

生産施設向け地震防災システム(T-RESQ F)の開発

東北地方太平洋沖地震による適用性検証

山本 優^{*1}・内山 泰生^{*1}・高木 政美^{*1}・末田 隆敏^{*2}

Keywords : manufacturing plant, earthquake disaster prevention, Earthquake Early Warning, onsite seismometer, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

生産施設、地震防災、緊急地震速報、現地地震計、2011年東北地方太平洋沖地震

1. はじめに

事業継続の観点から工場等の生産施設では、地震発生後早期に生産能力を回復することが求められている。しかし、既存の生産施設に対して免震化等の対策を講じることは困難であるため、様々な対策方法を適用することにより事業の継続をはかる必要がある。

気象庁から配信される緊急地震速報は、震源までの距離が比較的離れている場合には主要動が到達する数秒から数十秒前に情報が提供されるため、館内放送による従業員の安全確保、製造装置の自動停止による製品や装置の損傷防止等に利活用が可能であり、有効な対策方法の一つであると考えられる。

しかし、緊急地震速報は直下型地震のように震源が近い場合には情報提供が間に合わない可能性があることが指摘¹⁾されている。そこで、直下型地震にも対応するため、現地に設置した地震計で検知される初期微動の大きさから直後に到達する主要動の大きさを予測する方法が有効であると考えられる。この方法は、初期微動と主要動の伝播速度の違いによる敷地への到達時間差を利用するもので、直下型地震の場合であっても1～3秒程度の余裕時間が期待できる。そこで、弊社でも現地地震計と緊急地震速報を併用した地震防災システム（T-RESQ F）を開発し、数値シミュレーションや振動台実験により性能評価を実施してきた^{2),3)}。

地震時における製造装置の自動停止は装置設置位置での加速度値が判断基準とされることが多い⁴⁾。そこで、地震応答解析により、最大速度値が異なる様々なレベルの入力地震動に対する建物対象階での応答倍率モ

ルを作成する。この応答倍率モデルと現地地震計で予測された主要動の大きさから装置設置位置での加速度値を予測することで、緊急地震速報が間に合わない可能性が高い直下型地震に対しても各装置へ主要動到達前に自動停止信号を配信することが可能になる。

上記の方法により製造装置に適切な自動停止信号を配信するためには、建物解析モデルの妥当性とあわせて主要動の大きさの予測精度を検証することが重要となる。既往の報告^{2),3)}では計測震度を指標として、現地地震計による主要動の大きさの予測方法の検証を行い、緊急地震速報と同程度の予測精度があることを示した。本システムは緊急地震速報が間に合わない可能性が高い直下型地震を対象としているため、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で得られた強震記録に基づいて、遠方で発生した巨大地震に対するシステムの適用性の検討及び課題の抽出を行う。

2. T-RESQ F の概要

T-RESQ F では解析サーバにおいて、気象庁から配信される緊急地震速報と現地地震計で検知した揺れの大きさを受信し、これに基づいて建物各階における応答加速度を予測し、製造装置へ停止信号を配信する²⁾。図-1にシステム構成図を示す。

緊急地震速報は気象庁から配信事業者を経由し、ADSL回線、IP-VPN回線、専用線、衛星回線によって配信される。本システムでは、これらから任意の2回線を主回線と副回線に選択可能である。また、配信事業者サーバと解析サーバ間の回線の生存確認をTCP/IP通信によって定期的に行う。これにより、主回線に障害が発生した場合には、自動的に副回線への切替えを行い、緊急地震速報を確実に受信することができる。

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室

*2 技術センター技術企画部情報技術室

現地地震計からの複数レベルの接点出力信号は多芯ケーブルを経由し接点入力監視装置で受信する。受信した接点信号を解析サーバに通知し、この信号を用いて初期微動による主要動の大きさの予測を行う。現地地震計は敷地内に複数台設置することで、地震計周辺の環境振動による誤作動を防止するとともに、地震計故障時の冗長性を確保している。

解析サーバでは図-2に示すように緊急地震速報と現地地震計のうち早く得られた情報を用いて主要動の大きさの予測を行う。ただし、緊急地震速報と現地地震計の情報が同時に得られた場合には、2手法による予測値を組み合わせることで、予測結果の精度向上を図っている。この予測結果は地表面における揺れの大きさ（速度値）であることから、これに予めモデル化した建物各階の応答倍率を乗じることで、製造装置設置階における揺れの大きさ（加速度値）を予測できる。

製造装置設置階における加速度予測値が各接点に設定した値を超えた場合には、装置停止信号をLAN経由で接点制御装置に配信する。接点制御装置からは無電圧A接点またはB接点が出力可能であり、この信号を各製造装置に通知することで装置の自動停止を行う。

システムの信頼性向上のため、全てのネットワーク機器について二重化を行い、機器故障によりシステムが正常動作しないリスクを低減させている。また、解析サーバから各機器へTCP/IPによる生存確認を定期的に行い、異常時には管理者へ自動通知する。これにより、異常箇所を早期に回復することができる。

3. 主要動の大きさの予測方法

3.1 緊急地震速報による予測方法

緊急地震速報を用いた最大速度値の予測は気象庁技術基準⁵⁾に準拠し、2005年までに日本で得られた82地震4261記録の回帰分析によって求めた(1)式に示す距離減衰式を用いて行う。

$$\begin{aligned} \log V_E &= 0.636M - 1.767 + 0.004h + g \\ g &= \begin{cases} -\log(X+e) - 0.002X & (h \leq 30) \\ 0.7 \log(1.7h+e) - 1.7 \log(X+e) - 0.002X & (h > 30) \end{cases} \\ e &= 0.0028 \cdot 10^{0.5M} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 V_E は S 波速度 Vs=600(m/s)程度の工学的基盤における最大速度値(cm/s)、 M はモーメントマグニチュード、 h は震源深さ(km)、 X は震源からの距離(km)をそ

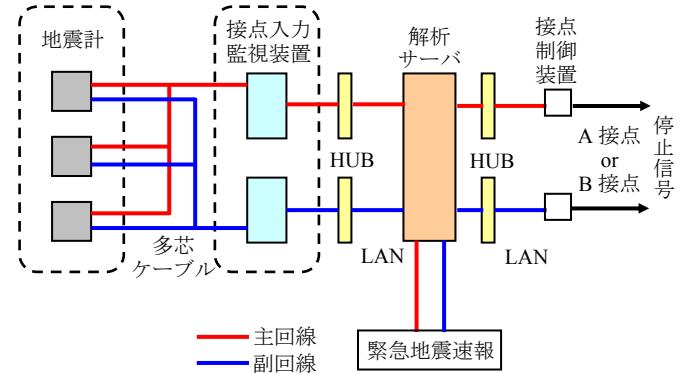


図-1 システム構成
Fig.1 System configuration

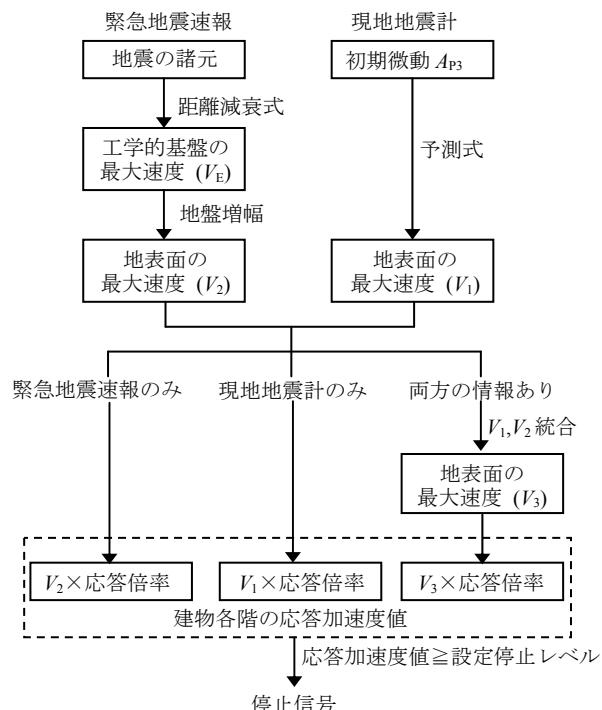


図-2 製造装置停止時のシステム動作フロー
Fig.2 Flow of system operation in case of emergency shutdown

れぞれ示す。

(1)式によって求められる工学的基盤における最大速度値 V_E に防災科学技術研究所 J-SHIS⁶⁾で公開されている表層地盤の增幅率等の地盤増幅率を乗じて地表面における最大速度値 V_2 への換算を行う。

3.2 現地地震計による予測方法

現地地震計で検知した初期微動（P 波）による主要動（S 波）の予測は過去に得られた強震記録の回帰分析から求められた(2)式^{2),3)}を用いる。

$$\log V_1 = 1.68 \cdot \log A_{P3} - 0.821 \quad (2)$$

ここで、 V_1 は S 波部分の最大速度値(cm/s)、 A_{P3} は水平 2 成分と上下 1 成分の時刻歴波形データから計算され

る初期微動部の3成分合成加速度の最大値(cm/s^2)をそれぞれ示す。本システムでは、初動検知から最大2.5秒間における最大値 A_{P3} を初期微動部とみなして(2)式を適用し、2.5秒以降は、別途作成したS波部分を含む3成分合成加速度の最大値とS波部分の最大速度値との関係式である(3)式を適用する。

$$\log V_1 = 1.13 \cdot \log A_{P3} - 1.403 \quad (3)$$

4. 東北地方太平洋沖地震における精度検証

4.1 緊急地震速報による予測精度の検証

東北地方太平洋沖地震では、地震発生(14時46分18.1秒:気象庁一元化処理震源による)から約28秒後に緊急地震速報の第1報が配信され、約139秒後の第15報まで情報が更新された。表-1に緊急地震速報の配信状況を示す。

表-1および図-3に示すように、第1~2報ではマグニチュードが6以下、その後の情報でマグニチュード6から7へと推移し、最終報で8.1と推定されている。Mが大きな地震ほど、震源断層面が大きくなるため、断層面が全て破壊するまでにはある程度の時間がかかる。このため、観測される地震波のごく最初の時間の部分には、断層面のごく初期の破壊に関する情報しか含まれていないために、断層の大きさが500×200km程度と推定されている今回の地震では、緊急地震速報の予測精度が低下していると考えられる。

震源域に近い岩手県、宮城県、茨城県に設置されている強震観測点を対象として緊急地震速報に基づく地震動強さの予測精度の検証を行う。検討対象は、防災科学技術研究所の地震観測点である、IWT007(岩手県釜石)、MYG012(宮城県塩竈)、IBR003(茨城県日立)の3地点とした。図-4に観測点の位置を示す。

図-5に計測震度予測値の推移を示す。ここで、計測震度は(1)式に基づいて推定した地表面の最大速度値 V_1 から、気象庁技術基準⁵⁾に示されている(4)式によって計測震度 I に換算した値である。なお、図中にはJMA2001走時表から計算した各地点におけるS波到達予測時間、強震記録から計算した観測計測震度値を併せて示している。

$$I = 2.54 + 1.82 \log V_1 \quad (4)$$

図-5から、各地点のいずれの報数においても、計測震度の予測値が観測計測震度値より小さく推定され

ていることが分かる。これは、表-1および図-3に示したように、緊急地震速報の推定値が実際の地震のマグニチュード(9.0)よりも過小に評価されていることに起因している。

表-1 緊急地震速報の配信状況
Table 1 List of earthquake early warning reports

報数	配信時間	震源情報				地震発生からの経過時間(秒)
		北緯	東経	深さ	M	
1	14時46分45.6秒	38.2	142.7	10	4.3	27.5
2	14時46分46.7秒	38.2	142.7	10	5.9	28.6
3	14時46分47.7秒	38.2	142.7	10	6.8	29.6
4	14時46分48.8秒	38.2	142.7	10	7.2	30.7
5	14時46分49.8秒	38.2	142.7	10	6.3	31.7
6	14時46分50.9秒	38.2	142.7	10	6.6	32.8
7	14時46分51.2秒	38.2	142.7	10	6.6	33.1
8	14時46分56.1秒	38.1	142.9	10	7.2	38.0
9	14時47分02.4秒	38.1	142.9	10	7.6	44.3
10	14時47分10.2秒	38.1	142.9	10	7.7	52.1
11	14時47分25.2秒	38.1	142.9	10	7.7	67.1
12	14時47分45.3秒	38.1	142.9	10	7.9	87.2
13	14時48分05.2秒	38.1	142.9	10	8.0	107.1
14	14時48分25.2秒	38.1	142.9	10	8.1	127.1
15	14時48分37.0秒	38.1	142.9	10	8.1	138.9

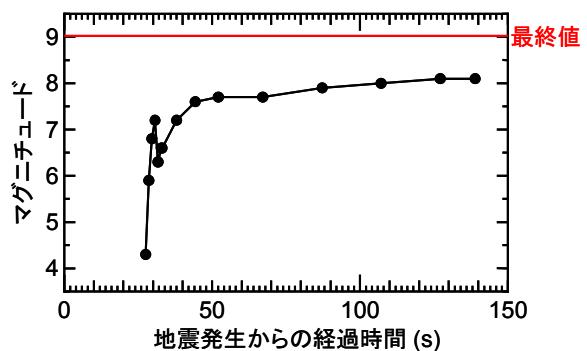


図-3 マグニチュード情報の推移
Fig.3 Change of magnitude information

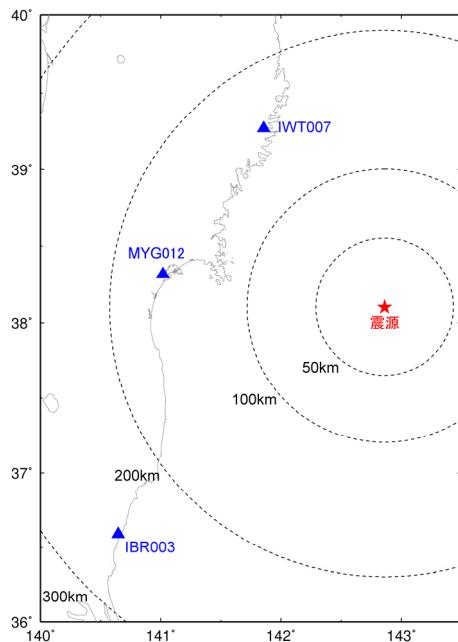


図-4 検討地点の位置
Fig.4 Location of sites in this study

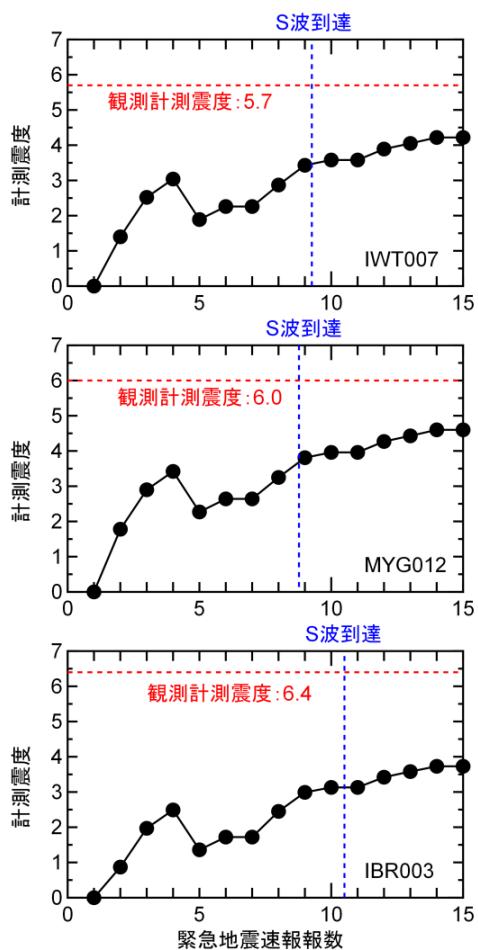


図-5 予測震度の推移
Fig.5 Change of predicted seismic intensity

4.2 現地地震計による予測精度と適用性の検証

4.2.1 予測精度の検証

図-4の地点に本システムの現地地震計が設置されていた場合を想定し、予測精度の検証を行う。図-6に各地点の観測加速度波形を示す。図の横軸は、発震時刻からの経過時間としている。図中に気象庁走時によるP波到達時刻を赤線で、S波の到達時刻を青線で示す。IWT007とMYG012では初期微動継続時間（P波到達からS波到達までの時間）は約18秒、IBR003では約28秒である。今回の地震による加速度波形は、P波の振幅が緩やかに増加しているため、S波の立ち上がりが明瞭でないといった遠方の地震によく見られる波形となっている。

図-7に、上記3地点の観測記録から求めた A_{P3} （初期微動部の初動検知から2.5秒間）と、 V_1 との関係を示す。 A_{P3} が $0.05\sim0.5\text{cm/s}^2$ であるのに対し、観測 V_1 は $20\text{cm/s}\sim60\text{cm/s}$ 程度である。図中には(2)式も併せて示しているが、予測 V_1 は $0.001\sim0.5\text{cm/s}$ 程度であり、観測値に比べて過小評価となっている。

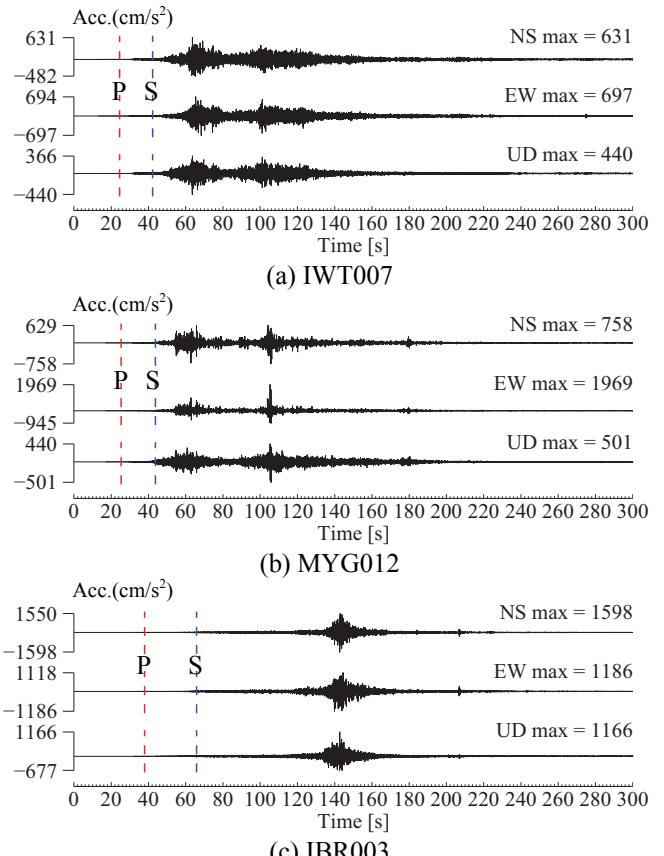


図-6 検討地点で得られた観測記録
Fig.6 Observation records at the sites

(2)式は直下型地震で得られたデータに基づいて作成されている。ここで、直下型地震の場合には、図-8上に示すように初期微動が短く、初動検知から数秒を用いれば、初期微動の最大値が得られる傾向にある。一方、今回の地震はP波が比較的長い時間ゆるやかに増加する傾向がある（図-8下）ため、初動検知から2.5秒といった短い時間では、初期微動のごく最初の小さい振幅の部分しか予測に用いていないことが示唆される。

そこで図-7に、初期微動部全体から求めた A_{P3} と V_1 との関係についても示した。前述のとおり、予測式は直下型地震を対象に作成したものであるため、厳密には精度の比較はできないが、概ね予測式のばらつきの範囲内である。よって、今回の地震においても、初期微動継続時間を適切に評価できれば、本システムで観測値に近い予測ができる可能性がある。

4.2.2 建物内の応答加速度予測への適用性の検証

本システムは、図-2に示すように、現地地震計で得られた3成分合成加速度から地表面におけるS波部分の最大速度を予測し、さらに建物モデルから得られる建物各階の応答倍率を乗じることで、製造装置設置階における加速度値を予測する。予測加速度値が設定

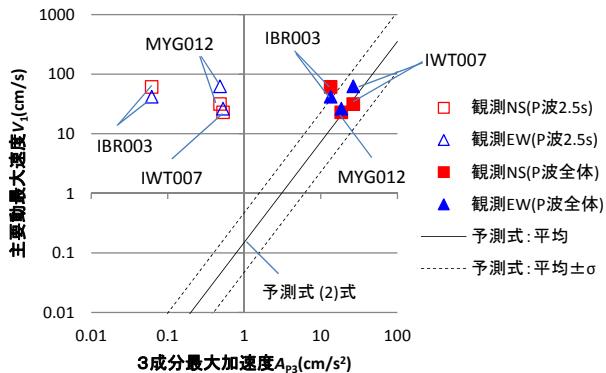


図-7 A_{p3} と V_1 の関係
Fig.7 Relation between A_{p3} and V_1

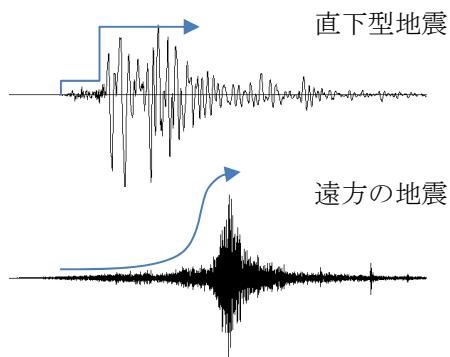


図-8 直下型地震と遠方の地震の地震波の違い
Fig.8 Characteristics of near-field earthquake motions and far-field earthquake motions

した値を超えた場合に、製造装置への停止信号を発する。

ここで、前述の3地点に平屋建ての生産施設が建っていた場合を想定して、本システムの適用性について検討した。製造装置がフリーアクセスフロア(FA)上に設置されているものと仮定し、地表面最大速度に対する1階のFA上の床応答加速度(以下、応答加速度とする)の応答倍率モデルを作成し、3地点の地震波に対する応答加速度の計算を行った。停止信号の発信は、応答加速度が200cm/s²を超えると予測された時に行われるものとした。

図-9に、現地地震計による応答加速度のシミュレーション結果を示す。横軸は地震発生からの経過時間、縦軸は加速度(cm/s²)である。初動検知から2.5秒間の A_{p3} を用いた場合の応答加速度を図-9の赤破線に示す(これを「予測①」とする)。また、初動全体の A_{p3} を用いた場合の応答加速度を緑実線に示す(これを「予測②」とする)。比較のため、緊急地震速報から算出される V_2 を応答加速度に換算した値(これを「EEW」とする)を青線で示す。

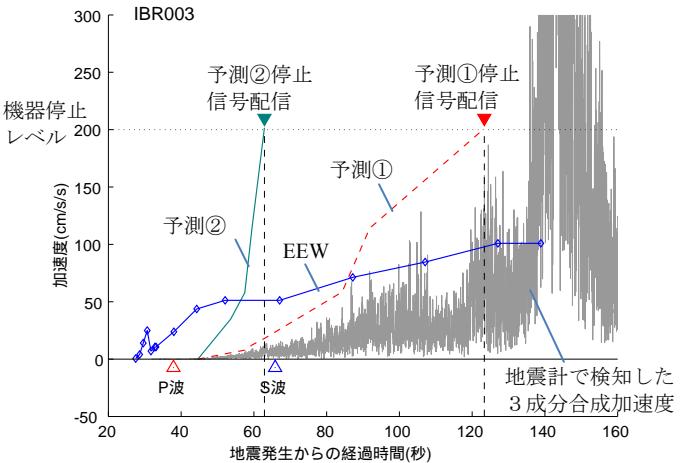
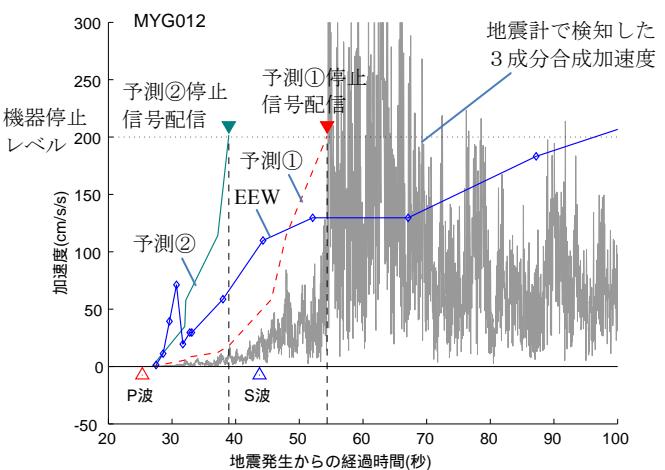
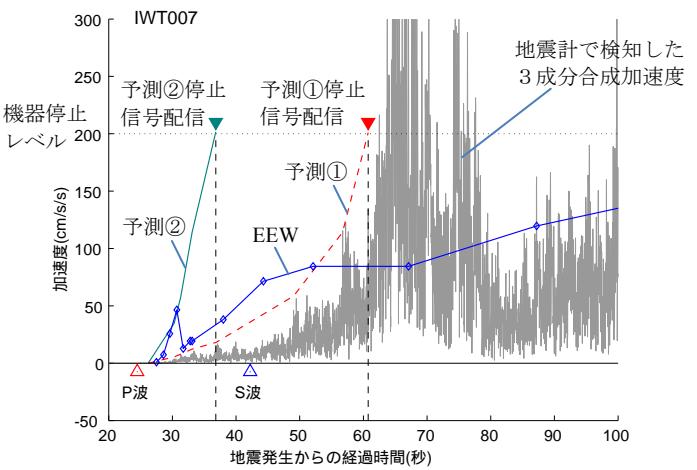


図-9 現地地震計による応答予測の推移
Fig.9 Change of predicted response acceleration

IWT007とMYG012は、震源から近い観測点であるため、現地地震計による検知と緊急地震速報の受信时刻がほぼ同じである。IBR003は遠方の観測点のため、現地地震計が揺れを検知するよりも前に緊急地震速報を受信する。

予測①は、予測開始から数十秒間は緊急地震速報よ

りもさらに過小評価となっている。これは、本システムでは、初動検知から 2.5 秒以降は S 波とみなし、(3) 式による予測となってしまうためである。図中には参考のため、現地地震計で検知した 3 成分合成加速度及び気象庁走時による P 波と S 波の到達時刻も示しているが、停止信号を発信した時刻は、S 波の到達後であり、大きな揺れの到達前に機器の停止ができない。

一方、予測②では、予測①及び緊急地震速報よりも早いタイミングで予測値が 200cm/s^2 に達し、停止信号を発信できることがわかる。予測①と比較すると、IWT007 では約 22 秒、MYG012 では約 15 秒、IBR003 では約 60 秒前に停止信号を発信できることがわかる。このように、今回の地震においても、初期微動継続時間を適切に評価することにより、より早く建物応答の予測を行い、停止信号を発信できる可能性がある。

なお、現状のシステムでは、緊急地震速報と現地地震計の予測結果を重み付け平均して最終的な予測値としている。直下型地震に対しては現状のシステムによる予測を行い、今回の地震のような遠方の巨大地震に対して、緊急地震速報の予測精度が落ちると考えられる場合は、現地地震計による予測値を優先することも考えられる。

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震で得られた強震記録に基づき、システムの適用性について検証を行った。

緊急地震速報による予測では、今回のような巨大なマグニチュードの地震に対しては緊急地震速報の予測精度が低下し、結果的に計測震度の予測値が過小評価される傾向があることがわかった。

現地地震計による予測では、直下型地震を対象とした現状のシステムによる初期微動の 2.5 秒間を用いた

予測では、長い初期微動のごく初期の部分しか用いていないため、観測値を過小評価してしまう。しかし、初期微動継続時間を適切に評価することにより、緊急地震速報では予測の難しい遠方の巨大地震に対しても予測値が改善され、停止信号の配信をより早くできる可能性がある。

今後は、緊急地震速報では適切な震度予測が難しいと言われている東海・東南海・南海地震のような巨大地震に対して、直下型地震を対象に開発した本システムの機能を拡張し、現地地震計と緊急地震速報を最適に組み合わせて、予測精度を高める方法について検討を行う予定である。

謝辞

解析には防災科学技術研究所の K-NET の記録を用いました。図の作成には GMT(Wessel and Smith, 1998)⁷⁾を使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁 : http://www.seisVol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats_EEW.html
- 2) 糸井達哉, 内山泰生, 高木政美, 末田隆敏, 渡辺誠司, 長島一郎 : 直下型地震に対応した生産施設向け生産施設向け地震防災システム (T-RESQ F) の開発, 大成建設技術センター報, 第 42 号, 2009.
- 3) 糸井達哉, 内山泰生, 高木政美, 末田隆敏, 長島一郎 : 緊急地震速報と現地地震計の初期微動情報を併用した地震防災システムの開発と性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第 33 号, pp.827-832, 2010.
- 4) 鈴木秀明・他 : 半導体生産工場の地震・防災対策実務ハンドブック, サイエンスフォーラム, 1996.
- 5) 気象庁 : 予報許可許可の技術基準について, 2008.
- 6) 防災科学技術研究所 : 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 7) Wessel, P. and W.H.F. Smith: Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU 72, 441, 445-446, 1991.