

間隙中の空気の状態を変化させた不飽和砂のせん断変形挙動

宇都宮大学 地域デザイン科学部 正会員 ○海野寿康 吉直卓也

栃木県 正会員 中野 碧

1. はじめに

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・流下する流動性崩壊が多大な被害をもたらした。これら流動性崩壊は、表層土砂が泥化し大規模に流下する特徴を有するが、土砂は飽和度が100%未満の不飽和土であることが多く、崩壊や流下メカニズムについて未解明な点が多い¹⁾。不飽和土の力学挙動は、サクシオンにより間隙空気や間隙水の状態に応じて影響を受けることから、これら間隙中の水・空気の状態とせん断変形挙動の関係について検討する必要がある。

本研究では、間隙水・空気の状態とせん断変形挙動の相互関係を明らかにするためコンクリート施工時に用いられる空気連行剤(AE剤)を使用して強制的に土中の水分状態を変化、流動化させた不飽和砂に対し静的・繰返しせん断試験を実施しその挙動について比較した。

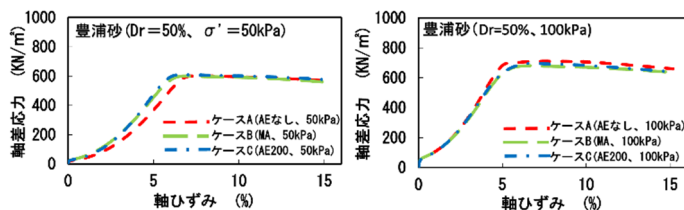
2. 試料の物理特性と AE 剤添加による間隙水状態

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 of AE200 である。どちらもアルキルエーテル系イオン界面活性剤であり 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。供試体は、初期状態として乾燥密度 $1.48 \sim 1.54 \text{ g/cm}^3$ (中密)、飽和度 ($S_r = 45 \sim 85\%$) になるようモールドに投入し作製した。AE 剤有の場合のみ、水 70cc に対して AE 剤を 6~7cc (10%) で添加している。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。

3. 飽和状態下における単調せん断挙動

薬剤自体のせん断挙動への影響を確認するため飽和試料に対する単調荷重試験を行い、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 を求めた。実験では、通常の飽和供試体への三軸圧縮試験同様に、蒸留脱気水および脱気 AE 剤添加水を供試体内に循環させたうえ、 $BP = 100 \text{ kPa}$ 荷重することで飽和度 $S_r = 100\%$ 、 B 値: 0.95 以上を確保している。図-1 に応力-ひずみ関

係を示す。試験より応力-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とを確認した。結果より土中に気泡が無い状態であれば薬剤自体の強度への影響は無いと推測される。



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

図-1 飽和砂の応力-ひずみ関係

4. 不飽和土のせん断試験の概要

試験に用いた三軸試験装置は、PTFE メンブレンフィルター ($AEV = 200 \text{ kPa}$) 付き下部ペデスタル、フッ素樹脂コーティングガラスフィルタと間隙空気圧計を上部キャップに装備した機材であり、供試体上部で間隙空気圧 u_a 、供試体下部で間隙水圧 u_w を測定している。また、二重セルを配置し体積変化について直接計測を行った。

試験は所定の乾燥密度に調整した土を蒸留水あるいは AE 剤 10% 濃度添加液を加水することで初期飽和度 $S_{r0} = 90\%$ に調整して初期条件とし、基底応力 ($\sigma_c - u_a$) を 20 kPa に保ち間隙空気圧を目標値まで段階的に 5 kPa ずつ荷重・圧密を実施 (3t 法)。等方応力下にて非排気・非排水条件で軸ひずみ片振幅 0.18, 0.36, 0.72, 1.08, 1.44, 1.80% の正弦波各 10 波を振幅数 $f = 0.005 \text{ Hz}$ でひずみ制御により荷重している。

5. せん断変形挙動について

繰返しせん断挙動を比較する前に不飽和土の単調荷重試験について観察する。図-2 に初期サクシオンが同一で異なる 2 つの基底応力 ($\sigma_c - u_a$) を与えた際の応力-ひずみ関係を示す。図より、拘束圧 20 kPa については薬剤有りのケース B、ケース C が薬剤無しのケース A より軸ひずみ 15% 時の強度が低い。しかし基底応力が 80 kPa では各ケースの差は小さい。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、今回は十分な実験本数を行っていないため、今後、別途検討を行う。

キーワード 不飽和砂, 水分状態, AE 剤

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部 TEL. 028-689-6217

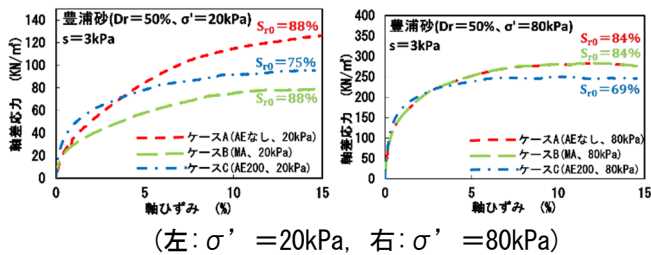


図-2 不飽和砂の応力-ひずみ関係

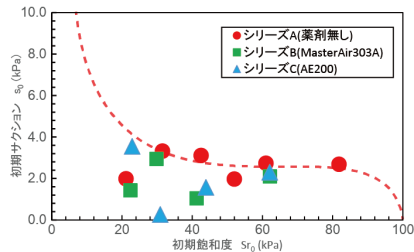


図-3 供試体の繰返しせん断前のサクシオンと飽和度

繰返しせん断試験を行った3シリーズにおける供試体の初期飽和度とサクシオンの関係を図-3に示す。豊浦砂自身が保水性が低く、せん断前の初期サクシオンは、4.0kPa以下の小さい値であるが、この低いサクシオンの状態で薬剤の有無を比較した場合、薬剤の添加により薬剤無と同程度の飽和度であっても若干だが初期のサクシオンは低下し、保水性が低下しているようである。

ここで有効応力として下記式[1]に基づく骨格応力 σ'_m で表記する。

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

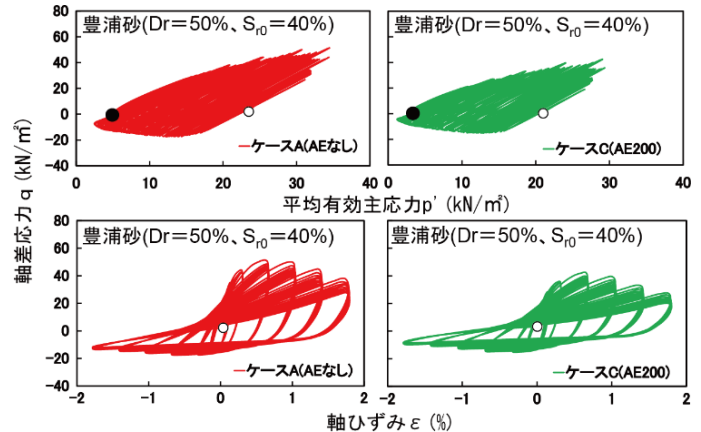
u_a , u_w , および χ は、それぞれ空気圧、間隙水圧および材料パラメータであり、パラメータ $\chi = S_r/100$ を用いる。さらに骨格応力より不飽和土の液状化を“有効応力がゼロに至った状態”と定義し飽和土同様に液状化の評価についてせん断後の有効応力減少比を式[2]によって定義する(液状化した場合、ほぼ0.95~1.00となる)。

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

シリーズ A とシリーズ C の代表的な供試体の有効応力経路と応力-ひずみ関係を図-4に示す。図より等しい飽和度にも関わらず AE 薬剤の有・無により繰返しせん断変形挙動には差が見られる。薬剤添加により繰返しひずみ軟化が顕著化し、有効応力も AE 剤添加により、より小さな値まで低下している。すなわち、同一水分量(同一飽和度)にも関わらず、間隙空気や水分状態によってせん断挙動が変化することが観察できる。

図-5 にシリーズ A, B, C の有効応力減少比とせん断前における飽和度についてまとめたグラフを示す。シリーズ A と B, C を比較することにより AE 剤の有・無に

よる液状化する飽和度範囲の影響をみると AE 剤添加により、より低い飽和度範囲まで有効応力減少比が高い値をとることが見てとれる。このことから液状化するように変化したことが伺えるが、この知見は著者らの既往実験でも観察されており²⁾、同一飽和度状況下においても、メニスカス水あるいはバルク水など間隙水や空気の状態によって繰返しせん断による有効応力低下挙動も大きく影響を受けると言えそうである。



a) AE 剤添加無し b) AE 剤添加有り (ケース C)

図-4 同一飽和度下の薬剤添加有・無のせん断挙動

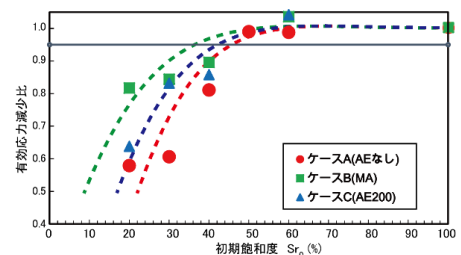


図-5 有効応力減少比と初期飽和度関係

5. まとめ

a. 低拘束圧下では、AE 剤を添加すると静的圧縮強度は低下するようであるが、ある程度高い拘束圧になると前述の挙動を示さない。

b. AE 剤により強制的に水分状態を変化させると、有効応力減少比が低い飽和度まで 0.95 以上となり、液状化する飽和度の範囲が若干だが広がる。

以上のことから、不飽和土の繰返しせん断変形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うける。

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す。また、AE200 については竹本油脂株式会社の支援を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献 1) T. UNNO, M. KAZAMA, N. SENTO and R.

UZUOKA :Change of moisture and suction properties of volcanic sand induced by shaking disturbance, Soils and Foundations, Vol.46, No.4, pp.519-528, 2006. 2) 海野寿康, 吉直卓也 他：間隙中の水分状態を変化させた不飽和土の繰返しせん断変形挙動, 土木学会第 72 回年次学術講演会第 C 部門, III-3, CD-ROM, 福岡, 2017.