

地下水动力学 问题

И·В·嘎尔摩諾夫 合著
А·В·列別節夫

人民鐵道出版社

地下水动力学問題

И·В·嘎尔摩諾夫 合著
苏联 A·B·列別節夫

李为麟 廣鍾岩 合譯



人民鐵道出版社

一九五六年·北京

本書敘述地下水动力学全部主要公式和計算方法，對於水工技術及水利建筑的水文地質方面的計算特加詳細說明，其中並有例題88項包括各种不同情况。

本書經苏联高等教育部審定作为高等学校學員参考書，亦可供从事研究利用地下水或防治地下水的各种工程技術人員参考。

地下水动力学問題

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

ПО ДИНАМИКЕ ГОДЗЕМНЫХ ВОД

苏联 И.В.ГАРМОНОВ, А.В.ЛЕБЕДЕВ 合著

苏联地質書籍出版社（一九五二年莫斯科俄文版）

ГОСТЕОЛИЗДАТ, Москва, 1952

李为麤、廣鍾岩合譯

人民鐵道出版社出版（北京市霞公府 17 号）

北京市書刊出版營業許可証出字第 010 号

新華書店發行

人民鐵道出版社印刷厂印

（北京市建國門外七聖廟）

1956 年 12 月初版第 1 次印刷

平裝印 1—4, 535 册

書号: 656 开本: 787 × 1092 $\frac{1}{32}$ 印張 9 $\frac{1}{2}$ 字數 203 千 定价 (10) 1.60 元

序 言

本書系供地質勘探、採礦和工科大学以及大学地質系「水文地質」專業學生學習「地下水动力学」課程時，作參考之用。本書亦可供從事研究利用地下水或防治地下水的專家們的參考。

本書包含地下水动力学課程的全部主要計算公式及方法。關於水工技術及水利建築的水文地質方面的計算特加詳細說明。

當編著此參考書時，作者曾引用 Г. Н. Каменский, М. Е. Альтовский, Н. Н. Биндеман, Н. К. Гиринский 及其他蘇聯學者的著作。實際工作中的地下水动力学問題系 1940 年 МГРИ 水文地質學教研室所整理，但也有很多的例題是作者多年研究水文地質所積累的。第九章「筑壩地區地下水運動的計算」系作者與 Ф. М. Бочевеv 共同編寫。

作者敬向 Г. Н. Каменский 教授致以謝忱，當此書出版之際，蒙其予以許多可貴的指示。

作者認為本書還有缺點，將以感激的心情接受所有的批評和指示，來件請寄示：Москва, Старомонетный Пер, 35, Лаборатория гидрогеологических проблем им. акад. Ф. П. Саварецкого АН СССР。

目 錄

序 言

緒 論

第 一 章 地下水运动的基本方程式

§ 1. 滲透直綫定律 (ДАРСИ 定律)	
及其应用範圍	3
§ 2. 紊流定律及КРАСНОПОЛЬСКИЙ	
的公式	5
§ 3. СМРЕКЕР 方程式	5
§ 4. 根据岩層的顆粒成份求滲透系数的	
經驗公式	6

第 二 章 非飽和土壤中的滲入

§ 5. 在自然条件下用試坑滲入法求滲透系数	10
§ 6. 例題	16

第 三 章 地下水流向集水建筑物的流量計算

§ 7. 求流向鑽孔及豎井的流量計算公式	22
§ 8. 鑽孔湧水量的曲綫	29
§ 9. 求流入互相作用的井群的流量	31
§ 10. 求流入水平集水設備的流量	41

§11. 例題	43
§12. 坑道的湧水量計算公式和例題	58

第 四 章 求蓄水層滲透系数

§13. 均質岩層中完整孔的揚水試驗	67
§14. 均質岩層中不完整孔的揚水試驗	71
§15. 非均質岩層中鑽孔的揚水試驗	74
§16. 試坑的揚水試驗	75
§17. 裂隙岩層中鑽孔的揚水試驗	75
§18. 鑽孔的注水和壓水試驗	76
§19. 例題	77

第 五 章 計算壤中暗流和受壓暗流的流量及 繪制降落曲綫

§20. 均質蓄水層的基本公式	84
§21. 非均質岩層的基本公式	92
§22. 例題	94

第 六 章 壤中水的壅水計算

§23. 水平的和傾斜的均質岩層的基本計算公式	117
§24. 非均質岩層的計算公式	121
§25. 例題	123

第 七 章 蓄水庫和水渠滲透水量損失的計算

§26. 計算公式	138
§27. 例題	151

第 八 章 壤中水水面漲落及流量的計算

(壤中水狀況的推算)

§28. 确定壤中水補給及平衡的数值·····	163
§29. 确定壤中水水面随时间的变化·····	169
§30. 泉水湧水量的推算·····	172
§31. 例題·····	174

第 九 章 筑壩地区地下水运动的計算

§32. 筑壩地区地下水运动研究的任务及其 一般形式·····	195
§33. 均質岩層中平底壩壩下的滲透·····	197
§34. 非均質岩層中平底壩壩下的滲透·····	200
§35. 流網計算法·····	203
§36. 土壤滲透穩定性的計算·····	209
§37. 壩兩岸附近的滲透·····	210
§38. 例題·····	217
附錄Ⅰ 落水及壅水曲綫·····	232
附錄Ⅱ 双曲綫正弦表·····	241
附錄Ⅲ 双曲綫余弦表·····	245
附錄Ⅳ 双曲綫正切表·····	248

緒 論

Г. Н. Каменский 氏提出地下水动力学的定义为：「在自然的或人为的因素影响下，水在地殼岩層中运动的学說。同时，研究水的运动，其範圍不僅为饱和水份的岩層；帶有孔隙而未經水饱和的岩層，水在其中各种运动的形态亦为研究的对象」。

關於地下水运动的基本学說，俄國於十八世紀之始，即有 М. В. Ломоносова, Д. Бернулли 及 Л. Эйлера 数位学者在前彼得堡科学院進行研究。

首先研究地下水在帶有孔隙的岩層中的运动的，是法國水力学学者 Дарси，他在 1852 年根据試驗首創孔性土壤中滲透的基本定律，並引用了有关滲透系数的概念。

十九世紀末，俄國有 Н. Е. Жуковский 氏从事研究地下水滲透的基本理論，他光輝地解决了莫斯科美吉辛斯克攔水壩一系列地下水的理論問題。俄國革命前，尚有 К. Э. Лемке, И. А. Евневич, А. А. Краснопольский, Д. П. Кочерин 等人致力於攔水建築物地下水問題。

苏联十月革命后，尤其是在斯大林五年計劃的年代里，地下水运动理論达到最充分的發展；在此期中，對於各种建築物巨量的試驗及地下水动力学理論方面的探討，与其他國家相比，已把这門科学提高到居其首位。

苏联的学者們發表了關於地下水动力学的最卓越的綜合性論文，必須指出的是 Н. Н. Павловский, Е. А. Замарин, Г. Н. Каменский, П. Я. Полубаринова-Кочина, Ф. Б. Нельсон-Скорняков, М. Е. Альтовский, Н. Н. Биндеман, Н. К. Гиринский, В. Н. Щепкачев 諸家的著作。

對壤中水运动理論的發展，Н. Н. Павловский (1923—1931) 的著作具有重大意义，即在水土建築物下壤中水运动的理

論的研究和壤中水不等速运动在理論上的發展。

關於地下水动力学理論的發展並運用於社会主义的建筑工程中，則Г.Н.Каменский的著作起了巨大的作用。在其綜合性論文《地下水动力学基礎》中，Каменский 總結了關於地下水动力学的學識並將其發揮到整个一系列的問題上，此書第一版刊行於1934年。他首創在具有不同性質的透水性的岩層中地下水运动的理論及地下水不穩定运动的一些原理。Каменский的著作對於具体的自然条件，是能够反映在地下水运动的理論中，促進了地下水动力学在水文地質学中的运用。

应用地下水动力学來解决具体的实际問題，尤其是在斯大林五年計劃的年代里，特具有寬廣的范围。現今根据地下水运动理論來解决实际問題，已經成为全部水文地質的勘测中的不可少的部份。

第一章 地下水运动的基本方程式

§ 1. 渗透直线定律 (ДАРСИ定律) 及其应用范围

地下水於多孔岩層中运动时, 通常呈層流状态。

層流符合於渗透直线定律。該定律是在1856年, ДАРСИ 根据砂的渗透实验而建立的。实验是在如图 1 所示的仪器中进行, 以砂装满圆筒后, 水从上面注入。借侧流管保持一定的水位。水透过砂由圆筒下面水龙头流出。为了量出渗透时的水头损失, 在圆筒的上面和下面分别装以水银测压计。

实验证明: 流量与在单位渗流长度上水头损失之间的关系, 是用下式表示:

$$Q = k \frac{h}{l} \omega, \quad (1)$$

式中 Q ——单位时间内透过砂的流量;

h ——水头损失;

l ——砂柱的渗流长度;

k ——渗透系数 (因岩层的和渗透液的物理性质而异的常数);

ω ——透水砂柱的横断面积。

以面积 ω 除流量 Q , 以字母 v 表示其商数, 得

$$v = \frac{Q}{\omega} = k \frac{h}{l}. \quad (2)$$

v 称为渗透速度。它不是孔隙中的真正流速, 而为在渗透岩层全断面上的某种换算数值。水流的真正流速, 应如水在管中或河槽中移动一样。

孔隙中的真正流速，可以用孔隙断面除流量 Q 求得之，孔隙断面为总断面 ω 与孔隙率 p 之乘積，其算式如下：

$$u = \frac{Q}{\omega p} \quad (3)$$

比较算式 (2) 和 (3) 得

$$v = up, \quad (4)$$

因此，渗透速度等於水在孔隙中的平均流速乘以孔隙率。因为 p 永远小於 1，所以渗透速度永远小於孔隙中平均流速。

比值 $\frac{h}{l}$ 表示單位滲流長度的水头跌落，即水头梯度，或为液壓坡度。

以 I 表示 $\frac{h}{l}$ ，則得

$$v = kI. \quad (5)$$

按 ДАРСИ 定律这个公式表明，当層流运动时，渗透速度与水头梯度成正比。

如設 $I=1$ ，則方程式 (5) 改为如下形式：

$$v = k, \quad (5a)$$

即当水头梯度等於 1 时，則渗透系数等於渗透速度。因此，渗透系数應該用長度單位与時間單位之比表示之，即公尺 / 晝夜，公尺 / 秒或公分 / 秒。

根据 Г.Н.Каменский 的資料得知，渗透直綫定律的应用，不僅對於細砂足够精确；当地下水真正流速小於 1000 公尺 / 晝夜时，對於粗砂及卵石夾砂層也同样正确。只有喀斯特流域和大型裂縫中的地下水才具有較大的流速。因此對於解决水文地質問題，在大多数情况中是可以採用渗透直綫定律的。

流速超出 ДАРСИ 所建立的規律性时，叫作臨界速度。为了

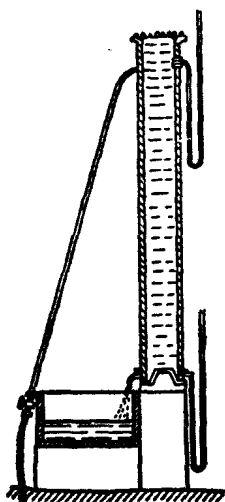


圖 1. Дарси 仪器

求出臨界速度 v_{kp} ，可以採用 Н.Н.Павловский 的公式：

$$v_{kp} = \frac{1}{6.5} (0.75p + 0.23) \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{Re}{d}, \quad (6)$$

式中 v_{kp} ——臨界速度，公尺/秒；

p ——岩層孔隙率；

μ ——水的粘滯系数；

ρ ——水的密度；

d ——顆粒的有效直徑，公分；

Re ——常数，根据 Н.Н.Павловский，砂的 Re 值在 50
——60 之間。

對於溫度為 10° 的水，公式 (6) 具有較簡單的形式如下：

$$v_{kp} = 0.002 (0.75p + 0.23) \frac{Re}{d}. \quad (7)$$

§ 2. 紊流定律及 КРАСНОПОЛЬСКИЙ 的公式

在大塊碎石和裂縫岩層中流動的地下水，如果流速不大時，則保持層流運動（當水頭梯度不大時，在所述岩層中是完全可能的）。如果流速很大時，則層流狀態便為之破壞，而出現紊流。

КРАСНОПОЛЬСКИЙ 用下式表示透水岩層中地下水紊流定律：

$$Q = \omega k_k \sqrt{I}, \quad (8)$$

式中 k_k ——岩層的滲透系数。

用橫斷面 ω 除流量 Q ，得

$$v = k_k \sqrt{I}. \quad (9)$$

由方程式 (9) 得知：在紊流狀態下，水流速度與水流坡度的平方根成正比。

§ 3. СМРЕКЕР 方程式

由層流轉入紊流的混合狀態或過渡狀態時，可用 СМРЕКЕР 公

式:

$$Q = \omega k_c \sqrt[m]{I}, \quad (10)$$

式中 k_c ——岩層的滲透系数;

m —— m 值与暗流特征及土壤性質有关, 其变化在 1 至 2 之間。

以断面 ω 除流量 Q , 得:

$$v = k_c \sqrt[m]{I}. \quad (11)$$

当 $m = 1$ 时公式 (11) 獲得下列形式:

$$v = k_c I. \quad (12)$$

即变为滲透直線定律的方程式。当 $m = 2$ 时 Смрекер 公式獲得形式如下:

$$v = k_{c1} \sqrt{I}, \quad (13)$$

即变为表示紊流的 Краснопольский 方程式。

§ 4. 根据岩層的顆粒成份求滲透系数的經驗公式

岩層顆粒成份的对数曲線, 岩層顆粒成份用所謂对数曲線來表示。为了構成这个曲線, 沿横坐标以对数表示顆粒直徑, 而沿縱座标表示顆粒由最小直徑到所給直徑的总含量 (圖 2)。

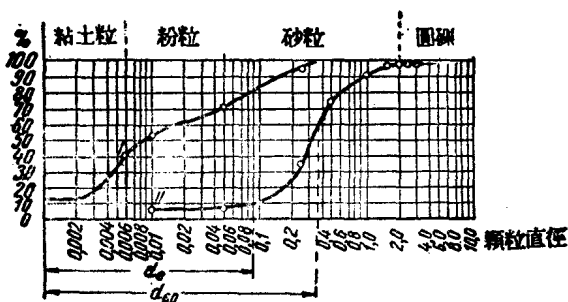


圖2. 岩層顆粒成份的对数曲線

用对数曲线可以求出有效直径和岩層的不勻系数。所謂有效直径 d_e 是指一种直径，小於这种直径的成份恰佔了岩層的10%。不勻系数 k_n 为相当於縱座标60%的顆粒直径对有效直径之比，即

$$k_n = \frac{d_{60}}{d_e} \quad (14)$$

ХАЗЕН 公式。對於不勻系数小於5.0和岩層有效直径的限界在0.1到3.0公厘之間时，可以用Хазен的經驗公式求渗透系数：

$$k = C d_e^2 (0.7 + 0.03t) \quad (15)$$

式中 k ——渗透系数，公尺/晝夜；

d_e ——有效直径，公厘；

t ——渗透水温度 $^{\circ}\text{C}$ [$(0.7 + 0.03t)$ 为修正温度]；

C ——經驗系数，由400到1200，因砂粒的顆粒成份而異（砂粒越大，則系数越大）。

СЛИХТЕР 公式。Слихтер 的經驗公式如下：

$$k = A d_e^2 m \frac{1}{\mu} \quad (16)$$

式中 k ——渗透系数，公尺/晝夜；

d_e ——有效直径，公厘；

A ——等於88.3的系数；

m ——与孔隙率有关的系数（各种孔隙率 p 的 m 值，列於表1）；

表1

p	m	p	m	p	m	p	m
0.26	0.01187	0.32	0.02352	0.38	0.04151	0.43	0.06267
0.27	0.01350	0.33	0.02601	0.39	0.04524	0.44	0.06776
0.28	0.01517	0.34	0.02878	0.40	0.04922	0.45	0.07295
0.29	0.01694	0.35	0.03163	0.41	0.05339	0.46	0.07838
0.30	0.01905	0.36	0.03473	0.42	0.05789	0.47	0.08455
0.31	0.02122	0.37	0.03808				

μ ——与温度有关的水的粘滯系数（其值如表 2 所示）。

表 2

°C	μ	°C	μ	°C	μ	°C	μ
0	0.0178	8	0.0139	16	0.0111	24	0.0093
1	0.0172	9	0.0135	17	0.0108	25	0.0091
2	0.0167	10	0.0131	18	0.0105	26	0.0089
3	0.0162	11	0.0127	19	0.0103	27	0.0087
4	0.0157	12	0.0124	20	0.0101	28	0.0085
5	0.0152	13	0.0120	21	0.0099	29	0.0083
6	0.0147	14	0.0117	22	0.0097	30	0.0081
7	0.0143	15	0.0114	23	0.0095		

Слихтер 公式適用於不勻系数較大和有效直徑在 0.01 到 5.0 公厘之間的岩層。

對於顆粒均勻而潔淨的砂，在溫度為 10° C 時，Слихтер 得出滲透系数與孔隙率的关系如下：

$$k_{10} = k_1 d_s^2, \quad (17)$$

式中 k_{10} ——10° C 的滲透系数，公尺/秒；

d_s ——顆粒有效直徑，公厘；

k_1 ——與孔隙率有关的值（見表 3）。

表 3

p	k_1	p	k_1	p	k_1	p	k_1
0.26	0.0009	0.32	0.0019	0.38	0.0031	0.44	0.0052
0.28	0.0012	0.34	0.0023	0.40	0.0037	0.46	0.0061
0.30	0.0015	0.36	0.0029	0.42	0.0042	0.47	0.0068

Крюгер 公式。Крюгер 公式給出了 18° C 的滲透系数的数值：

$$k_{18} = 1.44 \times 10^6 \frac{p}{\theta^2}, \quad (18)$$

式中 k_{18} ——18° C 的滲透系数，公尺/晝夜；

p ——孔隙率；

θ ——1 公尺³ 土壤中顆粒表面積的总和，公分²。

用 Крюгер 公式求滲透系数的例子列於表 4 中。

表 4

顆粒成份, 公分		單位體積中各成份含量 q	$\frac{q}{d}$	孔隙率 p	顆粒表面積總和 公分 ² $\theta = 6(1-p)$ $\Sigma \frac{q}{d}$	滲透系数 公尺/晝夜 $k_{18} = 1.44 \times 10^6 \frac{p}{\theta^2}$
粒徑範圍	平均粒徑 d					
< 0.001	0.0005	0.368	736	0.40	6 (1-0.4)	$1.44 \times 10^6 \frac{0.4}{3041^2} =$ $= 0.062 \text{ 公尺/晝夜}$ 或为 0.000072 公分/秒
0.001—0.005	0.003	0.251	83.6		844.9 =	
0.005—0.025	0.015	0.378	25.2		= 3041.6	
0.025—0.05	0.037	0.003	0.1			
			$\Sigma \frac{q}{d} =$ = 844.9			

第二章 非飽和土壤中的滲入

§ 5. 在自然条件下用試坑滲入法求滲透系数

当壤中水水面位於深度不小於2——3公尺时，为求非飽和土壤滲透系数，採用試坑滲入試驗，因为滲入量与土壤透水性成直接关系。試驗和計算的方法是很多的。常用的是 А.К.Болдырев, Г. Н. Каменский, Е. А. Замарин, Н. Н. Биндеман 和 Н. С. Нестеров 等方法。

А.К.БОЛДЫРЕВ 方法。在作試驗的地層上掘試坑时，坑底应高出壤中水的水面一公尺或以上。在靠近試坑邊緣的地面上，設置兩個充滿水的有刻度的（10——20公升）容器，水从容器經虹吸管不断流入試坑，使坑中水位經常保持不变，約在坑底以上10公分。为觀測水位，在坑底設置一根以公分刻划的水准尺（圖3）。

求出單位時間內注入試坑的水量 Q ，並以坑底面積 ω 除之，則得平均滲入速度：

$$v = Q / \omega \quad (19)$$

用公式（5）求滲透系数

$$k = \frac{v}{I}。$$

А.К.Болдырев 假定，如坑底水柱高度不大於 10 公分，而保持持久滲入时，則水头梯度等於 1，因此，

$$k = v \quad (20)$$

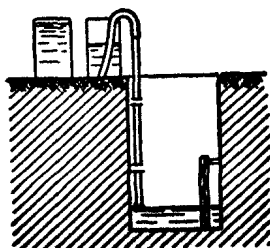


圖3. Болдырев的試坑滲入試驗設備示意圖