

地層・地形と断層の動きを考慮した中規模領域の表層地盤の変状解析

○東北大学工学部建築・社会環境工学科 学生会員 大川 真里奈
 東北大学大学院工学研究科 学生会員 鈴木 峻
 東北大学大学院工学研究科 正会員 高瀬 慎介
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎
 茨城大学工学部都市システム工学科 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

我が国において活断層に関する規制や調査は重要構造物に対してのみ行われており、一般的な構造物に対する影響については十分に検討されていないのが現状である。その理由として、断層の分布が複雑であることや断層活動に伴って現れる地表面亀裂の予測が困難であることなどが挙げられている。表層地盤の変状解析に着目した先行研究では、地震発生に伴う応力変化を解析したもの [1] や、断層挙動のばらつきを表現し実断層の再現を行ったもの [2] が挙げられるが、局所的な変形の特徴づけや現象の再現性能の面で改善の余地がある。本研究では地層・地形と断層の動きを考慮したモデルを用いて解析を行い、これまで考慮されてこなかった地層や地形の特性が表層地盤に生じる地表面亀裂に与える影響を評価するための材料モデルや解析条件に関する基礎的検討を行うことを目的とする。

2. 材料モデル

岩盤および表層地盤に発生する損傷を有限ひずみ損傷モデル [3] によって表現する。弾性損傷構成則として、次式を用いる。

$$\sigma = (1 - D(\lambda_e)) \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_{\alpha} n_{\alpha} \otimes n_{\alpha} \quad (1)$$

ここで、 D は損傷変数であり、 σ_{α} は次の弾性構成式で与えられる Cauchy 応力の主方向成分である。

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{J} \frac{\partial H}{\partial \ln \lambda_{\alpha}} = \frac{2\bar{\mu}}{J} \ln \lambda_{\alpha} + \frac{\bar{\lambda}}{J} \ln J \quad (2)$$

ここで、 H は Hencky 超弾性体のひずみエネルギー関数、 J は体積変化率（変形勾配テンソルのヤコビアン）、 λ_{α} は α 方向の主方向ストレッチ、 $\bar{\mu}$ と $\bar{\lambda}$ は材料パラメータである。式 (1) の D は弾性域で $D = 0$ 、損傷域で $0 < D \leq 1$ を取る損傷変数であり、損傷進展の判定には次の評価式を用いる。

$$f_D(\varepsilon_e) = \varepsilon_e - \varepsilon_0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_D < 0 & \rightarrow \text{弾性域} \\ f_D \geq 0 & \rightarrow \text{損傷域} \end{cases}$$

ここで、 ε_0 は損傷開始ひずみであり、 ε_e は次式で定義さ

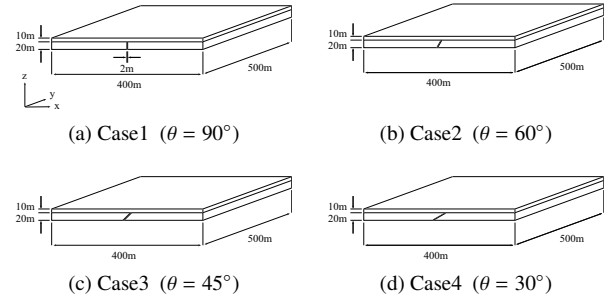


図-1: 解析モデル

表-1: 各種地盤の材料パラメータ

	岩盤	断層	表層地盤
ヤング係数 E (Pa)	2.4×10^{10}	1.0×10^{10}	0.1×10^{10}
ポアソン比 ν	0.24	0.24	0.24
密度 ρ (kg/m ³)	2.51×10^3	2.51×10^3	1.29×10^3
損傷開始ひずみ ε_0	0.38×10^{-3}	0.38×10^{-3}	0.38×10^{-3}
破壊エネルギー G_f (N/m)	100	100	100
引張圧縮強度比 k	10	10	10

れる等価ひずみである。

$$\varepsilon_e = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1' + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1'\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2'} \quad (4)$$

ここで、 k は引張圧縮強度比、 ν はポアソン比であり、 I_1' と J_2' はそれぞれ $I_1' = \text{tr} \varepsilon$ 、 $J_2' = \frac{1}{2} \mathbf{e} : \mathbf{e}$ で与えられるひずみテンソルの第1、第2不変量である。なお、 $\mathbf{e} = \varepsilon - \frac{1}{3} (\text{tr} \varepsilon) \mathbf{I}$ である。

損傷域では次式のような発展則で損傷変数が変化する。なお、過去に経験した損傷は回復しないこととすると、次式は減少しない関数である。

$$D(\lambda_e) = 1 - \frac{J_e \varepsilon_0}{J_0 \varepsilon_e} \exp\left(-\frac{E \varepsilon_0 L_e}{J_0 G_f} (\lambda_e - \lambda_0)\right) \quad (5)$$

ここで、 E はヤング係数であり、 λ_0 と J_0 はそれぞれ損傷発生時のストレッチと体積変化率である。また、 λ_e は現在の等価ストレッチであり、 J_e は $J_e = \lambda_e^{1-2\nu}$ で表される体積変化率である。 G_f は破壊エネルギーであり、結合力-開口変位曲線下の面積で定義される値であり、 L_e は $L_e = (12V_e)^{1/3}$ で表される有限要素の代表長さで、 V_e は要素体積である。

3. 簡易モデルによる変状解析

地層と地形を考慮した簡易モデルを用いて地表面に生じる地盤変状の解析を行う。以下のテストケースでは表層地

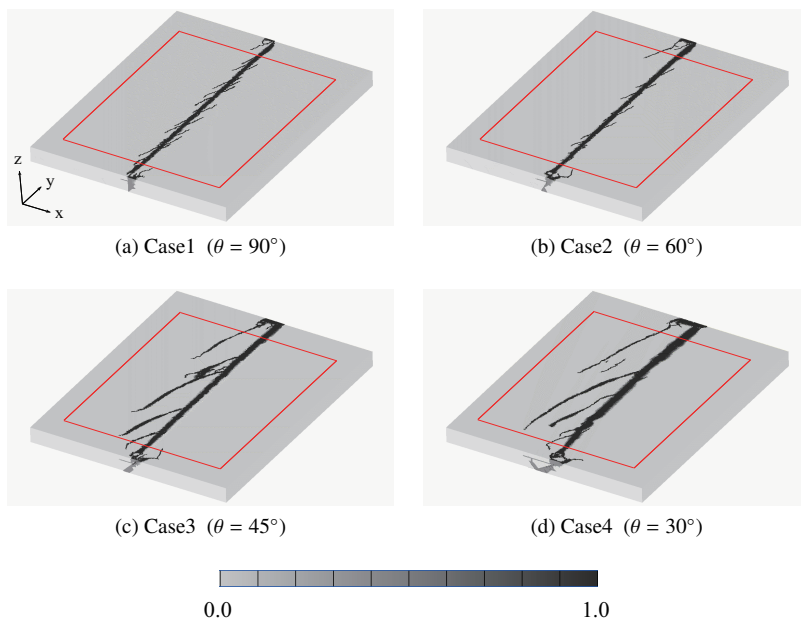


図-2: 解析結果

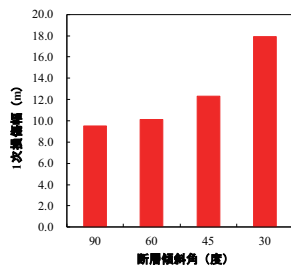


図-4: 1次損傷幅

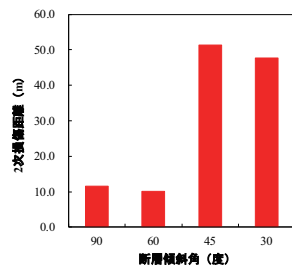


図-5: 2次損傷長さ

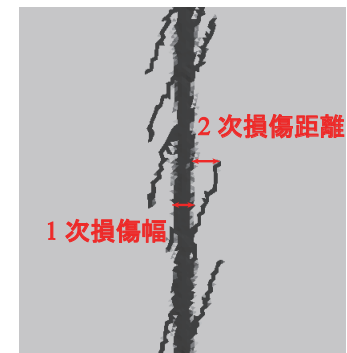


図-3: 各指標の算定方法

盤を 10m と仮定し、図-1 に示すようなモデルを用いて断層のもつ傾斜角 θ が変化した影響 (Case1: $\theta = 90^\circ$, Case2: $\theta = 60^\circ$, Case3: $\theta = 45^\circ$, Case4: $\theta = 30^\circ$) を調査する。境界条件として下盤側を完全固定し、上盤側に断層面に沿う強制変位を与えることで断層の動きを表現する。強制変位の値は、実際に観測された地殻変動の準東西成分 1.5 m とする。材料パラメータは文献 [4] を参考に表-1 のように強度は一樣とし、剛性を変化させることで各種地盤を表現することとし、自重を含めた解析を行う。

解析の結果を図-2 に示す。この図から断層面に平行な損傷 (1次損傷) と断層面に一定の角度をもって発生する損傷 (2次損傷) が発生することが見てとれる。断層運動による構造物等の被害はこの2次損傷の関与が示唆される。

断層の傾斜角が2次損傷に与える影響を調査するために、1次損傷幅と2次損傷距離を指標として用いて、データを整理する。境界条件の影響によって生じた損傷を無視するために、図-2 に示す赤枠内で指標の算定を行う。それぞれの指標は図-3 に示すように算定し、2次損傷距離に関しては平均値を取ることとする。結果を図-4,5 に示す。

図-4,5 より、断層傾斜角が小さいほど1次損傷幅が広く

なり断層近傍では地表面損傷が広い範囲で見られると考えられる。一方で、断層から離れた地点に伸びる2次損傷の距離に関しては、断層傾斜角との相関が見られないが、断層傾斜角 60° と 45° の間で2次損傷の進展パターンが変化するのではないかと考えられる。

4. 結論

本研究では岩盤と断層、表層地盤を模擬したモデルに強制変位を与え、変状解析を行った。その結果、恣意的に与えた亀裂面からではなく、任意の亀裂面からの損傷の進展過程を解析することができた。平成 28 年熊本地震の際にも断層と認識されていた部分から派生した、断層面に対して斜めに発生する亀裂が確認されており、本研究で用いた損傷モデルの表層地盤の変状解析に対する有用性を示すことが出来たと考えられる。今後、より複雑な地形を考慮したモデルによって実際の地表面亀裂の再現を試みる必要があるといえる。

参考文献

- 1) 金折裕司, 遠田晋次, 小泉朗: 山口県中西部で発生した 3 被害地震と周辺断層付近の応力変化, 自然災害科学, *J.JSND*, 20-2, 213-224, 2001.
- 2) 中川英則, 堀宗朗: 非線形スペクトル確率有限要素法を用いた地表地震断層のシミュレーション, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, 225-241, 2011.
- 3) 車谷麻緒, 阿部俊逸, 相馬悠人, 寺田賢二郎: コンクリートの破壊力学と修正 von-Mises 基準に基づく等方性の有限ひずみ損傷モデル, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.1, 11-21, 2017.
- 4) 増田秀夫, 田中荘一: 岩の力学的性質 II—試験に関する技術と結果一, 古今書院, 1992