帯水層の蓄熱利用に関する研究　その２　解析による蓄熱特性の評価

関西電力(株)　簇持和洋　朝川　誠
(株)ニュージェック　竹澤請一郎　伊藤成輝　新田　昭

１．はじめに

「帯水層の蓄熱利用に関する研究　その１」では、都市部における帯水層蓄熱技術の確立を目的として実施した短期蓄熱実験の結果を報告した。ここでは、それらの実験結果に対して、熱輸送と浸透流を連成させた解析を実施し、蓄熱容量、蓄熱効率についての検討を試みる。また、透水係数実験の結果から、水平透水係数の鉛直分布を算定し、それが蓄熱容量に与える影響について考察した。

２．熱輸送・浸透流連成解析

浸透流の基礎方程式はダルシー則および水量保存則から以下のように導かれる。

$$\frac{\rho_w g}{\mu} K \nabla^2 h = S_S \frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{(式 1)}$$

ここに、ρ_w：水の密度、S_S：比貯留係数、K：固有透過度、μ：水の粘性係数、g：重力加速度である。

また、熱の対流および伝導・分散による移動の基礎方程式は、フーリエ則、熱量保存則をもとに以下のように導かれる。

$$\nabla^2(\kappa T) - n\nabla(\rho_w c_w T v) = \rho' c' \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(式 2)}$$

ここに、n：間隙率、$\rho_w c_w$：水の熱容量、ρ'c'：有効熱容量、v：地下水流速、κ／ρ'c'：熱分散係数である。さらに、

$$\kappa = \alpha v + \kappa_e \qquad \text{(式 3)}$$

α：分散長、v：地下水実流速、κ_e：有効熱伝導係数である。

３．解析の条件および方法

（１）短期蓄熱シミュレーション

今回実施した短期蓄熱実験と同様の条件で解析を行い、蓄熱容量、蓄熱効率の再現を試みる。解析モデルおよび物性値を、それぞれ表-1、図-1 に示す。

ここで蓄熱効率実験に対する解析では、比較的井戸近傍の流速の大きい領域が対象となる。従って、式 3 よりκの値は分散長に支配され、この分散長の設定が実験を再現する上で重要となる。さらに分散長は観測

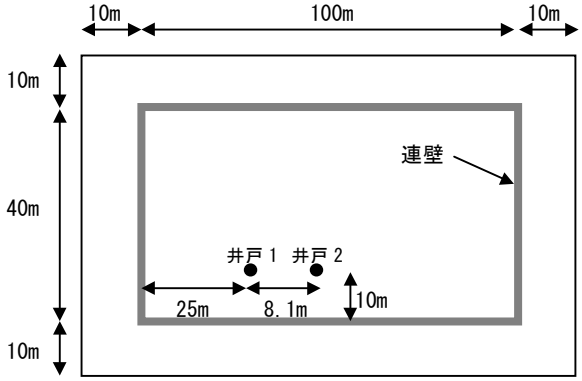

図-1　解析モデル図

表-1　解析条件

	値	備考
自然地下水温度	22.2℃	
注入冷水温度	5℃	
間隙率	0.36	予備調査
透水係数	1.5×10^{-2}(cm/s)	
熱容量(水)	4.2×10^{6} J/(m³･℃)	理科年表
熱伝導係数(〃)	0.6 J/(m･s･℃)	理科年表
熱容量(土粒子)	2.2×10^{6} J/(m³･℃)	
熱伝導係数(〃)	3.5 J/(m･s･℃)	

スケールが大きくなるに従って増加するというスケール依存性が認められているため、蓄熱サイクルによって異なる値を設定してやる必要がある。ここでは分散長に対するパラメータスタディを行い、短期蓄熱におけるサイクルタイムと分散長の関係を求める。

（２）水平透水係数の鉛直分布算定

従来、帯水層の評価にあたっては帯水層は均質であるとして解析することが多いが、実際には水平透水係数の異なるいくつかの層に分かれる場合がある。そのため平均透水係数で解析した場合、蓄熱容量などの評価に誤差が生じる可能性がある。そこで、ここでは、帯水層中に注入した冷水をトレーサーとして利用し、帯水層における水平透水係数の鉛直分布を算定する。

算定の手順は、以下のとおりである。

1)（１）の平面 2 次元解析モデルを使用して、実験と同様の条件で解析を実施する。

2)各観測孔地点における温度低下が 3℃に達するまでの時間を算定する。

3) 1),2)の解析を透水係数を変化させて行い、それぞ

キーワード：帯水層蓄熱、蓄熱効率、蓄熱容量、帯水層、解析
連絡先　　:株式会社ニュージェック〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19 TEL06-6245-4901 FAX06-6251-2565

れ 3℃低下までの時間と透水係数の関係をプロットしておく。

4)透水係数実験（図-2）において、各観測孔の各深度における 3℃低下までの時間を測定する。

5) 3)で求まった関係と、4)で計測した時間から、それぞれの深度における透水係数を算定する。

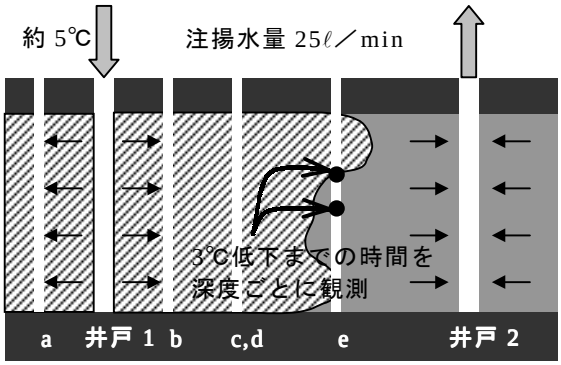

図-2　透水係数実験

4．解析結果

（1）短期蓄熱シミュレーション

・蓄熱容量

解析による蓄熱容量算定結果および、蓄熱容量実験による測定結果を表-2 に示す。

表-2　蓄熱容量

解析値	1.2×10^{10}（J）
実測値	7.9×10^{9}（J）

実測値に比べて解析値が約 1.5 倍の値を示しており、過大評価となっている。この理由としては、前項で示した透水係数の鉛直分布を考慮せずに蓄熱容量を算定していることが考えられる。

・蓄熱効率

分散長および、解析より求められた蓄熱効率値（3 サイクル目）と蓄熱サイクルの関係を図-3 に示す。

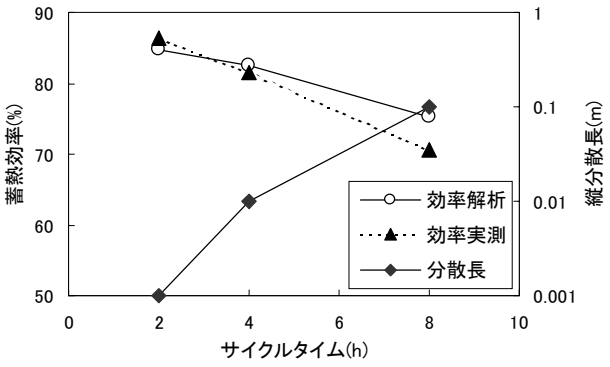

図-3　分散長、蓄熱効率のスケール依存性

図のように分散長を適切に設定することにより、蓄熱効率のスケール効果を再現することができた。また、蓄熱サイクルの増加に従って分散長も大きくなっており、従来から言われている分散長のスケール依存性と同様の傾向を示した。

（2）水平透水係数の鉛直分布算定

解析結果に実測値をプロットした図を図-4 に示す。

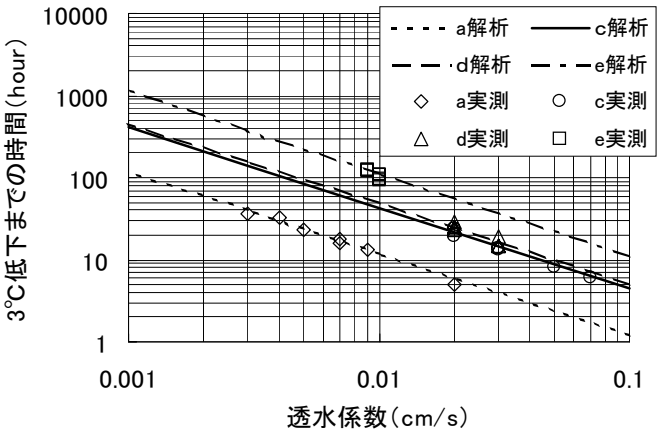

図-4　解析結果および実験結果

水平透水係数の鉛直分布算定結果を表-3 に示す。

透水係数は深度によって異なる値を示し、最大と最小の層では 2 倍以上の開きが見られた。ここで求められた透水係数は鉛直方向の熱伝導を無視したものであり、これを考慮した場合はさらに開きが大きくなる可能性がある。

表-3　透水係数算定結果

深度（GL −m）	透水係数（cm/s）
50.5	2.1×10^{-2}
51.5	1.6×10^{-2}
52.5	1.4×10^{-2}
53.5	2.1×10^{-2}
54.5	1.2×10^{-2}
55.5	1.1×10^{-2}
56.5	9.7×10^{-3}
全層平均	1.5×10^{-2}

5．まとめ

(1)蓄熱容量の算定では、解析値が実測値を上回った。この相違は鉛直方向の水平透水係数分布を考慮することによって是正できると考えられる。

(2)パラメータスタディにより蓄熱サイクルと分散長の関係を求めたところ、サイクルタイムの増加に従って分散長も大きい値をとることが分かった。

(3)層厚 7m の帯水層を 7 分割し、水平透水係数の鉛直分布を算定した結果、その値に 2 倍以上の開きが見られた。鉛直方向の熱伝導・分散を考慮することにより、さらに開きが大きくなると考えられる。

6．謝辞

本研究の実施にあたり、岡山大学環境理工学部西垣教授からご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。