

地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説（2017年度版）

Theory of Well Test Analysis –Theoretical Solutions for Groundwater Survey-

公益社団法人 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会
WG 3（地下水調査）

2. 単孔による現場透水試験

2.1 Hvorslev 式の説明（JGS1314, 1322, 1323）

JGS 基準となっている（単孔式）現場透水試験法の一つである Hvorslev 式を説明する。この式を用いた試験法は 1951 年に Hvorslev の出した報文にまとめられた極めて実用的な方法であるが、井戸仕様の理論的な根拠については、Hvorslev がその全てを示しているわけではなく、彼以前の先人たちの成果をうまく活用している^{1)・2)}。この報文には複数の井戸に対応した理論式が紹介されているが、JGS 基準ではパッカー式と呼ばれる定常式が誘導の出発点となっている。定常井戸理論式は基準書の解説編にもこれまでから説明してきたが、ここでは再編集してこれを説明している（[資料 2-01-1](#)、[資料 2-01-2](#)）。また、Hvorslev の報文（1951）で紹介された、他の井戸仕様に対する理論式も示しておく（[資料 2-02](#)）。

また、Hvorslev の示した非定常法は地盤の貯留性を無視できる条件下での理論構築がなされている（[資料 2-03-1](#)、[資料 2-03-2](#)）。この非定常式では、試験孔水位変動に非定常特性のみ考慮されたものであり、同じ扱いを室内透水試験法の変水位透水試でも用いられている。このことは、Hvorslev(1951)の整理でも一覧にされている。ここまでの説明を定常式の誘導から非定常式まで一連で示すと長くなるが、定常井戸式と、これを使った非定常式の一般化された誘導に分けて示すと、非定常式は簡潔な説明が可能となっている。

ところで、地盤の貯留性の影響がみられないという条件が現場試験で満たされているかを、実際の試験結果を見て判断する必要がある。この具体的な方法として試験孔内水位変動速度を用いた方法を西垣³⁾や Chapius⁴⁾（村田⁵⁾が紹介）が理論的な解説を含め説明しており、この理論を説明する（[資料 2-04](#)）。Hvorslev の方法の内、基準に採用されているパッカー式（一般には Hvorslev 式と呼ばれているが、この呼称は適切ではない）の実務的な適用に際して、 $L/D > 4$ （ L :試験区間長、 D :試験孔口径）を満たすべくとされている。これは、パッカー法の定常式に平方根が入っているが、 L/D を大きくできると平方根の計算を予め済ませておくことができるという開発当時（1940年代）の計算技術背景に基づくものである。この点についても、[資料 2-01-1](#)に説明した。

2.2 Cooper 法（JGS1314, 1321）

Hvorslev 法が地盤の貯留性を無視できる井戸仕様（孔内貯留の影響の方が地盤貯留の影響よりおおきく、後者が無視できる状態）の試験孔内の水位の非定常挙動を示したのに対して、Cooper ら⁶⁾は地盤の貯留性も考慮した井戸理論からスラグ試験法を説明した（[資料 2-01-1](#)）。ここでは、この井戸理論誘導に用いられた数学技術である Laplace 変換法（[資料 4-04](#)）を説明し、さらにこの理論解の計算精度を向上させる技法についても触れる（[資料 2-05](#)）、このとき、Bessel 関数という特殊関数を用いるが、この関数は井戸理論では頻繁に登場し、その近似式は有用なので[資料 4-03](#)で説明する。また、Cooper らは帯水層に対して完全貫入井戸を考えているが、不完全（部分）貫入井戸に対する Hyder ら⁹⁾のスラグ試験の理論解を簡単に紹介する（[資料 2-08](#)）。この方法は条件としては完全貫入井戸を用いる Cooper 法と不完全（部分）貫入井戸を用いる Hyder 法の違いに過ぎないが、後者の解法には Cooper 法で用いた Laplace 変換技術に加え、Fourier 変換技術を適用し、いずれの技法も数値的に解く半理論解の適用によって試験孔内水位変動を求めている。

2.3 単孔式現場透水試験結果の解析

試験結果の具体的な解析方法を考える。Hvorslev 法による試験結果の解析に用いられる直線勾配法（[資料 2-06](#)）、Cooper らの手法による試験結果の解析には標準曲線一致法が用いられる（[資料 2-07](#)）である。特に、地盤の貯留性と試験孔内の貯留性の比の違いで複数の曲線群との fitting を行うのであるが、この精

度を高める曲線である derivative 曲線の考え方を説明する (資料 2-07)。

また, Hvorslev 法と Cooper らの方法は, 井戸貫入率や地盤内貯留の取扱に違いがあるが, Hyder ら⁹⁾は不完全 (部分) 貫入井戸で地盤貯留を扱うモデルを開発している。具体の活用には計算機によるシミュレーションが必須となり, 簡易式や数表が与えられてはいないが, 今回は支配方程式の説明を示している (資料 2-08)。

2.4 E19 法 (JGS1316)

USBR (米国内務省開拓局) のアースマニュアルの E19 法を試験基準として採用しており, この基本式を解説する (資料 2-09)。ここでは基本式のみ解説とし, 地下水位高さと試験孔位置の関係によるほかの式については, 未対応のままである。今後は, 不飽和帯での透水試験法の理論解についても同様の理論説明を考えていく。

【参考文献】

- 1) Hvorslev, M.J.: Time lag and soil permeability in ground-water observations, Waterways Experiment Station Corps of Engineers, U.S. Army, 50p., 1951.
- 2) 進士喜英: 現場透水試験の源流 Hvorslev (1951), 地下水学会誌, 地下水学の名著を読む (7), Vol. 58, No. 2, pp. 241-246, 2016.
- 3) 西垣誠: 単孔式原位置透水試験法の整理 (その 2), 地下水と井戸とポンプ, Vol. 28, No. 3, pp. 15-24, 1986.
- 4) Chapuis, R.P. et al.: In situ variable head permeability tests, In proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden June 15-19, vol.1, pp.401-406, 1981.
- 5) 村田芳信: スラグ試験の適用性と結果の解釈, 応用地質技術年報, No. 21, pp. 81-96, 2001.
- 6) Cooper, H.H. Jr., Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S.: Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, Water Resources Research, Vol.3, No.1, pp.263-269, 1967.
- 7) Papadopoulos, I.S., Bredehoeft, J.D. and Cooper, H.H. Jr.: On the analysis of 'Slug test' data, Water Resources Research, Vol.9, No.4, pp.1087-1089, 1973.
- 8) Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S.: A method for determining the hydraulic properties of tight formation, Water Resources Research, Vol.16, No.1, pp.233-238, 1980.
- 9) Hyder, Z and Butler, J.J. Jr.: Slug test in partially penetrating wells, Water Resources Research, Vol.30, No.11, pp.2945-2957, 1994.
- 10) USBR: Earth manual, the 2nd ed., pp.579-593, 1974.
- 11) Glover, R.E.: Theory and problems of water percolation, USBR, Engineering Monographs No.8, edited by Zangar, C.N., appendix B, pp.69-71, 1953.