

老朽化したフィルダムに堆積した底泥土の粒度・塑性指数と 強度に及ぼす影響

北 島 明 福 島 伸 二 *1

概 要

筆者らは老朽化ため池の堤体改修のために、池内に堆積した底泥土を固化処理して所要の強度と遮水性を有する築堤土に利用できる砕・転圧盛土工法を開発し^{1)~3)}、これまでに数箇所のため池の改修に適用してきた^{4)~6)}。本論文は、老朽化フィルダムの貯水池内に堆積した底泥土を固化処理して堤体改修のための築堤土に使用することを前提に、固化処理した底泥土の強度に及ぼす粒度の影響の取扱いを検討するためにフィルダムの池内に堆積した底泥土の粒度と物理化学的特性の調査を実施した。調査結果から、フィルダムでは、底泥土の粒度が池内の上・下流域で大きく相違するが、固化処理特性に深く関係する物理化学特性の相違が少ないことがわかった。このことから、池内で粒度が異なる底泥土を固化処理して築堤土として使用するには、底泥土の物理化学的性質が池内で一定であるとし、上流域の粗粒分の多い底泥土を堤体付近に堆積した細粒分の最も多い底泥土に粗粒分だけが加わったとして扱えることがわかった。

Investigation on Grading and Soil Plasticity Characteristics of Muddy Soil in Reservoirs for Improvement of Old DAM Embankments

Abstract

A muddy soil accumulates at the bottom of reservoirs in most of old fill type dams. This accumulation causes the water pollution and the loss of reservoir capacity. The muddy soil is very soft and clayey with a high water content. We have developed a new method to repair old embankments by using the accumulated muddy soil mixed with cement. This technique has the advantage of recycling the problematic muddy soil. In this paper, we investigate the grading and the plasticity characteristics of the muddy soil accumulated in reservoirs to examine the applicability of the muddy soil to repairing of old fill type dam embankments.

From the investigations, we concluded that careful management of the strength of cement-mixed muddy soil is required because the grading values of muddy soil in a dam reservoir are not uniform.

キーワード: 老朽化フィルダム, 底泥土, 粒度,
塑性指数, 固化処理土, 強度

*1 本社 土木本部

§1. はじめに

築造年代の古いフィルダム(H \geq 15m)、特にダム基準の制定以前に築造されたものは老朽化により改修を必要とするものが多く、ため池に比較すると堤体や池の規模が大きく改修に必要な築堤土や除去処分すべき底泥土が大量になるなど、より深刻な問題となっている。このようなフィルダムは約 1700~1800 箇所あるとされているが、大部分が堤高 30m 程度以下で、最近築造されているロックフィルダムに比較すると小規模で、ため池と同様に均一型かあるいはこれに近い堤体構造をしている。このことから、筆者らは砕・転圧盛土工法が老朽化フィルダムの堤体改修にそのまま適用できると考え、堤体改修の基本的考え方や断面構造について提案してきた⁷⁾。

池や流入河川の規模が小さいため池では、堆積した底泥土が粘土・シルト分のような細粒分の多い高含水比底泥土であり、築堤土に利用するために固化処理した底泥土の強度は含水比の影響を考慮するだけで管理できた^{4)~6)}。一方、フィルダムではため池に比較すると池や流入河川の規模が大きく、砂礫のような粗粒土も大量に流れ込み粗粒から細粒までの底泥土が堆積しやすく、固化処理時の強度管理には含水比と粒度の両方の影響を考慮しなければならない。本工法をフィルダムに適用するには、母材である底泥土の粒度に関してこのような問題を解決する必要がある。

そこで、本報告ではフィルダムの池内に堆積した底泥土を固化処理して築堤土として利用することを前提に、フィルダムの池内に堆積した底泥土の調査を実施し、固化処理した底泥土の強度に及ぼす粒度の影響の取扱いについて検討した結果を述べる。

§2. 貯水池内の土砂や底泥土の堆積特性

フィルダムやため池の貯水池内の土砂は、降雨により流域内の土砂が侵食されるなどして河川に流れ込み、さらにこれが河床を掃き流して池内に流入堆積したものである。堆積土砂の粒度や物理化学的特性は流域や河床の地質状況に規定されるものと考えられる。

一方、池内の土砂の粒度は、流水速度が池内の上流域から下流域へと低下するのに応じて粒径の大きい粗粒分から先に沈降堆積するため、上流域には砂礫のような粗粒土が、下流域には粘土・シルトのような細粒土が堆積するなど池内位置で相違し、その程度は池の規模が大きいほど顕著になるものと考えられる。

堤高が概ね H=30m 程度までの老朽化フィルダムの大部分は中山間地に立地し流入河川も小規模なので、堆積した土砂は最上流域には砂や礫も堆積するが、シルト・

粘土分のような細粒分を多く含む底泥土が主体である。本報告ではこのような底泥土を対象とし、砕・転圧盛土工法により底泥土を固化処理して堤体改修用の築堤土に利用することを前提とする。

底泥土の物理化学的特性は底泥土粒子と固化材との化学結合に深く関係するが、これは流れ込んだ土粒子のうちの粒子間に物理化学的反応力が作用しやすい粒径の小さい細粒分量により規定されるものと考えられる。このことから、同一河川から供給される底泥土の物理化学的性質は基本的には同じであり、上流側の粗粒分の多い底泥土は堤体付近にある細粒分が最も多い底泥土に、物理化学的性質に影響を及ぼすことが少ない粗粒分だけが加わったものと考えられる⁸⁾。

そこで、本報告ではこのことを確認するために、フィルダムの池内に堆積した底泥土の粒度と物理化学的特性の調査を実施することにした。底泥土の粒度特性は、築堤土としての遮水性の目安となることや現場で比較的簡単に求められることから、粒度試験(JGS 0131)から求められる粒径 75 μ m以下の粘土・シルトの細粒分含有率 F_c が指標となろう。また、土の物理化学的性質は粘土粒子とその周囲の水との間の界面作用であるため、この性質の指標は界面作用の大きな粘土粒子を多量に含むほど大きな値を示す液性限界・塑性限界試験(JGS 0141)により求まる塑性指数 I_p が適している。したがって、底泥土の調査には粒度特性の指標として F_c を、物理化学的特性の指標として I_p を採用することにした。

§3. フィルダムにおける粒度・塑性指数特性調査

フィルダムの貯水池内に堆積した底泥土の調査は西大谷ダムで実施した。西大谷ダム(静岡県掛川市, H=15.1m)は1934年(昭和9年)に築造されたものであるが、砕・転圧盛土工法により堤体の耐震補強と漏水防止のための改修工事が2005年8月に完了している⁹⁾。

底泥土は河川により運搬されるので、その粒度特性は池内の流路に顕著に現れるものと考えられる。そこで、試験に使用した底泥土は、落水状態における河川流入部から堤体取水部までの滞筋に沿ってほぼ一定の間隔をおいた7箇所にて採取した。なお、底泥土は土砂を薄層状に挟んで堆積していても、各採取位置での平均的な粒度や含水比の底泥土が入手できるように、スコップにより深さ方向に混合してから採取した。試料採取時の目視から、堤体付近ほど水深が深く、堆積した底泥土は高含水比で、かつ層厚も厚いことが確認できた。

図1には西大谷ダムの堤体改修前のFWL時(常時満水位)の沿岸線により表示した池平面図を示す。図中に

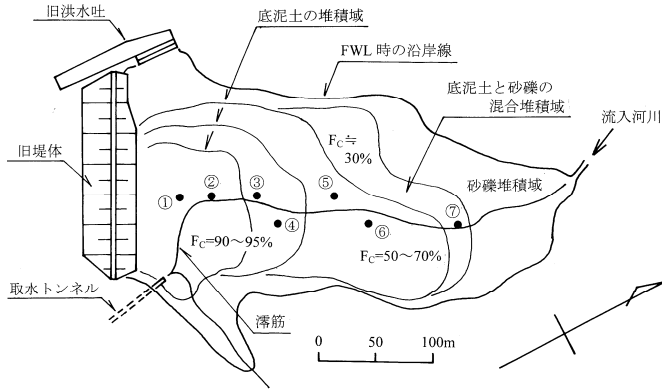


図1 西大谷ダムにおける池平面図と底泥土の採取位置

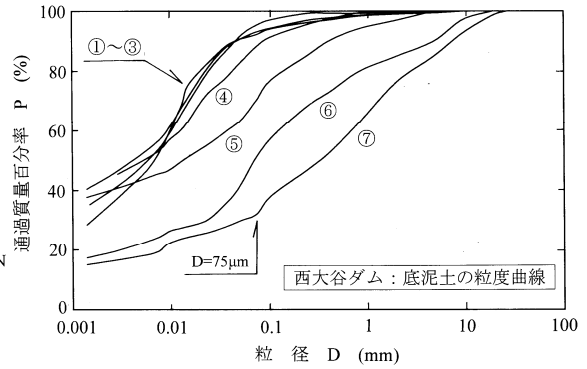


図2 西大谷ダム内各位置における底泥土の粒度曲線

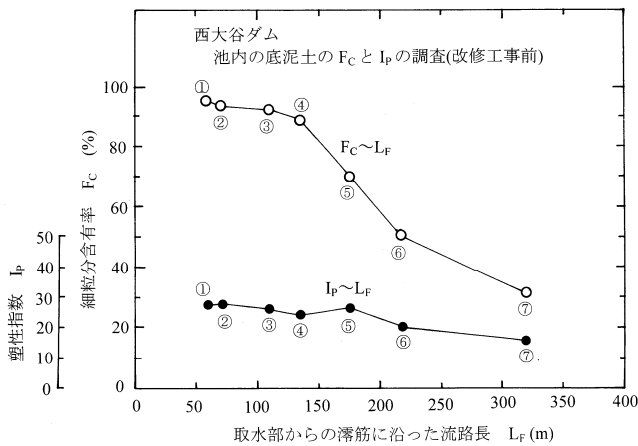


図3 西大谷ダムの滞筋に沿ったFcとIpの変化

は底泥土の採取位置を●印により、また落水時の流入水が流れる滞筋を曲線により示してある。このダムは海底に堆積した泥層と砂・砂礫層からなる互層が隆起固結した小笠層群が広く分布する丘陵地に立地している。

池内の滞筋に沿った各位置で採取した底泥土の粒度試験から求めた粒度曲線を図2に示す。また、図3には取水部からの滞筋に沿った距離 L_f に対する底泥土の F_c 値(○印)と I_p 値(●印)の変化をそれぞれ示す。これらの図から以下のことがわかる。底泥土の粒度が池内の堆積位置で異なり、堤体に近い①～④のような水深の深い領域では細粒分が多く $F_c=90\%$ 前後の底泥土が堆積している。しかし、ある程度上流域⑤～⑦に進むと底泥土の F_c が連続的に低下し粗粒分が増加する。一方、底泥土の I_p 値は20～30の範囲にあるが、上流域⑥～⑦でやや低下する傾向がみられるものの池内での相違は少ない。

このことから、上流域の粗粒分を多く含む底泥土は堤体付近の水深の深い下流域に堆積した細粒分を最も多く含む底泥土に物理化学的的性質に影響を及ぼさない粗粒分が加わったものであると考えることができよう。

§4. 底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度の影響

貯水池内の位置により、底泥土の粒度を数種類に分類することができれば、各底泥土毎に固化処理のための配合試験を実施し、強度管理に粒度の影響を考慮することができる。しかし、これまでのフィルダムの調査結果からわかるように、底泥土の粒度は池内で連続的に変化しており、底泥土を F_c の値により数種類に分類することが難しい。したがって、所定の強度を有する固化処理した底泥土を得るには、粒度が固化処理強度に及ぼす影響を評価できる方法を確立することが必要になる。

(1) 基本底泥土と上流域底泥土の粒度と含水比

以上の調査結果から以下のことが明らかになった。貯水池内に堆積した底泥土の粒度は池や流入河川の規模に関係しており、フィルダムのように池や流入河川の規模がある程度以上大きくなると、底泥土の粒度は池内位置で相違し、底泥土を固化処理するには強度に及ぼす含水比だけでなく粒度の影響を考慮しなければならない。しかし、池内で底泥土の粒度特性に相違があっても、物理化学的特性は一定であることから、池上流域の粗粒分を多く含む底泥土は堤体付近の水深の深い下流域に堆積した底泥土に物理化学的特性に影響を及ぼさない粗粒分が加わったものと考えられる。

筆者らは底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度と含水比の影響を考慮するために、堤体付近に堆積した細粒分を最も含む底泥土を基準底泥土として、上流域に堆積した底泥土の含水比と粒度に関して以下のような取扱いを提案している⁸⁾。図4には基本底泥土と上流域の粗粒分の多い底泥土の土粒子分と水分の模式図を示す。

基本底泥土に含まれる土粒子分の質量 M_{S0} を $75\mu\text{m}$ 以下の細粒の土粒子分の質量 M_{SF} と $75\mu\text{m}$ を超える土粒子分の質量 M_{SC} に分け($M_{S0}=M_{SF}+M_{SC}$)、水分の質量を

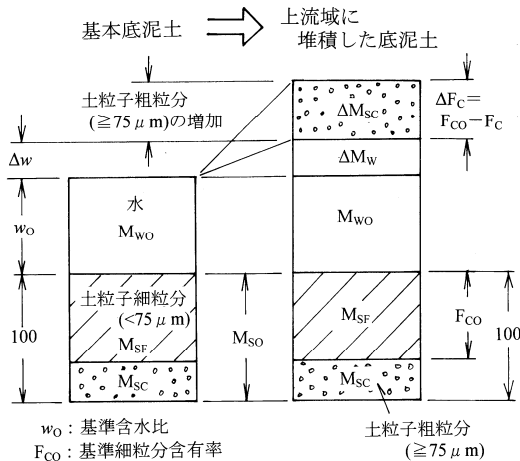


図 4 池内底泥土の土粒子分と水分の模式図

M_{W0} とすると、基準となる含水比 w_0 と $75\mu m$ 以下の細粒分含有率 F_{CO} はそれぞれ

$$w_0 = (M_{W0} / M_{S0}) \times 100 \quad (1)$$

$$F_{CO} = (M_{SF} / M_{S0}) \times 100 \quad (2)$$

になる。これに対して、池上流域に堆積した底泥土は基本底泥土に粗粒分 ΔM_{SC} が加わっただけであるので、これらの土粒子の質量は $M_S = M_{S0} + \Delta M_{SC}$ 、増加した粗粒分に含まれる水分 ΔM_W を含めた全水分質量は $M_W = M_{W0} + \Delta M_W$ となる。底泥土の全体含水比 w_T は

$$\begin{aligned} w_T &= (M_W / M_S) \times 100 \\ &= (M_{W0} + \Delta M_W) \times 100 / (M_{S0} + \Delta M_{SC}) \\ &= (w_0 + \Delta w) / (1 + \Delta M_{SC} / M_{S0}) \\ &= w / (1 + \Delta M_{SC} / M_{S0}) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで、 Δw は基本底泥土に加わった粗粒分に含まれる水分 ΔM_W を基本底泥土の土粒子分 M_{S0} により算定した含水比変化 $(= \Delta M_W / M_{S0}) \times 100$ である。また、 $w = w_0 + \Delta w$ は上流域底泥土のうち基本底泥土に加わった ΔM_{SC} を除いた基本底泥土状態で考えた含水比である(ここでは換算含水比という)。また、 F_C は上式を考慮すると

$$\begin{aligned} F_C &= (M_{SF} / M_S) \times 100 \\ &= M_{SF} \times 100 / (M_{S0} + \Delta M_{SC}) \\ &= F_{CO} / (1 + \Delta M_{SC} / M_{S0}) \\ &= F_{CO} \cdot (w_T / w) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。したがって、粒度が F_C である底泥土の w は w_T と基本底泥土の w_0 と F_{CO} から

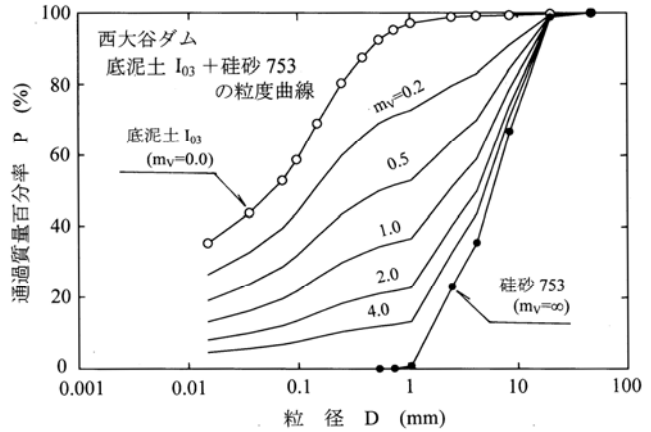


図 5 西大谷ダムにおけるモデル化底泥土の粒度曲線

$$w = (F_{CO} / F_C) \cdot w_T \quad (5)$$

により求まる。

このような取扱いにより、基本底泥土より粗粒分を多く含む上流域底泥土の固化処理強度は、 w_T ではなく粗粒分 ΔM_{SC} を除いた基本底泥土状態で表した w による強度成分と、基本底泥土に加わった粗粒分 ΔM_{SC} による強度成分から構成されると考えることができる。

(2) 粒度を変えた底泥土とその固化供試体の準備

以上の取扱いが成り立つことを、砂分を加えて F_C だけを変えたモデル化底泥土の試験により確認した⁸⁾。モデル化底泥土は、西大谷ダムの底泥土 I_{03} ($w_0=72.0\%$ 、図2の粒度曲線①～③)に硅砂753(硅砂7号、5号、3号を質量比1:1:1で混合して粒度調整した砂)をある一定の割合 m_v で加えて図5に示す粒度曲線をもつように粒度調整して F_C だけを変えたものである。モデル化底泥土の w は式(5)により基準値 $w_0=72.0\%$ になるように含水調整した。 m_v は底泥土の体積 V_{Mud} に対する硅砂753の体積 V_{Sand} の比

$$m_v = V_{Sand} / V_{Mud} \quad (6)$$

である。しかし、室内試験で使用する供試体の作製には体積比 m_v では不便なので、質量比 m_M

$$m_M = M_{Sand} / M_{Mud} = (\rho_{ts} / \rho_{tm}) \cdot m_v \quad (6')$$

を使用した。底泥土 I_{03} の密度 ρ_{tm} はヘドロや泥土における $\rho_t \sim w$ 関係により推定される $\rho_{tm}=1.55g/cm^3$ とし、硅砂753の密度 ρ_{ts} は乾燥状態で水中落させたときの平均値 $1.80g/cm^3$ とした。

固化材は底泥土のような高含水比粘性土の固化処理

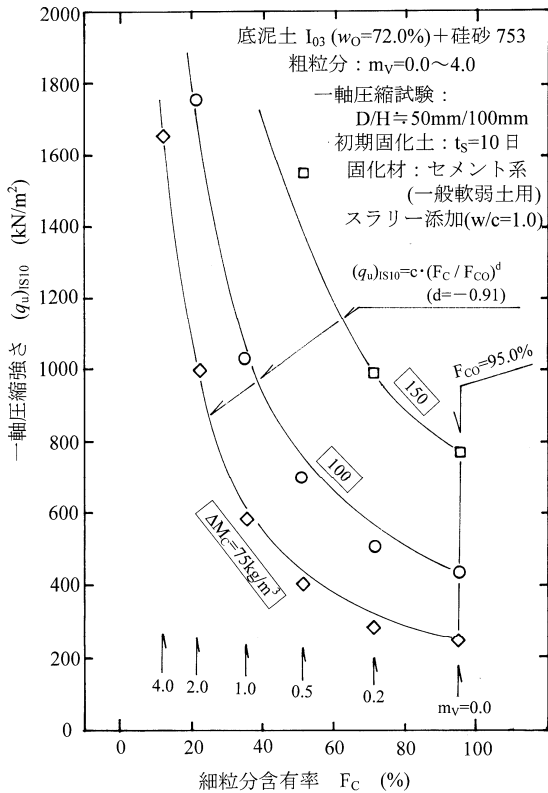


図 6 西大谷ダムにおける底泥土の $(q_u)_{IS10}$ と F_c の関係

に適したセメント系（一般軟弱土用）を使用した。固化材添加量は底泥土 1m^3 当りの質量 ΔM_c (kg/m^3) により表示し、質量 M の底泥土の初期固化に必要な固化材量 M_c は底泥土の密度 ρ_t から算定した ($M_c = M \cdot (\Delta M_c / \rho_t)$)。なお、底泥土 I_{03} に珪砂 753 を加えた底泥土の ρ_t は底泥土の ρ_{tm} と珪砂 753 の密度 ρ_{ts} から次式

$$\rho_t = (\rho_{tm} + m_v \cdot \rho_{ts}) / (1 + m_v) \quad (7)$$

により算定した。

固化処理底泥土の供試体は、底泥土にスラリー状態（水・固化材比 $w/c=1.0$ ）にした固化材を加え、小型ミキサーにより 2 分間以上攪拌混合してから、内径 D と高さ H が $D/H=50\text{mm}/100\text{mm}$ の成型モールド内に気泡が残らないように詰めて作製し、 $t=t_s=10$ 日だけ養生してから一軸圧縮試験に使用した。

(3) 底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度の影響

F_c を変えたモデル化底泥土を固化処理してから養生日数 $t_s=10$ 日目までに発揮された一軸圧縮強さ $(q_u)_{IS10}$ と F_c の関係を図 6 に示す。図から、固化処理底泥土の $(q_u)_{IS10}$ は粗粒分が増加 (F_c が減少) すると急増することがわかる。

基本底泥土に粗粒分が加わった底泥土の固化処理強

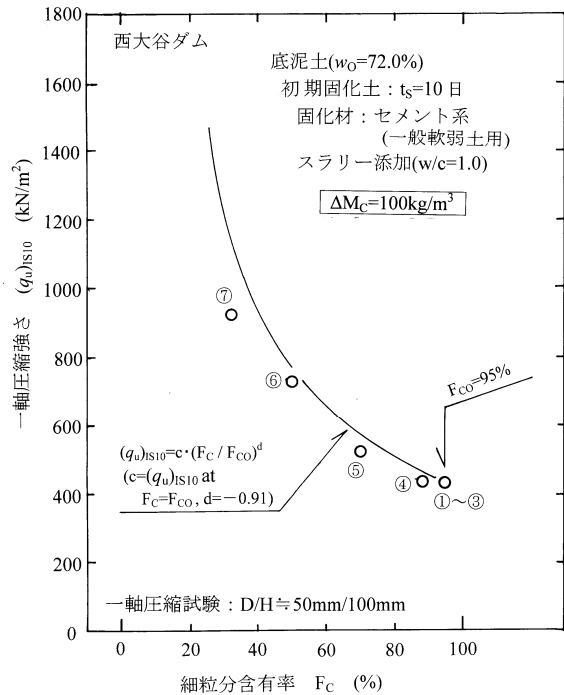


図 7 西大谷ダムにおける底泥土の $(q_u)_{IS10}$ と F_c の関係

度は、基本底泥土の固化処理土をモルタルに例えると粗粒分を加えた底泥土の固化処理土は粗骨材を含むコンクリートに相当するものと考えられる。つまり、粗粒分増加による強度は粗粒子を核にした粒子周囲の付着固化部の存在が大きな役割をするが、これは粗粒分量により以下のような特性を示すものと考えられる。加えた粗粒分が少ない段階では基本底泥土の固化処理強度に粗粒子の付着固化部による強度成分が加わり粗粒子量に比例的に強度が増加する傾向を示す。一方、粗粒分量がさらに増加して粗粒子の付着固化部が直接接触して骨格構造を形成するようになると、強度は僅かの粗粒分増加に対し急増するようになる。

このような F_c による $(q_u)_{IS10}$ の変化は $(q_u)_{IS10}$ と F_c を F_{c0} により正規化した F_c / F_{c0} との関係が両対数グラフ上ではほぼ直線で近似できることから、

$$(q_u)_{IS10} = c \cdot (F_c / F_{c0})^d \quad (8)$$

のような指数関数式により表現できる⁸⁾。ここで、 c は $F_c = F_{c0}$ における $(q_u)_{IS10}$ の値、 d は両対数グラフ上の直線の傾きである（図 6 の例では $d = -0.91$ ）。図 6 に示した曲線は上式によるものであるが、 $(q_u)_{IS10} \sim F_c$ 関係をうまく表せることがわかる。したがって、上式の関係を利用すれば基本底泥土の基準粒度 $F_c = F_{c0}$ 時の強度 $c = (q_u)_{IS10}$ がわかれば粗粒分増加 (F_c の減少) による強度変化を推定できる。

図7には西大谷ダムの池内の滞筋に沿って採取した底泥土①～⑦(w は $w_0=72.0\%$ になるように含水調整)を固化材添加量 $\Delta M_c=100\text{kg/m}^3$ で固化処理した時の強度 $(q_u)_{IS10}$ と F_c の関係を示す。図中の曲線は図6のモデル化底泥土の試験結果から得られた近似式(5)によるものであるが、池内に実際に堆積した底泥土の固化処理強度の粒度による影響をうまく近似できることがわかる。

以上の結果から、底泥土の物理化学的特性に影響を及ぼさない硅砂や砂礫土を加えたモデル化底泥土により求めた近似式により、実際の池に堆積した底泥土の固化処理強度の粒度の影響をうまく近似できることがわかる。

§5. あとがき

老朽化フィルダムの貯水池内には長年の間に大量の底泥土が堆積して、貯水容量の減少や水質悪化の原因になっている。しかし、これらのフィルダムは堤高が概ね $H=30\text{m}$ 程度までで、大部分が中山間地に立地し流入河川も小規模なので、堆積した土砂は最上流域には砂や礫も堆積するが、シルト・粘土分のような細粒分を多く含む底泥土が主体である。

一般に、池や流入河川がさらに小規模なため池では、池内に堆積した底泥土の粒度の相違は少なく、底泥土を固化処理して所定の強度を得る場合の管理は含水比の影響だけを考慮することが可能である。これに対して、フィルダムでは底泥土の粒度は池内位置で相違し、底泥土を固化処理するには強度に及ぼす含水比だけでなく粒度の影響も考慮しなければならない。そして、池内で底泥土の粒度特性に相違があっても、物理化学的特性は一定であることから、池上流域の粗粒分を多く含む底泥土は堤体付近の水深の深い下流域に堆積した底泥土に物理化学的特性に影響を及ぼさない粗粒分が加わったものと考えることが可能である。

このような考え方に立って、粒度調整したモデル化底泥土の固化処理土の試験を実施し、固化処理強度 $(q_u)_{IS10}$ と粒度 F_c の関係を近似できる近似式

$$(q_u)_{IS10}=c \cdot (F_c/F_{c0})^d$$

が得られているが、この式は実際の池に堆積した底泥土を固化処理した時の $(q_u)_{IS10}$ に及ぼす F_c の影響をうまく表現できる。

参考文献

- 1) 福島伸二, 石黒和男, 北島 明, 池田康博, 酒巻克之, 谷 茂: 固化処理したため池底泥土の盛土材への適用性の研究, 土木学会論文集, No. 666/III-53, pp. 99-116, 2000.
- 2) 福島伸二, 石黒和男, 北島 明, 谷 茂, 池田康博, 酒巻克之: 固化処理したため池底泥土の堤体盛土材への適用性確認のための現場実証試験, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp. 269-284, 2001.
- 3) 福島伸二, 北島 明, 谷 茂, 石黒和男: 固化処理した底泥土を砕・転圧した築堤土の目標強度設定・配合試験法と施工管理法の提案, 土木学会論文集, No. 715/III-60, pp. 165-178, 2002.
- 4) 福島伸二, 北島 明, 谷 茂, 石黒和男: 固化処理した底泥土により築造した均一型堤体盛土の強度・遮水特性, 土木学会論文集, No. 750/III-65, pp. 205-221, 2003.
- 5) 福島伸二, 北島 明, 谷 茂, 石黒和男: 固化処理底泥土により築造した傾斜遮水ゾーンによる老朽ため池堤体の漏水対策事例, 土木学会論文集, No. 764/III-67, pp. 341-357, 2004.
- 6) 福島伸二, 谷 茂, 北島 明: 固化処理底泥土を用いた急勾配・高堤体ため池の補強法の事例研究, 土木学会論文集, No. 771/III-68, pp. 289-308, 2004.
- 7) 谷 茂, 福島伸二, 北島 明: 底泥土を活用した既設フィルダムの堤体改修工法, ダム工学, Vol. 14, No. 3, pp. 177-188, 2004.
- 8) 福島伸二, 谷 茂, 北島 明: 固化処理底泥土の強度の及ぼす粒度・含水比の影響, 土木学会論文集(投稿中)
- 9) 北島 明, 谷 茂, 福島伸二, 西本浩司: 固化処理底泥土を用いた老朽化フィルダム堤体の耐震補強に関する事例研究, ダム工学, Vol. 15, No. 3, pp. 227-240, 2005.

ひとこと

本年度は、砕・転圧盛土工法を堤高30mクラスのフィルダムの改修工法として提案できるよう努めていくとともに、一曲でも多く六甲嵐を斉唱できるよう球場に足を運びたいと思います。



北島 明