

既存ブレースの耐震補強工法の開発

Development of a Method for Seismic Strengthening Existing Braces

岸本 剛* 山上 聡* 服部晃三** 船津昌史**

要 旨

山形鋼を使用したブレースの座屈耐力を向上させる目的で、角型鋼管を拘束材を使用し無溶接・無開孔で山形鋼に取り付け座屈補剛する耐震補強工法を開発した。また、山形鋼を使用したラチス柱を座屈補剛する工法も考案した。補強効果と座屈耐力を評価するため座屈実験を実施し、角型鋼管は山形鋼の補強に効果があること、また、その補強効果を考慮した計算値は実験値を安全側に評価することを確認した。

キーワード：ブレース、座屈補剛、耐震補強、山形鋼

1. まえがき

ブレースを使用した鉄骨造建物では、ブレースに山形鋼が使用されることが多い。一般に山形鋼を使用したブレースは細長比が大きいため、通常、ブレースには圧縮力を負担させず、引張力のみを負担させる設計が行われる。しかし、山形鋼の座屈補剛により圧縮力を負担させることが可能となれば、引張力と共に圧縮力も負担する設計が可能となる。そのため、引張力のみ補強に比べ補強量を減らすことができ、耐震補強工法としてメリットがある。また、文化的価値の高い建物の耐震補強工事では、建物の現状保持の観点から、既存部材への穴あけや溶接を避ける施工を要求されることがある。

山形鋼を座屈補剛により耐震補強する研究についてはこれまでいくつか行われ(例えば 1)、2)、その補強効果が明らかにされている。例えば小澤らは補強材の曲げ剛性が付加されることにより山形鋼の座屈耐力が大きくなることを指摘している。しかし、既往の研究では、既存部材である山形鋼に溶接あるいは穴あけを行い補強している例も多く、これらを避けた補強工法の研究事例は少ない。

そこで、今回、山形鋼を使用したブレースを、拘束材を使用し角型鋼管を無溶接・無開孔で山形鋼に取り付け、座屈補剛する耐震補強工法を考案した。同様に、山形鋼を使用したラチス柱を座屈補剛する工法も考案した。これらの補強効果を検証するため座屈実験を実施し、耐力評価を行った。本報では工法概要と補強効果、および耐力評価法について報告する。

2. 工法概要

図-1 に山形鋼を使用したブレースやラチス柱に、溶

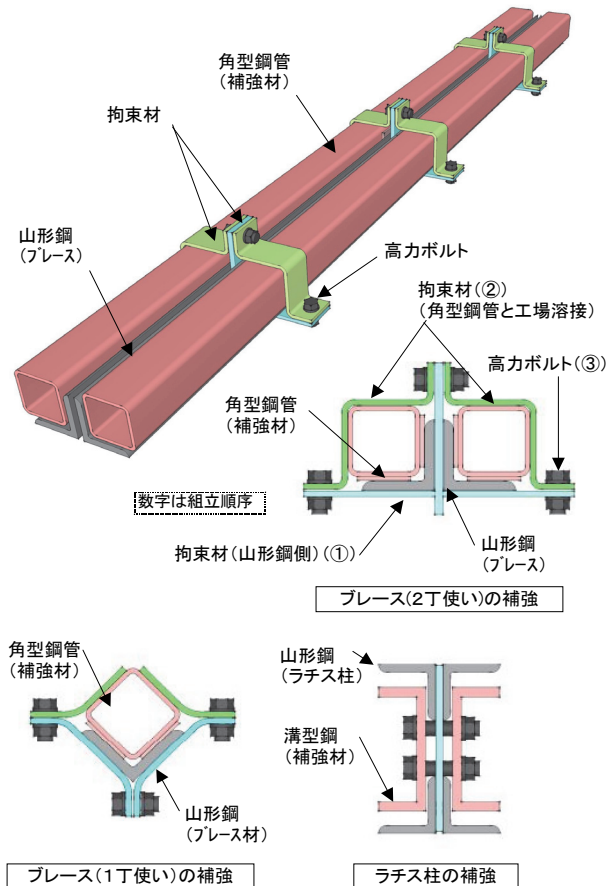


図-1 工法概要

接や穴あけ無しで補強材を取り付け座屈補剛する耐震補強工法 (以下、本工法) の概要を示す。対象とする部材は、山形鋼を使用したブレース (1丁使い、2丁使い)、ラチス柱である。本工法は、補強材によりブレースの断

*技術研究所 **西日本支社建築設計部

面性能を向上させ、座屈耐力を増大させる耐震補強工法で、角型鋼管は、拘束材によりブレースである山形鋼に取り付けられる。拘束材は高力ボルトで締め付けることにより固定される。同様に、ラチス柱の場合では、溝型鋼は背中合わせに配置され、山形鋼を挟み込むように高力ボルトで固定される。組立は、図-1に示すように、①既存部材に山形鋼側より拘束材を取り付け、②既存部材に拘束材を溶接した角型鋼管を取り付け、③①と②の拘束材を高力ボルトで締め付け一体化する手順で行われる。現場では拘束用鋼板と角型鋼管を設置後、高力ボルトで締め付けて固定するので既存部材への溶接や穴あけが不要となる。

3. 実験概要

3.1 試験体

表-1に試験体一覧を、図-2に対象となるブレースと山形鋼を使用したブレースとラチス柱の断面を示した概要図を、図-3に試験体形状を、表-2に材料試験結果を示す。試験体は実大スケールで、山形鋼を用いたブレースを対象とした試験体14体、ラチス柱を対象とした試験体2体の計16体である。基本的に図-2(b)に示す弱軸方向で実験を行った。ただし、ブレース2丁使いでは、通常、弱軸方向は交差部が支点となって座屈長さ

表-1 試験体一覧

No	既存部材	座屈方向	試験体形状					座屈長さ L(mm)	細長比 λ		
			既存部材	補強部材	拘束方法						
					種類	形状	拘束材 ヒッチ				
1	ブレース	弱軸 曲げ	-	-	-	-	3640	154			
2			□-60x60x3.2	鋼材挟込	A1	@500					
3			□-75x75x4.5						A2	@1000	
4										@400	
5			□-100x100x6	鋼材挟込	A1	@500					
6									繊維巻付	全域	
7			-	-	-	-			159	240	
8			2L-50x50x6	□-50x50x3.2	鋼材挟込	A2					@500
9			-	-	-	-					
10			L-75x75x6	□-75x75x4.5	鋼材挟込	C			@500	2340	119
11			-	-	繊維巻付	全域					
12			4L-50x50x4	PL-6	ボルトによる固定				-	-	
13			ラチス柱	弱軸 曲げ	-	-			-	-	-
14			-	-	-	-			-	-	-

*表中の細長比は無補強の場合の値

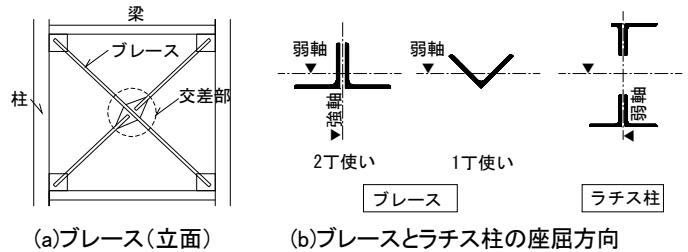
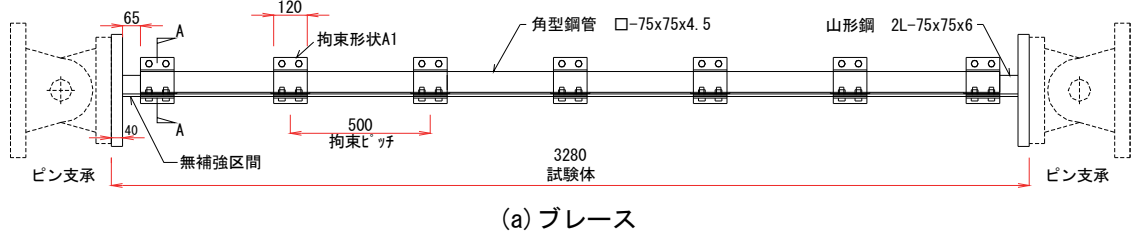
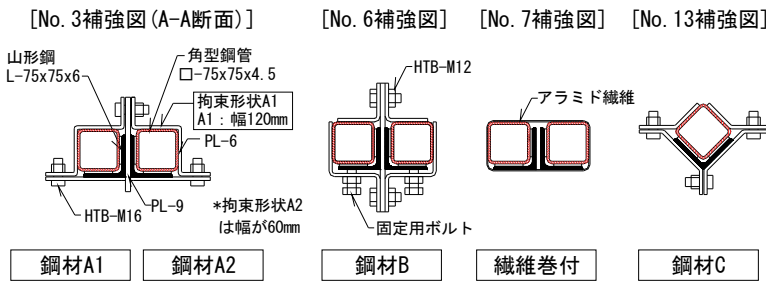


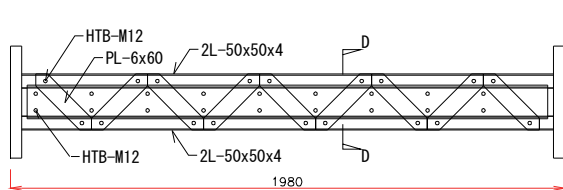
図-2 概要図



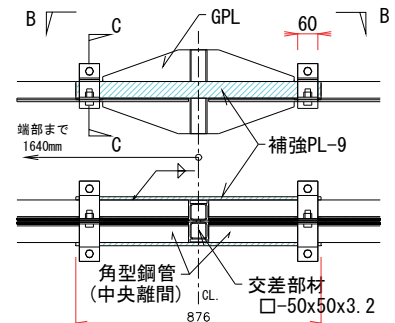
(a) ブレース



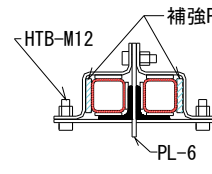
(b) 角型鋼管との拘束方法



(d) ラチス柱



B-B断面図



C-C断面図

(c) 交差部を模擬したブレース

図-3 試験体形状

が部材長の半分となるため、同図の弱軸方向の直交方向（強軸方向）で座屈する可能性もある。そこで、2 丁使いでは強軸方向も座屈方向とした。

図-3 (a) にブレースの試験体例を示す。ブレースの実験パラメータは、座屈方向の他に、角型鋼管の断面の大きさ、山形鋼と角型鋼管の拘束材の種類、間隔とした。山形鋼の座屈耐力は補強材の曲げ剛性が付加され大きくなる。そこで、角型鋼管の曲げ剛性 (EI) の大きさを角型鋼管の断面、つまり断面二次モーメントの大きさとして変化させた。拘束方法は図-3 (b) に示すように、山形鋼と角型鋼管を鋼材や繊維シートで固定する方法とした。鋼材による拘束は、2 丁使いを拘束するタイプ (A1、A2、B)、1 丁使いを拘束するタイプ (C) がある。繊維巻付による拘束は、アラミド繊維を角型鋼管の材軸方向の全面に巻き付けた。

通常、ブレースは図-2 (a) に示すように構面内の配置が X 形になっていることが多い。この場合、部材中央の交差材により、部材全長にわたり角型鋼管を配置することができない。図-3 (c) に示す No.11 はこの状態を模擬し、材軸方向の中央にガセットプレート (GPL) を配置し、山形鋼と角型鋼管を継ぎ、角型鋼管の外側から鋼板で補強した試験体である。

ラチス柱は、図-3 (d) に示すように両側から溝型鋼厚さ 6mm のコの字形の鋼板をボルトで固定する方法で座屈補剛した。

3.2 加力方法

図-4 に加力方法を示す。加力は、No.10、11 以外は単調圧縮加力とした。No.10、11 は繰返し荷重による影響を確認する目的で降伏変位の 1、2 倍の変位振幅で 1 サイクルづつ加力した。材端条件は座屈方向に対して回転自由とした。したがって実験での座屈長さ (L) は両端のピン支点間 (No.1~14 で 3640mm、No.15、16 で 2340mm) となる。これより山形鋼のみの細長比 (λ) はブレースの 2 丁使い弱軸方向で 154、同強軸方向で 159、1 丁使い弱軸方向で 240 となる。また、ラチス柱の細長比 (λ) は 119 となる。なお、No.9~11 では、強軸方向の座屈耐力を確認できるように弱軸方向の面外変形を拘束し実験を実施した。

4. 実験結果

4.1 荷重-軸方向変位関係と最終変形状況

表-3 に実験時の最大荷重一覧 (圧縮) を示す。表中には 4.3 節に示す補強効果を考慮した細長比を記載している。また、図-5 に各試験体の荷重 (N) - 軸方向変位 (δ) 関係を示す。各試験体とも補強した試験体は無補強に対して最大荷重が増加した。最大荷重に達した後は、無補強の No.1 や、取り付けた角型鋼管の曲げ剛性が小さい No.2 は、荷重は最大荷重後も緩やかに低下し

表-2 材料試験結果

(a) 鋼材

種類	試験体	降伏強度	引張強度	降伏ひずみ	伸び (%)
		$\sigma_y(N/mm^2)$	$\sigma_u(N/mm^2)$	$e_f(\times 10^{-6})$	
L-50x50x4	No.15,16	338	482	1567	36
L-50x50x6	No.9,10,11	322	461	1524	27
L-75x75x6	No.4	337	492	1626	26
	No.4以外	314	446	1589	23
□-50x50x3.2	No.10,11	433	482	2046	36
□-60x60x3.2	No.2	447	493	2088	24
□-75x75x4.5	No.4	396	471	1954	34
	No.4以外	451	490	2132	-
□-100x100x6	No.8	496	532	2328	25
PL-4.5	No.9,10,11	318	471	1504	40
PL-6	No.4	364	463	1694	30
	上記以外	346	430	1641	27
PL-9	No.4	352	449	1684	26
	上記以外	351	434	1670	26

(b) アラミド繊維 (カタログ値)

試験体	繊維目付	設計厚さ	引張強度	引張弾性率
	g/m ²	mm	N/mm ²	N/mm ²
No.7,14	415	0.286	2060	1.18x10 ⁶

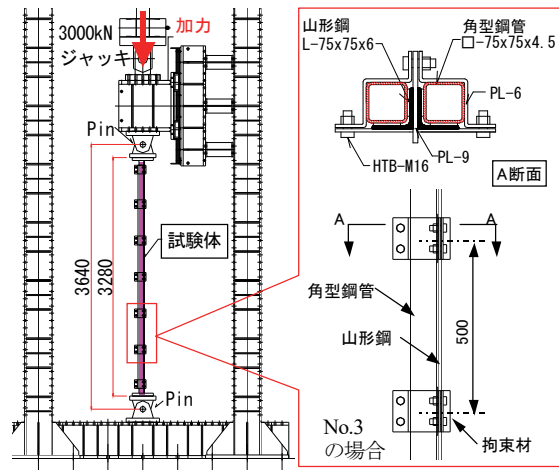


図-4 加力方法

表-3 最大荷重一覧

No	既存部位	座屈方向	実験結果			細長比 ³⁾ λ
			最大荷重 Nmax(kN)	耐力 ¹⁾ 増加率	最終 破壊 ²⁾	
1	ブレース	弱軸 曲げ	118	-	①	154
2			257	2.18	①	116
3			468	3.97	①→②	88
4			448	3.81	①	94
5			540	4.59	①→②	88
6			410	3.48	①→②	88
7			352	2.99	①→②	-
8			543	4.61	①→②	63
9		78	-	①	159	
10		強軸 曲げ	340	4.34	①→②	130
11			287	3.67	①	130
12		弱軸 曲げ	34	-	①	240
13			273	8.13	①→②	98
14			147	4.36	①→②	-
15			284	-	①	119
16		ラチス柱	弱軸 曲げ	392	1.38	①→②

1) 無補強に対する耐力の増加率
2) ①: 全体曲げ座屈、②: 端部変形
3) 式(1)(4.3節)による補強効果を考慮した細長比

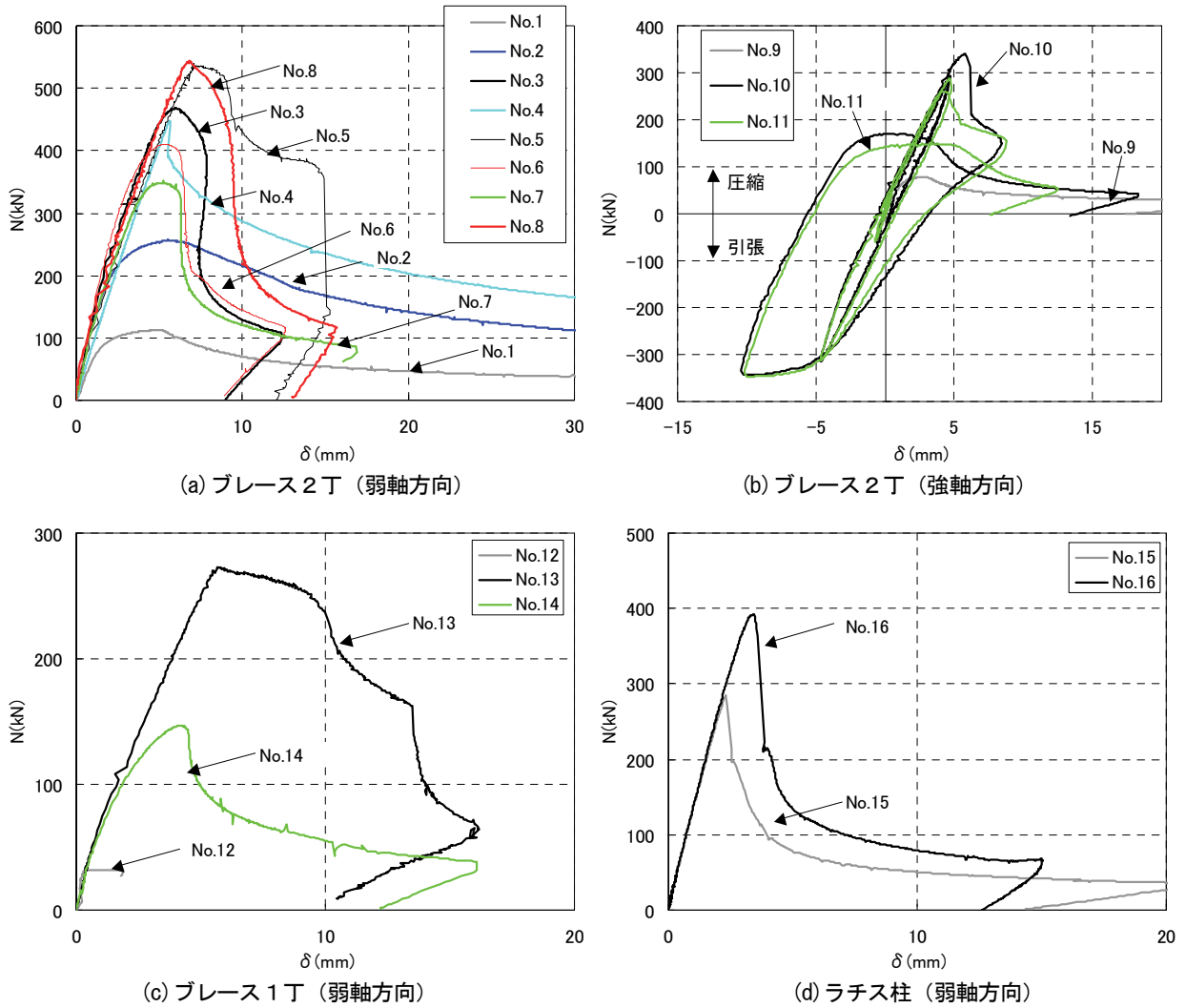
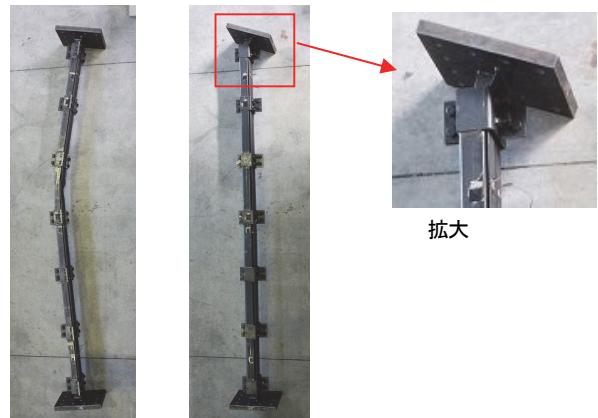


図-5 圧縮軸力(N)一軸方向変位(δ)関係

たが、角型鋼管の曲げ剛性が大きい No.8 などは急激に荷重が低下する傾向がみられた。これは、各試験体とも座屈により材軸直交方向に曲げ変形が生じるが、No.1 や No.2 は最大荷重が比較的小さいため、圧縮軸力と曲げ変形により山形鋼に作用する曲げモーメントが小さくなる。そのため座屈後の荷重低下が小さいと考えられる。

写真-1 に最終変形状況の一例を示す。最終変形状況は、無補強の試験体と No.2 などの補強した試験体では、部材全体が曲がる全体座屈となったが、角型鋼管で補強した試験体の多くは No.3 のように全体座屈後に最終的に試験体端部の無補強区間で折れ曲がるような状態となった。今回の実験では、補強した試験体についても図-3 (a)に示すように試験体の端部に 65mm の無補強区間がある。この部分は補強区間に比べ曲げ剛性が急激に小さくなっている。

この曲げ剛性の差とこの部分に生じる試験体の曲げモーメントの差を比較することにより端部無補強区間の損傷を検討した。図-6 に各試験体の最終変形状況と補強区間と無補強区間の曲げモーメント比 (M_a/M_b) を曲げ剛性比 (EI_a/EI_b) で除した値との関係を示す。ここで、



全体座屈 (a) No. 2 全体座屈後端部変形 (b) No. 3

写真-1 最終変形状況

座屈後の曲げモーメントは等分布荷重によるものと仮定し、補強区間の曲げモーメント (M_a) は中央位置とした。また、補強区間の曲げ剛性は、角型鋼管と山形鋼の曲げ剛性を加算したものである。縦軸が 1 より小さい場

合は、無補強区間と補強区間の曲げモーメント比 (M_a/M_b) より曲げ剛性比 (EI_a/EI_b) が大きい領域である。この場合、無補強区間では、補強区間と比較して曲げモーメントより曲げ剛性が小さいため端部変形が生ずると考えられる。同図では概ね縦軸が1近傍、またそれ以下の場合、最終変形は端部変形であり、縦軸が1より大きい場合は全体座屈となっている。これより無補強区間と補強区間の曲げ剛性比が端部変形の原因と考えられる。なお、角型鋼管で補強していない試験体 (No.1、9、12) はいずれも全体座屈となった。

4.2 最大荷重の比較

a. 拘束方法による比較

図-7に、山形鋼2丁使い (座屈方向が弱軸方向) の場合の、角型鋼管との拘束方法の違いによる最大荷重の比較を示す。各試験体の山形鋼と角型鋼管の曲げ剛性は同一である。アラミド繊維による拘束は、材軸方向全域としたにもかかわらず他の鋼材での拘束より最大荷重が小さかった。これは、繊維を巻き付ける際、鋼材タイプと異なり山形鋼と角型鋼管をボルト等で絞り込んでいないため、拘束効果が小さいと考えられる。

拘束材の形状が同じで間隔が異なる試験体 (No.4、No.5) を比較すると、間隔が1000mmと大きいNo.5の方が400mmのNo.4よりも最大荷重が小さく、No.4に対し約83%であり、間隔が最大荷重に与えることがわかる。

また、拘束材の間隔の違いによる最終変形状況を比較すると、図-6によれば、間隔の小さいNo.5は全体座屈後の端部変形に対し、大きいNo.4は全体座屈となった。間隔が大きい場合は、曲げ剛性が計算よりも小さく、補強部と端部無補強部の剛性差が小さくなり全体座屈したと推測される。このことから、拘束材の間隔が大きい場合、角型鋼管は補強効果を十分発揮していないと考えられる。

b. 角型鋼管の断面による比較

図-8に、山形鋼2丁使い (座屈方向が弱軸方向) の場合の、角型鋼管の断面の違いによる最大荷重の比較を示す。拘束材の間隔は500mmである。角型鋼管の断面が大きくなるに伴い、最大荷重が増加した。

図-9に、曲げ剛性比と最大荷重比の比較を示す。縦軸は最大荷重比で、無補強試験体No.1の最大荷重で基準化した値、横軸は曲げ剛性比で無補強試験体No.1の曲げ剛性 (EI_0) で基準化した値である。角型鋼管で補強した試験体の曲げ剛性 (EI_n) は、山形鋼と角型鋼管の曲げ剛性を足し合わせ求めた。曲げ剛性比が大きくなるほど、最大荷重比も大きくなっていることが確認できた。No.4に関しては、山形鋼が降伏荷重 (同図の点線) に達したため、最大荷重比が頭打ちであった。

4.3 耐力評価方法

実験より、角型鋼管の曲げ剛性と拘束材の間隔が耐

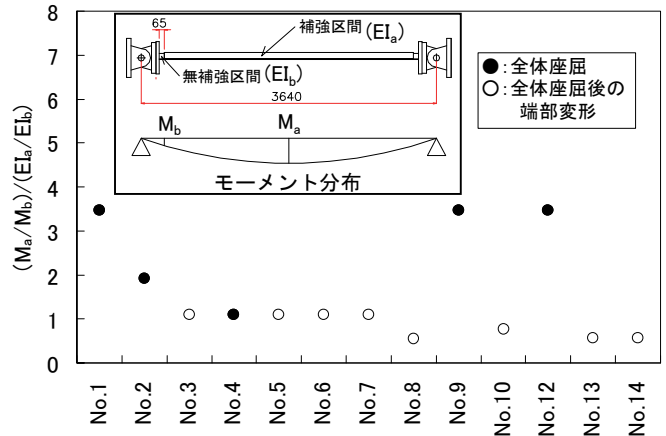
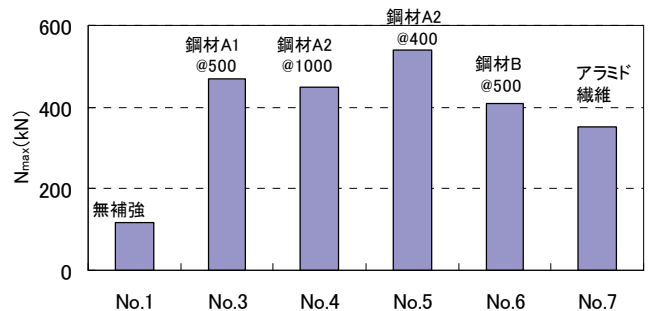


図-6 最終変形状況と $(M_a/M_b) / (E_a/E_b)$ の関係



* 図中には拘束方法 (図-3 (b)参照) を示す

図-7 拘束方法による最大荷重 (N_{max}) の比較

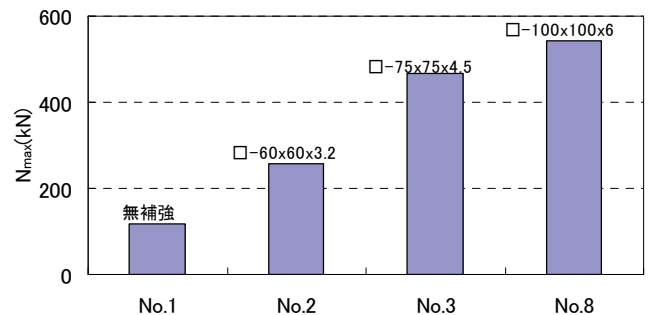


図-8 角型鋼管の断面による最大荷重 (N_{max}) の比較

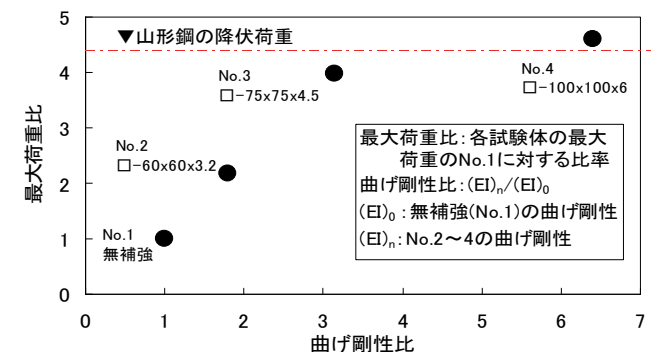


図-9 曲げ剛性比と最大荷重比の比較

屈耐力に影響することを確認したので、次に座屈耐力の評価方法を検討する。

角型鋼管の曲げ剛性と、拘束材の間隔の影響を考慮

した細長比 λ は式(1)で算定することとした。

$$\lambda = C \cdot \lambda_0 \tag{1}$$

ただし、 C : 鋼材による拘束材の効果を考慮した係数で式(2)³⁾による、 λ_0 : 角型鋼管による座屈補剛効果を考慮した細長比で式(3)による

$$C = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 \cdot I_o \cdot l_1}{48 \cdot l_k^2} \left(\frac{l_1}{I_f} + 4 \frac{e_o}{I_b} \right)} \tag{2}$$

$$\lambda_0 = \frac{l_k}{i_o} \tag{3}$$

$$i_o = \sqrt{\frac{I_o}{A_k}} \tag{4}$$

ただし、 l_1 : 拘束材の間隔(mm)、 I_o : 山形鋼と角型鋼管の断面 2 次モーメントの和(mm⁴)、 l_k : 座屈長さ(mm)、 I_f : 山形鋼と角型鋼管の断面 2 次モーメントの小さい方(mm⁴)、 I_b : 拘束材の断面 2 次モーメント(mm⁴)、 e_o : 拘束材の有効長さ(mm)、 A_k : 山形鋼の断面積(mm²)

拘束材の間隔による影響は、式(2)で設計に反映することとした。拘束材の間隔が大きいほど山形鋼に付加される角型鋼管の曲げ剛性が低下すると考え、それを鋼構造座屈設計指針³⁾を参考に式(2)で細長比を割増すことで評価した。組立材が非充腹の場合、充腹の場合に比べ座屈荷重が低下することを同式は反映したもので、ここでは「鋼構造座屈設計指針³⁾より非充腹の程度が拘束材の間隔に相当すると考えた。また、同式は拘束材の形状(幅、厚さ等)も併せて考慮している。角型鋼管による補剛効果を考慮した細長比は式(3)で求める。

図-10 に拘束材に鋼材を使用したブレースの座屈応力度と細長比との関係を示す。縦軸は降伏応力度で無次元化した値、横軸は式(3)による細長比である。同図中には、式(5)、式(6)に示す Johnson の放物線式とオイラー式で求める座屈曲線に加え、「鋼構造設計規準」⁴⁾による座屈曲線も併せて示す。

$\lambda \leq \lambda_0$ のとき

$$\sigma_c = \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\lambda / \lambda_0 \right)^2 \right\} \cdot \sigma_y \tag{5}$$

$\lambda > \lambda_0$ のとき

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \tag{6}$$

ただし、 σ_c : 山形鋼の座屈応力度(N/mm²)、 λ_0 : 限界細長比、 σ_y : 設計基準強度(N/mm²)、 E : ヤング係数(N/mm²)、 λ : 細長比

今回の実験より、補強前で細長比が 154~240 と比較的

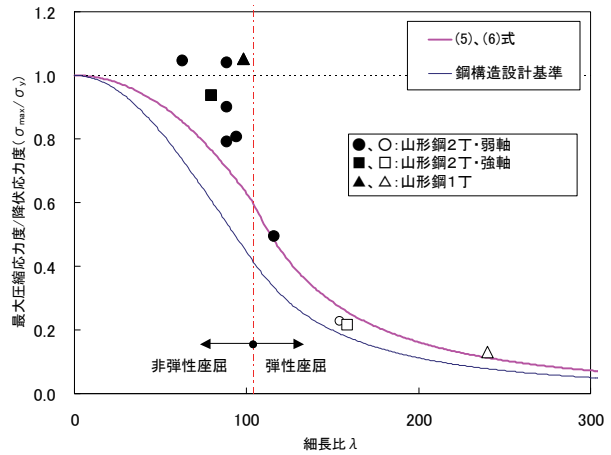


図-10 座屈応力度と細長比の関係

大きい領域でも補強効果があることが確認できた。また、補強した試験体についても細長比の増加と共に座屈応力度が低下しており、概ね式(5)、式(6)による座屈曲線で評価できること、また、実験値は「鋼構造設計規準」による座屈曲線を上回り、安全に評価できることが確認できた。

5. まとめ

今回の実験により、以下の知見を得た。

- i. 山形鋼を角型鋼管で補強することにより座屈耐力が大きくなること、座屈耐力は角型鋼管の曲げ剛性の増加に伴い大きくなることがわかり、補強部材として角型鋼管は有効である
- ii. 拘束材の種類として、角型鋼管の曲げ剛性が同じ場合、拘束材の間隔が大きくなるほど座屈耐力が小さくなる
- iii. 角型鋼管による角型鋼管の曲げ剛性と、拘束材の間隔の影響を考慮した提案式は、座屈応力度を安全に評価でき、本工法は耐震補強工法として有効である
- iv. ラチス柱を鋼板で座屈補剛することにより座屈耐力が上昇し、座屈補剛に効果がある

6. あとがき

既存ブレースに穴あけや溶接をすることなく座屈補剛する耐震補強工法の適用場面は、今後増えてくることが予想される。今後、開発した工法を積極的に実建物に適用していきたい。

【参考文献】

- 1) 小澤他、「鉄塔山形鋼トラス個材の座屈補強実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2006.9
- 2) 福岡他、「送電用山形鋼鉄塔柱材の補強に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003.9
- 3) 日本建築学会、「鋼構造座屈設計指針」、2009
- 4) 日本建築学会、「鋼構造設計規準」、2005