

亀裂性岩盤におけるグラウト侵入状況のはぎ取り調査

寺戸康隆¹・中川誠司²・米田俊一³・塩崎 功⁴・大西有三⁵・中川浩二⁶

¹ 正会員 理博 日本基礎技術(株)技術本部技術研究室長 (〒150-0031 東京都渋谷区桜丘町 15-17)

² 学生会員 工修 Materials Science & Mineral Engineering, University of California

³ 正会員 工博 宇部興産(株) 技術開発部 セメント・コンクリートグループグループリーダー

⁴ 正会員 工修 (株)間組技術研究所 技術研究部 主任研究員

⁵ 正会員 工博 京都大学 教授 工学研究科土木システム工学専攻

⁶ 正会員 工博 山口大学 教授 工学部社会建設工学科

グラウチング試験後の亀裂性岩盤のはぎ取り調査結果をもとに、亀裂およびグラウト侵入亀裂の分布および方向性を検討した結果、次のようなことが分かった。1)各水平・鉛直掘削面の亀裂トレースの観察により、立体的なグラウト侵入形態が再現された。2)グラウト侵入亀裂の空間的分布は、卓越する亀裂方向分布に支配される傾向を示した。3)方向別グラウト侵入頻度は層理面を切る高角度の亀裂グループが層理面に沿ったものより大きな頻度を示した。4)グラウトの水セメント比は、練り上げ時 600%であったものが硬化後は水が分離し 80%前後にあった。

Key Words: grouting, fractures, Schmidt net, open-cut surveying, water-cement ratio

1. まえがき

ダム基礎岩盤などの改良工法として最も一般的であるグラウチングは、ボーリング孔を利用し、あらかじめ混合攪拌したグラウト(注入材)をポンプ等で圧入することによって、亀裂や間隙をグラウトで充填し基礎の水密化・一体化をはかる技術である。この場合、グラウトは浸透性あるいはグラウタビリティを良くするため、練り上げ時には適度の流動性や粘性を与えており、懸濁型グラウト(例えばセメントグラウト)の初期配合はモルタルやコンクリートに比べはるかに水セメント比の大きい配合(概して W/C=10~4)を用いている。しかし、グラウトが亀裂や間隙に侵入し硬化に至る過程で水の分離あるいは脱水が生じ、結果的にはグラウト硬化後の水セメント比は通常のもルタルやコンクリートに近い値を示す。

注入後の懸濁型グラウトがどのように亀裂に侵入し、硬化に至るかの機構を解明することはグラウチングを合理的に行い、その信頼度を高める上

からも重要である。しかし、目視できない地盤中の挙動を通常求められるデータから推定することは容易でなく、これに関した研究報告例は極めて少ない¹⁾。

筆者らはこれまで特にグラウチング前後の岩盤の物性変化を電磁波、弾性波および比抵抗トモグラフィ解析によって追跡し²⁾、更にはぎ取り調査によって確認する方法を試みてきた。これによって亀裂へのグラウトの侵入経路とグラウトの硬化過程を追求し、亀裂性岩盤の注入のメカニズムを知る手がかりが得られるのではと考えた。

本論ではグラウチング試験結果とはぎ取り調査結果をもとに、グラウトが侵入した亀裂の分布と方向性を解析し、亀裂とグラウト侵入の関係を考察した。

2. はぎ取り前のグラウチング試験の概要

(1) 地質概要

調査地点は山口県宇部市にあるセメント製造用

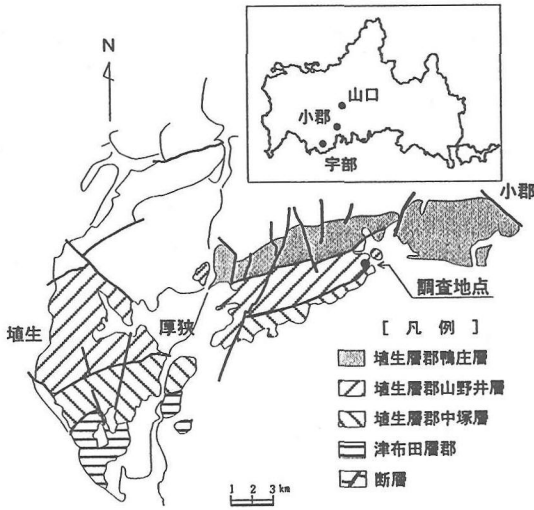


図-1 調査地点周辺の地質概要

粘土材料の採石場の一面であり(海拔標高約210m)、地山の被り約70mが既に掘削除去された地点である。地質は模式地の埴生からENE-WSWの走向で分布する中生代三畳紀の埴生層群に属し、頁岩を主体にし砂岩の薄層を伴う(図-1)⁹⁾。これらはE-Wの走向でN側に40°前後で傾斜する単斜構造を示す。また、広域的には本層群を切断するN-SからNE-SW系の断層が見られ、この共役系亀裂は、層理面を切る高角度の亀裂として反映される。地表の露頭面の観察では本層は亀裂が顕著で、亀裂面沿いに風化・酸化・変質が見られ、掘削によるゆるみも加わり、開口亀裂が多く流入粘土が挟在する。また、層理面に平行して破碎部が介在する。地下水水面は現況地盤面下1~3mに位置し南側に傾く。

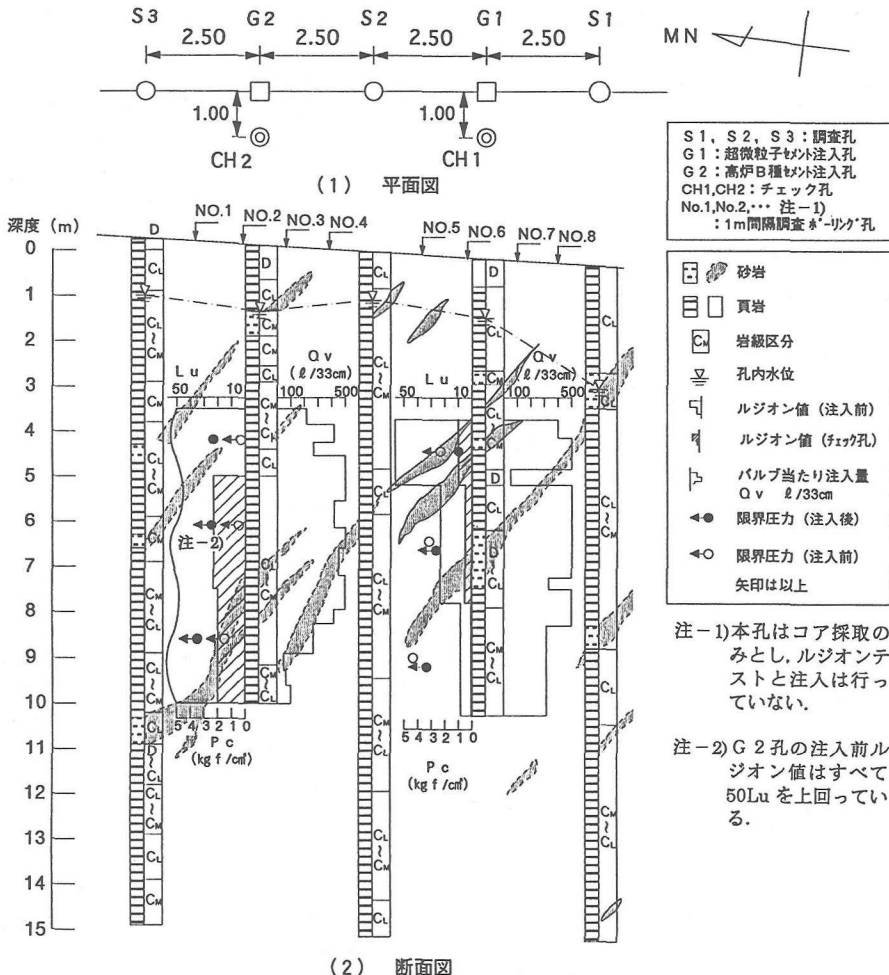


図-2 グラウチング試験結果総括図

表-1 注入前後の透水性および注入特性 (p:平均注入圧力 kgf/cm²)

ステージ (深度)	透 水 特 性						注 入 特 性			
	注入前		注入後 (チェック孔)				単位注入セメント量		透水性等価注入量	
			直後		1 カ月後					
	限界圧力	砂'礫値	限界圧力	砂'礫値	限界圧力	砂'礫値	C	C/Lu	C/Lu/p	
kgf/cm ²	Lu	kgf/cm ²	Lu	kgf/cm ²	Lu					
注入孔：超微粒子セメント注入孔 (G1)										
第1	2.31≦	57.8	1.20	10.1	—	—	初回 累計	171.6 196.1	3.0 3.4	0.37 —
第2	3.35	24.2	2.78≦	5.1	—	—	初回 累計	170.6 199.4	7.0 8.2	0.73 —
第3	4.25	7.4	3.28≦	0	3.51≦	0.68	初回 累計	139.0 143.0	18.8 19.4	1.26 —
全長			4.46	1.8	3.51	1.7	全長	177.3	7.0	—
注入孔：高炉B種セメント注入孔 (G2)										
第1	0.49≦	1613	—	—	—	—	初回 累計	180.5 197.3	0.11 0.12	0.016 —
第2	0.76≦	504	2.23≦	21.2	—	—	初回 累計	177.0 196.9	0.35 0.39	0.035 —
第3	1.22≦	605	3.28≦	17.6	2.41≦	13.3	初回 累計	94.8 99.9	0.16 0.17	0.011 —
全長			4.86≦	5.3	2.91≦	8.8	全長	159.7	0.20	—

(2) グラウチング試験

試験パターンは単列パターンとし、地層の走向とほぼ直角に主測線(はぎ取り調査の L3 側線:図-6 参照)を設けた。

孔配置は、5m 間隔に事前の調査孔 3 孔(南側から S1, S2, S3 孔)を配置し、この中間に深度 10m の注入孔 2 孔(南側から G1, G2 孔)を配置した。G1 孔は超微粒子セメントを注入材料に使用した。また、両注入孔から西側に 1m 離れた位置にそれぞれチェック孔(CH1, CH2 孔)を設けた(図-2)。注入孔とチェック孔では孔径 66mm で地質コアを採取し、ルジオンテストを行った。コア採取にはコアパックドチューブを使用した。一方、ルジオンテストの方法は有効圧力レベルで試験が行える孔内静水圧試験法による⁹⁾。

施工法は二重管ダブルパッカー法を採用した⁹⁾。

注入孔はルジオンテスト後口径 86mm ビットで拡孔し、33cm 間隔の注入バルブを備えた注入外管(マンシエットチューブ)を設置した。注入外管と孔壁の間はスリーブグラウトでシールした。スリーブグラウトには高炉 B 種セメントとベントナイト(日本ベントナイト M1)のスラリー(対セメント重量比 15%)の混合材を使用した。水セメント・ベントナイト比は m³ 当たりセメントとベントナイトをそれぞれ 400kg, 60kg としたので 184%であった。

施工法について通常ステージ法ではなく二重管ダブルパッカー法を採用した理由は次のとおり

である。露頭観察と地質柱状図によれば CL 級の岩級を伴う亀裂性岩盤であり、この施工法が適用できるという判断のもとに、限られた数量の中でより多くの亀裂にグラウトを到達させ、できるだけ多くの情報を得るにはステージ法よりもこの施工法が有利であると考えた。反面、この施工法は注入バルブと注入直前にクラッキングにより形成されたスリーブグラウト(シール材)中の小さな人工割れ目を介してグラウトを地山に注入するため、圧力損失が大きく有効注入圧力と注入量の関係がステージ法ほど素直に現れないという傾向を伴いがちである。しかし、ここではグラウト侵入と亀裂の関係をつかむ上で特別な支障はないものと考えた。

注入材は、南側の G1 孔では超微粒子セメント(宇部マイクロセメント、比重 2.94、ブレン値 9300cm²/g、平均粒径 3μm)を使用し、水セメント比は W/C=6(ただし 1 回目注入)、セメント重量に対しそれぞれマイティ 150 を 2%、超微粒の赤色顔料を 5%添加している。北側の G2 孔では高炉 B 種セメント(比重 3.09、ブレン値 3860cm²/g、平均粒径 15μm)を使用し、水セメント比は W/C=6(ただし 1 回目注入)、セメント重量に対しそれぞれポポリス NO.8 を 0.25%、超微粒の緑色顔料を 5%添加した。

注入方法は圧力制御を基本としたが、グラウトの到達範囲を確かなものにするため、経験的指標を参考にして計画注入量を注入バルブ(孔長上 33cm 間隔)当たり 500 ℓ とした。注入圧力(口元圧力)の

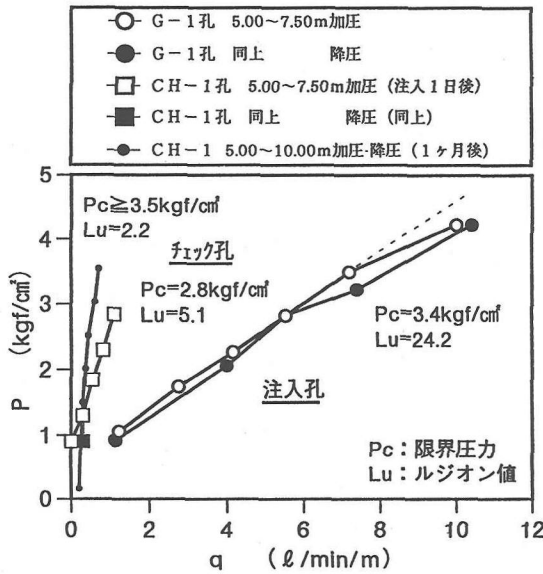


図-3 注入孔とチェック孔のルジオンテストの p-q カーブ

設定は最大 15kg/cm² として概して深度に対し 1.5(kg/cm²)/m の圧力勾配を与えた。その他の仕様は以下のとおりとした。

- ①注入速度は 10 l/min 以下とした。
- ②注入順序は下位から上位の注入バルブへ漸時移行するアップステージ方式とした。
- ③水押しは省略し、クラッキング(スリーブ割り)はグラウトミルクで行った。
- ④注入完了基準は規定注入圧力に達し、注入速度が 1 l/min 以下でだめ押しを 5 分間行ったときか、計画注入量に達したときのいずれかとした。結果的には後者のケースが多かった。

表-1 は試験結果をもとに注入前後の透水特性と注入特性をまとめたものである。図-2 はグラウティング試験結果の総括図である。

地質断面は頁岩(優勢層)中に北側に 45~50° の傾斜で 20~50cm 厚の砂岩の単層が挟在するように比較的整然とした分布で示されるが、岩級区分はかなりまちまちである。これは層理面およびこれとほぼ直交した両方向の亀裂系に沿った風化、変質あるいはゆるみが岩級に反映され、その分布を複雑にしているためと考える。

透水性はこれらの様相に影響され、G1, G2 孔とは必ずしも連続性はない。南側の G1 孔は特に風化・変質の影響でルジオン値が小さく、北側の G2 孔は開口亀裂の影響でルジオン値が大きくなっている。

G1, G2 孔とも深度 5m 付近まではゆるみによる亀裂の開口化でルジオン値は大きかった。G2 孔は開

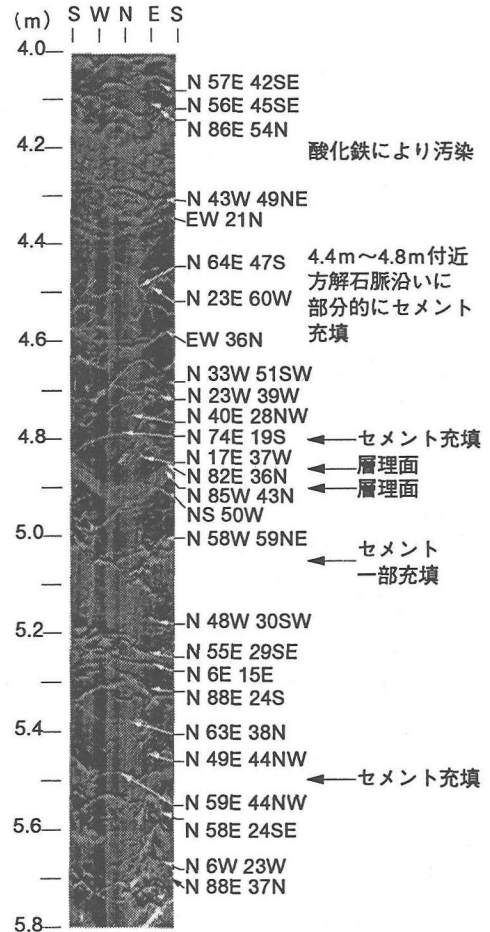
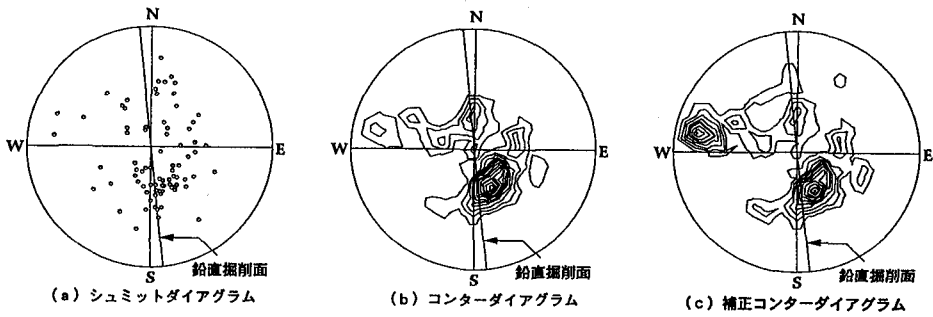


図-4 調査孔 S3 の孔壁展開画像 (深度 4.00~5.80m)

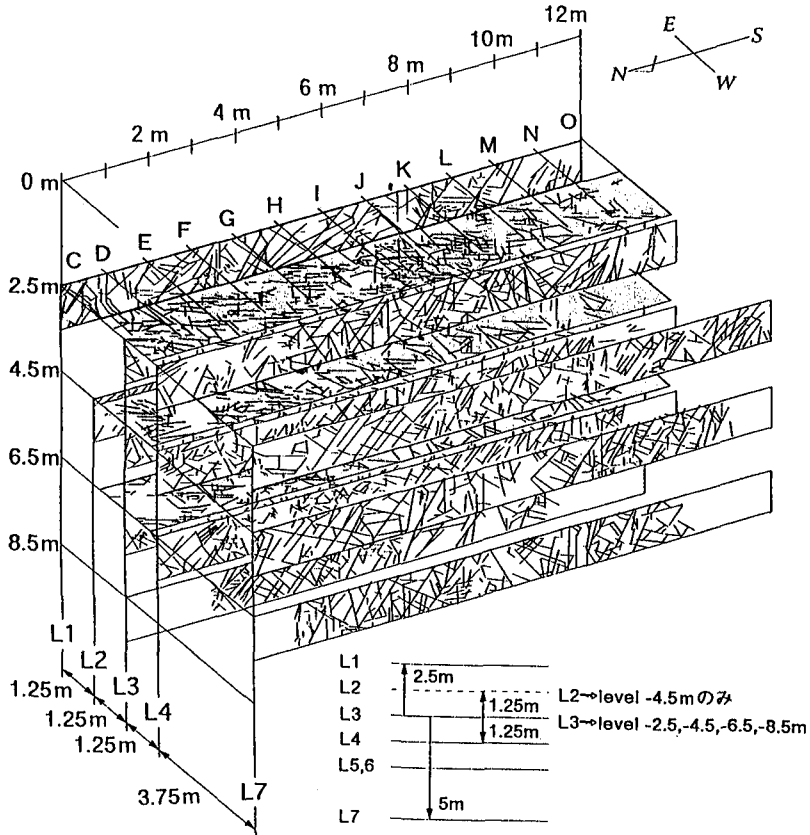
口亀裂の影響で最終深度まで数 100Lu を示したが、G1 孔は 5m 以深では変質部および破碎部が挟在するため限界圧力が 1kgf/cm² 前後と小さく、またルジオン値は第 2 ステージが 24.2Lu、第 3 ステージが 7.4Lu と比較的小さかった。

単位注入セメント量は、1m 孔長の累計表示では超微粒子セメント注入孔(G1 孔)が全体平均で 177kg/m、高炉 B 種セメント注入孔(G2 孔)が全体平均で 160kg/m を示し、超微粒子セメントの方がやや多かったがオーダーは変わらない。しかし、ルジオン値で除した透水性等価注入量(C/Lu)は超微粒子セメントの方が高炉 B 種セメントよりかなり大きく、相対的には超微粒子セメントの方が注入効率は良かったことを示す。

両孔とも第 2 ステージ以深は、深度によってルジオン値、注入量とも減少しており、風化、ゆる



図—5 孔壁画像処理から作成した亀裂面の頻度分布



図—6 亀裂トレースの投射図

み等の透水性に対する影響が深度とともに少なくなる傾向と矛盾しない。

注入後の透水性の改良効果については、注入孔から1m離れたチェック孔のルジオンテストによれば、両孔ともルジオン値はかなり低減しているが(特に高炉B種セメント注入孔側では当初のルジオン値が非常に大きかったことから低減比が1/30程度以下と高かった)、改良後のルジオン値は第2ステージ以深では超微粒子セメント注入孔側が5Lu以下、高炉B種セメント注入孔側が20Lu止まりで、超微粒

子セメント注入孔側の方がかなり低いルジオン値にまで改良できている。注入後の透水性の安定度を見るため1ヶ月経過後同じチェック孔で再度ルジオンテストを行った。これによると、両孔とも第3ステージのルジオン値はほぼ同じかむしろ小さくなっている。ただし、全孔長の平均ルジオン値は超微粒子セメント注入孔側は変わらないが、高炉B種セメント注入孔側では亀裂中にグラウトの未充填部が若干残されていたためか、ルジオン値は5.5Luが8.8Luへとやや大きくなっていった。

図-3 は超微粒子セメント注入孔側の注入孔とチェック孔のルジオンテストの有効圧力-単位注入量曲線(p-q カーブ)である。注入孔は曲線性を帯びた低勾配(高浸透型)のカーブが示され、圧力による亀裂面の変位が予想される。しかし、チェック孔は高勾配(低透水型)の直線性のカーブに変化し、変形性および透水性の改良・一体化が促進されたことが裏打ちされる。

(3) 孔壁展開画像による亀裂面方向分布の予備調査

はぎ取り調査に先立ち、ボアホールテレビシステム(BIP システム[®])を用いたボーリング孔内の壁面観察を行った。図-4 は調査孔 S3 の深度 4~5.8m 間の孔壁展開画像である。比較的良好な画像が得られた S3 孔、および L2 側線上の 2 本のボーリング孔で得られた亀裂のトレースより、岩盤内部の亀裂の方向分布の再現を試みた。

図-5 は BIP システムで得られた亀裂の方向分布を示すシュミットダイアグラムである。本例のように鉛直なボーリング孔を用いた場合、高角度でボーリング孔を切る亀裂は観察されにくく、方向分布に偏りを生じる。このため、亀裂面とボーリング孔のなす角を θ として、重み $W=1/\sin\theta$ を各観測データに与えた統計的な補正を行った⁷⁾。ただし、非常に θ の小さな場合 W が大きくなることを考慮し、 $\theta < 11.5^\circ$ の場合は一定の重み $W=5$ を用いた。補正前後の分布密度図(コンターダイアグラム)を図-5(b)(c)に示す。

同図より層理面に沿った亀裂(ダイアグラム中央 S 寄り)、鉛直に近い亀裂(同 W 付近)、およびやや不明瞭であるが他の亀裂グループ(中央 E 寄り)の分布が読み取れ、これらは地表面における地質観察の結果と一致する。したがって、岩盤内部の亀裂の方向分布は、地表面での観察との比較から、ほぼ同様であると予想された。

3. はぎ取り調査の手法

グラウチングを行った岩盤中のグラウトの広がりできるだけ立体的に追跡するため、地層の真の傾斜方向とほぼ一致する南北方向を長軸とした座標系を設け(図-6 参照)、バックホー等を使用し、ベンチカット方式で西側からはぎ取りを行った(写真-1)。まず、幅 7m、長さ 14m の範囲の平面を深度 2.5m まではぎ取り、注入孔のある L3 測線を中心にした 2m 幅の範囲の水平面を観察した。そのあと L7→L1 測線の順で深さ 1m の鉛直断面を切り出し、順次断面

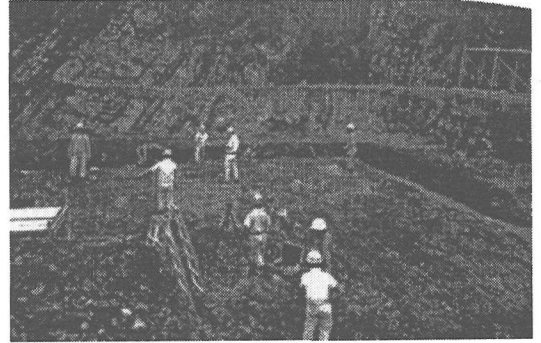


写真-1 はぎとり状況



写真-2 はぎとり面の亀裂観察

の観察を行った。その後再び次の観察深度の平面まではぎ取りし、以下同じ手順を深度 9.5m まで繰り返した。亀裂観察は、1m×1m グリッド群を掘削面に設けたうえで、データサンプリングが比較的容易な 20cm 以上のトレース長(掘削面と亀裂の交叉線の長さ)をもつ亀裂について行い、各掘削面で亀裂のラフスケッチと写真撮影を行った。主な調査項目は次のとおりである。

- ① 亀裂の走向、傾斜、幅、長さ
- ② 亀裂中の挟在物の有無、性状
- ③ 亀裂中のグラウトと顔料侵入の有無
- ④ 地層、断層、破砕部等の分布、岩級区分
- ⑤ グラウト硬化体の化学分析(見掛け比重、化学分析、EPMA 解析、元素分布等)のためのサンプリング

4. はぎ取り調査の結果

(1) 亀裂トレースの分布と岩盤スケッチ

図-6 は鉛直掘削面に対し $N30^\circ W$ 俯角 30° の、方向から見た鉛直掘削面と水平掘削面における亀裂のトレース投射図である。写真-2 はほぼこの方向か

ら撮影したものである。また、図-7 はグラウトが侵入した亀裂のトレース投影図である。このうち、高炉B種セメントグラウトに関するものを図-8(a)、超微粒子セメントグラウトに関するものを図-8(b)にそれぞれ透視による亀裂トレース投影図として示している。

亀裂の方向については、トレースを組み合わせることで、実際の亀裂面の立体的分布をイメージとして描くことができる。

図-9 は深度 4.5m の水平面のスケッチ、図-10 は L3 測線の鉛直面スケッチである。

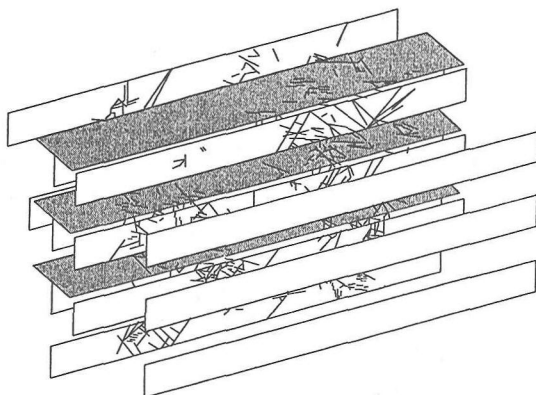


図-7 グラウトの侵入した亀裂トレースの投影図

(2) 地質および亀裂の分布

層理面の走向はほぼ東西方向にあるので(図-9)、図-10 に見られる鉛直掘削面の地層の傾きはほぼ真の傾斜角(北側に 40° 前後;紙面左)を示す。地層は頁岩主体であり層理面が明瞭でないが、軟質化した比較的厚い砂岩が北側と南側に挟在するので、これを鍵層(キーベッド)にして層理面方向を特定できる。

層理面自体は概して密着しているが、これに沿った方向の開口亀裂が多く観察された。また、層理面に平行して3枚の破碎部が挟在する。風化の進行した砂岩層および破碎部は流入粘土や破碎粘土によって、亀裂が目詰まりし、周辺の開口亀裂を包蔵する比較的良好的な頁岩にくらべて、相対的な難透水ゾーンとなる。

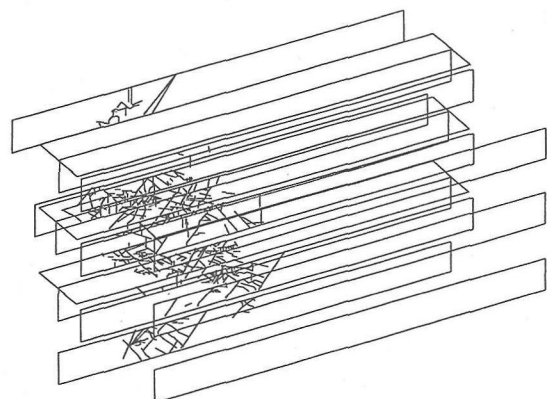


図-8 (a) グラウト侵入亀裂トレースの投影図
(高炉B種セメント)

(3) グラウトの分布

図-7 と図-8 に示すグラウトの侵入した亀裂トレースおよび図-9 と図-10 の斜線で示したグラウト到達範囲で示されるように、グラウトは層理面ないしはこれにほぼ平行する亀裂、および層理面を切る亀裂に侵入したことはグラウト硬化体・添加した顔料の色調・フェノールフタレイン溶液によるアルカリ反応等によって観察された。

注入孔の位置関係から、南側は超微粒子セメントあるいは赤色顔料が、北側は高炉セメントB種あるいは緑色顔料が主体に分布した。グラウトはかなりの多くの亀裂に侵入していたが、これは施工法を孔長当たりの注入間隔(33cm 間隔)がステージ法よりも概して15倍の密度にある二重管ダブルパッカー法を適用したことにもよると思われる。

注入されたグラウトの水平方向分布は、亀裂の方向性ほど明確さはないが、地質観察による概略調査では、WNW-ESE~E-W 方向(層理面に沿う方向)にやや発達する傾向がみられた。また、NW-SE 方向の侵入長は比較的短く、この方向の亀裂分布が比較的少

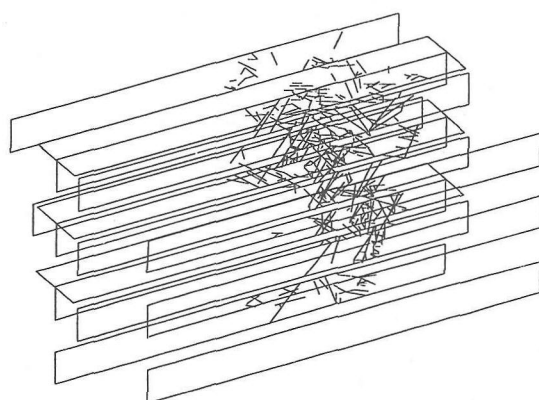


図-8 (b) グラウト侵入亀裂トレースの投影図
(超微粒子セメント)

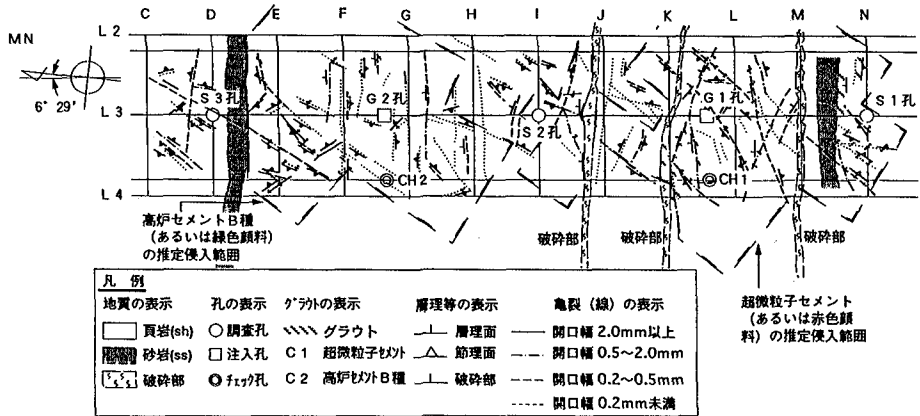


図-9 深度 4.5m 水平面のスケッチ

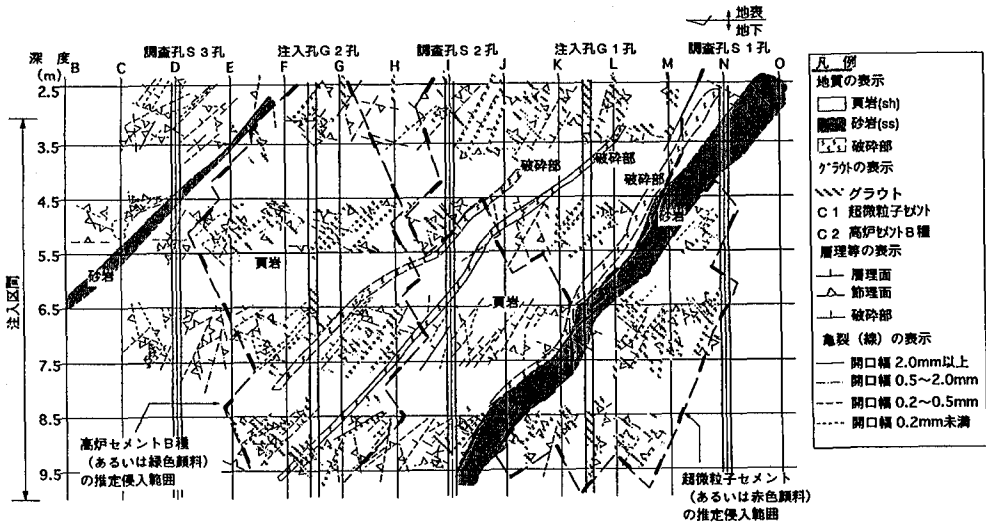


図-10 L3面の鉛直面スケッチ

ないことと符合する。分布の広がり、超微粒子セメントで6~7m、高炉B種セメントでは4~5.5mであった。

なお、表層の深度2.5m付近(グラウト注入深度よりも浅い)では、高炉B種セメントはL1断面において若干のグラウトが認められたほかは全く侵入が認められなかった。超微粒子セメントは流入粘土および破碎粘土のため透水性が予想されるにもかかわらず、この深度においてもかなりの分布が認められた。

(4) 亀裂およびグラウト侵入亀裂の開口幅の頻度

図-11は亀裂およびグラウト侵入亀裂の観察された開口幅の頻度およびグラウト侵入率を示したものである⁹⁾。岩盤の緩みの影響のため、開口幅の分布

は必ずしも実情を反映しないおそれはあるが、超微粒子セメントの方がより細かい亀裂まで高い侵入率(グラウト侵入亀裂数/亀裂数)を示す傾向が見られる。また、全亀裂数に対する侵入率の比較では、高炉B種セメントが37%~49%の比率を示す一方、超微粒子セメントは55%~63%の比率を示しており、明らかに後者が亀裂性岩盤に対する卓越した浸透性を持つことが分かる。

(5) グラウト硬化体の物性

表-2は採取したグラウト硬化体の化学分析結果を示す。

サンプル中のセメント含有率は高炉B種セメント、超微粒子セメントとも平均51%を示した。水セメン

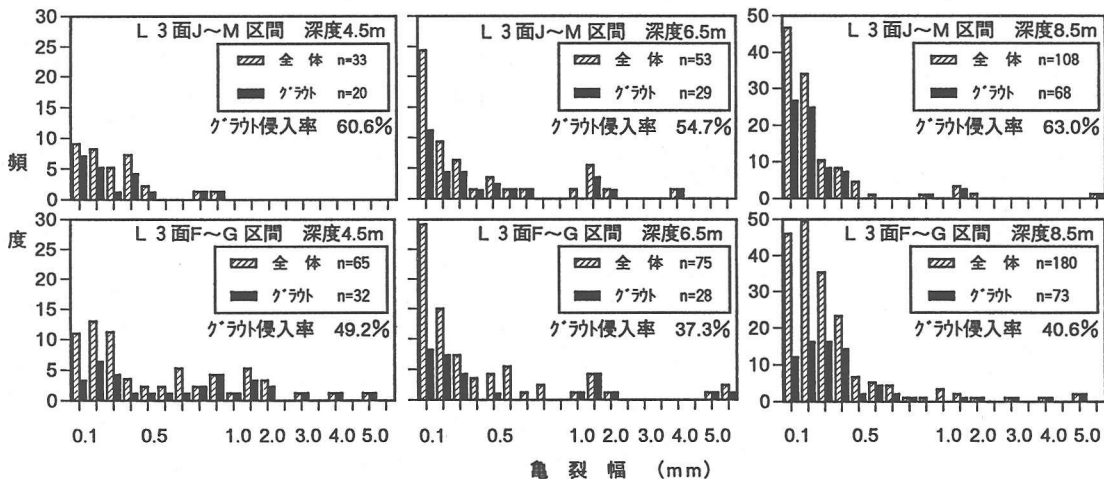


図-11 亀裂およびグラウト侵入亀裂の開口幅頻度

表-2 グラウト硬化体の化学分析結果 (平均値)

セメントの種類	採取地点	サンプルの厚さ t	見掛け比重 G c	吸水率	セメント含水率	顔料含有率	水・セメント比 w/c
高炉B種	18点	3.3mm	1.72	63.3%	50.6%	7.44%	0.81
超微粒子	26点	3.7mm	1.78	63.3%	51.4%	2.94%	0.78

ト比は、吸水率をセメント含有率で除して求めると、高炉B種セメントが81%、超微粒子セメントが78%を示した。これは練り上げ時の600%の水セメント比にくらべ、概ね1/7.5まで分離あるいは脱水が起こったことを示す。

5. 亀裂およびグラウト侵入亀裂の方向性

(1) 亀裂面の方向の頻度分布

図-12は全水平・鉛直掘削面の亀裂面の方向をシュミネットの下半球にプロットしたものであり、(a)は北側(I測線より北)、(b)は南側(I測線より南)掘削面の亀裂面の方向である。図-13は図-12のコンターダイアグラムである。各コンターは1%の頻度を示す。

両図から亀裂面の方向性は3つのグループに分けることができる。各グループの特徴は次のとおりである。

①グループ1

層理面および破碎部(あるいは走向断層)に沿った亀裂群であり、卓越方向(走向/傾斜)はE~W/30°~40°Nを示す。最大頻度は北側で6%、南側で5%を

示す。

②グループ2

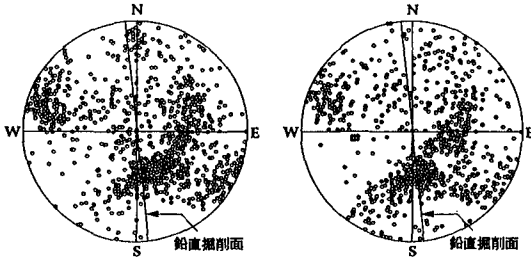
層理面および破碎部(あるいは走向断層)を鈍角に切る高角度の亀裂群であり、トレース長の長い亀裂である。卓越方向(走向/傾斜)はN-S~N30°E/70°NW~90°~60°SEを示す。鉛直断面では高角度を示すものと、層理面と反対方向のやや緩い見掛け傾斜を示すものとある。最大頻度は北側で6%、南側で4%を示す。

③グループ3

個数はそれほど多くないが、N-Sに近い走向をもち、傾斜は60°前後の角度でW~NW側に傾く。卓越方向(走向/傾斜)はN7°E/60°Wを示す。鉛直断面では層理面と反対方向の緩い見掛け傾斜を示すことが多い。最大頻度は北側で2%、南側で3%を示す。

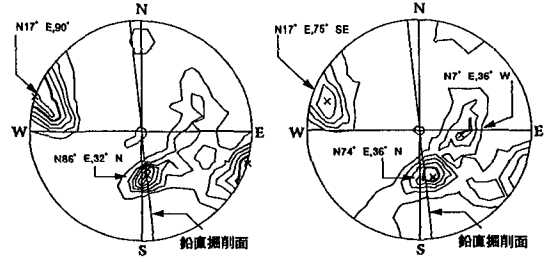
(2) グラウト侵入亀裂面の方向の頻度分布

図-14は全水平・鉛直掘削面のグラウト侵入亀裂面の方向をシュミットネットの下半球にプロットしたものであり、(a)は北側、(b)は南側掘削面のグラウト侵入亀裂面の方向である。(a)は高炉B種セメントグラウト、(b)は超微粒子セメントグラウトの分布と考えてよい。



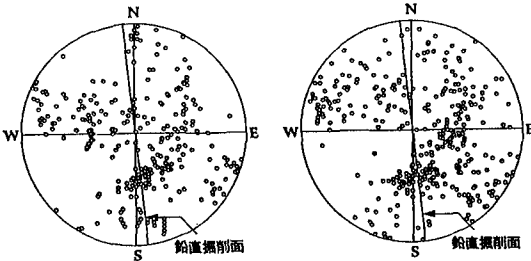
(a) 北側掘削面 (b) 南側掘削面

図-12 全亀裂方向のシュミット・イグラム



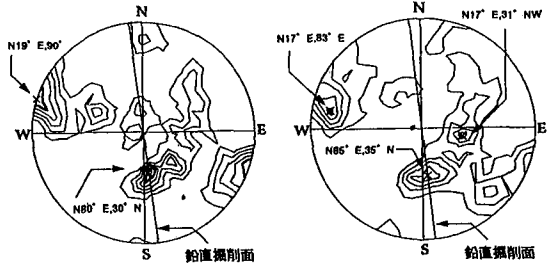
(a) 北側掘削面 (b) 南側掘削面

図-13 全亀裂面方向のコンター・イグラム



(a) 北側掘削面 (b) 南側掘削面

図-14 グラウト侵入亀裂面方向のシュミット・イグラム



(a) 北側掘削面 (b) 南側掘削面

図-15 グラウト侵入亀裂面方向のコンター・イグラム

図-15は図-14のコンターダイアグラムである(各コンターは1%の頻度を示す)。

図-12と図-14および図-13と図-15を対比して明瞭に分かるように、グラウト侵入亀裂面の方向はグラウトが侵入していない亀裂面を含めた全体亀裂面の方向性とほとんど一致している。亀裂群は前記の3通りのグループにそのまま当てはめることができる。コンターのピークで示される亀裂群の卓越方向(走向/傾斜)は前記の亀裂群のグループのピークとほとんど変わらない。

グループ別の最大頻度は北側ではグループ1とグループ2がともに5%、グループ3が2%を示し、南側ではグループ1とグループ2がともに4%、グループ3が3%を示す。また、超微粒子セメント、高炉B種セメントグラウトとも侵入亀裂面方向の頻度分布はほぼ同様の傾向を示す。

6. 亀裂トレースから見た亀裂/グラウト侵入亀裂の方向性

図-16は鉛直掘削面の亀裂トレース(掘削面と亀裂面の交差線)の傾斜(見掛け傾斜)別頻度を示す。

(a)は北側、(b)は南側の亀裂トレースである。図-17は水平掘削面の亀裂トレースの方向(走向)別頻度を示す。図中同心円の半径は各方向別に観察され

た亀裂の頻度を示す。

鉛直掘削面では、北側、南側掘削面ともN側に50°前後の傾斜を示すグループ1の亀裂(層理面およびこれに平行する亀裂、頻度40%以上)と反対方向(S側に20°~50°の傾斜を示す亀裂(頻度30%前後)が卓越する。高角度のグループ2のうち、90°に近い亀裂の見掛け傾斜角は亀裂の走向と掘削断面の成角の違いにはほとんど影響されず真の傾斜角に近い角度が示されるので、同じ図でも90°に近い角度が示されることになるが、実際には観測面は60°~80°の傾斜を持つため、後者のように比較的低い見掛け傾斜を示す。一方、グループ3の亀裂は走向が観測面と鋭角に交わるため非常に小さな見掛け傾斜を示すことになるが、頻度的には明確にその存在を示さない。

図-17の水平掘削面の亀裂トレースは、N20°~40°Eの走向を持つグループ2の亀裂(頻度25~30%程度)とN90°前後の走向を持つグループ1の亀裂(頻度30%程度)が卓越し、N-S~N10°Eの走向を持つグループ3の亀裂は20~25%の頻度でこれらに次ぐ。

一方、図-18, 19は掘削面において観察された亀裂のうちグラウトの侵入が確認されたものの方向別頻度を示すものである。図-16, 17から以下のようなことが分かる。

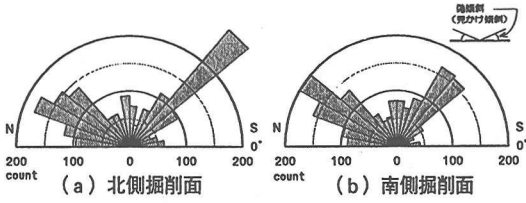


図-16 鉛直掘削面の亀裂トレースの傾斜 (見掛け傾斜) 別頻度

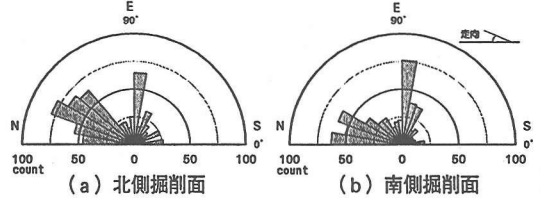


図-17 水平掘削面の亀裂トレースの傾斜 (走向) 別頻度

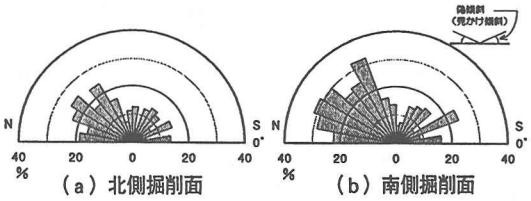


図-18 鉛直掘削面のグラウト侵入亀裂トレースの傾斜 (見掛け傾斜) 別頻度

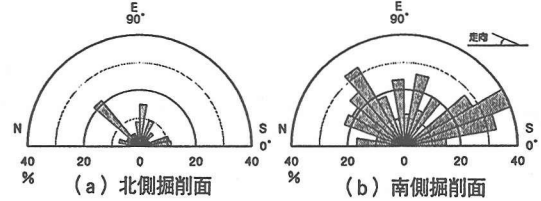


図-19 水平掘削面のグラウト侵入亀裂トレースの傾斜 (走向) 別頻度

(1)鉛直掘削面では(図-18)、北・南ともグループ2に相当する亀裂が高い侵入頻度を示す一方、亀裂の数と方向性において顕著なグループ1の亀裂は比較的低い侵入頻度を示す。

(2)先にも指摘したように、水平・鉛直両掘削面においても、超微粒子セメントが注入された南側の亀裂の方が高い侵入頻度を示す。また、超微粒子セメントは高炉B種セメントにくらべて、広範囲に分布する傾向を示す。

グループ2の亀裂がグラウト侵入頻度が高い理由は、グループ1の亀裂は広範囲に顕著に分布するが堆積構造に沿うため上載荷重の影響等を受けて、小さな開口性を示すのに対して、グループ2の亀裂はグループ1を切る高角度の亀裂であり、大きな開口性を示す傾向があり、グラウトが侵入しやすいことが挙げられる。

超微粒子セメントがより多くの亀裂に侵入したことは、岩盤内の微細亀裂に対するその優れた浸透性を示すものである。すなわち、南側岩盤(超微粒子グラウトが注入された岩盤)は北側にくらべて風化が進行し、多くの亀裂は流入粘土や破碎粘土で閉塞されていたことを考え併せて、超微粒子セメントの優位性は強調されるべきである。

なお、以上の考察において水平観察面は掘削による観測面の攪乱、および観察面清掃時のグラウトの洗い落としのため、鉛直観察面にくらべて観察結果

の信頼性にやや劣ることが指摘された。

7. まとめ

グラウチング試験後の亀裂性岩盤のはぎ取り調査結果をもとに亀裂およびグラウト侵入亀裂の方向性を解析した結果、次のようなことが分かった。

- (1)各水平・鉛直掘削面の亀裂トレースの観察により、立体的なグラウト侵入形態が再現された。
- (2)グラウト侵入亀裂の空間的な分布は、卓越する亀裂方向分布に支配される傾向を示した。すなわち、グラウトの侵入が確認された亀裂の方向は、もとの亀裂の方向分布にほぼ一致する。
- (3)亀裂トレースの観察によれば、方向別グラウト侵入頻度は各亀裂グループの卓越方向で比較的大きな値を示す。これは卓越方向の亀裂が、より高い透水性とグラウタビリティを持っていたことを意味する。
- (4)方向別グラウト侵入頻度は亀裂の方向グループによっても異なる挙動を示す。層理面を切る高角度の亀裂グループは、層理に沿った亀裂グループにくらべて比較的大きな侵入頻度を示す。これは層理に沿った亀裂がより密着したものになるのにくらべて、これを切る高角度亀裂は開口性にあるためと考えられる。
- (5)風化の進んだ亀裂性岩盤や破碎部を伴う岩盤で

は、岩盤等級と透水性あるいはグラウトビリティは必ずしも一致しない。これは流入粘土や破砕粘土によって開口亀裂が塞がれてしまうことによる。

(6) 注入材では超微粒子セメントが高炉 B 種セメントにくらべ、より高密度により広範囲に分布した。

また、透水性の改良も超微粒子セメントが高炉 B 種セメントよりも低位のルジオン値まで改良された。

(7) グラウトの水セメント比は、練り上げ時は、600%であったが、硬化後は水が分離して 80%前後にあった。

8. あとがき

従来、注入したグラウトを三次元的に目視で追跡した報告例は極めて稀である。筆者らは、山口県宇部市の実験場でグラウチング試験前後で種々の原位置試験を実施し、はぎ取り調査によってグラウト侵入亀裂の立体的な把握を試みた。本論はこの結果をまとめたものである。

これによって亀裂注入のメカニズムを解明するまでには至らなかったが、それに一步近づいたといつてよいように思える。今後更に追求を深め、基礎的なよりどころを見い出していくつもりである。

最後に、はぎ取り調査やデータ整理に協力を得た山口大学工学部社会建設工学科の坂尾和男技官をはじめ学生・院生諸氏に感謝の意を表します。また、宇部興産(株)技術センターの馬場敦氏にはグラウト硬化体のサンプルの化学分析をお願いした。また、(株)東建ジオテック山口営業所長北村春夫氏には実験地区の地質についての資料を提供いただいた。

これらの方々に紙面を通じ謝意を表します。

本論は(株)間組、宇部興産(株)、日本基礎技術(株)、(株)ダイヤコンサルタントおよび川崎地質(株)の共

同実験の成果の一部を発展させたものである。

参考文献

- 1) 神尾重雄, 玉田展, 裏山真次郎, 解良一夫: 亀裂性岩盤の透水性評価に関する一考察, 土木学会論文集, No. 424/III-14, pp. 261-269, 1990. 12.
- 2) 北村孝海, 米田俊一, 寺戸康隆, 中川浩二: 岩盤レーダーによる水みち推定およびグラウト硬化過程と効果の推定, 土木学会論文集, No. 454/III-20, pp. 83-92, 1992. 9.
- 3) 寺戸康隆, 米田俊一, 春日明, 中川浩二, 結城則之: はぎ取り調査における注入後のグラウト侵入形態と亀裂系および亀裂性状の関係, 第 24 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp. 116-120, 1992. 2.
- 4) 寺戸康隆: 孔内静水圧試験法(多段階孔内定水位試験法)を用いたルジオンテストの適用性について, 応用地質, Vol. 33, No. 5, pp. 1-10, 1992. 12.
- 5) 土木学会: ダムの地質調査, p. 85, 1986. 10.
- 6) 亀和田俊一, 遠藤努, 西垣好彦, 杉江剛史: ボーリング孔壁画像処理手法とその解析について, 応用地質, Vol. 34, No. 6, pp. 49-57, 1994. 2.
- 7) Terzaghi, R.: Source of Error in Joint Surveys, Geotechnique, Vol. 15, pp. 287-304, 1965.
- 8) 米田俊一, 向上拡美, 寺戸康隆, 中川浩二: 岩盤注入セメント系グラウトの浸透挙動に関する検討, 土木学会論文集, No. 480/VI-21, pp. 63-65, 1993. 12.

(1996. 8. 27 受付)

OPEN-CUT SURVEY ON A HEAVILY FRACTURED ROCK MASS AFTER GROUT INJECTION

Yasutaka TERADO, Seiji NAKAGAWA, Shunichi YONEDA, Isao SHIOZAKI,
Yuzo OHNISHI and Koji NAKAGAWA

The authors conducted an extensive open-cut survey on a grouted rock mass, which is a Triassic formation of sandstone inter-bedded shale. The salient results are:

- 1) From the traces of fractured obtained on both the horizontal and vertical sections of the excavation, three dimensional images for the distribution of original and grout injected fractures were obtained.
- 2) The directional distribution of the grout-injected fractures coincided with the one for all the fractures. Directional group sub-parallel to the geological bedding structures showed less tendency to be penetrated by grout than those of vertical or nearly vertical fractures.
- 3) The water/cement ratio of the grout dropped from 600% at mixing to about 80% after getting hardened inside the rock formation.