

(140) 連続桁橋における可変剛性システムの制御則と制震効果に関する基礎的研究

神戸市 正員○前田 英輝
 京都大学工学部 正員 家村 浩和
 京都大学工学部 正員 五十嵐 晃
 阪神高速道路公団 正員 堀江 佳平

1. はじめに

本研究では、1自由度系にモデル化した桁橋梁に可変剛性型(Active Variable Stiffness: AVS)制震システムを設置した場合の地震応答低減効果を2種類の制御則について検討した。また、並列桁橋梁において並列桁同士ジョイントダンパー(Joint Damper: JD)による連結に可変剛性型制震システムを併用するハイブリッド型制震システムについて、その地震応答低減効果の検討を行うとともに、この種の制震システムにおける制御則の特性についての考察を行った。

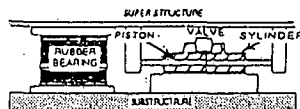


Fig.1 Active Variable Stiffness Bearing

2. 可変剛性型制震システム

可変剛性型制震システムとは、入力地震動の周波数特性に応じて構造物の剛性を変化させ、構造物の応答特性を変化させることにより非共振化を図り、構造物の入力エネルギーそのものを減らそうとするものである。Fig.1に可変剛性型支承(Active Variable Stiffness Bearing: AVSB)を示した。本研究では、2つの制御則AVS1、AVS2に基づいて剛性の切り替えを行うものとする。(Fig.2)

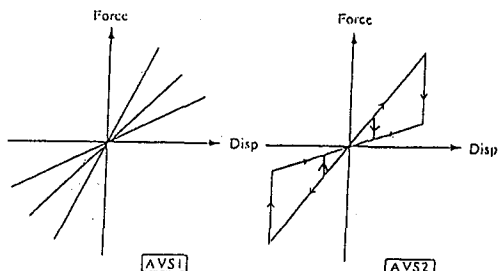


Fig.2 Modelling of Force-Displacement Relation

・ AVS1: 最適剛性選択型

用意する剛性タイプは7種類とする($k_1 > k_2 > k_3 > k_4 > k_5 > k_6 > k_7$)。地震が発生し地震加速度が記録されると、この地震動に対する各剛性タイプの地震応答解析を行う。この各剛性タイプの応答量を評価関数により評価し制御時間間隔(本研究では0.02秒)ごとに最適剛性タイプを算出する。そして上部構造物と橋脚上部の相対変位が0の時に最適剛性に切り換える。

・ AVS2: エネルギー開放型

用意する剛性タイプは2種類とする($k_1 > k_7$)。この制御則においては、以下のように剛性を選択するものとする。

- ・ 変位の絶対値が増加する時は高剛性 k_1 を選択する。
- ・ 変位の絶対値が減少する時は低剛性 k_7 を選択する。

3. 1質点系における可変剛性システムによる制震

Fig.3に可変剛性型制震システムを適用した解析モデルの概念図を示した。同図のように橋の桁部を剛体とし橋脚はすべて同じ挙動をするものと仮定し1質点系に近似する。上部構造物を2つの支点で弾性支承により支持する。AVSにより構造物の剛性を変化させることで、構造物全体の固有周期を0.6秒から2.0秒まで変化させることを可能にした。制御則AVS1ではタイ

Table1 Natural Periods of Analytical Model

TYPE	PERIOD(sec)	AVS1	AVS2
1	0.6	○	○
2	0.9	○	×
3	1.1	○	×
4	1.3	○	×
5	1.5	○	×
6	1.7	○	×
7	2.0	○	○

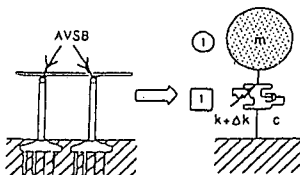


Fig.3 Analytical Model with AVS (1DOF)

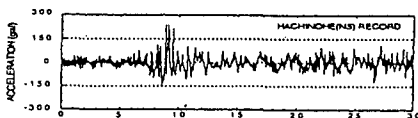


Fig.4 Time History of Input Earthquake

プ1からタイプ7までの7種類、制御則AVS2ではタイプ1とタイプ7の2種類とする。無制御時のモデルの固有周期は2秒である（剛性タイプは k_7 ）。減衰定数は5%とする。入力地震波には、Fig.4のような八戸記録波(NS)を採用し、橋軸方向に入力した。最大入力加速度は235galである。無制御時と比較して2つの制御則AVS1、AVS2による応答低減効果を検討する。

制御則AVS1による変位－復元力曲線をFig.5、変位・加速度・入力エネルギーの時刻暦曲線をFig.6からFig.8までに示した。制御則AVS2による変位－復元力曲線をFig.9、変位・加速度・入力エネルギーの時刻暦曲線をFig.10からFig.12までに示した。AVS1においては、変位応答、総エネルギー入力とも無制御時の50%まで低減した。このことは、変位の絶対値が増加する時に最も剛な剛性である k_1 を選択するように規定しているので、最も柔な剛性である k_7 の無制御時と比較して変位応答は必然的に低下することに起因する。総エネルギー入力は無制御時の60%でありAVS1より低減効果は劣るが、相対速度が0の瞬間に剛性の切り換えを行い履歴ループに膨らみを持たせることにより、構造物に蓄積されたひずみエネルギーを外部に消散することが可能となる。また、絶対加速度波形については、剛性切り換えが行われる瞬間に急激な増幅が見られるが、切り換えの機会が圧倒的に多いAVS2のほうが増幅の幅も大きく、小刻みで瞬間的な増幅が起りやすい。なお、最大復元力については、無制御時の約12tonfと比較すると、AVS1の時は約16tonf、AVS2の時は約26tonfとなり、剛性を切り替えることでより大きな復元力が作用することとなる。

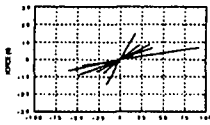


Fig.5 Force-Displacement Response (AVS1)

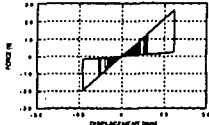


Fig.9 Force-Displacement Response (AVS2)

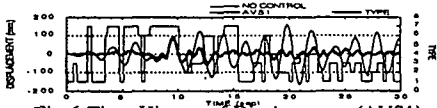


Fig.6 Time History of Displacement (AVS1)

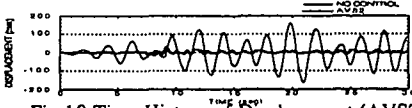


Fig.10 Time History of Displacement (AVS2)

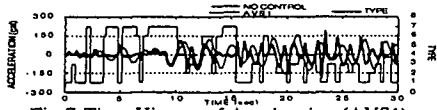


Fig.7 Time History of Acceleration (AVS1)

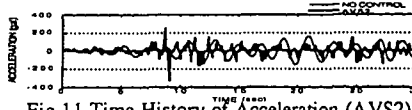


Fig.11 Time History of Acceleration (AVS2)

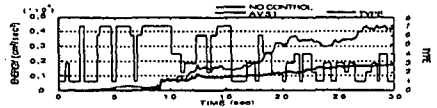


Fig.8 Time History of Total Energy (AVS1)

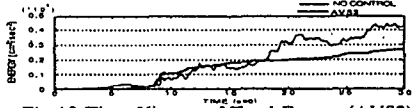


Fig.12 Time History of Total Energy (AVS2)

4. 2質点系における可変剛性システムによる制震

Fig.13に解析モデルの概念図を示した。1質点系の時と同様の仮定により、各々1質点系からなる並列桁構造モデルを設定する。上部構造物を2つの支点で弾性支承により支持する。NODE#1にAVSを設置し、AVSにより構造物の剛性を変化させることで、構造物の固有周期を0.6秒から2.0秒まで変化させることを可能にした。なお、各剛性タイプに対する系全体の1次および2次の固有周期は、Table2のようになる。制御則AVS1ではタイプ1からタイプ7までの7種類、制御則

Table2 Natural Periods of Analytical Model (2DOF)

TYPE	1st PERIOD(sec)	2nd PERIOD(sec)	AVS1	AVS2
1	1.45	0.572	○	○
2	1.51	0.805	○	×
3	1.57	0.925	○	×
4	1.65	1.01	○	×
5	1.74	1.07	○	×
6	1.85	1.12	○	×
7	2.00	1.15	○	○

AVS2ではタイプ1とタイプ7の2種類とする。無制御時のモデルの固有周期は2秒である。(剛性タイプは k_1 。)減衰定数は5%とする。入力地震波には、1質点系の時と同様にFig. 4のような八戸記録波(NS)を採用し、橋軸方向に入力した。最大入力加速度は225galである。無制御時と比較して2つの制御則AVS1、AVS2による応答低減効果を検討する。

連結部材の減衰は $h=0.20$ として、剛性 K をNODE#2の K_2 (一定)を基準にして $K/K_2=0, 1, 10$ の3種類として、

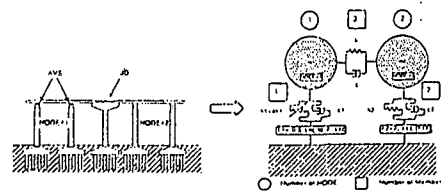


Fig.13 Analytical Model with AVS (2DOF)

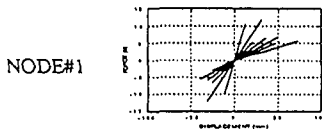


Fig. 14 Force-Displacement Response (AVS1)

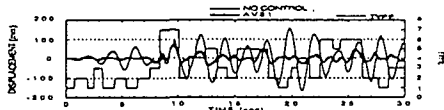
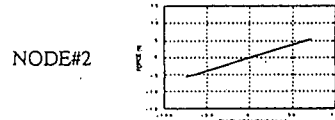


Fig.15 Time History of Displacement (AVS1)

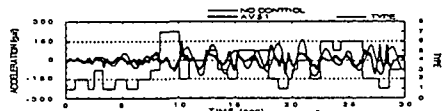
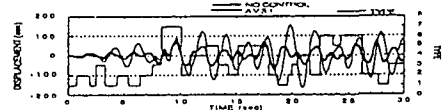


Fig.16 Time History of Acceleration (AVS1)

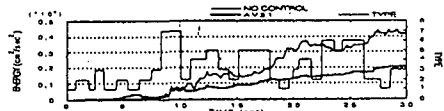
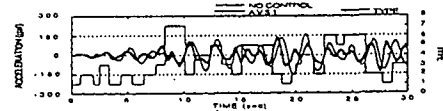


Fig.17 Time History of Total Energy (AVS1)

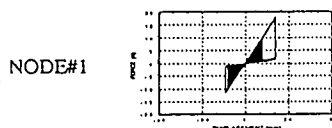
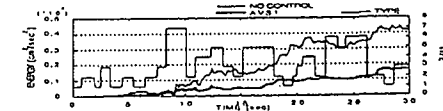


Fig. 18 Force-Displacement Response (AVS2)

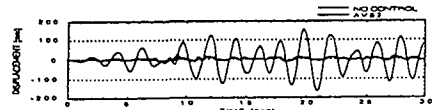
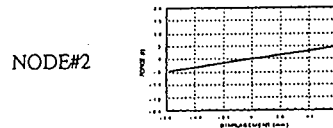


Fig.19 Time History of Displacement (AVS2)

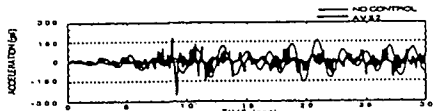
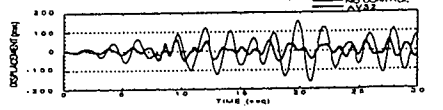


Fig.20 Time History of Acceleration (AVS2)

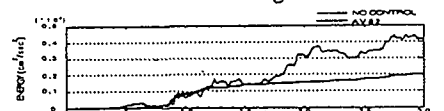
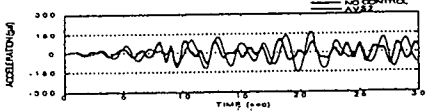
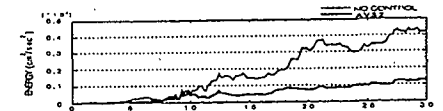


Fig.21 Time History of Total Energy (AVS2)



地震応答解析を行った。その結果、 $K/K_2=1$ の時にAVS1、AVS2とも安定した低減効果を示した (Fig. 14～Fig. 21)。AVS1においては、変位応答、総エネルギー入力についてNODE#1、NODE#2とも無制御時の50%まで低減した。AVS2においては、変位応答がNODE#1では無制御時の20%、NODE#2では無制御時の40%、総エネルギー入力がNODE#1では無制御時の40%、NODE#2では無制御時の30%にそれぞれ低減した。NODE#1での変位応答の低減が著しいことは1質点系の時と同様である。また、系全体の総エネルギー入力についてはAVS2のほうが低減効果に優れており、非共振化とともにエネルギー開放の効果が現れている。

5. JDの剛性・減衰をパラメーターとした最大応答値の比較

2質点系ハイブリッド型制震システムにおいて、JDの剛性、減衰が系全体の応答低減にどのような影響を与えるかを検討する。連結部材の諸元については、連結部材の剛性 K をNODE#2の K_2 (一定) を基準にして $K/K_2=0, 1, 10$ の3種類、減衰については $h=0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.60$ の5種類とする。変位、加速度、総エネルギー入力について各制御則ごとの最大応答値をFig. 22からFig. 24までに示した。剛性については、制御則AVS1では変位には明確な差が見られないが加速度については $K/K_2=1$ の時、総エネルギー入力については $K/K_2=10$ の時がそれぞれ効果的な低減を示した。ただし、 $K/K_2=10$ においては加速度の急激な増幅現象を示しやすいことに留意する必要がある。制御則AVS2では、変位、加速度、総エネルギー入力とも $K/K_2=1$ の時が効果的な低減を示した。特に、総エネルギー入力の低減効果が著しい。減衰については、制御則AVS2において、減衰の増加とともに各評価項目が横ばいあるいは若干減少という類似の挙動を示したものの、どの減衰が最も効果的かを判断することはできない。

6. まとめ

1) 1質点系モデルを用いて、2つの制御則AVS1、AVS2による制震効果を検討したところ、AVS1においては、変位応答、総エネルギー入力とも無制御時の50%、AVS2においては、変位応答が無制御時の20%、総エネルギー入力は無制御時の60%にそれぞれ低減した。

2) 可変剛性システムおよびジョイントダンパーを併用した2質点系モデルを用いて、2つの制御則AVS1、AVS2による制震効果を検討したところ、連結部材の剛性を橋脚の姿勢と等しくした時にAVS1、AVS2とも安定した低減効果を示した。変位応答、総エネルギー入力についてAVS1、AVS2とも系全体として無制御時と比較して50%以上低減した。

3) 絶対加速度波形における剛性切り換えが行われる瞬間での増幅は、切り換えの機会が圧倒的に多いAVS2のほうが増幅の値も大きく、小刻みで瞬間的な増幅が起こりやすい。

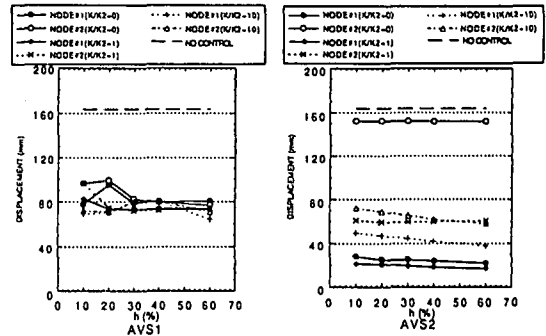


Fig.22 Maximum Displacement Responses

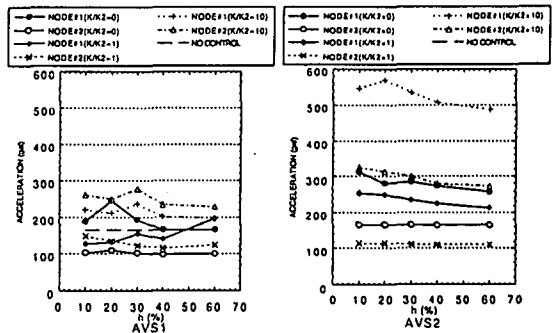


Fig.23 Maximum Acceleration Responses

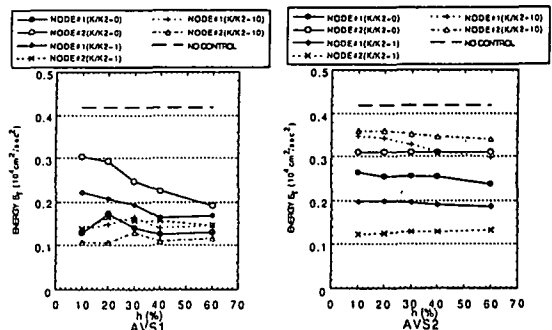


Fig.24 Total Energy at Every Node