

既設アースダム堤体の耐震性能評価法—レベル1地震動を想定して—

Performance Evaluation Method of an Existing Bank of an Earth Dam

正 垣 孝 晴 (しょうがき たかはる)

防衛大学校 建設環境工学科

高 橋 章 (たかはし あきら)

東京電力㈱ 建設部ダム技術グループ

熊 谷 尚 久 (くまがい なおひさ)

防衛大学校 建設環境工学科

1. はじめに

関東ロームを用いて約80年前に築造されたアースダム堤体のレベル1地震動を想定した性能評価法を示す。当該のアースダム堤体は、ダムの安定性を検討するための地盤情報が皆無であった。我が国には、古来から農業や発電用に多くのアースダムが築造されてきたが、それらの安定性を検討するための地盤情報を有するダムは極めて少ない。大規模な地震荷重に対する既設ダム堤体の安定性の照査、その透明性や説明責任が問われている。緊縮財政下において、安全で経済的・合理的な建設構造物を構築・維持管理するため、省力化・低コスト化に直結する高精度の地盤調査・試験技術や評価技術が提案されている¹⁾。

本稿では、アースダム堤体の安定性に関する耐震性能評価法が非排水強度の信頼度分析を踏まえて検討される。

2. アースダムの概要と堤体の性能評価法

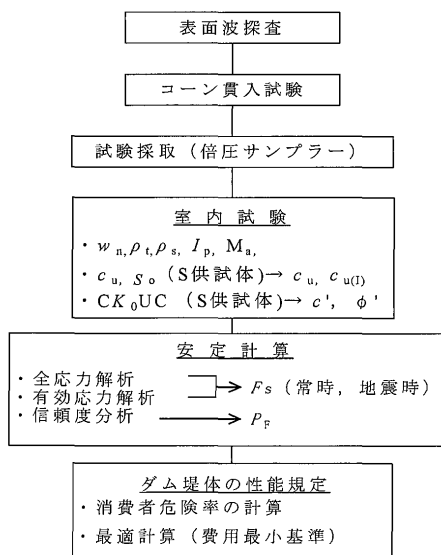
当該ダムの概要を口絵写真—1に示す。堤長約1000 m、堤高約20 mの大ダムである。図—1は当該ダム堤体の性能評価のフローを示している。堤体規模が大きいことから、ダム堤体の下流側法肩部で行った表面波探査の結果から決定したコーン貫入試験（以後、CPT）と

試料採取位置を口絵写真—1に併せて示す。これらの調査に許される期間が7日であったことから、コーン貫入試験と不攪乱試料採取は、機動性のあるコーンサンプラー²⁾を用いた。堤体を構成する関東ロームは、砂分10～24%、シルト32～34%、粘土40～58%であり、塑性指数 $I_p = 36 \sim 47$ 、一軸圧縮強さ $q_u = 35 \sim 199$ kPaの範囲の土である。粘性土に分類され、供試体のサクシオン S_0 が適正に測定できることから一・三軸強度特性の検討と、レベル1地震動を想定した全応力解析によって堤体の信頼度分析と性能規定を行う。

コーンサンプラーで採取した直径 d 48 mm、高さ h 500 mmの試料から、小型供試体を用いて一軸圧縮試験UCT、三軸圧縮試験 CK_0UC 、一面せん断試験DSTと段階荷重圧密試験ILを行う。 CK_0UC に関しては d 48 mm、 h 100 mmのO供試体も用いた。強度試験の試験条件を表—1にまとめた。 CK_0UC の K_0 圧密は、 d 15 mm、 h 35 mmのS供試体に対しては軸圧 σ'_a を増加させて側圧 σ'_r を制御した。また、O供試体は、 σ'_r を増加させ σ'_a で K_0 状態を保った。口絵写真—2に供試体位置を示す。不攪乱試料として、UCTとS供試体の CK_0UC に対して計12個、DSTとILに対しては各1供試体、そして3個のO供試体を作成した。これらの試験データの統計処理により、性能規定における消費者危険率（第2種の過誤）を考慮した安定計算が可能となる。繰返し三軸試験CTXはレベル2地震動の検討に関連して今後予定している。

3. 強度特性

CPTは、深さ方向の連続的な地盤情報を得ることができる。当該堤体のコーン貫入試験結果は紙幅の制約で既報³⁾に譲ることとする。コーンサンプラーと同じ貫入孔Borの中で、CPTを行わない深度で、乱れの少ない



図—1 性能評価の流れ

表—1 試験条件

試験	圧密 圧力 (kPa)	ひずみ 速度 (%/min)	せん断 条件	非排水 強度	供試体 寸法 (mm)
UCT	-	1	非排水	$q_u/2$	d15, h35
CK_0UC	30, 100, 200	0.05	非排水	$q_{max}/2$	d15, h35 d48, h100
DST	100	0.1	非排水	τ_{max}	d30, h10

試料を複数採取した。Bor 2 の採取試料に対して行った UCT と CK_0UC から得た自然含水比 w 、湿潤密度 ρ_t 、 q_u 、破壊ひずみ ε_f 、変形係数 E_{50} 、サクシオン S_0 を深度 z に対して図-2 に示す。非排水強度 c_u として、 $q_u/2$ に加えて CK_0UC の原位置の圧密降伏応力 $\sigma'_{p(l)}$ 下の非排水強度⁴⁾ $c_{u(l)}$ の平均値、および q_u と S_0 から推定した原位置の非排水強度⁴⁾ $q_{u(l)}/2$ を併せてプロットした。 $q_{u(l)}/2$ と $c_{u(l)}$ の平均値は、それぞれ 145 kPa、141 kPa と同等であるが、 $q_u/2$ は $c_{u(l)}$ の 40% と小さい。このような傾向は他の z や Bor でも同様であった。応力解放と試料採取に伴う強度低下は自然堆積した有機質土や粘性土で 40% 程度であった⁴⁾。しかし、締め固めた過圧密 OC 状態の関東ロームの強度低下は大きい。

図-3 に一例として、Bor 2, $z = (5 \sim 5.93)$ m の強度増加率 c_u/p と σ'_a/σ'_{vo} の関係を示す。ここで、 σ'_a は CK_0UC の圧密圧力、 σ'_{vo} は有効土被圧である。図中の曲線はプロットの近似曲線である。繰返しによる c_u/p は不攪乱試料によるそれより約 0.1 大きい、乱れの少ない試料の c_u/p は、供試体寸法に依存していない。 σ'_{vo} と $\sigma'_{p(l)}$ 下の c_u/p は、それぞれ 0.6 と 0.4 であるが、 σ'_{vo} より小さい OC 領域の c_u/p は過圧密度に応じて、さらに大きくなる。このような挙動は有効内部摩擦角 ϕ' と静止土圧係数 K_0 の結果とも整合している。 ϕ' と K_0 は全応力解析には直接関係しないが、OC 状態下の締め固めた関東ロームの特異な挙動として、 c_u/p やレベル 2 地震動を想定した CK_0UC 結果の解釈の精緻化に欠か

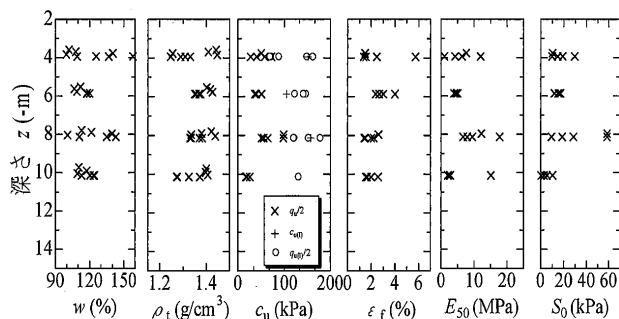


図-2 土性図 (Bor 2)

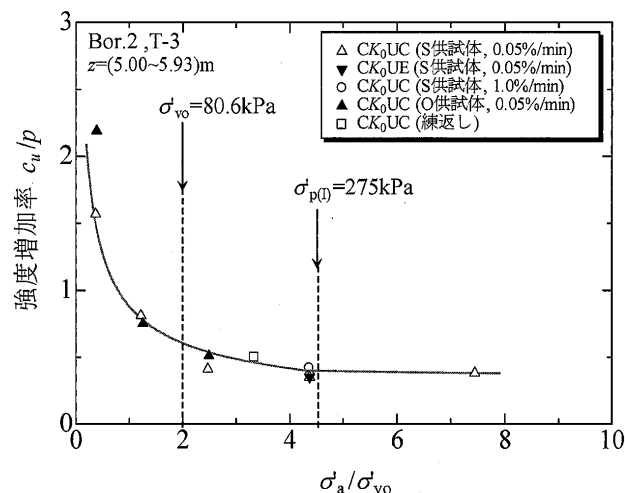
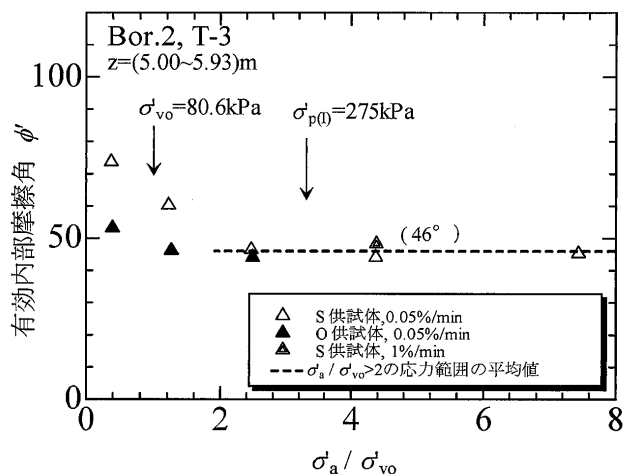
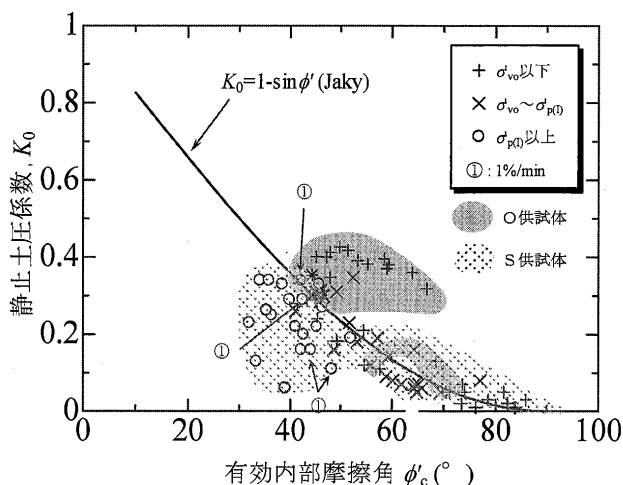


図-3 強度増加率と応力比の関係

せない。

図-3 の同じ供試体に対して、 ϕ' の応力依存性を検討するために σ'_a/σ'_r の最大点と原点を結ぶ勾配から得た ϕ' と σ'_a/σ'_{vo} の関係を図-4 に示す。 σ'_{vo} 近傍の OC 領域の ϕ' は、 $45 \sim 75^\circ$ と大きい、 $\sigma'_a/\sigma'_{vo} > 2$ の領域では 46° の一定値となる。このような傾向は他の Bor や z でも同様であった。

Bor 1, 2, 3 のすべての深度の供試体に対して、 CK_0UC の K_0 圧密過程で得た K_0 と ϕ' の関係を図-5 に示す。ここで、 K_0 は各供試体の圧密終了時の値を用いた。図-3, 4 で示したように、 c と ϕ' に応力依存性があることから、プロットは、 K_0 を求めた σ'_a の応力レベルに応じて $\sigma'_a < \sigma'_{vo}$, $\sigma'_{vo} < \sigma'_a < \sigma'_{p(l)}$, $\sigma'_{p(l)} < \sigma'_a$ で 3 区分した。図-5 には Jaky 式 ($K_0 = 1 - \sin \phi'$) を併せて示したが、Jaky 式は $\sigma'_{p(l)} < \sigma'_a$ のプロット (○) の上限に位置するが、他の結果はプロットを近似した曲線に近い。 $\sigma'_a < \sigma'_{vo}$ のプロット (+) の ϕ' は 85° に達する結果もあるが、荷重増加のない過圧密のダム堤体の応力条件を考えると、このような大きな ϕ' が実際の破壊現象下で発現される可能性は否定できない。1%/min で得たプロットは①と表記して他のプロット (0.05%/min) と区別した。しかし、 K_0 と ϕ' の関係に及ぼすひずみ速

図-4 ϕ' と応力比の関係図-5 K_0 と ϕ' の関係

報 告

度効果はない。また、OとS供試体を網掛けで区分して供試体寸法の影響を検討した。O供試体の K_0 が大きいのは、図—4で示した供試体の圧密方法の差に起因している。

4. アースダム堤体の性能評価法

アースダム堤体がレベル1地震動に対して粘性土（本稿ではc材と仮定）として挙動する場合は円弧すべりによる全応力解析の検討が必要である。 $q_u/2$ の平均値を供試体の測定深度に応じて口絵写真—3の3, 4, 5層に入れて安定解析を行った。地震力に関しては、強震域の海溝型地震を想定して水平深度を0.15として、同図中に示す最小安全率の円弧を得た。この円弧に対して、地盤の非排水強度の採用値に関する信頼度を検討した。

$q_u/2$, $c_{u(l)}$, $q_{u(l)}/2$ に対して、供試体数 n と破壊確率 P_f の関係を図—6に示す。 P_f の定義と計算方法は文献5)と同様である。 $q_u/2$ は強度が小さいことに起因して n に関係なく破壊($P_f=100\%$)するが、 $q_{u(l)}/2$ の P_f は100%から減少して $n=14$ で0.4%になる。 $c_{u(l)}$ は試験総数が8と少ないことに加え、すべての強度が比較的そろって大きいことを反映して、 $n=14$ で $P_f=0.4\%$ になる。 $P_f \leq 5\%$ を満足する $c_{u(l)}$ と $q_{u(l)}/2$ の n は、それぞれ9と11である。このことは、採取試料の品質を考慮して、設計値を性能規定化できることを意味する。

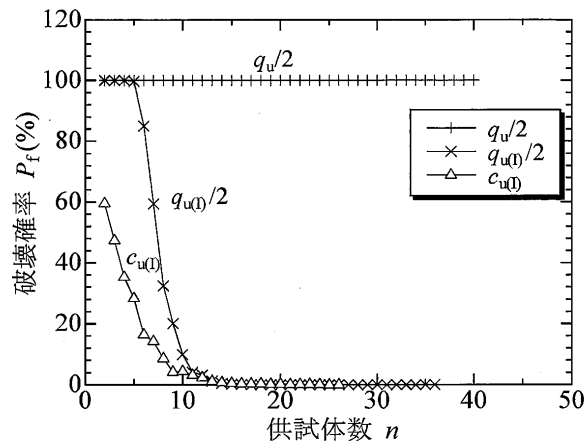
c_u と n が式(1)で示す盛土破壊時の修復総費用 C_t に及ぼす影響を検討し、地盤の非排水強度採用値の性能規定化へ向けた検討を行う。

$$C_t = P_f \times C_f + C_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

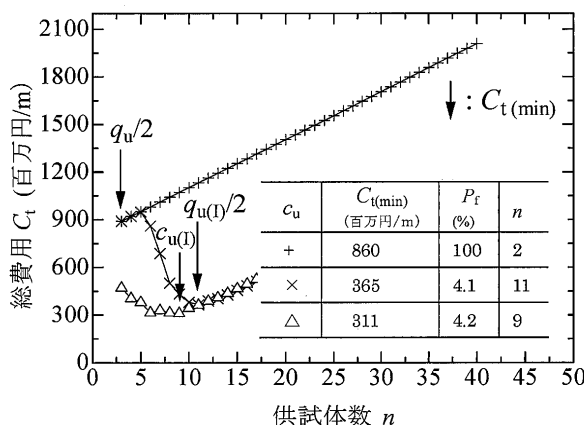
ここで、 C_f : 破壊復旧費 (1037百万円), C_1 : 初期の地盤調査・試験費であり、試料採取費10百万円に加え、H19年の建設物価よりUCTは5250円/供試体, $C K_0$ UCは71600円/3供試体, とした。 P_f と C_1 は n の関数となる。 C_f は、30 m幅の破壊を想定して当該ダムの想定金額を用いた。

$q_u/2$, $c_{u(l)}$, $q_{u(l)}/2$ から求めた C_t と n の関係を図—7に示す。 C_t が最小となる n , P_f , C_t を図—7の表にまとめた。 $q_u/2$ は強度が小さいことに起因して、 n が増しても C_t が低下することは無く一次関数的に増加している。一方、 $q_{u(l)}/2$ は n が増加すると c_u の平均値の信頼度が向上し C_t の低下が著しい。 $C_{t(\min)}$ の n は $q_{u(l)}/2$ で11, $c_{u(l)}$ で9であるが、試験費用の差を反映して C_t は、それぞれ365百万円/mと311百万円/mとなり、 $q_{u(l)}/2$ は $c_{u(l)}$ より17%大きい。両強度の平均値は同等であるが、 $c_{u(l)}$ の試験個数が8と少なく、このデータの標準偏差が幾分小さかったことが n と C_t の差になっている。標準偏差に差がなければ $q_{u(l)}$ は $c_{u(l)}$ と同じ設計結果を与えることになるが、試験費用の観点から有利になる。

採取試料の品質確保を前提とすれば、地盤強度採用値も性能規定が可能となる。また、各種せん断・応力条件下の強度・圧密特性がコーンサンプラーで採取した d 48 mmの試料片から測定できるので、小型供試体は調査・試験費用の削減に加え、調査・設計の精度向上への



図—6 破壊確率と供試体数の関係



図—7 総費用と供試体数の関係

寄与が大きい。加えて、原位置非排水強度として $q_{u(l)}$ を用いれば盛土形状をスリム化できる可能性もある。

5. おわりに

コーンサンプラーによるコーン貫入試験と乱れの少ない試料の採取に加え、小型供試体を用いた各種強度・圧密試験からダム堤体の地盤特性を明らかにした。そして、レベル1地震動を想定した安定解析から、既設アースダム堤体の性能評価を行った。

今後は、動的挙動の試験結果を踏まえ、レベル2地震動に対する検討を予定している。

参 考 文 献

- 1) 正垣：地盤調査・試験法の小型・高精度化技術の役割と展望，土と基礎，Vol.54, No. 8, pp. 1~2, 2006.
- 2) 正垣・西原：無線によるコーン情報の伝送システム，土と基礎，Vol. 54, No. 11, pp. 26~28, 2007.
- 3) 村田・正垣・熊谷・鶴田・高橋・西原：関東ロームに対するコーン貫入試験と非排水強度，第42回地盤工学研究発表会，pp. 91~92, 2007.
- 4) Shogaki, T.: An improved method for estimating in-situ undrained shear strength of natural deposits, Soils and Foundations, Vol. 46, No. 2, pp. 1~13, 2006.
- 5) Shogaki, T. and Takahashi, A.: Reliability of the cone penetration, undrained shear strength tests and the optimum embankment design method, The 13th Asian Regional Conf. on SMGE, pp. 1085~1088, 2007.

(原稿受理 2007.9.28)