急速および繰返し載荷条件での固結砂のリングせん断挙動

山口大学大学院 国 鈴木素之

JR西日本コンサルタンツ 正 藤井公博

山口大学大学院 学〇高原宏吏 学 遠藤了

1.はじめに 中越地震においては、砂質泥岩斜面で地すべりが発生し、甚大な被害が生じた.この地震により、砂質土斜面が地震動に対して脆弱であることが判明した.しかし、砂質泥岩や砂岩のような弱く固結した土の繰返しせん断強度や大変形状態に至るまでのせん断挙動は必ずしも十分に明らかにされていない.本研究では、固結した砂が地震動によって固結力(以下、セメンテーション)を喪失し、著しく強度低下して、余震によって大規模な崩壊に至ったと考え、固結した土の動的せん断強度特性を解明することを目的としている.そこで、豊浦標準砂にベントナイトを少量添加して物性を調整した砂(以下、非固結豊浦調整砂)とそれにセメント系固化材を少量添加してセメンテーションを再生した砂(以下、固結豊浦調整砂)に対して、せん断速度を 0.2~20mm/min の範囲で変化させる圧密・定圧リングせん断試験を実施した.また、定体積条件での応力制御方式の繰返しせん断が可能なリングせん断試験装置を用いて、同砂試料に対して繰返しリングせん断試験を実施した.本文では、これらの試験結果に基づいて、固結した砂のせん断強さに及ぼすせん断速度の影響ならびに大変形に至るまでの繰返しせん断挙動について考察する.

 試料および供試体 豊浦標準砂の物理特性は $\rho_s=2.639 \text{g/cm}^3$, $U_c=2.1$, $U_c'=2.1$ で, 試料としては 0.85mm ふるい通過分を用いた.供試体寸法は内径 6cm, 外径 10cm, 高さ 2cm の環状であり, せん断は供 試体底面から高さ1cmで行われる.非固結豊浦調整砂 の調製は豊浦標準砂,助材,蒸留水をそれぞれ 75.6%, 5.7%, 18.7%の質量比で撹拌混合し、予圧密法により 直径 15cm の再構成試料を作製し、トリミング法で同 試料から供試体を切り出した.また,固結豊浦調整砂 の調製は豊浦標準砂、助材、安定材、蒸留水をそれぞ れ 73.7%, 5.6%, 2%, 18.7%の質量比で撹拌混合し, CBR 試験用モールドを用いて直径 15cm, 高さ 4cm の 再構成試料を作製し,トリミング法で同試料から供試 体を切り出した. なお, 安定材には一般軟弱土用セメ ント系固化材(以下,固化材),助材にはベントナイ ト ($\rho_s=2.716 \text{g/cm}^3$, $w_L=479\%$, $w_P=37\%$)を用いた.

<u>3. 固結砂の急速リングせん断特性</u>

3.1 試験方法と試験条件 通常のリングせん断試験装 置を用いた.供試体を所定の圧密応力 σ_c で 60min間圧 密した後,上下部リングの隙間を設定し,せん断速度 $\delta=0.2mm/min(0.005rad/min)$ で定圧せん断を開始し た.試験では垂直応力 $\sigma_N = 294 \rightarrow 196 \rightarrow 98kPa$ のように σ_N を段階的に減少させ,最終段階の $\sigma_N = 98kPa$ の下で $\delta=0.2 \sim 20mm/min$ の範囲で δ を段階的に増加させた. なお,供試体の過圧密比 0CR は 1,水浸条件とした.

3.2 試験結果と考察 図-1 に固結豊浦調整砂の応力 比τ/σ_Nとせん断変位δ(せん断変位角θ)の関係を示す.



 $\sigma_N = 98$ kPaの下で達した定常状態においてδを 0.2mm/min から 20mm/min まで段階的に変化させているが, τ/σ_N は定常状態に達したにも関わらず一旦増加し, せん断速度の増加に伴って徐々に減少する過程がわかる. こ れは σ_N の減少に伴ってせん断層厚が広がり, セメンテーションの残存した部分が新規にせん断されたため と考えられる. 図-2には, 定常状態応力比(τ/σ_N)_{ss}と対数表示の δ の関係を示している. 非固結豊浦調整砂 の(τ/σ_N)_{ss}は log δ の変化に関わらず一定であった. また, 固結豊浦調整砂の(τ/σ_N)_{ss}は log δ の増加に伴い直 線的に低下し, 最終的に非固結豊浦調整砂の(τ/σ_N)_{ss}の値に近づいている. これは, せん断速度の増加に伴 ってせん断層のセメンテーションが消失していったためと考えられる.

4. 固結砂の繰返しリングせん断特性

4.1 試験装置 本装置は既設のリングせん断試験装置,空圧サーボコントローラー(周波数 f=0.001~ 9.9Hz),ベロフラムシリンダー2基(軸可動範囲±75mm),定体積コントロール装置,動ひずみデータロ ガー,データ記録用パソコンから構成される.垂直荷重,せん断荷重,リング周面摩擦力,垂直変位,せん 断変位が計測される.繰返し載荷は,2基のベロフラムシリンダーに静圧が供給された状態で,空圧サーボ 弁を通じて,片方のベロフラムシリンダーに動圧が供給されることにより行われる.

4.2 試験手順と試験条件 前述 と同様に供試体を 60min 間圧密 した後,垂直圧負荷を手動から 自動制御に切替え,垂直圧の定 体積条件制御,繰返し載荷を順 次開始した.試験はσ_N=98~ 294kPa, f=0.5Hzの下で繰返しせ ん断荷重を変えた.なお,供試 体は 0CR=1,水浸条件とした.

4.3 試験結果と考察 図-3(a)お よび(b)にそれぞれ初期垂直応力 **σ**_{N0}=98kPa の場合における非固結 および固結豊浦調整砂のσ_N, せ ん断応力τ, 垂直変位 v およびδ の時刻歴を示す. (a)の非固結豊 浦調整砂の場合, せん断の進行 に伴う供試体の収縮挙動に対し て定体積条件を保つようにσ_Nは 漸次減少し、最終的に一定にな っている.これと同時にτは徐々 に増加し、負の値の領域(供試 体が回転軸に対して時計回りに せん断される方向)に偏ってい るが、その後減少しほぼ一様に 繰返し載荷される状況になる. 一方, せん断が進むにつれて, δ は徐々に増加・累積し、vも増加 して定体積条件を保つことがで きなくなる.この理由として上



下部リングの隙間から試料の相当量の漏れが考えられる.(b)の固結豊浦調整砂の場合,繰返し載荷により 生じるτは、せん断過程を通じて、非固結豊浦調整砂に比べて大きく、セメンテーションの効果による繰返 しせん断強さの増加がみられる.また、非固結豊浦調整砂に比べて、vは低い値に制御され、δの累積量も 小さい.図-4(a),(b)にそれぞれ両試料のτとσ_Nの関係を示す.なお、各図中に示す強度線は別途実施した 圧密定圧リングせん断試験から求めたものである.定常状態の粘着力 c_{ss}は、非固結豊浦調整砂では c_{ss}=0kPa、固結豊浦調整砂では c_{ss}=18.5kPa であり、セメンテーション効果が現れている.また、定常状態 の内部摩擦角φ ssはほぼ同じであった.(a)の非固結豊浦調整砂の場合、σ_{N0}=294kPa を除いて、応力経路は、 τが正あるいは負の領域の強度線に達して破壊に到っている.(b)の固結豊浦調整砂の場合も、応力経路は非 固結豊浦調整砂と同様に最終的に強度線に達している.しかし、あるケースの応力経路は強度線に達してい なかった.この理由として、セメンテーションが一挙に失われたため、それに伴って下位に転移した強度線 にせん断面の応力状態が達して、せん断破壊した可能性が考えられる.

5. まとめ 1) 固結した砂の定常状態応力比はせん断速度の段階的な増加に伴い減少し、最終的に固結のない 砂の値に近づく.2) 非固結および固結砂の非排水繰返しせん断時の応力経路は、同一試料に対して別途実施 した圧密定圧リングせん断試験から得られた定常状態せん断強度線に達して繰返しせん断破壊が生じた. 謝辞:本研究は科研費・基盤研究(C)(課題番号:20560464,代表者:鈴木素之)の助成を受けた.ここに記 して、関係各位に謝意を表す.