

平成 22 年 4 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19510186
 研究課題名（和文） 緊急地震速報を利用した入力地震動波形のリアルタイム推定手法構築と構造制御への応用
 研究課題名（英文） Real-time prediction of earthquake ground motion for structural control using information of earthquake early warning
 研究代表者
 長島 一郎（NAGASHIMA ICHIRO）
 大成建設株式会社・技術センター・建築技術研究所・防災研究室・室長
 研究者番号：10374042

研究成果の概要：地震時に震源近傍で観測される地震動波形を、時々刻々コンピュータに伝送し、震源から離れた想定地点における主要動の地震動波形を、その到達前に計算して推定する「入力地震動波形のリアルタイム推定手法」を提案し、実際の地震観測記録を用いて有効性を実証した。インターネット回線を利用したデータ伝送試験も実施し、伝送時間遅れを実測すると共に、有効性を実証した。本研究のように想定地点における地震動波形を事前に推定する技術が確立されれば、これらの情報を用いた地震防災システムの信頼性と適用性が飛躍的に向上する効果が期待される。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地震工学、構造制御

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学 A

キーワード：リアルタイム地震防災、入力地震動、地震動シミュレーション、システム同定理論、部分空間法、状態方程式、緊急地震速報、構造制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 平成 18 年 8 月から気象庁の緊急地震速報の先行的な提供が開始された。しかしながら、これらの地震直前情報の利用は、警報による避難安全性の確保や設備機器の停止等に限定されている。この理由は、得られる情報が震度等の最大値情報のみであり、その値にも多くの誤差が含まれるため、機器等の高度な制御を行うには不十分であった。

(2) 地震波形のリアルタイム伝送システムは、気象庁や防災科学技術研究所の観測シス

テムで実用化しており、衛星通信の利用が一般的である。しかしながら、低コスト化や普及を考えた場合、インターネットの利用を検討する必要があった。

2. 研究の目的

地震発生時に、地震動の主要動が到達する前に、その地震動波形を推定する手法を構築し、リアルタイム地震防災とその応用に関する新しい研究分野を開拓する事を目的とする。

(1)地震動の長周期成分を対象として、震源近傍の観測波形を入力して、地震動を想定する地点における地震動波形を時々刻々計算して推定する「地震動予測フィルター」を構築する。

(2)地殻内地震を対象として、短周期地震動の基礎的な特性を分析し、地震動の短周期成分を対象とした入力地震動波形のリアルタイム推定手法を提案する。

(3)波形推定情報を、震源近傍の観測点から地震動予測地点までリアルタイムに伝送するインターネット利用の可能性と有効性を実証する。

3. 研究の方法

(1)地震動予測フィルターの構築

地震動の長周期成分を対象として、地震動予測フィルターを構築する。地震動予測フィルターは、震源近傍と地震動を想定する地点間の地震動の周波数伝達特性と、震源近傍の地震動波形から対象とする長周期成分を抽出するバンドパスフィルターを組合わせて構築する。理論地震動波形及び観測地震動波形を用いて、地震動予測フィルターの適用性を検証する。観測地震動波形としては、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測記録を用いて、前震で作成した地震動予測フィルターを本震に適用する場合や、本震で作成したフィルターを余震に適用する場合を想定する。

(2)短周期地震動の入力地震動波形のリアルタイム推定

地殻内地震の短周期地震動の基礎的な特性を把握した上で、入力地震動波形のリアルタイム推定の提案を試みる。まず、振幅スペクトルと位相スペクトルについて基礎的な検討を行う。振幅スペクトルに対しては、スペクトルインバージョンによる震源・伝搬経路・サイト特性の分離評価が広く行われており、本検討でも同様の分析を行う。位相スペクトルについては、振動数軸上での微分値である群遅延時間の統計量について、同様に震源・伝搬経路・サイト特性に分離し、特性の分析を行う。

既往研究では、地殻内地震の震源近傍記録を対象を絞ってこのような分析を行った例が少ないことから、本研究では 2007 年能登半島地震の余震記録を分析対象とする。以上の基礎的な検討結果に基づき、経験的に評価する伝達関数を用いた入力地震動波形のリアルタイム推定手法を提案し、提案手法の推定精度の評価を行う。

(3)インターネットを利用した地震動波形のリアルタイム伝送

地震動予測フィルターを実際に適用する場合には、地震発生時に震源近傍で観測された地震動波形を、ネットワークを利用してリ

アルタイムに伝送する必要がある。広域で安価にデータ伝送を行う方法について検討するため、インターネットの TCP/IP で波形データを伝送するプロトタイプシステムを開発する。ADSL と企業内のイントラネットを用いた比較的安価なネットワークにより、どの程度の時間遅れでデータ伝送が可能であるかを実証する。

4. 研究成果

(1)地震動予測フィルターの構築

①地震動予測フィルターの構築方法

地震動のノイズ成分を除去し、地震動予測フィルターを出来るだけ単純化するためにも、対象とする周波数成分をバンドパスフィルターで抽出する方法が有効と考えられる。しかしながら、バンドパスフィルターを通した地震動波形には位相ずれが生じるため、これを補償する必要がある。そこで、バンドパスフィルターを通した震源近傍波形と、FFTにより対象とする周波数帯成分を抽出した位相ずれの無い想定地点における地震動波形との伝達特性を部分空間法により同定し、バンドパスフィルターによる位相遅れを補償する方法を考案した。

バンドパスフィルターへの入力地震動波形と出力波形を、それぞれ $\ddot{x}(i)$ 、 $\dot{z}(i)$ とすると、フィルターの状態方程式は以下の通り記述出来る。

$$Z(i+1) = A_F \cdot Z(i) + B_F \cdot \ddot{x}(i) \quad (1)$$

$$\dot{z}(i) = C_F \cdot Z(i) + D_F \cdot \dot{x}(i) \quad (2)$$

ここで、 i は時間ステップを表し、 $Z(i)$ は状態ベクトルで次元はフィルター次数と一致する。 A_F 、 B_F 、 C_F 、 D_F は定数行列である。尚、入力地震動波形は加速度、出力波形は速度とした。

上記バンドパスフィルターの出力波形 $\dot{z}(i)$ と、FFTにより対象周波数帯成分を抽出した想定地点の地震動速度波形 $y(i)$ との伝達特性を以下の状態方程式で表現する。

$$X(i+1) = A \cdot X(i) + B \cdot \dot{z}(i) \quad (3)$$

$$y(i) = C \cdot X(i) + D \cdot \dot{z}(i) \quad (4)$$

$X(i)$ は状態ベクトルで次元はモデル次数と一致する。部分空間法で定数行列 A 、 B 、 C 、 D を推定する。

(1)～(4)式を用いて、地震動予測フィルターは以下の状態方程式で記述出来る。

$$\begin{bmatrix} X(i+1) \\ Z(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \cdot C_F \\ 0 & A_F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X(i) \\ Z(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \cdot D_F \\ B_F \end{bmatrix} \cdot \ddot{x}(i)$$

$$y(i) = [C \quad D \cdot C_F] \cdot \begin{bmatrix} X(i) \\ Z(i) \end{bmatrix} + D \cdot D_F \cdot \dot{x}(i) \quad (5)$$

②地震観測記録を用いた適用性検討

2004 年紀伊半島南東沖の地震の前震、本震、余震と、2004 年新潟県中越地震の本震と 2 つの余震を用いて検討した。各々の地震の震源

と観測点位置を図1に示す。

2004年紀伊半島南東沖の地震では、図1のA測線の地表面 Transverse 方向を対象に、KiK-netの震源近傍A1(SZOH36)の加速度波形から、想定地点A4(YMNH15)の速度波形を推定した事例を示す。前震に対して、A1地点と78km離れたA4地点間の地震動予測フィルターを作成し、本震と余震を推定した。本震と余震のA4地点の波形推定結果を前震での検証結果と共に図2に示す。ピーク前後の波形が概ね推定出来ており、15.4秒前に推定可能であった。2004年新潟県中越地震に対しても同様の検討を行い、関東平野の83km離れた2地点の本震に対して地震動予測フィルターを作成し、余震の主要なピーク前後の波形が28秒前に概ね推定出来る事を確認した。

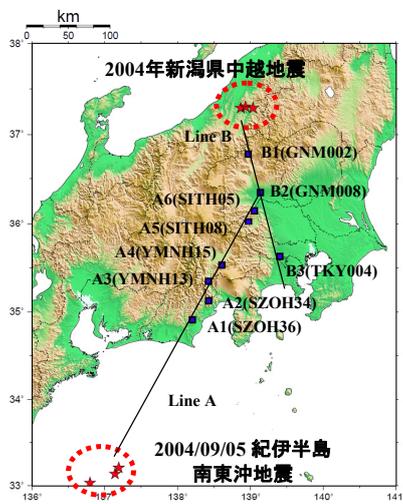


図1 震源と観測点の配置

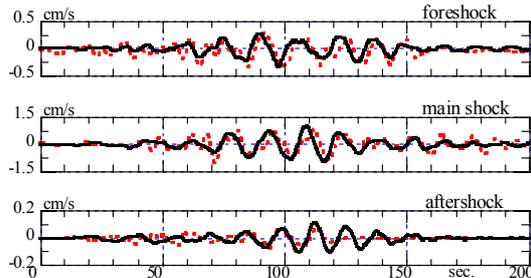


図2 地震動速度波形の推定結果例

以上より、長周期地震動成分に対して地震動予測フィルターの構築方法を提案し、観測記録を用いて有効性を例証した。

(2)短周期地震動の入力地震動波形のリアルタイム推定

①振幅・位相スペクトルに関する検討

図3に分析対象とした17地震(MJ3.9~5.2)の震央位置(黒丸白数字)と地震動観測点(K-NET, KiK-net)の分布を示す。大部分が2007年能登半島地震の余震記録である。観測記録のうち、震源距離が10km~100km

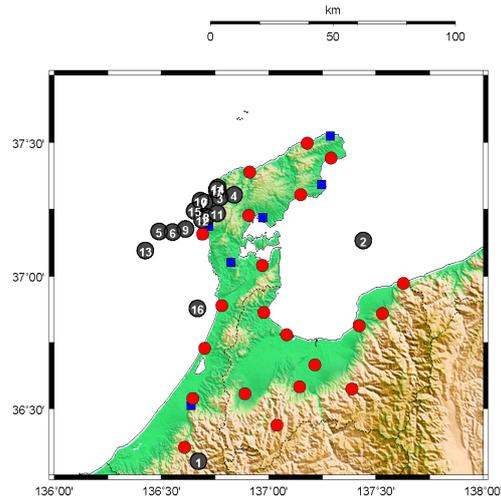


図3 震央位置と地震動観測点

の記録を選択した。

地震*i*の観測点*j*における、S波開始時間の遅れ t_{ij} 、フーリエ振幅スペクトル $A_{ij}(f)$ 、位相スペクトル(すなわち、群遅延時間の平均と分散の各々)について、スペクトルインバージョン手法を用いて基礎的な検討を行った。スペクトルインバージョンでは、地震*i*での観測点*j*における観測値 o_{ij} が、(6)式のように震源特性 s_i 、伝搬経路特性 p_{ij} 、サイト特性 g_j の和で表わされると仮定する。

$$o_{ij} = s_i + p_{ij} + g_j \quad (6)$$

伝搬経路特性 p_{ij} は、(7)式のような震源距離 r_{ij} の関数であると仮定する。

$$p_{ij} = \alpha \cdot r_{ij}^k \quad (7)$$

ここに、 α 、 k は定数である。

S波開始時間の遅れ t_{ij} は、堆積層が厚い観測点では大きくなる傾向が確認された。振幅スペクトルのインバージョン解析で求めたQ値は、他地域で求められた地殻内地震の結果と同じ傾向を示していた。また、震源距離が大きくなるにつれて群遅延時間が大きくなる傾向が見られ、これは伝搬経路の不均質性による継続時間の伸びを表していると考えられるが、震源距離70km程度で頭打ちになる傾向も見られた。

②震源近傍の観測記録を用いた地震動波形のリアルタイム推定

震源近傍の観測記録を用いた経験的伝達関数による地震動波形のリアルタイム推定手法を提案した。

振幅スペクトルについて経験的伝達関数を求める。地震*i*での2地点間の振幅スペクトルの比を震源距離や伝搬経路特性の影響を取り除いた上で(8)式で評価する。

$$R_{i,j \rightarrow k}(f) = \frac{A_{ik}(f)}{A_{ij}(f)} \cdot \frac{r_{ik}}{r_{ij}} \cdot e^{-\pi \cdot (r_{ij} - r_{ik}) / Q(f) \beta} \quad (8)$$

経験的伝達関数は、N個の地震記録を(9)式のように幾何平均することで求める。

$$R_{i,j \rightarrow k}(f) = \left(\prod_{i=1}^N R_{i,j \rightarrow k}(f) \right)^{1/N} \quad (9)$$

経験的伝達関数を用いて、(10)~(12)式で地震動波形のリアルタイム推定を行う。

$$F_{ik}(f) = R_{i,j \rightarrow k}(f) \cdot F_{ij}(f) \cdot E(f) \quad (10)$$

$$E(f) = \frac{r_{ik}}{r_{ij}} \cdot e^{-\pi f \cdot (r_{ik} - r_{ij}) / Q(f) \beta} \cdot e^{-i2\pi f \cdot (r_{ik} - r_{ij}) / \beta} \cdot e^{-i\pi f (g t_k - g t_j)}$$

$$F_{ij}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_{ij}(t) \cdot e^{i2\pi f t} dt \quad (11)$$

$$x_{ik}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{ik}(f) \cdot e^{i2\pi f t} dt \quad (12)$$

図4に経験的伝達関数を用いて(10)~(12)式で求めた波形推定結果と観測記録との比較を示す。S波開始時刻や振幅特性ともよく一致している。本事例では位相特性は補正していないが、定性的には波形を精度良く再現することが出来ている。

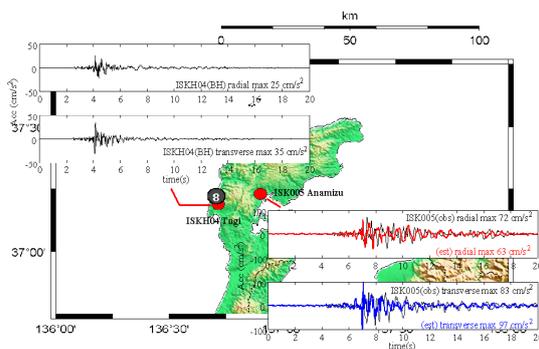


図4 推定結果と観測記録の比較例 (<10Hz)

以上より、経験的に評価する伝達関数を用いて地震動をリアルタイム推定する手法を提案し、主要動の傾向を比較的良く推定出来る事を例証した。

(3) インターネットを利用した地震動波形のリアルタイム伝送

図5に示す通り、震源近傍観測点を想定したクライアント PC で収集した微動観測データを、NTT のフレッツ・ADSL (8M タイプ) から FNICS 経由で TAISEI イントラネット内のサーバ PC へ伝送するシステムを構築し、実証試験を実施した。サンプリング周期 0.01 秒で 0.32 秒間のデータを一つのブロックとして TCP/IP で微動波形を伝送した。

各データブロックの時間遅れは図6に示す通り、概ね 200msec 以内であり、インターネット利用のデータ伝送の有用性が実証出来た。ただし、0.5%程度の頻度でパケットの遅れが生じ、180 秒間のデータに 1 回程度 1 秒以上の遅れが生じた。別途実施したイントラ

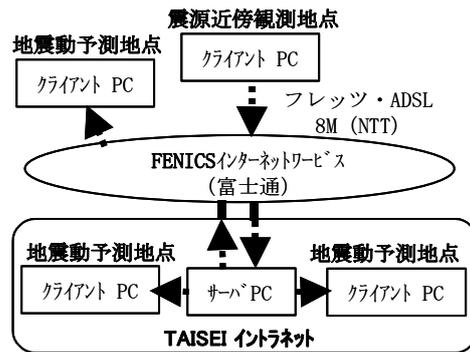


図5 データ伝送試験のネットワークの構成

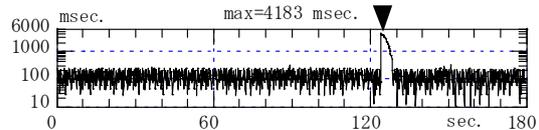


図6 データ伝送試験結果

ネット内の試験では遅れは生じなかった。遅れデータを無視するか複数データを利用した補償等の対策が必要である。

以上より、本研究の成果は、地震動の長周期成分、及び地殻内地震の短周期成分までを対象として、震源近傍の観測波形を用いて地震動想定地点における主要動の地震動波形を、その到達前に推定する手法を提案し、インターネットによるデータ伝送方法を含めて、有効性を実証した事である。

現在の気象庁の緊急地震速報では、震度と到達時間の情報しか得られず、距離減衰式に基づく予測方法では精度のばらつきも大きい。本研究のように想定地点における地震動波形を事前に推定する技術が確立されれば、これらの情報を用いた地震防災システムの信頼性と適用性が飛躍的に向上する効果が期待される。

今後は、多点の観測記録を併用した推定手法の開発 (例えば多入力多出力系による地震動予測フィルターの開発)、理論地震動を用いた更なる検討、緊急地震速報の震源推定結果と併用した推定精度の評価、マグニチュードが大きく震源断層の大きさの影響が無視できない地震への適用性の検討などが課題と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

① I. Nagashima, C. Yoshimura, Y. Ychiyama, R. Maseki and T. Itoi, Real-time prediction

of earthquake ground motion using empirical transfer function, 査読有, Proc. of 14th WCEE, S02-023, 2008.

② T. Itoi, I. Nagashima and Y. Uchiyama, Spectral amplitude and phase characteristics of shallow crustal earthquake based on linear inversion of ground motion spectra and some engineering applications, 査読有, Proc. of 14th WCEE, 03-02-0024, 2008.

③ C. Yoshimura, Y. Yamamoto and S. Nanai, Long-period ground motion simulation of 2004 off the KII Peninsula earthquakes and prediction of future M8 class earthquakes along Nankai trough subduction zone, south of Japan island, 査読有, Proc. of 14th WCEE, S10-048, 2008.

〔学会発表〕(計5件)

① 長島一郎、吉村智昭、内山泰生、欄木龍大、糸井達哉、入力地震動波形のリアルタイム推定システム-地震観測記録を用いた適用性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp353-354、九州、2007.

② 糸井達哉、長島一郎、内山泰生、震源近傍の観測記録と伝播・サイト特性を用いたやや遠方での短周期地震動推定-2007年能登半島地震の記録を用いた基礎検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp177-178、九州、2007.

③ 山本優、吉村智昭、七井慎一、久田嘉章、関東・濃尾・大阪平野を考慮した南海トラフ沿い巨大地震の長周期地震動シミュレーション(その1) 2004紀伊半島沖地震のシミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp91-92、広島、2008.

④ 吉村智昭、山本優、七井慎一、関東・濃尾・大阪平野を考慮した南海トラフ沿い巨大地震の長周期地震動シミュレーション(その2) 想定東海・東南海連動地震のシミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp93-94、広島、2008.

⑤ 長島一郎、吉村智昭、内山泰生、欄木龍大、糸井達哉、入力地震動波形のリアルタイム推定システム-地震動予測フィルターとデータ伝送試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp93-94、東北、2009.

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：地震動波形推定方法

発明者：長島一郎、吉村智昭、内山泰生、欄木龍大、糸井達哉

権利者：大成建設株式会社

種類：特許

番号：特願2009-15348

出願年月日：2009年1月27日

国内外の別：国内

○取得状況(計1件)

名称：リアルタイム地震情報を利用したリアルタイム地震応答波形推定方法

発明者：長島一郎、欄木龍大、高木政美、吉村智昭、内山泰生

権利者：大成建設株式会社

種類：特許

番号：特許第4385948号

取得年月日：2009年10月9日

国内外の別：国内

〔その他〕

リアルタイム地震情報利用協議会、K-NETデータのリアルタイム利活用に関する調査・研究報告書—5.1リアルタイム地震防災システムの検討—、2009年3月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長島 一郎 (NAGASHIMA ICHIRO)

大成建設(株)技術センター・建築技術研究所 防災研究室・室長

研究者番号：10374042

(2) 研究分担者

吉村 智昭 (YOSHIMURA CHIAKI)

大成建設(株)技術センター・建築技術研究所 防災研究室・課長

研究者番号：20374043

(3) 研究分担者

内山 泰生 (UCHIYAMA YASUO)

大成建設(株)技術センター・建築技術研究所 防災研究室・課長代理

研究者番号：30374044

(4) 研究分担者

欄木 龍大 (MASEKI RYOTA)

大成建設(株)技術センター・建築技術研究所 防災研究室・課長代理

研究者番号：40374055

(5) 研究分担者

糸井 達哉 (ITOI TATSUYA)

大成建設(株)技術センター・建築技術研究所 防災研究室・主任

研究者番号：60393625