

遮水性盛土の地盤剛性指標に基づく締固め管理

坂本 博紀¹・小林 弘明²・龍岡 文夫³・曾田 英揮⁴

¹正会員 独立行政法人水資源機構 朝倉総合事業所 (〒838-0012 福岡県朝倉市江川1660-67)

E-mail: hiroki_sakamoto@water.go.jp

²正会員 鹿島建設株式会社 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1丁目3-1)

E-mail: h-kobayashi@kajima.com

³名誉会員 東京大学・東京理科大学 名誉教授 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: tatsuoka@rs.noda.tus.ac.jp

⁴正会員 一般財団法人国土技術研究センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

E-mail: h.soda@jice.or.jp

フィルダムのコアゾーンなどの遮水性盛土の締固めでは、通常、粒度などの土質、含水比、締固めエネルギーを適切に管理し、締固めた盛土での試料採取、乾燥密度、含水比の現場測定を、あるいは現場透水試験も行い、品質を確認する。しかし、これらの品質確認は抜取検査であるために多くを実施できず、その頻度から盛土全体の品質の一様性の確認が難しい。著者らは地盤剛性指標 S に基づく遮水性能評価法を、室内試験と現場試験の結果に基づき検討し、フィルダムの実施工に適用した。その結果、土質と締固めエネルギーレベルなどの施工条件を S の許容上限値を決定した盛立試験と同じに保てば、 S の上限値管理によって現場透水係数が許容上限値以下であることを間接的ではあるが迅速に確認できることが分かった。

Key Words : dry density, earthfill dam, permeability, soil compaction control, soil stiffness, water content

1. 序文

フィルダムのコアゾーンの建設では、所要の乾燥密度と透水係数を確保するため、粒度・粒子特性等の土質（以後、粒度等の土質）、含水比、締固めエネルギー（以後、Compaction Energy Level, CEL）を適切に管理するとともに、締固め後の盛立面において現場密度試験を、あるいは現場透水試験も行い、その品質を確認している。これらの現場試験の実施には一定の試験時間と労力が必要で、特に現場透水係数には概ね1日を要する。このため、日常管理における遮水性能確認は、搬出材の代表粒度と各層の施工後に乾燥密度と含水比を測定し、それらが管理範囲にあることを確認するという間接的な手法で実施されるのが一般的である¹⁾。これらの管理試験は、いずれも比較的少数の抜取検査であるために多くを実施できず、その頻度から盛土全体の品質の一様性の確認が難しいという課題がある。一方、一般土工ではGNSS (Global Navigation Satellite System: 全球測位衛星システム) を用いたICT (Information and Communications Technology) を活用した面的な盛土の施工管理が進んでおり²⁾、さらには転圧機で計測した加速度応答記録から得られる種々

の地盤剛性指標^{3,4)}（以後、加速度応答スペクトル指標）とGNSS記録を関連付けた面的な管理方法（以後、ローラ加速度応答法）も普及しつつある^{5,6,7)}。しかし、従来のローラ加速度応答法は次章で説明するように地盤剛性指標 S の下限值管理法であり、フィルダムのコア材などの含水比の高い粘性材料では、締固めに伴う剛性の変化は許容下限値周辺では小さいため、この方法は適用が困難とされている^{4,5,8)}。なお、本稿では、締固めた地盤における、非水浸CBR、平板載荷試験や落球探査法⁹⁾等による変形係数、加速度応答スペクトル指標等の地盤剛性を反映した測定値を包括して地盤剛性指標と呼称して S と略記する。通常のGNSS管理はCELを規定する施工層厚や転圧回数を管理するものであり、締固め後の剛性や遮水性などの物性を評価していないことや、ローラ加速度応答法については上記の適用条件の課題があるため、現状のフィルダムのコアゾーンの品質管理では、GNSS等のICTを利用した面的な管理記録は、施工層厚管理や転圧回数管理を行うための補間的な施工管理記録や参考情報として取り扱われており、従来の管理手法の代替手法としては位置づけられていない^{10,11)}。

福岡県に（独）水資源機構が建設中の小石原川ダム

(以後、本ダム)の建設にあたって、著者らは、これらの諸課題の解決法の一つとして、締固め土の地盤剛性指標 S の上限値管理に基づいた遮水性能の管理法を各種の室内試験と現場試験の結果に基づき詳細に検討した。著者らは、室内試験と現場盛立試験から得られた含水比の変化に伴う、現場透水係数 k_f 、乾燥密度 ρ_d と地盤剛性指標 S の関係とそれに対する土質と CEL の影響を整理し、

S の上限値管理に基づいた k_f の間接的であるが迅速な評価法を構築し、実施工の品質管理に適用した。

本稿では、2章に上記の新たな評価法の構築に至る理論的背景を、3章、4章に室内および実機を用いた現場盛立試験の結果をとりまとめた。5章では得られた知見に基づき品質管理への適用について検討した。最後に6章では実施工における品質管理試験結果を整理し、新たな評価法の妥当性を確認した。

2. 理論的背景

本章では遮水材料として使用される土の締固め特性を述べ、締固め状態と各種物性の関係を論じる。そのうえで地盤剛性指標 S を用いた締固め土の遮水性能管理に必要な条件と、締固め土が所要の遮水性を確保されるために必要な S の管理範囲を論じる。

締固め土の乾燥密度 ρ_d 、現場透水係数 k_f 、地盤剛性指標 S と含水比 w には、通常図-1に示す関係がある。図-1aに示す S の等高線と図-1bに示す $S \sim w$ 関係は、図-2に示す結果に基づいている。これは、シルト質砂の多様な転圧機を用いた実大締固め試験で得た膨大なデータ¹³⁾の解析によるものである^{14), 15)-17)}。▲, ●等の印のデータは、実大締固め試験の代表例である。締固め曲線 A-A は、室内締固め試験(標準プロクター, 1Ec)によるものである。最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ は、 ρ_d が最大になる飽和度 S_r であり、粒度等の土質と締固めエネルギーレベル CEL の変化に対する一定性が高い^{14), 15)-17)}。図-2の左上にデータ解析^{14), 15)-17)}で得た締固め土の非水浸 CBR の S_r と ρ_d を変数とした経験式 (ρ_w は水の密度) を示す。また、図-1aに示す k_f の等高線と図-1bに示す $k_f \sim w$ 関係は、図-3に示す御母衣ダムのコア材の室内試験の結果¹⁸⁾の解析によるものである^{14), 15)-17)}。図-2, 3に示すような形状の S と k

図-1 所定の土質と CEL における締固め土の工学的性質の概念図(文献¹²⁾の図を図-2, 3を参考に拡張)

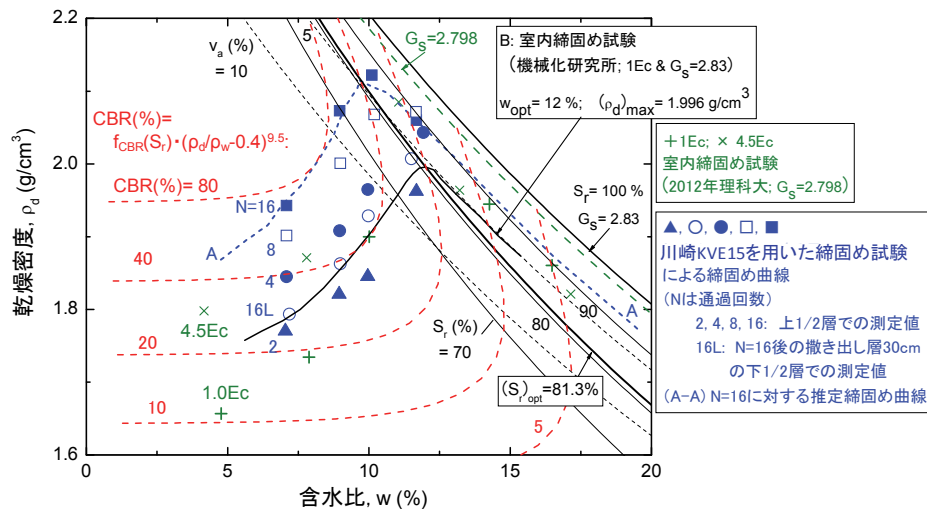


図-2 建設機械化研究所での実大締固め試験による非水浸 CBR の等高線と締固め曲線(原データ¹³⁾, データ解析^{14), 15)-17)})

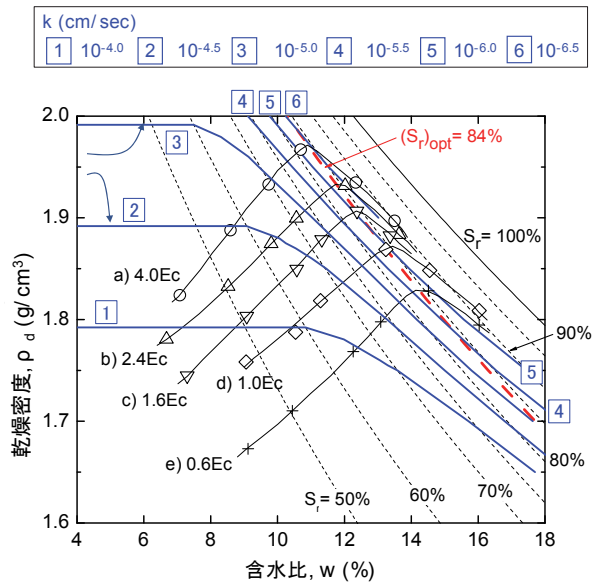


図-3 御母衣ダムコア試料室内試験による異なる CEL での締固め曲線と飽和透水係数 k_f の等高線 (原データ¹⁸⁾, データ解析^{14), 16), 17)})

の等高線は他のデータでも得られている^{14), 15)-17), 19)}. S と k_f の等高線がこのような形状になるのは, ρ_d が増加すると地盤剛性指標 S は増加し k_f は減少する一方, 飽和度 S_r が高くなると 1) サクションが低下して S が低下するとともに 2) サクションが低下すると骨格粒子間の空隙内で細い粒子が空隙内に分散するため, ミクロな空隙が平均的に小さくなり k_f が減少するからである. これらは, 文献^{14), 15)-17)}で詳細に説明されている.

図-1に示す関係に基づくと, 粒度等の土質と現場の締固めエネルギーレベル CEL を一定に管理し, 管理法の妥当性を現場透水係数 k_f の測定によって適宜検証する場合は, 前述した乾燥密度と含水比を用いた遮水性能の管理法と同様に, 以下で説明する地盤剛性指標 S に基づく管理法が成り立つと考えられる.

すなわち, k_f が許容上限値 $(k_f)_{cr}$ 以下に維持されるためには, 図-1a で締固めた盛土の (ρ_d, w) 状態が $(k_f)_{cr}$ の等高線より右上方に位置する必要がある. $(k_f)_{cr}$ の等高線と CEL_f に対応する締固め曲線との交点を C とする. この締固め曲線に沿って w が増加して点 C から右側に移動すると, 図-1b, c に示すように k_f と S はともに減少する. この際 S は単調減少し, k_f は極小値を経て増加に転じるが, 遮水材料では後述する含水比の管理上限値 (図-1 の点 D) で $k_f < (k_f)_{cr}$ を満足する材料を使用する. 従って, 現場の締固め状態は点 C よりも右側に位置する必要がある, 点 C での w は許容下限値となり S の値は許容上限値 S_u となる. 以上より, 締固めた盛土の S の上限値管理によって k_f の上限値を間接的に管理できる. この場合, CEL_f に対する最適含水比 $(w_{opt})_{CEL_f}$ に対してやや湿潤側に一定の管理範囲を設定して含水比 w を管理するのが合理的である²⁰⁾. これは図-1a の点 T ~ D で管

理を行うことと同義であり, この w の管理範囲の下限値 (点 T) における S を S の管理上限値 S_{LB} に設定することで, k_f は $(k_f)_{cr}$ に対して余裕をもって管理される. なお, 本ダムでは, 飽和度の下限値を適切に設定することで, $(k_f)_{cr}$ に対して余裕を確保しつつ, 含水比の管理下限値を $(w_{opt})_{CEL_f}$ から更に引き下げている²⁰⁾. また, 転圧機械を用いた締固めの施工性を確保するために, w の管理上限値を規定し, この際の S を S の管理下限値 S_{LB} として規定する場合がある (点 D) .

以上, 遮水性盛土の品質管理には S の上限値管理が有効であることを述べたが, ローラ加速度応答法による締固め管理では, 通常は, ローラの応答加速度から得た地盤剛性指標 S の下限値管理を採用している^{5), 7)}. しかし, 締固め状態は ρ_d と w など 2 変数で定義されるので, S の値だけでは締固め状態を同定できない. さらに, 図-1a で $S > S_{LB}$ の領域内には締固めが不十分な領域も含まれているので, S の下限値管理だけでは適切な締固め管理は難しく, 前述のように, 遮水性盛土の品質管理では S の上限値管理が特に必要となる. これに対して, 前述のように, 現場の土質と CEL_f を一定に管理した場合は, それに対応する現場締固め曲線と剛性 S の等高線の交点から締固め状態が同定される (図-1a) . その場合は, 落球探査試験, ローラ加速度応答法等から得た地盤剛性指標 S の上限値管理によって締固め土の現場透水係数 k_f の上限値管理を迅速に実施できると考えられる.

地盤剛性指標 S の上限値管理による遮水性能管理の最大の利点は, 測定が迅速になることで多数点での測定による遮水性能の管理が可能になることである. 特に, ローラ加速度応答法による S を採用すると連続的な測定による面的な管理が可能になる. その結果, 序文で説明した比較的少数の抜取検査型の品質管理の課題を縮小, あるいはそれからの脱却ができて, (a) 品質確認範囲の大幅な拡大, (b) 比較的少数の抜取検査方式では見落とす可能性がある局所異常箇所の発見, (c) 盛土の均質性の確認, など様々な面での品質管理の向上が見込まれる.

次章以降に, 本章で記した理論的背景に基づき整理・分析した室内試験・現場盛立試験の結果を記す.

3. 室内試験

(1) 試験条件

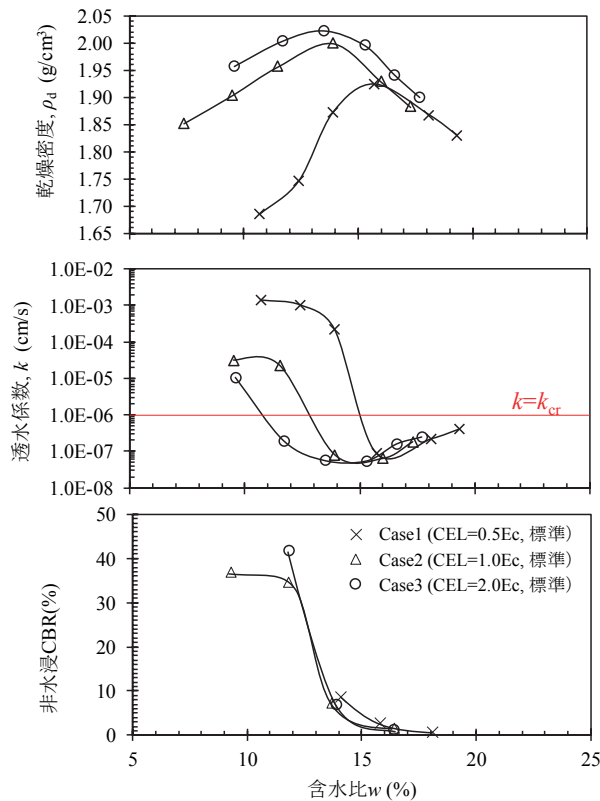
図-1 の関係が本ダムのコア材でも成立するか確認するために, 地盤剛性指標 S として非水浸 CBR (以後, CBR と略記) を採用し粒度・CEL を変化させた室内試験を実施した (表-1) . 図-4 に使用材料の粒度分布を示す. Case 1-3 で使用したのは, 後述する盛立試験で使用した本ダムの一般コア材 (コア材 B) を最大粒径 $D_{max} =$

37.5mm のせん頭粒度に調整した試料である。本ダムの一般コア材は強風化岩由来の礫混じり粘性土であり、粒径が 0.075mm 以下の細粒分の含有率 F_c が 30~50% 程度の細粒材と F_c が 5~15% 程度の粗粒材を混合した材料（コア材 A）と、コア材 A を基本に細粒材の一部を、直径 20~50mm の風化岩を破碎機で粉碎して製造した人工細粒材で置換した材料（コア材 B）である。Case1~3 の試料は、最大粒径 $D_{\max}=150\text{mm}$ の全粒度での目標 $F_c=22\%$ で混合製造した材料を母材として調整した。

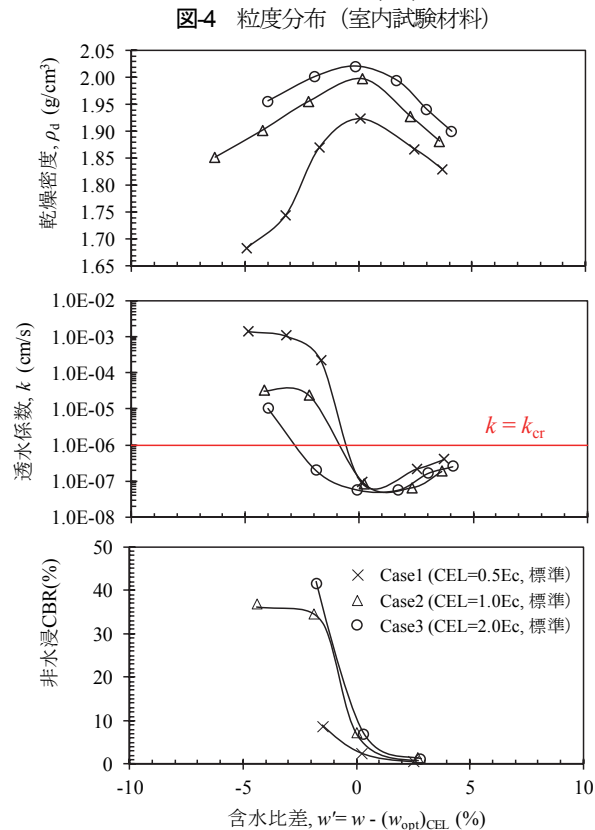
また、Case 1~3 の試料を標準粒度とし、 F_c の値を既往ダムの実績²¹⁾を参考に設定した本ダムにおける F_c の管理目標範囲（15~25%）の上下限値付近となるように製造した材料を $D_{\max}=37.5\text{mm}$ のせん頭粒度に調整し、それぞれ粗粒粒度（Case 4, $F_c=18.3\%$ ）と細粒粒度（Case 5, $F_c=29.3\%$ ）の材料として使用した。

表-1 室内試験ケース一覧（試験粒度及び CEL）

Case	粒度 ($D_{\max}=37.5\text{mm}$)			CEL
	粒度区分	<0.075mm 含有率(%)	<4.75mm 含有率(%)	
Case 1	標準	26.0	58.4	0.5Ec
Case 2	標準	26.0	58.4	1.0Ec
Case 3	標準	26.0	58.4	2.0Ec
Case 4	粗粒	18.3	44.5	1.0Ec
Case 5	細粒	29.3	67.8	1.0Ec



(a) w



(b) $w' = w - (w_{opt})_{CEL}$

図-5 標準粒度での含水比—乾燥密度、透水係数、剛性の関係に対する CEL の影響 (Case 1~3)

(2) 試験結果

図-5 に Case 1~3 の試験結果を示す。図中の k_{cr} は室内透水試験の許容上限値である。フィルダムの遮水材料では室内透水試験では $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ を、現場透水試験では $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ を許容上限値として採用するのが一般的である²²⁾。室内試験と現場試験で上限値が異なるため、本稿では室内試験による透水係数を k 、現位置試験による現場透水係数を k_f と区別して略記する。フィルダムの浸透制御に関する設計では、遮水材料の透水係数の設計値に k_f の許容上限値 $(k_f)_{cr} (=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec})$ を採用する。一方、上述のとおり k の許容上限値 k_{cr} は $(k_f)_{cr}$ の 1/10 に設定される。これは、現場盛土の不均質性と異方性等の影響により現場透水係数は室内透水係数よりも大きくなるが、これに安全側の余裕も加味して経験的に設定されたものである²²⁾。なお、透水係数の単位は [m/sec] が標準

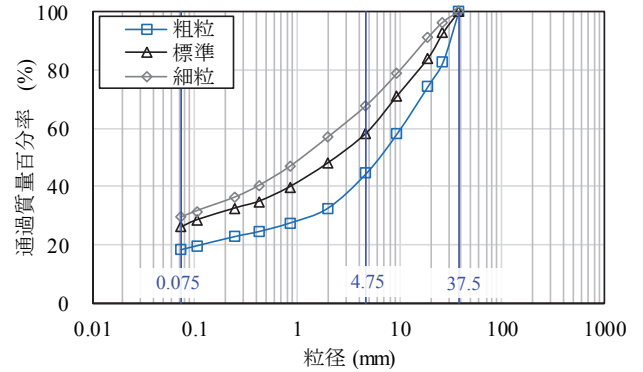


図-4 粒度分布（室内試験材料）

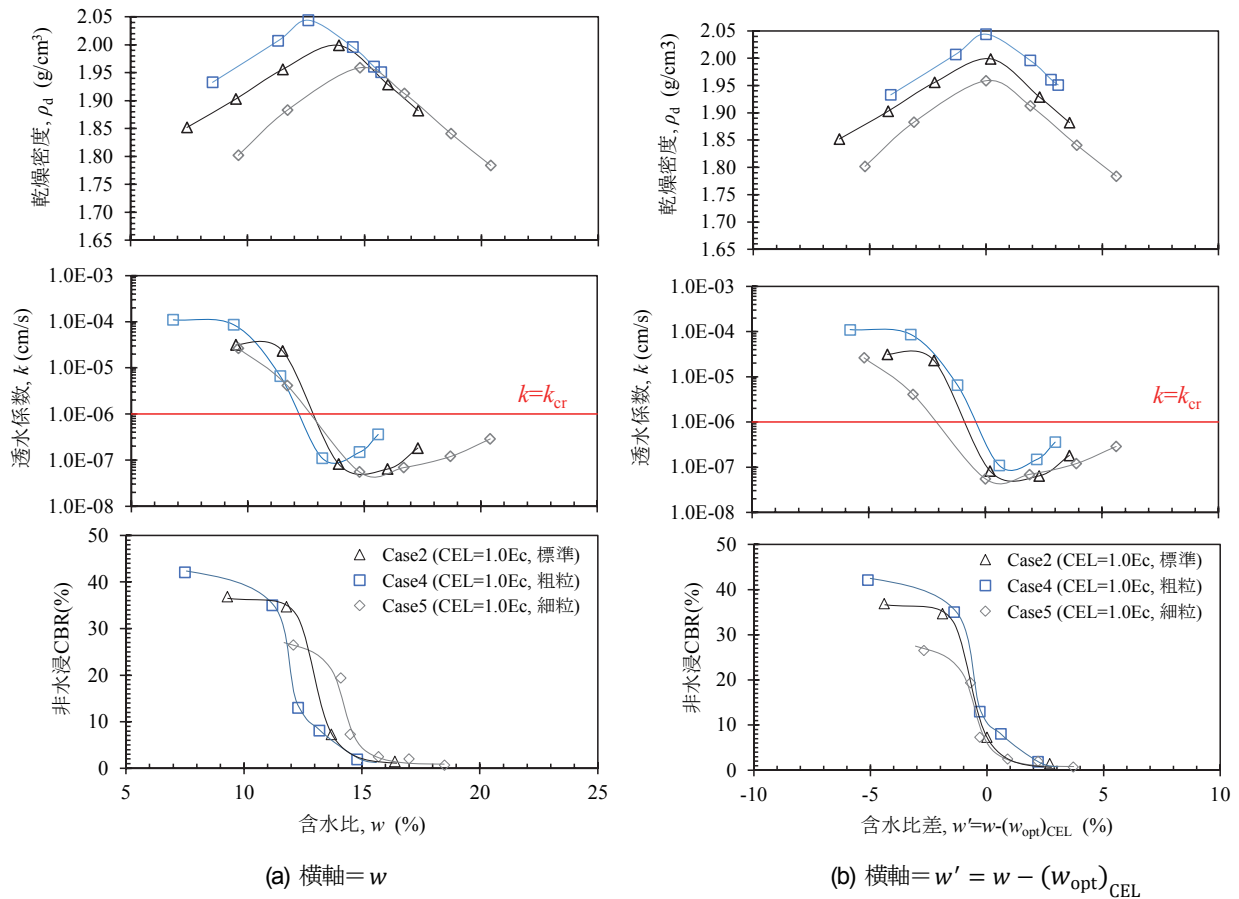


図-6 1Ecでの含水比—乾燥密度, 透水係数, 剛性の関係に対する粒度の影響(Case 2, 4, 5)

であるが, 国内のダム建設事業では慣例的に[cm/sec]が使用されているため, 本稿でも[cm/sec]を使用する。

図-5aの横軸は含水比 w の計測値であり, 図-5bの横軸は w と各ケースの土質とCELに応じた最適含水比 $(w_{opt})_{CEL}$ との差 $w' = w - (w_{opt})_{CEL}$ である。図-5bより, 概ね $w' = -2 \sim 3\%$ の範囲では w' が減少すると(すなわち飽和度 S_r が減少すると)CBRは増加し, 図-1に示す概念図での傾向と良く一致している。

図-5より, CELが高いほど最大乾燥密度 $(\rho_d)_{max}$ が増加し, 透水係数 k の最小値 k_{min} は低下し, 最適含水比 $(w_{opt})_{CEL}$ が減少するという一般的な傾向が見られる。またCELが高い程, 乾燥側で w の減少に伴うCBRの増加は大きく, その上昇量は1.0Ec以上のCELでより大きい。これらは, 1.0Ec以上のCELで締固めを行えば, $w < (w_{opt})_{CEL}$ の乾燥側では(すなわち $S_r < (S_r)_{opt}$ の低飽和度側では)剛性指標 S によって鋭敏に含水状態を判別できることを意味している。なお, 後述する盛立試験の結果からも, 全粒度材料においても1Ec以上の CEL_f が確保されれば $(w_{opt})_{CEL}$ よりも乾燥側での地盤剛性指標の上昇がより鋭敏になることを確認している。

以上要するに, 同一の材料ではCELが高いほど ρ_d , k , 剛性の物性は向上し, また含水比の変化による ρ_d と k の変化は鈍くなる一方, 剛性の変化は大きくなる。特

に剛性の変化傾向に注目すると, 含水比 w が小さいほど剛性が上昇する左肩上がりの分布となり, 特に $(w_{opt})_{CEL}$ より乾燥側における剛性の増加傾向が大きく, その傾向は $CEL \geq 1Ec$ 以上で顕著である。これらのことから, 性能向上と品質管理の容易さの両面から, より高いCELで施工管理を行うことが有利といえる。

次に粒度の影響を, 図-6を参照して検討する。前述の通り, 試験粒度は実施工で想定されるばらつきの範囲内で設定したが, この範囲内で粒度が変化しても, w の変化による ρ_d , k , CBRの変化傾向は変わらない。しかし, 粒度が粗いほど, 標準粒度に対して $(\rho_d)_{max}$ は若干大きく w_{opt} は若干小さくなり, k_{min} は若干大きくなる。また図-6bを見ると, 粒度が粗いほど同一の $w' (= w - (w_{opt})_{CEL})$ でのCBRは若干大きくなる。特に, w' が実施工で想定される管理許容下限値よりも小さくなり $k > k_{cr}$ となる乾燥側の $w' < -1\%$ の範囲では, この傾向が顕著になる。

図-7に, 図-5, 6に示すデータのCBR~ k 関係を示す。

図-7aはエネルギーを変化させた場合, 図-7bは粒度を変化させた場合である。いずれのケースでも $CBR < 5\%$ の範囲で k は極小値を示し, 図-1cに示す概念図の傾向と一致している。

表-2に, 各ケースでの $\rho_d = [(\rho_d)_{max}]_{CEL}$ となるとき

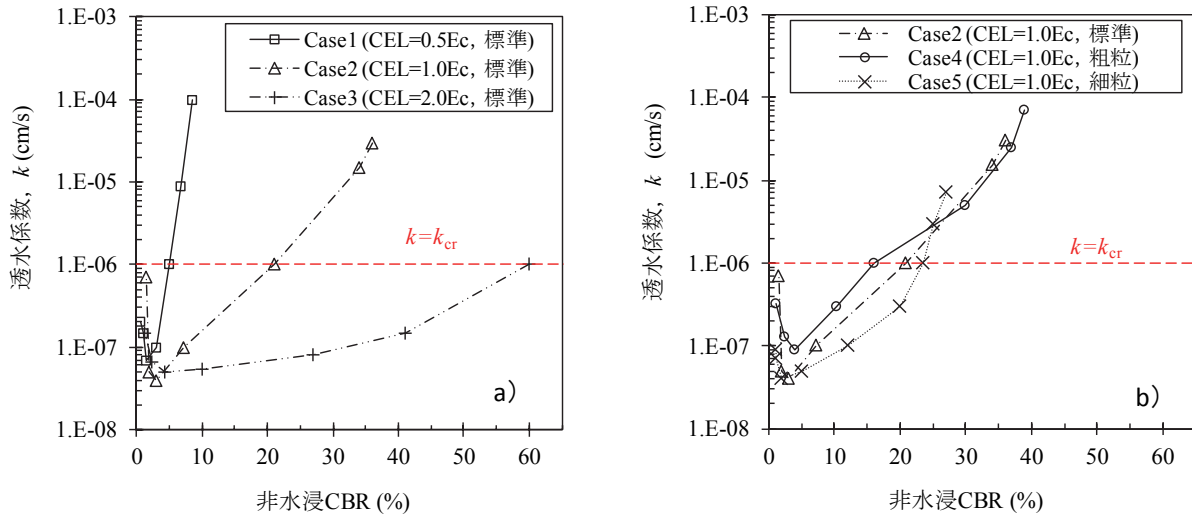


図-7 図-5, 6 に示す室内試験データより求めた CBR~k 関係

表-2 室内試験での各種特性点における CBR と含水比の値

Case	粒度区分	CEL	$(CBR_{opt})_{CEL}$ (%)	CBR_{cr} (%)	$(w_{opt})_{CEL}$ (%)	w_{cr} (%)
Case1	標準	0.5Ec	3.0	5	15.6	15.0
Case2	標準	1.0Ec	7.3	21	13.7	12.9
Case3	標準	2.0Ec	10.0	60 [*]	13.6	10.8
Case4	粗粒	1.0Ec	10.3	16	12.6	12.2
Case5	細粒	1.0Ec	5.0	24	14.8	13.3

※ 外挿値

の含水比の値 $(w_{opt})_{CEL}$ および CBR の値 $(CBR_{opt})_{CEL}$ と、 $k = k_{cr}$ (1.0×10^6 cm/s) となる時の含水比 w_{cr} および CBR の値 CBR_{cr} を示す。図-7a と表-2 から、同一粒度で CEL が 2.0Ec から 0.5Ec に低下すると $k \leq k_{cr}$ を満足する CBR の範囲は大きく減少し $k = k_{cr}$ となる CBR_{cr} は 60% から 5% と大きく低下する。これは CEL が低下すると ρ_d が低下して、CBR が低下するとともに k は増加するためである。この結果は、地盤剛性指標 S の上限値管理によって遮水性能を管理する場合に、現場条件として定めた CEL_f の値に対して施工時の値が不足した場合は、 S の管理上限値を満足していても遮水性能を満足しない可能性があることを意味しており、 CEL_f 管理の重要性を裏付けるものである。

図-7b と表-2 から、同一の CEL で粒度が粗になると、 $k < k_{cr}$ を満足するための CBR の上限値 CBR_{cr} が低下し、遮水性能を満足する CBR の範囲が狭くなる。ただし、実施工で想定された F_c の変動 (18%~30%) によって CBR_{cr} は 15~25% 変化するが、CEL の変動 (0.5Ec ~ 2.0Ec) による変化に比べればその変化は小さい。

いずれのケースでも、 CBR_{cr} の値は、 $S_r = (S_r)_{opt}$ 状態での CBR である $(CBR_{opt})_{CEL}$ の値よりも大きい。この傾向は、今回の室内試験の範囲では CEL と粒度に関わらず、 $k = k_{cr}$ となる時の含水比 w_{cr} はそれぞれのケースでの $S_r = (S_r)_{opt}$ となる最適含水比 $(w_{opt})_{CEL}$ よりも若干小さく、図-1a, b において点 C は点 T よりも左側に位

置していることを意味している。これは、 $(S_r)_{opt}$ 付近の S_r を確保することによって k_{cr} よりも小さい k を保証できて、点 C を越えない範囲でやや乾燥側の施工を許容できることを示している。

以上示したように、室内試験によって検討した結果、本ダムの一般コア材の実施工で想定される遮水性能の確保が可能な w の範囲内 $(w_{opt})_{CEL} \leq w \leq (w_{opt})_{CEL} + 3 \sim 4\%$ において、 w が減少すると地盤剛性指標 S は増加することを確認できた。また、実施工で S を用いた遮水性能管理を実施する場合、必要な遮水性能を確保するためには、「現場の全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{max} = 37.5$ mm の部分」に作用する締固めエネルギーレベル CEL_f は 1.0Ec 以上確保することが望ましいこと、 S の許容上限値に対する管理基準値 S_{UB} の値は管理粒度の範囲内で最粗粒での値に基づいて決定する必要があること、実施工での粒度等の土質と CEL_f の条件は S_{UB} の値を決定した盛立試験での条件と同等以上に保つ必要があることが分かった。

4. 現場試験 (盛立試験)

3 章で説明した室内試験で得られた含水比 w と乾燥密度 ρ_d 、透水係数 k 、地盤剛性指標 S の相関性が現場に適用できるか、実施工に先立ち盛立試験を実施して確認した。 S として落球探査法⁹⁾による変形係数 E と加速度応答スペクトル指標の一つである CCV (Compaction Control Value)^{3), 23)}の 2 種類を採用した。本稿では、前者の変形係数を解析した結果を報告する。なお、落球探査法による変形係数は平板載荷試験による変形係数と良好な相関が得られることが確認されており⁹⁾、変形係数から理論的に換算した地盤反力係数 K 値と経験式を用いて現場 CBR_{cr} への換算も可能である²⁴⁾。

(1) 試験条件

表-3 に、試験ケースと試験項目の一覧を示す。ここに示す含水比は、「盛立試験での現場全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{\max} = 37.5\text{mm}$ の部分」の施工時の含水比であり、標準プロクターIEcでの最適含水比 $(w_{\text{opt}})_{\text{IEc}}$ を基準にして $w' = w - (w_{\text{opt}})_{\text{IEc}} = -1.9\% \sim 2.2\%$ の範囲で複数設定した。この含水比の変化による、締固めた全粒度試料の地盤剛性指標、現場透水係数、及び両者の相関の変化を分析した。できるだけ全体的な傾向を確認するために、試験を行う w の範囲には現場透水係数が品質管理基準を満足しないことが予測された w の値も含まれている。なお、表-3 には記載していないが、乾燥密度、含水比については後述するとおり、Walker-Holtz の礫率補正式²⁾によって全粒度試料の現場締固め状態から $D_{\max} = 37.5\text{mm}$ 材料の締固め状態を算定するため、各試験孔から採取した材料を用いて粒度試験と比重・吸水率試験を実施している。

盛立試験は、実施工と同じ転圧機種である 10t 級平滑振動ローラを用いて、実施工と同じ仕上がり厚 30cm で 3 層の試験ヤードを造成し、下層地盤の影響を受けないよう 3 層目で各種の現場試験を実施した。盛立試験ヤードの造成例と試験孔の基本配置を図-8 に示す。

図-9 に各ケースでの原位置全粒度試験材の平均粒度分布を示す。使用材料は全て当ダムの一般コア材であり、

Case 1 では、一般コア材の標準粒度として製造したコア材 A を使用した。Case 2 では、製造時に使用する細粒材の一部を直径 20~50mm の風化岩を破碎機で粉砕して製造した人工細粒材で置換したコア材 B を使用した。コア材 B は、細粒分の質の変化を考慮して粒径が 0.075mm より小さい試料の通過質量百分率（以後、 $<0.075\text{mm}$ 含有率）と粒径が 4.75mm より小さい試料の通過質量百分率（以後、 $<4.75\text{mm}$ 含有率）を若干高めて製造した。なお、追加試験として実施した Case 1-1 は試験材料を新たに製造したため、Case 1-2~4 とは粒径 0.075mm 以上の範囲での粒度が若干異なる。

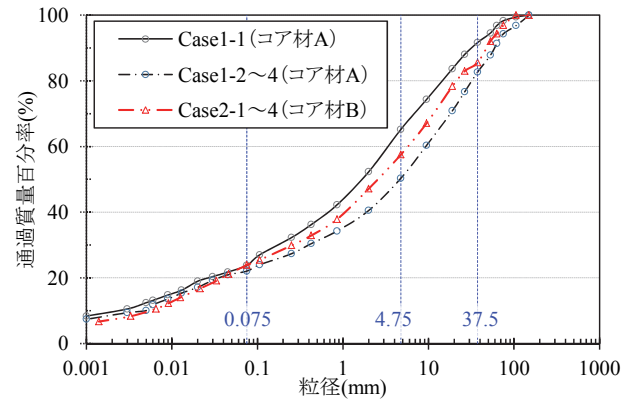


図-9 盛立試験での原位置全粒度材料の平均粒度分布

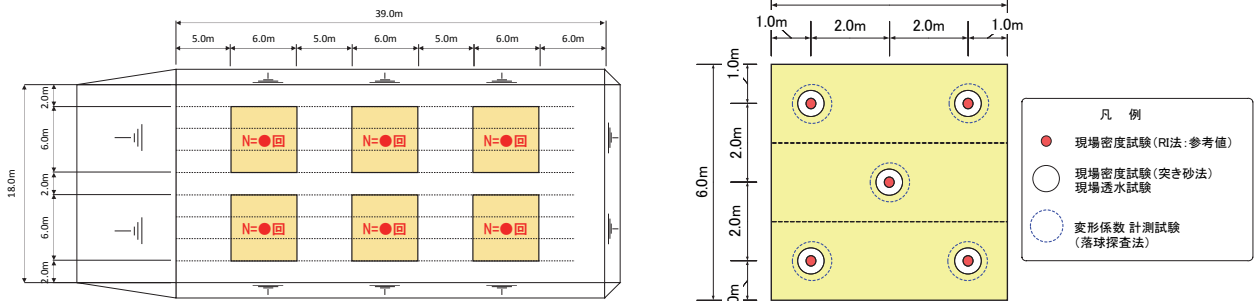


図-8 盛立試験ヤード造成例と原位置試験孔の基本配置

表-3 盛立試験ケース一覧

Case	含水比 $w' = w - (w_{\text{opt}})_{\text{IEc}}$ ($<37.5\text{mm}$ 粒度)	試験項目				備考
		現場密度試験 (JGS1611)	現場透水試験 (JGS1316)	地盤剛性指標1 変形係数 E	地盤剛性指標2 CCV	
Case1-1	-1.70%	○	○	○	—※1	コア材A, w :管理下限値より乾燥側
Case1-2	-0.8%	○	○	○	○	コア材A, w :管理下限値
Case1-3	0.50%	○	○	○	○	コア材A, w :中間含水比
Case1-4	2.20%	○	○	○	○	コア材A, w :管理上限値
Case2-1	-1.90%	○	○	○	—※2	コア材B, w :管理下限値より乾燥側
Case2-2	-1.00%	○	○	○	○	コア材B, w :管理下限値
Case2-3	0.20%	○	○	○	○	コア材B, w :中間含水比
Case2-4	2.20%	○	○	○	○	コア材B, w :管理上限値

※1 計測機器の故障により未実施

※2 施工層のみの含水比調整であったため参考値扱い

(2) 試験結果

図-10 に、現場試験により得られた実施工の施工仕様である転圧回数 ($N=8$) での w の変化に伴う締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ 、現場透水係数 k_f 、落球探査法による変形係数 E の変化を示す。図-10 には、各ケースで実施した 5 点の試験孔から得られたこれらの値と、その平均値をプロットした。コア材 A (Case 1) とコア材 B (Case 2) では締固め特性が異なり $(w_{opt})_{1Ec}$ の値が異なるため、各ケースの原位置密度試験孔群の近傍で採取した代表試料を $D_{max} = 37.5 \text{ mm}$ のせん頭粒度で調整した試料 (以後 $< 37.5 \text{ mm}$ 試料) を用いた室内締固め試験 (IEc) によって得た $(w_{opt})_{1Ec}$ を用いて、横軸の座標を $w' = w - (w_{opt})_{1Ec}$ としてデータ整理した。図-10a に示す $(D_c)_{1Ec}$ は原位置全粒度試料の内部の $D_{max} = 37.5 \text{ mm}$ の部分の締固め度であり、式(1)により算出した。

$$(D_c)_{1Ec} = \rho_d / [(\bar{\rho}_d)_{max}]_{1Ec} \quad (1)$$

ρ_d : 原位置密度試験孔で計測した全粒度試料の乾燥密度から Walker-Holtz の礫率補正式²⁵⁾によって求めた $D_{max} = 37.5 \text{ mm}$ の部分の乾燥密度

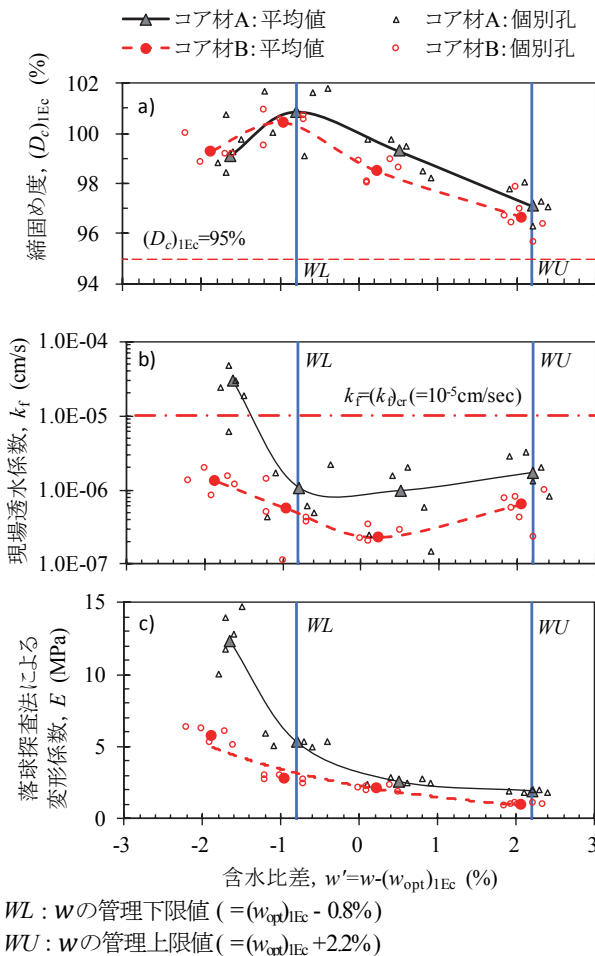


図-10 盛立試験の結果 ($N=8$)

$[(\bar{\rho}_d)_{max}]_{1Ec}$: 各ケースの原位置密度試験孔群の近傍で採取した代表試料から得た $< 37.5 \text{ mm}$ 試料を用いた室内締固め試験 (IEc) による突き固め曲線群の代表曲線における最大乾燥密度

三国の礫率を変化させた場合の室内試験結果¹⁸⁾に基づく、原位置全粒度試料の内部で $D_{max} = 37.5 \text{ mm}$ の部分が受ける CEL は粒子破碎にエネルギーの一部が消費されるため、全粒度試料が受ける CEL よりも小さくなると考えられる。従って、ここに示す $(D_c)_{1Ec}$ の値は、「全粒度試料の原位置乾燥密度」/「全粒度試料を用いた締固め度 (IEc) による最大乾燥密度」で定義される原位置全粒度試料の締固め度よりも小さくなると思われる。なお、式(1)による $(D_c)_{1Ec}$ は、試験孔から採取した試料を用いた粒度試験と比重・吸水率試験の結果に基づき礫率補正を行うため、試験孔ごとの礫率と礫比重のバラツキの影響を排除できている。また、原位置盛土の平均遮水性性能は $D_{max} = 37.5 \text{ mm}$ の部分の式(1)による $(D_c)_{1Ec}$ に強く支配され则认为される。これらの理由から、式(1)による $(D_c)_{1Ec}$ を現場密度の管理指標として採用した。

図-10 に示すように、粒度等の土質および CEL_f が一定とみなせる現場条件下で実施した遮水性材料の盛立試験で得られた含水比と乾燥密度・透水係数・剛性の関係の傾向は、図-1 の概念図、および図-5,6 に示す室内試験結果の傾向と良く一致している。

粒度等の土質の影響を確認するためにコア材 A, B の挙動を比較すると、図-6 に示す室内試験と同様に、粒度が細かいコア材 B の方が同一の w' の値での $(D_c)_{1Ec}$, k_f と E の全てが低めにシフトしている。特に、 w が後述する含水比の管理下限値 WL である $w' = -0.8\%$ よりも小さくなると、コア材 A と比して k_f と E の値の低下が著しい。ただし、図-5 に示すように WL より乾燥側では、Case1-1 (コア材 A) の方が Case2-1 (コア材 B) よりも粒度が細かいが、Case1-2~4 (コア材 A) と同様に同一の w' の値での $(D_c)_{1Ec}$, k_f と E の全てが粒子が粗い Case2-1 (コア材 B) よりも高めの値を示している。これらのことから、上記の傾向は粒度の差だけでなく、人工細粒材の置換による粒度以外の粒子特性の変化の影響も受けていると考えられる。コア材 B の k_f はコア材 A と比較して全体的に 1 オーダー程度低く、 $-2\% < w' < 2\%$ の範囲全体で、現場透水係数 k_f は許容上限値 $(k_{fc})_{cr}$ ($= 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$) よりもかなり低い。また、後述のように、コア材 B でも、 E が設定した管理上限値以下であれば k_f は許容上限値 $(k_{fc})_{cr}$ 以下となることを確認している。

図-11 に、盛立試験で得られた、地盤剛性指標 S としての落球探査法による変形係数 E と現場透水係数 k_f の

関係を示す。現場試験であるため個別値は不可避免的にばらついたが、平均値は図-1cの模式図と図-7に示す室内実験の結果と同様に、 E の減少とともに k_f が減少し、 E がある値以下になると k_f は若干増加している。図-11より、今回のCase 1(コア材A)とCase 2(コア材B)のいづれにおいても、 E が概ね10MPa以下であれば k_f は現場透水係数の管理基準値 $(k_f)_{cr}$ 以下となると判断できる。本ダムでの w の管理範囲は、飽和度管理¹³⁾に基づいた上で CEL_f を勘案し $(w_{opt})_{1Ec} - 0.8\% \sim (w_{opt})_{1Ec} + 2.2\%$ (即ち、 $w' = -0.8\% \sim 2.2\%$)に設定している²⁰⁾。図-10を見ても、この w' の管理範囲内では、 k_f は $(k_f)_{cr}$ よりも十分小さく、 E は6.0MPa程度以下である。

(3) 締固め状態と地盤剛性指標

図-12に、コア材Aの締固め状態の管理範囲(許容範囲)とその周辺での地盤剛性指標 S としての落球探査法による変形係数 E の等高線を示す。図-1aの模式図は、

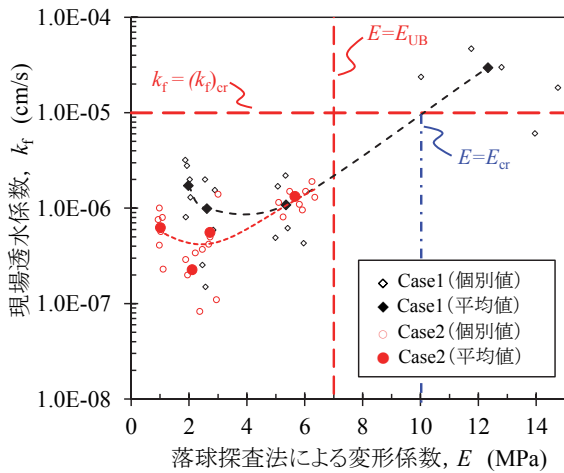


図-11 盛立試験における透水係数と変形係数の関係

この結果と整合している。図-12に示す異なる転圧回数 N での現場締固め曲線の推定法は、文献²⁰⁾に記した。本ダムでの締固め状態の管理許容範囲は、 $(D_c)_{1Ec}$ 、 w 、 S_r のそれぞれの管理許容範囲によって構成されており、設計で要求される k_f 、強度等の物性を保証するように設定した。特徴的なこととして、 S_r の許容下限値 $S_{r,L}$ の設定によって、 $(D_c)_{1Ec}$ と S_r が低いために k_f が高く浸水時のコラプス変形が生じ易い状態を排除する一方、現場で実現可能な CEL_f を活用して、 w は比較的低い $(D_c)_{1Ec}$ が高く S_r が最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ に近いことから k_f が十分低く強度・剛性が高いなどの高い品質を保証できる状態に締固めすることを奨励している。これに対応して、 w の許容下限値を $N=8$ (現場全粒度試料内での $D_{max}=37.5\text{mm}$ の部分に対しての $1.6Ec$ 相当の CEL_f での w_{opt} 付近で設定している。この w の許容下限値は、通常採用される $1Ec$ での最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも1%弱小さい。

図-12より、遮水性材料の E の変化は含水比 w の影響が支配的であり、 E の計測のみで締固め状態 (ρ_d, w) を確定することは困難であることが分かる。しかし、 E は材料の粒度等の土質と CEL_f を一定に管理して現場締固め曲線を確定できる場合は、 E の等高線と現場締固め曲線の交点から締固め状態 (ρ_d, w) を同定できることから、測定された地盤剛性指標 S の上限値管理によって透水係数の上限値管理ができることが分かる。

図-13aに CEL_f に応じた落球探査法による変形係数 E と w の関係を、図-13bに CEL_f に応じた E と w と最適含水比 $(w_{opt})_{CEL}$ との差 $w' = w - (w_{opt})_{CEL}$ の関係を示す。図-13bより $CEL_f \geq 1Ec$ 以上では $w' < 0$ の乾燥側で(すなわち $S_r < (S_r)_{opt}$ の低飽和度側で) w の低下に伴い E は鋭敏に上昇している。これは図-5に示した室内試験の結果と傾向と一致する。

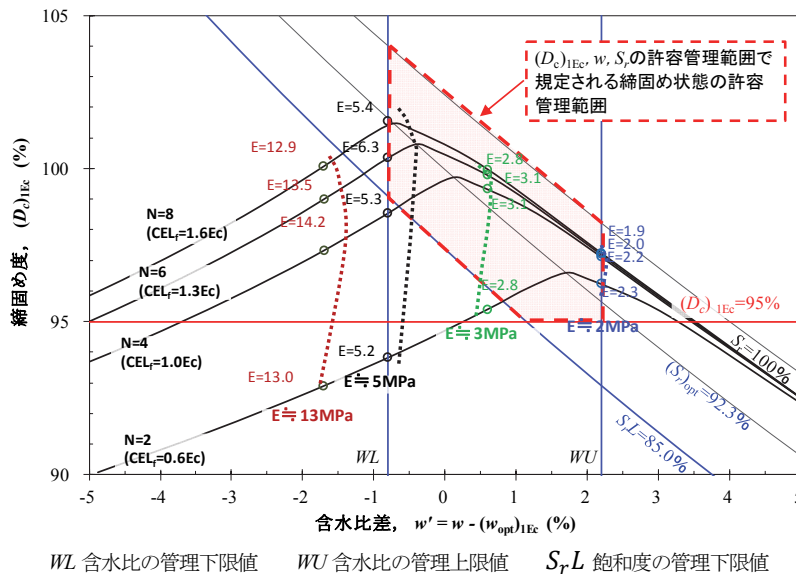


図-12 締固め状態の管理範囲と変形係数 E の等高線の比較(コア材Aの $D_{max}=37.5\text{mm}$ 試料)

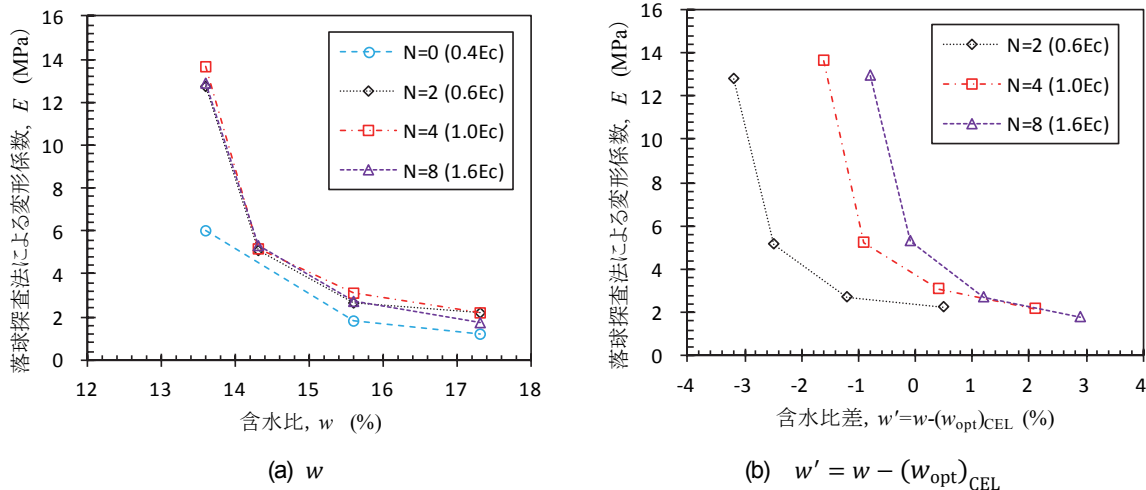


図-13 盛立試験における含水比—地盤剛性指標（落球探査法による変形係数）の関係に対する CEL の影響

5. 品質管理への適用

3 章, 4 章より, 材料の粒度等の土質, 含水比, CEL_f が適切に管理された条件下において, 転圧後の盛立面で測定した地盤剛性指標 S が設定した管理基準値 (管理上の許容上限値) S_{UB} 以下であることを確認することで, 現場透水係数 k_f が管理基準値 (管理上の許容上限値) よりも十分小さいことを間接的に確認できると判断できる. 本章では, 本ダムで採用した S_{UB} の設定法と運用時の留意事項について述べる.

(1) E の管理基準値 E_{UB} の設定

図-12 に示す地盤剛性指標 S としての落球探査法による変形係数 E の値は, 図-10, 11 に示すデータの平均値である. 一方, 実施工では, ρ_d , k_f などの管理項目と同様に, E の個別の計測値に基づいて締固め状態を評価することになるので, 以下のように, 管理基準値 E_{UB} は E と k_f の計測値のばらつきを考慮して設定した.

ばらつきには, (a) 施工ロット間のばらつき, (b) 施工ロット内のばらつき, (c) 計測精度に起因するばらつき, が考えられる. この内 (b), (c) のばらつきは, 図-11 に示す個別データのばらつきの大きさを管理基準に反映することで考慮できる. (a) のばらつきは, 試験結果を参考に次のように考慮した. 図-6 の室内試験結果を見ると, 粗粒粒度での k は, $w' = (w - (w_{opt})_{1Ec}) = 0\%$ 付近で, 標準粒度での k の約 3 倍である. 一方, 図-10 の現場試験結果を見ると, w が許容下限値である $w' = -0.8\%$ 付近における k_f の平均値は, k_f が比較的大きいコア材 A でも管理基準値 $(k_f)_{cr}$ ($=1.0 \times 10^5 \text{ cm/sec}$) よりも概ね 1 オーダー低い. これらから, k_f の計測値が上記の粒度のばらつきの影響を受けても E の上限値管理によって $k_f < (k_f)_{cr}$ の条件を満足できると判断した. また, 図-6 の室内試験結果を見ると, $w' = 0\%$ 付近では, 粗粒粒

度試料の剛性は標準粒度試料の値よりも 40% 程度高い. そこで, 図-11 に示す盛立試験結果における $w' = 0.8\%$ でのコア材 A の E の計測値の上限値 6.0MPa に, この粒度のばらつきの影響 40% の 1/2 程度の影響を見込み, 管理基準値 E_{UB} を 7.0MPa とした. 図-11 に示す盛立試験で得られた平均的な $E \sim k$ 関係に $E = 7.0\text{MPa}$ を代入すると, $(k_f)_{cr}$ の 1/4 程度の k_f の値が得られる. この差によって, ばらつきの要因 (a), (b), (c) の影響に備えつつ無用に安全過ぎる管理とならない, と判断した. また図-12 を見ると, 締固め状態の許容範囲の左端の境界線 ($w =$ 許容下限値) に沿って 7.0MPa 程度である. したがって, $E_{UB} = 7.0\text{MPa}$ は妥当な値であると判断した.

(2) 運用時の留意事項

a) 地盤剛性指標による管理の位置づけ

遮水性盛土の場合を含め一般の盛土の場合で, 締固め状態が図-12 に示すような許容範囲の内部に位置するかどうかを地盤剛性指標 S を活用して迅速に確認することを, 図-1 の概念図も参照して検討してみる. まず, 従来の S の下限値管理ではこの確認はできないことは明らかである. また, それぞれの S の測定箇所での w の値を仮に推定できる場合でも, 図-1a において現場透水係数 $k_f < (k_f)_{cr}$ となる許容範囲付近では S の等高線は w の等高線と平行的なので, S と w の値だけから, 締固め状態を適切に確認することはできない. 一方, 現場飽和度 S_r が推定できれば, $S_r = (S_r)_{opt}$ 状態を目指す S_r の上下限値管理と S の上下限値管理の併用によって, 一定の精度でこの確認ができる.

しかし, 現状では w, S_r は S のように迅速に測定できない. 一方, S の上下限値管理を行う場合でも, 材料の土質と CEL_f が確実に管理されていない場合は, 締固め度が低い状態を確実に排除できない. 結局, 次の管理法の組み合わせが現実的である.

$E \sim k$ 曲線に対する CEL_f と粒度の変化の影響を模式的に描いた。すなわち、 $k_f = (k_f)_{cr}$ となる E の値 E_{cr} とそれに対応した管理基準値 E_{UB} の値は、 CEL_f の減少と粗粒化によって低下する。このため、 E の管理基準値 E_{UB} はそれぞれの現場毎に設定する必要がある、また実施工では従来と同様に CEL_f と使用材料の粒度等の土質の適切な管理が不可欠となる。

6. 実工事での品質管理記録

本ダムのコアゾーンにおける盛立開始から 2019 年 1 月末時点までの 15 ヶ月間の品質管理記録を整理し実施工における w , ρ_d , k_f , E の関係を得て、地盤剛性指標 S を用いた遮水性能の間接管理の妥当性を確認した。

図-15 に、盛立試験から得られた落球探査法による変

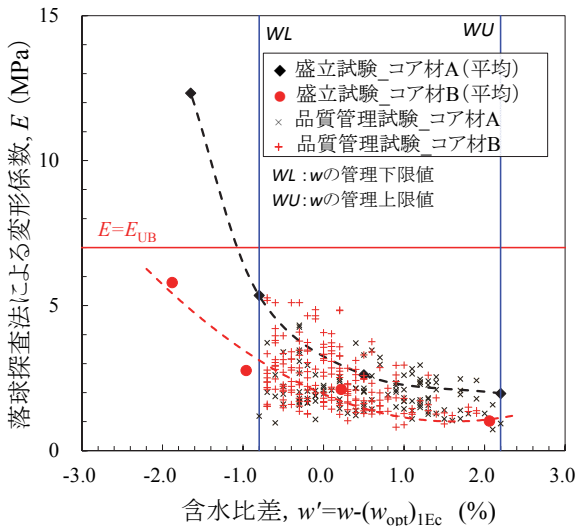
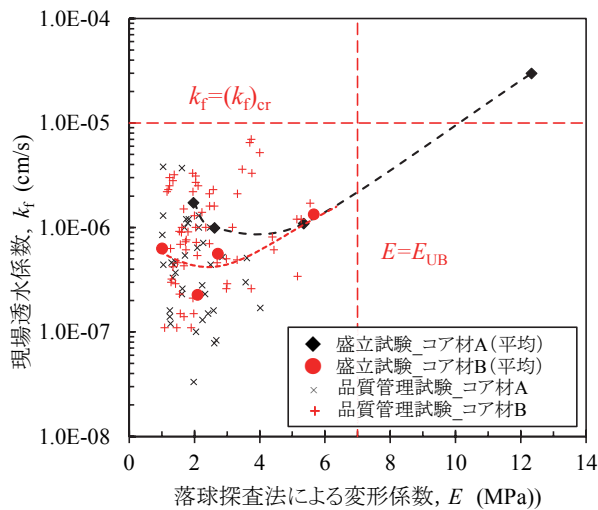
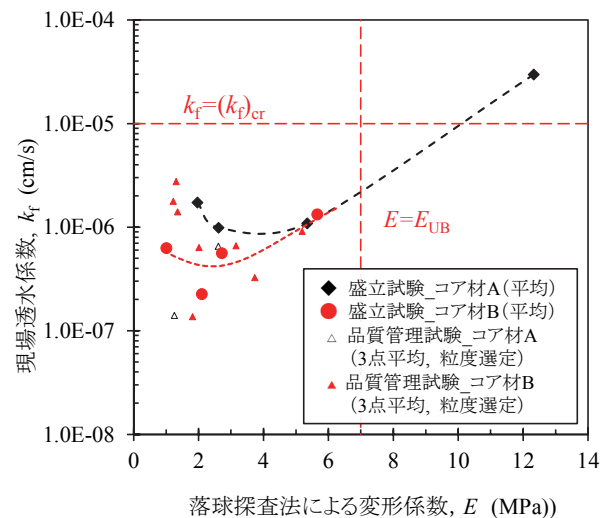


図-15 地盤剛性指標 $E \sim w$ 関係のまとめ (盛立試験と実施工)



(a) 全データ(個別値)



(b) 抽出データ(3点平均値)

図-16 原位置透水係数 $k_f \sim$ 落球探査法による変形係数 E 関係のまとめ (盛立試験と実施工)

形係数 E と w の関係 (図-10c) に本ダムでの品質管理試験値を重ねた結果を示す。図中の二つの破線は、盛立試験で得られた Case 1 (コア材 A) と Case 2 (コア材 B) での平均関係である。実施工でのコア材 A, B のデータは、盛立試験でのコア材 A, B の平均曲線の周囲にプロットされていて、また全て $w' = (w - (w_{opt})_{1Ec})$ の管理範囲内に位置している。本ダムでの w' の平均値は、コア材 A で $w' = 0.6\%$ 、コア材 B で $w' = 0.1\%$ である。 w' の値は全データで本ダムでの管理下限値の -0.8% 以上 ($\therefore w > (w_{opt})_{1Ec} - 0.8\%$) であるが、従来の管理では許容範囲を外れる $w' < 0$ ($\therefore w < (w_{opt})_{1Ec}$) の状態のデータがかなり多いことが、特徴的である。

なお、本ダムでは、 CEL_f 管理と含水比の上限値管理によって盛土の強度・剛性の下限値管理ができると判断できた。また、図-12, 15 から分かるように、含水比が管理上限値に接近すると E の変化率が非常に小さくなり、 E による締固め状態の推定精度が著しく悪くなる。これらの理由によって、 E の下限値管理は行わなかった。

図-16 に、盛立試験から得られた $k_f \sim E$ 関係 (図-11) に本ダムでの品質管理試験値を重ねた結果を示す。図中の曲線は盛立試験から得られた Case 1 (コア材 A) と Case 2 (コア材 B) での平均関係である。図-16a より、分析対象とした全てのデータで $E < E_{UB} (= 7 \text{ MPa})$ 、 $k_f < (k_f)_{cr} (= 10^{-5} \text{ cm/s})$ であり管理基準を満足していることがわかる。ただし、コア材 B の数点で、 k_f が $(k_f)_{cr}$ に近い。これらの点で現場透水試験を行った孔から採取した試料を用いて粒度を確認したところ、管理基準値内ではあるが、粒度分布が粗めであった。この結果で、粒度管理の重要性が再確認された。

図-16a では、個別孔毎のデータをプロットしており、粒度等の土質が管理範囲の中であらうしているため、デ

表-5 盛立試験と実施工の粒度特性値 (平均値)

区分	粒度 ($D_{\max}=150\text{mm}$)		
	<0.075mm 含有率(%)	<4.75mm 含有率(%)	37.5mm 超過率 ^{※1} (%)
コア材A (盛立試験)	22.0	50.3	17.4
コア材B (盛立試験)	23.9	57.5	14.4
コア材A (実施工 ^{※2})	25.6	55.5	11.6
コア材B (実施工 ^{※2})	23.8	52.3	16.3

※1 37.5mm 以上粒径の含有率

※2 砂置換試験孔からの採取試料による粒度試験結果の平均値

ータポイントのばらつきが大きい。そこで粒度等の土質のばらつきの影響を排除した場合の傾向を確認するため、試験孔から採取した試料の粒度が盛立試験時の粒度に近い条件のもの (<0.075mm 含有率 22%前後, <4.75mm 含有率 55%前後) を抽出し、1 回の試験で計測する 3 点分のデータの平均値をプロットしたのが図-16b である。図-16b から、粒度等の土質が近い条件ならば、実施工データにおける $E \sim k_f$ 関係も盛立試験と同様の分布傾向を示すことがわかる。盛立試験と実施工のコア材 A, B の関係を表-5 に示す。表-5 より、実施工時の粒度は、コア材 A では盛立試験時よりも細粒側で、コア材 B ではコア材盛立試験時よりやや粗粒側 (コア材 A の盛立試験よりは細粒側) で管理されていたことがわかる。図-16a に示すように、同一の E における k_f の値はコア材 A の盛立試験の代表曲線より低目のデータが多い。これは、実施工において一般コアの製造粒度がコア材 A の盛立試験時よりやや細粒側になっていたためと思われる。この結果は図-7b の室内試験結果や図-14 に示した模式図とも整合する。

以上示した実施工のデータから、粒度等の土質と現場締固めエネルギーレベル CEL_f が適切に管理された条件の下では、地盤剛性指標の管理による遮水性性能の間接管理が可能であることが確認できる。

7. 結論

(独) 水資源機構が建設中の小石原川ダム (福岡県朝倉市) に関連して、遮水性材料を用いた各種の室内試験と現場盛立試験を実施して基本的な法則性を確認し、地盤剛性指標の上限値管理に基づいた現場透水係数の間接的であるが迅速な評価法を構築した。以下に本研究で得られた結果を示す。

1) 既往の研究を参照して把握した、締固め土の締固め

特性と工学的性質の概念的全体像に基づいて、粒度・粒子特性等の土質と締固めエネルギーレベル CEL が既知の場合には、地盤剛性指標 S の上限値管理による遮水性材料の透水係数 k の上限値管理が可能になることが推察できた。

- 2) 材料と含水比を変化させて実施した室内での非水浸 CBR 試験、締固め試験、透水試験、および盛立試験の結果に基づいて、本ダムの一般コア材でも 1) の概念的全体像の傾向を確認でき、1) の管理手法が適用可能であることを確認した。
- 3) 室内試験の結果に基づいて、1) の管理手法を適用する場合、必要な遮水性能を確保するためには、現場全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分に対して $1Ec$ 以上の現場締固めエネルギーレベル CEL_f を確保することが望ましいことが確認できた。また、室内試験および盛立試験の結果に基づいて、 S の管理上の許容上限値 (管理基準値) S_{UB} の値は管理粒度の範囲内で最粗粒の材料での値に基づき決定する必要がある、さらに実施工での粒度・粒子特性等の土質と CEL_f の条件は S_{UB} の値を決定した盛立試験での値と同等以上の条件を確保する必要があることが確認できた。
- 4) 室内試験および盛立試験の結果より、1) の管理手法において、地盤剛性指標として落球探査法による変形係数を用いた場合の管理基準値を定め、間接的だが迅速に透水係数を管理する評価法を構築できた。
- 5) 4) の評価法を実施工の品質管理に適用し、15 ヶ月間の品質管理記録を解析した結果、この評価法の妥当性を確認できた。

本稿では、地盤剛性指標に落球探査法による変形係数を用いた場合の検討結果を記した。地盤剛性指標としてローラ加速度応答法による指標を採用すれば、落球探査法で測定する場合よりもさらに迅速に測定可能であり、さらには面的なデータを用いた評価が可能となる。この方法による遮水性盛土の面的管理は、1 年間の試行によるデータ収集と分析を経て 2019 年 5 月より実際の品質管理への適用が始まっている。これらは、別途報告する予定である。

謝辞：本稿の作成にあたり、多くの室内試験・現場試験の実施、整理にあたりご協力頂いた小原隆志氏、小原直人氏、福島雅人氏をはじめとする関係者の皆様、本ダムの技術検討会において各段階でご指導とご助言を頂いた松本徳久氏、水野光章氏、山口嘉一氏および関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修, 財団法人ダム技術センター編纂: 多目的ダムの建設 昭和 61 年度版 第 5 巻施工編, pp. 333-335, 1986.
- 2) 国土交通省: TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領, 2019.3.
- 3) 公益社団法人地盤工学会: 土の締固め, pp. 103-104, 2012.
- 4) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集, No. 652/III-51, pp. 115-123, 2000.
- 5) 橋本毅: ドイツにおける ICT を利用した締固め管理技術, 建設の施工企画, ' 10. 3, pp. 29-33, 2010.
- 6) 古屋弘, 藤山哲雄: 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 α システム」の開発と実用化, 建設の施工計画, ' 10. 10, pp. 42-46, 2010.
- 7) NEXCO: 土工施工管理要領(平成 29 年 4 月) 参考資料, pp. 参 127-165, 2017.
- 8) 藤山哲雄, 益村公人, 建山和由, 石黒健, 三嶋信雄: 種々の土質条件に対するローラ加速度応答法の締固め管理への適用性, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 169-179, 2002.
- 9) 北本幸義, 吉田輝, 川野健一: 落球探査法による地盤物性の迅速評価, 電力土木, No. 360, pp. 119-120, 2012.
- 10) 小倉公一, 古屋弘, 足田喜彦, 肥後桂介: 森吉山ダムにおける堤体盛土の情報化施工一リアルタイム施工管理システムの試行一, ダム工学, Vol. 18, No. 3, pp. 156-165, 2008.
- 11) 柴藤勝也, 日下雅史, 伊藤文夫: ICT を用いたダム施工監理のあり方について(殿ダムでの事例), 土木学会第 66 回年次講演会, pp. 643-644, 2011.
- 12) 公益社団法人地盤工学会: 土の締固め, pp. 10-15, 2012.
- 13) 根本忠, 佐々木隆男: 土の締固め特性, 創立 303 周年論文集, 建設機械化研究所, pp. 45-58, 1994.
- 14) 龍岡文夫: 土の締固めにおける飽和度管理の重要性, ダム技術, No. 354, 3 月号, pp. 3-16, 2016.
- 15) 龍岡文夫: 盛土の締固めにおける飽和度管理の重要性, 技術手帳, 地盤工学会誌, Vol. 63, No. 7, pp. 39-40, 2016.
- 16) Tatsuoka, F.: Compaction characteristics and physical properties of compacted soil controlled by the degree of saturation, Keynote Lecture, Deformation characteristics of geomaterials, *Proc. of 6th Int. Conf. on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Buenos Aires, pp. 40-78, 2015.
- 17) Tatsuoka, F and Gomes Correia, A.: Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design, *Transportation Geotechnics*, Vol. 17, pp. 3-27, 2018.
- 18) 三国英四郎: フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その 1), 土と基礎, Vol. 10, No. 1, pp. 4-12, 1962.
- 19) 辻良祐, 吉田輝, 藤崎勝利, 小林弘明, 小原隆志, 曾田英揮, 坂本博紀, 龍岡文夫: 締固め土の乾燥密度, 飽和度と変形係数(剛性)の関係, 第 53 回地盤工学研究発表会, p. 1039-1040, 2018.
- 20) 坂本博紀, 福島雅人, 日野浩二: 小石原川ダムにおけるコア盛立の高度化・合理化の検討, ダム技術, No. 390, pp. 52-65, 2019.
- 21) 財団法人ダム技術センター編集・発行: 多目的ダムの建設 平成 17 年度版 第 5 巻 設計 II 編, pp. 88-101, 2005.
- 22) 建設省土木研究所フィルダム研究室: Q&A フィルダム遮水材料の透水係数の規格値, ダム技術, No. 101, pp. 59-61, 1995.
- 23) 北村佳則, 西尾貴至, 内山恵一: ローラ加速度応答を用いた盛土品質評価, 第 25 回日本道路会議論文, CD-ROM, 07P04, 2003.
- 24) 公益社団法人地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, p. 722, 2013.
- 25) Walker, F. C. and Holtz, W. C.: Control of embankment material by laboratory testing, *Proc. ASCE*, Vol. 77, No. 108, pp. 1-25, 1951.
- 26) 坂本博紀, 曾田英揮, 小林弘明, 龍岡文夫: フィルダムのコアゾーンにおける締固め状態の評価事例, 土木学会第 72 回年次講演会, 2017.

(Received July 11, 2019)

(Accepted April 28, 2020)

SOIL COMPACTION CONTROL BASED ON SOIL STIFFNESS INDEX FOR IMPERMEABLE EMBANKMENT

Hiroki SAKAMOTO, Hiroaki KOBAYASHI, Fumio TATSUOKA and Hideki SODA

To properly construct impermeable embankment, typically the core zone of earth-fill dam, it is required to ensure sufficiently low values of the coefficient of hydraulic conductivity, k . To this end, the grading characteristic of backfill and the moisture content and dry density after compaction in the field are measured and controlled. This conventional method is, however, time-consuming therefore restricting the number of measurements. To develop an indirect but much faster method that can control the field k values to be sufficiently low by upper-bound control of field soil stiffness index, S , we performed a comprehensive series of laboratory and field tests changing the compaction energy level, CEL, and particle size distribution characteristics related to the construction of a 139 m-high fill dam. It was confirmed that, when the CEL and the soil type are controlled to be identical to those used in field tests by which the allowable upper bound of S is determined, the k value is kept lower than the allowable upper bound if all measured S values are kept lower than the specified upper bound.