

砕・転圧盛土工法のフィルダムへの適用性検討のための現場実証試験

北 島 明 福 島 伸 二 ^{*1}

概 要

フィルダムではため池と比較して、貯水池や流入河川の規模が大きいため砂礫のような粗粒土が流れ込みやすく、貯水池内には粗粒から細粒までの広範囲な粒度の底泥土が堆積し、底泥土を固化処理して築堤土とする場合の強度管理に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。筆者らはこれまでにフィルダムの堤体改修に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場合を想定し、室内試験により底泥土の固化処理強度に及ぼす含水比と粒度の影響を調べ、これらの影響を考慮した強度管理法を提案してきた。

本稿では実際の貯水池内に堆積していた粒度と含水比の異なる底泥土を用いて実施工レベルでの現場実証試験を実施し、提案した固化処理土の強度管理法が実施工でも十分に適用でき、砕・転圧盛土工法がフィルダム堤体改修工法として適用できることを報告する。

Site test to examine the applicability a new method to repair damaged embankments using cement-mixed muddy soil

Abstract

Most old fill-dams have led to muddy soil accumulating in the reservoir. This muddy soil is generally very soft and clayey and leads to changes in water content and the grading. In order to make efficient use of this muddy soil as embankment soil, we have developed a new type of muddy soil-cement mix. The strength and strain behavior of the cement-mixed muddy soil is influenced considerably by the water content and the grading of muddy soil. We have proposed a strength control method considering the effect of the grading and the water content of muddy soil on the cement-mixed muddy soil, and proved the proposed method by the site investigation test under actual conditions.

キーワード： 底泥土 固化処理土 堤体改修
粒度 含水比 強度

^{*1} 建設本部 土木エンジニアリングセンター

§1. はじめに

筆者らは老朽化したため池やフィルダムの堤体改修に池内に堆積した底泥土を固化処理して築堤土として活用できる砕・転圧盛土工法¹⁾を開発し、数箇所のため池改修に適用してきた。筆者らは砕・転圧盛土工法が $H=30\text{m}$ 程度以下の比較的小規模な老朽化フィルダムの堤体改修にもそのまま適用できると考え、固化処理した底泥土を用いた堤体補強における設計法の提案をしてきた。しかしながら、フィルダムではため池と比較すると流入河川や貯水池の規模が大きくなり、堆積場所により底泥土の粒度分布が粗粒から細粒まで広範囲にわたるため、底泥土を固化処理する時の強度管理には含水比だけでなく粒度も考慮する必要性が生じた。これまで、筆者らは室内試験により底泥土の固化処理強度に及ぼす含水比と粒度の影響を調べ、これらを考慮した強度管理法を提案してきた²⁾。本稿では、実際の池に堆積した含水比と粒度が変化する底泥土を用いて実施レベルの固化処理試験を実施し、提案した含水比と粒度を考慮した強度管理法の適用性を確認した結果について報告するものである。

§2. 底泥土の強度に及ぼす粒度と含水比の影響

池内の底泥土の物理化学的性質は流域や河床の地質に規定されるので基本的に同じである。したがって、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さない粗粒分だけが加わったものと考えられる。上流側の粗粒分の多い底泥土の全体の含水比 w_T は、下流側の細粒分の多い底泥土を基本底泥土として、その含水比 w_0 と細粒分含有率 F_{C0} を基準とすれば、基本底泥土から増加した粗粒子分を除いた状態での含水比 w は

$$w = (F_{C0}/F_C) \cdot w_T$$

と表せる(ここではこれを換算含水比という)²⁾。

また、含水比と粒度が変化する底泥土を固化処理した時の強度は、底泥土の w と F_C と基本底泥土の基準の w_0 と F_{C0} と差を考慮するとそれぞれ

$$(q_u)_{IS10}(F_{C0}, w) = a \cdot (w/w_0)^b$$

$$(q_u)_{IS10}(F_C, w_0) = c \cdot (F_C/F_{C0})^d$$

で表せる。ここで、 a は基本底泥土の $w=w_0$ における強度 $a=(q_u)_{IS10}(F_{C0}, w_0)$ 、 c は底泥土(F_C, w)の $F_C=F_{C0}$ における強度 $c=(q_u)_{IS10}(F_C, w_0)$ 、 b と d は配合試験により求まる係数である(b は底泥土の種類によらず $b \approx -1.37$ である)。このような関係は底泥土に粗粒分を加えたモデル化底泥土を用いた一連の室内試験から求められた実験式である。

§3. 現場実証試験ヤードの構成

前述の関係式が実施工においても適用可能かを判断するため、宮城県北西部の丘陵地にある孫沢ダムの堤体に近い左岸側の池敷の比較的平坦な場所で現場実証試験を実施した。孫沢ダムは1937年(昭和3年)に強風化砂質凝灰岩からなる砂質シルト土により築造された均一型のフィルダムであり、1967年(昭和42年)に受けた台風被害の復旧対策として1970年(昭和45年)にアスファルトフェーシングを用いた漏水防止工事により堤高 $H=16.5\text{m}$ の表面遮水型ダムに改修されている。現場試験は池内に堆積した底泥土の室内配合試験と、試験結果による目標強度を現場で達成するための固化材添加量の決定、砕・転圧盛土工法による実施レベルでの現場固化・盛土試験による初期固化土と砕・転圧土の強度特性調査からなっている。

現場実証試験は砕・転圧盛土工法の標準的な施工工程に従って可能な限り実施工と同じ施工機械を使用し、同じ手順で実施した。試験盛土は貯水面以下の環境において向こう2年間にわたって経過調査をできるように池敷面からの掘込み型にした。試験盛土の概念図を図1に示す。

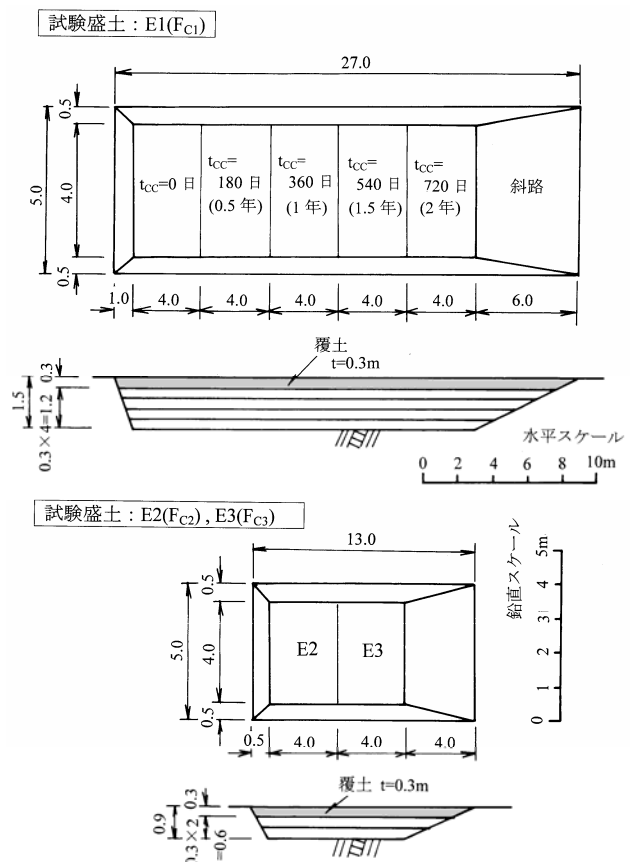


図1 試験盛土の概念図

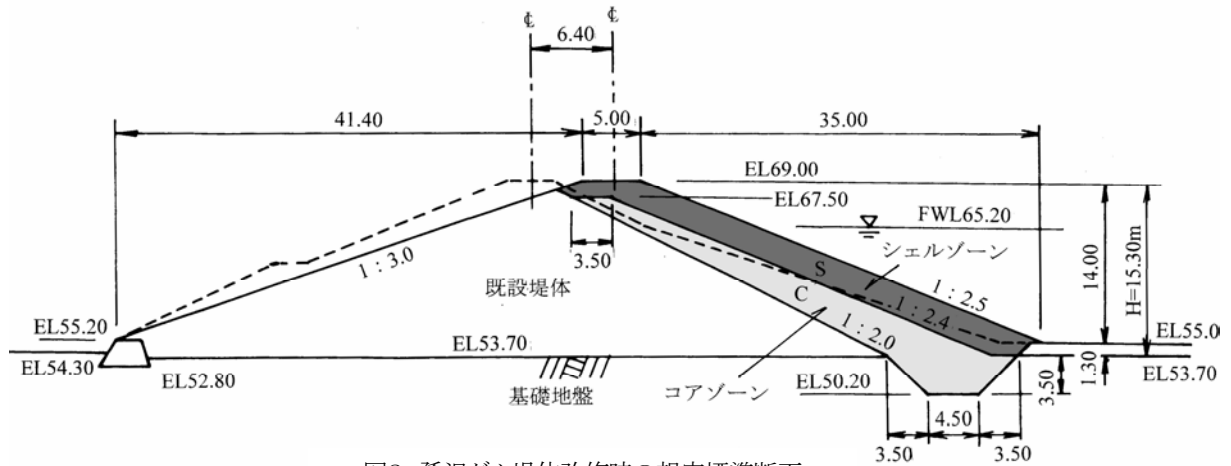


図2 糸沢ダム堤体改修時の想定標準断面

表1 初期固化ピット P1～P3 の底泥土の物理特性

ピット	w_t	F_c	w
配合試験	93.0	86.6	93.0
P1	60.7	63.8	82.4
P2	44.5	39.6	97.3
P3	34.0	30.3	97.2

初期固化ピットは粒度を変えた3種類の底泥土を固化処理できるようにP1～P3の3箇所用意した。P1が最も下流側の細粒分の多い底泥土を対象とし、P3が上流側の粗粒分の多い底泥土を対象としている。各ピットに投入した底泥土の物理特性を表1に示す。

試験盛土E1は、図1の上の図に示すように、固化ピットP1で初期固化した底泥土(F_{c1})を砕・転圧した砕・転圧土地盤を築造するものである。盛土規模は、盛立当日の $t_{cc}=0$ 日目の調査に加えて $t_{cc}=0.5$ 年、1年、1.5年、2年経過毎に調査をするために、試験区画 $4m \times 4m$ を5面確保できるような盛土表面広さを約 $4m \times 20m$ とし、盛土層厚を試験盛土の深さ方向の調査ができるように4層分の約1.2mとした。

試験盛土E2とE3は、図1の下図に示すように、固化ピットP2とP3で初期固化した底泥土(F_{c2} 、 F_{c3})を砕・転圧して隣り合わせに砕・転圧土地盤を築造するものである。盛土規模は調査が盛立当日の $t_{cc}=0$ 日目だけなので、粗粒分の異なる2種類の底泥土からなる砕・転圧土の試験区画 $4m \times 4m$ を2面確保できるように広さ $4m \times 8m$ とし、盛土層厚を2層分の約0.6mとした。なお、これらの試験盛土表面には層厚0.3mの池内の非固化処理土を使用して覆土を設けた。

§4. 目標強度の設定

目標強度は糸沢ダムを砕・転圧盛土工法による改修を想定した堤体断面について実施した安定計算から、堤体全体が $F_s \geq 1.2$ を満足して安定であるために必要な砕・転圧土部の強度レベルとして設定した。既設堤体の強度パラメータ(c 、 ϕ)は既往の文献³⁾を参考にして推定した値を採用した。

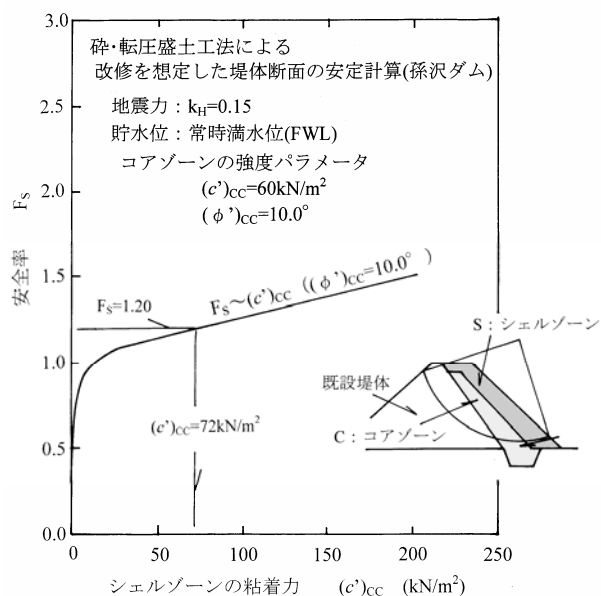
改修断面は、図2に示すように、堤体上流側に堤体の補強のためのシェルゾーンと漏水防止のためのコアゾーンとした傾斜ゾーン型の堤体構造を想定した。すなわち、堤体上流側は改修後の堤体全体が既設堤体内に入るように、かつ強度劣化した表層部を除去するために既設堤体を1:2.0で掘削した部分に、コアゾーンを1:2.4に、シェルゾーンを1:2.5になるようにゾーニングした。また、堤体下流側は既設の堤体法先部から勾配1:3.0で掘削して緩勾配化により安定化させることにした。シェルゾーンは上流域に堆積した粗粒分の多い底泥土を用いた強度重視の砕・転圧土により、コアゾーンは堤体付近の下流域に堆積した細粒分の多い底泥土を用いた遮水性重視の砕・転圧土によりそれぞれ築造することを想定した。

想定した改修堤体の安定計算は、コアゾーンの強度をトラフィカビリティが確保できる強度(c)_{CCTrafficability}の砕・転圧土により築造するものとし、シェルゾーンの(c)_{CC}をパラメトリックに変えて行い F_s と(c)_{CC}の関係を求めた。 (ϕ) _{CC}は、 ΔM_c によらずほぼ一定であるので試験値に余裕をみた一定値 (ϕ) _{CC}=10°とした。

安定計算により得られた $F_s \sim (c)$ _{CC}関係を図3に示す。図より、堤体全体が $F_s=1.20$ を満足して安定であるために必要なシェルゾーンの目標強度は

$$(c)_{CCStability}=72\text{kN/m}^2$$

となる。

図3 シェルゾーンの粘着力 c' ～堤体全体の安全率 F_s

§5. 含水比と粒度を考慮した強度管理法の適用性

5.1 初期固化土の一軸圧縮試験

初期固化ピットにおいて初期固化した底泥土の約 1 ヶ月間における強度発現特性を確認するために、採取した初期固化土供試体の一軸圧縮試験を実施した。

供試体は固化処理直後のピット内に内径 75mm×肉厚 0.5mm×長さ 150mm のシンウォールチューブを埋設し、翌日掘り出して両端面を整形した。これらの供試体は養生容器内で養生し、初期固化後から $t=t_s=1, 3, 10, 28$ 日目にそれぞれ2供試体について一軸圧縮試験を実施した。

図4には固化ピット P1 ($F_{C1}=63.8\%$)から採取した初期固化土供試体の一軸圧縮強さ $(q_u)_{IS}$ と養生日数 $t=t_s$ の関係を示す。この図には、目標強度範囲として $(q_u)_{IS}^*$ と α_{FL} により強度割増しをした $(q_u)_{IS}^*/\alpha_{FL}$ を示してある。なお、初期固化土の目標強度 $(q_u)_{IS}^*$ は F_C により強度低下比 R_3 の値が異なるため、 $(q_u)_{IS}^*=(q_u)_{CC}^*/R_3$ の関係 ($(q_u)_{CC}^*=146\text{kN/m}^2$) を用いて求めている。これらの図から、 $(q_u)_{IS}$ は養生期間とともに増加していくが、 $t=t_s=10$ 日付近まで急増していき、それ以降の増加傾向は鈍化してくることがわかる。また、 $t=t_s=10$ 日の強度 $(q_u)_{IS10}$ は目標とする $(q_u)_{IS}^* \sim (q_u)_{IS}^*/\alpha_{FL}$ の範囲にほぼ入っていることがわかる。

次に、固化ピット P1 の $(q_u)_{IS10}$ と、固化ピット P2 ($F_{C2}=39.6\%$) と P3 ($F_{C3}=30.3\%$) における $t=t_s=10$ 日目の強度 $(q_u)_{IS10}$ と F_C に対してプロットした関係を図5に示す (○印は平均値を、上・下に伸びた縦線は最大・最小値範囲を示す)。図には F_C により変化する目標強度の範囲

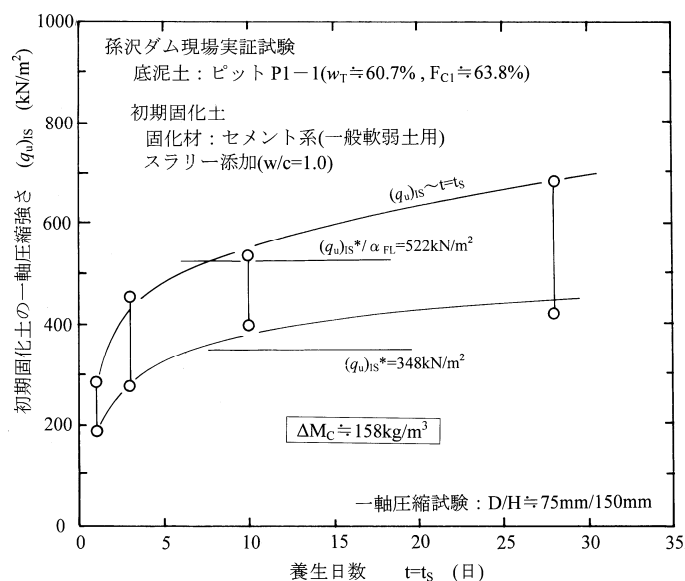


図4 初期固化土の一軸圧縮強さ(P-1 ピット)

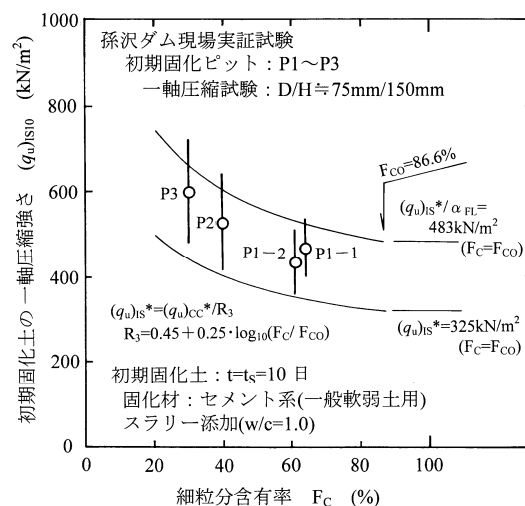


図5 初期固化土の一軸圧縮強さ～細粒分含有率

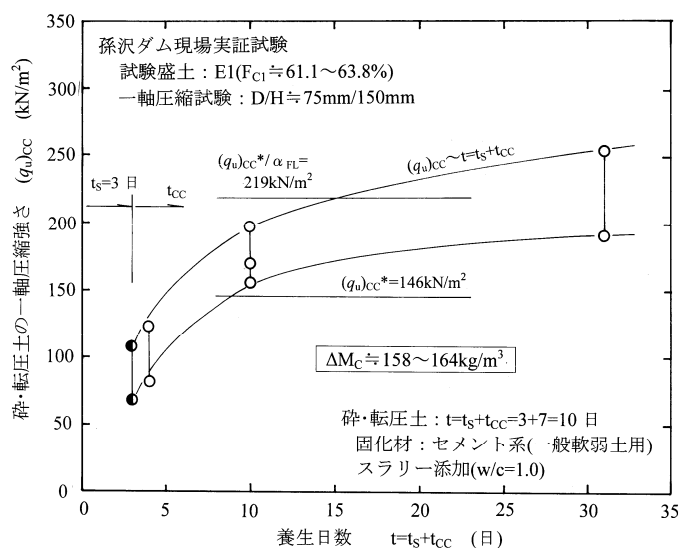


図6 砕・転圧土の一軸圧縮強さ(E1 ピット)

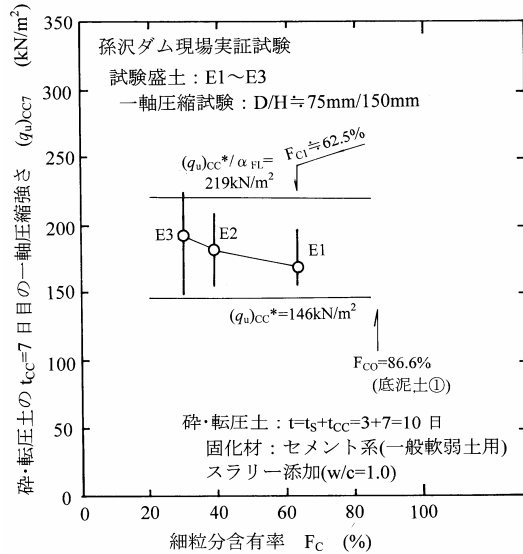


図7 砕・転圧土の一軸圧縮強さ～細粒分含有率

$(q_u)_{IS}^* \sim (q_u)_{IS}^* / \alpha_{FL}$ を曲線で示してある。図から、粗粒分が多い底泥土からなる初期固化土の方が強度のバラツキ範囲が大きい傾向を示しているが、どの固化ピットでも目標強度にほぼ入っており、 $F_{cc} = 86.6\%$ を基準にして $F_c \approx 60 \sim 30\%$ までの範囲で変化する底泥土であっても所定の強度範囲に初期固化できたことを示している。

5.2 砕・転圧土の一軸圧縮試験

図6は粗粒分 $F_{c1} = 63.8\%$ の底泥土からなる砕・転圧土で築造した試験盛土 E1 から採取した不攪乱供試体についての一軸圧縮試験結果である。供試体は室内の恒温恒湿状態で養生し、所定の養生日数を経過させた後、約 1 ヶ月間における強度発現特性を調べた $(q_u)_{cc} \sim t = t_s + t_{cc}$ 関係を示す($t_{cc} = 7$ 日目 の試験のみ 3 供試体について実施)。図7は目標強度 $(q_u)_{cc}^*$ の設定日に相当する $t_{cc} = t - t_s = 10 - 3 = 7$ 日目の強度 $(q_u)_{cc7}$ と F_c の関係を示す(記号○印は 3 供試体の平均値を、記号の上・下の縦線は最大・最小値の範囲を示す)。図中には目標とする強度範囲 $(q_u)_{cc}^* \sim (q_u)_{cc}^* / \alpha_{FL}$ を示してある。

図から砕・転圧土の強度 $(q_u)_{cc7}$ は、粗粒分が多い底泥土を母材とする砕・転圧土ほど強度のバラツキ範囲が大きい傾向が見られるものの、どの試験盛土においても $(q_u)_{cc7}$ はほぼ目標強度範囲に入っていることがわかる。このことは、室内試験レベルで確認した「含水比と粒度の影響を考慮した強度管理法」が配合試験時に採取した $F_{cc} = 86.6\%$ の底泥土を基準にして、実際に池内に堆積していた $F_c = 64 \sim 30\%$ までの範囲で変化する底泥土を所定の強度範囲にある砕・転圧土を製造するのに有効であることを示している。

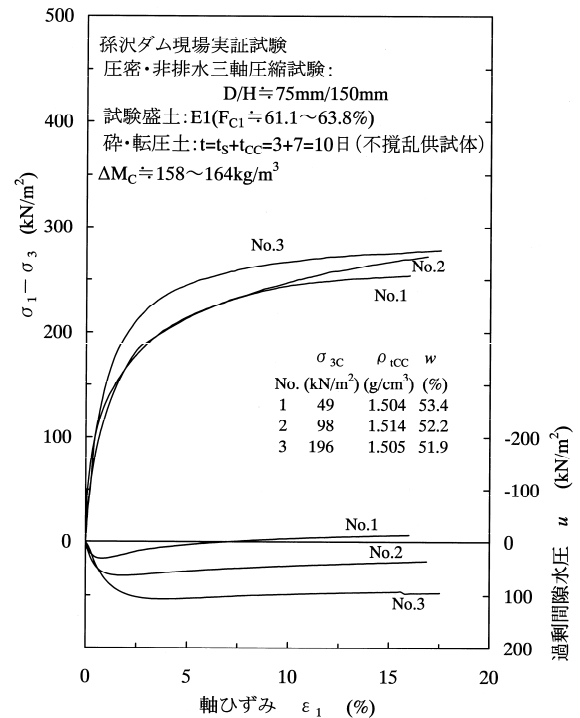


図8 CU 試験における応力～ひずみ曲線

また、粗粒分が多い底泥土からなる砕・転圧土ほど強度のバラツキ範囲が大きいことは、初期固化土の強度状態を反映しているためと思われる。したがって、目標強度を達成するための ΔM_c は w と F_c が基準値である w_0 や F_{cc} から離れるほど、近似式では完全に考慮しきれない可能性があることに留意しなければならない。

5.3 砕・転圧土の三軸圧縮試験

粒度の異なる底泥土からなる砕・転圧土により築造した試験盛土の強度パラメータを確認するために、試験盛土 E1 ～ EP3 から採取した不攪乱供試体の等方圧密・非排水三軸圧縮試験を実施した。図8には試験盛土 E1 の砕・転圧土($t = t_s + t_{cc} = 3 + 7 = 10$ 日目)の不攪乱供試体の三軸圧縮試験により求められた $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim u \sim \epsilon_1$ 関係を示す。また、図9には図8に示した応力～ひずみ曲線の $\epsilon_1 = 15\%$ 時の偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{15}$ から求めたMohrの応力円と強度パラメータ $((c)_{cc7}, (\phi)_{cc7})$ を示す。

図10には試験盛土 E1 の結果と、試験盛土 E2 と E3 から採取した不攪乱供試体の試験から得られた $((c)_{cc7}, (\phi)_{cc7})$ を F_c に対してプロットした結果を示す(E1 のデータは $F_c \approx 62.5\%$ に対してプロット)。図中には目標とする粘着力の範囲 $(c)_{cc}^* \sim (c)_{cc}^* / \alpha_{FL}$ を示してある。

図から以下のことがわかる。砕・転圧土の $(c)_{cc7}$ は、各試験盛土とも目標とする粘着力範囲に入っており、また内部摩擦角 $(\phi)_{cc7}$ は 10° 前後の値を示している。このことは、

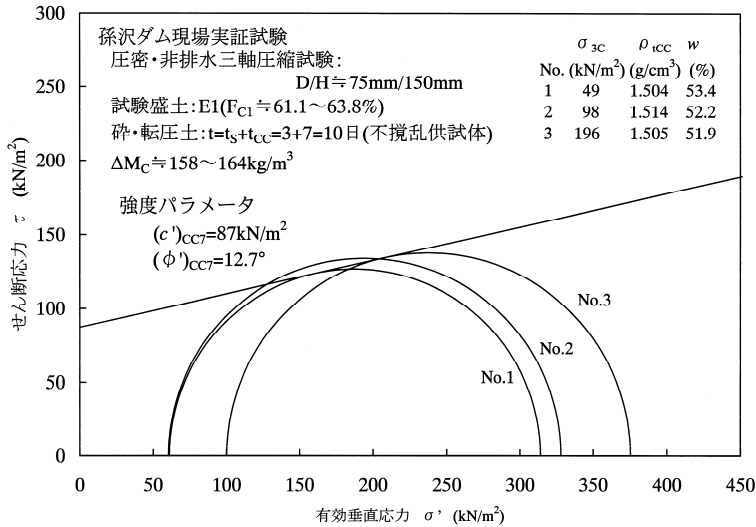
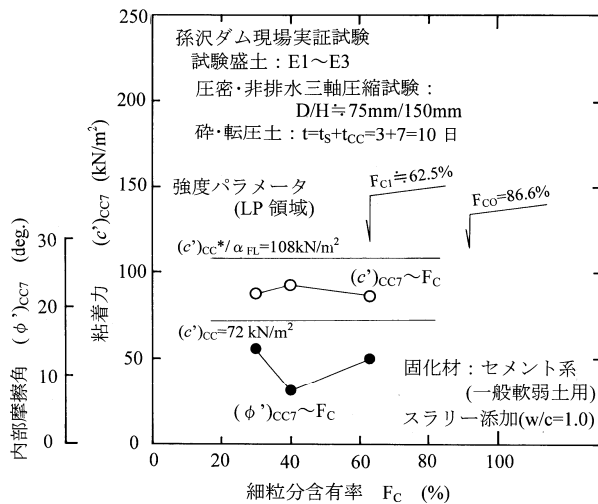


図9 砕・転圧土の CU 試験における Mohr の応力円

図10 内部摩擦角、粘着力～細粒分含有率関係
(砕・転圧土の CU 試験)

実施工において一軸圧縮強さ(q_u)_{IS}あるいは(q_u)_{CC}を用いて施工管理を行っても、三軸圧縮試験による目標とする(c')_{CC7}を確保できることを示している。

§6. おわりに

本稿はフィルダムの堤体改修に砕・転圧盛土工法を採用して、池内の堆積一で含水比 w と粒度 F_C が変化する底泥土を固化処理して築堤土に利用する場合を想定し、著者らが w と F_C が変化する底泥土の室内試験結果から提案してきた「 w と F_C の影響を考慮した固化処理底泥土の強度管理法」の適用性を確認するために、実施工レベルの現場固化・盛

土試験を実施したものである。

実施した現場試験により、提案した「 w と F_C の影響を考慮した固化処理底泥土の強度管理法」が、 w や F_C が広い範囲で変化する底泥土であっても目標とする強度範囲の初期固化土あるいは砕・転圧土に固化処理できることが確認できた。しかしながら、 F_C が粗粒分を多く含む室内配合試験の基準値 F_{C0} との差が大きくなる底泥土ほど、固化強度に及ぼす w と F_C の影響を近似した指数関数式がこれらの影響を完全に考慮しきれない傾向を示すことに留意しなければならない。

この問題は今後の課題として、実績を積み重ねながら近似精度を高めることで解決して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 谷 茂, 福島伸二, 北島 明, 酒巻克之: 砕・転圧盛土工法設計・施工法について, 農業工学研究所技報, 第202号, pp.141-182, 2004
- 2) 北島 明, 福島伸二, 谷 茂, 西本浩司: 老朽化フィルダムに堆積した底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度の影響に関する調査研究, 土木学会論文集 C Vol.63 No.2 pp.417-427, 2007
- 3) 例えば, 中野博視: アースダム(孫沢ダム)におけるアスファルト・フェイシングについて, 農業土木学会誌, Vol.39, No.11, pp.20-26, 1971
- 4) 北島 明, 福島伸二, 谷 茂, 五ノ井淳, 酒巻克之: 含水比と粒度が変化する底泥土の固化処理時の強度管理法の適用性, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, 253-269, 2007

謝 辞 本研究に貴重なご意見、ご協力をいただいた農研機構農村工学研究所の谷部長に深謝いたします。



北島 明

ひとこと

本年度は、砕・転圧盛土工法を堤高 30m クラスの大原ダムの改修工法に適用し、フィルダム堤体改修の実績を挙げるとともに、来年の新戦力の早期発掘のために鳴尾浜の動向に注目していきたいと思います。