

固化改良土（砕・転圧盛土工法）の非排水繰返し応力履歴下の強度特性

株式会社フジタ 技術センター 正会員 ○堀田崇由・北島 明
株式会社フジタ 建設本部 正会員 福島伸二

§1. まえがき

筆者らは築造年代の古いフィルダムやため池の堤体改修（補強や漏水防止）を目的として、貯水池内に堆積した底泥土を固化改良して所要の強度と遮水性を有する築堤土（砕・転圧土）として利用する砕・転圧盛土工法^{1) 2)}を開発し、これまでにフィルダム4カ所とため池9カ所に適用してきた。堤体改修は既設堤体の上流側を一部掘削除去して砕・転圧土ゾーンを腹付けるもので、新たに腹付けたゾーンを含む堤体全体の安定性を正確に評価するには砕・転圧土ゾーンと既設堤体の地震時強度特性の相違を認識しておく必要がある。著者らは既報³⁾において固化改良土である砕・転圧土と土質材料である堤体土の非排水繰返し応力下での強度特性の相違について室内試験による応力～ひずみ曲線と最大偏差応力の比較により調べた結果を報告した。本稿はこれに引き続くもので、非排水繰返し応力下での強度特性の相違を有効応力経路上で確認したものである。

§2. 非排水繰返し・単調二段階載荷型三軸試験

砕・転圧盛土工法によるフィルダムやため池の堤体改修は、図1に概念的に示すように、既設堤体の上流側の一部を掘削除去して、堤体安定に必要な強度と貯水機能を満足する遮水性をもつ砕・転圧土の傾斜ゾーンを腹付けるのが基本となる。砕・転圧土ゾーンを含む新堤体の安定計算は円弧すべり面を仮定し、すべり面全長に占める砕・転圧土ゾーンの割合が小さいことから、砕・転圧土ゾーンと既設堤体が一体として挙動する複合地盤として扱われる。

堤体内で砕・転圧土ゾーンや既設堤体の土要素が受ける地震時応力状態は、図1の上図に示すように、異方圧密条件下での繰返し三軸圧縮試験により再現し、地震による繰返し応力履歴が砕・転圧土、堤体土の強度特性に及ぼす影響を調べた。試験は供試体を地震前の応力状態として等方圧密応力 σ_c 、初期せん断応力相当の偏差応力 σ_s を加えた異方圧密状態 $K=\sigma_r/\sigma_a$ ($\sigma_r=\sigma_c+\sigma_s$, $\sigma_t=\sigma_c$) のもとで、非排水状態で地震力に相当する繰返し応力 $\pm\sigma_d$ を所定回数だけ加えた後に、非排水のまま一定変位速度で単調載荷によりせん断する、非排水繰返し・単調二段階載荷型三軸試験である³⁾。異方圧密時の応力レベルは平均主応力で $p_c=(\sigma_a+2\cdot\sigma_t)/3=\sigma_c+\sigma_s/3$ 、初期せん断応力である σ_s ($=(\sigma_a-\sigma_t)$) の大きさは $\sigma_c\cdot(1/K-1)$ 、繰返し応力の大きさは応力比 $R=\sigma_d/(2\cdot p_c)$ によりそれぞれ表示できる。なお、異方圧密状態は一定の $K=0.5$ に設定した。

§3. 砕・転圧土供試体と堤体土供試体の準備

試験には、既報³⁾と同様にNNカオリン粘土（細粒分含有率 $F_c \approx 100\%$ 、塑性指数 $I_p=19.2$ ）と、耐震補強を実施した大原ダムの既設堤体からの掘削土のうちの9mm以上粒径分を除いたカット粒度堤体土（最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.85\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt}=13.7\%$ ）を使用した。砕・転圧土試料は $w=100\%$ に含水調整したNNカオリン粘土に、 $w=w_{opt}$ に含水調整した堤体土を体積比1:1の割合で加え合せたモデル化底泥土（ $w \approx 60\%$ ）を使用した。モデル化底泥土の準備には各構成試料の湿潤密度は、NNカオリン粘土では $w=100\%$ 時の値 $\rho_M=1.45\text{g/cm}^3$ 、堤体土では締固め度 $D_c=95\%$ に相当する $\rho_E=D_c\cdot\rho_{dmax}\cdot(1+w_{opt}/100)=2.00\text{g/cm}^3$ をそれぞれ採用した。

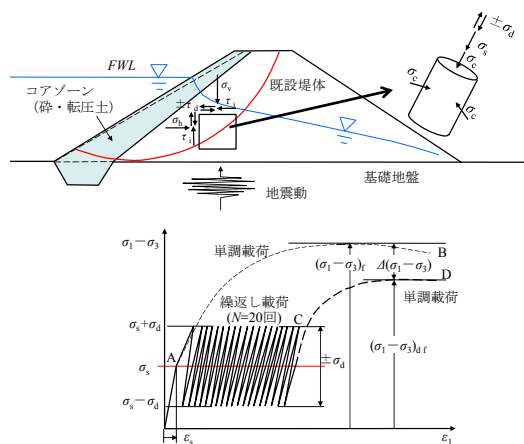


図1 堤体内の地震時挙動と繰返し三軸試験による再現

砕・転圧土供試体はモデル化底泥土をセメント系固化材（高有機質土用）により固化改良して、直径 $D=50\text{mm}$ 、高さ $H=100\text{mm}$ の三分割型モールドを用いて参考文献 1), 2) に規定された方法で準備した（固養生条件 $t=t_s+t_{cc}=3+7=10$ 日）。堤体土供試体はカット粒度堤体土の含水比を $w=w_{opt}$ に含水調整し、 $D/H=75\text{mm}/150\text{mm}$ の二分割型モールド内で試料を4層に分けて、1.25kgランマーにより締固め度 $D_c=95\%$ に突き固めて準備した。

§4. 砕・転圧土と堤体土の繰返し応力履歴の影響

図2は砕・転圧土の堤高15m超のフィルダムの堤体補強で一般的な目標強度レベルに近い $(c')_{cc}=120\text{kN/m}^2$ になるように固化した砕・転圧土供試体を、応力レベル $p_c=100\text{kN/m}^2$ 、 $K=0.5$ ($\sigma_c=75\text{kN/m}^2$, $\sigma_s=75\text{kN/m}^2$) で異方圧密した後に、非排水状態で繰返し応力履歴 $\sigma_d \approx \pm 60\text{kN/m}^2$ ($R=0.311$) を $N=20$ 回だけ加えてから、変位速度 $0.3\%/分$ で単調載荷した試験から得られた応力～ひずみ関係を示す。図中には比較のために同一条件で準備した砕・転圧土の繰返し応力履歴を加えない状態 ($R=0.0$) の応力～ひずみ関係も示してある。砕・転圧土は繰返し応力履歴を加えても過剰間隙水圧 u が累積増加しているものの、変位が累積しないことがわかる。図3は堤体土供試体を $p_c=100\text{kN/m}^2$ 、 $K=0.5$ で異方圧密

キーワード：固化改良土、繰返し応力履歴、強度、繰返し三軸

連絡先：〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 ☎ 046-250-7095

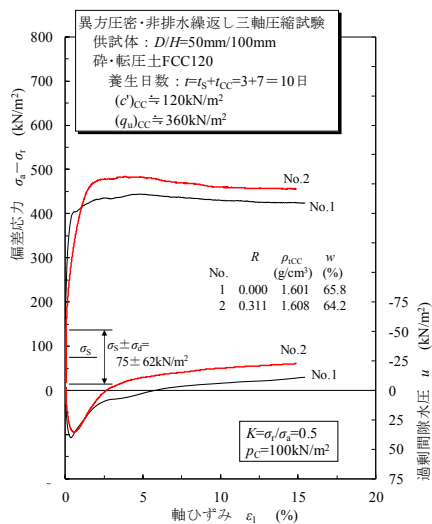


図2 砕・転圧土の非排水繰返し・単調二段階荷重試験

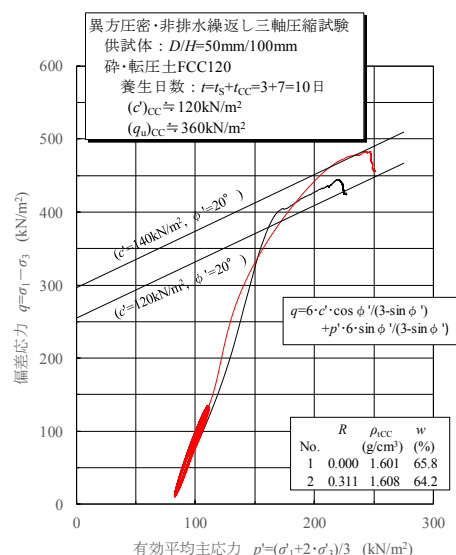


図4 砕・転圧土の非排水繰返し・単調荷重中の有効応力経路

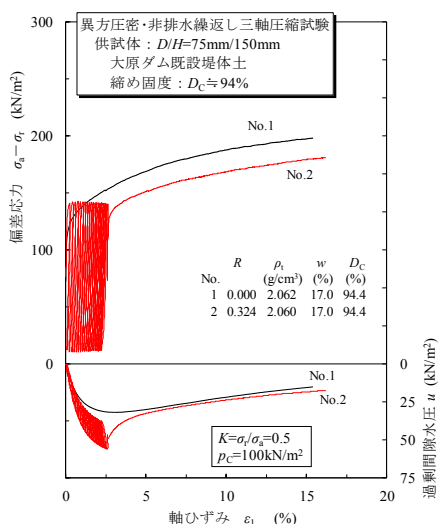


図3 堤体土の非排水繰返し・単調二段階荷重試験

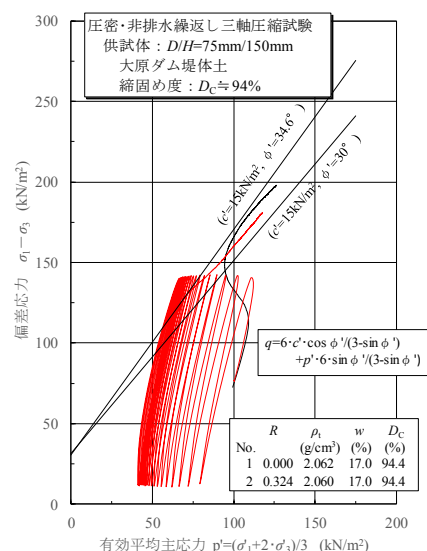


図5 堤体土の非排水繰返し・単調荷重中の有効応力経路

した後に、非排水状態で $\sigma_d = \pm 60\text{kN/m}^2$ ($R=0.324$) で繰返し応力履歴を $N=20$ 回だけ加えてから単調荷重した試験から得られた応力～ひずみ関係を示す。堤体土が繰返し応力により変位と u の累積増加がみられることがわかる。

図4は以上の砕・転圧土の試験結果を偏差応力 $q=(\sigma_v - \sigma_1)$ と有効平均主応力 $p'=(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ の応力面上の有効応力経路として示す。図中には同じ配合条件で準備した砕・転圧土の等方圧密・非排水三軸圧縮試験を実施して求めた強度パラメータ $c' \approx 120\text{kN/m}^2$, $\phi' \approx 20^\circ$ に近い $c'=120 \sim 140\text{kN/m}^2$, $\phi' \approx 20^\circ$ に相当する $q \sim p'$ 面上の破壊規準線

$$q = 6 \cdot c' \cdot \cos \phi' / (3 - \sin \phi') + p' \cdot 6 \cdot \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$$

を示してある。図5は堤体土に関する同様の関係を示す。図中の直線は別途実施した堤体土の等方圧密・非排水三軸圧縮試験による強度パラメータ $c'=15\text{kN/m}^2$, $\phi'=34.6^\circ$ に相当する上式による破壊規準線と ϕ' のみを $\phi'=30^\circ$ に相当する破壊規準線をそれぞれ示す。これらの有効応力経路図からも、砕・転圧土では非排水繰返し応力履歴による強度低下がみられないが、堤体土では強度低下があることがわかる。

§5. あとがき

固化改良土である砕・転圧土と、土質材料である堤体土の非排水繰返し応力下での強度特性について室内試験により調べたところ以下の結論が得られた。砕・転圧土は主に化学的に固結された粘着力に卓越しているため繰返し応力履歴による強度低下はほとんど認められないこと、堤体土では強度低下があることが有効応力経路上からもわかった。

【参考文献】1) (社)農業農村整備情報総合センター編：ため池改修工事の効率化，一砕・転圧盛土工法によるため池堤体改修，設計・施工・積算指針(案)，(社)農業農村整備情報総合センター，2006。2) (社)農業農村整備情報総合センター編：砕・転圧盛土工法によるフィルダム堤体改修，一堆積土・発生土を有効活用したフィルダムのリニューアル技術，設計・施工・積算指針(案)，(社)農業農村整備情報総合センター，2009。3) 堀田崇由，北島 明，福島伸二：固化改良土(砕・転圧盛土工法)の非排水繰返し応力履歴による強度低下特性，第53回地盤工学会研究発表会，2018。(投稿中)