

加速度記録による変位への積分方法と 1999年台湾地震記録による永久変位

小鹿文方¹・箕輪親宏²・大谷圭一³

¹工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006茨城県つくば市天王台3-1)

²工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006茨城県つくば市天王台3-1)

³工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006茨城県つくば市天王台3-1)

加速度記録から永久変位を求めるために、積分方法には長周期ノイズの除去と永久変位成分の保留が共に要求される。Iwan等(1994)は、時間域を区間に分け、3次多項関数で各区間における積分速度のベースラインを仮定する方法を提案した。本研究ではIwan等の積分方法に基づいて、積分速度より加速度記録に対するベースラインの修正によって、積分変位を求める改良積分方法を提案した。また、永久変位の積分結果を大きく左右している時間域の区間分け方を物理的意味で定義し、微調整の手法を提案することによって、安定的な積分変位を得られた。また、1999年台湾地震の加速度記録を用いて、永久変位を求めた。その結果、GPS観測結果とよく調和することによって、本提案方法の有効性が検証された。

Key Word : *baseline correction, permanent displacement, 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake records*

1. はじめに

積分で加速度記録から変位を求めるには、記録に含まれていた長周期ノイズに対するベースラインの修正は必要不可欠である。今までよく使われているローカット手法は、長周期ノイズだけではなく、記録に含まれている地震動の長周期成分および永久変位の成分までもカットされた。1999年台湾地震には地表断層付近に数メートルの永久変位を見られ、且つ高密度強震観測記録が得られたので、加速度記録から永久変位を求める積分方法の研究は注目された。

大きな地表変位に伴った加速度記録を用いて、積分変位を求める場合に、積分方法には長周期ノイズの除去と永久変位成分の保留が共に要求される。Iwan等(1994)¹⁾、(1995)²⁾は、時間域を3つの区間に分け、各区間における速度のベースラインを3次多項関数と仮定し、最小二乗法で求める方法を提案し、初めて積分によって加速度記録から永久変位を求められた。本研究では、Iwan等の積分方法を改良し、より正確、より安定的な積分変位を求める手法を提案し、また1999年台湾地震の加速度記録を用いて、積分による永久変位を求め、GPS観測結果との比較により、本提案方法の有効性を検証した。

2. 積分方法

(1) Iwan等の積分方法

Iwan等の積分方法は、加速度記録から線性のベースラインを取除いてから、単純に積分した速度を対象にし、記録時間を3つの区間に分けて、各区間における積分速度のベースラインを3次多項関数と仮定し、また分割点において連続・平滑条件に満足させ、最小2乗法で速度ベースラインを算出するものである。

この方法には、時間区間の分け方が視覚に頼り、明確な定義がないが、積分変位の結果は時間区間の分け方に敏感で、不安定である。また断層変位などの永久変位が存在しているので、速度波形の積分がゼロにならないはずであるが、単一の区間に対して、最小2乗法で速度のベースラインを算出する場合に、修正された速度波形の積分がゼロにするので、3つの区間の間にベースラインの連続・平滑条件を加えられると、時間全域における修正速度の積分がゼロにならないが、最大変位を過小評価する恐れがある。そこで、物理的に地震動の終了速度はゼロにならなければいけないので、ベースラインを算出するには速度波形より加速度波形を対象とするほうがもっと合理的であると考えられる。以上の理由によって、本研究では、Iwan等の積分方法を改良し、時間区間の分け方を物理的意味で定義し、さらにその分割点の微調整手法を提案し、加速度記録のベースラインを修正することによって、安定的な積分変位を求める方法を提案した。

(2) 本提案の積分方法

a) 積分方法

本提案手法は、地震動記録の時間区間を3つに分け、各区間における加速度波形のベースラインを2次放物線で近似し、次の式に示している。

$$\text{第1区間: } BL_1(t) = a_1 + b_1t + c_1t^2 \quad (1a)$$

$$t \in [0, T_p]$$

$$\text{第2区間: } BL_2(t) = a_2 + b_2t + c_2t^2 \quad (1b)$$

$$t \in [T_p, T_E]$$

$$\text{第3区間: } BL_3(t) = a_3 + b_3t + c_3t^2 \quad (1c)$$

$$t \in [T_E, T_D]$$

ここに、 T_p はP波の初動時間で、地震動の始動時間でもある。 T_p は記録の終了時間である。 T_E は永久変位が形成されるまでにかかる時間で、断層食い違いの立ち上がり時間や、断層距離、P波速度、S波速度などを総合的に考慮して、 T_E の初期値を決める。例えば、

$$T_E = T_S + \tau + \alpha \quad (2)$$

とする。ここに、 T_S はS波の初動時間で、 τ は断層食い違いの立ち上がり時間である。 α は時間調整係数で、地震と観測点によって違うが10秒以内の値を取っている。 T_E についてさらに微調整を行う必要がある。この微調整はとても重要で、永久変位の結果にも大きな影響を与える。

また、すべての区間における加速度平均値はゼロになるはずである。第1区間にはP波の到達時間前にあるノイズであるので、区間内における加速度平均値と速度平均値はゼロにする。第3区間には加速度平均値と速度平均値（断層変位の時間過程を考慮

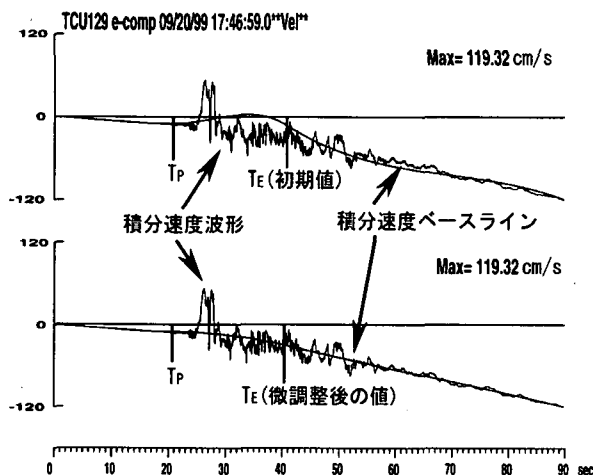


図-1a T_E の微調整による積分速度ベースラインへの影響

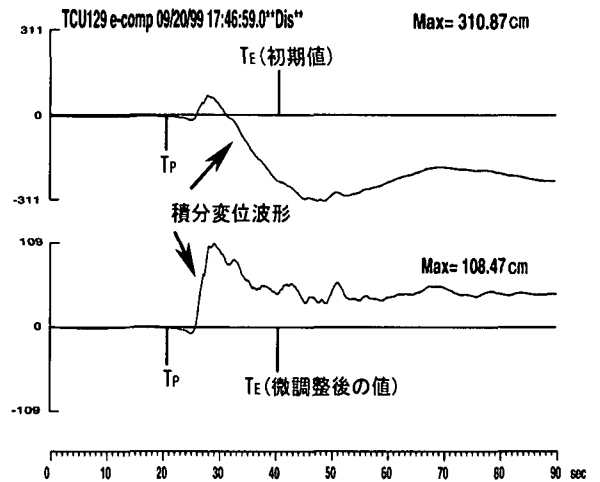


図-1b T_E の微調整による積分変位への影響

して区間内における変位の総増加量)もゼロになるはずである。すると、第1区間と第3区間のベースラインを最小二乗法によって求め、第2区間のベースラインを T_p と T_E におけるベースラインの連続条件および区間内における加速度平均値をゼロにすることによって求める。

b) T_E の微調整方法

上の項に述べた積分方法によって、ベースラインの修正が行われると、 T_E における速度値はゼロにならなければいけない。すると、もし T_E の初期値における速度値は速度波形の平均値から大きく離れると、第2区間のベースラインが大変歪んで求められる。ここで、 T_E の周辺において、ベースラインの修正された速度波形と、速度平均値曲線（2次放物線と仮定する）とを交差している時間点を修正の T_E 値として、式(3)の条件を満足するまで、繰り返し T_E を微調整する。

$$|T_{E_{i+1}} - T_{E_i}| \leq dt \quad (3)$$

ここに、 i は繰り返しの回数で、 dt は波形記録の時間サンプリングである。一例として図-1aと図-1bに示すように、 T_E の微調整は第2区間における積分速度波形のベースラインを大きく左右していることによって、積分変位波形にも大きな影響が及ぼされる。

3. 積分結果およびGPS観測結果との比較

(1) 計算に使われるデータ

計算に用いたデータは1999年9月21日に台湾中部におけるマグニチュード M_w 7.6の地震により取れた加速度記録である。この地震の地表断層線周辺約20キロの範囲における50個の観測点で取れた加速度記録を選んだ。またGPSデータは台湾内政部中央地質調査所の921台湾大地震地質調査報告書(1999)³⁾により公表された地震後車龍埔断層区域における地表変

位置の測量結果を用いた。

(2) 積分結果

地表変位の大きい観測点に対して、図-2と図-3に示すように、ベースラインの修正と積分変位波形は相対的に安定的になっている。一方、地表変位の小さい観測点において、積分変位波形は発散しやすく、ベースラインの修正によって大きく左右される。この場合に T_E の微調整はさらに重要になり、積分変位結果の安定性に直接的に繋いでいる。

(3) GPS観測結果との比較

今度の地震断層の長さは80キロに及ぶ。地表地震断層の走行はほぼ南北で、東側が西側に対して2~6メートルほど隆起した。台湾内政部中央地質調査所の921台湾大地震地質調査報告書³⁾によると、車籠埔断層の周辺約20キロの範囲に26個のGPS観測点において地震の直後に観測データが得られた。特に地震断層の北端部に近いところに、8.5メートルの最大水平地表変位が観測された。また、地表地震断層の沿線に近い東側に3メートル以上の隆起が多数観測された。

ここで、地震記録の終了時点における積分変位の値を永久変位として、GPS観測結果と比べた。図-4

には水平変位成分、図-5には鉛直変位成分の比較結果である。強震観測点とGPS観測点とは重なっていないが、全体の変位分布によって、両者はかなり調和していることがわかった。

4. まとめ

本研究では、積分変位を求めるために、Iwan等の方法を改良して、加速度記録に対するベースラインの修正方法を提案した。この方法で1999年台湾地震の加速度記録を用いて、永久変位を求めた。その結果、GPSの観測結果とよく調和することによって、本提案方法の有効性は検証された。

参考文献

- 1) Iwan, W.D. and Chen, X.: A New Procedure for the Processing of strong-Motion, *10ECEE Proc.*, pp. 213-222, 1994.
- 2) Chen, X.: Near-Field Ground Motion from the Landers Earthquake, EERL Report, No. 95-02, 1995.
- 3) 台湾中央地質調査所：921台湾大地震地質調査報告書, 1999.

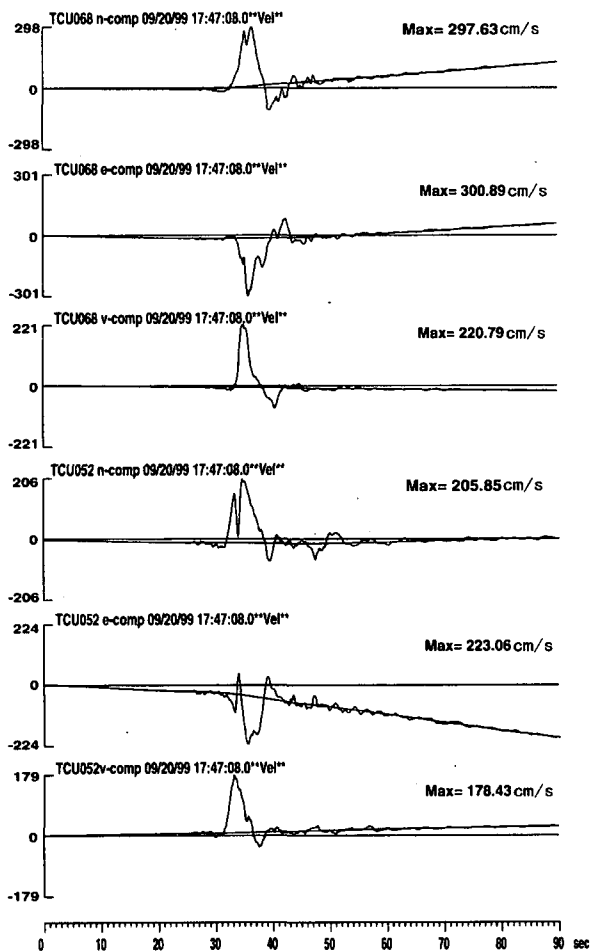


図-2 速度波形から見たベースラインの修正

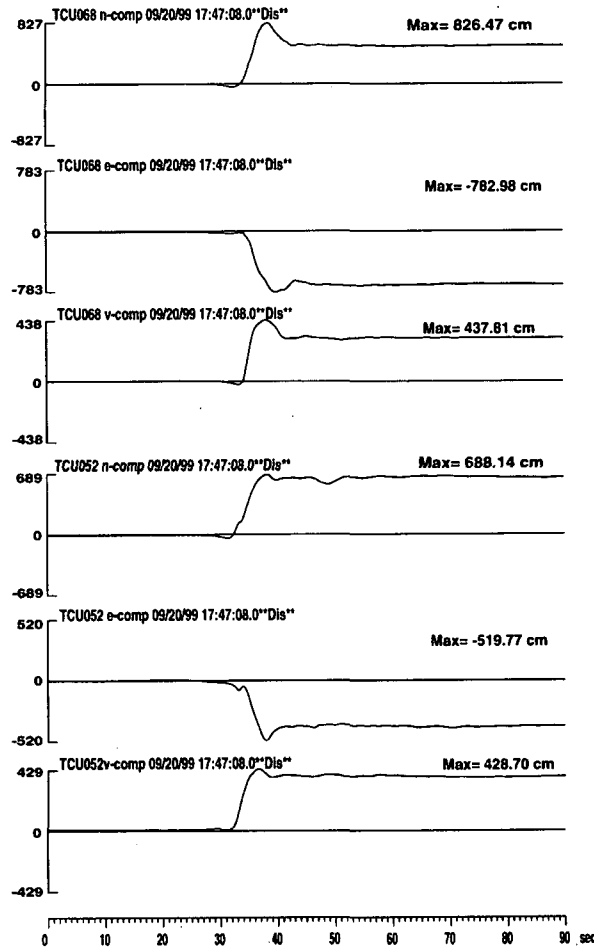


図-3 ベースライン修正された積分変位波形

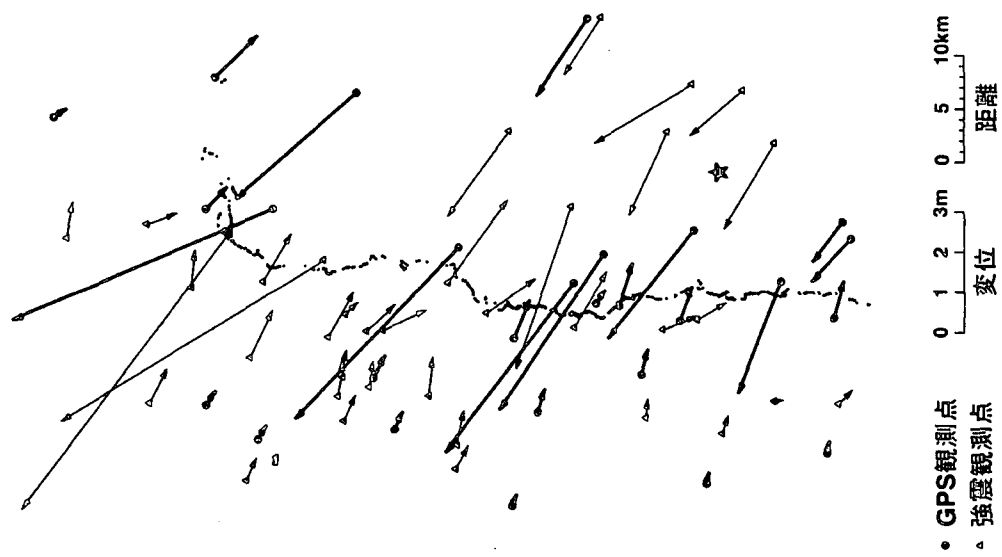


図-4 積分による永久変位とGPS観測結果との比較(水平成分)

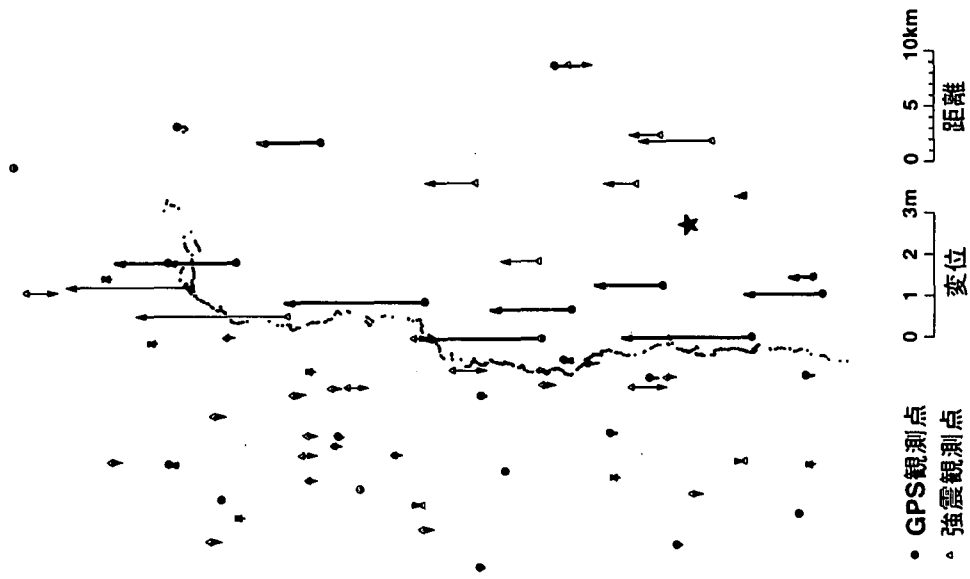


図-5 積分による永久変位とGPS観測結果との比較(鉛直成分)