

高い浸透性能を発揮する 「極超微粒子セメント注入材料」

竹内 仁哉¹

¹日特建設株式会社 技術本部 設計部

液状化対策、耐震補強、地盤強化、止水等を目的として薬液注入工法が用いられている。この工法は、ミキサー内で混合した注入材料を地盤内に浸透させて固結させる工法であり、他工法に比べて建設副産物の発生が少なく、施工設備も小規模で済むため利便性が高い。しかし、砂質土地盤に十分に浸透し、かつ強度発現性に優れた注入材料は今まで存在しなかった。そこで高い浸透性、強度発現性、耐久性を有する新しい注入材料を得るために、従来のセメント系注入材料よりも更に粒子径を細かくした極超微粒子セメント注入材料を開発した。本論文では、この極超微粒子セメント注入材料の注入特性と施工事例について報告する。

キーワード：極超微粒子セメント、セメント系注入材料、浸透性能、高強度改良

1. 極超微粒子セメント注入材料の特性

(1) セメント粒子径

極超微粒子セメント（以下 USFC と略す）は、注入材料としての浸透性能を向上させるために、セメント粒子を極力、微細に粉碎・分級する特殊な工程を経ることによって製造されている。図-1 にレーザー散乱・回折法で測定した USFC の粒度分布を示す。図中には、市販の超微粒子セメント（以下 SFC と略す）と普通ポルトランドセメント（以下 OPC と略す）の粒度分布も併記した。図-1 から USFC の平均粒径(D₅₀)は 1.5 μ m であり、SFC の 4 μ m に比べて約 1/3、OPC の 20 μ m に比べて約 1/13 と極めて微細なセメント粒子であることが理解できる。写真-1 に USFC と SFC の電子顕微鏡写真（5000 倍率）を示すが、両者の粒子径の差異はより明瞭である。そしてこの粒子径の差異（大小）が、後述のとおり、地盤への浸透に対して大きな影響を与える。

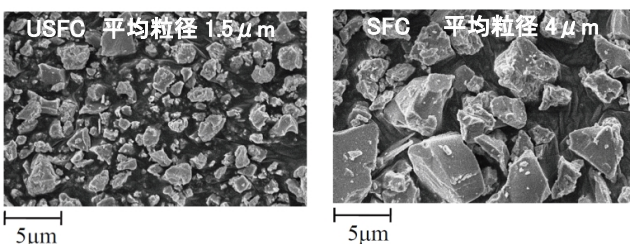


写真-1 セメント粒子の電子顕微鏡写真

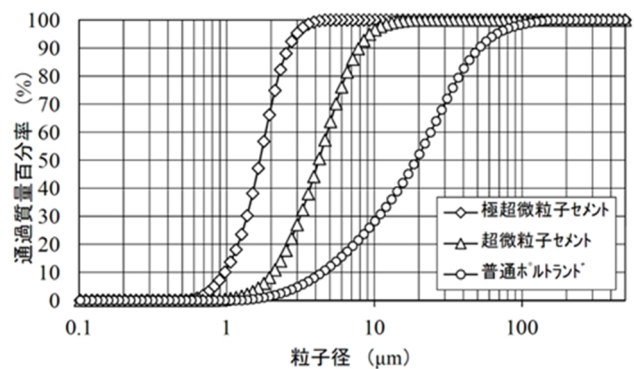


図-1 各種セメントの粒度分布

(2) 浸透性能

USFC の浸透性能を評価するために、比較対象として SFC 及び OPC を選定し、写真-2 に示す配合 W/C=200%のグラウトの自然流下による浸透試験を行った。この試験は容器内に模擬砂層として①珪砂 4 号、②豊浦砂、③ガラスビーズ (JIS R6001 J-150)の 3 層を設け、試験容器の上部からそれぞれの注入材料を注ぎ各層への浸透状況（浸透可否）を確認して、その注入材料の浸透性能を評価するものである。各砂層の D₅₀および D₁₅を表-1 に、粒度分布を図-2 に示す。また浸透試験に用いた各注入材料の粒子径 (G₅₀, G₈₅)を表-2 に示す。

試験の結果、USFC のみが 3 層を全浸透通過したのに対し、SFC は豊浦砂層と珪砂 4 号層を、OPC は珪

砂 4 号層のみを浸透通過した時点で目詰まり現象が発生し、それよりの下層への浸透は不可であった。この結果から、注入材料に含まれる粒子径が砂層への浸透に大きな影響があること、および最も微細粒子である USFC の浸透性能が最も高いことが理解できる。

われている。一般に懸濁型注入材料の浸透限界は、次式に示すグラウタビリティー比 (N_1) で判断することが可能である。

$$\text{【浸透する条件】} \quad N_1 = D_{15}/G_{85} \geq 15$$

D_{15} : 地盤の土粒子の粒径加積曲線の 15% 粒径

上述の浸透試験に用いた砂層および注入材料からグラウタビリティー比 N_1 の算出値と、浸透試験から得られた浸透可否をまとめると表-3 のようになる。表中の○×は N_1 比から見た浸透可否を示している。 N_1 比と今回の試験結果が整合的であることと同時に、理論上からも USFC の浸透性能の高さが理解できる。

表-3 グラウタビリティー比 N_1 と浸透試験結果

	USFC	SFC	OPC
①珪砂4号	314 ○	92 ○	16 ○
②豊浦砂	90 ○	26 ○	5 ×
③ガラスビーズ	30 ○	9 ×	2 ×

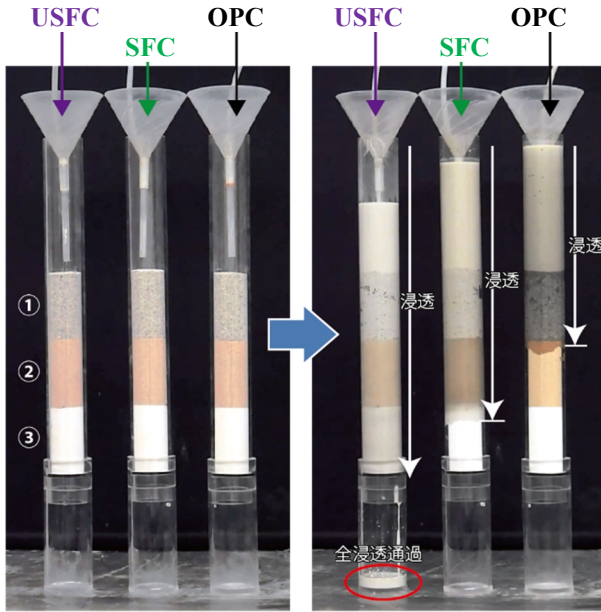


写真-2 自然流下による浸透試験

表-1 試験砂層の粒径

粒径	①珪砂4号	②豊浦砂	③ガラスビーズ
D_{50} (μm)	800	230	82
D_{15} (μm)	660	190	64

表-2 注入材料の粒子径

粒径	USFC	SFC	OPC
G_{50} (μm)	1.5	4.3	17.9
G_{85} (μm)	2.1	7.2	41

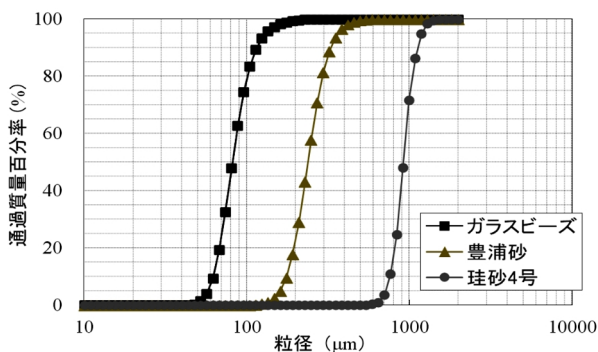


図-2 試験砂層の粒度分布

従来から、セメントグラウトを含む懸濁型注入材料が地盤に浸透するためには、土粒子間隙に対して注入材料の粒子径が十分に小さくなければならないと言

2. 野外での極超微粒子セメント注入試験¹⁾

自然地盤において、実機を用いた実物大規模の注入試験を通じ、改良体の 3 次元的形状や強度等を確認する目的で野外注入試験を行った。

(1) 野外注入試験の概要

a) 地盤条件

注入試験は千葉県富津市内の沖積層地盤で実施した。事前に行った地質調査結果から得られた注入対象地盤の物理特性を表-4 に示す。

b) 注入試験の諸条件

注入試験孔は 4 孔とし、USFC の配合 (W/C) 及び注入速度は、表-5 のとおりに設定した。充填率 (α) は、事前に行った室内試験で貧配合条件ほど注入材料の浸透長が短縮した結果を考慮し、通常よりも高い値とした。計画注入量 Q は改良体(球体)の直径を $\phi 2.0\text{m}$ と仮定し、充填率 $\alpha=125\%$ と設定して、次式を用いて算出した。

$$Q = V \times n \times \alpha = (4/3 \times \pi \times 1^3) \times 0.36 \times 1.25 = 1,880 \text{ L/孔}$$

V : 改良体の体積 (m^3)

表-4 注入対象地盤の物理特性

土質分類	礫まじり中砂～細砂
細粒分含有率	$F_c = 3\%$
間隙率	$n = 36\%$
相対密度	$D_r \approx 100\%$
透水係数	$k = 4.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
N 値	$N = 17 \sim 27$

表-5 野外注入試験の諸条件

注入孔番	W/C (%)	注入速度 (L/min)	充填率 (%)
1	400	15	125
2	800	15	
3	800	20	
4	1200	15	

(2) 注入方法

注入に用いた試験用パイプの概要を図-3 に示す。試験用パイプは、孔径約 100mm のボーリング削孔した孔内に、注入区間長 $L=1.0\text{m}$ のストレーナー加工した $\phi 40\text{mm}$ の塩ビ製パイプを挿入した。なお、地表部への注入材料の漏出防止として、布製パッカを注入区間上部に取り付けている。

USFC の注入は、一定速度で行い計画注入量に達した時点で注入完了とした。作業中の注入速度、注入圧力及び積算注入量は、電磁流量計を使用して記録した。

(3) 注入試験結果

a) 改良体の強度

注入完了後、試験孔からそれぞれ 0.25, 0.50, 0.75m 離れた位置でチェックボーリングを行い、採取したコアを用いて一軸圧縮試験(材齢 28 日)を行った。結果を図-4 に示す。特筆すべき事項として、1) $W/C=400\%$ は改良体外周部付近(0.75m)でも 7000kN/m^2 以上の高強度を発現した、2) $W/C=800\%$ 以上の貧配合条件でも 3000kN/m^2 以上の強度を有していた、ことが挙げられる。理由は不明であるが $W/C=800\%$ 、20L/min の試験孔における 0.50m 部の異常高値を除けば、各試験孔における大きな強度差は無く、高強度かつ均質な改良体が造成されたものと推察できる。

b) 改良体出来形

注入完了後、地盤を掘削し改良体の出来形確認を行った。確認した改良体の一例を写真-3 に示す。各試験孔の改良体のいずれも球体状を呈しており、注入材料の割裂脈は無く浸透注入形態で改良されたものと推察できた。出来形径は貧配合条件ほど改良体径が小さくなる傾向があり、頭部改良径で比較すると、 $W/C=400\%$ は $\phi 1.9 \sim 2.0\text{m}$ 、 $W/C=800\%$ が $\phi 1.8 \sim 1.9\text{m}$ 、 $W/C=1200\%$ が $\phi 1.5 \sim 1.6\text{m}$ であった。この結果から、 $W/C=400 \sim 800\%$ の範囲が適切な改良体径を得られる配合であると判断された。

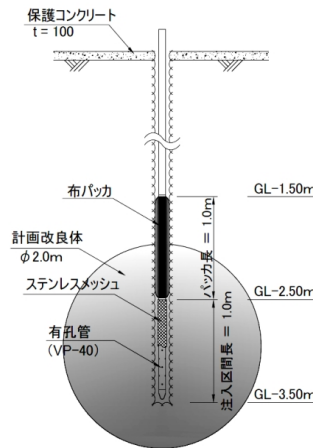


図-3 注入方法の概要図

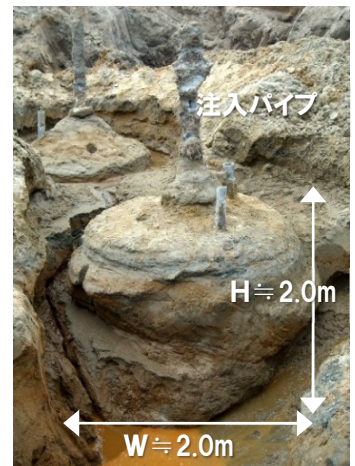


写真-3 改良体出来形
($W/C=400\%$ 15L/min)

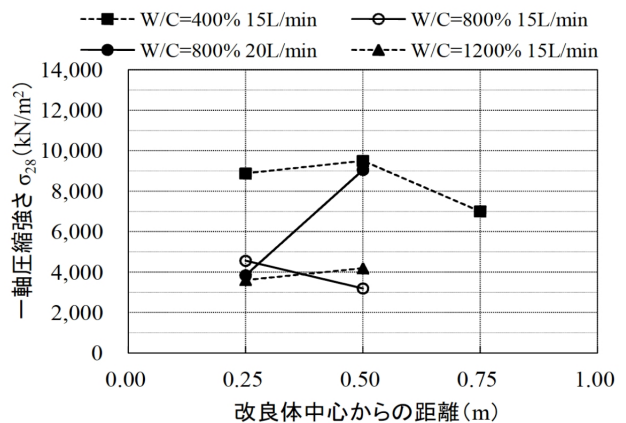


図-4 一軸圧縮強さと改良体中心からの離間距離

3. 施工事例²⁾

(1) 工事概要

本工事は、ガントリークレーンの大型化に伴い重量が増加することで、既設レール基礎の曲げ耐力（地震時）が不足したため、荷役作業を止めることなくその対策をとる必要性から、地盤改良によって基礎直下の地盤バネを強化した事例である。図-5 にそのレール基礎断面を示す。地盤改良の対象は基礎砕石および基礎栗石であり、栗石層の間隙には砂等が詰まっており、その粒度分布は礫分 83%、砂分 13%、シルト分 4%、また基礎砕石は礫分 72%、砂分 24%、シルト分 4%であったことが事前調査で判明している。

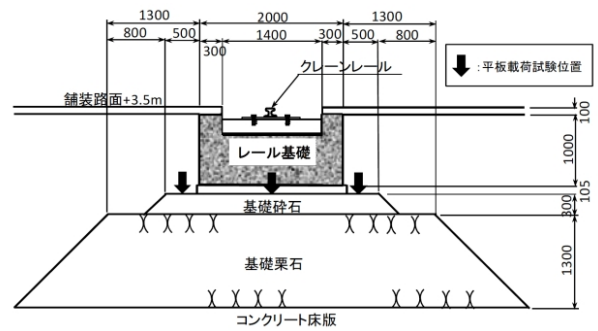


図-5 レール基礎断面

(2) 施工方法

施工方法は、以下の観点から USFC 注入材料を用いた注入工法が最適であると判断された。

- ① 岸壁を供用しながらの施工が可能であり、短時間で作業エリアを開放できる。
- ② 対象は粗石が多数混入する礫質土であるが、間隙は砂および細粒分で詰まっている。
- ③ 地盤改良によってレールに変状を与えない。
- ④ 改良体上面に高い支持力が求められる。

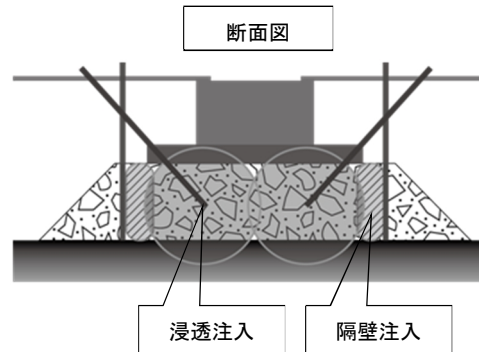


図-6 施工概略

表-6 全体工事数量

項目	隔壁注入工	浸透注入工
注入工法	FDC「ラチング」工法	ダブルパッカ工法
注入孔数	736本	349本
計画数量	一次注入 (CB)	約 27,500 L
	二次注入 (USFC)	約 181,000 L
		約 94,000L
		約 659,000 L

注入方法は、まず任意方向への浸透制御が可能な FDC グラウチング工法により対象範囲の外側に 0.5m 厚さの隔壁を作った後、内部を浸透注入によって改良する手法が採用された。その概念図を図-6 に示す。内部浸透注入はダブルパッカ工法が採用され、一次注入材料 (CB) の注入率は 5%、二次注入材料 (USFC) の注入率は 36%の設定で注入が行われた。工事延長は 350m あり、その全体工事数量を表-6 に示す。施工は約 2.5 ヶ月の工期を要したが、施工中はレール等の動態観測を行い、変状は全く発生しなかった。

(3) 効果確認

注入効果確認は平板載荷試験 6 ヶ所、チェックボーリングコア観察および孔内水平載荷試験 7 ヶ所を実施している。いずれも必要な地盤強度が得られたことを確認している。

4. おわりに

極超微粒子セメントは、これまでのセメント系注入材料にはない高性能を有しているものの、特殊な工程を経て製造される材料であるために非常に高価である。従って、用途や地質条件別に最適な配合や注入方法を検討し確立する必要がある。今後も試験や施工事例を通じてデータの蓄積を図り、より経済性・品質特性に優れたものを目指す必要がある。

参考文献

- 1) 竹内仁哉ら：極超微粒子注入材による地盤注入工法の開発（その 3）—現場注入特性—，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010
- 2) 二田義規ら：供用中のガントリークレーン基礎直下の地盤の補強について、平成 28 年度近畿地方整備局研究発表会論文集，2016