

アクティブマスダンパーを加振装置とした実大振動試験装置の開発

石田 琢志^{*1}

渡壁 守正^{*1} 稲井 慎介^{*1}
手塚 純一^{*2} 渡部 幸宏^{*2}
中村 匠^{*2}

概 要

近年、長周期地震に対する超高層建物や免震建物の耐震性能および室内の安全性確保に向けた研究開発が盛んに行われている。筆者らは、こうした研究開発に用いる実験的検証の方法として、実大規模での検証実験が可能な「実大振動試験装置」を開発した。本装置は、一般的に用いられる振動台実験と異なり、屋上階に設置したアクティブマスダンパー（AMD）を加振装置とした点に特徴を持つ。また、試験体の一部に免震装置を組み込むことで、長周期化による大振幅応答の実現が可能である。

本報告では、実大振動試験装置の設計概要と、地震の揺れを再現する加振入力波の作成手法として、地動入力時と強制外力入力時の伝達関数の比を用いる手法を提案し、その妥当性をシミュレーション解析および実大振動実験により検証した結果について示す。

Development of Full-Scale Vibration Tests System Using Active Mass Damper

Takushi ISHIDA^{*1} Morimasa WATAKABE^{*1}
Shinsuke INAI^{*1} Junichi TEZUKA^{*2}
Takahiro WATABE^{*2} Takumi NAKAMURA^{*2}

Recently, researches and developments have been conducted to secure earthquake resistance and indoor safety for high rise and isolated buildings subjected to long-period ground motion. “Full-Scale Vibration Tests System” was developed to verify performances in full-scale buildings. Unlike the shaking table tests, the system is vibrated by active mass damper (AMD) installed in the roof floor. Moreover, “Full-Scale Vibration Tests System” is feasible to deform itself with large response displacements by placing base isolation system that makes the structure sway in a long period.

This report shows the structural design of “Full-Scale Vibration Tests System” and validity of the generation method of input wave for AMD to simulate earthquake responses, offering the method of using the transfer function ratio of ground motion inputs to external forces.

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 構造設計部

^{*1} Technical Research Institute ^{*2} Structural Design Department

アクティブマスダンパーを加振装置とした実大振動試験装置の開発

石田 琢志^{*1} 渡壁 守正^{*1}
 稲井 慎介^{*1} 手塚 純一^{*2}
 渡部 幸宏^{*2} 中村 匠^{*2}

1. はじめに

海溝型の巨大地震によって長周期地震動が発生した場合、その地震動を受ける超高層建物や免震建物は、長時間、大振幅で揺れる可能性が指摘されている¹⁾。実際に、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、首都圏の超高層建物で片振幅60cmを超える大振幅応答が観測された²⁾。こうした長周期地震動に対し、建物の耐震性や室内の安全性を確保するための研究開発が盛んに行われており^{例え3)}、解析等の理論的研究に加え、その性能や信頼性を実験的に検証した実証的研究が報告されている。

こうした実証的研究には、振動台を用いた検証方法が信頼性も高く、一般的に用いられるが、振動台の規模やコストといった制約から、実大規模の試験体を用いての実験は困難である⁴⁾。そのため、振動台実験の多くは、縮小模型や架構の一部を取り出した部分実験によるものであり、実大規模での性能は、構成要素を数値化したシミュレーション解析により外挿して把握しているのが現状である。

筆者らは、こうした問題点を踏まえ、実大規模の試験体による検証実験が可能な試験装置として、「実大振動試験装置⁵⁾」の開発を行った。本装置は、振動台と異なり、屋上階（以下、R階と称す）に設置したアクティブマスダンパー（以下、AMDと称す）を加振装置とした点に特徴を持つ。また、試験体の一部に免震装置を組み込むことで、長周期化による大振幅応答の実現が可能である。

本報告では、実大振動試験装置の設計概要と、地震の揺れを再現する加振入力波の作成手法として、地動入力時と強制外力入力時の伝達関数の比（以下、伝達関数比と称す）を用いる手法を提案し、その妥当性を

シミュレーション解析および実大振動実験により検証した結果について示す。

2. 実大振動試験装置の設計概要

2.1 試験体の概要

実大振動試験装置（写真-1a）は、階高3.0m、最高高さ18.9m、各階のスパン長さ8.0m×8.0m、総質量約530ton、1階と3階に免震装置を組み込んだ（以下、それぞれM1階、M3階と称す）実大8層鉄骨造試験体である。実大振動試験装置の立面図を図-1に、M1階とM3階の平面図を図-2に示す。M1階は、約

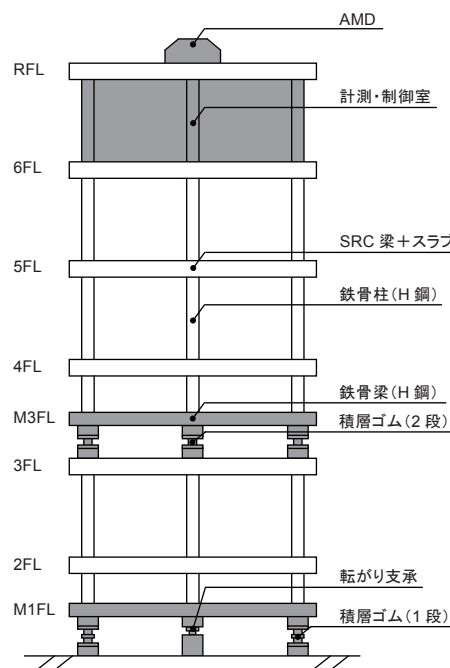


図-1 実大振動試験装置の立面図

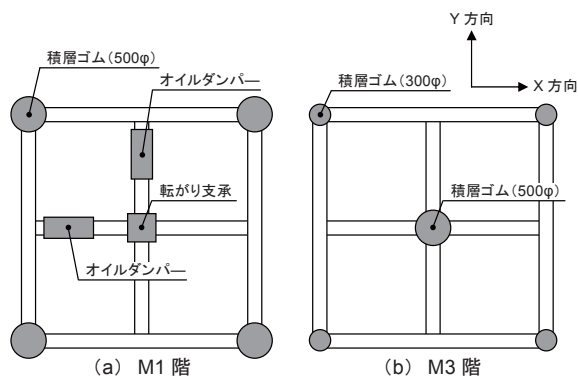


図-2 実大振動試験装置の平面図



(a) 実大振動試験装置

(c) 転がり支承

写真-1 実大振動試験装置の外観

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 構造設計部

5秒の周期を実現するため、外径500φの積層ゴムを2段組にしたもの（写真-1b）4基と転がり支承（写真-1c）1基を配置した。M3階は、中間階においても大振幅の応答を実現するため、外形300φの積層ゴム4基と外形500φの積層ゴム1基の計5基の積層ゴムを1段組にして配置した。各免震装置は、実験の用途に合わせて固定できる仕様とし、M1階には減衰機構としてオイルダンパー（減衰係数：50kNs/m）を2基設置した。

2.2 AMDの概要

AMDの外観と諸元を写真-2、表-1にそれぞれ示す。AMDの上部質量は、2組のレール上に設置し、XY方向への任意の加振が可能な仕様とした。AMDのメインポンプの容量は120 l/min、30kWであり、これにより、長周期・長時間の加振を可能にした。



写真-2 AMDの外観

表-1 AMDの諸元

	X方向	Y方向
可動部質量 (ton)	5.59	4.41
静摩擦係数	0.004	0.005
最大ストローク (mm)	350	320

3. 解析モデルの妥当性の検証

実験に先立ち作成した解析モデルによるシミュレーション結果と、実大振動試験装置内に設置した地震計により観測された地震記録との応答比較から、解析モデルの妥当性を検証した。

3.1 実大振動試験装置のモデル化

解析モデルは、Y方向について1層を1質点とした8質点系等価せん断型モデルとして作成した。解析モデルの質量と剛性を表-2に示す。また、本装置は、大振幅応答を実現するため、可能な限り少ない減衰要素で設計した。このため、積層ゴムのわずかな減衰やCLBの履歴特性が応答に影響を及ぼすことが懸念された。そこで、積層ゴムは、図-3に示す単体試験の結果を参照し、線形剛性、線形粘性を有するKelvin-Voigtモデルでモデル化し、転がり支承は、標準型バ

表-2 解析モデルの質量と剛性

FL	M1	2	3	M3	4	5	6	R
質量 (ton)	31.6	78.1	83.2	17.7	78.1	79.0	79.3	87.1
剛性 (kN/m)	931	91100	56400	61000	94800	45700	42700	40900

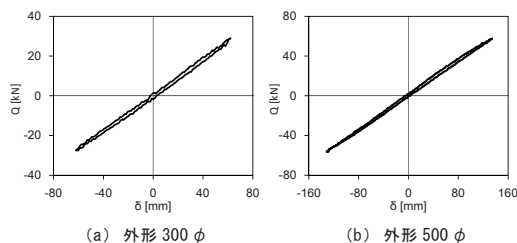


図-3 積層ゴムの単体試験結果

イリニアモデルとしてモデル化した。モデル化した転がり支承の諸元を表-3に示す。

3.2 地震観測記録との応答比較

3.2.1 地震記録の概要

解析モデルの妥当性を検証するため、2012年2月19日に茨城県北部で発生した地震の観測記録（以下、IBR-0219と称す）との応答比較を行った。IBR-0219の諸元を図-4に示す。また、同地震波の加速度時刻歴波形およびフーリエスペクトルを図-5に示す。図-5より、IBR-0219は、5Hz近傍の短周期成分を主成分とした地震波であることが確認できる。

3.2.2 応答比較

M1階における、同地震波入力時の解析結果と地震観測記録の相対変位および絶対加速度の時刻歴応答を図-6に示す。なお、地震観測記録の相対変位は、加速度記録の2階積分と地盤の変形の差分から算出し、2階積分の際、ハイパスフィルタ処理により長周期成分を除去した。同図より、観測記録は、短周期成分が卓越し、免震周期での応答となっていないが、解析結果は、その傾向をおおむねとらえており、妥当性があるものと判断できた。

表-3 転がり支承の諸元

転がり摩擦係数	転がり荷重 (kN)	転がり変位 (mm)	転がり剛性 (kN/mm)	2次剛性比
0.00414	8.3	0.2	41.4	0.0001

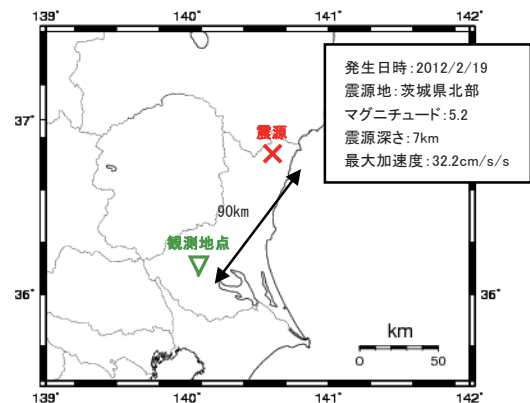


図-4 IBR-0219の諸元

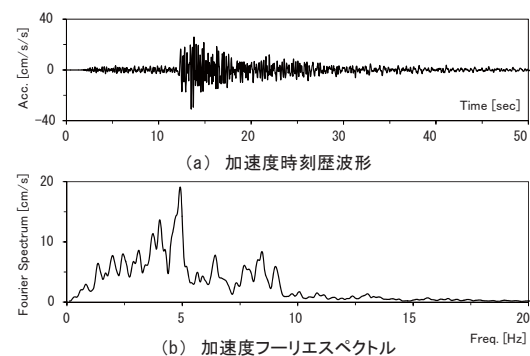


図-5 IBR-0219の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトル

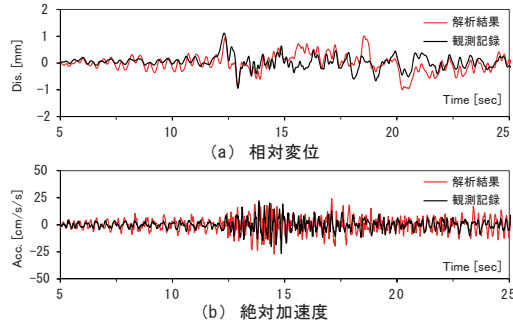


図-6 IBR-02919 入力時の M1 階の時刻歴応答

4. 加振入力波の作成

AMD 加振により地震時の応答を再現する場合、地動入力と強制外力入力で外力分布が異なるため、地震波を同位相のまま AMD の入力としても地震の揺れを再現することはできない。そこで、地動入力時と AMD による強制外力入力時の伝達関数比を用いる手法（図-7）を提案し、特定階（以下、 j 階と称す）における地震時挙動を再現する AMD の加振入力波を作成し、その妥当性を検証した。

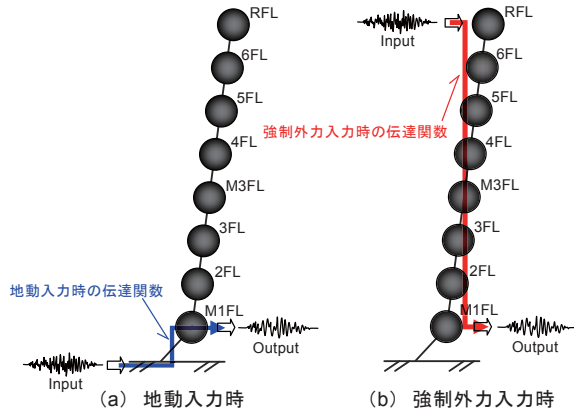


図-7 加振入力波の作成イメージ

4.1 理論式の導出

N 質点系等価せん断型モデルの地動入力に対する振動方程式（添え字： g ）と、 R 階に強制外力を入力する場合の振動方程式（添え字： r ）は、それぞれ次式により表現できる。

$$[M]\{\ddot{x}_g\} + [C]\{\dot{x}_g\} + [K]\{x_g\} = -[M]\begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{z}_0 \quad (1)$$

$$[M]\{\ddot{x}_r\} + [C]\{\dot{x}_r\} + [K]\{x_r\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} F \quad (2)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{x\}$ は地面からの相対変位ベクトル、 $\ddot{z}_0$ は地動加速度、 F は AMD の加振入力波である。

$[C]$ 、 $[K]$ を非連成化するため、式 (1)、(2) を層間座標系に変換した場合の振動方程式は、下式となる。

$$[M']\{\ddot{\delta}_g\} + [C']\{\dot{\delta}_g\} + [K']\{\delta_g\} = -[M']\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \end{Bmatrix} \ddot{z}_0 \quad (3)$$

$$[M']\{\ddot{\delta}_r\} + [C']\{\dot{\delta}_r\} + [K']\{\delta_r\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} F \quad (4)$$

$$[M'] = \begin{bmatrix} m_1 + \cdots m_N & \cdots & m_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_N & \cdots & m_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[C'] = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & c_N \end{bmatrix}; [K'] = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & k_N \end{bmatrix}$$

ここで、 $[M']$ 、 $[C']$ 、 $[K']$ はそれぞれ層間座標系における質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{\delta\}$ は層間変位ベクトルである。

式 (3)、(4) をラプラス変換し、 $\{\delta(s)\}$ について整理すると、

$$[Z(s)]\{\delta_g(s)\} = -[M']\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \end{Bmatrix} \ddot{z}_0(s) \quad (6)$$

$$[Z(s)]\{\delta_r(s)\} = [F']\begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} F(s) \quad (7)$$

$$[Z(s)] = \begin{bmatrix} s^2 m_1 + \cdots s^2 m_N + s c_1 + k_1 & \cdots & s^2 m_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s^2 m_N & \cdots & s^2 m_N + s c_N + k_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、式中の s はラプラス演算子である。式 (6)、(7) の前から $[Z]^{-1}$ を乗ずれば、

$$\{\delta_g(s)\} = -[Z(s)]^{-1} [M']\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \end{Bmatrix} \ddot{z}_0(s) \quad (9)$$

$$\{\delta_r(s)\} = [Z(s)]^{-1} \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} F(s) \quad (10)$$

これより、 j 階の層間変形 $\delta_b(s)$ は、伝達関数 $H(s)$ を用いて次式で表される。

$${}_g \delta_j(s) = {}_g H_j(s) \cdot \ddot{z}_0(s); [{}_g H(s)] = -[Z(s)]^{-1} [M']\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (11a,b)$$

$${}_r \delta_j(s) = {}_r H_j(s) \cdot F(s); [{}_r H(s)] = [Z(s)]^{-1} \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (12a,b)$$

式 (11)、(12) より、層間変形 $\delta_b(s)$ が同値となる場合、加振入力波 $F(s)$ は次式となる。

$$F(s) = T(s) \cdot \ddot{z}_0(s); T(s) = \frac{{}_g H_j(s)}{{}_r H_j(s)} \quad (13a,b)$$

ここでは、式 (13b) の伝達関数の比 $T(s)$ を伝達関数比と称す。 $s = i\omega$ とすれば、式 (13) は周波数領域での表現となり、式 (13a) から導出される $F(s)$ を逆ラプラス変換することで、時間領域での加振入力波 $F(t)$ が算出できる。以上に示した加振入力波の作成フローを図-8 に示す。なお、地震時の応答を再現する対象階は、いずれも M1 階として検討した。

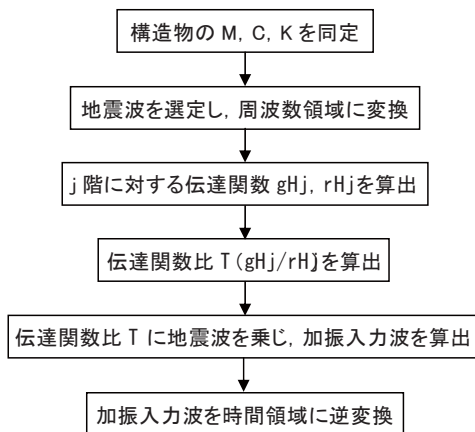


図-8 加振入力波の作成フロー

4.2 伝達関数比 T の特性

ここでは、式 (13b) により導出した伝達関数比（以下、 T と称す）の特性を検証した。まず、8 質点系モデルを簡略化した 2 質点系モデルから T の理論式を導出し、その構成要素を把握することで、加振入力波が対象階のシステム変更に依存しないことを確認した。次に、3.1 節で作成した 8 質点系モデルの T を算出し、その周波数特性を把握した。

4.2.1 2 質点系モデルによる検証

2 質点系モデルに地動入力した場合と最上階（2 階）に強制外力を入力した場合の 1 層の層間変位 $\delta_1(s)$ は、式 (11)、(12) よりそれぞれ次式で表される。

$${}_g \delta_1(s) = \frac{-1}{\det Z} [s^2 m_1 m_2 + s(m_1 + m_2)c_2 + (m_1 + m_2)k_2] \ddot{z}_0(s) \quad (14)$$

$${}_r \delta_1(s) = \frac{1}{\det Z} [sc_2 + k_2] F(s) \quad (15)$$

$$\det Z = s^4 m_1 m_2 + s^3 (m_1 c_2 + m_2 c_1 + m_2 c_2) + s^2 (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2 + c_1 c_2) + s(c_1 k_2 + c_2 k_1) + k_1 k_2 \quad (16)$$

従って、伝達関数比 $T(s)$ は、

$$T(s) = -\frac{s^2 m_1 m_2 + s(m_1 + m_2)c_2 + (m_1 + m_2)k_2}{sc_2 + k_2} \quad (17)$$

式 (5) に示したとおり、層間変位を変数とすることで、減衰、剛性マトリクスが非連成化され、また、伝達関数の比を取ることで $\det Z$ が除去されるため、式 (17) に示すとおり、1 層の層間変位を再現する T には、同層の減衰 c_1 および剛性 k_1 は含まれない。こ

れは、地震の応答を再現する対象階のシステム変更（例えば、ダンパーの設置・非設置）や非線形性によらず、試験体に同じ外力を与えることが可能なことを示唆している。従って、本手法は振動台実験と同様、シミュレーション解析を介さず直接的にダンパーなどの制御装置の性能検証が可能である。

4.2.2 8 質点系モデルによる検証

3.1 節で作成した 8 質点モデルにより、 T の特性を検証する。図-9 に T および地動入力時と R 階強制外力入力時の伝達関数（以下、それぞれ ${}_g H$ 、 ${}_r H$ と称す）を示す。なお、 T の導出に用いる試験体の M 、 C 、 K は、3.2 節で妥当性が確認された設計値とした。同図より、 T は、分母である ${}_r H$ の逆数に近い特性を有することが確認できる。2 次以降の高次の極において、 ${}_r H$ は、 ${}_g H$ よりも振幅の増加率が大きくなるため、 T はその部分が落ち込んだスペクトル形状となり、加振力が小さくなることがわかる。一方、7.0Hz 以降では、 ${}_r H$ の減少に反比例して T は増加するため、加振力は増大してしまう。表-4 に示す等価質量比より、地動入力時では、3 次成分までの和がほぼ 100% となるため、それよりも高次の成分は不要と判断できる。これより、再現周波数と加振力との兼ね合いから、加振入力波は 5.0Hz の以降の高次成分を除去して作成することとした。

4.3 シミュレーション解析による妥当性の検証

4.3.1 加振入力波の作成

4.1 節で示した加振入力波の作成手法の妥当性をシミュレーション解析により検証した。用いる地震波は、最大加速度を 30cm/s^2 、 10cm/s^2 にそれぞれ基準化した El Centro-NS および Sannomaru-EW⁽⁶⁾ とした。

作成した加振入力波と各地震波の時刻歴波形とフーリエスペクトルを図-10、11 に示す。図-11 より、加振入力波は、地震波よりも長周期成分が卓越した波

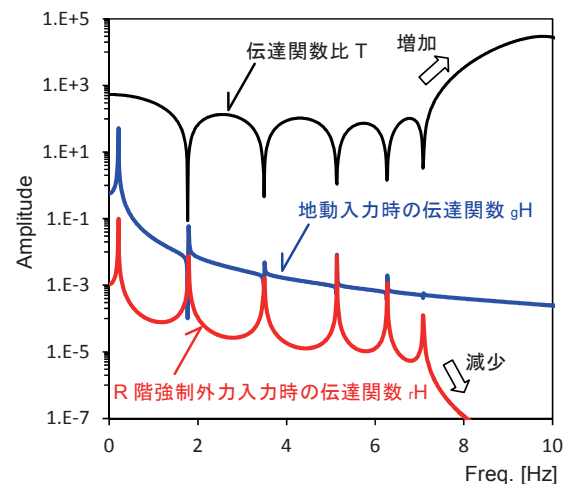


図-9 8 質点モデルにおける伝達関数比の特性

表-4 各加振方法による等価質量比の相違

（単位：％）	1st (0.21Hz)	2nd (1.80Hz)	3rd (3.50Hz)	4th (5.14Hz)	5th (6.27Hz)
地動	99.97	0.032	0.002	0.000	0.000
R階強制外力	17.01	32.36	26.34	16.53	5.822

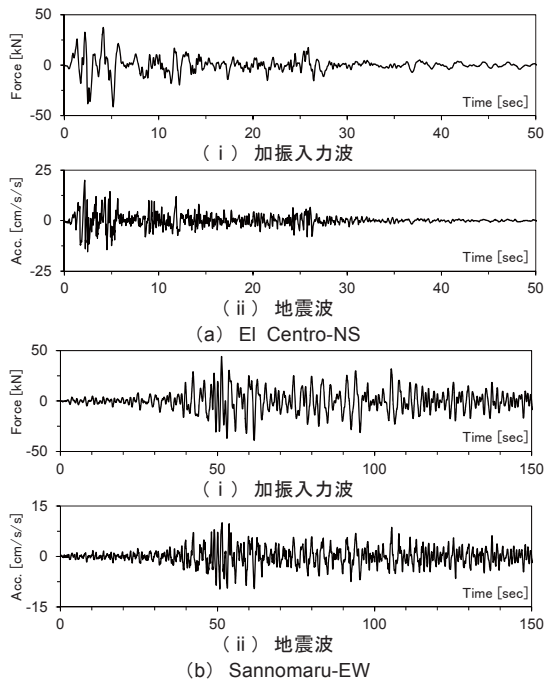


図-10 加振入力波および地震波の時刻歴波形

形であり、この傾向は El Centro-NS で顕著である。図-9、表-4 が示すように、地動入力時の応答は 1 次成分が支配的であるのに対し、強制外力時の応答は、2 次以降の高次成分の寄与率が増大するため、加振入力波はこれを相殺するように長周期成分が卓越した波形となる。また、4.2.2 節で示したとおり、伝達関数比は、2 次以降の極が落ち込むスペクトル形状であるため、加振入力波のスペクトルも同様に極の部分で落ち込んだ形状を示すことが確認できた。

4.3.2 応答比較

地動入力時と強制外力入力時の応答比較として、M1 階の層間（相対）変位と加速度の時刻歴応答を図-12 に、応答加速度のフーリエスペクトルを図-13 にそれぞれ示す。図-12 より、いずれの地震波においても、応答変位は、地震時の挙動を精度良く再現できていることが確認できた。一方、El Centro-NS における応答加速度は、再現精度が若干低下することが確認できた。これは、図-13 (a) に示すように、フィルタ処理を施した 5.0Hz 以降の高振動数帯域での再現性の低下が原因と考えられる。しかしながら、5.0Hz 以下の低振動数帯域では地震時応答を精度良く再現できており、提案した加振入力波作成手法の妥当性を確認することができた。一方、Sannomaru-EW においては、図-11 (b) に示すように、地震波自体に 5.0Hz 以上の成分がほとんどないため、同振動数以上の高振動数帯域においても、加振入力波と地震波はほぼ同様の挙動を示すことが確認できた（図-13b）。このため、5.0Hz 以下の低振動数帯域を主成分とする地震波では、応答加速度も高精度で再現可能なことが確認できた。なお、フィルタ処理により、5.0Hz 以上の高振動数帯域を除去したにもかかわらず、応答のピークが確認できる理由として、転がり支承の非線形性が考えられるが、詳細な検討は今後の課題とする。

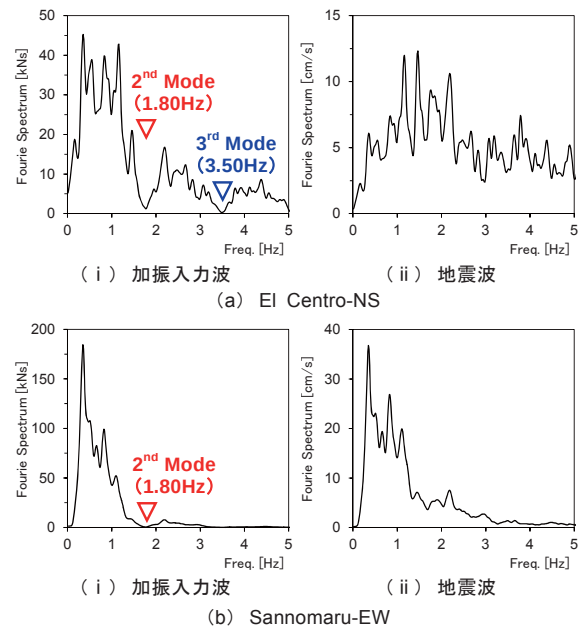


図-11 加振入力波および地震波の加速度フーリエスペクトル

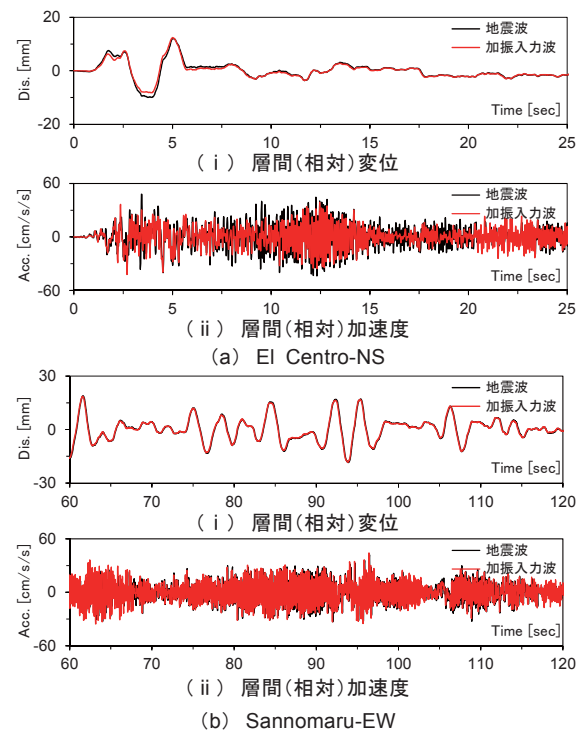


図-12 M1 階の層間（相対）変位・加速度時刻歴応答

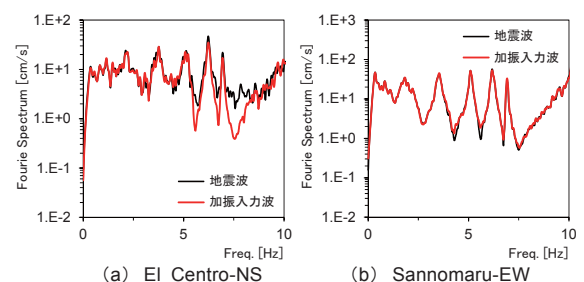


図-13 M1 階の応答加速度フーリエスペクトル

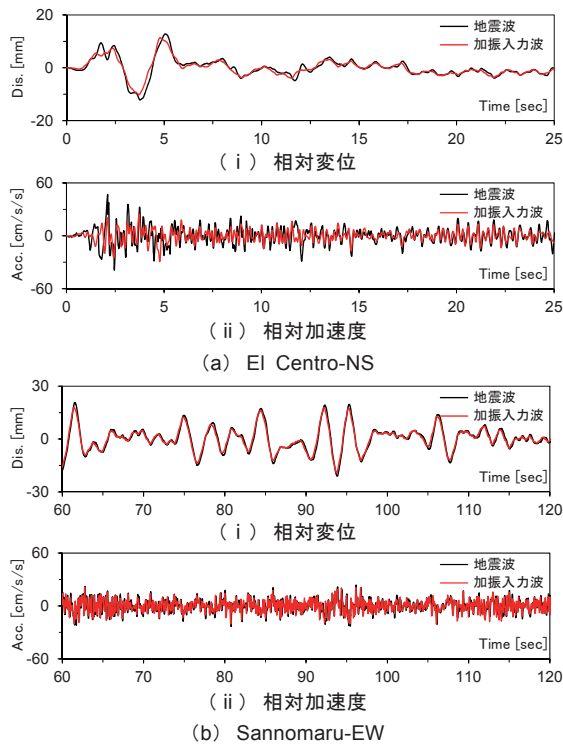


図-14 R階の相対変位および相対加速度時刻歴応答

続いて、図-14に再現対象階以外のR階における相対変位と加速度の時刻歴応答を示す。同図より、地震時応答の再現対象階でないR階においても、地震時の挙動を精度良く再現できており、この傾向は相対変位において顕著である。本試験体は、1次の等価質量比が99%であり(表-4)、1次成分が支配的な応答となるため、免震層(M1階)の応答を再現することで、上部構造の他の階の応答も再現可能であることが確認できた。

4.4 実大振動試験装置による妥当性の検証

加振入力波の妥当性を実大振動試験装置を用いた加振実験により検証した。検証は、以下のステップで行った。

- 1) 実大振動試験装置で観測された地震(図-4)の地盤加速度から、M1階の応答を再現する加振入力波(図-15)を作成
- 2) 作成した加振入力波を実大振動試験装置に入力して加振実験
- 3) 加振実験により得られたM1階の応答(以下、実験結果と称す)と、地震観測記録(以下、観測記録と称す)を比較し、地震時応答の再現性を検証

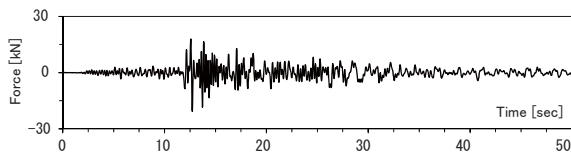


図-15 加振入力波の時刻歴波形 (IBR-0219)

M1階における、実験結果と観測記録の層間(相対)変位と加速度の時刻歴応答およびそのフーリエスペクトルを図-16、17にそれぞれ示す。同図より、若干

の差異はあるが、実験結果は、観測記録をおおむね再現できていることが確認できた。実験結果と観測記録との差異は、試験体のモデル化誤差およびAMDの出力誤差が考えられるため、この部分の修正を今後の課題としたい。

5. おわりに

本報告では、振動台と異なり、屋上階に設置したAMDを加振装置とすることで実大試験体での地震時応答の再現が可能な「実大振動試験装置」を開発し、その検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 地動入力時と強制外力入力時の各伝達関数の比を用いた加振入力波の作成手法を提案し、シミュレーション解析および実大振動試験装置による加振実験から、作成手法の妥当性を示した。
- 2) 2質点系モデルを用いた理論式の導出から、再現対象階のシステム変更によらず、同じ外力により

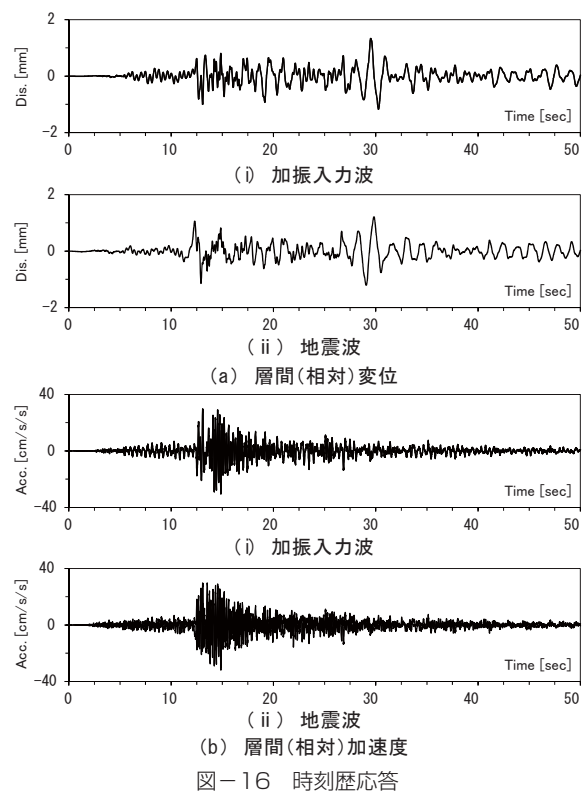


図-16 時刻歴応答

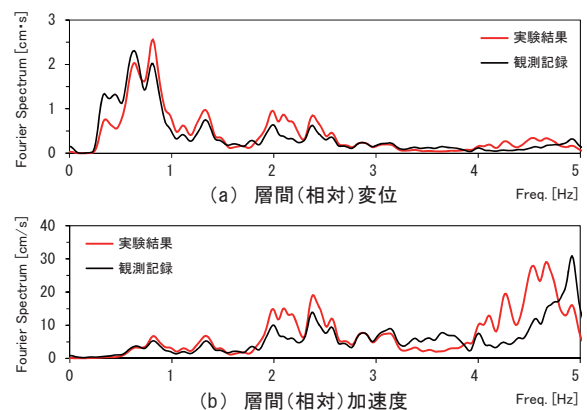


図-17 応答フーリエスペクトル

加振実験が可能なことを示した。

- 3) 8 質点系モデルでの伝達関数比の周波数特性から、高振動数帯域まで含めた加振入力波は最大加振力が過大となるため、再現周波数を適切に設定し、ローパスフィルタ処理を施して作成する必要があることを確認した。
- 4) フィルタ処理の影響から、地震波によっては応答加速度の再現精度が若干低下するが、遮断周波数以下の低振動数帯域を主成分とする地震波であれば、応答加速度を高精度で再現できることを確認した。
- 5) 1 次成分が支配的な構造物では、再現対象階以外の階においても、その階における地震時の揺れを精度良く再現できることを確認した。

今後は、本実験装置を適用した実大規模の実証実験により、長周期地震動をはじめとした種々の振動問題に対する有効な対策技術の開発に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) (社) 土木学会、(社) 日本建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言、2006.11
- 2) 翠川：東北地方太平洋沖地震での長周期地震動の影響および室内被害についてのメモ、2011.8
- 3) 榎田ほか：大振幅応答を実現する震動台実験手法の構築と超高層建物の室内安全性、日本建築学会構造系論文集、No.637、pp.467-476、2009.3
- 4) 鈴木ほか：実大構造物の地震応答加振システムに関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.514、pp.105-1100、1998.12
- 5) 渡部ほか：AMD を加振装置として利用した実大振動実験（その 1-3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.1079-1084、2012.9
- 6) (財) 愛知県建築住宅センター：名古屋市三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成、2004.7