

藤沼ダム建設工事におけるコア材の飽和度管理

永井裕之^{*1}・三反畑勇^{*1}・山岸明広^{*2}

2011年東日本大震災での藤沼ダム決壊の主要因の一つは「盛土締固め不足」である。このことから、藤沼ダムの復旧工事では、崩壊した堤体よりも確実に高品質な盛土の実現を目的とし、締固め度 Dc を指標とした従来の密度管理に加え、「最適飽和度」の実現を目指す飽和度管理も実施した。なお、最適飽和度とは、締固め曲線上の最大乾燥密度・最適含水比時の飽和度であり、締固めエネルギーと土質が変化しても変化が一定の範囲内ならば概ね一定値を示す特徴がある。品質管理の結果、締固め度・飽和度の全測定値が管理基準を満足し、高品質の盛土が実現できた。本論では、副堤のコア材の品質管理手法および施工管理の結果を報告する。

キーワード：フィルダム、飽和度管理、締固め度

1. はじめに

現在、2011年東日本大震災で決壊した藤沼ダム（本堤と副堤）の復旧工事が行われている。この決壊の主要因は全般的な締固め不足と、堤体上部で砂質土を使用し締固めが特に不足していたことである。このことから、復旧工事では、旧堤体よりも確実に安定な盛土の実現を目指して①土質材料の管理、②締固めエネルギーの高いレベルでの一様性を目指した重機通過回数と撒出し厚さの管理、③従来の締固め度の下限値管理に加えて飽和度による締固め管理を実施した。なお、最適飽和度とは、締固め曲線上の最大乾燥密度・最適含水比時の飽和度であり、締固めエネルギーと土質が変化しても変化が一定の範囲内ならば概ね一定値を示す特徴がある。

上記の②と③を実施した結果、現場での締固め度・飽和度の全測定値は管理基準を満足した。特に、それぞれの箇所での実締固め条件の下での最大乾燥密度に近い乾燥密度が一貫して得られ、高品質の盛土が実現できたことを確認した。本論では、藤沼ダム副堤の中央コア部の施工管理に飽和度管理^{1)~6)}を適用した結果を報告する。

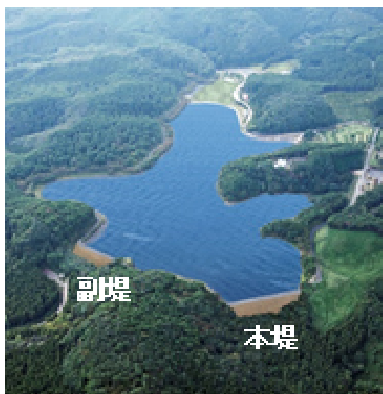


図-1 藤沼ダム完成予想図

2. 工事概要

藤沼ダムは、図-1に示すように、福島県須賀川市にある農業用貯水池（藤沼湖）の本堤（高さ31.4m）、副堤（高さ18m）の2つのフィルダムからなる。

図-2に副堤の全体図を示すが、堤体は中心遮水型で、コアゾーン（粘性土）の外側はフィルターゾーン（碎石）、ランダムゾーン、ロックゾーンから構成されている。本論では、副堤工事におけるコアゾーンの盛土材（コア材）の選定と締固め管理手法について述べる。

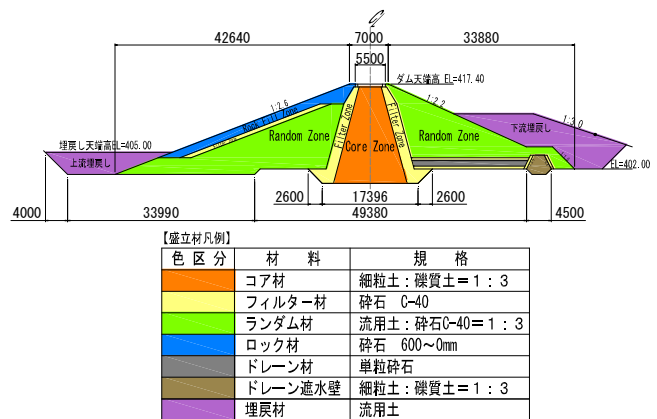


図-2 副堤全体図

3. コア材の選定と盛立仕様等の検討

コア材は、良質な粘性土の採取が困難であったため、福島県内で購入した細粒材（粘性土：降下火山灰質土）と粗粒材（礫質土：風化安山岩）を乾燥重量比1:3で混合して用いた。盛立仕様と品質管理基準は表-1に示す検討フローによって設定した。以下に検討結果を示す。

*1 土木研究部 *2 東北支店

表-1 盛立仕様および品質管理基準の検討フロー

検討フロー	試験の概要	主な結果など
①室内混合試験	細粒材, 粗粒材およびコア材 (室内混合) の物理試験, 締固め試験を事前に実施して, コア材の施工含水比等の目安を把握する。(各材料を現場に搬入前に実施した。)	図3.4 と表2
②現場混合試験	ストックヤードで重機を用いた混合攪拌および含水比調整 (曝気) を行って施工方法を決定するとともに, 現場混合したコア材で室内試験 (物理, 締固め) を実施し現場転圧試験の仕様を設定する。	図5.9 と表3
③現場転圧試験	19t 級振動タンピングローラーを用いて3 含水比条件で転圧試験を行って締固め特性を把握し, 転圧仕様を設定する。	図6.7, 8, 9 と表4
④室内確認試験	転圧試験等の結果を基に, コア材の代表的な室内試験条件を設定し, 締固め透水三軸圧縮圧密などの試験を行い管理基準を設定する。	図10

表-2 コア材の材料特性

	締固め試験結果 (室内混合試験)		物理試験結果の範囲 (現場混合試験)		
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最適含水比 w_{opt} (%)	自然含水比 w_c (%)	細粒分含有率 F_c (%)	礫率 ($D \geq 4.75$ mm) $P_{4.75}$ (%)
細粒材 [単独]	0.919	62.4	62.8~118.5 (平均 88.6)	78.1~96.7 (平均 90.1)	0
粗粒材 [単独]	2.089	9.5	4.2~9.5 (平均 7.5)	11.1~12.8 (平均 12.1)	39.3~48.4 (平均 43.9)
コア材	1.815	15.9	—	27.3~30.6 (平均 29.0)	27.7~30.6 (平均 29.2)

3.1 コア材の選定

表-1の①室内混合試験で実施した粒度試験および締固め試験の結果を図-3, 図-4に示す。コア材 (19mm アンダー)の締固めエネルギーレベルCELが標準プロクター (1Ec)での最適含水比は15.9%, 最大乾燥密度は1.815g/cm³であった。表-2には、後述する現場混合試験において実施した物理試験で得た、ストックヤードで採取した盛土材の細粒分含有率と礫率の変動範囲も示す。

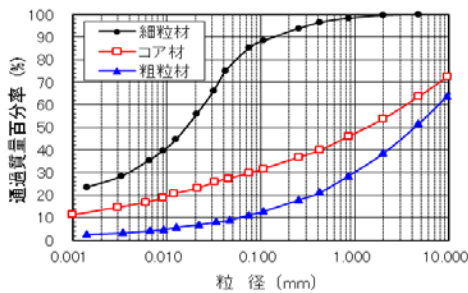


図-3 コア材料および混合したコア材の粒度

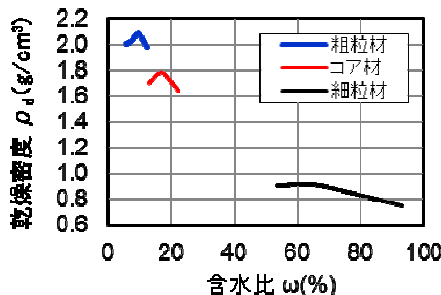


図-4 室内締固め試験結果 (1Ec)

3.2 盛立仕様の設定

検討フローの②現場混合試験では、まず含水比の高い細粒材を厚さ約20cmで広く撒き出して天日乾燥し (2日程度), 次にスタビライザーで細粒材と粗粒材を1:3で混合攪拌しながら曝気を促進し (図-5), 最後にストックパイルしたコア材をバックホウで混合攪拌して含水比を調整した。ここで採取したコア材の締固め試験 (1Ec) で得られた最適含水比 w_{opt} は 18.5%程度であった。

検討フローの③コア材現場転圧試験は、19t 級タンピングローラー (図-6) を用いて、含水比3種、撒き出し厚25cm, 転圧速度3~4km/h, 転圧回数6, 8, 10, 12回の条件で実施した。設定含水比は、図-4で示した1Ecの締固めでの最適含水比 $w_{opt} = 18.5\%$, 乾燥側 $w_{dry} = w_{opt} - 1.5\% = 17.0\%$, 湿潤側 $w_{wet} = w_{opt} + 4\% = 22.5\%$ ($D_c = 95\%$ に対応する湿潤側含水比)としたが、転圧後の含水比は設定値をやや下回った。現場密度試験 (砂置換 $\phi 20$ cm, 突き砂法) と現場透水試験は、図-7のように最終転圧面の凹凸を除去してから実施した。主な結果を表-3, 図-8に示す。 $w = w_{wet}$ では、8回以上の転圧で繰り返しの傾向が認められ、締固め効率も低い。 w を $w_{opt} + 0.5\%$ 程度に設定すれば、8回転圧で $D_c \geq 95\%$, 現場透水係数 $\leq 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s という管理基準を十分に満足できると判断した。

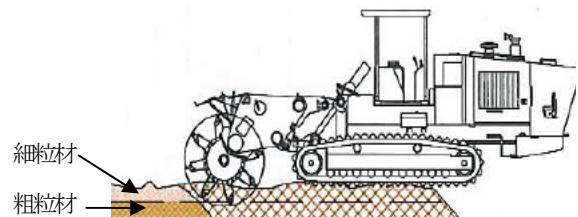


図-5 スタビライザーによる攪拌混合状況

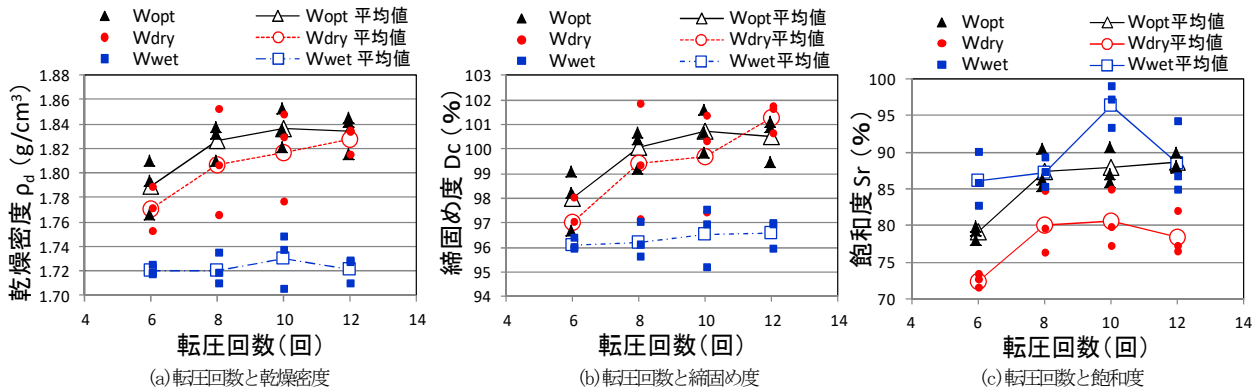


図-8 盛立試験結果



型式	SV900TV
車体重量	20.0 t
起振力	35.0 t
寸法	全長6.25×全幅2.53m
ドラム	幅2.15 m フート高さ(突起) 11.5cm

図-6 締固め重機(タンピングローラー)

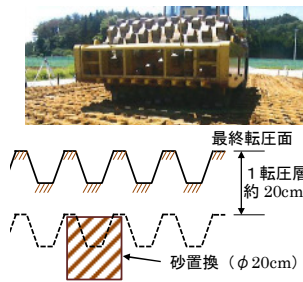


図-7 密度試験方法

場混合試験でのコア材の室内締固め試験と現場転圧試験の結果(転圧回数=8)を示す。室内締固め試験でCELを1.0Ec, 2.0Ec, 4.5Ecと変化させても $(\rho_d)_{max}$ が得られる最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ はほぼ一定であり、 $w = w_{opt}$ で8回転圧の現場締固め状態は $S_r = (S_r)_{opt}$ 状態に近い。従って、 $S_r = (S_r)_{opt}$ 状態を目指す飽和度管理が適用可能と判断できた。また、現場での転圧回数=8での締固め状態は、繰り返しが生じた $w = w_{wet}$ の場合を除くと室内締固め試験でのCEL=1.0Ecの結果に近い。このことから、実盛立て工事での ρ_d と w の品質管理値はEcの室内締固め試験の結果を基準にして $0.95 \times (\rho_d)_{max}$ と $w_{opt} + 0.5\%$ とした。図-10は検討フローの④室内確認試験の代表的な結果で、透水係数の要求品質($k \leq 1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$)から飽和度下限線SLを $80\% = (S_r)_{opt} - 5\%$ に、

表-3 現場転圧試験の主な結果(8回転圧)

現場締固め含水比条件	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm^3)	飽和度 (%)	透水係数 (cm/s)	
乾燥側 w_{dry}	1	15.0	1.851	84.6	6.26×10^{-6}
	2	15.2	1.805	79.5	8.24×10^{-6}
	3	15.5	1.765	76.3	6.21×10^{-6}
	平均	15.3	1.807	80.1	6.84×10^{-6}
最適 w_{opt}	1	15.5	1.838	85.4	4.95×10^{-6}
	2	16.4	1.810	86.2	5.00×10^{-6}
	3	16.6	1.832	90.4	3.55×10^{-6}
	平均	16.5	1.827	87.4	4.43×10^{-6}
湿潤側 w_{wet}	1	18.8	1.709	85.2	4.41×10^{-6}
	2	18.9	1.734	89.2	5.42×10^{-6}
	3	19.0	1.718	87.1	5.77×10^{-6}
	平均	18.9	1.720	87.2	5.17×10^{-6}

3.3 品質管理手法の設定

「要求性能を満足する盛土の剛性・強度・透水・クラップス抵抗等の諸物性を実現するには、締固めにおいて、盛土材の土質と w , CEL, 締固め土の ρ_d (あるいは所定のCELに対する D_c)と S_r を適切に管理する必要がある」として、5つの管理境界(表-4)を用いる管理法が提案されている¹⁾²⁾。ここでは、藤沼ダムのコア材の飽和度下限線SL・上限線SUの設定法を説明する。図-9(a), (b)に、①現

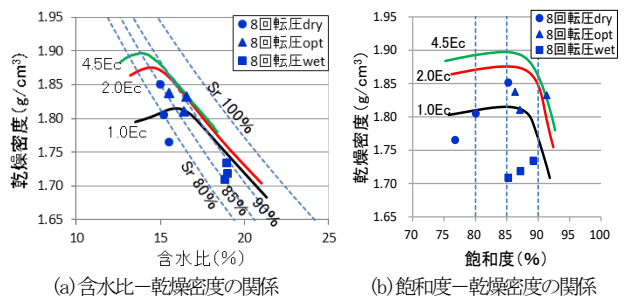


図-9 コア材の締固め試験結果と現場転圧試験結果

表-4 締固めにおける5つの管理境界

管理境界	土構造物の要求性能の実現に必要な物性管理	a)高い強度、剛性の確保	水害によるb)強度低下、c)沈下の抑制	d)必要な透水性の確保	e)凍害の防止
締固めに用いる盛土材に対する管理境界	含水比下限線: VL	○	●	○	
	含水比上限線: VU	●			●
締固めた盛土に対する管理境界	締固め下限線: DL	●	○	○	○
	飽和度下限線: SL		●	●	
	飽和度上限線: SU	○			●

●: 要求項目の確保に非常に重要な管理境界, ○: 要求項目の確保に重要な管理境界

過転圧防止のために飽和度上限線 S_u を $90\%=(S_r)_{opt} - 5\%$ に設定した。なお、締固め度下限線 DL での $D_c=95\%$ の供試体の三軸圧縮試験では、設計強度を満足するせん断強度が得られた。

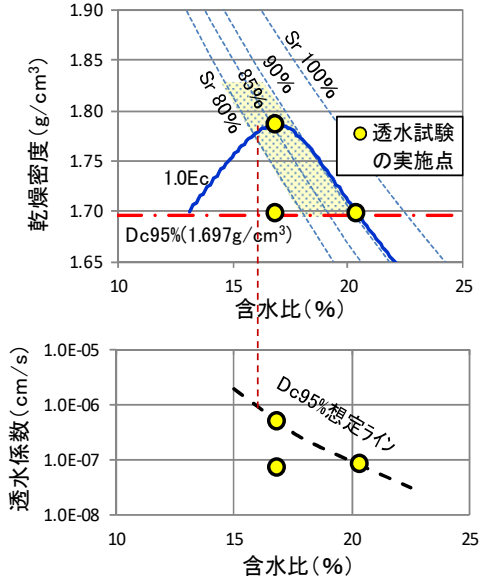


図-10 コア材の締固め・透水試験結果

4. 品質管理試験項目

表-5, 表-6 に、現場品質管理試験の項目と試験頻度を示す。定期管理は施工前にストックパイルから採取した試料が対象であり、日常管理は施工後に盛立場から採取した試料が対象である。土質材料のばらつきも考慮し、副堤の盛立量 10,000 m³ に対して、3000 m³ に 1 回の定期管理を実施し、日常管理は 1 日に 1 回の頻度で試験を行った。

表-5 試験項目および試験頻度

試験項目	基準値	試験頻度※	
		定期管理 (施工前)	日常管理 (施工後)
粒度試験 (JIS A 1204)	最大粒径 D_{max} (mm)	≤ 150	ストックパイル毎 (3,000m ³ 程度/回) ⇒全4回(盛土量÷3,000m ³)
	線率 $P_{4.75}$ (%)	≥ 20	
	細粒分含有率 F_c (%)	≥ 25	
含水比試験 (JIS A 1203)	施工含水比 w (%)	$w_{opt} \pm 0.5\%$	1回/午前・午後 (3試料/回)
締固め試験 (JIS A 1240)	-	-	ストックパイル毎 (3,000m ³ 程度/回) ⇒全4回(盛土量÷3,000m ³)
現場密度試験 (突砂法, φ200mm) (JGS 1611)	締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ (%)	≥ 95	-
	飽和度 S_r (%)	$(S_r)_{opt} - 5\%$ $\sim (S_r)_{opt} + 5\%$	

表-6 定期管理と日常管理の期間

	期間			
定期管理	H26.10.17	H26.12.9	H27.6.8	H27.8.17
日常管理	H26.11.8 ~H27.4.13	H27.4.19 ~H27.7.2	H27.7.4 ~H27.9.21	H27.9.22 ~H27.10.3

5. 品質管理試験結果

5.1 粒度

図-11 に粒度加積曲線を示す。定期管理と日常管理で得られた結果は概ね一致しており、盛土材が均一であったことが確認できる。それでも、全工程で見ると粒度分布は若干変動しており、以下で示すように締固めの結果に影響を与えた。しかし、後述の通り、原位置締固めエネルギーレベル (以下、CEL) と飽和度の管理によってその変動に対処できた。

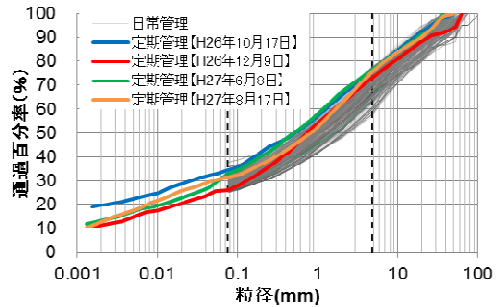


図-11 粒度試験結果

5.2 含水比

締固め対象はコア材料であり飽和状態での透水係数の最小値の実現を目指し、また試験工事によって CEL が 1Ec 程度であることを確認していたので、含水比 w の管理基準値は「 $1Ec$ の締固め試験で得られた最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ 」 + 0.5% を基準とし、現場では w が不可避免に変動することに備えて、 $(w_{opt})_{1Ec} - 1\% \sim (w_{opt})_{1Ec} + 2\%$ とした。図-12 に、定期管理と日常管理で得られた w の実測値と $(w_{opt})_{1Ec}$ との差の度数分布を示す。いずれの場合でも、全測定値は管理基準を満足している。

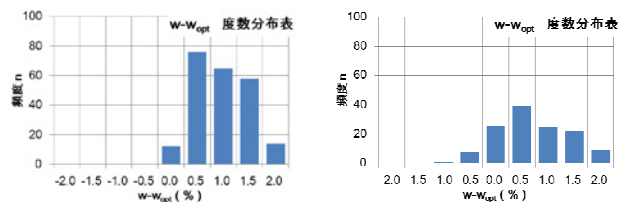


図-12 含水比試験の度数分布：(左) 日常管理, (右) 定期管理

5.3 現場締固め

表-6 に示した計 4 回の「定期管理での試験と日常管理での現場試験」で得られた実測値のうち、定期管理: H26.10.17, 日常管理: H26.11.8 ~ H27.4.13 と定期管理: H27.6.8, 日常管理: H27.7.4 ~ H27.9.21 の結果をそれぞれ図-13, 図-14 にプロットした。それぞれの図に、①締固め度の管理範囲 $(D_c)_{1Ec} \geq 95\%$ と②飽和度 S_r の管理範囲 $S_r=(S_r)_{opt} - 5\% \sim (S_r)_{opt} + 5\%$ を黄色で塗りつぶした領域で

示した。これらの図より、 $(D_c)_{1Ec}$ および S_r の全測定値が管理値を満足していることが確認できる。特に、 w が目標値 $(w_{opt})_{1Ec} + 0.5\%$ よりも低い場合でも、 $S_r = (S_r)_{opt}$ 状態の実現を目指す上記の飽和度管理によって、1Ec での最大乾燥密度に近い乾燥密度が実現できている。

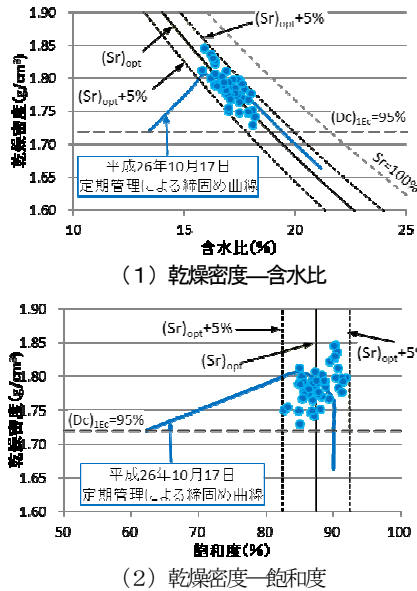


図-13 乾燥密度 - 含水比

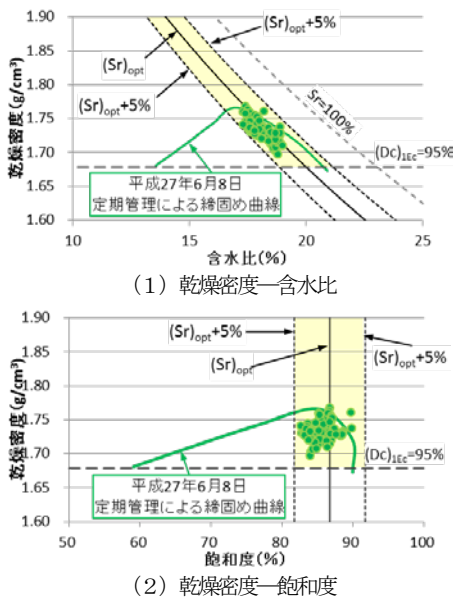


図-14 乾燥密度 - 含水比

6. 考察

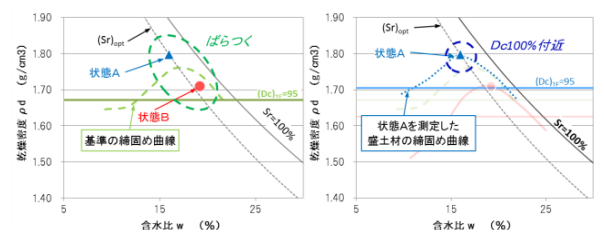
今回の現場では、19 トン級振動タンピングローラーの通過回数と撤出し厚さ (25 ± 5 cm) を厳密に管理することで、CEL が場所的に一樣になるようにしている。したがって、図-13、図-14 で見られる測定値のばらつきと

変化の主因は CEL のばらつきと変化ではなく、図-11 と図-12 から伺える土質の若干の変動と推定できる。 $(S_r)_{opt}$ は土質が限定的に変動しても一定と仮定できるので、現場 $S_r \approx (S_r)_{opt}$ (一定値) の状態を維持することによって、同一の CEL (この場合は 1Ec) に対する真の締固め度 $(D_c)_{t-1Ec}$ を 100% 近くに維持でき、強度・剛性も高い一定値に維持できることになる。今、図-15(1) に示すように、CEL=1Ec (一定) の基準の締固め曲線に対して、土質のばらつきにより異なる ρ_d の状態 A, B が測定された場合、図-15(2), (3) に示すように、状態 A, B を測定した盛土材を用いた CEL=1Ec での締固め試験を行い、それで得た $(\rho_d)_{max}$ を用いて状態 A, B での真の締固め度 $(D_c)_{t-1Ec}$ を計算すれば、それぞれ 100% に近い値となる。一方、図-15(4) に示すように、一樣に CEL=1Ec を管理し、かつ $S_r \approx (S_r)_{opt}$ を目指した飽和度管理を行うことによって、土質がばらついたとしても $(D_c)_{t-1Ec}$ を 100% 近くに維持できることになる。

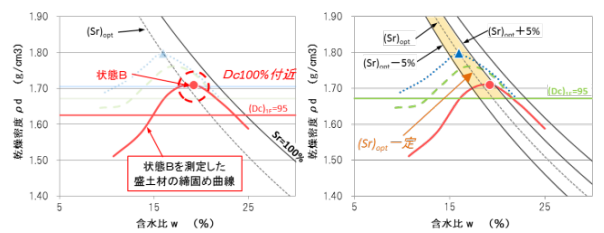
7. まとめ

藤沼ダム副堤と本堤では、従来の盛土材の含水比、密度による管理に加え、飽和度 S_r 管理を実施することで、以下の知見を得た。

- ・全測定において、1Ec に対する締固め度 $(D_c)_{t-1Ec} \geq 95\%$ 、 $(S_r)_{opt} - 5\% \leq S_r \leq (S_r)_{opt} + 5\%$ という管理基準を満足した。
- ・土質のばらつきによって締固め状態が 1Ec での締固め曲線に対してばらついていると推定できるが、現場締固めエネルギーを高いレベルで一樣・一定に管理した上で $S_r = (S_r)_{opt}$ を目指した管理を行ったことで、1Ec に対する真の締固め度 $(D_c)_{t-1Ec}$ は管理値 95% を十分に超えて 100% 近くの高い値に維持できた。



(1) 基準曲線で締固め度算出 (2) 状態Aで真の締固め度算出



(3) 状態Bで真の締固め度算出 (4) 最適飽和度一定

図-15 真の締固め度管理

謝辞：本論文で用いた試験データは藤沼ダム本体建設工
事の品質試験の結果であり、(社) 地域環境資源センター
の田中忠次氏、茨城大学の毛利栄征氏から貴重なアドバ
イスを頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 龍岡文夫：盛土締固めにおける各種重要な管理項目，第
51 回地盤工学研究発表会，pp. 777-778，2016
- 2) 龍岡文夫，藤代健司，須藤雅人，建山和由，根本忠：乾燥
密度と飽和度の関数として締固めた土の物性，第 48 回地
盤工学研究発表会，pp. 575-578，2013)
- 3) 三反畑勇，永井裕之，山岸明広，龍岡文夫，中山睦人，
三浦亨，渡邊浩樹：藤沼ダムにおける飽和度管理（その
1：工事概要と管理手法），第 51 回地盤工学研究発表会，
pp. 999-1000，2016
- 4) 永井裕之，三反畑勇，山岸明広，龍岡文夫，中山睦人，三
浦亨，渡邊浩樹：藤沼ダムにおける飽和度管理（その 1：
品質管理結果），第 51 回地盤工学研究発表会，pp. 1001-
1002，2016
- 5) 三反畑勇，永井裕之，山岸明広，龍岡文夫，中山睦人，三
浦亨，渡邊浩樹：藤沼ダム建設工事におけるコア材・ラン
ダム材の飽和度管理（その 1）～工事概要と特性など～，
第 71 回年次学術講演会，pp. 351-352，2016
- 6) 永井裕之，三反畑勇，山岸明広，龍岡文夫，中山睦人，三
浦亨，渡邊浩樹：藤沼ダム建設工事におけるコア材・ラン
ダム材の飽和度管理（その 2）～管理手法と品質管理結果
～，第 71 回年次学術講演会，pp. 353-354，2016

Control of the Degree of Saturation in the Construction of Fujinuma Dam

Hiroyuki NAGAI, Isamu SANDANBATA and Akihiro YAMAGISHI

One of prime factors in the Fujinuma Dam break by the Eastern Japan Great Earthquake was insufficient compaction of the embankment in 2011. From this fact, in Fujinuma Dam, realization of a high-quality embankment rather than restoration construction of a rotted bank body is preferable. The degree of saturation should also be controlled, aiming to realize the most suitable percent humidity. Conventional compaction control by density should also be undertaken, to make the index of total settled degree, D_c , effective. Further, the most suitable percent humidity is that of maximum dry density on the moisture-density curve and the time of optimum moisture, and even if the total settled energy and the soil quality change, when the change is in the applicable area, there is a feature that indicates a constant value for the most part. The total settled degree and all measures of percent humidity met the control criteria as a result of quality control, and a high-quality fill could be achieved. Quality control techniques for the core materials of associated banks and the result of building management will be reported by the main subject.