

軽量角形鋼による耐震天井構造の開発

Development of Earthquake-Resistant Ceiling Structure by Lightweight Square Steel

研究代表者 工学部建築学科*1 准教授 松本 慎也
Shinya Matsumoto
共同研究者 株式会社佐藤型鋼製作所*2 代表取締役 佐藤 公章
Masafumi Sato
広島大学名誉教授*3 藤谷 義信
Yoshinobu Fujitani

The Great East Japan Earthquake occurred on March 11, 2011, it has been reported that many dropped out damage for nonstructural components (ceiling) in a buildings. The fall of ceiling materials is high risk for human damage especially. Large space structures or public gymnasium, etc. must be a safe place, because of it will be used a shelter in a disaster. Therefore, it is important to grasp the seismic performance for nonstructural components such as ceiling. In this study, the basic characteristics of seismic performance for suspended ceiling structure are investigated. In this study, the suspended ceiling structure with improved seismic resistance (earthquake-resistant ceiling structures) using a lightweight steel pipe with caulking is proposed. In this paper, the results of vertical and horizontal loading test are shown, and the mechanical properties of suspended ceiling structure are verified.

Keywords: Ceiling structures, Lightweight square steels, Caulking

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、大規模空間を有する建築物における非構造部材（天井）の脱落被害が報告された⁽¹⁾。特に天井材の落下は人的被害の危険性が高く、体育館や公共の大空間構造物は地震時等に避難場所となるところであり安全な場所ではなならない。そのため、耐震性能を十分に把握することが重要である⁽²⁾⁽⁴⁾。

本研究ではこれまでに吊り天井構造の耐震性能に関する基礎的特性を調査するとともに⁽⁵⁾、かしめ加工によって成形された軽量形鋼管を用いて耐震性を向上させた新型の大型吊り天井構造（軽量耐震構造型ぶどう棚）を提案している⁽⁶⁾。本報告では、これらの研究において部材の詳細な力学的特性を検討をするために必要となる成形後の鋼材の引張材料試験および、角形鋼管の圧縮試験の結果について報告する。そして、部材を接合する際の接合金物の特性を実験により調査し、接合部のディテールを改良することで、より高い耐震性の軽量耐震天井を提案する。

2. 材料引張試験

本研究では、角形鋼管のコーナー部においてかしめ成形により嵌合した角形鋼管を用いる。このかしめ成形角形鋼管は図1に示すような断面形状であり、ボード類などの面材をスクリーネジによりビス止めする際に、スクリーネジ先端のプレを低減し、作業性を上げるために、二側面にビード加工面を有している。

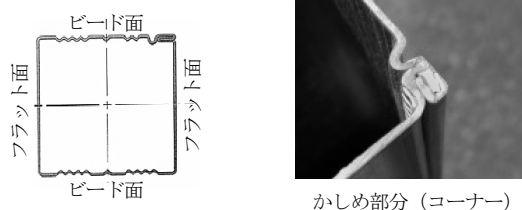


図1. かしめ成形角形鋼管の断面形状

鋼材は JIS G3302 に適合する溶融亜鉛めっき鋼板 (SGCC-Z12) である。鋼材の引張試験は成形前のコイルより切り出して製作した試験体 1, 冷間加工成形後の部材のフラット面より切り出して製作した試験体 2, 冷間加工成形後の部材のビード面より切り出して製作した試験体 3 の 3 種類とし、それぞれ同一種類に対し 3 体ずつ試験片を切り出し、JIS の金属材料引張試験方法 (JIS Z

*原稿受付 2014年5月12日

*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番
E-Mail matsumoto@hiro.kindai.ac.jp

*2 〒733-0802 広島市西区三滝本町2-24-24
E-Mail sato.m@satoock.co.jp

*3 〒739-2103 東広島市鏡山1-4-1

2241)に基づく引張試験を実施し、特性を比較した(表1参照)。試験体の板厚は1.2mmであり、図2に示す薄板材料に使用される5号試験片により引張試験を行った。試験に用いた鋼材コイルの材料検査証明書(ミルシート)に記載されている化学成分の特性値を表2に示す。いずれもJIS規格を適合している。

表1. 引張試験体一覧

試験体名	試験体の製作方法
引張試験体1	成形前のコイルより切り出して製作した試験体
引張試験体2	冷間加工成形後の部材のフラット面より切り出して製作した試験体
引張試験体3	冷間加工成形後の部材のピード面より切り出して製作した試験体

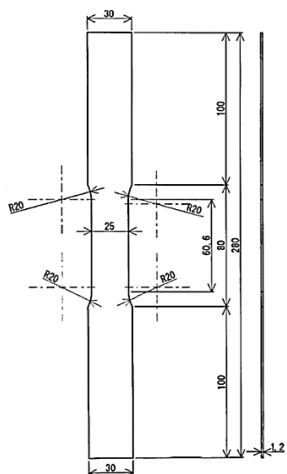


図2. 引張試験片(5号試験片)

表2. 材料検査証明書(ミルシート)

コイル寸法 (mm×mm×mm)	質量 (kg)	化学成分(%)				
		C ×10 ⁻³	Si ×10 ⁻²	Mn ×10 ⁻²	P ×10 ⁻³	S ×10 ⁻³
1.2×1219×844	9670	59	2.5	19	10	8

図3~図5に引張試験体1から引張試験体3の荷重-変位関係を示す。また、図6に引張試験体1-1, 引張試験体2-1, 試験体3-1に対する応力度-ひずみ度関係を比較する。

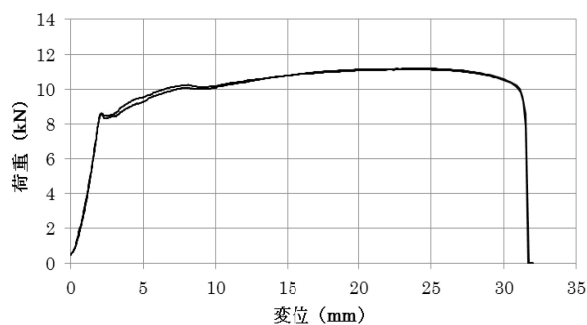


図3. 引張試験体1の荷重-変位関係

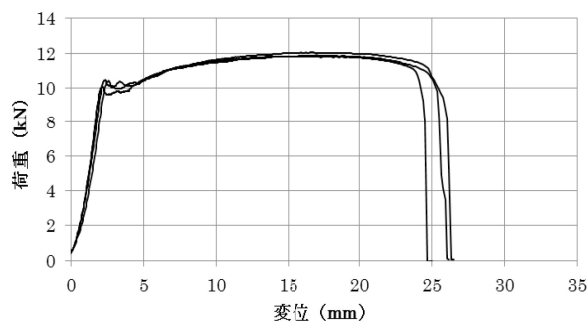


図4. 引張試験体2の荷重-変位関係

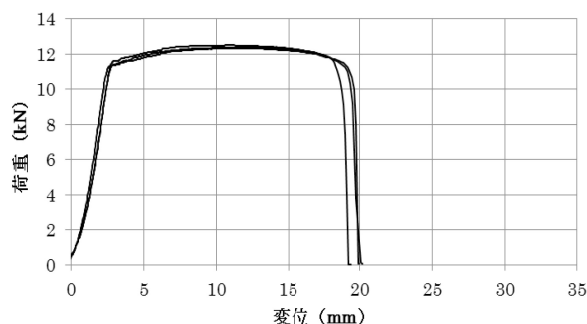


図5. 引張試験体3の荷重-変位関係

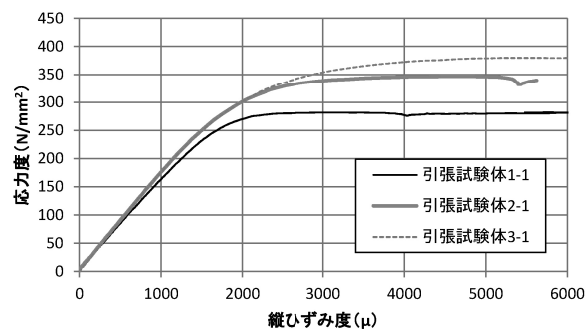


図6. 応力度-ひずみ度関係

表 3 に引張試験結果の一覧を示す。各試験体の引張強さ(3 試験体の平均値)は、引張試験体 1 では 372N/mm²、引張試験体 2 では 397N/mm²、引張試験体 3 では 414N/mm²であった。引張強さは成形前のコイルより切り出して製作した引張試験体 1 よりも、冷間加工成形後の部材のフラット面より切り出して製作した引張試験体 2、さらに冷間加工成形後の部材のビード面より切り出して製作した引張試験体 3 の順に大きくなるのがわかる。また、降伏応力度はそれぞれ、引張試験体 1 は 285N/mm²、引張試験体 2 は 343N/mm²、引張試験体 3 は 385N/mm²であった。また、ヤング係数は 1.69×10⁵ ~ 1.82×10⁵N/mm²であり、一般的な鋼材(2.05×10⁵N/mm²)に比べ 1 割程度小さいことが確認された。破断伸びは引張試験体 1 では 34.0%、引張試験体 2 では 32.8%、引張試験体 3 では 26.6%であり、引張強さが大きい試験体ほど破断伸びは小さくなるという一般的な鋼材の特性も確認された。ポアソン比は 0.309~0.322 であった。写真 1~写真 3 に各引張試験体の破断状況を示す。

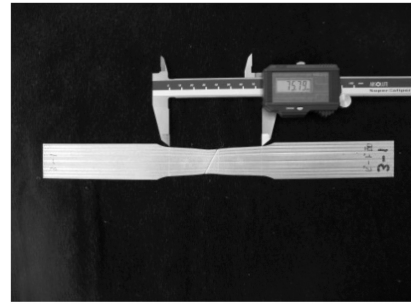


写真 3. 引張試験体 3-1 破断状況

3. 圧縮試験

部材が圧縮を受ける際の力学特性に関する基礎データを得るために、図 7 に示すような部材長 90mm と部材長 180mm の 2 種類の角形鋼管試験体(断面 45mm×45mm)に対し、圧縮試験を行った。このとき板厚は 1.2mm、1.0mm、0.8mm の 3 種類とし、板厚を変化させることで幅厚比を変化させた場合の圧縮強度の特性を検討する。表 4 に圧縮試験体の断面定数を示す。

表 3. 引張試験結果一覧

試験体	引張強さ		降伏応力度		ヤング係数		破断伸び		ポアソン比	
	σ_{max}		σ_y		E		δ		ν	
	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²		%			
引張試験体 1	1-1	370.2	281.7	285	160243	168771	34.48	34.0	0.317	0.316
	1-2	373.5	287.2	171295	174775	33.75		0.316		
	1-3	371.9	285.9	174775	33.77	0.316				
引張試験体 2	2-1	401.6	346.8	343	174808	181917	33.07	32.8	0.319	0.322
	2-2	394.0	334.9	186945	183998	32.38		0.334		
	2-3	396.0	348.5	183998	32.98	0.313				
引張試験体 3	3-1	411.0	379.7	385	176189	175218	26.32	26.6	0.317	0.309
	3-2	413.0	387.6	173281	27.52	0.308				
	3-3	417.2	386.9	176183	26.05	0.302				

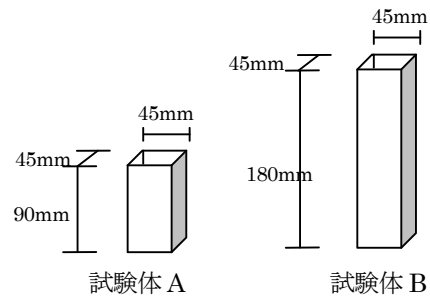


図 7. 圧縮試験体の形状 (板厚 1.2mm, 1.0mm, 0.8mm)

表 4. 圧縮試験体の断面定数一覧

試験体	板厚 t (mm)	幅 b (mm)	部材長 L (mm)	断面積 A (cm ²)	断面二次モーメント		断面係数		断面二次半径		幅厚比 b/t
					I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	Z _x (cm ³)	Z _y (cm ³)	i _x (cm)	i _y (cm)	
A-1	1.2	45	90	2.39	7.66	7.35	3.41	3.27	1.79	1.76	37.5
A-2	1.0	45	90	2.05	6.79	6.38	3.02	2.84	1.82	1.76	45.0
A-3	0.8	45	90	1.69	5.67	5.21	2.52	2.32	1.84	1.76	56.3
B-1	1.2	45	180	2.39	7.66	7.35	3.41	3.27	1.79	1.76	37.5
B-2	1.0	45	180	2.05	6.79	6.38	3.02	2.84	1.82	1.76	45.0
B-3	0.8	45	180	1.69	5.67	5.21	2.52	2.32	1.84	1.76	56.3

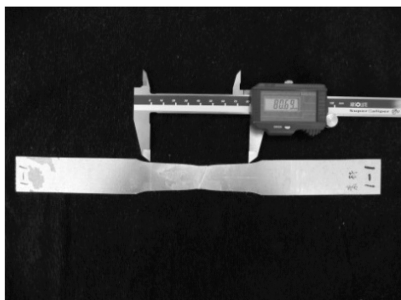


写真 1. 引張試験体 1-1 破断状況

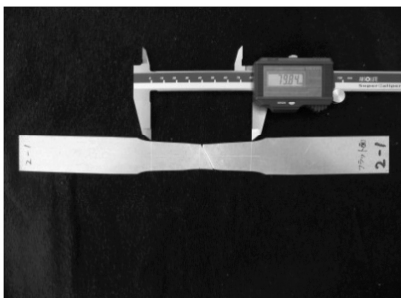


写真 2. 引張試験体 2-1 破断状況

図 8 および図 9 に試験体 A (部材長 90mm) および試験体 B (部材長 180mm) の圧縮応力度-変位関係を示す。これらの図より、板厚が小さくなるほど、局部座屈の影響が大きくなり、圧縮強度が小さくなるのがわかる。また、部材の長さは、板厚 1.2mm の試験体で若干の差があるものの、ほぼ同様の傾向であった。

表 5 に圧縮試験の結果一覧を示す。表には、試験体側面の各 4 面の中央にそれぞれ貼ったひずみゲージの値の平均値から求めた最大荷重時のひずみ度も合わせて示す。各試験体の圧縮強度に対する幅厚比の影響を図 10 に示す。また各板厚の試験体の圧縮強度の平均値を表 6 に示す。表中には、板厚 1.2mm における圧縮強度を基準とし

て、その値に対する圧縮強度の変化率を示す。表より、板厚が 1.2mm から 0.8mm へと減少すると、圧縮強度は約 0.69 倍となることがわかる。

試験体 A における終局状況を写真 4～写真 6 に示す。すべての試験体において、最大耐力を越え大きく変形しても、かしめ部分はしっかりと嵌合されており、かしめ部分がはずれることはなかった。

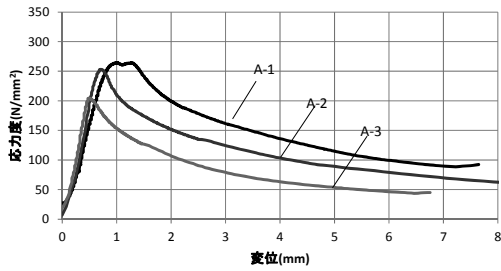


図 8. 圧縮応力度－変位関係（試験体 A）

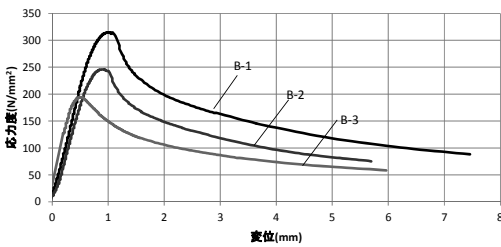


図 9. 圧縮応力度－変位関係（試験体 B）

表 5. 圧縮試験の結果一覧

試験体	最大荷重 Pmax(kN)	圧縮強度 σ (N/mm ²)	最大荷重時 ひずみ度 ϵ (μ)	幅厚比 b/t
A-1	63.2	264	1780	37.5
A-2	51.9	253	2764	45.0
A-3	34.5	204	915	56.3
B-1	75.2	315	2546	37.5
B-2	50.4	246	2168	45.0
B-3	32.9	194	904	56.3

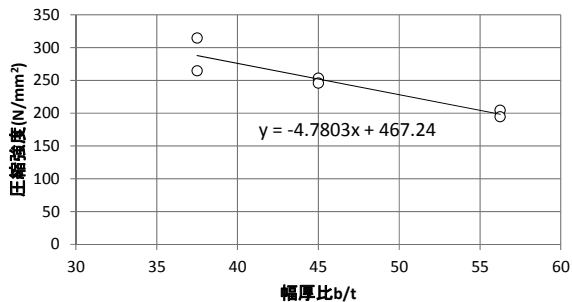


図 10. 幅厚比の影響

表 6. 圧縮強度特性（試験体平均値）

板厚 (mm)	断面寸法	圧縮強度 (N/mm ²)	変化率
1.2	45×45×1.2	290	1.00
1.0	45×45×1.0	250	0.86
0.8	45×45×0.8	199	0.69

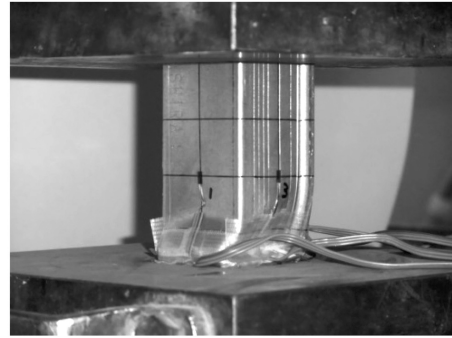


写真 4. 試験体 A-1 終局状況（板厚 1.2mm）

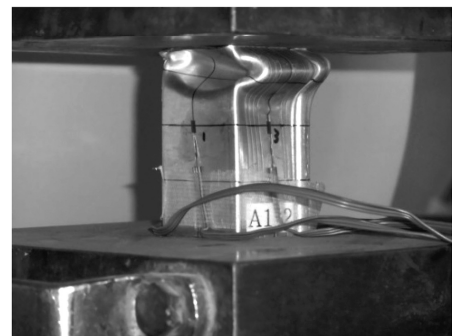


写真 5. 試験体 A-2 終局状況（板厚 1.0mm）

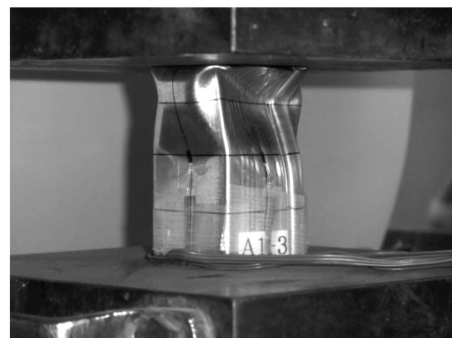


写真 6. 試験体 A-3 終局状況（板厚 0.8mm）

以上の引張試験、圧縮試験の結果から、板厚 1.2mm のかしめ成形軽量角形鋼管を設計に用いる場合の材料基準強度は端数を切り捨て、 $F=280\text{N/mm}^2$ とすることとした。また、鋼材のヤング係数は引張試験による最小値である $1.69 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ の値を用いることとした。

4. 耐震天井構造（ぶどう棚）

4.1 1段ブレース試験体

本研究では、天井懐高さを 3m 以上の天井構造を対象として軽量角形鋼管による耐震天井構造を提案する。写真 7 に 1 段ブレース試験体を示す。主な使用部材は表 7 に示す通りである。

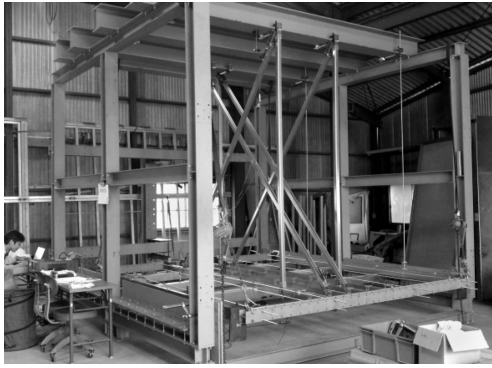


写真 7. 1 段ブレース試験体（鉛直補強材あり）

表 7. 使用部材断面

種別	寸法・板厚	単位重量 kg/m	断面積 cm ²	断面 2 次モーメント cm ⁴	
				I _x	I _y
水平材	100×45×1.2	2.91	3.71	50.8	13.7
ブレース材 鉛直材	45×45×1.2	1.87	2.39	7.66	7.35
吊りボルト	1/2'	-	0.925	0.0682	

1 段ブレースにおける試験体は鉛直補強部材のない試験体 1-1（図 11 参照）および鉛直補強部材のある試験体 1-2（図 12 参照）の 2 通りについて検討を行った。

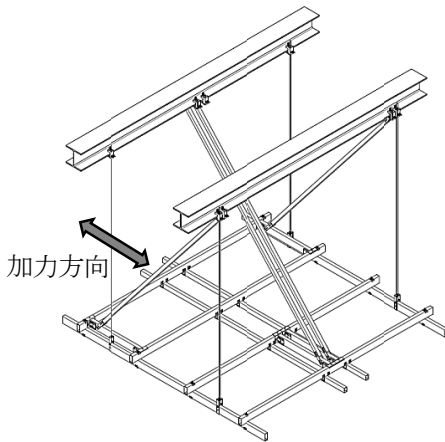


図 11. 試験体 1-1（鉛直補強材なし）

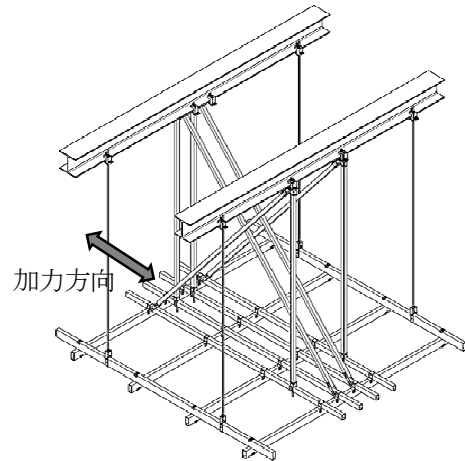


図 12. 試験体 1-2（鉛直補強材あり）

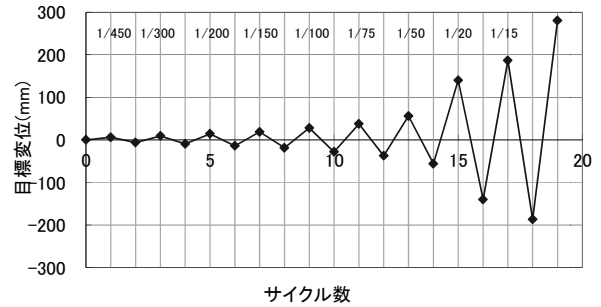


図 13. 荷重プログラム

加力試験は油圧ジャッキによって、水平方向に正負交番繰り返し荷重を作用させ、天井懐高さに対する水平変位が目標変形角 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/20, 1/15rad となるように漸増させ（図 13 参照）、最終サイクルは試験体が終局状況に至るまで静的加力を行った。

図 14 に試験体 1-1 および試験体 1-2 に対する荷重-変位関係を比較する。いずれの試験体もブレース材が座屈することで最大耐力となる破壊性状であった（写真 8, 写真 9 参照）。表 8 に 1 段ブレース試験体の耐力特性を示す。試験体 1-1 の最大耐力は 21.7kN であり、試験体 1-2 の最大耐力は 39.0kN であった。各試験体の質量がそれぞれ、試験体 1-1 は 107.32kg、試験体 1-2 は 129.95kg であるので、耐力重量比 (P/W) は試験体 1-1 は 20.6、試験体 1-2 は 30.6 となる。すなわち、1 段ブレース試験体では、鉛直補強材を設けることで、最大耐力は 1.8 倍増加し、耐力重量比は、1.5 倍の性能となり、鉛直補強部材の有効性が示された。

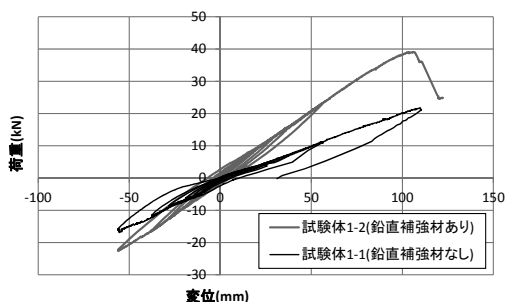


図 14. 荷重-変位関係



写真 8. 試験体 1-1 の終局状況 (ブレース材の座屈)



写真 9. 試験体 1-2 の終局状況 (ブレース材の座屈)

表 8. 1 段ブレース試験体の耐力特性

試験体名	鉛直補強材	最大耐力 P (kN)	質量 M (kg)	重量 W (kN)	耐力重量比 P/W
試験体 1-1	なし	21.7	107.32	1.05	20.6
試験体 1-2	あり	39.0	129.95	1.27	30.6

5. まとめ

本研究では、かしめ成形による軽量形鋼管の材料引張試験及び圧縮試験を行い、材料特性を把握した。そして耐震性を向上させた新型の大型吊り天井構造（耐震構造型ぶどう棚）を提案し、接合部のディテールに対する耐震性能を検討した。その結果、軽量で高い耐震性を有する天井構造を構築できた。

参考文献

- (1) 日経アーキテクチャ編，“東日本大震災の教訓 都市・建築編”，日経 BP 社，(2011-6)
- (2) 小林俊夫，由利隆行，荒井智一，“鋼製天井下地を用いた吊り天井の耐震性に関する研究”，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 630 号，(2008-8)，pp.1295-1302
- (3) 寺本翔史，永野康行，辻岡静雄，“耐震設計された天井の水平加力実験”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造 I，(2010-9)，pp.859-860
- (4) 高木圭一郎，渡辺恵介，大迫勝彦，吉田宏一，大庭章，小林俊夫，荒井 智一，“金属パネル天井の耐震性に関する研究（その 11）吊り下げ設備を含む天井の水平加力試験”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造 I，(2010-9)，pp.863-864
- (5) 松本慎也，藤谷義信，佐藤公章，“吊り天井構造の耐震性能に関する研究”，日本建築学会中国支部研究報告集，第 34 巻，(2011-3)，pp.57-60
- (6) 松本慎也，藤谷義信，佐藤公章，“吊り天井構造の耐震性能に関する研究”，日本建築学会中国支部研究報告集，第 35 巻，(2012-3)，pp.293-296
- (7) 日本建築学会，非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会，天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン，2013 年 3 月 4 日版報告書
- (8) 松本慎也，佐藤公章，藤谷義信，“軽量角形鋼管による耐震吊り天井構造の力学的特性に関する研究”，近畿大学工学部研究報告，No.47，(2013-12)，pp.49-54