

丸鋼を用いた床振動低減用 TMD の開発

谷 翼^{*1}・栗栖 藍子^{*2}

Keywords : tuned mass damper, floor vibration, round bar, period adjustment, free vibration test

TMD, 床振動, 丸鋼, 周期調整, 自由振動試験

1. はじめに

無柱の空間を確保するため、事務所ビルなどでは単材で大きなスパンを架け渡すことがある。スパンに対して十分な梁せいを確保できない場合、歩行等に伴う床振動により居住性が損なわれないよう対策を行わなくてはならない。

床振動軽減のために、鋼板やコンクリート塊をマスとした TMD を設置する例が見られる。TMD は主として、マス・ばね・減衰装置から成るが、ばねとしてコイルスプリングが用いられることが多い。TMD と床とを同調させるためには、コイルスプリングの種類や数量、あるいはマスとの位置関係を変える必要がある。

本稿では、より簡易な同調が可能な TMD として、建築工事でも一般に広く使用される丸鋼を用いたシステムを提案する(図-1)。隣接する大スパン梁間に丸鋼を架け渡し、水平に近い角度を有する軸力部材によりマスを吊り下げるシステムである。周期調整には、水平に設置された丸鋼(以下、水平材)に設けたターンバックルを用いる。ターンバックルにより水平材の長さを変えることで、斜めに設置された丸鋼(以下、斜材)の角度が変わり、鉛直方向の剛性が調整可能となる。実大の試験体を製作し、周期調整の検証および自由振動試験を行ったので、その結果を報告する。

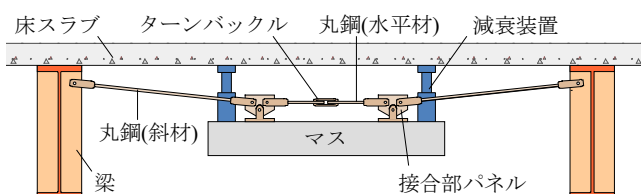


図-1 提案システム概念図

Fig.1 Conceptual model of the system

2. 提案システムの力学特性

2.1 力学モデル

本システムは、図-2 に示す力学モデルに置き換えることができる。このとき、斜材の軸力の鉛直成分はマスの重量と釣り合う。また、水平材の軸力は、接合部パネルとマスとの接合部位置での曲げモーメントの釣り合いから求められる(図-3)。なお、丸鋼に比べ、マスは断面積が非常に大きいこと、接合部パネルは形状が小さいことから、マスおよび接合部パネルを剛とみなした。

2.2 鉛直剛性

本システムの鉛直剛性は、丸鋼(斜材、水平材)の軸剛性と斜材の角度により決定される。斜材の長さが一定の場合、斜材の角度が水平から鉛直に近づくほど

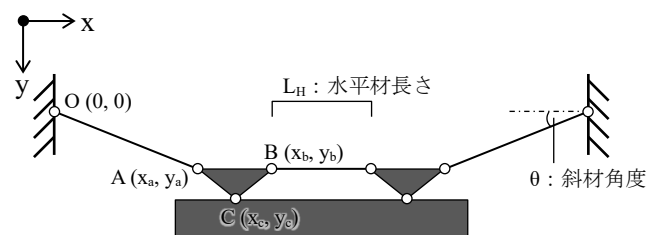


図-2 提案システムの力学モデル

Fig.2 Mechanical model of the system

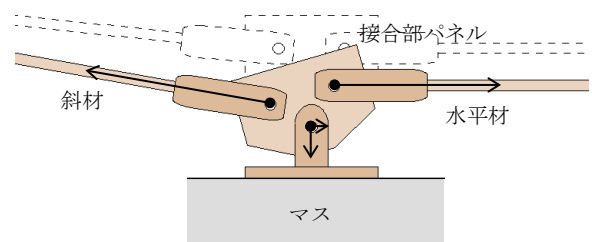


図-3 接合部パネル周辺の力の釣り合い

Fig.3 Equilibrium of forces around connection panel

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

*2 技術センター 知的財産部 特許室

鉛直剛性は増加する。各部の位置関係は材の寸法に応じて一意に決まることから、水平材の長さを変化させることで鉛直剛性を調整することが可能となる。

鉛直剛性の計算値の一例を図-4 に示す。鉛直変位に応じて斜材角度が変化するため、力-変位関係は非線形となる。ただ、一般的な床振動低減用の TMD に生じる変位の変動幅は 0.1mm 未満と小さいことから、本稿においては線形とみなして検討を行う。

3. 試験体

3.1 試験体外形

一般的な事務所ビルを想定し、試験体の設計を行った。マスにはコンクリートを使用し、接合部パネル等と併せて重量を 1t 程度とした。丸鋼には大きな張力が作用するため、490 材を使用している。本試験体において想定している振動数範囲は 4~8Hz 程度である。なお、本試験では周期調整の可否の確認を主目的としているため、減衰装置は設けていない。試験体図を図-5 に示す。実際には自重による変形が生じるため各部の寸法や位置関係は変化するが、それらは考慮していない。

3.2 試験項目

試験体の振動数が小さくなるほど水平材に生じる軸力は増加し、4Hz では 20kN を超えることが予想される。そこで、大きな軸力が生じている場合においてもターンバックルを人力にて締め付けられるかの確認を行う。また、水平材の長さに応じた振動数の変化をハンマリング試験により確認する。コンクリートマス中央部を鉛直下向きに加振するものとする。

3.3 計測

丸鋼のひずみ、マスおよびマスを支える鋼製柱の加速度、マスの鉛直変位を計測する。図-6 に計測位置を示す。各丸鋼にはひずみゲージを 2 枚貼付している。また、周期調整ごとに斜材の角度、水平材の長さを計測する。サンプリング周波数は 200Hz とする。

4. 試験結果

4.1 周期調整

レンチを用いてターンバックルを回転させ、水平材の長さを変化させた。水平材は 2 本あるため、両方のターンバックルを同時に同量回転させることで試験体を水平に保った。人力でも問題なくターンバックルを締め付け可能なことを確認した。

その後、コンクリートマス中央部を打撃することで

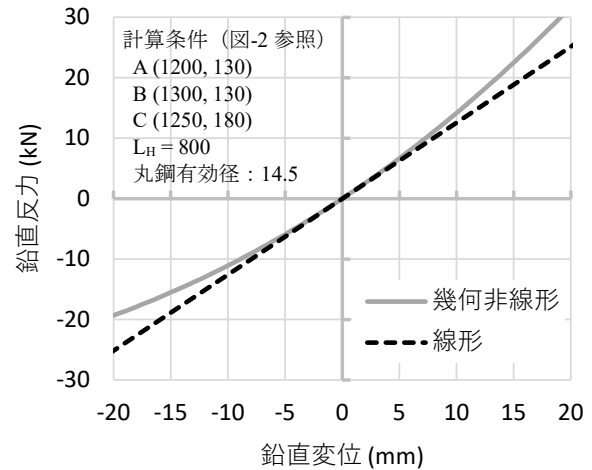


図-4 鉛直剛性の計算例

Fig.4 Calculation example of vertical stiffness

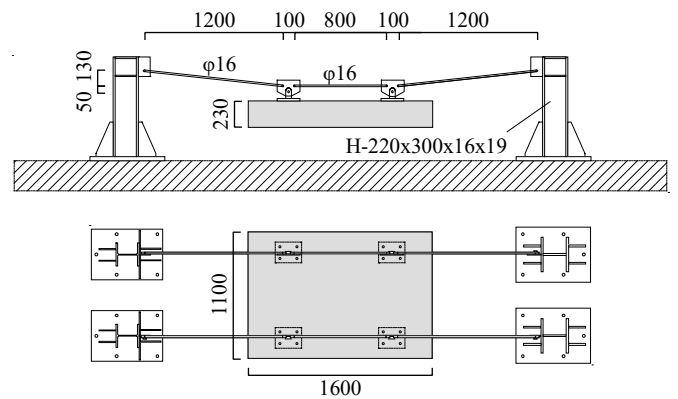


図-5 試験体

Fig.5 Specimen

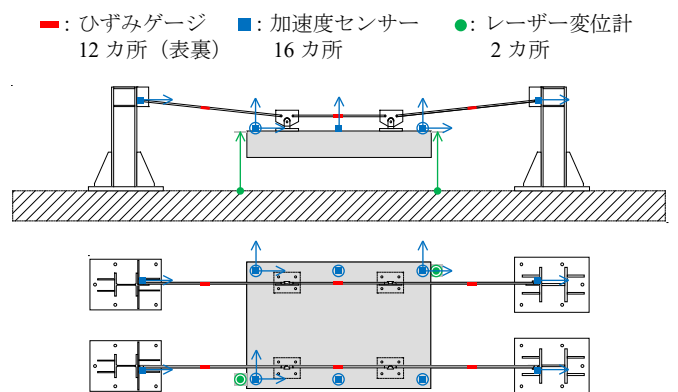


図-6 計測点

Fig.6 Measurement point

自由振動を生じさせた。試験の様子を図-7 に、計測結果を表-1 に示す。

水平材の長さに応じて斜材の角度が変化するとともに、固有振動数が変化していることがわかる。固有振動数は 4.2 から 7.8Hz となっており、試験体設計時に想定した範囲を概ね網羅している。



図-7 試験状況
(上：試験体全景，左下：周期調整，右下：打撃状況)

Fig.7 Experiment situation

(top: Overall view of the specimen,

left: period adjustment, right: hammering situation)

表-1 試験結果

Table 1 Test result

case	水平材長さ (mm)	斜材角度 (°)	軸力(kN)		固有振動数 (Hz)
			斜材	水平材	
1	845	12.8	12.0	2.0	7.81
2	807	9.5	15.7	10.6	6.15
3	794	7.6	19.7	18.8	4.98
4	785	6.2	24.2	26.1	4.20

4.2 加速度波形

各 case におけるハンマリング試験時の鉛直方向加速度の時刻歴を図-8 に示す。加速度はマスの鉛直加速度計測点 6 点の平均値とし、最大値を 1 に基準化している。また、加振直後の衝撃により生じる加速度が卓越する時間帯は除いている。一定の振動数で振動しながら、時間の経過とともにわずかに振幅が低減していることがわかる。このときの減衰定数は約 0.3%であり、振動数の違いによる差は小さい。

このときの加速度時刻歴のフーリエ振幅（最大振幅で基準化）を図-9 に示す。各 case とも明瞭なピークを有しており、各々の一次モードで自由振動していることがわかる。

4.3 計算値との比較

図-2 に示した力学モデルを用い、幾何学的な関係から求まる軸力および固有振動数を計算した。計算値と実験値との比較を行う。

水平材の長さとお軸力の関係を図-10 に示す。水平材が短くなるにつれて軸力が増加する傾向は一致しているものの、計算値と実験値の乖離が大きくなっている。斜材の軸力の鉛直成分とマスの重量は釣り合うことから、斜材の角度が設計時に想定した幾何学的な関係か

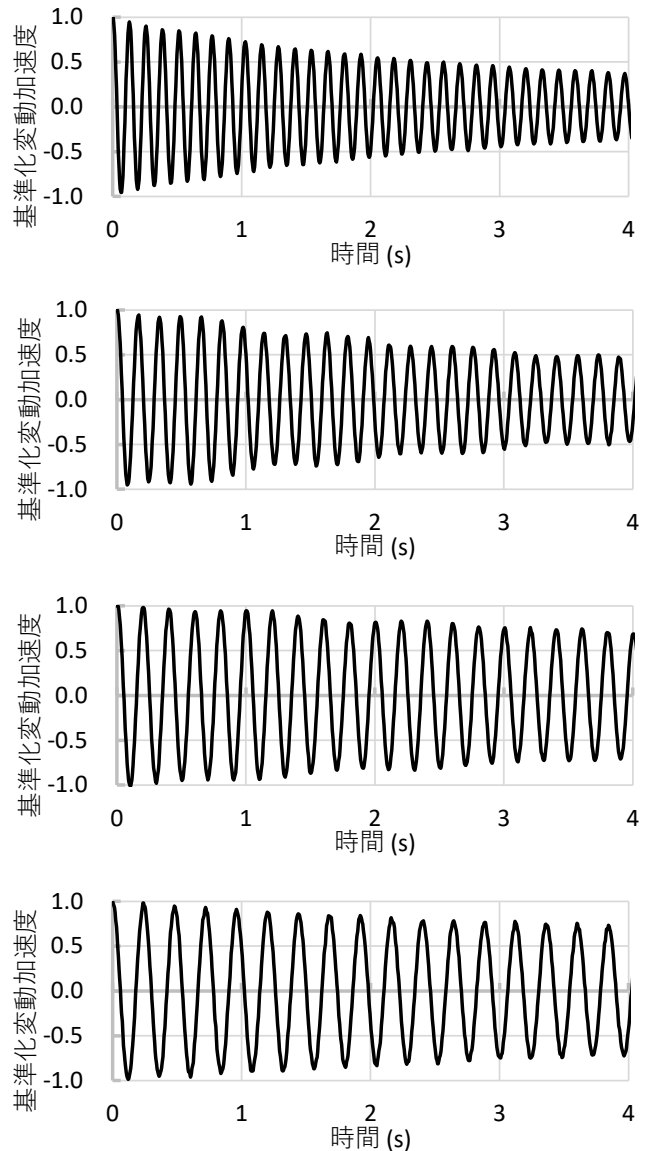


図-8 基準化鉛直加速度の時刻歴
(上から case1, 2, 3, 4)

Fig.8 Time history of standardized vertical acceleration
(from top to bottom: case1, 2, 3, 4)

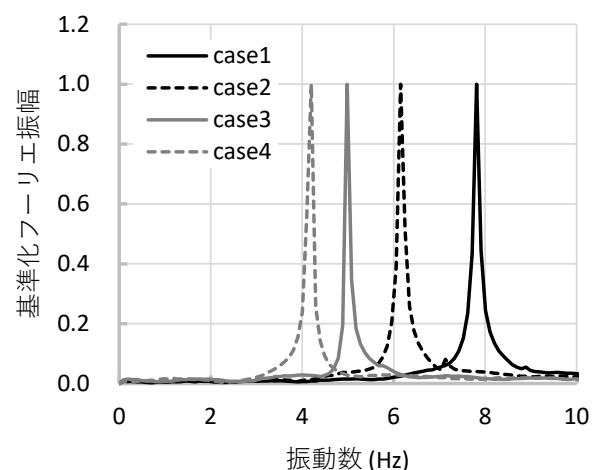


図-9 鉛直加速度の基準化フーリエ振幅

Fig.9 Standardized Fourier amplitude of vertical acceleration

ら乖離している可能性がある。そこで、水平軸を水平材長さから斜材角度に変更した。

斜材角度と軸力の関係を図-11 に示す。斜材に生じる軸力は実験値の方がやや計算値よりも大きな値となっているが、水平材長さとの関係よりもよい対応を示している。ただ、水平材に生じる軸力においては、実験値と計算値との乖離は依然大きい。その要因として、各丸鋼の初期長さの誤差、接合部パネルの寸法誤差、ボルト孔径とボルト軸径との差、丸鋼の変形による位置関係の変化等が挙げられる。

丸鋼軸力と固有振動数の関係を図-12 に示す。丸鋼の軸力の増加に伴って固有振動数が低下することがわかる。固有振動数が最も低い 4Hz 程度の場合でも丸鋼に生じる軸応力度は 150MPa 程度である。地震時に上下方向に 1G の加速度が生じた場合においても、490 材を使用することで丸鋼に生じる応力を弾性範囲内に留めることができる。固有振動数を高振動数側に变化させる場合は丸鋼の軸力が低下することになるが、丸鋼は圧縮力を負担できないため、水平材の軸力が 0 となると固有振動数は頭打ちとなる。計算値よりも小さな軸力となっているが、それでも 8Hz 程度までは引張軸力が生じており、広い振動数範囲で同調可能であるといえる。丸鋼の軸力が計算値よりも小さな値となっているが、前述のように各種誤差が影響しているものと考えられる。また、本計算では丸鋼を支える鋼製柱の変形を考慮していないため、その分だけ剛性を大きく見積もっている。各種誤差や周辺部の変形を考慮した検討を行う必要がある。

5. まとめ

丸鋼とマスを組み合わせた床振動低減用の TMD を提案し、ハンマリング試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- ・丸鋼の長さをターンバックルにより調整することで、マスの固有振動数を变化させることができる。
- ・丸鋼に強度の高い材を使用することで広い範囲での固有振動数の調整が可能となる。
- ・丸鋼の軸力が 25kN 程度であっても、人力でターンバックルを締めることが可能である。
- ・減衰装置を設置しない場合、減衰定数は 0.3% 程度である。

今後は、減衰装置を設置したうえで振動台試験を実施し、地震時の落下に対する装置の安全性を確認する予定である。

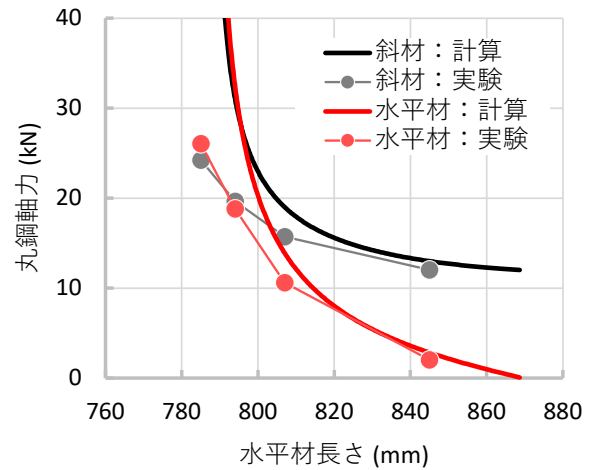


図-10 丸鋼軸力－水平材長さ関係

Fig.10 Round bar axial force – horizontal element length relation

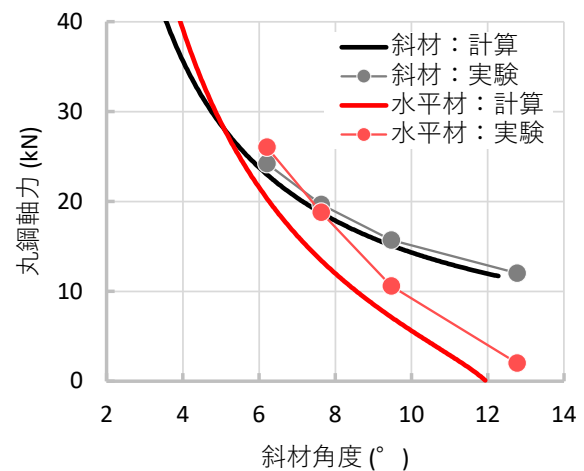


図-11 丸鋼軸力－斜材角度関係

Fig.11 Round bar axial force – diagonal element angle relation

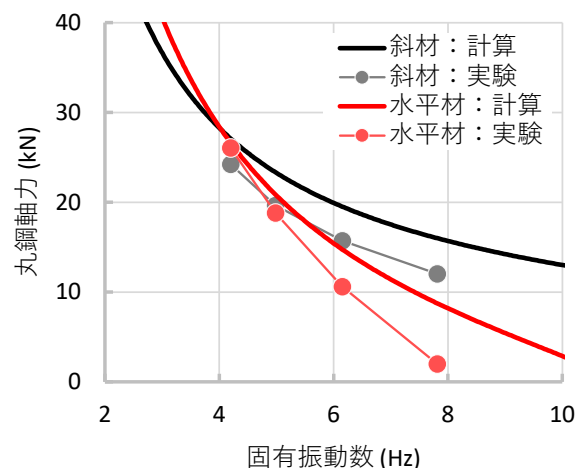


図-12 丸鋼軸力－固有振動数関係

Fig.12 Round bar axial force – natural frequency relation

参考文献

- 1) 岡本達雄, 下野直人, 高橋良典, 吉岡宏和, 井上竜太: 動吸振器 (TMD) による鉄骨造建物の床振動制御技術の開発・普及と制振効果を活かした建築作品群の創出, 2012 年日本建築学会賞(業績), 2012.8