

鋼管を並列配置した格子型制振壁システムに関する実験的研究

Experimental study of Lattice damping wall system with multi layer type

○鈴木 壮^{*1} 鈴木 琢也^{*2} 薩川 恵一^{*3} 鈴木 敏志^{*4}
Soh SUZUKI^{*1} Takuya SUZUKI^{*2} Keiichi SATSUKAWA^{*3} Satoshi SUZUKI^{*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 Circular steel tubes arranged in parallel is not proposed. So, this study proposes the formula for evaluating elastic stiffness in the case this system has multi layer type. Then, validity of the formula is verified by experiment.

Keywords : 制振壁, 鋼管, 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

制振構造の主たるデバイス装置である鋼製制振部材には、ブレース型制振部材とパネル型制振部材の2種類に大別される。

現在、円形鋼管(以下、鋼管)の振り特性を生かした新たな制振壁システムの提案が行われている。提案されている格子型制振壁システム(以下、本システム)は、鉛直材と水平材(以下、格子材)を格子状に配置し、その交差部に円形鋼管を挿入した構成である。本システムに水平力が作用した場合、格子材がせん断変形し、交差部に回転力が加わることにより、鋼管に振りモーメントを作用させ、エネルギー吸収する仕組みである。

本システムの特徴は、鋼管の鋼材種およびサイ

^{*1} 第2種正会員

修士(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} 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)

^{*3} 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)

^{*4} 非会員

博士(工学) 愛知工業大学 工学部建築学科 講師
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

ズを選定することにより、本システムのせん断降伏応力度および弾性剛性がフレキシブルに対応可能である、また、鋼管の配置により、壁空間に開口部を設けることが可能である。

既往の研究[1]では、複数の円形鋼管を配置した本システムの載荷実験および数値解析により、配置した各鋼管がほぼ同じ履歴挙動を示すことが明らかとなっている。また鋼管の振り変形に加え、格子材の曲げ変形およびせん断変形を考慮した弾性剛性評価式および全塑性耐力評価式の2式の提案を行い、実験結果および数値解析により評価式の妥当性を示している。さらに、文献[2]では、格子材の剛度を変化させた場合の本システムの載荷実験を行い、本システムが安定的にエネルギー吸収することを明らかにしている。

しかし、より高いせん断力および弾性剛性が必要な場合、壁の面方向に鋼管を増やすと、壁空間に開口部を設けることが困難となることが想定される。そこで本研究では、奥行方向に鋼管を並列配置し、本システムのせん断耐力を上昇させ、壁空間に開口部を設けることを可能とした本システムの提案を行い、載荷実験によりエネルギー吸収能力を検証することを目的とする。また、文献[1]で示された2つの評価式を準用し、鋼管を並列配置させた場合の式を導出し、実験結果との比較により評価式の妥当性を検証することを目的とする。

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に本システムの概要およびモーメント分布を示す。●は鋼管，○はピン接合部を示す。実線は鉛直材，点線は水平材に作用する曲げモーメント分布を示す。

本システムは格子材の四辺端を支持材で囲み，格子材の端部と支持材はピン接合する。本研究では，配置した鋼管が同じ履歴挙動を示す機構とし，挿入する鋼管はすべて同一サイズとする。また鋼管近傍に作用する格子材の曲げモーメントにおいて，鉛直材の上下および水平材の左右がそれぞれ同じとなるように鋼管を配置する。鋼管とピン接合部の距離は鋼管間距離の半長とする。

図3に本研究で提案する2種類の方式を示す。図3(a)に示す Single Layer 方式(以下, SL 方式)は，格子材の交差部に鋼管を挿入した単層方式である。図3(b)に示す Multi Layer 方式(以下, ML 方式)は，鋼管を奥行方向に複数個並列配置した複層方式である。鋼管を i 個並列配置することで，本システムのせん断耐力を i 倍とすることを目的とする。

格子材の並列層数は鉛直材を p 層，水平材を q 層とし，格子材の本数は鉛直材を $p \times m$ 本，水平材を $q \times n$ 本とする。鋼管の並列層数を i 層とし，鋼管総数は $i \times n \times m$ 個とする。格子材における鋼管間距離は鉛直方向を L_v ，水平方向を L_h とする。壁高さは H ，壁幅は B とする。

2.2 本システムの全塑性耐力評価式の導出

本研究で提案する2種類の方式において，本システムのせん断降伏耐力評価式を導出する。

格子材を剛と仮定すると，各鋼管の振り角 θ_i と壁のせん断変形角 $\gamma_{h(\theta)}$ は等しくなる。壁のせん断力 Q_h と水平変位 $\delta_{h(\theta)}$ の積で求まる外部仕事と各鋼管の振りモーメント M_i と振り角 θ_i との積で求

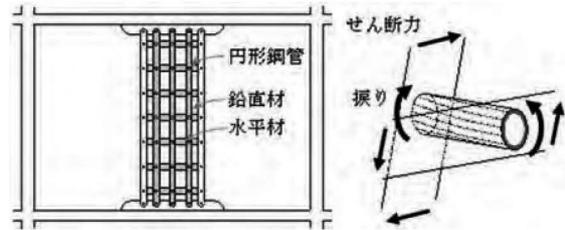


図1 提案する格子型制振壁システム

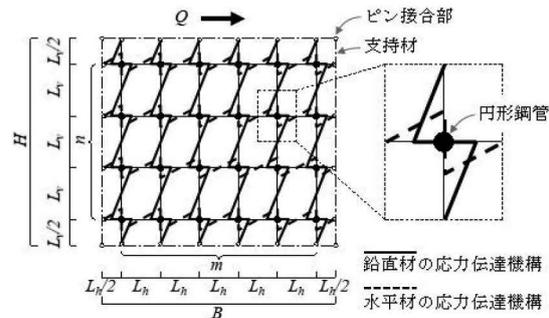


図2 本システムの概要

まる内部仕事による力のつり合いは式(3)で表される。なお，本研究で使用する記号のパラメータは巻末に示す。

$$\theta_i = \gamma_{h(\theta)} \quad (1)$$

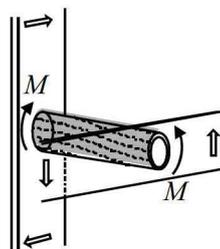
$$\delta_{h(\theta)} = H \cdot \theta_i \quad (2)$$

$$Q_h \cdot \delta_{h(\theta)} = i \cdot n \cdot m \cdot M_i \cdot \theta_i \quad (3)$$

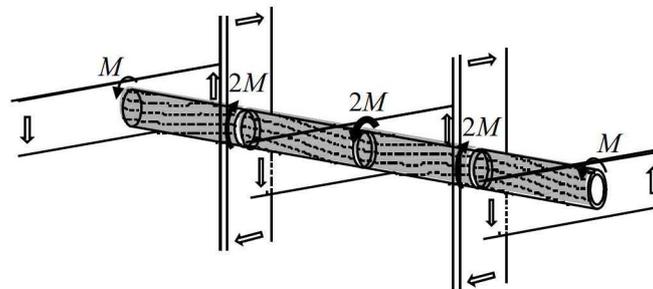
式(1)～(3)より壁のせん断力 Q_h は式(4)で表される。

$$Q_h = \frac{\sum M_i}{H} = \frac{i \cdot n \cdot m \cdot M_i}{H} \quad (4)$$

鋼管単体の全塑性振りモーメント M_{ip} 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 Q_{hp} は式(6)で表される。



(a) Single Layer 方式



(b) Multi Layer 方式

図3 提案する2種類の方式

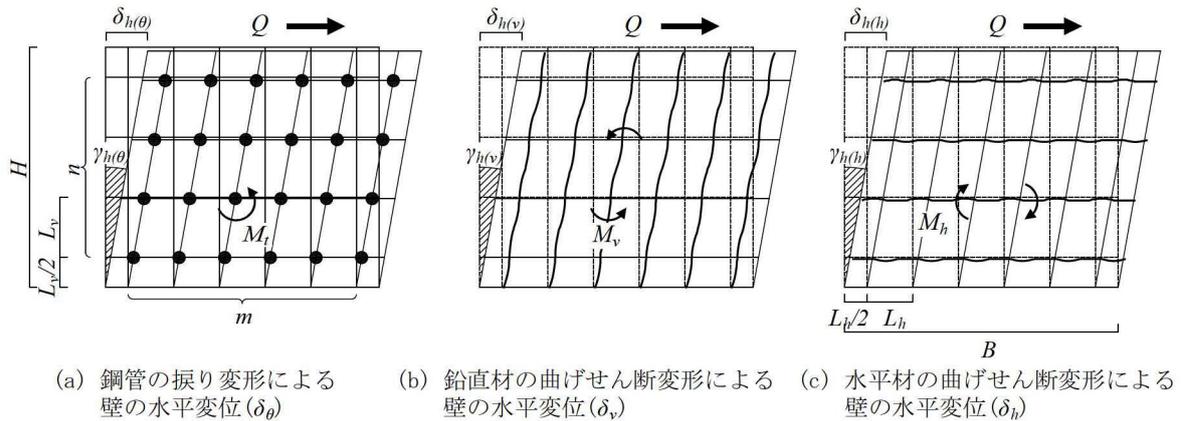


図4 評価式の導出モデル

$${}_cM_{tp} = 2\pi \cdot \left(\frac{D^3}{2}\right)^2 \cdot t \cdot \frac{t \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$H = n \cdot L_v \quad (10)$$

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

$${}_cK_{h(\theta)} = i \cdot \frac{m}{n \cdot L_v^2} \cdot k_{h(\theta)} \quad (11)$$

2.3 本システムの弾性剛性評価式の導出

本システムの弾性剛性評価式を導出する。導出は以下の手順により行う。

- ① 格子材を剛として、円形鋼管の捩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 $\delta_{h(v)}$ 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 $\delta_{h(h)}$ 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 円形鋼管の捩り変形による壁の水平変位 $\delta_{h(\theta)}$

図4(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 ${}_cQ_h$ と鋼管の捩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。

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

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

- 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 $\delta_{h(v)}$

鉛直材の曲げ変形を考える。図4(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導出し、壁のせん断力 ${}_cQ_h$ 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。

$$\theta_v = \frac{M_v \cdot L_v}{6EI_v} \quad (12)$$

$$M_v = \frac{6EI_v}{L_v} \theta_v \quad (13)$$

$$2 \cdot M_v \cdot \theta_v = 2 \cdot \frac{6EI_v}{L_v} \theta_v \cdot \theta_v = \frac{12EI_v}{L_v} \theta_v^2 \quad (14)$$

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。また、鉛直材の並列層数が p 層であることから、鋼管間の部材は $p \times n \times m$ 本である。式(10)、(15)、(16)より、壁のせん断力 ${}_cQ_h$ と水平変位 ${}_m\delta_{h(v)}$ の関係は式(17)で表される。

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

$${}_c Q_h \cdot m \delta_{h(v)} = p \cdot n \cdot m \cdot \frac{12EI_v}{L_v} \cdot m \gamma_{h(v)}^2 \quad (16)$$

$${}_c Q_h = p \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{12EI_v}{L_v^3} \cdot m \delta_{h(v)} \quad (17)$$

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_v とすると、鉛直材の総断面積 $all A_v$ は式(18)で表される。壁のせん断力 ${}_c Q_h$ は(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。

$$all A_v = m \cdot A_v \quad (18)$$

$${}_s \gamma_{h(v)} = \frac{{}_s \delta_{h(v)}}{H} \quad (19)$$

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

$${}_c Q_h = p \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{GA_v}{L_v} \cdot {}_s \delta_{h(v)} \quad (21)$$

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。

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

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

$${}_c K_{h(v)} = p \cdot \frac{m}{n} \left(\frac{12EI_v}{L_v^3} + \frac{GA_v}{L_v} \right) \quad (24)$$

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 4(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。

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

$${}_c K_{h(h)} = q \cdot \frac{n}{m} \left(\frac{12EI_h}{L_h^3} + \frac{GA_h}{L_h} \right) \quad (26)$$

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。

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

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

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

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 ${}_c K_y$ は式(31)で表される。

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

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

3. 載荷実験による評価式の妥当性の検証

本研究では前章で導出した全塑性耐力評価式および弾性剛性評価式の妥当性を検証するため、3体の試験体を用意し、載荷実験を行った。

3.1 試験体概要

表 1 に試験体一覧、図 5 に試験体寸法を示す。本研究では鋼管の並列層数 i をパラメータとする。

鋼管の並列層数 i は、試験体 SL-1 を 1 層とし、試験体 ML-1 を 2 層、試験体 ML-2 を 4 層とする。

格子材は PL-16×100 を使用し、鋼材種は SS400 を使用した。円形鋼管は Φ -48.6×3.2 を使用し、鋼材種は STK400 を使用した。配置する鋼管個数は縦横 3×3 個とする。鋼管の隅肉溶接間(図の塗潰部)を鋼管の変形領域とし、この長さを鋼管長さ h とする。

3.2 加力・計測計画

図 6 にピン接合部詳細、図 7 に載荷装置を示す。試験体は治具となる上下の CT 鋼とピン接合する。ピン接合部は、ピン部回転軸となる中実円棒を両側からナットで締め付ける。治具と格子材が板厚方向に締め付け過ぎを防ぐため、治具と格子材の板厚の合計長さを有する円筒形のシリンダーを挿入している。載荷は、門型フレームに設置したアクチュエータにより載荷梁に水平力を作用させ、試験体にせん断力を加える。なお試験体の面外変形は、載荷梁上部の面外変形治具により拘束する。

図 8 に本実験での載荷プログラムを示す。載荷は本システムのせん断変形角(${}_c \gamma$: 左図の斜線部)が 1/100, 1/50, 1/30, 1/20 [rad.] となる水平変位の範囲で

表 1 試験体一覧

Name	鋼種		n	m	i	p	q	H	B	L _v	L _h	t _{PL}	D	D'	t	h	σ _y	σ _u	tσ _y	tσ _u
	格子材	鋼管																		
SL-1	SS400	STK400	3	3	1	1	1	1200	1200	400	400	16	48.6	45.4	3.2	32	286	435	339	471
ML-1					2	2	1													
ML-2					4	2	3													

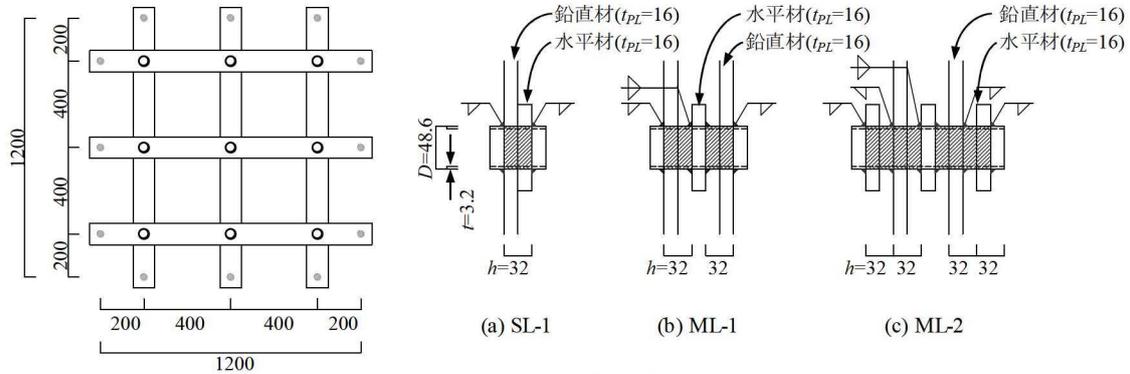


図 5 試験体寸法

各振幅を正負 2 回ずつ計 8 回繰り返した後、初期
載荷方向に 1/10[rad.]まで単調載荷を行う。

図 7 に本システムのせん断変形角 $e\gamma$ を計測する
ため、斜変位計設置位置を示す。斜変位計は、試
験体の隅部のピン接合部位置に対角線上に設置し、
本システムのせん断変形角 $e\gamma$ は式(32)より算出し
ている。

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

図 9 に各鋼管のひずみゲージ添付位置を示す。
各鋼管単体に作用する振りモーメントを推定する
にあたり、鋼管内部にひずみゲージを添付するこ
とが困難であったため、鋼管周りの格子材端に 4
枚のひずみゲージ添付し、格子材端に作用する曲
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。添付したひずみゲージより、格子材
に作用するせん断力および曲げモーメントを算出
する。せん断力は、曲げモーメントをひずみゲ
ージ添付間距離で除して、式(34)より算出する。曲
げモーメントは、せん断力に鋼管中心-反曲点間距
離を乗じて、式(36)より算出する。

$${}_n M_{eR(L)} = \frac{|\epsilon_{R(L)1}| + |\epsilon_{R(L)2}|}{2} \times \frac{I_h}{35} \times E \quad (33)$$

$${}_n Q_h = \frac{{}_n M_{eR(L)} + {}_{n+1} M_{eR(L)}}{L'_h} \quad (34)$$

$$x_h = \frac{{}_n M_{eR}}{{}_n M_{eR} + {}_{n+1} M_{eL}} \times L'_h \quad (35)$$

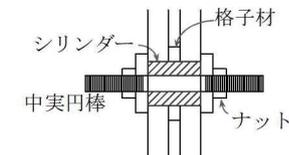


図 6 ピン接合部詳細

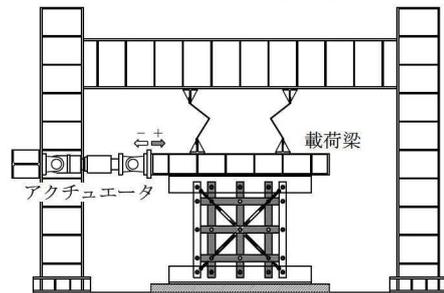


図 7 載荷装置

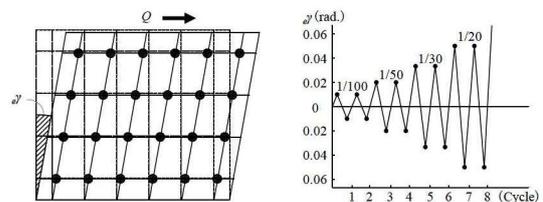


図 8 載荷プログラム

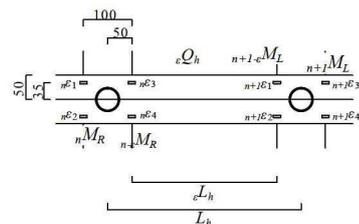


図 9 ひずみゲージ添付位置

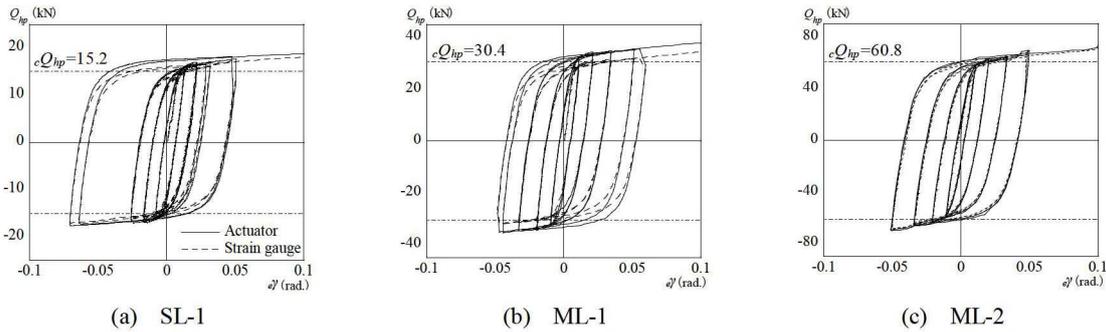


図 10 荷重変形関係

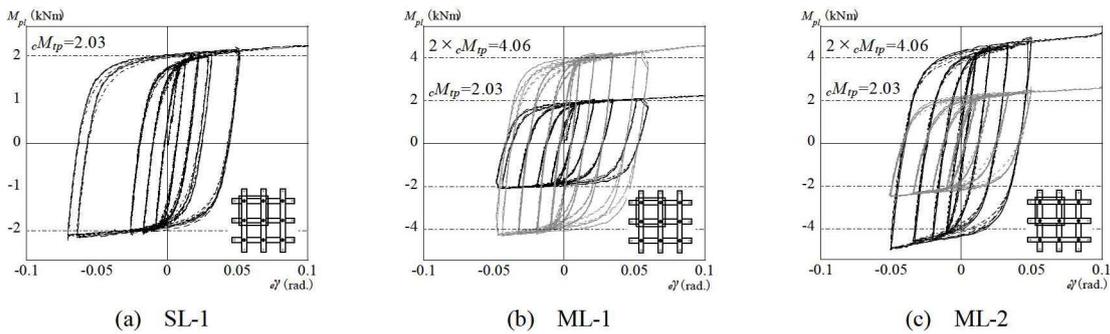


図 11 モーメント変形関係

表 2 実験結果

Name	cM_{tp}	cQ_{hp}	eQ_{hp}	eQ_{hp}/cQ_{hp}	$cK_{h(\theta)}$	$cK_{h(v)}$	$cK_{h(h)}$	cK_{γ}	eK_{γ}	eK_{γ}/cK_{γ}
SL-1	2.03	15.2	15.5	1.02	3.56	44.1	44.1	3.68×10^3	3.50×10^3	0.95
ML-1	2.03	30.4	28.9	0.95	7.12	44.1	88.2	6.89×10^3	6.54×10^3	0.95
ML-2	2.03	60.8	56.4	0.93	14.2	88.2	88.2	12.9×10^3	12.0×10^3	0.93

$${}_n M_{R(L)} = \epsilon Q_h \times x_h \quad (36)$$

本システムの層せん断力は、外部に配置した格子材の鋼管間に作用するせん断力の2倍と内部に配置した格子材に作用するせん断力の合計として式(37)より算出した。

$$eQ_h = 2 \times {}_n Q_h + {}_{n+1} Q_h \quad (37)$$

4. 荷重実験結果

4.1 本システムのエネルギー吸収能力

図 10 に本システムのエネルギー吸収能力を確認するため、各試験体の荷重変形角関係を示す。縦軸はせん断力 eQ_{hp} 、横軸は本システムのせん断変形角 ϕ' を示す。実線はアクチュエータより計測した荷重、点線はひずみゲージより算出したせん断力を示し、一点鎖線は、2 章式(6)より算出した本システムのせん断降伏耐力の計算値を示す。

繰返し荷重において、3 つの試験体はせん断変

形角 1/20[rad.]まで耐力は低下しておらず、式(6)より算出した本システムのせん断降伏耐力で降伏し始め、安定した紡錘形の履歴挙動を示した。また、1/20[rad.]の2 サイクル目以降に行った単調荷重でも、せん断変形角 1/10[rad.]まで耐力は維持していた。アクチュエータより計測した荷重とひずみゲージ算出した層せん断力もほぼ一致し、本システムの安定したエネルギー吸収能力を確認した。試験体 ML-1 は SL-1 の約 2 倍、試験体 ML-2 は約 4 倍のエネルギー吸収能力を発揮した。

4.2 各鋼管の履歴挙動

図 11 に本システムに配置した各鋼管の履歴挙動を確認するため、鋼管近傍に添付したひずみゲージより算出した格子材端に作用する曲げモーメント変形関係を示す。縦軸は格子材の曲げモーメント、横軸は本システムのせん断変形角を示す。また、実線は鉛直材、点線は水平材の鋼管近傍に作用する曲げモーメントを示し、一点鎖線は 2 章式(5)より算出した鋼管単体の全塑性捩りモーメ

ントを示す。なお計測機器の制限により、点線で囲む4つの鋼管近傍にひずみゲージを添付し、計測した。

すべての試験体において、配置した鋼管は式(5)より算出した鋼管単体の全塑性振りモーメントでほぼ同時に降伏し、紡錘形の履歴挙動を示した。鋼管の配置によらず、複数の鋼管は同じ履歴挙動を示した。試験体 ML-1 の水平材には、鉛直材の2倍、試験体 ML-2 の鉛直材には、水平材の2倍の曲げモーメントが作用した。

4.3 評価式の妥当性の検証

表2に2章で導出した評価式の妥当性を検証するため、本システムのせん断降伏耐力および弾性剛性の実験値と計算値の比較を示す。実験値の算出において、せん断降伏耐力は初期勾配と本システムのせん断変形角 $e\gamma$ が $1/100[\text{rad}]$ 時における接線勾配の交点とした。また、弾性剛性は初期勾配から算出した。せん断降伏耐力における実験値と計算値の比は $0.93\sim 1.02$ であり、弾性剛性における実験値と計算値の比は $0.93\sim 0.95$ であった。

5. おわりに

本研究では、既往の研究で示された評価式を準用し、鋼管を奥行方向に並列配置した場合の式を導出し、載荷実験によりその妥当性を検証した。本研究で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、導出し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。
- ・ 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。
- ・ 弾性剛性評価式より算出した計算値と実験値の比は約9割であった。

今後の検討課題

鋼管と格子材の弾性変形量における本システムのエネルギー吸収効率を検討する。

参考文献

- [1] 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
- [2] 鈴木壮,鈴木琢也,薩川恵一,他2名: 格子型制振壁システムの繰返し性能に関する実験的研究, 鋼構造年次論文集, 第26巻, pp.572-579, 2018.11

本研究で使用した記号パラメータ

n	: 鉛直方向の鋼管個数
m	: 水平方向の鋼管個数
i	: 円形鋼管の並列層数
p	: 鉛直材の並列層数
q	: 水平材の並列層数
H	: 壁高さ[mm]
B	: 壁幅[mm]
L_v	: 鉛直方向の鋼管間距離[mm]
L_h	: 水平方向の鋼管間距離[mm]
t_{PL}	: 格子材の板厚[mm]
D	: 円形鋼管の直径[mm]
D'	: 円形鋼管の板厚中心間距離[mm]
t	: 円形鋼管の板厚[mm]
h	: 円形鋼管の高さ[mm]
σ_y	: 格子材の降伏応力度[N/mm ²]
σ_u	: 格子材の引張強さ[N/mm ²]
$t\sigma_y$: 円形鋼管の降伏応力度[N/mm ²]
$t\sigma_u$: 円形鋼管の引張強さ[N/mm ²]
$A_{(v\ or\ h)}$: 格子材1本の断面積[mm ²](v : 鉛直材 h : 水平材)
G	: せん断弾性係数
E	: ヤング率
θ_t	: 円形鋼管の振り角
$e\gamma$: 壁のせん断変形角[rad.]
δ_h	: 壁の水平変位[mm]
M_t	: 円形鋼管の振りモーメント[kNm]
cM_{tp}	: 円形鋼管の全塑性振りモーメント[kNm](c : 計算値)
$(c\ or\ e)Q_{hp}$: 本システムのせん断降伏耐力[kN](c : 計算値 e : 実験値)
$cK_{h(\theta)}$: 円形鋼管の振り変形による壁のせん断剛性[kN/rad.]
$cK_{h(v)}$: 鉛直材の曲げせん断変形による壁のせん断剛性[kN/rad.]
$cK_{h(h)}$: 水平材の曲げせん断変形による壁のせん断剛性[kN/rad.]
$(c\ or\ e)K_\gamma$: 壁のせん断剛性[kN/rad.](c : 計算値 e : 実験値)