

東京大学（本郷）講堂改修工事

天井耐震改修工事を中心に

櫻庭 記彦

東京大学講堂（安田講堂）改修工事のうち、特に天井の耐震化は利用者の安全確保の観点で重要な位置付けの改修である。2011年東日本大震災以降、精力的に開発を進めてきた天井耐震化技術の中から、当社の最新の知見を盛り込んだ「ぶどう棚直貼り方式」による天井耐震改修を実施した。本稿では講堂天井の耐震改修工事の概要、天井材の検討、振動台実験による検証結果、施工上の留意点などについて述べる。
キーワード：東京大学、安田講堂、天井、非構造部材、天井耐震改修、ぶどう棚、軽量化

1. はじめに

東京大学（本郷）講堂が「安田講堂」と名付けられているのは、安田財閥創始者である安田善次郎による全額寄付により建設されたことに由来している。

安田講堂は、1922年に内田祥三、岸田日出刀らの設計、清水組（現清水建設）の施工で着工し、1925年に竣工した建物である。着工後の1923年には関東大震災を経験したものの、当講堂の現場に被害は少なく工事を再開することができ、1925年7月6日に竣工を迎えた。1968年～1969年の東大紛争による影響を受け長期間閉鎖をされていたが、1990年に大規模改修がなされ、翌年より卒業式が催されてきた。1996年には登録有形文化財の東京都第1号の登録を受けている。

2011年東日本大震災により一部被害を受け、これらの耐震改修と同時に建設当初のオリジナルデザインに近い形での全体改修を行うこととなった（写真1, 2）。

平成25年6月12日～平成26年12月26日にかけて改修を実施した内容は、①構造躯体耐震化、②講堂天井の耐震化、③オリジナル意匠の保存・補修、④居住環境の向上と省エネルギー化、⑤バリアフリー整備、⑥内装改修、⑦設備更新、などである。その中でも防災上重要な位置付けとなった講堂の天井耐震化工事は、天井材を軽量化してぶどう棚直付けにすることにより、オリジナルデザインを保ったまま耐震性を持たせることに成功した。

本稿では、改修工事の概要を講堂天井の改修内容とそのための振動実験など、天井の耐震化を中心に述べる。



写真1 全景（撮影 小川重雄）



写真2 改修前の講堂全景（撮影 小川重雄）

2. 改修工事全体の概要

工事の概要は下記の通りである。

設計：東京大学キャンパス計画室（千葉学）・同施設部 香山壽夫建築研究所

構造：万建築設計事務所

設備：総合設備コンサルタント

施工：清水建設， 関電工， 日本装芸
 延べ床面積：6988 m²
 階数：地下1階 地上5階 塔屋4階
 構造：鉄筋コンクリート造， 一部鉄骨造
 工期：2013年6月～2014年12月

改修工事の内容は以下の通りである。

- ①構造躯体の耐震化
RC耐震壁214枚，鉄骨ブレース24箇所設置
- ②講堂天井の耐震化
既存講堂天井を全て撤去し，グラスファイバー補強石膏板（GRG）で新設
- ③オリジナル意匠の保存・補修
外壁サッシ，講堂天井を建設当初意匠に復元
- ④居住環境の向上と省エネ
各所二重サッシを新設，断熱
- ⑤バリアフリー整備
エレベーター新設，バリアフリースイレ新設
- ⑥内装改修
講堂の遮音性能の向上，自然光の復活
- ⑦設備更新
電気設備，機械設備の全面更新

3. 天井改修工事

(1) 天井改修工事の概要

既存の講堂天井は，ラスモルタル下地に砂漆喰にて左官施工された100 kg/m²を超える天井材を，なまし鉄線またはスチール製フラットバー等で吊り下げる形式で構成されていた。地震時に天井に生じる慣性力を躯体に伝達する機構（ブレース等）は無く，また解体時にはラスモルタルと砂漆喰間の界面剥離の兆候が見受けられるなど，脱落防止・耐震信頼性に乏しい納まりとなっていた（写真—3）。



写真—3 既存天井下地の状況

今回，与条件として示された改修方針は下記の通りであった。

- ①天井下地は吊り天井とせず，地震時に本体構造体から加速度応答増幅が少ない「ぶどう棚直貼り」方式（本体架構に下地鉄骨を組み付け，そこに天井材を直結する工法）とする。
- ②天井材は軽量化を図り，下地の耐震信頼性向上と落下リスクの低減を図る。
- ③天井自体の脱落防止の実現と，維持管理工具などの貫通落下防止を図る。
- ④天井面の設計用水平震度は2.75 Gとする。
上記方針を受け，砂漆喰の部分にはGRG（Glass fiber Reinforced Gypsum）を採用し，天井の軽量化および維持管理工具などが天井を貫通し固定席まで落下することを防止する性能を確保すること，天井下地は本体構造に直接的に取り付け構成すること，として天井の計画を行った。

(2) 天井材について

天井材のGRGに用いた石膏は，天然石膏を精製・焼成した半水石膏を使用した。補強用のガラス繊維はガラスストランドを不規則に重ねて配置し，バインダーで結合したコンティニューアスストランドマットを使用した。いずれも化学石膏やチョップドストランドマット（裁断したガラス繊維）よりも強度が確保しやすい組み合わせである。これらを，既存天井デザインにあわせて作成した型を使用し，最低2層（2プライ）以上重ね合わせて天井材を製作した。

使用箇所が最上階の天井であり，経年により屋根面からの漏水の影響を受ける可能性があることから，通常メーカーが規定している気乾基準強度値のほかにも含水時の強度変化等についても，実際に採用する接合部を再現した試験体によりその強度確認を実施した。結果を表—1に示す。

鉛直荷重設定は，パネル1枚を6点で鉛直支持する。最大天井パネル質量が1232.5 Nのため，支持点の長期荷重は205.8 Nである。

鉛直震度1.0および割増計数1.25（設計条件より）により，パネル一枚当たりの短期鉛直荷重 $1232.5 \times (1.0 + 1.0) \times 1.25 = 3081.25$ N，取付け部短期鉛直荷重 $205.8 \times (1.0 + 1.0) \times 1.25 = 514.5$ Nとし，繰返し荷重は 514.5 N × 低減率約80% × 4か所 = 1626 Nとした。

試験結果から，取付け部強度に関しては，想定荷重に対し十分な強度を有することがわかった。

さらに曲げ強度は水中浸漬して含水させると気乾時

表一 各種強度試験結果

| 試験項目 | 試験結果 |
|---------------------|---|
| 1. 物性 | |
| 1.1 比重 | 絶乾比重 1.644 ~ 1.671 自然乾燥時比重 1.651 ~ 1.655 |
| 1.2 乾燥・吸湿速度 | 乾燥速度 24 時間ではほぼ乾燥, 48 時間で安定 吸湿速度 48 時間で安定 |
| 1.3 熱膨張率 | 線膨張係数 12.96×10^{-6} |
| 1.4 長さ変化率 | 湿乾燥返し 5 回の平均 約 550×10^{-6} |
| 2. 材料強度 | |
| 2.1 気乾時曲げ強度 | 4 体平均 47.06 N/mm ² |
| 2.2 湿潤時曲げ強度 | 4 体平均 24.17 N/mm ² |
| 2.3 湿乾燥返し履歴曲げ強度 | 4 体平均 44.01 N/mm ² (乾湿 5 回繰返し後) |
| 2.4 衝撃強度 | 500 × 600 × 80 mm, 2 プライの試験体に質量 1 kg の錘を落下させ, 状態を観察 → 2 m の高さまで貫通なし |
| 3. 取付け部強度 | |
| 3.1 固定部引抜試験 | 4 体平均 8207.5 N (≧想定鉛直荷重 514.5 N) |
| 3.2 気乾時パネル載荷試験 | 500 × 600 × 80 mm, 2 プライの試験体に 400 × 500 mm の平板を載せ加力 最大荷重 23030 N (≧想定鉛直荷重 3081.25 N) |
| 3.3 湿潤時パネル載荷試験 | 最大荷重 12348 N (≧想定鉛直荷重 3081.25 N) |
| 3.4 気乾時パネル繰返し載荷試験 | 500 × 600 × 80 mm, 2 プライの試験体に 400 × 500 mm の平板を載せ取付部想定鉛直荷重の 80% 程度 (1626 N) にて 300 回加力し状態を観察 → 変化なし |
| 3.5 湿潤時パネル繰返し載荷試験 | 500 × 600 × 80 mm, 2 プライの試験体に 400 × 500 mm の平板を載せ取付部想定鉛直荷重の 80% 程度 (1626 N) にて 100 回加力し状態を観察 → 変化なし 繰返し履歴後最大荷重 11858 N (≧想定鉛直最大荷重 3081.25 N) |
| 4. 取付け部長期耐久性 | |
| 4.1 長期載荷試験 | 500 × 600 × 80 mm, 2 プライの試験体に砂袋 (745 N) を載せ取付け部の変化を観察 面材たわみが生じるものの, 取付部に変化なし |

強度の約半分まで強度低下すること, 繰返し含水してもその後の乾燥によりほぼ気乾強度に戻ることに等しかった。

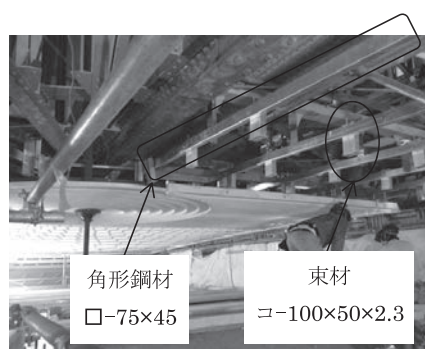
熱伸びに関しては, 線膨張係数 12.96×10^{-6} であり, 鋼材やコンクリートとほぼ同等であることから, 接合部等に特段の配慮が不要であることがわかった。

(3) 天井下地について

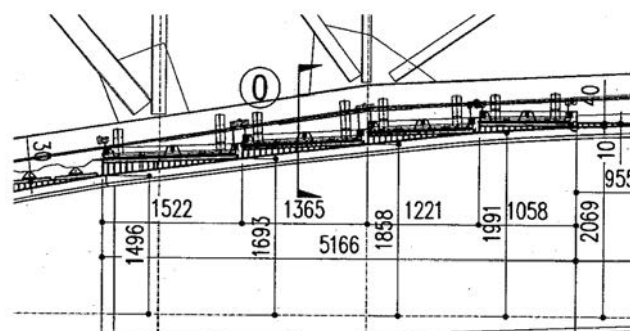
写真一 4, 図一 1, 2 に示す通り, 天井下地は既存のトラス梁下弦に直接的に緊結した角形の鋼材に対し, コ-100 × 50 × 2.3 の束材を剛に接合し構成した。これらの部材選定は短期許容応力度設計により容易に行うことができる。

4. 振動台での天井耐震性確認実験

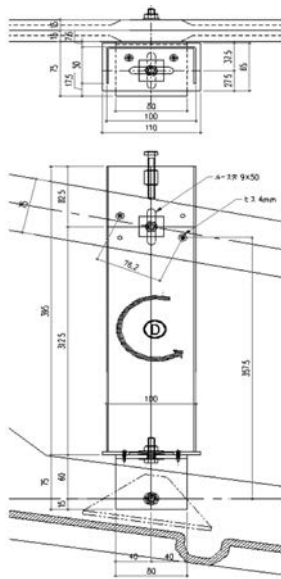
改修後の天井はぶどう棚直付けとなるため「吊り天井」ではなく, 国土交通省が告示に規定した「特定天井」に当たらない。軽量化された天井板の荷重は全て



写真一 4



図一 1 天井下地図



図一 2 天井下地詳細

強固な鉄骨下地を介して構造体が支持するため、設計的に十分な耐震性を保有していることは明らかであったが、天井面の変形、特にガラスとその取り付け部分での変形による不具合が発生しないか等を動的に確認することを目的に、振動台での耐震性確認実験を実施した。

(1) 振動台実験概要

躯体側一次鉄骨は天井下地に対し十分に剛な構成とし、その下に取り付ける天井および天井下地を、現場計画通りに再現し、振動台にて地震波加振を行った。

試験体に、設計目標値である水平応答加速度の1/4倍、1/2倍、1.0倍の応答値が出るようにステップバイステップで入力加速度を上げて加振し、応答性状を確認した。この加振は2回実施し、1回目の加振終了後に各接合部をいったん解体し、加振による局部的な

損傷の有無を確認し、その後、各接合部を再度本施工同様の状態に復旧して、2回目の加振を行った。

最後に「極めて稀に発生する地震による力」による応答性状について観察した。

(2) 試験体

試験体は図一 3 に示す天井図から太い破線で囲った部分を切り出したモデルとした。

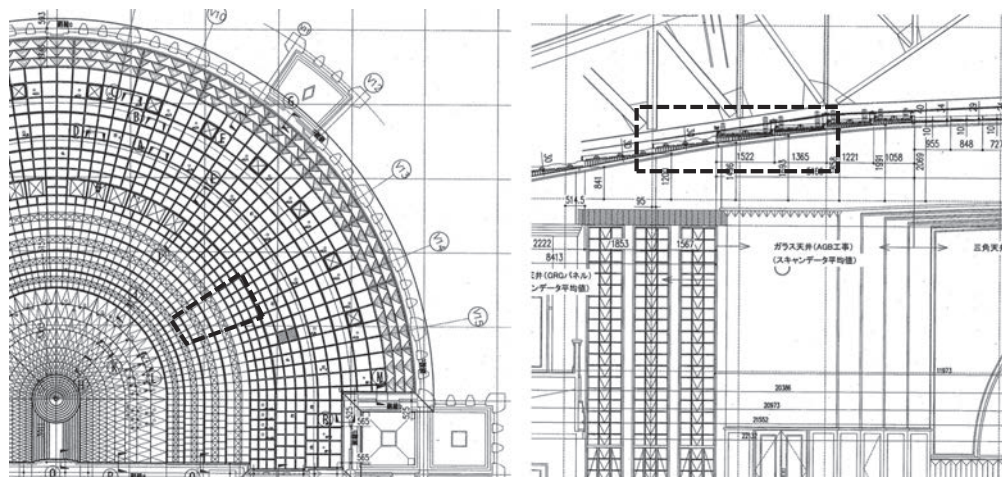
試験体設置用フレームは H-400 × 400 × 13 × 21 のベースの上に H-300 × 300 × 10 × 15 で組み立てた外形寸法 3.8 m (D) × 6.6 m (W) × 3.31 m (H) のフレームで、上部に角パイプを取り付けて天井下地部材を設置し、天井を組み立てた。測定はフレーム上、下地材、天井面について、それぞれ中央と東端、北端に加速度計を上下水平 3 成分ずつ設置した。下地材と天井面との水平相対変位も 2 箇所測定した。

(3) 入力地震波

加振波としては標準波として多くの実験で使われてきた El Centro 波を使用した。入力最大加速度の大きさは El Centro 波については NS 成分 (Y 方向入力) を基準に決め、EW 成分 (X 方向入力) については元波形と同比率で算出した最大加速度で入力し、UD 成分 (Z 方向入力) については NS 成分の半分の最大加速度とした。

さらに、告示波を用いてより広い周波数帯に対する応答性状を確認した。告示波は設計目標値である水平応答加速度の 1.0 倍の応答値が出るように入力した。

「極めて稀に発生する地震による力」としては 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に記録された震度 7 相当 (計測震度 6.5) の KiK-net 芳賀 (TCGH16) 観測波を振動台に入力した。



図一 3 天井図と試験体として切り出した部分 (太い破線で囲った部分、左:平面図、右:断面図)

(4) 試験結果

地震波加振の前に試験体の振動特性把握のため、ホワイトノイズ波 100 cm/s^2 入力に加振を行い固有振動数を確認した。水平 X 方向はガラス面側で 13 Hz (周期 0.08 sec), GRG 成形版側で 16 Hz (周期 0.06 sec) であり, 水平 Y 方向はガラス面側中央で 28 Hz (周期 0.04 sec), ガラス面側試験体端部で 21 Hz (周期 0.05 sec) であった。懐 1.5 m の一般的な在来吊り天井の水平固有振動数が初期剛性で 2~7 Hz 程度¹⁾ であるのと比較すると, 非常に高い剛性が確保されていた。

地震波加振では, 告示波の X 方向加振については目標の天井面応答加速度 2.75 G を超える加振ができたが, Y 方向加振ではフレームの剛性不足もあり, 目標の加速度まで加振できなかった。しかしながら, El Centro 波加振ではほぼ天井面応答加速度 2.75 G に近い加振ができており, Y 方向については変形量も微小であり, 損傷も全くなかったため, 要求性能を満足しているものと判断した。

地震波加振時の天井面応答加速度・変位は, 1 回目の加振において El Centro 波加振時の下地材 (ぶどう棚) - 天井面相對変位 (2 点の平均) は目標 2.75 G の 1/2 加振時で 2.0 mm, 目標 2.75 G 時で 3.2 mm~3.4 mm と小さく, 1 回目加振後に実施した接合部を解体しての損傷確認においても, ビスの緩み, ビス孔の拡大, 変形など損傷の痕跡は認められなかった。再組み立て後の 2 回目 (解体点検後) の加振でも 1 回目とほぼ同様で, 芳賀観測波加振時においても X 方向 3.5 mm, Y 方向 2.0 mm であり, 加振後の損傷も全く見られなかった。写真一 5, 6 に最終加振 (芳賀観測波) 後の

試験体を示す。

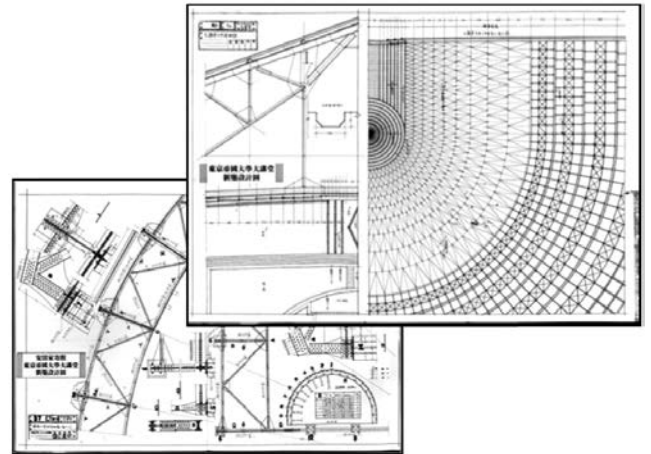
なお, 振動台実験結果の詳細については文献²⁾ で参照できる。

5. 施工について

(1) 改修工事全体の施工

改修工事内容は多岐にわたった。意匠的には原則として創建当時の姿に復元しながら, 構造躯体本体の耐震性能向上と省エネルギー化, バリアフリー化, 老朽設備の更新等に加え, 天井の耐震化を図った (参照: 文献³⁾)。

本案件においては創建当時の設計図および写真が明瞭な形で保存されていたため, 現地実測 DATA と照合しながら復元すべき姿を特定することができた (図一 4)。現地の実測は, 3D スキャン技術を用いた。レー



図一 4 保存されていた創建当時の竣工図



写真一 5 芳賀波加振後の試験体全景



写真一 6 芳賀波加振後の試験体 (左右とも)

レーザーキャナによる位相差方式で点群 DATA を取得し、3点実測により3次元化した。合計40GB、約11億5000万点の点群により再現された実測図は、現地測量結果との差異が最大5mm以内という精度であった(図-5, 6)。

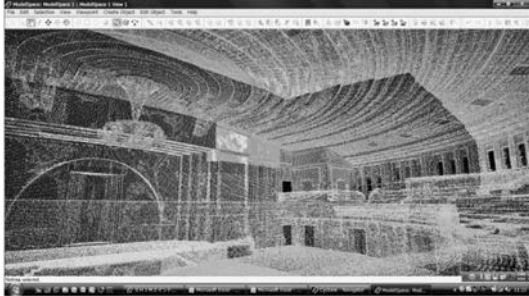


図-5 3次元実測した点群 DATA



図-6 3次元実測結果より作図した鉄骨詳細図

取得した3次元点群 DATA は、3次元作図ソフト等を用い図面化を行い、施工に使用するのはもちろんのこと、既存建物の記録図書として保存・活用することとした。

また、過去の改修において、老朽化部位や紛争時の損傷等を復旧する際、創建時とは異なる材料で改修されていた部位が散見されたため、今回の改修では老朽部分のみではなく、改修時に変更された仕様も極力、創建当時に戻す作業を実施した。一部事例を写真-7～9に示す。

(2) 天井改修工事の施工

本案件の天井改修工事では、耐震性確保のために、躯体に固定したぶどう棚(天井下地鉄骨フレーム)に天井を緊結する形式を取ったので、ぶどう棚を固定する既存躯体の状況、現況寸法等を正確に把握することが重要であった。

多くの場合、天井内では設備や既存躯体との取合いなどの理由で天井支持部分の全ての躯体を実測できる例は少なく、一部の抽出実測値と設計図、施工図情報などをもとに発注部材を決めていく。ところが実際の施工現場では、既存躯体が図面情報や一部の实測値と異なっていたりし、予測した寸法通りに発注部材が適用できない場合も多く、既存天井を解体して初めて有

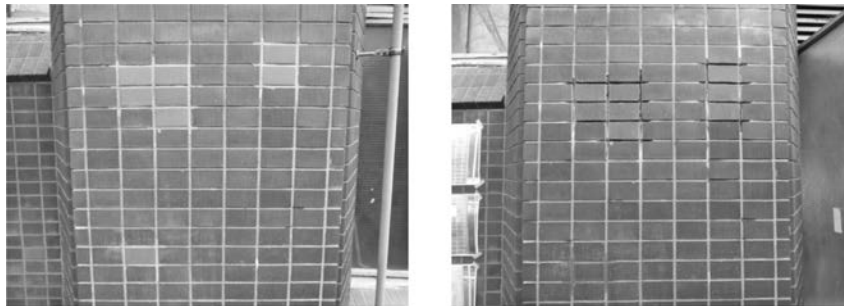


写真-7 元の風合いに復元した外装タイル、左：従前の改修、右：今回の改修



写真-8 接合部など補強し無垢材で復元した座席



写真—9 解体し破損した石材は、復元加工し再利用

効な施工情報が得られることが多い。

結果として天井解体前に発注した部材は、実測値との整合を図るため再発注になるなど、工期、コスト面で制御が難しい。

当工事では工期中に、天井解体後の既存躯体実測・作図期間を設け、部材発注を行うことにより結果的に手戻りを防止し、短工期化を図った。

以上より、この種の天井改修の施工・準備における注意点をまとめる。

- ①現地での既存躯体の実測調査が重要。調査工期を事前に確保しておく必要がある。
- ②レベル調整機構、誤差が生じた場合の逃げ方などの事前計画が重要。下地の精度は仕上げ精度に直結する。
- ③3次元計測による既存躯体の把握が有効。
- ④特に鉄骨工事は、現地実測の結果変更せざるを得ない場合、施工情報を即時に製造サイドに伝達し、タイムリーに部材製造・供給可能とする生産システムの構築が不可欠となる。

6. おわりに

2014年4月1日より国土交通省から、天井耐震化に関する告示⁴⁾が示された。

当告示において最も注視すべき吊り天井の特性は、地震時の躯体床応答加速度から生じる天井面の応答加速度である。中地震時であっても、天井面2.2Gに達する可能性が示唆され、これによって生じる天井面慣性力に対し弾性設計を行うことが骨子となっている。

ただし、吊り天井における力学的特性はいまだに未知な点が多く、様々な形態、材質、吊長さや質量の天井に、告示に示された手法がいつも適用できるわけではない。現時点では、フラットな形状で吊り長さが一定、天井質量が 20 kg/m^2 以下のものに関してのみ適用可能な基準であり、東大安田講堂の天井のように複雑な形状で質量が大きな天井への適用は難しい。

学術界や様々な研究機関において、現在もなお吊り天井に関する力学的研究が進行中であり、その知見に基づく新たな設計手法は今後も開発が進んでいくものと思われる。そのような状況下において、当稿に示すような複雑な形状の天井に対しても、容易に耐震性を確保し適法性を満足する一つの手法として、「ぶどう棚直貼り形式」が有効であることを示した。

仮に、告示による吊り天井形式で今回の改修を想定した場合、既存躯体や設備との干渉を避けながら十分な量のブレースを設置したり、天井周囲等に必要なクリアランスを防音、断熱、空調効果、排煙などの天井が持つべき耐震性以外の性能を満足しながら設置することや、吊長さが躯体形状により必然的に異なるため天井の各部位において事前にその挙動や発生応力を想定し、それに対し各所の接合部を適切に設計することは、現時点での天井に関する学術的知見を駆使しても極めて難易度が高く、実現が困難であったと思われる。

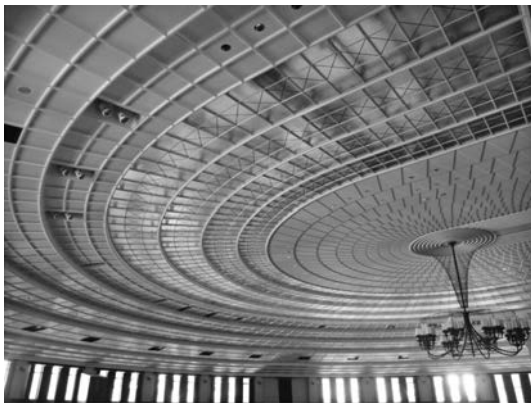
当工事においては、吊り天井形式ではなくぶどう棚直貼りとし、軽量化した天井材を強固に固定することで容易な設計手法で耐震性を実現し、かつ適法性を満足した。

一方で、日本建築学会からは天井に関するガイドライン⁵⁾が報告されており、人命保護・安全確保を大前提に機能維持性(耐震性)を確保する原則が示された。しかし具体的な設計・施工指針が出されるのはまだ先で、現時点では関係者らが案件ごとに最適解を模索し、合意形成を図りながら天井耐震改修を進めているのが実情である。

今回の改修事例が示す通り、告示に示された天井耐震化の手法以外にも、容易に耐震性を確保できる様々



写真—10 改修後の講堂全景



写真—11 改修後の天井全景

な方法を構築し整備，実施していくことが喫緊の課題である。さらに，その手法を誰もが使えるように一般化していく必要がある（写真—10，11）。

膨大な量の既存天井ストックが存在している現状において，可及的速やかにこれら耐震的に課題のある既存天井の安全安心化を，業界を挙げて推進することが急務である。

謝 辞

当計画推進に当たり，東京大学 千葉学先生，清家剛先生，東京大学キャンパス計画室・同施設部様，香山壽夫建築研究所様，万建築設計事務所様から様々のご協力と貴重なご指導をいただいた。

また，投稿執筆に当たり，旭ビルウォール(株)様，(株)紋郎美術工房様，旭ビルト工業(株)様らから多大なご協力をいただいた。

加振用地震波として独立行政法人防災科学技術研究所様の基盤強震観測網（KiK-net）の記録波を使わせていただいた。

ここに記して感謝申し上げます。

JCM A

《参考文献》

- 1) 脇山善夫，元結正次郎：“V.天井の耐震対策”，建築技術，第794号，pp.112～119，2012.
- 2) 櫻庭記彦，鈴木健司，尾形晃弘：“東京大学（本郷）講堂改修工事”，清水建設研究報告，第92号，pp.77～86，2015.
- 3) 浜野次郎，櫻庭記彦：“V.複雑形状の漆喰湿式天井の耐震改修事例”，建築技術，第785号，pp.132～135，2015.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所，建築研究所，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”，2013.10.
- 5) 日本建築学会，“天井等の非構造材の落下に対する安全対策指針・同解説”，2015.01.

【筆者紹介】

櫻庭 記彦（さくらば ふみひこ）
清水建設(株)
設計本部 設計技術部 兼技術研究所
安全安心技術センター
技術グループ長兼主任研究員

