

慣性接続要素を有する質点系の地震応答特性

仲宗根 淳*

近年慣性接続要素あるいは慣性質量ダンパ等と呼ばれる制震装置に関する研究が活発化している。この制震装置は設置点間の相対加速度に応じて抵抗力を発揮するという従来の制震装置にはない特徴を有する。

本報告は慣性接続要素を1質点系や多質点系に適用した解析モデルを用いた周波数応答解析や地震応答解析の結果を記述している。採用したパラメータや他制震装置を用いた場合との比較から慣性接続要素を用いた系の応答性状の把握を試みたものである。

キーワード：慣性接続要素，地震応答，周波数応答

1. 序

慣性質量ダンパあるいは慣性接続要素等と呼ばれる制震装置に関する研究開発が活発化している。本報告では質点系モデルを用いて慣性接続要素を有する建物の応答性状に関して地震応答解析結果を基に報告する。

2. 慣性接続要素の概要

慣性接続要素は接続される節点間の相対加速度に対して抵抗する力を発揮するもので既に装置が実用化^{*1}されている。一般には装置内にボールねじ機構が組み込まれている。装置が接続された両端に相対変位が生じるとボールねじ機構により装置内内筒の回転運動に変換され、回転慣性抵抗が発生する。また同時に充填されている粘性体により、せん断抵抗力が発揮される。内筒が回転することで発生する慣性質量の効果は実際に回転する内筒の質量の1000倍以上にも増幅することが可能である。

3. 慣性接続要素を有する1質点系の応答

3.1 振動方程式

本報告で検討の対象とする慣性接続要素が付加された1質点系の解析モデルをFig.1に示す。(a)が制震装置がない場合であり、(b)が慣性接続要素のみが原系に付加された解析モデルであり、(c)が慣性接続要素、減衰要素およびバネ要素で構成された解析モデルである。(c)のモデルは慣性質量と支持剛性によりmaxwell型の振動系を構築しTMDと同様な考えで建物本体の応答を低減しようとするものであり、斎藤^{*2,3}や石丸^{*4,5}らが検討結果を報告している。本報告ではその付加系部分を同調マスダンパと称している。

Fig.1の(a),(b)に示す無制震、無制震+慣性接続要素の振動方程式、固有円振動数および減衰定数を(1),(2)式に示す。慣性接続要素が付加された系は固有円振動数と減衰定数が小さくなるのが分かる。(3)式は質点の相対変位と相対速度を状態変数として記述した状態方程式である。同式から外力の入力に関わる係数が $m_0/(m_0+m_a)$ と1より小さくなることから、慣性接続要素が付加されると入力低減効果が生じることも分かる。

Fig.1の(c)に示すモデルの振動方程式は(4)式となる。

質点とダンパの変位と速度を状態変数とした状態方程式は(5)式となる。後述する1質点系の解析における付加系の剛性と減衰は文献^{*4}を参照し決定した。具体的には慣性質量を仮定すると(6)式により付加系の支持剛性が定まる。同調マスダンパ部の減衰定数を零および無限大とした系の固有周期から最適な減衰定数が定まり、その値をできるだけ実現するように付加系の減衰係数 c_a を設定した。

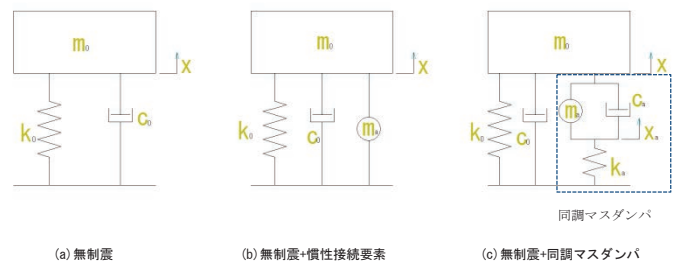


Fig.1 1質点系の解析モデル

・無制震

$$m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x = -m_0 \ddot{z} \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_0}{m_0}}$$

$$h = \frac{c_0}{2\omega m_0}$$

m_0 : 原系の質量, k_0 : 原系の剛性, c_0 : 原系の減衰係数
 x : 質点変位, z : 地動加速度, ω : 固有円振動数, h : 減衰定数

・無制震+慣性接続要素

$$(m_0 + m_a) \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x = -m_0 \ddot{z} \quad (2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_0}{m_0 + m_a}}$$

$$h = \frac{c_0}{2\omega(m_0 + m_a)}$$

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_0/(m_0 + m_a) & -c_0/(m_0 + m_a) \end{bmatrix} x_s + \begin{bmatrix} 0 \\ -m_0/(m_0 + m_a) \end{bmatrix} \ddot{z} \quad (3)$$

$$x_s = \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}$$

m_a : 慣性接続要素の質量,

* 技術研究所 建築構造研究グループ

・無制震+同調マスダンパ

$$m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x + k_a x_a = -m_0 \ddot{z} \quad (4)$$

$$m_a (\ddot{x} - \ddot{x}_a) + c_a (\dot{x} - \dot{x}_a) - k_a x_a = -m_0 \ddot{z}$$

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_0/m_0 & -k_a/m_0 & -c_0/m_0 & 0 \\ -k_0/m_0 & -k_0/m_0 - k_a/m_0 & -c_0/m_0 + c_a/m_0 & -c_a/m_0 \end{bmatrix} x_s + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \ddot{z} \quad (5)$$

k_a : 慣性接続要素の支持剛性
 c_a : 慣性接続要素の減衰係数

$$x_s = \begin{pmatrix} x \\ x_a \\ \dot{x} \\ \dot{x}_a \end{pmatrix}$$

$$k_a/k_0 = \frac{1-2\gamma-\sqrt{1-4\gamma}}{2\gamma} \quad (6)$$

$$\gamma = m_a/m_0$$

3.2 周波数応答解析

慣性接続要素が系の動的応答に及ぼす影響を把握する目的で調和地動加振に対する応答解析(周波数応答解析)を7種の解析モデルに対し実施した。Table1に解析モデルの諸元を示す。モデルは無制震モデルと慣性接続要素を制震装置として含んだモデルおよびオイルダンパを想定した減衰を与えたモデルに大別できる。

Table1 1質点系の解析モデル

モデル名	内容	固有周波数(Hz) 減衰定数	備考
sys0	$m_0 = 10000 \text{ kg}$ $k_0 = 394 \text{ kN/m}$ $c_0 = 2.51 \text{ kNs/m}$	$f = 1.0$ $h = 0.02$	基本モデル(無制震)
sys1	付加系: $m_a = 0.1 \times m_0$ $k_a = 0.127 \times k_0$ $c_a = 3.36 \text{ kNs/m}$	$f_1 = 0.93$ $h_1 = 0.11$ $f_2 = 1.22$ $h_2 = 0.13$	sys0+同調マスダンパ
sys2	付加系: $m_a = 0.5 \times m_0$	$f = 0.82$ $h = 0.016$	sys0+慣性接続要素
sys3	付加系: $m_a = 1.0 \times m_0$	$f = 0.71$ $h = 0.014$	sys0+慣性接続要素
sys4	$c_0 = 12.5 \text{ kNs/m}$	$f = 1.0$ $h = 0.1$	sys0+オイルダンパ
sys5	$c_0 = 15.1 \text{ kNs/m}$	$f = 1.0$ $h = 0.12$	sys0+オイルダンパ
sys6	付加系: $m_a = 0.1 \times m_0$ $k_a = \infty$ $c_a = 3.36 \text{ kNs/m}$	$f = 0.95$ $h = 0.045$	sys0+同調マスダンパ

Fig.2には慣性質量の大きさの影響を把握するために sys0, sys2 および sys3 の解析結果を比較している。慣性質量を増加させることで卓越周波数が低域側へ移動しており、系の固有周期が慣性質量により伸びていることが分かる。地動加速度に対する変位応答比あるいは絶対加速度応答比への慣性質量の影響は加振周波数により異なることが分かる。また絶対加速度応答については加振周波数が増すと入力加速度の $1 - m_0/(m_0 + m_a)$ 倍、つまり慣性質量が本体質量の 1/2 の sys2 の場合は入力加速度の 0.33 倍に、慣性質量が本体質量と同じ sys3 の場合は 0.5 倍に近づいていくことが分かる。

Fig.3には sys0, sys1, sys6 を比較している。無制震モデルの sys0 の結果は固有周波数で応答が増幅しているが同調マスダンパが付加されている sys1 の系は原系の固有周波数での応答を大きく低減している。また同調マスダンパの支持剛性を無限大とした sys6 との比較から、適切な支持剛性を与え、慣性質量を本体架構と同調させることで卓越周波数の応答が低減できることが分かる。

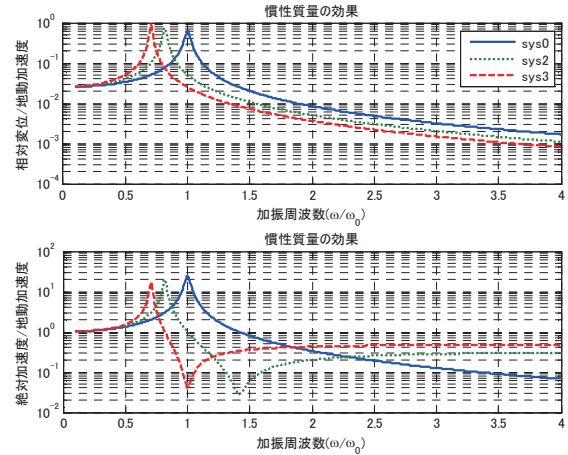


Fig.2 周波数応答解析結果(sys0, sys2, sys3)

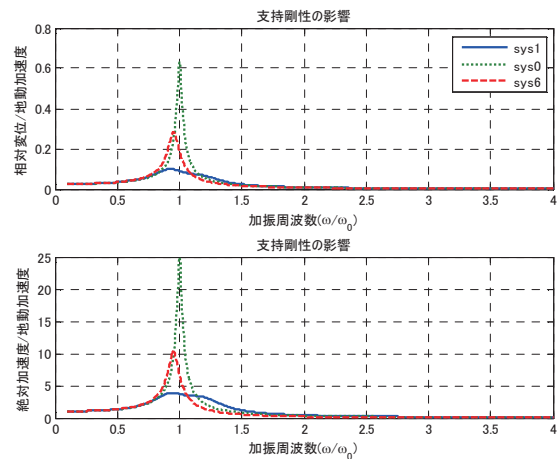


Fig.3 周波数応答解析(sys1, sys0, sys6)

Fig.4に sys0, sys1, sys4, sys5 の解析結果を比較する。sys4とsys5はsys0にオイルダンパが付加された系を想定し減衰係数を増している。ただし速度と減衰力の関係は線形であり、リリーフ挙動は考慮していない。また、制震装置の軸剛性や取付部の剛性を無視している。変位応答の最大値は sys1 と sys5 でほぼ同程度である。加速度応答の最大値については若干 sys1 が sys5 に比較して小さい。

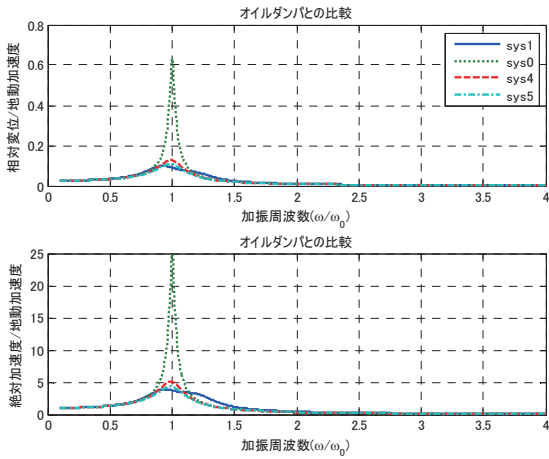


Fig. 4 周波数応答解析 (sys1, sys0, sys4, sys5)

Table2 入力地震動

	入力地震動	最大加速度 (gal)	継続時間 (s)
実地震動	EL Centro NS (1940)	511	53
	EL Centro EW (1940)	285	53
	Taft NS (1952)	486	54
	Taft EW (1952)	497	54
	Hchinohe NS (1968)	330	36
	Hchinohe EW (1968)	255	36
模擬地震動	AW1: 告示波ランダム位相	348	120
	AW2: 告示波八戸位相	367	60
	AW3: 告示波神戸位相	391	60
	AW2b: 告示波八戸位相	332	234

3.3 地震応答解析

周波数応答解析は系の定常振動を解析するものである。それに対し地震時の応答は過渡振動が卓越する場合もあり、また地震波はその周波数帯域により異なるパワーを有する。以上から Table1 のモデルに対して時刻歴の地震応答解析により地震時の挙動を解析した。慣性接続要素の影響を明確にするため架構は弾性とした。応答解析に使用した入力地震動を Table2 に示す。Table2 の実地震動は最大速度を 50kine になるように増幅しており、他は告示スペクトルに適合させた模擬地震動である。入力地震動の擬似速度応答スペクトルを Fig. 5 に示す。

変位および絶対加速度の最大応答値を無制震モデル (sys0) の最大応答値で基準化して Fig. 6 に示す。各入力地震動による最大応答変位の大きさは sys1, sys4, sys5 で大きく変わらないが、オイルダンパを想定した sys4, sys5 がやや小さく、またその変動も小さい傾向が窺える。慣性質量のみが付加されている sys2, sys3 は入力地震動により応答低減の効果が差があることが分かる。sys1 の支持剛性を剛にした sys6 は sys1 よりも応答低減の効果が小さいことも分かる。

sys2, 3 の変位応答は EL centro EW の入力地震動において sys0 に対し応答が増幅する結果になっている。Fig. 7 に sys1, sys2, sys3, sys4 の EL centro EW に対する変位応答の時刻歴を示す。sys1 は 12 秒付近で応答が大きくなっているが、それ以降の時刻では sys0 に比較して応答を大きく低減していることが分かる。sys2, 3 については全時間帯で sys0 に比較して応答が大きい。Fig. 8 に慣性質量が本体架構質量と同量および 1/2 の場合の EL centro EW に対する変位応答スペクトルを示す。なお、周期は慣性質量付加前の周期でプロットしている。周期が 1 秒の原系に 1/2 の質量の慣性質量を付加すると、EL centro EW の入力においては原系の応答に対し増幅する周期帯になっていることが分かる。sys2, 3 は慣性接続要素を付加することで EL centro EW のより優勢な周波数帯域に周期が伸長したことが変位応答を大きくしている。

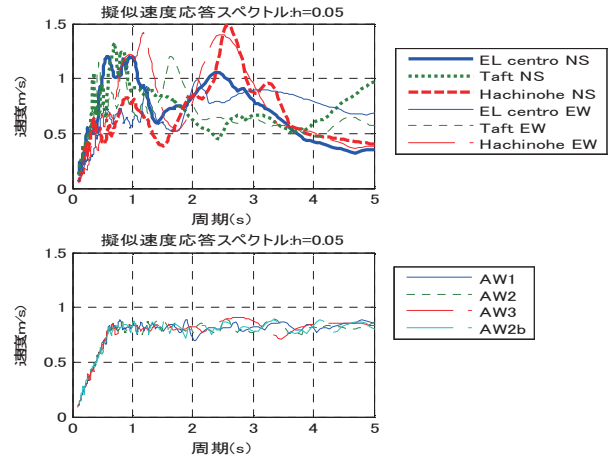


Fig. 5 入力地震動の擬似速度応答スペクトル

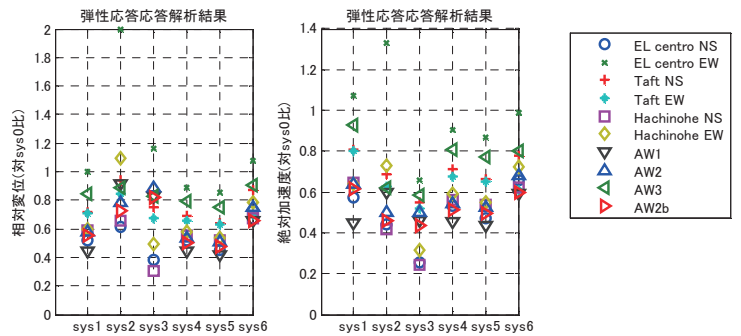


Fig. 6 地震応答解析結果

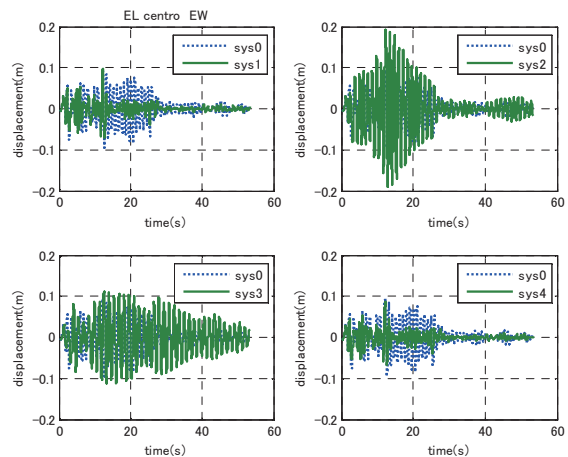


Fig. 7 変位応答時刻歴波形 (EL centro EW)

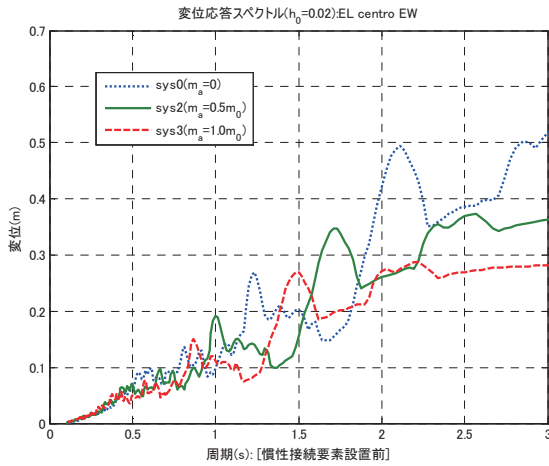


Fig. 8 変位応答スペクトル(EL centro EW)

4. 慣性接続要素を有する多質点系の地震応答

複数の振動モードを有する振動系に慣性接続要素を適用した場合の制震効果を把握するために、多質点系による応答解析を実施した。解析対象建物は高層鉄骨建物を想定した。解析モデルは制震装置を設置しないモデル（無制震モデル）とオイルダンパによる制震のモデル（オイルダンパモデル）および同調マスダンパによる制震のモデル（同調マスダンパモデル A, B）の 3 形式とした。

無制震モデルは最下層を固定した 50 質点のせん断型質点系でモデル化した。構造減衰は剛性比例型の内部粘性減衰として 1 次モードに対し 2% の減衰定数を与えた。なお、架構は弾性としている。オイルダンパモデルは 1 層から 34 層にダッシュポット (150000kN/(m/s)) とバネ要素 (750000kN/m) を直列に配置した maxwell 型の減衰機構を付加した。同調マスダンパモデルは無制震モデルの 1 次モードと 2 次モードに同調させた場合（同調マスダンパモデル A）と 1 次モードにのみ同調させた場合（同調マスダンパモデル B）の 2 種類とした。

同調マスダンパの支持剛性と減衰係数は文献⁴⁶⁾を参照して定めた。原系の質量と慣性質量の比から付加系の剛性と減衰係数を決定でき、その結果を (5) 式を多質点系に拡張した状態方程式に代入し周波数応答関数を算定し、再度慣性質量の量を修正することを数回繰り返し定めた。Table3, 4 にモデルの諸元を示す。各モデルの固有周期と減衰定数を Table5

に示す。同調マスダンパモデルは慣性質量の影響で実際の応答に対する影響が小さいモードが存在するので、周波数応答解析結果や刺激関数を参照して応答に影響のあるモードを確認 Fig. 9 刺激関数 (同調マスダンパモデル A)

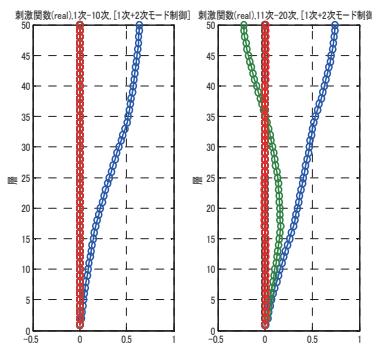


Fig. 9 刺激関数 (同調マスダンパモデル A)

し、1~4 次の固有周期と減衰定数を判断した。

Table3 無制震モデルの質量と剛性

層	質量(ton)	剛性(kN/m)	層	質量(ton)	剛性(kN/m)	層	質量(ton)	剛性(kN/m)	層	質量(ton)	剛性(kN/m)
50	1081	434140	40	1376	932990	30	1122	1252440	20	1104	1655260
49	1081	482160	39	1107	957490	29	1165	1294590	19	1161	1722940
48	1081	520390	38	1089	980790	28	1149	1322030	18	1121	1744460
47	1197	665420	37	1096	1002390	27	1120	1359190	17	1121	1860990
46	1144	710500	36	1118	1044990	26	1412	1394940	16	1144	1974990
45	1107	739900	35	1090	1076940	25	1532	1470000	15	1161	1972440
44	1191	780090	34	1070	1105440	24	1120	1482930	14	1146	1989400
43	1137	808490	33	1119	1151500	23	1125	1549400	13	1126	2085340
42	1107	847700	32	1138	1189090	22	1147	1570440	12	1419	2113990
41	1084	842800	31	1134	1224020	21	1126	1632690	11	1150	2253200

Table4 同調マスダンパの諸元

同調マスダンパモデルA					同調マスダンパモデルB				
層	慣性質量(ton)	減衰係数(kN/(m/s))	支持剛性(kN/m)	制御モード	層	慣性質量(ton)	減衰係数(kN/(m/s))	支持剛性(kN/m)	制御モード
18~34	60000	16203	98630	1次	18~34	60000	19831	100610	1次
1~17	30000	27473	350700	2次	1~17	30000	9415	50303	1次

Table5 各モデルの固有周期と減衰定数

	無制震モデル		同調マスダンパモデルA (1次+2次)		同調マスダンパモデルB (1次)		オイルダンパモデル	
	T	h	T	h	T	h	T	h
1次	5.05	0.02	5.42	0.07	5.42	0.08	4.99	0.06
2次	1.93	0.052	4.68	0.06	4.57	0.07	1.86	0.09
3次	1.17	0.086	2.09	0.11	1.91	0.05	1.08	0.14
4次	0.86	0.118	1.72	0.08	1.15	0.08	0.79	0.15

周波数応答解析結果を Fig. 10 に示す。図示しているのは地動加速度に対する質点の絶対加速度の周波数応答関数である。無制震モデルの 1, 2 次モード付近で同調マスダンパモデル A の応答が抑制されていることが窺える。同調マスダンパモデル B についても無制震モデルの 1 次モード付近の応答は抑制されている。しかし、制御対象ではない 2 次モード付近の応答は無制震モデルと大きく変わらないことが分かる。

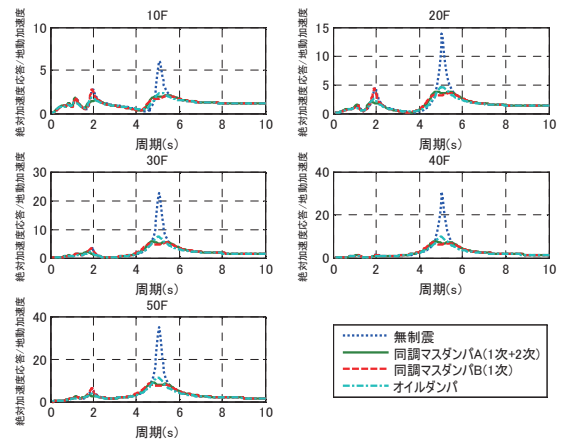


Fig. 10 周波数応答解析結果

地震応答解析に用いた入力地震動は Table2 に示す模擬地震動 4 波と実地震波 3 波 (EL centro NS, Taft EW, Hachinohe NS) の計 7 波とした。地震応答解析による各層の層間変形角の最大値を入力地震動別に Fig. 11 に示す。無制震モデルは模擬地震波に対する応答が大きくなっている。Table2 の模擬地震波は Fig. 5 に示す応答スペクトルから上記 3 実地震波と比較して 5 秒付近のパワーが大きく、その事が影響していると考えている。同調マ

スダンパやオイルダンパの制震効果は模擬地震波に対する応答に明確に現れている。同調マスダンパモデル A は 1 次モードのみに同調させた同調マスダンパモデル B に比較すると模擬地震波に対する制震効果がやや大きいことが解析結果から窺え、慣性質量の配置、量あるいは同調させるモードの決定は制震効果に影響することが分かる。同調マスダンパモデルの AW3 波に対する絶対加速度応答の時刻歴波形を FFT 処理して Fig. 12 に示す。時刻歴応答解析結果においても同調マスダンパモデルが制御対象としたモード付近の応答を抑制していることが分かる。Fig. 13 には 10F と 30F の AW3 波に対する同調マスダンパの変形(図 1 において $x-x_d$) を示す。10F では層間変形が大きな 10~15 秒付近で 2 次モードに近い約 2 秒程度の周期でダンパが振動している。30F では 1 次モードに近い 5 秒程度で振動していることが窺える。

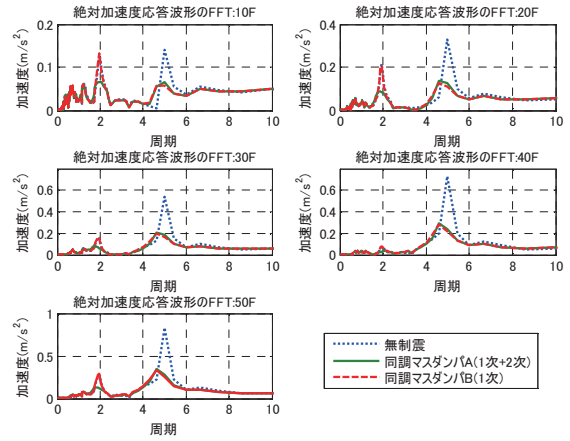


Fig. 12 時刻歴波形のフーリエスペクトル(AW3)

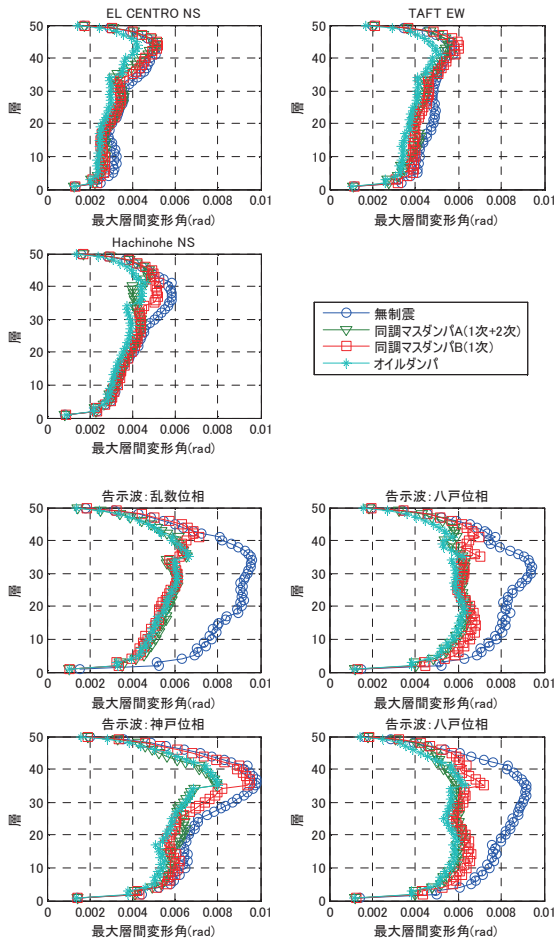


Fig. 11 地震応答解析結果

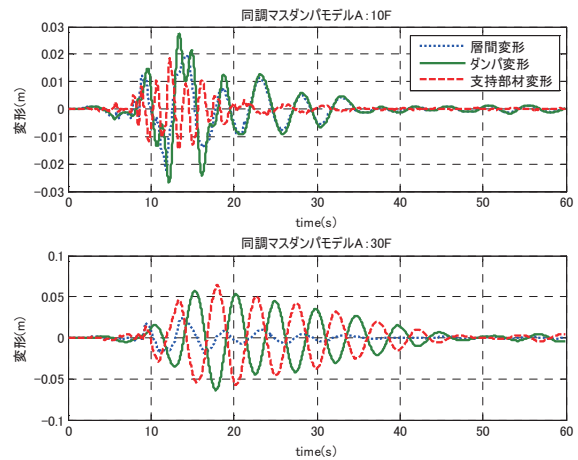


Fig. 13 同調マスダンパの変形

5. まとめ

慣性接続要素が適用された質点系モデルの動的挙動を周波数応答解析と地震応答解析により解析し、他制震装置と比較・検討した。慣性接続要素に支持剛性を付加して本体架構と同調させることで、同調させた周期帯で効果的に応答が低減できることおよび同調させるモードが異なると最大応答値も異なることを確認した。

高層建物に同調マスダンパを適用する場合は同調外モードが増幅する場合があります、それに対し別途対策することで制震効果が向上する報告*7が有る。高次モードの減衰が小さい場合は入力地震動の特性により 2 次以上のモードが励起されることも考えられ、慣性接続要素を同調マスダンパとして高層建物に適用する場合は同調するモードの決定は地震時の応答を制御する上で重要である。

謝辞

本検討に使用した模擬地震動は設計本部耐震設計部の荻野部長よりご提供いただきました。ここに記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 斎藤, 谷沢他「(仮称) A ビル 高効率な制震システムを採用した複合通信ビル」, ビルディングレター, 2011. 7
- 2) 斎藤, 栗田, 井上「慣性接続要素を利用した線形粘性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御 Kelvin モデル化手法に関する考察」, 構造工学論文集, Vol153b, 2007. 3
- 3) 斎藤, 杉村, 井上, 「慣性接続要素を利用した粘性ダンパーによる制震構造の応答制御に関する一考察」, 構造工学論文集, Vol154b, 2008. 3
- 4) 石丸, 三上他: 「D. M 同調システム簡易設計法」, 日本建築学会論文報告集第 652 号, 2010 年 6 月
- 5) 石丸, 秦他: 「付加剛比による D. M 同調システム簡易設計法」, 日本建築学会論文報告集第 654 号, 2010 年 8 月
- 6) 杉村, 五十嵐他: 「同調粘性マスダンパーの鉄筋コンクリート造建物への有効性の検討」, 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻 第 37 号, 2011 年 10 月
- 7) 郭, 石丸他: 「同調 D. M. システムを有する構造設計法に関する研究」, 日本建築学会論文報告集第 686 号, 2013 年 4 月

Earthquake response of lumped mass system with the device of using inertial mass effect

Jun NAKASONE

Abstract

To reduce seismic response of a building structure, installing passive control devices to the structure has been thought to be effective solution. Among these passive control devices, some papers pointed out that the device which uses effect of inertial mass has a possibility to reduce dynamic response of structures effectively.

In a report, dynamic response of lumped mass system with inertial mass device induced by an earthquake is discussed. Through frequency response function analysis of SDOF (single-degree of freedom system) and time history analysis of MDOF (multi-degrees of freedom system), the effectiveness of inertial mass devices is analytically examined.

Analysis results show that inertial mass device with stiffness element which was described in papers*1~6 has effectiveness to reduce dynamic response of building structures at tuned frequency, and also show that high rise buildings, which have lots of excitable natural frequencies, can be excited by earthquake ground motion at untuned frequencies.

Keywords : Inertial mass, Vibration control, Tuned mass damper, Passive control system
