

BCJ が審査した技術の紹介

# 天井ボード材に斜め部材を固定する“剛”な耐震天井構工法（リニアブレース®）

黒瀬行信\*1 / 正藤倫宏\*1 / 小川 寛\*1 / 山里和久\*1 / 櫻庭記彦\*2 / 鈴木健司\*2 / 半澤徹也\*2

\*1 清水建設株式会社 設計本部 / \*2 清水建設株式会社 技術研究所

## 1 はじめに

吊り天井の落下事故による、人的被害や施設閉鎖、長期製造停止等の災害に鑑み、「建築物における天井脱落対策に係る技術基準」（平成25年国土交通省告示第771号等）が平成26年4月1日に施行された。

施行された技術基準を満たすためには、今までの吊り天井では、ブレース密度が高くなり、設備との干渉やコスト高等、実用面で解決すべき問題があった。

清水建設は、ブレース密度を天井面積20~25m<sup>2</sup>に1対程度の割合としながら、平成25年国土交通省告示第771号第3第4項第一号に規定される構造方法（計算ルートの簡易スペクトル法）に適合する実用性の高い吊り天井の開発に成功し、特定天井対応の構工法として一般評定を受けたので、ここに報告する。

## 2 構工法の概要

清水建設は、エヌパット(株)、(株)能重製作所、(株)染野製作所、(株)ミルックスの協力を得て、吊り天井のシステムとして極めて剛性の高いブレース構造の構工法を開発した。すなわち、野縁等で緊結された石膏ボード等の天井面が十分な面内剛性を有することに着目し、ブレースをダイレクトに天井面へ接続できる剛性の高い専用金物を開発するとともに、構造躯体との接合部についても剛性の高い専用金物を併せて開発した。本構工法の全体図を図1に記す。

本構工法は、天井下地材を介さずにブレース単独で地震時の水平力を負担する構造とし、その接合部の剛性を高めることで、天井の固有周期を0.1秒以下とし、“剛”な周期帯の吊り天井を実現している。

図2のグラフは、平面の大きさが1.82m×3.64m、天井吊長さ1,500mm、試験体中央1カ所に角度60°の

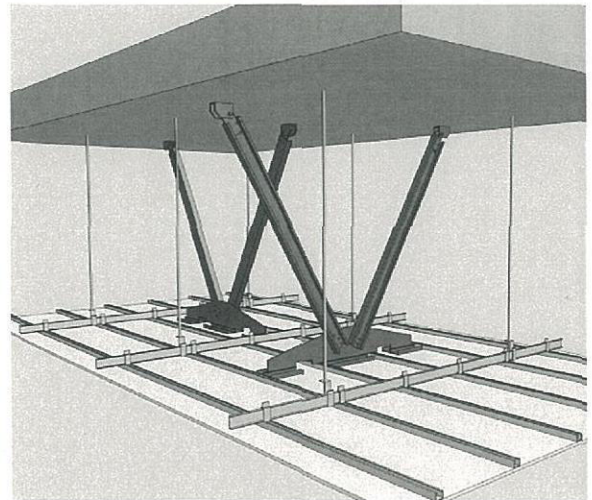


図1 本構工法の全体図（在来工法の天井下地）

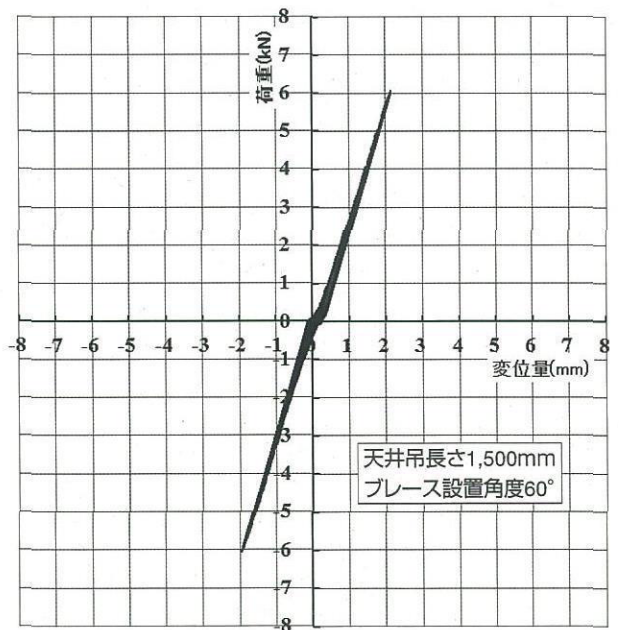


図2 天井ユニット正負繰返し載荷試験の例

V字ブレースを設置した天井ユニットの試験体について、加力制御で±2kN、±4kN、±6kNの正負3回繰返し水平載荷を行った試験の結果の一例であるが、水平方向の荷重と変位の関係は、ほぼ線形の弾性範囲内の挙動を示し、水平剛性は2,800kN/m程度で

あった。

天井の固有周期  $T_{ceil}$  は、天井質量と水平剛性から求められるので、V字ブレース 1カ所が負担する天井質量を500kgとすれば、 $T_{ceil}=0.084$ 秒 $<0.1$ 秒となる。

固有周期が0.1秒未満の剛な天井は、地震時の応答加速度が抑えられ、水平震度0.5で設計できるため、天井質量が20~25kg/m<sup>2</sup>以下であれば、V字ブレース 1カ所あたりの負担面積を20~25m<sup>2</sup>に設定できる。

また、告示が定める仕様基準では60mm以上必要な天井周囲のクリアランスについても、天井の水平剛性が高いため10~20mm程度とすることが可能となる。

本構工法では、ブレースが地震時の水平力を負担し、天井下地材が天井の自重を負担することで、両者の役割が明確に分かれている。本構工法の天井下地は、野縁、野縁受けを用いた在来工法のほかに、清水建設が開発したSDクリップレス工法を採用することができる。この工法は、図3・図4に示すように、野縁と野縁受けが一体になったSDTバー（メインバー・クロスバー）と呼ばれる格子状下地材を用いることで、在来工法のクリップを無くした天井であり、石膏ボード等の天井板を格子状のSDTバーの下面にボードビスで固定して高い面内剛性を有する天井面を構築する。

本構工法は、ブレースおよびその接合部の剛性と強度を高めて“剛”な天井を構築することを目的としているが、想定を超えた地震動により天井構成部材が終局状態となる際に、ある程度の靱性が確保出来るように、最大荷重がブレースの座屈によって決まるように接合部の強度を確保する設計とした。

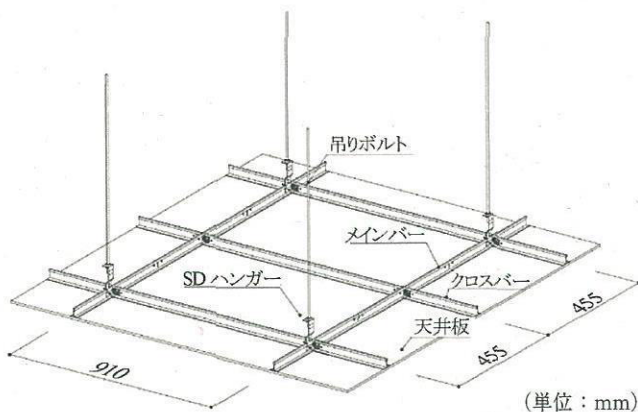


図3 SDクリップレス工法の天井下地

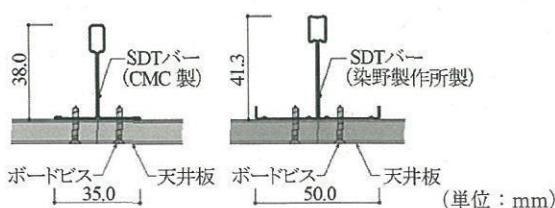


図4 SDTバーと天井板の接合

### 3 適用条件

超高層建築物については、特定天井の構造についても個別に性能評価を行うため、一般評定の適用範囲は、高さが60m以下の建築物としている。なお、新耐震基準の設計もしくは耐震診断等で耐震性が確かめられた既存建築物にも、既存天井を全面撤去して特定天井を新設する場合には本構工法を適用できることとした。

また、本構工法を適用する特定天井は、風雨の影響を受ける屋外（軒天井等）や浴室・温水プールなど湿潤環境にある屋内の天井は対象外としている。

### 4 特定天井の構造方法

以下に本構工法の構造方法のポイントを記す。

- ・天井面構成部材等の単位面積質量は25kg/m<sup>2</sup>以下。
- ・天井材の接合は、本構工法で指定する接合基準に基づき、相互に緊結し、容易に滑り若しくは外れ又は損傷を生じない構造とする。
- ・天井面および支持構造部の勾配は、5/100程度以下の概ね水平とする。
- ・天井面と支持構造部が同時に傾斜している場合は、水平面に対する吊り長さの変化の割合が5/100程度以下とする。
- ・吊り材は、JIS規格品または同等品とする。
- ・天井の平面形状は、矩形、台形、一部円弧等を含み、地震時に一体として挙動すると想定される形状とする。
- ・天井の水平投影面積は、1,500m<sup>2</sup>以下となるようにクリアランスを設けて相互に縁を切るものとする。
- ・天井開口は、一般的な照明設備（1.33m×0.33m）や点検口（0.6m×0.6m）を設置する程度とし、開口周りに補強を設ける。
- ・開口が一方向に連続する場合は、開口間の寸法を開口辺長の50%以上とし、連続する開口によって区分される天井部分には、開口が連続する方向に1組以上のV字ブレースを設ける。

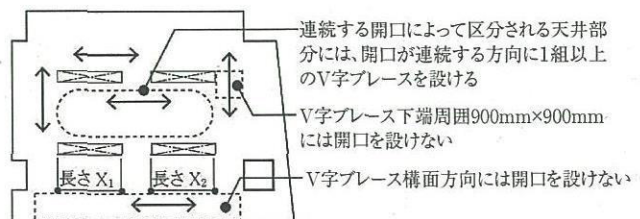


図5 天井開口の例

- ・ブレース材の下端は開口から900mm以上離すものとし、ブレース材の構面方向には開口を設けない。
- ・開口間の寸法が開口辺長の50%未満となるようなブリーズライン等の連続した設備開口部を有する天井部分は、周囲の壁等からの片持構造として、他のゾーンの天井からクリアランスをとり明確に切り離す。
- ・天井の吊り長さは、0.4m以上、3m以下とする。
- ・天井面の段差は、鉛直方向、水平方向ともに縁を切り、有害な応力の集中が生ずるおそれのある部分を設けない。

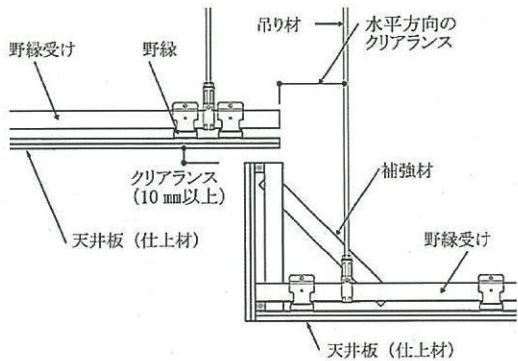


図6 段差部のクリアランス例

- ・ブレースは、天井ユニット試験の結果に基づき、吊り長さに応じて表1の仕様の部材2本をV字状に組み合わせるものとする。水平面に対するブレース設置角度は45°以上、60°以下とし、ブレース材は、JIS規格品または同等品とする。

表1 吊り長さに応じたブレース材の仕様基準

吊り長さ : L (mm)	ブレース材呼び寸法
400 ≤ L ≤ 800	C-40×20×1.6
800 < L ≤ 1,000	C-40×20×10×1.6
1,000 < L ≤ 1,200	C-50×20×10×1.6
1,200 < L ≤ 2,000	C-65×30×10×1.6
2,000 < L ≤ 2,400	C-65×30×10×2.3
2,400 < L ≤ 3,000	C-75×45×15×1.6

- ・1組のV字ブレースが負担する天井質量の最大値は、吊り長さが2.4m以下の場合には500kg、2.4mを超え3.0m以下の場合には450kgとする。
- ・1組のV字ブレースが負担する天井面積の最大値は、天井の単位面積質量が20kg/m<sup>2</sup>以下の場合には25m<sup>2</sup>、20kg/m<sup>2</sup>を超え25kg/m<sup>2</sup>以下の場合には20m<sup>2</sup>とする。
- ・V字ブレースは、図7に示すように、X・Y方向それぞれに2列以上を目安として分割された、おおむね50m<sup>2</sup>以下のおおよそ均等かつ、整形な範囲に2組以上配置する。
- ・天井面構成部材と壁等とのクリアランスは、平成12年国土交通省告示第1457号第11第1項第二号ハに定める以下の計算式により算出した数値以上を確保する。

$$d_{ceiling} = \frac{3}{2} \times \left( \frac{T_{ceiling}}{2\pi} \right)^2 \times a_{ceiling} + \frac{3}{2} \times L_{ceiling} \times R$$

$d_{ceiling}$  天井面構成部材と壁等との隙間 (cm)

$T_{ceiling}$  天井の水平方向の固有周期 (s)

$a_{ceiling}$  水平方向の加速度 = 0.5 × 980 = 490 (cm/s<sup>2</sup>)

$L_{ceiling}$  吊り長さ (cm)

$R$  当該の階高に対する地震時の層間変位の割合

本構工法では、天井の固有周期が0.1秒以下である

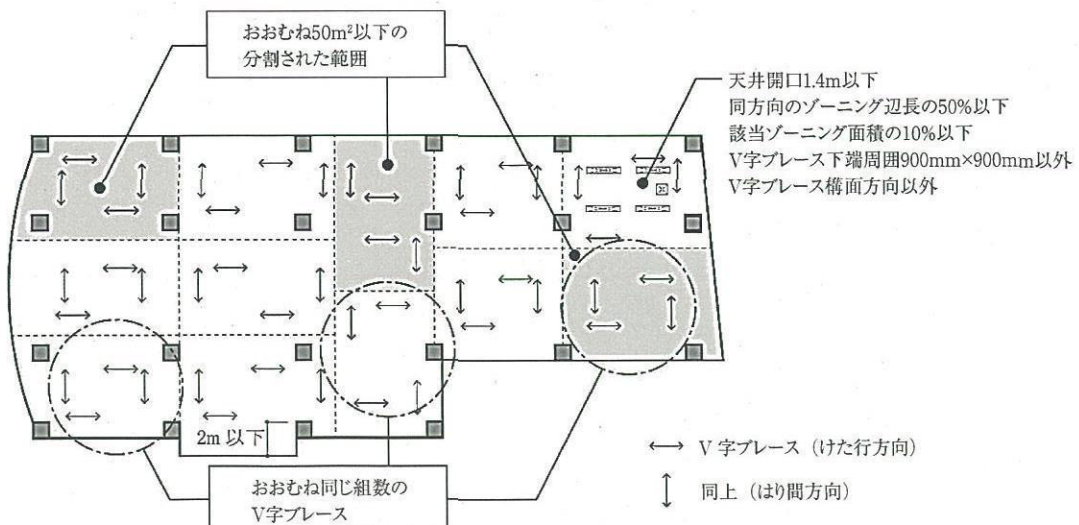


図7 ゾーニング例

ことから、層間変形角  $R = 1/200$  に対して、壁等とのクリアランスを下式で略算してもよい。

$$d_{ceiling} = \frac{3}{2} \times \left( \frac{0.1}{2\pi} \right)^2 \times 490 + \frac{3}{2} \times L_{ceiling} \times \frac{1}{200}$$

$$= 0.186 + 0.0075 \times L_{ceiling}$$

・天井板は、板厚12.5mmの石膏ボードまたは、板厚9.5mm以上の石膏ボードおよび化粧石膏ボードや板厚5.0mm以上のけいカル板やこれらの天井ボードを下地貼りとした2枚貼り等の天井板を使用することができる。また、天井ユニット試験を行いこれと同等以上の性能を有することが確認できたものは使用することができる。

## 5 性能検証

「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」に記載の試験方法に従って本構工法の天井ユニット試験および要素試験を行い、簡易スペクトル法を用いるために必要な天井の水平方向の剛性や許容耐力を検証し、想定を超える地震動の作用に対しては最大荷重がブレースの座屈によって決まることを確認した。

### (1) 天井ユニット試験概要

天井ユニット試験は、一方向の水平力を載荷する試験を3体以上行い、破壊荷重および破壊の状況、損傷荷重、許容荷重の評価を行った。また、水平加力の制御基準値を  $Q_a = 4 \text{ kN}$  として、 $\pm 0.5Q_a$ 、 $\pm 1.0Q_a$  及び  $\pm 1.5Q_a$  の各段階でそれぞれ3回以上正負繰り返し加力を行い、水平方向の剛性の評価を行った。

試験体は、平面が1,820×3,640mmの天井（図8）とし、幅5.6m、奥行3.3m、高さ3.7mの鉄骨製試験架台（図9）の上に載せたPC版から吊りボルトで吊り下げた。V字ブレースは、上端をPC版に、下端を天井板にそれぞれ専用金物で固定し、実際の構造方法の通りに組み上げ、加力方向に直交する方向への変形を拘束するための斜め部材等を試験体に取り付けた。

試験体への加力は、油圧ジャッキにて行い、重量が影響しないように別吊りで設置したH-150×150の鋼材を介して天井板の側面を加圧した。

天井の変形量は、試験場床面と天井面の相対変位について、V字ブレース下端部近傍となる試験体の端部2ヶ所で計測した。

本構工法は、吊長さに応じてブレースの仕様を規定しており、ブレースの設置角度は施工性を考慮して、45°以上60°以下の範囲で設定可能としている。

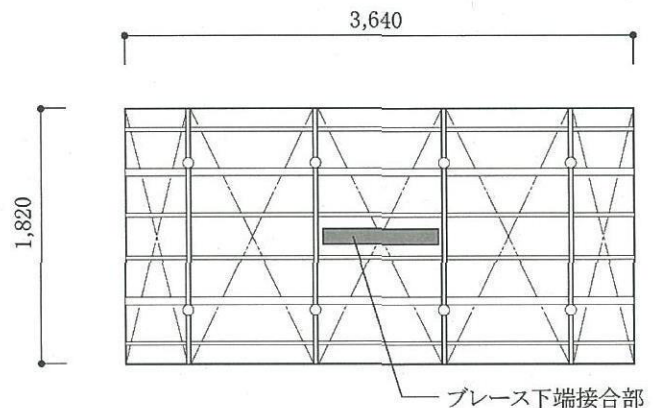


図8 天井ユニットの試験体

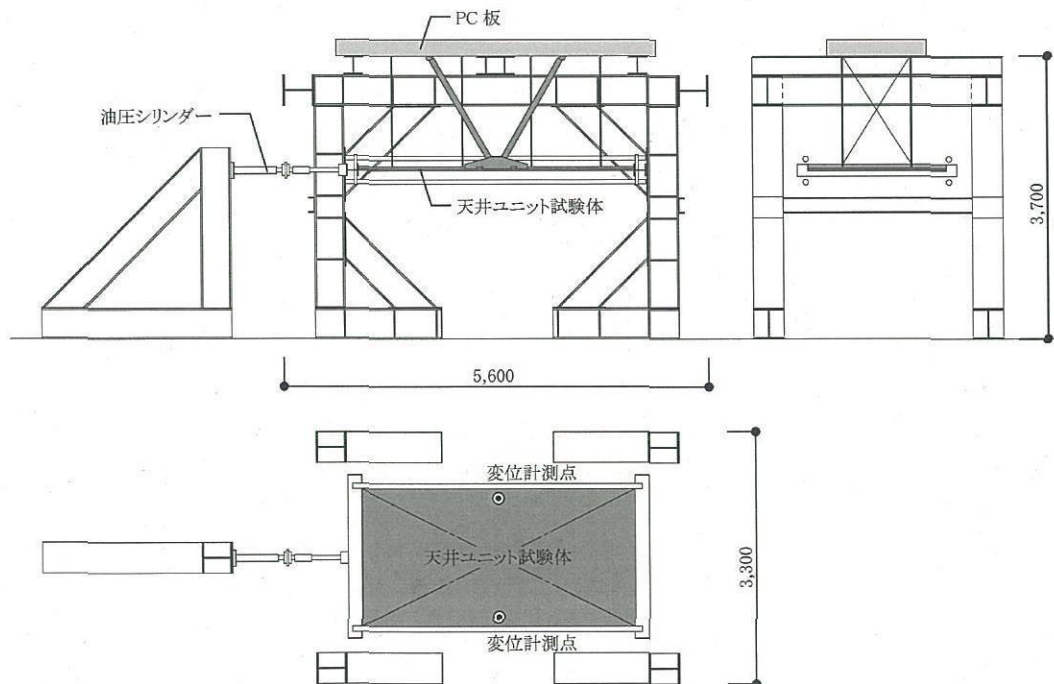


図9 天井ユニットの試験の概念図

(2) 天井ユニット試験の条件設定

V字ブレースの水平方向の柔性を  $f$  とすれば、

$$f = \sum \frac{N^2}{k_i} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_{br}}$$

$$= \left( \frac{1}{2\cos\theta} \right)^2 \sum + \left( \frac{1}{k_i} + \frac{2h}{E \times A_b \times \sin\theta} \right) + \frac{1}{k_b}$$

$\cos^2\theta$ 、 $\sin\theta \times \cos^2\theta$  は、図10に示すように60°が最小となり、 $k_i$ 、 $k_b$  は設置角度により大きく変化しないので、天井全体の水平方向の剛性  $K$  ( $K=1/f$ ) は、設置角度  $\theta$  が60°で最小となる。

本構工法では、ブレース材の耐力が座屈耐力で決まる設計であるので、1組のV字ブレースが負担できる水平耐力  $Q_b$  と、ブレース材1本の弾性座屈による短期許容圧縮力  $P_b$  の関係は、 $Q_b = P_b \times 2 \times \cos\theta$  により、

$$Q_b = 1.5 \times \frac{\pi^2 \times E \times i^2 \times \sin^2\theta}{2.17 \times h^2} \times A_b \times 2 \times \cos\theta$$

$\sin^2\theta \times \cos\theta$  は、図10のグラフに示すように45°の時に最小となり、54.74°付近で最大となるが、45°と60°とでは、計算値で6%程度の差であり、試験のバラツキの範囲と想定した。

以上より、天井ユニット試験は、ブレース材の仕様別に以下の試験を行う方針とした。

- ・設置角度60°かつ、ブレース材の仕様別に最大吊長さにて、水平剛性および許容耐力の検証。

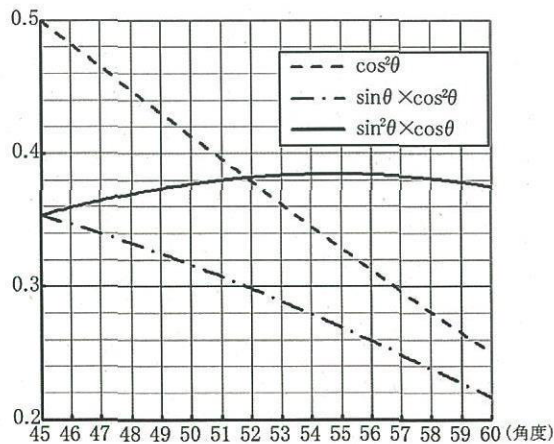


図10  $\cos^2\theta$ 、 $\sin\theta \times \cos^2\theta$ 、 $\sin^2\theta \times \cos\theta$ の値

表2 天井ユニット試験結果

ブレース設置角度		54.74°			60°		
ブレース材呼び寸法	吊り長さ	破壊荷重	部材の破壊	吊り長さ	損傷荷重	水平方向の剛性	
C-40×20×1.6	400mm	20.21kN	ブレース座屈	800mm	8.47kN	2,187kN/m	
C-40×20×10×1.6	800mm	11.10kN	ブレース座屈	1,000mm	7.77kN	2,510kN/m	
C-50×20×10×1.6	1,000mm	21.48kN	ブレース座屈	1,200mm	12.86kN	2,733kN/m	
C-65×30×10×1.6	1,200mm	21.16kN	ブレース座屈	2,000mm	7.03kN	2,068kN/m	
C-65×30×10×2.3	2,000mm	13.98kN	ブレース座屈	2,400mm	6.90kN	2,327kN/m	
C-75×45×15×1.6	2,400mm	11.83kN	ブレース座屈	3,000mm	8.78kN	1,962kN/m	

- ・設置角度54.74°かつ、ブレース材の仕様別に最小吊長さにて、最大荷重がブレースの座屈によって生じることの検証。

(3) 水平方向の剛性評価

表2に示すように、天井ユニット試験による水平方向の最少剛性値は、設置角度60°天井吊り長さ3,000mmにて1,962kN/m（天井の吊り長さが2,400mm以下の場合は、天井吊り長さ2,000mmにて2,068kN/m）であり、安全側に以下の設計値を定めた。

- ・2,050kN/m（吊り長さ2.4m以下）
- ・1,950kN/m（吊り長さ2.4m超3.0m以下）

1組のV字ブレースが負担する天井質量の最大値は、吊り長さが2.4m以下の場合は500kg、2.4mを超え3.0m以下の場合は450kgであるので、それぞれについて、天井の固有周期を算定すると、

- ・吊り長さが2.4m以下の場合、

$$T_{ceil} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{max}}{K_{ceil}}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{500}{2,050 \times 10^3}}$$

$$= 0.0981 < 0.1 \text{秒}$$

- ・吊り長さが2.4mを超えて3.0m以下の場合、

$$T_{ceil} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{max}}{K_{ceil}}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{450}{1,950 \times 10^3}}$$

$$= 0.0954 < 0.1 \text{秒}$$

以上より、本構工法の天井は、固有周期が0.1秒以下の“剛”な周期帯に該当する。

(4) 許容耐力の評価

1組のV字ブレースが負担する天井質量の最大値は、500kgであり、簡易スペクトル法における“剛”な周期帯の数値として、天井の水平震度は  $k=0.5$  であるので、1組のV字ブレースが負担する最大の水平力は、

$$500\text{kg} \times 0.5 \times 9.8 = 2.45\text{kN}$$

許容荷重の最小値は、損傷荷重の最小値より、

$$6.90\text{kN} / 1.5 = 4.60\text{kN} > 2.45\text{kN}$$

以上よりブレースの設置角度についての6%程度の安全率を考慮しても十分な許容耐力を確保している。

## (5) 破壊状況の評価

全ての天井ユニット試験で、最大荷重がブレースの座屈によって決まることは明らかになったが、破壊荷重の最大値である21.48kNに対して、ブレース接合部の余力がどの程度あるのか、要素試験により検証を行った。

ブレース上端接合部の要素試験では、ブレースの軸方向に引張、圧縮の加力を行い、ブレース下端接合部の要素試験では一方向の水平加力を行った。各要素試験では加力方向ごとに3体以上の試験を行い、破壊荷重および破壊の状況の評価を行った。ブレースの設置角度は、それぞれともブレースの軸力が理論上最大となる54.74°とした。

各要素試験の概念図は、ブレース上端接合部が図11、下端接合部が図12に、試験結果は表3にそれぞれ示す。

ブレース上端接合部の破壊は、接合金物の座屈や破断によって生じており、表3の数値は鉄骨部材に取付けた場合の結果であるが、PC板に取付けた場合も同等の破壊荷重を確認している。ブレース下端接合部の破壊荷重は、金物の変形に先行して天井板の破壊によって生じており、表3の数値は本構工法で規定する最大ビス本数での結果である。下端接合部については、石膏ボード等の天井板と接合するボードビスの本数別に試験を行い、その本数により破壊荷重が変化するため、本構工法ではブレース仕様に応じて座屈荷重が異

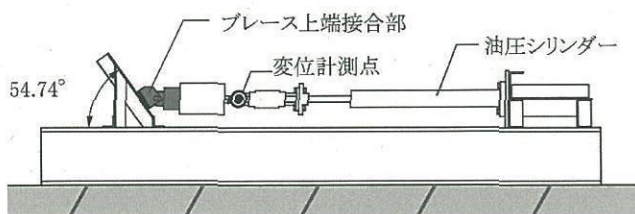


図11 ブレース上端接合部の要素試験の概念図

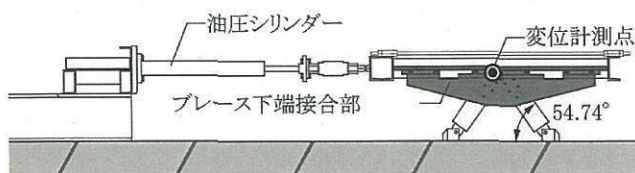


図12 ブレース下端接合部の要素試験の概念図

表3 ブレース上下端接合部の要素試験結果

ブレース接合部	上端		下端
	軸圧縮	軸引張	水平一方向
破壊荷重	25.22kN	27.17kN	22.86kN
破壊の状況	金物の変形・ 局部座屈	金物の変形・ 破断	天井板の破壊

なることを踏まえてビス本数を安全側に規定した。

## (6) 上下地震力の検証

本構工法においては、水平方向の地震力は全てブレースが負担し、鉛直方向の地震力は吊り材等の鉛直力を支持する天井構成材が負担することとしている。

柱スパンが15mを超える場合は、上下震度1.0以上を考慮する必要があるため、鉛直力を支持する天井構成材とその接合部について、下向きの震度2.0に対して検討を行った結果、本構工法で規定する仕様においては、耐力上問題がないことを確認している。

## 6 設計者・施工者の条件

本構工法を適用する特定天井についての設計者、施工者の条件を表4に示す。表中の○印の場合は、清水建設の天井に関する専門技術部署が、他者である設計者または施工者の技術指導を行う必要がある。

表4 建築物の設計者・施工者の組合せ

当該の特定天井の設計者・ 施工者の組合せ		設計者	
		清水建設 清水建設設計JV	左記以外の他者
施工者	清水建設 清水建設JV	◎	○
	上記以外の他者	○	×

## 7 おわりに

本構工法は、天井面の十分な面内剛性に着目し、ブレースを天井面に直接固定することで、天井の固有周期が0.1秒以下となる“剛”な吊り天井を実現した。

その結果、「簡易スペクトル法」を用いた計算ルートに適合するものとして、全国で第一号の一般評定を取得した。

実際の設計では、本構工法の規定を遵守した仕様とすれば、天井吊長さに応じたクリアランスの簡易計算を行う程度で、容易に特定天井の設計が可能となる。

本評定では、汎用性を考慮して、単位面積質量が25kg/m<sup>2</sup>以下の特定天井を対象としている。音楽ホール等の天井のように単位面積質量が25kg/m<sup>2</sup>超となる天井については、単純な計算で設計可能であるが審査機関と個別の対応を行うものとした。

また、本評定は簡易スペクトル法に準拠しているが、例えば個別案件で「水平震度法」を用いる場合に本構工法の試験結果を計算根拠として用いるなど、様々な設計法としての活用も考えられる。