

断層運動を含む地震記録の分析

鈴木崇伸

正会員 東洋大学助教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 川崎市鯨井 2100)

断層近傍での地震動には地盤の並進運動成分が含まれている場合があり、構造物の耐震強化や地震直後の対応を考える上で重用なデータとなる。本研究では台湾集集地震の観測データをもとに波形分析を行って、その特徴を明確にした。さらに断層の動きに伴う並進運動成分を定量化したところ、1自由度系のインディシアル応答で近似可能なことが明らかになった。今後、断層近傍での強震動のモデル化と、永久変位の簡易計算について研究を進める予定でいる。

Key Words: fault movement, strong motion records, indicial response

1. 目的

強震観測網の拡充にともなって、多数の強震記録から地震現象を、より詳細に理解できる可能性がでてきている。液状化地盤での波形の違いから、リアルタイムに液状化の発生を検知する方法がいくつか提案されている。同様に、断層近傍での地震動には地盤の並進運動成分が含まれている場合があり、構造物の耐震強化や地震直後の対応を考える上で重用なデータとなる。断層運動による地盤の永久変位も、その運動の特徴は加速度波形の中に含まれているはずであり、適切なデータ処理を行えば、変位量の計算が行えると考える。

本研究では、数値減衰を見込んだ簡単な前進積分を行って、速度・変位を計算し、3次元の直線運動を求めて、断層近傍での地震動を分析する。また運動エネルギーの変化やその変化率（パワー）などから、断層運動を含んだ加速度記録の特徴を分析する。さらに、運動を特徴づける基本的なパラメータを仮定してモデル化を試みている。

2. 解析方法

(1) 時間積分方法

断層変位を含む加速度記録には長周期のノイズが多く含まれており、積分にあたっての工夫がいくつか報告されている。加速度記録の積分法についてはこれまで、勝倉らによるFFTを応用した方法や、Iwan, Chenによる物理的な因果性を加味して多項式でゼロ線補正する方法などが提案されている。またKostadinov&Yamazakiは断層の運動をガウス関数で近似して、長周期の運動のみを取り出す方法を提案している。

今回は2段階の補正を加えて線形加速度法で積分を行なう。はじめは主要動の前と後でノイズレベル（ゼロ線

の平均値）が異なることに注目して補正する。加速度記録の開始部分の5秒間の平均値と終了部分の5秒間の平均値を計算し、全体の平均とのずれ量を計算する。図-1に計算イメージを示すが、加速度において階段関数の補正を行い、速度においては1次関数の補正を加える。この補正により加速度波形が歪み、終速度が0にならなくなるために、終速度が0になるように2段階目の補正を行なう。2段階の補正を加えた速度波形をもとに変位波形を計算する。

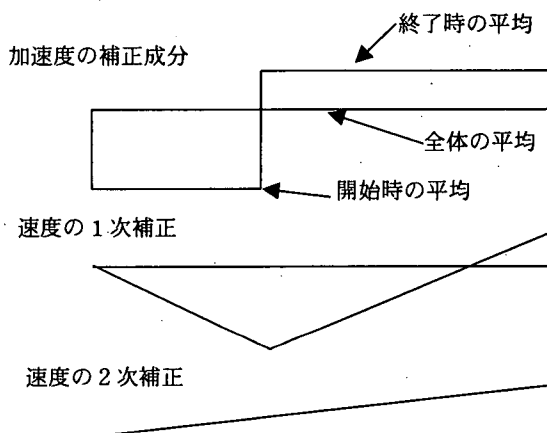


図-1 時間積分における補正方法

(2) 解析手順

断層運動をとらえた波形の特徴を明確にするためにいくつかの物理量の時間変化を計算する。まず、長周期の波形成分を概観するためにタイムウィンドウで区切って平均化処理を行う。平均化処理によりハイカットされた波形は長周期成分の変動をおよそ表したものとなり、長周期の速度振幅と波形がおおよそわかる。今回は5秒間隔のタイムウィンドウで計算する。次に前述の補正を加え

て速度波形と変位波形を計算する。変位波形においては断層運動による永久変位が計算できる。

断層運動を含む地震動は3次元的な剛体の移動と振動が重なり合っている。そこで剛体運動を抽出する計算を行ってみる。断層運動を3次元空間内の直線運動と仮定して、3成分の速度波形を直線上に投影して合成してみる。また単位質量あたりの運動エネルギーとパワーの時間変化を計算して台湾の記録と神戸の記録を比較してみる。

3. 計算結果

(1) 波形の分析

公開されている台湾集集地震の強震記録のうち、断層が地表にあらわれた付近の観測点として、石岡(TCU068)、台中(TCU052)の2地点を紹介する。図-2にTCU052の3成分の波形を示している。複数のグ

ラフの組み合わせとなっているが、各列は地震動の成分ごとであり、各行はそれぞれ加速度(第1段)、加速度の長周期変化(第2段)、速度(第3段)、変位(第4段)を示している。縦軸の単位はそれぞれ、Gal, Gal, cm/s, cmである。

加速度波形から、水平動の最大加速度は300Gal~400Galであり、上下動は半分の200Galくらいとなっている。主要動がはじまるのと同時に長周期の成分が3方向とも重なっている。長周期成分を概観するために5秒間隔でタイムウィンドウを設定してその間の平均加速度を計算したのが2段目のグラフである。短周期成分が除去された結果、振幅は小さくなっている。水平成分の力積を概算すると $40\text{Gal} \times 5\text{sec} = 200\text{cm/s}$ ほどとなる。

次に3列目は前述の方法で補正して計算した速度波形である。加速度の長周期成分に対応して水平方向の最大振幅は約200cm/s、上下方向は約150cm/sとなっている。

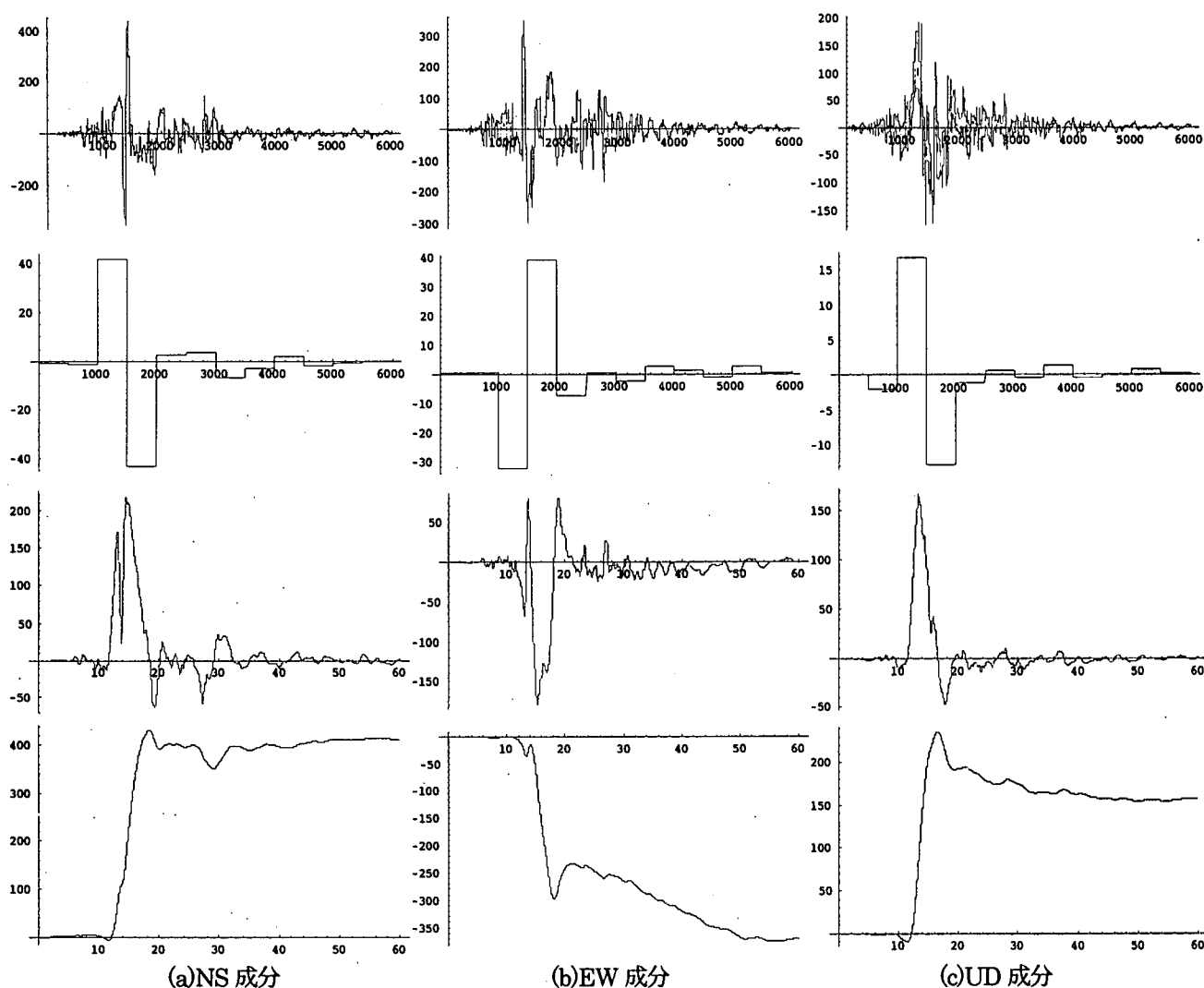


図-2 TCU052の積分結果(図の配置: 加速度(第1段)、加速度の長周期変化(第2段)、速度(第3段)、変位(第4段))

また最大速度の発生時刻はおよそ同時刻となっている。
最大速度が発生する 1/2 周期において、片振幅の波形となっている。

最下段は変位波形であるが、EW 成分は長周期ノイズが除去しきれておらずピークに達したあとに変位が進行している。NS 成分、UD 成分はピークのあとやや変位量が小さくなって安定する波形となっている。最大変位量は NS 成分で約 4m、EW 成分で約 -3m (ピーク値)、UD 成分で約 2.5m となっている。

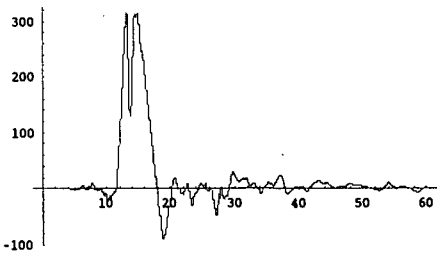
(2) 剛体運動成分の抽出と分析

断層運動を含む地震動は 3 次元的な剛体の並進運動と振動が重なり合っている。そこで剛体運動を抽出する計算を行ってみる。3 成分の最大変位を (d_x, d_y, d_z) とし、その方向余弦を (e_x, e_y, e_z) とする。3 成分の速度波形を方向余弦の方向に投影して直線運動成分を計算する。計算式は

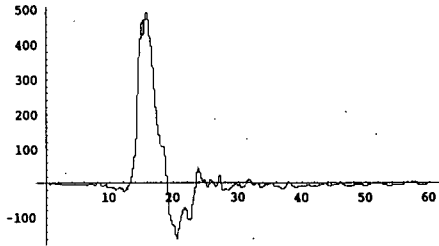
$$v_r(t) = v_x(t)e_x + v_y(t)e_y + v_z(t)e_z$$

である。

図-3 に 3 次元的な直線運動成分に合成した波形を示す。(a) は図-2 に示した TCU052 の記録であり、(b) は TCU068 の記録である。最大値は異なるものの 2 つの波形は、最大振幅を含むゼロクロス時間が 7~8 秒である点と、それに続く半波が最大振幅の 1/3 程度と合っている点がよく似ている。ある方向に直線的に大きく動いて少しもどろというものが断層の運動と考えられる。また最大速度は TCU052 が約 3m/s、TCU068 が 5m/s となっており、付近の断層変位の大きかった TCU068 のほうが大きくなっている。



(a)TCU052



(b)TCU068

図-3 地震記録から求めた並進運動成分の速度変化

(3) エネルギーとパワー

大振幅の速度がどれほどのエネルギーとパワーを持っているかを計算してみる。単位質量あたりの運動エネルギーは次式に示すように 3 成分の速度の 2 乗値の合計から計算される。

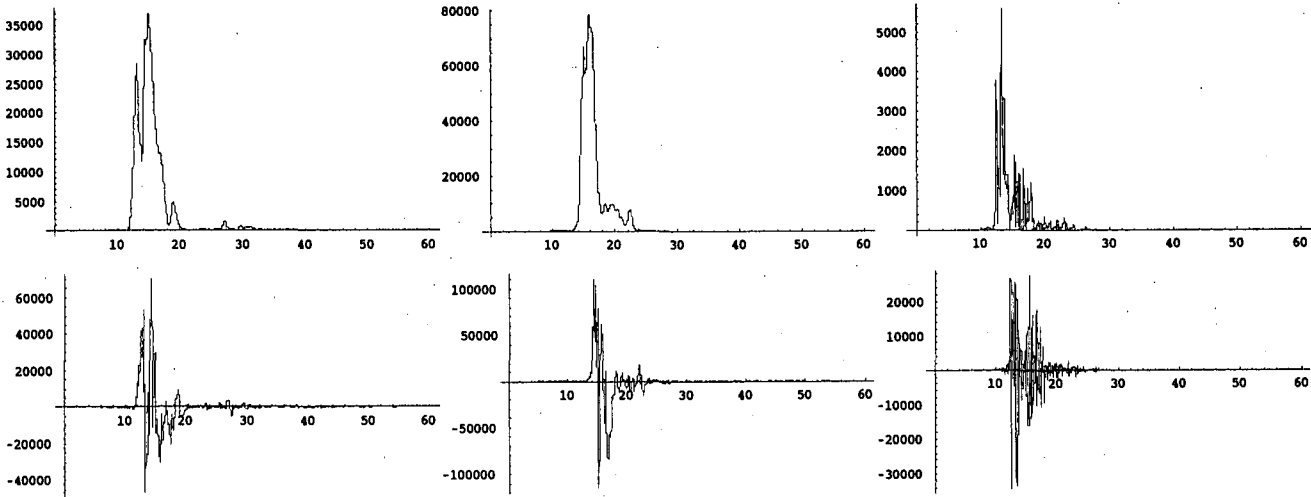
$$K = \frac{1}{2} \sum v^2$$

またエネルギーの時間変化率 (パワー) は加速度ベクトルと速度ベクトルの内積で計算できる。式で表すと

$$\frac{dK}{dt} = a_x v_x + a_y v_y + a_z v_z = (a_x, a_y, a_z) \cdot (v_x, v_y, v_z)$$

となる。

図-4 に単位質量あたりのエネルギーとパワーを計算した結果を示している。縦軸の単位はエネルギーが (*)



(a)TCU052

(b)TCU068

(c)神戸気象台

図-4 3 成分を合成したエネルギー (上段) とパワー (下段) の時間変化

10^{-4}Nm/kg)、パワーが $(*10^{-4}\text{Nm/kg/s})$ である。同図(c)に比較のために兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の計算結果を示している。剛体的な並進運動成分が大振幅であるために台湾の記録では極めて大きなエネルギー値となっている。しかしながらパワーは神戸に比して極めて大きいというほどでもない。

4. 並進運動のモデル化

速度波形、変位波形の特徴の分析結果から、ある時刻に一定の力が作用する振り子のインディシアル応答で近似する。運動方程式は

$$\ddot{u} + 2hp\dot{u} + p^2u = a \quad (t > 0)$$

$$u(0) = 0, \quad \dot{u}(0) = 0$$

方程式を解いて

$$u(t) = \frac{a}{p^2} \left\{ 1 - \exp(-hpt) \left(\cos p_d t + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin p_d t \right) \right\}$$

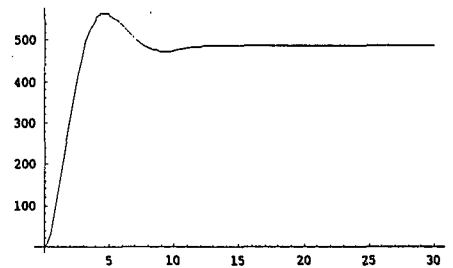
$$p_d = p\sqrt{1-h^2}$$

$p = 2\pi/8$, $h = 0.5$, $a = 300$ としたときのインディシアル応答を図-5 に示す。概ね断層運動の並進運動成分を示す図-3 の波形を近似できている。

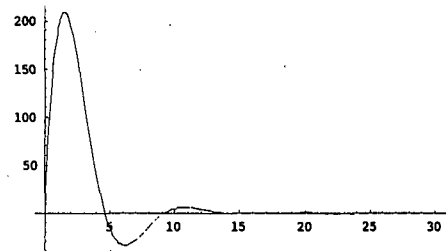
表-1 に応答の特性値を示している。インディシアル応答のパラメータは (p, h, a) の3つであり、経験的または解析的に3つのパラメータが決まれば、永久変位を求められる。特に永久変位は (p, a) の関数となる。波形分析からこれらのパラメータを決定できれば、永久変位をリアルタイムな推定に応用できると考える。

表-1 インディシアル応答の特性値

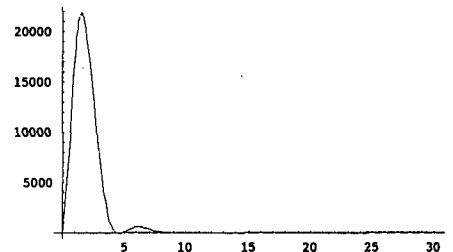
最大変位	$\frac{a}{p^2} \left(1 + \exp \left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}} \right) \right)$
永久変位	$\frac{a}{p^2}$
最大変位と永久変位の比率	$1 + \exp \left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}} \right)$
最大速度	$\frac{a}{hp} \exp \left(-\frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \text{ArcTan} \frac{\sqrt{1-h^2}}{h} \right)$



(a)変位



(b)速度



(c)エネルギー

図-5 インディシアル応答の計算例

5. まとめ

断層運動を含む加速度記録の特徴は

- ・ ゼロクロス時間の大きい正負の加速度パルスを含み、速度振幅が極めて大きくなる。
- ・ その加速度パルスはほぼ同時刻に発生する。
- ・ 長周期の速度振幅が極めてく、大きなエネルギーを発生するが、パワーはそれほどでもない。

などがあげられる。また1自由度系のインディシアル応答が断層変位の特徴をよく表現できるのが確認できた。今後リアルタイムな断層変位の推定法の研究を進める予定でいる。

参考文献

- 1) 理論地震動研究会, 地震動その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994
- 2) X. Chen, Near fields ground motion from the Landers Earthquake, Report No. EERL95-02,1995
- 3) M.V. Kostadinov, Fumio Yamazaki, Influence of static displacement on peak ground velocity at sites that experienced forward rupture directivity, Proc. of Workshop on seismic fault induced failures, 2001