

2.2 長時間透水試験による軟岩地盤の透水性評価と基礎処理の合理化

研究年度：令和2年度

研究分野：地質・基礎に関する調査研究

調査研究名：ダム基礎地盤の透水性評価

研究者：山口嘉一*、狩生 亮

【要約】

ダム基礎地盤の透水性は、一般的に、ルジオンテストによって評価される。この試験方法については、「ルジオンテスト技術指針・同解説」（2006年改訂版）が定められている。しかし、この技術指針では、軟岩地盤における試験の具体的な課題の一つである非定常浸透とそれに対する対策である長時間透水試験については示されていない。本研究では、長時間透水試験に関する既往及び現在実施中の事例の概要を紹介するとともに、それに基づく基礎処理の合理化について考察する。

【キーワード】

ダム基礎軟岩、ルジオンテスト、長時間透水試験、基礎処理

1. はじめに

ダム基礎地盤の透水性は、一般に、多段階の定圧注水試験であるルジオンテストによって評価される。この試験方法については、「ルジオンテスト技術指針・同解説」^{1),2)}が定められており、全国のダムにおいて統一された方法により実施され、ダム基礎地盤の透水性が評価されている。また、本技術指針は、1984年6月に初めて指針化¹⁾され、その後の技術的進歩を踏まえて2006年7月に改訂²⁾された。改訂版の中では、従来のような硬岩地盤のみならず、軟岩地盤に対する試験実施上の留意点も考慮されており、かなり幅広いダム基礎地盤に適用できる指針となった。

緊縮財政下における公共事業でのコスト削減、環境保全の観点からの開発工事における改変面積の最小化が至上命題となっている中で、ダム建設事業においてもコスト削減と環境保全の達成が強く求められている。そのため、従来は掘削除去していたような地盤上においても、適切な調査、検討の結果を踏まえて安全性を確認した上でダムを建設しなければならない場合がある。このような状況下において、ダム堤体からの荷重が相対的に小さくなる堤高の低い部分から袖部にかけては、風化度の高い岩盤（風化軟岩盤）や未・低固結の堆積軟岩盤を基礎とする事例も少なくない。このような地盤においては、主たる基礎処理方法であるセメントを主材料としたグラウチングによる遮水性の改良が困難となることが一般的である。しかし一方で、風化軟岩などにおいては、卓越した水みちとなる明瞭な亀裂が発達してい

ない場合が比較的多い。さらに、ルジオンテストの注入圧力などの試験仕様が、必ずしも強度の小さい軟岩地盤には適しておらず、限界圧力発生後の透水性を評価することで、透水性を実際よりも過大に評価した場合も多くみられた^{3),4)}。このような軟岩地盤におけるルジオンテストの課題を解決するための方策については、「ルジオンテスト技術指針・同解説」の改訂版²⁾において、既往の検討事例の成果も踏まえ、解説や参考資料として示されている。しかし、軟岩地盤、特に不飽和地盤における各圧力段階の安定流量（非定常浸透流量）の評価方法については、具体的な対策を表記するには至っていない。

以上のような、軟岩地盤におけるルジオンテストの安定流量（非定常浸透流量）に関する具体的な課題と、その対策としての長時間透水試験の概要を事例に基づいて紹介するとともに、それを踏まえた基礎処理の合理化に関して考察する。

2. 安定流量に対する課題と長時間透水試験

2.1 安定流量に対する課題

ルジオンテストの各圧力段階において、安定流量が得られるまでの注水時間かなり長い場合、技術指針^{1),2)}における安定流量の規定（5分間の注入流量が平均±10%の変動未満）を採用すると、定常状態が得られる前に次の圧力段階に移行することで、透水性の指標であるルジオン値を実際よりもかなり高く評価してしまう可能性がある。

特に、地下水面上の不飽和領域の軟岩地盤では、試験孔周辺を十分飽和させた状況で安定（定常）流

量を得るのにかなり長い時間を要す。また、地下水水面下の軟岩地盤でも、その変形性が大きく貯留効果の高い地盤では同様な課題が発生する。

不飽和軟岩地盤で実施したルジオンテストの有効注入圧力と単位注入流量の時刻歴（昇圧段階のみ表示）とP-Q曲線の一例^{5)~8)}をそれぞれ図-1と図-2に示す。図-1からは、各圧力段階の流量が定常状態に至っていないことが想定され、結果として図-2に示すような昇圧時には下に凸、降圧時には上に凸のヒステリシスループを描くP-Q曲線（昇降圧異路の逐次流量減少型P-Q曲線³⁾）が得られていることがわかる。つまり、各注入圧力段階でさらに長い時間注水すれば、より小さい流量として安定流量が得られ、結果として評価される透水性がより実態に近くなる方向で小さくなる。

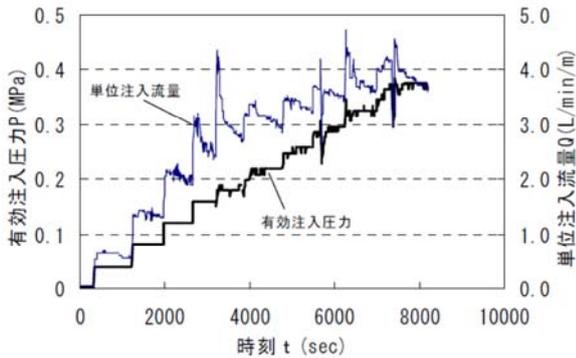


図-1 ルジオンテストによる有効注入圧力および単位注入流量の昇圧過程の時刻歴の一例(大保脇ダム)^{5)~8)}

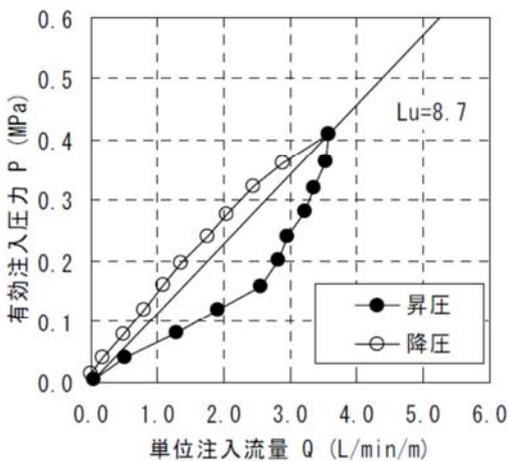


図-2 ルジオンテストによるP-Q曲線の一例(大保脇ダム)^{5)~8)}

2.2 長時間透水試験の既往事例

長時間透水試験の既往事例を表-1にとりまとめる。また、ルジオンテスト（ここでは、水押試験も含めた総称）による換算ルジオン値 Lu_{WPT} と長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の関係図^{7),8)}を図-3と図-4に示す。

表-1 長時間透水試験の既往事例

ダム名	耶馬溪ダム	漢那脇ダム	大保脇ダム
ダム型式	重力式コンクリートダム	内部土質遮水壁型ロックフィルダム	内部土質遮水壁型ロックフィルダム
ダム高 (m)	62	37	66
管理者	国土交通省九州地方整備局	内閣府沖縄総合事務局	内閣府沖縄総合事務局
対象地盤	第四紀更新世凝灰角礫岩	第四紀更新世頭礫層	先第三系名護層千枚岩主体 (DH級)
長時間透水試験の仕様	・1圧力による試験 ・大半が飽和地盤での実施 ・試験数=25	・5段階の圧力のルジオンテストにおいて、上位2段階のみ長時間透水 ・試験数=3	・1圧力による試験 ・不飽和地盤での実施 ・試験数=8
ルジオンテストと長時間透水試験によるルジオン値の比較	$\alpha = Lu_{LPT}/Lu_{WPT} = 0.2 \sim 0.75$ Lu_{WPT} =ルジオンテストの換算ルジオン値 Lu_{LPT} =長時間透水試験の換算ルジオン値	$\alpha = Lu1/Lu2 = 0.5$ 程度 (0.53, 0.59, 0.46) $Lu1$ =安定流量による換算ルジオン値 $Lu2$ =計測開始30分後の流量による換算ルジオン値	$\alpha = Lu_{LPT}/Lu_{WPT} = 0.1 \sim 0.5$ Lu_{WPT} =ルジオンテストの換算ルジオン値 Lu_{LPT} =長時間透水試験の換算ルジオン値
Lu_{LPT} と Lu_{WPT} の関係図	図-3	—	図-4
参考文献	9)	10), 11)	5)~8)

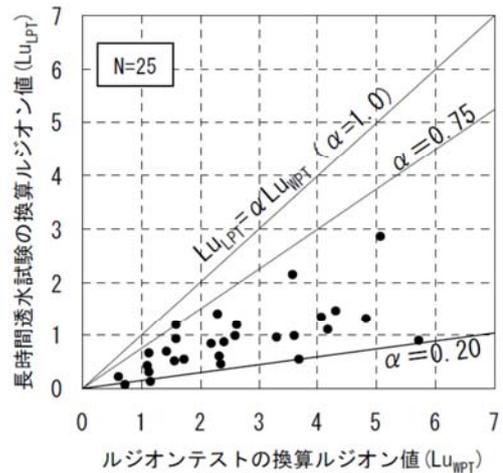


図-3 ルジオンテストによる換算ルジオン値 Lu_{WPT} と長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の関係(耶馬溪ダム)^{7),8)}

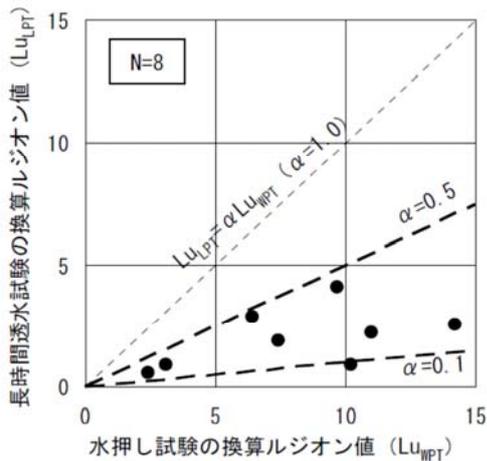


図-4 ルジオンテストによる換算ルジオン値 Lu_{WPT} と長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の関係 (大保脇ダム) ^{7),8)}

各事例において、地盤の性状（地盤の飽和状態も含む）やルジオンテストや長時間透水試験の仕様が異なることなどから、厳密な定量関係の評価を行うことは難しいが、ルジオンテストによる換算ルジオン値 Lu_{WPT} と長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の比率 $\alpha (=Lu_{LPT}/Lu_{WPT})$ は 0.1~0.75 の間に分布し、その多くが 0.5 程度以下であることがわかる。つまり、安定流量を得るために、一定の注入圧力条件下において通常よりも長時間の注水を行うことで、より実際に近い状況で、通常のルジオンテストよりも透水性を小さく評価できることがわかる。

3. Tダムにおける長時間透水試験の実施

現在建設が進められている Tダムの安山岩の自破砕部 (Tta) のカーテングラウチングにおいては、注入材料として超微粒子セメントを用いても改良目標値である 5Lu までの改良が進みづらく、多くの追加孔が発生している。また、対象岩盤の性状から、5Lu 程度（通常のルジオンテストによる透水性評価）がグラウチングによる改良に限界と考えられ、またこの程度のルジオン値にまで遮水性を改良することで大きな水みちが残存している可能性は低いものと想定された。

このような状況を踏まえ、2章において事例紹介した長時間透水試験を、注入回数がある程度進んだ 3 次孔以降で、通常のルジオンテストによる透水性が 5~10Lu の試験区間で併せて実施し、一定注入圧力における安定流量が得られた時の透水性を評価することを検討している。

長時間透水試験において、一定注入圧力における

安定流量を得るための通水時間についても検討を行うため、第一段階の試験として、以下の圧力段階、各圧力段階での通水時間の組み合わせで長時間透水試験が実施された。

- (1) 4 圧力段階、各圧力段階で 1 時間通水 (1 時間 / 段階 × 4 圧力段階) : 5 区間
- (2) 2 圧力段階、各圧力段階で 12 時間通水 (12 時間 / 段階 × 2 圧力段階) : 1 区間
- (3) 1 圧力段階、各圧力段階で 24 時間通水 (24 時間 / 段階 × 1 圧力段階) : 5 区間

ルジオンテストによる換算ルジオン値 Lu_{WPT} と 3 種類の仕様の長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の関係図を図-5 に示す。

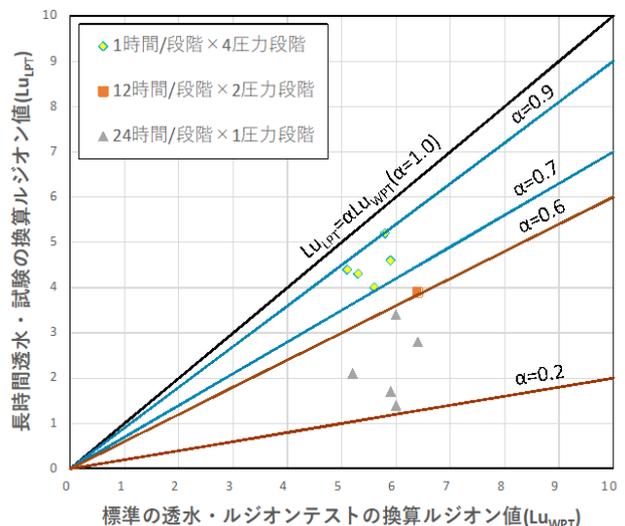


図-5 ルジオンテストによる換算ルジオン値 Lu_{WPT} と長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の関係 (Tダムにおける試験)

この図より、ルジオンテストによる換算ルジオン値 Lu_{WPT} と長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の比率 $\alpha (=Lu_{LPT}/Lu_{WPT})$ は、各圧力段階での通水時間が 1 時間の場合で 0.7~0.9 (5 データ)、12 時間で 0.6 程度 (1 データ)、24 時間で 0.2~0.6 (5 データ) となっている。このことから、Tダムの Tta に対する長時間透水試験については、一定圧力段階での安定流量を得るための通水時間を 24 時間とすることが適切と判断し、今後は「1 圧力段階、各圧力段階で 24 時間通水 (24 時間 / 段階 × 1 圧力段階)」で長時間透水試験のデータを増やし、その結果に基づく、Tta の透水性の適正評価およびグラウチングの合理化の検討を進めることとなっている。

4. 基礎処理の合理化に向けた検討における留意点

2章における既往事例及び現在建設が進められているダムにおける試験的検討結果から、一定注入圧力において長時間通水する長時間透水試験を実施することにより、より実際に近い状況で、通常のルジオンテストよりも透水性を小さく評価できることがわかった。この結果より、岩盤状況によっては、長時間透水試験を実施することによりグラウチングにおける追加孔を低減できる可能性があることが容易に理解できる。たとえば、ルジオンテストによる換算ルジオン値 Lu_{WPT} と長時間透水試験の換算ルジオン値 Lu_{LPT} の対応関係、たとえば図-3 が得られていたとすると、通常のルジオンテストの換算ルジオン値が $5Lu$ 以下であれば、長時間透水試験結果として得られる安定流量時の換算ルジオン値はほぼ $2Lu$ 以下であることがわかる。少し極端な解釈になるが、たとえば規定最終次数孔における通常のルジオンテストにおいて $5Lu$ 以下のルジオン値が得られ、試験を実施した領域の改良目標値が $2Lu$ であれば、追加孔を施工する必要がないと評価できる可能性がある。しかし、実際には、ある程度安全側判断を踏まえた適用を図っていく必要がある。さらに、長時間の通水により試験孔周辺の地盤の目詰まりが進行して透水性が小さく評価されていた場合には、実際よりも透水性を過小評価することになるので注意が必要である。目詰まり現象発生 of 具体的な確認方法としては、同一試験区間で通常のルジオンテストと長時間透水試験を実施する場合、2つの試験における同一もしくは同程度の注水圧力条件下での初期段階の注水流量の経時変化が同程度であることを確認することにより対応できる。

5. おわりに

ダムの軟岩地盤における透水試験（ルジオンテスト）の具体的な課題の一つである非定常浸透に対する対策である長時間透水試験に関する3既往事例（2章）と現在建設が進められているダムサイトにおける1事例（3章）の概要を紹介した。その結果、一定注入圧力において長時間通水する長時間透水試験を実施することにより、より実際に近い状況で、通常のルジオンテストよりも透水性を小さく評価できることがわかった。

上記の事例に基づき、長時間透水試験によるグラウチング（ダム基礎地盤に対する主たる基礎処理方法）合理化の考え方と適用に際して留意点を簡単にとりまとめた（4章）。

今後、同様な事例を積み重ねることにより、適切な形でダム基礎グラウチングの合理化が図られることを期待する。

参考文献

- 1) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説、(財)国土開発技術研究センター、56pp.、1984年。
- 2) (財)国土技術研究センター編集：ルジオンテスト技術指針・同解説、大成出版社、66pp.、2006年。
- 3) 松本徳久、山口嘉一、弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈、建設省土木研究所資料、No.2518、238pp.、1987年。
- 4) 松本徳久、山口嘉一：軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する考察、土木技術資料、Vol. 27、No.10、pp. 531～536、1985年。
- 5) 山口嘉一、安仁屋勉、池澤市郎、赤松利之：長時間透水試験による不飽和地盤の透水性評価、日本地下水学会 2007年春季講演会講演要旨、pp. 42-47、2007年。
- 6) 山口嘉一、安仁屋勉、池澤市郎、赤松利之：不飽和軟岩地盤における長時間透水試験、第42回地盤工学研究発表会平成19年度発表講演集、pp. 1071-1072、2007年。
- 7) 山口嘉一、安仁屋勉、池澤市郎、赤松利之：風化軟岩地盤の不飽和帯における長時間透水試験、地盤工学ジャーナル、Vol. 3、No. 3、pp. 229-242、2008年。
- 8) 山口嘉一、池澤市郎、下山頭治：不飽和風化軟岩地盤の長時間透水試験による飽和透水性評価、ダム技術、No. 270、2009年。
- 9) 建設省九州地方建設局耶馬溪ダム工事事務所：耶馬溪ダム工事誌、1112pp.、1985年。
- 10) 沖縄開発庁沖縄総合事務局北部ダム事務所：漢那ダム工事誌、959pp.、1996年。
- 11) 振井茂宏、寺川陽、森吉尚、安仁屋勉：第四紀砂礫層におけるグラウト効果の評価について、第40回建設省技術研究会講演概要、自由課題河川部門、pp. 13-20、1986年。