

熱海土石流災害の起点となった崩壊盛り土の力学特性と崩壊過程の検討

名城大学 学生会員 ○夏目将嗣

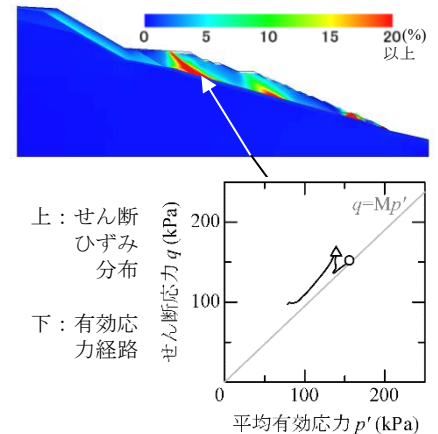
名城大学 正会員 小高猛司

静岡県

杉本敏彦, 西川 茂, 大野正敏

1. はじめに

2021年7月3日逢初川において数度の土石流が発生し、熱海市伊豆山地区に甚大な被害をもたらした^{1),2)}。土石流の発生源となる多量の盛り土が残置されていた逢初川源頭部は、埋め土前には周囲の沢より相対的に深い谷を形成し、地下水が集中しやすい地形であった^{1),3)}。そのため、7月1日から続いた降雨によって、源頭部の盛り土に多量の地下水が供給され、盛り土全体が崩壊したと考えられている^{1),3)}。図1は、逢初川土石流発生原因調査検討委員会で示された数値解析による盛り土崩壊の再現解析結果の一部である^{1),4)}。上図は盛り土崩壊時のせん断ひずみ分布であり、底部全体にわたるすべり面が形成されていることがわかる。また下図は、矢印で示す盛り土底部の降雨前からの有効応力経路であるが、盛り土構築過程で限界状態定数 M と同程度に高い応力比となり (○印)、降雨による地下水の流入により間隙水圧が上昇することで M よりもさらに高い応力比へと状態を移し (△印)、それ以降も地下水が流入することで間隙水圧が上昇すると、塑性体積膨張を伴う軟化現象が生じて、盛り土全体が崩壊に至ったことが示されている^{1),4)}。

図1 盛り土崩壊再現解析結果¹⁾

本報では、上記の数値解析で得られた低有効応力レベルにおける土の軟化挙動を検証するため、崩壊現場に残る盛り土から採取した土を用いて実施した吸水軟化試験⁵⁾をはじめとする室内試験の結果を示す^{1),4)}。

2. 室内試験の概要

試験試料は逢初川源頭部右岸側の盛り土が落ち残った箇所において、スコップで掘り起こして採取した黒色盛り土の地盤材料であり、図2にその粒度分布を示す。砂置換法による現場密度試験と非繰返し法の突固めによる締固め試験 (JISA 1210 A-b 法) を実施した結果 (図3)、現場の乾燥密度 $\rho_d = 1.09 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{\text{opt}} = 30.4\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}} = 1.37 \text{ g/cm}^3$ となり、現場の盛り土の締固め度は80%以下だったと推察された。この現場の乾燥密度を基に締め固めて作製した三軸供試体に対して、吸水軟化試験⁵⁾を実施した。

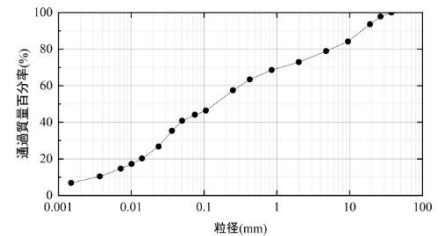


図2 盛り土試料の粒度分布

供試体は直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱形であり、9.5 mm 以上の礫を取り除いたせん断粒度調整試料を用いた。供試体作製時の乾燥密度は、圧密過程での体積圧縮を見越して $\rho_d = 0.92 \text{ g/cm}^3$ とした。この供試体を二重負圧法で飽和させた後、有効拘束圧 50, 100, 150 kPa で等方圧密を行い、非排水三軸圧縮試験 (CUB 試験) と吸水軟化試験を実施した。なお、有効拘束圧 100 kPa での等方圧密後の供試体の乾燥密度は $\rho_d = 1.19 \text{ g/cm}^3$ となり、ボーリングで採取された盛土深部 8~9 m の試料の乾燥密度 $\rho_d = 1.21 \text{ g/cm}^3$ に近い値である。

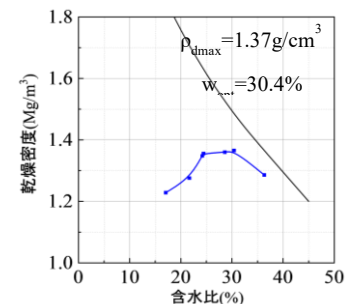


図3 締固め曲線

3. 試験結果

図4にCUB試験の結果を示す。有効応力経路より崩壊盛り土はゆる詰め土のせん断挙動を示しており、限界応力比 q/p' は 1.0 程度で強度の低い土であったことがわかる。

吸水軟化試験の結果を図5, 吸水軟化試験中の供試体の様子を写真1に示す. 今回の盛り土の崩壊の過程は, 降雨前の盛り土内での初期せん断が作用した状態から, 盛り土内への地下水流入に伴って間隙水圧が上昇したと考えられる. これを三軸試験装置内で模擬するために, 初期せん断が作用した状態のまま, 間隙水圧を徐々に上昇させていく吸水軟化試験を行った. 図6は今回の盛り土の崩壊過程を模擬したポンチ絵であり, 以下説明する吸水軟化試験の各段階が, 盛り土崩壊のどの過程にあたるかについて概念的に示した.

まず, 有効拘束圧 (100 kPa) をかけた状態で軸圧を増大させていくと, 軸差応力が①のところまで上昇していく. 軸差応力が①に達すると, その軸差応力を一定に保ちながら, すなわち, 初期のせん断応力を作用させたまま, 間隙水圧の増加に伴い横軸の平均有効応力が低下していく (②). やがて図5から得られる限界状態付近に到達する (③) と, その時点まではほとんど軸ひずみも体積膨張も発生していなかった供試体に急激に変化が現れて, 一気に土の崩壊が始まる. この状態が, 地下水流入によって, 盛り土がすべり破壊を始める状態となる. 土はこの状態に到達すると, それまで維持してきた骨格構造の急激な劣化が生じ始めるために, 土粒子間の空隙に容易に水を吸い込めるようになり, 軟化をしながら空隙内に水を取り込み続けることにより, 固体状の土が有効応力を消失した液状化した状態 (④) にまで変化する. その状態に達すると土は容易に流動化してしまう.

図5に示した吸水軟化試験の有効応力経路は, 数値解析によって得られた図1に示す盛り土底面のすべり面上の土の有効応力経路に相当するものであり, 両図が類似していることがわかる.

4. まとめ

崩壊現場から採取した試料を用いて実施した吸水軟化試験の結果, 限界状態に到達してから急激に軟化し始め, その後も吸水を伴い軟化し続け液状化することが示された. その有効応力経路は, 数値解析で示されたすべり面上の土の有効応力経路と類似していることから, 数値解析で予測された地下水流入による塑性体積膨張を伴う軟化現象による盛り土の崩壊メカニズムが, 実際の土による吸水軟化試験からも示された.

参考文献: 1) 逢初川土石流の発生原因調査検討委員会, 最終報告書, 2022. 2) 難波, 杉本, 西川, 大野: 2021年7月熱海土石流災害の概要—降雨状況, 地形状況, 土石流流下による伊豆山地区の被害状況等—, 地盤工学会誌, 71(3), 2023. 3) 難波, 杉本, 西川, 大野, 今泉, 沢田, 小高, 辻岡: 2021年7月熱海土石流災害における地下水流入状況から見た盛り土崩壊の誘因について—地盤調査, 水文調査, 等—, 地盤工学会誌, 71(3), 2023. 4) 吉川, 野田, 中野, 小高, 夏目, 難波: 2021年7月熱海土石流災害における盛り土崩壊メカニズムの解明—三相系弾塑性解析と吸水軟化試験—, 地盤工学会誌, 71(3), 2023. 5) Kubo, Kodaka, Lee, Ishihara, Nakayama: Shear strength evaluations of river embankment soils under low confinement pressure using water absorption softening test, Proc. of 16ARC, JPN-048, 2019.

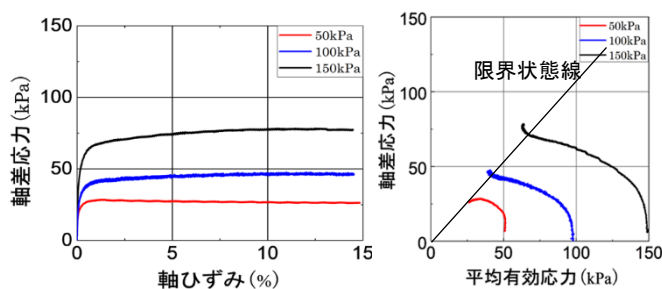


図4 CUB 試験結果

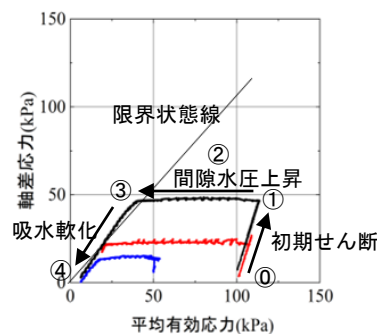


図5 吸水軟化試験の試験結果

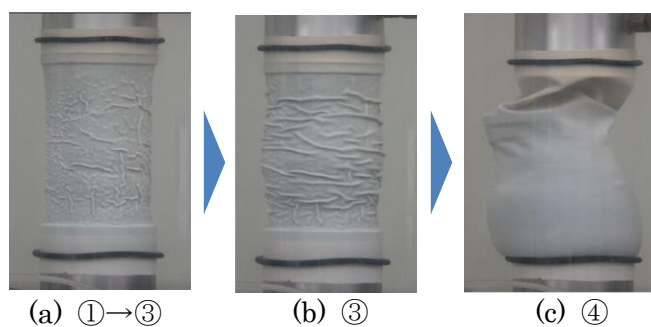


写真1 吸水軟化試験中の供試体の様子

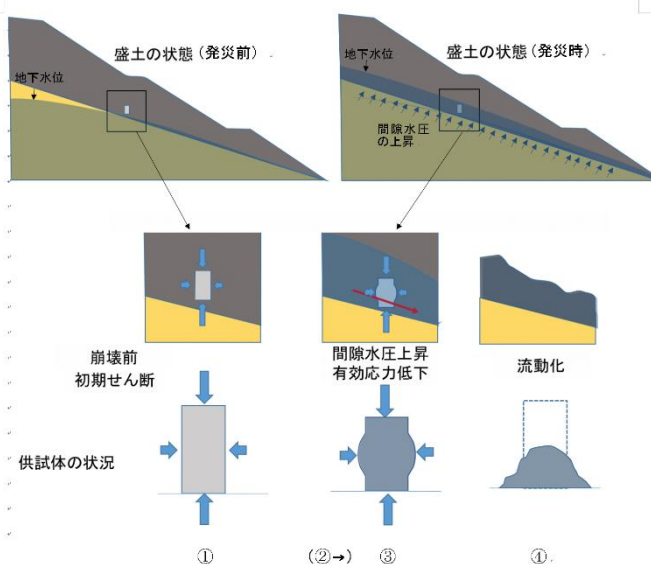


図6 地下水上昇に伴う盛り土の崩壊・流動化の概念図