

大規模・長期揚水のための地下水リチャージ技術の開発

石川 明 林 秀彦
(技術研究所) (技術研究所)

Development of Groundwater Recharge Technology for Large-scale, Long-term Groundwater Pumping

Akira Ishikawa, Hidehiko Hayashi

本稿では目詰まりによる注水性能の低下を防ぎつつ地下水リチャージを行うための地下水リチャージシステムと現場への適用結果について示す。東京都内の現場を対象にして、目詰まりの原因物質である地下水中の鉄、マンガン濃度の測定結果や溶存態・粒子態の比率の変化、酸化鉄の大きさや形状、存在形態について示した。次に、揚水中の酸化した鉄などを地表でろ過した後に注水するリチャージシステムの概要を示した。18ヶ月間の現場への適用結果から、目詰まりの原因となる酸化鉄や土粒子を高精度にろ過することで地下水リチャージを安定的に実施でき、本技術が超々高層構造物の建設にとまなう大規模・長期揚水のための地下水リチャージに対応できる技術であることを示した。

This paper presents a groundwater recharge system while preventing the reduction of water injection performance due to clogging and describes the results of its application in the field. The results of measurements of the concentrations of iron and manganese, which are substances that cause clogging in the groundwater at the Tokyo site, as well as changes in the dissolved and particulate states, and the size, shape, and morphology of oxides, were presented. A recharge system was introduced to remove oxide and soil particles from the groundwater. After 18 months of on-site application, the system has demonstrated the ability to continuously recharge groundwater by filtering out clogging iron oxides and soil particles to meet the large-scale, long-term groundwater recharge required for the construction of super-tall buildings.

1. はじめに

近年の超々高層建築構造物では地下構造物も大深度化している。このため、地下掘削も大深度になり、ドライワークや根切り底面安定のための地下水揚水も長期・大量化している。地下施工時の資源循環や環境負荷の低減、地盤・周辺構造物への影響低減、建設コストの削減、など全ての点において、地下掘削時に汲み上げる大量の地下水を下水道に流下せず地中にもどす地下水リチャージ工法はその重要性を増していると考えている。

地下水リチャージの大きな技術課題は、リチャージにとまなう「目詰まり」である(図-1)。「目詰まり」とは、ディープウェル(以下、DW: Deep Well)から揚水した地下水に含まれる土粒子の他に、地下水中の鉄イオンやマンガンイオンが空気酸化により析出して固形物となり、リチャージウェル(以下、RW: Recharge Well)のスクリーンやスクリーン近傍の地盤を詰まらせる現象の総称であり、

汲み上げる地下水の水質にも依存している。この「目詰まり」によるRWの注水性能への影響を少なくするため、筆者らは地下水を地表部で高精度(鉄濃度で0.05 mg/L未満)に連続ろ過し、目詰まり物質を除去した後に地中に戻すリチャージシステムを開発してきた。本稿では、東京都内の地下水の状況を示し、次に開発したリチャージシステムの技術概要と現場の水質とRWの目詰まりの関係について示し、得られた結論を記述する。

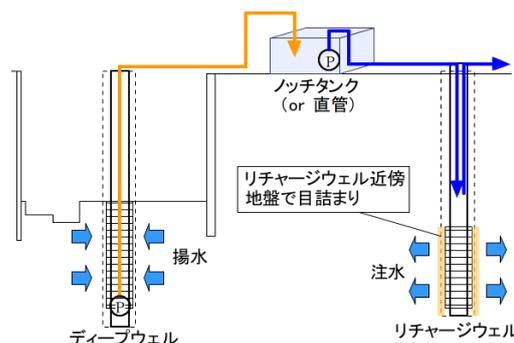


図-1 地下水リチャージの「目詰まり」現象

2. 揚水の水質

2.1 揚水した地下水の水質とその特徴

表-1は、図-2に示した東京都内各所の地下水(揚水)の水質のうち、目詰まりに関連する鉄(Fe)やマンガン(Mn)の濃度、その他の水質指標 pH、電気伝導率(EC)、浮遊物質質量(SS)、溶存酸素濃度(DO)、酸化還元電位(Eh)について示したものである。これらは全て自社で取得したデータである。

調査の対象とした帯水層は主に上総層群の江戸川層 Eds である。目詰まりと関連の深い全鉄(以下、TFe)濃度は<0.01-12 mg/Lと幅広く、同じ現場でも濃度が異なる場合があった。例えば、⑨-1では揚水直後の地下水の採水であったため 12 mg/Lであったのに対し、⑨-2~4では 0.3-2.0 mg/Lであった。⑤では、井戸 W1は<0.01-1.43 mg/Lであったのに対し、対象の帯水層が異なる井戸 W2では 3.59-3.93 mg/Lであった。⑦は 3.7-4.9 mg/L、⑫は 2.7-3.1 mg/Lと、濃度が比較的高かった。

⑦-2、3では、現場の揚水直後に TFe と鉄(II)イオン(以下、Fe²⁺)の濃度をパックテスト(共立理化学研究所製 WAK-Fe、WAK-Fe²⁺)により測定した。

⑨から⑫では揚水直後の試料をろ紙5種Cでろ過操作し、溶存鉄(以下、DFe)としての鉄濃度を測定した。揚水時の空気との接触・攪拌の度合いにもよるが、⑦-2、3、⑨-3、4、⑪、⑫-1、2は、TFeのうち84%以上が DFe として地下水中に溶けた状態であったのに対し、⑨-1、⑩-2~4では、TFe中の DFeの比率は50%未満であった。一方、同様の方法で測定した全マンガン(以下、TMn)と溶存マンガンの比率は、測定した全ての現場(⑨~⑫)で96%以上が地下水中に溶存された状態であった。

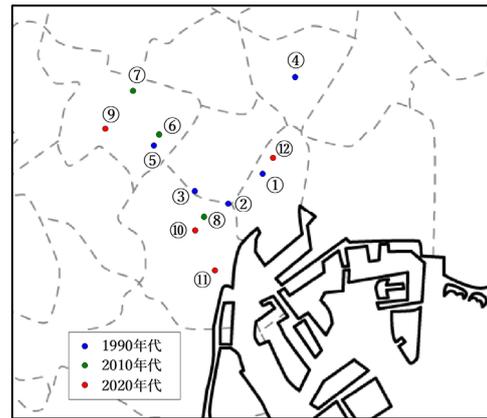


図-2 地下水質を調査した箇所

表-1 揚水の水質調査結果

No.	①-1	①-2	②-1	②-2	③-1	③-2	④-1	④-2	⑤						⑥		
場所	中央区		港区		千代田区		台東区		新宿区						新宿区		
採水年	1991	1992	1993		1995		1995		1995	1996			1995	1996	2013		
帯水層	Eds		Eds		Eds		Tog	Eds	W1						Eds		
備考	-	-	-	-	T.P.-25m	T.P.-50m	-	-	-						-		
全鉄(TFe)	mg/L	1.78	0.99	1.8	1.6	1.3	0.037	0.15	0.04	0.15	1.43	0.07	<0.01	3.59	3.67	3.93	1.2
全マンガン(TMn)	mg/L	0.68	0.98	0.12	0.04	0.25	0.03	0.05	0.04	1.56	5.37	3.21	1.57	8.18	5.00	5.25	0.49
pH	-	7.7	7.4	7.1	-	7.2	8.0	8.1	8.3	7.0	7.1	7.2	7.0	7.4	7.2	7.2	7.2
色度	度	30	16	80	800	16	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16
濁度	度	40	2	9	8	8	<1	1	<1	7	21	2	<1	6	4	4	2.9
溶存酸素濃度(DO)	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.1	5.4	10.8	-	2.9	0.1	-

No.	⑦-1	⑦-2	⑦-3	⑧*1	⑨-1	⑨-2	⑨-3	⑨-4	⑩-1	⑩-2	⑩-3	⑩-4	⑩-5	⑪	⑫-1	⑫-2
場所	新宿区			港区	新宿区				港区					中央区		
採水年	2016			2016	2019		2020		2019	2020			2021	2021	2024	
帯水層	Eds			Eds	Eds				Eds					Eds	Eds	
備考	-	-	-	事前調査	NW (揚水開始時)	NE	SW	SE	DW5	DW5	DW7	DW9	DW12	-	-	-
全鉄(TFe)	mg/L	4.9*2	3.8*2	3.7*2	0.51	12	1.6	0.30	0.30	0.06	0.24	0.21	0.76	1.1	0.26	3.1
溶存鉄(DFe)	mg/L	-	-	-	-	2.2	1.0	0.29	0.28	-	0.11	0.10	0.09	-	0.24	2.6
鉄(II)イオン(Fe ²⁺)	mg/L	-	3.4*2	3.6*2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DFe/TFe	%	-	89*2	98*2	-	18	63	97	93	-	46	48	12	-	92	84
全マンガン(TMn)	mg/L	0.44	-	-	0.27	0.18	0.08	0.27	0.51	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	0.08	0.07	1.8
溶存マンガン(DMn)	mg/L	-	-	-	-	0.18	0.08	0.26	0.50	-	<0.05	0.05	<0.05	-	0.07	1.8
DMn/TMn	%	-	-	-	-	100	100	96	98	-	-	100	-	-	100	100
pH	-	7.1	7.4	-	-	-	-	7.3	7.4	6.7	7.8	8.0	7.4	-	8.0	7.0
酸化還元電位*3(Eh)	V	-	0.21	-	-	-	-	0.32	0.28	-	0.40	0.40	0.31	0.22	0.27	0.14
水温(t)	°C	-	17.9	-	-	-	-	18.5	17.6	20.9	25.3	22.1	25.4	19.9	17.3	19.4
色度	度	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75	-
電気伝導率(EC)	mS/m	-	49.3	-	-	-	-	48.8	41.6	36.2	42.0	46.1	46.8	50.2	155	1340
浮遊物質質量(SS)	mg/L	-	-	-	8.8	34	5.2	1.2	2.4	<1	1.8	3.6	15.6	2.2	<1	19.0
濁度	FTU	-	20.6	-	-	-	-	1.93	9.92	0.20	4.58	4.17	5.36	3.82	0.13	15.15
溶存酸素濃度(DO)	mg/L	-	-	-	-	-	-	7.32	4.1	-	6.7	8.23	6.8	4.38	1.47	-

*1 施工中の水質データは表-5に記載 *2 デジタルパックテスト (共立理化学研究所、WAK-Fe、WAK-Fe²⁺) で測定

*3 $Eh = E_{S,H,E} = E_{measured} + 206 \cdot 0.7(t-25)$

2.2 揚水の鉄イオンの時間変化

ここでは、⑫-2の揚水を対象として、地下水中の鉄の状態について考察する。

表-2に、⑫-2の揚水直後の試料をメンブレンフィルター(保持粒径 10、0.45、0.2 μm)および、ろ紙5種C(保持粒径 1 μm)でろ過操作したTFeとTMn濃度を示す。原水のTFe濃度が2.7 mg/Lに対して、10 μm、1 μmろ過操作後では2.6 mg/L(96%)とほとんど変わらず、0.45 μm、0.2 μmのろ過操作後も比率は89%、70%であった。一方、揚水した地下水を一旦、解放タンクに入れたあとの注入水については、ろ過操作後の濃度比率が86%から41%へと低下した。揚水-注水過程で地下水が大气に触れることにより、保持粒径10-0.2 μmのフィルターを通過することができない固体状の鉄粒子が地下水中に析出したことがわかる。

表-3に、14日間連続注水の後にRW内の水中ポンプを稼働させて、逆揚水した地下水(逆洗水)のTFe、TMn濃度を示す。図-3はこのうち、横軸を逆洗開始からの経過時間、縦軸をTFe濃度として示したものである。逆洗水中のTFe濃度は逆揚水開始5分後に77 mg/L、10分後に93 mg/Lであり、注水中の鉄分がRWのスクリーン近傍に高濃度に蓄積された状態と考えられる。逆揚水を継続すると濃度は減少し、55分経過以降は5.2-4.9 mg/Lと一定に近い濃度となった。逆洗水を10-0.2 μmのフィルターでろ過した試料については、一番目の粗い10 μmでのフィルターでも逆揚水開始5分後から1.1 mg/Lを下回った。RWに注水した地下水中の鉄イオンは、RWあるいはウェル近傍の地盤内で10 μmのフィルターで捕集される程度の大きさの酸化鉄として成長、析出したものと考えられる。

表-2 DW揚水、注水中のTFe、TMn濃度

	ろ過操作 保持粒径 (μm)	揚水		注水	
		濃度 (mg/L)	通過比率 (%)	濃度 (mg/L)	通過比率 (%)
TFe	原水	2.7	-	2.9	-
	10	2.6	96	2.5	86
	1	2.6	96	2.3	79
	0.45	2.4	89	1.3	45
	0.2	1.9	70	1.2	41
TMn	原水	1.6	-	1.6	-
	10	1.6	100	1.5	94
	1	1.6	100	1.6	100
	0.45	1.6	100	1.5	94
	0.2	1.6	100	1.6	100

2.3 析出した酸化物の存在形態

酸化物として析出した鉄分はどのような形態をしているのかについては⑥の現場で調べている。まずDWから揚水した地下水を配管経路の途中で保持粒径1 μmのバッグフィルターに通し、その変化状況を調べた。バッグフィルターは通水開始後約3時間でフィルター底部が赤茶色に変化し、着色部からの通水が阻害されてフィルター内に水が溜まるようになった。6時間後にはさらにその傾向が強くなっていった(写真-1)。

写真-2にバッグフィルターで捕集された物質の走査電子顕微鏡(SEM)写真を示す。ゲル状の物質が観察され、これをさらに拡大すると針状、あるいは中が空洞のパイプ状の物質から構成されているのが確認された。既往の文献にも挙げられている鉄細菌による生成物とよく似た形状である²⁾。

表-3 RW逆洗水中のTFe、TMn濃度

	ろ過操作 保持粒径 (μm)	RW逆洗開始からの経過時間(min)					
		5	10	20	55	60	70
TFe 濃度 (mg/L)	原水	77	93	21	5.2	4.9	5.1
	10	1.1	0.44	1.0	0.53	0.57	0.53
	1	0.27	0.26	0.23	0.50	0.44	0.47
	0.45	0.12	0.10	0.16	0.49	0.40	0.47
	0.2	0.08	0.05	0.13	0.43	0.39	0.43
TMn 濃度 (mg/L)	原水	1.8	1.9	1.6	1.6	1.6	1.6
	10	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5
	1	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	0.45	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6
	0.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

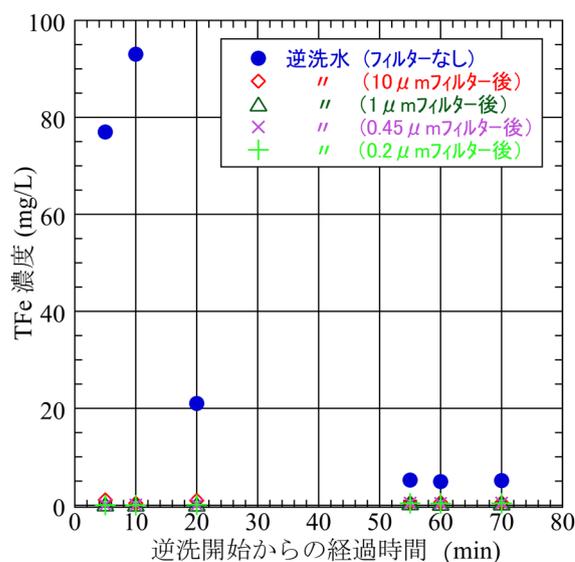


図-3 RW逆洗中のTFe濃度の経時変化



(a) 開始直後



(b) 約3時間後

(試験開始からの平均通水量 30 L/min/1 袋)



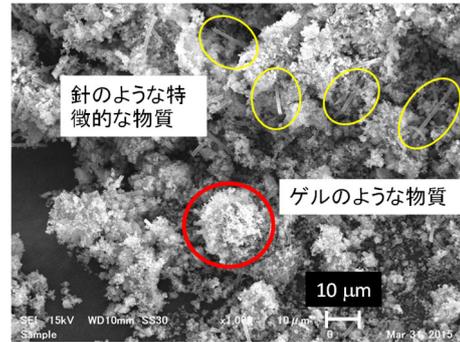
(c) 約6時間後

(3時間後からの平均通水量 66 L/min/1 袋)

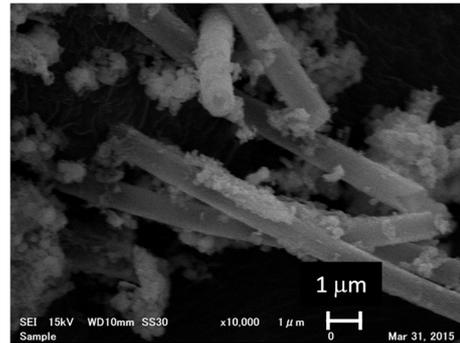
写真-1 現場⑥の通水試験状況

このような針状物質は、比表面積が大きいことから土粒子間に入ることにより容易に目詰まりを引き起こすことが推測される。このパイプ状物質の大きさは長辺方向に 10 μm 以上あり、表-3、図-3 に示した、逆洗水中に含まれる鉄が 10 μm のフィルターでほぼ捕集された結果と整合している。

表-4 に、蛍光 X 線分析(XRF)により求めた捕捉された物質の単位重量比について示す。ここでは、検出された元素を 100%として換算している。主な成分は、Fe(71%)、Si(13%)であり、その他に Ca、Al、Mn、P(2.5%)などが検出された。Fe、Si、P の成分比は、その他の成分も含まれていることを考えると既往文献²⁾に示された微生物由来の酸化鉄の成分比 Fe : Si : P=73 : 22 : 5 に類似したものと考えている。



(a) 捕集物質の特徴



(b) 針状物質の拡大図

写真-2 捕集物質の SEM 写真

表-4 蛍光 X 線(XRF)による分析結果

元素名	(wt%)	元素名	(wt%)
Na	0.35	Ca	3.05
Mg	0.38	Ti	0.1
Al	4.15	Mn	3.59
Si	13.01	Fe	71.44
P	2.55	Zn	0.18
S	0.85	Sr	0.06
K	0.28	Zr	0.01

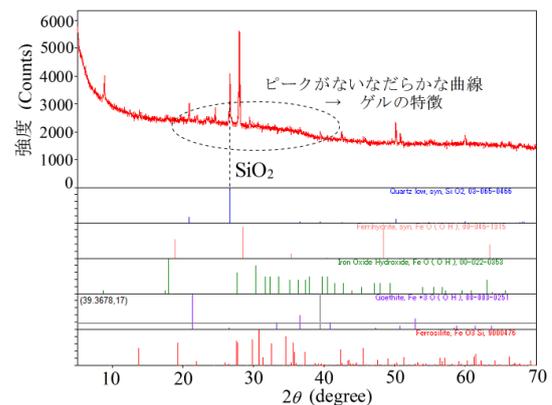


図-4 X 線回折(XRD)による分析結果

図-4 に示す X 線回折(XRD)の結果によれば、土粒子を示す石英(SiO₂)のピークはあるものの全体的にはゲル特有のなだらかな形状となっている。このことからフィルターにより捕捉された物質は結晶性の鉱物というよりは、Fe、Si 系のゲルの可能性が高いことがわかった。

3. バネ式フィルターによるリチャージシステム

3.1 基本コンセプト

排水工法ではDWによる揚水が行われる。超々高層建築の地下構造物は大深度化しているため、揚水開始時は被圧地下水の減圧であっても、揚水の過程で自由水面をもつ不圧地下水に代わる。そのため、地下水が空気に触れないようにすることは難しい。地下水中の鉄イオンの空気酸化を可能な限り防ぐため、DWとRWを直接配管でつなぎ閉管にするという方法もある³⁾。この場合、揚注水が地表で見えないため、DWの稼働停止、再稼働時や流量調整の際の水質への影響、揚注水のバランスなどに留意する必要がある。また、この方法における地下水質と目詰まりの定量的な評価は未だ途上という認識である。本稿で提案する方法は上記とは異なり、揚水過程で酸化した地下水中の鉄分を高精度ろ過により地表で除去した後、リチャージする方法である。

3.2 目詰まり Less リチャージシステムの概要

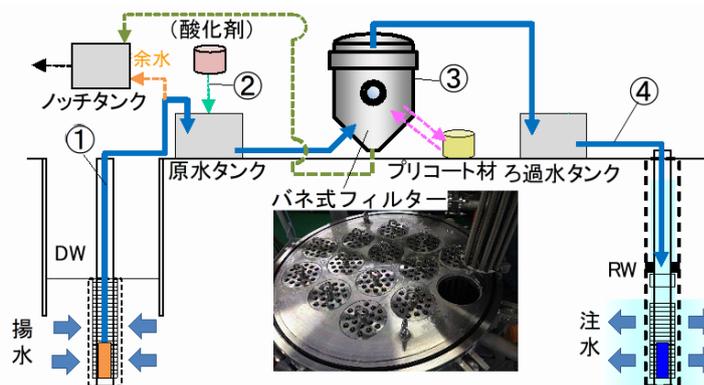
図-5(a)に提案する目詰まり Less リチャージシステムの概要を示す。揚水からリチャージまでのフローは以下のとおりである。①DWから揚水した地下水を原水タンクに貯留する。②原水タンクで酸化剤(次亜塩素酸ナトリウム)を添加する。添加せず空気酸化した鉄分のみ除去する場合もある。③プリ

コート材を付着させ、ろ材を形成したバネ(バネ式フィルター)により地下水をろ過し、ろ過水タンクに入れる。④ろ過水を注水する。

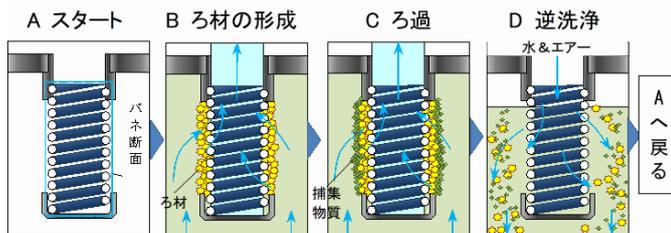
図-5(b)にバネ式フィルターのろ過メカニズム、図-5(c)にろ材が形成されたバネの外観を示す。プリコート材を溶かした水を約10分循環させるとバネにプリコート材が均一に付着してろ材の膜が形成される。プリコート材の量は、 $\phi 15\text{ mm}$ 、 $L=300\text{ mm}$ のバネ1本につき10gである。揚水のろ過を開始すると、土粒子や酸化鉄などの物質がろ材に捕集される。一定流量下で容器内圧が上がり圧力損失が閾値(0.2 MPa)を超えた段階で、逆圧を作用させてろ材と捕集された物質を同時にバネから脱落させた後、ろ材の再形成を実施する。この逆洗浄とろ材の再形成のサイクルは約15分で完了する。これらのフローは完全自動化されており容器内圧や処理流量も外部からモニタリングしている。バネのスリット幅は90 μm 、プリコート材は、ケイソウ土の融剤焼成品(中央シリカ製#600H)を用いている。

本システムのメリットは下記である。

- ・目詰まりの原因となる鉄分を0.05 mg/L未滿まで高精度に除去できるため、地下水質によらず安定したリチャージが可能となる。
- ・ろ過装置内の圧力変化を遠隔モニタリングすることで、揚水の水質変化を常時観測できる。



(a) システムの概要



(b) バネ式フィルターのろ過メカニズム



(c) ろ材が形成されたバネ (カラム試験時)

図-5 目詰まり Less リチャージシステム

4. 現場への適用

4.1 現場の概要と計測結果

表-1⑧の現場は武蔵野地東端の低地部との境界付近に位置していた。

図-6に現地のボーリング柱状図と電気検層結果を示す。施工地盤は、T.P.+11.0 m(GL-0.0 m)であり、根切り深度はT.P.-11.0 m(GL-22.0 m)であった。現地は洪積の砂層、粘性土層、一部砂礫層から構成される地盤であり、T.P.-40 m付近までは明確な難透水層はなかった。ソイルセメント遮水壁下端を当初計画のT.P.-32 m付近に設定すると大量の揚水が必要であると予測された。T.P.-50 m付近の粘性土層は層厚が0.8 m、0.5 m、2.2 mと薄いですが、電気検層結果をふまえ、この粘性土層まで遮水壁を延長することで湧水量を減じられると判断し、最大深度60 mのソイルセメント遮水壁を施工した。さらに、Bor.BでT.P.-60 m付近に砂礫層があることを確認したため、T.P.-60 m～T.P.-80 mの地層を対象とする地下水リチャージを計画した。地下水リチャージは、1本あるいは2本のDWから揚水した地下水を前述のろ過装置を介して、RWに注水するものである。

図-7に揚水を開始した2017年3月から停止した2018年10月までの各種データを示す。(a)は掘削域の地下水位、(b)は現場全体の揚水量 Q_p ・注水量 Q_R の経時変化である。現場は、高層棟部は順

打ち、低層棟部は逆打ちの順打ち・逆打ち併用工法を採用したため、掘削域の水位と揚水量はそれぞれの床付け段階でピークに達している。先行する順打ちの掘削のため、2017年3月から5月までに水位を床付けレベルGL-22.0 mまで低下させ、2017年5月～9月下旬まではほぼ一定の水位を保っている。順打ち部のマットスラブ打設などが完了した2017年11月から2018年2月下旬にかけていったん揚水量を減じ、その後2018年7月上旬まで逆打ち部床付けのために揚水量を再び増加させ水位を床付けレベルGL-22.0 mまで低下させている。一方、注水量は一部期間を除きほぼ一定量である。2017年6月中旬までは370 m³/d(0.26 m³/min)であったが、その後、注水量を徐々に増やし、2017年10月ごろからは490～550 m³/d(0.34～0.39 m³/min)まで増やした。(c)は揚水開始からの累計注水量 Q_{total} である。本現場のリチャージでは18ヶ月間で約25万m³を注水した。(d)はRW内部に設置した水圧計による水位の経時変化である。2017年3月から6月にかけてはRW内の水位上昇速度がその後の期間と比べると速いことがわかる。この時期は順打ち部の掘削が急速に進んだ時期であり、場内水位・揚水量の変化に加え、掘削重機の振動の影響で、揚水した地下水中の土粒子の混入量が多かった影響がでたものと考えている。マットスラブの1次打設が完了した2017年8月以降は、水位の上昇速度が緩やか

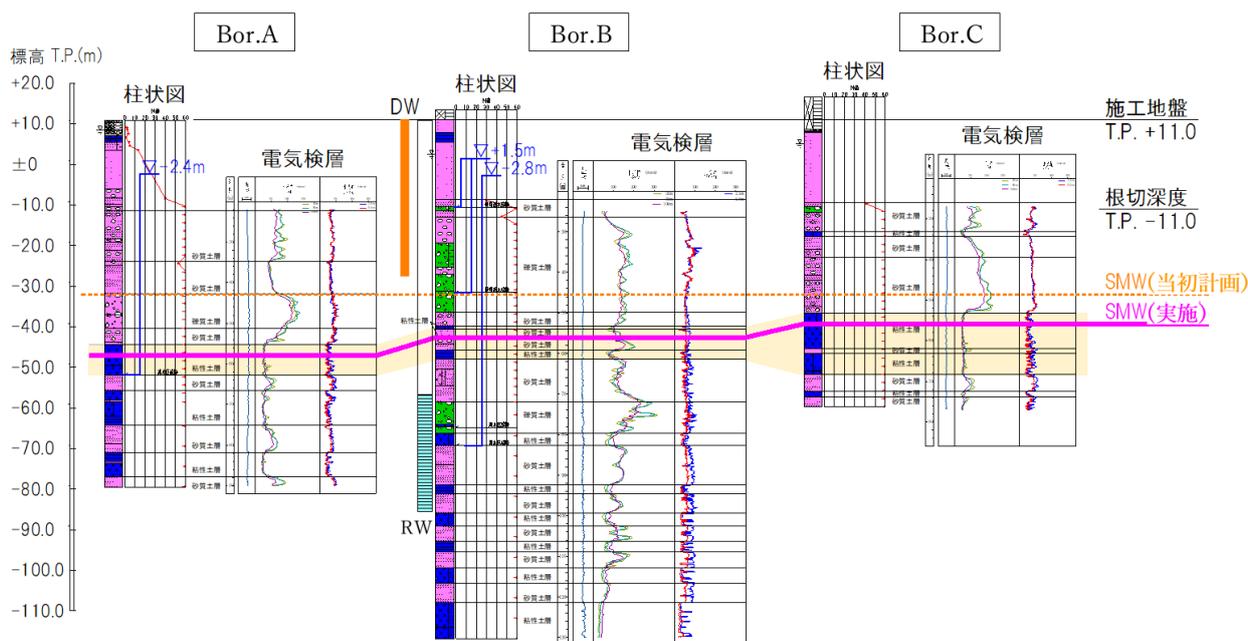


図-6 現場のボーリング柱状図と電気検層結果

になり注水が安定してきていることがわかる。なお、水位の上昇が断続的になっているのは、その時点でRWの逆洗浄(逆揚水)を実施したためである。(e)は注水量 Q_R をRW内の水位上昇量 s で除したものでありRWの注水性能を示している⁴⁾。ここに s は注水層の自然水頭をGL-16.5 mとしてその時点の水頭との差分量である。 Q_R/s はRWの逆揚水の

直後に高く、その後、RWの水位上昇に応じて低下する傾向にある。2017年8月以降は、わずかに低下する傾向はあるものの $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{min}$ 以上の注水性能を保持しつつ最大 $0.39 \text{ m}^3/\text{min}$ の注水量を継続していることがわかる。(f)はバネの1日あたりのろ材再形成(バネの逆洗浄)回数を示したものである。2017年6月に4回/日を越えたのは前述した揚水中

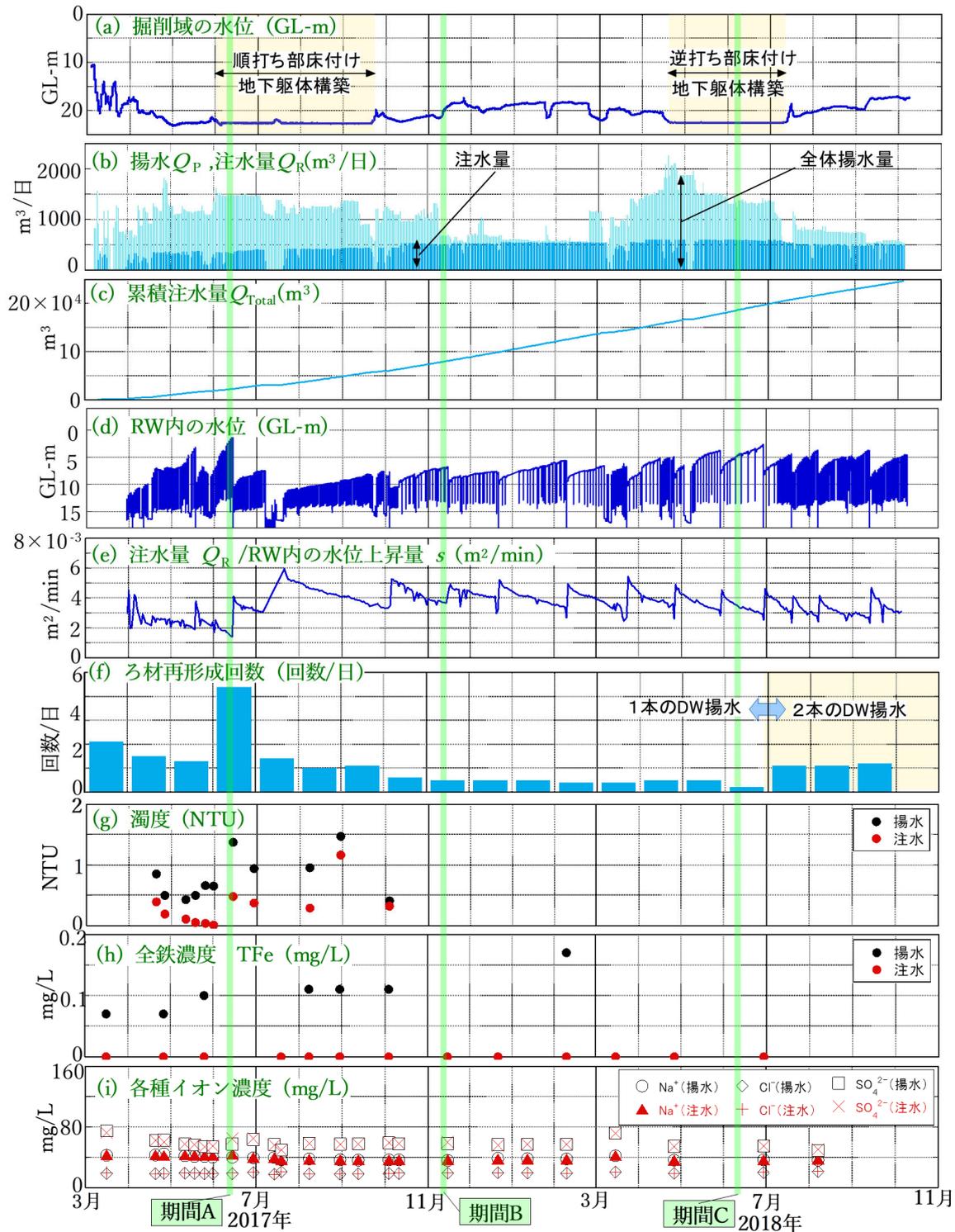


図-7 揚・注水時の各種データの経時変化

に含まれる土粒子の影響と考えられる。この6月を除けば1日あたりのろ材再形成回数は減少傾向にあり、2017年10月からは1回/日より少なくなった。ただし、2018年7月よりろ過する揚水が2本のDWの混合水になり1回/日程度にろ材再形成頻度が増えた。(g)~(h)に、揚水とバネ式ろ過後の注水の水質を示す。(g)の濁度は揚水で2 NTUを下回り、注水はさらに低い濁度であった。(h)のTFeは

揚水で最大0.17 mg/Lであり、表-1に示した東京都内のTFe実測結果<0.01~12 mg/Lの中では濃度が低い部類であった。注水のTFeは0.05 mg/L未満であり、高精度にろ過されていることがわかる。(i)に示したNa⁺、Cl⁻、SO₄²⁻などのイオンは揚水と注水ではほぼ一致している。本システムによる地下水ろ過はこれらのイオンに影響を与えないことを示している。表-5はこれらを含めた揚水、注水の水質

表-5 揚水と注水の水質測定結果

測定項目	単位	採水年	2017															2018									
			日付	3.16	4.20	4.26	5.11	5.18	5.25	5.31	6.14	6.29	8.8	8.30	9.12	10.4	10.11	11.15	12.21	1.11	2.8	3.15	4.26	6.29	7.19	8.7	
全鉄 (TFe)	mg/L	揚水	0.07		0.07				0.10			0.05	0.11	0.11	0.11				<0.05	<0.05		0.17	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
		注水	<0.05		<0.05				<0.05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05				<0.05	<0.05		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
全マンガン (TMn)	mg/L	揚水	<0.05		<0.05				<0.05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05				<0.05	<0.05		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
		注水	<0.05		<0.05				<0.05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05				<0.05	<0.05		<0.05	<0.05	<0.05		
pH	-	揚水		7.36	-	7.53	7.69	7.51	7.24	7.36	7.31	7.56	7.64	7.67													
		注水		7.39	-	7.60	7.70	7.39	7.29	7.47	7.23	7.68	7.78	7.76													
酸化還元電位*4 (E _{measured})	mV	揚水	218	213	200	209	218	176	217	218	198	180	224														
		注水	178	193	176	188	181	125	212	204	191	186	215														
電気伝導率(EC)	mS/m	揚水	66.1	59.7	61.2	60.4	69.2	55.5	57.4	55.5	53.8	52.6	51.3														
		注水	58.6	59.3	59.8	54.1	59.3	58.6	58.8	56.2	50.1	50.0	50.1														
溶存酸素濃度 (DO)	mg/L	揚水											2.22	3.23													
		注水											4.46	4.12													
濁度	NTU	揚水		0.85	0.50	0.43	0.50	0.66	0.65	1.37	0.94	0.95	1.47	0.41													
		注水		0.39	0.19	0.11	0.05	0.04	0.01	0.48	0.37	0.29	1.16	0.32													
浮遊物質(SS)	mg/L	揚水										<1.0	<1.0	0.08		0.2	<1.0		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0		
		注水										<1.0	<1.0	0		<1.0	<1.0		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0		
強熱減量 (LOI)	mg/L	揚水												<1.0		<1.0	<1.0		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0		
		注水													<1.0		<1.0	<1.0		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0		
全りん (TP)	mg/L	揚水									0.035	0.031	0.031	0.031	0.032	0.044	0.031	0.031	0.032	0.044	0.034	0.031	0.027	0.028	0.034		
		注水									0.035	0.032	0.035	0.028	0.031	0.029	0.034	0.031	0.032	0.044	0.034	0.031	0.027	0.028	0.034		
全窒素 (TN)	mg/L	揚水									3.8	3.9	4.2	3.9	4.3	4.3	4.4	4.4	4.7	3.3	4.0	3.4	4.7	4.7			
		注水									4.0	3.9	4.2	3.8	4.3	4.2	4.4	4.4	4.7	3.3	4.0	3.4	4.7	4.7			
塩分	%	揚水	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
		注水	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
溶存有機炭素	TDC	mg/L	揚水	31.9	35.8	37.7	41.2	41.7	41.3	39.9	39.6	39.3												31.1	43.0	42.7	
	DIC	mg/L	揚水	31.2	34.6	37.7	40.1	40.6	40.7	40.1	39.5	39.0													31.3	43.6	43.8
	DOC	mg/L	揚水	0.7	1.2	0.0	1.1	1.1	0.6	-0.2	0.1	0.3													-0.14	-0.6	-1.0
	TDC	mg/L	注水	31.3	35.6	37.1	39.7	39.6	39.8	39.2	38.0	38.3													31.1	39.5	40.4
	DIC	mg/L	注水	31.0	34.3	36.1	38.3	38.7	39.1	38.7	37.5	37.8													30.7	39.9	41.3
DOC	mg/L	注水	0.2	1.3	1.0	1.4	0.9	0.7	0.5	0.6	0.5													0.46	-0.6	-0.9	
陽イオン	Li ⁺	mg/L	揚水	t	t	t	t	t	t	nd	t	nd															
	Na ⁺	mg/L	揚水	42.8	43.1	44.6	42.0	41.3	41.3	40.5	40.0	39.3	37.7	36.9	36.5	36.7	36.8	36.0	38.5	38.1	37.9	42.1	36.3	36.7	36.9	36.5	
	NH ₄ ⁺	mg/L	揚水	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	K ⁺	mg/L	揚水	4.0	4.3	4.4	4.7	4.8	4.6	5.0	5.2	5.5	5.9	6.3	6.5	6.1	6.2	5.6	6.8	6.7	6.6	4.9	7.5	7.3	4.0	3.9	
	Mg ²⁺	mg/L	揚水	14.5	14.6	14.9	15.5	15.0	15.1	15.4	15.2	15.6	15.1	14.9	14.8	14.7	14.6	13.9	16.6	15.8	15.8	18.1	15.6	15.8	18.6	18.2	
	Ca ²⁺	mg/L	揚水	35.9	37.7	39.9	39.2	37.8	38.8	39.7	39.6	39.9	37.9	37.8	37.8	36.9	36.8	35.5	40.4	38.7	38.4	43.3	37.7	37.4	39.3	38.6	
陰イオン	F ⁻	mg/L	揚水	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Cl ⁻	mg/L	揚水	18.0	18.3	19.1	18.9	18.8	18.3	18.2	18.2	19.6	18.1	18.0	18.2	18.9	18.9	19.0	19.9	19.2	18.9	20.3	18.9	20.0	21.2	21.2	
	NO ₂ ⁻	mg/L	揚水	0.1	t	t	0.1	0.1	nd	0.1	nd																
	Br ⁻	mg/L	揚水	nd	nd	nd	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	nd													
	NO ₃ ⁻	mg/L	揚水	18.6	18.5	17.7	17.4	18.0	18.2	18.5	17.0	18.2	17.3	18.3	18.0	17.6	17.7	16.9	17.0	17.0	17.8	13.1	16.0	14.5	19.2	18.9	
	PO ₄ ³⁻	mg/L	揚水	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
陽イオン	Li ⁺	mg/L	注水	t	t	t	nd	t	t	nd	t	t	nd														
	Na ⁺	mg/L	注水	43.6	43.2	42.4	43.0	42.8	42.5	42.6	44.0	39.8	37.3	36.6	36.6	36.7	36.8	37.0	38.1	37.9	37.9	42.4	36.5	36.8	36.6	37.8	
	NH ₄ ⁺	mg/L	注水	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	K ⁺	mg/L	注水	3.9	4.3	4.4	4.6	4.8	4.6	4.9	5.2	5.6	5.7	6.2	6.5	6.1	6.2	5.8	6.8	6.7	6.6	4.9	7.6	7.5	4.0	4.0	
	Mg ²⁺	mg/L	注水	14.4	14.6	14.3	15.0	15.0	14.8	15.6	15.1	15.7	14.8	14.7	14.8	14.7	14.6	14.3	16.4	15.8	15.8	18.2	15.6	15.8	18.5	18.8	
	Ca ²⁺	mg/L	注水	35.9	37.9	38.6	37.4	37.9	38.1	40.2	39.4	40.3	37.3	37.6	37.6	36.6	36.3	39.8	38.5	38.5	43.6	37.7	38.9	39.0	39.8	39.8	
陰イオン	F ⁻	mg/L	注水	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Cl ⁻	mg/L	注水	19.7	18.3	18.4	19.3	19.8	18.9	18.9	19.4	20.1	18.1	18.0	18.2	19.0	19.2	19.6	19.9	19.2	18.9	20.5	19.0	20.1	21.1	22.1	
	NO ₂ ⁻	mg/L	注水	nd	t	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Br ⁻	mg/L	注水	nd	nd	nd	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	nd													
	NO ₃ ⁻	mg/L	注水	19.3	18.5	17.7	17.8	18.1	18.4	19.2	17.0	18.3	17.4	18.4	18.3	17.4	17.9	17.3	16.9	17.5	17.						

データを示したものである。以上より今回提案したシステムは、①目詰まりの原因となる鉄分を0.05 mg/L未満まで連続除去した、②2 NTUを下回った揚水の濁度を注水ではさらに低下させた、③6月中旬の1時期を除き18ヶ月間にわたり 2×10^{-3} m²/min以上の注水性能を保持しつつ最大0.39 m³/minの注水量を継続した。

4.2 ろ過流量とろ過容器の圧力関係と考察

図-8は、図-7中の緑線に示す期間A~C(5日間)でバネを納めた容器内圧 P とろ過流量 Q_R の経時変化を示したものである。また、圧力 P を全水頭 s としてm単位に換算し、図-7(e)と同様に Q_R/s とした結果も併記した。期間Aはバネのろ材再形成頻度が高い時期であったため、容器内圧は1日で

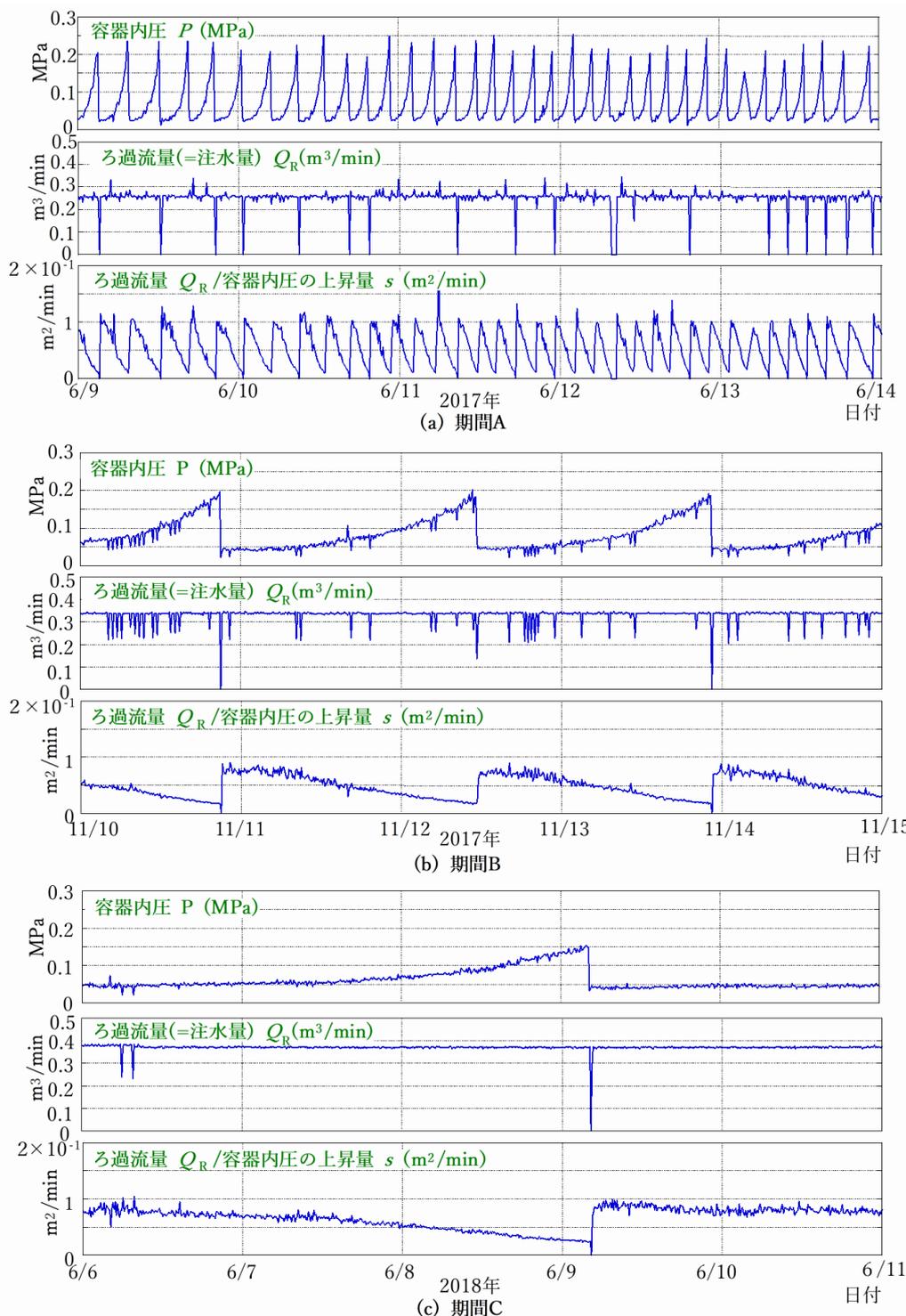


図-8 バネ式ろ過装置のろ過流量とろ材再形成状況(図-7の期間A、B、C)

表-6 バネ式ろ過の鉄捕集量の推定値

	単位	期間A 2017.6	期間B 2017.11	期間C 2018.6
バネのろ過面積	m ²	3.53		
ろ過水量 (=注水量)	L/min	255	340	385
	m ³ /d	367	490	554
揚水中の鉄濃度	mg/L	0.1 ^{*5}		
ろ過中の鉄負荷量	mg/min	25.5	34.0	38.5
ろ材再形成間隔(平均)	min	200	2000	4800
鉄捕集量	g	5.1	68	180

*5 実測結果からの仮定値

4回～7回、設定した逆洗開始圧力の0.2MPaまで達している。 $Q_{R/S}$ は約 $1 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{min}$ が最大であり、図-7(e)と比較すると20～25倍の値を示している。また、期間B、期間Cは揚水の水質が変化したため、ろ材再形成頻度は下がっているが、 $Q_{R/S}$ の上限、下限値は期間Aと大きく変わっていない。このことは、ろ過材としての性能はろ過水の水質に関わらず一定であることを示している。

表-6に、バネ式ろ過の鉄捕集量の推定値を示す。今回、用いたバネは $\phi 15 \text{ mm}$ 、 $L=300 \text{ mm}$ で、容器内に並列で設置した本数は250本、全体のろ過面積は 3.53 m^2 となる。図-8に示した3期間のろ過水量、地下水中の鉄分量(0.1mg/Lが全量除去されたと仮定)、ろ材再形成間隔から、各期間の1サイクルあたりのバネへの鉄負荷量は5.1g、68g、180gと計算された。このことは、容器内圧が上昇する原因が鉄だけでなく、この時期の地下水に含まれる土粒子の量に起因していることを示すものである。一方、鉄・土粒子を高精度に除去したにも関わらず、図-7(e)に示したように一定注水下で $Q_{R/S}$ が徐々に低下し、月に1回程度のRW逆揚水で値が回復した。この理由は現時点で明確でない。注水層の地下水に溶存する鉄イオンが注水と反応して酸化鉄として析出した可能性もあるが、これについては今後の課題としたい。

5. 結論

本稿では、超々高層建築構造物の地下構造の施工時に用いる地下水リチャージ技術について、その概要と現場への適用結果を示した。本稿で得られた結論は以下のとおりである。

1. 東京都内上総層群の江戸川層Edsの目詰まりと関連の深い全鉄TFe濃度は $<0.01\text{--}12 \text{ mg/L}$ と幅広く、同じ現場でも濃度が異なる場合があった。溶存鉄DFeとしての鉄濃度は揚水時の空気との接触・攪拌の度合いにより、TFeのうちDFeが

84%以上であったもの、50%未満であったもの、などがあった。

- ⑫-2の揚水では、原水のTFe濃度 2.7 mg/L に対して $10 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ ろ過操作後のTFe比率はそれぞれ96%、70%であった。一方、解放タンクに入れたあとの注入水は比率がそれぞれ86%、41%へと低下した。地下水が大気に触れることにより、フィルターを通過できない固体状の鉄粒子が地下水中に析出したと考えられる。またRW近傍の地下水は $10 \mu\text{m}$ 以上の酸化鉄が集積されていることがわかった(表-3、図-3)。
- 酸化した鉄分を電子顕微鏡や蛍光X線で分析した結果、針状あるいは細いパイプ状の酸化鉄で構成されていた。重量比は鉄が70%以上であり、長辺方向の長さは $10 \mu\text{m}$ 以上であった。これらの結果は2.の結論とも整合している。
- RWの目詰まりの原因となる酸化鉄を高精度に連続ろ過できるリチャージシステムを提案し、現場への適用事例を示した。この事例では18ヶ月間で累積注水量 25 万 m^3 の地下水リチャージを実施した。目詰まりの原因となる地下水中の鉄分を 0.05 mg/L 未満まで連続ろ過し、RWの注水性能を示す指標である $Q_{R/S}$ は2017年6月中旬を除き $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{min}$ 以上の注水性能を保持しつつ最大 $0.39 \text{ m}^3/\text{min}$ の注水量を継続した。その他の溶存態の水質については影響を与えなかった。
- ろ過の状況を分析した結果、RWの目詰まりは鉄分だけでなく揚水中の土粒子とも密接に関連することがわかった。掘削初期の2017年3月～6月にかけてRW内の水位上昇速度が速く、バネ式濾過の逆洗・ろ材再形成頻度も高かったことから揚水中の土粒子は、地下水流速の変化や掘削施工時の振動等にも影響を受けたと推測された。

<参考文献>

- 石川明, 芹澤貞美, 田崎雅晴, 林 秀彦, 依田侑也: “バネ式フィルターによる地下水の地盤返送”, 第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集, Vol.23, S1-31. 2017
- Hideki Hashimoto, Atsushi Itadani et. al: “Nano-Micrometer-Architectural Acidic Silica Prepared from Iron Oxide of Leptothrix ochracea Origin”, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol.5, Issue 11, pp. 5194-5200, 2013
- 三宅紀治, 高坂信章, 石川明: “リチャージ工法での問題点と対策例”, 基礎工, Vol.19, No.3, pp.60-67, 1996
- 山本淳史, 加藤哲, 石川光甫, 西田有祐, 高坂信章: “原位置におけるリチャージウエルの洗浄効果に関する考察”, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会, III-309, 2024