現場試験およびカラム試験による濁水低減効果の比較事例

○西山浩平¹・小川邦彦¹・鷲見浩司¹¹八千代エンジニヤリング株式会社

1. はじめに

水源井戸の上流側で地盤改良工が計画され、その濁水影響が懸念された。そこで、水源井戸の近傍において掘削中のボーリング孔とその下流の既設観測孔を利用し、帯水層を通じた掘削水の濁りの到達時間や濁度の低減程度を把握するための現場試験を実施するとともに、施工による影響を予測した。また、施工で発生が予測される濁度から管理基準値を設定し、リアルタイムによる地下水質モニタリングを立案・実施した。さらに、地盤改良の対象層(粘性土)のサンプルから濁度約 300 度の濁水を作成し、帯水層(砂礫層)を通水試料とするカラム試験を実施した。以上の現場試験とカラム試験の結果から、両者の濁度の低減効果を比較し、その要因を考察した。

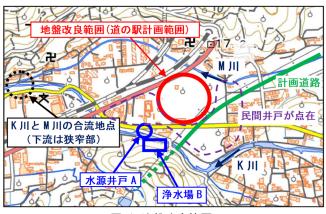


図-1 地盤改良範囲

2. 概要

当該地盤改良工は,道路事業に付属する道の駅の計画範囲で実施された(令和3年12月に施工完了)。地盤改良範囲は2つの河川に挟まれた沖積低地に位置し,その下流は狭窄部となっている(図-1)。沖積低地には,厚さ2~3mのAc層(粘性土層)が広く分布し,このAc層の圧密沈下の抑制と,その下位のAg層の地耐力増加のため,両層は地盤改良の対象となった(図-2)。地盤改良範囲の下流側には水源井戸があり,その取水帯水層はAg層である。水源井戸から周辺の1200戸へ水道水が供給されるため,地盤改良に伴う地下水の濁りがAg層を通じて水源へ到達した場合,社会的影響が大きい状況にあった。

そこで,地盤・地下水情報の整理や,ボーリング調査時に 発生する濁水の特性を原位置試験により把握することで, 施工影響の予測・評価,地下水質モニタリング計画,水源井 戸の原水を処理する浄水場への事前対策の立案を行った。

3. 地盤改良工周辺の地下水の流れ

現地踏査や井戸調査の結果をもとに,測水可能な井戸が多く分布する地盤改良工南側の範囲で地下水位コンターを作成し,地下水の流れを検討した(図-3)。

支川の M 川は三面張りで河川水の地下浸透が見込めないことから,地盤改良工周辺の地下水は直近の K 川からの供給が主体であると想定された。

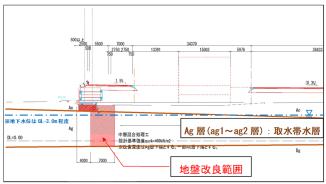


図-2 地盤改良工の断面図

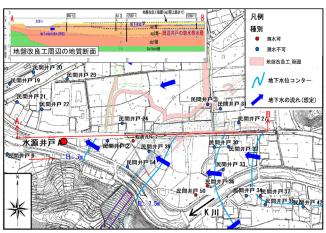


図-3 地下水の流れ(地盤改良工周辺)

Comparison of the muddy water reduction effect by the field test and the column test Kohei Nishiyama ¹, Kunihiko Ogawa ¹, Koji Washimi ¹ (¹ Yachiyo Engineering Co., Ltd.)

KEY WORDS: Water source well, Ground improvement, Muddy water effect, Column test, Groundwater quality monitoring

4. 地盤改良工の概要

地盤改良工は中層混合処理工法(スラリー噴射方式)が適用された(図-4)。当該工法は,軟弱地盤中の改良材(スラリー状)を供給し,強制的に原位置土と全層鉛直攪拌混合することにより,土と改良材を化学的に反応させ,強度を高めるものである。

- ・改良深さ 10m 程度まで対応可能
- ・互層地盤であっても均質な改良体の造成が可能
- ・低変位であり近接施工が可能

5. ボーリング調査・現場試験(原位置カラム試験)

想定した地盤改良工周辺の地下水の流れを踏まえて、施工時の濁水影響を把握するため下流側に追加観測孔2孔を設置した(図-5)。また、そのボーリング時には、以下の手順で原位置カラム試験を実施し、Ag層の濁水特性を把握した。

- ①下流側の観測孔 No.4 設置後に自記水質計を設置 (pH.濁度(NTU)を 10 分毎に測定)。
- ②上流側の観測孔 No.3 掘削時,地下水面に到達した時間を記録。さらに,到達時のボーリング孔内水を採水して,発生源濁度 1040 (NTU) を測定。
- ③自記水質計の連続データを定期的に回収。pH・ 濁度に変動があった場合(観測孔 No.3 掘削前の pH,濁度より上昇した場合),No.3 の濁水が No.4 に 到達したものと判断。

上記の①~③より,以下の結果を得た。

- ・観測孔 No.3~No.4 の距離 35m において,濁水は 1.5~3 日で到達する。
- ・観測孔 No.3~No.4 の距離 35m において,濁水が Ag 層中を通過すると,発生源濁度に対して 8~27%程度濁度が低減することが確認できた(図-6)。
- ・pHは有意な変動が認められなかった。

図-4 スラリー噴射方式の概要図1)

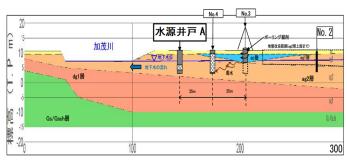


図-5 原位置カラム試験の概要図

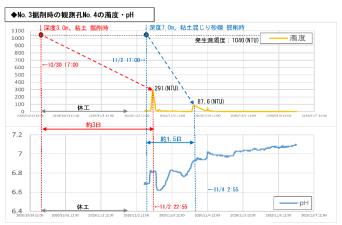


図-6 原位置カラム試験時の濁度変化

6. 地下水質モニタリング計画・事前対策

以上の調査検討結果を踏まえて,地下水質モニタリング計画や配水地点である浄水場における事前対策を立案・実施した。

①自記水質計による pH・濁度のモニタリング

地下水の流れにおいて,地盤改良工施工範囲から下流側に位置する観測孔や水源井戸について,水質(pH・濁度)の連続観測を実施。

②自記水質計の管理基準値の設定

原位置カラム試験結果や,浄水場 B で最大処理可能な濁度 (10NTU 程度)を踏まえて,pH・濁度の管理基準値を設定(表-1)。

③遠隔モニタリングシステムの導入

水源井戸の自記水質計において、pH・濁度の管理基準値を超

表-1 管理基準値の設定

水道水基準

			-	pH値 5.8以上8.6以下
知识 나나 上	话口	管理レベル1	管理レベル2	遺度 2度以下 管理レベル3
観測地点	項目	注意	用心	警戒
観測孔No.2	рН	8.0	8.3	-
	濁度	10.0 ※浄水場Bが通常運用で 処理可能な濁度	290.0 ※原位置カラム試験結果	-
観測孔No.3	рН	8.0	8.3	-
	濁度	10.0 ※浄水場Bが通常連用で 処理可能な濁度	1040 ※原位置カラム試験結 果	-
観測孔No.4	рН	8.0	8.3	_
	濁度	10.0 ※浄水場Bが通常運用で 処理可能な濁度	290.0 ※原位置カラム試験結 果	-
水源井戸A	рН	8.0	8.3	8.6 ※水道水基準
	濁度	2.0 ※水道水基準	5.0 ※中間値	10.0 ※浄水場Bが通常運用で 処理可能な濁度

過した場合に警報メールが複数の関係者に配信される遠隔モニタリングシステムを導入。

④浄水場における事前対策

水源管理者である自治体と協議し、濁水影響が生じた場合の事前対策として以下を実施。

・近傍の浄水場からの仮設配管設置、既設の PAC 処理装置(凝集剤添加装置)の修理,pH 処理装置の仮設

7. 施工影響の予測・評価

地盤改良工は,令和2年12月 14 日から施工範囲の南西部(水 源側)から開始された。施工開 始から 7.02 日後に,施工開始地 点から下流 50m の観測孔 No.3 で濁度 1000(NTU)以上が観測 された。さらに,観測孔 No.3 か ら 35m 下流の観測孔 No.4 では, その 2.8 日後に濁度 4.1NTU が 観測された(図-7)。

原位置カラム試験結果によ る事前の予測では,前者の到達 時間は 4.5~8.6 日,後者の到達 時間は3~6日と想定しており、 概ね想定どおりの実現象が確認 された。

また,両観測孔では濁水影響は 認められたが、保全対象である水 源井戸では,濁度は 0.0NTU,pH は 7.0~7.1 と一定であり、影響で認め られなかった。すなわち、濁りは到 達しないことが確認された。

ここで,連続水位観測(2020 年 11月~2021年3月)の結果,両観測

孔の水位差は小さく(図-8),付近の地下水の流れは緩やかであ ると想定される。これは、近傍の観測孔 No.2 における地下水流 向・流速測定(別途調査)の結果とも整合する。

地下水の流速が小さい場合,濁水の発生源からの距離に対し て分散幅はより広がると想定される(図-9)。地盤改良工では、Ag 層中に大量の濁水が発生したものの,施工時期が渇水期で地下 水の流速が小さかったことから,濁水の分散効果が大きかった と想定される。さらに、地盤改良工が連続施工されたにも関わら ず濁水がより遠い水源井戸に到達しなかった要因として,Ag 層 中で濁水の細粒分にろ過効果または吸着効果が作用したことが 想定される。



た現象は、濁水に含まれる細粒分の濃度が分散効果、ろ過効果、吸着効果の複合作用により下流ほど低下し、濁度が低減した ことによるものと推測される。

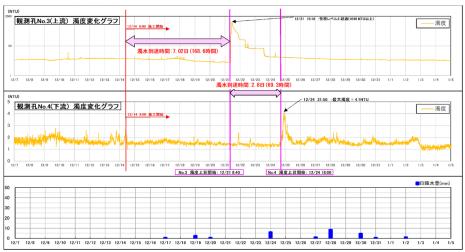


図-7 施工時の濁度変化

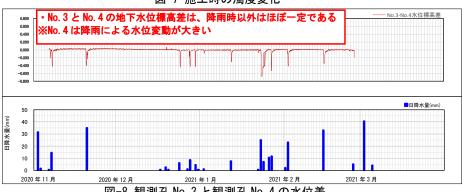


図-8 観測孔 No. 3 と観測孔 No. 4 の水位差

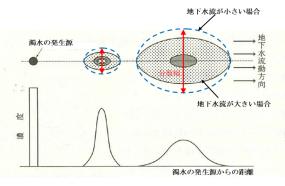


図-9 分散を伴う濁水到達イメージ 2)に加筆

8. カラム試験(塩水試験, 濁水試験)

8.1 手法

試験は ISO21268-3 に準拠する上流向カラム試 験(塩水試験,濁水試験)を実施した(図-10)。カラ ム試料は、観測孔 No.3 および No.4 のボーリングコ アから採取した帯水層の Ag1 層(砂礫) および Ag2 層(粘土混じり砂礫)とした。カラムの試料径は5cm とし、採取できた試料量を踏まえ、Ag1 層の試料長 は10cm, 30cm, Ag2層の試料長は10cm, 20cm, 30cmと した。採取した試料は,95%が 4mm 以下になるよう に 4mm 篩でふるい分けした後,1層 2cm に分割して

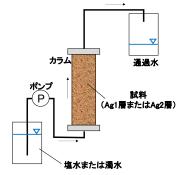




図-10 上流向カラム試験装置(左図),試験の実施状況(右図)

充填した。各層の締固めは、125g(直径 5cm カラム)のおもりを用いて、20cm の高さから 3 回落下させた。試料の両端にはガラスビーズを充填することで密実性を高めた。試験は、カラム試料で吸着されない塩水(濃度: 1,000mS/m 程度)を通水する塩水試験、地盤改良の対象層となった Ac 層 (粘性土層)から作成した濁水(300 度程度)を通水する濁水試験を実施した。通水量は、ポンプを用いて 5m1/分で一定とし、通水時間は累積液固比(L/S)が 10 まで実施した。通過水の採水は 10 回実施し(液個比=0.1,0.3,0.5,0.7,0.9,1.1,1.5,2,5,10)、塩水試験の場合は電気伝導度、濁水試験の場合は濁度を測定した。

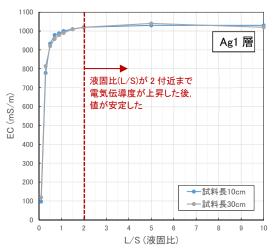
8.2 結果

(1) 塩水試験

カラム試料に純水を飽和した後,塩水(1,040mS/m)を注入した。カラムを通過した水(通過水)を表-2 で示した液固比毎に採水し,電気伝導度(mS/m)を測定した。測定結果表(表-2),通過水の電気伝導率変化グラフ(図-11)を示す。いずれの試料長も液固比(L/S)が 2 付近まで電気伝導度が上昇した後,値が安定しており,カラム試料の種類やカラム長の違いによる濃度変化の明確な遅延は認められない結果となった。

試料	通過水の塩水濃度 EC(mS/m)										
	L/S(液固比)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.5	2	5	10
Ag1層	試料長10cm	96.4	778	933	979	988	1000	1010	1020	1030	1030
	試料長30cm	118	814	920	958	979	990	1010	1020	1040	1020
Ag2層	試料長10cm	22.8	705	914	961	979	990	1000	1020	1030	1040
	試料長20cm	3.46	560	814	895	967	996	1010	1030	1030	1040
	試料長30cm	0.44	407	842	972	1000	1010	1020	1030	1040	1030

表-2 塩水試験結果 一覧



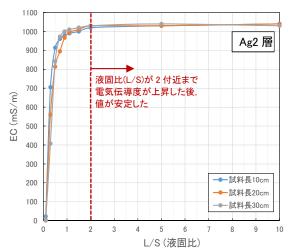


図-11 塩水試験結果(左図: Ag1層, 右図: Ag2層)

(2) 濁水試験

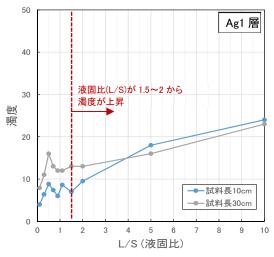
カラム試料に純水を飽和した後,Ac 層から作成した濁水(290 度)を注入した。カラムを通過した水(通過水)を表-3 で示した液固比毎に採水し,濁度(度)を測定した。測定結果表(表-3),濁度変化グラフ($\mathbf{Z}-12$)を示す。

Ag1 層の試料長 10cm では,液固比(L/S)が 1.5 までは濁度が 10 度以下まで低減したが,液固比(L/S)が 1.5 以上では徐々に濁度が上昇し,液固比(L/S)が 10 で 24 度まで達した。Ag1 層の試料長 30cm では,液固比(L/S)が 2 までは濁度が 13 度以下まで低減したが,液固比(L/S)が 2 以上では徐々に濁度が上昇し,液固比(L/S)が 10 で 23 度まで達した。また,液固比(L/S)が 2 以下までは,カラム長が長いほど濁度の低減効果が高い傾向となった。

Ag2 層の試料長 10cm では,液固比(L/S)が 2 までは濁度が 24 度以下まで低減したが,液固比(L/S)が 2 以上では徐々に濁度が上昇し,液固比(L/S)が 10 で 36 度まで達した。Ag2 層の試料長 20cm では,液固比(L/S)が 1.5 までは濁度が 26 度以下まで低減したが,液固比(L/S)が 1.5 以上では徐々に濁度が上昇し,液固比(L/S)が 10 で 39 度まで達した。Ag2 層の試料長 30cm では,液固比(L/S)が 2 までは濁度が 14 度以下まで低減したが,液固比(L/S)が 2 以上では徐々に濁度が上昇し,液固比(L/S)が 10 で 26 度まで達した。また,液固比(L/S)が 1.5 以下までは,カラム長が長いほど濁度の低減効果が高い傾向となった。

表-3 濁水試験結果 一覧

試料	通過水の濁度										
	L/S(液固比)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.5	2	5	10
Ag1層	試料長10cm	4.0	6.4	8.8	7.4	6.0	8.6	7.0	9.5	18	24
	試料長30cm	7.9	11	16	13	12	12	13	13	16	23
Ag2層	試料長10cm	11	33	24	26	24	27	27	24	37	36
	試料長20cm	6.1	16	21	24	25	28	26	27	37	39
	試料長30cm	3.5	10	11	12	13	13	14	14	21	26



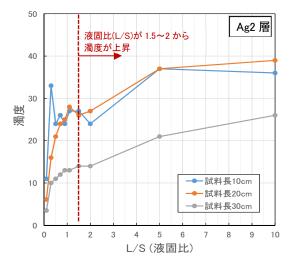


図-12 濁水試験結果(左図: Ag1 層, 右図: Ag2 層)

8.3 考察

塩水試験では、いずれの試料長も液固比(L/S)が2付近まで電気伝導度が上昇した後、値が安定した。これより、試料長に関わらず、カラム試料に飽和した純水は、液固比(L/S)が2付近で注入濃度の塩水(1,040mS/m)に置き換わったことが分かる。 濁水試験では、Ag1層(砂礫)およびAg2層(粘土混じり砂礫)から作成したカラム試料にAc層の濁水(290度)を注入することで、通過水の濁度を測定した。Ag1層およびAg2層ともに、塩水試験でカラム内が塩水に置き換わった液固比(L/S)が1.5~2までは、カラム長が長いほど濁度の低減効果が高い傾向となったものの、液固比(L/S)が1.5~2以上では緩やかな濁度の上昇が認められた。また、Ag1層およびAg2層のカラムで液固比(L/S)が10の通過水の粒度測定(レーザー回折法)を実施したところ、1~10μmの粒径の極細粒な土粒子が確認された。

これらより,カラム内が純水から濁水に置き換わる液固比(L/S)が $1.5\sim2$ までは,注入した濁水の土粒子はカラム内に十分捕捉され,通過水の濁度が徐々に低減したが,液固比(L/S)が $1.5\sim2$ 以上ではカラム内で捕捉しきれなかった土粒子が移流した可能性がある。

9. おわりに

原位置カラム試験、地盤改良工の施工時、カラム試験では帯水層(Ag1 層および Ag2 層)の濁度低減効果が確認された。また、カラム試験より、帯水層内が濁水に飽和された後は、Ac 層の極細粒な土粒子がカラム内を移流する可能性が示唆された。本件と同様に保全対象の上流に地盤改変を伴う施工を実施する場合は、施工箇所周辺の帯水層の土質、地盤改変する施工箇所で発生する濁水の粒度分布,周辺の地下水の流れなどの情報が、保全対象へ濁水が到達する可能性を定性的に判断する上で有効になると考える。

参考文献

- 1) パワーブレンダー工法協会 HP: 入手先http://www.power-blender.com/ (参照 2023.6.12)
- 2) 藤縄克之: 地学ワンポイント2 汚染される地下水, 共立出版株式会社, p76, 1990
- 3) 「建設工事における環境保全技術」編集委員会: 地盤工学・実務シリーズ 26 建設工事における環境保全技術, 社団 法人 地盤工学会, 2009