

# 粘摩擦特性を持つ連結ダンパーシステムの 制振性能の実験的検証

家村 浩和<sup>1</sup>・五十嵐 晃<sup>2</sup>・藤原 寅士良<sup>3</sup>・豊岡 亮洋<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 (〒 151-8578 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

<sup>4</sup>学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

本報告は、隣接構造系の地震応答を低減するための連結ダンパーの特性として、粘性に加えて摩擦力が存在する場合の応答低減効果を検討したものである。従来より粘性ダンパーを用いた連結ダンパーに対する最適パラメータ導出式が提案されているが、実際のエネルギー吸収装置に存在する摩擦力は制振効果や最適パラメータに大きな影響を与える。そこで、摩擦力の効果を振動制御において積極的に利用するため、等価線形化法を組み合わせ利用した最適パラメータの導出法を提案した。さらに、その有効性を数値シミュレーションにより示すとともに、模型や実物大構造物を用いた実験により応答低減効果の確認を行い、提案するパラメータ設定法を現実の構造物に適用した場合の信頼性を実験的に検証した。

**Key Words :** viscous-friction damper, equivalent linearization method, optimal parameter, model experiment, full-scale experiment

## 1. はじめに

近年の構造物の巨大化・長大化および先の阪神淡路大震災による甚大な被害を受けて、従来の耐震設計の考え方に加えて、何らかのデバイスを構造物に導入し、積極的に地震エネルギーの吸収を行うことにより構造物応答などの低減を行う制振技術が注目されている。これら制震装置にはTMD、AMD、ダンパー、免震装置など多種多様なものがあり、それら装置の最適なパラメータ設定法、制御手法が研究されてきた。

こうした技術の中で、比較的容易に制振効果をあげることが期待できるものの一つとして、ジョイントダンパー方式がある。これは、特性の異なる隣接した構造物の間を、ダンパー等のエネルギー吸収デバイスで連結し、それぞれの構造物の振動性状の違いを利用してエネルギー吸収を図り、応答低減を行う方式の制振手法である。しかし、実際のジョイントダンパーについての研究例、実験例などは少なく、未だ研究段階といえる。

そこで本報告においては、ジョイントダンパーを設置した構造系の応答特性について検討を行うため、模型実験モデルによる振動台実験を行い、ジョイントダンパーの特性に関する考察、および最適パラメータの導出法について検討した。さらに、実物大の5層、および3層フレーム構造を用い、両者の間に設置した油圧式アクチュエーターをジョイントダンパーとして用

いた振動実験を行った。

## 2. 最適ダンパーパラメータの設定法

### (1) PQ 定点理論に基づく設定法

ジョイントダンパーとして粘性ダンパーを用いることを想定すると、2つの構造系であるため、特定のモードに着目した場合、TMDの最適パラメータ調整法に用いられるPQ定点理論を適用することができる。このことを利用して、蔭山ら<sup>2)</sup>はジョイントダンパーの剛性と粘性減衰係数の最適値を理論的に導出している。すなわち、ダンパーの減衰係数を変化させたときの変位振幅比曲線の通過する定点をP点、Q点とし、その点で各々極大値をとり、なおかつP点、Q点の高さが等しくなる場合を最適調整条件と考えるとき、最適なジョイントダンパーの粘性減衰係数は次式で与えられる。

$$C_{opt} = h_{opt} m_1 m_2 (\omega_P + \omega_Q) \left( \frac{1}{m_1 + m_2} + \frac{\omega_P \omega_Q}{k_1 + k_2} \right) \quad (1)$$

なお、この最適値は最適な $\omega_P, \omega_Q$ に対して、その値との残差を最小にすることにより得られているため、厳密解ではなく準最適値である。

### (2) 等価線形化法に基づく設定法の提案

前節で得られた準最適値は、ダンパー装置が線形挙動をすることを前提とした値である。しかし、実際の

ダンパー装置は、粘性流体の摩擦力や発生荷重能力の制限などから非線形的な挙動を示すと考えられる。そこで、ダンパーに固有の摩擦力を包含した粘摩擦ダンパーを想定し、ダンパーの履歴吸収エネルギーの観点から等価剛性、等価減衰定数を算定することを考える。そのとき、最適なジョイントダンパーの粘性減衰係数は次のような手順により定めることができる。まず、(1)式や複素固有値解析を利用した最適値に対して、それを設置した場合の構造系の1次固有周期を複素固有値解析により算出し、その値に近い周波数を設定加振周波数  $f$  とする。すなわち、設計における最悪時のケースを想定する。次に、摩擦項を含めた場合の最適な減衰係数を  $c_d$  とすると、以下の式が成立する。

$$F_{friction} \cdot u_B + \pi \cdot c_d \cdot v \cdot u_B = \Delta W_{opt} \tag{2}$$

ここに、

- $F_{friction}$  : 既存摩擦力 (N)
- $v$  : 最大ダンパー速度 (kine)
- $u_B$  : 最大ダンパーストローク (cm)
- $\Delta W_{opt}$  : 最適粘性時の1サイクル当たりの履歴吸収エネルギー (N・cm)

いま、粘摩擦ダンパーを設置した場合と粘性ダンパーを設置した場合とで、ダンパーストローク  $u_B$  が等しくなると仮定すると、先の加振周波数  $f$  と、粘性ダンパーの最適減衰係数  $C_{opt}$  を用いて、次式によりダンパーの粘性減衰係数が得られる。

$$C_d = C_{opt} - \frac{F_{friction}}{2\pi^2 f} \tag{3}$$

実際には、(3)式により定めた粘性減衰係数に対して、動的応答解析を行うことによりダンパーストロークや変位・荷重履歴などを計算し、それを粘性ダンパーにおいて最適減衰を設定した場合の結果と比較し、発生荷重や履歴吸収エネルギーが等しくなるように、ダンパーの粘性減衰係数を繰り返し計算により更新する。

### 3. 模型実験による検証

#### (1) 模型実験システムの概要

次に、振動台を用いた模型実験を行うことにより、前節での提案式を実験的に検証した。実験モデルは、固有周期が異なるように質量、剛性を調節した1自由度模型を2つ設置し、両者の間を電磁型アクチュエーターで接続したものである。模型構造物の諸元を表-1に示す。

電磁型アクチュエーターは、外側に設けた磁石の内側をコイルが通過する仕組みになっており、コイルに流す電流を DSP および安定化電源を介して制御する

表-1 模型構造物諸元

|            | Structure-1 | Structure-2 |
|------------|-------------|-------------|
| 質量 (kg)    | 2.345       | 3.855       |
| 板ばね厚 (cm)  | 0.10        | 0.10        |
| 板ばね幅 (cm)  | 10.0        | 10.0        |
| 板ばね長さ (cm) | 37.8        | 37.8        |
| 剛性 (N/m)   | 493.999     | 509.666     |
| 固有振動数 (Hz) | 2.31        | 1.83        |
| 減衰定数       | 0.014       | 0.014       |

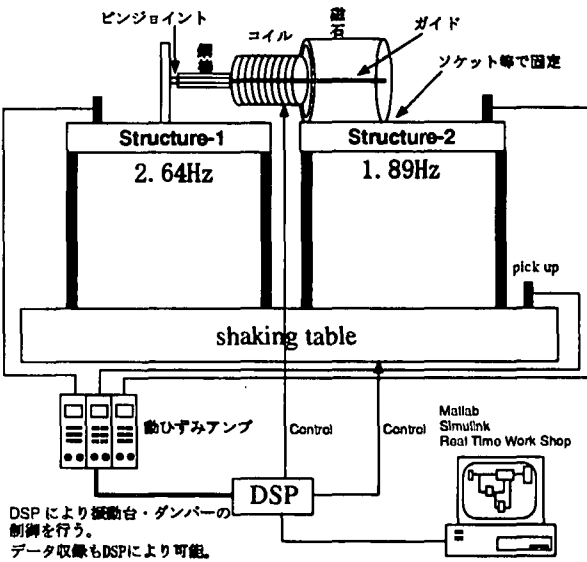


図-1 模型実験システム図

ことにより荷重を発生させる。また、ダンパーの構造上、0.45(N)の摩擦が存在するため、以下においてはこの摩擦を考慮した粘摩擦ダンパーとして解析・実験を行う。振動台としては電磁式振動台(振研(株)製)を用い、制御はDSPを介して行った。計測のため、振動台には加速度ピックアップ、動ひずみアンプを設置し、ダンパーの変位、荷重は、それぞれ可視光レーザー変位計(KEYENCE製)およびアンプ内蔵型ロードセル(日本電産シンボ(株))を用いて計測した。実験システム概念図、および諸元をそれぞれ図-1、表-1に示す。

#### (2) 解析と模型実験の比較

ダンパーが粘性の場合の最適粘性減衰係数は、本モデルのパラメータをPQ定点理論に基づく(1)式に適用した結果、6.3(Nsec/m)となった。この最適値と、ダンパーに初期状態から生じている0.45(N)の摩擦力とを用い、粘摩擦要素を考慮した提案式(3)により最適な粘性減衰係数を計算すると、約2.0(Nsec/m)の値が得られた。この最適パラメータの妥当性を解析的に検証するため、ダンパーの粘性減衰係数と摩擦力を変化させ

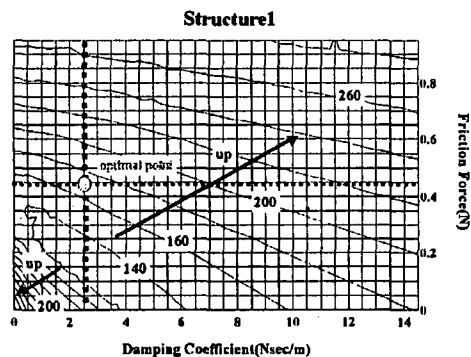


図-2 最大加速度応答等高線 (Structure-1)

たときの Structure-1 の最大応答加速度の等高線および上述の最適パラメータの関係を計算したものを図-2 に示す。計算に用いる外乱として、スイープ波加振 (周波数帯域 1-5(Hz), 継続時間 25(sec), 振幅 20(gal)) を設定した。

図-2 により示されているように、初期状態の摩擦 0.45(N) が加速度の最小値をカバーする値の範囲を超えているため、等高線で示される最適パラメータの組み合わせとは若干の相違が生じているものの、(3) 式は与えられた摩擦力に対しては、ほぼ妥当な粘性係数を与えていることが分かる。なお、ここではダンパーによる付加剛性を無視して計算を行っているが、この点も相違が生じている原因の一つと考えられる。付加剛性に負の剛性を用いて固有振動調整を行う手法については蔭山らの研究<sup>2)</sup>に詳しい。

次に、ダンパーを提案式に基づく最適粘性減衰係数に設定し、振動台によりスイープ波加振 (周波数帯域 1-5(Hz), 継続時間 25(sec), 振幅 20(gal)) を行った場合の Structure-1、Structure-2 の応答比較をそれぞれ図-3、図-4 に示す。

これらの図で分かるように、ジョイントダンパーで接続しない場合の応答と比較して、両構造物とも大幅に応答が低減されており、ジョイントダンパーによる制振手法の有効性が確認できる。特に Structure-1 においては、最大応答で 50% 近い低減効果が得られた。

## 4. 実大構造を用いた実験

### (1) 実大実験システムの概略

京都大学防災研究所に設置されている実大の 5 層フレーム、3 層フレーム、及び動的アクチュエーター (島津製作所製) を用いて、ジョイントダンパーの制振性能を実大規模で検証する実験を行った。実物大フレーム実験施設の外観と実験システムを、それぞれ図-5、図-6 に示す。また、2つのフレーム構造の概要を表-2 に示す。

動的アクチュエーターの制御に関しては、連結位置

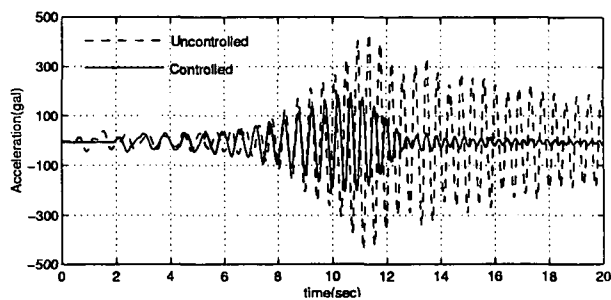


図-3 スイープ加振時応答比較 (Structure-1)

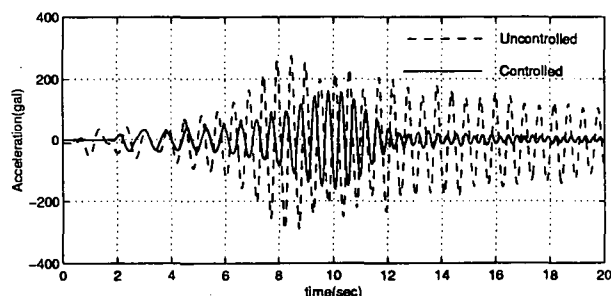


図-4 スイープ加振時応答比較 (Structure-2)

表-2 実大構造フレーム諸元

| 3 層構造物諸元   |        |      |       |
|------------|--------|------|-------|
| 固有振動数 (Hz) | 2.44   | 7.23 | 13.91 |
| 減衰定数 (%)   | 3.5    | 4.5  | 5.5   |
| 各層質量 (ton) | 19.25  | 19.1 | 22.82 |
| 層当たり高さ (m) | 約 3.5m |      |       |

| 5 層構造物諸元   |        |      |      |       |       |
|------------|--------|------|------|-------|-------|
| 固有振動数 (Hz) | 1.78   | 5.61 | 9.69 | 14.39 | 18.68 |
| 減衰定数 (%)   | 2.0    | 1.2  | 0.8  | 0.9   | 1.1   |
| 各層質量 (ton) | 30.8   | 30.1 | 29.6 | 39.0  | 33.6  |
| 層当たり高さ (m) | 約 3.5m |      |      |       |       |

で計測した 2 つの構造物の変位、速度信号に対して定数フィードバックを行う制御、すなわち摩擦ダンパー型、粘性ダンパー型のパッシブなデバイスの挙動を模擬した実験を行った。

また、任意の地震動が作用した状態での構造物の振動応答を再現する手法として、3 層フレーム 3 階 (2t)、および 5 層フレーム 4 階 (5t) に設置してある加振装置をトルク制御で同時に制御した<sup>3)</sup>。計測は 5 層、3 層とも加速度、速度、変位信号を計測し、A/D を介して計測ソフト (日本シンクネット製) で一括して収録した。

### (2) 地震応答低減特性に関する実験

地震波入力として、El-Centro NS 成分波と神戸海洋気象台 NS 成分波を、それぞれ最大振幅 5(gal) にスケー

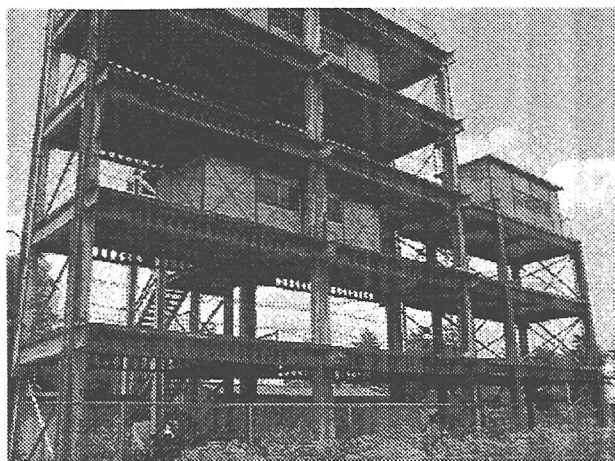


図-5 実物大フレーム実験施設外観  
5-Story Frame

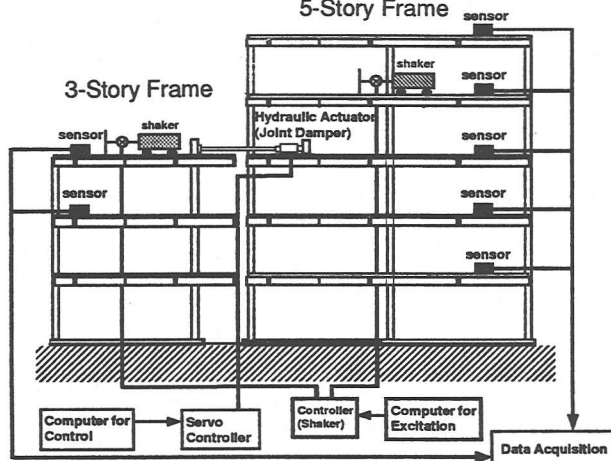


図-6 実験システム

リングしたものを想定し、無制御の場合と、ジョイント部の粘性減衰係数を  $300(\text{kNsec/m})$  と与えたときの5層最上階における速度応答を比較した。その応答時刻歴を図-7、図-8に示す。ここで、ジョイント部の粘性減衰係数は、複素固有値解析によるモード解析において、1次の複素モード減衰定数が最大となるような粘性減衰係数をもって決定した。

これらの図より、どちらの地震動においても加振初期状態において最大応答に対する低減効果は小さく、数秒経過してからその効果が現れていることが分かる。また、El Centro 波のように比較的継続的な地震動に関しては効果が発揮できているものの、神戸波のような衝撃的な地震動に対してはあまり低減効果が見られない。この傾向は、一般的にパッシブタイプの制振装置の欠点として指摘されているものである。すなわち、神戸波のような衝撃的な特性を持つ地震動に対して効果的な振動低減効果を得るためには、アクティブ型・セミアクティブ型の制御則および制御装置を用いる必要があると考えられる。この点に関しては、今後も実大実験を継続し、検討を進める予定である。

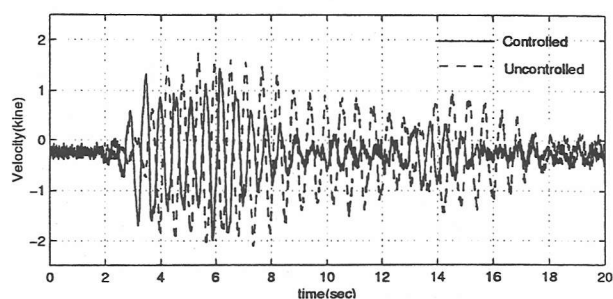


図-7 5層5階速度応答比較 (El Centro 5gal)

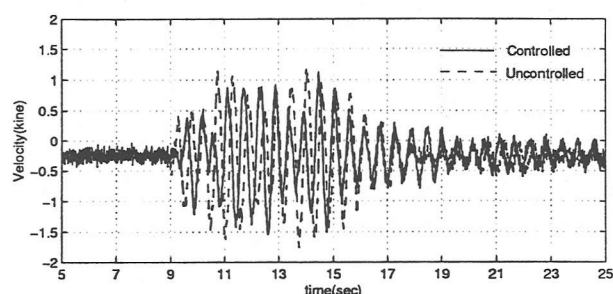


図-8 5層5階速度応答比較 (Kobe NS 5gal)

## 5. 結論

本報告においては、構造物の制振手法の1つであるジョイントダンパーシステムについて、連結装置が粘摩擦型ダンパーである場合の最適な粘性減衰係数を、最適粘性ダンパーの減衰係数と摩擦力を考慮した履歴吸収エネルギーに着目して決定する方法を提案した。また、その決定方法の有効性を、振動台を用いた模型実験と数値解析により検証した。さらに、実大レベルの構造物に対し、パッシブなジョイントダンパーを実装した場合の振動制御実験を行った結果について述べた。

## 参考文献

- 1) 藤原寅士良、ジョイントダンパーによる隣接構造物の振動制御に関する実験的研究、京都大学提出修士論文、1999
- 2) 蔭山満ほか、連結された2重系構造物の最適制振、大林組技術研究所報告書 No.49 pp31-36
- 3) 家村浩和、五十嵐晃、豊岡亮洋、加振装置による構造物の地震時挙動の再現に関する検討、構造工学論文集 Vol.45A pp719、1999