

オンサイト情報を利用したリアルタイム地震警報システムの開発

Development of Real-time System for Mitigating Earthquake Damage Using On-Site Information

北爪 慎*, 池本 敏和**, 北浦 勝***
 Makoto Kitazume, Toshikazu Ikemoto, Masaru Kitaura

*修士 金沢大学 大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
 ** 工博 金沢大学助教 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
 ***工博 金沢大学名誉教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Recently, effectiveness of real-time mitigation of earthquake damage is widely recognized gradually. In Japan, many seismometers have been installed throughout the land and the Japan Meteorological Agency started providing earthquake early warning from 1 October 2007. However, in areas that are close to the focus of an earthquake, the warning may not be transmitted before strong tremors hit.

In this paper, we develop a new system for an earthquake early warning, paying attention to the response of a structure. Firstly, we analyze promptly the structural response subjected to S-wave predicted from P-wave just measured by a seismometer installed at the base of the structure. Secondly, appropriate warning is announced according to the level of analyzed maximum response, when the residents wonder whether this response is becoming greater or not. This system provides only a few seconds. However, residents are able to quickly protect themselves even if the structure is close to the focus.

Key Words: Earthquake, Countermeasures Against Earthquake Disaster
 キーワード: 地震, 地震防災

1. 研究の背景および目的

2007年10月1日より、緊急地震速報¹⁾の提供が開始された。緊急地震速報により、病院などの重要機関の他、一般住宅においても、メディアの活用により、以前より早く地震による震度情報を知ることができるようになった。緊急地震速報の主な情報は震源とサイトの震度である。これらの情報により、サイトの揺れの強さを知ることができる。しかし、震度は地表面における揺れの強さであり、揺れが増幅する過程、揺れが最大となるまでの

時間などはわからない。また、建物に関して、震度は小さくとも、地震動によっては建物が共振し、建物の応答が増大する可能性もある。Table 1は、その可能性を示唆するものであり、地表と比べて、建物の応答が増大していることがわかる。

以上のことから、地震による建物の応答の時刻歴を推定することは、避難の開始時期など、地震発生時の対応に有益なことであると考えられる。そこで本研究では、建物の応答に着目し、建物直下に設置した地震計により観測された初期微動から地震動の予測、応答の推定を行

Table 1 Example of the instrumental seismic intensity

| Epicenter | Kanazawa University Hospital | | | | K-NET | KiK-net | |
|---|------------------------------|------|------|------|------------|-------------|------|
| | Under30m | G.L. | 1F | 9F | Under29.6m | Under805.5m | G.L. |
| 2004/9/5 Tokaido offing | 1.64 | 1.77 | 2.22 | 2.98 | 2.03 | 1.09 | 2.01 |
| 2004/10/23 Niigata Prefecture Chuetsu | 1.22 | 1.36 | 2.08 | 2.31 | 1.51 | 0.55 | 1.43 |
| 2007/7/16 Niigata Prefecture Chuetsu offing | 1.92 | 2.08 | 2.43 | 2.62 | 2.10 | 0.96 | 2.07 |

う。そして、推定された応答のレベルに応じて、適切な地震速報を流すというリアルタイム地震防災システムの開発を目指す。すなわち、本システムは建物が揺れ始めたときに、応答がさらに大きくなるか、それとも小さいままかを瞬時に判断し警報を出す。揺れを感じてから、大きく揺れるまでの余裕時間は通常の緊急地震速報のそれより、さらに短い。しかし、本システムには建物近傍で発生した地震にも有効であるという大きな特徴がある。

2. 開発しているリアルタイム地震防災システムの概要

Fig. 1 に本システムの流れを示す。本システムは、まず建物直下に設置した地震計 (Fig. 2) により地震動の建物への到達を検知し、観測を開始する。次に、観測された 2 秒間の初期微動と、過去の地震から経験的に得られた建物の増幅特性、および位相特性を用いて、主要動を予測する。予測された主要動による建物の応答を推定し

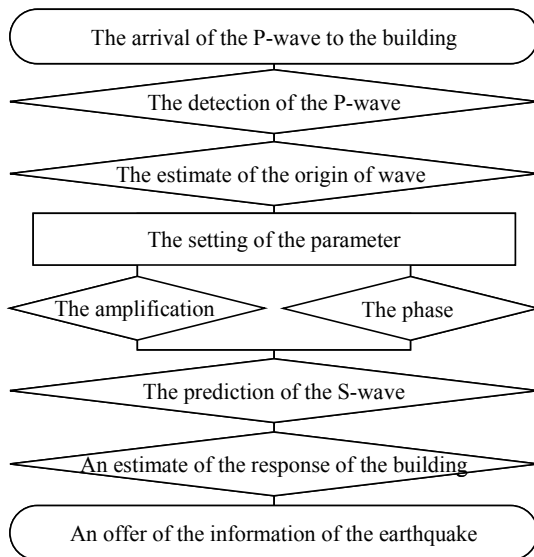


Fig. 1 A system flow

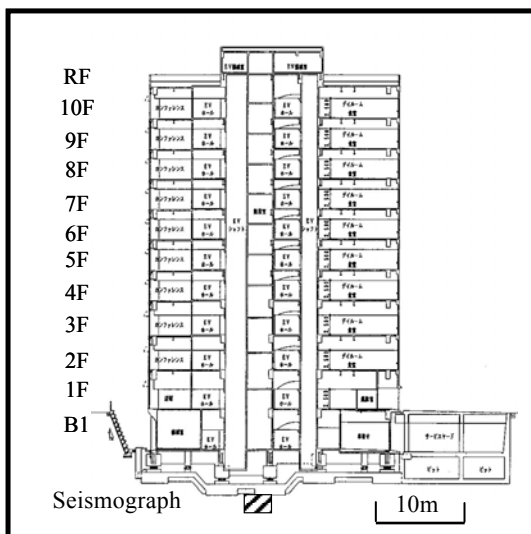


Fig. 2 The setting position of the seismograph

た後、建物の応答が増大するかどうか判断する。そして、推定された建物の応答のレベルに応じて、適切な地震速報を提供する。

開発しているシステムの特徴は、オンサイトで得られた情報を用いているところにある。これにより、建物の応答の経時特性を精度よく推定することが可能となり、適切な対応へつなげることができると考えている。また、時刻歴応答を推定していることから、免震、制振システムへの応用も期待できる。

3. 応答推定手法とそれに用いるパラメータについて

開発しているシステムでは、モード重畳法を用いて建物の応答を推定している。また、地震動の主要成分の振幅フーリエスペクトルを予測する際、振幅の増幅を決定する増幅特性と、振幅の経時特性を決定する位相特性の 2 つのパラメータを用いている。

3.1 増幅特性について

増幅特性は経験的に求める。過去に観測された地震の記録から地震動の主要成分の振幅フーリエスペクトル $F_S(\omega)$ と、同方向における 2 秒間の初期微動の振幅フーリエスペクトル $F_P(\omega)$ の比を算出し、それらの平均化、かつ Parzen ウィンドウにより平滑化したものを増幅特性スペクトル比 S/P と定義する (式(1))。

$$\frac{S}{P} = \left(\frac{F_S(\omega)}{F_P(\omega)} \right) \quad (1)$$

S/P を算出するにあたり、地震記録を震央方位および震央距離によって分類した。分類の条件を Table 2 に示す。建物から見た震央方向に関して東西南北の 4 分類、震央距離に関して 100km 未満、100km 以上 400km 未満および 400km 以上の 3 分類、合計で 12 分類している。

それぞれの条件を決定した根拠について述べる。まず震央方位に関しては、4 方位に分けることで地震の伝播方向の地質的特徴を捉えることができると考えた。次に震央距離に関しては、M8 程度の地震が発生した時、観測点において震度 5 弱以上、震度 3 以上の揺れがそれぞれ生じると考えられる距離を基準とした。分別した記録からスペクトル比を決定することで、地震の諸元を考慮できると考えている。

Table 2 The classification of the records

| Direction | Epicentral distance | Total |
|------------|-----------------------|-------------|
| North | Under 100km | |
| South | Between 100 and 400km | |
| East | 400km over | |
| West | | |
| 4 patterns | 3 patterns | 12 patterns |

一例として、Fig. 3 に KiK-net 横浜で観測された地震記録のスペクトル比を示す。これらのスペクトル比は KiK-net 横浜の地震計で 2003 年 3 月から 2008 年 3 月までに得られた 78 の地震記録を用いて、震央距離 100km 以上 400km 未満、かつ 4 方位で分類し、算出したものである。Fig. 3 から、卓越振動数の違い、および最大値の違いを読み取ることができ、分類の必要性がわかる。タイプで分けた地震記録を用いてスペクトル比を算出、平均化し、タイプ別のスペクトル比を決定することで、地震の諸元を考慮することが可能となる。

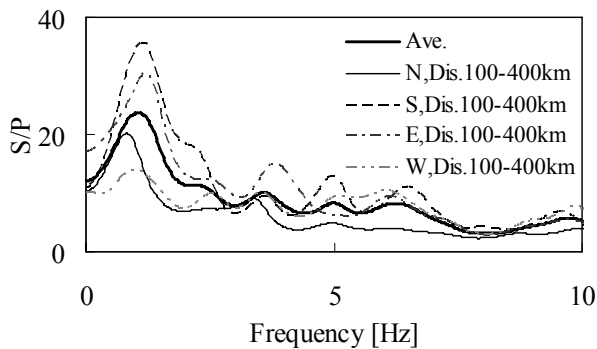


Fig. 3 The difference of epicenter direction in S/P

3. 2 位相特性に関する既往研究とシステムへの導入

位相特性に関する基礎的な研究は、過去にいくつか行われている。大崎ら²⁾は、地震の加速度時刻歴波形 (Fig. 4) の包絡形と、隣り合うフーリエ位相の差である位相差分 $\Delta\phi_k$ (式(2)) の頻度分布 (Fig. 5) の対応関係を指摘している。

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k \quad (k=1, \dots, N/2-1) \quad (2)$$

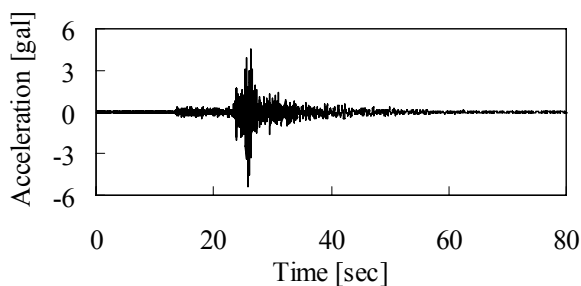


Fig. 4 A time career of the acceleration

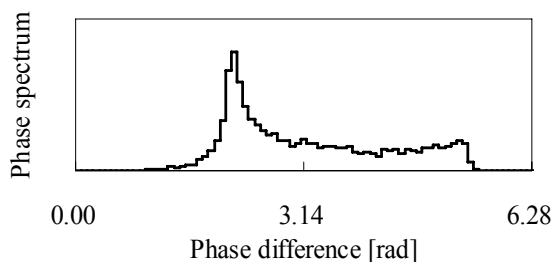


Fig. 5 A frequency distribution of the Pha. dif.

他にも、和泉と勝倉³⁾は、フーリエ位相の傾きである群遅延時間の平均値と標準偏差により、地震の加速度時刻歴波形の重心位置と広がり表現できることを示し、位相情報と波形の経時特性の関係を論じた。また、沢田ら⁴⁾は群遅延時間と地震動の継続時間の関係を検討した。さらに、木村⁵⁾は、群遅延時間を用いた波形制御について考察し、特に初期位相が局所的波形形状に大きな影響を与えることを指摘した。

以上のような基礎的な研究^{2)~5)}から、建物の応答を解析、また推定する際、地震動の位相特性の推定は重要な要素であると考えている⁶⁾。特に、今回の対象建物である金沢大学病棟のように、免震装置を備えた建物に関しては、免震装置の作動により固有振動数が変化し、非線形応答を示すため考慮が必要である。

位相特性に関して、本システムでは観測された初期微動から位相スペクトルの補正を行っている。これは、大崎ら²⁾の研究成果と、初期微動の位相スペクトルと地震動の主要成分の位相スペクトルが対応している (Fig. 6) ことに着目したためである。

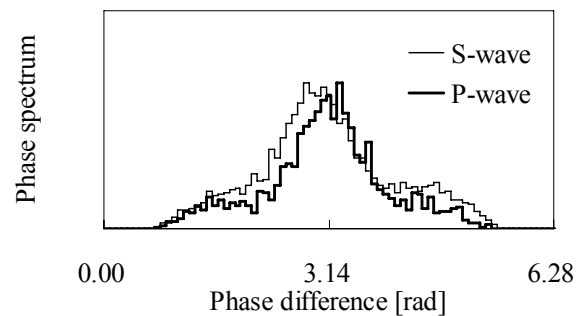


Fig. 6 The distribution for the phase by S-wave and P-wave

4. 対象建物のモデル化について

今回、対象とする建物は金沢大学病棟である。建物の応答推定にあたり、常時微動計測を行い、固有周期、振動モードならびに減衰定数を算出した。Fig. 7, Fig. 8, Table 3, Table 4 に固有周期、Fig. 9, Fig. 10 に振動モード、Fig. 11, Table 5 に減衰定数の結果を示す。ただし、減衰定数は RD 法により算出した。その結果、3 次モードまで確認された。したがって、3 質点系のモデルとし、応答の推定を行うこととする。

Table 3 A natural frequency in the short side

| Floor | GL | 1F | 7F | RF |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| Mode1 | — | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| Mode2 | 3.3 | 3.1 | — | 3.1 |
| Mode3 | — | 4.1 | 4.1 | 4.1 |

Unit : [Hz]

Table 4 A natural frequency in the long side

| Floor | GL | 1F | 7F | RF |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| Mode1 | — | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| Mode2 | 3.7 | 2.8 | — | 2.8 |
| Mode3 | — | 5.9 | 5.9 | 5.9 |

Unit: [Hz]

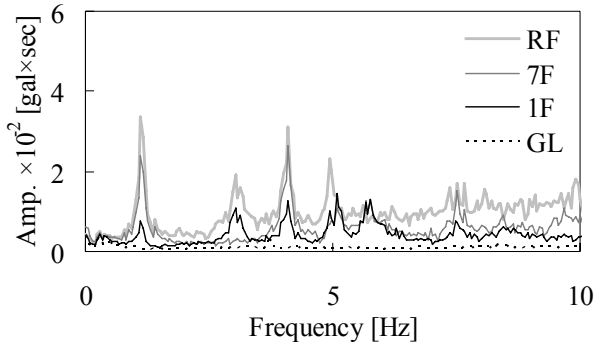


Fig. 7 Fourier spectrum in the short side

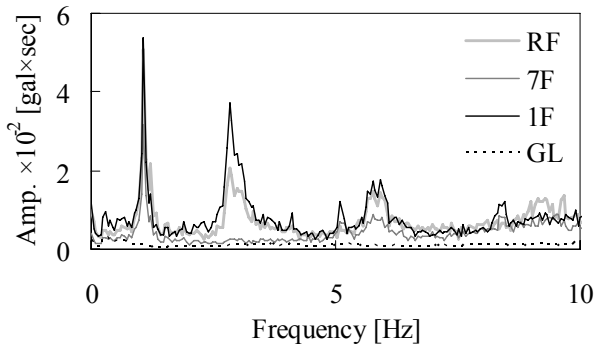


Fig. 8 Fourier spectrum in the long side

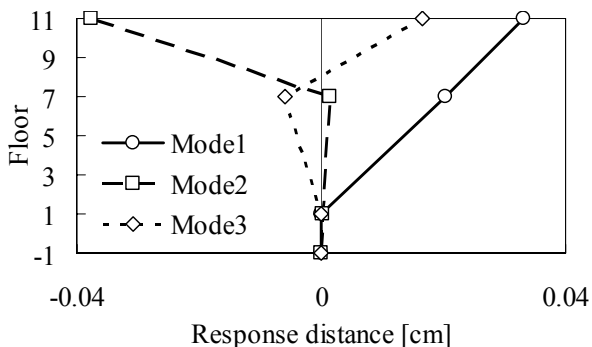


Fig. 9 A mode of the vibration in the short side

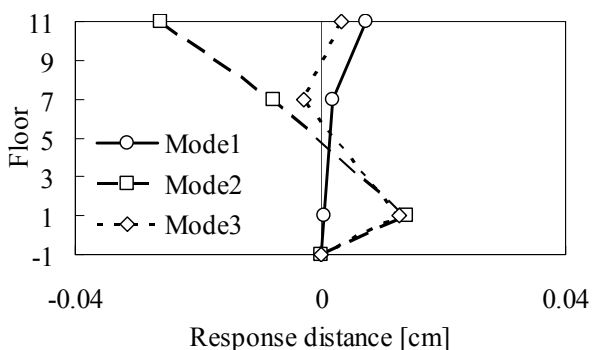


Fig. 10 A mode of the vibration in the long side

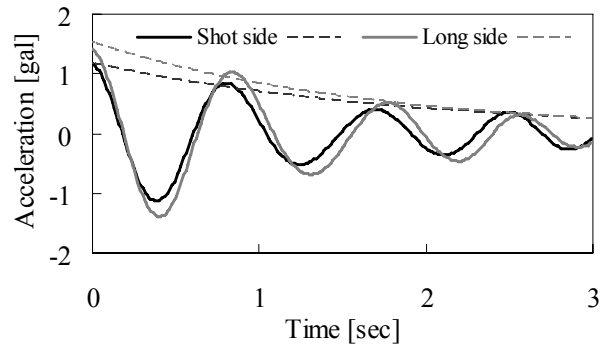


Fig. 11 The damping free vibration by Random decrement technique

Table 5 Modal damping ratios

| | Mode1 | Mode2 | Mode3 |
|-------|-------|-------|-------|
| Short | 8.2 | 7.8 | 7.3 |
| Long | 9.5 | 8.8 | 7.8 |

Unit: [%]

5. リアルタイム地震防災システムの試行

作成したシステムのプロトタイプを用いて、地震による金沢大学病棟の応答を推定した。入力に用いる地震は、東海道沖、新潟県中越地方、ならびに新潟県上中越沖を震央とする地震である。入力の一例として、新潟県中越地震における金沢大学病棟直下の記録と予測された地震動の主要成分を Fig. 12 に示す。また短辺方向における金沢大学病棟 9F にて記録された応答加速度と推定された応答を Fig. 13~15、各波形の速度応答スペクトルを Fig. 16~18 に示し、それぞれの最大加速度とその発生時刻を Table 6 に示す。さらに、長辺方向における最大加速度とその発生時刻を Table 7 に示す。推定の結果から、速度応答スペクトルに関して、おおむね良好な結果となっている。一方、加速度波形に関して、最大加速度の値や減衰過程などに差異が見られた。したがって、位相特性に関して、再検討が必要といえる。特に、東海道沖地震のように、継続時間が長い地震に対して差異が大きいことから、システムの改善が必要といえる。

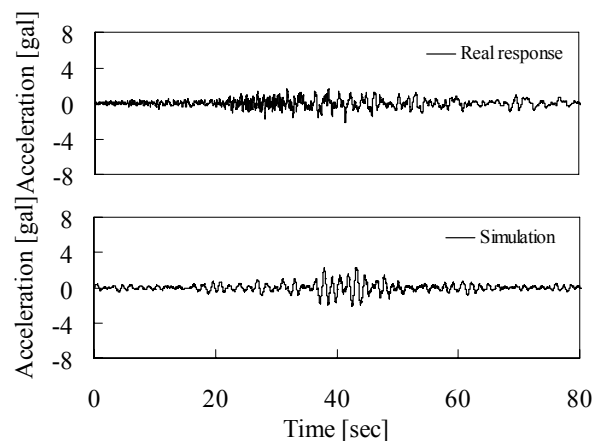


Fig. 12 Input wave (Niigata Prefecture Chuetsu)

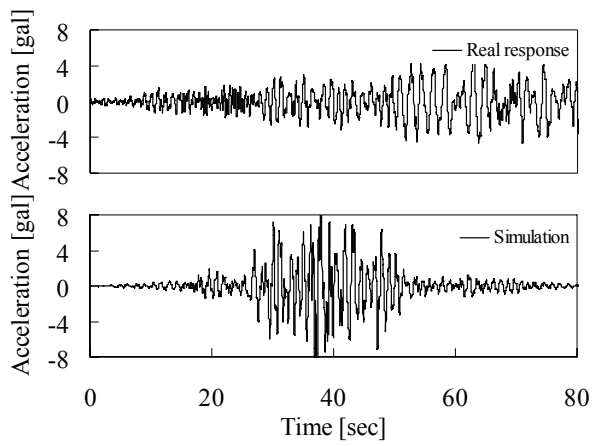


Fig. 13 The wave estimated wave in Tokaido offing

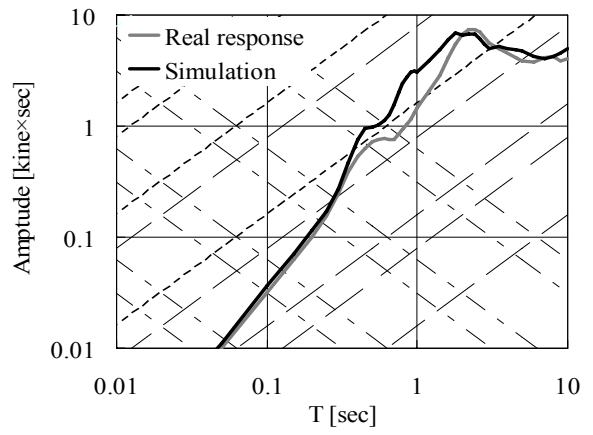


Fig. 16 Velocity response spectrum wave in Tokaido offing

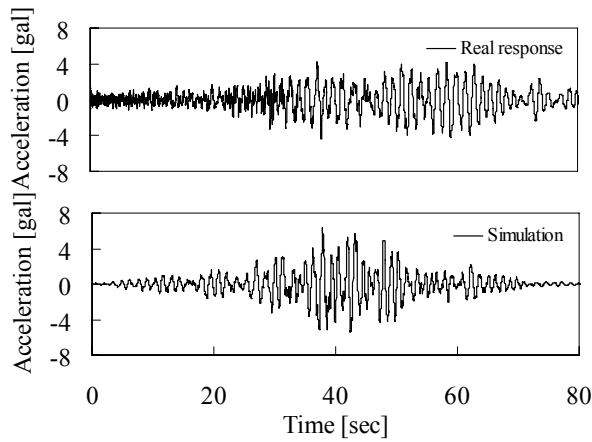


Fig. 14 The wave estimated wave in Niigata Prefecture Chuetsu

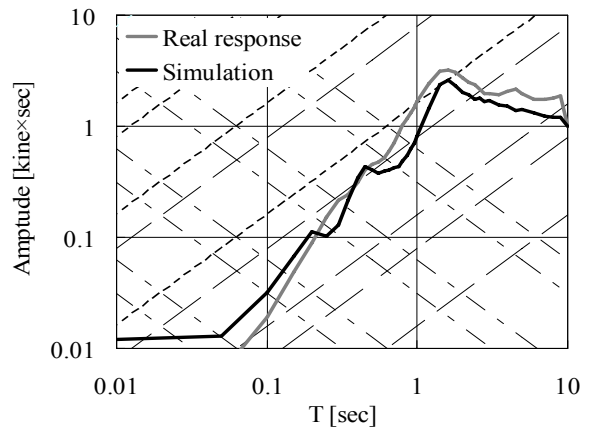


Fig. 17 Velocity response spectrum wave in Niigata Prefecture Chuetsu

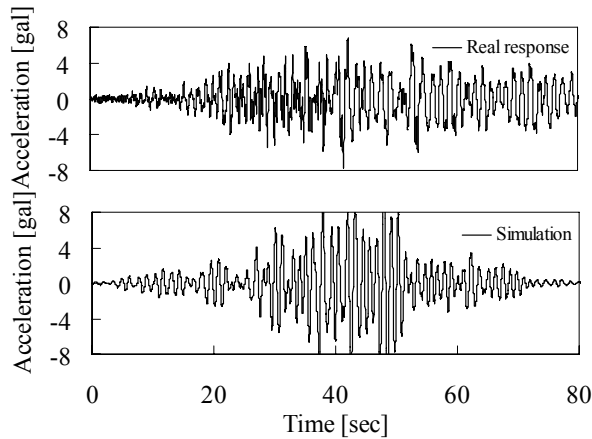


Fig. 15 The wave estimated wave in Niigata Prefecture Chuetsu offing

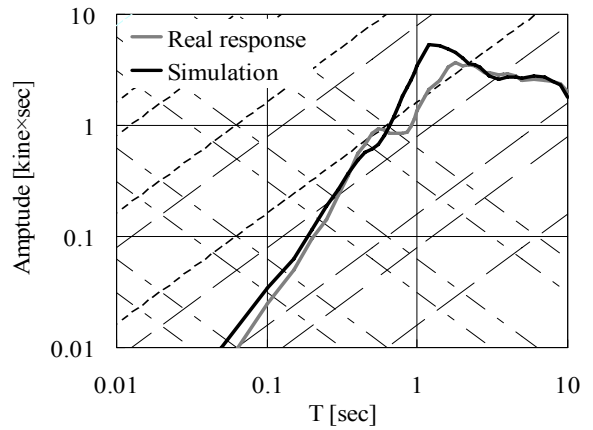


Fig. 18 Velocity response spectrum wave in Niigata Prefecture Chuetsu offing

Table 6 As a result of the short side

| Epicenter | Real response | | Simulation | |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Acc. _{MAX} [gal] | Time _{MAX} [sec] | Acc. _{MAX} [gal] | Time _{MAX} [sec] |
| 2004/9/5 Tokaido offing | 11.7 (—) | 76.8 (—) | 14.3 (122%) | 49.3 (-28sec) |
| 2004/10/23 Niigata Prefecture Chuetsu | 3.8 (—) | 45.6 (—) | 3.9 (103%) | 47.5 (2sec) |
| 2007/7/16 Niigata Prefecture Chuetsu offing | 7.0 (—) | 52.1 (—) | 9.6 (137%) | 55.5 (3sec) |

Table 7 As a result of the long side

| Epicenter | Real response | | Simulation | |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Acc. _{MAX} [gal] | Time _{MAX} [sec] | Acc. _{MAX} [gal] | Time _{MAX} [sec] |
| 2004/9/5 Tokaido offing | 5.3 (—) | 75.0 (—) | 8.8 (165%) | 49.3 (-26sec) |
| 2004/10/23 Niigata Prefecture Chuetsu | 4.4 (—) | 42.7 (—) | 5.2 (118%) | 42.6 (0sec) |
| 2007/7/16 Niigata Prefecture Chuetsu offing | 7.8 (—) | 55.8 (—) | 8.1 (104%) | 62.1 (6sec) |

6. 今後の研究課題

今回、システムのプロトタイプを組み、システムを試行した。その結果、システムの特徴である増幅特性に関しては成果が得られたと言ってよい。一方、推定された応答の波形と金沢大学病棟にて記録された波形の増幅過程および減衰過程に差異が生じた。すなわち、時間経過による振幅の増幅および減衰を決める位相特性に関して、課題の残る結果となった。特に、震央距離が比較的長い海溝型、かつマグニチュードの大きい地震に対して、十分な精度を持つ推定が困難であることがわかった。

また、今回システムの試行した地震は、過去に金沢大学病棟にて記録された地震波形を解としている。ただし、免震装置が塑性域に入ると予想される 2007 年の能登半島地震に関しては、システムのエラーのため記録が残っていなかった。そのため、今回の検討では弾性域に留めることとした。

課題に関しては、現在検討中であり、結果が得られ次第、報告させていただく予定である。

謝辞

本研究では、独立行政法人防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net で得られた観測記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁地震火山部：緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料，2008.07.
- 2) 大崎順彦，岩崎良二，大川出，政尾亨：地震波の位相特性とその応用に関する研究，第 5 回日本地震工学シンポジウム，pp.201-208，1978.11.
- 3) 和泉正哲，勝倉裕：地震動の位相情報に関する基礎的研究，日本建築学会論文集，第 327 号，pp.20-28，1983.5.
- 4) 沢田勉，永江正広，平尾潔：位相差分による地震動継続時間の定義とその統計解析，土木学会論文集，第 368/I-5 号，pp.373-382，1986.4.
- 5) 木村正彦：模擬地震動作成における波形制御について，日本建築学会構造系論文報告集，第 367 号，pp.30-36，1986.9.
- 6) 山根尚志，長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その 1 位相差分分布と地震動経時特性の関係に関する理論的背景，日本建築学会構造系論文報告集，第 553 号，pp.49-56，2002.3.

(2009 年 8 月 7 日受付)