

加速度から変位を求める積分手法と実地震記録への適用

太田良巳*1・アイダン・オメル*2

An integration technique for ground displacement from acceleration records and its application to actual earthquake records

Yoshimi OHTA and Ömer AYDAN

Abstract

There are various procedures for evaluating ground velocity and ground displacement from acceleration records. Although the derivation of velocity and acceleration from displacement records do not present any problem, the integration of acceleration records to obtain velocity and displacement responses may yield responses different from the actual ones. Some base-line procedures are used to handle these problems with the concept that the ground would return to its original position after ground shaking stops. Depending upon the intensity of shaking or crustal deformations, ground may move permanently, which may invalidate the basic assumption of base-line procedures. It is well known that every accelerometer is triggered when a threshold value of acceleration or velocity is exceeded. Furthermore, the accelerometers may induce motions different that from the actual ground motions due to their inherent physical features. Therefore, the Erratic Pattern Screening (EPS) method proposed by the authors is slightly modified to obtain the permanent ground displacement with the consideration of features associated with strong motion recording. This method is applied to results of laboratory faulting and shaking table tests, in which shaking was recorded using both accelerometers and laser displacement transducers. Furthermore, the method was applied to strong motion records of several large earthquakes with measurements of ground movements by GPS. The comparison of computed responses with actual recordings were almost the same, implying that the proposed method can be used to obtain actual recoverable as well as permanent ground motions from acceleration recordings.

1. はじめに

1999年台湾・集集地震、トルコ・コジャエリ地震では断層運動に伴う大きな断層変位が地表に見られた。また、これらの地域では多くの加速度計が設置されており、多くの地震加速度記録が計測された。日本においても1995年兵庫県南部地震以降、地震加速度の観測網の整備が進んできている。このような背景から加速度応答から地盤の永久変位を求める研究は注目されている。

定義にしたがって変位記録を2階微分すると加速度が求められる。逆に加速度記録を2階積分すると変位が求められることが理論的に保証されている。高周波数を含まない変位記録の場合、変位応答を2階微分し、加速度応答を求

めることは非常に容易である。加速度応答から積分法を用いて変位応答を導くには、ベースラインの修正が必要である。ベースラインの修正を行わずに積分を行うと、加速度応答から得られる変位応答は応答が発散し、実際とは異なる応答が見られる。これは電子記録に存在するバックグラウンドノイズなどによって影響を受ける積分定数とその原因だと考えられる。そこで、筆者らは加速度応答の全体からある一定の値の範囲をカットし積分を行う手法を提案した。(アイダン・大田, 2006; 太田, 2006) しかしながら、この手法では、計測器によるノイズや長周期のノイズだけでなく、地震応答に含まれる地震動の長周期成分や地盤の永久変位応答に対しても修正がされてしまう。大きな地表断層を伴う地震における加速度応答を積分し地盤の永久変位を求める場合には、計測ノイズや長周期のノイズを除

2007年9月21日受理

*1 日本物理探査株式会社 技術本部 環境防災部 (Nippon Geophysical Prospecting Company)

*2 東海大学海洋学部 海洋建設工学科教授 (Tokai University, Dept. of Marine Civil Engineering)

去し、地震動の特徴および最大変位を保つことが大変重要である。本研究では、加速度応答全体から一定の範囲の値をカットするのではなく、加速度応答の特徴を考慮して部分的にノイズのカットを行う手法を提案する。この手法を室内で行ったいくつかの振動実験と1999年トルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震と2003年十勝沖地震への適用を行った。本研究で提案する手法を用いて地震加速度から積分によって地盤の永久変位を求め、GPS 観測結果と比較し、筆者らが提案する手法の有効性を検証した。

2. 積分方法

定義に従って加速度 $a(t)$ を2階積分すると式(1)が成立する。

$$\begin{aligned} v(t) &= \int a(t) dt + C_1 \\ u(t) &= \int v(t) dt + C_1 t + C_2 \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ここで、 $v(t)$ 、 $u(t)$ 、 C はそれぞれ速度・変位・積分定数を示す。

計算の方法は、加速度時歴 $a(t)$ が、一定時間間隔ごとの離散値によって与えられるとし、まず時刻 n および $n+1$ における加速度 a_n 、 a_{n+1} の間を、線形に変化すると仮定する。時刻 $n+1$ における速度・変位は加速度 a_n を用いて式(2)で表される。

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= v_n + \frac{1}{2} (a_n + a_{n+1}) \Delta t \\ u_{n+1} &= u_n + v_n \Delta t + \frac{1}{3} \left(a_n + \frac{1}{2} a_{n+1} \right) \Delta t^2 \end{aligned} \quad \dots (2)$$

式(2)は $t=0$ のとき、式(3)で与えられる。

$$\begin{aligned} v_{t=0} &= a_{t=0} \Delta t \\ u_{t=0} &= \frac{1}{2} a_{t=0} \Delta t^2 = 0 \end{aligned} \quad \dots (3)$$

積分定数に伴う傾きを修正するために基線の補正 (*baseline correction*) を行う。加速度を数値積分して求まる速度を v' とする。積分定数によって右肩上がりの反応になることより次式について考慮する必要がある。

$$V_{BL} = D_1 + D_2 t \quad \dots (4)$$

誤差関数を以下の式で表し、

$$E = \left(\int A(t) dt - \int (D_1 + D_2 t) dt \right)^2 \quad \dots (5)$$

式(5)に最小二乗法を適用し、定数 C_1 および C_2 は以下のように得られる。

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{1}{\Delta} \left[\left(\int t^2 dt \right) \left(\int a(t) dt \right) - \left(\int t dt \right) \left(\int a(t) t dt \right) \right] \\ D_2 &= \frac{1}{\Delta} \left[- \left(\int t dt \right) \left(\int a(t) dt \right) + \left(\int dt \right) \left(\int a(t) t dt \right) \right] \\ \Delta &= \left(\int t^2 dt \right) \left(\int dt \right) - \left(\int t dt \right)^2 \end{aligned} \quad \dots (6)$$

式(4)および式(6)を考慮して速度の関数を以下の式で得ることができる。

$$v(t) = v' - D_1 - D_2 t \quad \dots (7)$$

提案する手法では加速度記録の時間区間を3つに分け、それぞれの区間で積分を行う手法を採用した。Fig. 1に加速度波形の特徴を考慮した加速度記録の区間分けを示す。①区間は計測開始から振動が開始されるまでの区間である。②区間は振動区間、③は振動停止から計測停止までとなっている。

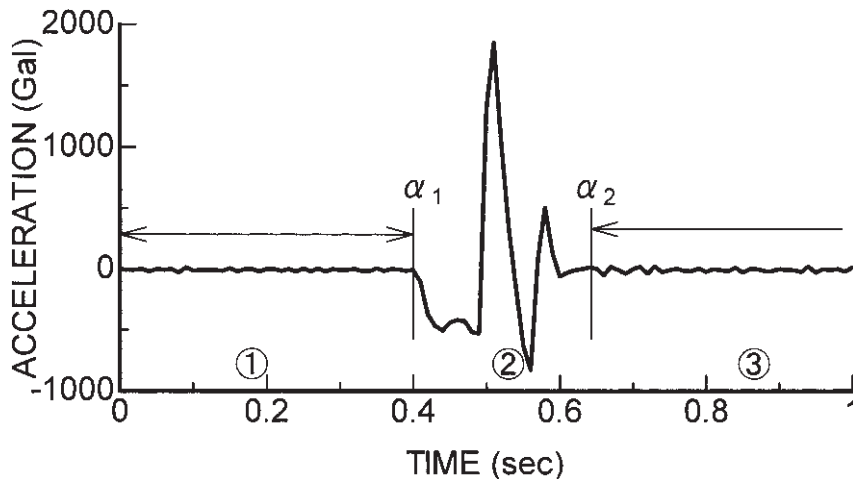


Fig. 1 Division of the acceleration records into sections

真の振動は②区間だけであるため、①区間と③区間の振動は主に計測器の特性やバックグラウンドノイズによるものであると考えられる。また、各強震計は計測を開始する過程においてあるトリガーレベル (trigger level) が設けられているため、振動記録に最初から有限な値が存在し、それは数値積分より得られる結果に大きな影響をもたらす。提案する手法では、①・③区間においてノイズを補正してから EPS (Erratic Pattern Screening) 法 (アイダン, 太田 (2006); 太田 (2005); 太田, アイダン (2004)) を適用し積分を行い、②区間には直接積分を行う手法を適用するが、計算開始前、①・③区間において次式を用いて下記の値を求め、加速度記録全体にその補正を行うこととする。

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N a_i \quad \dots (8)$$

Fig. 2 に加速度記録の拡大図を示す。加速度記録にほぼ一定範囲のノイズが見られる。Fig. 2 に見られるノイズは主に計測機械とバックグラウンドによるものであると考えられる。①・③区間のノイズはほぼ一定の振幅を示している。そこで、式(8)で①・③区間の平均加速度を求め、その後ある一定の値を①・③区間の積分計算から省きながら積分を行う。つまり、①・③区間においては加速度波形の補正を行い従来の EPS 法を適用し、②区間においては、一般的な積分を適用し補正は何も行わない計算を行う。ここで積分の方法として線形加速度法を用いる。

この様なノイズは実際の地震において記録された加速度記録でも見られる。また使用されている計測器の観測精度によっては高レベルのノイズも見られる。

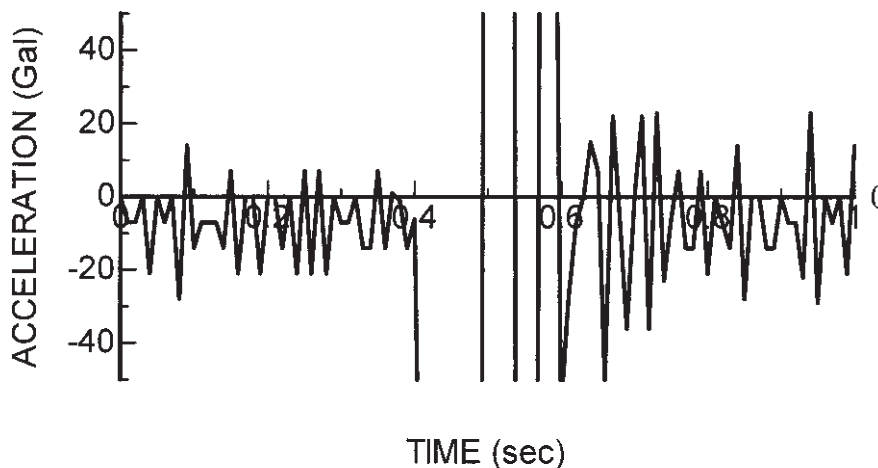


Fig. 2 The expanded view of the acceleration record

3. 室内実験への適用

3.1 室内断層実験への適用

次に筆者らが行った、室内断層実験 (アイダン, 太田 (2006); 太田 (2005); 太田, アイダン (2004)) で得られた加速度記録への適用を行った。Fig. 3 に実験装置の模式図を示す。断層運動を重力場における上部堆積地盤の自由落下により模擬し、堆積地盤内の断層亀裂伝達・変形のほか、地震断層の上盤と下盤の地震時の地震動について検討した。本実験機は重力場のもとで断層運動に伴い発生する加速度応答や堆積地盤の変形を測定・観測することを目的としている。観測面の寸法は、長さ 780mm・高さ 300mm・奥行き 250mm である。観測面は透明なアクリル板になっており、その他の部分は鉄製になっている。観測面の底盤は左右 2 つのブロックよりなっている。片方の底面は固定されており、もう一方の底面は一定の角度で落下し、断層運動を模擬する。断層の相対変位量を最大で 200mm まで調整することが可能である。Fig. 3 において Acc 1 が設置されている底面が固定された面であり断層に対して下盤、Acc 3 が設置されている底面が運動する底面であり上盤とする。計測項目は加速度計を上盤および下盤、断層直上に設置した。また、レーザー変位計を用いて上盤と断層直上における地表面の永久変位の計測を行った。レーザー変位計のターゲットは加速度計の表面としている。

Fig. 4 に Fig. 3 で紹介した断層実験より得られた加速度記録および変位応答を示す。Fig. 4 に示した実験結果は Fig. 3 に示した実験装置模式図における ACC 3 における加速度応答および変位応答である。

Fig. 5 に計測された加速度応答と変位応答を数値微分して求めた加速度応答を示す。数値微分的手法としては中心差分法を用いた。Fig. 5 における 2 つのグラフを比較すると応答は非常に類似している。このことより変位記録を 2

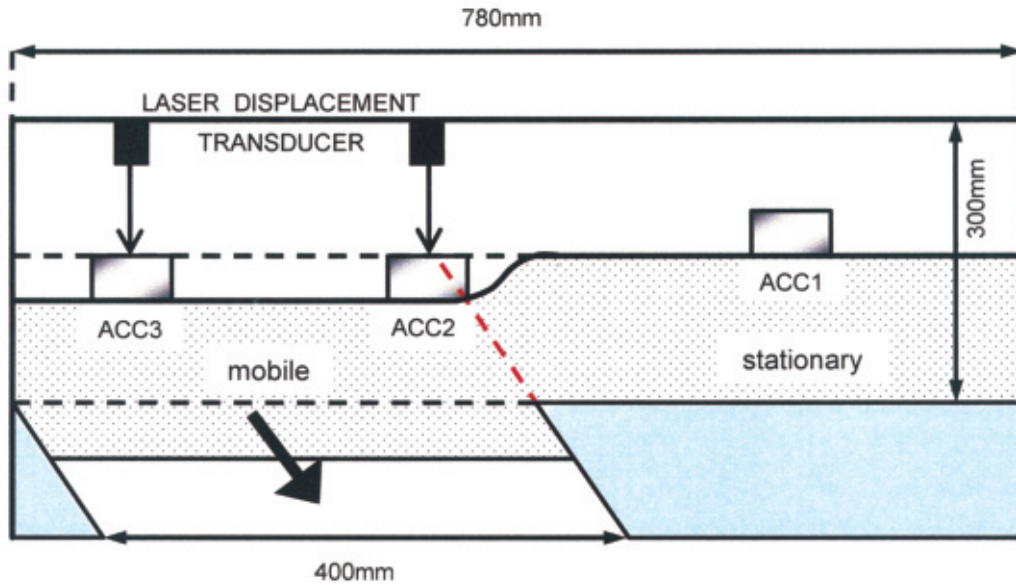


Fig. 3 A schematic view of the faulting experimental device

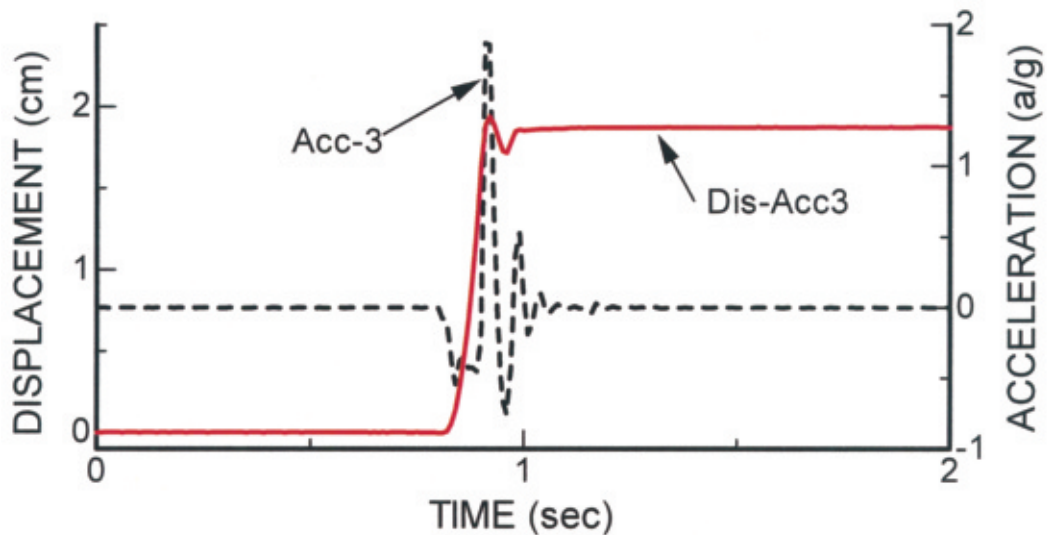


Fig. 4 The relation between acceleration and displacement responses (Faulting displacement=100mm, Layer thickness=20mm)

階数値微分し加速度応答を求めることは非常に容易であることが確認できた。

同様に、Fig. 6 に実測された変位応答と加速度応答を2階数値積分して求められた変位応答を示す。Fig. 6 に示す計算値の変位応答は基線の補正を行っていない計算結果で、積分手法は線形加速度法を用いた。レーザー変位計によって計測された変位応答は計測開始から約5秒までは応答を示さず、瞬時にして地表面が約2cm変位した様子が見て取れる。今回の実験はFig. 4 から見て取れるように非常に瞬間的な運動である。しかしながら、数値積分によって求められた変位応答は、計測開始とともに右肩上がりの応答を示している。変位が発生する時間は計測された変

位応答と同じであるが、断層運動が停止した後も右肩上がりの応答を示している。Fig. 5 に示した加速度応答と比較しても加速度応答が減衰しているのに対して変位の応答が継続している。このような応答を示す要因としてはバックグラウンドノイズに影響を受ける積分定数がある原因だと考えられる。

Fig. 2 に示したように加速度応答には計測機械の特性やバックグラウンドにともなうノイズが存在している。これらを含めて計算を行うとFig. 6 のような計算結果が得られてしまう。そこで、実測された変位応答と前節で紹介した基線の補正法を用いた結果の比較をFig. 7 に示す。EPS法を用いた計算結果ではFig. 6 に見られるような右

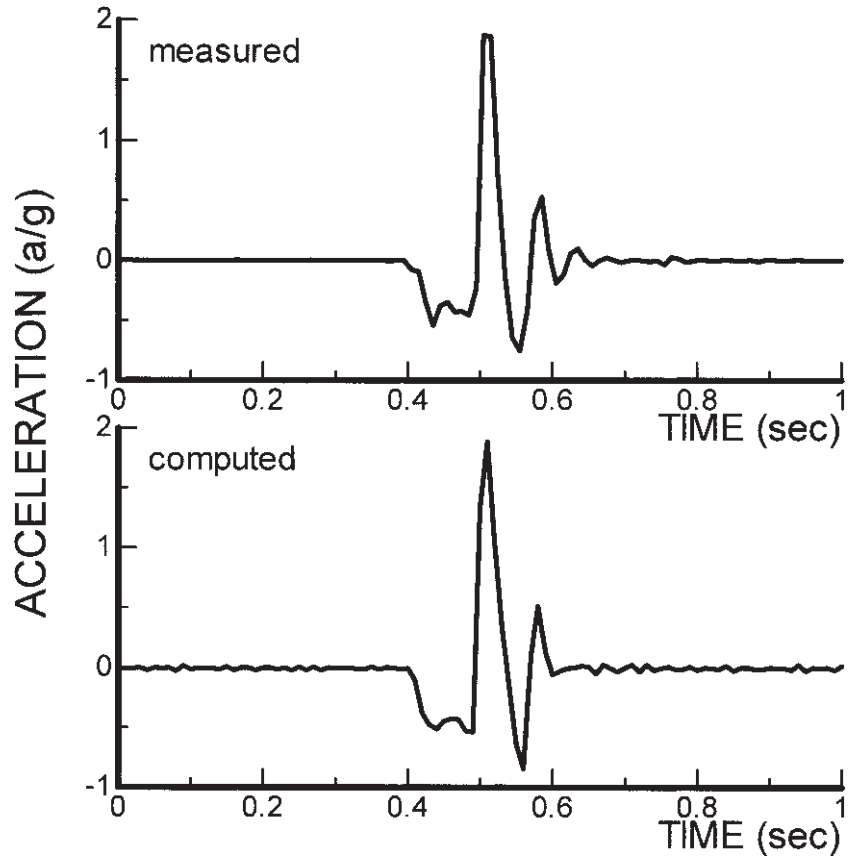


Fig. 5 Comparison of measured acceleration response with computed response

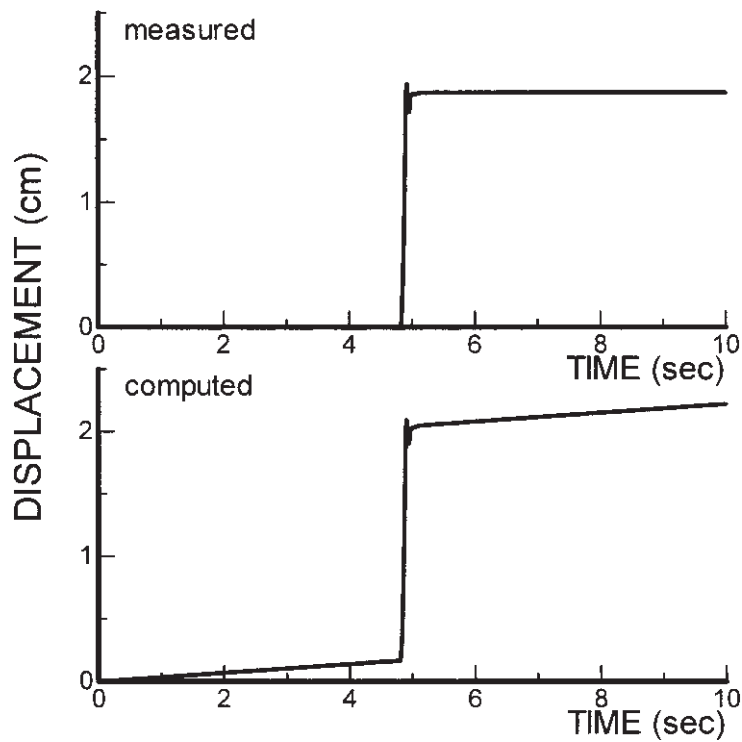


Fig. 6 Comparison of measured displacement response with computed response

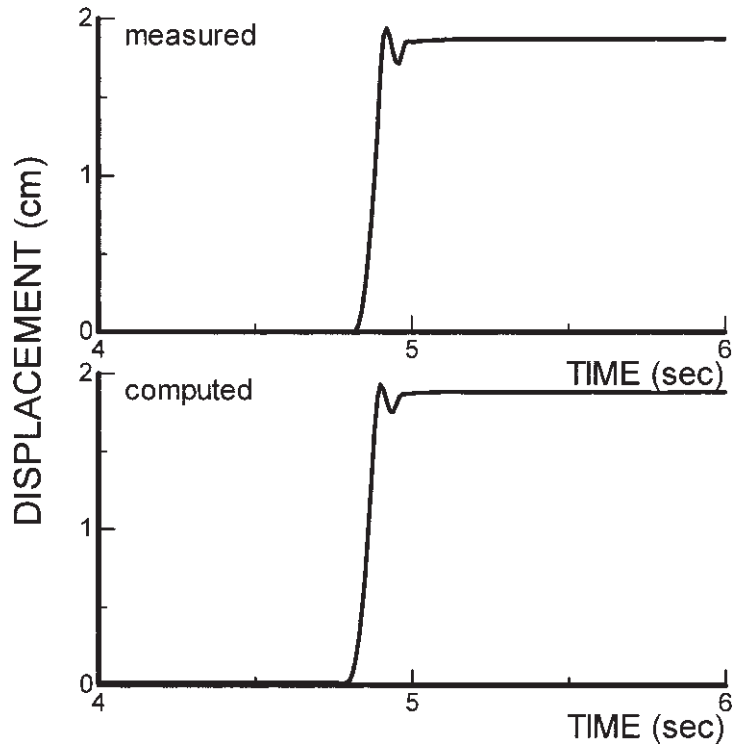


Fig. 7 Comparison of measured displacement response with computed response by EPS method

肩上がりの応答は見られない。また、計測された変位応答と比較しても最大変位量、残留変位量ともに同じである。この結果より、本研究で紹介した新しい基線の補正の手法は非常に有効である事が確認できた。

3.2 振動実験への適用

次に、振動台を用いた実験を行い、得られた加速度応答にEPS法を適用する。Fig. 8に振動実験の模式図を示す。振動台に加速度計を設置し、加速度応答を計測する。また、レーザー変位計を用いて振動台の変位を測定する。

Fig. 9に計測された変位応答と補正をせずに加速度記録から求めた変位応答を示す。補正を行わずに積分を行うとFig. 6と同じように応答が収束しない変位応答が得られた。Fig. 10にEPS法を用いた積分結果を示す。EPS法

を用いた計算結果ではFig. 9の問題点は解決され、残留変位もレーザー変位計によって計測された変位量に非常に近い値となっている。しかしながら、Fig. 10の計算結果では変位応答の計測結果に比べて若干シフトしたような応答が見受けられている。このことは記録データに存在するノイズによるものと考えられる。この結果より、本論文で提案した手法は、室内断層実験の様な非常に短い加速度記録だけでなく、振動実験のような長い加速度記録においても適用できる事が示せた。

4. 実地震への適用

前章までに紹介してきた積分法を実際の地震加速度記録に適用する。用いる地震加速度記録は1999年トルコ・コジ

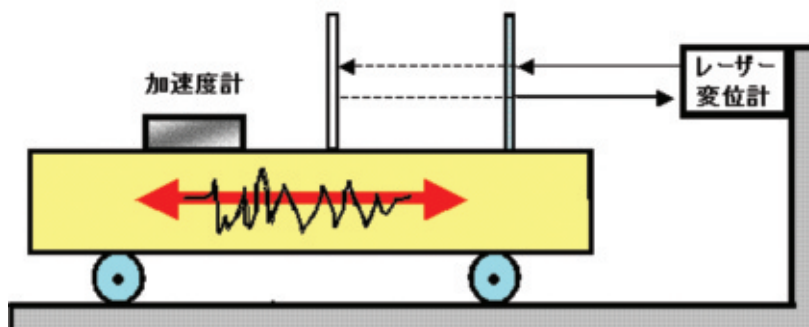


Fig. 8 A schematic view of shaking table experiment

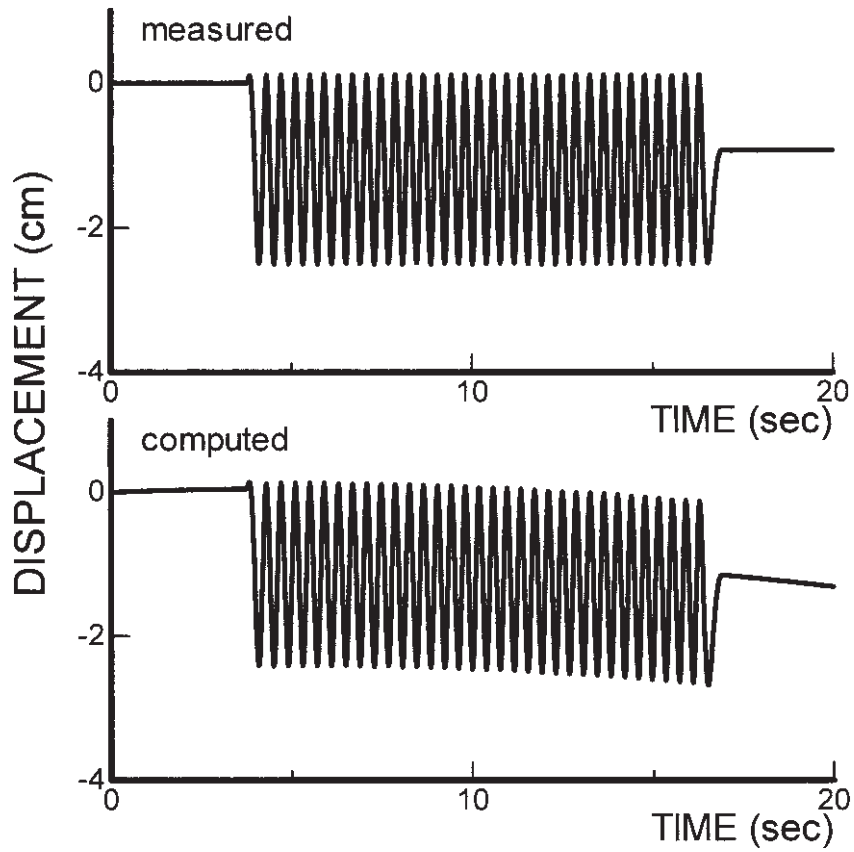


Fig. 9 Comparison of measured displacement response with computed response

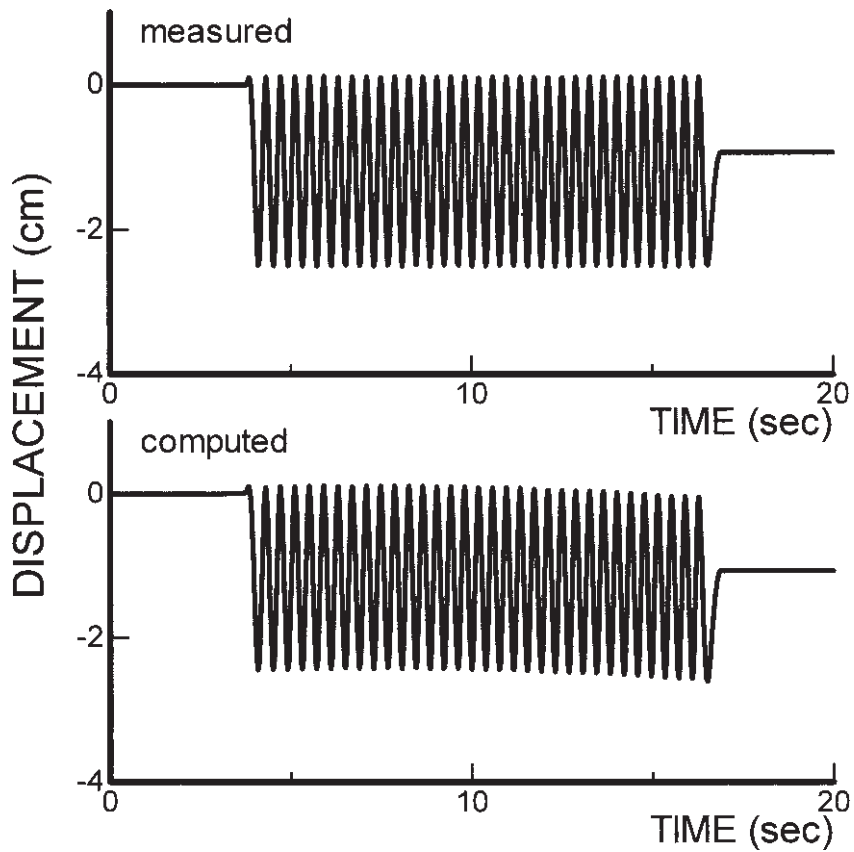


Fig. 10 Comparison of measured displacement response with computed response by EPS method

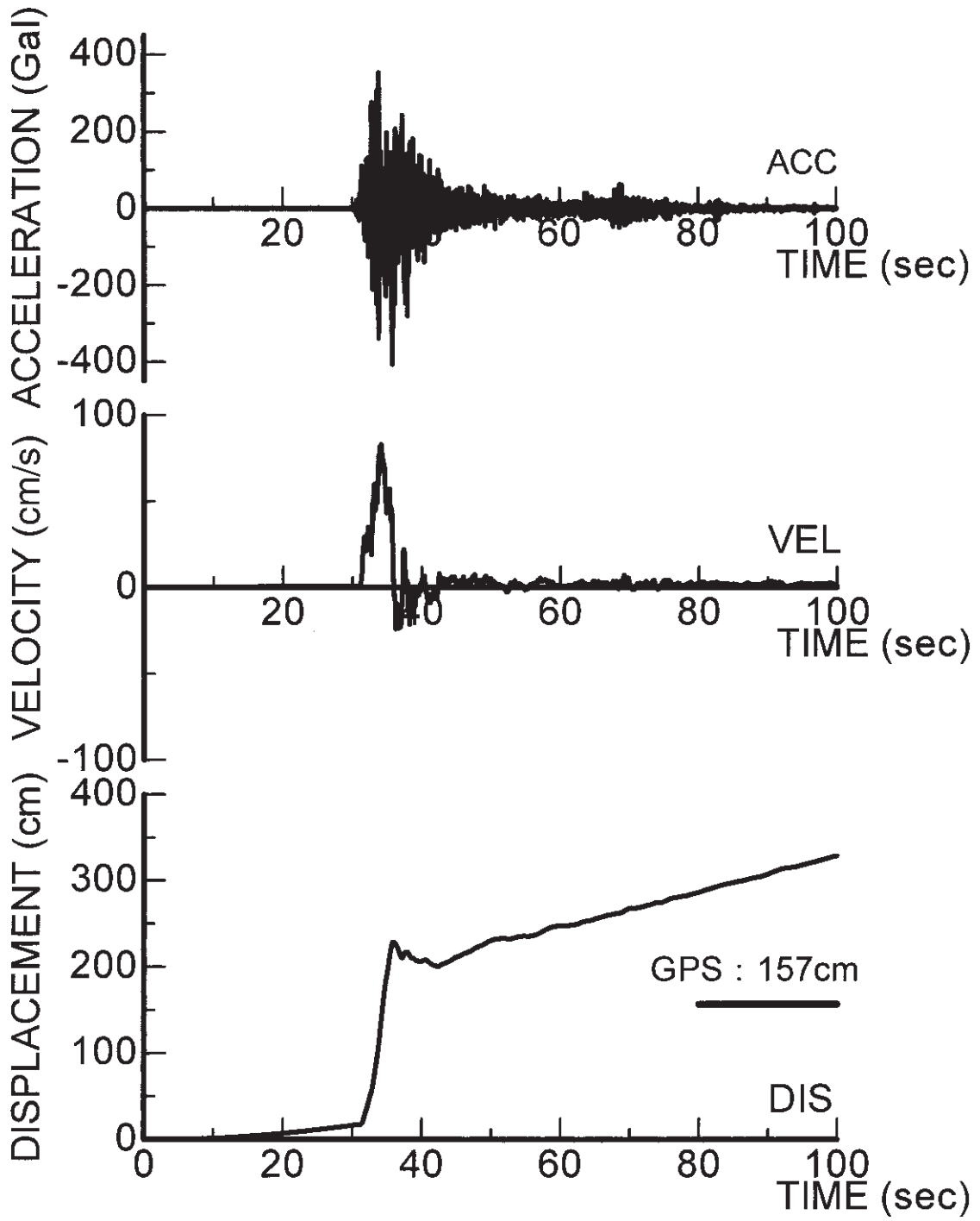


Fig. 11 The displacement response of the EW direction in Sakarya (No Base line correction)

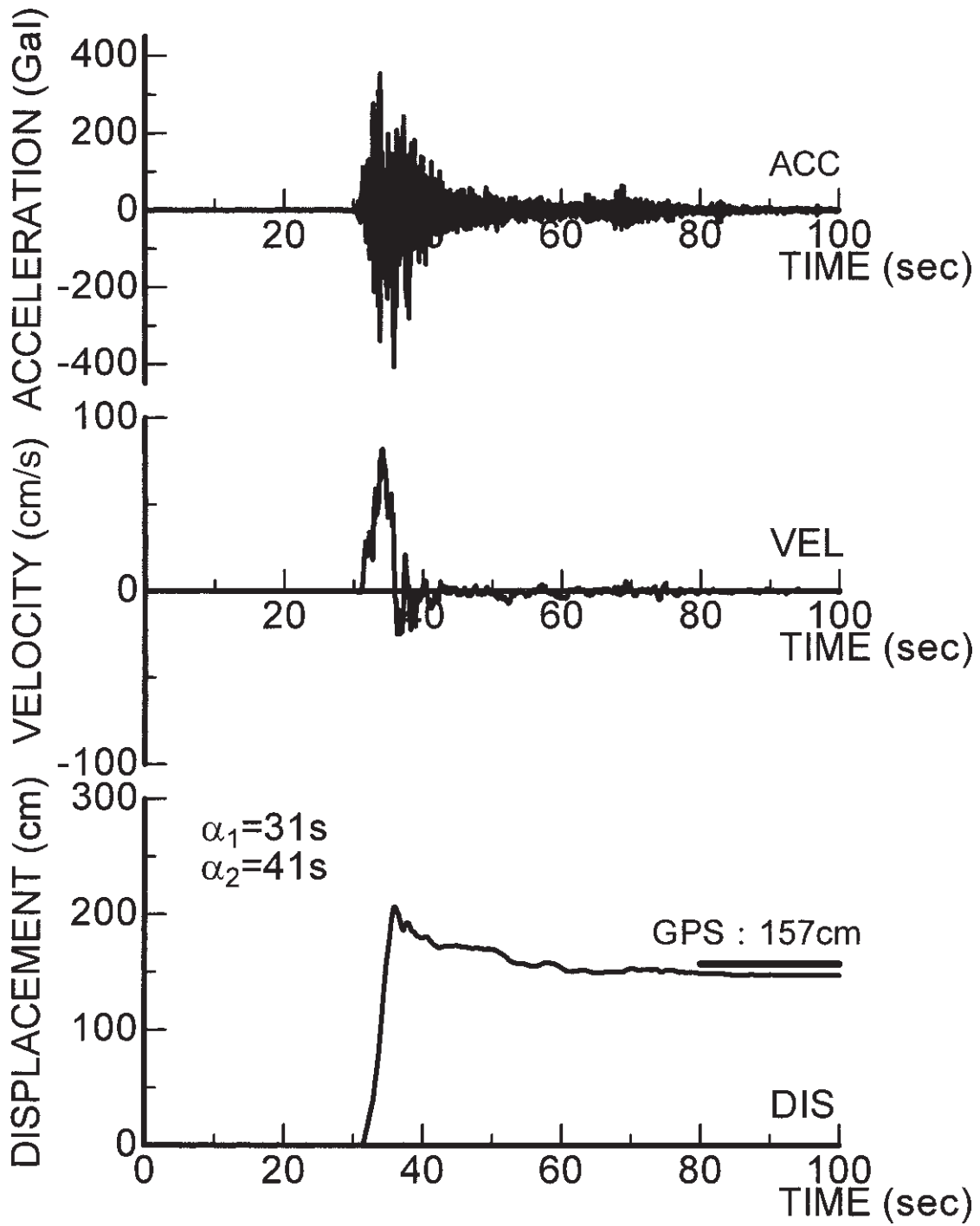


Fig. 12 The displacement response of the EW direction in Sakarya (EPS method)

ャエリ地震 (M=7.4) (DAD-ERD, 1999) における観測点 Sakarya の EW 方向の地震加速度記録を用いる。コジヤエリ地震では地表面に非常に大きな永久変位が見られた。断層は右横ずれを示し、最大 4.9m の横ずれ変位が確認された。Sakarya における EW 方向における最大加速度は約 350gal である。Fig. 11 に Sakarya における EW 方向の加速度記録を数値積分した結果を示す。Fig. 11 で見られるように変位応答は一定の値に収束せず、右肩上がりの応答を示している。そこで、EPS 法を用いた数値積分結果を Fig. 12 に示す。EPS 法を用いた計算結果では、

ある一定の値で永久変位が安定している。実地震においては Fig. 1 に示した α_1 , α_2 の決定が困難になる。 α_1 は加速度計のトリガーレベルおよび P 波の到達時刻より決定する。実地震の場合、 α_2 の決定は大変困難であるが、現在地震計の振動特性や地震断層の破壊パラメータ (例えば、地震の規模、地震断層の幾何学特性、ライズタイム、破壊伝達時間) などを考慮して決定している。Fig. 12 の図中に示した数値は測点 Sakarya の付近の GPS によって計測された永久変位の値を示している。Fig. 12 では EPS 法を用いて地震加速度記録より求めた永久変位と

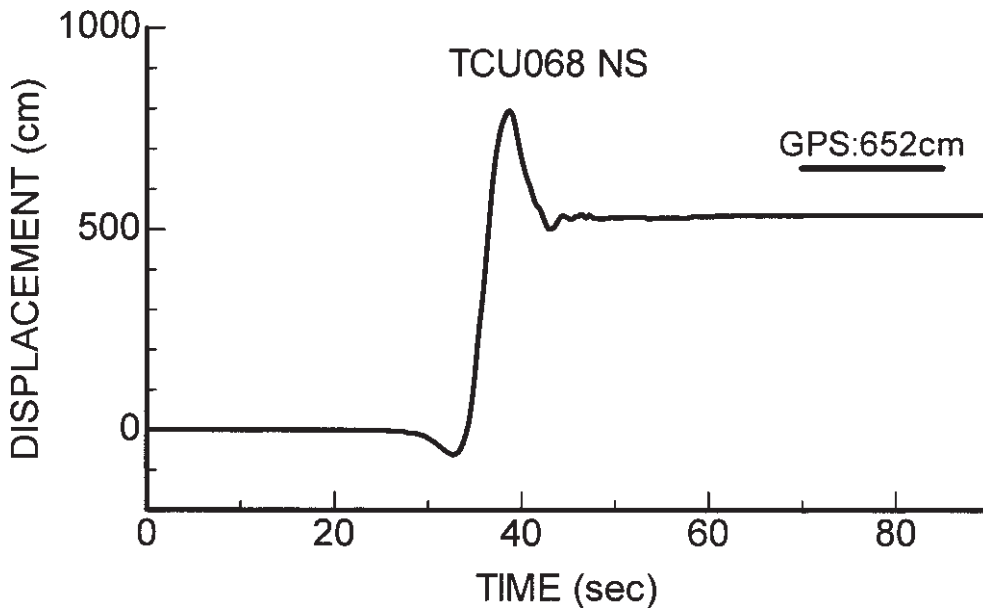


Fig. 13 The displacement response of the UD direction at TCU068 Station

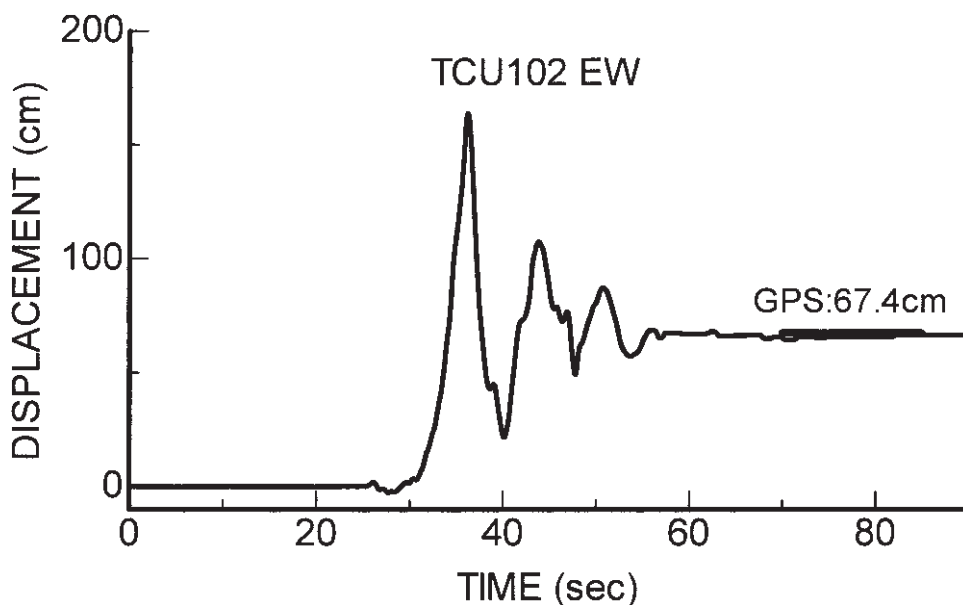


Fig. 14 The displacement response of the EW direction at TCU102 Station

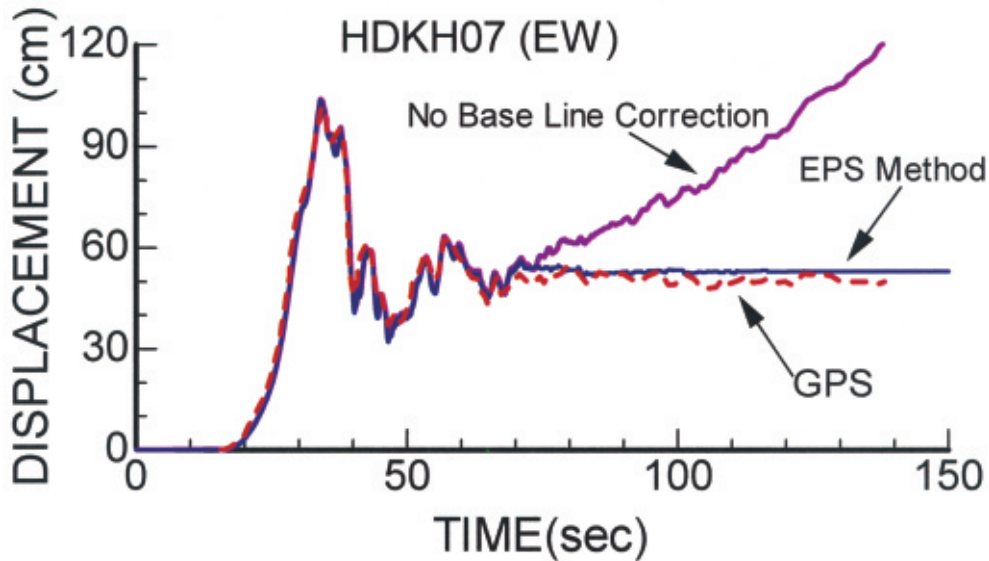


Fig. 15 Comparison of the measured displacement response with computed displacement responses

GPSにより観測された永久変位とを比較すると非常に近い値が得られている。この結果より本手法が実地震に対しても非常に有用であることが証明された。

また、1999年に発生した台湾・集集地震においても非常に大きな加速度および地表面に大きな永久変位が計測された。集集地震で得られた地震加速度（台湾中央気象局、1999）に適用した例を Fig. 13, Fig. 14 に示す。Fig. 13 に観測点 TCU068 における NS 方向の地震加速度記録への適用結果、Fig. 14 に観測点 TCU102 における EW 方向の地震加速度記録への適用結果を示す。

最後に、2003年に発生した十勝沖地震で計測された北海道・様似町における加速度応答に適用し、その結果を Fig. 15 に示す。この加速度応答は Kik-net（防災科学技術研究所、2003）による加速度記録を用いた。Fig. 15 に類似における加速度応答を補正なしで数値積分し求められた変位応答および EPS 法を適用し求めた変位応答と GPS で計測された変位応答（Miyazaki *et al.* 2004）との比較を示す。EPS 法を適用し求めた変位応答と GPS で計測された変位応答は非常に類似している。この結果より EPS 法を用いて求めた変位応答は残留変位だけでなく時間経過ごとの変位も求めることが確認できた。

5. 結 論

本論文では、加速度記録を積分して残留変位を求めるために、筆者らがこれまで提案してきた手法を改良して、ノイズを伴う加速度記録の修正法を提案した。この方法を室

内実験より得られた加速度応答へ適用した結果、この手法が非常に有効であることが確認できた。また、実地震より得られた地震加速度への適用も可能であることを確認することができた。

参考文献

- アイダン・オメル, 太田良巳 (2006): 地震断層近傍における地震動の特徴とその評価, 「近年の国内外で発生した大地震の記録と課題 (II)」シンポジウム, 東京, 土木学会, pp.114-120, ISBN 4-8106-0600-7
- 防災科学技術研究所 基盤強震観測網 (2003): <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- DAD-ERD (1999): Kocaeli earthquake strong motion records. <http://angora.deprem.gov.tr/kocaeli.htm>
- 太田良巳, アイダン・オメル 2004: 地震断層近傍における地震動および永久変形に関する実験的研究 「海-自然」東海大学紀要海洋学部2004第2巻第3号, 1-12
- 太田良巳: 地震断層の運動に伴う地震動および地表変形の特性に関する基礎的研究, 東海大学大学院海洋学研究科修士学位論文, 2006
- 台湾中央気象局 (1999): <http://www.cwb.gov.tw/>
- Miyazaki, S, K. M. Larson, K. Choi, K. Hikima, K. Koketsu, P. Bodin, J. Haase, G. Emore, and A. Yamagiwa (2004). Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data. *Geophysical Research Letters*, VOL. 31, L21603.

要 旨

加速度応答から変位応答を求める手法に関しては、古くから多くの研究がなされてきている。加速度記録に数値積分を適用すると、得られる変位応答は実際のものとは異なる傾向がある。そのため、既往の研究では振動後に変位が0に戻るとした方法など、基線の補正という手法がとられてきた。本研究では計測された加速度記録の特徴を考慮して、区分化して、加速度記録による変位への積分方法について新しい手法について提案する。本研究にて提案する手法を室内振動実験および模擬断層模型を用いた室内断層実験によって得られた加速度記録に適用した。また、実測した変位記録と比較および実地震で計測された加速度記録に適用することによって、本論文で紹介する手法の有効性が検証された。