

低透水性岩盤における効果的注入工法の開発

Effective Grouting System for Rock Mass with Low Permeability

山本拓治*, 日比谷啓介*, 伊達健介*, 大場康信**

Takuji Yamamoto, Keisuke Hibiya, Kensuke DATE, Yasunobu Oba

Effective grouting system (including grouting material) suited for the grouting into rock mass with low permeability needs to be developed, especially in the construction of underground storage plant or repository of radioactive waste. Authors aimed at the fineness of new material (US-grout), which was developed in Sandia National Laboratories for the prevention of radioactive leakage, and estimated its fundamental characteristics by laboratory tests in which the popular super fine cement was adopted as its comparison material. Furthermore, the dynamic grouting system was developed, making possible to inject the grout with high viscosity into the small fissure in rock mass by putting the dynamic pressure with high frequency on constant pressure. Injection tests using the new system were carried out on-site, and the grouting characteristics of US-grout and super fine cement became clear.

In this paper, the fundamental characteristics of US-grout and super fine cement obtained from laboratory tests, the outline of the dynamic grouting system, and the grouting characteristics of both materials obtained from field tests were mentioned.

Key Words: dynamic grouting system, ultra super fine cement, permeability, Lugeon test

1. はじめに

石油やLPGの地下石油備蓄基地および放射性廃棄物の処分施設の建設においては、従来の注入工法では注入が困難な低透水性の岩盤部へも、経済的かつ確実な注入が要望されている。そのため、筆者らは、米国国立研究所が核廃棄物による放射能の漏洩を防止するために開発したグラウト材料と国内の代表的超微粒子セメントの比較を目的とした室内試験を実施するとともに、注入効果を確認するための原位置試験を実施した。

また、高濃度のグラウト材料を効果的に注入するために、動的注入工法を開発した。この工法は、一定の注入圧力に高周波の動的な圧力を付加することにより、微細な割れ目にも高濃度、高粘性のグラウトを注入する新しい止水工法である。

本論文は、国内と米国の代表的超微粒子セメントの特性比較試験結果と新たに開発した動的グラウチングシステムの概要を紹介するとともに、透水性の異なる複数の岩盤状況において、従来の注入工法（以下、静的注入工法と称す）と動的注入工法の注入効率の違い、材料の違いによる注入効率の違い等を実現場での注入試験により確認した結果を報告するものである。

2. 注入材料の特性

米国国立研究所で開発された超超微粒子注入材（Ultra Superfine：以下USと記す）と、国内の代表的な超微粒子注入材（Super Fine：以下SFと記す）のグラウト材としての諸物性と特徴を比較することを目的として、現場での実注入試験に先立って、室内試験を実施した。

* 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部

** 正会員 ケミカルグラウト(株)施工本部 岩盤工事部

表-1に、使用材料の概要とカタログに記載されている各材料の諸物性を示す。試験材料にはUSを2種類(スタンダード、プレミアム：以下それぞれUS-S、US-Pと記す)とSFを1種類使用し、混和剤は各メーカーの推奨する高性能減水剤を推奨する割合で使用した。ただし、USの化学成分は公表されていないため、主要成分である火山灰(パミス)の分析値を用いた。

USは、通常水セメント比の低い配合での注入を標準としているが、国内では通常100から1000%での配合を用いており、現場の状況に応じて配合切り替えを行いながら注入している。そこで、本試験では、US-P、US-Sの基準配合である60%、80%と、日本で代表的に使用される水セメント比600%の配合で試験を実施した(表-2参照)。なお、試験はすべて20±2℃の恒温室で実施した。浸透性試験は55mmのアクリルパイプを加工した装置に空隙率が45%になるように豊浦砂を計量し、15cmの砂層を作成した後、上部ポートより500mlのセメントミルクを投入し5分後に懸濁液の通過した砂層の長さを測定した。粘性試験はB型回転粘度計を使用し、フリージング試験は土木学会基準、その他の試験はJIS基準に従った。

図-1に各材料の粒度分布を示す。同図には、普通ポルトランドセメントおよび高炉B種セメントの代表的粒度分布も併せて示している。表-3に各種試験の性能試験結果を、表-4に各グラウト材料の強度と乾燥収縮率の試験結果を示す。

試験結果をまとめると以下のようなものである。

- ① USは火山灰を主成分とし、耐硫酸塩ポルトランドセメントクリンカー及び微量の分散剤で構成される注入材である。火山灰はセメントクリンカーより柔らかく被粉砕性が高いため容易に微粉化が可能となり、粒径の異なる製品の製造が比較的容易に可能になっているものと推察される。
- ② 粒度分布は、US-Pがもっとも細かく、1μm通過分も20%程度と微粒子分が多く、5μm以上の粒子はほとんど存在しない。SFとUS-Sは、ほとんど差がなく平均粒子径も2.5から3.5μm程度であった。
- ③ 浸透性は、いずれのグラウト材も非常に良好な性能を有し、試験方法の範囲内では、明瞭な差があるとはいえなかった。ただし、US-Pは1μm以下の超微粒子分が多いにもかかわらず、低水セメント比についても、一定の浸透性を有する材料であることは、特筆すべきであり、この理由は、分散剤、火山灰の効果が大きいものと思われる。

表-1 使用材料の物性

材料の種類	混和剤	添加量(wt%)	密度(g/cm³)	平均粒径(μm)	主要化学成分(%)				
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
SF	M(高性能減水剤)	SF×1.5	3.0	3.0	29.4	10.4	1.7	51.4	3.5
US-S	D(高性能減水剤)	US-S×1.05	2.63	2.5	70.5	13.5	1.1	0.8	0.5
US-P		US-P×0.673	2.70	4.0					

表-2 試験に使用した配合

材料の種類	W/C(%)	混和剤添加量(%)
SF	60	1.50
	80	
	600	
US-S	80	0.678
	600	
US-P	60	1.05
	600	

表-4 強度および乾燥収縮率

種類	配合 W/C(%)	乾燥収縮率 (%)			圧縮強度 (N/mm²)	
		1週	4週	8週	1週	4週
		1週	4週	8週	1週	4週
SF	60	-0.31	-0.40	-0.45	28.6	53.0
US-S	80	-0.08	-1.16	-1.30	3.36	8.57
US-P	60	-0.11	-0.55	-0.60	12.1	26.8

表-3 各種試験の性能試験結果

種類	配合 W/C(%)	浸透性試験 浸透長(cm)				粘性試験 粘度 (10 ⁻³ Pg-s)	フリー ディング率 (%)	粒度分布								
		直後	30分	60分				直後			30分			60分		
		50μ	50μ	50μ	50μ			50μ	95μ	50μ	50μ	95μ	50μ	50μ	95μ	95μ
SF	60	6.0	6.0	5.5	50.7	0.0	3.43	10.36	3.48	10.35	3.51	10.55				
	80	14.0	14.0	13.0	15.2	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	600	15.0	15.0	15.0	2.1	88.5	3.19	10.24	3.32	10.14	3.36	10.48				
US-S	80	12.0	12.0	10.0	21.4	6.76	2.83	8.96	2.92	10.39	2.85	9.35				
	600	15.0	15.0	15.0	2.1	85.7	2.80	8.94	2.77	9.11	2.77	8.63				
US-P	60	6.0	5.5	4.5	74.7	0.0	1.91	5.29	1.88	4.63	1.92	5.74				
	600	15.0	15.0	15.0	3.5	79.4	1.90	4.79	1.90	4.79	1.89	4.71				

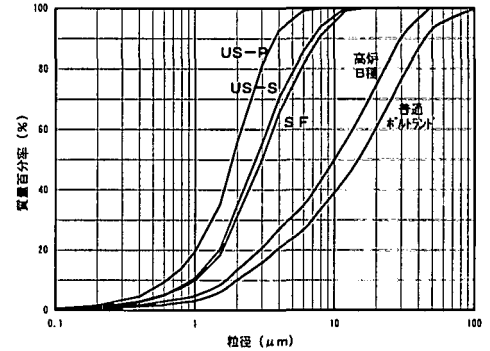


図-1 粒径加積曲線

- ④ 粘性は、SF がもっとも低く、US-P が最も高い値を示した。分散剤の効果が大きいものと思われるが、粒度と反比例する結果となった。これは、US の混和材が流動性を高める目的だけではない可能性があるかと推察される。
- ⑤ プリージング率は、水セメント比 60% でどちらのグラウトも 0% が得られているが、高水セメント比では、大きな違いが見られ、600% では、SF の 86.5% に対し、US-P は 79.4% と最も小さく、粒度との相関性があり、材料独自の成分による違いが明確である。
- ⑥ 乾燥収縮率は、SF が 0.31% と最も大きく、US とかなり異なる結果となった。この理由は、SF の初期水和収縮と水の蒸発に起因すると考えられ、US の乾燥収縮率が小さいのは、粒度が細かいことと、火山灰粒子中の水の抱きこみにより保水性が大きいためと考えられる。ただし、地下水位以下の通常の岩盤中のグラウト材として考えた場合、グラウト材が乾燥状態になることはありえず、実際に注入したグラウト材がこのような差になることは考えにくい。US は高温の発熱を伴う高レベル放射性廃棄物処分施設への注入を目的に開発されたものであるためこのような結果となったと考えられる。
- ⑦ 圧縮強度は、SF は US-S よりも強度発現の大きかった US-P と比較しても、1 週、4 週とも 2 倍から 2.4 倍と極めて高強度が得られている。この理由は、グラウト材の構成材料による水和挙動の違いによるものであると考えられる。

以上、米国で開発された材料(US)と国産の代表的材料(SF)の諸物性に関する基礎的比較試験を実施した。その結果、浸透性については、ほぼ同程度の性能を有していることが明らかになったが、今後、通常のダムやトンネル以外の分野での使用やより高度な止水性能を要求される構造物の建設を想定する場合は、圧力下での注入試験、低水セメント比での施工性、改良効果の確認、注入硬化体としての止水性、透水性の確認、耐久性および安定性の確認、低温、高温下での特性等について検討を進めていく必要がある。

3. 動的グラウチングシステムの概要

(1) システムの概要

本システムは、脈動の少ない定圧グラウトポンプにより一定圧力でグラウトを供給する注入孔内までのライン上に、脈動発生装置を付加する方式である。

定圧グラウトポンプは、インバーター制御モーターで駆動する 3 連式単動ピストン型であり一定圧力、流量の供給が可能となっている。

脈動発生装置はプランジャー型ポンプによりオイルをアクチュエータに送り込み脈動を発生させる機構である。発生装置は振動数を 3~20Hz まで可変でき、振幅は内蔵したアキュムレータにより 4.5MPa を上限として抑えることが可能である。

脈動発生装置は、発生装置に内蔵した圧力センサーからの信号をデータロガーによりデジタルデータに変換し、リアルタイムにコンピューターの LCD 表示にて波形を確認し、フィードバックするシステムとした。グラウトの製造は、微粒子系セメントの高濃度、高粘性のグラウトの混練りが可能な高速ミキサー（最大回転数 3,500rpm）を使用した。図-2 に本システムの概要図を示す。

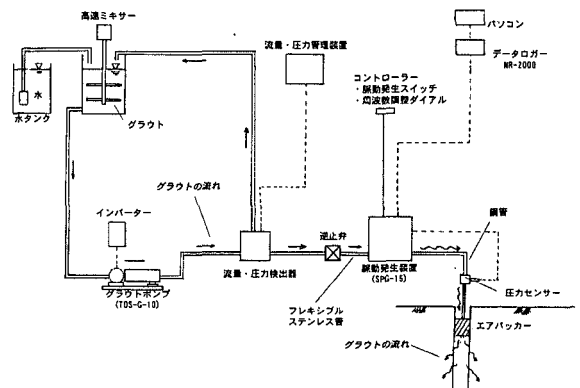


図-2 動的グラウチングシステム概要図

(2) 脈動圧確認試験

注入ホース長の増大とともに注入材に付加した脈動が減衰することが考えられる。また、圧力を制御するアキュムレータの原位置での性能や機械自体の耐久性についても、未知の部分があったため、ミルク注入を実施する前に、

水による脈動圧確認試験を実施した。写真－１は脈動圧発生装置である。図－３(a)(b)は定常圧 0.5MPa の状態で、12Hz の脈動を与えた場合の注入ホースの長さやアキュムレータの有、無の場合の脈動波形の比較を示したものである。図－３(a)では、アキュムレータを使用することによって、必要以上の圧力を吸収・制御できることがわかる。ただし、実工事においては様々な注入条件に対応する（たとえば振幅を大きく抑える）必要がある場合もあることを考慮し、アキュムレータの容量をさらに大きくし流量調整弁にて調整可能となるよう変更した。



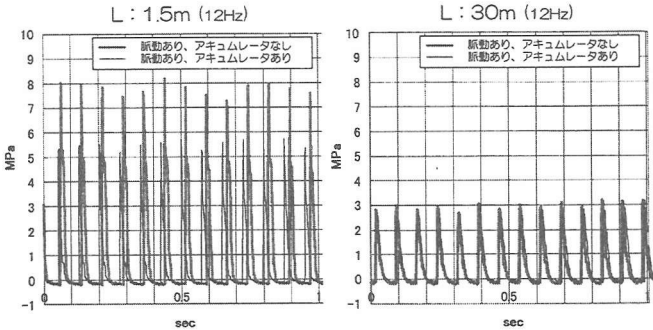
写真－１ 脈動圧発生装置

一方、図－３(b)に示すように、ホース長が 30m にも及ぶと、ホースの弾力により、アキュムレータの必要性以上に減衰が進むことがわかったため、実際の施工にあたっては減衰防止のため脈動発生装置から先を SGP 鋼管とした。

また、脈動発生時にはホースが大きく振動し、配管そのもの及びアクチュエータの一次側の定圧ポンプに損傷を与えることが懸念されたため、脈動発生装置前後を SGP 鋼管およびステンレス製フレキシブル管の組み合わせとし、リターンの脈動による振動を防止

するために、アクチュエータの一次側に逆止弁を設けることとした。なお、逆止弁は脈動を注入側へ安定して効果的に付与する役割も同時に果たしている。

これらの仕様変更に伴い、脈動発生装置により発生した脈動を減衰せずにグラウト孔に伝播させることも可能となり、グラウトポンプ側への逆の伝播による減衰も抑制することが可能となった。



(a) ホース長 1.5m (b) ホース長 30m

図－３ 脈動波形図

4 原位置注入結果

(1) 注入試験の概要

注入は花崗岩体に掘削したトンネルの中から水平方向に長さ約 75m のボーリング(φ66)を 5m のフォアステップで掘削・注入した。1 次孔は 10m 間隔、2 次孔はその中央に削孔しており、総注入ステップは約 250 である。注入域には、3 本の破碎帯が存在し、アプライトが貫入している。このアプライトと断層の周囲は、破碎され高透水域(10～20 ルジオン)となっているが、その他は、概ね 5 ルジオン以下の低透水域となっている。注入に際しては、透水試験を実施し、注入材料や注入工法を変化させて注入を実施した。注入材料については、SF および US-P を採用し、W/C はそれぞれ 800%, 400% とした。なお、注入途中での配合切り替えは実施していない。

表－５に材料と工法を組み合わせた計 4 ケースの注入試験仕様一覧を示す。

(2) 注入結果

セメントミルクの注入に先立って、周波数を変化させて水注入試験を実施した。定常注入圧は 0.5Mpa とし、周波数を 0 から 12Hz まで変化させた。図－４は 3 ルジオン程度の岩盤で実施した例であり、ケース 1、ケース 2 はそれ

表－５ 原位置注入試験時の試験仕様

No.	ケース名	材料	工法	圧力(MPa)	周波数(Hz)	W/C(%)
1	S-SF	SF	静的(S)	0.5	-	800
2	D-SF	SF	動的(D)	0.3～1.1	3～15	800
3	S-USP	US-P	静的(S)	0.5	-	400
4	D-USP	US-P	動的(D)	0.3～1.1	3～15	400

ぞれ、アキュムレータを操作することによって、注入圧の上限を 3.3Mpa、2.0Mpa にした例である。図-5 に試験の結果得られた周波数と注入流量の関係を示す。この結果によると、圧力振幅が大きいケース 1 の例では、周波数の上昇に伴い注入量も大きくなっているが、圧力振幅の小さいケース 2 では、周波数を上昇させても大きな注入量の変化はなかった。むしろ、中間の 6Hz 程度で最大の注入量を計測した。したがって、今回の注入では、機械の耐久性も考慮し、6~12 Hz の比較的 low 周波数での注入を実施することとした。今回の実験では、セメントミルクでの周波数を変化させたデータは少ないため、報告できないが、地盤の透水性と周波数や圧力振幅の違いによる注入効率の違いについては、今後検討していきたい。

図-6 は、表-5 に示す材料と工法を組み合わせ合わせた合計 4 ケースの原位置注入結果をまとめたものである。横軸にはルジオン値、縦軸には注入材料によって W/C が異なることを考慮し、注入流量ではなく単位長さあたりに注入されたセメント量（以下、単位セメント量とする）を採用した。この図を見ると、USP と SF の材料の違いによる注入流量の違いはほとんどなく、工法が変わってもその傾向は同じである。しかし、静的注入工法と動的注入工法では、同程度のルジオン値でもかなり注入量がことなり、高濃度のグラウト材が効果的に注入されていることがわかる。たとえば、5 ルジオン程度の岩盤では、約 2 倍のセメントを注入することが可能であった。今回注入した岩盤では、岩盤強度のわりには、比較的低圧力の注入しか出来なかったため、その差は少ないが、より大深度で高強度の岩盤部で、高圧力の注入が可能な場合は、その効果が増大するものと考えられる。

5. おわりに

米国立研究所が核廃棄物による放射能の漏洩を防止するために開発したグラウト材料と国内の代表的超微粒子セメントの比較を目的とした室内試験を実施するとともに、日本の岩盤への注入効果を確認

するための原位置試験を実施した。その結果、この材料は、国内で使用されている超微粒子セメントより、さらに粒径が小さく、ブリーディング、収縮率が小さい材料であるが、浸透性、注入量については、国内産の超微粒子セメントと変わりがなかったことを確認した。また、高濃度のグラウト材料を効果的に注入するために、動的注入工法を開発し、透水性の異なる複数の岩盤状況において、従来の静的注入工法と動的注入工法の注入効率の違い、材料の違いによる注入効率の違い等を実現現場での注入試験により確認した。その結果、動的注入工法は、グラウト材の流動性、浸透性を大幅に向上出来る工法であることを確認した。なお、室内材料試験に際しては、日鐵セメント(株)の協力をいただいた。

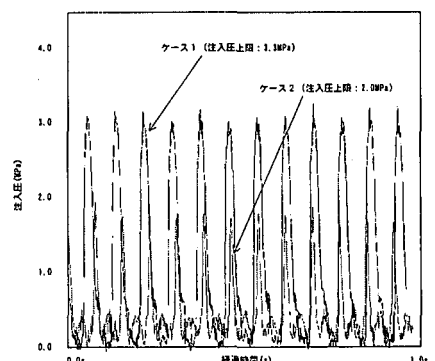


図-4 1秒間における注入圧の変動

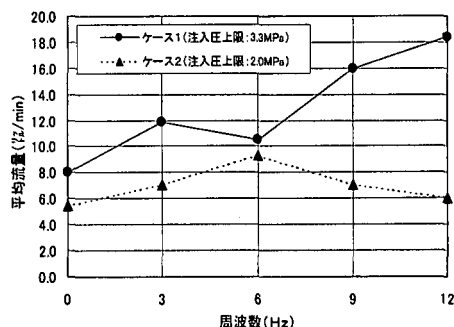


図-5 周波数と平均流量の関係

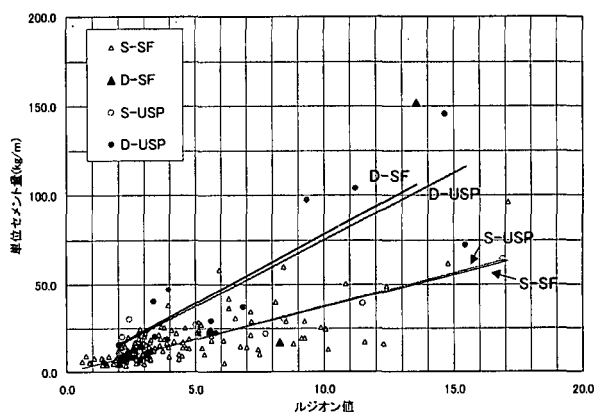


図-6 単位長さあたりに注入されたセメント量