

高水圧トンネルの周辺岩盤に対する グラウチングの効果判定について

篠原 淑郎*

1. ま え が き

最近の揚水発電の高揚程、大容量化に伴い、導水路、放水路トンネルの設計内圧は、従来のものに比して著しく大型化されつつある。しかも開発地点の枯渇により、これらを建設する場所が必ずしも地質の良好な所でないため、これらトンネル周辺の地盤改良が重要な課題となってきた。

グラウチングの設計ならびに施工は、従来から経験に依存する所が多く、経験者独自の判断にゆだねられてきた。これは、岩盤の地質条件が多様であり、グラウチングが目視できない所での問題であるため、定量的な把握、理論的分析が困難であり、常に応用動作を必要とするためと考えられる。

実際に、われわれが現場でグラウチングを実施するにあたって、最も頭を悩ますのは岩盤の改良度の判定と追加グラウチングの判定である。これについては、グラウチング前後の弾性係数を測定し、これにより岩盤の改良度を知り、十分に改良されていない部分に対して追加注入をすることが最も確実な方法である。しかしながら、グラウチング範囲全体の弾性試験を実施しながら、一方においてグラウト作業をすることは現場作業を過度に複雑化させるばかりではなく、工期の延伸の原因となる。このため、あらかじめ透水量と弾性係数の関係を求めておき、グラウチング完了範囲の任意の位置にテスト孔を削孔し、これの透水量より岩盤改良度を判定する方法が普通採用されている。この方法によれば、グラウチング作業と同一作業種目内の作業により、岩盤改良度を判定できるため便利であるが、広範なグラウチング範囲全域にテスト孔を削孔しなければならない。

筆者が建設を担当した沼原発電所放水路トンネルのグラウチングにおいては、グラウチング作業中に得られる各グラウト孔のセメント注入量と、グラウチング前にそ

の注入圧に等しい水圧で実施した透水量との関係が、その周辺岩盤の改良度と密接な関係があることに注目し、ここに提案しようとする一つの基準係数を設定し、これが基準を越えているか否かで岩盤の改良度をあらかじめ知り、追加グラウチング指示の基準とした。この方法でグラウチングを実施した後で、弾性波試験によりトンネル周辺岩盤の改良度を調査したが、その結果、岩盤は十分所定のものまで改良されていることを示している。

2. 設 計

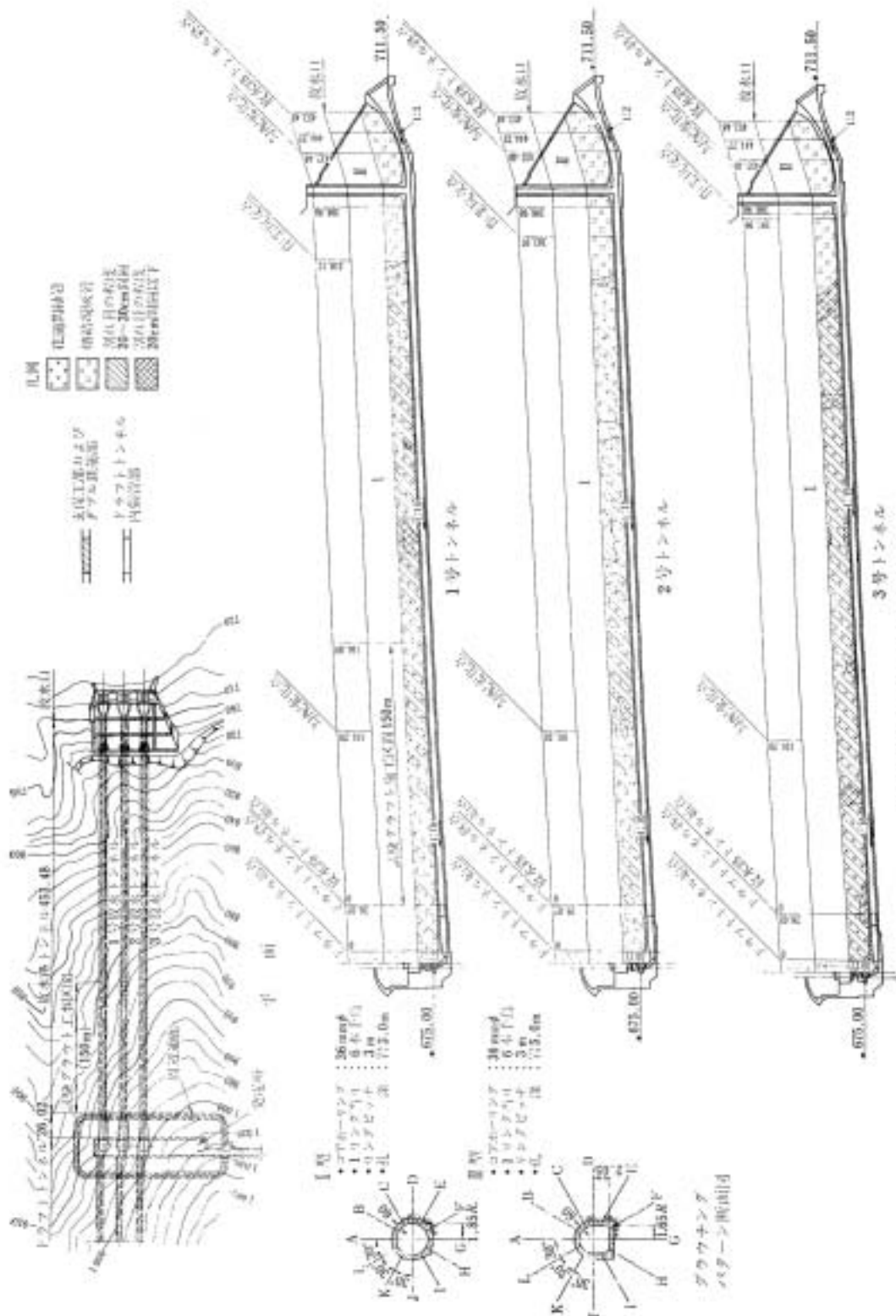
(1) 放水路トンネルの設計と地質

沼原発電所放水路は3本の高水圧トンネルからなり、1条あたり約500m、内径3.7mである。その設計静水圧は約9kg/cm²、水撃圧を加えた全設計水圧は13kg/cm²である。放水路トンネルはこの全設計水圧の約40%を岩盤に負担させ、残りの60%を巻立鉄筋コンクリートに負担させる設計とした。この巻立コンクリートの外側1mの範囲の周辺岩盤の弾性係数は40000kg/cm²となることが要求された。このため、トンネル周辺に実施するコンソリデーショングラウチングによって、周辺岩盤の弾性係数を改良する必要があるが生じた。

トンネル周辺の岩盤は、図-1に示すとおり大部分花崗閃緑岩からなり、地表に近い所に熔結凝灰岩が存在する。花崗閃緑岩は岩塊自体は非常に堅硬であるが、クラック、シームが発達しており、また、熔結凝灰岩は割れ目が少なく塊状であるが、局部的にかなり軟弱化している部分がある。

トンネル掘削前に実施した弾性波試験によれば、未攪乱状態のトンネル付近の弾性波速度は3.5~4.5km/secで、これは静弾性係数として40000kg/cm²以上を期待できるものである。したがって、このコンソリデーショングラウチングにおいては、トンネル掘削により生ずるトンネル周辺岩盤の応力解放によるゆるみ領域を、深部の基盤程度まで改良すればよいと考えられた。

* 正会員 電源開発(株)バンチャオネン工事事務所
所長代理



図一 取水用トンネル地質図

(2) 岩盤改良度の判定基準

一般にセメントグラウチングは、岩盤の割れ目にセメントミルクを圧入して割れ目を充填し、岩盤を水密なものとする同時に、岩盤にプレストレスを与えることにより岩盤の弾性係数を向上させようとするものである。この場合、セメント粒子はミルク内の水により割れ目の奥に運搬されるが、割れ目の抵抗により流速が低下し、この運搬力がなくなった所でセメント粒子が残留し水のみがさらに奥に流れていくものである。したがって、割れ目が大きく抵抗の小さいほど、また、注入圧の高いほどセメント粒子で充填される距離は延びる。注入圧が高くなれば運搬力が増加するだけでなく、岩盤内の割れ目を押し開いて大きくするため、セメント粒子の到達距離は大となりグラウト効果はよくなる。

これらは定性的にはわかるが、実際の割れ目の規模、粒度、空間的分布、岩盤の変形性等が一樣でなく、またセメントミルクの流れが液体としての流れのほかに、塑性体としての性質を帯びるため、その到達距離、すなわちグラウチングの有効範囲および岩盤の改良度を定量的に把握することが困難となる。このためグラウチングにより改良しようとする岩盤の割れ目の性状、およびセメントミルクがこの割れ目を充填する性状を表わす目安として次の係数に注目した。いま1本のグラウト孔のセメントミルクの注入量を C とし、注入前にミルク注入圧に等しい水圧で実施した透水試験から得た透水量を q とすれば、 $K=C/q$ は岩盤の改良度を判定する一つの基準と考える。すなわち、 K が小さい値を示す場合にはそのグラウト孔と交差する割れ目群は、透水性に比較してセメント粒子が運搬・固着され難く、したがって、グラウト圧力による岩盤中のシルトまたは粒土物質を圧縮または圧密する効果が少なく、また、微小な割れ目を接着させるとともに岩盤内にプレストレスを生じさせる可能性が少なくなる。反対に K が大きいということは一定の透水性のある岩盤に対して、セメント粒子が運搬・固着され易いことを示し、その周辺岩盤はグラウト効果のよいものであることを示すと考えられる。これを割れ

目の規模と空間的分布のみから見れば、一定の透水性に対し前者は比較的小規模の割れ目が数多く入っていることを示し、逆に後者は比較的大規模の割れ目が数少なく入っていることを示す。

したがって、この K 値とグラウチング後の岩盤の透水量との関係をあらかじめ求めておけば、一次グラウチング作業中に、実施後の透水量すなわち岩盤改良度をグラウチング範囲全体にわたって推測することができる。

従来、ややもすればミルク注入量の絶対値の大きいグラウト孔の周辺に追加グラウチングをする傾向があったが、筆者の考えでは、 K がある規準値以下の場合、すなわちミルク注入量の比較的少ないグラウト孔の周辺に一次グラウチングの注入圧より高い圧力で追加グラウチングを実施する必要がある。この場合、一次グラウト孔の透水量が目標透水量より少ない場合は、当然追加グラウチングをする必要はない。

この追加グラウチングの判定に使用する K の規準値については、本格的なグラウチングをする前に相当量まとまった範囲について試験グラウチングを行って定め、それに従ってグラウチング作業をするが、その過程においても、常にデータを観測しながら、順次基準値を改正していく方がよい結果を得られる。

試験グラウチングについては局部的に小数のグラウト孔によるものは不正確であり、したがって、ある範囲まとめて行わなければ、適正な結果を得ることが困難である。今回の放水路トンネルグラウチングについては、トンネル延長の約 10% にあたる 150 m 区間について試験グラウチングを行い、その一次グラウト孔の中間に任意にテスト孔を削孔して、その透水試験の結果より後述のような規準値を定めた。

(3) グ라우チングの設計

前述の放水路トンネルの設計より、放水路トンネル周辺の岩盤の弾性係数は $40\,000\text{ kg/cm}^2$ 以上となることが要求されたので、これに応ずるグラウチング後の透水量を次のように定めた。透水量と岩盤の弾性波速度の関係は、吉田勝英博士が田子倉ダムで求められており(図-3 参照)、これに従ってコンソリデーショングラウチングの完了基準を定めた。

この放水路トンネルについて求めた弾性波速度と平均透水量の関係は図-4 に示すとおりである。この平均透水量は長さ 3.0 m のボーリング孔について注入水圧 10 kg/cm^2 で実施した透水試験により得たものである。これより所要の弾性係数を期待するためには、その付近の岩盤の透水量は 9 l/min 以下となることが必要である。したがって、ここではグラウト孔が 3 m であることから、目標透水量を 3 l/min/m とした。

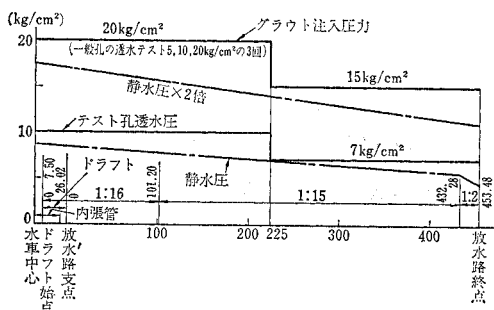


図-2 注入圧力および透水試験圧力

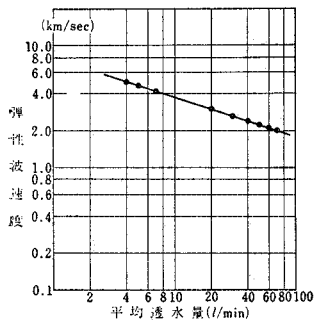


図-3 平均透水量と弾性波速度
(田子倉ダム)

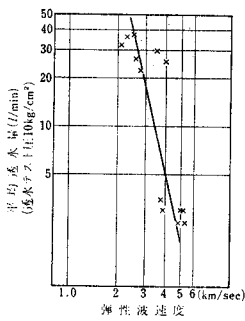


図-4 平均透水量と弾性波速度
(放水路トンネル)

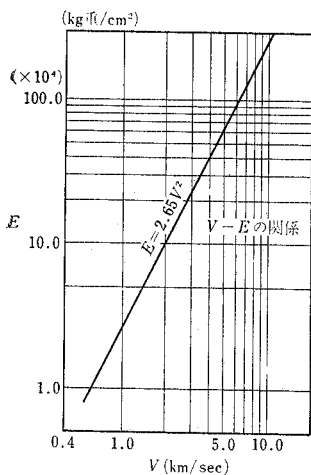


図-5 弾性波速度—動弾性係数

一方、弾性波試験から得たトンネル周辺岩盤のゆるみ領域の範囲と、その範囲内および基盤の弾性波速度は表-4に示すとおりである。ゆるみ領域の範囲については、これがトンネル側壁立上がり部におけるものであるため小さく出ているが、天端付近ではこれの2～3倍になると推測される。また、基盤の弾性波速度は熔結凝灰岩で3.5 km/sec、花崗閃緑岩で4.5 km/sec以上であるから、このコンソリデーショングラウチングにおいては、ゆるみ領域内の岩盤を基盤程度に改良すればよいと考えられた。したがって、この目的を達成するために注入圧および注入パターンを次のように定めた。注入圧は図-2に示すとおり、トンネル部分に加わる静水圧の2倍をとることとし、テスト孔における透水試験の水圧は、静水圧に等しくした。注入パターンは図-1に示すように、1断面6本を交互に30°ずらすこととした。岩盤削孔長は3.0 m、リング間隔は3.0 mとした。なお、ゲート立坑付近については、岩盤の性状、構造物

の配置状況を考慮して削孔長を5.0 mとした。

3. 試験グラウチングと岩盤改良判定基準の設定

(1) 試験グラウチング

試験グラウチングは、図-1に示すように1号放水路トンネルの発電所側150 m区間について実施した。全グラウト孔の本数は294本で、平均セメント注入量は、470 kg/mとかなり大きい値を示した。

グラウチング完了後、各リングの中間に49本のテスト孔を削孔し、これについて10 kg/cm²の水圧で透水試験を行い、岩盤改良度を検討した。試験グラウチングの実績は表-1に示すとおりである。

(2) 岩盤判定基準の設定

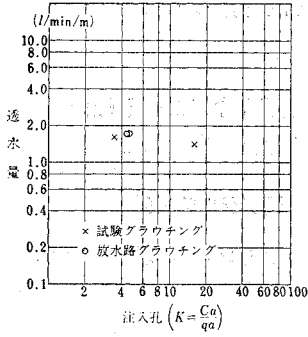
この試験グラウチングの結果は次のようにして注入効果判定に供した。すなわち、テスト孔に隣接するリングの注入孔のうち、テスト孔に最も近い各2本ずつをとりこれらの平均セメント注入量 C_a kg/mと、注入圧と等しい水圧で実施した透水試験より得た平均透水量 q_a l/min/mをテスト孔位置における岩盤の C および q として K を求め、これとテスト孔の透水量 q_t とを比較することとした。

この場合、 K と q_t との関係で同一の K に対しては、 C_a が小になれば q_t も小になることから、セメント注入量別に資料を整理することとした。その注入量の範囲は、 $C_a=0\sim 125$ kg/m、 $C_a=126\sim 175$ kg/m、 $C_a=176\sim 225$ kg/m、 $C_a=226\sim 275$ kg/m、および $C_a > 276$ kg/mの5範囲とした。これらについて K と q_t の関係を示すと図-6～10に示すとおりである。

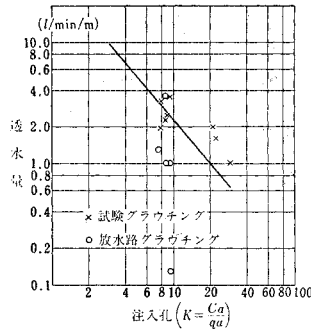
この結果から q_t が3 l/min/m以下になる範囲は、前述の5範囲について、 $C_a < 125$ kg/mを徐き、それぞれ $K > 8$ 、 $K > 12$ 、 $K > 16$ 、 $K > 20$ である。 $C_a < 125$ kg/mの場合は、 K の値にかかわらず $q_t < 3$ l/min/mとなっているので、これについて追加注入の必要はなく、他の4範囲については、それぞれここに設定し

表-1 試験グラウチング実績

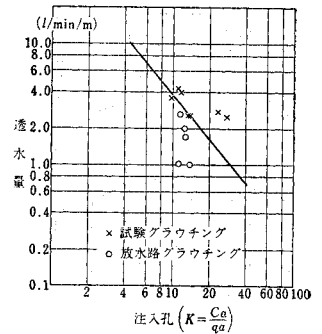
ゾーン	グラウト形式 (mm)	施工本数 (本)	ボーリング			岩盤注入 (m)	使用セメント		摘要
			コンクリート (m)	岩盤 (m)	計 (m)		注入 (kg)	m当り注入 (kg/m)	
一般孔	36	294	211.0	1029.0	1240.0	1029.0	484028	470.4	施工トンネル長1号トンネル150m間
T D 孔	36	16	10.7	96.0	106.7	96.0	185325	1930.4	
テスト孔	36	12	14.6	69.4	84.0	69.4	3155	45.4	
追加孔	36	37	24.8	129.5	154.3	129.5	5557	42.9	
計		359	261.1	1323.9	1585.0	1323.9	678065	512.2	



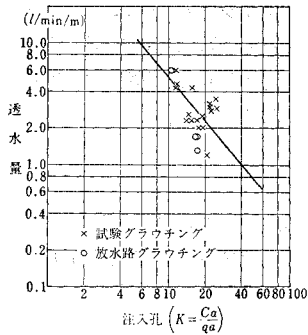
(セメント注入量 125 kg/m 以下)
図-6 追加注入基準 (1)



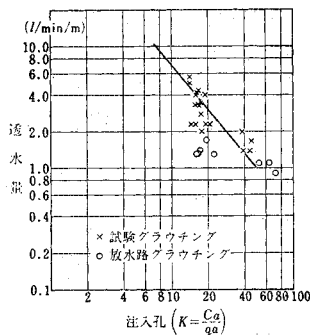
(セメント注入量 126~175 kg/m)
図-7 追加注入基準 (2)



(セメント注入量 176~225 kg/m)
図-8 追加注入基準 (3)



(セメント注入量 226~275 kg/m)
図-9 追加注入基準 (4)



(セメント注入量 275 kg/m 以上)
図-10 追加注入基準 (5)

4. グラウチングの施工実績と比較

(1) 施工実績

注入実績は表-2,3に示すとおりである。なお、追加孔の検討は、トンネル中心を原点として、水平、垂直の直交座標軸を考え、隣接する2リングの注入孔の各象限に含まれるものの平均セメント注入量 C_a と平均透水量 q_a をそれぞれの象限内の岩盤の C 、および q として K

が基準値以下となった場合に追加注入をすることとした。

を求めた。追加孔は2リングの中央にリングに平行に、また、 K 値の近い側に水平に対し、 30° 、 45° 、および 60°

表-2 ボーリング グラウチング実績 (その1)

ゾーン	グラウト形式 (mm)	施工本数 (本)	ボーリング			岩盤 注 入 (m)	使用セメント		備 考
			コンクリート (m)	岩盤 (m)	計 (m)		注 入 (kg)	m当り注入 (kg/m)	
【1号】									
一般孔	36	597	470.0	2019.0	2489.0	2019.0	435762	215	施工トンネル長 305.9 m
細砂混入	36	8	5.5	24.0	29.5	24.0	C 36 624 S 9 518		
湧水処理孔	36	14	9.6	14.0	23.6	14.0	(C+S) (46142)	1922	
追加孔	36	136	97.7	454.3	552.0	454.3	3488	249	うち再追加孔 7 本
計		755	582.8	2511.3	3094.1	2511.3	15341	33	
【2号】									
一般孔	36	900	777.5	2970.6	3748.1	2970.6	500733	199	施工トンネル長 455.9 m
細砂混入	36	10	7.1	32.0	39.1	32.0	C 26 133 S 1 801		
湧水処理孔	36	17	12.2	17.0	29.2	17.0	(C+S) (27914)	872	
追加孔	36	295	235.7	921.0	1156.7	921.0	222	13	うち再追加孔 4 本
計		1222	1032.5	3940.6	4973.1	3940.6	23787	25	
【3号】									
一般孔	36	875	705.2	2887.0	3592.2	2887.0	584301	148	施工トンネル長 455.9 m
細砂混入	36	33	22.6	99.0	121.6	99.0	C 96 806 S 13 321		
湧水処理孔	36	38	34.3	38.0	72.3	38.0	(C+S) (110127)	1112	
追加孔	36	240	175.7	756.0	931.7	756.0	1438	37	うち再追加孔 3 本
テスト孔	56	9	6.7	25.0	31.7	25.0	254	10	
計		1195	944.5	3805.0	4749.5	3805.0	669113	175	

表-3 ボーリング グラウチング実績 (その2)

ゾ ーン	グラウト 形 式 (mm)	施工本数 (本)	ボ ー リ ン グ			岩 注 入 盤 長 (m)	使用セメント		備 考
			コンクリ ート(m)	岩 盤 (m)	計 (m)		注 入 (kg)	m当り注入 (kg/m)	
一 般 孔	36	2372	1952.7	7876.6	9829.3	7876.6	1500078	190	(C+S=184 183 kg) S/C=15.4%
細 砂 混 入	36	51	35.2	155.0	190.2	155.0	C159 543 S 24 640	1188	
湧 水 処 理 孔	36	69	56.1	69.0	125.1	69.0	5148	74	
追 加 孔	36	671	509.1	2131.3	2640.4	2131.3	64 484	30	
テ ス ト 孔	56	9	6.7	25.0	31.7	25.0	254	10	
計		3172	2559.8	10256.9	12816.7	10256.9	C1729 507 S 24 640	171.0	施工トンネル長 1367.7 m

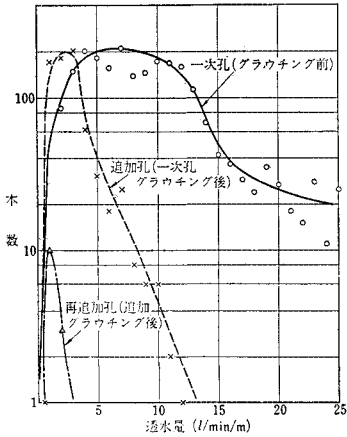


図-11 グラウチング前後の岩盤透水量の変化 (1)

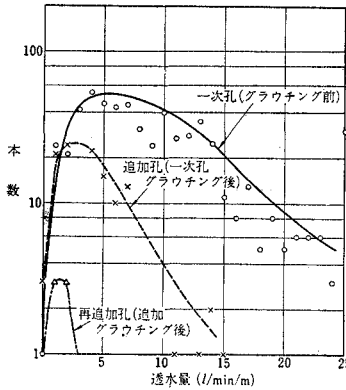


図-12 グラウチング前後の岩盤透水量の変化 (2)

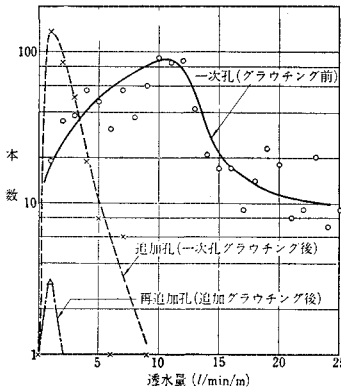


図-13 グラウチング前後の岩盤透水量の変化 (3)

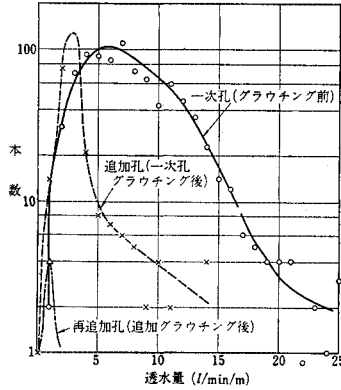


図-14 グラウチング前後の岩盤透水量の変化 (4)

の方向に削孔注入することとした。K 値が基準値に近い場合は座標軸を 45° ずらして再検討した追加孔についても K が基準値に達しないときは、さらに再追加注入をすることとした。再追加孔は全部で 14 孔あった。

(2) 注入効果

放水路トンネルのグラウチング前後の透水量を示せば図-11~14 に示すとおりである。実線は一次孔のグラウチング前の透水量の分布で、これはトンネル周辺岩盤

の透水量は、大半が 3~13 l/min/m であることを示している。破線は再追加注入前、すなわち一次孔注入完了時の透水量を表わし、これによれば一次孔のグラウチングの結果、大部分の岩盤の透水量は 5 l/min/m 以下に改良されていることがわかる。1 点鎖線は追加注入後の透水量で、これによるとすべての岩盤は目標透水量である 3 l/min/m 以下になっていることを示している。

このトンネルグラウチングの実施前後における弾性波試験結果を示せば表-4 のとおりである。これはグラウチング前にあったゆるみ領域は消滅し、すべての岩盤が目標弾性係数の 40 000 kg/cm² 以上に改良されていることを示し、このグラウチングの所期の目標は達成されたということが出来る。

5. あとがき

以上に、筆者が工事を担当した沼原発電所放水路トンネルグラウチングにおける岩盤改良の判定と追加注入の検討方法を述べた。

これは、まだ未完成のものであ

り、その基本的な考え方についても独善的すぎることもあるが、今後グラウチング工事を担当される各位にやさかでも参考になればと思い、菲才を省みずデータとともにまとめてみた次第である。

筆者が現在コンサルタントとして工事を担当している、タイ国バンチャオネンダムは大規模なグラウチング工事を必要とするもので、現在、今まで実施した試験グラウチングの結果をまとめ、グラウチング工事施工基準を作成中である。これについても、ここで述べた方法に

表-4 グラウチング前後の弾性波速度

測点	地質	支保工	グラウチング前						グラウチング後		
			ゆるみ層				合計厚 (m)	基盤の速度 (km/sec)	ゆるみ層	速度 (km/sec)	
			第1層		第2層						
			厚さ (m)	速度 (km/sec)	厚さ (m)	速度 (km/sec)					
2号-1	花崗閃緑岩	有	0.4	1.2	—	—	0.4	5.0	—	—	
2号-2	花崗閃緑岩	有	0.3	0.85	1.2	1.6	1.5	5.0	—	—	
3号-1	熔結凝灰岩	有	1.3	0.7	3.2	1.3	4.5	3.5	0	3.5	
3号-2	熔結凝灰岩	有	0.3	1.2	1.1	1.7	1.4	3.8	0	3.3	
3号-3	花崗閃緑岩	無	0.1	2.2	0.5	2.6	0.6	4.6	0	5.0	
3号-4	花崗閃緑岩	有	0.2	1.3	0.9	1.7	1.1	4.8	0	4.1	
3号-5	花崗閃緑岩	有	0.3	0.8	1.2	2.0	1.5	4.9	0	3.9	
3号-6	花崗閃緑岩	有	0.7	2.8	—	—	0.7	4.7	0	5.0	
3号-7	花崗閃緑岩	無	0.4	0.6	—	—	0.4	4.5	0	5.3	
3号-8	花崗閃緑岩	無	0.7	1.0	—	—	0.7	4.9	0	4.8	

よる基準作成が可能であり、十分なグラウト効果を得る といっている次第である。
ものと確信している。その結果については後日発表した

(1974.5.15・受付)

ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針

A 5・78 900 円 会員特価 800 円 (〒 140 円)

ダム基礎岩盤グラウチングの施工実例集

A 4・348 13 000 円 (〒 400 円)

●土木学会創立60周年記念出版

日本の土木地理 ●新刊

=国土への理解と認識のために

土木学会編

A 5判・456頁 3200円

本書は、土木学会創立60周年の記念事業の一環として企画されたもので、土木事業が強い影響を与え、そして受けている地形・気候・土壌、または都市、さらには産業・交通などの交通とのかかわりを、土木事業を主題とした地理学的方法をもって把握し、“土木とは何か”を明らかにする。

目次＝土木地理学の成立／地形と土木構造物／気候との対応／土壌の特性とその対策／土地利用の食糧生産／エネルギー獲得の地理的条件／海岸線と商工業港／国土と交通／都市／災害対策／付録・諸表。

技術者の夢

●既刊

W.リイ／猪瀬寧雄訳

B 6判・232頁 900円

たんなる空想ではなく、プランとして科学的に十分な根拠をもち、しかも実現可能なプランで世界的なレベルの新しい自然の利用と自然の改造とを壮大に述べ、読者をあきさせることなく興味深く話を展開する。



森北出版

東京神田小川町3の10
電話03-292-2601 代
振替東京34757