

床揺れ防止用制振装置の開発

Development of Tuned Mass Damper for Slab Vibration

柳沼勝夫* 稲留康一*

要 旨

近年、事務所ビル等では、室内間仕切りの自由度を増すために建築空間内を無柱にしたいという要望が多く、スラブが大型化してきている。大型化されたスラブの固有周波数は、人が揺れを感じやすい周波数に近くなるため、環境振動問題が生じることが懸念される。これを防止するためには、建物構造の補強や制振装置などによる対策が有効であるが、床揺れを制御する制振装置による対策は、建物構造の補強に比べると軽微であるため有効な手段である。そこで本報では、スラブの鉛直振動を効果的に制御する制振装置の概要と実大試験スラブにおける効果の検証結果について報告する。

キーワード：居住性、制振装置、環境振動、S造スラブ、鉛直振動

1. まえがき

建築空間内を無柱とし、空間内間仕切りの自由度を増したいという要望が多く、近年ではスラブが大型化してきている。大型化されたスラブの固有周波数は、人が揺れを感じやすい周波数に近くなるため、環境振動問題が生じる恐れがある。これを防止するためには、建物構造の補強や制振装置（以下、TMD：Tuned Mass Damper）などによる対策が有効であるが、床揺れを制御するTMDによる対策は、建物構造の補強に比べると軽微であるため有効な手段である。そこで本報では、スラブの鉛直振動を効果的に制御するTMDの概要と実大S造試験スラブにおける効果の検証結果について報告する。

2. TMDの概要

開発したTMDは、質量とばね、減衰装置により構成し、鉛直方向のみを制御するものとした。TMDの構成例を図-1に示す。

本TMDは、質量とばねのバランスによりスラブの固有周波数にチューニングする。チューニングは質量を加減して行う方法を採用した。そのため、質量は、微調整を可能とするために薄い鋼板を積層している。なお、ばねには、コイルばねを採用している。また、減衰装置は、温度変化や経年劣化を考慮してシリコン製のオイルダンパを採用した。

3. TMDの設計

効果的な制御を行うためには、対象スラブの一次固有

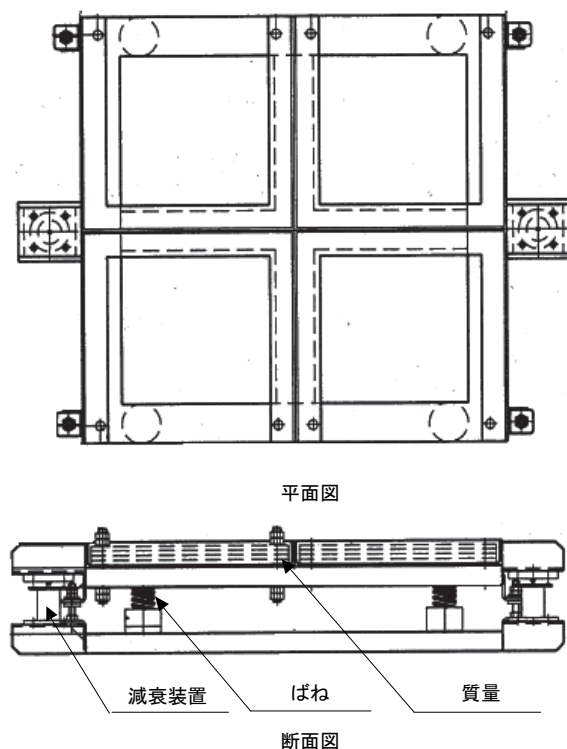


図-1 TMDの構成例

周波数や動的質量を考慮したTMDの質量、ばね、減衰比の設定が必要である。そのため、これら各要素に対する設定方法を検討した。

3.1 スラブの動的質量算定方法の検討

対象スラブが動的な荷重を受けた際に、どの程度の質量が稼働するのにかよってTMDの質量を決める必要があ

る。そのため、スラブの動的質量の算定が必要となる。

スラブの動的質量を検討するため、図-2に示すS造試験スラブを用いて実験を行った。この試験スラブは、等価厚さ105mmのデッキスラブであり、四周を大梁(G1、G2：H=450×200×9×14)とし小梁を2本設けている。スラブの面積は約125m²で、スラブの静的質量は約30,000kgである。

動的質量を算定するために、スラブ中央部を力検出器付きハンマ（インパルスハンマ）で加振し、加振点近傍での振動加速度を測定して振動アクセラランス（振動加速度/加振力）を求めた。振動アクセラランスの逆数が動的質量となる。測定ブロックダイアグラムを図-3に、動的質量の測定結果を図-4に示す。

図-4の動的質量の測定結果をみると、全体の傾向としては、周波数の上昇に伴い動的質量が低下しており、周波数依存性がみられる。スラブの一次固有周波数は5.5Hzであり、この周波数では動的質量が大きく低下している。

衝撃荷重を与えた場合のスラブの強制変形範囲（加振時間内のスラブの応答範囲）は、その応答がスラブの曲げ変形に依存することから、曲げ波の1波長の範囲に相当する。そこで、各周波数に対する曲げ波の波長を算出し、その1波長の範囲内の質量が動的な質量になると仮定して図-4中に示した。その結果、動的質量の測定結果の平均的な値となっており、対応が良いことがわかる。しかし、低次の固有周波数については、共振、反共振の影響により対応が取れていない。そこで、実測値から共振の程度を表す共振倍率（Q値）¹⁾を求め、一次固有周波数における動的質量実測値にQ値を乗じた。その結果、約15,700kgとなり、曲げ波の1波長分の質量とほぼ対応が取れる結果となった。これらの結果から、スラブの動的質量は、各周波数に対する曲げ波の1波長分の質量と想定することで設定が可能であるといえる。

3.2 TMDの最適減衰比の算出

TMDの最適減衰比、最適減衰係数は、次式²⁾を用いて算出できる。

$$\mu = m/M \tag{1}$$

$$\zeta \text{ (最適減衰比)} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \tag{2}$$

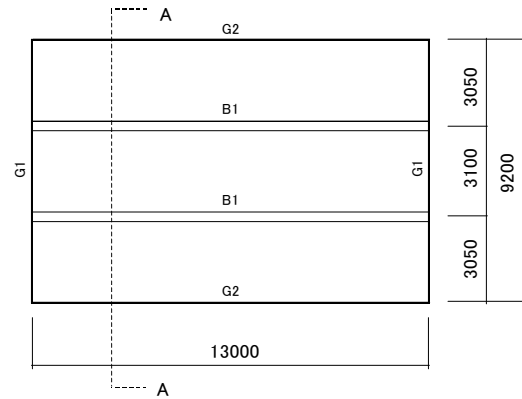
$$C \text{ (最適減衰係数)} = \zeta(2\sqrt{m \cdot k}) \tag{3}$$

ここで、 m ：TMDの質量 (kg)

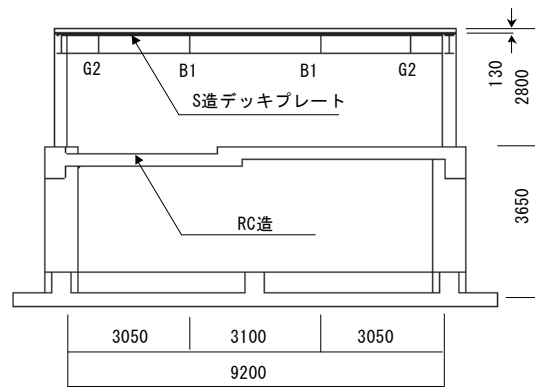
M ：スラブの動的質量 (kg)

k ：TMDのばね定数 (N/m)

理論解としては、TMDの減衰比を最適減衰比とすることによって効果的な装置となる。



平面図



A-A断面図

図-2 S造試験スラブの概要

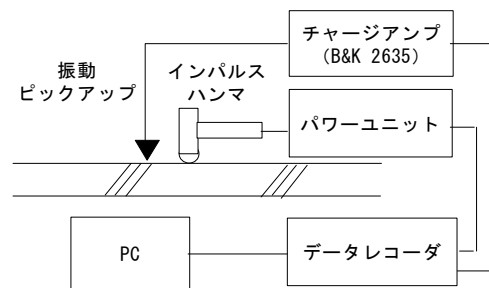


図-3 動的質量の測定ブロックダイアグラム

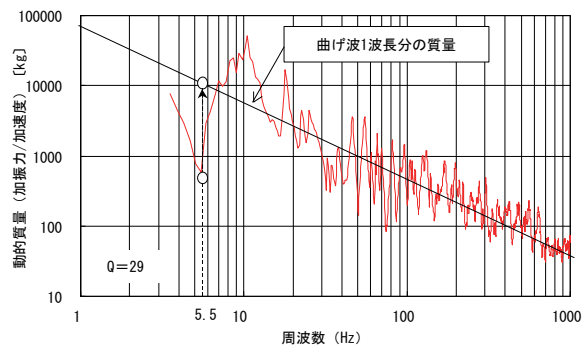


図-4 スラブの動的質量と固有周波数

4. TMD の効果確認実験

開発した TMD の効果を検証するため、TMD を試作して S 造試験スラブで効果確認の実験を行った。試作した TMD を写真-1 に示す。

4.1 試作した TMD の概要

TMD は、質量比が 0.6% (ばね上質量 100kg)、2.0% (ばね上質量 300kg)、3.2% (ばね上質量 500kg) の 3 種類を試作した。減衰比は、各質量比とも 6% を基本としたが、質量比 2.0% の装置については、8%、12%、21% も試作した。表-1 に試作した TMD の概要を示す。なお、減衰比 8.0% が式(2) で求めた最適減衰比である。

4.2 実験方法

実験は、スラブ上に TMD を設置し、スラブを加振した時のスラブの振動加速度を測定した。なお、TMD を固定した場合 (非制振時) と固定を解除した場合 (制振時) の測定結果を比較することで効果を確認した。

スラブを加振する際の加振源には、安定した加振を行える重量床衝撃音用加振源であるゴムボール (JIS A 1418-2 に規定されている衝撃力特性(2) : ゴムボールの仕様は、外形 0.185m、有効質量 2.5±0.1kg) を用い、高さ 1m から自由落下させた。

また、実際に問題となる加振源として人間の歩行などの連続的な加振が想定されるが、図-5 に示す人の歩行によるスラブの振動加速度応答例のように、同一の人間でも歩行間隔や加振力にばらつきが生じるため、制振時、非制振時で加振状況が変わる恐れがあった。そこで、ゴムボールを高さ 0.2m から 0.6 秒間隔 (人間の歩行間隔をイメージ) で自由落下させて連続加振とし、歩行加振を模擬した実験も行った。

制振装置の設置位置はスラブ中央とし、スラブ中央から 1.5m 離れた位置を加振点とした。スラブの振動加速度応答測定位置はスラブ中央から 1m 離れた点とした。測定位置の概要を図-6 に、測定状況を写真-2 に示す。

スラブの振動加速度応答の測定には、振動レベル計 (RION VM-53A) を用い、スラブ加振時の振動加速度応

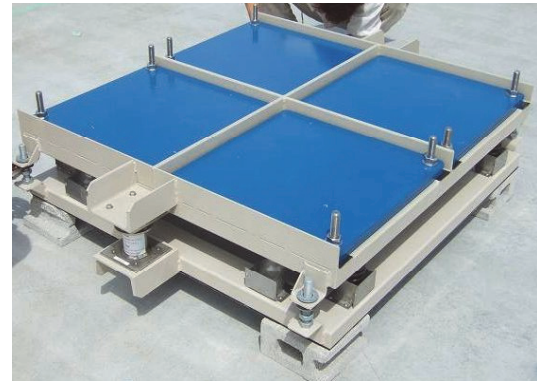


写真-1 TMD の試作機

表-1 スラブの動的質量に対する質量比と減衰比

質量比	装置ばね上の質量	スラブの動的質量
0.6%	100kg	約15700kg
2.0%	300kg	
3.2%	500kg	

質量比	減衰比	最適減衰係数に対する比率
2.0%	6.0%	0.8
〃	8.0%	1.0
〃	12.0%	1.5
〃	21.0%	2.2

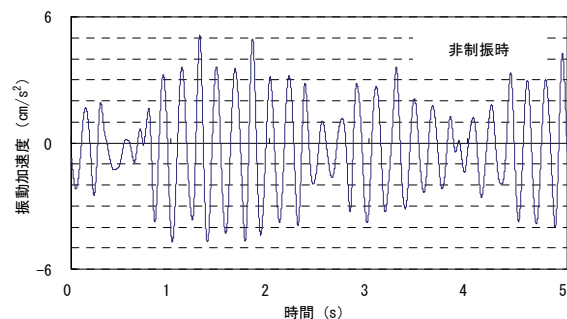


図-5 歩行加振時のスラブの振動加速度応答例

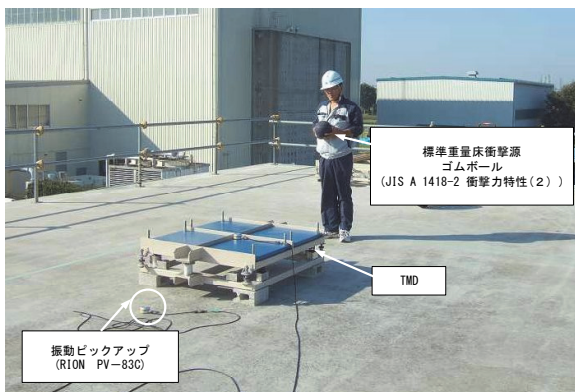


写真-2 測定状況 (ゴムボール単発加振時)

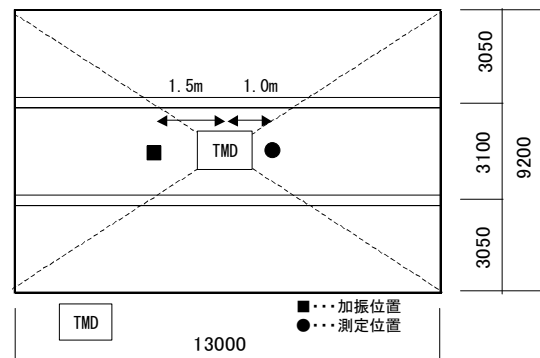


図-6 測定位置の概要

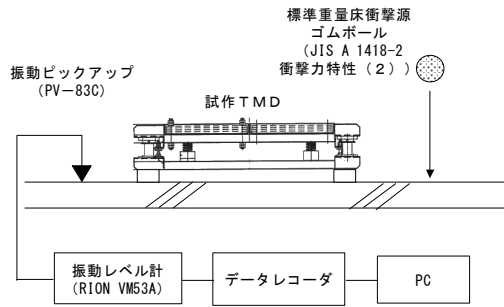


図-7 振動加速度応答の測定ブロックダイアグラム

答をデータレコーダに収録し周波数分析を行った。図-7に測定ブロックダイアグラムを示す。

5. 検証結果

5.1 質量比の影響

ゴムボール単発加振時におけるスラブの振動加速度時系列応答波形測定結果を図-8に示す。非制振とは、スラブ上にTMDを設置した後、ばねを固定し、TMD本体が上下運動を起こさないようにした状態である。

衝撃初期応答は、制振時と非制振時とも振動加速度がほぼ同程度である。装置はスラブの振動に同調して動くことで効果を発揮するので、スラブが動き出さないと効果は得られない。そのため、衝撃初期の応答は制振時、非制振時では差がない結果となる。しかし、スラブが揺れ出すと、装置がスラブの揺れに同調して作用するため、装置の質量効果、減衰効果が発揮され振動は収束していく。本測定結果でもその傾向が伺える。

振動波形のスペクトル解析結果を図-9に示す。

スラブの一次固有周波数付近に着目すると、TMDを稼働させずに設置するだけでも質量効果が得られ、一次固有周波数が低域側へ移行し、振動加速度応答も若干ではあるが低減している。質量比の違いに着目すると、質量比が大きいほど、一次固有周波数における振動加速度の低減量も大きく得られている。ただし、一次固有周波数を中心として低域側および高域側での振動が増加するが、

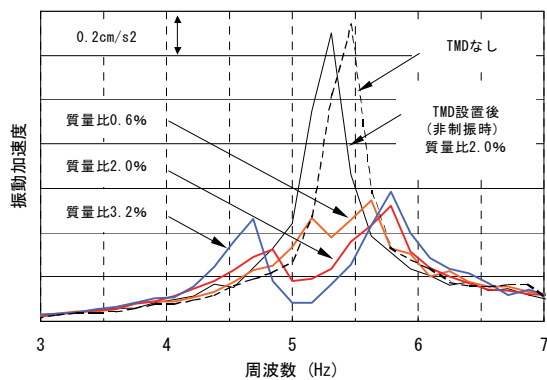
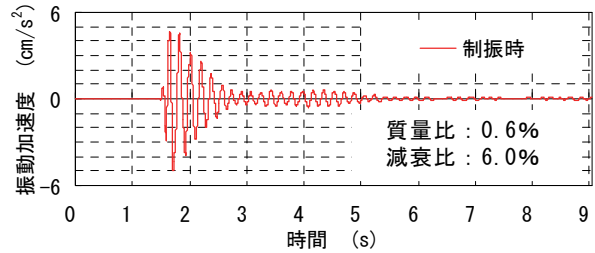
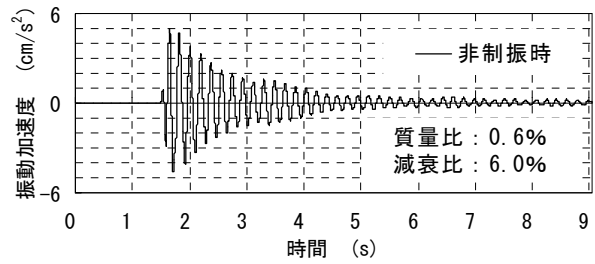
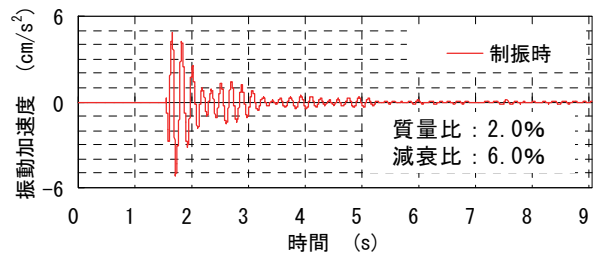
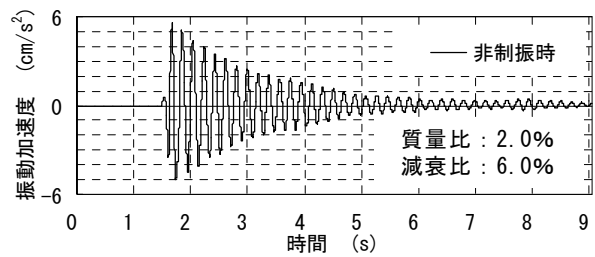


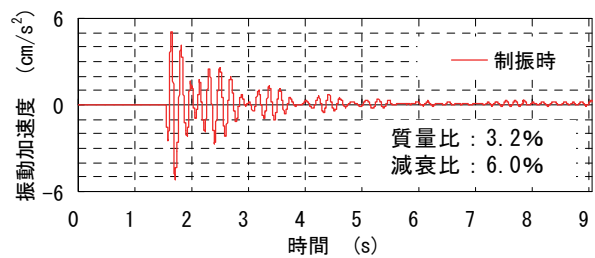
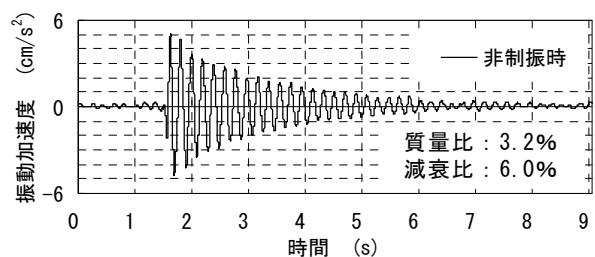
図-9 周波数分析結果 (質量比の違い)



(A) 質量比0.6%



(B) 質量比2.0%



(C) 質量比3.2%

図-8 スラブの振動加速度応答 (質量比の違い)

その増加する周波数の幅や振幅は質量比が大きいものほど大きくなる。これは TMD の理論解でも同様な傾向にある。このことから、質量比が大きいものほど一次固有周波数に対する効果は得られやすいが、総合的な効果（左右に振り分けられた成分も含めた振幅の絶対値）を考えると、今回試作した質量比の範囲では質量比 2.0%程度の場合が最も効果的であることがわかった。

5.2 減衰比の違い

質量比 2.0% の TMD の減衰比を変えて減衰比の影響を検討した。単発加振時の振動加速度応答を図-10 に示す。

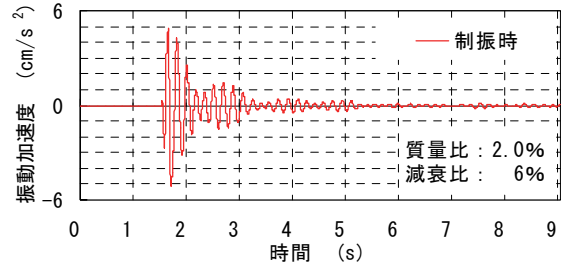
非制振時に比べると各減衰比とも効果は得られているが、減衰比によって効果の大小は異なる。また、減衰比 21% では、一応は減衰性能の向上は見られるが、他の減衰比の場合に比べて効果は少ない。

振動波形のスペクトル解析結果を図-11 に示す。

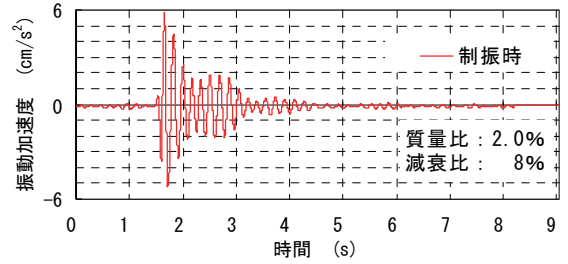
減衰比が 6%、8%、12% については、一次固有周波数を中心に両サイドの周波数に振動成分が分割される傾向であり、理論解と同一の傾向を示すが、減衰比 21% については、傾向が異なる。このことから、減衰比については、式(2)に示した最適減衰比に近い値を採用することで、効果的な装置を提供できるといえる。今回試作した範囲内では最適減衰比の 0.8~1.5 倍程度の間であれば効果的な装置となると考えられる。

5.3 居住性能ランク

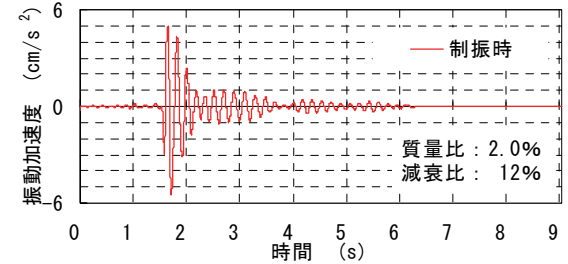
実建物で環境振動問題が懸念される加振源としては、人間の歩行や走行などの連続的な加振であると考えられる。そこで、連続加振時における効果を検証した。なお、人間の歩行では、前述したように制振時、非制振時に安定した加振を行うことが難しいため、ゴムボールを 0.2m の高さから 0.6 秒間隔で連続落下させて歩行のような連続加振を模擬した。効果の検証は一連の実験で効果的であった質量比 2.0%、減衰比 12% の装置で行った。振動加速度応答測定結果を図-12 に示す。



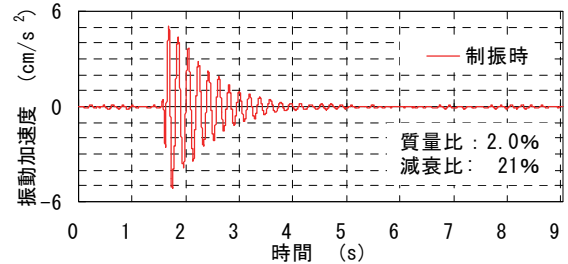
(A) 減衰比6%



(B) 減衰比8%



(C) 減衰比12%



(D) 減衰比21%

図-10 スラブの振動加速度応答（減衰比の違い）

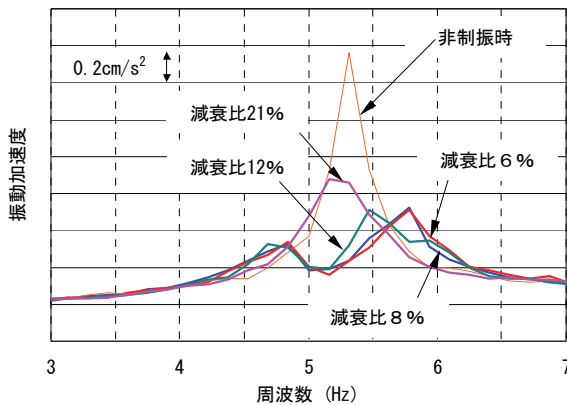


図-11 周波数分析結果（減衰比の違い）

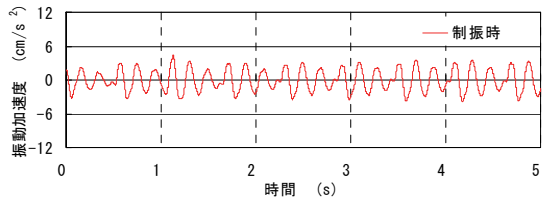
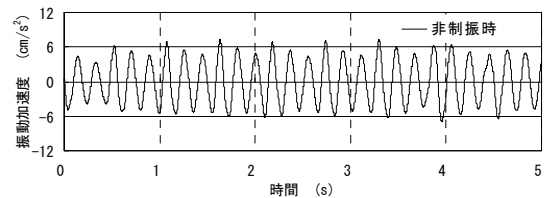


図-12 連続加振時におけるスラブの振動加速度応答

この結果をみると、連続加振時でも振動加速度が低減しており、実際に障害が生じるケース（人間の歩行）に対しても効果的であることがわかる。また、日本建築学会・環境基準（居住性能指針）に規定されている鉛直振動の評価結果（衝撃信号用時定数 10ms の 1/3 オクターブバンド分析）を図-13 に示すが、これを見ても、非制振時 V-90 に対して制振時 V-50 と大きな効果が得られていることを確認できる。

5.4 TMD を横架材上に設置した場合の影響

本検討では、スラブ上に TMD を設置して検証を行ったが、実建物へ装置を搭載する場合には、写真-3 に示すようにスラブ下（梁と梁の間に横架材を設けてその上に設置する）に設置することになる。そこで、横架材上に設置した場合における振動加速度応答を測定し、今回の検証実験の結果と比較した。その結果を図-14 に示す。

両者の対応性はよく、実際の設置でも今回の検証結果と同等の効果が得られた。

6. まとめ

床揺れ防止用の制振装置を開発し、実大試験スラブで効果を検証した結果、以下のことがわかった。

- i. スラブの動的質量は、振動アクセラランスから求めることが可能であるが、固有周波数に対応する周波数では、共振、反共振の影響が現れるため、共振の程度を表す共振倍率（Q 値）を求め、共振によって低下した分を補正すると、対象周波数の曲げ波 1 波長分の範囲に相当する質量と良く対応する
- ii. 質量比は大きいほど一次固有周波数での効果は得られるが、総合的に判定すれば、質量比 2.0% 程度とすることが有効である
- iii. 減衰比は、最適減衰比の理論解に近いほど効果的であるが、今回の検討結果では、最適減衰比の 0.8~1.5 倍の範囲であれば同等の効果が得られる
- iv. ゴムボールを 0.2m の高さから 0.6 秒間隔で自由落下させて歩行を模擬した加振を行い、効果を検証した結果、非制振時 V-90 に対して制振時 V-50 と大幅に振動を軽減できる
- v. 横架材上に設置した場合でも、スラブ上に設置した場合と同等の効果が得られる

7. あとがき

床揺れに対して効果的な制振装置を提案できることを実大試験スラブで検証した。現在施工中の実物件に適用しており、今後は、実物件においても制振効果を検証していく予定である。

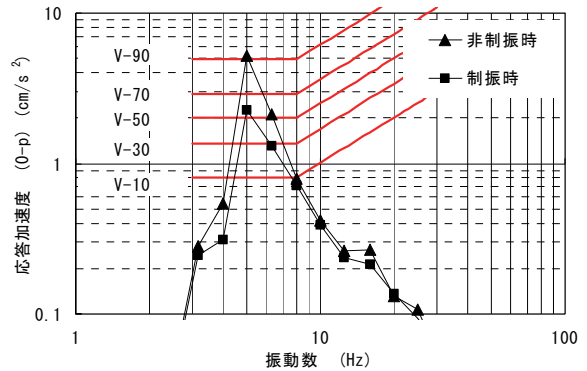


図-13 居住性能評価



写真-3 横架材上に設置した TMD

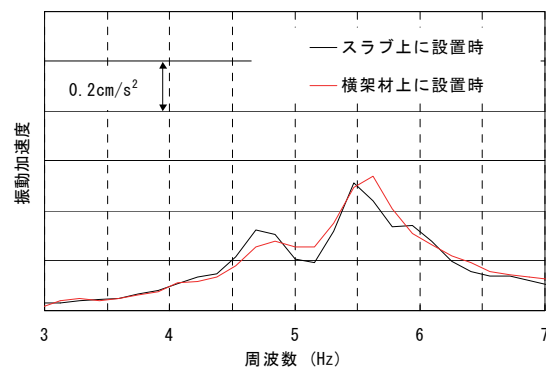


図-14 横架材上に設置した TMD の効果

【参考文献】

- 1) (社) 日本騒音制御工学会、「騒音制御工学ハンドブック [基礎編]」、技報堂、pp.11-13、2001
- 2) 長松昭男、「モード解析入門」、コロナ社、pp.344-347、1993
- 3) 背戸一登、「産業制御シリーズ① 構造物の振動制御」、コロナ社、pp.39-44、2006
- 4) JIS A 1418-2 : 2000 「建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法 第2部：標準重量衝撃源による方法」
- 5) 日本建築学会、「建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説」、pp.5-16、2004