

# 耐震性に優れた大規模天井工法の開発

天井支持要素と耐震要素を明確に分離した信頼性の高い天井工法

欄木 龍大<sup>\*1</sup>・木村 雄一<sup>\*2</sup>・佐々木 晴夫<sup>\*3</sup>・倉本 真介<sup>\*4</sup>

**Keywords** : large-scale ceiling, shaking table test, seismic performance, vibration property, kinetic property

大規模天井, 振動台実験, 耐震性能, 振動特性, 力学的特性

## 1. はじめに

近年, 震度 5 を超える地震が多発し, 公共性の高い大規模空間において, 主要構造部に目立った損傷がないにも関わらず, 天井材が損傷・落下するなどの被害が報告されている<sup>1),2)</sup>。天井の耐震対策としては, 図-1(a)のように吊りボルト間に振れ止め用のブレースを設置するのが一般的であるが, 耐震要素であるブレース材を天井支持要素である吊りボルトに接続しているために, 地震の際に耐力の小さい吊りボルトやハンガー, クリップ等が損傷し, ブレースが水平抵抗材として十分に機能せず, 天井変位を抑制できないことが最近の研究で明らかとなってきた<sup>3),4)</sup>。2011 年東北地方太平洋沖地震においても, 体育館や空港ターミナルビルなどの大規模空間で, 天井の破損や落下が多数報告されている<sup>5)</sup>。

弊社では, 近年の地震による天井被害を受け, 野縁と上階の床スラブ間に V 型ブレースを配置することで, 大規模天井の耐震性を大幅に向上させた改良型耐震天井工法を開発した。改良型耐震天井工法は, 吊り要素と耐震要素を明確に分離した工法であり, 地震力を V 型ブレースで処理し, 吊り要素に影響を与えないことで落下を防止している。その安全性および力学的特性(剛性・耐力)の確認を目的に, 天井の部分試験体(4.5m×4.5m)の振動試験を実施した。また, 耐震性能の比較を目的に, 吊りボルト間にブレースを設置した従来天井についても同様の試験を実施した。

本論文では, 改良型耐震天井工法の概要と, 従来天井および改良天井の耐震性能について, 実験結果を元に報告する。

## 2. 改良天井の構成

天井の耐震性向上対策として, 吊りボルトや野縁受けには天井材を吊下げる機能のみを与え, 地震力はブレース部だけで処理させるというコンセプトに基づき, ブレースの設置方法を図-1(b)に示すように改良した。

- ・天井に入る地震力を直接ブレースに流すために, ブレースを吊りボルトや野縁受けを介さず, 野縁と上階の床スラブ間に直接取り付ける。
- ・野縁受け方向には, 追加野縁を設置してブレースを取り付ける。
- ・一对のブレースはV字に配置する。

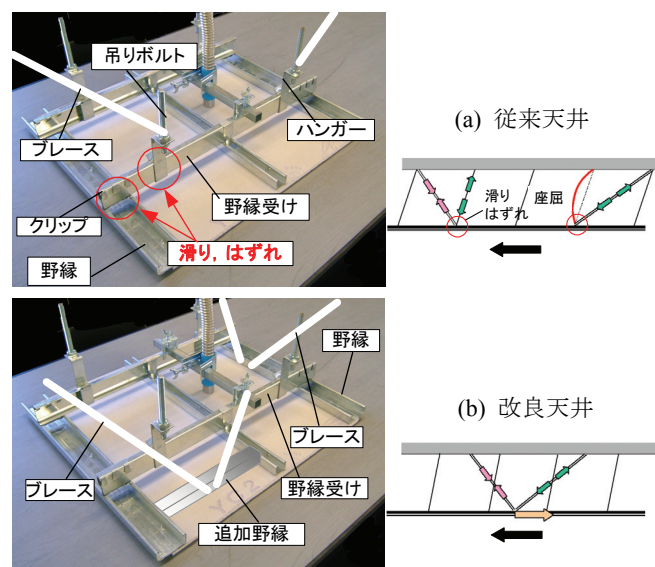


図-1 ブレースの設置方法  
Fig. 1 Outline of Brace Installation

## 3. 実験概要

### 3.1 試験体

図-2 に天井試験体の全景と概略図を示す。試験体

\* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

\* 2 設計本部構造計画G r

\* 3 建築本部技術部建築技術部

\* 4 設計本部構造G r

は、従来天井 (No.1, No.2) , 改良天井 (No.3) の計 3 体である。天井の全体寸法を 4.5m×4.5m, 吊りボルト (φ9) の間隔を 0.9m, 吊り長さを 1.5m とし、振動台上に設けた架台フレームの上部梁から懸架する。ブレースは従来天井では  $[-38 \times 12 \times 1.2]$  を、改良天井では  $\square-19 \times 1.2$  を用い、ねじれ防止のために、従来天井では主加振方向にブレースを 2 対設置した。ブレースの取付角度は約 60°である。天井ボードの積層数を変えることで重量を調整し、目標とする水平力がブレースに作用するように計画をした。表-1 に試験体の諸元を示す。また、図-3 に天井試験体の写真を示す。

表-1 試験体の諸元  
Table 1 List of Test Model

|      | ブレース<br>タイプ | 加振<br>方向 | ボルト<br>枚数 | ブレース<br>本数 | 重量 W<br>(N) | 単位重量<br>(N/m <sup>2</sup> ) | ブレース1対の<br>水平剛性Kb<br>(N/cm) *1 | ブレース1対の<br>負担せん断力Q<br>(N) *2 |
|------|-------------|----------|-----------|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| NO.1 | 従来          | 野縁       | 1         | 2          | 2185        | 108                         | 43049                          | 464                          |
| NO.2 | 従来          | 野縁受      | 2         | 2          | 3680        | 182                         | 43049                          | 464                          |
| NO.3 | 改良          | 野縁受      | 3         | 1          | 5502        | 272                         | 50536                          | 3119                         |

\*1)  $K_b = 2 \cdot E \cdot A / L \cdot \cos^2 59^\circ$  \*2) 座屈荷重(オイラー式)から求めた計算値

### 3.2 加振方法

加振には大成建設 (株) 所有の三軸振動台 (寸法 4m×4m, 最大積載重量 200kN, 最大加速度 1G) を用いた。振動台の入力波として、ElCentro 波 (ElCentro NS 1940) を振幅調整した波を用いた。ブレースの耐力および天井の損傷挙動に関する基礎データを取得するため、1 軸加振を中心に試験を実施した。なお、固有振動数を把握するためにホワイトノイズ加振も実施した。

### 3.3 計測方法

歪型加速度計 (共和電業製 AS-2GB) を用いて鉄骨フレーム、天井パネル、振動台の加速度を計測した。また、レーザー式変位計 (キーエンス製 LK-500) を用いて架台フレームと天井パネルの相対変位を計測した。また、歪みゲージにより、ブレースおよび吊りボルト軸力を計測した。ゲージの荷重変換係数は、部材の引張試験により決定した。図-4 に計測点配置を示す。

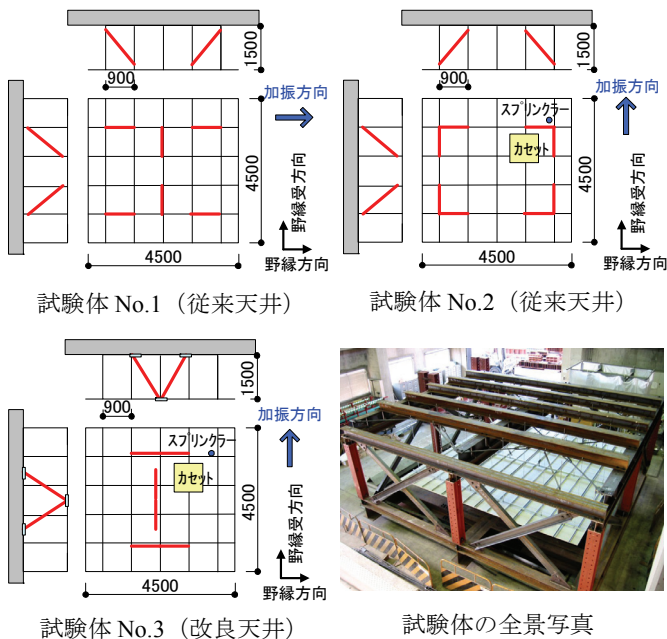


図-2 試験体の概略図と全景写真

Fig.2 Diagrammatic Sketch and Cover Shot of Test Model

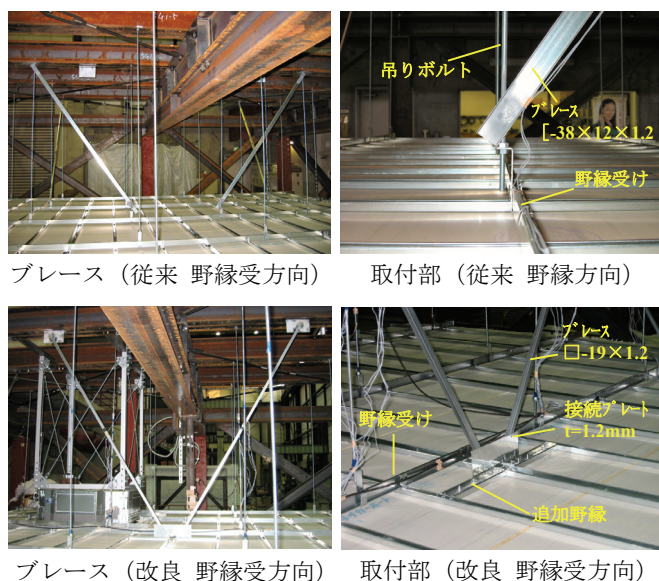


図-3 試験体の写真

Fig.3 Photograph of Test Model

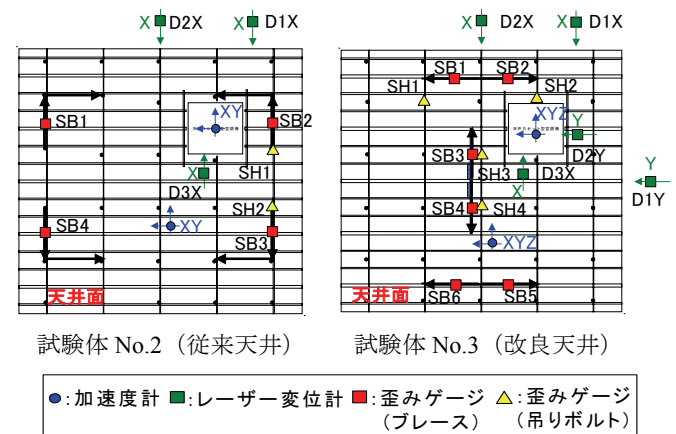


図-4 計測点配置

Fig.4 Measuring Points

## 4. 実験結果

### 4.1 天井の振動特性

図-5 にホワイトノイズ (50Gal) 加振時の伝達関数 (天井面/架台) と ARX (Auto-Regressive eXogenous) による同定モデルの伝達関数を比較して示す。また、表-2 に同定した試験体および架台フレームの固有振動数  $f$  および減衰定数  $h$  と、それを元に換算した天井

モデル（ボード 1 層貼り，ブレース 1 対配置）の固有振動数  $f_m$  を示す。天井モデルの固有振動数  $f_m$  は，従来天井では野縁方向 1.9Hz，野縁受け方向 4.3Hz であり，改良天井では野縁方向 10.8Hz，野縁受け方向 13.8Hz である。改良天井の固有振動数は従来天井に比べて 3～5 倍程度高くなっていることがわかる。また，従来天井，改良天井共に，野縁受け方向の振動数が野縁方向に比べて高くなる傾向が見られる。従来天井の減衰定数（野縁受け方向）が他に比べて著しく大きくなっているが，ハンガーと野縁受け接合部のすべりの影響によるものと考えられる。なお，架台フレームの固有振動数は，天井試験体に比べて高いことが確認できる。

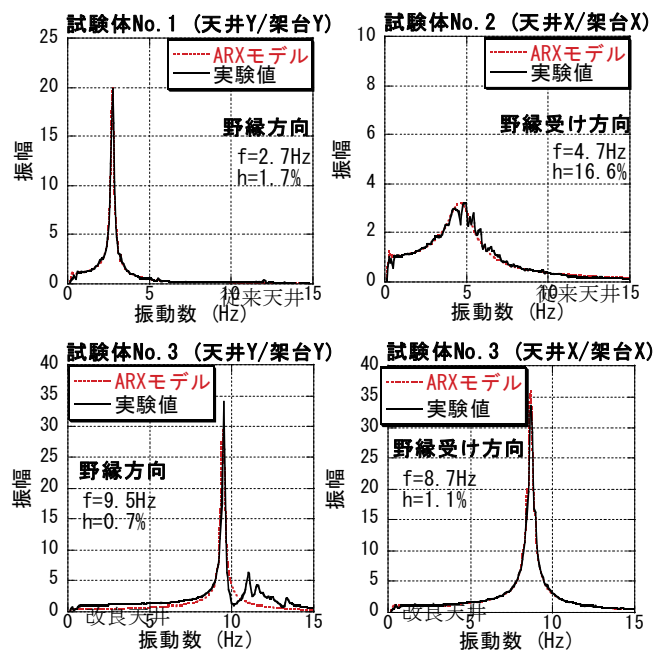


図-5 伝達関数  
Fig.5 Transfer Function

表-2 天井の振動特性  
Table 2 Natural Period and Damping Factor of Test Model

|          | タイプ | 加振方向    | ブレース<br>対数 | ボード<br>層数 | 重量<br>W (N) | 固有振動数<br>f (Hz) | 減衰定数<br>h (%) | 換算振動数<br>f <sub>m</sub> (Hz) *2 |
|----------|-----|---------|------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|---------------------------------|
| 試験体No.1  | 従来  | 野縁 (Y)  | 2          | 1         | 2185        | 2.7             | 1.7           | 1.9                             |
| 試験体No.2* | 従来  | 野縁受 (X) | 2          | 2         | 3680        | 4.7             | 16.6          | 4.3                             |
| 試験体No.3  | 改良  | 野縁 (Y)  | 2          | 3         | 5502        | 9.5             | 0.7           | 10.6                            |
|          |     | 野縁受 (X) | 1          | 3         | 5502        | 8.7             | 1.1           | 13.8                            |
| 架台フレーム   |     | X       |            |           |             | 12.9            | 0.7           |                                 |
|          |     | Y       |            |           |             | 16.6            | 1.0           |                                 |

\*1 ハンガーと野縁受を固定しない場合

\*2 ボード1層貼り，ブレース1対配置のモデルに換算した場合の振動数  $f_m = f \times \sqrt{W/2185}$  / ブレース対数

## 4.2 地震波加振結果

表-3 に試験ケースと被害状況を示す。また，図-6 に 1 軸加振時の架台の入力加速度（換算加速度）と天井の最大変位の関係を示す。ここで換算加速度とは，ボード 1 層貼り・ブレース 1 対配置の天井モデルのブレースに，試験体と等価なせん断力を作用させる入力加速度である。以後，架台の入力加速度は換算加速度

で表記する。図-7 に ARX モデルによる加振毎の天井固有振動数および減衰定数の同定結果を示す。加振結果を以下にまとめる。

表-3 試験ケースと加振結果  
Table 3 Tests Case and Excitation Results

|     | No. | 入力加速度 (cm/s <sup>2</sup> ) [ ]は換算加速度*1 |             |             | 結果 (天井の最大変位, 被害状況)    |
|-----|-----|----------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------|
|     |     | X方向<br>(野縁受け)                          | Y方向<br>(野縁) | Z方向<br>(上下) |                       |
| 従来型 | 1   |                                        | 50 [25]     |             | 7.3mm                 |
|     | 2   |                                        | 100 [50]    |             | 12.3mm                |
|     | 3   |                                        | 200 [100]   |             | 15.7mm                |
|     | 4   |                                        | 300 [150]   |             | 31.5mm クリップ滑り         |
|     | 5   |                                        | 400 [200]   |             | 81.3mm クリップ外れ (3箇所)   |
|     | 6   | 100 [100]                              |             |             | 11.0mm                |
|     | 7   | 200 [200]                              |             |             | 29.2mm ハンガー滑り         |
|     | 8   | 300 [300]                              |             |             | 52.4mm ハンガー滑り         |
|     | 9   | 500 [500]                              |             |             | 115.8mm ハンガー滑り        |
|     | 10  | 100 [100]                              |             |             | 3.5mm                 |
| 改良型 | 11  | 300 [300]                              |             |             | 14.2mm                |
|     | 12  | 500 [500]                              |             |             | 43.1mm クリップ滑り         |
|     | 13  | 750 [750]                              |             |             | 83.9mm クリップ滑り         |
|     | 14  | 554 [554]                              | 900 [900]   | 543 [543]   | クリップ外れ (24箇所), プレース座屈 |
|     | 15  | 554 [554]                              | 900 [900]   | 543 [543]   | 天井落下                  |
|     | 16  | 300 [900]                              |             |             | 3.0mm                 |
|     | 17  | 600 [1800]                             |             |             | 7.5mm                 |
|     | 18  | 750 [2250]                             |             |             | 73.7mm プレース座屈         |
|     | 19  | 554 [1662]                             | 750 [1125]  |             |                       |

\*1) 4.5m × 4.5m (ボード1層貼り) にブレース1対を配置した場合に換算。換算係数=ボード層数/ブレース対数

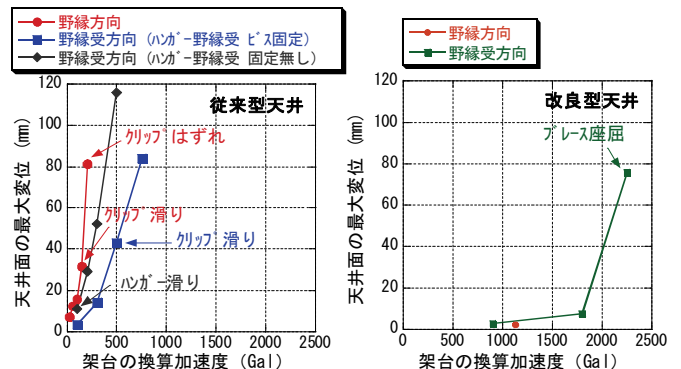


図-6 架台加速度（換算値）と天井最大変位の関係  
Fig.6 Relationship between Displacement and Input Acc.

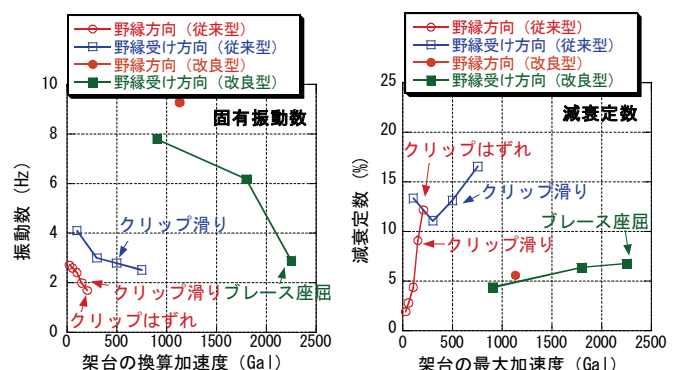


図-7 架台加速度（換算値）と天井の振動特性の関係  
Fig.7 Relationship between Characteristics and Input Acc.

## 従来天井

野縁方向は，150Gal 換算の加振 (No.4) で力が集中するブレース接続部周辺のクリップ（爪）が滑り，200Gal 換算の加振 (No.5) でクリップがはずれ，天井

変位が増大して野縁受けが損傷した（図－8(a)）。野縁受け方向は、ハンガーを野縁受けに固定しない場合は、100Gal 換算の加振（No.6）からハンガーが滑って天井変位が大きくなった（図－8(b)）。一方、ハンガーを野縁受けに固定した場合は、500Gal 換算の加振（No.12）からクリップと野縁受け間に滑りが生じて天井変位が増大したが（図－8(c)）、750Gal 換算の加振までは損傷が無かった。以上のことから、従来天井はクリップが滑って天井変形が増大するため、耐震性は余り期待できず、地震時の最大変位の予測も困難であることがわかる。

なお、3 軸加振では、加振 1 回目（No.14）で野縁方向ブレースの接続部周辺のクリップがはずれ、続いて実施した 2 回目加振（No.15）で試験体が大きく揺れながら振動し、残りの全てのクリップがはずれて天井が落下した。

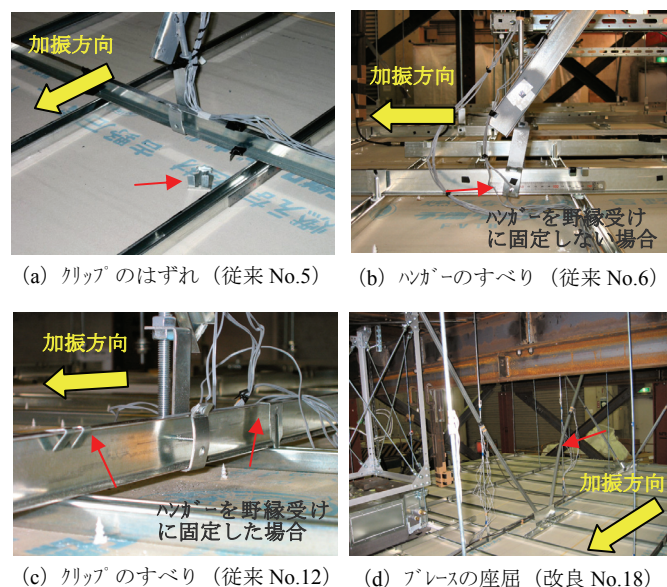
### 改良天井

1800Gal 換算の加振（No.17）に対しても、ブレースおよび天井材（吊りボルト、野縁等）は無損傷であった。天井の最大変位は 7.5mm、天井カセットとの相対変位も 6.2mm とクリアランス（30mm）に対して十分小さいことから、優れた耐震性能を有することが確認された。2250Gal 換算の加振（No.18）で、ブレースが座屈し（図－8(d)）、天井変位が増大したが、水平抵抗要素と天井の吊り下げ要素が分離されているため、天井材（吊りボルト、野縁等）の損傷は無く、天井を吊り下げる機能は保持された。ブレースは座屈するまで有効に働くため、改良天井を用いることで周辺壁・設備とは根拠あるクリアランスを設定することが可能となる。また、2 軸加振（No.19）においても、ブレースおよび天井材は無損傷であった。

なお、従来天井、改良天井共に加振によって天井の振動数は低下し、減衰定数が増加する傾向が見られた。

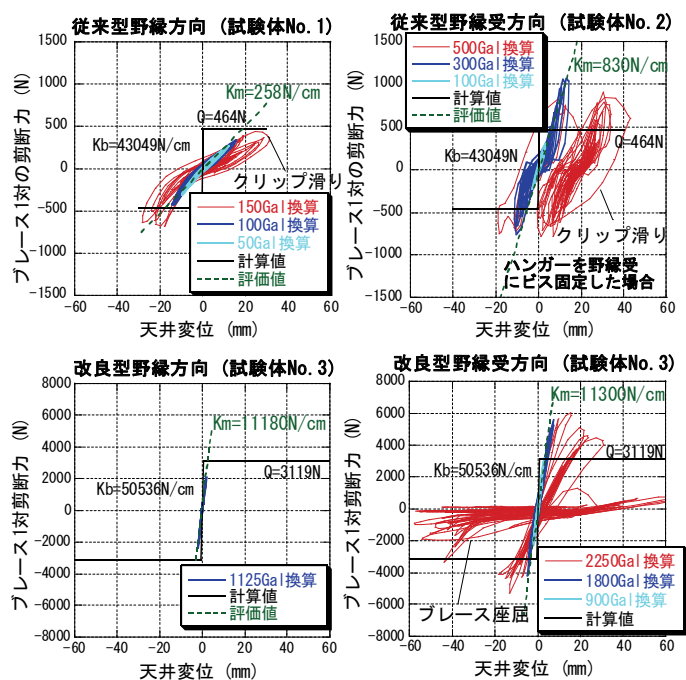
### 4.3 天井の力学的特性

図－9 に 1 方向加振時のブレース軸力から算出したブレース 1 対のせん断力と天井変位の履歴曲線を示す。なお、改良天井（試験体 No.3）では、野縁方向の 1 軸加振を実施していないため、野縁方向については水平 2 軸加振時（No.19）の履歴曲線を示す。水色・青線が損傷前（クリップの滑りやブレース損傷無し）の履歴曲線、赤線が損傷後（クリップの滑りやブレースの座屈が発生）の履歴曲線である。図中には損傷前の履歴曲線から評価した等価水平剛性（Km）と、ブレース単体の水平剛性（Kd）およびオイラーの座屈荷重から求めたせん断力の計算値（Q）も併せて示す。表－4 に



図－8 被害状況

Fig.8 Damage Condition



図－9 天井変形とブレース 1 対の剪断力の関係

Fig.9 Relationship between Ceiling Displacement and Shear Force of Pair Brace

表－4 ブレース 1 対の力学的特性

Table 4 Kinetic Property of Pair Brace

| ブレース<br>タイプ | 方向  | 試験体        | ブレース単体(1対)<br>の水平剛性<br>Kb (N/cm) | ブレース1対の<br>等価水平剛性<br>Km (N/cm) | ブレース1対の<br>最大負担せん断力<br>(N) |       |
|-------------|-----|------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------|
|             |     |            | 計算値*1                            | 実験値*2                          | 計算値*3                      | 実験値*2 |
| 従来          | 野縁  | No.1       | 43049                            | 258                            | 464                        | 690   |
|             | 野縁受 | No.2(ビス固定) |                                  | 830                            | 464                        | 1100  |
|             | 野縁受 | No.2(固定無し) |                                  | 932                            | 464                        | 70    |
| 改良          | 野縁  | No.3       | 50536                            | 11180                          | 3119                       | —     |
|             | 野縁受 | No.3       |                                  | 11300                          | 3119                       | 6050  |

\*1  $K_b = 2 \cdot E \cdot A / L \cdot \cos^2 59^\circ$

\*2 地震波加振時の天井変形とブレースせん断力の履歴曲線から評価

\*3 オイラー座屈荷重から算定したせん断力の計算値

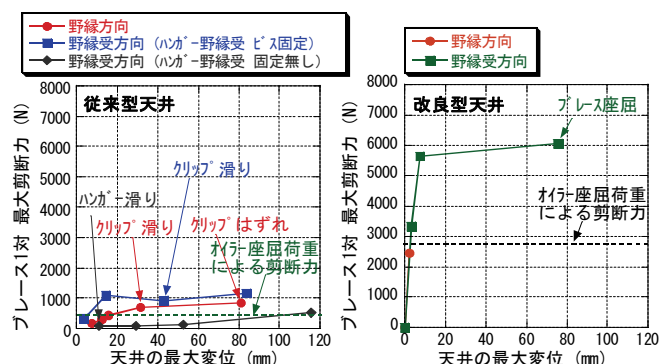


図-10 ブレース1対の最大せん断力と天井最大変位の関係  
Fig.10 Relationship between Maximum Displacement of Ceiling and Maximum Shear Force of Pair Brace

履歴曲線より求めたブレース1対の等価水平剛性 ( $K_m$ ) と最大負担せん断力をまとめて示す。また、図-10に1軸加振時のブレース1対の最大せん断力と天井最大変位の関係を示す。以下に結果をまとめる。

#### 従来天井

従来天井のブレース等価水平剛性 ( $K_m$ ) は、吊りボルトと野縁等の接合偏心や、ハンガーやクリップ等の接合部剛性が低いことに起因して、ブレース単体の水平剛性 ( $K_b$ ) の  $1/160$  (野縁方向)、 $1/50$  (野縁受方向) 程度しかなく、ブレースが有効に機能していない。また、1対のブレースが負担できる最大せん断力は、クリップがずれるため、野縁方向は  $690N$ 、野縁受け方向は  $1100N$  (ハンガーを野縁受けに固定した場合) で頭打ちとなっている。この値は、オイラー座屈荷重によるせん断力の計算値 ( $Q=464N$ ) の約2倍の大きさであるが、クリップが滑っていることから天井変形が大きくなっている。また、ハンガーを固定しない場合は、ハンガーが滑るためにブレースは  $70N$  のせん断力しか負担できず、変形が更に大きくなっている。

#### 改良天井

改良天井のブレース等価水平剛性 ( $K_m$ ) は、ブレース単体の水平剛性 ( $K_b$ ) の  $1/5$  程度であるが、従来天井に比べて10倍以上の大きさとなっている。また、1対のブレースが負担できる最大せん断力も  $6050N$  であり、従来天井に比べて約5.5倍の大きさとなっている。この値はブレースの座屈耐力で決まっていることから、ブレースは座屈するまで有効に働き、天井の変形を抑制することがわかる。なお、ブレースはオイラー座屈によるせん断力の計算値 ( $Q=3119N$ ) の1.8倍程度の荷重に対しても無損傷であるが、等価水平剛性 ( $K_m$ ) は70%程度に低下している。この理由として、ブレースの弾性座屈による剛性低下とブレース接合部の剛性

低下 (ビスの緩み等) が考えられる。

### 5. 耐震天井の設計方針

改良天井の実験結果をまとめると、以下の通りである。

- ・ボードと接合部との緩みが多少あるが、換算固有振動数が  $10Hz$  以上となる。
- ・ブレース剛性は計算値より小さいが、天井変位を  $1cm$  程度に収めるには十分な剛性である。
- ・ブレースの挙動はオイラー座屈近辺 ( $3000N$ ) までは、ほぼ線形性を示した。
- ・ブレースはオイラー座屈荷重の2倍弱までは、剛性が多少落ちるものの安定して抵抗した。
- ・オイラー座屈荷重の約2倍程度になると、先ずブレース材の塑性座屈が起こり、続いてブレース接合部の破壊、天井ボード部分のビス抜けなどが同時に起こり、破壊に到った。

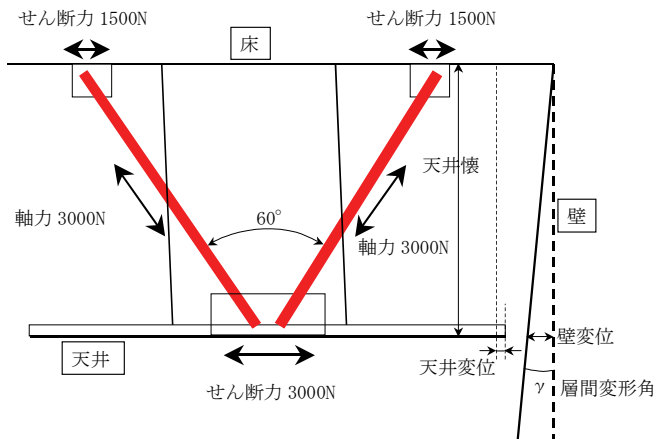
これらの結果から、耐震天井の設計方針を、以下のように設定する。

#### 耐震天井の設計方針

- ・吊ボルトは天井自重を支える機能だけとし、地震による水平力は独立したブレースで抵抗する機構とする。
- ・ブレースはV型で一对とし、圧縮引張材で構成する。ブレース相互のなす角度は  $60^\circ \sim 90^\circ$  とする。
- ・ブレースは座屈耐力の大きい箱型断面を用いる。天井懐が大きくなるほど断面を大きくして、一对のブレースの水平せん断抵抗力を同程度とする。(水平せん断力  $3000N$  に対してオイラー座屈耐力以下)
- ・ブレース下端は天井慣性力を円滑に伝達できるよう、野縁に直接取り付け。野縁受け方向は、ブレース受け材を専用に設置してそれに直接取り付け。
- ・接合部やビス等は設計値の2倍 ( $6000N$ ) の軸力やせん断力に対して安全率を見込んで本数を決める。
- ・天井周囲の壁・柱とのクリアランスを設ける。クリアランスは天井変位  $10mm$  と天井懐×最大層間変形角の和以上とする。
- ・設備機器、照明機器などは天井面とは独立して自由に変位可能な吊り方式とする。ブレース等により変位を拘束する吊り方式の場合は、天井面の変位と緩衝しないだけのクリアランスを設ける。
- ・天井に作用する慣性力は「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」(日本建築学会編)の震度法による基準震度を  $0.3$  とした逆三

角形分布より算定する。ただし詳細な応答解析をした場合はそれによる。

- ・ブレースの必要本数は、天井の地震時重量を実状に合わせて設定し、天井の耐震グレードに応じて決める。



図ー 1 1 ブレース 1 対のせん断力とクリアランスの設定  
Fig.11 Configuration of Sheer Force of Pair Brace and Clearance

## 6. まとめ

大規模天井の耐震性向上を目指して、吊りボルトとブレースの機能を明確に分離するというコンセプトを設定した。地震時の天井慣性力は野縁と上階の床スラブ間に配した V 字型ブレースによって床あるいは屋根の構造躯体へ直接的に伝達させることで、吊りボルト

に天井を吊る機能のみを持たせた改良天井工法を開発した。耐震性および力学的特性の比較を目的に、吊りボルト間に振れ止め用のブレースを配した従来天井および、改良天井の振動台実験を実施した結果、改良天井は従来天井に比べて優れた耐震性能を有することが実証された。今後は本システムを新築建物はもちろん、既存建物の天井の耐震性向上へ展開を進める予定である。

## 謝辞

本実験に関して、東京工業大学元結正次郎助教授からご指導を給りました。ここにお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，他：2003 年十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の被害に関する現地調査報告，2003.10.14
- 2) スポパーク松森事故対策検討委員会：スポパーク松森落下事故調査報告書，平成 17 年 10 月
- 3) 中本康，他：釧路空港ターミナルビル天井落下に関する研究その 1～その 5)，日本建築学会学術講演梗概集，構造 II，pp.883-892，2004.8
- 4) 船積宏彰，元結正次郎，他：在来工法による鋼製下地天井の力学的特性に関する研究（その 1～その 2），日本建築学会学術講演梗概集，構造 I，pp.911-914，2005.9
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所，他：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震調査研究(速報) 第 5 章 5.6 非構造部材の被害，平成 23 年 4 月