

水工建筑物的 渗透计算

苏联B. И. 阿拉文等著

水利电力出版社

水工建筑物的渗透计算

苏联 В.И. 阿拉文 С.Н. 奴米罗夫著

伍修燾 李协生译

水利部02345版社

內 容 提 要

本書闡述了各类水工建筑物如：重力壩、土壩、渠道、排水溝、建筑基坑等等在各种情形下的滲透計算方法，并介紹了近来在苏联水工設計工作中已广泛采用了的电拟法和分段法。書中的計算方法和公式均簡便而实用，并附有大量計算实例。

本書可供水工建筑物的設計工程师、技术員应用，也可供高等院校师生参考。

本書第一、二、三各章系由李协生譯，第四章系由唐仲南譯，第五至十章系由伍修羣譯，最后由伍修羣担任全書的校訂工作。

В. И. АРАВИН С. Н. НУМЕРОВ
ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
СТР И АРХ ЛЕНИНГРАД 1955

水工建筑物的滲透計算

根据苏联国立建筑工程与建筑艺术出版社1955年列宁格勒修訂本第2版翻譯

伍修羣 李协生譯

*

1211S315

水利电力出版社出版(北京西郊科舉路二里溝)

北京市書刊出版業營業許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本*9 $\frac{1}{2}$ 印張*241千字*定价(第10类)1.60元

1959年6月北京第1版

1959年6月北京第1次印刷(0001—2,980册)

原 序

苏共第十九次代表大会关于第五个五年计划的决议，对苏联的电气化方面和土壤改良方面的水工建设的发展，给予了极大的注意。苏联规模巨大的水利工程建設要求新的更合理的设计和施工方法。因此，在选择合理的水工建筑物結構时起着非常重要作用的水工建筑物的渗透計算，在苏联水利建設的現有情况下，也应当获得进一步的发展和改善。这种情况便是著者对本書进行根本修改並把它再次出版的工作基础。

在修改本書时，曾考虑了水利設計院、水电設計院和其它設計院的設計工程师們的意見。

在第二版中，渗透計算的方法曾根据現有的理論研究和試驗研究大大地加以簡化。書中在大部分情况下採用了形式簡單，且在实用目的上足够精确的近似計算公式。在本書中，對於渗透計算的理論基础的敘述，已减少到最小限度，而關於理論方法的知識則完全刪除了。这些知識敘述於著者所著“空气和液体在不变形的多孔介質中的运动理論”一書中，該書已由苏联国家技术理論出版社在1953年出版。

在該書中介紹了渗透理論的发展簡史，由史实可知，以 H.E. 儒可夫斯基、H. H. 巴甫洛夫斯基和 Л. C. 列宾遜为奠基人的苏联的渗透理論学派，居於世界科学的前列。

在本書的第二版中，对某些部分作了甚大的补充，例如，介紹电拟法(ЭИДА)、分段法等部分。其所以作这些补充，是因为近来在实际的水工設計工作中已广泛採用了这些方法。还与第一版不同处是补充了大量的計算实例。

本書主要是根据苏联学者們的著作編写成的。書后附有在編写本書时为本書著者所利用的，或是直接有关於書中所涉及的問題的著作的目录。凡是引用这些著作处，均以方括号中的号碼註明。

本書供水工建築物的設計工程師們應用。它亦可供水利工程系和水利土壤改良系的学生們參考。

根據上述的本書用途，內容的安排是按照水工建築物的形式，而不是依計算公式用何種方法求得為轉移。例外的是第一章，其中介紹有關滲透計算的一般知識，以及第九、十章，其中介紹有關近似計算方法和電擬法的實際知識。

著者預先對所有將要提出促進本書進一步改善的批評和願望的機關和个人表示感謝。

意見請寄下列地址：Ленинград, улица Герцена, 47, Гос. издательство Литературы по строительству и архитектуре.

目 录

緒 言

第一章 滲透和滲透計算的基本知識.....8

- §1. 滲透的概念.....8
- §2. 孔隙和裂縫介質的特性.....8
- §3. 滲入土壤中的水的分類.....11
- §4. 滲透水流的概念.....14
- §5. 滲透的基本方程式.....15
- §6. 滲透的基本定律.....16
- §7. 土壤在其透水性方面的分類.....19
- §8. 確定土壤滲透系數簡介.....19
- §9. 重液體的滲透方程式.....21
- §10. 平面穩定滲透.....22
- §11. 水平面滲透.....26
- §12. 水工建築物滲透計算的目的和任務.....29
- §13. 水工建築物滲透計算方法的一般知識.....30
- §14. 關於制定滲透計算圖形的方法的一般知識.....31

第二章 地下河槽、無壓和有壓(自流)

地層中的滲透計算.....36

- §15. 基本概念和圖形.....36
- §16. 在稜柱形地下河槽中的等速滲透.....38
- §17. 當不透水層表面具有順坡($i > 0$)時, 在矩形斷面的
稜柱形地層中的變速滲透.....39
- §18. 當不透水層表面水平($i = 0$)時, 在矩形斷面的
稜柱形無壓地層中的變速滲透.....42
- §19. 當自地表面有下滲時, 在具有水平槽底的
稜柱形矩形地下河槽中的滲透.....44
- §20. 當不透水層表面具有反坡($i < 0$)時, 在矩形斷面的
稜柱形無壓地層中的變速滲透.....47
- §21. 在任意橫斷面形狀的稜柱形地下河槽中的變速滲透.....48
- §22. 在由不同坡度的分段組成的稜柱形地下河槽中的變速滲透.....50
- §23. 在任意形狀非稜柱形地下河槽中的滲透.....53
- §24. 在水平層狀地層中的無壓滲透.....54
- §25. 當滲透系數在水平方向變化時, 在水平不透水層上的
稜柱形矩形地層中的滲透.....56

§26. 在均質地層中的有壓滲透	57
§27. 在層狀地層中的有壓滲透	58
§28. 在水平均質地層中的有壓-無壓滲透	59
§29. 在水平層狀地層中的有壓-無壓滲透	60
§30. 當具有水平不透水層時, 在很長的無壓地層中的不穩定滲透	62
§31. 在有限長度的矩形大塊土體中的不穩定滲透	64
第三章 普通水井和有壓水井(自流井)	68
§32. 基本概念和圖形	68
§33. 普通完整集水井	69
§34. 在層狀地層中的普通完整水井	73
§35. 靠自地表下滲和外來的入流供水的普通完整水井	75
§36. 位於水池附近的普通完整水井	75
§37. 當具有水平不透水層時, 設置在平面滲透水流中的普通水井	77
§38. 普通完整吸水井	78
§39. 普通不完整水井	79
§40. 有壓(自流)完整集水井	80
§41. 在層狀土壤中的有壓(自流)完整水井	81
§42. 在等速滲透水流中的有壓(自流)完整水井	82
§43. 在相鄰透水地層之間具有聯系時的有壓(自流)完整水井	82
§44. 有壓(自流)不完整集水井	83
§45. 有壓完整吸水井	86
§46. 有壓不完整吸水井	87
§47. 地底自流完整集水井	88
§48. 完整集水井的小井羣	89
§49. 在均質或層狀無壓地層中的長列普通完整水井	91
§50. 當有排水集水區時, 在均質或層狀地層中的 長列普通完整水井	92
§51. 在均質或層狀有壓地層中長列的完整有壓(自流)井	95
§52. 當有排水集水區時, 在均質或者層狀有壓地層中的 長列完整有壓(自流)井	96
§53. 在平面圖上成多角形的完整基坑	98
§54. 在均質或者層狀無壓地層中由井羣圍護着的建築基坑	100
§55. 在均質或者層狀有壓地層中由井羣圍護着的建築基坑	102
§56. 在均質或者層狀有壓-無壓地層中由井羣圍護着的建築基坑	103
第四章 水平排水設備	105
§57. 導溝	105
§58. 位於水溝或水池底下的排水設備	106
§59. 在水平壓力地層中的排水溝	108
§60. 在極大厚度透水層中的排水溝	113

§61. 当地基中具有水平不透水层时的排水沟.....	117
§62. 当地基中具有傾斜不透水层时的排水沟.....	125
§63. 由兩道排水沟組成的排水系統.....	126
§64. 从地面向由許多排水管組成的排水系統的滲透.....	130
§65. 由許多排水沟組成的排水系統.....	132
第五章 渠道的滲透.....	136
§66. 導言.....	136
§67. 鼠道式灌沟.....	136
§68. 灌水壟沟.....	138
§69. 地基中有强透水土层时的渠道滲透.....	139
§70. 当有壅水时, 在无限厚度的透土层中的渠道滲透.....	142
§71. 当有天然均匀滲透水流时, 在无限厚度的透土层中的渠道滲透.....	145
§72. 当有排水沟时, 在无限厚度的透土层中的渠道滲透.....	148
§73. 在地基中有水平不透水层时的渠道滲透.....	150
§74. 在地基中有傾斜不透水层时的渠道滲透.....	157
§75. 淤淀的渠道的滲透.....	158
第六章 土坝的滲透.....	158
§76. 導言.....	158
§77. 不透水地基上的土壩.....	160
§78. 无限深度的透水地基上的土壩.....	167
§79. 有限深度的透水地基上的土坝.....	168
§80. 透水性大于壩体的地基上的土壩.....	172
§81. 不透水地基上的具有斜牆的土壩.....	172
§82. 在不透水地基上的具有心牆的土壩.....	173
§83. 在心牆下設置有兩排防滲板樁的土壩.....	174
§84. 在有限深度的透水地基上具有斜牆、鋪盖和截水牆的土壩.....	176
§85. 在有限深度的透水地基上具有斜牆和鋪盖的复式壩.....	178
第七章 水工建築物护底下面的滲透.....	179
§86. 導言.....	179
§87. 平面护底地基中的有压滲透.....	180
§88. 平面护底地基中的有压—无压滲透.....	185
§89. 压力滲透水流环绕防滲板樁的流动.....	190
§90. 具有防滲板樁的平面护底地基中的有压滲透.....	193
§91. 地基深度甚大时, 水工建築物护底地基中有压滲透的 近似計算方法.....	200
§92. 地基具有有限深度时, 水工建築物护底地基中有压滲透的	

近似計算方法.....	204
第八章 繞過水工建築物的滲透.....	220
§93. 基本概念.....	220
§94. 不考慮日常地下水流的影响, 繞過埋入深度相当小的岸墩的滲透.....	223
§95. 不考慮日常地下水流的影响, 繞過寬度甚小的河岸刺牆或帷幕的滲透.....	225
§96. 考慮日常地下水流的影响, 繞過埋入深度相当小的河岸岸墩的滲透.....	227
§97. 考慮日常地下水流的影响, 繞過寬度甚小的河岸刺牆或帷幕的滲透.....	229
§98. 引水渠末端地段的側面滲透.....	231
第九章 滲透的近似計算方法.....	232
§ 99. 分段法的原理.....	232
§100. 某些基本分段的計算关系式.....	235
§101. 用分段法解題的实例.....	236
§102. 繪制流网的图解法.....	241
§103. 根据流网确定基本的滲透特性.....	248
第十章 电拟法 (ЭПЛА).....	251
§104. 用电拟法研究滲透的基本概念.....	251
§105. 模型材料.....	253
§106. 模型制造.....	254
§107. 平面滲流模型的设计.....	257
§108. 水平面有压和无压滲透模型设计.....	260
§109. 水平面有压—无压滲透模型设计.....	268
§110. 研究平面不穩定滲透的模型设计.....	273
§111. 电拟試驗的裝置和仪器.....	276
§112. 試驗的进行.....	279
§113. 試驗結果的整理.....	285
附录	287

緒 言

近年来，工业和建筑业的要求在苏联推动了渗透理論的迅速发展。

新的渗透研究方法的制定，使有可能为在水工建筑物設計方面有着特別重要意义的实用的渗透計算方法的发展建立了基础。这里包括作为水利樞紐組成部分的各种水工建筑物：土坝、重力坝、水电站、船閘、引水渠道和压力前池等等。这里也应当包括为了供水目的而取用地下水的水利土壤改良建筑物，以及建筑基坑排水的建筑物。在水工建筑物中防止渗透和控制渗透水流的問題，决定着水工建筑物的結構和尺寸。

在大多数情况下，渗透計算提供下列可能性：选择水工建筑物护底的地下輪廓的合理形式和尺寸；确定渗透損失、护底上的渗透水流压力和渗透速度等等。渗透計算还給出为进行建筑物的靜力計算用的資料。

在由於水工建筑物抬高水位而將会引起地下水位上升的区域，渗透計算可以預先确定此区域内渗透水流的形式。

同时可以确定出水庫中渗透損失大小和拟定出防滲和排水設備的合理方案。

当对联接水工建筑物与河岸的結構（岸墩和防滲帷幕等）的周圍进行渗透計算时，須确定这些建筑物上的渗透水流压力、渗透流量和渗透速度。根据这些数值就可以选择出这些結構物的合理尺寸和附屬於它們的排水設備。

当設計土坝和圍堰时，渗透計算可以确定出浸潤綫的形狀、渗透流量、排水設備的布置和尺寸以及渗透速度等等。

在排水区域内，排水建筑物的主要尺寸和分布亦借渗透計算来确定。渗透計算可以确定出渗透水流的自由水面的形狀和滲入排水网各地段的渗透流量。

在設計建筑基坑中的水位降低时，渗透計算具有决定性意义。它可以确定出基坑中的渗透流量和地下水位降低的数值，这对于建筑工地上合理地布置降低地下水位的设备是必需的。

当进行目的在於确定渗透水流的形式、渗透流量和渗透系数等等的水文地质研究时，广泛地应用了渗透計算的公式和方法。这些方法和公式，在水工建筑物运用的过程中研究水工建筑物及其地基中的渗透时，也同样被应用着。

第一章 渗透和渗透計算的基本知識

§1. 渗透的概念 液体在孔隙或裂缝介质中的运动，叫做渗透。在設計不同的水工建筑物时，例如重力坝、土坝、闸、围堰、建筑基坑和排水系統等等，我們經常会遇到渗透現象。当研究自然界中的渗透时，渗透問題在水文地质調查中也具有重要的意义。同样，研究石油和气体的渗透也是非常重要的，有很多專門文献討論了这些問題。

土壤的孔隙或岩石的裂缝具有不同的而且复杂的形状。液体即在这些縫隙中流动。这种情况就促使我們要用特殊的方法去研究在孔隙或者裂缝介质內的液体运动。正因为孔隙和裂缝的形状沒有規律性，所以我們就得根据一些平均指标来判断各种介质的渗透性質。

当研究渗透时，我們不对沿着个别孔隙和裂缝內的液体的运动感到兴趣，而要确定一些平均渗透特征值：渗透速度、渗透压力和渗透流量等等，同时它們所相应的面积的尺寸，与被研究的渗透区域的总尺寸比較起来是很小的，但是与液体流經的孔隙或者裂缝的尺寸比較起来則是够大的。水工建筑物渗透計算的基本任务就是确定上述的特征值。

§2. 孔隙和裂缝介质的特性 土壤的顆粒常具有很不相同的形状和大小。砂类土壤的顆粒通常或者是銳稜的，或者是稍微呈圓形的岩石碎屑。粘土类土壤的顆粒多半是具有伸展很厉害的魚

鱗形狀或者是具有邊緣不規則的薄片形狀。

表 1 所列為一種現行的按照顆粒大小的土壤粒徑分類。

表 1

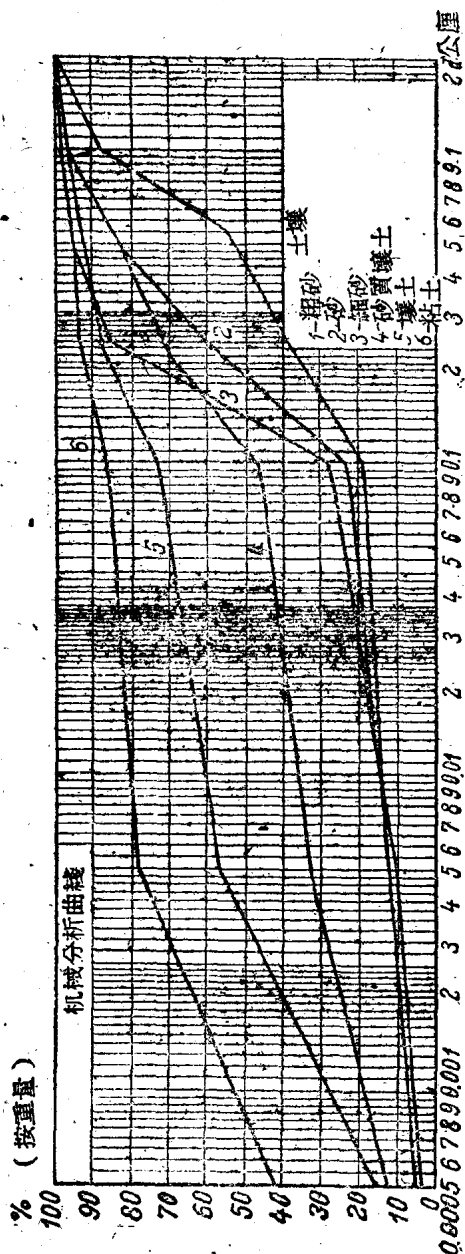
粒 徑 組 名 稱	d (公厘)	
頑石(滾圓的)和塊石(有稜角的)	粗 的	大于800
	中 的	800—400
	小 的	400—200
卵石(滾圓的)和碎石(有稜角的)	最粗的	200—100
	粗 的	100—60
	中 的	60—40
	小 的	40—20
礫石(滾圓的)和石屑(有稜角的)	粗 的	20—10
	中 的	10—4
	小 的	4—2
砂土粒(砂)	最粗的	2—1
	粗 的	1—0.5
	中等的	0.5—0.25
	小 的	0.25—0.10
	更小的	0.10—0.05
粉狀顆粒(粉土)	粗 的	0.05—0.01
	小 的	0.01—0.005
粘土粒	粗 的	0.005—0.001
	細 的	小于0.001

關於土壤組成的概念可以從其機械分析中得到。

由於機械分析的結果，可以得到土壤機械分析曲線。在此曲線上，沿橫座標軸綫（通常用對數比例尺）量取土壤的顆粒直徑，而沿縱座標軸綫量取小於該直徑的土壤顆粒總重與所研究的全部土樣重量之比的百分數。

在圖 1 上載有不同土壤的機械分析曲線的舉例。

在土壤中含有比某一粒徑組直徑小的土粒佔 10%（按重量計）時，則此直徑稱為土壤顆粒的有效直徑 d_e 。在土壤中含有比某一粒徑組直徑小的土粒佔 60%（按重量計）時，則此直徑稱為控制直徑 d_0 。 d_e 和 d_0 的數值可以由機械分析曲線上得到，如圖 2 所示。比值 d_0/d_e 稱為土壤的均勻系數。在十分均勻的土壤中，此系數



等於1。在土壤顆粒之間存在有為水或空氣所充滿的間隙，即孔隙，而滲透就沿着這些孔隙發生。土樣的孔隙容積 W' 與等於孔隙和土壤顆粒容積之和的土樣總容積 W 之比值，稱為土壤孔隙率：

$$m = \frac{W'}{W} \quad (1.1)$$

土壤孔隙率通常用百分數表示：

$$m\% = 100 \frac{W'}{W} \quad (1.2)$$

圖1 土壤孔隙率用實驗方法來確定。

如果土壤是由同樣直徑的球形顆粒所組成，則根據球體相對位置的性質，這種假想土壤的孔隙率可能在0.259到0.476之間變化。實際上，土壤是由不同形狀和大小的顆粒所組成的。因此，天然土壤的孔隙率在更大的範圍內變化。

在表2中列有各種土壤孔隙率的概略資料。天然粘土類土壤的孔隙率多取決於土壤的壓實程度。

当粘土类土壤压实得很好时，其孔隙率数值就可能比在表 2 中所列的数值小好几倍。土壤孔隙率与压力间的关系，可用实验方法绘制压缩曲线来确定。

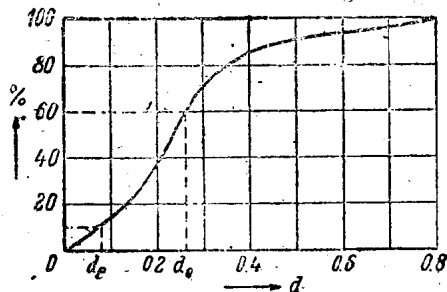


图 2

在岩石类土壤中，在极大多数的情况下，渗透系沿着形状和大小极不相同的裂缝进行的。裂缝的宽度实际上在从一公厘的若干分之一（次毛细裂缝和毛细裂缝）到几公分之间的范围内变化。对于多裂缝的岩石类土壤也可采用关于缝隙率的概念。

试样的裂缝容积与其总容积之比称为缝隙率。缝隙率实际上在很大的范围内变化。

表 2

土 壤 名 称	孔 隙 率
礫石(顆粒直徑 2~20公厘)	0.30~0.40
砂(顆粒直徑 0.05~2公厘)	0.30~0.45
砂質壤土	0.35~0.45
壤土	0.35~0.50
粘土	0.40~0.55
泥炭土	0.60~0.80

§3. 渗入土壤中的水的分类 水在土壤中可能处于不同的状态：成蒸汽状态包含在土壤孔隙中；成束缚水状态受土粒间吸引力牵制，以薄膜形式包围着土壤颗粒；成毛细水状态充满于孔隙或裂缝中，并且表面张力(毛细力)作用较重力作用占优势；成重力水或游离水状态，主要受重力作用而运动。

在通常的水利技术实践情况下，我们所遇到的渗透是重力水

和毛細水的滲透。

但是，当有很大的压力时，束縛水也可能移动，例如在紧密粘土类土壤中的束縛水。

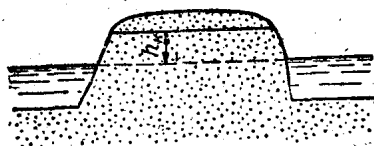


图 3

毛細水在受大气压力的自由水面以上形成毛細区域（图 3）。在毛細区域内，压力將小於大气压力，同时，在毛細区域上部各点上（直接位於弯液面之下）的压力

$$p = p_a - \gamma h_k, \quad (1.3)$$

式中 p_a ——大气压力；

γ ——液体的比重；

h_k ——毛細上升高度。 h_k 的数值取決於孔隙的大小和形狀，並用实验室的或野外的方法来确定。

在表 3 中列有 h_k 的概略数值。

表 3

土 壤 名 称	h_k (公分)
礫質砂	0~10
純淨的粗、中、細顆粒砂	10~50
粉砂	50~150
粘土質砂	20~100
粉狀粘土質砂	100~200

“水的毛細状态”的概念如应用於細小多孔的粘土就失去其意义了，因为在粘土中水是束縛着的。水的毛細上升速度對於不同的土壤是很不相同的。此外，此速度随時間而变化，同时随着接近於最大毛細上升高度 h_k 而减小。例如，根据 Ф. П. 沙瓦林斯基對於粘土类土壤的觀察，最初毛細上升速度約为 70 公分/晝夜，而在开始实验后經過 200 天，就大約减少到千分之一。在砂土中毛細

上升速度是很高的。

毛細水本身可以形成完全没有空气的毛細区域。在毛細区域的某一部分中可能是一些联通的空气孔隙，在这些孔隙中的压力与大气压力相差很少。例如，当水从渠道向土壤渗透时就可能发生这种情况。最后，在毛細区域的某一部分中，毛細水可能仅处于狭小的互相不联通的孔隙部分。相互间不连接的水质点的移动只能在垂直向下的方向进行。在毛細区域的这一部分中有大气压力。这种情况在水从上面向土里渗入不多时可能发生。

当地下水位下降时，在毛細区域内并非所有的孔隙空间都空出来了，而只是其中的一部分。束缚水和大部分的毛細水都还留在孔隙内。在重力作用下而排出的水的容积 W'' 与土壤的总容积 W 之比，称为出水率或土壤出水率：

$$m' = \frac{W''}{W} \quad (1.4)$$

很显然，出水率比孔隙率小。出水率的大小取决于土壤孔隙的大小、水从土壤排出的持续时间、土壤的温度和土壤的矿物成分。出水率可以用实验室的及野外的方法来确定。在表4中列有研究饱和砂的出水率时所得到的概略资料。

表 4

有效直径 d_e (公厘)	0.475	0.185	0.155	0.118	0.083
在 0.5 小时内的出水率	0.107	0.078	0.056	0.016	0.013
在 1 小时内的出水率	0.156	0.133	0.103	0.029	0.022
在 9 昼夜内的出水率	0.243	0.228	0.201	0.158	0.134
在 2.5 年内的出水率	0.269	0.255	0.220	0.185	0.155

由表4可知：砂的粒徑愈小，出水率就愈小，同时水从孔隙中排出就愈慢。

当地下水位上升时，水不是充满土壤中全部孔隙容积，而只是充满了除去原保留在土壤孔隙中的水分以外的孔隙容积。孔隙的自由容积与土壤总容积之比称为饱和不足系数或土壤的饱和不足度。很显然，土壤的饱和不足度是与出水率相类似的系数，同

时在很多情况下，与出水率在数量上相等。

水从地表面渗入土壤称为下渗。下渗系由于大气降水以及人工措施(例如进行灌溉)所造成。下渗强度是地表面水平投影单位面积上所下渗的水量数值。此数值具有速度因次，以后用 ε 表示；同时此数值可以根据地区由水文资料来确定，或者根据相当的工程措施的用途由技术资料来规定。

蒸发强度是从地表面水平投影单位面积上所蒸发掉的水量数值。此数值也用 ε 表示，但与下渗强度在符号^①上不同。

下渗强度或蒸发强度与土壤渗透系数(K)之比是无因次的数值：

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{K} \quad (1.5)$$

此值亦可称为化引下渗(蒸发)强度。

§4. 渗透水流的概念 在研究渗透时，系以同样液体的假想渗透水流来代替在孔隙中和裂缝中液体的真实水流，並認為这种假想渗透水流是不间断地充斥于土壤所佔有的全部容积中。同时，通过土壤容积中任何面积的假定渗透水流的流量，应该与通过同一面积的真实水流的流量相等。在此面积上的渗透水流压力也等于真实水流在其上的压力。在渗透水流中任意取出的容积上所受到的渗透水流的阻力，应该等于同样容积中的真实的阻力。

在此面积内的渗透水流平均流速称为平均渗透速度。在此面积的孔隙或裂缝内的平均流速 v' 与平均渗透速度 v 的关系，可用下式来表示：

$$v = mv', \quad (1.6)$$

因为 $m < 1$ ，所以 $v < v'$ 。

如减小在渗透水流中所取出的面积的尺寸，则在极限时我們得到在給定点的渗透速度。

渗透速度在渗透水流所佔据的容积内連續地分布。

^① 此处所指的“符号”，不是指蒸发强度或下渗强度的代表字母，而是指同一字母本身所具有符号；如正、負号。——譯者