

防振ゴムを用いた在来工法天井の水平方向動特性

奥田 浩文 時野谷 浩良

Horizontal Dynamic Characteristics of Conventionally Constructed Ceiling using Vibration Isolation Rubber

Hirofumi Okuda Hiroyoshi Tokinoya

Abstract

To improve the earthquake-resistant performance of ceilings, capturing the horizontal dynamic characteristics precisely is necessary. However, some ceilings require not only earthquake-resistant performance but also vibration isolation. Unfortunately, there have not yet been any studies on ceilings with vibration isolation devices such as rubber bearings. This paper describes the result of a vibration experiment on a ceiling with vibration isolation and the analytical results from using a simple model. The analytical results were found to agree well with the experimental results if the horizontal stiffness of the isolation devices could be evaluated in advance.

概要

天井の耐震性能を向上させるためには、天井の水平方向動特性を正確に把握することが必須となる。一方、天井には水平方向の揺れを抑制対象とする耐震性能と共に、上下方向の揺れを抑制対象とする防振性能も求められる場合がある。しかし、天井に防振ゴムを設置することなどによって実現される、上下方向の防振対策を施した天井の、水平方向動特性の把握に関する検討は皆無に等しいのが現状である。本報では、防振対策を含めた天井の水平方向動特性を確認するための振動実験を実施し、簡易モデルによる解析と実験結果との対応性について検討した。検討の結果、防振ゴムの水平方向剛性を事前に評価できれば、解析と実験結果とは概ね整合することを確認した。

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災では、体育館や音楽ホールなど、多数の建築物の天井が脱落し、かつてない規模の天井被害が発生した。これらの被害を踏まえ、国土交通省も「建築物における天井脱落防止対策試案」¹⁾をまとめるなど、天井脱落対策に係る早急の法制化を進めている。

天井の耐震性を向上させるためのひとつの方策としては、天井に作用する見掛け上の外力を小さくするという観点から、建物とそれに設置される天井との共振を回避することが有効であるといえる。建物と天井の共振回避を実現するためには、天井の水平方向動特性を正確に把握することが必須となる。しかしその手段としては、天井下地の力学的特性が不明であることなどを理由に、多くの場合、解析によらず、各種の実験により得られた知見を拠り所としているのが実情である。なお、上記の国土交通省・天井脱落防止対策案¹⁾の中にも、天井水平方向の動特性に係る算定方法の詳細は示されていない。

このような状況に対して、これまで各種の実験に基づき、天井水平方向の動特性に関するいくつかの報告^{例えば 2), 3)}がなされている。これらの多くは、一般的な在来工法天井、すなわちFig. 1に示す通り、吊りボルト、ハンガー、野縁受、クリップ、野縁、ブレースから構成される

鋼材製下地に、天井ボード等を張り付けた形の天井を対象としている。

一方、天井には水平方向の揺れを抑制対象とする耐震対策と共に、上下方向の揺れを抑制対象とする防振対策が求められる場合がある。防振対策が求められるひとつの事例としては、集合住宅やホテルが地下鉄近傍、高架下に建設される場合の列車振動の遮断が挙げられる。また、ホテルに設置された屋外設備機器稼動に起因する、客室への固体伝搬音の遮断も、防振対策が求められる事例である。天井耐震性の確保と天井防振性の確保とを同時に解決するための対策法としては、吊り型の防振ゴム

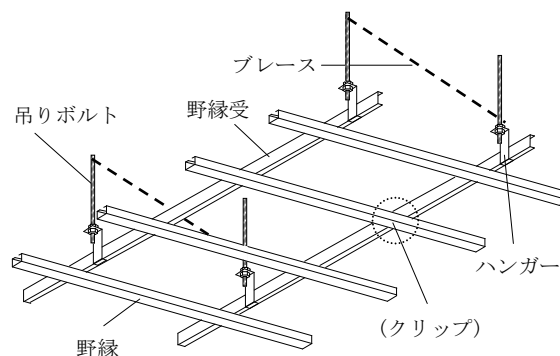


Fig. 1 鋼製下地の基本構成 (見上図)
Schematic of Ceiling with Steel Furring

を天井吊りボルトの中間部に設置する方法が一般的である。しかし、このような防振対策を施した天井水平方向の動特性、すなわち天井の耐震性検討の観点からの実験的な検討は皆無に等しいのが現状である。

本報では、在来工法天井に防振ゴムを併設した天井の動特性確認を目的として行った水平方向振動実験の結果、および簡易モデルによる解析と実験結果との対応性について報告する。

2. 実験の概要

2.1 天井モックアップ概要

天井モックアップ(以下、試験体と称す)の概要をFig. 2に、試験体全体の形状・寸法をFig. 3に、試験体の基本仕様をTable 1にそれぞれ示す。試験体は在来鋼材製下地を用いた2体とした。試験体Aは、野縁を300mm間隔、野縁受を1,020mm間隔で設置している。また試験体Bは、野縁を300mm間隔、野縁受を900mm間隔で設置している。試験体A、B共に、野縁と野縁受との接合部は全て一般クリップで固定した。吊りボルトの設置本数は、試験体Aは49本、試験体Bは25本である。またブレースは、試験体Aの場合は加振方向に4対、加振直交方向に6対設置し、試験体Bの場合は、加振方向に8対、加振直交方向に6対設置している。なお、試験体A、Bの総質量は、それぞれ1025.0kg、362.5kgである。

防振ゴムは、試験体Aでは吊り元近傍に設置され、試験体Bでは吊りボルト中間部に設置されている。防振ゴムによる防振効果を発揮させるには、防振ゴムを固着させることのないブレース設置が必須となる。試験体Aの場合は、防振ゴム下端側の吊りボルトから天井面に向かってブレースを設置することによって防振効果が発揮できる仕様としている。また試験体Bの場合は、ブレースの下側固定部に更に防振ブレース金具を追加することによって防振効果が発揮できる仕様としている。

なお、各試験体はぶどう棚から吊られる形で構成されているが、本実験での加振方法、加振レベルでは、ぶどう棚の動特性を考慮する必要はなく、固定点として取り扱えることを付記しておく。

2.2 実験概要

2.1節に示す試験体を用いて行った加振実験の概要をFig. 4に示す。加振実験は人力加振による自由振動実験とした。同実験は、天井の動特性(固有周期、減衰定数)を評価するための実験であり、人力で天井を水平加振した後、加振を停止する方法によって行った。Fig. 4には計測の概要も併記している。変位計により、加振後の自由振動波形を計測した。なお、同波形の計測は、レーザー式の変位計を用いて、吊り元と天井面との相対変位を対象に行った。

加振実験は、試験体A、B共に、ブレースが設置されて

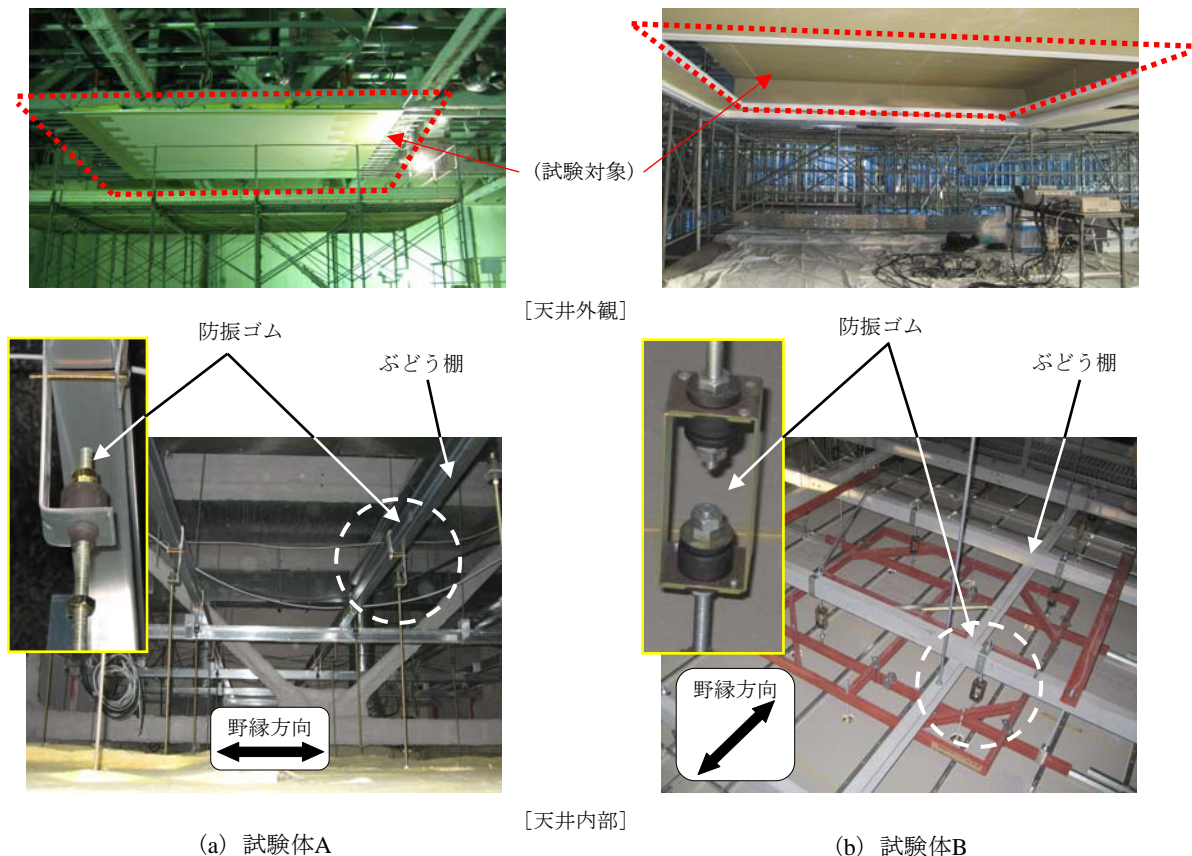


Fig. 2 試験体の概要
View of Ceiling

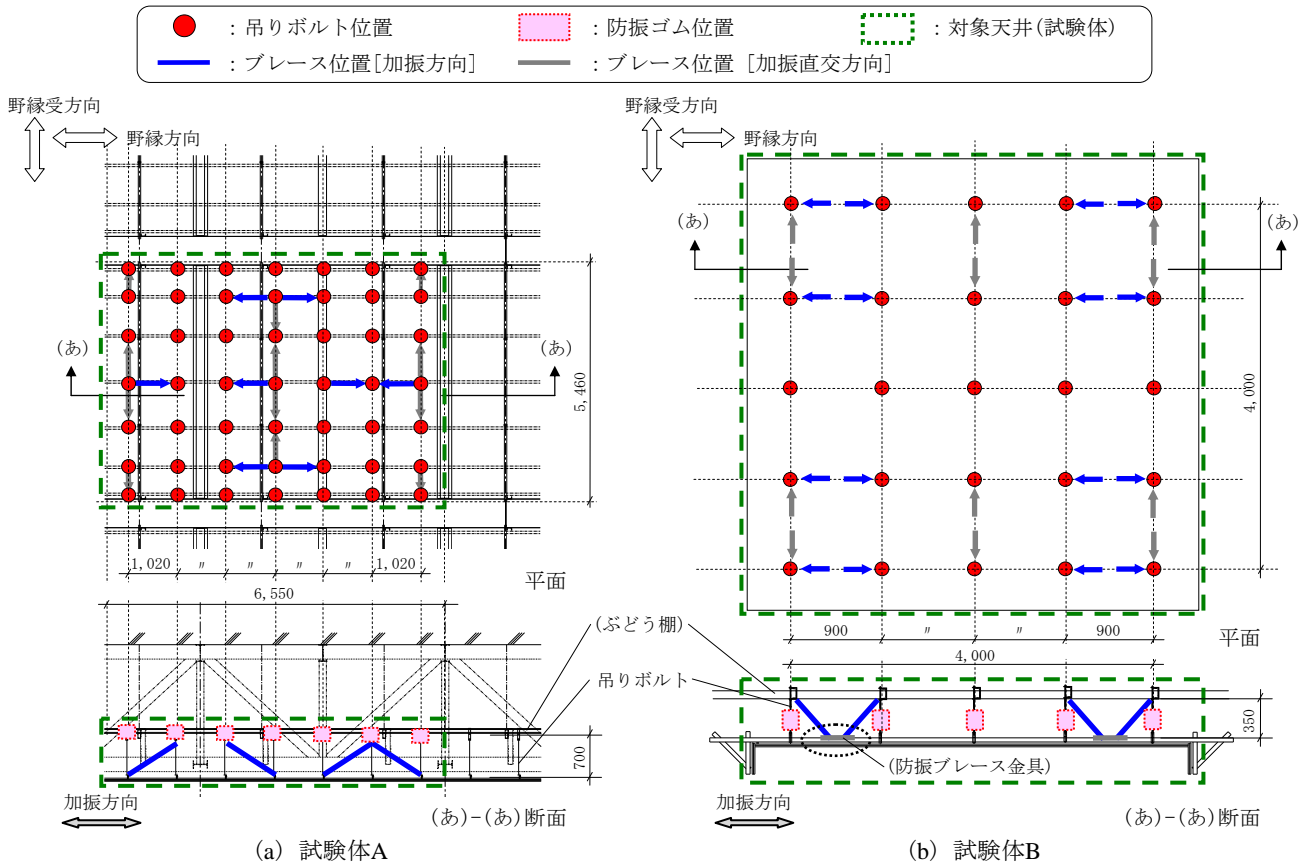


Fig. 3 試験体の形状・寸法
Configuration and Dimensions of Ceiling

Table 1 試験体の基本仕様
Specifications of Ceiling

	試験体A	試験体B
防振ゴム	圧縮許容荷重 431N (天然ゴム系)	圧縮許容荷重 300N (天然ゴム系)
天井材	グラスウール t=50mm 石膏ボード t=15mm(2枚) 岩綿吸音板 t=9mm(1枚)	石膏ボード t=12.5mm(2枚)
野縁	CW-19 50×19×0.5 CS-19 25×19×0.5	
野縁受	CC-19 38×12×1.2	
吊りボルト	全ねじボルト φ=9mm	
ハンガー	一般ハンガー t=2mm	
クリップ	一般クリップ CW-19 t=0.8mm CS-19 t=0.8mm	
ブレース	CC-19 38×12×1.2	

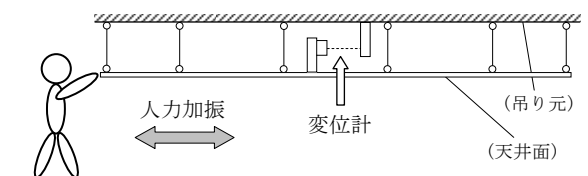


Fig. 4 振動実験の概要
Outline of Free Vibration Test

いない場合および設置された場合の2種類について行った。なお、加振方向はFig. 3に示す野縁方向とした。

2.3 実験結果

自由振動実験によって得られた時刻歴応答波形(天井の野縁方向変位応答波形)をFig. 5に一括して示す。図中、左図は試験体Aの、右図は試験体Bの結果をそれぞれ表している。また、同図・上図はブレースが設置されていない場合の、下図はブレースが設置された場合の結果である。Fig. 5の結果から、加振停止後の5波を用いた対数減衰率⁴⁾により天井の減衰定数を計算した。

Fig. 5に示す4つの変位応答波形を用いて行った、周波数分析結果をFig. 6に一括して示す。Fig. 5と同様に、図中、左図は試験体Aの、右図は試験体Bの結果をそれぞれ表している。また、同図・上図はブレースが設置されていない場合の、下図はブレースが設置された場合の結果である。周波数分析結果として得られるスペクトルがピークとなる周期が、天井の固有周期となる。

自由振動実験により得られた天井の動特性(固有周期、減衰定数)をTable 2に一括して示す。これらの結果から、試験体Aの水平方向の動特性は、ブレースが設置されていない場合、固有周期1.46sec、減衰定数2.7%、ブレースが設置された場合、固有周期0.55sec、減衰定数7.6%であ

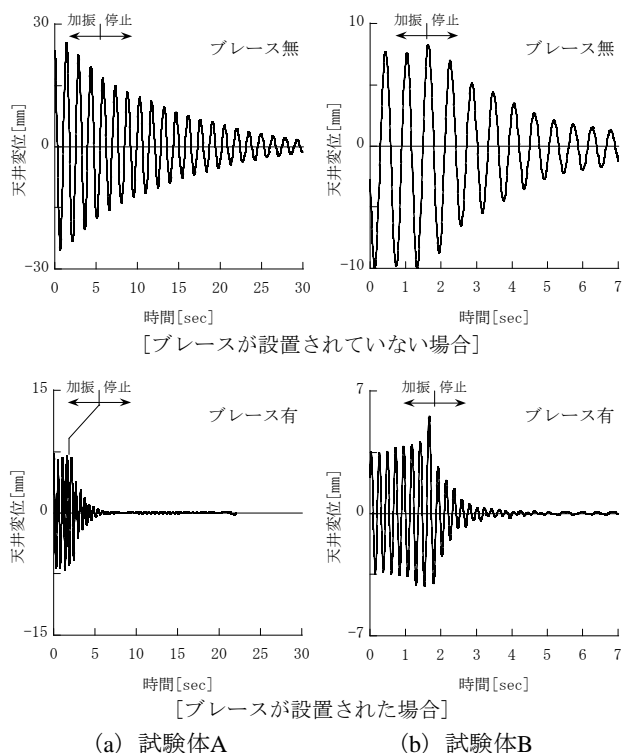


Fig. 5 自由振動実験結果 (変位応答波形)
Result of Free Vibration Test
(Displacement Response Wave)

Table 2 天井水平方向の動特性 (実験値)
Dynamic Characteristics of Ceiling by Experiment

		試験体A	試験体B
固有周期	ブレース無	1.46sec	0.60sec
	ブレース有	0.55sec	0.23sec
減衰定数	ブレース無	2.7%	3.0%
	ブレース有	7.6%	7.8%

ることを確認した。また試験体Bのそれは、ブレースが設置されていない場合、固有周期0.60sec、減衰定数3.0%、ブレースが設置された場合、固有周期0.23sec、減衰定数7.8%であることを確認した。

3. 解析の概要

3.1 簡易解析モデル概要

天井の固有周期は、吊りボルトの長さにより決定される振り子振動と、吊りボルトの剛性によって決定されるばね振動との合成振動として、式(1)で評価される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m \cdot l}{m \cdot g + k \cdot l}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{m \cdot g / l + k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (1)$$

ここで、 T : 天井の固有周期

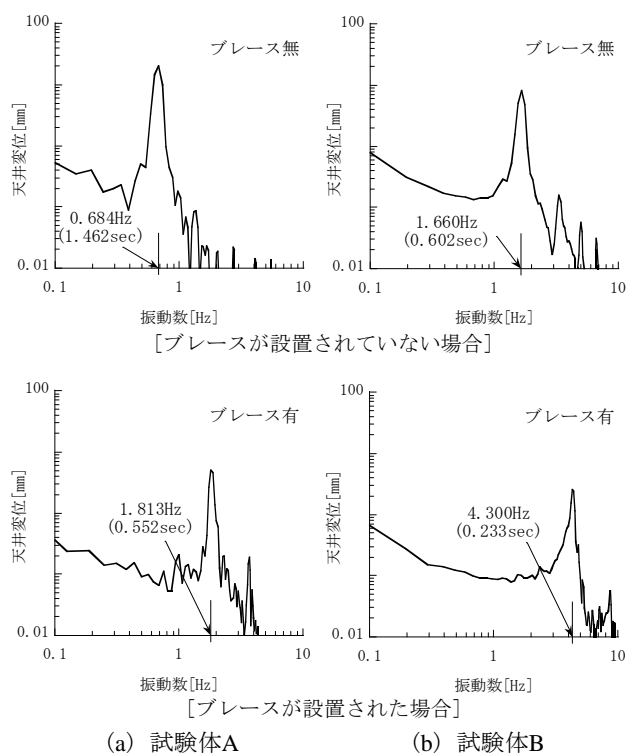


Fig. 6 変位応答波形のフーリエスペクトル
Fourier Spectrum of Displacement Response Wave

- m : 天井質量
- k : 吊りボルトのばね剛性
- l : 振り子の長さ(吊り長さ)
- g : 重力加速度
- K : 天井の等価ばね剛性

天井周期を計算するためのばね剛性のモデル化は、既往の手法²⁾に基づき決定する。すなわち、振り子の長さ、および吊りボルトのばね剛性は、各部分がFig. 7に示す材端支持条件とみなして計算するものとする。

- 1) 振り子の長さは、固定点(吊り元)からハンガー上端までとする。(Fig. 7 (a))
- 2) ハンガーは、野縁受の上端位置で固定支持され、片持ち梁の変形を生じるものとして剛性を評価する。(Fig. 7 (b))
- 3) 吊りボルトは、上端固定一下端固定あるいは上端固定一下端ピンの支持条件で変形を生じるものとして2種類の方法で剛性を評価する。(Fig. 7 (c))
- 4) ブレースが取り付く吊りボルトにおいて、下端側にブレースが取り付けられた吊りボルトについては、ブレース設置の影響を考慮してその剛性を評価する。(Fig. 7 (d))
- 5) ブレースが取り付く吊りボルトにおいて、上端側にブレースが取り付けられた吊りボルトについては、その変形状況はブレース無しの吊りボルトと同等とみなし、ブレースを無視して剛性を評価する。(Fig. 7 (d))

以上が既往の手法の概要であるが、既往の手法と2章で示す実験との大きな差異は防振ゴム設置の有無にある。ここでは、ブレースが設置されていない場合の実験結果から防振ゴムの水平剛性を逆算する方法で、簡易モデルによる解析と実験結果との対応性について検討する。すなわち、

- 1) まず、ブレースが設置されていない既往モデル²⁾に防振ゴムモデルを加えた形の改良モデルを構築する。
- 2) 改良モデルの剛性は、既往モデルの吊りボルトばね剛性と防振ゴムばね剛性と直接結合とする。
- 3) 改良モデルの防振ゴムばね剛性の値は、防振ゴムばね剛性を含めた解析時剛性が、ブレースが設置されていない場合の実験時剛性の値と一致するように設定する。
- 4) 上記で決定した改良モデルに既往モデルと同様の方法でブレースを追加し、当該モデルを用いた解析結果と、ブレースを設置した場合の実験結果とを比較する。

試験体AとBでは防振ゴムの設置位置が異なるため、改良モデルのばね剛性はFig. 8のように設定する。なお、ブレース下端部が野縁受と接合され、また防振ブレース金具自体のばね剛性も有する試験体Bの実験は、ブレースの設置方法の点で、Fig. 8に示すモデル化との間に差異がある。しかし本報は、簡易モデルによる解析と実験との対応性検討を目的としていることから、ここではその差は考慮しないものとする。

天井の減衰定数については、既往の知見に基づき、ブレース設置の有無による減衰係数の変化の割合は、当該固有周期の変化の割合の2乗にほぼ一致する²⁾という前提のもとに計算する。すなわち、

- 1) まず、実験時の固有周期比の2乗値を2乗周期比 μ_T^2 として、式(2)で求める。

$$\mu_T^2 = (T_{無} / T_{有})^2 \quad (2)$$

ここで、 $T_{無}$: ブレースが設置されていない場合の固有周期

$T_{有}$: ブレースが設置された場合の固有周期

- 2) 次に、実験で得られた減衰定数 h から減衰係数 C を計算する。なお、減衰係数 C と減衰定数 h とには、ブレース設置の有無に関わらず、式(3)の関係がある。

$$C = 2 \cdot h \cdot (2 \cdot \pi / T) \cdot m \quad (3)$$

ここで、 T : 天井の固有周期

m : 天井質量

- 3) ブレースが設置されていない場合の減衰係数 $C_{無}$ に対するブレースが設置された場合の減衰係数 $C_{有}$ の比率を減衰係数比 $\mu_c (= C_{有} / C_{無})$ として求め、式(2)で計算した2乗周期比 μ_T^2 と比較する。

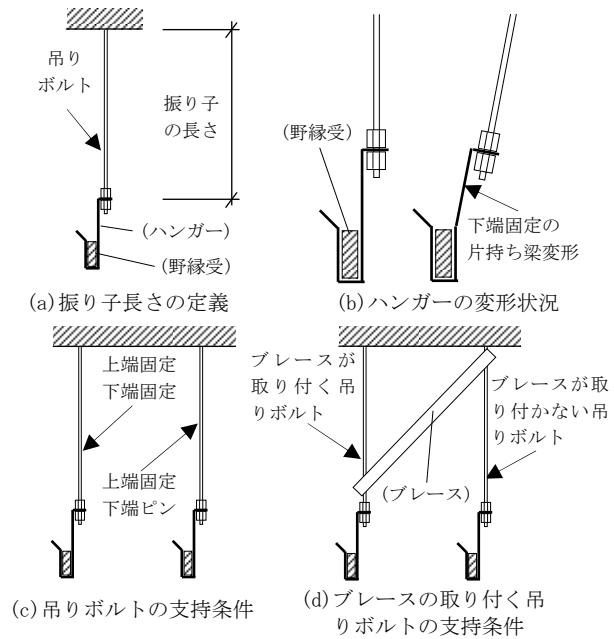


Fig. 7 ばね剛性算定の考え方²⁾
Method to Calculate Stiffness

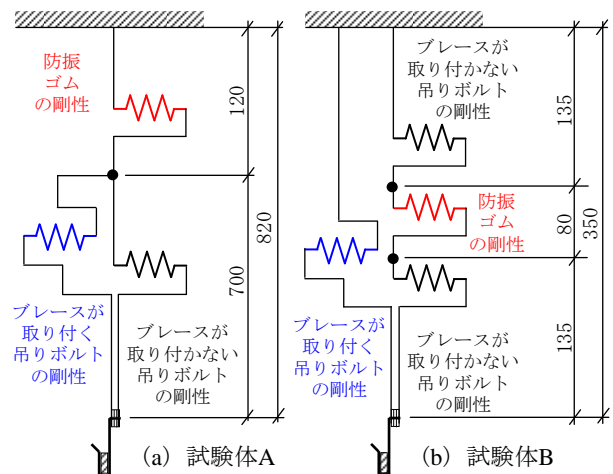


Fig. 8 改良モデルのばね剛性配置
Stiffness of Improved Model

3.2 実験値と解析値の比較

3.2.1 固有周期 自由振動実験により得られた天井の固有周期と、3.1節に示す改良モデルを用いて解析したそれとの比較検討結果をTable 3に示す。同表には、ブレースが設置されていない場合の、既往モデルによる解析結果も併記している。なお、実験結果から逆算した、解析に用いた防振ゴム1箇所当たりの剛性は、試験体Aの場合は $2.10 \times 10^3 \text{ N/mm}$ 、試験体Bの場合は $4.99 \times 10^2 \text{ N/mm}$ であった。

ブレースが設置されていない試験体Aの場合、改良モデルの固有周期1.46secに対して、既往モデルのそれは0.94secであった。同様の試験体Bの場合、改良モデル0.60sec、既往モデル0.35secであった。このことから、天井全体ばね剛性に占める防振ゴムばね剛性の影響は大き

く、実験と解析とを整合させるためには、防振ゴムばね剛性の適切な評価が重要であることを確認した。

また、ブレースが設置された場合の解析結果に対する実験結果の固有周期比($T_{実}/T_{解}$)は、試験体Aの場合で1.04、試験体Bの場合で0.85であった。試験体Aの場合、防振ゴムの水平方向剛性を事前に評価できれば、本報で示す簡易なモデルを用いた解析でも、約4%の範囲内で実験結果と整合することを確認した。試験体Bの場合、3.1節で示す通り、実験条件と解析条件との間に差異があるものの、固有周期比($T_{実}/T_{解}$)は約15%の範囲内にあることを確認した。

3.2.2 減衰定数 自由振動実験により得られた天井の減衰定数をTable 4に示す。同表には3.1節で示す計算で求めた2乗周期比 μ_T^2 、減衰係数比 μ_c も併記している。

試験体Aの場合、2乗周期比 μ_T^2 が7.05であるのに対して、減衰係数比 μ_c は7.47であった。同様に、試験体Bの場合、2乗周期比 μ_T^2 が6.81に対して減衰係数比 μ_c は6.78であった。試験体A、B共、2乗周期比 μ_T^2 と減衰係数比 μ_c とが概ね一致していることから、防振ゴムを設置した場合においても、ブレース設置の有無による減衰係数の変化の割合は、当該固有周期の変化の割合の2乗にほぼ一致することを確認した。

4. まとめ

防振ゴムを用いて上下方向の防振性能が付与された天井に関して、耐震性を検討する上で重要となる、水平方向の動特性を振動実験により確認した。また当該実験結果と簡易なモデルを用いた解析結果との比較検討を行った。本検討の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 吊り元近傍に防振ゴムを設置した試験体Aの水平方向動特性は、ブレースが設置されていない場合、固有周期1.46sec、減衰定数2.7%、ブレースが設置された場合、固有周期0.55sec、減衰定数7.6%であった。また吊りボルト中間部に防振ゴムを設置した試験体Bのそれは、ブレースが設置されていない場合、固有周期0.60sec、減衰定数3.0%、ブレースが設置された場合、固有周期0.23sec、減衰定数7.8%であった。
- 2) 天井固有周期に関する解析の結果、天井全体ばね剛性に占める防振ゴムばね剛性の影響は大きく、実験と解析とを整合させるためには、防振ゴムのばね剛性を適切に評価しなければならない。
- 3) 天井固有周期について実験結果と解析結果とを比較した結果、4%~15%の範囲内で実験結果と解析結果とは整合した。すなわち、防振ゴムの水平方向剛性を事前に評価できれば、本報で示す簡易なモデルによる解析によっても、防振ゴム設置時の固有周期は概ね予測できる。

Table 3 実験結果と解析結果の比較 (固有周期)
Comparison between Experiment and Analysis
(Natural Period)

			試験体A	試験体B
ブレース無	実験	固有周期 $T_{実}$	1.46sec	0.60sec
	解析	(改良モデル) 固有周期 $T_{解}$	(1.46sec)	(0.60sec)
		(既往モデル) 固有周期 $T_{解}$	0.94sec	0.35sec
ブレース有	実験	固有周期 $T_{実}$	0.55sec	0.23sec
	解析	固有周期 $T_{解}$	0.53sec	0.27sec
		固有周期比 $T_{実}/T_{解}$	1.04	0.85

Table 4 減衰性能
Damping Characteristics

			試験体A	試験体B
実験	ブレース無	減衰定数 $h_{無}$	2.7%	3.0%
	ブレース有	減衰定数 $h_{有}$	7.6%	7.8%
解析	減衰係数比 μ_c		7.47	6.78
	2乗周期比 μ_T^2		7.05	6.81

- 4) 天井減衰定数について実験結果と解析結果とを比較した結果、防振ゴムを含む天井構成であっても、ブレース設置の有無による減衰係数の変化の割合は、当該固有周期の変化の割合の2乗にほぼ一致した。すなわち、ブレースが設置されていない場合の減衰定数を事前に評価できれば、ブレース設置時の減衰定数は概ね予測できる。

本報では、一般ハンガー、一般クリップを用い、ブレースは吊りボルトに接合するといった標準的な構成の天井を対象に簡易モデルを構築した。しかし、昨今の地震による天井被害を受けて、接合金物(ハンガー、クリップ)の耐震化が進んでいることなどから、これらにも対応していくことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省：「建築物における天井脱落対策試案」に関するご意見募集について、(別紙)天井脱落対策に係る技術基準原案、(2012)
- 2) 日本建築センター：体育館等の天井の耐震設計ガイドライン、(2005)
- 3) 日本建築学会：非構造部材(屋根、外壁、天井)の地震・風による被害の軽減化の研究、非構造部材(屋根、外壁、天井)の地震・風による被害の軽減化の研究、特別研究・39、pp.114~191、(2008)
- 4) 柴田明徳：最新耐震構造解析、森北出版、pp.10~15、(1981)