

高吸水性ポリマー材を利用した
地盤掘削安定液の基本性状と場所打ち杭工法
への適用

Utilization of a Superabsorbent Polymer
Suspension for The Cast In-situ Pile
Construction

2018年 2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

浅 野 均

Hitoshi ASANO

目 次

第 1 章	序論	2
1.1	研究の目的	2
1.2	掘削安定液の機能	9
1.3	本論文の構成	10
第 2 章	既往の地盤掘削安定液の課題と高吸水性ポリマー材の利用例	9
2.1	既往の地盤掘削安定液の概要	9
2.2	既往の地盤掘削安定液の課題	11
2.3	高吸水性ポリマー材の利用例と機能	14
2.3.1	吸水膨張性止水材	15
2.3.2	施工時の地山との摩擦低減材 ⁹⁾	15
2.3.3	掘削時の逸水を防止するための目詰り材 ⁵⁾	16
2.3.4	シールドトンネルの透水性裏込め材料 ⁴⁾	17
2.3.5	加泥材・滑材・排泥処理剤	18
2.3.6	空隙充填材 ¹⁰⁾	19
2.4	まとめ	19
第 3 章	高吸水性ポリマー安定液の基本性状 ¹⁷⁾	22
3.1	高吸水性ポリマー安定液の定義	22
3.2	高吸水性ポリマー安定液の作製・性状測定方法	23
3.2.1	安定液の作製方法	23
3.2.2	性状測定項目及び測定方法	24
3.3	高吸水性ポリマー安定液の基本性状	30
3.3.1	使用溶液の違いによる影響	30
3.3.2	高吸水性ポリマー材の添加率による性状変化	33
3.3.3	高吸水性ポリマー材の配合方法による性状変化	37
3.3.4	電気伝導率による性状変化	37
3.3.4.1	塩化ナトリウム (NaCl) 濃度による性状変化	37
3.3.4.2	塩化カルシウム (CaCl ₂) 濃度による性状変化	42
3.3.5	余剰水率による性状変化	45
3.4	まとめ	47
第 4 章	高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭工法への適用性 ¹⁷⁾	53
4.1	高吸水性ポリマー安定液の孔壁安定性	53
4.2	高吸水性ポリマー安定液の流動性	56
4.3	高吸水性ポリマー安定液の適用深度	58
4.4	高吸水性ポリマー安定液の土砂分離特性	59
4.5	高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭本体への影響	62
4.5.1	コンクリートの置換性	62

4.5.2	杭本体の出来形	63
4.5.3	コンクリートと鉄筋との付着性能	64
4.6	高吸水性ポリマー安定液の環境特性	65
4.6.1	材料特性	65
4.6.2	温度特性	65
4.6.3	紫外線の影響	68
4.6.4	pH（水素イオン濃度）の影響	72
4.7	長期安定性	74
4.7.1	増粘剤添加による性状変化	74
4.7.2	細粒分及び増粘剤添加による性状変化	77
4.7.3	長期安定性試験	80
4.8	まとめ	83
第5章	高吸水性ポリマー安定液の現場管理手法 ¹⁷⁾	88
5.1	管理項目および管理限界値	88
5.2	現場管理フロー	90
5.3	まとめ	91
第6章	施工実績による管理手法の検証 ¹⁷⁾	95
6.1	アースドリル工法への適用（その1） ¹⁵⁾	95
6.1.1	工事概要	95
6.1.2	高吸水性ポリマー安定液の管理状況	96
6.1.3	産業廃棄物の低減効果	100
6.2	アースドリル工法への適用（その2）	101
6.2.1	工事概要	101
6.2.2	高吸水性ポリマー安定液の管理状況	101
6.2.3	産業廃棄物の低減効果	104
6.3	リバーズ工法への適用	104
6.3.1	工事概要	106
6.3.2	高吸水性ポリマー安定液の管理状況	106
6.3.3	産業廃棄物の低減効果	108
6.4	掘削工事費の比較	109
6.4.1	土砂と汚泥の区分	109
6.4.2	安定液の材料費の比較	111
6.4.3	排泥・掘削土処分費の低減効果	111
6.4.3.1	リバーズ工法の場合	111
6.4.3.2	アースドリル工法の場合	113
6.5	まとめ	114
第7章	結論	116

謝辞.....	119
参考文献.....	120
付録.....	122
付録 A：高吸水性ポリマー材の安全性資料.....	123
付録 B：施工実績（2017.3 現在）.....	130

論文概要・研究業績

第 1 章 序論

第 1 章 序論

1.1 研究の目的

安定液で掘削地盤の孔壁を保持する場所打ち杭工法は、1930年頃からヨーロッパで開発され、日本においては既製杭の打設に伴う騒音・振動が建設公害として社会問題化した1960年代から徐々に採用されるようになった。この場所打ち杭工法に用いられる地盤掘削安定液は、その使用実績が多くなるにつれて進化し、初期の頃の安定液は、ベントナイトを主材とした懸濁液であったが、地中連続壁工法における研究・開発を背景に、安定液の増粘性やろ水減少効果を目的にCMC (Carboxy Methyl Cellulose) が1970年代より使用されはじめた。現在使用されている安定液は、ベントナイトとCMCの長所を取り入れたベントナイトCMC安定液が広く採用され、土質等の条件により配合割合を変化させ使用されている。

既往のベントナイト系安定液は、実績は豊富である一方、比較的緩い地盤における孔壁安定性向上のためのベントナイト濃度上昇に伴う安定液比重増大によるコンクリート置換性低下やコンクリート中のカルシウムイオン (Ca^{2+}) や海水中の溶解塩類混入による急激な流動性喪失などの施工上の課題、孔壁にベントナイトが付着して杭の最大周辺摩擦力の低減や有効杭径が減少^{1)・2)}することや鉄筋にベントナイトが付着して鉄筋の付着強度が低下³⁾するなどの品質上の課題があり、これらの諸問題の改善が望まれている。

また、場所打ち杭工法の安定液は、掘削工法により違いはあるものの、可能な限り繰り返し使用されるが、掘削土砂の混入やコンクリート打設時のセメント成分の影響などによって徐々に性能が低下する。性能低下した安定液は、再生・調合が不可能となった場合は、産業廃棄物の「汚泥」として処理、処分される。さらに、掘削土自体も安定液により泥濁化するため、通常は、場内への盛土などにも利用できず、産業廃棄物扱いとなる。近年、産業廃棄物の処理においては最終処分場の不足、遠隔化などの問題が顕在化しているため、環境上及び経済性上の負荷が大きく、その減量化は早急に改善すべき重要な課題となっている。

本研究は、外的条件変化によって吸水状況が変動⁴⁾する特性や逸泥防止材料としての優れた遮水性能⁵⁾が知られている高吸水性ポリマー材に着目し、高吸水性ポリマー材を懸濁した安定液が、既往の場所打ち杭工法用掘削安定液との比較において、上記の施工改善及び品質改善、さらには産業廃棄物低減による環境改善につながることを、国内外で初めて実験的に調査したものである。また、この安定液をアースドリル工法とリバーズ工法による場所打ち杭工法の現場に適用し、その管理手法を考案するとともに、

施工性に問題がないこと並びに環境や経済性改善につながる産業廃棄処分量の低減効果を実証した。

1.2 掘削安定液の機能

掘削安定液に求められる機能を大別すると、施工性、杭本体への影響回避（品質確保）、環境負荷低減、経済性の4項目が挙げられ、各項目ごとの概要を以下に示す。

(1) 施工性

地中に場所打ち杭などの支持構造物を造るために、地山を鉛直に掘削してできた孔は土の持つ自立高さを超える場合や、地下水が土砂とともに流出する場合に崩壊するので、この防止対策として安定液が使用される。この際、安定液は安定液の液圧を孔壁面に有効に伝達し孔壁の安定を保つために、透水性の高い地盤など対しても孔壁面に難透水性を付与する機能が必要である。また安定液は、回転式掘削機などでは掘削された掘削ズリを地上へ搬出する媒体となるため、安定液と掘削土砂とが速やかに分離できる適度な粘性と流動性を保持する必要がある。

上記のほか、50m以上の大深度への適用性、現場作業環境や作業手間の良さなども求められる。

(2) 杭本体への影響回避（品質確保）

掘削した孔に品質の良い場所打ち杭を造るために、支持力確保のため杭先端に堆積したスライムを確実に除去し、安定液中に鉄筋かごなどを建て込んだのちにコンクリートを打設する。この際、安定液とコンクリートがスムーズに置換されることが杭品質を確保する上で必須となる。

また、上記のコンクリート打設の際に、孔壁や鉄筋の周りに安定液が残ることにより、杭径が不足したり周面摩擦抵抗が減少しないこと、コンクリートと鉄筋の付着性能に影響を与えないことが求められる。

(3) 環境負荷低減

場所打ち杭工法の安定液は、性能低下または掘削終了後には産業廃棄物として処理される。さらに、掘削土自体も安定液により泥濁化するので場内への盛土などにも利用できず産業廃棄物扱いとなるため、その減量化は改善すべき重要な課題である。

上記のほか、逸泥・逸水低減などのよる地下水汚染抑止、CO₂排出量削減につながるものであることが求められる。

(4) 経済性

産業廃棄物扱いとなる処分安定液や掘削土処理の低減によるコスト低減のほか、安定液の長期安定性改善、施工省力化、使用材料の単価・使用量の低減など、経済性改善につながる新たな安定液の開発が望まれる。

1.3 本論文の構成

本論文の構成および各章の概要を示す。

研究目的及び既往研究調査

第 1 章 序論

1.1 研究の目的、1.2 掘削用安定液の機能、1.3 本論文の構成

第 2 章 既往の地盤掘削安定液の課題と高吸水性ポリマー材の利用例

2.1 既往の地盤掘削用安定液の概要

2.2 既往の地盤掘削用安定液の課題

2.3 高吸水性ポリマー材の利用例と機能、2.4 まとめ



高吸水性ポリマー安定液の基本性状及び適用性の解明

第 3 章 高吸水性ポリマー安定液の基本性状

3.1 高吸水性ポリマー安定液の定義

3.2 高吸水性ポリマー安定液の作製・性状測定方法

3.3 高吸水性ポリマー安定液の基本性状、3.4 まとめ

第 4 章 高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭工法への適用性

4.1 孔壁安定性、4.2 流動性、4.3 適用深度、4.4 土砂分離特性

4.5 杭本体への影響（コンクリートの置換性、杭本体の出来形、
コンクリートと鉄筋との付着性能）

4.6 環境特性（材料特性、温度特性、紫外線の影響、PHの影響）

4.7 長期安定性、4.8 まとめ



高吸水性ポリマー安定液の実用性検証

第 5 章 高吸水性ポリマー安定液の現場管理手法

5.1 管理項目および管理限界値、5.2 現場管理フロー

5.3 まとめ

第 6 章 施工実績による管理手法の検証

6.1～2 アースドリル工法への適用

6.3 リバース工法への適用、6.4 掘削工事費の比較、6.5 まとめ



結論

第 7 章 結論

第 1 章では、高吸水性ポリマー材(以下、ポリマー材)を利用した安定液の開発の目的と地盤掘削用安定液として必要な機能を明らかにするとともに、本論文の構成と各章の概要を要約した。

第 2 章では既往の地盤掘削用安定液全般について整理を行い、孔壁安定性や流動性に係る施工上の課題、場所打ち杭本体構造に与える影響などを明らかにした。

また、建設分野でのポリマー材の利用例を調査し、この材料を地盤掘削用安定液に応用した場合における流動性・孔壁安定性・安定液の最終処分時の減量化などの優位性が期待できる機能を明確化した。

第 3 章では、高吸水性ポリマー安定液(以下、ポリマー安定液)を、場所打ち杭工法における孔壁の安定性と掘削、コンクリート置換性を成立させるために必要な粘性を配合・調整できることを前提とした「水(溶媒)と吸水膨張させたポリマー材が懸濁した溶液」と定義し、ポリマー材の材料特性とポリマー安定液の基本性状を実験的に解明した。ポリマー安定液の基本性状を実験的に調査するために、ポリマー安定液の作製方法を定め、その性状に影響する比重・ろ過水量・膜厚・pH・電気伝導率・溶媒の塩分濃度・温度などの測定項目を抽出し、ポリマー材の添加率とポリマー安定液の粘性及び比重の関係、使用溶媒の電気伝導率と吸水倍率との関係を実験的に明らかにした。その結果、ポリマー材の吸水膨張の程度にかかわらず、ポリマー安定液の性能を支配する粘度はポリマー材に吸着された水分を除く余剰水率に依存することを示した。

第 4 章は、ポリマー安定液の場所打ち杭工法への適用性について、第 2 章で示した既往の安定液の施工上の課題と場所打ち杭本体構造に与える影響の観点から、各種室内実験を通じて検証した内容についてまとめたものであり、ポリマー安定液実用化の核心となる章である。

まず施工上の課題となる孔壁安定性については、安定液の遮水性能確認試験装置を用いて、粒径の異なる模擬砂地盤に対するポリマー安定液と既往のベントナイト系安定液の遮水性能を比較した。その結果、遮水性能を発揮できる適用地盤の粒径範囲がベントナイト系安定液よりも広く、かつ遮水性能を発揮するまでに要する時間も短いことが判明し、優れた遮水性能を有することがわかった。

流動性については、既往の安定液の流動性を表す指標であるファンネル粘性に着目して、ポリマー安定液のファンネル粘性を調査した。第 3 章で得られた余剰水率と粘度の関係から、余剰水率とファンネル粘性の関係式を求めた。

適用深度については、加圧が可能なベーンせん断試験装置を用いて、掘削深度 50m 程度に相当する地下水圧下におけるポリマー安定液と水道水の

ベーンせん断抵抗を比較した。その結果、加圧に伴いポリマー安定液のベーンせん断抵抗は微増するものの水道水と同程度であることを確認した。

ポリマー安定液は、塩化カルシウムなどの二価の金属イオンを添加して余剰水を含む溶媒の電気伝導率を上昇させることでポリマー材に吸着されていた水が溶出する。これにより懸濁状態が崩れてポリマー材が土粒子とともに沈降し、安定液の上部に排水基準を満足する水が分離でき、廃液処分量の減量化が図れる。ポリマー安定液は比重によって土砂分離度が変化するため、比重の異なる安定液の分離試験を実施し、安定液の比重が 1.05 以下であれば分離度 70%以上が確保できるが、比重が大きくなると分離度が低下する傾向があることを確認した。

次に、場所打ち杭本体への影響を明らかとするために、コンクリートの置換性・杭本体の出来形に影響する泥膜厚さ・鉄筋とコンクリートとの付着性能への影響に係る実験をおこなった。まず杭本体を造成するコンクリートの置換性については、水槽内に満たしたポリマー安定液にコンクリートを底部から打設して置換性に問題がないことを確認した。杭本体の出来形に関係する泥膜厚さについては、既往の安定液のろ過試験装置を用いて、安定液中の粘土分混入率を変化させた場合のポリマー安定液と既往のベントナイト系安定液のろ紙に付着した泥膜厚さを比較した。その結果、既往の安定液では粘土分混入率の増加に伴い泥膜厚さが 1mm 程度から急激に増大するのに対して、ポリマー安定液の場合は 0.5mm 程度で十分薄く、粘土混入率に無関係に一定であることを確認し、泥膜によるマッドケーキの増大で杭径を縮小させる恐れがないことがわかった。鉄筋とコンクリートとの付着性能への影響については、安定液をコンクリートで置換して作製した供試体の鉄筋引き抜き試験を実施し、既往の安定液より付着応力度が約 4~7% 向上する結果が得られ、杭本体の品質向上が期待できると判断された。

さらに、ポリマー安定液の環境特性（材料特性・温度特性・紫外線の影響・pH の影響）についてもそれぞれ調査及び実験をおこない、環境破壊につながることもなく、かつ通常の施工条件において施工性を阻害することもなく、既往の安定液と比べ優れた特性を有した場所打ち杭工法の安定液として適用できることを確認した。なおポリマー安定液の長期安定性を保つための増粘剤の効果確認実験をおこない、安定液中に累積する細粒分による劣化を抑制できることを確認した。

第 5 章では、第 4 章までに得られた室内実験結果に基づいて、ポリマー安定液を実際に現場で使用するための管理手法を検討した。管理項目及び管理限界値については、既往の安定液で通常使用するものにポリマー材の吸水特性に関係する使用溶媒の電気伝導率を加えた内容とし、現場管理手

法としては、現場使用水及び地下水の調査、安定液の試験練り・配合計画、現場配合及び施工中の管理、安定液の破棄という手順でフロー図を準備した。

第 6 章では、第 5 章で示したポリマー安定液の現場管理手法を実際の場所打ち杭施工(アースドリル工法、リバーズ工法)に適用し、その妥当性を検証した。

アースドリル工法については、掘削長 34m で杭径 1~1.5m 程度の 74 本、掘削長 53.7m で杭径 1.7~1.9m の 20 本の 2 現場でポリマー安定液による場所打ち掘削杭施工を特段のトラブルもなく連続施工し、掘削残土の泥濘化が抑えられたため一般残土として取り扱うことができた。リバーズ工法についても、掘削長 35.5~37m で杭径 1.5~2.5m の 5 本の杭を特段のトラブルもなく連続施工できた。

施工中における深度方向でのポリマー安定液の比重・ファンネル粘性・電気伝導率は深度ごとにばらつきもなく一定していることを確認し、安定液として優れた性状を有しているとともに、第 5 章で示した管理手法が現場管理手法として使用できることを実証した。

また、アースドリル工法の杭 20 本の現場では安定液の最終処分時で約 80%の分離に成功し、リバーズ工法の現場では安定液の最終処分時では比重 1.1 以上であったが約 29%の分離に成功し、廃液処分量の低減効果が実証された。

ポリマー安定液と既往の安定液との経済性比較では、約 32%の材料コスト低減に加え、安定液及び掘削残土の産廃処分量の低減効果によるコスト低減により、ポリマー安定液はコスト改善効果も期待できることがわかった。

第 7 章は本論文の結論であり、本研究で得られた主要な結果を総括するとともに、今後の課題について要約した章である。

第 2 章 既往の地盤掘削安定液の課題と高吸水性ポリマー材の利用例

第 2 章 既往の地盤掘削安定液の課題と高吸水性ポリマー材の利用例

2.1 既往の地盤掘削安定液の概要

地中連続壁工法や場所打ち杭工法に用いられる既往の地盤掘削安定液の種類は、ベントナイトの配合率によりベントナイト系安定液と CMC 系安定液に分類でき、前者のベントナイト配合率は 2～8%，後者は 4% 以下の場合が多い。

ベントナイトは、主としてモンモリロナイト系粘土鉱物によって構成され、一般的には、ベントナイト系安定液には Na 系主体のベントナイトを、CMC 系安定液には Ca 系主体のベントナイトを使用する。また、ベントナイトは粒度が細かいものほど膨潤度が高く、通常は 250 と 300 メッシュ通過粒径のものが使用されている。

場所打ち杭工法におけるベントナイト系安定液と CMC 系安定液の標準的な配合表⁶⁾を表 2-1-1、管理項目と管理基準値の例⁶⁾を表 2-1-2、管理項目の使用機器を表 2-1-3 に示すとともに、以下にベントナイト系安定液と CMC 系安定液それぞれの概要を示す。

表 2-1-1 安定液の標準的配合表

安定液の種類	掘削土	配合量 (kg/m ³)		
		ベントナイト	CMC	分散剤
ベントナイト系安定液	粘性土	20～40	0～1	1～2
	砂質土	40～60	0.5～1	1～2
	砂礫	50～80	0.5～2	1～2
CMC系安定液	粘性土	0～20	1～2	1～3
	砂質土	10～30	2～4	0～2
	砂礫	20～40	2～5	0～2

表 2-1-2 安定液の管理項目と管理基準の例

管理項目	単位	ベントナイト系	CMC系
		掘削中	掘削中
比重		1.02～1.20	1.01～1.20
ファンネル粘性	sec	22～30	20～30
ろ過水量	ml	20以下	30以下
砂分	%	5(1)以下	5(1)以下
pH		7～10.5	7～11.5

()内はコンクリート打設前

表 2-1-3 管理項目の使用機器

管理項目	使用機器	備考
比重	マッドバランス	測定頻度 1回/1日 or 1回/1本
ファンネル粘性	ファンネル粘度計	
ろ過水量	ろ過試験器	
砂分	砂分計	
pH	pHメーター	

(1) ベントナイト系安定液

ベントナイト系安定液ではベントナイト粒子が水中に大小さまざまに分散している（図 2-1-1①参照）。この粒子が内圧と外圧の差で地盤の隙間に浸透する。するとベントナイト粒子は孔壁面の土粒子のマイナス電化に引かれて土粒子の表面に吸着する。またこれと同時に地盤がフィルターとなってベントナイト系安定液の水分のみを通過させる作用も発生する（図 2-1-1②参照）。このような現象が進行すると地盤の土粒子がベントナイト粒子で包まれ大きくなり隙間をふさぐ状態となり、膜（マッドケーキ）が形成され、この特性を泥壁形成性という。粒子による目詰まりなどの減少も加わりマッドケーキはさらに成長し水を通しにくい膜となり、かつ砂などの粒子の結合をするプラスターの働きをするようになる。この膜を介して内圧を掘削孔壁面に完全に伝えることが出来るようになり、孔壁の安定は保てることになる（図 2-1-1③参照）。

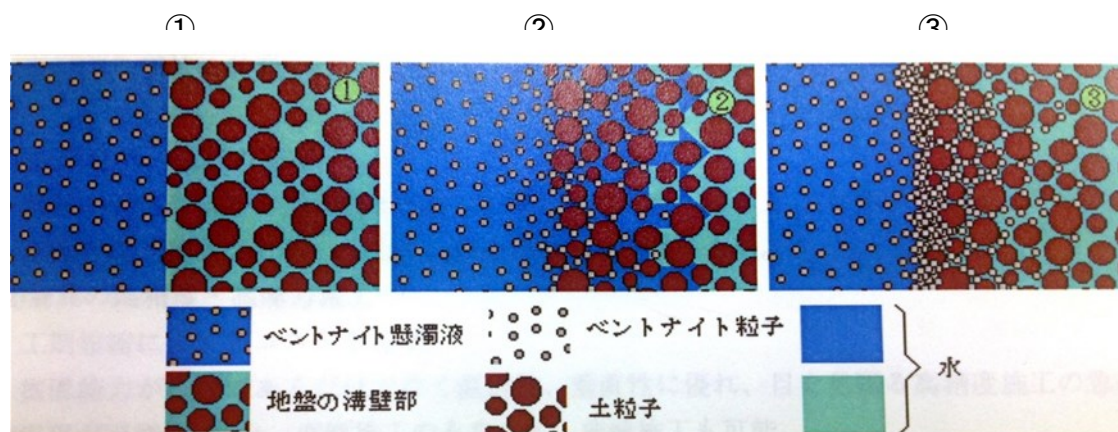


図 2-1-1 ベントナイト系安定液の溝壁安定化メカニズム

(2) CMC 系安定液

CMC 系安定液は、有機化合物であるモノマー（単量体）を重合、または集合して巨大分子化させたものがポリマーと呼ばれる。安定液材料としてのポリマーは、水溶性高分子に属し、増粘性とろ水減少効果を目的に使用されている。その中で、従来安定液に使用されているポリマーの代表的なものが CMC である。CMC の用途は、食品、医療、化粧品、配合肥料、繊維、建材、製紙、土木・ボーリングなど広範囲にわたり、増粘剤、分散安定剤、粘着剤、保護コロイド剤などとして使用されている。

CMC 系安定液ではポリマー・粘土複合体がベントナイト系安定液のベントナイトと同様な役割を果たす。すなわち、ベントナイトの小さな粒子を核として液中に分散・溶解した CMC が囲むように保護コロイドを形成し、よく分散する。これがマッドケーキを形成し掘削地盤は安定する。

CMC 系安定液の性質は基本的にはベントナイト系安定液と変わらない。すなわち、安定液掘削に必要な性質として孔壁面にマッドケーキを作る性質（造壁性）・適度な粘性と比重があるが、これらのある範囲に管理することが良好な構造物の造成に不可欠である。

CMC 系安定液を用いると、コンクリート打込み時の安定液の劣化領域（コンクリート天端からの凝集劣化範囲）がベントナイト系安定液の約 1/4 に減少する。また、ベントナイト系安定液に比較して、塩分やセメント粒子の混入による劣化度合いが少なく、ろ水量、粘性を適度の確保した低比重の安定液が配合できるのでコンクリートの置換性が良いという長所をもっている。しかしながら、土中のバクテリアの活動が盛んになる夏場（液温 20℃以上）では、CMC の腐敗による粘性低下の影響を受けやすいので、必要な粘性などの安定液性状を維持するため、夏場は腐敗防止対策が必要となるなど、施工管理上の取り扱いが煩雑となるなどの短所がある。

CMC 系安定液が適する場合は、永久構造物や密な配筋の鉄筋コンクリートなどの高品質な施工が要求される構造物、海水の影響や塩分を多く含む地盤や改良地盤など、施工時に化学的影響を受ける場合などが挙げられる。

2.2 既往の地盤掘削安定液の課題

既往の安定液は、ベントナイトの配合率によりベントナイト系安定液と CMC 系安定液の 2 種類に大別されることは前述のとおりであるが、両安定液ともベントナイトが主体的な役割を果たすこと、安定液としての管理のしやすさ及びコスト面などからベントナイト系安定液の使用が大半を占めていることを鑑み、本研究ではベントナイト系安定液を既往の安定液として捉え、その課題を以下に示す。

既往の安定液は、施工上の課題・杭本体構造への影響・環境負荷への影響・経済性の観点において課題を有しており、その主な要因がベントナイトの使用に起因するものであるため、諸課題の解決へのひとつの方向性として、ベントナイトを使用しない新たな安定液の開発が望まれる。

(1) 施工上の課題（孔壁安定性・流動性など⁷⁾）

ベントナイト系安定液が掘削孔の崩壊を防止するためには、安定液中の粘土粒子が掘削地盤中に浸透して粗粒土粒子を結合するとともに、地山側孔壁と安定液の界面において安定液のろ過が進行し、泥膜（マッドケーキ）が形成され、泥膜を介して安定液の液圧が全応力として作用する造壁性が求められる。しかしながら、地山材料が粗粒土の場合には泥膜が形成されないで逸水現象が生じる場合がある。そのため、透水係数の高い地盤など

には、ベントナイト濃度を上げる必要があるが、安定液の比重が増大するため、コンクリートとの置換性が低下することになる。

また、ベントナイト系安定液は、コンクリート中のカルシウムイオン (Ca^{2+}) や海水中の溶解塩類が混入すると、急激に流動性を失いゲル状となる性質をもち、上記の造壁性を著しく低下させる。

上記のほか、掘削土の泥濁化を抑えることができれば、現場作業環境の改善につながり、施工性の向上を図ることができる。

(2) 場所打ち杭本体構造への影響

掘削完了後、鉄筋籠を建込み、コンクリートを打設する際、安定液がコンクリートに巻き込まれることなくコンクリートの上に乗って押し上げられるような良好な置換流体である必要がある。既往の安定液は高比重・高粘性となりやすく、砂分の抱き込み量が多くなり、コンクリート置換していく流体機能が低下するため、鉄筋への付着力低下³⁾、コンクリート強度の低下⁸⁾、をまねく。また、このような状態の安定液を用いると、孔壁面に弱くて厚いマッドケーキしかできず、孔壁崩壊の原因となるとともに、有効杭径（掘削断面積）の減少^{1) 2)}、につながる。そのため、良質なコンクリート品質を得るためには、ベントナイト成分の少ない低比重の安定液が良好とされている。

以上に示すように、安定液の影響によって鉄筋にベントナイトが付着して鉄筋の付着強度が劣化することや、孔壁にベントナイトが付着して杭の最大周辺摩擦力の低減や杭径が縮小するなどの事例が見られるため、表 2-2-1 に示す鉄道構造物等設計標準・同解説や表 2-2-2 に示す道路橋示方書・同解説などの基準類では、これらの実状を考慮し、安定液としてベントナイト泥水（安定液）を使用する場合には、鉄筋の付着強度やコンクリートの各種強度、杭の周辺摩擦力、杭の有効径を低減することが規定されている。

(3) 環境負荷への影響

性能低下または掘削終了後のベントナイト系安定液は産業廃棄物として処理される。また、ベントナイト系安定液を使用して掘削した残土は泥濁化しやすく、場内への盛土などにも利用できずに全量が産業廃棄物扱いとなるため、環境負荷の低減の観点から、その改善が望まれている。

上記のほか、逸泥・逸水を生じた場合には地下水の汚染、産業廃棄物処理に伴うCO₂排出量の増大なども改善されるべき課題であるといえる。

(4) 経済性

安定液を使用した場所打ち工法にとって、産業廃棄物扱いとなる処分安定液や掘削土処理費が環境負荷の側面だけでなく工事費上においても、大きいウェイトを占めており、その改善は工事費の低減につながる。

上記のほか，安定液の長期安定性改善，施工省力化，使用材料の単価・使用量の低減を実現できれば経済性の改善につながる。

表 2-2-1 鉄道構造物等設計標準・同解説による規定²⁾
(基礎構造物，平成 24 年 1 月)

項目		自然泥水 または CMC系安定液 ^{※1,2}		ベントナイト泥水	
定義		ベントナイト濃度3%未満		ベントナイト濃度3~10%	
		泥水比重 1.04以下 に管理	泥水比重 管理条件 無し	泥水比重 1.10以下 に管理	泥水比重 管理条件 無し
コンクリート 特性値	圧縮、曲げ	補正係数 $\rho_c=0.8$	補正係数 $\rho_c=0.7$	補正係数 $\rho_c=0.7$	補正係数 $\rho_c=0.6$
	引張、支圧				
	付着強度	$\rho_c=0.7$	$\rho_c=0.6$	$\rho_c=0.6$	$\rho_c=0.5$
	ヤング係数	$\rho_c=0.8$		$\rho_c=0.8$	$\rho_c=0.7$
	せん断 V_c	$0.9 \cdot \rho_c$		$0.9 \cdot \rho_c$	$0.8 \cdot \rho_c$
設計径 および 有効断面	地盤抵抗 の算定	公称径			
	杭体の断面 性能の算定	オールケーシング：公称径-2cm			
		リバーズ： アースドリル：公称径	リバーズ： アースドリル：公称径-5cm	リバーズ： アースドリル：公称径-5cm	アースドリル：公称径-5cm
支持力	基準周面 支持力度 (kN/m ²)	砂質土、砂礫： 粘性土： 0.4C ≤ 150	砂質土、砂礫： 粘性土： 0.4C ≤ 150	砂質土、砂礫： 粘性土： 0.4C ≤ 75	砂質土、砂礫： 粘性土： 0.4C ≤ 75

- ※1：コンクリート特性値と支持力においては，CMCを主成分とする安定液で新液の状態ベントナイトの配合率が3%未満のもの。
- ※2：リバーズ工法，アースドリル工法の設計径および有効断面においては，ベントナイト濃度が3%未満かつCMC濃度が0.6%以下のものを自然泥水とする。
- ※3：せん断 V_c は施工修正係数 ρ_c により低減した設計圧縮強度から算定した値に対して低減するものとする。

表 2-2-2 道路橋示方書・同解説による規定¹⁾

(下部構造編，平成 24 年 3 月)

項目		自然泥水			ベントナイト安定液
定義		特に表記はないが 右記以下の比重			ベントナイトを使用し，孔内での 比重が1.05程度以上のもの
コンクリート 許容応力度 (N/mm ²)	呼び強度	30	36	40	同左
	設計基準強度 (水中)	24	27	30	
	曲げ圧縮応力度	8	9	10	
	軸圧縮応力度	6.5	7.5	8.5	
	せん断応力度 τ_a^1	0.23	0.24	0.25	
	せん断応力度 τ_a^2	1.7	1.8	1.9	
	付着強度	1.2	1.3	1.4	
有効径		公称径			アースドリル工法 公称径-5cm
支持力		特に表記なし			特に表記なし

2.3 高吸水性ポリマー材の利用例と機能

既往の安定液のもつ課題解決にあたっては，ベントナイトに代わる新たな材料をベースとした安定液を模索する必要があると考え，その候補として高吸水性ポリマー材に着目した。

高吸水性ポリマー材は，多量の水を吸水してゲル化し，その水を保持する機能を有している。1960 年頃，PVA（ポリビニルアルコール）や PEG（ポリエチレングリコール）などの水溶性樹脂を構成する高分子を相互に結合架橋した親水性架橋高分子が，園芸用の土壌保水剤などの用途を目標に開発された。その後も吸水性向上などを目的に多くの組成や製法が検討され，その用途開発も多岐にわたって進められ，現在では紙おむつやナプキンなどの衛生用品のみならず，農業・園芸，食品・流通，土木・建築，化粧品，メディカル，電気・電子産業分野でも使用されている。

以下に，地下建設工事における高吸水性ポリマー材の利用例を整理するとともに，場所打ち杭工法用の安定液としての応用が期待できる機能を明らかにする。

2.3.1 吸水膨張性止水材

高吸水性樹脂が膨潤して体積を増大させることを利用して微細な隙間を埋め、水漏れを防ぐ止水用途での応用例は多数ある。この用途では、他の素材との複合化が進んでおり、「水膨潤ゴム」や「水のう」が代表的な例としてある。

水膨潤ゴムとは、ゴムと高吸水性樹脂を混合・複合化することにより、水を吸収して相似的に元の体積の数倍程度にまで膨張する材料であり、土木分野での止水剤として重要な材料となっている。特にシールド工法においてセグメントを組み立ててトンネル覆工を構築する場合には、セグメント間からの水漏れを防ぐため、ほとんどのケースで水膨潤ゴムが使用されている（図2-3-1参照）。水膨潤ゴムではゴムを押し広げるほどの高吸水性ポリマー材の高い膨潤圧力を利用したものである。この用途では高吸水性ポリマー材の経時的安定性の高さとゴムとの相溶性の良さが前提となっている。

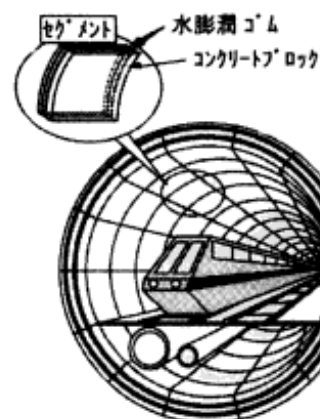


図 2-3-1 水膨潤ゴムの使用例
(シールドセグメントの止水)

水のうとは、都市では水害時に土のうを作製する土砂が容易には手に入らないため、災害現場で水を吸収させることで土のうと同じ働きをする「吸水性ゲル水のう」が検討されている。この用途でも、高吸水性ポリマー材の膨潤による体積変化を利用しているが、高吸水性ポリマー材だけでは比重が水に近いと、実際には軽さなどを比重調整剤と混合してカバーする等の対策などによって、一般に普及させる取り組みが行われている。

これらのことは、大きな吸水能力がより少ない材量で安定液を作製できることを示唆し、安定液の基本となる簡便性や経済性を、高吸水性ポリマー材に期待できることを示している。

2.3.2 施工時の地山との摩擦低減材⁹⁾

図 2-3-2 に示すように地下掘削工事等を行う際に構築される仮設土留め壁の芯材に使用される H 鋼を工事終了後に引き抜き回収するためや、鋼矢板遮断工等において鋼矢板の土付着（共上り）を防止して打設・回収を容易にしたり、地盤沈下によるネガティブフリクション対策や圧入ケーソン工等における杭、ケーソン表面の摩擦（付着）の大幅な低減を目的として、高吸水性ポリマー材が利用されている。この摩擦低減材は、H 形鋼

などの杭（鋼材）の表面に高吸水性ポリマー材層を形成させ、セメント水又は地下水との接触により、セメント層（又は地層）と杭（鋼材）との境界面に含水ゲルを介在させ、この含水ゲル層の働きで摩擦（付着）を低減している。低減効果の一例を図 2-3-3 に示しているが、これによると概ね約 5 分の 1 の効果を有している。

このことは安定液に必要な流動性を、高吸水性ポリマー材に期待できることを示している。

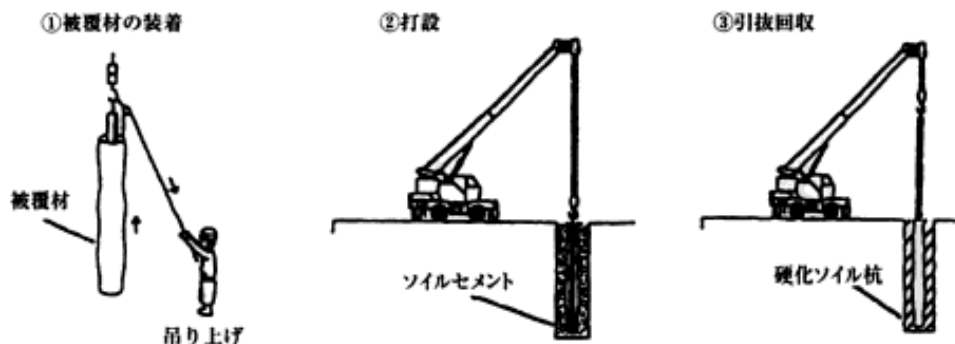


図 2-3-2 高吸水性ポリマー被覆材を用いた H 型鋼回収の概念図

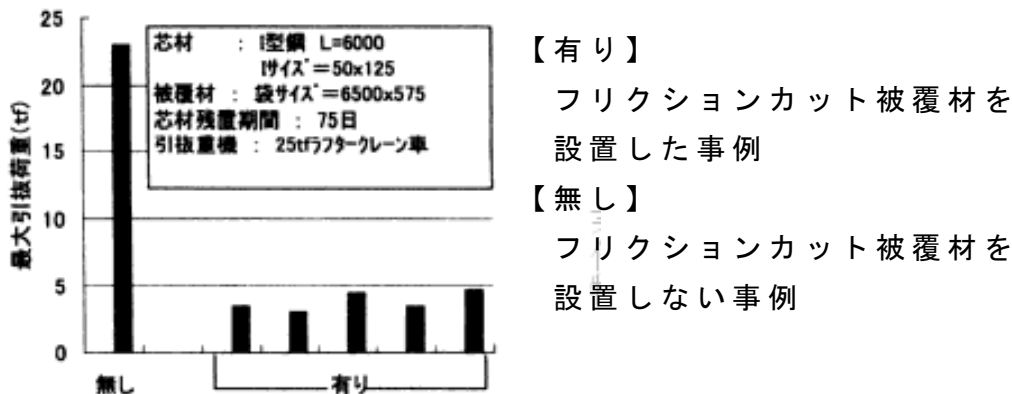


図 2-3-3 高吸水性ポリマー被覆材による引抜荷重の変化

2.3.3 掘削時の逸水を防止するための目詰り材⁵⁾

ベントナイト系安定液による掘削工法においては、掘削面に形成した泥膜により安定液と地山側に水頭差を与えることで孔壁は安定を保持している。しかし、砂層や礫層のような透水係数の大きな地層を掘削する場合は、泥膜の形成が不完全となり、孔内安定液が地盤に逸水するため水頭差の維持が困難となる。

このような場合の逸泥防止材料（Lost Circulation Materials, 以下 LCM と略す。）は、透水係数の大きい地盤において、粗粒の土粒子間隙

を目詰め・閉塞するために使用する材料で、古くはおがくず，ワラ，塊状粘土，レンガ片，豆，木くず，ゴムくずなどが使用されていた．逸泥を確実に，且つ再発しないように防止するには，LCM が亀裂，または土粒子間隙内に深く入り込んで内部に強い充填層を形成する必要がある．これを実現する手段として考え出されたのが，高吸水性ポリマー材を配合した LCM であり，時間とともに水を吸って膨張する性質を有している．

このことは安定液としての優れた孔壁遮水性を，高吸水性ポリマー材に期待できることを示している．

2.3.4 シールドトンネルの透水性裏込め材料⁴⁾

シールドトンネル建設により，建設前に地盤内に存在していた地下水流が阻害される場合がある．この地下水流保全対策を目的として，シールドトンネルの裏込め材料に二価の金属イオンによるアルカリ環境下で水を排水する高吸水性ポリマー材を主材モルタルに添加することによって透水性を有する裏込め材料の開発が試みられている（図2-3-4 参照）．

これらの特性は，吸水膨張させて安定液に利用した高吸水性ポリマー材を二価の金属イオンによるアルカリ環境下におくことにより，安定液の最終処分時の減量化への応用が期待できることを示している．

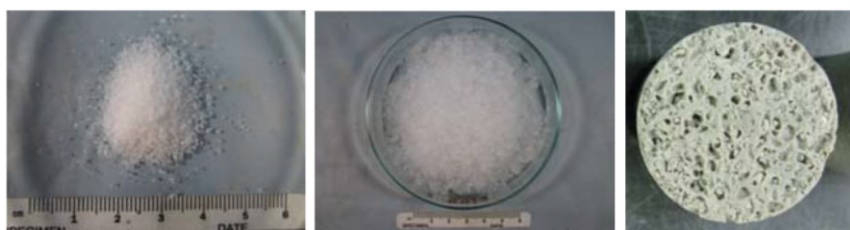
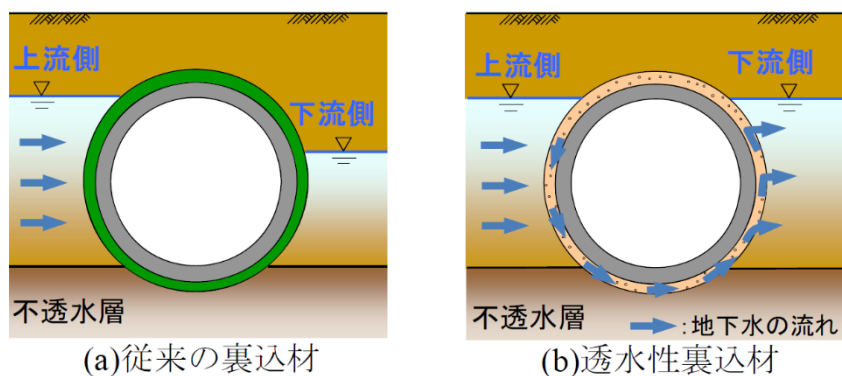


写真-1 吸水ポリマー (粒状：吸水前) 写真-2 吸水ポリマー (ゲル状：吸水後) 写真-3 吸水ポリマー排水後の空隙生成状況

図 2-3-4 透水性裏込め材料の開発概要図

(上：イメージ図，下：透水性裏込め材料の生成状況過程写真)

2.3.5 加泥材・滑材・排泥処理剤

横穴状に掘削したトンネルを構築するシールド工法のうち、泥土圧シールド工法（図2-3-5の左図参照）では、掘削機先端にある切羽（カッター）の潤滑・冷却・湧出する地下水の止水・排出される掘削土の塑性流動性改善を目的として、掘削機先端から含水して高吸水性ポリマー材が添加される。また鉄管やコンクリートヒューム管を先端の掘削機に続いて押し込んで下水管などを敷設する推進工法では、推進距離が長くなるにつれて推進抵抗が大きくなる問題があるが、類似の技術として含水した高吸水性ポリマー材を滑剤として管側面に添加することにより推進抵抗の低減が図られている。実際の使用にあたっては、粒子径の細かく吸水速度の速い高吸水性ポリマー材が好んで使用され、カルボキシメチルセルロースやベントナイトなどを混合し、加泥材や滑材としてより複合的効果が発揮されるように工夫されている。これらの分野では、高吸水性ポリマー材の持つ吸水性とそれに伴う低摩擦性、流動性改善効果、体積変化による止水の効果を利用している。さらに、ゲルという固体的側面を有する物質を使用することで加泥材または滑材の地山への拡散を抑制することができ、効果の持続性を確保できるよう配慮がなされている。

また掘削土を泥水として排出する泥水圧シールド工法（図2-3-5の右図参照）では、排出される泥水は中間処理で脱水処理されるが、さらに高吸水性ポリマー材を添加して余剰水を吸収固化させることにより、ダンプ積載して処分できる土砂に改質する操作が行われる。セメント系固化剤や生石灰などの無機系の添加剤に比べて処理土の強度は弱い

H

変化が少なく、短時間で効果が発現すること、少量添加で改質が可能であるなどの特長を有している。

これらの一連の高吸水性ポリマー材の利用事例は、安定液に複合的に求められる孔壁遮水性や流動性などの特性を期待できることを示している。

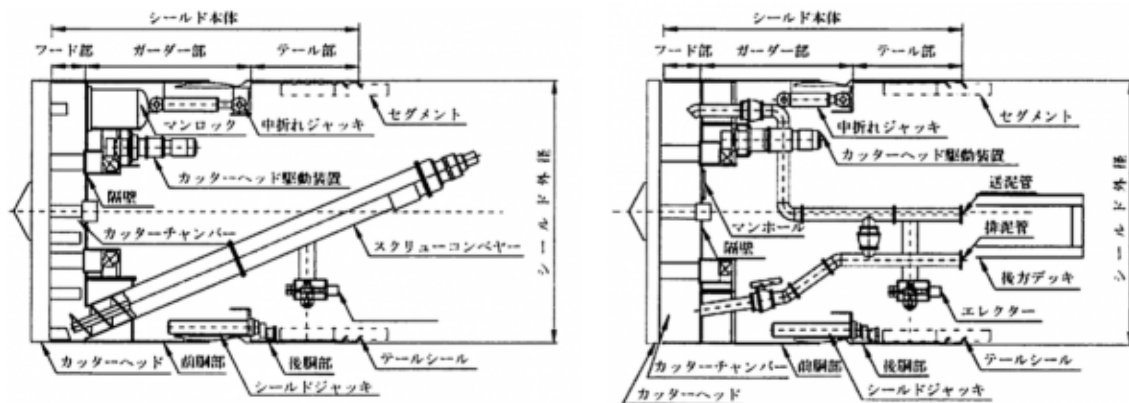


図2-3-5 シールド工法略図（トンネル標準示方書）
（左図：泥土圧シールド機，右図：泥水圧シールド機）

2.3.6 空隙充填材¹⁰⁾

トンネル覆工の上部に空隙がある場合には，地山崩落によるトンネル覆工の破壊の危険性があるため，空洞を軽量な材料で充填しておく必要がある（図2-3-6参照）．既往の空隙充填材としては，エアモルタルなどのセメント系材料が用いられることが多いが，セメント系充填材だけでは流動性が高すぎるため，重力に抗した盛り上げ充填が難しいという問題及び地下水が存在した場合に充填材が流失するという問題がある．そこで，高吸水性ポリマー材をセメント系充填材に混合すると，充填材中の水を高吸水性ポリマー材が保持し，ポンプでの圧送などの高応力下では高い流動性を示し，応力が抜けた状態では高い保形性を示す，いわゆるチキソトロピックな挙動を付与することができ，隙間なく空隙を埋めることが可能になる．さらに地下水が存在した場合にも地下水中への充填材流失が起り難く，安定した施工が可能となる．本用途で高吸水性ポリマー材が果たす役割は水の保持と，ゲルが水を保持したことによる流動性制御である．

この高吸水性ポリマー材の利用事例は，安定液に求められる状況に応じた流動性制御機能を期待できることを示している．

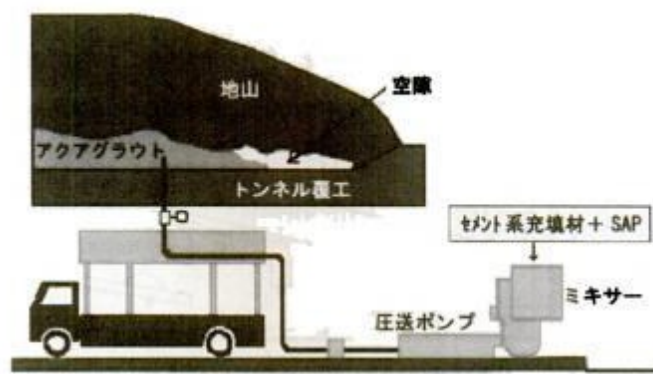


図2-3-6 空隙充填工法（アクアグラウト）の概念図

2.4 まとめ

場所打ち杭工法などに用いられる既往の安定液の孔壁安定性は，安定液中のベントナイト粒子が内圧と外圧の差で地盤の間隙に浸透し，孔壁面の土粒子のマイナスイオン電化に引かれて土粒子の表面に吸着する．同時に地盤がフィルターとなってベントナイト系安定液の水分のみを通過させる作用が進行すると地盤の土粒子がベントナイト粒子で包まれ大きくなり間隙をふさぐ状態となり，膜（マッドケーキ）が形成され，この膜を介して内圧を掘削孔壁面に完全に伝えることができるようになることで確保される．

その種類は，ベントナイトの配合率によりベントナイト系安定液とCMC

系安定液に分類でき、前者のベントナイト配合率は2～8%、後者は4%以下の場合が多いことを示した。また、それぞれの標準的な配合表、管理項目と管理基準値の例、管理項目の使用機器を示すなど、既往の安定液の概要を整理した。

既往の安定液は、実績は豊富である一方、地山材料が粗粒土の場合には泥膜が形成されないで逸水現象が生じるなどの施工上の課題、孔壁にベントナイトが付着して杭の最大周辺摩擦力の低減や有効杭径が減少するなどの品質上の課題、性能低下または掘削終了後の系安定液及び掘削した残土が泥濘化しやすく全量が産業廃棄物扱いとなる環境負荷への影響、その処分費増大による経済性の観点において課題を有しており、その主な要因のベントナイトの使用に起因するものである。そこで、これら諸課題の解決へのひとつの方向性として、ベントナイトに代わる新たな材料をベースとした安定液を模索する必要があると考え、その候補として高吸水性ポリマー材に着目した。

高吸水性ポリマー材は、多量の水を吸水してゲル化し、その水を保持する機能を有しており、1960年頃から園芸用の土壌保水剤などの用途を目標に開発された。その後も吸水性向上などを目的に多くの組成や製法が検討され、その用途開発も多岐にわたって進められ、現在では紙おむつやナプキンなどの衛生用品のみならず、農業・園芸、食品・流通、土木・建築、化粧品、メディカル、電気・電子産業分野でも使用されている材料である。

吸水膨張性止水材としての利用、施工時の摩擦低減材、掘削時の逸水を防止するための目詰り材、シールドトンネルの透水性裏込め材料、加泥材・滑材・排泥処理剤としての利用、空隙充填材としての利用など、地下建設工事における高吸水性ポリマー材の利用例を整理することで、場所打ち杭工法用の安定液としての応用が期待できる機能を明らかなものとした。

第 3 章 高吸水性ポリマー安定液の基本性状

第 3 章 高吸水性ポリマー安定液の基本性状¹⁷⁾

3.1 高吸水性ポリマー安定液の定義

本研究の「高吸水性ポリマー安定液」は、「水と吸水膨張させた高吸水性ポリマー材が懸濁した溶液」で、場所打ち杭工法における孔壁の安定性と掘削置換性を両立させるために、必要な粘性を配合によって調節できる特徴を持っている。

ここで使用する吸水前の高吸水性ポリマー材の外観は、**図 3-1-1** 左下に示すように平均中心粒径 $35\mu\text{m}$ 程度の白色粉末状であり、紙オムツや土壌保水材等に使用されており、原料及び生産工程に重金属のような環境汚染物質は使用していない。また、土壌中に存在する場合、土壌から流出する場合のいずれの場合においても、環境に悪影響を及ぼすような物質に変化しないので、環境への影響が極めて小さい材料である。**表 3-1-1** に、工場生産時における基本的な材料特性、**図 3-1-2** に分子構造式を示す。

化学的には、部分的にナトリウム塩を形成したカルボキシル基を多数有する高分子が 3 次元的に架橋された分子構造で、水が存在すると、カルボキシル基がイオン化し、親水性が高まった分子鎖は水に溶け込もうと拡張する。さらに、遊離したナトリウムイオン濃度によって生じる浸透圧で分子鎖間に水が入り込み、**図 3-1-1** 右上に示すように分子鎖の魚網状の網目に水が取り込まれた状態となる。水道水を用いた場合には、概ね 500 倍前後の水を吸水することで、安定液として適度な粘性を有する性状を示す。

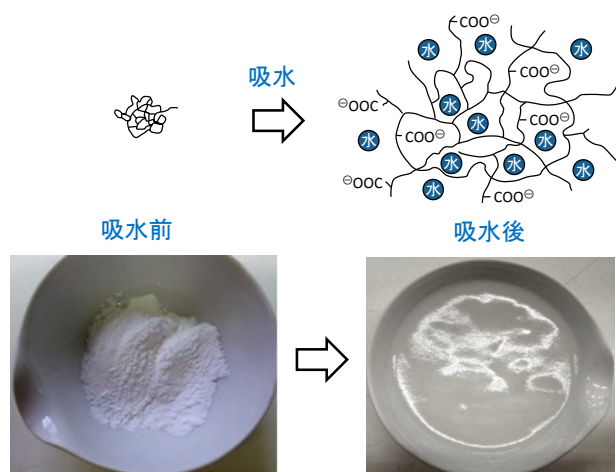


図 3-1-1 高吸水性ポリマー材の外観と吸水概念図

表 3-1-1 高吸水性ポリマー材の材料特性

成分含有量	アクリル酸重合体の部分ナトリウム塩架橋物－95%	
	水－5%	
物理的状態	形状	粉末状
	粒径	平均35 μ m
	臭い	ほぼ無臭
	pH	約6 (0.5%生理食塩水分散液)
	嵩比重	約0.65 (25 $^{\circ}$ C)

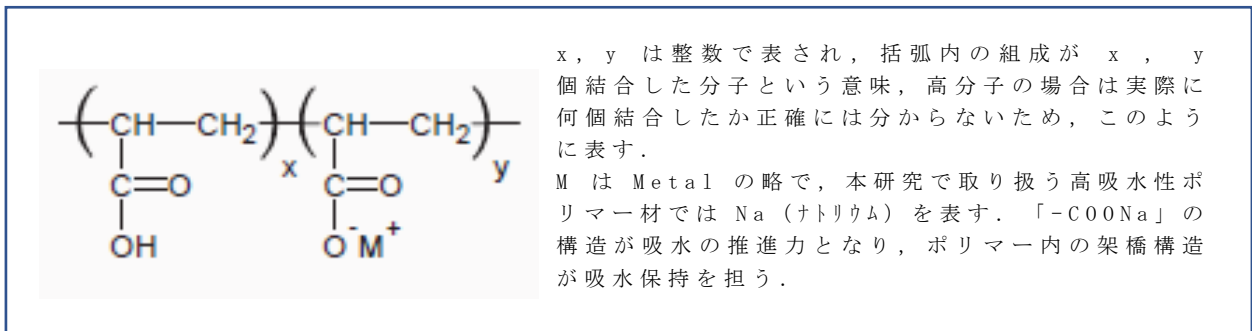


図 3-1-2 高吸水性ポリマー材の分子構造

3.2 高吸水性ポリマー安定液の作製・性状測定方法

高吸水性ポリマー安定液の基本性状を明らかにするために, 使用水の水質, 水量, 高吸水性ポリマー材の配合量, 粒径, 吸水倍率等をパラメーターとして室内実験を実施した.

3.2.1 安定液の作製方法

実験に使用する高吸水性ポリマー安定液の作製方法は, 次の通りである.

- ・使用水 (イオン交換水, 水道水等) 及び所定の配合量の高吸水性ポリマー材を計量する.
- ・使用水の入った容器をマグネチックスターラーに載せ, 容器に攪拌子を入れ, 回転させる.
- ・高吸水性ポリマー材と使用水を均一に混合するために, 使用水に高吸水性ポリマー材を少量ずつ添加し 30 分程度攪拌する.
- ・粉末状の高吸水性ポリマー材が溶液中に残っていないことを確認し, これを試料とする.

なお, 高吸水性ポリマー材の添加率 P は, 式(1)で定義した.

$$P(\%) = \frac{\text{高吸水性ポリマー材の質量 (g)}}{\text{使用水の質量 (g)}} \times 100 \quad (1)$$

3.2.2 性状測定項目及び測定方法

室内実験における測定項目と使用する測定器具を表 3-2-1 に示す。

表 3-2-1 測定項目と測定器具

測定項目	測定器具等
比重	マッドバランス
粘度	ファンネル粘度計
	ビスコテスター
ろ過水量	小型ろ過試験器
pH	防水型複合計 FCSTestr35
電気伝導率	
塩分濃度	
温度	
膜厚	ノギス
吸水倍率	電子秤, ナイロンメッシュ

比重、粘度、ろ過水量の測定は、既往の場所打ち杭用の安定液管理で一般に用いられている器具を使用した。試料の pH 測定、電気伝導率測定には防水型複合計を用いた。

(1) 比重

安定液の比重は安定液中に懸濁している物理量に左右され、特に粒子の影響が大きい。安定液の比重は孔壁安定やコンクリート置換性に関係しており、安定液の中に含まれる土粒子分の量を表す大変重要な計測管理項目である。シルトや細かい砂で比重が高い場合は下記のような現象が発生する。

- ・厚くて弱いマッドケーキが形成され、孔壁の安定性が低下する。
- ・コンクリートの置換性が悪くなり、良好なコンクリートの打設が困難となる。
- ・掘削底面に沈積するスライムが増え、支持力が低下する。
- ・安定液の循環能率が落ちる。
- ・循環パイプの摩耗が増大する。

安定液の比重は図 3-2-1 に示すマッドバランスという装置を用いて測定する。マッドバランスを利用した比重測定方法は、下記のとおりである。

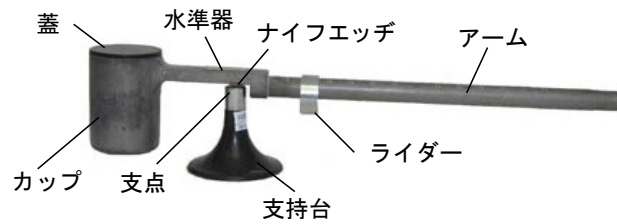


図 3-2-1 マッドバランス概要図

- ・測定する配合試料をカップ内に一杯入れる。
- ・蓋をのせ静かに回しながら完全にカップと密着させる。
- ・少量の安定液が蓋の上を開けてある小孔から溢れ出る。
- ・蓋の上の小孔を指で押さえ、カップの外側やアームについている配合試料をきれいに洗いとる。
- ・ナイフエッジを静かに支持台の支点上にのせカップとアームがバランスするまで水準器を見ながらライダーを動かす。
- ・バランスしたところでライダーの目盛りを読む。比重は小数点以下 2 桁で表す。

マッドケーキの形成や止水に役立つ粘土分で比重が上がっているのなら良いが、シルト・砂分などで比重が上がっている場合は比重が高くても、孔壁の安定には役立たないのみならず反対に害になる。

また、孔壁の安定からは比重は高いほうが良いが、コンクリートの品質からは低いほうが良い。そこでこの両者が適合する範囲を設定し、これより高い場合を劣化状態とする。なお砂分の量を簡略に調べるには砂分率法による。

(2) ファンネル粘性と粘度

粘性の機能は、ろ水量の低下と土粒子の浮遊（掘削土砂の流体輸送分離）に寄与するが、管内の摩擦抵抗の増加やスライムの沈降時間に影響する。さらにコンクリート打ち込み時のコンクリートと安定液の置換性にも影響を与える。一般には逸液防止が図れる範囲で出来るだけ低粘性に維持することが望ましい。

粘性は、ファンネル粘度計を用いてファンネル粘性を測定する(図 3-2-2 参照)。ファンネル粘性の測定方法は、下記のとおりである。水道水のファンネル粘性は $F_v=18.5\pm 0.5(\text{sec})$ である。

- ・ファンネル本体を付属三脚で鉛直に立つように支持し、上部に金剛付のフタを載せる。
- ・採取容器（500cc）で配合試料を口元一杯に採取し、ファンネル本体下

部の流出口を人差し指でふさぎ、採取器で採取した配合試料をファンネル本体の上方から注ぎ込む。

- ・流出口の下方に採取容器を置き、ファンネル下部の流出口をふさいでいる指を離し、泥水が流出する時間(sec)を測定する。
- ・この時間(sec)をファンネル粘性とする。



図 3-2-2 ファンネル粘度計

ファンネル粘度計は 100 秒を超える値になると、測定値が安定しないことから、高粘度の安定液に関してはビスコテスターを用いて測定を行った(図 3-2-3 参照)。測定方法はビスコテスター本体にローターを取りつけ、ローターを試験液中に浸し、スイッチを入れ粘度を測定する。なおビスコテスターによる水道水の粘度は、 $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ (パスカル・秒) である。



図 3-2-3 ビスコテスタ (VT-04F)

ファンネル粘性と粘度の相関関係を調べるために実施した実験結果を図 3-2-4 に示す。

ファンネル粘性 x と粘度 y とし，最小二乗法により近似式を求めると式(2)となり，明確な相関関係がみられることから両者とも粘性を確認するうえで有効であるといえる。

$$y = 1.4076 \ln(x) - 3.8108 \quad (2)$$

ここに， y : 粘度 (P) ， x : ファンネル粘性 (sec)

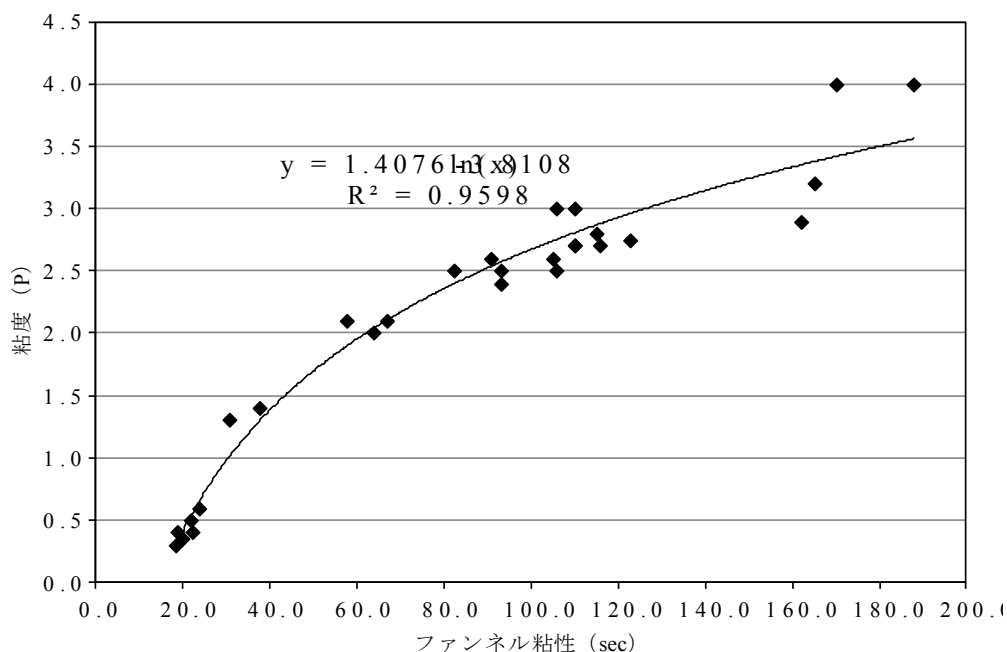


図 3-2-4 ファンネル粘性と粘度の関係

(3) ろ過水量，膜厚

ろ過水量は，安定液によって掘削孔壁面に形成されるマッドケーキによって決まる．安定液中にマッドケーキを形成する成分が不足してくるとマッドケーキができず，ろ過水量が増加してくる．このような場合は管理値として粘性が維持されていても，孔壁の安定性を維持することは困難となる．一般にマッドケーキが厚い場合は，ろ過水量が大きくなることが多い．これは安定液中に細かい砂・シルト・凝集粘土を含むとポーラスな膜を形成するためである．マッドケーキの膜厚は薄くてかつ透水係数の小さいものが望ましい．

安定液のろ過水量および膜厚の測定には，小型ろ過試験器を用いた(図 3-2-5, 図 3-2-6 参照)．小型ろ過試験器とは，API 規格（アメリカ石油協会規格）に準拠した加圧ろ過試験器の 1/2 の断面積を有する試験器であり，API 規格の加圧ろ過試験では安定液を加圧条件 300kPa の下で，30 分後の規格ろ紙（No4A, φ90mm）からの流出水量とろ紙上に形成され

る泥膜厚で表示されるのに対し，加圧条件 300kpa の下で 7.5 分後に得られたろ水量を 4 倍，泥膜厚を 2 倍にして API 規格の測定値に換算する．なお膜厚は，泥膜が形成されたろ紙厚をノギスで測定し，ろ紙厚を差し引いて求めた．測定方法は下記のとおりである．

- ・ ガasket 内に配合試料を入れ，濾紙を設置する．
- ・ キャップを取り付け， $3.0\text{kg}/\text{cm}^2$ で 7.5 分加圧する．
- ・ 濾水量を測定するとともに，泥膜をノギスで測定する．



図 3-2-5 小型濾過試験機



図 3-2-6 膜厚の測定

(4) pH，電気伝導率，塩分濃度，温度

安定液の pH，電気伝導率，塩分濃度，温度は，すべて防水型複合計 (FCSTesttr35) を用いて測定した(図 3-2-7 参照)．使用溶液および安定液中に入れ，表示された値を読むことで結果を得ることができる．

なお，電気伝導率とは物質中の電流の流れやすさを表す量のことをいい，抵抗率の逆数で単位はジーメンス/メートル (S/m) である．電気伝導率と塩分濃度の関係は図 3-2-8 に示すように，濃度が上がると電気伝導率も上がる比例関係にある．電解物質の濃度がある程度以上になると解離度 (イオンになりやすさ) が小さくなり，導電率の増加は頭うちの傾向になる．さらに濃度を増すとイオン間の相互作用により導電率はむしろ減少していく．



図 3-2-7 防水型複合計

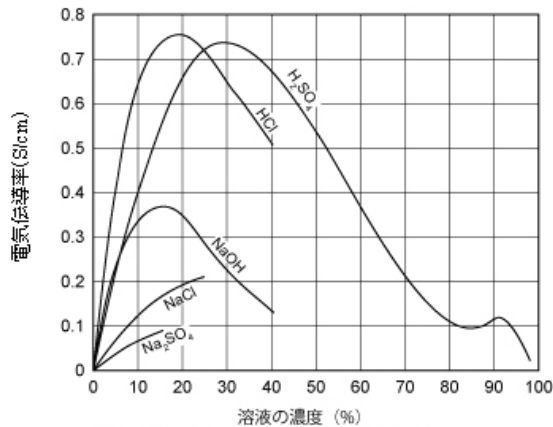


図 3-2-8 溶液の濃度と電気伝導率の関係
(液温 18℃)

(5) 吸水倍率

吸水メカニズムについては P.J.Flory によって理論確立されており，吸水力を高めるには，できる限りポリマー中のイオン基の密度と強度を高めてイオンの浸透圧と水との親和力を大きくすること，架橋剤量を調節して架橋密度を小さくすることで実現できる．ただし架橋密度を小さくしすぎると吸水後の膨潤ゲルの強度が弱くなる傾向がある．

本研究では，高吸水性ポリマー材の吸水倍率をナイロンメッシュの袋を用いて測定した．吸水後の高吸水ポリマー材を通過させないために，目開き 57 μm のナイロンメッシュ (N-No255HD) を 10cm \times 40cm の長方形に切り取って折り返して，図 3-2-9 のように側方 2 辺をヒートシールし，上部が開いた袋（以下，ティーバック）とする．吸水倍率の測定方法は，以下のとおりである．

- ・まず 200g の溶媒（水道水，イオン交換水+NaCl 溶液）に所定の量の高吸水性ポリマー材 (M_c) を入れ，攪拌し作製された配合試料をこのティーバックの中に投入する．
- ・吸水状態のポリマー材が入ったティーバックを気中に吊るして約 1 日水切りを行い，水切り後の質量 (M_a) を測定し，試料を入れていないティーバックの質量 (M_b) も同時に測定する（図 3-2-9 参照）．
- ・測定結果より，吸水倍率 Q (g/g) を式(3)で求める．

$$Q(\text{g/g}) = \frac{M_a - M_b - M_c}{M_c} \quad (3)$$

ここで M_a : 水切り後の質量(g)

M_b : ナイロン 10cm \times 20cm の袋の質量(g)

M_c : 200g の溶媒に含まれる高吸水性ポリマー材の乾燥質量(g)

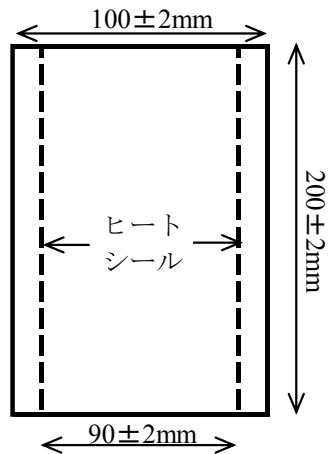


図 3-2-9 ナイロン製ティーバックと吸水倍率測定状況

3.3 高吸水性ポリマー安定液の基本性状

3.3.1 使用溶液の違いによる影響

まず使用溶液の種類の違いによるサプリア安定液の性状変化を確認した。ここでは溶液として蒸留水・イオン交換水・水道水を使用した。蒸留水とは原水を加熱・気化した蒸気を冷却し凝縮させることにより不純物を除去し、純度を高めた精製水のことである。水中の不純物のうち低沸点成分は気化により、また不揮発性成分は液相中で濃縮させることにより除去をしたものである。イオン交換水とは原水に含まれる鉄・ニッケル・カルシウムなどの金属（陽）イオンを水素イオンに置き換える陽イオン交換樹脂と、塩素イオン・炭酸イオン・ホウ酸イオンなどのアルカリ成分（陰イオン）を水酸イオンに置き換える陰イオン交換樹脂により脱イオン化された精製水のことであり、有機物の除去はされていない。水道水は実験室のものを使用した。

(1) 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

- ・蒸留水，イオン交換水および水道水を 1000mℓ採取する。
- ・防水型複合計(FCSTestr35)を用いて使用水性状を測定する。
- ・高吸水性ポリマー材 1.0g を投入し，0.5 時間攪拌する。
- ・各パラメータを測定する。

(2) 結果と考察

図 3-3-1 に使用溶液の電気伝導率を示す。水道水は $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度，蒸留水とイオン交換水は $10\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下の値となった。また図 3-3-2 に安定液の電気伝導率を示す。水道水は $400\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度，蒸留水とイオン交換水 $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の値となった。高吸水性ポリマー材を 0.1% 添加すると約 $200\mu\text{S}/\text{cm}$ の増加となった。

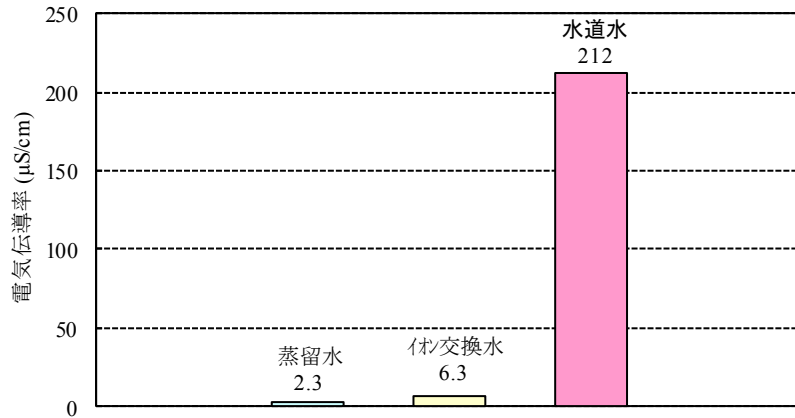


図 3-3-1 使用溶液の性状 (電気伝導率)

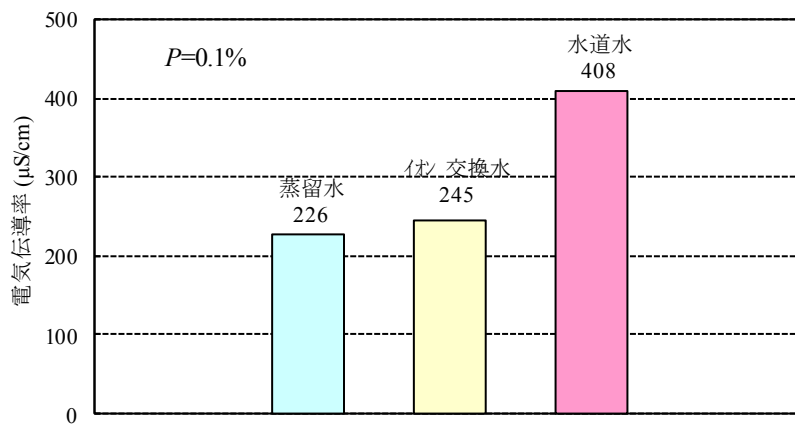


図 3-3-2 安定液の性状 (電気伝導率)

次に図 3-3-3 に使用溶液の pH を示す．水道水は弱アルカリ側となった．図 3-3-4 は安定液の pH を示す．水道水は高吸水性ポリマー材を 0.1% 添加したことによって弱酸性側となった．

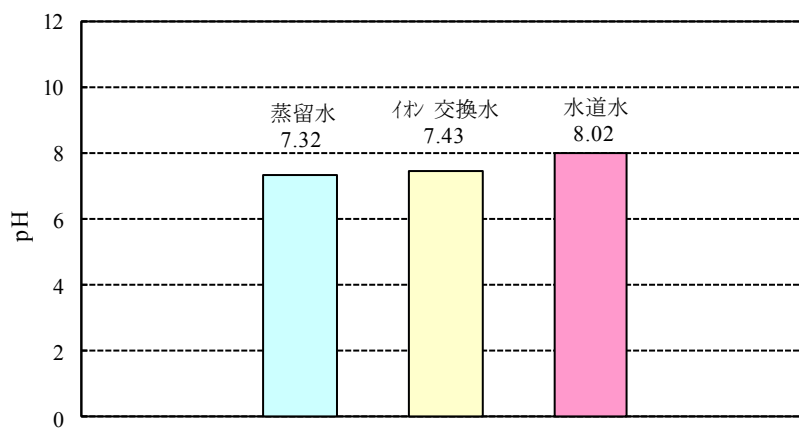


図 3-3-3 使用溶液の性状 (pH)

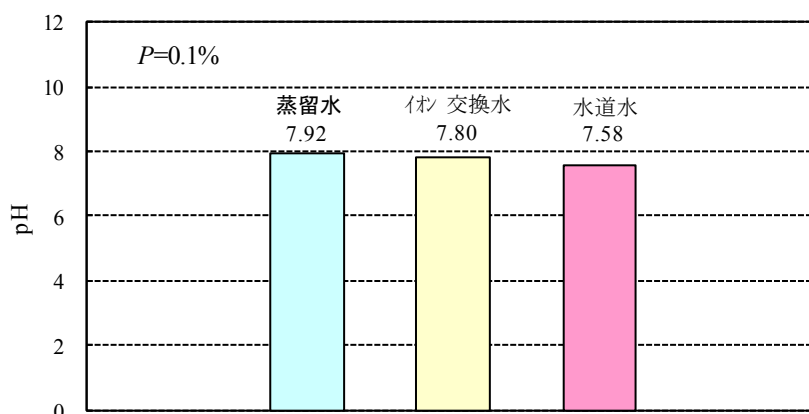


図 3-3-4 安定液の性状 (pH)

図 3-3-5 に安定液の比重を示す。高吸水性ポリマー材を 0.1% 添加した場合でも比重 1.0 の値となった。

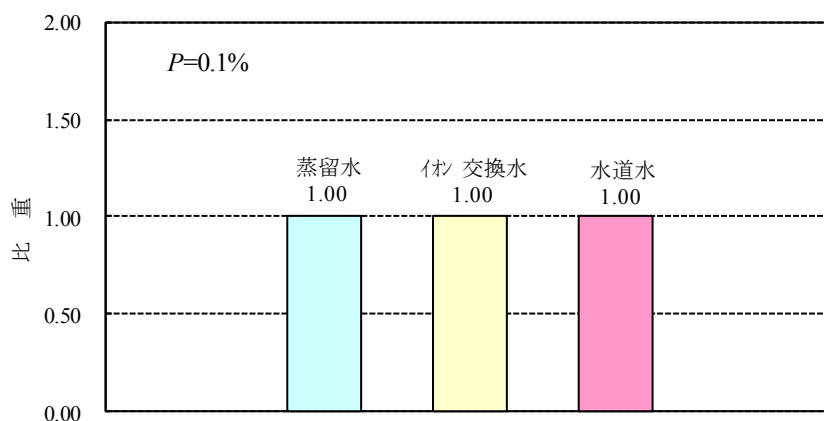


図 3-3-5 安定液の性状 (比重)

使用溶液別のファンネル粘性の関係を図 3-3-6 に示す。蒸留水・イオン交換水・水道水の電気伝導率が低い順にファンネル粘性は高い値を示すことが確認された。これは溶液のイオン濃度が高いとポリマー内部と外部溶液との浸透圧が小さくなるためと考えられる。

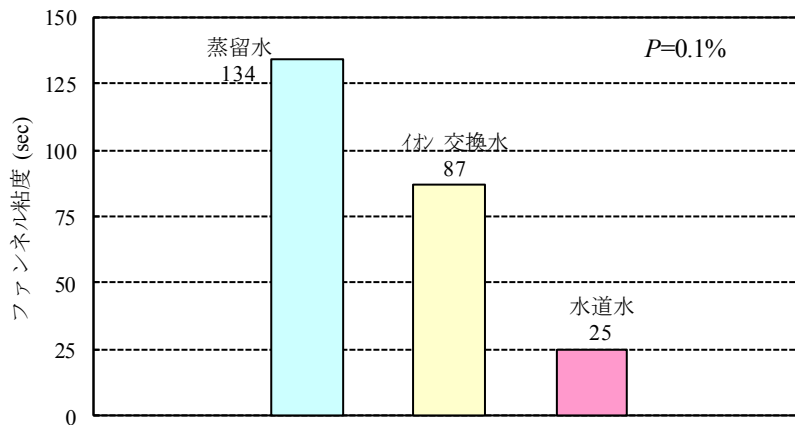


図 3-3-6 安定液の性状（ファンネル粘度）

使用溶液の電気伝導率と安定液の吸水倍率の関係を図 3-3-7 に示す。蒸留水・イオン交換水・水道水の順に吸水倍率は高い値を示すことが確認され、より純度の高い水の方が優位な吸水倍率を示した。これは溶液のイオン濃度が高いとポリマー内部と外部溶液との浸透圧が小さくなるためと考えられる。

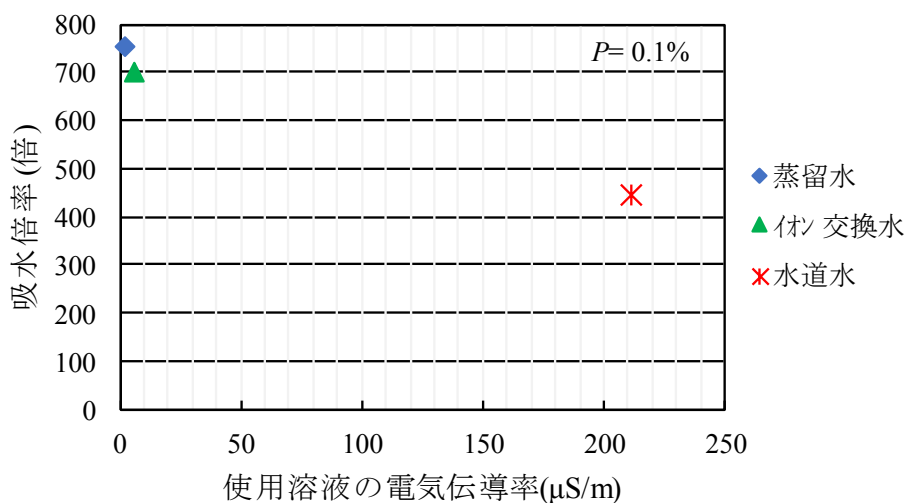


図 3-3-7 使用溶液の電気伝導率と安定液の吸水倍率の関係

3.3.2 高吸水性ポリマー材の添加率による性状変化

高吸水性ポリマー材の添加率による安定液の性状変化を確認するために、イオン交換水及び水道水を用いて、高吸水性ポリマー材の添加率 P を 0.05, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15% の 5 パターンで実験を実施した。

(1) 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

- ・ イオン交換水及び水道水を 1000ml 採取し，防水型複合計 (FCSTesttr35) を用いて使用水性状を測定する．
- ・ 高吸水性ポリマー材を所定量投入し，0.5 時間攪拌する．
- ・ 各パラメータを測定する．

(2) 結果と考察

高吸水性ポリマー材の添加率と安定液の電気伝導率の関係を図 3-3-8 に示す．イオン交換水・水道水ともに添加率を増やすほど安定液の電気伝導率が増える傾向にある．

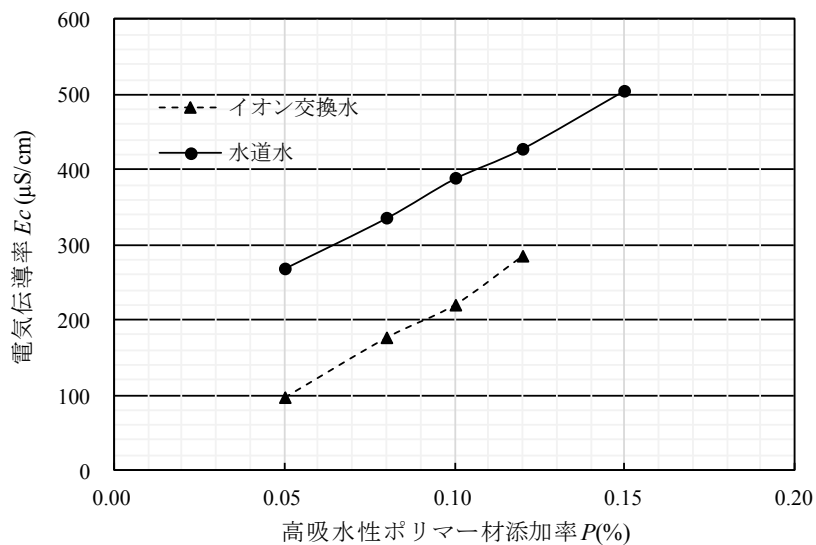


図 3-3-8 高吸水性ポリマー材の添加率と安定液の電気伝導率の関係

高吸水性ポリマー材の添加率と安定液の pH の関係を図 3-3-9 に示すが，添加率を増やすほど pH は微減する傾向があることが確認された．

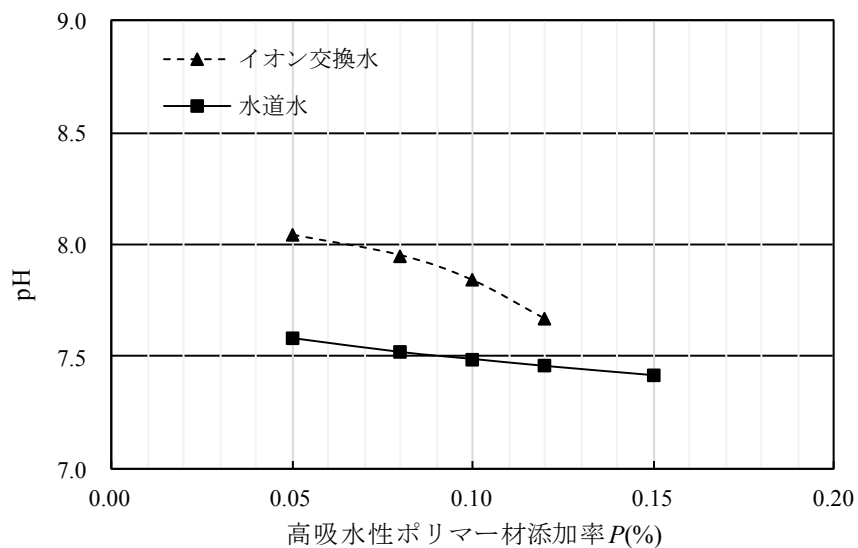


図 3-3-9 高吸水性ポリマー材添加率と安定液の pH の関係

高吸水性ポリマー材の添加率と安定液のファンネル粘性の関係を図 3-3-10 に示す。水道水・イオン交換水ともに添加率を増やすほどファンネル粘性も大きくなることが確認できた。また、使用溶液において水道水よりもイオン交換水の方がファンネル粘性の増え方も大きいことがわかった。

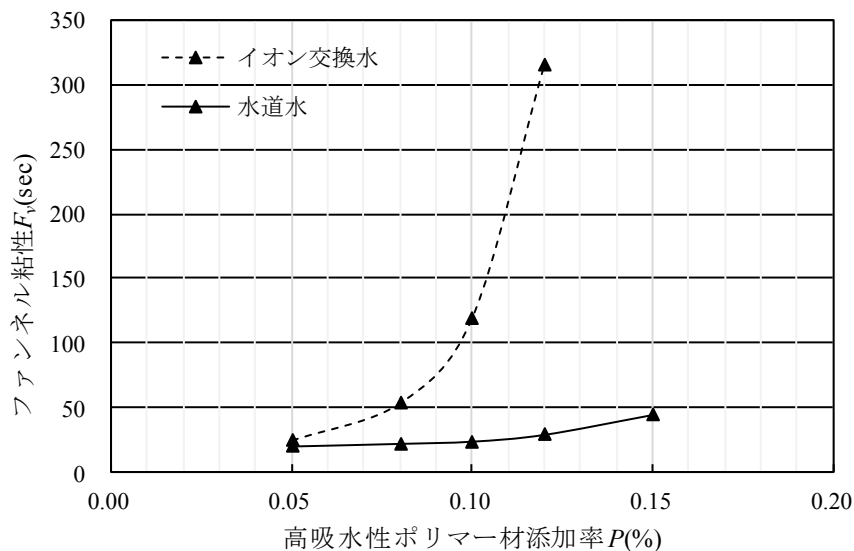


図 3-3-10 高吸水性ポリマー材添加率とファンネル粘性の関係

高吸水性ポリマー材の添加率と安定液のろ過水量の関係を図 3-3-11 に示す。添加率を増やすほど安定液のろ過水量が減少する傾向にある。また、使用溶液において水道水よりもイオン交換水の方がろ過水量は少ないことが確認できた。

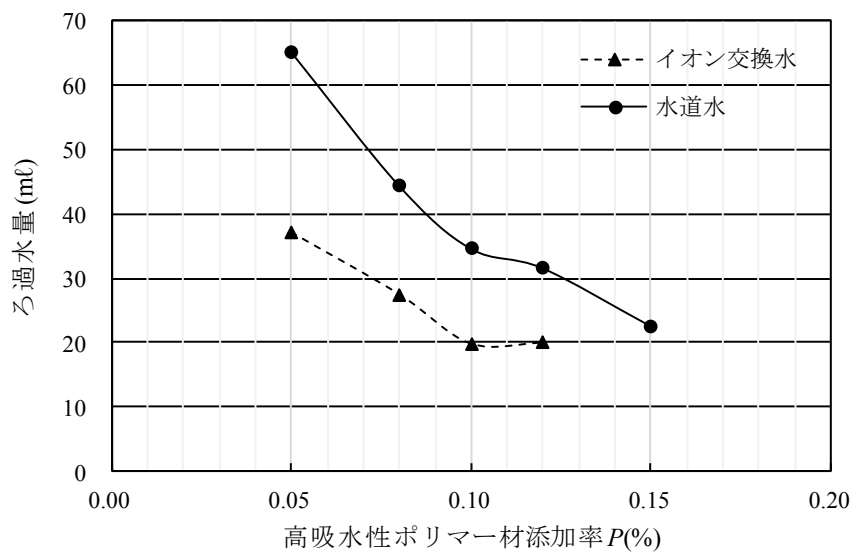


図 3-3-11 高吸水性ポリマー材添加率とろ過水量の関係

高吸水性ポリマー材の添加率と膜厚の関係を図 3-3-12 示す。添加率を増やすほど膜厚も大きくなることが確認できた。なお使用水が水道水とイオン交換水における膜厚において、大きな違いは見られなかった。

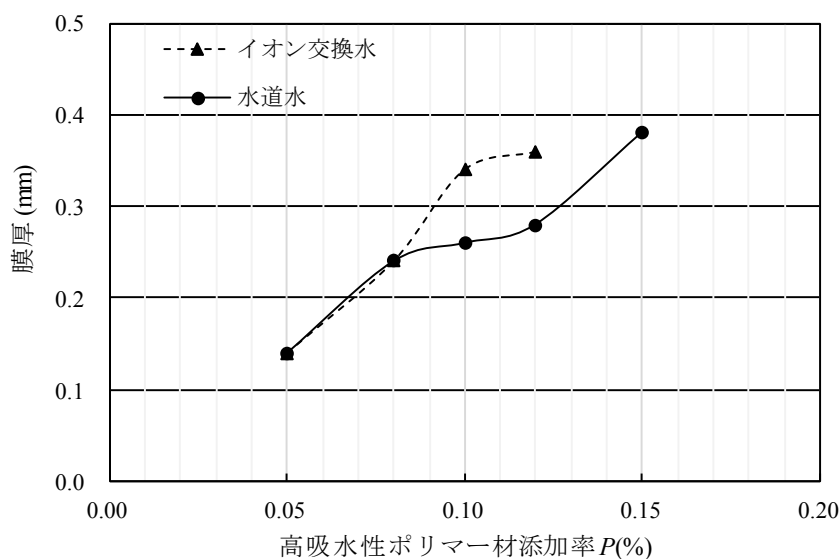


図 3-3-12 高吸水性ポリマー材添加率と膜厚の関係

使用水にイオン交換水を使用した場合の高吸水性ポリマー材の添加率と安定液の吸水倍率の関係を図 3-3-13 に示す。添加率に関わらず吸水倍率 $Q(g/g)$ は 700 倍程度の一定の値を示すことが確認された。この結果より添加率が 0.1% 以下であれば高吸水性ポリマー材が本来もつ吸水能力と同じ吸水膨張が得られることがわかったので、これ以降の試験では添加率 0.1% を基準として試験を行うこととした。

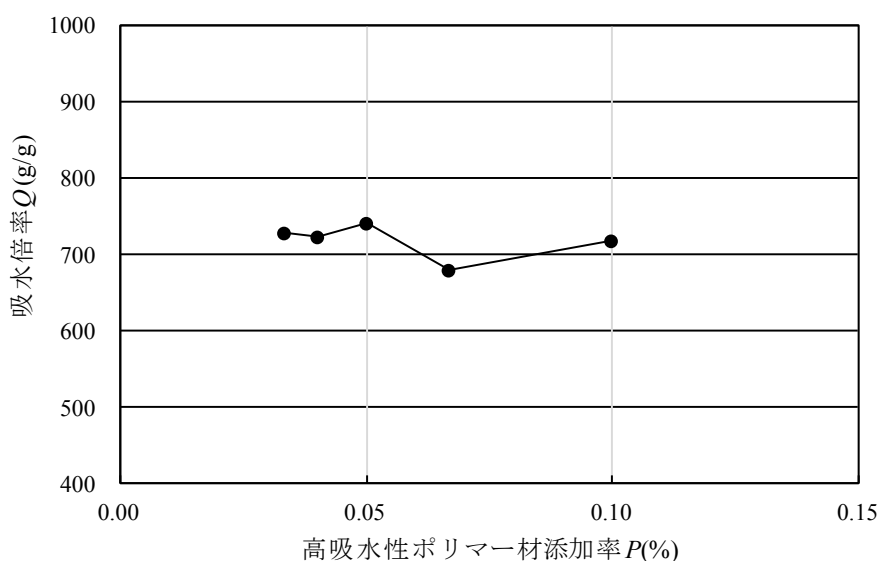


図 3-3-13 高吸水性ポリマー材添加率と吸水倍率の関係

3.3.3 高吸水性ポリマー材の配合方法による性状変化

高吸水性ポリマー材の配合方法による性状変化を確認するため、攪拌時間に着目し、攪拌の時間を変化させた実験を実施した。

(1) 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

- ・イオン交換水を 1000ml 採取する。
- ・防水型複合計(FCS Testtr35)を用いて使用水性状を測定する。
- ・高吸水性ポリマー材 1g を投入し、攪拌時間を 0.5 時間、1 時間、1.5 時間、2 時間と分け攪拌する。
- ・吸水倍率を測定する。

(2) 結果と考察

試験結果を図 3-3-14 示す。攪拌時間が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 時間それぞれの吸水倍率はどれも 700 倍付近の値を取っていることが分かる。このことから高吸水性ポリマー材の添加率に 0.15% 以内であれば攪拌時間を 0.5 時間以上とれば十分吸水膨張を完了できることがわかった。今後の試験では 0.5 時間の攪拌を基本とすることとした。

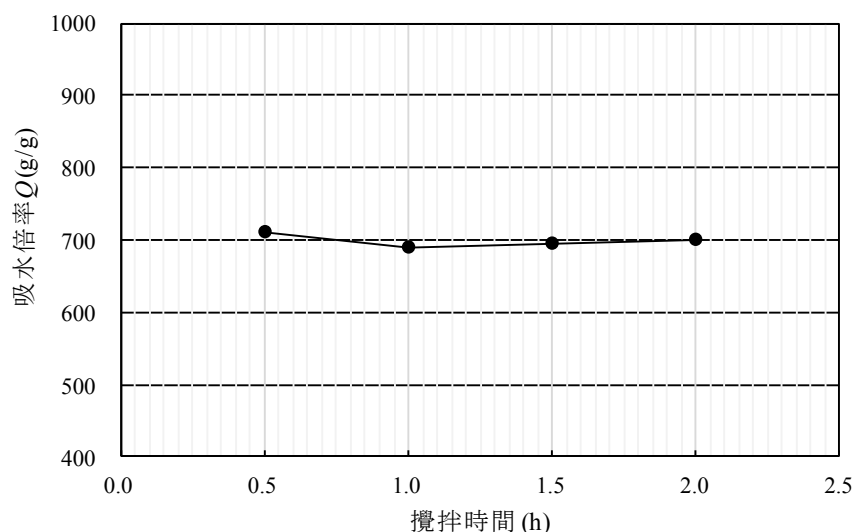


図 3-3-14 攪拌時間と吸水倍率の関係

3.3.4 電気伝導率による性状変化

3.3.4.1 塩化ナトリウム (NaCl) 濃度による性状変化

まずイオン交換水に NaCl を添加し、NaCl 濃度と電気伝導率の関係を確認した。

NaCl 濃度と電気伝導率の関係を図 3-3-15 に示す。NaCl 濃度と電気伝導率とはほぼ比例関係にあることが確認できた。図 3-3-15 より、 x を NaCl 濃度(%), y を電気伝導率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) とし最小二乗法を用いて式

(4)を算出した.

$$a = \frac{n \sum_{k=1}^n x_k y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2} \quad b = \frac{\sum_{k=1}^n x_k^2 \sum_{k=1}^n y_k - \sum_{k=1}^n x_k y_k \sum_{k=1}^n x_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2}$$

$$y = 17496.76x + 43.83913 \quad (4)$$

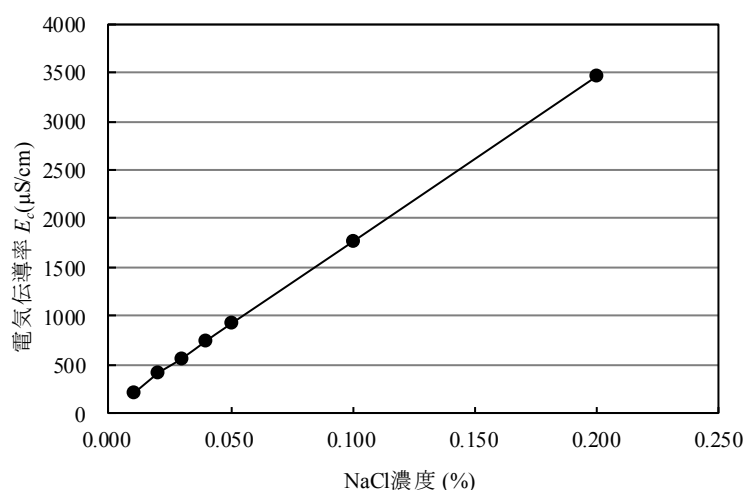


図 3-3-15 NaCl 濃度と電気伝導率の関係

次に NaCl 濃度により電気伝導率を変化させ、高吸水性ポリマー安定液の性状変化を確認した. NaCl 添加方法として添加前の使用水に添加する場合と, 添加後の安定液に添加する 2 通りを行った. また, 式(4)を用いて電気伝導率が 100, 150, 200, 500, 1000, 1500, 2000 ($\mu\text{S/cm}$) になるように NaCl の配合量を調整して添加した.

(1) 試験方法

添加前の使用水に NaCl を添加する場合

- ・ 事前に使用水性状を測定したイオン交換水 1000mℓに NaCl を投入する.
- ・ 防水型複合計(FCSTesttr35)を用いて使用水性状を測定する.
- ・ 高吸水性ポリマー材 1g を投入し 0.5 時間攪拌する.
- ・ 各パラメータを測定する.

添加後の安定液に NaCl を添加する場合

- ・ 事前に使用水性状を測定したイオン交換水 1000mℓに高吸水性ポリマー材 1g を投入し 0.5 時間攪拌する.
- ・ 防水型複合計(FCSTesttr35)を用いて使用水性状を測定する.

- ・ 所定の量の NaCl を投入し十分に攪拌する．
- ・ 各パラメータを測定する．

(2) 結果と考察

NaCl 添加順序を変えた場合の NaCl 濃度と安定液の電気伝導率の関係を図 3-3-16 示す．NaCl の添加順序を変えても電気伝導率に大きな変化は見られなかった．

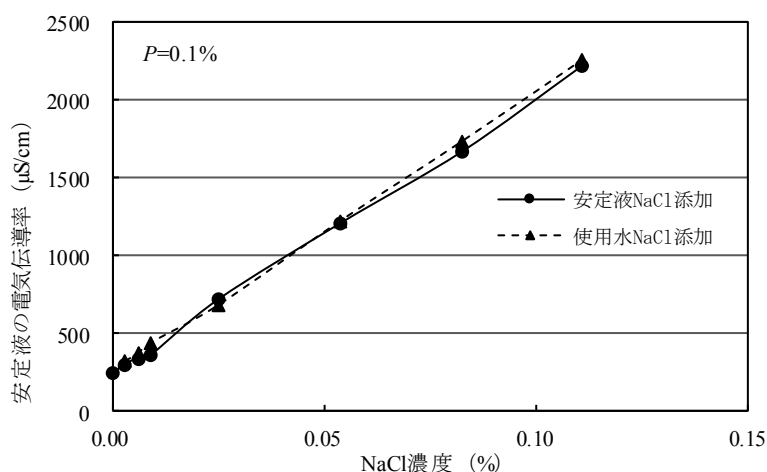


図 3-3-16 NaCl 添加順序を変えた場合の NaCl 濃度と安定液の電気伝導率の関係

高吸水性ポリマー材添加後の安定液に NaCl を添加する場合の安定液の電気伝導率と吸水倍率の関係を図 3-3-17 に示す．安定液の電気伝導率が高いほど、吸水量が低下することが確認できた．

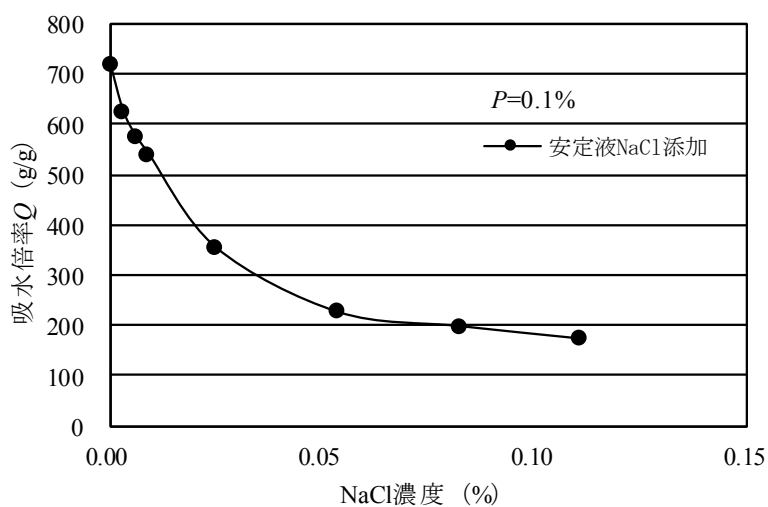


図 3-3-17 高吸水性ポリマー材添加後の安定液に NaCl を添加する場合の安定液の電気伝導率と吸水倍率の関係

使用水の電気伝導率と吸水倍率の関係を図 3-3-18 に示す。使用水の電気伝導率が高いほど吸水量が低下することが確認できた。また水道水の吸水倍率は約 450 倍であった。

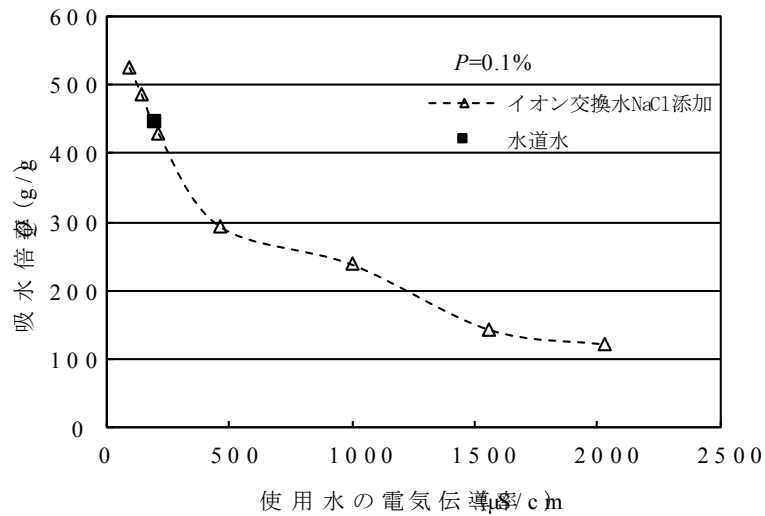


図 3-3-18 使用水の電気伝導率と吸水倍率の関係

NaCl 添加順序を変えた場合の安定液の電気伝導率と吸水倍率の関係を図 3-3-19 に示す。NaCl の添加順序を変えても吸水倍率の推移は同じ傾向を示した。また一度吸水したポリマーも電気伝導率と同じであれば吸水前のポリマーとほぼ同じ吸水倍率に低下することが分かった。

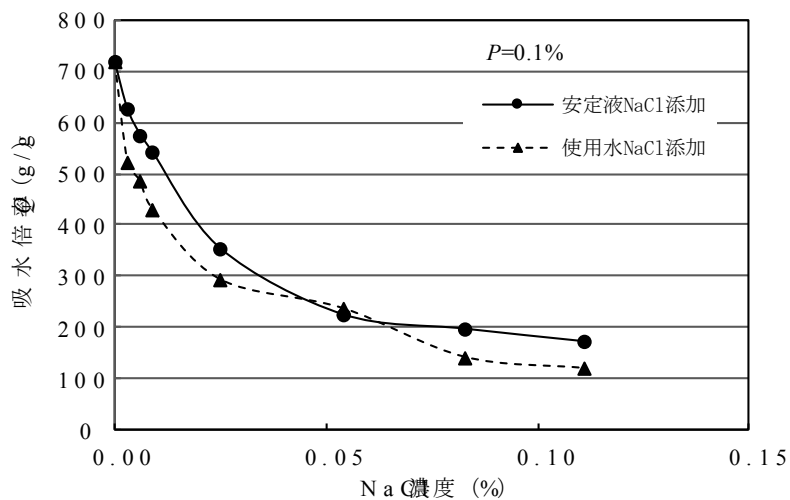


図 3-3-19 NaCl 添加順序を変えた場合の安定液の電気伝導率と吸水倍率の関係

NaCl 添加順序を変えた場合の安定液の電気伝導率とファンネル粘性の関係を図 3-3-20 に示す。安定液の電気伝導率が高いほどファンネル粘性が低下することが確認できた。また一度吸水したポリマーも電気伝導率

が同じであれば吸水前のポリマーとほぼ同じファンネル粘性に低下することがわかった。

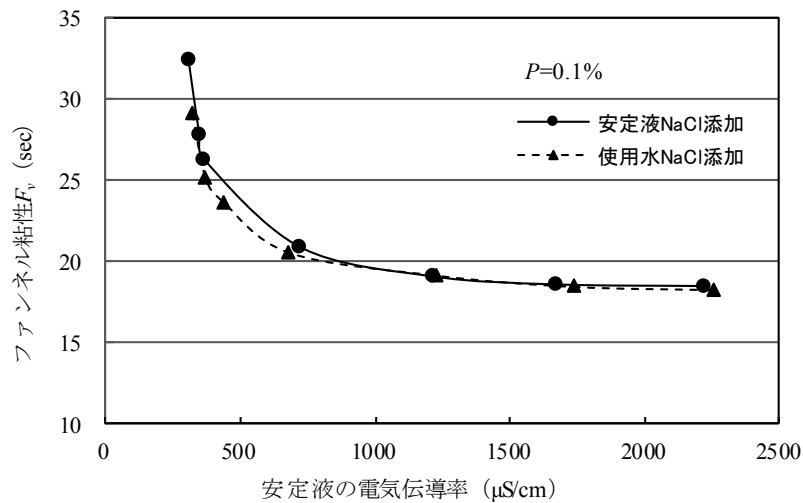


図 3-3-20 NaCl 添加順序を変えた場合の安定液の電気伝導率とファンネル粘性の関係

NaCl 添加順序を変えた場合の吸水倍率とファンネル粘性の関係を図 3-3-21 に示す。吸水倍率が高いほどファンネル粘性が増加することが確認できた。すなわち、一定水量のもとではポリマーの吸水倍率が高くなるほどファンネル粘性は増加することが確認できた。

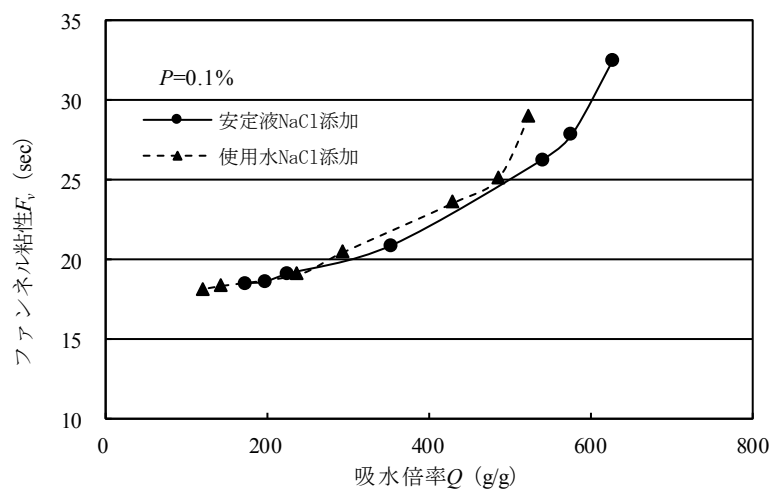


図 3-3-21 NaCl 添加順序を変えた場合の吸水倍率とファンネル粘性の関係

3.3.4.2 塩化カルシウム (CaCl₂) 濃度による性状変化

まずイオン交換水に CaCl₂を添加し, CaCl₂濃度と電気伝導率の関係を確認した.

CaCl₂濃度と電気伝導率の関係を図 3-3-22 に示す. CaCl₂濃度と電気伝導率はほぼ比例関係にあることが確認できた. 図 3-3-22 より, x を CaCl₂濃度(%), y を電気伝導率 (μS/cm) として最小二乗法を用いて式 (5)を算出した.

$$a = \frac{n \sum_{k=1}^n x_k y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2} \quad b = \frac{\sum_{k=1}^n x_k^2 \sum_{k=1}^n y_k - \sum_{k=1}^n x_k y_k \sum_{k=1}^n x_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2}$$

$$y = 11881.62366x + 70.62419 \quad (5)$$

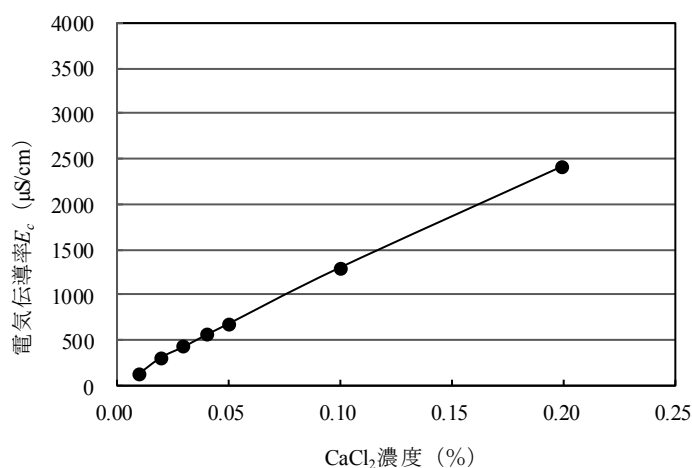


図 3-3-22 CaCl₂濃度と電気伝導率の関係

溶質の違いによる濃度と電気伝導率の関係を明らかにするために, 図 3-3-15 と図 3-3-22 の結果を同一図上で比較したものを図 3-3-23 に示す. これによると CaCl₂よりも NaCl の方が少ない濃度で電気伝導率に影響を与えることがわかった.

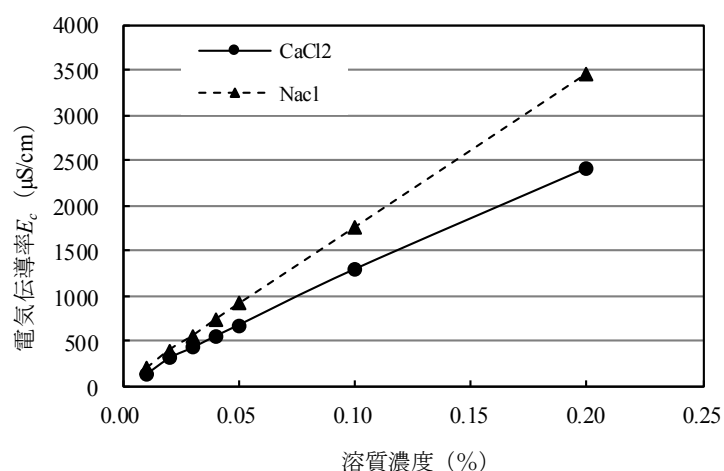


図 3-3-23 媒質の違いによる濃度と電気伝導率の関係

次に CaCl_2 濃度により電気伝導率を変化させ、高吸水性ポリマー安定液の性状変化を確認した。 CaCl_2 添加方法としては添加前の使用水に添加することとした。これは添加後の安定液に CaCl_2 を添加すると CaCl_2 が吸水膨張した高吸水性ポリマー材の架橋構造を破壊するためである。また、式(4)を用いて電気伝導率が 100, 150, 200, 500, 1000, 1500, 2000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) になるように CaCl_2 の配合量を調整して添加した。

(1) 試験方法

- ・ 事前に使用水性状を測定したイオン交換水 1000ml に CaCl_2 を投入する。
- ・ 防水型複合計(FCSTesttr35)を用いて使用水性状を測定する。
- ・ 高吸水性ポリマー材 1g を投入し 0.5 時間攪拌する。
- ・ 各パラメータを測定する。

(2) 結果と考察

電気伝導率を 1000, 1500, 2000($\mu\text{S}/\text{cm}$)になるように塩化カルシウム (CaCl_2) を添加した場合、 CaCl_2 と高吸水性ポリマー材が反応してしまい白い沈殿物が生成された (図 3-3-24 参照)。これは金属イオン Ca^{2+} が高吸水性ポリマー材の架橋構造を破壊した影響と考えられる。そこでここでは 100, 150, 200, 500 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)に調整した実験の結果のみを示す。

使用水の電気伝導率と吸水倍率の関係を図 3-3-25 に、電気伝導率とファンネル粘性の関係を図 3-3-26 を示す。この結果から CaCl_2 と NaCl とは同じ電気伝導率では、イオン価数の違いによる吸水性能及びファンネル粘性に大きな違いは見られないことが確認された。



図 3-3-24 白い沈殿物が生成された様子

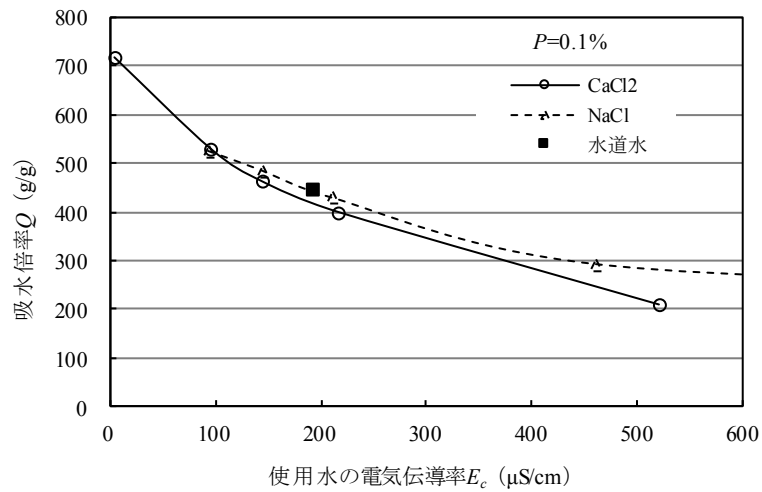


図 3-3-25 使用水の電気伝導率と吸水倍率の関係

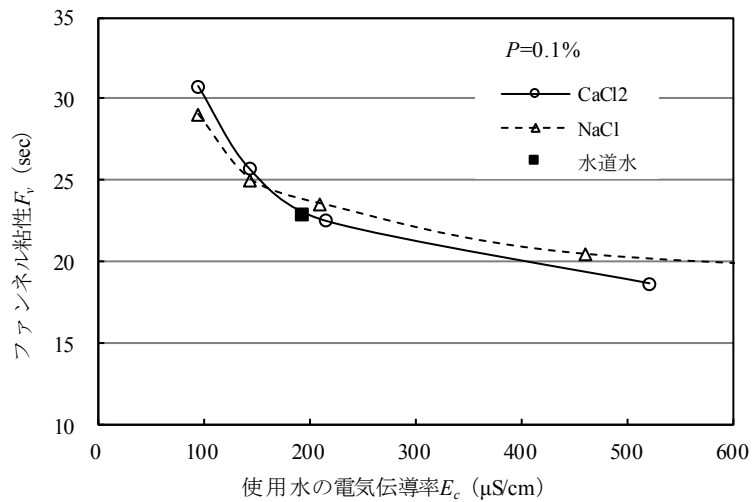


図 3-3-26 使用水の電気伝導率とファンネル粘性の関係

3.3.5 余剰水率による性状変化

これまでの実験結果から一定水量のもとでは、ポリマーの吸水倍率が高くなるほど粘性は増加する傾向にある。また、電気伝導率と高吸水性ポリマー材の添加量を変化させることによってポリマーに吸水されない水（余剰水）をコントロールすることができる。一方で、**図 3-3-27**にあるように吸水されたポリマーの粒径による影響なども考えられるため、余剰水量を変化させた安定液の性状変化を確認した。

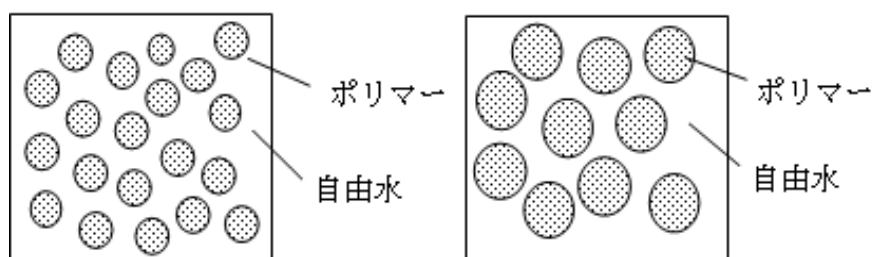


図 3-3-27 吸水されたポリマーの粒径の違う安定液のイメージ図

(1) 試験方法

- ・ 事前に使用水性状を測定したイオン交換水に所定の量の NaCl を投入する。
- ・ 防水型複合計 (FCSTesttr35) を用いて使用水性状を測定する。
- ・ 高吸水性ポリマー材を所定の量投入し 0.5 時間攪拌する。
- ・ 各パラメータを測定する。

なお余剰水率 η は下記の式で算出した。

$$\text{余剰水率 } \eta(\%) = \frac{\text{余剰水の体積 } (\lambda)}{\text{安定液の全体積 } (\lambda)} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{余剰水量}(\lambda) = \text{使用水量}(\lambda) - \frac{\text{吸水倍率 } Q(\text{g/g}) \times \text{高吸水性ポリマー材添加量}(\text{g})}{1000} \quad (7)$$

(2) 結果と考察

余剰水率とファンネル粘性の関係を **図 3-2-28** に示す。余剰水率が高くなるほどファンネル粘性は減少することが確認できた。また、自由水率が同等の値であれば吸水倍率の値によらずファンネル粘性は同等の値を示すことが確認できた。

次に余剰水率と粘度の関係を **図 3-2-29** に示す。余剰水率が高くなるほど粘度は減少することが確認できた。余剰水率が同等の値であれば、吸水

倍率の値によらず粘度は同等の値を示すことが確認できた。

また、余剰水率とろ過水量の関係を図 3-2-30 に示す。余剰水率が大きいほど、ろ過水量も多くなることが確認できた。余剰水率が同等の値であれば、吸水倍率の値によらずろ過水量は同等の値を示すことが確認できた。

これらの結果より、高吸水性ポリマー安定液の粘性はポリマーの粒径によらずに余剰水の割合に影響する。つまり、ポリマーの濃度による影響が支配的であることが確認できた。

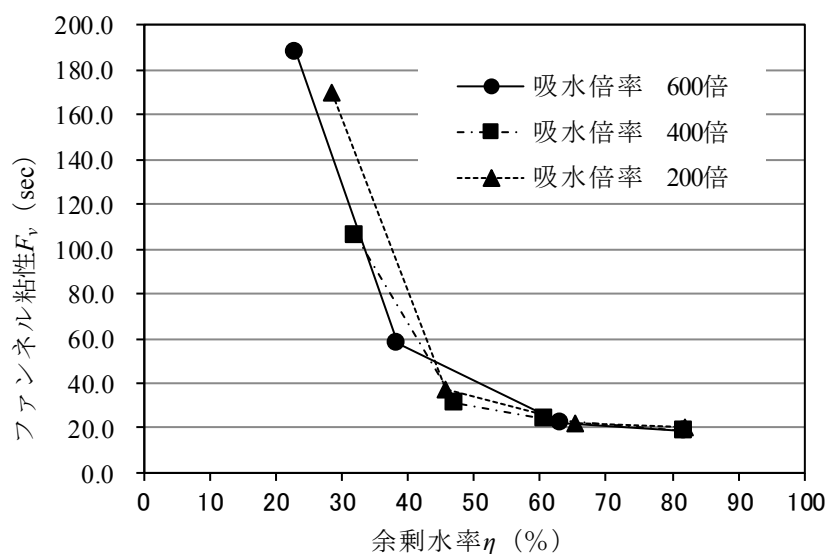


図 3-3-28 余剰水率とファンネル粘性の関係

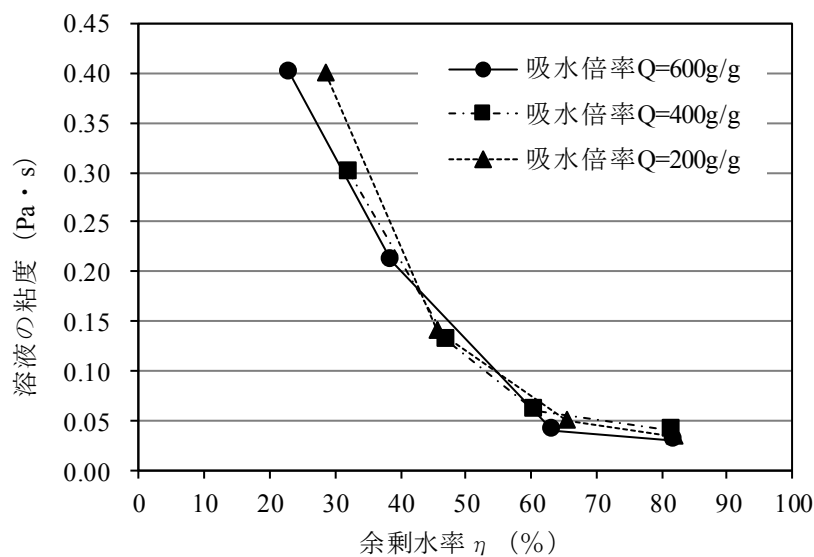


図 3-3-29 余剰水率と粘度の関係

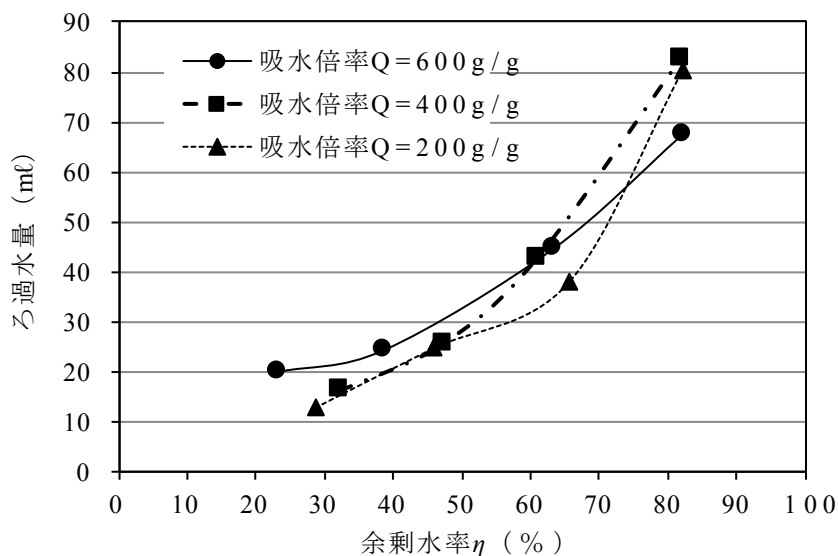


図 3-3-30 余剰水率とろ過水量との関係

3.4 まとめ

本研究の「高吸水性ポリマー安定液」を、「水と吸水膨張させた高吸水性ポリマー材が懸濁した溶液」と定義し、場所打ち杭工法における孔壁の安定性と掘削置換性を両立させるために、必要な粘性を配合によって調節できる特徴を持っていることを実験により確認した。

実験にあたっては使用する高吸水性ポリマー材の材料特性、性状測定項目及び測定方法を明確なものとし、再現性を確保できるよう配慮した。なお、測定項目は比重・粘度（ファンネル粘度及びビスコテスター粘度）・ろ過水量・pH・電気伝導率・塩分濃度・温度・膜厚・吸水倍率とした。

高吸水性ポリマー安定液の基本性状を明らかにするために実施した実験の着目点は5項目であり、結果及び考察を含めて以下に示す。

(1) 使用溶液の違いによる影響

蒸留水・イオン交換水・水道水の3種類の溶液を使用した高吸水性ポリマー安定液について、電気伝導率・pH・比重・ファンネル粘度・電気伝導率と吸水倍率に関する比較実験を実施した。

pH及び比重については使用溶液による差異はなく、それぞれ中性域で比重1.0を保持した。電気伝導率については、蒸留水とイオン交換水は $10\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下なのに対して水道水では $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度と大きく異なり、これに高吸水性ポリマー材0.1%相当を添加した溶液では、すべてについ

て約 $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 増加する傾向を示した。この電気伝導率の違いの影響でファンネル粘性と吸水倍率においても違いを生じた。蒸留水とイオン交換水の吸水倍率は 700 倍を超えるが、実施工での前提となる水道水では 500 倍程度となり、高吸水性ポリマー材 0.1% を添加すれば、安定液としての適度な流動性を示す 25 秒程度のファンネル粘性が得られることがわかった。

(2) 高吸水性ポリマー材の添加率による性状変化

高吸水性ポリマー材の添加率の違いによる安定液の性状変化をより詳細に確認するために、イオン交換水と水道水を使用溶液として添加率の増減による電気伝導率・pH・ファンネル粘性・ろ過水量・膜厚・吸水倍率の変化を実験により明らかにした。

添加率を増やすほど安定液の電気伝導率は増加するが pH は微減し、ファンネル粘性は添加率に応じて級数的に増大するイオン交換水に対して水道水は添加率 0.05~0.15% の範囲で 20~50 秒程度の緩やかな増大となることがわかった。ろ過水量は添加率を増やすほど減少するとともに水道水よりもイオン交換水の方がろ過水量は少ないことが確認できた。既往の安定液における、ろ過水量基準から考えると水道水の場合の添加量は 0.1% 以上は必要であると判断される。膜厚は使用水が水道水とイオン交換水で大きな違いは見られず、添加率を増やすほど膜厚も大きくなるものの膜厚そのものは比較的薄く形成されることが確認できた。

(3) 高吸水性ポリマー材の配合方法による性状変化

高吸水性ポリマー材の配合方法による性状変化を確認するため、攪拌時間に着目し、攪拌の時間を変化させた実験を実施した。攪拌時間が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 時間それぞれの吸水倍率はどれも 700 倍付近の値で推移し、0.5 時間攪拌すれば十分吸水膨張を完了できることがわかった。

(4) 電気伝導率による性状変化

電気伝導率を変化させる方法として、塩化ナトリウム (NaCl) と塩化カルシウム (CaCl_2) の 2 種類の水溶性の塩化物濃度で調整する方法を採用し、電気伝導率による性状変化を確認する実験を実施した。イオン交換水を用いて NaCl 濃度及び CaCl_2 濃度と電気伝導率の関係を確認した。各濃度と電気伝導率とはほぼ比例関係となり最小二乗法を用いて近似式を算出した。高吸水性ポリマー安定液は電気伝導率が高いほど吸水倍率及びファンネル粘性は低くなり、また高吸水性ポリマー材の吸水倍率とファンネル粘性との間には相関性があり、吸水倍率が高くなるほどファンネル粘性は増加することが確認できた。溶質の違いを比較すると CaCl_2 の方が NaCl より少ない濃度で電気伝導率に影響を与えるが、同じ電気伝導率では吸水性能及びファンネル粘性に大きな違いを生じないことが確認された。

(5) 余剰水率による性状変化

これまでの実験結果から、一定水量のもとでは高吸水性ポリマー材の吸水倍率が高くなるほど粘性は増加する傾向にある。また電気伝導率と高吸水性ポリマー材の添加量を変化させることによって高吸水性ポリマー材に吸水されない水（余剰水）をコントロールすることができる。一方で、吸水された高吸水性ポリマー材の粒径による影響なども考えられるため、余剰水量を変化させた安定液の性状変化を確認した。

余剰水率とファンネル粘性及び粘度の関係は、余剰水率が高くなるほど減少すること、余剰水率が同等の値であれば吸水倍率の値によらず同等の値を示した。また、余剰水率とろ過水量の関係では、余剰水率が大きいほどろ過水量も多くなること、余剰水率が同等の値であれば吸水倍率の値によらずろ過水量は同等の値を示した。これらの結果より、高吸水性ポリマー安定液の粘性はポリマーの粒径によらずに余剰水の割合に影響することが確認できた。

以上の一連の実験から、高吸水性ポリマー安定液の基本特性となる粘性は溶液中の余剰水の多寡によってコントロールでき、以下にまとめることができることを解明した。

高吸水性ポリマー安定液は、**図 3-4-1** に示すように吸水膨張したポリマーと吸水されなかった余剰水の懸濁液となる。この懸濁液は、粘性を有しており、一定水量のもとでは高吸水ポリマー材の添加量が多くなる程、粘性も大きくなる。

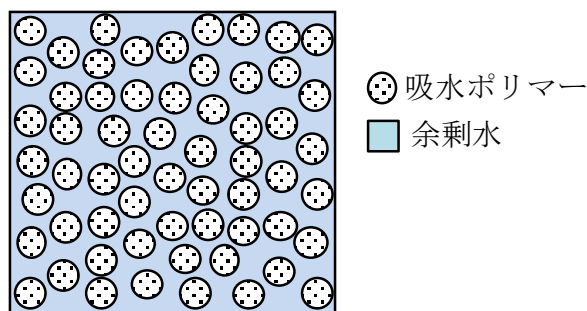


図 3-4-1 高吸水性ポリマー材を添加した水溶液

高吸水性ポリマー材添加率 P を変化させた時のファンネル粘性と比重の変化状況を **図 3-4-2** に示す。この図からわかるように、高吸水性ポリマー安定液は、粘性が増加しても比重が 1.01 以下と低比重であり、高粘性・低比重の安定液である。従来のペントナイト系安定液が 1m^3 当り 30～50kg 前後のペントナイト材料を添加するのに対し、高吸水性ポリマー安定液は $P=0.1(\%)$ 、すなわち水 1m^3 当り高吸水性ポリマー材 1 kg 前

後の添加で、ベントナイト系安定液と同等の粘性を確保できることがわかる。

高吸水性ポリマー材の高い吸水能力は、前述のように浸透圧と親水基の拡張によるもので、吸水と同時にゲルの中のナトリウムイオン濃度が高い塩水のような状態のため、浸透圧が働いてゲル内への水の浸透が促進される。一方、ポリマーをとりまく外部溶液のイオン濃度が高くなれば、吸水性能は低下する特性を持つ。図 3-4-3 に使用溶媒として、イオン交換水に濃度を変化させた NaCl 溶液を用いた場合の電気伝導率 E_c とポリマー吸水倍率 Q の関係を示す。安定液で通常使用する水道水は $E_c = 200 \sim 300 \mu\text{S}/\text{cm}$ であり、このとき高吸水性ポリマーは 500 倍程度の高い吸水性能を示すことがわかる。

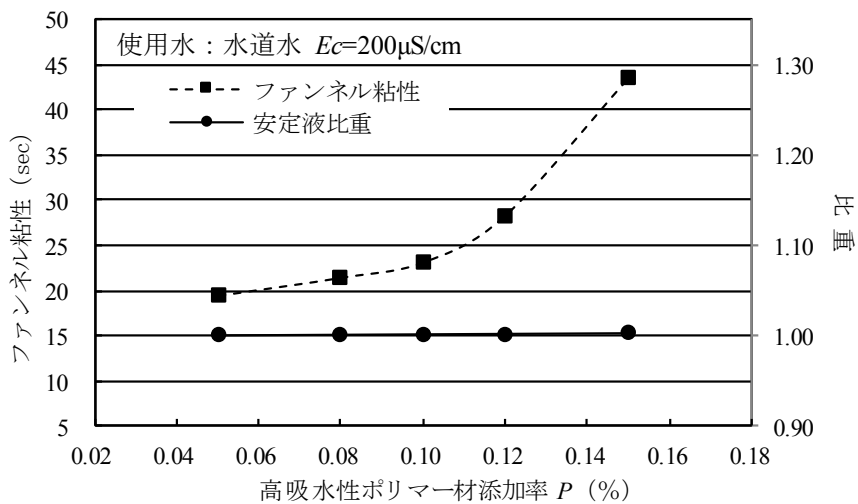


図 3-4-2 ポリマー材添加率 P とファンネル粘性・比重の関係

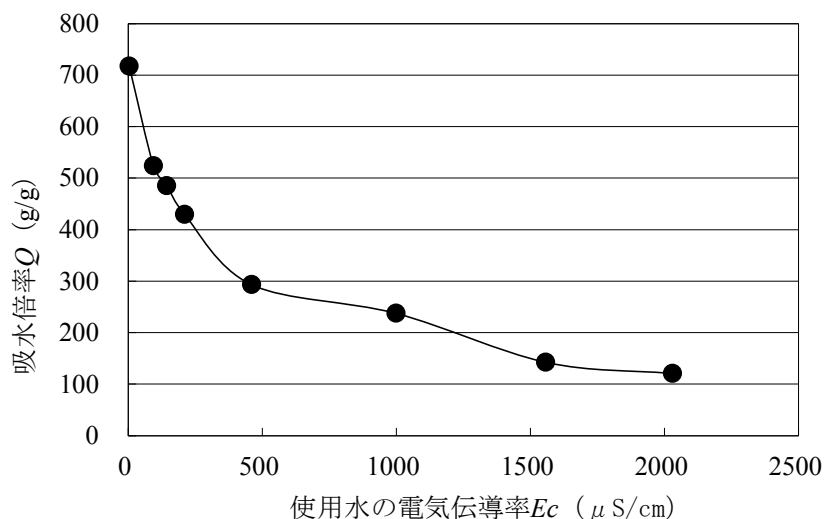


図 3-4-3 使用水の電気伝導率 E_c と吸水倍率 Q の関係

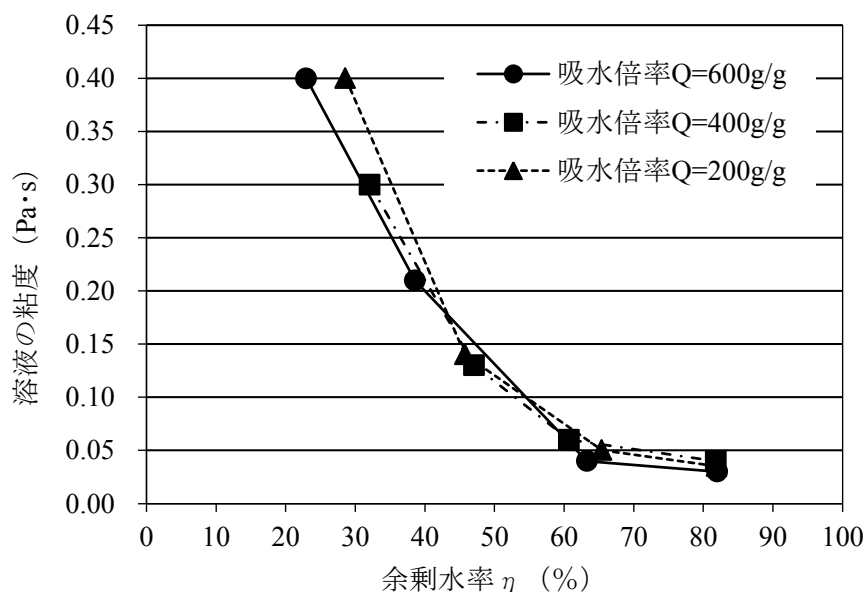


図 3-4-4 余剰水率 η と溶液の粘度との関係

図 3-4-4 は、電気伝導率 E_c を調整した NaCl 溶液を用いて吸水倍率 $Q=200\text{g/g}$, 400g/g , 600g/g と吸水状態の異なる高吸水性ポリマー安定液を用意し、溶媒量を調整することにより安定液に含まれる余剰水の全体積に占める割合（以下、余剰水率 η (%)）を変化させ、各安定液の粘性をビスコテスターで測定した結果を示したものである。ここに、余剰水率 η は、式(8)で定義する。

$$\text{余剰水率}\eta(\%) = \frac{\text{余剰水の体積}(\lambda)}{\text{安定液の全体積}(\lambda)} \times 100 \quad (8)$$

図 3-4-4 に示すように余剰水率 η が高くなるほど安定液の粘性は減少し、また余剰水率 η が同等の値であれば、高吸水性ポリマー材の吸水状態によらず安定液の粘性は、同等の値を示す。この結果より、高吸水性ポリマー安定液は、高吸水性ポリマー材の吸水状態に関わらず、溶液中の高吸水性ポリマー材の添加量を調整（=余剰水量の調整）することで、必要な粘性を得られることがわかる。

第 4 章 高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭工法への適用性

第4章 高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭工法への適用性¹⁷⁾

4.1 高吸水性ポリマー安定液の孔壁安定性

地山を鉛直に掘削した場所打ち杭の孔壁は、地下水が土砂とともに流出したり、土の自立高さを超える場合に崩壊する。ベントナイト系安定液の場合には、掘削された孔壁面に速やかに形成されたマッドケーキを介して、安定液圧で地山圧に抵抗することで孔壁の安定化が図られる。そのため、安定液には、孔壁にマッドケーキ等の難透水層が速やかに形成される機能が必要とされる。(図4-1-1参照)

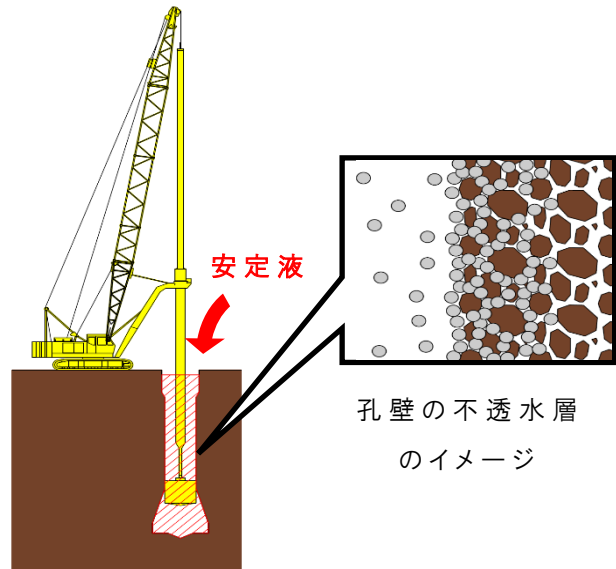


図4-1-1 場所打ち杭の孔壁安定模式図

まず高吸水性ポリマー安定液が透水性の高い地盤においても難透水層を形成し孔壁の安定化を図れることを確認するために、拡底杭を模擬した安定性確認実験を実施した。水槽内に傾斜角 20° の仕切り板を設け、片側に試料土(川砂 $D_{50}=0.35\text{mm}$)を、その反対側に高吸水性ポリマー安定液を入れた状態で、仕切り板を撤去した後も試料土は崩壊することなく優れた安定性能を有することを確認した。(図4-1-2参照)

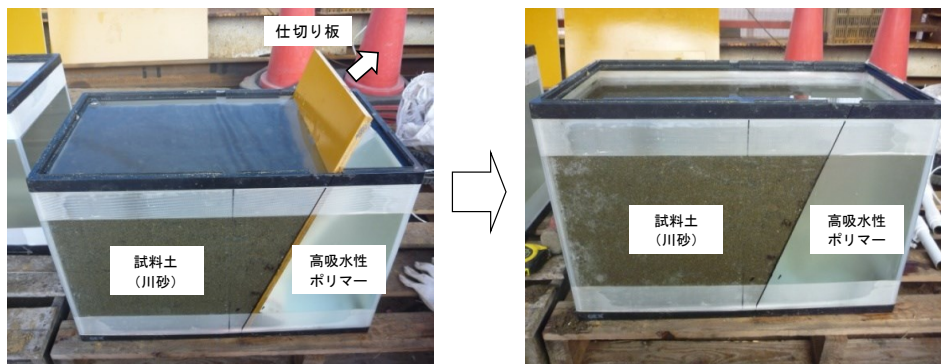


図4-1-2 拡底部の孔壁安定性実験

次に高吸水性ポリマー安定液とベントナイト系安定液による難透水層の形成状況と遮水性能を比較するために、既往研究¹¹⁾で用いられている図

4-1-3 に示す遮水性能確認試験装置を用いて実験を実施した。

実験では、間隙を水で満たした模擬地盤の上に安定液を張り、両シリンダーA,B に掘削時の地盤地下水圧に相当する圧力 300kPa を加え等圧状態にした後、シリンダーAに安定液と地下水位の水頭差に相当する差圧 20kPa を与え、模擬地盤内からの透水量経時変化を計測した。なお、模擬地盤には、粒径の異なる硅砂 7 号, 5 号, 3 号の 3 種類を相対密度 $D_r=60(\%)$ 程度の状態で用いた。

図 4-1-4 にベントナイト系安定液 (ベントナイト添加率 $Be=3.0\%$) , 図 4-1-5 に高吸水性ポリマー安定液 (高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.12\%$, 使用水の電気伝導率 $Ec=200\mu S/cm$) を用いた場合の透水量経時変化を示す。なお、試験に用いたベントナイト添加率は実現場で標準的に使用される $F_v=25(sec)$ に相当するものを採用し、高吸水性ポリマー材添加率については、上記ベントナイト安定液と同程度以上の粘性が確保できる配合を採用した。

ベントナイト系安定液の場合、粒径の粗い硅砂 3 号及び 5 号では、安定液により難透水層を形成できず透過した。高吸水性ポリマー安定液の場合、いずれの模擬地盤においても透水係数 $10^{-7}m/s$ 程度の難透水層が形成され、ベントナイト系安定液よりも粗粒分を多く含む地盤への適用が可能であると判断される。さらに、両安定液が難透水層を形成できた硅砂 7 号において、表 4-1-1 に示すように難透水層形成までの時間が、ベントナイト系安定液 91(sec) に対し、高吸水性ポリマー安定液は 48(sec) と約半分の時間で難透水層が形成され、それまでの透水量も約半分となっている実験結果から、優れた孔壁安定性を有していることが確認された。

ベントナイト系安定液の場合には安定液中のベントナイト粒子が地盤中に浸透すると土粒子を包み込み、間隙を塞ぐ状態になって泥膜を形成するのに対して、CMC 系安定液の場合には CMC 分子も地盤中に浸透するが、膜は形成せず粒子間を詰まらせる機能で孔壁安定性を確保するという安定原理の違いが従来から指摘¹²⁾されている。高吸水性ポリマー安定液の方が難透水層の形成時間が速いという上記の試験結果から、CMC 系安定液により近い安定化機構であると考えられる。

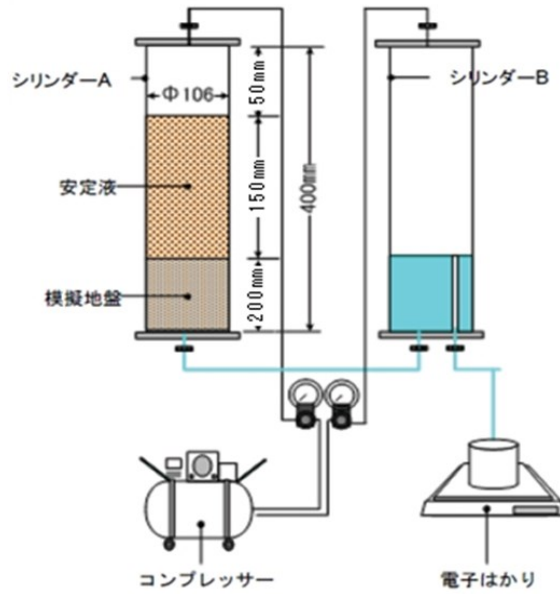


図 4-1-3 遮水性能確認試験装置

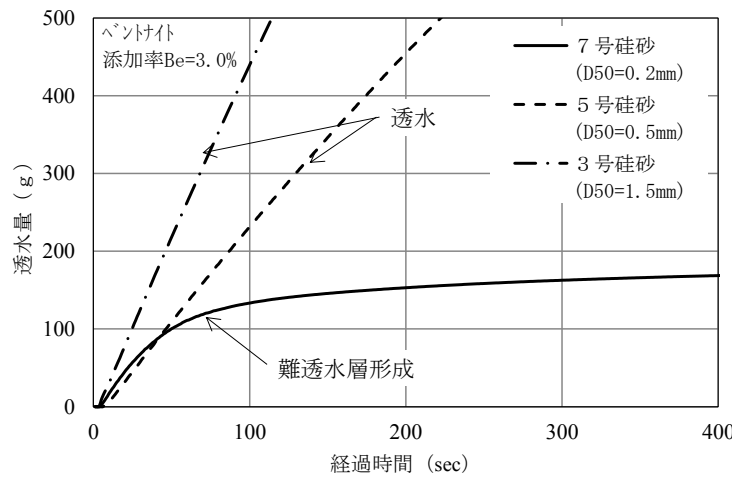


図 4-1-4 透水量経時変化 (ベントナイト系安定液)

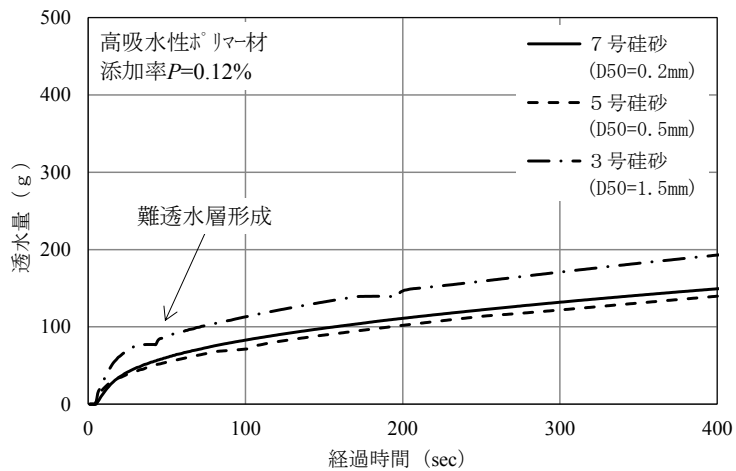


図 4-1-5 透水量経時変化 (高吸水性ポリマー安定液)

表 4-1-1 難透水層形成時間と透水量及び見かけの透水係数比較

試料土		珪砂7号	珪砂5号	珪砂3号	備考
ベントナイト系 安定液	難透水層形成時間 (sec)	91	-	-	
	難透水層形成までの透水量 Wv (g)	130	-	-	
	模擬地盤の間隙量 Vv (cm ³)	795.5	782.6	772.8	相対密度Dr=60%
	難透水地盤厚※ L (cm)	3.3			L=Wv/Vv×20cm
	動水勾配 i	61.2	-	-	i=200cm/L
	難透水層形成後の透水量 Q (cm ³ /sec)	0.266	-	-	
	模擬地盤断面積 A (cm ²)	91.6	91.6	91.6	
	難透水層形成後の透水係数 k (m/s)	4.75E-07	-	-	k=Q/(A・i)
高吸水性 ポリマー安定液	難透水層形成時間 (sec)	48	44	46	
	難透水層形成までの透水量 Wv (g)	59.5	51.6	92.5	
	模擬地盤の間隙量 Vv (cm ³)	795.5	782.6	772.8	相対密度Dr=60%
	難透水地盤厚※ L (cm)	1.5	1.3	2.4	L=Wv/Vv×20cm
	動水勾配 i	133.7	151.7	83.5	i=200cm/L
	難透水層形成後の透水量 Q (cm ³ /sec)	0.380	0.357	0.567	
	模擬地盤断面積 A (cm ²)	91.6	91.6	91.6	
	難透水層形成後の透水係数 k (m/s)	3.11E-07	2.57E-07	7.41E-07	k=Q/(A・i)

※模擬地盤間隙量から難透水層形成までの透水量より難透水地盤厚を推定

4.2 高吸水ポリマー安定液の流動性

ベントナイト系安定液等の既往の安定液では、掘削性能に関係する安定液の流動性を表す指標としてファンネル粘性が使用される。高吸水性ポリマー安定液も安定液の管理を考慮し、既往の安定液と同様にファンネル粘性を流動性の指標として用いることにした。

第3章で述べたように、高吸水性ポリマー安定液の基本性状として、安定液中の余剰水率 η が高くなるほどファンネル粘性は減少し、また余剰水率 η が同等の値であれば、ポリマーの吸水倍率 Q の値によらずファンネル粘性は同等の値を示す特性がある。このことから、ファンネル粘性に影響を及ぼす要因として、使用水の電気伝導率 E_c 、安定液の余剰水率 η が考えられる。

図 3-3-32 に示すように、高吸水性ポリマー材の吸水倍率 Q (g/g) は溶媒の電気伝導率 E_c (uS/cm) の増加につれて一定値に漸近していくので、高吸水性ポリマー材の吸水倍率 Q の逆数と E_c の関係を図 4-2-1 に再整理した結果は、式(9)の一次関数で近似的に表される。

$$\frac{1}{Q} = 3 \times 10^{-6} E_c + 0.0015 \quad (9)$$

また、上記使用水の電気伝導率の範囲内で、高吸水性ポリマー材の添加量を変動させた時の余剰水率 η とファンネル粘性 F_v をプロットした結果を図 4-2-2 に示す。この結果から、余剰水率 η がファンネル粘性への大きな影響要因であり、その関係は式(10)で近似できる。

$$F_v = 86197\eta^{-1.964} \quad (10)$$

図 4-2-2, 近似式(10)に示すように, ファンネル粘性は余剰水率の概ね -2 乗に比例することがわかるとともに, 高吸水性ポリマー安定液の流動性は, 安定液中の吸水したポリマー材以外の余剰水率 η に支配され, 余剰水率 η は, 高吸水性ポリマー材の添加量により調節が可能であることがわかる.

また, 高吸水性ポリマー材の添加量は, 使用水の電気伝導率 E_c を測定することにより, その吸水性能 (吸水倍率 Q) を推定し, 添加量を決定することが可能である.

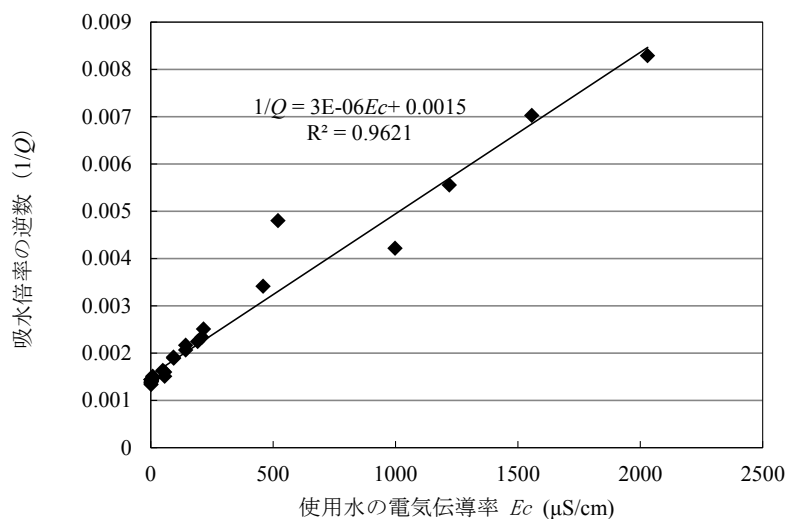


図 4-2-1 使用水電気伝導率 E_c と吸水倍率 Q の関係

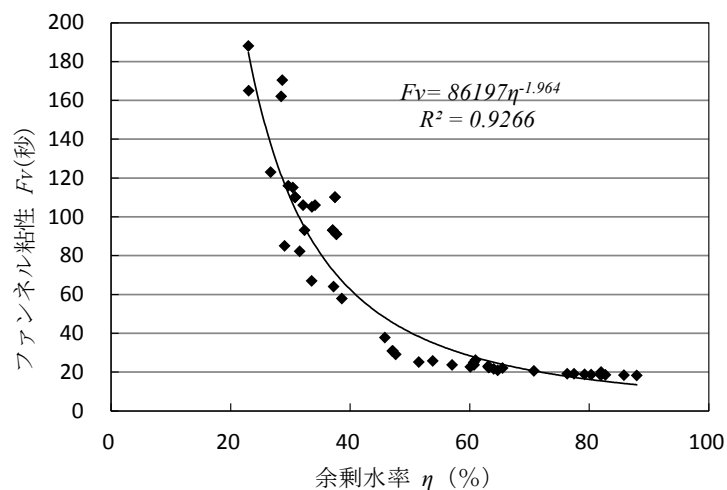


図 4-2-2 余剰水率 η とファンネル粘性 F_v の関係

4.3 高吸水性ポリマー安定液の適用深度

場所打ち杭工法における掘削深度，すなわち拘束圧による影響を確認するため，図 4-3-1 の加圧ベーンせん断試験装置を用いて高吸水性ポリマー安定液 ($P=0.15\%$) の体積変化，せん断抵抗を測定し，ベントナイト系安定液 ($B_e=5.0\%$)，水道水と比較した．なお，試験に用いたベントナイト添加率は，影響度が最も顕著となると想定される実現場で上限的に使用される $F_v=35(\text{sec})$ 程度を意図し，ポリマー材添加率については，上記ベントナイト安定液と同程度の粘性が確保できる配合を採用した．拘束圧は，0，100，200，300，400，500kPa と段階的に上げて各加圧状態で安定液が安定した状態であることを確認するために 10 分間放置し，それぞれ安定液の液面変化から推定される体積変化，ベーンせん断抵抗値を測定した．試験結果は，図 4-3-2 に示すとおりである．

加圧に伴う高吸水性ポリマー安定液の体積変化は観察されず，加圧前と加圧後のファンネル粘性の性状変化も生じなかった．また，各加圧条件下での安定液のベーンせん断抵抗も，徐々に抵抗値が増すものの，ベントナイト系安定液，水道水と同様に大きな変化は生じなかった．この結果より，ほぼ飽和状態にある高吸水性ポリマー安定液は掘削深度 50m 程度に相当する地下水圧の範囲 (490kPa) では，安定液としての流動性を保持するものと考えられるが，実施工等での検証が必要である．

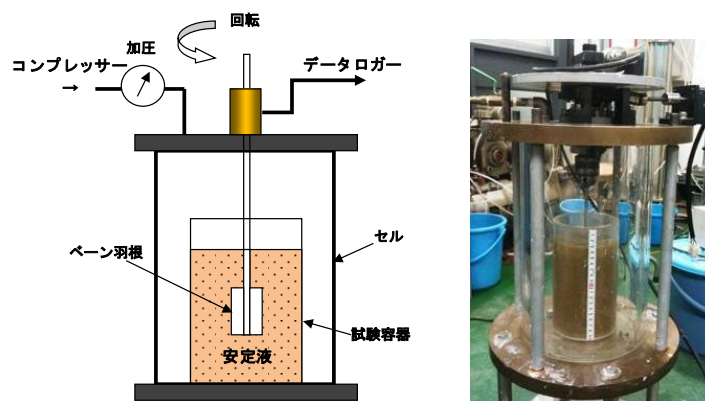


図 4-3-1 加圧ベーンせん断試験装置

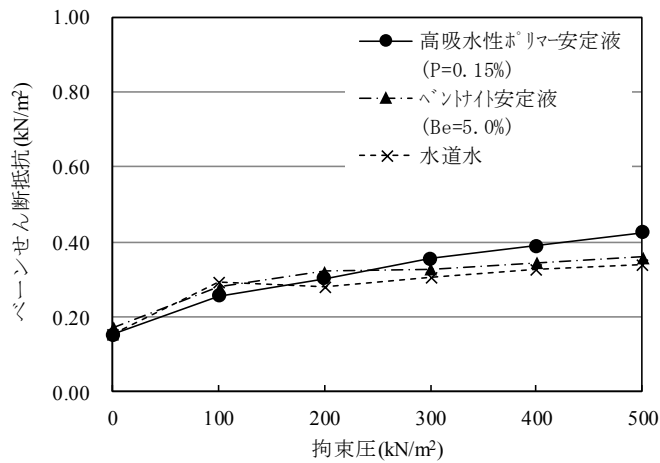


図 4-3-2 拘束圧と各試料のベーンせん断抵抗

4.4 高吸水性ポリマー安定液の土砂分離特性

高吸水性ポリマー安定液は、掘削施工中は吸水膨潤した高吸水性ポリマー材にプラス(+)に荷電した細粒分土粒子を取り込んで膨潤した状態で懸濁性を保持している。この安定液に塩化カルシウム CaCl_2 を添加すると、 $-\text{COONa}$ と Ca^{2+} とが置換結合し、アクリル酸重合体が Na と Ca の部分塩架橋物となるため、半透膜が消失し吸水していた水を放出し膨潤ゲルが小さくなる。その結果、高分子凝集剤と同様に付着土粒子とともに沈降し、安定液を水と土砂に容易に分離することができる。このとき分離した水は中性域を示す。図 4-4-1 に塩化カルシウム添加による分離状況、図 4-4-2 に分離メカニズム模式図を示す。

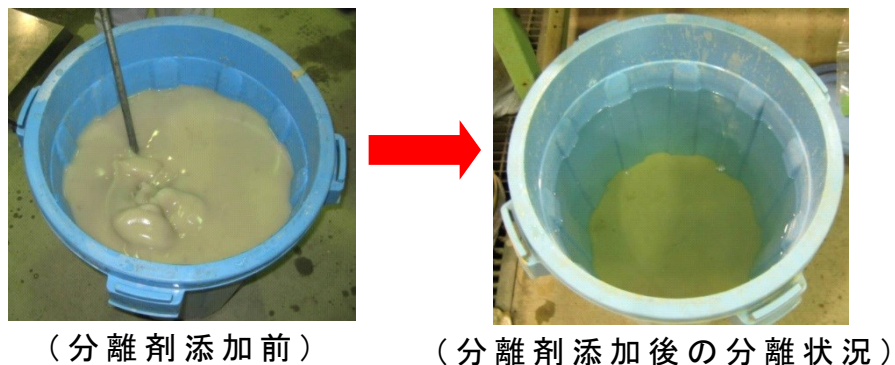


図 4-4-1 高吸水性ポリマー安定液の分離状況

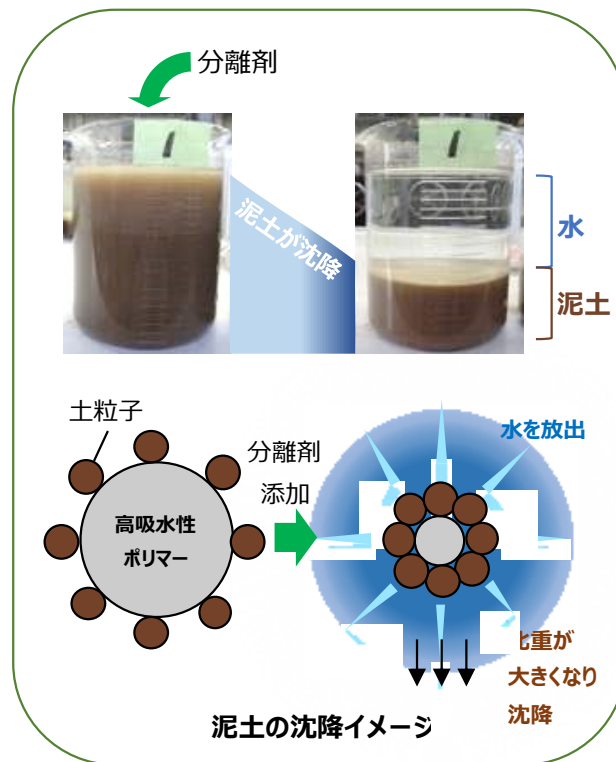


図 4-4-2 分離メカニズムの模式図

土砂分離に関わる影響要因は、細粒分土粒子の混入量のほかに高吸水性ポリマー材添加率が考えられるが、安定液として機能する範囲であれば管理値前後となるため高吸水性ポリマー材添加率は 0.10～0.12%と範囲が狭い。そのため高吸水性ポリマー材添加率を一定とし、分離量との相関性が支配的と推定される混入する粘土量に着目した。この分離特性を調査するために、高吸水性ポリマー安定液（高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.1\%$ ）とベントナイト系安定液（ベントナイト添加率 3.0%）に、混入する粘土量（微粉末粘土）を変化させて異なる比重の安定液を作製し、分離剤となる塩化カルシウムを一定量投入攪拌し、その分離状況を測定した。なお、投入する塩化カルシウム添加量は、塩化カルシウム添加率 C と電気伝導率 E_c の関係（図 4-4-3）より、高吸水性ポリマー材の吸水倍率 Q が半分以下となる電気伝導率 $E_c=2000\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上を指標に $C=0.2\%$ とした。塩化カルシウム添加率 C は式(11)で定義し、分離結果を定量化するため分離度を式(12)で定義する。図 4-4-4 に分離試験手順及び分離度の模式図を示す。

$$C(\%) = \frac{\text{塩化カルシウムの質量 (g)}}{\text{安定液 (水) の質量 (g)}} \times 100 \quad (11)$$

$$\text{分離度}(\%) = \frac{\text{分離水の体積}(\lambda)}{\text{安定液の体積}(\lambda)} \times 100 \quad (12)$$

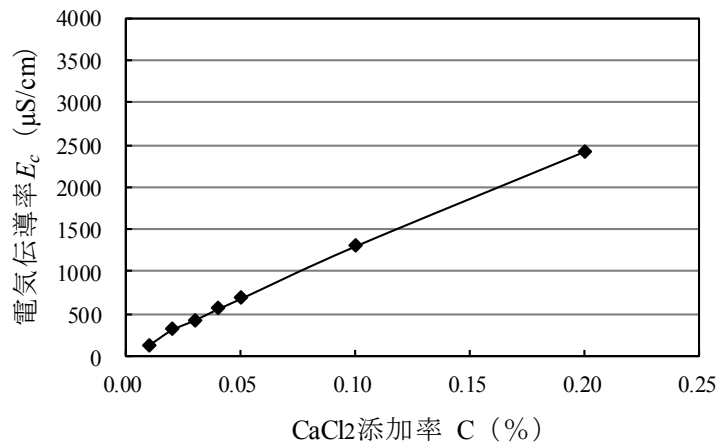


図 4-4-3 塩化カルシウム添加率 C と電気伝導率 E_c の関係

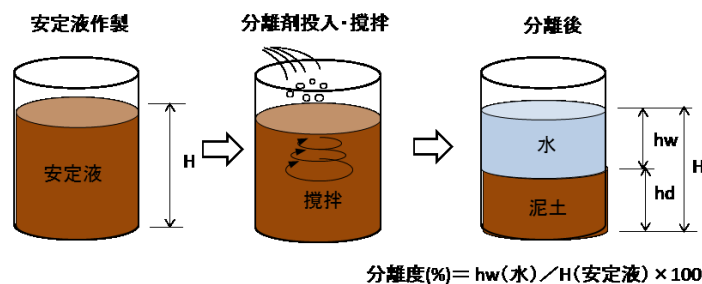


図 4-4-4 安定液の分離試験手順及び分離度

高吸水性ポリマー安定液とベントナイト系安定液のそれぞれに対して実施した分離試験で得られた安定液の比重と分離度の関係を図 4-4-5 に示す。

高吸水性ポリマー安定液の分離度は安定液の比重によって異なり、比重が 1.05 のときは 70%程度分離できるのに対して、比重が大きくなるほど固体泥土分が多いため分離量が少なくなる傾向にある。一方、ベントナイト安定液の場合には比重に影響されず概ね 35%の分離が可能であり、高吸水性ポリマー安定液は比重 1.1 以下の場合に優位性を発揮することがわかった。

但し、高吸水性ポリマー安定液の場合には分離水は中性であるため、そのまま直接放流できるが、ベントナイト系安定液の場合は直接放流のために

アルカリ性状を中和処理する必要がある。

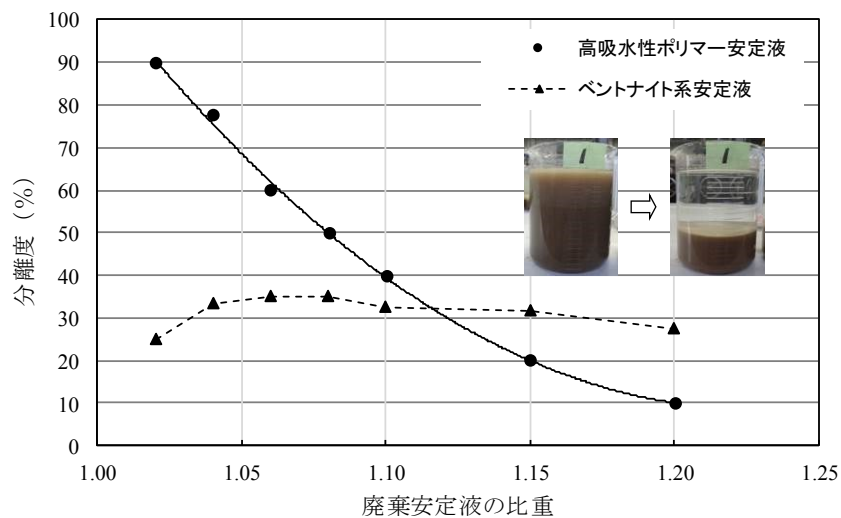


図 4-4-5 安定液の比重と分離度の関係

4.5 高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭本体への影響

4.5.1 コンクリートの置換性

$F_v=25(\text{sec})$ の性能を持つ高吸水性ポリマー安定液（高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.1\%$ ）を満たしたガラス水槽内にトレミー管を模擬した投入管よりコンクリートを底部より打設置換し、水槽内に配置した塩ビ管内のコンクリート充填状況を確認した（図 4-5-1 参照）。実験の結果、図 4-5-2 に示すように安定液のコンクリート内への巻き込みも見られず良好な置換性を確認した。

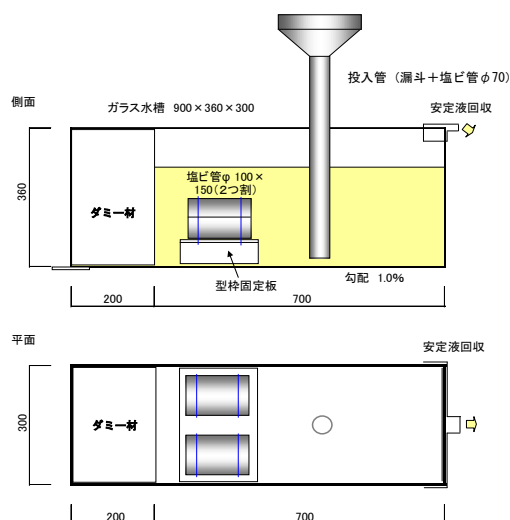


図 4-5-1 コンクリート置換性試験装置



図 4-5-2 コンクリート置換充填状況

4.5.2 杭本体の出来形

$F_v=25(\text{sec})$ の性能を持つベントナイト系安定液（ベントナイト添加率 $B_e=3.0\%$ ）と高吸水性ポリマー安定液（高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.1\%$ ）のろ紙に付着する泥膜厚を測定した。なお、各安定液には、掘削に伴い細粒分が安定液中に混入することを想定し、粘土分（微粉末粘土）混入率をパラメーターとして作液した。図 4-5-3 は、粘土分含有率と泥膜厚さの関係を比較したものであり、図 4-5-4 にそれぞれの泥膜形成状況を示している。

ベントナイト系安定液では粘土分混入率が高いほど泥膜厚さが増加するのに対し、高吸水性ポリマー安定液では粘土分混入率が増えても泥膜厚さはほぼ 0.5mm 以下で一定であった。このことより、高吸水性ポリマー安定液は泥膜厚さが非常に薄く、従来のベントナイト系安定液に比べて杭径の確保、周面摩擦力の向上が期待される。

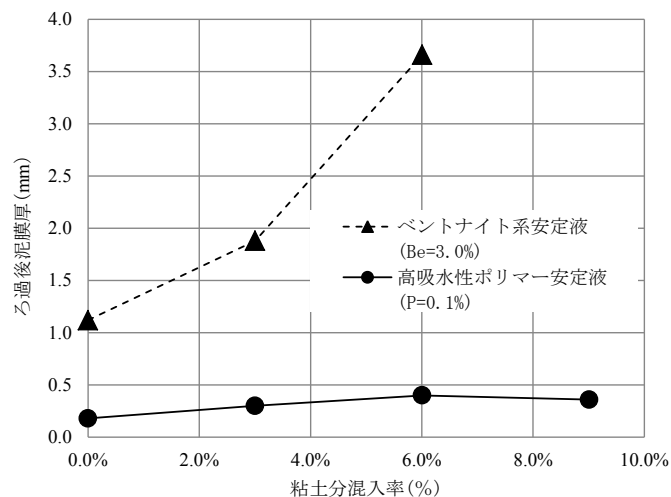


図 4-5-3 安定液粘土分混入率と泥膜厚

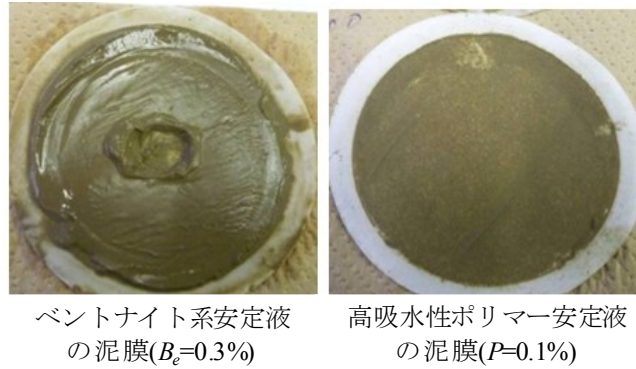


図 4-5-4 ろ紙に付着した各安定液の泥膜形成状況

4.5.3 コンクリートと鉄筋との付着性能

高吸水性ポリマー安定液の鉄筋付着への影響を確認するため、コンクリート打設後に鉄筋引き抜き試験を行ってベントナイト系安定液の場合の結果と比較した。なお、高吸水性ポリマー材添加率は一般的に適用する範囲が $F_v=25\sim30(\text{sec})$ の性能を持つ $P=0.1\sim0.12\%$ であるため、その両端の 2 ケースについて試験を実施することで、濃度（粘性）の影響の有無を確認することとした。またベントナイト添加率については実現場で上限的に使用されるレベルを採用した。

図 4-5-5 に示すように、引き抜き試験用の鋼製型枠（ 150×150 ）中に鉄筋 D22 を設置し、安定液を満たす。ベントナイト系安定液（ベントナイト添加率 $B_e=5.0\%$ ）と高吸水性ポリマー安定液（高吸水性ポリマー材添加率 $P=\textcircled{1}0.1\%$ 、 $\textcircled{2}0.12\%$ ）に 4 時間浸した後に、コンクリートを置換打設し供試体を作製した。材齢 28 日まで水中養生し、28 日強度で鉄筋引き抜き試験（JSCE-G503-1999）を行い、鉄筋付着応力度を計測した。試験状況を図 4-5-6 に、試験結果を表 4-5-1 に示す。

高吸水性ポリマー安定液に浸した鉄筋付着応力度は、ベントナイト系安定液に比べて、約 4～7% 高い付着応力度が得られた。



①安定液充てん ②コンクリートの打設 ③コンクリート置換完了

図 4-5-5 供試体作製手順



図 4-5-6 鉄筋引き抜き試験状況

表 4-5-1 最大付着応力度測定結果

安定液		最大付着応力度 (N/mm ²)
ベントナイト系安定液		9.14
高吸水性ポリマー安定液	1)	9.51
	2)	9.79

4.6 高吸水性ポリマー安定液の環境特性

4.6.1 材料特性

高吸水性ポリマー材は長鎖のポリマー分子が相互に架橋されているため水中で基本的に安定している。しかし、太陽光、特に紫外線に当たると徐々に分解し、架橋が切れて非架橋の水溶性ポリアクリル酸ソーダとなる。この非架橋ポリアクリル酸ソーダは、国内で食品添加物として認可されている物質であり、さらに光分解が進むと非架橋ポリアクリル酸ソーダは分子鎖が切れて分子量 1000 程度まで分解され、一般の微生物によって生分解される。（巻末の付録 A 高吸水性ポリマー材の安全関連データ参照）

4.6.2 温度特性

安定液は、寒冷地での施工や夏場など施工環境による温度変化に対し、安定した性状が要求される。本研究で用いる高吸水性ポリマー材の温度依存性を確認するため、安定液を所定の温度に設定した恒温恒湿容器に一日静置し、 $F_v=25(\text{sec})$ の性能を持つ高吸水性ポリマー安定液（高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.1\%$ ）の温度に依存した性状（粘度，吸水倍率）の

変化を調べた。なお、使用水にはイオン交換水 ($E_c=2.0\mu\text{S}/\text{cm}$) と水道水 ($E_c=200\mu\text{S}/\text{cm}$) を用いた。

(1) 試験方法

- ・ 事前に使用水性状を測定したイオン交換水及び水道水 1000mℓに高吸水性ポリマー材を 1g 投入し 0.5 時間攪拌する。
- ・ インキュベータ (図 4-6-1 参照) に一日ほど入れ, 温度を 5℃, 10℃, 25℃, 35℃, 40℃となるように調整する。
- ・ 各パラメータを測定する。吸水倍率には測定に時間がかかるため, 安定液の温度を保つため, インキュベータ内で実験を実施した。



図 4-6-1 温度調整機 (インキュベータ)

(2) 結果と考察

安定液の温度と電気伝導率の関係を図 4-6-2 に示す。水道水・イオン交換水ともに温度による電気伝導率の違いは見られないことが確認できた。

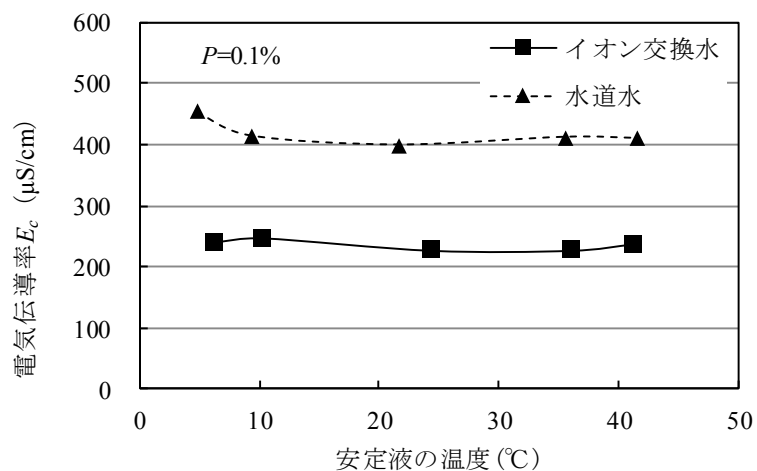


図 4-6-2 安定液の温度と電気伝導率の関係

安定液の温度とファンネル粘性の関係を図 4-6-3 に示す。水道水は温度によりファンネル粘性は大きく変化しないことが確認できた。一方でイオン交換水は安定液の温度が高いほどファンネル粘性が低くなる傾向が見られた。

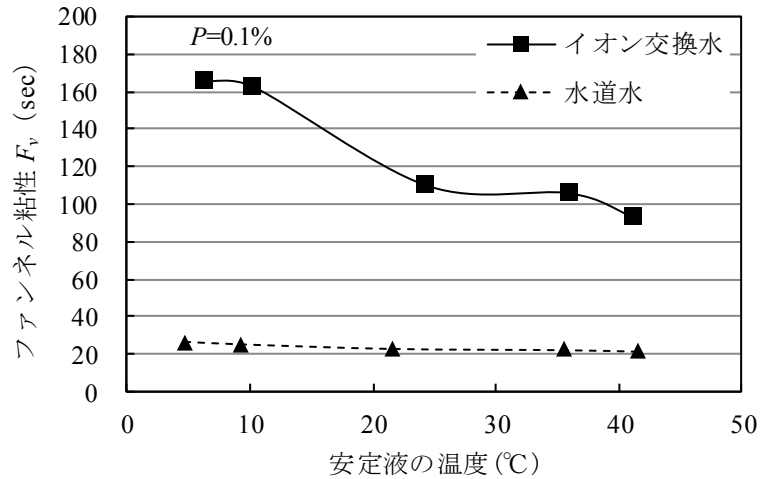


図 4-6-3 安定液の温度とファンネル粘性の関係

安定液の温度と粘度の関係を図 4-6-4 に示す。水道水は温度により粘度は大きく変化しないことが確認できた。一方でイオン交換水は安定液の温度が高いほど粘度が低くなる傾向が見られた。これは粘度の温度依存性が影響していると考えられる。

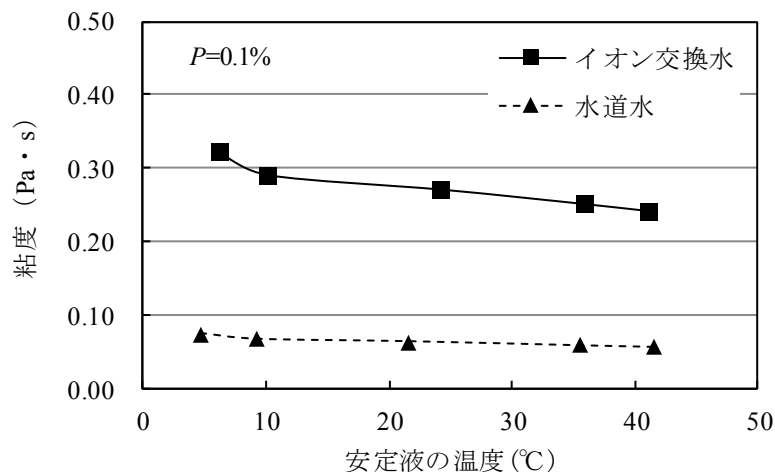


図 4-6-4 安定液の温度と粘度の関係

安定液の温度とろ過水量の関係を図 4-6-5 に示す。水道水・イオン交換水ともに温度によるろ過水量の違いは見られないことが確認できた。

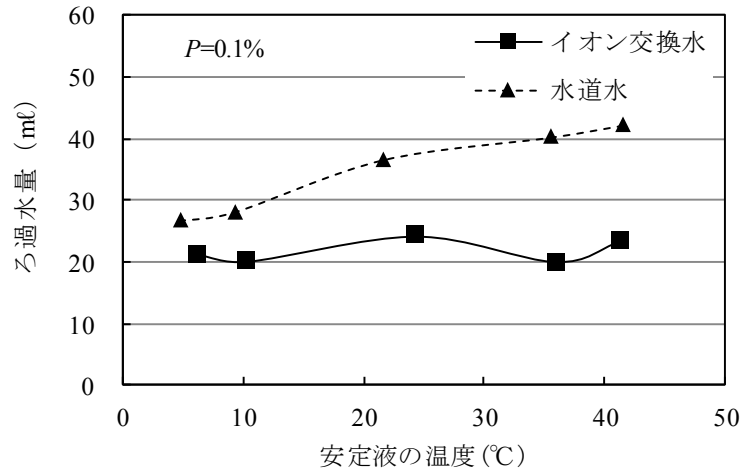


図 4-6-5 安定液の温度とろ過水量の関係

安定液の温度と吸水倍率の関係を図 4-6-6 に示す．水道水・イオン交換水ともに温度による吸水倍率の違いは見られないことが確認できた．

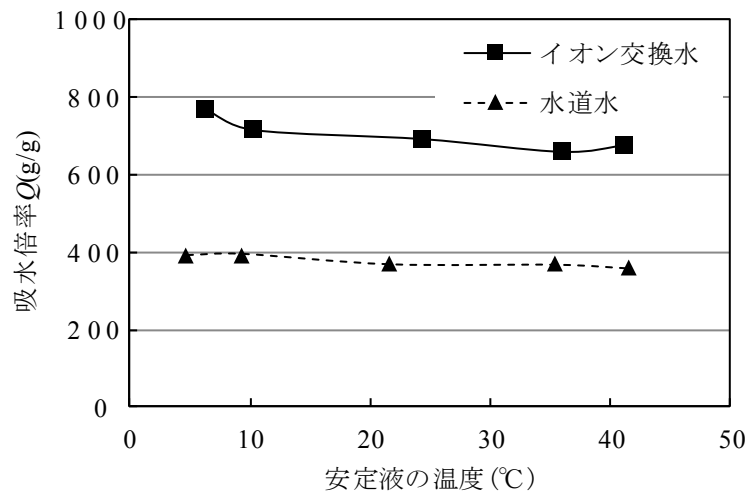


図 4-6-6 安定液の温度と吸水倍率 Q の関係

粘度は温度が高くなる程，低下する傾向が見られたが，一般的な液体は温度が 1 度上昇すると粘度が数%～10%減少するといわれるのに対し，ほぼ影響のない範囲であった．高吸水性ポリマー材の吸水性能も，温度に対し安定していることを確認した．

4.6.3 紫外線の影響

紫外線は太陽から放射される電磁波の一種で，紫外線 (UV : UltraViolet) は波長 10~400 nm の範囲の波長の短い電磁波である．波長が短くなればなるほど電磁波の持つエネルギーは大きくなり，紫外線は

物質に吸収された時，その物質の構造を変化させる作用がある．高分子材料の太陽光紫外線による劣化は，この紫外線の吸収により，光子の持つエネルギーが授与され，高分子材料のポリマー鎖の切断が起こることによって生じる．

紫外線の影響を調べるため， $F_v=25(\text{sec})$ の性能を持つ安定液（高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.1\%$ ）を用意し，ブラックライトで照射するものと暗室に静置するものに分け，所定日数放置後，安定液の性状を比較した．ブラックライト照射による経過日数の換算には，式(13)を用いた．

$$\text{経過日数(日)} = \frac{\text{ブラックライトの照度}(\mu\text{W}/\text{cm}^2) \times \text{照射時間(h)}}{\text{日光の照度}(\mu\text{W}/\text{cm}^2) \times \text{日当たりの日光照射時間(h/日)}} \quad (13)$$

ここで，ブラックライトの照度計の値は $155\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，直射日光の照度計の値は $45.8\mu\text{W}/\text{cm}^2$ を用いた．1日あたりの日光の照射時間は2012年の全国平均日照時間1923.8時間に365日を除いた値である5.3を用いた．

(1) 試験方法

- ・ 事前に使用水性状を測定したイオン交換水 1000ml に高吸水性ポリマー材 1g 投入したものを4つ作り0.5時間攪拌する．
- ・ 作製した安定液の各パラメータを測定する．
- ・ 紫外線を照射するもの，暗室に置くものの2パターンに取り分け，所定時間放置する．放置後，十分に攪拌した安定液を採取し，各パラメータを測定する．（図4-6-7参照）



図4-6-7 放置時の状態（左：紫外線照射 右：暗室）

(2) 結果と考察

経過日数とファンネル粘性の関係を図 4-6-8 に示す。紫外線を当てた場合は 15 日を超えるにつれてファンネル粘性の値は減少していることが分かる。一方で 15 日を超えるまでは紫外線を照射した場合でも安定したファンネル粘性を保持できることが確認できた。

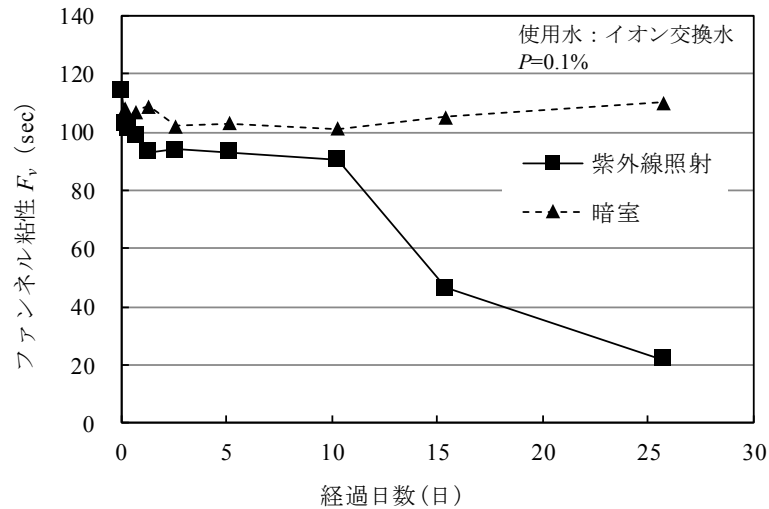


図 4-6-8 経過日数とファンネル粘性の関係

経過日数と粘度の関係を図 4-6-9 に示す。紫外線を当てた場合は 15 日を超えるにつれて粘度の値は減少していることが分かる。一方で 15 日を超えるまでは紫外線を照射した場合でも安定した粘度を保持できることが確認できた。

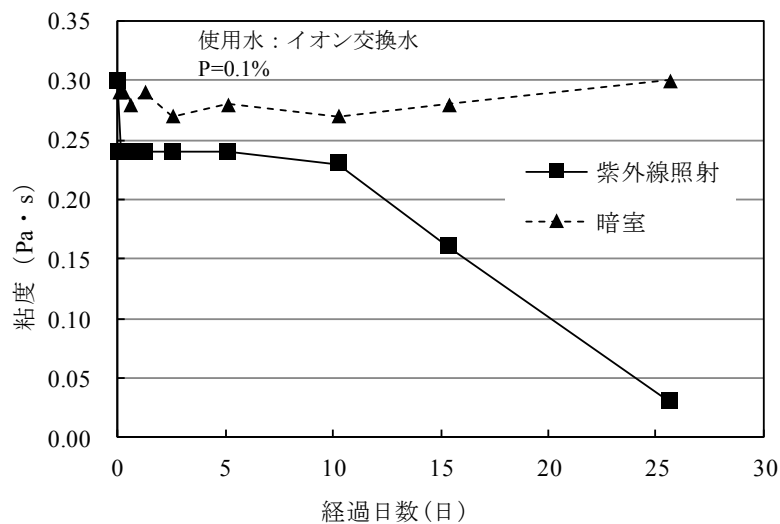


図 4-6-9 経過日数と粘度の関係

経過日数とろ過水量の関係を図 4-6-10 に示す。紫外線を当てた場合は経過日数が 15 日を超えた時にろ過水量が増加することが確認できた。

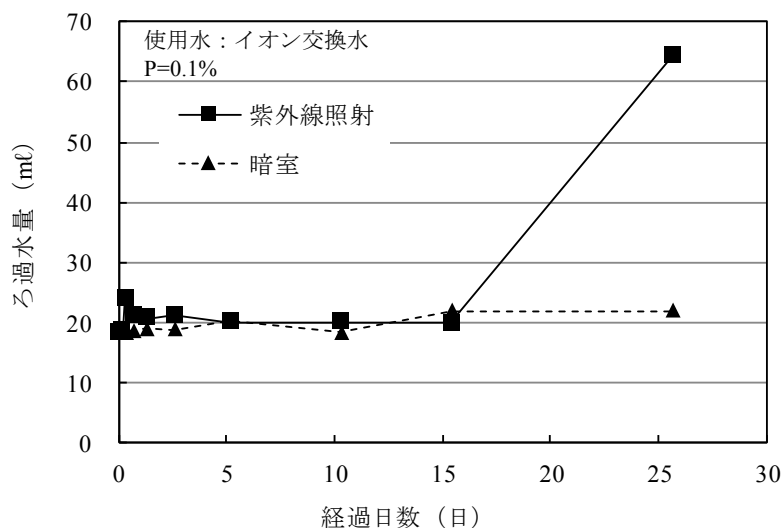


図 4-6-10 経過日数とろ過水量の関係

経過日数と安定液の電気伝導率の関係を図 4-6-11 に示す。紫外線を当てた場合は電気伝導率が微量ながら増加していることがわかる。10 日付近にピークを迎え、それ以降は減少している。

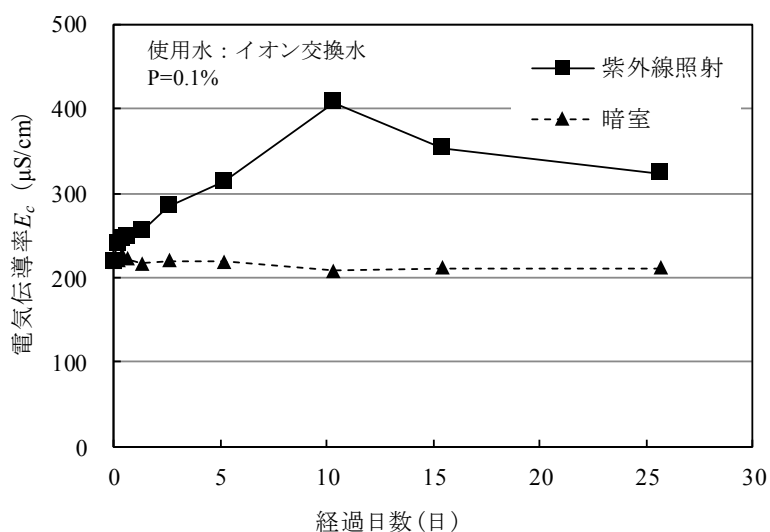


図 4-6-11 経過日数と安定液の電気伝導率の関係

紫外線を照射した場合、粘度は 10～15 日経過後に低下がはじまるとともに、安定液の造膜性能を示すろ過水量も 15 日を超えた頃から増加がはじまっている。一方、暗室に静置した安定液は 25 日程度まで安定した性状を示していることから、高吸水性ポリマー安定液の紫外線による劣化現象が確認された。

このことより、屋外で長期間同じ安定液を使用する場合は、紫外線の影響に留意する必要がある。

4.6.4 pH（水素イオン濃度）の影響

場所打ち杭工法における安定液は、掘削、スライム処理、鉄筋籠建込み、コンクリート打設のサイクルにより繰り返し使用される。安定液の使用頻度が増すごとに、セメントや土中の塩分の混入により、ベントナイト系安定液ではベントナイト微粒子が凝集し、分散安定性を失うなど安定液の劣化が生じる。そのため、従来の安定液は pH9～10 を維持するか、CMC を用いる場合は CMC を腐敗させる土中バクテリアを抑制するため、pH9.5～11.5 で管理される。また、地層の多くは酸性土壌であり、安定液で掘削を行った場合、pH は低下するため、炭酸ソーダなどの pH 調整剤が用いられる。高吸水性ポリマー安定液の初期性状は pH7.5～8.0 の中性域の安定液であり、用いられる高吸水性ポリマー材は比較的広い pH 領域で吸水性能を発揮できる材料である。

使用水（イオン交換水）の pH を塩酸と水酸化ナトリウム溶液を用いて変化させて、 $F_v=25(\text{sec})$ の性能を持つ安定液（高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.1\%$ ）の性状を確認した。

(1) 試験方法

- ・ 事前に使用水性状を測定したイオン交換水1000mlに塩酸または水酸化ナトリウムを投入しpHを4, 5, 6, 7, 8, 9になるように調整する。
- ・ pHを調整した使用溶液に高吸水性ポリマー材を1g投入し、0.5時間攪拌する。
- ・ 各パラメータを測定する。

(2) 結果と考察

使用溶液のpHと使用溶液の電気伝導率の関係を図4-6-12に示す。使用溶液のpHが中性付近だと使用溶液の電気伝導率が低く、使用溶液のpHが酸性・塩基性側だと電気伝導率が高いことが確認できた。これは酸性・塩基性側は溶けているイオン数が多いため、吸収される液中のイオン濃度が増加するとポリマー内部と外部溶液との浸透圧が小さくなるためであると考えられる。

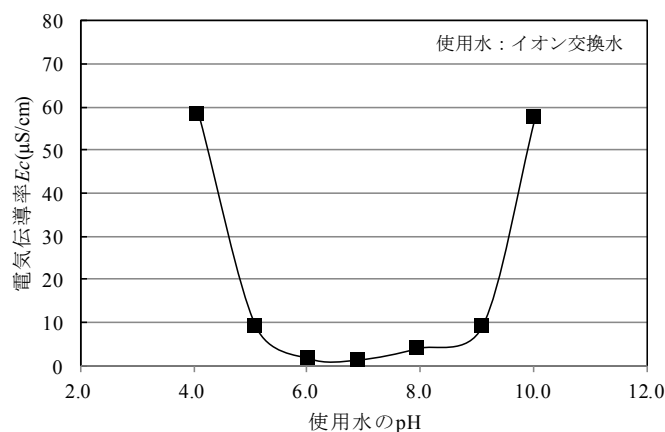


図4-6-12 使用溶液のpHと使用溶液の電気伝導率の関係

使用溶液のpHとファンネル粘性の関係を図4-6-13に示す。使用溶液のpHが中性付近だとファンネル粘性が高く、使用溶液のpHが酸性・塩基性側だとファンネル粘性が低いことが確認できた。

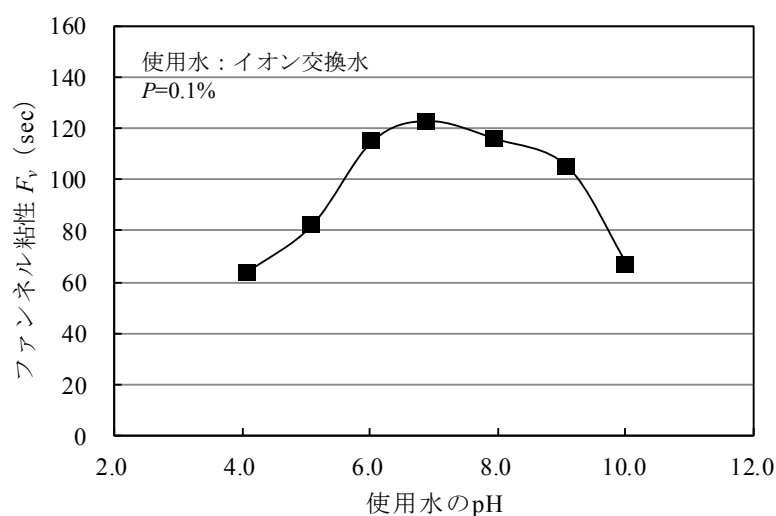


図4-6-13 使用溶液のpHとファンネル粘性の関係

使用溶液のpHと粘度の関係を図4-6-14に示す。使用溶液のpHが中性付近だと粘度が高く、使用溶液のpHが酸性・塩基性側だと粘度が低いことが確認できた。

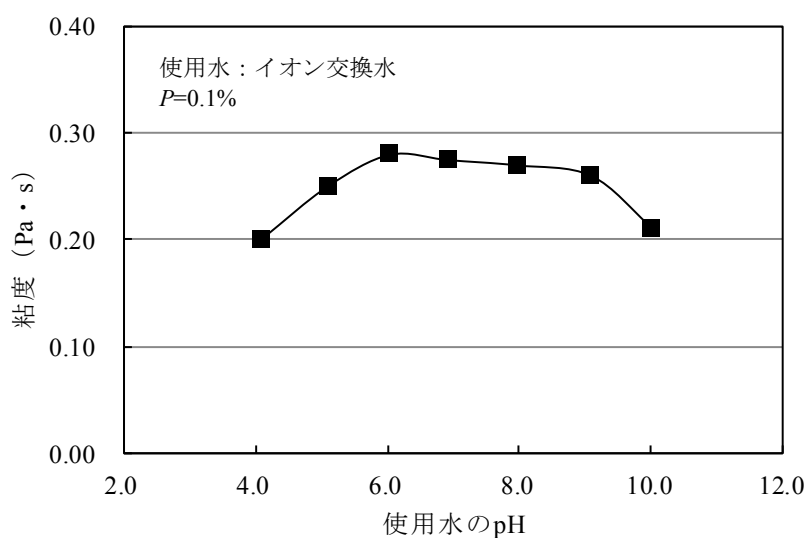


図4-6-14 使用水のpHと粘度の関係

使用溶液のpHと吸水倍率の関係を図4-6-15に示す。使用溶液のpHが中性付近だと吸水倍率が高く、使用溶液のpHが酸性・塩基性側だと吸水倍率が低いことが確認できた。

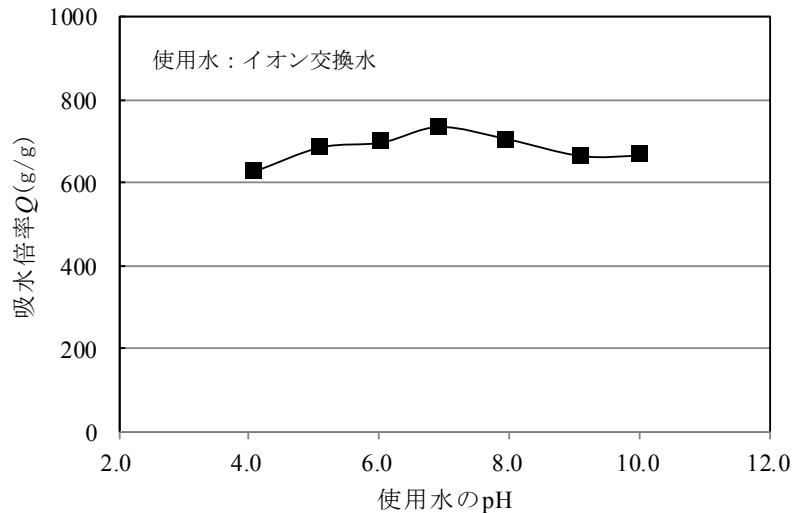


図 4-6-15 使用水の pH と吸水倍率の関係

pH6～9 の範囲外では粘性は 2 割程度粘度低下するものの、吸水性能は pH4～10 の範囲で安定しており、比較的広い pH 領域で使用できることがわかった。

4.7 長期安定性

高吸水性ポリマー安定液の現場での施工においては、安定液中に細粒分が増大することなどにより粘性低下を招くため、安定液の転用性を高めるための事前対策を準備しておく必要がある。そこで増粘剤などの助材を加えたことによる長期安定性の程度を実験により確認することとした。

4.7.1 増粘剤添加による性状変化

増粘剤を添加した場合に安定液の性状がどのように変化するかを確認するための実験を実施した。

(1) 試験方法

- ・ 事前に使用水性状を測定した水道水を、吸水倍率が400倍になるようにNaClで電気伝導率を調整し、高吸水性ポリマー材を所定量投入し、0.5時間攪拌する。
- ・ 高吸水性ポリマー材が十分に溶けきったら、増粘剤を0.005%、0.01%、0.02%、0.05%、0.10%投入し0.5時間攪拌する。
- ・ 各パラメータを測定する。なお増粘剤は、高吸水性ポリマー材を溶かしたのちに投入した。

(2) 結果と考察

増粘剤添加率とファンネル粘性の関係を図4-7-1に示す。増粘剤添加率を増やすほどファンネル粘性も比例的に増加することが確認できた。

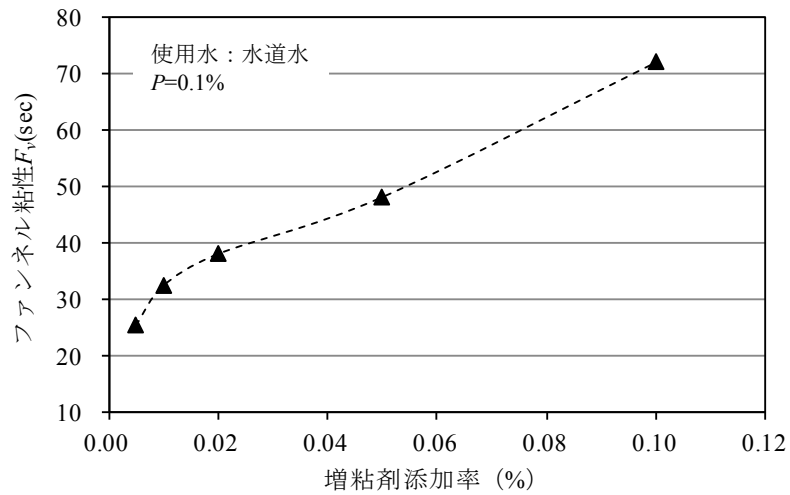


図4-7-1 増粘剤添加率とファンネル粘性の関係

増粘剤添加率と粘度の関係を図4-7-2に示す．増粘剤添加率を増やすほど粘度も比例的に増加することが確認できた．

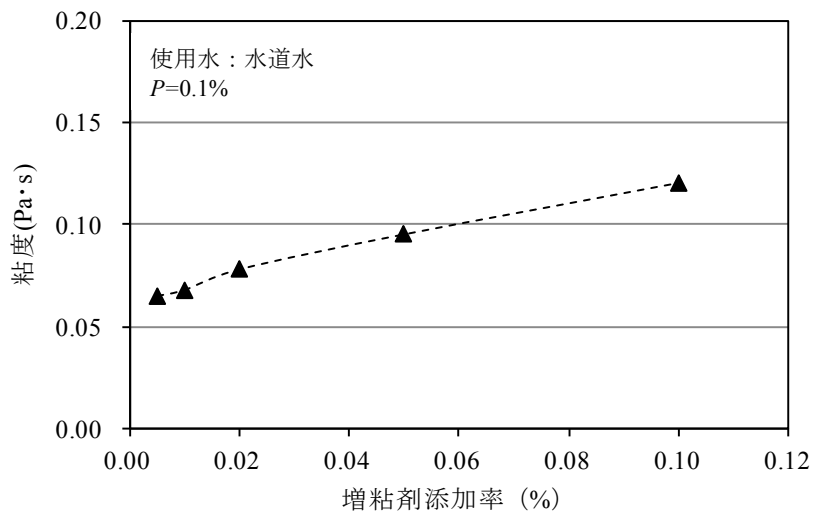


図4-7-2 増粘剤添加率と粘度の関係

増粘剤添加率とろ過水量の関係を図4-7-3に示す．増粘剤添加率を増やすほど，ろ過水量は減少することが確認できた．これは増粘剤が難透水膜の形成に作用したからであると考えられる．

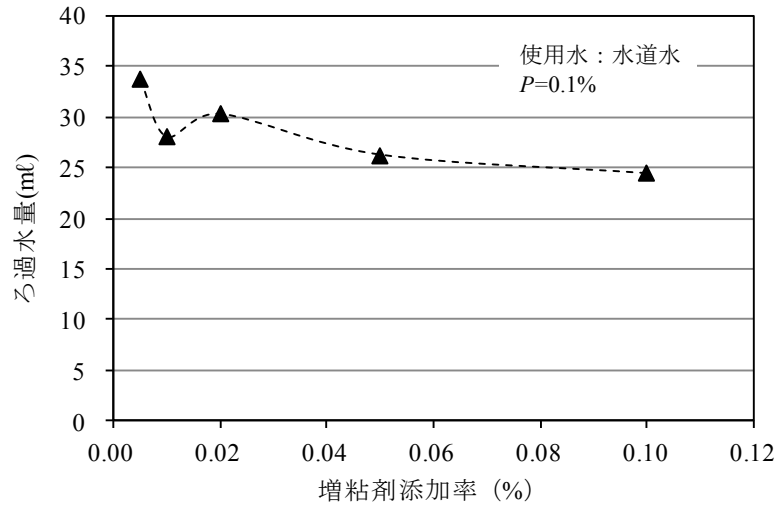


図4-7-3 増粘剤添加率とろ過水量の関係

増粘剤添加率と電気伝導率の関係を図4-7-4に示す。増粘剤添加率を増やすほど電気伝導率も比例的に増加することが確認できた。

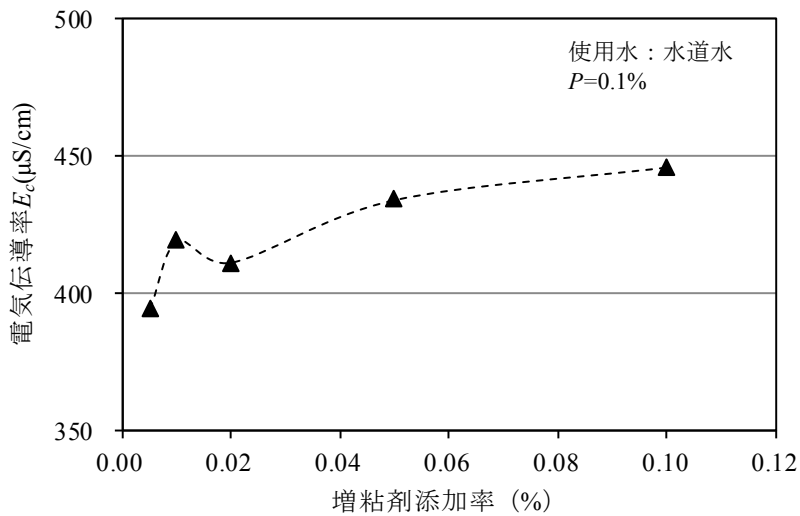


図4-7-4 増粘剤添加率と電気伝導率の関係

余剰水率 η とファンネル粘性 F_v の関係を図4-7-5に示す。余剰水率が同等の値であれば増粘剤添加率を増やすほどファンネル粘性も増加することが確認できた。

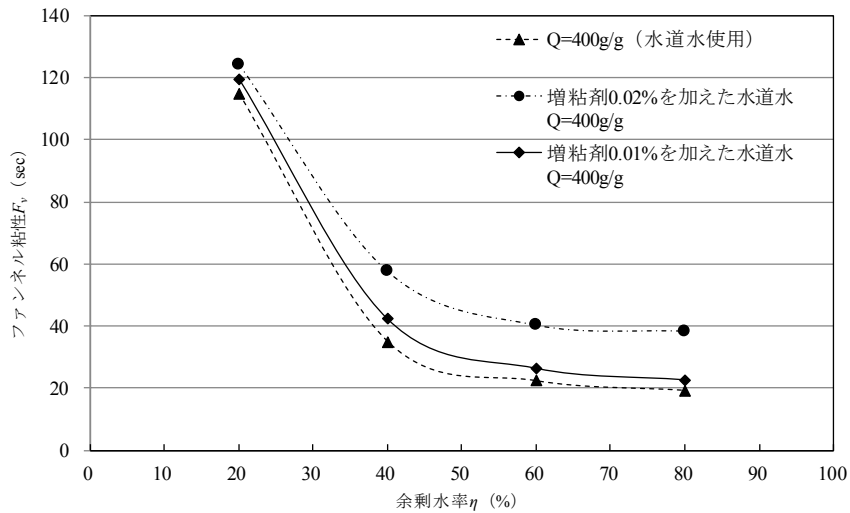


図4-7-5 余剰水率とファンネル粘性

余剰水率と粘度の関係を図4-7-6に示す。余剰水率が同等の値であれば増粘剤添加率を増やすほど粘度も増加することが確認できた。

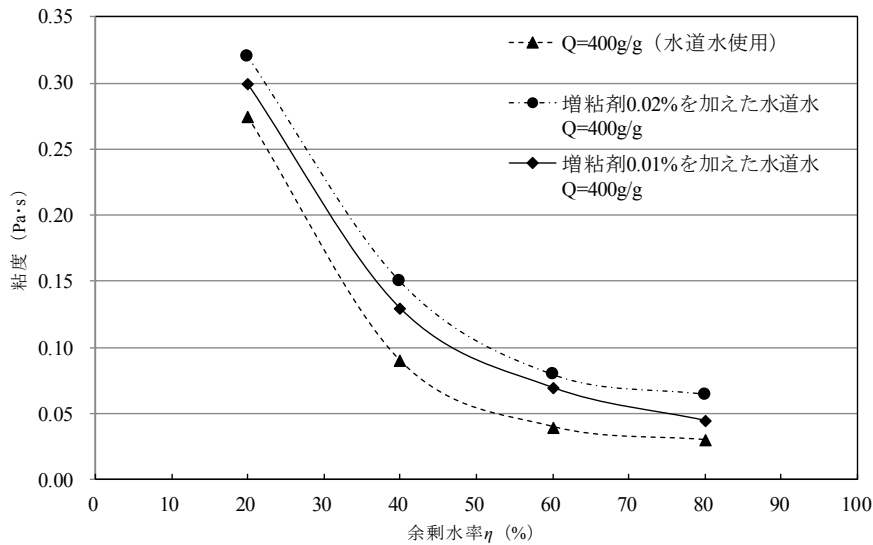


図4-7-6 余剰水率と粘度の関係

以上より、増粘剤の量を調整することによって高吸水性ポリマー安定液の性能の一つである粘性を改善することが確認できた。

4.7.2 細粒分及び増粘剤添加による性状変化

細粒分及び増粘剤を添加することによる高吸水性ポリマー安定液の性状変化を実験により確認した。

(1) 試験方法

- ・ 事前に使用水性状を測定した水道水1000mlに高吸水性ポリマー材を

所定量投入し0.5時間攪拌する。

- ・高吸水性ポリマー材が十分に溶けきったら、添加率0.005%、0.020%、0.100%の割合で増粘剤を投入し0.5時間攪拌する。
- ・増粘剤が十分に溶けきったら、添加率1%、2%、5%、10%、12%、14%の割合で細粒分(カオリン)を投入し十分に攪拌する。
- ・各パラメータを測定する。

(2) 結果と考察

増粘剤添加率ごとの細粒分(カオリン)添加率と比重の関係を図4-7-7に示す。細粒分添加率が増加するほど比重も増加することが確認できた。

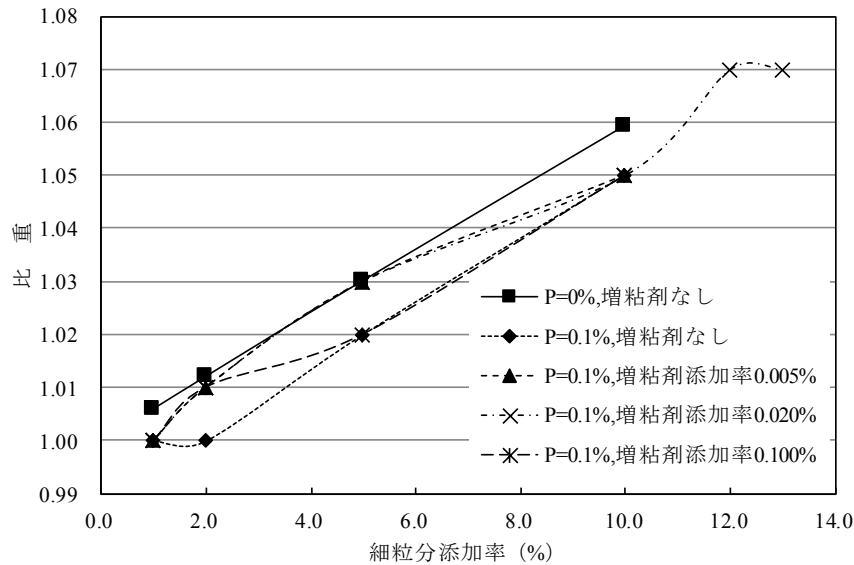


図4-7-7 細粒分添加率と比重の関係

細粒分添加率とファンネル粘性の関係を図4-7-8に示す。細粒分添加率が増加してもファンネル粘性は大きく変化しないことが確認できた。

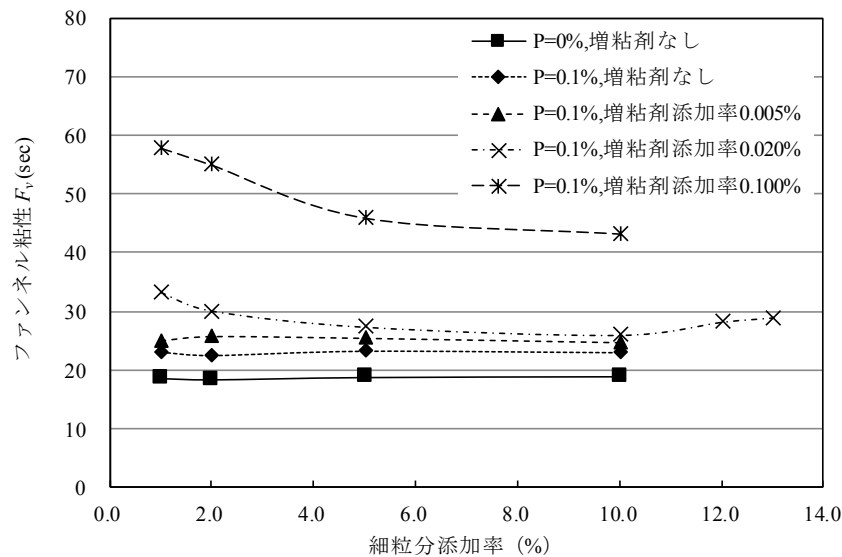


図4-7-8 細粒分添加率とファンネル粘性の関係

細粒分添加率と粘度の関係を図4-7-9に示す。細粒分添加率が増加しても粘度は大きく変化しないことが確認できた。

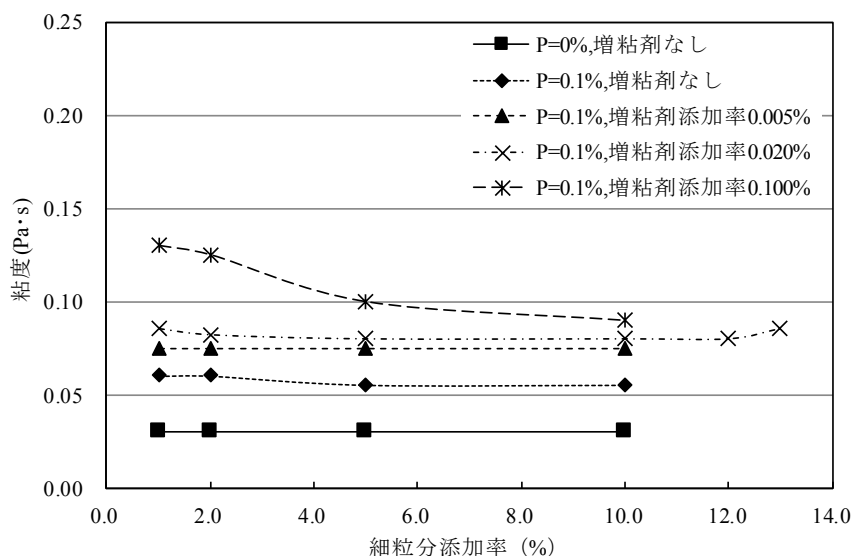


図4-7-9 細粒分添加率と粘度の関係

細粒分添加率とろ過水量の関係を図4-7-10に示す。細粒分添加率が増加すると、ろ過水量が微量であるが増加することが確認できた。これは細粒分が水を通しにくい膜の形成を阻害したことが原因と考えられる。また増粘剤の添加量が多いほどろ過水量が減少することが確認できた。

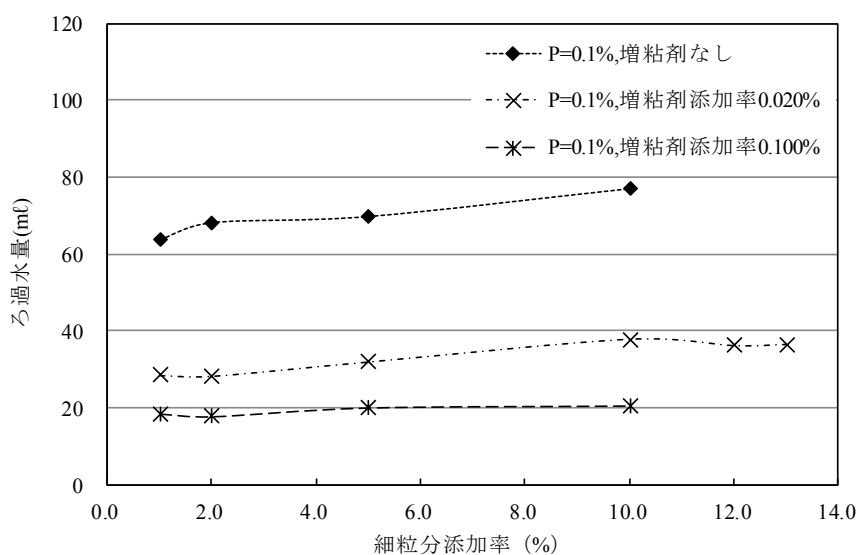


図4-7-10 増粘剤添加率とろ過水量の関係

以上より、細粒分を添加することにより比重とろ過水量が増加するが、粘性への影響度は低いことが確認できた。

4.7.3 長期安定性試験

高吸水性ポリマー安定液の長期安定性を把握するため、上下分離モールドを用いた確認実験を実施した。

(1) 試験方法

- ・上下分離モールドに高吸水性ポリマー安定液を入れ、24時間、72時間放置したあと、分離状況及び性状変化を確認する。(図4-7-11参照)
- ・配合としては、増粘剤と細粒分(カオリン)を添加していないもの、増粘剤0.02gもしくは細粒分10gまたは50gのみ添加したもの、増粘剤0.02gと細粒分10g添加したもの、増粘剤0.02gと細粒分50g添加したものを実験ケースとする。
- ・放置後、上部モールドから安定液を採取し各性状を確認する。



図4-7-11 上下分割モールド

(2) 試験結果と考察

経過日数と比重の関係を図4-7-12に示す。日数経過に伴い比重が減少することが確認された。増粘剤0.02gかつ細粒分50gの配合以外の安定液は1日で比重1.00まで減少するのに対し、増粘剤0.02gかつ細粒分50gに配合した安定液は3日経過しても比重1.01までしか減少しなかった。これは増粘剤が作用して細粒分の沈降を抑制したと考えられる。

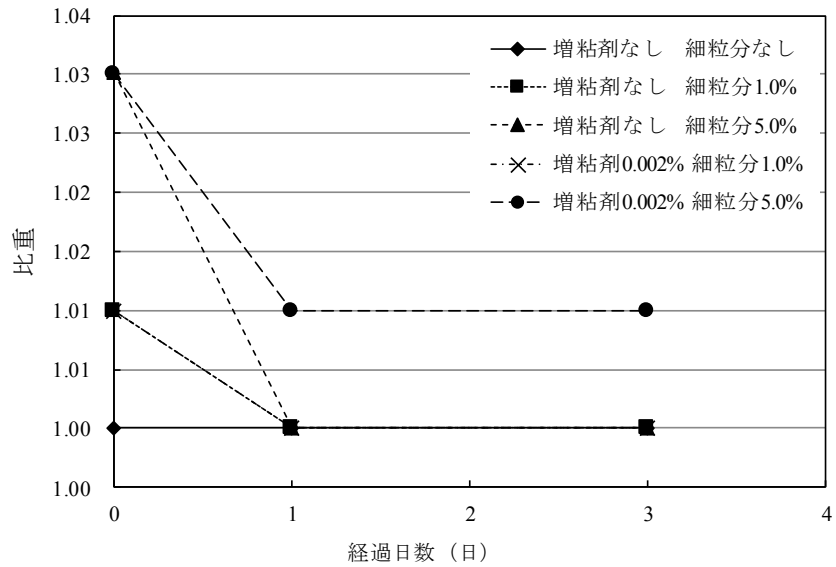


図4-7-12 経過日数と比重の関係

経過日数とファンネル粘性の関係を図4-7-13に示す。日数経過に伴いファンネル粘性が減少するが、増粘剤の混入により減少傾向は緩和されることが確認された。

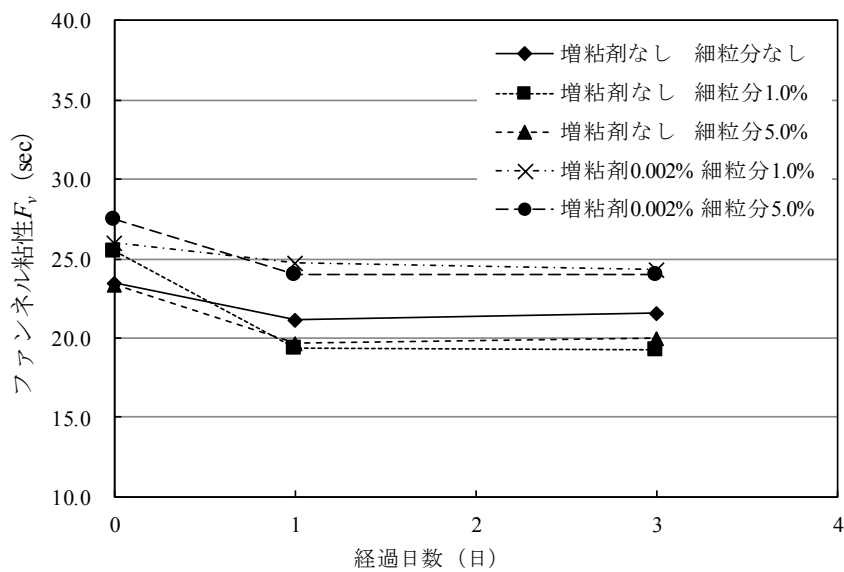


図4-7-13 経過日数とファンネル粘性の関係

経過日数と粘度の関係を図4-7-14に示す。日数経過に伴い粘度が減少するが、増粘剤の混入により減少傾向は緩和されることが確認された。

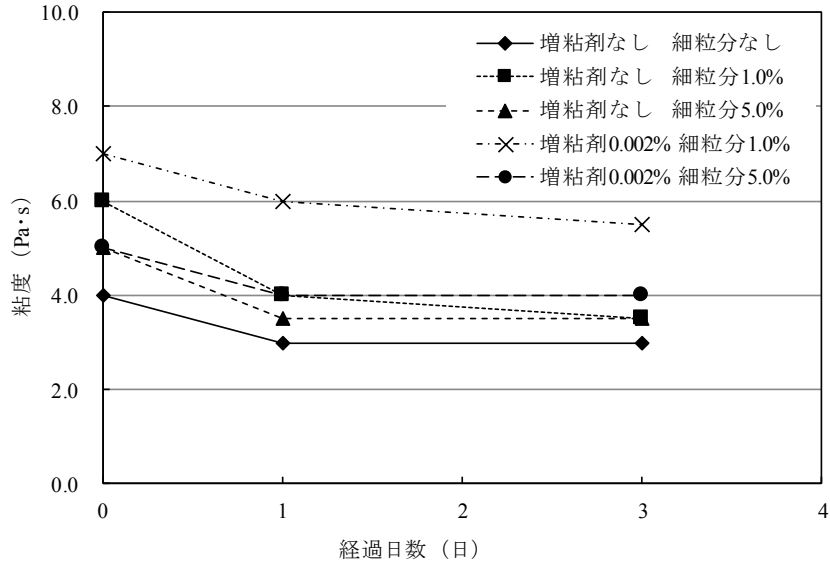


図4-7-14 経過日数と粘度の関係

経過日数とろ過水量の関係を図4-7-15を示す。日数経過に通じてろ過水量は安定的あることが分かる。

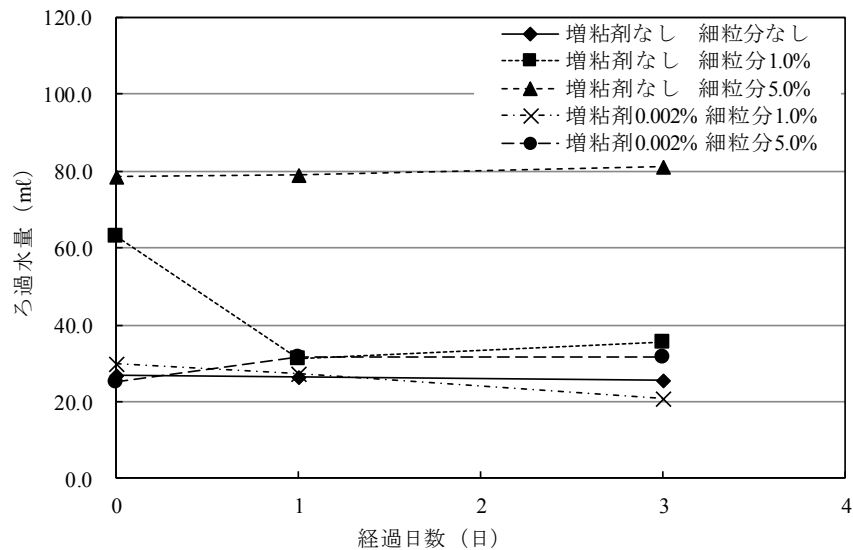


図4-7-15 経過日数とろ過水量の関係

図4-7-13, 図4-7-14の示すように粘性が減少しているにも関わらず, 図4-7-15に示すろ過水量が変化しない理由についての考察を以下に示す。

一般にろ過水量は粘性の低下と添加した細粒分の影響で増大する。本実験では模式的に示した図4-7-16のように上部モールドの細粒分の濃度が日数経過とともに低下するため, 粘性低下するにもかかわらずろ過水量が増大しなかったと考えられる。

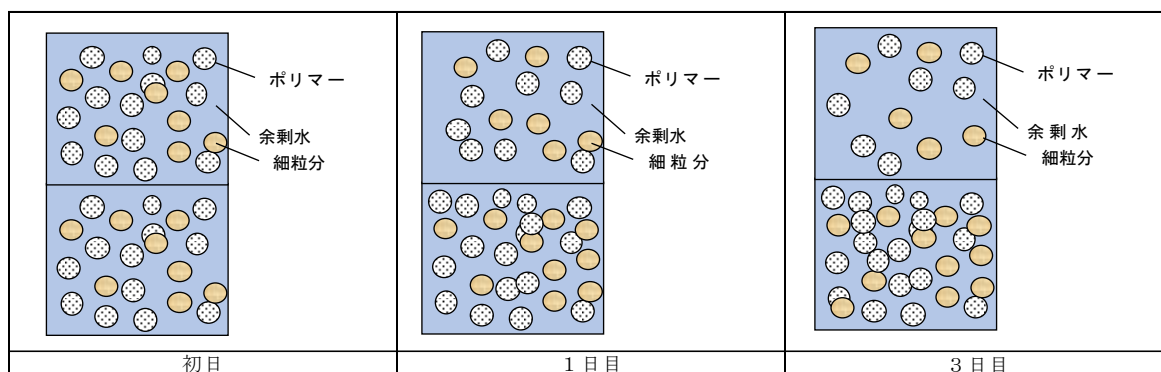


図4-7-16 上下モールド試験の模式図

以上の実験により，高吸水性ポリマー安定液に増粘剤を添加することによって懸濁保持性が良好になり，細粒分の増大による高吸水性ポリマー安定液の劣化を抑制できることが確認できた。

4.8 まとめ

高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭への適用性を検証するために実施した実験の着目点は7項目にわたり，結果及び考察を含めて以下に示すとともに，既往の安定液との比較において優位性を発揮することを明らかにした。

(1) 孔壁安定性

まず施工上の課題となる孔壁安定性については，まず高吸水性ポリマー安定液が透水性の高い地盤においても難透水層を形成し孔壁の安定化を図れることを確認するために，拡底杭を模擬した安定性確認実験を実施した。水槽内に仕切り板を挟んで試料土と高吸水性ポリマー安定液を入れた状態で仕切り板を撤去しても試料土の崩壊はなく安定であることを確認した。

次に安定液の遮水性能確認試験装置を用いて，粒径の異なる模擬砂地盤に対するポリマー安定液と既往のベントナイト系安定液の遮水性能を比較した。ベントナイト系安定液の場合，粒径の粗い硅砂3号及び5号では，安定液により難透水層を形成できず透過したが，高吸水性ポリマー安定液の場合，いずれの模擬地盤においても透水係数 10^{-7}m/s 程度の難透水層が形成され，ベントナイト系安定液よりも粗粒分を多く含む地盤への適用が可能であると判断された。さらに，両安定液が難透水層を形成できた硅砂7号において，難透水層形成までの時間が，ベントナイト系安定液91(sec)に対し，高吸水性ポリマー安定液は48(sec)と約半分の時間で難透水層が形成され，透水量も約半分となっている実験結果から優れた孔壁安定性を有していることが確認された。この結果，ポリマー安定液の遮水性能を発揮できる適用地盤の粒径範囲がベントナイト系安定液よりも広く，

かつ遮水性能を発揮するまでに要する時間も短いことが判明し、優れた遮水性能を有することがわかった。

(2) 流動性

流動性については、既往の安定液の流動性を表す指標であるファンネル粘性に着目して、高吸水性ポリマー安定液のファンネル粘性を調査した。第 3 章で得られた余剰水率と粘度の関係から、ファンネル粘性は余剰水率の概ね-2 乗に比例する近似式で求めることができるとともに、高吸水性ポリマー安定液の流動性は、安定液中の吸水したポリマー材以外の余剰水率 η に支配され、余剰水率 η は高吸水性ポリマー材の添加量により調節が可能であることがわかった。また、安定液としての適切な流動性（粘性）を得るには、使用水の電気伝導率 E_c を測定することにより吸水性能（吸水倍率 Q ）を推定し、高吸水性ポリマー材の添加量を変更することで柔軟に対応できることが分かった。

(3) 適用深度

適用深度については、加圧が可能なベーンせん断試験装置を用いて、掘削深度 50m 程度に相当する地下水圧下における高吸水性ポリマー安定液と水道水のベーンせん断抵抗を比較した。その結果、加圧に伴う高吸水性ポリマー安定液の体積変化は観察されず、加圧前と加圧後のファンネル粘性の性状変化も生じなかった。また、各加圧条件下での安定液のベーンせん断抵抗も、徐々に抵抗値が増すものの、ベントナイト系安定液、水道水と同様に大きな変化は生じなかった。この結果より、ほぼ飽和状態にある高吸水性ポリマー安定液は掘削深度 50m 程度に相当する地下水圧の範囲（490kPa）では、実施工等での検証が必要であるものの、安定液としての性能は保持できるものと判断された。

(4) 土砂分離特性

高吸水性ポリマー安定液は、塩化カルシウムなどを添加して余剰水を含む溶媒の電気伝導率を上昇させることでポリマー材に吸着されていた水が溶出し、懸濁状態が崩れてポリマー材が土粒子とともに沈降して、安定液の上澄み部分として排水基準を満足する水が分離でき、廃液の減量化が図れる特性を有する。この特性を定量化するため、比重の異なる安定液の分離試験を実施し、安定液の比重が 1.05 以下であれば分離度は 70%以上が確保できるが、比重 1.1 では約 40%、1.15 では約 20%となり、分離性能は安定液の比重が大きいほど固体泥土分が多いので分離量が少なくなる傾向にあることを明らかにした。

(5) 場所打ち杭本体への影響

既往の安定液では、場所打ち杭本体の品質に悪影響を与えることが課題として残されており、高吸水性ポリマー安定液がその改善に効果を発揮で

きるかを検証するため、コンクリート置換性・出来形確保性・コンクリートと鉄筋の付着性能に関する実験を実施した。

まず杭本体を造成するコンクリートの置換性について、水槽内に満たした高吸水性ポリマー安定液にコンクリートを底部から打設した置換性確認実験を実施し、問題がないことを確認した。

次に杭本体の出来形に係る泥膜厚さについて、既往の安定液のろ過試験装置を用いて、安定液中の粘土分混入率を変化させた場合のポリマー安定液と既往のベントナイト系安定液のろ紙に付着した泥膜厚さを比較した。その結果、既往の安定液では粘土分混入率の増加に伴い泥膜厚さが1mm程度から急激に増大するのに対して、ポリマー安定液の場合は0.5mm程度で十分薄く、粘土混入率に無関係に一定であることを確認し、泥膜によるマッドケーキの増大で杭径を縮小させる恐れがないと判断され、既往の安定液に比べ杭径の確保、周面摩擦力の向上が期待できることがわかった。

また、高吸水性ポリマー安定液の鉄筋付着への影響を確認するため、安定液をコンクリートで置換した供試体の鉄筋引き抜き実験を実施した。その結果、高吸水性ポリマー安定液に浸した鉄筋付着応力度は、ベントナイト系安定液の場合と比べて、約4～7%高い付着応力度が得られ、杭本体の品質向上が期待できると判断された。

(6) 環境特性

高吸水性ポリマー安定液の環境特性（材料特性・温度特性・紫外線の影響・pHの影響）について、それぞれ調査及び実験を行い、使用に当たり環境的負荷をかけないこと・使用環境上の適応性がよいことを確認した。

材料特性について、高吸水性ポリマー材は太陽光、特に紫外線に当たると徐々に分解し、架橋が切れて非架橋の水溶性ポリアクリル酸ソーダとなるが、この非架橋ポリアクリル酸ソーダは国内で食品添加物として認可されている物質であり、環境汚染への影響は低い。

温度特性については、温度が高くなるほど粘度は低下する傾向が見られたが、一般的な液体では温度が1度上昇すると粘度が数%～10%減少するといわれるのに対し、ほぼ影響のない範囲であった。また高吸水性ポリマー材の吸水性能も温度に対し安定していることを確認した。

紫外線の影響については、粘度は紫外線を照射して10～15日経過後に粘度低下がはじまるとともに、安定液の造膜性能を示すろ過水量も15日を超えた頃から増加がはじまる。一方、暗室に静置した安定液は25日程度まで安定した性状を示していることから、高吸水性ポリマー安定液の紫外線による劣化現象が確認された。このことより、屋外で長期間同じ安定液を使用する場合は、紫外線の影響に留意する必要がある。

pH の影響については、pH6～9 の範囲外では粘性は 2 割程度粘度低下するものの、吸水性能は pH4～10 の範囲で安定しており、比較的広い pH 領域で使用できることがわかった。

(7) 長期安定性

高吸水性ポリマー安定液の施工時における長期安定性を確保するための事前対策を準備しておくために、増粘剤などの助材を加えた効果や性状変化を実験的に確認した。

増粘剤の効果について、増粘剤が難透水膜の形成に作用することで増粘剤添加率を増やすほど過水量は減少し、増粘剤の量を調整することによって高吸水性ポリマー安定液の性能の一つである粘性（孔壁安定性）が改善されることが確認できた。また細粒分増大への対応性に係る実験の結果、高吸水性ポリマー安定液に増粘剤を添加することによって懸濁保持性が良好になり、細粒分の増大による高吸水性ポリマー安定液の劣化を抑制できることが確認できた。

以上の一連の実験的検証の結果、高吸水性ポリマー安定液は既往の安定液と比べ優れた特性を有した場所打ち杭工法用の安定液として現場適用できると判断された。

第 5 章 高吸水性ポリマー安定液の現場管理手法

第 5 章 高吸水性ポリマー安定液の現場管理手法¹⁷⁾

5.1 管理項目および管理限界値

場所打ち杭工法における安定液の最も重要な作用として掘削時の孔壁の崩壊防止と、掘削を円滑に行うことを助ける働き、掘削終了後長い時間を経ても安定液に混入している砂やシルト分を主体とするスライムを沈殿させない効果があげられる。また、コンクリート打込み時には、掘削中に混入したスライムの分離を容易に行え、かつ安定液がコンクリートに混入されることのない置換性が必要である。

これらの性能指標を支配する管理指標として、安定液の濃度、砂の混入程度は安定液の比重により推定でき、安定液の流動性は粘性により知ることができる。また、孔壁の安定性は安定液が地盤への浸透過程において不透水膜を形成する造壁性に関係し、ろ過試験により性能を確認できる。安定液の性質を最も悪化させるセメントの混入に対しては pH 試験で、掘削完了後の孔底に沈積するスライムの有無については砂分率測定で安定液の状態を知ることができ、各基準値を設け管理している。既往の安定液の管理基準値の例^{13) 14)}を表 5-1-1 に示す。

表 5-1-1 既往の安定液の管理基準の例

管理項目	管理基準値	要調整範囲
比重	1.02~1.15	1.15~1.20
ファンネル粘度	21~30sec	30~35sec
ろ過水量	≤ 30mℓ	30~40mℓ
砂分率	≤ 5%	5~10%
pH	7~10.5	7以下, 10.5以上

高吸水性ポリマー安定液は、高吸水性ポリマー材が安定液の材料として最も主要な材料であり、安定液に所要の粘性を与え、孔壁に保護膜を形成する性質を付与する。

そのため、高吸水性ポリマー安定液の特性と要求性能に関する実験結果から、高吸水性ポリマー安定液の現場適用における管理項目として、安定液の流動性と懸濁安定性に着目した。

高吸水性ポリマー安定液の流動性および懸濁安定性は、安定液中の吸水した高吸水性ポリマー材以外の余剰水率 η に支配され、高吸水性ポリマー材の添加量は、安定液使用水の電気伝導率 E_c と高吸水性ポリマー材の吸水倍率 Q により決定される。

管理基準および調整範囲を含む安定液の流動性は、表 5-1-1 によればファンネル粘度 $F_v = 21 \sim 35(\text{sec})$ の範囲である。図 4-2-2 と式(10)に

よれば、余剰水率 $\eta=53.3\% \sim 69.1\%$ の範囲において、適正な流動性および懸濁性を保持できることがわかる。

したがって、所定のファンネル粘性 F_v (sec) の高吸水性ポリマー安定液 1.0m^3 を得るのに必要な高吸水性ポリマー材の添加量 m_p (kg) は以下の手順で求められる。

式(10)を変形すると、余剰水率 η (%) は式(14)で表される。

$$\eta = \left(\frac{F_v}{86197} \right)^{\left(\frac{1}{1.964} \right)} \quad (14)$$

一方、使用溶媒の電気伝導率が E_c ($\mu\text{S}/\text{cm}$) の場合、その使用水における高吸水性ポリマー材の吸水倍率 Q は、式(9)より式(15)で求められる。

$$Q = \frac{1}{(3 \times 10^{-6} \times E_c + 0.0015)} \quad (15)$$

以上より、高吸水性ポリマー安定液の密度を $1000(\text{kg}/\text{m}^3)$ と仮定すると、必要な高吸水性ポリマー材量 m_p (kg) は、式(16)より求められる。

$$m_p = \frac{1000}{Q} \times \left(\frac{(100 - \eta)}{100} \right) \quad (16)$$

本研究で用いた高吸水性ポリマー材の添加量は、上記により算定可能であるが、使用する高吸水性ポリマー材を変更する場合には、ファンネル粘性と余剰水率の関係式(10)を明らかにし、これを式(14)、(15)、(16)に反映することで算定可能である。また、高吸水性ポリマー材の吸水性能は、使用溶媒の電気伝導率 E_c に依存するため、高吸水性ポリマー材を添加する使用溶媒の電気伝導率 E_c は、高吸水性ポリマー安定液管理の重要な指標である。

そのため、高吸水性ポリマー安定液の現場適用における管理項目として、従来の比重、ファンネル粘性、ろ過水量、砂分率、pH に加えて、電気伝導率 E_c を追加した。

例えば、通常の水道水 ($E_c=200\mu\text{S}/\text{cm}$) を用いた場合の吸水性能の $1/2$ 程度、吸水倍率 $Q=200$ (g/g) を限界値として式(15)より電気伝導率 E_c の管理値を設定すると、 $E_c=1167\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下となる。このとき、必要となる高吸水性ポリマー材添加量は、 $\eta=69.1\%$ とすると式(16)により安定液 1m^3 あたり 1.5 (kg) 程度が必要となる。以上の考察を取りまとめた高吸水性ポリマー安定液の管理基準の例を、表 5-1-2 に示す。

表 5-1-2 高吸水性ポリマー安定液の管理基準の例

管理項目	管理基準値	要調整範囲
比重	1.02～1.15	1.15～1.20
ファンネル粘度	21～30sec	30～35sec
ろ過水量	≤ 30ml	30～40ml
砂分率	≤ 5%	5～10%
pH	6～10	6以下, 10以上
電気伝導率 E_c	1000 μ S/cm以下	1000～1500 μ S/cm

5.2 現場管理フロー

安定液は、掘削地盤に応じて孔壁安定性等の所要性能を満足する安定液となるよう配合することが重要である。また施工中は、土砂、地下水等の混入により安定液の性状が変化していくため、表 5-1-2 のような安定液の管理基準を設定し安定液の状態を適切に管理していくことが必要となる。高吸水性ポリマー安定液の現場管理フローを図 5-1-1 に示す。

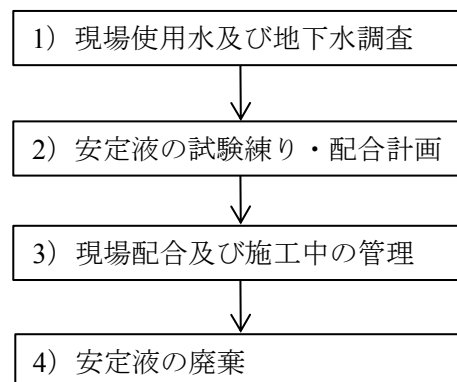


図 5-1-1 安定液管理フロー

(1) 現場使用水及び地下水の事前調査

高吸水性ポリマー材は、使用水に含まれる陽イオン濃度によって生じる浸透圧作用により吸水膨潤するため、周辺の陽イオン濃度が高い（=電気伝導率 E_c が大きい）場合、吸水性能が低下し安定液の粘性に大きな影響を及ぼす。そのため、現場適用にあたっては、安定液を作液するための使用水及び掘削対象地盤の地下水の電気伝導率 E_c 、pH 等の性状を予め調査する必要がある。

(2) 安定液の試験練り・配合計画

現場適用の際には、事前調査で採取した使用水や地下水による安定液の試験練りを行い、安定液が所要性能（比重、ファンネル粘性、ろ過水量、pH、 E_c 等）を確保できるか確認することが望ましい。また、式(16)により高吸水性ポリマー材の添加量を決定する。

(3) 現場配合及び施工中の管理

(2)より決定した配合計画に基づき現場で安定液を配合し、所要性能を確保できるか品質管理試験を実施する。施工中は循環使用することにより安定液の性状が変化していくため、適正な安定液性状であるかについて表 5-1-2 に示すような安定液管理基準値を設定し、工事の進捗にあわせ適宜試験を行い安定液の状態を管理する。

また、試験の測定値が管理基準値に適合しない場合には、調整可能範囲であれば管理基準内に入るよう再配合を行う。従来のベントナイト系安定液の場合、要調整範囲の安定液に凝集抑制の分散剤、炭酸ソーダ等の pH 調整剤などの薬剤が使用される。しかしながら、高吸水性ポリマー安定液の場合、これらの薬剤によって電気伝導率が高くなる場合があるので、高吸水性ポリマー材の吸水性能低下の要因となるため、使用には留意する必要がある。やむを得ず電気伝導率が高くなった場合は、加水または新液の追加により電気伝導率の低下を図る、もしくは高吸水性ポリマー材の追加により再調整を行う。

(4) 安定液の廃棄

施工完了時や施工場所の移動に際して、安定液を廃棄する必要がある場合、高吸水性ポリマー安定液は前述のように安定液中の浮遊土砂と水成分とに容易に分離することができ、産廃処分量の低減を図ることができる。分離にあたっては、分離特性に関わる比重、pH を事前に確認するとともに、ビーカーレベルの分離試験を実施し、分離材（塩化カルシウム、pH 調整剤等）の配合を決定する。

また、分離を行う安定液貯留水槽は、長期間使用している場合、水槽底部に泥土が堆積し安定液比重に大きく影響するため、事前分離試験結果とは必ずしも整合しない場合があることに留意する必要がある。安定液産廃処分量の減量化に際し分離水を下水道等に排出する場合は、所管の排出基準等（pH、濁度等）に準拠し、適宜検査を行い排出する必要がある。

5.3 まとめ

高吸水性ポリマー安定液を場所打ち杭工法に適用するにあたり、第 3 章及び第 4 章で示した各種実験で得られた知見に基づき、管理手法を具体化した。

既往の安定液の管理項目は、安定液の濃度・砂の混入程度を推定するための比重、安定液の流動性がわかるファンネル粘性、孔壁の安定性に直接関係する不透水膜を形成する造壁性能を確認できるろ過水量、スライムの有無を知ることができる砂分率、安定液の性質を最も悪化させるセメントの混入程度がわかる pH の 5 項目からなり、適正な使用のために項目ごとの管理基準値を定めている。

高吸水性ポリマー安定液の流動性および懸濁安定性は、安定液中の吸水した高吸水性ポリマー材以外の余剰水率 η に支配され、高吸水性ポリマー材の添加量は、安定液使用水の電気伝導率 E_c と高吸水性ポリマー材の吸水倍率 Q により決定される。そのため、高吸水性ポリマー安定液の現場適用における管理項目としては、従来の比重、ファンネル粘性、ろ過水量、砂分率、pH に加えて、電気伝導率 E_c を追加することとし、管理基準値を通常の水道水 ($E_c=200\mu\text{S}/\text{cm}$) を用いた場合の吸水性能の 1/2 程度、吸水倍率 $Q=200$ 倍程度となる電気伝導率 $E_c=1000\mu\text{S}/\text{cm}$ とした。

施工中の安定液は土砂・地下水等の混入により性状変化していくため、管理基準に基づき管理していく必要があり、高吸水性ポリマー安定液の現場管理フローを以下の 4 つの手順のとおりまとめた。

(1) 現場使用水及び地下水の調査

高吸水性ポリマー材は、使用水の陽イオン濃度が高い (=電気伝導率 E_c が大きい) 場合、吸水性能が低下し安定液の粘性に大きな影響を及ぼすため、使用水及び掘削対象地盤の地下水の電気伝導率 E_c 、pH 等の性状を予め調査する必要がある。

(2) 安定液の試験練り・配合計画

現場適用の際には、事前調査で採取した使用水や地下水による安定液の試験練りを行い、安定液が所要性能 (比重、ファンネル粘性、ろ過水量、pH、 E_c 等) を確保できるか確認することが望ましい。また、高吸水性ポリマー材の添加量を決定する。

(3) 現場配合及び施工中の管理

決定した配合計画に基づき現場で安定液を配合し、所要性能を確保できるか品質管理試験を実施する。施工中は循環使用することにより安定液の性状が変化していくため、適正な安定液性状であるかについて表 5-1-2 に示すような安定液管理基準値を設定し、工事の進捗にあわせ適宜試験を行い安定液の状態を管理する。

また、試験の測定値が管理基準値に適合しない場合には、調整可能範囲であれば管理基準内に入るよう再配合を行う。従来のベントナイト系安定液の場合、要調整範囲の安定液に凝集抑制の分散剤、炭酸ソーダ等の pH 調整剤などの薬剤が使用される。しかしながら、高吸水性ポリマー安定液

の場合、これらの薬剤によって電気伝導率が高くなる場合があるので、高吸水性ポリマー材の吸水性能低下の要因となるため、使用には留意する必要がある。やむを得ず電気伝導率が高くなった場合は、加水または新液の追加により電気伝導率の低下を図る、もしくは高吸水性ポリマー材の添加により再調整を行う。

(4) 安定液の廃棄

施工完了時や施工場所の移動に際して、安定液を廃棄する必要がある場合、高吸水性ポリマー安定液は前述のように安定液中の浮遊土砂と水成分とに容易に分離することができ、産廃処分量の低減を図ることができる。分離にあたっては、分離特性に関わる比重、pH を事前に確認するとともに、ビーカーレベルの分離試験を実施し、分離材（塩化カルシウム、pH調整剤等）の配合を決定する。

また、分離を行う安定液貯留水槽は、長期間使用している場合、水槽底部に泥土が堆積し安定液比重に大きく影響するため、事前分離試験結果とは必ずしも整合しない場合があることに留意する必要がある。安定液産廃処分量の減量化に際し分離水を下水道等に排出する場合は、所管の排出基準等（pH、濁度等）に準拠し、適宜検査を行い排出する必要がある。

第 6 章 施工実績による管理手法の検証

第 6 章 施工実績による管理手法の検証¹⁷⁾

以上述べてきた高吸水性ポリマー安定液の性能に関する室内実験による検証と現場管理手法の考察をもとに、2種類の場所打ち杭工法施工現場に高吸水性ポリマー安定液を適用し、管理手法及びその有効性を検討した。

6.1 アースドリル工法への適用（その1）¹⁵⁾

アースドリル工法の掘削は、ドリリングバケットを回転させて地盤を掘削し、バケット内部に収容された土砂を地上に排出する。孔壁の保護は、地上に近い表層部はケーシングを用い、それより以深は安定液で孔壁を保持している。掘削完了後、孔底処理を行い掘削孔内に鉄筋籠を建込み、トレミー管を用いてコンクリートを打設し杭を築造する工法である。

掘削からコンクリート打設までの一連の作業が 1 台のアースドリル掘削機により施工可能であり、機械設備の規模が小さいため、比較的狭い敷地においても作業性がよく、施工能率が高いことを特徴としている。(図 6-1-1 参照)

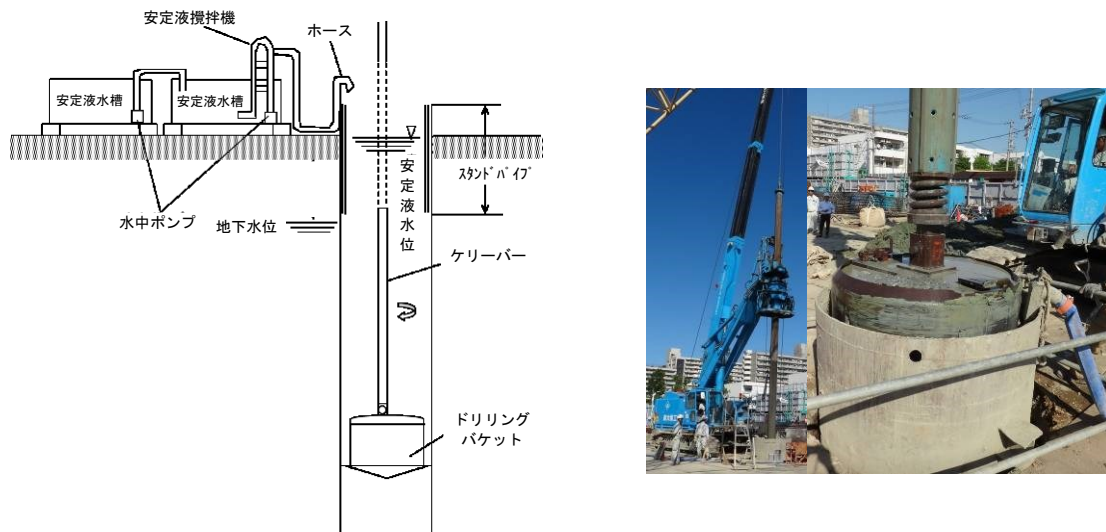


図 6-1-1 アースドリル工法施工概要図（左：施工模式,右：施工状況）

6.1.1 工事概要

施工場所：大阪府

杭諸元等：杭径： $\phi 1000 \sim 1500 \text{ mm}$ 、

 拡底： $\phi 1400 \sim 2600 \text{ mm}$

掘削長・本数： $L=34.0 \text{ m} \times 71 \text{ 本}$

掘削土層：上部 10m 砂礫層，10～30m 砂質土層

 30m 以深礫混り細砂（支持層）

6.1.2 高吸水性ポリマー安定液の管理状況

掘削地盤は、砂礫混りの砂質土主体の地盤のため安定液の逸水量を少なくするため、事前配合試験を行い、標準よりやや高い濃度の安定液 1m^3 当り高吸水性ポリマー材 1.2kg （高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.12\%$ ）に粘性補助として安定剤（増粘剤）を少量添加した。配合表を表 6-1-1、図 6-1-2 に高吸水性ポリマー安定液の作製状況を示す。

表 6-1-1 アースドリル工法安定液配合表

材 料		配 合	備 考
吸水性ポリマー材		$1.2\text{ kg}^3/\text{m}$	添加率 $P=0.12\%$
安定剤	増粘剤	$0.2\text{ kg}^3/\text{m}$	
水	水道水	1.0 m^3	$E_c=220\mu\text{S}/\text{c}$

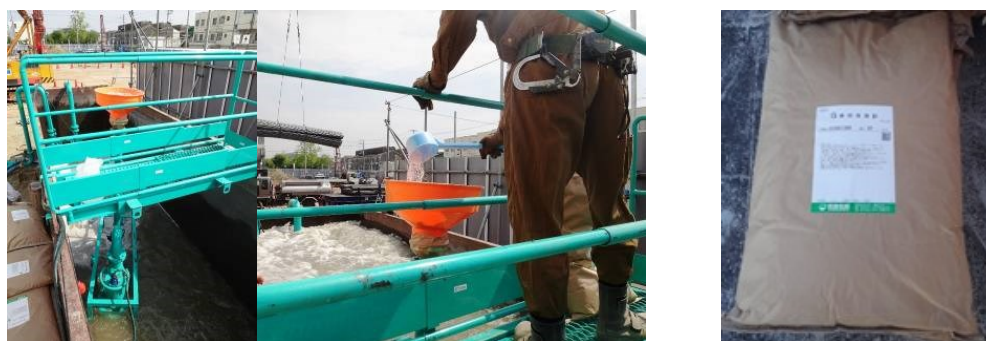


図 6-1-2 高吸水性ポリマー安定液（左：作液状況, 右：ポリマー材）

本工事では、掘削中は孔壁防護のため、孔内安定液は地下水位より 1.5m 以上高く保持し、可能な限り繰り返し使用した。掘削土砂の混入やセメント成分の影響などにより徐々に劣化するため、安定液性状が管理基準に適合するか試験により確認し、基準を満足しない場合は、薬剤補充、加水等により性状復帰を図った。図 6-1-3 に安定液管理基準を示す。

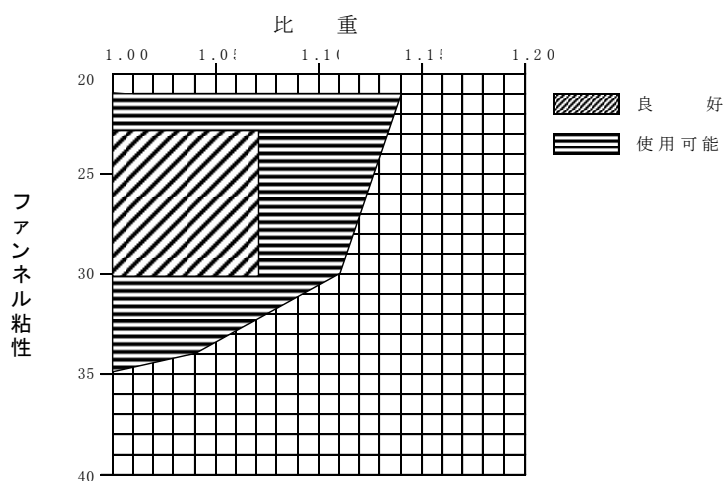


図 6-1-3 安定液管理基準

本工事で観測された安定液の性状（比重，ファンネル粘性，電気伝導率）

の経時変化（プラント）を図 6-1-4 に，施工初期段階における安定液性状の掘削深度別分布状況（3日目）を図 6-1-5 に示す。

安定液の比重は，掘削土の細粒分混入による比重増加もなく，1.02～1.07 と適正範囲の安定した比重で推移した。ファンネル粘性は， $F_v=30\text{sec}$ 程度で掘削を開始したが，比較的自立性の高い地山であったため施工中は $F_v=21\text{sec}$ 程度を保持し掘削を行った。安定液の電気伝導率は， $E_c=450\sim 710\mu\text{S}/\text{cm}$ と施工期間中に上昇傾向であったが，その変動量は比較的小さく，深度方向の変化もないことから，地下水，掘削土混入による電解質濃度の影響は少なく安定した性状であった。

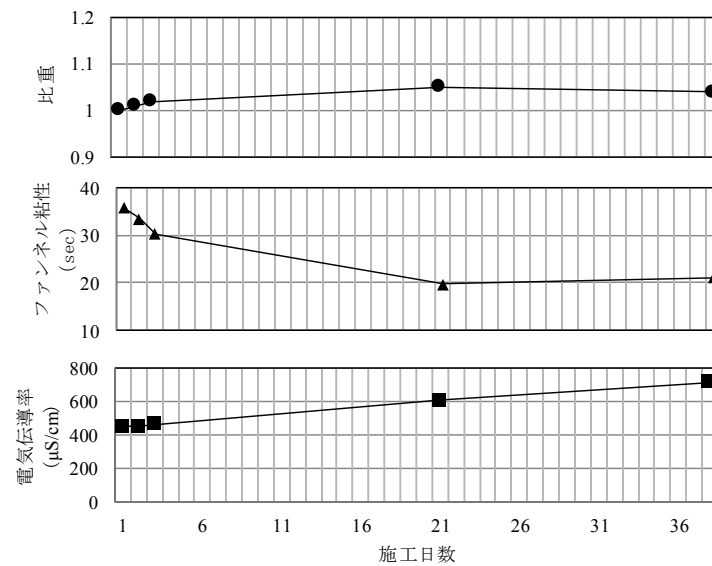


図 6-1-4 安定液性状の経時変化（プラント）

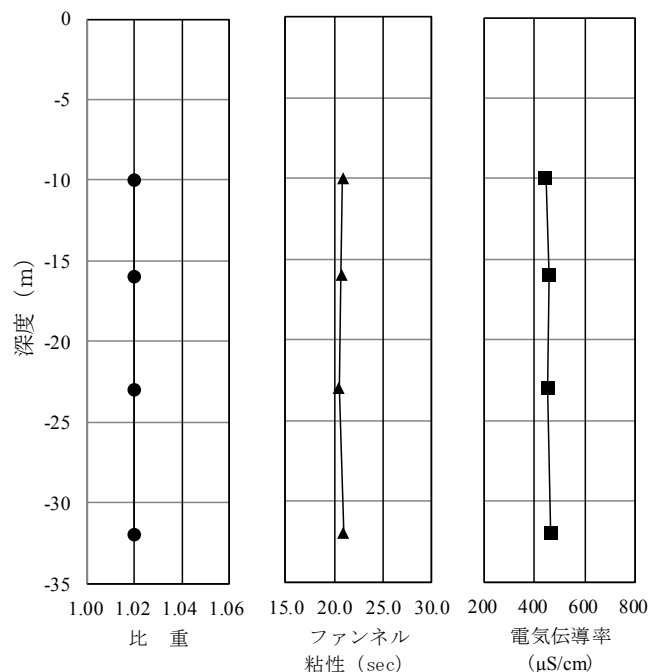


図 6-1-5 掘削深度別の安定液性状（3日目）

施工状況の詳細を以下に示す。

(1) 比重

深度別の安定液比重測定では、深度によらず均一な孔内比重が確認できた。安定液が低粘性で且つ対象地盤が砂質土主体であったが、施工中は掘削土の細粒分混入による比重増加もなく、1.02～1.07と適正範囲の安定した比重で施工することができた。

(2) ファンネル粘性

ファンネル粘性 $F_v=30$ 秒程度で掘削を開始したが、比較的自立性の高い地山であるため施工中は $F_v=21\text{sec}$ 程度を保持し掘削を行った。深度毎の安定液ファンネル粘性測定では、深度によらず均一な粘性が確認できた。

(3) 電気伝導率

高吸水性ポリマー材の吸水性能は、溶液中の電解質濃度が高くなると吸水性能は低下する。施工中の地下水、掘削土砂、セメント成分等の混入による電解質濃度の影響を把握するため、安定液の電気伝導率を測定し、安定液中の高吸水性ポリマー材の吸水状態を確認した。

$E_c=450\sim710\mu\text{S}/\text{cm}$ と施工毎に上昇傾向であったが、経時変化は低変動で且つ深度方向の変化もないことから、安定液の地下水、掘削土混入による電解質濃度の影響は少なかったと推測される。

(4) 孔壁の安定性

安定液の粘性低下が削孔開始より起きたものの、適度な粘性を安定的に確保し、孔壁を崩壊させることなく懸念された逸水も生じなかった。超音波測定器による孔壁測定結果の一例を図 6-1-6 に示す。測定結果からも、大きな孔壁の肌落ちが見られなかったことから、安定液として良好な孔壁安定性能を確保できたものと考えられる。

(5) スライム沈降性

高比重・高粘性の安定液は、孔壁防止には有効だが安定液中にスライムが多く浮遊し、孔底に沈殿物が堆積するためコンクリートの置換性が悪くなり、コンクリートの劣化、スライムの鉄筋への付着により付着強度低下をまねく。そのため、最近では孔壁を崩壊させない範囲でスライムを短時間に沈降処理できる低比重・低中粘性の安定液が一般化されている。

本工事では、安定液の性状は低比重・低粘性で推移し、良好な安定液性状を維持できた。また、掘削完了後に、5分毎に掘削深度を測定し、この間に沈積する沈殿物の量、及び沈積が止まる時間を測定するスライム沈殿試験を実施した。測定結果を図 6-1-7 に示す。掘削完了後、15分程度でスライムの沈積は止まり、良好なスライム沈降性が確認できた。

また、通常スライム処理は、掘削完了後に底ざらいバケットで掘りくずを除去する一次孔底処理を行い、安定液に多くの砂分を含んでいる場合は、

コンクリート打込み前までの間に孔底に沈降したスライムを除去する二次孔底処理が行われる。本工事では、スライム沈降性が良好だったため、掘削完了後の孔底処理は二次孔底処理をほとんど行うことなく施工できた。

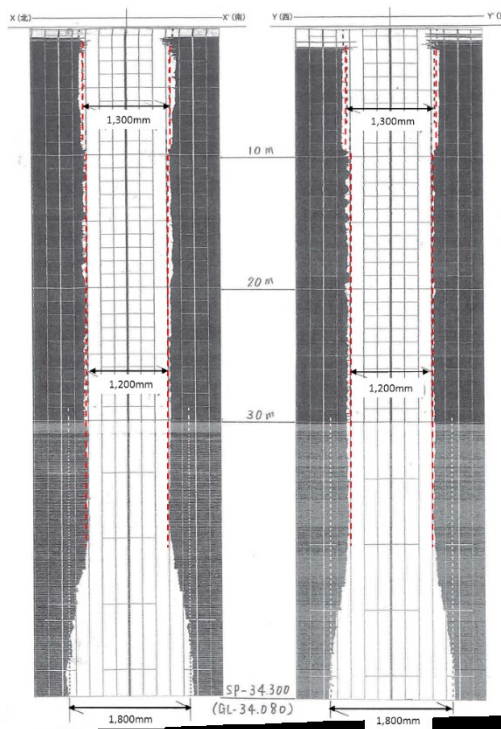
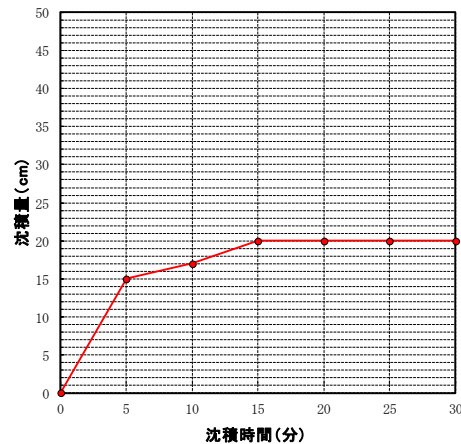


図 6-1-6 孔壁測定結果の一例
(上：超音波測定結果，下：超音波測定装置)



NO.	時間 分	深度 m (SP)	沈積量 cm	増加量 cm
0	0	34.300		
1	5	34.150	15.0	15.0
2	10	34.130	17.0	2.0
3	15	34.100	20.0	3.0
4	20	34.100	20.0	0.0
5	25	34.100	20.0	0.0
6	30	34.100	20.0	0.0

図 6-1-7 スライム沈殿試験測定結果
(上：沈積グラフ，下：測定データ)

(6) 転用性

施工中は、適宜安定液性状を確認し、コンクリート打設時に回収される安定液のロス量分の新液を作液補充し、施工中に安定液の劣化（比重増加、粘性低下等）が確認された場合は、薬剤補充を行い適正な安定液性能を確保した。

また、コンクリート打設時には、コンクリート接触面から 2m 付近までの安定液は性状劣化が想定されたため、廃棄液とし回収液に混入しないよう配慮した。その結果、コンクリート打設時の廃棄液以外は、上記対応により施工中に安定液が劣化することなく、余剰廃棄液を出さずに最後まで使用でき、転用使用が十分可能な安定液であることが確認できた。

(7) コンクリート置換性

従来のベントナイト安定液では、崩壊防止と孔内土粒子の沈降を阻止す

るために高比重・高粘性が使用されていたが，最近ではコンクリートの置換性が重視され，低比重・低中粘性（ファンネル粘性 20～27sec，比重 1.10 以下）が使用されている。

本工事の安定液性状は，前記のとおり低比重・低粘性の安定液性状を確保し，また施工完了後の杭頭処理時にコンクリート硬化不良もなく，良好な置換性が得られた。

6.1.3 産業廃棄物の低減効果

施工完了後の水槽内に残った安定液は，施工期間中搬出することなく長期間転用使用したため，水槽底部に泥土が多く堆積し，水槽内の攪拌を伴う安定液の分離作業は，比重を上昇させ分離効果が低くなることが推測されたため，本工事では分離を行わず全量産廃処分とした。

しかしながら，アースドリル工法で施工時に排出される掘削土において高吸水性ポリマー使用による利点を確認した。従来のアースドリル工法で施工時に排出される掘削土は，膨潤したベントナイトが混入し含水比の高い泥状のため汚泥として産廃処分される。

一方，高吸水性ポリマー安定液は低粘性で水切れが良好なため，砂質土主体の掘削土は，残土処分可能な非泥状のため，一般残土処分することができた。

処分状況の詳細を以下に示す。

(1) 掘削土

従来アースドリル工法で施工時に排出される掘削土は，膨潤したベントナイトが混入し含水比の高い泥状（コーン指数 $< 200 \text{ kN/m}^2$ ）を呈しており，汚泥として産業廃棄物処分される。

高吸水性ポリマー安定液は，泥寧化しやすいベントナイトを使用しておらず，低粘性で水切れが良好なため，砂質土主体の掘削土は，残土処分可能な非泥状（コーン指数 $> 200 \text{ kN/m}^2$ ）を呈しており，産廃量低減が図れた。

（図 6-1-8 参照）



図 6-1-8 バケット引上げ掘削土

(2) 安定液

施工完了後の安定液は，早期プラント搬出の都合上，安定液分離作業がプラント解体搬出工程内に組めず，また水槽底部に泥土が多く堆積し，分

離剤の水槽内での攪拌を伴う分離作業は、比重を上昇させ分離効果が低くなることが推測されたため、本工事では全量廃棄した。

ベントナイト系安定液の場合、施工中の劣化の要因は細粒分混入による比重増加が多く、性状回復には加水する必要がある、そのためには水槽内に満たされた安定液を施工途中で廃棄する必要がある。高吸水性ポリマー安定液は、低比重・低粘性を確保できたため、水槽内にスライムが沈降堆積したものの、施工途中で安定液を廃棄せず転用使用でき、産廃量低減効果が発揮された。

6.2 アースドリル工法への適用（その2）

6.2.1 工事概要

施工場所：埼玉県

杭諸元等：杭径：φ1700～1900mm、

 拡底：φ2200～3400mm

掘削長・本数：L=53.7m×20本

掘削土層：上部7m粘性土層，10～25m細砂層

 25m以深シルト・細砂層

6.2.2 高吸水性ポリマー安定液の管理状況

掘削地盤は、上部が砂礫層の介在する細砂層であることから、安定液の逸水量を少なくするため、標準よりやや高い濃度の安定液 1m³ 当り高吸水性ポリマー材 1.2kg（高吸水性ポリマー材添加率 P=0.12%）に粘性補助として安定剤（増粘剤）を少量添加した。また、安定液への細粒分混入が少ない砂質土主体の地盤で地下水位も GL-2.0m と高いことから、安定液の初期比重を高くするため加重材（粘土）を少量添加する配合とした。配合表を表 6-2-1、施工状況を図 6-2-1 に示す。

表 6-2-1 アースドリル工法安定液配合表

材 料		安定液 1m ³ 当り	
		配 合	備 考
吸水性ポリマー材		1.2 kg/m ³	添加率 P=0.12%
安定剤	増粘剤	0.1 kg/m ³	
加重材	粘土	20 kg/m ³	
水	水道水	1.0 m ³	E _c =250μS/cm



図 6-2-1 アースドリル工法施工状況

本工事で観測された安定液の性状（比重，ファンネル粘性，電気伝導率，pH）の経時変化（プラント）を図 6-2-2 に示す。

安定液の比重は，掘削対象地盤が砂質土主体であったことから掘削土の細粒分混入による比重増加もなく，1.01～1.02 と適正範囲の安定した比重で推移した。ファンネル粘性は， $F_v=30\text{sec}$ 以上で初期掘削を開始し，細砂，砂礫層からの逸水に配慮し比較的高粘性を保持しながら掘削を行った。安定液の電気伝導率は，初期作液時に電気伝導率の高い工業用水を使用したため $1,000\mu\text{S}/\text{cm}$ に近い高い数値を示したが，地下水の混入と共に徐々に低下したことから，地下水，掘削土混入による電解質濃度の影響は少なく安定した性状であった。また，pH については施工中のコンクリート打設による安定液への影響もなく，中性域で推移した。

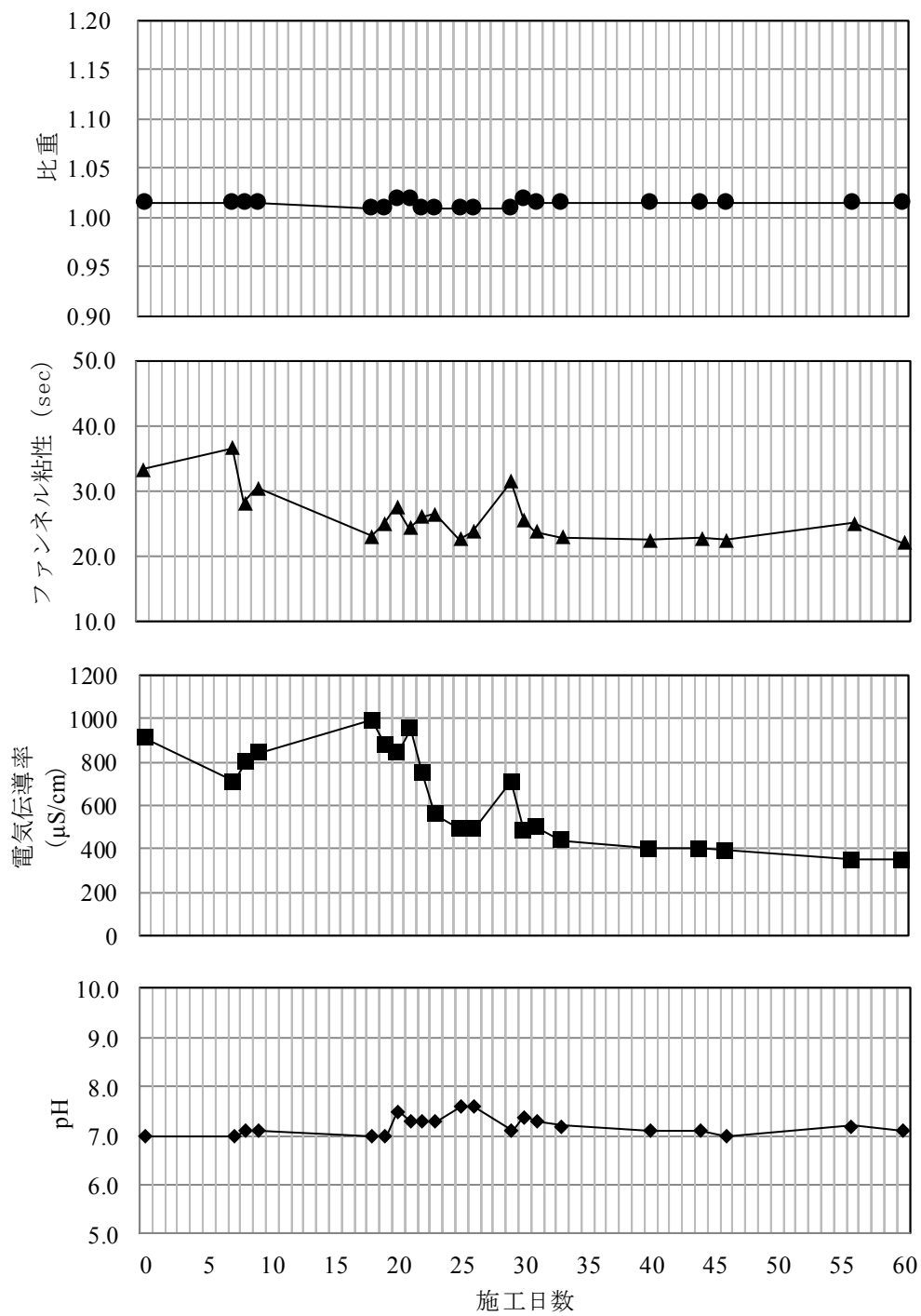


図 6-2-2 安定液性状の経時変化 (プラント)

6.2.3 産業廃棄物の低減効果

(1) 掘削土

建設廃棄物処理指針では、アースドリル工法は、泥水非循環工法であるため、バケット引き上げ後の掘削土の性状が泥状を呈しているか否かで、汚泥に該当するか判断される。ただし、掘削土が廃棄物処理法外の残土処分となる土砂か廃棄物処理法上の産廃処分となる汚泥かの判断は、建設廃棄物処理指針に例示として示されているが、実際は施工場所の自治体および掘削土の受入者により処分が判断される。

高吸水性ポリマー安定液は、水を含むと泥濁化するベントナイトを使用していないため、バケット引き上げ時の掘削土の性状は、一時的に安定液の混入により泥状となるものの、地上仮置きによる天日乾燥により性状が早期に改善される。そのため本工事では、掘削対象土が砂質土主体の地盤であったため、行政確認、受入者の判断から、従来産廃処分となる汚泥として取り扱われていた掘削土は、約 3,000m³ 全量土砂として残土処分することができた。

(2) 安定液

施工完了後の水槽内に残った安定液は、施工期間中搬出することなく長期間転用使用し、施工完了後に水槽に残った産廃処分となる安定液 200m³ について、水槽内に分離剤（塩化カルシウム）を投入攪拌し、泥水の分離を実施した。分離した結果、細粒分の混入した廃棄安定液となる泥水 200m³ は、水 160m³、泥土 40m³ に分離され、約 80%の産廃処分量の低減効果を確認した。分離結果を表 6-2-2 に示す。

表 6-2-2 廃棄安定液分離結果

分離前		分離方法		分離後					
廃棄安定液		配合	攪拌方法	分離量		比率	分離水性状		
泥水量	比重	分離剤(CaCl ₂)		分離水	泥土	水 : 泥土	濁度(SS)	pH	抽出物質
200.0m ³	1.015	2.5kg/m ³	攪拌ポンプ	160.0m ³	40.0m ³	8.0 : 2.0	47mg/l	6.90	不検出

6.3 リバース工法への適用

リバース工法（リバースサーキュレーションドリル）は、ビットを回転させ地盤を切削し、その土砂を孔内泥水とともにサクシオンポンプまたはエアリフト方式などにより地上に吸い上げ排出する。リバース工法では、通常、現場発生土を利用した泥水を循環水として使用するため安定液に比べ造壁性が劣り、孔壁崩壊の危険性を持っている。図 6-3-1 と図 6-3-2 にリバース工法の施工概要図を示す。



図 6-3-1 リバース工法施工概要図



図 6-3-2 リバース工法（TBH掘削機）施工概要図

6.3.1 工事概要

施工場所：神奈川県

杭諸元等：杭径 $\phi 1500\text{mm} \sim 2500\text{mm}$

掘削長・本数： $L=35.5 \sim 37.0\text{m} \times 5$ 本

掘削土層：上部 10m 細砂, 10m \sim 32m 砂質シルト主体互層
下部砂礫層(支持層)

6.3.2 高吸水性ポリマー安定液の管理状況

下部の透水性の高い砂礫層に対応するため，初期配合は造壁性を考慮し，標準よりやや高い濃度の安定液 1m^3 当り高吸水性ポリマー材 1.2kg （高吸水性ポリマー材添加率 $P=0.12\%$ ）に粘性補助として安定剤（増粘剤）を少量添加し，ファンネル粘性 $F_v=35(\text{sec})$ 程度の比較的粘性の高い安定液を作液した．配合表を表 6-3-1 に示す．

表 6-3-1 リバース工法安定液配合表

材 料		配 合	備 考
吸水性ポリマー材		$1.2\text{kg}/\text{m}^3$	添加率 $P=0.12\%$
安定剤	増粘剤	$0.1\text{kg}/\text{m}^3$	
水	水道水	1.0m^3	$E_c=170\mu\text{S}/\text{cm}$

リバース工法では，大きな比重，高い粘性の泥水を用いると，サクシヨンポンプの揚泥量は低下し掘削速度は低下する．そのため，掘削土砂をポンプで排出するためには，孔壁の安定を保てる低比重，低粘性の泥水が求められる．図 6-3-3 に本工事の安定液の比重とファンネル粘性，電気伝導率の場所打ち杭施工順序で示した経時変化（プラント），図 6-3-4 に杭 1 本目施工時の掘削深度別の安定液性状を示す．

リバース工法では，一般に泥水の循環過程において，粒径の大きい土粒子は循環槽に沈降し，掘削孔に供給される泥水には微細な細粒土のみが残り，循環回数が増すごとに泥水の比重は高くなる．本工事でも，徐々に比重が高くなる傾向が見られたが，最終杭を除きほぼ適正な循環流体を確保できる比重 $1.02 \sim 1.08$ 程度を保持した．また，安定液の粘性は掘削初期は大きく低下したものの，施工中は安定的にファンネル粘性 $F_v=20 \sim 25(\text{sec})$ 内で推移し，適正な低粘性を確保することができた．掘削中は，掘削速度の低下，孔壁の崩壊及び下部砂礫層における逸水を起こすことなく高吸水性ポリマー安定液により孔壁安定性が十分確保できたものと判断できる．

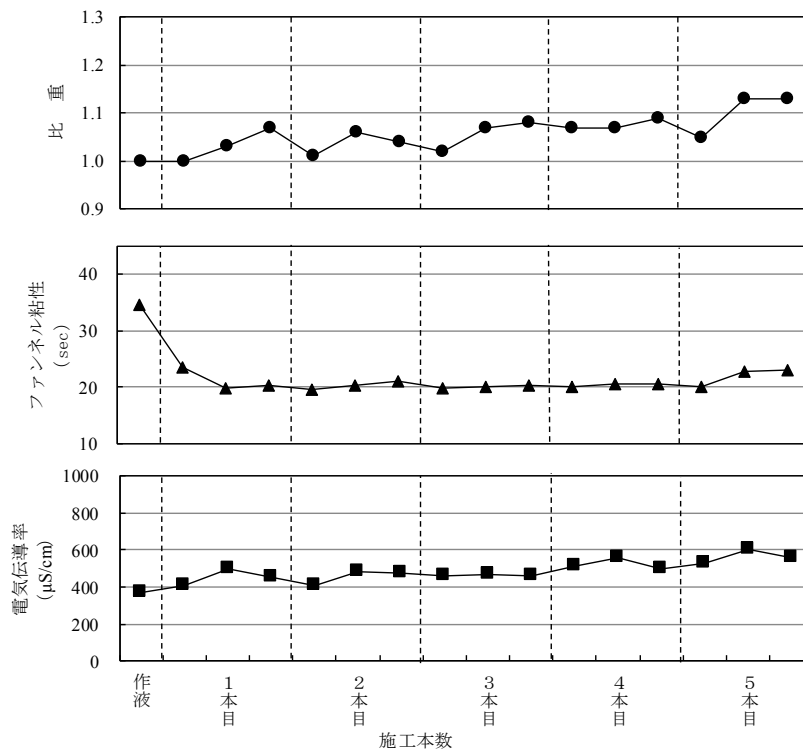


図 6-3-3 安定液性状の経時変化 (プラント)

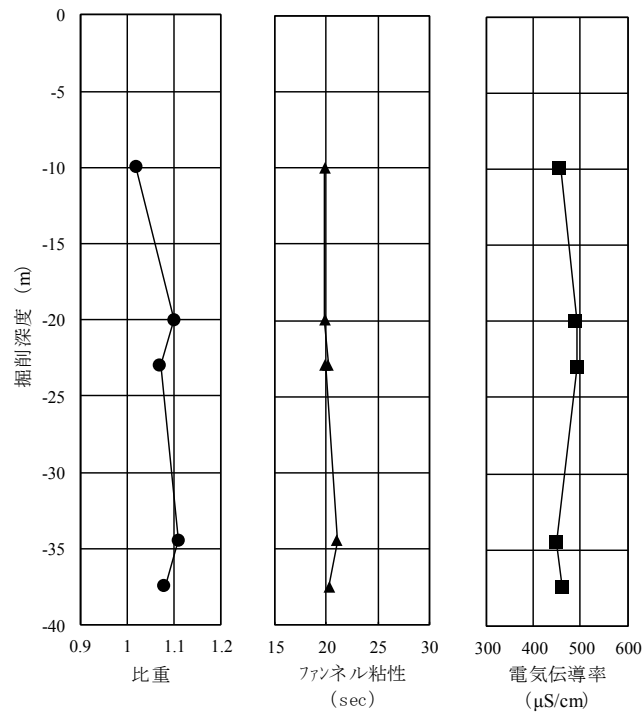


図 6-3-4 掘削深度別の安定液性状 (1本目)

6.3.3 産業廃棄物の低減効果

リバース工法では、掘削土は循環槽で沈殿させ、コンテナダンプ車に積み込み場外搬出される。一方、泥水は再利用されるが、施工中に掘削利用できなくなった劣化泥水及び施工終了後の泥水は全量産廃処分となるため、この泥水処理費が工事費の大きな負担となる。

本工事では、施工終了後に回収槽と循環槽に残った安定液に分離剤を添加し安定液処分量の低減を図った。施工終了時の安定液は、比重 1.11～1.12 で全量で約 176m³であった。分離剤は、攪拌ポンプのある作液槽に投入・攪拌後、循環ポンプにより循環させ、循環後ポンプを停止し、一晚静置した。図 6-3-5 に分離時プラント循環経路図、分離結果を表 6-3-2 に示す。分離水は濁度も小さく pH 7.67 と中性域で直接放流が可能であり、各槽においてばらつきはあるものの全体で約 29%の産廃処分量の減量化を達成した。

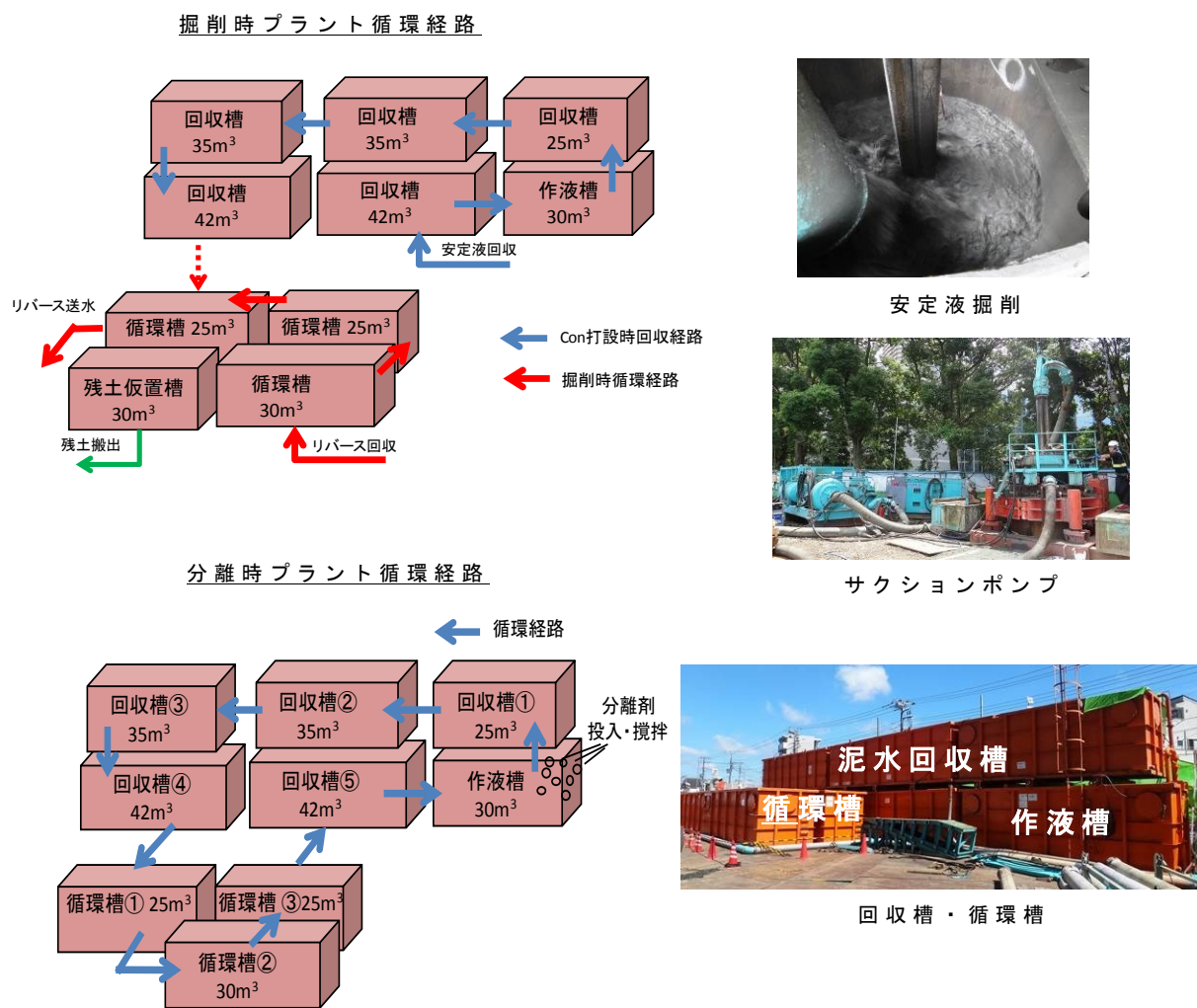


図 6-3-5 掘削時・分離時プラント循環経路図

表 6-3-2 廃棄安定液の分離結果

回収槽	分離前		分離方法	分離後				
	回収安定液		配合	分離量		割合		分離水性状
	泥水量 (m ³)	比重	塩化カルシウム (kg/m ³)	分離水 (m ³)	泥土 (m ³)	水 : 泥土	pH	
作液槽	26.4	1.12	3.0	6.4	20.0	2.4 : 7.6	7.67	
回収槽①	14.3	1.12	3.0	3.6	10.7	2.5 : 7.5	7.67	
回収槽②	0.0	-	3.0	0.0	0.0	- : -		
回収槽③	0.0	-	3.0	0.0	0.0	- : -		
回収槽④	37.0	1.11	3.0	8.0	29.0	2.2 : 7.8	7.67	
回収槽⑤	28.0	1.11	3.0	6.0	22.0	2.1 : 7.9	7.67	
循環槽①	22.0	1.11	3.0	8.3	13.7	3.8 : 6.2	7.67	
循環槽②	26.4	1.11	3.0	10.0	16.4	3.8 : 6.2	7.67	
循環槽③	22.0	1.11	3.0	8.3	13.7	3.8 : 6.2	7.67	
計	176.1			50.6	125.5	2.9 : 7.1		

6.4 掘削工事費の比較

本研究の高吸水性ポリマー安定液は、従来の機械設備を使用し作液および分離が可能であることから、機材損料、賃料および運転経費等の機械費、労務費は同等と考え、従来の安定液（ベントナイト系、CMC系）による掘削工事費の差異は、安定液の材料費と産廃処分費を比較対象とした。安定液の材料費のうち施工中の安定液性状調整の材料費は、掘削対象土質、地下水・土中に含まれるイオン成分等によって異なるため作液・分離によって生じる材料費とした。なお、算定にあたっては2017年3月時点の実勢単価を参考とした。

6.4.1 土砂と汚泥の区分

場所打ち杭工法等の掘削工事に伴い発生する掘削物が「汚泥」に該当すれば「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（以下「廃棄物処理法」という。）が適用され産業廃棄物となり、残土又はしゅんせつ土砂（以下「土砂」という。）に該当すれば廃棄物処理法規制対象外とされている。

掘削物が「汚泥」か「土砂」かの基本的な判断区分の考え方については、「建設廃棄物処理指針（平成22年度版）」に示され、地下鉄工事等の建設工事に係る掘削工事に伴って排出されるもののうち、含水率が高く粒子が微細な泥状のものは、無機性汚泥（以下「建設汚泥」という。）として取り扱われる。また、粒子が直径75 μ mを超える粒子をおおむね95%以上含む掘削物にあっては容易に水分を除去できるので、ずり分離等を行って泥状の状態ではなく流動性を呈さなくなったものであって、かつ生活環境の保全上支障のないものは土砂として扱われる。

建設汚泥として取り扱われる場合、廃棄物処理法上の産業廃棄物となり、中間処理業者による産廃処分委託費として、地域による価格差はあるが

10,000～25,000 円/m³ 程度の処理費用が発生する．一方，土砂として取り扱われる場合は，埋戻し材料などとして自ら利用が可能であり，場外への残土委託処分費も受入場所により差異はあるものの，5,000～10,000 円と汚泥と比較し安価となる．

この土砂か汚泥かの判断は，水を利用し地山を掘削する工法においては，発生した掘削物を元の土砂と水に分離する工程までを掘削工事としてとらえ，この一体となるシステムから排出される時点の性状で判断される．

判断区分の参考として，代表的な場所打ち杭工法であるリバーズ工法（泥水循環工法）とアースドリル工法（泥水非循環工法）について図 6-4-1，図 6-4-2 に例示する．

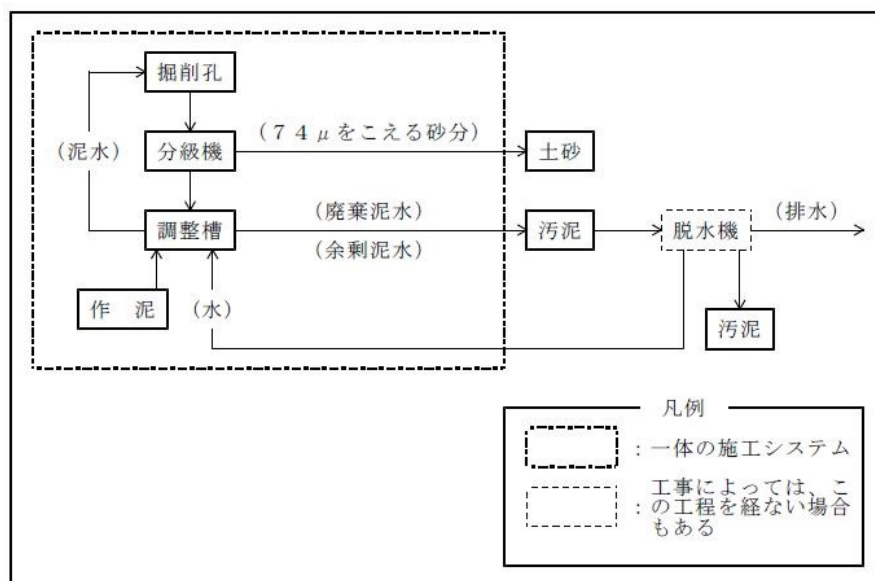


図 6-4-1 泥水循環工法（泥水シールド・リバーズ工法等）¹⁶⁾

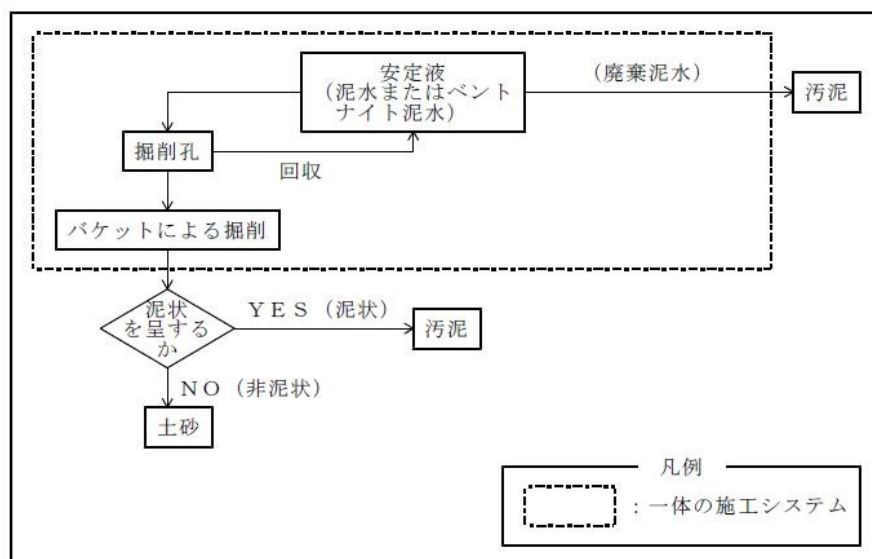


図 6-4-2 泥水非循環工法（アースドリル工法等）¹⁶⁾

6.4.2 安定液の材料費の比較

高吸水性ポリマー安定液は、従来のベントナイト安定液が水 1m³ 当り 30～50kg（添加率 3～5%）のベントナイト材料を添加するのに対し、高吸水性ポリマー安定液は高吸水性ポリマー材 1kg（添加率 0.1%）前後の添加で、ベントナイト安定液と同等の性能を確保できる。そのため、高吸水性ポリマー材は高価なものの使用量が少なくなるため、安定液の材料費用としては従来の安定液と比較して、同等以下となる。

以下の表 6-4-1～6-4-3 に、各安定液を 1m³ 作液した場合の単価比較を示す。

表 6-4-1 高吸水性ポリマー安定液作液単価

材料	高吸水性 ポリマー材	安定剤 (増粘剤)	加重材 (粘土等)	水	
添加率	0.05～0.2%	0～0.02%	0～2%	-	1m ³ 当り平均単価比率
使用量	0.5～2kg	0～0.2kg	0～20kg	1000kg	0.63

表 6-4-2 ベントナイト系安定液作液単価

材料	ベントナイト	CMC	分散剤	水	
添加率	2～8%	0～0.2%	0.1～0.2%	-	1m ³ 当り平均単価比率
使用量	20～80kg	0～2kg	1～2kg	1000kg	1.0

表 6-4-3 CMC 系安定液作液単価

材料	ベントナイト	CMC	分散剤	水	
添加率	0～4%	0.1～0.5%	0～0.3%	-	1m ³ 当り平均単価比率
使用量	0～40kg	1～5kg	0～3kg	1000kg	1.16

6.4.3 排泥・掘削土処分費の低減効果

6.4.3.1 リバース工法の場合

泥水循環工法であるリバース工法は、図 6-4-1 に示すように泥水循環途中で分級される土砂以外はすべて汚泥として取り扱われ産廃処分となる。泥水シールドでは、施工量が大きいため分級設備を設ける場合が多いが、リバース工法の場合、分級設備はなく泥水循環過程の沈殿した土砂を浚って掘削土を搬出するため、掘削土は汚泥として取り扱われ、すべて産廃処分となる。

ここに、杭径φ2.0m、掘削長35.0mの場所打ち杭を、リバース工法で従来のベントナイト系安定液と高吸水性ポリマー安定液で施工した場合の経済性比較を行う。

なお、安定液材料費単価は表6-4-1～6-4-3に示す数値の平均単価、処分単価は地域により価格差があるため、ここではわかりやすさを優先し、産廃処分単価（運搬込み）を10,000円/m³とし残土（土砂）処分をその半額と設定した。表6-4-4に各単価表を示す。また、高吸水性ポリマー安定液を使用した場合の安定液の分離については、施工実績より廃棄安定液の分離による低減率30%（比重1.12）とし比較を行った。

リバース工法における経済比較を表6-4-5に示すとおり、約20%のコスト低減となった。

表 6-4-4 単価表

項目		単位	ベントナイト系安定液	高吸水性ポリマー安定液	低減効果	備考
単価	安定液単価	比率	1.0	0.63	37%	平均単価比率
	分離剤単価		-	0.05	-5%	0.2%添加
	残土処分単価	円/m ³	5,000			
	産廃処分単価	円/m ³	10,000			残土・泥水

表 6-4-5 リバース工法の場合の経済比較

項目		単位	ベントナイト系安定液	高吸水性ポリマー安定液	低減効果	備考
施工条件	杭径	m	2.0	2.0	-	場所打ち杭リバース工法
	掘削長	m	35.0	35.0	-	スタンプパイプ10m径2.2m
	杭長	m	32.5	32.5	-	空掘り2.5m
	本数	本	1	1	-	
数量	掘削土量	m ³	116	116	-	産廃処分
	安定液量	m ³	180	180	-	作液量
	廃棄泥水量 ^{※1}	m ³	180	126	30%	安定液比重1.12
経済性	安定液材料費	比率	1.0	0.68	32%	作液材料、分離剤含む
	産廃処分（残土）	比率	1.0	1.0	0%	掘削土量×1.1
	産廃処分（泥水）	比率	1.0	0.70	30%	
	計	比率	1.0	0.80	20%	

※1 廃棄泥水量は最終杭完了時に水槽に残った安定液量（ポリマー安定液は分離後）

6.4.3.2 アースドリル工法の場合

泥水非循環工法であるアースドリル工法は、図 6-1-1 に示すようにリバース工法とは地盤の掘削機具、土砂の孔外排出方法が異なり、ドリリングバケットにより掘削された土砂は、バケット引き上げ後の掘削土の性状が泥状を呈しているか否かで、汚泥に該当するか判断され、十分に水切りや固化材などによる脱水を行い、ダンプトラックに積込み、場外に搬出される。従来のベントナイト系安定液で施工時に排出される掘削土は、膨潤したベントナイトが多く混入し含水比の高い泥状（コーン指数 200kN/m^2）を呈しており、汚泥として産廃処分される。

6.2 のアースドリル工法の適用事例のように、高吸水性ポリマー安定液は、ベントナイトを使用していないため、地上仮置きによる天日乾燥により性状が早期に改善され、従来産廃処分となる汚泥として取り扱われていた掘削土は、全量土砂として残土処分することができる。

ここに、杭径 $\phi 2.0\text{m}$ 、掘削長 35.0m の場所打ち杭を、アースドリル工法で従来のベントナイト系安定液と高吸水性ポリマー安定液で施工した場合の経済性比較を行う。なお、安定液材料費・処分費単価は表 6-4-4 を用いて、高吸水性ポリマー安定液を使用した場合の安定液の分離については、アースドリル工法の実績で得られた低減率 80% とし比較を行った。

アースドリル工法における経済比較は表 6-4-6 に示すとおりであり、約 61% のコスト低減となった。

表 6-4-6 アースドリル工法の場合の経済比較

項目		単位	ベントナイト系安定液	高吸水性ポリマー安定液	低減効果	備考
施工条件	杭径	m	2.0	2.0	-	場所打ち杭アースドリル工法
	掘削長	m	35.0	35.0	-	スタンプタイプ 10m 径 2.2m
	杭長	m	32.5	32.5	-	空掘り 2.5m
	本数	本	1	1	-	
数量	掘削土量	m^3	116	116	-	産廃処分
	安定液量	m^3	180	180	-	作液量
	廃棄泥水量 ^{※1}	m^3	180	36	80%	安定液比重 1.12
経済性	安定液材料費	比率	1.0	0.50	50%	作液材料、分離剤含む
	産廃処分（残土）	比率	1.0	0.50	50%	掘削土量×1.1
	産廃処分（泥水）	比率	1.0	0.20	80%	
	計	比率	1.0	0.39	61%	

※1 廃棄泥水量は最終杭完了時に水槽に残った安定液量（ポリマー安定液は分離後）

6.5 まとめ

高吸水性ポリマー安定液を 2 種類の場所打ち杭工法と 3 箇所の施工現場に適用した結果を以下にまとめる。

(1) 適用性

- a) アースドリル工法及びリバース工法で必要とされる安定液基本性能（掘削孔壁の安定性能，スライム沈降防止と沈降時間の短いスライム沈降性，コンクリート置換性）を満足した。
- b) 杭の品質に良好な低比重・低粘性を維持し，適切な管理を行えば，転用使用が十分可能である。
- c) 従来の安定液に比べて材料使用量が少なく，材料置場の省スペース化，作液作業の時間・労力等の省力化が図れる。
- d) アースドリル工法においては，本安定液を使用したバケットから排出される掘削土は泥寧化しにくく，土質によっては産廃量の減量化が期待できる。
- e) 長期にわたり繰り返し使用した安定液の水槽内は，泥土が多く堆積している。分離時は攪拌するため，堆積泥土の混入により比重が上昇し分離が困難となるため，別途分離槽を設ける等の対処が必要である。なお安定液が低比重の場合には，廃液の産廃処分量を大幅に減量化できることを実証した。

(2) 経済性

- a) 高吸水性ポリマー安定液の材料コストは，既往のベントナイト系安定液に対して約 32%の低減効果を実現できる。
- b) 安定液の産廃処分量の減量化は安定液の比重により変動するが，その減量化率に応じたコスト低減効果を期待できる。
- c) 既往のベントナイト系安定液では，掘削残土が泥濁化するため産廃処分量扱いとなるが，高吸水性ポリマー安定液をアースドリル工法に適用した 2 現場とも一般残土として処分でき，大きなコストメリットを得ることができた。今後実績を重ね，より確実な経済性効果としての定着化が望まれる。

第 7 章 結論

第 7 章 結論

本研究は、高吸水性ポリマー材を水により十分膨張させた懸濁液である高吸水性ポリマー安定液が、場所打ち杭工法における地盤掘削安定液としての要求性能を満たし、その特性により孔壁の安定性の確保、本体構造の品質向上、環境負荷低減や掘削工事費削減を実現できることを実証したものである。以下に得られた結論を記すとともに、高吸水性ポリマー安定液の特長を要約したものを図7-1-1に示す。

- (1) 高吸水性ポリマー安定液は、高吸水性ポリマー材の投入量に応じて、粘性をコントロールすることができ、掘削地盤特性及び掘削工法に応じて適切に対応することができる。従来の安定液より少ない材料で所要の粘性を発揮できることから、コスト低減を実現することができる。具体的には、水 1m^3 に対して必要となる高吸水性ポリマー材は $0.5\sim 2\text{kg}$ と少量であるため、作泥手間の大幅な省力化を図ることができる。
- (2) 高吸水性ポリマー安定液によって、掘削時の孔壁安定に不可欠な難透水層が形成され、その対象土質はベントナイト系安定液よりも広い。
- (3) 高吸水性ポリマー安定液の粘性は、使用水に含まれる電解質濃度の影響を受ける。また、掘削中の地下水の電解質濃度やコンクリート打設によっても影響を受け、電解質濃度が高くなれば高吸水性ポリマー材の吸水性能が低下し、安定液中の余剰水が増加することで安定液の粘性が低下する。

ただし粘性は、安定液中の吸水したポリマー材以外の余剰水率 η に支配され、余剰水率 η は、高吸水性ポリマー材の添加量により調節が可能である。また、所定の粘性を有する高吸水性ポリマー材の添加量は、使用水の電気伝導率 E_c を測定することにより、その吸水倍率 Q を推定し、添加量を決定することができる。

- (4) 高吸水性ポリマー安定液は、 $490\text{ (kN/m}^2\text{)}$ の拘束圧のもとでも安定液としての機能を保持しうる。
- (5) 高吸水性ポリマー安定液は、ベントナイト系安定液の使用において課題となっていたコンクリート置換性、出来形確保性、コンクリートと鉄筋との付着性について、ベントナイト系安定液のようにCaイオンとの接触でゲル化せず粘度も増加しない特性を有するため、場所打ち杭本体構造の品質向上につなげることができる。特に、出来形確保性については、設計径を 5cm 低減して設計する必要がなくなり、構造物設計上の合理化、コスト低減を追求することができる。
- (6) 現場における掘削管理は、ファンネル粘性や電気伝導率を含む管理指

標でおこなうことができる。特に、安定液の回収時にファンネル粘性を測定し、粘性が上昇している場合には加水し、粘性が低下している場合には、高吸水性ポリマー材を添加することで、適正值に容易に回復させることができる。

- (7) 安定液で孔壁保持する代表的な場所打ち杭工法であるアースドリル工法，リバーズ工法に適用し，良好な施工性，品質を得たことにより高吸水性ポリマー安定液及びその管理手法の妥当性を実証した。なお，高吸水性ポリマー安定液を2週間を超える長期間にわたって繰返し使用する場合には，紫外線による性能劣化に注意する必要がある。
- (8) 施工実績によると，掘削後に回収した安定液は，塩化カルシウムなどの分離材を添加することで，吸水した高吸水性ポリマー材に拘束された掘削土などに汚染されない水が上澄み液として容易に分離され，浮遊する土粒子とともに高吸水性ポリマー材が沈降する。この上澄み液のpHは中性であり，濁度も下水道排出基準をみたすため，直接放流が可能となり，排泥土量を低減できることを実証した。
- (9) 上記の(1)と(8)より，高吸水性ポリマー安定液を使用するとベントナイト系安定液に比較して，材料費，排泥処分費が低減できる。

なお，建設現場内に掘削土の仮置スペースがある場合には，このスペースがベントナイト系安定液では高含水比のため，産廃処分となる廃泥置き場に占用されるのに対して，高吸水性ポリマー安定液では掘削土砂を建設残土として即時に搬出することが可能で，掘削土を場内利用する際は自ら利用も図りやすい。作業スペース削減，掘削土の自ら利用の推進により，さらなる環境負荷低減及びコスト低減効果を発揮することが期待される。

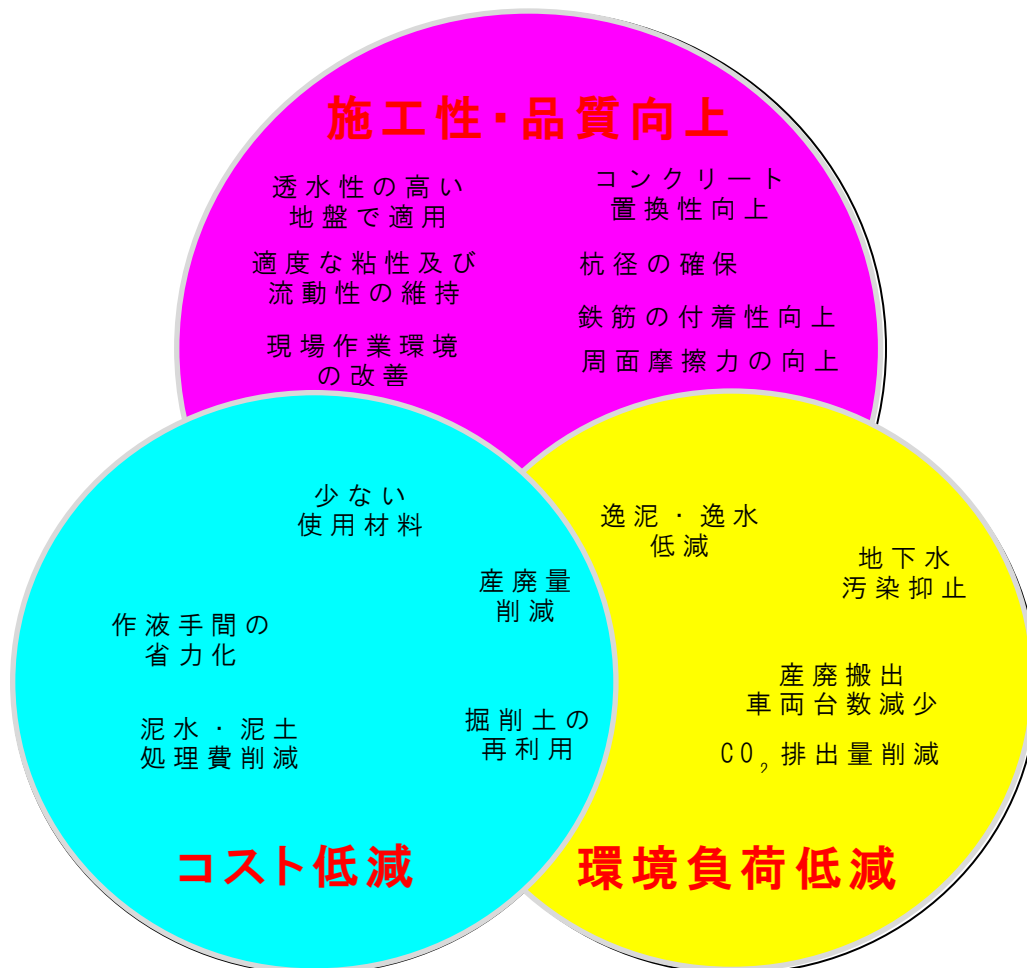


図7-1-1 高吸水性ポリマー安定液の特長要約図

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり，早稲田大学理工学術院 赤木寛一教授には長年にわたり，並々ならぬご指導とご教授をいただきましたことを深くお礼申し上げます．また，有限会社マグマの近藤義正様には，非常に有用なご意見と助言をいただきました．

研究の実施にあたり，戸田建設(株)の下坂賢二君並びに早稲田大学赤木研究室学生の熱心な協力を得たことを記すとともに，理論を現場に移行するためのフィールド提供・協力をいただきました戸田建設(株)現場作業所の皆様に、心より謝意を表します．

平成30年2月

浅野均

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV 下部構造編，pp. 444-445，2012.3.
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物），pp. 251-254，2012.1.
- 3) 藤井衛，武智耕太郎，新井マウリシオ淳：場所打ちコンクリート杭築造時における分散剤がコンクリートの品質改善に及ぼす効果，日本建築学会技術報告集，Vol. 18，No. 38，pp. 113-118，2012.
- 4) 屋代勉，田島孝敏，新村亮，山元寛哲：吸水性ポリマーを用いた透水性を有する裏込め注入材の開発，土木学会論文集F1，Vol. 69，No. 2，pp. 89-104，2013.
- 5) 西村宏之：最近の逸泥防止材料について，石油技術協会誌，第57巻5号，pp. 480-485，1992.9.
- 6) 社団法人 日本基礎建設協会：場所打ちコンクリート杭の施工と管理，2009.6.
- 7) 地盤工学会：杭基礎のトラブルとその対策（第1回改訂版），2016.11.
- 8) 西村昌宏，神田政幸，西岡英俊，館山勝，千葉佳敬：掘削泥水中に打設される場所打ちコンクリートの品質に関する研究，土木学会第63回年次学術講演会，2008.9.
- 9) 柴山充弘，梶原莞爾” 高分子ゲルの動向：つくる・つかう・みる”，CMC出版 pp168~172
- 10) 小西真治：[鉄道総研パテントシリーズ(110)] トンネル空洞充填工法（アクアグラウト工法），RRR，Vol.66，No.6，pp.36-37，2009.06
- 11) 近藤義正，仲山貴司，赤木寛一：掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用，土木工学会論文集C，Vol. 64，No. 3，pp. 505-508，2008.
- 12) 高木清，細井武，赤木寛一：飽和砂地盤における連続地中壁掘削時の溝壁の安定機構について，土木学会論文集No.693/VI-53，pp168，2001.12
- 13) 小泉真五：各論 アースドリル工法の安定液管理値およびその問題点，基礎工256号 特集 安定液の特性と管理，vol.22，pp.41-44，1994.11.
- 14) 一ノ瀬勤，仲野拓美：報文 TBH杭工事における安定液の配合と管理，基礎工256号 特集 安定液の特性と管理，vol.22，pp.45-49，1994.11.
- 15) 浅野均，赤木寛一，近藤義正：高吸水性ポリマー掘削安定液のアースドリル工法への適用，第59回地盤工学会シンポジウム論文集，pp. 693-698，2014.
- 16) 環境省：建設廃棄物処理指針（平成22年度版），建設工事から生ずる廃棄

物の適正処理について（通知），環産第110329004号，pp. 16-17，2011. 3.

- 17) 浅野均，下坂賢二，赤木寛一，近藤義正：高吸水性ポリマー材を利用した地盤掘削安定液の基本性状と場所打ち杭工法への適用，土木学会論文集 F1，Vol. 73 ， No. 2 ， pp. 71-87、2017. 10.

付録

付録A：高吸水性ポリマー材の安全性資料

付録B：施工実績（2017.3現在）

付録A：高吸水性ポリマー材の安全性資料

(1) 有害性について

次頁の安全性データ（MSDS）に記載の通り，有害性を示す情報なし．

(2) 環境汚染物質の管理

高吸水性ポリマー材製造に使用する原料及び生産工程には重金属のような環境汚染物質は使用していない．重金属含有量は下表のとおり，環境への悪影響を及ぼさないよう管理されている．

分析項目		分析検査結果	
		管理値	検出限界
重金属	ヒ素 (As ₂ O ₃)	検出限界以下	0.1ppm
	鉛	検出限界以下	0.05ppm
	カドミウム	検出限界以下	0.01ppm
	総水銀	検出限界以下	0.01ppm
	総鉛	5.0 ppm 以下	0.5ppm

(3) 土壌中での変異による環境汚染の可能性

土壌中に存在する場合，土壌から水系へ流出する場合，土壌表面へ出てくる場合のいずれにおいても環境にあく影響を及ぼすような物質には変化しないため，環境への影響は極めて小さい．

a) 土壌中に存在する場合

架橋ポリアクリル酸ソーダ系であるため，土中に残留しても微生物による分解は生じない．長期的な可能性としては土壌中の多価金属塩との結合による水膨張性能の低下が考えれるがpHは当初の中性域を保持する．また，架橋体であるため基本的に水に溶けだすことはなく，地下水の汚染につながらない．

b) 土壌から水系へ流出，または土壌表面にでてきた場合

長鎖のポリマー同士が架橋されているので水に溶けることはなく，水中でも基本的に安定している．しかし，太陽光（特に紫外線）に当たると徐々に分解し，架橋が切れて非架橋（長鎖）の水溶性ポリアクリル酸ソーダになる．この非架橋ポリアクリル酸ソーダは国内では食品添加物として認可されており，ヨーロッパでは洗剤のビルダーとして大量に使用されているが，特に問題は発生していない．

(4) 化学物質等安全データシート (MSDS)

1. 製品及び会社情報

製品名 : Geosap
(英文名) : GEOSAP
会社名 : 三洋化成工業株式会社
(英文名) : Sanyo Chemical Industries, Ltd.
住所 : 京都市東山区一橋野本町11番地の1
担当部門 : 製品等審査部
緊急連絡電話番号 : (075) 541-4330
問合わせ電話番号 : (03) 5200-3478(営業業務部)
FAX番号 : (03) 3279-3139(営業業務部)
SDS No. : 002320302

2. 危険有害性の要約

GHS分類

物理化学的危険性
引火性液体 : 分類対象外
健康に対する有害性
急性毒性(経口) : 区分外
急性毒性(経皮) : 区分外
急性毒性(吸入:ガス) : 分類対象外
急性毒性(吸入:蒸気) : 区分外
急性毒性(吸入:粉塵、ミスト) : 区分外
皮膚腐食性/刺激性 : 区分外
眼に対する重篤な損傷/眼刺激性 : 区分外
呼吸器感受性 : 分類できない
皮膚感受性 : 区分外
生殖細胞変異原性 : 分類できない
発がん性 : 分類できない
生殖毒性 : 分類できない
特定標的臓器毒性(単回ばく露) : 分類できない
特定標的臓器毒性(反復ばく露) : 分類できない
吸引性呼吸器有害性 : 分類できない
環境に対する有害性
水生環境有害性(急性) : 分類できない
水生環境有害性(長期間) : 分類できない
オゾン層への有害性 : 分類できない

ラベル要素

絵表示 : -
注意喚起語 : -
危険有害性情報 : -

<取扱い注意>

- <安全対策>
- ・取扱う前に、「安全データシート」をよくお読みのうえ作業して下さい。
 - ・炎および高温のものから遠ざけてください。
 - ・飲み込んだり、吸い込んだり、眼、皮膚に触れないようにし、取扱い中は、保護眼鏡、保護手袋、保護マスクなどの適切な保護具を着用して下さい。
 - ・取扱い後は、手、顔などをよく洗い、うがいをして下さい。
- <救急処置>
- ・火災時には、炭酸ガス、粉末または泡消火器で初期消火に当たり、火災が広がった場合は、泡消火剤または多量の噴霧水で消火して下さい。
 - ・飲み込んだ場合は口をすすいで下さい。無理に吐かせないで下さい。
 - ・吸入した場合は空気の新鮮な場所で、呼吸しやすい姿勢で休息させて下さい。
 - ・皮膚に付着した場合は多量の水と石鹼で洗って下さい。
 - ・眼に入った場合水で数分間注意深く洗って下さい。次にコンタクトレンズを着用していて容易に外せる場合は外して下さい。その後も洗浄を続けて下さい。
 - ・暴露または暴露の懸念がある場合は医師の診断／手当を受けて下さい。
- <保管>
- ・容器を密閉して換気の良い場所で保管して下さい。
- <廃棄>
- ・都道府県知事の許可を受けた専門の廃棄物処理業者に委託処理して下さい。

3. 組成、成分情報 (含有量は代表値)

単一製品・混合物の区別	単一製品
化学名	-
成分及び含有量	アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物 95%
	水 5%
化審法番号	「あり」または「対象外」
安衛法番号	「あり」または「対象外」
CAS No.	あり
危険有害成分及び不純物	アクリル酸重合物のナトリウム塩 95%

4. 応急措置

吸入した場合	: 被災者を新鮮な空気の場所に移動させ安静にし、必要に応じて医師の診断を受ける。
皮膚に付着した場合	: 直ちに石鹼と水で付着部分をよく洗う。外観に変化があるか痛みが続く場合は、医師の診察を受ける。
目に入った場合	: 直ちに清浄な水で15分以上洗眼(まぶたの裏までよく洗う)した後、速やかに医師の処置を受ける。
飲み込んだ場合	: 水で口の中を洗浄し、コップ1~2杯の水または牛乳を飲ませる。直ちに医師の処置を受ける。無理に吐かせてはならない。 被災者に意識がない場合は、口から何も与えてはならない。

5. 火災時の措置

消火剤	: 二酸化炭素、粉末、泡、水噴霧
使ってはならない消火剤	: 棒状水
特定の消火方法	: 火元への燃焼源を絶ち、消火剤を使用して消火する。 周囲の設備などに散水して冷却する。
消火を行う者の保護	: 粉塵が飛散した場合は燃える可能性があるため、消火活動は、可能な限り風上から行い有毒なガスの吸入を避ける。 消火作業では、適切な保護具(手袋、眼鏡、マスク)を着用する。

6. 漏出時の措置

- 人体に対する注意事項 : 漏出防止、除害などの作業は、必ず、保護具(手袋、保護眼鏡)を着用する。
水分を吸収しゲルとなったものは滑り易いので注意する。
- 環境に対する注意事項 : 流出した製品が河川などに排出され、環境への影響を起こさないように注意する。
- 回収、中和、封じ込め及び浄化の方法・機材
: 付近の着火源となるものを取り除く。
漏出したものをすくいとり、または掃き集めるなど、粉塵の飛散しない方法で空容器に回収する。
残留物は真空で吸い取る等して、粉塵の飛散しない方法で取り除く。
残留分が極少量の場合は、多量の水で洗い流す。

7. 取扱い及び保管上の注意

- 取扱い
- 技術的対策 : 作業場の換気を十分に行い、保護眼鏡、保護手袋等の適切な保護具を着用し、直接の接触を防ぐ。
- 局所排気・全体換気 : 「8. 暴露防止及び保護措置」に記載の局所排気、全体換気を行う。
- 注意事項 : 強酸化剤との接触は避ける。
火気を近づけない。
粉塵が滞留すると爆発の恐れがある。
- 安全取扱い注意事項 : 取扱い後は、手、顔などをよく洗い、うがいをする。
- 保管
- 適切な保管条件 : 高温、多湿の場所を避け、通気の良い屋内で密封保管する。
高温多湿下で長期間保管することにより着色するおそれがある。
吸湿すると品質劣化を起こす。吸湿しないように注意する。
- 包装容器材料 : 製品使用容器に準ずる。

8. 暴露防止及び保護措置

- 設備対策 : 蒸気、粉塵またはヒューム、ミストが発生する場合は、局所排気装置を設置する。
粉塵が滞留する場合は、機器類は防爆構造とし、設備は静電気除去対策を実施する。
取扱い場所の近くに、洗眼および身体洗浄のための設備を設置する。
- 管理濃度 : 設定されていない
- 許容濃度
- 日本産業衛生学会 : (TWA)8mg/m³(第3種粉塵(総粉塵)) (1)
- ACGIH : (TWA)10mg/m³(I)(Particles (insoluble or poorly soluble) Not Otherwise Specified) [PNOS] (2)
- (TWA)3mg/m³(R)(Particles (insoluble or poorly soluble) Not Otherwise Specified) [PNOS] (2)
- 当社推薦許容濃度:0.05mg/m³(吸水性樹脂)
- 保護具
- 呼吸器用の保護具 : 粉塵が発生する作業環境下では防塵マスクを使用する。
- 手の保護具 : 不浸透性保護手袋
- 目の保護具 : 側板付保護眼鏡
- 皮膚及び身体の保護具 : 長袖作業衣

9. 物理的及び化学的性質 (代表値)

物理的状态

形状	: 粉末状
色	: 白色
臭い	: ほとんど無臭
pH	: 7.5(製品の0.1%イオン交換水分散液)
物理的状態が変化する特定の温度/温度範囲	
沸点	: 沸点を示す前に熱分解する。
融点	: 融点を示す前に熱分解する。
引火点	: 引火せず(分解する)(セタ密閉式)
発火点	: データなし
爆発特性	
爆発限界	: データなし
嵩比重	: 0.65(25°C)
溶解性	
溶媒に対する溶解性	水… 不溶(ゲル化) トルエン、メタノール、酢酸エチル…不溶
粘度	: 40000mPa·s(25°C) (製品の1.0%イオン交換水分散液)
粉塵爆発性	: 粉塵爆発下限界濃度:1200g/m ³ 以上 (3)
蒸気圧	: データなし
分解温度	: データなし
n-オクタノール/水分配係数	
	: データなし

10. 安定性及び反応性

安定性	: 通常の取扱い条件においては、光、熱、衝撃に対して化学的に安定。
危険有害反応性の可能性	
	: 強酸化剤とは反応して危険。
避けるべき条件	: データなし
混触危険物質	: 強酸化剤
危険有害な分解生成物	
	: データなし
その他	: データなし

11. 有害性情報 (本品または成分の情報およびその類似品の情報)

急性毒性(経口)	: 区分外 LD50>2000mg/kg(ラット)(区分外) (3)
急性毒性(経皮)	: 区分外 アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物 ポリマーであり区分外とした。
急性毒性(吸入:ガス)	: 分類対象外 GHSの定義におけるガスではない。
急性毒性(吸入:蒸気)	: 区分外 アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物 ポリマーであり区分外とした。
急性毒性(吸入:粉塵、ミスト)	: 区分外 アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物 ポリマーであり区分外とした。
皮膚腐食性/刺激性	: 区分外 ヒトパッチ試験:皮膚に対して安全(区分外) (3) 一次刺激性:無刺激(モルモット、2%生理食塩液)(区分外) (3) 連続(累積)刺激性:無刺激(モルモット、14日間、2%生理食塩液)(区分外) (3)
眼に対する重篤な損傷/眼刺激	: 区分外

	無刺激性(ウサギ、洗眼群)(区分外) (参考)粉末が角膜を傷つける恐れがある。	(3)
呼吸器感作性	: 分類できない (参考)微粉を吸入すると、気管に炎症を起こす恐れがある。	
皮膚感作性	: 区分外 感作性なし(モルモット)(区分外)	(3)
生殖細胞変異原性	: 分類できない (参考)エームズ試験=陰性	(3)
発がん性	: 分類できない	
産業衛生学会	: 本品の構成成分は、発がん性物質としてリストアップされていない。	(1)
IARC	: 本品の構成成分は、IARCモノグラフにランクアップされていない。	(4)
生殖毒性	: 分類できない データなし	
特定標的臓器毒性 (単回ばく露)	: 分類できない データなし	
特定標的臓器毒性 (反復ばく露)	: 分類できない データなし	
吸引性呼吸器有害性	: 分類できない データなし	

12. 環境影響情報 (本品または成分の情報およびその類似品の情報)

水生環境有害性(急性)	: 分類できない
生態毒性	: データなし
水生環境有害性(長期間)	: 分類できない データなし
残留性/分解性	: データなし
生体蓄積性	: データなし
土壌中の移動性	: データなし
その他の有害性	: データなし
オゾン層への有害性	: 分類できない データなし

13. 廃棄上の注意

都道府県知事の許可を受けた専門の廃棄物処理業者に委託処理する。

14. 輸送上の注意

国際規制	: 航空輸送はICAO/IATA及び海上輸送はIMDGの規則に従う。
国連分類	: 国連の分類基準に該当しない
国連番号	: 国連の分類基準に該当しない
海洋汚染物質	: 該当せず
国内規制	: 消防法、労働安全衛生法等に定められている運送方法に従う。 船舶安全法に定められている運送方法に従う。
輸送の特定の安全対策及び条件	: 運搬に際しては、容器の漏れのないこと及び所定の表示のあることを確かめ、転倒、 落下、損傷がないよう積み込み、荷崩れの防止を確実にを行う。
緊急時応急措置指針番号	: 171

15. 適用法令

化審法	: 特定化学物質	: 該当せず
	: 監視化学物質	: 該当せず
	: 優先評価化学物質	: アクリル酸重合物のナトリウム塩

労働安全衛生法	： 特化則	： 該当せず
	： 有機則	： 該当せず
	： 表示物質(法57条の関係)	： 該当せず
	： 通知対象物(法57条の2の関係)	： 該当せず
	： 指針・通達物質(既存変異原化学物質等)	： 該当せず
	： 通達による表示物質	： 該当せず
	： 危険物	： 該当せず
	： 安衛則326条の関係	： 該当せず
化学物質管理促進法(PRTR法)	： 特定第一種指定化学物質	： 該当せず
	： 第一種指定化学物質	： 該当せず
	： 第二種指定化学物質	： 該当せず
消防法	： 危険物	： 該当せず
	： 指定可燃物	： 該当せず
毒物及び劇物取締法	： 毒物、劇物	： 該当せず
危険物船舶運送及び貯蔵規則	： 危険物	： 該当せず
輸出入貿易管理令	： 規制物質	： 該当せず
薬事法	： 日本薬局方	： 該当せず

<コメント>

- (1)本品(吸水性樹脂)の特殊な用途への使用は、その用途、用法に適した安全対策等を実施のうえ、使用者の責任において行って下さい。例えば、用途として以下の事例があります。
- (a)直接、食品・食材と接触する商品及び／又は用途
 - (b)本品に吸水された水を介し、食品・食材と接触する商品及び／又は用途
 - (c)人の口や目に直接入る恐れがある商品及び／又は用途
 - (d)誤って直接口に入れる恐れが多い商品及び／又は用途
- (2)ご用途での保管上の注意事項
- (a)吸水性樹脂は、高温高湿下で着色する恐れがあります。水、雨等を吸入します。吸水性樹脂を用いた各商品は、密閉して保管下さい。
 - (b)吸水性樹脂の含水ゲルは、長期の光を受けると、ゲル状態から流動化していきます。ゲル状でのご用途は、直射日光を避けて下さい。

16. その他の情報

- (1)「産業衛生学雑誌」(2013/9)(日本産業衛生学会)
- (2)「TLVs and BEIs」(2013)(ACGIH)
- (3)安全性試験機関測定値
- (4)「化学物質の発がん性評価とその分類基準(第7版)」(2007)(JETOC)

* この情報は新しい知見に基づき改訂されることがあります。

* ここに記載された情報は、当社の最善の知見に基づくものですが、情報の完全さ、正確さを保証するものではありません。すべての化学品には未知の有害性がありうるため、取扱いには細心の注意が必要です。本品の適性に関する決定は使用者の責任において行ってください。

記載内容の問い合わせ先

会社 : 三洋化成工業株式会社
 担当部門 : 担当営業課

付録B：施工実績（2017.3現在）

高吸水性ポリマー安定液 施工実績
（AWARD-Sapli 工法）

件数	場所打ち 工法	杭用途	発注者	施工時期	杭径 (mm)	掘径 (mm)	本数 (本)	掘削長 (m)	掘削土量 (m3)
1	ED	建築基礎杭	民間	H23.12 ~ H24.1	1000~1500	無	9	17.2	208.6
2	ED	建築基礎杭	民間	H24.4 ~ H24.5	1100~1300	1300~1800	21	30	740.0
3	ED	鉄道高架橋 基礎杭	民鉄	H24.7 ~ H24.7	1200	無	14	9	142.5
4	ED	建築基礎杭	民間	H24.7 ~ H24.8	1500	1900~2100	6	27	310.9
5	ED	建築基礎杭	民間	H24.8 ~ H24.9	1000~1200	1600	18	18.3	375.0
6	BH	抑止杭	電力	H24.10 ~ H24.11	500,600	無	23	14, 16	97.1
7	ED	鉄道高架橋 基礎杭	民鉄	H25.1 ~ H25.2	1200	無	38	9.5	408.1
8	RE	道路橋基礎杭	国交省	H25.3 ~ H25.3	1500	無	4	67.5	477.0
9	ED	鉄道高架橋 基礎杭	民鉄	H25.4 ~ H25.5	1200~1300	無	68	18~20	2043.0
10	TBH	鉄道高架橋 基礎杭	民鉄	H25.4 ~ H25.7	1500	無	5	31.5	279.0
11	ED	建築基礎杭	民間	H25.8 ~ H25.10	1000~1500	1200~2600	71	34	3500.0
12	RE	歩行者連絡橋 基礎杭	組合	H25.11 ~ H25.12	1500~2500	無	6	35~36.7	720.0
13	ED	鉄道高架橋 基礎杭	民鉄	H26.2 ~ H26.3	1200	無	15	9.5	161.1
14	ED	建築基礎杭	民間	H26.6 ~ H26.6	1800	2200~2900	16	23	1014.3
15	RE	歩行者連絡橋 基礎杭	組合	H26.7 ~ H26.8	1500~2500	無	5	35	656.2
16	ED	建築基礎杭	民間	H27.3 ~ H27.4	1500	1800~2200	15	26.8~31.1	768.3
17	ED	建築基礎杭	民間	H28.5 ~ H28.7	1500~1700	1900~3000	30	29	2072.9
18	ED	建築基礎杭	民間	H28.12 ~ H29.2	1700~1900	2200~3400	20	55.5	2971.0
						計	384		16945.0

※ ED:アースドリル工法、RE:リバース工法、TBH:トップドライブリバース工法、BH:ロータリーボーリング工法

博士論文概要

論文題目

高吸水性ポリマー材を利用した地盤掘削安定液の基本性状と場所打ち杭工法への適用

Utilization of a Superabsorbent Polymer Suspension for The Cast In-situ Pile Construction

申請者

浅野	均
Hitoshi	ASANO

2018年2月

安定液で掘削地盤の孔壁を保持する場所打ち杭工法は、1930年頃にヨーロッパで開発され、日本においては既製杭の打設に伴う騒音・振動が建設公害として社会問題化した1960年代から徐々に採用されるようになった。この場所打ち杭工法に用いられる地盤掘削安定液は、初期の頃はベントナイトを主材とした懸濁液であったが、地中連続壁工法における研究・開発を背景に、安定液の増粘性やろ水減少効果を目的にCMC（Carboxy-Methyl Cellulose）が1970年代より使用されはじめ、現在使用されている安定液はCMCを一部含むベントナイト系安定液が広く採用され、土質等の条件により配合割合を変化させて使用されている。

場所打ち杭工法の安定液は可能な限り繰り返し使用されるが、掘削土砂の混入やコンクリート打設時のセメント成分の影響などによって徐々に性能が低下する。この劣化した安定液は産業廃棄物の「汚泥」として処分されるが、近年、最終処分場の不足、遠隔化などの問題が顕在化している。また、既往のベントナイト系安定液は、実績は豊富である一方、孔壁にベントナイトが付着して杭の最大周面摩擦力や有効杭径が減少することや鉄筋にベントナイトが付着して鉄筋の付着強度が低下するなどの品質上の課題があり、これらの課題の解決が望まれている。

本研究は、既往のベントナイト系に代わる新たな地盤掘削安定液として、外的条件変化によって吸水状況が変動する特性や逸泥防止材料としての優れた遮水性能が知られている高吸水性ポリマー材に着目し、高吸水性ポリマー材を懸濁した安定液を考案し、その基本的性状の調査と既往の場所打ち杭工法用掘削安定液との性能比較をもとに、上記の産業廃棄物の低減や杭の品質改善につながることを、国内外で初めて実験的に調査したものである。特に、この安定液をアースドリル工法とリバース工法による場所打ち杭工法の現場に適用し、その管理手法を考案するとともに産廃処分量の低減効果及びコスト改善効果を実証した。

本論文の構成は7章からなり、以下に各章の概要を述べる。

第1章では、高吸水性ポリマー材(以下、ポリマー材)を利用した安定液の開発の目的と地盤掘削用安定液として必要な機能を明らかにするとともに、本論文の構成と各章の概要を要約した。

第2章では既往の地盤掘削用安定液全般について整理を行い、孔壁安定性や流動性に係る施工上の課題、場所打ち杭本体構造に与える影響などを明らかにした。

また、建設分野でのポリマー材の利用例を調査し、この材料を地盤掘削用安定液に応用した場合における流動性・孔壁安定性・安定液の最終処分時の減量化などの優位性が期待できる機能を明確化した。

第3章では、高吸水性ポリマー安定液(以下、ポリマー安定液)を、場所打ち杭工法における孔壁の安定性と掘削、コンクリート置換性を成立させるために必要な粘性を配合・調整できることを前提とした「水(溶媒)と吸水膨張させたポリマー材が懸濁した溶液」と定義し、ポリマー材の材料特性とポリマー安定液の基本性状を実験的に解明した。ポリマー安定液の基本性状を実験的に調査するために、ポリマー安定液の作成方法を定め、その性

状に影響する比重・ろ過水量・膜厚・pH・電気伝導率・溶媒の塩分濃度・温度などの測定項目を抽出し、ポリマー材の添加率とポリマー安定液の粘性及び比重の関係、使用溶媒の電気伝導率と吸水倍率との関係を実験的に明らかにした。その結果、ポリマー材の吸水膨張の程度にかかわらず、ポリマー安定液の性能を支配する粘度はポリマー材に吸着された水分を除く余剰水率に依存することを示した。

第4章は、ポリマー安定液の場所打ち杭工法への適用性について、第2章で示した既往の安定液の施工上の課題と場所打ち杭本体構造に与える影響の観点から、各種室内実験を通じて検証した内容についてまとめたものであり、ポリマー安定液実用化の核心となる章である。

まず施工上の課題となる孔壁安定性については、安定液の遮水性能確認試験装置を用いて、粒径の異なる模擬砂地盤に対するポリマー安定液と既往のベントナイト系安定液の遮水性能を比較した。その結果、遮水性能を発揮できる適用地盤の粒径範囲がベントナイト系安定液よりも広く、かつ遮水性能を発揮するまでに要する時間も短いことが判明し、優れた遮水性能を有することがわかった。

流動性については、既往の安定液の流動性を表す指標であるファンネル粘性に着目して、ポリマー安定液のファンネル粘性を調査した。第3章で得られた余剰水率と粘度の関係から、余剰水率とファンネル粘性の関係式を求めた。

適用深度については、加圧が可能なベーンせん断試験装置を用いて、掘削深度 50m 程度に相当する地下水圧下におけるポリマー安定液と水道水のベーンせん断抵抗を比較した。その結果、加圧に伴いポリマー安定液のベーンせん断抵抗は微増するものの水道水と同程度であることを確認した。

ポリマー安定液は、塩化カルシウムなどの二価の金属イオンを添加して余剰水を含む溶媒の電気伝導率を上昇させることでポリマー材に吸着されていた水が溶出する。これにより懸濁状態が崩れてポリマー材が土粒子とともに沈降し、安定液の上部に排水基準を満足する水が分離でき、廃液処分量の減量化が図れる。ポリマー安定液は比重によって土砂分離度が変わるため、比重の異なる安定液の分離試験を実施し、安定液の比重が 1.05 以下であれば分離度 70%以上が確保できるが、比重が大きくなると分離度が低下する傾向があることを確認した。

次に、場所打ち杭本体への影響を明らかとするために、コンクリートの置換性・杭本体の出来形に影響する泥膜厚さ・鉄筋とコンクリートとの付着性能への影響に係る実験をおこなった。まず杭本体を造成するコンクリートの置換性については、水槽内に満たしたポリマー安定液にコンクリートを底部から打設して置換性に問題がないことを確認した。杭本体の出来形に関係する泥膜厚さについては、既往の安定液のろ過試験装置を用いて、安定液中の粘土分混入率を変化させた場合のポリマー安定液と既往のベントナイト系安定液のろ紙に付着した泥膜厚さを比較した。その結果、既往の安定液では粘土分混入率の増加に伴い泥膜厚さが 1mm 程度から急激に増大するのに対して、ポリマー安定液の場合は 0.5mm 程度で十分薄く、粘土混入率に無関係に一定であることを確認し、泥膜によるマ

ッドケーキの増大で杭径を縮小させる恐れがないことがわかった。鉄筋とコンクリートとの付着性能への影響については、安定液をコンクリートで置換して作製した供試体の鉄筋引き抜き試験を実施し、既往の安定液より付着応力度が約 4~7%向上する結果が得られ、杭本体の品質向上が期待できると判断された。

さらに、ポリマー安定液の環境特性（材料特性・温度特性・紫外線の影響・pH の影響）についてもそれぞれ調査及び実験をおこない、環境破壊につながることもなく、かつ通常の施工条件において施工性を阻害することもなく、既往の安定液と比べ優れた特性を有した場所打ち杭工法の安定液として適用できることを確認した。なおポリマー安定液の長期安定性を保つための増粘剤の効果確認実験をおこない、安定液中に累積する細粒分による劣化を抑制できることを確認した。

第 5 章では、第 4 章までに得られた室内実験結果に基づいて、ポリマー安定液を実際に現場で使用するための管理手法を検討した。管理項目及び管理限界値については、既往の安定液で通常使用するものにポリマー材の吸水特性に関係する使用溶媒の電気伝導率を加えた内容とし、現場管理手法としては、現場使用水及び地下水の調査、安定液の試験練り・配合計画、現場配合及び施工中の管理、安定液の破棄という手順でフロー図を準備した。

第 6 章では、第 5 章で示したポリマー安定液の現場管理手法を実際の場所打ち杭施工（アースドリル工法、リバーズ工法）に適用し、その妥当性を検証した。

アースドリル工法については、掘削長 34m で杭径 1~1.5m 程度の 74 本、掘削長 53.7m で杭径 1.7~1.9m の 20 本の 2 現場でポリマー安定液による場所打ち掘削杭施工を特段のトラブルもなく連続施工し、掘削残土の泥濘化が抑えられたため一般残土として取り扱うことができた。リバーズ工法についても、掘削長 35.5~37m で杭径 1.5~2.5m の 5 本の杭を特段のトラブルもなく連続施工できた。

施工中における深度方向でのポリマー安定液の比重・ファンネル粘性・電気伝導率は深度ごとにばらつきもなく一定していることを確認し、安定液として優れた性状を有しているとともに、第 5 章で示した管理手法が現場管理手法として使用できることを実証した。

また、アースドリル工法の杭 20 本の現場では安定液の最終処分時で約 80%の分離に成功し、リバーズ工法の現場では安定液の最終処分時では比重 1.1 以上であったが約 29%の分離に成功し、廃液処分量の低減効果が実証された。

ポリマー安定液と既往の安定液との経済性比較では、約 32%の材料コスト低減に加え、安定液及び掘削残土の産廃処分量の低減効果によるコスト低減により、ポリマー安定液はコスト改善効果も期待できることがわかった。

第 7 章は本論文の結論であり、本研究で得られた主要な結果を総括するとともに、今後の課題について要約した章である。

研究業績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	高吸水性ポリマー材を利用した地盤掘削安定液の基本性状と場所打ち杭工法への適用、土木学会論文集 F1, Vol. 73 , No. 2 , pp. 71-87、2017 年 10 月、 <u>浅野均</u> , 下坂賢二, 赤木寛一, 近藤義正
○論文	高吸水性ポリマー掘削安定液のアースドリル工法への適用、第 59 回地盤工学シンポジウム論文集、21-3、pp. 693~698、2014 年 11 月、 <u>浅野均</u> , 赤木寛一, 近藤義正
2. 講演	
○講演	高吸水性ポリマーを添加した地盤掘削用安定液の基本性状、土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol 69、III-234、2014 年 9 月、岩崎光紀, 赤木寛一, <u>浅野均</u> , 請川誠, 下坂賢二
○講演	特殊吸水性ポリマー安定液による地盤掘削技術(AWARD-Sapli 工法)の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol 68、VI-042、2013 年 9 月、請川誠, 赤木寛一, 近藤義正, <u>浅野均</u> , 下坂賢二
○講演	高吸水性ポリマーを用いた地下水流保全型山留め壁工法の研究開発、第 11 回地盤工学会関東支部発表会、2014 年 10 月、佐藤雅恵, 赤木寛一, 岩崎光紀, <u>浅野均</u> , 請川誠, 下坂賢二, 近藤義正, 上原精治
○講演	高吸水性ポリマーを添加した地盤掘削用安定液の開発、第 10 回地盤工学会関東支部発表会、2013 年 10 月、坂本達也, 赤木寛一, 岩崎光紀, <u>浅野均</u> , 請川誠, 下坂賢二, 近藤義正, 上原精治
○講演	気泡掘削による深層混合処理工法 (AWARD-Demi 工法) の開発、土木学会「土木建設技術発表会 2014」、pp191-196、2014 年 11 月 26 日、下坂賢二, 赤木寛一, 近藤義正, <u>浅野均</u> , 三反畑勇, 安井利彰, 俵豊光
○講演	AWARD-Demi 工法のフィールド試験 (その 3 : 品質評価)、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol69、VI-671、2014 年 9 月、安井利彰, 赤木寛一, 近藤義正, 土屋敦雄, <u>浅野均</u>
○講演	気泡安定液の溝壁安定化機構について、土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、Vol 39、III-1、2012 年 9 月、野口欣彦, 赤木寛一, 松田光, <u>浅野均</u>
○講演	WARD-Demi 工法の開発(その 3:施工試験結果)、土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol 67、VI-302 頁、2012 年 9 月、安井利彰, 赤木寛一, 近藤義正, 土屋敦雄, <u>浅野均</u>
講演	新型雨水貯留浸透施設工法の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol 70、VI-258 頁、2015 年 9 月、下坂賢二, <u>浅野均</u> , 請川誠, 田中孝, 津田和義, 朝妻雅博, 竹森敬介
講演	穴あき帯状鋼板によるコンクリートのひび割れ抑制効果について、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol 69、VI-328、2014 年 9 月、関根一郎, <u>浅野均</u> , 田中徹
講演	外殻先行トンネル構築法におけるボルト拘束型モルタル充てん継手の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol 66、pp95-96、VI-048、2011 年 9 月、請川誠, <u>浅野均</u> , 下坂賢二
講演	鉄道連続立体交差事業における新しい直上高架化工法の開発(その 1)、土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部 Vol 66、pp657-658、VI-329、2011 年 9 月、小林修, <u>浅野均</u> , 佐藤郁
講演	鉄道連続立体交差事業における新しい直上高架化工法の開発(その 2)、土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部 Vol 66、pp659-660、VI-330、2011 年 9 月、小川伸也, <u>浅野均</u> , 小林修, 佐藤郁
講演	主桁分割型合成セグメントの開発、土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部 Vol65、pp455-456、VI-228、2010 年 9 月、請川誠, <u>浅野均</u> , 下坂賢二

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	開削地下構造物の急速構築技術(さくさく SLIT 工法の開発)、土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部 Vol164、pp399-400,VI-200、2009 年 9 月、請川誠、 <u>浅野均</u> 、下坂賢二、辻利幸、宇田川徳彦
講演	分割プレキャスト円管接合法の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部 Vol164、pp237-238,VI-119、2009 年 9 月、小林修、 <u>浅野均</u> 、佐藤郁、山中典幸、安井賢太郎
講演	障害物直下のソイルセメント壁構築技術(SWING ウォール工法の開発)、土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部 Vol163、pp531-532,VI-266、2008 年 9 月、請川誠、 <u>浅野均</u> 、茂雅夫、寫野知明、下坂賢二
講演	プレキャストアーチ式高架橋の静的載荷・振動試験、土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol162、6-029、2007 年 9 月、 <u>浅野均</u> 、請川誠、佐藤郁、小林修
講演	プレキャストコンクリート製塔状構造物の強度性能に関する実験的研究、土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol162、6-028、2007 年 9 月、野本禎久、 <u>浅野均</u> 、請川誠、山中典幸
講演	プレキャストアーチ式高架橋「すいすい SWAN 工法」の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol161、6-183、2006 年 9 月、小林修、 <u>浅野均</u> 、請川誠、佐藤郁、宇田川徳彦
講演	プレキャストアーチ式高架橋「すいすい SWAN 工法」実物大組立性能確認試験、土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol161、6-184、2006 年 9 月、佐藤郁、 <u>浅野均</u> 、請川誠、小林修、宇田川徳彦
講演	立体交差急速施工に係わる橋脚柱先行建て込み工法の性能確認試験結果、土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol160、6-038、2005 年 9 月、小林修、福井次郎、 <u>浅野均</u> 、請川誠、新田明
講演	立体交差急速施工に係わる橋脚柱先行建て込み工法の適用性について、土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol159、6-154、2004 年 9 月、小林修、 <u>浅野均</u> 、中谷眞二、新田明
講演	立体交差急速施工技術「すいすい MOP 工法」上部工施工試験、土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol159、6-155、2004 年 9 月、神宮敏樹、大波修二、栗原正幸、 <u>浅野均</u> 、小林修
講演	立体交差工事における二次渋滞の回避を狙った急速施工法の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol158、565-566、2003 年 9 月、朝倉弘明、 <u>浅野均</u> 、中谷眞二、新田明、大波修二
講演	急速立体交差施工技術「すいすい MOP 工法」の開発、(社)日本道路協会、第 25 回道路会議、2003 年 11 月、 <u>浅野均</u> 、朝倉弘明
3. その他	
○その他	特殊ポリマー安定液を用いた場所打ち杭の施工例 AWARD(アワード)-Sapli(サブリ)工法、基礎工、Vol. 42、No. 3、pp. 46-49、2014 年 3 月、 <u>浅野均</u> 、赤木寛一、近藤義正、上原精治、請川誠、下坂賢二
その他	大口径プレキャスト円管を利用した風力発電設備の開発、基礎工、1 月号、2009 年 1 月、小林修、 <u>浅野均</u> 、山中典幸、安井賢太郎
その他	開削地下構造物の急速構築技術「さくさく SLIT 工法」の開発、電力土木、5 月号、2011 年 5 月、請川誠、 <u>浅野均</u>
○特許	地盤掘削用膨潤高吸水性ポリマー安定液組成物及びこれを用いた施工法、特許第 6113433 号、2017 年 3 月 24 日登録、赤木寛一、近藤義正、上原精治、 <u>浅野均</u> 、請川誠
○特許	透水性基礎の構築方法、特許第 6066757 号、2017 年 1 月 6 日登録、赤木寛一、近藤義正、上原精治、 <u>浅野均</u> 、請川誠

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○特許	段階式固化施工法、特許第 5513182 号、2014 年 4 月 4 日登録、赤木寛一、近藤義正、土屋敦雄、 <u>浅野均</u> 、請川誠
特許	鋼殻エレメントの継手構造、特許第 6115956 号、2017 年 3 月 31 日登録、 <u>浅野均</u> 、請川誠、下坂賢二
特許	浮体式洋上風力発電設備、特許第 6108445 号、2017 年 3 月 17 日登録、佐藤郁、 <u>浅野均</u> 、宇都宮智昭、吉田茂雄
特許	セグメントの継手構造、特許第 5752909 号、2015 年 5 月 29 日登録、 <u>浅野均</u> 、請川誠、下坂賢二
特許	地下構造物の構築方法及び地下構造物並びにそのためのプレキャストコンクリート部材、特許第 5513867 号、2014 年 4 月 4 日登録、 <u>浅野均</u> 、請川誠、下坂賢二、辻利幸
特許	直上高架橋の基礎工用施工装置及び施工方法、特許第 5477898 号、2014 年 2 月 21 日登録、 <u>浅野均</u> 、小林修、佐藤郁
特許	地盤浸透機能を備えた雨水貯留構造物、特許第 5190287 号、2013 年 2 月 1 日、 <u>浅野均</u> 、請川誠、小林修、佐藤郁、野本禎久、村野耕作、山中典幸、安井賢太郎
特許	直上高架橋の施工装置及び施工方法、特許 5187969 号、2013 年 4 月 24 日、 <u>浅野均</u> 、小林修、佐藤 郁
特許	合成セグメント、特許 5160521 号、2013 年 3 月 13 日、 <u>浅野均</u> 、請川誠、下坂 賢二 プレキャストコンクリート壁体の止水構造及びその施工方法、特許第 4836276 号、2011 年 10 月 7 日登録、 <u>浅野均</u> 、請川誠、下坂賢二、辻利幸、宇田川徳彦
特許	地中貫入体のための止水装置及びこれを用いた地中貫入体の施工方法、特許 4833089 号、2011 年 12 月 7 日、小玉正文、利根誠、日向利行、多田幸司、請川誠、下坂賢二、 <u>浅野均</u> 、浅井康彦、藤森英男、石本典義
特許	地下構造物の構築方法、特許第 4881555 号、2012 年 2 月 22 日、 <u>浅野 均</u> 、請川誠、朝倉弘明、小林修、神谷章、渡辺敬一、辻利幸、宇田川徳彦
特許	軽量盛土構造及びそのための樹脂発泡ブロック体並びにその構築方法、特許第 4747011 号、2011 年 5 月 20 日登録、 <u>浅野均</u> 、請川誠、小林修、下坂賢二、山下剛志、山田浩久
特許	立体高架橋構造の施工方法、特許第 4680803 号、2011 年 2 月 10 日登録、 <u>浅野均</u> 、請川誠、小林修、下坂賢二、辻利幸、宇田川徳彦
特許	プレキャスト工法による変断面塔状構造物、特許第 4494282 号、2010 年 4 月 16 日、 <u>浅野 均</u> 、請川誠、小林修、佐藤琢己、野本禎久、村野耕作
特許	シールド掘進機及びこれを用いた地下空間の構築方法、特許第 4461274 号、2010 年 2 月 26 日、 <u>浅野均</u> 、請川誠、吉沢武久、浅井康彦、柳楽毅、杉山雅彦、室延明、小松典彦
特許	外壁パネルの取付け構造及び外壁パネルの組立方法、特許第 4415081 号、2009 年 12 月 4 日登録、福井次郎、 <u>浅野均</u> 、請川誠、小林修
特許	多軸作業ロード掘削機を用いた拡幅掘削のアタッチメント・拡幅掘削方法及び装置、特許第 4385198 号、2009 年 10 月 9 日、 <u>浅野均</u> 、請川誠、内藤欣雄、柳楽毅、茂雅夫、平川悦雄
特許	地下水流動保全工法、特許第 4274898 号、2009 年 3 月 13 日登録、 <u>浅野均</u> 、請川誠、柳楽毅
特許	道路立体交差施工方法及び橋脚接続構造、特許第 4004423 号、2007 年 8 月 31 日登録、 <u>浅野均</u> 、朝倉弘明、林光芳、落合正水、町田佳則、立田浩研、大波修二、北嶋杉生、栗原正幸、菱木孝浩、長澤大次郎、新田明、中谷眞二

