

Theim-Dupuit の平衡説を用いた非線形井戸損失式の提案

A proposal on non-linear well loss formula applicated

Theim-Dupuit's equilibrium theory

奥野日出* 小山修平**
Hizuru Okuno Shuhei Koyama

1. はじめに

全国井戸台帳によると、深井戸は帯水層の地質構成に基づき、多層スクリーンや不完全貫入の構造を有するものが多い。これは、地域地下水盆の地下水貯存において計画用水量を施工コスト面を踏まえ有利に獲得するための最適な井戸設計と考えられている。

しかし、これらの固有井戸では水理定数や揚水管理に関して井戸理論を正確に適用し難く、不適切な設計揚水量を導き目詰まり発生などの劣化事例は少なくない。

本稿では、安全な設計揚水量を導くための実用的な井戸損失式を帯水層の水理地質特性と段階揚水試験結果などから平衡説を用いて作成し、Jacob 法と対比した上で、本井戸損失式の有効性について記述した。

2. 井戸損失式の提案

非平衡説に基づく井戸損失式は、Jacob (1947) により式(1)のように示される。¹⁾

$$s = B_j Q + C_j Q^2 \dots\dots(1)$$

ここに、s:水位低下量(m) (全井戸損失量)

Q:段階揚水量(m³/day)

B_j :線形井戸損失係数(day/m²)

C_j :非線形井戸損失係数(day²/m⁵)

(サフィックス_jは Jacob を引用)

すなわち、B_j = B1 (r_w, t) + B2

B1 (r_w, t) = W(u)/4 kH:地層水損失 ,
u = (r_w²S) / (4 kHt)

ここに、W(u):井戸関数、kH:透水量係数、

S:貯留係数、r_w:井戸半径、t:揚水時間。

B2:グラベルパック、スクリーン孔などの線形井戸損失

である。

C_j は、turbulent flow (乱流) 域として考えられる係数であり、Jacob 法では、次式(2)を用いて測定値から得られる。

$$s/Q = B_j + C_j Q \dots\dots(2)$$

式(2)より、C_j が揚水量漸増に伴う水位低下の測定領域より求められることは、固有の井戸がその地下水盆下に貯存する地下水の包蔵性を把握し得る係数として意義あることと考えられるが、段階揚水時に比湧出量 Q (=Q/s) に変化がない場合にはC_jが求まらず、揚水仕様(ポンプ能力)に注意がいる。また全井戸損失は、スクリーン開口率の影響を受けるため、その影響を B2 の線形損失としていることには根拠がなく、C_jの勾配が小さいときには、地層水損失が乱流域にあるかどうかも分からない。一方、地層水損失が層流域のみとしているなら、乱流域での損失要因が何か不明瞭と言える。

すなわち、Jacob 説(非平衡説)には乱流域としての測定値には疑問があると共に乱流域を把握する理論的な指標はない。

今では式(1)、(2)が非平衡説に基づく揚水試験より水理定数の算出法が定着化しているようであるが、下記の施工井戸においては理論との一致性がなく、実用的な水理定数や設計揚水量の試算の適用性が難しくなる。

- ・帯水層が複層で井戸構造が多層スクリーンとなる場合
- ・帯水層厚や基盤底深度が変化する場合
- ・不完全貫入井とする場合 など

著者らは、滋賀、兵庫などの地域地下水盆の調査研究として、計画用水量が満たされる深井戸の適正位置を電気・電磁探査、プレボーリング調査などにより調べ、また揚水量を試算するための水理定数も検討してきた。²⁾ さらに施工井戸で揚水試験を行い、帯水層を構成する地質条件と揚水挙動との対応を考察した。³⁾

これより、著者が提案する井戸損失式は、帯水層の水理地質特性、段階揚水試験と井戸設計仕様などを用いて式(3)のように示される。³⁾

* 株式会社アスカソイルコーナー Co.,Ltd. Asuka Soil Corner

** 大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科 Osaka Prefecture University, Life & Environmental Sciences

キ-ワ-ド: 地下水 井戸損失 揚水管理

$$s = B_e Q + C_e Q^2 \dots\dots(3)$$

ここに、 B_e :線形井戸損失係数(day/m²)

C_e :非線形井戸損失係数(day²/m⁵)

(サフィックス e は Theim-Dupuit の平衡説引用)

すなわち、 $B_e = \ln(R/r_w) / 2 \cdot \mu k m$

R :影響圏半径、 r_w :井戸半径、 k :透水係数、 m :帯水層厚、 μ :透水量補正係数

$$C_e = 0.2 \cdot B_e^2 / \cdot L$$

:スクリーン開口率、 L :スクリーン長である。

なお、0.2はスクリーン開効率の基準とした。

式(3)は、式(1)の非平衡説に対し、平衡説(地層水井戸損失が層流域)、帯水層の水理定数補正(μ)、井戸仕様(r_w , L)の導入でもって、この相違を揚水量 Q と水位低下量(井戸損失) s の関係で図示すると図1のようになる。

すなわち、式(1)の非線形項は式(3)にはなく、Theim-Dupuitの平衡説の延長上で考えると、その非線形項は影響半径 $R > R_c$ なる領域となる。

したがって、式(3)は R 一定で揚水量が漸増する過程において地下水面の動水勾配 i が次第に急となる仮定をしたものであり、 $R > R_c$ が非平衡説と対比される乱流域の指標となる。なお、式(3)の原型は de Prony の式⁴⁾を引用したものであり、平衡説はその式の第1項目の線形微分より求められたものである。

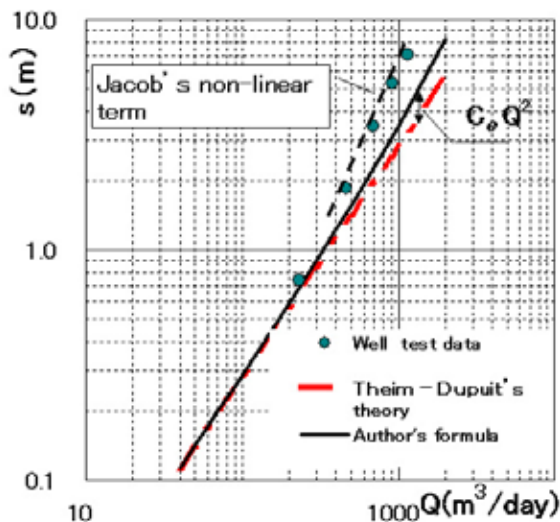


図1.揚水試験結果と各井戸損失式との対応

3. 調査事例及び設計揚水量の算出方法³⁾

図2,図3には滋賀県湖北平野下の揚水試験結果と解析事例を示した。当域の地質は、沖洪積地盤の粘土、砂・砂礫層が互層し、深井戸には洪積層の帯水層にスクリーンを設けた。

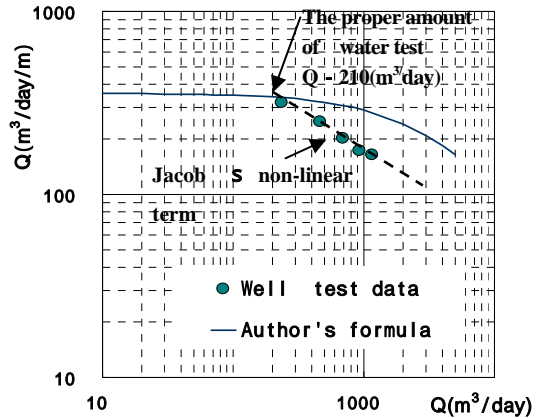


図2.三層スクリーン・完全貫入井戸の事例 (井戸長55m, $\mu=0.6$, $\alpha=0.2$, $L=12$ m)

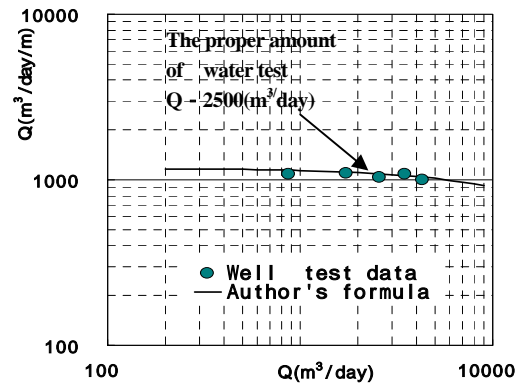


図3.単層スクリーン・不完全貫入井戸の事例 (井戸長76m, $\mu=1.6$, $\alpha=0.2$, $L=28$ m)

非線形井戸損失式は、水理定数と μ , L などより表わされるため、 Q が低下する手前で設計(適正)揚水量が求められる。また、図2の測定値の大半が損失式よりも下位にあるのは明らかに乱流域に相当し、Jacob法の非線形項に相当すると思われる。一方、図3では測定値より緩い勾配の C_e を求めることができるが、著者の式では測定値が乱流域に相当せず、非線形性は地層水損失(係数 B_e^2)と井戸仕様(r_w , L)によるものと考えられる。なお、本井戸損失式による井戸効率については当日発表する。

以上

【引用文献】

- 1) Jacob, C.E., 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 112(2312):1047-1070
- 2) 奥野日出・小山修平:「地下構造可視化技術を用いた深井戸計画の成功例と失敗例」, 地盤の環境・計測に関するシンポジウム2007(論文集), 社地盤工学会関西支部, (2007), p82-87.
- 3) 奥野日出:「地域地下水モデルの要素分析と揚水管理に関する調査事例」, 地盤の環境・計測に関するシンポジウム2008(論文集), 社地盤工学会関西支部, (2008), p107-114.
- 4) 最上武雄著:「土質力学」, 技報堂出版(1982)赤井浩一執筆 p.199.