

## クリアランスを有さない天井の地震応答性状 その3 応答解析による天井の変形と応力分布の検討

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」についての一連の研究の報告である。前報<sup>1)</sup>では、地震時の応答性状を明らかにすることを主な目的として振動台実験を行い、実験結果と、簡易なモデルを用いた解析の結果について報告している。本報では、この実験結果から得られた知見を基に、多質点系を用いたモデルによる応答解析を行った。はじめに、振動台実験の結果と解析結果と良く対応することを確認した。天井各部の加速度について、天井の衝突側端部の加速度は大きく、天井の重心位置付近では小さい分布形状となった。また、天井の端部や受け壁に生じる反力は、天井の重心位置に生じる加速度と天井の全質量の積に概ね一致することが明らかとなった。これにより、天井の重心位置に全体の質量を集約した単純なモデルを用いて重心位置の加速度を求め、天井の質量を乗じることで、設計用の荷重を評価できることが示された。

### Seismic Performance of Ceiling without Artificial Spacing to Surrounding Object Part 3: Analytical Study on Deformation and Stress of 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 using simple models following the result of these tests.

This paper reports on the results of the numerical analyses using multi-degree-of-freedom models. The analytical results and those of the tests correspond well. The acceleration at the edge of the ceiling was very large while that at the center of the ceiling was small. The maximum reaction force of the wall and ceiling was almost the same with the maximum acceleration at the center of the ceiling multiplied by the mass of the ceiling. This means that the analytical result of a simple model in which the ceiling was modeled with a SDOF system can evaluate the maximum load of the ceiling and the walls.

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 首都圏支社 建築技術部

## §1. はじめに

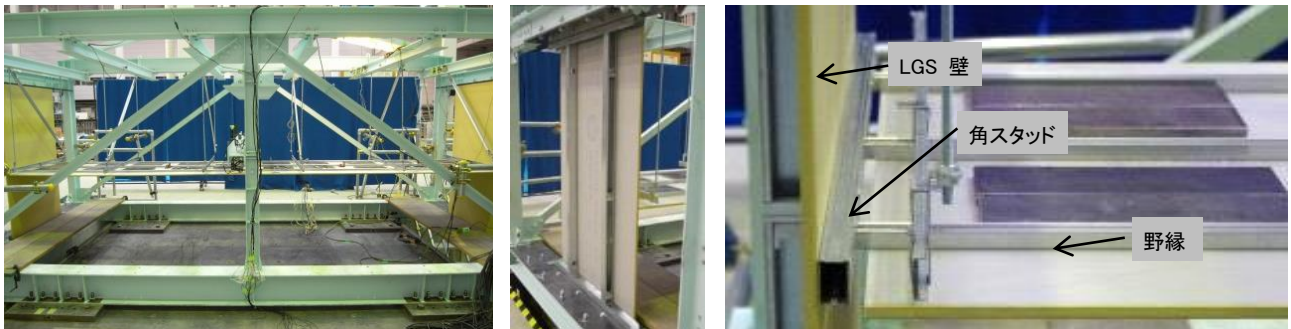
吊り天井の耐震性を考える上で、天井面に生じる地震力を適切に躯体に伝達させる必要があるが、その手段としては、屋根面または床スラブと天井面構成部材の間に設置したブレースにより躯体に伝達させる場合と、天井の周囲の壁等に負担させることで耐震性を確保する「クリアランスなし天井」とする場合が考えられる。前者については大型で天井高の高い天井(特定天井)を対象に平成25年に施行された国土交通省告示<sup>2)</sup>に詳細が規定されており、天井の周囲の壁等との接触を防ぐためにクリアランスを設けることが求められている。一方、後者のクリアランスなし天井についても、いくつかの研究<sup>例えば3,4)</sup>がなされているが、現時点で耐震設計法が十分に確立されてはいない。筆者らもこのクリアランスなし天井を対象として振動台実験を行い地震時の性状について検討を行っており、前報その1では実験の概要と結果について、その2では、この振動台実験の結果について比較的簡易なモデルを用いた時刻歴応答解析による評価と、スペクトル法による最大応答値の評価を行っている。しかし、前報で行った解析では、天井に生じる荷重や加速度の分布、天井が縮むことで生じる端部の隙間についてはモデルの特性上、表現できない。

そこで、天井を多数区間に分割し、それぞれを質点とばねで表現した多質点系を用いて解析を行った。本報では、天井の変形や荷重の分布について検討し、簡易モデルでも天井の最大荷重を評価しうることを示す。

## §2. 解析概要

本検討では、振動台実験で用いた天井試験体(図1(a)~(c))をおよそ1mごとに分割し、その区間の質量と、相互の区間の間の剛性を表すばねからなる、連続した質点系でモデル化した(図1(d))。解析にはADAM-DYNA ver. 6.3を用いた。解析のモデルの条件について以下にまとめる。

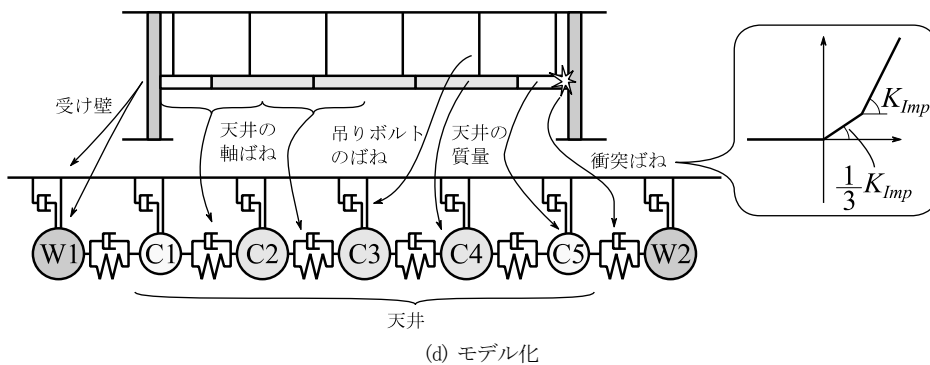
- 1) 天井の質量は5つの質点に集約する。中央の3つの質点(C2、C3、C4)の質量は全質量の1/4、両端の質点(C1、C5)の質量は全質量の1/8(他の質点の1/2)とした。
- 2) 天井の質点相互をばねで連結した。連結ばねの剛性は天井試験体全長の1/4の長さの軸剛性とした。軸剛性は野縁の断面のみ考慮して評価した。
- 3) 天井の軸ばねの減衰定数は10%とした。
- 4) 両側の受け壁は質量、剛性、減衰を有する1自由度系にそれぞれモデル化した。
- 5) 吊りボルトの剛性は振り子剛性、減衰は振動台実験の試験体での自由振動波形から計算した値とし、5つの天井の質点に接続するダッシュポットに均等分配した。
- 6) 衝突ばねは2折れ線でモデル化した。衝突の瞬間の計算の安定性を考慮し、緩和のための1次剛性を設けた。2次剛性 $K_{Imp}$ を、上記2)の分割長の1/2の長さ(全長の1/8)の軸剛性として、1次剛性を2次剛性の1/3とした。
- 7) 衝突部の減衰は、反発係数0.9に相当する減衰とした。
- 8) 時間刻みは $10^{-5}$ 秒とした。



(a) 対象とした試験体(全景)

(b) 天井を受けるLGS壁

(c) 天井端部の状況



(d) モデル化

図1 試験体モデル

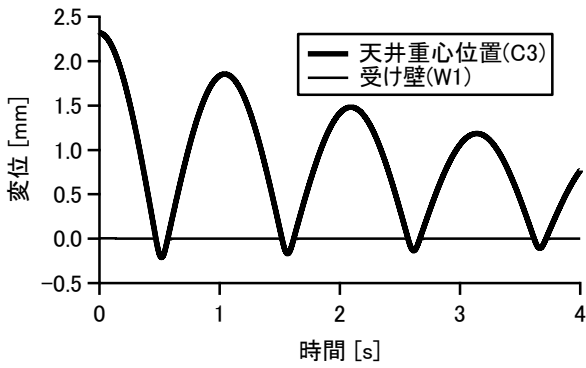


図2 重心位置と受け壁の変位の時刻歴

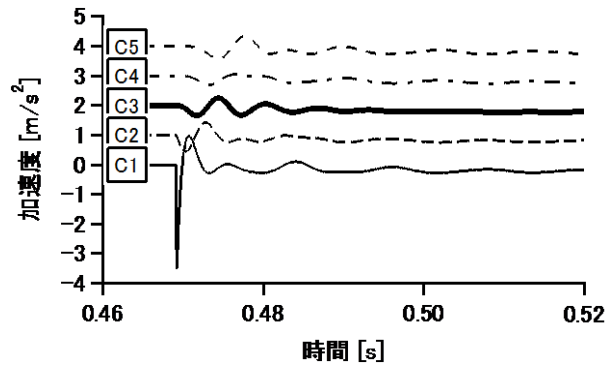


図3 天井各部の加速度の時刻歴

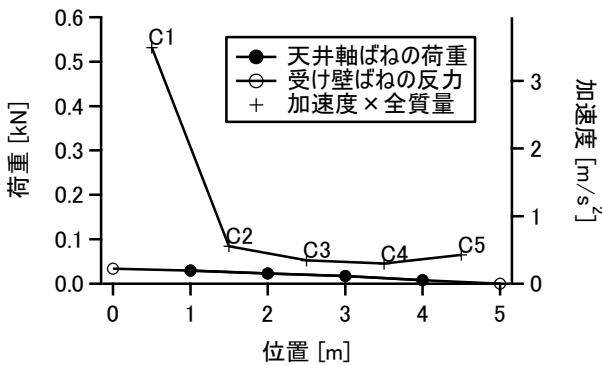


図4 各部の荷重と加速度

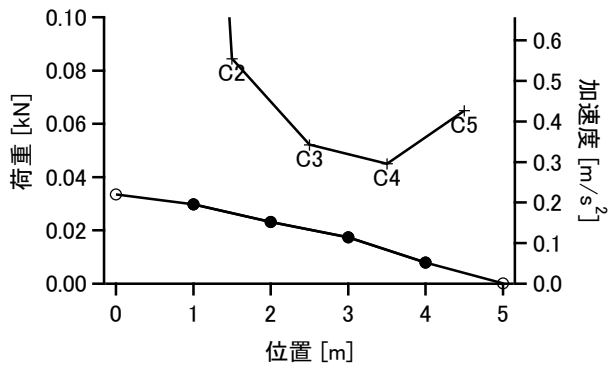


図5 各部の荷重と加速度(左図の拡大)

表1 各部の加速度

	加速度[m/s <sup>2</sup> ]	加速度×全質量 [N]
C1	3.50	531
C2	0.56	84
C3	0.34	52
C4	0.30	45
C5	0.43	65

表2 各部の荷重

		荷重 [N]
受け壁	W1	34
天井	C1-C2間	30
	C2-C3間	23
	C3-C4間	17
	C4-C5間	8
最大荷重		34

### §3. 解析の結果

#### 3.1 変位を与えて開放した場合 (単純衝突)

単純な挙動を解析し、整合性を確認することで、解析モデルの妥当性を検討する。試験体の片側の受け壁W2を除去した状態で天井をW2の方向に引いて離間させ、その後変位を解放することで、受け壁W1と天井が衝突する状況を模擬した解析を行った。

解析結果のうち、天井の重心位置と受け壁の変位の時刻歴を図2に示す。2.3mmの変位を与えられた状態(時間0)から、吊りボルトの復元力により変位し受け壁と衝突、短時間受け壁と同時に変位し、反発する状況が再現された。振幅比から求まる反発係数は、衝突ばねの減衰から求まる理論値0.9と対応した。

図3に天井の各質点の加速度の時刻歴を示す。C1からC5は天井を模す5つの質点の加速度時刻歴である(最初に天井と受け壁が衝突する付近の時刻を拡大)。C1から順にC5まで順次加速度が伝達している状況が分かる。また、C1では衝突時に大きい加速度が生じたが、それ以外の質点ではC1よりかなり小さい加速度となった。

次に、天井各部分の荷重と加速度の分布について検討する。図4は各質点を連結するばねと受け壁のばねの最大荷重と、各質点の加速度に天井全体の質量を乗じた値を示している(右縦軸は各質点の加速度と対応)。横軸は衝突する天井端部からの距離である。図5は同図の縦軸の小さい範囲を拡大したものである。また、表1に質点の加速度の最大値、表2に天井のばねの荷重の最大値を示した。天井の荷重は衝突側に近づくほど大きくなり、端部が最大とな

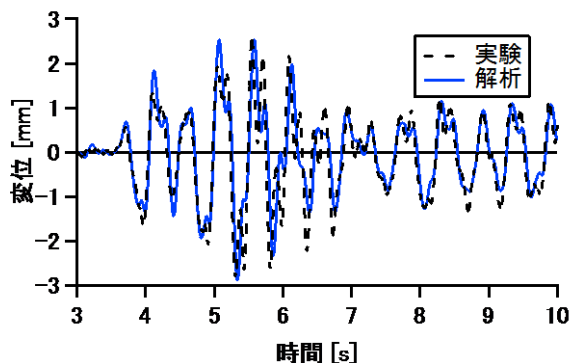


図6 重心位置の変位の時刻歴

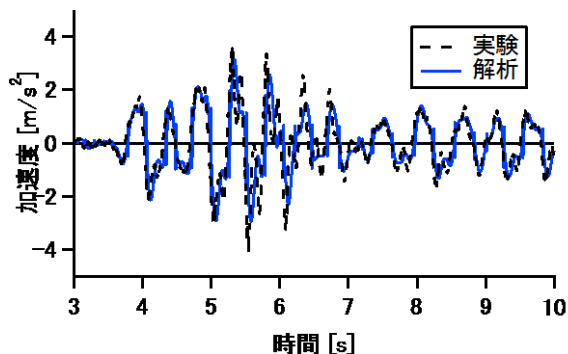


図7 重心位置の加速度の時刻歴

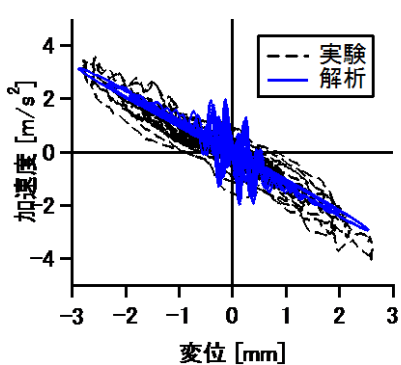


図8 重心位置(C3)の加速度変位関係

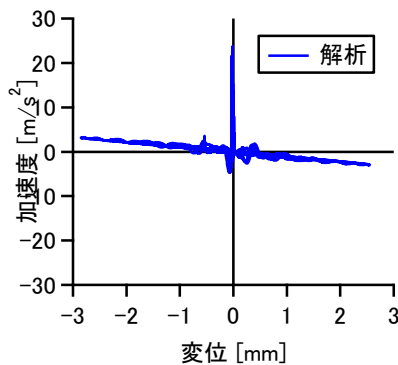


図9 端部(C1)の加速度変位関係

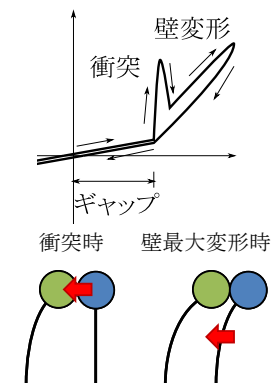


図10 加速度の2つのピーク

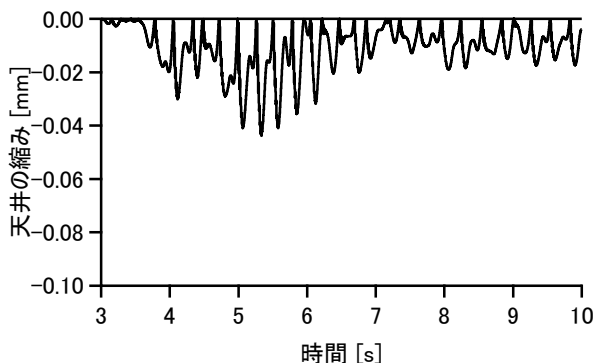


図11 天井の軸縮み

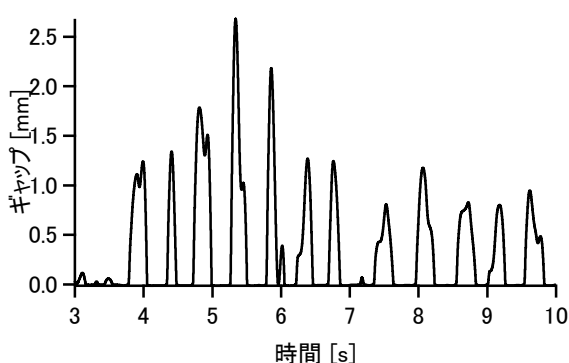


図12 天井端部と受け壁のギャップ

る。また、受け壁の荷重は天井端部よりさらに大きい値(34 N)となった。また、中央の質点(重心位置)であるC3の加速度に天井の質量を乗じた値は52 Nとなり、最大荷重をやや上回る値になっている。

### 3.2 地震応答(振動台実験)

次に、振動台実験の結果を、本解析モデルを用いて再現する。解析には振動台上で観測された加速度波形を用い、両側に受け壁が設置された状態で行う。

はじめに、実験結果との対応を確認する。図6は天井重心位置の変位の時刻歴、図7は加速度の時刻歴を示したものである。重心位置の加速度、変位ともに実験結果と解析

結果は良好に一致していることが分かる。

図8は天井の重心位置の加速度変位関係、図9は天井の端部の加速度変位関係について、解析結果と実験結果を示したものである。図8、図9を見ると、変位0付近で、加速度の突出が見られる。これは天井と受け壁の衝突時に生じたものである(図10参照)。この衝突時の加速度の突出は、天井端部C1では大きい、重心位置では小さくなっており、最大変位時に生じている受け壁からの反力に起因する加速度より小さくなっていることが分かる。重心位置における加速度の突出は実験、解析ともに現れている。

図11に天井の軸縮み、図12に天井端部と受け壁の間の隙間(ギャップ)の時刻歴を示す。受け壁と天井の端部の間

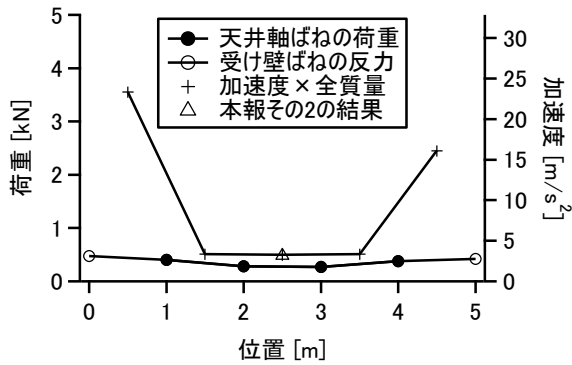


図13 各部の荷重と加速度

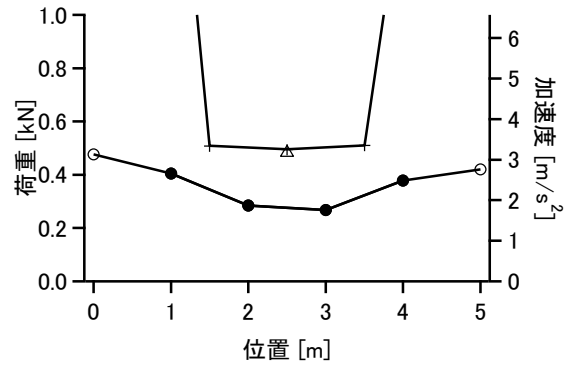


図14 各部の荷重と加速度(左図の拡大)

表3 各質点の加速度

	絶対値		加速度×全質量 [N]
	加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	増幅率	
C1	23.4	11.5	3551
C2	3.3	1.6	508
C3	3.3	1.6	495
C4	3.4	1.6	510
C5	16.1	7.9	2451

表4 各部の荷重

		荷重 [N]
受け壁	W1	476
天井	C1-C2間	404
	C2-C3間	285
	C3-C4間	268
	C4-C5間	378
受け壁	W2	420
最大荷重		476

表5 試験体モデルの解析結果の一覧

		$A_G$ [m/s <sup>2</sup> ]	$R_A$	① $A_G \times M$ [N]	② $F_{max}$ [N]	②/①	$\delta_c(\delta_c)$ [mm]
単純衝突		0.34	—	52	34	0.65	—
JMA Kobe NS	1質点系(前報)	3.17	1.30	482	—	—	—
	5質点系(本報)	3.26	1.34	495	476	0.96	2.68(0.04)

$A_G$ : 天井の重心位置における最大加速度  
 $R_A$ : 入力最大加速度に対する $A_G$ の比  
 $M$ : 天井の全質量

$F_{max}$ : 天井及び受け梁に生じる荷重の最大値  
 $\delta_c$ : 受け壁と天井の端部の間に一時的に生じる隙間の最大値  
 $\delta_c$ : 天井縮みの最大値

に一時的に生じる隙間は最大で2.68 mmであった。そのうち0.04 mmが天井の軸縮み、残りが受け壁の変形に起因している。

図13、図14、表3、表4は前節と同様に、各質点を連結するばねと受け壁のばねの最大荷重と、各質点の加速度に天井全体の質量を乗じた値を示している。受け壁との衝突が生じる天井端部の質点では変位0付近で生じる衝突時の瞬間的な加速度が生じ、これが最大値となるため端部の質点であるC1とC5の最大加速度が非常に大きい値となっている。しかし、その他の天井の質点の加速度は小さく、天井の重心位置(C3)の加速度に天井の全体の質量を乗じた値は、天井端部や受け壁の最大荷重とほぼ対応していることが分かる。これらの傾向は、前節に示した単純衝突の場合

と同様の結果である。

図13、図14中に本報その2で示した、天井を1自由度系でモデル化した場合の解析結果を示す。本解析の重心位置の応答とよく一致していることが分かる。すなわち、天井の重心位置に全体の質量を集約した単純なモデルを用いて求められる重心位置の加速度に天井の全質量を乗じた値から設計用の荷重を評価できると言える。

### 3.3 最大加速度と最大荷重の対応

表5に解析結果の一覧を示す。天井を1質点系でモデル化した前報の解析結果も併記している。単純衝突、振動台実験の解析結果ともに、天井の重心位置における最大加速度に天井の全体の質量を乗じた値は、天井や受け壁に生

じる荷重と同等かやや大きく、最大荷重を安全側に評価することができる。天井の重心位置での最大加速度の入力最大加速度に対する比率は1.34倍であった。

#### §4 まとめ

天井の周囲にクリアランスを設けず、周囲の壁等に地震力を負担させる方式の在来工法吊り天井について、天井の変形や応力分布を再現できるモデルを用いて地震応答解析を行い、振動台実験の結果との比較、応力分布に関する考察を行った。以下にまとめを示す。

- 1) 天井を一方向に変位させた後に解放する状況を再現した解析を行い、応答性状が適切であり、衝突ばねの減衰定数の設定などが適切であることを確認した。
- 2) 振動台実験で用いた加速度波形を用いて応答解析を行い、加速度応答、変位応答が実験結果と良く対応することを確認した。
- 3) 天井内部に生じる荷重と、加速度分布について検討した。単純衝突、地震応答ともに、天井の衝突側端部の加速度は大きくなるが、端部に生じる反力及び受け壁に生じる反力は、天井の重心位置に生じる加速度と天井の全質量の積に概ね一致する。
- 4) 上記3)の結果より、天井の重心位置に全体の質量を集約した単純なモデルを用いて重心位置の加速度を求め、天井の質量を乗じることで、設計用の荷重を評価できる。

**謝辞** 東京工業大学大学院人間環境システム専攻 教授の元結正次郎先生には、解析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) 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
- 3) 元結正次郎、菅野嵩晃:隙間なし鋼製下地在来工法天井の不安定挙動に関する一考察 その1・その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 831-834、2015年9月
- 4) 脇山善夫、渡壁守正、稲井慎介、森田泰弘、石原直、喜々津仁密:開口を有する鋼製下地吊り天井の耐力に関する実験、その1-その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.855-858、2015年9月

#### 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。地震時の挙動を明らかにするとともに天井各部の性能を検証し、設計法を確立し、実施へとつなげていきたいと思っております。



田原 健一