

天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング®」

奥田 浩文 達 富 浩
(本社設計本部)

藁科 全興 白鳥 勝彦
(東京本店建築事業部) (本社設計本部)

Ceiling Fall Prevention System “Fail-Safe Ceiling® (FSC)”

Hirofumi Okuda Hiroshi Tatsutomi
Masaoki Warashina Katsuhiko Shiratori

Abstract

The ceiling fall prevention system “Fail-Safe Ceiling® (FSC)” is a technology that prevents ceiling panels from falling during seismic events through the installation of net members just under the existing panels of a suspended ceiling. The purpose of the FSC is to temporarily keep damaged ceiling panels in place to allow sufficient time and space for the occupants to escape. Two FSC types have been developed: the “Flat bar & Net” type and “String” type. The choice of type is determined by the weight of the ceiling members, including the FSC itself, and the architectural design. Static and dynamic tests of FSCs have been conducted to confirm their strength. The results showed that FSCs have sufficient strength against the impact loads induced by falling ceiling members, which was confirmed for suspended ceilings of less than 60 kg/m² with the “Flat Bar & Net” type FSC and for one of less than 30 kg/m² with the “String” type FSC.

概 要

天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング®」(以下、「FSC」)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、既存吊り天井の落下を防止する構法である。「FSC」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、「FSC」によって地震時における当該施設利用者の避難時間、避難空間を確保できる。「FSC」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種類があり、天井面構成部材等の質量(「FSC」自体の質量を含む)および意匠性により選択する。「FSC」の耐力確認を目的として、静的・動的試験を行った結果、「フラットバー+ネットタイプ」の場合は天井面構成部材等の質量が60kg/m²以下の吊り天井、「ストリングタイプ」の場合は30kg/m²以下の吊り天井であれば、「FSC」は当該天井落下時の衝撃荷重に対して必要な耐力を保持していることを確認した。

1. はじめに

平成23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、平成25年7月に天井に係る建築基準法施行令および施行規則が改正^{1),2)}され、同年8月に新たな告示³⁾が公布された。これら天井脱落対策に係る政省令・告示に定められた各規定の解釈や技術上の留意事項をとりまとめる形で、国土交通省等は、同年9月に天井脱落対策に係る技術基準の解説⁴⁾(以下、「技術基準」)を発行した。「技術基準」への適合が義務付けられる天井(以下、「特定天井」)とは、落下によって重大な危害が生ずるおそれのある天井を指す。具体的には、設置高さ6m超、水平投影面積200m²超、単位面積質量2kg/m²超で、かつ人が日常利用する場所に設置されている吊り天井が「特定天井」となる。なお、既存天井が「特定天井」となる場合は、一定の範囲の増改築や大規模修繕・模様替えを行う際に遡及の対象になるとされており、上記増改築時等には制限緩和の特例も設けら

れている。すなわち、既存天井の場合は、「技術基準」適合の代替として「落下防止措置」を講じることが認められている。ここでの「落下防止措置」とは、地震時に当該施設利用者が避難できるよう、落下しようとする天井を一時的に保持する性能を有するものとして規定されている。

一方、「特定天井」の範囲内外を問わず、まずは人命に係わる既存天井の安全対策を早急に実施したいという建物所有者のニーズに対して、既存天井への「技術基準」適合は、工期、コスト等の点で解決すべき多くの課題を有している状況にある。このような背景から、短工期・ローコストで、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「落下防止措置」技術の開発は急務となっていた。

著者等は、天井材の損傷は許容するものの、天井落下を一時的に防止することで人命保護を達成するという、既存天井を対象とした「落下防止措置」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®」(以下、「FSC」)を開発した。本報では、「FSC」の概要とその適用

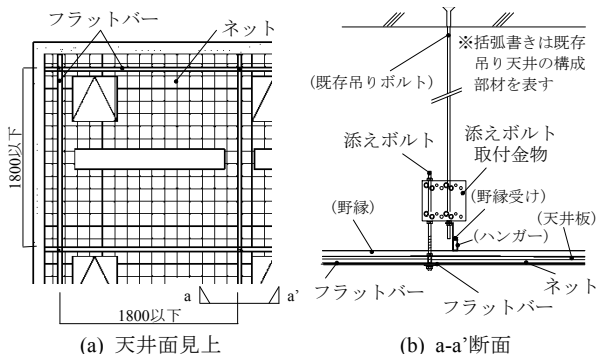


(a) フラットバー+ネットタイプ



(b) スtringタイプ

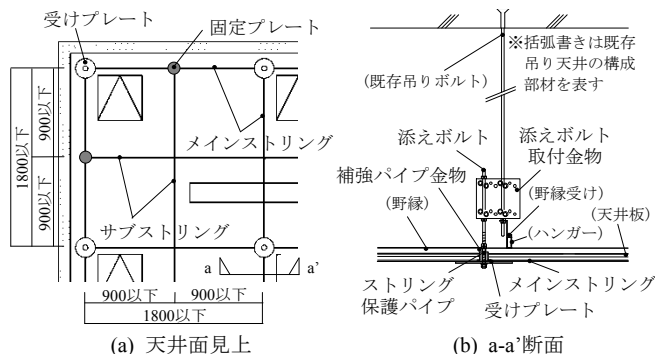
Fig. 1 外観イメージ
Appearance of FSC



(a) 天井面見上

(b) a-a'断面

Fig. 2 「フラットバー+ネットタイプ」の構成部材
Member Arrangement of “Flat Bar & Net” Type FSC



(a) 天井面見上

(b) a-a'断面

Fig. 3 「Stringタイプ」の構成部材
Member Arrangement of “String” Type FSC

範囲・目標性能、および「FSC」の有用性を確認する目的で行った各種試験結果について報告する。なお、「FSC」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15-07号)を取得している。

2. 「FSC」の概要

2.1 基本概念と構成部材

「FSC」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り、既存吊り天井の落下を防止する構法である。「FSC」を用いることによって、地震時における当該施設利用者の避難時間、避難空間の確保が可能となる。「FSC」は、既存吊り天井の吊りボルト、あるいは新設された吊りボルトによって支持される。「FSC」の外観イメージをFig. 1に示す。「FSC」には、「フラットバー+ネットタイプ」と「Stringタイプ」の2種類があり、「FSC」自体の質量を加算した天井面構成部材等の質量(以下、「FSC天井質量」)および意匠性により選択する。なお、「FSC」設置位置近傍には、「FSC」施工時における天井裏からの作業を極力削減することを意図して、必要に応じて点検口を設ける仕様としている。

2.1.1 フラットバー+ネットタイプ 構成部材の概要をFig. 2に示す。本タイプは、添えボルト(スチール製)、添えボルト取付金物(スチール製)、フラットバー(アルミニウム製)、ネット(ポリプロピレン製)などから構成される。既存吊りボルトと添えボルトとを添えボルト取付金物で固定する。添えボルトは天井板下まで貫通させる。ネットはタッカーによって天井板下面に固定する。フラ

ットバーはネット下面に1800mm以下毎に配置し、添えボルトに固定する。なお、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されるため、「FSC」の許容耐力には寄与しないものとする。また、「FSC」を支持するための既存吊りボルトの水平方向設置間隔が1800mmを超過する場合などにより吊りボルトを新設する際は、フラットバーを当該新設吊りボルトに直接固定する。

2.1.2 Stringタイプ 構成部材の概要をFig. 3に示す。本タイプは、添えボルト(スチール製)、添えボルト取付金物(スチール製)、メインストリング・サブストリング(いずれも超高強度繊維ポリエチレン製)、受けプレート・固定プレート(いずれもスチール製)などから構成される。既存吊りボルトと添えボルトとを添えボルト取付金物で固定する。添えボルトは天井板下まで貫通させる。メインストリングは添えボルトを介して、1800mm以下毎に配置した受けプレートに固定する。サブストリングはメインストリングの概ね中間位置に配置し、外周部に配置した添えボルトを介して、外周部のみに配置した固定プレートを設置端として固定する。よって、当該天井の外周部には900mm以下毎に添えボルトが配置されることになる。また「フラットバー+ネットタイプ」の場合と同様に、既存吊りボルトの水平方向設置間隔が1800mmを超過する場合は、新設された吊りボルトに受けプレート(および固定プレート)を直接固定する。

2.2 適用範囲と目標性能

「FSC」の適用範囲を以下に示す。

- 1) 屋内の既存吊り天井を対象とする。なお、吊り天

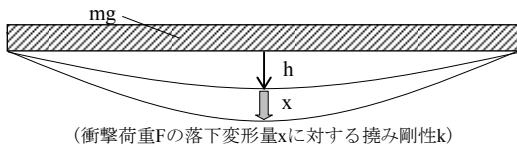


Fig. 4 衝撃荷重算定方法の模式図
Schematic View of Impulsive Load Calculation

- 井でない天井や、吊り天井に用いられる吊りボルトが鋼製でない場合の天井は適用範囲外とする。
- 2) 形状は水平とする。ただし、5/100程度までの勾配は概ね水平の範囲⁴⁾として許容する。
 - 3) 既存吊りボルト(あるいは「FSC」を支持するために新設された吊りボルト)の水平方向設置間隔は1800mm以下とする。
 - 4) 「FSC」を構成する部材(添えボルト取付金物など)の実際の納まり寸法を勘案し、天井吊り長さは500mm以上とする。
 - 5) 「FSC」は水平方向設置間隔を1800mm以下とする最小ユニットの組み合わせで構成されることから、天井面積は制限しない。
 - 6) 建物の構造種別、規模、設置階は制限しない。

「FSC」の目標性能は、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とする。この目標性能を満足する「FSC天井質量」を、ここでは「フラットバー+ネットタイプ」の場合で60kg/m²以下、「ストリングタイプ」の場合で30kg/m²以下とする。なお、天井板(ロックウール吸音板9mm+石こうボード9.5mm)と天井下地材(野縁受け、野縁等)とから構成される、一般的な在来工法天井の天井面構成部材質量は概ね10~13kg/m²である。当該質量と目標性能を満足する「FSC天井質量」とを比較した場合の「FSC」の適用範囲は、「フラットバー+ネットタイプ」の場合でその4倍程度まで、「ストリングタイプ」の場合でその2倍程度までとなる。

2.3 天井材落下による衝撃荷重の算定

天井材落下時に「FSC」に作用する衝撃荷重の算定方法(模式図)をFig. 4に示す。衝撃荷重Fは、天井材落下時の位置エネルギーから算定⁴⁾する。いま、重力加速度g、「FSC」の撓み剛性k、「FSC天井質量」m、「FSC」の初期撓み量h、落下による変形量xとし、また「FSC」の撓み剛性kは弾性と仮定(F=kx)とすると、天井材落下による衝撃荷重Fは、

$$\frac{1}{2}kx^2 = mgh + mgx \rightarrow F = mg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2kh}{mg}} \right) \quad (1)$$

として表される。ここで、「FSC」の構成部材であるフラットバーおよびストリングと天井材とは密着させて設置することを勘案すると、式(1)における「FSC」の初期撓み量hは概ねゼロとみなすことができる。よって、「FSC」

Table 1 各試験の概要
Outline of Static and Dynamic Test

項目	目的	対象	荷重方法	試験体数
要素試験	「FSC」構成部材の耐力確認	・添えボルト取付部 ・フラットバー部 ・ストリング部	集中荷重による静的荷重	試験対象毎に3体
ユニット試験	衝撃荷重に対する「FSC」適用天井の耐力確認	・「フラットバー+ネットタイプ」天井 ・「ストリングタイプ」天井	等分布荷重による静的荷重	試験対象毎に1体
振動台試験	天井落下現象再現による「FSC」適用の効果確認	・「フラットバー+ネットタイプ」天井 ・「無対策」天井 ・「ストリングタイプ」天井 ・「無対策」天井	慣性力による動的荷重	「FSC」:各1体 「無対策」:2体

に作用する天井材落下による衝撃荷重Fは、式(2)に示す通り、「FSC天井質量」の2倍(衝撃係数2.0)となる。

$$h = 0 \text{ の場合 : 式(1) } \rightarrow F = mg (1 + \sqrt{1}) = 2mg \quad (2)$$

3. 試験の概要

3.1 試験項目

「FSC」の有用性確認を目的とした各試験の概要をTable 1に示す。要素試験では「FSC」の主要構成部材を、ユニット試験では「FSC」を適用した天井ユニットをそれぞれ対象として、「FSC」の保持する耐力が2.3節で算定される衝撃荷重を上回ることを確認する。また、振動台試験では実天井の落下現象を再現することによって、「FSC」による落下防止効果を確認する。

要素試験は添えボルト取付部、フラットバー部、ストリング部を対象に、当該試験体に集中荷重を静的荷重する方法で、ユニット試験はフラットバー+ネット、ストリングの各タイプを対象に、当該試験体に等分布荷重を静的荷重する方法でそれぞれ行う。また、振動台試験は当該試験体を水平1方向+上下方向の2方向同時加振する方法で行う。なお、要素試験の試験体数は試験対象毎に3体⁴⁾、⁵⁾とし、ユニット試験のそれは試験対象毎に1体⁴⁾とする。また、振動台試験の試験体数は、「FSC」を適用した天井と適用しない天井とを同時加振する形で行うことから、試験対象毎に2体とする。

要素試験の最大耐力 σ_B は、試験結果のばらつきを考慮し、式(3)に示す通り、試験タイプ毎の結果(各最大耐力値) x_i の平均値 x_{mean} から標準偏差 σ の1/2を差し引いた値(以下、「最大耐力(特性値[- $\sigma/2$])」)として算定⁵⁾する。

$$\sigma_B = x_{mean} - \sigma/2 \quad (3)$$

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

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

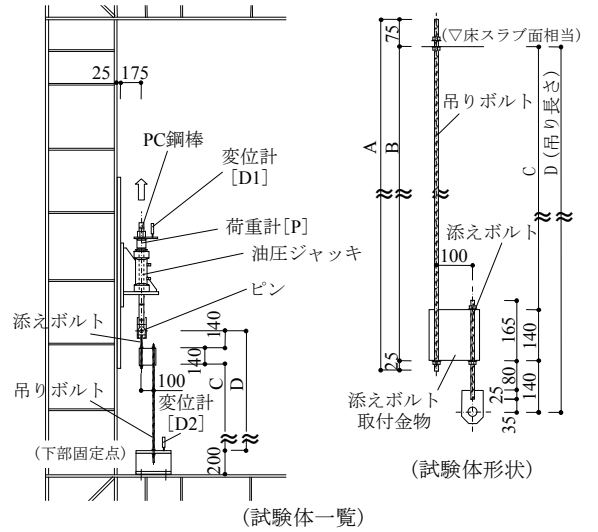
ここで、n : 試験タイプ毎の試験体数

3.2 要素試験：添えボルト取付部の引張試験

3.2.1 試験概要 添えボルト取付部の引張試験の概

要をFig. 5に示す。加力は油圧ジャッキを用いて行った。同図には計測項目、計測位置も併記している。試験体は吊り長さをパラメータ(500mm, 1000mm, 1500mmの3種類)とした。

3.2.2 試験結果 試験状況の一例をFig. 6に、荷重－変位関係をFig. 7に、最大耐力の一覧をTable 2にそれ



試験タイプ	試験体数	試験体構成	吊り長さ (mm)	寸法 (mm)				備考
				A	B	C	D *	
EJ-05	3	・吊りボルト	500	460	360	220	500	(添えボルト) : φ9 材質:SS400
EJ-10		・添えボルト	1000	960	860	720	1000	
EJ-15		・添えボルト 取付金物	1500	1460	1360	1220	1500	

* D[吊り長さ]: 構造耐力上主要な部分(例えば床スラブなど)から天井板下面までの鉛直方向長さ

Fig. 5 添えボルト取付部の引張試験概要
Outline of Tension Test of Bolt Connection

ぞれ示す。荷重Pには加力点での鉛直荷重(P)を、変位Dには加力点での鉛直変位(D1)から下部固定点での鉛直変位(D2)を差し引いた値(=D1-D2)をそれぞれ用いている。式(3)により算定した「最大耐力(特性値[-σ/2])」は、それぞれ、吊り長さ500mmの場合で20150N, 同1000mmの場合で24333N, 同1500mmの場合で23467Nであった。本試験体の破壊過程としては、当該部への偏荷重の増加に伴い添えボルト取付金物が回転し、吊りボルトと比較して相対的に回転角が大きくなる添えボルトに大きな変形(曲げ変形)が作用することで、添えボルトが破断するという結果であった。

3.3 要素試験：フラットバー部の鉛直荷重試験

3.3.1 試験概要 支点間距離(L)を1800mmとしたフラットバー部の鉛直荷重試験の概要をFig. 8に示す。加力は精密万能試験機を用いて行い、加力位置はフラットバー中央部(L/2)とした。同図には計測項目、計測位置も併記している。

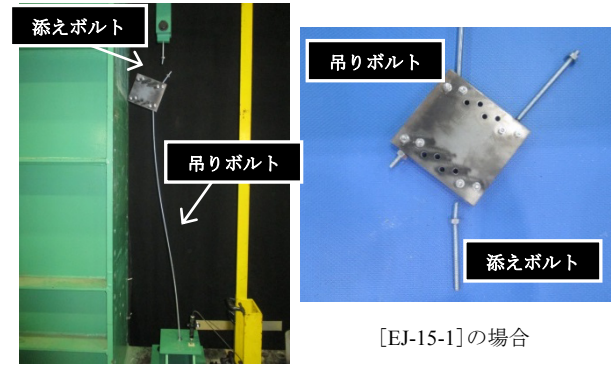


Fig. 6 添えボルト取付部の破断状況
Photos of Damaged Bolt Connections

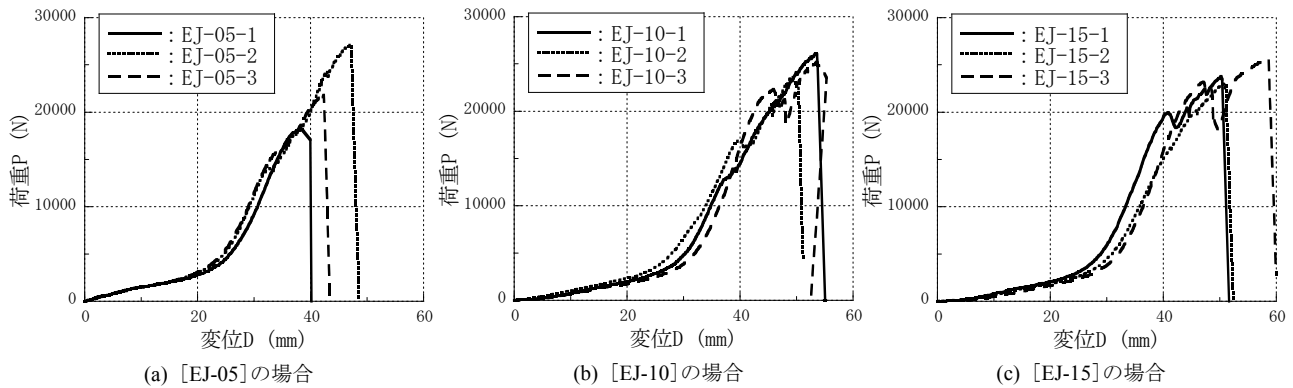


Fig. 7 荷重－変位関係 (添えボルト取付部引張試験)
Load - Displacement Relationship (Tension Test of Bolt Connection)

Table 2 最大耐力一覧 (添えボルト取付部引張試験)
Maximum Strength (Tension Test of Bolt Connection)

吊り長さ500mmの場合		吊り長さ1000mmの場合		吊り長さ1500mmの場合	
試験体名称	最大耐力 (N)	試験体名称	最大耐力 (N)	試験体名称	最大耐力 (N)
EJ-05-1	18100	EJ-10-1	26100	EJ-15-1	23800
EJ-05-2	27200	EJ-10-2	23600	EJ-15-2	23000
EJ-05-3	22000	EJ-10-3	25200	EJ-15-3	25600
特性値 [-σ/2]	20150	特性値 [-σ/2]	24333	特性値 [-σ/2]	23467

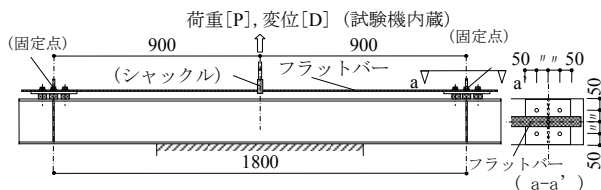


Fig. 8 フラットバー部の鉛直荷重試験概要
Outline of Vertical Loading Test of Flat Bar

(試験体一覧)

試験タイプ	試験体数	試験体構成	支点間距離 L(mm)	加力位置 [加力スパン] (mm)	幅 (mm)	厚 (mm)	備考
EF-L2	3	・フラットバー	1800	L/2 [900-900]	40	3	(フラットバー) 材質:A6063-T5



(a) 加力後 [全景] (b) 加力後 [破断部詳細]

Fig. 9 フラットバー部の破断状況 ([EF-L2-1]の場合)
Photos of Damaged Flat Bar [EF-L2-1]

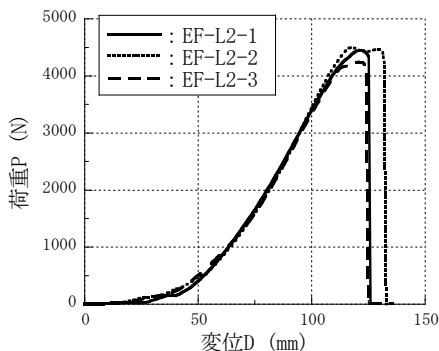


Fig. 10 荷重-変位関係 (フラットバー部鉛直荷重試験)
Load - Displacement Relationship (Vertical Loading Test of Flat Bar)

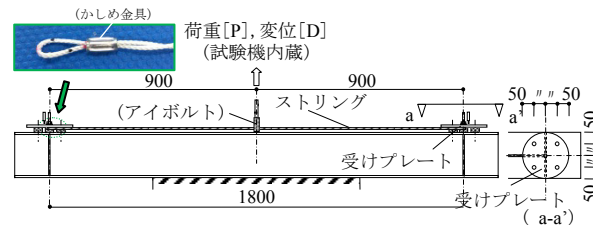
Table 3 最大耐力一覧 (フラットバー部鉛直荷重試験)
Maximum Strength (Vertical Loading Test of Flat Bar)

加力位置L/2の場合	
試験体名称	最大耐力(N)
EF-L2-1	4448
EF-L2-2	4503
EF-L2-3	4243
特性値 [-σ/2]	4329

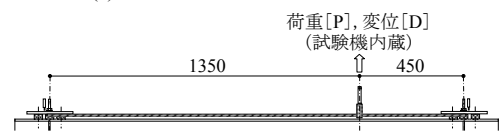
3.3.2 試験結果 試験状況の一例をFig. 9に、荷重-変位関係をFig. 10に、最大耐力の一覧をTable 3にそれぞれ示す。荷重P、変位Dともに試験機に内蔵されたセンサー値(鉛直荷重(P)および鉛直変位(D))を用いている。式(3)により算定した「最大耐力(特性値[-σ/2])」は4329Nであった。本試験体の破壊過程としては、いずれの試験体においても固定点近傍でフラットバーが破断するという結果であった。

3.4 要素試験：ストリング部の鉛直荷重試験

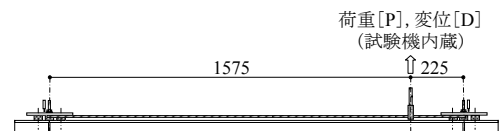
3.4.1 試験概要 支点間距離(L)を1800mmとしたストリング部の鉛直荷重試験の概要をFig. 11に示す。加



(a) 加力位置がストリング中央部(L/2)の場合



(b) 加力位置がストリング端部(L/4)の場合

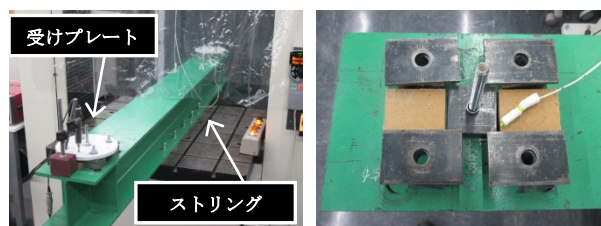


(c) 加力位置がストリング端部(L/8)の場合

(試験体一覧)

試験タイプ	試験体数	試験体構成	支点間距離 L(mm)	加力位置 [加力スパン] (mm)	自由長	備考
ES-L2	3	・ストリング ・受けプレート	1800	L/2 [900-900]	0.975L	(ストリング) 材質:超高強度繊維ポリエチレン 線径:2.4mm
ES-L4				L/4 [1350-450]		
ES-L8				L/8 [1575-225]		

Fig. 11 ストリング部の鉛直荷重試験概要
Outline of Vertical Loading Test of String



(a) 加力後 [全景] (b) 加力後 [破断部詳細]

Fig. 12 ストリング部の破断状況 ([ES-L2-1]の場合)
Photos of Damaged String [ES-L2-1]

力は精密万能試験機を用いて行い、加力位置はストリングの中央部(L/2)、同1/4端部(L/4)、同1/8端部(L/8)の3種類とした。同図には計測項目、計測位置も併記している。ストリングの設置に際し、ストリングに与える初期張力はストリング長で管理している。すなわち、本試験では自由長1755mm(0.975L)のストリングを1800mm(L)まで、自由長に対して2.5%分引き延ばした形で設置している。なお、2.5%の引き延ばし量は、設置後のストリングと天井板下面との間にたるみを生じさせないことを意図とし

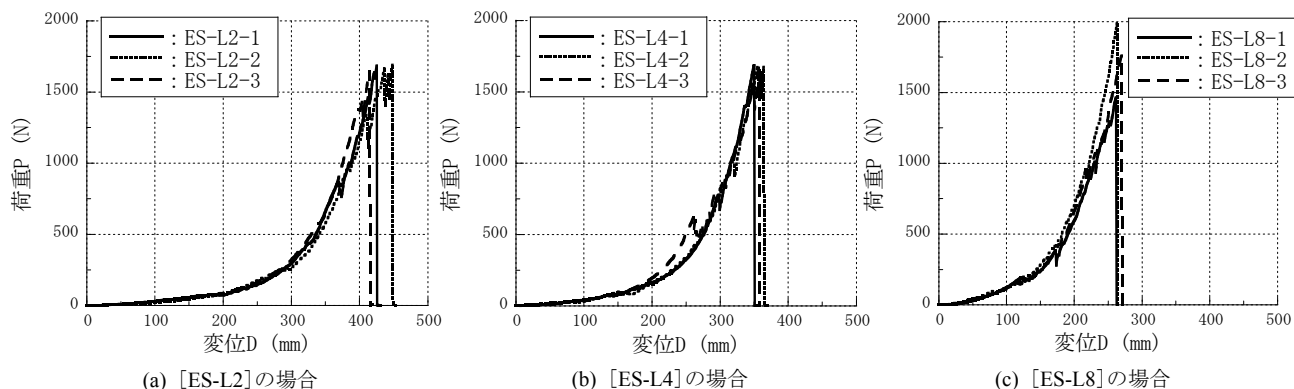
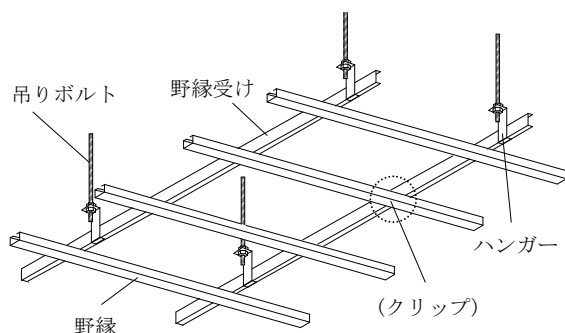


Fig. 13 荷重-変位関係 (ストリング部鉛直荷重試験)
Load - Displacement Relationship (Vertical Loading Test of String)

Table 4 最大耐力一覧
Maximum Strength (Vertical Loading Test of String)

加力位置L/2の場合		加力位置L/4の場合		加力位置L/8の場合	
試験体名称	最大耐力(N)	試験体名称	最大耐力(N)	試験体名称	最大耐力(N)
ES-L2-1	1684	ES-L4-1	1686	ES-L8-1	1464
ES-L2-2	1698	ES-L4-2	1679	ES-L8-2	1997
ES-L2-3	1642	ES-L4-3	1692	ES-L8-3	1760
特性値 [-σ/2]	1660	特性値 [-σ/2]	1682	特性値 [-σ/2]	1606



○大きさ: 5.7m×3.9m [22.23m²], 吊り長さ: 2.3m
(6×4スパン, @900)

鋼製下地金物	吊りボルト [ø900×ø900] 野縁受け [ø900] 野縁 [ø300] (シングル) クリップ (シングル・ダブル共) ハンガー	全ねじボルト φ9 38×12×1.0 25×19×0.4 50×19×0.4 t=0.8 t=2.0
天井板	・フラットバー+ネットタイプ 天井(石こうボード) ・ストリングタイプ 天井(石こうボード)	t=9.5 3枚 t=9.5 2枚

Fig. 14 鋼製下地の基本構成 (見上図)
Schematic of Ceiling with Steel Furring

て決定した。

3.4.2 試験結果 試験状況の一例をFig. 12に、荷重-変位関係をFig. 13に、最大耐力の一覧をTable 4にそれぞれ示す。荷重P、変位Dともに試験機に内蔵されたセンサー値(鉛直荷重(P)および鉛直変位(D))を用いている。式(3)により算定した「最大耐力(特性値[-σ/2])」は、それぞれ、ストリング中央部(L/2)加力の場合で1660N、同1/4端部(L/4)加力の場合で1682N、同1/8端部(L/8)加力の場合で1606Nであった。本試験体の破壊過程としては、かしめ金具部でストリングが破断するという結果であった。

3.5 ユニット試験

3.5.1 試験概要 試験対象となる既存吊り天井の概要をFig. 14に示す。当該天井は、一般的な在来工法天井、すなわち、吊りボルト、ハンガー、野縁受け、クリップ、野縁からなる鋼製下地に天井板(石こうボード等)を張り付けた形で構成される。なお、今回の試験では斜め部材

(ブレース)は設置していない。石こうボード1枚当たりの単位質量を6.7kg/m²、鋼製下地金物および「FSC」の総単位質量を5kg/m²とすると、「フラットバー+ネットタイプ」の「FSC天井質量」は558kg (25.1kg/m²)、「ストリングタイプ」のそれは409kg (18.4kg/m²)となる。

上記仕様の在来工法天井に「FSC」を適用した試験体の概要をFig. 15に示す。試験体には「FSC」施工用の点検口を6箇所設けており、「フラットバー+ネットタイプ」における点検口部分のネットは切り抜いている。なお、本試験における載荷荷重は試験体に搭載する砂袋の数量積算によって、天井面の変位(上下方向)は同図に示す位置(計15箇所[◇印])に設置した変位計によってそれぞれ算出した。等分布荷重の載荷は、1体当たり6.5kgおよび4.2kgの質量を有する砂袋を、天井面全体に等分布的に漸増載荷する方法で行った。本試験は「FSC」が保持する耐力確認を目的としているため、当該試験体の全クリップを外した(当該試験体の全質量を「FSC」で負担した)状態、す

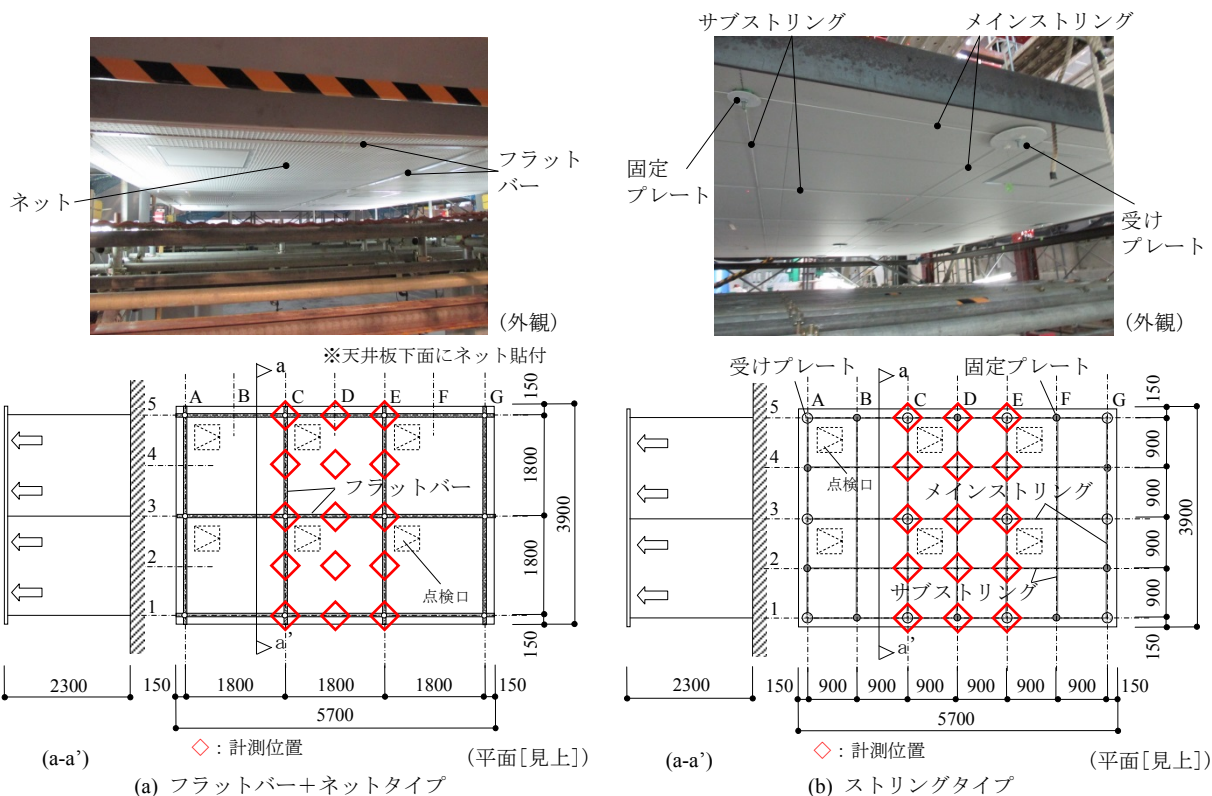


Fig. 15 試験体概要
Outline of Test Specimen

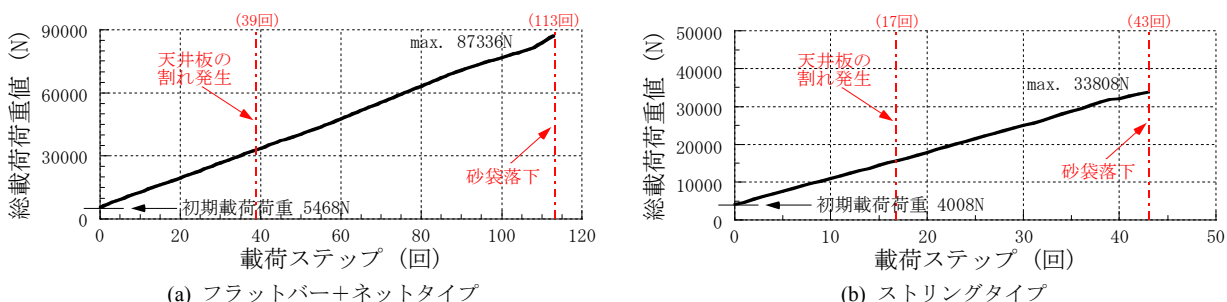


Fig. 16 荷重ステップと総載荷荷重値の関係
Number of Steps – Total Load Relationship

なわち「FSC天井質量」（「フラットバー+ネットタイプ」の場合は558kg、「ストリングタイプ」の場合は409kg）を初期荷重として「FSC」に作用させた状態を、当該試験の初期状態として行っている。この場合の「FSC」への初期載荷荷重は、「フラットバー+ネットタイプ」の場合で5468N、「ストリングタイプ」の場合で4008Nとなる。

3.5.2 試験結果 荷重ステップと「FSC天井質量」を含む総載荷荷重値との関係をFig. 16に、試験状況をFig. 17にそれぞれ示す。「フラットバー+ネットタイプ」の場合、荷重ステップは最大113回、総載荷荷重値は87336N（砂袋による載荷荷重の平均値724N）とし、「ストリングタイプ」の場合、荷重ステップは最大43回、総載荷荷重値は33808N（砂袋による載荷荷重の平均値692N）とした。「フラットバー+ネットタイプ」の場合、荷重ステップ39回後（載荷荷重値32984N）に天井板の割れが野縁

と平行に発生し、同113回後（載荷荷重値87336N）に当該割れ部分から砂袋の一部が落下した。また「ストリングタイプ」の場合、荷重ステップ17回後（載荷荷重値15746N）に天井板の割れが野縁と平行に発生し、同43回後（載荷荷重値33808N）に当該割れ部分から砂袋の一部が落下した。砂袋の一部が落下した後の試験体は、両タイプ共、荷重の継続により天井板の割れが進行し、それに追従する形で落下する砂袋の量が増大するという状況であった。よって砂袋が落下する直前の荷重、すなわち「フラットバー+ネットタイプ」の場合は荷重ステップ112回後（載荷荷重値86159N）を、「ストリングタイプ」の場合は同42回後（載荷荷重値33249N）を、それぞれ当該試験における最終載荷ステップ（最大耐力値）とした。

天井面における荷重-変位関係をFig. 18に示す。各図共、変位計測は砂袋を搭載する直前の状態（「FSC天井質

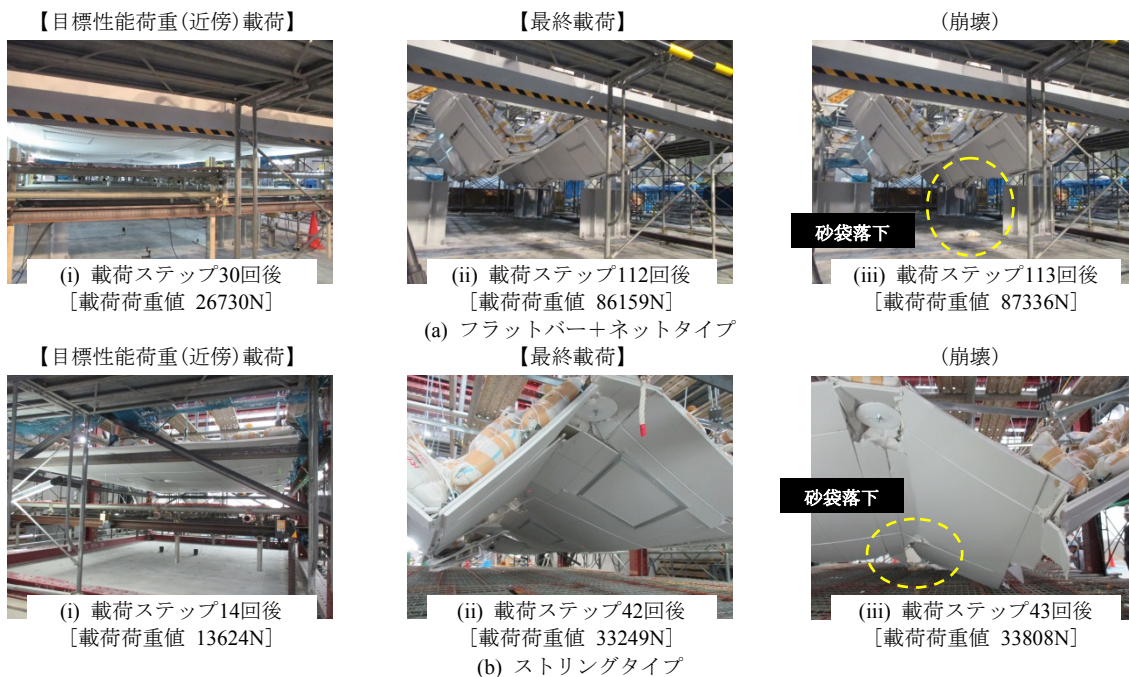


Fig. 17 試験体崩壊状況
Photos of Test Specimen at Typical Loading Step

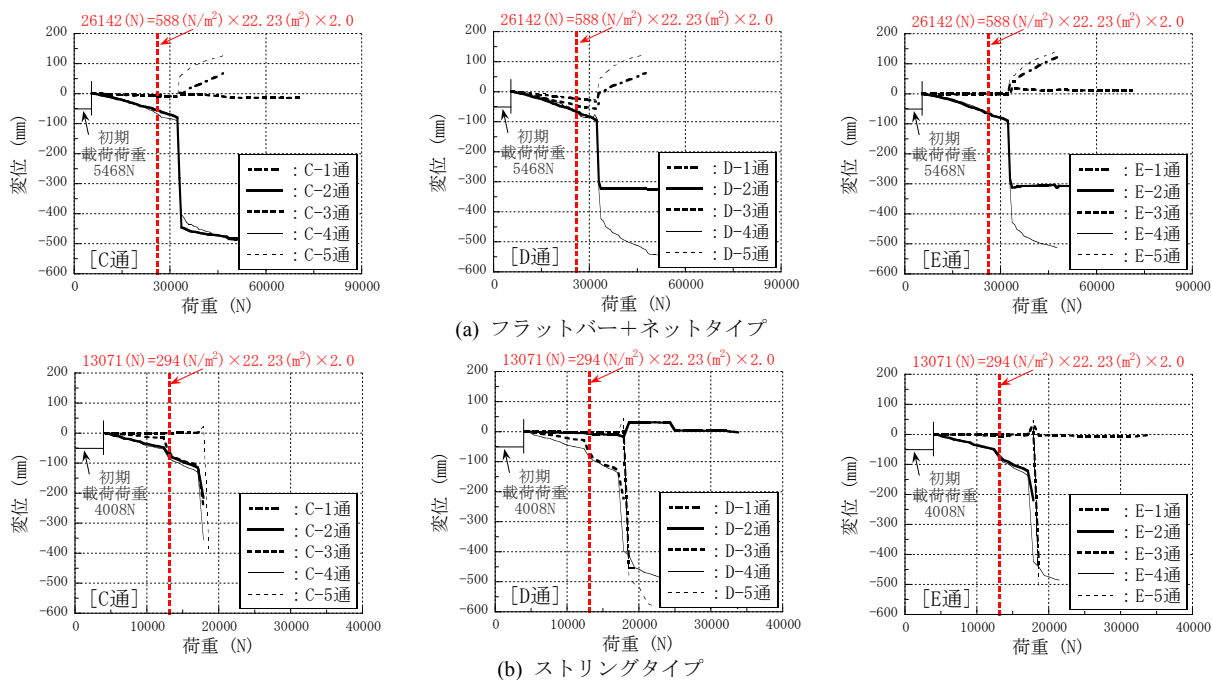


Fig. 18 荷重-変位関係 [上下方向]
Load - Displacement D Relationship in Vertical Direction

量」の全てが「FSC」に載荷された状態を初期状態(ゼロ点)として行っている。また各図に示す変位値の極性は、載荷に伴い発生する天井面の沈み込み量(落下量)がマイナス値となるように設定している。各図には、2.2節に示す目標性能荷重値、すなわち「フラットバー+ネットタイプ」の場合は 60kg/m^2 に相当する載荷荷重値(588N/m^2)、「ストリングタイプ」の場合は 30kg/m^2 に相当する載荷荷重値(294N/m^2)に、試験体面積と衝撃係数(2.0)とを乗じた値も併記している。なお、「フラットバー+ネットタイ

プ」の目標性能荷重値は 26142N 、「ストリングタイプ」のそれは 13071N となる。これら目標性能荷重値とFig. 17に示す「目標性能荷重(近傍)載荷」に相当する載荷荷重値との関係は以下となる。

$$\begin{aligned}
 & \text{[フラットバー+ネットタイプ]} \\
 & \bigcirc 26730\text{N} \text{ [載荷ステップ30回後]} > 26142\text{N} \\
 & = 588\text{N/m}^2 \times 22.23\text{m}^2 \times 2.0 \text{ [衝撃係数]} \\
 & \text{(参考) 載荷ステップ29回後の総載荷荷重値: } 25902\text{N}
 \end{aligned}$$

Table 5 「FSC」の許容耐力
Allowable Strength of FSC

(a) フラットバー+ネットタイプ

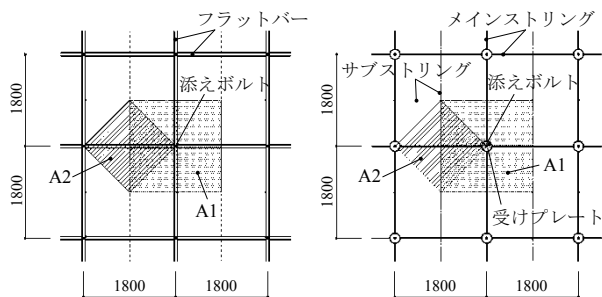
	特性値 [-σ/2] Pcha	支配面積 A (A1, A2, A3)	材料 安全率 a	許容耐力 Pa =Pcha/(A×a)	目標性能を満足する 「FSC天井質量」 m	目標性能*) [衝撃荷重] m×2.0
要素試験 添えボルト取付部	20150N	A1 =3.24m ²	1.5	4146N/m ²	60kg/m ² (588N/m ²)	1176N/m ²
要素試験 フラットバー部	4329N	A2 =1.62m ²	1.5	1781N/m ²		
ユニット試験	86159N	A3 =22.23m ²	1.5	2583N/m ²		

*) (目標性能) = (「FSC天井質量」) × (衝撃係数[2.0]), (「FSC天井質量」) = (天井面構成部材等の質量) + (「FSC」自体の質量)

(b) スtringタイプ

	特性値 [-σ/2] Pcha	支配面積 A (A1, A2, A3)	材料 安全率 a	許容耐力 Pa =Pcha/(A×a)	目標性能を満足する 「FSC天井質量」 m	目標性能*) [衝撃荷重] m×2.0
要素試験 添えボルト取付部	20150N	A1 =3.24m ²	1.5	4146N/m ²	30kg/m ² (294N/m ²)	588N/m ²
要素試験 String部	1606N	A2 =1.62m ²	1.5	661N/m ²		
ユニット試験	33249N	A3 =22.23m ²	1.5	997N/m ²		

*) (目標性能) = (「FSC天井質量」) × (衝撃係数[2.0]), (「FSC天井質量」) = (天井面構成部材等の質量) + (「FSC」自体の質量)



(a) フラットバー+ネットタイプ (b) Stringタイプ

Fig. 19 「FSC」各部材の支配面積
Control Area of Each Member of FSC

[Stringタイプ]

○13624N [載荷ステップ14回後] > 13071N

= 294N/m² × 22.23m² × 2.0 [衝撃係数]

(参考) 載荷ステップ13回後の総載荷荷重値: 12986N

「フラットバー+ネットタイプ」, 「Stringタイプ」共に, 「目標性能荷重(近傍)載荷」までの試験範囲を対象とした荷重-変位関係は概ね線形で, かつ天井材に大きな損傷は発生していないことを確認した。このことから, 衝撃荷重を2.3節に示す方法で算定することは妥当であると考えられる。なお, 両タイプ共, 「最終載荷」時では天井面に天井板の割れに伴う大きな変位が発生し, また既存吊りボルトや添えボルト, フラットバーの一部には変形が生じたものの, 添えボルト取付金物・受けプレート・固定プレートの変形や, フラットバー・ネット・メインString・サブStringの破断などの事象は発生しなかった。

3.6 目標性能と静的載荷試験結果の比較

目標性能(2.2節)と要素試験結果(3.2節~3.4節)との比

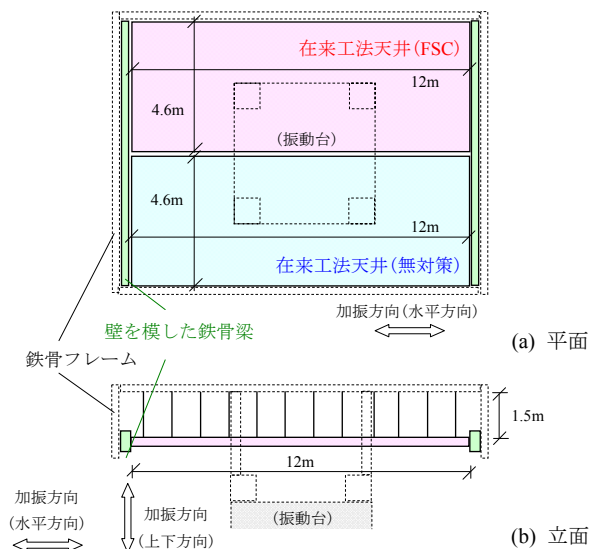


Fig. 20 振動台試験概要
Outline of Shaking Table Test

Table 6 加振波形の概要
Outline of Input Wave

地震波(振動台への入力波)	最大値	
2011年東北地方太平洋沖地震 K-NET仙台波	水平方向	3000cm/s ² 原波形[NS成分]×1.98倍
	上下方向	1500cm/s ² 原波形[UD成分]×5.17倍
1995年兵庫県南部地震 JMA神戸波	水平方向	1636cm/s ² 原波形[NS成分]×2.00倍
	上下方向	664cm/s ² 原波形[UD成分]×2.00倍

較をTable 5に示す。同表中の各許容耐力は, 施工上のばらつきや構造耐力上の安全余裕を勘案し, 各要素試験から得られた「最大耐力(特性値[-σ/2])」, Fig. 19に示す各部材の支配面積, および材料安全率⁴⁾とから算定した。同

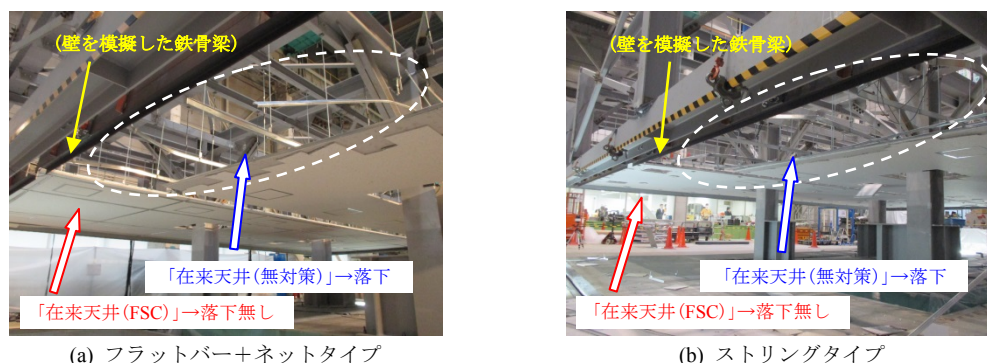


Fig. 21 試験体崩壊状況（「在来工法天井（無対策）」落下後）
Photos of Test Specimen (After Falling of Conventional Ceiling)

表にはユニット試験(3.5節)により得られた最大耐力に基づく許容耐力も併記している。これらの結果から、目標性能を満足する「FSC天井質量」以下の範囲においては、「FSC」は衝撃荷重に対して必要な耐力を保持していることを確認した。

3.7 振動台試験

3.7.1 試験概要 試験の概要をFig. 20に示す。本試験で用いた天井はFig. 14に示す在来工法天井を基本として構成(天井面構成部材等の質量:約19kg/m²)しており、「FSC」を適用した天井(以下、「在来工法天井(FSC)」)と無対策の天井(以下、「在来工法天井(無対策)」)とを併設する形で行った。試験体の大きさ(平面)は、いずれも12m×4.6mとし、試験体長手方向を野縁受け方向とした。地震波(振動台への入力波)の一覧をTable 6に示す。本試験は水平1方向(試験体長手方向)、上下方向の2方向同時加振で行った。

3.7.2 試験結果 「在来工法天井(無対策)」落下後の状況をFig. 21に示す。同天井が落下する程の大きな外力を作用させた場合でも、「FSC」は十分な落下防止効果を保持していることを確認した。落下した「在来工法天井(無対策)」を撤去し、全てのクリップを外した状態の「在来工法天井(FSC)」加振後の状況をFig. 22に示す。全てのクリップを外したことに起因して天井板の割れなどは発生したものの、本加振においても天井が落下する事象は発生しなかった。

4. まとめ

「FSC」の有用性確認を目的とした各種試験を行った。これらの結果から、以下の知見を得た。

- 1) 要素試験およびユニット試験の結果から、「フラットバー+ネットタイプ」の場合は「FSC天井質量」が60kg/m²以下の吊り天井、「ストリングタイプ」の場合は同質量が30kg/m²以下の吊り天井であれば、「FSC」は当該天井落下時の衝撃荷重に対して必要な耐力を保持していることを確認した。

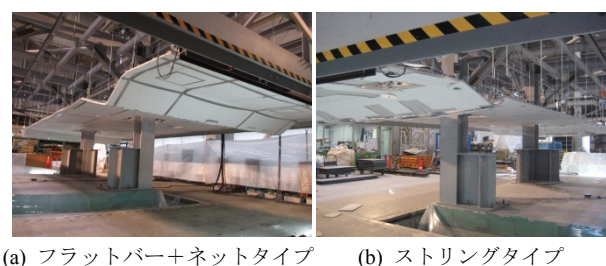


Fig. 22 試験体崩壊状況（最終加振後）
Photos of Test Specimen (After Falling of Excitation)

- 2) 振動台試験の結果から、「FSC」が保持する性能の範囲内であれば、一般的な在来工法天井が落下するような大きな外力を作用させた場合でも、「FSC」適用天井は落下しないことを確認した。

本報では、屋内の既存吊り天井で、かつその形状が水平である天井を対象とした場合の、「FSC」の有用性(落下防止効果)について報告した。今後は、曲面・斜面など、特殊形状天井に対しても「FSC」を適用・展開していく予定である。

参考文献

- 1) 建築基準法施行令の一部を改正する政令(平成25年政令第217号)
- 2) 建築基準法施行規則および建築基準法に基づく指定資格検定機関等に関する省令の一部を改正する省令(平成25年国土交通省令第61号)
- 3) 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件(平成25年国土交通省告示第771号)
- 4) 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, 一般社団法人 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, 2013.9
- 5) 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