斜め部材と下地材に角形鋼管を用いた在来工法天井の耐震対策

SEISMIC COUNTERMEASURES FOR CONVENTIONAL CEILINGS USING SQUARE STEEL PIPES FOR BRACE MATERIAL AND BASE MATERIAL

吉津利洋 — * 1 太田雅久 — * 2
久松千寿 — * 3 岸 千優輝 — * 4

Toshihiro YOSHIZU — * 1 Masahisa OTA — * 2
Chihiro HISAMATSU — * 3 Kazuyuki KISHI — * 4

キーワード：

吊り天井, 角形鋼管, 天井ユニット試験, 一方向加力試験, 斜め部材

Keywords:

Suspended ceiling, Square steel pipe, Ceiling unit test, Unidirectional force test, Brace material

We have devised a suspended ceiling with an oblique member, which is a C-section steel changed to a square steel pipe, for the ceiling foundation. In order to confirm the earthquake resistance of the devised ceiling foundation, a ceiling unit test was conducted. As a result, the following was found. For specimens with suspension lengths of 0.5m, 1.0m, and 1.5m, the earthquake resistance decreases as the suspension length increases.

1. はじめに

東日本大震災では、脱落等の軽量鉄骨天井の被害が多数発生した。国土交通省からは震災時の技術的助言が示されるなどの注意喚起がなされていたが、具体的な耐震基準や設計方法なども十分に整備されない状況で、大震災が発生したためであった。その後、特定天井(脱落によって重大な危害を生ずる恐れがある天井)¹⁾について、建築基準法施行令に基づいた構造耐力上の安全性を確保することを明確に義務づける技術基準(対象:6m超の高さにある200m²超の吊り天井に対しては、吊りボルト等の増設, 接合金物の強度向上等)が設定された。

対象外天井としては、吊り天井以外の天井、人に重大な危害を与えるおそれの低いもの(高さ6m以下、面積200m²以下、天井の質量が2kg/m²以下)、人に危害を与えるおそれがない場所に設置されているもので、居室、廊下など日常利用する場所に設けられるもの以外の天井が挙げられる。これらの天井については、設計者の判断により、安全を確保することとされている。

なお、既存の天井に対しては、新築時の基準または落下防止措置を行うこととされている。落下防止装置としては、天井が損傷しても落下しないような措置がなされているもの(ネットの設置、天井をワイヤー等で吊る構造等)とされている。

こうした状況で、新設工事における公共建築工事標準仕様書(建築工事編)「4節 軽量鉄骨天井下地」²⁾では、天井のふところが1.5m以上の場合は、補強用部材またはC-19×10×1.2(mm)以上を用いて、吊りボルトの水平補強、斜め補強(ブレース)を行うことと規定されているものの、その規定未満では、設計者の判断に委ねられている。

そのため、設計者によっては、天井のふところ1.5m未満に対しても、耐震性を向上するために、斜め補強を必要とする場合がある。

そこで、特定天井以外の耐震性の向上を確保するために、部材断面を向上させる目的から、主要構成部材をC形鋼から断面コーナー部をかしめ加工した冷間圧延による角形鋼管とする方法が提案されている³⁾。本報告では、主要構成部材である斜め部材および野縁受け材を、閉鎖型の角形鋼管とした。そこで、この部材性能を発揮させるため、ハンガーおよびクリップと野縁受けの接合をビス留めとした。さらに、野縁受けと野縁のクリップのズレを防止するため、野縁にズレ止め金物を用いる構造(図1参照)⁴⁾とした。

図1 ハンガー・クリップおよび斜め部材 概略図

¹⁾ 北海道科学大学 准教授・博士(工学)
(〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

²⁾ 常盤工業(株) 常務執行役員

³⁾ 常盤工業(株)技術研究所 研究員

⁴⁾ 北海道科学大学大学院 大学院生

¹⁾ Assoc. Prof., Hokkaido Univ. of Science, Dr. Eng.

²⁾ Managing Executive Officer, Tokiwa Kogyo Co., Ltd.

³⁾ Researcher, Technical Research Laboratory, Tokiwa Kogyo Co., Ltd.

⁴⁾ Graduate Student, Hokkaido Univ. of Science Graduate School

2. 試験目的

天井ユニットを対象として、従来の軽量鉄骨天井下地と、斜め部材および野縁受け材に角形鋼管を用いた天井下地（以下、「本技術」と称す。）との比較（比較試験）を行うとともに、本技術の吊り長さが変化した場合でも、耐震性を確保しているかを確認（耐震性試験）することを目的とした。

3. 比較試験

3.1 比較試験の試験概要

（1）試験体の種類および使用材料

試験体の種類および使用材料を表1に示す。同表の試験体 No. 10YNH-NN および試験体 No. 10YBH-NA は、従来の吊り天井下地の仕様とし、試験体 No. 10YNH-BA については、本技術の吊り天井下地とした。本技術では、斜め部材および野縁受け材に、角形鋼管を用いた。なお、角形鋼管は、C形鋼(CC-25: JIS A 6517)の弱軸方向の断面、二次モーメントは3倍以上の材料を選定した。

（2）試験体の形状

天井ユニットの試験体形状例を図2に示す。天井ユニットは、2.1m×2.1mとし、吊り長さは1.0m(吊りボルトから野縁下端の距離)とした。なお、吊りボルトはφ12mmを使用し、間隔を900mm×900mmとし、加力方向および直行方向に、それぞれ3本を設置した。また、野縁受けの間隔は900mm、野縁(CS-25, CW-25: JIS A 6517)の間隔は303mmとし、仕上げ材には石膏ボード(t=9.5mm)を使用した。

表1 試験体の種類および使用材料

試験体 No.	野縁受け材		斜め部材 寸法(mm)	ハンガー、 クリップ	ズレ止め
	寸法(mm)	I ^y (mm ⁴)			
10YNH-NN	C-38×12×1.6 (CC25型)	18,300 1,100	—	ネジ留め 無し	無し
10YNH-NA	C-38×12×1.6 (CC25型)	18,300 1,100	—	ネジ留め 有り	有り
10YNH-BA	□-32×14×1.6 (□-32×14×1.6) ²⁾	16,200 4,200	□-32×14×1.6	ネジ留め 有り	有り

1) 断面二次モーメント上端は強軸(Ix), 下段は弱軸(Iy)

2) ()内は、追加野縁受け材

図2 試験体形状例(野縁受け方向、斜め部材有り)

ここで、試験体 No. 10YNH-BA における斜め部材および野縁受け材との固定金具の取付け仕様を写真1に示す。

写真1 斜め部材および野縁受け材との固定金具の取付け仕様

3.2 比較試験の試験方法

天井ユニット試験体の野縁受け方向に対して、一方向の静的荷重を加え、最大荷重を確認した後、除荷を行うものとした。

3.3 比較試験の試験結果および考察

（1）試験結果一覧

試験結果一覧を表2に示す。同表中の降伏荷重(Py)は、「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」¹⁾第Ⅱ編天井およびその接合部の耐力・剛性の設定方法第4章天井ユニットの試験・評価に示される方法に準拠した値である損傷荷重を降伏荷重に読み替えるものとした。

降伏荷重(Py)の算出は、次の①～③の手順とした。

①荷重－変位曲線に基づき、初期剛性(eK)とする直線を直線Ⅰとした。②eK/3の傾きをもつ直線を、荷重－変位曲線を接するように平行した直線を直線Ⅱとした。③直線Ⅰと直線Ⅱの交点を降伏荷重とした。

同表中の試験体 No. 10YNH-NN および試験体 No. 10YNH-NA では、吊りボルトの下部が水平変位するのみで、荷重の上昇が認められなかったため、最大荷重は計測できなかった。また、降伏荷重の算定は、荷重－変位曲線に基づき、初期剛性(eK)とした直線の接点とした。

同表中の弾性ひずみエネルギー量は、荷重と変位を乗じて2で除した値(三角形の面積)を示した。

同表から、本技術の試験体 No. 10YNH-BA は、従来の試験体 No. 10YNH-NN と比較して、初期剛性、降伏荷重およびエネルギー吸収量を上回っており、耐震性が向上することが確認された。さらに、従来の試験体 No. 10YNH-NN と試験体 10YNH-NA を比較して、ハンガー、クリップおよびズレ止め対策にネジ留めをしても、初期剛性および降伏荷重に大差がないことが示された。

表2 試験結果一覧

試験体 No.	初期剛性 eK ¹⁾ (kN/mm)	降伏 荷重 Py(kN)	最大 荷重 Pu(kN)	弾性ひず みエネルギー 量 ²⁾ (kNmm)	最大荷重時の 破壊状況
10YNH-NN	0.003	0.20	—	5.6	—
10YNH-NA	0.004	0.18	—	3.7	—
10YNH-BA	0.750	14.2	15.7	200.6	斜め部材の固定金物 用ビスのせん断破壊

1)初期剛性(eK)は、荷重－変位曲線に基づき、算出した。

2)弾性ひずみエネルギー量は降伏荷重(Py)までとした。

(2) 荷重(P)－変位(δ)関係

荷重(P)－変位(δ)関係を図3～図5に示す。同図には、降伏荷重を求めるため、直線Ⅰ(朱線)または直線Ⅱ(青線)を示した。ただし、図3および図4については、直線Ⅰのみの明記とした。

図3 荷重(P)－変位(δ)関係(試験体 No. 10YNH-NN)

図4 荷重(P)－変位(δ)関係(試験体 No. 10YNH-NA)

図5 荷重(P)－変位(δ)関係(試験体 No. 10YNH-BA)

図3～図5から、吊り高さが1.0mにおいて、吊り天井下のC形鋼の野縁受けのみでは、最大荷重までの変位量が大きく、耐震性の向上が必要と考えられる。このことから、斜め部材が必要であることが分かった。そこで、斜め部材の断面形状としては、C形鋼と比較して、閉鎖型の角形鋼管は、弱軸の断面2次モーメントが3倍以上ある角形鋼管を選定した。さらに、野縁受け材も同材とした。

上ある角形鋼管を選定した。さらに、野縁受け材も同材とした。

4. 本技術の耐震性の確認試験^{5), 6)}

4.1 試験概要

斜め部材および野縁受け材に角形鋼管を用いた本技術では、特定天井への適用を目標としている。このため、吊り長さ6.0mとする前に、それ以下の吊り長さの耐震性の向上を確認する必要がある。

そこで、吊り長さが2.0mと3.0mおよび4.5mの3種類の天井ユニットに対して、加力試験を行い、天井ユニットの水平耐力を確認した。なお、水平補強は、新設工事における公共建築工事標準仕様書(建築工事編)「4節 軽量鉄骨天井下地」²⁾において、「水平補強は、縦横方向に間隔1.8m程度に配置する。」との記述を考慮して、吊り長さ2.0mと3.0mは吊りボルト中央に1本、4.5mは1.5m間隔に2本設置した。なお、吊りボルト長さが2.0m、3.0mおよび4.5mの水平補強材の端部については、固定するものとした。

(1) 試験体の種類および使用材料

試験体の種類を表3に、試験体の使用材料を表4に示す。表3から、天井ユニットは、吊りボルトの長さを0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、3.0mおよび4.5mの6種類(6シリーズ)とし、吊りボルトのスパン(間隔:900mm)の倍数とした場合、長方形(短辺:2スパン、長辺:2, 4, 6スパン)の3種類の形状とした。また、天井ユニットの主な構成部材は、「3.比較試験」と同じとし、異なる項目を表4の通りとした。

(2) 試験体形状

試験体形状例を図6～図8に示す。また、試験体No. 30YUHおよび試験体No. 45YUHの試験体形状写真を写真2に示す。

表3 試験体の種類

シリーズ 種類	試験体 No.	加力方向	吊り天井の寸法		吊りボルト	
			吊りボルト スパン	水平補強材@ ×本(段)	長さ (m)	本数 (本)
05 シリーズ	05YUH 05YNH	野縁受け 野縁	1.8m×1.8m (2スパン×2スパン)	—	0.5	9
10 シリーズ	10YUH 10YNH	野縁受け 野縁			1.0	
15 シリーズ	15YUH 15YNH	野縁受け 野縁			1.5	
20 シリーズ	20YUH 20YNH	野縁受け 野縁	3.6m×1.8m (4スパン×2スパン)	@1.0m×1	2.0	15
30 シリーズ	30YUH 30YNH	野縁受け 野縁		@1.5m×1	3.0	
45 シリーズ	45YUH 45YNH	野縁受け 野縁		@1.5m×2	4.5	21

表4 試験体の使用材料

シリーズ 種類	試験体 No.	野縁受け材	水平補強材	吊りボルト補強材
05 シリーズ	05YUH 10YUH 15YUH	□-32×14×1.6	—	—
10 シリーズ	05YNH 10YNH 15YNH	□-32×14×1.6 (□-32×14×1.6)	—	—
20 シリーズ	20YUH 30YUH	□-32×14×1.6	□-32×14×1.6	□-32×14×1.6 水平補強材上部に設置
30 シリーズ	20YNH 30YNH	□-32×14×1.6 (□-32×14×1.6)		
45 シリーズ	45YUH 45YNH	□-32×14×1.6 (□-32×14×1.6)	□-32×14×1.6	□-32×14×1.6 水平補強材と水平補強材の間に設置

* ()内は追加野縁受け材

図6 試験体形状(野縁受け方向)例(No. 05YUH, 10YUH, 15YUH)

図7 試験体形状(野縁受け方向)例(No. 20YUH, 30YUH)

図8 試験体形状(野縁受け方向)例(No. 45YUH)

写真2 試験体形状(試験体 No. 30YUH, 45YUH)

4.2 試験概要

天井ユニットの加力方法は、野縁受け方向(試験体 No. ○○YUH)および野縁方向(試験体 No. ○○YNH)の両方に対して、油圧ジャッキを用いて一方向加力を行う。なお、吊り長さが 2.0m, 3.0m および 4.5m (20 シリーズ, 30 シリーズおよび 45 シリーズ) に設置した水平補強材の端部は、鉄骨フレームに固定するものとした。

4.3 試験結果および考察

(1) 試験結果一覧

耐震性試験結果一覧を表 5 に示す。同表中の平均値は、加力方向が異なる試験体(野縁受け方向, 野縁方向)の平均値を示した。

また、表中の試験体 No. 30YUH と試験体 No. 45YUH および試験体 No. 45YNH の破壊状況写真を写真 3 および写真 4 に示す。

表 5 耐震性試験結果一覧

シリーズ 種類	試験体 No.	初期剛性 eK ¹⁾ (kN/mm)	降伏 荷重 Py(kN)	最大 荷重 Pu(kN)	エネルギー 吸収量 ²⁾ (kNmm)	最大荷重時 の破壊状況
05 シリーズ	05YUH	1.70	27.2	29.7	325.8	斜め補強材上側の固定金物の变形
	05YNH	0.90	18.8	27.3	634.5	—
	平均値	1.30	23.0	28.5	480.2	—
10 シリーズ	10YUH	1.32	17.6	20.9	335.3	野縁受け部材のせん断変形
	10YNH	0.75	14.4	15.7	270.4	—
	平均値	1.04	16.0	18.3	302.9	—
15 シリーズ	15YUH	0.73	14.1	15.9	243.3	斜め部材の固定金物用ビスのせん断破壊
	15YNH	0.55	13.7	16.7	445.7	追加野縁受け部材の座屈
	平均値	0.64	13.9	16.3	229.7	—
20 シリーズ	20YUH	1.60	20.3	23.8	372.1	水平補強材, 吊りボルトの座屈
	20YNH	1.50	13.6	20.7	288.3	—
	平均値	15.5	17.0	22.2	330.2	—
30 シリーズ	30YUH	1.34	13.8	23.0	883.1	斜め部材の座屈
	30YNH	0.56	15.8	17.4	391.5	野縁方向の斜め部材固定金具の变形
	平均値	0.95	14.8	20.2	637.3	—
45 シリーズ	45YUH	0.58	19.7	21.3	493.3	斜め部材の座屈
	45YNH	0.48	13.6	16.7	522.2	野縁方向の斜め部材固定金具の变形
	平均値	0.53	16.7	19.0	507.8	—

1)初期剛性(eK)は、直線 I から算出した。

2)エネルギー吸収量は最大荷重(Pu)までとした。

(a) 水平補強材が無い試験体

水平補強材が無い試験体(05 シリーズ, 10 シリーズおよび 15 シリーズ)では、載荷方向が野縁方向に比べ、野縁受け方向の初期剛性(eK)および降伏荷重(Py)が高くなることが分かった。これは、水平力が、野縁受け方向の場合、野縁受け材(角形鋼管)自体に直接加わるのに対して、野縁方向は野縁(CC-25, CW-25)のクリップを介して、野縁受けに伝達されるためと考えることができる。

野縁受け方向と野縁方向の平均値から、吊り長さが長くなるに伴い、初期剛性, 降伏荷重, 最大荷重(Pu)およびエネルギー吸収量が低下する傾向が示された。破壊形式から、水平力に対して斜め部材が耐力負担となったため、固定金物や野縁受け材が損傷する結果となった。

(b) 水平補強材を有する試験体

水平補強材を有する試験体(20 シリーズ, 30 シリーズおよび 45 シリーズ)では、加力方向が野縁方向に比べ、野縁受け方向の初期剛性(eK)および最大荷重(Pu)が高くなることが分かった。また、野縁

受け方向と野縁方向の平均値から、吊り長さが長くなるに伴い、初期剛性および最大荷重が低下する傾向が示された。

破壊形式から、水平補強材の間隔が 1.0m である 20 シリーズでは、水平補強材と野縁受け(追加野縁受け)材に設置したが、斜め部材の負担が高いため、水平補強材および吊りボルトが座屈した。また、水平補強材の間隔が 1.5m である 30 シリーズおよび 45 シリーズでは、水平補強材下側には、吊りボルト補強材が無いため、斜め部材に水平力が集中し、横座屈や受け部材の変形に至ったことが分かった。

写真3 試験体破壊状況(試験体 No. 30YUH)

写真4 試験体破壊状況(試験体 No. 45YUH, 45YNH)

(c) 水平補強材の有無による比較

野縁受け方向と野縁方向の平均値において、20 シリーズの初期剛性(eK), 降伏荷重(Py), 最大荷重(Pu)およびエネルギー吸収量が 10 シリーズと比較して、高くなることが分かった。

また、30 シリーズの初期剛性(eK), 降伏荷重(Py), 最大荷重(Pu)およびエネルギー吸収量が 15 シリーズと比較して、高くなることが分かった。

図9 荷重(P)-変位(δ)関係(試験体 No. 05YUH, No. 05YNH)

(2) 荷重(P)-変位(δ)関係

荷重(P)-変位(δ)関係を図9～図14に示す。同図の降伏荷重は、直線Ⅰと直線Ⅱの交点の荷重とした。同図から、加力方向が野縁方向と比較して、野縁受け方向の降伏荷重(Py)および最大荷重(Pu)が高い値が示された。

(3) エネルギー吸収量と固定金物のせん断力(Q)の関係

表7の破壊形式から、試験体は、斜め部材および野縁受けの固定金具のせん断破壊、水平補強材(試験体 No. 20YUH, No. 20YNH)または水平補強材の座屈(試験体 No. 30YUH, No. 45YUH)の3種類に分類されることが分かった。

図10 荷重(P)-変位(δ)関係(試験体 No. 10YUH, No. 10YNH)

図11 荷重(P)-変位(δ)関係(試験体 No. 15YUH, No. 15YNH)

図12 荷重(P)-変位(δ)関係(試験体 No. 20YUH, No. 20YNH)

図 1 3 荷重 (P) - 変位 (δ) 関係 (試験体 No. 30YUH, No. 30YNH)

図 1 4 荷重 (P) - 変位 (δ) 関係 (試験体 No. 45YUH, No. 45YNH)

(4) 接合部における負担荷重 (N)

斜め部材および野縁受け材との固定金物に変形した試験体 (No. 05YUH, No. 15YUH, No. 05YNH, No. 15YNH, No. 30YNH, No. 45YNH) を対象として、降伏荷重 (Py) 時における野縁受け方向または野縁方向と、斜め部材の固定金物 (写真 1 参照) に加わる荷重の負担割合を示すため、固定金物をピン接合と仮定して算出した。その結果、固定金物の水平方向に対する負担荷重 (N) は、 $0.57 \times Py \sim 0.97 \times Py$ であった。ここで、エネルギー吸収量と固定金物が負担する荷重 (N) の関係を図 1 5 に示す。

図 1 5 エネルギー吸収量と固定金物が負担する荷重 (N) の関係

図 1 5 から、野縁方向と比較して、野縁受け方向の固定金物のエネルギー吸収量が低下することが示された。すなわち、野縁受け方向では、水平力が角形鋼管 (斜め部材および野縁受け材) の強軸に作用したため、固定金物に変形したと考えることができる。一方、野縁方向では、野縁受け材の角形鋼管の弱軸で作用するため、クリップを介して野縁受け材に変形したものと思われる。

5. まとめ

吊り天井における比較試験の試験概要および本技術の耐震性の確認試験の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 吊り長さが 1.0m の吊り天井 (C 形鋼の野縁受け材) において、斜め部材および野縁受け材を角形鋼管に変更することで、降伏荷重が 71 倍となる。
- (2) 吊り長さ (天井ふところ) が高くなるに伴い、初期剛性、降伏荷重、最大荷重およびエネルギー吸収量が低下する。
- (3) 水平補強材を用いない吊り天井 (吊り長さ 0.5m, 1.0m および 1.5m) に斜め部材を設置した場合、載荷方向が、野縁受け方向の場合、初期剛性および降伏荷重は、野縁方向と比較して高い。
- (4) 水平補強材 (間隔 1.0m または 1.5m) および吊り補強材を設置した場合、載荷方向が、野縁受け方向の場合、初期剛性および最大荷重は、野縁方向と比較して高い。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所，一般社団法人新・建築士制度普及協会：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説，2013.10
- 2) 国土交通省大臣官房官庁営繕：公共建築工事標準仕様書（建築工事編）平成 31 年版，pp. 164-165, 2019.4
- 3) 松山幸平，松本慎也，佐藤公章：軽量角形鋼管を用いた耐震天井構造の耐力特性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 859-860, 2016.8
- 4) 鎌田孝行，太田雅久，加茂千寿：特定天井への適用を目的とした耐震天井工法の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 861-862, 2016.8
- 5) 吉津利洋，太田雅久，鎌田孝行，加茂千寿，柳田佳伸：特定天井への適用を目的とした耐震天井工法の開発（その 2 斜め部材を有する天井ユニット），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp. 1145-1146, 2019.9
- 6) 加茂千寿，太田雅久，鎌田孝行，柳田佳伸，吉津利洋：特定天井への適用を目的とした耐震天井工法の開発（その 3 斜め部材と水平補強材を有する天井ユニット），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp. 1147-1148, 2019.9

[2019 年 10 月 1 日原稿受理 2019 年 10 月 31 日採用決定]