

東京大学(本郷)講堂改修工事

- 天井の耐震改修を中心として -

櫻庭 記彦 鈴木 健司 尾形 晃弘

(技術研究所) (技術研究所) (東京支店建築第2部)

Retrofitting of "Yasuda Auditorium" of the University of Tokyo

- Focusing on seismic retrofitting of the ceiling -

by Fumihiko Sakuraba, Kenji Suzuki and Akihiro Ogata

Abstract

In the renovation of the Yasuda Auditorium of the University of Tokyo, seismic retrofitting of the ceiling was very important for the safety of users. The retrofitting has been accomplished by "directly fixed ceiling system" that has been developed by incorporating the latest findings after the 2011 Great East Japan Earthquake into the retrofitting method for ceilings. This paper provides an overview of the retrofitting work and discusses the materials used, the results of verification experiments carried out on a shaking table, and important considerations in implementing the work.

概要

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。

1.はじめに

平成25年6月12日～平成26年12月31日にかけて、東京大学講堂(安田講堂)の改修工事を実施した。その内容は、「構造躯体耐震化」、「講堂天井の耐震化」、「オリジナル意匠の保存・補修」、「居住環境の向上と省エネルギー化」、「バリアフリー整備」、「内装改修」、「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。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。

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。

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が少なく、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、写真-2)。



写真-1 東京大学講堂(安田講堂) 全景(改修前)

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報告
する。



写真 - 2 講堂内部全景(改修前)

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

今回の改修工事のうち、講堂天井の改修の概要に
ついて以下に述べる。

3.1 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100kg/m²を超える天井材を、番線
またはスチール製フラットバーで吊り下げる形式で
構成されていた(写真-3)。地震時に天井に働く慣性
力を躯体に伝達する機構は無く、また解体時にはラ
スモルタルと砂漆喰の界面に剥離が生じるなど、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 改修前の天井下地の状況

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2.75G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。

3.2 天井材について

天井材は前述のとおりGRGを採用した。

石膏は天然石膏を精製・焼成した半水石膏を使用し、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。(写真 - 4)



写真 - 4 GRG 製造状況

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、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、試験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、天井想定単位質量 $24\text{kg}/\text{m}^2$ × 最大天井パネル寸法 $5.24 \text{ m}^2 = 1232.5\text{N}/\text{枚}$ に対し計 6 点で鉛直支持するとして、1 か所あたりの負担荷重は $1232.5\text{N}/6 \text{ か所} = 205.8\text{N}/1 \text{ か所}$ である。

設計条件として鉛直震度 1.0 および割増計数 1.25 を与えられたため、パネル一枚当たりの想定鉛直最大荷重 $1232.5 \times (1.0 + 1.0) \times 1.25 = 3081.25\text{N}$ 、取付部想定鉛直荷重 $205.8 \times (1.0 + 1.0) \times 1.25 = 514.5\text{N}$ とし、繰返し荷重は $514.5\text{N} \times \text{低減率約 } 80\% \times 4 \text{ か所} = 1626\text{N}$ とした。

曲げ強度は水中浸漬して含水させると気乾時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、等がわかった。

表 - 1 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	湿乾繰返し 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 47.06N/mm ²
2.2 湿潤時曲げ強度	4 体平均 24.17N/mm ²
2.3 湿乾繰返し履歴曲げ強度	4 体平均 44.01N/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 1kg の錘を落下させ、状態を観察 → 2m 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 8207.5N(≧想定鉛直荷重 514.5N)
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 23030N(≧想定鉛直荷重 3081.25N)
3.3 湿潤時パネル載荷試験	最大荷重 12348N(≧想定鉛直荷重 3081.25N)
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(1626N)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(1626N)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 11858N(≧想定鉛直最大荷重 3081.25N)
4.取付け部長期耐朽性	
4.1 長期載荷試験	500×600×80 mm、2 プライの試験体に砂袋(745N)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

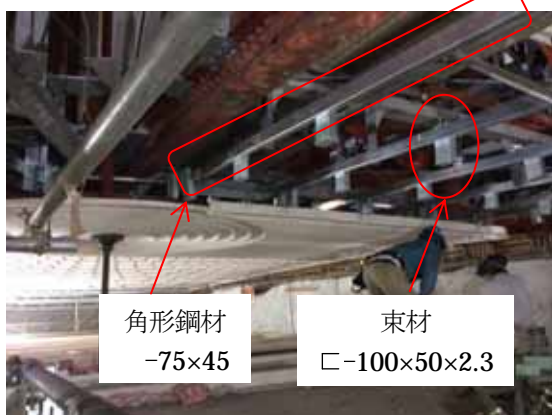
取付け部強度に関しては、想定荷重に対し十分な強度を有することがわかった。

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。

3.3 天井下地について

写真 - 5、図 - 1、図 - 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、 $\square-100 \times 50 \times 2.3$ 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設計により可能である。

検討の一例を図 - 3 に示す。



角形鋼材
-75×45

束材
 $\square-100 \times 50 \times 2.3$

写真 - 5 天井下地施工状況

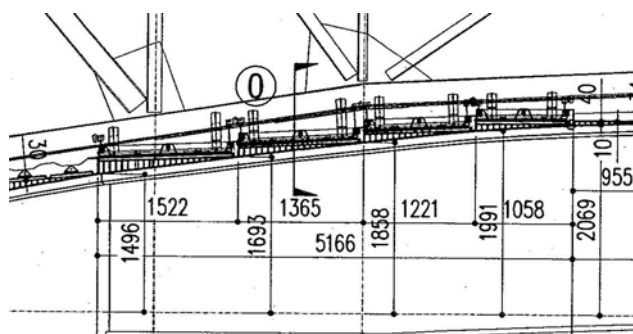


図 - 1 天井下地構成

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、国土交通省が告示で規定した特定天井にも当たらない。軽量化された天井板の荷重は全て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合い部分での変形による不具合が発生しないか確認することなどを目的に、振動台での耐震性確認実験を実施した。

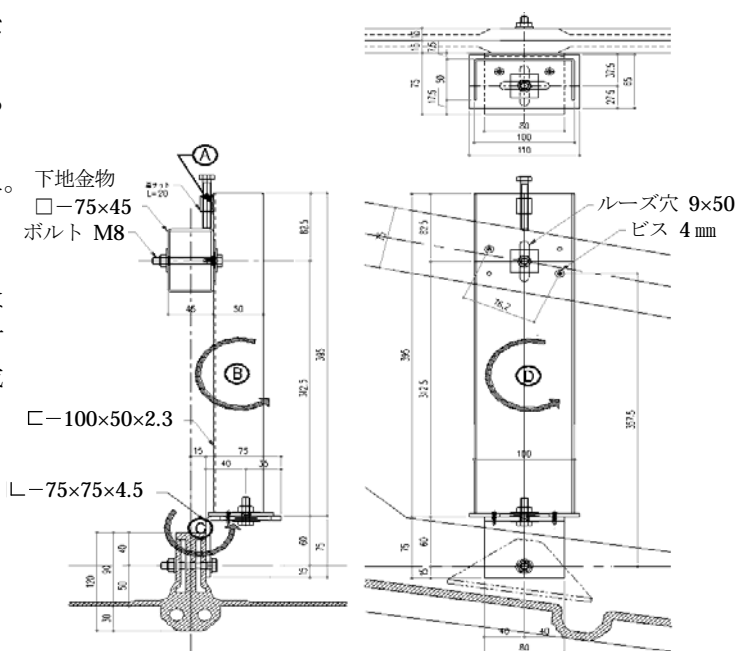


図 - 2 天井下地構成(詳細)

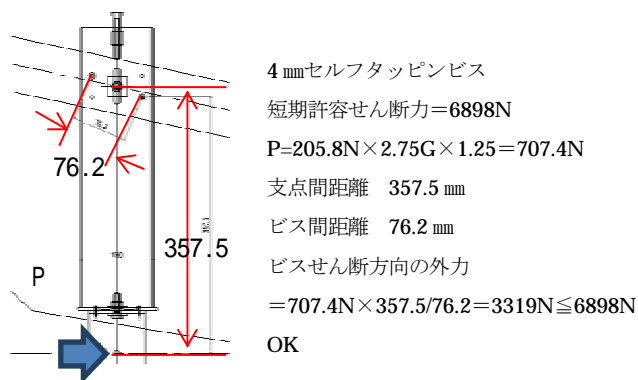


図 - 3 接合部強度確認例

4.1 振動台実験概要

躯体側1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。

4.2 試験体

試験体は図 - 4 に示す天井図から赤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 3.8m(D)×6.6m(W)×3.31m(H)のフレームで、上部に角パイプを取り付けて天井下部材を設置し、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。

試験体設置用フレームと試験体を測定位置とともに図-5、図-6に示す。

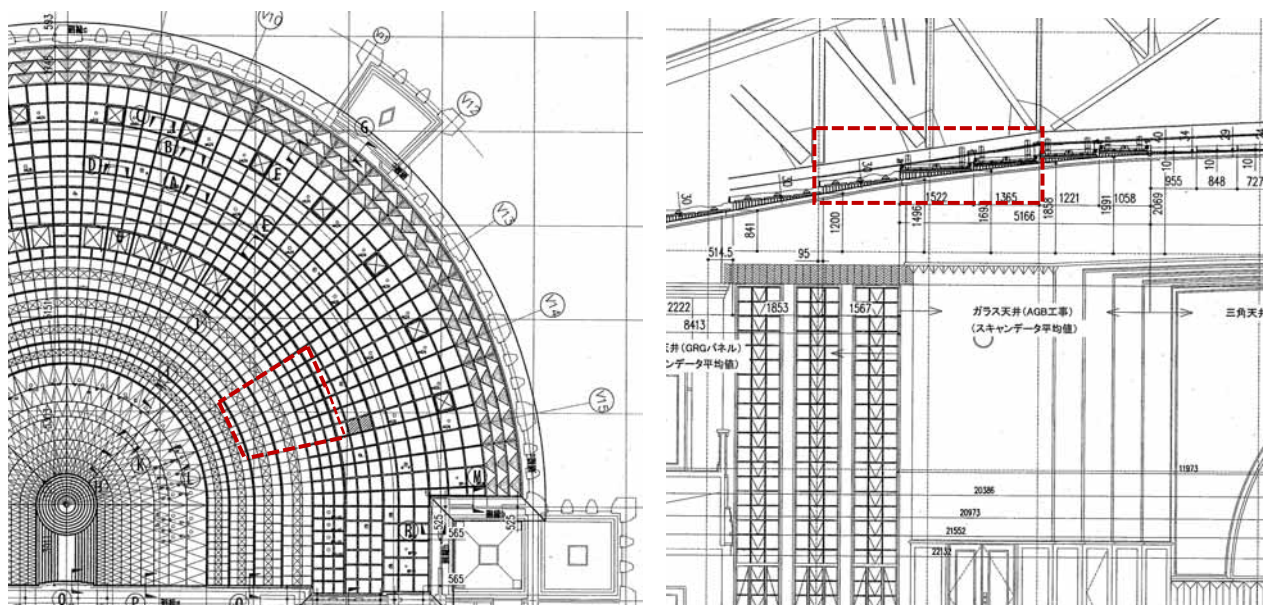


図-4 天井図と試験体として切り出した部分(赤い破線で囲った部分、左:平面図、右:断面図)

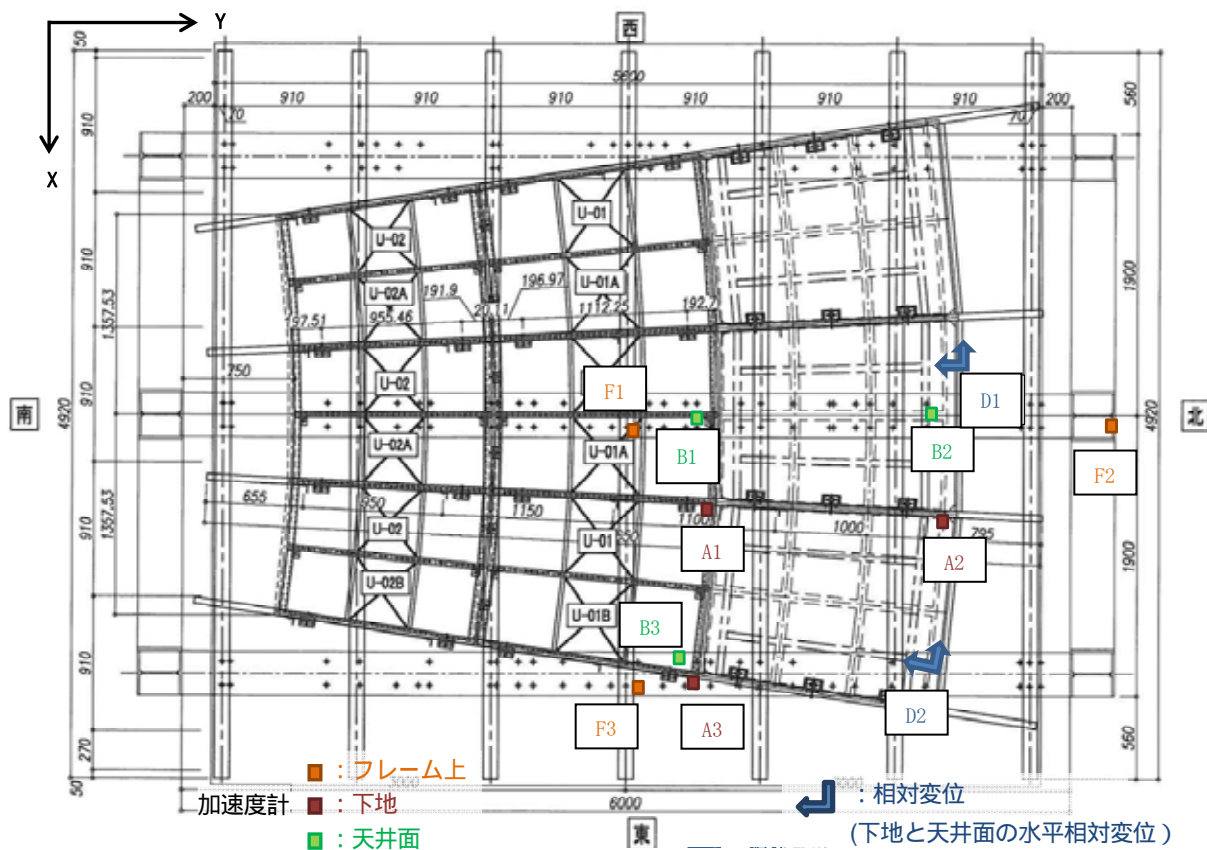


図-5 実験用フレームと試験体および測定位置(平面図)

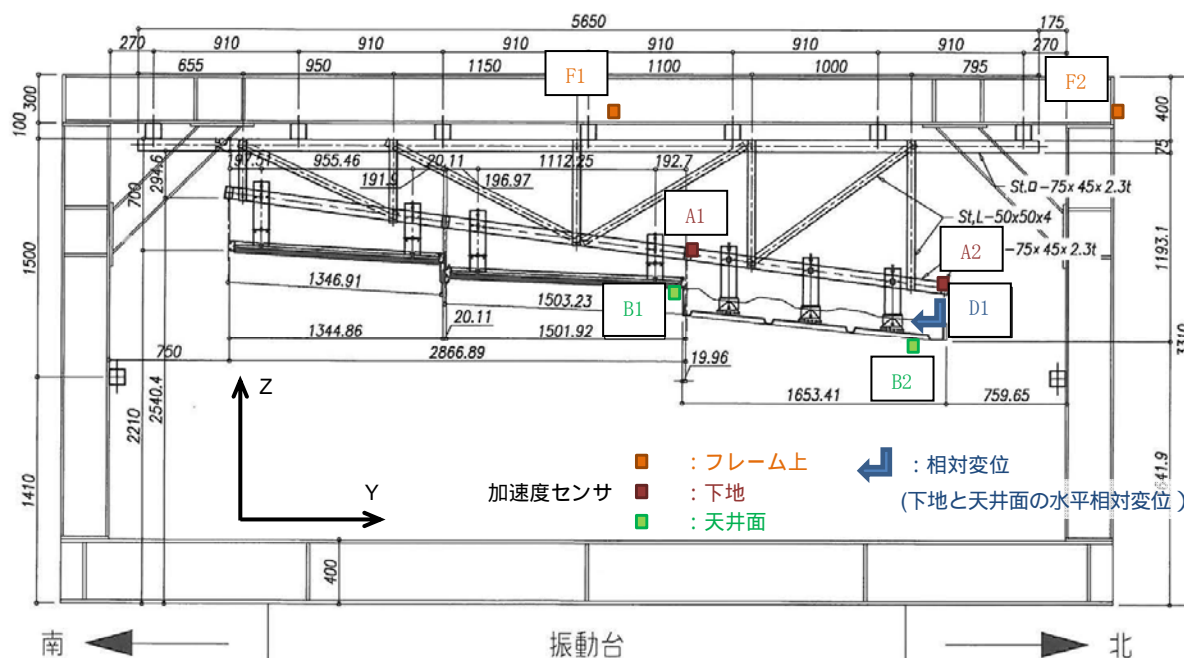


図 - 6 実験用フレームと試験体および測定位置(断面図)

4.3 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。ただし、振動台の変位制限を回避しながら加速度を大きくするために、**El Centro** 波にローカットフィルターをかけて処理した波形を用いた。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。

入力に用いた地震波を表 - 2 に示し、各波の時刻歴加速度波形と加速度応答スペクトルを図 - 7 に示す。

4.4 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のホワイトノイズ波 100 cm/s² 入力の加振を行った。図 - 8 にホワイトノイズ加振時の伝達関数を示す。

フレーム中央(F1)に対する天井面の伝達関数より固有振動数を確認すると、水平 X 方向はガラス面側で 13Hz(周期 0.08sec)、GRG 成形版側で 16Hz(周

表 - 2 入力地震波

名称	概要	X 方向	Y 方向	Z 方向
El Centro 波	1940 年インペリアル・バレー地震。カリフォルニア州 El Centro での観測記録波。	EW 成分	NS 成分	UD 成分
告示波	短周期帯の加速度応答スペクトル(減衰 5%)が 1G となる模擬波。ランダム位相。	水平成分 H2	水平成分 H1	鉛直成分
芳賀観測波	2011 年東北地方太平洋沖地震での KiK-net 芳賀(TCGH16)の観測記録波。	NS 成分	EW 成分	UD 成分

期 0.06sec)であり、水平 Y 方向はガラス面側中央で 28Hz (周期 0.04sec)、ガラス面側試験体端部で 21Hz(周期 0.05sec)であった。懐 1.5m 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 2~7Hz 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おり、図 - 7 の応答スペクトルでは短周期側の応答振動が比較的小さくなる領域にある。

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 2.75G 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 2.75G 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

を満足していると判断した。

地震波加振時の天井面応答加速度・変位を表-3に示すが、1回目の加振においてEl Centro波加振時の下地材(ぶどう棚)－天井面相対変位(2点の平均)は目標2.75Gの1/2加振時で2.0mm、目標2.75G時で3.2mm～3.4mm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3.5mm、Y方向2.0mmであり、加振後の損傷も全く見られなかった。

図-9に芳賀観測波加振時の応答加速度波形を、写真-7、写真-8に最終加振(芳賀観測波)後の試験体を示す。

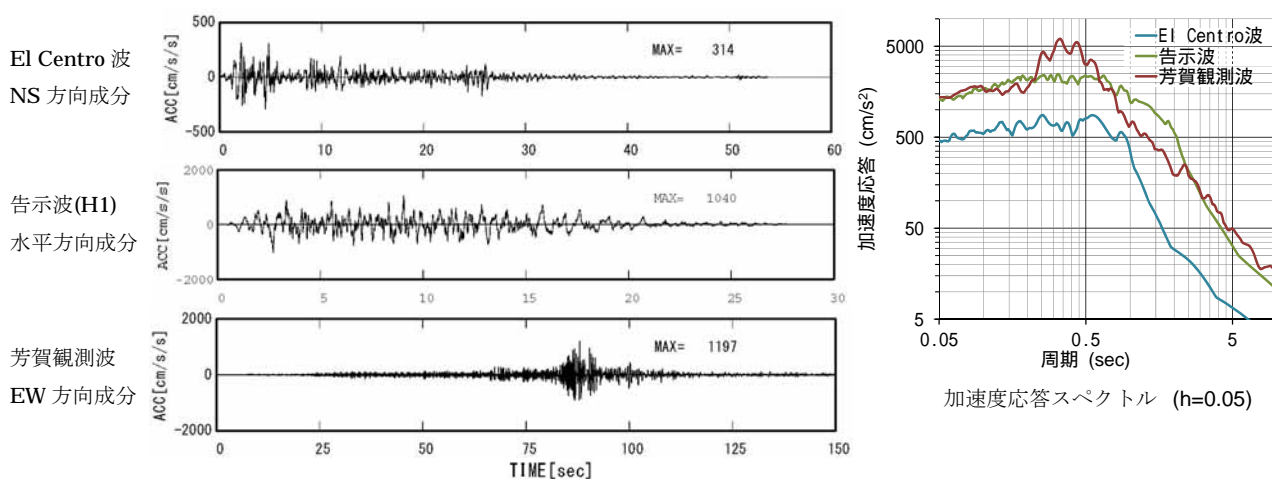


図-7 入力波の時刻歴加速度波形と加速度応答スペクトル(h=5%)

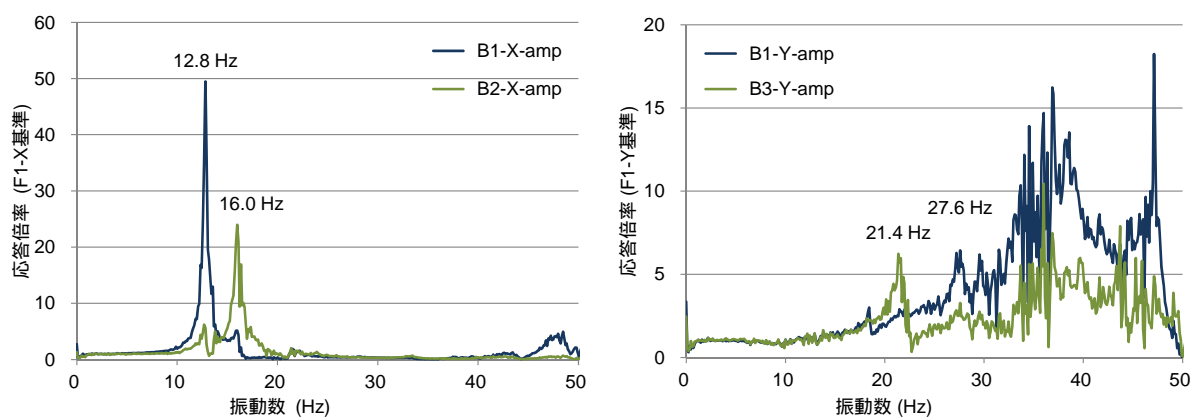


図-8 ホワイトノイズ加振時のフレームに対する天井面の伝達関数

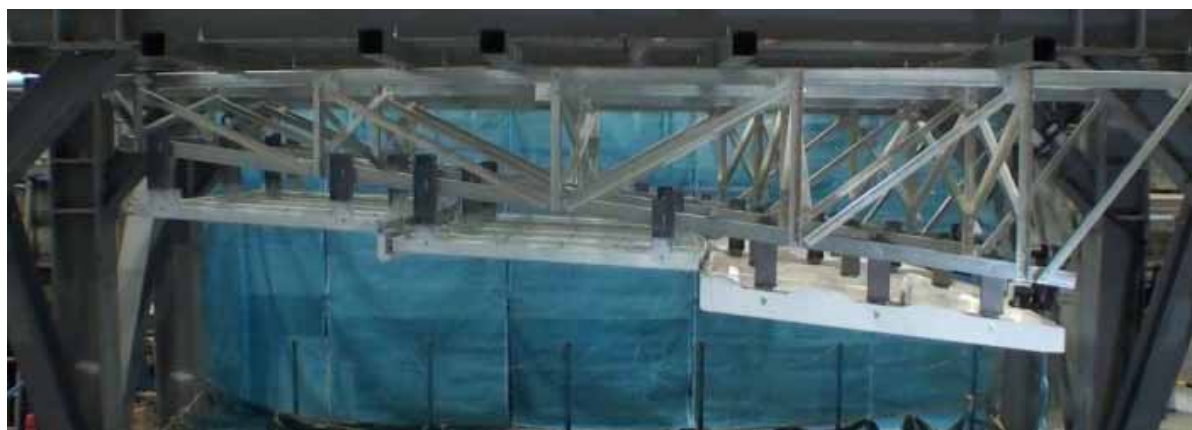


写真-7 芳賀観測波での加振後の試験体状況(無損傷)



写真 - 8 芳賀観測波での加振後の試験体状況(無損傷)

表 - 3 地震波加振結果^{※1}

入力波	天井面目標 水平最大加速度 (cm/s ²)	ぶどう棚鋼材下加速度 (cm/s ²)			天井面加速度 (cm/s ²)			ぶどう棚-天井面相対変位 (mm)		
		A1-X	A1-Y	A1-Z	B1-X	B1-Y ²	B1-Z	DX1,DX2平均	DY1,DY2平均	
1回目 解体 点検前	El Centro波 XYZ 目標の1/2倍	1348	1280.7	1613.3	1031.9	1589.3	1840.5	1615.6	1.98	0.20
	El Centro波 XYZ 目標2.75G	2695	2076.7	2271.0	1450.9	2559.4	2607.9	2483.2	3.42	0.59
	告示波 XYZ 目標2.75G	2695	1958.1	1441.3	787.8	2799.9	1728.5	1110.3	3.21	0.18
2回目 解体 点検後	El Centro波 XYZ 目標の1/2倍	1348	1308.8	1628.0	1009.1	1748.4	1854.4	1471.3	1.96	0.19
	El Centro波 XYZ 目標2.75G	2695	2035.7	2248.4	1434.8	2542.2	2568.6	2361.8	3.48	0.38
	告示波 YZ 目標2.75G	2695	208.8	1606.7	806.4	774.7	1867.8	1055.3	0.60	0.15
	告示波 XZ 目標2.75G	2695	2291.1	213.4	827.5	3208.7	260.5	1152.0	3.98	0.18
	芳賀観測波 XYZ ³	-	2069.6	2107.3	1304.5	2774.0	2549.9	1605.2	3.50	1.97

※1 記録波形からノイズを除去するために20Hzローパスフィルター処理した結果(最大値)

※2 実験用フレームのY方向の剛性がX方向に比べて小さかったため、目標の応答加速度2.75Gに届いていない

※3 解体点検前は試験体損傷の可能性がある芳賀観測波加振は行わなかった

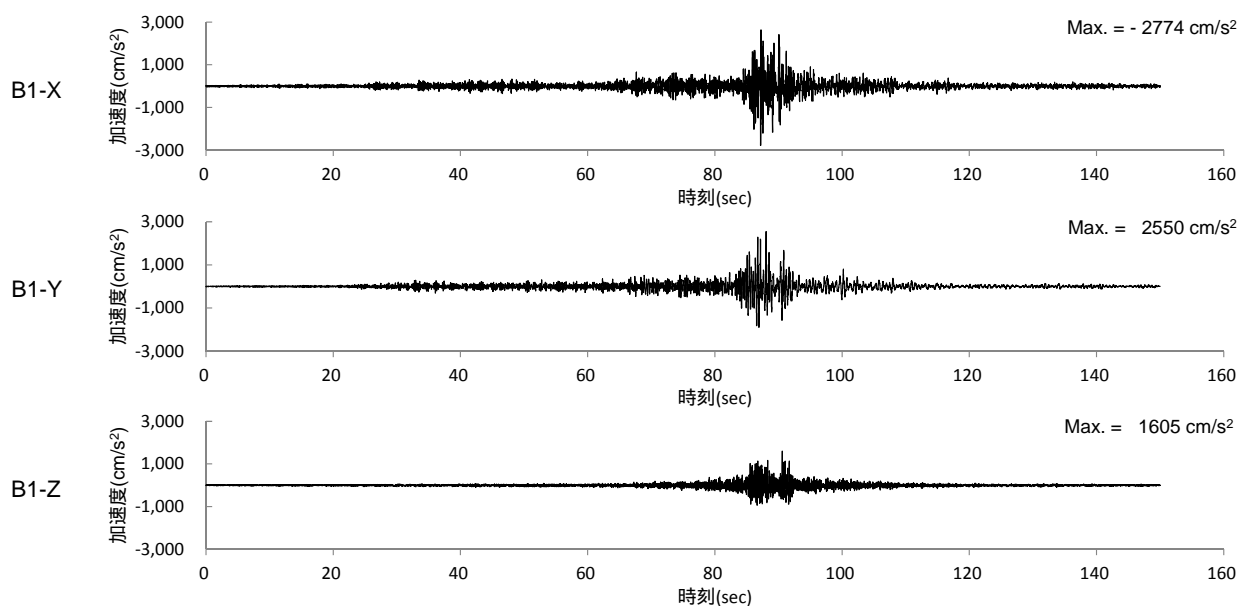


図 - 9 芳賀観測波加振時の天井面(B1)応答加速度波形 (20Hzローパスフィルター処理後)

5. 施工について

5.1 改修工事全体の施工

改修工事は2章に記載の通り多岐の内容に渡った。原則として意匠的には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。

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-10、写真-9参照)。

実測には3Dスキャン技術を用いた。レーザース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-11、図-12)。

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活用することとした。なお、外装材(タイル)や内装材(石材)、ホール座席等は、過去に老朽化や紛争時の損傷を復旧

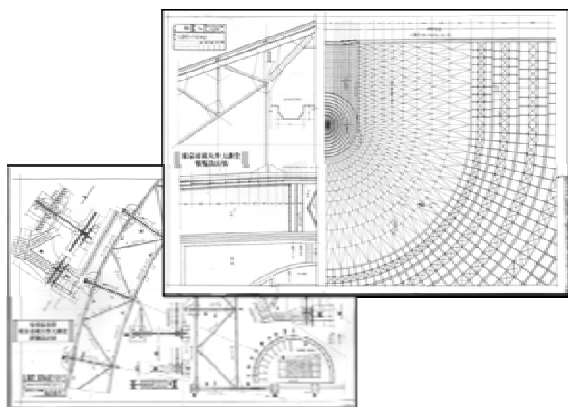


図-10 創建時の設計図



写真-9 創建時の竣工写真

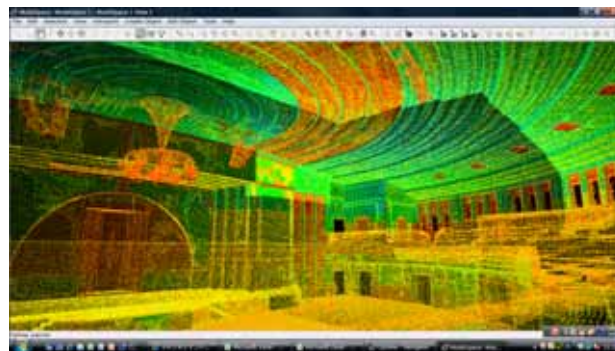


図-11 3次元計測した点群DATA



図-12 点群DATAから作図した既存鉄骨

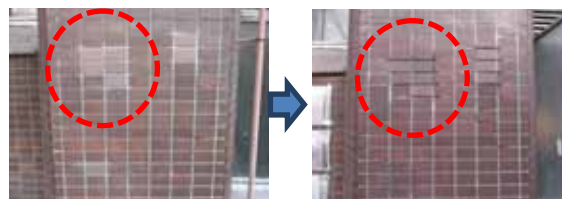


写真-10 改修タイルの創建時復元

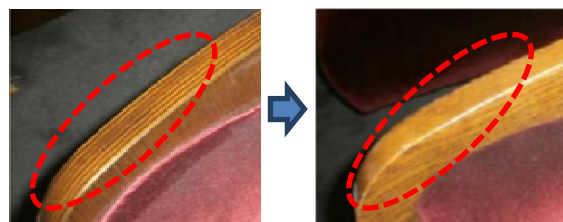


写真-11 ホール座席の創建時復元

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創建当時に戻す作業を実施した(写真-10、写真-11)。

5.2 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(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実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²⁾が示された。当告示は現時点では、フラットな形状で吊り長さが一定、天井質量が20 kg/m²以下のものに関する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できない。

仮に告示による吊り天井形式で考えた場合、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は、極めて難易度が高い計画となる。

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耐震性、適法性を確保した。

一方、日本建築学会からは天井に関するガイドライン³⁾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態である。

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、容易に耐震性確保できる様々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。

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、清家剛両先生、東京大学キャンパス計画室・同施設部、香山壽夫建築研究所、万建築設計事務所から様々な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、旭ビルウォール株式会社、株式会社紋郎美術工房、株式会社能重製作所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。

<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, 2012., pp.112.~119.
- 2) 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.
- 3) 日本建築学会 非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会, 調査報告書2013.03.06, 日本建築学会, 2013.