

慣性接続要素を用いたピロティ構造の剛性比の改善

正会員 ○村上 翔*1 同 吉富信太*2 同 辻 聖晃*2 同 竹脇 出*2

2. 構造—2. 振動

慣性接続要素, 負剛性, ピロティ構造物, 変形制御, 加速度制御

1. 序

慣性接続要素(以下 IMD)と呼ばれる新しい制振装置が研究・開発されている[1-4]。鋼材ダンパーや粘性ダンパーが節点間の相対変位、相対速度に抵抗する機構であるのに対して、IMD は節点間の相対加速度に対して抵抗する制振装置である。建物が振動する際、層間変形と層間の相対加速度は一般に逆位相で生じるため、IMD の反力は層剛性による復元力とは反対の向きに生じる(図1)。このため、IMD は動的には負剛性を有している。IMD の負剛性は主に粘性ダンパーの実効率を向上させる目的で利用されており、粘性体と IMD を組み合わせた粘性マスダンパーの研究や開発は IMD に関する研究の主流となっている。

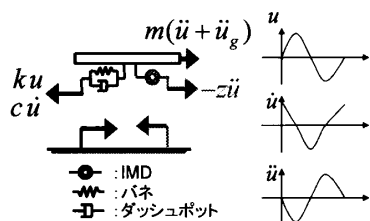


図1 IMDを設置した1質点系の力の釣合

本論文では IMD の動的負剛性を、ピロティ等の剛性比に偏りがある建物の剛性比の改善に利用することを提案する。

2. せん断2質点系の第2層 IMD 設置時の刺激関数

本節ではせん断2質点系を扱い、第2層に IMD を設置したモデル A(図2-(a))と IMD を設置しないモデル B(図2-(b))について、これらが共に1次モードの第1層変形が第2層変形の λ 倍となる場合において、刺激関数の比較を行う。各モデルは層質量 m (等分布)を有するものとし、モデル A の第2層に設置する IMD の慣性質量を z とする。モデル A の IMD を除いたモデルの1次モードの第1層変形が第2層変形の $\lambda'(>\lambda)$ 倍とすると、(1)式が成立する。

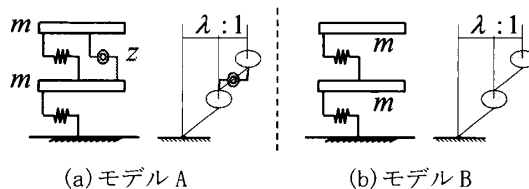


図2 第2層 IMD 設置系 A と非設置系 B(1次モード共通)

$$z/m = (\lambda' - \lambda)(2\lambda\lambda' + \lambda' + \lambda + 1) / \{\lambda(1 + 2\lambda')\} \quad (1)$$

モデル A, B の s 次刺激関数をそれぞれ β_A, β_B とおくと、 β_A, β_B は(2)-(5)式で表現される。

$${}_1\beta_A = \frac{(1 + 2\lambda')\lambda}{\{(1 + 2\lambda')\lambda^2 + \lambda'(1 + \lambda')\}} \left\{ \frac{\lambda}{1 + \lambda} \right\} \quad (2)$$

$${}_1\beta_B = \frac{(1 + 2\lambda)}{\{\lambda^2 + (1 + \lambda)^2\}} \left\{ \frac{\lambda}{1 + \lambda} \right\} \quad (3)$$

$${}_2\beta_A = \frac{1}{\{(1 + 2\lambda')\lambda^2 + \lambda'(1 + \lambda')\}} \left\{ \frac{\lambda'(1 + \lambda')}{-(1 + 2\lambda')\lambda - \lambda'(1 + \lambda')} \right\} \quad (4)$$

$${}_2\beta_B = \frac{1}{\lambda^2 + (1 + \lambda)^2} \left\{ \frac{1 + \lambda}{-\lambda} \right\} \quad (5)$$

(4)式において、 $\lambda < \lambda'(1 + \lambda')/(1 + 2\lambda')$ とすると ${}_2\beta_A$ の第2成分が正となる。これは IMD が2次固有周期において有する負剛性効果によって、2次モードにおける第2層の動的な剛性が負となるためである。このときモデル A の2次モードの第2層変位は第1層変位よりも小さくなる。これは IMD を持たないモデル B には見られない特徴である。

(2)式と(3)式より(6)式の関係が成立し、IMD を設置したモデル A の1次の刺激関数はモデル B よりも小さくなるのがわかる。

$${}_1\beta_B - {}_1\beta_A = \frac{(\lambda' - \lambda)(\lambda + \lambda' + 2\lambda'\lambda + 1)}{\{(1 + 2\lambda')\lambda^2 + \lambda'(1 + \lambda')\} \{\lambda^2 + (1 + \lambda)^2\}} \left\{ \frac{\lambda}{(1 + \lambda)} \right\} \quad (6)$$

以上の特徴について、第1層剛性が第2層剛性よ

り小さいピロティ型のせん断 2 質点系を原モデルとして、層剛性を変化させた場合と第 2 層に IMD を設置した場合について、1 次モードが共に直線形となる場合の刺激関数の比較を表 1 に示す。

表 1 第 2 層 IMD 設置系 A (原モデルがピロティ) と非設置系 B (1 次モード共通) の刺激関数

	1 次モードの刺激関数	2 次モードの刺激関数
原モデル (ピロティ)	1 層変形大	1,2 層とも変形小 2 層変形 > 1 層変形
層剛性調整	1 層変形 = 2 層変形 2 層の水平変位大	1,2 層変形大 2 層変形 > 1 層変形
第 2 層に IMD 設置	1 層変形 = 2 層変形 2 層の水平変位小	2 層水平変位 > 0 (2 層が動的負剛性 $k_2 - \omega^2 z < 0$) 1 層変形 > 2 層変形

表 1 において注目すべき点は以下の通り。

- ・IMD を設置したモデル A の場合、2 次モードの第 2 層の層間変形が IMD を設置しないモデル B よりも小さくなる。このため、第 2 層の変形を抑えたまま第 1 層の変形を低減できると考えられる。
- ・IMD を設置したモデル A の場合、1 次と 2 次の刺激関数の第 2 成分が同符号となる。第 1 層に IMD を設置していないため頂部の 1 次と 2 次の刺激関数の和は 1 となることから、1 次と 2 次の刺激関数の第 2 成分が異符号となるモデル B に比べ、モデル A の方が頂部最大絶対加速度（頂部最大絶対加速度を 1 次と 2 次の応答値の SRSS 値として計算するとする）を小さくできると考えられる。

以上のことから、ピロティ構造のピロティ階以外の層に IMD を設置することにより、ピロティ階の変形と頂部最大絶対加速度を同時に低減可能である。

3. IMD を第 2 層に設置したピロティ型せん断多質点系の応答性状

本節ではピロティ型の剛性分布を持つせん断多質点系を扱い、第 2 層に IMD 設置時の最大層間変形と頂部最大絶対加速度の変化について考察を行う。

第 1 層の剛性が第 2 層の半分であるようなピロティ型せん断 2 質点系の第 2 層に慣性質量 z の IMD を設置したモデル（図 3）について、Newmark-Hall の応答スペクトルより求めた各層の最大層間変形と頂部最大絶対加速度を図 4 に示す。原ピロティモデルの 1 次固有周期については表 2 の 4 モデルを考える。応答値としては各次数の応答値の SRSS 値を用いる。

図 4 より、ピロティ型せん断 2 質点系の第 2 層に IMD を設置した際には次の特徴がある。

- ・最大層間変形の層方向最大値と頂部最大絶対加速度を同時に低減可能。
 - ・第 2 層の最大層間変形は IMD の設置により大きくなるが、第 1 層を上回ることはない。
 - ・設置する IMD の慣性質量には最適量が存在し、その値は原モデルの 1 次固有周期に依らずほぼ一定。
- 第 2 層に設置する IMD の慣性質量に最適量が存在するのは、IMD を第 2 層に設置した際、剛性比が改善されて第 1 層の層間変形が低減される効果と、固有周期が長くなる（応答スペクトル上で変位が大きくなる）効果の両方が存在するためである。

次に図 5 の 5 質点せん断モデルの第 2 層に慣性質量 z の IMD を設置したモデルについて、各層の最大層間変形と頂部最大絶対加速度を図 6 に示す。原ピロティモデルの 1 次固有周期については表 3 の 4 モデルを考える。

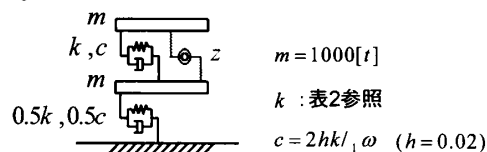


図 3 IMD を第 2 層に設置したピロティ型せん断 2 質点系

表 2 図 3 の主系 (IMD 除く) の 1 次固有周期と層剛性

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1 層剛性 [10^4 kN/m]	5.6	2.5	1.4	0.9
2 層剛性 [10^4 kN/m]	11	5.0	2.8	1.8
1 次固有周期 [s]	0.4	0.6	0.8	1.0

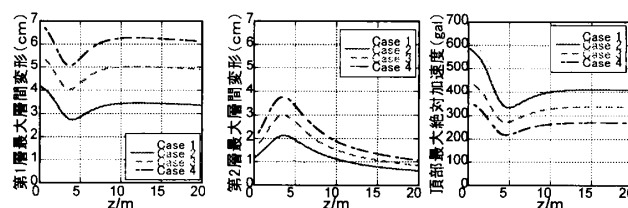


図 4 各層の最大層間変形及び頂部最大絶対加速度と第 2 層の IMD 設置量の関係

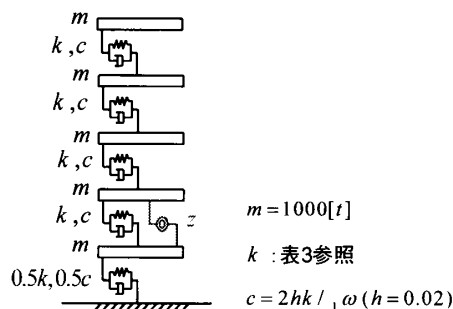


図 5 IMD を第 2 層に設置したピロティ型せん断 5 質点系

表 3 図 5 の主系 (IMD 除く) の 1 次固有周期と層剛性

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1 層剛性 [10^5 kN/m]	20.9	9.3	5.2	3.3
2-5 層剛性 [10^5 kN/m]	41.7	918.6	10.4	6.7
1 次固有周期 [s]	0.4	0.6	0.8	1.0

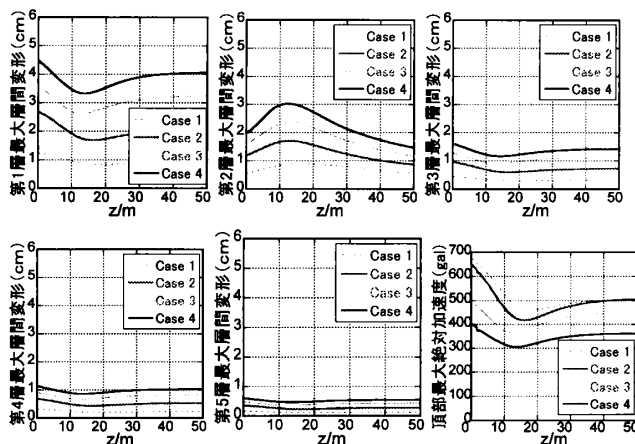


図 6 ピロティ型せん断 5 質点系の第 2 層の IMD 設置量と最大層間変形、頂部最大絶対加速度

図 6 より、ピロティ型せん断多質点系の第 2 層に IMD を設置した際には次の特徴がある。

- ・最大層間変形の層方向最大値と頂部最大絶対加速度を同時に低減可能。
- ・第 2 層の変形は設置前に比べ大きくなるが、他層の層間変形は低減され、また第 2 層の変形量が第 1 層の変形量を上回ることではない。
- ・IMD の設置量には最適量が存在し、原ピロティモデルの 1 次固有周期が 0.7 秒以上であればほぼ一定となる。これは、減衰定数が 2% の応答スペクトル上で加速度一定領域と速度一定領域の境界の固有周期が約 0.6~0.7 秒であることに由来する。

IMD を第 3 層以上に設置した場合や、第 2 層以上の複数の層に設置した場合には、第 2 層のみに設置した場合に比べ応答低減の度合いが小さくなることも確認している。IMD 設置時には、設置層においては、動的剛性が低下するため変形は増加するが、層せん断力は低減される。このため設置層の上下では、動的剛性は保たれたまま層せん断力のみが低減され変形が低減される。従って IMD をより下層部に設置した方が原モデルの層せん断力が大きい分 IMD による層せん断力の低減効果が大きくなる。設置層以外の層間変形を低減する効果が大きくなるので、ピロティ構造の第 1 層変形を低減する場合には第 2 層に IMD を設置すると効率が良いといえる。

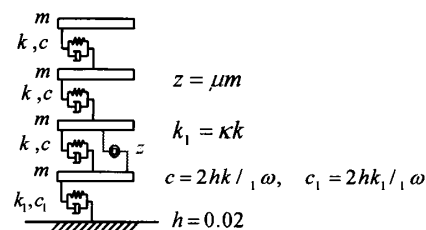


図 7 第 2 層に IMD を設置したピロティ型せん断多質点系 (4 質点の例)

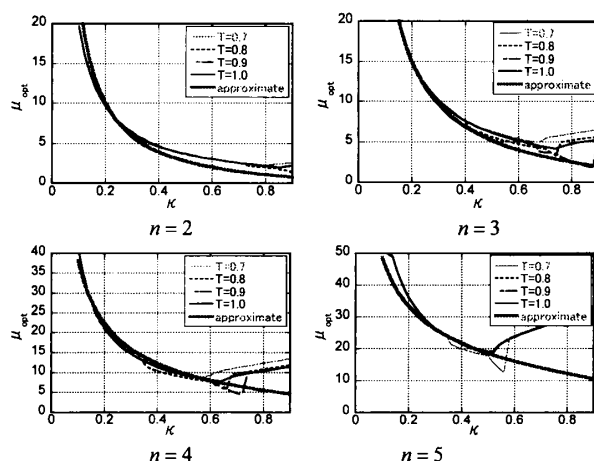


図 8 ピロティ型せん断 n 質点系 (1 次固有周期 T 秒) の第 1 層の最大層間変形を最小化する第 2 層 IMD の質量比 μ_{opt}

4. ピロティ構造の第 2 層に設置する IMD の設計式

以上の結果より、本研究では第 1 層の剛性が比較的小さいせん断多質点系を原モデルとして、第 2 層に IMD を設け、最大層間変形の層方向最大値を最も低減するような IMD の設置量を決定する式を経験的に導き (このとき頂部最大絶対加速度も同程度の割合で低減)、これをピロティ構造に用いる IMD の設計式として提案する。扱うモデルは、図 7 に示す 1 次固有周期 T 秒、層質量 m (等分布) で、第 2 層以上の剛性が一定、かつ第 1 層の剛性のみ他層の $\kappa (< 1)$ 倍であるようなピロティ型せん断 n 質点系 ($n = 2 \sim 5$) を原モデルとし、その第 2 層に層質量の μ 倍の慣性質量をもつ IMD を設置したものである。

図 7 のような第 2 層に IMD を設置したピロティ型せん断多質点系において、第 1 層の最大層間変形を最小化 (最大層間変形の層方向最大値を最小化) するときの μ を μ_{opt} と定義すると、 μ_{opt} と κ の関係は図 8 となる。図 8 中に approximate として描かれているのは、(7) 式で表される近似曲線である。

$$\mu_{opt} = 2^{n-1} \left(\frac{1.5 - \kappa}{1.5\kappa} \right)^{1.3-0.2n} \quad (7)$$

図 8 より 1 次固有周期が 0.7 秒以上のピロティ型

せん断多質点系の第2層にIMDを設置する場合、第1層の最大層間変形を最小化するIMDの設置量は、 κ (第1層剛性の第2層剛性に対する比)と層数を固定するとほぼ一定値に収束することと、その値は(7)式により近似的に求めることができることがわかる。

(7)式より決定した慣性質量を有するIMDをピロティ型せん断多質点系の第2層に設置した場合の、第1層の最大層間変形と頂部最大絶対加速度の原モデルに対する比を図9に示す。図9より最大層間変形の層方向最大値と頂部最大絶対加速度を2～3割低減可能であることがわかる。

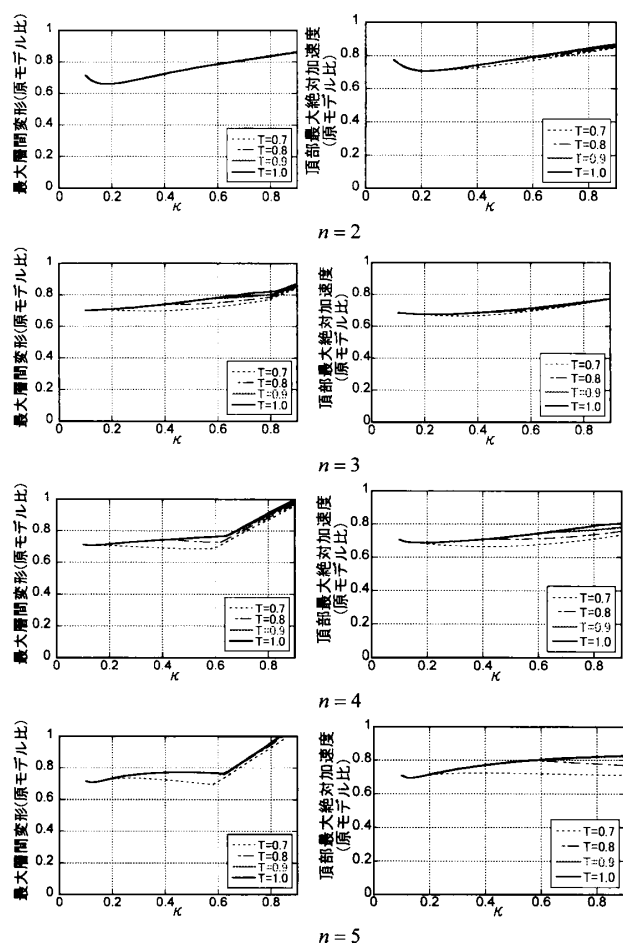


図9 提案式の量のIMDを第2層に設置したピロティ型せん断 n 質点系の第1層最大層間変形と頂部最大絶対加速度

次に実際に(7)式を用いたピロティモデルの設計例を示す。表4に示すような諸元をもつピロティ型4質点せん断モデルにおいて、第2層に(7)式より算出した慣性質量をもつIMDを設置する前後のレベル1

での応答を比較すると、表5となる。

表4 ピロティ型4質点せん断モデルの諸元

層質量[t]	1000
1層剛性[10^5 kN/m]	3.7
2-4層剛性[10^5 kN/m]	7.4
1次減衰定数(*)	0.01
IMD設置前の1次固有周期[s]	0.80
IMD設置後の1次固有周期[s]	0.93
第2層のIMD設置量[t]	3[t]
第2層のIMDの慣性質量効果[t]	10000[t]

*構造減衰を層剛性比例で与えるものとする。

表5 IMD設置前後の最大応答値の比較

	設計目標	IMD設置前	IMD設置後
最大層間変形の最大値[cm]	3.5	4.7	3.5
頂部最大絶対加速度[gal]	490	553	402

表5より、ピロティ型せん断多質点系の第2層に設置するIMDの量を(7)式に基づき決定すれば、最大層間変形の層方向最大値と頂部最大絶対加速度の両方を2～3割低減し、設計目標を満足していることが確認できる。

6. 結論

本論文では動的負剛性をもつIMD設置時のせん断多質点系のモード特性に着目し、以下の結論を得た。

- ・せん断多質点系にIMDを設置した場合、IMDの動的負剛性により設置層の層せん断力が低減され、設置層以外の層間変形が低減される。
- ・ピロティ型せん断多質点系の第2層にIMDを設置することにより、層間最大変形の層方向最大値と頂部最大絶対加速度を同時に低減可能である。
- ・ピロティ型せん断多質点系の第2層に設置するIMDの設置量に最適値が存在することを明らかにし、その値を決定する経験式を提案した。

参考文献

- [1] 古橋 剛, 石丸 辰治: IMDによる多質点振動系の応答制御, 日本建築学会構造系論文集, No. 601, pp. 83-90, 2006. 3.
- [2] 石丸 辰治, 古橋 剛ら: 擬似モード制御によるD.M.同調システムに関する研究 (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 725-728, 2011. 8.
- [3] 石丸 辰治, 古橋 剛ら: 層剛性低減によるD.M.モード制御に関する基礎的研究 (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 729-732, 2011. 8.
- [4] I. Takewaki et al., Fundamental mechanism of earthquake response reduction in building structures with inertial dampers, *Struct. Control Health Monitoring* (online).

*1 京都大学大学院修士課程学生

*2 京都大学大学院工学研究科

Kyoto University, Graduate Student

Kyoto University, Graduate School of Eng.