

ボード天井による固体音防止に関する研究

吉田 克雄 平野 滋

Study on Structure-borne Sound Abatement by Board Ceiling

Katsuo Yoshida Shigeru Hirano

Abstract

Gypsum board ceilings have been considered as comprising one way of abatement of structure-borne sound from upstairs in a reinforced concrete building, but the effectiveness has not been explained with sufficient clarity. The authors therefore carried out a study by experiments on the effects of hanging the ceiling directly from an RC slab and of supporting the ceiling providing vibration control. The results are as follows: ① In some cases under 63 Hz, structure-borne sound increases with the ceiling in comparison with only an RC slab. ② Above 125 Hz, the effect of double ceiling boards is more than 5 dB, and in case of hanging the ceiling with vibration control by mounted rubber, it is more than 15 dB. ③ The effect of inserting glass wool in the ceiling is about 5 dB above 250 Hz. ④ The mounted rubber hanger has an effect of about 7 dB at low to medium frequencies, which is less than the calculated value, but it is very effective for abatement of structure-borne sound.

概 要

鉄筋コンクリート造の建物で、直上階からの固体音防止方法の一つとしてボード天井を設けることが考えられるが、その効果については十分究明されていない。そこで、ボード天井をコンクリートスラブから直吊りした場合と防振支持した場合について、固体音防止効果を実験により究明した。その結果、以下のことが明らかとなった。① 63Hz以下では、固体音はコンクリート直天井に比べ、天井を設けたことにより増幅する場合がある。② 125Hz以上では、ボードを二重貼りにすれば直吊り天井で5dB以上、防振吊り天井で15dB以上の効果が得られる。③ 天井裏空気層へのグラスウール挿入の効果は、250Hz以上で約5dB得られる。④ 防振ハンガーは定常加振に対して低中音域で約7dBの効果で計算値より少ないが、固体音防止には極めて有効である。

1. 序

鉄筋コンクリート造の建物内での固体音の発生源として、空調機、ポンプ等の機械類による振動、物の落下、人の歩行などがある。これらによる固体音の防止対策は、個々の機械については防振するのが一般的であり、物の落下、人の歩行などの床衝撃音については床の仕上工法別による対策実施例も多く、その効果も究明されつつあり予測にも活用されている。

一方、これら固体音の発生源の直下階の居室側においては、石膏ボード等による遮音天井を設けることにより固体音を小さくすることが考えられるが、逆に低音域で増幅することもある。ボード天井による固体音防止の効果については、既往の研究報告等も少なく正確な予測が困難である。

そこで今回、軽鉄下地のボード天井をコンクリートスラブより吊りボルトで直吊りする従来の施工方法による場合と、防振支持する場合について固体音防止効果の調査研究を行なった。

2. 実験概要

2.1 実験装置とボード天井の構造

図-1に示のように、鉄筋コンクリート打放しの実験棟の

一室に浮床構造を設置し6帖間相当の大きさの実験用の小部屋の壁を浮床上に独立させて建てた。

ボード天井は、図-2に示すように、RCスラブから吊った場合と、短辺方向のRCのはりから鉄骨チャンネルを架けてそこから吊った場合について、防振ハンガー（固有振動数 $f_N=11\text{Hz}$ ）の有無、鉄骨チャンネル両端の防振ゴム（ $f_N=9\text{Hz}$ ）の有無、グラスウールの有無、天井背後空気層150mm、350mm、700mmの組合せとした。ボードについては、プラスターボード12mm2枚貼りを基本にし、1枚と3枚の場合も一部の天井について実験した。

なお、ボード天井の盛替のうち、グラスウール挿入、撤去、防振ハンガー取付け、空気層の変化等は、天井中央部のボード1枚分の面積部分のみを取り外して施工し、他のボードはそのままの状態とし、極力、実験対象以外の装置の条件は変わらないよう十分配慮した。

2.2 実験方法

2.2.1 加振源 固体音発生源は、定常加振と衝撃加振としそれぞれ下記のものを用い実験棟の屋上を3点加振した。
定常加振：加振機（最大加振力20kgG・400W）

衝撃加振
┌ 軽量衝撃源：タッピングマシン（JIS A1418
│ に規定する軽量衝撃音発生器）
└ 重量衝撃源：自動車用タイヤ（7.5kgのタイヤを高さ90cmから自由落下）

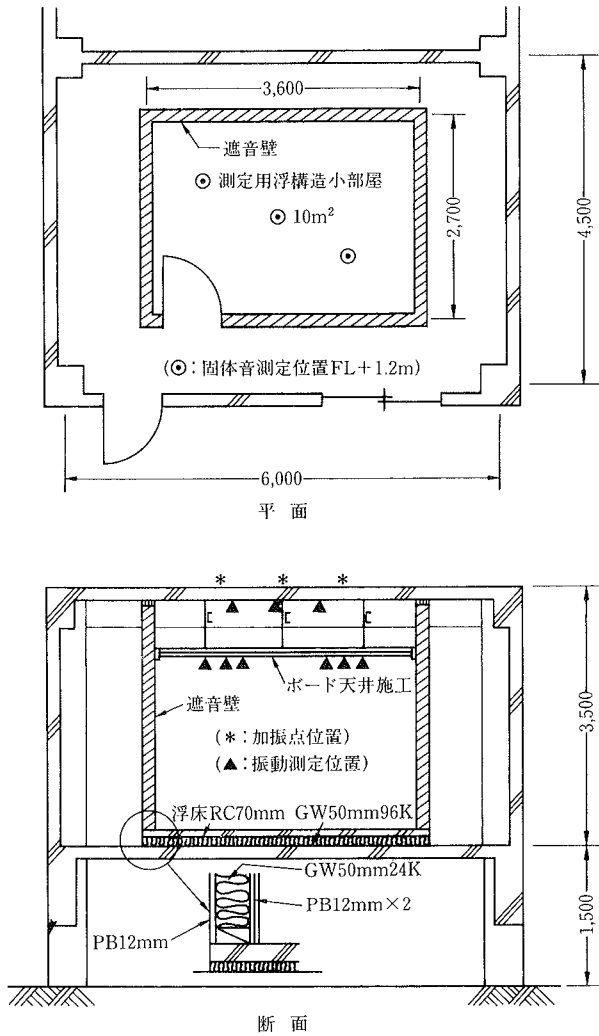


図-1 測定用浮構造小部屋

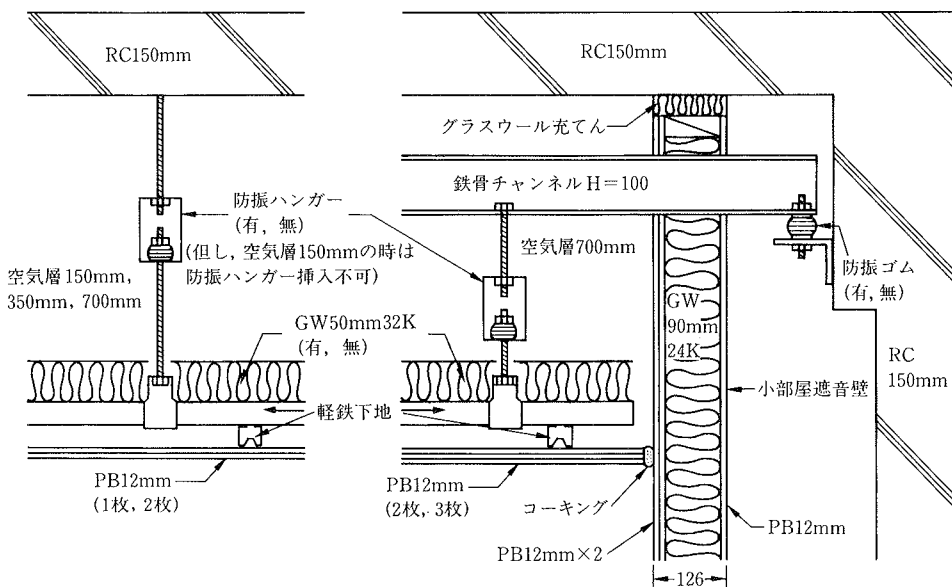


図-2 ボード天井断面

2.2.2 固体音の測定限界 実験は、始めにボード天井施工前の RC 直天井の場合で屋上を加振し、小部屋内外の固体音の測定を行なった。又、天井以外からの放射音による影響を調べるため、各部の振動加速度レベルの測定と、小部屋遮音壁については遮音測定を行ない、小部屋の床と壁からの放射音を推定し、ボード天井からの固体音を測定する際の暗騒音を含めた測定限界を求めた。結果を図-3 中のハッチで示した。

2.2.3 固体音測定とボード天井の振動測定 ボード天井施工後は、小部屋内の固体音とボード天井の振動加速度レベルを測定した。ボード天井の構造により遮音性が高くなると小部屋内の固体音が測定限界に近付き、天井からの放射音の影響が分からなくなるので、その場合のボード天井の振動を測定し、比較的測定限界の影響を受けないプラスチックボード 2 枚貼り、空気層 150 mm の場合の固体音とボード天井の振動をもとにコンクリート直天井に対する固体音防止改善量（振動加速度レベルの差を音圧レベルに換算）を求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 RC スラブからの空気層 150 mm の直吊り天井の効果

図-3 に、RC スラブからの直吊り天井で空気層 150 mm の場合の測定結果を示す。これから直吊り天井の遮音効果として概ね次のようなことが言える。RC スラブ直天井の場合の固体音に比べ、63Hz 以下では天井ボードの枚数、グラスウールの有無にかかわらず効果がなく、1~2 dB 増幅する場合もある。一方、125Hz 以上では周波数が高くなるにつれて固体音が減衰し、定常加振と衝撃加振（タッピングマシン）は、ボード 2 枚、グラスウール入の場合で、コンクリート直天井に比べ概ね、125Hz で 10dB、250Hz で 20dB、500Hz では 25dB と大きな減音効果が得られ、タイヤの場合は、これよりやや効果が小さい。

グラスウール挿入の効果は、31.5Hz~125Hz ではほとんどなく、250Hz 以上では平均約 5dB 得られている。又、ボードの 2 枚貼りによる効果もほぼ同様の傾向で、63Hz 以下ではほとんど効果なく、125 Hz 以上では 3~8 dB で、平均すれば約 5dB の減音効果が得られている。

3.2 空気層 350,700 mm の直吊り及び防振ハンガー吊り天井の効果

空気層 350 mm と 700 mm でのボード 2 枚貼りグラスウール入りで防振ハンガー有無

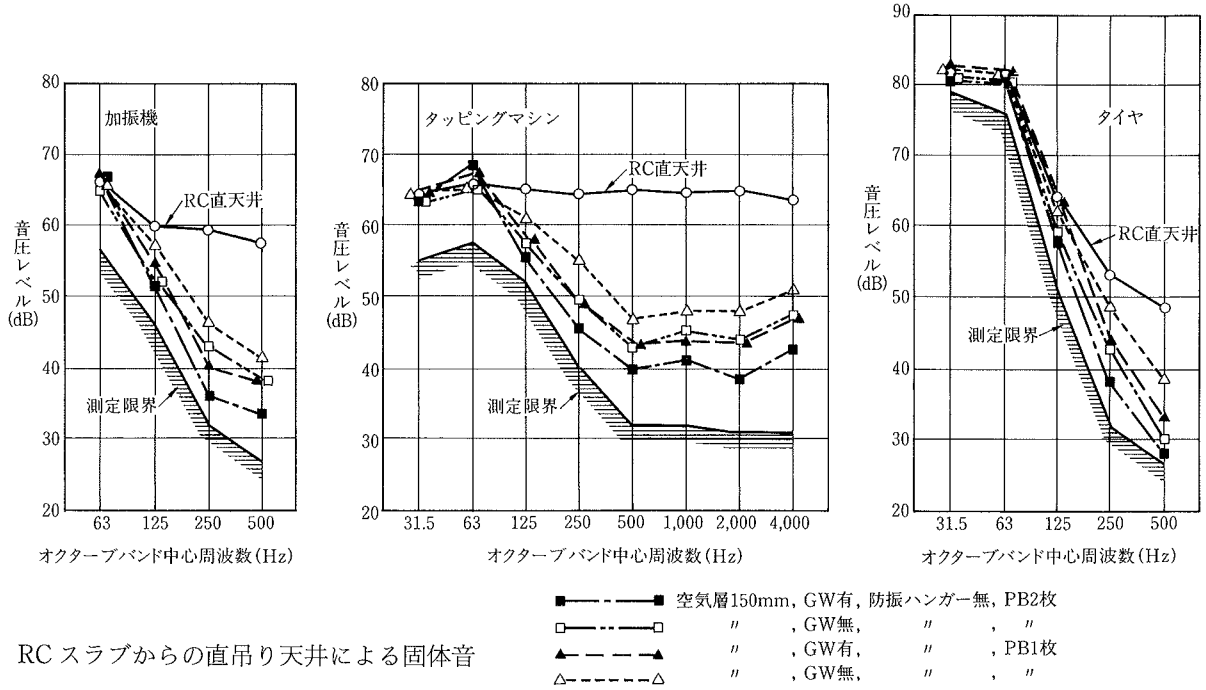


図-3 RCスラブからの直吊り天井による固体音

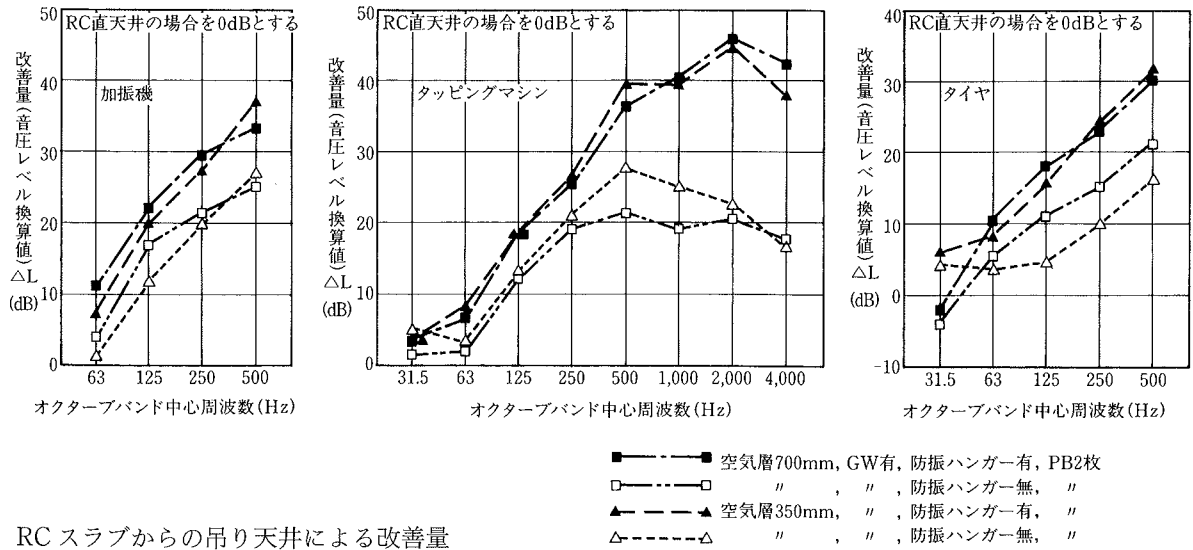


図-4 RCスラブからの吊り天井による改善量

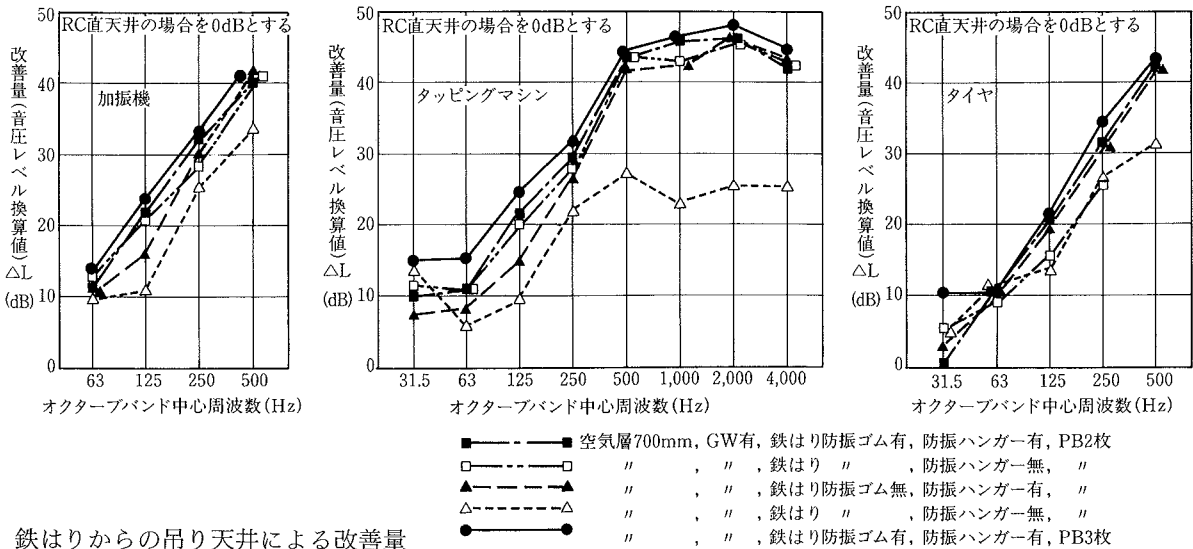


図-5 鉄はりからの吊り天井による改善量

の実験では、固体音の測定値が測定限界に近付くため、天井ボード面の振動を測定し、比較的測定限界の影響を受けていない、空気層 150 mm のボード 2 枚貼り、グラスウール無しの場合の振動と固体音とをともに、振動レベル差分だけ、固体音も減ずるとして、RC スラブ直天井に対する改善量を求めた。これらの結果を図-4 に示す。これらの結果から次のことが分かる。

直吊り天井の場合、空気層が増えることにより定常加振ではコンクリート直天井の固体音に対する改善量も概ね増え有利に働くが、衝撃加振では必ずしもそうならず、タイヤの場合では逆に 31.5Hz で約 5dB 悪くなり固体音が増幅することとなる。実験での固体音の測定でも 5dB 以上の増幅が確認された。一方、防振ハンガーによる吊り天井では、同条件の防振ハンガー無しの場合に比べ、定常加振では 5~10dB、衝撃加振では 2~25dB で周波数の高い方が効果が大きい。63Hz では加振源に関係なく、6dB 程度である。

3.3 鉄骨チャンネルのりからの吊り天井による効果

空気層 700 mm、グラスウール挿入、鉄骨チャンネル端部防振ゴム有無、チャンネルからの防振ハンガー有無での測定も前節同様に行ない、RC 直天井に対する改善量を求めた。これらの結果を図-5 に示す。

これらより全体的な傾向として、RC 直天井に比べ防振ゴム、防振ハンガーの有無にかかわらず 63Hz では加振源に関係なく概ね 10dB、31.5Hz でもタッピングマシンでは約 10dB の効果が見られ、図-4 に示した RC スラブからの吊り天井よりは低音域で効果が大きい。又、鉄骨チャンネル端部のゴム及び防振ハンガーについては、いずれか一方を用いれば効果はあり、ゴムと防振ハンガーの両方を用いてもそれ程改善量は増えてない。これは改善量がプラスターボード 2 枚の透過損失にほぼ相当していると考えられ、防振上からは十分に絶縁されていると見なせる。防振ゴムと防振ハンガーの双方を用いた場合でプラスターボードを 3 枚貼りにしてみると同条件の 2 枚貼りよりも低音域で効果が更に増している。

3.4 実測値と計算値との比較検討

RC スラブからの直吊り天井と防振吊り天井について、定常加振での実験値を計算値と比較検討する。始めに、RC スラブからの直吊り天井について検討する。図-6 中に示す振動モデルで RC スラブが加振源により定常的に強制振動した場合、スラブから吊った天井への振動は下式によって求められる¹⁾。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(1)$$

- m : ボード天井の質量
 - k : 直吊り天井のバネ定数
 - r : 速度に比例する抵抗
 - $F_0 \sin \omega t$: 加振源による強制振動加振力
- (1)式よりボード天井への振動伝達率は

$$\tau = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\omega/\omega_0)^2}{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_0)^2}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

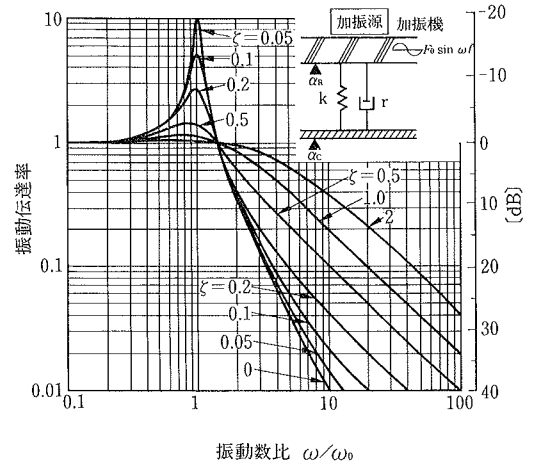


図-6 振動伝達率及び減衰量

表-1 直吊り天井への振動の減衰量 (dB)
($\alpha_0 = 10^{-3} \text{cm/sec}^2$)

オクターブバンド中心周波数	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
コンクリート直天井の振動 $L_R = 20 \log \left(\frac{\alpha_R}{\alpha_0} \right) \text{dB}$	64.8	65.5	69.0	77.0
吊りボルトからのボード天井の振動 $L_C = 20 \log \left(\frac{\alpha_C}{\alpha_0} \right) \text{dB}$	70.6	58.9	56.6	62.2
振動の減衰量 $L_R - L_C = 20 \log \left(\frac{\alpha_R}{\alpha_C} \right) \text{dB}$	-5.8	6.6	12.4	14.8

但し、 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\xi = r/r_c$, $r_c = 2\sqrt{m \cdot k}$

減衰量は

$$\Delta L = 20 \text{Log} (1/\tau) \quad \dots\dots\dots(3)$$

となり図-6 のようになり、 $\omega/\omega_0 = 1$ の固有振動数で増幅する。

次に実験値として、RC スラブから吊りボルトによる直吊り天井 (プラスターボード 12 mm × 2 枚、空気層 700 mm、グラスウール有り) の振動測定データを RC スラブ直天井と比較して表-1 に示す。

ボードが吊りボルト無しに直に RC スラブに密着しているとすれば、その時のボード面の振動は、ほぼ RC スラブ面の実測値 α_R と見なせる。吊りボルトからのボード天井とした時、ボード面の振動が α_C となれば、吊りボルト、野縁、ボードなどの振動の系による減衰量は

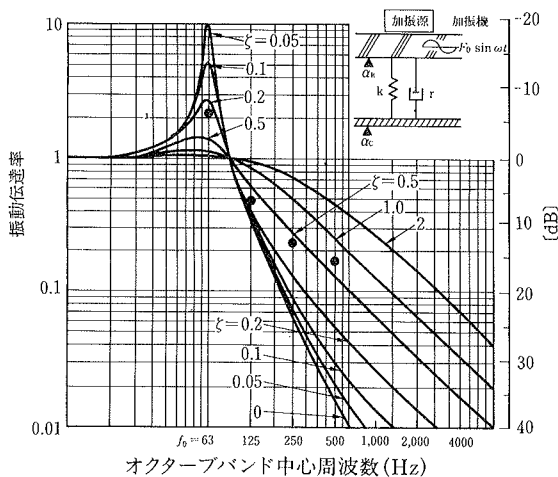
$$\Delta L = 20 \text{Log} \frac{\alpha_R}{\alpha_C} \text{dB} = L_R - L_C \quad \dots\dots\dots(4)$$

となり、表-1 に示したとおりである。これを見ると 63Hz で増幅しているのが、この系の固有振動数 $f_0 = \omega_0/2\pi = 63 \text{Hz}$ と見なし、実験による減衰量を計算値の図-7 上にプロットした。これより RC スラブからの直吊り天井への振動減衰量は図中の減衰比が $\xi = 0.5$ の場合の計算値と比較的よく対応していることが分かる。

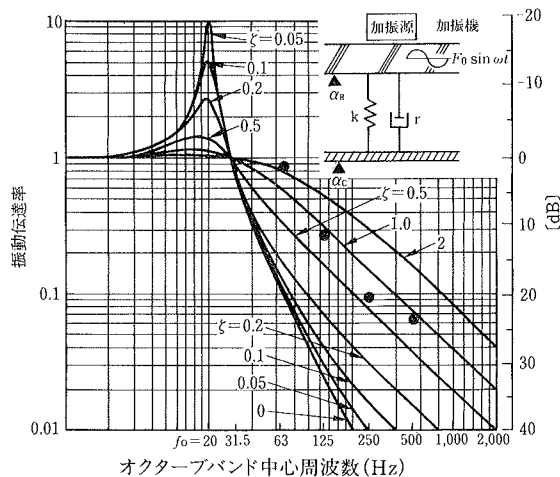
次に、この吊り天井 (全重量 195 kg) に防振ハンガー (動的バネ定数 100 Kg/cm) 9 本を入れると固有振動数は、下式により $f_0 \approx 11 \text{Hz}$ となる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \cdot g}{W}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

但し W : 天井重量, k : バネ定数, g : 重力の加速度



図一七 直吊り天井への減衰量と実験値
(●実験値：加振機)



図一八 防振吊り天井への減衰量と実験値
(●実験値：加振機)

一方、RCスラブとボード天井による中空二重構造の音の共鳴透過に対する周波数を下式により計算すると

$$f_{\text{rmd}} \text{ (Hz)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \times m_2} \cdot \frac{\rho_0 c^2}{d}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

但し、 m_1, m_2 ：二つの表面材の面密度 d ：中空層の厚さ
 ρ_0 ：空気中の密度 C ：空気中の音速
 $f_{\text{rmd}} \approx 17\text{Hz}$ となり、中空二重構造の空気によるバネの方が固い結果となり、双方のバネを考慮し下式により計算すると $f_0 \approx 20\text{Hz}$ となる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k_1 + k_2) \cdot g}{W}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

但し k_1 ：防振ハンガー 9 本分の動的バネ定数
 k_2 ：中空二重構造を質点系に換算した場合のバネ定数
 防振ハンガーを入れた場合の実験値を表一 2 に示す。

以上から防振ハンガー吊り天井の固有振動数 $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ を 20Hz と見なし、実験による減衰量を計算値の図一 8 上にプロットした。この結果から、実験値は概ね $\zeta = 0.5 \sim 1$ の計算値の範囲にあり、防振ハンガーのゴムだけによる振動モデルとみた場合の一般的に考えられる $\zeta = 0.05 \sim 0.1$ の値よりは減衰量が 10dB 以上小さい。この理由としては、RCスラブから天井ボード面までの振動系が単純な防振ゴムのみによるバネ系でないこと、固有振動数 $f_0 = 20\text{Hz}$ に比べ実験周波数が 63Hz では 3 倍 125Hz 以上では 6 倍以上離れており、 f_0 から離れる程、単純なバネの計算値程は減衰しないこと、RCスラブからの放射音による音圧がボード天井を振動させること、などが考えられる。

以上より、ボード天井の防振効果を高めるには固有振動数を極力小さくし、かつボード天井自身の遮音性能も高める必要がある。従って、振動系のバネを柔らかくし、天井ボードの枚数を増やすなど剛性を高め重くすることが有効である。

4. まとめ

(1) RCスラブからの直吊りボード天井の効果 RC直天井に比べて、125Hz 以上では周波数が高くなるにつれ

表一 2 防振吊り天井への振動の減衰量 (dB)
($\alpha_0 = 10^{-3} \text{cm/sec}^2$)

オクターブバンド中心周波数	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
コンクリート直天井の振動 $L_R = 201 \log \left(\frac{\alpha_R}{\alpha_0} \right) \text{ dB}$	64.8	65.5	69.0	77.0
防振ハンガーからのボード天井の振動 $L_C = 201 \log \left(\frac{\alpha_C}{\alpha_0} \right) \text{ dB}$	63.2	53.1	49.4	54.1
振動の減衰量 $L_R - L_C = 201 \log \left(\frac{\alpha_R}{\alpha_C} \right) \text{ dB}$	1.6	12.4	19.6	22.9

て空気層の大小にかかわらず効果がある。63Hz 以下では空気層 150 mm の場合ほとんど効果がないが、空気層を 700 mm と増していくと定常加振では 63Hz で 5dB の効果が得られるが、衝撃加振 (タイヤ) では 31.5Hz で逆に 5dB 程度増幅する。グラスウール挿入の効果及び、プラスターボードの 1 枚から 2 枚への貼り増しによる効果は、ほぼ同様の傾向で、低音域ではほとんどないが、250Hz 以上では約 5dB 得られ、それぞれ固体音が減衰する。

(2) 防振ハンガー挿入の効果 31.5Hz ではあまり効果はないが、63Hz~500Hz では同条件の直吊り天井に比べ約 5 dB~15dB、1KHz~以上では 15dB 以上の効果が得られる。防振ハンガーは施工も簡単で、低廉でもあり、固体音防止に極めて有効であると言える。

(3) 鉄骨チャンネルからの吊り天井による効果 全周波数でコンクリート直天井に比べて効果があり鉄骨チャンネル支持部の防振ゴム及び、防振ハンガーの有無にかかわらず 63Hz での効果は約 10dB 得られ、RCスラブから防振ハンガー吊りした場合よりも効果がある。125Hz 以上では防振ゴムか防振ハンガーのどちらか一方を用いれば、両方を用いた場合とそれ程変わらない結果が得られる。

謝 辞

実験に当たりヤクモ工業 (株) の舟木宣光氏、新出 孝氏に協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

1) 時田保夫, 他:騒音・振動 (上), コロナ社, p. 209~212, (1978. 3)