

実大構造物を用いた ジョイントダンパーシステムの震動制御実験

家村 浩和¹・五十嵐 晃²・豊岡 亮洋³

¹フェロー 工博 京都大学工学研究科 教授 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 Ph.D. 京都大学工学研究科 助教授 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生会員 修(工) 京都大学工学研究科 博士後期課程 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

複数の構造物間をエネルギー吸収装置を介して連結することにより、それらの動的応答を制御する手法としてジョイントダンパーシステム (JDS) がある。この手法の土木・建築構造物の地震時性能の向上を目的とした制震技術としての適用性を実証するため、2棟の実大鋼構造試験架構とバリアブルダンパーを用いた実大試験を行った。試験架構を加振装置により加振した状態で、バリアブルダンパーを線形粘性ダンパーとして制御することにより、実大構造物の地震動入力時の応答を調べた。理論的検討により算出された JDS の連結粘性係数の最適値は妥当であることを実証した。また、入力地震動と制御対象構造物の特性の違いによって、得られる制震効果に大きな差異が生じることを明らかにした。

Key Words : seismic response control, Joint Damper System, variable damper, experimental verification, full-scale test

1. はじめに

近年、相次ぐ大規模地震による被害を受けて、土木構造物には従来にも増して高い地震時性能が要求されている。しかし、想定される入力レベルや地震時性能が高くなるほど大きな変形能や減衰性能が要求されるため、従来の構造設計の枠組みの中での対処のみでそうした高い要求性能を満足することは困難となってくる。このような背景のもとで、ダンパーやアクチュエータ等の付加的な装置を構造物に設置し、それらを適切に同調もしくは制御することにより構造物の応答を低減し、地震時性能の向上を図る、いわゆる制震(振)技術の研究開発が盛んに行われている。

そうした振動制御手法の一つであるジョイントダンパーシステム (Joint Damper System, 以下 JDS と称する) は、振動特性の異なる複数の構造物同士をエネルギー吸収装置などで連結し、その振動性状の差から生じる相対変形を利用してデバイスによるエネルギー吸収を行い、振動応答を低減する制振システムである。この手法は、隣接する高層構造物の同時振動制御を目的として開発されたものであるが、橋梁構造物における桁間の連結装置などにも応用できるものと考えられる。

JDS の基本的な理論をまとめた既存の研究としては次のようなものがある。背戸ら¹⁾は、隣接する高層ビル同士の振動制御手法として、アクチュエータを連結

装置として構造物の相互作用により振動応答を低減させる手法を提案し、その有効性をシミュレーション及び模型実験を通して検証している。

蔭山ら²⁾は、2自由度の隣接構造物を対象として、非減衰系の仮定と PQ 定点理論に基づき、最適な連結剛性および減衰係数を求める手法を提案している。また、この考え方を多質点系に拡張し、連結構造の有効性を数値的に検証している。

また、土木構造物への適用を想定したものとして、阿部・藤野⁴⁾は、パッシブ装置を高架橋の桁間ダンパーとして設置することを想定し、パッシブ装置で連結された簡易な 2 自由度系モデルに対して白色外乱を作用させた場合における正規化応答値を最適化することで、最適な連結パラメータを理論的に求めている。また、このモデルに対して El Centro NS 成分波、Kobe NS 成分波を入力した場合の正規化応答を計算し、得られた最適連結パラメータの妥当性について検討している。

伊津野ら⁵⁾は、JDS の連続高架橋の連結装置としての適用性に関して検討を行っている。この研究においてはアクティブなデバイスを連結装置として用い、比較的制御則が容易な ON-OFF 切り替え制御を用いた場合の動的応答解析を行い、JDS が構造物の非共振化に有効であることを示している。このような研究成果をふまえた上で実際の構造物に適用するにあたっては、実験を重ね、装置や制御系の信頼性を実証することが不

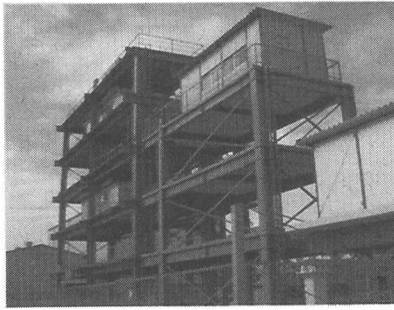


図-1 実大構造実験システム

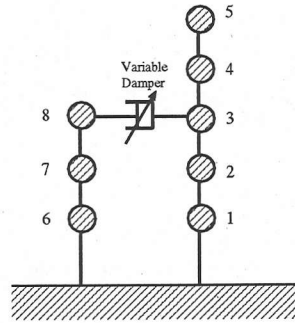


図-3 実大構造実験システムのモデル図

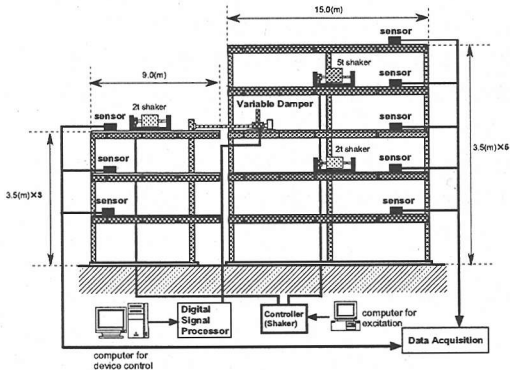


図-2 実大構造実験システム概要図

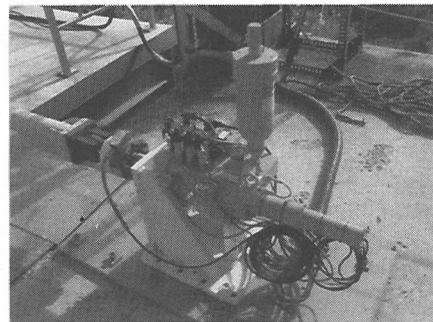


図-4 バリアブルダンパー装置

可欠であると考えられる。

このように、JDSによる制振効果とその有効性は解析により示されているが、実際の構造系にこうした制御を適用するためには、実際に適用されるものに近い作動条件や環境で稼動するデバイスを開発・製作し、実大構造物による実験により発揮性能や適用性、信頼性など、実用化に際してのあらゆる問題点を明確にし、それらを十分に検証する必要がある。この目的のため、著者らは京都大学防災研究所構内において、実大鋼構造試験架構を用いた実大構造実験施設を構築・整備している。本論文は、この実大構造実験施設において、バリアブルダンパー装置を用いたジョイントダンパーシステムの有効性を実験的に検証したものである。

2. 実験システムの概要

図-1 および図-2 に、本研究で用いる実大構造実験施設の写真および実験システムの概念図を示す。以下にこの実験システムの概要について述べる。

(1) 実大鋼構造試験架構

実験対象構造物は、実際の建物構造物と同一スケールを持つ5層、3層の2棟からなる鉄骨フレーム構造

表-1 実大フレーム構造物諸元

(a) 5層構造物

固有モード	1次	2次	3次	4次	5次
固有振動数 (Hz)	1.75	5.42	9.17	14.35	18.68
減衰定数 (%)	1.28	1.0	0.8	0.9	1.1

(b) 3層構造物

3層構造物諸元	1次	2次	3次
固有振動数 (Hz)	2.41	7.23	13.91
減衰定数 (%)	1.47	4.5	5.5

であり、総重量はそれぞれ 163.1 ton, 61.17 ton である。この鉄骨構造は、実際の土木・建築構造物と同等の重量スケールおよび動特性を持つ構造系を構成するものとして構築したものであり、必ずしも実際の建築構造物を想定しているわけではない。図-3 に、解析に用いた本試験システムのモデルを示す。表-1 に示す固有振動数、減衰定数などの動特性パラメータは、実験に先立ち簡易的な同定実験を行って決定した。

(2) バリアブルダンパー装置

本研究において、連結部におけるエネルギー吸収デバイスとして用いたバリアブルダンパー装置（日立製作所製）を図-4 に示す。ここで用いたバリアブルダン

表-2 バリアブルダンパー装置諸元

定格荷重	±50 kN [Dynamic loading]
有効ストローク	±50 mm
最大速度	20 kine
制御方式	電気油圧サーボ
油圧	210 kgf/cm ²
変位, 速度検出	磁歪線式変位検出装置 (非接触) 測定範囲: 0~100 mm
サーボ弁	直動型 60 ℓ/min
定格粘性係数範囲	200~800 kN·s/m

パーは、粘性流体を封入した2つのシリンダをパイプ管で接続して流体の経路とし、その経路上に開度を

外部指令に基づいて調節するサーボバルブを設置した可変減衰ダンパーである。バルブ開度をリアルタイムに変化させることにより、制約の範囲内で任意の粘性減衰を得ることが可能である。バリアブルダンパー装置の諸元を表-2に示す。

この装置を、図-2に示すように3層フレーム3階部と5層フレーム3階部を連結する形で設置している。本研究においては、一定の減衰係数を持つ、線形粘性ダンパー（パッシブダンパー）を想定して実験を行った。このため、速度に比例した制御力を発生する理想的な粘性ダンパーの挙動を再現するようにリアルタイムにバルブ開度を制御する。

本バリアブルダンパー装置における発生制御力 F は、スプール弁開度 $h(0 \leq h \leq 1)$ およびデバイス速度応答 $v(\text{m/sec})$ の関数であり、最大速度付近において次式のようなバルブ開度-発生荷重関係が成立する。

$$|F(v, h)| = \left(\frac{153.3}{h^2} + 306.3 \right) v^2 + \left(\frac{0.1442}{h} + 0.4430 \right) v \quad (1)$$

このように、本装置の制御力には速度の2乗に比例する項が含まれている。この関係式において制御力指令値を、想定する粘性ダンパーより $|F(v)| = C_0 \cdot |v|$ とし、それを満たすように必要なバルブ開度 h を各時刻において求め、指令値とする方法で本ダンパーを制御した。

(3) 制御装置

バルブ開度をリアルタイムに制御するための外部指令信号の生成には、DSPシステムを用いている。このDSPはA/D(12-bit 6CH, 変換時間 $5 \mu\text{sec}$), D/A(16-bit 2CH, 変換時間 $10 \mu\text{sec}$) モジュールおよびDSP(クロック 50 MHz, 命令サイクル 40 nsec) より構成されており、サンプリングは 1 kHz で行った。このシステムにより、データのリアルタイムモニタリング、システム設

定値変更と制御、計測、データの記録などを一元的に管理している。

(4) 加振装置

実大鋼構造試験架構の地震応答状態を再現するため、3層フレームの3階部および5層フレームの2階、4階部に加振装置が設置されている。これらの加振装置は、補助質量、復元バネ要素、サーボモーターから構成されており、サーボモーターに指令を与えることでボールねじにより接続された補助質量を駆動し、その慣性力によって振動を発生させる⁷⁾。補助質量は3層3階、および5層2階設置のものが2 ton、5層4階設置のものが5 tonである。

3. 最適連結パラメータの導出

(1) 最適化基準の設定

本研究における対象構造物に対するJDSの最適連結粘性係数について検討する。JDSにおいては連結部の粘性が低すぎると、2つの構造物は独立な振動性状を示すため連結の効果がなく、逆に粘性が高すぎると2つの構造物が一体的に振動する。いずれの場合においても共振振動数における応答倍率が大きくなる結果となる。これらの2つの場合の間に構造系の応答を最適化するような連結粘性減衰係数が存在することが予想できる⁴⁾。

JDSの粘性係数を振動系のパラメータと見なして、その最適化を行う手法には様々なものが考えられるが、基本的には振動系を構成する2つの構造物の振動特性を統一的に解釈する指標を導入し、その指標の最適化（最大化、最小化）を図ればよいと考えられる。この統一的な指標として、ここでは最大応答変位の低減に着目した正規化応答値、およびダンパーによる付加減衰性能に着目した1次モード減衰定数の2種類を用いる。

(2) 正規化応答値による最適化

連結により共振時の応答の低減率を直接的に把握するため、次式のように定義される、非連結時の共振時最大応答値を基準として連結時の応答の大きさを倍率の形で表す指標を採用した。

$$NR = \left(\frac{\max(|v_{33}|)}{\max(|v_{33(n_j)}|)} + \frac{\max(|v_{55}|)}{\max(|v_{55(n_j)}|)} \right) \quad (2)$$

ここに、 $v_{33(n_j)}, v_{55(n_j)}$ はそれぞれ、連結しない場合の共振点における5層屋上階、3層屋上階の速度応答(相対速度)である。最適値算出にあたっては、入力として正弦波地震、実地震動を想定した場合のそれぞれについて、連結粘性を様々に変化させて応答計算を行い、式(2)に必要な最大応答値を求め、各連結粘性に対する

表-3 最適連結パラメータ（正弦波地震動想定時）

最適化パラメータ	最適連結粘性 (kN/m/sec)	共振振動数 (Hz)
複素減衰定数	257.0	1.81
正規化応答値	180.0	1.79

NR 値を計算した。その上で、この NR 値を最小化するものとして連結粘性を求めた。

(3) 減衰定数による最適化

ここでいう減衰定数とは、連結系全体を一つの振動系と見なした場合の各次モード減衰を指す。JDS においては、1 次モード減衰定数を最大にするような連結粘性減衰係数が存在することが知られている⁶⁾。このことから、主要な振動モードの減衰定数を最大にするような連結部粘性減衰係数を計算することにより、減衰付加性能の観点からダンパーを最適化することができる。ここでは、応答に最も大きく関係してくる減衰定数であることから、1 次モードに対するモード複素減衰定数の最大化を最適化基準とする。なお、モード減衰定数は構造物特性値および連結部の粘性減衰係数により決定される系固有の値であり、入力には依存しない基準である。また、複素固有値解析による最適化は、構造系全体の減衰を最大化することを目的としたものであるため、得られた最適値が各層の最大応答変位については必ずしも最適値とはならないことに注意を要する。

(4) 正弦波入力に対する最適値

入力として、周波数を 1.0 Hz から 4.0 Hz までを範囲とする、振幅 10 gal の正弦波地動を想定する。加振周波数および連結粘性係数の組み合わせを変えて正弦波入力時の時刻歴応答計算を行い、周波数について最大値で、かつ連結粘性については最小値となる、鞍点を与える粘性減衰を求めることにより、正規化応答値による最適化を行った。解析においては、デバイスは理想的な速度比例型の線形粘性要素として設定し、実際のデバイスに生じる摩擦力、剛性要素などの影響は考慮していない。

なお、連結粘性係数によって全体振動系の固有振動数がシフトするため、連結状態における共振振動数は、各々の構造物単位の固有振動数とは異なったものとなる。表-3 に、計算された最適連結粘性係数およびそのときの 1 次固有振動数を示す。

表-3 の結果に示されるように、最適化の基準により得られる最適値も異なったものになるため、要求される制振効果に応じて最適化基準を設定する必要がある。時刻歴応答計算を伴わないことから計算手順としては

表-4 最適連結パラメータ（地震動想定時）

最適化パラメータ	最適連結粘性 (kN/m/sec)	
	ECNS	KBNS
複素減衰定数	257.0	257.0
正規化応答値	58.0	199.0

減衰定数の最適化の方法が有利である。このことは、次節の地震動入力時においても同様である。

なお、正規化応答値の最小化を最適化基準とした場合、ダンパーが発生可能な最低粘性減衰係数の公称値である 200 kN/m/sec をわずかに下回っていることが分かる。このため、この最適化基準を用いたダンパーの最適化を図る場合は、準最適値として 200 kN/m/sec を与えることとした。

(5) 実地震入力下における最適値

次に、地震作用下における JDS の最適連結粘性係数を計算する。想定する地震動としては、エル・セントロ NS 成分波 (1940, 以下 El Centro NS と呼ぶ。図表中では ECNS と表記) および神戸海洋気象台記録 NS 成分波 (1995, 以下 Kobe NS と呼ぶ。図表中では KBNS と表記) を、ともに最大振幅を 10 gal にスケーリングしたものを想定する。時刻歴応答計算の条件および最適化に用いるパラメータは正弦波地震動の場合と同一である。表-4 に、各地震動について計算された最適連結粘性係数の値を示す。

本節で計算した連結粘性係数の最適値に基づき、JDS の効果と JDS の設定方法の妥当性を実大実験により検討する。

4. 正弦波入力想定実験

(1) デバイス挙動の再現性

実験を行うにあたって、バリアブルダンパー装置を線型粘性ダンパーとして制御を行った場合に実現される挙動を確認するため、加振振動数 1.0 から 4.0 Hz の範囲における正弦波地動 (最大加速度 10 gal) 作用時の装置の応答を調べる試験を行った。加振装置への指令に関しては、加振装置のストローク制約を満足しかつ構造物の弾性応答範囲内で実験を行うという条件より、地動最大加速度が 10 gal になるように指令値を作成した。この条件は正弦波入力時の非連結共振時における応答から算出したものである。加振振動数は 0.5 Hz 間隔で変化させた。連結粘性係数として 200, 400, 600 kN/m/sec の 3 種類の値を設定したときの、各振動数におけるデバイスの変形、速度、制御力の最大値と加振振動数の関係を 図-5 に示す。図中の丸が実験値、実線がモデルに基づき求めた解析値である。この図より、実

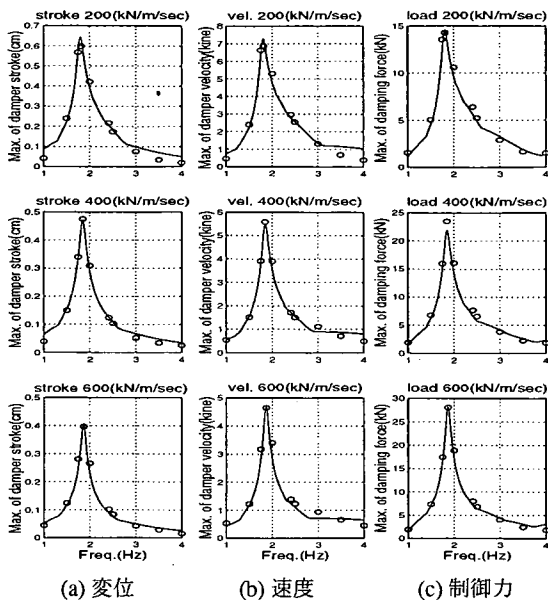


図-5 各粘性減衰係数におけるデバイスの周波数応答

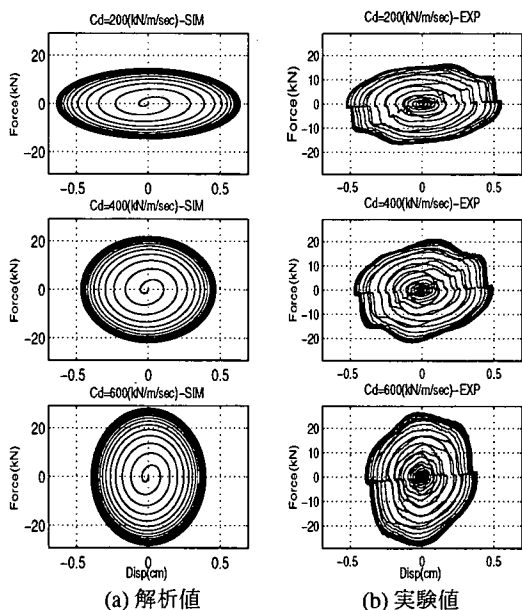


図-6 各粘性減衰係数における荷重-変形履歴関係(共振時)

実験値と解析による予測値とは良好な一致を示していることが分かる。

また、連結粘性として 200, 400, 600 kN/m/sec の 3 種類の値を設定したときの、連結時の 1 次固有振動数における荷重-変形履歴を図-6 に示す。この図より、連結剛性および装置の摩擦の影響がうかがえるものの、履歴形状はおおむね良好な一致をみせていることが分かる。

この結果より、設定周波数全域にわたって比較的良

好に線型粘性ダンパーの挙動が再現可能な制御システムであることが確認された。ただし、図-5 においては、3 Hz 以上の振動数の場合に若干の応答値誤差が生じている。これは、加振誤差および構造物、デバイスのモデル化誤差が原因として考えられるが、こうした振動数では応答倍率が低く、応答にあまり大きな影響を与えないため、実験を行う上でのデバイスの制御には支障はほとんどないものと考えられる。

(2) 複素固有値解析による最適パラメータ

前述のように、複素固有値解析に基づく最適連結粘性係数は、連結された構造物を一体と見なした場合の構造系の複素 1 次モードの減衰定数を最大化するものである。前節における正弦波加振試験の結果を用いてこの最適性を検討する。まず非連結の場合と連結の場合とで、速度応答の Fourier スペクトルを計算し、構造系の 1 次モード固有振動数におけるスペクトル値を算出する。非連結、連結の場合のこれらの値をそれぞれ V_{nj} , V_j とする。いま、構造系として 1 自由度系構造物を想定し、共振振動数による調和地盤振動を仮定した場合、その動的応答倍率は近似的には減衰定数に逆比例する。このことから、5 層・3 層連結モデルにおける、非連結時および連結時の 1 次減衰定数をそれぞれ h_{nj} , h_j とすれば、

$$V = \frac{V_{nj}}{V_j} \propto \frac{h_j}{h_{nj}} \quad (3)$$

なる比例関係が成立する。 h_{nj} は一定値であるため、この V を最大化すれば、それは 1 次モードの減衰定数を最大化することと等価となる。多自由度系については、運動方程式をモード分解することにより、1 次モード応答については、

$$\ddot{q}_1 + 2h_1\omega_1\dot{q}_1 + \omega_1^2q_1 = -\phi_1^T M \{1\} \ddot{z} + \phi_1^T D u \quad (4)$$

なる運動方程式が成立する。 ϕ_1 はモードマトリクスの 1 次モード成分に相当するベクトルである。いま、構造物の速度応答はモード応答とモードマトリクスにより

$$\dot{x} = \Phi \cdot \dot{q}(t) \quad (5)$$

と表せられるが、共振振動数においては他の振動モードの影響は相対的にかなり少ないと仮定し得るため、近似的に

$$\dot{x} \cong \phi_1 \dot{q}_1(t) \quad (6)$$

と表せられる。このことから、5 層 5 階部の 1 次速度モード応答は

$$\dot{q}_{1,5}(t) = \frac{\dot{x}_5}{\phi_{1,5}} \quad (7)$$

と表せられる。ここに、 $\phi_{1,5}$ は 1 次固有モードベクトル ϕ_1 の 5 階部に相当する要素である。このようにして

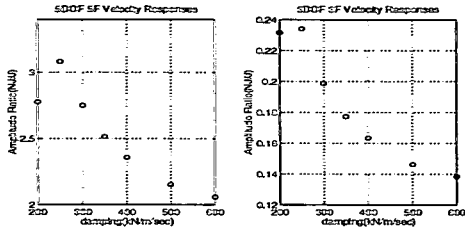


図-7 Fourier 振幅比 V の比較

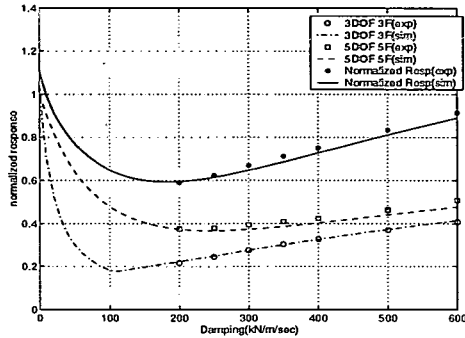


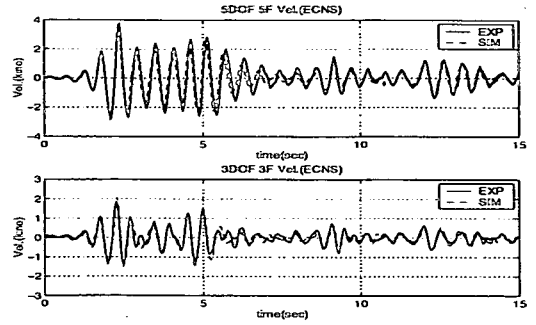
図-8 正規化応答値の比較

計測した1次モード応答に対して式(3)と同様の形で減衰定数の比を評価することが可能である。

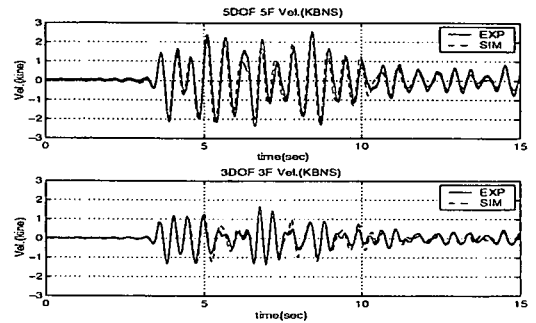
図-7には、各連結粘性における共振周波数を設定した最大値10 galの正弦波を入力した場合について、速度応答として5層5階部、および3層3階部応答をとった場合のFourier振幅比 V を実験値より計算したものを示す。振動の1次モード成分のみを抽出しているため、これらの2つの値はそれぞれ5層構造物、3層構造物全体に付与される1次モード減衰量に逆比例するパラメータと考えられる。この図より、連結粘性が計算上の最適値である250 kN/m/secの付近で最大値をとっていることが分かる。本実験結果は、複素固有値解析より導出された最適連結粘性が実験上もほぼ最適値であることを示唆している。

(3) 正規化応答による最適パラメータ

図-8に、実験により得られた正規化応答値と連結粘性係数の関係を示す。モデルの解析に基づく予測値を比較のため併記している。図には、正規化応答値(NRノルム)の他、3層3階相対速度、5層5階相対速度の正規化応答値も示している。この正規化応答値は、バリアブルダンパー装置が発生可能な最小の減衰係数である200 kN/m/secにおいて最小値をとり、それ以上では一様増加する傾向が実験、解析値ともにみられ、解析による正規化応答値の評価の妥当性を実験的に裏付けるものである。



(a) El Centro NS(10gal)



(b) Kobe NS(10gal)

図-9 実験により得られた屋上階速度応答比較

5. 地震波入力想定実験

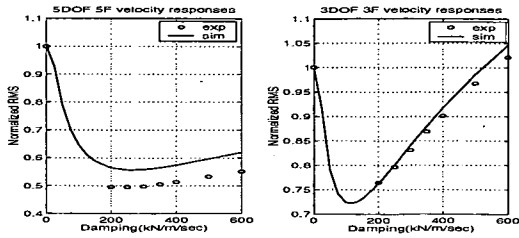
JDSおよび粘性ダンパーの、制振システムとしての実際の構造物への適用性を検証するため、実地震動入力下における挙動および地震時性能についても実験を行った。以下では、実地震動入力を想定した実大実験の結果について述べる。

(1) 実験条件

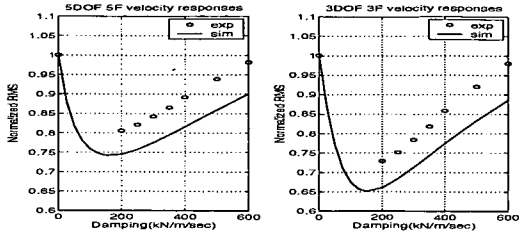
El Centro記録NS成分およびKobe記録NS成分を実験に用いる想定地震動入力とした。正弦波入力時の実験結果との対比を行うため、地動最大加速度を10 galにしたものを用いた。なお、本ダンパー装置の制約上、200 kN/m/secより低い連結粘性係数は実現することが不可能であったため、実験的な検討においては連結粘性減衰係数は、200、250、300、350、400、500、600 kN/m/secの7ケースを設定した。

(2) 時刻歴応答の比較

連結部の粘性を200 kN/m/secに設定したときの、3層および5層最上階における速度時刻歴応答を、図-9に示す。4段の図のうち、(a)は入力をEl Centro NS成分波に設定した場合における比較であり、(b)は入力をKobe NS成分波に設定した場合である。



(a) El Centro NS(10gal)



(b) Kobe NS(10gal)

図-10 正規化 RMS 応答値 (5 層, 3 層屋上階速度応答)

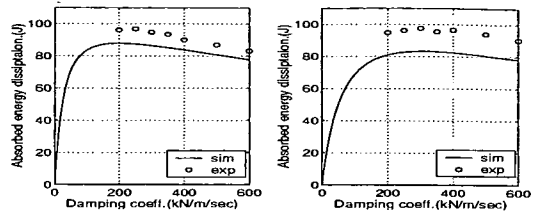
これらの結果を見ると, El Centro NS 入力, Kobe NS 入力の場合ともに, ピーク, 波数ともに解析結果と良好な一致を示していることが分かる。

(3) RMS 応答の比較

実験における時刻歴応答の, 全制御時間を通しての一致度を定量的に把握するための指標として, 正規化 RMS 応答値による比較を行った。正規化 RMS 応答値は, 連結時の RMS 応答の, 非連結時の RMS 応答値に対する比を次式のように定義したものである。

$$RMS_n = \sqrt{\sum_{i=1}^N v_i^2 / T} / \sqrt{\sum_{i=1}^N v_{i(nj)}^2 / T} \quad (8)$$

ここに, N はデータ数, T は制御時間, v_i , $v_{i(nj)}$ はそれぞれ連結した場合および非連結の場合の i 階における相対速度応答であり, ここでは 3 層, 5 層の両構造物の屋上階における相対速度応答を用いる。El Centro NS 成分波, および Kobe NS 成分波を入力とした場合の, 3 層, 5 層の両構造物の相対速度応答に関する正規化 RMS 応答値を 図-10 に示す。これらの実験結果と解析による予測値の比較から, 2 つの地震動入力ともに, 時刻歴応答の再現性は非常に良好であることが分かる。ただし, El Centro NS の場合, 予測値が実験値をわずかに上回っており, また Kobe NS の場合, 予測値が実験値をわずかに下回っている。この原因としては, 比較的高い周波数における加振精度, モデルの同定精度, 装置の非線型特性などが考えられる。



(a) El Centro NS(10gal)

(b) Kobe NS(10gal)

図-11 履歴吸収エネルギー量の比較

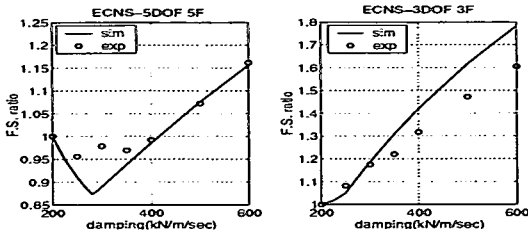
(4) 履歴およびエネルギー吸収性能の比較

JDS におけるダンパーの履歴吸収エネルギーに着目した検討を行う。連結粘性係数と, 制御終了時 (20 sec) までの履歴吸収エネルギー量の関係を, 解析値と比較して 図-11 に示す。

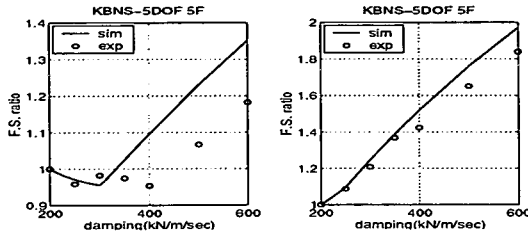
基本的には, El Centro NS, Kobe NS のどちらの地震動入力を用いた場合も, 吸収エネルギー量の傾向は良好な一致がみられるが, 吸収エネルギー量自体は常に実験値の方が大きくなっている。この原因は, 加振精度に起因する誤差, および速度の小さい領域におけるデバイスの摩擦力の影響の 2 つの要因によるものが考えられる。すなわち, 速度応答の大きな領域においては実験における加振精度が若干失われることに起因して解析値との誤差が生じており, 逆に速度応答が小さな領域では, 解析において実際のダンパーの制御によっても解消できない摩擦を考慮していない影響が生じている。

(5) 複素固有値解析による最適パラメータ

地震動入力の場合について Fourier スペクトルの比と連結粘性係数の関係を 図-12 に示す。図の縦軸は, 連結粘性を 200 kN/m/sec とした場合の Fourier スペクトルの 1 次モード振動数での値を基準として, 他の連結粘性を与えた時の 1 次モード振動数における Fourier スペクトル値を倍率の形で表している。(a) の El Centro NS, (b) の Kobe NS の各々について, 5 層と 3 層の双方の構造物の屋上階速度応答に基づく結果を示している。実験, 解析とも, バリアブルダンパー装置の発生可能な連結粘性である 200 kN/m/sec 以上を対象に検討した。いま, 表-4 に示した最適連結粘性である 257.0 kN/m/sec において 1 次モード減衰が最大となるとすれば, この連結粘性は応答の 1 次モード振動数における Fourier スペクトルの比を極小にすることが予想される。図-12 より, 基本的にはどちらの地震動においても, 5 層最上階については解析上の最適値である 257.0 kN/m/sec 付近において, また 3 層については 200 kN/m/sec 付近においてそれぞれ Fourier スペクトル比の極小値が確認でき, 解析上の最適値付近において最も良好な付加減衰性能が

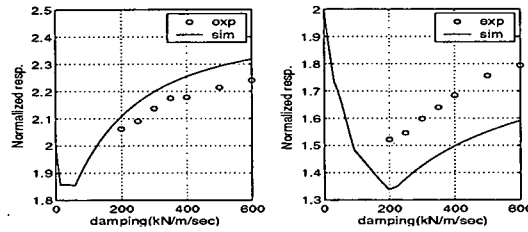


(a) El Centro NS(10gal)



(b) Kobe NS(10gal)

図-12 Fourier スペクトル比



(a) El Centro NS(10gal)

(b) Kobe NS(10gal)

図-13 正規化応答の比較

得られていることが分かる。5層構造物については、解析による予想とは異なり、極小値が複数確認でき、解析との変動も3層構造物に比べると比較的大きいが、これは高次モードの影響と考えられる。全体的な実験値の傾向としては、本研究で用いたバリアブルダンパー装置の下限値付近の200-250 kN/m/secで最適状態が得られており、付加減衰最大化の観点から導かれた複素固有値解析による最適値は、実験的にもある程度確認できたと考えられる。

(6) 正規化応答による最適パラメータ

地震動入力時の正規化応答と連結粘性係数の関係を図-13に示す。この図より、応答値は連結粘性係数の増加に伴って単調に増加する傾向を示しており、解析の傾向と一致する。なお、計算上はEl Centro NS入力の場合、最適値が58.0 kN/m/secで得られているが、この値は本研究で用いたバリアブルダンパー装置の下限減衰係数をかなり下回っており、実験においてこの減衰値を再現することができなかった。そのため、以降の

議論においては、本試験構造物およびバリアブルダンパー装置の制約を考慮した結果として、計算上の最適値に最も近く、かつ実現可能な値として、最適な連結粘性を200 kN/m/secと設定した。

ただし、この連結粘性を設定したEl Centro NS入力の場合、NR値が2を越えており、最大応答値で見た場合にはJDS構造は不利なものとなっている。これは、NR値の算出にあたっては5層および3層最上階の最大応答の和を用いているが、次章の図-14に示すように、5層の最大応答は低減されるが、3層の最大応答は逆に増大したためである。これら最大応答は、連結による共振点の移動量と地震動の卓越周期の関係によって変化するものであるため、実際の構造系に適用するにあたっては、連結後の共振点が想定地震動の卓越周期に近くならないよう、質量や剛性といった構造パラメータを調整する必要があると考えられる。

(7) 地震動作用下における最適パラメータの設定

以上の検討により、地震動作用時の最適値導出に関して次のような結論を得た。

- 最大付加減衰性能を目的とした場合、El Centro NS入力、Kobe NS入力とも、連結粘性が200-250 kN/m/sec付近で最適な状態を得た。これは解析により予測された最適値に近いものであった。
- 最大応答低減を目的とした場合の結果を正規化応答により検討したところ、バリアブルダンパー装置の性能範囲である200-600 kN/m/secの連結粘性において、解析と実験の値、傾向は良い一致を見せた。ただし、解析的に最適と予測された連結粘性をデバイスが再現することが不可能であったため、実現可能な最小の連結粘性である200 kN/m/secを準最適値として採用した。

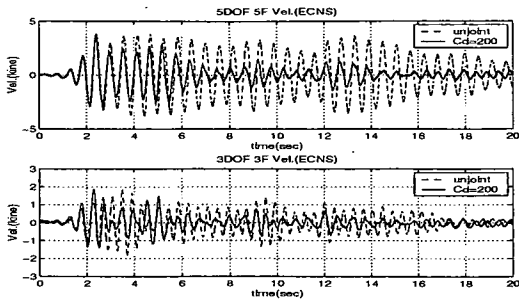
次章においては、連結粘性を200 kN/m/secとした場合について、JDSの振動制御効果を地震波別に検討する。

6. 地震時のJDSの制振効果に関する検討

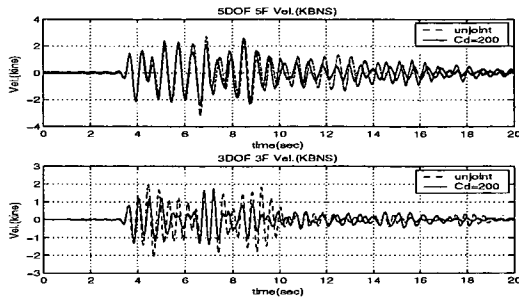
JDSによる構造物の地震応答低減の有効性を検討するため、前節で定めた設定値に基づいて連結して実験を行った場合の地震応答を、非連結状態と比較する。また、入力地震動による応答低減効果の相違に着目した検討を行う。

(1) 応答最大値の低減効果

非連結の場合と、連結粘性係数を計算上の最適値である200 kN/m/secに設定した場合における、両構造物の相対速度応答の比較を図-14に示す。ここでは、3層、5層の両構造物の屋上階における速度応答時刻歴を示



(a) El Centro NS(10gal)



(b) Kobe NS(10gal)

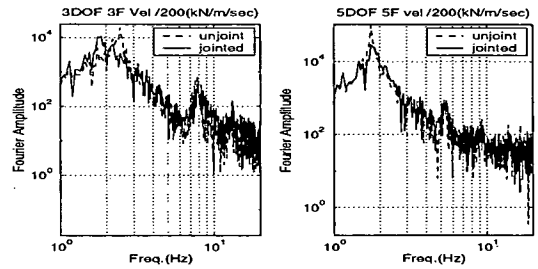
図-14 時刻歴応答(実験値)比較

している。入力として El Centro NS および Kobe NS を用いた。また、図-15には Fourier スペクトルを比較して示す。ここでは、3層、5層の両構造物の屋上階における速度応答時刻歴を示している。図の結果を見る限り、JDS を設置しても応答最大値に差異はあまり見られない。

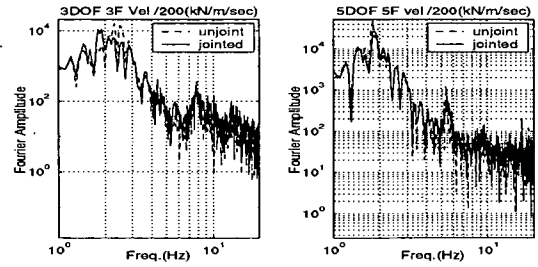
このことは、構造系のインパルス応答関数により説明できる。非連結の場合と、200 kN/m/sec の連結粘性を設定した場合において、単位のインパルス加速度入力作用した場合の相対速度応答の解析値の比較を図-16に示す。連結によって構造系には減衰が付加されサイクル毎の応答振幅の減衰は大きくなっているが、第1サイクルのピーク値の大きさにはほとんど影響がないことが分かる。構造系の地震入力時の最大応答は、入力開始直後の立ち上がり部におけるインパルス応答関数に大きく影響されることから、最大応答低減には目立った効果は現れないことになる。このことは、JDS の性能を検討する際には注意する必要がある。

(2) エネルギー吸収性能

JDS による効果を、振動エネルギーの観点から検討するため、構造物の振動エネルギー、ジョイントダンパーによる吸収エネルギー、構造系全体での吸収エネルギー、構造系に入力される地震エネルギーの時間変化を図-17に示す。



(a) El Centro NS(10gal)



(b) Kobe NS(10gal)

図-15 Fourier Spectrum 比較(非連結・連結)

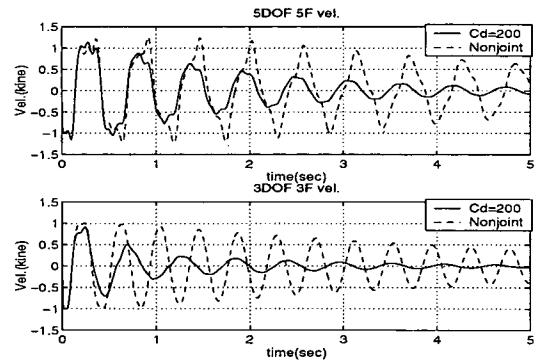


図-16 インパルス応答関数の比較

構造物の振動エネルギー(図中(a))に着目すると、El Centro NS 入力の場合、連結時のエネルギーの急激な減少が見られるのに対し、Kobe NS 入力の場合の減少効果は小さい。この理由として、(d)に示されているように、El Centro NS 入力の場合、連結状態と非連結状態では入力エネルギーはほぼ違いが無いのに対し、Kobe NS 入力の場合は連結によって約2倍近く増加していることが挙げられる。図-18には、非連結の場合と200 kN/m/sec で連結した場合の、5層と3層構造物の屋上階速度応答に関する周波数応答関数を示す。前述のように、連結によって構造系の固有振動数が変化するため、El Centro NS 入力の場合、結果的に入力エネルギーが減少しているのに対し、Kobe NS 入力の場合、連結により固有振動数がシフトして固有モード付

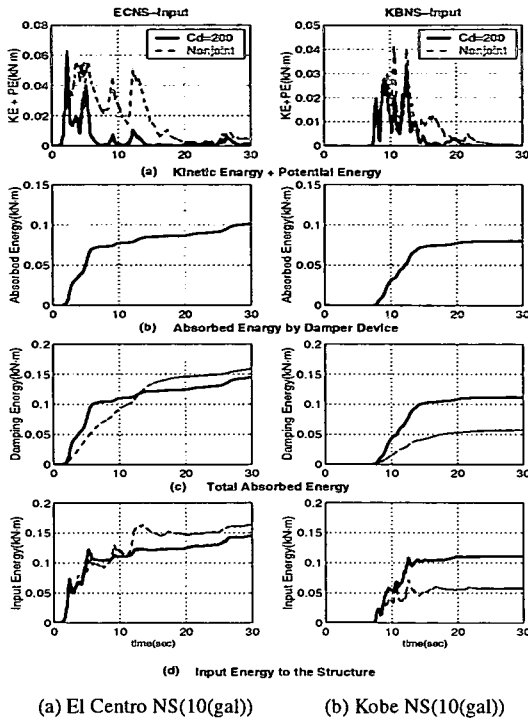


図-17 エネルギーの時刻歴変化

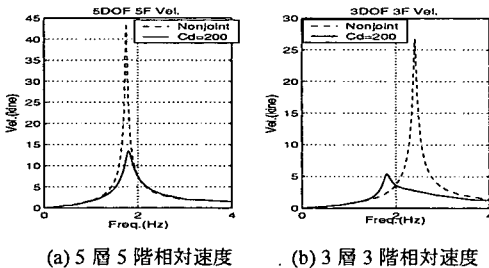


図-18 連結による周波数応答の変化

近を励起したため、入力エネルギーが増大したものと解釈できる。この入力エネルギーの増加分は、(b)、(c) 図に示すようにダンパー装置により吸収されたことで相殺されるが、Kobe NS 入力の場合にはそれでも入力エネルギーの増加分を吸収するには至らなかったものと考えられる。これは、連結粘性のみによる JDS の性能の限界を示すものであるが、同時に効果の高い JDS の動作原理を考える上では、非共振化が大きな要素であることを示唆するものである。

(3) 応答低減効果

JDS の応答低減効果を、エネルギー吸収の時間的な変動の観点から検討する。El Centro NS 入力の場合、非

連結の場合の入力エネルギー変化(図中 (d))は、立ち上がり部に比較的小さな入力エネルギーが存在し、その後長めの継続時間内に平均的にエネルギーが入力されるという特性を有している。一方、Kobe NS 入力の場合、短時間(10 sec 付近)の間に集中的にエネルギーが入力されている。図-16からも分かるように、JDS のインパルス応答は、連結粘性の有無に関わらず、入力直後の応答振幅にはほとんど影響がなく、エネルギー吸収により応答振幅の低減効果を発揮するという特性を有している。このことから、El Centro NS 入力のように、エネルギーが継続時間内において平均的に入力されるような場合、入力直後を除いて大きな減衰効果を発揮することが可能であることが分かる。

(4) 地震時の JDS の効果に関する総括

実験結果に基づいた以上の考察より、地震動作用下における JDS の応答制御効果の特性は次のようにまとめられる。

- 入力地震動の特性として、入力エネルギーが時間的に分散しているものについては減衰効果が期待できる。
- 逆にエネルギーが短時間に集中する入力については、効果的に減衰を得ることは難しい。
- いずれの場合にしても、JDS に粘性ダンパーを用いる場合、入力立ち上がり直後の応答の低減性はほとんど期待できない。
- エネルギー吸収効果とは別に、連結による非共振化により構造特性を変化させることで振動応答を低減することが可能である。ただし、入力の卓越周波数成分によっては逆効果となる可能性もある。

7. 結論

本研究においては、バリエブルダンパーを粘性ダンパーとして機能させた場合の JDS の効果を実験により検証した。以下に、本研究で得られた知見を述べる。

- 装置の性能試験、アルゴリズムの検討を行うとともに、解析的に予測された最適な連結粘性の確認、および地震動作用時の装置・構造物の挙動について実験を行った。
- 正弦波地震動を想定した実験により、バリエブルダンパーの良好な制御が可能であることを示すとともに、解析的に得られた最適な連結粘性減衰係数の妥当性を確認した。
- 実地震動を想定した実験により、El Centro NS 入力のように構造物に入力される地震エネルギーが長時間に分散する場合は、デバイスのエネルギー吸収による減衰性能の増加が期待できること、Kobe

NS入力のような短時間において入力エネルギーが集中する場合は、連結に伴う非共振化が重要であることを示した。

たとえば、本研究の結果を踏まえるとJDSの実際の構造物への応用として、免震化された高架橋間の連結ダンパーとしての適用が考えられる。免震橋梁においては、支承剛性の選択によって隣接する橋梁の固有振動数比を調整することが可能であるため、最大応答低減やエネルギー吸収最大化などの基準のもとに、JDSにとって効果的な振動数比を与えることが可能であると考えられる。このように、高架橋の免震化により橋脚の塑性化を防止すると同時に、桁部の応答変位をJDSにより吸収するシステムとして適用することが有効であろう。その場合、連結後の共振振動数を想定する地震動の卓越周波数から十分離すように設計することが必要である。また、最大応答の低減を図るのであれば、同様に連結構造系のパラメータ調節と最大応答計算とを併用した形で最適化を行う必要がある。さらに、デバイスの特性を実時間で変化させるセミアクティブ制御あるいはアクティブ制御を用いて対応する方法も考えられる。

謝辞：本研究は、日本学術振興会の平成9-12年度未来開拓学術研究推進事業「大地震対応のインテリジェント制震構造の開発」(代表者：西谷章(早稲田大学))の一つの拠点研究「インテリジェント制震機構の実大構造物実験」(代表者：家村浩和)として行われたものであり、実験の遂行にあたっては各方面よりご助力を頂いた。また、バリアブルダンパー装置の製作、実験に関しては(株)日立製作所の今野隆男、堀内敏彦、堂園美礼の各氏をはじめとする関係各位にご助力頂いた。ここに記して謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) 背戸一登, 富波佳均, 松本幸人, 土井文夫: 並立する弾性構造物のモデル化法と振動制御法(超々高層ビル実現のための基礎研究), 日本機械学会論文集(C編) 61巻 585号, pp.145-151, 1995.
- 2) 蔭山 満, 安井 譲, 背戸一登: 連結制振におけるダンパーの最適配置に関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム STS6-3, pp.257-262, 1998.
- 3) 田村 和夫, 林 康裕, 渡辺 宏一: 鋼材ダンパーで連結した連層壁制振架構の振動特性, 第10回日本地震工学シンポジウム H2-12, pp.2823-2828, 1998.
- 4) 阿部 雅人, 藤野 陽三: 高架橋全体系の耐震性能の向上を考えたパッシブ制震装置の最適化, 土木学会論文集 No.605/I-45, pp.241-252, 1998.
- 5) 伊津野 和行, 川村 弘昌, 森 泰樹, 小林 紘士: 簡易アクティブ制御連結システムによる線状に連続する構造物の地震応答制御の試み, 土木学会論文集 No.647/I-51, pp.229-240, 2000.
- 6) 家村 浩和, 五十嵐 晃, 藤原 寅士良: ジョイントダンパーによる隣接構造物の震動制御と最大応答の評価, 第52回年次学術講演会 I-B156, pp.312-313 1997.
- 7) 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, 第45回構造工学シンポジウム Vol.45A, pp.719-726, 1999.
- 8) 家村 浩和, 五十嵐 晃, 豊岡 亮洋: バリアブルジョイントダンパーによる実大構造物の振動制御実験; 第2回免震・制震コロキウム, pp.91-98, 2000.
- 9) 家村 浩和, 五十嵐 晃, 豊岡 亮洋: ジョイントダンパーを用いた実大構造物の震動制御実験, 第2回日本制振(震)シンポジウム, pp.121-128, 2000.
- 10) 柴田 明徳: 最新 耐震構造解析, 森北出版, 1986.
- 11) 山口 宏樹: 構造振動・制御, 共立出版, 1996.

(2001. 6. 11 受付)

FULL-SCALE EXPERIMENT OF THE JOINT DAMPER SYSTEM FOR STRUCTURAL VIBRATION CONTROL

Hirokazu IEMURA, Akira IGARASHI and Akihiro TOYOOKA

The aims of this paper is to verify the efficacy of Joint Damper System (J.D.S.), which is one of the structural control method that can reduce dynamic responses of multiple structures by connecting these structures with energy absorption devices. For this purpose, full-scale structural vibration control experiment with using variable damper device is executed. This device is controlled so that it works like an idealized viscous damper device.

As a result, validity of the analytical solutions of the optimal joint damper coefficients is confirmed. Also, it is shown that control effects of Joint Damper System differ greatly in accordance with the characteristics of earthquake and structural parameters.