

# 既存天井の後付耐震改修構法の開発

## グリッドサポート構法

櫻庭 記彦

既存天井に対して天井の室内側からサポート材を天井面に設置し、地震時に天井に生じる慣性力を、サポート材を介して躯体または構造体に負担させることにより、天井変位および損傷を制御する構法を開発した。一般的に用いられるブレースにより天井慣性力を躯体に伝達する方法に比して、部材・接合部の設計や変形制御等が非常に容易であり、高い耐震性能を天井に付与できる構法である。

さらに当構法は、既存天井が想定以上の地震力に対して鉛直支持力を喪失しても、天井面に設置したサポート材で天井自重を支持することにより、人災につながるような天井の崩落を防止する機能を兼ね備える。

本稿では、当構法の設計法及び実大振動台実験による検証結果について述べる。

キーワード：天井，耐震化，落下防止，改修

### 1. はじめに

天井の耐震改修を行う場合、既存天井を一旦撤去して新たに性能が確認された耐震天井を新設する方法や、天井内で天井下地に耐震ブレースを追加し、接合金物を補強するなどの方法が一般的にとられている。

前者の場合、改修を行う空間に対して工事期間中の立ち入り禁止措置や事業停止、工事中の塵埃飛散、産業廃棄物の増加、多額の工事費用負担などの課題があり、天井改修工事が実施に至らないことも多い。後者の場合は、天井の耐震化を図るうえで重要な下地主材や接合部および耐震ブレース等の強度のバランス<sup>1)</sup>を確保することが難しく、改修しても一定の耐震性能を期待できないという課題がある。また、設備等との干渉で、後から十分な補強対策ができない場合も多い。

さらに、24時間365日稼働環境下にある施設（例えばインフラ管制施設や特殊な製造ラインなど）では、工事期間中の一切の業務停止を行わず、また改修工事完成後は大地震などの災害後もただちに業務再開を行わなくてはならず、これらの条件を満足する既往の天井耐震化構法は存在していなかった。

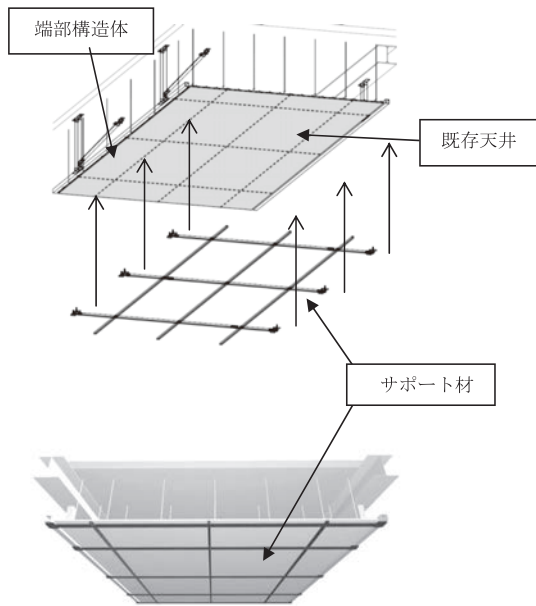
そこで、既存の天井を使用しながら容易に改修でき、既存天井下地の強度にかかわらず一定の耐震性能を付与できる「グリッドサポート構法」の開発を行った。

2章では当構法の概要を、3～5章では当構法の力学的検討および振動台実験による検証結果を示す。

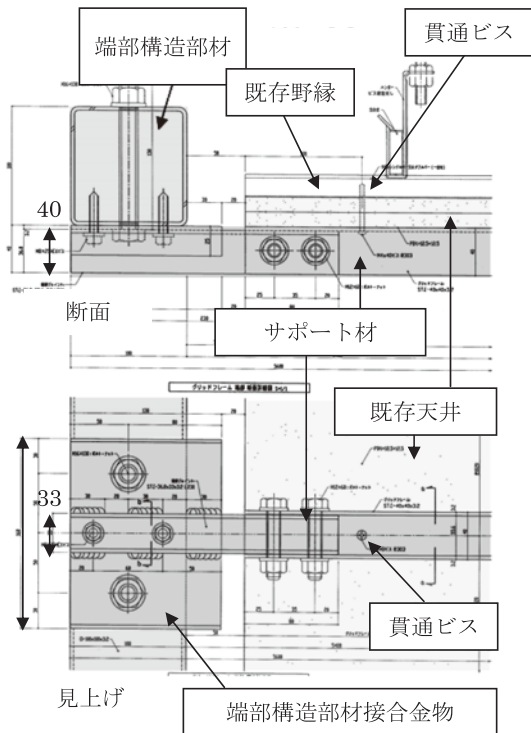
### 2. 改修構法の概要

1章に述べた施工上の課題を解決するため、次の方針で開発を行うこととした。まず、①塵埃飛散や産業廃棄物を縮減するため、既存天井の解体範囲を最小限とすること、②土日・夜間作業であっても工事のための仮設盛替えに容易に対応できるように、構成部材を3m以下程度の短尺部材とすること、③天井下地の強度や天井内設備の配置に左右されず、低コストで一定の耐震性能と落下防止性能を併せ持たせるため、構成部材を後付けの汎用部材とすること、④天井内作業を最小限とすること、などである。格子状に構成した鋼材（以下、サポート材と呼ぶ）を、既存天井のボード面に室内側から野縁を貫通するビスで固定し、その端部を天井周囲の構造部材（例えば角形鋼管□—100×100×3.2等）に所定の接合金物で固定する。当構法の概要を図—1に、詳細を図—2に示す。

当構法では、地震時に天井面に生じる慣性力をサポート材を介して周囲の構造部材に伝達することにより、天井面の変位を制御し、天井の損傷・脱落の主な原因である下地接合部への繰返し曲げ等の負荷を軽減することができる。ブレースを用いて天井慣性力を躯体に伝達する方法に比べて、より直接的に躯体に力を伝達することができるため、平易な机上検討で部材設計が可能である。また本構法は、万一天井が鉛直支持力を喪失しても、サポート材によって天井面全体の崩落を防止するフェイルセーフ機能を併せ持っている。



図一 改修構法の概要



図二 改修構法における天井材と端部構造材との接合詳細

さらに、下地材の主材に一般普及材（非 JIS 材）を使用した天井で、ブレース等の耐震対策を施していない天井に対しても一定の耐震性能を付与することができる。

### 3. サポート材断面の検討

3章では、サポート材断面の設計法を示す。

まず、想定する地震力に対して既存天井の水平方向の慣性力を求め、1本当たりのサポート材が負担する

水平力を算定する。次に、既存天井が全面落下した場合にサポート材に加わる最大張力を算定する。最大張力は、懸垂線の式<sup>2)</sup>を用いて反復解法により求めることができる。サポート材断面は、これら2つの力に耐えるように設計することになる。

本検討では、長さ 12 m、重量 20 kg/m<sup>2</sup> の既存天井を仮定し、サポート材の取付けピッチを@ 1,800 とした。想定する地震力は、国土交通省から天井の脱落に関する告示（国土交通省告示第 771 号他）<sup>3)</sup> の仕様規定における最大値である天井面加速度 2.2G とした。これらの条件を用いて上記の検討を行ない、サポート材には、板厚 t = 3.2 mm で図一 2 に示す部材断面の SPCC 材を用いることとした。また、サポート材どうしの接合部や、サポート材と端部構造体への接合部に使用するボルトについても、上記 2 つの力に耐えるように径や本数を求めた。

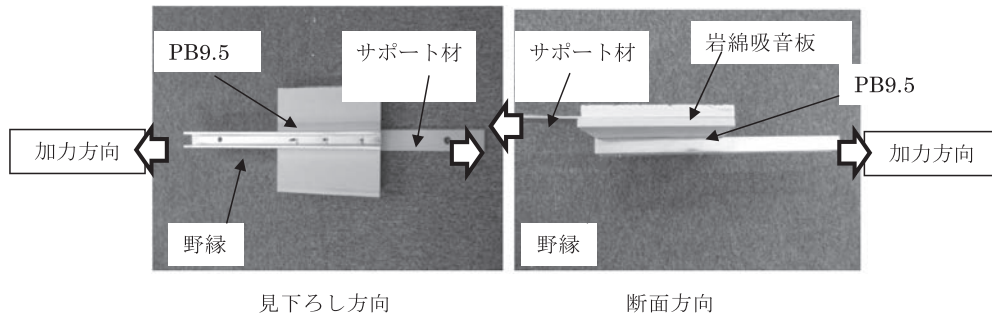
### 4. 既存天井との接合部の検討

サポート材は天井と一体化させ、地震時の天井慣性力を確実に負担させる必要がある。ここでは、サポート材と既存天井との接合部について検討した。

当該部の接合では、天井室内側よりサポート材をタッピングビスにてボードに貫通させて野縁と固定することとした。ビスには、内装工事で汎用的に使用される 4 mm のタッピングビスを使用した。

ビスによりサポート材と野縁とを、ボードを介して固定した場合の接合耐力を実験で求めた（写真一 1）。実験では、一般材の野縁に対し、9.5 mm の石膏ボードおよび岩綿吸音板を介して厚さ 3.2 mm の鋼製フラットバー（サポート材）をビス固定し、引張試験機にてせん断方向に加力して耐力を測定した。ビス形状は皿ビスおよび鍋ビスの 2 種類とし、耐力の違いを調べた。

その結果、皿ビスと鍋ビスでは、鍋ビスの方が 1.1 倍から 2.0 倍程度耐力が高く、また弾力的な挙動を示す範囲も鍋ビスの方が大きいことが解った。また、@ 300 ~ 400 程度でサポート材を鍋ビスで固定すれば、3章で求めた地震時慣性力に対し、弾性範囲では 2 倍程度、終局耐力では 3.6 倍程度の耐力が見込めることが解った。ビスピッチは施工的に野縁のピッチに影響されることとなるが、一般的に用いられる @ 303 で配置された野縁に鍋ビスで固定すれば、天井慣性力をサポート材に有効に伝達できると考えられる。



写真一 1 既存天井との接合耐力試験体

### 5. 振動台実験

振動台実験では、サポート材と天井材との接合部、サポート材どうしの接合部、サポート材と端部構造部材との接合部が、想定する地震力に対して継続使用可能な状態を保持できることを確認した。想定する地震力は国土交通省告示第771号他<sup>3)</sup>の仕様規定の最大値が2.2Gであることから、1.5倍の安全率を見て天井面で最大加速度3.3Gとなるレベルとした。

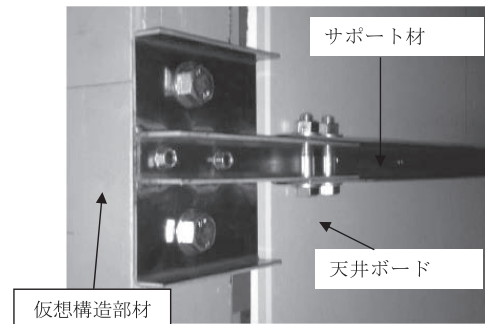
#### (1) 試験体

振動台上に加振用フレームを設置し、加振用フレーム上部から既存天井を模した試験体を吊り下げ、その下部にサポート材を設置して加振した。

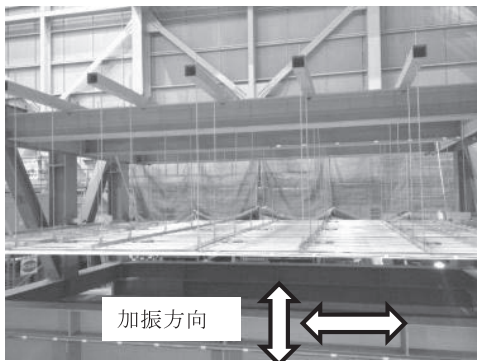
試験体となる既存天井では、野縁と野縁受け等の主

材を一般材とし、JIS A 6517<sup>4)</sup>と同形状の一般材クリップ、ハンガーを用いた。試験体の大きさは5.7 m × 5.0 mで、吊長さを1500 mmとした。ブレース等の耐震部材は設置しなかった(写真一2, 3)。

さらに、図一2に示すサポート材を天井面室内側に所定のピッチにてビスを固定し、その端部を仮想構造部材である角形鋼管□-100 × 100 × 3.2に緊結した(写真一3, 4)。



写真一 4 端部接合部



写真一 2 試験体全景 (天井ふところ側)



写真一 3 試験体全景 (天井仕上げ面側)

計測項目は、振動台、加振用フレーム頂部の加速度、天井面の加速度および加振用フレームからの相対変位とした。

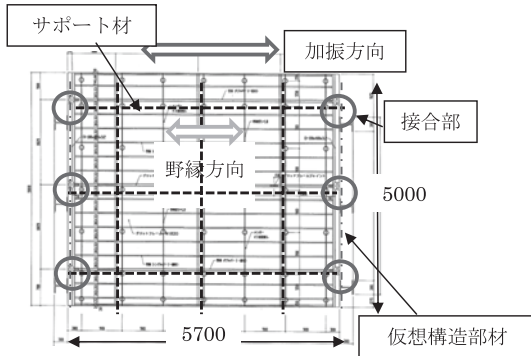
実建物に適用する場合には、サポート材は4辺の端部をそれぞれ構造部材に緊結することになるが、本実験では加振用フレームの制約上2辺にしか仮想構造部材が設置できないため、試験体は①～③の3種類を用意した。試験体の諸元を表一1に示す。

試験体①では、野縁方向にサポート材を固定し、サポート材と天井材の接合部の耐力を確認した。サポート材は3本使用(@1800)し、端部は3か所で仮想構造部材に緊結した(図一3)。

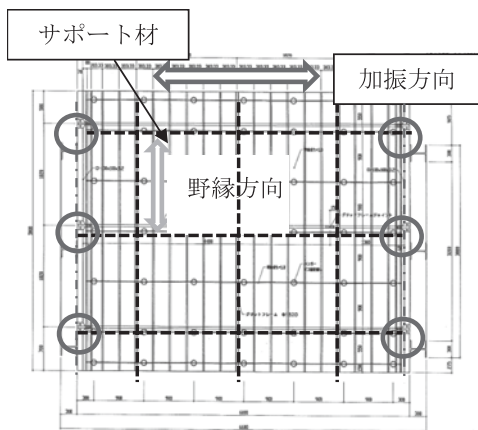
試験体②では、野縁と直交方向にサポート材を固定し、試験体①と同様にサポート材と天井材の接合部の耐力を確認した。サポート材の数は試験体①と同じである(図一4)。また試験体②では、振動台の能力の限界付近である1500 Galの加振波を入力し、損傷が

表一 試験体諸元

試験体面積	5.7 × 5.0 = 28.5 m <sup>2</sup>
試験体総重量	既存天井重量 (ボード及び天井下地) : 634.12 kg サポート材 : 3.38 kg/m <sup>2</sup> × 28.5 m <sup>2</sup> = 96.33 kg 試験体重量 : 634.12 + 96.33 = 730.5 kg 試験記号 e 以降は 87.3 kg のおもりを付加し 817.8 kg



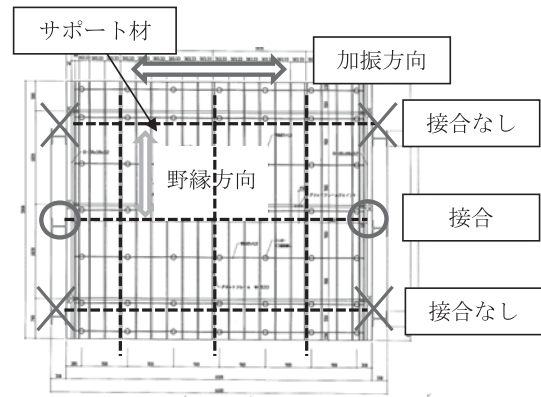
図一三 試験体①



図一四 試験体②

始まる起点を把握した。

試験体③では、サポート材と端部構造体との接合部およびサポート材どうしの接合部の耐力を確認した。実建物での構造部材の設置ピッチを 12 m, サポート



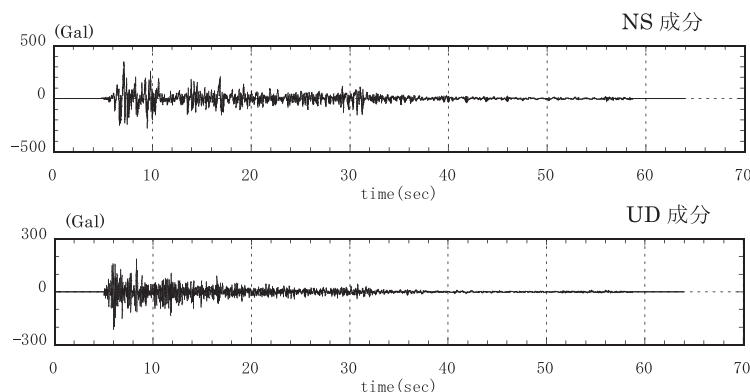
図一五 試験体③

材の取付けピッチを 1.8 m と想定した場合のサポート材 1 本あたりに掛かる天井面積 12 m × 1.8 m 相当分の慣性力を、試験体の接合部に負担させた。試験体は、サポート材の端部接合部を中央一か所のみ接合し、その他の接合部を外し、中央のサポート材に天井試験体のすべての水平力を集中して所定の軸力を負担させることとした (図一五)。

(2) 加振ケース

加振方向は水平 1 方向 + 上下方向とした。入力波は、図一六に示すエルセントロ波 NS 成分および UD 成分を最大加速度で基準化して用いた。上下方向の最大加速度は水平方向の 1/2 とした。

水平方向の最大加速度 300 Gal の入力から開始して、徐々にレベルを上げた加振を行った。なお、振動台の能力の限界付近の入力でも、天井面に掛かる水平方向の慣性力が目標値に達しなかった場合は、天井面におもりを付加して目標とする慣性力を上回るように調整した。目標値の具体的な設定方法は以下のとおりである。面積 28.5 m<sup>2</sup>, 重量 20 kg/m<sup>2</sup> の天井に対して、天井面最大加速度 3.3 G の場合の慣性力を求めると 1,881 kgf となる。本試験体におもりを付加しない場合、サポート材込みの重量は 730.5 kg であるため、



図一六 振動台への入力波 (エルセントロ波)

慣性力 1,881 kgf となる最大加速度は 2.6 G である。また、本試験体に 87.3 kg のおもりを付加して試験体重量を 817.8 kg にすると、慣性力 1,881 kgf となる最大加速度は 2.3 G である。したがって、試験体①と②では、おもりの付加の無い天井では 2.6 G、おもりを付加した天井では 2.3 G が天井面の目標加速度となる。試験体③では、面積  $21.6 \text{ m}^2$  ( $1.8 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ )、重量  $20 \text{ kg/m}^2$ 、天井面最大加速度 3.3 G の場合の慣性力  $1,425.6 \text{ kgf}$  ( $21.6 \text{ m}^2 \times 20 \text{ kg/m}^2 \times 3.3 \text{ G}$ ) が目標とする慣性力であり、おもりを付加した試験体重量 817.8 kg のときには、1.7 G が天井面の目標加速度となる。

### (3) 実験結果

地震波による加振に先立ち、ホワイトノイズ波の加振を行って試験体の固有振動数を調べた。試験体①および②の水平方向の固有振動数は 34.9 ~ 38.3 Hz (周期 0.026 秒 ~ 0.028 秒) であり、通常の在来工法天井

の固有周期に対して非常に高いことを確認した。

野縁方向にサポート材を固定した試験体①の加振結果を表一 2 に示す。試験記号 d では振動台の能力の限界付近の加振に対し、天井面加速度が目標の 2.6 G を上回らなかったため、天井面におもりを付加した。試験記号 e では、試験体重量 817.8 kg に対して天井面では目標とする 2.3 G を上回る最大加速度となったが目視上損傷がなく、一部サポート材と天井の接合ビスにゆるみが出た程度であった。軽微な補修により初期状態に復旧できる状態であり、目標とする軽損で継続使用可能な範囲にとどめることができた。

野縁受け方向にサポート材を固定した試験体②での加振結果を表一 3 に示す。試験記号 g では、天井面で目標とする 2.3 G を上回る最大加速度となったが、目視上損傷がなく、ビスの緩みも発生しなかった。さらに試験記号 h では、振動台入力加速度 1,500 Gal に対して天井面で 3,049 Gal の応答加速度となり、想定

表一 2 試験体①の加振結果 (野縁方向の加振) H (水平方向), V (上下方向)

記号	振動台入力 加速度 (Gal)	試験体重量 (kg)	天井面目標 加速度 (G)	加振フレーム頂部 (天井吊元)加速度 (Gal)	天井面 応答加速度 (Gal)	天井面と加 振フレーム の最大相対 変位 (mm)	目視観察結果
a	H = 300 V = 150	730.5	2.6	H = 622 V = 589	H = 516 V = 542	0.3	損傷なし
b	H = 900 V = 300	730.5	2.6	H = 1528 V = 1808	H = 1476 V = 3080	1.0	損傷なし
c	H = 1200 V = 600	730.5	2.6	H = 2053 V = 2170	H = 1898 V = 2584	0.9	損傷なし
d	H = 1500 V = 750	730.5	2.6	H = 2539 V = 3442	H = 2283 V = 5586	1.8	サポート材および天井面に損傷なし 天井のクリップ外れ、ハンガー開き が生じる
e	H = 1500 V = 750	817.8	2.3	H = 2466 V = 3276	H = 3350 V = 5238	4.2	サポート材および天井面に損傷なし サポート材と天井の接合ビスに一部 ゆるみ

表一 3 試験体②の加振結果 (野縁受け方向の加振) H (水平方向), V (上下方向)

記号	振動台入力 加速度 (Gal)	試験体重量 (kg)	天井面目標 加速度 (G)	加振フレーム頂部 (天井吊元)加速度 (Gal)	天井面 応答加速度 (Gal)	天井面と加 振フレーム の最大相対 変位 (mm)	目視観察結果
f	H = 1000 V = 300	817.8	2.3	H = 1734 V = 900	H = 1638 V = 887	1.1	損傷なし
g	H = 1500 V = 450	817.8	2.3	H = 2528 V = 1677	H = 2443 V = 2241	1.9	損傷なし
h	H = 1500 V = 750	817.8	2.3	H = 2498 V = 2200	H = 3049 V = 4818	2.9	損傷なし サポート材と天井の接合ビスに一部 ゆるみ 天井のクリップ外れ、ハンガー開き が生じる

表一 4 試験体③の加振結果 H (水平方向), V (上下方向)

記号	振動台入力 加速度 (Gal)	試験体重量 (kg)	天井面目標 加速度 (G)	加振フレーム頂部 (天井吊元)加速度 (Gal)	天井面 応答加速度 (Gal)	天井面と加 振フレーム の最大相対 変位 (mm)	目視観察結果
i	H=1100 V=300	817.8	1.7	H=1920 V=917	H=2218 V=1060	4.9	損傷なし

既存天井のクリップが外れ、ハンガーに開きが生じた。しかしグリッドサポートには、既存天井との接合ビスに一部ゆるみが生じただけで、サポート材やサポート材どうしの接合部、端部接合部等に損傷は生じなかった。

長さ 12 m 相当分の軸力を背負わせたサポート材の接合部を再現した試験体③の加振結果を表一 4 に示す。試験記号 i では、天井面で目標とする 1.7G を超える最大加速度となったが、接合部に損傷は生じなかった。

## 6. まとめ

- 地震時の天井慣性力を、格子状に構成したサポート材で端部の構造部材に直接的に伝達する天井耐震改修工法「グリッドサポート構法」を開発した。
- 地震時にかかる慣性力と、既存天井が全面崩落した場合にかかる張力を考慮して、サポート材断面およびサポート材と天井材との接合部、サポート材どうしの接合部、サポート材と端部構造部材との接合部の設計を行った。
- その耐震性能を、振動台による動的実験によって確認した。目標とした慣性力（天井重量 20 kg/m<sup>2</sup>、天井面加速度 3.3 G）に対し、部材が軽損にとどまり、軽微な補修で継続使用可能であることを確認した。
- 開発した構法では、引張材と天井のビス接合部に損傷が発生しやすいことが解った。野縁という薄板部材に対してビスで固定しているため、繰返し挙動によって緩み等が生じ、接合耐力が徐々に喪失されるためであり、想定以上の地震力に対して破損が始まるのもこの部位からである。このため地震後や一定期間の経年に応じて、接合ビスおよび周辺を点検し必要に応じて補修を実施する等の維持管理が必要と思われる。

なお、本構法を実際の建物に適用する場合には、サ

ポート材の端部を支持する構造部材の設計条件や、その部材を既存躯体に取り付ける方法について、建物個別の条件に応じて検討する必要がある。

また、本構法は野縁に対し天井材であるボード系材料が連続的に緊結されている状態を利用して脱落防止対策を図っている。既存天井や室の状況によりボードのビス抜け等が想定される場合、またはそれらに対しても落下防止が要求される場合は、ネット、メッシュ等をグリッドサポートと既存天井面の間に挿入するなどの対策を講じることができる。

## 7. おわりに

### 謝辞

当構法は「グリッドサポート」として商標登録されている。清水建設㈱の保有する特許技術を株式会社オクジュー、株式会社桐井製作所らと共同開発により商品化を行ったものである。当構法の開発に当たって、両社からの多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

JICMA

### 《参考文献》

- 鈴木 健司, 金子 美香, 半澤 徹也, 神原 浩, 櫻庭 記彦: “鋼製下地 在来工法天井の耐震性能に関する実験的研究”, 清水建設研究報告第 89 号, pp.23 ~ 28, 2012.
- 中原一郎: 材料力学上巻, 養賢堂, 1993.
- 国土交通省住宅局建築指導課: 建築基準法施行令の一部を改正する政令について (平成 26 年 4 月施行) 2013.
- 日本工業標準調査会: JIS A 6517:2010, 2010.

### 【筆者紹介】

櫻庭 記彦 (さくらば ふみひこ)

清水建設㈱

設計・プロポーザル統括 環境・技術ソリューション

本部 BCP・防災ソリューション室主査

兼 技術研究所 安全安心技術センター

主任研究員

