

堤体改修用固化改良土（砕・転圧盛土工法）の引張強度を考慮した破壊規準の提案

株式会社フジタ 土木本部 フェロ-会員 〇福島伸二
株式会社フジタ 技術センター 正会員 北島 明

§ 1. まえがき

砕・転圧盛土工法¹⁾²⁾はフィルダムやため池の堤体改修（耐震補強や漏水防止）を、貯水池に堆積した底泥土、あるいはこれに工事に伴う掘削土を加えた混合泥土からなる原料泥土にセメント系固化材を加えた固化改良土を築堤土に利用して行うものである。固化改良土は、原料泥土にセメント系固化材を加えて固化しただけの初期固化土と、さらにこれを固化途上中に解砕して通常の土質材料と同様に一定層厚で敷き均してから締固め転圧した砕・転圧土の2種類を扱うが、築堤土には砕・転圧土として使用する。堤体改修は既設堤体の上流側の一部を掘削除去した部分に砕・転圧土ゾーンを腹付けるのが基本であるものの、既設堤体が強度的に優れていない場合には堤頂部を掘削除去して砕・転圧土ゾーンにより再築堤する方法がある³⁾。しかしながら、堤頂部は応力レベルの低い部位で地震時に引張亀裂が生じやすく、堤体安定性を合理的に評価するには砕・転圧土ゾーンの引張強度 σ_t も考慮する必要がある。そこで、本稿では砕・転圧土の引張強度を圧裂試験や一軸引張試験により調べ、 σ_t を考慮した破壊規準を提案するものである。

§ 2. 砕・転圧土の圧裂試験と一軸引張試験

砕・転圧土の強度は初期固化土を解砕・転圧するまでの初期固化日数 t_s ($t_s=3$ 日を標準)と、その後の日数 t_{cc} を合せた $t=t_s+t_{cc}$ に依存する¹⁾²⁾。目標強度は原料泥土に固化材を添加してから初期固化土の強度発現が緩やかになる $t=10$ 日目の強度により設定し、 $t=10$ 日相当の $t_{cc}=t-t_s=10-3=7$ 日目の一軸圧縮強さ $(q_u)_{CC7}$ により設定される。砕・転圧土の σ_t を対象とする場合も $t=10$ 日目までに発揮される値 $(\sigma_t)_{CC7}$ を考える。砕・転圧土の $(\sigma_t)_{CC7}$ は供試体の準備や試験実施が簡単な圧裂試験により求めるのを基本とした。また、比較のために、同じ配合条件で準備した供試体の一軸引張試験も実施した。砕・転圧土の基本的な強度特性は一軸圧縮試験を、強度パラメータは三軸圧縮試験をそれぞれ実施して調べた。圧裂試験⁴⁾は、等方弾性体と仮定した直径 $D \times$ 高さ $H=50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱状供試体を横にして直径の上・下方向に荷重 P を加え、供試体直径部分の鉛直・水平応力がせん断応力の作用しない主応力である最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 であり、それぞれ

$$\sigma_1=3 \cdot |\sigma_3|, \sigma_3=\sigma_s=-2 \cdot P/(\pi \cdot D \cdot H) \quad (1)$$

になることを利用して圧裂引張強度 σ_s を求める試験である(圧裂試験 Splitting Tensile による σ_t は σ_s として表示する)。圧裂試験は供試体内部の応力～ひずみ状態が一様でない、有効応力で評価できないなどが問題になるものの、とにかく試験の実施が簡単なことが利点である。一軸引張試験は $D \times H=50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の供試体を単純引張条件で破壊させて一軸引張強度 σ_u を求めるもので、供試体の上・下両端面を直径 $52\text{mm} \times$ 深さ 22.5mm の凹型の定着部をもつキャップとペダスタルにアクリル系瞬間接着剤により接着して、供試体の軸方向への単純引張状態で載荷できるようにした(一軸引張試験 Uniaxial Tensile による σ_t は σ_u として表示する)。一軸引張試験は圧裂試験と同様に試験結果を有効応力で評価できないことに加え、供試体の上・下端部を引張力載荷器具であるキャップとペダスタルに定着させるのが難しい、供試体の破壊が端部付

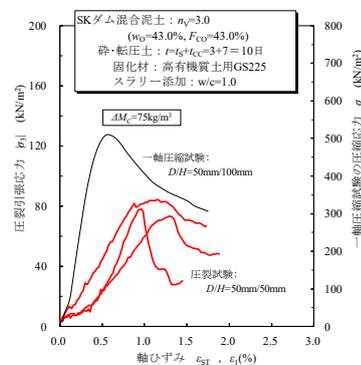


図1 砕・転圧土の圧裂試験と一軸圧縮試験

近で生じやすく結果にバラツキが生じやすい問題もある。砕・転圧土の供試体は、堤体改修を実施中のSKダムの底泥土と既設堤体土を1:3の割合で加え合わせた混合泥土(含水比 $w=29.7\%$)を、参考文献¹⁾²⁾に規定された方法により、スラリー化したセメント系固化材(高有機質土用)を加えて準備した。

図1は固化材添加量 $\Delta M_c=75\text{kg/m}^3$ で準備した砕・転圧土の圧裂試験による引張応力 $|\sigma_3|$ と供試体直径 D の変化率 $\varepsilon_{ST}=(\Delta D/D) \times 100$ (%)を示す。 ΔD は P を変位速度 0.15mm/min で載荷した時の σ_1 方向の D の変位である。なお、 ε_{ST} は σ_1 方向の応力・変形状態が一様ではないことから最大主ひずみ ε_1 を表示しているわけではない。図中には、比較のために同じ固化養生条件で準備した砕・転圧土の一軸圧縮試験から得られた圧縮応力 σ とひずみ ε_1 の関係を併せて示す。図2は同一配合条件で準備した砕・転圧土の一軸引張試験による最小主応力 $|\sigma_3|$ と供試体の ε_1 の関係を示す。 ε_1 は、試験中に測定した軸方向ひずみが最小主ひずみ ε_3 なので、体積一定条件 $2 \cdot \varepsilon_1 + \varepsilon_3 = 0$ を仮定して $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3/2$ から算定した。

§ 3. 砕・転圧土の引張強度と一軸圧縮強さの関係

砕・転圧土の σ_t と $(q_u)_{CC7}$ の関係を調べるために、図1で示した圧裂試験、図2に示した一軸引張試験を $\Delta M_c=50, 100\text{kg/m}^3$ で準

キーワード：固化改良土、破壊規準、引張強度、圧裂試験

連絡先 〒151-8570 渋谷区千駄ヶ谷4-25-2 株式会社フジタ 土木本部 土木エンジニアリングセンター ☎ 03-3796-2299

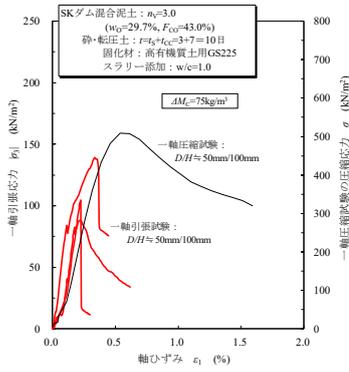


図2 砕・転圧土の一軸引張試験と一軸圧縮試験

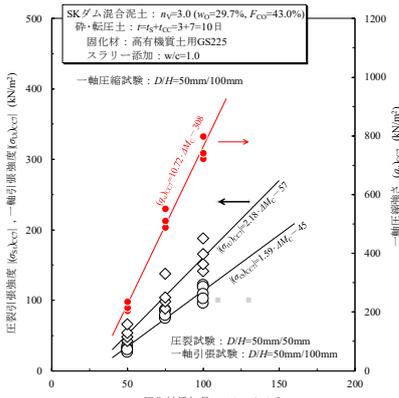
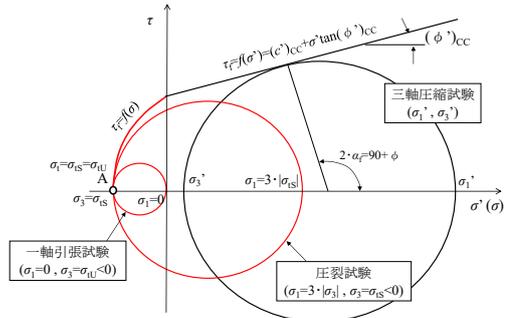


図3 砕・転圧土の圧裂・一軸引張強度と一軸圧縮強さの関係

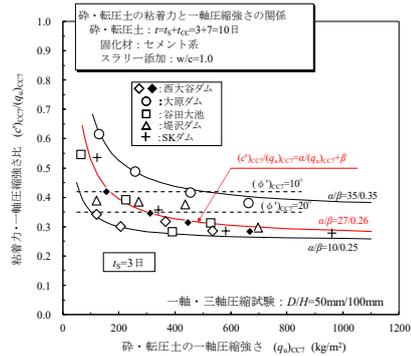


図5 砕・転圧土の(c')cc₇と(q₆₀cc₇)の関係

備した砕・転圧土について実施した。図3は最大応力値である圧裂引張強度(σ₆₀)cc₇ (○印)，一軸引張強度(σᵤ)cc₇ (◇印) とΔM₆₀の関係、(q₆₀)cc₇ (●印) とΔM₆₀の関係をそれぞれ示す。図から、|(σ₆₀)cc₇| と|(σᵤ)cc₇|は(q₆₀)cc₇と同様にΔM₆₀の増加に対してほぼ比例的に増加し、それぞれ図中に示したような直線により近似できることがわかる。以上から、|(σ₆₀)cc₇|~(q₆₀)cc₇ 関係、あるいは|(σᵤ)cc₇|~(q₆₀)cc₇ 関係は、今回の試験実施範囲では、ΔM₆₀に関係なくそれぞれ

$$(\sigma_{60})_{cc7} \doteq -0.15 \cdot (q_{60})_{cc7} \quad (2)$$

$$(\sigma_u)_{cc7} \doteq -0.22 \cdot (q_{60})_{cc7} \quad (3)$$

の直線により近似できる。また、(σ₆₀)cc₇ と(σᵤ)cc₇ の関係は式(2)と式(3)を用いると以下の関係が導かれる。

$$(\sigma_s)_{cc7} \doteq 0.68 \cdot (\sigma_u)_{cc7} \quad (4)$$

§4. 砕・転圧土の引張強度を考慮した破壊規準

圧裂試験は試験実施上から一軸引張試験より簡単で、σ₆₀がσᵤの7割程度であり、両者の相違は大きなものではないので、安全側の配慮として両者が等しい

$$\sigma_s \doteq \sigma_u \quad (5)$$

として扱う(以下、σ₆₀とσᵤをまとめてσ₁により示す)。そこで、砕・転圧土のσ₁を考慮した破壊規準として、図4のようなσ<0側の破壊規準には安全側の値を与える圧裂試験から求めた、あるいは式(2)により推定した(σ)cc₇によるMohrの応力円を滑らかに包絡する全応力表示の二次曲線と、σ≥0の圧縮側では三軸圧縮試験による有効応力表示のMohr-Coulomb型の破壊規準線

$$\tau=f(\sigma)=(c')_{cc7} \cdot \{\sigma/(\sigma)_{cc7}+1\}^{0.5} \quad (6)$$

$$\tau=f(\sigma)=(c')_{cc7}+\sigma \cdot \tan(\phi')_{cc7} \quad (7)$$

から構成されるものを提案したい。すなわち、σ<0の引張側では曲線による全応力表示の破壊規準τ=f(σ)と分け、両者がσ=0において接続するようにしたものである。二次曲線による破壊規準線は岩石などで採用されているGriffith型と同じであるが、相違点はGriffith型では(c')cc₇と(σ)cc₇の関係が(c')cc₇=2·(σ)cc₇のように一定なのに対して⁴⁾、(c')cc₇が(σ)cc₇により変化することである⁵⁾。

§5. あとがき

堤体改修用の固化改良土(砕・転圧土)の引張強度を考慮した破壊規準として、圧裂試験による引張強度と三軸圧縮試験による強度パラメータを組み合わせた破壊規準を提案した。破壊規準は圧裂試験による、あるいは上式により推定した(σ)cc₇と三軸圧縮試験から得られる強度パラメータ((c')cc₇, (φ')cc₇)を組み合わせ、全応力と有効応力が混在するもの、σ<0の引張側とσ≥0の圧縮側で分けた次の2式から構成される。

$$\tau=(c')_{cc7} \cdot \{\sigma/(\sigma)_{cc7}+1\}^{0.5} \quad (\sigma < 0)$$

$$\tau=(c')_{cc7}+\sigma \cdot \tan(\phi')_{cc7} \quad (\sigma \geq 0)$$

【参考文献】1) (社)農業農村整備情報総合センター：ため池改修工事の効率化—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)，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，—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) 福島伸二，谷茂：砕・転圧盛土工法によるフィルダムやため池の堤体改修での堤頂補強問題，水と土，第177号，pp.56-62，2016。4) 山口梅太郎，西松裕一：岩石力学入門，東京大学出版会，pp.86-89，1967。5) 福島伸二，北島明，谷茂：堤体改修用固化改良土(砕・転圧盛土工法)の粘着力と一軸圧縮強さの関係，第61回地盤工学シンポジウム，2018。