

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：22701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21510192

研究課題名（和文） 強震記録に基づく傾斜運動の推定

研究課題名（英文） Estimation of tilt motion by means of strong-motion recordings

研究代表者

木下 繁夫（KINOSHITA SHIGEO）

横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科・教授

研究者番号：90360015

研究成果の概要（和文）：強震時に生じる傾斜運動を、観測された強震記録に基づいて推定した。この傾斜運動には局地的な地盤変動によるものと断層運動に付随するものがあるが、本研究ではいずれの場合も強震記録に基づく推定法を確立し、考察した。

研究成果の概要（英文）：This study conducted the estimation of tilt motions during a strong-motion earthquake by means of strong-motion recordings. Local and earthquake fault oriented tilt motions were successfully evaluated in this study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：強震記録・傾斜運動・永久変位

1. 研究開始当初の背景

1995年に発生した兵庫県南部地震を契機に、我が国の強震観測は充実し、震源域の強震記録が蓄積されつつある。これらの強震記録が示す顕著な特徴の一つは、強震計が本来記録する地動の並進運動に重畳して、傾斜（回転）運動による応答が記録されることである。最近でも、2003年十勝沖地震における HKD086 観測点（K-NET）や WISE ネットワーク（北海道開発庁）の道南地域の観測点、2005年新潟県中越地震における NIG019 観測点（K-NET）、2007年能登地震における ISK005 観測点（K-NET）及び輪島観測点（F-net）、新潟県中越沖地震における NIG018 観測点（K-NET）、及び、2008年岩手宮城内陸地震における IWTH25、IWTH26、AKTH04 観測点（KiK-net）の様に、各

地震の震源域で最大規模の揺れを記録した強震記録上には、傾斜運動による応答が記録されている

しかしながら、慣性換振器から得られる一つの地震記録から並進運動と傾斜（回転）運動を分離することは理論的に不可能である。このため、目的にあわせて近似的に分離することが要請される（Graizer, 2006）。この近似の精度を上げるためには、記録上に出現する傾斜（回転）運動による過渡応答波を並進運動による通常の地震波から分離して抽出するという技術的な困難さを伴う（Kinoshita, 2008）。この傾斜（回転）運動の精度良い分離が無ければ、震源域地震動の永久変位を精度良く推定することも困難であり（Pillet and Virieux, 2007）、傾斜（回

転) 運動の物理的背景を明確にすることも困難であろう。即ち、強震記録から傾斜(回転)成分を、精度良く分離・抽出する技術の確立が早急に必要とされている。これが本研究の目的の第一である。

傾斜運動を引き起こす物理的要因も種々あるが、傾斜運動の抽出自体がままならない現状では、その考察に立ち入ることすら難しい。傾斜運動の抽出を可能として話を進めれば、物理的要因として考えられるのは、観測点近傍における地盤の変形(サイト効果)と断層運動に基づく震源効果によるもの(Bouchon and Aki, 1982)であろう。特に、震源効果による傾斜運動が、観測結果と一致する様な結果は皆無である。更に、2008年岩手宮城内陸地震のIWTH25観測点やAKTH04観測点における上下動成分での回転運動(上下動加速度計の地震前後のオフセット量として評価すれば)は、地中記録の上下動成分のオフセットは地表上下動のそれより、また、地中の水平成分のオフセットよりも大きい事実を示しており、何を測定したのかを明確にすることから始めなければならない。このように、震源域近傍での傾斜(回転)運動には、未知な部分が多く、何も解決されていないのが現状である。そこで、本研究では、Kinoshita(2008)の基礎的な成果を進展させ、強震記録上の傾斜(回転)成分の抽出法を確立し、傾斜運動を引き起こす物理的要因を確立した方法の実強震記録への適用から追求する。

2. 研究の目的

(1) 強震記録(通常の加速度強震計の記録に加えて、低感度の広帯域速度計(例えば、Hutt, Evans and Yokoi (2008))の記録)に含まれる傾斜運動による応答成分を同定し、傾斜運動を逆推定する方法を確立する。同定問題に対しては、Kinoshita(2008)による median filtering による解法を進展させて、非因果的な非線形フィルタである Empirical Mode Decomposition 法(Huang et al., 1998)に基づく filtering を用いて一般化する。このような非因果的な非線形フィルタを用いる一般化は、通常の因果的な線形 filtering では、群遅延や整定時間の問題が発生し、傾斜運動による応答を正確に抽出出来ないためである。

(2) 強震記録から推定された傾斜(回転)運動の生成要因をサイト効果と震源効果に分類し、個々の要因を明らかにする。特に、傾斜(回転)運動に及ぼす震源からの影響については、GPS 観測に基づく地震直後の地殻変動との比較考察を含めて、その定量化を最終

的な目標とする。

(3) 岩手宮城内陸地震における地中群列記録(IWTH25 や AKTH04 観測点)に発生した大加速度の原因を、表層地盤の非線形応答の立場から明らかにするため、傾斜運動の影響を取り除いて考察する。

3. 研究の方法

(1) 強震記録上に現れる傾斜運動成分を波形同定し、傾斜運動を加速度領域で推定する方法を確立し、実記録に適用する。傾斜運動成分の同定には、成分波形自体の同定と傾斜運動の onset の決定が鍵となる。従来の同定法では median filter のカスケード接続による方法を用いていたが(Kinoshita, 2008)、精度上に限界が生じるため、本研究では Huang et al. (1998) が提案した EMD(Empirical Mode Decomposition)法に基づく filtering を用いる。即ち、EMDにより得られる IMF(Intrinsic Mode Function)による線形結合で成分波形の同定を行い、傾斜運動の onset を、その線形結合から得られる瞬時周波数の時間変化により決定する。

この推定方法は地盤変動による局所的な傾斜運動が対象であり、扱う強震記録は、K-NET や KiK-net の加速度記録と F-net 等の広帯域速度記録から選択する。これらは、インターネット上で公開されている記録であり、2004年新潟県中越地震および2008年岩手宮城内陸地震において得られた震源近傍の記録とする。加速度強震記録が傾斜成分を含むことの判定には、①加速度記録の記録開始時と終了時にオフセットが生じていること、②広帯域速度計と等価な速度記録に変換した際に、固有の過渡応答を示すこと、及び、③完全積分に対し、オフセット相当分の直線勾配を有すること、の3点を用いる。広帯域速度記録に含まれる傾斜成分は、その過渡応答波形から直接判断する。

(2) 地震断層の運動に付随する傾斜運動は地殻変動と関連するものであり、地震中に発生する静的変位(コサイミックな永久変位)や表層地盤の非線形応答と関連して考察を進めた。この種の傾斜運動をモデル化するため、小刻みに加速度オフセットが生成されるよう、加加速度領域でデルタ関数列を導入する方法を用いた。

この方法ではDC成分近くまで速度信号を復元する必要があり、広帯域速度計の周波数補償が不可欠である。加速度記録は通常零感度を有するため、完全積分を実施する。このようにして復元された速度波形は加速度ステップが

生じる時点で速度波形上の直線勾配が変化するため、これから傾斜運動が推定される。

特に、研究期間中に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源依存の傾斜運動を定量的に評価し静的変位の発生と太平洋沿岸域での伝播を考察するための強震記録が得られた。即ち、強震動の継続中に宮城県沿岸部から静的変位が発生し、関東及び岩手県側に伝播した静的変位はほぼ東へ水平変位するとともに地盤が宮城県域で50から100cm程度沈下したことを強震記録のみから解明することを可能とするため、これを実施する。得られた結果は、地震後のGPS測量との比較研究から考察可能である。この様な情報を現地での地震観測のみからリアルタイムで導けることは、津波警報の質の改善に貢献しよう。

(3) 局所的な傾斜運動を除去した後の並進運動は、表層地盤の非線形応答に関する考察を広い帯域で行うことを可能とする。岩手・宮城内陸地震における一関西観測点の非対称上下動は4g近い最大加速度を記録している。本研究では、確率論的なアプローチを採用し、バウシグ・ボールと類似の全波整流型の変位運動が発生し、少なくとも2回以上の連続した大きなバウシグが極めて高い加速度を発生することを強震記録に基づき考察する。

(4) 研究全体を通して、広帯域地震計記録の低域周波数補償とトレンド補償に関する技術の向上が必要となる。本研究では、デジタルフィルタリングと統計的トレンドモデルの活用でこれらに対応する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果は、強震記録に基づく傾斜運動推定法の確立とその結果として得られるコイシミックな静的変位の推定である。傾斜運動は局所的な地盤変動によるものと断層運動による地殻変動によるものとに大別される。

(1) 局所的な傾斜運動

本研究から導かれた、地盤変動に起因する局所的な傾斜運動の推定法は以下の手順による。

- ① 加速度強震記録を広帯域速度記録に変換する。勿論、広帯域速度記録はそのまま用いる。
- ② 傾斜運動は広帯域速度記録上では地震計固有の長周期過渡応答波形となるため、これを intrinsic mode function (IMF) を用いて抽出する。これは、地震記録から非定常・非線形信号に適用可能な直交関数系(数学的には証明されていないが、経験上完備系に近い)

を作り、その関数系で過渡応答波形を表現することに相当する。

③ IMF で平滑・抽出された過渡応答波形を広帯域速度計の逆特性で補正すると、地動の加速度傾斜成分が得られる。但し、この作業は計算における発散を防ぐため、加加速度の領域で行い、その後、完全積分をすることで加速度領域に戻す。

上記方法の妥当性を検証するため、2003年十勝沖地震において得られた大津観測点の広帯域速度記録等を用いた。結果として、この方法は安定で精度の良い傾斜運動が推定できることが確認された。図1のグレーの実線は大津観測点のNS成分であり、液状化に伴う地盤傾動によるものである。IMFを用いて同定された過渡応答波を黒太線で示す。図中の矢印は傾斜運動開始点を示すものであり、点線で示した瞬時周波数から読みとったものである。

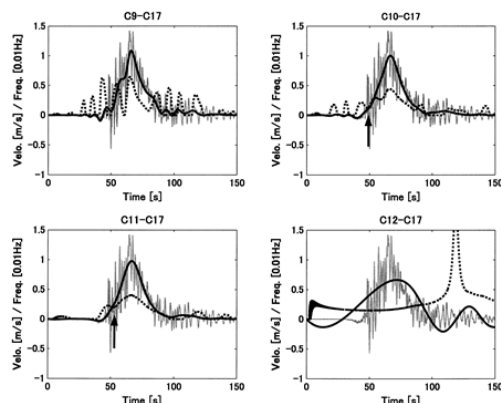


図1. 局所的な傾斜運動の記録と過渡応答波の IMF を用いた表現

図2は、図1に示した過渡応答波から推定された加速度傾斜運動を示したものである(図中の点線)。図中の黒実線は IMF を用いて表現した過渡応答波(広帯域速度波形中の過渡応答分)を示す。

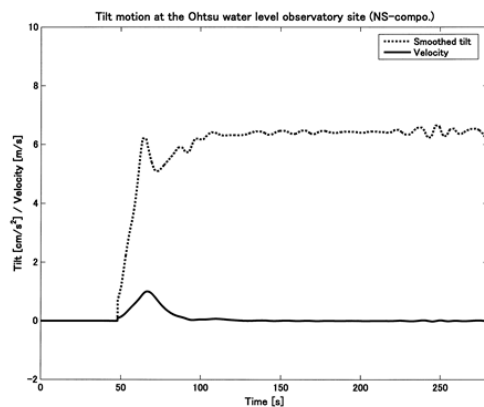


図2. 過渡応答波から推定された加速度傾斜運動

(2) 断層運動に伴う傾斜運動

断層運動に伴う傾斜運動は局所的な地盤傾動によるものと比較してかなり小さな加速度ステップとして強震記録上に出現する。これに対するモデル化は加加速度の領域で行われ、 δ 関数列で記述される。これは、大局的に見て、加速度波上に小刻みな加速度ステップあるいはオフセットが出現することを意味する。これに対する傾斜運動の推定も、基本的には局所的な傾斜運動に対する方法と同じである。但し、広帯域速度記録上の過渡応答波に代わって、ほぼ DC 成分に近いところまで周波数補償された速度記録の勾配関数を同定することにより、傾斜運動を推定する。具体的には加速度次元の勾配とその出現時である。

加速度もしくは速度領域で傾斜成分を除去すれば、コサイミクな静的変位の推定も積分操作により可能となる。

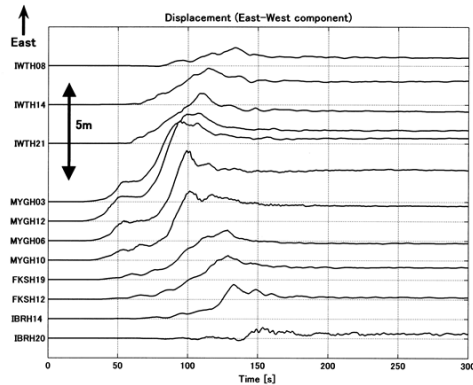


図 3. 傾斜運動を除去した後には得られる静的変位の発生と伝播

図 3 はその一例を示すもので、2011 年東北地方太平洋沖地震における KiK-net の太平洋沿岸観測点で推定された静的変位の発生と伝播を示すものである。この結果は、GEONET で得られた GPS による地震直後の変位とほぼ一致する。また、P 波到達後、およそ 50 秒程度で、太平洋側の地盤が沈下した様子も上下動成分の変位運動から確認される。地震記録から静的変位の発生と伝播がリアルタイムで処理できれば、津波警報等の精度向上に貢献しよう。

(3) 広帯域速度記録の周波数補償とトレンド補償法の確立

本研究における技術的側面での困難さは、広帯域速度計記録の極低周波数域までの周波数補償とフレキシブルなトレンド推定法を見出すことにある。結果として、本研究ではデジタルフィルタによる周波数補償と統計的トレンドモデルの利用を提案した。この方法を 2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた F-net の記録に適用した結果実用的な結果を得た。図 4 はその一例であり、F-net 気仙沼観測点の記録であ

る。

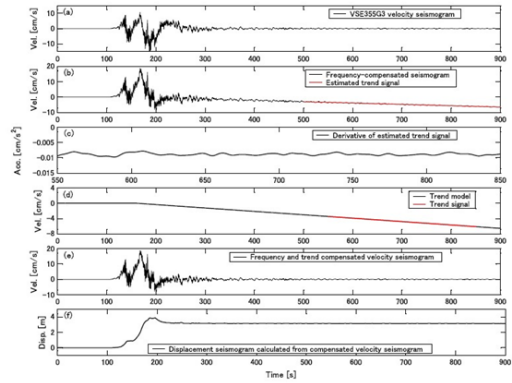


図 4. 広帯域速度計の低周波数および傾斜運動によるトレンド除去と静的変位の推定例

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 6 件(全て査読有))

- ① Kinoshita, S. (2012), Low-frequency and trend compensation of broadband seismograms, *EPS*, **64**, e5-e8.
- ② Kinoshita, S. (2011), A stochastic approach for evaluating the nonlinear dynamics of vertical motion recorded at the IWTH25 site for the 2008 Mw6.9 Iwate-Miyagi inland earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **101**, 6, 2955-2966.
- ③ Kinoshita, S. and M. Takagishi (2011), Generation and propagation of static displacement estimated using KiK-net recordings, *EPS*, **63**, 779-783.
- ④ Kinoshita, S. (2010), A method for estimating the Green's function of a near-surface layer for SH-waves by means of a borehole receiver array, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **100**, 3, 1381-1388.
- ⑤ Kinoshita, S. (2009), Nonstationary ray decomposition in a homogeneous half space, *EPS*, **61**, 1297-1312.
- ⑥ Kinoshita, S., H. Ishikawa and T. Satoh (2009), Tilt motions recorded at two WISE sites for the 2003 Tokachi-Oki earthquake (M8.3), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **99**, 2B, 1251-1260.

[学会発表] (計 2 件)

- ① 木下繁夫、地表記録のみで構成する表層地盤の擬グリーン関数、日本地震学会秋季大会、2009 年 10 月、京都
- ② Kinoshita, S., Nonlinear vertical

response characteristics of a near-surface layer recorded at the Iwth25 site for the 2008 Miyagi-Iwate Inland Earthquake, 米国地球科学連合秋季大会, 2010年12月、サンフランシスコ

[その他]

ホームページ等

<http://kjisin.sci.yokohama-cu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下 繁夫 (KINOSHITA SHIGEO)

横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科・教授

研究者番号：90360015

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：