

地表断層による永久変位を考慮した震源近傍における強震動計算法
(その1: 平行成層地盤のグリーン関数を用いた定式化)

正会員 鈴木 宏伸*
同 久田 嘉章**

地表断層 永久変位 震源近傍
強震動計算法 平行成層地盤 グリーン関数

1. はじめに

近年、震源近傍における地震動特性として「大変位タイプの地震動(または「fling」)¹⁾が注目されている。これは1999年台湾集集地震やトルコ・コジャエリ地震の観測波形に見られたように大規模な地表断層の近傍で観測され、断層すべり運動に起因する大きな永久変位を伴う強震動である。1995年兵庫県南部地震の強震動特性として注目された「Forward directivity(前方指向性)効果」による「長周期パルス」が断層面の直交成分に卓越するのに対し、「fling効果」は断層すべり方向が卓越する特徴がある。また周期数秒以上の長周期地震動が卓越するため、「fling効果」は活断層近傍に建つ免震構造や超高層建築の耐震設計の入力地震動として考慮されるべき地震動である。

著者らは昨年、断層すべりによる永久変位を考慮した震源近傍における地震動計算法として、成層地盤のグリーン関数を用いた効率的な解析的手法を提案した(日本地震学会秋季大会、2001)。手法の妥当性は半無限成層地盤を対象に確認していたが、今回は新たに波数積分法に改良を加え、成層地盤においても効率的に計算が行える手法を開発した。そこで(その1)では本手法の定式を紹介し、(その2)では「fling効果」を中心とした様々な計算例を紹介する。

2. 断層すべりによる永久変位を考慮し、成層地盤のグリーン関数を用いた震源近傍における効率的な強震動計算法

a. 円形断層・軸対象モデルによる断層面積分法の説明

初めに図1に示すように簡単な震源モデルを用いて、断層すべりによる永久変位を考慮した震源近傍における強震動を計算する際の注意点を説明する。このモデルではすべり[D]が一様で、半径Rの円形断層を全無限弾性体中に置く。また観測点は断層中心の直上に距離Zの位置に置く。この時、円振動数ωにおける観測点におけるすべり方向の変位解は次式で与えられる。

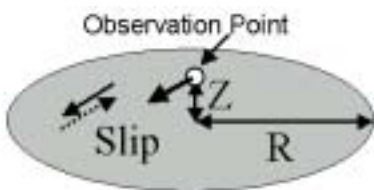


図1: 円形断層・軸対象モデルによる変位解

$$U(Z, \omega) = \frac{Z}{4} \int_0^R \frac{r}{\zeta^3} \left\{ 2D_1 + D_2 \left(\frac{r}{\zeta} \right)^2 \right\} dr \cdot [D] \quad \dots (1)$$

$$\text{ここで、 } \zeta = \sqrt{r^2 + Z^2}, \quad s = i\omega\zeta/V_S, \quad p = i\omega\zeta/V_P$$

$$D_1 = \zeta\chi - r^2\psi_{,\zeta}, \quad D_2 = 2(\zeta^2\chi_{,\zeta} - 2\zeta\chi)$$

$$\chi = \left\{ \frac{3}{s^2} - \frac{3}{s} + 1 \right\} \frac{e^s}{\zeta} - \left(\frac{p}{s} \right)^2 \left\{ \frac{3}{p^2} + \frac{3}{p} + 1 \right\} \frac{e^p}{\zeta}$$

$$\chi_{,\zeta} = \left\{ -\frac{9}{s^3} + \frac{9}{s^2} - \frac{4}{s} + 1 \right\} \frac{s}{\zeta^2} e^s - \left(\frac{p}{s} \right)^2 \left\{ -\frac{9}{p^3} + \frac{9}{p^2} - \frac{4}{p} + 1 \right\} \frac{p}{\zeta^2} e^p$$

$$\psi_{,\zeta} = \left\{ -\frac{3}{s^3} + \frac{3}{s^2} - \frac{2}{s} + 1 \right\} \frac{s}{\zeta^2} e^s - \left(\frac{p}{s} \right)^2 \left\{ -\frac{3}{p^3} + \frac{3}{p^2} + \frac{1}{p} \right\} \frac{p}{\zeta^2} e^p$$

(1)式の静的変位解(ω=0)は、次式で与えられる。

$$U(Z) = \frac{Z}{8(1-\nu)} \int_0^R \frac{r}{\zeta^3} \left\{ 2(1-2\nu) + 3 \left(\frac{r}{\zeta} \right)^2 \right\} dr \cdot [D] \quad \dots (2)$$

ここでνはポアソン比である。軸対称問題となるため、(1),(2)式の断層面積分は断層半径R方向の1次元積分となる。

断層面近傍の観測点にて断層すべりに起因する永久変位を含んだ強震動を計算する際、最も注意すべき点は正確な断層面積分の評価である。(1),(2)式の断層面積分の計算例として、

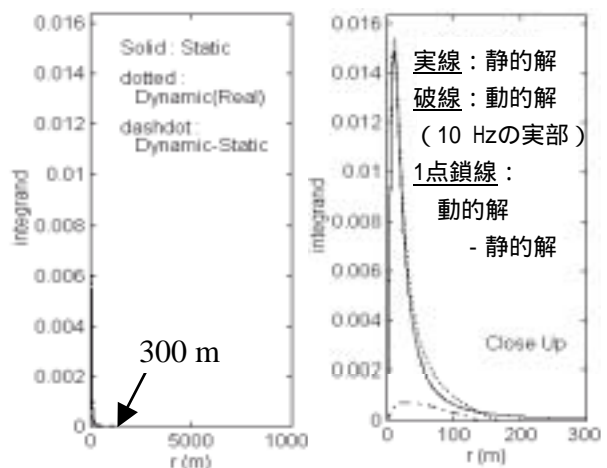


図2: R=10 kmとした(1),(2)式の被積分関数例 (Z=10 mで、左はr=0~10 km、右はr=0~30 m)

R=10 km, [D]=1 m, Vs=3 km/s, Vp=5 km/s, 及び Z=10 m として、10 Hz と 0 Hz における(1),(2)式の被積分関数を図2に示す。図の左側は r = 0 ~ 10 km までの被積分関数を示しているが、振幅が見えない。そこで r = 0 ~ 300 m までの狭い領域の被積分関数を図2の右側に示す。図より観測点近くの非常に狭い領域で振幅が急激に大きくなる特異性を示していることが分かる。従って観測点が断層面に極近い場合(図2では 10 m)観測点に近い断層面領域(図2では約 0 ~ 300 m 程度)では非常に密な積分点を配置しないと、正確な変位解が求まらないことに注意すべきである。また図2では、10 Hz の被積分関数(1式)を実線で、0 Hz の被積分関数(2式)を破線で描いているが、両者はほぼ等しく、動的解の断層面近傍における特異性は、静的解で近似できることが分かる。従って、動的解から静的解を引くと非常に滑らかな関数となり(図2の1点鎖線)、動的解における特異性が除去される。

b. 断層面近傍の観測点における断層面積分の効率的計算法

上の結果から、成層地盤における任意の断層モデルを対象として、断層面近傍の観測点における断層面積分法を効率的に行う計算法を提案する。食違い断層モデルによる変位解は次式で与えられる。

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} T_{ik}^D(X, Y; \omega) [D_i(X; \omega)] d\Sigma \quad \dots (3)$$

ここで \int_{Σ} は断層面積、 T_{ik}^D は成層地盤における動的グリーン関数の Traction 成分である。上に見たように(3)式では観測点 Y が断層面 X に近い場合、動的グリーン関数が急激に大きな振幅となる特異性を示す。このため Y 点に近い断層領域で高密度な積分点を分布させないと、(3)式の断層面積分は正しく評価されない。従って成層地盤のグリーン関数を用いると波数積分が必要なため多大な計算時間が必要になってしまう。

そこで本手法では(3)式に代わり、次式を用いる。

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} \{T_{ik}^D(X, Y; \omega) - T_{ik}^S(X, Y)\} [D_i(X; \omega)] d\Sigma + \int_{\Sigma} T_{ik}^S(X, Y) [D_i(X; \omega)] d\Sigma \quad \dots (4)$$

すなわち断層面積分を二つに分け、初めに動的グリーン関数から静的グリーン関数を引いて断層面積分を行い、次に静的グリーン関数の断層面積分を行い、両者を加え合わせる。この方法では、第1積分では観測点が断層面に近い場合に生じる被積分関数の特異性が除去されているため、積分点を一様に分布させる通常の断層面積分が行える(対象とする波長当たり 5 ~ 10 点程度)。一方、第2積分では被積分関数の特異性を厳密に評価するため、観測点に近い積分領域で高密度な積分点を分布させる必要があるが、グリーン関数は静的解であり、かつ全ての振動数で共通であるため、一度だけ積分を行えば良い。従って、(3)式よりも遥かに効率的な計算が可能となる。

c. その他、効率的に計算を行うための各種手法

(4)式の計算を効率的に行うための各種手法を列記する。

まず断層面近傍で傾斜関数状になる変位解を厳密に計算す

るため、(4)式は変位解でなく、速度解として計算する。これは $\omega = 0$ で傾斜関数の振幅が無限大になるためである。得られた速度解を時刻歴上で積分を行えば、傾斜関数状の変位解を得ることができる。

次に、(4)式の第1積分におけるグリーン関数を評価する際、動的解から静的解を引く操作を波数領域で行う。すなわち、

$$T_{ik}^D(X, Y; \omega) - T_{ik}^S(X, Y) = \int_0^{\infty} \{T_{ik}^D(X, Y; \omega) - T_{ik}^S(X, Y)\} dk \quad \dots (5)$$

を用いる。本研究では地表断層を主な対象としているため震源が地表近くのグリーン関数を大量に計算する必要があるが、震源深さと観測点深さが近い場合、グリーン関数の波数積分の収束が遅くなるという問題が生じる。一方、動的解の被積分関数は、波数が増加すると静的解に収束する。従って(5)式を用いれば、震源深さと観測点深さが近い場合でも波数積分の収束性が保証され、効率的な計算が行える。

最後に、(4)式の第2積分における静的グリーン関数では、震源深さと観測点深さが近い場合、その波数積分の収束は非常に遅くなるが、積分路変換法を用いることで効率的な波数積分が行える。すなわち図3に示すように実軸上の波数 k を、任意の点 B から Cauchy の定理により複素平面上に拡張する。その際、被積分関数のベッセル関数を第1種と第2種のハンケル関数に分解し、第1種ハンケル関数項は第1象限で(図の B-C-E)、第2種ハンケル関数項は第4象限で(図の B-D-E)それぞれ積分を行う。Hankel 関数は虚数軸上では指数関数となり急激に減衰するため、それぞれ BC 路及び BD 路上の点である C' および D' 点までの短い積分区間で被積分関数が収束し、効率的に積分が行える。

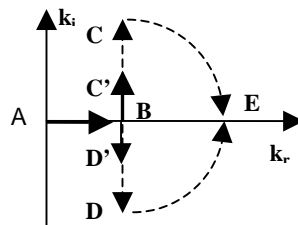


図3：積分路変換法による静的グリーン関数の波数積分

3. おわりに

(その1)では成層地盤を対象とし、断層すべりによる永久変位を考慮し震源近傍における地震動を効率的に計算する解析手法を紹介した。(その2)では各種計算例を紹介する。なお、本プログラムは研究目的でソースコードを公開している。著者のホームページを参照されたい (<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/>)

参考文献

1) 久田嘉章, 震源近傍の強震動 - 改正基準法的设计用入力地震動は妥当か? -, 第29回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、pp99-110, 2001

*工学院大学建築学科

**工学院大学建築学科 助教授 工学博士

* Dept. of Architecture, Kogakuin Univ.

** Associate Prof., Dept. of Architecture, Kogakuin Univ., Dr. Eng