

(45) 圧力トンネル周辺岩盤のグラウチング前後の変化について

中部電力(株) 土木建築部 正会員 西川 力
同 上 正会員 土山茂希
(株) 間 組 技術研究所 正会員 ○蓮井昭則

Study on Effect of Grouting on Pressure Tunnel

Tsutomu NISHIKAWA, Chubu Electric Power Co.,INC.
Shigeki TSUCHIYAMA, Chubu Electric Power Co.,INC.
Akinori HASUI, HAZAMA-Corporation

Abstract

In order to evaluate the grouting effect around the pressure tunnel, borehole loading tests and crosshole seismic measurements were carried out before and after the grouting. The changes of the mechanical properties of the rock mass were investigated. In the result, it was observed that deformation coefficient and seismic velocity of the rock mass increased where grout material had been penetrated. It was also clarified that the rock mass was not uniformly improved while the limited portion showed the effect of the grouting.

1. まえがき

水力発電所の圧力トンネルは一般に内水圧に対する岩盤負担を期待して、トンネル周辺岩盤にグラウチングを実施している。しかし、その効果の判定については主としてグラウト材の注入量や透水性（ルジオン値）で判断しており、コンソリデーショングラウチングのような岩盤の力学的特性を改善する目的のグラウチングに対しては不明確な部分が多い。

筆者らは赤石発電所に伴う圧力トンネルの建設時において、グラウチングによりトンネル周辺岩盤が受ける変化を把握するために、トンネル内に調査断面を設けてグラウチングの前後で孔内载荷試験と孔間弾性波測定を実施した。この結果について報告する。

2. 調査概要

2.1 地質状況および調査断面

圧力トンネルは内径 3.6m の円形断面を有し、設計覆工コンクリート厚 30cm の馬蹄形で、発破掘削を用いた NATM 工法で施工された。調査断面は水力発電所の調圧水槽から上流側約 50m の圧力トンネル内に設けた。図-1 に調査断面付近の状況と周辺岩盤の地質を示す。地質は砂岩を主体とした砂岩とけつ岩の互層で構成される CM 級岩盤

で、亀裂は比較的多いが亀裂面の風化は少なく岩石としては硬質であった。同様な地質の発電所地点の砂岩の岩石コアによる結果では、一軸圧縮強度が 1200~3200kgf/cm²、静弾性係数約 700000kgf/cm²、P 波

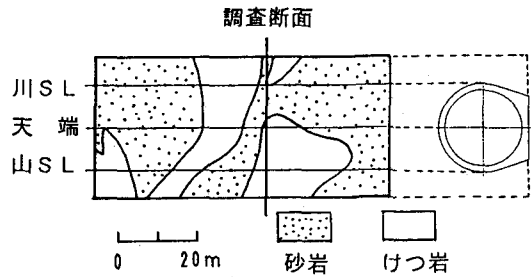


図-1 調査断面付近の地質

速度約 6.3km/sであった。また、湧水はトンネル全体では数ヶ所でみられるものの、調査断面付近ではほとんどなかった。

2. 2 グラウチング計画

グラウチングは、覆工コンクリート背面と岩盤の間の空隙を充填し密着させるコンタクトグラウチング（低圧グラウトと呼ぶ）と、周辺岩盤の力学特性の改良を主目的とするコンソリデーショングラウチング（高圧グラウトと呼ぶ）の2種類を実施した。図-2にグラウチング計画を示すが、低圧グラウトはトンネル覆工の天端部からトンネル延長方向に6m間隔で、高圧グラウトはグラウト孔の配置が異なるA組とB組を3m間隔で交互に計画された。

2. 3 調査方法

グラウチングと調査断面の位置関係を図-3に示すが、調査断面は高圧グラウトの第2断面（B組）と第3断面（A組）の中間位置に設けた。覆工コンクリート打設後、調査断面の天端、底盤と左右のスプリングラインの4方向に放射状に岩盤内孔長4mのボーリング孔（ $\Phi 66\text{mm}$ ）を穿孔し、これを用いて孔内載荷試験を実施した。また、そのボーリング孔に孔間距離1mで平行にボーリング孔を穿孔し、トンネル軸方向に沿った孔間弾性波測定を実施した。

孔内載荷試験は孔内載荷試験装置（エラストメータ200、応用地質製）を使用し、載荷速度は毎分2 kgf/cm^2 で1段5 kgf/cm^2 増加の最大20 kgf/cm^2 の階段載荷とした。試験位置は岩盤表面から深さ0.5、1、3m、さらに天端部では1.5、2、4mの位置を追加した。

一方、孔間弾性波測定は測定装置としてハザマ式孔間弾性波探査システムを使用し、発振装置と受振装置を同じ深さに設置する方法（平行測線）とした。測定位置は深さ0.5から2mまでは25cm間隔、2mから4mまでは50cm間隔である。

調査の時期は低圧グラウト1週間前と高圧グラウト約2週間後で、同じボーリング孔の同じ位置で実施した。また、ボーリング孔口からグラウト材が流入するのを防止するために孔口にはパッカーを設置し、グラウチング終了後には孔内の水洗いを行った。

3. 測定結果

3. 1 グラウチング注入実績

グラウチングは低圧グラウト、高圧グラウトとも下流側より順次実施された。低圧グラウトは図-3の第1断面（調査断面より下流側約5m）で3000

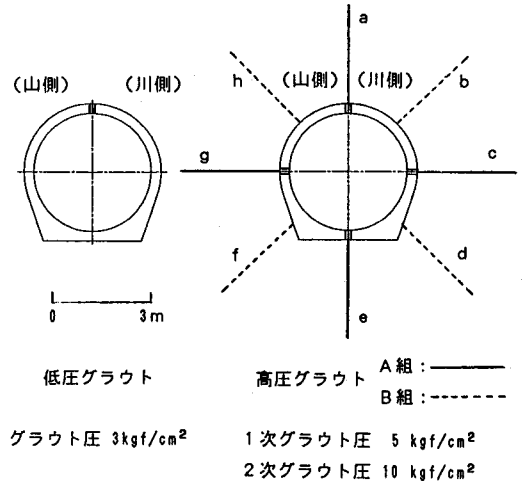


図-2 グラウチング計画

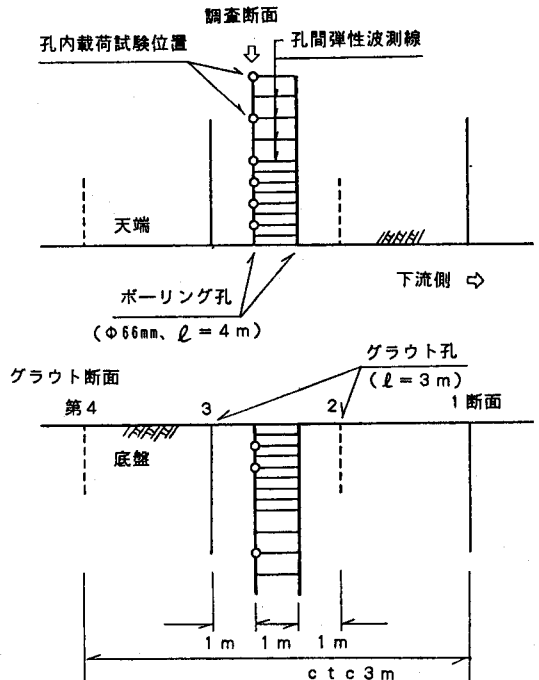


図-3 調査断面とグラウト断面

近いグラウト材が注入された。一方、高圧グラウトでは第1断面のc孔で470φ、第2断面（下流側2m）のb孔で100φ、第3断面（上流側1m）のg孔で70φがそれぞれ注入された。しかし、第1断面から第4断面間のその他のグラウト孔ではほとんど注入できなかった。

3.2 孔内載荷試験

グラウチング前とグラウチング後での変形係数の分布状況を図-4に示す。試験結果の全平均でみると、変形係数はグラウチング前では17000kgf/cm²からグラウチング後には29000kgf/cm²と増加している。天端部では岩盤表面から深さ1mでグラウチング前に比べてグラウチング後に変形係数が大きく増加し、深さ3m付近でも増加がみられる。山側スプリングライン部（山S L部）と川側スプリングライン部（川S L部）では全試験位置で増加しているが、底盤部ではほとんど変化がみられない。

3.3 孔間弾性波測定

(1) P波速度

グラウチング前と後でのP波速度の分布状況を図-5に示す。P波速度を全平均でみると、グラウチング前の平均P波速度は4200m/s、グラウチング後は4100m/sであった。また、天端部ではグラウチング前に深さ2.5~4mに2000m/s前後の低速度帯がみられる。グラウチング前後の変化では天端部の深さ2.5~3m付近で増加しているが、逆に底盤部と山S L部の岩盤表面から深さ1.5m間では低下している部分が見られる。

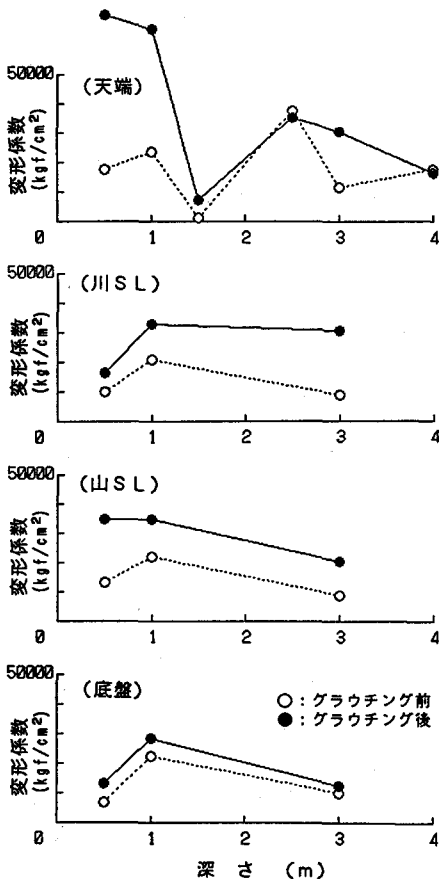


図-4 変形係数の分布

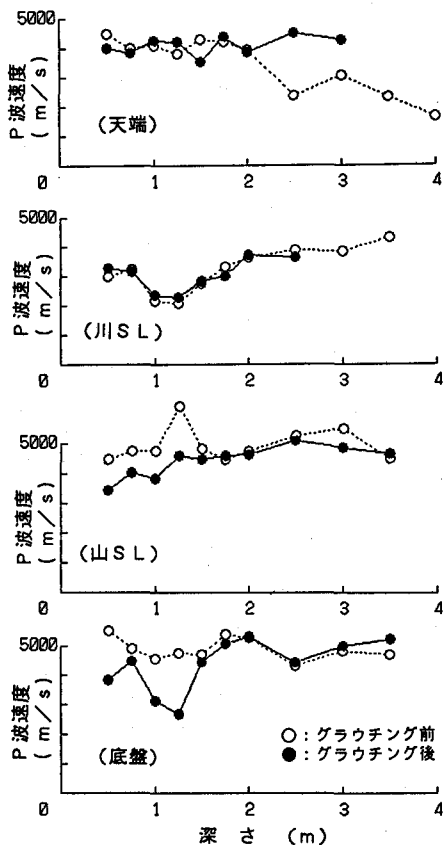


図-5 P波速度の分布

(2) P波初動振幅

振幅の測定結果は発振波動の大きさ (A_0)、受振波動の大きさ (A)、および発振点と受振点の距離 (L) を用い、 $A = A_0 \exp(-L\alpha)$ で表わされる減衰定数 (α) で整理した。

グラウチング前と後でのP波初動振幅の減衰定数分布状況を図-6に示す。天端部ではグラウチング前に深さ3.5m付近で振幅減衰の激しい部分が見られる。しかし、グラウチング前後での変化はほとんどないと思われる。

4. 考察

4.1 ゆるみ領域

ゆるみ領域はグラウチング前のP波速度の分布状況から天端部とそれ以外の3方向(山SL、川SL部、底盤部)の2つに分けて推定した。

(1) 天端部

図-5に示したように、天端部では岩盤表面から深さ2.5mまではP波速度が4000m/s程度の部分が続いているが、深さ2.5~4mでは2000m/s程度の低速度帯がある。ボーリングコアの観察でみると、この付近は亀裂頻度2.5本/m(RQDが80以上)の新鮮な砂岩で占められており、亀裂面に風化はなく断層やそれに類似した弱層の存在も認められない。したがって、この低速度帯はトンネルの掘削によって開口した亀裂が生じたことに起因していると考えられ、天端部のゆるみ領域は深さ4m程度にまで及んでいると思われる。

(2) 底盤部とスプリングライン部

グラウチング前のP波速度を基にすると、川SL部では岩盤表面から深さ1.75m付近までがゆるみ領域と推定することができる。

一方、山SL部と底盤部ではグラウチング前は低速度域が見られないが、グラウチング後に岩盤表面から深さ1.5m付近の間でP波速度の低下はみられる。他の地下発電所空洞の掘削に伴った側壁岩盤の弾性波伝播諸特性の測定では掘削の進展とともにP波速度が低下するが、ベンチ通過後もP波速度が低下している例が報告されている。同様のことが本トンネルでも生じていると考えれば、グラウチング後に測定したP波速度を用いてゆるみ領域を推定できる。

川SL部ではグラウチング前のP波速度を、山SL部と底盤部ではグラウチング後のP波速度を用いて整理した3方向の平均値の分布状況を図-7に示す。図より、平均値表示ではあるが深さ1.75m以深では4500m/s前後、深さ1.5m以浅では3000~3900m/sの低速度帯になっていることが分かる。したがって、4500m/s前後が掘削前のP波速度とすると掘削によって10%~30%の速度低下が掘削によって生じており、

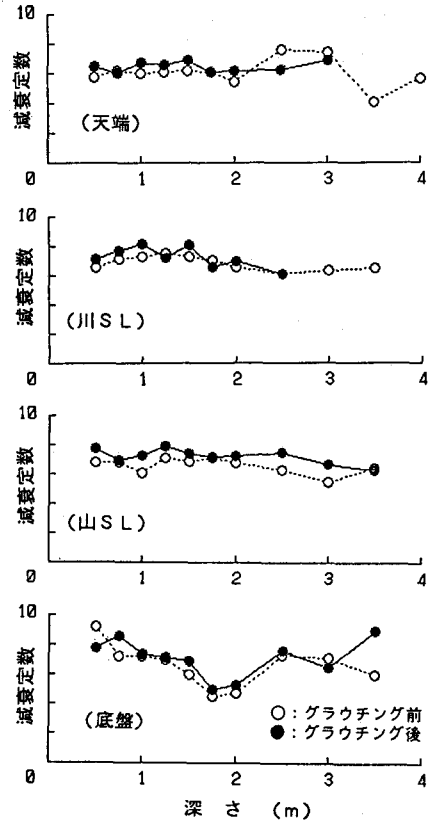


図-6 減衰定数の分布

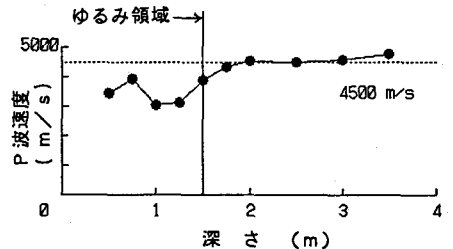


図-7 P波速度の平均値の分布

底盤と川S L、山S Lの3方向でのゆるみ領域は岩盤表面から深さ 1.5m程度の範囲までおよんでいると推定できる。

4. 2 グラウチング前後における変化

変形係数、P波速度、および振幅減衰定数のグラウチング前後での変化を模式的にまとめると図-8 による。前節で述べたP波速度の低下部分を除くと、グラウチング前後における変化は天端部の深さ 1 mまでと川S L、山S L部の全域、そして天端部の深さ2.5 ~ 3 m付近である。

(1) ボーリング孔周辺岩盤の変化

天端部の深さ 1 mまでと川S L、山S L部の全域では変形係数は増加しているが、P波速度や振幅減衰定数には変化はみられず、グラウチングによる影響はボーリング孔周辺岩盤だけに生じているようである。これは以下に示す理由から低圧グラウト時に岩盤表面中の亀裂を通じてグラウト材がボーリング孔内にリークしたことが原因と思われる。

①底盤部には変形係数の変化が生じていない。

②低圧グラウト時の覆工コンクリート（覆工内壁の円周方向に設置したひずみゲージによる）が覆工外周から静水圧を受けたような挙動を示しており、変形係数の増加した方向と一致する。

また、低圧グラウト時に岩盤表面からボーリング孔内にグラウト材がリークしたことは、岩盤表面からグラウト材が浸透している可能性も示唆しているが、調査結果に現れていないことから深さ50cm以内のごく浅い部分に限られていると思われる。

(2) 孔間の岩盤の変化

天端部では変形係数が深さ 3 mで約12000kgf/cm²から31000kgf/cm²に増加している。また、P波速度は深さ 2.5 ~ 3 mの位置で 2.3 ~ 3 km/sが 4.3 ~ 4.5 km/sに増加し、同じ天端部の他の部分のP波速度と同程度になっている。前節で述べたように、この付近では岩盤中に開口した亀裂の存在が推定されている。この亀裂内にグラウト材が浸透することにより、変形係数で約 2.5倍、P波速度で約 1.5倍の増加となり、他の部分の岩盤と同程度まで力学特性が回復されたと考えられる。

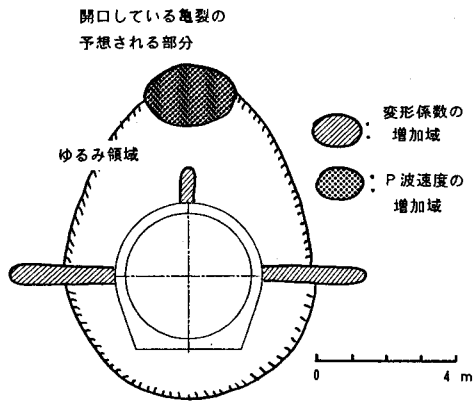


図-8 推定岩盤状況

5. あとがき

今回の調査により、岩盤中の亀裂内にグラウト材が浸透した部分では変形係数、P波速度ともに増加し力学的な回復がなされていること、亀裂が比較的多い岩盤であるが亀裂が連続していないため、グラウチングの効果は遍在的になっていることなどが判明した。最後に、本調査において貴重な御助言を頂いた（財）電力中央研究所の日比野敏氏、本島睦氏、ならびに調査に御協力頂いた間・株木・鴻池共同企業体の皆様に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三谷、岩井、益田、石口：水圧管路におけるグラウチング効果の研究、熊谷技報, No. 34, PP. 15-27, 1984
- 2) 世一、蓮井、平井、中川：孔間弾性波測定によるグラウチング前後の改良効果の判定について、第21回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, PP. 151-155, 1989. 2
- 3) 世一、蓮井、山下：地下空洞掘削時における周辺岩盤の物性変化に関する計測結果とその評価について、第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, PP. 193-198, 1984