

座屈拘束ブレースの実験的研究 —塑性長さの影響—

岩田研究室 200770141 田所 敦志

1. 序

座屈拘束ブレースとは軸方向力を伝達するブレース(以下芯材とする)が座屈しないように拘束材を用いて補剛したものである(図1)。既往の研究^{1)~3)}では座屈拘束ブレースの各種パラメータを変えた実験的研究を行ってきた。得られた結果から、エネルギー性能に着目し、累積塑性歪エネルギーを芯材の降伏変位と降伏荷重で無次元化した累積塑性歪エネルギー率 ω を算出し、 P_E/P_y (P_E :拘束材のオイラー座屈荷重、 P_y :芯材の降伏荷重) との間に(1)式に示す性能評価式を設定した。

$$\omega = 150 \frac{P_E}{P_y} \quad (1)$$

しかし、既往の研究結果は芯材長さに対する塑性化部長さの比(以下、塑性長さ比)を53%とした試験体について行った実験結果であり、座屈拘束ブレースの長さに関するプロポーションを変えたものではない。

近年では座屈拘束ブレースの実物件への適用が増えてきている。特に倉庫などの一般的に階高の大きい建築物では座屈拘束ブレースが長くなり、塑性長さ比は大きい場合80%近くにもなることが想定される。一方で高層ビルなどの建築物では塑性長さ比は30%程度に小さくなるが想定され、実物件に適用する際には塑性長さ比はかなりの幅をもって使用されることになる。座屈拘束

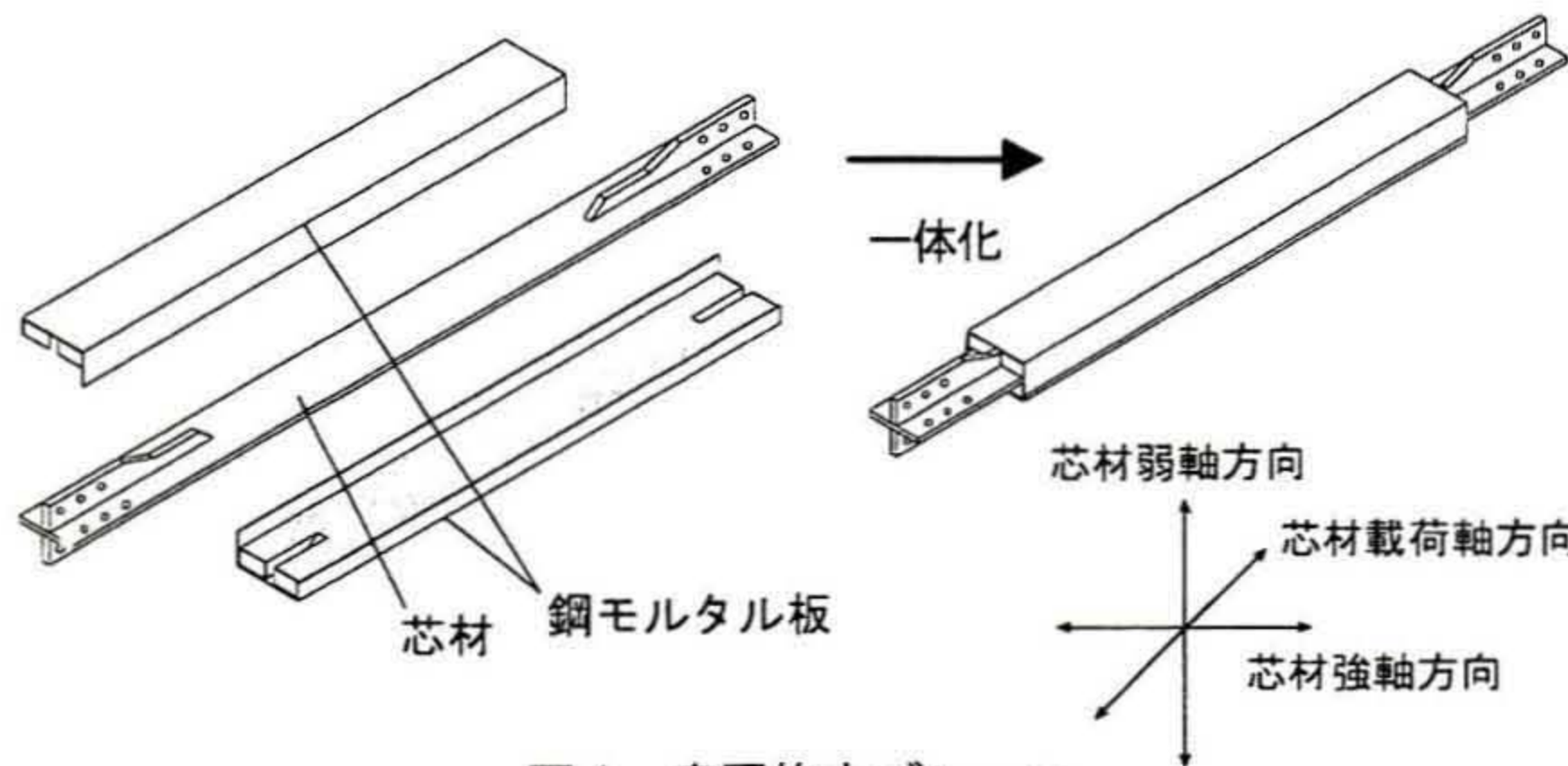


図1 座屈拘束ブレース

ブレースを汎用性を持った制振部材として使用するには、様々な塑性長さ比に対する性能評価式(1)の適用性を検証することが必要である。

本論では、芯材長さ及びリブ長さ起因する塑性長さ比と、 P_E/P_y を変えた試験体について、静的漸増繰返し載荷を行い、各パラメータが塑性変形能力、累積塑性歪エネルギー、復元力特性、破壊性状、芯材最終状態に与える影響について検証する。

2. 実験計画

2.1 試験体の設定

表1に試験体一覧を、図2に試験体の詳細を示す。試験体のパラメータは芯材の塑性長さ比 $\alpha=L_2/L_1$ (塑性化部長さ/芯材長さ)と拘束力 P_E/P_y である。 P_E を算出する際の座屈長さは、芯材長さ L_1 とする。

a) パターン1

リブ長さ L_R を一定とし、芯材長さを変えることにより芯材の塑性長さ比を変える。また、芯材厚さによる影響を調べるため、芯材厚さを16mmと12mmの2種類とする。

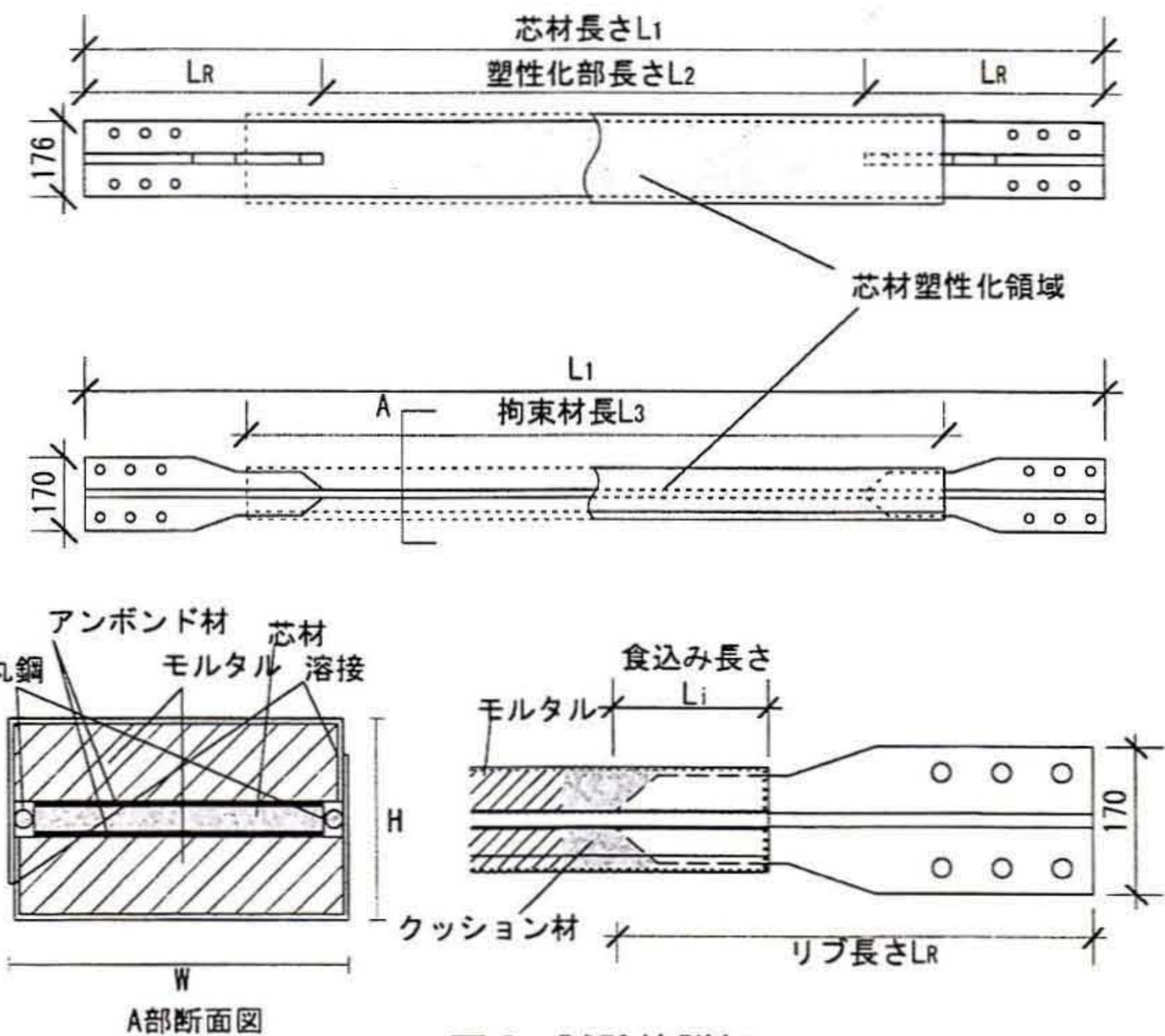


図2 試験体詳細

表1 試験体一覧

パターン	試験体	芯材									拘束材					クリアランス mm	P_E/P_y	L_2/L_1	L_i mm
		鋼種	寸法	断面積 mm ²	幅厚比	P_y kN	L_1 mm	L_2 mm	L_3 mm	L_R mm	W mm	h mm	H mm	$I_x \times 10^4$ mm ⁴	P_E kN				
1	1	①	PL-176×16	2816	11.0	792	2351	1251	1605	550	203.2	50.0	118.0	631	2309	1.0	2.9	53.2	177
	2	②	PL-176×16	2816	11.0	852	1804	704	1022	550	203.2	40.0	98.0	402	2499	1.0	2.9	39.0	159
1・3	3	③	PL-132×12	1584	11.0	458	2351	1511	1797	420	159.2	37.5	89.0	259	949	1.0	2.1	64.3	143
1	4	④	PL-132×12	1584	11.0	466	3765	2925	3197	420	159.2	58.0	130.0	659	940	1.0	2.0	77.7	136
2	5	①	PL-176×16	2816	11.0	792	1644	544	898	550	203.2	50.0	118.0	631	4724	1.0	6.0	33.1	177
	6	⑤	PL-176×16	2816	11.0	763	2351	1251	1605	550	203.2	70.0	140.0	1299	4753	1.0	6.2	53.2	177
3	7	②	PL-132×12	1584	11.0	458	2351	1511	1797	420	159.2	31.0	76.0	177	649	1.0	1.4	64.3	143
	8	②	PL-132×12	1584	11.0	458	2351	1511	1797	420	159.2	53.0	130.0	540	1975	1.0	4.3	64.3	143
	9	②	PL-132×12	1584	11.0	458	2351	1251	1797	550	159.2	37.5	89.0	259	949	1.0	2.1	53.2	243
	10	②	PL-132×12	1584	11.0	458	2351	705	1797	823	159.2	37.5	89.0	259	949	1.0	2.1	30.0	546
	11	②	PL-132×12	1584	11.0	458	2351	705	1797	823	159.2	31.0	76.0	177	649	1.0	1.4	30.0	546
	12	②	PL-132×12	1584	11.0	458	2351	705	1797	823	159.2	53.0	130.0	540	1975	1.0	4.3	30.0	546

表2 材料特性

鋼種	板厚 (mm)	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	降伏歪 (%)
①	16	281.4	445.4	63.2	0.137
②	16	302.7	435.3	69.5	0.148
③	12	289.3	427.1	67.7	0.141
④	12	294.4	432.7	68.0	0.144
⑤	16	270.8	423.2	64.0	0.132

表3 リブ変位誤差

試験体	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
精算(mm)	0.262	0.315	0.136	0.139	0.262	0.253	0.141	0.136	0.136	0.349	0.369	0.349
略算(mm)	0.267	0.328	0.14	0.143	0.267	0.259	0.15	0.141	0.141	0.353	0.378	0.353
誤差(%)	1.91	4.13	2.94	2.88	1.91	2.37	6.38	3.68	3.68	1.15	2.44	1.15

表4 層間変形角

载荷歪	1・6・9 α=53.2	2 α=39.0	3・7・8 α=64.3	4 α=77.7	5 α=33.1	10・11・12 α=30.0
ε/3	1/2054	1/2603	1/1654	1/1344	1/3302	1/3545
2ε/3	1/1027	1/1302	1/827	1/672	1/1651	1/1772
0.25	1/376	1/513	1/311	1/257	1/604	1/667
0.5	1/188	1/256	1/156	1/129	1/302	1/333
0.75	1/125	1/171	1/104	1/86	1/201	1/222
1.0	1/94	1/128	1/78	1/64	1/151	1/167
1.5	1/63	1/85	1/52	1/43	1/101	1/111
2.0	1/47	1/64	1/39	1/32	1/76	1/83
2.5	1/38	1/51	1/31	1/26	1/60	1/67
3.0	1/31	1/43	1/26	1/21	1/50	1/56

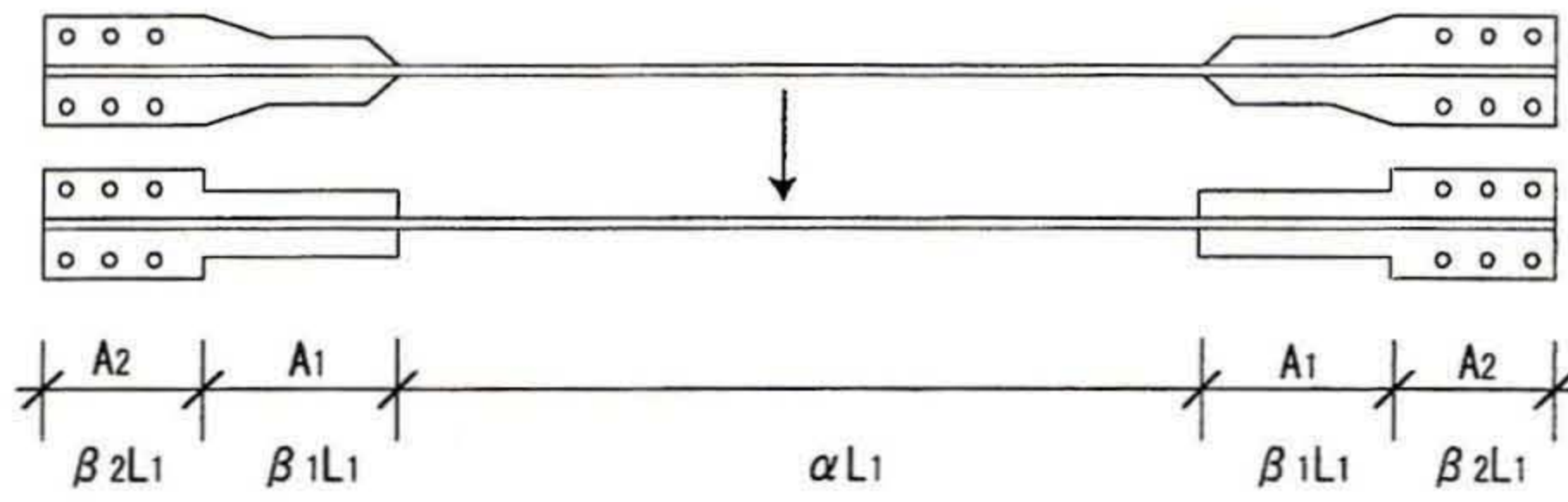


図3 5分割モデル

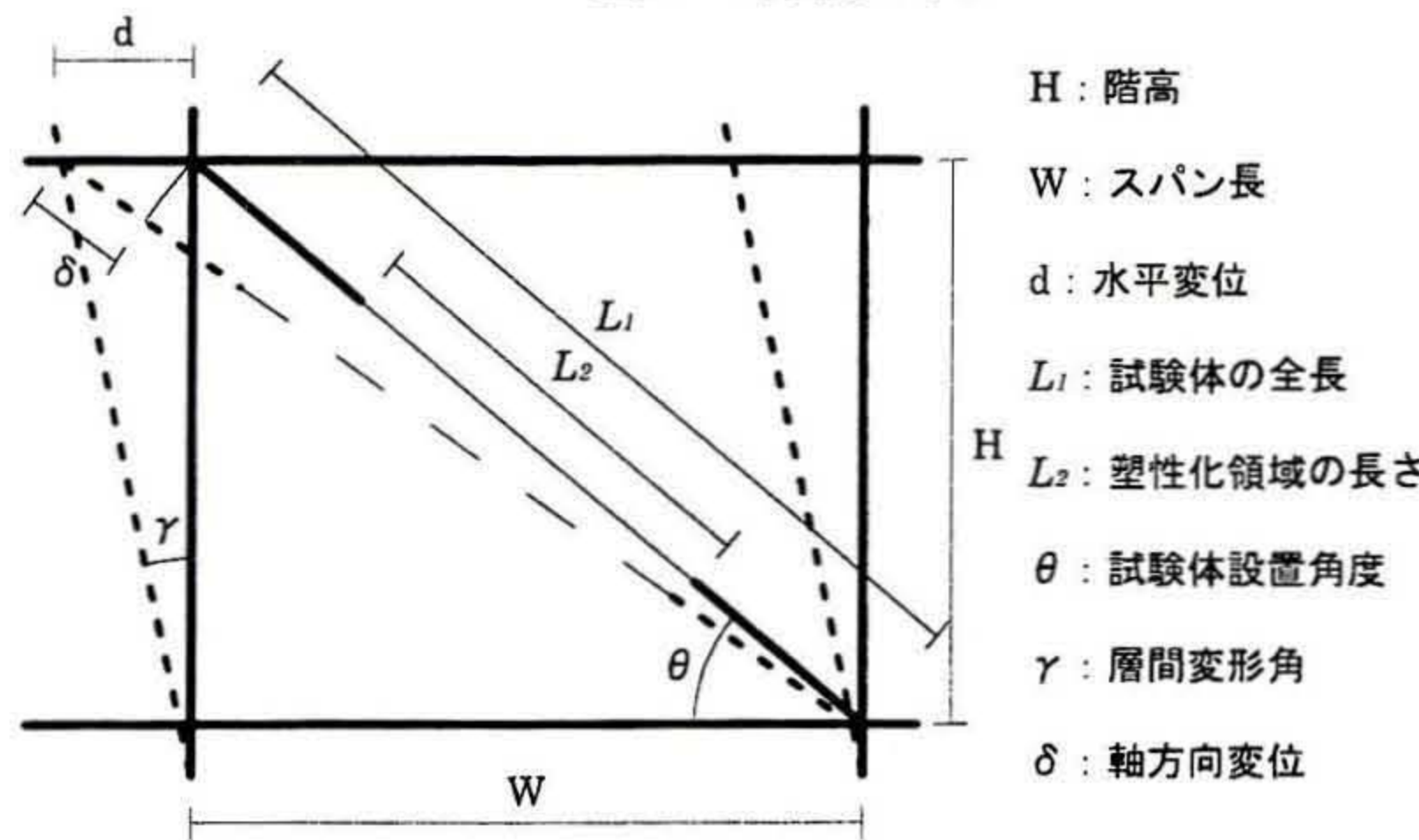


図4 実験モデル

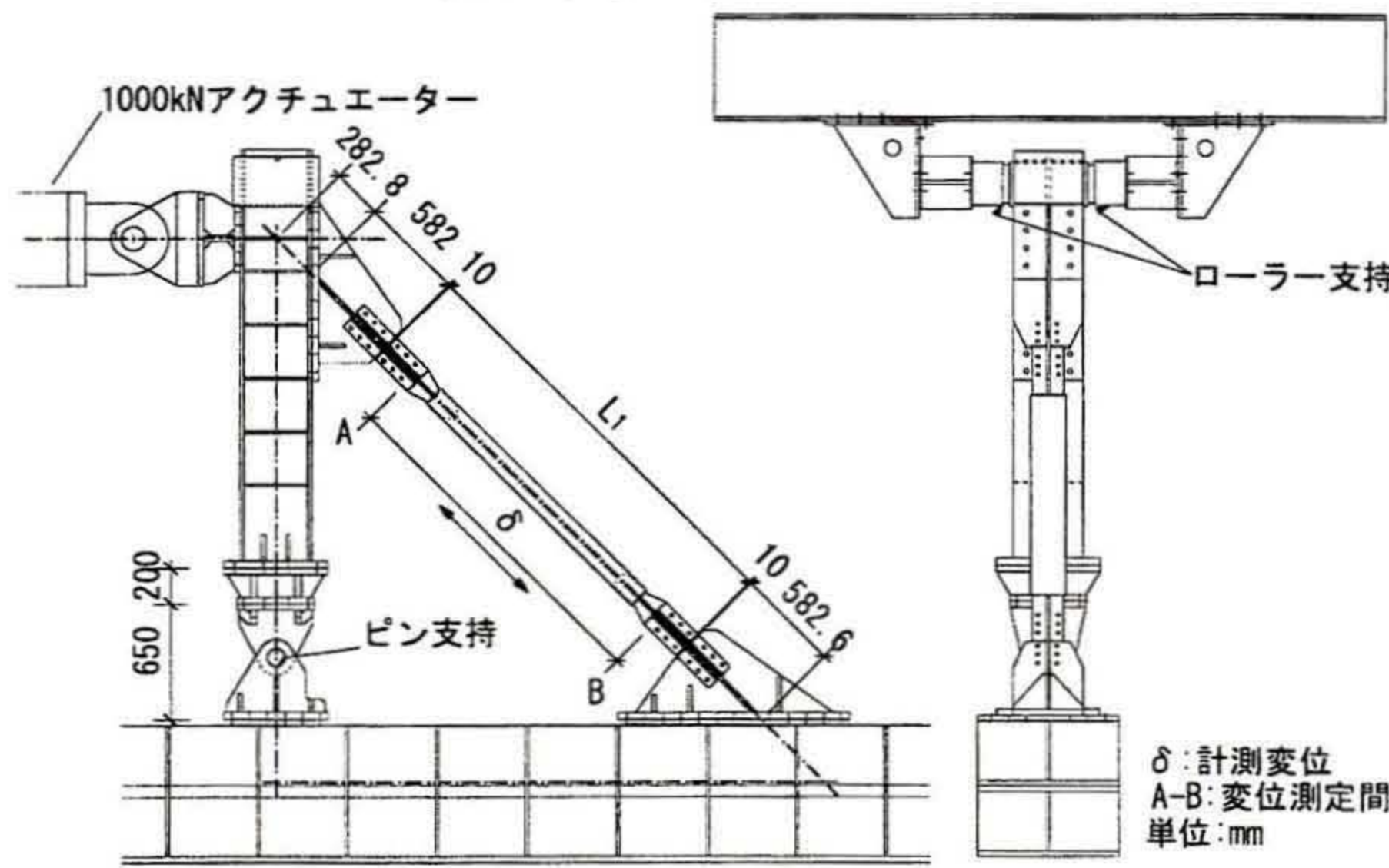


図5 実験装置

b) パターン2

塑性長さ比が小さい場合において、設計法で定められた拘束力の適用範囲³⁾を超える試験体を製作し、その座屈形式を検証する。P_E/P_yを弱軸局部変形と引張破断の境界付近である6.0程度とする。

c) パターン3

芯材長さを一定とし、リブの食込み長さを変えることにより塑性長さ比を変える。塑性長さ比と拘束力の影響を把握するために塑性長さ比30.0%と64.3%の試験体については、それぞれP_E/P_yを1.4、2.1、4.3の3種類設定する。

2.2 载荷モデル

図3に試験体の5分割モデル、図4に実験モデルを示す。5分割モデルの妥当性を検討するため文献4よりリブの変断面部を細分割した33分割モデルと5分割モデルのリブ変位の誤差を求める。表3にリブ変位の精算値と略算値との誤差を示す。誤差は全ての試験体で7%以内に収ま

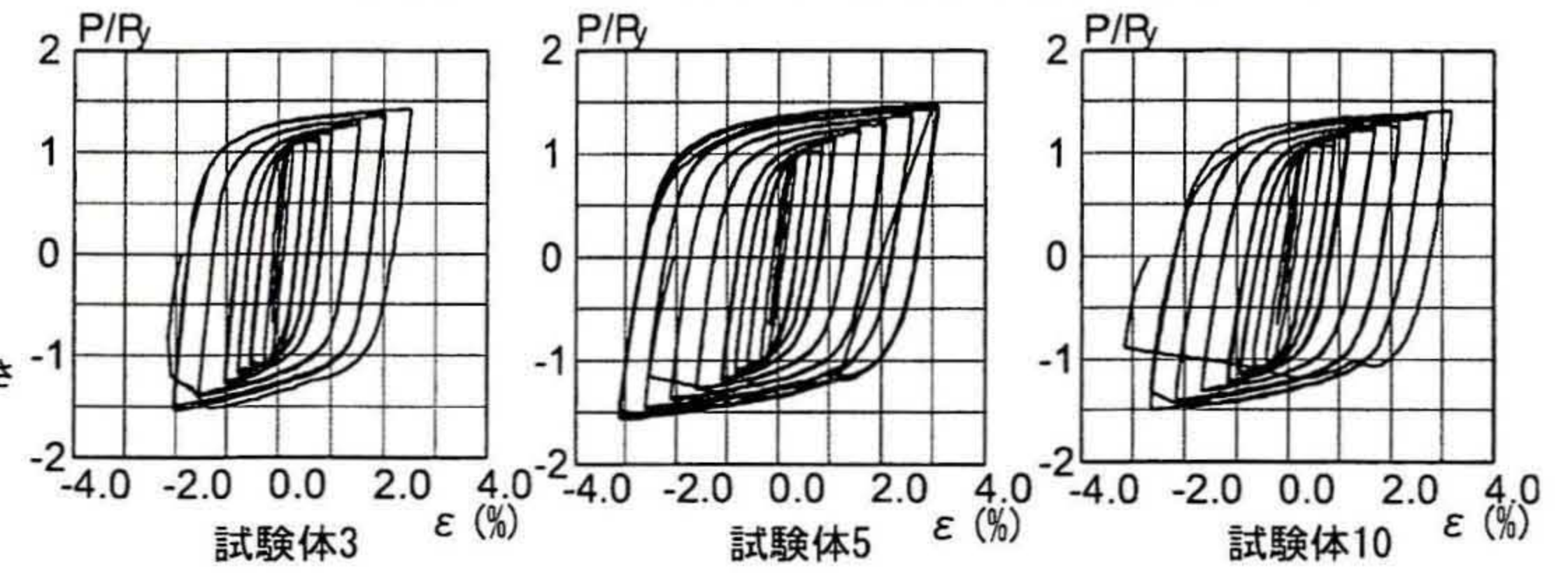


図6 P/P_y-ε関係

っており微少である。よって5分割モデルにより軸変位を算出する。図3に示すように芯材長さに対する分割したリブ長さの比をそれぞれβ₁、β₂、断面積をA₁、A₂、とすると、試験体の軸変形量δは次式のように表せる。

$$\delta = \epsilon \alpha L_1 + \frac{2P_y}{A_1 E} (1 - \alpha) L_1 \quad (2)$$

ここで

$$A_1 = \frac{2A_1 A_2 (\beta_1 + \beta_2)}{A_2 \beta_1 + A_1 \beta_2} \quad (3)$$

設置角は既往の研究^{1)~4)}と同じく45°とすると、層間変形角との関係から軸ひずみは次式のように表せる。

$$\epsilon = \frac{\gamma \cos \theta \sin \theta - 2P_y / \{A_1 E (1 - \alpha)\}}{\alpha} \quad (4)$$

本論では各試験体の塑性長さ比が異なるため、既往の研究^{1)~4)}で想定した層間変形角γ=軸歪εの関係は適用できない。(4)式をもとに算出した各試験体の歪量に相当する層間変形角を表4に示す。

2.3 実験装置

载荷方法は、既往の研究と同じであり、歪制御の正負交番漸増繰返し载荷にて、表4に示す歪量を与える。

3. 実験結果

3.1 载荷履歴および終局状態

各試験体の最大耐力の75%まで低下した時のP/P_y(P: 軸方向荷重 P_y: 芯材の降伏荷重)とε(芯材の歪量(%))の関係の各パターンの一例を図6に示す。各試験体とも安定した復元力特性を示した。また、载荷履歴および終局状態と座屈モード数を表5に示す。

3.2 塑性化部長さ変位の算出

試験体の計測変位 δ は図5より試験体の第1ボルト間A-Bで計測しているため、計測値から塑性化部長さの変位を求める。試験体の端部リブおよび接合部は弾性設計であることから、実験値の荷重を用いてリブ部の変形量を算出し、計測変位より減じることにより算出する。

4. 考察

4.1 耐力比

表6に層間変形角1/100近傍の圧縮耐力 P_{c100} と引張耐力 P_{t100} 、降伏耐力 P_y で無次元化した値 P_{c100}/P_y 、 P_{t100}/P_y および P_{c100}/P_{t100} を算出し、最大圧縮耐力 P_c に対する最大引張耐力 P_t の比 P_t/P_c を示す。また降伏比の逆数 ξ と、 P_t/P_y を ξ で除した値を示す。

パターン1、パターン3ともに試験体の塑性長さ比が大きくなると P_t/P_c の値も高くなる。特に塑性長さ比が77.7%の試験体4では P_t/P_c の値は1.17になり、他の試験体と比べて高い値となる。これは、試験体4は座屈モード数が33であり、他の試験体と比べ圧縮時の芯材とモルタルとの接触点が多く、摩擦による影響が大きいことが原因

である。また、拘束力の高い試験体ほど、局部変形に至るまでに多くの履歴ループを有するため、塑性変形が進展し、芯材がモルタルに強固に食込み P_c/P_t は高くなる。

試験体3、7、8と試験体10、11、12はそれぞれ塑性長さ比が64.3、30.0である。 P_E/P_y の変化による耐力上昇は塑性長さ比が小さい試験体のほうが少ない。これは塑性長さ比の小さい試験体では座屈モード数が少なく、モルタルとの接触面積が小さいことから、塑性変形の進展による影響が少ないためと考える。

パターン3の試験体では、他の試験体と異なり、層間変形角が大きくなると P_t/P_c が概ね同じ値か、低くなる結果となる。パターン3の試験体ではリブの食込み長さが546mmと長い層間変形角が大きくなるにつれ圧縮時、引張時共に拘束材とリブが接触し、 P_t/P_c が低下した。

また、文献5に示したように、降伏比と引張側の耐力上昇率はほぼ反比例する。本論の試験体においても表6に示すように、 $P_t/P_y/\xi$ は概ね100程度となり、 P_t/P_y は降伏比の逆数 ξ とほぼ等しい結果が得られた。この結果から、塑性長さ比は引張側の耐力上昇率には影響を与えない。

表5 荷履歴および芯材最終状態と座屈モード数

試験体名	荷履歴および終局状態	座屈モード数 B_{mode}
1	3.0%歪2回目圧縮側において、弱軸下から1/4付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	14
2	3.0%歪2回目圧縮側において、弱軸下から1/4付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	7
3	2.5%歪1回目圧縮側において、弱軸上から1/4付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	16
4	2.5%歪2回目圧縮側において、弱軸上部端部付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	33
5	3.0%歪6回目圧縮側において、弱軸下部リブ付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	4
6	3.0%歪4回目圧縮側において、強軸方向に大きく変形が進み、実験装置への影響を考慮し、実験を終了した。	15
7	2.0%歪1回目圧縮側において、弱軸下部リブ付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	15
8	3.0%歪1回目圧縮側において、弱軸上から1/4付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	21
9	2.5%歪2回目圧縮側において、弱軸上部リブ付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	15
10	3.0%歪1回目圧縮側において、弱軸上部リブ付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	6
11	3.0%歪1回目圧縮側において、弱軸中央付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了した	5
12	3.0%歪2回目圧縮側において、弱軸下部リブ付近において局部変形が生じ、耐力低下を起こしたため実験を終了し	7

表6 耐力比および降伏比の逆数

パターン	試験体名	1/100近傍の耐力(kN)					最大耐力(kN)				ξ 1/%	$P_t/P_y/\xi$
		P_{c100}	P_{t100}	P_{c100}/P_y	P_{t100}/P_y	P_{c100}/P_{t100}	P_c	P_t	P_t/P_y	P_c/P_t		
1	1	956	931	1.21	1.17	1.03	1306	1209	1.53	1.08	0.016	96.46
	2	979	949	1.15	1.11	1.03	1115	1067	1.25	1.05	0.014	86.99
1・3	3	582	556	1.27	1.21	1.05	699	654	1.43	1.07	0.015	96.67
1	4	514	505	1.10	1.08	1.02	782	669	1.44	1.17	0.015	97.62
2	5	1020	981	1.29	1.24	1.04	1241	1177	1.48	1.05	0.016	93.84
	6	889	851	1.17	1.11	1.05	1255	1112	1.46	1.13	0.016	93.24
3	7	532	519	1.16	1.13	1.02	622	604	1.32	1.03	0.014	91.62
	8	516	515	1.13	1.12	1.00	800	695	1.52	1.15	0.014	105.38
	9	567	551	1.24	1.20	1.03	709	655	1.43	1.08	0.014	99.27
	10	654	602	1.43	1.31	1.09	686	648	1.41	1.06	0.014	98.28
	11	645	607	1.41	1.33	1.06	677	653	1.43	1.04	0.014	99.05
	12	650	610	1.42	1.33	1.07	736	670	1.46	1.10	0.014	101.57

表7 性能評価・座屈長さ/座屈モード関係

α	P_E/P_y	E_t	ω	塑性長さ L_2 (mm)	L_2/B_{mode}
53.2	2.9	1114	819	1251	89.4
39.0	2.9	402	454	704	100.6
64.3	2.1	423	433	1511	94.4
77.7	1.8	1016	519	2925	88.6
33.1	6.0	628	1061	544	136.0
53.2	6.2	1141	906	1251	83.4
64.3	1.4	289	296	1511	100.7
64.3	4.3	610	624	1511	72.0
53.2	2.1	404	500	1251	83.4
30.0	2.1	230	506	705	117.5
30.0	1.4	215	471	705	141.0
30.0	4.3	300	658	705	100.7

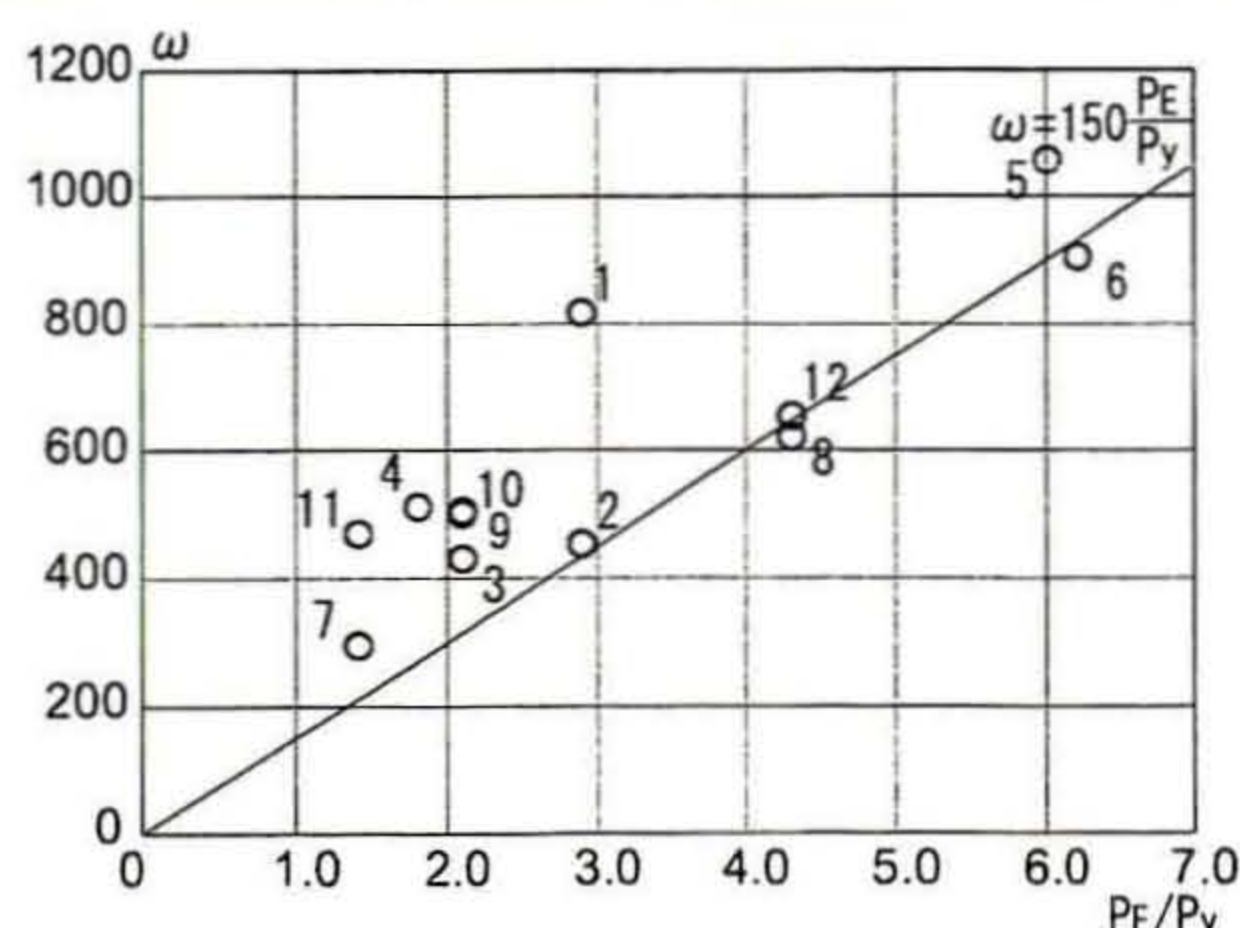


図7 ω - P_E/P_y 関係

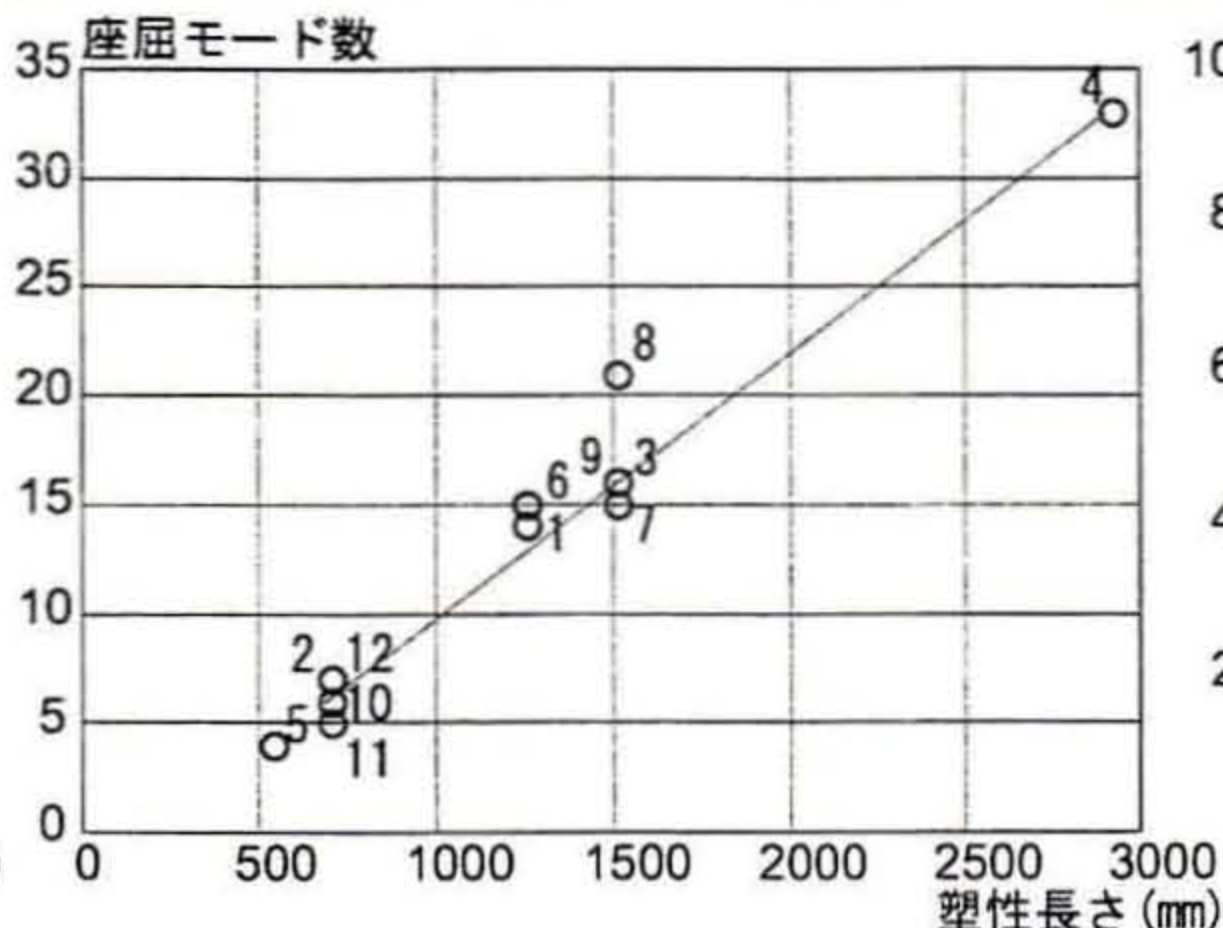


図8 塑性長さ-座屈モード関係

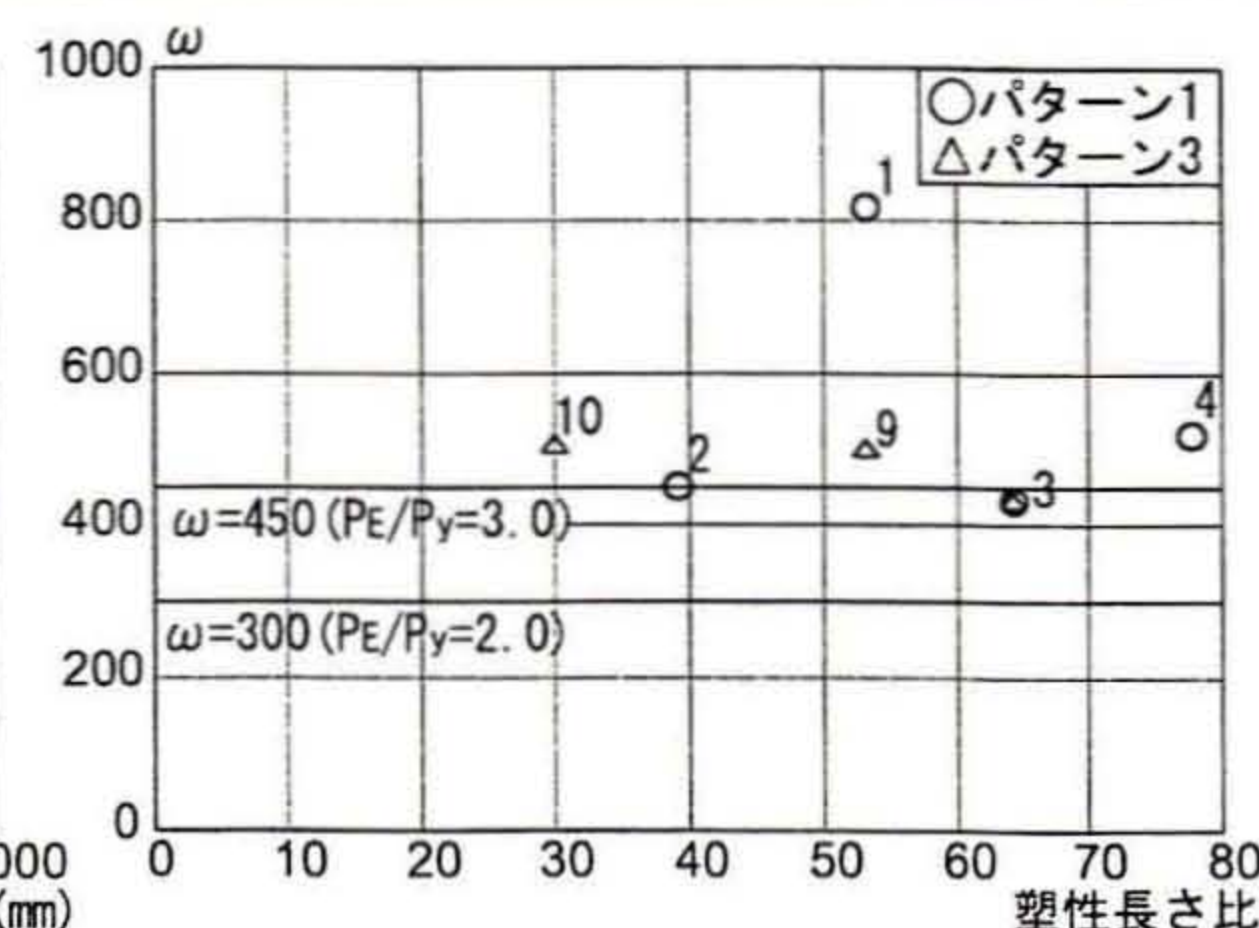


図9 塑性長さ比- ω 関係

表8 塑性長さ比- ω 関係

試験体	P_E/P_y	ω	L_3/L_1	$2L_R/L_1$	$2L_i/L_2$
1	2.9	819	53.2	0.47	0.28
2	2.9	454	39.0	0.61	0.45
3	2.1	433	64.3	0.36	0.19
4	1.8	519	77.7	0.22	0.09
9	2.1	500	53.2	0.47	0.39
10	2.1	506	30.0	0.70	1.55

4.2 ω - P_E/P_y 関係

表7に試験体の最大耐力の75%まで低下した時の累積塑性歪エネルギー E_t と累積塑性歪エネルギー率 ω を、図7に本論の実験結果の ω と P_E/P_y の関係を示す。試験体6については、強軸方向に変形が進み、実験装置への影響を考え載荷を中止したため、試験体8については P_E/P_y は設計条件の範囲の限界近くであったため、性能が低下した。

試験体5は、 P_E/P_y が6.0と既往の設計範囲を超えているにも関わらず、局部変形が発生し、性能評価式を満たしている。これは、試験体の塑性長さ比が小さくなることにより強軸方向の曲げ剛性が高くなったこと、また、端部リブ部分に応力が集中しやすくなったことで、弱軸変形を起こしやすくなったと考える。試験体5の ω は、既往の実験から引張破断との境界が $\omega=1000$ を目安と考えると、弱軸変形の限界付近であるといえる。

試験体3、7、8は塑性長さ比が64.3%、試験体10、11、12は塑性長さ比が30.0%の試験体であり、それぞれ P_E/P_y が2.1、1.4、4.3である。塑性長さ比が異なる試験体においても ω と P_E/P_y は概ね比例関係が成立している。ただし、 ω の上昇率は塑性長さ比により異なり、塑性長さ比の大きい試験体の方が ω の上昇率は高い。これは塑性長さ比の大きい試験体では P_E/P_y に対する P_t/P_t の上昇率が大きいため、見かけ上 ω が高くなったからである。

4.3 塑性化部長さと座屈モードの関係

図8に塑性化部長さと座屈モード数の関係を示し、表7に塑性化部長さを座屈モード数で除した値(L_2/B_{mode})を示す。弱軸局部変形を起こす試験体では、塑性化部長さに比例して、座屈モード数は線形的に増える傾向がある。

塑性化部長さを座屈モードで割った値 L_2/B_{mode} は72~141mmの値を示した。文献3に示すように、座屈モード数は拘束力またはクリアランスの影響を受けるが、塑性長さ比が700mm程度の小さい範囲を除き、概ね L_2/B_{mode} は90mm程度の値を示しており、塑性化部長さが長い範囲では、座屈モードの波長は概ね一定で現れる。板厚の影響も、表7に示す通り L_2/B_{mode} に差は少ないことから塑性化部長さに対して板厚が薄い範囲では影響は少ない。

4.4 塑性長さ比- ω 関係

図9にパターン1とパターン3の試験体について、塑性長さ比と ω の関係を示す。また表8にリブ長さに対する芯材長さの比、リブの食込み長さに対する塑性化部長さの比を示す。 ω を比較する上で性能に関わる因子であ

るクリアランス、 P_E/P_y 、幅厚比を揃えた試験体1と2、試験体3と4のそれぞれを比較し考察を行う。各試験体ともに、塑性長さ比が小さくなると ω は低下する。これは、試験体2と3の塑性長さ比の小さい試験体では、芯材長さに対するリブ長さが長く、リブの食込み長さが短い。端部リブ部分は曲げ剛性が高いため、塑性化部領域の端部に応力が集中し、性能が低下したと考える。その影響は芯材長さに対するリブ長さの比が0.61と高い値を示した試験体2において特に顕著に現れている。また P_t/P_t が大きくなることで、見かけ上の ω が増加したことも原因の一つである。

一方、リブの食込み長さを変えたパターン3の試験体では塑性長さ比が小さくなると ω は若干高くなり、塑性長さ比と ω の関係がパターン1の試験体と逆になった。これは、塑性長さ比に相対して端部リブの食込み長さが長くなる場合、層間変形角が大きくなるにつれて、リブが拘束材と接触することで曲げモーメントを負担し、局部変形を起こしやすい塑性領域端部が安定したと考える。

5. 結論

本論は、座屈拘束ブレースの塑性長さ比をパラメータとした実験を行い以下の知見を得た。

- (1) 塑性長さ比が大きい試験体は P_t/P_t が大きくなり、塑性長さ比が80%程度では圧縮と引張の耐力比は1.17ほどにもなる。しかし、層間変形角1/100相当の歪量では圧縮側引張側ともほぼ等しい耐力を示す。
- (2) 塑性長さ比が30%程度の試験体では $P_E/P_y=6.0$ までは性能評価式(1)で評価できる。
- (3) 異なる塑性長さ比においても、 P_E/P_y と ω の比例関係は成立する。
- (4) 座屈モード数と芯材の塑性化部長さとの間は線形的な比例関係があり、塑性化部長さが長くなると座屈モード数も多くなる。
- (5) 塑性長さ比が小さくリブの食込み長さが短い場合、端部リブ付近に応力が集中し性能が低下するが、リブの食込み長さを長くすることで性能の低下を防ぐことが可能である。

[参考文献]

- 1) IWATA Mamoru, MURAI Masatoshi : Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, 2006 ; 35 : PP1807-18
- 2) 岩田衛, 村瀬亮, 和泉洋次, 村井正敏 : 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究-その3 芯材の座屈挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第611号, pp133-139, 2007. 1
- 3) 村瀬亮, 村井正敏, 岩田衛 : 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究-その4 芯材幅厚比と拘束力および断面ディテールの影響, 日本建築学会構造系論文集, 第620号, pp117-124, 2007. 10
- 4) 中村慎, 山下哲郎, 村井正敏, 岩田衛 : 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究-芯材の降伏耐力および軸剛性の調整, 日本建築学会構造系論文集, 第629号, pp1143-1150, 2008. 7
- 5) 田所敦志, 山下哲郎, 村井正敏, 岩田衛 : 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの骨pp897-898格曲線と耐力上昇, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2008 C-1 分冊