

高次モーメントまで考慮した位相差分の統計量を基にした 模擬地震動作成手法に関する研究

Study on generation of the design artificial ground motion based on
statistical values of phase difference including higher moments

学籍番号 47096767
氏名 永雄 健一 (Nagao, Kenichi)
指導教員 神田 順 教授

1. イントロダクション

1.1 研究の背景と目的

設計用模擬地震動の策定方法の一つに目標応答スペクトルと位相情報を与えてフーリエ逆変換し、その目標の応答スペクトルに合うように収束計算をするというものがある。位相、特に位相差分の情報は地震動の非定常性において重要な役割を果たすとして様々な研究が行われてきた。大崎・他(1978)は位相差分の頻度分布と時刻歴波形の包絡形の形状が類似している (Fig.1) ことを指摘し、岩崎・他(1988)は数理的にその根拠を説明した。以後、位相差分の平均 μ を波形の最大振幅の位置、標準偏差 σ を主要動の継続時間の目安であるとして、様々な研究が行われた。

ところが、位相差分の歪度 β_3 や尖度 β_4 についてほとんど検討されてこなかった。地震動の包絡形と位相差分の頻度分布が類似していることを考えれば、分布形をより詳細に規定する高次モーメントの特性を周波数帯域毎に把握するのは重要であると考えられる。

本研究では $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ を推定し、これらの情報から模擬地震動を作成する試みを提案する。

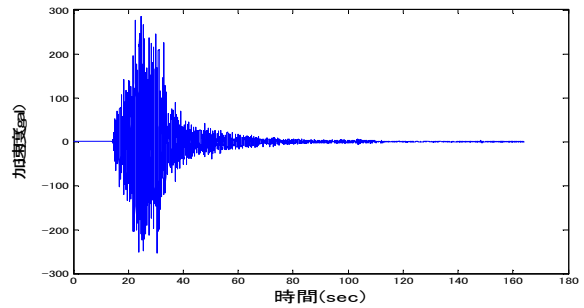


Fig.1: 加速度波形とその位相差分の頻度分布の例

1.2 位相差分と統計量の定義

大崎・他(1978)に従い下のように位相差分を定義した。

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

ここに $\Delta \phi_k = k$ 次の位相差分

$\phi_k = k$ 次の位相

$N =$ データ数

続いて統計量 $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ の定義を示す。

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta \phi_i - \mu)^2 \quad \dots (2)$$

$$\beta_3 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta \phi_i - \mu)^3}{N \sigma^3} \quad \dots (3)$$

$$\beta_4 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta\phi_i - \mu)^4}{N\sigma^4} \dots (4)$$

ここに μ = 位相差分の平均

σ = 位相差分の標準偏差

β_3 = 位相差分の歪度

β_4 = 位相差分の尖度

N = 位相差分のデータ数

正規分布の歪度は 0, 尖度は 3 である。

1.3 解析条件

本研究では Table.1 の 13 個の地震を選び観測波形を解析した。波形は防災科学技術研究所の KiK-net の地中観測波形である。検討する周波数帯域は次のように設定した。

0.1–1.0Hz (含まれるデータ数 149)

1.0–2.0Hz (含まれるデータ数 164)

2.0–3.0Hz (含まれるデータ数 164)

3.0–5.0Hz (含まれるデータ数 327)

5.0–10.0Hz (含まれるデータ数 819)

Table.1: 本論文で検討した地震

No.	地震名	M _w	発生メカニズム
1	2000年鳥取県西部	6.6	直下型横ずれ
2	2004年新潟県中越	6.6	直下型逆断層
3	2005年福岡県西方沖	6.6	直下型横ずれ
4	2007年能登半島沖	6.7	直下型逆断層
5	2007年新潟県中越沖	6.6	直下型逆断層
6	2008年岩手・宮城内陸	6.9	直下型逆断層
7	2003年十勝沖	7.9	プレート境界逆断層
8	2005年宮城県沖	7.1	プレート境界逆断層
9	2011年三陸沖	7.2	プレート境界逆断層
10	2001年芸予	6.7	スラブ内
11	2001年岩手県内陸南部	6.5	スラブ内
12	2003年宮城県沖	7.0	スラブ内
13	2009年駿河湾沖	6.2	スラブ内

2. σ と β_3 , σ と β_4 の関係

著者は Table.1 の地震それぞれで得られた観測波形をフーリエ変換し位相差分を算出した。そして前述の 5 つの帯域内における位相差分の $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ を観測波毎に計算した。次に地震毎に各帯域における σ と β_3 , σ と β_4 の散布図を作成し回帰分析を

行った。Fig.2 と Fig.3 に例として 5.0 – 10.0 Hz における全ての直下型地震の平均的な σ と β_3 , σ と β_4 の関係を示す。

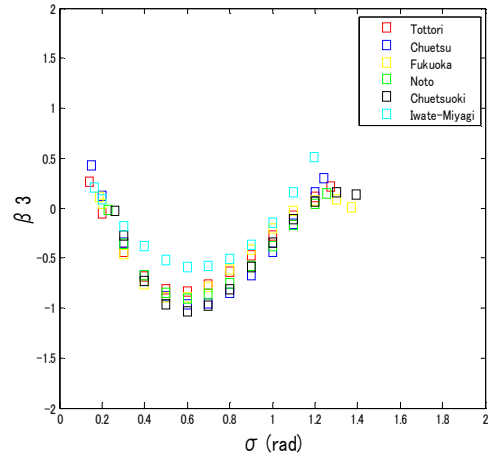


Fig.2: 5.0 – 10.0 Hz における直下型地震の平均的な σ と β_3 の関係

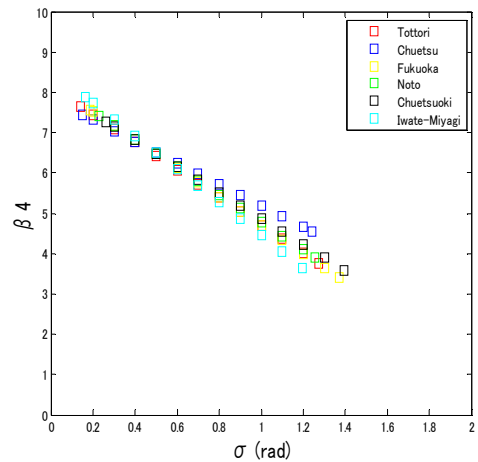


Fig.3: 5.0 – 10.0 Hz における直下型地震の平均的な σ と β_4 の関係

Fig.2 を見ると各地震とも σ が 0.6 程度で β_3 が最小になるという傾向を持つと分かる。しかし直下型を含む全地震の結果を比べると地震間の差は大きく、その差も地震の規模や深さなどの違いによると考えられる系統的なものではなかった。よって位相

差分の $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ の関係は地震毎に個別に定義する方法を採用した。

3. σ の推定法

第二章の検討で位相差分の σ から β_3 と β_4 を地震毎に推定できることを示した。そこで σ を決めることを考える。一般に震源から遠い観測点の波形は分散して継続時間が長く、位相差分の σ が大きい。実際、既往の研究は位相差分の σ を震源からの距離で説明している。しかし地震波は不均質な速度・減衰構造を持つ地盤を伝わるので、位相差分の σ もその影響を受けていると推察される。本研究では各観測点における波形の位相差分の σ を、震源から観測点に至るまでのエネルギー減衰 ($E.A.$) との関係で見ることにした。 $E.A.$ は地震波が伝播した地盤の不均質性の影響を含んでいる。

地震のタイプ毎に結果を整理すると、高周波数帯域では地震の違いによらず、 σ と $E.A.$ の関係はよくまとまる。例としてプレート境界地震の 3.0 – 5.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係を Fig.4 に示す。

一方 0.1 – 1.0 Hz では堆積層上のサイトとそうでないサイトの σ と $E.A.$ の関係の差が明瞭で (Fig.5 と Fig.6 参照)、地震間の差も大きい。

さらに、直下型・プレート境界・スラブ内という地震のタイプ毎に σ と $E.A.$ の勾配は異なる。

これらのことから、低周波数帯域では地震毎に個別の σ と $E.A.$ の関係を用い、高周波数帯域では地震のタイプ毎にまとまった σ と $E.A.$ の関係を用いる。また 0.1 – 1.0 Hz では堆積層の上に観測点があるかどうかで異なる σ と $E.A.$ の関係を用いることとする。

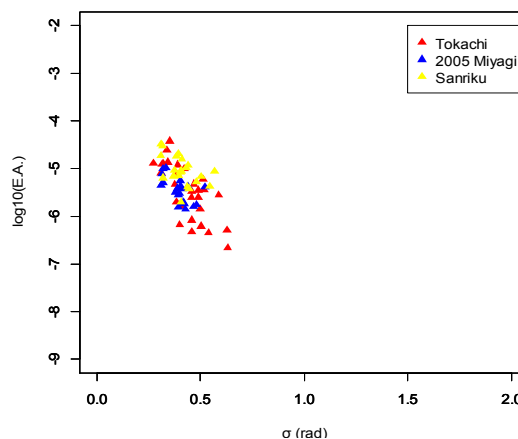


Fig.4: 3.0 – 5.0Hz のプレート境界地震の D と $E.A.$ の関係

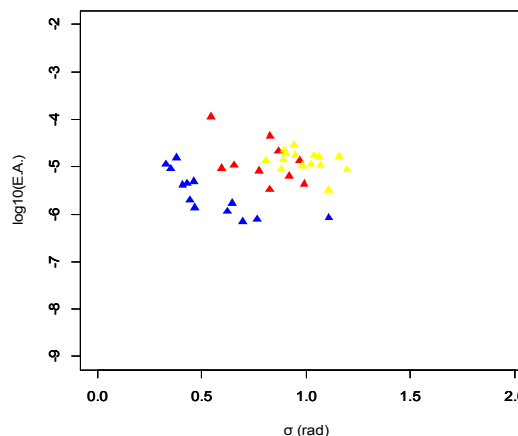


Fig.5: 0.1 – 1.0 Hz プレート境界地震の D と $E.A.$ の関係
(堆積層上のサイト以外)

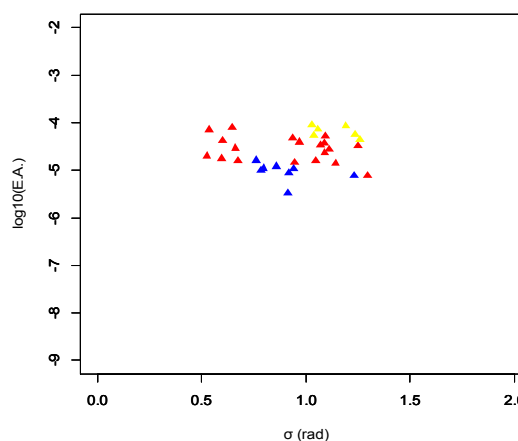


Fig.6: 0.1 – 1.0 Hz プレート境界地震の D と $E.A.$ の関係
(堆積層上のサイトのみ)

4. 地震波形の因果性について

本章では継続時間の短い波形は因果関数と見なせることと因果関数をフーリエ変換した時に、実部と虚部の間にヒルベルト変換の関係が成り立つことを利用し、実務で扱うなめらかなフーリエ振幅を、位相差分の値を基に、地震動の因果性を満足させる目的でぎざぎざさせるアルゴリズムを考案した。Fig.7 になめらかな初期のスペクトルとぎざぎざさせた後のスペクトルの例を示す。

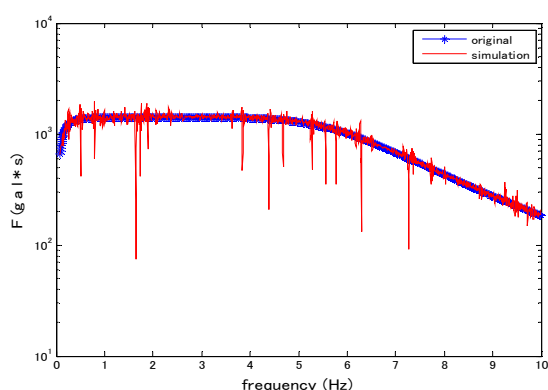


Fig.7: 因果性を満足するために、位相差分の値を基にぎざぎざさせたスペクトル

5. 模擬地震動作成例

各章の検討から、地震のタイプ・規模・深さ・震源を仮定し、その震源から設計地点までの $E.A.$ を推定できれば、a) 設計地点における振幅レベル、b) 設計地点における位相差分の $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ 、c) 継続時間の短い波形については因果性、を考慮した波形を作成できる。著者らはそのような波形の作成手法を提案した。地震の諸元を 2004 年新潟県中越地震と同じとし、震源から 100 km の地点に構造物を建設する場合、作成された模擬地震動の例を Fig.8 に示す。また著者らは上述の b), c) に加え d) 告示スペクトル

が規定する応答レベルを持つ、波形を作成する手法も提案した。地震の諸元・設計地点は上の例と同じとし、告示スペクトル（レベル 1）と同等の応答レベルを持つ模擬地震動の例を Fig.9 に示す。Fig.9 の波形は、Fig.8 の波形と同じ位相差分を持ちながらも、振幅は 3 倍近いレベルに上昇している。

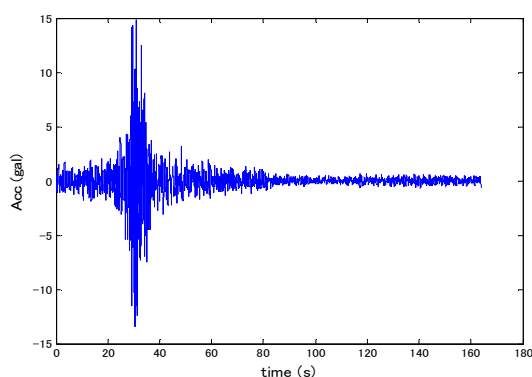


Fig.8: 模擬地震動作成例

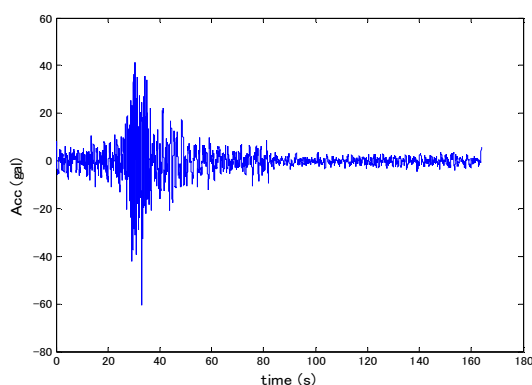


Fig.9: 模擬地震動作成例（告示スペクトルのレベルを考慮）

6. まとめ

地震動の位相差分の高次モーメント特性や $E.A.$ による σ の推定法などを検討し、位相差分の高次モーメント情報を考慮した模擬地震動作成手法を提案した。