

嘉瀬川ダムにおける風化岩盤の透水性評価及び 限界圧力の判定方法

大野 将嗣^{1*}・松本 佳之¹・永松 和彦²・山口 嘉一³・大江 和正⁴・加登住 誠⁵

¹国土交通省 九州地方整備局 嘉瀬川ダム工事事務所（〒849-0922 佐賀県佐賀市高木瀬東2-16-35）

²九州グラウト部会 座長（〒849-0922 佐賀県佐賀市高木瀬東2-16-35）

³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）

⁴八千代エンジニアリング株式会社 九州支店 河川・水工部（〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸2-1-5）

⁵八千代エンジニアリング株式会社 九州支店 環境部（〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸2-1-5）

*E-mail: oono-m8911@qsr.mlit.go.jp

嘉瀬川ダムの基礎岩盤は花崗岩質岩で構成され、その一部は風化の影響を受けている。その風化部は事前の試験等により、「高い透水性を示す箇所が点在する」「グラウチング改良効果が得難い」「限界圧力の発生頻度が高く、限界圧力が低い」という特徴を有することが確認できた。このような岩盤では、限界圧力の発生によりグラウチングの注入圧力が規制され所期の改良効果を得られない可能性があり、合理的な施工を行うためには、注入圧力の把握を高精度に行った透水試験を行い適切に岩盤の透水性状と限界圧力を把握し、限界圧力発生時の注入圧力設定について検討する必要があるが生じた。本論文では、これらの課題を踏まえて嘉瀬川ダムの風化部で実施した透水性評価及び限界圧力判定方法について考察する。

Key Words : weathered rock, permeability evaluation, critical pressure, granite, grouting

1. はじめに

嘉瀬川ダムのダムサイト周辺の基礎岩盤は花崗岩質岩からなり、設計段階の地質解析結果と施工段階の掘削面で確認した岩盤性状やボアホールスキャナやボーリングコアの再観察等の施工中の追加調査結果をもとに、透水性と遮水目的の改良性に着目し、①未風化透水帯（岩芯は未風化で硬質、割れ目沿いの一部に熱水変質粘土やマサを挟在する場合がある。）、②風化透水帯（風化の影響により岩芯まで褐色酸化や軟質化する風化部と、概ね未風化の風化残留核が混在する。）、③左岸変質帯（断層および断層周辺で熱水変質を強く被る。）の3つの“透水帯”に区分して基礎処理工を実施した。

設計段階におけるグラウチング試験及びコンソリデーショングラウチングの施工実績より、風化透水帯は未風化透水帯と比較して、①高い透水性を示す箇所が点在する、②グラウチングによる改良効果が得難い、③限界圧力の発生頻度が高く、限界圧力が低い。という特徴を有することが確認できた。そのため、このような岩盤では、限界圧力の発生により基礎岩盤への有害な影響（岩盤の変位や破壊）を与えないために、グラウチングの注入圧力を規制し低圧化して施工を進めるため所期の改良効果

を得られない可能性があり、合理的なグラウチングによる改良を行うには、注入圧力の把握を高精度に行った透水試験を行い適切に岩盤の透水性状と限界圧力を把握し、限界圧力発生時のグラウチングの注入圧力設定について検討する必要があるが生じた。

そこで、風化透水帯のカーテングラウチングの施工に先立ち実施した試験施工において、適切に透水性を把握することを目的に昇圧段階を細かく設定し、規定孔の最終次数孔で孔内圧力センサーを用いた孔内静水圧透水試験を行い、また、改良効果を高めることを目的に、透水試験結果より作成した P-Q 曲線における限界圧力判定に際して、他ダム事例では単位注入量が急増する点の折れ曲がり後の勾配を 10°～20°程度以上としていることに対し、嘉瀬川ダムでは 20°程度以上とし、20°未満においては規定圧力でグラウチングを行った。

本論文では、上記の風化透水帯における透水性評価及び限界圧力判定方法について考察する。

2. 嘉瀬川ダムの概要

嘉瀬川ダムは、一級河川嘉瀬川水系嘉瀬川の上流部、佐賀県佐賀市富士町に建設中の洪水調節、流水の正常な

機能の維持、かんがい用水、都市用水の供給、並びに発電を目的とした多目的ダムで、堤高約 97m、堤頂長約 460m の重力式コンクリートダムである。昭和 63 年に建設事業に着手後、平成 17 年 9 月に基礎掘削を開始し、平成 19 年 10 月から本体打設を行い平成 21 年 12 月に打設が完了した。基礎処理工においては平成 19 年 6 月より施工を開始し、平成 22 年 9 月で施工が完了した。

3. 嘉瀬川ダム基礎岩盤の透水帯区分

設計段階の地質解析結果と施工段階の掘削面で確認した岩盤性状や施工中の追加調査結果をもとに、基礎岩盤をその透水性と遮水目的の改良性に着目しての3つの”透水帯”に区分した(図-1)。

(1) 未風化透水帯

岩芯は未風化で硬質、割れ目沿いの一部に熱水変質粘土やマサを挟在する場合がある。透水性は2Lu以下が主体で、2～50Luが混在する。透水要因は高角度割れ目が主体であるが、低角度節理も透水要因となっている場合がある。岩級はCM級岩盤、CH級岩盤が主体であり、堤敷からリム部深部にかけて広く分布する。

未風化透水帯 (23BL-P001 孔)



写真-1 未風化透水帯の代表コア写真

(2) 左岸変質帯

左岸中位標高に分布し、断層および断層周辺で熱水変質を強く被る。山側は割れ目沿いおよび岩芯まで軟質化しているが、締まりは極めて良好である。川側は山側に比べ岩芯の軟質化の程度が低く、割れ目沿いには熱水変質粘土が厚く充填している。透水性は殆どが2Lu未満

であり、岩級はCL級岩盤、CM'級岩盤が主体である。

左岸変質帯 (10BL-P001 孔)



写真-2 左岸変質帯の代表コア写真

(3) 風化透水帯

風化の影響により岩芯まで褐色酸化や軟質化する風化部と、概ね未風化の風化残留核が混在する(写真-3)。右岸では殆どの割れ目で割れ目沿いにマサ化していることに対し、左岸では右岸に比べ割れ目沿いにマサ化している頻度が少ない。

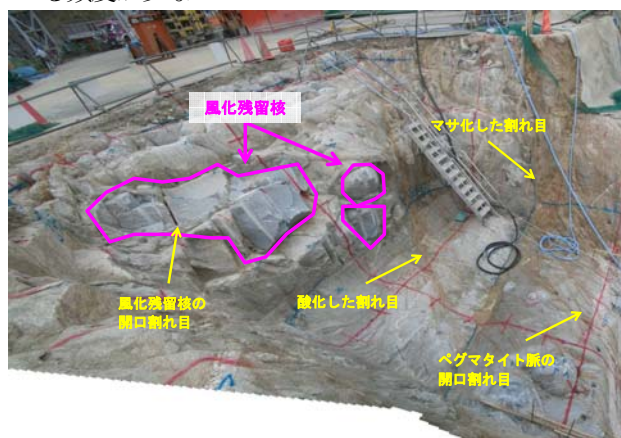


写真-3 右岸風化透水帯部の掘削面状況

透水性としては、左岸は10Lu以上の透水部を主体とする。右岸は2～5Luを主体とし、5Lu～20Lu以上が混在する。透水要因はペグマタイト脈(右岸のみ)や風化残留核に発達する開口気味の割れ目と、マサ化した割れ目や褐色酸化した割れ目である。また、右岸の風化透水帯のコア写真から、ペグマタイト脈や風化残留核の割れ目沿いにはセメントミルクが充填されているのが確認できるが、マサ化した箇所ではセメントミルクは確認されていない(写真-4)。岩級はCM'級岩盤が主体で、風化

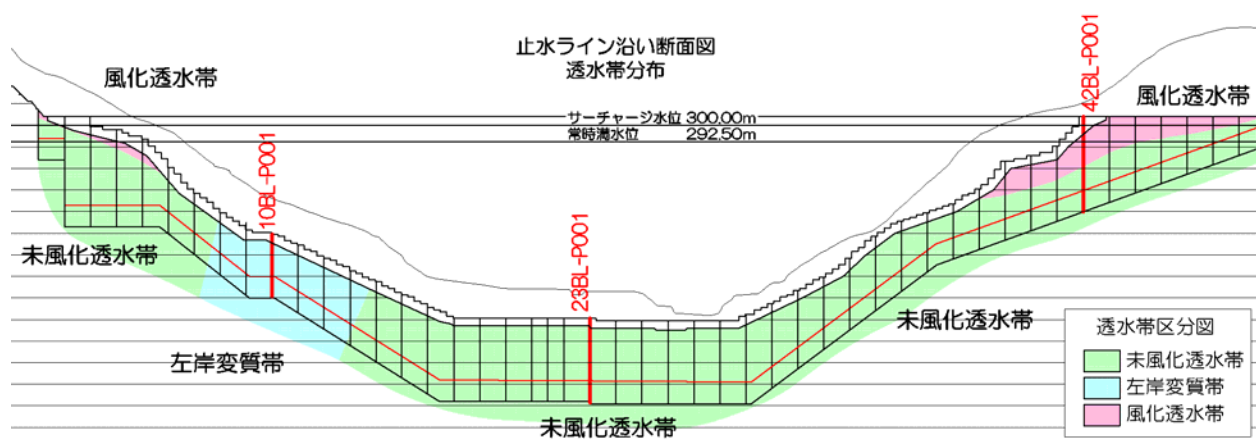


図-1 止水ライン沿い透水帯区分

残留核はCM級～CH級岩盤に区分され、左岸と右岸のアバットメント～リム部にかけて分布する。

風化透水帯 (42BL-P001 孔)



※写真中の紫色を呈する箇所は、セメントミルクのフェノールフタレインによるアルカリ反応

写真-4 風化透水帯の代表コア写真

4. 風化透水帯におけるグラウチング試験とコンソリデーショングラウチング

(1) グ라우チング試験

設計段階に実施したグラウチング試験結果について示す。グラウチング試験の実施箇所は図-2に示すように、右岸の堤体取付部付近である。

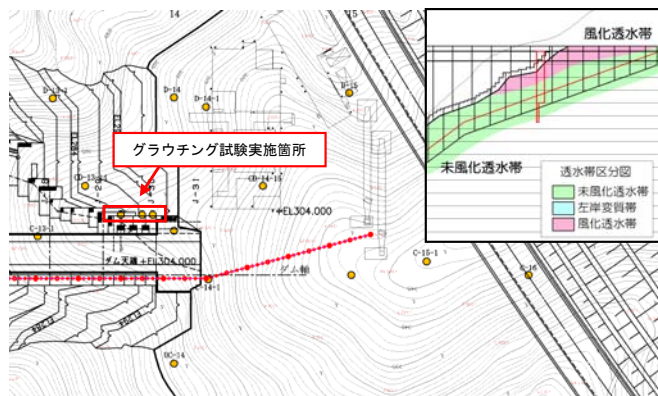


図-2 グ라우チング試験実施箇所

試験区間の施工実績を図-3に示す。試験結果より、ルジオン値は高次数になるにしたがい徐々に減少する傾向が確認できる(図-4)。但し、割れ目沿いにマサ化した部分については、5次孔(孔間隔 0.375m)においても5Luを超える箇所が残存しており中央内挿法による効果が得難いと考えられた。

また、特にマサ化した試験区間浅部(1～3st)においては、0.3MPa前後の比較的低压で限界圧力が発生していることから、注入圧力が規制されグラウチングの改良効果が得難く施工量の増大が懸念された(図-5)。

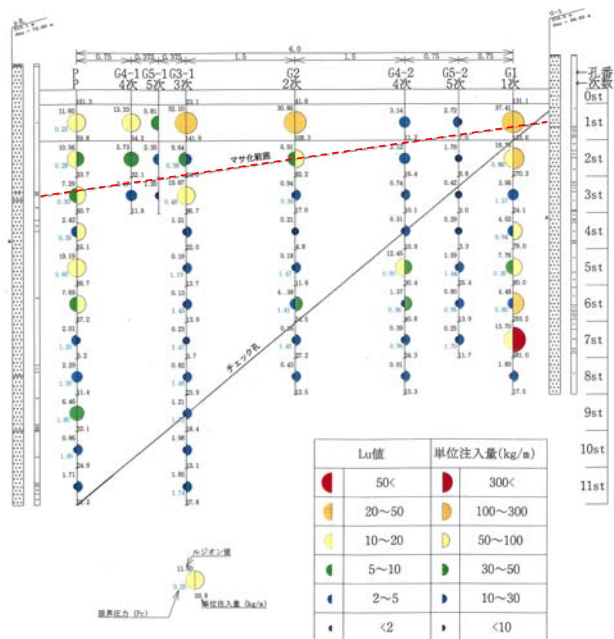


図-3 グ라우チング試験の施工実績図

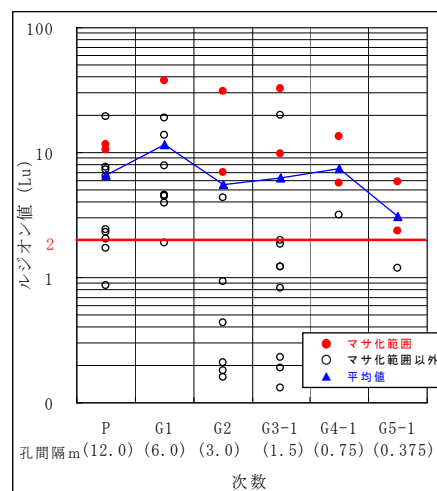


図-4 グ라우チング試験の改良状況

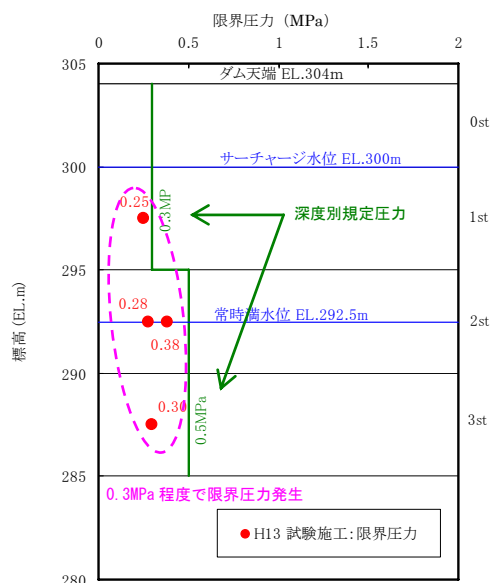


図-5 限界圧力の発生状況 (1～3st)

(2) コンソリデーショングラウチング

施工段階における右岸アバットメント部の遮水性改良目的のコンソリデーショングラウチング施工実績を図-6に示す。掘削面で確認した岩盤性状から概ね堤体28ブロック（BL-28）より右岸側がCL級を主体とした岩盤となっており、風化透水帯と区分した。

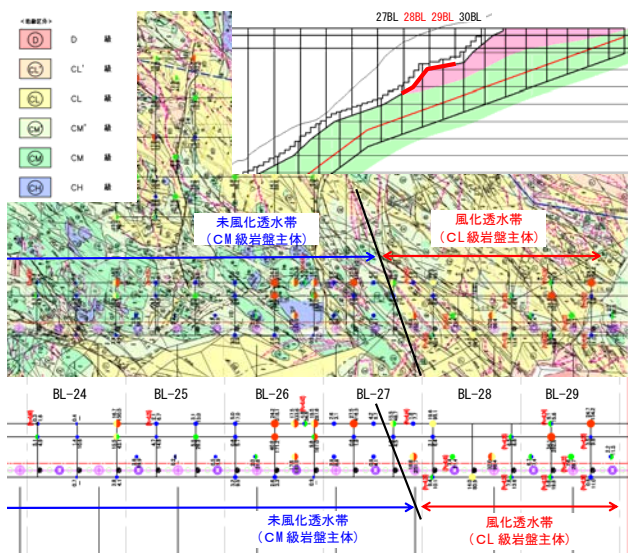


図-6 コンソリデーショングラウチングの施工実績

風化透水帯の改良前の透水特性を把握するために遮水性改良目的のコンソリデーショングラウチングの1～2次孔の施工実績を整理した結果、5Lu以上の中～高透水が約80%（11st/14st）を占めていることがわかった（図-7）。

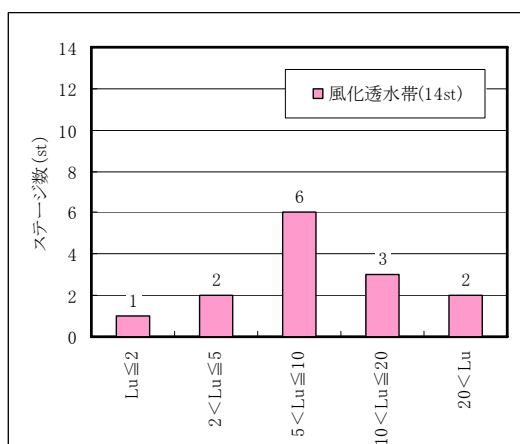


図-7 ルジオン値頻度分布

コンソリデーショングラウチングの施工は最大注入圧力0.5MPaで実施し、限界圧力が発生したステージは約60%（8st/14st）を占め、全てが0.3MPa以下となっている（図-8）。

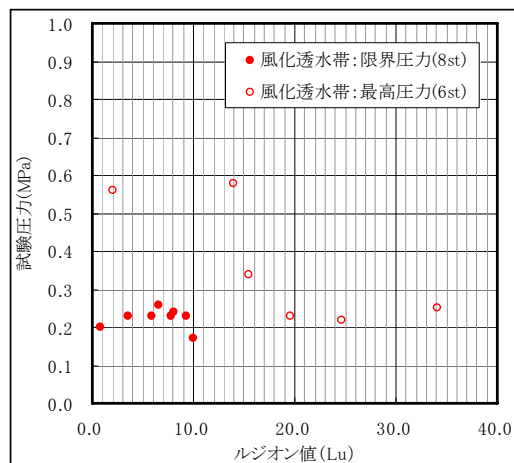


図-8 限界圧力の発生状況

5. 風化透水帯におけるカーテングラウチングの試験施工

(1) 試験施工概要

右岸高位標高部には、風化による影響で割れ目沿いにマサを挟在し、改良効果が得がたい透水部が存在することが設計段階のグラウト試験及び施工中のコンソリデーショングラウチングの施工結果から確認できた。

注入圧力を原位置で測定する透水試験を行い適切に岩盤の透水性状を把握するとともに、限界圧力発生時の注入圧力の設定について検討するため、図-9に示すカーテングラウチングブロック（41BL）において表-1に示す仕様でカーテングラウチングの試験施工を行った。

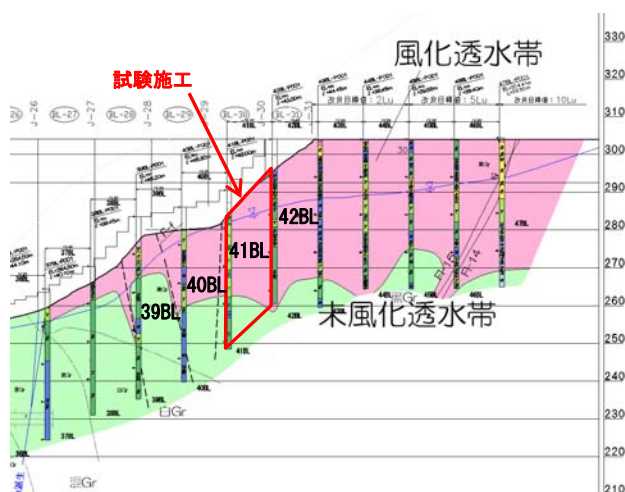


図-9 風化透水帯における試験施工実施箇所

表-1 風化透水帯での透水試験仕様

透水試験	透水試験－１（パイロット孔）												
	st	最高圧	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9		
	1	0.3	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.24	0.16	0.08		
	2～3	0.5	0.08	0.17	0.26	0.33	0.42	0.50	0.38	0.25	0.13		
	4～5	0.7	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.53	0.35	0.18		
	6～7	1.0	0.17	0.33	0.50	0.67	0.83	1.00	0.75	0.50	0.25		
	8以上	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.30	1.50	1.11	0.75	0.38		
	(MPa)												
	透水試験－２（４次孔）												
	st	最高圧	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9		
水押し試験	1	0.3	0.03	0.05	0.07	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.15		
	2～3	0.5	0.03	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.25		
	4～5	0.7	0.03	0.05	0.07	0.10	0.25	0.40	0.55	0.70	0.35		
	6～7	1.0	0.03	0.05	0.07	0.10	0.35	0.55	0.75	1.00	0.50		
	8以上	1.5	0.03	0.05	0.07	0.10	0.45	0.80	1.15	1.50	0.75		
	(MPa)												
	(注) 注速度：8L/min/min以下 (昇圧速度：0.05MPa/min以下)												
	・透水量の測定は、各圧力段階及び透水量が安定した後の10分間とする。												
	・湧水が見られる場合は圧力は、各圧力段階＋湧水圧力とする。												
	・孔内圧力センサーを使用して静水圧透水試験を実施する。												
水押し試験	透水試験－１（パイロット孔）												
	st	最高圧	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7				
	1	0.3	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.16				
	2～3	0.5	0.08	0.17	0.26	0.33	0.42	0.50	0.25				
	4～5	0.7	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.35				
	6～7	1.0	0.17	0.33	0.50	0.67	0.83	1.00	0.50				
	8以上	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.30	1.50	0.75				
	(MPa)												
	(注) 注速度：8L/min/min以下 (昇圧速度：0.05MPa/min以下)												
	・透水量の測定は、各圧力段階及び透水量が安定した後の5分間とする。												
	・湧水が見られる場合は圧力は、各圧力段階＋湧水圧力とする。												
	・4次孔では孔内圧力センサーを使用して静水圧透水試験を実施する。												

透水試験－１

透水試験－２

水押し試験

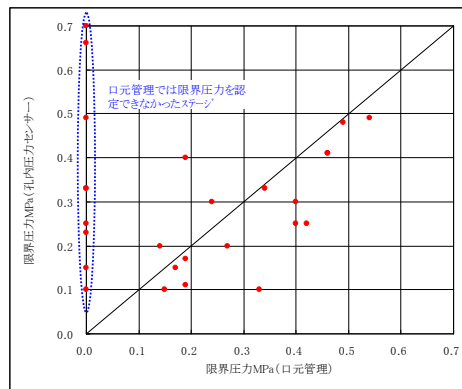


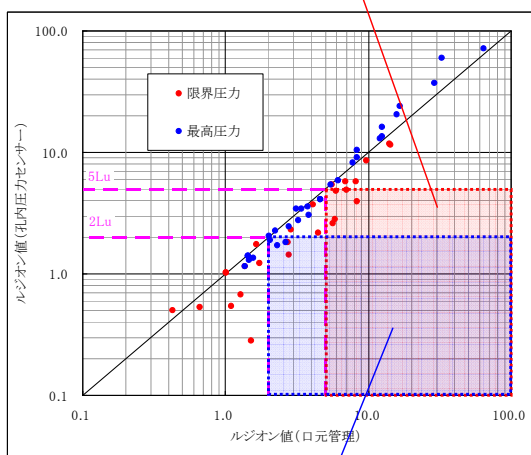
図-11 限界圧力の比較

孔内で圧力計測が行える孔内圧力センサーを用いた方が適切に岩盤の透水性状を把握できるが、実際の施工現場においては施工性やコストなどの観点から口元管理による施工を余儀なくされる場合がある。その際には昇圧段階を小刻みにして透水性状を把握する方法も有効であると考え、低圧で限界圧力が発生する岩盤の場合は、口元管理では限界圧力が把握できない可能性があるため透水試験方法の選定においては注意が必要である。

(2) 透水試験結果の考察

試験施工区間 (41BL) のパイロット孔(41BL-P001, 42BL-P001)及び規定最終次数孔である 4 次孔で得られたデータを基に、孔内圧力センサーによる測定値および口元圧力より算出した孔内有効圧力から換算したそれぞれのルジオン値の関係を図-10 に、限界圧力の関係を図-11 に示す。口元管理の場合、ルジオン値がやや高く評価される傾向にあり、その傾向は透水性が低いほど顕著である。また、口元管理では限界圧力を認定できなかったステージが 38%程度 (9st/24st) 確認された。

口元管理値 > 5Lu が孔内圧力センサーで 5Lu 以下となる範囲
5 ステージ (7.7% = 5st/65st)



口元管理 > 2Lu が孔内圧力センサーで 2Lu 以下となる範囲
5 ステージ (7.7% = 5st/65st)

※ 孔内圧力センサーでは限界圧力を認定しているが、口元管理では限界圧力を認定できないステージを含んでいる (9st)。

図-10 ルジオン値の比較

(3) 限界圧力判定及び限界圧力発生状況についての考察

風化透水帯は、常時満水位付近の高標高部に分布しており作用する水頭差が相対的に小さいこと、主体となる風化岩盤は粒子間の結合力が完全に消失した“マサ”ではないことから、ダムの貯水圧による浸透破壊の懸念はないと評価している。

その上で、適切な注入圧力でのグラウチングを実施すべく、P-Q 曲線の折れ曲がりを確認できるデータに対し、降圧時の流量変化と P-Q 曲線の折れ角との関係に着目して、P-Q 曲線で降圧時に昇圧時と同経路、あるいは近い経路を辿る（最高圧力時と原点を結ぶ直線より上側にプロットされる）ものをタイプ I、降圧時に直線的に原点へ戻る、あるいは流量を増加しながら原点に戻る（同直線より下側にプロットされる）ものをタイプ II に分類し、折れ角別の発生頻度を整理した (図-12)。

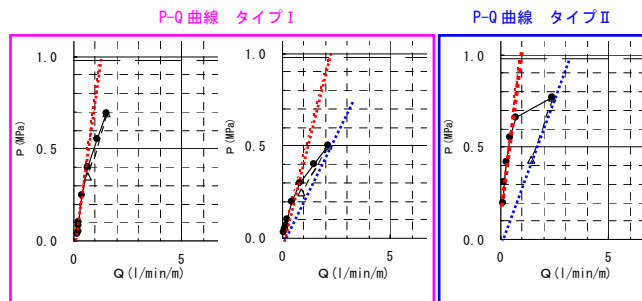


図-12 P-Q 曲線タイプ別パターン

図-13 に示すとおり、P-Q 曲線の折れ角が 20° 未満の場合は大半がタイプ I となることが確認できた。また、折れ角 20° 未満のステージの 95%は規定圧力程度まで昇圧できていたことから、改良効果が最大限得られる圧

力設定とするため規定圧力で注入した。

一方、折れ角 20° 以上の場合はタイプⅡが主体となっており、透水要因となる割れ目が塑性的に変化した可能性があると捉え、限界圧力を認定し、限界圧力に応じた圧力で注入することとした。

なお、折れ角の算出は複数の折れ点がある場合は、単位注入量が急増する点から最高圧力点を結ぶ直線となす角を採用している。

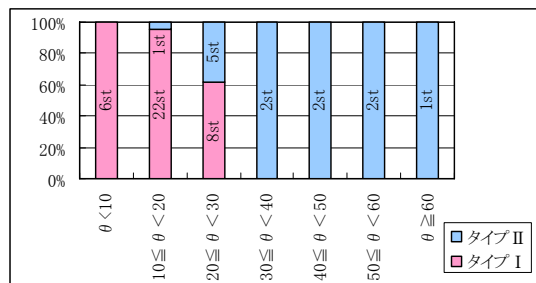


図-13 P-Q曲線タイプ別頻度状況

試験施工区間における次数別の限界圧力頻度分布を図-14に、深度別限界圧力発生状況を図-15に示す。

各次数とも限界圧力の発生頻度は概ね 40%前後（図-14）で、深部のステージにおいても低圧の限界圧力が発生している状況にあり、グラウト注入時に規定圧力まで昇圧できないことも所期の改良効果が得られ難い要因の一つと考えられる（図-15）。

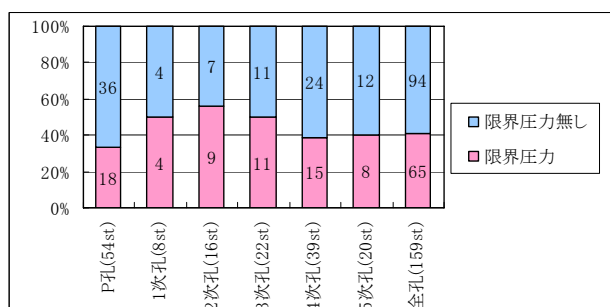


図-14 限界圧力の頻度分布

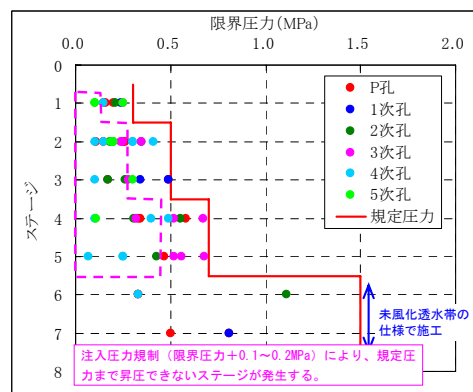


図-15 深度別の限界圧力発生状況

限界圧力発生時の注入圧力の設定については「限界圧力+0.1~0.2MPa」と規制された範囲で高圧側の「限界圧力+0.2MPa」で注入することにより、規定圧力による所期の注入効果に近づけるのではないかとと思われるが、高圧側で注入するにあたっては、P-Q曲線のパターンや岩盤性状を考慮したうえで、適切な限界圧力の判定を行う必要がある。

6. おわりに

花崗岩質岩盤における風化透水帯の試験施工の結果は次のとおりとなった。

- 1) 孔内圧力センサーを用いることで、口元圧力管理より精度良く透水性を評価できることを確認できたが、追加孔の要否の判断基準としてのルジオン値評価に影響を与える可能性は低いと考えられる。
- 2) 口元圧力管理では低圧での限界圧力を把握できない可能性がある。
- 3) P-Q曲線の折れ角が 20° 未満のステージを規定圧力まで昇圧して注入したことによる岩盤への悪影響、例えば、管理値を超える岩盤変位等は確認されなかった。

今回の試験結果が、基礎岩盤の安全性を確保しつつ改良効果を最大限引き出すための合理的なグラウティングの施工方法の検討の際に役立つことを期待したい。

EVALUATION OF PERMEABILITY AND CRITICAL PRESSURE OF WEATHERED GRANITE FOUNDATION AT KASEGAWADAM

Masashi OONO, Yoshiyuki MATSUMOTO, Kazuhiko NAGAMATSU, Yoshikazu YAMAGUCHI, Kazumasa OOE and Makoto KATOZUMI

The rock foundation at the Kasegawa Dam is composed of granite, and some part of the foundation is weathered. Therefore, we have difficulty in the improvement of water-tightness of the foundation. In order to perform an effective foundation grouting in these rock masses, we should properly evaluate the permeability and the critical pressure with the accurate permeability tests, and set an appropriate injection pressure during foundation grouting. We made test grouting in weathered zone at the Kasegawa Dam to investigate these technical issues. In this paper, we report the method and the results of the test grouting