

フジタ式耐震天井の性能評価法

田原 健一 佐々木康人
佐藤 幸博*1 佐々木 聡

概 要

吊り天井と周囲の壁等との間のクリアランスを設けず、天井に生じる地震力を周囲の壁等に負担させる「クリアランスなし天井」について筆者らは振動台実験及び簡易なモデル¹⁾や多質点系を用いたモデルによる応答解析²⁾により、地震応答性状を明らかにしてきた。

これらの知見を元に、筆者らは「フジタ式耐震天井」を開発した。フジタ式耐震天井は、吊り天井と周囲の壁等との間のクリアランスを設けず、ブレースを用いないことで、周囲の壁等に天井面に生じる地震力を躯体へと伝達することを基本概念としている。周囲の壁等との隙間が天井と周囲の壁等との衝突を招き、性能に影響するので、この隙間を小さくするための工夫として、天井下地材を端部で延長し、周囲の壁等と密着させている。

このフジタ式耐震天井の耐震設計法を確立するために、各要素の性能試験と、設計法の整備、試設計を通じた設計法の有効性の確認を行ったので、本報では、これらについて報告する。

Evaluation of seismic performance of Fujita's earthquake resistant ceiling

Abstract

'The non-clearance ceiling' is a type of suspended ceiling that uses walls, girder or other surrounding objects to support the seismic force of the ceiling. The previous paper reports the experimental results of shaking-table-tests and the result of numerical analysis following the result of these tests.

The Fujita's earthquake resistant ceiling has developed based on the knowledges of these results. This ceiling touches the edge of its furrings of the ceiling on surrounding objects tightly, in order not to make corrossions by the vibration caused by earthquakes. To touch edge of the furrings on surrounding objects, it has adjustable system on the furrings.

Some experiments were carried out to establish the seismic design method of Fujita's earthquake resistant ceiling. This paper reports the design method, result of experiment and a trial design of a virtual ceiling.

キーワード: 吊り天井、衝突、
地震応答解析、応答スペクトル

*1 東日本支社 建築技術部

§1. はじめに

1.1 背景

吊り天井において、周囲にクリアランスを有さず地震力を周囲の壁等に伝達させることで耐震性を確保する天井について、筆者らは地震応答性状を実験及び解析により検討し、報告した。これらの知見を踏まえてフジタ式耐震天井を開発したので、本報ではこの概要と各部の性能確認試験および設計法について報告する。

1.2 フジタ式耐震天井の概要

図 1 にフジタ式耐震天井の概要を示す。

本工法は、地震力を斜め部材(ブレース)に負担させるのではなく、天井端部を周囲の剛強な壁等に接触させることにより、地震力を躯体に伝達させることを基本概念とする。施工上生じる端部の隙間を極力なくすことを意図し、天井下地の端部を比較的短い延長材を用いて壁等に接触させている。端部の隙間をなくすことで、衝突による過大な衝撃力が生じないようにしている。

野縁と野縁受けは耐震クリップを用いて接合する。これは鉛直方向の支持能力および、野縁受け方向の水平剛性、耐力を確保することを目的としている。野縁については、比較的短い材を端部に使い、ジョイント材を用いた接合部で長さを微調整することで、周囲の壁等への接触をしやすくしている。野縁受けの端部では、野縁3本程度にまたがる長さの延長材を、野縁受け本体と背中合わせにビス留めする。この延長材の位置を微調整することで端部での周囲の壁等への接触をしやすくしている。また、野縁受けの接合箇所については、剛性と耐力の確保を目的として、ジョイント材を用いず、野縁受けを背中合わせとしたうえでビス留めとしている。

なお、野縁のおよび野縁受けの先端にはランナーをかぶせる。これは、応力集中の緩和と接触部の横ずれに対する滑動性を良好とすることを目的としている。

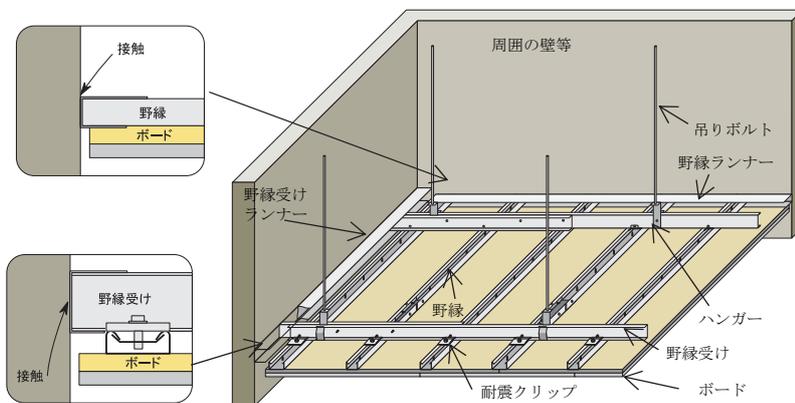


図 1 フジタ式耐震天井の概要

1.3 力の伝達

天井面に作用する地震力の、周囲の壁等までの伝達経路の概要を図 2 に示す。

本工法では、天井面(主としてボード)に生じる地震による慣性力を、野縁または野縁受けを介して周囲の壁等へと伝えている。野縁方向では、ボード各部に生じる慣性力がボードビスを介して野縁に伝わる(図 2 (a))。ボードからの慣性力による野縁の軸力は端部が最大となり、これが周囲の壁等に伝わる。野縁受け方向では、ボード各部に生じる慣性力はまず野縁に伝わり、野縁・野縁受け接合部(クリップ)を介して野縁受けに伝わる(図 2 (b))。野縁受けまでの力の伝達機構はブレース天井と同様である。野縁受けに生じる軸力は端部が最大となり、周囲の壁等に伝わる。

なお、周囲の壁等と天井とは接触しているが接合はされておらず、天井面の引張力は生じない構造である。

§2. 設計法

2.1 剛性評価

告示³⁾を参考に、剛と見なせる範囲は天井の水平方向の振動数が 10 Hz 以上となる場合であると考え、その剛性を確保することを基本方針とする。

野縁方向は野縁の軸剛性は断面積、長さ、ヤング率から評価するが、天井面の重心位置に集中質量があると考え、野縁の応力分布を三角形分布とした変形をもって評価する。野縁のジョイントは、野縁とせっこうボードが初期剛性を評価するレベルの変形において十分に一体化し、かつ千鳥配置となっているため考慮しない。

野縁受け方向は野縁受けの軸剛性、野縁・野縁受け接合部、野縁受けのジョイントの直列剛性により評価する。野縁受け等の剛性は野縁と同様に三角形の応力分布として評価する。野縁・野縁受け接合部およびジョイントの剛性は次章の試験結果を用いる。

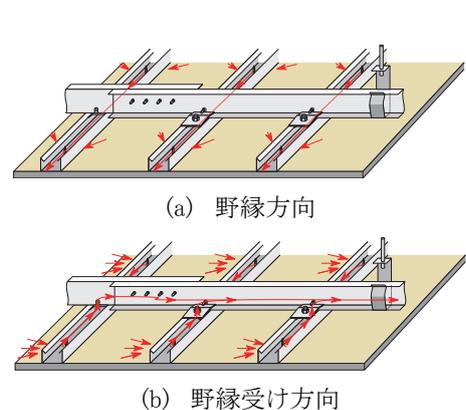


図 2 力の流れ

周囲の壁等が十分な剛性を必ずしも有していると判断できない場合、適宜剛性を評価し、天井の水平剛性との直列和を用いて全体の剛性とする。

2.2 外力評価

天井は剛とみなすことができる場合、吊り元の加速度に対する天井の加速度の比(増幅率)は1、水平震度=0.5(表 1 参照)だが、実験と解析からこれを推定する。実験(既報¹⁾)では増幅率が1.21倍から1.99倍であった。天井を連結した多質点でモデル化したモデルによる応答解析(既報²⁾)では、3種類の地震波を用いた検討の結果、増幅率は最大で1.14倍であった。

以上を考慮し、天井での増幅率を2とする。

2.3 耐力評価

各部の応力を適切に評価し、次章の試験結果を用いて評価する。ビスのせん断耐力は文献⁴⁾を元に評価する。周囲の壁等の耐力についても、適宜検討する。

§3. 試設計

3.1 設計対象、設計条件

試設計の対象は中層建物(建物の1次固有周期が地盤周期より短い: $T < T_G$)の最上階にあり15 m × 15 mの室内に設けられた水平な吊り天井とし、フジタ式耐震天井の仕様とする。野縁は303mmピッチ、野縁受けは910mmピッチとし、耐震クリップにより接合する。天井面構成部材の単位面積当たりの質量20 kgとする。図3に概要、表2に設計条件を示す。

3.2 要素の性能

(1) 野縁方向の性能

試験体図面を図4に示す。試験は、幅1.82 m、長さ3.9 mの大きさの試験体と、約1スパン分の合板($t = 12$ mm)を用いた加力部を、野縁を介して一体化させたものを用いる。試験体の天井の仕様はせつこうボード12.5 mm一枚貼りとし、錘等は載せていない。

図5に実験結果から得られた荷重変形関係を示す。最大耐力まで、剛性劣化もなく安定した履歴となっている。最大耐力は37.0 kNであった。試験体の幅は1.82 mであるため、単位幅あたりの最大耐力は20.0 kN/mである。最大耐力時を概ね損傷時と見なせるので、損傷時荷重は20.0 kN/mとする。

表 1 告示による水平震度

設置階		周期帯		
		1次共振	2次共振	剛
上層階	$T_1 \leq T_G$	$2.2r_1Z$	$1.1r_2Z$	0.50
	$T_G < T_1$	$2.2(T_G/T_1)Z$		
中層階	$T_1 \leq T_G$	$1.3r_1Z$	0.66Z	
	$T_G < T_1$	$1.3(T_G/T_1)Z$		
下層階	—	0.50		

ここで、

$$r_1 = \min\left(\frac{1+0.125(N-1)}{1.5}, 1.0\right), \quad r_2 = \min(0.2N, 1.0), \quad Z: \text{地域係数}$$

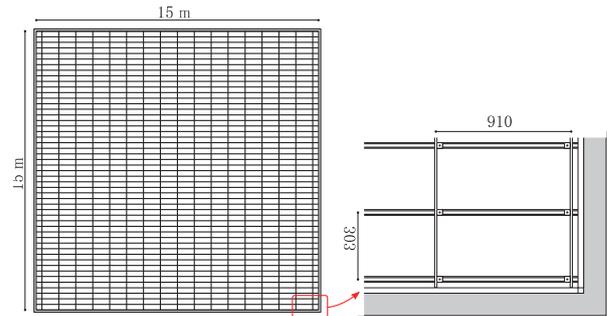


図 3 設計対象

表 2 設計条件

野縁	JIS19型(CS-19、CW-19) ピッチ303 mm(50本)、断面積: $A = 35 \text{ mm}^2$
野縁受け	JIS19型(CC-19) ピッチ910 mm(17本)、断面積: $A = 69 \text{ mm}^2$
クリップ	耐震クリップ
天井質量	20 kg/m ² (せつこうボード+岩綿吸音板+その他)
周囲の壁等	RC壁(十分な剛性、耐力を有する)

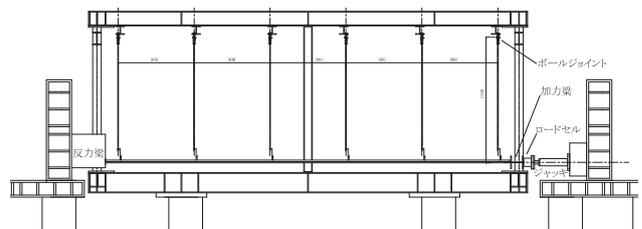


図 4 野縁方向試験の試験体

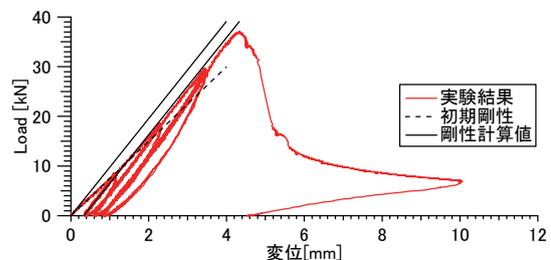


図 5 野縁方向試験の結果

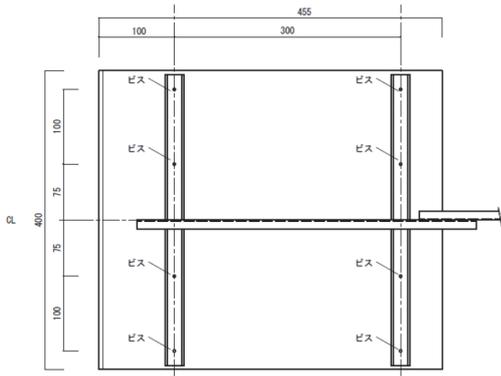


図 6 野縁・野縁受け接合部試験の試験体

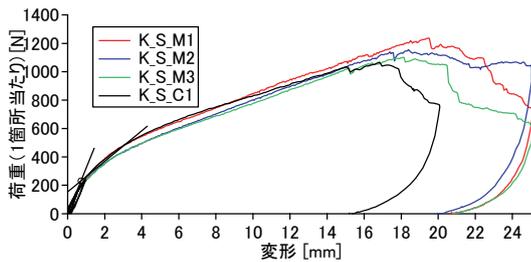
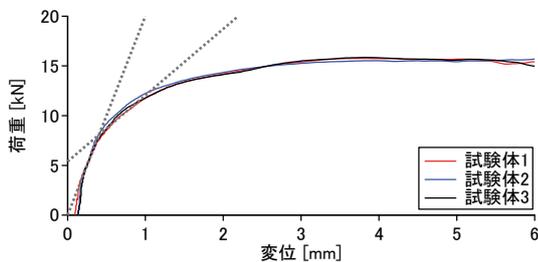


図 7 野縁・野縁受け接合部試験の結果

表 3 野縁・野縁受け接合部試験の結果一覧

加力方法	試験体	初期剛性	損傷時荷重	最大荷重
単調	K S M1	320 N/mm	268 N	1236 N
	K S M2	310 N/mm	223 N	1155 N
	K S M3	310 N/mm	216 N	1101 N
繰返し	平均	313 N/mm	236 N	1164 N



(a) 荷重変形関係



(b) 実験後の試験体

図 8 野縁受けのビスジョイント試験の結果

表 4 野縁受けのビスジョイント試験の結果一覧

	試験体全体	ビス1本あたり
初期剛性	20 kN/mm	5 kN/mm
損傷時荷重	8.1 kN	2.0 kN
最大荷重	15.8 kN	3.9 kN

(2) 野縁受け方向の性能

○野縁・野縁受け接合部

試験体形状を図 6 に示す。450 × 400 mm のボードに、長さ 380 mm の野縁を 2 本取り付け、その上に長さ 400 mm の野縁受けをクリップで設置しドリルねじ (JIS 品 φ4.2) で留める。

本実験ではボードを固定し、野縁受けまたは延長材の端部を加力する。加力パターンは一方方向加力及び正負交番繰返し載荷である。

図 7 に得られた荷重変形関係を示す。試験体には接合部が 2 箇所あるが、グラフは 1 箇所あたりに換算して示す。実験結果より求めた損傷時荷重と初期剛性を表 2 に示す。

以上の実験結果より、設計で使用する接合部 1 箇所あたりの許容荷重は損傷時荷重 (最小値) の 2/3 倍とする。許容荷重と初期剛性を以下のように定める。

許容荷重	144 N
初期剛性	313 N/mm

○野縁受けのビスジョイント

野縁受け 2 本を 4 本のビスを用いて下孔を開けずに接合 (端空きおよびビスピッチを 20 mm) した。野縁受けの端部は試験機のチャックで挟めるよう加工した。荷重と 2 本の野縁受けの相対変位を計測した。

実験結果のグラフを

図 8(a) に示す。図中に初期剛性と、初期剛性の 1/3 の勾配をもつ、最も耐力の低い試験体の荷重変形関係の接線を示す。損傷時荷重は初期剛性この接線の交点の荷重値とした。

実験後の試験体の写真を

図 8(b) に示す。

以上の実験結果より、設計で使用するビス 1 本あたりの許容荷重は損傷時荷重の 2/3 倍とする。許容荷重と初期剛性を以下のように定める。

許容荷重	1.35 kN
初期剛性	5 kN/mm

3.3 剛性の評価

(1) 野縁方向の軸剛性と固有周期

全質量が野縁方向中央部に集中しているとして、全長 (12.2m) の 1/2 の長さの軸剛性とする。

野縁の軸力は三角形分布であると仮定する。端部から x の位置の荷重を $(l-x)w$ とすると、ひずみは、

$$(l-x)w / EA$$

となる。よって中央(端部から $l/2$)の位置の変形は

$$\delta = \int_0^{l/2} \frac{(l-x)w}{EA} dx = \frac{3wl^2}{8EA}$$

合計の軸力($P = wl$)と重心位置における変位から求めた野縁1本あたりの剛性 K_M は

$$K_M = \frac{P}{\delta} = \frac{8EA}{3l} = \frac{8 \times 205000 \times 35}{3 \times 15000} = 1265 \text{ N/mm}$$

よって、全体の剛性 K_x は、

$$K_x = 50K_M = 63250 \text{ N/mm}$$

天井全体の質量は、

$$M = 15 \times 15 \times 20 = 4500 \text{ kg}$$

天井の野縁方向の固有周期 T_x は

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_x}} = 2\pi \sqrt{\frac{4.5}{63250}} = 0.053 \text{ s} < 0.1$$

天井の固有周期は0.1s以下であり、剛とみなすせる。

(2) 野縁受け方向の軸剛性と固有周期

天井面に生じた慣性力は野縁およびクリップを介して野縁受けに軸力として導入される。軸力分布は三角形分布であると仮定する。

野縁受け1本あたりの剛性 K_{CC} は

$$K_{CC} = \frac{P}{\delta} = \frac{8EA}{3l} = 2515 \text{ N/mm}$$

野縁、野縁受け接合部の剛性は、実験結果より評価する。1箇所あたりの剛性は

$$K_J = 313 \text{ N/mm}$$

野縁受け継手の剛性は実験結果よりビス1本当たり5000 N/mmとする。野縁受けの継手は野縁受け1本につき5箇所が存在する(図9)

地震時の軸力分布を三角形分布と考えると各継手の変形の比率は図中のようになる。すなわち継手5箇所の変形の合計は継手1箇所の変形の2.5倍となる。1箇所当たり4本のビスを用いるとき、1列の野縁受けの剛性 K_{CJ} は

$$K_{CJ} = 5000 \times 4 / 2.5 = 8000 \text{ N/mm}$$

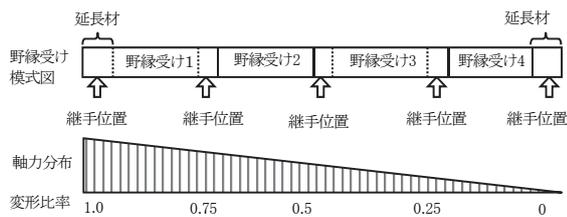


図9 野縁受け継手の変形比率

(3) 野縁受け方向の全体の剛性

全体の剛性 K_y は、 K_{CC} 、 K_J 、 K_{CJ} の直列剛性なので、

$$K_y = \left(\frac{1}{17K_{CC}} + \frac{1}{17 \times 50 \times K_J} + \frac{1}{17K_{CJ}} \right)^{-1}$$

$$= 28985 \text{ N/mm}$$

天井の野縁受け方向の固有周期 T_y は

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_y}} = 2\pi \sqrt{\frac{4.5}{63250}} = 0.078 \text{ s} < 0.1$$

天井の固有周期は0.1s以下であり、剛とみなせる。

3.4 外力の設定

天井での増幅率を2とする。よって、水平震度 k は吊元の水平震度(表1)より、

$$k = 2.0 \times 0.5 = 1.0$$

野縁方向水平地震力 F_y は以下の通りとなる。

$$F = k \times M \times g = 1.0 \times (4.5 \times 9.8 \text{ m/s}^2) = 44.1 \text{ kN}$$

3.5 耐力の評価

(1) 野縁方向

○野縁の降伏

野縁の本数は50本なので、1本あたりの荷重は

$$N = F/50 = 882 \text{ N}$$

野縁1本あたりの降伏荷重 N_{my} は、

$$N_{my} = \sigma_y \times A = 205 \times 35 = 7175 \text{ N/本}$$

以上より、

$$N_{my} > N \quad \therefore \text{OK}$$

○天井面の全体座屈

天井面の全体座屈に関する許容耐力 P_a (単位幅あたり)は実験結果(2.2)より、

$$P_a = 13.3 \text{ kN/m}$$

天井に作用する荷重は、単位幅あたり、

$$P = F/15 = 44.1/15 = 2.94 \text{ kN/m}$$

以上より、

$$P_a > P \quad \therefore \text{OK}$$

(2) 野縁受け方向

○野縁受けの降伏

野縁受けの本数は17本なので、1本あたりの荷重は

$$N = F/17 = 42.1/17 = 2.48 \text{ kN}$$

野縁受けの断面積は69 mm²なので降伏耐力 N_y は、

$$N_y = \sigma_y \times A = 69 \times 205/1000 = 14.1 \text{ kN/本}$$

以上より、

$$N_y > N \quad \therefore \text{OK}$$

○野縁受けの座屈

野縁受け 1 本あたりの荷重は、

$$N = 2.48 \text{ kN}$$

野縁と野縁の間隔を座屈長さとした座屈耐力 N_{cr} は、

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 \times 2.05 \times 10^5 \times 835}{30^2} = 18.4 \text{ kN}$$

座屈耐力の 2/3 を許容耐力と考えると、

$$2/3 N_{cr} > N \quad \therefore \text{OK}$$

○野縁受け継手

野縁受け 1 本あたりの荷重は、

$$N = 2.48 \text{ kN}$$

実験よりビス 1 本あたりの許容せん断力は 1.35 kN なので、ビス 4 本の継手の許容せん断力 Q_a は、

$$Q_a = 4 \times 1.35 = 45.4 \text{ kN}$$

以上より、 $Q_a > N \quad \therefore \text{OK}$

○野縁野縁受け接合部

野縁受けの本数は 17 本、野縁の本数は 50 本なので、1 箇所あたりの荷重は

$$Q = F / (17 \times 50) = 42.1 / (17 \times 50) = 49.5 \text{ N}$$

実験結果より許容せん断力 Q_a は

$$Q_a = 157 \text{ N}$$

以上より、

$$Q_a > Q \quad \therefore \text{OK}$$

(3) ボードビス

ボードビスの第一折れ点耐力は下式で評価される⁴⁾。

$$q_y = 0.5 A_{sc} \sqrt{\sigma_{c,w} E_b} = 479 \text{ N}$$

ここで、ビスの軸部断面積: $A_{sc} = 12.3 \text{ N/mm}^2$

せっこうボードのヤング率: $E_b = 2000 \text{ N/mm}^2$

許容せん断耐力は、

$$2/3 q_y = 319 \text{ N}$$

単位面積当たりの水平力は

$$20 \times 9.8 = 196 \text{ N}$$

単位面積当たりのビス本数は 22 本なので、

$$22 \times 319 = 7025 > 196 \text{ N} \quad \therefore \text{OK}$$

§4. まとめ

本論文では、クリアランスなし天井の一種であるフジタ式耐震天井について、以下の内容を示した。

- 1) フジタ式耐震天井の基本概念と天井下地の設計法を示した。
- 2) 15 m 四方の特定天井の面積に該当する天井を例に設計例を示した。

- 3) 野縁方向の加力実験と、野縁受け方向の性能に影響する各部の実験結果により、初期剛性と許容荷重を示した。

謝辞 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系教授 元結正次郎先生には、検討の実施や本報の執筆にいたるまで懇切丁寧なご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田原健一、佐々木康人、佐藤幸博、佐々木聡: クリアランスを有さない天井の地震応答性状 その1・その2、フジタ技術研究報告、第50号、2014年
- 2) 田原健一、佐々木康人、佐藤幸博、佐々木聡: クリアランスを有さない天井の地震応答性状 その3、フジタ技術研究報告、第51号、2015年
- 3) 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法等を定める件(平成25年国土交通省告示第771号)、ほか、官報号外第170号、2013年8月5日
- 4) 天野聡志、元結正次郎、佐々木康人、佐藤幸博、田原健一: ビス接合部における最大耐力の推定—非構造部材におけるビス接合部の力学的性状に関する研究 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.891-894、2015.9

ひとこと

クリアランスなし天井はシンプルでありながら十分な耐震性を有しています。この性能に着目し、これまでフジタ式耐震天井の開発を進めて参りましたが、遂に実用化にこぎつきました事を喜ばしく思う次第です。



田原 健一