

鋼製下地在来工法天井の耐震性能に関する実験的研究

鈴木 健司 金子 美香 半澤 徹也 神原 浩 櫻庭 記彦
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Experimental Study on Aseismic Performance of a Hanging Ceiling

by Kenji Suzuki, Mika Kaneko, Tetsuya Hanzawa, Hiroshi Kambara, and Fumihiko Sakuraba

Abstract

The collapse of hanging ceilings during earthquakes has become a serious problem. In this study, various experiments were conducted to determine the response of ceilings in an earthquake. The arrangement of the reinforced steel clips used for preventing steel components in the ceiling from sliding was examined through experiments on a small shaking table. The results of the experiments were used to develop the proposed method for reinforcing conventional ceiling systems. The reinforcement method was validated by experiments on a large shaking table test.

概要

最近の地震において天井の損傷・落下が大きな問題となっている。本研究では、従来一般的な鋼製下地在来工法天井を部分的に補強することで実現できる耐震性能の高い天井構法を提案し、振動実験でその性能を検証した。まず小型振動実験装置により必要な補強箇所と数量を調べ、次に大型振動台による振動実験により従来天井との性能比較を行い、さらに天井に設備を組み込んだ振動実験で目標耐震性能を満足することを確認した。

§ 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、非構造部材に多数の被害が発生した。中でも天井の損傷・落下は、人命が危険にさらされるだけでなく、建物が継続使用できなくなるなどBCPの観点からも影響が大きく、注目を集めている。

建築学会の非構造部材の耐震設計施工指針¹⁾によると、非構造部材の耐震安全性の目標として、

- 極めて稀に発生する地震動時(大地震動時)においても人命に危険を及ぼさないこと
- 稀に発生する地震動時(中地震動時)には、破損したり過大な変形が生じることがなく、建築物の居住性が損なわれないこと

等が掲げられている。しかし今回の地震では、震度5程度の揺れでも天井の落下被害が報告されている²⁾。

一方、鋼製下地材メーカーは震災以前からJISで規定された金物より耐震性能を向上させた金物を開発³⁾、製造しており、耐震補強部材あるいは耐震天井システムとして販売している。また、天井の耐震性能についての研究^(例えば4)~7)では、被害事例の分析や、各種実験によりクリップやハンガーなど接合部の影響などが検討

されている。しかし、実際に適用しやすいように、施工性や経済性を考慮しつつ耐震性能を高めた天井構法については、十分な検討がなされていない。

本研究では、従来下地材構成の一部分のみを補強することで実現できる耐震性能の高い天井構法を提案し、振動実験でその性能を検証した。耐震目標性能は、①天井面の応答加速度1Gに対して天井下地が軽微な損傷にとどまり、応答変位を天井と壁とのクリアランス(ここでは100mmと設定)以下にすること、②大地震動時に天井下地の一部に損傷が生じても人命に危険を及ぼすような崩落がないこととした。

§ 2. 従来の鋼製下地在来工法天井の問題点

2.1 天井の構成

鋼製下地在来工法天井の構成を図-1に示す。上階床スラブの底面に配置されたインサートから(あるいは上階床スラブ下に組まれたフレームに取り付けられたフックなどから)吊り下げられた吊りボルト下部のハンガーに野縁受けが取り付けられ、これに野縁がクリップで留め付けられ、野縁に石膏ボードなどがビス止めされている。また、天井の水平変位を抑制するた

めには、斜め補強材(ブレース)が設置される。ブレースの下端は野縁受けなどにビス止めされるか吊りボルトに金物で固定され、上端については施工性を上げるために吊りボルトに簡易に留め付けられるようにした金物が多く用いられている。全体的に、軽量な材料を用いて簡易な方法で比較的短時間に施工できるように考えられた構成となっている。

2.2 従来天井の問題点

天井下地材は、各部材、部品をはめ込んだり引っかけたり折り曲げたりするだけで組み立てられるようになっており、部材と部材の接合部は強固な接合にはなっていない。地震などの水平力に対する抵抗力は部材間の接合部の摩擦力に依存しており、接合部材の締め付け力が小さい場合には、水平力に抵抗しきれず接

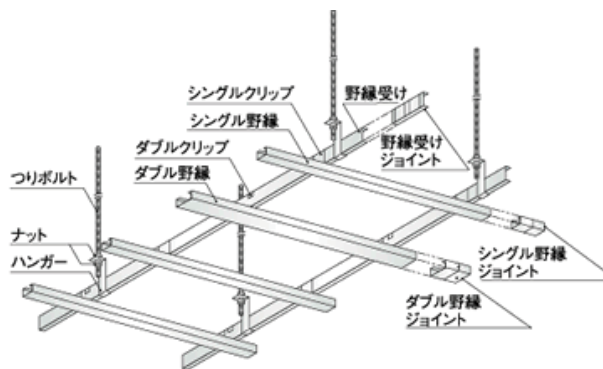


図-1 建築用鋼製下地材¹⁾

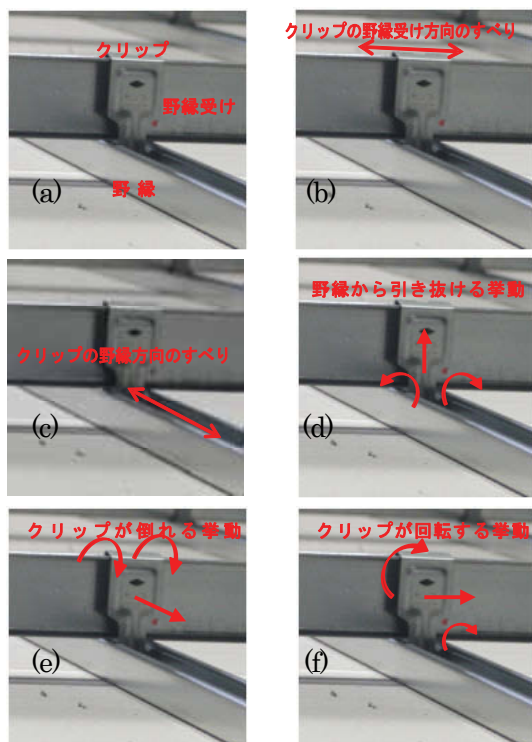


図-2 クリップ、野縁、野縁受けとその変形

合部が滑ってしまう(図-2 (b), (c))。このため、ブレースを設置して地震時の変位を抑えようとしても、周辺の野縁とクリップ、クリップと野縁受けなどの接合部で滑りが生じてブレースに十分力が伝わらず、変位を抑えることができない問題点がある。

また、野縁と野縁受けをつなぐクリップは、野縁の溝型の中にはめ込まれて野縁両側面の折り返し部分に引っかかっているだけであり、大きな力がかかるとクリップが野縁から引き抜けたり(図-2 (d))、野縁受けから引き剥がされるような挙動が発生する(図-2 (e), (f))。このようなことが数多くのクリップで発生すると野縁の支持点となるクリップが減り、クリップ1つあたりにかかる荷重が増し、その荷重によってさらに野縁受けからクリップが外れ、ついには天井の崩落につながってしまう。

§3. 耐震性の高い天井構法の提案

現在、各鋼製下地メーカーからクリップをはじめとする接合部の保持力を増した耐震補強部材が提案されている。しかしながら、いずれの耐震補強部材もこれまでより高価で施工手間も増えるので、経済性、施工性を考えると、できるだけ耐震補強部材の使用量を抑えることが望ましい。ブレースに水平力を伝えて天井の水平変位を抑える上では、ブレース周りの滑りを抑えることが重要であるため、ここではブレース周りのみに耐震補強部材を使用することを考えた。

必要な耐震補強部材の数と配置を調べるため、小型振動実験装置で実験を行った。人力で加振することのできる小型振動実験装置で1方向加振を行って加速度と天井面および各部材の挙動を観測した。試験体の天井面積は約17m²とし、天井下地材にはJIS19形の部材を用い、厚さ12.5mmの石膏ボードと厚さ12mmの岩綿吸音板を貼った。V字型で一对のブレースを設置し、補強材には市販の部材を使用した。



図-3 提案する天井の補強箇所

天井面での応答加速度 1G 程度の加振を行い、滑りや変形挙動を観察した結果、図-3に示すように、ブレースの足元周辺の9箇所のクリップとハンガーを耐震性の高い(滑りにくい)金物に置き換えることにより、天井面の応答加速度 1G 程度まで滑りを生じさせずにブレースに水平力を伝達できるとの結果を得た。

§ 4. 従来天井と耐震天井の比較実験

3章で提案した天井の耐震性能を確認するために大型3次元振動台で地震波加振を行った。

4.1 実験概要

4.1.1 実験フレーム

実験フレームと試験体を図-4に、実験の全体風景を写真-1に示す。天井面に合わせて、壁面を模擬する角形鋼管を2本設置し、Y方向の変形が天井と壁とのクリアランス 100mm より大きくなると衝突するようにした。実験フレームの固有振動数は、X方向(短辺方向)約 34Hz、Y方向(長辺方向)約 12Hz であり、天井の固有振動数 3~6Hz に比べて十分に高い。

4.1.2 試験体

天井下地材には JIS 規格適合材を使用し、クリップ等を補強しない場合(以下、従来天井と呼ぶ)と、3章に示した補強案を適用した場合(以下、耐震天井と呼ぶ)の2ケースについて実験した。いずれもブレースは天井面中央にV字型で2方向、計4本を集中させる形で設置した。ブレース上端と吊りボルトをつなぐ金物には、吊りボルトを挟み込む形状の閉鎖型の金物を用いた。天井端部には、天井面の回転を抑えるため、加振方向と直交する方向に仮設のブレースを設置した。

公共建築工事標準仕様書で 1.5m 以上の天井ふところの場合は水平補強と斜め補強が必要とされているため、ここでは 1.5m の天井ふところでも水平補強なしの天井を対象にした。天井面積は約 25m²とした。

4.1.3 加振波

加振波としては El Centro 波 NS 成分を用いた。入力レベルは振動台で 150Gal、300Gal とした。耐震天井では天井面での応答加速度 1G に対する挙動を確認するために 600Gal レベルの入力についても実験した。

4.1.4 データ測定

データ測定位置を図-5に、センサの設置状況を写真-2に示す。振動台、フレームおよび天井面の加速度、フレームと天井面の相対変位、天井面と野縁受け

の相対変位の時刻歴データを計測した。ブレースのチャンネル材には、両フランジ面とウェブ面の計3箇所に軸方向にひずみゲージを貼った。

4.2 実験結果

加振結果を表-1に示す。入力レベルに対して実際に振動台上で観測された加速度はやや大きく、フレーム上(吊りボルトの吊り元)での応答加速度はさらに 1.2~2 倍に増幅している。天井面での応答加速度はフレーム上より大きい場合と小さい場合があるが、耐震天井では、入力レベル 600Gal の加振時に天井面での応答加速度が約 1G となっている。

ブレース材のひずみゲージで測定されたひずみ値か

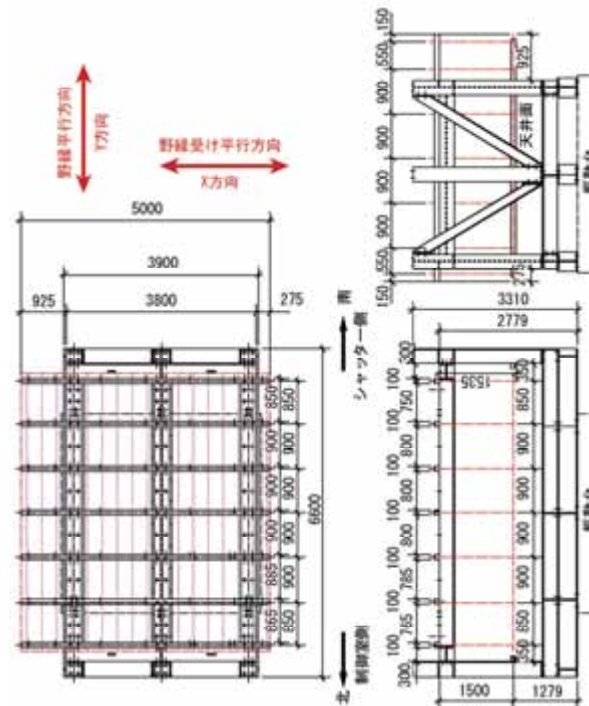


図-4 大型振動台実験の試験体



写真-1 大型振動台実験の実験風景

らブレースの負担する水平力(ブレース負担力)を推定し、縦軸をブレース負担力、横軸を天井面の変位として描いた荷重-変形曲線を図-6に示す。

4.2.1 従来天井の結果

従来天井では、150Gal 入力に加振でも、野縁平行方向(Y 方向)ではクリップと野縁の間で滑って天井面の変位が大きくなり、一部のクリップが外れた。野縁受け平行方向(X 方向)では、野縁平行方向に比べ滑りは小さいが、クリップが野縁の溝を押し広げ、それに伴いクリップがわずかに回転する挙動による変位が見られた。図-6を見ても、両方向とも荷重値の小さいところで傾きが小さくなっている。野縁平行方向(Y 方向)で変形とともに負担する水平力がわずかに増えているのは、クリップが滑っても野縁受けの面外曲げにより水平力が周辺に伝達されるからと考えられる。

300Gal 入力に対しては、野縁平行方向(Y 方向)、野縁受け平行方向(X 方向)とも大きく滑り、天井面の変位は大きくなった。特に、野縁平行方向では天井面の変位が 50mm を超えた。

4.2.2 耐震天井の結果

150Gal 入力に対しては、野縁平行方向(Y 方向)、野縁受け平行方向(X 方向)とも滑りがほとんど無かった。天井面と野縁受けとの相対変位が 3mm 程度出ているのは、野縁受けの倒れや、クリップの回転により生じていると考えられる。図-6からも従来天井に比べ変位が抑えられていることがわかる。300Gal 入力に対しては、クリップと野縁の間でわずかな滑りが見られた。

600Gal 入力(天井面の応答加速度約 1G)に対しては、野縁受け平行方向ではブレースの弾性座屈が見られたものの、天井下地に損傷は見られず、天井面の変位も 31mm に収まった。野縁平行方向ではクリップの滑りや野縁受けの変形が見られ、天井面の変位は 62mm と野縁受け平行方向より大きくなったものの、ブレースの座屈は見られなかった。小型振動実験装置での実験ではほとんど見られなかったクリップの滑りが発生したのは、加振波の違いによるものと考えられる。

以上のように、耐震天井では、いずれの方向でも天井面での応答加速度が 1G までの範囲では、天井面の変形は設定した壁とのクリアランス 100mm より小さく収まり、天井下地の損傷はないことを確認できた。

§ 5. 耐震天井の目標性能確認実験

耐震天井について、実際の天井と同じように設備機器を組み込んだ状態で加振を行い、1章に示した目標

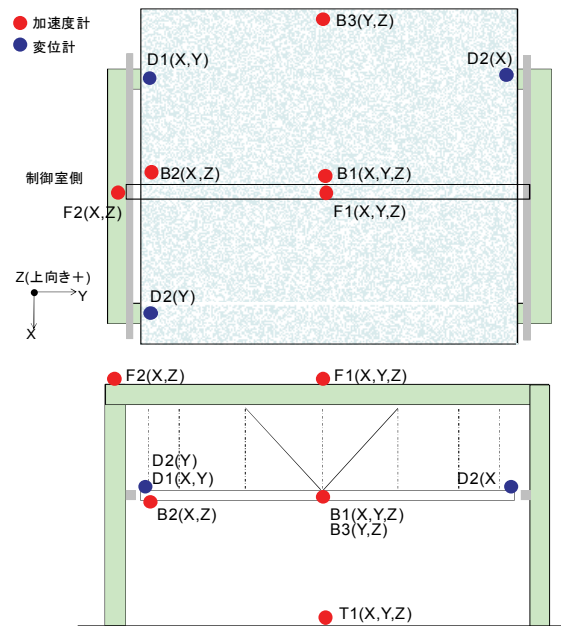


図-5 測定位置



写真-2 天井面と野縁受けとの相対変位測定

表-1 加速度・変位の最大値

試験体	加振方向	入力レベル	振動台加速度 T1	フレーム上加速度 F1	天井面加速度 B1	天井面変位 (D1+D2)/2
すべて標準クリップ	野縁受け平行方向(X)	150 Gal	193 Gal	363 Gal	144 Gal	10 mm (RD* 6.9 mm)
		300 Gal	311 Gal	627 Gal	410 Gal	41 mm (RD 35.5 mm)
	野縁平行方向(Y)	150 Gal	213 Gal	348 Gal	197 Gal	35 mm (RD 24.7 mm)
		300 Gal	356 Gal	567 Gal	370 Gal	65 mm (RD 49.7 mm)
耐震補強案	野縁受け平行方向(X)	150 Gal	199 Gal	284 Gal	468 Gal	6 mm (RD* 2.8 mm)
		300 Gal	321 Gal	452 Gal	646 Gal	13 mm (RD 5.7 mm)
		600 Gal	799 Gal	946 Gal	1095 Gal	31 mm (RD 11.3 mm)
	野縁平行方向(Y)	150 Gal	223 Gal	321 Gal	338 Gal	8 mm (RD 3.1 mm)
		300 Gal	369 Gal	535 Gal	602 Gal	20 mm (RD 13.5 mm)
		600 Gal	755 Gal	1064 Gal	913 Gal	62 mm (RD 34.2 mm)

* RD : 天井面と野縁受けとの相対変位 (D3)

性能を満足するかどうかを確認した。

5.1 実験概要

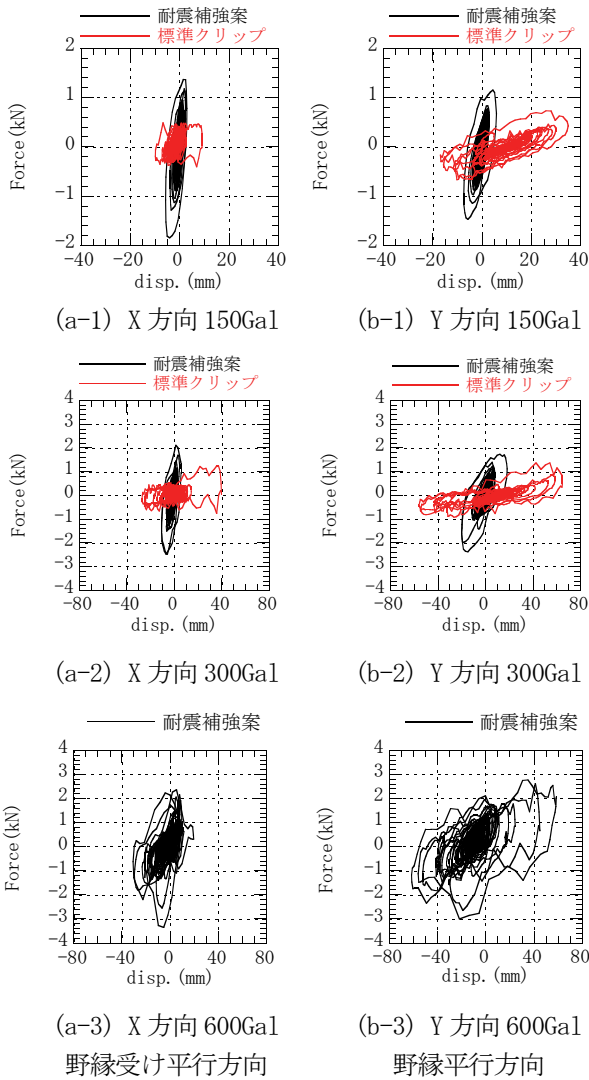


図-6 荷重-変形曲線の比較

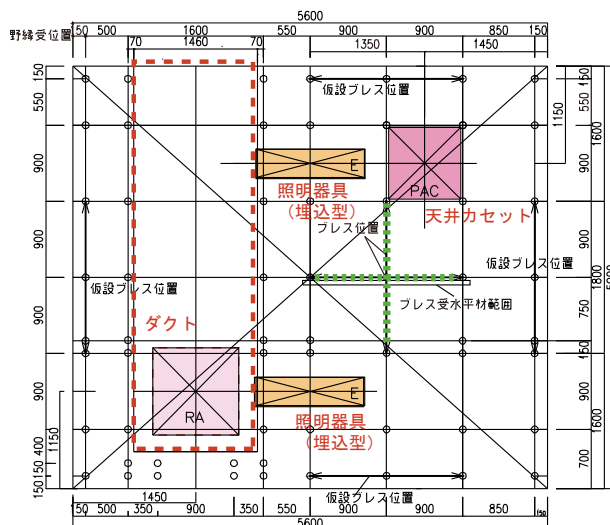


図-7 設備機器を組み込んだ天井試験体

天井は前章までの耐震天井と同様にブレース周り 9 箇所のクリップとハンガーを補強した。また、既往の実験において、天井面が壁を模擬した角形鋼管に衝突した際に衝撃により端部のクリップが外れて天井面の一部が落下する挙動が確認されていたため、天井端部 4 辺に位置するクリップも耐震補強用のものを用いた。

図-7に示すように設備機器として耐震ブレースを掛けた吊りボルトで下げられた天井カセットおよびダクトを配置し、照明器具(2 箇所)は天井埋込型とした。

入力波としては、中地震動用として El Centro NS 成分と UD 成分を振動台水平加速度 600Gal で基準化した波、大地震動用として東北地方太平洋沖地震において KiK-net 芳賀(TCGH16 : 栃木県芳賀郡芳賀町)で観測された EW 成分(1197Gal)と UD 成分(808Gal)の波を用いた。加振方向はいずれも壁を模擬した角形鋼管が設置してある方向(野縁平行方向:Y 方向)および上下方向の 2 方向である。

5.2 実験結果

実験フレーム上部(天井吊り元)での加速度記録を図-8、図-9に示す。El Centro 600Gal 入力については天井面の応答加速度、変位も示す。また、加振前の試験体全景を写真-3に、KiK-net 芳賀波での加振後の状況を写真-4に示す。

加振の結果、El Centro 600Gal の入力では天井面での応答加速度が 1G になるが、最大変位は 30mm 程度に抑えられ、天井面が壁を模擬した角形鋼管に衝突することはなく、各部材にも目立った損傷は発生しなかった。また、設備との取り合い部においても損傷は生じなかった。KiK-net 芳賀波入力では、実験フレーム上部で 2G を超える応答となり、ブレースや野縁受けの座屈、クリップの滑りなどが発生し、天井は大きく水平方向に変位し、天井面が壁を模擬した角形鋼管に激しく衝突した。しかし、補強用クリップが外れることはなく、標準クリップの大半も外れることなく保たれたので、天井の鉛直荷重支持機能が失われることはなく、天井端部の一部分こそ衝突により欠け落ちたが、天井全体が崩落するような挙動は起きなかった。設備機器ではダクトを吊るブレース付きの吊りボルトが曲がったが、大きな損傷は受けなかった。

§ 6. おわりに

従来の一般的な鋼製下地在来工法天井を部分的に補強することで実現できる耐震性能の高い天井構法を提案した。振動台実験の結果、提案した天井は天井面の応答加速度が 1G の場合でも天井下地の損傷がほとんど

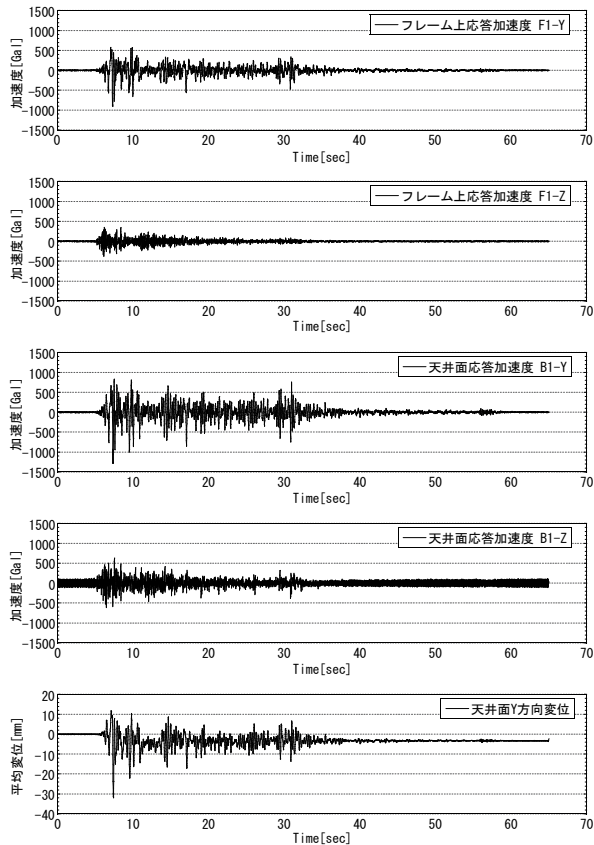


図-8 El Centro 600Gal 入力時の波形

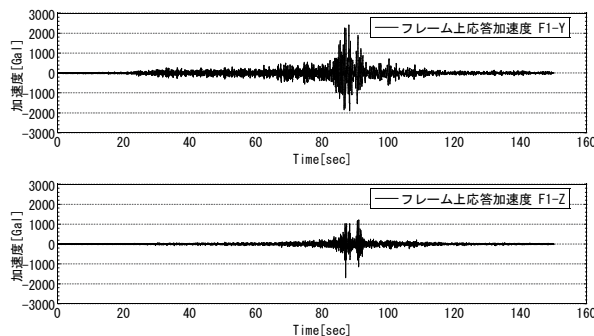


図-9 KiK-net 芳賀波入力時の波形

なく、天井面の応答変位も想定したクリアランス以内に納めることができた。また、天井吊り元の加速度が

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：“非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領”，2003年
- 2) 日本建築学会：“2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報”，2011年7月
- 3) 小林 他2名：“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年8月，pp.1295～1302
- 4) 西山 他3名：“芸予地震による体育館天井の落下被害調査とその対策”，日本建築学会技術報告集，第16号，2002年12月，pp.367～372
- 5) 金子 他3名：“グリッド天井の耐震性能確認実験”，日本建築学会大会学術講演梗概集(B-2)，2006年9月，pp.507～508
- 6) 大場，川口：“2011年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下に関する調査速報 その1：被害概要と考察”，日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1)，2011年8月，pp.759～760
- 7) 元結 他2名：“天井の地震被害および動的基本特性”，文部科学省特別教育研究経費「首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学研究の展開」平成21年度成果報告シンポジウム予稿集，2009

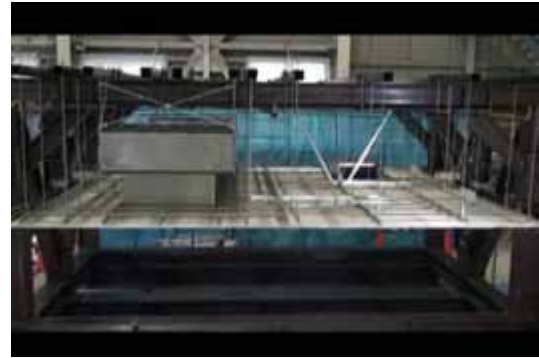


写真-3 加振前の天井

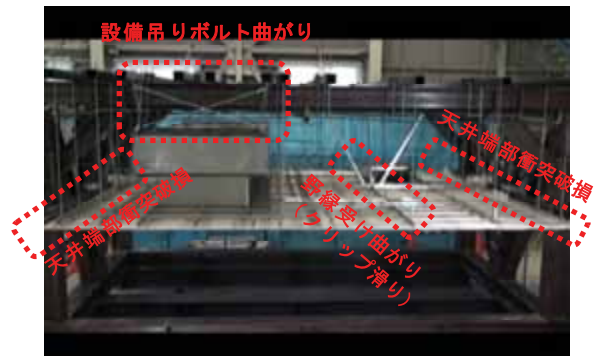


写真-4 KiK-net 芳賀の記録波での加振後の天井

2Gを超えるような大地震動時にも、一部の部材に損傷は発生するものの崩落には至らず、目標耐震性能を満足することを確認した。

提案した天井は耐震性能を確保しつつ経済性や施工性にも配慮したものとなっており、今後、実建物への適用を図っていく予定である。

謝辞

本研究にあたり、三洋工業株式会社には実験施設の提供など多大なご協力を頂きました。また、株式会社ミルックスには試験体施工にご協力いただきました。末筆ながら感謝申し上げます。