

(96) 孔内静水圧試験法の適用性について

日本基礎技術(株) 寺戸 康隆

On Application of the Borehole Multistage Constant Permeability Test

Yasutaka TERADO, Japan Foundation Engineering Co., Ltd.

Abstract

The borehole permeability test method is divided into the Lugeon test method and other permeability tests based on Darcy's law. In any test method, it is important to apply the adequate procedures and equipments in order to gain accurate permeability value under several hydro-geological environment and properties of several kind of rock mass.

The borehole multistage constant permeability test method is considered the best one from the above mentioned point of view. This method is generally defined that multistage constant injection pressure is charged near the test stage in the borehole while controlling flow of supply water. Therefore, such tools as a pressure sensor (of a suspension type), flow control valve etc. are equipped in this measuring instrument.

According to the writer's experiences, this method is supremely effective especially in the test of the following cases.

- (1) when the bedrocks are composed of weak rocks with small critical injection pressure or unconsolidated river deposits,
- (2) when weathered or sheared rocks lie under deep groundwater level,
- (3) when the bedrocks are composed of huge permeable porous rocks or hard rocks with wide open cracks,

1. まえがき

ボーリング孔を利用した透水試験法には、ルジオンテストとこれ以外のダルシー則を適用した透水試験法がある^{1), 2)} (表-1)。いずれの試験法も、試験地の水文地質環境や地盤性状に対応した試験方法あるいは試験装置を適用することが大切であり、そうでないと地盤固有の透水特性が求められないおそれがある。

例えば、地下水位が低い水文条件下で、対象地盤の限界圧力が小さい場合、静水圧によって限界圧力以上の水圧が作用し、過大なルジオン値あるいは透水係数を求める結果となったり、あるいは深部の高透水性地盤を対象にする場合、管内流速が非常に大きくなり、乱流の影響によって計算以上の管内抵抗が働き、過小なルジオン値あるいは透水係数を求める結果となることである。これらの現象はいずれも加圧方式が地上加圧式であることに起

表-1 透水係数を求めるための現場透水試験法とその適用性^{1), 2)}

試験区分	試験名又は適用式名	地下水位による適用性	試験地点の地質からの深さによる適用性			測定される透水係数の主な方法	備 考
			深い	中	浅い		
ピット法	・アースマニュアル E-19	不飽和帯又は孔底程度の地下水位のとき。	×	×	○	水 圧	ピット又はボーリング孔を利用。バックカーは用いない。
バックカー法	・アースマニュアル E-18 ・鉄田の式	地下水位にほぼそれほど影響されない。	○	○	△	水 圧	ルジオンテストと同方法。ボーリング孔を利用。バックカーを用いる。
オープンエンド法	・アースマニュアル E-18	地下水位にほぼそれほど影響されない。	×	△	○	水 圧	ボーリング孔又はピットを利用。孔側等はケーシング等で不透水。土壌室のみで試験。
トレーサー法	・重力浸透法	不飽和帯で適用。	×	△	○	水 圧	permeabilityを求める試験方法であるので、地盤の有効孔隙率をかりて補正の要あり。
	・地下水流法	地下水位以下の場所に通ず。	○	○	○	水 圧	

記号説明
○：適用可能
×：適用不可
△：適用一部可能であるが適用する式、条件、信頼性等に注意を要する。

因する。最近では、試験ステージに圧力センサーを置き、有効注入圧力を直接測定して、ルジオンテストを行うようになった^{3)・4)}。これによって低有効圧力小流量の測定ができるようになり、前記のような事態は避けられるようになった。この試験方法は多段階の加圧を孔内で行なえるので、多段階孔内定水位試験法と言えるが、ここでは孔内静水圧試験法と呼ぶことにする。本稿では、上記のことを実際のデータから検証するとともに、本試験法の適用性について述べることにする。

2. 試験方法

図-1は本試験法のブロックダイアグラムである⁵⁾。これは、定格孔径66mmのボーリング孔に挿入した注入管中に注入ホースで送水し、管内の水頭を一定にした状態で行う透水試験あるいはルジオンテストの方法を示す。測定原理は、地盤への透水によって低下する水位をセンサーでとらえ、水位を一定にするために要する流量を迅速に供給することにある。

試験は、水頭0から漸次水頭を加えることによって各圧力段階の流量を計測し、試験水頭が地表に至れば、通常のルジオンテストと同じように、ポンプ圧あるいはガス圧で加圧して試験を行う。

このようにして、孔内と地上の両方の圧力-流量($p-q$)データが連続して得られる。

3. 試験結果と適用性

3.1 軟岩の試験

新第三紀～第四紀の砂(岩)層、砂礫(岩)層軟質凝灰岩等の堆積軟岩、まさ等の風化軟岩および火砕流、火山泥流、熔結凝灰岩非熔結部等の火山軟岩のように、概して限界圧力の小さい地盤のルジオンテストでは、水圧破碎を起こし、最初から限界圧力を超えた大透水量カーブを示すことが多い。このため、圧力を十分管理した試験を行っている。しかし、本試験法を用いてステージにおける有効注入圧力レベルの試験を行う方が微妙な圧力制御ができ、データにより高い信頼性が得られる。図-2は第四紀砂礫岩のルジオンテストの $p-q$ 図を従来法と本試験法とで比較した例である。従来法では最初から横這い傾向の $p-q$ 曲線を示すが、本試験法では限界圧力点が明確となり、固有のルジオン値は小さいことが示される。

3.2 低地下水下の軟岩、強風化岩、破碎部等の試験

軟岩はもとより、強風化岩、破碎部においても、地下水位が低い条件下では、従来の地上加圧式であれば試験深度に限界圧力以上の静水頭が作用するケースが多い。このケースでは通水した段階で限界圧力を超えたデータが示され、正確なルジオン値は得られない。図-3はこのようなケースの試験例を示す。

図中、(1)と(2)は軟質凝灰岩の例³⁾、(3)は微～非熔結火砕流の例³⁾を示す。いずれも0に近い有効注入圧力が

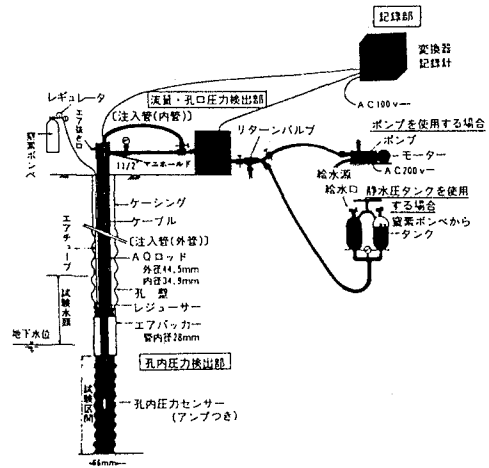


図-1 孔内静水圧試験法を用いたルジオンテストのブロックダイアグラム⁵⁾

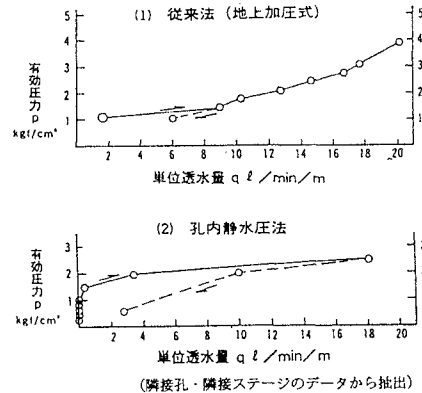


図-2 第四紀砂礫岩のルジオンテストの $p-q$ 図についての従来法と本試験法の比較例

ら連続してデータが採取され、限界圧力が明瞭に読み取れる。

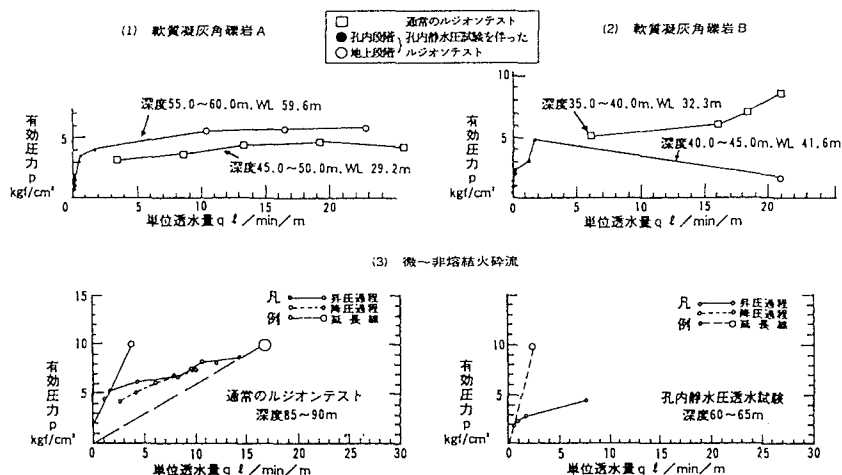


図-3 低地下水位下の軟岩のルジオンテストのp-q図についての従来法と本試験法の比較例

3.3 透水性が著しく大の多孔質地盤、開口亀裂性岩盤等の試験

現世の珊瑚石灰岩、高熔結凝灰岩、流紋岩、熔岩等では、調査孔径等の制約もあって、従来の試験法では流速が非常に大きくなり、乱流の影響で管内および試験ステージに著しい損失水頭が発生するため、実際の（極）大ルジオン値が反映されにくいケースが少なくない。この現象は漏水量の管理には安全上見過ごせない。図-4は開口亀裂性流紋岩について従来法と本試験法を比較した試験例である⁵⁾。

従来の方法では測定点が少ないため、点のとり方によってルジオン値は大きく異なり、個人差が出て、データに対する信頼性が低くなる。本試験法では連続した（極）低圧、小流量のデータが取れるので、ルジオン値のとり方に個人差がなくなり、信頼性が高くなる。

図-5は熔結凝灰岩、

図-6は玄武岩熔岩の

p-q図の例である。

通常の孔径とポンプによっても大透水性を評価できるデータを得ることができる。

図-7は開口亀裂を有する流紋岩の同ステージにおいて、従来法と孔内静水圧試験法によるルジオン値の測定結果を対比したもの

である。これによれば、従来法で測定したルジオン値が10Lu程度以上になると、孔内静水圧試験法で測定したルジオン値は、ばらつきが大きいものかなり大きな値が示されている。すなわち、実測値については10倍から30倍の値になる。更に50Lu程度以上になると孔内静水圧試験法の値は放物線のカーブを辿り、45度の線を外れて増大する傾向が読み取れる。

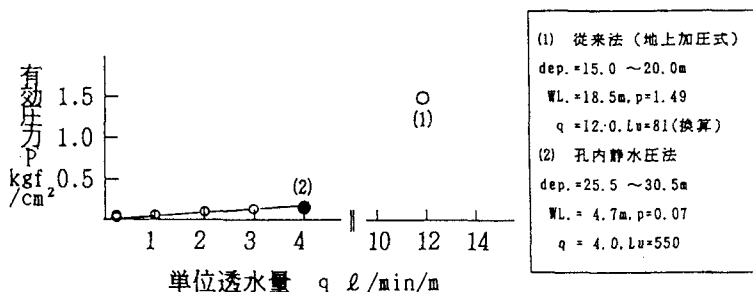


図-4 開口亀裂をもつ流紋岩のルジオンテストのp-q図についての従来法と本試験法の比較例

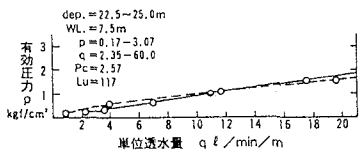


図-5 熔結凝灰岩の孔内静水圧試験法の $p-q$ 図の例

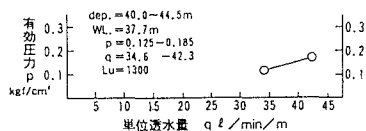


図-6 玄武岩熔岩の孔内静水圧試験法の $p-q$ 図の例

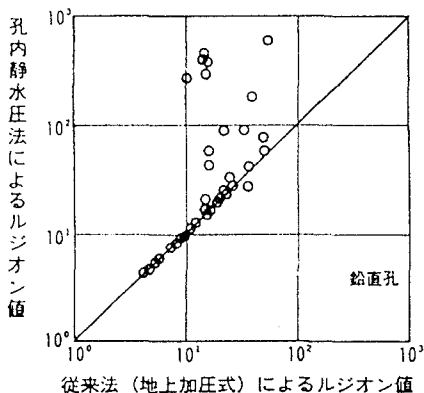


図-7 従来法と孔内静水圧試験法による測定ルジオン値の対比図(流紋岩の例)

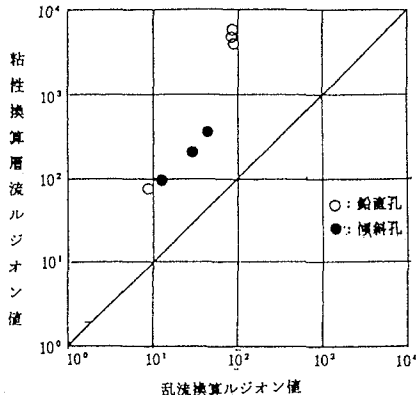


図-8 乱流換算ルジオン値と粘性換算層流ルジオン値の関係図(山口・渋市・松本, 1990年)⁸⁾

ところで、本島(1979年)は、第四紀熔岩の節理をボアホールTVで観察し、「節理より求めたルジオン値」と当該ステージのルジオン試験結果によるルジオン値との関係を求めている⁷⁾。本島は、ルジオンテスト結果の値がほぼ50Luを超えるとその値は節理より求めたルジオン値より小さな値になることを示し、乱流状態の影響を反映していることを示唆すると述べている。一方、山口・松本ら(1987年, 1989年)は、高透水性岩盤に対して高粘性流体を用いた透水試験を行い、層流によるルジオン値を求めている⁸⁾。

また、岩本・園元・有門ら(1990年)も、高透水性の熔結凝灰岩を対象にして高粘性流体を用いたルジオンテストを行っている⁹⁾。

図-8は、山口・松本らの論文から引用した乱流換算ルジオン値と粘性換算層流ルジオン値の関係図である。これを見ると、層流のルジオン値は測定範囲の10Luから100Luの間において、乱流換算ルジオン値より10倍から70倍の変化を示し、50Lu程度以上から乖離が急激に大きくなることが示唆される。

岩本・園元・有門らの論文でも、水による乱流状態のルジオン値と層流状態に換算したルジオン値とは、それぞれ10Luの場合10倍から20数倍、20Luの場合20倍から50倍、30Luの場合30倍から90倍になり、注入圧力が増せばその差が大きいたことが示されている。

両論文とも、透水性の大きな岩盤では乱流の影響を受けやすく、透水性は層流状態に比較してかなり小さく評価されるおそれがあることを指摘し、ダム湛水時の漏水量の予測は層流に近い状態の透水性で判断する必要があることを提言している。

前掲の図-7に示した従来法と孔内静水圧試験法による測定ルジオン値の対比図は、これら層流換算ルジオン値との対比図である図-8に非常に類似の傾向が示され、共通した関係があることを示唆している。これは本島や岩本らの論文とも符合する。すなわち、水による試験であっても、(極)低圧、小流量(小流速)の試験ができればレイノルズ数が小さくなり、結果的に層流状態に近い透水性が求められたとすることができる。

4. 湛水後の漏水量と孔内静水圧試験法によるルジオン値との相関

表－2は、あるダムの湛水後の漏水対策におけるルジオンテスト結果から計算した推定漏水量と実測漏水量を比較したものである。従来の試験法で求めたルジオン値による推定漏水量は、実測値にくらべて1/29の値であったが、本試験法で求めたルジオン値による推定漏水量は実測値に近い値を示した。これは必ずしも孔内静水圧試験法だけによるものでないが、この試験法が実際の漏水量を推定するために層流状態に近い透水性を求める上で有力な方法であることが示唆される。

表－2 従来法と孔内静水圧試験法による測定ルジオン値から計算した湛水後の推定漏水量および実際の漏水量の比較

5. まとめ

筆者らの開発した孔内静水圧試験装置によるルジオンテストの実施例は既に60余例に及ぶが、本試験法を実施してきた結果、次のような適用性と新たな示唆を得た。

(1) 軟岩、砂礫(岩)層等のように、概して限界圧力が小さい地盤のルジオンテストには本試験法は有効である。

(2) 軟岩に限らず、強風化岩、破碎部等で、地下水位が低いため、現行の地上加圧式であれば限界圧力以上の静水頭が作用するケースで

は、本試験法を適用しなければ地盤本来の厳密な限界圧力と正確なルジオン値が求められない。

(3) これ以外に筆者が着目していることとして、本試験法を適用すれば層流に近い状態の試験ができるため従来高領域の透水性が求めにくかった現世の珊瑚石灰岩のような多孔質地盤、火山岩のような開口亀裂性岩盤等の正確なルジオン値が求められることが挙げられる。

(4) 本試験法によれば、層流に近い状態の試験ができるので、求めたルジオン値を透水係数に置き換え、浸透流解析の入力値とすることができる場合が多い。

6. あとがき

通常のルジオンテストに孔内静水圧試験法を用いることにより、大深度や複雑な水文地質条件下でも厳密な限界圧力と正確なルジオン値を求めることができるようになった。また、(極)大透水性についても信頼性のあるp-qデータが得られるようになった。今後、例えば、ルジオンマップのルジオン値区分の上下限を必要によっては現行の1 Lu未満と50Lu以上から0.1Lu 未満と100Lu 以上にすることも可能であり、これによって透水性について、よりメリハリのある表示ができるものと考えらる。

[参考文献]

- 1) 財団法人国土開発技術研究センター(1984):ルジオンテスト技術指針・同解説、p.31
- 2) 菅原 捷・中村康夫・双木英人(1986):グラウト工の調査設計法に関する研究〔Ⅲ〕総括、水資源 開発公社試験所地質研究室報告第8510号、p.25
- 3) 寺戸康隆・藤井徹美・米田 潤(1988):孔内静水圧試験の方法と結果の評価、第23回土質工学研究発表会講演集、pp.127-128
- 4) 山口嘉一・松本徳久(1989):低地下水域におけるルジオンテスト、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.406-410
- 5) 寺戸康隆(1992):孔内静水圧試験法(多段階孔内定水位試験法)を用いたルジオンテストの適用性について、応用地質Vol.33、No.5、pp.1-10
- 6) 岩清水義隆(1989):丹生川ダムの第四紀堆積物の透水性評価について、ダム地質No.31、pp.26-35
- 7) 本島 融(1990):「応用地質Q&A」、応用地質Vol.31、No.1、pp.37-38
- 8) 山口嘉一・流市秀雄・松本徳久(1989):ルジオンテストにける乱流の影響と対策、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.401-405
- 9) 岩本忠信・園元秀夫・有間秀幸・上妻睦男(1990):高粘性流体を用いた岩盤透水係数の測定、応用地質 Vol.31、No.2、pp.1-8

ルジオンテストの方法		湛水後の推定浸透量 Q	平均透水係数 T	平均透水係数 k	(2)/(1)	(3)/(1) (3)/(2)
(1)	従来法 (地上加圧法)	$5.34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	$2.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$1.23 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	25.4	28.7
		32.0 ℓ/min	$2.46 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$	$1.23 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$	25.4	28.7
(2)	孔内静水圧法	$1.33 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$	$6.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$3.07 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	1.0	1.1
		800.0 ℓ/min	$6.14 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$	$3.07 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$	1.0	1.1
(3)	実測値 (近似値)	湛水後の漏水量	逆算透水係数	逆算透水係数	—	—
		$1.52 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$	$7.02 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$3.53 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	—	1.0
		915.0 ℓ/min	$7.02 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$	$3.53 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$	—	1.0

脚注) 解析手法は平面二次元浸透流解析による。