

水分状態を異にした不飽和砂の有効応力低下挙動

宇都宮大学 学生会員 ○中野碧
宇都宮大学 正会員 海野寿康, 吉直卓也

1. 研究背景と目的

2016 熊本地震や 2011 東日本大震災などの既往の地震地盤災害において自然斜面や盛土斜面が泥状になり崩壊や流下する流動性崩壊が広範囲にわたってみられ、多大な被害をもたらした。災害調査によってそれらの多くが表層崩壊であり、崩壊した地盤は不飽和土であったことが報告されている¹⁾。ただし、現状では不飽和土の流動メカニズムの未解明な点が多く、研究は進んでいない。

ここで、不飽和土の繰返しせん断挙動は土中の水分量だけでなく水分状態によって影響を受けること²⁾から、水分状態を異にした不飽和土の地震時の有効応力低下メカニズムを把握する必要がある。

本研究では AE 剤を添加し強制的に土中の水分状態を変化させた“きれいな砂”を用いて、単調載荷試験と繰返しせん断試験を行い、せん断変形挙動に対する水分状態の影響を調べた。

2. 試料の物理特性と使用した AE 剤の性質

実験では、豊浦砂(土粒子密度 $\rho_s = 2.643 \text{ g/cm}^3$, 最大間隙比 $e_{\max} = 0.977$, 最小間隙比 $e_{\min} = 0.605$)を用いた。また、水分状態を変化させるために使用した AE 剤は、BSAF 社の MasterAir303A と竹本油脂株式会社の AE200 である。どちらも JIS A 6204「コンクリート用化学混和材」AE 剤(I 種)に適合する薬剤である。両薬剤はあらかじめ蒸留水に対して 10%濃度で添加し、間隙水として用いた。

3. 試験結果

本研究で行った各試験の手法を図-1 に示す。また、本稿では各試験における試験ケースをシリーズ A: AE 剤無し, シリーズ B: MasterAir303A, シリーズ C: AE200 とし結果を整理する。

(1)飽和状態下における単調せん断挙動

単調載荷試験を行い、各シリーズの軸ひずみ-軸差応力関係および粘着力 c と内部摩擦角 ϕ をそれぞれ求め、薬剤の有無で比較した。この試験では、有効応力はテルツァーギの有効応力を用いて整理する。

図-2 に応力-ひずみ関係を示す。図より応力-ひずみ関係中の軌跡が各シリーズでほぼ一致している。こ

キーワード 不飽和土, 繰返しせん断, 水分状態, AE 剤

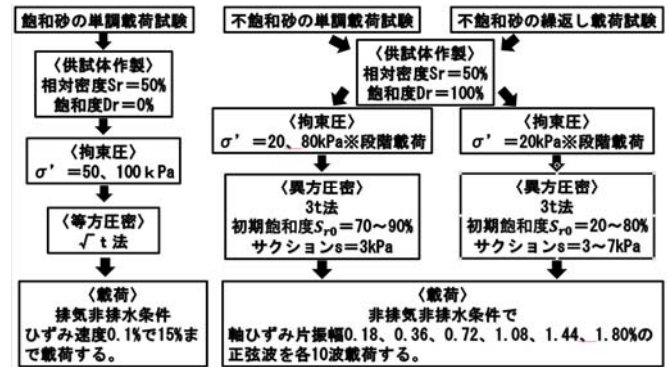


図-1 各試験の概要

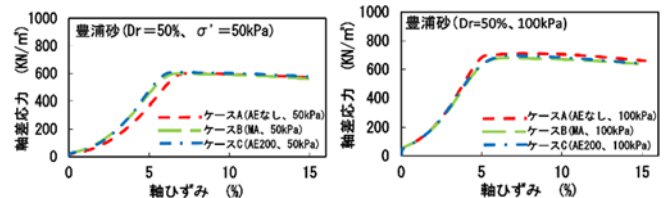


図-2 飽和砂の応力-ひずみ関係

(左: $\sigma' = 50 \text{ kPa}$, 右: $\sigma' = 100 \text{ kPa}$)

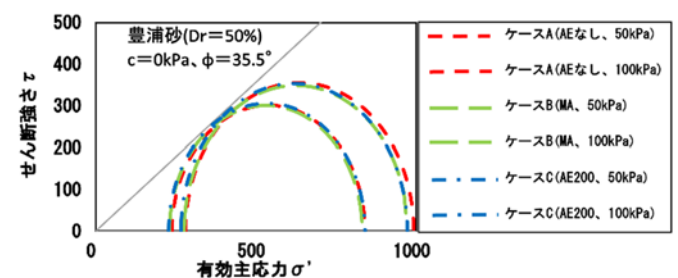


図-3 飽和砂のモール応力円

で、図-3 にひずみ 15%のモール応力円を示す。図より、薬剤の有無に関わらず c , ϕ の値が一致している。以上の結果より、飽和状態であれば、薬剤自体の強度への影響は微小であると推測される。

(2)不飽和状態下における単調せん断挙動

不飽和砂について(1)と同様の試験を行った。ここでは、Bishopの有効応力式(Bishop et al. 1963)³⁾を用いた。 u_a , u_w , および χ はそれぞれ空気圧, 間隙水圧および材料パラメータを表す。

$$\sigma'_m = (\sigma_m - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad [1]$$

パラメータ χ は $\chi = S_r/100$ とする。

図-4 に応力-ひずみ関係を示す。図より、拘束圧 20kPa については薬剤有りのケース B, ケース C が薬剤無しの場合 A より軸ひずみ 15% 時の強度が低い。しかし、拘束圧 80kPa については各ケースの差は小さい。よって、低い拘束圧の状態では薬剤添加により強度低下が生じる可能性もあるが、高い拘束圧の状態では影響が小さいようである。ただし、拘束圧が高い状態での薬剤添加による強度への影響は、十分な数の試験を行っていないため不明であり、今後の課題である。

(3) 不飽和状態下における繰返しせん断挙動

既往研究²⁾と同じく繰返しせん断試験を行い、同一飽和度ごとに有効応力経路および応力-ひずみ関係を薬剤の有無で比較する。図-5 にケース A, ケース C の初期飽和度 $S_{r0}=40\%$ の供試体について、繰返し载荷中の有効応力経路および応力-ひずみ関係を示した。図より、ほぼ等しい飽和度であるが薬剤の有無の異なるケース A とケース C では繰返しせん断変形挙動に差がある。有効応力経路より、ケース A に比べてケース C の方が繰返し载荷後の有効応力が低下している。また、応力-ひずみ関係より、ケース A よりケース C の方がひずみ履歴によって軟化挙動を示す。この結果から、繰返しせん断変形挙動は水分量(飽和度)だけでなく水分状態によって影響を受ける可能性が示唆される。この知見は既往の研究²⁾を裏付けるものである。

(4) 不飽和砂の初期飽和度と有効応力減少比の関係

繰返し载荷試験を行い、各シリーズにおける飽和度と有効応力減少比の関係を求め、薬剤の有無で比較した。その結果を図-6 に示す。せん断中の有効応力減少比は、式[2] によって定義される。

$$\text{有効応力減少比} = 1 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \quad [2]$$

図-6 より、初期飽和度 $S_{r0}=30\%$ で比較するとケース A は有効応力減少比が 0.6 程度であるのに対し、ケース C は 0.8 程度であり、液状化しやすい状態にある。すなわち、ケース A に比べてケース C は薬剤添加により有効応力減少比の値が高くなり、同じ载荷履歴であれば、液状化しやすいことがわかる。

4. 結論

以下が本研究で得られた結論である。

- (1) 飽和状態では、薬剤添加による単調せん断挙動への影響はみられなかった。
- (2) 不飽和状態では、拘束圧 20kPa においては薬剤添加による単調せん断挙動への影響がみられたが、拘束圧 80kPa においてはみられなかった。
- (3) 繰返し载荷履歴より、薬剤添加によって同一飽和度下にも関わらず繰返しせん断挙動に差がみられた。

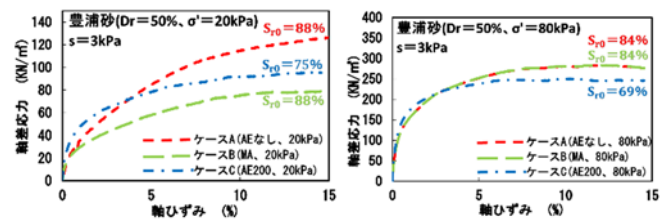
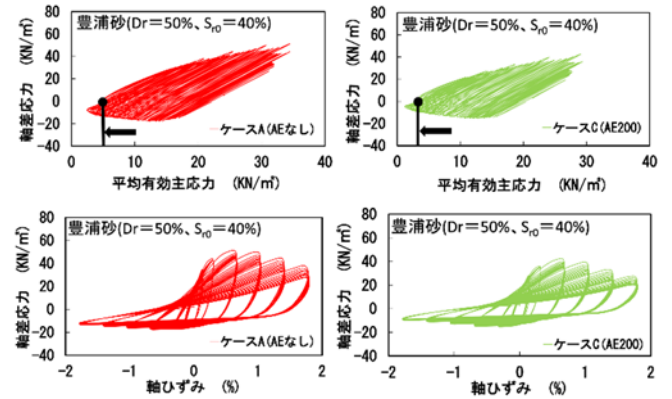


図-4 不飽和砂の応力-ひずみ関係

(左: $\sigma'_v=20\text{kPa}$, 右: $\sigma'_v=80\text{kPa}$)



(A) AE なし

(B) AE200 10% 添加

図-5 同一飽和度下での不飽和砂の有効応力経路および応力-ひずみ関係

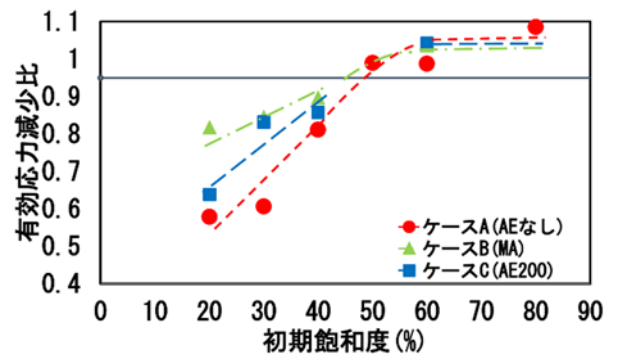


図-6 飽和度と有効応力減少比の関係

繰返しせん断挙動は水分量(飽和度)だけでなく水分状態によって影響を受ける可能性がある。

- (4) 水分状態を変えることで、同一飽和度下にもかかわらず不飽和砂の有効応力減少比の値は高くなり、液状化しやすい状態である。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 15H02263 の助成を受けて実施したものである。また、AE200 については竹本油脂株式会社の支援を受けた。

参考文献 1) 平成 28 年度熊本地震地盤災害調査報告書。公益社団法人地盤工学会 2) Toshiyasu Unno, Afifah Yasmin Binti Zakaria, and Taro Kumamoto: Liquefaction of unsaturated sandy soil considering non-plastic fine granular and the water state, I.C on PBD-III, No.151, BC, Canada, July, 2017. 3) Bishop, A.W. and Blight, G.E : Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils, Geotechnique, 13(3), 177-97, 1963.