

ICT施工の導入を目的とした フィルダムの合理的な施工管理方法の開発

佐藤弘行・坂本博紀・青井克志・吉田諭司・下山顕治・山口嘉一

1. 研究の背景と目的

近年、我が国の社会資本整備において、施工の効率化や精度の向上、施工管理の合理化等を目的にICT施工の積極的な導入が推進されている。平成20年7月には「情報化施工推進戦略¹⁾」が策定され、ダム分野においてもICT施工の導入が重要であると位置づけられている。フィルダムの建設においても、GPSによる転圧回数の管理は広く導入されている。河川土工および道路土工等では、ICT施工を施工管理に導入した場合、まき出し厚、締固め回数等、施工プロセス管理の確実性を向上させることができることから、密度試験等、締固め後の現場試験を省略する方針へ転換しており²⁾、工種としての盛土の施工管理は全般的に合理化・省力化が進んできている。

一方、大量の貯水を目的とする重要構造物の一つであるフィルダムの盛土材料の密度の基準値は他の盛土構造物よりも厳しいと考えられる。また、貯水を目的とするフィルダムは、盛立材料の密度とともに遮水性も施工管理の項目としており、密度とともに遮水性も設計や施工管理上重要な指標となっている。このような理由から、フィルダムの施工管理において、転圧回数等の工法規定管理のみをもって従来の施工管理と置き換えることは許容されるものではない。しかし、ダムの設計施工においても従来以上のコスト削減が求められている現状において、ICTを利用した施工管理の合理化は推進していかなければならない重要な課題である。

そこで、土木研究所水工研究グループ水工構造物チームでは、「ICT施工を導入したロックフィルダムの施工管理方法の合理化に関する研究」を、重点研究課題として平成23年度から25年度に実施した。本研究課題においては、フィルダムの高い要求品質を踏まえたうえで、施工の省力化、高速化、高

度化が期待できるICT施工を活用するための合理的な施工管理方法について検討を行った。

本稿では、ロックフィルダムの施工管理試験として重要なコアゾーンにおける原位置透水試験について、透水性が低いために試験時間が長くなり盛立工程に影響する場合もあることから、原位置透水試験と非定常飽和・不飽和浸透流解析を組み合わせた効率的な飽和透水係数の推定方法の検討内容について紹介する。

2. ロックフィルダムの盛立面における原位置試験の概要

- 図-1にロックフィルダムの断面の模式図を示す。ロックフィルダムは主に3つのゾーンで構成される。
- ① コアゾーン…貯水池の水を止水するためのゾーン
 - ② フィルタゾーン…コアから浸透した水を速やかに排水するためのゾーン
 - ③ ロックゾーン…堤体の自重や貯水による水圧を支えるゾーン

ここでは、本稿と関係のあるコアゾーンの盛立面における施工管理について簡単に説明する。

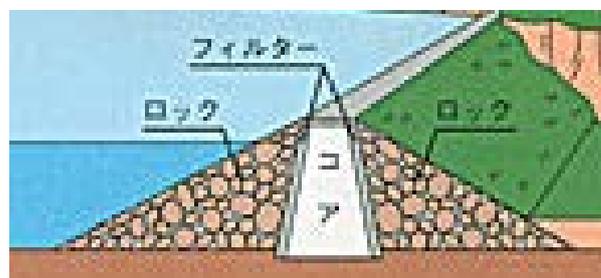


図-1 ロックフィルダムの断面の模式図

ロックフィルダムのコアゾーンの盛立面における原位置試験として、主に①現場密度試験と②現場透水試験、の2つの試験が実施される。ロックフィルダムのコアゾーンの現場密度試験には、一般的に砂置換法が用いられる。砂置換法は、盛立後に直径30cm、深さ30cmの試験孔を掘った後、豊浦砂等の

砂を孔に投入し、投入した砂の量から試験孔のコア材の密度を算出する方法である。砂置換法により得られた密度から締固め度に換算し、現場密度試験から得られた締固め度が95%以上となるように施工管理を行っているロックフィルダムが多い。

ダムは貯水を目的とする構造物であり遮水性も重要な項目であるため、ロックフィルダムの盛立面において現場透水試験を行い、算出した透水試験を施工管理値に用いていることは、他の盛土構造物とは異なるダムの特徴の一つと考えられる。ロックフィルダムのコアゾーンの盛立面における現場透水試験は、図-2に示す模式図のように、現場密度試験と同程度の直径30cm、深さ30cmの試験孔を掘り、その試験孔を用いて定水位法による現場透水試験を行うことが一般的である。コアゾーンの盛立面における現場透水試験では、一般的に $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ を上限值として施工管理が行われることが多い。なお、ロックゾーンやフィルタゾーンは排水性が重要であることからロックゾーンやフィルタゾーンにおいても現場透水試験が実施され、ロックゾーンの透水係数は $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 程度、フィルタゾーンの透水係数は $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 程度を下限值として施工管理が行われることが多い。

3. コアゾーンの原位置透水試験の課題

ダムは貯水が目的であるため、水を貯めた時の透水係数、つまり飽和時の透水係数を知ることが重要である。しかし、盛立時のコアゾーンは不飽和状態であるため、不飽和状態の盛立面における現場透水試験から飽和時のコアゾーンの透水係数を推定する必要がある。実際の施工管理では、試験孔周辺に十分水が浸透して飽和領域が多くなるように、コアゾーン盛立面における現場透水試験の試験時間を長くする対応がとられることが多い。図-3に、コアゾーンの現場透水試験にかかる時間の一例を示す。多くの場合で6時間以上の時間がかかっており、50%程度は14時間以上の時間がかかっている。現場透水試験中は試験孔近傍の盛立ができなため、透水係数が小さいコアゾーンの現場透水試験の合理化が、施工面からは大きな課題となっている。ICT施工の導入により施工の効率化・高速化が期待されることから、フィルダムにとって重要な施工管理

項目である現場透水試験の合理化に主眼を置いた。

具体的には、現場透水試験開始から比較的短い時間のデータから、飽和状態の浸透流量を高い精度で予測することができれば、その予測値をもって飽和時の透水係数を算出することが可能となり、現場透水試験の試験時間を短縮することができると考えた。現場透水試験の初期段階の不飽和状態での浸透流量の予測には、不飽和から飽和に変化していく際の試験データをもとに非定常飽和・不飽和浸透流解析を用いることで飽和状態での透水係数を推定できると考えた。そこで本稿では、現場透水試験と非定常飽和・不飽和浸透流解析を組み合わせた飽和透水係数の推定の検討結果を紹介する。

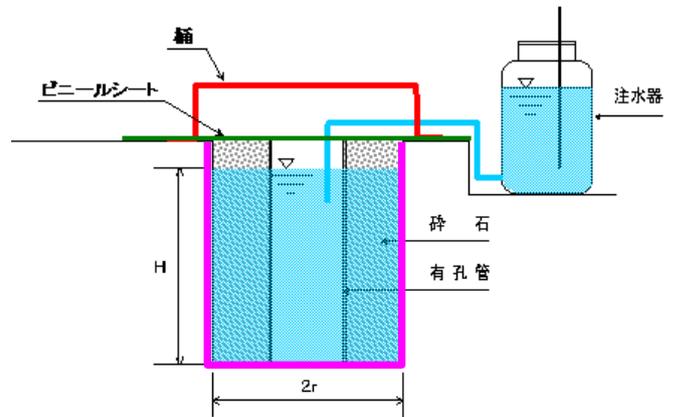


図-2 試験孔模式図

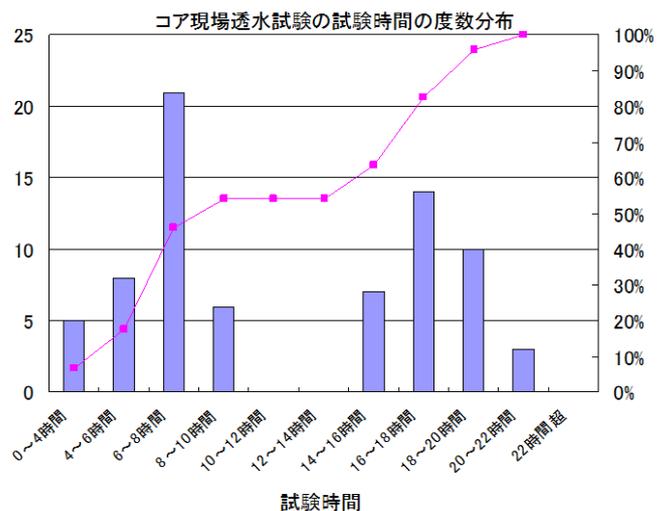


図-3 コアゾーンの現場透水試験にかかる時間



図-4 現場透水試験実施状況

4. ロックフィルダムのコアゾーンの盛立面上における現場透水試験

試験は平成24年度に、当時沖縄県久米島で建設中であった儀間ダムの下流側に試験ヤードを造成して実施した。現場透水試験の実施状況を図-4に示す。

試験孔からの蒸発散の影響を少なくするため、現場透水試験は盛立完了直後の夕方もしくは夜間から計測を開始した。計測時間間隔については、浸透量の変化が大きい現場透水試験開始直後の数時間は20分～30分、その後は1時間毎として、24時間程度まで計測を行った。透水試験孔には図-4に示すように、上面にビニールシートを被せて雨水の浸入、熱や風による水面からの蒸発の抑制を図った。

5. 非定常飽和・不飽和浸透流解析

5.1 解析条件と飽和透水係数の同定方法

非定常飽和・不飽和浸透流解析は岡山大学地盤環境評価学研究室より公開されている解析ソフトAC-UNSAF2D³⁾をベースにして、改良したプログラムを用いて解析を行った。

解析モデルは図-5に示す半径10m、高さ10mの軸対象モデルとした。解析モデルにおける現場透水試験孔の直径、深さ、孔内水位は現場透水試験の実測値を用いた。中心軸と底面は不透水境界とし、側面および表面を浸出点境界とした。また、初期条件としてモデル内の飽和度は一様とし、飽和度に対応する有効体積含水率と van-Genuchten式⁴⁾から逆算さ

れる圧力水頭をモデル全体に与えた。解析では修正マルカート法により、同定対象時間内の各時間ステップにおける累積浸透流量の解析値と実績値の残差二乗和が最小となるまで飽和透水係数を変化させて収束計算を行った。

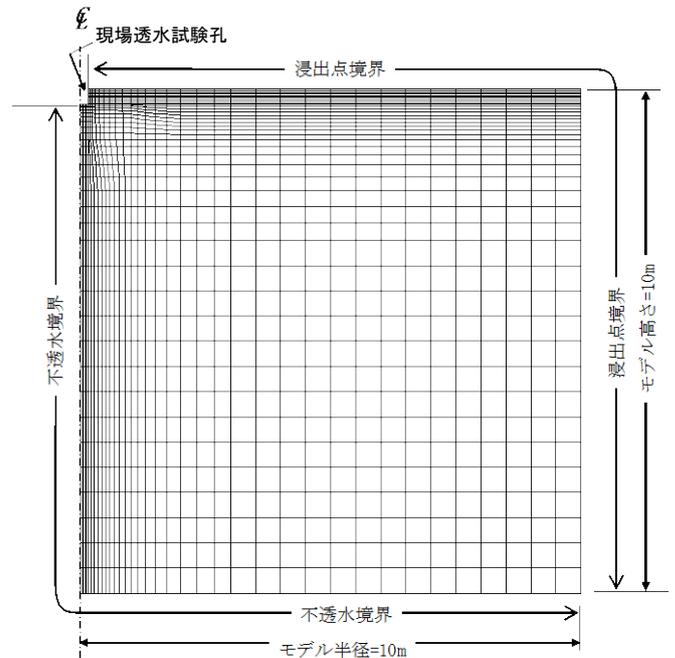


図-5 解析モデル

5.2 解析結果

図-6 に、現場透水試験により計測した累積浸透流量と、非定常飽和・不飽和浸透流解析により推定した累積浸透流量を示す。図-6 の非定常飽和・不飽和浸透流解析の結果としては、現場透水試験の最初の2時間、3時間、5時間、10時間、全時間の試験データから推定した累積浸透流量の結果を示している。多くの場合、図-6 に示したように、現場透水試験開始から数時間のデータと、非定常飽和・不飽和浸透流解析を組み合わせることにより、精度よく累積浸透流量や飽和透水係数を推定することができた。また、図-6 や他の解析ケースで算出した最終的な飽和透水係数の推定精度をふまえて、多くの場合、現場透水試験開始後6時間程度の試験データを用いることにより、飽和透水係数を精度よく算出できることがわかった。

なお、コアゾーンの盛立直後の間隙水圧による浸透流量への影響等の検討も行った。その結果、コアゾーンの盛立による間隙水圧による飽和透水係数

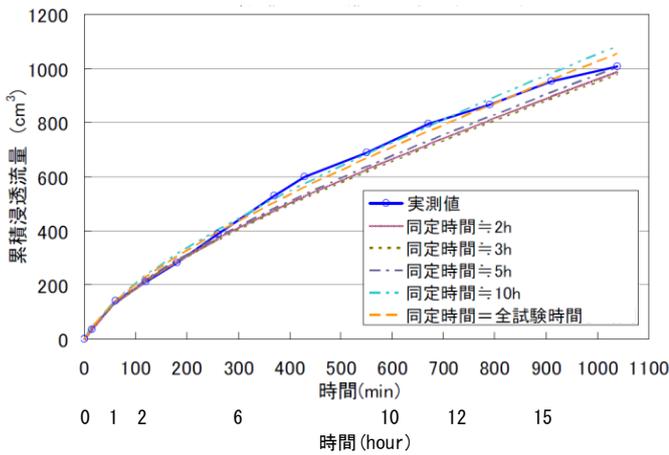


図-6 コアの現場透水試験と非定常飽和・不飽和浸透流解析から予測した浸透流量の比較

の推定への影響は小さいこと等の知見が得られている。

6. おわりに

本稿では、ICT施工の導入を目的としたフィルダムの合理的な施工管理方法の研究として、試験時間が長くフィルダムの施工に影響する場合もある現場透水試験と、非定常飽和・不飽和浸透流解析を組み合わせることにより、従来よりも短い試験時間でコア材料の飽和透水係数を精度よく求める手法を提案した。その結果、多くの場合、現場透水試験開始から6時間程度のデータを用いて非定常飽和・不飽和浸透流解析を実施することにより、精度よく飽和透水係数を求めることができることがわかった。

紙数の都合により本稿では省略したが、現場密度試験の合理化についての検討も実施しており、ICT施工では可能と考えられる材料採取から盛立までの材料の粒度分布等の施工管理を綿密に実施し、盛立時の材料の粒度分布等を精度よく把握しておくことで、盛立面での現場密度試験数を削減できる可能性を示した。その他不飽和浸透流解析の計算手法の詳細等も記載しており、ご興味がある方は成果報告書をご覧くださいいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略、2008年7月
- 2) 国土交通省：TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領、2012年3月
- 3) 西垣誠、進士喜英：有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析-AC-UNSAF2D-プログラム解析およびユーザーマニュアル、岡山地下水研究会、2005
- 4) M. Th. van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980

佐藤弘行



国立研究開発法人
土木研究所水工研究
グループ水工構
造物チーム 主任
研究員
Hiroyuki SATO

坂本博紀



(独)水資源機構
(前 (独)土木研
究所つくば中央
研究所水工研究
グループ水工構
造物チーム研究
員)
Hiroki SAKAMOTO

青井克志



西日本技術開発
(株) (前 (独)
土木研究所つく
ば中央研究所水
工研究グループ
水工構造物チ
ーム交流研究員)
Katsushi AOI

吉田諭司



(株)ニュージェック
(前 (独)土木研
究所つくば中央研
究所水工研究グ
ループ水工構
造物チーム交流
研究員)
Satoshi YOSHIDA

下山顕治



(株)ニュージェック
(前 (独)土木研
究所つくば中央研
究所水工研究グ
ループ水工構
造物チーム交流
研究員)
Kenji SHIMOYAMA

山口嘉一



(一財)ダム技術セン
ター 首席研究員
(当時 (独)土木
研究所つくば中央
研究所水工研究
グループ
水工構造物チ
ーム上
席研究員)
Yoshikazu YAMAGUCHI