

先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業

「強震応答実験装置を用いた建造物の耐震性能把握手法の確立」
利用成果報告書

平成 26 年 11 月 17 日

防災研究所長 殿

[利用代表者]

氏名 池田 努 (70 才)

職名 代表取締役

所属機関名 日本工機株式会社

所在地 香川県三豊市高瀬町上麻乙 7 6 3

電話 0 8 7 5 - 7 4 - 7 2 4 1

F A X 0 8 7 5 - 7 4 - 7 2 4 0

E-mail アドレス Tsutomu_Ikeda@nihonkohki.co.jp

利用目的	<p>東日本大震災では、非構造材の落下、特に数多くの吊り天井の落下事故が広域にわたって発生し、多くの人命を奪い傷つける結果となった。このため、本年 4 月より新たな技術基準が法制化され、吊り天井構造の耐震強化が義務化された。</p> <p>平成 26 年 6 月 23, 24 日の実験では構造物に吊下支持される天井材を補強する天井補強具（特許登録）を含めた吊り天井構造の振動実験を実施した。本実験では、その補強具の改良品に対して同様の振動実験を行い、耐震性能を定量的に評価する。種々の角度から実証的なデータを得るとともに、その有効性・妥当性を検証する。その結果、吊り天井構造を耐震強化する製品の販売促進に役立つ。</p>
利用形態 (該当する項目を■にし てください)	<input checked="" type="checkbox"/> トライアルユース <input type="checkbox"/> 成果公開利用 <input type="checkbox"/> 成果非公開利用
利用期間	平成 2 6 年 1 0 月 1 5 日～平成 2 6 年 1 0 月 1 6 日
試験体仕様 (大きさ・重量)	<p>試験体には吊り天井構造を吊下支持するためのフレーム（構造躯体の模擬）と吊り天井構造を含む（右写真）</p> <p>フレーム寸法：D2300 mm×W2300 mm×H2518 mm 天井面＝1800 mm×1800 mm 総重量＝2400kg</p> 
加振内容	<p><u>調和波：</u> 共振（応答倍率）曲線把握のため、周波数を変化させたスイープ試験</p> <p><u>2011 年東北地方太平洋沖地震・K-net 日立波：</u> 梁間（X 方向）単独加振、桁行（Y 方向）単独加振ならびに XYZ 方向同時加振の実施。それぞれについては、振動台の性能範囲ならびに試験体が大きく破壊しない範囲で、実地震波の振幅レベルを変化させる。</p> <p><u>1995 年兵庫県南部地震・神戸海洋気象台波：</u> X 方向単独加振、Y 方向単独加振ならびに XYZ 方向同時加振の実施。それぞれについては、振動台の性能範囲ならびに試験体が大きく破壊しない範囲で、実地震波の振幅レベルを変化させる。</p>

次項に続く

<p>実験結果の概要と 実験により得られ た成果</p>	<p>平成26年6月23,24日には山形架構建築物に吊下支持される天井材を補強する天井補強具の振動実験を行ったが、本実験ではその改良品を設置したフレーム(建築構造物の一部模擬)を含めた吊り天井構造の振動実験を実施することにより、その耐震性能を定量的に評価する。</p> <p>まず、スワイプ試験により、山形架構建築物の梁間方向(野縁受け方向)と桁行方向(野縁方向)における吊り天井構造の固有周期などを把握した。次に、2011年東北地方太平洋沖地震時のK-net日立波、1995年兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台波を対象に、天井構造が大きく破壊しない範囲で実地震波の振幅レベルを変化させた入力波を与え、各部位での時刻歴応答を検討した。</p> <p>今回の天井補強具は野縁と野淵受けの交差部に設置して補強するとともに、ブレース材の自由運動を許容するようなピン結合としている。しかも、補強具には衝撃力(地震エネルギー)を吸収するような工夫を施した。</p> <p>天井補強具を取りつけた吊り天井構造の振動実験の結果、強い揺れによっても、1)新基準が定める天井部での水平震度(2.2)に耐えること、2)ブレース連結具に大きな荷重が作用しても取付け状態の維持が保持できること、3)吊りボルトと野縁受けをつなぐハンガーの開き、野縁受けと野縁を連結するクリップの外れがないこと、4)吊りボルトが大きく変形したり、天井板が落下しないこと、5)吊り元の吊り金具が外れないことなど、従来品よりも耐震性の高さが明らかになった。</p> <p>山形架構では梁間方向が弱軸となるので、吊り天井もその方向で揺れやすい。本実験によると、桁行方向では大きな揺れが生じると、野縁に取り付けた天井補強具が衝撃力(地震エネルギー)を吸収することにより、連結部の耐震性能が高まることがわかった。一方、梁間方向については、吊りボルトの長さが異なり、複雑な応答となる。天井部での加速度が特に新基準が定める2.2gを超えると、特にブレースに大きな影響を及ぼすが、ブレースに大きな変形を起こすことはなかった。2.2g強を超える大加速度の場合、軽微な損傷発生となる非弾性の塑性応答を許容するとしても、金具の外れ、ブレースの大きな屈曲や天井脱落の大損傷に至らない機能を有していることが明らかになった。</p> <p>本試作品は2.2g耐震天井の条件を満たしていた。大きな地震力を受けても、天井板の脱落に至らず、高耐震性を保証できることが実証的に明らかになった。</p>
<p>社会、経済への波及 効果の見通し</p>	<p>新開発の天井補強具は従来品によく見られた課題を解決できると期待される。すなわち、強い揺れによって作用する力や変位を抑えることができ、天井材を補強する効果が著しく損なわれるという問題を克服することも可能である。</p> <p>本実験では、天井材を容易かつ確実に補強して耐震性を高めることができ、新開発の天井補強具の性能を実証することができた。</p> <p>天井構造の耐震性強化に対する要望が強くなっている。このことから、耐震補強部材は、法制化に伴って新設天井の耐震化に活用されるのはもちろん、耐震化が進んでいない膨大な既存天井の耐震補強に役立つことが期待され、社会への波及効果は大きい。</p>
<p>発生した発明・著作物など (特許名称・出願番号・出願人、雑誌掲載資料)</p>	<p>新規特許 出願準備中</p>
<p>その他</p>	

- 1) 実験終了後、速やかに(原則1ヶ月以内に)提出下さい。
提出先:京大防災研究所 社会防災研究部門・都市空間安全制御分野
(E-mail:ito@zeisei.dpri.kyoto-u.ac.jp)
- 2) 文部科学省への評価報告が求められています。
知的財産権等の成果の追跡調査にもご協力宜しくお願い致します。

吊り天井補強具の耐震性能評価のための振動実験

1. はじめに

吊り天井は、震災時の避難場所となる体育館をはじめとした文教施設や交通施設、公共施設、商業施設など、あらゆる建物に採用されている。体育館、柔剣道場、工場、学校、ホール、オフィスビル、商業ビル、マンション、ホテルなど、利用施設は多い。東日本大震災では、非構造材の落下、特に夥しい件数の吊り天井の落下事故が広域にわたって発生し、多くの人命を奪い傷つける結果となった。

東日本大震災の吊り天井被害を受け、本年 4 月 1 日には「新築建築物等への適合を義務付ける建築基準法施行令および関連省令の改正」（以降、新基準とする）が吊り天井に関して行われた。吊り天井は建築環境や設備との関係で必要不可欠である。地震大国である我が国では、特に東日本大震災での吊り天井被害と新基準の施行を受け、天井耐震化のニーズが高まっている。

体育館などの山形架構では梁間方向に斜めの天井となるが、新基準の計算ルート設計に従えば、吊り長さを不均一にする工事が認められている。構造体が弱軸となる梁間方向における天井の揺れはその直角方向である桁行方向よりも大きくなる。この場合、複雑な地震応答が生起するが、どのような挙動を示すか、不明である。最適な吊り長さの決定に当たっては、解析や振動実験によってその挙動を解明する必要がある。

平成 26 年 6 月 23, 24 日の実験では構造物に吊下支持される天井材を補強する天井補強具（特許登録）を含めた吊り天井構造の振動実験を実施した。本実験では、その補強具の改良品に対して同様の振動実験を行い、耐震性能を定量的に評価する。種々の角度から実証的なデータを得るとともに、その有効性・妥当性を検証する。その結果、吊り天井構造を耐震強化する製品の販売促進に役立てる。

2. 実験方法

2.1. 実験参加者

日本工機株式会社：池田努、水澤勝史

香川大学：野田茂、林宏輔

(株) 伸和製作所：山本賢治

(有) マルキン：金崎敏明、宮崎篤志ほか 1 名

2.2. 内容

吊り天井は、天井のうち、構造耐力上主要な部分または支持構造部から天井面構成部材を吊り材により吊り下げる構造の天井のことを言う。これは、吊りボルト、ハンガーの吊り材、斜め部材（ブレース）の天井材、野縁受け、野縁、クリップの天井下地材と天井板（ボード）からなる天井面構成部材よりなる。吊り天井は構造躯体の吊元でインサートするか、金具によって吊元に取り付けられる。写真 1 に在来工法による一般的な吊り天井の構成を示す。

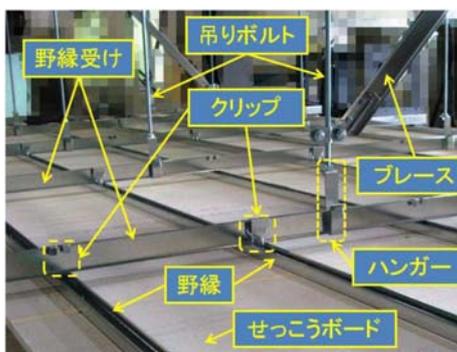


写真 1 軽量鉄骨下地在来工法天井



写真 2 振動台上に設置した試験体

東日本大震災では、吊りボルトの吊り元である上部クランプの外れ、野縁受けと野縁を接合するクリップの外れ、野縁から仕上げ材のみが脱落、野縁受けと吊りボルトを接合するハンガーの開き・破断・外れ、ブレースの溶接の外れなどが見られた。そこで、振動実験ではこうした事態が生じないような天井補強具を開発し、その試作品を山形架構建築物に取り付けた。その状況を写真 2 に示す。

振動実験においては、まず、スweep試験により、山形架構建築物の梁間方向（野縁受け方向）と桁行方向（野縁方向）における吊り天井構造の固有周期などを把握した。次に、2011 年東北地方太平洋沖地震時の K-net 日立波、1995 年兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台波を対象に、天井構造が大き

く破壊しない範囲で実地震波の振幅レベルを変化させた入力波を与え、各部位での時刻歴応答を検討した。特に、振動実験により、新たに開発した試作品が新基準の 2.2g 耐震天井を満たすかどうか、さらには耐震的な余裕がどの程度あるかを検証することにした。

2.3. 加振パターン

1) 調和波：

山形架構建築物の梁間方向（野縁受け方向）と桁行方向（野縁方向）における共振（応答倍率）曲線把握のため、振動台の加振波の振幅を 100gal とし、周波数を 2.5～14Hz に変化させたスイープ試験を実施した。

2) 2011 年東北地方太平洋沖地震・K-net 日立波：

梁間方向（X 方向）単独加振、桁行方向（Y 方向）単独加振ならびに XYZ 方向同時加振を実施した。振動台の性能範囲ならびに試験体が大きく破壊しない範囲で、実地震波の振幅レベルを変化させた。加振パターンについては X 方向単独加振で 3 パターン、Y 方向単独加振で 3 パターンならびに XYZ 方向同時加振で 3 パターンを設定した。

3) 1995 年兵庫県南部地震・神戸海洋気象台波：

X 方向単独加振、Y 方向単独加振ならびに XYZ 方向同時加振を実施した。振動台の性能範囲ならびに試験体が大きく破壊しない範囲で、実地震波の振幅レベルを変化させた。加振パターンについては X 方向単独加振で 3 パターン、Y 方向単独加振で 3 パターンならびに XYZ 方向同時加振で 3 パターンを設定した。

3. 研究結果

3.1. 加振データ

入力地震波には 2011 年東北地方太平洋沖地震時の K-net 日立波（図 1）と 1995 年兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台波（図 2）を用いた。加振データについては図 1、図 2 に示す原記録の振幅を拡大縮小して変化させた。

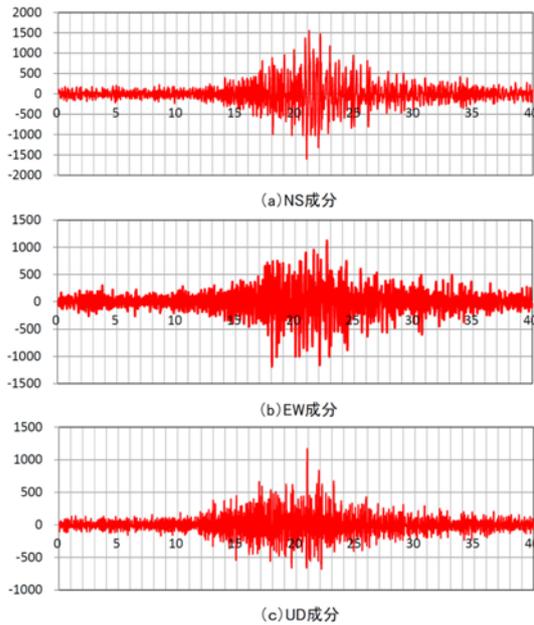


図 1 2011 年東北地方太平洋沖地震・K-net 日立波加速度 (gal)

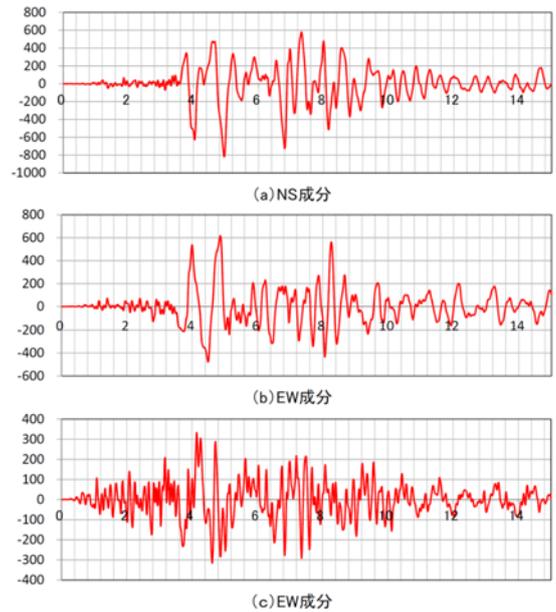


図 2 1995 年兵庫県南部地震・神戸海洋気象台波加速度 (gal)

3.2. 実験結果

振動実験に当たり、加速度センサーは試験体フレーム上部、吊り天井の天井板と天井補強具近傍の野縁に複数設置した。また、天井板の変位挙動を明らかにするため、CCD レーザー変位計を天井板の梁間方向と桁行方向に取り付けた。以下においては天井板中心部に位置する天井補強具近傍の野縁に設置した加速度記録の結果のみを示す。

スイープ試験の結果は図 3 のようになる。図よりわかるように、梁間方向（野縁受け方向）では天井構造の固有円振動数は 6.5Hz、桁行方向（野縁方向）では 8.2Hz ほどである。固有円振動数は先の実験試作品よりも高くなっており、吊り天井構造は全体的に剛性が大きくなっている。これはプレー

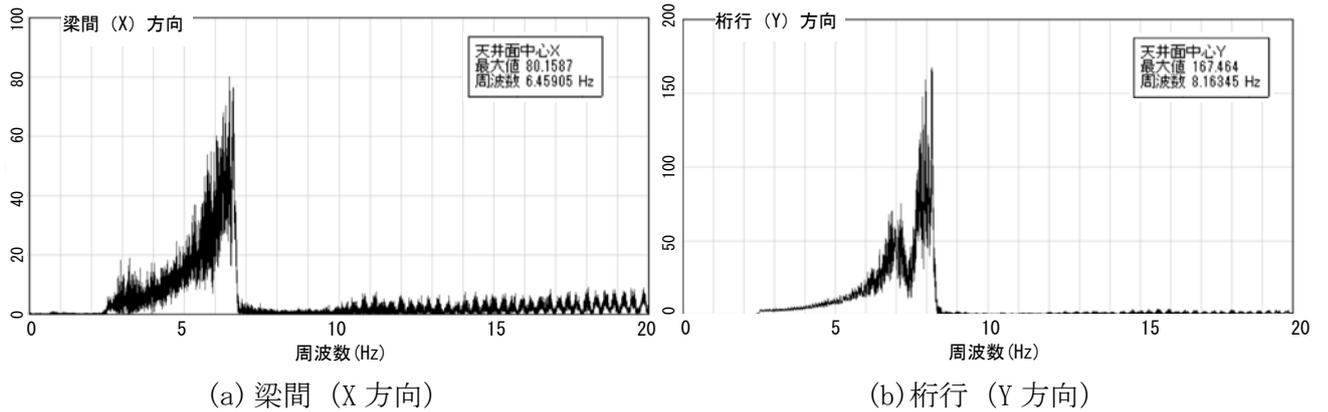


図 3 共振（応答倍率）曲線

ス有する在来工法の一般的な吊り天井の固有周期とほぼ同じである。梁間方向では山形架構のために吊り長さが異なり、桁行方向に比べて長周期になっており、図 3 の応答倍率よりわかるようにかなり揺れやすくなる。一方、図 3 の結果より、吊り天井の減衰定数が求められ、大きくないことがわかる。

2011 年東北地方太平洋沖地震時の K-net 日立波を縮小した入力地震波（XYZ 方向同時加振波）による天井板中心部の時刻歴応答の一例を図 4 に示す。この場合には吊り天井部で特に梁間（野縁受け方向）と上下方向で 2.2g を大幅に超える応答を呈していることがわかる。上下方向には 6g に迫るかなり大きな加速度を生じているが、これは野縁部での回転挙動を抑えるために生じた結果と言える。構造躯体の大きな揺れに抵抗することにより、野縁と野縁受けの交差部に設置した新開発の天井補強具が有効に機能発揮した結果である。変形を抑えることになった反面、インパルス的に大きな加速度応答を生じている。ブレースは先の実験と異なり、4 本のうちの 1 本に若干の湾曲を生じた程度であり、大きく問題になることはなかった。新開発の天井補強具の設置により、天井板の脱落・落下に至る事態は避けられた。

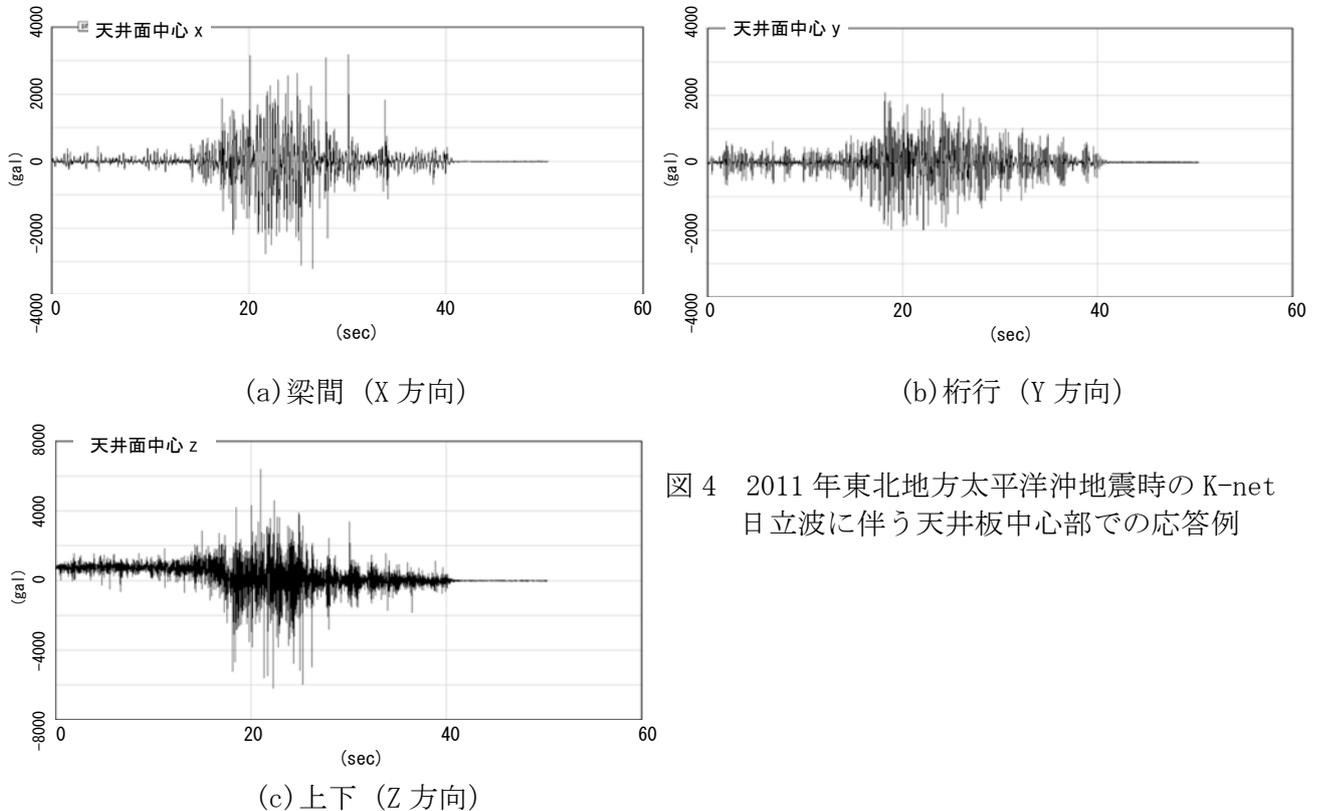


図 4 2011 年東北地方太平洋沖地震時の K-net 日立波に伴う天井板中心部での応答例

2011 年東北地方太平洋沖地震入力では吊り天井の各部位の揺れが大きく卓越しなかったが、1995 年兵庫県南部地震入力では 2011 年東北地方太平洋沖地震入力に比べ、吊り天井に衝撃的な作用を与えた。しかしながら、本実験の範囲では吊り天井に損傷や破壊の発生は見られず、機能支障を与えるこ

とはなかった。

学校体育館を模擬した山形架構実大モデル振動実験（独）防災科学技術研究所、2014年3月31日プレス発表）によれば、新基準を満たす2.2g耐震天井であっても、従来の天井構成部材と施工方法を採用する限り、大きな地震力を受けると、ブレースの取り付け金具のはずれ、ブレースの折れ曲がり、骨組みの変形、天井板の多数落下が見られている。2.2g超の天井加速度となった場合、小・中程度の損傷は許容するとしても、天井板脱落の事態は絶対避けなければならない。

多数の加振パターンを用いた本実験の結果、ブレースを野縁と野縁受けの交差部に連結した新開発の天井補強具を採用すれば、東日本大震災と阪神・淡路大震災の地震波に対し、新基準が定める天井部での水平震度（2.2）に耐え、天井落下が生じることがなかった。この点は（独）防災科学技術研究所の新基準を満たす2.2g耐震天井と大きく異なり、高耐震性を有する特徴である。

3.3. 当初計画との比較

当初計画と実績に特に大きな相違は見られない。

4. まとめ

4.1. 結果のまとめと考察

東日本大震災の吊り天井被害を受け、本年4月1日には新基準が施行された。これを受け、新たに開発した天井補強具を取りつけた吊り天井構造の振動実験を実施した。その結果、強い揺れによっても、開発製品については1) 新基準が定める天井部での水平震度（2.2）に耐えること、2) ブレース連結具に大きな荷重が作用しても取付け状態の維持が保持できること、3) 吊りボルトと野縁受けをつなぐハンガーの開き、野縁受けと野縁を連結するクリップの外れがないこと、4) 吊りボルトが大きく変形したり、天井板が落下しないこと、5) 吊り元の吊り金具が外れないことなど、従来品よりも耐震性の高さが明らかになった。

山形架構では梁間方向が弱軸となるので、吊り天井もその方向で揺れやすい。本実験によると、桁行方向では大きな揺れが生じると、野縁に取り付けた天井補強具が衝撃力（地震エネルギー）を吸収することにより、連結部の耐震性能が高まることがわかった。一方、梁間方向については、吊りボルトの長さが異なり、複雑な応答となる。天井部での加速度が特に新基準が定める2.2gを超えると、天井補強具が野縁部で大きな回転運動を起こしてブレースの変形をきたすことはなかった。2.2g強を超える大加速度の場合、軽微な損傷発生となる非弾性の塑性応答を許容するとしても、金具の外れ、ブレースの大きな屈曲や天井脱落の大損傷に至らない機能を有していることが明らかになった。

4.2. 今後の課題

本試作品では2.2g耐震天井の条件を満たしていることがわかった。大きな地震力を受けても、天井板の脱落に至らず、高耐震性を保証することがわかった。山形架構建築物で弱軸となる梁間方向の揺れが大きく抑えられると考えられる。

野縁と野縁受けの交差部に設けた耐震補強金具のメカニズムが実験的に検証され、2.2g耐震天井を超える高耐震機能を発揮することが確認された。今後は、今回の改良試作品の製品化を行い、吊り天井構造を耐震強化する製品の販売促進に役立てることが課題となる。