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<sup>1),2)</sup>。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<sup>1),3)</sup>。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<sup>1),3)</sup>。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<sup>1),4)</sup>。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 
0
5
10
15
20(%)

以上

上: せん断 (vi)
200

小ボみ 分布
(vi)

方布
(vi)

方布
(vi)

方布
(vi)

方布
(vi)

小山
(vi)

ション
(vi)

小山
(vi)

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(O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(Δ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<sup>1),4)</sup>。

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<sup>5)</sup>をはじめとする室内試験の結果を示す<sup>1),4)</sup>。

## 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(JISA1210A-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  $w_{opt} = 30.4 \%$ ,最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.37 \text{ g/cm}^3$ 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 <sup>5)</sup>を実施した。

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 取り除いたせん頭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 負圧法で飽和化させた後、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  $\rho_d = 1.21$  g/cm<sup>3</sup>に近い値である。

## 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の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3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、土粒子間の間隙に容易に水を吸い込め るようになり,軟化をしながら間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



図6 地下水上昇に伴う盛り土の崩壊・流動化の概念図

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落の誘因について-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.