

花崗閃緑岩基礎における無段階水押し試験の適用性検証

山口嘉一^{1*}・新家拓史²・池澤市郎¹

¹正会員 独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 （株）ニュージェック（〒135-0007 東京都江東区新大橋1-12-13）

*E-mail: yamaguti@pwri.go.jp

近年、個々のダムサイトの地質条件が多様化するとともに、社会資本整備に対するコスト縮減への社会的要求が高まるなか、ダム基礎グラウチングについても、所要の止水性を確保したうえで経済性を追求することが強く求められている。このような状況において、グラウチング作業では、施工中の透水試験である水押し試験の時間短縮に着目した無段階水押し試験によるコスト縮減の検討事例が増えてきている。

本論文では、無段階水押し試験の適用性検証を目的として、中生代白亜紀の花崗閃緑岩を基礎とするダムサイトにおいて、従来の水押し試験と無段階水押し試験を同一ステージで実施し、比較検討した結果を報告するとともに、無段階水押し試験実施時の留意点をとりまとめた。

Key Words : dam foundation grouting, water pressure test, granodiorite, P-Q curve, Lugeon value

1. はじめに

近年、個々のダムサイトの地質条件が多様化するとともに、社会資本整備に対するコスト縮減への社会的要求が高まっている。そのため、ダム基礎グラウチングについても所要の止水性を確保したうえで、経済性を追求することが強く求められている。グラウチングにおける施工の合理化については、中央プラント方式による注入材料の製造や輸送の合理化、注入管理の電算処理化など、従来より様々な取り組みが行われ、具体的な効果を発揮している。しかし、グラウチング作業そのものについては合理化に関する検討は行われているが、具体的な効果のある対応があまり示されていないのが現状である。グラウチング工事では、工事費に占める人件費の割合が材料費や機械損料費に比べ高いため、グラウチングの工程短縮がそのコスト縮減に与える効果が高い。そこで、グラウチング施工中の透水試験である水押し試験の時間短縮に着目した無段階水押し試験の採用によって、ダム基礎グラウチングのコスト縮減を図ることが検討されている^{1)~3)}。

無段階水押し試験とは、従来、圧力を数段階設定し、各圧力段階ごとに注入量を測定していた方法に対し、圧力上昇過程において連続的に昇圧しながら注入量測定を行い、透水性を把握する方法である。本研究では、実ダムにお

ける無段階水押し試験の適用性検証を目的として、中生代白亜紀の花崗閃緑岩を基礎とするダムサイトにおいて、従来の水押し試験と無段階水押し試験を同一ステージで実施し、比較検討した結果について報告するとともに、無段階水押し試験実施時の留意点をとりまとめた。

2. 無段階水押し試験

ダム基礎グラウチングにおいては、セメントと水を主材とした懸濁液であるセメントミルクの注入前に水押し試験を実施して、ステージごとに基礎地盤の透水性や限界圧力を把握し、グラウチングによる遮水性の改良状況の把握や、当該ステージにおけるセメントミルクの初期濃度、最大注入圧力等の決定を行っている。従来の水押し試験は、圧力を数段階設定し、各圧力段階において注入量が定常状態となったと判断して注入量を測定するため、圧力段階の設定数の増加によって試験時間が長くなる^{4),5)}。特に、最近のダム基礎地盤に多く見られる軟岩地盤では、限界圧力や限界圧力以下でのルジオン値を正確に把握するため、注入圧力を比較的細かい昇圧ステップで設定することも多く、この場合は試験時間がさらに長くなる。このような段階的な昇圧を基本とした試験方法が採用されたのは、一定圧力で注入時の水の流れ

が安定するまでには、ある程度の時間が必要との考えによる。

しかし、水押し試験は追加孔の必要性を判断する簡易的なルジオンテストの意味合いが強く、当該孔のルジオン値と改良目標値の大小関係が判断できれば、その値に対してそれほど高い精度は要求されないと考えられる。そこで、水押し試験時の施工工程の短縮によるグラウチングのコスト縮減を図るため、圧力上昇過程において圧力段階を設けずに連続的に昇圧しながら注入量測定を行う「無段階水押し試験」が検討されている。

図-1 に従来の圧力段階を設ける方式の水押し試験（以下、段階水押し試験という）と無段階水押し試験の昇圧過程の概念を示す。段階水押し試験では、ある設定した圧力段階（この図では4段階）ごとに注入量が一定になったことを確認のうえ、この注入量を測定し、有効注入圧力-注入量関係からルジオン値を算出する。「ルジオンテスト技術指針・同解説」^{6,7)}では、注入量が一定になるまで十分注入した後注入量の測定を行い、注入量の測定時間は原則として5分間とされており、近年のダム基礎グラウチングにおける水押し試験でも、注入量一定の判断基準は現場によって多少異なるが、概ね5分間の定常状態の注入量を計測している。これに対し、無段階水押し試験では昇圧時に変化する注入量を連続的に測定し、有効注入圧力-注入量関係からルジオン値を算出する方法である。これにより、各圧力段階での定常状態の注入量計測に伴う計測時間が不要となり、水押し試験時間の短縮によるコスト縮減が期待できる。

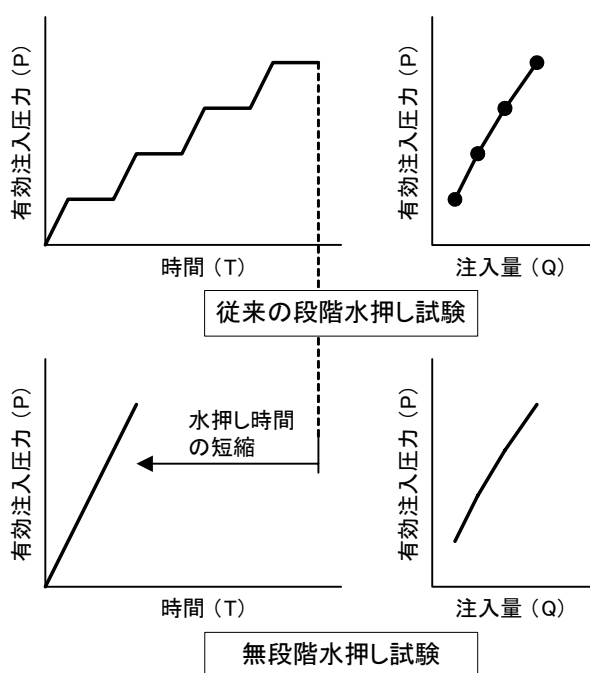


図-1 段階および無段階水押し試験の概念

3. 無段階水押し試験の検証試験事例

(1) 検証試験の方法

ここでは、実ダムにおける無段階水押し試験の導入に際して実施した適用性検証試験について紹介する。

長井ダムは、国土交通省東北地方整備局が山形県長井市に建設中の堤高 125.5m の重力式コンクリートダムである。当ダムでは、無段階水押し試験の採用にあたり、その適用性検証のために同一試験区間で段階水押し試験との比較試験を実施している。試験対象としたのは、カーテングラウチング河床部左岸側 41BL のパイロット孔から3次孔までの8孔、120ステージである。試験位置および孔配置を図-2 に示す。孔配置は、パイロット孔間隔 12m の単列配孔（孔間隔 1.5m, 規定3次孔）である。図上の丸文字および数字は施工次数を表し、P はパイロット孔、数字は1～3次孔を意味する。

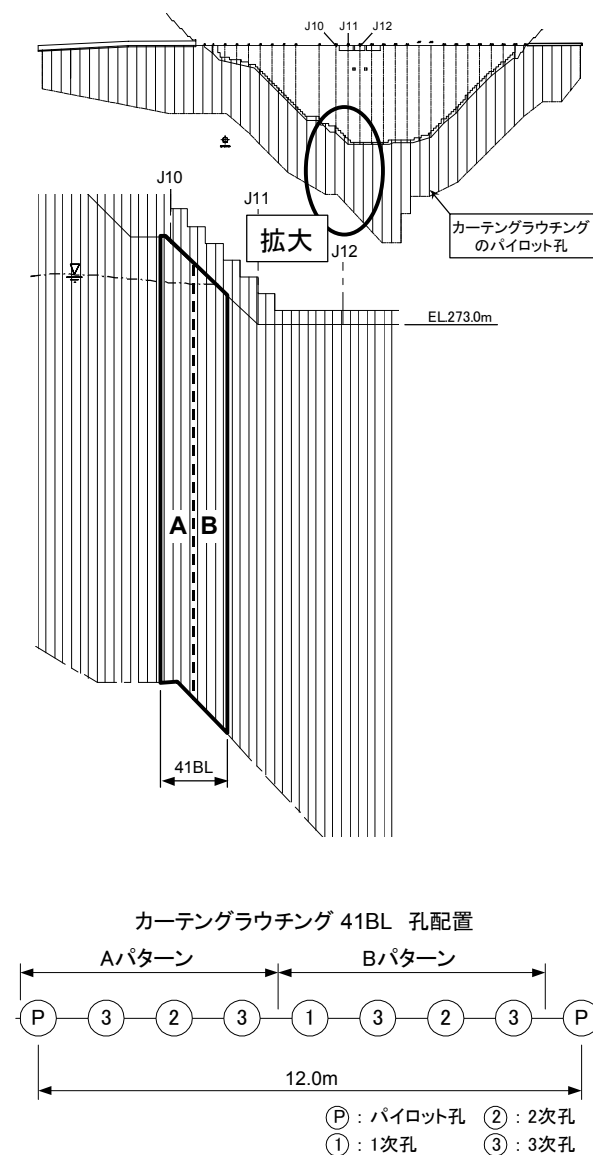


図-2 試験施工範囲

表-1 長井ダムにおける水押し試験の実施要領

A パターン（無段階水押し試験先行）				B パターン（段階水押し試験先行）			
ステージ	注入 圧力 (MPa)	無段階水 押し試験 (MPa)	段階水押し試験 (MPa)	ステージ	注入 圧力 (MPa)	段階水押し試験 (MPa)	無段階水 押し試験 (MPa)
1	0.5	0→0.5	0→0.1→0.3→0.4→0.5 (→0.3→0.1)	1	0.5	0→0.1→0.3→0.4→0.5	0→0.5
2	0.7	0→0.7	0→0.1→0.3→0.5→0.7 (→0.4→0.1)	2	0.7	0→0.1→0.3→0.5→0.7	0→0.7
3	1.0	0→1.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0 (→0.7→0.3→0.1)	3	1.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0	0→1.0
4	1.5	0→1.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0 →1.5(→1.0→0.7→0.3→0.1)	4	1.5	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0 →1.5	0→1.5
5	2.0	0→1.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0→ 1.5→2.0(→1.5→1.0→0.5→0.1)	5	2.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0 →1.5→2.0	0→2.0
6	2.5	0→1.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0→ 1.5→2.0→2.5(→2.0→1.5→1.0 →0.5→0.1)	6	2.5	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0 →1.5→2.0→2.5	0→2.5
7～	3.0	0→1.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0→ 1.5→2.0→2.5→3.0(→2.0→1.5 →1.0→0.5→0.1)	7～	3.0	0→0.1→0.3→0.5→0.7→1.0 →1.5→2.0→2.5→3.0	0→3.0

表内の圧力値は口元圧力方式による口元での注入圧力を示す。
 圧力上昇速度：0.1MPa/min 段階水押し試験測定時間：5min
 A パターン：無段階水押し試験の最大注入圧力は 1.0MPa を上限とする。段階水押し試験の()内の圧力段階は、パイロット
 孔で実施した降圧過程を示す。
 B パターン：段階水押し試験で限界圧力が発生した場合、無段階水押しの最大注入圧力は限界圧力とする。

長井ダムサイトには、中生代白亜紀の花崗閃緑岩が広く分布している。岩自体は堅硬であるがクラッキーな岩盤状況を呈しており、閃緑岩の捕獲岩やアプライト岩脈が点在する。また、割れ目沿いの熱水変質起源の弱層（変質粘土脈と周辺の弱部）が河床部標高付近全体に面的な拡がりをもって分布している。

検証試験箇所も花崗閃緑岩で構成され、透水性は調査時のルジオンマップでは地表面から 40m 程度までが概ね 2～5Lu、それ以深は 2Lu 以下となっている。検証試験は、試験区間を中央で区切り、同じステージで無段階水押し試験を先行する A パターンと段階水押し試験を先行する B パターンの 2 種類を実施し、それぞれのルジオン値を比較している。各試験の仕様を表-1 に示す。ここで、長井ダムでは口元圧力方式で実施しており、表内の圧力値は施工管理上の値である補正前の口元での注入圧力を表している。段階水押し試験では、適正なルジオン値、限界圧力把握のため、セメントミルク注入時の規定圧力まで昇圧し、各圧力段階において測定時間 5 分で実施した。また、無段階水押し試験は、先行する A パターンにおいては、できるだけ限界圧力を発生させずに段階水押し試験と比較するため、3 ステージ以深の最大注入圧力を 1.0MPa とした。B パターンでは、先行する段階水押し試験と同じ最大注入圧力で実施した。なお、本研究におけるルジオン値の算出は、有効注入圧力 1.0MPa 程度までのデータを用いて評価した。注入圧力

の圧力上昇速度は、現場において一般的に採用されている 0.1MPa/min である。なお、パイロット孔については、段階水押し試験において表中の()内に示す降圧過程を実施している。

(2) 検証試験の結果

検証試験として 120 ステージで行った先行水押し試験より得られたルジオン値の頻度分布を図-3 に示す。カーテングラウチングの改良目標値である 2Lu 以下のデータが占める割合が 60.8% (73/120) と最も多く、10Lu を超過する高透水データは 5.8% (7/120) と少ない。この結果は、調査時の結果と概ね整合している。また、先行水押し試験における限界圧力の発生は全体の 27.5% (33/120) で確認された。

段階水押し試験と無段階水押し試験のルジオン値の比較結果を図-4 に示す。ここで、先行水押し試験において限界圧力の発生が確認された 33 データは、ルジオン値の正確な対比ができないため、試験結果の評価において評価対象から除外し、残りの 87 データを使用した。図より、2 パターンの試験順序によって得られるルジオン値は、A パターン、B パターンとも両者のルジオン値の相関は高く、無段階水押し試験のルジオン値が段階水押し試験のルジオン値よりもわずかに大きく評価されることがわかる。また、試験順序による両者の関係に有意な差は見られない。

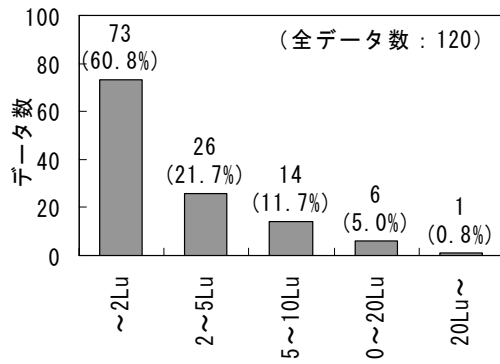
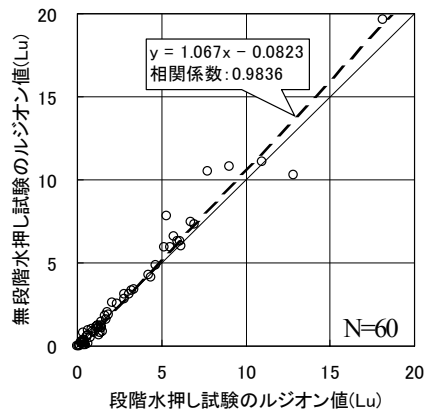
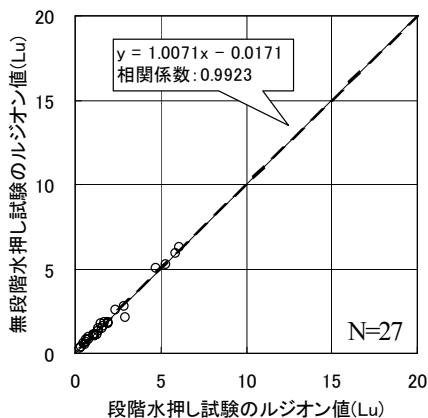


図-3 先行水押し試験で得られたルジオン値の頻度分布



(a) Aパターン（無段階水押し試験先行）



(b) Bパターン（段階水押し試験先行）

図-4 段階水押し試験と無段階水押し試験のルジオン値の比較

次に、試験で得られた時々刻々の注入圧力、注入量データから作成した P-Q 曲線をもとに、段階水押し試験のルジオン値（以後、段階 Lu とする）と無段階水押し試験のルジオン値（以後、無段階 Lu とする）の関係を詳細に分析した。ここで、段階 Lu、無段階 Lu とともに改良目標値の 2Lu 以下となった 55 データ（45.8%）は、多少の差があったとしてもダム基礎地盤の透水性を評価するうえでの問題にはならないと考え、ここでの評価から除外した。よって、先行水押し試験で限界圧力が発生した 33 データと、段階 Lu、無段階 Lu とともに 2Lu 以下の 55 データを除く 32 データを分析対象とした。

なお、参考のために、先行水押し試験で限界圧力が発生した 33 ステージの段階水押し試験と無段階水押し試験のルジオン値の比較を図-5 に示す。この図より、先行水押し試験において限界圧力が発生した場合、後行水押し試験で得られるルジオン値が先行水押し試験のそれよりも大きいことがわかる。

また、限界圧力が確認された P-Q 曲線の一例を A パターンと B パターンについて、それぞれ図-6 の(a)と(b)に示す。図中の段階水押し試験の P-Q 曲線における○印は、ルジオン値を求める際に用いる各有効圧力段階での安定流量値を示している。これらの図より、先行水押し試験においてどちらのケースとも、明瞭に限界圧力（折れ曲がり点）が捉えられていることがわかる。

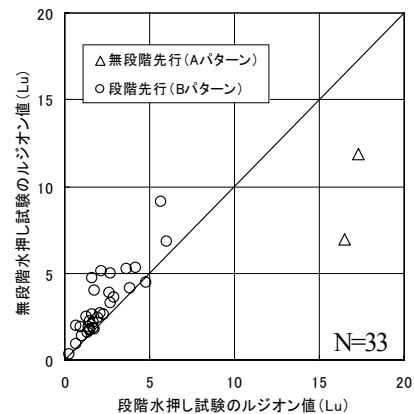
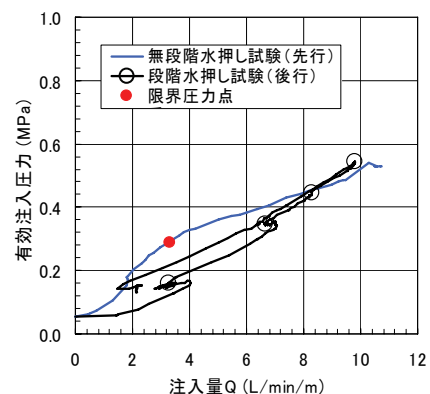
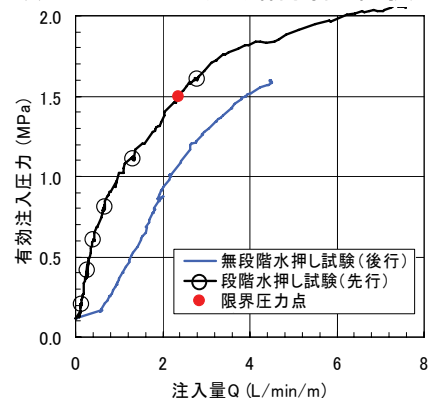


図-5 先行水押し試験で限界圧力が発生したケースにおけるルジオン値の比較



(a) Aパターン（無段階水押し試験先行）



(b) Bパターン（段階水押し試験先行）

図-6 先行水押し試験で限界圧力を確認した P-Q 曲線

段階 Lu と無段階 Lu の分析結果を表-2 に示す。表より、段階 Lu と無段階 Lu が同程度（両者の差が 1Lu 未満で、かつ両者の比の 1 からのずれが 0.1 未満）となったのは 21 データ（65.6%）であった。また、段階 Lu より無段階 Lu が大きい（両者の差が 1Lu 以上、もしくは両者の比が 1.10 以上）のは 9 データ（28.1%）で、逆に段階 Lu より無段階 Lu が小さいデータは 2 データ（6.3%）であった。なお、段階 Lu より無段階 Lu が小さい 2 データは、先行試験時の一時的な目詰まり等により実際より小さい透水性と評価されたと考えている。

図-7 に、段階 Lu > 無段階 Lu となった P-Q 曲線の一例を示す。図より、先行した無段階水押し試験は、注入圧力の上昇に伴い注入量が減少する逐次流量減少型 P-Q 曲線であるのに対し、後行の段階水押し試験では直線型の P-Q 曲線を示す。これは、先行試験では穿孔時のスライム等や試験水中の浮遊物により地盤の目詰まりが発生したが、後行試験時の水洗い等で目詰まりがある程度解消され、異なる透水性状を示したものと想定できる。

また、段階 Lu < 無段階 Lu となった 9 データについて、さらに詳細に分析する。図-8 に分析対象 32 データのうち段階 Lu < 無段階 Lu（9 データ）を区分した両ルジオン値の比較を示す。図より、9 データの両者のルジオン値の差は 0.25～2.82（両者のルジオン値の比は 1.08～1.46）であり、このうち両者の差が 1Lu 以上の 4 データは、全て透水性が 5Lu 以上と比較的高い箇所である。ここで、図-9 に両者のルジオン値が 5Lu 以上で差が比較的大きい 2.50 となった P-Q 曲線の一例を示す。図より、得られるルジオン値に差があるとしても、それほど大きな差異ではないことがわかる。

これより、無段階水押し試験は、改良目標値である 2Lu よりある程度透水性が高い範囲で測定精度が段階水押し試験に比べて若干低下する可能性が考えられるが、実務上大きな問題ではないといえる。よって、長井ダムにおける無段階水押し試験は、従来の水押し試験に代わる試験として、十分実用に供することができるものであると考えられる。

表-2 段階水押し試験と無段階水押し試験のルジオン値の分析結果

評 価		パターン		合 計
		A	B	
分析対象	段階Lu≒無段階Lu	15 (60.0%)	6 (85.7%)	21 (65.6%)
	段階Lu<無段階Lu	9 (36.0%)	0 (0.0%)	9 (28.1%)
	無段階Lu<段階Lu	1 (4.0%)	1 (14.3%)	2 (6.3%)
	計	25	7	32
分析対象外	限界圧力発生により評価不可	2	31	33
	段階Lu、無段階Luともに2Lu以下	35	20	55
合 計		62	58	120

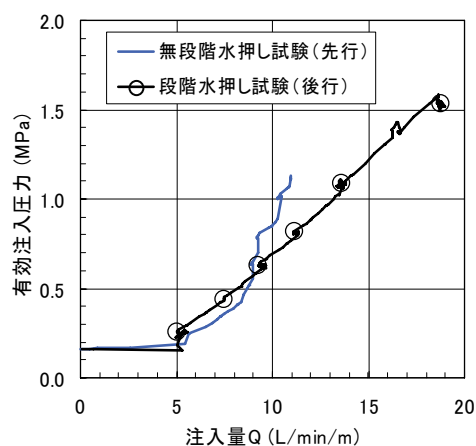


図-7 「段階 Lu > 無段階 Lu」データの P-Q 曲線例

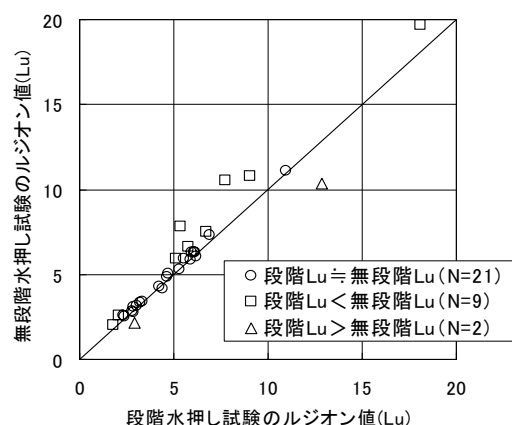


図-8 詳細分析対象データのルジオン値の比較

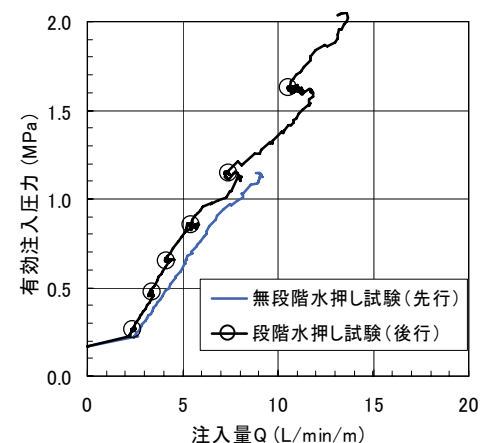


図-9 「段階 Lu < 無段階 Lu」データの P-Q 曲線例

4. おわりに

中生代白亜紀の花崗閃緑岩が広く分布する長井ダムサイトにおいて、無段階水押し試験導入のための実証試験を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 同一ステージにおける段階水押し試験と無段階水押し試験の比較試験の結果、両者のルジオン値はほぼ同程度の値となり、無段階水押し試験は十分実用に供することがわかった。

(2) しかし、無段階水押し試験では、段階水押し試験よりも透水性を大きく評価する可能性があるため、その適用にあたっては、検証試験等による適用性の検討の上、施工上支障を来さぬよう十分留意することが重要である。

今回の実証試験では、対象 120 ステージ中 118 ステージが地下水面下での試験であった。しかし、地下水面上の不飽和領域においては、非定常浸透の影響により、無段階水押し試験ではルジオン値を過大に評価してしまう可能性がある。特に、低限界圧力の軟岩地盤などでは非定常浸透の影響が大きく、無段階水押し試験によって正確に透水性を把握する上での重要な課題である^{8),9)}。さらに、軟岩地盤などの限界圧力が低い基礎地盤で無段階水押し試験を適用する場合、透水性以外に限界圧力の正確な評価についても検討しておく必要がある。今後は、これらについても研究を進め、より合理的な水押し試験の方法を確立していきたい。

また、近年、セメントミルクの配合を水から高濃度ミルクまで任意に変更できるシステムも開発されている^{10),11)}。このようなシステムによって、注入初期の圧力上昇過程において無段階水押し試験を行い、水押し試験とセメントミルク注入を一連で実施する合理的な施工も可能と考えられることから、無段階水押し試験の適用に関する検討は、今後の重要な課題である。

参考文献

1) 永山 功, 吉田 等, 宮内茂行, 名波義昭, 井川貴史:
基礎岩盤グラウチングにおける水押し試験の合理化の試

み, ダム技術, No.176, pp.3-12, 2001.5.

- 2) 川地 悟, 佐藤英一, 浅井俊光, 山口昌広, 加藤慎一郎: 徳山ダムの基礎処理工 (カーテングラウチング) における施工合理化の取り組み, ダム技術, No.233, pp.51-65, 2006.2.
- 3) 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム: 無段階水押し試験実施にあたっての留意点, ダム技術, No.234, pp.78-82, 2006.3.
- 4) 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室: 基礎岩盤グラウチングにおける水押し試験の方法について, ダム技術, No.152, pp.80-82, 1999.5.
- 5) (財)国土技術研究センター編集: グ라우チング技術指針・同解説, 大成出版社, 2003.7.
- 6) 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, 1984.6.
- 7) (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, 2006.7.
- 8) 山口嘉一, 中村洋祐, 新家拓史: 不飽和領域における水押し試験による透水性評価, 第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会, III-009 (CD-ROM), 2006.3.
- 9) 山口嘉一, 新家拓史: 無段階水押し試験による不飽和地盤の透水性評価, ダム工学, Vol.16, No.2, pp.94-108, 2006.6.
- 10) (株)環境総合テクノス: KK 式自動グラウチングシステム, (財)ダム技術センター建設技術審査証明報告書, 2001.10.
- 11) 前田建設工業(株), 日特建設(株): Multi CO-MIX グ라우チング用セメントミルク配合任意変更装置, (財)土木研究センター建設技術審査証明報告書, 2005.2.

APPLICABILITY VERIFICATION OF WATER PRESSURE TESTS WITH A MONOTONOUS PRESSURIZATION IN THE GRANODIORITE FOUNDATION

Yoshikazu YAMAGUCHI, Takuji ARAIE, Ichiro IKEZAWA

The geological conditions of dam sites are diversified, and the social demand of reducing the cost to infrastructure maintenance increases. Therefore it is strongly required to accomplish the rationalization of the dam foundation grouting. In this paper, the applicability of water pressure tests with a monotonous pressurization is verified at a dam foundation composed of granodiorite, conventional water pressure tests and water pressure tests with a monotonous pressurization are carried out at the same stages. The detailed procedure and the results of verification tests are described. In addition, the instructions for performing water pressure tests with a monotonous pressurization are discussed.