

# 吊り長さの短い駅舎天井の耐震改修工法

清水 克将\* 三木 広志\* 山田 聖治\*

## Seismic Reinforcement Method for Suspended Ceilings with Shorter Hanging-Distance

Katsuyuki SHIMIZU Hiroshi MIKI Seiji YAMADA

In stations built beneath low viaducts, since the cavity between the viaduct bottom and the suspended ceiling over the station is small, it is difficult to install the usual anti-seismic braces used for reinforcement. In addition, anti-vibration rubber that is usually used as a noise abatement in a conventional method, weakens this type of structure's anti-seismic reinforcement performance. As such, we developed a less costly, more practical seismic reinforcement method, where the ceiling cavity is not obstructed. Structural cyclic loading tests were carried out to evaluate the anti-seismic performance of this method. This method demonstrated a strong anti-seismic performance. In addition, acoustic tests were conducted for a new construction method that replaces the conventional one. It demonstrated the same noise reduction effect as the conventional method.

キーワード：耐震天井，吊り長さ，鋼管，列車騒音対策

### 1. はじめに

不特定多数の人が利用する駅施設では、駅空間の耐震安全性の確保が重要であり、駅空間を構成する部材の一つである天井の耐震安全性の確保も重要である。駅施設の天井については、建築基準法や同法に基づく技術的助言を準用しながら安全性に配慮してきている。しかし、高架下駅で高架橋高さが低い場合等では、天井吊り長さ（天井懐高さ）を十分確保できないことから、一般的な耐震改修工法の適用が困難である。

また、駅舎の天井では、耐震性の確保と同時に、駅利用者の快適性の観点から、騒音対策も重要である。高架下駅等では、列車走行時に大きな列車騒音にさらされる場合があり、従来は防振ハンガーによる騒音対策が実施されている。しかし、防振ハンガーは一般的な耐震改修工法との両立が困難である。

以上を踏まえ、まず、吊り長さの短い天井に対する新たな耐震改修工法を開発した。本工法は、一般的な耐震改修工法である斜め材を用いず、天井裏空間を大きく阻害しない特徴がある。次に、本耐震改修工法に適用可能な騒音対策を検討した。本対策は、実駅における騒音伝搬経路を考慮しており、様々な耐震改修工法と両立可能となっている。そして、吊り長さの短い天井に対する列車騒音対策を組み合わせた耐震改修工法として提案する。

### 2. 吊り長さの短い天井の耐震改修工法

高架下駅で高架橋高さが低い場合等では、天井吊り長さを十分確保できないものの、天井裏への設備配管等の

\* 構造物技術研究部 建築研究室

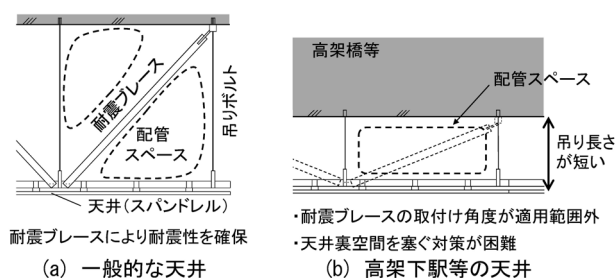


図1 吊り長さの短い天井における耐震化の課題

スペースを確保することは通常高さの天井と同様に求められる。この場合、「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」<sup>1)</sup>（以下、天井技術基準）における一般的な耐震改修工法である斜め部材（耐震ブレース，図1(a)）は、天井裏空間を塞ぐために適用が困難である（図1(b)）。一方、吊りボルト等の天井下地材を溝形鋼等で構成する手法も考えられるが、高架橋へ溝形鋼等を固定するためのアンカー施工や天井のレベル調整等の施工が困難であること等の課題がある。そこで、本章では、まず、耐震改修を実施しない場合の吊り長さの短い天井の耐震性能について解析的な検討を行う。そして、鉄道総研で新たに開発した施工性が高く安価で、天井裏空間を遮蔽しない耐震改修工法の概要を示すとともに、その耐震性能を構造実験により検証する。

#### 2.1 吊り長さの短い天井の耐震性能

吊り長さが短い天井の場合には、吊りボルトのせん断スパンが通常吊り長さの天井に比べて短いことから、耐震改修を実施しなくとも耐震性能を満足する可能性が考えられる。そこで、耐震改修を実施しない吊り長さの短い天井の耐震性能について解析的な検討を行う。

2.1.1 解析結果

解析モデルを図2に、解析モデルの仕様を表1に示す。天井を構成する吊りボルト（上端固定支持）、野縁受け、野縁はすべて梁要素とした。また、ハンガーは、ハンガーの板厚と同断面の板要素とし、吊りボルトと野縁受けの間に配した。これらの材料はSGCC材（許容応力度 $270\text{N/mm}^2$ ）として材料非線形性を考慮せず弾性体とした。クリップは、既往のクリップの試験結果より得られる剛性<sup>2) 3)</sup>の平均値を用いた弾性連結ばね要素とし、野縁と野縁受けの間に配した。天井材（スパンドレル）はモデル化せず重量のみ考慮した。水平荷重は、天井技術基準の水平震度法の1層建物の設計震度1.47Gを用いて、野縁と野縁受けの各交点に静的に与えた。解析パラメータは、吊り長さ（250～450mmの5ケース）および載荷方向（野縁、野縁受け方向の2ケース）である。

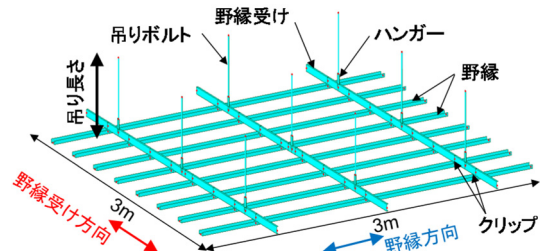


図2 解析モデル

表1 天井仕様（寸法の単位はmm）

吊りボルト	梁要素：3/8" @900
ハンガー	板要素：RPハンガー-C38用を想定し b23×h73×t3.2
クリップ	ばね要素：野縁方向 20kN/m, 野縁周り 12Nm/rad 野縁受け方向 82kN/m, 野縁受け周り 5.3Nm/rad
野縁受け	梁要素：CC-19@900
野縁	梁要素：CS-19@300
天井重量	900N（天井面積9m <sup>2</sup> , 単位重量100N/m <sup>2</sup> ）

2.1.2 解析結果

吊り長さ450mmの変形図を一例として図3に示す。載荷方向によって変形形状が異なっている。野縁受け方向では吊りボルト上下端が固定となっているが、野縁方向では下端はピンに近く、層間変形が45mmと大きい。これは、吊りボルト下端が、野縁受け方向では野縁受けの強軸周りの曲げにより抵抗するのにに対し、野縁方向では野縁受けのねじれにより抵抗するため、吊りボルト下端の固定度が低かったことが要因と考えられる。

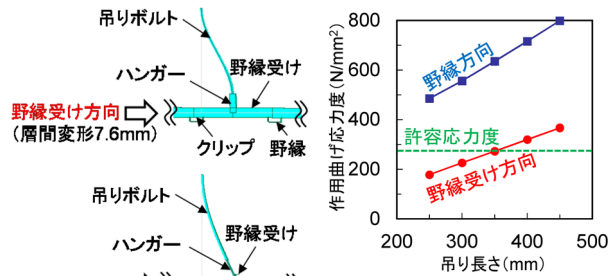


図3 変形図

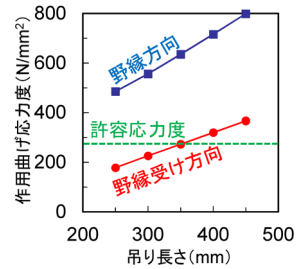


図4 吊りボルトの作用曲げ応力度の比較

天井各部の許容耐力に対する作用応力の比が最も大きい吊りボルトの作用曲げ応力度の解析結果を図4に示す。野縁受け方向では、吊り長さ350mm程度以下で許容応力度を下回ったが、それ以上の吊り長さの結果や、下端の剛性が小さい野縁方向では許容応力度を上回った。以上から、吊り長さの短い天井であっても適切に耐震改修する必要があることが分かった。

2.2 吊り長さの短い天井の耐震改修工法の仕様

前節の検討により、吊り長さの短い天井にも何らかの耐震改修が必要となることが分かった。天井裏空間を遮蔽せずに安価に天井の耐震性能を向上させるためには、汎用材料を使用し吊りボルト近傍を補強することが望ましい。そこで、鋼管を用いた耐震改修工法を提案する。

提案する耐震改修工法の仕様を図5(a)に示す。これは一般的な小径の鋼管を補強材として用い、吊りボルトを覆うように鋼管を設置した後に、鋼管下端をナットで締付けたものである。これにより鋼管には、吊りボルトを反力とした初期軸力が導入され、吊り元である高架橋と鋼管を接触させ、地震時に天井に作用する水平力に対して鋼管の支圧力により抵抗することを期待している（図5(b)）。また、吊りボルト上部の補強により相対的に下部のハンガー等の接合部が弱点となることを防止するため、耐震ブレース設置時に用いる従来のハンガー補強

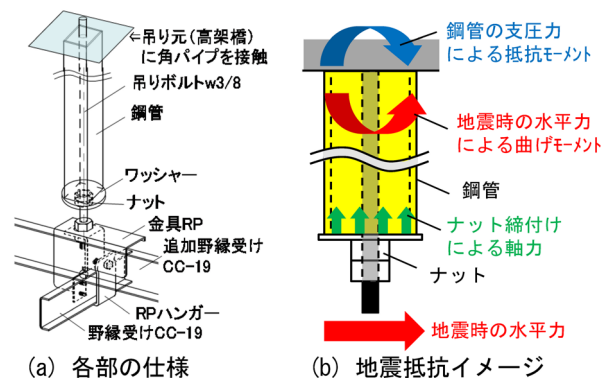


図5 鋼管による耐震改修工法の概要

材（金具 RP）と、接合部の回転抵抗のために野縁受けと同材の CC-19 を野縁受けの直交方向に設置している。

以上に示した耐震改修工法の構成部材はいずれも安価で、施工が容易であるにもかかわらず、天井裏空間を僅かに遮蔽する程度で済むため、吊り長さの短い天井への適用に対して有効である。

2.3 実験概要

提案した耐震改修工法の耐震性能を検証するため、構造実験を実施した。

2.3.1 試験体

試験体一覧を表2に示す。実験因子は、吊り長さが



のため、角パイプ上部の軸ひずみを用いて、角パイプ上部の曲率および角パイプ上端から反曲点までの距離を求めた。算出方法は式(1)、式(2)の通りである。

$$\phi_1 = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) / D, \quad \phi_2 = (\varepsilon_4 - \varepsilon_2) / D \quad (1)$$

$$a = (100\phi_1 - 25\phi_2) / (\phi_1 - \phi_2) \quad (2)$$

ここに、 $\phi_1, \phi_2$ ：角パイプ上部の断面1, 2の曲率、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ ：角パイプ上部の断面1, 2の軸ひずみ、 $D$ ：角パイプせい、 $a$ ：角パイプ上端から反曲点までの距離である。

試験体 No.2 の曲率および反曲点距離の算出結果を図8に示す。水平荷重—曲率関係(図8(a))は、角パイプ毎の施工誤差等による差はあるが、全体的な挙動として荷重の増大に伴って曲率が增大している。反曲点までの距離(図8(b))は、荷重が小さい範囲では曲率の値が計算上無限大になっているが、荷重が大きい範囲では概ねある一定値となっており、その値は、200～300mm程度であった。この内、平均的な挙動を示すと考えられる吊点として、水平荷重がゼロの時に施工誤差等による曲げが角パイプに生じない、すなわち曲率が概ねゼロとなる吊点の反曲点距離(表5)は、試験体に依らず吊り長さ300mm, 450mmに対して概ね0.7倍であった。つまり、鋼管補強により吊りボルト上端で層モーメントの7割を負担する一方で、吊りボルト下端では、加力方向に依らず3割の層モーメントを負担可能な固定度を有することを意味している。以上により、鋼管による吊りボルト上部の剛性・耐力向上に加え、特に2.1節で低剛性であった野縁方向の吊りボルト下部の剛性・耐力が向上し、天井全体として高い耐震性能を有することが分かった。

### 2.4.3 天井の固有周期と壁との必要クリアランス量

各水平荷重時の割線剛性の最小値から天井固有周期を求め、天井技術基準の算定方法により、天井と壁との必要クリアランス量を算定した。ここで、必要クリアランス量とは、地震動によって天井が周囲の壁等との衝突により脱落することを防ぐための壁等との離隔であり、吊り天井の耐震性向上において重要なパラメータである。その結果を図9に示す。最大設計荷重2kNの固有周期は、吊り長さ300mmで0.05s程度、吊り長さ450mmで0.1s程度となり、いずれも吊り天井として高い剛性を有することが分かった。これにより算定される必要クリアランス量は、吊り長さ300mmで5mm程度、吊り長さ450mmで11mm程度となり、クリアランス量を小さくできることが分かった。クリアランス量を小さくできることは、後に述べる列車騒音対策をする上でも有効である。

## 2.5 荷重抵抗機構に関する解析的検討

提案工法の荷重抵抗機構を解析的に検討する。

### 2.5.1 解析的検討

吊り元位置に対して、平面保持の仮定に基づく断面解

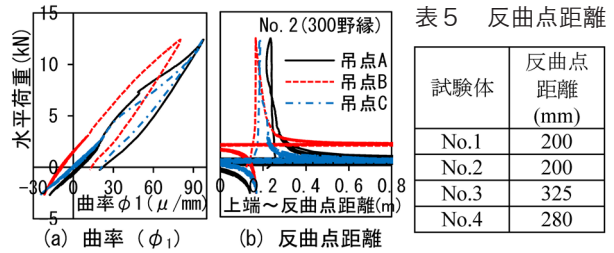


図8 曲率と反曲点距離

表5 反曲点距離

試験体	反曲点距離 (mm)
No.1	200
No.2	200
No.3	325
No.4	280

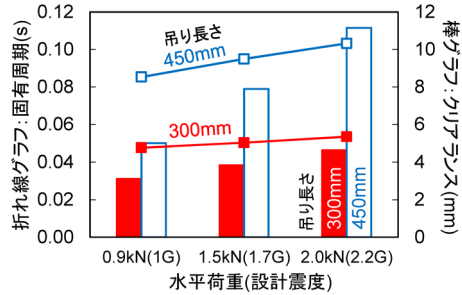


図9 水平荷重毎の固有周期と必要クリアランス量

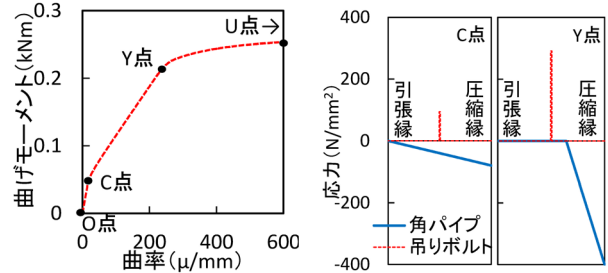


図10 モーメント—曲率関係 図11 断面応力分布

表6 実験結果を用いて求めた曲げモーメント

試験体	吊り長さ (mm)	実験結果		断面解析結果		
		反曲点距離 (mm)	初期ひずみ ( $\mu$ )	モーメント $M$ (kNm)		
				C点	Y点	U点
No.1	300	200	-130	0.029	0.20	0.26
No.2		200	-220	0.048	0.21	
No.3	450	325	-130	0.029	0.20	
No.4		280	-220	0.048	0.21	

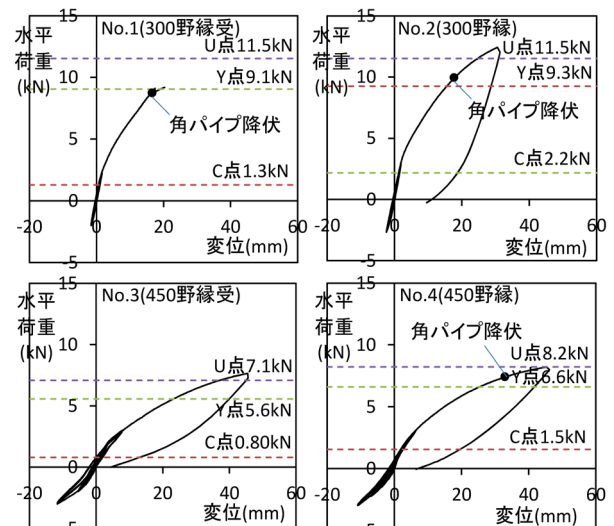


図12 C, Y, U点の計算耐力と実験結果の比較

析を実施した。材料物性は、吊りボルトおよび角パイプ共に、弾性係数 200kN/mm<sup>2</sup>、降伏強度 400N/mm<sup>2</sup>、降伏ひずみ 2000 μ とし、完全弾塑性モデルとした。なお、角パイプの引張側応力は、吊り元の高架橋に引張力を伝達できないことからゼロとした。また、角パイプの初期圧縮ひずみは実験結果を考慮し -200 μ とした。

解析により得られたモーメント-曲率関係を図 10 に、断面応力分布を図 11 に示す。O～C 点までは、角パイプの圧縮応力が全断面で生じ、C 点では角パイプの引張縁の応力がゼロとなっている。C～Y 点では角パイプの応力ゼロの範囲が圧縮縁側に広がり、Y 点では角パイプの圧縮縁が降伏強度に達している。Y 点以降は降伏強度に達した範囲が広がり、吊りボルトが降伏強度に達して最大曲げモーメント (U 点) を迎えることが分かる。

### 2.5.2 実験結果との比較

断面解析により得られる C, Y, U 点の曲げモーメントを用いて、各点における天井試験体の層せん断耐力を求めた。算出方法は式 (3)、式 (4) の通りである。

$$M_2 = M_1(L - a) / a \quad (3)$$

$$Q = 9(M_1 + M_2) / L \quad (4)$$

ここで、L: 吊り長さ、M<sub>1</sub>: 上端の曲げモーメント、M<sub>2</sub>: 下端の曲げモーメント、Q: 試験体の層せん断耐力であり、a は式 (2) による。なお、M<sub>1</sub> は、実験により得られた初期ひずみの平均値を用いて断面解析により求めた。また、a は、実験における角パイプの軸ひずみより算出される水平荷重-曲率関係 (図 8) で、水平荷重がゼロの時に曲率が概ねゼロとなる角パイプの結果から求めた。

C, Y, U 点の曲げモーメント M<sub>1</sub> を表 6 に、計算から求めた C, Y, U 点の層せん断耐力 (図中の破線) と実験結果 (図中の実線) の比較を図 12 に示す。ここで、反曲点距離と断面 1 の軸ひずみから算出した角パイプ上端の軸ひずみが 3 つの吊点全てにおいて圧縮降伏した点を角パイプ降伏点として同図に示す。各試験体ともに C 点以降に剛性が徐々に低下し、Y 点は角パイプ降伏点とほぼ一致していることが分かる。また、Y 点以降の剛性低下は緩やかで、U 点を超えてもせん断力は上昇傾向である。これは、解析では材料性能を完全弾塑性モデルとしているため、降伏後のひずみ硬化の影響によるものと考えられる。以上により、角パイプの施工誤差はあるが、本算定方法により天井全体の層せん断耐力を概ね評価可能であり、提案工法による抵抗機構を解析的に解明することができた。

## 3. スパンドレル天井に対する列車騒音対策

高架下駅等では、列車走行時に大きな列車騒音にさらされる場合があり、従来は吊りボルトに防

振ハンガーを設ける列車騒音対策が実施されている。しかし、従来の耐震改修工法である耐震ブレースを設置する場合には、耐震ブレースを介して列車振動が天井に伝搬するため、防振ハンガーの騒音低減効果を減殺することが考えられる (図 13)。また、前章で提案した耐震改修工法の場合には、防振ハンガーが天井下地全体の剛性を下げて耐震性能を低下させるため適用できない。そこで、駅舎天井において近年適用例の多いアルミスパンドレル等の金属天井を対象に、実駅測定による騒音伝搬経路の検討を行うとともに、耐震改修工法との両立が可能な騒音対策方法を検討し、音響実験による効果検証を行う。

### 3.1 高架下駅における列車騒音の伝搬経路

高架下駅における列車通過時の騒音は、階段・エスカレータ等から伝搬する空気伝搬音と、軌道で発生した列車振動が高架橋スラブ下面・壁・床に伝搬して放射される固体伝搬音に分類される。さらにこの固体伝搬音は、高架橋スラブ下面に金属天井のような仕上げがある場合には、列車振動が吊りボルトを介して天井仕上げに伝搬して放射される騒音 (以下、天井固体伝搬音) と、高架橋スラブ下面から放射された騒音が天井仕上げを透過する騒音 (以下、天井透過音) および天井仕上げの隙間を伝搬する騒音 (以下、天井隙間伝搬音) に区分できる。これらの伝搬経路を図 14 に示す。なお、従来の防振ハンガーは、主に天井固体伝搬音への対策方法となる。

### 3.2 実高架下駅における金属天井の遮音性能測定

実高架下駅 (A 駅) において、スパンドレル天井の遮音性能を検討した。測定概要を図 15 に示す。コンコースに設置したスピーカからピンクノイズを放射し、コン

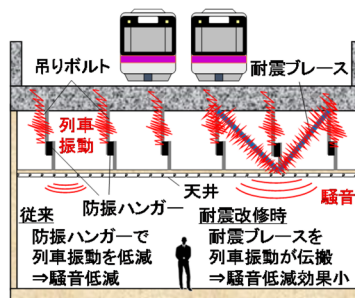


図 13 駅天井の騒音対策の課題

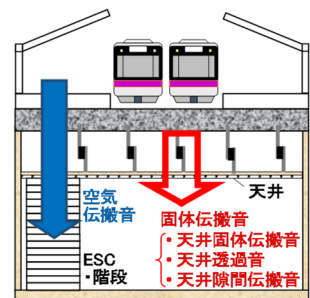


図 14 列車騒音伝搬経路

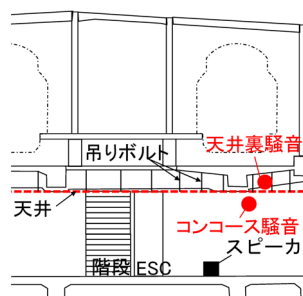


図 15 測定概要 (A 駅)

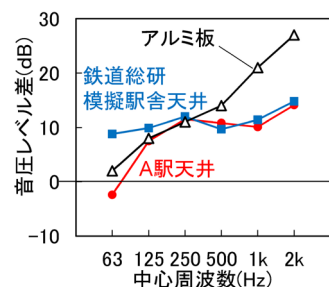


図 16 遮音性能測定結果

コースと天井裏の音圧レベル差を測定した。測定結果とアルミ板の透過損失値<sup>4)</sup>を比較した結果を図16に示す。また、A駅の天井と同様の仕様である鉄道総研の実物大模擬駅舎の同様の測定結果も同図に示す。音圧レベル差は、周波数500Hz帯以上においてスパンドレル天井（A駅および模擬駅舎）がアルミ板よりも小さいことが分かる。これは、スパンドレルを嵌合して構築する天井の嵌合部隙間から天井隙間伝搬音が伝搬していることが理由の一つとして考えられる。

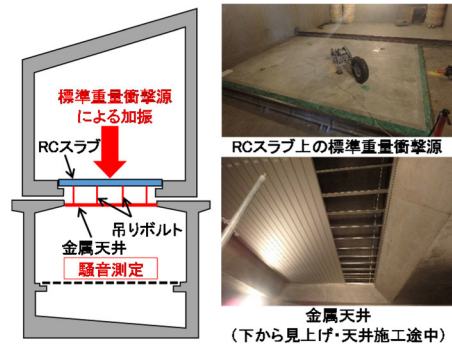


図17 上下階残響室における実験概要

### 3.3 天井騒音低減対策の効果検証実験

前節の測定結果より、スパンドレル嵌合部の隙間を塞ぐことで、騒音低減できる可能性を示した。そこで、嵌合部の隙間を防振材（以下、パッキン）で塞いだ金属天井の騒音低減効果を、音響実験により検討した。実験方法は、「JIS A 1418 建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法」に準拠し、上下階残響室にて実施した（図17）。実験ケース一覧を表7に示す。実験ケースは、ケース0が天井を設けないRCスラブのみの条件、ケース1が騒音対策を施さないスパンドレル天井のみの条件、ケース2が従来工法（防振ハンガー）を用いる条件、ケース3が防振ハンガーを用いずにスパンドレル嵌合部の隙間をパッキンで塞いだ条件である。標準重量衝撃源を音源とした測定結果を図18に示す。

騒音対策のないケース1では、周波数250Hz帯以上でRCスラブのみのケース0よりも高い音圧レベルとなっている。また、騒音対策を施したケース2および3は、ケース1よりも低い音圧レベルとなっており、対策効果が確認できる。さらにケース3では、周波数500Hz帯以上でケース2よりも低くなっており、パッキンにより天井隙間伝搬音が低減した効果が表れたと考えられる。以上により、スパンドレルの嵌合部隙間に設置するパッキンは、従来の防振ハンガーと同等の騒音低減効果が得られる可能性があることが分かる。

## 4. おわりに

吊り長さの短い天井に対して、鋼管による耐震改修工法を提案し、構造実験により耐震性能を検証した。その結果、最大の設計荷重に対して荷重低下せず高い耐震性能を有すること、高い剛性により周囲の壁等とのクリアランス量を小さくできることを示した。また、高架下駅の騒音対策方法としてスパンドレルの隙間を塞ぐパッキンの効果を音響実験により検証し、従来の防振ハンガーと同等の騒音低減効果があることを示した。以上から、吊り長さの短い天井に対して、耐震改修工法と騒音対策方法を組み合わせた工法を提案した（図19）。本工法は、施工性が高く安価なため実駅に適用されている。

表7 実験ケース一覧

ケース	天井※	騒音対策		備考
		防振ハンガー	パッキン	
ケース0	なし	なし	なし	RCスラブのみ
ケース1	あり	なし	なし	騒音対策なし
ケース2	あり	あり	なし	防振ハンガーあり
ケース3	あり	なし	あり	パッキンあり

※天井の仕様は各試験体共通で以下の通り（単位：mm）  
 吊りボルト:3/8" @900, ハンガー:RPハンガー, クリップ:CW-25, 野縁受け:CC-25@900, 野縁:CC-25@303, 天井材:アルミスパンドレルt1.0, 吊り長さ:380, 天井面積:3m×4m=12m<sup>2</sup>

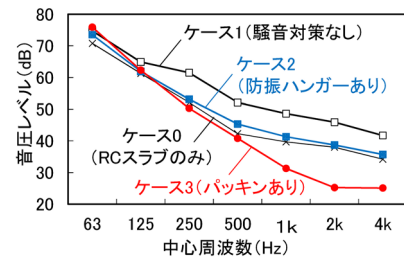


図18 金属天井の遮音性能測定結果

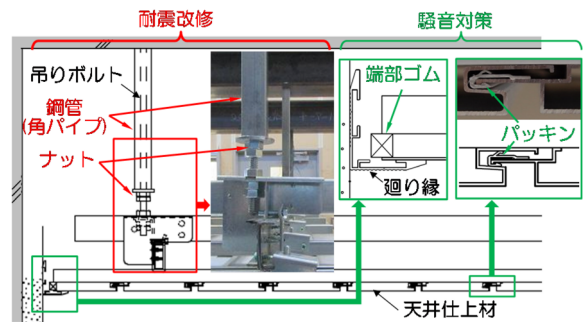


図19 騒音低減を考慮した耐震改修工法

## 文献

- 1) 国土技術政策総合研究所ほか：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) 小林俊夫ほか：在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究 その3，その4，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.231～234，2009.8
- 3) 桐井製作所：耐震天井（告示対応）試験データ集，2016.10
- 4) 前川純一ほか：建築・環境音響学，共立出版，1997