

既設駅舎の天井改良工法選定のための耐震設計法

清水 克将* 三木 広志* 山田 聖治*

Seismic Design for the Improvement Construction Method of the Ceiling of Existing Stations

Katsuyuki SHIMIZU Hiroshi MIKI Seiji YAMADA

The ceiling of stations has support - structural types different from those which the ceiling of general buildings has. For example, the case where the ceiling is hanged from the waterproof folded plate to prevent water leakage as is often the case with elevated stations, and the case where the ceiling is hanged from horizontal structural members such as the channel steel as is often the case with over - track buildings can be cited. For the evaluation of the seismic performance of the ceiling of stations, it is required that the structural performance of the support part of the ceiling is grasped. And it is required that the load acting on the ceiling during earthquakes is adequately evaluated. Shaking table tests and analytical studies of the suspended ceiling in consideration of the support part of existing stations are conducted. Seismic design for the improvement construction method of the ceiling of existing stations is proposed.

キーワード：鉄道駅，耐震天井，横架材吊り天井，二段天井，設計用地震力，耐震性能目標

1. はじめに

過去の地震において多くの一般建築物で吊り天井の崩落事故が発生した。鉄道駅は不特定多数の方が利用されることから、駅舎天井にはこのような地震被害を防止するために耐震安全性を確保することが重要である。一方、平成25年7月に建築基準法が改正さ

れ、一定条件の天井（以下、特定天井）に対する脱落対策の規定が追加された。また、同年10月および平成28年7月には「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説^{1) 2)}」（以下、天井技術基準）が示され、改正建築基準法の解釈や技術上の留意事項が取りまとめられた。

ラチ内コンコース等の駅舎天井は、建築基準法の適用対象外ではあるものの、多くの場合で建築基準法に準拠して設計されている。そのため、駅舎天井の設計に天井技術基準を適用するにあたっては、天井支持構造形式や駅施設の利用状況等の一般建築物とは異なる点を整理する必要が生じた。そこで、天井技術基準に示された耐震設計法を念頭に駅舎天井の実態に即した設計用地震力算定法を提案した。また、建築基準法改正前に設計・施工された既存天井について、保有している耐震性能を天井技術基準に基づいて検証した。

* 構造物技術研究部 建築研究室

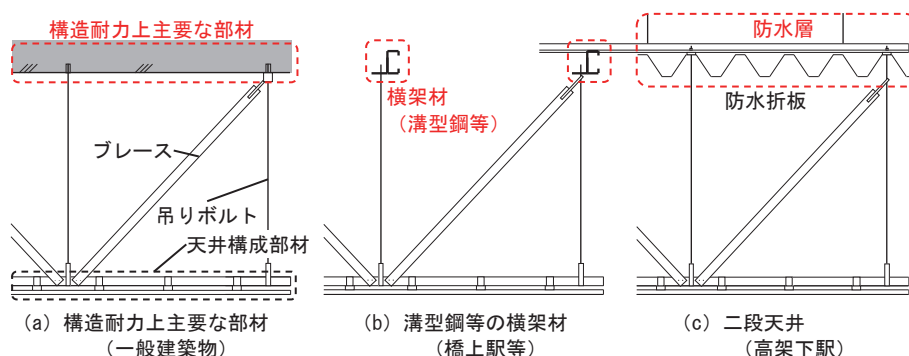


図1 天井が支持される部位

2. 駅舎天井の実態

ここでは、一般建築物とは異なる吊り形式となる駅舎天井について、その違いを述べると共に、課題を整理する。まず、一般建築物の吊り天井の天井技術基準における耐震化手法は、耐震ブレースを地震力の抵抗要素とした方式が一般的に実施され、吊り天井の吊り元は構造耐力上主要な部材から吊られていることが前提となっている（図1 (a) 参照）。一方、橋上駅等では、屋根折板の下地材（母屋材）や天井用に独立して設置された溝形鋼材等（以下、吊り元横架材）から吊り下げられる吊り天井形態となっている場合が多い（図1 (b) 参照）。また、高架下駅では、漏水対策のために高架下に防水折板（以下、防水天井）を設置し、仕上天井をこの防水天井から吊り下げる二段天井形態となっている場合が多い（図1 (c) 参照）。

上記のように構造耐力上主要な部材ではない部材から

特集：構造物技術

天井が吊られている場合では、天井技術基準に示されている天井の設計用地震力の算定法を用いた耐震設計を行うことが困難である。そこで、吊り元が天井の応答性状に与える影響を解析的および実験的検討により示し（3章）、吊り天井の設計用地震力の算定法を提案する（4章）。

3. 吊り元が天井応答に与える影響の把握

駅舎で使用される2つのタイプの吊り天井（吊り元横架材から吊られた天井、防水天井から吊られた天井）に対して、解析的および実験的検討により吊り元の性能が天井応答に与える影響を検討する。

3.1 吊り元横架材から吊られた天井

3.1.1 解析的検討

吊り元横架材の断面の違いが吊り元横架材を含めた天井の層全体剛性に与える影響を把握するため、吊り元横架材断面をパラメータとした天井の弾性解析を行った。解析対象とした吊り天井の構成は図2に示すように、小梁間に設置した吊り元横架材から天井を吊り下げ、吊り元横架材の弱軸方向に耐震ブレースを設置したものである。検討方向は吊り元横架材の弱軸方向であり、天井面と吊りボルトとの各交点位置に均等に水平力を与えた。

剛な吊り元から吊られた天井の層剛性で規準化した吊り元横架材断面毎の天井の層剛性の解析結果を表1に示す。吊り元横架材の断面二次モーメントが大きいほど、耐震ブレースが取り付け吊り元横架材の変形が小さくなることから、天井の層全体の剛性が高くなる事が分かる。

3.1.2 振動台実験による検討

吊り元横架材の違いや吊り元横架材の端部支持条件が天井応答に与える影響を実験により検証するため、振動台上に設置した支持架構に横架材と吊り天井で構成される試験体を作成し振動実験を行った。図3に実験概要を示す。実験パラメータは、吊り元横架材の断面（C-100×50×20×3.2、C-150×75×20×3.2の2ケース）および横架材の端部支持条件（ピン、固定の2ケース）である。実験パラメータ以外の吊りボルト、耐震ブレースおよび天井構成部材は表2に示す通り全て同一とした。天井の設計震度は、2階建て橋上駅の2階部分を想定して16.5m/s²で天井許容耐力以下となるように設定した。なお、耐震ブレース1組で負担する天井面積を10m²（単位重量100N/m²）とし、実験の制約上不足する天井面積分は付加質量で調整した。入力地震動は、建築告示波で位相を神戸NS、八戸EW、ランダム3種類とし、微小レベルから加振レベルを徐々に大きくして加振を行った。

天井面最大加速度と吊り元横架材のたわみ角の関係を図4に示す。天井面最大加速度が大きくなると横架材の

たわみ角も増大する。同じ天井面最大加速度で比較すると、吊り元横架材断面の大きい方が、また端部支持条件が固定の方が、吊り元横架材たわみ角が小さい事がわかる。

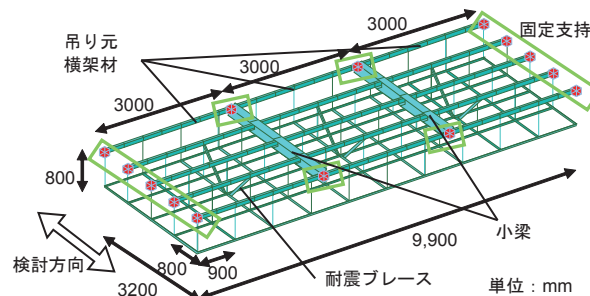


図2 解析モデル

表1 天井層剛性の解析結果

吊り元横架材の断面形状 (mm)	吊り元横架材の弱軸方向の断面二次モーメント (cm ⁴)	天井層剛性の剛な吊り元との比
剛な吊り元	—	1.00
L-25 × 3	0.332	0.015
L-50 × 6	5.23	0.102
[-75 × 40 × 5 × 7	12.2	0.147
[-100 × 50 × 5 × 7.5	26.0	0.258
C-100 × 50 × 20 × 2.3	19.0	0.180

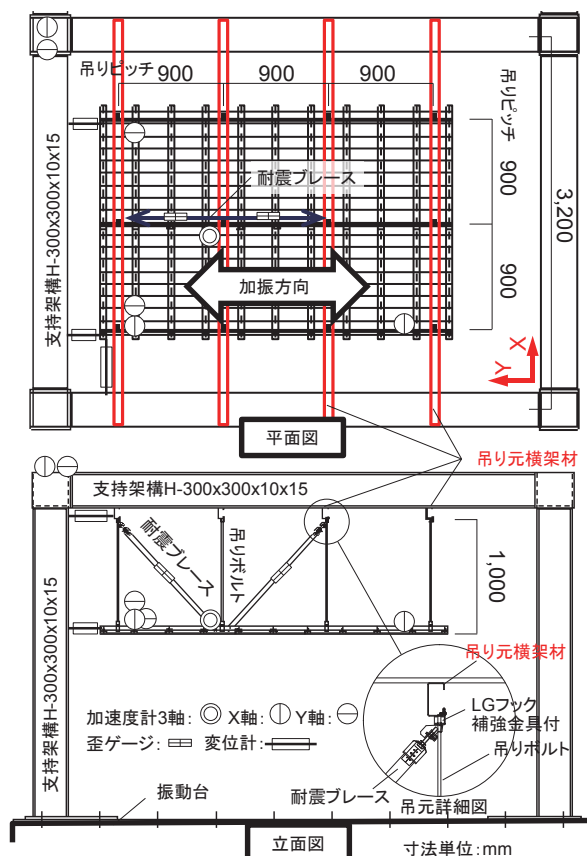


図3 吊り元横架材天井の振動台実験概要

ここで、設計荷重 16.5m^2 に対するたわみ角の制限値を、天井技術基準の設計例を参考に $1/300$ 以下とすると、制限値を満たすものは本実験では吊り元横架材 C-150 の固定支持条件のみである。

以上の解析的および実験的検討により、吊り元横架材のように剛性の低い部材を吊り元とする場合には、吊り元を含めた天井全体の評価が重要であり、天井面の設計用地震力を算定する際には、吊り元横架材の影響を考慮する必要があることが分かる。

3.2 防水天井から吊られた天井

3.2.1 解析的検討

高架下天井を対象として、剛な吊り元である高架橋から防水天井と仕上天井が吊られた二段天井を想定して、防水天井および仕上天井の応答性状を把握するため、動的解析を実施した。解析モデルは図5に示す通り防水天井および仕上天井を2質点系に置換したモデルである。防水天井および仕上天井の質量は、それぞれの面積が 10m^2 程度のものを想定し、防水天井単体の固有周期は 0.1s で固定とし、仕上天井の固有周期を $0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{s}$ と変動させた。減衰は 5% とし、吊り元(高架橋)にホワイトノイズを入力した。

この解析モデルの吊り元(高架橋)から、防水天井および仕上天井への応答増幅を図6に示す。高架橋から仕上天井の増幅(図6(a))では、防水天井と仕上天井の固有周期が離れている場合には、それぞれ単体の固有周期に近い周期で増幅しており、防水天井と仕上天井の固有周期が近い場合には、連成固有周期においてのみ増幅している。一方、高架橋から防水天井への増幅(図6(b))では、防水天井の方が仕上天井より重量が重いことから、防水天井と仕上天井の固有周期が離れている場合には、防水天井の固有周期近傍のみで大きな増幅が見られ、防水天井と仕上天井の固有周期が近い場合には、仕上天井と同様に連成固有周期で増幅していることがわかる。

3.2.2 振動台実験による検討

二段天井の応答性状を検証するため、振動台上に設置した支持架構に二段天井を設置して加振を行った。実験概要を図7に示す。実験パラメータは仕上天井の層剛性の異なる2パターン(加振方向が野縁受け方向と野縁方向)である。防水天井(加振方向が流れ方向)やその他の天井構成部材は全て同一とした。天井面積は、耐震ブレースが1組で負担する天井面積を 10m^2 (単位重量: 仕上天井 $100\text{N}/\text{m}^2$, 防水天井 $194\text{N}/\text{m}^2$) とし、実験の制約上不足する仕上天井および防水天井の面積分は付加質量で調整した。仕上天井は許容耐力 1700N (メーカー提示値)のものを採用し、防水天井は予備応答解析から仕上天井に先行して許容耐力に至らないように設定した。防水天井の諸元を表3に、仕上層吊り元の詳細を図8に

示す。なお、仕上天井の諸元は表2と同一である。入力地震動も前節と同様である。

支持架構最大加速度と防水天井および仕上天井の最大加速度を図9に示す。同じ支持架構最大加速度で仕上お

表2 吊り元横架材天井の諸元

吊りボルト	W3/8@900mm
吊り長さ	1000mm
耐震ブレース	C-40
野縁受け	CC-19
野縁	CW-19
天井材	アルミスパンドレル 幅 100mm, 厚さ 0.8mm
天井面積	6m^2 (想定天井面積 10m^2)
横架材と吊りボルトの接合部材	LG フック (補強金具付)

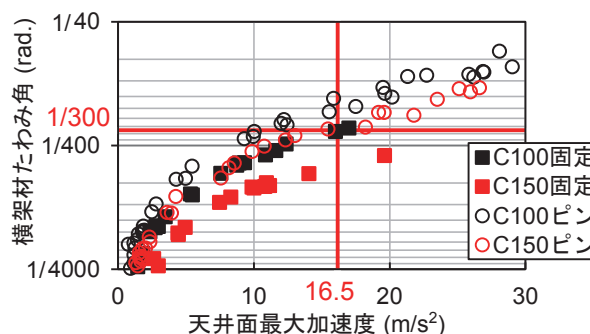


図4 天井面最大加速度と横架材たわみ角の関係

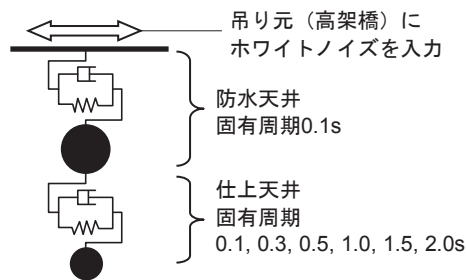
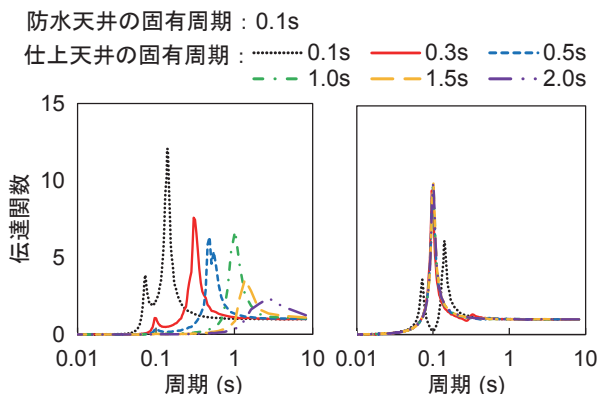


図5 二段天井の解析モデル



(a) 仕上天井／高架橋 (b) 防水天井／高架橋

図6 応答加速度の伝達関数

特集：構造物技術

よび防水天井の最大加速度を比較すると、入力地震動の位相の違いによりばらつきはあるものの、仕上天井>防水天井の関係となっていることがわかる。

以上の解析的および実験的検討により、防水天井と仕上天井が二重振り子となって仕上天井の応答が増幅していることから、防水天井と仕上天井の設計用地震力を算定する際には、連成を考慮する必要があることが分かる。

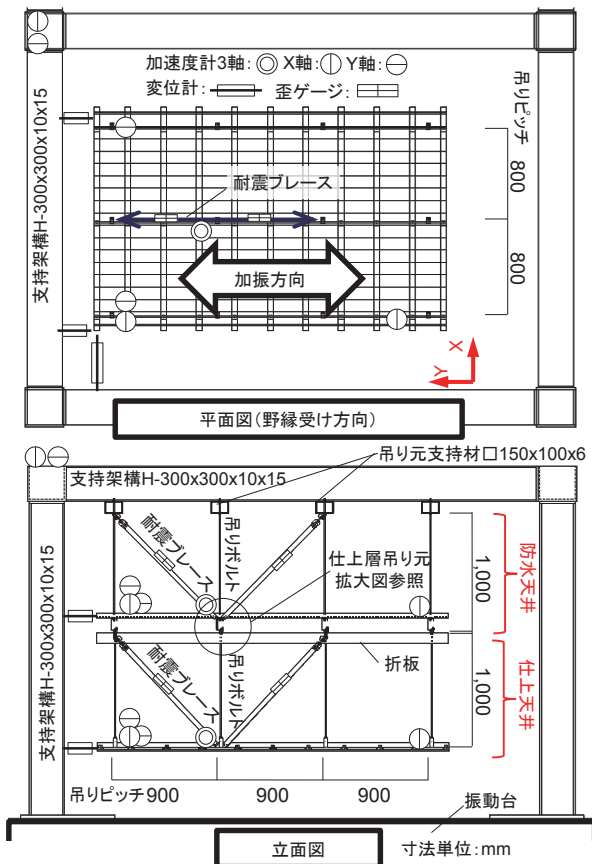


図7 二段天井の振動台実験概要

表3 防水天井諸元

吊りボルト	W3/8@900mm
吊り長さ	1000mm
耐震ブレース	C-40
吊り受け材	L-50 × 50 × 6
折板下地材	C-100 × 50 × 20 × 2.3
折板	H-88 × t0.6@200
折板面積	6m ² (想定面積 10m ²)

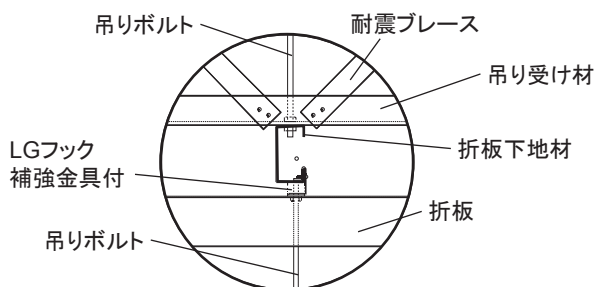


図8 仕上天井吊り元詳細

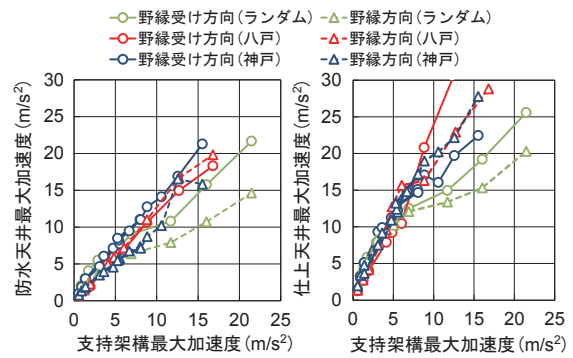


図9 最大絶対加速度

(左：防水天井，右：仕上天井)

4. 吊り元の影響を考慮した吊り天井の設計用地震力の算定法

前章で示したように、駅舎で使用される2つのタイプの吊り天井（吊り元横架材から吊られた天井、防水天井から吊られた天井）は、吊り元の剛性によって吊り天井の応答が異なることや、構造耐力上主要な部材から二重振り子で吊られる挙動を示すことがわかった。一方、天井技術基準で示されている設計用地震力は、吊り元が構造耐力上主要な部材で吊られていることを前提として、1質点系の吊り天井の地震力を算定するものであり、吊り元が構造上主要な部材ではない吊り天井や、2質点系となる二重振り子タイプの吊り天井の各層の地震力を直接求めることができない。そこで、駅舎で使用されるこの2つのタイプの吊り天井のそれぞれについて、設計用地震力の算定法を示す。

4.1 横架材吊り天井の設計用地震力の算定法

吊り元横架材から吊られた天井で、仕上天井単体の剛性が吊り元横架材の剛性に対して十分に大きな値の場合には、吊り元横架材の剛性が低いことによる吊り免震に近い挙動で応答性状を表現することができる。そこで、横架材吊り天井の設計用地震力の算定では、吊り元横架材と仕上天井の直列剛性と全質量による1質点として求めた設計用震度に、天井質量を乗じたものを天井の設計用地震力とし、この震度に全質量をかけたものを吊り元横架材の設計用地震力とする。算定法の具体的な流れを図10および以下に示す。

手順①：横架材質量 M_p と仕上天井質量 M_c を合計した質量 $M=M_p+M_c$ と、横架材剛性 K_p と仕上天井剛性 K_c の直列剛性 $K=1/(1/K_p+1/K_c)$ を用いた1質点系に縮約する。

手順②：縮約した1質点系の固有周期 $T=2\pi\sqrt{(M/K)}$ を用いて天井技術基準に示す応答スペクトル法により設計用震度 (k_h) を求める。

手順③：横架材および仕上天井の設計用地震力 (Q_p, Q_c) を以下により求める。

$T \leq 0.1s$ の場合：

横架材と天井が剛であると判断し、天井技術基準における天井が剛である場合の設計用震度に M を乗じる。ここで、判断基準となる周期 $0.1s$ は天井技術基準において天井が剛と判断する判別式を参考に設定した。

上記以外：

$$Q_p = k_h(M_p + M_c) \quad (1)$$

$$Q_c = k_h M_c \quad (2)$$

3. 1節で実施した吊り元横架材から吊られた天井の振動台実験結果を用い、上記提案法による仕上天井の最大層せん断力および吊り元横架材たわみ角の比較を表4に示す。提案法は、実験値に概ね近い層せん断力を評価できており、また、吊り元横架材のたわみ（水平変位）は安全側に評価していることがわかる。

なお、この算定方法の前提条件は、天井の各接合部が強固に固定されていることである。防水天井下地材と仕上天井の吊りボルトの接続部には様々な仕様があるが、ここで提案する算定法は、応答性状にモード解析が適用できることが背景にあるため、地震外力を受けた際に容易に滑動するような接合部の場合は適用できない。また、本算定法は、仕上天井単体の剛性が吊り元横架材の剛性に対して十分に大きな値であることを前提としている。そのため、天井と吊り元横架材の水平剛性が近接する場合には、次節の方法により評価する必要がある。

4.2 二段天井の設計用地震力の算定法

防水天井から吊られた仕上天井の場合は、二重振り子のように挙動すると仮定して扱う必要がある。厳密にはモーダルアナリシスを行うことになるが、ここでは簡便に設計用地震力を算定することを目的に、防水天井の設計用地震力については、連成固有周期をもつ1質点系として求めた設計用震度に防水天井と仕上天井の合計質量を掛け合わせたものとする。また仕上天井は、防水天井からの増幅を建設省告示第1793号のせん断力係数の高さ方向の分布係数（以下、 A_i 係数）を用いた設計用地震力として算定する。算定法の具体的な流れを図11および以下に示す。

手順①：2質点系の連成1次および2次モード固有周期 (${}_m T_1, {}_m T_2$) を求める。ここで、仕上天井および防水天井それぞれ単体の固有周期 (T_w, T_c) が既知の場合には、以下の式(3)～式(5)により連成固有周期を求める。

$${}_m T_1 = \sqrt{p + \sqrt{p^2 - q^2}} \quad (3)$$

$${}_m T_2 = \sqrt{p - \sqrt{p^2 - q^2}} \quad (4)$$

ここに、 $p = \frac{(1+b)T_w^2 + T_c^2}{2}$, $q = T_w T_c$, $b = \frac{M_c}{M_w}$ (5)

手順②：各モードに対して天井技術基準に示す応答スペクトル法により設計用震度 (k_{h1}, k_{h2}) を算出する。

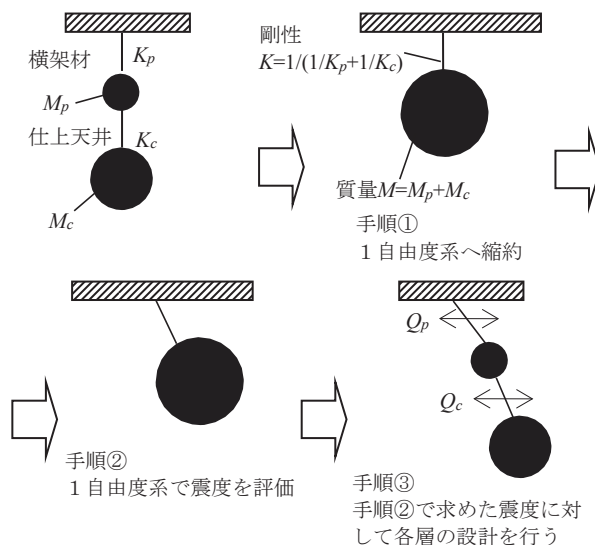


図10 吊り元横架材から吊られた天井の設計用地震力の算定方法の概要

表4 提案法と実験結果の比較

	提案法	実験値
吊り元横架材たわみ角 (rad)	1/145	1/317
仕上天井最大層せん断力 (kN)	1.53	1.26

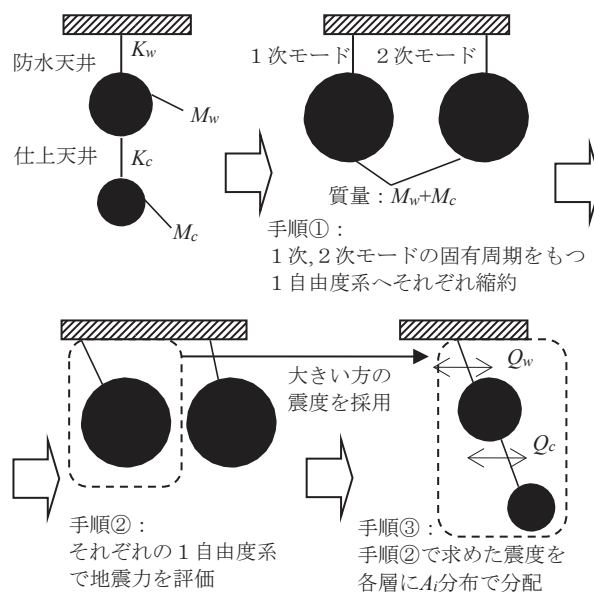


図11 防水天井から吊られた仕上天井の設計用地震力の算定方法の概要

手順③：各層の設計用地震力 (Q_w, Q_c) を以下により求める。

${}_m T_2 < {}_m T_1 \leq 0.1s$ の場合：

二段天井が剛であると判断し、天井技術基準における天井が剛である場合の設計用震度に $M_w + M_c$ を乗じる。ここで、判断基準となる周期 $0.1s$ は天井技術基準において天井が剛と判断する判別式を参考に設定した。

上記以外の場合：

$$Q_w = \max(k_{h1}, k_{h2})(M_w + M_c) \quad (6)$$

特集：構造物技術

$$Q_c = A_c Q_w M_c / (M_w + M_c) \quad (7)$$

ここで A_c は 2 質点系のみから算出する A_i 係数であり以下の式 (8)、式 (9) により求める。

$$A_c = 1 + (1/\sqrt{\alpha_c - \alpha_c}) 2_m T_1 / (1 + 3_m T_1) \quad (8)$$

$$\alpha_c = M_c / (M_w + M_c) \quad (9)$$

なお、前述のように防水天井の地震力算定時にモード質量で地震力を算定すれば、より正確な地震力を算出できる。しかし本提案では、算定の簡便さと設計用地震力を安全側（大きめ）に算出することを目的に、全質量を用いている。

3. 2 節で実施した二段天井の振動台実験結果を用い、上記提案法によって算出した最大層せん断力の比較を表 5 に示す。この結果から、提案法は実験値に対して安全側に層せん断力を評価できることがわかる。

なお、この算定方法の前提条件は、前節と同様に天井の各接合部が強固に固定されていることである。防水天井下地材と仕上天井の吊りボルトの接続部には様々な仕様があるが、ここで提案する算定法も、横架材吊天井と同様に応答性状にモード解析が適用できることが背景にあるため、地震力を受けた際に容易に滑動するような接合部であれば適用はできない。

5. 建築基準法改正前の吊り天井の性能評価

前章までは、駅舎天井特有の吊り天井に対する設計用地震力算定法について述べた。本章では、建築基準法改正前に設計・施工された既存の吊り天井の中で、設計用地震力を $9.8m/s^2$ (1.0G) として耐震設計されている天井を対象に、天井技術基準に示されている簡易スペクトル法を用いた天井の設計用地震力が 1.0G を超過する場合の建物一次固有周期と天井固有周期の関係を求めた。

その結果を図 12 に示す。図中に示した線を下回る組み合わせでは、天井の設計用地震力が 1.0G 未満となるため、建築基準法改正前の天井であっても耐震性が確保されている。また、地盤種別で多少の差異はあるものの、短周期側ではほぼ同様の関係を示している。なお、本検討は、天井が構造耐力上主要な部材から吊られていることを前提にした解析であるため、構造耐力上主要な部材から吊られていない場合には、4 章に示した方法などで設計用地震力を求める必要がある。

6. おわりに

構造耐力上主要な部材から吊られていない天井の設計用地震力の設定法について、吊り元横架材から吊られている場合と防水天井から吊られている場合のそれぞれについて提案し、その精度を検証した。また、建築基準法改正前の既存天井の耐震性能検証の結果、建築基準法改

正後の耐震性能を満足する建物と天井の固有周期の組み合わせを示した。

以上の他に、不特定多数の方が利用されることを考慮した天井の耐震性能目標の設定 (図 13) や、天井耐震化事例の収集等の検討項目を整理し、駅舎天井の耐震設計に資する設計資料集として取りまとめる予定である。

謝 辞

本報告の内容は、JR、民鉄および鉄道運輸機構で構成された鉄道駅における耐震天井に関する検討会（事務局 鉄道総研）において検討を行ったものである。関係各位に謝意を表します。

表 5 提案法と実験結果の比較

		提案法	実験値
最大層せん断力 (kN)	防水天井	3.88	2.01
	仕上天井	1.64	1.13

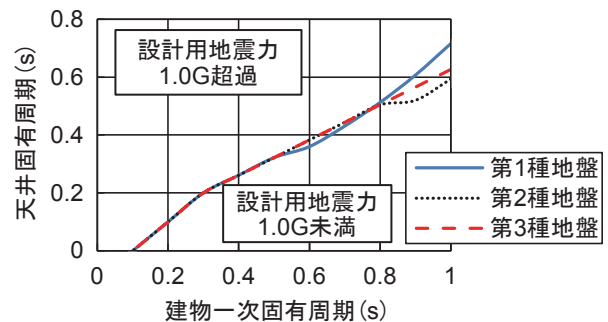


図 12 設計用地震力が 1.0G を超える建物一次周期と天井周期の組み合わせ

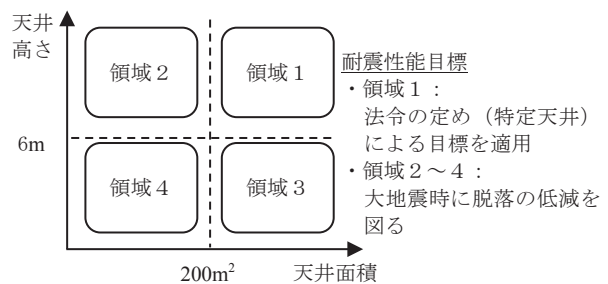


図 13 天井規模毎の耐震性能目標

文 献

- 1) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説（平成 25 年 10 月版），2013
- 2) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説（平成 28 年 7 月版），2016

■ 2018年2月号（特集：構造物技術）の訂正

特集論文の図中に誤りがありました。

以下のように訂正させて頂き、お詫び申し上げます。

【訂正箇所】

P. 47 図1中の一部表記

【誤】

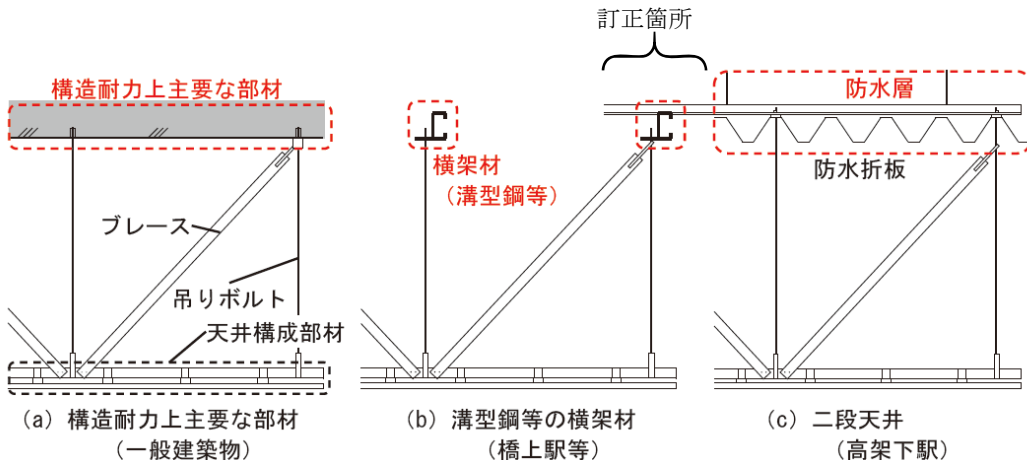


図1 天井が支持される部位

【正】

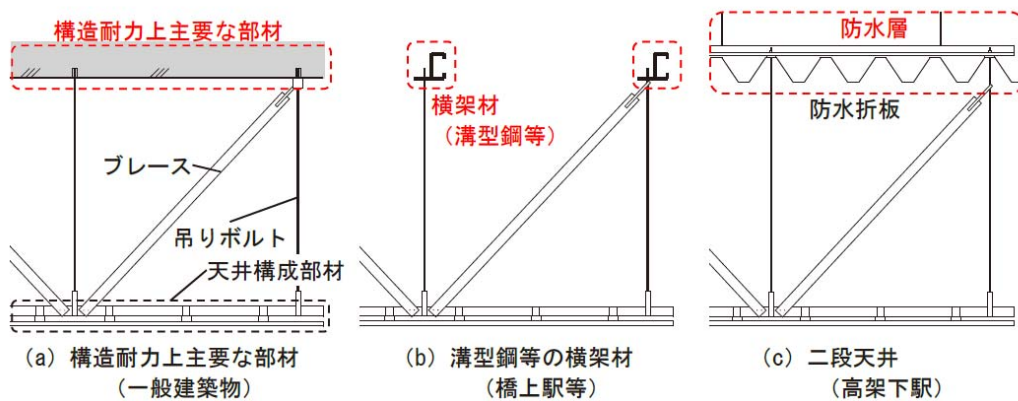


図1 天井が支持される部位