

加速度記録から地盤の変位応答を求める手法について

太田 良巳1・アイダン オメル2

1正会員 日本物理探鑛株式会社 (〒143-0027 東京都大田区中馬込2-2-12)

E-mail:yota@n-buturi.co.jp

2正会員 東海大学 海洋学部海洋建設工学科 教授(〒424-8610静岡県静岡市清水区折戸3-20-1) E-mail:aydan@scc.u-tokai.ac.jp

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 録に数値積分を適応すると、得られる変位応答は実際のものと異なる傾向がある.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応し、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 応することによって、本論文で紹介する手法の有効性が検証された.

Key Words : acceleration, Base line correction, numerical integration method, permanent displacement

1. はじめに

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.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. しかしながら,加速度記録をそのまま2階積分して変位 を求める場合には,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変位のグラフが発散する応答を示 す.求められた変位の応答には残留変位が見られ,加速 度が減衰しているのに対して応答が継続されているよう な応答を示す.この様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その原因だ と考えられる.加速度応答を2階積分すると積分定数の 項は二次の関数としてあらわされるためであると考えら れる.

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.

従来,強震計が設置されている地盤は弾性挙動示すと 考え地震後に元の位置に戻るとして,積分法を用いて加 速度記録から変位を求める際には、ベースラインの修正 が適用されている.今までよく使われている手法では、 地震に伴う地盤の永久変位の成分まで補正される.そこ で筆者らは加速度記録の積分によって地盤の永久変位を 求める手法として EPS 法を提案した¹⁾. EPS 法では一定 範囲のノイズをカットして積分を行う手法をとったが、 この方法では最大加速度に対してノイズが大きい記録に は適応しかねない.そこで、本研究では EPS 法を改良 し、より正確な永久変位を得られる手法を提案し、筆者 らが行った室内実験より得られた加速度記録を用いて、 EPS 法による永久変位を求め、加速度記録と同じ場所で 測定した変位記録との比較により、提案する手法の有効 性を検討した.

また,1999年に発生したトルコ・コジャエリ地震で 計測された地震加速度に本手法を適応し,計算より得ら れた永久変位と観測点近くの GPS で計測された地盤の 永久変位とを比較し,さらなる本手法の有効性の検討を 行った. 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. 図-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.



図-1 加速度波形の区間分け

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によるノイ ズ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 法を適応し積分を行い、②区間には直 接積分を行う手法を適応するが、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.

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^{N} a_i \tag{1}$$

図-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.図-2に見られるノイズは 主に計測機械とバックグラ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(1)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法を適応し,②区間におい ては,一般的な積分を適応し補正は何も行わない計算を 行う.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.



図-2 加速度記録の拡大図

3. 室内実験への適応

3.1 室内断層実験概要

次に筆者らが行った,室内断層実験¹²で得られた加 速度記録への適応を行った. 図-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。本実験装置は重力場のもとで断層運動中に発 生する加速度応答や堆積地盤の変形を観測するために製 作した。観測水槽の大きさは、長さ 780mm・高さ 300mm・ 奥行き 250mm である。観測水槽のみ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。水槽の 底盤は左右2つのブロックよりなっている。片方のブロ ックの下に底盤を支える棒があり、この棒はピンにより とめられている。このピンを引き抜くことにより一定の 角度で底盤が落下し、その運動を断層運動としている。 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.



図-4 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.数値微分の手法としては 中心差分法を用いた.図-4 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.



図-4 加速度応答における計測値と計算値の比較

3.3 数值積分

同様に、図-5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. 図-5 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. 今回の実験は図-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. 図-4 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. この様な応答を示す 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 分定数がその原因だと考えられる.

図-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図-5 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図-6に示す. EPS法を用いた計算結果では図-5に見られるような右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.



図-5 変位応答における計測値と計算値の比較



3.4 振動台実験

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法を適応する. 図-7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.



図-7 振動実験模式図

図-8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 と図-5と同じように応答が収束しない変位応答が得られ た.図-9にEPS法を用いた積分結果を示す.EPS法を用い 計算結果では図-8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.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応できる 事が示せた.







山り仏を川いた町奔厄のは

4. 実地震への適応

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応する.用いる地震加速度記録は 1999 年トル コ・コジャエリ地震(M=7.4)における観測点 sakarya の EW 方向の地震加速度記録 ³³を用いる.コジャエリ地震 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 方向の地震加速度記録を図-10 に示 す. Sakraya における EW 方向における最大加速度は約 350gal である.



図-10 SakaryaにおけるEW方向の加速度記録

図-11 に Sakrya 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.図-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図-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.また,図中に示した数値は観測点 sakrya 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.図-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 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.



図-11 SakrayaにおけるEW方向の永久変位(補正なし)



図-12 SakrayaにおけるEW方向の永久変位(補正あり)

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⁴に適応した例を図-13,図-14に示す.図-13に観測点TCU068におけるUD方向の地震加速度記録への適応結果,図-14に観測点TCU102におけるEW方向の地震加速度記録への適応結果を示す.



図-13 TCU068におけるUD方向の永久変位



図-14 TCU102におけるEW方向の永久変位

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応した結果、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応も可能であること 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 ける地震同の特徴とその評価.「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
- 2) 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
- 3) DAD-ERD 1999 : <u>http://angora.deprem.gov.tr/kocaeli.htm</u>
- 4) 台湾中央気象局 1999: http://.www.cwb.gov.tw/

(2007.06.29 受付)

A METHOD FOR EVALUATING PERMANENT GROUND DISPLACEMENT FROM ACCELERATION RECORDS

Y. Ohta¹ and Ö. Aydan²

¹Nippon Geophysical Prospecting Company, Tokyo ²Department of Marine Civil Engineering, Tokai University, Shizuoka

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 authors proposed a new method, called EPS method, 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. 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.