

流動化処理工法の適用性拡大に関する基礎的研究

清水 英 樹 勝 又 正 治
菅 井 正 澄 鶴 田 慎 之 介*

要 旨

現行の流動化処理工法では、性状がほぼ一定で細粒分を主体とした土質材料を対象とした実施例が多いが、建設残土の発生抑制と有効利用の促進が強く求められる社会状況にあつて、工法の付加価値を高めて新たな用途へ適用性を拡充することが今後不可欠になるものと考えられる。

以上の観点から、本研究では流動化処理工法の適用性拡大を目指して以下に示す基礎的検討を行った。

- 1) 土質材料の適用範囲拡大を目的として、これまで利用実績のない泥土圧シールド掘削土に対する適用性の検討
- 2) 流動化処理土の再利用用途拡大を目的とした高品質化（高強度化・靱性能向上）に関する検討
- 3) 流動化処理土の品質管理手法の合理化と製造コスト低減に関する検討

キーワード 流動化処理工法／建設発生土／リサイクル／泥土圧シールド／繊維混入／高炉スラグ

目 次

- | | |
|--------------------------|---|
| 1. はじめに | 2.3 流動化処理土の品質管理
手法の合理化と製造コスト低減に関する検討 |
| 2. 検討項目 | |
| 2.1 泥土圧シールド掘削土の適用性に関する検討 | 3. まとめ |
| 2.2 流動化処理土の高品質化に関する検討 | |

A fundamental study about applicability expansion of liquefied soil stabilization method

Hideki SHIMIZU
Masazumi SUGAI

Masaharu KATSUMATA
Shin-nosuke TSURUTA*

Synopsis:

Many of application examples of liquefied soil stabilization method have used soil materials of stable property till now. On the other hand, social circumstance requests the reduction and recycle of excavation surplus soil to construction industries. So, we considered that it was necessary to add new performance to the above method, and to magnify its application work. The following fundamental study was done aiming at applicability expansion of that method.

- 1) Examination about applied possibility of discharged surplus soil from the bubble shield tunneling method.
- 2) Examination about high performance evolution (in strength and toughness) for liquefied stabilized soil.
- 3) Examination about rationalized quality control method for liquefied stabilized soil and reduction of its production cost.

1. はじめに

流動化処理工法とは、土質材料と固化材を十分な流動性が得られるように加水混合した湿式の安定処理土（＝流動化処理土）を用いて、埋め戻しや空隙の充填を行う工法である（写真-1）。本来この工法は、締固め施工が十分に行えない場合の対応工法として開発された¹⁾経緯があるが、大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済活動や生活様式を見直し、循環型社会の構築を目指す我が国にとって、建設副産物、とりわけ建設発生土と建設泥土の有効な再利用を促進する一方策として注目されるようになってきている。建設副産物の発生抑制とリサイクルの促進及び適正処理の推進を図るための具体的な施策として、平成9年10月に策定された「建設リサイクル推進計画'97」には、将来的に建設工事で必要となる土砂は原則として建設発生土の工事間流用ですべて賄う方針が打ち出されている。このような方針を反映してか、図-1に示した流動化処理土の年度別施工数量の推移を見ると、'97年度を境にして急激な伸びを見せており、この工法が時代の要請に即したものであることが伺える。

一方、流動化処理工法は砂質土、粘性土を問わず様々な土砂の利用が可能であるとされ、それが工法の特徴のひとつに挙げられてきた。しかし、コンクリートが厳正に定められた品質の骨材とセメントを使用したいわば品質の基準化された製品であるのに比して流動化処理土の場合、骨材にあたる土質材料が粒度、コンシステンシー、土粒子の鉱物的性質などの点で多種多様に変化するため、その力学的・工学的性質も多様に変化するのが当然といえる。したがって、実際に流動化処理土の製造や利用に携わる現場にあっては、流動化処理土が所定の品質を確保できるように、ある程度一定性状の建設発生土もしくは泥土・泥水などに使用を限定しているのが実状といえる。しかし、この工法がさらに建設発生土の発生抑制とリサイクルの促進に寄与していくためには、工法の付加価値を高めて新たな用途への適用性を拡充していくことが今後不可欠になるものと考えた。

以上の観点から、本研究では流動化処理工法の適用性拡大を目指して以下に示す基礎的検討を行った。

- 1) 土質材料の適用範囲拡大を目的として、これまで利用実績のない泥土圧シールド掘削土に対する適用性の検討



写真-1 流動化処理工法の施工状況

- 2) 流動化処理土の再利用用途拡大を目的とした高品質化（高強度化・靱性能向上）に関する検討
- 3) 流動化処理土の品質管理手法の合理化と製造コスト低減に関する検討

2. 検討項目

2.1 泥土圧シールド掘削土の適用性に関する検討²⁾

これまでに泥水シールド工法から発生する一次分級砂や余剰泥水を流動化処理土に用いた事例³⁾は数多く報告されているが、泥土圧シールドの掘削土を用いた事例はほとんど報告されていない。この理由として、泥土圧シールドの場合、掘削土をチャンバー内で塑性流動されるための加泥剤や地上に排出された掘削土を運搬可能な状態に改質するための固化剤などが添加されており、これが流動化処理土の品質に影響を及ぼし、適用を阻んでいることが考えられる。しかし、今後行われるシールド工事ではコスト面で優位性のある泥土圧式の占める割合が増えていくものと予想され、“処分に苦慮する掘削土”を排出する代表的な工事となるが見込まれる。したがって、泥土圧シールド掘削土の流動化処理土への適用性を検討することにより、掘削土の処分問題解決と流動化処理工法の適用範囲拡大を図ることが本検討の目的である。

最近の泥土圧式シールドでは、地盤条件に合わせて粘土・ベントナイト、高分子材料、気泡などを添加する各

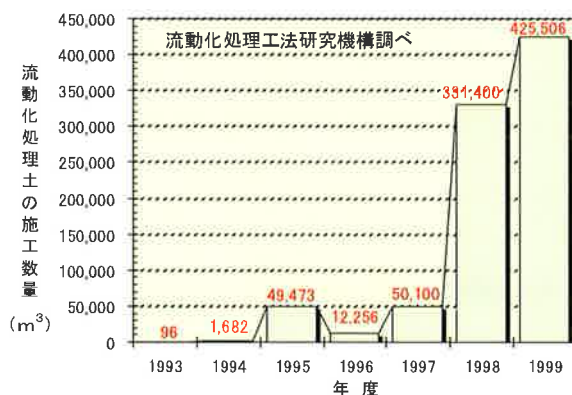


図-1 流動化処理土の年度別施工数量の推移

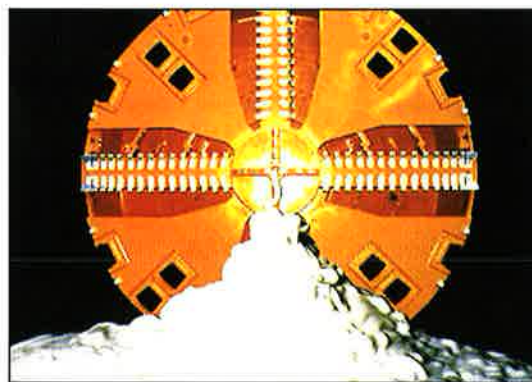


写真-2 気泡シールド工法

種の工法が使い分けられている⁴⁾。ここでは帯水層、砂礫層から軟弱粘性土層までの幅広い地層に対応可能で掘削土に対する加泥剤の影響が最も少ないとされる気泡シールド工法（切羽あるいはチャンバー内にシェービングクリームのような微細な気泡を注入しながら掘進する工法：写真-2）に着目し、気泡シールド掘削土を模擬した土質材料を用いて流動化処理土を作製し、その品質を調べることで、加泥剤（気泡）が処理土の品質に与える影響と適用を可能とするための方策について検討した。

(1) 試料土の土質特性

配合試験に用いた試料土は地下鉄開削工事の現場から採取した土砂を粒径 19mm アンダーにふるい分けしたものに、購入クレイ材（岐阜県産粘土：ミツボシクレイ）を添加することで、流動化処理土の強度とフローに影響を及ぼすとされる指標⁵⁾ 細粒分含有率 (Fc) が 10, 20, 30% と変化するように調整した。採取土砂と購入クレイ材の土質特性を表-1、試料土の土質特性を表-2 に示すとともに試料土の粒度分布を図-2 に示す。

(2) 配合試験ケース

試料土の細粒分含有率、単位セメント量、泥水密度をパラメータとした一連の配合ケースにおいて、気泡添加の有無が流動化処理土の品質に及ぼす影響について調べた。なお本試験は、流動化処理土の一般的な品質基準範囲内 ($q_{u28}=0.2\sim1.0\text{MPa}$, JHS フロー^{※1}=160~300mm) で

行うように努めた。配合試験ケースの一覧を表-3 に示す。表中にある泥水密度とは、試料土に加水してスラリー状に解泥したときの密度を言い、材料分離が生じない下限値付近で 1 水準、フロー160mm^{※2}を概ね確保できる上限値付近で 1 水準、計 2 水準の値を設定した。なお、固化材には高炉セメント B 種を用いた。

※1：日本道路公団規格によるフロー試験 (JHS A313)

※2：実施工において流動勾配が大きく変化する限界フロー値¹⁾

(3) 気泡添加方法

気泡添加ケースにおける気泡の添加方法は以下の通りであった。

- ①別途、事前に気泡試験を実施し、最適な気泡添加仕様を決定。
- ②試料土に加水して、含水比を約 24%に調整（気泡試験の結果より）。
- ③気泡剤（原液濃度 3%）を容積比で 6 倍に発泡させて、気泡を作製。
- ④試料土の容積比 30%の気泡を投入し、ハンドミキサーで 30 秒間の弱攪拌（チャンバー内での混合攪拌を模擬）
- ⑤5 分間放置（流動化処理プラントに送られるまでのタイムラグを想定→消泡期間）
- ⑥水、固化材の順で投入し、ハンドミキサーで 60 秒間の強攪拌（流動化処理プラントにおける混練を模擬）

(4) 結果と考察

図-3 は気泡添加が流動化処理土のフロー値に及ぼす影響を示したものである。この図より、気泡添加により一般的に 15%程度フロー値が低下していることが確認できる。その傾向は、Fc に依存するというよりはむしろ、気泡を添加しない通常の流動化処理土において十分なフロー値が出ているケースほど気泡添加によるフローの落ち

表-1 採取土砂とクレイ材の土質特性

材 料 の 種 類		採取土砂 ($\sim 19\text{mm}$)	クレイ材
土粒子密度 G_s [g/cm^3]		2.613	2.627
粒度特性	礫分 ($2\sim 19\text{mm}$) [%]	53.2	0
	砂分 ($75\mu\text{m}\sim 2\text{mm}$) [%]	36.8	2.8
	シルト分 ($5\sim 75\mu\text{m}$) [%]	3.5	10.0
	粘土分 ($5\mu\text{m}$ 以下) [%]	6.5	87.2
	最大粒径 [mm]	19	-
自然含水比 [%]		15.1	0.9

表-2 試料土の土質特性

試料土の細粒分 [%]		10	20	30
採取土砂とクレイ材の乾燥重量比		100:0	87:13	76:24
土粒子密度 G_s [g/cm^3]		2.613	2.617	2.619
粒度特性	礫分 ($2\sim 19\text{mm}$) [%]	53.2	46.3	40.2
	砂分 ($75\mu\text{m}\sim 2\text{mm}$) [%]	36.8	32.4	28.5
	シルト分 ($5\sim 75\mu\text{m}$) [%]	3.5	4.3	5.1
	粘土分 ($5\mu\text{m}$ 以下) [%]	6.5	17.0	26.3
	最大粒径 [mm]	19	19	19
自然含水比 [%]		15.1	14.0	12.2

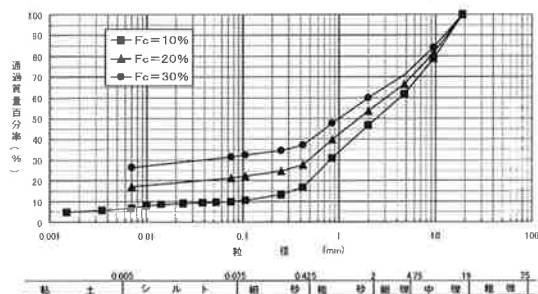


図-2 試料土の粒度分布

表-3 試験ケース一覧表

細粒分含有率 F_c (%)	気泡 添加	単位セメント量 (kg/m^3)	泥水密度
10	無	50 100 150	各単位セメント量 ごとに 2 水準
	有		
20	無		
	有		
30	無		
	有		

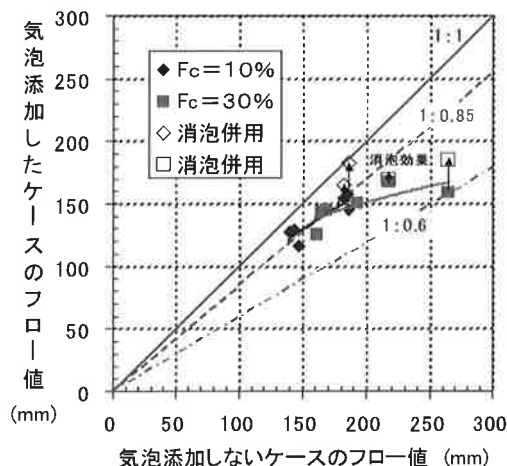


図-3 気泡添加がフローに及ぼす影響

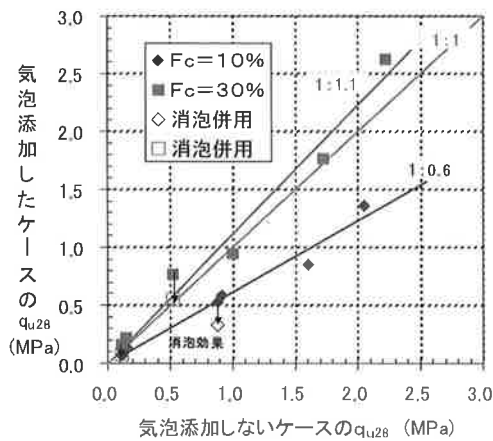


図-4 気泡添加が q_u に及ぼす影響

込みが激しく、最大で40%ものフロー低下が生じている。シールド掘削土を塑性流動化させるために添加する気泡が流動化処理土のフローを低下させるという一見、矛盾とも思える現象を引き起こす要因としては、気泡と土粒子の凝集作用が考えられる。コンクリートのAE剤の作用について検討を加えたKreijer⁶⁾によれば、一般に陰イオン性のAE剤によって生じる気泡は負に帯電しており、これがセメント粒子に吸着して架橋構造を形成するためペーストの粘性は増大するが、いったん流動を始めると球状の気泡がペーストの移動を容易にするため、全体の塑性粘度は低下するとしている。気泡シールド工法に用いられる気泡剤には掘削土のハンドリング性を良好なものとするため、大部分の気泡が比較的短時間のうちに消泡するような性能が付与されている。Kreijerの結果をこれに当てはめてみるならば、土粒子やセメント粒子の容積に対して気泡が十分な容積を占めている間は高い流動性を呈するが、消泡作用が進行して気泡と土粒子との容積比が近づいてくると両者の凝集・架橋作用が卓越して現れるようになり、ペーストの粘性増大、フロー値の低下をもたらすと考えられる。

つぎに図-4により、気泡添加が流動化処理土の一軸圧縮強度に及ぼす影響を見てみると、こちらの結果は掘削土のFcの違いによって、挙動にかなりの差が見られる。Fc=10%の場合は気泡添加により約4割もの強度低下が生じている。一方、Fc=30%の場合は強度低下する様子は全く見られない。これらの結果は強度発現のメカニズムの違いと上記フロー挙動で述べた土粒子と残留気泡の凝集作用との相乗効果によってもたらされたものと考えられる。つまりFc=10%のケースにおける強度発現のメカニズムは土粒子の噛み合いによるところが大きいと考えられる。そこで、土粒子表面に残留気泡の凝集によって滑面のようなものが形成されると噛み合いが弱くなり、強度低下を起こすことになる。一方、細粒分に富んだFc=30%のケースにおける強度発現のメカニズムは土粒子の噛み合いよりはむしろペーストの固結力によるところが大きいものと考えられる。この場合、残留気泡が強度に及ぼす影響は相対的に小さいものとなり、著しい強度低下は起こらないことになる。

以上により、気泡が混入するシールド掘削土を流動化処理土に用いた場合、配合条件によってはフロー値や一軸圧縮強度の低下を招くことが明らかになった。そこで、気泡添加が及ぼす影響を低減する方法として、1)高炉スラグ、2)流動化剤、3)消泡剤の各材料を添加した追加検討を実施し、その効果を確認した。

1)高炉スラグは一般にコンクリートの長期強度とワーカビリティを向上させる効果を有する⁷⁾とされていることから、気泡添加した流動化処理土の練り上がり 1m^3 あたり200kgの高炉スラグ(密度 2.88g/cm^3 、比表面積 $4,080\text{cm}^2/\text{g}$)を添加して、その効果を確認することにした。その結果、強度増加に伴う間接的なフロー改善効果(強度増加が見込める分、目標強度を得るための泥水密度を低く設定できるため、フローの増大が図れる効果)は期待できるものの、当該試料土が50%を越える礫分を含有しており、泥水密度の設定値を下げると材料の分離現象が起こるため、対策法としての効果が発揮できないことが判明した。

2)流動化剤は処理土の品質に最も大きな影響を与える単位水量を変化させることなく、レオロジー的性質を向上させる目的で添加を試みた。添加方法はソイルセメント用に開発された流動化剤(株式会社エヌビー製:レオソイル100B)を気泡添加した流動化処理土の練り上がり 1m^3 あたり2kgの割合で添加した。流動化剤のメカニズムはセメント粒子に吸着して電気的な反発力を生む界面活性剤がもたらす分散効果^{8) 9) 10)}により流動性を高めるもので、これを添加することにより確かに処理土の流動性を回復させることはできた。しかし、1)高炉スラグのケースと同様にフローの増加に相まって材料分離が起こり不適となった。

3)消泡剤は添加の目的が“気泡の影響を取り除くこと”にある点で1)高炉スラグ、2)流動化剤と異なる。消泡剤原液を10倍に希釈した溶液を気泡の容積比10%の割合で添加した結果を図-3、4中に白抜きプロットで併記した。まず図-3により、消泡剤併用によるフローの改善効果を見てみると、Fc=10%のケースでは気泡を添加しない通常の流動化処理土の98%程度までフロー値が回復しているのに対して、Fc=30%のケースでは同様な回復傾向は見られるものの、回復度は70%程度にとどまっており、土粒子の粒径によって気泡の消失度合いに差が生じていることが示唆される。つぎに図-4により、消泡剤併用が強度に及ぼす影響について見てみると、気泡添加のケースよりもさらに強度低下を招いているケースが多く見受けられる。原因は残留気泡の消失による間隙の増大、凝集力・架橋力の低下、単位水量の増加などいくつか考えられるが、低下に応じた強度の割り増しが必要になるものと考えられる。

以上、気泡添加がフロー値や一軸圧縮強度に及ぼす影響を低減する方法を追加検討した結果、今回使用した材料の中では消泡剤を併用することが最も効果的であると判断した。

2.2 流動化処理土の高品質化に関する検討

流動化処理土を単なる充填材としてだけではなく、盛土本体などの新たな用途に拡充を図る場合、強度や変形性などの点で高品質化が求められることが予想される。流動化処理土における高強度化は、単に固化材量を増やすだけでなく、相まって発生するフロー低下をどのように抑制するかが問題となる。そこで、普通ポルトランドセメントと高炉スラグの併用による強度面での高品質化に関する検討を行った。また、流動化処理土の利用実績が着実に増えていく一方で、固化処理した材料の脆性破壊を危惧する声も聞かれる。そこで、本来の土質材料が有する変形追従性を付加すべく、ビニロンファイバーを混入した流動化処理土を作製し、ファイバー混入による変形特性の改善（靱性能の向上）効果について調べた。

(1) 使用材料

本検討における配合試験にも前項の検討において使用した地下鉄開削工事の現場から採取した土砂（19mm アンダー）を試料土として用いるとともに、固化材には普通ポルトランドセメントと高炉スラグ（密度 2.88g/cm^3 、比表面積 $4,080\text{m}^2/\text{g}$ ）を用いた。

また、流動化処理土の靱性能向上に関する検討において使用したビニロンファイバーは全3種類で、その性能と形状を比較したものを表-3、写真-3に示す。各種ファイバーが存在する中でビニロンファイバーを選定した理由は、比重差による材料分離や腐食等の問題が生じないこと、吸水性が少なく流動化処理土の性能面（特にフロー）への影響を極力抑えられることを重視した。各ファイバーの特徴を簡単に述べると、タイプ RF-S602 は繊維同士が絡み合っただけの状態になるファイバーボールと呼ばれる現象が起こらないように、平時は極細の繊維が束ねられた状態にあるが、着水すると素繊維がばらける特殊加工が施されている。一方、タイプ RF350 は S602 の10倍近い太さを有し、針のような状態を呈している。今回の検討においては S602 と同じ繊維長 6mm のものと

倍の 12mm のもの2種類を用意して繊維長の違いが流動化処理土の靱性能に及ぼす影響についても検討した。

(2) 配合試験ケース

流動化処理土の高強度化に関する配合試験ケースを表-4に示す。この一連の試験ではセメントの一部を高炉スラグで置き換えた固化材を用い、スラグ置換率（4水準）、単位固化材量（2～4水準）と設定泥水密度（ $1.60\sim 1.75$ の間で2水準）をパラメータとした全22ケースの配合パターンを設定した。

つぎに流動化処理土の靱性能向上に関する試験ケースを表-5に示す。この一連の試験ではファイバーのタイプ（3水準）とファイバー混入量（2水準）をパラメータとした6ケースにファイバー無添加の1ケースを加えた全7ケースの配合パターンを設定した。なお、単位セメント量（ 100kg/m^3 ）と設定泥水密度（ 1.63g/cm^3 ）は一定とし、ファイバー混入量は単位セメント量に対する質量パーセントで表したものをパラメータとした。

表-4 流動化処理土の高強度化に関する試験ケース

スラグ置換率 (%)	単位固化材量 (kg/m^3)	泥水密度	摘 要
0	50,100,150	2水準	普通ポルトランドセメントを用いたケース
40	50,70,100,150		高炉セメントB種相当を用いたケース
60	70,100		高炉セメントC種相当を用いたケース
90	70,100		極端に高炉スラグを多くしたケース

表-5 流動化処理土の靱性能向上に関する試験ケース

単位セメント量 (kg/m ³)	泥水密度 (g/cm ³)	ファイバー のタイプ	ファイバー混入量 (単位セメント量×W%)
100	1.63	無添加	無添加
		RF-S602	10
		(φ 26 μ m,L6mm)	5
		RF350	5
		(φ 200 μ m,L6mm)	10
		RF350	5
		(φ 200 μ m,L12mm)	10

表-3 使用した各ビニロンファイバーの性能

タイプ	繊維直径 (μm)	繊維長 (mm)	比重 (g/cm^3)	引張強度 (cN/mm^2)	切断伸度 (%)	ヤング率 (cN/mm^2)
RF-S602	26	6	1.30	118	9.2	2840
RF350	200	6 12	1.30	91	7.2	3040

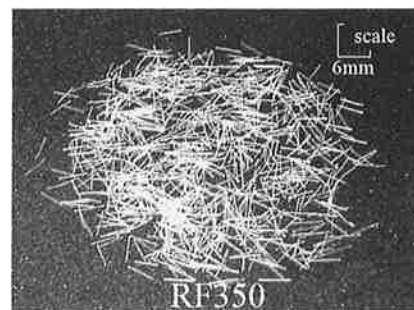
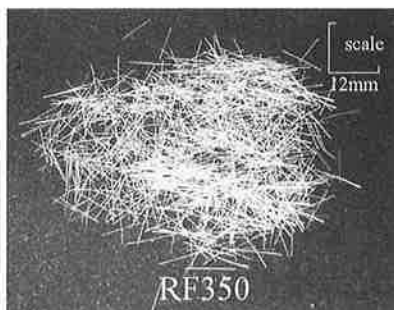


写真-3 使用した各ビニロンファイバーの形状

(3) 結果と考察

1) 流動化処理土の高強度化に関する検討結果

図-5 は普通ポルトランドセメント（以下 OPC）を固化材として添加した流動化処理土のフローと一軸圧縮強度の関係を示したものである。この図より、練り上がり処理土 1m³あたりの単位固化材量を 50kg（C50）、100kg（C100）、150kg（C150）と増やしていけば達成強度を表すラインは当然のことながら上方へスライドしていく。つまり強度だけを高めるのであれば、単位固化材量を増やしてやりさえすればよいことになる。しかし、一方で

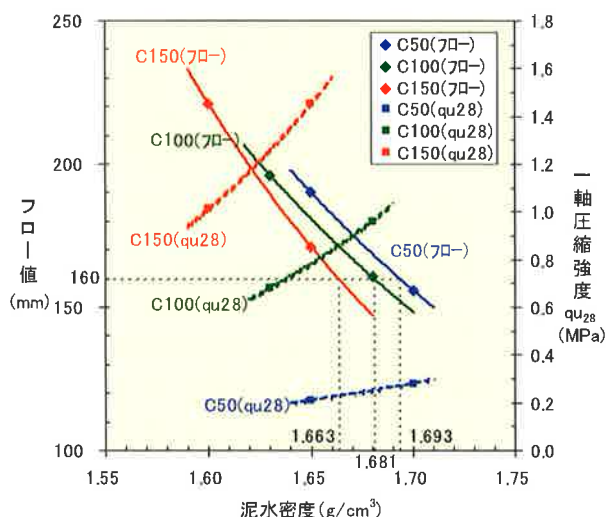


図-5 OPC添加処理土のフローと q_{u28} の関係

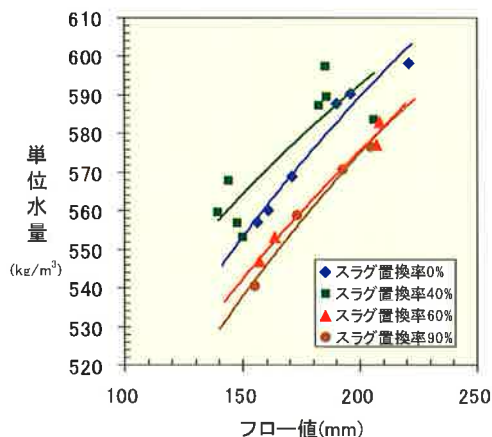


図-6 スラグ置換率とフロー値の関係

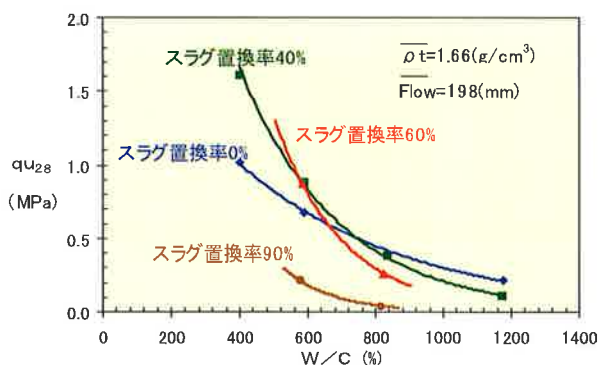


図-7 スラグ置換率と q_{u28} の関係

単位固化材量の増加に伴って、フローのラインが左へスライドしていくのがわかる。これは、例えば目標フロー値を 160mm と設定した場合、単位固化材量が C50→C100→C150 と増えるにしたがって泥水密度の設定値を 1.693→1.681→1.663 と下方へ修正していかなければならないことを意味している。強度増加を目的として固化材を増やしてもフローを確保するために加水して設定泥水密度を下げるといった非合理的ともいえる配合を強いられるのは、強度とフローという相反する品質管理項目を両立させなければならない流動化処理土特有の課題といえる。

そこで、高炉スラグ（以下 BFS）が有するとされるワーカビリティ向上効果や長期強度の増大効果に着目し、OPC の一定量を BFS で置き換えた固化材が流動化処理土のフローや強度に与える影響を調べることにした。図-6 は BFS 置換率とフローの関係を示したものである。この図より、BFS 置換率 40% では OPC と同等もしくはそれ以上の単位水量を与えないと同一のフローが確保できないが、BFS 置換率 60% になると OPC に比べてかなり少ない単位水量でフローが確保できることがわかる。換言すれば、OPC の 60% を BFS に置換することでフローの改善効果が現れたことになる。しかし、BFS 置換率を 90% まで上げても、それ以上の効果は期待できないこともわかった。次に BFS 置換率と一軸圧縮強度の関係を示した図-7 を見てみると、BFS 置換率 40% の場合、W/C がおよそ 700% 以下になってくると OPC に比べて強度が増加する傾向にあり、W/C=400% の配合条件の下では強度比約 1.5 倍にも達している。この傾向は BFS 置換率 60% の場合もほぼ同様であるが、BFS 置換率 90% になると OPC に比べて著しい強度低下を引き起こしていることがわかる。

以上により、OPC の一部を BFS で置換した固化材は流動化処理土のフロー改善と強度の割増し効果が期待できるため、処理土の高強度化を実現するにあたって非常に有用と考える。本検討の結果からは、フローの改善と強度の割増しが同時に期待できる BFS 置換率 60% が最適と判断でき、これは高炉スラグセメント C 種にほぼ相当することから、その代用の可能性を示唆するものである。

2) 流動化処理土の靱性能向上に関する検討結果

図-8 はビニロンファイバーを混入した流動化処理土の靱性能向上効果を比較したものである。この図より、ファイバーが混入しない流動化処理土が非常に脆性的な破壊挙動を示しているのに対して、ファイバー混入したケースはすべて、確実に靱性能が向上していることがわかる。その効果を比較すると以下のようにまとめられる。

- ・添加率 5% では効果が小さく、十分な靱性を付与するためには 10% 程度の添加は必要と思われる。
- ・効果の度合いを比較すると RF-S602 > RF350 (12mm) > RF350 (6mm) となることから、混入するファイバーは太くて剛性の高いものを数少なく混入するよりも細くて剛性が低いものでも数多く混入する方が靱性能向上に寄与する。また、繊維長は長い方がより大きい効果が期待できるものの、有意性はそれほど認められない。

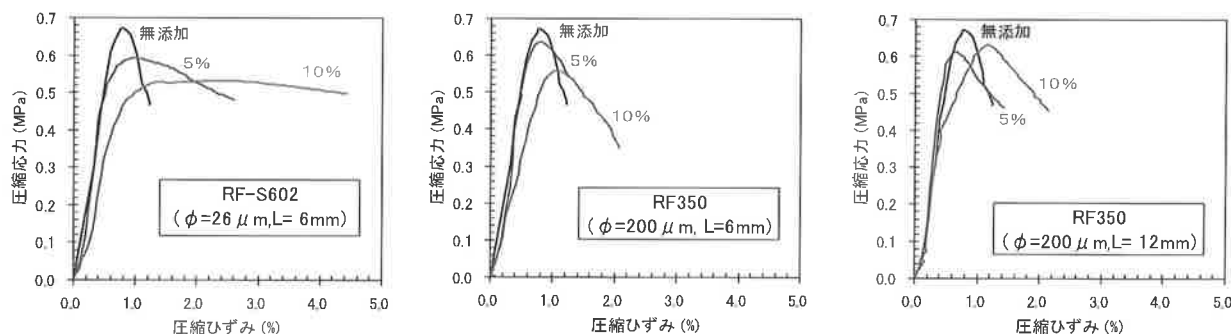


図-8 ビニロンファイバーを混入した流動化処理土の靱性能向上効果の比較

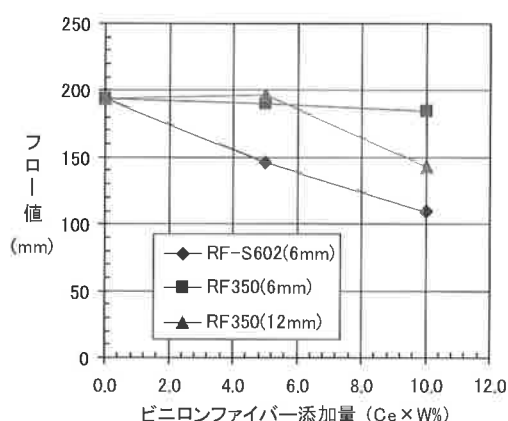


図-9 ファイバー添加がフロー値に及ぼす影響

一方で、ファイバー混入により懸念される事項も見受けられる。ひとつは、ビニロンファイバーの添加率が高くなるほどピーク強度が低下する傾向にあることである。いまひとつは、図-9に見られるフローの低下傾向にある。フローの低下度合いは靱性能の向上効果が高いケースほど大きく、RF-S602を10%添加したケースではフロー値がほぼ半減しており、流動化処理土の最大の特徴である流動性が大きく損なわれる結果となっている。

2.3 流動化処理土の品質管理手法の合理化¹¹⁾と製造コスト低減¹²⁾に関する検討

流動化処理工法の適用拡大を図るためには、母材として使用する建設発生土の適用範囲を拡大する一方で、用途に関しても拡充を図っていくとの観点から、いくつかの具体的方策を提案し、その適用性に関する基礎的なデータの収集を行ってきた。しかし、これらの成果を実工事へ展開していくためには、多様な発生土を一元的に管理できるような合理的な管理手法の確立が求められるとともに製造コストに関しても随時低減に努めていかなければならないものとする。本検討では、 C/e という指標（固化材のセメンテーション効果と土粒子の構造的な強さを合わせて表現する指標）に着目した品質管理方法を提案し、その妥当性を検証するとともに、固化材の一部を単価的に安い高炉スラグに置き換えることで品質を低下させることなく、処理土の製造コスト低減が、どの程度見込めるのかについて検討を実施した。

(1) 品質管理手法の合理化検討

本検討に際しては、本文「2.1 泥土圧シールド掘削土

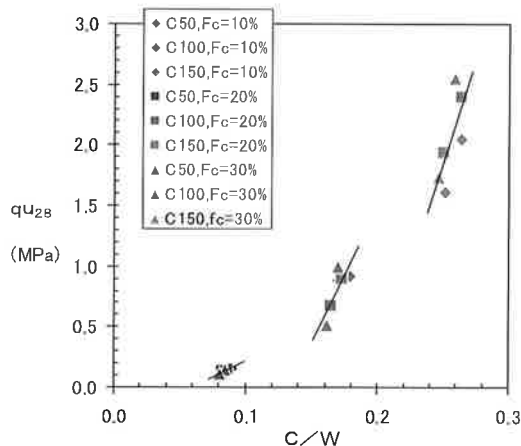


図-10 C/W と q_{u2s} の関係

の適用性に関する検討」において実施した試験のうち、気泡を添加しないケースのデータを用いており、試験内容の詳細は当該箇所を参照されたい。

コンクリート材料では、強度に影響する配合指標として水セメント比(W/C)が広く用いられている。また、菅井らが行った浚渫粘性土をセメント固化したときの強度特性について調べた実験によれば、セメント改良粘性土の強度は細粒分含有率(F_c)によらず、セメント水比(土中の全水量を強結合水により補正)と一意的な線形関係にあると報告している¹³⁾。そこで、本検討においても同様な整理を行った結果を図-10に示す。各単位セメント量ごとに線形関係は認められるものの一意的な関係とはいいがたく、 F_c による層別も難しい。前述の浚渫粘性土の場合は、液性限界付近の含水比で固化材を添加しているのに対し、流動化処理土の場合は液性限界の数倍という含水比状態にある固化土であることを勘案すれば、両者の土粒子間隙状態は全く別のものといってよい。つまり、土粒子の間隙が相対的に小さく、固化材によるセメンテーション効果が強度に支配的となる浚渫粘性土の場合は C/W という指標によって一意的な関係が得られたが、固化材のセメンテーション効果と併せて土粒子構造の粗密さが強度に影響する流動化処理土の場合には、同様な結果に至らなかったものとする。つぎに、このような流動化処理土の強度発現のメカニズムを考慮して久野らが提案した C/e なる指標¹⁴⁾に着目してみたい。 e とは土の間隙比と呼ばれ、 $e = (\text{間隙の体積}) / (\text{土粒子の体積})$ で表される。流動化処理土の場合、間隙は水で満たされていることから $e = (\text{水の体積}) / (\text{土粒$

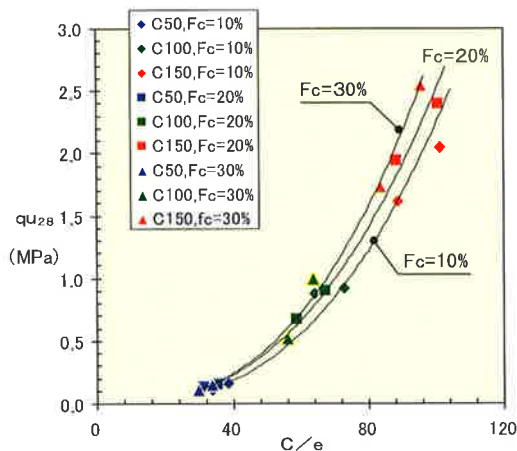


図-11 C/e と q_{u28} の関係

子の体積)となり、 C/e は、セメント水比に土粒子の体積を掛けた値($C/e = (C/W) \cdot (\text{土粒子の体積})$)となる。図-11に C/e と q_{u28} の関係を示す。この図より、 C/e と q_{u28} の関係が単位セメント量によらず一意的に表される一方で F_c によって層別されることがわかる。この関係を用いれば、配合試験における単位セメント量のパラメータとしての設定水準を減らすことが可能で、かなりの試験ケース数削減が見込める。また、品質管理方法としては、想定される F_c ごとに $C/e \sim q_{u28}$ 関係とフロー～泥水密度関係を予め準備しておけば、発生土の F_c を測定するだけで、所要フロー値→設定泥水密度→ e (計算)→ C (計算)と最適な固化材添加量を求めることができ、簡便で合理的な配合設計と品質管理を実現できるものと考ええる。

(2) 流動化処理土の製造コスト低減に関する検討

本文「2.2 流動化処理土の高品質化に関する検討」においてセメントの一部を高炉スラグに置換することにより、配合条件によっては強度の割り増しが期待できることを述べた。一般に高炉スラグはセメントより安価な材料といえ、より安価な材料に置き換えることで強度の割り増しも期待できるとあれば、かなりのコストダウンが見込める。そこで、図-7に示したスラグ置換率と q_{u28} の関係を指標 C/e を用いて整理し直したものが図-12である。仮に目標強度1.5MPaに対してスラグ置換率40%の固化材を使用したとすると、強度の割り増しによって約25kg/m³もの単位固化材量が低減できると試算される。一方、目標強度が1MPa以下の場合、強度の割り増しが期待できないため、スラグ置換率×材料単価差のコストダウンしか見込めないことになる。つまり、目標強度の高い高規格流動化処理土ほどスラグ置換によるコストメリットが生じやすくなる。

3. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ①気泡を添加されたシールド掘削土を流動化処理土に用いる場合、フローと強度の低下が起こる。フローに関しては消泡剤の併用が最も効果が高かったが、強度に関しては一定の割り増しが必要と考える。
- ②流動化処理土の高強度化(1MPa以上)を図るには、セメ

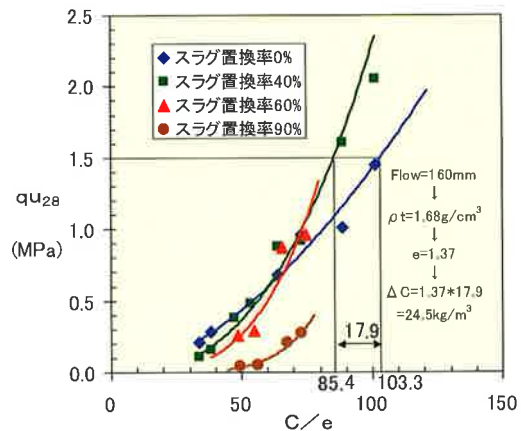


図-12 スラグ置換ケースにおける $C/e \sim q_{u28}$

ントの一部を高炉スラグで置換した固化材が有用であり、最適な置換率は60%であることがわかった。

- ③流動化処理土の十分な靱性向上を図るにはビニロンファイバーを単位固化材量の質量比10%以上添加することが必要で、太い針状ファイバーよりも細い繊維状ファイバーの方が有効であることがわかった。但し、合理的な添加率を明らかにすること、ファイバー添加による強度低下への対応が今後の課題として上げられる。
- ④ C/e という指標に着目した流動化処理土の品質管理手法は簡便で合理的な配合設計と品質管理を行う上で有用である。但し、この手法を適用できる土質条件、配合条件等を今後明確化していく必要があると考える。
- ⑤セメントの一定量を高炉スラグで置換することで流動化処理土の製造コスト低減が期待できる。単価差益と添加量低下の両方が見込める高強度仕様の流動化処理土ほどコストメリットが大きい。

謝辞

中部支店八事シールド作業所、八坂光洋所長ならびに上野登紀夫副所長には、泥土圧シールド掘削土の流動化処理土への適用検討という課題を与えていただくとともに配合試験の実施に際しては多大なるご協力をいただいた。末筆ながら感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1)久野悟郎 編著、(社)日本建設業経営協会中央技術研究所 流動化処理工法研究委員会 著:土の流動化処理工法—建設発生土・泥土の再利用技術—、技報堂出版、1997年
- 2)清水、八坂、勝又、鶴田:泥土圧シールド掘削土の流動化処理土への適用性に関する検討、土木学会第56回年次学術講演会 講演概要集Ⅲ(投稿中)、2001年
- 3)例えば、助川 禎:泥水シールド発生土によるトンネルインバート材の開発、土木学会論文集 No.504, VI-25, pp.107-116, 1994年12月
- 4)シールド工法入門、地盤工学入門シリーズ17, 3.3(5), p.83, 1992年9月
- 5)清水、勝又、高森、林原、河原:建設発生土を用いた流動化処理土の品質管理方法に関する研究、前田建設技術研究所報 Vol.40, pp.131-138, 1999年
- 6)P.C.Kreijer:Proceedings of Admixture Congress, C180, Lancaster, Construction Press, 1p., 1980
- 7)島崎、牧野、関口、金谷:高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの諸性質について、コンクリート工学年次論文報告集 13-1, 1991年
- 8)T.Sato and R.Ruch:Surfactant Science 9, Stabilization of Colloidal Dispersion by Polymer Adsorption, Marcel Dekker Inc., N.Y., 1980
- 9)北原、古沢:分散乳化系の化学、工学書、1979年5月
- 10)古沢邦夫:高分子吸着と分散安定化作用、高分子 40巻, pp.786-789, 1991年12月
- 11)菅井、勝又、清水:流動化処理土の強度発現要因と配合設計に関する一考察、第36回地盤工学研究発表会 講演集, pp.821-822, 2001年6月
- 12)鶴田、勝又、菅井、清水:流動化処理土の固化材コスト低減に関する一考察、土木学会第56回年次学術講演会 講演概要集Ⅲ(投稿中)、2001年
- 13)菅井、藤山:セメント改良粘土の一軸圧縮強度に影響を及ぼす要因について、土木学会第55回年次学術講演会 講演概要集Ⅲ, 2000年
- 14)久野、吉原:流動化処理土の一軸圧縮強さに関する2,3の考察、第33回地盤工学研究発表会, pp.2281-2282, 1998年