-365

降雨による盛土の進行性崩壊に対する浸透-変形連成解析手法の適用

鉄道総合技術研究所正会員〇松丸 貴樹鉄道総合技術研究所(現北見工業大学)正会員川尻 峻三徳島大学大学院正会員渦岡 良介

1. はじめに

盛土は地震動や降雨の影響によって変状を生じることがあるが、両者の影響を同一の手法で評価できるならば大きな利点となる。著者らはこれまでに三相系多孔質体理論に基づく浸透-変形連成解析手法により、降雨や浸透水の影響を受ける不飽和盛土の地震時挙動を説明している¹⁾。本研究では同じ手法を用いて、降雨により変状が生じる盛土の進行性崩壊を対象とした解析を行い、手法の適用性と盛土に変状が生じる機構を説明することを試みた。

2. 解析手法

土骨格の構成式には不飽和土の地震時挙動を記述できる簡易な繰返し弾塑性構成式を用いた。具体的には,せん 断による降伏を考慮した相当応力比一定型の降伏関数,非線形移動硬化則²⁾,非関連流動則,Cam-Clay型の塑性ポ テンシャル関数を用いた。この構成式を基に,ダイレイタンシー係数がサクションの大きさに応じて変化できるよ う改良を行い¹⁾,また大きなひずみを表現できるよう塑性相当ひずみに応じて塑性剛性の低減も行っている³⁾。

基礎式は多孔質体理論に基づき,土骨格の変位 u^s,間隙水圧 p^w および間隙空気圧 p^aを未知数とする混合体のつりあい式と間隙水・間隙空気の連続式から成る⁴⁾。空間離散化には有限要素法を,時間積分には差分法を適用した。

3. 降雨散水で崩壊に至る盛土の散水実験の解析

(1)実験の概要⁵⁾ 盛土は水平地盤上に高さ 60cm,のり面勾配 1:1.5 の半断面模型として構築した。盛土構築には 稲城砂を用いている。降雨強度は,時間雨量 30mm/h を与えるが,盛土内での浸透が定常状態となったことを確認

した上で,散水開始から7.5時間後に時間雨量40mm/hとした。その後,盛土に進行的に変状が生じ,やがては崩壊に至り実験を終了している。実験結果は解析結果と併せて示す。

(2)解析条件 解析に用いた有限要素モデルを図1に示す。変位境界 条件として,下端は全節点固定,右端は水平方向のみ固定,鉛直ロー ラーとしている。水理境界条件は,盛土の天端とのり面で,実験に合 わせた降雨強度を流量境界として与えた。間隙空気に関する境界条件 は,盛土の天端とのり面で間隙空気圧がゼロとなる条件を与えた。

解析に用いた土骨格の構成式,および水分特性曲線のモデルパラメータは文献 ¹⁾を参照されたい。なお,水分特性曲線にはロジスティック関数モデル⁶⁾を用いた。 設定したパラメータを使って排気・排水条件下で行った稲城砂の三軸圧縮試験⁷⁾ のシミュレーション結果(軸ひずみと軸差応力の関係)を図2に示す。設定した 構成式のパラメータは,飽和状態の非排水繰返し三軸試験,ならびに非排気・非 排水条件の不飽和繰返し三軸試験を再現できるように定めているが,単調載荷試 験の挙動についても載荷初期を除いてある程度再現できることがわかる。

(3)解析結果および考察 実験および解析で得られた,各マノメーター位置での水 位および盛土のり肩での鉛直変位の経時変化を図3に示す。実験では,降雨散水 を開始してから盛土ののり先に近いマノメーターMa01から水位の上昇を開始し, 散水の継続とともに Ma2, Ma3 においても水位が上昇し,最終的にはのり先から 最も離れている Ma3 の水位が最大となる。解析によってもこの挙動を再現できて いる。しかしながら実験と比べると,解析での各マノメーター位置で水位が上昇



図1 解析に用いた有限要素モデル



キーワード 盛土,降雨,浸透-変形連成解析

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7261

を開始する時刻は50分程度遅く、水位の 上昇速度が大きくなっている違いが見ら れる。また、このことにより、盛土に変 状が生じる時刻(解析では相当ひずみが 急激に増加を開始する時刻)と鉛直変位 が急増する時刻が,実験と比べると解析 では早くなっている。水位上昇を開始す る時刻や上昇速度は,盛土材料の透水係

数や水分特性曲線のパラメータの設定に左右されるものと考えられる。 次に、実験における盛土変状の進展のスケッチを図4に、解析で得ら れた相当ひずみの進展状況を図5に示す。前述のように実験と解析では 盛土に変状が生じる時刻が異なっているため、ここでは変状開始からの 経過時間として整理した。実験では、のり先で盛土に変状が生じ、徐々 に盛土の深部へと進展していき,変状開始から60分経過後には盛土のり 面の上部にまで進展していった。解析では、のり先付近で大きな相当ひ ずみが生じ、その領域が盛土の深部に進展していく様子が表現されてお り、崩壊領域が盛土深部に進展していく挙動を再現できているといえる。

また、図1に示す要素 e184 および e148 での間隙水圧,平均骨格応力 減少比,相当応力比および相当ひずみの経時変化図を図6に示す。散水 の開始とともに間隙水圧が上昇を開始するが、平均骨格応力減少比の上 昇は直ちにではなく、間隙水圧が-4~-2kPa 程度となる 100~200 分を過 ぎたあたりからである。その後、450~500分の時点で間隙水圧が負から 正の値へと転じている。この時点までは、両要素ともに相当応力比や相 当ひずみに変動が生じていない。その後、のり先に近い要素 e184 では

500 分頃に、内部の el48 では 520 分頃に相当応力比が限 界状態の応力比 Mm=1.187 に到達するとともに、相当ひ ずみが急激に増加を始めている。このときの平均骨格応 力減少比は1には到達しておらず,骨格応力は幾分か残 存している。以上を踏まえると、間隙水圧の上昇による 骨格応力の減少の影響を受け,のり先に近い要素から相 当応力比が限界状態の応力比に到達することで、相当ひ ずみが増加を開始し、この領域が内部に拡大していくこ とで盛土の変状が進展していくものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、不飽和盛土の地震時挙動を記述できる三 相系多孔質体理論に基づく浸透-変形連成解析手法を、降雨による盛土の進行性崩壊に適用することを試みた。そ の結果、手法の妥当性を検証するとともに、盛土に変状が生じる機構を要素の挙動から説明することができた。

S.S.R.R.

Stress r

Deviatoric

参考文献 1) Matsumaru, T. and Uzuoka, R.: Three-phase coupled analysis of unsaturated embankment subjected to rainfall infiltration and seismic motion, Proceedings of Unsaturated Soils: Research & Applications, Sydney, 2014. (Accepted) 2) Armstrong, P.J. and Frederick. C.O.: A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect, Technical report C.E.G.B.Report RD/B/N731, Berkeley Nuclear Laboratories, 1966. 3) 古田竜一: 粘土及び砂からなる多層地盤の 動的挙動のモデル化とその応用, 岐阜大学博士論文, 2003. 4) Uzuoka, R. and Borja, R.I.: Dynamics of unsaturated poro-elastic solids at finite strain, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.36, pp.1535-1573, 2012. 5) 川尻峻三, 布川修, 伊藤賀章, 西田幹嗣, 松丸貴 樹,太田直之,杉山友康:水分挙動に着目した地震後の降雨による盛土崩壊メカニズムについて,第48回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1053-1054, 2013. 6) 杉井俊夫, 宇野尚雄: 新しい水分特性曲線モデル化について, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, pp.130-131, 1995. 7) 木口峰夫, 松 丸貴樹, 西村友良: サクション載荷履歴を与えた細粒分を含む砂質土の不飽和三軸圧縮試験, 第48回地盤工学研究発表会講演集, pp.857-858, 2013.









図 6 要素 e184 および e148 での各諸量の時刻歴