

地下水流動保全工法における迂回浸透工法の見詰まりに関する研究

A study on the clog up of detour permeation method as underground water preservation method

佐藤 常雄*・西垣 誠**・井田 隆久***・高津 忠****

Tsuneo SATO, Makoto NISHIGAKI, Takahisa IDA, Tadashi TAKATSU

The drying up of the well and ground settlement due to the underground flow disturbance by the large scale underground facility construction such as roadway and subway often causes social issues. The authors are developing the innovative diaphragm wall that can provide the water barrier in the construction and detour permeation in the completed state.

This paper reports the occurrence of the clog up that would prevent the function of the detour permeation method as the flow preservation method. The results of the study on the occurrence condition in the laboratory and field experiments are reported.

Keywords : Groundwater, flow barrier, the detour permeation method of construction, Technical development, clog up

1. はじめに

道路や地下鉄などの大規模線状地下構造物の建設に伴い，地下水流動が遮断され，上流側では地下水位が上昇し，下流側では地下水位が低下することで様々な影響が発生し，大きな社会問題¹⁾となることも少なくない．図-1に地下水流動の阻害により発生する具体的な影響のイメージ図²⁾を示す．下流側での井戸枯れや地盤沈下など影響や被害も大きい．

著者らは，この問題を解決するために，線状構造物構築のための掘削工事に使用されるRC地中連続壁やソイルセメント柱列壁などの山留め壁を対象に「施工時は遮水，完成後には通水が可能な地下水流動保全工法」の開発を行ってきた³⁾．地下水流動保全工法としては山留め壁で遮断された地下水を上流側で集水し下流側で復水させる迂回浸透工法が一般的で，上・下流の自然の水位差で復水させる．集水や復水に水中ポンプ等の動力を使わないところに特徴がある．迂回浸透工法の概念図⁴⁾を図-2に示す．

大規模線状地下構造物の建設に伴い，これまで実施された迂回浸透工法の特徴を整理して表-1に示す．

キーワード：地下水，流動阻害，通水工法，技術開発，見詰まり

* 正会員 (株) 銭高組 土木本部技術部

** 正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部

*** 正会員 (株) 銭高組 技術本部技術研究所

**** 正会員 工博 (株) 銭高組 技術本部技術研究所

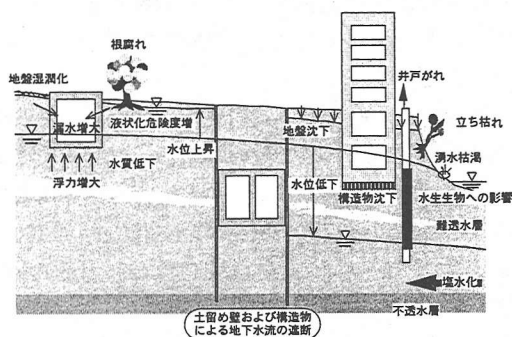


図-1 地下水流の遮断による影響イメージ²⁾

表-1 迂回浸透工法の事例

集水・復水方法		設置時期	締切り構内の通水	備 考
山留め壁に開口部を設置	山留め壁は通常施工 ^{4), 5), 6)}	埋め戻し時	透水性埋め戻し材	埋め戻し時あるいは埋戻し後に壁の一部を撤去
集水・復水の井戸を設置	山留め壁の一部に設置 ^{7), 8), 9)}	山留め壁と同時施工	連結管	用地境界に余裕がない場合
	山留め壁締切り構外に設置 ¹⁰⁾	山留め壁施工後	連結管	用地境界に余裕がある場合
集水管(有孔管, スクリーン管)	山留め壁締切り構内から構外にボーリングし, 地山に設置 ^{11), 12)}	掘削後	連結管	障害発生後の対応が可能
山留め壁の不連続施工	山留め壁の継手に特殊継ぎ手矢板を使用 ¹³⁾	山留め壁と同時施工	透水性埋め戻し材	埋め戻し後に継手部矢板を撤去
	山留め壁を歯抜け施工し, 凍結で土水圧に対応 ¹⁴⁾	埋め戻し後, 凍結解除	透水性埋め戻し材	埋め戻し後, 凍結を解除

集水・復水には, 上下流の山留め壁の一部を撤去し開口部を設ける例^{4), 5), 6)}, 集水・復水のために井戸を設置する例^{7), 8), 9), 10)}や掘削構内からボーリング等によりスクリーン管や有孔管を地山に設置する例^{11), 12)}がある。特殊な例としては, 山留め壁を歯抜けにして施工し, 地下掘削時には凍結により土水圧に対抗させ, 建設終了後凍結を解除して地下水流を復活させた事例¹⁴⁾もある。また, 山留め壁の上流側・下流側間の地下水流路として集水・復水施設(井戸や有孔管・スクリーン管)を連結管で直接通水する例と, 山留め壁開口部間を砕石等の透水材で埋め戻して通水する例がある。これらの工法は帯水層の位置や構造物との関係, 山留め壁の種類によって選択され, それぞれ特徴を有していて, 地下構造物の建設計画に先立って対策工を検討する事例が増えてきている。

地下水の流況を保全する迂回浸透工法の中で, 集水井と復水井を有する工法は, 比較的深度の深い地下構造物の建設に対する地下水保全対策として極めて有効な工法である。この迂回浸透工法の課題の一つに下流側復水井の目詰まりによる機能の低下がある。本研究では, 迂回浸透工法が適用される帯水層の礫質土と砂質土を対象として, 室内モデルおよび原位置復水井戸で目詰まり特性について検討した。

2. 迂回浸透工法における復水井の課題

通常の集水井や復水井は, 出来るだけ多量の地下水を取水したり復水(涵養)したりすることを目的とし, 集水井ではポンプ等による強制的な取水を, 復水井においても高い水位設定や加圧などによって強制的な復水を行うことが多い。一方, 迂回浸透工法は, 上流側の地下水を下流側に迂回浸透させることに目的があるため, 長期間にわたり継続的に用いられ, あくまでも自然の地下水の水位差を利用した, 上げ越しあるいは伏せ越しによる流路変更である。この際, 復水井付近では大きな流路変化が発生し, 目詰まりが発生することになる。このため, 適切に復水井を配置しないと流量が確保できず, 水位差が大きくなり地下水流動の保全が難しくなる。

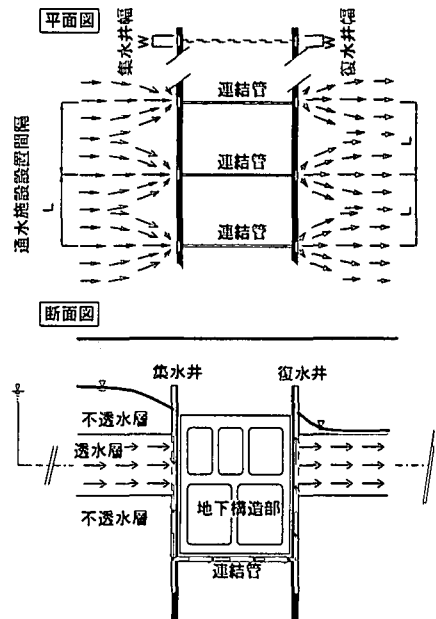


図-2 迂回浸透による地下水流動の模式図

復水井での目詰まり発生の要因を、地下水涵養方法である復水工法(リチャージ)で生じる目詰まり原因から抽出すると、復水工法の見詰まり発主の原因としては、①注入水中の懸濁物、②帯水層内での化学反応、③井戸または帯水層での微生物の増加、④注入水中の空気、⑤帯水層で復水するときにかかる土粒子の再配列の5項目が挙げられている¹⁵⁾。地下水流保全のための復水井では、上流側の地下水を下流側の同じ帯水層に迂回形式で復水させるため、④の問題は生じない。②と③については、水質の異なる複数の地下水を混在させて集水、復水させる際に考えられるが、通常は大きな問題とならない。①と⑤は復水時の流速に依存し、復水井の大きさや設置間隔に関係する問題で、土粒子の移動による目詰まりが生じない流速で迂回浸透施設を設計する必要がある。

この細粒土粒子の移動に伴う目詰まり発生条件については、浸透流による土粒子の移動に關するの限界動水勾配や限界流速などに基づく報告^{16),17)}や、復水井戸での目詰まりに關する研究^{18),19)}がある。これらの研究によれば、井戸近傍の動水勾配がある程度以上大きくなると目詰まりが発生して復水能力が低下し始めることがわかつている。西垣らは川砂や成田砂での実験で、目詰まりが発生する動水勾配(最小動水勾配)が0.05程度であることを報告¹⁹⁾している。図-2に示した様な復水井のピッチや径(幅)を適切に設計するためには、迂回浸透工法における復水井の見詰まり発生条件を明確にする必要がある。以下に、迂回浸透機能の確認実験と目詰まり条件把握実験の結果について述べる。

3. 復水井の見詰まりに關する実験

3. 1 室内3次元モデルによる復水実験

(1) 実験方法

1) モデル地盤

地盤材は、図-3に示すような目立つ粗大な粒径(20mm以上)の礫分を除去した礫質土と砂質土である。同図には、東京地域の主な帯水層である武蔵野礫層と江戸川層砂の粒度分布例も併記したが、両方ともかなりのばらつきがあることがわかる。モデル地盤は、飽和時の密度を礫層で $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ 、砂層では $\rho=1.8\text{g/cm}^3$ となるように、含水比を調整した材料を締固めて作製した。

2) 実験装置

地下水の迂回浸透をモデル化した実験土槽の模式図を図-4に示す。実験土槽は、長さ3200mm、高さ1000mm、幅は600mmである。上・下流部に1000mm長の透水層をはさんだ地盤モデルを設けている。透水層の厚さは150mmである。中央部に1000mm区間の山留め壁と井戸モデルと連結管を設けている。井戸モデルとして山留め壁モデルの端部(片側あるいは両側)に幅50mm、高さ150mm(透水地盤の厚さ相当)のスクリーンを設置し、集水井、復水井とした。使用したスクリーンはスロットサイズ0.5mm、開口率17.5%(記号S0.5mm-17.5%)である。実験中は、透水地盤や井戸に配置したマンメータの水位、流量、水温等を測定した。

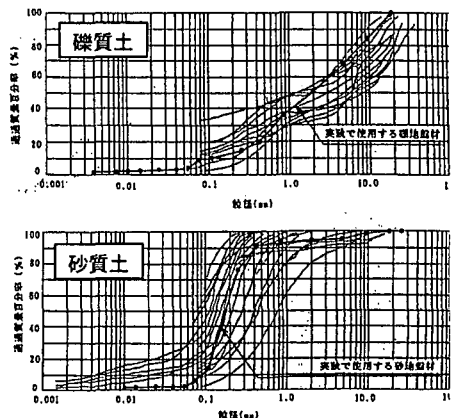


図-3 実験に使用した地盤材の粒度分布

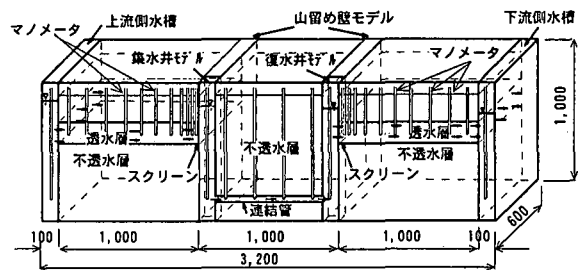


図-4 実験土槽模式図

3) 実験条件

モデル地盤の作製後、徐々に全体の水位を上昇させて透水層を飽和させた後、上流側の水槽から水位一定条件で水を供給し、下流側の水槽から水位一定条件で排出させる。

1段階の計測期間は5日間である。実験は、対象層が礫質材料と砂質材料の2種類、井戸間のピッチ60cm（山留め壁両側に井戸設置）、ピッチ120cm（山留め壁片側に井戸設置）の2種類である。動水勾配は $i=1/100$, $2/100$, $3/100$ の3種類で、一度水位差をゼロに戻してから所定水位差に再設定した。

(2) 実験結果

1) 礫質土の実験結果

ピッチ120cm条件で実施した3種類の動水勾配での、 $(Q/\Delta h)$ の比較図を図-5に示す。ここに、 Q は計測流量、 Δh は上流側と下流側水槽付近の水位差である。 $(Q/\Delta h)$ は $i=2/100$ での開始直後は $i=1/100$ 条件と同じ傾向を示していたが、1日経過後急激に2割程度低下し、回復状況を見せながらも徐々に低下した。 $(Q/\Delta h)$ の低下傾向は $i=3/100$ の条件下でさらに継続的に進行していく。 $i=2/100$ の実験における復水井付近水位の経時変化を図-6に示す。表示した測定ポイントは復水井の水位および復水井からの距離+10mm, +30mm, +50mm, +80mm, +130mmの各点（いずれも壁面から地盤内+5mmの点に設置したマンメータによる測定）である。 $(Q/\Delta h)$ が低下した通水1日経過後の同時期に、復水井の水位は上昇を始めている。+10mm点も同様の傾向を示す。逆に、+30mm点以降の測点は、 $(Q/\Delta h)$ の低下に合わせて低下し、この+10～+30mm間で水位差が拡大している。このように流量の低下をもって目詰まりの発生とした。また発生領域は水位差が拡大（動水勾配が大きくなる）した領域で、このケースでは、+10mm点と+30mm点の間で目詰まりが発生、進行しているとみなした。

各実験条件と目詰まり発生の判定結果を表-2に示す。ピッチ60cm条件においては、どの動水勾配でも目詰まりの発生は見られなかった。ピッチ120cm通水では、動水勾配 $i=2/100$, $3/100$ で目詰まり現象が生じた。

2) 砂質土の実験結果³⁾

礫質土と同様に、砂質土の実験結果についての目詰まりの発生の判定結果を表-3に示す。砂質土の場合は井戸ピッチ60cm, 120cmともに目詰まりが発生し、 $(Q/\Delta h)$ も大きく低下した。水位分布の測定結果例を図-7に示す。礫の実験では目詰まりの発生区間は復水井からの距離が+10mmから+30mm区間であったが、砂質土の実験では復水井から10mmの間で発生していた。これはいずれの条件でも同じであった。砂質土は目詰まりしやすいこと、また目詰まり発生領域は礫地盤よりさらに井戸近傍で発生することがわかった。

(3) 結果の考察

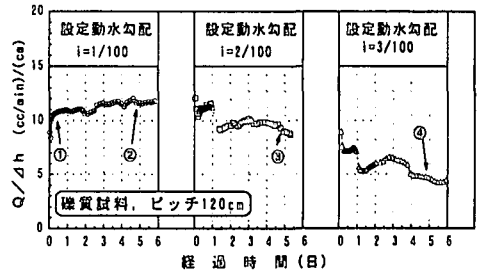


図-5 下流への流出流量($Q/\Delta h$)の経時変化（礫質土、ピッチ120cm）

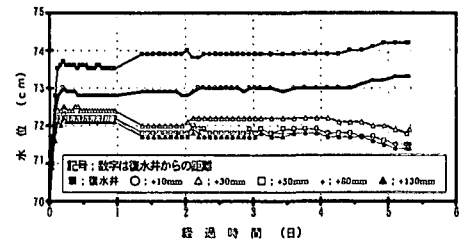


図-6 復水井付近の水位の変化（礫質土、ピッチ120cm, $i=2/100$ ）

表-2 礫質土のモデル実験結果一覧

地盤材料	通水条件	設定動水勾配		
		1/100	2/100	3/100
礫質土	井戸ピッチ60cm	○	○	○
	井戸ピッチ120cm	○	×	×

使用スクリーン：S0.5mm-17.5%

表-3 砂質土のモデル実験結果一覧

地盤材料	通水条件	設定動水勾配		
		1/100	2/100	3/100
砂質土	井戸ピッチ60cm	×	×	×
	井戸ピッチ120cm	×	×	×

使用スクリーン：S0.5mm-17.5%

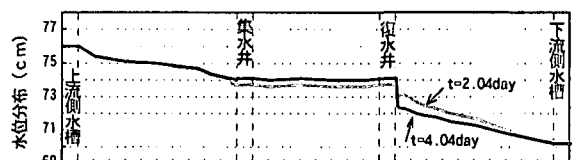


図-7 水位分布の変化（砂質土、井戸ピッチ60cm, $i=1/200$ ）

復水井付近の土粒子移動の概念図を図-8に示す¹⁸⁾。浸透が井戸から放射状であるため、復水井の近傍地盤の流速が大きい領域では土粒子が移動し、速度が低下した地点で滞留が進み目詰まりが発生することになる。本実験結果から、目詰まりは復水井のごく近傍で発生することが明らかとなった。このことから、目詰まりの発生条件を検討するにあたっては、スクリーンと地盤との接触面近傍での流速で行う必要があり、スクリーンの開口率を考慮した流速(図-9)と目詰まりによる流量阻害の関係で整理した。なお、当実験ではスクリーンと地山の間にフィルターは設けていない³⁾。

$$V_{s2} = \frac{Q}{\alpha \cdot A} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 Q : 計測流量 (cm^3/s), A : 復水井の浸透面積 (cm^2)

α : スクリーン開口率 (%)

V_{s2} : スクリーンの開口率を考慮した平均流速 (cm/s)

流量阻害の指標としては、通水初期流量からの変化を評価するために、 $(Q/\Delta h)_5 / (Q/\Delta h)_{\text{init}}$ を採用した。ここに、 $(Q/\Delta h)_{\text{init}}$ は初期安定時の流量と水位差の比で、 $(Q/\Delta h)_5$ は通水5日経過後の流量と水位差の比である。

3次元モデル実験と別途実施した復水側モデル実験²⁰⁾の結果も併せて整理して図-10(礫質土)、図-11(砂質土)に示す。3次元モデル実験と復水井モデル実験で流量比の値にばらつきが認められるのは、前者は目詰まりの発生により復水井の水位が上昇するのに対して、後者の実験では復水井の水位を一定としているため、目詰まりの進行は少ないことによる。このため、流速と目詰まりの進行度合いは、両実験で差が認められる結果となっている。この図より、礫質土の場合はある流速以上で目詰まりが発生することがわかる。目詰まりが発生する時の流速を目詰まり限界流速と呼ぶことにする。流速と目詰まり発生の関係から、実験で使った礫質土の目詰まり限界流速は、 $(V_{s2})_{\text{lim}} = 7.0 \times 10^{-2} (\text{cm/s})$ 程度といえる。

砂質土の実験では復水側モデル実験も含めてほとんどのケースで目詰まりが発生し、小さな流速でも目詰まりが発生しているところに砂材料での実験の大きな特徴がある。流速と目詰まりの関係を評価すると、当実験での最小流速 $V_{s2} = 8.4 \times 10^{-4} (\text{cm/s})$ 以上でいずれも目詰まりが発生しており、目詰まり限界流速は明確でない。またこの値は礫に比べて約 1/100 となっており、目詰まりしやすい地盤材といえる。

3. 2 現場復水実験

現場復水実験は、室内モデル実験で明確にできなかった砂質材料での目詰まり発生条件を把握する目的で、段階復水試験法で行った。また、目詰まりが発生した後の長期にわたる井戸内水位の挙動把握を行った。

(1) 実験方法

1) 実験対象層

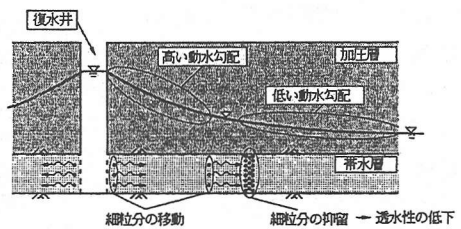


図-8 復水による土粒子移動の概念図¹⁸⁾

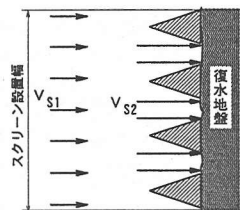


図-9 スクリーン近傍の流速

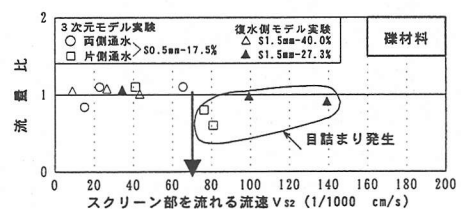


図-10 流速 V_{s2} と流量比の関係 (礫質土)

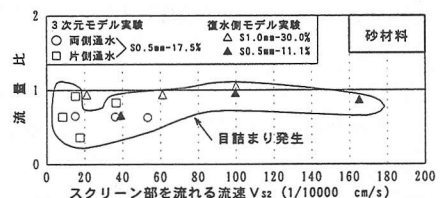


図-11 流速 V_{s2} と流量比の関係 (砂質土)

実験地は比較的平坦な台地部(淀橋台)にある。土質柱状図を図-12に示す。実験対象とする東京層砂層(T_{os1})は、上下を層厚 2m 程度の東京層粘土層で挟まれて層厚 5m 程度でほぼ水平に堆積している。黄褐色を呈する均一な細砂を主体とし、層上端部では粘土混じり層を、下端部では貝殻混じり層を伴っている。

図-13 に T_{os1} 層の上部と中央部での試料の粒径加積曲線を示す。有効径 D_{10} は、平均すると 0.008mm 程度である。透水係数は、復水井での現場透水試験結果によると $1 \sim 2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度である。

2) 井戸の配置と仕様

復水井および観測井の配置を図-14に示す。事前の調査結果から想定した流向を主計測方向とし、観測井の配置を決定した。復水井を中心に、各観測井はそれぞれ 1, 2, 5, 10, 20, および 30m の位置にある。主計測線と直角方向にも観測井を設置した。

井戸の削孔径は $\phi=590\text{mm}$ 、設置したスクリーン管径は $\phi=557\text{mm}$ である。スクリーン管にはスロットサイズ 0.5mm、開口率 17.5% のスクリーンを用いている。復水対象層以外からの水の流入や流出を防止するために、不透水層(東京層粘土層)部で、井戸鋼管部と地盤との隙間にシール材を充填した。

3) 実験条件

①段階復水実験

実験開始前の初期状態を把握した後、復水井の水位あるいは注水流量を一定値に設定し、2週間～1ヶ月間の水位変動を計測する。それぞれの段階の実験において目詰まり現象がみられた場合には、実験終了後井戸の洗浄を実施し、通水性の回復を図ったのちに次段階へと進む。復水井の設定水位上昇高さを変えて4段階実施した。

②長期復水実験

長期復水実験は目詰まり発生後の復水井の挙動を把握し、目詰まり発生後の復水井でどの程度の復水が可能かを判定する目的で実施した。実験は段階復水実験で生じた地盤の目詰まりを、ジェットティングと逆洗浄とによって初期の透水性まで回復したことを確認した後、段階復水実験で求められた限界流速時の注水流量 0.4 (1/min) の約2倍の 0.8 (1/min) に設定し、目詰まりを発生させて長期注水を継続した。

(2) 実験結果および考察

1) 段階復水実験結果

実験期間中(長期復水実験を含む)の地下水位の計測結果を図-15に示す。第1段階は復水井水位を+15cmの水位一定条件で復水実験を実施した。当初の注水流量は 0.1 (1/min) 程度であったが、周辺地下水位が全体的に上昇し(2週間で 30cm)、11日を経た時点で、設定水位差はゼロになった。この段階では目詰まりは生じていない。

第2段階は、復水井水位を+30cm 維持する条件として注水流量 0.4 (1/min) 一定条件で実施した。この時の注水流量と水位の経時変化を図-16に示す。

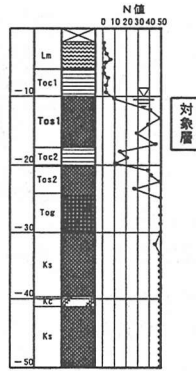


図-12 土質柱状図

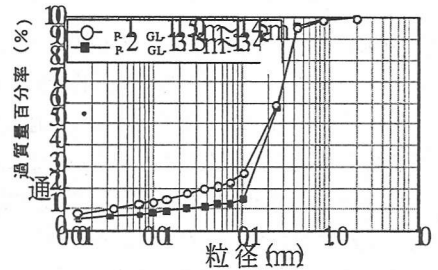


図-13 粒径加積曲線

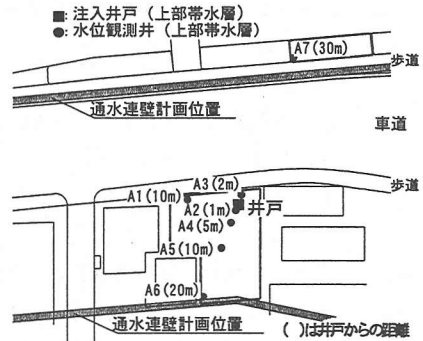


図-14 復水井および観測井の配置図

復水の影響の少ない観測井(A6)を基準として水位差の変動を見ると、5日目までは+30cmを維持しているが、以後徐々に井戸水位が上昇し最終計測時には+75cm程度に拡大した。当初の5日間は目詰まりが生じていなかったが、その後、目詰まりが徐々に進行したものと考えられる。第3段階、4段階は、復水井水位を+50cm、+100cmに維持できる注入流量として、3.6 (1/min)、7.2 (1/min)の流量一定条件で実施した。図-15に見られるように、復水井内の水位は徐々に上昇し、計測期間内ではまだ上昇傾向にあった。第3段階、4段階ともに、注水初期から目詰まりが発生、進行していると考えられる。

第4段階での測線方向水位分布の変化を図-17に示す。目詰まりは初期の段階から発生し、注水を続けることにより水位差は拡大し、最終計測時には井戸水位は+5.2mとなった。

2) 段階復水実験結果の考察

現地の地下水位は季節変動が大きく、また観測井設置範囲内でも水頭差があり地下水流が存在する(図-17参照)が、ここでは注水流量を平均流速で検討するものとし、流速はスクリーン開口率を考慮した前記式(1)で求めた。各段階における目詰まりの有無の判定とその際の平均流速を表-4に示す。第2段階の実験から、この際の平均流速 3.7×10^{-4} cm/sを対象とした砂質土層の目詰まり限界流速と判定した。この目詰まり限界流速は室内実験の結果(図-11)と同じように非常に小さな値となっている。従って、この砂質材料に対しての復水は極めて繊細であり、小さな水位設定しか与えられないことになると言える。また、目詰まりは図-17からもわかるように、復水井から1m以内で水位差が拡大しており、この領域で目詰まりが発生していることがわかる。砂質土の3次元モデル実験ではスクリーンから1cm以内で目詰まりが生じていることが確認されているが、実規模の井戸においても壁面から近い領域で目詰まりが発生することが確認できた。

(3) 長期復水実験結果および考察

約210日間の長期復水実験時の復水井水位と観測井水位の計測結果についても前出図-15に示した。実験期間中における周辺地下水は、A6、A7の計測結果が示すように、開始時から徐々に低下し最終的には40~50cmの低下する状況にあった。一方、復水井水位は、注水初期に急速に上昇し、以降徐々にその割合が小さくなり、5ヶ月を経た時点でほぼ一定値に収まる傾向にある。

注水に伴う地下水位変動と周辺地下水位の変動を分離す

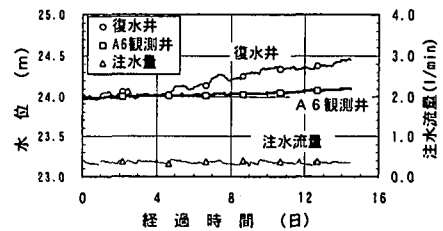
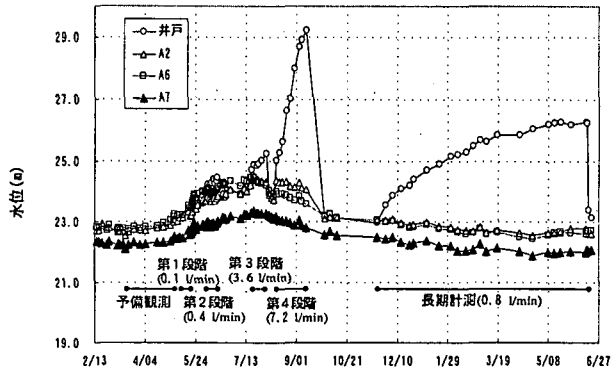


図-16 注水流量と水位の経時変化(第2段階)

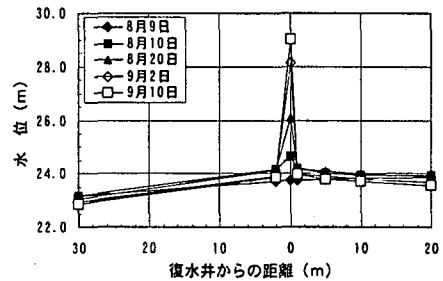


図-17 測線方向水位分布の変化(第4段階)

表-4 実験結果一覧表

段階	初期設定水位	○: 目詰まりなし ×: 目詰まり発生	
		目詰まりの有無	Vs(cm/s)
第1段階	+15cm	○	1.1×10^{-4}
第2段階	+30cm	○→×	3.7×10^{-4}
第3段階	+50cm	×	3.3×10^{-3}
第4段階	+100cm	×	6.7×10^{-3}

るために、A6 の水位を基準としたそれぞれの井戸の水位変化量を図-18 に示す。復水井は、当初 100 日程度までは比較的単調に目詰まりに伴う水位上昇(2~8mm/day)の期間を経て、その後水位の上昇と低下を繰り返しながらも水位が上昇するようになる。これは目詰まりが進行しながらも、局所的な“水みちの形成”がなされることで水が流れ、水位が低下するものと考えられる。この時の水位変動は±20cm 程度の繰り返しであった。その後、0.8 (l/min)の注水流量に対して、+3.5mの水位上昇となったが、ほぼ安定状態となった。

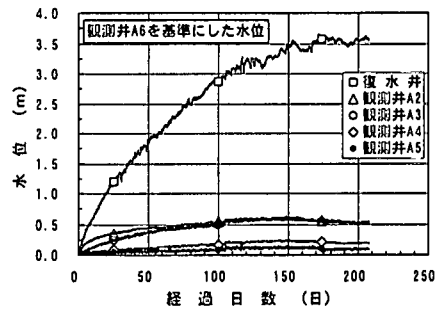


図-18 水位上昇の経時変化

以上から、目詰まり限界流速以上の流速となる流量を注

入した場合でも、復水井の水位は上昇を続けるが、最終的には注入流量に見合った一定の水位で安定することが確認できた。このことは、目詰まりしやすい砂質地盤においても透水係数は目詰まりにより低下するが、長期的にはある程度の復水はできることがわかった。

4. 目詰まり発生条件に関する検討

土粒子の移動に関しては、動水勾配あるいは流速に着目した整理が行われることが多い。前者は土粒子の移動を浸透圧で説明しようとするもので、後者は水の流速エネルギーと関係付けようとするものである。流速 V と動水勾配 i には $V=ki$ の関係があるので、目詰まりが発生するまでの透水係数 k に変化がないとすれば、動水勾配と流速での評価は同じ結果となると考えて良い。

これまで、土粒子の移動に関する研究は、パイピングやボイリングのような浸透水による地盤の進行性破壊現象を把握する目的で行われてきた。浸透水による地盤の進行性破壊は、土粒子に作用する浸透力が次第に大きくなり、ある限界を越えると土粒子を移動させることで発生する。このときの流速が進行性破壊現象という限界流速である。これまでの、この種の研究の結果をまとめた結果を図-19³⁾に示す。

これらの研究成果をそのまま復水井における地盤の目詰まり限界流速として適用するには、土粒子の移動方向の違いや地盤の破壊時の限界流速と土粒子移動・滞留が始まることで発生するのが

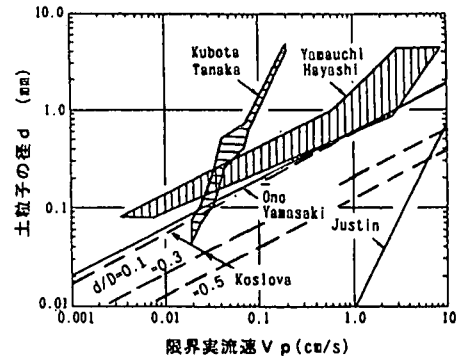


図-19 土粒子の粒径と限界実流速の関係³⁾

表-5 目詰まり限界流速に関する実験結果一覧

地 盤 材	初期透水係数 k_0 (cm/s)	10%粒径 D_{10} (mm)	20%粒径 D_{20} (mm)	細粒分含有率 (0.104以下) F_c (%)	目詰まり限 界動水勾配 i_{cr}	目詰まり発 生限界流速 V_d (cm/s)	備 考
川砂 No.1	7.46E-02	0.21	0.34	3.0	0.30	2.2E-02	放射モデル実験 ²¹⁾
川砂 No.2	4.50E-02	0.11	0.24	9.0	0.10	4.5E-03	
川砂 No.3	3.08E-02	0.074 *1	0.11	20.0	0.07	2.2E-03	
川砂 No.4	4.50E-01	0.51	0.61	0.0	0.50	2.3E-01	
成田砂 No.1	2.25E-02	0.13	0.18	4.0	0.30	6.8E-03	3次元モデル実験、 復水井モデル実験 ²⁰⁾
成田砂 No.2	3.02E-02	0.1	0.15	11.0	0.20	6.0E-03	
礫質土	3.40E-02	0.1	0.4	10.0	0.36	1.2E-02	
砂質土	3.00E-03	0.09	0.11	14.0	0.05	1.5E-04	
東京屑砂 (現場)	1.50E-03	0.008 *2	0.08 *2	22.0 *2	0.04	6.5E-05	現場復水実験

*1 : 10%粒径は0.074mm以下のため0.074とする

*2) 上層と下層の平均値

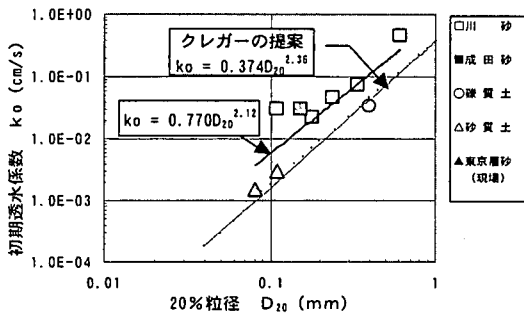


図-20 20%粒径 D_{20} と初期透水係数 k_0 の関係

目詰まり現象であることなどの相違に注意が必要である。

著者らがこれまで実施した目詰まりに関する実験結果から目詰まり発生に関して整理した結果を表-5に示す。なお、流速には地盤内の平均流速と地盤内の間隙を流れる実流速で検討される場合があるが、ここでは実間隙の把握が困難なことが多いことから平均流速で検討することにする。図-20に20%粒径 D_{20} と初期透水係数 k_0 の関係を示す。クレガーの提案値より少し大きめの値となっている。図-21に細粒分含有率 F_c (0.104mm以下) と初期透水係数 k_0 の関係を示す。細粒分含有率に比例して初期透水係数は小さくなっている。

このような細粒分を含む地盤材料での F_c と目詰まり限界流速 V_d の関係、同じく F_c と目詰まり限界動水勾配 i_{cr} と関係を図-22、図-23に示す。この図から、復水井を対象とした目詰まり限界流速や目詰まり限界動水勾配は細粒分含有率と密接な関係にあることがわかる。細粒土粒子の移動によって発生する目詰まりは、原因となる細粒分を多く含む程目詰まりしやすく、そのため限界流速や動水勾配も小さくなっているものと考えることができる。

図-24に初期透水係数と目詰まり限界流速の関係を示す。初期透水係数が小さい地盤材は目詰まり限界流速も小さく、復水は容易でないことが分かる。

迂回浸透工法を検討する際には、通水施設のピッチ、井戸径(復水面積)を設定する必要がある。これらは地下水条件(透水係数や動水勾配等)や発生する許容水位差によっても異なるが、一本当たりの復水可能流量を設定する際には目詰まりに対して配慮する必要がある。復水流速を目詰まり限界流速以下になるようにすることが望ましい。今回5種類の地盤材料ではあるが、迂回浸透工法の対象となる帯水層の粒度構成(D_{20})や細粒分含有率(F_c)あるいは地盤の透水係数(k_0)がわかると、目詰まり限界流速や目詰まり限界動水勾配の推定が可能であり、目詰まりによる機能の低下に配慮した地下水流動保全工法の設計に利用できることを示した。

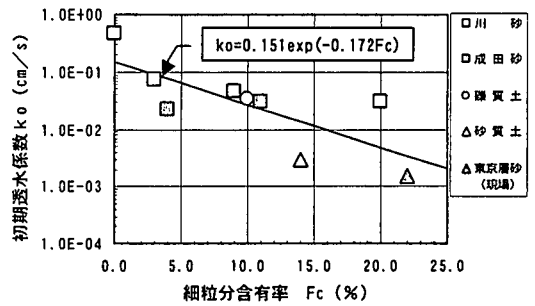


図-21 細粒分含有率 F_c と初期透水係数 k_0 の関係

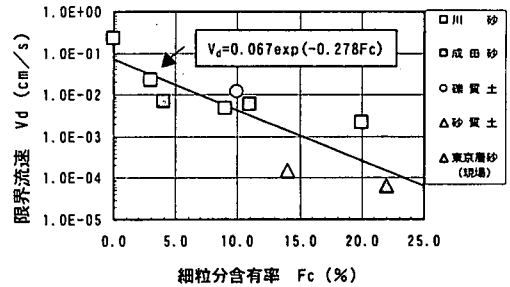


図-22 細粒分含有率 F_c と限界流速 V_d の関係

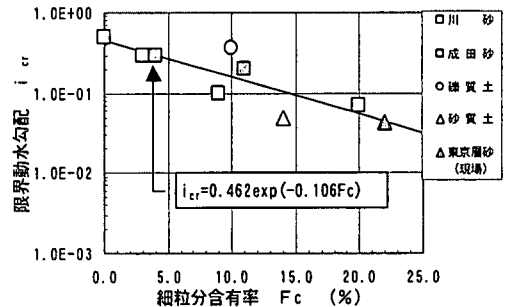


図-23 細粒分含有率 F_c と限界動水勾配 i_{cr} の

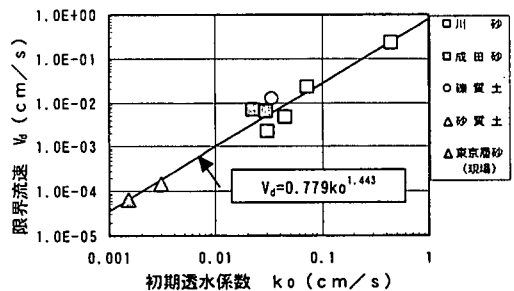


図-24 初期透水係数 k_0 と限界流速 V_d の関

5. おわりに

地下構造物の建設の際に発生する地下水流動阻害対策として、自然流下による迂回浸透工法が検討されるようになってきた。迂回浸透工法の機能を損なう大きな要因である復水井の目詰まりに関して各種の実験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 復水井の目詰まりは井戸のごく近傍で発生することが室内実験および現場実験から確認された。室内実験では礫質土で10～30mmの範囲、砂質土では井戸から10mm以内であった。現場井戸では1m以内で発生している。
- 2) 目詰まり限界流速(目詰まり発生時の流速)は礫地盤では 7.0×10^{-2} (cm/s) 程度であった。また、現場復水実験での砂地盤での目詰まり流速は 3.7×10^{-4} (cm/s) 程度の値が確認された。
- 3) 砂地盤は目詰まりしやすく、現場井戸の長期復水実験でも目詰まりにより透水係数が低下し、復水井の水位は上昇するが、ある程度の復水が可能である。
- 4) 迂回浸透工法での復水井を設計する際の目詰まり発生の判定に利用できる結果を目詰まり限界動水勾配、限界流速と地盤の粒度構成 (D_{20}) や細粒分含有率 (F_c) あるいは地盤の透水係数 (k_p) との関係で整理し、高い相関があることを示した。

最後になりましたが、実験を実施するに当たり貴重なアドバイスと多大な御協力をいただいた関係各位に感謝の意を表しておわりとします。

参考文献

- 1) 例えば、朝日新聞大阪版夕刊記事「お騒がせ 京都の地下鉄工事」、1993.12.11
- 2) 地下水地盤環境に関する研究協議会、地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法，2001.9.
- 3) 佐藤常雄，坂本佳一：地下水流動阻害の現状と対策技術の開発，地下水技術，第41巻第5号，pp.25-43，1999.5
- 4) 生田雄康，松本岸雄，古山章一，大野賢二：仙石線地下化工事における地下水保全対策，土と基礎，Vol.43，No.4，pp.41-42，1995.
- 5) 深津保文，塩出武：地下鉄根切工事における山留め工と排水の事例－福岡市高速鉄道2号線地下鉄東工区，基礎工，pp.85-88，1983.
- 6) 住之江 勝，上野秀裕，戸田博文，佐藤昭男，堀 幸夫：掘削式自動車道における地下水流遮断防止対策，土木学会中部支部平成5年度研究発表会講演概要集，pp.617-618，1994.
- 7) 半野久光，久保田強，山崎達郎，松田義則：通水機能を有する地中連続壁の検討，土木学会第50回年次学術講演会，第VI部門，pp.612-613，1995.
- 8) 通水 SMW 工法研究会：通水 SMW 工法試験施工計画書，1999.
- 9) 出口博一，福田雅友，椋浦正人，田中信幸，有本弘孝：京都市地下鉄烏丸線における通水工法を用いた地下水変動低減対策，地下水地盤環境に関するシンポジウム'96 発表論文集，地下水地盤環境に関する研究協議会，pp.123-134，1996.
- 10) 宇野尚雄，西垣 誠，永井 宏，柳田三徳：地下水環境保全のための復水工法の設計，第38回土質工学会シンポジウム，pp.153-158，1993.
- 11) 杉本隆男，三木健，上之原一有，中沢明，林喜久英，田村真一，張替徹：環8・井荻トンネル工事での地下水対策工，東京都土木技術究年報，pp.211-218，1995.
- 12) 杉村孝雄，山内英治，橋本 正，有本弘孝：神戸市営地下鉄山手線の三宮駅建設に伴う地下水流動保全対策，地下水地盤環境に関するシンポジウム'99 発表論文集，地下水地盤環境に関する研究協議会，pp.135-154，1999.
- 13) 名古屋高速道路公社：市道高速1号(吹上～四谷)地下水影響検討(その1)～(その3)業務委託報告書，1992-1996.
- 14) Weiler, A.: The düsseldorf method of metro-construction, a successful application of the gap-freezing-method, The 2nd Int. Symp. on Ground Freezing, The Norwegian Institute of Technology, pp.916-927, 1980.
- 15) 西垣誠：建設工事における復水工法，地下水技術，第33巻，第8号，1991.
- 16) 電力土木技術協会編：最新フィルダム工学，(社)電力土木技術協会，pp.99-103，1981.
- 17) 河野伊一郎：地下水工学，鹿島出版会，p.117，1989.
- 18) 建設省土木研究所：地下空間建設における地下水環境の保全技術マニュアル(案)－復水工法の設計・施工法－，pp.29-48，1993.
- 19) 西垣 誠，田中卓也，苗村正三，森嶋 章：復水工法の目づまり特性に関する研究，土木学会第45回年次学術講演会，第III部門，pp.826-827，1990.
- 20) 佐藤常雄，西垣 誠：迂回浸透工法による流況阻害の防止に関する研究，岡山大学環境理工学部研究報告，第2巻，第1号，pp.33-50，1997.01.
- 21) 西垣 誠，田中卓也：復水工法に関する研究，pp.28-47，1992.03.