

実大構造物を用いたJDSの制振効果 に関する実験的検討

家村 浩和¹・五十嵐 晃²・豊岡 亮洋³

¹フェロー 工博 京都大学大学院教授 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)

²正会員 Ph.D. 京都大学大学院助教授 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)

³学生員 京都大学大学院博士課程 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)

本論文においては、ジョイントダンパシステム (JDS) の有効性を実大実験により検証するため、京都大学防災研究所に設置された実大構造実験システムを用いて、2つの構造物を連結したJDSの震動制御効果を検証した。連結デバイスとしてバリアブルダンパー装置を用い、理想的な粘性ダンパーの挙動を再現するように制御した。装置の性能試験を行うとともに地震動入力を想定した実験を行い、理論的および数値的に導かれる最適連結粘性係数の最適性を確認するとともに、地震動作用下においてJDSを用いた場合、入力地震動の特性によって得られる制振効果に差が生じることを示した。

Key Words : full-scale experiment, Joint Damper System, variable damper device

1. はじめに

近年、ダンパーやアクチュエータといった付加的なデバイスを構造物に設置し、それらを適切にチューニングもしくはコントロールすることにより構造物の振動を低減する、いわゆる制震(振)技術の研究が盛んに行われている。特に、近年相次いで発生した大規模地震の被害を受けて、その重要性はますます高いものになりつつある。

ジョイントダンパシステム (Joint Damper System, 以下 JDS と称する) は、そうした実際への適用性が高いと考えられる振動制御理論の一つである。JDS とは、振動特性の異なる複数の構造物同士をエネルギー吸収デバイスなどで連結し、振動性状の差により生じる相対変形などを利用してデバイスによりエネルギー吸収を行い、振動応答の低減を図る制振システムのことである。

こうしたJDSによる制振効果については、解析的にはその有効性が示されているが、実際の構造系にこうした制御を適用するためには、シミュレーションの他に、実際に適用されるものに近い条件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その性能や適用性、信頼性を十分に検証する必要がある。この目的のため、現在京都大学防災研究所構内において構築・整備された、実大構造実験施設において実験がすすめられている。本論文は、この実大構造実験施設を用いた、ジョイントダンパシステムの有効性の実験的な検証の概要について述べる。

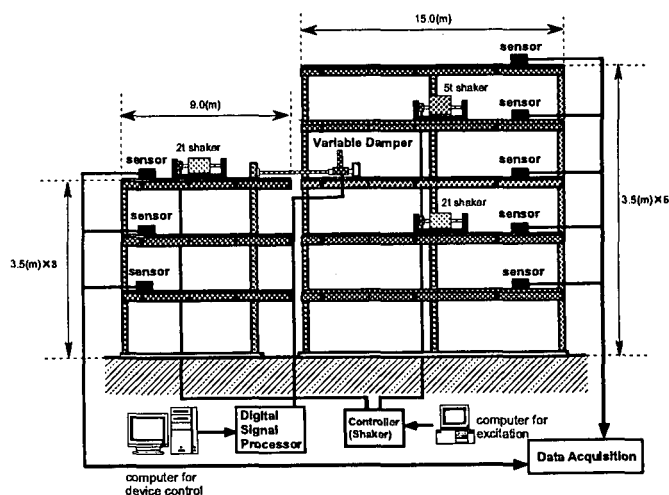


図-1 実大構造実験システム概要図

2. 実験システムの概要

図-1に、本研究で用いた実大構造実験施設の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) 実大フレーム構造物

実験対象構造物である5層構造物と3層構造物は、ともに実際の建物構造物と同一スケールを持つ鉄骨フレーム構造であり、表-1に示すような特性を有している。

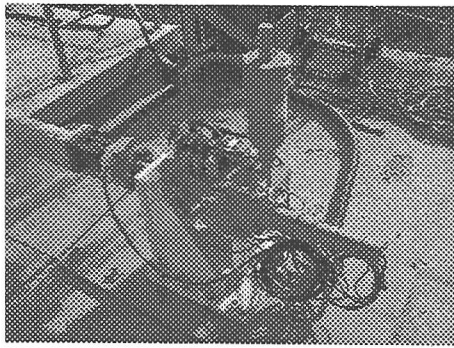


図-2 バリアブルダンパー装置

表-1：実大フレーム構造物諸元

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

5層構造物諸元					
モード	1	2	3	4	5
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

(2) バリアブルダンパー装置

本研究においては、連結部におけるエネルギー吸収デバイスとして、図-2に示すようなバリアブルダンパー装置（日立製作所製）を用いる。バリアブルダンパーとは可変減衰ダンパーのことであり、粘性流体を封入した2つのシリンダ室の間をバイパス管で接続し、そのバイパス管に開度を外部指令に基づいて調節するバルブを設置したものである。このバルブ開度を変化させることにより、ダンパーの物理限界の範囲内で任意の粘性減衰係数を得ることができる。この調節はリアルタイムに行なうことが可能である。実大構造実験施設に設置したバリアブルダンパー装置の諸元を表-2に示す。

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)
検出装置	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)
定格粘性範囲	200~800 (kN・s/m)

このダンパーを、図-1に示すように3層3階部と5層3階部を接続する形で設置している。このダンパー

は、リアルタイムに減衰係数を変化させることが可能であるが、本研究においては、一定の減衰係数を保持させる、粘性ダンパー（バッシブダンパー）としての実験を行うものとする。このため、バルブ開度をリアルタイムに制御することにより、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させる。ダンパー装置はバルブ開度をリアルタイムに制御することで装置特性をリアルタイムで可変にすることが可能であり、制御にはDSPを用いている。

本バリアブルダンパー装置における発生制御力 F は、バルブ開度 $h(0 \leq h \leq 1)$ およびデバイス速度 $v(\text{m/sec})$ 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。

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

このように、本装置では速度の2乗に比例した制御力が発生する。従って、本ダンパーを粘性ダンパーとして用いるには、この関係式において制御力指令値を $F(v) = C_D \cdot |v|$ と設定し、それをもとに必要なバルブ開度 h を求め、この h を各時刻において指令値として与えることで制御を行う。

3. 最適連結パラメータの導出

(1) 最適化基準の設定

実験を行うにあたって、本研究で想定している粘性ダンパーを用いたJDSの最適パラメータについて検討する。JDSにおいては連結部が柔らかすぎると連結の効果がなく、2つの構造物は独立な振動性状を示し、逆に固すぎると2つの構造物が一体的に振動し、いずれの場合も共振時の応答が大きくなる。そこで、2つの構造物を一つの構造系と見なした場合、そ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測できる。

2つの構造物の応答に関する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、ここでは正規化応答値を用いる。

(2) 正規化応答値による最適化

応答ノルムなど、構造物の応答をそのまま指標として用いた場合、その大きさは入力規模に依存したものになり、相対的な比較しか行うことができない。そこで、非連結時の共振時最大応答を基準としたときに、連結時の応答がどれほどの大きさになっているかを倍率の形で表すことを考える。これにより、連結時の共振応答の低減性を直接的に把握することができる。こ

ここでは、次式のような指標を採用した。

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

ここに、 $v_{33(nj)}$ 、 $v_{55(nj)}$ はそれぞれ、連結しない場合の共振振動数における5層、3層の屋上階における速度応答である。この最適化基準を用いて、入力として正弦波地震、実地震動を想定した場合に、それぞれ正規化応答を最小とするような粘性減衰係数を計算する。

(3) 実地震入力下における最適値

エル・セントロ NS 成分波 (1940, 以下 El Centro NS と称する。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 と称する。図表中では KBNS と表記) を、ともに最大振幅を 10(gal) にスケールしたものを入力として想定する。モデルに基づく検討の結果、最適な連結粘性は El Centro NS 入力の場合 58.0(kN/m/sec)、Kobe NS 入力の場合 199.0(kN/m/sec) であった。

以下では、この最適値の妥当性と再現性、及び JDS の効果を実大実験により検討する。なお、正規化応答値をパラメータとした場合、ダンパーの公称値としての発生可能な粘性減衰係数である 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、これら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) を与えるのが妥当と考えられる。

4. 地震波入力想定実験

デバイスの挙動に関して、正弦波入力を想定した実験により、モデル及び制御則の妥当性が示されている⁴⁾。ここでは、実地震動入力を想定して行った実大実験の結果について述べる。

(1) 実験条件

実験に用いる地震動入力として、装置の制約を考慮して El Centro NS 成分波および Kobe NS 成分波を、それぞれ最大加速度を 10(gal) にスケールしたものを設定する。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) 履歴およびエネルギー吸収性能の比較

ダンパーの挙動について、履歴吸収エネルギー量に着目した検討を行う。図-3 には、El Centro NS 成分波および Kobe NS 成分波を入力として連結粘性を変えた場合の、制御終了時 (20(sec)) における履歴吸収エネルギー量を、解析値と比較して示す。

これらの比較より、基本的にはどちらの地震動入力も考えた場合も吸収エネルギー量の傾向は良好にな

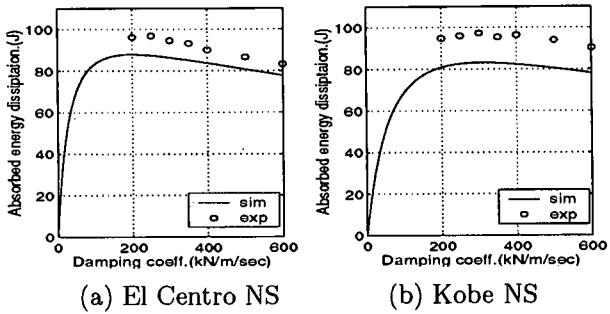


図-3 履歴吸収エネルギー量の比較 (左:ECNS/右:KBNS)

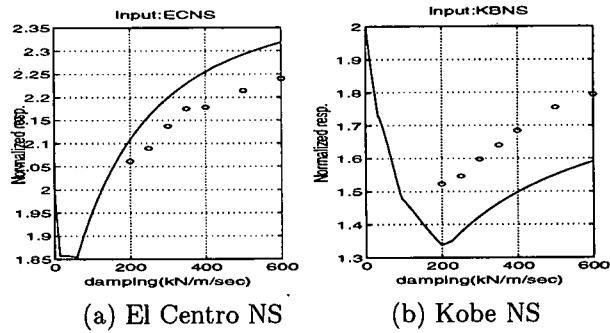


図-4 正規化応答の比較

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。この原因としては、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装置の摩擦の影響が考えられる。すなわち速度応答の大きな領域においては加振に起因する誤差が卓越し、逆に速度応答が小さな領域では、解析において摩擦を考慮していない影響が卓越していると考えられる。

(3) 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の比較を図-4 に示す。これらより、やはり応答値は単調に増加する傾向を示している。このことから、正規化応答をパラメータとした場合も、最適値を 200(kN/m/sec) に設定することの妥当性が実験的に示されていると考えられる。

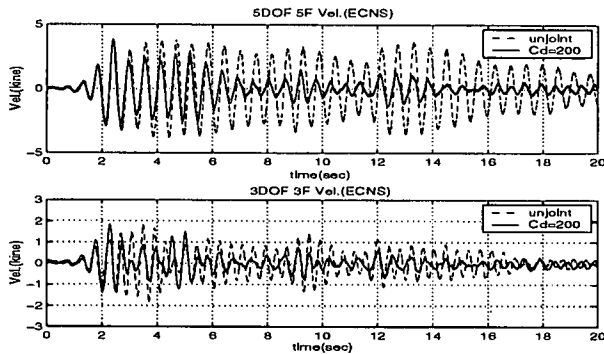
5. 地震時の JDS の制振効果に関する検討

(1) 実験応答比較

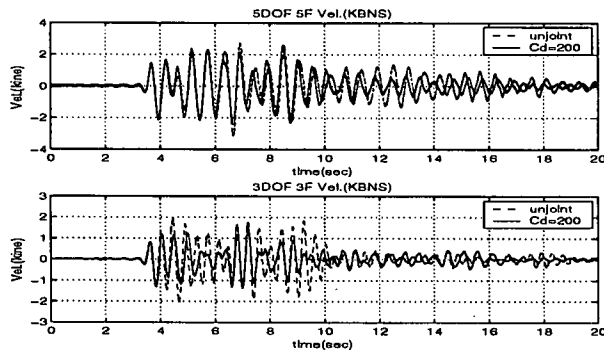
図-5 には、非連結の場合および連結粘性を計算上の最適値である 200(kN/m/sec) に設定した場合の、実験における5層、3層構造物の最上階速度応答を示す。入力として El Centro NS および Kobe NS を設定している。また、図-6 には、非連結の場合、および 200(kN/m/sec) で連結した場合について求めた、5層、3層構造物の屋上階速度応答の周波数応答曲線を示す。

(2) 応答低減効果

El Centro NS 入力についてみると、5層構造物に関しては、特にピーク後の応答に対して比較的大きな制



(a) El Centro NS(10(gal))



(b) Kobe NS(10(gal))

図-5 時刻歴応答 (実験値) 比較

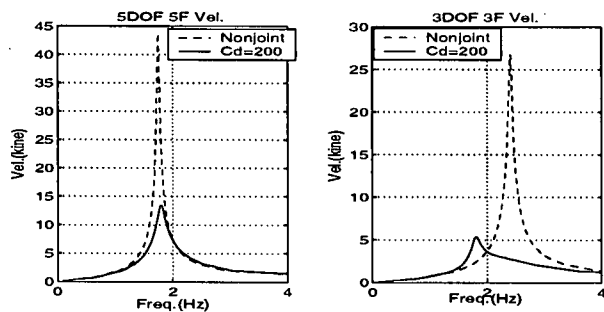


図-6 周波数応答関数 (非連結/最適連結状態)

振効果が見られる。これは、入力動が、1つのピークのあと比較的小さな入力が続くという特性を有していることから、非連結の場合の時刻歴応答波形にみられるように構造物の振動としては自由振動要素が支配的になり、ダンパー装置によるエネルギー吸収が効果的になされているためと考えられる。一方、3層構造物の方は、最大応答で見た場合にはむしろ応答が大きくなる傾向が生じている。これは、図-6の周波数応答関数の変化にみられるように、連結したことにより1次固有振動数が変化し、非連結の場合の周波数応答においてゲインの小さい部分に共振点が移動した結果、逆に応答が大きくなったものと考えられる。

一方、Kobe NS 入力の場合、3層構造物の方が El Centro NS 入力の場合とは逆に、若干3層3階部の最大応答に対して制振効果が得られている。これは、El Centro 入力の場合と同様に、連結により入力の卓越周

波数帯域から3層構造物の共振域が外れたためと考えられる。時刻歴応答における応答の減衰性については、El Centro NS 入力にみられるような大きな効果は確認できない。これは、Kobe NS 入力の特性として、比較的大きな入力短い時間に作用するため、構造物の応答は強制振動的な要素が卓越し、エネルギー吸収を十分に行うことができないためではないかと考えられる。いずれの入力の場合も、入力初期の応答に関してはパッシブ装置の効果は小さいことが分かる。

6. まとめ

本研究においては、実地振動を想定した場合のジョイントダンパー装置の挙動を把握することを目的とし、バリアブルダンパーを粘性ダンパーとして機能させた場合において実大実験を行った。その結果、El Centro NS 入力のように構造物が自由振動的な振動性状を示す場合は、デバイスのエネルギー吸収による減衰性能の増加、Kobe NS 入力のように強制振動的な振動性状を示す場合は、連結に伴う非共振化による最大応答の低減効果といった制震効果が期待できることを実験的に示した。

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：家村浩和)の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 蔭山 満・安井 謙・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
- 2) 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 年 3 月
- 3) 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 年 12 月
- 4) 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 年 11 月