

用抽水、灌水和壓水 測定岩石透水性的方法

賓德曼著

地質出版社

用抽水、灌水和壓水
測定岩石透水性的方法

賓 德 曼 著

本書原名“Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливками и нагнетаниями”，係賓德曼（Н. Н. Биндман）於1951年5月在全蘇礦山工程技術科學協會水文地質分會所作的專題講演全稿。

編輯委員會：謝苗諾夫（М. П. Семенов）（主席）、卡門斯基（Г. Н. Каменский）、奧弗琴尼科夫（А. М. Овчинников）、普里克郎斯基（В. А. Приклонский）、賓德曼（Н. Н. Биндман）、左洛塔烈夫（Г. С. Золотарев）。主要是敘述用抽水、灌水和壓水試驗以求岩石透水性的新計算方法。

本書是用野外方法決定滲透係數的實用指南，並且是供給為水上建築而進行勘查的廣大工程地質工作者用的。

蘇聯國立煤業出版社（Углетехиздат）1951年出版，由鞍鋼地質處陳揚同志翻譯，經地質部編譯室審核。

書號 0034

用抽水、灌水和壓水 測定岩石透水性的方法

著者	賓德曼
譯者	陳揚
審校者	地質部編譯室
出版者	地質出版社
	北京安定門外六鋪炕
經售者	新華書店
印刷者	北京市印刷一廠

印數(京)1—8000 一九五四年一月北京第一版
定價3800元 35千字 一九五四年一月第一次印刷

目 錄

原序.....	1
序言.....	3
一、鑽孔內的抽水試驗	6
(一) 均勻岩層完整井內的抽水試驗	7
1. 在距河流很遠的鑽孔內抽水	8
(1) 受壓水情況下	8
(2) 無壓水情況下	9
2. 在河流附近鑽孔內抽水.....	15
(二) 均勻岩層不完整井內的抽水試驗	16
1. 各種計算公式的導出法	17
2. 在距河流很遠的鑽孔內抽水	22
(1) 受壓水情況下	22
(2) 無壓水情況下	25
3. 在河流附近鑽孔內抽水	30
4. 河床下的抽水	33
(三) 不均勻岩層鑽孔內的抽水試驗	33
(四) 抽水時地下水的穩定運動	37
(五) 抽水時層流運動擾動的可能性	46

二、鑽孔內壓水和灌水試驗	53
三、抽水時滲透速度係數的確定	55
四、淺井內的抽水試驗	57
附錄	
參考文獻	59

原 序

爲了從科學技術上幫助那些爲偉大的共產主義建設而進行研究的工程地質工作者，全蘇礦山工程技術科學協會水文地質分會(Гидрогеологическая секция Всесоюзного научного инженера технического горного общества)曾在莫斯科組織了關於水力工程建築中水文地質計算方法的講座，計有以下的專題：

1. 地下水壓水及水庫滲水之水文地質計算；
2. 壩基及其周圍滲透的水文地質計算；
3. 防洪防淹區排水的水文地質計算；
4. 水從水渠的滲出及灌溉地區地下水水位的升高之水文地質計算；
5. 儲水池內地下水之流入及地下水位人工降低之水文地質計算；
6. 用抽水、灌水和壓水測定岩石透水性的方法；
7. 預測地下水狀況的水力學原理。

爲了使工作與探險隊及野外勘探隊的工程地質工作者們能直接在自己的實際工作中運用這演講材料，茲將每個專題的演講文印成單行本。

本書敘述的乃是賓德曼(Н. Н. Биндеман)於1951年5

月所作的第六個專題亦即有關“用抽水、灌水和壓水測定岩石透水性的方法”的講演文全部內容。

礦山協會將以感激的心情來接受對本書的所有批評和意見。來信請寄：莫斯科，弗拉基米羅夫街6號11室（Москва, проезд Владимирова, д.6, комн. 11）。

全蘇礦山工程技術科學協會

水文地質分會主席

謝苗諾夫

（М. И. Семenov）

序 言

確定岩石的透水性，是作為水力工程建築物設計基礎所進行的水文地質勘查中最重要任務之一。

岩石的透水性可用岩石的滲透係數、水在各種孔隙和裂隙中運動速度的係數及單位吸水量來說明。

滲透係數 K 乃是水力坡度為 1 時的滲透速度。

根據達爾西定律 (закон Дарси):

$$K = \frac{V}{I} = \frac{Q}{FI} \quad (1)$$

當坡度 $I = 1$ 時

$$K = V = \frac{Q}{F} \quad (2)$$

式中 V ——滲透速度;

Q ——地下水流流量;

F ——地下水流橫斷面積。

由此可見，滲透係數在水力坡度為 1 時，可另以滲過單位橫斷面積的流量來確定。

岩石的滲透係數可利用來計算蓄水池和水渠中水的滲透損失、堤壩基礎的抵抗力（不均勻基礎）、建築物基坑中水的流入等等。

滲透速度係數 K 。(Коэффициент скорости фильтрации)
為水力坡度等於 1 時，水在岩層孔隙或裂縫中運動的速度。

$$K_0 = \frac{V}{P_0} = \frac{Q}{P_0 F} \quad (3)$$

式中 P_0 ——岩層孔隙度（多孔性）。

由此可見，滲透速度係數只是通過單位橫斷面積上岩層孔隙和裂縫部分的地下水流流量。

由公式(2)和(3)可得：

$$K_0 = \frac{K}{P_0} \quad (4)$$

測定速度係數是爲了判定堅硬和半堅硬（скальный и полускальный）岩層剝蝕或溶解，以及砂質礫石岩層暗蝕（суффозия）的可能性。

本書對各種試驗的工作方法將不作系統的敘述。這裏只說明某些計算方法的基本問題，其中最應注意的是各種鑽孔內的抽水試驗，因爲它是評價岩層透水性最可靠和最通行的一種方法。

單位吸水量 q （Удельное водопоглощение）乃是鑽孔內進行壓水試驗時當試驗層爲單位厚度且壓力等於1米時的相當耗水量。

$$q = \frac{Q}{l_0 H_0} \quad (5)$$

式中 l_0 ——壓水間隔長度；

H_0 ——鑽孔內靜止水面之壓力。

單位吸水量能說明堅硬和半堅硬岩層裂隙程度之特徵，但只是它們透水性的間接標誌。

確定岩石透水性的方法，可分爲野外和室內兩種。但在水文地質調查組成中，各種試驗室內的研究只有附屬的意義

(用來預先說明砂和黏土的透水性)。這些問題在本書中也不作討論。

屬於野外方法的有抽水、灌水和壓水，均在鑽孔和淺井內進行。

這些方法簡要地說明於表 1。

表 1

試驗工作方式	優點	缺點
鑽孔內抽水試驗	乃是測定含水岩層滲透係數最基本、最準確的一種方法。用指示劑配合測定滲透速度便能計算出滲透速度的係數	當地下水面很深，同時岩石透水性又很大時，便會使得抽水操作發生各種技術上的困難
鑽孔內灌水試驗 (施用較小的壓力)	在某些情況下能說明“乾”岩石的透水性。當地下水面很深時，能測定含水層的滲透係數，並能代替抽水試驗	要求更準確地控制水位，但在野外情況下水位不是隨時可以保持着的，此外，在灌水時能發生岩層裂隙和孔隙的堵塞 (кальматация)
鑽孔內壓水試驗 (施用較大的壓力)	當根據某些技術原理進行抽水試驗發生困難時，能近似的敘述出堅硬岩層的透水性	孔隙或裂隙內有發生堵塞的可能。當壓力較大時，還有產生紊流的可能，從而使得各種計算發生困難
淺井內抽水	水在岩層中之運動方向近似於垂直時，能測定岩層之滲透係數 (水由底部侵入時)	含水層中深度不大的淺井常使直接接淺井的抽水地帶受到限制
淺井內灌水	能大約地測定高於地下水位之岩層滲透係數 (主要為砂質黏土類)	岩層呈飽和現象的條件下，才能測定岩層的滲透係數

一、鑽孔內的抽水試驗

鑽孔內之抽水試驗是一種比較耗費和繁重的調查方式。因此，在選擇試驗鑽孔位置和它的深度時，不僅需要有各種勘查工作所獲得的準確水文地質材料，而且還要有其他研究方法比較輕便，用作研究岩層透水性的大概資料；屬於這類方法的有：砂質岩層方面——實驗室的滲透係數試驗；堅硬的破裂岩層——壓水試驗。

根據實驗室所測得的滲透係數和壓水試驗，可繪製透水性按深度變化的近似曲線。這樣就可能確定在某些地區一般應用抽水試驗來測定滲透係數的合理性，也可適當地解決有關抽水方法和計算圖表的問題（位置、滲水管之長度、試驗井至觀測孔的距離等等）。

為了使得抽水試驗做得具有高度目的性，最好利用實驗室工作和壓水試驗已有的資料進行預先的滲透計算。如果這些計算表明滲透損失值於最不利情況下，仍和水庫因平衡而加入的部分相差不大，那末求這種平均滲透速度值是沒有多大用處的。但是，在同樣情況下，要是基礎不均勻，則要求用抽水試驗來詳細地研究岩層的透水性了。

抽水試驗時水量（湧水量）和水位降低決定於滲透係數。

選擇計算公式以決定滲透係數時，必須考慮下列因素：

（1）岩層均勻程度；

(2) 鑽孔內充水部分長度與含水層厚度的關係;

(3) 地下水水力狀態 (受壓水和無壓水);

(4) 含水層進水和出水區域的邊界條件;

(5) 抽水試驗時間;

(6) 水流的水力形式 (穩流和紊流)。

抽水可分為單孔 (一個井) 和多孔兩種。

多孔抽水時, 水位降低曲線係由一排或數排觀測孔觀測而得, 因此, 它較之單孔抽水有許多重要的優點, 主要如下:

(1) 整理多孔抽水成果時, 可不必使用只能在很大的假定程度內確定的降低半徑數量。

(2) 當水流運動實際呈穩定狀態時, 由於具有觀測孔故能更準確地測定時間。

(3) 根據觀測孔計算可無須考慮滲水管的反抗力。

(4) 在進行抽水的鑽孔周圍破裂得很厲害的岩層中, 可能發生紊流, 但這時離其較遠所佈置的觀測孔地方, 仍然保持層流。

(5) 當具有幾排觀測孔時, 則能估計出不均勻岩層於水平方向的透水性。

(6) 多孔抽水時可以進行測定滲透速度係數的試驗。

(一) 均勻岩層完整井內的抽水試驗

如果需要測定不厚的含水層內滲透係數的平均值時,

則進行完整井的抽水試驗。

在要求加撐的疏鬆岩層內應用這抽水試驗時，通常在滲水管長度上有所限制（裝置長度大於10—15米的滲水管，在技術上甚感困難）。

1. 在距河流很遠的鑽孔內抽水

(1) 受壓水情況下

在已揭露受壓水的完整井內進行抽水時，有着最簡單的運動形式，如果抽水前壓力面是水平的，並且含水層水平面無限擴展，則在抽水時其流線在水平面和垂直面上均係直綫，等勢能面（эквипотенциальные поверхности）爲一圓柱面（圖1）。

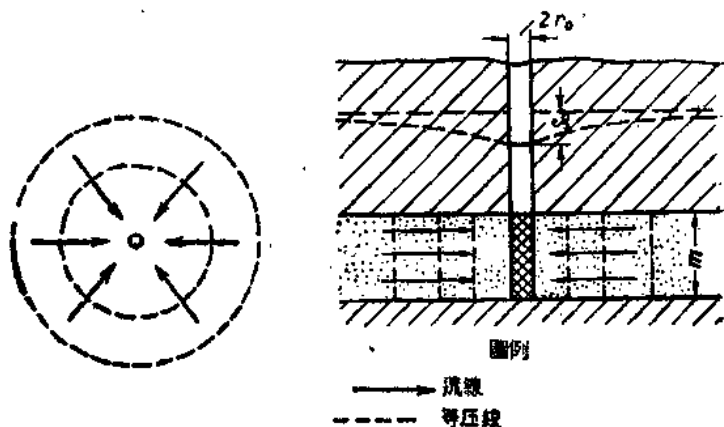


圖 1.

在垂直方向任意點的水流速度均等於零。因此，確定滲

透係數的問題可用水力學來準確地解決（鳩布伊(Дюпюи)受壓水公式）。

單孔抽水時：

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi m S_0} \quad (6)$$

式中 Q ——鑽孔湧水量；

R ——降底凹口半徑；

r_0 ——鑽孔充水管之半徑；^①

m ——含水層厚度；

S_0 ——抽水時鑽孔內水位的降低。

多孔抽水時，由中央孔和觀測孔得：

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right)}{2\pi m (S_0 - S_1)} \quad (7)$$

或由二個觀測孔得：

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi m (S_1 - S_2)} \quad (8)$$

式中 r_1 ——中央孔至第一觀測孔之距離；

r_2 ——同上，至第二觀測孔（其次一個）之距離；

S_1 ——第一觀測孔內水位之降低；

S_2 ——同上，第二觀測孔內水位之降低。

（2）無壓水情況下

如果地下水具有自由表面（無壓水），則水對鑽孔的壓力將較受壓水來得複雜。這時，流綫僅在水平面上是水平的，但在垂直方向愈向鑽孔越為彎曲。同樣，垂直於流綫的

^①以後，爲了簡略起見，我們將鑽孔進水部分稱爲滲水管。

等壓面亦呈彎曲狀態（圖 2）。

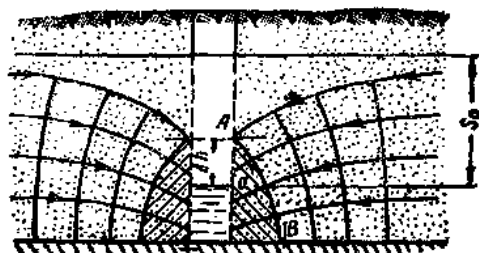


圖 2.

鳩布伊所引導的許多公式中，都沒有適合於這種彎曲等位面的情況，只適用於圓柱等位面。

與這些公式相適應的可得出以下的形式（圖 3）：

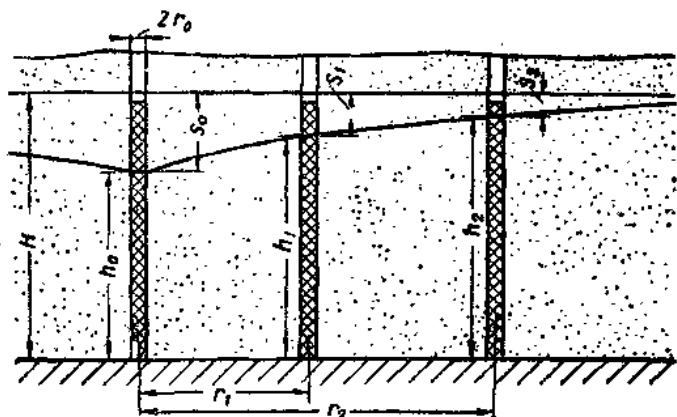


圖 3.

單孔抽水時：

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}{\pi S_0 (2H - \bar{S}_0)} \quad (9)$$

式中 H ——抽水前含水層厚度。

如為多孔抽水，則具有一個觀測孔時：

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right)}{\pi (S_0 - S_1) (2H - S_0 - S_1)}; \quad (10)$$

具有兩個觀測孔時：

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{\pi (S_1 - S_2) (2H - S_1 - S_2)}. \quad (11)$$

在無壓水情況下，自鑽孔內抽水時經常看到鑽孔內水位較直接在滲水管外面水位為低的所謂“跳躍”現象。這種跳躍現象是由於毗連鑽孔的岩層中地下水運動所發生的抵抗力引起（所謂“洩水”現象），以及流經滲水管所發生的抵抗力產生。

跳躍方式已為卡門斯基（Г. Н. Каменский）教授明確闡明：“如果自降低曲線與管壁之交叉點作一等壓面，則在垂直面上可能成為曲線 AB （圖2）。在它頂部成一大小與降落曲線斜度相當的角度向下傾斜。但在下部則近似垂直綫。在這等壓綫上任何一點壓力均為一致，皆等於降落曲線最終點 A 的水面高度，如果井中水面也靜止在這同一高度上，那末，停滯在 $A-B$ 面與井壁之間的土壤中水就不能移動了，於是要實現這運動就必須使壓力 Aa 降低某些，這僅在有跳躍 Δh 時才有可能。①”

由於鑽孔內水面的斷裂現象，某些水文地質學家認為在

①卡門斯基：“地下水運動原理”國立地質書籍出版社，莫斯科版，1943。

套管內測量 S_0 數值來決定滲透係數時其結果是不準確的，由此所求得的滲透係數值也會引起很大的誤差。

這是由於緊接鑽孔點 A 的等壓面（圖2）較諸滲水管側面為大，而它在鳩布伊公式中是以水量來除之，所以在計算後所得到的滲透速度和係數值都變大。誠然，計算時所用的鑽孔中水位較之外面小得很多，但是它可自水位降低愈多，水流坡度變化愈大的情況下來補償。

吉林斯基(Н. К. Гиринский)教授從抽水時所形成的水力網的分析證明：只有當水抽乾到底時（當 $S_0=H$ ），應用式(9)來計算滲透係數所得的結果才會是完全準確的，如果根據套管內水位來計算，則其誤差將達50%。

鳩布伊公式係根據受壓水的壓力面和無壓水的自由水面在抽水前為一水平面的條件下推演出來的。

依據這個先決條件，抽水時降落凹口在通過鑽孔的任何垂直面均為對稱，且進水邊界乃是以 R 為半徑的圓周。

自然界中與此相當的情況即是進行抽水的鑽孔分佈在圓形高地的中心，但這種情形是少有的。

在天然條件下，地下水通常自進水區域流向出水區域；因此，由鑽孔抽水時形成不對稱的降低，當抽水時間延續很久時，這個曲線就發展到進水區域（圖4），水流降低到一定程度時，降落曲線邊界則合併在一起，並在離鑽孔某一距離處形成一分水點 A ，把水流分成兩個方向：流向鑽孔和流向出水帶。