

液状化地盤上の盛土における 引張クラック発生メカニズムについての一考察

原田 陽弓¹・後藤 浩之²・澤田 純男³

¹ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: yomi@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

盛土構造物の耐震設計では、せん断破壊による円弧すべりのみを考慮しているものが多いが、実被害においては開口クラックが生じるものも多く観察されており、引張破壊も考慮した盛土構造物の耐震設計をする必要がある。本研究では、せん断破壊と引張破壊の双方を考慮した砂の弾塑性モデルを拡張有限要素法に導入した数値解析手法を用いて、液状化地盤上の盛土を対象に動的解析を行った。異なる盛土高さ及び入力周波数を設定し、引張破壊による開口クラックが盛土天端及び法面から発生進展するパターンと盛土底部から発生進展するパターンの2パターンについて、発生メカニズムを考察した。盛土と液状化地盤の固有周波数と入力周波数の関係によって、盛土内部に生じる動的な変位が開口クラックを生じさせる場合と、液状化地盤の側方流動に付随して生じる変位が開口クラックを生じさせる場合の、2種類のメカニズムが存在する可能性が示唆された。

Key Words: *extended finite element method, crack, tensile failure, soil embankment, liquefaction*

1. はじめに

盛土構造物は道路や鉄道、堤防といった様々な用途で利用されており、交通や防災において大きな役割を果たしている。ところが、巨大地震によって崩壊し、ライフラインに多大な影響を与えることも多い。緊急輸送路の確保や河川の氾濫による二次災害の抑止等のために、盛土の耐震性を確保することは重要な課題である。

現行の鉄道や道路盛土の耐震設計では、震度法やNewmark法¹⁾に基づいて安定計算をしているものが多い。どちらの計算手法においても円弧すべり面を仮定し、盛土材料の破壊メカニズムとしてせん断破壊のみを考慮している。

ところが、地震時の盛土の被害調査によれば、盛土の被害事例として円弧すべりのようなせん断破壊によるものだけではなく、盛土の法面及び天端において開口クラックが生じるようなものも多く観察されている。東北地方太平洋沖地震においては、多くの河川堤防で天端及び法面に縦断方向の亀裂が生じる被害が報告された²⁾。この破壊形態に至るメカニズムには液状化とそれに伴う側

方流動が関係していると考えられる。地下水位以下にある基礎地盤や盛土底部で液状化が発生し、側方流動により盛土に引張応力が働き、拘束圧の小さい天端や法面において引張破壊による亀裂が生じると考えられる。

このように、開口クラックを伴うような破壊メカニズムでは引張破壊が起きていると予想される。現行の評価法で想定されているせん断破壊による円弧すべりのみならず、引張破壊による開口クラックの発生・進展についても考慮する必要があると考えられる。

土の引張破壊に関する挙動を考慮して盛土の破壊メカニズムについて議論した研究は少ない。その理由として、土は圧縮せん断に対する強度に比べて引張強度は非常に小さく、実験などによる引張挙動に関するデータが少ないことや、そもそもすべり面を仮定した場合には引張破壊が生じ得ないことが挙げられる。

中田ら³⁾はせん断破壊と引張破壊の双方を表現できる土の弾塑性モデルを提案し、有限要素法(Finite Element Method: FEM)に導入して盛土の地震応答解析を行っているが、ひずみの局所化やクラックの開口・閉合といった現象は取り扱っていない。また池田ら⁴⁾は変位の不連

続面を表現できる拡張有限要素法 (eXtended Finite Element Method: X-FEM) に中田らが提案した弾塑性モデルを導入し、盛土にクラックが発生進展する現象を表現しているが、基礎地盤の液状化は考慮されていない。新保・矢富⁵⁾は軟弱地盤上の盛土底面に亀裂を配置し、地震動によって亀裂が拡大・進展する過程を X-FEM により解析することで、側方流動により盛土が分離破壊することを示しているが、クラックの自発的な発生は表現されていない。Wang ら⁶⁾は砂の斜面上で生成したすべり面と開口クラックがそれぞれ進展し、つながることを X-FEM を用いて表現している。以上のように、盛土および斜面におけるクラックの発生・進展に関する数値解析技術が近年開発されつつある一方、地震時の盛土に生じる開口クラックの発生メカニズムは解明されていない。

本研究では、液状化地盤上の盛土を対象とした動的解析を行い、開口クラック発生メカニズムについて考察する。盛土材料には中田ら³⁾が提案した引張破壊とせん断破壊を考慮した砂の弾塑性モデルを導入する。池田ら⁴⁾が提案した引張破壊による開口クラックとせん断破壊によるせん断クラックが自発的に発生進展する様子を表現できる X-FEM を用いた数値解析を行う。異なる盛土高さ及び入力周波数を設定することにより、引張破壊による開口クラックが盛土天端及び法面から発生する場合と盛土底部から発生する場合の異なる発生パターンを表現し、それぞれのパターンにおける発生メカニズムを考察する。

2. 拡張有限要素法によるクラックの表現

(1) 拡張有限要素法

FEM では、運動方程式と境界条件を満足する弱形式の積分方程式に基づいて、領域を複数の要素に分割して離散化を行う。クラックのような変位の不連続面を表現するには要素の境界と不連続境界を一致させる必要があり、解析前に不連続の発生位置を把握できない問題を解く場合、要素の再配置を行う必要がある。一方 X-FEM では、形状関数に不連続性を持つ関数を導入することで、要素の再配置を行わずに不連続面の発達を扱える。

4 節点要素の場合、要素内変位 u は次式で近似される。

$$u_i^h(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^4 N_I(\mathbf{x})u_{iI} + \sum_{I \in J} N_I(\mathbf{x})\psi_I(\mathbf{x})a_{iI} \quad (1)$$

ここに、 N は形状関数、 \mathbf{x} は座標、 I は節点番号、 J は不連続性を表現するために新たに付加された節点 (エンリッチノード) の集合である。 a はエンリッチノードに付加された自由度に対応する変数である。 ψ はエンリッチ関数であり、要素内の不連続性を表す関数である。本研究では、変位の不連続面を表現するためにヘビサイド

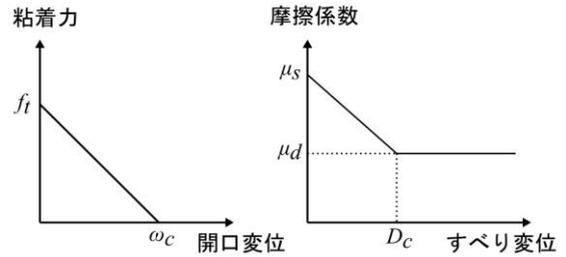


図-1 粘着力とせん断摩擦力のモデル⁴⁾

型の関数 (shifted Heaviside function⁷⁾) を用いる。

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\psi_I(\mathbf{x}) = H(\phi(\mathbf{x})) - H(\phi(\mathbf{x}_I)) \quad (3)$$

ここに、 $\phi(\mathbf{x})$ はレベルセット関数であり、不連続面からの距離を符号付きで表す。

エンリッチ関数とエンリッチノードに自由度が追加されるという点に着目すれば、X-FEM も FEM と同様にマトリクス形式の方程式が得られる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (4)$$

ここに、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{f\}$ は外力ベクトルである。

(2) クラック面の境界条件

クラックが閉合する場合は、領域が重ならないように開口変位が非負という変位の境界条件を与える。具体的にはペナルティ法を用いて、開口変位が負になったとき、次式で定義される分布荷重 p_c をクラック法線方向の荷重としてクラック表面に与える。

$$p_c = \alpha(u_i^+ - u_i^-)n_i \quad \text{on } \Gamma_c \quad (5)$$

ここに、 α はペナルティ定数、添字 +, - は不連続面により分断された近傍の 2 つの領域を区別するための記号、 Γ_c は変位の不連続面である。本研究では $\alpha = 10$ とする。

クラック先端の応力集中により塑性変形が生じる破壊進行領域を考慮するために、cohesive zone model^{8,9)}を用いて境界面に働く表面力を定義した境界条件を与える。このモデルでは、実在クラック先端の応力分布を破壊進行領域に設定した仮想クラック面の粘着力によって与える。引張クラックには法線方向にクラックを閉じる向きに働く粘着力、せん断クラックには接線方向にすべり方向と逆向きに働くせん断摩擦力を与える。

せん断摩擦力はせん断摩擦係数で定義し、法線応力に応じてその絶対値を制御する。粘着力とせん断摩擦係数の関係は、図-1 に示すように開口変位とすべり変位の大きさに応じて徐々に低下する直線型のモデルとする。図中の f_t は引張強度であり、 ω_c は粘着力がゼロになる開

口変位である。 μ_s, μ_d はそれぞれ最大静止摩擦係数であり、 D_c は摩擦係数が動摩擦係るすべり変位である。

(3) クラックの発生と進展

構成モデルには中田ら³⁾の弾塑性モデルをのモデルは Li and Dafalias¹⁰⁾が提案した砂のせ表現できる弾塑性モデルに、非弾性的な引張できる Ortiz¹¹⁾の構成モデルをカップリングする。所定の条件下でせん断ひずみーせん断応よび引張ひずみー引張応力関係においてピーク値を越え、ひずみ軟化挙動を示す。

本解析ではせん断応力がピーク値に達した時点をせん断破壊、引張応力がピーク時に達した時点を引張破壊とし、せん断時にはせん断クラックを、引張破壊時には引張クラックをそれぞれ不連続面として発生させる。以下、クラックを発生させる要素を「注目要素」、その周辺の要素を「周辺要素」と呼ぶ。破壊の判定に用いる応力の値は各要素の値とし、破壊判定は注目要素ごとに行う。このとき各要素内の応力は一定であるとする。

破壊と判定されたとき、注目要素の対角線の交点を通るようにクラックを発生させる。発生させるクラックの傾斜角は、せん断破壊時にはせん断応力最大となる面、引張破壊時には引張応力最大となる面の傾斜角とする。ただし、せん断応力最大となる面は共役に2面存在するため、それらに対応した2枚のクラックを発生させる。これは、実材料に見られるせん断クラックが通常1枚であることに矛盾するが、1つの要素という局所的な応力状態を判断基準として2枚のクラックを発生させても、その後の周辺の広い範囲の応力状態に応じて片方のクラックのみが進展し、もう片方のクラックが盛土の挙動に与える影響は小さいと考える。

ただし、周辺要素のクラックの先端が注目要素の辺上に一つ存在する場合には、その先端に接続するようにクラックを発生させる。せん断クラックの場合には、周辺要素のクラックと発生させるクラックとがなす角が小さくなる方の傾斜角を選び、一つのクラックを発生させる。

注目要素の辺上に存在するクラック先端が2つ以上の場合には、全ての先端に接続するクラックを配置させた後に、配置したクラックの両端が交わる辺の組み合わせが同じかどうかを判別する。辺の組み合わせが同じものが存在する場合には、該当するクラックの平均位置にクラックを1枚発生させ、該当しないクラックについてはそのままの位置で発生させる。辺の組み合わせが同じものが存在しない場合には、配置したクラックを全て発生させ、以降の解析において開口変位とすべり変位がそれぞれ等しくなるように平均化を行う。

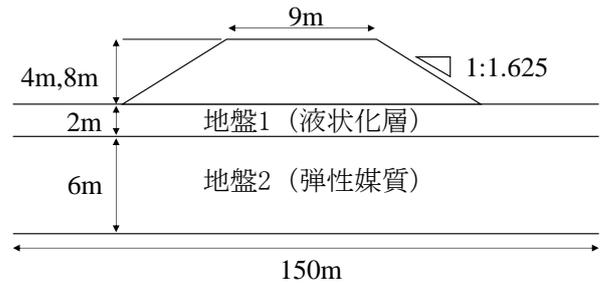


図-2 解析対象の盛土モデル

表-1 地盤1のモデルパラメータ

弾性定数	限界状態定数	塑性係数	その他
$G_0=125$ $\nu=0.25$	$Mc=1.25$ $e_f=0.934$ $\lambda c=0.019$ $\xi=0.7$	$d_1=0.41$ $d_2=1.0$ $m=3.5$ $h_1=3.15$ $h_2=3.05$ $h_3=2.2$ $h_4=3.5$ $n=1.1$	$p_a=101.2\text{ kPa}$ $a=1.0$ $b_f=0.005$ $b_2=2.0$ $b_3=0.01$

表-2 盛土堤体のモデルパラメータ

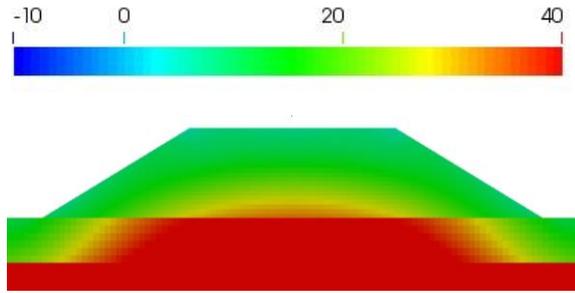
弾性定数	限界状態定数	塑性係数	その他
$G_0=118$ $\nu=0.33$	$Mc=1.2$ $e_f=0.934$ $\lambda c=0.2$ $\xi=0.7$	$d_0=0.38$ $m=3.5$ $h_1=0.89$ $h_2=0.47$ $n=5.0$	$p_a=101.2\text{ kPa}$ $C=40\text{ kPa}$ $f_f=33.3\text{ kPa}$ $c=0$

3. 数値解析モデル

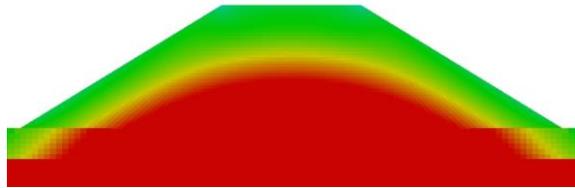
本解析で対象とする盛土モデルは図-2に示す通り堤体と下部地盤からなる。

地盤は水平な2層からなり、解析領域は深さ方向に8m、水平方向に150mである。側方は周期境界とする。地盤1は飽和砂で構成された深さ2mの液状化層とし、有効応力解析を行う。構成モデルには砂の繰り返しせん断挙動を考慮した Li¹²⁾のモデルを用いる。間隙水の境界条件は全要素において非排水とする。地盤1のモデルパラメータを表-1に示す。なお、各変数は Li¹²⁾に準拠する。地盤2はボアソン比0.33、体積弾性率100MPa、密度2000kg/m³の弾性媒質とし、厚さは6mである。

盛土堤体は天端幅9m、法面勾配1:1.625であり、高さは4mと8mの2種類を設定する。構成モデルには中田ら³⁾が提案した砂の弾塑性モデルを用い、池田ら⁴⁾が提案した解析手法によりクラックの進展解析を行う。なお、



(a) 盛土高さ 4m



(b) 盛土高さ 8m

図3 初期有効拘束圧 (kPa) の分布

堤体内で液状化は発生しないものとする。

盛土堤体のモデルパラメータを表-2 に示す。 M_c は限界応力比であり、内部摩擦角に関係している。 C はマトリックスサクシオンによる見かけの粘着力に関するパラメータであり、不飽和状態の砂質土を簡便に模擬するために導入している。 f_t は引張強度を表し、材料の内部摩擦角及び粘着力に関するものとして以下のように仮定した。

$$f_t = \frac{C}{M_c} \quad (6)$$

クラック先端の応力状態を表現する cohesive zone model のパラメータは、 $\omega_c = 1\text{mm}$ 、 $D_c = 10\text{mm}$ 、 $\mu_d = \tan 20^\circ$ とし、 μ_s は破壊時にクラック面に働いているせん断応力と法線応力の比とした。

上述した解析モデルに対して自重解析を行い初期応力状態を求めた後、地震動として水平加速度を与える。各モデルの初期有効拘束圧の分布図を図-3 に示す。また、入力する水平加速度を図-4 及び図-5 に示す。最大加速度振幅を 1.57m/s^2 とし、周波数は 1Hz と 4Hz の 2 種類を入力する。

4. 数値解析結果

(1) ケース 1 (高さ 4m, 入力周波数 1Hz)

図-6 及び図-7 に高さ 4m, 入力周波数 1Hz のケースの有効拘束圧と水平変位の分布図を示す。なお、水平変位は右向きが正とし、黒い線は発生したクラックを表す。

16.684 秒に天端において最初のクラックが発生した。引張破壊によるものであった。その後、天端において複

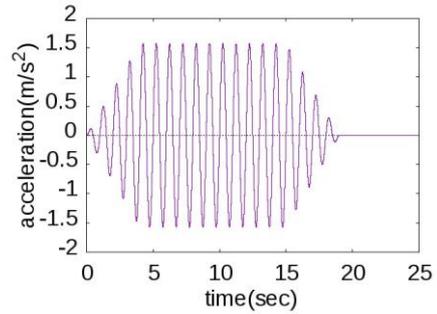


図4 入力水平加速度 (1Hz)

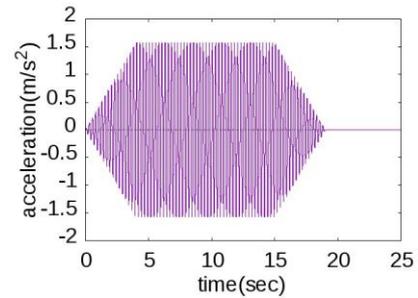


図5 入力水平加速度 (4Hz)

数のクラックが生じた後、盛土底部に向かってクラックが進展した。18.542 秒以降、新たなクラックは発生しなかった。

盛土内部において、右または左向きに変位している部分と変位していない部分との境界 (変位の境界) の位置はおおよそ盛土中央である。変位の境界において有効拘束圧が減少し、初期有効拘束圧の小さい盛土天端において引張応力が生じたことにより、天端において引張破壊によるクラックが発生したと考えられる。

地盤 1 における有効拘束圧は加振することにより初期状態より減少していることが確認され、水平変位の分布図より側方流動をしていることがわかる。しかし、盛土中央部の下部では液状化に至っていない。

また、入力周波数 1Hz に対応して盛土及び地盤の変位も 0.5 秒ごとに振動している。盛土内部の変位は、側方流動によって生じた残留変位と、入力動による動的な変位の重ね合わせとして表現されている。

(2) ケース 2 (高さ 4m, 入力周波数 4Hz)

図-8 及び図-9 に高さ 4m, 入力周波数 4Hz のケースの有効拘束圧と水平変位の分布図を示す。5.614 秒に盛土底部において最初のクラックが発生した。引張破壊によるものであった。複数の引張クラックが盛土底部において生じ、6.1 秒頃より盛土底部から天端に向かってクラックが進展した。6.66 秒頃には天端に到達し、天端付近で多くのクラックが発生した。6.75 秒に発生しているクラック周辺の有効拘束圧は隣接する要素間で値にばらつき

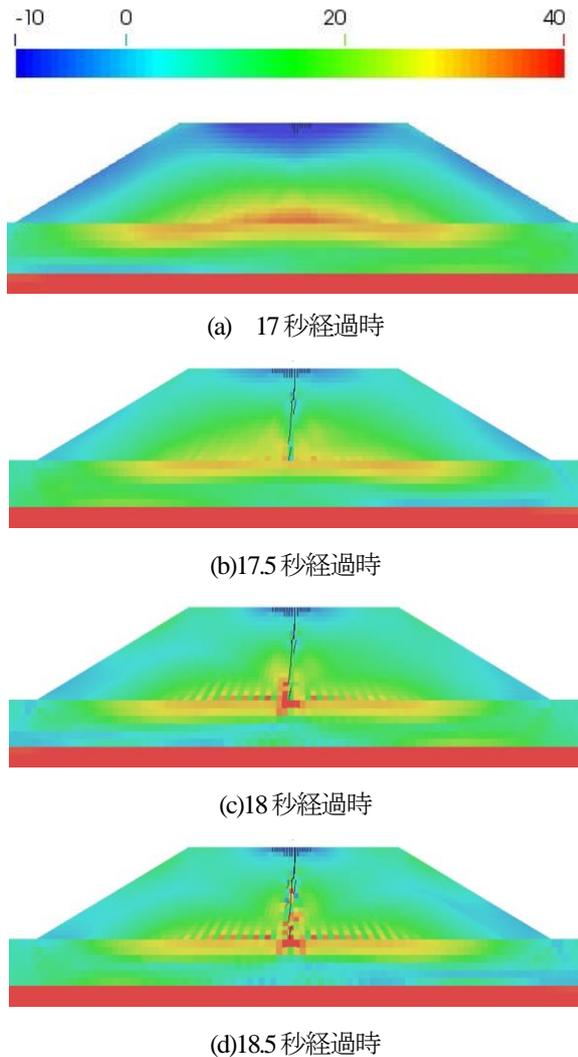


図-6 ケース1の有効拘束圧 (kPa) の分布

がみられ、計算が不安定になり始めている。6.75秒よりせん断破壊によるクラックも少数ではあるが発生し始め、7.028秒に計算が不安定になり解析が終了した。ケース1では引張クラックが天端から発生したのに対し、ケース2では盛土底部から発生した。

下部地盤における変位の境界の位置と盛土内部における有効拘束圧の低い箇所は、入力周波数 4Hz に対応して 0.125 秒ごとに振動しているが、盛土内部における変位の境界の位置の振動はほとんど確認されない。ケース1とは異なり、動的な変位は主體的でないと考えられる。

一方で地盤1における有効拘束圧が大きく減少しており、地盤1で液状化が発生していると考えられる。図-7と図-9を比較すると、ケース2の方が経過時刻が早いにも関わらず、地盤1における水平変位はケース2の方が大きい。ケース1とケース2における地盤1の挙動の違いは入力周波数 4Hz の方が単位時間あたりの繰り返し回数が多く、液状化に至るのが早かったためと考えられる。

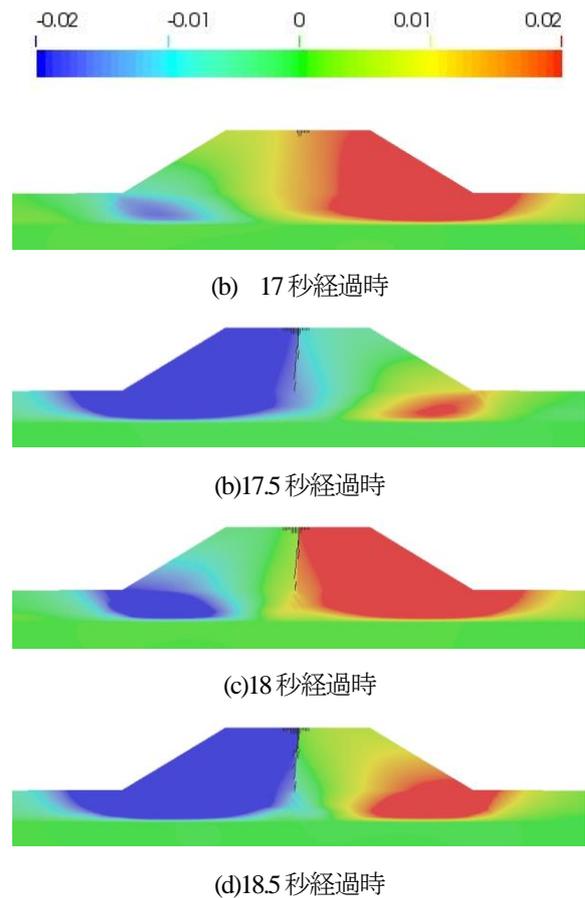


図-7 ケース1の水平変位 (m) の分布

盛土内部の変位は、ケース1では主に盛土自体が入力加速度に対応して振動することによって生じたが、ケース2では主に下部地盤が液状化・側方流動することによって生じたと考えられる。盛土内部の変位の生じ方の違いにより、有効拘束圧が減少して引張応力が生じる位置が異なり、引張クラックの発生位置が異なると考えられる。クラックの生じ方は盛土の固有周波数と入力周波数との関係、および下部地盤における液状化の発生の有無により決まると考えられる。

(3) ケース3 (高さ 8m, 入力周波数 1Hz)

図-10及び図-11に高さ 8m, 入力周波数 1Hz のケースの有効拘束圧と水平変位の分布図を示す。13.363秒より法面において引張破壊によるクラックが発生し始めた。14.4秒頃より法面から内部へクラックが進展する。15秒頃よりケース2と同様に計算が不安定になり、16.222秒に解析が終了した。

盛土内部の変位の境界の位置が入力周波数 1Hz に対応して振動するのに伴い、有効拘束圧の小さい位置も振動している。ケース3はケース1と同様に、主に盛土自体の振動による変位によって引張クラックが発生したと

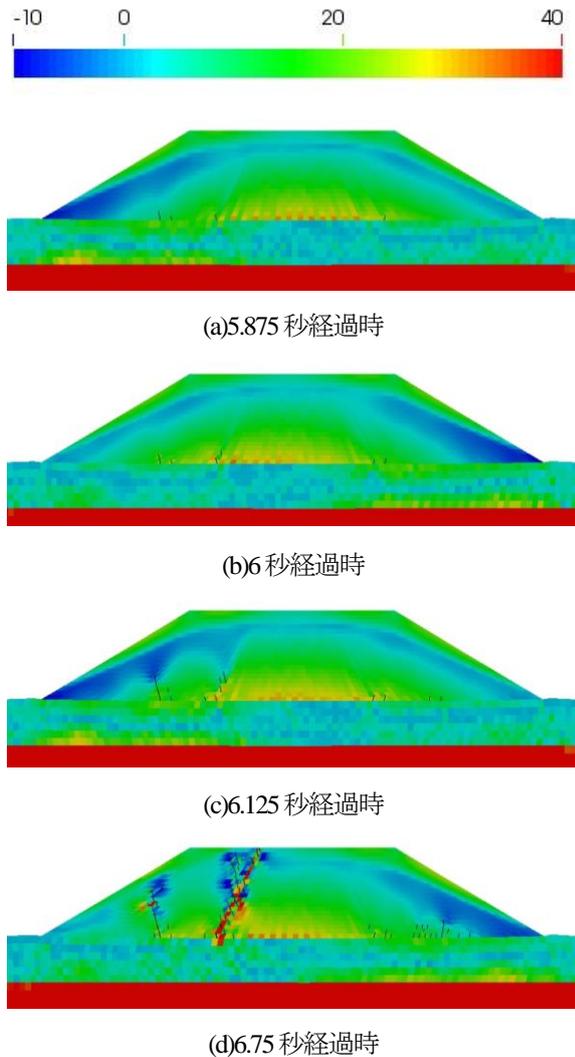


図-8 ケース 2の有効拘束圧 (kPa) の分布

考えられる。

ケース 1 では天端においてクラックが発生したのに対し、ケース 3 では法面においてクラックが発生した。このクラック発生位置の違い、すなわち変位の境界の位置の違いは、盛土の固有周波数の違いによって生じたと考えられる。

(4) ケース 4 (高さ 8m, 入力周波数 4Hz)

図-12 及び図-13 に高さ 8m, 入力周波数 4Hz のケースの有効拘束圧と水平変位の分布図を示す。図-13(d)10.25 秒以降、水平変位のスケールを変化して示していることに注意されたい。

5.072 秒より法面において引張破壊によるクラックが生じ始めた。6.896 秒より天端においても引張クラックが発生し始めた。7.232 秒以降はクラックが発生せず、9.605 秒より盛土底部法尻付近において引張破壊が発生し始めた。10.33 秒頃より盛土底部から法面に向かってクラックが進展した。10.9 秒頃に盛土底部中央付近にお

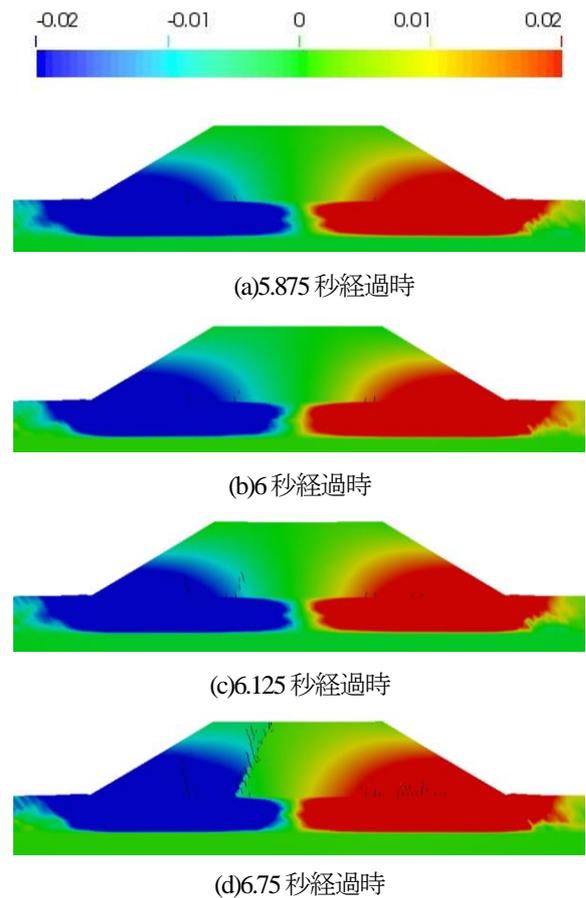


図-9 ケース 2の水平変位 (m) の分布

いても引張破壊によるクラックが発生し始め、天端に向かって進展し、11.75 秒頃には天端に到達したが、ケース 2 及びケース 3 と同様に計算が不安定になり始め、12.201 秒に解析が終了した。

7.232 秒までは、法面及び天端における変位の境界の位置において引張応力が生じクラックが発生した。これらのクラックはケース 1 及びケース 3 と同様に、主に盛土自体の振動による変位によって生じたと考えられる。発生位置が異なるのは盛土の固有周波数及び入力周波数の違いによるものと考えられる。

ケース 2 と比較して地盤 1 の有効拘束圧の減少が確認されないのは、盛土の荷重によって有効拘束圧が大きいためと考えられる。また、盛土の荷重によって液状化地盤の固有周波数がケース 2 とは変化したためとも考えられる。ただし、ケース 3 と比較するとケース 4 の方が地盤 1 の有効拘束圧の減少が確認できるが、ケース 1 とケース 2 の比較と同様に、入力周波数 4Hz の方が単位時間あたりの繰り返し回数が多いため早く液状化に至ったと考えられる。

9.605 秒以降は底部においてクラックが生じたが、これはケース 2 と同様に、液状化地盤の側方流動による残留変位が主体となって生じたと考えられる。7.232 秒ま

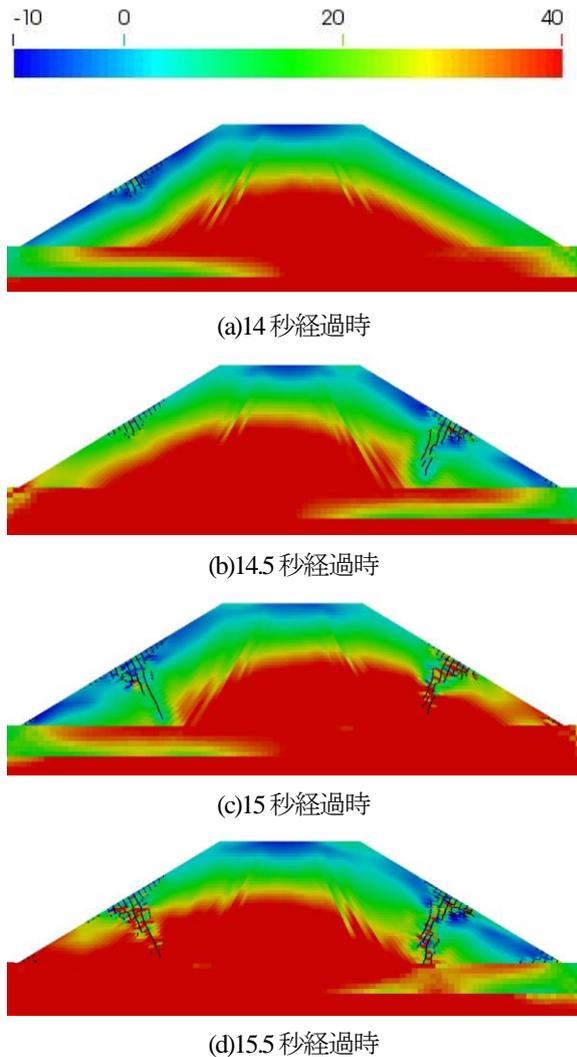


図-10 ケース 3 の有効拘束圧 (kPa) の分布

でに生じたクラックにより盛土の振動特性が変化し、盛土自体の振動による影響が相対的に小さくなったと考えられる。また、下部地盤の液状化が進行し側方流動による変位の影響が大きくなったことも一因として考えられる。

5. まとめ

本研究では、引張破壊とせん断破壊の双方を考慮した砂の弾塑性モデルを X-FEM に導入した数値解析手法を用いて、液状化地盤上の盛土を対象に動的解析を行った。盛土高さと入力周波数の違いによって、引張破壊による開口クラックの生じる位置が異なることを示した。

開口クラックが生じるメカニズムの解明には、盛土内部において変位が生じるメカニズムを解明することが求められる。盛土と液状化地盤の固有周波数と入力周波数の関係によって、盛土内部に生じる動的な変位が開口クラックを生じさせる場合と、液状化地盤の側方流動に付

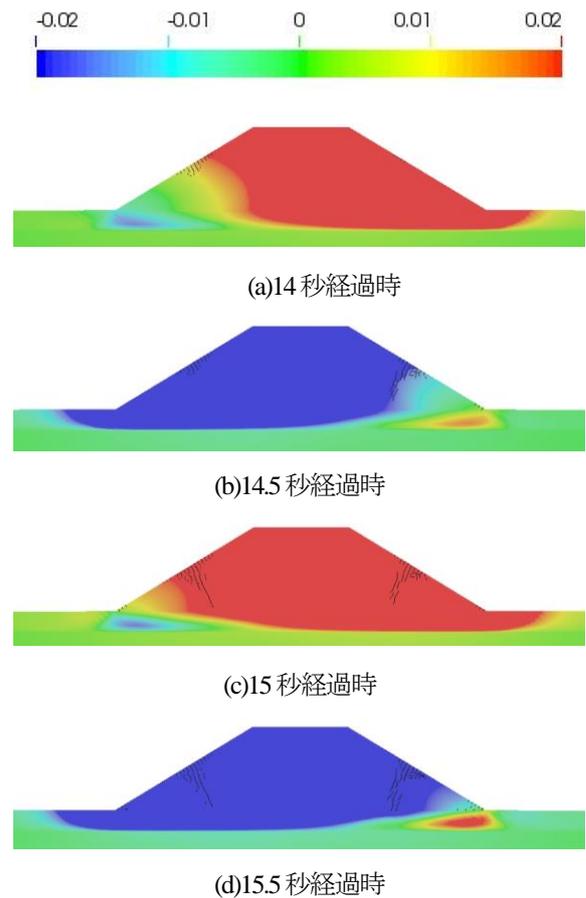


図-11 ケース 3 の水平変位 (m) の分布

随して生じる変位が開口クラックを生じさせる場合の、2種類のメカニズムが存在する可能性が示唆された。

本研究では限られたケースにおいて検討したが、盛土と地盤の固有周波数、液状化の発生のタイミングに着目してさらなる分析が必要である。

参考文献

- 1) Newmark, N. M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol.15, pp.139-159, 1965.
- 2) 国土交通省東北地方整備局北上川等堤防復旧技術検討会：北上川等堤防復旧技術検討会報告書，2011.
- 3) 中田光彦，澤田純男，後藤浩之，吉田望，飛田善雄：引張破壊を考慮した液状化地盤上における盛土の地震時破壊性状に関する研究，第 47 回地盤工学研究発表会概要集，2012.
- 4) 池田貴昭，後藤浩之，澤田純男：地震時盛土の引張破壊を考慮した拡張有限要素法によるクラック進展解析，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.72, No.2 (応用力学論文集 Vol.19)，pp.I_227-I_235, 2016.
- 5) 新保泰輝，矢富盟祥：亀裂進展解析を用いた河川堤防盛土の分離破壊に関する研究，第 26 回中部地盤工学シンポジウム概要集，2014.
- 6) X. Wang, Peng, Y., Jialin, Y., Yuzhen, Y. and He, L.: Simulated crack and slip plane propagation in soil slopes

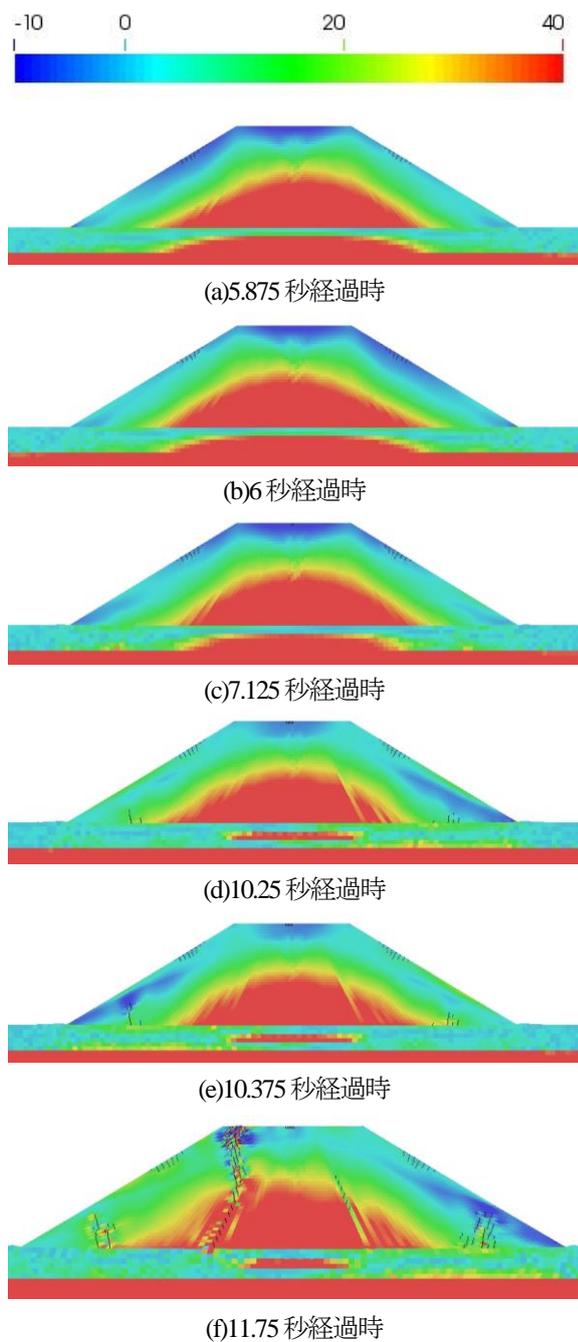


図-12 ケース4の有効拘束圧 (kPa) の分布

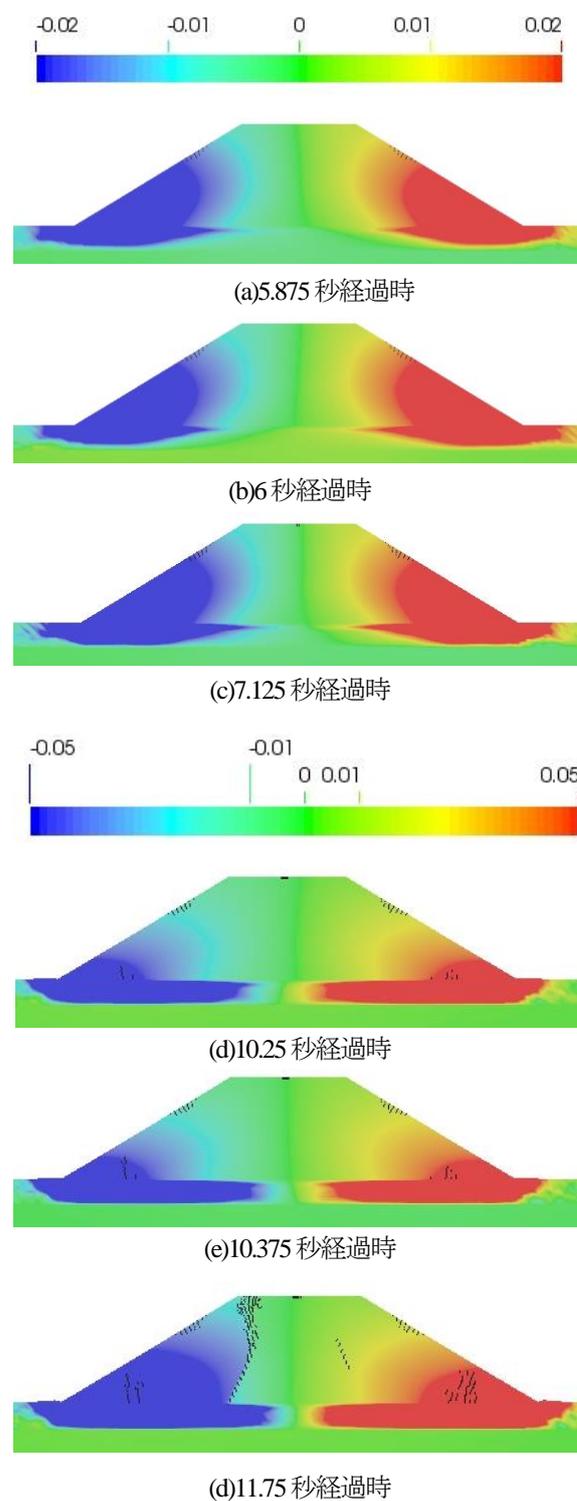


図-13 ケース4の水平変位 (m) の分布

with embedded discontinuities using XFEM, *International Journal of Geomechanics*, Vol.18, No.12, 2018.

- 7) Zi, G. and Belytschko, T.: New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.57, pp.2221-2240, 2003.
- 8) Dugdale, D. S.: Yielding of steel sheets containing silts, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.8, pp.100-104, 1960
- 9) Barenblatt, G. I.: The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture, *Advances in Applied Mechanics*, Vol.7, pp.55-129, 1962.
- 10) Li, X. and Dafalias, T. F.: Dilatancy for cohesionless soils, *Geotechnique*, Vol.50, pp.449-460, 2000.

- 11) Ortiz, M.: A constitutive theory for the inelastic behavior of concrete, *Mech. Mater.*, Vol.4, pp.67-93, 1985.
- 12) Li, X. S.: A sand model with state-dependent dilatancy, *Geotechnique*, Vol.52, No.3, pp.173-186, 2002.

STUDY ON GENERATION MECHANISM OF OPEN CRACKS IN THE SOIL EMBANKMENT UNDERLYING LIQUEFIABLE SOIL GROUND

Yomi HARADA, Hiroyuki GOTO and Sumio SAWADA

Current seismic design standards of soil embankments considers only circular slip caused by shear failure. However, many open cracks caused by tensile failures has been observed in soil embankments during the past earthquakes. Soil embankments need to be designed considering not only shear failure but also tensile failure. In this study, we performed numerical simulation of soil embankments underlying liquefiable soil ground. eX-tended finite element method (XFEM) incorporating the elasto-plastic model considering both shear and tensile failures is adopted in the numerical simulations. Two types of embankments with different heights are vibrated by two types of input motions with different frequencies. Open cracks occur from either surface or bottom of the embankment. The generation types correspond to the two types of mechanisms; dynamic displacement occurring inside the embankment causes the open crack, and permanent displacement accompanying the lateral flow causes the open crack, respectively.