

日本鉄道建設公団 青函建設局 正会員 松尾 昭吾
日本鉄道建設公団 青函建設局 正会員 松下 芳亮
日本鉄道建設公団 青函建設局 正会員 末永 充弘

1. まえがき

青函トンネルでは、線形、湧水の性状、地質状況等から、(1)これを安全に掘るため、(2)将来に亘ってトンネルの品質を保持するため、(3)揚水費等の維持費の軽減を計るため等を目的として、1部陸上部を除く全区間に亘って掘る前に切羽注入を実施しており、更に状況によっては、後向止水注入を実施した箇所もある。注入材料としては、(1)ゲル化物の強度が高いこと、(2)浸透性が良いこと、(3)ゲルタイムの調整が可能なこと、(4)耐海水性、(5)安定性等を有していることが条件であり、開発研究の結果、高炉コロイドセメントと⑤1号珪酸ソーダ75%溶液とによる L・W が優れていることが判明したのでこれを主材料として施工している。一般に珪酸ソーダを混入した湧水は、(1)PHが高い、(2)残留比色シリカ濃度が高い、(3)白濁する等があり、特に(2)、(3)については、海底部では湧水中の Ca^{2+} 濃度が約1200PPMと高いため、これと反応して析出沈殿するが淡水中では低いので、ゾルとして乳白濁を呈することから、排水処理に特殊な設備を要し、その開発が必要であったことから、専用師工区においてはセメント系の注入材料である E・S と高炉コロイドセメントとの組合せとして施工し、好結果を得ている。ほぼ同時期、叢内工区においては、当初珪酸ソーダを使用したが高炉コロイドセメント中の複雑な亀裂性状を有した擾乱帯に遭遇したこと等から浸透性が悪くなり、注入量が確保されず止水効果が悪くなり、7'400m〜7'45mまでの注入について E・S を採用してこの問題を突破した。また吉岡工区の本坑においては、黒松内層の軟岩及び挟性砂層に対する止水効果の向上と注入による砂層の強度の向上とを計ることを目的として補助的に E・S 注入を実施している。これらの工区の配合は、A液は E・S と E・S セッターとし、W/ES は、500%〜600%、セッターはセメント量の2%〜4%、B液は高炉コロイドセメントで W/C は、100%〜600%として両液を1:1の混合割合とし、15ショット方式で注入しており各工区において地質状況、湧水状況等を勘案して注入パターン・モードを選定している。以下に、E・S と高炉コロイドセメントとの混合物(以下 E・S グラウト)、ゲル化物の物性、浸透状況等についての検討結果を述べる。

2. 材料特性

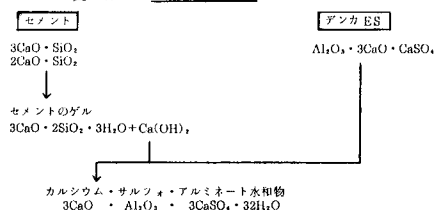
E・S の成分、硬化機構について、表-1、図-1に示す。成分は、カルシウム・サルフォ・アルミネートが大部分であり高炉コロイドセメントとの水和反応はセメント中の C_3S 、 C_2S の水和により、 $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ が生ずる。

この $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と E・S の成分であるカルシウム・サルフォ・アルミネートとが反応してエトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) が生成される。これによりセメントの水和速度が促進され短時間に強度を発現する。この短期の硬化時間を延伸させるために $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中の Ca^{2+} を一時的に封鎖する作用を持つセッターを選定剤として使用する。E・S グラウトの粒度及びゲルタイムは、W/C、W/ES 等により相違するが W/C = 100%〜600%、W/ES = 500%〜600% の範囲では概ね、6〜85cp であり至時変化を見ると、セッターが有効に作用しているのは上昇は小さく、セッターの作用がなくなると急激な上昇となりゲル化する。ゲルタイムは、セッター量が2%〜3%で約5〜9分である。E・S グラウトの加圧脱水率は、W/C = 100%で15%〜20%、W/C = 600%で25%〜70%である。加圧脱水試験によると加圧力10MPaまでは

表-1. デンカ E・S 及び高炉コロイドセメントの化学成分表

品名	lg-loss	In-sol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	粉末度 (45μ)	比値
デンカ E・S	0.6	0.8	2.2	23.9	0.7	42.6	0.2	28.3	5,500	2.9
高炉コロイドセメント	0.5	0.1	28.5	11.0	1.8	54.3	2.3	2.2	6,100	3.0

図-1. E・S 硬化機構図



6〜85cp であり至時変化を見ると、セッターが有効に作用しているのは上昇は小さく、セッターの作用がなくなると急激な上昇となりゲル化する。ゲルタイムは、セッター量が2%〜3%で約5〜9分である。E・S グラウトの加圧脱水率は、W/C = 100%で15%〜20%、W/C = 600%で25%〜70%である。加圧脱水試験によると加圧力10MPaまでは

急激な脱水率の増加を示すが以後の増加率は小さい。尚加圧脱水後の強度は高く特に、加圧力 30 kg/cm^2 以上、枚令28日では配合に関係なく高くなっている。ゲル化物の圧縮強度は算用師工区で $67 \sim 150 \text{ kg/cm}^2$ を確認しており砂質泥岩中に注入痕跡を含む岩石を採取して試験室で整形し測定したところ、圧縮強度は $11 \sim 63 \text{ kg/cm}^2$ 、曲げ強度は $0.9 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ 、剪断強度は $2.5 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ 、付着強度は $2.2 \sim 7.1 \text{ kg/cm}^2$ （すべて地山部分で破壊）であった。また、ゲル化物の含水率は概ね $19 \sim 40\%$ であった。ゲル化物を含む岩石（砂質泥岩）の透水量を図-2に示す装置で測定して①式により透水係数を算出した。また本装置を使用して 10 kg/cm^2 の加圧状態で30日までの透水状況を観察し併せて透過水の水質分析も行つて安定性を検討した。この結果、①透水係数は 3 kg/cm^2 では $0.10 \text{ }^{\circ}\text{cm}^2$ で $1.4 \sim 3.8 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ とほぼ地山の $1/2 \sim 1/3$ に減少している。②長期加圧時の透水係数は $12 \sim 19 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ であり、LW状試体の $1/10 \sim 1/5$ 。③透過水の溶出イオン量もLWより少ない。これらから材料としても安定しており注入による効果が大きいものと考えられる。

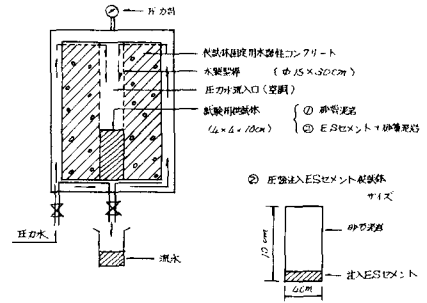
3. グラウトの浸透性

ゲル化物の注入状態及び注入巾について地山に注入された痕跡をダイヤモンドカッターで切り出し表面を平滑にして、観察した結果、表-2のような状況でありゲル化物の巾が大きく層数が多いこと及び地山との境界部が明確ではなく地山を巻き込んだ状態でゲル化していることが特長である。更に電子顕微鏡、蛍光X線分析、X線回折、細孔率分布を測定した結果、①エトリンガイト及びセメント水和物が流紋岩の結晶（ $5 \sim 20 \mu$ ）の間隙にまで浸透していること。②ゲル化物からはほぼ 30 mm の地山まで浸透していると考えられる結果を得た。これらから判断して、F-Sグラウトは浸透性においても優れていると考えられる。

4. あとがき

本材料による施工数量は、約 $40,000 \text{ m}^3$ である。止水効果を掘さく後の坑道への出水量で表わすと算用師工区は始発方が $0.3 \text{ }^{\circ}\text{m}^3/\text{m}$ 、終発方が $1.8 \text{ }^{\circ}\text{m}^3/\text{m}$ 、全体で $1.0 \text{ }^{\circ}\text{m}^3/\text{m}$ 、震内工区は $1.2 \text{ }^{\circ}\text{m}^3/\text{m}$ 、吉岡第12本坑は $0.3 \text{ }^{\circ}\text{m}^3/\text{m}$ となっており、先進導坑での平均坑道出水量が $0.4 \text{ }^{\circ}\text{m}^3/\text{m}$ であり、算用師終発方震内工区を除くと先進導坑と同程度の効果であり、この区間についても地質状況を考慮すれば成果があったものと考えている。以上の状況から、F-S注入の効果としては、①イオン浸透効果による止水効果、②高強度ゲル化物の地山への浸透による地山の補強効果があるものと考えている。流紋岩、砂質泥岩中に浸透したエトリンガイトの状況は、電子顕微鏡、X線細孔分布等により確認出来たがその生成過程を考えて見るとこのような微細な間隙にはエトリンガイトが針状結晶となって浸透することは考えられず、注入圧力により亀裂中で加圧脱水現象が起り、エトリンガイトの成分をイオンの形で含んでいる分離水が浸透してエトリンガイトに成長してこれが結晶間隙を網目状に埋め、湧水の透水度を低下させる効果を担っているものと判断している。またこの効果は長期透水試験の結果からも十分安定であると考えている。次にゲル化物と地山との境界部の状況及び付着強度試験受にはエトリンガイトの浸透状況から判断してゲル化物と地山とは一体となっているものと判断され、これが地山中の弱線部を満たすことから地山中に骨組を形成して岩盤マスのとしての強度の向上に寄与しているものと考えている。参考文献、樋口芳朗他「グラウト組成物」、新田豊他「急硬性セメントによる止水工法」。

図-2 岩盤及びESセメント注入部の透水試験方法



アウトプット表による透水試験結果

透水係数算出式(①式)

$$K = \frac{Q}{A} \times \frac{L}{P} \times \frac{Q}{A}$$

K: 透水係数 (cm^2/sec)

S: 水の単位影響 ($0.001 \text{ }^{\circ}\text{cm}^2$)

P: 水圧 ($3 \text{ kg/cm}^2, 5 \text{ kg/cm}^2, 10 \text{ kg/cm}^2$)

A: 試験試体の断面積 (10 cm^2)

A: 断面積 ($4 \times 4 = 16 \text{ cm}^2$)

Q: 流量 (cm^3/sec)

表-2 ゲル化物の浸透状況

項目	ゲル化物の巾 (%)	層数	平均層厚 (mm/層)
算用師	18 ~ 28	24 ~ 40	0.5 ~ 1
— (1年後)	40	46	0.9
吉岡 第12本坑	10	1	10
— 第13本坑	150	16	8