

鶴川ダム建設工事におけるコア材の飽和度管理を重視した現場締固め管理

前田建設工業株式会社 ICI 総合センター フェロー会員 ○石黒 健
新潟県柏崎地域振興局 和田 豊 八千代エンジニアリング株式会社水工部 正会員 貫井 明
前田建設工業株式会社 北陸支店鶴川ダム作業所 正会員 中島秀樹 武田智治
東京理科大学 フェロー会員 龍岡文夫

1. はじめに

Proctor¹⁾が土の締固めに関する4編の著名な論文を発表してから早や86年が経過した。その間、盛土構造物の設計手法は性能設計への機運の高まりと共により高度な要求性能に対応すべく著しい発展を遂げた。現場の施工法も、締固め機械の大型化やGNSS等を用いた施工管理技術の向上による施工の効率化が進んでいる。このような設計・施工技術の進展の中で、両者を橋渡しすべき現場締固め管理手法に関してはProctorの思想からむしろ後退してはいないか、との厳しい指摘が時折なされてきた^{2) 3)}。一方近年、龍岡⁴⁾が提唱する「締固め後の土の飽和度管理を重視した新たな締固め管理の考え方」が、客観的かつ合理的な現場締固め管理を具現化する手法として注目されている。この手法ではまず、盛土構造物の要求性能や要求水準、すなわち「性能設計」に直結した現場管理を目指す。ポイントは、要求性能を遵守するための現場管理が、「同時に」、転圧機械のエネルギー(CELf)を現場で最も効果的に土に加える最適施工=「性能施工」という行為そのものになっている点にある。すなわち、要求性能・性能設計・性能施工が三位一体となった包括的かつ合理的な現場管理を、飽和度管理を重視した管理法によって目指すものである(図1)。本手法を、あるロックフィルダムコア材の現場締固め管理基準の策定に用いた。その経緯を実現場の課題に即した形で具体的かつリアルに示してみたい。これにより、本手法を現場適用した一つの事例を設計・施工技術者に提供し、具体的な適用イメージを持って頂くことが本論文の目的である。この手法は、Proctorの現場管理の思想を現代の条件に沿ってより確実に実行することを目指したものと、考えている。論文の最後で再びこの点を論ずる。

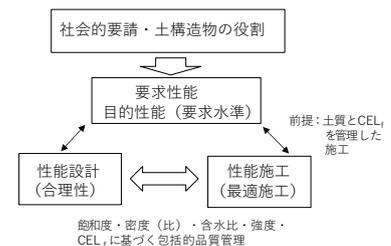


図1 飽和度管理を重視した現場締固め管理

2. 「飽和度管理を重視した現場締固め管理」の基本的な考え方と鶴川ダムにおける適用方針

龍岡が提唱する「飽和度管理を重視した現場締固め管理」の考え方^{4) 5)}を図2および表1に模式的に示す。詳細は文献^{4) 5)}を参照して頂き、図2中には鶴川ダムコア材で採用した管理基準線のみを示した。鶴川ダムは中央遮水壁型のロックフィルダムであり、コア材に求められる最も重要な要求性能は遮水性(透水係数)である。一方施工面では、現場含水比が25%(<37.5mm相当)を超える高含水比材料を30t級の大型のタンピングローラーで転圧するために、施工性(トラフカビリティ)の確保が重要な課題となる。結果的に、これらの要求性能と施工性を確保するために、飽和度の上下限、密度(比)の下限、含水比の上限のラインが定められた。なお、一般的には含水比の許容下限値の規定も必要であるが、本現場では盛土材料の自然含水比が高いため、含水比の許容上限値の規定は重要となるが許容下限値の規定は設けなかった。表1中に示すように、これらの基準線は性能設計と性能施工での別々のものではなく、相互に関連しつつ、その組み合わせによって締固め管理を行っていることに留意されたい(決して飽和度の値のみを管理するものではない)。例えば、飽和度の下限値ラインは遮水性と同時に最適飽和度を目指す最適施工の担保を、また上限ラインは施工性と同時に低すぎる強度・剛性の回避による構造安定性の担保と過転圧の回避、および最適飽和度を目指す最適施工の担保を担う。図2中には、「材料変動の影響」も模式的に記載した。鶴川ダムでは細粒と粗粒の2種類の母材をブレンドしてコア材の粒度調整を行っている。コア材の最大粒径の規定に変更が

キーワード ロックフィルダム, コア, 飽和度管理, 性能設計, 性能施工, Proctorの締固め管理

連絡先 〒302-0021 茨城県取手市寺田5270 前田建設工業株式会社 ICI 総合センター TEL 0297-85-6171

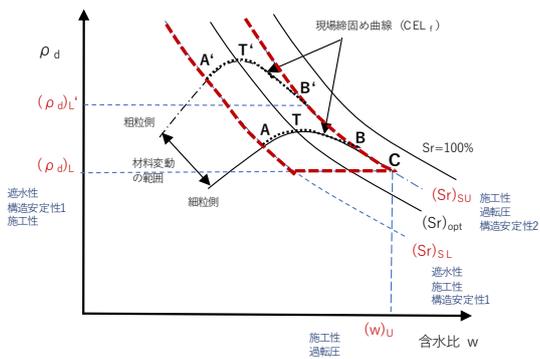


図2 鶴川ダムの現場締固め管理基準(模式図)

表1 管理基準と性能設計・性能施工の関係

	要求性能	管理基準				
		土質とCELの変動に影響されにくい		土質とCELの変化に影響されやすい		
		飽和度許容下限値 (S _L)	飽和度許容上限値 (S _U)	乾燥密度許容下限値 (ρ _{dL})	含水比許容下限値 W _L	含水比許容上限値 W _U
性能設計	遮水性の確保	●		○	○	
性能設計	構造物安定性の確保1	●		○	○	
	構造物安定性の確保2		●	○		○
性能施工	最適締固め状態を効率的に実現する施工性の確保	●	●			
	過転圧の回避		●	○		○

構造物安定性の確保1: 浸水時の過度のコラプス変形、軟化・弱化的回避
 構造物安定性の確保2: 低すぎる強度・剛性の回避
 ●: 効果的であり、○と組み合わせると確実になる
 ○: 効果があるが、●と組み合わせないと有効にならない

生じたこと、および粗粒コアの採取場所（原石山）や深度により調整後の粒度が一定の範囲で変動せざるを得ない状況であったため、本ダムでは材料の変動幅を考慮した現場管理基準線の検討を行った。実現場では、ロックフィルダム以外であっても（延長の長い道路や河川ではなおさら）材料変動は不可避に発生する。表1に示すように、従来は現場での土質と締固めエネルギーレベル(CELf)の変動の影響を受けてしまう最大乾燥密度と最適含水比に基づき締固め度と含水比の管理を行うが、提案手法では現場での土質とCELfの変動の影響が少ない飽和度管理を導入している。本論文では、このような場合に提案手法がどの程度の威力を発揮するのかを具体的に示すことを試みる。すなわち、鶴川ダムの現場締固め管理は、図2中の赤線で囲まれた密度・含水比の範囲内で行われる。この範囲内であれば所要の遮水性とせん断強度、そして過転圧を回避しつつ最適締固め状態を実現する施工性が担保される。同時に遮水性や施工性を担保するために飽和度の上下限ラインを遵守することにより、現場で材料粒度とCELfが変動して現場締固め曲線が最適飽和度ラインに沿って移動したとしても、図中の最適領域（飽和度Srが最適飽和度(Sr)_{opt}と一致している状態である締固めターゲットTの近傍のA→T→BとA'→T'→B'で囲まれた領域）で現場締固めが行われることが担保される。以下、これらの各管理基準線の策定経緯と具体的手法を、順を追って示していきたい。

3. 鶴川ダムの概要とコア材の施工および基本的な材料特性

鶴川ダムは、堤高 55m の中央遮水壁型ロックフィルダムである。図3に標準断面図を示す。本ダムのコア材は、後述する現場転圧試験結果から仕上がり厚が 25 cm となるように撒き出し、30t 級のタンピングローラにより 10 回転圧する仕様に定められた。写真1には、ブレンドパイルの切り崩しおよび転圧状況を示す。図4に本ダムのコア材の粒度範囲を、図5に室内締固め-透水試験結果を示す。前述した理由から、図中には2種類の材料（便宜的に「細粒側：青」、「粗粒側：赤」コアと称する。粗粒側コアは最大粒径の 100 mm から 150 mm への変更に伴い調整粒度が変化したものであるが、原材料自体は同一である）の試験結果を併記した。図中に記した管理範囲内に粒度の変動幅が収まるようブレンドパイルの細粒・粗粒母材の層厚等を緻密に管理していく予定であるが、今後もこの粒度範囲内の材料変動が現場で生ずることは避けがたい。室内締固め特性に対する粒度の影響は大きく、粗粒側コアの締固め曲線は通常言われているように細粒側コアのそれよりも左上に位置している。図4の室内試験粒度 (<37.5 mm) を見ると粗粒側コアは細粒側に比べて相対的に細粒分含有率が大きく粒度がより良好になっており、これが締

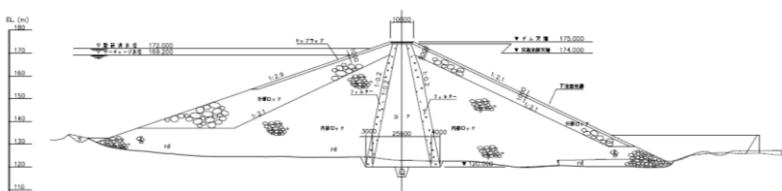


図3 鶴川ダムの標準断面図



写真1 コアのブレンドと現場転圧状況

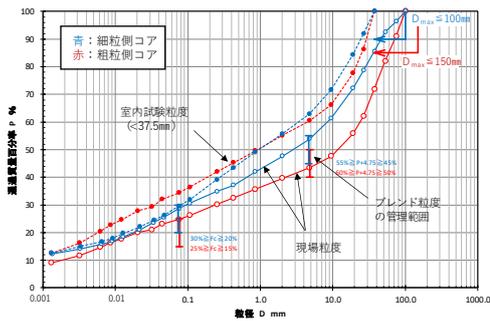


図4 コア材の粒度特性

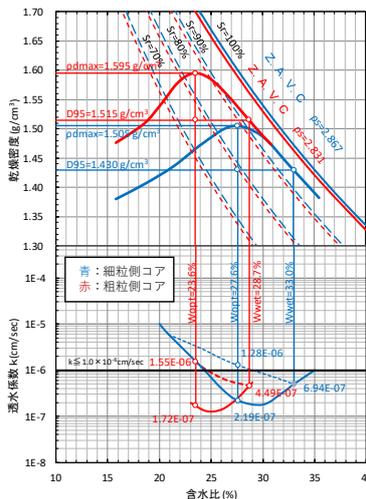


図5 コア材の室内締固め-透水特性

表2 実施した室内・現場試験の一覧

	要求性能	室内/現場	試験内容
性能設計	遮水性	現場	現場透水試験 (N=0~12)
		室内	室内透水試験 (0.8Ec~2Ec)
性能施工	せん断強度	室内	三軸CU試験 ($\rho d \cdot w$ 変化)
		現場	コーン貫入試験 (N=0~12)
性能施工	施工性	室内	コーン貫入・CBR試験 (0.8Ec~2Ec)
		現場	現場密度試験 (N=0~12)
性能施工	最適施工	現場	現場密度試験 (N=0~12)
		室内	室内締固め試験 (0.8Ec~2Ec)

固め特性、ひいては遮水性を向上させているものと考えられる。表2には、今回現場締固め管理基準を策定する目的で行った一連の室内試験および現場転圧試験の概要をとりまとめた。

4. 性能設計への対応：要求性能の確実な担保を目指して

フィルダムのコア材に要求される最も重要な品質は遮水性（透水係数）である。そこでまず、所要の現場透水係数（ 10^{-5}cm/sec ）⁶⁾を満足するために必要とされる締固め管理範囲を検討した。図6は、2種類のコア材を用いて行われた現場転圧試験の結果を、乾燥密度・飽和度・現場透水係数と転圧回数の関係として整理した結果を示す。なお以降の現場密度や含水比は、室内試験結果と比較できるように現場から採取した礫分を除算して、室内試験と同じ37.5mm以下の分の値に補正したものである。細粒側コアでは、密度収斂後のデータだけであるが、比較のために仕上がり厚20cmヤードの結果も併記した。転圧回数の増加に伴い乾燥密度と飽和度は増加し、透水係数が次第に減少する傾向が得られ、乾燥密度が確実に収斂し（転圧の収斂）かつ透水係数が規定値を安定的に下回る（要求性能を満足する）転圧回数として10回が定められた。龍岡⁴⁾による既往ダムの整理結果から、コア材の遮水性は乾燥密度と締固め時の飽和度の影響を強く受けることが予見されたため、3者の関係を整理した。図7を見ると、龍岡⁴⁾と同様、乾燥密度が大きく、飽和度が高いほど現場透水係数が減少することが明白である。最終的には乾燥密度と含水比からなる座標上に現場締固め管理範囲を策定する必要があることから、これらのデータを図8に再整理した。なお、図では規定値を満足するか否かを区分して示す目的で、細粒側コアと粗粒側コアを区別していない。また、判例にあるように赤と青の意味が異なる事に留意されたい。図中、●印は現場透水係数、■印は今回行った室内透水係数、▲印は本ダムの基本設計時に実施された既往の室内試験データである。また、青字はその値が規定値（現場は 10^{-5}cm/sec 以下、室内は暫定的に 10^{-6}cm/sec 以下⁶⁾）を下回った点（合格）を、赤字は上回った点（不合格）を示しており、青と赤のプロットの境界線が遮水性に基づく管理基準線となる。図中に3本の緑のラインを入れた。2種類のコア材に対して、飽和度に関しては同じ下限値ライン S_{rL} (83%) が、乾燥密度に対しては材料別に2つの下限値ライン ρ_{dL} が引けそうである（なお遮水性は乾燥密度と飽和度の関数であり同一の透水係数は乾燥密

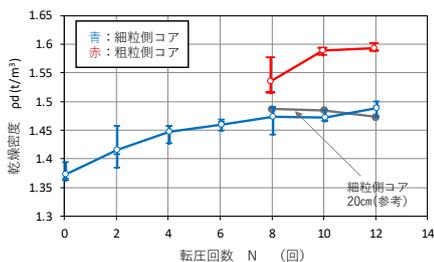


図6(a) 乾燥密度と転圧回数の関係

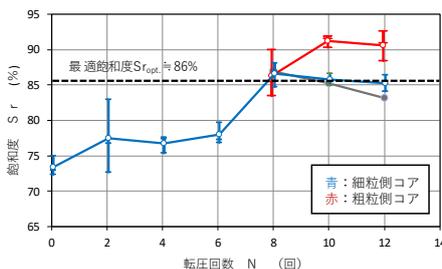


図6(b) 飽和度と転圧回数の関係

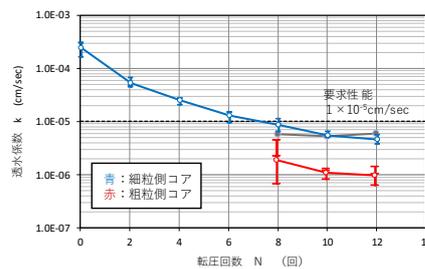


図6(c) 現場透水係数と転圧回数の関係

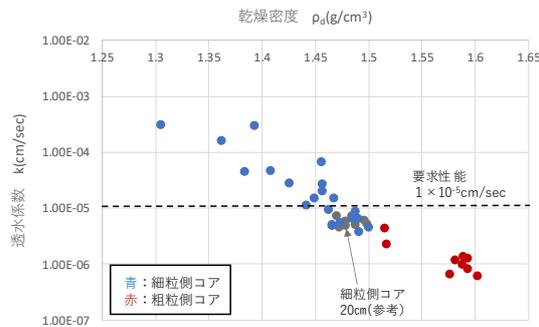


図7 (a) 乾燥密度と現場透水係数の関係

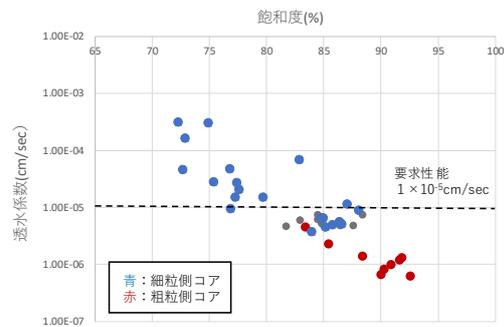


図7 (b) 飽和度と現場透水係数の関係

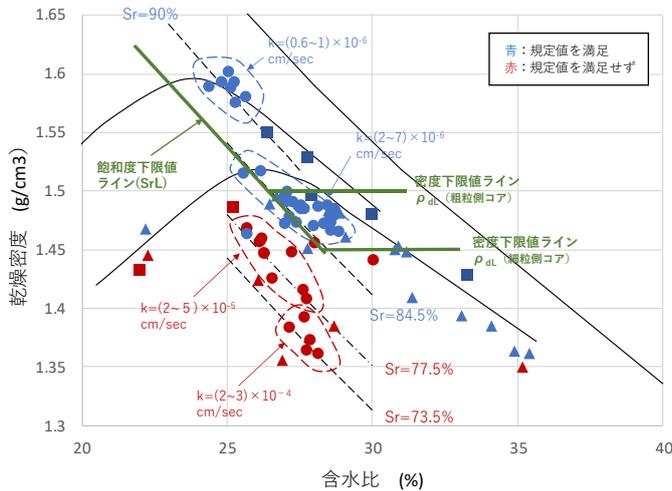


図8 含水比・乾燥密度平面上的の透水係数コンタと合否判定

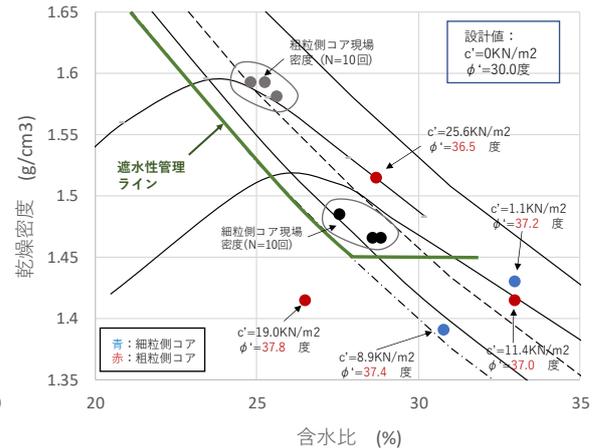


図9 強度定数の確認結果と管理基準線の関係

度～含水比平面上での等高線で表現される。従って、飽和度のみで遮水性の管理基準が決まらないことに留意されたい。また追加で行った粗粒側コアは全点が合格であったため、緑のラインはやや安全側の評価となる)。図中には、これらのプロットを類似の透水係数でグループ化してそれぞれ別の領域で示すと共に、飽和度一定ラインを併記した。これらがお互いにはほぼ平行な関係を保ちながら高密度・高飽和度領域ほど透水係数が小さくなるのが見て取れ、これは龍岡⁴⁾ 5)による整理結果と整合する。一方、コア材には所要のせん断強度(c', ϕ')も要求される。図9には、図8と同じ座標上に三軸試験の結果を併記した。鶴川ダムコア材のせん断強度は図中の設計値に対してかなりの余裕を有しており、上述の飽和度下限線に加えて遮水性から定まる乾燥密度の下限値 ρ_{dL} を遵守していれば、せん断強度に関する要求性能は十分に確保されることが確認できる。コア材の変形特性(剛性)に対しては明確な要求水準が定められていない。コアの剛性やロック、フィルタとの剛性差が築堤完了時の堤体内有効応力分布、湛水時のコアの有効応力分布、ひいては水理的破壊現象(ハイドロリックフラクチャリング)に対する安定性に影響を及ぼすことが良く知られている⁷⁾。コアの剛性は本来、この湛水時の水理的安定性というロックフィルダムの最も重要な要求性能から規定されるべきと思われる。そのためには本ダムを対象とした堤体挙動解析の結果を待つ必要がある。紙面の関係から、本検討については次報に譲る。

5. 性能施工への対応：理想的な現場締固めを目指して

転圧後の現場密度と含水比の状態が前章で定めた締固め管理範囲内に確実に収まるためには、転圧重機のエネルギー(CELf)が現場で安定的かつ有効に土に加わるような工夫が必要となる。すなわち、性能設計を担保する「性能施工」のための締固め管理基準である。目指したいのはまず、転圧重機の施工性(トランザクティブリティ)の確保である。30t級の大型タンピングローラが撒き出した材料の上を安定的に走行することが出来なければ、性能設計どころの話ではなくなってしまう。この過転圧を回避するための施工性が確保できれば、この転圧重機で達成可能な理想的な現場転圧を担保することが次のターゲットとなる。以下では、この順番に話を進める。なお施工性に関しては施

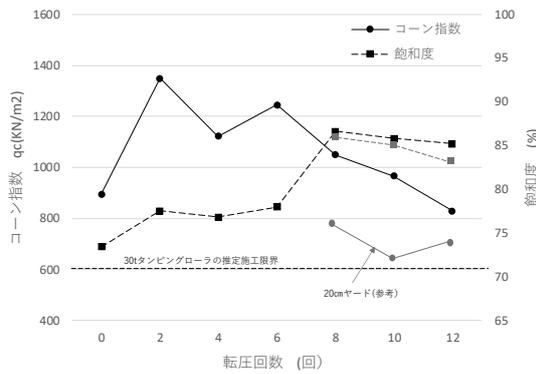


図 10(a) 転圧回数と現場コーン指数、飽和度の関係 (鶴川ダム)

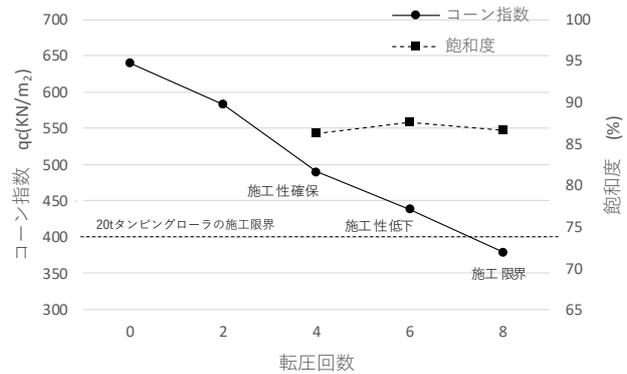


図 10(b) 同左 (0 調整池関東ロームコア)

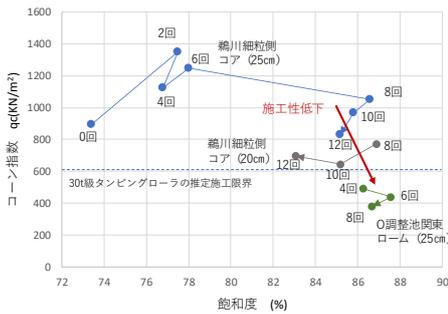


図 11 飽和度と現場コーン指数の関係

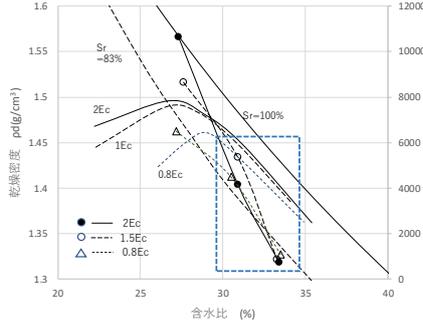


図 12(a) 室内締固め・コーン試験結果

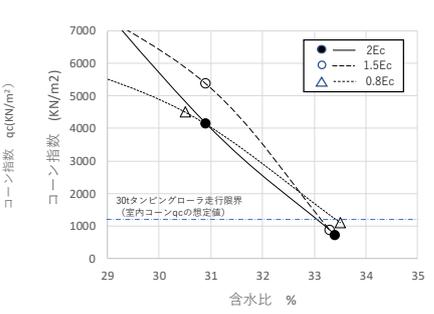


図 12(b) 同左青枠部の拡大図

工含水比の高い細粒側コアが専ら問題となるため、議論をこの材料に絞る。鶴川ダムコア材転圧時の重機の施工性は実際にどうであったのか。細粒側コアの転圧試験時に現地でコーン指数を計測した結果を飽和度と共に図 10(a) に示す。コーン指数は、転圧初期では乾燥密度と共に増加するものの、転圧回数 4 回以降は飽和度の上昇による強度低下の影響がこれを上回り、次第に減少する。最適飽和度(86%)以降では遮水性は向上するものの(図 6 参照)コーン指数は低下の一途をたどる。ただし試験施工時の目視観察では施工性の低下は見られず、問題なく転圧施工が行われている。大型タンピングローラが施工性を失ってしまうような現場コーン指数の限界値は一体どの辺りにあるのか。過去の類似の施工事例を調べた結果、ある調整池の転圧試験報告書(前田建設工業内部資料)の中に貴重な実測データを見出した。図 10(b)は、この調整池のコア材(関東ローム)を 20t 級のタンピングローラで転圧した際のコーン指数と飽和度の関係を示している。関東ロームという材料の特性によるものと思われるが、コーン指数は転圧初期から一貫して低下の傾向を示す。施工報告書によると転圧回数 4 回から 8 回の間で施工性の急激な悪化が生じ、6 回で施工性低下、8 回で施工不能限界に至ったとの記載がある。これより施工限界現場コーン指数を 400kN/m² と判定し、鶴川ダム転圧機械(30t 級)との重量比を掛け合わせた 600kN/m² のラインを、図 10(a)中に 30t 級重機の推定施工限界ラインとして併記した。仕上がり厚 25 cm ヤードはこの値に対して十分な余裕があるものの、転圧回数 8 回から 12 回の中でコーン指数が線形的に低下しこの値に近づいていることから、決定された転圧回数 10 回は施工性確保の面からも妥当といえる。20 cm ヤードはコーン指数がより小さく、限界値に近い。実際、試験施工では転圧時に側方流動(ウェーピング)の傾向が観察されたとの報告もあり、仕上がり厚を 20 cm でなく 25 cm としたこともまた、施工性確保の面から妥当である。図 11 には、これらのデータを飽和度と現場コーン指数の関係として再整理した。重機重量と土質に違いはあるものの鶴川ダムと 0 調整池のデータには概ね連続性が見られ、図中に矢印で示したような経路が現場の施工性の悪化を定量的に表しているものと考えられる(ただし、この関係は他の転圧重機には適用できる保証はないことに留意)。これらの現場データは、施工性を安定的に確保する(コーン指数の急減を避ける)ためには締固め後の飽和度を 90% よりも小さく抑えることが得策であることを示唆している。なお、粗粒側コアの転圧試験では転圧回数に関係なく施工機械の走行性に全く支障が生じていない。

現場転圧試験では施工含水比を一定の幅で変化させた場合のデータを取得していないため、鶴川ダムでどの程度

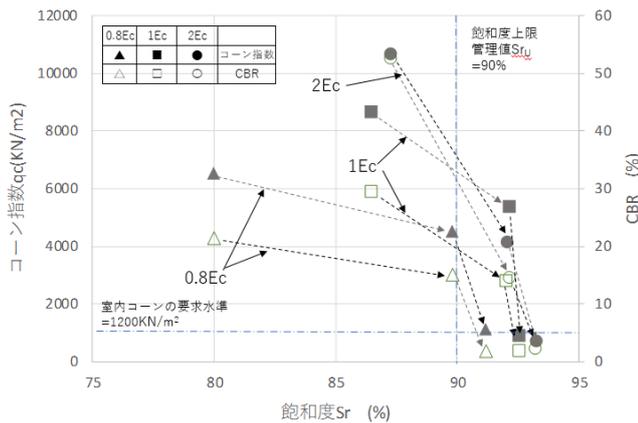


図 13 室内コーン指数と CBR が急減する飽和度

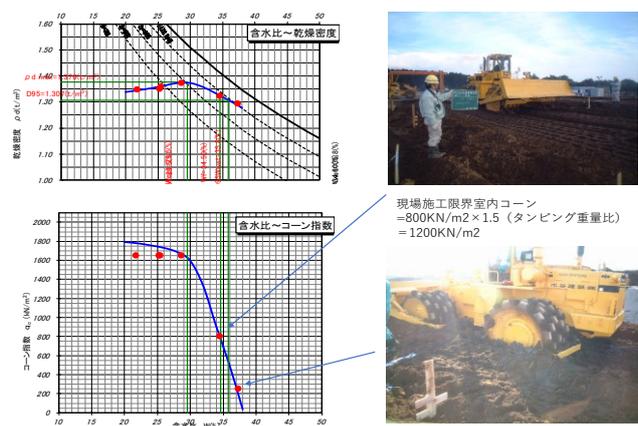


図 14 0 調整池における室内締固めコーン試験結果

まで現場含水比や飽和度が上昇すれば施工性が損なわれるかを明確に議論できない。そこで、細粒側コアを用いた一連の室内締固めコーン貫入-CBR 試験を実施した。図 12 に、その結果の一例として室内コーン指数の計測結果を締固め曲線と共に併記した。本試験では高含水比状態のコア材において転圧不足や過転圧により施工性が失われる状況を室内で再現する目的で、試験時の含水比を現場含水比よりも湿潤側に、また締固めエネルギーを 0.8Ec, 1Ec, 2Ec の 3 水準に変化させた。図より、室内コーン指数は現場含水比付近においては締固めエネルギーの大きさに対応した変化を示すものの、より高含水比側では急減して大差がなくなっている。湿潤側のみを拡大した図 12 (b) では、むしろ締固めエネルギーが大きいほどコーン指数が小さく、逆転傾向さえ見受けられる (過転圧現象を示唆)。この傾向は、飽和度に対して再整理した図 13 を見るとより明瞭で、図中に併記した CBR 値もほぼ同一傾向を示していることは興味深い。締固めエネルギーが大きく高密度領域にあるほどコーン指数や CBR 値が急減する飽和度はやや高めになるものの、それを超えると急激に強度低下が発生することが分かる。この結果と前述した現場コーン指数の急減傾向を総合的に勘案し、施工性を安定的に確保するための許容上限飽和度 Sr_U を 90% と定めた。さらに、タンピングローラの施工性が失われる「室内」コーン指数に関しても、0 調整池の施工記録が貴重なデータを提供してくれる。図 14 は 0 調整池コア材の室内締固めコーン試験結果であるが、図中に 2 つの施工状況写真を併記している。0 調整池では当初自然含水比での試験施工を試みたが、タンピングローラが撒き出し面に埋没する (現場では、施工機械が前に進めなくなる状態から、これを「カメ」と称する) 結果となった (下の写真)。この時の含水比に対応する室内コーン指数と、かろうじて施工が可能であった図 10 (b) の状態 (その後曝気により含水比を低下: 上の写真) に対応する室内コーン指数が図中に矢印で示されている。施工限界状態である上の写真に対応する室内コーン指数は 800kN/m^2 であるので、機械重量比 1.5 倍をかけた 1200kN/m^2 が鶴川ダムにおける室内コーン指数の所要値となる (興味深いことに、この値はダンプトラックが走行可能なコーン指数と偶然一致する⁸⁾)。試みに図 12 (b) 中にこの値を入れ、施工含水比の上限値を機械的に読み取ると約 33% となる。これらの結果を集積し、施工性確保のための管理基準線を定めてみる。図 15 は、密度・含水比平面上にここまで示してきた現場・室内コーン指数を求めた際の土の乾燥密度と含水比の組み合わせをプロットし、図 8 の遮水性管理基準と同じような合否判定を試みた結果である (赤が不合格。閾値は前出の 0 調整池の室内・現場コーン指数の限界値を参照)。冒頭述べたように、締固め管理基準線は個々の要求性

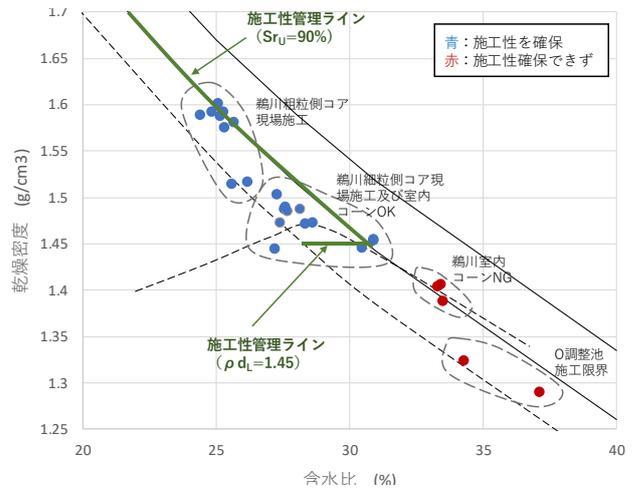


図 15 施工性確保に関する合否判定

「室内」コーン指数に関しても、0 調整池の施工記録が貴重なデータを提供してくれる。図 14 は 0 調整池コア材の室内締固めコーン試験結果であるが、図中に 2 つの施工状況写真を併記している。0 調整池では当初自然含水比での試験施工を試みたが、タンピングローラが撒き出し面に埋没する (現場では、施工機械が前に進めなくなる状態から、これを「カメ」と称する) 結果となった (下の写真)。この時の含水比に対応する室内コーン指数と、かろうじて施工が可能であった図 10 (b) の状態 (その後曝気により含水比を低下: 上の写真) に対応する室内コーン指数が図中に矢印で示されている。施工限界状態である上の写真に対応する室内コーン指数は 800kN/m^2 であるので、機械重量比 1.5 倍をかけた 1200kN/m^2 が鶴川ダムにおける室内コーン指数の所要値となる (興味深いことに、この値はダンプトラックが走行可能なコーン指数と偶然一致する⁸⁾)。試みに図 12 (b) 中にこの値を入れ、施工含水比の上限値を機械的に読み取ると約 33% となる。これらの結果を集積し、施工性確保のための管理基準線を定めてみる。図 15 は、密度・含水比平面上にここまで示してきた現場・室内コーン指数を求めた際の土の乾燥密度と含水比の組み合わせをプロットし、図 8 の遮水性管理基準と同じような合否判定を試みた結果である (赤が不合格。閾値は前出の 0 調整池の室内・現場コーン指数の限界値を参照)。冒頭述べたように、締固め管理基準線は個々の要求性

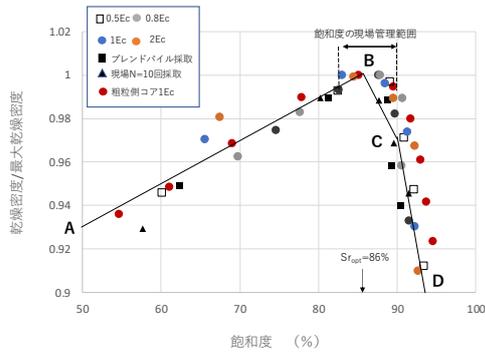


図 16(a) 飽和度と乾燥密度比の関係 (鶺川コア)

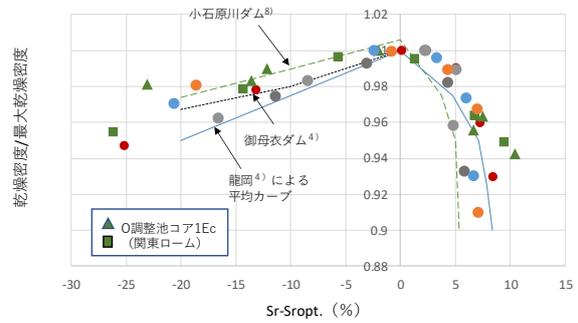


図 16(b) 飽和度差と最大密度比の関係 (既往ダム併記)

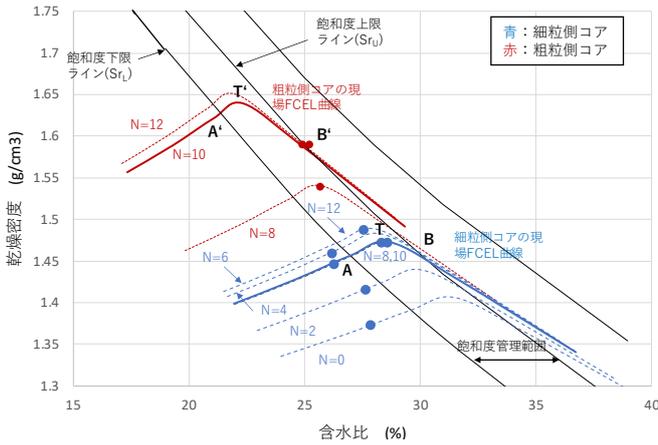


図 17 鶺川ダムコア材の現場締固め曲線 FCEL と締固め T

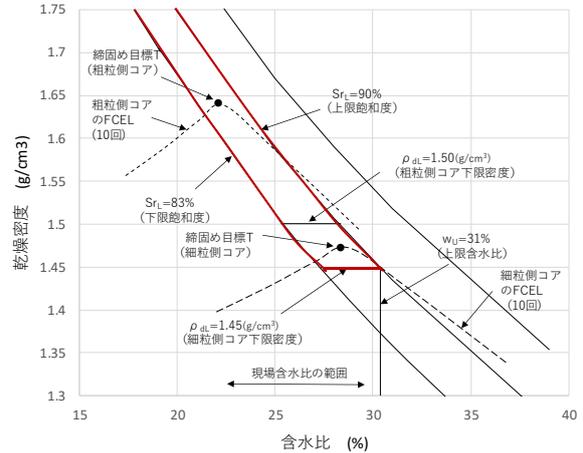


図 18 鶺川ダムで得られた現場締固め管理基準

能単独で決まるものではなく相互に関連する。この場合施工含水比の上限値 w_u は、遮水性に対する管理基準ラインの遵守を前提とし、施工性から定まる飽和度上限ライン (90%) と遮水性から定まる乾燥密度の下限ライン ρ_{dL} との交点として 31% に最終決定された (図 12 (b) に示す 33% は許容上限値として採用しなかった)。

施工性が担保されたので、最後に 30t 級タンピングローラの転圧エネルギーを有効に土に加えるための施工管理基準を検討する。この考え方は既に龍岡⁴⁾ ⁵⁾ により示されており、締固め土の飽和度と最大乾燥密度比 (ある締固めエネルギーで発揮される最大乾燥密度に対する、各飽和度での締固め後の乾燥密度の比率) が、締固めエネルギーや土質の違いの影響をあまり受けず、一意的な関係を有するとの実験事実をベースにしている。この考え方が鶺川ダムにおいてどの程度当てはまるのかを確認した。締固めエネルギーを変えた室内締固め曲線は前出の図 12 (a) 中に併記した (締固めは 0.5Ec でも実施)。これに転圧試験時に現場から採取した試料や粗粒側コアの締固め曲線 (図 5) を加え、飽和度と最大乾燥密度比の関係を図 16 (a) に示した。図より、鶺川ダムのコア材についても締固めエネルギーや材料粒度が変わっても両者にはほぼ一意的な関係が認められる。図中には先に遮水性と施工性確保から定めた飽和度の許容上下限の範囲を併記した。最大乾燥密度比は飽和度に対して最適飽和度を 1 とする上に凸の曲線を示すが、この上下限範囲はそのピークの左右近傍に位置し、結果的に最大乾燥密度比が急減する範囲を巧妙に避けていることが分かる。図 16 (b) には、最適飽和度からの差分を横軸にとり既往の整理事例と比較した結果を示す (試みに前出の 0 調整池関東ロームのデータも追記した)。龍岡による平均カーブや御母衣ダム⁴⁾、小石川原ダムのデータ⁹⁾ などと比べても、確かにコア材料や締固めエネルギーが異なっても概ね一意的な関係が認められる。ただし、異なる現場に対して一意的な関係が成り立つ必然性はなく、異なる現場に対しても変化の幅が小さく個々の現場では一意的と見なせることが重要である。本結果は、道路や河川など材料や転圧機械が頻繁に変わりやすい盛土構造物の現場締固め管理に福音をもたらす可能性を秘めている。図 17 には、図 16 (a) 中に記した 3 本の直線回帰式 (A→B→C→D) を用いて計算された現場締固め曲線 (FCEL) を各転圧回数毎、細粒側と粗粒側コアの 2 材料毎に求めた結果を示している (各転圧回数での現場密度・含水比のプロットも併記)。2 つの現場 CELf に対する締固

め曲線と遮水性から求まる飽和度下限線 S_{rL} 、施工性から求まる飽和度上限線 S_{rU} とで囲まれた範囲に着目願いたい。遮水性と施工性を担保するために飽和度の上下限値を現場で遵守することは何をもたらすのか。冒頭の図 2 や先の図 16(a)に関連して述べたように、このように締固めターゲット T のごく近傍での現場締固めを実施することは、「それぞれの現場条件で最大の乾燥密度」を得るだけでなく、「要求性能や施工性確保が同時に担保される」ことに他ならない。すなわち、この飽和度範囲を遵守することは、表 1 の中で構造安定性確保 1,2 として示したコア材の浸水（湛水）時の物性変化を最低限に留め、同時に低すぎる強度・剛性を回避するという性能設計上の効果も併せ有している。

論文の冒頭で模式的に示した現場締固め管理範囲を図 18 に具体的に再掲した。図の横軸には、現時点でのブレンドパイルの含水比範囲を併記した。今後の現場締固め管理では、現場密度・含水比と現場透水係数の計測のみならず、材料採取→ストックヤード→ブレンドパイルの各施工工程で粒度、含水比、塑性指数、室内締固め-透水試験等の品質管理試験を併せ実施していく予定である。本手法が現場 CELf 一定を前提としていることから、施工時には撒き出し厚を管理すると共に、GNSS によるタンピングローラの転圧回数管理を実施する。

6. おわりに

論文の冒頭で Proctor の 86 年前の論文に言及した。久野²⁾が指摘しているように、Proctor の締固め管理手法はその分かり易さ故に、締固め曲線や最適含水比、最大乾燥密度のみが一人歩きしてしまった感がある。しかし Proctor の原文¹⁾を読むと、アースダムの技術者であった彼が、締固められた堤体材料の遮水性、施工性、築堤時の圧密変形や湛水時の水浸沈下などを綿密に調べ、完成後の堤体に要求される各種機能の確保を目指していたこと、すなわち性能設計の考え方を現場管理に持ち込んでいたことは明白である³⁾。そして彼が強調していたのは、密度・含水比に併せて強度に基づく迅速現場管理を実施すること、すなわち Proctor Needle の活用であった。龍岡⁵⁾は最近、飽和度、密度比、含水比、FCEL の管理に加え、剛性（強度）の上下限管理の必要性を提唱している。本論文はこの問題に言及できるだけの実証データをいまだ有していないが、本課題についても、今後実験的な検討を加えていく予定である。図 19 は、Proctor¹⁾の論文に掲載された当時の牽引式シープスフトローラの写真である。鶴川ダムで使用するタンピングローラ（写真 1）はこの転圧機械が派生したものである。今回、鶴川ダムの現場を舞台に再び Proctor の締固め管理に立ち戻る議論を行っている事は、何かの因縁であろうか。

【参考文献】

- 1) Proctor.R.R. : Four Articles on the design and construction of rolled-earth dams (Fundamental principles of soil compaction, Description of field and laboratory method, Field and laboratory verification of soil suitability , New principles applied to actual dam buildings) , Engineering News Record,Vol.111,pp.245-248, 286-289,348-351,372-376,1933.
- 2) 久野悟郎 : R.R.Proctor(プロクター)、土と基礎、No. 1410、31-11(310)、pp51-55、1983.
- 3) 石黒 健 : 土の締固めと管理、第 2 章 土の締固め 2.5 室内締固めと現場締固め、pp127~148、土質工学会編、平成 3 年.
- 4) 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、pp. 3-16、2016. 3
- 5) 龍岡文夫 : 飽和度と剛性の管理に基づく盛土締固めの合理化について、地盤工学会誌投稿中.
- 6) 建設省土木研究所フィルダム研究室 : 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. 2、
- 7) 中央土質遮水壁型ロックフィルダムの湛水時安定性評価：森吉昭、内田善久、鶴田滋、高橋章、石黒健、太田秀樹、土木学会論文集、No. 764/III-67、69-84、2004. 6.
- 8) 社団法人日本道路協会 : 道路土工施工指針 3-3 建設機械の選定、3-3-2(2)トラフィカビリティ、pp. 47、昭和 61 年 11 月.
- 9) 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、第 72 回土木学会、III-300、平成 29 年.

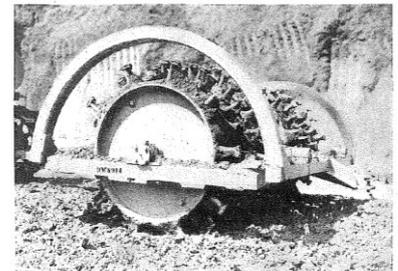


図 19 Proctor の時代のシープスフトローラ¹⁾