

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1：防災システムの概要と研究計画

正会員 ○金久保 利之*
同 亀田 敏弘**
同 庄司 学*

地震防災 センサー 地震動観測網 フィードフォワード セミアクティブ

1. 能動型防災システムの概要

1.1 既往の防災システム

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¹⁾。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おり、JRのUrEDASや気象庁のナウキャストが知られている。特にUrEDAS²⁾は、P波初動を検知して、マグニチュード、震央位置および深さを推定し、4秒以内に警報を出すシステムで、前述の被害予測や災害活動支援のための防災システムとは異なり、地震発生後列車の走行速度を減速して、被害自体を緩和しようとする能動型の地震防災システムと考えられる。しかし、現状では、UrEDASのようなリアルタイム地震情報を利用して被害緩和を行おうとする機構は、国外においても他に

実用化の例はなく、主として警報情報、被害度予測、救助活動支援に利用されている。これは、生情報の伝達、地震情報とするための演算およびチェック、さらに利用者への情報配信のために速くとも数分の時間を要するためである。気象庁のナウキャスト地震情報³⁾は「0次情報」としてP波検知後3秒で予測される震度等を発信するが、そのすぐ後に発生する地震動に対して、現状でどのような被害緩和行動が取れるかは未知である。

1.2 提案する能動型防災システムの概要

本研究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、ミリ秒のオーダーで、実質的に地震動の時刻歴の予期を可能にする点に

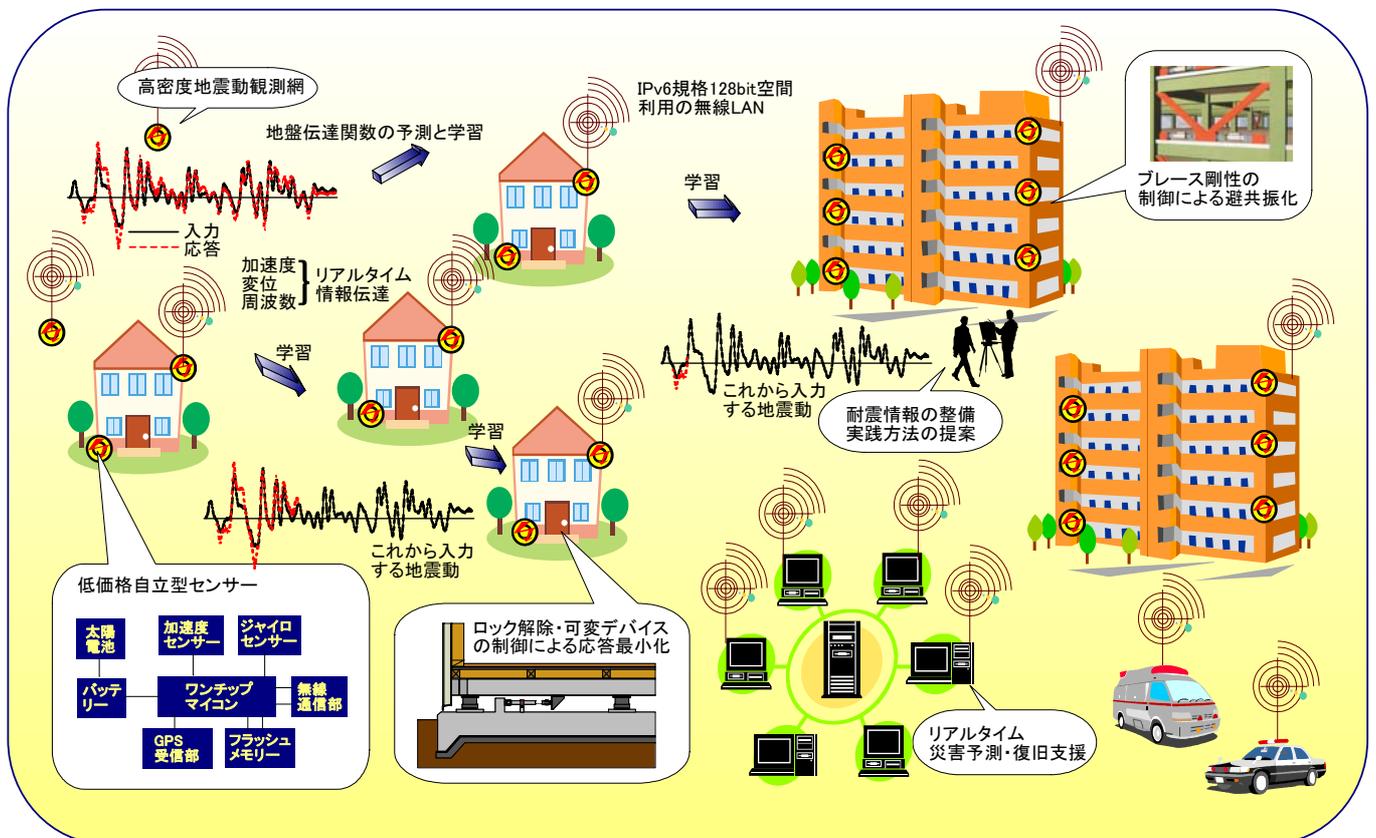


図1 地震動の即時配信による能動型防災システムの概要

ある。例えば、地域内のある箇所で地震動を受け、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。

2. システムの構築における課題と研究計画

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。

- 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
- 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

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

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	・制御エネルギー最小化 ・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

バックし、開発・構築や検証の際の目標値とする。

課題Cの検討項目は、本防災システムの適用にあたって、具体的に被害緩和のための能動的アクションを取る部分で、様々なレベルの検討が考えられる。制振方法別に見た、地震動時刻歴が既知となった場合の構造物の地震応答レベルを、図2に示す。例えば、大きな制御エネルギーとコストを費やすことができれば地震応答は0にできるが、実現は難しい。むしろ、コスト的に現実的なセミアクティブ型のフィードフォワード制御によって、どの程度の応答低減を望むことができるかが興味深い。

近年、戸建住宅においても免震構造が注目されており、十分な免震効果を得るためには免震層の剛性をかなり小さく設定する必要がある。そのため、常時微動や強風時の揺れ防止のためのロック機構が必要となっており、免震戸建住宅においては自ずと2種の剛性・減衰を備えていることになる。先のセミアクティブ型制御において、2種の剛性・減衰の切替えによって、どの程度の制振効果を見込むことができるかは、重要な検討項目である。

3. まとめ

提案する能動型防災システムの概要と検討課題を述べた。次報その2~その4では、低価格センサーの試作、可変剛性構造の制振効果および検証実験について報告する。

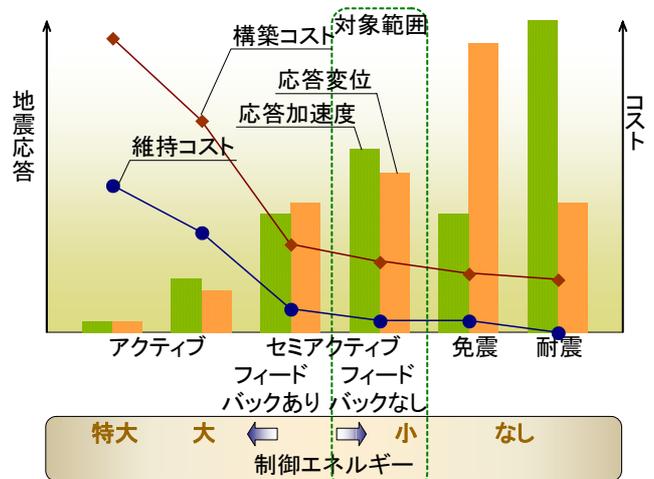


図2 課題Cにおける検討範囲

参考文献

- 1) 長能正武：国内外の防災システムのレビュー，災害からの復興と防災フロンティア，日本建築学会，pp.118~121，2004.2
- 2) 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，pp.1~33，1996.1
- 3) 横田 崇：気象庁における「ナウキャスト地震情報」の提供とその活用について，第2回国土セイフティネットシンポジウム，pp.17~24，2003.2

* 筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師・博士(工学)

** 筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師・Ph.D.

* Assist. Prof., Graduate Schl. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr.E

* Assist. Prof., Graduate Schl. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Ph.D

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2：低価格自立型加速度計測装置の開発

準会員 ○赤上 広生*
正会員 亀田 敏弘**
同 金久保 利之***

地震動観測網 自立型 加速度計測装置 大量生産民生品 時刻同期

1. はじめに

高密度地震動観測網の構築は、地震動を計測・予測する上で重要であるが、既存の装置では高価であるために困難である。この問題を解決するためには、低価格で小型かつ自立型の計測装置の大量供給が必要である。近年、小型・低消費電力・高性能な加速度センサーやワンチップマイコンなどが登場しており、これらのデバイスを組み合わせて加速度計測装置を製作する場合、計測装置の価格は通常の 1/10 程度となる。本報では、大量生産民生品向けのデバイスを利用した低価格で小型かつ自立型の加速度計測装置の開発を行い、試作品の振動計測精度ならびに計測装置間の時刻同期精度について検証を行った。なお、本報で報告する装置は、無線通信部を組込む前の状態での試作装置である。

2. 加速度計測装置の概要

2.1 ワンチップマイコン

本計測装置では、加速度センサー等の周辺機器を制御するためにワンチップマイコンを使用した。ワンチップマイコンとは、中央処理演算装置やメモリ、入出力部等の複数の Integrated Circuit (以下、IC) で構成されていたマイクロコンピュータ (以下、マイコン) 機能を 1 つの IC に凝縮し小型化したものである。したがって、外付け部品の削減による低価格化や低消費電力化が可能となった。近年では、用途を限定しない汎用ワンチップマイコンが開発され、動作速度やプログラム書き換え可能などの機能向上、チップ単価や開発コストの大幅低減により一般ユーザでも利用可能となっている。

2.2 加速度センサー

本研究の目的を達成するためには、低価格で高精度かつ取り扱いが容易な加速度センサーが必要である。また、ワンチップマイコン内蔵の A/D コンバータと直結するために、プリアンプ内蔵型加速度センサーを選択した。プリアンプとは、微弱な電気信号を増幅し、出力信号を制御する装置である。

2.3 加速度データの保存

加速度センサーで得られたデータを保存するために、不揮発性のフラッシュメモリ IC を使用した。

したがって、電力供給が遮断された場合のメモリ内容の消去がなく、地震災害時における計測装置との通信不可という最悪な場合においてもフラッシュメモリ IC 回収による加速度データ取得が可能である。また、本計測装置で使用したフラッシュメモリ IC は、書き込み時間 5ms を保証している。

2.4 計測装置間の時刻同期

本加速度計測システムでは、計測装置の複数設置を想定しているため、計測装置間の時刻同期を取るために Global Positioning System (以下、GPS) 受信機の 1PPS 信号を利用した。GPS とは、人工衛星から無線信号を送信して位置を計測する衛星航法システムである。GPS 衛星は原始時計を搭載しており、受信機側では測位演算プロセスで位置を固定することにより正確な時間が得られるため、離れた地点の時計を同期させることが可能である。

2.5 計測装置アーキテクチャ

ワンチップマイコン・3 軸加速度センサー・フラッシュメモリ IC 等を組み合わせて製作した加速度計測装置における各デバイス間の相互関係を表したアーキテクチャを図 1 に示す。なお、図中の矢印は電気信号の流れを表す。パーソナルコンピュータ (以下、パソコン) への加速度データの表示は、RS232 ケーブルを介して行っている。

2.6 加速度計測プログラム

本計測装置における計測プログラムを図 2 に示す。計測装置は、計測モード・通信モードの 2 つのモードを持つ。

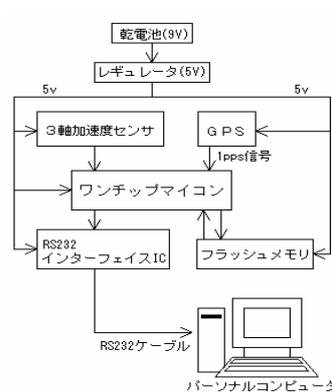


図 1 計測装置アーキテクチャ

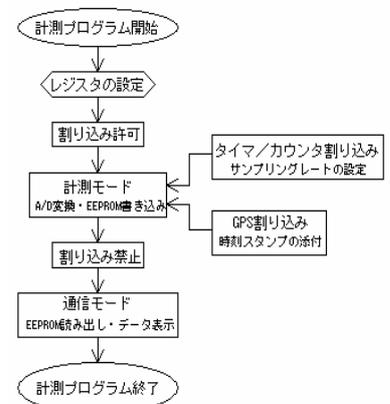


図 2 加速度計測プログラム

つ。計測モードでは、加速度センサーの出力電圧の A/D 変換とフラッシュメモリ IC へのデータの書き込みを繰り返す。また、サンプリングレートを設定するために、ワンチップマイコンのタイマ/カウンタ機能を利用した。具体的には、タイマ/カウンタ機能による割り込み発生時に加速度計測を開始する。さらに、1 秒毎の時刻スタンプを刻むために、ワンチップマイコンは GPS 受信機の 1PPS 信号の立ち上がりによって割り込みを発生し、時刻スタンプのためにあらかじめ用意した変数に「0」と「1」を交互に書き込む。指定の計測回数を超えると加速度計測を終了し通信モードに移行する。通信モードでは、フラッシュメモリ IC から加速度データを読み出し、パソコンに表示する。

3. 振動計測精度検証実験

加速度計測装置の試作品がプログラム通りに動作し加速度データの取得が可能であることを確認した上で、既存の加速度センサーと比較し試作品の計測精度について検証した。実験は、既存の加速度センサーと試作品を振動台に設置・固定をし、計測時間を 10 秒間、サンプリングレートを 100Hz として、 x 軸・ y 軸・ z 軸について 2Hz の正弦波で振動を加えた。 x 軸、 y 軸方向の加速度時系列を図 3 および図 4 に示す。また、得られた加速度データをフーリエ変換することにより、周波数成分の検出を行った(図 5、図 6)。計測開始時にデータが乱れる箇所が見られるが、その後はおおむね良好に計測できている。乱れた箇所のデータを除けば、周波数特性も既存の加速度センサーと良く一致している。

4. 時刻同期取得実験

GPS 受信機の 1PPS 信号を利用した計測装置間の時刻同期の取得について検証を行うことを目的とした実験を行った。具体的には 2 個の計測装置・GPS 受信機を使用して、異なる地点で同時に計測を開始させた。GPS アンテナの設置位置は、A 地点(北緯 36 度 06.5718 分・東経 140 度 06.0216 分)、B 地点(北緯 36 度 06.5355 分・東経 140 度 06.0551 分)であった。A 地点に設置した計測装置が刻んだ時刻スタンプを図 7 に示す。なお、図中の横軸は、セラミック振動子を使用した計測装置オリジナルの時刻である。

5. まとめ

本報では、大量生産民生品向けのワンチップマイコンや加速度センサー等を使用した低価格自立型の加速度計測装置を試作し、試作品の振動計測精度ならびに計測装置間の時刻同期の取得について検証を行った。今後、無線通信部を組み込み、同様に検証実験を行う予定である。

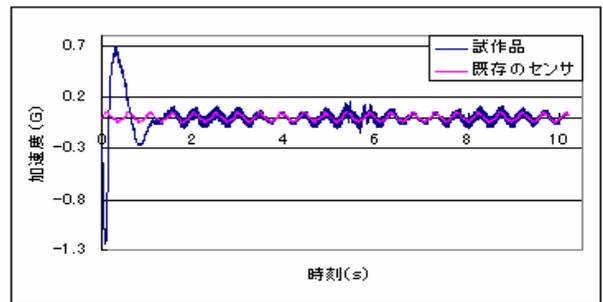


図 3 加速度時系列 ($x-2$)

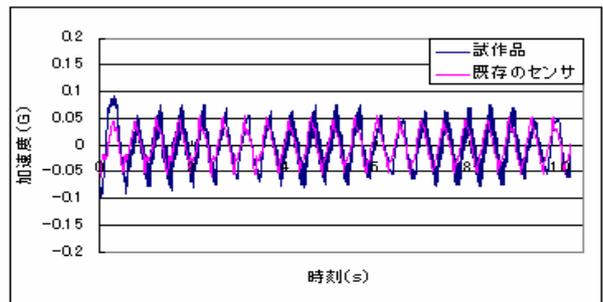


図 4 加速度時系列 ($y-2$)

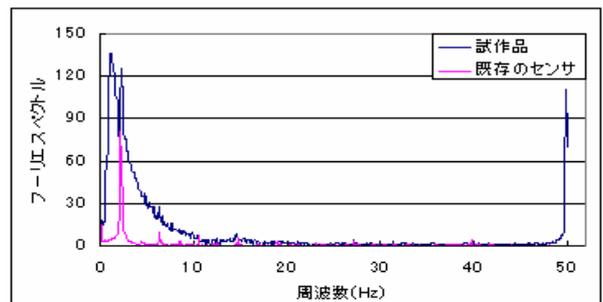


図 5 フーリエスペクトル ($x-2$)

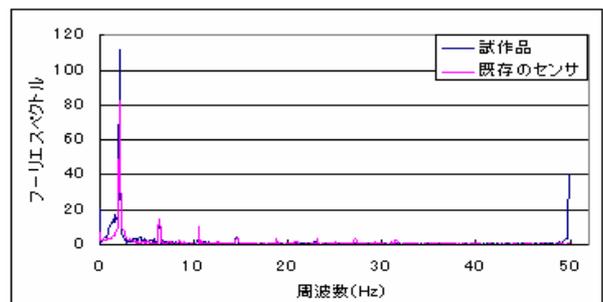


図 6 フーリエスペクトル ($y-2$)

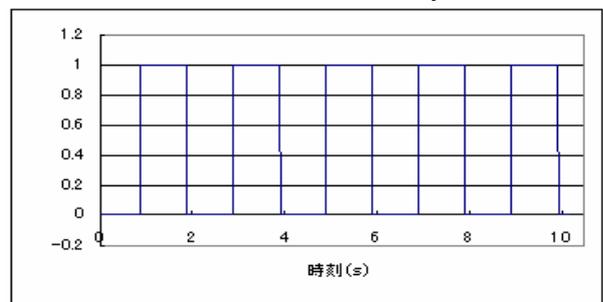


図 7 A 地点での時刻スタンプ

* 筑波大学大学院システム情報工学研究科 大学院生
 ** 筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師・Ph.D
 *** 筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師・博士(工学)

* Graduate student of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba
 ** Assist. Prof., Graduate Schl. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Ph.D
 *** Assist. Prof., Graduate Schl. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr.E

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3：可変剛性建物の制振効果

正会員 村山 良太*
 同 折田 潤*
 同 金久保 利之**

可変剛性 避共振 フィードフォワード 地盤振動数 指数平滑係数

1. はじめに

本報では、地震動の即時配信が可能となり、地震動の時刻歴が既知となった場合の建造物の制御システムの開発を目的とし、2つの剛性を有する可変剛性建物の制振効果を、地震応答解析により検討する。

2. 制御方法

フィードフォワード制御の前提は、対象としている建造物へ入力される地震波の時刻歴が既知ということである。地震波の特徴として時々刻々変化する地盤振動数を用い、次の瞬間には最適であろう対応を建造物に対して行い、地震応答を抑制するというのが目的である。ここでの地盤振動数の算出方法としては(1)式に示した、UrEDAS¹⁾に用いられている方法を準用した。 α は指数平滑係数を示し、値が1に近いほど地盤振動数時刻歴を平均化し、0に近いほど無操作の状態となる1つのパラメータとして扱える。

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

F_i : 時々刻々の地盤振動数
 a_i : 現時刻の地盤の加速度振幅
 v_i : 現時刻の地盤の速度振幅
 A_i : 加速度のパワースペクトル
 V_i : 速度のパワースペクトル

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

$$V_i = \alpha V_{i-1} + v_i^2$$

制御方法としては、対象としている建造物について、加速度の共振曲線に着目する。建造物を長周期化し地震による共振を避けるというのが免震の考えだが、これでは長周期が卓越した地震動に対しては有効ではない。そこで、あらゆる周期を持った地震動時刻歴に対応するために、固有周期を短周期（高剛性）、長周期（低剛性）へと移行できるような可変剛性デバイスを備えた建造物について考察する。この建造物の共振曲線を描くと図1のようになる。どのような周期成分をもった地震動が入力された場合でも建造物の応答加速度が最小となるように、図1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。2つの共振曲線の交点を制御振動数 F_{tc} とし、地震動の瞬間地盤振動数が F_{tc} 以下の状態で高剛性、 F_{tc} 以上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建造物の共振を避け、あらゆる周期成分をもった地震動に対して最適な制御を実施する。

3. 地震応答解析

想定建造物を免震中層建物とし、図2に示す1質点モデルで模擬した。また、 K は可変剛性を表し、図3に示すような剛性切り替えを行い、制御を行う。解析モデルの固有周期は高剛性時0.5秒、低剛性時1.5秒とし、制御振動数は共振曲線より得られた交点より0.89Hzとする。減衰は7%および15%の2種類を解析対象とした。解析方法は、Newmarkの β 法を用いた直接積分法による時刻歴応答解析とし、入力地震波は、El Centro NS、Taft NS、建築センター模擬波（Bcj-L1, Bcj-L2）、Hachinohe NS、Mexico、Miyagiの7波とした。解析においては地震動の時刻歴が既知であるため、計算を行うそのステップ毎の加速度データを用いて、時々刻々の地盤振動数を求めている。

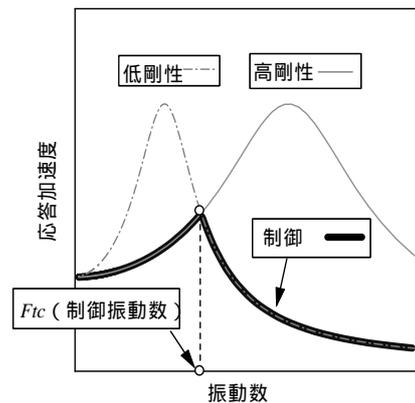


図1 制御概念

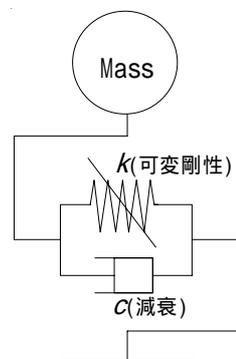


図2 解析モデル

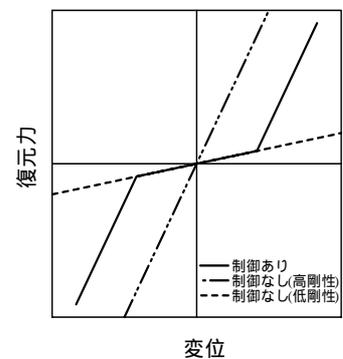


図3 可変剛性

4. 解析結果

4.1 解析結果の例

El Centro NS 波における制御なし（高剛性、低剛性）および制御した場合の応答加速度、応答変位、制御信号の時刻歴を図 4 に示す。なお、指数平滑係数 α は 0.95、減衰定数は 7%とした。制御により応答加速度は低剛性と同程度に低減され、応答変位は低剛性の場合と比べて 3 割程度抑制されていることが確認できる。また、地震終了後に低剛性となるため、残留変形は残らない。

4.2 指数平滑係数 の検討

(1)式の指数平滑係数 α の値をパラメータとして、 α と El Centro NS、Taft NS 波における最大応答値の関係を図 5 に示す。応答値は α に影響を受け、およそ 0.95 程度の時に応答加速度、応答変位ともに小さい値を示している。

4.3 種々の地震波における最大応答値

先の地震動 7 波について、制御なし（高剛性、低剛性）および制御した場合の最大応答値を、表 1 に示す。

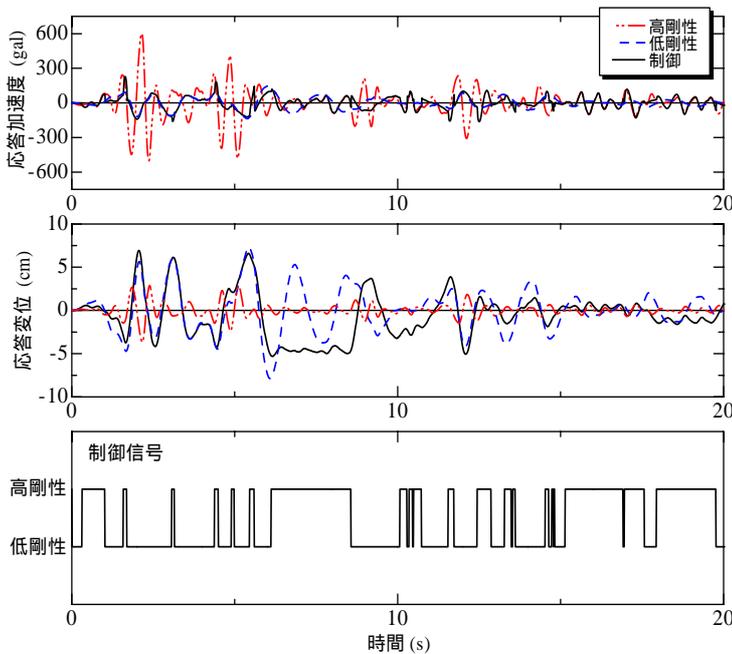


図 4 応答時刻歴 (El Centro NS)

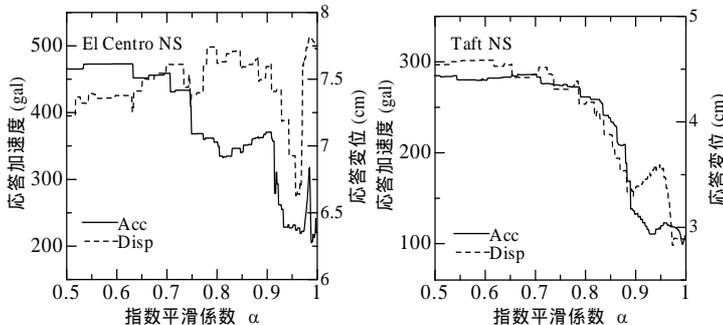


図 5 指数平滑係数 α と最大応答値の関係

各地震波において、高剛性時に比べて応答加速度の低減、低剛性時に比べて応答変位の抑制が確認できる。また、長周期成分の多い Mexico 波は卓越振動数が 0.5Hz 程度の長周期地震であり、低剛性時は共振してしまうため、制御することで常に高剛性の状態を保っていることが分かる。逆に、卓越周期が 6.5Hz 程度の極短周期である Miyagi 波では、地震開始直前に低剛性に切り替わり、応答は低剛性の場合と同値を示している。各地震波の性質を予測し、入力外乱に対して剛性を変化させることで柔軟に対応できていることが確認できる。

5. まとめ

建造物の固有周期を変化させるように可変剛性デバイスをフィードフォワード制御することで、応答加速度の低減、応答変位の抑制が確認できた。

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，pp.1-33，1996.1

表 1 最大応答値

		最大応答値			
		$h=0.07$		$h=0.15$	
		加速度 (gal)	変位 (cm)	加速度 (gal)	変位 (cm)
$\alpha = 0.95$	高剛性	753	4.7	604	3.7
	制御	258	7.9	228	6.9
	低剛性	178	10.0	147	7.9
El Centro NS	高剛性	335	2.1	236	1.4
	制御	150	4.8	119	3.5
	低剛性	107	6.0	93	4.9
Taft NS	高剛性	530	3.3	353	2.1
	制御	434	7.2	323	6.1
	低剛性	181	10.1	136	7.1
Bcj-L1	高剛性	899	5.6	631	3.8
	制御	1001	18.3	736	13.3
	低剛性	344	19.3	299	16.2
Bcj-L2	高剛性	468	2.9	465	2.6
	制御	447	9.1	284	8.1
	低剛性	163	9.1	154	8.1
Hachinohe	高剛性	260	1.6	218	1.3
	制御	260	2.2	218	2.1
	低剛性	523	30.0	386	21.0
Mexico	高剛性	151	0.9	145	0.7
	制御	65	3.5	53	2.4
	低剛性	65	3.5	53	2.4
Miyagi	高剛性	65	3.5	53	2.4
	制御	65	3.5	53	2.4
	低剛性	65	3.5	53	2.4

* 筑波大学大学院システム情報工学研究科
** 筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師・博士（工学）

* Graduate student of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba
** Assist. Prof., Graduate Schl. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr.E

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4：可変剛性建物の制振効果の検証実験

正会員 ○折田 潤*
同 村山 良太*
同 金久保 利之**

加振実験 制振 フィードフォワード 可変剛性 避共振

1. はじめに

本報では、フィードフォワード制振の妥当性を検証するために、可変剛性システムを備えたモデルを作製し、加振実験を行う。

2. 実験モデル

2.1 概要

対象を中層建物と想定し、対象建物の固有周期を高剛性時 0.5 秒、低剛性時 1.5 秒に設定した上で、縮小実験モデルを作製した。実験モデルの詳細を図 1 に示す。柱梁接合部は全てピンで、復元力を持たせるために第一、三層にブレース状にばねを設置した。また、第二層から第三層床部分にかけて、マグネットホルダーを用いた可変剛性デバイスを配した。マグネットホルダーへの電流の有無により剛性が変化し、電流を流さない状態では接合部がピンのみのため低剛性となり、電流を流している状態では可変デバイスによって第二層の変形がロックされ、高剛性となる。

2.2 特性値の同定

自由振動実験、振動台による正弦波加振実験を行い、実験モデルの特性値である固有周期と減衰定数を各状態で導出した。導出した各特性値を表 1 に示す。固有周期は対象想定建物の約 1/2 倍になっている。時間軸を 1/2 倍

にした Taft NS 波を入力波とし、地震応答解析および動的加振実験を行った。解析は、1 質点 1 自由度減衰系モデルとし、Newmark の β 法による直接積分により求めた。

解析結果と実験結果によるモデル応答値を比較して、図 2 に示す。解析結果はモデル応答をよく表現している。実験モデルの加速度共振曲線を図 3 に示す。

表 1 実験モデル特性値

	固有周期 (s)	減衰定数
低剛性時	0.74	0.07
高剛性時	0.29	0.07

3. 地震波加振実験

3.1 実験概要

振動台により、実験モデルに対してフィードフォワード制御をかけることで、制振効果の妥当性を検討する。実験に使用した地震波は、El Centro NS 波、Kobe NS 波、Mexico EW 波で、各地震動の時間軸を 1/2 倍に設定して加振を行った。制御方法は前報その 3 で解析を実施した、パワースペクトル瞬間地盤周波数による、避共振制御である。本実験モデルの制御振動数は、図 3 の共振曲線より、1.73Hz である。なお、指数平滑係数 α は 0.95 とした。

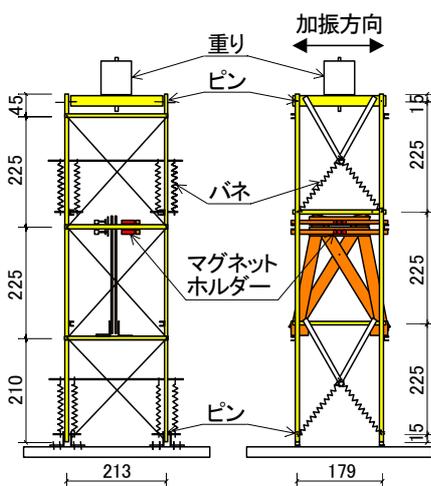


図 1 実験モデル

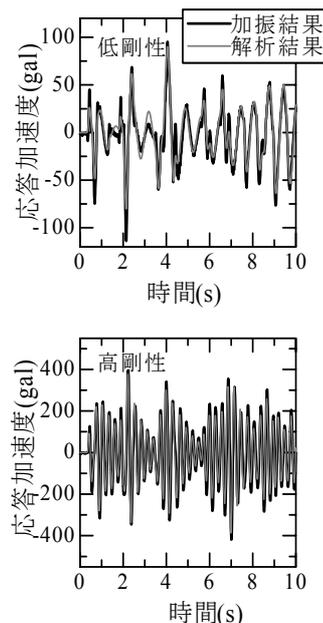


図 2 応答時刻歴比較

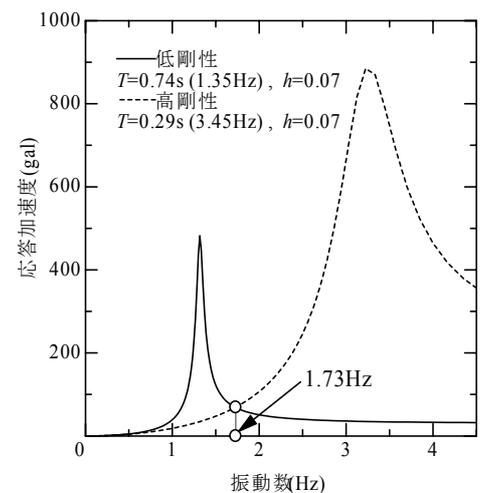


図 3 共振曲線

3.2 制御信号の作成

フィードフォワード制御を行うにあたり、実験モデルへの入力振動が既知である必要がある。本実験ではあらかじめ制御を行わない状態で実験モデルに各地震動を入力し、振動台の加速度を計測して、その実測値を入力振動と見立て、その後、同一の地震動による制御実験を行った。その際、入力振動（振動台加速度）の瞬間地盤振動数 ${}_gF_t$ より、制御信号をあらかじめ作製した。なお、低剛性から高剛性への切替時に、可変剛性デバイスの機械的応答時間遅れを考慮し、制御信号を各入力波に対して 40ms 分早めて入力するようにした。

3.3 実験結果

El Centro NS 波入力時について、制御をかけた場合、制御しない場合（高剛性、低剛性）の各応答および制御信号の時刻歴を図 4 に示す。また、入力地震波ごとの最大応答値を、制御の有無ごとに図 5 に示す。各地震波について、制御を行うことで応答の低減が見られ、制御による制振効果が確認された。なお、Kobe NS 波については入力加速度が過大であったために、高剛性時にマグネットホルダー部の滑りが生じ、可変剛性デバイスのロック部分が完全に機能しなかった。最終的に高剛性の状態で終わる場合に現れる残留変形は、地震動終了から十分時間が経った後に、ロックを解除することにより無くなる。

3.4 実験結果と解析結果の比較

解析対象を 1 質点モデルとし、Newmark の β 法による直接積分で制御時の応答解析を行った。El Centro NS 波入力において、解析結果と実験結果の応答および制御信号時刻歴を比較したグラフを、図 6 に示す。入力地震波毎の、制御による最大応答値の解析結果と実験結果の比較を表 3 に示す。比較的良い一致を示している。

4. まとめ

加振実験結果より、各種地震動に対する各応答の低減が見られ、瞬間地盤周波数によるフィードフォワード型避共振制御の制振効果が確認された。

表 3 最大応答値の比較

		解析	実験
最大応答 加速度 (gal)	El Centro NS	413	307
	Kobe NS	741	388*
	Mexico EW	170	199
最大応答 変位 (cm)	El Centro NS	2.7	3.3
	Kobe NS	4.7	4.6*
	Mexico EW	0.3	0.5

*高剛性時の可変剛性デバイスロック部分の滑りを確認

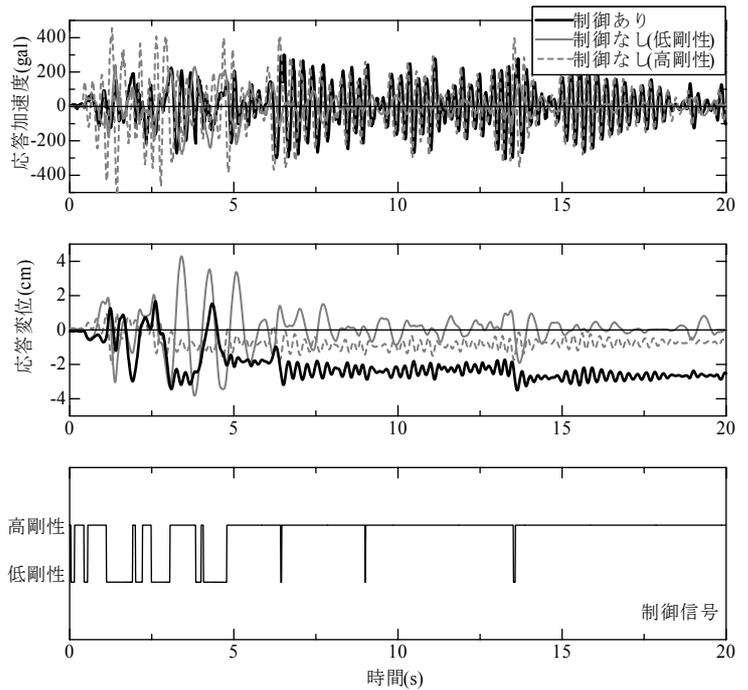


図 4 El Centro NS 波による実験結果

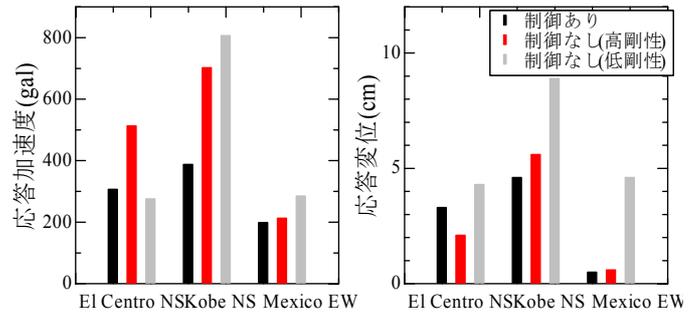


図 5 各地震波での最大応答値

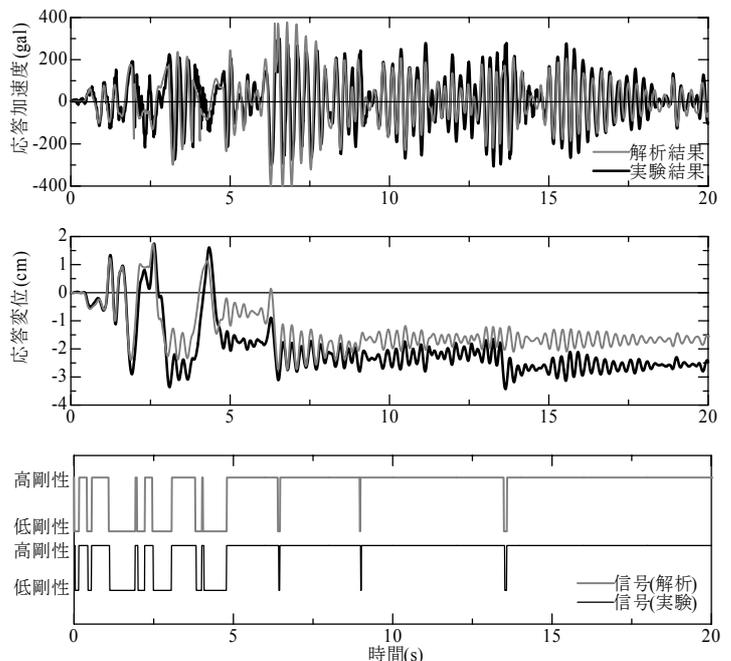


図 6 実験結果と解析結果の比較 (El Centro NS 波)

* 筑波大学大学院システム情報工学研究科

** 筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師・博士 (工学)

* Graduate student of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba

** Assist. Prof., Graduate Schl. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr.E