

天井耐震クリップ工法の開発

稲井 慎介*¹渡壁 守正*¹
石岡 拓*¹

概 要

近年、体育館などの大空間建物において地震などによる天井脱落被害が数多く発生しており、その耐震対策が検討されている。天井の落下原因については、これまで数多くの研究成果が発表されており、未だ解明されていない部分はあるものの、その被害状況から考察すると、特に天井部材の接合部の破壊に起因するものが多いとされている。

本報告では、低コストで、かつ簡易な施工で天井部材接合部の耐震性能を向上させることができる「天井耐震クリップ工法」の概要と耐震性能の検証実験結果について報告する

Development of Seismic Clip Method of Ceiling

Shinsuke INAI*¹ Morimasa WATAKABE*¹
Taku ISHIOKA*¹

Recently, the building of large space has been dropped ceiling damage occurred, measures that have been studied. The cause of the ceiling fall, has announced a number of research results, which is especially due to joint damage. In this report, we introduce an effective method to reinforce the joint of ceiling.

*¹ 技術研究所*¹ Technical Research Institute

天井耐震クリップ工法の開発

稲井 慎介*1
 渡壁 守正*1
 石岡 拓*1

1. はじめに

近年、体育館などの大空間建物において地震などによる天井脱落被害が数多く発生しており、その耐震対策が検討されている。天井の落下原因については、これまで数多くの研究成果が発表されており、未だ解明されていない部分はあるものの、その被害状況から考察すると、特に天井部材の接合部の破壊に起因するものが多いとされている。

筆者らも、これまでに天井の落下原因を検証するために種々の実験を実施し、接合部を効果的に補強することが天井の耐震対策において有効であることがわかった。

本報告では、コストや施工性を考慮して新しく開発した「天井耐震クリップ工法」の概要と、静的実験による力学的特性の検証結果、振動台実験による耐震性能の検証結果について報告する。

2. 天井の被害事例

天井落下被害の一例を写真-1に示す。天井は吊りボルトと野縁受けを残し、野縁と天井が一体で落下しており、この被害は天井接合クリップの破壊に起因することが推測できる。天井落下被害については、必ずしもこのようなケースばかりではないものの、クリップが破壊し、野縁と天井が一体で落下する被害がこの他にも数多くみられる。

3. 耐震クリップの概要

上記のような被害事例をもとに、天井接合部を効果的に補強することを目的に「天井耐震クリップ工法」を開発した。図-1に耐震クリップの概要を示す。耐



写真-1 天井落下被害の一例

震クリップは、クリップのサイズにあわせて、ダブル用、シングル用の2種類のサイズがあり、既存のクリップ上からはめ込んで補強する。

写真-2に取り付け方法を示す。既存のクリップの上からはめ込むのみで、溶接やボルトが不要で、取り付けが容易な工法である。

4. 静的実験

4.1 実験概要

「天井耐震クリップ工法」の補強効果を検証するため、静的加力実験を実施した。静的加力装置の概要を写真-3に示す。

加力は、接合部の剛性と耐力のみを評価することを目的に、できるだけ他の部材に変形が生じないようにクリップ近傍にハンガーと吊りボルトを設置、野縁受けを引き上げることにより行った。

4.2 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。実験パラメータは、クリップの有無の他に、野縁、野縁受け材料がJIS材と一般材（JIS規格を満たさない材）、クリップのサイズ（ダブルとシングル）、および掛け方（背掛け、腹掛け、

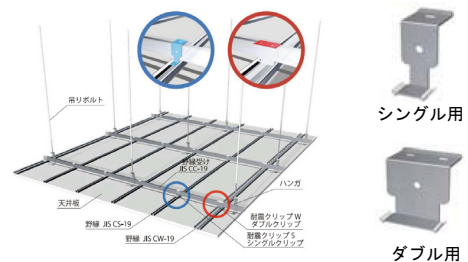
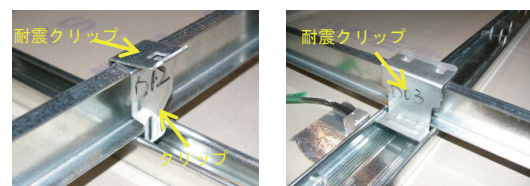


図-1 耐震クリップ工法概要



野縁の間から挿入 上からはめ込む 取付け完了



耐震クリップ取付け完了状況

写真-2 耐震クリップ取付け手順

*1 技術研究所

両掛け)とした。耐震クリップはそれぞれ既存クリップの反対側から取り付けるため、背掛け時は耐震クリップは野縁受け腹側から、腹掛け時は背側から取り付けた(図-2)。また、両掛けはクリップを背掛けした後、その上から腹掛けた。

計測は、試験装置により荷重と変形を、ひずみゲージによりクリップと耐震クリップのひずみを計測した。試験は、それぞれ同条件で3回実施した。

4.3 静的実験結果

1) 荷重と変形の関係

接合部の荷重と変形の関係を図-3に示す。背掛けの場合、初期剛性は耐震クリップの有無にかかわらずほぼ同じであった(図中の点線)。これは、背掛けのクリップにより剛性が決まり、腹側から掛けた耐震クリップが剛性にあまり寄与していないためと考えられる。JIS材でみると、耐震クリップなしでは約700Nで接合部が破壊したのに対し、耐震クリップを取り付けた場合、最大耐力は約1700Nとなり接合部耐力が2倍以上となった(図中の▼)。また、シングル、ダブルとも同程度の耐力であり、サイズの違いはほとんど

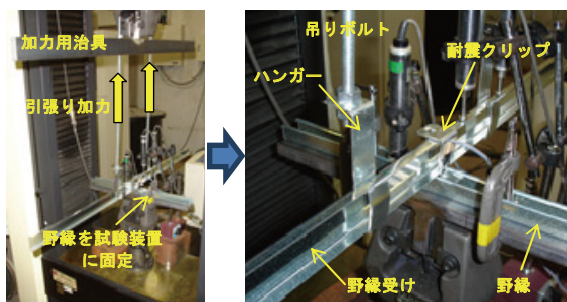


写真-3 静的実験状況

表-1 静的実験ケース

番号	記号	JIS	一般	耐震クリップ	サイズ	掛け方
1	JIS-WB-N	○	-	-	W	B
2	JIS-WF-N	○	-	-	W	F
3	JIS-WD	○	-	-	W	D
4	JIS-SB-N	○	-	-	S	B
5	JIS-SF-N	○	-	-	S	F
6	JIS-SD	○	-	-	S	D
7	JIS-WB-R	○	-	○	W	B
8	JIS-WF-R	○	-	○	W	F
9	JIS-SB-R	○	-	○	S	B
10	JIS-SF-R	○	-	○	S	F
11	GNR-WB-N	-	○	-	W	B
12	GNR-WF-N	-	○	-	W	F
13	GNR-WD	-	○	-	W	D
14	GNR-SB-N	-	○	-	S	B
15	GNR-SF-N	-	○	-	S	F
16	GNR-SD	-	○	-	S	D
17	GNR-WB-R	-	○	○	W	B
18	GNR-WF-R	-	○	○	W	F
19	GNR-SB-R	-	○	○	S	B
20	GNR-SF-R	-	○	○	S	F

※ W:ダブルサイズ、S:シングルサイズ、B:背掛け、F:腹掛け、D:両掛け

みられなかった。これは、後述するように最終的な破壊が耐震クリップの根元の野縁リップ部(後述写真-4参照)の塑性化に起因するため、この部分にサイズの違いがないことが原因と考えられる。

一方、腹掛けの場合、耐震クリップなしでは背掛けに比較して剛性が大きく低下するのに対し、耐震クリップを取り付けた場合、背掛けとほぼ同じ剛性、耐力であった。ダブルの耐力が高いのは最終的な破壊が耐震クリップツメの曲げ降伏によるため、クリップ幅の違いが影響したものと考えられる。

次に一般材についてみると、耐震クリップを取り付けた場合、背掛けでは剛性はJIS材に比較して小さい傾向はあるものの、最大耐力に大きな違いはなかった。また、腹掛けの場合、耐震クリップを取り付けた場合、取り付けない場合に比較して耐力は2倍以上高くなるものの、JIS材の場合と比較してかなり小さい耐力であった。これは、耐震クリップの最終的な破壊が野縁リップ部の破壊によるため、特に野縁材の厚さの影響を受けやすいことが原因と考えられる。

次に、図-4に両掛けと耐震クリップ(耐震クリップは腹掛け)の荷重と変形の関係の比較を示す。両者はクリップ根元が破壊するまで(図中▼)はほぼ同じ関係であるが、両掛けの場合はその後耐力が上がらず、補強効果は耐震クリップに比して小さいことがわかる。

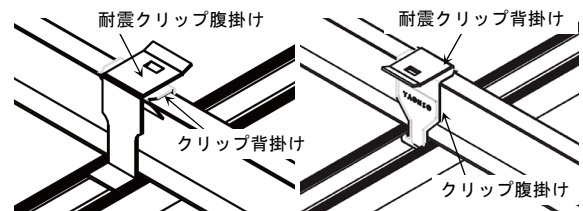


図-2 耐震クリップの掛け方

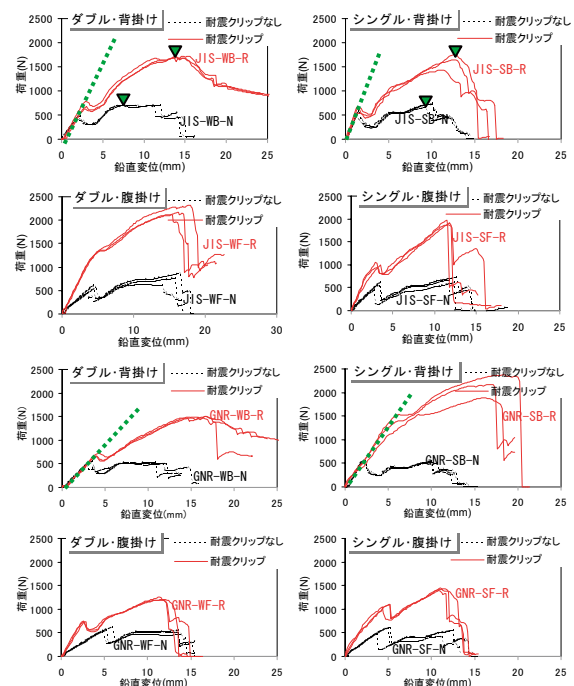


図-3 荷重と変形の関係

これは、上から被せたクリップはそれほど補強効果がないためと考えられる。

2) クリップのひずみ

図-5にクリップ、耐震クリップの変形とひずみの関係の一例(実験番号4と実験番号9)を荷重とともに示す。クリップは約1000 μ のひずみで降伏していることが確認でき、耐震クリップを取り付けた場合、クリップと逆方向のひずみ(クリップが引張りなので、耐震クリップは圧縮)が生じ、クリップ降伏後も高い靱性を保持していることが確認できた。耐震クリップは約1500 μ のひずみで降伏した。

3) クリップの破壊形状

前述したそれぞれの実験ケースのクリップ、耐震クリップの最終破壊形状を写真-4に示す。写真はJIS材のダブルクリップのみを示したが、一般材、シングルクリップの破壊形状はおおむね同じであった。

背掛けクリップの場合は、クリップ根元と野縁リップ部から破壊した(写真1段目)。前述したようにシングルとダブルで最大耐力に大きな違いがないのはこのためである(根元の仕様はシングルとダブルに差がない)。

腹掛けクリップの場合は、クリップツメが開いて最終的な破壊に至ることがわかった(写真2段目)。腹掛けの場合は、クリップツメ部のサイズが大きいダブルの方が耐力が高かった。

次に、耐震クリップあり背掛けの場合は、背掛けのクリップが根元から外れ、耐震クリップは外れないものの、野縁受け材の回転を拘束できずに破壊に至り、耐震クリップが十分な耐震性能を発揮できていなかった(写真3段目)。ただし、実際の天井材ではクリップは単独で用いられることはなく、両隣にもクリップがあるので、このような野縁受けが回転する破壊形状を示さないと考えられる。

耐震クリップあり腹掛けの場合、耐震クリップは背掛けとなり、最終的には耐震クリップ根元が破壊した(写真4段目)。このケースが最も高い耐力となった。最後に両掛けの場合、上から被せたクリップはあまり補強効果がなく、最終的には背掛けと同じ破壊形状となった(写真5段目)。

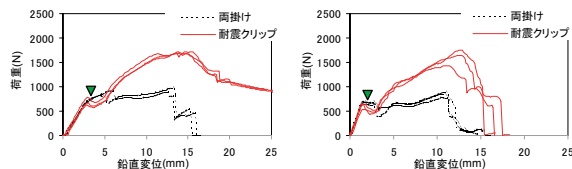


図-4 静的実験結果(両掛けとの比較)

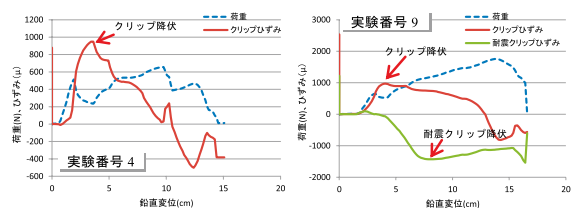


図-5 クリップの変位とひずみの関係

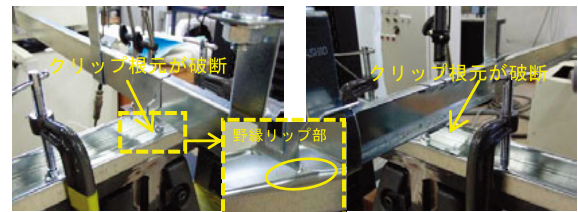
5. 振動台実験

5.1 実験概要

耐震クリップの耐震性能を検証するための振動台実験を実施した。振動台実験の概要を写真-5に示す。天井試験体サイズは2.7m×5mとし、天井耐震クリップ工法と在来工法の性能を比較するため、それぞれ4体ずつ計8体の天井試験体を作製した。天井材はすべてJIS材の19形とし、天井端部にクリアランスは設けなかった。天井ボードは、9.5mmのプラスタボード2枚張りとした。

5.2 試験体と試験ケース

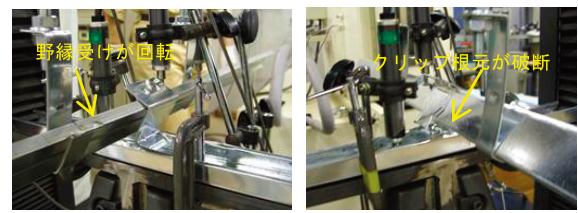
実験ケースと試験体図をそれぞれ表-2、図-6に示す。実験パラメータは、耐震クリップの有無の他に、天井の吊り長さや天井形状(フラット、曲面)とした。吊り長さが1500mmを超える試験体については、それぞれ振れ止めを設置した。試験体Ⅲの曲面部は一般



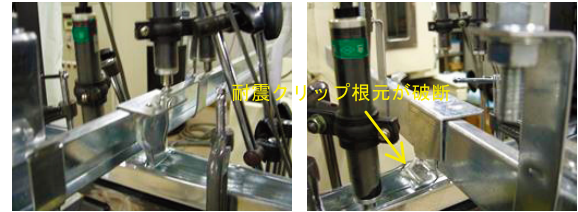
JIS-WB-N の破壊形状



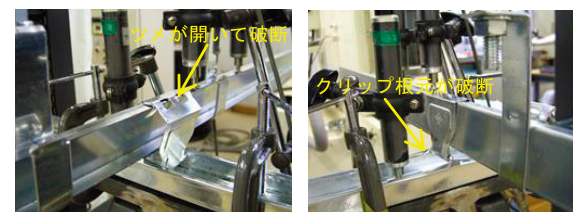
JIS-WF-N の破壊形状



JIS-WB-R の破壊形状



JIS-WF-R の破壊形状



JIS-WD の破壊形状

写真-4 クリップ、耐震クリップの破壊状況

の施工方法に倣い、クリップを両掛けとした。なお、実験は、実験ケースごとに天井耐震クリップ工法と在来工法による2つの試験体を同時加振した。

5.3 入力波

振動台に入力した波は、実際に天井落下被害を受けた体育館を対象とした地震応答解析の結果を用いた。体育館近傍で観測された地震動を用いて解析を行い、その屋根部の応答結果を振動台に入力した。

図-7にシミュレーション解析モデルを、図-8、図-9にそれぞれ入力地震動、屋根部の応答加速度時刻歴を示す。入力波は建物構造軸にあわせ、NS方向、EW方向に座標変換して入力した。入力地震動の加速度は最大で830galであるが、屋根部で加速度は大きく増幅し、張間方向で4800gal、上下方向で5800galの応答加速度となっていることがわかる。特に水平方向入力による梁中央の上下応答加速度が大きくなっている。振動台実験は張間方向と上下方向を対象としたため、桁行方向の応答加速度は示していない。

振動台性能の上限から2000galを超える加速度は再現できないため、実験は水平方向で約1200gal、上下方向で約1800galを最大入力として行った（解析結果の約1/3の入力、計測震度6.3）。この他、最大入力に対し倍率を12%、25%、40%、50%、70%と変えて実施した。入力方向は、水平一成分+上下成分の2方

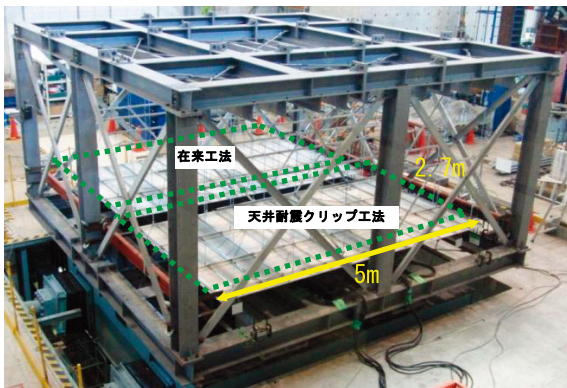


写真-5 振動台実験状況

表-2 実験ケース

試験体番号	吊り長さ (mm)	天井形状	振れ止め
I	800	フラット	なし
II	1500	フラット	2対
III	800 ~ 2400	曲面	局面部1対+水平
IV	2400	フラット	2対2段+水平

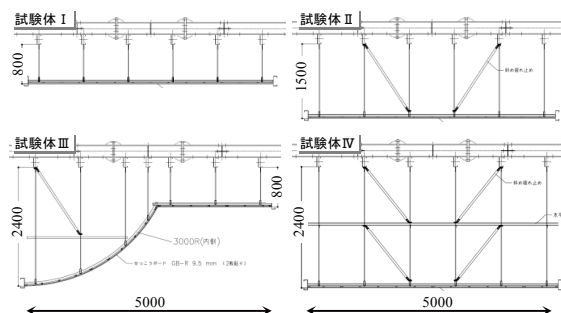


図-6 試験体図

向とした。振動台実験で用いた入力波の時刻歴波形(屋根応答加速度の約1/3)とそのスペクトルを図-10、図-11に示す。

5.4 計測計画

計測箇所を図-12に示す。加速度計を9カ所、変位計を4カ所にそれぞれ設置した。上下加速度は9カ所すべてで、水平加速度は天井中央部3カ所で測定した。また、天井に回転などが生じていないこと確認するため加振直交方向の変位も測定した。また、クリップ、および耐震クリップにひずみゲージを取り付けた。

5.5 試験結果

1) 天井の固有振動数

各実験ケースのランダム波入力から求めた天井の固有振動数の一覧を表-3に示す。各ケースとも端部に

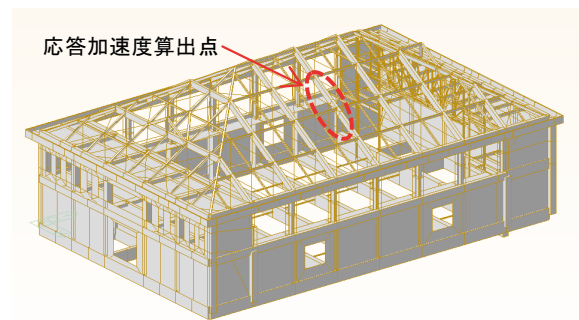


図-7 解析モデル

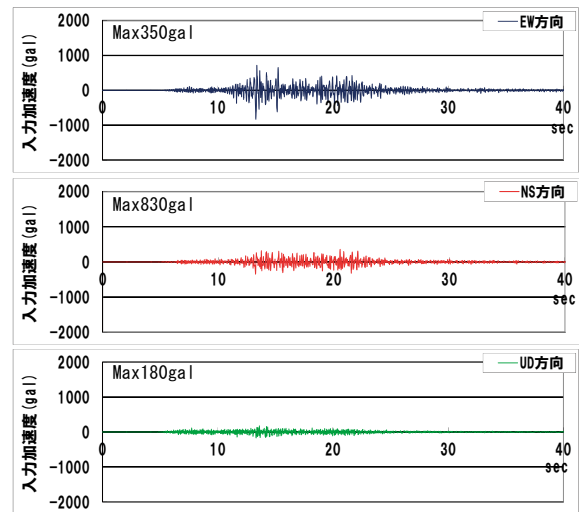


図-8 入力地震動の加速度時刻歴

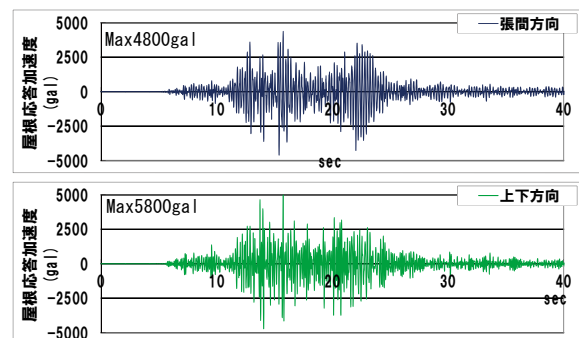


図-9 屋根部の応答加速度時刻歴

クリアランスをとっていないため、吊りボルトの長さや天井形状の違いによる固有振動数の差はあまりみられなかった。ただし、試験体Ⅰのみ他の試験体に比較して固有振動数が低かった。この原因の1つとしてこの試験体のみ、吊り長さが800mmと短いため振れ止めを設置していなかったことが影響していると思われる。試験体Ⅰの在来工法と天井耐震クリップ工法の固有振動数を比較すると耐震クリップ工法のそれが水平方向で50%、上下方向で80%程度高く、天井耐震クリップ工法の方がより天井接合部を強固に固定していることが確認できる。振れ止めを設置した試験体Ⅱ～Ⅳについては、両者に大きな差はなく、天井の剛性は振れ止めのみではほぼ決まるといえる。

2) 天井の応答加速度

図-13に各試験体の最大入力時の天井中央加速度時刻歴を示す。入力波(図-11)は10Hz以下の成分

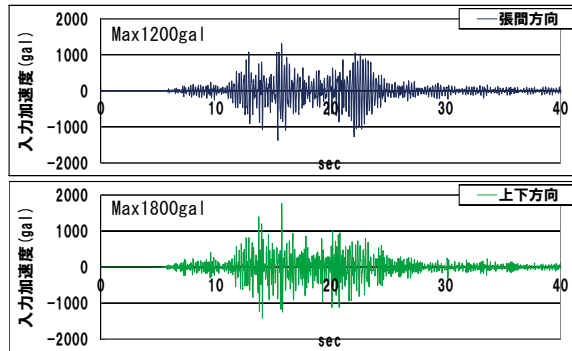


図-10 振動台入力波の時刻歴波形

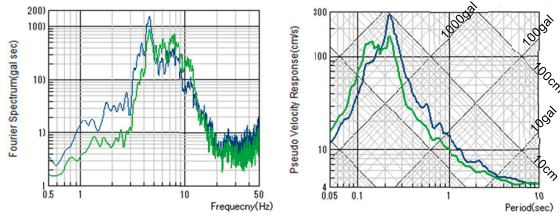


図-11 振動台実験に用いた入力波の諸元

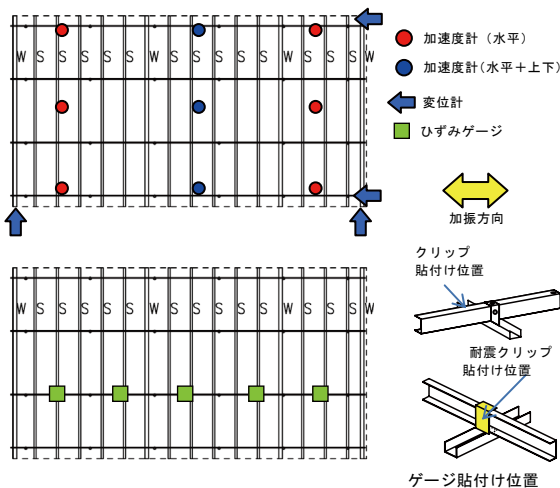


図-12 計測箇所

を多く含むことから、固有振動数がそれに近い試験体Ⅰの応答が他に比べて大きくなった。天井の最大加速度は、水平方向で1600gal程度なのに対し、上下方向では5000～8000galと非常に大きな加速度となった。在来工法と天井耐震クリップ工法の応答を比較すると、水平方向では大きな違いはないものの、上下方向では後者の方が応答加速度は大きくなっている。これは、天井耐震工法の方が、耐震クリップにより天井接合部をより強固に固定しているため、高振動数成分が伝達されやすく、その影響がより顕著に出たためと考えられる。

図-14に各ケースの上下方向の入力加速度と天井の最大応答加速度の関係を示す。入力加速度が小さい場合は、在来工法と天井耐震クリップ工法で天井の加速度に大きな差はないものの、入力加速度が大きくなるにしたがい、後者の方が大きな応答加速度となる傾向がみられた。ただし、天井応答加速度と被害状況は直接関係なく、いずれのケースも最大入力時には在来工法の天井は大きな被害を受けたのに対し、天井耐震クリップ工法の天井はほぼ無被害であった(後述4)天井の破壊状況参照)。

図-15に天井応答加速度時刻歴から算出したフー

表-3 天井の固有振動数

試験体番号	固有振動数 (Hz)			
	在来工法		耐震クリップ工法	
	水平	上下	水平	上下
Ⅰ	7.4	10.8	12.1	19.4
Ⅱ	15.8	18.2	12.1	19.2
Ⅲ	12.9	19.7	12.1	19.1
Ⅳ	12.5	18.2	12.8	17.1

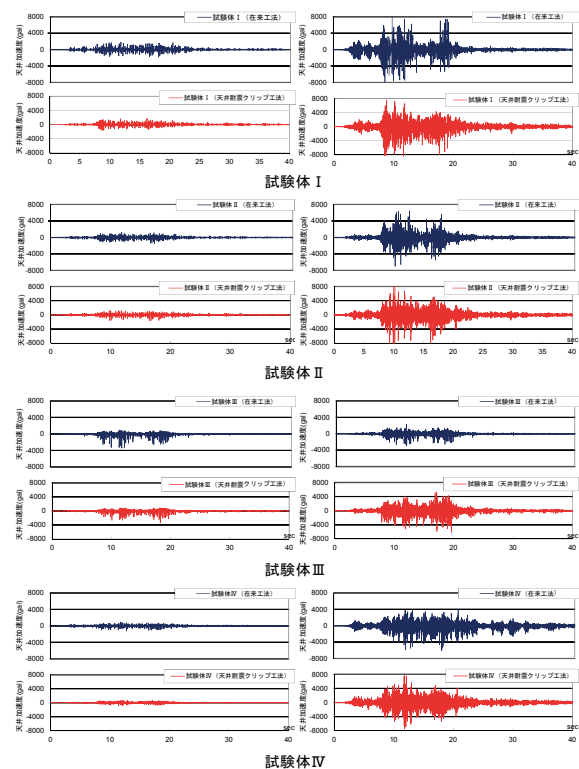


図-13 天井応答加速度時刻歴

リエスペクトルを示す。いずれのケースにおいても、天井耐震クリップ工法の方が10Hz以上の高振動数成分が卓越していることがわかった。

3) クリップのひずみ

図-16に各実験ケースのクリップひずみの時刻歴を示す。クリップひずみは、測定した複数のゲージの中から最大のひずみを記録した箇所の値を示している。

前述した静的試験においては、クリップひずみが約1000 μ で降伏に至ったが、振動台実験においても同様にクリップひずみ1000 μ 程度でクリップが外れる現象が確認できた。天井耐震クリップ工法では、いずれの実験ケースにおいてもクリップ、耐震クリップに生じたひずみは200 μ 程度であり、降伏ひずみまで相当な余裕があることがわかる。クリップ、耐震クリップが外れることはなく、耐震クリップが天井接合部を効果的に補強していることがわかった。

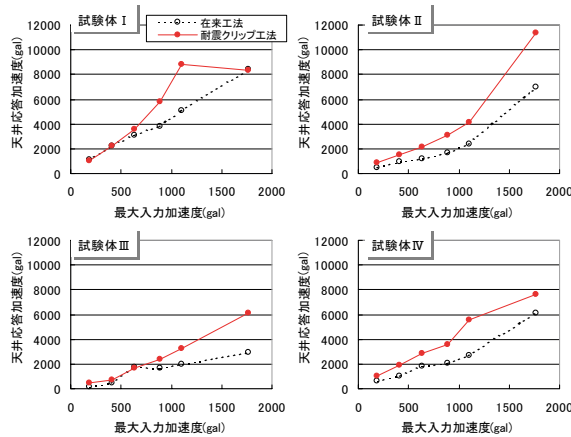


図-14 最大入力加速度と天井応答加速度の関係

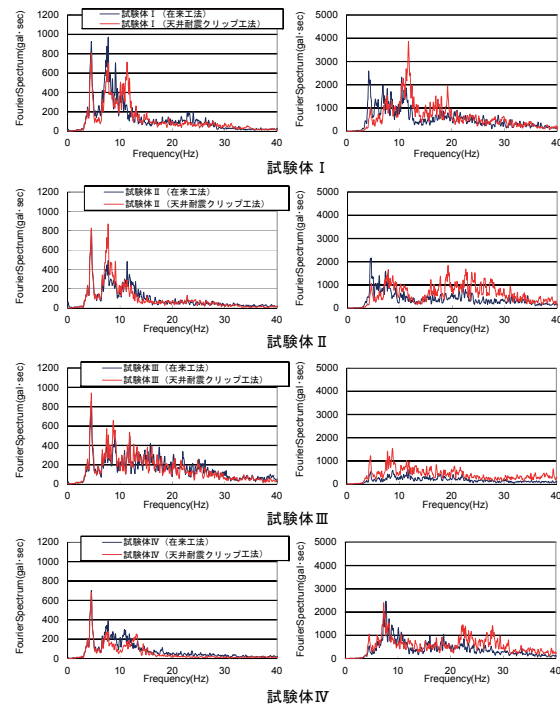


図-15 天井加速度時刻歴のフーリエスペクトル

4) 天井の破壊状況

表-4に各実験ケースにおける最大加振後の天井破壊箇所を、写真-6に各試験体の被害状況を示す。在来工法で天井形状がフラットな試験体I、II、IVにおいては、中央部の多くのクリップが外れ、天井が大きいたわんだ。試験体I、IIを例にクリップ外れ箇所を図-17に示す。クリップは、背掛けは根本が、腹掛けはツメが破壊しており、前述の静的試験と同様な破壊形状であった。これは、クリップが上下動により大きな引張り荷重を受けて破壊したことを示している。天井形状が曲面である試験体IIIでは、在来工法天井の曲

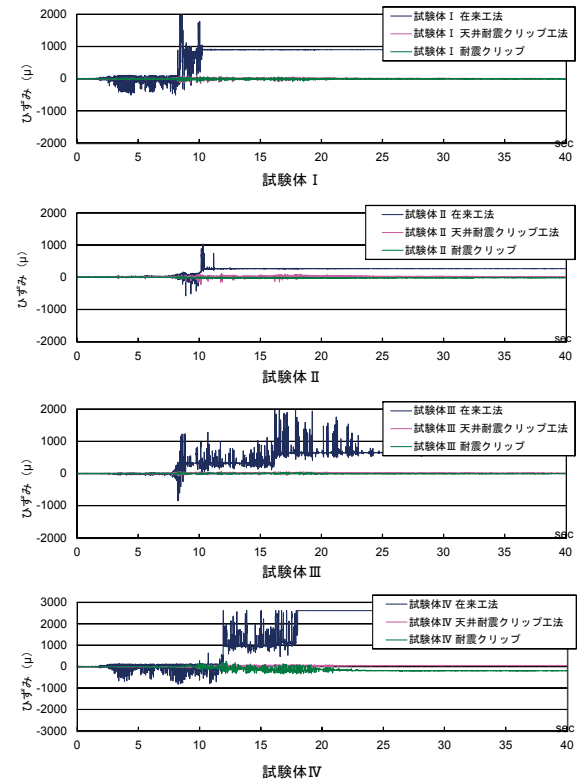


図-16 クリップのひずみ時刻歴

表-4 天井の破壊箇所

試験体番号	被害状況	
	在来工法	天井耐震クリップ工法
I	クリップ外れ：23カ所 (38%) ハンガー開き：5カ所 (21%)	被害なし
II	クリップ外れ：22カ所 (37%) ハンガー開き：4カ所 (17%)	被害なし
III	クリップ外れ：11カ所 (15%) ハンガー開き：なし (0%)	クリップ外れ：1カ所 (1%) ハンガー開き：なし (0%)
IV	クリップ外れ：20カ所 (33%) ハンガー開き：5カ所 (21%)	被害なし

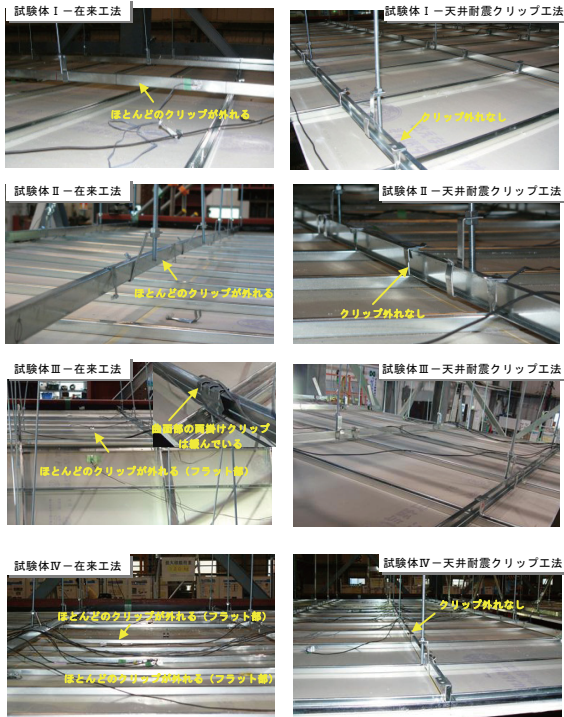


写真-6 天井の被害状況

面部は両掛けクリップのほとんどが緩んでいたが外れず、両掛けでないフラットな面のクリップのほとんどは外れた。天井耐震クリップ工法の天井では1カ所のみ耐震クリップが外れたが、その他の被害はなかった。

なお、今回の振動台実験に用いた天井のサイズが2.7m × 5mと比較的小さかったことから、クリップが外れた後も天井落下には至らなかった。

6. まとめ

天井の耐震対策工法として、簡易かつ低コストで補強可能な「天井耐震クリップ工法」を開発、静的実験、

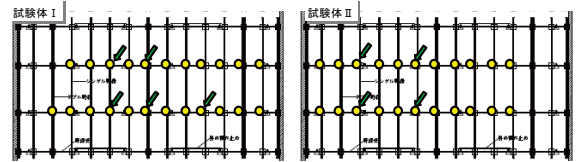


図-17 クリップ脱落箇所（在来工法）

振動台実験により、その効果を検証した。以下に、得られた成果をまとめて示す。

- ・耐震クリップの静的耐力は在来天井のクリップの2倍以上の耐力を有することを確認した。
- ・クリップの掛け方、サイズ、JIS材/一般材の違いによる接合部の力学的特性を確認した。
- ・振動台実験では、水平1.2G、上下1.8Gの入力において、在来工法天井の多数のクリップが破断したのに対し、「天井耐震クリップ工法」はほぼ無被害であり、耐震クリップが優れた耐震性能を有していることを確認した。
- ・耐震クリップを取り付けた天井は、在来のそれに比較して接合部の固定度が上がることを確認した。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所 K-NET: <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 2) 建築研究所：平成20年岩手・宮城内陸地震建築物被害調査報告会資料、2008.8.26
- 3) 脇山善夫他：学校体育館の振動特性調査、その1 調査の背景と概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2009.8
- 4) 飯塚他：地震被害を受けた体育館の天井脱落挙動に関する実験的研究 その1～その4、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2010.9
- 5) 岩下他：耐震クリップ工法の開発 その1、その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2011.8