

# 天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング® III」

奥田 浩文 達 富 浩  
(札幌支店営業第一部)

山村 都子 田 嶋 征夫  
(本社設計本部) (東京本店建築事業部)

## “Fail-Safe Ceiling® III (FSC3)” Fall Prevention Ceiling System

Hirofumi Okuda Hiroshi Tatsutomi  
Satoko Yamamura Yukio Tajima

### Abstract

“Fail-Safe Ceiling® III (FSC3)”, a fall prevention ceiling system, is a technology that prevents ceiling panels from falling during seismic events, by the installation of net components exactly under the existing panels of a suspended ceiling. Two conventional system types have been developed: “flat bar & net” type and “string” type. FSC3 is applicable only to the “flat bar & net” type systems. Conventional systems can be only applied to suspended ceilings with a limited weight, an inclination angle of 30° or less, and a tangential slope angle of 30° or less. FSC3 is expanded to be applicable to ceilings of unlimited weights and to inclined and curved ceiling surfaces with a larger inclination angle than 30°. Static tests of FSC3 were conducted to confirm their strengths. A design method of FSC3 developed based on these tests was applied to suspended ceilings of arbitrary masses by adjusting the installation interval of the net components and to suspended ceilings with an inclination angle less than 90° and a tangential slope angle of 90° or less.

### 概 要

天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング® III」(以下、FSC3)は、既存吊り天井の天井板下面にネット状の部材を設置することによって、地震による既存吊り天井の落下を防止する構法である。従来のフェイルセーフシーリング構法には「フラットバー+ネットタイプ」と「ストリングタイプ」の2種類があるが、FSC3は「フラットバー+ネットタイプ」のみを対象としている。本報では、従来構法の適用範囲の主項目である、天井質量、傾斜角および曲面天井での接線傾斜角の拡大を目的として、各種試験結果に基づいたFSC3の設計法を提案する。提案した設計法に基づき、ネット状の部材の設置間隔を調整することで、FSC3は任意の質量の天井に適用できると共に、傾斜角90度未満の傾斜天井、接線傾斜角90度以下の曲面天井に適用可能となる。

### 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、およびその余震による甚大な天井脱落被害を受けて、人命に係わる既存天井の耐震対策を早急に実施したいという建物所有者ニーズは高い。このような背景から、既存天井を解体せず、建物を使いながら、天井落下対策を実現する技術の開発は急務となっていた。

大林組はこれまで、2005年国土交通省告示第566号(増改築を伴う建築物の既設の特定天井について落下防止措置を定めた基準)の考え方に基づく天井落下防止構法「フェイルセーフシーリングI, II」(以下、従来構法)<sup>1),2)</sup>を開発し、その有用性を確認してきた。従来構法は、落下しようとする天井材を一時的に保持することを目的としており、地震時における当該施設利用者の避難時間、避難空間の確保を可能とする技術である。Fig. 1に示す通り、従来構法には、より高い安全性を実現する「フラットバー+ネットタイプ」と、安全性を確保しながら意匠性に配慮し

た「ストリングタイプ」の2種類がある。「フラットバー+ネットタイプ」は、天井板下面にネットを設置し、それを挟み込む形でフラットバーを格子状に配置することによって、また「ストリングタイプ」は、天井板下面に、端部をプレート固定したストリングを格子状に配置することによって、それぞれ落下しようとする天井材を保持する構法である。

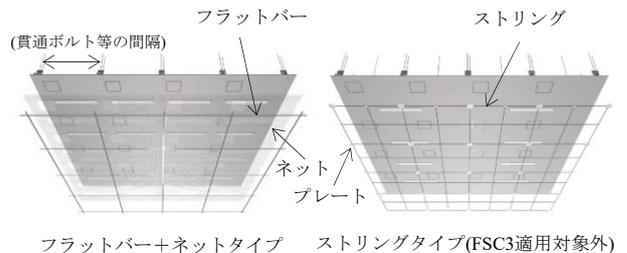


Fig. 1 天井落下防止構法の種類  
Types of Fall Prevention Ceiling System

従来構法開発以来、その適用数は計画中の案件も含めれば40件を超える。同構法の普及や適用数の増加に伴い、ホール天井等に代表される急勾配の傾斜天井や曲率の大きい曲面天井など、より複雑な形状の天井にも対応できる技術へのニーズが高まっている。しかし、同構法の実適用に際しては、各種試験に基づき検証した範囲のみをその対象としていたことから、天井形状や天井質量などに適用制限を設けていた。

本報では、上記ニーズに対応するために開発した、従来構法と比較して、急勾配な天井、曲率の大きな天井、重い天井に適用可能な天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング®III」(以下、FSC3)について報告する。なお、FSC3は、一般財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明(GBRC性能証明 第18-02号)を取得している。

## 2. 従来構法とFSC3の相違点

従来構法には「フラットバー+ネットタイプ」と「ストリングタイプ」の2種類があるが、FSC3は「フラットバー+ネットタイプ」のみを対象としている。よって、以降は「フラットバー+ネットタイプ」について、従来構法とFSC3との比較を行う。

従来構法およびFSC3の適用範囲の比較をTable 1に示す。従来構法は天井質量45kg/m<sup>2</sup>以下で、かつ傾斜角30度以下の傾斜天井(水平天井含む)、接線傾斜角30度以下の

曲面天井を対象としていた。FSC3は、傾斜角90度未満の傾斜天井(水平天井含む)、接線傾斜角90度以下の曲面天井を対象とし、また天井質量は計算によって任意に設定できるものとする。なお、FSC3を適用する天井形状において、垂直面のみが独立した壁状を呈している場合(傾斜角90度の場合)は、天井とはみなさず対象外とする。

本報では、上記FSC3の開発目的を満足するために、既往の知見<sup>1,2)</sup>に加えて、アルミ材を用いたフラットバーの設計に必要な許容引張応力度とヤング係数を設定することで、FSC3構成部材の応力を確認する設計法を提案する。同設計法に基づきフラットバーの設置間隔を適宜調整すれば、FSC3を任意の質量の天井に適用できると共に、傾斜角90度未満の傾斜天井(水平天井含む)、接線傾斜角90度以下の曲面天井にも適用できる。

## 3. FSC3の概要

### 3.1 基本構成と構成部材

FSC3の基本構成および構成部材の概要をPhoto 1およびFig. 2に示す。FSC3は、天井板下面に設置したフラットバーによって、地震により落下しようとする天井材を一時的に保持する構法である。FSC3は、既存天井の吊りボルト(或いは新設された吊りボルト)によって支持されている。添えボルト取付金物は、吊りボルトと添えボルトを固定する部材であり、添えボルトの下先端部には、傾

Table 1 従来構法・FSC3の適用範囲  
Application Range of Conventional System and FSC3

	天井形状	貫通ボルトの間隔 添えボルトの間隔	天井質量
従来構法	傾斜・曲面天井 (傾斜角度0~30度) [水平天井含む]	@ 3000mm×3000mm 以下	45kg/m <sup>2</sup> 以下
FSC3	傾斜・曲面天井 (傾斜角度0~90度) [水平天井含む]	@ 3000mm×3000mm 以下	計算により 設定

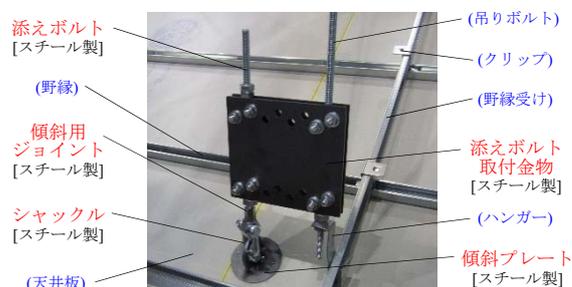


Photo 1 天井裏の構成  
Composition of Behind Ceiling of FSC3

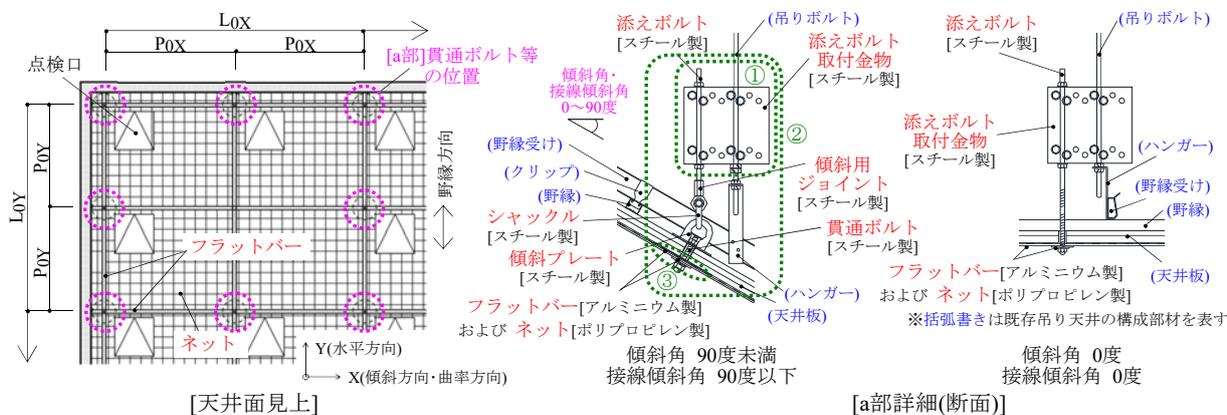


Fig. 2 基本構成および構成部材の概要  
Member Arrangement of FSC3

斜用ジョイントおよびシャックルを介して、天井板の傾斜角度に合わせた傾斜プレートが設置されている。傾斜プレートには貫通ボルトが接続されており、貫通ボルトは天井板下面まで貫通させている。ネットはタッカー(鉋打機)によって天井板下面に固定されており、フラットバーは、ネットを挟み込む形で貫通ボルトに固定されている。ネットは細かな落下物を受け止めることを目的として設置しているため、FSC3の耐力には寄与しないものとする。また、天井板の傾斜角度が0度の場合は、傾斜用ジョイント、シャックル、傾斜プレート、貫通ボルトを省略して、天井板を貫通させた添えボルトにフラットバーを直接固定する。なお、貫通ボルトの設置間隔と、貫通ボルトを用いない場合の添えボルトのそれとは同じ間隔となることから、以降では、貫通ボルト、添えボルトを総称して貫通ボルト等と呼称する。

Fig.2中、 $L_{ox}$ ,  $L_{oy}$ はXおよびY方向の貫通ボルト等の設置間隔(水平投影距離),  $P_{ox}$ ,  $P_{oy}$ はXおよびY方向のフラットバーの設置間隔(水平投影距離)をそれぞれ表している。ただし、貫通ボルト等の設置間隔は $L_{ox} \leq 3000\text{mm}$ ,  $L_{oy} \leq 3000\text{mm}$ , フラットバーの設置間隔は $P_{ox} \leq 1800\text{mm}$ ,  $P_{oy} \leq 1800\text{mm}$ とし、当該天井外周部における全てのフラットバー交差部には貫通ボルト等を設置するものとする。なお、FSC3設置位置近傍には、必要に応じて点検口を設ける仕様としている。

### 3.2 検討方針

FSC3に求められる性能は、天井落下時の衝撃荷重に対して必要な耐力を保持することにある。この時の衝撃荷重は、天井落下時の位置エネルギーから算定<sup>1)3)</sup>し、天井質量の2倍(フラットバーをたるませない程度に設置した場合の衝撃係数は2.0)<sup>1),2)</sup>とする。なお、FSC3はFig.2の緑破線部に示す、①「添えボルト取付部」、②「天井板取合部」、③「フラットバー」から構成されているが、既往の検討結果<sup>1),2)</sup>から、これら構成要素のうちフラットバーの有する耐力が最も小さいことを確認している。併せて、貫通ボルト等の設置間隔(水平投影距離)が等しければ、天井面の傾斜角度が小さいほど、フラットバーの鉛直支持力は小さくなることも確認している。

以上より、FSC3の検討方針としては、まず貫通ボルト等を支点とする1スパンにおいて、平面配置(傾斜角度0度)のフラットバーが負担する鉛直荷重に対する応力を規定する。次に当該天井に配置されるフラットバーが規定した応力内に納まるように、貫通ボルト等やフラットバーの設置間隔を調整する。本過程に基づき、当該天井に設置された全てのフラットバーに作用する応力を許容引張応力度以下とすれば、任意の質量の天井や、傾斜角90度未満の傾斜天井(水平天井含む)、接線傾斜角90度以下の曲面天井へのFSC3適用が可能となる。

以降、4章ではFSC3構成部材のうちフラットバーの耐力確認試験結果について、5章では4章の試験結果を反映したFSC3の(最も耐力の小さいフラットバーの)設計法に

ついて、6章では同設計法を用いた設計例についてそれぞれ述べる。

## 4. 性能確認試験

### 4.1 試験概要とフラットバー耐力の算定方法

試験で使用したフラットバーは、アルミニウム合金の押出材(A6063-T5)である。フラットバー耐力の確認を目的として、フラットバーの引張試験および鉛直荷重試験を行った。各試験の最大耐力 $\sigma_B$ は、試験結果のばらつきを考慮し、試験タイプ毎の結果(各最大耐力値) $x_i$ の平均値 $x_{\text{mean}}$ から標準偏差 $\sigma$ の1/2を差し引いた値(以下、最大耐力特性値)として、

$$\sigma_B = x_{\text{mean}} - \sigma/2 \quad (1)$$

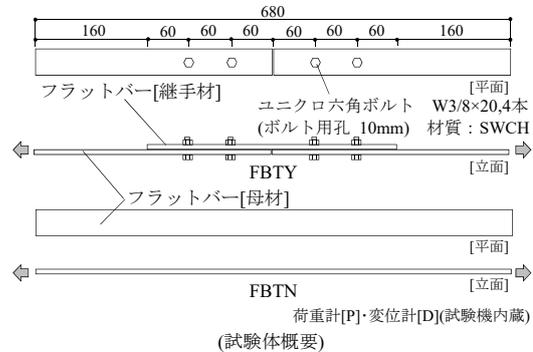
$$\text{ただし、 } x_{\text{mean}} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$$

$$\sigma = \sqrt{\sum (x_i - x_{\text{mean}})^2 / (n - 1)}$$

ここで、 $n$  : 試験タイプ毎の試験体数で算定<sup>4)</sup>する。

### 4.2 フラットバー引張試験

4.2.1 試験概要 アルミ材であるフラットバー[母材](試験タイプFBTN), フラットバーをボルト接合した試験体(同FBTY), それぞれを用いたフラットバー引張試



(試験状況)

(試験体一覽)

試験タイプ	試験体数	試験体構成	母材		継手材		接合方法	備考
			幅(mm)	厚(mm)	幅(mm)	厚(mm)		
FBTN	3	・フラットバー [母材]	40	3	-	-	-	材質: A6063-T5
FBTY	3	・フラットバー [母材・継手材共]	40	3	40	3	ボルト (4箇所)	

Fig. 3 フラットバー引張試験の概要  
Outline of Tension Test of Flat Bar

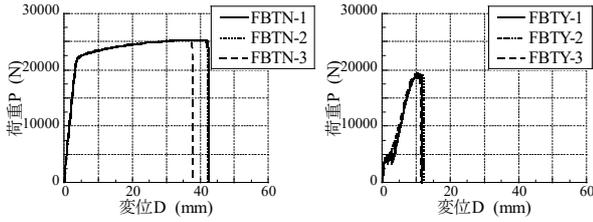


Fig. 4 荷重－変位関係  
Load - Displacement Relationship

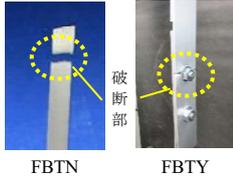


Photo 2 破断状況  
Damaged Flat Bar

Table 2 最大耐力一覧  
Maximum Strength

試験体名称	最大耐力 (N)	試験体名称	最大耐力 (N)
FBTN-1	25205	FBTY-1	19229
FBTN-2	25276	FBTY-2	19157
FBTN-3	25157	FBTY-3	19431
最大耐力特性値	25182	最大耐力特性値	19201

験の概要をFig. 3に示す。継手材は、母材と同一材を加工して製作した。加力は精密万能試験機を用いて行った。

4.2.2 試験結果 荷重－変位関係をFig. 4に、試験最終状況をPhoto 2に、最大耐力一覧をTable 2にそれぞれ示す。荷重P、変位D共に試験機に内蔵されたセンサー値を用いている。試験タイプFBTN、FBTYの最大耐力特性値は、それぞれ25.18kN、19.20kNであった。FBTYの破壊形式としては、いずれの試験体においても、ユニクロ六角ボルト用孔部でフラットバー[継手材]が破断するものであった。

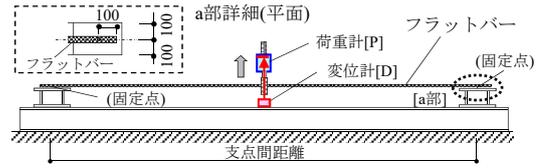
### 4.3 フラットバー鉛直荷重試験

4.3.1 試験概要 傾斜角度0度、支点間距離3119mmとしたフラットバー鉛直荷重試験の概要をFig. 5に示す。フラットバーと試験治具とは、固定点においてボルト固定されている。加力位置は試験体中央部とした。同図には計測項目、計測位置も併記している。

4.3.2 試験結果 試験最終状況をPhoto 3に、荷重－変位関係をFig. 6に、最大耐力一覧をTable 3にそれぞれ示す。荷重Pには載荷点での鉛直荷重値を、変位Dには同じく鉛直変位値をそれぞれ用いている。最大耐力特性値は4.20kNであった。試験体の破壊形式としては、いずれの試験体においても固定点でフラットバーが破断するものであった。

## 5. フラットバーの設計法

フラットバーの許容引張応力度とヤング係数を設定することで、FSC3構成部材(最も耐力の小さいフラットバー)の応力を確認する設計法を提案する。実設計においては、天井落下時の衝撃荷重に対して、本設計法で得られたフラットバーの応力が許容引張応力度以下であることを確認する。なお、天井衝撃荷重には、天井面構成部材



試験タイプ	試験体数	試験体構成	傾斜角(度)	支点間距離(mm)	幅(mm)	厚(mm)	備考
EF00-35	3	・フラットバー	0	3119	40	3	材質:A6063-T5

Fig. 5 フラットバー鉛直荷重試験の概要  
Outline of Vertical Loading Test of Flat Bar



Photo 3 破断状況  
Damaged Flat Bar

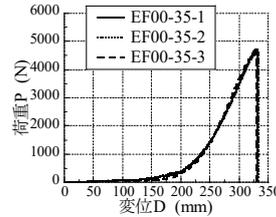
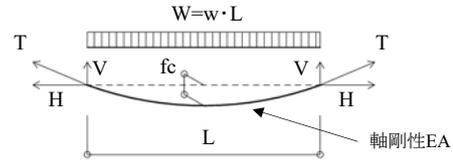


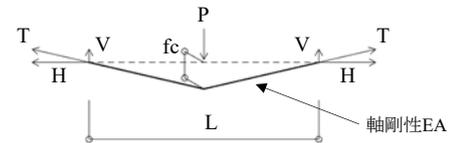
Fig. 6 荷重－変位関係  
Load - Displacement Relationship

Table 3 最大耐力一覧  
Maximum Strength

試験体名称	最大耐力(N)
EF00-35-1	4392
EF00-35-2	4277
EF00-35-3	4129
最大耐力特性値	4200



中央たわみ  $fc = \sqrt[3]{\frac{3WL^3}{64EA}}$  水平方向反力  $H = \frac{WL}{8fc}$   
鉛直方向反力  $V = \frac{W}{2}$  フラットバー張力  $T = \sqrt{H^2 + V^2}$   
(等分布荷重の場合)



中央たわみ  $fc = \sqrt[3]{\frac{PL^3}{8EA}}$  水平方向反力  $H = \frac{PL}{4fc}$   
鉛直方向反力  $V = \frac{P}{2}$  フラットバー張力  $T = \sqrt{H^2 + V^2}$   
(中央集中荷重の場合)

Fig. 7 応力算定(略算式)  
Estimation of Stress (Simplified Method)

等の質量に衝撃係数2.0を乗じた値を用いる。

### 5.1 変形を考慮したフラットバーの応力算定式

フラットバーは曲げ剛性が相対的に小さな材料であり、FSC3はネット状に配置されたフラットバーの引張力により天井の鉛直荷重を支持する構法である。フラットバーはたわみを生じることで鉛直荷重に対する抵抗力を発生するため、フラットバーの設計に際しては、変形を考慮した、ケーブル構造等で用いられる応力式(略算式)<sup>5)</sup>、或いは有限要素法(幾何非線形解析)による検討が必要となる。水平天井、傾斜天井についてはFig. 7に示す略算式により、同略算式では対応できない曲面天井については有限要素法(幾何非線形解析)により、それぞれフラットバーの応力を算出し、当該部材が許容引張応力度を超えないことを確認する。なお、紙面の都合上割愛するが、既往の試験結果<sup>1,2)</sup>と略算式および有限要素法による解析結果とは、概ね一致していることを付記しておく。

### 5.2 フラットバーの許容引張応力度

アルミニウム合金の押出材(A6063-T5)であるフラットバーの許容引張応力度は、2001年国土交通省告示第1024号(特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める基準)より、 $f=110\text{N/mm}^2$ と設定する。4.2節に示したフラットバー引張試験の結果から、フラットバー[母材](試験タイプFBTN)およびフラットバーをボルト接合した試験体(同FBTY)の最大耐力特性値はそれぞれ25.18kN、19.20kNとなる。これらを用いて算定した破断時の応力度は、

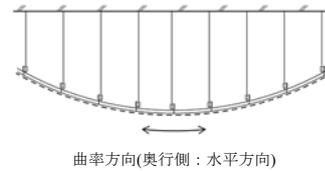
$$\begin{aligned} \text{[FBTN]} \quad N &= 25.18\text{kN} (\text{破断強度}) \\ Ag &= 120\text{mm}^2 (\text{断面積}) \\ \rightarrow \sigma &= N/Ag = 209.83\text{N/mm}^2 \geq 165\text{N/mm}^2 \\ \text{[FBTY]} \quad N &= 19.20\text{kN} (\text{破断強度}) \\ Ag &= 90\text{mm}^2 (\text{ボルト孔を控除した断面積}) \\ \rightarrow \sigma &= N/Ag = 213.33\text{N/mm}^2 \geq 165\text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

となる。これらの結果から、FSC3に用いるフラットバーは、許容引張応力度の1.5倍<sup>3)</sup>( $110 \times 1.5 = 165\text{N/mm}^2$ )以上の破断強度を有していることを確認した。

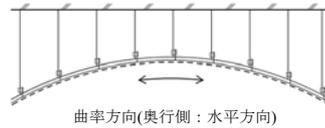
### 5.3 フラットバーのヤング係数

フラットバーの設計で用いるアルミニウム合金の押出材(A6063-T5)のヤング係数は、アルミニウム設計規準<sup>6)</sup>に準拠し $E=70000\text{N/mm}^2$ とする。ここでは $E=70000\text{N/mm}^2$ とした場合の、フラットバー1本当りの負担可能な鉛直荷重について検討する。4.2節に示したフラットバー引張試験の結果(試験体タイプFBTY)から、フラットバー(断面積 $120\text{mm}^2$ )の水平力Hは、 $H \approx T_a = T_{\max} = 19.20\text{kN}$ となる。よって、中央集中荷重の場合(Fig. 7参照)におけるフラットバー1本当りの負担可能鉛直荷重 $P_a$ は、単純梁に中央集中荷重が作用した時の中央たわみ $fc$ と水平方向反力Hの算定式より、

$$H = \sqrt[3]{\frac{EA \cdot P_a^2}{8}} \rightarrow P_a = 2 \sqrt{\frac{2H^3}{EA}} = 2 \sqrt{\frac{2 \times 19.20^3}{70 \times 120}} = 2.60\text{kN} \quad (2)$$



・2方向(曲率・水平方向)のフラットバーで鉛直荷重を負担  
(下に凸形状の場合)



・水平方向に配置されたフラットバーのみが鉛直荷重を負担  
(曲率方向のフラットバーは鉛直荷重を負担しない)  
(上に凸形状の場合)

Fig. 8 曲面天井の形状  
Shape of Curved Ceiling

となる。

また、4.3節に示したフラットバー鉛直荷重試験の最大耐力特性値は4.20kNである。

以上の結果より、4.3節で確認した鉛直荷重値(4.20kN)に対して、中央集中荷重の張力算定式に基づくそれ(2.92kN)は十分小さな値となる(安全側の設定となる)ことを確認した。

### 5.4 FSC3適用天井の形状

FSC3は、水平な平板天井、傾斜角90度未満の傾斜天井および接線傾斜角90度以下の曲面天井を対象としている。ただし、Fig. 8に示す通り、曲面天井における曲率は1方向とし、球面のような2方向に曲率を持つ天井は対象外とする。FSC3では、原則、水平方向、傾斜或いは曲率方向の2方向に配置されたフラットバーで当該天井の鉛直荷重を負担することになるが、1方向に曲率を持つ曲面天井で上に凸形状の場合、曲率方向のフラットバーは鉛直荷重に対して早期に座屈することが想定されるため、水平方向に配置されたフラットバーのみが鉛直荷重を負担するものとする。

## 6. 設計例

### 6.1 水平天井(略算式による検討)

対象とする水平天井の概要と設計条件をFig. 9に一括して示す。なお、天井面は野縁方向に荷重が分布する一方向板とし、吊り元の健全性は確保されているものとする。まず下式によりフラットバー(a)および(b)の荷重分担を算定する。いま  $L_{ox}=L$ ,  $L_{oy}=m_c L$ ,  $m_c=L_{oy}/L_{ox}=1.0$  とすると、それぞれ、等分布荷重時のフラットバー(a)の中央たわみ $fc(a)$ は、

$$f_c(a) = \sqrt[3]{\frac{3WL_{ox}^3}{64EA}} = \sqrt[3]{\frac{3WL^3}{64EA}} \quad (3)$$

中央集中荷重時のフラットバー(b)の中央たわみ $f_c(b)$ は、

$$f_c(b) = \sqrt[3]{\frac{PL_{oy}^3}{8EA}} = \sqrt[3]{\frac{P(m_c L)^3}{8EA}} \quad (4)$$

であることから、両者の中央たわみが等しくなるための比率 $W/P$ は $(8/3) \cdot m_c^3 = 2.667$ となる。よって、フラットバー(a)の負担荷重(等分布荷重) $W$ 、フラットバー(b)の負担荷重(中央集中荷重) $P$ は、それぞれ、

$$W = w \cdot \beta \cdot L_{ox} \cdot \frac{L_{oy}}{2} \cdot \frac{2.667}{3.667} = 1636N \quad (5)$$

$$P = w \cdot \beta \cdot L_{ox} \cdot \frac{L_{oy}}{2} \cdot \frac{1}{3.667} = 614N \quad (6)$$

となる。

以上より、フラットバー(a)に生じる中央たわみ $f_c(a)$ は、

$$f_c(a) = \sqrt[3]{\frac{3WL_{ox}^3}{64EA}} = 62.7mm \quad (7)$$

となり、同水平方向反力 $H = W \cdot L_{ox} / (8 \cdot f_c(a)) = 9786N$ 、同鉛直方向反力 $V = W/2 = 818N$ から、同張力 $T(a)$ は、

$$T(a) = \sqrt{H^2 + V^2} = 9820N \quad (8)$$

となる。同様にフラットバー(b)に生じる中央たわみ $f_c(b)$ は、

$$f_c(b) = \sqrt[3]{\frac{PL_{oy}^3}{8EA}} = 62.7mm \quad (9)$$

となり、同水平方向反力 $H = P \cdot L_{oy} / (4 \cdot f_c(b)) = 7340N$ 、同鉛直方向反力 $V = P/2 = 307N$ から、同張力 $T(b)$ は、

$$T(b) = \sqrt{H^2 + V^2} = 7346N \quad (10)$$

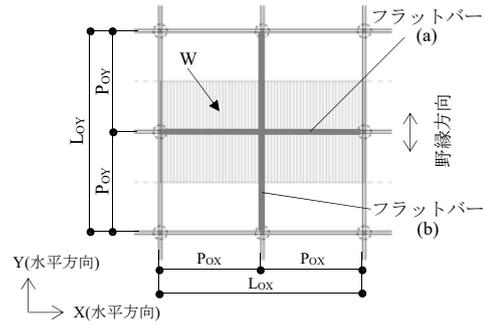
となる。これらとボルト孔欠損を控除したフラットバーの有効断面積 $A_g = (40mm - 10mm) \cdot 3mm = 90mm^2$ とから、鉛直荷重によりフラットバーに作用する応力 $\sigma$ は、

$$\sigma = \frac{T(a)}{A_g} = \frac{9820N}{90mm^2} = 109.1N/mm^2 < f = 110N/mm^2 \quad (11)$$

となる。以上の結果より、本例におけるフラットバーが許容引張応力度を超過しない天井質量は概ね $25kg/m^2$ となる。

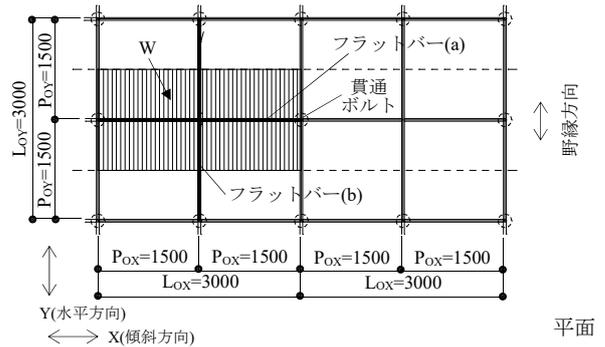
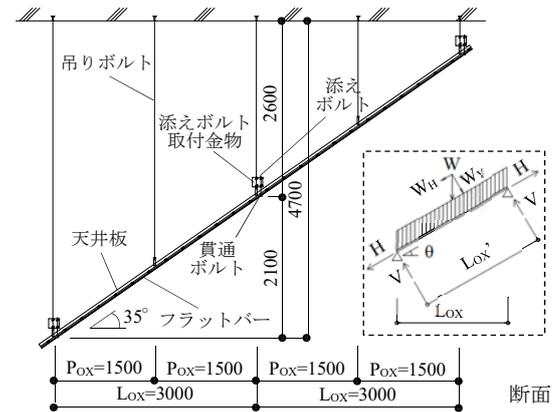
## 6.2 傾斜天井(略算式による検討)

対象とする傾斜角35度の傾斜天井の概要と設計条件を



設計条件	
天井質量	$w=250N/m^2(25.51kg/m^2)$
天井落下時の衝撃係数	$\beta=2.0$
貫通ボルト間隔[X,Y]	$L_{ox}=L_{oy}=3000mm$
フラットバー間隔[X,Y]	$P_{ox}=P_{oy}=1500mm$
フラットバーのヤング係数	$E=70000N/mm^2$
フラットバーの断面積	$A=120mm^2(40mm \times 3mm)$

Fig. 9 水平天井の概要(略算式)  
Outline of Flat Horizontal Ceiling (Simplified Method)



設計条件	
天井傾斜角	$\theta=35^\circ$
天井質量	$w=128N/m^2(13.06kg/m^2)$
天井落下時の衝撃係数	$\beta=2.0$
貫通ボルト間隔[X,Y]	$L_{ox}=L_{oy}=3000mm$
フラットバー間隔[X,Y]	$P_{ox}=P_{oy}=1500mm$
フラットバーのヤング係数	$E=70000N/mm^2$
フラットバーの断面積	$A=120mm^2(40mm \times 3mm)$

Fig. 10 傾斜天井の概要(略算式)  
Outline of Inclined Ceiling with inclination angle of  $35^\circ$   
(Simplified Method)

Fig. 10に一括して示す。なお、天井面は野縁方向に荷重が分布する一方向板とし、吊り元の健全性は確保されているものとする。いま  $L_{0x} = L_{0x}/\cos\theta$ ,  $L_{0x} = L$ ,  $L_{0y} = m_c L$ ,  $m_c = L_{0y}/L_{0x} = 1.0$  とすると、それぞれ、等分布荷重時のフラットバー(a)の中央たわみ $fc(a)$ は、

$$fc(a) = \sqrt[3]{\frac{3WL_{0x}^3}{64EA}} = \sqrt[3]{\frac{3W(L/\cos\theta)^3}{64EA}} \quad (12)$$

中央集中荷重時のフラットバー(b)の中央たわみ $fc(b)$ は、

$$fc(b) = \sqrt[3]{\frac{PL_{0y}^3}{8EA}} = \sqrt[3]{\frac{P(m_c L)^3}{8EA}} \quad (13)$$

であることから、両者の中央たわみが概ね等しくなるための比率 $W/P$ は $(8/3) \cdot m_c^3 \cdot \cos^3\theta = 1.466$ となる。よって、フラットバー(a)の負担荷重(等分布荷重) $W$ 、フラットバー(b)の負担荷重(中央集中荷重) $P$ は、それぞれ、

$$W = w \cdot \beta \cdot \frac{L_{0x}}{\cos 35^\circ} \cdot \frac{L_{0y}}{2} \cdot \frac{1.446}{2.466} = 836N \quad (14)$$

$$P = w \cdot \beta \cdot \frac{L_{0x}}{\cos 35^\circ} \cdot \frac{L_{0y}}{2} \cdot \frac{1}{2.446} = 570N \quad (15)$$

となる。

以上より、負担荷重(等分布荷重) $W$ の鉛直成分を $W_v (= W \cdot \cos\theta = 685N)$ 、同水平成分を $W_H (= W \cdot \sin\theta = 480N)$ とすると、フラットバー(a)に生じる中央たわみ $fc(a)$ は、

$$fc(a) = \sqrt[3]{\frac{3W_v(L_{0x}/\cos\theta)^3}{64EA}} = 57.3mm \quad (16)$$

となり、同水平方向反力 $H = W_v \cdot (L_{0x}/\cos\theta) / (8fc(a)) = 5475N$ 、同鉛直方向反力 $V = W_v / 2 = 342N$ から、同張力 $T(a)$ は、

$$T(a) = \sqrt{H^2 + V^2} \pm \frac{W_H}{2} = 5726N, 5246N \quad (17)$$

となる。同様にフラットバー(b)に生じる中央たわみ $fc(b)$ は、

$$fc(b) = \sqrt[3]{\frac{PL_{0y}^3}{8EA}} = 61.2mm \quad (18)$$

となり、同水平方向反力 $H = P \cdot L_{0y} / (4fc(b)) = 6990N$ 、同鉛直方向反力 $V = P / 2 = 285N$ から、同張力 $T(b)$ は、

$$T(b) = \sqrt{H^2 + V^2} = 6996N \quad (19)$$

となる。これらとボルト孔欠損を控除したフラットバーの有効断面積 $A_g = (40mm - 10mm) \cdot 3mm = 90mm^2$ とから、鉛直荷重によりフラットバーに作用する応力 $\sigma$ は、

$$\sigma = \frac{T(b)}{A_g} = \frac{6996N}{90mm^2} = 77.7N/mm^2 < f = 110N/mm^2 \quad (20)$$

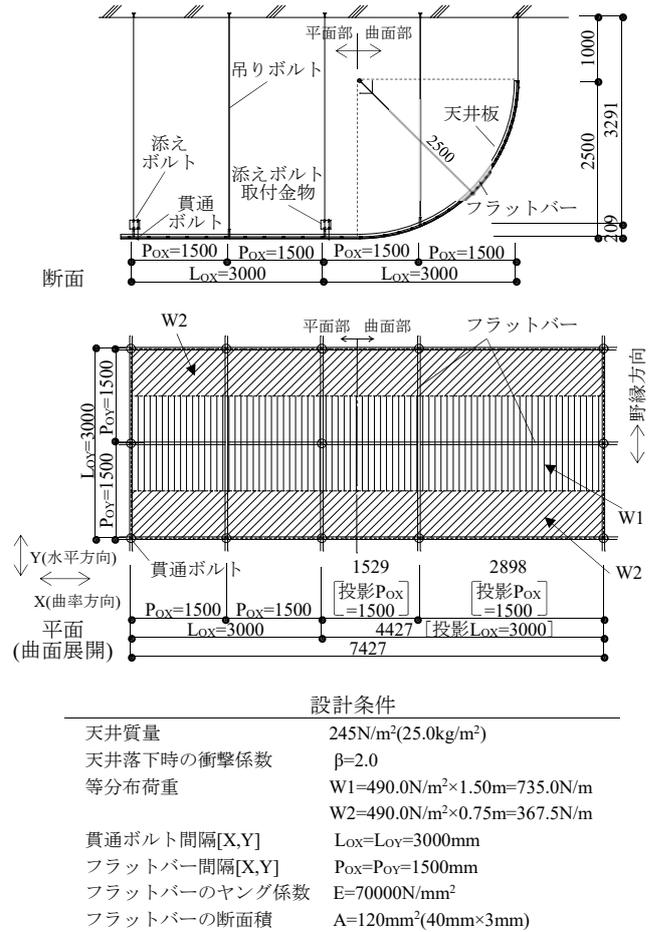


Fig. 11 曲面天井[下に凸形状]の概要 (有限要素法解析)  
Outline of Convex Downward Ceiling  
(Finite Element Method)

となる。以上の結果より、本例におけるフラットバー応力は許容引張応力度を超過しないことが確認できる。

### 6.3 下に凸形状の曲面天井(有限要素法による検討)

対象とする曲面天井(下に凸形状)の概要と設計条件をFig. 11に一括して示す。なお、天井面は野縁方向に荷重が分布する一方向板とし、吊り元の健全性は確保されているものとする。有限要素法により得られた、フラットバー変形後の軸力(変形倍率1.0)をFig. 12に示す。同図には、使用した解析ソフトおよび条件を併記している。同図の軸力がフラットバー許容引張応力度( $f = 110N/mm^2$ )以下であることを、平面部、曲面部別に確認する。なお、曲面部におけるフラットバーは、初期状態で曲率をもつことになるためその状態の応力、すなわちFig. 13に示す初期曲げ応力を考慮した検討を行う。

Fig. 12[平面部]の最大軸力 $T = 9770N$ であることと、ボルト孔欠損を控除したフラットバーの有効断面積 $A_g = 90mm^2$ とから、鉛直荷重によりフラットバーに作用する応力 $\sigma$ は、

$$\sigma = \frac{T}{A_g} = \frac{9770N}{90mm^2} = 108.6N/mm^2 < f = 110N/mm^2 \quad (21)$$

となる。

また、Fig. 12[曲面部]の最大軸力T=2510Nであることと、ボルト孔欠損を控除したフラットバーの有効断面積Ag=90mm<sup>2</sup>とから、鉛直荷重によりフラットバーに作用する応力σは、

$$\sigma = \frac{T}{A_g} = \frac{2510N}{90mm^2} = 27.9N/mm^2 \quad (22)$$

となる。なお、曲率Φ(曲率半径R=1/Φ)を持つフラットバー(Fig. 13参照)において、厚さt=3mm、ヤング係数E=70000N/mm<sup>2</sup>としたフラットバーの初期曲げ応力σ<sub>b</sub>は、

$$\sigma_b = \frac{tE}{2R} = \frac{3 \cdot 70000}{2R} = \frac{105000}{R} N/mm^2 \quad (23)$$

となり、上式より、曲率半径R=2500mm時の初期曲げ応力σ<sub>b</sub>は42.0N/mm<sup>2</sup>(=105000/2500)となることから、本例におけるフラットバーに作用する全応力(σ+σ<sub>b</sub>)は、

$$\sigma + \sigma_b = 27.9 + 42.0 = 69.9N/mm^2 < f = 110N/mm^2 \quad (24)$$

となる。以上の結果より、平面部、曲面部共に、フラットバー応力は許容引張応力度を超過しないことが確認できる。併せて、曲面部のフラットバー応力は平面部のそれと比較して相対的に小さい傾向にあることも確認できる。このことは、3.2節に示す、貫通ボルト等の設置間隔(水平投影距離)が等しければ、天井面の傾斜角が小さいほど、フラットバーの鉛直荷重支持力は小さくなることと整合している。

## 7. まとめ

従来構法で設定していた天井質量および天井形状に関する適用制限を緩和することによって、より急勾配の傾斜天井やより曲率の大きい曲面天井にも対応できる天井落下防止構法FSC3を開発した。得られた知見を以下に示す。

- 1) フラットバーの耐力確認のための各種試験を行い、同結果に基づき、FSC3の応力を確認できる設計法を提案した。
- 2) 提案した設計法に基づき、フラットバーの設置間隔を調整することによって、FSC3は任意の質量の天井に適用できると共に、傾斜角90度未満の傾斜天井(水平天井含む)、接線傾斜角90度以下の曲面天井にも適用できることを確認した。

ホール天井等に代表される、より複雑な形状の天井へのFSC3適用が期待される。今後も継続して、FSC3の普及・展開に努めていく予定である。

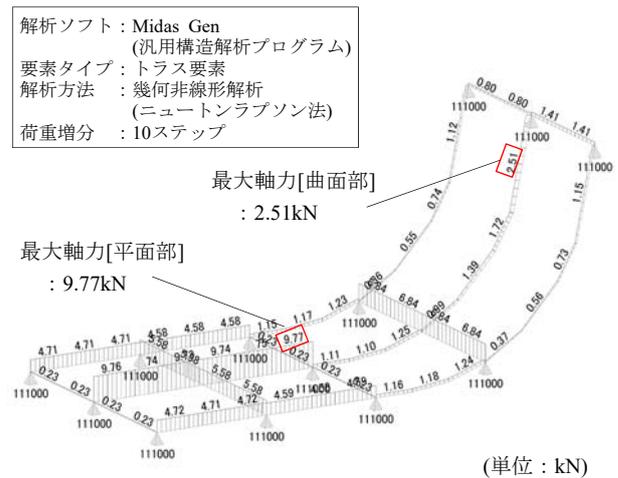


Fig. 12 解析結果 (軸力)  
Analysis Result (Axial Force)

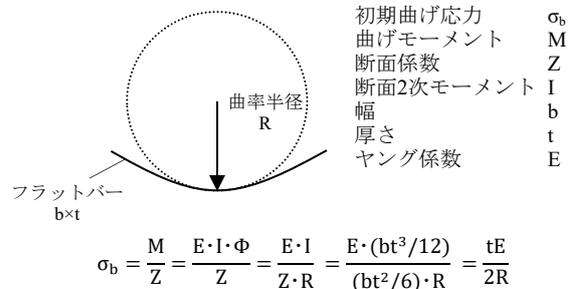


Fig. 13 フラットバーの初期曲げ  
Initial Bending of Flat Bar

## 参考文献

- 1) 奥田浩文, 達富浩, 他: 天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング」, 大林組技術研究所報, No.79, 2015.12
- 2) 奥田浩文, 達富浩, 山村都子, 他: 天井落下防止構法「フェイルセーフシーリングII」, 大林組技術研究所報, No.81, 2017.12
- 3) 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, 一般財団法人 新・建築士制度普及協会: 建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説(平成25年10月版), 2013.10
- 4) 財団法人 日本建築防災協会, 監修 国土交通省住宅局建築指導課: 既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説 2009年度改訂版, 2009.12
- 5) 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 監修: 膜構造の建築物・膜材料等の技術基準及び同解説, 2003.8
- 6) アルミニウム建築構造協議会: アルミニウム建築 構造設計規準・同解説, 2016.3