



地震動の即時配信による フィードフォワード型制振システムに関する基礎研究

折田潤¹⁾、金久保利之²⁾、境有紀³⁾

1) 筑波大学大学院システム情報工学研究科

e-mail:ori@rcs.kz.tsukuba.ac.jp

2) 正会員 筑波大学システム情報工学研究科、助教授 博士（工学）

e-mail:kanakubo@kz.tsukuba.ac.jp

3) 正会員 筑波大学システム情報工学研究科、助教授 工博

e-mail:sakai@kz.tsukuba.ac.jp

要約

近年のIT技術の進歩により、地震動情報の即時配信が可能となってきた。本研究においては、このリアルタイム地震情報を利用した能動型防災システムについて検討する。本システムの特徴は、構造物個別ではなくある空間的広がりを持った地域全体に高密度な地震動観測網を構築し、情報の伝達速度と地震動の伝播速度の差を利用し、秒単位以下のオーダーで、実質的に地震動の時刻歴の予期を可能にする点にある。この防災システムを擬似的に筑波大学構内の地下にある共同溝に構築し、地震動観測を実施した。観測データを基に、可変剛性構造物にフィードフォワード避共振制御を適用し、その制御効果を確認すると共に、本防災システムの有効性を検証した。

キーワード：地震観測網、防災システム、フィードフォワード、可変剛性、避共振

1.序論

防災システムと称される機構は、今日までに種々開発されている。それらは、災害の危険度をアセスメントあるいは被害を予測するもの、災害対応の訓練や災害時の活動を支援するもの、に大別される。

一方で近年のITの進歩により、「リアルタイム防災」と呼ばれる機構の開発も進められている。これらは地震の主要動が到着する前に警報を発したり、被害緩和行動をとるが、現状で実際にどの程度の効果があるかは未知数である。

本論で提案する能動型防災システムの概要を図1に示す。本防災システムは、ある想定した地域全体において、その地域の時間的・空間的状况に応じて機能的に防災機構を発揮するシステムである。このシステム

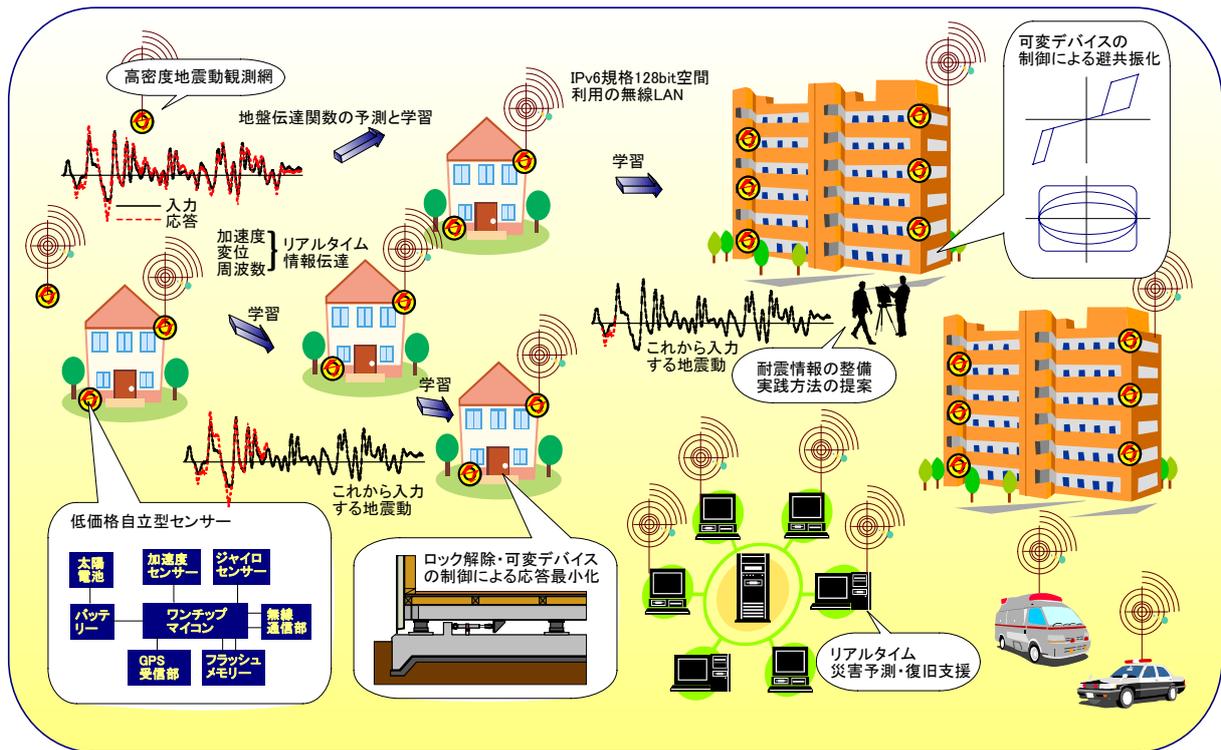


図1 地震動の即時配信による能動型防災システムの概要

の特長は、構造物個別ではなくある空間的広がりを持った地域全体に高密度な地震動観測網を構築し、情報の伝達速度と地震動の伝播速度の差を利用し、秒単位以下のオーダーで、実質的に地震動の時刻歴の予期を可能にする点にある。例えば、地域内のある箇所地震動を受け、ある応答値が返されたとすると、その情報が即座に周辺に配信され、地震動を受ける前の構造物やインフラがその地震動の時刻歴に対応する態勢を即座に取る。同時に実際の被災状況を把握する前に被災シミュレーションを行い、被災後の迅速な対応ができるようにする。また、これらの機構は自動的に学習され、改良される。地震動の伝播速度と情報の伝達速度の差を利用し、地震動が到達する時々刻々に応じて、応答や被害・支援活動を最小限・最適にする目標値を、能動的に変化させるフィードフォワード制御を行う。

提案する能動型防災システムの構築にあたって、次に挙げる4つの点が主要な課題であると考えている。また、各課題における具体的な問題と、それに対して検討が必要と考えられる項目を、表1に挙げる。これらの検討項目はそれぞれの課題に対して検討が必要であると同時に、それぞれの課題での検討結果を他の課題へフィードバックし、構築や検証の際の目標値とする。

- A. 低価格自立型センサーの開発と情報伝達ネットワークおよび高密度地震動観測網の構築
- B. 地震動の伝播の性質と、地域の地盤特性の違いによる即時配信情報の有効性および学習効果の検証

表1 各課題における検討項目

課題	不明点・問題点	検討項目
A	・低価格	・民生用汎用品の利用
	・自立型	・太陽電池、バッテリーの利用
	・時刻同期	・GPS等の利用
	・情報伝達速度	・LAN用無線利用、情報内容
B	・地震動伝播速度	・センサー設置間隔
	・地震動伝播方向	・センサー設置位置
	・地震動の性質の変化	・学習の方法とその効果 ・制振制御法との関連
C	・制御方法	・アクティブ、セミアクティブデバイスの開発
	・制御効果	・最適フィードフォワード制御法
	・デバイス	・制振効果の検証
		・課題AおよびBへの帰還
D	・リアルタイム性	・検討項目の抽出とその効果
	・有効性	・ソフトウェアの開発
	・啓蒙、宣伝	・利用方法
		・課題AおよびBへの帰還

- C. 地震動の時刻歴が既知となったときの、構造物の制御システムの開発
- D. リアルタイム情報を利用した被災シミュレーション、災害活動支援システムの構築とその有効性の検証

本防災システムの中核を担うのは、地震動情報の即時配信であり、この情報がリアルタイムで的確に得られなければ、システムが機能しなくなるだけでなく、逆に甚大な被害をもたらす可能性もある。したがって、本防災システムを構築する上で、有効に取得でき、かつ利用できる地震動情報が何であるかを解明する必要がある。また、得られた地震情報から実際に構造物やインフラが応答や被害を低減させる態勢を取ることができるのか、その効果はどの程度であるのか、基礎的な情報を把握しておく必要がある。

そこで、本論文は、表 1 に示される検討項目のうち、特に課題 B の地震動の伝播の性質と課題 C の構造物の制振方法に着目し、本防災システムを構築する上での基礎的な情報を把握することを目的とする。具体的には、本防災システムにおける地震動観測網を擬似的に筑波大学地下共同溝内に構築し、実際に地震動観測を実施する。構造物の制振システムは、一例として、過大な入力エネルギーを必要としない可変剛性によるセミアクティブ制振とし、得られた地震動データを用いてフィードフォワード制御のシミュレーションを行い、その制御効果を検証する。

2. 筑波大学地下共同溝地震観測網

2.1 概要

南北約 4km、東西約 2km のキャンパスを有する筑波大学構内の地下には、南北約 4km の幹線を中心として、延長 12km に達する共同溝が配置されている。共同溝内部には水、ガス、冷暖房、電気等を供給するための配管や配線が敷設されている。図 2 に共同溝断面の一例を示す。この共同溝内部に地震計 (SMAC-MD) を設置し、各設置ポイントを連結させることによって、筑波大学という限られた範囲内において高密度な地震観測網を設置し、想定している防災システム観測網を擬似的に構築した。本学共同溝を利用するメリットとして、①ボーリングデータの存在により地盤性状の把握がある程度可能、②共同溝構造の近似という点が挙げられ、構内の比較的離れた場所において、ほぼ同じ条件でデータの採取を行うことができる。

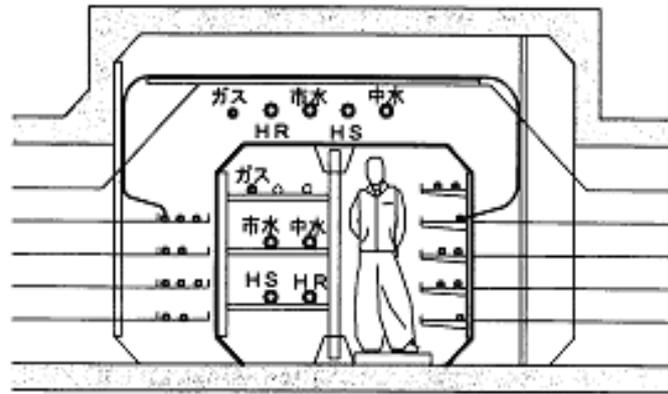


図 2 共同溝断面図

2.2 地震計設置状況

地震計設置点の設定条件については、(i) 設置間隔を東西南北ほぼ均等にする、(ii) 共同溝の内部構造が同様な箇所であること (共同溝の交差部であったり、一部内部通路が広がったりする部分がある)、(iii) 地上との連絡が可能でその上部に遮蔽物がないこと、の 3 点とし、この条件に合致する 9 点に地震計を設置した。ここで、(iii) については、現在、地震計 (SMAC-MD) の機能であるラジオ時報による時刻補正を行っているが、将来的に GPS を用いた時刻補正に移行し GPS 受信機を地上に設置する可能性があるために考慮している。

図3に、筑波大学敷地図および地下共同溝への地震計の設置場所を示す。図中の赤いラインが共同溝を示す。地震動の伝播状況を確認し易くするため、東西、南北の観測ラインが出来上がるように観測点を選定した。南北ラインは、A、B、C、D、G、H、Iの各点を結び、東西ラインはD、E、Fの各点を結んだものとしている。実測による各観測点間距離を表2に示す。

図4に地震計の結線状況を示す。B点、D点(2台)、H点に検出器内蔵のデータ記録計(SMAC-MD)を設置し、各記録計から1ヶ所または2ヶ所の計測点に検出器を設置した。D点に関しては、南北ラインでC点とG点とを結ぶために1台、東西ラインでE点とF点とを結ぶために1台設け、SMAC-MDを計2台設置した。全ての地震計は有線によって連動されており、任意の1点にトリガー設定値(2gal)以上の加速度が入力した場合、一斉に観測を開始するよう設定している。なお、サンプリング周波数は100Hzである。

写真1に地震計の設置状況を示す。SMAC-MD、検出器とも地下共同溝の壁面コンクリートに直接アンカーボルトを設け固定した。

表2 観測点間距離

方向	観測点	距離 (m)
南北ライン	A-B	586
	B-C	294
	C-D	491
	D-G	341
	G-H	812
	H-I	677
東西ライン	D-E	147
	E-F	181

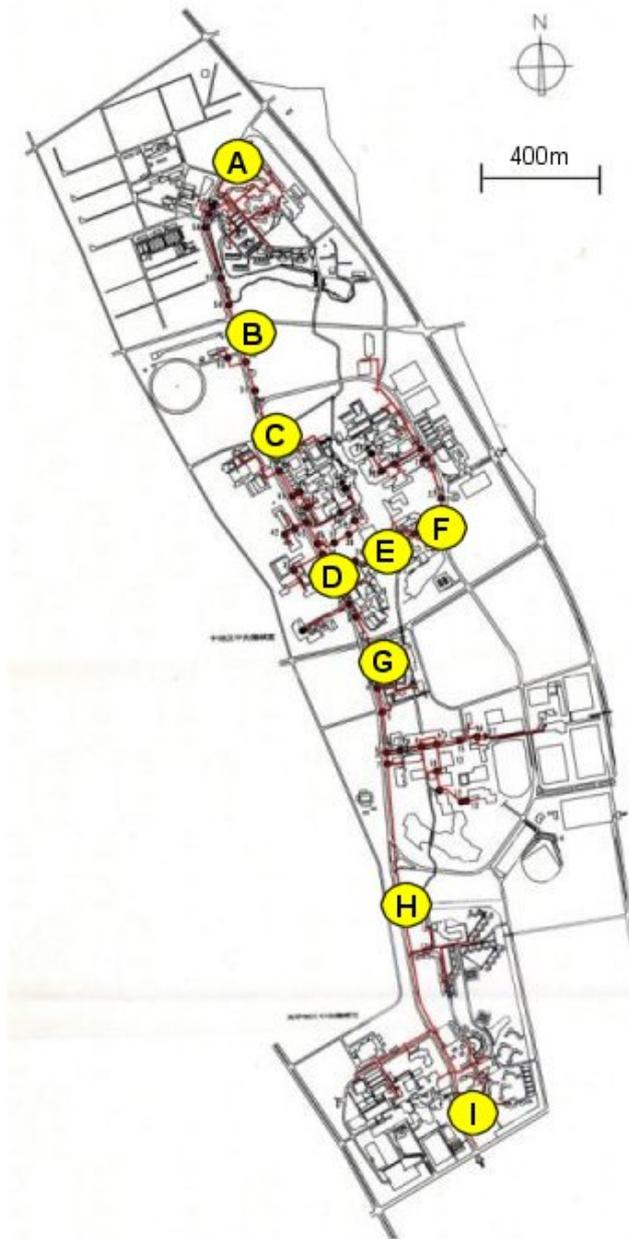


図3 筑波大学敷地図および地震計配置図



写真1 地震計設置状況 (左: SMAC-MD (B、D、H点)、右: 地上用検出器 (A、C、E、F、G、I点))

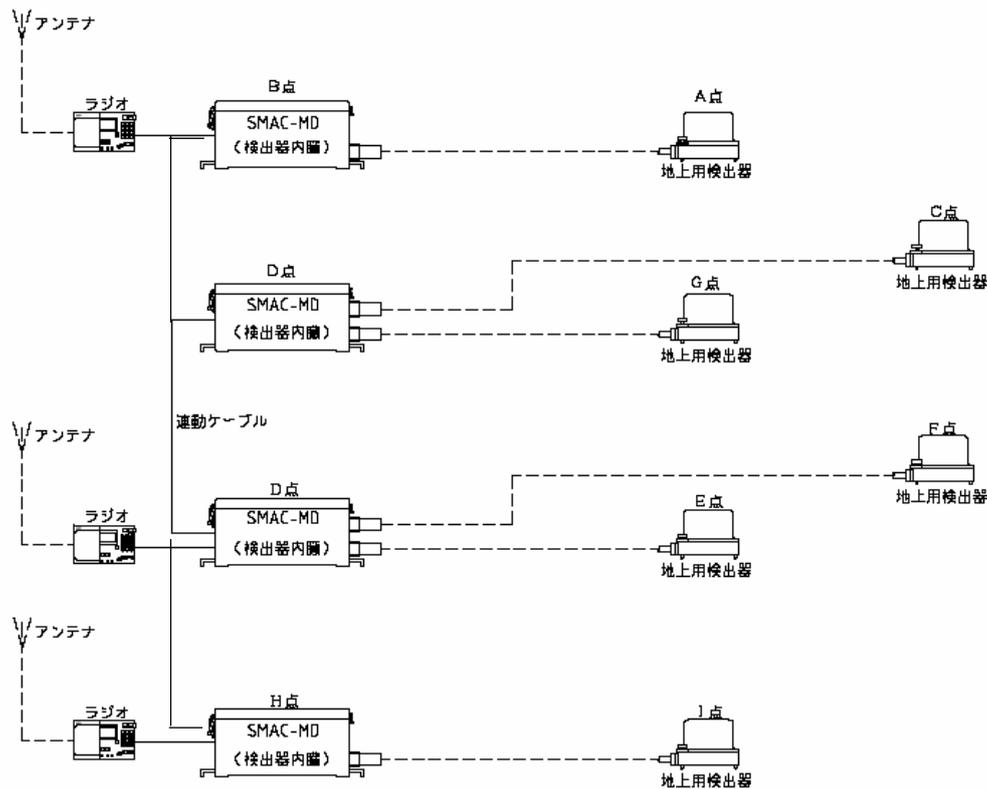


図4 地震計結線図

3.地震観測データ

2006年1月までに筑波大学地下共同溝地震動観測網で計測された地震動のうち、茨城県つくば市で震度4が観測された2005年4月11日の千葉県北東部を震源とする地震、および2005年8月16日の宮城県沖を震源とする地震の2つの地震動観測結果を検討する。例として、両地震動の東西(EW)成分を採りあげる。

3.1 千葉県北東部地震

3.1.1 概要

2005年4月11日の地震動は、以下の通りである。震央位置と震度分布を図5に示す。

- ・ 地震発生日時：2005年4月11日7:22頃
- ・ 震央位置：千葉県北東部（北緯35.7度、東経140.7度）
- ・ 震源の深さ：約60km
- ・ マグニチュード：6.1

地下共同溝地震動観測網が観測を開始したのは、同日7:22:29であった。茨城県つくば市では、震度4程度であった。

3.1.2 地震動観測結果

この地震で得られたデータを基に、各観測点に

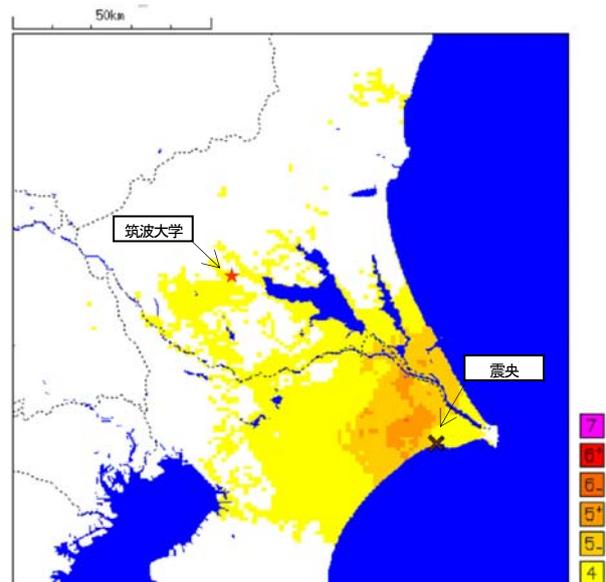


図5 震源位置および震度分布図（気象庁）

おける加速度時刻歴波形、フーリエスペクトル、ランニングスペクトルを算出した。ランニングスペクトルとは、得られた地震動情報がある一定時間に区切り、その時間内の地震動のフーリエスペクトルを求めたものであり、地震動の時間的振動特性の推移を確認することができる。D点EW成分に関して、観測結果を図6に示す。ランニングスペクトルに関しては、主要動近傍の15秒から55秒までを表示しており、色の赤い方がその成分が大きいことを示している。フーリエスペクトルから、D点で観測された本地震動のEW成分には0.8~2.5Hzの範囲が卓越している様子が伺え、ランニングスペクトルからその卓越振動数範囲が、地震動主要動の25秒から35秒の間に特に顕著であることが確認できる。

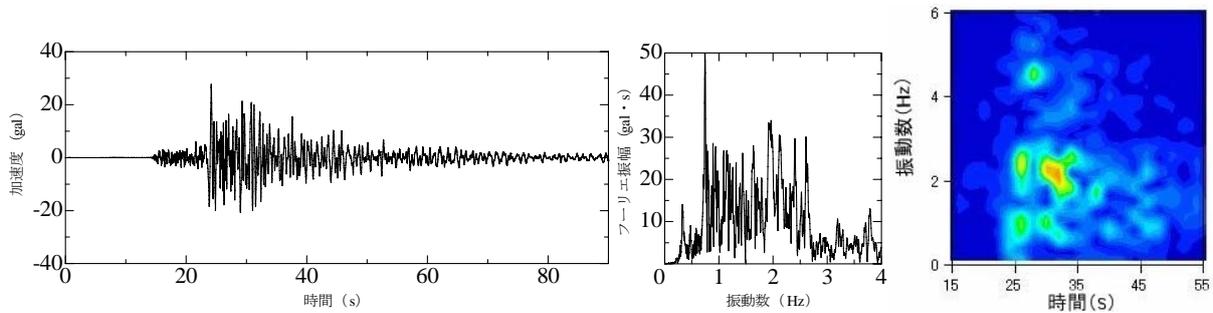


図6 観測結果 (D点EW成分)

3.1.3 地震動特性の推移

本地震動に関して、加速度時刻歴、フーリエスペクトル、ランニングスペクトルがどのように推移しているかを確認する。また、各観測点間における地震動の伝播に要する時間差を算出する。例として、南北ラインの各観測点EW成分に関して、加速度時刻歴を図7に、フーリエスペクトルを図8に、ランニングスペクトルを図9に示す。なお、最も大きな加速度が観測された23秒付近から数秒(図7で2秒、図9で4秒)の範囲を示した。

茨城県つくば市に位置する筑波大学は、震源位置から見て北西の方角にあるため、南寄りのI点から順に北向きに伝播している様子が確認できる。また、表3は、図7より各観測点で同位相である加速度のピーク(23.7秒付近から24.3秒付近における各観測点での加速度の最大値)を比較することで算出した、地震動の伝播に要する時間差を示している。

フーリエスペクトルからは、各観測点において多少の差異は認められるが、卓越している振動数帯域の大きな違いは見られない。また、ランニングスペクトルからは、南に位置するI点から順次北の観測点にむかって、ある時間に対して見られる1Hzと2Hz付近の卓越振動数が、ある程度の時間差のずれを伴って伝播している様子が確認できる。

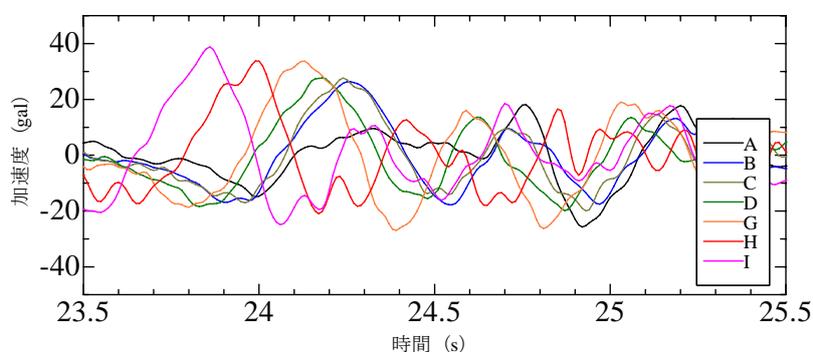


図7 加速度時刻歴 (南北ラインEW成分)

表3 地震動到達時間差

観測点間 (距離)	時間差 (ms)
I-H (677m)	140
H-G (812m)	170
G-D (341m)	60
D-C (491m)	60
C-B (294m)	40
B-A (586m)	40

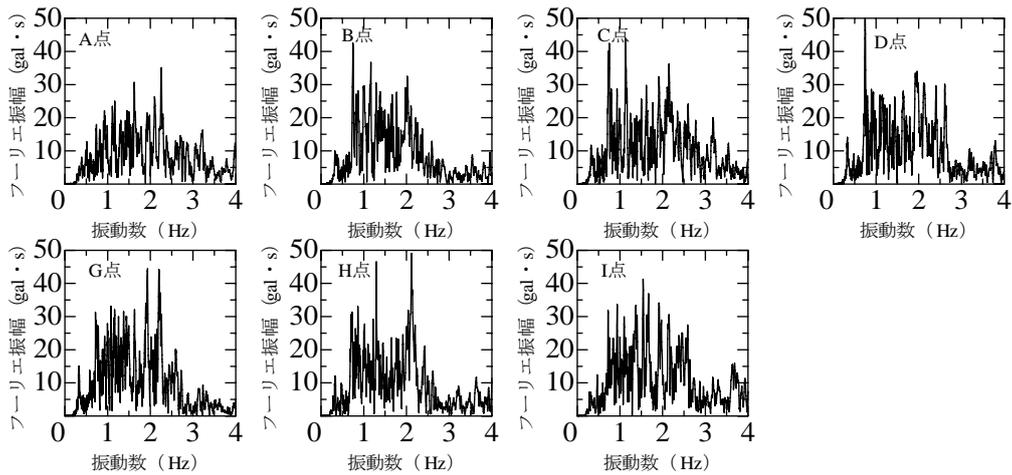


図8 フーリエスペクトルの比較 (南北ライン EW 成分)

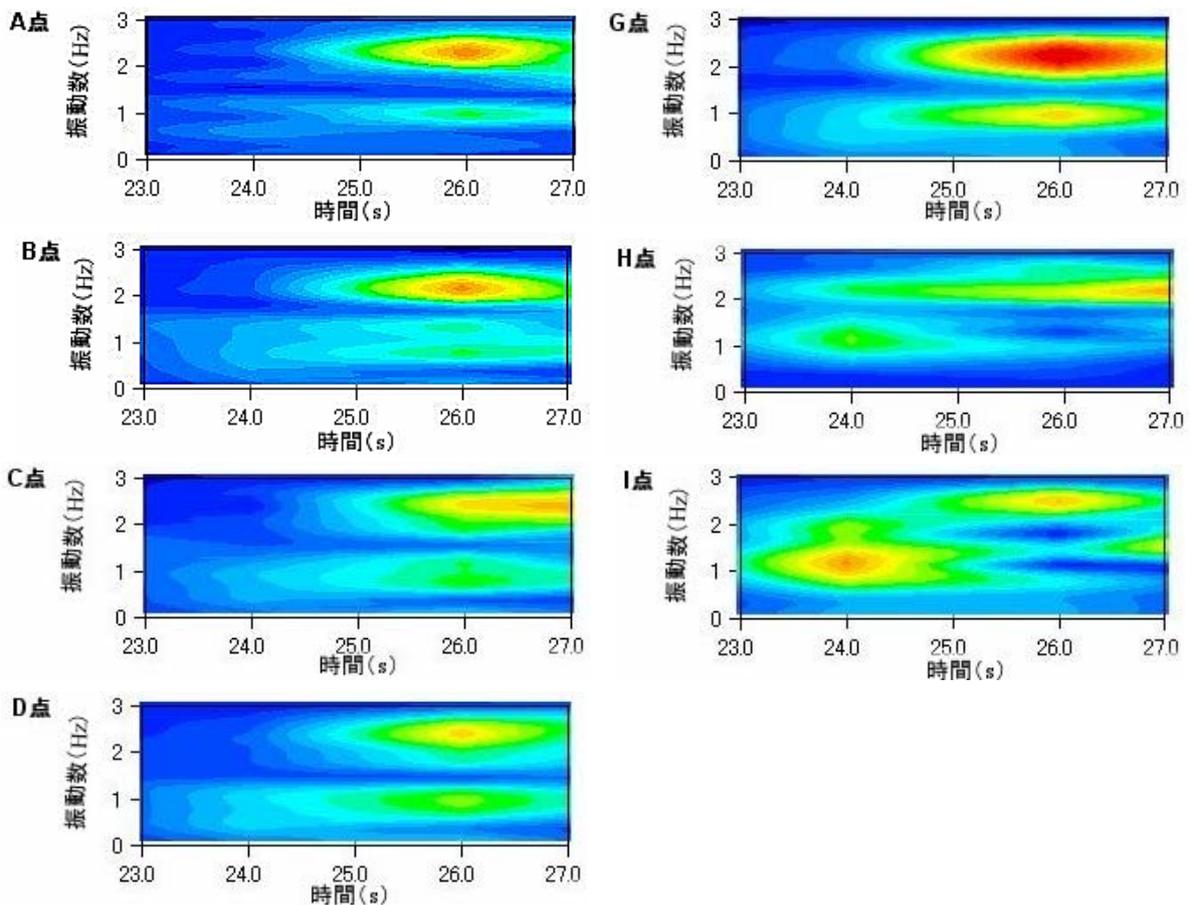


図9 ランニングスペクトルの推移 (南北ライン EW 成分)

3.2 宮城県沖地震

3.2.1 概要

2005年8月16日の地震動は、以下の通りである。震央位置と震度分布を図10に示す。

- 地震発生日時：2005年8月16日 11:46頃
- 震央位置：宮城県沖（北緯38.15度、東経142.28度）

- 震源の深さ：約 42km
- マグニチュード：7.2

地下共同溝地震動観測網が観測を開始したのは、同日 11:46 頃であった。本学の位置する茨城県つくば市では、震度 4 程度であった。

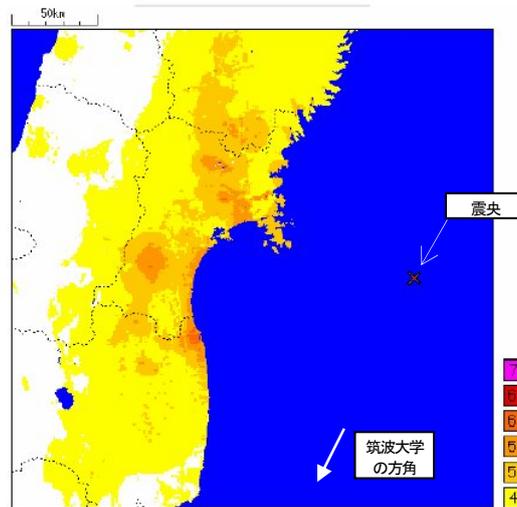


図 10 震源位置および震度分布図 (気象庁)

3.2.2 地震動観測結果

3.1.2 節と同様に、各観測点における加速度時刻歴波形、フーリエスペクトル、ランニングスペクトルを算出した。D 点 EW 成分に関して、観測結果を図 11 に示す。本地震は継続時間が長く、予め地震計に設定していたデータ記録時間 (60 秒) を越えてしまったため、主要動の途中までのデータしか取得できていない。ランニングスペクトルは、主要動開始近傍の 30 秒から 55 秒までを表示している。フーリエスペクトルから、D 点で観測された本地震動の EW 成分には 1.0~2.5Hz、および 4.0Hz 付近が卓越している様子が伺え、ランニングスペクトルから、その卓越振動数範囲が地震動主要動の 40 秒から 53 秒の間に特に顕著であることが確認できる。

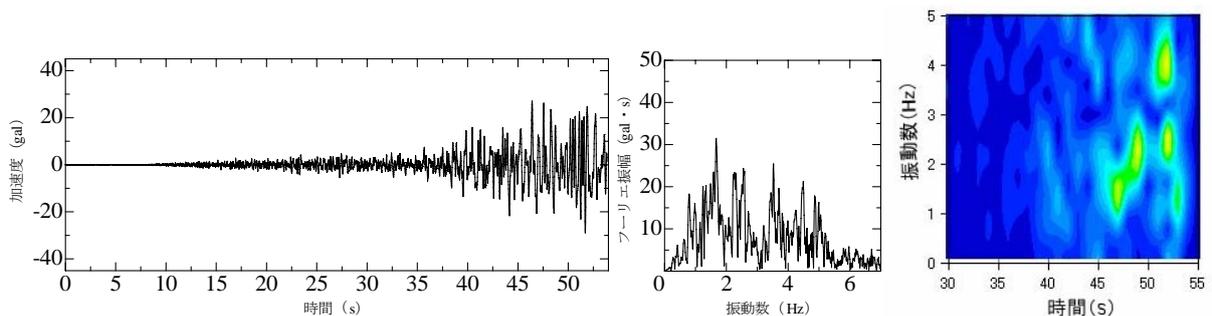


図 11 観測結果 (D 点 EW 成分)

3.2.3 地震動特性の推移

前節では南北ラインに着目したが、本節では異なる例として東西ラインに着目する。東西ラインの各観測点 EW 成分に関して、加速度時刻歴を図 12 に、フーリエスペクトルを図 13 に、ランニングスペクトルを図 14 に示す。なお、最も大きな加速度が観測された 43 秒から 55 秒 (図 12 は 48~51 秒) 付近の範囲を示した。茨城県つくば市に位置する筑波大学は、震源位置から見て南西の方角にあるため、より東寄りの F 点から順

に西向きに伝播している様子が確認できる。また、表 4 は前節と同様の方法（48.0 秒付近から 48.4 秒付近における各観測点での加速度の最大値）により算出した地震動の伝播に要する時間差を示している。

フーリエスペクトルからは、卓越している振動数帯域の大きな違いは見られない。また、ランニングスペクトルからは、主要動である 43 秒から 55 秒の範囲において、ほぼ同様の振動数特性を持っていることが確認できる。

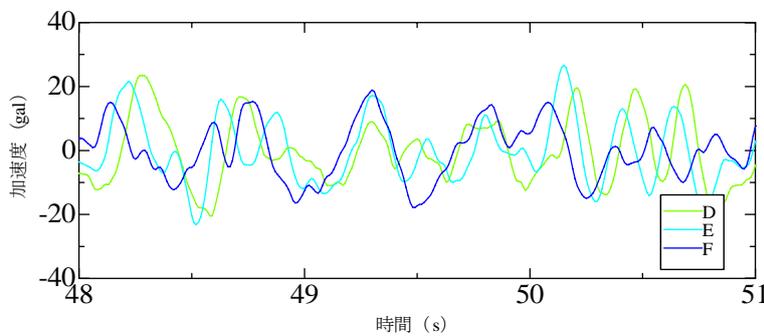


表 4 地震動到達時間差

観測点間 (距離)	時間差 (ms)
F-E (181m)	80
E-D (147m)	60

図 12 加速度時刻歴（東西ライン EW 成分）

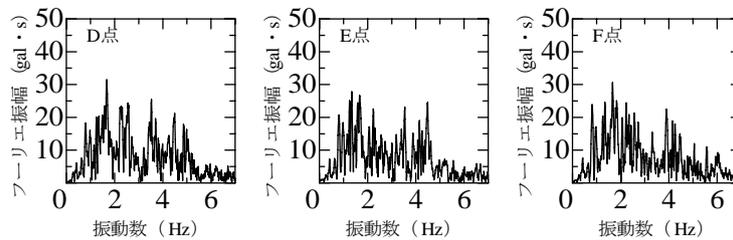


図 13 フーリエスペクトルの比較（東西ライン EW 成分）

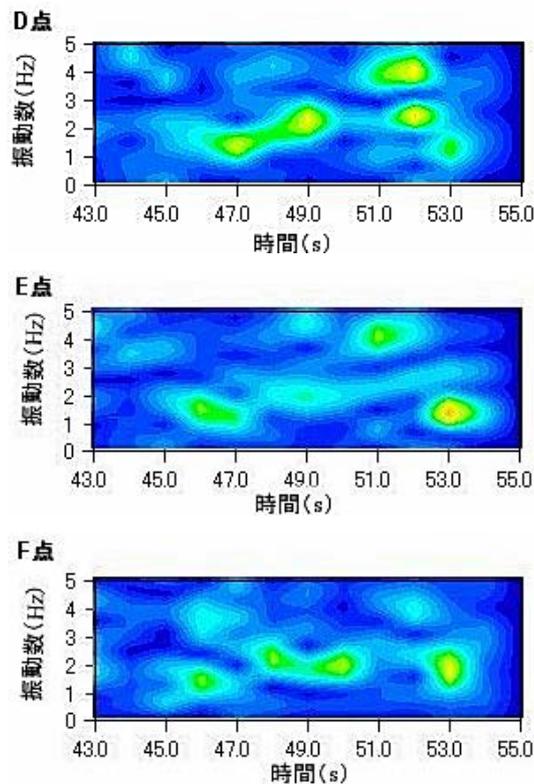


図 14 ランニングスペクトルの推移（東西ライン EW 成分）

4. 可変剛性構造物のフィードフォワード制御シミュレーション

著者らは、地震動情報の即時配信を利用したフィードフォワード制御の対象として、可変剛性構造物に着目している。これは、供給エネルギーが少なく済むセミアクティブ制振でフィードバック情報を必要としない制御が可能であることを主な理由としており、具体的な構造としてはロック機構を有する免震住宅等に対応させることができる。本章では、前章で観測された地震動を用いて可変剛性構造物を対象としたフィードフォワード制御のシミュレーションを行う。

4.1 解析方法

可変剛性構造物を模擬した1質点モデルを図15に示す。バネ剛性 K は図16のような履歴を描き、高剛性・低剛性の2種類の剛性を制御信号によって逐次切り替えることができる機構を想定している。なお、減衰はそれぞれの剛性時に対して3%としている。数値解析はNewmarkの β 法を用いた直接積分法とし、 β は1/4とした。

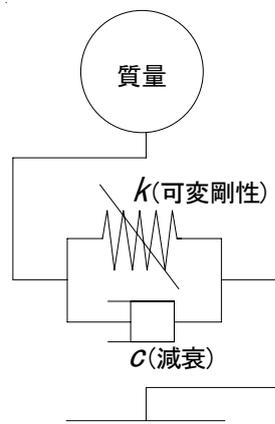


図15 解析モデル

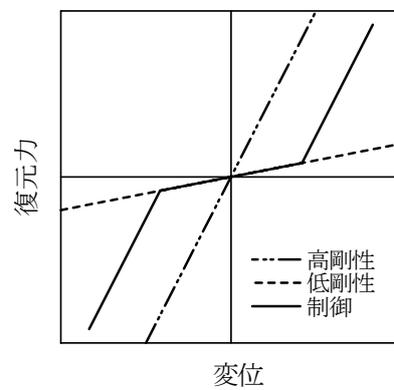


図16 可変剛性の履歴

4.2 制御方法

本シミュレーションでは、次節から示す3つの方法により、可変剛性構造物の制御を行った。

4.2.1 地盤瞬間振動数を用いた制御 (GFt 制御)

得られた地震動情報より、時々刻々と変化する地盤瞬間振動数を算出する。算出方法は(1)式に示したユレダス (UrEDAS: 早期地震検知警報システム)¹⁾ に用いられている方法を準用した。 F_i は時々刻々の地盤の振動数 (Hz)、 a_i は現時刻の地動の加速度振幅 (gal)、 v_i は現時刻の地動の速度振幅 (kine)、 A_i は加速度のパワースペクトル、 V_i は速度のパワースペクトルである。(2)、(3)式に含まれる指数平滑係数 α は0~1の範囲で任意の値を設定できる係数であり、 α が1に近いほど時間軸に対して平均化し、0に近いほど無操作の状態となる。著者らの既往の研究^{2), 3)}において、 α の値が0.98付近のときにもっとも制御効果が大いことが示されているので、本シミュレーションにおいてもこの値を採用した。

$$F_i = \frac{\sqrt{A_i/V_i}}{2\pi} \quad (1)$$

$$A_i = \alpha A_{i-1} + a_i^2 \quad (2)$$

$$V_i = \alpha V_{i-1} + v_i^2 \quad (3)$$

地盤瞬間振動数を基準として可変剛性を切り替え、避共振制御を行う。制御概念を図 17 に示す。入力波が定常の場合、構造物の応答が最小となるように図 17 の最下ラインに沿って制御を行うと、この 2 つの共振曲線の太線部分のような応答結果が得られることになる。二つの共振曲線の交点を制御振動数 F_{tc} (Hz) とし、入力される地震動の地盤瞬間振動数 Gf_t が F_{tc} 以下の状態で高剛性、 F_{tc} 以上の状態で低剛性という操作を可変剛性デバイスによって行うことで構造物の避共振化を計る。本シミュレーションでは、制御振動数を定める際の応答値として、加速度応答に着目した。

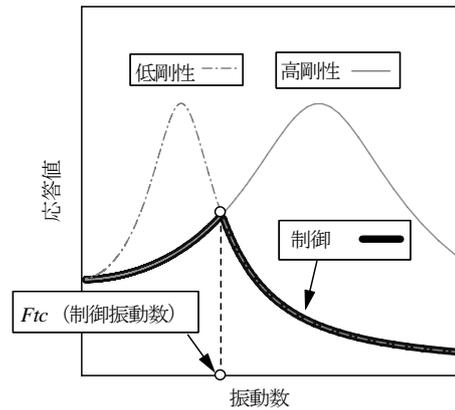


図 17 共振曲線と制御イメージ

4.2.2 ランニングスペクトルを用いた制御 (RSM 制御、RSP 制御)

得られた地震動情報のある一定時間に区切り、その時間内の地震動のフーリエスペクトルを求める。これにより、地震動の各時間帯の周波数特性が分かるため、卓越振動数を算出したり、設定周期付近の入力地震動の大小を比較したりすることで応答を小さく抑えることができるように制御を行う。

得られたランニングスペクトルを元に避共振化を計る制御方法として、次に示す 2 つの方法による。

一つは、図 18 に示すようにフーリエスペクトルの最大点のみに着目して卓越振動数を一つに決定し、図 17 に示すような共振曲線より得られる制御振動数 F_{tc} と比較する方法 (Running Spectrum control by Maximum value と称することにし、以下 RSM 制御と略す) である。具体的には、 Gf_t 制御の場合と同様に、フーリエスペクトルから求めた卓越振動数 F_t が制御振動数 F_{tc} 以下で高剛性、 F_{tc} 以上で低剛性を選択するよう制御を行う。なお、制御振動数 F_{tc} は加速度応答倍率より決めている。

もう一つは、図 19 に示すように可変剛性構造物の高剛性・低剛性の 2 つの設定周期付近の値を読み取り、その大小を比較する方法 (Running Spectrum control by Peak value と称することにし、以下 RSP 制御と略す) である。設定周期近傍のフーリエ振幅スペクトルの大小を比較し、値の小さい方を逐次選択するよう制御を行う。図中の AMP_{off} は低剛性時のフーリエ振幅スペクトルであり、 AMP_{on} は高剛性時のものである。

なお、両者共に制御間隔は、0.1 秒、0.3 秒、0.5 秒の 3 通りとした。

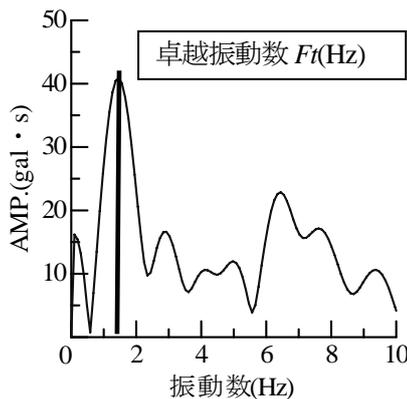


図 18 ランニングスペクトルの卓越振動数

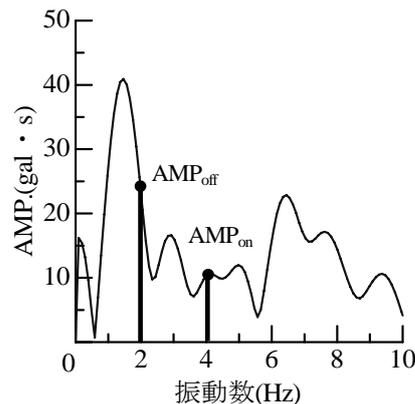


図 19 ランニングスペクトルの出力値比較

4.3 シミュレーション結果

各観測点において観測された加速度データを基に、 Gf_t 制御、ランニングスペクトル制御 (RSM 制御、RSP 制御) によって制御信号を作成する。そこで得られた制御信号を、未だ地震動の到達していない観測点に適用し、フィードフォワード制御を実施した。ランニングスペクトル制御については、ある一定時間に区切ったフーリエスペクトルを算出するための時間が必要となる。従って、地震動の到達時間差が、ランニングス

ペクトル制御で設定した時間間隔以上ある観測点にのみフィードフォワード制御は適用できることになる。可変剛性構造物の初期状態は構造物の風揺れ等を考慮し高剛性の状態を保ち、シミュレーションにおけるトリガー設定値以上の加速度が入力されると、制御信号を適用し制御を開始するといった手順を取った。

なお、本節ではシミュレーション結果の例示のため、制御信号作成点と制御点の組合せは千葉県北東部地震と宮城県沖地震で各々1つずつを採りあげることとし、次節 4.4 ではすべての点の組合せにおける最大応答値の評価を行う。

4.3.1 千葉県北東部地震

本地震動観測網で得られた千葉県北東部地震について、フィードフォワード避共振制御のシミュレーションを行った。図7より、本地震動観測網南北ラインにおいて、南方のI点から順に北の観測点に地震動が伝播していることが確認できたため、任意の観測点で作成した制御信号を、その点以北の観測点に適用しフィードフォワード制御を行った。可変剛性構造物の設定周期は高剛性 0.5 秒、低剛性 1.0 秒としている。これは、図6より、この地震動の振動特性として 1Hz および 2Hz 近辺の周波数が卓越しており、設定周期を地震動の振動特性に合わせることで、剛性の切替え効果を容易に確認しやすようにしたためである。なお、制御振動数 F_{tc} は、1.26Hz である。制御を開始するためのトリガー設定値は 5gal とした。

シミュレーション結果を、図 20～図 22 に例示する。GFt 制御、RSM 制御（制御間隔 0.3 秒）および RSP 制御（制御間隔 0.3 秒）による応答加速度、応答変位および制御信号を、それぞれ図 20、図 21 および図 22 に示す。これらは、南北ラインの A 点 EW 成分に対して、H 点で作成した制御信号を適用した場合を示している。終始制御を行わず高剛性、低剛性を保った場合の応答結果も同時に示し、制御による応答の比較をしている。

フィードフォワード制御を行うことで応答加速度は高剛性時よりも低減され、応答変位は低剛性時よりも低減されるという結果が各図から読み取ることができ、制御効果の確認ができた。

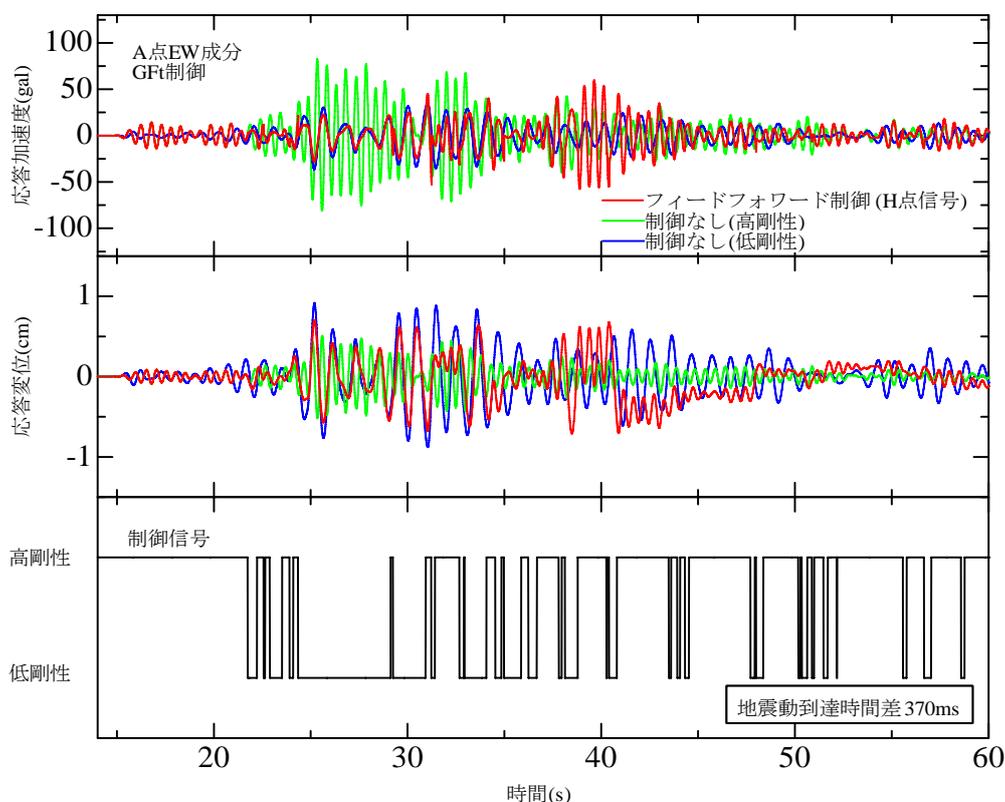


図 20 GFt 制御による制御結果（制御信号作成点：H 点）

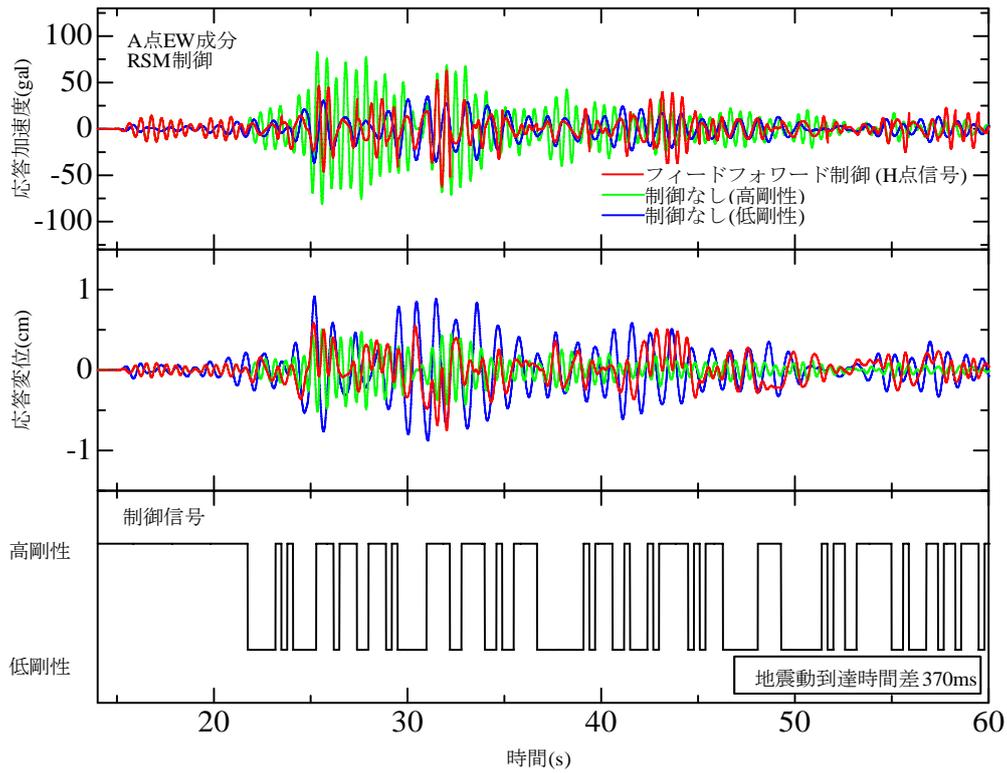


図 21 RSM 制御による制御結果 (制御信号作成点 : H 点)

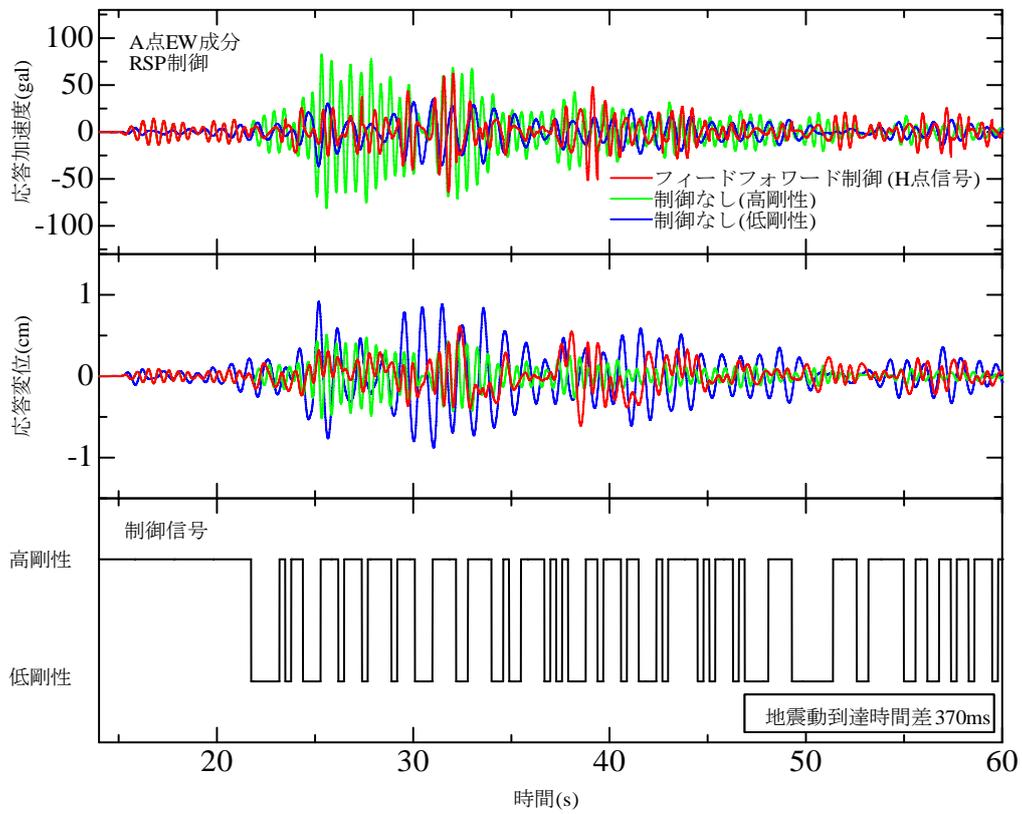


図 22 RSP 制御による制御結果 (制御信号作成点 : H 点)

4.3.2 宮城県沖地震

本地震動観測網で得られた宮城県沖地震について、同様のシミュレーションを行った。図 12 より、本地震動観測網東西ラインにおいて、東方の F 点から順に西の観測点に地震動が伝播していることが確認できたため、任意の観測点で作成した制御信号を、その点以西の観測点にて適用しフィードフォワード制御を行った。可変剛性構造物の設定周期は、前節と同様の理由により高剛性 0.25 秒、低剛性 1.0 秒としている。制御振動数 F_{tc} は 1.37Hz である。制御を開始するためのトリガー設定値は 10gal とした。

シミュレーション結果を、図 23～図 25 に例示する。GFt 制御、RSM 制御（制御間隔 0.1 秒）および RSP 制御（制御間隔 0.1 秒）による応答加速度、応答変位および制御信号を、それぞれ図 23、図 24 および図 25 に示す。これらは、東西ラインの D 点 EW 成分に対して、F 点で作成した制御信号を適用した場合を示している。

この地震動に対して、GFt 制御と RSP 制御に関しては、フィードフォワード制御を行うことで応答加速度は高剛性時よりも低減され、応答変位は低剛性時よりも低減されるという結果が各図から読み取ることができ、制御効果の確認ができた。一方、RSM 制御では、どの観測点においても終始高剛性と判断してしまうという結果が出ており、制御した場合と制御なし（高剛性）の場合との波形が一致してしまっている。これは、ランニングスペクトルの算出間隔を 0.1 秒としたため、10Hz 以下の周波数領域では適正なスペクトル振幅を計算することが不可能であるためであり、特に RSM 制御の場合その最大値のみに着目するため、周期 0.73 秒（1.37Hz）以上の領域を最大であると判断したためである。

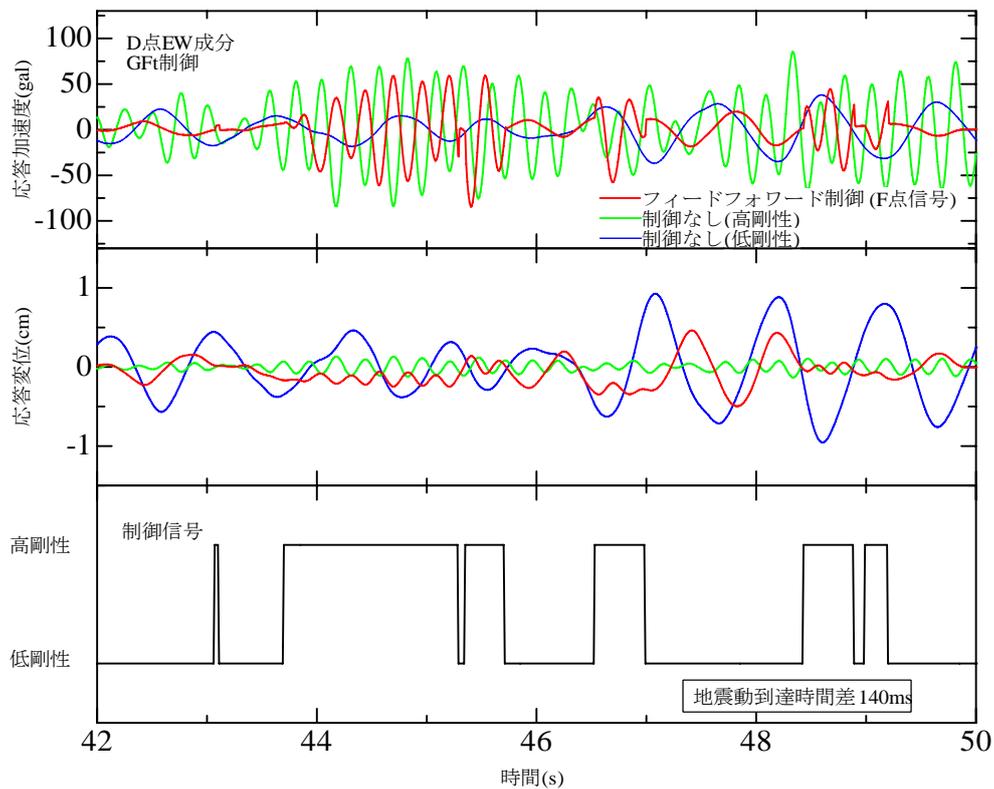


図 23 GFt 制御による制御結果（制御信号作成点：F 点）

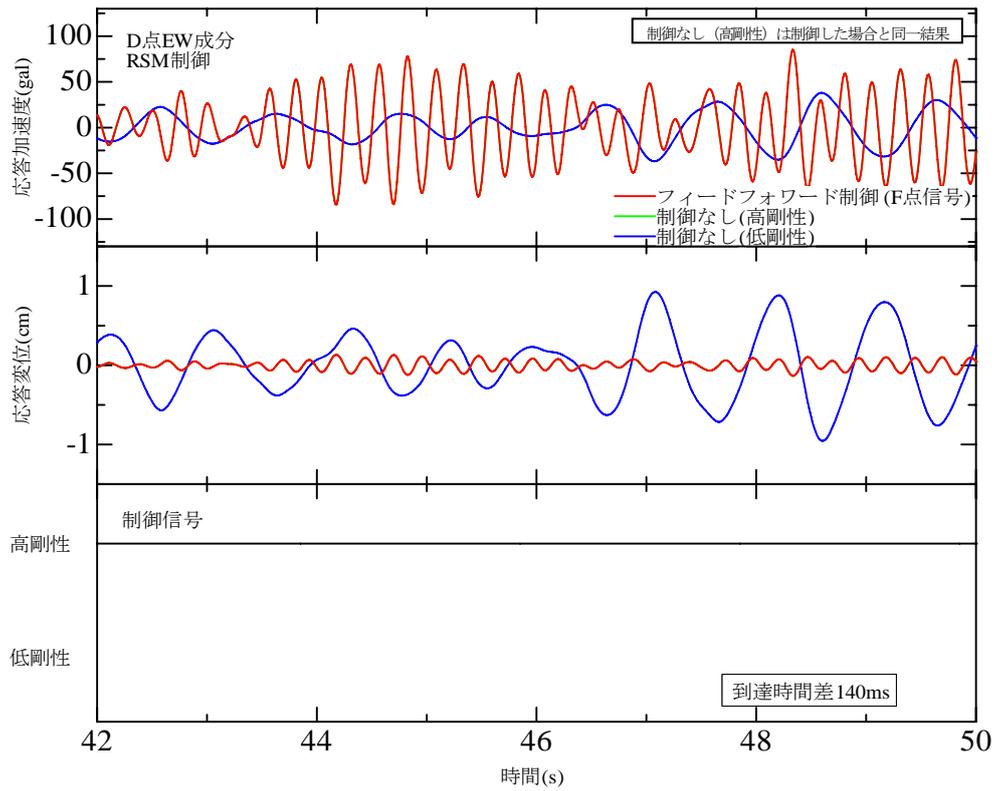


図 24 RSM 制御による制御結果 (制御信号作成点 : F 点)

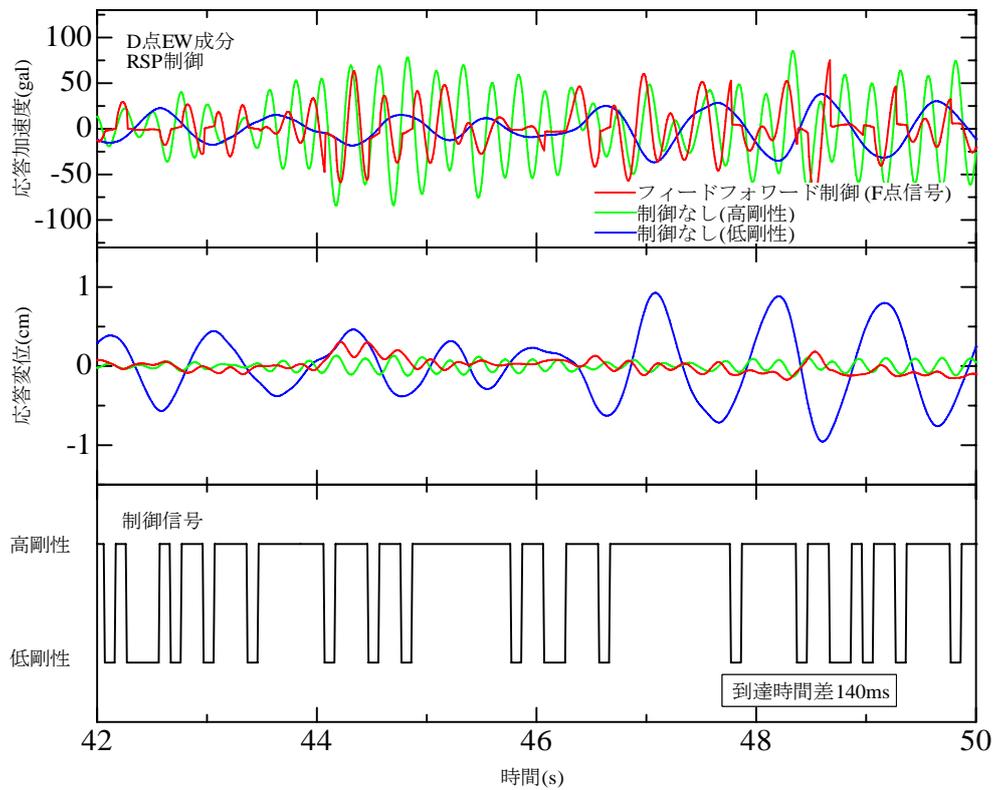


図 25 RSP 制御による制御結果 (制御信号作成点 : F 点)

4.4 評価

各観測点における制御効果を検討し、本制振システムの妥当性を確認する。EW成分に関して、観測点、制御信号作成点、制御手法ごとに、最大応答加速度を表5に、最大応答変位を表6に示す。表中の最大応答値とは、高剛性時応答と低剛性時応答（いずれも制御なし）のうち大きい値を示している。また、応答倍率は制御時の応答値を最大応答値で除した値である。

応答加速度、応答変位共に、制御による応答低減効果が確認できる。また、最も離れた地点の情報として、地震動到達時間差が約0.5秒、距離にして3200m程ある地点を制御に用いた場合においても同様に応答低減効果が得られた。実際に本制振システムを運用するにあたり、情報の伝達時間、各種被災緩和機構の始動時間等の遅れを生じるが、これらの所要時間は0.5秒以内に納まると考えられるので、地震動到達の前に被害緩和等の対処が出来ると判断できる。

表5 最大応答加速度一覧 (EW成分)

対象点	制御信号作成点	地震動到達時間差 (ms)	観測点間距離 (m)	最大応答加速度 (gal)			Gft制御		RSM制御						RSP制御													
				高剛性	低剛性	最大応答	制御	応答倍率	時間間隔			時間間隔			時間間隔													
									0.1秒	0.3秒	0.5秒	0.1秒	0.3秒	0.5秒	0.1秒	0.3秒	0.5秒											
A	B	40	586	83	36	83	76	0.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	80	880	83	36	83	65	0.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D	140	1371	83	36	83	46	0.56	83	1.00	-	-	-	-	61	0.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	G	200	1712	83	36	83	45	0.54	83	1.00	-	-	-	-	58	0.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	370	2524	83	36	83	60	0.72	83	1.00	63	0.76	-	-	65	0.79	64	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	510	3201	83	36	83	62	0.75	83	1.00	48	0.58	29	0.35	40	0.49	54	0.65	23	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-
B	C	40	294	121	66	121	63	0.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D	100	785	121	66	121	86	0.71	121	1.00	-	-	-	-	88	0.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	G	160	1126	121	66	121	93	0.77	121	1.00	-	-	-	-	87	0.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	330	1938	121	66	121	85	0.70	121	1.00	88	0.73	-	-	76	0.63	91	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	470	2615	121	66	121	86	0.71	121	1.00	87	0.72	-	-	77	0.63	88	0.73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	D	60	491	134	51	134	80	0.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	G	120	832	134	51	134	46	0.34	134	1.00	-	-	-	-	75	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	290	1644	134	51	134	59	0.44	134	1.00	-	-	-	-	66	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	430	2321	134	51	134	48	0.36	134	1.00	105	0.78	-	-	65	0.48	99	0.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	G	60	341	145	53	145	57	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	230	1018	145	53	145	56	0.38	145	1.00	-	-	-	-	86	0.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	370	1695	145	53	145	45	0.31	145	1.00	60	0.42	-	-	114	0.79	81	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	H	170	812	156	62	156	92	0.59	156	1.00	-	-	-	-	106	0.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	310	1489	156	62	156	59	0.38	156	1.00	83	0.53	-	-	97	0.62	106	0.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	I	140	677	117	56	117	62	0.53	117	1.00	-	-	-	-	81	0.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表6 最大応答変位一覧 (EW成分)

対象点	制御信号作成点	地震動到達時間差 (ms)	観測点間距離 (m)	最大応答変位 (cm)			Gft制御		RSM制御						RSP制御														
				高剛性	低剛性	最大応答	制御	応答倍率	時間間隔			時間間隔			時間間隔														
									0.1秒	0.3秒	0.5秒	0.1秒	0.3秒	0.5秒	0.1秒	0.3秒	0.5秒												
A	B	40	586	0.5	0.9	0.9	0.9	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	80	880	0.5	0.9	0.9	1.0	1.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D	140	1371	0.5	0.9	0.9	0.6	0.64	0.5	0.57	-	-	-	-	0.7	0.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	G	200	1712	0.5	0.9	0.9	0.5	0.58	0.5	0.57	-	-	-	-	0.6	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	370	2524	0.5	0.9	0.9	0.7	0.77	0.5	0.57	0.8	0.82	-	-	0.7	0.73	0.6	0.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	510	3201	0.5	0.9	0.9	0.9	0.95	0.5	0.57	0.6	0.60	0.7	0.76	1.0	1.10	0.7	0.72	0.7	0.72	0.7	0.71	-	-	-	-	-	-	-
B	C	40	294	0.8	1.7	1.7	0.6	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D	100	785	0.8	1.7	1.7	1.1	0.65	0.8	0.46	-	-	-	-	0.9	0.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	G	160	1126	0.8	1.7	1.7	1.3	0.78	0.8	0.46	-	-	-	-	0.6	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	330	1938	0.8	1.7	1.7	0.9	0.56	0.8	0.46	1.0	0.58	-	-	0.9	0.53	1.3	0.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	470	2615	0.8	1.7	1.7	0.9	0.56	0.8	0.46	1.0	0.59	-	-	0.8	0.50	0.9	0.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	D	60	491	0.8	1.3	1.3	0.7	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	G	120	832	0.8	1.3	1.3	1.0	0.77	0.8	0.66	-	-	-	-	1.0	0.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	290	1644	0.8	1.3	1.3	1.3	1.00	0.8	0.66	-	-	-	-	0.7	0.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	430	2321	0.8	1.3	1.3	1.1	0.89	0.8	0.66	1.2	0.94	-	-	1.1	0.84	1.2	0.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	G	60	341	0.9	1.3	1.3	0.9	0.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	230	1018	0.9	1.3	1.3	0.9	0.66	0.9	0.68	-	-	-	-	0.7	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	370	1695	0.9	1.3	1.3	0.8	0.59	0.9	0.68	0.9	0.68	-	-	0.8	0.61	0.8	0.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	H	170	812	1.0	1.6	1.6	1.2	0.77	1.0	0.62	-	-	-	-	1.0	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	310	1489	1.0	1.6	1.6	1.1	0.73	1.0	0.62	1.4	0.87	-	-	0.7	0.47	1.3	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	I	140	677	0.7	1.4	1.4	1.1	0.77	0.7	0.52	-	-	-	-	0.7	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5.結論

提案する能動型防災システムの高密度地震動観測網を擬似的に筑波大学地下共同溝内に構築し、地震動観測を実施した。得られた観測データのうち、2005年4月11日の千葉県北東部地震および2005年8月16日の宮城県沖地震に関して、地震動特性、伝播状況を検討し、本地震動観測網内における地震波の伝達に要する時間差を算出した。各地震動に対して、地盤瞬間振動数を用いた制御（GFt 制御）、ランニングスペクトルを用いた制御（RSM 制御、RSP 制御）を用いて、フィードフォワード避共振制御のシミュレーションを行った。その結果、制御を行わなかった場合に比べると、制御を適用することで応答加速度、応答変位共に低減されており、制振効果を確認することができた。

本シミュレーションでは、あらかじめ得られた地震動の全時間データを元に地震動の到達時間差および伝播方向を特定しているが、実際のシステムではこれらも即時的に行う必要がある。そのためには、対象とする構造物に地震動が到達する前に少なくとも空間的に3地点のデータが必要であり、本研究で構築した地震観測網だけでは、それらのシミュレーションは不可能であった。さらに本シミュレーションでは、すべての観測点での情報の組合せに対して検討を行ったが、実際のシステムでは情報の内容に応じてそれらを取捨選択する必要がある。今後、地震動観測点数を増加させて基礎データ数を増やしていくとともに、地震動の到達時間差および伝播方向の特定に関する検討を行いたいと考えている。

謝辞

筑波大学地下共同溝地震観測網は、東京大学地震研究所瀧澤一起先生、坂上実先生の多大なるご協力の下に構築したものである。また、本研究の一部は2004年鹿島学術振興財団研究助成による。

参考文献

- 1) 中村豊：研究展望、総合地震防災システムの研究、土木学会論文集、No.531、1996.1、pp.1-33
- 2) 折田潤、村山良太、金久保利之：地震動の即時配信による能動型防災システムの構築 その6：可変剛性建物の制御方法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2005.8、pp.639-640
- 3) 村山良太、折田潤、金久保利之：地震動の即時配信による能動型防災システムの構築 その7：可変剛性建物の各種制御方法の制振効果比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2005.8、pp.641-642

(受理：2006年2月28日)
(掲載決定：2007年1月22日)

Fundamental Study on Feedforward Type Control System using Real-Time Earthquake Motion Network

ORITA Jun¹⁾, KANAKUBO Toshiyuki²⁾, SAKAI Yuki²⁾

- 1) Graduate student of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba
- 2) Assoc. Prof., Graduate Schl. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr.E

ABSTRACT

Immediate casting technology of earthquake motion has been becoming possible by development of information technology. This paper describes the effectiveness of active disaster prevention system using immediate casting

information of earthquake motion. This system consists of high density seismological observation network in certain focused area. This system makes possible to expect the earthquake motion by using time lags between transmission speed of information and propagating speed of earthquake. This observation network system was actually constructed in the utility tunnel of University of Tsukuba and earthquake motion observation was carried out. The anti-resonance control for the variable stiffness structure is simulated using the observed acceleration data. The effectiveness of this disaster prevention system is recognized.

Key Words: Earthquake Motion Network, Disaster Prevention System, Feedforward, Variable Stiffness, Anti-Resonance