塔状構造物の可変剛性・減衰型振動制御の適用に関する実験的研究

九州大学大学院工学研究院　○正　員　宮森 保紀
北海道大学大学院工学研究科　正　員　小幡 卓司
国　土　交　通　省　正　員　安達 一憲
北海道大学大学院工学研究科　フェロー　林川 俊郎
北海道大学大学院工学研究科　フェロー　佐藤 浩一
新 日 本 製 鐵 株 式 会 社　正　員　下田 和敏

1. はじめに

地震や風、交通荷重などの不規則外力を受ける構造物の動的性能を向上させる手法として、振動制御の有効性が知られているが、近年では制御装置の動作により剛性や減衰などの構造特性を変化させて、構造物の応答量を抑制するセミアクティブ制御が注目されている[1)]。

本研究では、比較的簡便な制御則と制御装置により塔状構造を有する実験供試体の可変剛性・減衰型セミアクティブ振動制御を行った。具体的には実験供試体に剛性と減衰を付加できる制御装置を搭載し、卓越振動モードの応答量に応じて制御装置の動作を ON-OFF で切り替える。この ON-OFF 制御系の設計パラメータの決定には遺伝的アルゴリズム（以下、GA と称する）を適用した。以上のような制振システムについて、地震加速度を用いた強制加振に対する制振シミュレーションと振動制御実験を実施した[2)]。これらの実験と解析から、可変剛性・減衰型セミアクティブ制御の制振効果や適用性と、制御系設計手法の妥当性について考察を行ったもので、これらの結果について報告する。

2. 制御対象構造物と固有振動特性

本研究では、写真-1 のような鋼管とオイルダンパからなる制御装置を有する実験供試体を製作した。この供試体は構造物と制御装置の接続状態を ON-OFF で切り替えることで、固有振動特性の変化による非共振化と全体剛性・減衰の増大によって振動を抑制しようとするものである。表-1 は減衰自由振動実験の結果であり、制御装置が動作した場合は固有振動数と減衰定数が上昇するため、制御系設計はこの固有振動数の変化に着目して行う。なお解析は図-1 のような 2 次元多自由度系の解析モデルに対して実施する。

3. 可変剛性・減衰型セミアクティブ制御

可変剛性・減衰型システムの運動方程式は式(1)のように表される[3)]。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)+(\mathbf{C}+\mathbf{C}_v)\dot{\mathbf{u}}(t)+(\mathbf{K}+\mathbf{K}_v)\mathbf{u}(t)=\mathbf{f}(t) \quad \cdots (1)$$

ここで $\mathbf{C}_v$ はダンパの減衰係数からなる可変減衰マトリックス、$\mathbf{K}_v$ は鋼管の剛性から構成される可変剛性マトリックスである。また、構造物そのものの減衰マトリックス $\mathbf{C}$ は質量比例型減衰マトリックスを採用した。

可変剛性と可変減衰は、最も卓越しやすい１次モードの応答量に応じて ON-OFF で切り替える方式を採用し、構造物上層の応答加速度を観測量として ON 状態と OFF 状態の１次モードをそれぞれフィルタリングする。抽出した加速度が設定した閾値を超過した場合に、制御装置の ON-OFF を切り替えて動的応答量の抑制を図る。採用したフィルタは IIR 型楕円フィルタであり、カットオフ周波数が 2.2Hz のローパスフィルタとパスバンドが 2.3～10.0Hz のバンドパスフィルタを用いた。また、制御装置の時間遅れに対処し、構造特性の変化による振動抑制効果をより発揮させるために、制御装置が作動する際に一定時間 ON 状態を維持する。このような制御則では、加速度の閾値と ON 状態を維持する時間の設定が制振効果に極めて大きな影響を与えるため、GA によってこれらの３変数を最適化した。GA の評価関数は構造物のエネルギー量に着目して以下のような関数を用いた。

写真-1　実験供試体

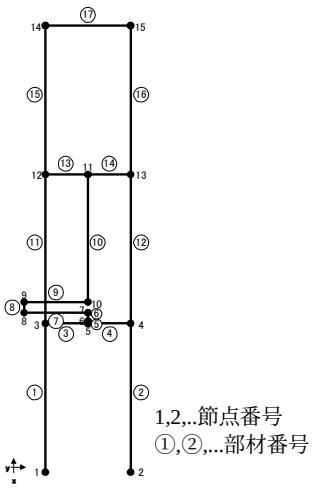


図-1　解析モデル

表-1　減衰自由振動実験結果

	固有振動数(Hz)		減衰定数(%)	
制御装置	OFF	ON	OFF	ON
1 次モード	1.95	2.61	0.28	2.17
2 次モード	6.53	6.65	0.29	0.58

$$J_{GA}=\sum_{n=1}^{N}\left[\sum_{m=1}^{n}\left[\left(\dot{\mathbf{x}}_m{}^T\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_m+\dot{\mathbf{x}}_m{}^T\mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_m+\dot{\mathbf{x}}_m{}^T\mathbf{K}\mathbf{x}_m\right)\Delta t\right]\right] \quad \cdots (2)$$

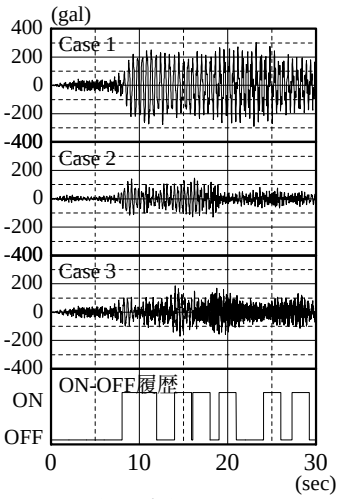
ここで、式(2)における右辺は構造物の運動、減衰、ひずみエネルギーを表しており、制御開始から終了までの総和を求めることにより、制御によって構造物の応答量がどの程度減少するかを算出する。GA オペレーション中では各個体の適応度を評価するため、時刻歴応答解析による制振シミュレーションを個別に実施した。このシミュレーションでは釧路沖地震における千代田大橋の橋軸方向の観測波形を入力外力とした。GA による最適化の結果、ON-OFF 制御の設計パラメータは、通常状態のローパスフィルタ通過成分に対する閾値が 12.52gal、作動状態のバンドパスフィルタ通過成分に対する閾値は 385.52gal、状態固定時間は 1.94sec となった。したがって、これらの値に基づいて制御系を設定する。

4. 振動制御シミュレーション

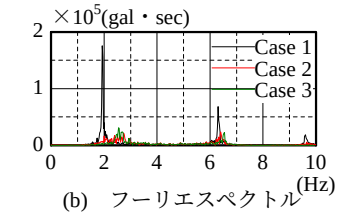
制振シミュレーションはニューマークβ法による直接数値積分法で行い、係数βは 1/2、時間刻みはΔt=0.01sec、解析時間は 30 秒間である。入力外力は GA による制御系設計で用いた釧路沖地震観測波に加えて、兵庫県南部地震における JR 鷹取駅観測波(EW 方向)を入力した場合の解析も行った。解析ケースは構造物に可変剛性・減衰を付加しない Case 1、可変剛性・減衰を全制御時間で ON 状態にした Case 2、ON-OFF 制御を行う Case 3 の 3 ケースとした。図-2 は釧路沖地震観測波、図-3 は兵庫県南部地震観測波を入力した場合の構造物上層における応答加速度とフーリエスペクトルならびに ON-OFF 変更履歴である。

図-2(a)では応答加速度が増大し始める約 8sec から ON-OFF

キーワード：セミアクティブ制御、振動制御実験、鋼製タワー、可変剛性・減衰型システム、強制加振
〒812-8581　福岡市東区箱崎 6 丁目 10 番 1 号　　電話・FAX　092-642-3268

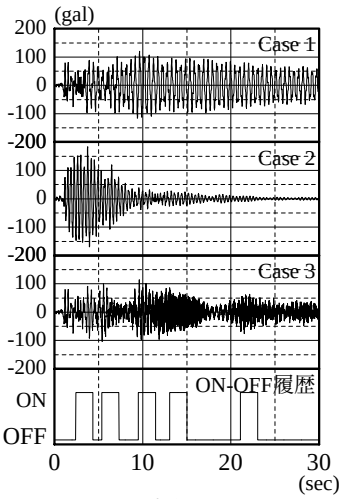


(a)　応答加速度と ON-OFF 履歴

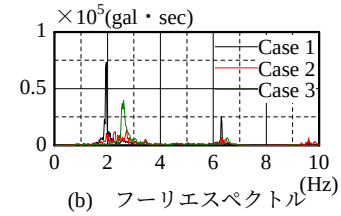


(b)　フーリエスペクトル

図-2　時刻歴応答解析結果
（釧路沖地震観測波入力）

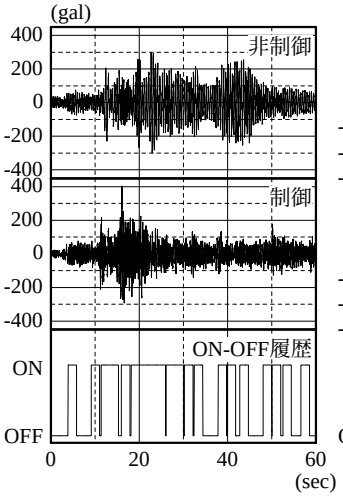


(a)　応答加速度と ON-OFF 履歴

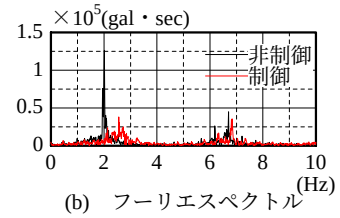


(b)　フーリエスペクトル

図-3　時刻歴応答解析結果
（兵庫県南部地震観測波入力）

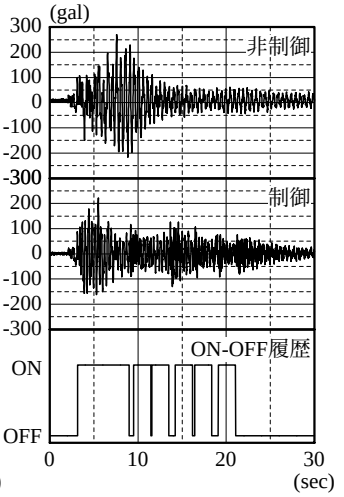


(a)　応答加速度と ON-OFF 履歴

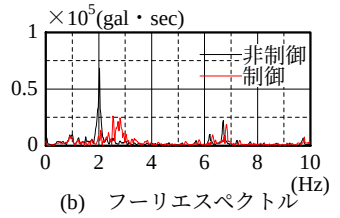


(b)　フーリエスペクトル

図-4　振動制御実験結果
（釧路沖地震観測波入力）



(a)　応答加速度と ON-OFF 履歴



(b)　フーリエスペクトル

図-5　振動制御実験結果
（兵庫県南部地震観測波入力）

変更が断続的に行われ、Case 1 と比較して Case 3 では応答加速度が大幅に減少している。可変剛性・減衰を固定した Case 2 では、ダンパによる減衰付加の影響が大きく動的応答量の抑制効果は極めて高いが、図-2(b)における１次モードのフーリエスペクトルのピーク値は、Case 3 がもっとも小さくなっており、剛性変化による非共振化によって１次モードの振動が抑制されている。さらに GA の最適化で用いていない地震波を入力した図-3(a)でも、制御によって加速度が抑制されている。図-3(b)では Case 1、Case 2 と比較して Case 3 のピーク値が大幅に減少しており、卓越振動モードに対して高い制振効果を発揮している。したがって本研究の制御手法は、制御系設計時とは異なる入力加速度に対しても制振効果が発揮されており、不規則外力による振動応答の低減に適用性を有すると考えられる。

5. 振動制御実験

解析で得られた制振効果を実際の構造物で確認するために、振動制御実験を実施した。実験は解析に準じて行い、入力外力も釧路沖地震観測波と兵庫県南部地震観測波を用いたが、釧路波については入力時間を 60sec とした。実験は可変剛性・減衰を作用させない非制御と ON-OFF 方式による制御の２ケースで行った。図-4 が釧路沖地震観測波、図-5 が兵庫県南部地震観測波を入力した場合の結果である。

図-4(a)では、制御開始後約 4.0sec でローパスフィルタ通過成分が閾値を超過して制御装置が作動し始めている。入力外力が大きくなり応答量が急速に増大する 10～20sec では応答加速度が一時的に大きくなるが、入力外力が継続して作用する 20～50sec においては、応答量の増減に応じて制御装置が動作し、高い振動抑制効果が発揮されている。図-4(b)では 1 次モードの最大ピークが OFF 状態の 1 次固有振動数の 2.0Hz 前後から ON 状態の 2.6Hz 前後に移動し、ピーク値は実験供試体上層では非制御時の 1/3 程度まで低下している。また、制御系の設計時に直接考慮していない２次モードについても制御によってピーク値が２割程度低減されている。これは制御装置の動作による剛性および減衰の増加が構造物の応答量全体の抑制に寄与したものと考えられ、本研究の制御システムはある程度のロバスト安定性も期待できる。このため、本研究の可変剛性・減衰型システムは不規則外力に対して、構造物の動的性能を確保することが十分に可能であると判断できる。

図-6 の兵庫県南部地震観測波を入力した場合は、制御装置の動作により 5.0sec から振動振幅が減少し、7.5sec 以降ではおおむね一定レベルに抑制されている。非制御時の応答加速度が 8.0～9.0sec にかけて最大値に達していることと比較すると、制御時は剛性と減衰の付加によって振動振幅が大きく抑制されていることが確認できる。フーリエスペクトルにおいても最大ピークが ON-OFF 制御によって通常状態から作動状態の固有振動数に遷移し、ピーク値も大幅に低減されている。

このように、本研究の ON-OFF 制御やその設計手法は、簡便ながら高い制振効果が発揮でき、実験においても解析と同様の結果を得られたことから、実構造物における適用性も十分に有すると考えられる。

6. おわりに

本研究では、構造性能可変型セミアクティブ制御の振動抑制効果や適用性を検討するために、実験供試体を制御対象として制振シミュレーションと振動制御実験を行った。解析と実験の結果から固有振動モードの卓越状況に応じて構造物の状態を変更すれば、固有振動特性の変化による非共振化と全体剛性・減衰の増大により卓越振動モードの応答量が大きく抑制された。制御系設計時とは異なる入力加速度を用いた場合でも、動的応答量の低減が確認され、実験においても解析と同様の制振効果が発揮された。このため、本研究の可変剛性・減衰型制振システムと GA による制御系設計は不規則外力に対して高い制振性能を発揮すると認められ、実験でも同等の結果が得られたことから、実際の構造物における適用性も十分に有すると考えられる。最後に、実験に協力して頂いた北海道大学大学院工学研究科 及川昭夫技官と大学院生の諸氏に対し、ここに記して感謝の意を表する次第である。

【参考文献】

1)W.N. Patten, J. Sun, G. Li, J. Kuhen and G. Song：Field test of an intelligent stiffener for bridges at the I-35 Walnut Creek bridge, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.28, Issue 2, pp.109-126, 1999.
2)宮森保紀、小幡卓司、安達一憲、林川俊郎、佐藤浩一、下田和敏：塔状構造物の可変剛性・減衰型振動制御の適用性について、土木学会北海道支部論文報告集、第 59 号, pp.46-49, 2003.
3)小堀鐸二：制震構造、鹿島出版会、1993.