地下帯水層蓄熱法におけるコロイドダム工法*

梅 宮 弘 道*¹, 佐々木 春 人*²The Construction of a Colloidal Dam in an Aquifer
for Thermal Energy Storage Method

Hiromichi UMEMIYA and Haruto SASAKI

A new method of the construction of the colloidal dam in the aquifer utilizing the chemical reaction of Fe ion was investigated experimentally, with the following results. (1) The clogging of the $\text{Fe}(\text{OH})_3$ in the one-dimensional experiments decreased the permeability, when the water, enriched with Fe ion, flowed for a long time. But the clogging is crushed and swept out when the inverse pressure gradient of more than 1.0×10^4 [Pa/m] was added. (2) The apparent thermal diffusivity decreased together with the permeability of the aquifer in the experiments with the two-dimensional model. It shows that the regional flow of the ground water gets out of the way from the colloidal domain constructed in the aquifer. (3) The field experiments showed that Fe ion was stored in the aquifer, decreasing the apparent thermal diffusivity by the yearly cycles. After the injection and recovery treatment the colloidal dam grows in the shape of a doughnut in the region where the pressure-gradient is less than 1.0×10^4 [Pa/m] in the aquifer.

Key Words: Aquifer thermal energy storage, recovery factor, permeability, construction of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ colloidal dam, apparent thermal diffusivity

1. 緒 言

本研究では、地下帯水層蓄熱法の野外実験を過去5年間にわたり行い、現在6年めを終了しようとしている。その結果を表1に示す。注入水量と同じ水量を揚水したときの[回収熱量]/[注入熱量]で定義される熱回収率は年々上昇し、1st サイクルの23%から5th サイクルの59%までに向上した。

その要因を挙げると、(1)注入水量の増加、(2)サイクルを繰返すごとの残留エネルギーの蓄積、(3)蓄熱井戸の断熱施工⁽¹⁾、(4)配管回路から溶出する鉄分による水酸化第二鉄〔以下 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 〕コロイドの自然地下水流遮へい効果⁽²⁾、が考えられる。

本研究では、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドの自然地下水流遮へい効果に着目し、室内模型実験および野外実験を行い、著者らが開発した地下帯水層の温度伝導率の大小で蓄熱性能を予測する判定法⁽³⁾により、蓄熱性能の改善効果が確認され、将来、積極的にその現象を活用したコロイドダム工法への発展が予測されるのでその内容を発表する。

2. モ デ リ ン グ

Fe イオンを含む水を帯水層のような充てん層内に注入すると、帯水層内の溶存酸素と反応し、次式のようになり $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドを形成すると考えられる。

また *Gallionella ferruginia*, *Leptothrix ochracea*, *Grenothrix polytypora* などの鉄細菌の活動でも、次式のような Fe イオンの酸化作用が考えられる⁽⁴⁾。

これらの $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ は、帯水層内でコロイド状になり、充てん粒子表面に付着成長し、やがて粒子間空気を閉鎖する。一方、充てん粒子と Fe コロイドとの機械的付着強度は極めて弱く、ある程度の水頭をかけて通水すると Fe コロイドははく離、微細化されて流出する。

したがって井戸から帯水層に Fe イオンを含む水を注入すると、図1に示すように Fe コロイドが帯水層粒子の空けきに成育し、透水係数が次第に低下し、いわゆる目づまり現象を引き起こす。ここで井戸から揚水して流れを反転すると、水頭こう配が強い井戸近傍

* 昭和63年8月26日 東北支部米沢地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月16日。

*¹ 正員、山形大学工学部 (〒992 米沢市城南4-3-16)。

*² (株)ブリヂストン (〒104 東京都中央区京橋1-10-1)。

表 1 熱回収実験結果

Cycle number		1st (1982-1983)	2nd (1983-1984)	3rd (1984-1985)		4th (1985-1986)	5th (1986-1987)	6th (1987-1988)
Charge	Amount [m ³]	7,600	8,000	16,800		30,300	30,200	26,500
	Mean temperature	25.0 °C	34.7 °C	32.6 °C		27.4 °C	27.2 °C	29.0 °C
Recovery	Amount [m ³]	7,600 (1)	8,000 (1.05)	16,800 (2.21)	22,800 (3)	30,300 (3.99)	30,200 (3.97)	26,500 (Estimation)
	Mean temperature	18.9 °C	21.5 °C	23.1 °C	22.4 °C	22.5 °C	23.0 °C	(24.1 °C) (Estimation)
Recovery factor [%]		23 (1)	28 (1.22)	39 (1.70)	46 (2)	52 (2.26)	59 (2.6)	(59) (Estimation)

図 1 モデリング

ではFeコロイドが破碎、除去され透水係数が回復するが、遠方の水頭こう配が緩やかな領域では、Feコロイドが取り残される。このような注入井戸から揚水して水の流れを逆転し透水係数を回復させる操作を逆洗という。注入・逆洗を繰返すことにより、井戸遠方に透水性の悪いFeコロイドがドーナツ状に取り残され、一種のダムのような働きをする。その内側では自然地下水の供給が衰え、酸素不足状態になり、逆洗後に供給されたFeイオンは、Feコロイド外部で反応し、Feコロイドダムは逆洗を繰返すごとに外側に成長すると考えられる。

また、Feコロイドダムが形成されると、自然地下水がそれを回避して流れる遮水現象により熱拡散が抑えられ、地下帯水層の蓄熱能力が改善されると考えられる。この蓄熱性能の改善状況は、井戸周辺の見掛け

温度伝導率の低下から判断される。

3. 室内模型実験

地下帯水層内の鉄コロイドの育成と除去に関するモデリングの適否を確認するために、2種類の室内模型実験を行った。

3・1 一次元モデル実験

(1) 充てん層内にFeイオンを含む水を流すとき、Fe(OH)₃の育成状況と透水係数の劣化

(2) 逆洗時のFeコロイドの破壊状況、逆洗水頭こう配と透水係数の回復

を調べるために、一次元実験装置を製作し、実験を行った。実験装置は、図2に示す鉄イオン水生成タンク①、図3に示すFeコロイドの観察・透水係数測定部となる一次元充てん塔②より成る。

Feイオン生成タンク①は、鉄線を約10 cmに切断したチップをドラム缶の口元まで充てんしたものを5個直列接続し、地下水を混合したpH 7の上水を連続通水して、Feイオンを生成するものである。この装置では、Feイオン濃度は、ほぼ0.7 ppm一定に保持され、オーバフロータンク③にFeイオン水を供給する。

充てん塔は、内径67.4 mm長さ500 mmの亚克力パイプ②に、平均粒径1.7 mmのガラスビーズを充てんしたものである。ビーズの両端は、直径4 mm、厚さ20 mmのガラスビーズ層を介し、ステンレスメッシュで固定されている。充てん塔はその両端がフレキシブルチューブ④、⑤を介してオーバフロータンク⑥、⑦に接続されており、手巻ウインチ⑧でオーバフロータンクを上下させることにより、充てん塔にかかる水頭差を正負を含めて自由に調節できる構造となっている。すなわち、正の水頭こう配を掛ければ順方向の流れを作ることができ、水頭こう配を負にすれば、逆洗状況を実現することができる。同時に水頭差に対する流量を測定することにより透水係数を求めることがで

きる。すなわち、目づまり生成行程、破壊行程の流量、水頭差をそれぞれ、 $\dot{M}$, m [m^3/s], ΔH , Δh [m], 流路断面積、長さを A [m^2], l [m] とすると、各行程の透水係数 K [m/s] は、次式によって与えられる。

$$K = \frac{\dot{M}l}{A\Delta H}, \frac{ml}{A\Delta h} \dots\dots\dots (3)$$

また、そのときの圧力こう配 P [Pa/m] は、水の密度、重力の加速度をそれぞれ ρ [kg/m^3], g [m/s^2] とすると、次式によって求められる。

$$P = \rho g \frac{\Delta H}{l} \dots\dots\dots (4)$$

3・2 二次元モデル実験

(1) Fe イオン水注入、逆洗の繰返しによる透水係数の変化

(2) 見掛け温度伝導率の測定による蓄熱性能の向上を確認するため図4に示すような二次元モデル模型実験装置を製作した。モデル地層は、2700 mm×4700 mm のコンクリートプール⑨に、平均粒径 1.7 mm, 厚さ 350 mm のビーズ層⑩の上下をそれぞれ厚さ

図2 Feイオン生成タンク

図3 一次元実験装置

500, 200 mm の不透水層を模したベントナイト層⑪, ⑫でサンドイッチ状に挟み込んだものである。両端には、ビーズ流出防止用メッシュ⑬その押え⑭, 中央に注入井⑬, その周囲に 56 本の観測井⑭を設けた。

注入井⑬は、直径 50 mm の硬質塩化ビニール管を用い、ビーズ層の部分にスリット状ストレーナ⑮を設け、井戸内部には深さ方向に均一に 14 本の熱電対⑯を設置して、井戸内温度をデジタルレコーダ⑰で観測する。

観測井⑭は、注入井と同じく、ビーズ層の領域にストレーナを設け、ケーシング内部には浮子式水位計を浮かべて基準点に設けたレベルによりステンレスパイプ頭部を読み取り、水位分布を測定し、透水係数 K [m/s] を求める。すなわち、自然地下水流のない状態で、水を厚さ b [m] のビーズ層に、一定流量 $\dot{M}$ [m^3/s] 注入したときに得られる各観測井の水位 h [m] を注入井からの距離 r に対して $h - \ln r$ 座標系で直線近似し、その傾き β から以下の式を用い透水係数 K が求められる。

$$K = \frac{\dot{M}}{2\pi b\beta} \dots\dots\dots (5)$$

また、蓄熱性能の改善効果を判断するために、井戸周りの見掛け温度伝導率 a_e を測定する。測定原理、方法の詳細は先の報告⁽³⁾に譲るとして、測定手順だけを以下に述べる。

(1) 鉄イオン水の注入をいったん停止し、自然地下水流のもと、加温器④で一定温度 θ [$^{\circ}\text{C}$] の水を作り、一定流量 $\dot{M}$ [m^3/s], 注入時間 T_0 [s] で注入井⑬から注入する。

(2) 注入を停止してからの時間 $t=0$ から T_0 [s] までの注入井戸内温度変化を測定し、無次元化 $\Psi (= \theta/\theta_0)$ する。

図4 二次元実験装置

(3) その結果を $\ln \Psi - t/T_0$ のグラフに整理し無次元温度こう配 γ を求める。

以上の温水ステップ入力後井戸内温度を観測することにより帯水層（ビーズ層）見掛け温度伝導率 a_e は以下の式で求められる。

$$a_e = -\frac{\gamma r_c^2}{\xi a_1^2 T_0} \dots\dots\dots (6)$$

$$x_0 = \frac{r_c^2}{4a_s T_0} \dots\dots\dots (7)$$

$$\nu = \frac{\dot{M}cp}{4\pi b\lambda_s} \dots\dots\dots (8)$$

a_1 : $J_0(a) = 0$ の 1 番めの根 (=2.4048)

r_c : 図 5 において ν から定まる定数

ξ : 図 6 において ν から定まる定数

a_s : 流れのない場合の帯水層の温度伝導率 m^2/s

λ_s : 流れのない場合の帯水層熱伝導率 $W/m \cdot ^\circ C$

b : 帯水層の厚さ m

実験は、以下の手順で行う。オーバフロータンク⑩

から流量計 F を経由して一定水量をコンクリートプールの一方のサイドポケット⑨に供給し、ビーズ層に水頭差を与える。供給水はビーズ層⑩内を流れて他方のサイドポケット⑪に流れ込み、レベルスイッチの付いた水中ポンプ⑫で自動的に排出される。これが自然地下水流を模した定常流であり、その流速は、オーバフロータンクからの供給水量で任意に調節することができる。

この定常流のもと、先に示した Fe イオン生成タンク①から Fe イオン水を注入井⑬より注入する。それと平行して、定期的に透水係数、見掛け温度伝導率の測定を行う。

透水係数が設定値以下になったならば、一般浅井戸用吸込ポンプを用い逆洗を行い、井戸近傍の $Fe(OH)_3$ コロイドの排出を行う。ただし、吸込口は注入井最下部とした。

なお、鉄イオン濃度の変化は、反応速度を変えるものの現象自体にはなんら影響を及ぼさないので気にする必要はない。

4. 実験結果およびその検討

4.1 $Fe(OH)_3$ 破壊強度 一次元モデル実験装置で、Fe イオン水を流し続けるときの透水係数の変化を図 7 に示す。全鉄濃度 0.69 ppm、水温 $13.1^\circ C$ 、 $pH = 7.33$ 水頭差 $\Delta H = 8 \text{ cm}$ の一定条件で実施したものであるが、透水係数は、初期値の 2.1 cm/s から、67 h 間後の 0.42 cm/s まで、時間の経過につれてその勢いを増して減少する。 $Fe(OH)_3$ の生成状況は、注入口近傍が最も強く、奥に入るにつれ弱くなっている様子がその鉄さび色からも判断される。これは、Fe イオンと溶存酸素との反応により、入口近傍に最も強く $Fe(OH)_3$ が生成されるためであると考えられる。

目づまりで透水係数が 0.2 cm/s を割る時点でバルブの切換えを行い、流れの方向を反転させて逆洗操作

図 5 ν vs. x_0

図 6 ξ vs. ν

図 7 透水係数の減少（一次元）

を行いながら透水係数を測定する。ビーズ充てん直後の初期透水係数 K_i 逆洗(back wash)直前の透水係数 K_b をもとに実験結果を、ビーズ内の圧力こう配と無次元透水係数 $(K - K_b) / (K_i - K_b)$ の関係にまとめ、図8に示す。データのばらつきは大きいが逆洗により $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドが破壊、放流され、透水係数が回復する様子が認められる。その回復現象は圧力こう配が 1.0×10^4 までは極めて顕著であるがそれ以上では緩慢になる。実験範囲内では透水係数の回復率は約50%であるが、野外実験の経験から判断すると、100 m 近い逆洗水頭差では、ほぼ完全に $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドが除去され、初期値に回復するものと考えられる。

著者らが先に測定した現地砂れき層(15~20 m)の透水係数は $K = 1.5 \sim 1.8 (\text{cm/s})$ であった。これをビーズ層に置き替えるとビーズ径は約2 mm となる。したがって、ビーズ径の大小でコロイド破壊圧力こう配が

図8 目づまりの破壊(一次元)

図9 透水係数、見掛け温度伝導率の減少(二次元)

異なるとしても $P = 1.0 \times 10^4 \text{ Pa/m}$ は一応目安として実用になると考える。

4.2 二次元モデルによる透水係数、見掛け温度伝導率の変化 二次元モデル実験装置でFeイオンの注入、逆洗操作を行いつつ、透水係数と見掛け温度伝導率の変化を測定した。測定は、自然地下水流速 $f = 2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とし、平均注入流量 3 l/min 、平均注入温度 12.6°C 、平均注入全鉄量 0.66 ppm 、平均 $\text{pH} = 7.3$ で325 h 間にわたり実施した。透水係数、見掛け温度伝導率の時間変化を図9に示す。時間経過につれ透水係数、見掛け温度伝導率ともに減少する様子が認められる。264, 288 および 312 h 間後に逆洗操作を行ったがその状況を図9に矢印で示す。初回の逆洗操作により、透水係数、見掛け温度伝導率、とも回復していることがわかる。2回め以降、逆洗効果が弱まったのは、一次元モデル実験と同じく、逆洗圧力こう配が小さいためであると考ええる。いずれにしても、一次元モデル実験結果と合わせ考えると、Feイオン水の注入により、(1)井戸周りの帯水層内に $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドが成育し、透水係数を低下させること、(2)逆洗操作により、圧力こう配が $1.0 \times 10^4 \text{ Pa/m}$ 以上の破壊半径内では、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドの破壊、除去が進むことが明らかとなり、さらには、(3)破壊半径以上の領域では、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドが取り残されることが演繹される。

4.3 野外実験結果 山形大学工学部内に位置する本実験場「ソーラアクイファ」の地層および回路図を、図10に示す。この地層図は、実験場に200 mの蓄熱井戸⑧(ケーシング径250 mm, 原掘孔500 mm)および、50 m井戸①(ケーシング径175 mm, 原掘孔250

図10 野外実験場

図 11 残留全鉄量 (野外)

図 12 サイクルごとの見掛け温度伝導率

mm) を掘った際に得られた地質柱状図を水平拡張したものである。地下 160 m から 180 m の帯水層は比較的自然地下水流が遅く、本研究の蓄熱層として利用している。

実験回路は、完全閉回路であり、その流路は、夏期 (5～9 月)、休止期 (4, 10 月)、冬期 (11～3 月) に分かれている。

夏期の温熱注入では、西井戸①より 12°C の自然地下水を揚水し、各種熱源に通水後 200 m 井戸⑧に注入される。休止期では、揚水、注入をいっさい行わず、システムのメンテナンスを行う。冬期回路では、夏期回路の流れを反転させ、200 m 井戸⑧よりくみ上げた微温地下水を、暖房、融雪に利用し西井戸①に戻す。

本システムの回路の主配管は、鋼管が使用されており、水源となっている 50 m 地下水は pH 6.9 と弱酸性であることと重なって、常時、鉄の溶出がある。夏期注入期間は、週に 1 度逆洗をしながら昼夜連続で注入を行うが、その際、200 m 井戸注入全鉄量、逆洗における排出全鉄量の測定を行い、注入時間 3500 h までの帯水層内残留全鉄量を算出し、図 11 に示す。注入された鉄分は、逆洗によってそのすべてが排出されるわけではなく、帯水層内にある程度残留することがわかる。

また、逆洗は週 1 回、30 min 間行い、その流量は 330 l/min、水中ポンプ位置は、地下 140 m であり、逆洗時の井戸内水位は、約 100 m まで降下する。したがって、Fe(OH)₃ コロイドの破壊圧力こう配を 1.0×10^4 Pa/m、自由水位面を地下 25 m、透水係数を $K = 2 \times 10^{-6}$ m/s と見積もると、コロイド破壊半径は約 20 m となり、注入量 30 000 m³ の蓄熱領域として、ほぼ間に合う容量である。

コロイドダムによる蓄熱性能の向上を判定するために、200 m 井戸周り、深さ 160 m から 180 m の帯水層

の見掛け温度伝導率を求めた。測定法は先の一本井戸法に準じるが、注入時間 T_0 を、夏期注入時間 3 672 h とし、10 月の休止期間の井戸内温度の回復曲線から見掛け温度伝導率を求めた。その結果を図 12 に示す。サイクルを重ねるにつれ、見掛け温度伝導率が低下していることがわかる。これは、先に推定したコロイドダムの生成とその蓄熱効果を裏付けるものである。より積極的にこの現象を活用することにより、自然地下水流のある地域でも、地下帯水層の蓄熱性能を向上させるコロイドダム工法として活用できる見通しが得られた。

5. 結 論

地下帯水層蓄熱法において、その熱回収率改善をはかる Fe コロイドダム工法の開発を目指して、室内模型実験、野外実験を行い、以下の結論を得た。

(1) 一次元模型実験で Fe イオン水を充てん層に注入し続けると Fe(OH)₃ コロイドの生成により目づまりが発生し、透水係数が減少する。この目づまりは逆洗操作により破碎、排出され圧力こう配が 1.0×10^4 Pa/m で透水係数が初期値の約 50% まで回復する。野外実験結果から推測すると、より強い逆圧力こう配がかかれば、初期値に回復すると推定される。

(2) 二次元模型実験で、Fe イオン水の注入により、透水係数の減少とともに、帯水層の見掛け温度伝導率も減少する。これは、Fe(OH)₃ コロイドの生成により、自然地下水流が井戸周りをう回して流れることを示唆している。

(3) 野外実験により、地下帯水層に残留する全鉄量の算定を行うとともに、見掛け温度伝導率の経年変化を求めて、Fe コロイドダム形成による熱回収率の向上効果を確認した。

以上を総合すると、Fe イオン水の注入・逆洗操作に

より、逆圧力こう配が 1.0×10^4 Pa/m 以上となる破壊領域では、Fe コロイドが排出され、その外側の領域では逆洗を重ねるたびにドーナツ状に Fe コロイドが成長して一種のダムが形成されると結論づけることができる。

なお、本研究費の一部は、昭和 61, 62, 63 年度文部省科研費試験研究(1)61850036 によることを付記して深謝する。

文 献

- (1) 梅宮・ほか 2 名, 機論, 54-497, B (昭 63), 178-184.
- (2) 梅宮・佐々木, 昭和 62 年度日本冷凍協会講論集, 37 (昭 62).
- (3) 梅宮・佐々木, 東北支部米沢地方講演会(昭 63-8)論文 No. 88-0046 B.
- (4) 木島, 防食工学, 143 (昭 57), 日刊工業新聞社.