

在来工法天井の耐震対策工法の開発 Development of Seismically Engineered Suspended Ceiling

金川 基*	鹿籠 泰幸**
Motoi Kanagawa	Yasuyuki Shikamori
飯塚 信一**	高井 茂光*
Shinichi Iizuka	Shigemitsu Takai

要 約

近年の大地震により、体育館等の天井落下が報じられており、国土交通省から天井落下防止策として、技術的助言等が出されている。しかしながら、天井の落下や崩落の原因については現状不明な部分が多い。このような状況から、筆者等は、これまでに在来天井の落下原因の検証実験を実施し、新たに、野縁と野縁受けをつなぐクリップを効果的に補強する「耐震クリップ工法」を開発した。本論は、その特徴と、地震に対する有効性に関して検証した結果を報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 耐震クリップ工法
- § 3. 静的加力実験
- § 4. 振動台実験
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

過去の被害地震報告^{1),2)}を見てみると、天井など非構造部材について体育館等の大規模空間建築の地震被害が取り上げられている。特に2001年芸予地震、2003年十勝沖地震、2005年の宮城県沖地震等の地震の際に、体育館など大規模空間を有する公共施設において吊り天井が破損・脱落する地震被害が多く報告されている。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震においても過去の被害報告と同様、天井の落下をはじめ、設備機器・配管等の損傷・落下被害が多く報告されている³⁾。

国土交通省は、これまでに地震の際に被害を受けた天井について現地調査を行い、2001年芸予地震の後に「芸予地震被害調査報告の送付（技術的助言）」、2003年十勝沖地震の後に「大規模空間を持つ建築物の崩落対策について（技術的助言）」を通知してきた。また2005年8月には「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について」を各地方公共団体に通知し、天井落下による事故を防止するために、体育館、屋内プール、劇場、ホール、空港などのターミナル、展示場等の500平方メートル以上の大規模空間を有する建築物について、落下の危険性を

調査するとともに、その結果に基づいて適切な崩落防止対策等の措置を講ずることを求めている。そういった状況の中、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^{4)~7)}、筆者らも、これまでに在来天井の落下原因を検証するためにさまざまな振動台実験を実施し、野縁と野縁受けをつなぐクリップを効果的に補強することが天井の耐震対策において重要な要因の一つである事を指摘してきた⁸⁾。本論では、経済性や施工性を考慮した在来天井の耐震対策に関して開発した「耐震クリップ工法」⁹⁾について、その特徴と、地震に対する有効性に関して検証した結果を報告する。

§ 2. 耐震クリップ工法

耐震クリップ工法の概要を図-1に示す。耐震クリップは、在来工法のクリップの種類に合わせて、シングル用とダブル用の2種類あり、野縁と野縁受けの接合部にあるクリップの上から耐震クリップをはめ込んで天井の鋼製下地材を補強する。耐震クリップ工法の施工手順を写真-1に示す。耐震クリップ工法は、耐震クリップをクリップの上からはめ込むのみであり、溶接やボルトが不要で取り付けが非常に簡易な工法である。

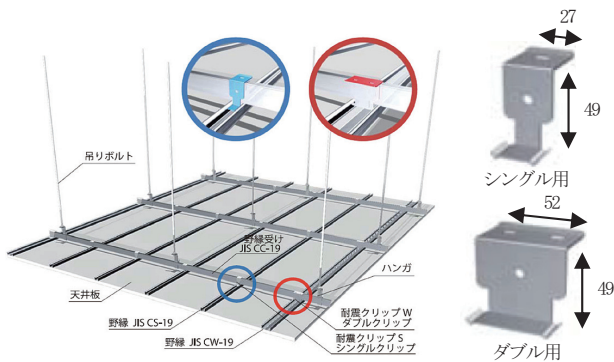
§ 3. 静的加力実験

3-1 実験概要

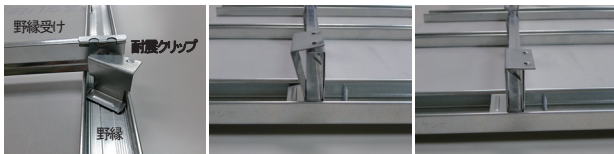
在来天井の鋼製下地材の強度を把握するため、天井の鋼製下地材を一部モデル化した試験体を用いて、静的加力実験を実施した。静的加力実験の概要を写真-2に示す。試験体は、実在の在来天井の鋼製下地材を用いて製作し、加力装置上部から順に、鉄製の加力用治具を介し

* 技術研究所建築技術グループ

** 技術研究所



図一 耐震クリップ工法の概要



- ①耐震クリップを斜めにして野縁に挿入
- ②一般クリップに被せるように上からはめ込む
- ③補強完了

写真一 耐震クリップ工法の施工手順

て、その中央部から 100 mm の間隔で吊りボルトを 2 本設置し、ハンガー、野縁受け、クリップおよび野縁を接続した。野縁は加力装置にシヤコ万で固定し、試験部分はクリップ接合部となるように、鳥津製作所製のオートグラフを用いて、静的加力を行った。

3-2 試験体

試験体諸元を表一に示す。実験パラメータは、耐震クリップの有無、鋼製下地材の種類（JIS 材と一般材：JIS 規格を満たさない材）、クリップの種類（シングルとダブル）、および、クリップの掛け方（背掛け、腹掛け、両掛け）とした。クリップ接合部の掛け方を写真三に示す。ここで、耐震クリップによる補強は、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を野縁受け腹側から取り付け、腹掛け時は背側から取り付けた。両掛けについては、在来工法によるクリップのみの設置とし、クリップを背掛けした後、その上からクリップを腹掛けとした。計測は、加力装置により荷重と変位を、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。ゲージ貼り付け位置は、クリップ、耐震クリップの根元とした（写真三参照）。

また、実験は同条件でそれぞれ 3 体実施した。

3-3 実験結果

(1) 荷重-変位関係

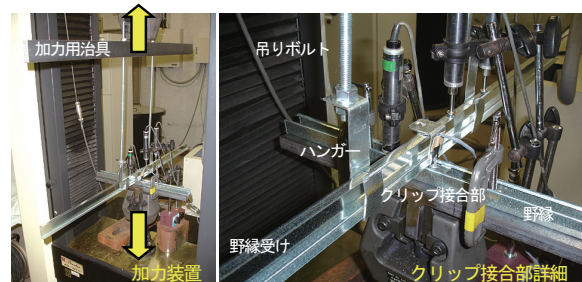
各試験体の荷重-変位関係を耐震クリップの有無で比較して図二に示す。ここで、図二の図中の数字は、表一の試験体の番号と対応している。

図より、鋼製下地材の種類、クリップの種類、および、クリップの掛け方に関わらず、耐震クリップ有りの場合は、耐震クリップ無しの場合に比べて 2 倍以上最大強度

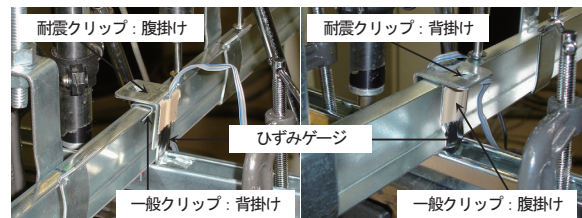
表一 試験体諸元

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

※表中の記号は、JIS：JIS 材、GNR：一般材、W：ダブルクリップ、S：シングルクリップ、B：背掛け、F：腹掛け、D：両掛け、N：耐震クリップなし、R：耐震クリップあり、を表す



写真二 静的加力実験の概要



(a)背掛け試験体 (b)腹掛け試験体

写真三 クリップ接合部の掛け方

が上昇している事がわかる（図中の【】の数字は耐震クリップ無しに対する耐震クリップ有りの比を表す）。

また、クリップが背掛けの場合、初期剛性は耐震クリップの有無に関わらずほぼ同じであった。これは、背掛けのクリップにより初期剛性が決まり、腹掛けとなる耐震クリップが初期剛性にあまり影響を及ぼさないためと考えられる。また、クリップの種類について比較すると、シングルおよびダブルとも同程度の強度となっており、双方の違いはほとんど見られなかった。

一方、クリップが腹掛けの場合、耐震クリップ無しでは背掛けに比較して初期剛性が大きく低下するのに対し、耐震クリップ有りの場合、背掛けとほぼ同じ初期剛性および強度であった。ダブルの強度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。

(2) クリップのひずみ

クリップおよび耐震クリップの変位とひずみの関係を荷重とともに図-3に示す。クリップは約1,000 μ のひずみ(図中▼)で荷重が低下しており、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：引張り、耐震クリップ：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1,500 μ のひずみで荷重が低下(図中▽)した。

(3) クリップ接合部の最終破壊形状

JIS材のシングルクリップについてのクリップ接合部の最終破壊形状を写真-4に示す。ここで写真に示す破壊形状は、鋼製下地材の種類およびクリップの種類によらず、クリップの掛け方による傾向が概ね同じであったため、代表例として示している。

1) 耐震クリップ無しでクリップが背掛けの場合
(写真-4(a)参照)

クリップ根元と野縁リップ部から破壊した。ここでクリップの根元の仕様はシングルとダブルに差がないため、前述の荷重-変位関係で最大強度に大きな違いがなかったものと考えられる。

2) 耐震クリップ無しでクリップが腹掛けの場合
(写真-4(b)参照)

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。腹掛けの場合は、クリップツメ部が直角までしか折り曲がらないため背掛けに比べて掛かりが甘く、開きやすかったと考えられる。

3) 耐震クリップ有りでクリップが背掛けの場合
(写真-4(c)参照)

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クリップ部が破壊した。

4) 耐震クリップ有りでクリップが腹掛けの場合
(写真-4(d)参照)

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。この場合が最も高い強度であった。

5) クリップ両掛けの場合(写真-4(e)参照)

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。

§4. 振動台実験

4-1 実験概要

耐震クリップ工法による在来天井の耐震性能を検証するため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。天井試験体は、寸法を2,700×5,000 mmとして、耐震クリップ工法と在来工法を直接比較するため並列に2枚張った。ここで、大規模空間の天井を模擬するために、境界条件として張間方向の天井端部に鉄骨

治具を設置し、鉄骨治具と天井試験体との設置部に厚さ10 mmの硬質ゴムを挿入した。また、天井の構成は、鋼製下地材にJIS A 6517に規定される19形の材料を、石膏ボードにJIS A6901に規定されているものを使用した。

試験体諸元を表-2に、各試験体の断面図(在来工法)を図-4にそれぞれ示す。実験パラメータは、耐震クリップの有無、天井試験体の吊りボルトの長さ、および、天

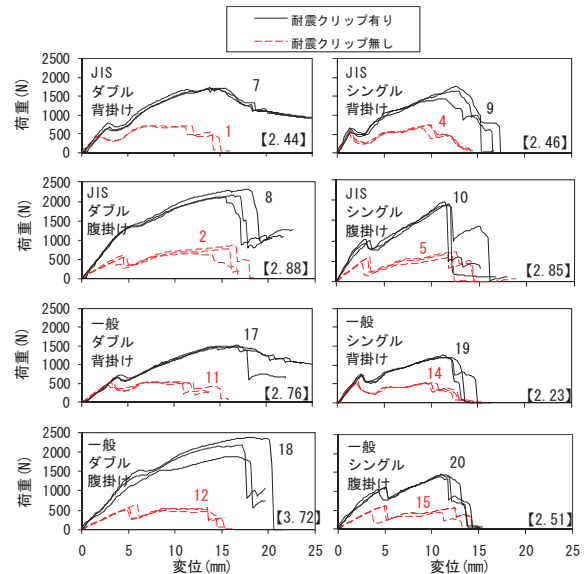


図-2 荷重-変位関係

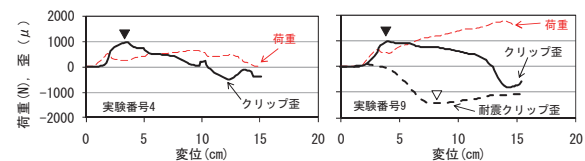


図-3 クリップ接合部の変位とひずみの関係

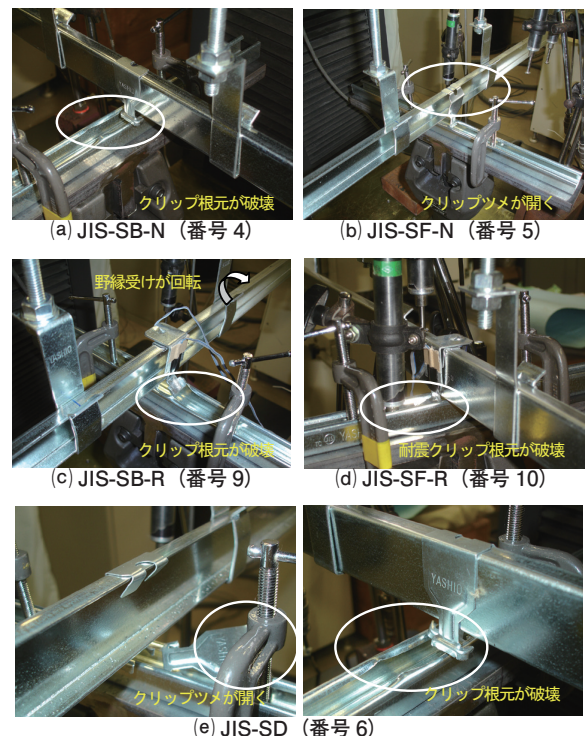


写真-4 クリップ接合部の最終破壊形状

井の形状とした。吊りボルトの長さが1,500 mm以上の試験体については、在来工法による天井では水平および斜め振れ止めを設置し、耐震クリップ工法による天井では水平振れ止めのみを設置した。試験体Ⅲの曲面部は一般の施工方法にともない、クリップを両掛けとした。

4-2 加振方法および計測方法

加振は、電気・油圧方式の3軸6自由度振動台（テーブル寸法5,500×5,500 mm、定格積載重量30 tf、最大加速度2 G:約1,960 gal）を用いた。

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⁷⁾。

振動台実験で用いた入力波形とフーリエスペクトルを図-5にそれぞれ示す。

入力方向は、張間方向および上下方向の2方向加振とした（写真-5参照）。

計測機器設置位置を図-6に示す。加速度計を9箇所、変位計を4箇所それぞれ設置した。上下加速度は9箇所すべてで、水平加速度は天井中央部3箇所測定した。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、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（写真-3に示す位置と同じ）。

4-3 実験結果

(1) 各試験体の固有振動数

各試験体の固有振動数の一覧を表-3に示す。各試験体とも端部に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見られなかった。ただし、試験体Ⅰの在来工法のみ他の試験体に比較して固有振動数が低かった。これは図では示していないが、この試験体のみフーリエスペクトルに明確なピークが確認できず、複数のピークから比較的明確なピークを固有振動数としたためである。試験体Ⅰの耐震クリップ工法については、他のケースと大きな違いは見られなかった。また、振れ止めを設置した試験体Ⅱ～Ⅳについては、両者に大きな差は見られなかった。

(2) 各試験体の応答加速度

試験体Ⅳを例に、振動台実験による試験体中央部にお

ける応答加速度時刻歴を図-7に示す。図より、最大加速度は、張間方向で1,300 gal程度なのに対し、上下方向では約8,000 galと非常に大きな値となった。また、在来工法と耐震クリップ工法の応答を比較すると、張間方向では大きな違いはないが、上下方向では耐震クリップ工法の方が若干大きな結果となった。これは、耐震クリップによりクリップ部を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と考えられる。なお、試験体Ⅰ～Ⅲについても同様な傾向を示していた。

表-2 試験体諸元

試験体番号	大きさ (mm)	吊り長さ (mm)	石膏ボード (厚 mm×枚)	振れ止め	備考
I	2700×5000	800	19.5×2	無し	平天井
II	2700×5000	1500	19.5×2	斜め2対	平天井
III	2700×5000	曲面 2400 平面 800	19.5×2	水平 斜め2対	平天井+曲面天井 曲面部分の一般クリップは両掛け
IV	2700×5000	2400	19.5×2	水平 斜め4対	平天井

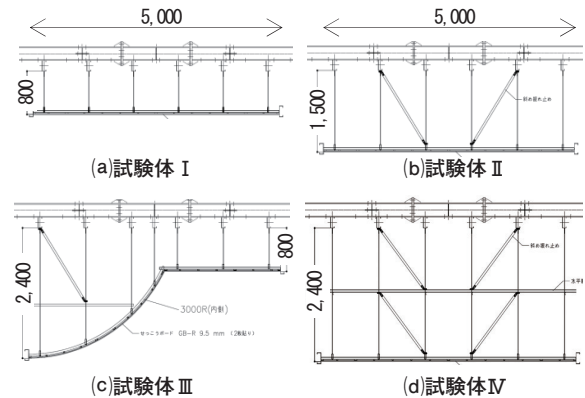
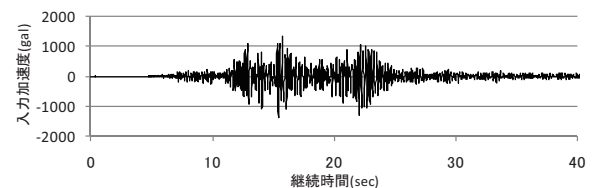
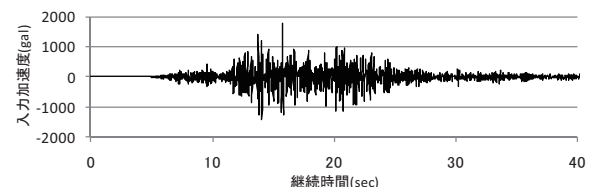


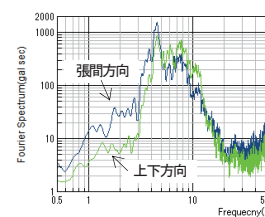
図-4 各試験体の断面図（在来工法）



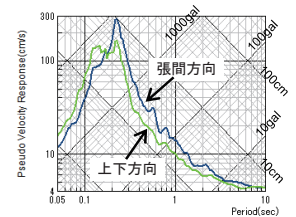
(a)振動台入力波（張間方向）



(b)振動台入力波（上下方向）



(c)フーリエスペクトル



(d)応答スペクトル

図-5 振動台入力波とスペクトル形状

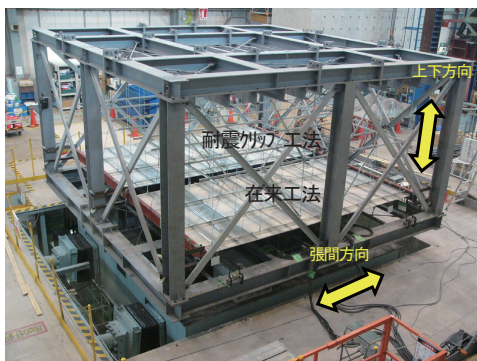


写真-5 振動台実験の概要

(3) 上下入力による天井の応答

各試験体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図-8に示す。入力加速度が小さい場合は、在来工法と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従い、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、いずれの試験体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、耐震クリップ工法の天井はほぼ無被害であった。

(4) フーリエスペクトル

試験体Ⅱ、試験体Ⅲの天井応答加速度時刻歴から算出したフーリエスペクトルを図-9に示す。張間方向の卓越振動数は在来工法と耐震クリップ工法で大きな差はないものの、上下方向では耐震クリップ工法の方が10 Hz以上の高振動数成分が卓越しているのがわかる。これは、耐震クリップが天井接合部を特に強固に固定しているためと考えられる。図には示していないが試験体Ⅰ、Ⅳについても同様な傾向が見られた。

(5) クリップのひずみ

試験体Ⅳのクリップひずみの時刻歴を図-10に示す。クリップひずみは、測定した複数のゲージ(図-6参照)の中から最大のひずみを記録した箇所の値を示した。前述図-3に示した静的試験においては、クリップひずみが約1,000 μで荷重低下に至ったが、振動台実験においても同様にクリップひずみ1,000 μ程度でクリップが外れる現象が確認できた。一方、耐震クリップ工法におけるクリップ、耐震クリップに生じたひずみは200 μ程度であり、在来工法のクリップに比較して相当な余裕があり、耐震クリップがクリップ接合部を効果的に補強していることがわかる。

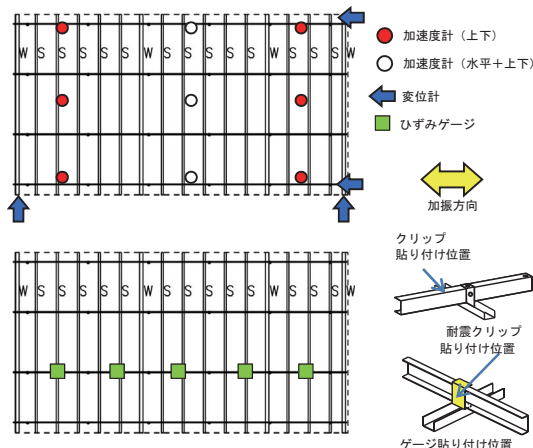


図-6 計測機器設置位置

表-3 各試験体の固有振動数一覧

試験体 番号	固有振動数 (Hz)			
	在来工法		耐震クリップ工法	
	張間方向	上下方向	張間方向	上下方向
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

(6) 最終破壊状況

各試験体における最大加振後の天井破壊状況を写真-1と表-4に示す。在来工法で天井形状がフラットな試験体Ⅰ、Ⅱおよび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。

クリップは、背掛けは根元が、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

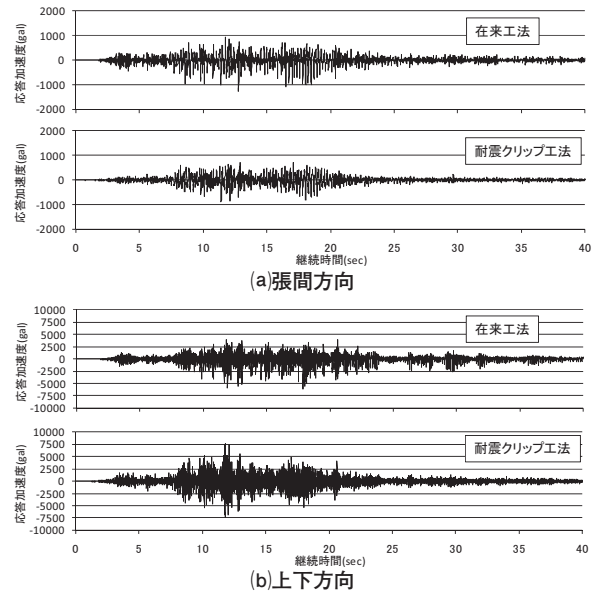


図-7 試験体中央部での応答加速度 (試験体Ⅳ)

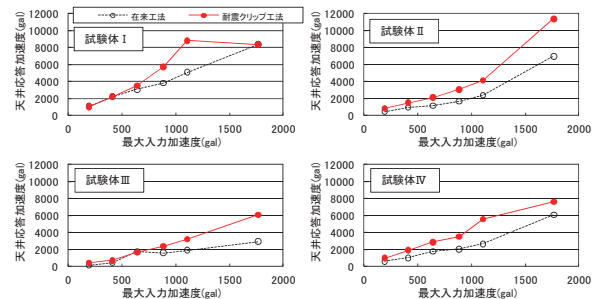


図-8 最大入力加速度と天井応答の関係

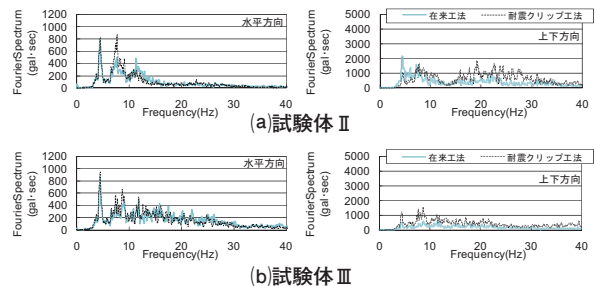


図-9 天井加速度時刻歴のフーリエスペクトル

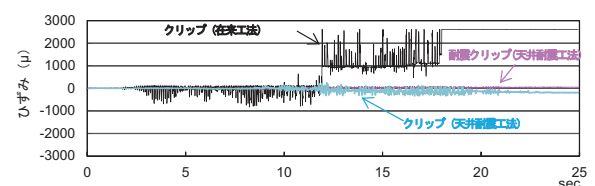


図-10 クリップひずみ時刻歴 (試験体Ⅳ)

験体Ⅲでは、フラット部のクリップはほとんど外れたものの、曲面部の両掛けクリップは外れず、両掛けによる一定の補強効果が確認できた。ただし、写真に示すように両掛けクリップのほとんどに緩みが見られた。この試験体のみ耐震クリップが1箇所外れた。外れた原因は不明であるが、外れ後の耐震クリップそのものに損傷や変形は見られなかったことから、施工時の嵌合不良の可能性が考えられる。なお、今回の振動台実験に用いた天井の大きさが2.7m×5mと比較的小さかったことから、いずれのケースにおいても天井落下はなかった。

§5. おわりに

在来工法天井の耐震対策工法として、施工が簡易であり、かつ、低コストで補強可能な「耐震クリップ工法」について、静的実験、振動台実験によりその効果を検証した。以下に得られた知見をまとめて示す。



写真-6 最終破壊状況 (左：在来, 右：耐震クリップ)

表-4 各試験体の被害状況一覧

試験体	在来工法	耐震クリップ工法
I	クリップ外れ…23箇所(60箇所中) ハンガー開き…5箇所(24箇所中)	無被害
II	クリップ外れ…22箇所(60箇所中) ハンガー開き…4箇所(24箇所中)	無被害
III	クリップ外れ…11箇所(72箇所中) ハンガー開き…0箇所(28箇所中)	耐震クリップ外れ…1箇所(72箇所中) ハンガー根元のナット緩み
IV	クリップ外れ…20箇所(60箇所中) ハンガー開き…5箇所(24箇所中)	無被害

- ・耐震クリップの強度は在来工法天井で用いられているクリップの2倍以上の強度を有することを確認した。
- ・クリップの掛け方、種類(シングル, ダブル), JIS材/一般材の違いによる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、「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。

謝辞：本研究は、戸田建設(株)および八潮建材工業(株)との共同研究にて実施され、本論作成にあたり、多大なご協力を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 深尾精一：1978年伊豆大島近海地震による体育館の天井落下について、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 541-542, 1978.
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3 シェル・空間構造 日本建築学会他 丸善, 1997年.
- 3) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報), 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, 平成23年5月.
- 4) 中本康, 元結正次郎, 吉川昇, 中川祐介, Nguyen Thanh Sang: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究その1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 843-848, 2006. 9.
- 5) 森田雄輔, 元結正次郎, 吉川昇, 佐藤恭章, 船積宏彰: クリップの素材試験およびクリップ接合実験概要その1~その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 807-812, 2008. 9.
- 6) 三浦彰一, 元結正次郎, 仲川勇誠, 佐藤恭章: 各種クリップの要素実験による力学的特性の検討 鋼製下地在来工法天井の耐震性能向上手法に関する研究その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 91-96, 2011. 8.
- 7) 脇山善夫, 石原直, 渡壁守正, 稲井慎介, 桑素彦, 飯塚信一, 高井茂光, 金川基: 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1~4 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 2010. 9.
- 8) 脇山善夫, 渡壁守正, 藤堂正喜, 飯塚信一, 稲井慎介, 高井茂光, 金川基, 石原直, 長谷川隆: 大規模空間を有する建築物の天井脱落被害に関する研究(その2)実天井の一部を模擬した試験体による振動台実験, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010. 11.
- 9) 吉川昇, 渡壁守正, 飯塚信一, 稲井慎介, 石岡拓, 高井茂光, 金川基, 岩下裕樹: 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, pp. 391-394, 2011. 8.