

XIV 断層運動による永久変位量の評価

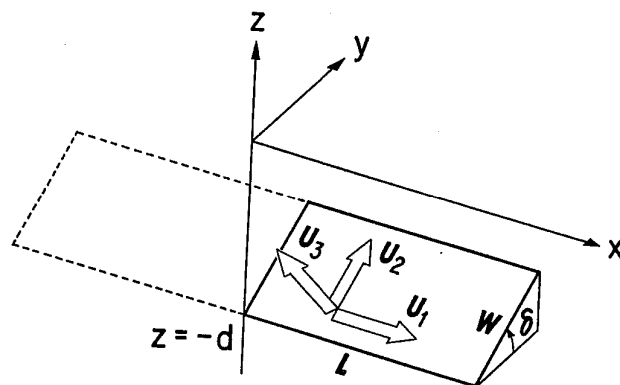
1. 背景

1999年に発生したトルコ kocaeli 地震，台湾集集地震では，地表に現れた断層変位による構造物被害が多発した。地震被害の予測においては，強震動だけではなくこのような地盤変形の評価も重要となる。

経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法を用いて強震動を予測する際，永久変位は一般に考慮されない。ひとつには，周波数領域で波形を扱う際に記録のステップ成分を正しく評価できないことである。高速フーリエ変換（FFT）に代表される取り扱いでは周期関数を仮定しており，取り扱う記録の始めと終わりは同じ値である必要がある。このため，ゼロから始まりある永久変位値で終了する記録の取り扱いが困難である。また，一般に強震観測記録（加速度記録）は長周期になるほど精度が低くなるため，振幅の極端に大きな大変位の記録を除けば，長周期をフィルターで低減して用いざるを得ない。

2. Okada(1985)の方法

地震動の時間変化を必要とせず最終変動量のみが必要であるなら，Okada(1985)による地表面変形の理論計算法を適用することができる。この手法では，半無限媒質（地表面を有する岩盤）中に断層運動が生じた場合の地表面における変位量とひずみを比較的高速に計算することができる。



図－1 Okada(1985)による座標系の定義

図－1にOkada(1985)による座標の定義を示す。長さL，幅W，傾斜 δ ，下端深さ-dの断層の想定することになる。 U_1 ， U_2 ， U_3 ，はそれぞれ走向方向，傾斜方向，断層面に垂直な方向（開口）の変位を表す。 U_3 は火山地下へのマグマの貫入などを扱う場合を除き，地震断層の運動では通常考慮されない。

ここで、 $p = y \cdot \cos \delta + d \cdot \sin \delta$ となる p を導入し、以下のような Chinnery の表記 (||) を用いて、 ξ と η で表現される関数 $f(\xi, \eta)$ を、 x , p と断層の大きさ L , W で表現される関数の和に置き換える。

$$f(\xi, \eta) || = f(x, p) - f(x, p - W) - f(x - L, p) + f(x - L, p - W) \quad (3)$$

(4) 式の表現を用いて以下の ξ と η を変数とする式を計算することにより、地表面における 3 方向の変位 (u_x , u_y , u_z) を求めることができる。

○横ずれの場合 : U_1

$$\left\{ \begin{array}{l} u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] || \\ u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] || \\ u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] || \end{array} \right. \quad (4)$$

○縦ずれの場合 : U_2

$$\left\{ \begin{array}{l} u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right] || \\ u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] || \\ u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d} q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cos \delta \right] || \end{array} \right. \quad (5)$$

斜めずれの場合は、すべりベクトルをこれら 2 方向に分解し、それぞれによる変位を足し合わせれば良い。ここで、各補助変数は以下のようにになっている。

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta} \frac{\xi}{R + \tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \\ I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R + \eta)] - I_3 \\ I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{R + \tilde{d}} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \\ I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu \cos \delta} \left[\ln(R + \tilde{d}) - \sin \delta \ln(R + \eta) \right] \\ I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu \cos \delta} \frac{2 \tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta}}{\xi(R + X) \cos \delta} \end{array} \right. \quad (6)$$

ただし, $\cos \delta = 0$ の場合は,

$$\begin{cases} I_1 = -\frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \frac{\xi q}{(R + \tilde{d})^2} \\ I_3 = \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \left[\frac{\eta}{R + \tilde{d}} + \frac{\tilde{y}q}{(R + d)^2} - \ln(R + \eta) \right] \\ I_4 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R + \tilde{d}} \\ I_5 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin \delta}{R + \tilde{d}} \end{cases} \quad (7)$$

である。なお,

$$\begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ \tilde{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta \\ \tilde{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta \\ R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2 \\ X^2 = \xi^2 + q^2 \end{cases} \quad (8)$$

である。

3. 永久変位の計算例

Okada(1985)の方法を用いて断層運動による地表面変位・ひずみの分布を計算した例を以下に示す。対象とした断層は長さ 20km・幅 20kmの左横ずれ断層と逆断層で、横ずれ断層の傾斜は 90 度、逆断層では 30 度とした。いずれの場合も、断層上端の深さは地表面下 1 km である。半無限媒質は S 波速度 3.5km/s、密度 2.8g/cm³であり、断層面上のすべり量を約 90cmとした。この場合、地震モーメントは約 1.4×10^{19} N・m、マグニチュードで約 6.7 となる。

図-2は左横ずれ断層の場合の地表面変位量を表している。図の中央部の横線が断層の地表投影である。水平変位は計算点から伸びた線の長さと同方向で示され、上下変位は円の大きさと方向で示される。実線の円は上、破線の円は下方向への変位を表している。最大変位量は約 23cm である。

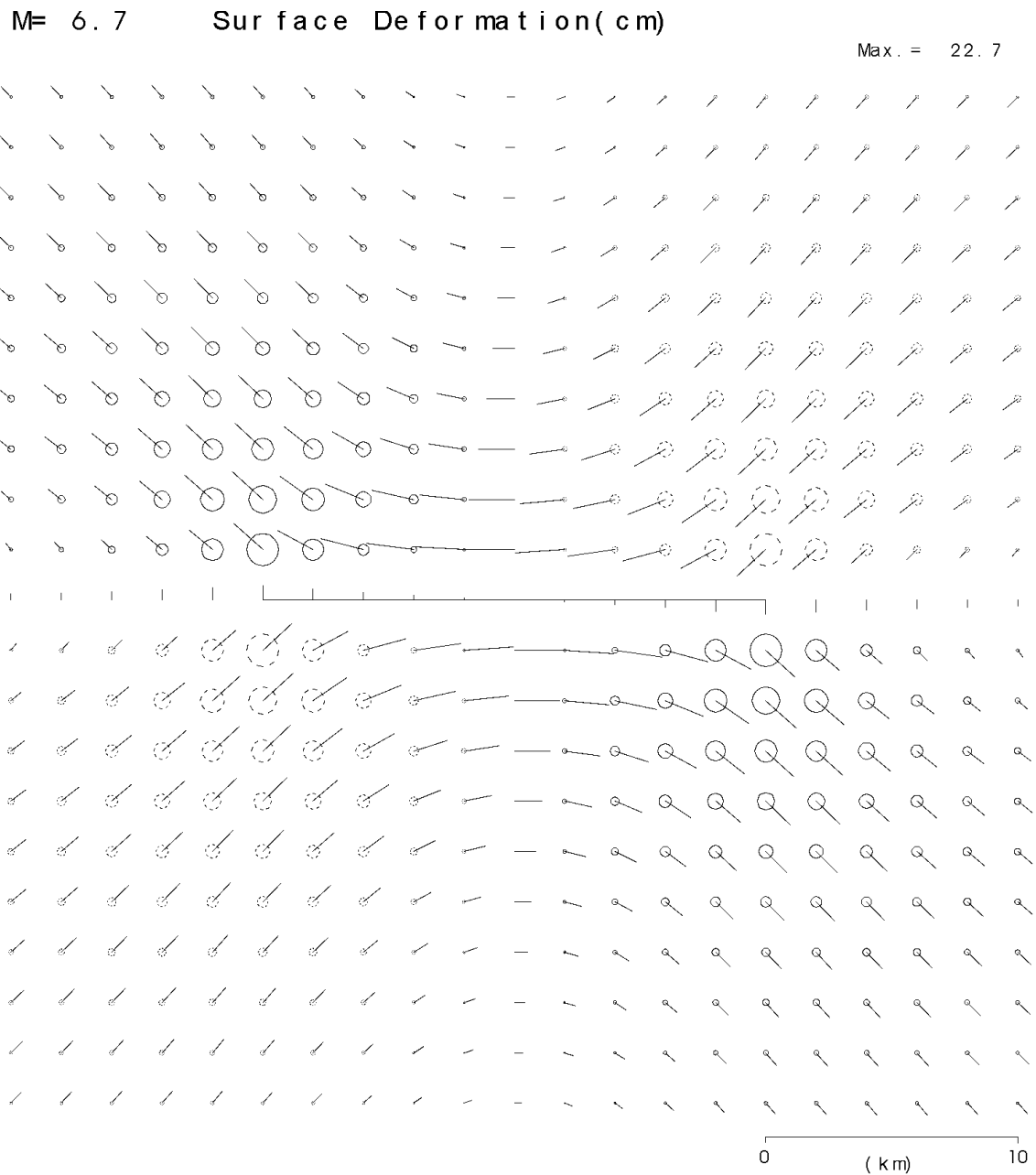


図-2 左横ずれ断層による地表面変位の計算例

図-3に逆断層による地表面変位分布を示す。上盤側で上下変動が大きいことがわかる。最大変位量は約44cmに達している。ここで、横ずれ断層地震の断層端部付近で上下変動が生じていることが興味深い。これは、図-4左に示すように、断層運動による物質の移動にともなって、体積の増える部分と不足する部分が生じることで理解できる。同様に、逆断層の深い方の断層端部付近では(図-4右)、断層運動による物質の移動による体積の不足により、沈降域となることが分かる。

M= 6.7 Surface Deformation (cm)

Max. = 43.8

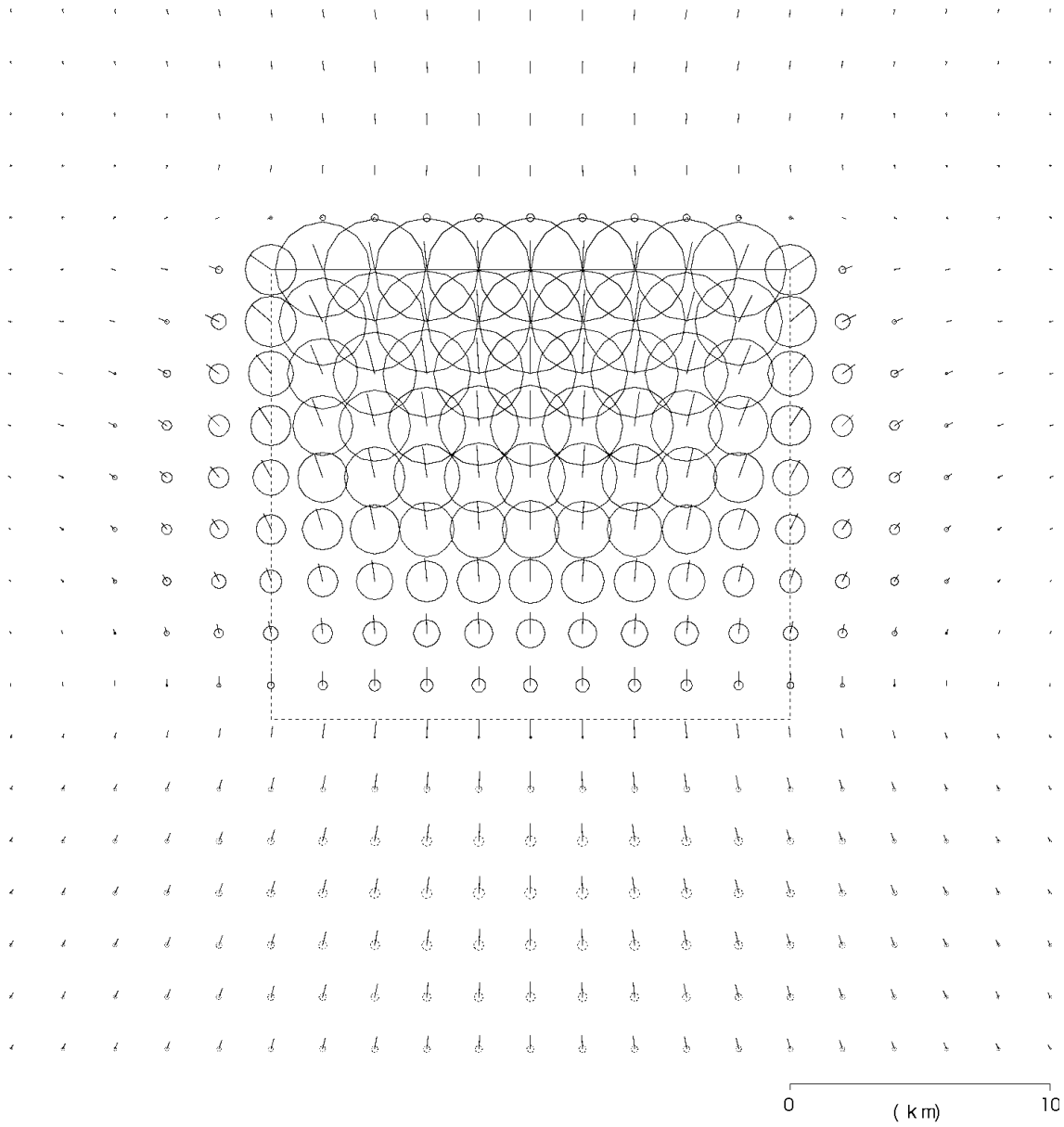


図-3 逆断層による地表面変位の計算例

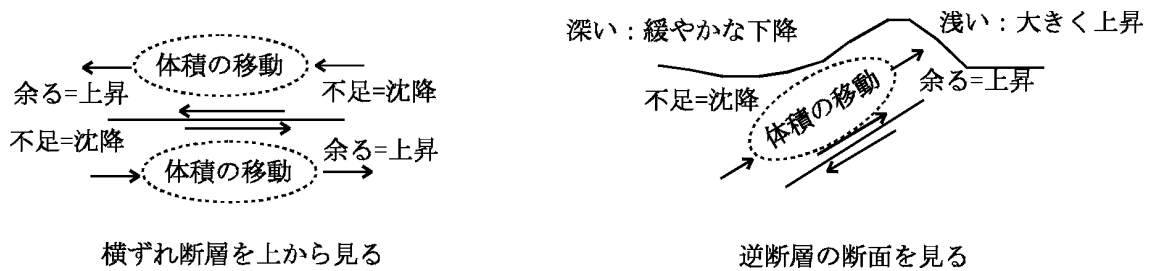


図-4 断層運動による体積の移動と隆起・沈降

4. まとめ

断層運動による永久変位量の計算にあたっては、経験的／統計的グリーン関数法は最適の手法ではなく、Okada(1985)による手法などを用いることが適当である。

Okada(1985)の方法で得られる地表面変動は半無限媒質（地表面を有する岩盤）上に限定されるが、表層地盤の影響を考慮する場合にはOkada(1985)による結果を静的なFEM解析の入力とするなどの配慮が必要である。

5. 文献

Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.

6. プログラム例

今回の内容はエクセル（ExcelはMicrosoft社の登録商標）ではなく、FORTRANによるコーディング例を紹介する（[Okada1985.txt](#)）。以下に示すプログラム例は、Okada(1985)の内容をコード化したものであり、論文に掲載された例題を計算することができる。プログラムでは、開口成分 (U_3) も考慮している。