

# 接続部の強化による耐震天井の開発

## Development of Aseismic Ceiling by Strengthening Connecting Parts

茂木正史\* 起橋孝徳\* 岸本 剛\* 山上 聡\*

### 要 旨

東北地方太平洋沖地震による被害を受けて天井の耐震性能の強化が急務となっているなか、天井下地材に建築用鋼製下地材を使用して構築する一般的な吊り天井（以下：従来天井）を改良して天井の耐震補強工法を開発した。始めに加力実験、振動台実験により野縁と野縁受けを結合するクリップが耐震性能の弱点となっていることを確認し、クリップを補強する金物を考案した。次に、従来天井に、クリップの補強やブレース材の強度を増加させる対策を施し、従来の耐震天井の目標レベルである天井面加速度 1.0G の振動を受けても損傷せず、水平変位が 5cm 以内に収まることを確認した。さらに、ブレース両端の取り付け部分の弱点などを補強することにより、国交省基準案で提案されている天井面加速度 2.2G で損傷せず、水平変位が 5cm 以内に収まることを確認した。

キーワード：耐震天井、振動台実験、天井面加速度、クリップ、ブレース

### 1. まえがき

天井を構成する材料は非構造部材に属し、その耐震性能の確保については、厳密に法制化されず、地震被害の発生を受けて、その都度、国や学協会から対策や指針が提案されるに留まっていた。例えば、平成 15 年に発生した十勝沖地震では、空港ターミナルビル等の天井が被害を受け、国土交通省から技術的助言「大規模空間を持つ建築物の天井の崩壊対策について」<sup>1)</sup>が、また、平成 17 年に発生した宮城県沖地震では体育館の天井が被害を受け、技術的助言「地震時の天井の崩壊対策の徹底について」<sup>2)</sup>が発行された。技術的“助言”というゆえに法的強制力が無いことが天井の耐震化が十分に進まなかった原因と考えられる。

このような状況のなか、平成 23 年に発生した東北地方太平洋沖地震においては、天井の被害が大規模かつ広範囲で生じ、天井が床面まで落下する被害も多数発生した<sup>3)</sup>。これを受け、国土交通省は天井の脱落による被害の防止を目的に天井落下対策に係る技術基準原案<sup>4)</sup>を作成し、平成 26 年の法制化を目指している。この原案では、適用条件が限定されるものの、非構造部材である天井の耐震仕様や設計法が法制化されること、耐震天井用の設計用地震力が天井面加速度で 1.0G 程度であったものが、最大 2.2G まで引き上げられることが注目される。今後、非構造部材についても、構造部材と同様に所定の地震動レベルに対して耐震性能を確保することが求められる。

以上の背景から、技術的基準案の要求性能を満たす天

井の耐震補強工法の開発に取り組んだ。既存の補強工法には、ブレースを取り付ける部材を天井面に新たに設置して、ボルトや野縁受けを介さずに天井に生じる地震力を直接ブレースに負担させる<sup>5)</sup>などの工夫がある。今回、開発した工法の基本方針は従来工法を可能な限り活用し、一部の部品の追加や部材の性能アップ、取り付け方法の改良等によって、必要な耐震性能を確保することである。本報では、従来天井に加えた改良の概要と、各改良による天井の耐震性能の向上について報告する。

### 2. 耐震補強の方針とクリップ補強金物

#### 2.1 目標性能と耐震補強の方針

目標クラスと目標性能を次のように設定した。

- A クラス：天井面加速加速度 2.2G に対して
- ・ 損傷（部材の脱落、変形）なし
  - ・ 変位は 5cm 以内
- B クラス：天井面加速加速度 1.0G に対して
- ・ 損傷（部材の脱落、変形）なし
  - ・ 変位は 5cm 以内

耐震補強の方針を以下に示す。

- i. 経済性を重視し、従来天井を活かした、改良を行う。従来天井とは天井下地材に建築用鋼製下地材（JIS A 6517）を使用し、野縁等は 19 型を採用して構築した<sup>6)</sup>吊り天井である
- ii. 天井板に作用する地震力をすべてブレースで受ける構造とする。そのためにブレース材の耐力、ブレース両端の接続部分の強度を確保する。ブレース

\* 技術研究所

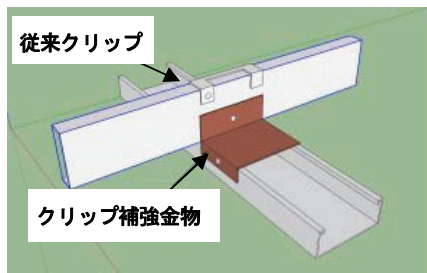


図-1 クリップ補強金物

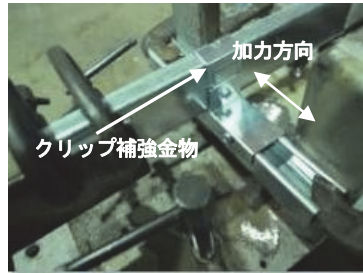
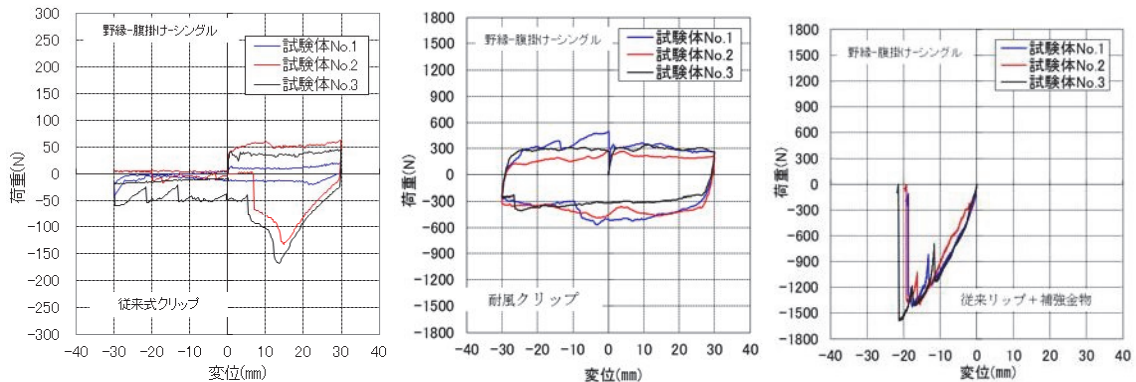
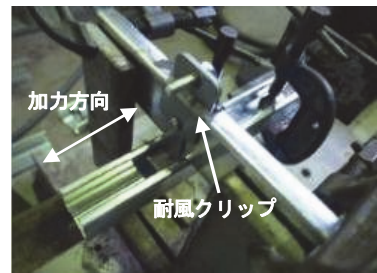


写真-1 試験状況 (野縁方向加力)



従来天井クリップ

耐風クリップ

従来天井クリップ+補強金物

図-2 クリップの静的加力試験結果 (野縁方向加力)

下部の接続部分では次節で述べるクリップ補強金物を使用する

- iii. 地震力を受けた際の天井の変位を抑えるために、地震力の大部分を負担するブレースの剛性と、ブレースに地震力を伝える各部の剛性を高める

### 2.2 クリップ補強金物

天井板が受ける地震力は、天井ボード、野縁、クリップ、野縁受け、繋ぎ材(野縁方向)を経てブレースに伝わるが、後述するようにクリップが天井脱落の原因となることが分かった。そこで、ブレース1組に対して6ヶ所のクリップが地震力を伝達する構造を計画し、対象となるクリップを補強することとした。図-1に従来天井クリップを補強するクリップ補強金物を示す。クリップ部の目標性能は最大荷重が720Nで、最大荷重時の変位を1cm以下とした。単位面積重量が20kg/m<sup>2</sup>の天井板20m<sup>2</sup>に2.2Gの天井面加速度が発生し、その慣性力を2組のブレースで受ける。さらに1組のブレースに対して6個のクリップを配置した場合に、クリップ1個が受ける荷重は720Nとなり、この値を目標値とした。また、最大荷重時のクリップの許容変位1cmは天井全体の許容水平変位の目標である5cm以内に収まる値として設定した。

クリップ強度と変形性能を調べるために、“従来天井クリップ”、“耐風クリップ”(軒天井用でビス止め式)および“従来天井でクリップ+クリップ補強金物”について静的加力試験を行った。写真-1に静的加力試験の

状況を、図-2に野縁受けを固定した状態で野縁方向に加力した際の各試験体の変位と荷重の関係を示す。“従来天井クリップ”の最大荷重は150N程度であるが、40Nで滑りが生じた。“耐風クリップ”は野縁受け方向の加力ではビスにより滑りを止めているが、ビスが無い野縁方向は約300Nで滑りが生じた。“従来天井クリップ+補強金物”は、野縁受け方向、野縁方向共ビス止めのため滑りが発生していない。野縁方向では耐力が1300N程度であり、10mm変形時の荷重は約1000Nであった。以上より、“従来天井クリップ+補強金物”が目標最大荷重720Nを満足し、その変位も7mm程度で、目標の1cm以内に収まる。

### 3. 振動台実験概要

#### 3.1 試験体

試験体の概要を図-3に、試験体全景を写真-2に示す。試験体は従来天井を基本としており、ケースごとに補強して製作した。本節ではすべての補強ケースに共通する内容について記す。

振動台の上に設置した鉄骨フレームの梁より900mm間隔に配置したφ9mm、長さ1500mm(水平材不要の最大値)の吊りボルト試験体を懸架した。天井の試験体寸法は4500mm×4500mmであり、天井地下材料には建築用鋼製下地材の19型を使用し、野縁材はシングル野縁(19×25×0.5)およびダブル野縁(19×50×0.5)を

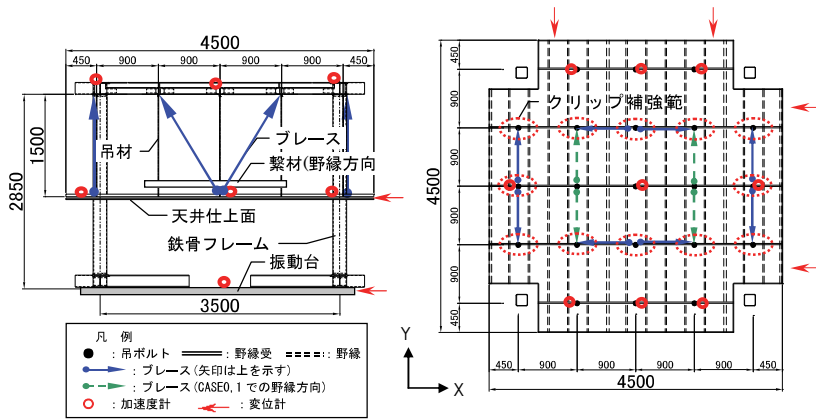


図-3 試験体概要



写真-2 試験体全景

300mm 間隔で配置した。野縁受けは鋼材 ([-38×12×1.2]) とし、野縁と直交して 900mm 間隔で配置し、野縁と野縁受けの結合には現場で折り曲げて留める方式のクリップ (厚さ 0.6mm) を使用した。ブレースは野縁方向と野縁受け方向にそれぞれ 2 組配置した。

### 3.2 補強ケース

補強ケースを表-1 に示す。天井重量は従来天井の CASE0 では 15kg/m<sup>2</sup> で、CASE1 以降の補強を加えたケースでは想定される最大重量の 25kg/m<sup>2</sup> であった。

CASE1~CASE3 では野縁と野縁受けを結合するクリップに補強金物 (写真-3) を追加した。その取り付け範囲を図-3 に示す。また、野縁受けと吊りボルトを繋ぐハンガーは軒天で採用されるビス止め式の耐風ハンガーとした。これは従来天井に採用したハンガーよりも胴部が短く、板厚が厚く、野縁受けへの固定度も高い。さらに、野縁受けの軸まわりの回転を抑制して下地のがたを防止する役目も果たす。また、ブレースのサイズを大きくした。

CASE2、CASE3 ではブレースの上部接続部を改良した。CASE0、CASE1 では、写真-4 に示すように X 方向のブレースを吊りボルト上部に掛け、その下に重ねて Y 方向のブレースを掛けている。そのため、吊りボルトに曲げを発生させるうでの長さが Y 方向では長くなり、ブレースからの軸力の作用により吊りボルトに曲げが生じやすい。そこで、CASE2、CASE3 では X 方向と Y 方向のブレースの同一の吊りボルトへの接続を避けた。また、写真-5 に示すようにブレース接続金物を使用して、ブレース上端をスラブに接触させる構造として、ブレースの軸力の伝達によって吊りボルトに生ずる曲げ変形を抑制した。

CASE3 ではさらに、野縁方向のブレースに野縁受けからの地震力を伝達する繫材 (図-3、写真-8) のサイズを大きくした。

### 3.3 計測項目と計測方法

鉄骨フレーム、天井面および振動台の加速度、ならびに天井面、振動台の変位を測定した。加速度計と変位計

の位置を図-3 の試験体概要に示す。

図-3 に示すように野縁受方向を X 方向、野縁方向を Y 方向とした。加速度計は鉄骨フレームの梁の天端に 7 か所、天井面では吊りボルト近傍の野縁受けに 9 ケ所、および振動台 (振動台内蔵) 1 ケ所、計 17 ケ所で、それぞれ X、Y、Z の 3 方向が測定できるように設置した。変位は天井面 (レーザー式変位計) と振動台 (振動台内蔵) の水平変位を X、Y の各方向 2 ケ所ずつ個別に計測し、天井の応答変位を算出した。

### 3.4 加振方法

加振には定格荷重 20t、最大加速度 3.0G、平面寸法 4m×4m の 3 次元 6 自由度振動台を用いた。加振波は補強方法の違いや加振中の天井の損傷による天井の応答特性 (固有振動数) の変化を適切に評価できるようにランダム波 (1~12Hz、位相ランダム) を採用し、継続時間を 60 秒とした。各試験ケースで X 方向、Y 方向交互にその入力加速度レベルを 50gal から 100gal、200gal と段階的に上げた。なお、各試験ケースのランダム波加振に先立ってパルス波加振を行い、試験体の固有振動数が作成したランダム波の周波数帯に含まれていることを確認した。また、従来天井 (CASE0) と改良天井 (CASE3) の加振では実地震波 (2004 年新潟県中越地震小千谷市 (震度 6) で観測) で 3 次元方向の耐震性能も調べた。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 パルス波加振結果と補強の効果

表-2 にパルス波加振 (100gal) により求めた各ケースの固有振動数とホワイトノイズ加振から求めた鉄骨フレームの固有振動数を示す。鉄骨フレームは固有振動数が天井と重ならないように計画したが、その固有振動数は 15Hz と設計どおりで、最少でも天井の固有振動数 10.3Hz の 5 割増しである。すべてのケースにおいて X 方向の固有振動数が Y 方向よりも大きい。これは、X 方向のブレース下部が直接、野縁受けの強軸方向 (野縁

表-1 補強ケース

ケース	タイプ	天井質量 kg/m <sup>2</sup>	ハンガー	クリップ補強	ブレース材					
					材料	上部接続部	下部接続部 (野縁受方向)	下部接続部 (野縁方向)	繫材 (野縁方向)	
CASE0	従来	15	ビス無し	無し	[-38x12x1.2	従来 (写真-4)	共通 (写真-6)	(写真-7)	[-38x12x1.2	
CASE1	補強1	25	ビス付き	補強金具 (写真-3)	[-45x30x1.4	改良 (写真-5)		改良 (写真-8)		[-45x30x1.4
CASE2	補強2									
CASE3	補強3									



写真-3 クリップ補強金物



写真-4 ブレース上部 (従来)



写真-5 ブレース上部 (改良)



写真-6 ブレース下部  
(野縁受け方向: 共通)



写真-7 ブレース下部 (繫材)  
(野縁方向: 従来)



写真-8 ブレース下部 (繫材)  
(野縁方向: 改良)

受けに平行に力が伝達)に接合されているのに対して、Y方向では、ブレースが繫材を介して野縁受けの弱軸方向(野縁受けの直角方向に力が伝達)に接続されている(写真-7、写真-8)ことが原因である。また、上述したようにX方向よりもY方向の剛性が小さい状況を改善するように補強を行ったのでX方向よりもY方向の方が補強後の固有振動数の増加割合が大きく補強効果が大きい。補強1によってY方向の剛性(固有振動数)が増加した要因は野縁方向のブレース下部の接続方法を写真-7から写真-8のように改良した効果である。補強2によってY方向の剛性が増加した原因はブレースの上部接続方法を写真-4から写真-5のように改良

表-2 鉄骨フレームと試験体の初期固有振動数

ケース	タイプ	固有振動数: Hz		
		加振方向		
		X(野縁受け)	Y(野縁)	Z(鉛直)
CASE0	従来	8.0	3.0	12.0
CASE1	補強1	10.1	5.0	13.0
CASE2	補強2	10.3	7.7	13.0
CASE3	補強3	10.3	7.8	18.0
鉄骨フレーム		15.0	15.0	23.0

した効果である。

#### 4.2 ランダム波加振結果

##### a. 補強された天井の耐震性能と損傷状況

天井の耐震性能は当該天井が損傷しない天井面の最大加速度(慣性力)とそのときの応答変位で評価される<sup>4)</sup>。表-3に損傷直前および損傷が発生した加振の応答加速度と応答変位をまとめた。ここで応答加速度と応答変位は各計測点の最大値の平均である。CASE1はBクラスの目標である天井面加速度の最大値1.0Gで損傷しない性能を達成しており、CASE3はAクラスの目標である天井面加速度の最大値2.2Gで損傷しない性能を達成している。各補強ケースにおける損傷状況を以下に示す。

CASE0は、X方向940cm/s<sup>2</sup>、Y方向830cm/s<sup>2</sup>の応答加速度までは損傷しなかったが、X方向は600cm/s<sup>2</sup>入力時に応答加速度1040cm/s<sup>2</sup>、応答変位11.5cmでクリップが外れ、ブレースが座屈した。Y方向は600cm/s<sup>2</sup>入力時に応答加速度1090cm/s<sup>2</sup>、応答変位13.5cmでクリップが外れた。この試験では図-1に示した爪型クリップが脱落したことから、従来天井の耐力はクリップの強度で決まることを確認した。



表一 3 損傷直前および損傷時の応答加速度と応答変位

ケース	タイプ	加振方向	未損傷最大 応答加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )	未損傷最大 応答変位 (cm)	損傷時 応答加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )	損傷時 応答変位 (cm)
CASE0	従来	X方向	940(400)	7.6(400)	1040(600)	11.5(600)
		Y方向	830(400)	9.1(400)	1090(600)	13.5(600)
CASE1	補強1	X方向	1610(600)	4.0(600)	—	—
		Y方向	1180(400)	3.6(400)	1460(600)	9.4(600)
CASE2	補強2	X方向	2120(600)	2.7(600)	2820(1000)	17.0(1000)
		Y方向	1990(600)	3.8(600)	—	—
CASE3	補強3	X方向	2490(600)	1.3(600)	—	—
		Y方向	2630(1000)	4.1(1000)	—	—

( )内は入力加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )

CASE1 ではクリップ補強金具 (図一 1、写真一 3) とブレース断面を大きくした効果により少なくとも  $1180 \text{ cm/s}^2$  の応答加速度まで損傷しないことを確認したが、Y 方向、 $600 \text{ cm/s}^2$  の入力時に、応答加速度  $1460 \text{ cm/s}^2$ 、応答変位  $9.4 \text{ cm}$  でブレース上端側の吊りボルトが破断した。これは X 方向と Y 方向のブレース上端が同じ吊りボルトに取り付けられ (写真一 4)、さらにクリップ補強金具によりブレース下側の弱点が補強され、水平剛性が増加したため、天井の応答加速度が大きくなり、より大きな荷重が吊元に集中したことによるものと考えられる。

CASE2 は両方向のブレース材の上端が同じ吊りボルトに接続しないように Y 方向のブレースの位置を変更した結果、 $1990 \text{ cm/s}^2$  の応答加速度まで損傷しなかったが、X 方向、 $1000 \text{ cm/s}^2$  の入力時に応答加速度  $2820 \text{ cm/s}^2$

でブレース材と金物を止めるビスが抜け、ブレースが外れた。また、野縁受けからブレースに力を伝達する繋ぎ材に撓みが生じた。

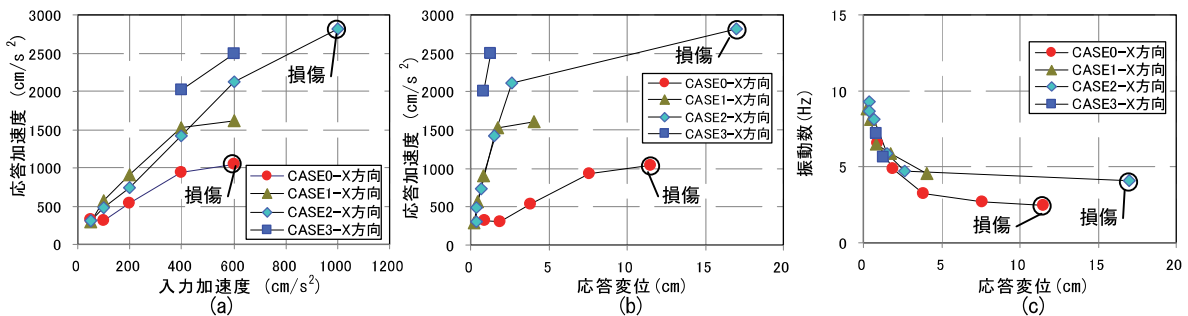
CASE3 では、ブレース取り付け部のビス本数を 4 本に倍増し、Y 方向のブレース下端が取り付く繋材 (写真一 8) の断面サイズを大きくした。その結果、X 方向は入力加速度  $600 \text{ cm/s}^2$  で応答加速度  $2490 \text{ cm/s}^2$ 、応答変位  $1.3 \text{ cm}$ 、Y 方向は入力加速度  $1000 \text{ cm/s}^2$  で応答加速度  $2630 \text{ cm/s}^2$ 、応答変位  $4.1 \text{ cm}$  の加振が損傷なく実施できた。

b. 補強された天井の応答特性

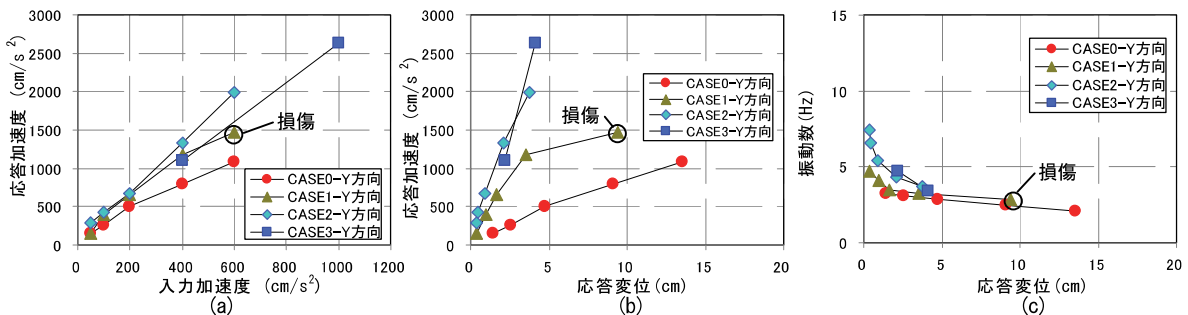
X、Y 方向加振における入力加速度と応答加速度、応答変位と応答加速度、応答変位と振動数の関係を図一 4 (a)、(b)、(c)、および図一 5 (a)、(b)、(c) に示す。

図一 4 (a)および図一 5 (a)より、未損傷試験体の加速度応答倍率 (入力加速度に対する応答加速度の比) は、X 方向の CASE0 で、約 2.5 が、CASE1、CASE 2 では約 4.0 に、Y 方向の CASE0 で、約 1.3 が、CASE1、CASE 2 では約 2.5 となっており、CASE1 と CASE2 の差は小さい。両方向とも CASE0 (従来) から CASE1 (改良) への補強による加速度応答倍率の増加が他のケース間よりも大きく、最初の補強が振動系を最も大きく変化させたことが分かる。

加速度から慣性力が求まるので、応答変位と応答加速度の関係から変位と荷重の関係を読み取ることができる。図一 4 (b)、図一 5 (b)より、CASE0 から CASE1 への



図一 4 X 方向 (野縁受け方向) 応答結果



図一 5 Y 方向 (野縁方向) 応答結果

補強によって他のケース間よりも剛性が大きく増加したことを確認できる。また、同図において X 方向と Y 方向のこう配（剛性）を比較すると、X 方向では CASE1 と CASE2 の剛性はほぼ等しいが、Y 方向では CASE2 が CASE1 より大きくなって、加速度応答倍率と同じ傾向を示している。これはパルス波加振結果で述べた X 方向と Y 方向のブレースと野縁受けの接続状態や野縁受けの方向の違いによると考えられ、Y 方向が段階的に補強の影響が現れている。CASE3 は X 方向において剛性がさらに大きくなっている。

図-4 (b)、図-5 (b) より、損傷前の各ケースで、X 方向と Y 方向の最大応答加速度の小さい方の値を耐力とすると、CASE1、CASE2、CASE3 の順に耐力が上がり、同じ応答加速度に対する変位は小さくなっている。CASE1 が耐震天井 B クラスを CASE3 が耐震天井 A クラスの性能を実現している。

図-4 (c)、図-5 (c) より、応答変位が大きくなる程、固有振動数が小さくなり、水平剛性の低下が推測される。これは、天井が複数の部材で構成されており、変位が大きくなるほど接合部など緩みが発生しやすくなるためと考えられる。

### 4.3 地震波加振結果

CASE0（従来天井）と CASE3（耐震天井 A クラス）の地震波加振結果を表-4 に示す。CASE0 では Y 方向のブレースが座屈し、周囲を除くクリップが脱落し、野縁が撓んだが、CASE3 は健全であった。基準案<sup>4)</sup>では鉛直方向の振動に対する性能は求めているが、CASE3 が 1830cm/s<sup>2</sup> の鉛直応答加速度でも損傷しないことが確かめられた。

表-4 地震波加振結果

	応答加速度 cm/s <sup>2</sup>	
	CASE0 従来式	CASE3 補強3
X方向	860	1880
Y方向	930	2580
Z方向	1050	1830
加振結果	・ブレース座屈 ・クリップ脱落 ・野縁撓み	・損傷なし

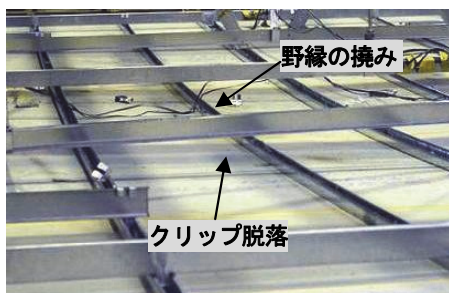


写真-9 地震波加振による損傷 (CASE0)

## 4. まとめ

従来型の軽量鉄骨下地の天井に補強を加えることによって天井面加速度 2.2G でも健全な耐震天井 A クラス、1.0G でも健全な耐震天井 B クラスの耐震天井を開発し、その性能を振動台実験により確認した。

以下に開発過程で明らかになった項目を示す。

- i. 天井に加わる地震力をブレースで受ける方式では、ブレース上下の接続部の強度確保が重要であり、クリップ補強金物やブレース上部接続金物が強度確保に有効であることを確認した
- ii. 従来天井において、野縁受けとブレースの接続の状況の違いより、野縁方向の剛性が野縁方向よりも低い（変位が大きくなる）という課題を、野縁受け方向のブレースと野縁受けの接続法方法を工夫することで改善できた
- iii. 水平剛性が応答変位に依存し、応答変位が大きくなるほど低下する傾向が確認された

## 5. あとがき

現在国土交通省で検討されている耐震天井には天井高さや天井面積に適用の条件があるが、この条件を満たさない天井にも、同程度の性能を求める動きがある。状況に応じて、今回開発した A クラスと B の天井仕様を使い分けて、安全な天井の実現に貢献したい。

### 【参考文献】

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課長、「大規模空間を持つ建築物の天井の崩壊対策について（技術的助言）」、平成 15 年 10 月
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課長、「地震時における天井の崩落対策の徹底について（技術的助言）」、平成 17 年 8 月
- 3) 一般社団法人建築性能基準推進協会、「平成 23 年度建築基準整備促進事業 地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討中間報告書」、平成 23 年 7 月
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課長、「天井落下対策に係る技術基準原案」、平成 24 年 7 月
- 5) 欄木龍大他、「耐震性に優れた大規模天井工法の開発」、大成建設技術センター報 第 44 号、2011
- 6) 例えば、国土交通省大臣官房官庁営繕部、「公共建築工事標準仕様書（建築工事編）」、社団法人公共建築協会、平成 19 年