

泥土を効率よく改良できる高分子改良材「ハイポリジオ™」の開発

木村 志 照 三 浦 俊 彦

Development of Polymeric Material “High-Poly-Geo™”

Capable of Efficiently Improving Muddy Soil

Yukinobu Kimura Toshihiko Miura

Abstract

Improved polymeric materials are used to reduce the fluidity of transportation and enhance strength when combined with solidifiers. However, the amount added is small, and the failure to improve likely occurs in the cohesive soil. Because polymeric materials are expensive, polymer improvers that can achieve improvements even in small quantities are desired. Therefore, we developed a high-poly-geo that can be slightly improved. Compared to conventional materials, high-poly Geo showed significant improvement due to its low viscosity when in contact with pore water. The results of field tests proved that the proposed material is conducive to constructability, as the amount of addition could be reduced by approximately 20% compared to conventional materials.

概 要

土質改良材の一つである高分子改良材は、運搬のために泥土の流動性を低下させることや、発生土利用のため固化材と併用し強度改良に用いられている。一方添加量が少量であるため、粘着力が高い粘性土など混合しにくい泥土では改良不良が生じやすい。また、高分子改良材の材料単価が高く改良コストが嵩むため、従来材に比べ少量でも改良効果が得られる材が望まれている。そこで、従来材よりも少量で効率よく改良できる高分子改良材「ハイポリジオ™」を開発した。ハイポリジオは泥土中の水と接触しても粘性が高まらない特長を有し、均質に混合できるため、従来材と比較して、短時間の混合で泥土の流動性を低下させることが可能である。また、固化材との併用による相乗効果により強度増進効果を発揮する。現場試験により、従来材に比べ添加量が2割程度削減でき、施工性に寄与する高分子改良材であることを実証した。

1. はじめに

泥土圧シールド工事の排土、浚渫土砂やその他工事などで発生するコーン指数（以下、qc）が200kN/m²未満の泥土は、汚泥として産廃処分されることが多い。泥土を汚泥として産廃処分する場合、流動性の高い泥土が運搬時にこぼれ落ちることがないように水密ダンプトラック等で運搬する必要がある。しかし、発生量が膨大な場合には泥土を改良して流動性を低下させ（以下、流動性改良）、通常のダンプトラックで輸送することが合理的である。

一般的な固化材は粉体状で、「添加混合時に粉塵が発生する」ことや「改良効果が得られるまで養生（一般的には半日～1日程度）のための仮置きが必要」などの課題がある。これに対し、高分子改良材は「液体状の材があり粉塵が発生しない」ことや「添加混合後、すぐに改良効果が得られ養生が不要」という特長を有し、狭隘な都市部など仮置き場の確保が難しい現場において、養生時間が不要で即時搬出できる利点がニーズに合致する。

高分子改良材の課題として、添加量が少量（一般的に

は泥土1m³に対して、数kg程度）のため、混合時に不均質になりやすく、改良不良が生じることがある。また、泥土中の水分と反応し、高分子が膨潤することで材の粘性が高くなり、より均質に混合することが難しく、改良効果が得にくくなる。特に、粘性土のように粘着力の高い土で、改良不良が生じやすい。また、高分子改良材は固化材に比べ単価が高く、添加量によっては改良コストが高くなる。そのため、より少量でも改良効果が得られる材の開発が望まれている。

一方、泥土にセメント系固化材や石灰系固化材（以下、固化材）を添加することでqc200kN/m²以上の改良土^{1),2)}として有効利用する場合があるが、最近では土質改良材の一つとして高分子改良材が用いられることがある。例えば泥土圧シールド掘削土の噴発防止剤として、あるいは一体の施工システム³⁾において用いると、排土を建設発生土として有効利用する場合には、高分子改良材が固化材と併用⁴⁾されることとなるが、その影響については検討が必要である。

以上の課題を解決するため、粘着力が高く混合しにく

い粘性土など、改良効果が得にくいような泥土においても、従来材より少量で流動性改良が可能で、固化材と併用しても強度増進が期待できる高分子改良材を開発した。

2. 新たな高分子改良材の開発

高分子改良材は、施工性を加味し液体状（溶媒に粉体高分子を分散させたスラリー）の高分子凝集剤を対象とした。新たに調合した高分子凝集剤候補を Table 1 に示す。アニオン性高分子凝集剤 2 種（以下、アニオン A、アニオン B）と両性高分子凝集剤 2 種（以下、両性 C、両性 D）の計 4 種と、比較としてアニオン性の従来材（以下、従来材 E）を用いて選定を行った。なお以下、本稿では高分子凝集剤を高分子改良材として記す。

2.1 選定試験方法

2.1.1 試料土 現場土に細粒分として笠岡粘土（シルト分 56.0%、粘土分 43.7%、塑性指数 34.4）を混合し、細粒分含有率（以下、Fc）を Fc 40% 設定（実測 Fc37.1%、含水比 28.0%）および Fc 50% 設定（実測 Fc 47.8%、含水比 35.1%）に調整し、試料土 2 種を作製した。なお、含水比は飽和度 90~95% となるように調整した。試料土の土質試験結果を Table 2 に、粒径加積曲線を Fig. 1 に示す。なお、湿潤密度は A-c 法で締固め（JIS A 1210:2020 に準拠）にて作製した試料を、土の湿潤密度試験（ノギス法、JIS A 1225）にて測定した。

2.1.2 気泡混合土 本試験では、改良対象としてシールド掘削土のひとつである気泡混合土とした。起泡沫材はレオフォーム®OL-10⁵を濃度 1wt% に希釈し、発泡倍率 10 倍の気泡を注入率 20v/v% で添加混合し作製した。

2.1.3 改良方法 気泡混合土に高分子改良材を 3.0、5.0、8.0kg/m³ 添加し、手で 60 秒間よく混ぜ改良した。改良後、締め固めた土のコーン指数試験方法（JIS A 1228）で qc を測定し改良効果を評価した。なお、改良目標は第四種建設発生土相当の qc 200kN/m² に安全率 1.2 を乗じた qc 240kN/m² 以上とした。

2.2 選定試験結果

Fc40% 設定試料土の改良結果を Fig. 2 に、Fc50% 設定試料土の改良結果を Fig. 3 に示す。どちらの試料土でも高分子改良材の添加量が増加するに従い、qc も大きくなり、いずれも従来材 E よりも改良効果が高かった。

Fc40% 設定試料土では各材ともに添加量 5kg/m³ 以上で目標強度を達成した。一方、細粒分が多く、含水比の高い Fc50% 設定では凝集力不足なのか、両性 D が改良目標を達成することができなかった。

2.3 改良効果の考察および高分子改良材の選定

アニオン A および B、両性 C と両性 D および従来材 E の強度改良効果の違いを高分子改良材の粘性特性に着目して考察する。泥土へ高分子改良材を混合すると、泥

Table 1 候補の高分子改良材緒言

Introduction to Candidate Polymer Improvement Materials			
No.	タイプ	原液粘度 (mPa・s)	0.5% 水溶液粘度 (mPa・s)
アニオン A	アニオン性	430	225
アニオン B	アニオン性	410	286
両性 C	両性	272	245
両性 D	両性	228	323
従来材 E	アニオン性	460	520

Table 2 選定試験で用いた試料土の土質試験結果
Results of Soil Test for Sample Soil

項目	Fc40% 設定	Fc50% 設定
湿潤密度(Mg/m ³)	1.890	1.803
含水比(%)	28.0	35.1
乾燥密度(Mg/m ³)	1.477	1.335
土粒子密度(Mg/m ³)	2.690	2.652
間隙比(-)	0.821	0.987
飽和度(%)	91.7	94.3
細粒分含有率(%)	37.1	47.8

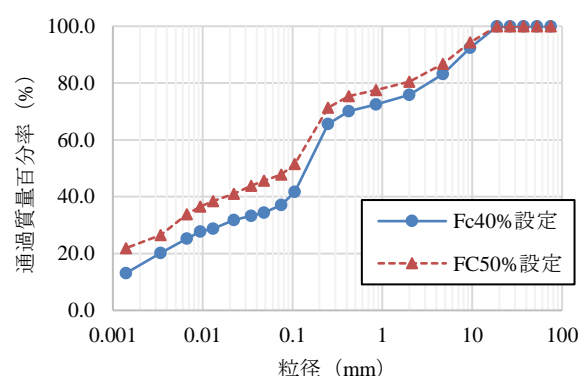


Fig. 1 試料土の粒径加積曲線
Grain Size Distribution Curve of Sample Soil

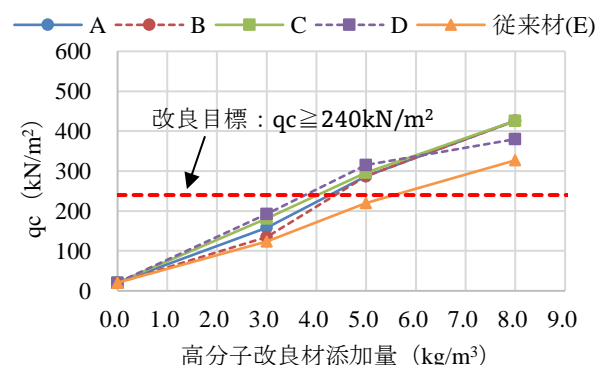


Fig. 2 設定 Fc40% の改良結果
Improved Results at Setting Fc40%

土間隙水に高分子が希釈されながら分散し、土粒子を絡めとりつつ団粒化させ、泥土が改良される⁶⁾。効率的に改良するためには、高分子改良材が泥土間隙に素早く分

散される必要がある。一方、一般的に高分子は水に接触すると膨潤し、粘度が増加する。Table 1 の 0.5%水溶液粘度は、高分子改良材を 0.5%に希釈した水溶液の粘度(B型粘度計, 60rpm で計測)を示しており、泥土間隙水で高分子改良材が希釈されたある粘性挙動を示していると考えられる。つまり、希釈時の粘度が低いほど分散性が高く改良効果が得られやすいと考えられる。Fig. 4 に 0.5%水溶液粘度と Fc50%設定試料土における改良後の qc の関係を示す。0.5%水溶液粘度と qc に強い相関が確認され、今回の改良条件においては、0.5%水溶液粘度が概ね 300mPa・s 以下の場合に改良目標を達成する結果となった。同程度の攪拌条件において、より粘性が低いほど改良効果を得やすいことを示しているものと考えられる。

以上の結果から、アニオン A、アニオン B および両性 C の 3 つが高分子改良材候補となった。この 3 つの原液粘度を比べると、両性 C が最も小さい。粘性が小さいほど注入ポンプ負荷は小さくなり施工性の面で有利になる。そのため、両性 C を新たな高分子改良材「ハイポリジオ™」として選定した。

3. 泥土の流動性改良効果の検討

3.1 流動性改良比較試験

泥土圧シールドの圧送排土を模擬した泥土の流動性改良効果をハイポリジオと従来材 F (従来材 E と同様なアニオン性高分子改良材) を用い比較検討した。

3.1.1 試料土 各種珪砂および笠岡粘土を用いて模擬土(砂質土および粘性土)2 種を作製した。模擬土に加水および加泥材(ベントナイト泥水)を添加混合し泥土を作製した。模擬土配合、初期含水比、加水、加泥材配合および試料土の初期性状を Table 3 に示す。

3.1.2 試験方法 作製した試料土に高分子改良材を 1.0~6.0kg/m³ 添加し、ソイルミキサー(容量 5L)の低速で 30 秒攪拌し、天地を返し、さらに 30 秒攪拌して改良土を作製した。改良土をテーブルフローコーンに充填し、50 回打撃後のフロー値(以下、T.F.50)を計測した。なお、運搬可能な流動性改良目標は、ダンプトラックで運搬できた流動性として、T.F.50 で 150mm 以下と報告されている例がある⁹⁾。安全率 1.2 とし、T.F.50 で 125mm 以下を目標とした。

3.1.3 試験結果 模擬砂質土の流動性改良結果を Fig. 5 に、模擬粘性土の流動性改良結果を Fig. 6 に示す。従来材 F では、砂質土で 2.0kg/m³ 添加、粘性土で 3.0 kg/m³ 添加で改良できた。一方、ハイポリジオは砂質土で 1.0 kg/m³ 添加、粘性土で 1.5 kg/m³ 添加で改良できた。この結果より、流動性の高い泥土において、従来材でも流動性改良は可能だが、ハイポリジオはより少ない添加量で十分な流動性改良ができることがわかった。

3.2 攪拌混合時間と流動性改良

施工では連続二軸ミキサーなどの攪拌機を用いた場合

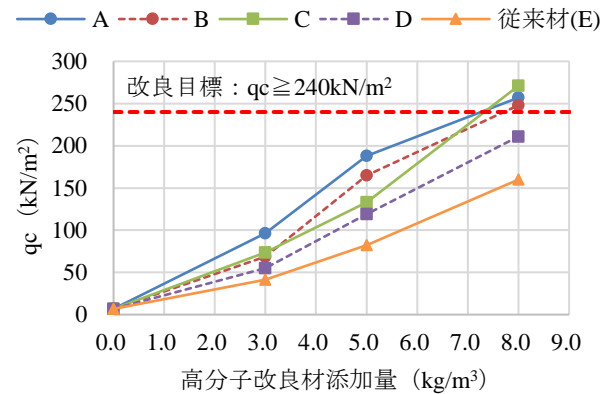


Fig. 3 設定 Fc50%の改良結果
Improved Results at Setting Fc50%

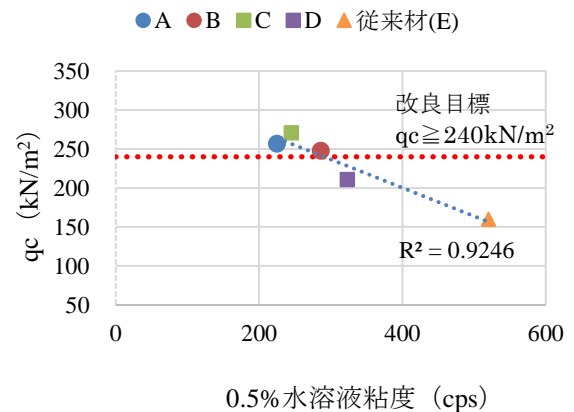




Fig. 4 粘性特性とコーン指数の関係
Relationship between Viscosity Properties and Cone Index

Table 3 運搬性改良検討で用いた試料土

Sample Soil Used in Study of Improving Transportability

項目		砂質土	粘性土
模擬土配合 (%)	珪砂 2 号	2.9	2.2
	珪砂 5 号	56.3	28.2
	珪砂 7 号	21.8	38.3
	笠岡粘土	19.1	31.3
初期含水比(%)		4.8	15.5
加水(L/m³)		—	250
加泥材	濃度 (kg/m³)	60	—
	添加量 (L/m³)	350	—
圧送用加水(L/m³)		100	135
試料土性状	見た目		
	T.F.50 (mm)	231	>300

でも、3.1 節の室内試験よりも攪拌時間は短いと考えられる。ここでは短時間の攪拌によるハイポリジオの流動性改良の効果を検討した。なお、一般的なセメント系固化材ジオセット 225（太平洋セメント社製、以下 GS225）を比較材として用いた。

3.2.1 泥土 ここでは 3.1.1 項の泥土の内、模擬砂質土を用いた。

3.2.2 試験方法 模擬砂質土の泥土にハイポリジオを 1.0kg/m^3 および 1.5kg/m^3 添加した。攪拌時間は、一般的に 60 秒以上に設定することが多いが、本検討では、短時間の攪拌条件として、ソイルミキサー（容量 5L）の低速で 5 秒（約 16 回転）、10 秒（約 32 回転）および 15 秒（約 48 回転）と 3 パターンとした。攪拌後、3.1.2 項と同様に T.F.50 を計測した。なお、セメント系固化材は 30kg/m^3 添加し、同様に計測した。

3.2.3 試験結果 Fig. 7 に攪拌混合時間による流動性改良の結果を示す。ハイポリジオは 15 秒で流動性改良ができた一方、セメント系固化材は流動性改良ができなかった。ハイポリジオ $1.5\text{kg/m}^3 \cdot 10$ 秒攪拌で T.F.50 が 128mm とやや目標に届かなかったものの、 1.0kg/m^3 よりも改良効果が高かった。また、5 秒攪拌ではハイポリジオ 1.5kg/m^3 の方が流動性は高かった。これは、ごく短時間では、不均質性が非常に高く、サンプリングのばらつきが影響したものと考えられる。

以上の結果から、15 秒程度と短時間の攪拌でも十分流動性改良ができることから、ハイポリジオは施工性改善に資する材料であると言える。

4. 固化材併用時の強度増進への影響検討試験

改良土の有効利用において qc を大きくし利用用途を広げるため、高分子改良材と固化材を併用することがある。一方で高分子改良材は塩類濃度が高いとその効果が低下することが知られている。そこで固化材から放出されるカルシウムイオン（以下、 Ca^{2+} ）など塩類による強度増進への影響の有無を評価した。

4.1 試験方法

4.1.1 試料土 細粒分含有率 99.1%（液性限界 78.8%、塑性限界 32.4%）の大阪沖積粘土を 9.5mm ふるいに通過させた土（初期含水比 47.9%）を用いた。加水で土砂圧送可能な性状（ペーンせん断 $1\sim 2\text{kPa}$ およびミニスランプ値 5cm 程度）となるように調整し、含水比 84.8%とした泥土を試料土とした。

4.1.2 高分子改良材 ハイポリジオと比較材として従来材 G（従来材 E および F と同様なアニオン性高分子改良材）を用いた。なお、添加量は 8kg/m^3 とし、高分子改良材のみとしたケースも実施した。

4.1.3 固化材 生石灰（秩父石灰工業社製）とセメント系固化材ジオセット 200（太平洋セメント社製、以下 GS200）を用いた。なお、添加量は 80kg/m^3 とし、固

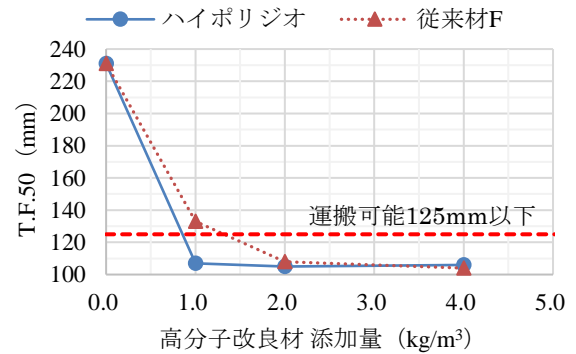


Fig. 5 模擬砂質土の流動性改良結果
Results of Improved Fluidity at Sandy Soil

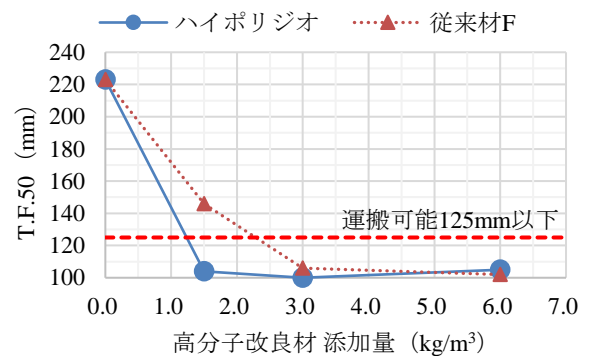


Fig. 6 模擬粘性土の流動性改良結果
Results of Improved Fluidity at Cohesive Soil

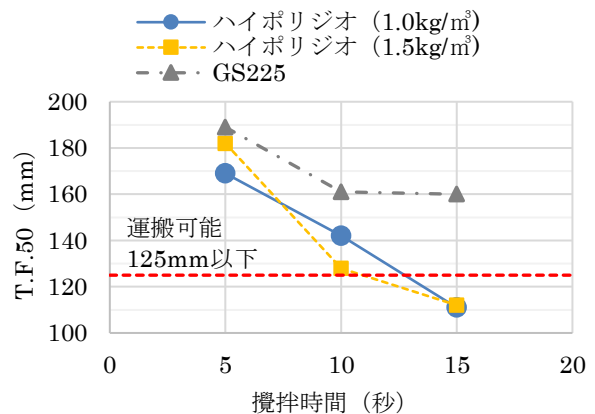


Fig. 7 攪拌時間による流動性改良結果
Results of Improved Fluidity Depended on Mixing Time

化材のみとしたケースも実施した。

4.1.4 試験体の作製および強度測定 試料土に高分子改良材、固化材の順で添加し、パン型ミキサー（容量 20L）の低速で 30 秒攪拌し、天地を返し、30 秒攪拌して改良土を作製した。改良 1 時間後、2 時間後および 24 時間後の qc を測定した。なお、改良目標は 2 章と同様 qc 240kN/m^2 以上とした。

4.2 試験結果

Fig. 8 に生石灰併用の結果を、Fig. 9 に GS200 併用の結果を示す。高分子改良材のみのケースでは、qc はハイポリジオの方がやや大きくなった。生石灰のみでは qc 70kN/m² 程度ではば一定であった。生石灰と高分子改良材併用では 1 時間後でも qc が大きくなり、特にハイポリジオは 1 時間後に目標強度を達成していた。一方、従来材 G は短時間で目標を達成しなかったが、24 時間後はどちらも同程度となった。生石灰は土壌中の水と反応して消石灰を生成し（消化吸水反応）、かつ発熱反応による水分蒸発により短期的に土の含水比を低下させる作用がある。また、生成した消石灰の一部は Ca²⁺として溶解し、土粒子の凝集作用に寄与する⁸⁾。高分子改良材併用では、さらに土の団粒化と間隙の自由水の補足が促進することで、締固めしやすくなり、qc が大きくなったと考えられる。短時間（1～2 時間後）では、より間隙または間隙水に分散しやすいハイポリジオで強度増進効果が高くなり、24 時間後には少し固化作用が進み、その差が小さくなったものと推察される。

GS200 のみでは、1～2 時間後までは生石灰よりも qc が小さいものの、24 時間後は qc 458kN/m²と大きくなった。これは、短時間では Ca²⁺による凝集が進み、24 時間後にはセメント水和硬化により強度発現したと考えられる。高分子改良材併用のケースでは、GS200 のみより qc が大きくなった。また、ハイポリジオと従来材 G の qc の差（以下、 Δqc ）は、1 時間後に $\Delta qc=47.5\text{kN/m}^2$ 、2 時間後に $\Delta qc=59.3\text{kN/m}^2$ 、24 時間後に $\Delta qc=236.2\text{kN/m}^2$ と時間の経過とともに Δqc が大きくなった。これは、高分子改良材が自由水を補足し、適度な自由水量となることで、セメント水和硬化による強度増進へ効果があつたものと推察される。また、 Δqc は自由水の補足、つまり高分子改良効果の差に起因しているものと考えられる。

以上から、高分子改良材と固化材併用時の強度増進への悪影響はなく、むしろ相乗効果によって強度増進に寄与する。また、高分子改良材による qc が高いほど併用時の qc が高い結果となった。

5. 現場実証試験

ハイポリジオの現場適用性を実証するため現場実証を行った。

5.1 実証現場

実証現場は泥土圧シールド工法で、排土は土砂圧送方式である。排土はダンプトラックにてすぐに運搬するため、土砂ピット排出直前に高分子改良材を添加し、二軸の攪拌機により流動性改良を行っている。なお、実証試験時の排土は、細粒分の多い粘性土であった。

5.2 実証試験方法

期間は 3 日間で昼施工を対象に実施した。1 日目は比較材である従来材 F を、2～3 日目は従来材 F からハイポ

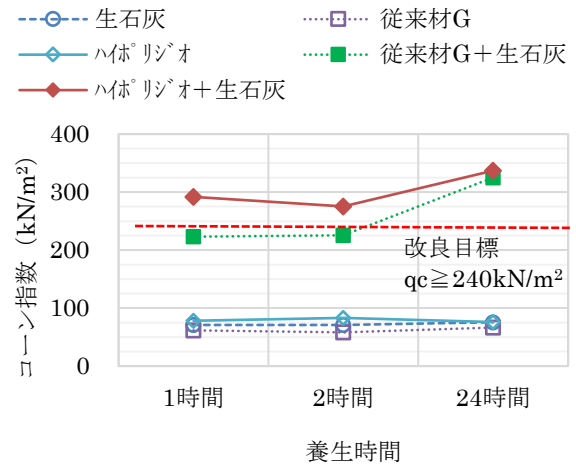


Fig. 8 生石灰併用による強度増進結果
Strength Improvement Results when Combined with Quicklime

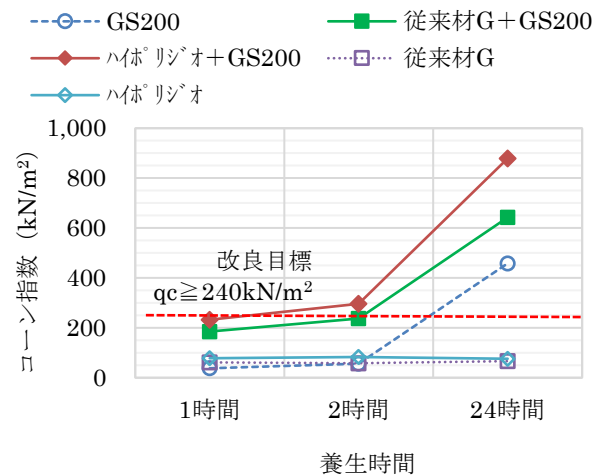


Fig. 9 GS200 併用による強度増進結果
Strength Improvement Results when Combined with GS200

Table 4 現場実証試験結果一覧
List of Field Demonstration Test Results

Ring No.	加泥材注入率 (%)	高分子改良材	平均添加量 (kg/m ³)	改良土	
				T.F.50 (mm)	含水比 (%)
57	22	従来材 F	1.53	108	42.9
58	21		1.53	122	44.5
59	22		2.16	102	40.2
60	22		2.10	104	42.0
64	22	ハイポリジオ	1.67	101	42.2
65	22		1.69	103	40.8
66	22		1.46	106	42.0
67	22		1.45	105	41.6
71	22		1.09	107	41.4
72	21		0.90	123	39.1
73	21		1.17	108	37.6

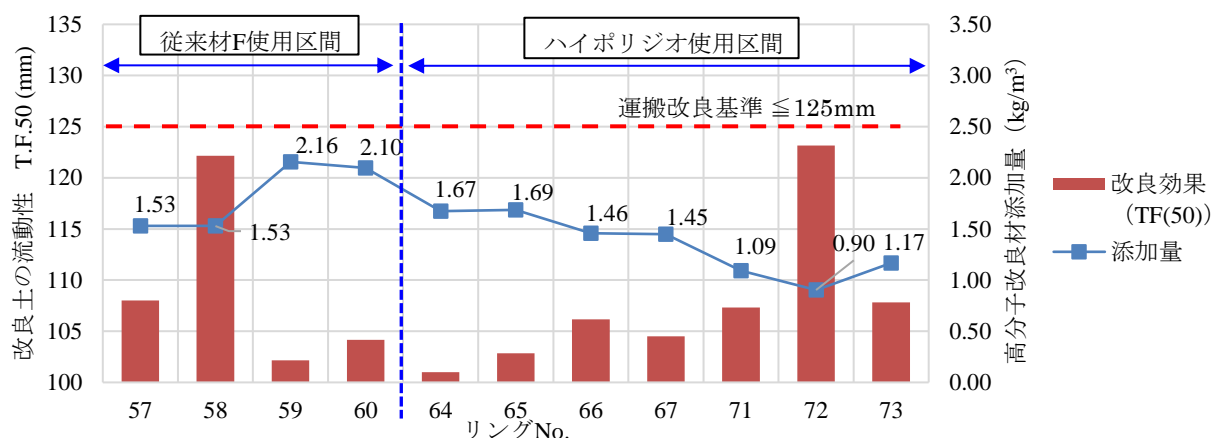


Fig. 10 高分子改良材添加量と流動性改良の結果
Polymer Modifier Addition Amount and Fluidity Improvement Results

リジオに切り替え施工を行った。掘削リングごとに排土を3試料、各10kg程度採取した。採取した排土を対象に、3章と同様にT.F.50を3試料測定しその平均を流動性改良結果とした。

5.3 実証試験結果

高分子改良材添加量と流動性改良結果をTable 4およびFig. 10に示す。従来材Fは、リングNo.57と58は同じ添加量だが、リングNo.58は流動性が高い結果となった。これは、従来材Fが均質に混ざっておらず改良が局部的に不十分な箇所をサンプリングした影響と考えられる。従来材Fによる流動性改良は、添加量1.5kg/m³程度でT.F.50=108mm、2.1kg/m³程度でT.F.50=102~104mmとなり、十分運搬が可能な性状であった。

一方、ハイポリジオは1.7kg/m³程度でT.F.50=101~103mm、1.5kg/m³程度でT.F.50=105mm程度と従来材Fより、流動性改良効果が高い傾向となった。さらに、添加量を減らしたところ、1.1~1.2kg/m³程度でT.F.50=107~108mm、0.9kg/m³では流動性改良効果が低下したもののT.F.50=123mmと運搬可能な性状であった。

実証試験の結果、ハイポリジオは従来材に比べ、添加量が2割程度少なくても流動性改良効果が得られ、より少ない量で効率的に改良が可能な高分子改良材であることが実証された。

6. まとめ

泥土を効率的に改良できる新たな高分子改良材の開発を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 新たに複数の配合に調査した高分子改良材候補から、間隙水に接触した際に粘性が高くない両性高分子改良材をハイポリジオとして選定した。
- 2) 流動性改良効果を検証した結果、ハイポリジオは粘性が低く、泥土中に効率的に分散するため、短時間の混合でも改良可能であることがわかった。

- 3) 固化材との併用による影響を検証した結果、悪影響はなく、固化材との相乗効果により強度増進に寄与することがわかった。
- 4) 現場実証試験を行った結果、従来材に比べ2割ほど少ない量でも、流動性改良効果が得られ、より少ない添加量で改良可能な高分子改良材であることが実証された。

参考文献

- 1) 後藤年芳, 片岡宏治: 土を固める, コンクリート工学, Vol.28, No.8, pp.52-62, 1990.8
- 2) 国土交通省通知, 建設汚泥処理土利用技術基準について, 平成18年6月12日, 国官技第50号, 国官総第137号, 国営計第41号
- 3) 東京都建設汚泥リサイクル指針, 東京都, 令和3年4月
- 4) 山名宗之, 富澤康雄, 藤原照幸, 水野克己, 稲垣学武, 水田和真, 勝見武, 嘉門雅史: シールド建設汚泥再生活用における品質管理とリサイクル効果の検証, 地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.4, pp.383-396, 2021
- 5) 木村志照, 三浦俊彦, 武田厚, 千野裕之: シールド工事用の高発泡性起泡剤の開発, 大林組技術研究所報, No.80, 2016
- 6) 中嶋正学, 三村充, 酒井宏: 漁港底泥浚渫作業における高分子凝集剤の活用事例, 日本水産工学会学術講演会講演論文集, 19, pp.245-248, 2007.5
- 7) 三浦重義, 田中浩, 吉田清司, 西川順次: 高含水泥土の軟弱性改良工法, 京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム講演論文集, Vol.9, pp.335-338, 1987.7
- 8) 小関宣裕, 桐山栄, 木戸健二: 石灰および石灰複合系固化材による地盤改良, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, 12巻, 319号, pp.512-515, 2005