1本の断面積を A とすると、鉛直材の総断面積 A_v は式(18)で表される。壁のせん断力 ${}_c Q_h$ は式(20)で表され、壁のせん断力 ${}_c Q_h$ と水平変位 ${}_s \delta_{h(v)}$ の関係は式(21)で表される。

$$A_v = m \cdot A \quad (18) \quad {}_s \gamma_{h(v)} = \frac{{}_s \delta_{h(v)}}{H} \quad (19)$$

$${}_c Q_h = G \cdot A_v \cdot {}_s \gamma_{h(v)} \quad (20)$$

$${}_c Q_h = \frac{m}{n} \cdot \frac{GA}{\ell_v} \cdot {}_s \delta_{h(v)} \quad (21)$$

以上より、式(17), (21)から鉛直材の曲げ変形及びせん断変形による壁の水平変位の合計は式(22)で表される。壁のせん断力 ${}_c Q_h$ と水平変位 $\delta_{h(v)}$ の関係は式(23)で表され、壁のせん断剛性 ${}_c K_{h(v)}$ は式(24)で表される。

$$\delta_{h(v)} = {}_m \delta_{h(v)} + {}_s \delta_{h(v)} \quad (22)$$

$${}_c Q_h = {}_c K_{h(v)} \cdot \delta_{h(v)} \quad (23)$$

$${}_c K_{h(v)} = \frac{m}{n} \left(\frac{12EI}{\ell_v^3} + \frac{GA}{\ell_v} \right) \quad (24)$$

③ 水平材の曲げ変形及びせん断変形による壁の水平変位 $\delta_{h(h)}$

図3(c)に導出モデルを示す。水平材は、鉛直材と同様の手順で導出する。

壁のせん断力 ${}_c Q_h$ と水平変位 $\delta_{h(h)}$ の関係は式(25)で表され、壁のせん断剛性 ${}_c K_{h(h)}$ は式(26)で表される。

$${}_c Q_h = {}_c K_{h(h)} \cdot \delta_{h(h)} \quad (25)$$

表1 試験体一覧

Name	n	m	$n \times m$	ℓ_h (mm)	ℓ_v (mm)	H (mm)	B (mm)	D (mm)	D' (mm)	t_{pl} (mm)	t (mm)	h (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	
No.1	3	3	9	400	400	1200	1200	48.6	45.4	3.2	16	32	436	471	
No.2	5		15			2000							900	377	446
No.3															

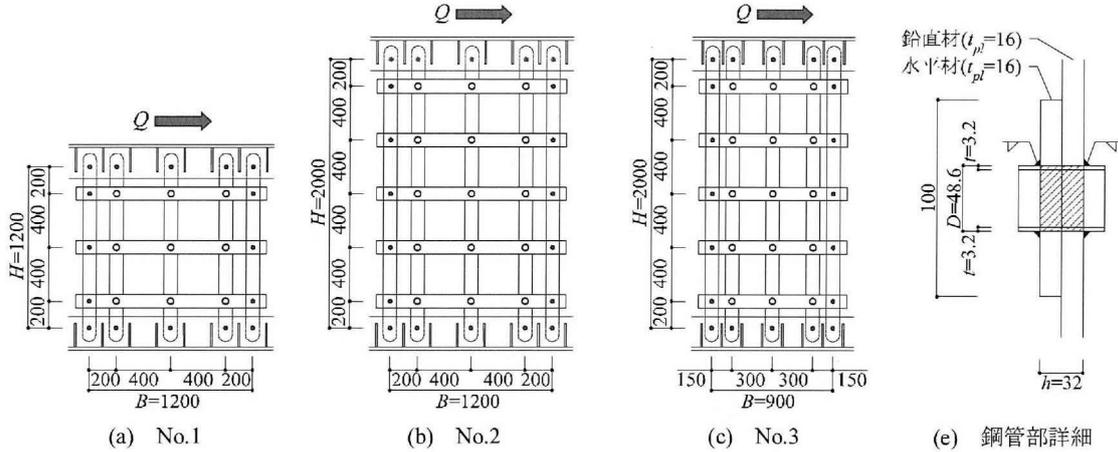


図4 試験体概要

$${}_c K_{h(h)} = \frac{n}{m} \left(\frac{12EI}{\ell_h^3} + \frac{GA}{\ell_h} \right) \quad (26)$$

④ 壁全体の水平変位 δ_h

①～③で導出した水平変位の合計が、壁全体の水平変位 δ_h となり式(27)で表される。壁のせん断力 ${}_c Q_h$ と水平変位 δ_h の関係は式(28)で表され、壁のせん断剛性 ${}_c K_h$ は式(29)で表される。

$$\delta_h = \delta_{h(\theta)} + \delta_{h(v)} + \delta_{h(h)} \quad (27)$$

$${}_c Q_h = {}_c K_h \cdot \delta_h \quad (28)$$

$$\frac{1}{{}_c K_h} = \frac{1}{{}_c K_{h(\theta)}} + \frac{1}{{}_c K_{h(v)}} + \frac{1}{{}_c K_{h(h)}} \quad (29)$$

壁のせん断力 ${}_c Q_h$ とせん断変形角 ${}_c \gamma$ の関係は式(30)で表され、壁のせん断剛性 ${}_c K_\gamma$ は式(31)で表される。

$${}_c Q_h = {}_c K_h \cdot H \cdot \frac{\delta_h}{H} = {}_c K_h \cdot H \cdot {}_c \gamma \quad (30)$$

$${}_c K_\gamma = {}_c K_h \cdot H \quad (31)$$

3. 載荷実験による評価式の妥当性の検証

本研究では2章で提案した全塑性耐力評価式及

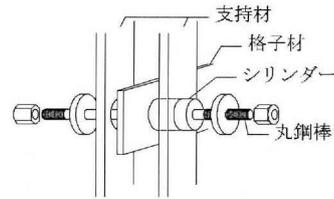


図5 ピン部詳細

び弾性剛性評価式の妥当性を検証するため、剛度の異なる格子材で構成された3体の試験体の載荷実験を行った。

3.1. 試験体概要

表1に試験体一覧を、図4(a), (b), (c)に各試験体の寸法を示す。試験体は配置する鋼管個数及び各格子材の鋼管間距離をパラメータとする。No.1では縦横の鋼管個数を3×3個の同数とし、No.2及びNo.3では縦横の鋼管個数を5×3個とする。格子材の交差部に挿入した鋼管の鋼管間距離は400mmを基本とした。No.3の水平材のみ300mmとし、鋼管間距離を短くすることによって格子材の剛度を変えている。

図4(d)に鋼管の接合部詳細を示す。鋼管は格子材を貫通させて格子材の外側面のみと隅肉溶接している。製作にあたっては薄肉鋼管厚のため溶け落ちないように溶接速度で溶接しており、隅肉溶接サイズは鋼管厚さ t の1.5倍以上を確保して

いる。これにより格子材から伝達する振りモーメントをせん断力 Q により円形鋼管に加えた。鋼管の塑性領域となる箇所は隅肉溶接間(図の斜線部)であり、この長さを鋼管高さ (h) とし、すべての試験体において鋼管高さ $h=32\text{mm}$ としている。すべての格子材は板幅を 100mm 、板厚 (t_{pl}) を 16mm とし、鋼種は SS400 を使用した。また円形鋼管は $\phi 48.6 \times 3.2$ とし、鋼種は STK400 を使用した。

図 5 に格子材と治具のピン接合部の詳細を示す。ピン部回転軸となる丸鋼棒を両側からナットで締め付けるピン接合としている。格子材および治具の板厚分の合計長を有する円筒形のピン孔部にシリンダーを挿入し、治具と格子材が板厚方向に締め付けられないようにしている。

表 1 に実験で使用した材料の素材試験結果を示す。鋼管の降伏応力度 σ_u は素材試験において降伏点が明確でなかったため、0.2% オフセット法で算出している。

3.2. 加力・計測計画

図 6 に荷重装置全体を示す。試験体は治具となる上下の CT 鋼とピン接合させている。加力方法は門型フレームに設置されたアクチュエータにより水平力を作用させ、荷重梁を介して試験体にせん断荷重を加える。なお荷重梁上部の面外変形治具により試験体の面外変形を拘束している。

図 7 に荷重プログラムを示す。荷重は本システムのせん断変形角 (左図の斜線部) e_y が $1/100$, $1/50$, $1/30$, $1/20\text{rad}$. となる水平変位の範囲で各振幅を 2 回ずつ計 8 回繰り返した後、初期荷重方向に $1/10\text{rad}$. まで単調荷重し終局状況を確認する。なお計測器の不具合のため、No.1 の $1/20\text{rad}$. の負側 1 回目は $1/15\text{rad}$. まで荷重している。

図 8 に斜変位計設置位置を示す。せん断変形角 e_y は試験体の隅部ピン接合位置に対角線上に斜変位計を設置し、式(32)により算出している。

$$e_y = \frac{H^2 + B^2 - \delta_{R(L)}}{2 \cdot H \cdot B} \quad (32)$$

各鋼管単体の振りモーメントを推定するにあたり鋼管内にひずみゲージを貼り付けることが困難であったため、鋼管周りの格子材端に貼付け、格子材端部に作用する曲げモーメントを鋼管に作用する振りモーメントとして扱った。

4. 荷重実験結果

図 9 にひずみゲージから算出した荷重-変形関係を示す。点線は 2 章の式 (6) から算出した全塑

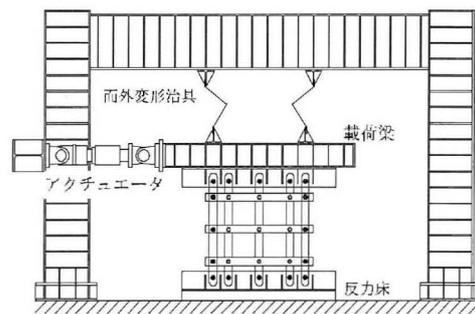


図 6 荷重装置全体

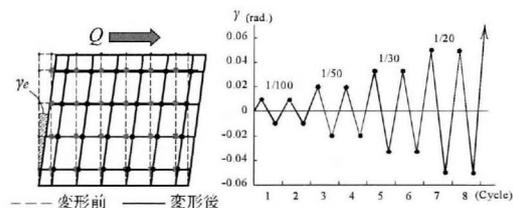


図 7 荷重プログラム

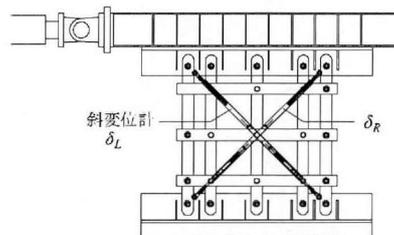


図 8 変位計設置位置

性耐力 cQ_{hp} を示す。計測機器の制限により、No.1 では図 9 上部の点線で囲まれた 4 つの鋼管、No.2 及び No.3 では 6 つの鋼管近傍にひずみゲージを貼付け、計測を行った。ひずみゲージからのせん断荷重の算出方法は、No.1 では壁の隅部に位置する鋼管①のねじり荷重を 4 倍、壁の外端辺に位置する鋼管②及び③はそれぞれ 2 倍、さらに壁中央に位置する鋼管④のねじり荷重を合算して壁高さ H で割っている。No.2 及び No.3 も同様の方法で算出している。No.1 では、せん断変形角 e_y が $1/20\text{rad}$. までせん断耐力は低下しておらず、全塑性耐力で降伏し始め、紡錘形の安定した履歴挙動を示した。また 8 回目以降に行った単調荷重では、せん断変形角 e_y が $1/10\text{rad}$. までせん断耐力は維持していた。No.2 及び No.3 も安定した履歴挙動を示した。剛度の異なる格子材を用いた場合でも安定的なエネルギー吸収を行った。

表 2 に修正した評価式より算出した計算値 (cQ_{hp}) と実験結果から得られた実験値 (cQ_{hp}) の全塑性耐力の比較を示す。図 9 に示す荷重-変形関係から

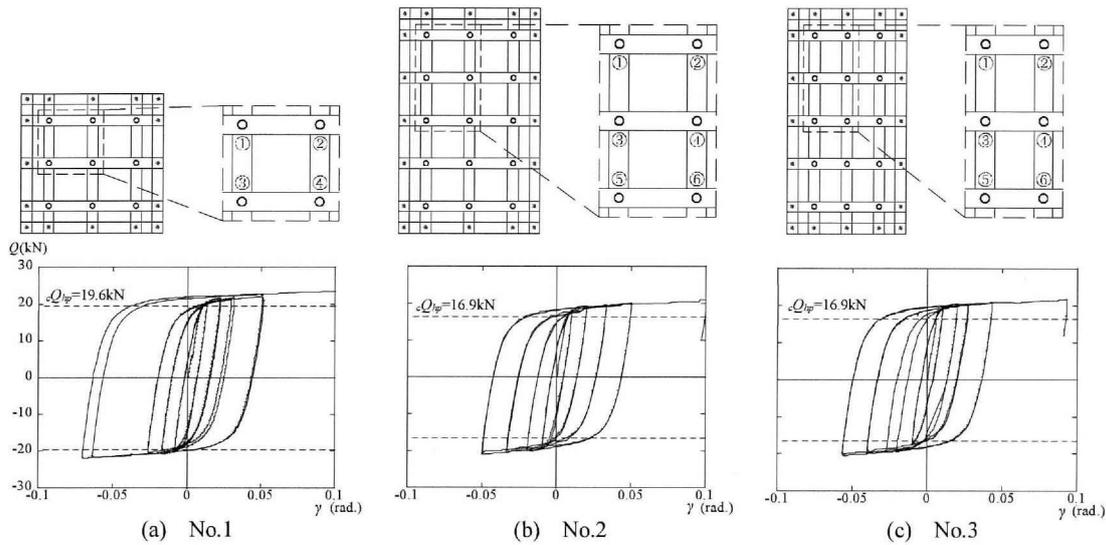


図9 荷重-変形関係

表2 実験結果一覧

Name	cM_{fp} (kN・m)	cQ_{hp} (kN)	eQ_{hp} (kN)	eQ_{hp}/cQ_{hp}	$cK_{h(\theta)}$ (kN/mm)	$cK_{h(h)}$ (kN/mm)	$cK_{h(v)}$ (kN/mm)	cK_{γ} (kN/rad.)	eK_{γ} (kN/rad.)	eK_{γ}/cK_{γ}
No.1	2.61	19.6	18.2	0.93	3.6	44.1	44.1	3682	3401	0.92
No.2	2.26	16.9	16.8	0.99	2.1	73.5	58.9	4015	3654	0.91
No.3			16.7	0.98	2.1	73.5	112.3	4081	3843	0.94

general yield 法を用いて、接線剛性が初期剛性の1/8となる点を降伏点とし、実験による全塑性耐力(eQ_{hp})を算出した。実験値(eQ_{hp})と計算値(cQ_{hp})の全塑性耐力比(eQ_{hp}/cQ_{hp})は9割強の値であり、修正した全塑性耐力評価式は有効であると考えられる。

すべての試験体において、本システムに配置した複数の円形鋼管はほぼ同時に降伏し、安定した履歴挙動を示していた。塑性化後も緩やかに耐力が上昇しており、鋼管の配置によらずに複数の円形鋼管は同じ挙動を示していた。

表2に2章で提案した評価式による計算値と実験で得られた実験値の弾性剛性値の比較を示す。実験値(eK_{γ})と計算値(cK_{γ})との弾性剛性比(eK_{γ}/cK_{γ})は9割強の値であり、修正した弾性剛性評価式も有効であると考えられる。載荷時に治具部分に多少の変形が生じたため、計算値と実験値では1割弱の誤差が生じたのではないかと考えられる。

5. おわりに

本研究では、文献[4]で示された全塑性耐力評価式及び弾性剛性評価式を剛度の異なる格子材で構成された場合を考慮した式に修正し、載荷実験によりその妥当性を検証した。得られた知見を以下

に示す。

- ・ 載荷実験を行った3つの試験体は、文献[3]で示された評価式で算出した全塑性耐力 cQ_{hp} で降伏し始め、紡錘形の安定した履歴挙動を示した。剛度の異なる格子材を用いた場合も安定的なエネルギー吸収を行った。
- ・ 本システムに配置した複数の円形鋼管はほぼ同時に降伏し、安定した履歴挙動を示した。塑性化後も緩やかに耐力が上昇した。
- ・ 修正した弾性剛性評価式から得られた計算値と実験から得られた実験値の弾性剛性比は9割強であり、よい対応を示した。

参考文献

- [1] 青木徹彦, 鈴木森晶: 鋼管を用いた弾塑性ねじりダンパー特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.889-905, 1998.3
- [2] 清川省吾, 谷中聡久, 尾下里治, 佐野泰治: 鋼管の振りを利用した鋼材ダンパーの開発, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.1119-1120, 2010.9
- [3] 鈴木琢也, 山崎賢二: 鋼管振りダンパーを利用した格子型制振壁システムにおける安全履歴のための限界幅厚比に関する解析的検討, 構造工学論文集第22巻第86号, pp.47-55, 2015.6
- [4] 福永雄大, 金子洋文, 鈴木琢也, 山崎賢二, 稲葉澄: 交差位置に鋼管を設けた格子型制振壁システムの静的復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.756, pp.291-299, 2019.2

本研究で使用した記号のパラメータ

n : 鋼管個数(鉛直方向)	σ_y : 鋼管の降伏応力度
m : 鋼管個数(水平方向)	σ_u : 鋼管の引張強さ
ℓ_v : 鋼管間距離(鉛直方向)	A : 鉛直材1本の断面積
ℓ_h : 鋼管間距離(水平方向)	A_v : 鉛直材の総断面積
H : 壁高さ	γ : 壁のせん断変形角
B : 壁幅	θ : 鋼管の振り角
D : 鋼管の外径	θ_v : 鉛直材の振り角
D' : 鋼管の板厚中心間距離	θ_h : 水平材の振り角
t : 鋼管の板厚	${}^cQ_{hp}$: 壁の全塑性耐力
h : 鋼管高さ	cQ_h : 壁のせん断力
${}^cM_{\phi}$: 鋼管単体の全塑性振りモーメント	
M_t : 鋼管の振りモーメント	E : ヤング係数
M_v : 鉛直材の振りモーメント	G : せん断弾性係数
M_h : 水平材の振りモーメント	I : 断面2次モーメント
δ_h : 壁の水平変位	${}^cK_{\gamma}$: 壁のせん断剛性
$\delta_{h(\theta)}$: 鋼管の振り変形による壁の水平変位	
$\delta_{h(v)}$: 鉛直材の曲げせん断変形による壁の水平変位	
$\delta_{h(h)}$: 水平材の曲げせん断変形による壁の水平変位	
${}^cK_{h(\theta)}$: 鋼管の振り変形による壁のせん断剛性	
${}^cK_{h(v)}$: 鉛直材の曲げせん断変形による壁のせん断剛性	
${}^cK_{h(h)}$: 水平材の曲げせん断変形による壁のせん断剛性	