

# 地盤の逆断層型破壊に伴う地震動的不規則波生成の有限変形シミュレーション

逆断層，地震動，進行性破壊

名古屋大学

学生会員 ○山岡 大祐

国際会員 山田正太郎 野田 利弘

(公財)地震予知総合研究振興会

国際会員 浅岡 顕

## 1. はじめに

原発の再稼働問題をはじめ，断層の存在が脚光を浴びている．断層破壊により発生する表層地盤の変状や地震動が予測できるようになればこれらの問題に少なからぬ貢献ができる．一方で，著者らの研究グループでは，これまでに三軸圧縮試験や支持力問題において，破壊が生じる際に振動が発生することを，慣性力を考慮した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>1)</sup> による計算結果を元に示してきた<sup>2),3)</sup>．これらの成果を踏まえ，同解析コードを用いて，新たに逆断層の破壊およびその破壊に伴う振動の生成シミュレーションを実施した．本稿ではその解析結果を示す．

## 2. 解析条件

計算は2次元平面ひずみ条件にて行った．**図1**に解析に用いた有限要素メッシュを示す．幅48m，厚さ8mの水平成層地盤の両側面に，プレートの運動による影響を想定した定率変位を与えた．圧縮したときに逆断層のような上下方向のズレが発生し得るよう，底面の鉛直方向の固定は1節点のみとし，赤線上の節点間に角度不変条件を与えるとともに，1つの節点の鉛直方向の変位を固定した．底面が水平を保って運動するように，変位制御問題では底面両隅部に角度不変条件を課した．底面水平方向には地盤の破壊により発生した振動を境界から散逸させるために，粘性境界を課した．载荷速度は，地盤内部で間隙水の移動がほとんど生じることのないような変位速度( $0.5 \times 10^{-5}$  m/sec)で与えた．

**表1**から**表3**に解析に用いた地盤の材料定数と初期値，および粘性境界の材料定数をそれぞれ示す．初期状態については間隙比一定で，過圧密比が分布する地盤とした．**表1**と**表2**は仮想的に与えた材料定数と初期値であり，強度や剛性等，岩盤とは異なるが，少なくとも非常に脆性的という面においては岩盤の性質を表すことができるよう設定した値である．また，どんなに均質に見える地盤であっても，実際の地盤では僅かな不均質性を有している．このような僅かな不均質性を，NCLの切片Nの値を $2.00 \pm 0.003$ の範囲内で乱数を発生させてランダムに与えることで考慮した．Nの違いにより，過圧密比に不均質性が生まれ，結果としてせん断時のピーク強度に違いが現れる．

## 3. 解析結果

**図2**に荷重－変位，および，破壊時付近の荷重－時間関係を示す．荷重は地盤側面に垂直に作用する力を初期断面積で割った値，変位は両側面における水平変位の合計値である．また，変位制御であるため，時間と载荷速度は比例関係にある．载荷の結果，荷重が急激に低下している．**図3**に**図2**の(a)～(d)に示す時刻のせん断ひずみ分布を示す．荷重の低下と同時にひずみの局所化が進行している．すべり線は底面から右斜め上に向かって入り，すべり線より左側の地盤が右側の地盤に乗り上げる逆断層型の破壊形態となった．**図4**に**図1**の点Pにおける水平方向の加速度時刻歴および破壊時付近のその拡大図を示す．逆断層的な破壊に伴って自然の地震動にも似た不規則な振動波形が得られている．本解析において破壊時にこのような不規則性が現れるのは，ランダムに与えた不均質性の効果である．紙幅の都合上，

表1 地盤の材料定数

(弾塑性パラメータ)	
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.02
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.004
限界状態定数 M	2.30
NCLの切片 N	$2.0 \pm 0.003$
ポアソン比 $\nu$	0.15
(発展則パラメータ)	
構造低位化指数 $a$ ( $b=c=1.0$ )	2.0
$c_s$	0.9
正規圧密土化指数 $m$	5.0
回転硬化指数 $b_r$	0.00
回転硬化限界定数 $m_b$	0.60
透水係数 $k$ (cm/sec)	$2.8 \times 10^{-7}$
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.70

表2 地盤の初期値

構造の程度 $1/R_0^*$	4.0
過圧密比 $1/R_0$	5.04~437
異方性の程度 $\zeta_0$	0.00
間隙比 $e_0$	2.00453
側圧係数 $K_0$	1.0
地表面荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	0.0981

表3 粘性境界の材料定数

基盤の密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.00
基盤のS波速度 $V_s$ (m/sec)	300

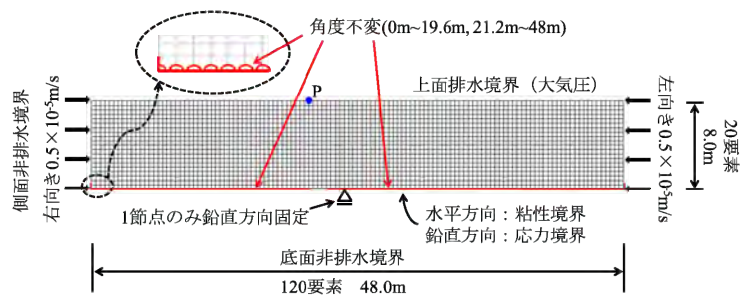


図1 有限要素メッシュと境界条件

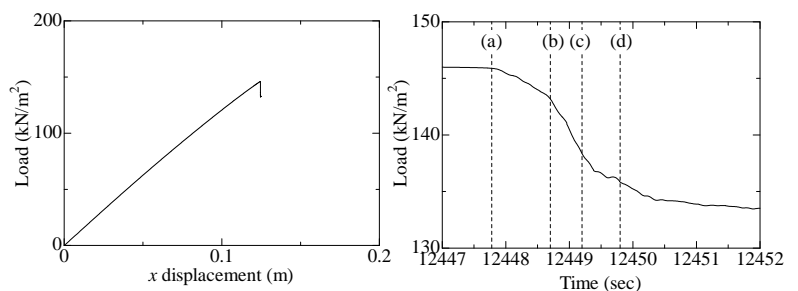


図2 荷重－変位，荷重－時間関係

割愛するが、ランダムな不均質性を有さない地盤を対象にすると、初動で最大加速度に達し、その後指数関数的に減衰する人工地震波と同様な特徴を持った波形が現れる。地盤のランダムな不均質性と不規則な波形の関係について調べるために、すべり線上の要素挙動を図5に示す。図中に示した要素番号は、すべり線上の底面部分を①として、右斜め上方に一つずつ振っていった。図中の(a)~(d)は図2や図4に示した記号に対応している。Nの不均質性に起因してピーク強度に違いがあること、さらに、ピークに至る時間にタイムラグがあることが分かる。断層破壊という大きな破壊イベントの中に要素レベルでの小さな破壊イベントが幾つも存在するために、不規則な波形が生まれている。図6に破壊時における加速度ベクトル図を示す。ピーク強度を迎えている要素付近から加速度が発生している様子を見て取ることができる。最後に破壊時にこのような加速度が発生するメカニズムについて考察する。図7に破壊時におけるせん断ひずみ分布を示し

ている。図3と同じせん断ひずみ分布であるが、図3ではすべり線の変化に焦点を当てている一方、図7では非破壊領域の変化に焦点を当てている。図7より非破壊領域では、破壊とともにひずみが減少していることがわかる。これは、断層の周辺地盤に蓄えられた弾性エネルギーが断層破壊によって一気に解放されることを示している。このような破壊に伴う、非破壊領域の弾性エネルギーの解放が、地盤内の加速度運動の源になっている。

#### 4. おわりに

慣性力を考慮した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA** を用いて、非常に脆性的な地盤材料を対象に、ひずみの局所化を伴う進行性破壊現象として逆断層的な破壊を再現した。また、地盤のランダムな不均質性に起因して、破壊時には不規則な振動波形が得られること、さらには、破壊時には非破壊領域に蓄えられた弾性エネ

ルギーが解放されることを示した。岩盤のモデル化、スケール等、見直すべき点はまだまだ多いが、断層生成およびそれに伴う地震動の発生シミュレーションの端緒的研究として、その可能性の一端を示した。謝辞：本研究は科学研究費補助金（基盤研究(B)：課題番号 25289143）の補助を受けて実施した。

参考文献) 1) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *S&F*, **48**(6), 771-790. 2) Noda et al. (2013): Acceleration generation due to strain localization of saturated clay specimen based on dynamic soil-water coupled finite deformation analysis, *S&F*, **53**(5), 653-670. 3) Yamada et al. (2013): Simulation of Delayed Failure in Naturally Deposited Clay Ground by Soil-water Coupled Finite Deformation Analysis Taking Inertial Forces into Consideration, *Proc. 18th ICSMGE*, 841-844.

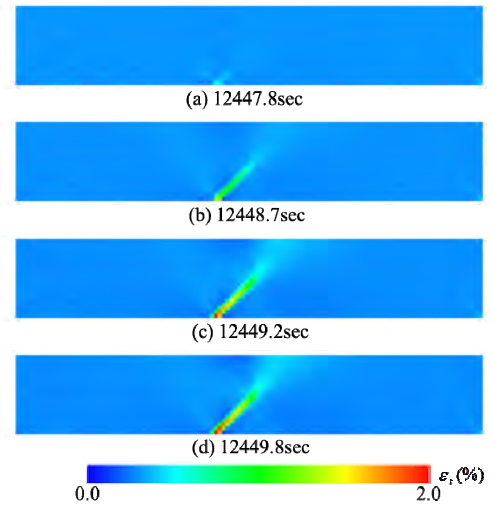


図3 せん断ひずみ部分(破壊領域にフォーカス)

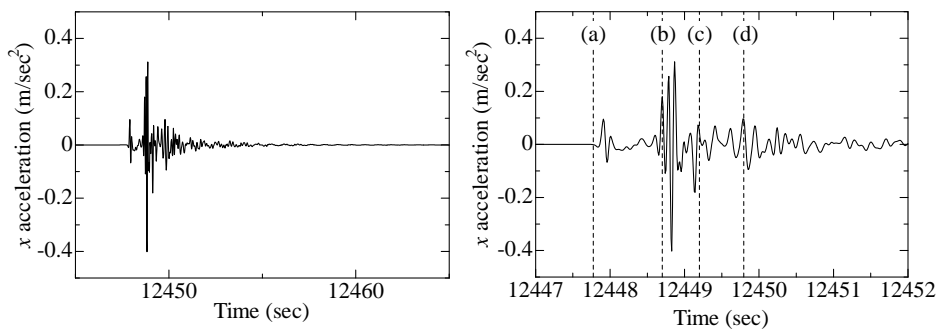


図4 点Pにおける加速度応答

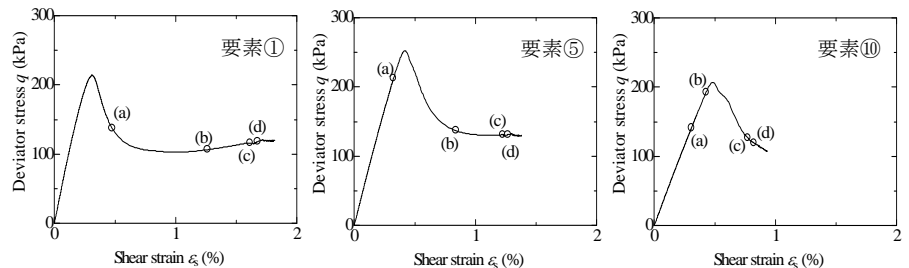


図5 すべり線上の要素挙動

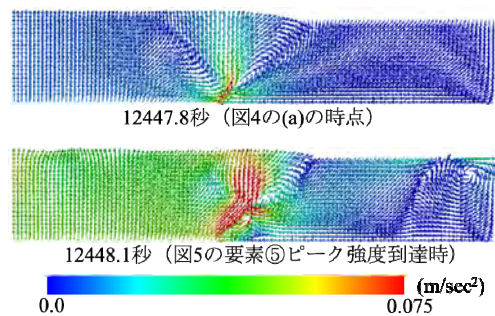


図6 破壊時の加速度ベクトル

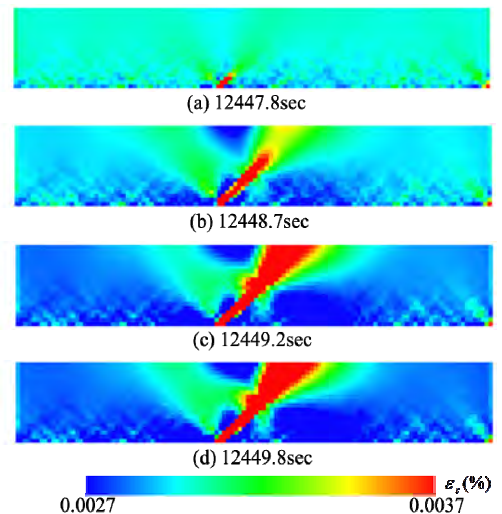


図7 せん断ひずみ分布(非破壊部にフォーカス)