

Ⅲ - 152

繰返し非排水せん断による砂の変形特性と降伏曲面の変化

神戸大学大学院 学生員 白川和靖 神戸大学工学部 正会員 田中泰雄
 大阪府 久保勝俊 神戸大学大学院 学生員 中井博之

1. はじめに 砂の液状化現象についての研究は数多く行われているが、繰返し非排水せん断を受けた砂の弾性・塑性領域（降伏特性）がどのように変化するかについての研究は少ないようである。これまで、砂の降伏特性の検討にアコースティック・エミッション（AE）計測を利用して、非排水条件で種々のせん断履歴を受けた砂の降伏曲面を求めており、繰返し非排水せん断履歴を受けると降伏曲面は徐々に縮小していくことが分かっている¹⁾。本研究では、これまでの研究をさらに進めて、砂が繰返し非排水せん断履歴を受けて液状化に至る過程での、降伏曲面の形状変化や変形特性について検討した。

2. 実験方法 実験試料には気乾状態の相馬砂を用いた。平均粒径は0.262、均等係数は2.036、比重は2.637であった。使用した三軸試験装置はペダスタル内部にAEセンサーが設置されており、これによって供試体内で発生したAEを計測する。微小変形の測定には高感度の非接触変位計、体積変化の測定には高精度の電子天秤を使用した。その他の応力や変位の測定、AE計測方法については文献²⁾を参照されたい。

供試体は直径50mm、高さ105mmで相対密度が約45～50%になるよう作製した。供試体に炭酸ガスを通した後、脱気水を透過し、1.0kgf/cm²の背圧を与えて飽和を行った。供試体は $p' = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ まで等方圧密し、1.5時間放置する。その後、 $q = \pm 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の応力振幅で、図-1に示す3種類の繰返し非排水せん断履歴を与えた。(1)せん断履歴A：等方圧密後に5サイクルの繰返し非排水せん断履歴を与えた。せん断履歴後の応力状態は図中の点Aで示される。(2)せん断履歴B：点Aからさらに繰返し非排水荷重を与え、伸張側で軟化挙動を示すような応力状態である図中の点Bのようなせん断履歴を与えた。(3)せん断履歴C：砂が軟化した後に変相線を越えた、図中の点Cの応力状態になるようなせん断履歴を与えた。せん断履歴後、供試体は排水条件で所定の応力状態まで除荷し、平均主応力 p' 一定条件の排水圧縮・伸張せん断試験を行った。

3. 実験結果及び考察 図-2及び図-3は、せん断履歴を受けた砂の p' 一定せん断試験中のAE計測結果の一例である。両図は、せん断履歴Bを与えた供試体の拘束圧 $p' = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ における圧縮せん断試験結果である。図から、せん断開始直後はAEは発生することなく軸ひずみが生じ

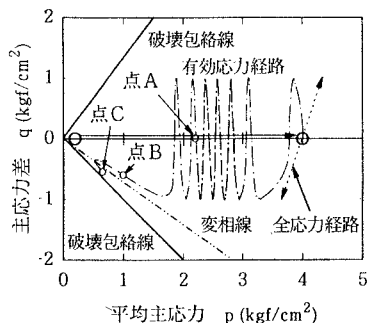


図-1 応力履歴経路

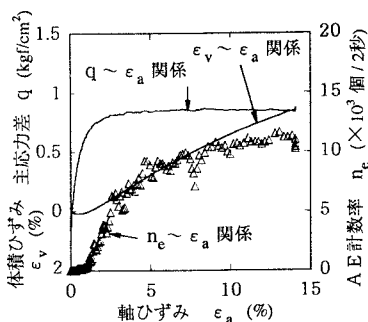


図-2 せん断試験結果例（せん断履歴B）
 ($p' = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ：圧縮)

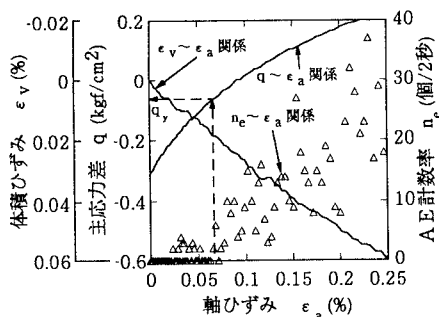


図-3 微小ひずみ部分（せん断履歴B）
 ($p' = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ：圧縮)

ることが分かる。しかし、ある応力に達するとAEは発生し始め、その後急増する。AEは塑性変形に伴って発生することから、AEの急増点に対応する主応力差 q_v は降伏応力と考えられる。他のせん断試験についても同様に降伏応力を決定することができた。

各せん断履歴を受けた供試体について降伏応力を求め、 $p'-q$ 平面上に降伏曲面を描いたものが図-4である。図から、せん断履歴Aを受けた砂の降伏曲面は p' 軸に関してほぼ対称的な形になることが分かる。しかし、供試体が軟化を示すような応力状態に達するせん断履歴Bでは弾性領域は大幅に縮小し、降伏曲面はせん断履歴を受けた方向に移動する。そして、変相線を越えるようなせん断履歴Cを受けると弾性領域は更に縮小し、ほとんど存在しなくなるようである。

各せん断履歴を受けた砂の粒子構造の変化を検討するため、弾性領域内での変形特性を比較する。図-5は p' 一定排水圧縮試験におけるせん断初期の、供試体の鉛直ひずみと水平ひずみの関係を示したものである。図には等方圧密履歴のみを受けた供試体の試験結果も示されている。図から、せん断履歴Aを受けることにより供試体には若干の異方性が見られ、鉛直ひずみ(ϵ_v)に比べて水平ひずみ(ϵ_h)を生じ易くなっている。しかし、伸張側に変形を受けたせん断履歴Bでは ϵ_h よりも ϵ_v の方が生じ易くなっており変形特性に大きな変化が見られる。さらに伸張側に変形したせん断履歴Cでは ϵ_v の方が生じ易くなり、異方性の程度はせん断履歴Bよりも大きい。次に降伏後の塑性領域における変形特性を比較する。図-6は各せん断履歴を受けた砂の、 p' 一定排水圧縮試験中の体積ひずみ増分($\Delta \epsilon_v$)とせん断ひずみ増分($\Delta \epsilon_s$)を求め、ひずみ増分ベクトルを示したものである。図中には、降伏曲面の位置も示している。図から、降伏後の塑性領域においてもせん断履歴の違いによって変形特性の違いが見られる。せん断履歴A→B→Cと履歴の程度が増加するに従ってせん断ひずみが生じやすくなり、剛性の低下が見られる。体積変化特性については圧縮性が増していくようである。しかし、応力状態が破壊に近づくと各供試体のひずみ増分ベクトルに大きな違いは見られなくなる。以上のように、砂では繰返し非排水せん断を受けると降伏曲面の大きさは徐々に減少する。そして、軟化挙動を示すような応力状態に達すると降伏曲面は急激に減少し、応力状態が変相線を越えると降伏曲面はほとんど存在しなくなるようである。また、各せん断履歴を受けた砂の変形特性は弾性及び塑性領域の両方で違いが見られ、各状態での粒子構造も大きく変化していると考えられる。

参考文献：1) 田中、平川、福田(1992)：第27回土質工学研究発表会、pp.461-462、2) 白川、田中、久保、吾郷(1994)：第29回土質工学研究発表会、pp.423-424

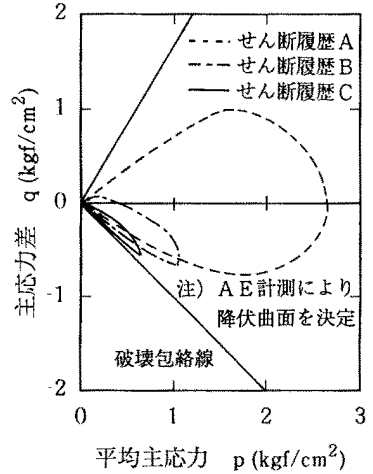


図-4 降伏曲面の比較

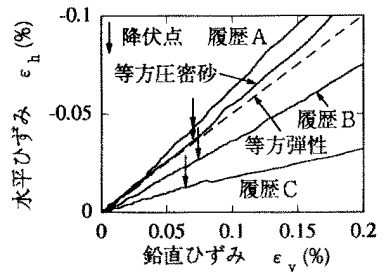


図-5 $\epsilon_v \sim \epsilon_h$ 関係 ($p'=0.5 \text{ kgf/cm}^2$: 圧縮)

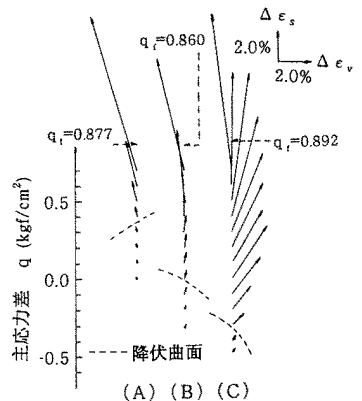


図-6 ひずみ増分ベクトル ($p'=0.5 \text{ kgf/cm}^2$: 圧縮)