

天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング® II」

奥田 浩文 達富 浩 白鳥 勝彦
(本社設計本部) (本社設計本部)

山村 都子 青山 優也 高木 健司
(本社設計本部) (東京本店建築事業部)

“Fail-Safe Ceiling® II (FSC2)” Fall Prevention Ceiling System

Hirofumi Okuda Hiroshi Tatsutomi Katsuhiko Shiratori
Satoko Yamamura Yuya Aoyama Kenji Takagi

Abstract

The “Fail-Safe Ceiling® II (FSC2)” fall prevention ceiling system is a technology that prevents ceiling panels from falling during seismic events, by the installation of net components just under the existing panels of a suspended ceiling. Two FSC2 types have been developed: the “Flat bar & Net” type and the “String” type. Conventional systems only cover flat horizontal ceilings. FSC2s are expanded to be applicable to inclined and curved ceiling surfaces. Static and dynamic tests of FSC2s have been conducted to confirm their strength. These tests were applied to suspended ceilings with an inclination angle of 30° or less. Results demonstrated that the experimental FSC2s retained the required strength to contain the impact load induced by falling ceiling components for the “Flat Bar & Net” type when the weight of the suspended ceiling was 45 kg/m² or less, and for the “String” type when the weight of the suspended ceiling was 30 kg/m² or less.

概 要

天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング® II」(以下、「FSC2」)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。「FSC2」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。水平な平面天井のみを対象とした従来構法の適用範囲を、傾斜した天井や曲面の天井などの特殊な形状の天井にまで拡大することを目的として、静的・動的試験を行った。試験の結果、天井面の傾斜角が30度以下の範囲で、且つ「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45kg/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、「FSC2」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、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は非常に高い。天井落下防止構法「フェイルセーフシーリング® II」(以下、「FSC2」)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、当該天井の落下を防止する構法である。「FSC2」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、「FSC2」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。

著者等はこれまで、2005年国交省告示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「FSC」¹⁾を開発し、その有用性を確認してきた。しかし、この従来構法「FSC」は水平な平面天井のみを対象としていたため、傾斜した天井や曲面の天井など、特殊な形状の天井への適用範囲の拡大が求められていた。

本報では、水平な平面天井に加えて、傾斜・曲面天井の落下防止も可能とする「FSC2」の概要と、その性能確認を目的として行った各種試験結果について報告する。なお、「FSC2」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16-27号)を取得している。

2. 「FSC2」の概要

2.1 基本概念と構成部材

「FSC2」の基本構成および構成部材の概要をFig. 1に示す。「FSC2」は、既存吊りボルト(或いは新設された吊りボルト)によって支持される。「FSC2」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、「FSC2」自体の質量を加算した天井面構成部材等の質量(以下、「FSC2天井質量」)および意匠性により選択する。図中、 L_{0X} 、 L_{0Y} はXおよびY方向の貫通ボルト(傾斜角0度の場合は添えボルト)の設置間隔(水平投影距離)、 P_{0X} 、 P_{0Y} はXおよびY方向のフラットバーまたはストリング

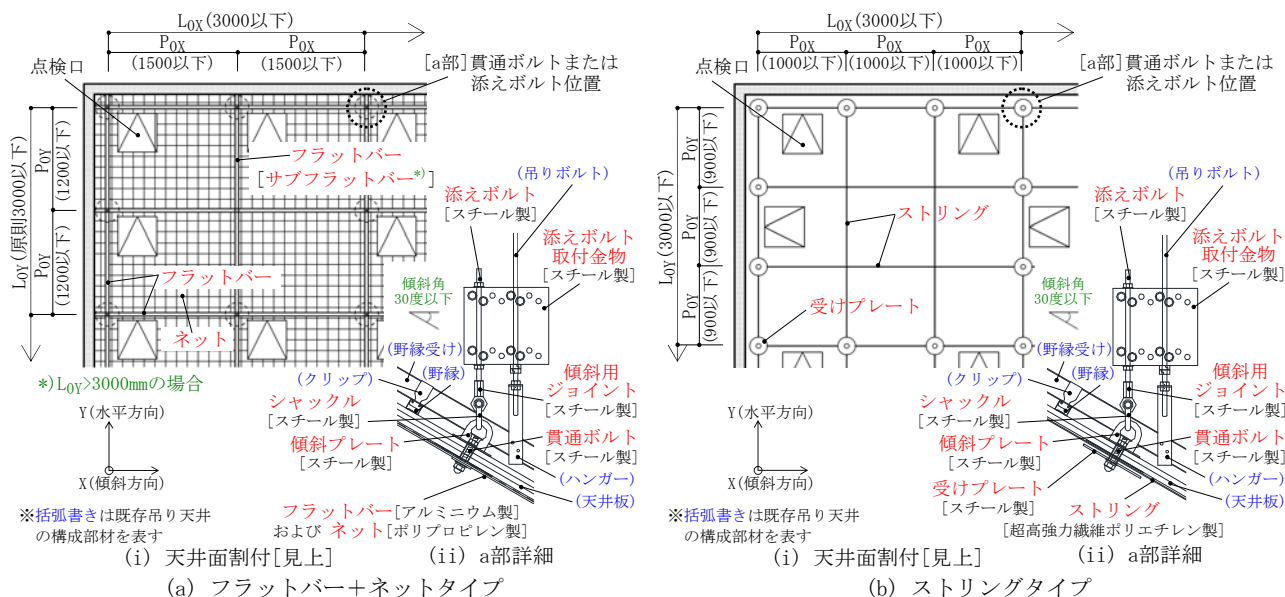


Fig. 1 基本構成および構成部材の概要
Member Arrangement of FSC2

の設置間隔(水平投影距離)をそれぞれ表している。なお、「FSC2」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。

2.1.1 フラットバー+ネットタイプ 本タイプは、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。添えボルトの先端には、傾斜用ジョイントおよびシャックルを介して、傾斜プレートを天井板の傾斜角度に合わせて設置する。傾斜プレートには貫通ボルトが接続され、貫通ボルトは天井板下面まで貫通させる。ネットはタッカー(鋸打機)によって、天井板下面に固定する。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いるため「FSC2」の許容耐力には寄与しないものとし、貫通ボルトの設置間隔が3000mmを超過する場合のフラットバー(サブフラットバー)も許容耐力には寄与しないものとする。天井板の傾斜角が0度の場合、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固定することも可能である。また、「FSC2」を支持するために吊りボルトを新設し、フラットバーを当該新設吊りボルトに直接固定することも可能である。

2.1.2 ストリングタイプ 本タイプは、ストリング(超高強度繊維ポリエチレン製)、受けプレート(スチール製)などから構成される。なお、既存吊りボルトから貫通ボルトまでの構成・取付方法は、「フラットバー+ネットタイプ」の場合と同様となる。ストリングは天井板下面まで貫通させた貫通ボルトを介して受けプレートに固定する。天井板の傾斜角が0度の場合、「フラットバー+ネットタイプ」の場合と同様に、天井板を貫通させた添えボルトにストリングおよび受けプレートを固定することも可能である。また、「FSC2」を支持するために吊りボルトを

新設し、ストリングおよび受けプレートを当該新設吊りボルトに直接固定できることも「フラットバー+ネットタイプ」の場合と同様である。

2.2 許容耐力算定のための前提条件

2.2.1 天井材落下による衝撃荷重の算定 「FSC2」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た構法であるため、当該天井落下時の衝撃荷重に対して必要な耐力を保持する必要がある。前報)と同様に、衝撃荷重 F は、重力加速度 g 、「FSC2」の撓み剛性 k 、「FSC2天井質量」 m 、「FSC2」の初期撓み量 h 、落下による変形量 x とし、また「FSC2」の撓み剛性 k を弾性と仮定($F=kx$)して、

$$F = mg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2kh}{mg}} \right) \quad (1)$$

で算定する。なお、「FSC2」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して設置するため、式(1)における「FSC2」の初期撓み量 h はゼロとなる。よって、「FSC2」に作用する天井材落下による衝撃荷重 F は、「FSC2天井質量」の2倍の値(衝撃係数2.0)となる。

2.2.2 設置間隔および傾斜角の設定 許容耐力算定に際しては、貫通ボルト(傾斜角0度の場合は添えボルト)、フラットバーおよびストリングの設置間隔、および天井面傾斜角を規定する必要がある。ここでは、前報)に示す各種試験で得られた耐力を勘案し、「FSC2」部材の設置間隔、および「FSC2」適用対象となる天井面傾斜角をそれぞれ以下とする。

- 「フラットバー+ネットタイプ」の配置寸法
 - ・ 貫通ボルト(または添えボルト [傾斜角0度の場合])の設置間隔: $L_{0X} \leq 3000\text{mm}$
 - $L_{0Y} \leq 3000\text{mm}$ を原則とするが、 $L_{0Y} > 3000\text{mm}$ の

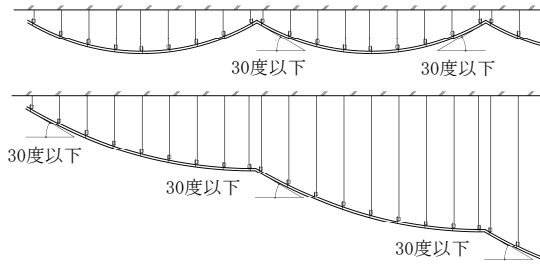


Fig. 2 曲面天井への適用例
Application Example to Curved Surface Ceiling

場合のY方向に設置するフラットバー(サブフラットバー)は、鉛直荷重を負担しないものとする。

- ・フラットバーの設置間隔

$$: P_{0X} \leq 1500\text{mm}, P_{0Y} \leq 1200\text{mm}$$

- 「ストリングタイプ」の配置寸法

- ・貫通ボルト(または添えボルト [傾斜角0度の場合])の設置間隔: $L_{0X} \leq 3000\text{mm}, L_{0Y} \leq 3000\text{mm}$
- ・ストリングの設置間隔

$$: P_{0X} \leq 1000\text{mm}, P_{0Y} \leq 900\text{mm}$$

- 天井面傾斜角

- ・30度以下
「FSC2」に用いるネット状の部材(フラットバー・ストリング等)には柔軟性があるため、Fig. 2に示す曲面が下に凸の形状で、且つ接線の傾斜角が30度以下の曲面天井は「FSC2」の適用範囲とする。

なお、従来構法「FSC」¹⁾は水平な平面天井(傾斜角0度)のみを対象としており、また「FSC」における添えボルトの設置間隔は両タイプ共に1800mm以下までに限定されていた。

3. 静的加力試験

3.1 試験項目

「FSC2」の耐力確認を目的とした静的加力試験の概要をTable 1に示す。要素試験では「FSC2」の主要構成部材を、ユニット試験では「FSC2」を適用した天井ユニットをそれぞれ対象として、「FSC2」の保持する耐力が2.2.1項で算定される衝撃荷重を上回ることを確認する。要素試験は天井板取合部、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載荷する方法で、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載荷する方法でそれぞれ行う。なお、要素試験の試験体数は試験対象毎に3体^{2),3)}とし、ユニット試験のそれは試験対象毎に1体²⁾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(2)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、

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

Table 1 試験の概要
Outline of Static Test

項目	目的	対象	載荷方法	試験体数
要素試験	「FSC2」構成部材の耐力確認	・天井板取合部	集中荷重による静的載荷	試験対象毎に3体
		・フラットバー部 ・ストリング部		
ユニット試験	衝撃荷重に対する「FSC2」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載荷	試験対象毎に1体

荷重計[P], 変位計[D] (試験機内蔵)

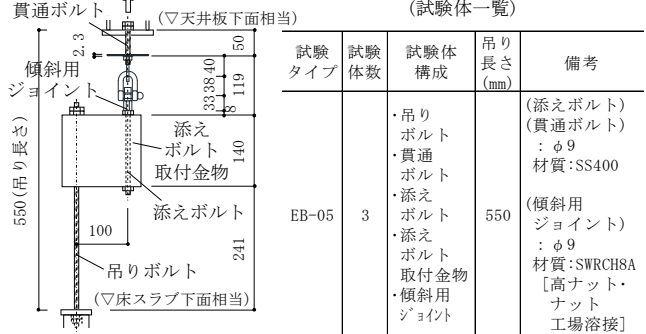


Fig. 3 天井板取合部の引張試験概要
Outline of Tension Test of Bolt Connection

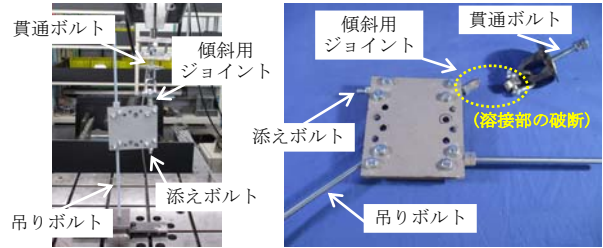


Photo 1 天井板取合部の破断状況 [EB-05-1]
Damaged Bolt Connections [EB-05-1]

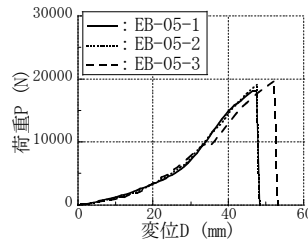


Fig. 4 荷重-変位関係 (天井板取合部)
Load - Displacement Relationship (Bolt Connections)

Table 2 最大耐力一覧 (天井板取合部)
Maximum Strength (Bolt Connections)

試験体名称	最大耐力 (N)
EB-05-1	18211
EB-05-2	19116
EB-05-3	19745
特性値 [- $\sigma/2$]	18638

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

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

n : 試験タイプ毎の試験体数で算定³⁾する。

3.2 要素試験 : 天井板取合部の引張試験

3.2.1 試験概要 引張試験の概要をFig. 3に示す。加力は精密万能試験機を用いて行った。同図には計測項目、計測位置も併記している。

3.2.2 試験結果 引張試験状況(破断)例をPhoto 1

に、荷重－変位関係をFig. 4に、最大耐力の一覧をTable 2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を用いている。式(2)により算定した「最大耐力(特性値[-σ/2])」は18638N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傾斜用ジョイントの溶接部が破断するという結果であった。

3.3 要素試験：フラットバー部およびストリング部の鉛直荷重試験

3.3.1 試験概要

鉛直荷重試験の概要をFig. 5に示す。試験体は傾斜角と水平投影距離(L₀) [支点間距離(L₁)]とをパラメータとし、加力位置はフラットバー部、ストリング部ともに当該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。なお、載荷点にはそれ自体の水平移動を拘束する措置を施している。また、ストリング部の鉛直荷重試験では、ストリングの設置に際し、ストリングに与える初期張力をストリング長で管理した。すなわち、支点間距離(L₁)を2000mmとした場合は、自由長1950mm(0.975 L₁)のストリングを2000mm(L₁)まで、自由長に対して2.5%分引き延ばした形で設置した。この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発生させないことを意図して決定した。

3.3.2 試験結果

フラットバー部の破断状況(破断)例をPhoto 2に、同荷重－変位関係(抜粋)をFig. 6に、同最大耐力の一覧をTable 3にそれぞれ示す。また、ストリング部の試験状況(破断)例をPhoto 3に、同荷重－変位関係(抜粋)をFig. 7に、同最大耐力の一覧をTable 4にそれぞれ示す。いずれの試験においても荷重Pには載荷点での鉛直荷重値を、変位Dには載荷点での鉛直変位値をそれぞれ用いている。式(2)により算定した「最大耐力(特性値[-σ/2])」の最小値は、フラットバーの場合で4200N、ストリングの場合で1478Nであった。フラットバー部を対象とした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し、ストリング部を対象としたそれは、いずれの試験体においても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。

3.4 ユニット試験

3.4.1 試験概要

試験対象となる吊り天井の基本構成をFig. 8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金物に天井板(石こうボード等)を張り付けた形で構成している。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。「FSC2天井質量」

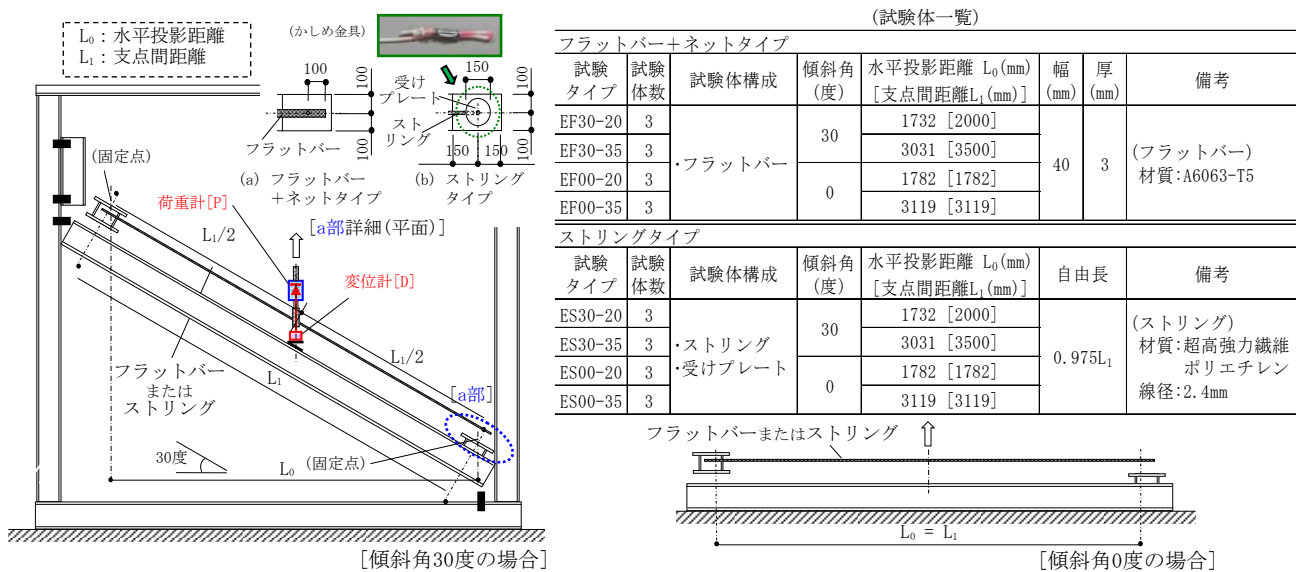


Fig. 5 フラットバー部およびストリング部の鉛直荷重試験概要
Outline of Vertical Loading Test of Flat Bar and String

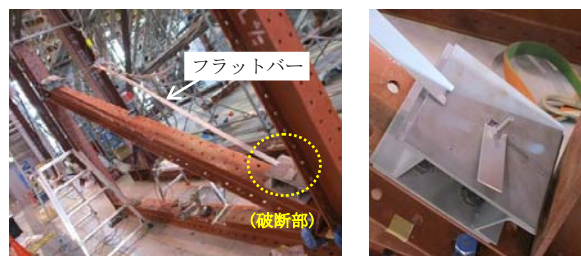
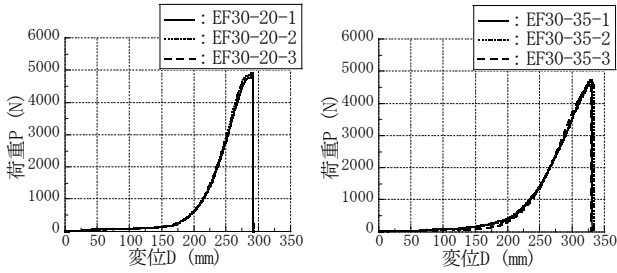


Photo 2 フラットバー部の破断状況 [EF30-35-1]
Photos of Damaged Flat Bar [EF30-35-1]



Photo 3 ストリング部の破断状況 [ES30-35-1]
Photos of Damaged String [ES30-35-1]

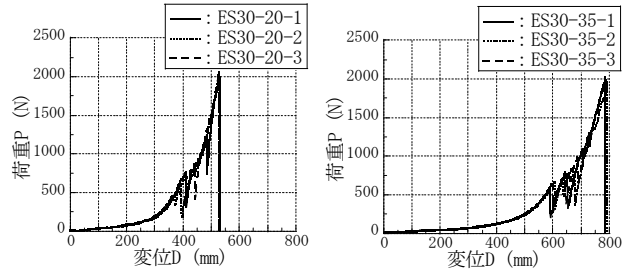


傾斜角 30 度の場合

Fig. 6 荷重-変位関係(フラットバー部)
Load - Displacement Relationship (Flat Bar)

Table 3 最大耐力一覧(フラットバー部)
Maximum Strength (Flat Bar)

傾斜角30度の場合			
試験体名称	最大耐力(N)	試験体名称	最大耐力(N)
EF30-20-1	4823	EF30-35-1	4724
EF30-20-2	4937	EF30-35-2	4629
EF30-20-3	4847	EF30-35-3	4620
特性値 [-σ/2]	4838	特性値 [-σ/2]	4628
傾斜角0度の場合			
試験体名称	最大耐力(N)	試験体名称	最大耐力(N)
EF00-20-1	4946	EF00-35-1	4392
EF00-20-2	4835	EF00-35-2	4277
EF00-20-3	4867	EF00-35-3	4129
特性値 [-σ/2]	4854	特性値 [-σ/2]	4200

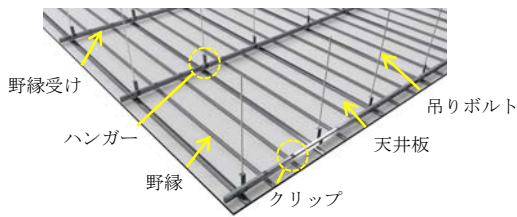


傾斜角 30 度の場合

Fig. 7 荷重-変位関係(ストリング部)
Load - Displacement Relationship (String)

Table 4 最大耐力一覧(ストリング部)
Maximum Strength (String)

傾斜角30度の場合			
試験体名称	最大耐力(N)	試験体名称	最大耐力(N)
ES30-20-1	1997	ES30-35-1	2017
ES30-20-2	2062	ES30-35-2	1955
ES30-20-3	2037	ES30-35-3	2022
特性値 [-σ/2]	2015	特性値 [-σ/2]	1979
傾斜角0度の場合			
試験体名称	最大耐力(N)	試験体名称	最大耐力(N)
ES00-20-1	1790	ES00-35-1	1480
ES00-20-2	1837	ES00-35-2	1530
ES00-20-3	1868	ES00-35-3	1472
特性値 [-σ/2]	1812	特性値 [-σ/2]	1478



[天井形状]

○大きさ(水平投影面積)

・フラットバー+ネットタイプ : 3.90m×6.30m [A3=24.57m²]
(3スパン@1200×2スパン@3000)

・ストリングタイプ : 3.00m×6.30m [A3=18.90m²]
(3スパン@900×2スパン@3000)

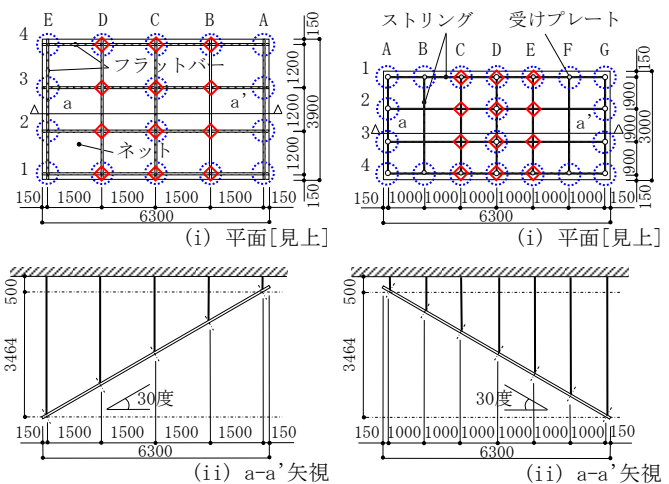
○吊り長さ 0.500m~3.964m

[構成部材]

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

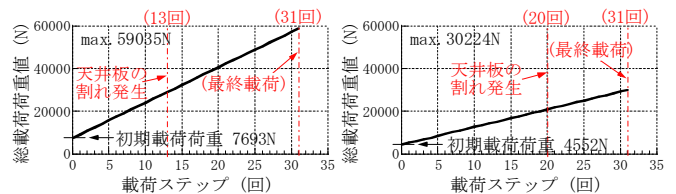
Fig. 8 天井の基本構成
Schematic of Ceiling with Steel Furring

は、「フラットバー+ネットタイプ」の場合で785kg, 「ストリングタイプ」の場合で464kgとなる。上記仕様の在来工法天井に「FSC2」を適用した試験体の概要をFig. 9に示す。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算出し、天井面の変位(鉛直方向)は同



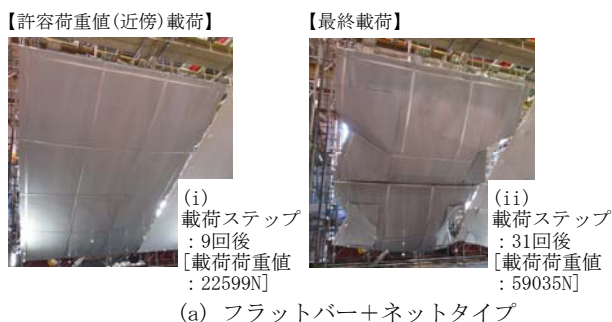
◇: 計測位置, ○: 貫通ボルト取付位置
(a) フラットバー+ネットタイプ (b) ストリングタイプ

Fig. 9 試験体概要
Outline of Test Specimen

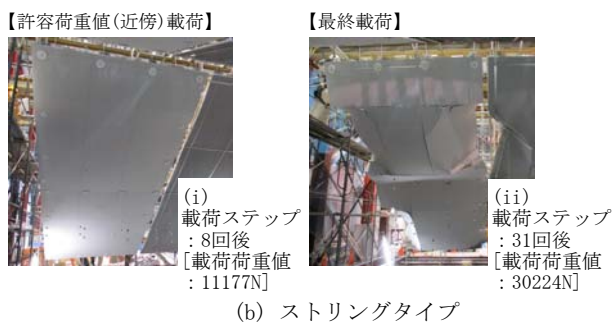


(a) フラットバー+ネットタイプ (b) ストリングタイプ

Fig. 10 載荷ステップと総載荷荷重値の関係
Number of Steps - Total Load Relationship



(a) フラットバー+ネットタイプ



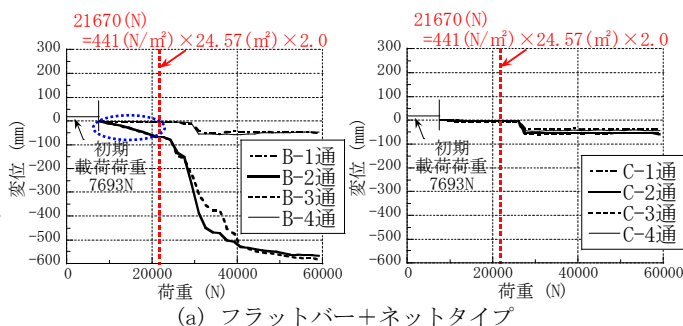
(b) スtringタイプ

Photo 4 試験状況

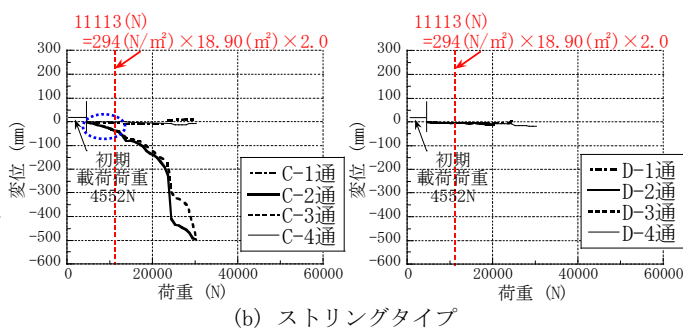
Test Specimen at Typical Loading Step

図に示す位置(計12箇所[◇印])に設置した変位計によって計測した。本試験は「FSC2」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状態、すなわち「FSC2天井質量」を初期荷重として「FSC2」に作用させた状態を、試験の初期状態として行っている。

3.4.2 試験結果 荷重ステップと「FSC2天井質量」を含む総載荷荷重値との関係をFig. 10に、試験状況をPhoto 4にそれぞれ示す。いずれの試験においても荷重ステップは最大31回とし、最終荷重ステップ時の総載荷荷重値は「フラットバー+ネットタイプ」の場合で59035N、「stringタイプ」の場合で30224Nとした。同図には参考のため、天井板に割れが発生した際の荷重ステップを併記している。天井面における荷重-変位関係(抜粋)をFig. 11に示す。同図には、後述の4.2節で示す許容荷重値、すなわち「フラットバー+ネットタイプ」の場合は45kg/m²に相当する載荷荷重値(441N/m²)、「stringタイプ」の場合は30kg/m²に相当する載荷荷重値(294N/m²)、それぞれの値に試験体面積と衝撃係数(2.0)を乗じた値を併記している。「フラットバー+ネットタイプ」、「stringタイプ」共に、Photo 4に示す「許容荷重値(近傍)載荷」までの範囲を対象とした荷重-変位関係は、Fig. 11の○破線部に示す通り概ね線形で、且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。荷重-変位関係が概ね線形であることから、「FSC2」で用いる衝撃荷重を式(1)で算定することは妥当であるといえる。なお、両タイプ共、Photo 4の「最終荷重」時では天井板の割れに伴う大きな変位が発生し、また吊りボルトや添えボルト、フラットバーの一部に変形が生じたものの、添えボルト取付金物・受けプレートの変形や、フラットバー・ネット・string・傾斜用ジョイントの破断は発生しなかった。



(a) フラットバー+ネットタイプ



(b) スtringタイプ

Fig. 11 荷重-変位関係(鉛直方向)

Load - Displacement Relationship in Vertical Direction

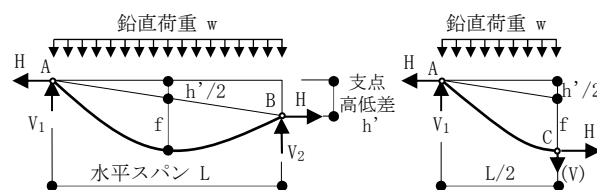


Fig. 12 高低差のあるケーブル反力
Cable Reaction Force with Vertical Difference

4. 許容耐力の算定

4.1 傾斜角による支点反力の影響 Fig. 12に示す通り、支点到高低差h'を有するフラットバー或いはstringが鉛直荷重wを受ける場合を考える。いま、両端の水平反力をH、鉛直反力をV₁、V₂とすれば、A点周りのモーメントの釣合い式から、鉛直反力V₂は、

$$wL \frac{L}{2} - h'H - V_2 L = 0$$

$$V_2 = \frac{wL}{2} - \frac{h'H}{L} \quad (3)$$

B点周りのモーメントの釣合い式から、鉛直反力V₁は、

$$wL \frac{L}{2} + h'H - V_1 L = 0$$

$$V_1 = \frac{wL}{2} + \frac{h'H}{L} \quad (4)$$

となる。また、C点周りのモーメントの釣合い式、

$$\frac{wL}{2} \frac{L}{4} + H \left(\frac{h'}{2} + f \right) - V_1 \frac{L}{2} = 0 \quad (5)$$

に式(4)を代入すると、水平反力Hは、

$$H = \frac{wL^2}{8f} \quad (6)$$

となり、式(4)と式(6)の関係から、鉛直反力 V_1 は、

$$V_1 = \frac{wL}{2} \left(1 + \frac{h'}{4f}\right) \quad (7)$$

となる。よって、高い側の鉛直反力 V_1 は、 $(1+h'/4f)$ 倍に割り増しされることになる。ただし、両端の支点が圧縮力を負担しない吊り材で支持されている場合、低い側の鉛直反力は $V_2 \geq 0$ となるため、高い側の鉛直反力 V_1 の最大値は、

$$V_1 = wL - V_2 \leq wL = 2 \left(\frac{wL}{2}\right) \quad (8)$$

となる。傾斜した天井最上部の鉛直反力は、式(8)より最大で2倍に増加すると考えられるが、後述のFig. 13に例示するように、その支配面積が一般部の約1/2であることを勘案すると、当該反力は一般部の鉛直反力と同程度と考えられる。

4.2 許容耐力と衝撃荷重の比較

要素試験から得られた許容耐力と衝撃荷重の比較をTable 5に一括して示す。同表中の許容耐力 P_a は、各要素試験から得られた「最大耐力(特性値 $[-\sigma/2]$)」、Fig. 13に示す各部材の支配面積 A および施工上のばらつきや構造

耐力上の安全余裕を勘案した材料安全率 a ²⁾とから算定した。同表にはユニット試験により得られた最大耐力に基づく許容耐力 P_a も併記している。なお、「フラットバー+ネットタイプ」、「ストリングタイプ」共に、同表・最右列に衝撃荷重 ($m \times 2.0$) に対する許容耐力 P_a の比率を示している。これらの結果から、全ての試験結果において許容耐力 P_a は衝撃荷重 ($m \times 2.0$) を上回っていることが確認できる。よって、「FSC2天井質量」 m が「フラットバー+ネットタイプ」の場合で 45kg/m^2 以下、「ストリングタイプ」の場合で 30kg/m^2 以下であれば、「FSC2」は衝撃荷重 ($m \times 2.0$) に対して必要な耐力を保持しているといえる。

なお、天井板(ロックウール吸音板9mm+石膏ボード9.5mm)と鋼製下地金物(野縁、野縁受け、クリップ、ハンガー等)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 $10 \sim 13\text{kg/m}^2$ である。当該質量は、「FSC2天井質量」 m に対して、「フラットバー+ネットタイプ」の場合では1/3程度、「ストリングタイプ」の場合では1/2程度の値となる。すなわち、「FSC2」の適用範囲は、一般的な在来工法天井質量の2~3倍程度までとなる。

Table 5 「FSC2」の許容耐力と衝撃荷重
Allowable Strength of FSC2 and Impact Load

(a) フラットバー+ネットタイプ

	特性値 [- $\sigma/2$] Pcha	支配面積 A (A1, A2, A3)	材料 安全率 a	許容耐力 Pa =Pcha/(A×a)	「FSC2天井質量」 (許容荷重) m	衝撃荷重 ^{*1)} $m \times 2.0$	許容耐力 衝撃荷重
要素試験 天井板取合部	18638N	一般部[A1] 2.880m ²	1.5	一般部 4314N/m ²	45kg/m ² (441N/m ²)	一般部 882N/m ²	4.89
		最上部 ^{*2)} [A1] 1.440m ²		最上部 8628N/m ²		最上部 ^{*3)} 1764N/m ²	4.89
要素試験 フラットバー部 [L _{0Y} ≤ 3000mm]	4200N	[A2] 2.160m ²		1296N/m ²		882N/m ²	1.46
		要素試験 フラットバー部 [L _{0Y} > 3000mm]		[A2] 2.880m ²			
ユニット試験	59035N	[A3] 24.57m ²	1601N/m ²		1.81		

*1) 衝撃荷重 = 「FSC2天井質量」(許容荷重) × 衝撃係数[2.0]

*2) 最上部の支配面積は、一般部の1/2とする。

*3) 最上部の衝撃荷重は、傾斜角の影響により最大2倍とする。

(b) ストリングタイプ

	特性値 [- $\sigma/2$] Pcha	支配面積 A (A1, A2, A3)	材料 安全率 a	許容耐力 Pa =Pcha/(A×a)	「FSC2天井質量」 (許容荷重) m	衝撃荷重 ^{*1)} $m \times 2.0$	許容耐力 衝撃荷重
要素試験 天井板取合部	18638N	一般部[A1] 1.890m ²	1.5	一般部 6574N/m ²	30kg/m ² (294N/m ²)	一般部 588N/m ²	11.18
		最上部 ^{*2)} [A1] 0.945m ²		最上部 13148N/m ²		最上部 ^{*3)} 1176N/m ²	11.18
要素試験 ストリング部	1478N	[A2] 1.485m ²		663N/m ²		588N/m ²	1.12
		ユニット試験		30224N			

*1) 衝撃荷重 = 「FSC2天井質量」(許容荷重) × 衝撃係数[2.0]

*2) 最上部の支配面積は、一般部の1/2とする。

*3) 最上部の衝撃荷重は、傾斜角の影響により最大2倍とする。

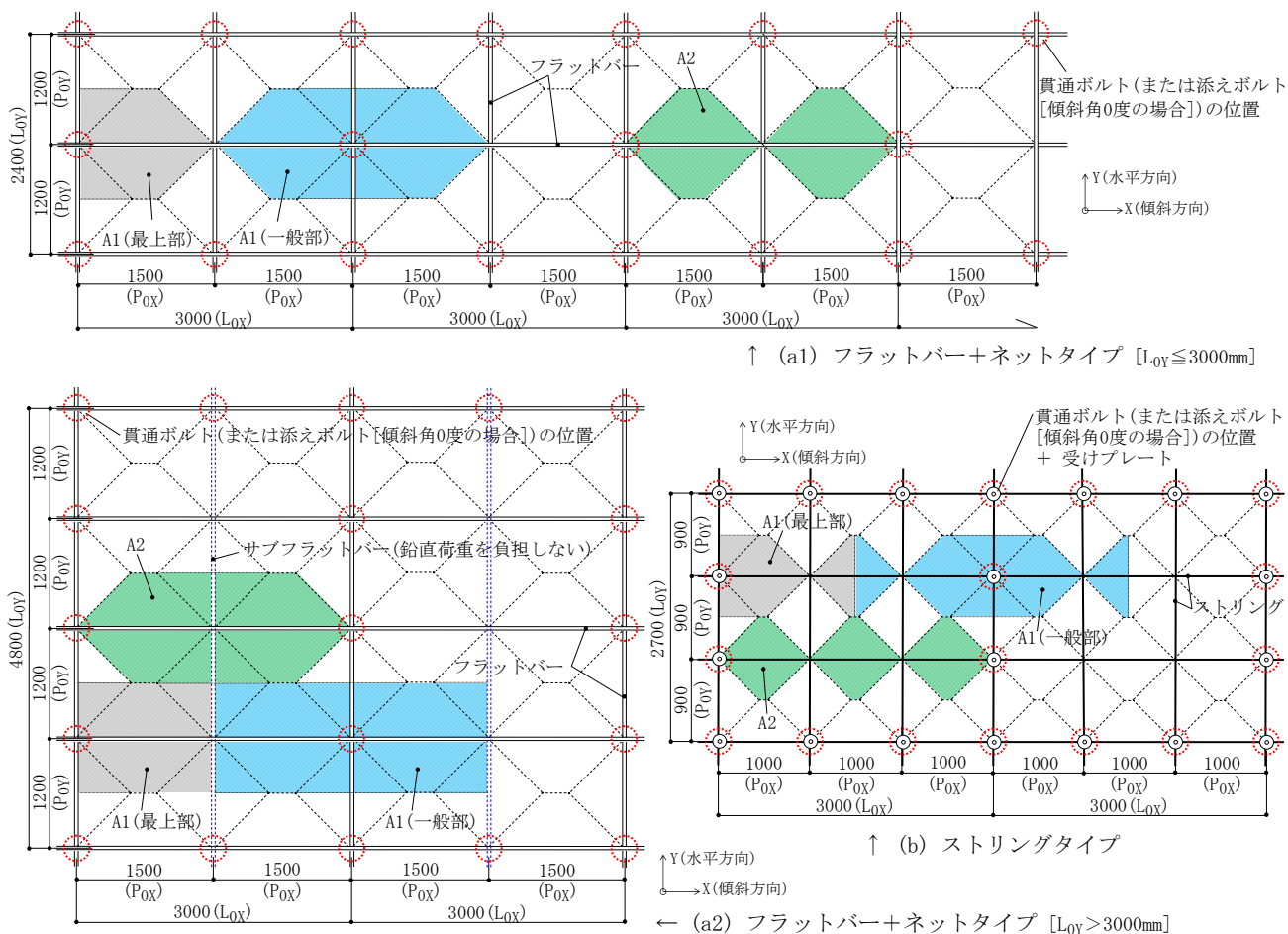


Fig. 13 「FSC2」各部材の支配面積
Control Area of Each Member of FSC2

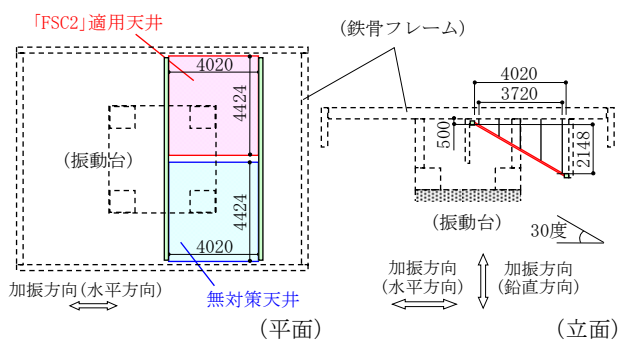


Fig. 14 振動台試験概要
Outline of Shaking Table Test

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	
		水平方向
2011年東北地方太平洋沖地震 K-NET仙台波	鉛直方向	1500cm/s ² 原波形[UD成分]×5.17倍
	水平方向	1636cm/s ² 原波形[NS成分]×2.00倍
1995年兵庫県南部地震 JMA神戸波	鉛直方向	664cm/s ² 原波形[UD成分]×2.00倍

5. 振動台試験

5.1 試験概要

本試験では実天井の落下現象を再現することによって、「FSC2」による落下防止効果を確認する。振動台試験の概要をFig. 14に示す。本試験で用いた天井はFig. 8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、「FSC2」適用天井と無対策天井とを

振動台上に併設する形で行った。なお、「FSC2」適用天井は、最大耐力が相対的に低い「ストリングタイプ」とした。試験体の大きさ(平面)は、いずれも4.42m×4.02m[水平投影面積]とし、天井板の傾斜方向を野縁受け方向とした。本試験に用いた地震波(振動台への入力波)の一覧をTable 6に、試験体設置状況をPhoto 5にそれぞれ示す。なお、本試験は水平1方向(天井板傾斜方向)と鉛直方向の2方向同時加振で行った。



Photo 5 試験体設置状況：「ストリングタイプ」
Test Specimen of “String” Type FSC2

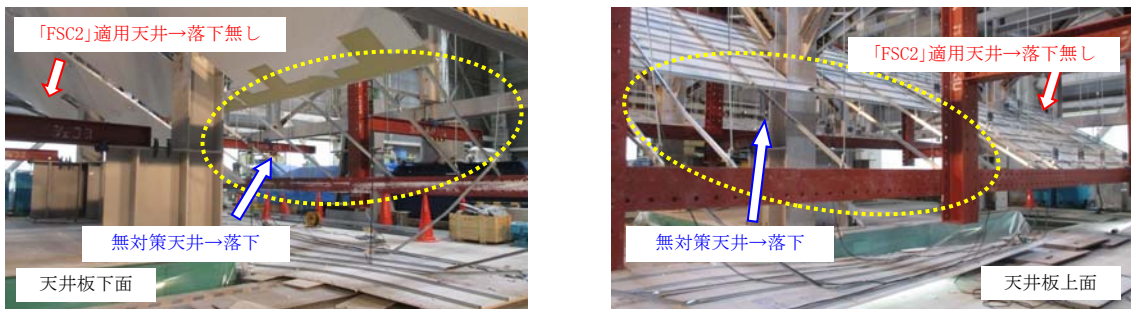


Photo 6 試験体崩壊状況：「ストリングタイプ」(無対策天井落下後)
Test Specimen of “String” Type FSC2 (After Falling of Conventional Ceiling)

5.2 試験結果

無対策天井落下後の状況をPhoto 6に示す。同天井が落下するような非常に大きな外力を作用させた場合でも、「FSC2」適用天井は落下しないことを確認した。

6. まとめ

「FSC2」の耐力確認、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) 水平な平面天井のみを対象とした従来構法「FSC」に対して、「FSC2」は傾斜角30度までの傾斜・曲面天井に適用が可能となることを確認した。
- 2) 静的加力試験(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「FSC2天井質量」が45kg/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、「FSC2」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。また、添えボルトの設置間隔を1800mm以下に限定していた従来構法「FSC」と比較して、「FSC2」は貫通ボルト(または添えボルト)の設置間隔を3000mmまで拡大できることになり、これによって「FSC2」の設計自由度、すなわち天井面への「FSC2」の割付自由度が大幅に高まることを確

認した。

- 3) 振動台試験の結果から、「FSC2」を適用することにより、在来工法天井の耐震安全性(落下防止効果)は格段に向上することを確認した。

水平な平面天井を含めた、傾斜・曲面天井への適用を可能とする天井落下防止構法「FSC2」を開発した。「FSC2」は劇場やホールなど、特殊な形状の天井が取り付けられることが多い大空間建物の天井落下を防止する技術である。今後は、傾斜角や貫通ボルト設置間隔などに代表される、本技術適用可能範囲のさらなる拡充を目指すと共に、「FSC2」の普及・展開に努めていく予定である。

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) 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(平成25年10月版), 2013.10
- 3) 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: 2009年度改訂版 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, 2009.12