

片持ち架構の上下振動制御に屋上緑化を マスダンパーとして利用した制振構造の性能検証

PERFORMANCE VERIFICATION OF SEISMIC-CONTROLLED STRUCTURE USING ROOFTOP GREENING AS MASS-DAMPER TO CONTROL VERTICAL VIBRATION OF CANTILEVER FRAMES

丸尾 純也*¹, 桑素彦*², 川又 哲也*³, 石田 琢志*¹, 得能 将紀*³, 石塚 圭介*³

Junya MARUO, Motohiko KUWA, Tetsuya KAWAMATA, Takushi ISHIDA, Masaki TOKUNO and Keisuke ISHIZUKA

There is a plan to install rooftop garden on 8.0-meter cantilever frame, which is the design and construction object of our company. However, excessive vertical vibration of cantilever frame during earthquake by roof greening weight is a problem. To cope with this issue, by supporting rooftop greening through mechanism having rigidity and damping, the rooftop greening is planned to be utilized as vertical mass damper. In this paper, the effectiveness of using rooftop greening as mass damper is verified analytically. Next, this paper examines concrete mechanisms for realizing rooftop greening as mass damper, and carries out shaking table test to verify its seismic control effect. The uplift property of the soil of rooftop greening by vertical vibration is also confirmed.

In the analysis, it was possible to reduce the response of the whole cantilever frame during earthquake by using the rooftop greening as mass damper. In the shaking table test, mass damper composed of springs and damper stably reduced the response to level-2 seismic motions in notification and the input over it. It was confirmed that the evaluation of the mass of roof greening utilized as mass damper didn't change, even when subjected to an acceleration exceeding 1G.

Keywords : Mass Damper, Rooftop Greening, Cantilever Slab, Seismic Response, Shaking Table Test
マスダンパー, 屋上緑化, 片持ち床, 地震応答, 振動台実験

1. はじめに

屋上緑化は都心部のヒートアイランド現象を緩和する手段として有効であり、また、利用者や従業員にとってのリフレッシュ空間としての効果も期待できる。しかし、建築物の屋上を緑化することは土壌や樹木などの大重量による地震力の増大など、建物の耐震性としては不利になる。既往の研究では、屋上緑化を積層ゴム支承で支持することで水平方向のマスダンパーとして利用する制振構造が提案されている^{1)~4)}。

当社においても 8.0m の片持ち架構に屋上庭園を計画する案件があり、屋上緑化重量による地震時の片持ち架構の過大な上下振動が課題であった。片持ち架構の梁せいやスラブ厚を大きくすることで地震時の上下振動を低減する場合、大幅なコスト増になる。そこで、剛性及び減衰を有する機構を介して屋上緑化を支持することにより、屋上緑化を上下方向のマスダンパー（以下、屋上緑化マスダンパー）として利用する計画とした。

本稿ではまず、屋上緑化マスダンパーの有効性を解析的に検証した結果について報告する。次に、屋上緑化マスダンパーを実現するための具体的な機構の検討と、その制振効果を検証するために実施した振動台実験について報告する。

2. 対象建物の片持ち架構の概要

建物の平面形状は 54.0m×64.8m であり、屋上緑化を設置する片持ち架構は対象建物の 6 階である。片持ち架構の長さは 8.0m であり、片持ち架構の先端部に屋上緑化を設置する。対象階の下階（4 階）

にも同様の片持ち架構があるが、マスダンパーによる減衰力を伝達させるため、4 階と 6 階は間柱で連結する計画とした。

3. 解析

3.1 解析モデル

解析モデルを図 1 に示す。屋上緑化を設置する 6 階の片持ち架構とその隣の 1 スパンをモデル化の範囲とし、4 階についても同様とした。境界条件は上下階の階高の 1/2 位置で柱をピン支持とした。また、実際には床が連続する Y3 通りの床の節点は X 軸周りの回転を拘束した。重量は構造体の自重及び地震用設計床荷重を設定した。減衰は 1,2 次モードに対してレーリー型減衰で 2% とした。スラブはスラブ厚の 1/2 高さ分だけ Z 方向正側にオフセットし、梁は梁せいの 1/2 高さ分だけ Z 方向負側にオフセットさせることでスラブと梁の合成断面としての断面 2 次モーメントを考慮した。

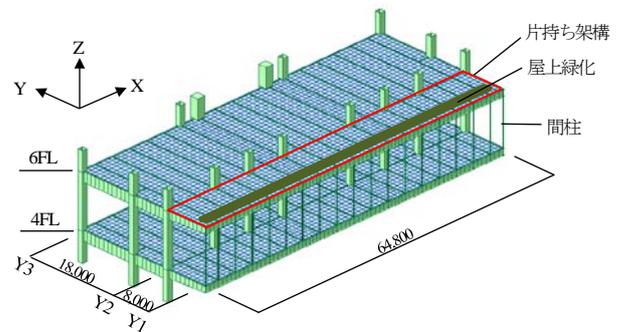


図 1 解析モデル

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士(工学)

*2 戸田建設株式会社構造設計部 博士(工学)

*3 戸田建設株式会社構造設計部 修士(工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

解析はまず、マスダンパーを設計するために屋上緑化の重量を考慮しないモデルに対し固有値解析を行い、その動特性を把握する。続いて、屋上緑化マスダンパーの制振効果を、屋上緑化を片持ち架構に固定したモデル（以下、非制振モデル）との応答比較により検証する。

3.2 固有値解析

鉛直方向の固有値解析結果として、屋上緑化の重量を考慮しない場合の主要モードを図2に示す。中央部は8.2Hz、両端部は9.7Hzでモードの振幅が大きくなることが確認できる。なお、片持ち架構の有効質量に対する屋上緑化の質量比は0.089であり、屋上緑化は片持ち架構の応答低減を見込める質量を有していると考えられる。屋上緑化マスダンパーは中央部で8.2Hz、両端部で9.7Hzのモードに対して、定点理論⁵⁾より剛性と粘性減衰係数を算出した。

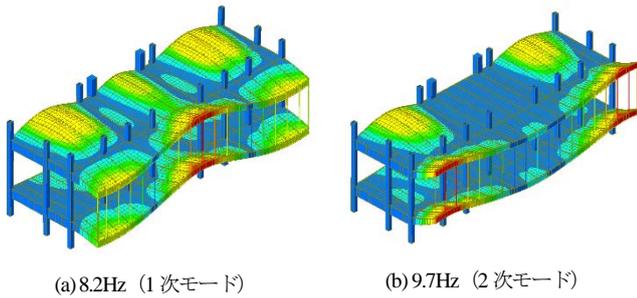


図2 固有値解析結果

3.3 地震応答解析

3.3.1 入力地震波

応答解析に用いる入力波はL2告示波(神戸位相, 八戸位相)及びサイト波(南関東地震, 首都直下地震の都心南部地震断層想定及び東京湾北部地震断層想定)の上下動応答波とした。応答波は全架構フレームモデルを対象としたZ方向への地震応答解析により求めた4階及び6階の応答加速度とし、それを3.1節に示した解析モデルの柱のピン支持位置に地震荷重として入力した。入力波をそれぞれCODE-KO, CODE-HA, KANTO, NANBU, TOKYOBAYと表記する。3階のある柱における入力波の速度応答スペクトルを図3に示す。

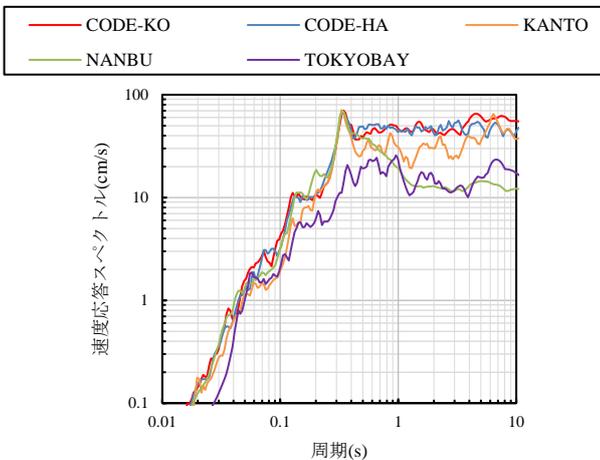


図3 速度応答スペクトル

3.3.2 地震応答解析結果

CODE-KO入力時の最大絶対加速度のコンター図及び評価点の位置を図4に示す。片持ち架構先端の評価点における最大絶対加速度を図5に示す。

CODE-KO入力時の非制振モデル(図4(a))は片持ち架構の中央部での応答が最も大きく、約15.90m/s²の絶対加速度が生じた。一方、制振モデル(図4(b))は屋上緑化に約12.0m/s²の絶対加速度が生じたが、片持ち架構の中央部は6.5m/s²程度であり、制振によって片持ち架構の応答を最大で約60%低減できていることが確認できる。

図5に片持ち架構先端の評価点における最大絶対加速度を示す。CODE-KO以外の4波においても、全ての評価点で制振モデルの応答は非制振モデルを下回っている。また、非制振モデルではどの地震波においても評価点④の応答が大きい傾向が見られるが、制振モデルでは評価点①~④の応答は同程度になっており、制振によって片持ち架構全体の応答を低減し、特に片持ち架構の中央部の応答低減量が大きいことが確認できる。

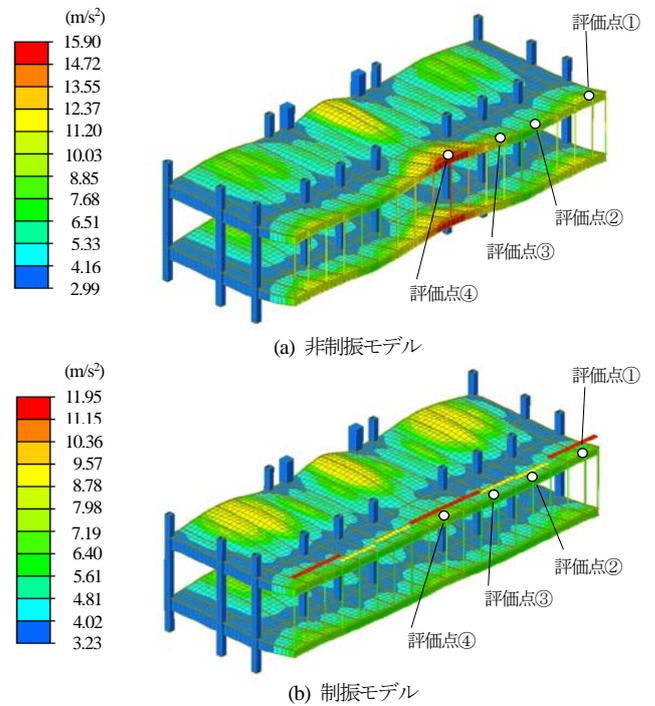


図4 最大絶対加速度のコンター図及び評価点の位置

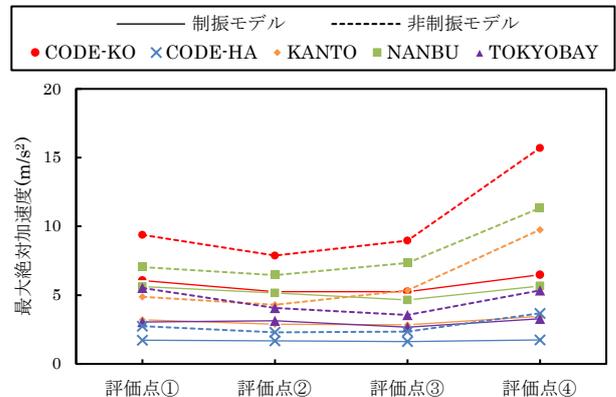


図5 評価点の最大絶対加速度

評価点④における CODE-KO 入力時の加速度時刻歴波形を図 6 に示す。非制振モデルに最大応答が生じる時間 (13 秒付近) 以外の時間に対しても制振モデルは応答を低減できていることが確認できる。

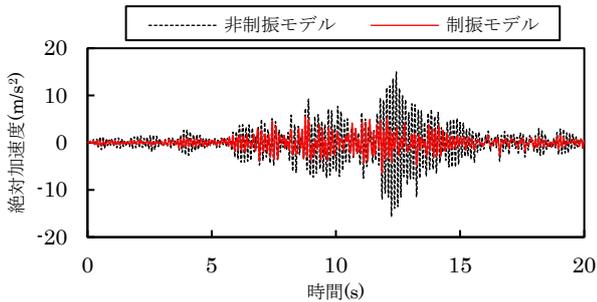


図 6 評価点④における絶対加速度時刻歴波形 (CODE-KO)

4. 縮尺試験体による振動台実験

屋上緑化マスダンパーを実現するための具体的な機構の検討及び、その制振効果の検証のため、縮尺試験体による振動台実験を実施した。

4.1 縮尺試験体

片持ち架構の中央部を模擬した 1/2 スケールの試験体を図 7 に示す。固有値解析より、屋上緑化の重量を考慮しない場合の片持ち架構の中央部の固有振動数は 8.2Hz であったため、試験体の固有振動数はフルード則の時間縮尺から $11.7\text{Hz} (=8.2 \times \sqrt{2})$ になるように設計した。質量比は 3.2 節に従い 0.089 とした。

試験体は鉄骨架台及び 3 本の H 型鋼梁 (250×250×9×14)、厚さ 360mm のコンクリート ($F_c=24\text{N/mm}^2$) で構成される。平面形状は長さ 4.0m、幅 1.5m であり、鉄骨架台からの片持ち長さは 3.1m である。片持ち架構先端上部のコンクリートブロック (1500×500×260) は屋上緑化の重量を想定したものである。片持ち架構の先端には屋上緑化の水平拘束機構としてコンクリートを充填した鋼管を設置した (写真 2 参照)。水平拘束機構とコンクリートブロックのクリアランスは 8.0mm とした。片持ち架構の先端下部には数枚の鉄板を錘として取り付け、試験体の固有振動数を調整した。

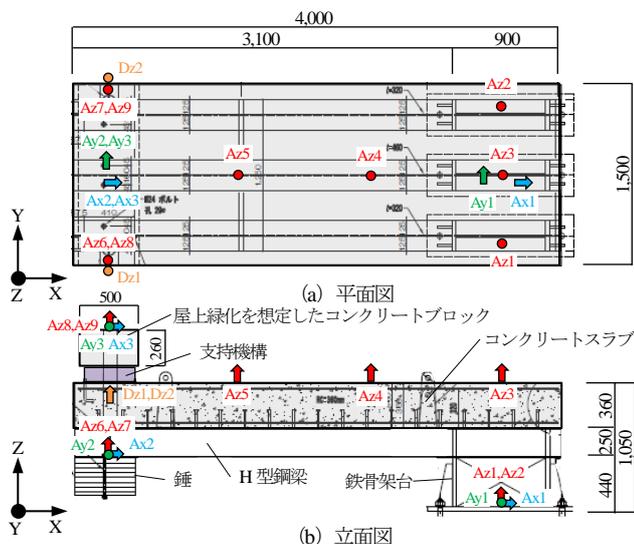


図 7 試験体図及びセンサー位置

コンクリートブロックを片持ち架構に固定した非制振試験体 (以降、単に非制振と記す) (写真 1) 1 体、後述する機構によりコンクリートブロックをマスダンパーとして利用する制振試験体 2 体の計 3 体の試験体を作成した。



写真 1 非制振試験体 全景

なお、図 7 には加速度計及びびレーザ変位計の設置位置を併記した。記載記号について頭文字の A は加速度計を、D は変位計を表す。添字及び矢印の向きは測定方向を、末尾の数字はセンサー番号を表す。

4.2 屋上緑化を想定したコンクリートブロックの支持機構

屋上緑化マスダンパーを実現するための具体的な機構として、バネとダンパーで構成される機械的な機構 (以下、機械式制振) (写真 2)、剛性と減衰特性を有する防振パッド (以下、パッド式制振) (写真 3) の 2 通りを検討した。それぞれの剛性及び粘性減衰係数は設計値である質量比 0.089、固有振動数 11.7Hz に対して定点理論より求めた値とした。

機械式制振は片持ち架構及び屋上緑化を想定したコンクリートブロックとボルトによって固定されるため浮上りにも対応できる機構であり、許容最大ストロークは $\pm 10\text{mm}$ である。一方、パッド式制振はパッド上にコンクリートブロックを載せるだけであり、引張には対応できないが、機械式制振と比べて安価という特長がある。パッド式制振はコンクリートブロックを載せたときのパッドの沈み込み量が 4.0~6.5mm のため、それ以上のストロークが生じた場合にはコンクリートブロックに浮き上がりが発生する。



写真 2 機械式制振

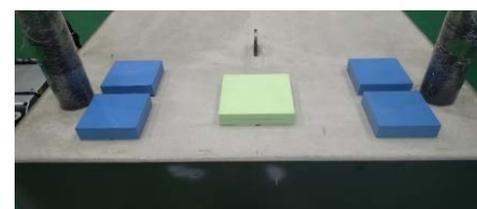


写真 3 パッド式制振

4.3 測定方法

片持ち架構各点の加速度を加速度計で、片持ち架構先端とコンクリートブロックの相対変位（ストローク）をレーザー変位計で計測した（図7参照）。加速度計による測定は鉛直方向に加えて水平2方向の測定も行った。測定のサンプリングは500Hzとした。

4.4 振動台入力波

3.3.1項に示した応答波であるCODE-KO、CODE-HA、KANTO、NANBU、TOKYOBAYを振動台への入力波とした。試験体を1/2スケールとしたため、フルード則に従い入力波の時間軸を $1/\sqrt{2}$ に縮尺して用いた。

加振は鉛直方向のみの1軸加振及び、鉛直方向と水平2方向の3軸加振とした。各入力波の入力倍率を表1に示す。なお、3.3.1項に示した応答波の倍率を100%とした。1軸加振5波と3軸加振5波を1セットの加振とし、順に倍率を増加させた。また、1セットごとに鉛直方向のホワイトノイズ加振及びスイープ加振を行い、試験体の振動特性を確認した。全セット終了後に鉛直方向の正弦波加振（振動数11.6Hz）を実施し、振幅を徐々に増加させて大振幅時の応答を測定した。なお、加振前及び全加振終了後にかかと加振測定を行い、各試験体の減衰定数の推定も実施した。

表1 入力倍率

入力波	鉛直方向倍率	水平方向倍率 (3軸加振時)
CODE-KO	40%, 60%, 80%	65%
CODE-HA	60%, 80%, 100%	70%
KANTO	60%, 80%, 100%	60%
NANBU	60%, 80%, 100%, 200%, 300%, 400%	100%
TOKYOBAY	60%, 80%, 100%	100%

4.5 実験結果

実験では1軸加振及び3軸加振を実施したが、何れも鉛直方向の応答に有意な差は生じなかったため、本稿では鉛直方向のみの1軸加振の結果を記載する。

4.5.1 試験体の固有振動数

コンクリートブロックを積載しない状態にかかと加振測定を行い、片持ち架構の固有振動数を確認した。図8にかかと加振時の片持ち架構先端のAz6とAz7の加速度時刻歴の平均から求めたフーリエスペクトルを示す。

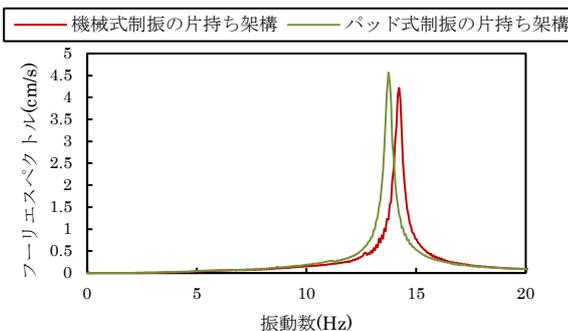


図8 かかと加振時のフーリエスペクトル（コンクリートブロック無積載）

機械式制振に用いる片持ち架構は固有振動数が14.2Hz、パッド式制振に用いる片持ち架構は13.7Hzであり、設計値（11.7Hz）よりも固有振動数が高かった。これはコンクリートの弾性係数が想定よりも高いことが主な原因と考えられる。そのため、機械式制振においては、バネを交換することにより、実固有振動数との調整を行った。ただし、機械式制振のダンパー及びパッド式制振の特性は変更できないため、設計値のまま用いた。

4.5.2 フーリエスペクトル比

振動台加速度はAz1とAz2の加速度時刻歴上の平均値、片持ち架構先端の加速度はAz6とAz7の加速度時刻歴上の平均値とした。各試験体で最初実施したスイープ加振における、振動台に対する片持ち架構先端のフーリエスペクトル比を図9に示す。

機械式制振及びパッド式制振は非制振よりもフーリエスペクトル比のピークが小さくなっており、制振による片持ち架構先端の応答を低減する効果を有することが確認できる。機械式制振は2つのピークの高さがほぼ揃っていることから同調性が高いと考えられる。ただし、定点理論の最適減衰時には2つのピーク間の谷になる部分がより明瞭に表れることから、定点理論の最適減衰よりも減衰係数は大きかったと考えられる。

パッド式制振は前述（4.5.1項）のように試験体の固有振動数が想定よりも高く、同調性が低かったため、機械式制振よりも高振動数側のピークが大きくなった。

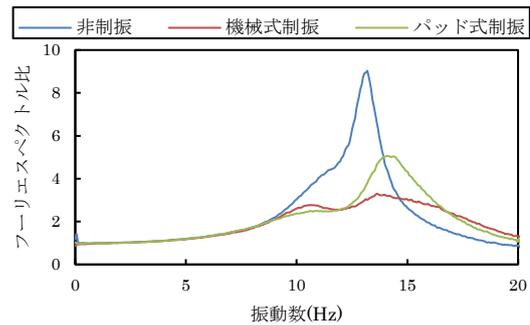


図9 フーリエスペクトル比

4.5.3 最大応答

CODE-KO 80%とその他4波100%入力時の片持ち架構先端の最大絶対加速度及び最大ストロークを図10に示す。

図10において、機械式制振及びパッド式制振は非制振よりも最大応答を低減しており、TOKYOBAY100%以外の4波では非制振に対して機械式制振及びパッド式制振は約25～50%の低減が見られた。TOKYOBAY100%では非制振及び機械式制振、パッド式制振で最大応答に差はなかった。ここでTOKYOBAY100%及びCODE-HA100%の片持ち架構先端の加速度のフーリエスペクトルを図11に示す。図11において、TOKYOBAY100%及びCODE-HA100%のどちらにおいても10～14Hz程度の範囲において制振は非制振よりも応答は小さくなっているが、非制振のTOKYOBAY100%は固有振動数帯の応答が他の入力波と比べて小さく、そのため、図10の最大応答に非制振及び制振の差が生じなかったものと考えられる。

図10(b)において、機械式制振の最大ストロークは0.8mm程度、パッド式制振は1.1mm程度であり、100%の入力（CODE-KOは80%）では何れもストロークの許容範囲内に収まることが確認できる。

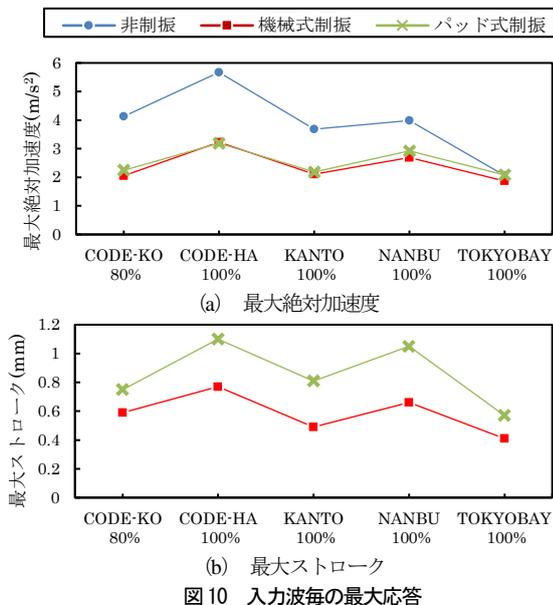


図 10 入力波毎の最大応答

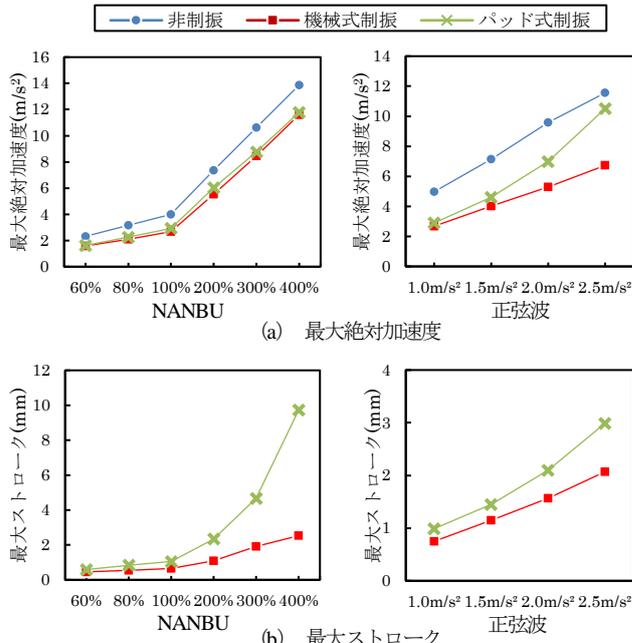


図 12 NANBU 及び正弦波の最大応答

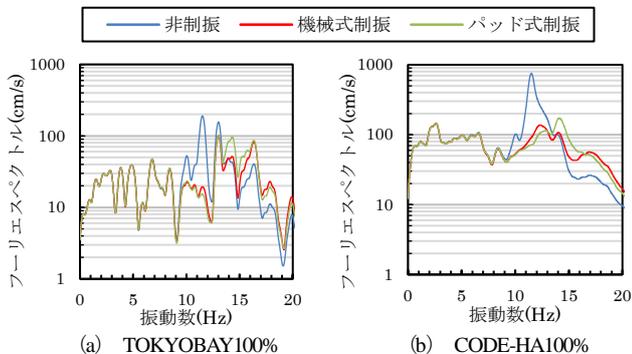


図 11 片持ち架構先端の加速度のフーリエスペクトル

次に NANBU60~400% 及び正弦波 1.0~2.5m/s² 入力時の片持ち架構先端の最大絶対加速度，最大ストロークを図 12 に示す。

NANBU 入力では倍率を大きくしても機械式制振とパッド式制振の加速度応答に大きな差はないが，正弦波入力に対しては入力倍率が大きくなるほどパッド式制振の応答低減効果が小さくなった。パッド式制振では正弦波の入力倍率を大きくしたとき，コンクリートブロックと水平拘束機構の接触が確認されており，この接触のためにパッド式制振の応答低減量が小さくなったと考えられる。

最大ストロークについて，機械式制振ではその値は最大 2mm 程度であり，許容値の±10mm に十分収まる範囲であった。対してパッド式制振では NANBU 400% 入力で最大 10mm 程度のストロークが生じた。コンクリートブロックによるパッドの沈み込み量は 4.0~6.5mm 程度であるため，ストロークの許容範囲を超えてコンクリートブロックには浮き上がりが生じたと推測される。ただし，このときコンクリートブロックと水平拘束機構の接触は生じなかったため，加速度応答は機械式制振と比べて大きな差が生じなかったものと考えられる。

以上より，入力波の倍率 100% に対しては機械式制振，パッド式制振のどちらにおいてもストロークの許容範囲内で非制振に対して応答を低減したが，機械式制振はそれ以上の入力倍率に対しても安定して応答を低減できる機構であることが確認できた。

4.5.4 減衰定数

各試験体の加振前後に行ったかかと加振による片持ち架構先端の自由振動波形にカーブフィッティングを行い，減衰定数を評価した。かかと加振をそれぞれ 10 回づつ行い，10 波形の 1 次モードの減衰定数を求めた。10 波形の減衰定数の平均値を図 13 に示す。

減衰定数は機械式制振が最も大きく，加振前後で 15~16% 程度であった。非制振は 1~2% 程度，パッド式制振は加振前で約 10%，加振後で約 7% であり，パッド式制振のみ加振後に減衰定数の低下が見られた。

パッド式制振における加振後の減衰定数の低下は，大振幅加振によってコンクリートブロックの位置にズレが生じて，パッドの面圧に偏りが発生したことが影響していると考えられる。対して機械式制振は大振幅加振を行っても，バネ・ダンパー部の特性変化は小さかったと考えられ，安定した特性を発揮できる機構であるといえる。

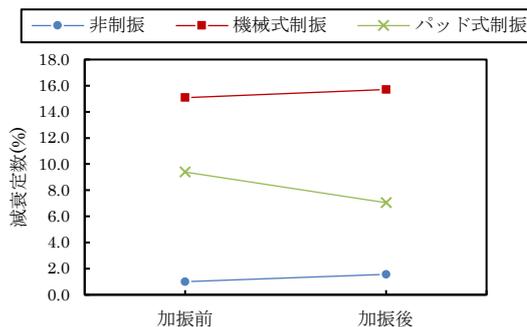


図 13 減衰定数

かかと加振による片持ち架構先端の自由振動波形を図 14 に示す。かかと加振後の最大加速度が生じる時刻を 0 秒としている。初期振幅にほとんど差はないが，その後のあと揺れについて機械式制振及びパッド式制振は非制振よりも振動の収束が明らかに早く，自由振動波形からも減衰定数が増加していることが確認できる。

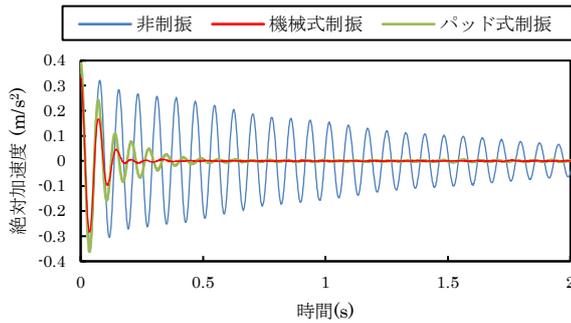


図 14 かかと加振後の自由振動波形

5. 土の振動台実験

上下振動によって土の浮き上がりが生じた場合、片持ち架構に寄与する屋上緑化の質量の評価が変化する可能性が考えられたため、土を入れたプランターに対して 1G を超える振動台実験を実施し、土の浮き上がりによって質量の評価が変化するかを確認した。

試験体は 3 体とし、図 15 に概要を示す。質量の評価が変化しない鉄板を試験体 A、振動により土が動くプランターと土を試験体 B、植栽の根による土の拘束効果を想定して、土の浮き上がりをパンチングメタルで抑制した試験体 C とする。試験体は全て同じ質量 (72kg) とした。試験体それぞれに対し、振動数 5~15Hz の加速度一定のスweep波での加振実験を行った。入力レベルは 5 段階として実施した。

振動台の最大加速度と試験体の最大加速度の関係を図 16 (a) に、試験体の最大加速度と試験体の卓越振動数の関係を図 16 (b) に示す。

図 16 (a) から、試験体 A の応答加速度は入力大きさとほぼ線形関係であるのに対し、試験体 B、C では非線形的な対応を示している。これには、土の粒子の微小な振動によって生じる摩擦等の影響が考えられる。

図 16 (b) から、試験体の応答加速度が 1G を超えた場合においても、いずれの試験体の卓越振動数はほぼ一定であり、土の質量の評価は変化していないことが確認できる。

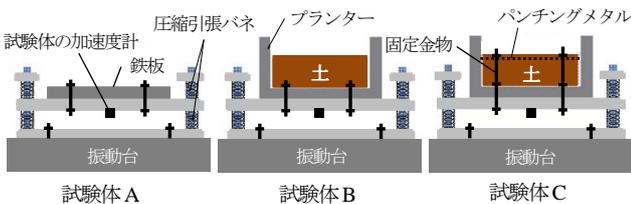
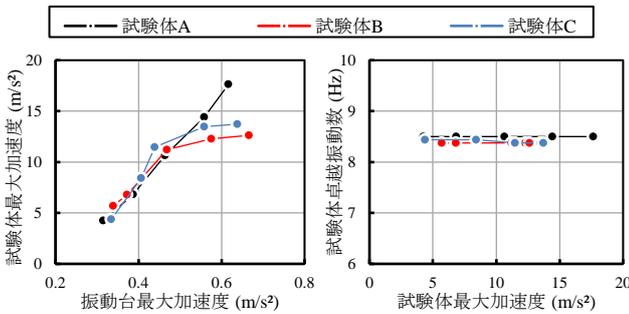


図 15 試験体概要



(a) 振動台加速度と試験体加速度 (b) 試験体加速度と卓越振動数

図 16 土の振動台実験結果

以上より、1G を超える加速度が土に作用しても、マスダンパーとして利用する屋上緑化の土の質量の評価は変化しないことが確認できた。

6. おわりに

屋上緑化をマスダンパーとして利用することによる地震時の上下振動への制振効果の検証と、それを実現するための具体的な機構の性能検証のため、解析及び縮尺試験体による振動台実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 解析において、屋上緑化をマスダンパーとして利用することで地震時の片持ち架構全体の応答を低減できることを確認した。
- 2) 屋上緑化を支持する具体的な機構として、バネとダンパーで構成される機構 (機械式制振) と剛性と減衰特性を有する防振パッド (パッド式制振) の 2 通りの機構の性能を検証した。振動台実験において、L2 告示波及びサイト波の倍率 100% に対しては機械式制振、パッド式制振のどちらの機構においてもストロークの許容範囲内で非制振に対して同等の応答低減効果を発揮したが、機械式制振はそれ以上の入力倍率に対しても安定して応答を低減できる機構であることが確認できた。
- 3) 1G を超える加速度が屋上緑化の土に作用した時に土の浮き上がりにより屋上緑化の質量の評価が変化するかを土とプランターを使用した振動台実験によって確認した。1G を超える加速度が作用しても、屋上緑化の土の質量の評価は変化しないことを確認した。

参考文献

- 1) 石塚馨 他: 屋上緑化を利用した制振構造 (グリーンマスダンパー) による建物の設計 その1~その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造II, pp.451-454, 2001. 9
- 2) 尾鷲淳也, 堤和敏: 既存構造物への屋上緑化装置による地震力低減効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 構造II, pp.531-532, 2010. 9
- 3) 笠井和彦 他: 東京同地区内にある先端構造建築群の東日本大震災における応答記録の分析 その1 全体概要およびグリーンマスダンパーをもつ制振建物の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造II, pp.603-604, 2013. 8
- 4) 松田大輝, 中根友則, 堤和敏: 耐震補強の問題点と制振装置付屋上緑化設置による低減効果に関する研究 その1~その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造II, pp.55-58, 2015. 9
- 5) J. P. Den Hartog, Mechanical Vibration (4th ed.), McGraw-Hill, pp.93-106.(1956)