

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

浅野 均¹・下坂 賢二²・赤木 寛一³・近藤 義正⁴

¹正会員 戸田建設株式会社 土木本部執務 (〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1)

E-mail: hitoshi.asano@toda.co.jp

²正会員 戸田建設株式会社 アーバンルネッサンス部 (〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1)

E-mail: kenji.shimosaka@toda.co.jp

³フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: akagi@waseda.jp

⁴正会員 有限会社 マグマ (〒247-0051 神奈川県鎌倉市岩瀬1306)

E-mail: ykondo@magumav.com

高吸水性ポリマー材は、1960年代以降、土木建設を含む幅広い分野で利用されてきた。本研究では、初期体積の500倍前後に吸水膨張させた粘性を有する高吸水性ポリマー安定液が、従来のベントナイト安定液に比べて、掘削地盤の安定性を向上させるとともに、場所打ちコンクリート構造物の品質向上、安定液掘削工法で発生する産廃処分量の減量化、施工の合理化が図れる優れた地盤掘削安定液であることを実験により確認した。この安定液を2種類の場所打ち杭工法現場に適用し、その管理手法を考案するとともに、高吸水性ポリマー安定液の性能と適用範囲を実証した。

Key Words : cast in situ pile, polymer suspension, soil stability, bearing capacity, waste soil

1. はじめに

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 (Sodium 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。

場所打ち杭工法の安定液に要求される性能は、掘削工法により違いはあるものの、主に、1) 掘削孔壁の崩壊防止性能、2) 掘削土砂の地上への搬出と分離性能、3) コンクリート打設時の良好な置換性能などである。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。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。

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。また、従来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。

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。また、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

効果を実証した。

2. 既往の地盤掘削安定液の概要と課題

(1) 既往の安定液の概要

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。

CMC とは、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であり、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、コンクリート打込み時の安定液の劣化を減少させるが、腐敗による粘性低下の影響を受けやすいので注意を要する。

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⁹⁾を表-1、管理項目と管理基準値の例⁹⁾を表-2に示す。

(2) 既往の安定液の課題

既往の安定液の課題を以下に示す。

a) 孔壁安定性・流動性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

表-1 安定液の標準的的配合表

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 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	m ²	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

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必要である。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。

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 (Ca²⁺) 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、上記の造壁を著しく低下させる。

b) 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。

3. 高吸水性ポリマー材の利用例と機能

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。特に、地下建設工事における高吸水性ポリマー材の利用例と安定液としての応用が期待できる機能を以下に示す。

(1) 施工時の地山との摩擦低減材

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、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。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。

(2) 掘削時の逸水を防止するための目詰め材⁵⁾

ベントナイト系安定液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。

(3) 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。この特性は、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。

4. 高吸水性ポリマー安定液

(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。

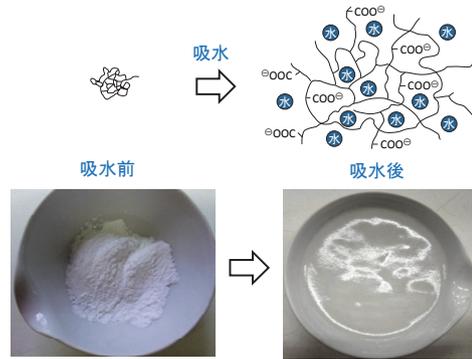


図-1 高吸水性ポリマー材の外観と吸水概念図

表-3 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%	
物理的状态	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)

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-1 左下に示すように平均中心粒径 35 μ m 程度の白色粉末状であり、紙オムツや土壤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、土壤中に存在する場合、土壤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 に、工場生産時における基本的な材料特性を示す。

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-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。

(2) 高吸水性ポリマー安定液の基本性状

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。

a) 安定液の作成方法

実験に使用する高吸水性ポリマー安定液の作成方法は、次の通りである。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。

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

b) 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4に示す。

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，孔壁の安定に関係しており，安定液の中に含まれる固体土粒子分の量に依存している。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-2）。

- ・測定する泥水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。

表4 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

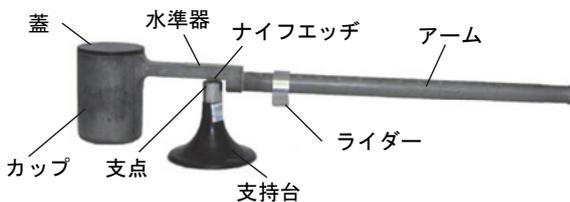


図-2 マッドバランス概要図

- ・少量の泥水が蓋の上に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泥水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。

2) ファンネル粘性と粘度

安定液の粘性はファンネル粘度計を用いて測定され，水道水のファンネル粘性は $F_v=18.5\pm 0.5(\text{sec})$ である。

また，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。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。

3) ろ過水量，膜厚

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。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, $\phi 90\text{mm}$ ）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。

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(FCSTestr35)を用いて測定した。

5) 吸水倍率

本研究では，ナイロンメッシュの袋を用いて，高吸水性ポリマー材の吸水倍率を測定した。吸水後の高吸水性ポリマー材を通過させないために，目開き $57\mu\text{m}$ のナイロンメッシュ（N-No255HD）を $10\text{cm}\times 40\text{cm}$ の長方形に切り取って折り返して，図-3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（写真-1 参照）。測定結果より，吸水倍率 Q (g/g) を式(2)で求めた。

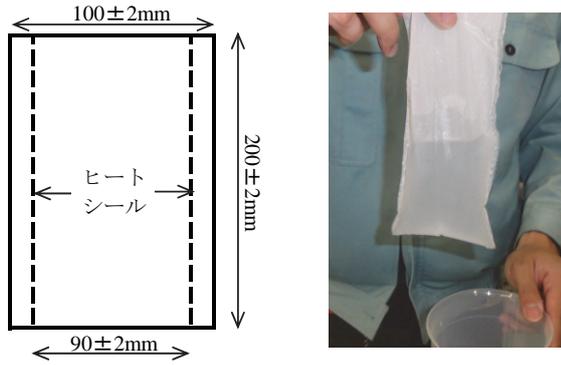


図-3 ナイロン製ティーバック 写真-1 吸水倍率測定状況

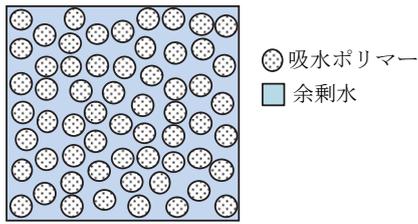


図-4 高吸水性ポリマー材を添加した水溶液

$$Q(\text{g/g}) = \frac{M_a - M_b - M_c}{M_c} \quad (2)$$

ここで、 M_a : 水切り後の質量 (g) , M_b : ナイロン 10cm×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)

c) 基本性状

高吸水性ポリマー安定液は、図-4 の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。

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-5 に示す。図-5 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。従来のベントナイト系安定液が 1m³ 当り 30~50kg 前後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 $P=0.1(\%)$ 、すなわち水 1m³ 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-6 に使用

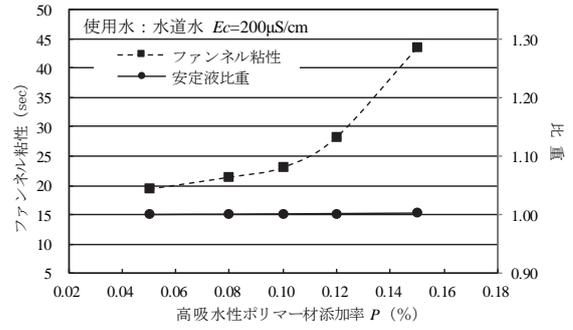


図-5 ポリマー材添加率 P とファンネル粘性・比重の関係

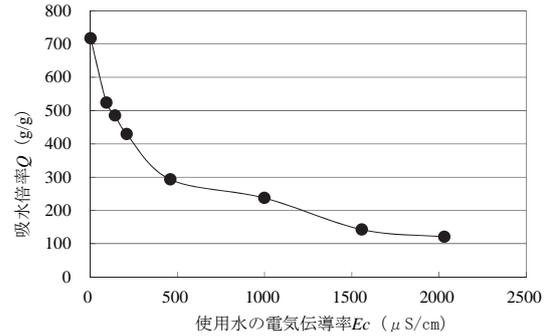


図-6 使用水の電気伝導率 E_c と吸水倍率 Q の関係

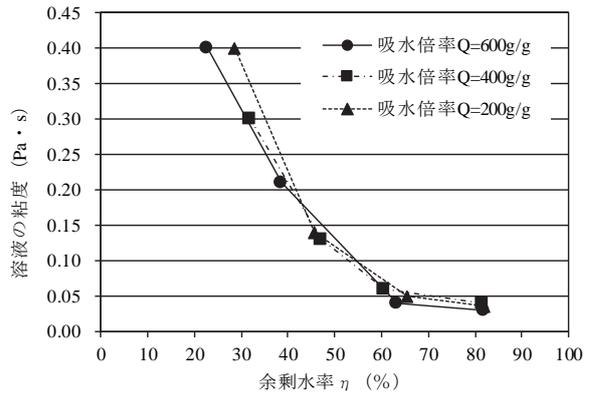


図-7 安定液の余剰水率と粘度の関係

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 $E_c=200 \sim 300\mu\text{S/cm}$ 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-7 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(3)で定義する。

$$\text{余剰水率 } \eta(\%) = \frac{\text{余剰水の体積 } (\lambda)}{\text{安定液の全体積 } (\lambda)} \times 100 \quad (3)$$

図-7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。

5. 高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭工法への適用性

(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。

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⁹⁾で用いられている図-8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、粒径の異なる珪砂 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-9にベントナイト系安定液（ベントナイト添加率 $Be=3.0(\%)$ ）、図-10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 $F_t=25(sec)$ 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、粒径の粗い珪砂 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珪砂 7号において、表-5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。

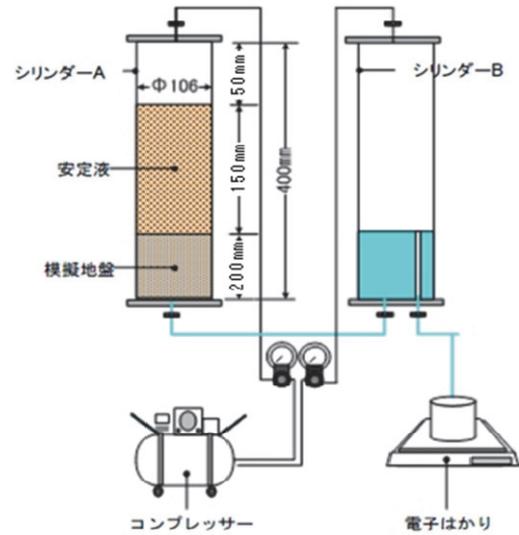


図-8 遮水性能確認試験装置

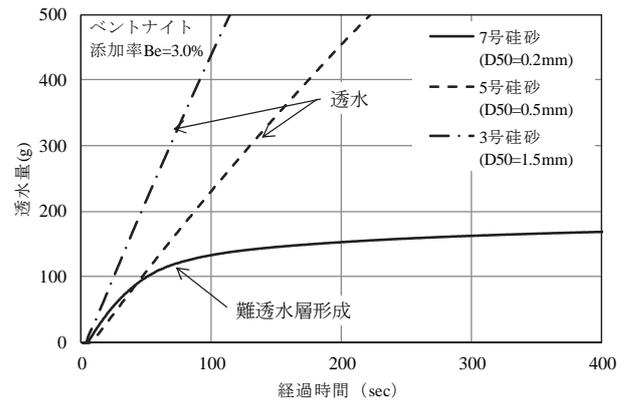


図-9 透水量経時変化（ベントナイト系安定液）

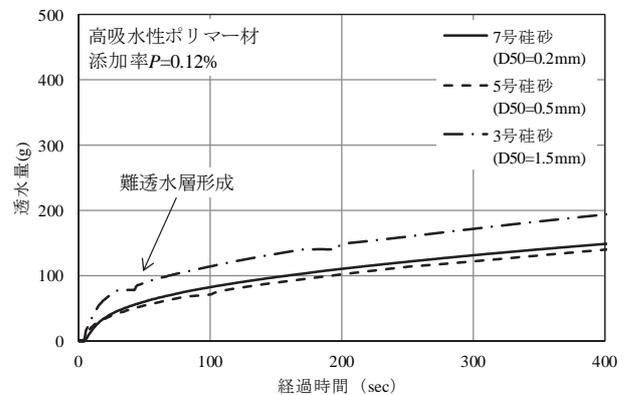


図-10 透水量経時変化（高吸水性ポリマー安定液）

表-5 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		硅砂7号	硅砂5号	硅砂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 W_v (g)	130	-	-	
	模擬地盤の間隙量 V_v (cm ³)	795.5	782.6	772.8	相対密度 $D_r=60\%$
	難透水地盤厚※ L (cm)	3.3			$L=W_v/V_v \times 20\text{cm}$
	動水勾配 i	61.2	-	-	$i=200\text{cm/L}$
	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	-	-	$k=Q/(A \times i)$
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 W_v (g)	59.5	51.6	92.5	
	模擬地盤の間隙量 V_v (cm ³)	795.5	782.6	772.8	相対密度 $D_r=60\%$
	難透水地盤厚※ L (cm)	1.5	1.3	2.4	$L=W_v/V_v \times 20\text{cm}$
	動水勾配 i	133.7	151.7	83.5	$i=200\text{cm/L}$
	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	$k=Q/(A \times i)$

※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

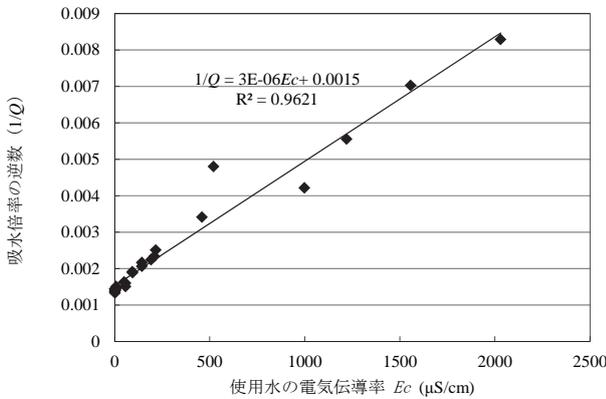


図-11 使用水電気伝導率 E_c と吸水倍率 Q の関係

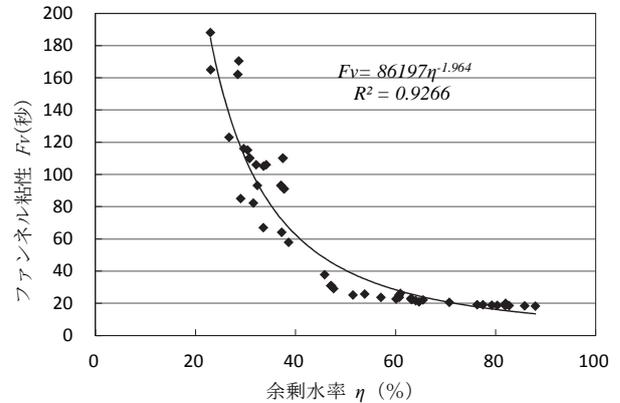


図-12 余剰水率 η とファンネル粘性 F_v の関係

(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、掘削性能に關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。

4.(2)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-6 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 ($\mu\text{S/cm}$)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-11 に再整理した結果は、式(4)の一次関数で近似的に表される。

$$\frac{1}{Q} = 3 \times 10^{-6} E_c + 0.0015 \quad (4)$$

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-12 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(5)で近似できる。

$$F_v = 86197 \eta^{-1.964} \quad (5)$$

図-12、近似式(5)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。

(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-13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 (Be=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 $F_t=35(\text{sec})$ 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-14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。

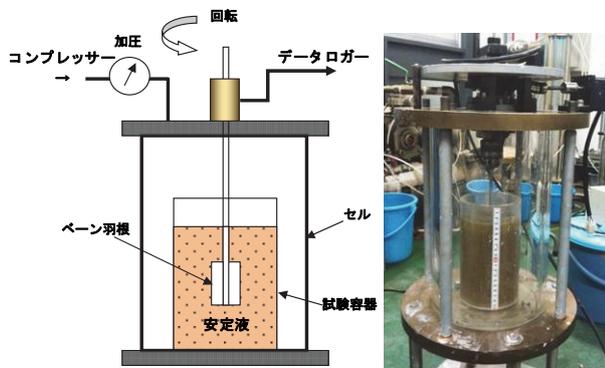


図-13 加圧ベーンせん断試験装置

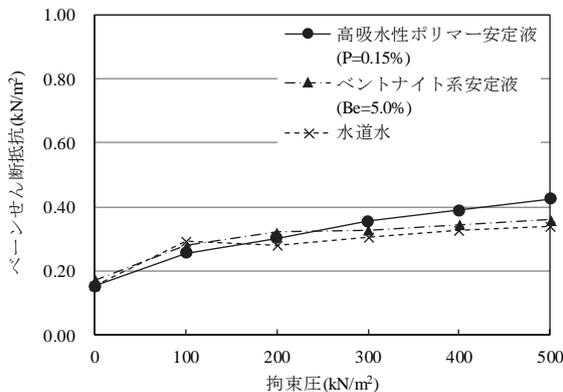


図-14 拘束圧と各試料のベーンせん断抵抗

(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。

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%) 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-15) 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(6)で定義し，分離結果を定量化するため分離度を式(7)で定義する。図-16 に分離試験手順及び分離度の模式図を示す。

$$C(\%) = \frac{\text{塩化カルシウムの質量 (g)}}{\text{安定液 (水) の質量 (g)}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{分離度}(\%) = \frac{\text{分離水の体積 (l)}}{\text{安定液の体積 (l)}} \times 100 \quad (7)$$

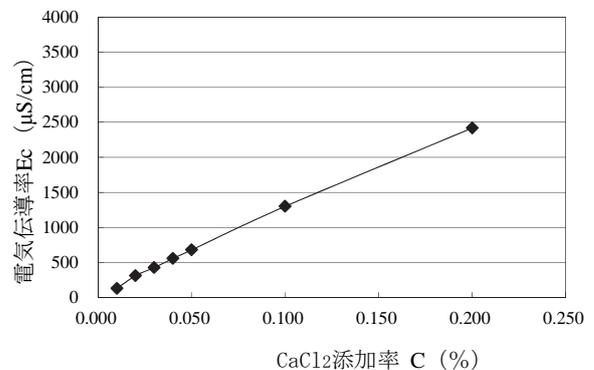


図-15 塩化カルシウム添加率 C と電気伝導率 E_c の関係

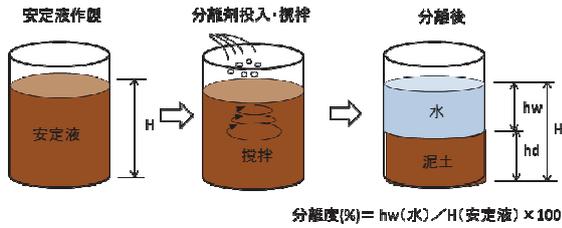


図-16 安定液の分離試験手順及び分離度

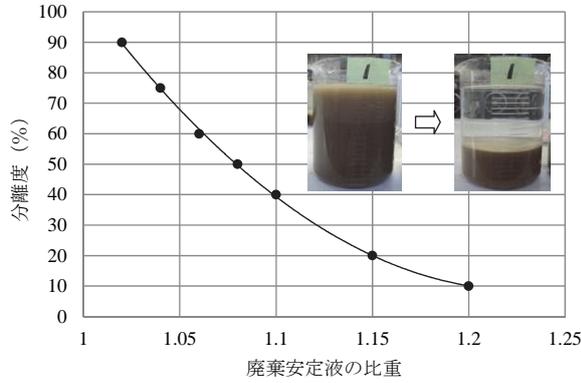


図-17 安定液の比重と分離度の関係

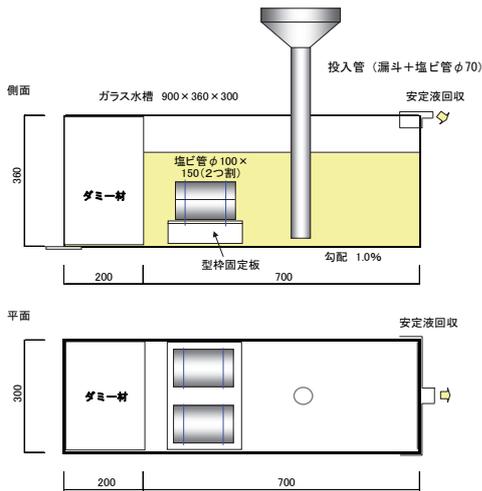


図-18 コンクリート置換性試験装置

分離試験で得られた安定液の比重と分離度の関係は図-17に示すとおりであり、分離度は安定液の比重によって異なり、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。

(5) 高吸水性ポリマー安定液の場所打ち杭本体への影響

a) コンクリートの置換性

$F_t=25(\text{sec})$ 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-18）。実験の結果、写真-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。



写真-2 コンクリート置換充填状況

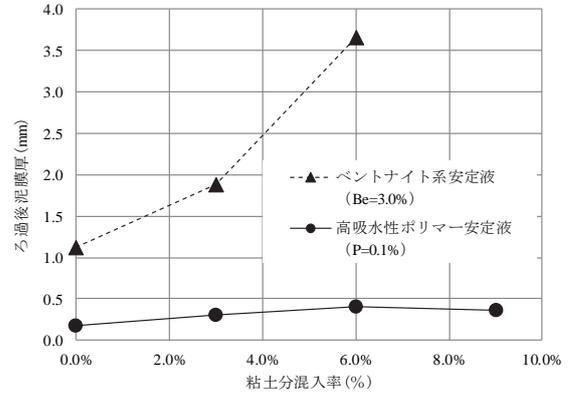


図-19 安定液粘土分混入率と泥膜厚



写真-3 ろ紙に付着した各安定液の泥膜形成状況

b) 杭本体の出来形

$F_t=25(\text{sec})$ 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-19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、写真-3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。



1)安定液充てん 2)コンクリートの打設 3)コンクリートの置換完了

写真4 供試体作製手順

表-6 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

c) 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 $F_t=25\sim30(sec)$ 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。

写真-4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 $B_p=5.0\%$)と高吸水性ポリマー安定液(高吸水性ポリマー材添加率 $P=1$) 0.1%, 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。試験結果を表-6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。

(6) 高吸水性ポリマー安定液の環境特性

a) 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

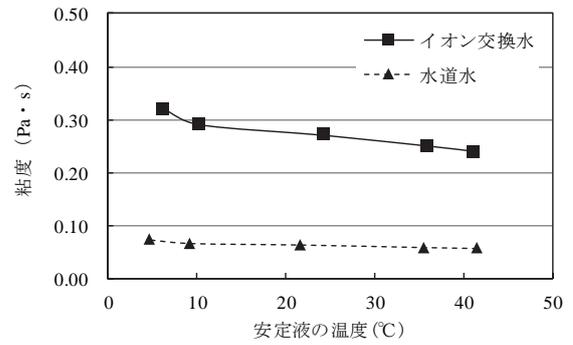


図-20 安定液の温度と粘度の関係

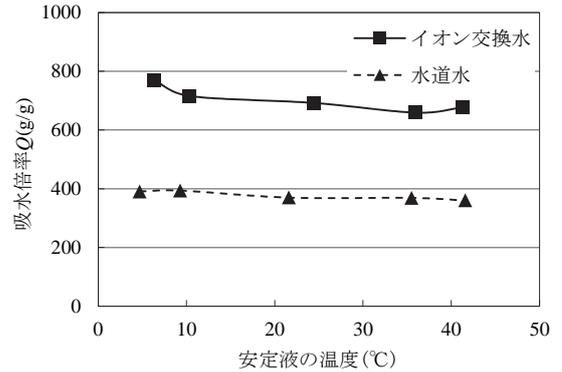


図-21 安定液の温度と吸水倍率 Q の関係

される。

b) 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、 $F_t=25(sec)$ 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($E_t=2.0\mu S/cm$)と水道水($E_t=200\mu S/cm$)を用いた。

図-20に安定液の温度と粘度の関係、図-21に安定液の温度とポリマー吸水倍率 Q の関係を示す。

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。

c) 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、 $F_t=25(\text{sec})$ 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(8)を用いた。

$$\text{経過日数(日)} = \frac{\text{ブラックライトの照度}(\mu\text{W}/\text{cm}^2) \times \text{照射時間(h)}}{\text{日光の照度}(\mu\text{W}/\text{cm}^2) \times \text{日当たりの日光照射時間(h/日)}} \quad (8)$$

経過日数と粘度の関係を図-22、経過日数とろ過水量の関係を図-23 に示す。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。

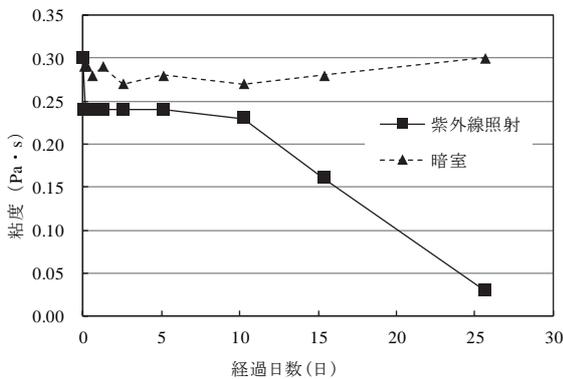


図-22 経過日数と粘度の関係

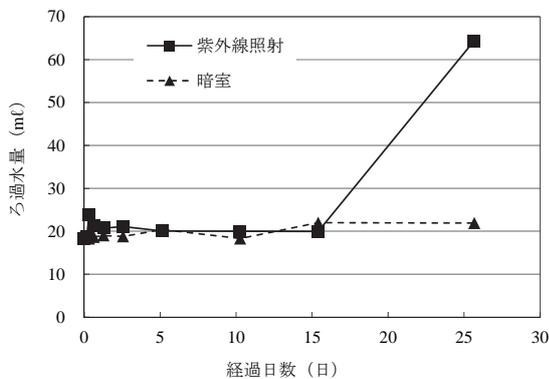


図-23 経過日数とろ過水量の関係

d) 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、 $F_t=25(\text{sec})$ 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。試験結果を、図-24、25 に示す。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。

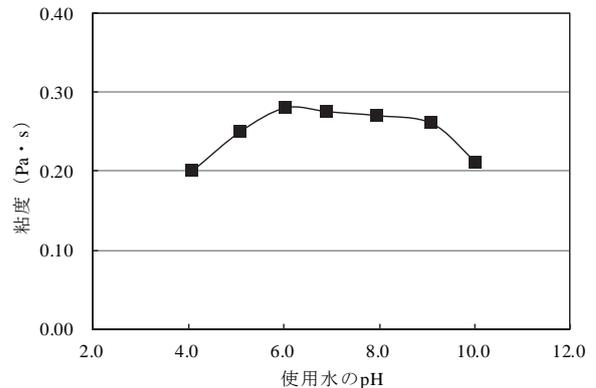


図-24 使用水の pH と粘度の関係

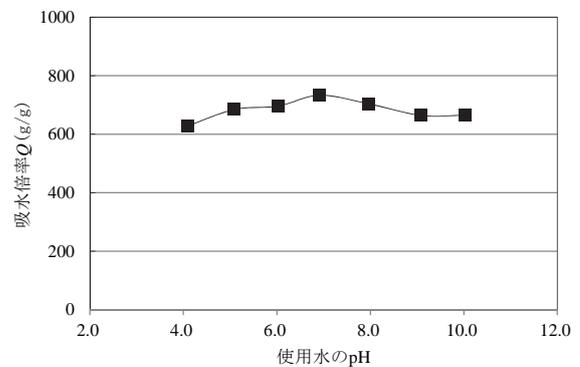


図-25 使用水の pH と吸水倍率の関係

6. 高吸水性ポリマー安定液の現場管理手法

(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を表-7に示す。

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-7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-12と式(5)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(5)を変形すると、余剰水率 η (%) は式(9)で表される。

$$\eta = \left(\frac{F_v}{86197} \right)^{\left(\frac{1}{1.964} \right)} \quad (9)$$

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(4)より式(10)で求められる。

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

以上より、高吸水性ポリマー安定液の密度を 1000 (kg/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(11)より求められる。

$$m_p = \frac{1000}{Q} \times \left(\frac{(100 - \eta)}{100} \right) \quad (11)$$

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(5)を明らかにし、これを式(9)、(10)、(11)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(10)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(11)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-8に示す。

表-8 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	$\leq 30\text{m}\ell$	30~40mℓ
砂分率	$\leq 5\%$	5~10%
pH	6~10	6以下, 10以上
電気伝導率 E_c	1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下	1000~1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$

表-7 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	$\leq 30\text{m}\ell$	30~40mℓ
砂分率	$\leq 5\%$	5~10%
pH	7~10.5	7以下, 10.5以上

(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-8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-26に示す。

a) 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。

b) 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(11)により高吸水性ポリマー材の添加量を決定する。

c) 現場配合及び施工中の管理

b)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-8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。

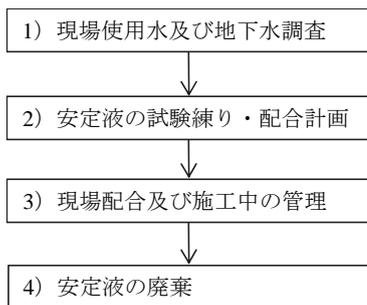


図-26 安定液管理フロー

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。

d) 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。

7. 施工実績による管理手法の検証

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。

(1) アースドリル工法への適用¹⁰⁾

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。

a) 工事概要

施工場所：大阪府
 杭諸元等：杭径：φ1000~1500mm
 拡底：φ1400~2600mm
 掘削長・本数：L=34.0m×71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)

b) 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 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

表-9 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 kg/m ³	添加率 P=0.12%
安定剤	増粘剤	0.2 kg/m ³	
水	水道水	1.0 m ³	E _c =220μS/cm

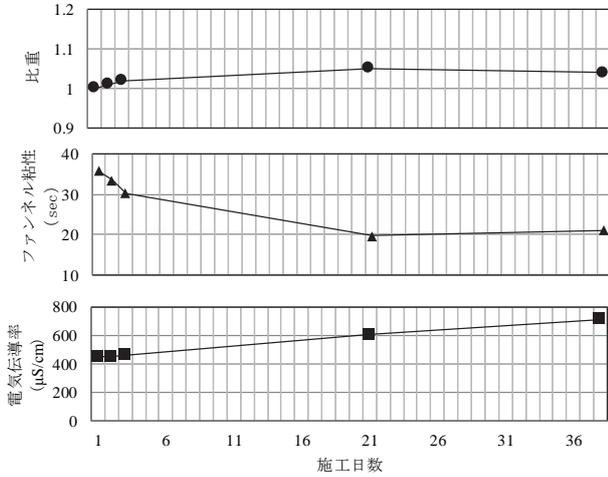


図-27 安定液性状の経時変化 (プラント)

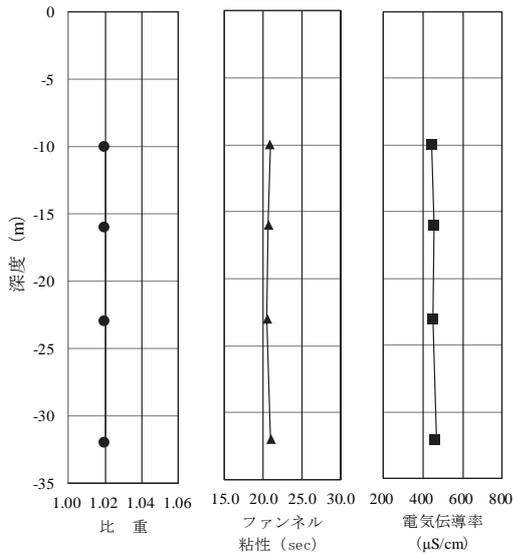


図-28 掘削深度別の安定液性状 (3日目)

補助として安定剤 (増粘剤) を少量添加した。配合表を表-9に示す。

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。

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-27 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-28 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=30sec 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=21sec 程度を保持し掘削を行った。安定液の電気伝導率は、E_c=450~710μS/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。

c) 廃泥液の低減効果

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 (コーン指数 < 200kN/m²) を呈しており、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 > 200kN/m²) を呈していた。掘削対象地盤によっては、現場内で天日脱水等の簡易な処理で一般残土処分可能な性状になることが期待される。

(2) 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。

a) 工事概要

- 施工場所：神奈川県
- 杭諸元等：杭径 φ1500mm~2500mm
- 掘削長・本数：L=35.5~37.0m × 5本
- 掘削土層：上部 10m 細砂、10m~32m 砂質シルト主体互層、下部砂礫層 (支持層)

b) 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 1m³ 当り高吸水性ポリマー材 1.2kg (高吸水性ポリマー材添

表-10 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 kg/m ³	添加率 P=0.12%
安定剤	増粘剤	0.1 kg/m ³	
水	水道水	1.0 m ³	E _c =170μS/cm

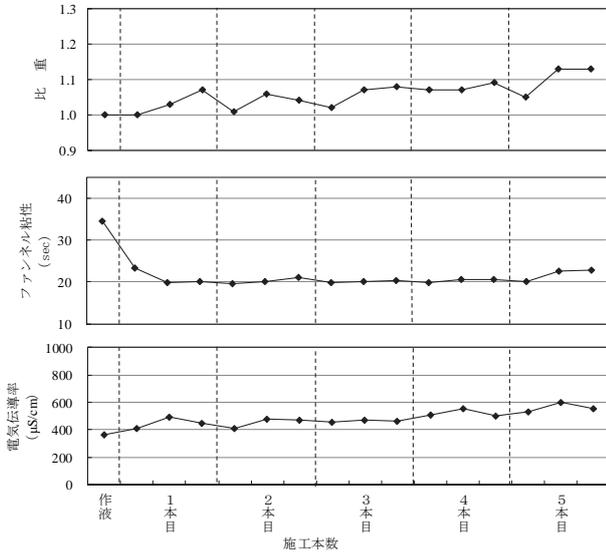


図-29 安定液性状の経時変化 (プラント)

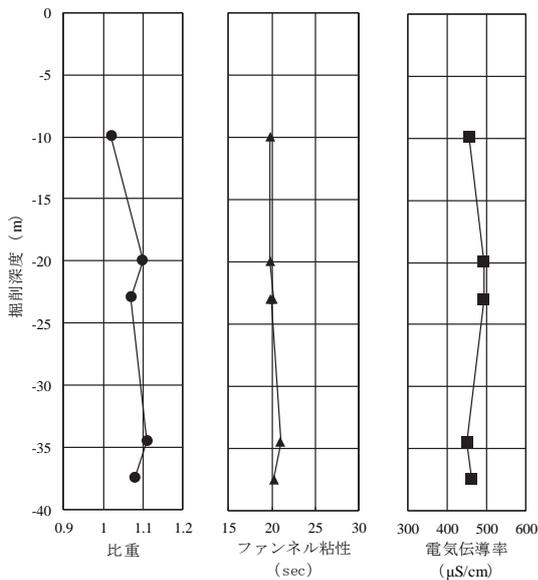


図-30 掘削深度別の安定液性状 (1本目)

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(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-10に示す.

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, サクショ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-29に本工法の安定液の比重とファンネル粘

表-11 廃棄安定液の分離結果

回収槽	分離前		分離方法		分離後			分離水性状
	回収安定液		配合		分離量		割合	
	泥水量 (m ³)	比重	CaCl ₂ (kg/m ³)	分離水 (m ³)	泥土 (m ³)	水 : 泥土		
作液槽	26.4	1.12	3.0	6.4	20.0	2.4 : 7.6	7.67	
回収槽A	14.3	1.12	3.0	3.6	10.7	2.5 : 7.5	7.67	
回収槽B	0.0	-	3.0	0.0	0.0	- : -		
回収槽C	0.0	-	3.0	0.0	0.0	- : -		
回収槽D	37.0	1.11	3.0	8.0	29.0	2.2 : 7.8	7.67	
回収槽F	28.0	1.11	3.0	6.0	22.0	2.1 : 7.9	7.67	
循環槽A	22.0	1.11	3.0	8.3	13.7	3.8 : 6.2	7.67	
循環槽B	26.4	1.11	3.0	10.0	16.4	3.8 : 6.2	7.67	
循環槽C	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		

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-30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 1.02~1.08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=20~25(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.

c) 廃泥液の低減効果

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, 一晩静置した. 分離結果を表-11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.

8. 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。

- (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發揮できることから、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 Ec 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、 $490\text{ (kNm}^2\text{)}$ 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、リバーシ工法に適用し、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くため、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發揮することが期待される。

謝辞: 本研究の実施にあたり、室内実験については、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、心より謝意を表す。

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) 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.

- 10) 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.

(2016. 10. 26 受付)

UTILIZATION OF A SUPERABSORBENT POLYMER SUSPENSION FOR THE CAST IN-SITU PILE CONSTRUCTION

Hitoshi ASANO, Kenji SHIMOSAKA, Hirokazu AKAGI and Yoshimasa KONDO

A superabsorbent polymer material has been used in the broad application fields including civil and architecture engineering area since 1960s. The superabsorbent polymer suspension, i.e. SAP suspension, has been produced by mixing the superabsorbent polymer material with water. The material characteristics of SAP suspension has been investigated experimentally and it has been indicated that SAP suspension improves the borehole stability and the better cast in-situ pile performance is achieved compared with those of bentonite clay suspension. SAP suspension has been employed in two cast in-situ pile construction sites and SAP suspension quality management procedure has been devised. Consequently, the high performance of SAP suspension for the stabilizing suspension for excavation and the application limits of SAP suspension have been demonstrated.