

(13) 各種条件下におけるルジオンテストの精度の検討

建設省土木研究所 正会員 山口 嘉一
建設省土木研究所 正会員 ○ 弘 末 文 紀
建設省土木研究所 正会員 松 本 徳 久

1. はじめに

ダム基礎の透水性調査法としては、一般にルジオンテストが用いられ、その透水性はルジオン値で評価される。この試験法については既に技術指針¹⁾が確立されており、統一された方法で実施されている。しかし、このことは、試験孔周辺の境界条件や地盤物性等が異なっても、同一の方法で試験を実施することを意味し、ある条件下での試験に対しては、その精度に疑問を抱く部分がある。よって、筆者らは、そのような条件下でのルジオンテストの精度を数値解析および現場試験により検討したので以下に報告する。

2. 浸透流解析の概要

3.～6.においては、適宜飽和-不飽和浸透流解析を実施して各種条件下でのルジオンテストの精度の検討を行う。この解析の基本方程式²⁾を次式に示すとともに、解析モデルおよび不飽和特性を図-1, 2に示す。

$$\text{div } K(\theta) \nabla (\varphi + z) = (C(\theta) + \alpha Ss) \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad \alpha = \begin{cases} 0: \text{不飽和領域} \\ 1: \text{飽和領域} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $K(\theta)$ は透水係数テンソル、 φ は圧力水頭、 z は鉛直座標、 θ は体積含水率、 $C(\theta) (= \partial \theta / \partial \varphi)$ は比水分容量、 Ss は比貯留係数である。

3. 試験孔掘削による地盤の緩みと注水による圧縮の影響

ルジオンテストの試験孔掘削に伴い周辺地盤が緩み、注水にともない周辺地盤が圧縮される。その結果、周辺地盤の透水性は変化するはずである。そこでここでは、それがルジオンテストの精度に与える影響を検討する。なお、対象は軟岩および砂礫地盤とする。硬岩地盤について検討しないのは、孔掘削に伴う緩みや、ルジオンテストの通常の注入圧程度での圧縮の影響は、この地盤においてはほとんどないと考えたからである。まず、地盤を弾性体と仮定すると、試験孔掘削に伴う体積緩み量や注水に伴う体積圧縮量(地盤への水の浸透は無視)は容易に求められる。また、Taylor⁴⁾によると透水係数 k と間隙比 e には、 $k \propto e^3 / (1+e)$ の関係が成り立つ。よって、上記の体積変化量が任意の影響半径内で発生したとすると、地盤変形後の影響半径内地盤の透水係数 k' は表-1として求められる。なお、試験孔半径3.3cm、注水区間長5m、変形前の地盤の透水係数 k_0 は 1.0×10^{-4} cm/sとした。この表より以下のことがいえる。

軟岩地盤を想定⁵⁾した変形係数 D が 1000 kgf/cm^2 の地盤では孔掘削($P = 0. \text{ kgf/cm}^2$)により透水係数は増加するが、その割合は影響半径 r が孔半径 r_0 の2倍と小さい場合でも $k' / k_0 = 1.010$ と非常に小さい。また、 $P = 10 \text{ kgf/cm}^2$ で注水する場合、逆に地盤は圧縮されるが、 $r/r_0 = 2$ の場合でも $k' / k_0 = 0.892$ とさほど大きな影響はない。特に、変形後の地盤に対して実施した浸透流解析より求めた注入流量 Q_r と変形前の地盤に対する注入流量 Q_0 の差という観点からいくと、 $r/r_0 = 2$ においても2%程度と

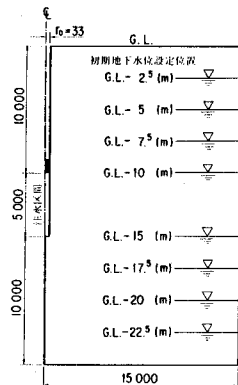


図-1 解析モデル

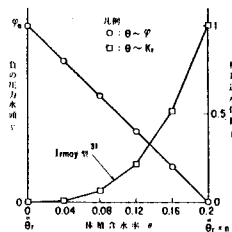


図-2 不飽和特性

表-1 地盤物性と変形後の透水係数

注水 区間 長さ (cm)	変形係数 D (kgf/cm ²)	間隙比 e ₀	ポアゾン比 ν	注入圧力 P (kgf/cm ²)	変形後 U _r (mm)	変形後の影響半径内地盤の 透水係数 $k' (= 10^{-4} \text{ cm/s})$	
						影響半径 (cm)	透水係数 k'
G.L. - 1000 - 1000 - 1000 - 1500	1000	0.25	0.3	0	-0.035	1.010	1.001
				10	0.394	0.892	0.996
				0	-0.347	1.101	1.012
				1	0.081	0.977	0.991
G.L. - 0 - 0 - 0	100	0.5	0.3	10	3.942	0.211	0.859
				0	-0.093	1.013	1.002
				1	0.346	0.945	0.993

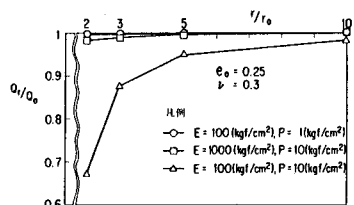


図-3 圧縮を考慮した浸透流解析結果

小さい(図-3参照)。さらにここでは、注水による圧縮を考える場合、壁面から地盤への浸透がなく、注入圧があたかも載荷荷重として作用すると仮定しているが、実際には地盤への浸透により壁面にかかる有効圧力は減少し、注水による圧縮の影響は上記の計算結果よりもさらに小さくなる。非常に弱い砂礫地盤を想定⁵⁾したDが100kgf/cm²の地盤における孔掘削に伴う緩みによる透水係数の増加は、 $r/r_0=2$ でも10%強である。注水にとまなう圧縮については、比較のためにこのような地盤に対する注入圧として現実的な1kgf/cm²と非現実的な10kgf/cm²を与えた場合の2通りについて検討を行った。注入圧として10kgf/cm²を与えると、 $r/r_0=2$ の場合で $k'/k_0=0.211$ となるが、注入流量についてはその影響範囲が小さいため $Q_r/Q_0=0.67$ と緩和される。また、現実的な注入圧1kgf/cm²を与えた場合は、ほとんど影響がない。その他に注意すべき場合として、第1ステージのように土被りの薄い位置で行う試験があげられる。ただ、この場合も、孔掘削による緩みは土被りが薄いためほとんど問題とならず、注水による圧縮についても、注入圧として現実的な1kgf/cm²を採用する限りはほとんど影響ない。

4. 注水に伴う地下水位上昇の影響

地下水面下でルジオンテストを行う場合、有効注入圧は、口元圧力を試験区間の中央から圧力計までの静水圧、地下水位および管内抵抗による損失水頭により補正して求める。従って、この地下水位を精度良く測定することは、即ちルジオンテストの精度の向上につながる。技術指針¹⁾では、

「通常毎朝作業開始前の孔内水位を測定し、この水位を試験時の地下水位とする」となっている。ところが実際の試験中には、注水に伴い図-4に示すように、試験孔周辺の地下水位が上昇していると考えられる。

もしこの水面上昇量が大きければ、技術指針どおりに求めた有効注入圧は、実際のそれよりも大きく見積っていることになり、ルジオン値については、逆に小さく見積っていることになる。そこでここでは、想定した条件下では地下水面上昇量が最大となる、試験孔以外の孔壁を不透水境界としたモデルと、地下水面上昇量が最小となる、地下水位以上孔壁を透水境界とし、地下水位以下バッカー(長さ1m)上端までを水压(初期地下水压)固定としたモデルの両方に対して浸透流解析を実施してみた(G.L.-7.5m)。解析結果をもとに、技術指針どおりに求めた有効注入圧P、および図-4の h'_2 を新たに地下水位として求めた有効注入圧P'と、注入流量との関係を求めたのが図-5である。この図より10kgf/cm²の注入圧に対するルジオン値は、Pから求めたのが9.8Lu、P'から求めたのが9.1Luとなり、低圧の1kgf/cm²の注入圧より求めたルジオン値は、それぞれ10.5Lu、9.0Luとなる。低圧でのルジオン値の差が大きいのは、図-6に示すように、注入圧と水面上昇量が比例せず、注入圧が大きくなるに連れて水面上昇量は鈍くなるためで、これは注入圧が小さいほど、不飽和領域内の負の最大圧力水頭(ここでは、 $\varphi_0=-1m$)の影響を大きく受けるためだと考える。いずれにせよここでは、孔周辺の地下水位上昇量をもとに有効注入圧を補正しているため、水面上昇量をかかなり大きく見積っていることになる。にもかかわらず、ルジオン値の差が上記程度であれば、実際上は注水に伴う地下水位上昇は、ルジオンテストの精度にほとんど影響ないと考えて良い。

5. 地下水位および負の最大圧力水頭値(φ_0)の影響

5.1 地下水位の影響

図-1に示したモデルに対して、地下水位を種々に変えて定常浸透流計算を行い求めた注入量の結果が図-7である。ただし注水区間以下に地下水位を設定した場合、定常計算では収束しないため長時間の非定常計算を行い、注入量が一定

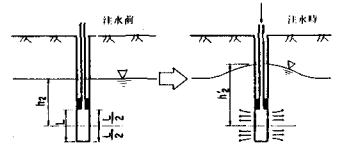


図-4 注水による地下水面の上昇

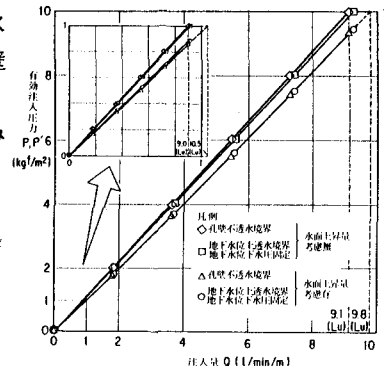


図-5 地下水面上昇量を考慮する場合としない場合のP、P'-Q曲線 (G.L.-7.5(m)の場合)

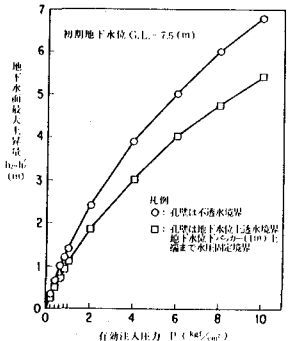


図-6 有効注入圧力と地下水面上昇量の関係

と見なしうる時の値をその地下水位での定常注入量とした。図-7では、地下水位が最上部にある場合(G.L.-2.5m)の注入量を基本注入量 Q_1 とした。これは、極力完全に近い形でポテンシャル流が達成されている時の流量を基準流量にしようと考えたためである。また、注水区間内に地下水位がある場合の有効注入圧の計算方法は、地下水位上の試験区間の中点を基準とする従来の式と、試験区間内の水圧分布の平均値地点を基準とする寺戸らの式⁷⁾の2通りを用いた。従来の式は理論上正しくないが、その簡便さにより、一般に用いられている。 Q_1 と比較すると、両者とも極端な差はないが、正確を期するためにも理論上正しい寺戸らの式を用いることを推奨したい。地下水位が注水区間より深くなればなる程、注入流量は、地盤中の水の流れが重力流がメインとなることにより、注水区間より上部に地下水位が存在する場合のそれよりも増加する。しかし、流量の増加率は、地下水位が深くなる程小さくなるため、図-7の下部曲線を延長して求まる注水区間より下部に地下水位がある場合の注入流量は、上部に地下水位がある場合の約3割増になると考えられる。

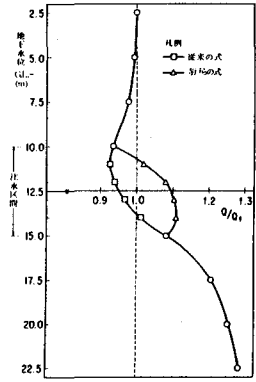


図-7 地下水位と注入量の関係

5.2 φ_0 の影響

注水区間上部とその内部に地下水位が存在する場合に、 φ_0 の値を3通りに変えて注入量を定常浸透流計算により求めた結果が図-8である。地下水位が注水区間上端より上方に遠ざかるにつれて、 φ_0 の影響は小さくなる。これは、 φ_0 の影響を受ける不飽和浸透領域が飽和浸透領域に比較して極端に小さくなるためである。一方、試験区間に地下水位がかかると、 φ_0 の大きさが注入流量にかなり影響してくることがわかる。よって、実際の試験では、対象地盤がどの程度 φ_0 の値を有する地盤であるかを把握しておくことが非常に重要である。

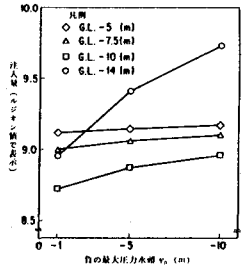


図-8 負の圧力水頭と注入量の関係

6. 長時間透水試験における地下水位・ S_s ・ φ_0 の影響

6.1 地下水位の影響

図-1に示したモデルに対して、同一地盤、同一注入圧のもとで地下水位を色々を変えて非定常浸透流計算を行った結果が図-9である。注水区間より上部に地下水位が存在する場合は、その位置にかかわらずほぼ同様の収束状態を示し、その収束時間も非常に早い。この結果は、西垣⁸⁾の結果とも良く一致しており、地下水面下の試験では、通常行っていると同程度の測定時間内に定常に至っていると考えられる。しかし、地下水位が注水区間上端よりも低い場合は、収束が非常に悪く、通常行っている試験の測定時間程度では、到底、定常流量を得ることができないうえ、定常流量と初期流量の差がかなり大きい。従って、注水区間内部および以深に地下水位が存在する場合の試験では、測定・解釈上十分注意を要する。

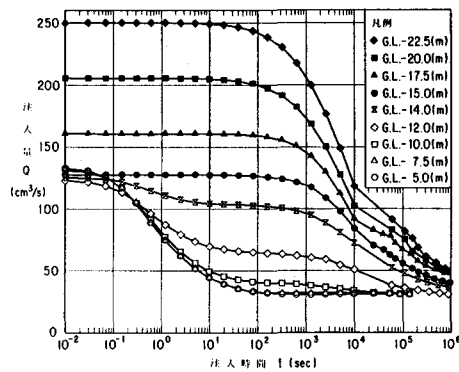


図-9 地下水位と注入時間の関係

($P=0.4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}, \varphi_0=-1 \text{ (m)}, S_s=10^{-7} \text{ (cm}^{-1}\text{)})$

6.2 S_s の影響

地下水位が注水区間より上にある場合と下にある場合の各々に対し、3種類の S_s 値を与え、同一の注入圧のもとで非定常浸透流計算を行った結果が図-10である。地下水位が注水区間より下にある場合、 S_s の流量収束状況に与える影響はほとんどない。地下水位が注水区間より上にある場合は、 S_s が1オーダー大きくなるにつれて、注入流量の収束に至る時間も1オーダーづつ大きくなる。これは、飽和・不飽和浸透流の基本方程式(1)より明らかである。地下水位が注水区間より下にある場合は、不飽和領域が卓越しているうえ、 $C(\theta)$

Ssであるので、全浸透を考えた場合でもSsが流量収束状況に与える影響がほとんどないためである。地下水位が注水区間より上にある場合は、不飽和領域が飽和領域に比べ極端に小さいため、全浸透を考えた場合に $C(\theta)$ はほぼ0とみなせ、Ssと時間が比例関係になるからである。従って、たとえ地下水位が注水区間より上にある場合でも、Ssが大きくなると必ずしも短時間に収束しないであろうことがわかる。一般にSsの大きい地盤の透水係数は小さい⁹⁾。この時の両物性の影響は、ともに収束を遅らせる方向に働くため、なお一層の注意が必要となる。

6.3 φ_0 の影響

地下水位が注水区間より上にある場合と下にある場合のそれぞれに対し、3種類の φ_0 の値を与え、同一の注入圧のもとで非定常浸透流計算を行った結果が図-11である。地下水位が注水区間より上にある場合は、 φ_0 が大きくなっても、流量収束状況に与える影響はほとんどない。地下水位が注水区間より下にある場合は、注入の初期と定常近くでは、 φ_0 が大きいもの程注入量が大きくなり、その中間時点では、 φ_0 の大きいもの程早く飽和領域が拡大されるため、注入量が定常になるのも早くなる。以上のことも式(1)より明らかで、地下水位が上にあり、飽和領域が不飽和領域を卓越する場合は、 φ_0 の大きさを反映する $C(\theta)$ の値がほぼ0とみなせ、地下水位が試験区間より下にある場合は、逆に $C(\theta)$ の変化の影響が効いてくるためである。

7. 地下水位が低くかつ弱い岩盤の地下深部における試験

地下水位が低くかつ弱い地盤の地下深部においてルジオンテストを行う場合、地表面から行くと、その静水圧あるいはボーリング時の送水圧だけで既に限界圧を越えてしまい、正確なルジオン値を得られない可能性がある。図-12は実際に行った試験結果である。地表面から深さ5.8m~40mの第四紀更新世砂岩層の軟岩を対象地盤とする。図の○、□は、地表面からの試験孔に近い横坑内から試験孔を掘削し、極力大きな水圧が载荷されないようにして行った試験の結果である。この図より、対象地盤に対し地表面から行った試験の結果は過大になりすぎることがわかる。また、横坑内の試験より得た限界圧は、2~3kgf/cm²の値を示した。従って、地表面より行った試験では、初期の静水圧あるいはボーリングの送水圧により破壊をひき起こし、過大なルジオン値を得ていた危険性は十分ある。しかし、この2種類の試験を行った試験孔は、かなり隣接しているものの、その地点の地質がかなり複雑なため、全く同じ地盤に対して行ったものとは言い切れないことを付記しておく。

(参考文献) 1)建設省河川局開発課：ルジオンテスト技術指針・同解説，1984.6. 2)赤井・大西・西垣：有限要素法による飽和・不飽和浸透流の解析，1977.8. 3)西垣：飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2,3の考察，土質工學論文報告集，Vol23, No3, 1983. 4)Taylor, D.W.: Fundamental of Soil Mechanics, 1948. 5)松本・池田：フィルグム基礎の軟岩の変形特性，土技資，1984.5. 6)古中：横方向地盤反力係数，土技資，1968.1. 7)寺戸：技術と施工，1985.7. 8)西垣：単孔式透水試験法の問題点の検討と改良，地下水と井戸とポンプ，1986.9. 9)建設産業調査会，地下水ハンドブック，1979.

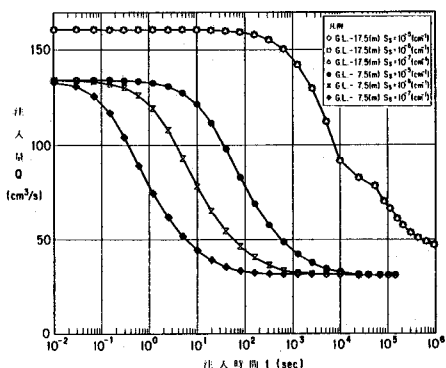


図-10 比貯留係数 Ss と注入時間の関係
($P=0.4$ (kgf/cm²), $\varphi_0 = -1$ (m))

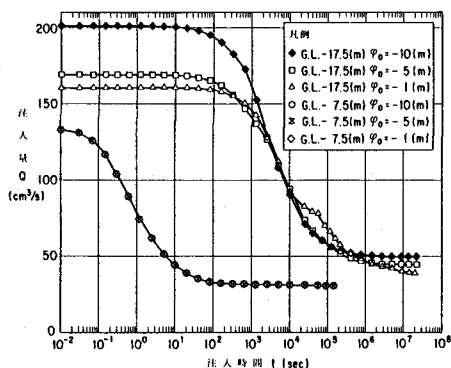


図-11 負の圧力水頭 φ_0 と注入時間の関係
($P=0.4$ (kgf/cm²), $Ss = 10^{-7}$ (cm⁻¹))

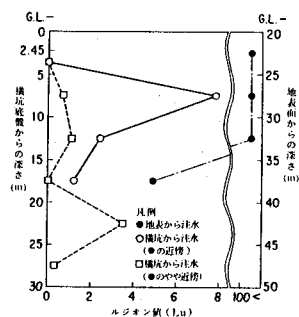


図-12 下部砂岩層中のルジオンテスト結果

(13) A Study of the Accuracy of Lugeon Tests Performed under the Various Conditions

Yoshikazu YAMAGUCHI

Fuminori HIROSUE

Norihisa MATSUMOTO

Public Works Research Institute

Ministry of Construction

Summary

Lugeon test is usually adopted as the method of surveying the permeability of dam foundations and the permeability of dam foundations is evaluated by Lugeon value (Lu). Lugeon test is water pressure injection method using boreholes. Since Lugeon value varies depending upon the test and analysis methods, a standard method has been established as technical guide by the Ministry of Construction and Lugeon tests are performed in an unified manner in accordance with this guide. However, since this also means that Lugeon tests are performed in an unified manner under any condition, the authors doubt the accuracy of these tests performed under some condition. Therefore, the authors investigated the accuracy of Lugeon tests performed under the following conditions by numerical analyses and field tests :

- (1) the investigation on the effect of the relaxation of surrounding foundation due to digging of borehole and the compression of that due to water injection,
- (2) the investigation on the effect of the rise of ground water level in surrounding foundation due to water injection,
- (3) the investigation on the effect of the position relation between the injection area and the ground water level, and the magnitude of suction of foundation (by steady seepage flow analysis),
- (4) the investigation on the effect of the position relation between the injection area and the ground water level, and the magnitude of suction and specific storage coefficient of foundation in case of the long-term Lugeon test (by unsteady seepage flow analysis),
- (5) the investigation on the Lugeon test performed in the deep part of weak rock foundation where the ground water level is very low.