

フィルダム堤体改修における堤体の強度パラメータの N 値による推定

株式会社フジタ 土木本部 フェロー会員 ○福島伸二

§ 1. まえがき

老朽化したフィルダムやため池の堤体改修では、既設堤体あるいは改修後堤体の安定性評価のための安定計算に既設堤体の有効応力表示の強度パラメータ (c' , ϕ') が必要であり¹⁾、これは標準貫入試験 (SPT試験) による N 値を用いて推定されるか、不攪乱状態で採取した供試体の三軸圧縮試験により直接的に求められる。三軸圧縮試験による (c' , ϕ') は正確な値が得られるものの、実施数が経済的に限定的にならざるをえず堤体全体の平均的な値を求めるには不十分な場合が多い。このため、既設堤体の平均的な硬軟状態や強度の均一性を知る目的で実施される SPT 試験による N 値を用いて (c' , ϕ') を推定することが重要となる。そこで、本稿は堤体改修を実施したフィルダム堤体で実施した SPT 試験による N 値と不攪乱供試体の三軸圧縮試験による (c' , ϕ') を対応させることで土被り圧依存性を考慮した N 値を用いた (c' , ϕ') の推定式を提案するものである。ただし、堤体土は砂質土 ($c=0$)、あるいは粘性土 ($\phi=0$) のように両極端の分類される土ではなく、中間土になる。

§ 2. N 値の土被り圧依存性の評価

SPT 試験による N 値は、有効土被り圧 σ_v により影響を受けて、 σ_v の深さ方向への増加に応じて増加することが知られている。そこで、本稿では堤体の N 値における σ_v 依存性を $\sigma_v=100\text{kN/m}^2$ における値を $N_1=c_N \cdot N$ とおいて

$$c_N = N / (\sigma_v / 100)^{0.5} \quad (\text{Liao and Whitman 法}^2)) \quad (1)$$

$$c_N = 170 \cdot N / (\sigma_v + 70) \quad (\text{道路橋示方書}^3)) \quad (2)$$

のどちらかにより考慮することにする。式(1)と式(2)による N 値の深さ方向 Z への変化は、 $N=N_1/c_N$ に $\sigma_v=\gamma \cdot Z$ (γ : 堤体の単体密度) を導入すれば得られる。式(1)は変形係数や液状化判定法の σ_v 依存性の評価に採用されている 0.5 乗則である。式(2)は液状化判定で採用されており、 $N \sim \sigma_v$ 関係の直線の変化を想定している⁴⁾。

図1はSKダムの堤体で実施した SPT 試験から得られた $N \sim Z$ 関係と、これを式(1)と式(2)により近似した σ_v 依存性を示す。これらの式では堤体毎の硬軟レベルを意味する N_1 が必要となるので、 $N \sim Z$ 関係を全体的にうまく近似できる値を試行錯誤的に選択した。ここで、注意しなければならないことは地下水位置であり、地下水位面以下では浮力 ($\gamma'=\gamma-\gamma_w$) により有効土被り圧 σ_v の増加割合が変化することである。図中には地下水位以下の $N \sim Z$ 関係では地下水位深さ Z_w とおくと、 $\sigma_v=\gamma \cdot Z_w + \gamma' \cdot (Z-Z_w)$ とした関係を点線により表示した。図から、堤体は盛土で自然地盤よりも均一であるにもかかわらず相当バラツキが大きいと言わざるをえないものの、 N 値は深さ方向に曲線的に増加する傾向を示しており、式(1)の方が全体的な N 値の σ_v 依存性をうまく表現できそうである。一方、式(2)は直線的に変化し、深さ方向に強い σ_v 依存性を与えることがわかる。以降の N 値の σ_v 依存性の補正は式(1)を採用することにする。

§ 3. 内部摩擦角と N 値の関係

堤体改修を実施、あるいは実施中のフィルダムの既設堤体において、SPT 試験による N 値とその実施箇所付近で採取した不攪乱供試体の CU 条件での三軸圧縮試験により ϕ' (c') を求めた。なお、供試体の透水性が高く CD 条件とした場合には $\phi_d=\phi'$ ($c_d=c'$) とした。図2は各ダムにおける ϕ' と N 値を $c_N=N/(\sigma_v/100)^{0.5}$

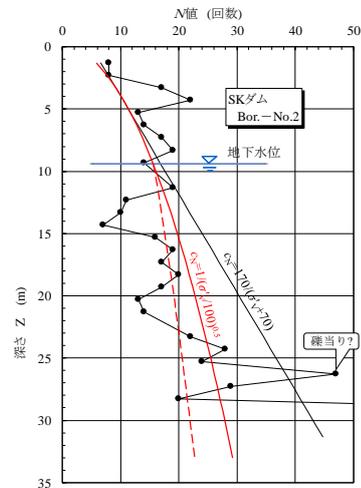


図1 SKダムの堤体の N 値の σ_v 依存性

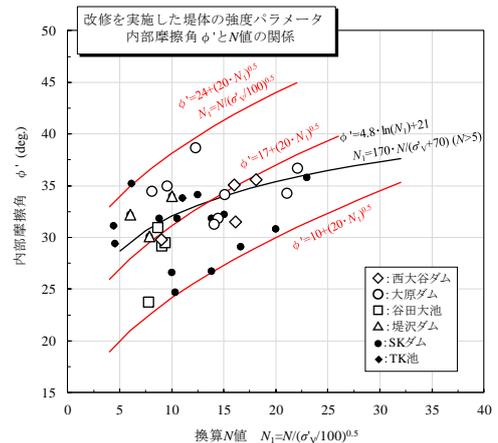


図2 内部摩擦角 ϕ' と N_1 値の関係

により σ_v の補正をした N_1 の関係を示す。図中の曲線は ϕ_d と N_1 の関係で表示されている建築学会基礎構造設計指針⁵⁾による

$$\phi_d = 20 + (20 \cdot N_1)^{0.5} \quad [N_1 = N / (\sigma_v / 100)^{0.5}] \quad (3)$$

を、 $\phi_d=\phi'$ として切片値の 20 をデータのバラツキの上限、平均、下限をうまく近似できるように 10, 17, 24 と変えた場合の $\phi' \sim N_1$ 関係をそれぞれ示す。また、比較のために道路橋示方書³⁾

キーワード：標準貫入試験、強度パラメータ、堤体改修

連絡先 〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-5-2 株式会社フジタ 土木本部 土木EC ☎ 080-9097-2195

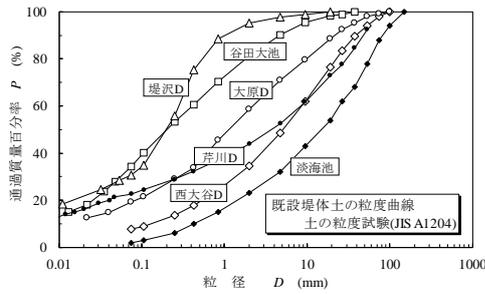


図3 各フィルダム堤体の代表的な粒度曲線

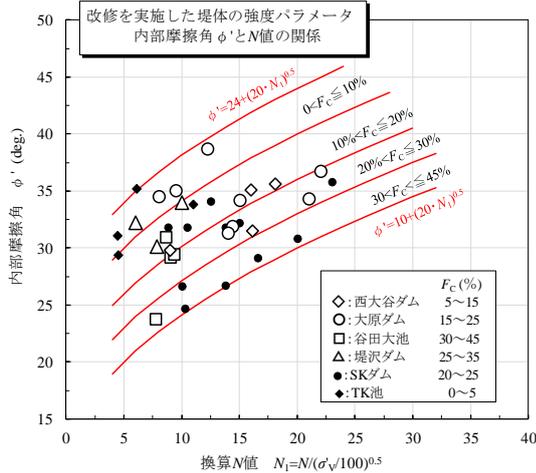


図4 内部摩擦角 ϕ' ~ N_1 値関係に及ぼす粒度の影響

$$\phi_a = 4.8 \cdot \ln(N_1) + 21 \quad (N_1 = 170 \cdot N / (\sigma'_v + 70)) \quad (4)$$

も示すが、この式は $\phi_a \sim N_1$ 関係の片対数上での直線性を利用したものである。図から、 ϕ' は N_1 が増加すると増加する傾向にあるが、式(3)は式(4)よりもこの傾向をうまく近似できそうである。これは式(4)が下限値を与えるように提案されたものであることに関係していよう。一方、 $\phi' \sim N_1$ 関係の同一の N_1 値でのバラツキが大きい、これは粒度の影響も大きいと思われる。一般に提案されている $\phi \sim N$ 関係式は砂質土に分類される土 ($c=0$) を対象にしているが、ここでは堤体のように中間土を対象とし、堤体により粒度特性が大きく異なっている。図3には各堤体の代表的な粒度曲線を示すが、堤体により粒度特性に相違があることから、これが $\phi' \sim N_1$ 関係のバラツキの一つの理由と考えられる。そこで、図4は図2に示した $\phi' \sim N_1$ 関係を、図3の粒度曲線を参考にして細粒分含有率 F_c の範囲を図4における凡例のように設定して、各堤体の F_c 範囲を区分できるように式(3)の切片を N_{10} と置き換えて段階的に変えた曲線をそれぞれ示す。図5は図4の各曲線から読み取った $N_{10} \sim F_c$ 関係であり、ほぼ直線

$$N_{10} = 23.2 - 0.314 \cdot F_c \quad (5)$$

により近似できる。したがって、 F_c を指標に粒度の影響を考慮した $\phi' \sim N_1$ 関係は式(3)と式(5)を組み合わせた

$$\phi' = N_{10} + (20 \cdot N_1)^{0.5} = 23.2 - 0.314 \cdot F_c + (20 \cdot N_1)^{0.5} \quad (6)$$

により表示することができる。

§4. 粘着力と N 値の関係

図6は ϕ' の場合と同様に c' と N_1 の関係を整理したものである。

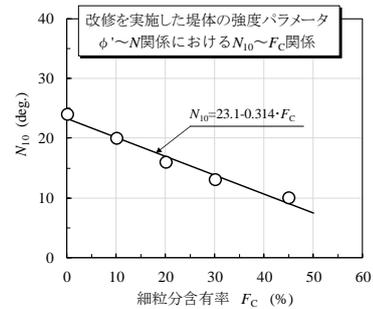


図5 $\phi' = N_{10} + (20 \cdot N_1)^{0.5}$ における $N_{10} \sim F_c$ 関係

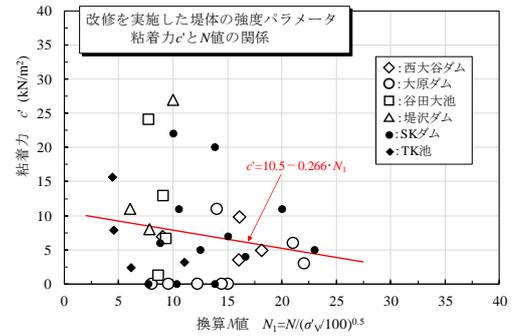


図6 粘着力 c' と N_1 値の関係

図から、 c' はバラツキが大きいものの、 N_1 の増加に対して減少している。一般に、粘土 ($\phi_a=0$ 土) の c は N の増加とともに増加するが、図6の $c' \sim N_1$ 関係はこれと逆の傾向にある。これは中間土では N_1 が増加すると ϕ' が増加するので、 c' が減少することに対応するためであろう。 $c' \sim N_1$ 関係は単純に直線により近似すると

$$c' = 10.5 - 0.266 \cdot N_1 \quad (7)$$

となる。 $\phi' \sim N_1$ 関係は F_c の影響を受けるが、 $c' \sim N_1$ 関係では F_c の影響を考慮していない。理由は、 c' はもともと小さいということで、三軸圧縮試験結果を整理する際に、安全側の扱いとして無視されることが多く、相関を得にくいと考えてのことである。

§5. あとがき

フィルダムの堤体改修工事での経験から得られた既設堤体の三軸圧縮試験による (c' , ϕ') と SPT 試験による N 値の関係を整理することで、 N 値から既設堤体の (c' , ϕ') を推定する場合には、それぞれ式(6)と式(7)を用いることを提案した。なお、以上の関係式は限られたデータから得られたもので、今後のデータの蓄積に応じて修正を加えてゆく必要のあるものである。

【参考文献】 1) 農林水産省農村振興局整備部監修：土地改良事業設計指針「ため池整備」, (公社)農業農村工学会, pp.9-19, 2015. 2) Liao, S.S.C. and Whitman, R.V. : Overburden Correction Factors for SPT in Sand, Proceedings of American Society of Civil Engineers, Vol.112, No.GT3, pp.373-377, 1986. 3) (公社)日本道路協会編：道路橋方書・同解説, IV 下部構造編, pp.536-537, 2017. 4) Skempton, A.W. : Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, Geotechnique, Vol.36, No.3, pp.425-447, 1986. 5) (一社)日本建築学会編：基礎構造設計指針, pp.113-116, 2001. 6) (公社)地盤工学会編：地盤調査の方法と解説, 第6編 サウンディング, 第2章 標準貫入試験, pp.279-316, 2016.