

(22) 埋設型水圧鉄管周辺岩盤のグラウチングによる改良

東京電力(株) 正会員 島 山 昭

1. はじめに

埋設型水圧鉄管は、内水圧を極力周辺岩盤に負担させ、鉄管厚を薄くすることが経済的となる。従来、埋設型水圧鉄管周辺岩盤の改良については、鉄管据付後に鉄管内より岩盤に削孔し、この孔より高压グラウチング(注入圧 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上)を行ない、グラウチング後鉄管の孔をシール密着する方法が一般に行なわれている。ところが近年高落差の水圧鉄管に用いられる高張力鋼(いわゆるHT 80材、引張強度 $80\text{kg}/\text{mm}^2$)は、材質上シール密着に欠陥が生じやすいことからグラウチングによる周辺岩盤の改良を実施せずに鉄管を据付けているのが現状である。

今市水力発電所の水圧鉄管工事では、水圧管路全線の支保工にロックボルトおよび吹付コンクリート工を採用したことにより、周辺岩盤の改良にこの吹付コンクリートを被覆層として利用した。低圧(注入圧 $3\sim 5\text{kg}/\text{cm}^2$)グラウチングを鉄管据付前に実施した。また、この低圧グラウチングの周辺岩盤改良効果を把握するため簡易弾性波速度測定を行った。この報告は、低圧グラウチングによる周辺岩盤改良効果について、測定結果にもとづき検討したものである。

2. 水圧鉄管および地質の概要(図-1参照)

今市水力発電所の水圧鉄管は、全線埋設型で延長は $1,000\text{m}$ 、標準内径 5.5m 、最大設計水頭は 840m である。内水圧の岩盤負担については、延長の 70% の区間で実施し、岩盤負担率の最大値は 47% 、鉄管板厚は、岩盤負担区間ではHT 80材で最大 57mm 、非岩盤負担区間ではHT 80で最大 77mm (分岐部を除く)となっており、全鋼材重量は $6,200\text{t}$ 、そのうちHT 80材は約 60% を占めている。

水圧鉄管経路地の地質は、導水路水槽側より新生代新第三紀の月山溶岩層(輝石安山岩)、泥炭岩層(泥岩と凝灰岩・凝灰角礫岩の互層)、グリーンタフ層(石英安山岩、凝灰角礫岩)、中世代白堊紀の酸性火成岩類(石

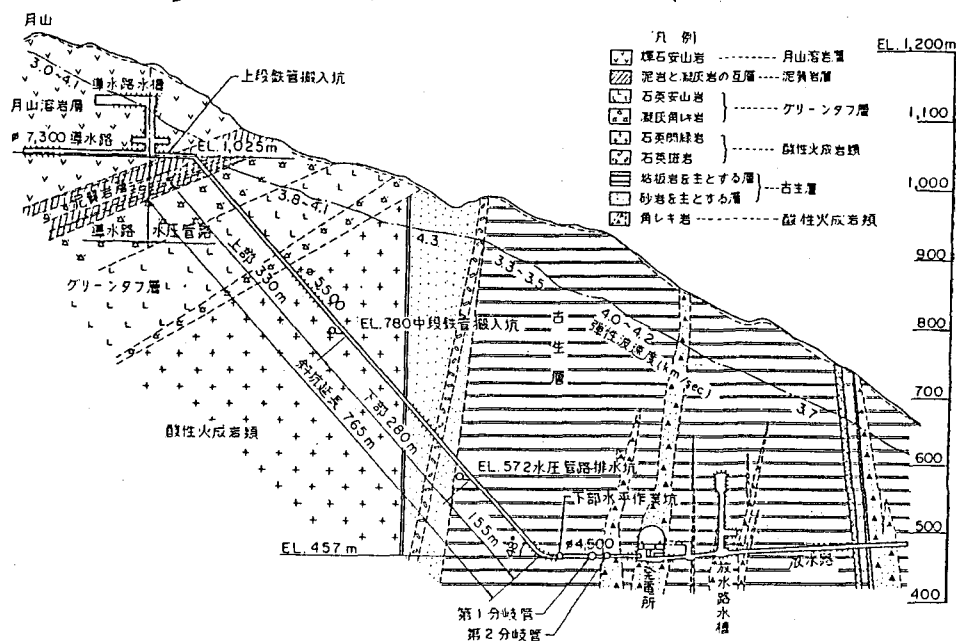


図-1 水圧管路縦断面図

英閃緑岩、石英斑岩）および古生代二疊紀の古生層（粘板岩、砂岩）である。岩盤等級は、経路地の77%がCH級以上、20%がCM級であり、破砕帯は10本程度認められたが最大幅が2m程度と小規模であり、全体的には堅硬な岩盤である。

3. 水圧鉄管の設計に採用した岩盤物性値

当地奥の地質は、古生層から新オミ紀の月山岩層まで広い年代にわたって分布し、また岩種も多いことからトンネル内において弾性波速度測定（ $l=900m$ 、測定間隔5m）、ジャッキ試験（近傍横坑に2箇所）、ポアホールジャッキ試験（37箇所）、シュミットロックハンマー反発度試験（132箇所）を実施し、岩盤物性値の把握に努めた。このうちジャッキ試験は最も直接的な試験方法であるが、ジャッキ能力に比して岩盤が硬いため測定値のバラツキが大きく好結果が得られなかった。また、シュミットロックハンマー試験で岩盤の物性値の絶対値を論じることは問題があることから、これらの値は参考値とし、水圧管路の岩盤物性値は、弾性波速度測定値と当地奥で実施したジャッキ試験結果の相関より岩種、岩盤等級ごとに定めることとした。ジャッキ試験は、中段鉄管掘入坑、水圧管路排水坑、発電所調査横坑および下部ダムサイト横坑の42箇所で行っており、このジャッキ試験箇所での弾性波速度

測定を行ない弾性波速度とジャッキ試験による変形係数の相関を求めた。（図-2）

また、トンネル内全線にわたって5m毎にピックアップを取りつけ弾性波速度測定を行って、水圧管路沿の岩盤を大きく岩種、岩盤等級ごとに10種類に分類し、この分類ごとにバラツキを考慮し、弾性波速度の平均と偏差を求めた。

10種類に分類した岩種、岩盤等級ごとの岩盤物性値は、（平均-偏差）の弾性波速度をもとに図-2を用いて変形係数を定めた。

その結果は表-1に示すとおりであり設計に用いた岩盤の変形係数は $15\sim35 \times 10^3 kg/cm^2$ である。

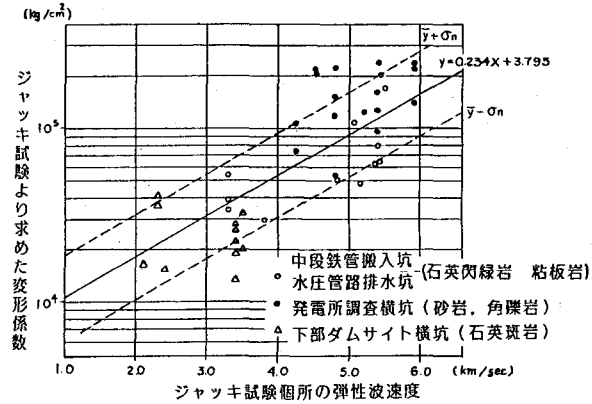


図-2 弾性波速度と変形係数の関係

4. グラウテン
グと弾性波速度
の測定

ジャッキ試験などにより把握した岩質のバラツキや、洗破によるゆるみ、岩盤の局部的な弱点を強化改善する目的で、吹付コンクリートを被覆層として利用した低圧のコンソリデーション

表-1 岩種毎の変形係数

	岩種	岩種別記号	掘入坑の 岩種別記号 m	設計値 $\times 10^3 kg/cm^2$	弾性波速度		弾性波速度と変形係数の相関		シュミットロックハンマー 変形より求めた変形係数 $\times 10^3 kg/cm^2$	ポアホールジャッキより 求めた変形係数 $\times 10^3 kg/cm^2$
					平均	平均-偏差	平均	平均-偏差		
①	輝石安山岩	CH	25	25	3.8	—	48	25	22 (13-31)	—
②	泥質岩	CMIXL	69	15	2.7	—	26	15	12	82
③	凝灰角礫岩	CH	83	21	3.9	3.3	52	21	54 (36-90)	68 (46-85)
④	石英安山岩	CH	68						50 (38-102)	68 (61-78)
⑤	石英閃緑岩 (角閃岩斑岩)	CH	272	28	4.5	3.9	70	28	40 (18-100)	96 (36-138)
⑥	砂岩	CH	66	25	4.4	3.6	67	25	21 (13-36)	41
⑦	—	CM	36	20	4.1	3.2	57	20	17 (12-15)	39
⑧	粘板岩	CH	116	35	5.1	4.3	97	35	40 (26-66)	106 (36-240)
⑨	—	CM	70	25	4.6	3.6	74	25	37 (28-62)	59 (51-67)
⑩	その他	—	93	0	—	—	—	—	—	—
	計			898						

ングラウチングを実施した。グラウチングの標準パターンは、図-3に示すように削孔長2m、1断面12孔で断面間隔は2mとし、注入次数は中間内挿法により1次、2次に分け、必要に応じて断面間隔が1mとなる追加注入(3次)を行った。同一断面内の注入では、5m以上の孔が存在する場合には、この孔を単独注入で処理し、その後5m以下の孔を同時注入とした。注入圧は3~5MPaとし、注入材料は早強セメントを用いた。

このグラウチング方法については、グラウチングの効果および吹付コンクリートのはく離、落盤などに対する施工の安全性を確認するため予備試験を近傍の水平トンネルで実施した。その結果、この低圧グラウチングでは、

①基層堅岩部については、注入前の弾性波速度の平均値3770m/sが注入後4000m/sと変化しないことから改良効果を期待することはできない。②表層ゆるみ領域については、注入後の弾性波速度の向上が認められることから改良効果が期待できる。③施工の安全性については問題がない。ことがあきらかとなった。

表層ゆるみ領域の弾性波速度を正確にとらえるには、ゆるみ領域での直接波を注入前後を通じて同一経路でとらえることが必要である。測定器は、簡易弾性波測定器(ソニックビュー)を採用した。各測定の構造は、岩盤内50cm程度の深さに先端部とモルタルで固定した鋼棒(φ22)をウェーブガイドとして用い、測定間隔は2mを標準とした(図-4参照)。所定の間隔に位置する1対2本の鋼棒について、一方をハンマーの打撃により起振し、他方の鋼棒のプレートにピックアップを取り付けて、ハンマーの打撃によって生じた波動を受振した。この鋼棒にはスポンジ状の緩衝材を巻き付け、鋼棒と孔壁とを遮断し、鋼棒先端部からの弾性波だけを受振するようにした。測定結果から弾性波速度を算出するため①鋼棒を伝播する時間、②ハンマースイッチの遅延時間を補正した。ゆるみ領域の弾性波速度 V_p は式であらわされる。

$$V_p = \frac{L}{T - \frac{L_1 + L_2}{v_g}} \quad (1)$$

ここに V_p : ゆるみ領域の弾性波速度 v_g : 鋼棒の弾性波速度(=5018m/s) T : 走時(立ち上がり時間+遅延時間)
 L : 固定端間距離 L_1, L_2 : 鋼棒の長さ

測定を行った岩種は、古生層および礫性火成岩類の53区

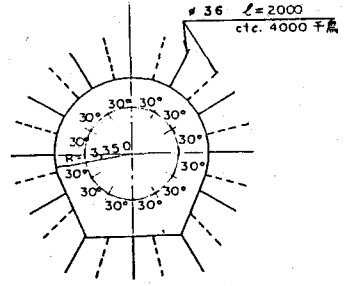


図-3 グラウチングパターン

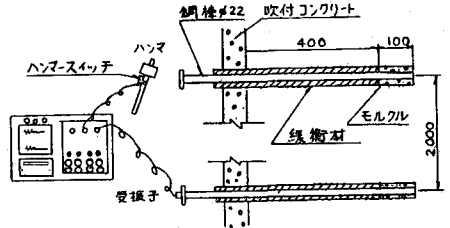


図-4 測定方法

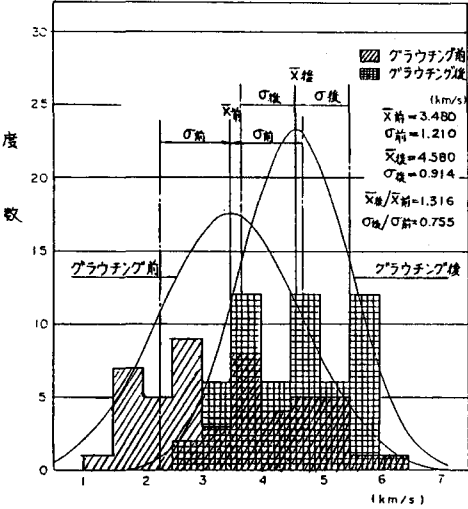


図-5 ゆるみ領域の弾性波速度のヒストグラム

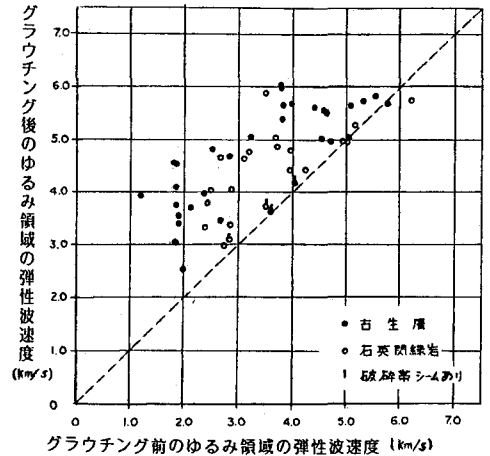


図-6 グラウチング前後のゆるみ領域の弾性波速度

間である。

簡易弾性波測定器による表層ゆるみ領域の測定結果を図-5～図-7に示す。これによれば、①表層ゆるみ領域の弾性波速度の平均値は、グラウチング前480m/sがグラウチング後450m/sと32%向上し、標準偏差19.210m/sから914m/sと76%に減少している。②グラウチング後の弾性波速度の上限値は580m/s程度と推定され、クラックがほとんどない堅硬な岩盤がこれに相等するものと考えられる。グラウチング前の弾性波速度が580m/s以上の場合は、この堅硬な岩盤が一部残っており、クラックが注入材料により填充されれば注入後の弾性波速度はこの上限値まで向上することが可能となるが、グラウチング前の弾性波速度が580m/s以下の場合は、周辺全体がクラッキーとなっており、このクラックを注入材料で完全に填充することが困難なことににより上限値までの改良ができないものと判断される。しかし注入前の弾性波速度が580m/s以下の改良効果は大きく、注入前の平均値210m/sが398m/sと72%向上している。③注入前後の弾性波速度増加率は、グラウト注入量からの推定が困難である。グラウト注入は岩盤のクラックの改良に有効に働いているが、弾性波伝播経路の短縮には至らないためと判断される。

5. 変形係数の改良効果

表層ゆるみ領域の改良による周辺岩盤の変形係数の向上を基層と表層の弾性波速度値より次の仮定を設けて推定した。①基層の弾性波速度は、グラウチングにより変化しない。②基層では同一弾性波速度に対する変形係数のバラツキは無いものとする。③表層の弾性波速度は簡易弾性波測定器による値を用いる。④岩盤変形係数と弾性波速度の関係は、図-2による。

基層と表層を合わせた等価な変形係数は、上記の仮定をもとに二重円環理論により次式で求める。

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_B} + (1-\nu) \frac{1}{D_S} \ln \frac{b}{a} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに D_B : 基層の変形係数、 D_S : 表層の変形係数、 ν : ポアソン比、 a, b : 鉄管中心より表層あるいは基層までの半径。

計算結果を図-8に示す。この図は表層の厚さを1mと仮定した場合であるがグラウチング後の変形係数は、グラウチング前と比較すると平均値で1.13倍、標準偏差で0.46倍となっている。

これよりグラウチング前後の(平均-偏差)による変形係数を比較するとグラウチング後はグラウチング前の1.5倍となっている。

以上、低圧グラウチングにより、ても岩盤の改良は可能であり、弾性波速度測定によりグラウチング効果の把握が可能となり、変形係数の向上が推定できることがわかった。

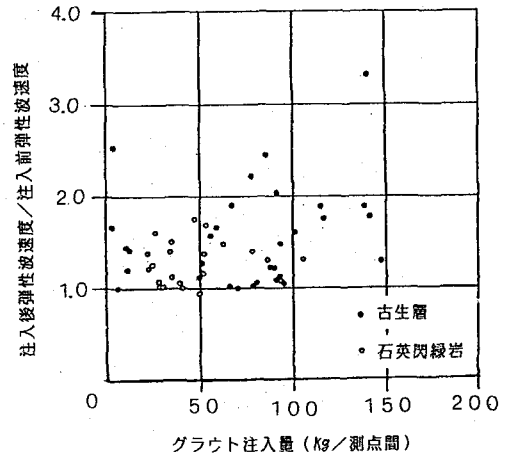
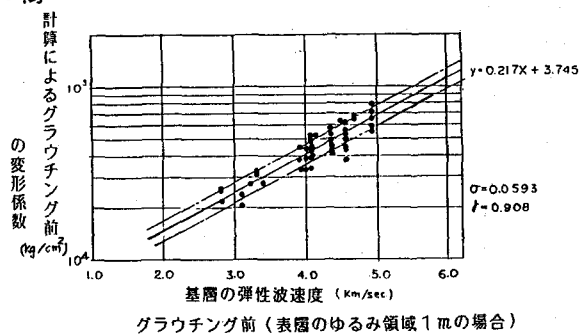
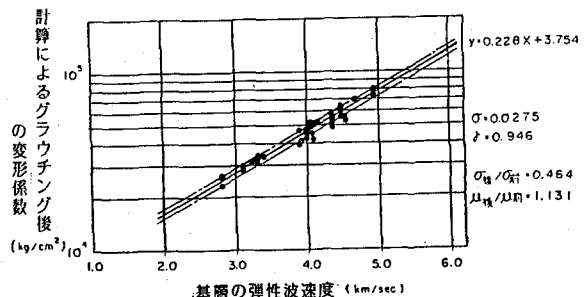


図-7 弾性波速度増加率とグラウト注入量の関係



グラウチング前(表層のゆるみ領域1mの場合)



グラウチング後(表層のゆるみ領域1mの場合)

図-8 基層の弾性波速度とグラウチング前後の変形係数

(22) IMPROVEMENT OF ROCK AROUND PENSTOCK BY GROUTING

Tokyo Electric Power Co., Inc.

Akira Hatakeyama

The embedded penstock at Imaichi hydropower station has a maximum design head of 840 m, a diameter of 5.5 m and a length of 1,000 m. Prior to the installation of the steel pipe, low-pressure ($3 \sim 5$ kg/cm²) grouting was carried out by making use of the shotcrete layer, since shotcrete and rock bolts were employed as supports of the tunnel for the penstock.

The measurements of seismic wave velocity have proved that the loosened zone near the surface due to blasting can be improved by grouting, while the bedrock can not be improved.

In order to closely evaluate the velocity of the loosened zone before and after grouting, a simplified method utilizing re-bars and a hammer was developed. The results show the following.

- (1) Grouting increased the average of velocity by 32% and decreased its standard deviation by 24%.
- (2) A zone of more than 3,500 m/s can be improved by grouting to as much as 5,800 m/s.
- (3) The increase rate of the velocity due to grouting cannot be estimated by the amount of grout.

Correlation between the velocity and Young's modulus of the rock mass was obtained through 42 in-situ jack tests. Based on the correlation and the above-mentioned results, the equivalent Young's modulus of the rock mass was obtained by the theory of double thick wall cylinders. The results showed that the average of Young's modulus and its standard deviation were multiplied by 1.13 and by 0.46 respectively due to grouting and that the Young's modulus value of average minus standard deviation used in the design of this penstock was multiplied by 1.5 after grouting.