目　　录

绪　言 …… (1)
第一章　包气带水的赋存形式与渗流特征 …… (4)
　第一节　包气带水的赋存形式 …… (4)
　第二节　毛细作用机制及毛细水的迁移特征 …… (4)
　第三节　包气带的水分分布特征 …… (9)
第二章　包气带水的垂向渗流机制研究 …… (15)
　第一节　给水度的概念及定义的探讨 …… (15)
　第二节　无蒸发、无入渗条件下砂柱释水实验研究 …… (16)
　第三节　蒸发条件下的砂柱释水实验研究 …… (27)
　第四节　重力释水的影响因素 …… (36)
　第五节　层状土的释水特征 …… (38)
第三章　包气带水的横向渗流机制研究 …… (42)
　第一节　两河渠间稳定流场中包气带水流特征 …… (42)
　第二节　两河渠间稳定流场潜水面的非流面问题研究 …… (50)
　第三节　“渗出面”问题的研究 …… (51)
　第四节　渗流速度的分布机制研究 …… (54)
第四章　孔隙-裂隙介质包气带水流特征研究 …… (58)
　第一节　概述 …… (58)
　第二节　黄土包气带水的渗流试验研究 …… (58)
　第三节　黄土包气带水渗流机制分析 …… (65)
第五章　包气带水运动的定量研究基础 …… (67)
　第一节　包气带水运动的达西定律 …… (67)
　第二节　包气带水运动的基本方程 …… (68)
　第三节　包气带水动力参数的确定方法概要 …… (72)
第六章　包气带介质环境特征研究 …… (89)
　第一节　介质环境作用概要 …… (89)
　第二节　黄土的物质组成与结构特征研究 …… (90)
第七章　包气带水文地质应用 …… (101)
　第一节　有渗流坝体应力分布特征 …… (101)
　第二节　放射性废物的包气带地质处置方案 …… (103)
参考文献 …… (107)

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

绪　　言

一、包气带水文地质学研究的内容和作用

包气带水文地质学是研究地面以下，潜水面以上地下水的科学。它是传统的水文地质学、土壤水科学与其它相关学科之间交叉延拓和发展的分支科学。它研究包气带水在不同的介质环境和边界环境作用下的迁移和变化规律，并在此基础上研究相关学科如何有效地应用这些规律，以期达到兴利避害的目的，从而建立相应的理论体系和应用方法。

在自然界的水循环过程中，包气带水是大气降水、地表水与地下水连接的纽带。无论对渗流本身，还是作为溶质迁移的载体，包气带水在水资源、农田灌溉、排水、生态平衡、工程地质和环境问题的研究中都占有重要的地位。因此，包气带水渗流的微观机制、宏观规律的研究成为人们关注的重要问题，已在水文地质学、工程地质学、土壤水力学、环境地质学及其它相邻学科中逐渐开展。

对于水文地质学科来说，随着包气带水研究的深入开展，势必推动水文地质学基础、地下水渗流理论等方面的延拓与发展，也将促进现行的地下水资源评价方法、溶质迁移理论的改进与发展。

对工程地质学科来说，由于地下水的研究扩展到包气带水，使得与此相关的土体工程地质中的坝体渗流、库区回水、边坡稳定等问题的研究范围亦相应扩展。

靠近地面表层土壤中的土壤水是包气带水的重要组成部分，是各种陆地植物的生长基础。土壤水量和溶质含量与作物的生长息息相关。土壤盐碱化的形成与防治都与包气带水的赋存形式和运移特征有密切的关系。

近年来世界各国都在考虑或已实施在大厚度包气带地层中或包气带之上的地表有利部位处置中、低水平放射性废物、工业废物或生活废物，在放射性核素和其它有害元素向人类环境迁移过程中包气带水流是其主要载体。因此，研究包气带水流的微观机制和宏观定量方法不仅可以解决包气带水渗流的基础理论问题，而且可以解决各种废物地质处置过程中的一些技术方法问题。

二、包气带水文地质学的研究与发展

包气带水的研究方法包括形态学研究和能态学研究两个方面，前者是基础，后者是深入。二者相辅相成。

最初包气带水的研究是从土壤水研究开始的，非饱和土壤中的水分问题一直是土壤水和土壤物理研究的一个重要方面。18世纪后期，人们开始采用形态学的观点，定性地描述和分析土壤中的水分赋存特征和运动特征。前苏联学者在本世纪40年代、我国学者在50年代至60年代早期都先后用形态学方法深入地研究了土壤水的形成、分布状态和迁移特征，建立了土壤水的学科分支。80年代至90年代初，由于水文地质学科研究向包气带水扩展，我国许多水文地质学者在形态学研究方面取得了深入的进展。在包气带水的均衡实验、数值模拟、水动力参数的测定方法、零通量面的理论与应用研究等方面做了大量的工作，其

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

中也有人研究了凝结水对沙漠的补给作用．冻结作用对包气带水的迁移和及对道路的危害等问题。

微观形态学的研究方法陆续解决了包气带水的形成、赋存和迁移规律等方面的基本理论问题，也为各相关学科的延拓和交叉发展奠定了基础。但是形态学的方法却不能在宏观上定量地描述包气带水的运动。

在本世纪初，能态学的方法开始被引用到包气带水的研究中。Buckingham (1907) 和Willard-Gardner (1921)都先后采用能态学观点研究了包气带水的运动。但是他们对包气带水的定义既不全面，也没有说明他们所建立的流量公式与达西定律之间的联系。

L. A. Richard(1928)在对包气带水进行研究时，定义了总水势，并把饱和流的达西定律引入到非饱和流中，建立了非饱和流达西定律。引用非饱和流达西定律的非饱和流连续方程被称为Richard方程。经30年代至50年代的发展和逐步完善，特别是60年代至70年代以后，由于计算机的推广应用和各学科研究的交叉渗透，使包气带水的研究从基础理论到应用方法、从定性分析到定量计算、从方程的研究到水动力参数和介质特征的测试技术、测试方法、以及不同条件下相应的数学模型的研制和应用都得到飞速的发展。在80年代，我国各相关学科的学者从不同角度对包气带水(包括溶盐)进行了深入的研究。对非饱和水分特征曲线、水力扩散度、非饱和渗透系数、土体含水量、溶质的弥散系数等参数的测定方法和不同边界条件下的水、溶质和热流的数值模型、模拟方法、包气带水均衡特征及相应的解法等方面都取得了长足的进展。包气带水动力学的研究体系基本形成。雷志栋、杨诗秀、谢森传等先生的《土壤水动力学》一书的问世无疑是这方面研究成果的总结和体现。

与此同时，由于各种废物，特别是放射性核废物处置的需要，欧美学者对坚硬的孔隙-裂隙双重介质中包气带水流特征和数学模型的研究取得了很大的进展。

近年来，作者在研究中取得了以下几方面的新认识：

1．包气带水的垂向渗流(包括重力释水的作用)机制和横向渗流机制问题。作者认为在包气带中既有单相(水)的渗流过程，也有二相(水、气)的渗流过程。二相渗流的显著特征是水气界面的迁移。从整个包气带看，入渗水分下渗的过程，通常伴随着水气界面的迁移，属于二相渗流过程。可是，一但下渗水流与支持毛细水柱相接后，又可以形成水的单相渗流过程。支持毛细水的垂向运移，也伴随着水气介面的迁移，是二相渗流过程。不等径葫芦状毛管网络模型直观形象地表现了多孔介质的空隙特征，用于描述包气带水的二相渗流过程是可行的。作者据此分析了重力释水的过程，认为重力释水只与释水后的潜水位以上的原饱水带及其相联系的支持毛细水带有关。作者还重新定义了给水度，并通过实验研究了不同条件下的实测给水度与理论给水度的关系。

2．包气带水的垂向渗流与横向渗流是密切相关的有机整体，那一种运动形态占主导地位，取决于整个渗流场的动力条件。实验研究的结果证明，支持毛细水能传递静水压力，与饱水带构成统一的渗流场，进行着垂向渗流和横向渗流。在无入渗、无蒸发的两河渠间渗流场中，存在着高速横向渗流带，分布在潜水面以上的毛细饱水带和两河渠底界连线以上的饱水带。在支持毛细水不饱水带中，影响渗流速度大小的主要因素是流管径的大小，其次是流程的长短。支持毛细水的补给和排泄都是通过潜水面进行的，因此潜水面不是流面。用虹吸管束模型可以描述支持毛细水的渗流过程，在毛细饱水带用等径的虹吸管束模型，在毛细不饱水带用不等径的虹吸管束模型。实验和机制研究的结果证明，该条件在排

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水河渠边壁的凌空面不存在“渗出面”，所谓的“渗出面”的部位实际上是流面。

3．为了解决有害废物浅地层处置的安全性评价问题，作者在松散的孔隙-裂隙双重介质（如黄土）包气带水流和溶质的迁移特征方面又进行了深入的研究。作者根据实验和机制研究的结果提出：孔隙-裂隙双重介质中的裂隙对非饱和水流不起导水作用，在包气带水流和溶质迁移的定量研究中，可以将孔隙-裂隙双重介质概化为单一孔隙介质，这就大大地简化了数学模型和计算上的难度。非饱和流状态下的水流屏蔽效应及水流屏蔽介质结构既解决了包气带水流理论问题，又为在包气带地层处置有害废物新技术的提出奠定了基础。在放射性废物、工业废物和城市垃圾的地质处置方面，这种非饱和水流屏蔽技术具有广泛的应用前景，它不仅安全可行，而且可以节省大量的处置费用。陈家军等（1992）用非平衡吸附-解吸模型成功的模拟了放射性核素在包气带中的迁移过程。

今后，包气带水文地质的研究范围将进一步扩大。随着包气带水文地质理论体系的形成和逐渐完善，将在农业地质、水文地质、工程地质、环境地质、环境评价、环境工程等相关问题的研究中得到广泛的应用。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第一章　包气带水的赋存形式与渗流特征

第一节　包气带水的赋存形式

如图1-1所示，地表以下的一定深度上存在着地下水面。地下水面以上，岩石空隙中没有充满水，包含有空气，称为包气带；地下水面以下，岩石空隙全部为水所充满，称为饱水带。在包气带中，水分以支持毛细水、悬挂毛细水、孔角毛细水及结合水的形式存在。结合水吸附在空隙的壁面上。细小的介质孔隙通道构成毛细管。在毛细力的作用下，与潜水面相连的毛细水可以保持一定的高度，称为支持毛细水。所有的支持毛细水一起形成支持毛细水带。在支持毛细水带以上的包气带中，由于毛细管上、下弯液面的毛细力的作用，在较细的毛细管中会保留与地下水面不相连接（当然也不与支持毛细水相连接）的毛细水，这种毛细水称为悬挂毛细水；孔角毛细水（也称触点毛细水）悬留在包气带中的颗粒接触点上。

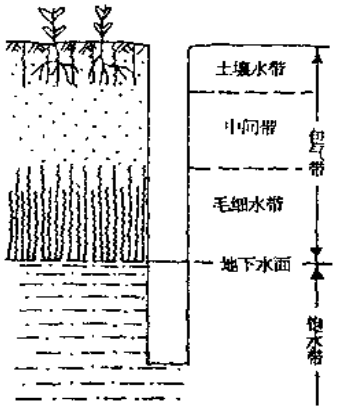


图1-1 包气带和饱水带

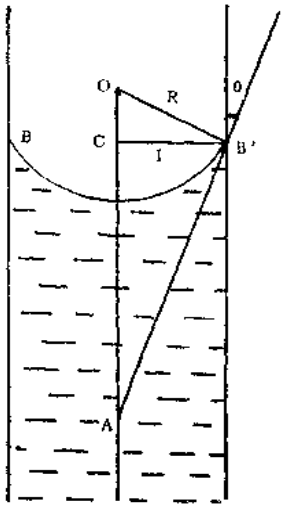


图1-2 圆筒状毛管中的弯液面

第二节　毛细作用机制及毛细水的迁移特征

一、毛细作用

在盛有溶液的容器壁上，液体表面的弯曲是由于湿润现象（具表面能的固体表面与水相互作用的结果）引起的。水对大部分物体皆湿润良好，但湿润角很少达到 0°。只有十分干净的玻璃、二氧化硅和金属的表面，湿润时的湿润角才能达到 0°。如果容器的直径

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

很小，以至能以水液面紧贴容器表面弯曲部分的曲率半径来衡量，则此弯曲部分就融合起来形成凹形弯液面。实际上，能形成弯液面的管径上限大约为几毫米。在圆筒状的毛细管中，弯液面的曲率半径 R 与毛细管的半径 r 之间满足式：

$$r = R \cdot \cos\theta \tag{1-1}$$

在完全湿润的情况下，$\theta = 0$，则 $R = r$ 。式中的 r、R、θ 如图1-2所示。圆管的直径愈小，弯液面的曲率愈大，也就是曲率半径愈小。液体表面的弯曲会改变表面压力值。如图1-3所示，凹形的弯液面使表面压力 P 值减小，凸形的弯液面使表面压力 P 值增大。这时实际表面压力 P 值与标准大气压力 P_a 的差值为：

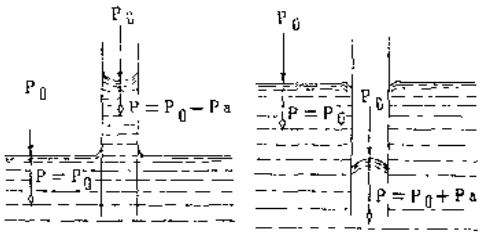


图1-3 毛细现象

$$P_0 = P - P_2 \tag{1-2}$$

其中 P_0 称为附加表面压力。根据拉普拉斯公示，有：

$$P_0 = \alpha(1/R_1 + 1/R_2) \tag{1-3}$$

式中，α ——水的表面张力系数，在标准状态下 $\alpha = 0.0074\,N/m$；

P_0 ——任意形状的弯液面所产生的附加表面压力；

R_1、R_2 ——液体表面的两个主要曲率半径。

当液面为凸形时，附加表面压力是正值。此时，实际表面压力 $P = P_a - P_0$ 。当液面为凹形时，附加表面压力是负值。故实际表面压力 $P = P_a - P_0$ 。平的液面不产生附加表面压力，故 $P = P_a$ 。

在圆筒状毛细管中，$R_1 = R_2$ ，弯液面产生的附加表面压力为：

$$P_0 = 2\alpha / R \tag{1-4}$$

二、支持毛细水的特征

将圆筒状毛细管插入水中。在附加表面压力的作用下，水会沿毛细管上升，直到毛细水柱压力值与附加表面压力值相等时，才停止上升。由1-1和1-4两式有：

$$P_0 = 2\alpha \cdot \cos\theta / r \tag{1-5}$$

又有，

$$P = h_0 \rho g \tag{1-6}$$

式中，h_0 ——毛细水柱高度；

ρ ——水的密度；

g ——重力加速度，$g = 981\,cm/S^2$。

在克·厘米·秒单位制中，当完全湿润（$\theta = 0$）时，由1-5和1-6式，可得茹林公式：

$$h_0 = 2\alpha \cos\theta / r g \approx 0.15/r = 0.3/d \tag{1-7}$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

式中 d (cm)为毛细管直径。1-7式说明毛细管内水的上升高度与毛细管的直径成反比。而毛细管的直径愈小，水的上升速度愈慢。这是因为随着毛细管的直径变小，其摩擦阻力值急剧增大，降低了水的上升速度。直管中毛细水的迁移规律，可作为进一步讨论的基础。

为了便于说明包气带中毛细水的特征，下面研究胡芦状毛细管中（如图1-4所示）的水分变动问题。毛细管的直径呈周期性的粗，细相间，犹如一个个圆胡芦串连而成的一系列粗细相间的孔隙，每个孔隙的粗径和细径都相同。图1-4中的b、c为两支普通的圆筒状毛细管。其中粗径毛细管的半径为 r_1，它等于胡芦状毛细管中粗径部位的半径；细径毛细管的半径为 r_2，它等于胡芦状毛细管中细径部位的半径。如图1-4的方式将这三支毛细管的末端置于水中，毛细管b和c中水的上升高度分别为 h_1 和 h_2。胡芦状毛细管吸水过程中，毛细水每上升一节胡芦管都要经过一个胡芦管的粗径部位。由1-7式可知，如胡芦状毛细管的粗径 r_1 与该节胡芦管的大径部位在自由水面之上的高程值 Z_d 之间的关系满足式：

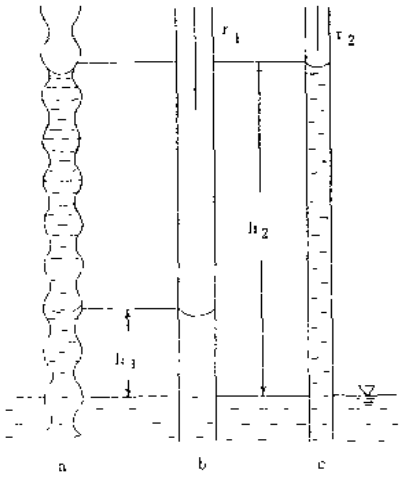


图1-4 胡芦状毛细管中的水分平衡

$$r_1 \leqslant 2\alpha \cdot \cos\theta / Z_d \rho g \qquad (1-8)$$

则胡芦管中的毛细水高度 H_1 等于或稍高于（不超过一节胡芦管的高度）半径为 r_1 的粗径毛细管b中的支持毛细水高度 h_1。H_1 称为胡芦状毛细管的毛细上升高度。

将这三支毛细管全部没入水中，充满水后再把它们上升到原来的位置。这时，两支圆筒状的毛细管b和c中的水位仍在各自原来的位置。但是，在胡芦状毛细管中将是另外一种情况。胡芦状毛细管的排水过程中，毛细水每下降一节胡芦管时，都要经过一节胡芦管间的细径部位。如胡芦状毛细管间的细径 r_2 与该细径部位在自由水面之上的高程 Z_d 之间的关系满足式：

$$r_2 \geqslant 2\alpha \cdot \cos\theta / Z_d \rho g \qquad (1-9)$$

时，弯液面才能通过该细径部位。所以，胡芦状毛细管a排水时，毛细水的最终高度 H_2 保持在等于或稍低于（不超过一节胡芦管的高度）半径为 r_2 的细径毛细管c中支持毛细水高度 h_2。H_2 称为胡芦状毛细管的毛细保持高度。对比1-7和1-8两式，显然：

$$H_1 > H_2 \qquad (1-10)$$

就是说，胡芦状毛细管中排水时的毛细保持高度要高于吸水时的毛细上升高度。

三、悬挂毛细水的变动特征

为研究方便起见，首先讨论圆筒状毛细管中的悬挂毛细水，然后讨论胡芦状毛细管中的悬挂毛细水。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

取一根圆筒状毛细管，半径为 r，悬空放置。从上面慢慢地向管中加水，注意不能产生气泡。对图1-5所示的a、b、c三种情况进行分析。其中图1-5a表示最初一段时间，毛细管内形成不太高的水柱悬挂在毛细管的底部。毛细水柱的上下弯液面都向内凹。毛细水在上下弯液面和重力的共同作用下平衡。其中水柱的重量为：

$$W = \pi r^2 h \rho g \qquad (1-11)$$

在单位面积（1 cm^2）上由重力产生的压强 q 为：

$$q = W / \pi r^2 = h \rho g \qquad (1-12)$$

q 也称为重力压力。上弯液面的附加表面压力为 P_{c_1}，下弯液面的附加表面压力为 P_{c_2}，它们均为负值。而且有：

$$P_{c_1} = q + P_{c_2} \qquad (1-13)$$

这就是毛细管中悬挂毛细水柱的平衡条件。由3-4式，则有：

$$h \rho g = 2\alpha / R_1 - 2\alpha / R_2$$
$$= 2\alpha (1/R_1 - 1/R_2) \qquad (1-14)$$

式中 R_1、R_2 分别表示毛细柱上下端弯液面的曲率半径。因为 $h \rho g$ 恒为正值，因此 $R_1 < R_2$。即上端弯液面的曲率半径，应该小于下端弯液面的曲率半径。只有在这种条件下，上端弯液面所形成的附加表面压力才会大于下端液面的附加表面压力。这两个附加表面压力的差值自下而上，与自上而下方向的重力压力相平衡。

如果继续向毛细管中加水，随着水柱高度 h 的增长，1-14式中的 $h \rho g$ 不断增大，就是 $2\alpha (1/R_1 - 1/R_2)$ 增大。假定其上端弯液面的曲率半径是不变的，并且有 $R_1 = \cos\theta / r$，式中 θ 为湿润角。因为 α 值是不变的，则1-14式的右端随 R_2 的增大而增大。就是说，下端弯液面的曲率半径将随着水柱高度的增长而减小。最后达到图1-5 b的情况，即下端弯液面为平面，则 $1/R_2 = 0$，下端弯液面的附加表面压力为0，面有：

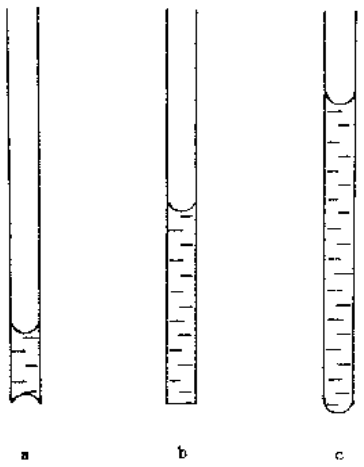


图1-5 圆筒状毛细管中的悬挂毛细水

$$h \rho g = 2\alpha / R_1 \qquad (1-15)$$

成为与1-4式相同的形式，这时悬挂毛细水柱高度等于支持毛细水柱高度。

当 h 进一步增大时，下端弯液面变成下凸的形状。其附加表面压力为正值，方向由下向上。这时要将1-13式改为：

$$q = P_{c_1} + P_{c_2} \qquad (1-16)$$

即：

$$h \rho g = 2\alpha (1/R_1 - 1/R_2) \qquad (1-17)$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

这种情况如图1-5c所示。随着水柱高度增加，下端弯液面的曲率将一直增大到在毛细管下端弯液面断裂形成水滴自由坠落时为止。这时水柱高度 h 达到最大值。

现在再来讨论悬空放置的胡芦状毛细管中的水位变动问题。与圆筒状毛细管不同，水在胡芦状毛细管不仅能在下端悬持，而且能在上端和中部悬持。

任取一空的胡芦状毛细管，如图1-6所示。从其上端慢慢加水。落入串珠状毛细管上端粗径部位的第一滴水将立刻进入该毛细管最上部的细径部位。这是因为串珠状毛细管细径部位比粗径部位水形成的弯液面曲率大（如图1-6a所示），水滴重力压力与上下弯液面附加表面压力的合力总是把水滴赶入细径部位悬持。显然，这时水滴处于细径中心稍向下一点的位置。只有在这种条件下，上端弯液面才比下端弯液面具有稍大的曲率，它们的附加表面压力差与水滴重力压力相平衡。

再向管内慢慢加水，形成串珠状水柱。在其长度和重力压力逐渐增加的同时，上下两端弯液面曲率差值亦随之增大，使得串珠状水柱保持在毛细管的上端。二曲率差的增加，意味着下端弯液面越来越靠近串珠状毛细管粗径部位（如图1-6b）。重力压与上下弯液面附加表面压力相抗衡，而某一孔径下毛细水弯液面附加表面压力值是有限的。与重力压力相关的毛细水柱高度以最大毛细保持高度为限。当悬挂毛细水柱高度等于最大毛细保持高度时，上弯液面附加表面压力达到最大值；这时下弯液面附加表面压力为0。毛细力会吸引下弯液面使悬挂毛细水的平衡破坏而向下迁移。就是说，毛细水的下边界处于0压或正压状态下一定会向下迁移。

由于种种原因，在毛细管中往往产生空气阻塞。这种情况下，胡芦状毛细管细径部位所形成弯液面的附加表面压力大于其粗径部位弯液面的附加表面压力。水被吸到毛细管的细径部位形成孔角毛细水，气泡就占据了毛细管的粗径部位（如图1-7所示）。无论是悬挂

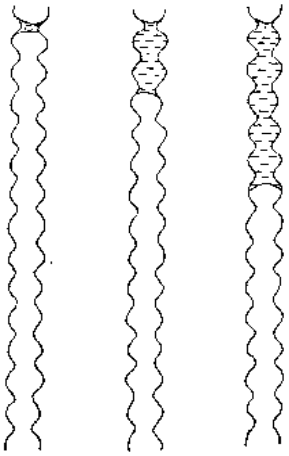


图1-6 胡芦状毛细管中的悬挂毛细水



图1-7 胡芦状毛细管中的孔角毛细水

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

毛细水还是孔角毛细水都被弯液面的附加表面压力所限制，彼此隔断，不能传递静水压力。

第三节　包气带的水分分布特征

一、包气带水分分布的测定试验

选取纯净的干燥石英砂，经筛析后，选取了粗砂（粒径为0.5～1mm），中砂（粒径为0.3～0.5mm），细砂（粒径为0.1～0.25mm）进行实验，测试吸水和释水情况下的水分分布特征曲线。实验使用可分节的透明有机玻璃圆筒，直径为4.25mm，长度分别有1cm，2cm，4cm三种，按不同砂样的需要进行连接、密封，作为实验砂柱的护壁。

为了克服装样的不均匀性，利用分次薄装、勤捣实的办法进行装样。每次装样厚约1cm左右。记录装样总重量，按砂样体积求得干容重。

首先进行吸水实验。砂柱的底界为透水滤网，放在碳化硅砂石片上，如图1-8所示。该砂石片透水性良好。保持供水水位在砂柱底界的高程，由于毛细力的作用，水即沿着砂柱上升。同时在水中滴入少量红色示踪剂，可以清晰地显示出水锋在孔隙中的跳跃性上升过程。宏观上看，初期水锋上升的很快，后期的水锋上升过程越来越慢。整个吸水过程持续48小时。试验停止后，立刻将砂柱分节取样、称重、烘干，再称得干砂重。按干容重换算出各砂样体积和所含水的重量，求得各节砂样的平均含水量值。各组砂样测试及计算数据见表1-1、表1-2、表1-3。

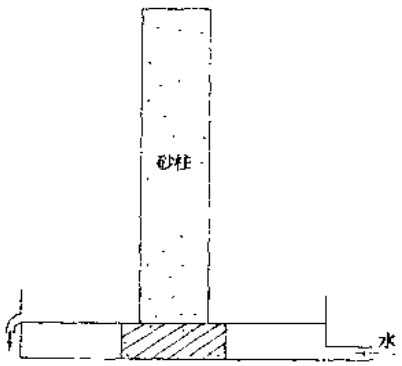


图1-8 吸水试验装置示意图

排水试验重复上述过程装样，将砂样饱水后再释水，释水水位仍保持在砂柱底界水平上，释水过程持续24小时，然后分节测试并计算含水量的有关数据见表1-4、表1-5、表1-6。

表1-1　吸水实验粗砂柱含水量数值计算表

测样号	1	2	3	4	5	6	7	8
水重(g)	0.947	3.32	4.875	5.515	6.560	6.075	6.920	6.347
干砂重(g)	3.778	17.84	21.735	21.486	23.188	21.280	21.150	22.150
干砂体积(cm³)	2.489	11.517	14.033	13.870	14.970	13.738	13.654	14.330
含水量(θ)	0.0261	0.2014	0.3474	0.3977	0.4375	0.4422	0.4336	0.4460

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表1-2　吸水实验中砂柱含水量数值计算表

测样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水重(g)	0.238	1.484	3.131	3.973	4.657	5.798	11.698	12.640	12.595	13.183	12.996	12.872
干砂重(g)	7.878	17.652	12.890	21.342	20.602	23.480	41.190	42.608	41.820	43.350	42.255	42.565
干砂体积(cm³)	5.418	12.061	15.042	14.665	14.157	16.447	28.303	29.209	28.736	29.787	29.238	29.245
含水量(θ)	0.0623	0.1313	0.2081	0.2709	0.3290	0.3695	0.4138	0.4293	0.4333	0.4426	0.4446	0.4401

表1-3　吸水实验细粗砂柱含水量数值计算表

测样号	1	2	3	4	5	6	7
水重(g)	1.094	5.446	19.837	23.745	24.719	24.070	26.416
干砂重(g)	42.720	41.790	84.564	86.726	89.486	88.015	89.399
干砂体积(cm³)	38.291	27.676	55.003	57.434	59.262	58.288	59.205
含水量(θ)	0.0387	0.2329	0.3642	0.4134	0.4171	0.4129	0.4462

表1-4　释水实验粗砂柱含水量数值计算表

测样号	1	2	3	4	5	6	7	8
水　重(g)	1.968	2.332	2.539	2.712	2.617	2.392	2.510	2.534
干砂重(g)	77.245	83.220	83.855	86.343	90.958	83.416	84.270	88.551
干砂体积(cm³)	51.088	55.040	55.460	57.105	60.167	54.507	55.734	58.552
含水量(θ)	0.0385	0.0424	0.0468	0.0476	0.0435	0.0439	0.0450	0.0435

测样号	9	10	11	12	13	14	15
水　重(g)	2.398	2.690	4.736	10.177	22.530	26.567	35.015
干砂重(g)	84.232	87.765	87.930	84.608	87.650	91.843	86.755
干砂体积(cm³)	56.709	58.046	58.156	56.958	57.970	60.743	56.716
含水量(θ)	0.0430	0.0463	0.0814	0.1819	0.3886	0.4374	0.4411

表1-5　释水实验中砂柱含水量数值计算表

测样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水　重(g)	3.930	3.167	3.428	3.319	3.847	3.430	3.883	3.735	4.094	3.972	4.385	4.374
干砂重(g)	84.285	85.060	85.726	84.046	85.886	84.564	84.695	85.668	86.516	85.367	86.520	87.627
干砂体积(cm³)	56.653	56.182	56.668	55.513	56.728	55.921	55.876	56.584	56.748	56.365	57.147	57.812
含水量(θ)	0.0626	0.0564	0.0605	0.0598	0.0678	0.0613	0.0696	0.0660	0.0721	0.0704	0.0760	0.0757

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表1-5

测样号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
水　重(g)	4.582	4.664	5.456	8.142	12.082	15.265	20.452	23.183	26.466	22.996	25.747	28.457
干砂重(g)	89.868	86.578	87.377	89.170	86.650	87.843	86.380	80.035	90.837	81.646	87.390	93.070
干砂体积(cm³)	59.35	56.628	57.718	58.897	57.186	58.020	57.054	52.863	59.668	53.861	57.665	61.473
含水量(θ)	0.077	0.0807	0.0946	0.1383	0.2113	0.2632	0 3555	0.4196	0.4436	0.4270	0.4466	0.4629

表1-6　释水实验细砂柱含水量数值计算表

测样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
水　重(g)	3.000	3.265	3.452	3.701	4.044	4.313	4.330	1.983	4.473	4.474	4.852
干砂重(g)	86.040	84.105	86.038	87.354	87.140	86.967	84.379	43.581	86.014	86.894	84.366
干砂体积(cm³)	56.880	55.405	56.879	57.646	57.404	56.692	55.586	28.775	56.004	56.254	55.677
含水量(θ)	0.0529	0.0590	0.0650	0.0643	0 0708	0.0762	0.0778	0.0689	0.0799	0.0844	0.0873
测样号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
水　重(g)	5.148	5.355	5.520	6.379	6.425	9.189	10.486	12.436	15.452	18.793	22.907
干砂重(g)	86.224	88.979	84.750	85.880	86.769	86.145	87.450	84.406	86.263	86.067	87.470
干砂体积(cm³)	56.156	55.323	56.830	56.674	57.160	56.749	57.609	55.603	56.237	56.015	57.623
含水量(θ)	0.0916	0.0964	0.1043	0.1128	0.1124	0.1619	0.1820	0.2337	0.2926	0.3239	0.3975
测样号	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
水　重(g)	24.801	24.501	24.582	24.666	24.812	24.281	26.080	24.588	26.492	25.118	26.686
干砂重(g)	87.799	87.165	88.275	86.838	87.420	85.807	87.061	86.410	89.994	87.441	88.761
干砂体积(cm³)	57.839	57.421	58.152	58.118	57.596	56.526	57.353	58.241	59.285	57.537	58.486
含水量(θ)	0.4238	0.4267	0.4227	0.4241	0.4208	0.4313	0.4372	0.4235	0.4464	0.4365	0.4563

按表1-1～表1-6的 θ 值与对应的各节砂柱中点至释水或吸水的水位面的高程值分别绘制出粗砂、中砂、细砂三组砂样的纵剖面含水量曲线，即水分分布特征曲线，如图1-9所示。

二、包气带水分分布的机制分析

如果该砂柱是从潜水面以上的包气带中取出的，则砂柱的水分分布特征曲线就是包气带的水分分布特征曲线。一般说来，在无蒸发及入渗的条件下，而且潜水位的埋深大于最大毛细保持高度时，可将包气带的水分分布特征曲线概化如图1-10所示。

曲线的纵座标是由潜水面算起的高度，称毛细负压，用 h 表示，横座标用(体积)含水率 θ 表示。这种水分分布机制可用不等径葫芦状毛管网络模型(图1-11)或等径的葫芦状毛管网络模型(图1-12)描述。

从本质上看，这两个模型都反映了大小不等的葫芦状毛管的毛细作用控制着包气带的

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水分分布，二者对描述该问题是等效的。但不等径葫芦状毛管网络模型更直观、清楚。图1-11所示的水分分布特征曲线下部含水率 $\theta > \theta_0$ 段，与支持毛细水带的水分相对应。

在葫芦状毛管网络中任取单根葫芦状毛管。如前所述，支持毛细水的保持高度大于吸水高度。因此，释水时的水分分布曲线 a（简称释水曲线）的中间部分高于吸水时的水分分

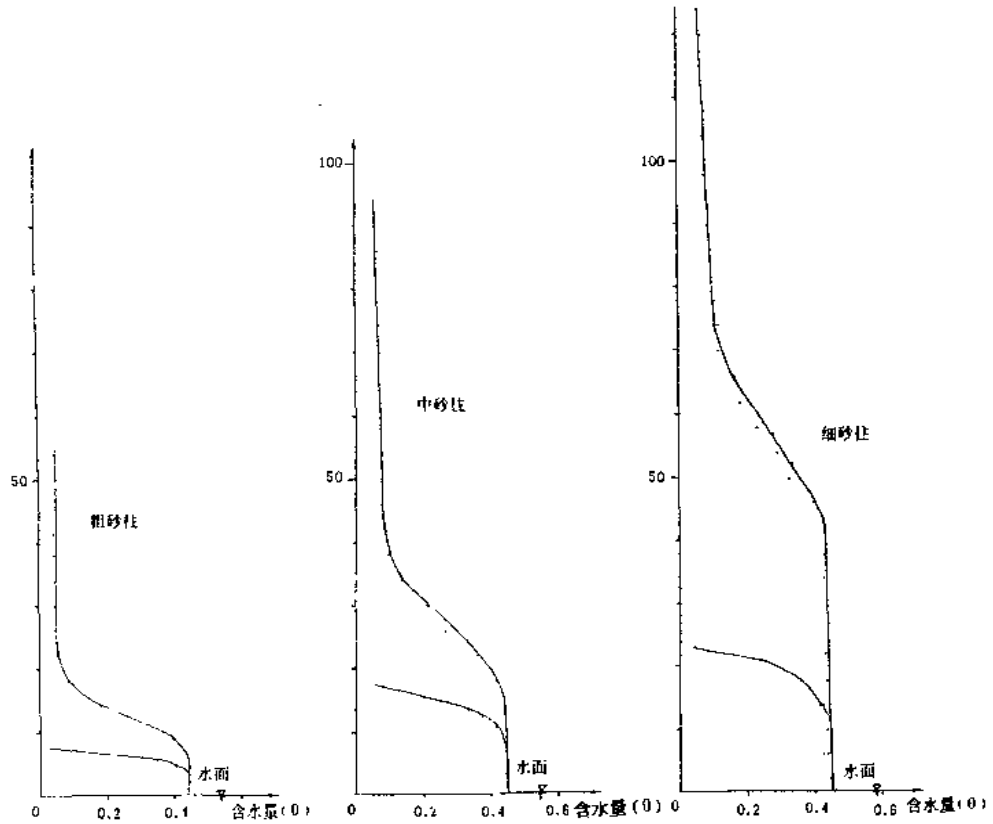


图1-9 实验砂柱水分分布特征曲线

布曲线 b（简称吸水曲线）的中间部分，其两端 $\theta = \theta_0$，$\theta = \theta_s$ 部分的曲线重合。

这种模型不仅恰当地描述了包气带的水分分布，而且使包气带水渗流的微观机制分析得以实现。

从科学方法论来看，所谓微观机制分析的方法，实质上是一种理想模型的理想实验过程。观察实验和抽象思维是科学研究中的两大武器，缺一不可，只有把两者有机地结合起来，才能导致重大的科学发现。理想模型是科学抽象的一种特定形式，它不仅运用科学抽象方法归结出研究对象的共同属性，而且进一步运用理想化方法，在思维上把这些属性引导到极限值上去。理想实验并非真实的物质实验，它是在人们的思维中进行的，即在思维中运用理想模型，塑造理想模型在理想条件下的运动过程，进行严密的辩证思维的一种理论研究的方法。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

可以说，不等径葫芦状毛管网络模型的建立，是宏观的包气带水动力学研究进入微观机制研究的的转折点。

三、包气带的水流特征概要

在包气带中，既有单相（水）的渗流过程，也有二相（水、气）的渗流过程。二相渗流的显著特征是水、气界面的迁移。何种运动形态占主导地位，取决于整个流场的动力条件。从整个包气带看，入渗水分下渗的过程，通常也伴随着水气界面的迁移，属于二相流体。可是，一但下渗水流与支持毛细水柱相接，形成自上而下的连续充水通道，又可以形成水的单相渗流过程。

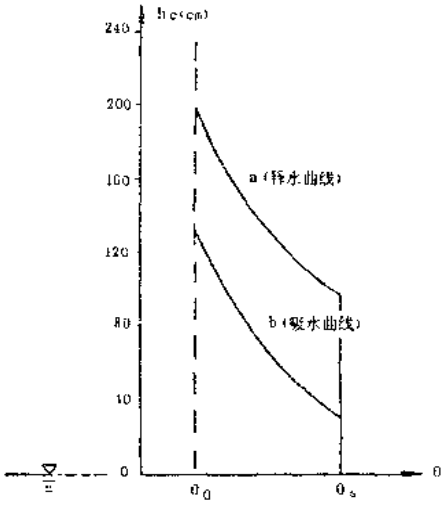


图1-10 包气带的水分特征曲线

无论是均质还是非均质的多孔介质，都具有不同等级大小的孔隙。这些孔隙互相连通构成纵横交错且狭阔不等的网络状通道。在饱水的情况下，这些通道的透水程度不同，其中相对大径断面通道中水的渗流对平均速度的大小起主导性的作用。

在毛细饱水带中，地下水的渗流特征与饱水带相同。而在毛细饱水带顶面以上的支持

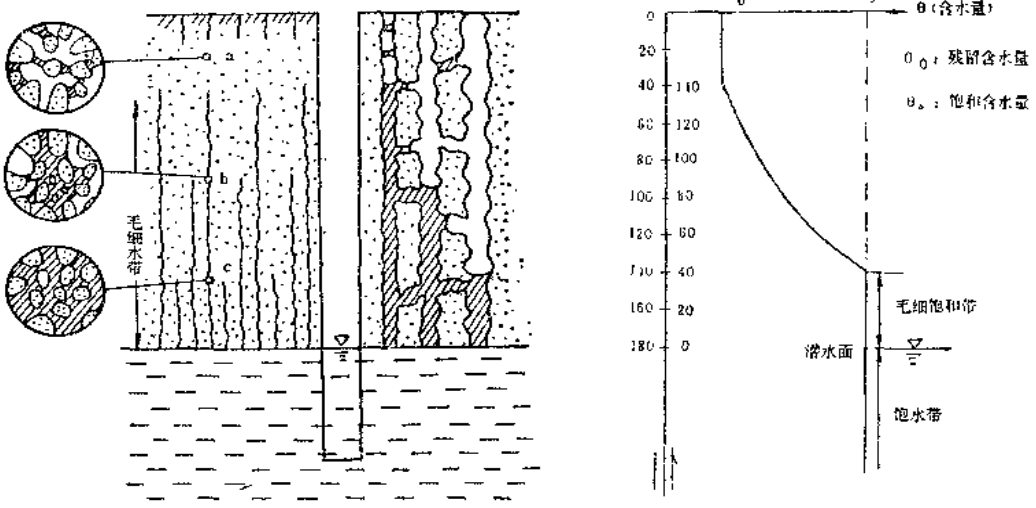


图1-11 不等径葫芦状毛管网络及均质土水分分布曲线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

毛细水带中，随着高度的增加，含水量逐渐减小：首先在较大的孔隙中失水充气，使网络通道中的大径断面渗流阻断；但在小一些的通道中仍然饱水，可以保持连续的纵横渗流。

对于等粒分布的均匀介质来说，介质对水作用的毛细负压值（有人也用吸力表达）随含水量变化。含水量增大时，介质对水作用的毛细负压值变小；反之，当含水量减小时，介质对水作用的毛细负压值变大。

对于层状分布的非均质结构，其中每一层都是等粒分布的均匀介质。在粗、细粒层交接的界面附近，粗粒层的含水量小于细粒层的含水量。两层介质的粒度差别愈大，则它们之间的含水量差别愈大。这是因为，在相同含水量的情况下，细粒层对水作用的毛细负压值大于粗粒层对水作用的毛细负压值。这时，粗粒层中的水分将向细粒层中迁移，直至粗、细两层介质对边界处水分作用的毛细负压值相等时为止。

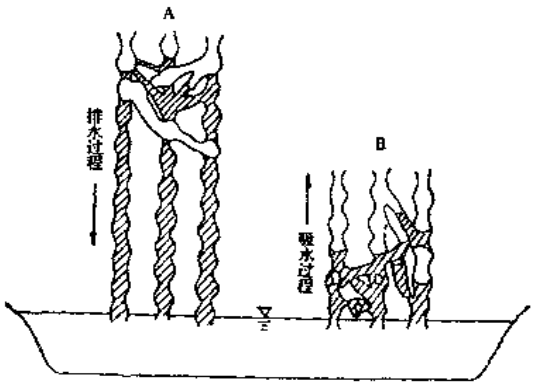


图1-12 等径葫芦状毛管网络模型

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第二章　包气带水的垂向渗流机制研究

包气带水的垂向渗流过程，大多伴随水气界面的迁移，属于水气二相流体问题，目前的研究中既考虑水气界面对垂向渗流的影响，又简化为纯水渗流过程。主要解决重力释水、蒸发、入渗、给水度的概念及其数值大小的影响因素等方面的问题。本章首先讨论了给水度的概念问题，给出了能确切反映重力释水本质的给水度定义。然后给出无蒸发、无入渗条件下和蒸发条件下的释水实验研究成果。同时讨论了重力释水的影响因素和层状土的重力释水特征等问题。

第一节　给水度的概念及定义的探讨

一、问题的提出

给水度的概念和定义是人们研究、认识地下水的产物。在以研究地下水流向集水建筑物为特征的“找水水文地质学(张入全，1986)”中，着重于饱水带的研究，认为给水度 μ 只与饱水带的重力释水有关；对某一具体的均质含水层来说，μ 为常量。随着研究、认识的不断深化，发现给水度不仅与饱水带有关，而且也与包气带的释水有关，它不是常量，故给水度的概念和定义也在不断地演变，且至今尚无较恰当的定义。

找水水文地质学中将给水度定义为“饱水岩石在重力作用下释出水的体积与岩石体积之比(王大纯等，1984)”。重力释水涉及多孔介质由饱和状态转为非饱和状态，它与包气带的水分分布规律密切相关，而这个定义没有反映包气带的作用，是不全面的。

J．贝尔(1972)将给水度定义为“当潜水位下降一个单位时，从潜水面延至地面的单位水平面积的土柱中所排出的水量(体积)”；陈崇希(1984)将给水度定义为“在单位水平面积多孔介质柱体(包括饱水带和包气带)中，当潜水位下降一个单位时，由于重力作用释放的水量”。这两个定义比前一个定义有了改进，反映了包气带水的地位，但都未能说明包气带水的哪一部分起作用，仍比较笼统。对饱水带来说，重力释水只在水位变动带发生，故上述 J．贝尔的定义中将(下降后的)潜水面作为土柱重力释水的下界是恰当的。

二、重力释水与包气带的关系

究竟哪部分包气带水与重力释水有关呢？如第一章中所述：在潜水面以上的包气带中，水分以支持毛细水、悬挂毛细水、孔角毛细水及结合水的形式存在。其中结合水和孔角毛细水不能在自身的重力作用下释出，就是说，这部分水与给水度无关。因此只要研究潜水水位变化时，支持毛细水和悬挂毛细水的变化特征，即可了解它们与重力释水的关系。仍在不等径葫芦状毛管网络模型中取出一葫芦状毛管，其上已存在悬挂毛细水。在悬挂毛细水下面的管壁开一气孔，使气孔的孔径大于毛管葫芦大腔直径(D)(图2-1，a)。

将毛细管的底部插入水面 L_1，在毛细力作用下，水沿着毛管上升到吸水高度(H_{cz})后静止，形成支持毛细水(图2-1，b)。在此过程中，顶部的悬挂毛细水没有变动。当水面

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

上升时，支持毛细水也随着上移，但顶部的悬挂毛细水仍不变动(图2-1，c)。当水面下降时，支持毛细水并不立即随着下移（图2-1，d)。只有当支持毛细水上弯液面至水面的距离大于毛细保持高度H_{cD}支持毛细水才开始随着水面的下降而下移(图2-1，e)。同样，顶部的悬挂毛细水仍不变动。

在上述理想实验中，悬挂毛细水与水位变化无关，这是悬挂毛细水与支持毛细水之间的毛细管壁上存在通气孔的缘故。在不等径葫芦状毛管网络中看，这种进气条件在悬挂毛细水形成时即开始存在。可见，潜水位下降释水只引起新潜水位以上的原饱水带及其相联系的支持毛细水带的水分变化。

综上所述，笔者(1985)曾经将给水度定义为：当潜水位下降一个单位时，该潜水位以上的原饱水带及其相联系的支持毛细水带在重力作用下释出的水柱高度。它在数值上等于单位水平面积多孔介质柱体中该潜水位以上的原饱水带水及其相联系的支持毛细水带释出的重力水量(体积)。

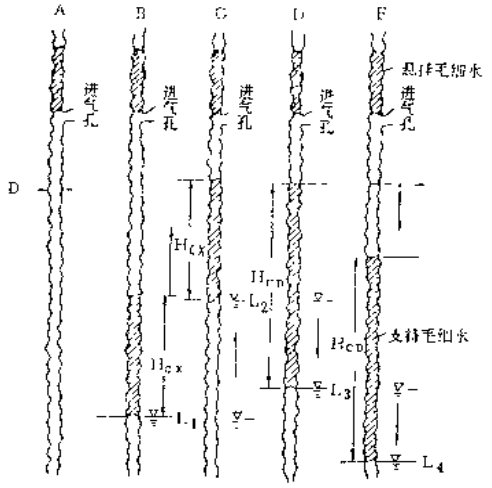


图2-1 变动水位与支持毛细水、悬挂毛细水的变化关系示意图

为表达简明起见，参照水文地质学基础中对给水度的定义方式，现将给水度重新定义为：当潜水位下降一个单位时，该潜水位以上的原饱水带及其相联系的支持毛细水带在重力作用下释出的水量(体积)。它能更进一步地反映重力释水的本质所在。

第二节 无蒸发、无入渗条件下砂柱释水实验研究

无蒸发、无入渗情况下的砂柱释水实验装置如图2-2所示，仍取透明的有机玻璃筒，内径为11.9cm，柱高为210cm，在底部向上10cm处，装有滤网，可装砂柱200cm。在图2-2所示砂柱的左侧安装19个U型水银测压力位计。自滤网向上每隔10cm装一个带陶土头的测压探头。砂柱底界(滤网位置)在U型水银测压水位计基准面以上9cm处，各测点的高程值见表2-1。

表2-1 释水实验砂柱各测点高程值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
测点高程	199	189	179	169	159	149	139	129	119	109	99	89	79	69	59	49	39	29	19

首先用粗砂柱进行实验，粗砂装样总量为35880g，柱高200cm，干容重为1.613g/cm，用可计量的马利奥特瓶从砂柱底部为其充水，达到饱水时，共容水9750ml，可求得其饱和

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

含水量 $\theta = 0.4383$。

将初始水位高程保持在饱水砂柱顶面高程上，即 $H = 209\text{cm}$。在底部安排水管，管头采用三通管溢水装置。然后逐次下降溢水高程，使砂柱自然排水。在每次下降的高程上保



持 3 个小时，使砂柱达到该条件下的充分释水。在这种无压条件下排水不仅存在重力释水量，而且也存在弹性释水量，因此这里使用无压释水系统 $\mu + \mu^*$ 描述释水程度，溢水水位的降深值与对应的排水量值见表2-2。并按式：

$$\text{区段释水系数} = \mu + \mu^* = \triangle Q / \triangle S \qquad (2\text{-}1)$$

$$\text{累计释水系数} = \mu + \mu^* = \sum \triangle Q / \sum \triangle S \qquad (2\text{-}2)$$

分别求得区段释水系数与累计释水系数值，见表2-2。各次溢水水位降深值及对应的U型水银测压水位计数据见表2-3。

由表2-3，采用下述公式计算水头：

$$\text{水头} = \triangle h \times 12.6 + \text{高读值} + \text{上覆水柱高}$$

式中 $\triangle h$ 为U型水银测压水位计读值差。粗砂释水过程中的各测点的变化水头值，见表2-4，进一步求出各测点的毛细负压水头值见表2-5。以图1-9中的粗砂释水曲线做为毛细负压

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水头值与含水量关系的标定曲线，可以求出粗砂释水过程中各测点的含水量值，见表2-6。

表2-2 粗砂释水过程排水量及释水系数值表

ΔS	ΔQ	区段释水系数	ΣΔS	ΣΔQ	累计释水系数	ΔS	ΔQ	区段释水系数	ΣΔS	ΣΔQ	累计释水系数
1.5	2.5	0.0160	1.5	2.5	0.0160	5.0	166.0	0.2957	55.4	1660.3	0.2995
2.5	2.5	0.0112	3.5	5.0	0.0128	5.0	166.2	0.2985	60.4	1626.5	0.2972
1.9	3.3	0.0156	5.4	8.3	0.0138	5.0	165.5	0.2976	65.4	1691.9	0.2936
5.0	15.0	0.0270	10.4	23.3	0.0200	5.0	165.3	0.2967	70.4	1856.2	0.2871
5.0	55.0	0.0990	15.4	78.3	0.0467	5.0	165.0	0.2975	75.4	2022.3	0.2412
5.0	142.0	0.2553	20.4	220.3	0.0971	5.0	165.0	0.2967	80.4	2187.3	0.3446
5.0	160.0	0.2877	25.4	380.3	0.1345	5.0	166.0	0.2967	85.4	2352.3	0.2476
5.0	161.0	0.2895	30.4	541.3	0.1785	5.0	156.0	0.2953	90.4	2515.3	0.2505
5.0	161.5	0.2904	35.4	702.8	0.1926	10.0	328.0	0.2949	100.4	2846.3	0.2549
5.0	162.5	0.2922	40.4	865.3	0.1928	10.0	330.0	0.2967	110.4	3176.3	0.2587
5.0	166.0	0.2967	45.4	1030.3	0.2040	10.0	328.0	0.2953	120.4	3505.3	0.2618
5.0	165.0	0.2967	50.4	1195.3	0.2132						

表2-3 无蒸发粗砂柱释水各测点U型水银测压位计读数(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
水银柱上覆水柱高	26.82	38.26	37.12	30.86	27.58	26.72	26.82	19.86	26.82	27.58	27.12
S=4	25.20 26.10	35.60 24.40	36.60 24.20	35.56 24.56	26.20 25.00	25.90 24.60	25.80 24.50	25.70 23.00			
20.4	24.85 25.46	25.05 25.10	24.85 24.80	24.93 25.17							
35.4	24.70 25.60	24.70 24.45	24.45 25.20	24.56 25.55							
40.4	24.65 25.65	24.3 25.45	24.10 25.65	24.17 25.93							
55.4	24.60 25.70	24.10 25.05	23.80 25.90	23.78 26.33	24.42 26.78						
60.4	24.60 25.70	24.05 26.10	23.60 26.10	23.40 26.70	24.05 27.15	23.80 26.80					
70.4	24.60 25.70	24.00 25.15	23.65 25.15	23.20 25.90	23.70 27.60	23.40 27.20	23.27 27.03				
80.4	24.60 25.70	24.00 25.15	23.55 25.15	23.15 25.95	23.45 27.75	23.05 27.55	22.87 27.43	23.77 25.73			
90.4	24.60 25.70	24.00 25.15	23.55 25.15	23.15 25.95	23.25 27.95	22.80 27.80	22.50 27.70	23.45 27.10	22.43 27.82		
100.4	24.60 25.70	24.00 25.15	23.55 25.15	23.15 25.95	23.25 27.95	22.80 27.80	22.70 27.90	22.15 27.85	22.10 28.20	22.63 28.72	

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表2-3

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
水银柱上程水柱高	26.82	28.28	27.12	30.56	27.68	26.72	26.82	19.36	26.82	27.58	27.12
110.4	34.60 / 26.70	34.00 / 26.15	33.56 / 26.15	33.15 / 26.95	33.25 / 27.95	32.80 / 27.80	32.70 / 27.90	32.06 / 27.46	31.72 / 28.58	32.25 / 29.15	31.40 / 28.20
120.4	34.60 / 26.70	34.00 / 26.15	33.56 / 26.15	33.15 / 26.95	33.25 / 27.95	32.80 / 27.80	32.70 / 27.90	32.06 / 27.46	31.60 / 28.80	31.90 / 29.60	31.00 / 28.59

表2-4 无蒸发粗砂柱释水各测点水头值(cm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=4	205	206	205	205	206	205	205	205	205	206	205
20.4	189.28	188.60	188.60	188.70	188.76	188.80	188.49	188.49	188.49	188.76	
30.4	180.11	179.63	178.13	178.80	178.80	178.85	178.80	178.01	178.80		
40.4	175 18	170.36	168.70	168.80	168.32	168.37	168.32	168.32	168.32		
50.4	174.87	163.81	160.46	158.60	158.36	158.41	158.63	158.36	158.36		
60.4	173.66	162.60	155.22	148.67	148.67	148.72	148.67	148 67	148.15		
70.4	173.66	161.19	153.91	143.43	139.60	138.24	138.71	138.19	138.19		
80.4	173.56	161.19	153.91	142.12	132.96	129.07	128.23	128 23	128.23		
90.4	173.56	161.19	153.91	142.12	127.71	122.52	119.80	118.54	118.00		
100.4	173.56	161.19	153.91	142.12	127.71	122.52	114.56	111.99	108.10	108.84	
110.4	173.56	161.19	153.91	142.12	127.71	122.52	114.56	109.37	98.10	98.89	98 84
120.4	173.56	161.19	153.91	142.12	127.71	122.52	114 56	109.37	92.34	89.72	88.94

表2-5 无蒸发粗砂柱释水过程中各测点的毛细负压水头值(cm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=4	4	4	4								
30.4	-9.72	-0.40	-0 60								
30.4	-18.89	-9.47	-0.88								
40.4	-22.82	-18.64	-10.30	-0.20							
50.4	-24.18	-25.81	-18.64	-10.40	-0.64						
60.4	-25.44	-26.60	-23.78	-23.33	-10.33	-0.28					
70.4	-25.44	-27.81	-26.09	-25.57	-19.60	-10.76	-0.29				
80.4	-25.44	-27.81	-26.09	-26.86	-26.05	-19.93	-10.77	-0.77			
90.4	-25.44	-27.81	-26.09	-26.86	-31.29	-25.48	-19.20	-10.46	-1.00		
100.4	-25.44	-27.81	-26.09	-26.86	-31.29	-26.48	-24.44	-17.01	-10.90	-0.16	
110.4	-25.44	-27.81	-26.09	-26.86	-31.29	-26.48	-24 44	-19.37	-21.00	-10.11	-0.16
120.4	-25.44	-27.81	-26.09	-26.86	-31.29	-26.48	-24 44	-19.37	-26.66	-19.26	-10.51

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-6　无蒸发释水过程中各测点含水量变化数值表 (cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=5	0.44										
20.4	0.88	0.440									
30.4	0.073	0.390	0.440								
40.4	0.046	0.379	0.375	0.440							
50.4	0.043	0.041	0.078	0.370	0.440						
60.4	0.041	0.041	0.046	0.062	0.372	0.440					
70.4	0.041	0.040	0.044	0.042	0.070	0.360	0.440				
80.4	0.041	0.040	0.044	0.041	0.041	0.066	0.350	0.440			
90.4	0.041	0.040	0.044	0.041	0.040	0.041	0.072	0.370	0.440		
100.4	0.041	0.040	0.044	0.041	0.040	0.041	0.045	0.102	0.340	0.440	
110.4	0.041	0.040	0.044	0.041	0.040	0.041	0.045	0.070	0.056	0.378	0.440
120.4	0.041	0.040	0.044	0.041	0.040	0.041	0.045	0.070	0.041	0.070	0.360

中砂柱的稳定释水实验。中砂装样总量为352 g，干容重为1.586 g / cm³，达到饱和时容水9720cm³，其饱和含水量为0.4370。释水实验过程与粗砂相同，释水水位每隔4小时变动一次。

溢水水位降深值，排水量及区段释水系数，累计释水系数值见表2-7。溢水水位降深值对应的U型水银测压水位计数据见表2-8。据表2-8计算出中砂释水过程中各测点的变化水

表2-7　中砂柱无蒸发释水过程中排水量及释水系数值表 (cm, ml)

$\triangle S$	$\triangle Q$	区段释水系数	$\Sigma\triangle S$	$\Sigma\triangle Q$	累计释水系数	S	$\triangle Q$	区段释水系数	$\Sigma\triangle S$	$\Sigma\triangle Q$	累计释水系数
S=1	2.6	0.0225	1	2.6	0.0225	5	160.0	0.2877	80	1786.2	0.1995
2	2.5	0.0112	3	5.0	0.0150	6	162.0	0.2913	86	1928.2	0.2040
2	2.6	0.0120	5	7.6	0.0186	6	160.0	0.2877	90	2088.2	0.2086
5	7.0	0.0126	10	14.6	0.0130	5	161.6	0.2904	95	2249.8	0.2129
5	14.7	0.0264	15	29.2	0.0175	5	160.6	0.2886	100	2410.2	0.2167
5	46.0	0.0827	20	75.2	0.0338	6	161.0	0.2895	106	2571.2	0.2202
5	86.0	0.1546	25	161.2	0.0680	5	161.5	0.2904	110	2732.7	0.2234
5	122.0	0.2194	30	283.2	0.0849	5	162.0	0.2917	115	2894.7	0.2263
5	130.0	0.2338	35	413.2	0.1061	10	327.0	0.2940	125	3221.7	0.2317
5	135.0	0.2428	40	548.2	0.1232	10	326.0	0.2922	135	3546.7	0.2362
5	138.0	0.2482	45	686.2	0.1371	10	321.0	0.2886	145	3867.7	0.2398
5	140.0	0.2518	50	826.2	0.1496	10	326.0	0.2949	155	4193.7	0.2434
6	150.0	0.2697	56	976.2	0.1696	10	322.0	0.2895	165	4517.7	0.2462
5	155.0	0.2787	60	1131.2	0.1596	10	325.0	0.2923	175	4843.7	0.2488
5	158.0	0.2841	65	1288.2	0.1783	10	326.0	0.2932	185	5167.7	0.2512
5	159.0	0.2859	70	1448.2	0.1860	10	327.0	0.2940	195	5494.7	0.2534
5	158.0	0.2841	75	1606.2	0.1926						

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-8　中砂无蒸发释水实验各测点U型水银测压水位计读数(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
水银柱上覆水柱高	31.05	31.53	24.00	28.20	29.50	29.60	28.90	27.00	30.50	31.25	27.90
S－10	35.45 24.95										
20	35.07 25.33	34.95 25.25									
30	34.57 25.73	34.57 25.63	34.65 25.10								
40	34.35 26.05	34.20 26.00	34.27 25.78	34.25 25.90							
50	34.20 26.20	33.95 26.25	33.90 25.85	33.97 25.28	34.35 26.80						
60	34.10 26.30	33.80 26.40	33.65 26.10	33.60 25.65	33.97 27.18	33.80 27.00					
65	34.07 26.38	33.75 26.45	33.57 26.18	33.45 25.80	33.78 27.37	33.61 27.19					
70	34.05 26.35	33.70 26.50	33.60 26.25	33.30 6.95	33.60 27.55	33.42 27.38	33.26 27.16				
80	34.00 26.40	33.65 26.55	33.40 26.35	33.15 27.10	33.30 27.85	33.05 27.75	32.87 27.52	32.65 26.35			
90	34.00 26.40	33.60 26.60	33.35 26.40	33.05 27.20	33.15 28.00	32.70 28.10	32.50 27.90	32.27 26.73	32.40 27.95		
100	34.00 26.40	33.60 26.60	33.30 26.45	33.00 27.35	33.00 28.15	32.55 28.25	32.17 28.23	31.90 27.10	32.02 28.33	32.40 28.60	
110	34.00 26.40	33.60 26.60	33.30 26.45	32.95 27.30	33.05 28.20	32.50 28.30	32.00 28.40	31.60 27.40	31.65 28.70	32.02 29.18	31.40 28.25
120	34.00 26.40	33.60 26.60	33.30 26.45	32.95 27.30	33.00 28.25	32.45 28.35	31.95 28.45	31.40 27.60	31.30 29.05	31.65 29.55	31.02 28.65
130	34.00 26.40	33.60 26.60	33.30 26.45	32.95 27.30	33.00 28.26	32.40 28.40	31.90 28.50	31.15 27.65	31.05 29.30	31.33 29.87	30.65 29.00
140	34.00 26.40	33.60 26.60	33.30 26.45	32.95 27.30	33.00 28.25	32.40 28.40	31.85 28.55	31.10 27.70	31.00 29.35	31.10 30.10	30.30 29.35
150	34.00 26.40	33.60 26.60	33.30 26.45	32.95 27.30	33.00 28.25	32.40 28.40	31.85 28.55	31.05 27.75	30.95 29.40	31.05 30.15	30.05 29.60
160	34.00 26.40	33.60 26.60	33.30 26.45	32.95 27.30	33.00 28.25	32.40 28.40	31.85 28.55	31.05 27.75	30.90 29.45	31.00 30.30	29.95 29.70

头值，见表2-9，进一步求出各测点的毛细负压水头值见表2-10。以图1-9 中的中砂释水曲线做为压力水头值与含水量关系的标定曲线，求出中砂释水过程中各测点的含水量值见表2-11。

细砂柱的稳定释水实验。细砂装样为34800 g，干容重为1.586 g / cm³。达到饱和时容

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-9　中砂柱无蒸发释水实验各测点的水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=10	199.00										
20	188.84	189.00									
30	178.36	179.04	179.00								
40	169.98	169.36	169.02	169.00							
50	166.05	162.80	159.33	159.06	158.98						
60	163.43	158.87	152.78	149.37	149.02	149.00					
65	162.64	157.56	150.68	145.44	144.05	144.00					
70	163.13	156.25	148.85	141.51	139.23	139.02	139.00				
80	160.81	154.94	146.23	137.68	131.47	129.33	129.06	129.00			
90	160.81	153.63	144.92	134.96	127.54	120.16	119.36	119.07	119.00		
100	160.81	153.63	143.61	133.65	124.97	116.22	110.71	109.38	109.01	109.00	
110	160.81	153.63	143.61	132.34	123.66	114.92	106.26	101.52	99.32	99.05	99.00
120	160.81	153.63	143.61	132.34	122.66	113.61	104.96	96.28	90.15	89.36	89.03
130	160.81	153.63	143.61	132.34	122.66	112.30	103.64	92.25	83.60	80.98	79.34
140	160.81	153.63	143.61	132.34	122.66	112.30	102.33	90.94	82.29	74.95	70.17
150	160.81	153.63	143.61	132.34	122.66	112.30	102.33	89.63	80.98	73.64	68.52
160	160.81	153.63	143.61	132.34	122.66	112.30	102.33	89.63	79.67	72.33	67.00

表2-10　中砂柱无蒸发释水实验各测点的毛细负压水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=10	0.0										
20	-10.16	0.0									
30	-20.64	-9.96	0.0								
40	-29.02	-19.65	-9.98	0.0							
50	-32.95	-26.20	-19.67	-9.94	0.0						
60	-36.67	-30.13	-25.22	-19.63	-9.98	0.0					
65	-36.36	-31.44	-28.32	-23.56	-14.95	-5.00					
70	-36.85	-32.75	-30.15	-27.94	-19.67	-9.98	0.0				
80	-38.19	-34.06	-32.77	-31.42	-27.95	-19.67	-9.96	0.0			
90	-38.19	-35.37	-34.80	-34.04	-31.46	-28.84	-19.64	-9.93	0.0		
100	-38.19	-35.37	-35.39	-35.35	-34.02	-32.77	-28.29	-19.62	-9.98	0.0	
110	-38.19	-35.37	-35.39	-36.66	-35.34	-34.08	-32.74	-27.48	-19.68	-9.96	0.0
120	-38.19	-35.37	-35.39	-36.66	-36.65	-35.39	-34.05	-32.72	-28.85	-19.64	-9.97
130	-38.19	-35.37	-35.39	-36.66	-36.66	-36.70	-35.36	-34.75	-35.40	-28.02	-19.66
140	-38.19	-35.37	-35.39	-36.66	-36.65	-36.70	-36.67	-38.06	-36.71	-34.06	-28.63
150	-38.19	-35.37	-35.39	-36.66	-36.65	-36.70	-36.67	-39.37	-38.02	-35.36	-36.38
160	-38.19	-35.37	-35.39	-36.66	-36.65	-36.70	-36.67	-39.37	-39.33	-36.67	-38.00

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-11　中砂柱无蒸发释水实验各测点的含水量值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=10	0.437										
20	0.437	0.437									
30	0.375	0.437	0.437								
40	0.325	0.390	0.437	0.437							
50	0.156	0.270	0.390	0.437	0.437						
60	0.120	0.210	0.270	0.390	0.437	0.437					
66	0.110	0.180	0.240	0.330	0.437	0.437					
70	0.108	0.160	0.210	0.260	0.390	0.437	0.437				
80	0.092	0.140	0.160	0.180	0.260	0.390	0.437	0.437			
90	0.092	0.120	0.126	0.140	0.180	0.230	0.390	0.437	0.437		
100	0.092	0.120	0.120	0.120	0.140	0.160	0.230	0.390	0.437	0.437	
110	0.092	0.120	0.120	0.110	0.120	0.140	0.160	0.250	0.390	0.437	0.437
120	0.092	0.120	0.120	0.110	0.110	0.120	0.140	0.160	0.230	0.390	0.437
130	0.092	0.120	0.120	0.110	0.110	0.110	0.120	0.110	0.130	0.250	0.390
140	0.092	0.120	0.120	0.110	0.110	0.110	0.110	0.093	0.110	0.140	0.230
150	0.092	0.120	0.120	0.110	0.110	0.110	0.110	0.090	0.093	0.120	0.120
160	0.092	0.120	0.120	0.110	0.110	0.110	0.110	0.090	0.090	0.110	0.093

水9660cm³，其饱和含水量0.4343。释水实验过程与粗砂中砂释水过程相同。释水水位每隔6小时变动一次。

溢水水位降深值，排水量及区段释水系数，累计释水系数值见表2-12。溢水水位降深

表2-12　细砂柱无蒸发释水过程中排水量及释水系数数值表

△S	△Q	区段释水系数	ΣΔS	ΣΔQ	累计释水系数	△S	△Q	区段释水系数	ΣΔS	ΣΔQ	累计释水系数
5cm	1.0	0.0018	5	1.0	0.0018	5	124.0	0.2230	85	948.0	0.1003
5	1.5	0.0027	10	2.5	0.0022	5	130.0	0.2238	90	1078.0	0.1077
5	7.5	0.0135	15	10.0	0.0060	5	142.0	0.2571	95	1221.0	0.1166
5	8.0	0.0144	20	18.0	0.0061	5	145.0	0.2607	100	1366.0	0.1228
5	8.5	0.0153	25	26.5	0.0095	5	148.0	0.2661	105	1514.0	0.1296
5	9.0	0.0162	30	35.5	0.0106	5	152.0	0.2733	110	1666.0	0.1362
5	14.5	0.0261	35	50.0	0.0128	5	157.0	0.2823	115	1823.0	0.1425
5	35.0	0.0629	40	85.0	0.0191	5	160.0	0.2877	120	1983.0	0.1486
5	47.0	0.0845	45	132.0	0.0264	5	160.0	0.2877	125	2143.0	0.1541
5	75.0	0.1349	50	207.0	0.0372	5	160.0	0.2877	130	2303.0	0.1593
5	90.0	0.1618	55	297.0	0.0486	5	161.0	0.2895	135	2464.0	0.1641
5	94.0	0.1690	60	391.0	0.0586	5	160.0	0.2877	140	2624.0	0.1686
5	96.0	0.1708	65	486.0	0.0672	5	161.0	0.2895	145	2786.0	0.1727
5	100.0	0.1798	70	586.0	0.0753	5	160.5	0.2886	150	2945.5	0.1766
5	118.0	0.2122	75	704.0	0.0844	5	160.0	0.2877	155	3105.5	0.1801
5	120.0	0.2158	80	824.0	0.0926	5	160.5	0.2886	160	3266.0	0.1835

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

值对应的U型水银测压水位计数据见表2-13。据表2-13算出细砂释水过程中各测点的变化水头值，见表2-14。进一步求出各测点的毛细负压水头值见表2-15。以图1-9中细砂释水曲线做为毛细负压水头值与含水量关系的标定曲线，求出细砂释水过程中各测点含水量值见表2-16。

按表2-2，表2-7，表2-12的数值分别绘出区段释水系数和累计释水系数与降深之间的变化曲线图，见图2-3。图中的区段释水系数曲线为 S_q，累计释水系数曲线为 S_l。 S_l

表2-13 砂无蒸发释水实验测点间的U型水银测水位计数据表 (cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水银柱上 液水柱高	29.20	31.20	29.90	28.20	27.60	26.30	26.70	26.70	25.40	27.10	25.30	24.90
S=5	35.87 24.63											
20	35.10 26.20	34.95 25.20										
30	34.72 26.56	34.57 25.58	34.40 25.30									
40	34.35 26.95	34.18 25.97	34.02 25.68	34.30 25.85								
50	33.97 26.33	33.80 25.33	33.63 26.07	33.92 25.23	34.35 26.65							
60	33.60 26.70	33.43 26.72	33.25 26.45	33.53 26.60	33.57 27.03	33.85 26.80						
70	33.25 27.05	33.05 27.10	32.87 26.83	33.15 26.98	33.58 27.40	33.47 27.18	32.95 26.65					
80	33.00 27.30	32.76 27.46	32.50 27.20	32.77 27.36	33.20 27.78	33.10 27.55	32.57 27.03	32.96 27.45				
90	32.80 27.50	32.46 27.70	32.15 27.55	32.40 27.73	32.82 27.16	32.70 27.95	32.18 27.42	32.57 27.83	32.50 27.65			
100	32.60 27.70	32.26 27.96	31.90 27.80	32.05 28.03	32.45 28.53	32.32 28.33	31.80 27.80	32.20 28.20	32.12 28.03	32.1 28.1		
110	32.50 27.80	32.06 28.15	31.70 28.00	31.80 28.33	32.10 28.88	31.95 28.70	31.43 28.17	31.80 28.60	31.78 28.43	31.7 28.5	32.15 28.85	
120	32.46 27.90	31.95 28.25	31.60 28.20	31.60 28.53	31.85 29.13	31.50 29.05	31.05 28.55	31.43 28.97	31.35 28.80	31.3 28.9	31.77 29.23	31.35 28.75
130	32.30 28.00	31.85 28.35	31.30 28.40	31.40 28.73	31.65 29.33	31.35 29.30	30.70 28.90	31.07 29.33	30.97 29.18	30.9 29.3	31.40 29.60	30.97 29.13
140	32.25 28.05	31.75 28.46	31.20 28.50	31.20 28.93	31.45 29.62	31.15 29.50	30.45 29.15	30.73 29.67	30.60 29.55	30.5 29.6	31.02 29.88	30.58 29.60
150	34.00 26.40	33.50 26.60	31.15 28.55	31.10 29.03	31.25 29.73	30.95 29.70	30.25 29.35	30.47 29.93	30.26 29.90	30.2 30.0	30.65 30.26	30.20 29.88
160	34.00 26.40	33.60 26.60	30.10 28.60	31.06 29.06	31.15 29.65	30.75 29.90	30.05 29.65	30.27 30.18	30.00 30.15	29.8 30.4	30.28 30.73	29.82 30.25

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-14　细砂柱无蒸发释水实验各测点的水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S=5	204.00											
20	189.04	189.00										
30	179.08	179.04	179.00									
40	169.89	168.83	169.00	169.00								
50	159.43	158.87	158.79	159.01	159.00							
60	149.74	158.17	148.83	149.05	149.01	149.00						
70	140.67	139.22	138.87	139.09	139.05	139.02	139.00					
80	134.02	130.06	129.18	129.14	129.10	129.03	129.07	129.00				
90	128.78	123.50	120.01	119.44	119.14	118.86	118.86	118.99	119.00			
100	123.64	117.68	113.46	110.27	409.40	106.89	108.90	109.30	109.05	109.00		
110	120.92	112.44	108.22	103.72	100.27	99.30	99.21	98.82	98.71	99.01	99.00	
120	118.36	109.82	102.98	98.48	93.73	90.03	89.25	89.13	88.88	88.67	89.00	89.00
130	115.68	107.20	97.74	93.24	88.45	83.48	80.08	79.69	78.92	78.84	79.38	79.05
140	114.37	104.68	95.12	88.00	83.24	78.24	73.62	70.79	69.23	68.88	69.42	69.09
150	114.37	104.68	93.81	86.38	78.01	73.00	68.29	63.93	60.06	59.19	59.53	59.13
160	114.37	104.68	92.60	84.07	76.37	67.76	63.06	58.73	53.61	50.02	49.91	49.30

表2-15　细砂柱无蒸发释水实验各测点的毛细负压水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S=5	5.00											
20	-9.96	0.00										
30	-19.53	-9.96	0.00									
40	-29.61	-20.17	-10.00	0.00								
50	-39.57	-30.13	-20.21	-9.99	0.00							
60	-49.36	-39.83	-30.17	-19.95	-9.99	0.00						
70	-58.43	-49.78	-40.13	-29.91	-19.95	-9.98	0.00					
80	-64.28	-58.96	-49.82	-39.86	-29.90	-19.67	-9.93	0.00				
90	-70.23	-65.50	-58.99	-49.66	-39.86	-30.15	-20.14	-10.01	0.00			
100	-75.46	-71.32	-65.64	-58.73	-49.60	-40.11	-30.10	-19.70	-9.96	0.00		
110	-78.05	-75.58	-70.78	-65.38	-58.73	-49.60	-39.79	-30.18	-20.29	-9.99	0.00	
120	-80.70	-79.13	-76.02	-70.52	-65.28	-58.97	-49.76	-39.87	-30.12	-20.34	-10.00	0.00
130	-83.32	-81.80	-81.25	-75.76	-70.52	-65.53	-58.93	-49.86	-40.08	-30.16	-19.62	-9.96
140	-84.63	-84.42	-83.88	-81.00	-75.76	-70.76	-66.47	-58.21	-49.77	-40.12	-29.88	-19.91
150	-84.63	-84.42	-86.19	-83.62	-80.79	-76.00	-70.71	-66.03	-58.94	-49.81	-39.47	-29.87
160	-84.63	-84.42	-86.60	-84.93	-83.63	-81.24	-76.95	-70.27	-65.49	-58.98	-49.09	-39.70

线在 S_q 线的右侧，显然同一降深 S 值所对应 S_q 值大于 S_1 值。S_1 线上的任一点的值表示初始水位埋深为0(即 $S=0$，这里 S 表达降深和埋深双重意义)，排水水位降至该点，达到充分自由释水时，用总释水量与总降深值求得的释水系数值。而 S_q 线上任一点

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-16　细砂柱无蒸发释水实验各测点的含水量值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S－5	0.434											
20	0.434	0.434										
30	0.430	0.434	0.434									
40	0.430	0.430	0.434	0.434								
50	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434							
60	0.365	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434						
70	0.240	0.350	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434					
80	0.180	0.240	0.350	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434				
90	0.115	0.168	0.240	0.363	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434			
100	0.108	0.113	0.168	0.240	0.363	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434		
110	0.103	0.108	0.115	0.165	0.240	0.350	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434	
120	0.097	0.100	0.110	0.115	0.168	0.240	0.350	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434
130	0.095	0.096	0.097	0.108	0.115	0.168	0.240	0.356	0.426	0.430	0.430	0.434
140	0.094	0.094	0.094	0.097	0.108	0.115	0.168	0.240	0.358	0.425	0.430	0.430
150	0.094	0.093	0.092	0.094	0.097	0.110	0.115	0.168	0.240	0.350	0.425	0.430
160	0.094	0.093	0.091	0.093	0.094	0.097	0.110	0.115	0.168	0.240	0.360	0.426

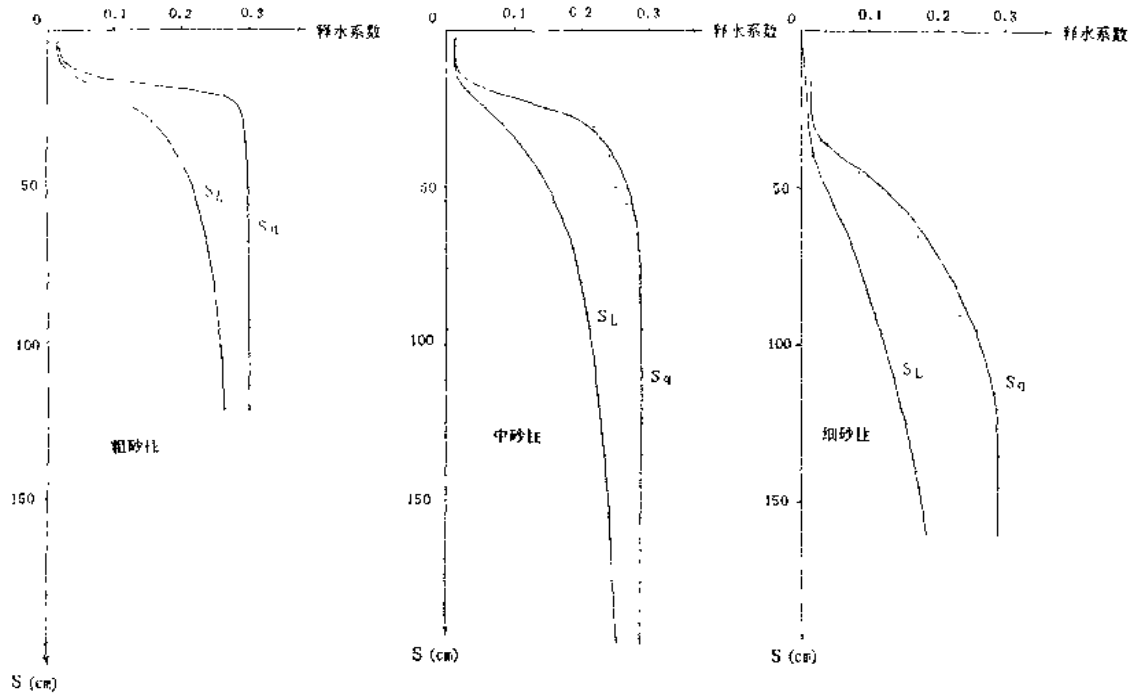


图2-3 无蒸发释水实验砂柱释水系数变化曲线图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

的值则表达释水水位由某一 S_1 降到 S_2 时，由 $\triangle S$ 与对应的释水量 $\triangle Q$ 求得的释水系数值。当 S_1 大于砂样(或含水层)的最大支持毛细水高度时，则区段释水系数趋于常量。(饱和水量与残留含水量的差值)，这里称其为理论释水系数。

一般说来，在野外的实际包气带地层中，降水入渗补给潜水时，下渗的水分与原有支持毛细水相接，高于毛细保持高度，这里暂称为超高支持毛细水。在潜水的入渗补给末期，地表的入渗补给源消失，包气带中的超高支持毛细水向下运移，毛细高度逐渐降低，潜水位上升速度逐渐减缓，潜水位置基本稳定，此时称为稳定条件。这时包气带的水分分布符合释水曲线(图2-4，a 线)。

当潜水位由 A 下降 $\triangle H$ 到 B，且充分释水后，达到新的水分分布，仍符合释水曲线(图2-4，b 线)。b 线与 a 线在垂向上的对应点距相等。这时的实测给水度应等于理论给水度，给水度的大小与水位降 $\triangle S$ 无关。

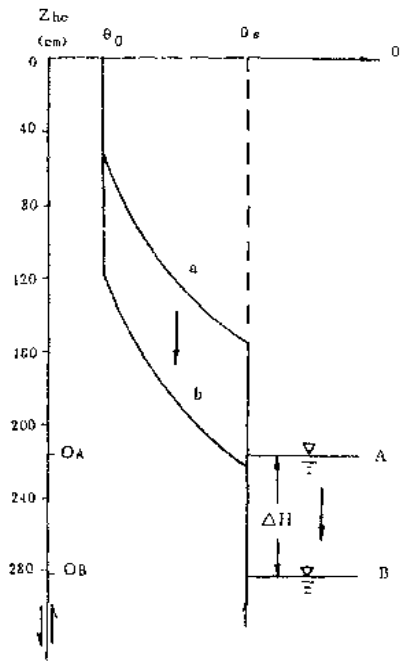


图2-4 无蒸发条件下包气带的水分分布曲线及释水性示意图

第三节 蒸发条件下的砂柱释水实验研究

蒸发条件下的砂柱释水实验仍采用图2-2所示装置，在其上增加红外灯光照及风力条件，如图2-5所示。仍分别采用前述的粗砂、中砂、细砂柱进行实验，以便与无蒸发的释水条件进行对比。

粗砂蒸发释水实验。初始饱水后，使水位下降至埋深50cm，充分释水后，进行蒸发实验。砂柱的温度变化见表2-17。实验历时64小时，在砂顶面位置实测液面蒸发总量为12.52cm水柱高。从开始蒸发至20小时，初始水位回弹至49.4cm，说明砂温增高使毛细保持高度见效，支持毛细水向下迁移，使潜水位上升。至36小时，砂柱水位埋深开始下降，至50小时降至埋深50cm，此后缓慢地持续下降。就是说在第36小时表面蒸发开始影响到潜水位。第60小时下降到50.4cm。停止蒸发后，立即进行释水实验，排水水位每次下降5cm。对应的埋深 S，释水量 Q 及释水系数值见表2-18。

中砂蒸发释水实验。令初始水位埋深为64.4cm，稳定40小时，达到充分释水。蒸发历时170小时。灯照强度比粗砂柱蒸发实验时加大，在砂柱顶面位置的液面蒸发总量为77.26cm水柱高，在蒸发的过程中仍有水位回升现象(水位大约回弹1cm)。最后水位下降至65cm。平均室内温度11.3℃，湿度为 6%。砂柱的温度变化见表2-19。

停止蒸发后释水实验的排水水位每次下降 5cm。对应的埋深 S、释水量 Q 及释水系

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

数值见表2-20。溢水水位降深值与对应的U型水银测压水位计数值见表2-21。据表2-21求

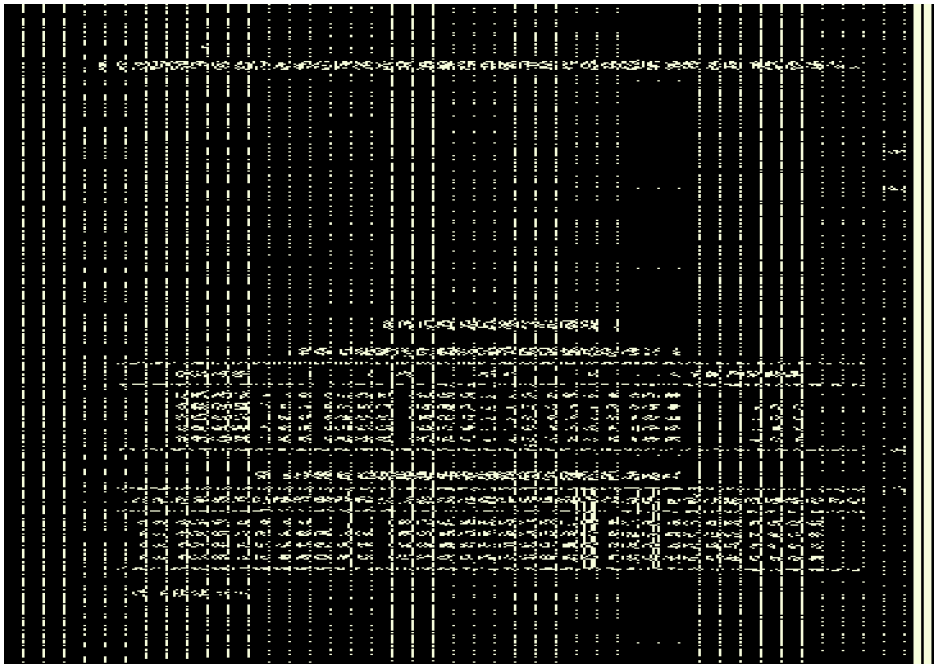


图2-5 蒸发实验装置

表2-17 蒸发实验中粗砂柱湿度变化值(cm, ℃)

测点号	1	2	3	4	5	6	顶部干砂厚度
测点埋深	5.0	10.0	15.0	25.0	35.0	50.0	
初始温度	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	0.0
第16小时	26.5	20.0	17.0	15.0	14.5	14.5	0.5
第40小时	40.0	28.0	19.5	17.5	16.0	14.5	2.0
第64小时	40.0	34.0	20.0	17.5	15.0	14.5	3.0

表2-18 蒸发后粗砂柱释水量及释水系数值(cm, ml)

ΔS	$\Sigma\Delta S$	ΔQ	区段释水系数	ΔS	$\Sigma\Delta S$	ΔQ	区段释水系数	ΔS	$\Sigma\Delta S$	ΔQ	区段释水系数
0.0	50.4	0.0		5.0	70.4	165.0	0.2967	5.0	90.4	166.0	0.2986
5.0	55.4	140.0	0.2518	5.0	75.4	165.5	0.2976	10.0	100.4	327.0	0.2940
5.0	60.4	150.0	0.2697	5.0	80.4	165.0	0.2967	10.0	110.4	330.0	0.2967
5.0	65.4	165.0	0.2967	5.0	85.4	165.0	0.2967	10.0	120.4	329.0	0.2968

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-19　蒸发实验中中砂柱温度变化值(cm，℃)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
测点埋深	5.0	10.0	15.0	25.0	35.0	50.0	70.0	100.0	164.0
初始温度	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
第24小时	50.7	23.3	17.0	13.0	12.5	11.7	11.3	11.3	11.3
第48小时	57.5	23.0	17.7	13.5	12.5	11.7	11.3	11.3	11.3
第72小时	62.5	24.7	18.0	13.7	12.5	11.7	11.3	11.3	11.3
第96小时	60.5	24.8	18.0	13.7	12.5	11.7	11.3	11.3	11.3
第120小时	61.7	25.3	18.5	13.8	12.5	11.7	11.3	11.3	11.3
第144小时	65.0	28.0	18.6	13.8	12.5	11.7	11.3	11.3	11.3
第170小时	68.5	28.3	18.6	13.5	12.5	11.7	11.3	11.3	11.3

表2-20　蒸发后中砂柱释水量及释水系数值(cm,ml)

ΔS	ΣΔS	ΔQ	区段释水系数	ΔS	ΣΔS	ΔQ	区段释水系数	ΔS	ΣΔS	ΔQ	区段释水系数
0	65	0.0		5	95	157.0	0.2823	10	140	325.0	0.2922
5	70	130.0	0.2338	5	100	160.0	0.2877	10	150	329.0	0.2958
5	75	132.0	0.2374	5	105	161.0	0.2895	10	160	326.0	0.2922
5	80	138.0	0.2392	5	110	161.0	0.2895	10	170	322.0	0.2895
5	85	137.0	0.2464	10	120	328.0	0.2949	10	180	324.0	0.2913
5	90	145.0	0.2607	10	130	325.0	0.2922	10	190	326.0	0.2931

表2-21　中砂柱蒸发释水实验各测点的U型水银测压水位计读数(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=65	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.62	33.30 26.95	33.78 27.37	33.60 27.30					
70	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.65	33.30 26.95	33.60 27.55	33.42 27.38	33.15 27.15				
80	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.62	33.15 27.10	33.30 27.55	33.05 27.05	32.87 27.53	33.65 26.35			
90	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.62	33.05 27.20	32.15 28.00	32.70 28.10	32.50 27.90	32.27 26.73	32.40 27.95		
100	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.62	33.00 27.25	33.00 28.10	32.55 28.25	32.17 28.33	31.90 27.10	32.02 28.33	32.40 28.60	
110	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.62	33.95 27.30	33.05 28.20	32.60 28.50	32.00 28.40	31.60 27.40	31.65 28.70	32.02 29.18	31.40 28.26
120	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.62	33.95 27.20	33.00 28.25	32.45 28.35	31.95 28.45	31.40 27.60	31.30 29.05	31.65 29.65	31.02 28.63
130	33.90 26.65	33.50 26.70	33.13 26.62	33.95 27.30	32.00 28.25	32.40 28.40	31.90 28.50	31.15 27.65	31.05 25.30	31.33 29.87	30.56 29.00

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表2-21

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
140	33.90	33.60	33.13	33.95	33.00	32.45	31.85	31.10	31.00	31.10	30.30
	26.65	26.70	26.62	27.30	28.25	28.35	28.55	27.70	29.35	30.10	29.85
150	33.90	33.50	33.13	33.95	33.00	32.45	31.85	31.05	30.95	31.05	30.05
	26.55	26.70	26.63	27.30	28.26	28.35	28.55	27.75	29.40	30.15	29.60
160	33.90	33.50	33.13	33.95	33.00	32.45	31.85	31.05	30.90	31.00	29.95
	26.65	26.70	26.62	27.30	28.25	28.35	28.55	27.75	29.45	30.20	29.70

出释水过程中各测点的水头值见表2-22。进一步求出各测点的毛细负压水头值见表2-23。仍以图1-9中的中砂释水曲线做为压力水头值与含水量关系的标定曲线，求出各测点的含水量值见表2-24。

表2-22　中砂柱蒸发释水实验各测点水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=65	157.56	151	139.16	141.51	144.05	144.00					
70	157.56	151	139.16	141.51	139.33	139.02	139.00				
80	157.56	151	139.16	137.58	131.44	129.32	129.06	129.00			
90	157.56	151	139.16	134.95	127.54	120.16	119.36	119.07	119.00		
100	157.56	151	139.16	133.65	124.97	116.23	110.71	109.38	109.01	109.00	
110	157.56	151	139.16	132.34	123.66	114.92	106.26	101.62	99.32	99.06	99.00
120	157.56	151	139.16	132.34	122.35	113.61	104.96	96.28	90.16	89.36	89.03
130	157.56	151	139.16	132.34	122.35	112.30	103.64	92.26	83.60	80.98	79.34
140	157.56	151	139.16	132.34	122.35	112.30	102.33	90.94	82.29	74.95	70.17
150	157.56	151	139.16	132.34	122.35	112.30	102.33	89.63	80.98	73.64	63.62
160	157.56	151	139.16	132.34	122.35	112.30	102.33	89.63	79.67	72.33	61.00

表2-23　中砂柱蒸发释水实验各测点毛细负压水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=65	-41.11	-38.00	-39.84	-27.49	-14.95	-5.00					
70	-41.11	-38.00	-39.84	-27.49	-19.67	-9.98	0.00				
80	-41.11	-38.00	-39.84	-31.42	-27.53	-19.67	-9.95	0.00			
90	-41.11	-38.00	-39.84	-34.04	-31.46	-28.84	-19.64	-9.93	0.00		
100	-41.11	-38.00	-39.84	-35.35	-34.08	-33.77	-28.29	-19.63	-9.99	0.00	
110	-41.11	-38.00	-39.84	-35.66	-35.34	-34.08	-32.74	-27.48	-19.68	-9.95	0.00
120	-41.11	-38.00	-39.84	-35.66	-35.66	-35.39	-34.05	-31.72	-26.86	-19.64	-9.97
130	-41.11	-38.00	-39.84	-35.66	-35.66	-35.70	-35.36	-35.75	-35.40	-28.02	-19.66
140	-41.11	-38.00	-39.84	-35.66	-35.66	-35.70	-35.67	-38.06	-35.71	-34.05	-28.52
150	-41.11	-38.00	-39.84	-35.66	-35.66	-35.70	-35.67	-39.37	-38.02	-35.36	-35.38
160	-41.11	-38.00	-39.84	-35.66	-35.66	-35.70	-35.67	-39.37	-39.33	-38.67	-38.00

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-24　中砂柱蒸发释水实验各测点含水量数值表(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S=65	0.085	0.093	0.090	0.25	0.437	0.437					
70	0.085	0.093	0.090	0.250	0.390	0.437	0.437				
80	0.085	0.093	0.090	0.160	0.250	0.390	0.437	0.437			
90	0.085	0.093	0.090	0.140	0.180	0.230	0.390	0.437	0.437		
100	0.085	0.093	0.090	0.120	0.140	0.160	0.230	0.390	0.437	0.437	
110	0.085	0.093	0.090	0.110	0.120	0.140	0.160	0.250	0.380	0.437	0.437
120	0.085	0.093	0.090	0.110	0.110	0.120	0.140	0.160	0.230	0.390	0.437
130	0.085	0.093	0.090	0.110	0.110	0.110	0.120	0.110	0.170	0.250	0.390
140	0.085	0.093	0.090	0.110	0.110	0.110	0.110	0.093	0.110	0.140	0.230
150	0.085	0.093	0.090	0.110	0.110	0.110	0.110	0.090	0.093	0.120	0.120
160	0.085	0.093	0.090	0.110	0.110	0.110	0.110	0.090	0.090	0.110	0.093

细砂蒸发释水实验。初始水位埋深值为48.5cm，蒸发实验历时312小时。蒸发作用强度比粗砂和中砂柱的蒸发强度都低，砂柱顶面的液面蒸发总量为28.73cm水柱高。在蒸发的过程中，仍有水位回升的现象。最后水位下降值50cm。平均室温为11.3℃，湿度为66%。砂柱的温度变化见表2-25。

停止蒸发后，释水实验的排水水位每次下降5cm。对应的埋深 S 、释水量 Q 及释水系数见表2-26。溢水水位降深值与对应的U型水银测压水位计数值见表2-27。据表2-27求出释水过程中各测点的水头值见表2-28。进一步求出各测点的毛细负压水头值见表2-29。由图1-9中的细砂释水曲线确定各测点的含水量值见表2-30。

表2-25　蒸发实验中细砂柱温度变化值(cm，℃)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
测点埋深(cm)	5.0	10.0	15.0	25.0	35.0	60.0	70.0	100.0	154.0
初始温度	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
第24小时	21.0	17.5	16.5	14.7	13.5	11.3	11.3	11.3	11.3
第48小时	27.5	19.0	16.5	14.7	13.5	11.3	11.3	11.3	11.3
第96小时	29.5	19.5	17.0	14.7	13.5	11.3	11.3	11.3	11.3
第144小时	30.5	19.8	17.0	14.7	13.5	11.3	11.3	11.3	11.3
第216小时	32.0	20.0	17.1	14.8	13.5	11.3	11.3	11.3	11.3
第312小时	32.0	20.0	17.1	14.8	13.5	11.3	11.3	11.3	11.3

按表2-18、表2-20、表2-26分别绘出蒸发后的砂柱区段释水系数变化曲线(见图2-6)。并将其与图2-3比较。显然，蒸发影响使蒸发后的砂柱初期释水减量，区段释水系数变小。随着释水深度加大，趋向于理论释水系数，逐渐向无蒸发释水条件下砂柱的区段释水系数曲线靠拢，直到重合。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-26　蒸发后细砂柱释水量及释水系数值(cm, l)

ΔS	ΣΔS	ΔQ	区段释水系数	ΔS	ΣΔS	ΔQ	区段释水系数	ΔS	ΣΔS	ΔQ	区段释水系数
0	50	0.0		5	80	120.0	0.2258	10	120	317.0	0.2850
5	55	67.0	0.1205	5	85	124.0	0.2232	10	130	320.0	0.2877
5	60	81.0	0.1457	10	90	130.0	0.2338	10	140	320.5	0.2882
5	65	90.0	0.1618	10	95	143.0	0.2571	10	150	321.5	0.2891
5	70	98.0	0.1762	10	100	145.0	0.2607	10	160	320.5	0.2882
5	75	118.0	0.2123	10	110	300.0	0.2697				

表2-27　细砂柱蒸发释水实验各测点的U型水银测压水位计读数(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S=60	31.95 28.35	31.55 28.65	33.15 26.55	33.92 26.23	34.35 25.65							
60	31.95 28.35	31.55 28.65	33.15 25.55	33.53 26.60	33.97 27.03	33.85 25.80						
70	31.95 28.35	31.55 28.65	32.57 26.83	33.15 26.98	33.58 27.40	33.47 27.18	32.95 25.65					
80	31.95 28.35	31.55 28.65	32.50 27.10	33.77 27.36	33.20 27.78	33.10 27.55	32.57 27.03	32.95 27.45				
90	31.95 28.35	31.55 28.65	32.15 27.55	33.40 27.72	32.83 28.16	33.70 27.95	33.15 27.42	32.57 27.85	33.50 27.65			
100	31.95 28.35	31.55 28.65	31.90 27.80	33.05 28.08	32.45 28.53	33.31 28.31	31.80 27.80	32.30 28.20	33.13 28.03	32.10 28.15		
110	31.95 28.35	31.55 28.65	31.70 28.00	31.80 28.35	32.10 28.88	31.95 28.70	31.42 28.17	31.80 28.60	31.73 28.43	31.72 28.53	32.15 28.85	
120	31.95 28.35	31.55 28.65	31.50 28.30	31.60 28.63	31.85 29.13	31.80 29.05	31.05 28.65	31.43 28.97	31.35 28.80	31.33 28.93	31.77 29.23	31.35 28.75
130	31.95 28.35	31.55 28.65	31.30 28.40	31.40 28.73	31.65 29.33	31.35 29.30	30.70 28.90	31.07 29.33	30.97 29.18	30.95 29.30	31.40 29.60	30.97 29.13
140	31.95 28.35	31.55 28.65	31.20 28.50	31.20 28.93	31.45 29.53	31.15 29.50	30.45 29.15	30.73 29.67	30.60 29.55	30.57 29.65	31.03 29.98	30.68 29.57
150	31.95 28.35	31.55 28.65	31.15 28.55	31.10 29.03	31.26 29.73	30.96 29.70	30.25 29.35	30.47 29.93	30.25 29.80	30.30 30.05	30.65 30.35	30.20 29.88
160	31.95 28.35	31.55 28.65	31.10 28.55	31.05 29.08	31.15 29.82	30.75 29.90	30.05 29.55	30.27 30.13	30.00 30.15	29.85 30.40	30.38 30.73	29.82 30.25

按表2-24、表2-30的数值绘制蒸发后的释水过程中，实验砂柱的含水量变化曲线，见图2-7，将其与图2-4比较，显然蒸发作用使其含水量分布曲线低于无蒸发的释水曲线。

一般说来，由稳定转向蒸发条件时，包气带的初始水分分布符合释水曲线(图2-8，d)，对应于潜水位D。蒸发时地表土层的水分耗减；随着蒸发影响的向下扩展，影响带含水量

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2-28　细砂柱蒸发释水实验各测点水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S=50	106.61	99.29	146.21	159.01	159.00							
60	106.61	99.29	146.21	149.06	149.01	149.00						
70	106.61	99.29	138.87	139.09	139.06	139.02	139.00					
80	106.61	99.29	129.15	129.14	129.10	129.33	129.07	129.00				
90	106.61	99.29	120.91	119.44	119.14	118.86	118.86	118.99	119.00			
100	106.61	99.29	113.46	110.27	109.40	108.89	108.90	109.30	109.06	109.00		
110	106.51	99.29	105.32	103.73	100.27	99.20	99.21	98.23	98.71	99.01	99.00	
120	106.61	99.29	103.96	98.48	93.72	90.06	89.26	89.13	88.88	88.67	89.00	89.00
130	106.51	99.29	97.74	93.34	86.48	83.48	80.08	79.69	78.93	78.84	79.38	79.06
140	106.51	99.29	96.12	88.00	83.24	78.24	73.63	70.79	69.23	68.88	69.42	69.09
150	106.51	99.29	93.51	86.38	78.01	73.00	68.29	63.97	66.06	59.19	59.53	59.13
160	106.61	99.29	92.50	84.07	76.37	67.76	63.05	58.73	53.51	50.02	49.91	49.80

表2-29　细砂柱蒸发释水实验各测点毛细负压水头值(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S=50	-92.49	-89.71	-82.79	-9.99	0.00							
60	-92.49	-89.71	-82.79	-19.96	-9.99	0.00						
70	-92.49	-89.71	-40.13	-29.91	-19.96	-9.98	0.00					
80	-92.49	-89.71	-49.82	-29.86	-29.90	-19.67	-9.98	0.00				
90	-92.49	-89.71	-68.99	-49.58	-39.86	-30.16	-20.14	-10.01	0.00			
100	-92.49	-89.71	-65.64	-68.73	-49.60	-40.11	-30.10	-19.70	-9.98	0.00		
110	-92.49	-89.71	-70.78	-65.28	-68.73	-49.80	-39.79	-30.18	-20.39	-9.99	0.00	
120	-92.49	-89.71	-76.02	-70.52	-66.28	-68.97	-49.76	-29.87	-30.12	-20.33	-10.00	0.00
130	-92.49	-89.71	-81.26	-75.76	-70.52	-65.62	-68.92	-49.81	-40.08	-30.16	-19.62	-9.95
140	-92.49	-89.71	-83.88	-81.00	-75.76	-70.76	-66.47	-68.21	-49.77	-40.12	-29.58	-19.91
150	-92.49	-89.71	-86.19	-83.62	-80.79	-76.00	-70.71	-65.03	-68.94	-49.81	-39.47	-29.87
160	-92.49	-89.71	-86.60	-84.93	-83.68	-81.24	-75.95	-70.27	-65.49	-58.98	-49.09	-39.70

表2-30　细砂柱蒸发释水实验各测点含水量数值表(cm)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S=50	0.083	0.085	0.425	0.434	0.434							
60	0.083	0.085	0.425	0.430	0.434	0.434						
70	0.083	0.085	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434					
80	0.083	0.085	0.350	0.425	0.430	0.430	0.434	0.424				
90	0.083	0.085	0.240	0.363	0.425	0.430	0.430	0.424	0.434			
100	0.083	0.085	0.168	0.246	0.353	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434		
110	0.083	0.085	0.115	0.168	0.240	0.350	0.425	0.430	0.430	0.434	0.434	

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表2-30

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
120	0.083	0.085	0.110	0.115	0.168	0.240	0.350	0.426	0.430	0.430	0.434	0.434
130	0.083	0.085	0.970	0.108	0.115	0.168	0.240	0.365	0.425	0.430	0.430	0.434
140	0.083	0.086	0.094	0.097	0.108	0.115	0.168	0.240	0.353	0.425	0.430	0.430
150	0.083	0.086	0.092	0.094	0.097	0.110	0.115	0.168	0.240	0.360	0.426	0.430
160	0.083	0.086	0.091	0.093	0.094	0.097	0.110	0.116	0.168	0.240	0.350	0.426

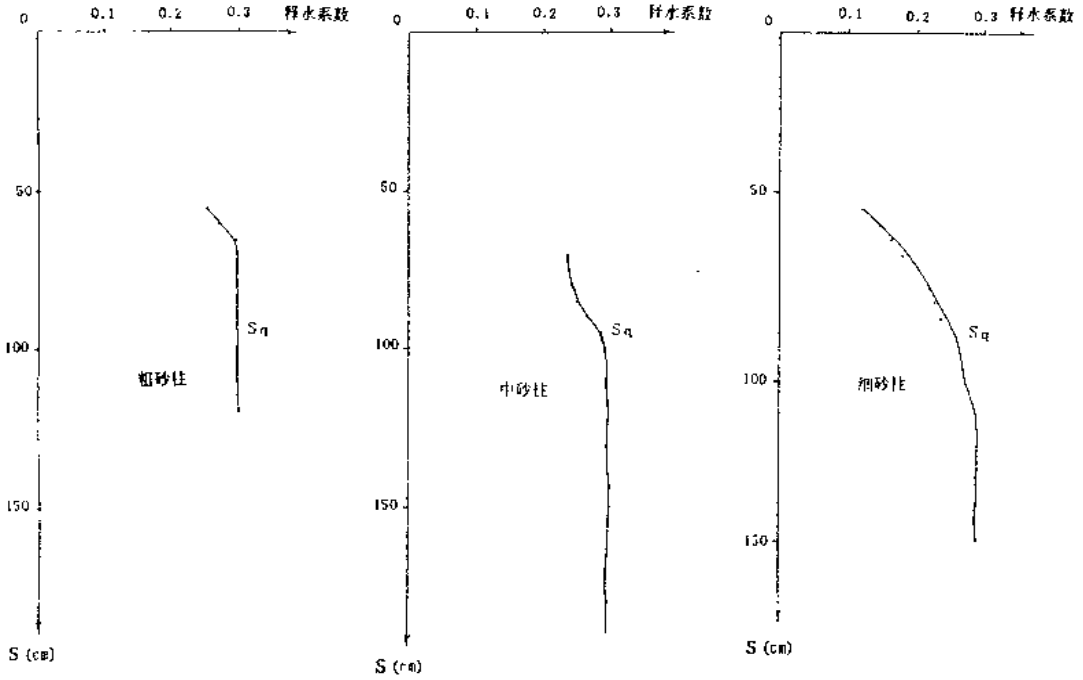


图2-6 蒸发后砂柱释水系数变化曲线图

$\theta < \theta_0$，形成由下向上递减的水力梯度(图2-8)的阴影部分曲线所示，使支持毛细水的水分上移。此时，在支持毛细水的顶面作用着蒸发强度（e）。

若支持毛细水顶面所在的葫芦孔处于毛细水保持高度至毛细吸水高度之间，每一葫芦孔都有一使支持毛细水静止的位置。支持毛细的顶面(上弯液面)处于这个位置时，支持毛细柱的底(潜水面)和顶(上弯液面)之间的压力为零，水力梯度即为零。只要毛细高度稍一降低，支持毛细水柱的底顶之间即形成压力差 $\triangle h$ (图2-9)，相应的水力梯度使支持毛细水向上运移。

从单个葫芦孔来看，在支持毛细水顶面降至葫芦孔底的细径时，则达到该葫芦孔所能产生的作用于支持毛细水柱底顶之间的最大压力差（$\triangle h$）；相应产生的支持毛细水的上升速度（V），为该孔造成的最大毛细升速。V取决于各孔的 $\triangle h$ 及相应的支持毛细高度，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

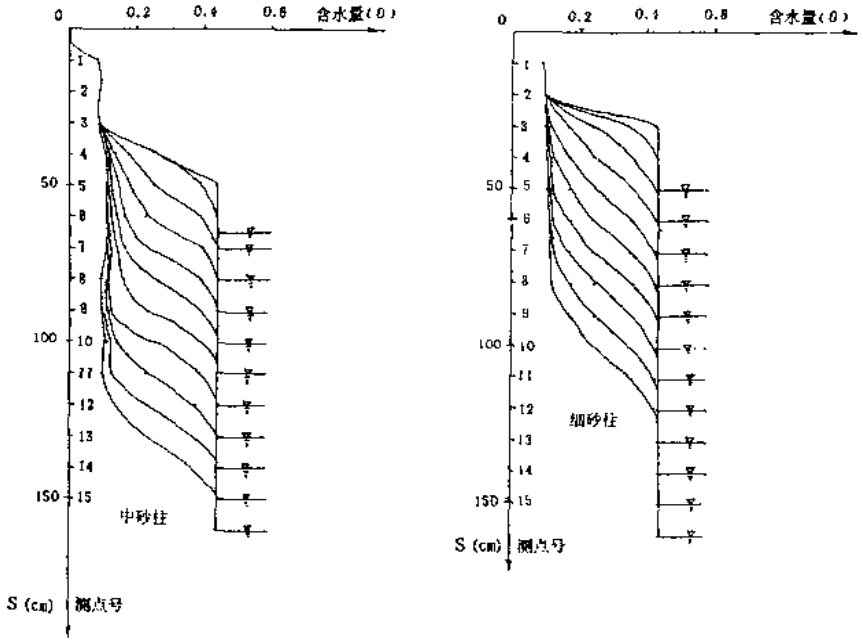


图2-7 蒸发后释水实验砂柱含水量变化曲线图

如图2-9所示，$h+\triangle h=H_{CB}$。支持毛细水带由上向下不同葫芦孔的 $\triangle h$ 呈等差级数分布，公差等于单个葫芦孔的高度，其中以毛细保持高度所对应的葫芦孔的 $\triangle h$ 为最小（小于单个葫芦孔的高度）。h 则以相同的公差减小。当 h 远远大于葫芦孔的高度时，h 的相对变化不大；当 $K(\theta)$ 近似不变时，则 V 与 $\triangle h$ 近似呈直线关系，即由毛细保持高度向下的不同葫芦孔，V 线性增大。不同粒级的介质，相应的 V 值（例如都在毛细保持高度的葫芦孔）也不同，粗介质的 V 远大于细介质的 V。

对某一葫芦孔而言，当支持毛细水顶面的蒸发强度 e（其量纲为：$L\cdot T^{-1}$）大于支持毛细水的最大升速 $V(L\cdot T^{-1})$ 时，支持毛细水顶面会通过葫芦孔底的细径迅速下跌到下一个葫芦孔底的静止位置。这时的支持毛细水高度便小于毛细

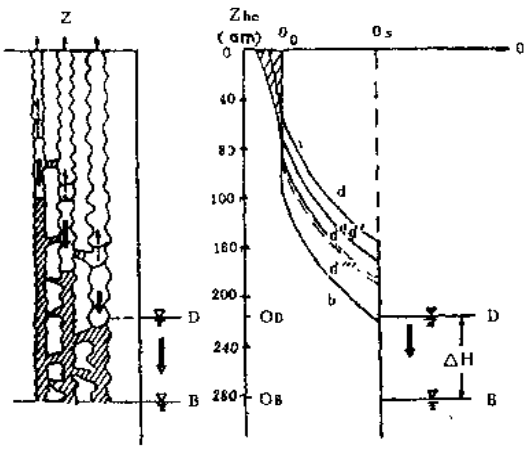


图2-8 蒸发条件下包气带的水分分布及释水性示意图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

保持高度。在新的葫芦孔中，如仍满足 $\varepsilon > V$ 条件时，则会重复上述过程。

尽管 ε 可以很大，但支持毛细水顶面跌落到一定位置时，某一定值 ε 与支持毛细水的上移速度相适应时（支持毛细水保持一定的高度与潜水面同步下降），即形成稳定蒸发。这时支持毛细水高度与毛细保持高度的差值 ΔL（如图2-8，d'' 线）为定值。当 ε 改变后，ΔL 也随之改变；ε 越大，ΔL 也越大。当 ε 大到一定程度时，支持毛细水的高度将低于毛细吸水高度（图2-8）。

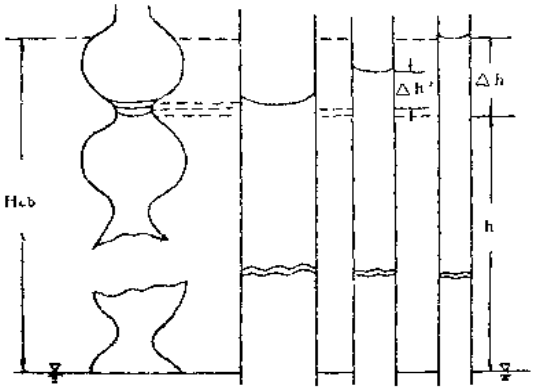


图2-9 蒸发条件下葫芦孔形成的压力差示意图

在上述蒸发条件下，包气带水分分布曲线若为 d''（图2-8）时，它对应的潜水位为 D 水平；当潜水位下降 $\triangle H$ 至 B，充分释水后包气带达到新的稳定水分分布时，附合释水曲线（图2-9，b）。d'' 线与 b 线的高差小于 d 线与 b 线的高差，这时的实测释水系数小于理论释水系数。这就是说，蒸发条件造成释水减量效应。ε 越大，释水减量效应越大。随着 $\triangle H$ 的增大，减量效应的影响程度相对减弱，使实测释水系数逐渐趋近于理论释水系数。

当 $\varepsilon < \min(V)$，即 ε 小于或等于毛细保持高度所对应的葫芦孔的 V 时（图2-9），支持毛细水的高度稍低于毛细保持高度（差值远小于半个葫芦孔的高度）即形成稳定蒸发。这时包气带的水分分布接近释水曲线；这种条件下的释水减量效应很小，实测释水系数稍小于理论释水系数。

综上所述，蒸发条件下，存在释水减量效应，实测释水系数总是小于理论释水系数。

第四节　重力释水的影响因素

一、不同的初始水位埋深对重力释水的影响

如图2-3所示的释水过程中，当初始水位 S_0 或 S_1 小于砂样（或含水层）的最大支持毛细水高度时，则存在释水减量效应（张人权，1985），实测释水系数（某一条件下的实验测得的释水系数）小于理论释水系数。S_1 越小，减量效应越强。当 $S_1 = 0$ 时，则 q 线与 L 线重合。

按表2-6、表2-11、表2-16的 $S \sim Q$ 值绘制释水过程中实验砂柱含水量变化曲线图，见图2-10。这个图也明显地反映出，当 S_1 值小于最大支持毛细水高度时，其释水曲线是不完整的。以 S_1 为初始水位时，降低排水水位高度，使其充分释水。则因初始释水曲线的不完整性，产生减量效应，使区段实测释水系数小于理论释水系数。而且弹性释水是与水位

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

的变化伴随进行的，参与整个无压释水过程。当 $S_0 = 0$ 时，而且水位下降幅度不大时（例如图2-10中的细砂释水至 S_1 、 S_2 ），几乎不发生重力释水，这时测得的释水系数值就是

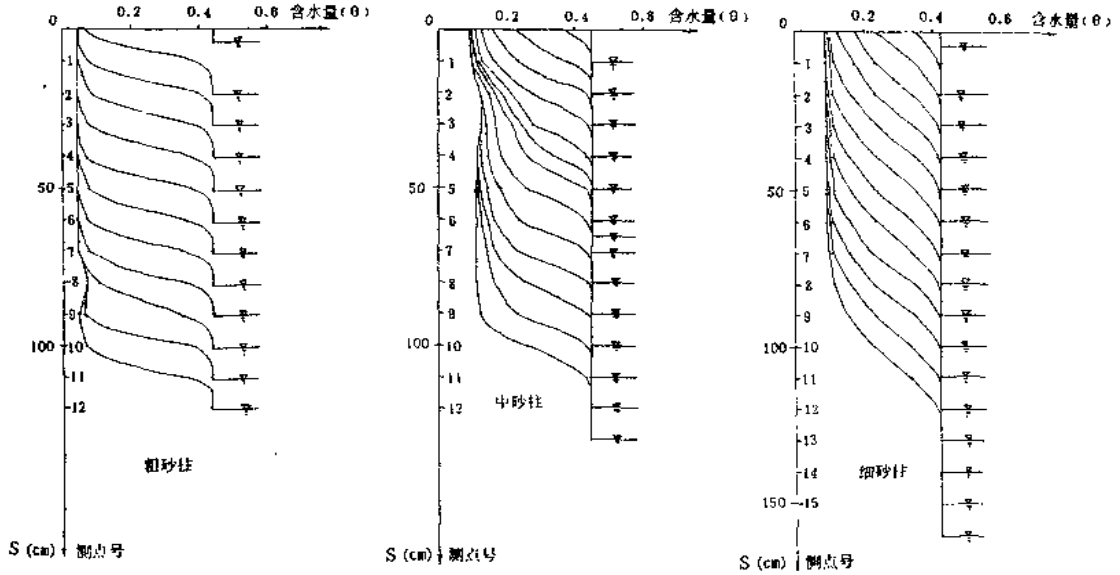


图2-10 无蒸发释水实验砂柱含水量变化曲线图

该条件下的弹性释水系数。当 S_1 值大于最大支持毛细高度时的水分分布符合释水曲线。

二、潜水下降速度对重力释水的影响

裴源生、张蔚榛等通过数值模拟得出，地下水位作等速下降时，降速越大，得出的给水度越小。随着降深加大及下降时间增加，给水度逐渐趋近于理论给水度。

如第一章中图1-11所示，对天然土的大小不同的孔隙通道来说。水位下降时，越是小的通道，流动阻力越大，流动速度越小。若是水位下降速度与最细小通道中的水流速度相近，则任一时刻释出的水体积除以释水土体的体积，都等于理论给水度值。水位降速加大时（如图2-11所示），大通道中的水迅速释出，并通过较粗的连通管道排走较小孔隙通道孔腹（孔隙通道中直径粗大的部分）中的水，在小孔隙通道中形成悬挂毛细水。这样，便产生两种效

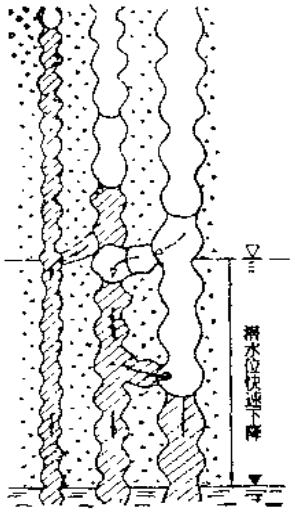


图2-11 异径毛管网络的释水减量作用

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

应之一的减量效应：悬挂毛细水滞留于孔隙之中，时间延续再长也不再释出，实测给水度便小于理论给水度；二是滞后效应：与更细小通道连通的那部分悬挂毛细水，最终仍可释出，但必须经由更为曲折、更为细小的通道排出，释水滞后于水位下降更为明显。

如果土中孔隙通道直经相近，即使水位降速很大也不会形成悬挂毛细水，此时释水滞后但不减量。

综上所述，对于均质土，水位降速越大，孔隙通道大小的差别越悬殊，释水的滞后效应与减量效应就越显著，实测给水度就越小于理论给水度。

第五节　层状土的释水特征①

对于上细下粗的土层的界面上，经常有可能形成界面悬挂毛细水，因此，层状土的释水减量与滞后远较均质土为强烈。

一、层状土释水减量效应

如图2-12所示条件下的层状地层。上部为细粒土，下部为粗粒土。其中的a、b、c各图右侧为简化表示的毛管网络模型，图上只表示了最细的毛管。当地下水位由细粒层降到粗粒层时，由于毛细力的大小取决于弯液面所在处的孔隙直经，因此，在无进入空气的条件下，毛席上升高度仍可保持与细粒中相当的高度(图2-12 a、b)；在有进气条件时，则在地下水位下降到界面以下的距离超过粗粒层毛细包和带高度时，毛细水开始在界面处断裂；当潜水位到界面的距离大于粗粒层最大毛细保持高度时，粗细层界面会产生全面的"水力断裂"，细粒层中形成悬挂毛细水而与下部毛细水失去水力联系(图2-12 c)。

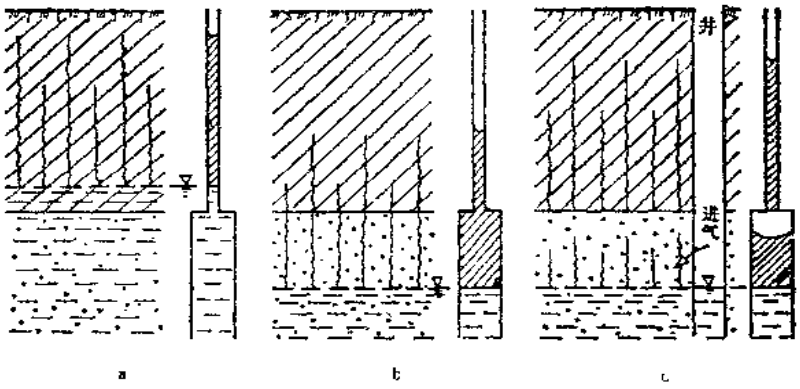


图2-12 上细下粗地层中毛细水作用产生的减量效应

常见的进气条件是：①粗粒层与井壁相通，通过井壁粗粒层的弯液面释水进气，并向四周扩展，形成界面悬挂毛细水与"水力断裂"，②细粒层中有部分特大孔隙(虫孔、根孔、

①本节据张人全等"层状土重力释水机制初步研究"一文 见参考文献。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

裂隙)，水位下降时特大孔隙超前释水形成悬挂毛细水当弯液面降到界面以下时，粗粒层便进气释水。

由于上细下粗界面形成的界面悬挂毛细水，这部分水尔后不再释出，所以，层壮土的释水减量效应十分显著，实测给水度常小于理论给水度。由上可知，层壮土出现悬挂毛细水的原因仍然是粗细孔隙通道释水不同步。

层壮土的理论给水度的大小还与细粒层的厚度有关。因为，薄层细粒土的释水减量效应更加明显(如图2-13所示)。图 a 表示水位下降前毛细水的分布，图 b 表示水位下降后毛

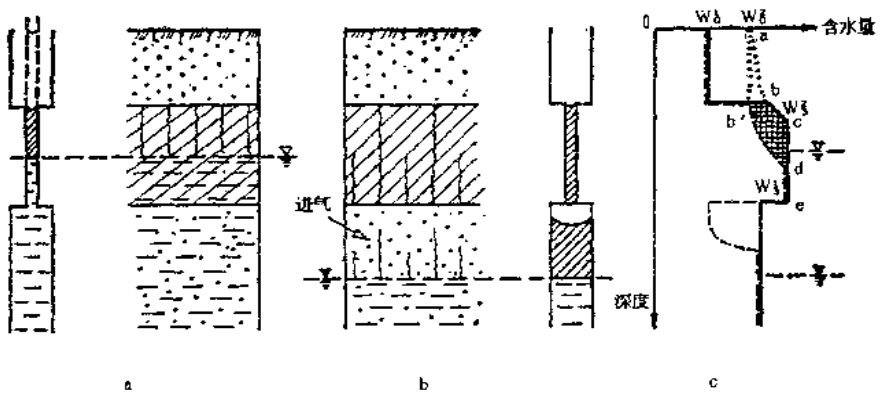


图2-13 薄层细粒土的释水减量效应示意图

细水的分布，图 c 表示水位变动前、后含水量的分布曲线。细粒层较薄时，毛细水分布受上覆粗粒层的限制而不能达到其最大上升高度（图2-13 a），含水量的分布如图2-13 c 中 bcde 线所示。随着水位下降，毛细带高度增加(图2-13 b)；水位降到粗粒层中并形成界面悬挂毛细水后，薄层细粒土含水量分布如图2-13 c 中的 b′de 曲线所示，释水量相当于 bcdb′ 所包的范围。若为厚层细粒土，释水量相当于 abcd 所包的范围。相对于厚层细粒土，薄层的释水减量相当于 abb′ 所包的范围。当细粒土厚度小于其毛细饱和带高度，则孔隙注中的水均以悬挂毛细水的形式自滞留，给水度为零。

显然，若细粒土层中没有特大孔隙，其下伏的粗粒层又未与井壁相连

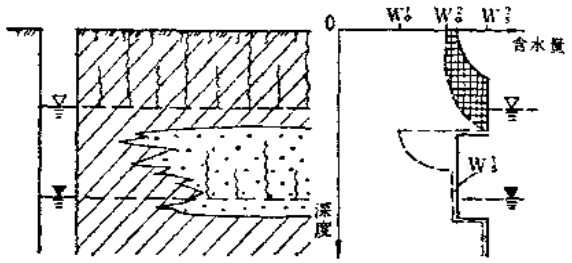


图2-14 进气条件不利时细粒土层的释水减量

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

通时，则一直要到细粒层毛细饱和带消失，即其最粗的孔隙通道中的水释出后，粗粒层才能释水。此时，悬留于细粒层中的水分较少，减量效应较弱（如图2-14所示）。

二、层状土释水的滞后效应

某些情况下，细粒层的悬挂毛细水随后仍可释出；条件是并非整层形成界面悬挂毛细水，即与下伏的粗粒层之间未形成全面的"水力断裂"。此时，悬留的毛细水需经长距离的迂回绕流，释水更加滞后（如图2-15所示）。

在上述前提下，水位下降速度越大，滞后效应越显著。这是因为：①水位降速越大，不论粗、细粒土层，都会在其细小的孔隙中形成更多的局部悬挂毛细水，使更多的水通过更细小通道绕流（见图2-11）；②水位降速越大，细粒土层一开始悬留的毛细水越多，越多的超量悬挂毛细水经由粗粒层的细小孔角通道缓慢释出，释水滞后越显著。

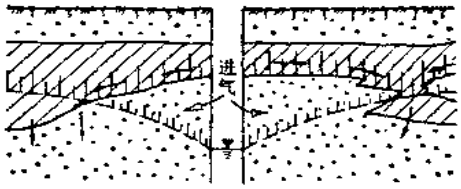


图2-15 悬挂毛细水绕流滞后给水

三、层状土结构含水层抽水试验中的几个问题

在层状结构的含水层中进行抽水试验确定其水文地质参数时，水位下降到一定时间后，常出现水位长期持续稳定而不下降的情况。这与层状土的滞后释水有关。当粗、细粒层界面形成悬挂毛细水面只发生局部的水力联系时，渗流的断面明显变小，渗流的途径显著变长，渗水的过程长期延续，从而使抽水量与释水量长期保持平衡。

在一定条件下，抽水过程注中还经常出现潜水位"上升"的反常现象（通常称为水位回弹）。如图2-16所示的水文地质条件下，潜水位在Ⅰ位置时，无进气条件，上细下粗的土层形成连续的毛细水带；一旦水位下降到Ⅱ位置，可由井壁进气时，粗粒层中的超高支持毛细水便迅速释出，大量的包气带水在短时间内转入含水层，使潜水位抬高到Ⅲ位置。

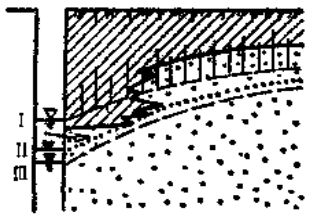


图2-16 井壁进气造成潜水位"回弹"

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

而习惯上常将层状土注中抽水实验求得的给水度看成抽水水位变动带某一土层的给水度，或若干土层厚度的加权平均给水度，都是不正确的。在层状非均质条件下，给水度的大小不仅取决于水位变动带的岩性，还取决于支持毛细水带的岩性，以及土层的厚度和配置情况。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第三章 包气带水的横向渗流机制研究

第一节 两河渠间稳定流场中包气带水流特征

支持毛细水的横向渗流实验是在潜水仪(如图3-1所示)上进行的，它是一个理想的实体

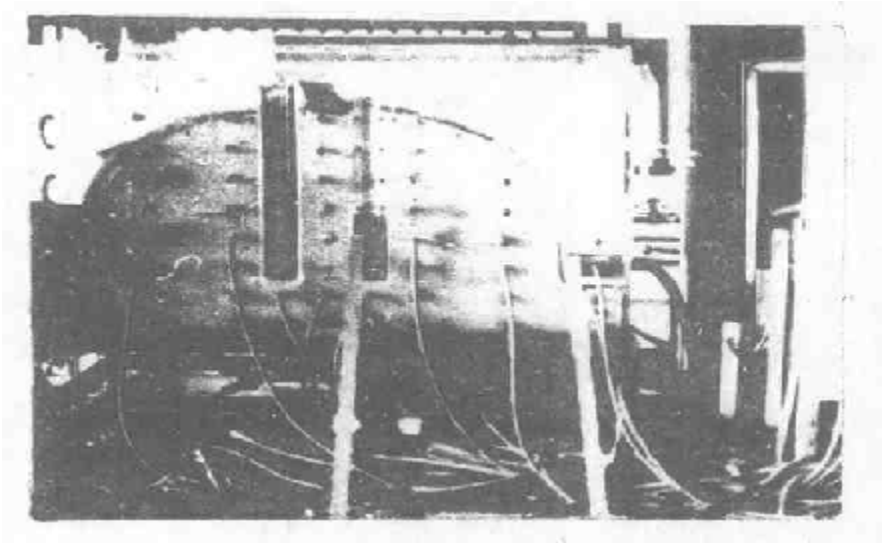


图3-1 潜水仪

模型，用来描述河间地块潜水含水层。含水层为均质各向同性(用粒径0.1～0.5mm的分选石英砂充填，上表面及河界面罩以滤网，四壁为有机玻璃封闭)，两侧河渠均未切穿含水层底板，河渠的水位由供水、排水装置控制，在河渠纵剖面上设有七排小孔，可做示踪剂注入孔或测压孔。它可以很好地模拟有入渗与无入渗条件下，天然河渠间潜水渗流流线的形状、分布、绘制流网等，是地下水渗流研究中比较理想的装置。该实验是在两侧河渠之间造成一定数值的水头差，保持长时间后便形成河渠间潜水的稳定流动，潜水位之上的支持毛细水也形成稳定的分布高度，也就形成了稳定的水气界面分布，界面不发生垂向迁移问题。潜水仪的B面剖面如图3-2所示：剖面长约100cm，高约50cm，两河渠边壁直距约80cm。示踪孔由左向右编号为1～7竖排，每排的上下相邻小孔间距为5cm。由上向下编号，例如：3-1点、3-2点、3-3点、……。纵剖面上各测压孔的实测水位见表1，据此绘出潜水面的趋势形状。

为了研究流场的状态特征，在高水位河渠中瞬时加入示踪剂后，对渗流的补给、迳流、排泄进行全程观测。

河渠水中加入示踪剂后，1分30秒时的示踪景观如图3-3所示。可见示踪水流通过河渠壁向下、向侧方渗出。在河渠侧壁水深约1／2处存在分流界面，界面以上的示踪水流在侧

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

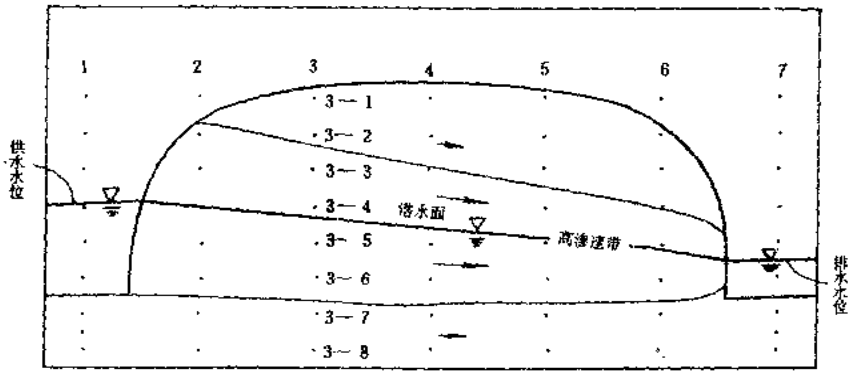


图3-2 流场及示踪孔排示意图

表3-1 剖面潜水位实测值

示踪(或测压)孔排	1	2	3	4	5	6	7
潜水位H值(cm)	44.0	42.6	41.8	40.0	39.0	37.5	36.2

渗的同时也向潜水位以上运移。3分钟时的示踪景观台图3-4所示。河渠侧边渗流分界面更加清晰，这时上升渗流沿边壁的锋面高度(与河水位比较)可达5cm左右，呈尖锋形状。7

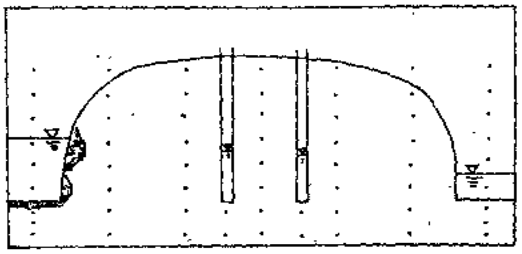


图3-3 第1分30秒时示踪剂的分布

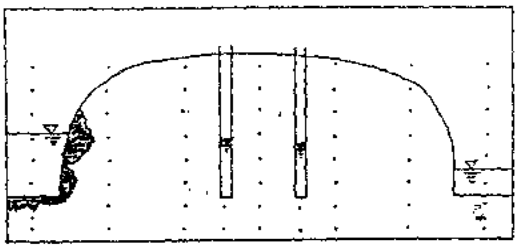


图3-4 第3分时示踪剂的分布

分钟时的示踪景观如图3-5所示。在潜水位附近的渗流，横向迁移距离最长，前锋已越过第2排示踪孔位置，渗流上升锋面高度约6.5cm，仍为尖锋形状。13分钟时的示踪景观如图3-6所示。图示的潜水位高度为实测。在潜水面附近渗流的横向距离最长，上升锋面高约8.5cm，呈平顶锋面形状。21分钟时的示踪景观如图3-7所示，直接测得非完整井中水位。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

上升的平顶锋面高约 9 cm，水平渗流的主速前锋已超过第三排示踪孔的位置，水平高速渗流前锋主要分布在潜水位以上的非饱和带与潜水位以下的一部分饱和水带区域上。 在2-2

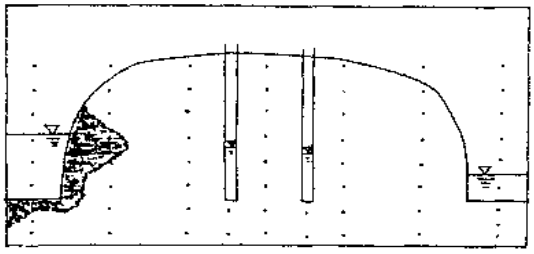


图3-5 第 7 分时示踪剂的分布

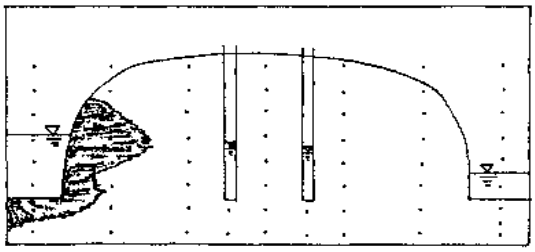


图3-6 第13分时示踪剂的分布

点与2-6点之间的横向流速近似为抛物线型分布。 通过渠侧壁1／2高度以下的示踪渗流横向运移锋面均达第 2 排示踪孔的位置，渗速近相等，再向下渗速变小。27分钟时的示踪景观如图3-8所示。直接测得二非完整潜水井中的水位高度。上升的锋面高约10cm，水平渗流

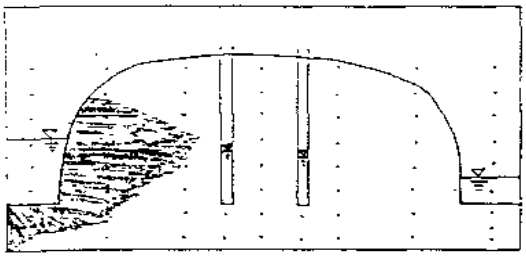


图3-7 第21分时示踪剂的分布

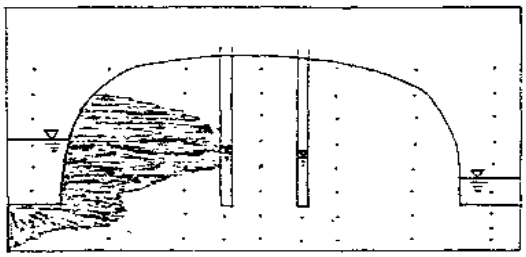


图3-8 第27分时示踪剂的分布

的高速前锋已达左侧潜水井。50分钟时的示踪景观如图3-9所示。左边壁附近潜水位以上的渗流上升锋面已超过10cm，水平渗流的前锋位于第 5 排与第 6 排示踪孔中间部位，该锋面宽度约10-12cm，分布于潜水位面的上下。红锋过后，左渠供水的更新水渗流浅色锋面已至左侧潜水井。55分钟时，供水渠底侧渗流示踪景观如图3-10所示。可见底水平面以下的渗流距离最大点在第二排与第三排示踪孔中间，渗流线长约15cm。向下渗流的最短流线约 6 cm。还可见沿底部直角形隔水边壁的渗流流线转向情况，在1-8号示踪点左侧有一个很小的滞流区。62分钟时，水平渗流示踪的前锋景观和井、渠水位如图3-11所示。高速渗流的前锋已趋近右侧排水河渠，两河渠边壁间的直线距离约为80cm，而引时供水渠底界以下的流线长为7～10cm不等(实验记录)是高速渗流速度的0.09～0.20倍。60分钟时，横向渗流锋面呈船首形逼近右侧排水渠的水下湿壁，如图3-12所示。这时，供水端上升锋面高约11cm。80分钟时，示踪景观如图3-13所示。供水渠一侧的边壁附近渗流顶锋面向右横向推移约10cm，供水渠壁以下的渗流距离仍很小。这时更新水渗流的浅色锋面在供水渠附近上升10cm

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

左右，横向推移锋面已至第 5 排与第 6 排示踪孔之间的部位，渠底水平面以下渗流显示推移距离仍很小。120分钟时的示踪景观如图3-14 所示。更新水横向渗流的浅色前锋已透过

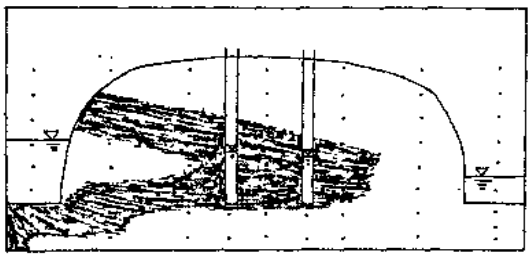


图3-9 第50分时示踪剂的分布

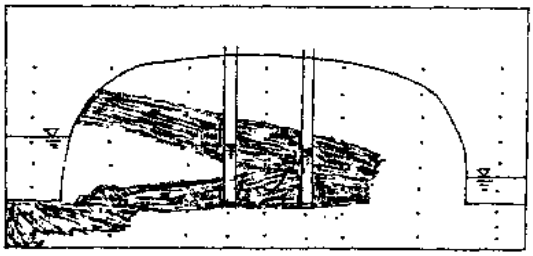


图3-10 第55分时示踪剂的分布

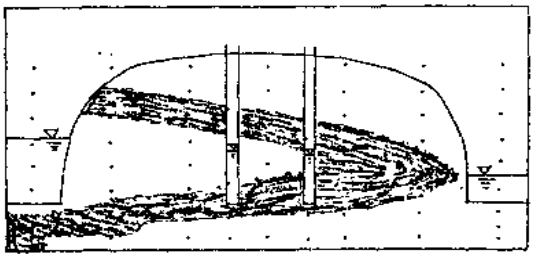


图3-11 第62分时示踪剂的分布

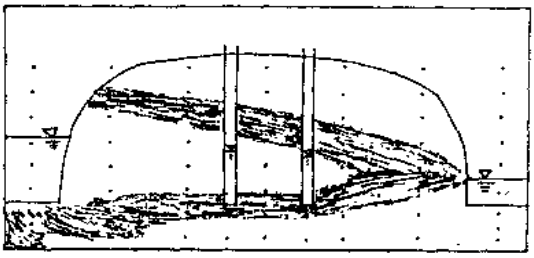


图3-12 第60分时示踪剂的分布

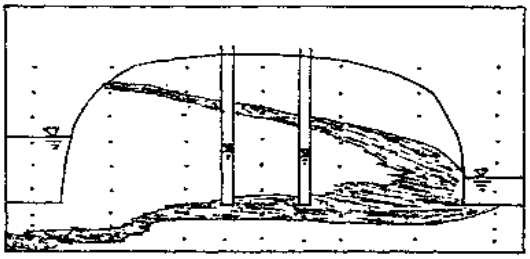


图3-13 第80分时示踪剂的分布

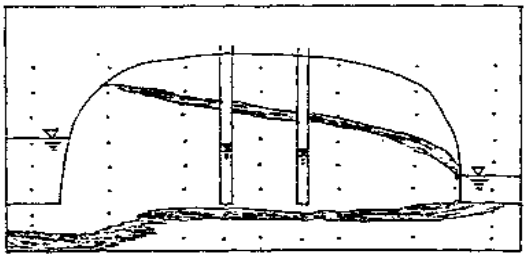


图3-14 第120分时示踪剂的分布

排水渠壁。上部的深浅颜色界面可作为高速渗流带的上界，下界大致为两底连线。在4-2、5-2示踪点新注入的示踪剂显示出该点以下、高速渗流带以上的部位，仍有水平渗带。140分钟时的示踪景观如图3-15所示。横向高速渗流带的底界显示更加清晰，顶部示踪剂边界逐渐冲淡、模糊，该示踪渗流观测至此结束。

总括上述的实验事实为：示踪剂穿越供水河渠湿周边壁后，一部分在饱和水带向排水河渠运移；另一部分沿供水河渠的凌空边壁附近上升进入支持毛细水带，上升一定高度后

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

在支持毛细水带中向排水河渠方向横向运移，在排水河渠附近斜转 向下经河渠边壁的湿周排泄。就是说，在两河渠水位差的作用下，支持毛细水带与饱和水带构成统一横向渗流场。

从孔隙水压力的分布情况看：在支持毛细水带为负压，在饱和水带为正压。支持毛细水带按其含水情况又可以分为毛细饱水带与毛细非饱水带。在垂向上看，这个横向渗流场由上向下依次分布为毛细非饱水带、毛细饱水带与饱和水带。

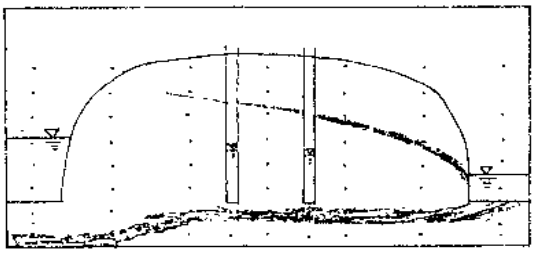


图3-15 第140分时示踪剂的分布

为了便于研究横向渗流机制，应将多孔介质网络通道进行模型概化。描述多孔介质中单相流体的最简单模型一般是用毛细管按一定方式排列而成，这样例可借助于水力学中的管流理论研究多孔介质中的渗流问题。

一、在某一等径圆管中的均匀水流。

所谓均匀水流是指沿程各过水断面及其上各点的流速沿程不变或者说流线都是平行直线的水流。我们研究该均匀管流中切应力作功与沿程水头损失h的关系。如图3-16所示，

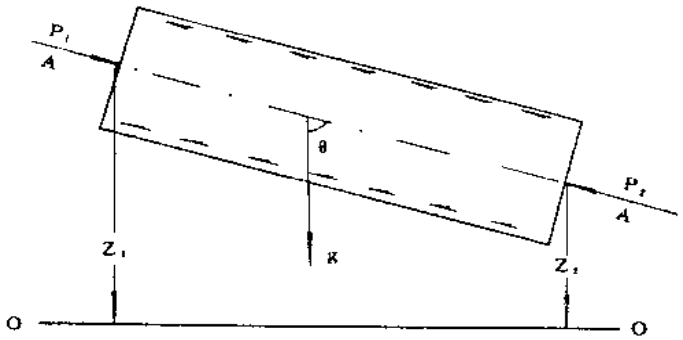


图3-16 斜置均匀流管中应力的分布示意图

在流管中任取一段流股，该段流股为流面及二断面围成的圆柱体。从力的平衡看，作用在圆柱体的阻力与驱动力相等。如果流股长为 L，边界面周长为 C。流股边界面上作用有切应力 τ。一般情况下，流股边界面上各处的 τ 值是不一样的。考虑到均匀流的特征，流股边界的切应力沿程不变，则流股边界面上作用的总摩擦阻力为：

$$F_f = \tau' \cdot C \cdot L \qquad (3\text{-}1)$$

式中 τ' 为平均值，

$$\tau' = \int_0 \tau \, dC / C$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

驱动力包括压差驱动力与重力在流向上的分量驱动力。作用于流股两端断面上的压强分别为 P_1 和 P_2，流股的过水断面面积为 A，则压差驱动力为：

$$P_1 \cdot A - P_2 \cdot A \tag{3-2}$$

如果流股轴线与重力线的夹角为 θ，则重力在流向上的分量为：

$$\gamma \cdot A \cdot L \cdot \cos\theta \tag{3-3}$$

式中，γ 为水的重率。由平衡条件，有：

$$P_1 \cdot A - P_2 \cdot A - \gamma \cdot A \cdot L \cdot \cos\theta = \tau \cdot G \cdot L \tag{3-4}$$

将该式两边同时除以 $\gamma \cdot A$，得：

$$P_1 / \gamma - P_2 / \gamma - L \cdot \cos\theta = \tau \cdot G \cdot L / (\gamma \cdot A) \tag{3-5}$$

流股段两端断面中心点的高程分别为 Z_1、Z_2（自某一选定的基准面算起）。因为：

$$L \cdot \cos\theta = Z_1 - Z_2 \tag{3-6}$$

所以，(3-5)式左端项变为：

$$P_1 / \gamma - P_2 / \gamma - Z_1 - Z_2 = (Z_1 - P_1 / \gamma) - (Z_2 - P_2 / \gamma) \tag{3-7}$$

由于均匀流的流速沿程不变，任意两个过水断面间的速头差均为零，故有：

$$(Z_1 - P_1 / \gamma) - (Z_2 - P_2 / \gamma) = H_1 - H_2 = h_f \tag{3-8}$$

式中，H_1、H_2 分别为该段流股两端断面的总水头。

综合(3-5)、(3-6)、(3-7)、(3-8)式，有：

$$h_f = \tau' \cdot C \cdot L / (\gamma \cdot A)$$

就是：

$$\tau' = \gamma \cdot A \cdot h_f / (C \cdot L)$$

令 $A / C = R$　$h_f / L = J$，R 称为水力半径，J 称为水力坡度，则：

$$\tau' = \gamma \cdot R \cdot J \tag{3-9}$$

只要附合均匀流的条件，无论是层流带是紊流，(3-9)式均适用。上面的分析适用于任何大小的流股。如果把流股断面扩大，则有：

$$\tau_0' = \gamma \cdot R_0 \cdot J \tag{3-10}$$

式中：τ_0 为大断面流股边壁上的平均切应力，R_0 为大断面流股过水断面的水力半径，水力坡度 J 在均匀流中是个常数，不随流股的大小而改变。由(3-9)、(3-10)式得：

$$\tau' / \tau_0' = R / R_0$$

上式表明，流股表面的平均切应力与流股的水力半径成正比。如图3-17所示：在过水断面上由管轴线到管壁，切应力的大小是线性分布的，故管壁处切应力 τ_0 最大，越向流股中心轴线靠近，切应力越小。在等径的圆管中为轴对称流动。取与圆管呈同心圆形的流股，半径为 r，则：

$$\tau_0' = \tau_0$$

τ_0 为流股边壁上的切应力，在均匀流中为常数。因为：

$$R = A / C = r / 2$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

则有:

$$\tau' = \tau = r \cdot R \cdot J = r \cdot r \cdot J / 2 \qquad (3\text{-}11)$$

在层流中，切应力服从牛顿内摩擦定律:

$$\tau = \mu \cdot dU_X / d_Y \qquad (3\text{-}12)$$

式中 U_X 为轴向流速， Y 为从管壁量起的径向距离。均匀管流中的断面速度分布如图3-18所示，

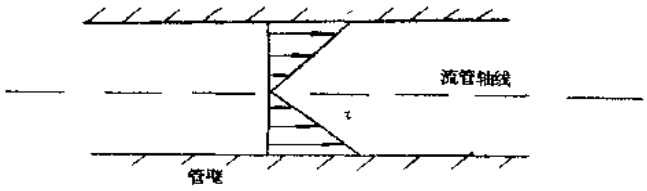


图3-17 均匀管流断面的切应力分布示意图

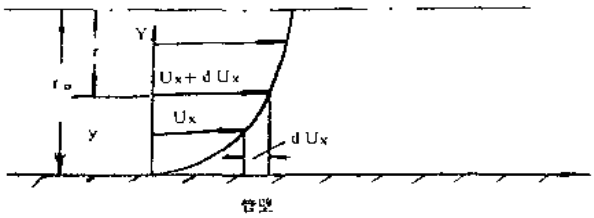


图3-18 均匀管流断面速度分布示意图

其中 r_0 为流管半径， $Y = r_0 - r$ ， $d_Y = -d_r$ 有:

$$\tau = -\mu \cdot dU_X / d_r = \gamma \cdot J \cdot r / 2 \qquad (3\text{-}13)$$

由，

$$dU_X = -\gamma \cdot J \cdot r / 2\mu$$

积分得:

$$U_X = -\gamma \cdot J \cdot r_0 / 4\mu + C$$

当 $r = r_0$ ， $U_X = 0$ 时，可得 $C = \gamma \cdot J \cdot r^2 / 4\mu$ ，代入上式可得流速分布公式为:

$$U_X = r \cdot J \cdot (r_0^2 - r^2) / 4\mu \qquad (3\text{-}14)$$

(3-14)式表明管流中的流速分布是以管轴为中心的旋转抛物面，管轴线上的流速最大，为:

$$U_{Xmax} = r \cdot J r_0^2 / 4\mu$$
$$= r \cdot J \cdot d^2 / 16\mu \qquad (3\text{-}15)$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

式中：d 为圆管中的直径。如果以 V 代表断面平均流速，则：

$$V = \int_0 U_x \cdot \pi \cdot d^2 / (\pi \cdot r_0^2)$$
$$= \gamma \cdot J \cdot r_0^2 / 8\mu$$
$$= \gamma \cdot J \cdot d_0^2 / 32\mu \qquad (3\text{-}16)$$

比较(3-15)、(3-16)两式，可以看出：

$$V = U_{xmax} / 2$$

对(3-16)式，如果 $\gamma \cdot r^2 / 32\mu = K$，则流量 Q 的表达式可以写成：

$$Q = V \cdot A$$
$$= \gamma \cdot d^2 \cdot J \cdot A / 32\mu$$
$$= K \cdot J \cdot A \qquad (3\text{-}17)$$

式中 A 为流管断面面积。(3-17)就是达西公式的表达形式。

(3-16)式表明了圆管流平均速度与管径的关系。在一定的温度和压力下，水的 γ、μ 值为常量，在一水力坡度下的管流流速的大小与流管直径的平方成正比。因此，多孔介质中过水断面流速的不等值分布可用不等径的流管来描述。

二、负压区的单相水流横向运移机制

负压区的单相水流横向运移机制可由如下的实验说明：这是用来测定非饱和土柱中水的传导度的常规实验之一，实验装置如图3-19所示。一满装均质饱土水柱或非饱土水柱的

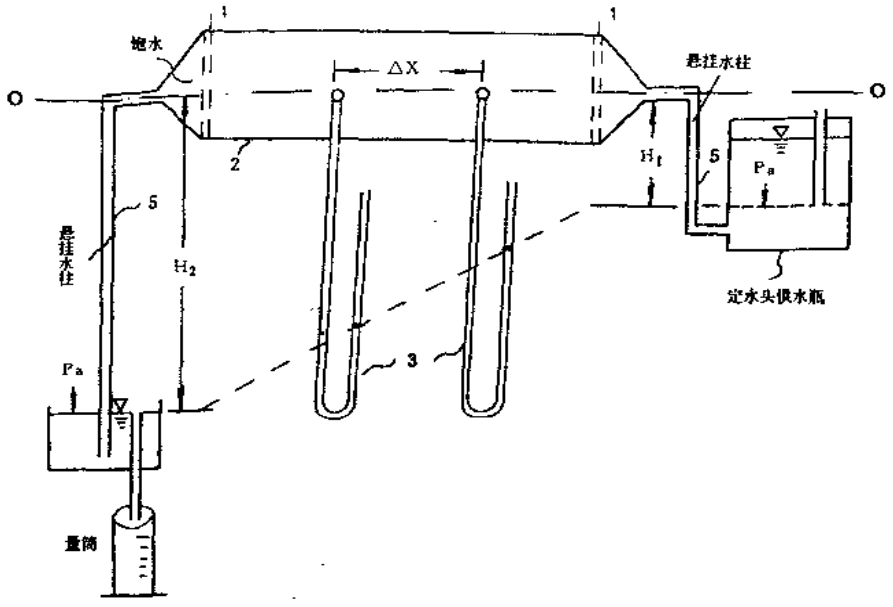


图3-19 负压条件下的渗流实验装置

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

有机玻璃圆柱 2，呈水平放置。在土柱中部按预定的 $\triangle X$ 间隔安装两支张力计 3，测点位于土柱的中轴线上，且规定土柱中轴线为水头零高度。在土柱的两端用多孔陶板 4 或特制的碳化硅透水石板封闭，要求陶板的吸力远大于干土柱的吸力。在土柱两端陶板的外侧，有机玻璃管柱缩径以联接导管 5 供水或排水。供水通常用定水头供水瓶——马利奥特瓶来实现排水采用溢流装置 7，用量筒计时测溢流量。在陶管外及导管中饱水，将供水瓶及排水装置的 P_a 面置于土柱轴线以下，在导管中 P_a 面至 O 高度水头面之间形成悬挂状水柱 H_2，这样便使土柱形成负压区，且存在横向水力坡度。取 $\triangle H = H_2 - H_1$，当 $\triangle H$ 取不同的值时，量筒 7 测得的溢流量不同。该实验整个流动过程实质上是一个虹吸过程，在虹吸过程中负压区的饱水土柱或非饱水土柱的水分，在横向水力坡度的作用下运移。因此，在含水多孔介质中，支持毛细水通过饱合水带与补给及排泻河渠发生水利联系，在两侧河渠水头差的作用下进行着横向渗流。整个流动过程实质上也是一个虹吸过程，可以用虹吸管束模型来加以描述。

支持毛细水带的渗流速度与含水量相关，支持毛细水非饱和带的含水量变化很大，渗流速度不等，可用不等径的虹吸管束模型来描述。这些流管的管壁为水气界面即水的张力面构成。虹吸管的管径由支持毛细水饱水带顶界向上逐渐减小，减小的程度视介质的粒度或实验所得的支持毛细水的横向渗流速度分布而定。对于支持毛细水的饱水渗流，则用等径的虹吸管束模型描述。

在两侧河渠水位不变的稳定渗流条件下，渗流水头的零压面即潜水面的分布在垂向上是一定的。与之相伴随的支持毛细水的高度即水气界面的分布也是一定的，不发生移动。则构成横向渗流流管壁的水气界面就是恒定的。由于这些横向渗流管道的存在，才使支持毛细水的横向运移得以实现。因此，支持毛细水不仅在垂向上传递静水压力，而且在横向上也传递静水压力。

这样，支持毛细水带的虹吸管束模型与饱水带已有的流管束模型并连，就完整的描述了河渠间的横向稳定渗流状态，包括它的补给、迳流、排泄的全过程。

第二节　两河渠间稳定流场潜水面的非流面问题研究

既然支持毛细水在进行着横向渗流，那么它应有一定的补给与排泄方式。第一节中的实验表明，在两河渠间的稳定流场中，支持毛细水借助于饱和水带与两侧河渠发生水力联系，支持毛细水横向运移的补给与排泄是通过潜水面进行的。因此说，该条件下潜水面不是流面。

一、问题的由来

传统的水文地质教材与杂志，着眼于潜水面以下的饱和水带研究，认为两河渠间稳定潜水流在垂向上不发生水量交换，该条件下的潜水面是流面。

在现行的水文地质专业教材中，注意了包气带水分运移的研究。但究其所指，对支持毛细水是研究垂向运移规律，对上述条件下的潜水面仍视为流面。

Jacob Bear对该问题的研究是采取分别处理的方式。其一，假定自由面(潜水面)是介

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

质孔隙中空气和水的一个突变界面。在各向同性或各向异性的孔隙含水层中，没有入渗补给的稳定自由面是一个流面。其二，图3-20所示：将毛细管带(即支持毛细水带)看做是一个近似的概念，按这一观点，假定在潜水(或自由)面以上存在一个完全的饱和带，"毛细管带内部发生着流动，且流线从两个方向穿越潜水面。即使在稳定流动中，潜水面也不是一个流面。"

二、潜水面非流面性的物理机制分析

为了说明上述条件下支持毛细水横向渗流的补给与排泄发生在潜水位面的物理机制，下面探讨虹吸管流的形成过程。在虹吸管束模型中取最顶部的一根流管，流管的中段沿水力坡度方向里斜置状态。在重力的作用下，管中水沿流管向较低处运移，使流管的高端产生吸力，低端产生压力。在流场的侧向凌空边壁，由于水气界面的弯液面作用，流管高端吸力无法突破水气界面，就是说管壁不会进气面降压。这种吸力使支持毛细水顶端的水头降低，沿支持毛细水流管形成由下向上的水力坡度。使高水位段的饱和水向上运移补充支持毛细水，以维持支持毛细水的垂向水头高度。这样，支持毛细水的补给水流便在穿越着潜水面。同理，流管低端的压力无法突破凌空边壁，该压力向低水位段的饱和水带传递，形成由上向下的水力坡度。使支持毛细水的排泄水流向下穿越潜水面。在两侧河渠水位差的作用下，使得这个补给与排泄的过程不断进行，形成稳定的虹吸管流。

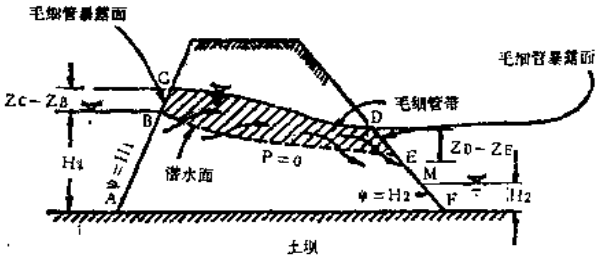


图3-20 潜水面非流面性示意图(据 Jacob Bear)

其下任一虹吸管流的补给与排泄过程同上所述。都是通过潜水面进行的。因此，在无入渗无蒸发的两河渠间稳定流场中，潜水位面不是流面。

第三节 "渗出面"问题的研究

一、"渗出面"的概念

所谓"渗出面"是这样定义的：当稳定潜水面逼近渗流区(例如土坝)的下游边界时，它将终止在流动区域外水体水面以上的一个点上。水面以上和潜水面以下的一段边界叫渗出面。如图3-21所示，表明"渗出面"是潜水渗流区域边界的一部分，流线与其相交，渗出面是透水边界。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

二、排水边壁附近的渗流特征

对此，从研究横向渗流的排泄特征与潜水位在边壁的位置入手，在实验模型的排水河渠边壁附近的垂直断面示踪孔中瞬时注入红色示踪剂，示踪的迹线在稳定渗流状态下就是流线。

在第6排小孔注入示踪剂后，1分钟时示踪剂显示横向迁移如图3-22所示。2分钟时的景观如图3-23所示。5分钟时的景观如图3-24所示。7分钟时的景观如图3-25所示。12分钟时的景观如图3-26所示。潜水位以上示踪点6-5注入的示踪剂向斜下方运移，穿越潜水位面进入饱和水带。15分钟时的景观

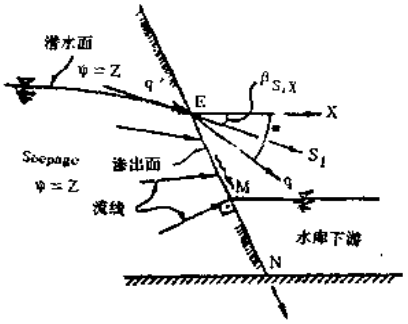


图3-21 “渗出面”示意图
(据Jacob Bear, 1972)

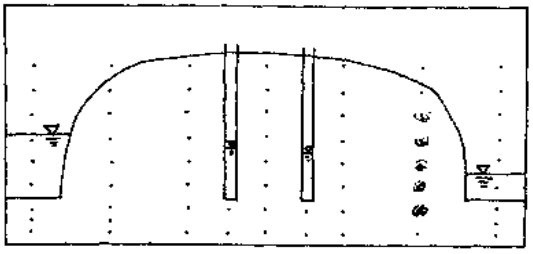


图3-22 第1分时示踪剂的分布

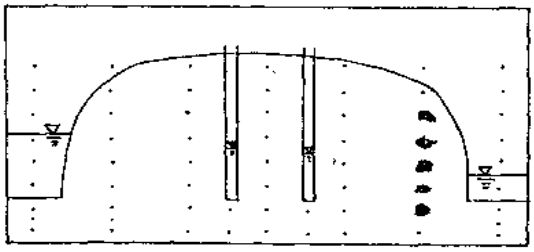


图3-23 第2分时示踪剂的分布

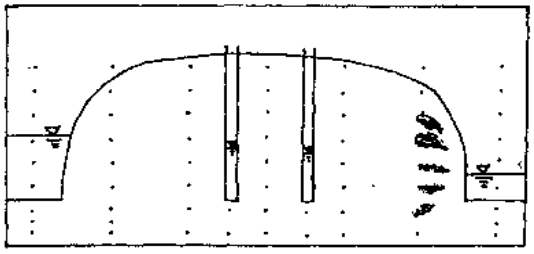


图3-24 第5分时示踪剂的分布

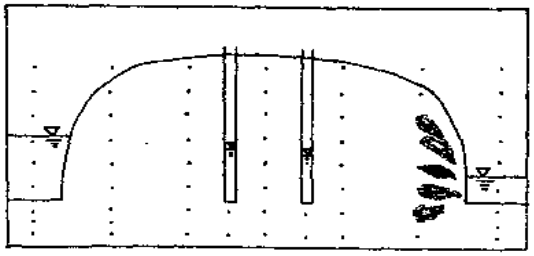


图3-25 第7分时示踪剂的分布

更为明显，如图3-27所示。6-5号示踪点注入的示踪剂在排泄河渠水位以下约2 cm处入渠，图示潜水位为实测，示踪剂显示的流线如图3-32所示，17分钟时的景观如图3-28所示。示

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

踪点6-6注入的示踪剂呈水平方向渗入右渠。20分钟时的景观如图3-29所示。24 分钟时的景观如图3-30所示，这时，6-4、6-5、6-6示踪点注入的示踪剂接近消失。30分钟时的景观如图3-31所示。从剖面上看，中间三个示踪点注入的示踪剂基本被冲清，以上下红色示踪

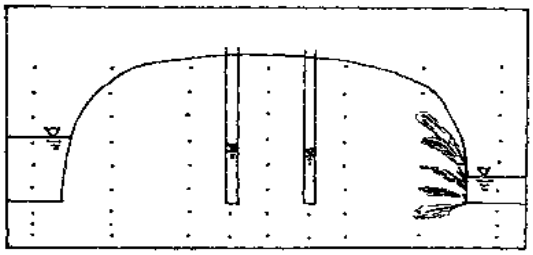


图3-26 第12分时示踪剂的分布

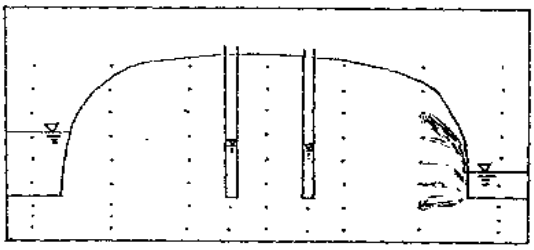


图3-27 第15分时示踪剂的分布

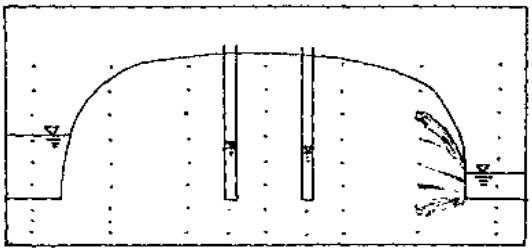


图3-28 第17分时示踪剂的分布

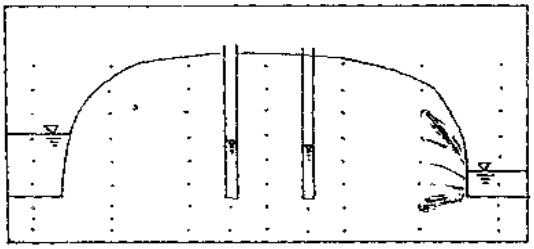


图3-29 第20分时示踪剂的分布

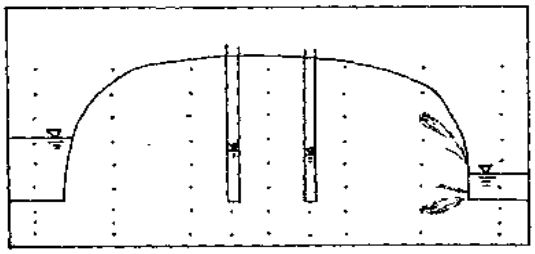


图3-30 第24分时示踪剂的分布

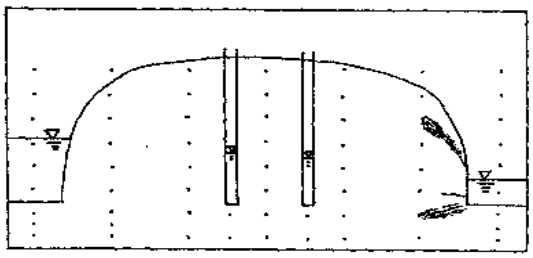


图3-31 第30分时示踪剂的分布

剂为边界，中部是剖面上的高流速带。在这个流动过程中，右渠的凌空渠壁上，始终没有水滴渗出，排泄边界附近渗流的观测至此结束。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

示踪流线表明，潜水面以上示踪点注入的示踪剂，在边壁附近向斜下方运移穿越潜水面进入饱和水带后，在排水河渠水位以下约 2 cm的厚度上(侧湿壁厚约 5 cm)穿越湿周边壁。就是说，湿周才是排水边壁。最上部的示踪迹线沿边壁向下与排泄河渠水位面相接，表明该段凌空边壁为流面。同时，在渗流过程中，河渠凌空边壁上始终没有水滴渗出，表明凌空边壁不存在渗出面。

三、潜水位与河渠水位的关系

按纵剖面实测的潜水位数据绘出的潜水位面形状与两河渠水位高程比较，似应与河水位相连接。再从凌空边壁的孔隙水压力分布看，紧靠凌空边壁的渗流水头上高下低，流线与河渠水位相连。边壁渗流水头最高点的数值，按流程与两河渠水位差推算。两河渠边壁间直距约80cm，水位差为7.8cm，支持毛细水横向渗流上边界长约100～110cm。假设沿程水头损失均匀情况下，平均水力坡度为0.07～0.10之间。据此，可求得边壁渗流水头最高点与排水河渠水位之差约在1～1.5cm左右。在边壁的压力水头分布如图3-32的 AOB 线所示，在支持毛细水带分布为负压，负压线的斜率大于tg45°；O压点在河渠水面与边壁的交点上。因此，潜水位只能与排水河渠水位面相连，不存在"渗出面"。Jacob Bear将潜水位面做为流面而推得的潜水位不能与排水河渠水位相连的结论是欠妥的。

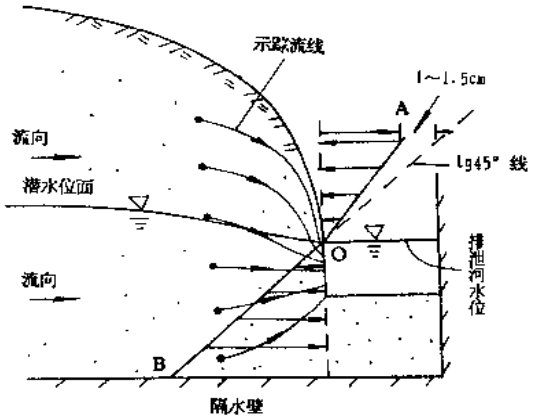


图3-32 排水边界附近的示踪流线及孔隙水压力分布图

第四节 渗流速度的分布机制研究

一、渗流速度分布特征的实验研究

为了研究支持毛细水与饱和带水渗流速度的分布情况，在渗流中段垂直断面上的示踪孔排中瞬时注入红色示踪剂，观测不同时刻示踪剂的迁移情况。为观测方便，在 A 面剖面进行，这时右侧为供水渠，左侧为排水渠。示踪孔的编号为由右向左为1-7排。

在第三排示踪孔3-2号到3-6号孔瞬时注入红色示踪剂后。2 分钟时的景观如图3-33所示。其中的3-2、3-3、3-4号示踪点位于支持毛细水带，3-5以下各点位于饱和水带。图示的井中水位，也就是该断面的潜水位。图上可见潜水位之上的3-3、3-4与潜水位之下的3-5、3-6号点注入的示踪剂产生明显迁移。5 分钟时的景观如图3-34所示，上述4点注入的示踪剂的迁移更加明显。11分钟时的景观如图3-35所示，其中潜水位以上的3-3、3-4点示踪

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

显示该部位的水平流速明显高于潜水位以下的3-5、3-6点部位的流速。两侧河渠底连界线

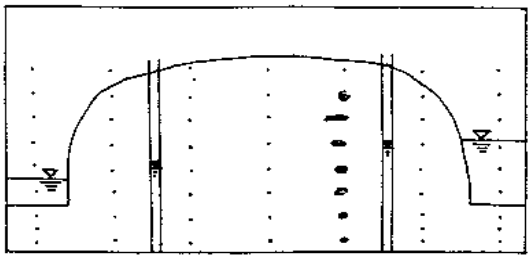


图3-33 第2分时示踪剂的分布

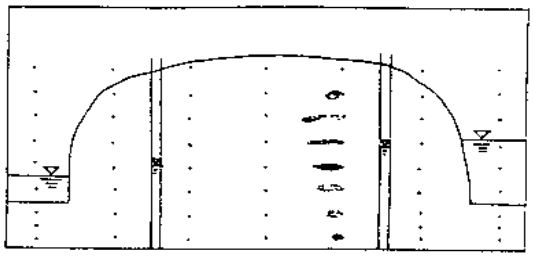


图3-34 第5分时示踪剂的分布

(以下简称渠底线)在3-6、3-7点中间的水平上通过。17分钟时的景观如图3-36所示，这时潜水面上下的速度差异显示更加明显。3-2点示踪水流为渐向下的横向运移。渠底连线以

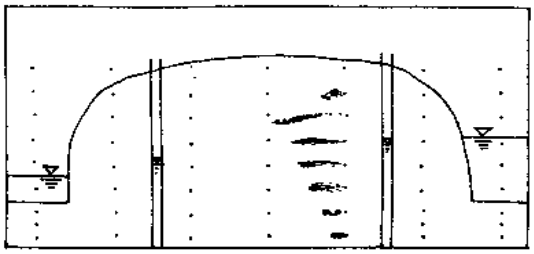


图3-35 第11分时示踪剂的分布

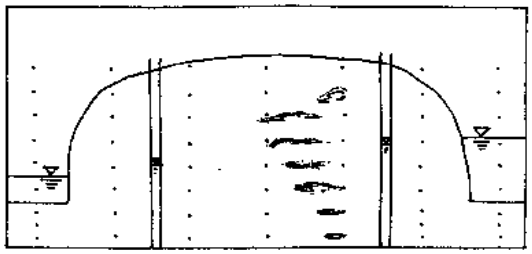


图3-36 第17分时示踪剂的分布

下的3-7点示踪迁移水平距与3-2点示踪水平迁移距离近似相等。再向下的3-8点示踪剂迁移的距离更短。19分钟时中部示踪剂的景观如图3-37所示。20分钟时的示踪景观如图3-38所示。23分钟时的示踪景观如图3-39所示。33分钟时的示踪景观如图3-40所示。该项示踪

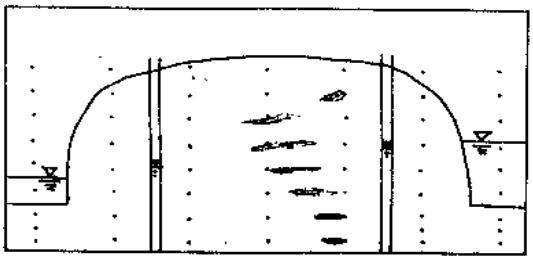


图3-37 第19分时示踪剂的分布

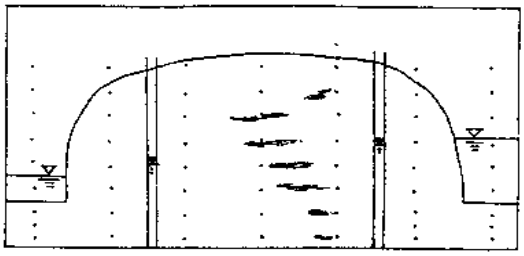


图3-38 第20分时示踪剂的分布

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

观测至此结束。

示踪结果表明：两河渠间无入渗补给的稳定渗流中，从支持毛细水带到饱和水带的横

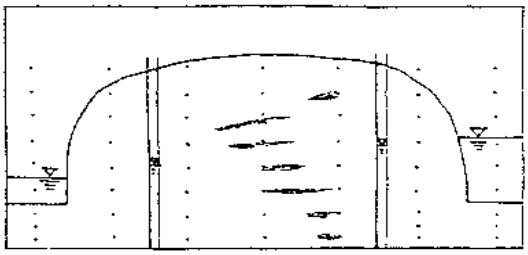


图3-39 第23分时示踪剂的分布

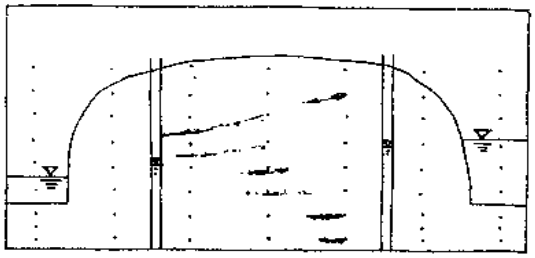


图3-40 第33分时示踪剂的分布

向渗流速度在剖面上的分布差异很大。高流速带分布在潜水面之上的毛细饱水带与两侧河渠底界连线以上的饱和水带，向上或向下渗流速度均渐变小。

二、渗流速度分布的机制分析

由前述的公式3-16知道，渗流速度大小与流管直径的平方成正比。还与水力坡度的大小成正比，而平均水力坡度等于水位差与流程之比。上述实验条件下，在两侧补给与排泄水位之差一定的情况下，渗流速度与流程的长短成反比，从整个实验的流场上看，高渗速带基本处于较短流程位置上。

无论是均质还是非均质的多孔介质，都具有不同等级大小的孔隙。这些孔隙互相连通构成纵横交错且狭阔不等的网络状通道。在饱水的情况下，这些通道的透水程度不同，其中相对大径断面的通道中的渗流对平均渗流速度起主导性作用。任取垂直于流向的表征面元作为过水断面研究，其孔隙大小的分布与孔隙度的大小都具有相似的特征。因此，在传统的渗流理论中用等径的流管束模型描述饱和水带渗流是比较合适的。

在毛细饱水带中，渗流过水断面的特征与饱和水带相同。因此，用等径的虹吸管束模型描述毛细饱水带的渗流也是可行的。

综上所述，在毛细饱水带及与其相联系的饱和水带中，控制渗流速度大小的主要因素是流程的长短。流程越短，渗流速度越大；反之，流程越长，渗流速度越小。

在毛细饱水带顶面以上的支持毛细水带中，随着高度的增加，含水量逐渐减小，存在着水气界面。在潜水面稳定的状态下，支持毛细水的垂向高度不变。上述水气界面也处于位置不变的状态，构成网络通道的部分管壁。自毛细饱水带顶面向上，首先在较大孔隙中失水充气，使网络通道中的大径断面的渗流阻断，但在小一些的通道中仍然饱水，可以保持连续的纵横渗流。这时的过水断面上，因大孔隙充气，渗流通道的断面直径变小，故渗流速度变小。越向上，进气的孔隙变小，保持连续渗流通道的断面的直径更小，使之渗流速度更小；直到最大支持毛细高度附近，纵横连续渗流的通道被空气完全阻断。由此确定支持毛细水横向渗流范围的上界在最大支持毛细高度附近。因此，对毛细饱水带顶面以上

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

支持毛细水带中的横向渗流，用不等径的虹吸管束模型来描述是合理的。

从流程上看，在支持毛细水不饱和带中，越向上部横向渗流的流程越长，但其增量是有限值；可是，渗流速度很快减小，并在最大支持毛细高度附近趋于零。这表明，在支持毛细水不饱水带中，对横向渗流速度大小的主要影响因素是流管径的大小，其次是流程的长短。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第四章　孔隙-隙裂介质包气带水流特征研究

第一节　概 述

近年来，美国为实施其高放射性核废料的处置和管理综合计划，在内华达州尤卡山区，对巨厚的低渗透性岩石包气带水分运移问题进行了大量的研究工作。在孔隙-裂隙双重介质岩石的包气带水分运移机制和模型研究方面都取得了一定的进展。这方面研究的典型代表文献有：P. Montazer等，1984，《内华达尤卡山区非饱和带水流的概念性水文模型》；J.S.Y. Wang等，1984，《尤卡山区控制非饱和孔隙-裂隙凝灰岩中水流运动的水文机制》；E.A. Klavetter等，1986，《非饱和裂隙岩体的水文特性估计》。P. Montazer根据毛细理论对包气带水分运移进行了广泛的定性描述和分析，阐述了非饱和带裂隙中的水流特征，提出了毛细屏障原理，并分析了横向渗流机制。J.S.Y. Wang等在P. Montazer 研究的基础上，根据毛细理论建立了平行毛细管束模型；在此基础上，利用统计分析原理，建立了包气带水动力特征参数与岩体孔隙-裂隙空间形态特征之间的定量关系。E.A. Klavetter 等人综合了前两人的研究成果，对低渗透性岩体中以垂向非饱和流为主情况下的水流特征进行了分析，认为孔隙和裂隙系统间水量交换很小，孔隙系统的压力水头和裂隙系统的压力水头近似相等，从而建立了包气带水分运移孔隙-裂隙双重介质数学模型。

此外，1986年曲焕林等人用陕西洛川黄土饱水带的抽水实验，证实了黄土中的饱和水流具有孔隙-裂隙双重介质的水流特征。1989年，李云峰博士用压汞法和计算机图象处理等方法，研究了黄土中的孔隙分布和饱水黄土的渗透性之间的关系。证明了直径 $D > 5\ \mu m$ 或面积 $A > 557\ \mu m^2$ 的孔隙是透水孔隙，并推算出结合水的厚度是水分子直径的9000倍。他认为："黄土这种特殊的'双重介质'，其裂隙以导水为主，但是，决不意味着黄土地层的导水性以裂隙为主；裂隙、孔洞的影响不大，导水性仍以孔隙为主；黄土垂向渗透系数和水平渗透系数的差异性，也不仅仅是由裂隙、孔洞造成的，孔隙同样起着很大的作用；因此，黄土与通常的双重介质差别很大，而与孔隙介质却更为接近，当作孔隙介质研究也许更合理些。"

第二节　黄土包气带水的渗流试验研究

一、节理裂隙对包气带水流的作用试验

黄土普遍具有大孔隙和垂直节理裂隙。黄土包气带水流与溶质的迁移是否与这些大孔隙和节理裂隙的发育程度相关？影响多大？这是水文地质学研究和在黄土包气带中处置中、低放射性核废物的工作所必需解决的问题之一。为此，在实验场区进行了渗水试验，用来研究孔隙、裂隙黄土介质中包气带水的渗流特征。

1．渗水试验场地的选定

在研究实验场区和外围的不同时代（层位）黄土成因、节理裂隙和大孔隙发育特征的

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

基础上，选定实验场区内一个人工剖面做为渗水试验的场地。该剖面的垂直节理裂隙比较发育。在试验前，对剖面的节理裂隙分布情况进行了测量。

2．渗水试验场地的处理

为了保护观测壁面和保证人工喷淋水分的均匀入渗，在试验之前对实验场地的观测壁面和喷淋平面分别进行了处理。

(1)观测壁面的处理。如图4-1所示，将观测壁面处理成垂直平面、刨光、护壁。观测面的宽度为3.20m，高为2.12m。护壁用5 mm厚的有机玻璃板粘接成一块整体，外用四个三角架连接五根横置的角钢支撑。为了防止喷淋水沿边壁流下，在有机玻璃板与边壁的上部接触面用凡士林油封闭。封闭宽度约5cm，不影响对壁面附近包气带水流状态的观测。

(2)喷淋渗水平面的处理。将喷淋平面的表生植物和表土剥掉，用水准仪核测，处理成水平面。喷淋面长3.20m，与观测壁面宽度对等，宽2.00m，面积为6.40m²。为了防止喷淋面干裂和保持喷淋水下渗的均匀性，在喷淋面上用5 cm厚的洁净中砂覆盖。同时，对喷淋面的周边用砖围砌保护。

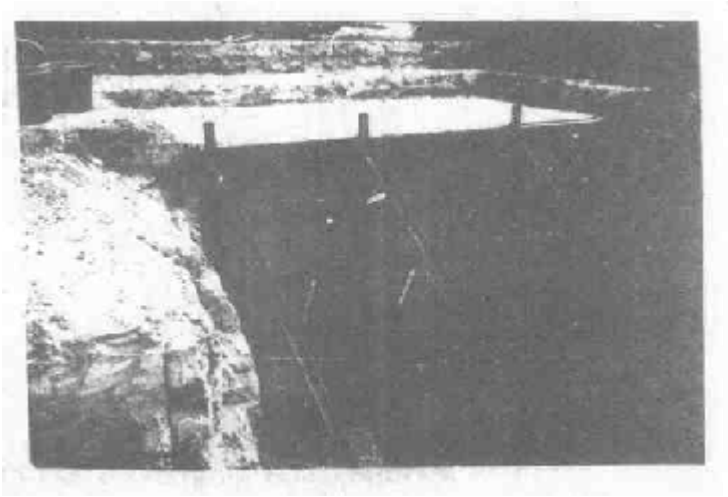


图4-1 渗水试验场

3．渗水试验过程和监测

喷淋试验使用天然水进行，监测剖面上的湿锋迁移状况和含水量的变化情况。

(1)渗水试验的时间。喷淋渗水试验自1990年6月8日20时开始，至7月4日11时止，历时26天。

(2)喷淋方式。喷淋采取间歇性定量喷水的方式，每天早、晚各喷淋一次，每次喷水48 L，喷淋强度为15mm／d。为防止蒸发的影响，每次喷淋后，立即用塑料布将喷淋面覆盖。热力蒸发水分在塑料布上形成凝结水珠后又被砂层所吸附。这样，基本上可以不考虑喷淋水的蒸发散失量。

(3)监测的项目。监测的项目主要是湿锋的迁移状况和剖面含水量的变化情况。剖面分为左、中、右三部分。右边部分留下，用来进行以非放射性核素为溶质的喷淋试验。在左边和中间部分的有裂隙和无裂隙部位设采样点57个，采取直径5 cm的土柱测含水量。采样时间、点位、计算结果和湿锋的迁移状况见图4-2、图4-3、图4-4、图4-5、图4-6、图4-7、图4-8、4-9。

二、非饱和水流屏蔽试验

1．空洞屏蔽

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

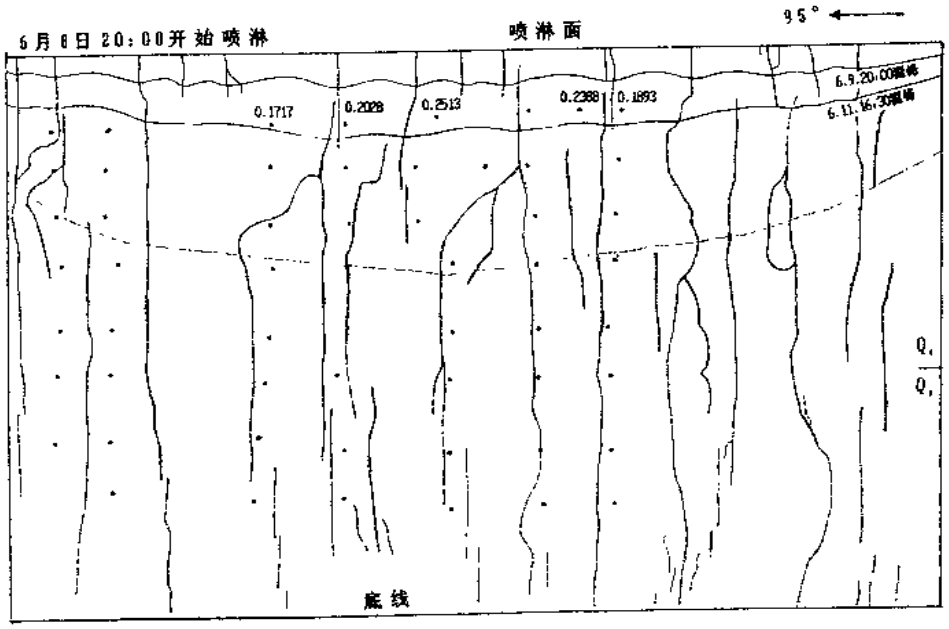


图4-2 第24小时、第44.5小时渗水湿锋和含水量分布图

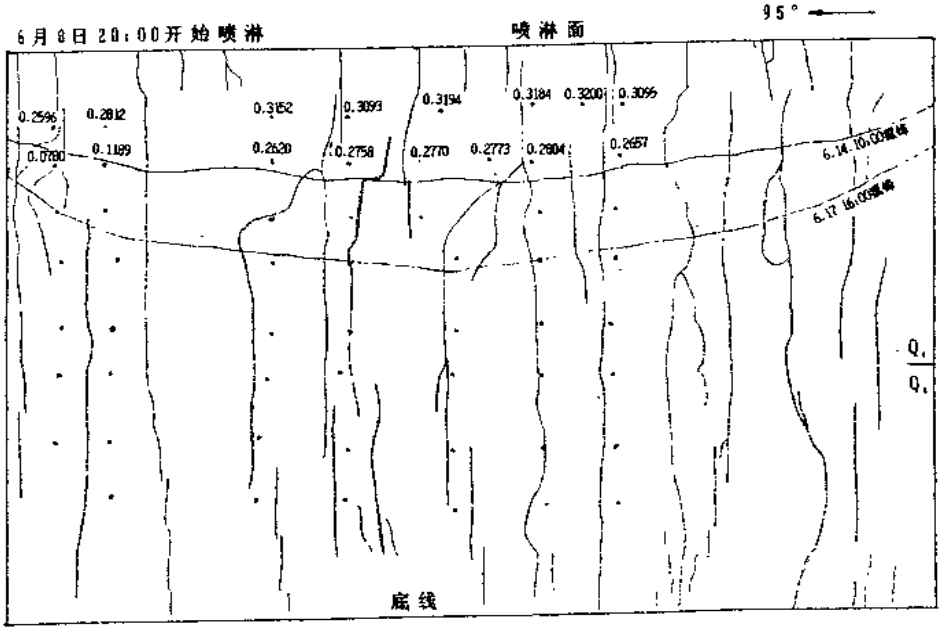


图4-3 第134小时、第212小时渗水湿锋和含水量分布图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

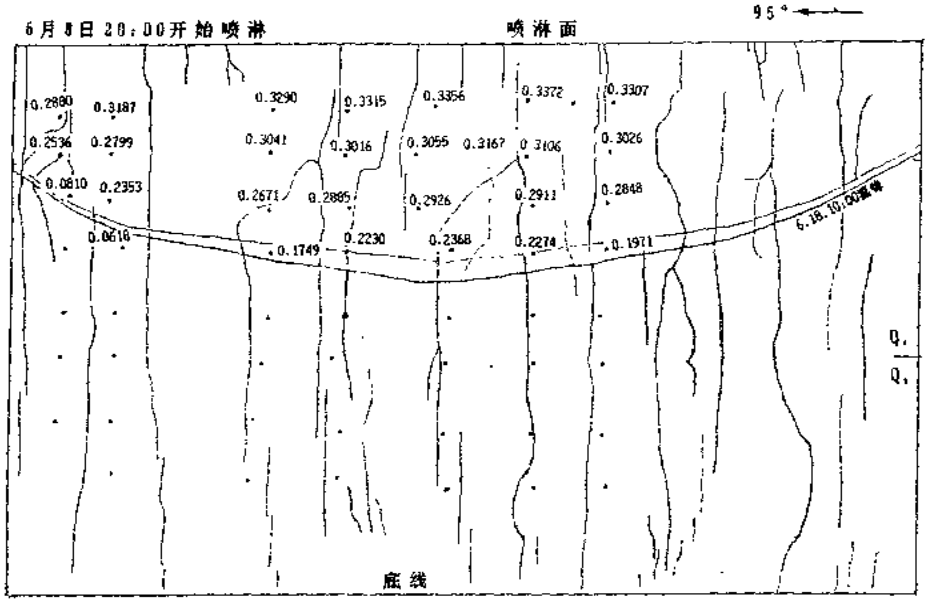


图4-4 第230小时渗水湿锋和含水量分布图

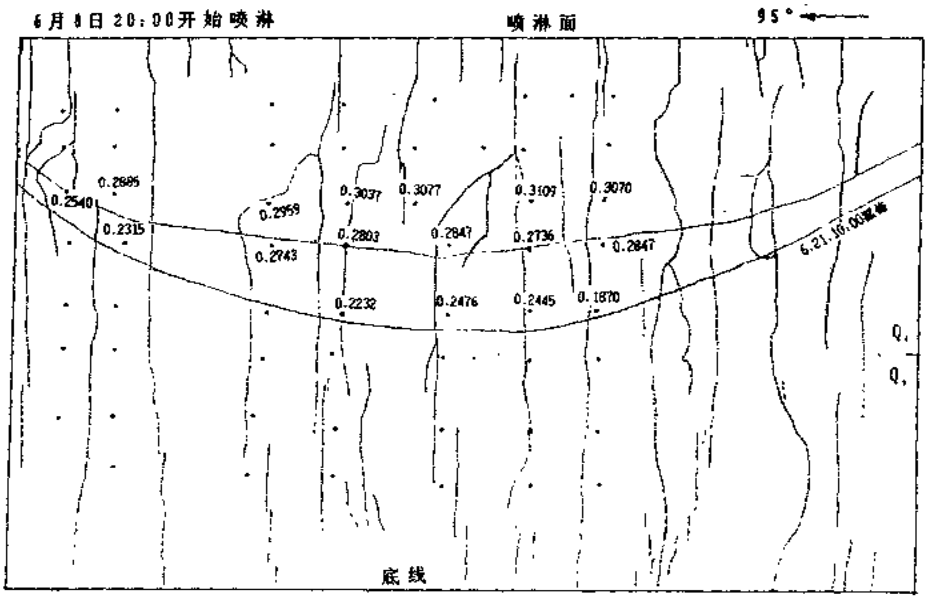


图4-5 第302小时渗水湿锋和含水量分布图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

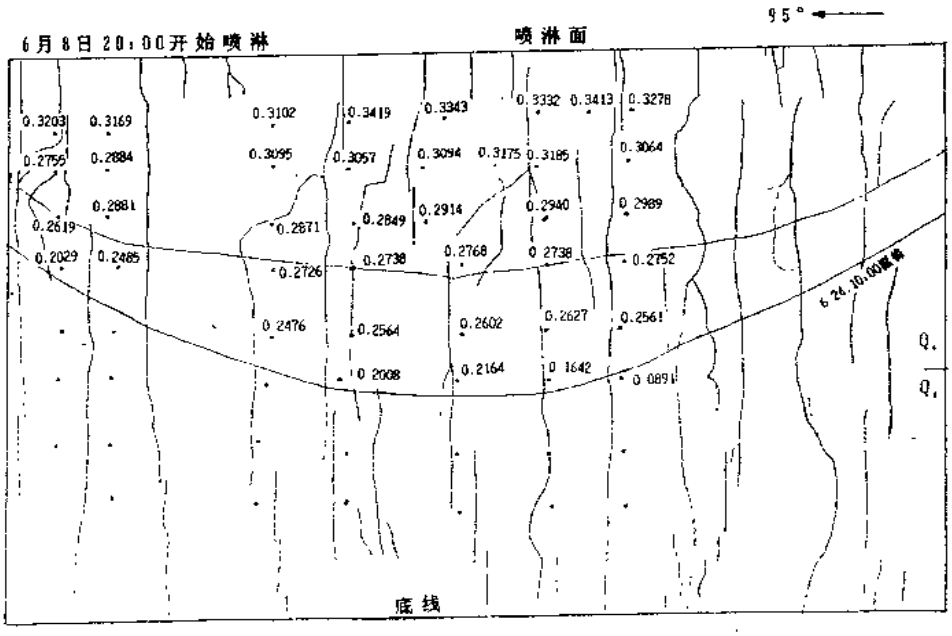


图4-6 第374小时渗水湿锋和含水量分布图

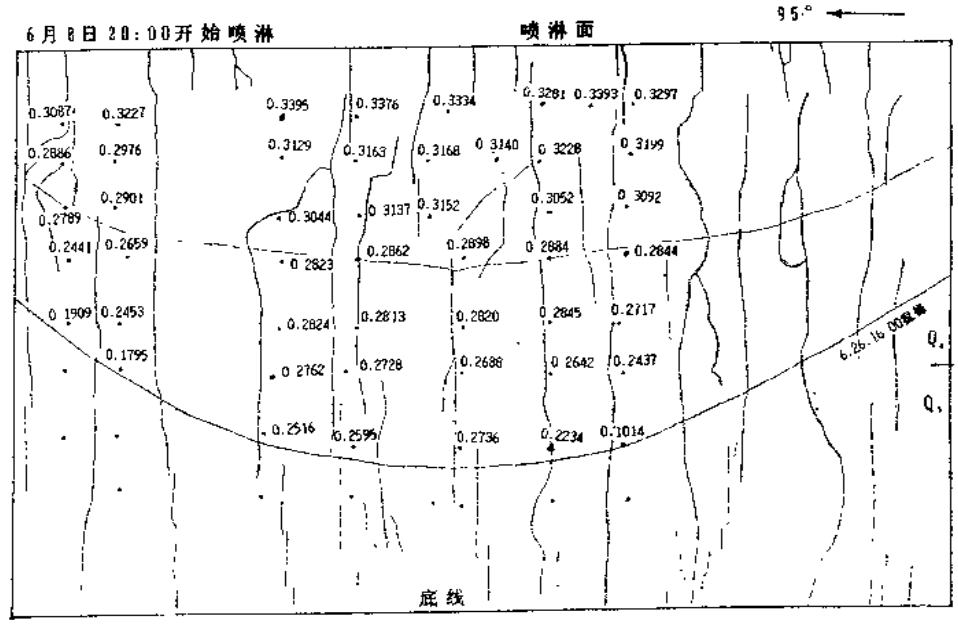


图4-7 第428小时渗水湿锋和含水量分布图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

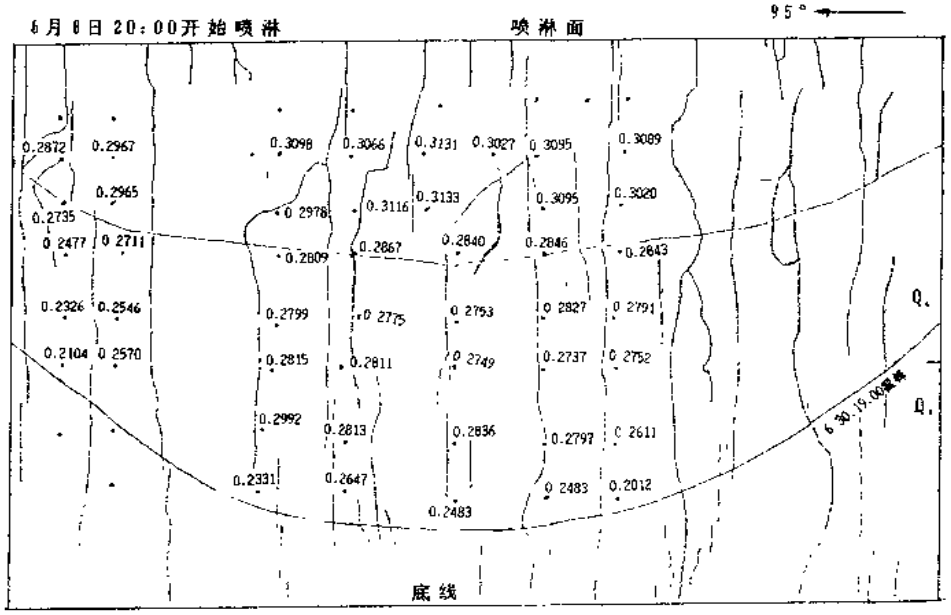


图4-8 第527小时渗水湿锋和含水量分布图

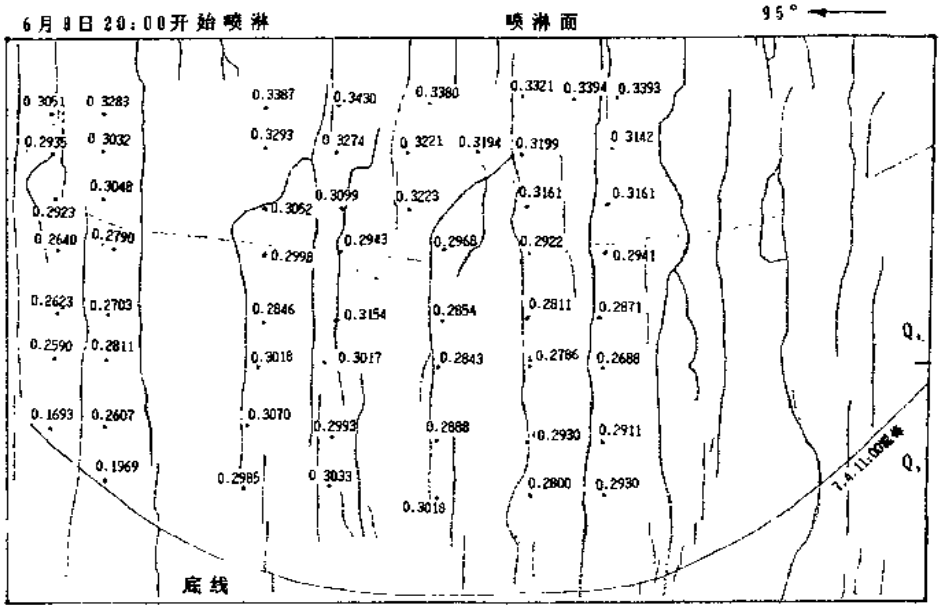


图4-9 第615小时渗水湿锋和含水量分布图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

在实验场区渗水试验场的观测壁面上，设置了一个人工孔洞。洞的直径为20cm，洞深为40cm，洞顶距地表喷淋面约80cm。在喷淋渗水试验中的湿锋向下迁移的过程中，仅湿润了洞周的边壁，始终无水渗出。就是说，空洞上面向下迁移的水流可以绕过洞周去湿润洞的底壁。这个现象体现了空洞对非饱和水流的屏蔽作用。

2．粗粒体屏蔽

在室内，用渗流槽进行了细粒层介质非饱和流场中的粗粒体对水流的屏蔽作用试验。该渗流槽(如图4-10所示)是用透明的有机玻璃板制成；它的高度为40cm，宽度为20cm，厚度为15cm；底部设有排水孔。

(1)装样。将渗流槽底部的排水口用滤网覆盖，其上铺2cm厚的玻璃球层(玻璃球的粒径约为5mm)，再用滤网覆盖。其上分层装填湿润的细粒石英砂(粒径约为0.1mm左右)，边装边捣实。

在石英砂的中部用玻璃球装填成半球状的粗粒层。半球面紧靠在有机玻璃板面上。半球面的直径约为10cm。将石英砂装填完毕后，用滤网覆盖，上压 3cm厚的玻璃球层。

(2)试验的过程。试验开始，在砂槽的上部靠观测壁面的石英砂中同时加入四点红色示踪剂（如图4-10中的①组箭头符号所示）后，立即在砂槽上部灌水。每次灌水，都在砂层的表面上形成短时间的积水，积水时段长约为5-10秒钟。等到积水渗净再过10秒钟左右进行下一次灌水。第一次灌水后约1分钟，在砂槽底部的排水管中即开始有水流出。这说明石英砂层的含水量很高，毛细水上下贯通、传递静水压力，使得水量快速传输。

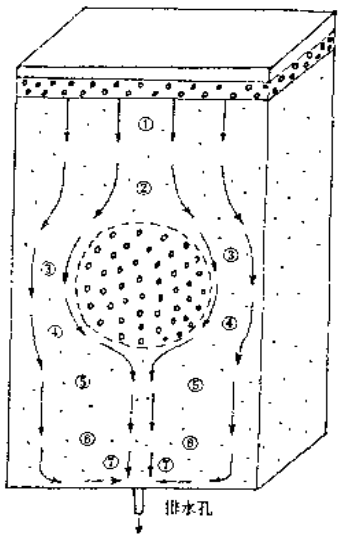


图4-10 粗粒体对非饱和水流的屏蔽作用试验研究

第10分钟，由如图4-10中的②组箭头符号所示：四点红色示踪剂在向下迁移的过程中有向粗粒层两侧分流的趋势。

第15分钟，由如图4-10中的③组箭头符号所示：红色示踪剂向粗粒层的两侧分流的趋势更加明显。红色示踪剂的上方续补四点红色示踪剂。

第20分钟，由如图4-10中的④组箭头符号所示：左边第一红色示踪剂绕过粗粒层之后有向中心靠拢的趋势。左边第二红色示踪剂绕过粗粒层。第24分钟又续红色示踪剂。

第30分钟，由如图4-10中的⑤组箭头符号所示：中间两条红色示踪剂绕过粗粒层后向中间靠拢。

第33分钟，由如图4-10中的⑥组箭头符号所示：中间两条红色示踪剂绕过粗粒层后，边向中间靠拢边向下迁移。两边的红色示踪剂已接近砂槽的底部。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第41分钟，由如图4-10中的⑦组箭头符号所示：中间两条红色示踪剂几乎相接并在继续向下迁移。

试验至此结束，历时41分钟。在此期间，共灌水5000ml。砂槽的水平断面面积为300cm²。可算出灌水量为167mm水柱。尽管砂槽的上部供水边界出现短时间的饱水条件，由于石英砂层的虑波作用，粗粒层的上边界仍能保持负压条件。红色示踪剂向下迁移的速度受供水速度的控制。

第三节　黄土包气带水渗流机制分析

一、黄土包气带水渗流中的裂隙作用机制分析

在实验场区黄土包气带的渗水试验中，如果以垂直节理裂隙导水为主，则要在节理裂隙部位形成向下凸的湿锋。否则，说明裂隙的导水作用不大或不起作用。

由图4-2至图4-9给出的下渗水流湿锋变化的情况可知：喷淋渗水试验的初期，黄土的节理裂隙对下渗水流有一定的作用。每次喷淋时，可在地面附近形成暂时性积水，造成短时间的饱水入渗过程。而饱水入渗过程，使得节理裂隙部位的高渗透性发挥了很大的作用，从而形成黄土节理裂隙处渗水的下凸状湿锋。

喷淋中、后期的下渗湿锋迁移的情况表明，黄土节理裂隙起导水作用的深度是有限的。在6月17日以后，节理裂隙附近湿锋下凸的情况基本消失。湿锋线与裂隙直交或斜交，说明该条件下节理裂隙的导水作用已经消失，愈向下部愈是如此。

1．单向流问题

在每次喷淋后短时间的饱水入渗阶段，入渗水同时沿孔隙通道和节理裂隙通道下渗。由于节理裂隙的阻力相对较小，而它的渗透系数又较大，因此可以形成相对超前的湿锋。一般说来，在含水量大体相同的情况下，黄土孔隙对水分作用的毛细负压值大于节理裂隙对水分作用的毛细负压值。沿节理裂隙下渗的水流同时不断地向周围的孔隙侧渗。当地表的补给水源消失后，节理裂隙中的水分可以完全被孔隙夺走而形成充气的通道。本文将这种裂隙水向孔隙介质中单方向的流动过程称为单向流（如图4-11所示）。节理裂隙充气以后，其导水作用也就消失了；从而形成以孔隙通道为主的包气带水下渗过程。

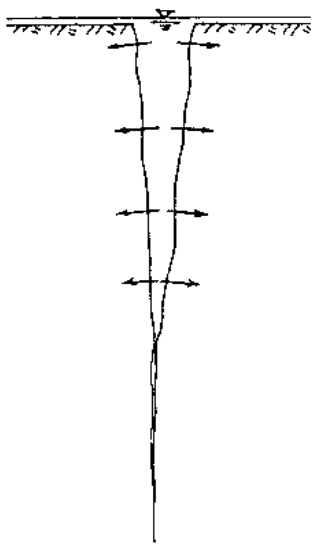


图4-11 由裂隙向孔隙的单向流示意图

节理裂隙导水作用的深度与饱水入渗时间的长短及节理裂隙的张开程度有关。饱水入渗的时间愈长、节理裂隙的张开程度愈好，则节理裂隙导水作用的时间也长，影响的深度愈大；反之，只能影响到地表以下很浅的部分。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

2．节理裂隙无作用问题

在野外的节理裂隙观察中可见，黄土的节理裂隙主要为干裂。仅在黄土台塬边部的冲沟中，黄土层失去侧限而产生的重力卸荷作用使得黄土的节理面张开，形成较宽的裂隙。但在黄土台塬的中部，揭去表层干土，湿润的黄土平面上观察不到张开的裂隙。黄土是一种塑性体。在一定深度以下，由于自重荷载的作用，黄土的节理裂隙会自然闭合。而且，在天然条件下，无论是饱水入渗的时间还是渗水的强度都远远小于我们进行的试验条件。因此可以说：在大厚度黄土包气带中，节理裂隙对包气带水分迁移的作用，基本上可以划分为两个带：

(1)在浅部，强补给时可以充水的节理裂隙部分，形成单向流带。

(2)在单向流带以下，节理裂隙对包气带水不起传导作用，实际上是充气阻水，可以称其为节理裂隙无作用带或节理裂隙阻水带。这时，可以将包气带黄土概化为均匀介质，来研究它的渗水特征。

二、非饱和流场中的水流屏蔽作用机制分析

由渗水试验的结果及图4-10显示的结果可知：在细颗粒孔隙介质的非饱和流场中，空洞和粗粒体都对水流起到屏蔽作用。本书将这个作用的过程称为“非饱和水流的屏蔽效应(简称水流屏蔽效应)”。这种孔隙介质中的空洞或细粒层中包粗粒体而产生“水流屏蔽效应”的介质结构简称为“水流屏蔽结构”。

在毛细负压的作用下，细粒层的含水量远大于粗粒层，可在细粒层中某些孔径的孔隙中形成能够传递静水压力的连续网络状充水通道。而在粗粒层中，因其毛细负压值很低，仅能保持一些触点毛细水。这些触点毛细水被空气阻断，各点孤立，无法形成连续的充水通道，不能传递静水压力。这时下渗的水流会沿着细粒层中的充水通道向下运移，而不会通过粗粒层。即使在含水量很低，没有形成连续网络状充水通道的情况下，只要满足非饱和流条件，由于细粒层对水作用的毛细负压远大于粗粒体对水作用的毛细负压，也会使得下渗的水分不断地被细粒层吸取，在细粒层中不断向下迁移，仍无法进入粗粒层。

空洞之所以阻水，是因为空洞中被连通大气的空气所充斥，处于零压的状态，而洞周围土层中的非饱和水流处于负压状态，当然不能向空洞中排水了。

在天然情况下，大厚度包气带黄土的含水量都比较低，水分不能将所有的孔隙充满，可以形成充气的大孔隙网络。这些大孔隙网络连接黄土内的空洞使之与大气连通，保持零压状态。因此，这些土中空洞仍是水流屏蔽结构。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第五章　包气带水运动的定量研究基础

第一节　包气带水运动的达西定律

一、土水势的概念与计量

迄今为止，对包气带水运动的定量研究，都是从能态的观点出发的。而且认为，在完全干燥的土体中，全部的孔隙充满空气；在完全饱和的土体中，水分占据所有的孔隙；假定水分不饱和的状态下，水分所到之处的空气自动排出，不考虑空气的流动过程。经典物理学认为，任一物体所具有的能量由动能和势能组成。对地下水来说，由于水分在介质孔隙中的运移很慢，其动能一般可以忽略不计。因此，在同一水流系统中，任意两点间的自由水分将在势能差的作用下迁移。

包气带水的势能用土水势来表达。单位数量的包气带水在同温度条件下以某一标定的参考状态，转移到包气带某一指定点所要具有的能量，称为该点的土水势。所谓单位数量是指：单位质量或单位重量或单位体积。因此，土水势的计量单位也存在着不同的表达方式。为了与地下水动力学中的计量单位相一致，通常采用单位重量水分的土水势来表达；用长度单位cm(或m) 来计量。这就是通常所说的水头表达方式。

二、土水势的表达

从热力学基础出发，可以导出土水势的表达形式为：

$$\psi = \psi_z + \psi_p + \psi_m + \psi_s + \psi_T \qquad (5\text{-}1)$$

式中，ψ_z 称为重力势，它取决于水质点与零压面在垂向的相对位置高度。即 $\psi_z = \pm Z$。当 Z 座标向上为正时，取“+”号；Z 座标向下为正时，取“-”号。

ψ_p 称为压力势，它是由于压力场中压力差的存在引起的，标准参考状态下的压力一般是取标准大气压或当地大气压（实际应用上是取潜水面为零压面）。对于饱和带水，其压力 $\psi_p > 0$。对于包气带水，考虑到通气孔隙的连通性，各点所承受的压力均为大气压，其附加压强 $\triangle P = 0$，因而取各点的压力势 $\psi_p = 0$。特殊条件下的压力势，可由实际条件确定。

ψ_m 称为基质势。包气带水的基质势是由于介质土对水的吸持作用引起的。吸持作用主要是吸附作用和毛管作用。在包气带，$\psi_m < 0$；在饱和带，$\psi_m = 0$。介质土对水分吸持作用的大小与土体的含水量有关，故包气带水的基质势 ψ_m 是含水量 θ 的函数。

ψ_s 称为溶质势。它是包气带水中所有形式的溶质对水分的综合作用（吸引力）的结果。因此，$\psi_s < 0$。包气带水中溶质的均匀分布，使其对水分流动的影响并不显著。但在分析植物根系吸水、植物细胞中的渗流以及水气扩散等问题时，溶质势的存在便很重要了。

ψ_T 称为温度势。它是由于温度场的温差所引起的。包气带中任一水质点的温度势由该点的温度与标准参考状态的温度之差所决定。通常，相对其它作用而言，由于温度差造成的包气带水分运动是微乎其微的。但在实验室和沙漠包气带水运移等与温度密切相关的

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

专题研究中，温度势的作用是不容忽视的。

土水势的五个分势在实际问题中并不是同等重要的。一般，在研究水分运动问题时，溶质势和温度势都可以不考虑。对于饱和带水，由于基质势 $\psi_m = 0$，某点的总水势(或总水头) ψ 由压力势 ψ_p 和重力势 ψ_g 组成。即：

$$\varphi = \varphi_p \pm Z = P / r \pm Z \qquad (5\text{-}2)$$

式中：P / γ ——为压力水头；

Z ——为位置水头，正、负号视 Z 轴的方向而定。

对包气带水，在不考虑气压势的情况下，取 $\psi_p = 0$；这时，某点的总水势（或总水头）由基质势 ψ_m 和重力势 ψ_g 组成，即：

$$\psi = \psi_m \pm Z = h \pm Z \qquad (5\text{-}3)$$

式中，$h = \psi_m$ 称为毛细负压。

三、包气带水运动的达西定律

包气带水的运动包括饱和运动(如毛细饱水带水流)和非饱和运动两种形式。包气带水和饱和带水一样，大都属于有势运动。一般认为，适用与饱和带水运动的达西定律在大多数情况下也适用于包气带水的运动问题。

最早将达西定律引入包气带水运动研究的是Richards(1931)。非饱和达西定律的表达式为：

$$q \text{（或 } v\text{）} = - K(\psi_m) \nabla \psi \qquad (5\text{-}4)$$

又，

$$q \text{（或 } v\text{）} = - K(\theta) \nabla \psi \qquad (5\text{-}5)$$

式中，q 为水流通量(或渗流速度)，它是单位时间内通过单位面积过水断面(包括介质和水的断面)的水量。量纲为：cm / s 或 m / d 。

$K(\psi_m)$ 或 $K(\theta)$ 为包气带水流的渗透系数。在毛细饱水带，$K(\psi_m) = K_s$，(饱水渗透系数)或 $K(\theta) = K_s$，它只随土体变化；在毛细不饱水带，K 值不仅随土体变化，而且随 ψ_m 或 θ 变化而变化。这时，ψ 值由(5-3)式确定，$K(\psi_m)$、$K(\theta)$ 均小于 K_s 。

第二节　包气带水分运动的基本方程

经典物理学中已经证明：在重力场(势场)中，宏观运动的物质遵从三大守恒定律。这就是质量守恒、能量守恒、动量守恒。

在水力学中，这些守恒关系分别以连续方程、伯努里(Bernoulli)方程、奈维尔-斯托科斯(Navier-Stokes)方程来体现。水流连续方程反映了地表水流的质量守恒变化关系；伯努里方程反映了地表水流的能量守恒变化关系；奈维尔-斯托科斯方程是动力平衡方程，它反映了地表水流的动量守恒变化关系。

传统的水文地质学中，以研究多孔介质中的饱和水流为基础的地下水动力学是在水力学的基础上发展起来的。考虑到多孔介质中的水流速度很低，动量的变化不大，而介质骨架和水的弹性变化作用的影响占重要地位，故用反映介质骨架和地下水弹性变化特征的状态方程取代了奈维尔-斯托科斯方程。而且用实验归结出来的反映多孔介质中水流能量变

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

化的达西公式取代了伯努里方程。这样，忽略了动量的变化，用连续方程、达西公式和状态方程构成了饱和地下水流研究的基础，反映了饱和地下水流的质量守恒、能量守恒、介质和水的弹性变化特征。

在包气带水流中，压力势 $\psi_p = 0$，即包气带中处处为零压，恒定不变。因此不需要考虑介质骨架和水的弹性变化，而只需考虑包气带水流的质量守恒和能量守恒的变化关系。这种守恒变化关系仍用连续方程和达西定律来表达。

一、包气带水流的连续方程

在包气带水流场中任取一微六面体，微六面体的棱分别与直角座标系的 X、Y、Z 座标平行，其中心点为 $P(X,Y,Z)$，微六面体的棱长分别为$\triangle X$、$\triangle Y$、$\triangle Z$；。设 $P(X,Y,Z)$ 点水流通量(或流速)的分量分别为 q_X、q_Y、q_Z；P 点附近水的平均密度为 ρ。根据水均衡原理分析微六面体中包气带水质量的守恒关系。

在单位时间内，沿 X 轴方向流入微六面体内的包气带水质量为:

$$\rho q_X \triangle Y \triangle Z - \frac{\partial(\rho q_X)}{\partial X} \frac{\triangle X}{2} \triangle Y \triangle Z \qquad (5\text{-}6)$$

这时在 X 轴方向流出微六面体的包气带水质量为:

$$\rho q_X \triangle Y \triangle Z + \frac{\partial(\rho q_X)}{\partial X} \frac{\triangle X}{2} \triangle Y \triangle Z \qquad (5\text{-}7)$$

在微六面体中，沿 X 方向的包气带水流入量与流出量之差为:

$$-\frac{\partial(\rho q_X)}{\partial X} \triangle X \triangle Y \triangle Z \qquad (5\text{-}8)$$

同理，在微六面体中，沿 X 方向和 Y 方向的包气带水流入量与流出量之差为:

$$-\frac{\partial(\rho q_Y)}{\partial Y} \triangle X \triangle Y \triangle Z \qquad (5\text{-}9)$$

$$-\frac{\partial(\rho q_Z)}{\partial Z} \triangle X \triangle Y \triangle Z \qquad (5\text{-}10)$$

再看微六面体内包气带水质量变化的表达式。微六面体内原有水质量为:

$$\rho \theta \Delta \triangle X \triangle Y \triangle Z \qquad (1\text{-}11)$$

单位时间内，包气带水质量的变化率为:

$$-\frac{\partial}{\partial t}(\rho \theta \triangle X \triangle Y \triangle Z) \qquad (5\text{-}12)$$

根据质量守恒定律(在水文地质学中称为水均衡原理)可知：微六面体周边流入流出的包气带水质量之差恒等于微六面体中水质量的变化量，即为:

$$-\left[\frac{\partial(\rho q_X)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho q_Y)}{\partial Y} + \frac{\partial(\rho q_Z)}{\partial Z}\right] \triangle X \triangle Y \triangle Z$$

$$= \frac{\partial}{\partial t}[\rho \theta \triangle X \triangle Y \triangle Z] \qquad (5\text{-}13)$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

这就是包气带水流的连续方程。

二、包气带水流的基本微分方程

上述连续方程和达西公式从不同方面描述了包气带水流的运动状态，都是研究包气带水运动的基本方程。将它们联系在一起就可以构成描述包气带水运动的微分方程。微分方程刻划包气带水运动的一般规律，所以在解决各种实际问题时一般都从微分方程出发。

如前所述，在包气带水流中介质和水不会发生弹性形变，所以，$\rho \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z =$常量，这时(5-13)式可简化为：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial (q_X)}{\partial X} + \frac{\partial (q_Y)}{\partial Y} + \frac{\partial (q_Z)}{\partial Z}\right) \tag{5-14}$$

当土体为各向同性时，由包气带水流的达西公式(5-5)，取 q（或 v）在 X、Y、Z 方向的分量：

$$q_X = -K(\theta)\frac{\partial \psi}{\partial X} \tag{5-15}$$

$$q_Y = -K(\theta)\frac{\partial \psi}{\partial Y} \tag{5-16}$$

$$q_Z = -K(\theta)\frac{\partial \psi}{\partial Z} \tag{5-17}$$

将(5-15)、(5-16)、(5-17)式代入(5-14)式得：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X}\left[K(\theta)\frac{\partial \psi}{\partial X}\right] + \frac{\partial}{\partial Y}\left[K(\theta)\frac{\partial \psi}{\partial Y}\right] + \frac{\partial}{\partial Z}\left[K(\theta)\frac{\partial \psi}{\partial Z}\right] \tag{5-18}$$

这就是描述包气带水流的微分方程。

三、包气带水基本微分方程的几种应用形式

因为(5-18)式中有 ψ 和 θ 两个自变量，使用起来不太方便，需要将其简化。常用的简化形式有：以含水量 θ 为变量和以总水势(或总水头)为变量两种表达形式。

1．扩散方程

由(5-3)式 $\psi = \psi_m \pm Z$，得：

$$\frac{\partial \psi}{\partial X} = \frac{\partial \psi_m}{\partial X} = \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta}\frac{\partial \theta}{\partial X} \tag{5-19}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Y} = \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta}\frac{\partial \theta}{\partial Y} \tag{5-20}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z} = \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta}\frac{\partial \theta}{\partial Z} \pm 1 \tag{5-21}$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

令，

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi_m} = C(\theta) \tag{5-22}$$

$C(\theta)$ 称为容水度，它表示基质势（或毛细负压）值变化一个单位时，含水量的变化，可以根据水分特征曲线求得。将(5-22)式代入(5-19)、(5-20)、(5-21)式后再代入(5-18)式得

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X}\left[\frac{K(\theta)}{C(\theta)}\frac{\partial \theta}{\partial X}\right] + \frac{\partial}{\partial Y}\left[\frac{K(\theta)}{C(\theta)}\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right]$$
$$+ \frac{\partial}{\partial Z}\left[\frac{K(\theta)}{C(\theta)}\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right] \pm \frac{\partial K(\theta)}{\partial Z} \tag{5-23}$$

令，

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \tag{5-24}$$

$D(\theta)$ 称为水力扩散系数，可由试验求得。将(5-24)式代入(5-23)式，则得：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X}\left[D(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial X}\right] + \frac{\partial}{\partial Y}\left[D(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right]$$
$$+ \frac{\partial}{\partial Z}\left[D(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right] \pm \frac{\partial K(\theta)}{\partial Z} \tag{5-25}$$

(5-25)式是以 θ 为变量的二阶非线性偏微分方程。也叫扩散方程。

2．基质势（或毛细负压水头）方程

从水分特征曲线可知，基质势（或毛细负压）与含水量之间存在函数关系。包气带水渗透系数 K 和容水度 C 既是含水量 θ 的函数，也是基质势（或毛细负压）ψ_m 的函数。所以可将(5-18)式改写成：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X}\left[K(\psi_m)\frac{\partial \psi}{\partial X}\right] + \frac{\partial}{\partial Y}\left[K(\psi_m)\frac{\partial \psi}{\partial Y}\right]$$
$$+ \frac{\partial}{\partial Z}\left[K(\psi_m)\frac{\partial \psi}{\partial Z}\right] \tag{5-26}$$

(5-26)式左边：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi_m}\frac{\partial \psi_m}{\partial t} = C(\psi_m)\frac{\partial \psi_m}{\partial t} \tag{5-27}$$

将(5-27)式和 $\psi = \psi_m \pm Z$ 代入(5-26)式得：

$$C(\psi_m)\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X}\left[K(\psi_m)\frac{\partial \psi}{\partial X}\right] + \frac{\partial}{\partial Y}\left[K(\psi_m)\frac{\partial \psi}{\partial Y}\right]$$
$$+ \frac{\partial}{\partial Z}\left[K(\psi_m)\frac{\partial \psi}{\partial Z}\right] \pm \frac{\partial K(\psi_m)}{\partial Z} \tag{5-28}$$

这就是用基质势（或毛细负压水头）表达的包气带水流方程。

需要指出的是，由于滞后作用，基质势和含水量不是单值函数，土体的吸水和排水过

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

程不同。上述基本方程应只用于吸水或排水的单一过程，同时要注意参数的配合。

第三节　包气带水动力参数的确定方法概要

在包气带水分运动的研究中，首先要确定水动力参数和初边值变量。包气带水动力参数主要包括渗透系数 $K(\theta)$，水力扩散率 $D(\theta)$ 或比水容量 $C(\theta)$，三者能知其二即可。初边值变量包括介质土的含水量 θ 和总水势(或基质势)等项。

一、介质土含水量的测定方法

1．称重法

土体含水量可以有许多种表达形式，其中最基本的也是最常用的是以容积含水量来表示。其计算公式为：

$$\theta = (g_w - g_s)r / g_s \qquad (5\text{-}29)$$

式中：g_w——测样湿重；

g_s——测样干重；

r——介质土的干容重。

不管在室内还是在野外取样，为防止采样后水分散失引起的误差，最好在采样现场迅速装盒，并立即用高精度的电子秤对湿样称重。不能及时称重时，要马上将样盒密封保水。在野外同时采取原状土样，以备测干容重之用。土样的烘干，一般是采用烘箱在105～110℃的条件下烘干至恒重，然后称得干土重。其它的烘干方法有：用酒精烧三次，或用快速红外线烘干仪烘干等。

算例：在某实验场用静力触探机连接采样器，采取0～29m深的包气带原状土样。大致按9.2m的间距二次采样，测得包气带黄土剖面各点的含水量值见表5-1。按表5-1绘出该包气带黄土剖面的含水量分布曲线如图5-1所示。

2．中子仪测量法(中子法)

中子法是用中子水分仪间接测定介质土含水量的方法。由于它需要在特制铝合金护壁的钻孔中进行测量，故常在野外实验场或固定监测点使用。

中子水分仪中的中子源放出来的快中子与水分子中的氢原子核碰撞后，变成慢中子并为探测器所检测。慢中子越慢，说明介质土的含水量越高，这样就可以根据标定曲线求出含水量。

中子仪所测的是以中子源为中心的球形土体内的平均含水量，球域直径对较湿介质土约为15cm，较干介质土约为15～30cm。故在湿润锋面或靠近地表的20cm左右厚度或层状土的介面处等含水量间断分布的部位测量是不准确的。

方法使用的注意问题：一是标准曲线的准确性，二是地面附近的中子屏蔽防护。标定曲线必须与所测的介质土和所用的测管相对应，否则会造成较大的误差，所以必须认真做好。对中子源的屏蔽一般采用30cm高的石蜡圆柱环，环内径与测孔一致。同时严守操作规程，这样才能保护观测者的安全。

3．γ 射线法

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表5-1 验场区黄土剖面土样含水量（θ）测定结果表（深度：m）

采样深度	θ 值	采样深度	θ 值	采样深度	θ 值	采样深度	θ 值	采样深度	θ 值
1.05	0.078	7.31	0.181	12.75	0.219	18.60	0.296	23.75	0.318
1.17	0.079	7.49	0.111	12.96	0.186	18.65	0.277	23.86	0.353
1.31	0.093	7.65	0.195	13.16	0.202	18.80	0.281	24.12	0.352
1.76	0.096	7.84	0.131	13.30	0.197	19.00	0.270	24.34	0.321
2.60	0.112	8.22	0.178	13.50	0.219	19.24	0.295	24.55	0.329
2.64	0.121	8.42	0.181	13.76	0.226	19.40	0.294	24.75	0.318
2.70	0.145	8.66	0.224	14.06	0.198	19.64	0.260	24.95	0.316
2.76	0.122	8.86	0.210	14.26	0.197	19.90	0.240	25.15	0.350
2.88	0.119	9.24	0.177	14.43	0.209	20.20	0.277	25.35	0.350
3.34	0.150	9.45	0.188	14.63	0.210	20.44	0.304	25.55	0.358
3.64	0.154	9.72	0.238	14.82	0.240	20.54	0.278	25.76	0.345
3.86	0.158	9.94	0.181	15.03	0.261	20.64	0.258	25.92	0.388
4.02	0.109	10.18	0.189	15.33	0.260	20.88	0.206	26.05	0.348
4.14	0.135	10.36	0.175	15.57	0.275	21.12	0.336	26.35	0.260
4.58	0.144	10.60	0.182	15.77	0.271	21.36	0.293	26.55	0.404
4.94	0.146	10.80	0.204	15.97	0.260	21.60	0.295	26.74	0.415
5.20	0.156	11.00	0.198	16.22	0.265	21.86	0.280	26.94	0.415
5.44	0.162	11.20	0.192	16.40	0.223	22.10	0.261	27.20	0.420
5.87	0.119	11.41	0.181	16.60	0.151	22.31	0.279	27.40	0.406
5.01	0.117	11.64	0.152	16.65	0.276	22.60	0.244	27.60	0.421
6.23	0.111	11.88	0.141	16.92	0.293	22.74	0.263	27.81	0.392
5.46	0.111	12.08	0.186	17.26	0.269	22.86	0.260	28.02	0.412
6.78	0.199	12.29	0.183	17.60	0.293	23.10	0.283	28.24	0.406
7.00	0.112	12.42	0.208	17.80	0.308	23.32	0.263	28.47	0.429
7.18	0.218								

γ 射线法也是一种间接的测定含水量的方法，它主要在实验室内应用。放射性同位素发出的 γ 射线穿透土体时，被介质土和水分所吸收使放射强度衰减，在介质土体部分不变的情况下，γ 射线强度的改变只与含水量有关。由 γ 射线强度的变化，对照标定曲线，便可以确定剖面土体的含水量。

二、水分特征曲线的测定方法

在包气带水流的数值计算中，需要确定非饱和水流渗透系数 $K(\theta)$ 的大小。而 $K(\theta)$ 是土体含水量 θ 的参变量，用试验方法确定其值比较困难，往往利用公式：

$$K(\theta) = D(\theta) \cdot C(\theta) \qquad (5\text{-}30)$$

求得，式中 $C(\theta) = d\theta / dh$ 称为比水容量，可由土体的非饱和水分分布特征曲线图上求得该值。

在 $\psi_m \sim \theta$ 座标系中，表示土体含水率与基质势（或毛细负压）的关系曲线图叫水分特征曲线。它的测定就是测量土体（或土样）的含水量与基质势（或毛细负压）值的一系列对应关系点，最终确定水分特征曲线。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

1．负压计法

负压计法测定土体(或土样)的水分特征曲线，就是用负压计测定土体对水的吸力值，用称重法或其它方法测定相应的含水率。在第一章、第二章中均应用此种方法。

负压计主要由素烧陶土头、连通管和压力计组成，如图(5-2)所示。负压计测定土体吸水的原理是：在量程范围内，饱水的多孔陶土头透水不透气，可以传递静水压力。当陶土头插入被测的土体(或土样)时，管中的密封自由水便通过陶土壁与土体之间建立水力联系。当管中的水势高于土体中的水势时，管中的水会很快被土体吸取一部分，直到水势平衡，而在管中形成稳定的负压。这个负压值由与管连通的负压计表示出来。当管中的水势低于土体中的水势时，土体的一部分水会通过陶土头进入管中。直至水势平衡。因此负压计法既可以测量土体的脱水过程，也可以测量土体的吸水过程。

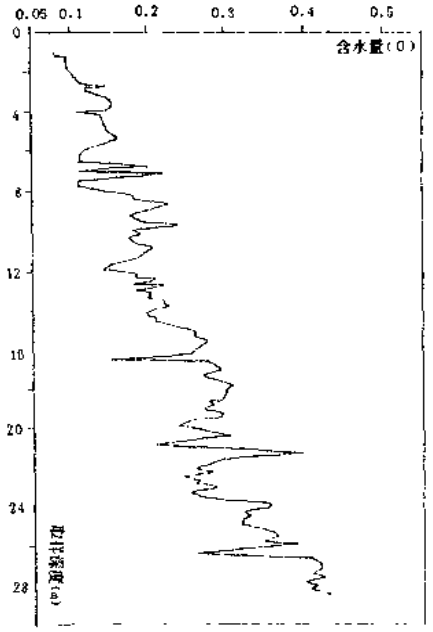


图5-1 实测黄土剖面含水量

为了尽量减小陶土头内外水量交换对测点含水状态的影响，应尽量降低这种水量的交换量，这与负压计的选取有关。采用机械真空表(或称负压表)或压力传感器时，因省去连通管外的导压管，可以极大地减少陶土头内外的水量交换，但目前使用的机械真空表本身的精度不太高，使用一段时间后机械本身的精度降低。压力传感器的精度较高，但目前大多靠进口，影响了它的普及和使用，在使用U形管型压力计时，产生的水量交换较前两种压力计为多，因此要求连通管与压力计之间的导压管要尽量短，径细，不变形。其中充水的U形压力计，读出值的精度高，但对陶土头内外水量交换影响很大，所以使用不多，充水银的U形压力计的读值精度在1 mm以内，相当于13.6mm水柱的精度，它使陶土头内外的水量交换大大降低，故为目前广泛使用的压力计之一。

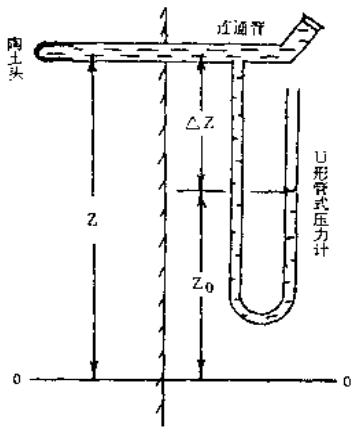


图5-2 负压计的结构示意图

由于这种方法是水做为负压的导压介质，所以其测量范围理论上是在0～1bar。实际上是0～0.8bar之内，因为负压值＞0.8bar时，水分子气化严重，在导压管内产生水力断裂，使测量值产生极大的误差而失效。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

2．砂性漏斗法

砂性漏斗法如图5-3所示，用底部装有多孔板（可用陶土板）的有机玻璃漏斗，将土样装在漏斗板上，板下水室连通一个悬挂水柱，形成对土样的吸力。漏斗顶端应加盖，以防土样水分蒸发。但不能影响空气的自由进出。

砂性漏斗法的原理是漏斗的土样通过多孔板与悬挂水柱建立水力联系，处于平衡状态时，土壤的总水势与多孔板下悬挂的自由水的总水势相等（恒等于出水口水面的水势）。因此计算出土样承受的负压值和含水量。

该方法仅适用与室内。土样可为扰动土，也可为原状土，可测脱温曲线，也可测吸湿曲线，测量的吸力范围仍在0～0.8bar之间。

注意，土柱的高度要低于其细胞水的高度。在实验前把多孔板浸水一天，清除漏斗室和水管中的气泡，然后把已知干容重的土样装进漏斗进行饱和，使土柱出水口水面与土柱的地面齐平。试验开始时，将水柱出口下降ΔH_1距离，这等于在土柱底面施加吸力ΔH_1，土样便开始排水，待稳定后量出所排出的水量$\triangle W_1$。逐级降低水柱出口，记下每次的吸力值$\triangle H_1$和稳定后的$\triangle T_3$的累加排水量$\triangle W_1$，直至脱湿过程结束，实验结束时，实测最后的土样含水量，据此推导出实验过程中各次的吸力值与含水量的对应关系，绘出脱水曲线。如果由较大的吸力开始，用马利奥特瓶供水，逐级抬高供水水位高度，用同样的方法可测得吸水曲线。

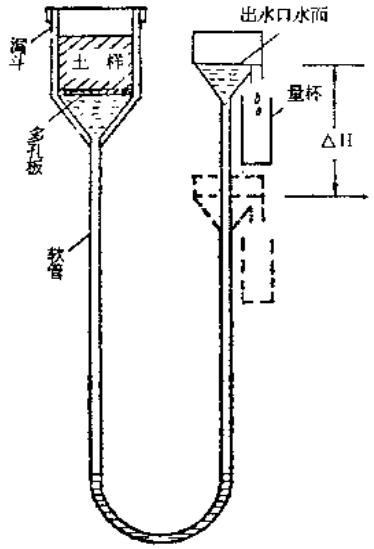


图5-3 砂性漏斗法装置示意图

3．压力仪法

上述两种方法，使用负压都只能测吸力低于0.8bar的土体水分特征曲线。要测得更高吸力的部分曲线就需要使用正压的压力仪法。该方法所加压力的最大限度，取决于多孔板（陶土板或薄膜）的耐压能力（即在压力作用下透水不透气的能力）和压力室的安全工作压力。

目前我国使用的进口压力薄膜仪，陶土板有1、5、15bar三种，有的在超过1bar以后用醋酸纤维薄膜。如图（5-4）所示，压力仪由加压系统、压力室和排水系统三部分组成，一般用氮气瓶（或空气压缩机）为加压系统提供气压源。

该供气装置有两套耐高压的粗调和微调的精密

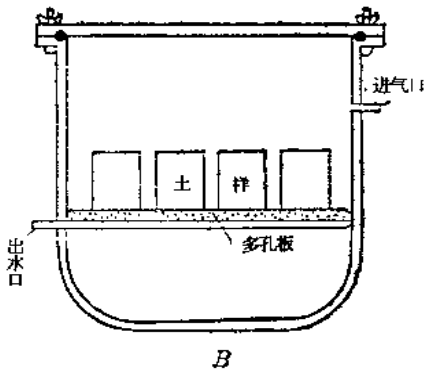


图5-4 压力仪示意图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

调压阀，可以准确的调解和测量所加压力。压力室一般为不锈钢制成的密封容器。

将带不锈钢环刀的原状或扰动的饱水土样放在压力室内的陶土板上，饱水的陶土板使板上土样中的水分和板下的水室的自由水相联系，传递静水压力。当压力室内气压增加到某一定值时，陶土板上土样中的总水势高于板下自由水的水势时，土样便开始排水，直到陶土板上的土柱和板下的自由水的水势相等时为止。这时土柱的基质势等于压力室内压力的负值。在已知土样初始含水率的情况下，根据排水的水量就可以算出相应的含水率。增加压力，重复上述过程，可以得到土样的一系列吸力，和含水量的对应值，从而测得脱水曲线。将加压改成减压，排水改成供水，就可以测定土样的吸水曲线。

有的压力室一次可放入多个土样。加压后不必测定排出的水量，待排水停止后，关闭进气阀门，打开压力室，取出土样用高精度电子秤迅速称重，测定相应的含水量，再放回压力室内进行下一级的测量。

测例：在某实验场区用静力触探机和冲击钻接长1.1 m的取样器采取原状黄土岩芯，再用 DIK -1600B取样器二次取样。每个试样体积为100cm³，不破坏土体的结构。在垂直剖面上大体按1 m的间距采27 个原状土样。将土样连同环刀一起放入 DIK -3520型土壤箱中进行饱和，用时一天，测得饱水重量（包括土样、环刀、滤纸）。

在压力为10～35cm水柱范围内，用 DIK -3520型土壤箱脱水，水分达到平衡的时间为一天。当压力大于35cm水柱以后，将土样转入 DIK -3400型宽程土壤水分特性仪中进行测量，先后使用了3 bar和15bar的陶瓷压力板；水分平衡时间分别为4 天～14天；在压力为50～800cm水柱范围内用 DIK -3400型宽程 PF 加压系统，在压力为1000～10000cm水柱的范围内用高压氮气控制压力。在不同压力下达到平衡以后，称量试样的重量（包括土样、环刀、滤纸）。在测完10000cm水柱压力对应的样重后，将试样放入恒温烘箱中，以105℃的温度烘干至恒重，约用7 天，然后称重。整个试验过程历时约半年。

用试验数据计算出不同压力下每个土样的含水量值，见表5-2。用这些资料分别绘出个土样的水分特征曲线，如图5-5、5-6、5-7、5-8、5-9所示。而且综合绘出埋深2～9m、9～18m、18～21m、21～28m四个层位包气带黄土的水分特征曲线如图5-10所示。

4．天然或试验土柱含水量剖面法

表5-2　土样水分特征测试成果表（压力板法）

样号	取样深度 (cm)	10	20	35	50	70	90	120	150	200	300	400	600	800	1000	2000	3000	5000	10000
1	193	44.5	43.7	43.3	43.2	42.6	40.4	37.8	34.9	29.7	28.8	17.2	15.0	13.1	11.9	10.4	10.2	10.0	9.7
2	256	48.0	47.3	47.4	47.6	47.3	46.1	44.1	42.1	38.7	31.7	26.7	21.6	19.2	18.1	14.7	13.8	13.4	12.9
3	380	47.1	46.3	46.1	45.9	45.6	44.3	42.8	41.6	35.8	36.0	33.0	29.2	27.2	26.5	20.6	19.0	15.6	14.1
4	490	51.4	51.4	51.2	51.2	50.9	49.8	48.1	46.3	42.1	32.0	25.2	20.9	18.6	17.2	13.8	12.2	12.8	12.6
5	576	44.6	43.6	43.5	43.3	43.2	41.8	40.3	38.4	36.3	28.7	23.5	18.6	17.6	17.3	10.7	9.8	8.1	7.2
6	596	49.5	48.9	49.0	49.0	48.7	47.8	46.3	45.0	42.1	33.5	26.3	19.0	17.0	16.6	11.9	11.0	10.4	9.9
7	705	52.0	51.5	51.4	51.3	50.6	49.9	48.2	47.0	44.2	35.1	28.3	22.0	15.5	13.5	10.4	9.7	8.4	7.5
8	790	50.6	50.3	50.4	50.5	50.5	49.5	47.6	46.7	41.4	33.8	26.1	21.2	16.6	15.4	13.0	11.4	10.8	10.2
9	894	46.2	46.1	46.2	46.3	46.0	45.4	44.1	42.7	39.7	33.9	29.9	26.1	24.8	24.1	19.8	18.6	16.1	14.2

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表5-2

样号	取样深度 (cm)	10	30	35	50	70	90	120	150	200	300	400	500	800	1000	2000	3000	5000	10000
10	984	40.8	40.5	40.8	40.7	40.5	39.0	36.9	34.9	32.0	27.9	24.9	22.4	20.4	19.0	16.9	15.2	14.1	13.6
11	1086	43.1	43.0	43.4	43.5	42.0	41.6	39.7	38.0	35.4	31 4	27.8	24.1	21.9	20.6	17.6	16.6	15.9	15.4
12	1182	46.4	46.1	46.5	46.5	46.6	45.5	44.1	42.8	39 9	30 9	22.9	19.3	17.3	16 0	13.5	11 9	11.3	10.6
13	1284	39.7	39.6	39.7	39.8	39.6	39.4	38.5	36 5	33 6	29 5	27.1	24.7	22.9	21.6	18.2	16.9	15.7	14.5
14	1381	42.4	42 4	42.7	42.4	42.4	42.4	42.5	40.9	38 3	33 9	30 9	27.5	25.3	25.0	20.9	19.8	19.0	17.9
15	1480	42.6	42.7	42.7	42.7	41.9	42.1	41.2	40.3	38.8	35 8	33.0	29.3	26.9	26.6	23.7	20.7	19.2	16.6
16	1589	36.5	36.5	36.2	36.2	35.4	35.2	34.5	33.0	30.8	27 4	24.8	23.1	21.7	21.3	17.4	16.5	15.4	14.6
17	1687	33.6	33.8	34.0	34.1	33.8	33.6	33.3	32.6	31.3	28.3	25.6	23.2	20.6	19.1	16.1	14.1	13.0	12.1
18	1770	32.9	33.0	33.1	33.2	33.0	33.1	32.7	32.4	32.0	31.1	30.2	29.3	28.5	28.6	26.7	25.7	23.9	21.1
19	1860	25.5	25.4	25.3	25.4	25.1	25.2	24.8	24.6	24.3	24.0	23.6	23.2	22.8	22.4	21.4	20.7	19.6	18.0
20	1964	29.3	29.2	29.2	29.7	29.2	29.1	28.7	27.7	26.5	24.2	22.0	20.0	19.1	17.1	14.1	13.1	10.6	8.4
21	2066	34.1	34.1	34.0	33.9	33.8	33.9	33.3	32.9	32.2	30.6	29.6	27.9	26.3	25.2	21.3	20.5	18.2	15 2
22	2230	41.3	41.3	41.6	41.1	41.7	41.7	41.1	40.4	38.9	35.3	33.2	28.3	26.4	25 3	21.8	20.9	18.8	16.5
23	2330	42.7	43.0	43.5	43.3	43.7	43.8	43.3	42 9	42.1	38.2	33.1	27.1	24.3	22.8	19.2	18.8	16.8	14.9
24	2440	38.6	38.6	38.4	38.4	37.6	37.7	37.3	36.9	36.3	34 8	32.9	29.0	26.4	26.4	21.0	19.6	17.7	14.3
25	2540	36.4	35.5	35.7	35.1	35.6	35 7	35.5	35.9	35.3	34.8	32.9	29.0	26.4	25.4	21.0	19.5	17.7	14.3
26	2640	37.1	36.9	36.9	36.7	36 4	36.6	36.3	36.0	35.6	34.8	33.9	32.7	31.3	30.7	25.9	22.7	18 8	15.7
27	2775	40.0	40.0	39.9	39.7	39.3	39.5	39.2	39.1	38.8	37.4	36.5	34.9	33.2	31.4	26.4	23.4	18.6	15.3

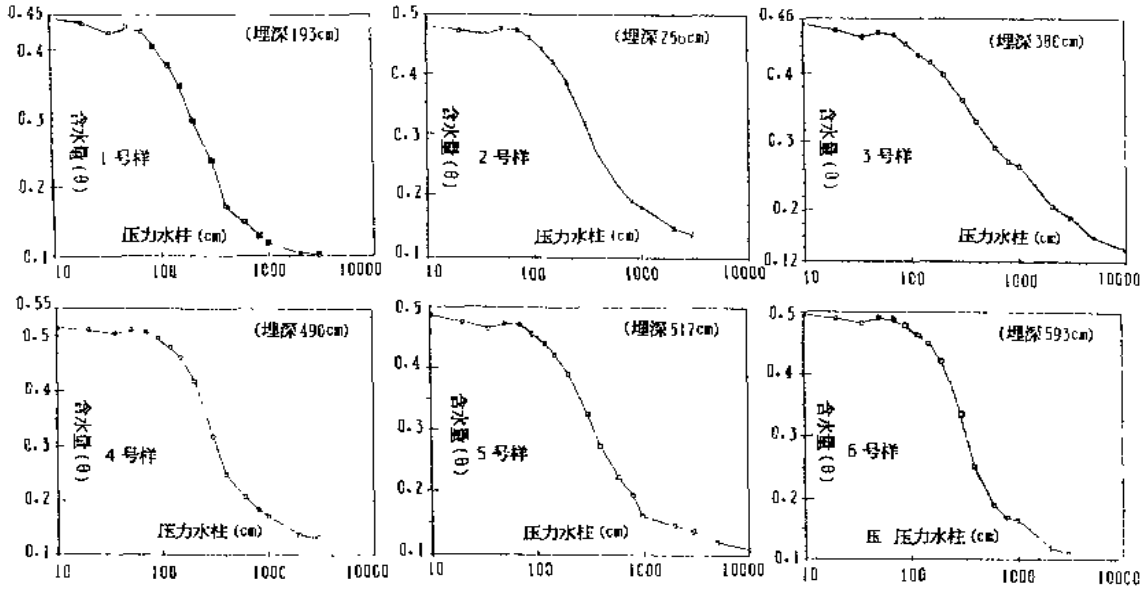


图5-5 1～6号土样实测水分特征曲线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

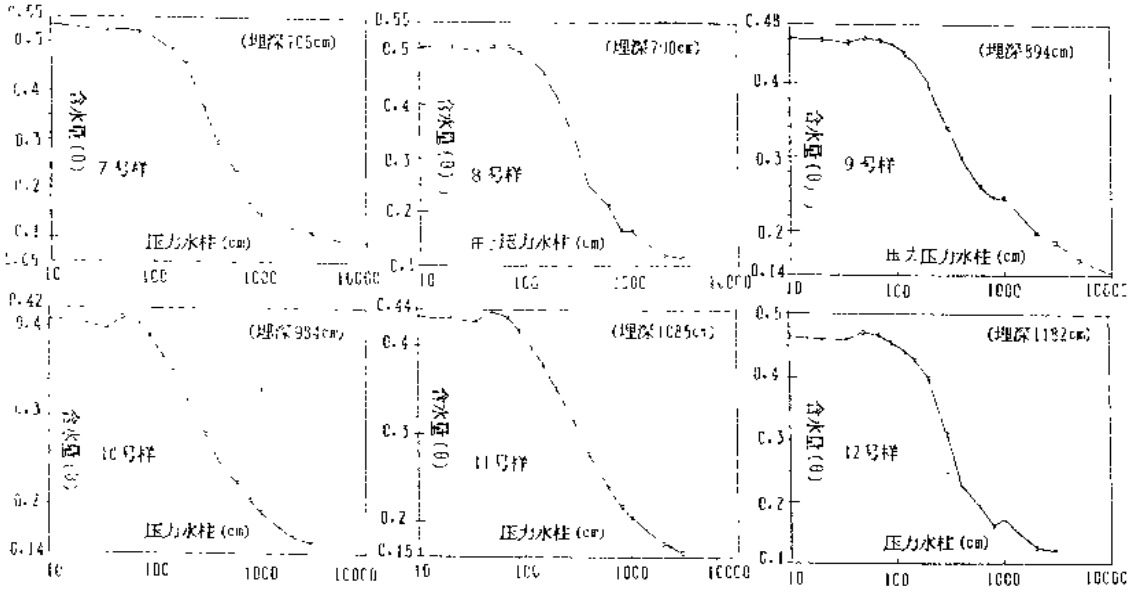


图5-6 7～12号土样实测水分特征曲线

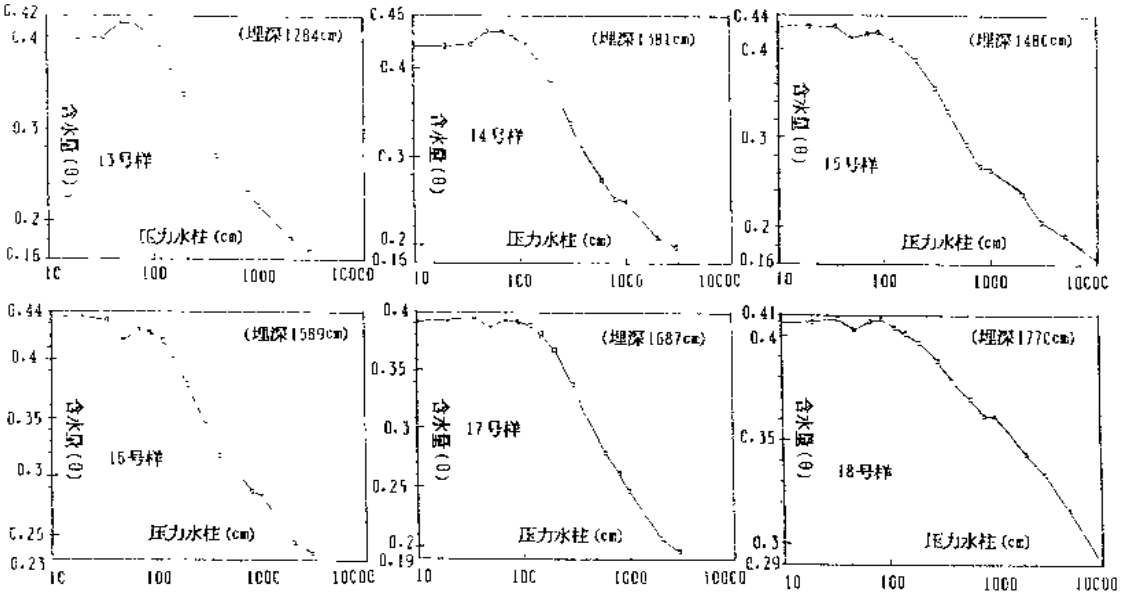


图5-7 13～18号土样实测水分特征曲线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

当地下水位基本不变，而地表处的水分通量等于零，或饱水土柱做完水位充分释水后。土体(或土柱)剖面含水率的大小及分布最终必定达到稳定状态，这时剖面任一点的基质势

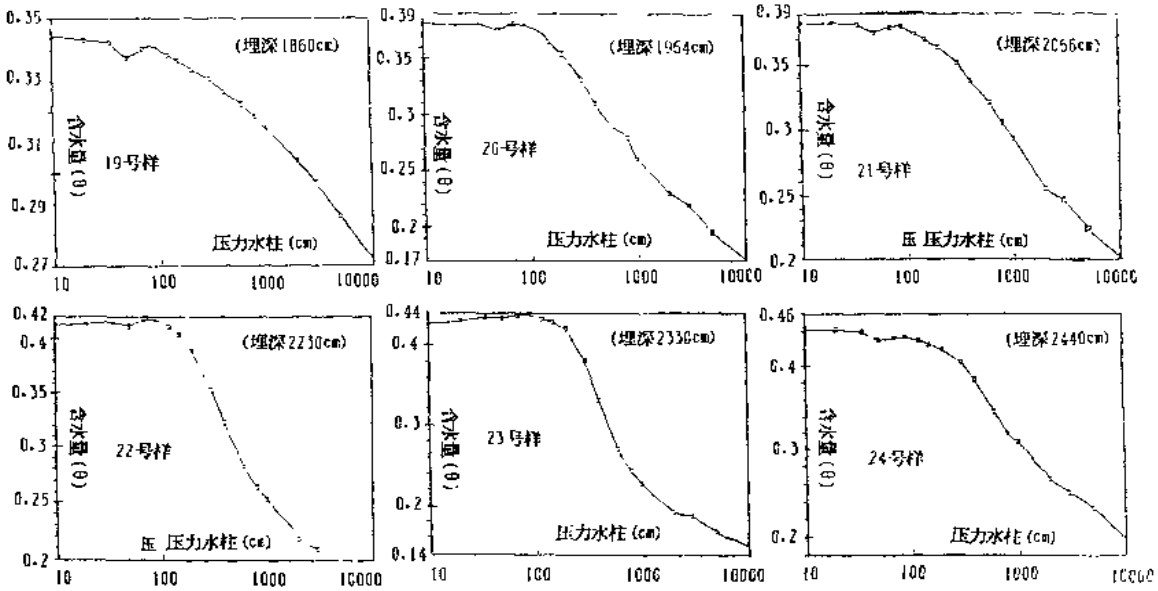


图5-8 19～24号土样实测水分特征曲线

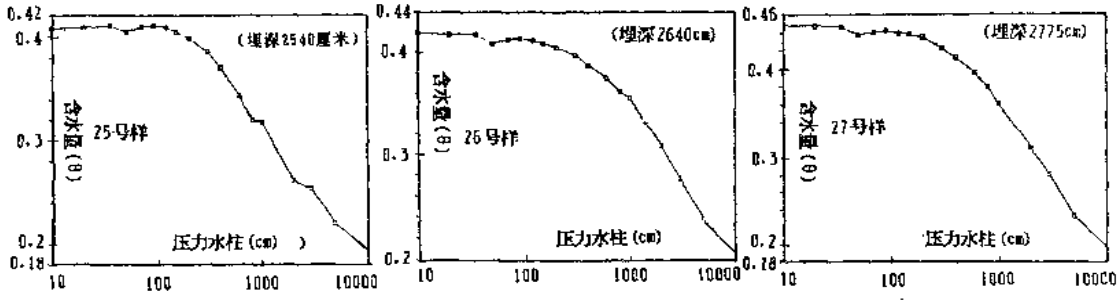


图5-9 25～27号土样实测水分特征曲线

与位势(位置水头)之和恒为零。就是说，当 Z 座标的原点在潜水面(或排水水位)处，且向上为正时，土体(或土柱)剖面上任一点的 Z 座标即为该点的吸力值。测出各点的含水量，就可以求得土体(或土柱)的水分特征曲线。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

三、水力扩散度“ θ ”的测定原理及算例

水力扩散度 $D(\theta)$ 是包气带水渗流和放射性核素迁移值模拟计算中的重要参数。为了满足在包气带黄土中进行中、低放射性核废物处置环境安全评价的需要，设计了该项试验，于1990年7月4日～ 8月11日完成。

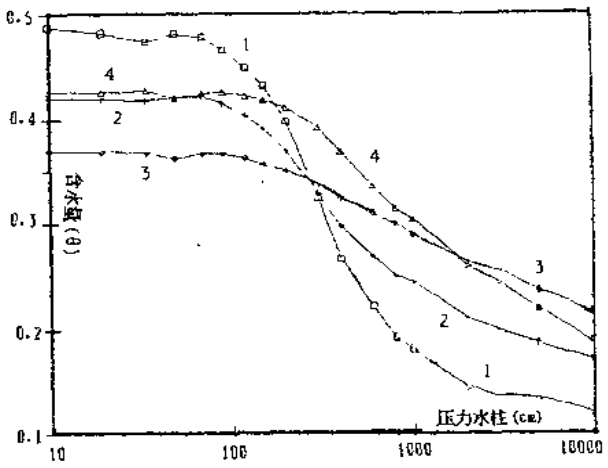


图5-10 四层土综合水分特征曲线

1．测试原理

本次试验是采用水平土柱法测定某实验场区包气带黄土的水力扩散度 $D(\theta)$ 的。一个半无限供水边界的水平土柱，均质各向同性，初始含水量相同，水分在非饱和土的吸力(负压)作用下形成水平渗流。忽略重力的作用，该条件下土柱中的水分运移满足如下定解条件：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \theta}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial X}\left[D(\theta)\dfrac{\partial \theta}{\partial X}\right] & (5\text{-}31) \\ \theta \big|_{t=0} = \theta_0 \qquad X > 0 & (5\text{-}32) \\ \theta \big|_{X=0} = \theta_s \qquad t > 0 & (5\text{-}33) \end{cases}$$

通过积分变换，可以求得该定解问题的解析解为：

$$D(\theta) = \frac{1}{2}\frac{d\lambda}{d\theta}\int_{\theta_0}^{\theta} \lambda\, d(\theta) \qquad (5\text{-}34)$$

式中：$\lambda = X t^{-1/2}$，为积分变换的参数；

X ——土柱任意点座标；

θ ——土柱任意点，任意 t 时刻的含水量；

θ_0 ——土柱的初始含水量；

θ_s ——土柱的饱和含水量。

为了便于计算，将(5-34)式改写成差分的形式：

$$D(\theta) = \frac{1}{2}\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta}\sum_{\theta=\theta_0}^{\theta} \lambda \Delta\theta \qquad (5\text{-}35)$$

利用(5-35)式和试验结果资料便可求得 $\theta \sim D(\theta)$ 的系列值。

2．试验装置

试验装置如图5-11所示。该装置是用透明的有机玻璃管制成的。管长64cm，分成可以

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

拆接的16个小节，每节长4 cm，管径为4 cm。供水端装一片透水石，使得试验过程中只透水不透气。用马利奥特瓶供水，0压面在土柱底界的水平上。供水瓶与透水石的结合作用，

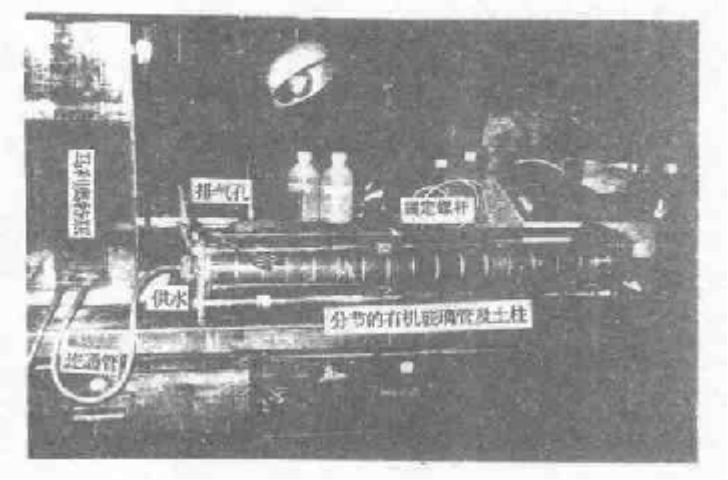


图5-11 水力扩散系数 $D(\theta)$ 测定实验装置

使得土柱的吸水端形成稳定的0压和饱水的供水边界。这样，土柱的吸湿过程既可以排除重力的影响，又可以排除侧向水压的影响。

3．实验步骤

(1)采样、装样。采、装原状土样。由第二章第一节可知，实验场区包气带黄土可以归纳为四个层位。在实验场区外围的天然剖面上，对应这四个层位选择了采样点。剥去表层干土，直接用试验装置上的有机玻璃管采取原状土柱，在现场直接封好试验装置；同时采取测土柱的初始含水量和干容重的土样。

采、装扰动土样。在实验场区钻孔中采得四个层位黄土的扰动样，在现场封装，保持土样的湿度。回室内将土样粉碎、筛匀、搅拌，使得土样的含水量相同。然后分层装样、捣实。每次装样厚度约1.5～2cm；并取相同的装样，用来测量土柱的初始含水量和干容重。尽量控制扰动土装样的土柱干容重与原状土的干容重相同，这样可以认为二者的密实程度相同。

(2)试验过程。连接好试验装置，做好有关各项准备工作后，在供水端瞬时排气饱水，形成稳定的零压、饱水的供水边界条件；同时记录供水的起始时间。

监测土柱中水流湿锋迁移的情况。当湿锋接近土柱的尾端时，停止试验。这时，迅速去掉供水条件，将土柱分解作含水量测定采样。先从湿锋处采起，逐渐向供水端采取。每节土样的含水量值与该节土柱中心的座标相对应。记录试验结束的时间，求得试验历时的时段长 t 值。

4．试验资料的整理

(1)绘制土样的含水量 θ 与 λ 的关系曲线图。按公式 $\lambda = X t^{-1/2}$ 计算出 λ 值。用对应于 X 点的 $\lambda \sim \theta$ 值点图，并修正成光滑的 $\lambda \sim \theta$ 关系曲线图(见图5-12、5-13、5-14、5-15)。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

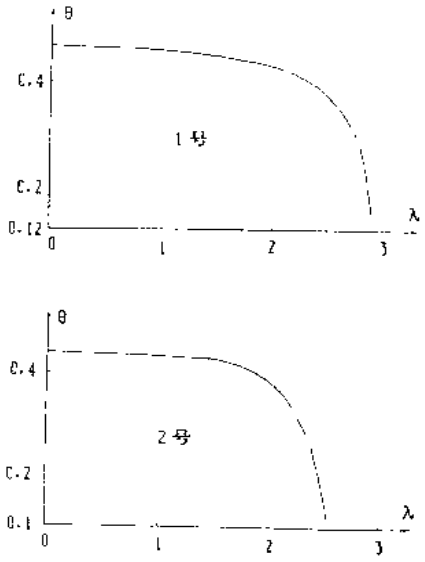


图5-12 1、2号原状土样 λ ~ θ 关系曲线

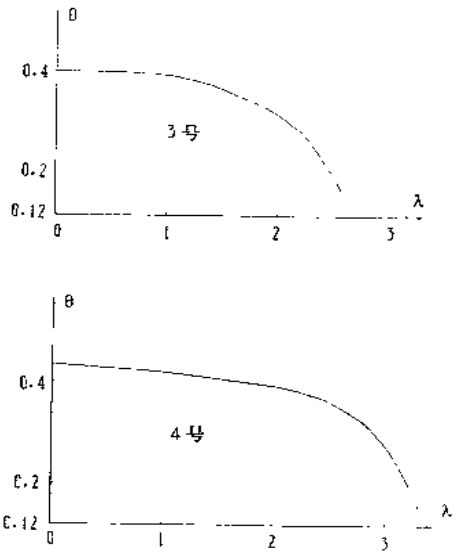


图5-13 3、4号原状土样 λ ~ θ 关系曲线

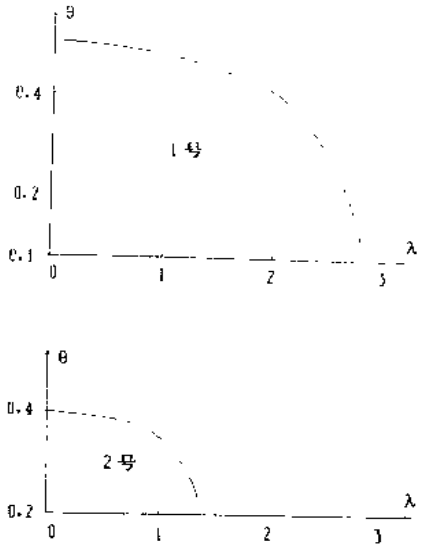


图5-14 1、2号扰动土样 λ ~ θ 关系曲线

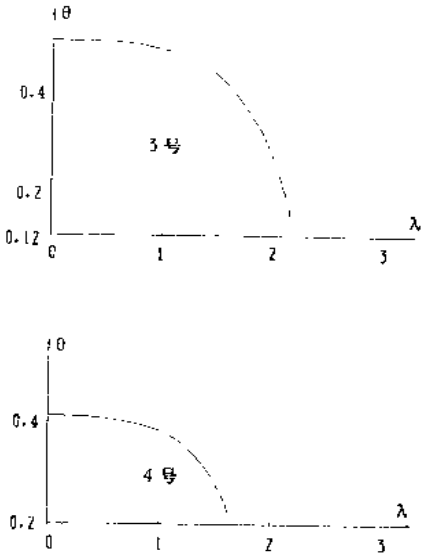


图5-15 3、4号扰动土样 λ ~ θ 关系曲线

(2) $D(\theta)$ 值的计算。在修正后的 $\lambda \sim \theta$ 关系曲线上选取对应的 $\lambda \sim \theta$ 系列值。应

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

用每个土柱的初始含水量 θ_0，按(2-5)式计算出 $D(\theta)$ 值。计算过程及结果见表5-3、5-4、5-5、5-6、5-7、5-8、5-9和5-10。

表5-3　1号原状土样 $D(\theta)$ 测定计算过程数值表

θ	λ	$\Delta\theta$	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\Delta\theta$	$\overline{\Delta\lambda/\Delta\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\Delta\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\Delta\theta$	$D(\theta)$
0.1249	2.887								
0.140	2.880	0.0151	0.007	0.46358	0.48179	2.88350	0.043540	0.04354	0.010488
0.160	2.870	0.020	0.010	0.500	0.500	2.8750	0.05750	0.10104	0.025260
0.180	2.850	0.020	0.010	0.500	0.500	2.8550	0.05730	0.15834	0.039585
0.200	2.860	0.020	0.010	0.500	0.500	2.8550	0.05710	0.21544	0.053860
0.220	2.840	0.020	0.010	0.500	0.500	2.8450	0.05690	0.27234	0.068085
0.240	2.830	0.020	0.010	0.500	1.000	2.8350	0.05670	0.32904	0.164520
0.260	2.800	0.020	0.030	1.500	1.376	2.8150	0.05563	0.38634	0.264921
0.280	2.775	0.020	0.025	1.250	1.760	2.7875	0.05575	0.44109	0.385963
0.300	2.730	0.020	0.045	2.250	2.125	2.7525	0.05505	0.49104	0.527146
0.320	2.690	0.020	0.040	2.000	2.500	2.7100	0.05420	0.55034	0.687925
0.340	2.630	0.020	0.060	3.000	3.250	2.6600	0.05320	0.60354	0.980762
0.360	2.560	0.020	0.070	3.500	4.250	2.5950	0.05190	0.65544	1.392810
0.380	2.460	0.020	0.100	5.000	5.500	2.5100	0.05020	0.70564	1.940510
0.400	2.340	0.020	0.120	6.000	7.500	2.4000	0.04800	0.75364	2.836150
0.420	2.160	0.020	0.180	9.000	12.75	2.2250	0.04500	0.79864	5.091330
0.440	1.830	0.020	0.330	16.50	29.00	1.9950	0.03990	0.83854	12.16883
0.460	1.000	0.020	0.830	41.50	83.25	1.4150	0.02830	0.86684	36.08231
0.468	0.000	0.008	1.000	125.0	125.0	0.5000	0.00400	0.87084	54.42750

表5-4　2号原状土样 $D(\theta)$ 测定计算过程数值表

θ	λ	$\Delta\theta$	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\Delta\theta$	$\overline{\Delta\lambda/\Delta\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\Delta\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\Delta\theta$	$D(\theta)$
0.1118	3.535								
0.120	3.534	0.0082	0.011	1.34146	1.02073	2.52960	0.020741	0.020741	0.010585
0.140	3.510	0.020	0.0140	0.700	0.9500	2.5170	0.05134	0.071081	0.033763
0.160	3.486	0.020	0.0240	1.200	1.1150	2.4980	0.04996	0.121041	0.069598
0.180	3.464	0.020	0.0220	1.100	1.1000	2.4750	0.04950	0.170641	0.093797
0.200	3.442	0.020	0.0220	1.100	1.1000	2.4530	0.04906	0.219601	0.120780
0.220	3.420	0.020	0.0220	1.100	1.1760	2.4310	0.04862	0.268221	0.157579
0.240	3.395	0.020	0.0250	1.250	1.5000	2.4075	0.04815	0.316371	0.227278
0.260	3.360	0.020	0.0350	1.750	1.8750	2.3775	0.04756	0.363921	0.341175
0.280	3.320	0.020	0.0400	2.000	2.0000	2.3400	0.04680	0.410721	0.410721
0.300	3.280	0.020	0.0400	2.000	2.1250	2.3000	0.04600	0.456721	0.486266
0.320	3.235	0.020	0.0450	2.250	2.5000	2.2575	0.04515	0.501871	0.627338
0.340	2.180	0.020	0.0550	2.750	3.1250	2.2075	0.04416	0.546021	0.853167
0.360	2.110	0.020	0.0700	3.500	4.1250	2.1450	0.04290	0.588921	1.214649

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表5-4

θ	λ	Δθ	Δλ	Δλ/Δθ	$\overline{\Delta\lambda/\Delta\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\Delta\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\Delta\theta$	D(θ)
0.380	3.615	0.020	0.0950	4.750	6.1250	2.0625	0.04125	0.630171	1.929895
0.400	1.865	0.020	0.1500	7.500	9.3750	1.9400	0.03880	0.669871	3.135201
0.420	1.640	0.020	0.2250	11.25	46.625	1.7525	0.03505	0.704021	16.41248
0.440	0.000	0.020	1.6400	82.00	82.000	0.8200	0.01640	0.720421	39.62725

表5-5　3号原状土样$D(\theta)$测定计算过程数值表

θ	λ	Δθ	Δλ	Δλ/Δθ	$\overline{\Delta\lambda/\Delta\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\Delta\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\Delta\theta$	D(θ)
0.1739	1.270								
0.180	1.266	0.0061	0.005	0.819672	1.034836	1.2675	0.007731	0.007731	0.004000
0.200	1.240	0.020	0.026	1.260	1.375	1.2626	0.03606	0.032781	0.032536
0.220	1.210	0.020	0.030	1.500	1.550	1.2250	0.02450	0.057281	0.044392
0.240	1.178	0.020	0.032	1.600	1.675	1.1940	0.02388	0.081161	0.063914
0.260	1.147	0.020	0.031	1.550	1.800	1.1625	0.02325	0.104411	0.093969
0.280	1.106	0.020	0.041	2.050	2.300	1.1265	0.02253	0.126941	0.146952
0.300	1.055	0.020	0.051	2.550	3.026	1.0805	0.02161	0.148551	0.224682
0.320	0.986	0.020	0.070	3.500	4.000	1.0200	0.02040	0.168951	0.337902
0.340	0.898	0.020	0.090	4.500	5.125	0.9400	0.01880	0.187751	0.481111
0.360	0.780	0.020	0.118	5.750	6.500	0.8375	0.01676	0.204501	0.654628
0.380	0.635	0.020	0.145	7.250	19.50	0.7075	0.01416	0.218651	2.131847
0.400	0.000	0.020	0.635	31.75	31.75	0.3175	0.00635	0.225001	3.571890

表5-6　4号原状土样$D(\theta)$测定计算过程数值表

θ	λ	Δθ	Δλ	Δλ/Δθ	$\overline{\Delta\lambda/\Delta\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\Delta\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\Delta\theta$	D(θ)
0.1457	1.645								
0.160	1.638	0.0103	0.007	0.679611	0.789805	1.6415	0.016907	0.016907	0.006678
0.180	1.620	0.020	0.018	0.900	0.950	1.6290	0.03258	0.049487	0.023606
0.200	1.600	0.020	0.020	1.000	1.050	1.6100	0.03220	0.081687	0.042885
0.220	1.575	0.020	0.025	1.100	1.250	1.5890	0.03178	0.113467	0.070916
0.240	1.550	0.020	0.025	1.400	1.425	1.5640	0.03128	0.144747	0.105133
0.260	1.521	0.020	0.029	1.450	1.450	1.5355	0.03071	0.175457	0.137206
0.280	1.492	0.020	0.029	1.450	1.775	1.5065	0.03013	0.205587	0.182468
0.300	1.450	0.020	0.042	2.100	2.250	1.4710	0.02942	0.235077	0.264382
0.320	1.402	0.020	0.048	2.400	3.875	2.4260	0.03852	0.583527	0.378820
0.340	1.335	0.020	0.067	3.350	3.675	1.3685	0.02737	0.290897	0.534523
0.360	1.256	0.020	0.080	4.000	5.750	1.2950	0.02590	0.316797	0.910791
0.380	1.105	0.020	0.150	7.500	10.88	1.1800	0.02360	0.340397	1.850908

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表5-6

θ	λ	△θ	△λ	△λ/△θ	$\overline{\triangle\lambda/\triangle\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\triangle\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\triangle\theta$	D(θ)
0.400	0.820	0.020	0.285	14.25	16.38	0.9625	0.01926	0.859647	2.944609
0.420	0.450	0.020	0.370	18.50	23.31	0.6350	0.01270	0.872347	4.340169
0.436	0.000	0.016	0.450	28.13	28.13	0.2250	0.00350	0.876947	6.286764

表5-7　1号扰动土样$D(\theta)$测定计算过程数值表

θ	λ	△θ	△λ	△λ/△θ	$\overline{\triangle\lambda/\triangle\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\triangle\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\triangle\theta$	D(θ)
0.1122	2.800								
0.120	2.790	0.0078	0.010	1.282051	1.29103	2.7950	0.021801	0.020801	0.014072
0.140	2.764	0.020	0.026	1.30	1.260	2.7770	0.05554	0.07734	0.048338
0.160	2.740	0.020	0.024	1.20	1.260	2.7520	0.05504	0.13238	0.089367
0.180	2.710	0.020	0.030	1.50	1.525	2.7250	0.05450	0.18688	0.161840
0.200	2.675	0.020	0.035	1.75	1.875	2.6925	0.05385	0.24073	0.225685
0.220	2.635	0.020	0.040	2.00	2 275	2.6550	0.05310	0.29383	0.348924
0.240	2.580	0.020	0.055	2.75	2.625	2.6075	0.05215	0.34598	0.454100
0.260	2.530	0.020	0.050	2.50	2.600	2.5550	0.05110	0.39708	0.496361
0.280	2.480	0.020	0.050	2.50	2.625	2.5050	0.05010	0.44718	0.586925
0.300	2.425	0.020	0.055	2.75	2 760	2.4525	0.04905	0.49623	0.682371
0.320	2.370	0.020	0 055	2.75	2.875	2.3975	0.04795	0.54418	0 782260
0.340	2.310	0.020	0.060	3.000	3.500	2.3400	0.04680	0.59098	1.034216
0.360	2.230	0.020	0.080	4.000	4.250	2.2700	0.04540	0.63638	1.352309
0.380	2.140	0.020	0.090	4.500	6.250	2.1850	0.04370	0.68008	1.785212
0.400	2.020	0 020	0 120	6.000	7.250	2.0800	0.04160	0.72168	2.616093
0.420	1.850	0.020	0.170	8.500	10.50	1.9250	0.03870	0.76038	3.992000
0.440	1.600	0.020	0.250	12.50	13.50	1.7250	0.03450	0.79488	6.366446
0.460	1.310	0.020	0.290	14.50	17.50	1.4550	0.02910	0.82398	7.209832
0.480	0.900	0.020	0.041	20.50	31.75	1.1050	0.02210	0.84608	13.86467
0.500	0.000	0.020	0.900	45.00	45.00	0.4500	0.00900	0.85508	19.23932

表5-8　2号扰动土样$D(\theta)$测定计算过程数值表

θ	λ	△θ	△λ	△λ/△θ	$\overline{\triangle\lambda/\triangle\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\triangle\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\triangle\theta$	D(θ)
0.2302	1.355								
0.240	1.340	0.0098	0.015	1.530061	1.64081	1.3475	0.01321	0.03205	0.010830
0.260	1.305	0.020	0.035	1.750	2.125	1.3225	0.02645	0.05855	0.043133
0.280	1.255	0.020	0.050	2.500	3.625	1.2800	0.02560	0.08626	0.085647
0.300	1.200	0.020	0.055	2.750	3.250	1.2275	0.02455	0.08981	0.145933
0.320	1.125	0.020	0.075	3.750	3.750	1.1625	0.02325	0.11306	0.211978

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表5-8

θ	λ	△θ	△λ	△λ/△θ	$\overline{\triangle\lambda/\triangle\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\triangle\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\triangle\theta$	D(θ)
0.340	1.050	0.020	0.075	3.750	4.625	1.0875	0.02175	0.13805	0.811736
0.360	0.940	0.020	0.011	5.500	8.250	0.9950	0.01990	0.15471	0.638168
0.380	0.720	0.020	0.220	11.00	28.50	0.8300	0.01660	0.17131	2.012883
0.400	0.000	0.020	0.720	36.00	55.00	0.3600	0.00720	0.17851	3.213090

表5-9　3号扰动土样$D(\theta)$测定计算过程数值表

θ	λ	△θ	△λ	△λ/△θ	$\overline{\triangle\lambda/\triangle\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\triangle\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\triangle\theta$	D(θ)
0.1580	2.152								
0.160	2.146	0.002	0.006	3.000	2.025	2.1490	0.004298	0.00430	0.043610
0.180	2.125	0.020	0.021	1.050	1.150	2.1355	0.04271	0.04701	0.027029
0.200	2.100	0.020	0.025	1.250	1.250	2.1125	0.04225	0.08926	0.065786
0.220	2.075	0.020	0.025	1.250	1.375	2.0875	0.04175	0.13101	0.090068
0.240	2.045	0.020	0.030	1.500	1.500	2.0600	0.04120	0.17221	0.129156
0.260	2.015	0.020	0.030	1.500	1.750	2.0300	0.04060	0.21281	0.186207
0.280	1.975	0.020	0.040	2.000	1.875	1.9950	0.03990	0.25271	0.236913
0.300	1.940	0.020	0.035	1.750	2.125	1.9575	0.03915	0.29186	0.310099
0.320	1.890	0.020	0.050	2.500	2.625	1.9150	0.03830	0.33016	0.433332
0.340	1.835	0.020	0.055	2.750	3.000	1.8625	0.03725	0.36741	0.551112
0.360	1.770	0.020	0.065	3.250	3.125	1.8025	0.03605	0.40346	0.620403
0.380	1.710	0.020	0.060	3.000	3.375	1.7400	0.03480	0.43826	0.739560
0.400	1.635	0.020	0.075	3.750	3.875	1.6725	0.03345	0.47171	0.913934
0.420	1.555	0.020	0.080	4.000	4.625	1.5950	0.03190	0.50361	1.164592
0.440	1.450	0.020	0.105	5.250	6.125	1.5025	0.03005	0.53366	1.624327
0.460	1.310	0.020	0.140	7.000	9.250	1.3800	0.02760	0.56126	2.595815
0.500	0.400	0.020	0.680	34.00	57.00	0.7400	0.01480	0.59996	20.09859
0.504	0.000	0.004	0.400	100.0	100.0	0.2000	0.00080	0.60076	30.03790

表5-10　4号扰动土样$D(\theta)$测定计算过程数值表

θ	λ	△θ	△λ	△λ/△θ	$\overline{\triangle\lambda/\triangle\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\triangle\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\triangle\theta$	D(θ)
0.2245	1.620								
0.240	1.590	0.0155	0.030	1.935483	2.09274	1.6050	0.02488	0.02488	0.026030
0.260	1.545	0.020	0.045	2.250	2.500	1.5675	0.03135	0.05623	0.070283
0.280	1.490	0.020	0.055	2.750	2.875	1.5175	0.03035	0.08658	0.124454
0.300	1.430	0.020	0.060	3.000	3.250	1.4600	0.02920	0.11578	0.185137
0.320	1.360	0.020	0.070	3.500	3.875	1.3950	0.02790	0.14368	0.276374
0.340	1.275	0.020	0.085	4.250	5.125	1.3175	0.02635	0.17003	0.436694

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表5-10

θ	λ	△θ	△λ	△λ/△θ	$\overline{\triangle\lambda/\triangle\theta}$	$\overline{\lambda}$	$\overline{\lambda}\triangle\theta$	$\Sigma\overline{\lambda}\triangle\theta$	D(θ)
0.360	1.156	0.020	0.120	6.000	6.875	1.2160	0.02480	0.19433	0.667999
0.380	1.000	0.020	0.156	7.750	13.88	1.0775	0.02165	0.21688	1.389708
0.400	0.640	0.020	0.360	18.00	35.67	0.8200	0.01640	0.23228	4.143273
0.412	0.000	0.012	0.640	53.33	53.33	0.3200	0.00384	0.23612	6.296452

(3)绘制 $\theta \sim \log[D(\theta)]$ 关系曲线图。按表5-3～表5-10所给出的对应值绘出 $\theta \sim \log[D(\theta)]$ 曲线图(见图5-16、5-17)。

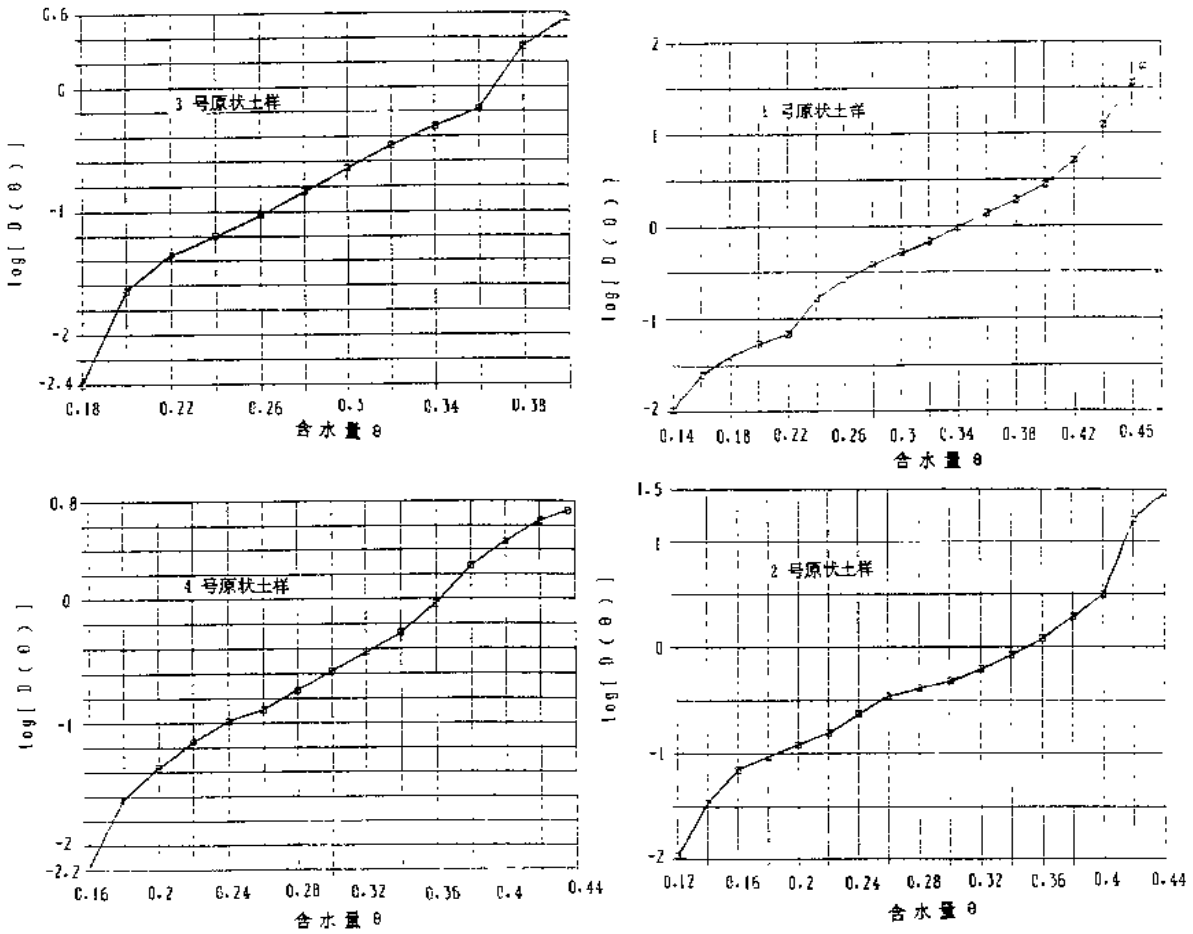


图5-16 原状土 $\theta \sim \log[D(\theta)]$ 关系曲线图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

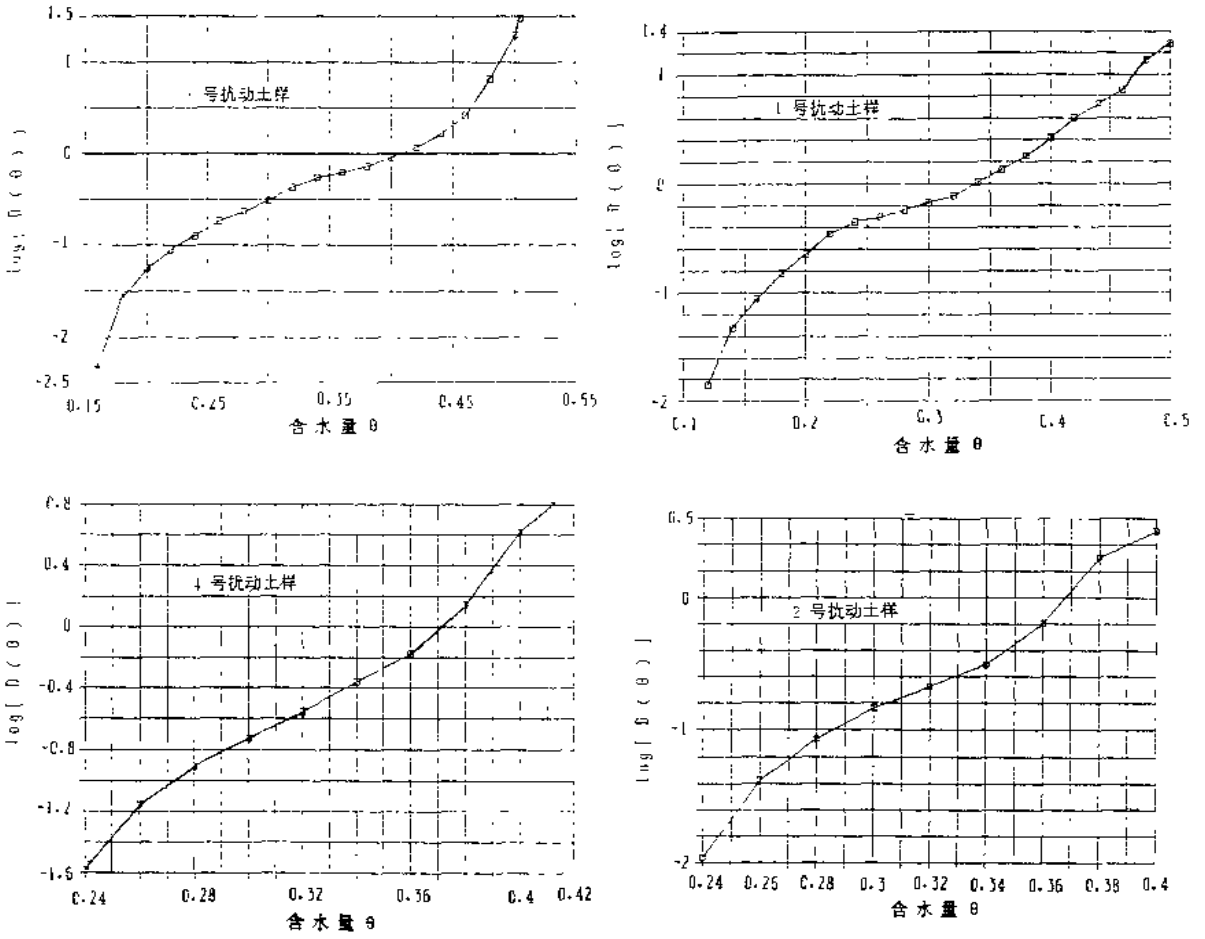


图5-17 扰动土 $\theta \sim \log[D(\theta)]$ 关系曲线图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第六章　包气带介质环境特征研究

第一节　介质环境作用概要[①]

一、包气带介质的环境意义

包气带地层做为地表至潜水间的地质单元，它不仅具有储存和传输地下水的能力，而且具有非常重要的环境作用。众所周知，地表的污染物多半是通过包气带后才进入潜水含水层的。因此，包气带不仅提供储存和传输入渗水的地质空间，而且也起着储存、滞留和传输地表渗入污染物的作用。在这个过程中，包气带土体做为介质环境，而包气带水既作为污染物溶质迁移的载体，也做为溶质与环境介质之间的媒介。所以，近年来在地下水环境质量评价、地下水污染研究和放射性废物地下处置研究中，人们逐渐把很大的注意力集中在包气带的研究上。

污染物进入包气带后，可能产生一系列复杂作用：物理-化学的、生物的及物理的。其中，有的作用对污染物具有阻碍或衰减的效果，这就是人们所说的自然净化作用，通常将其简称为"自净作用"。这些自净作用的结果，可减缓或减轻对潜水的污染，或在一定的时期内，可使潜水免遭污染。但是，包气带中不仅具有自净作用，而且某些物理-化学作用或生物作用会使某些污染的迁移能力增强。如果认为污水渗过包气带后，由于自净作用，所有污染物的浓度都会降低，从而产生一种盲目的安全感，这是非常错误的。因为污水渗过包气带后，有些物理-化学和生物作用的结果会使某些污染物的浓度增加。例如，用火电厂排放的高F^-灰水做土柱渗滤试验时，初期虑出水的F^-浓度逐渐降低；降低到一定程度之后便逐渐升高，甚至虑出水的F^-浓度大大高于灰水的F^-浓度。又如，pH值增大时可使酸性农药变为阴离子，使其从交换复合体中释放出来；钠含量高的污水入渗可使交换复合体中的钙镁释放出来等等。

二、包气带介质环境作用的研究内容

近二十年来，对于影响污染物在包气带中迁移的各种机理，国内外都在进行研究。其中：

1．使污染物迁移衰减或减缓作用的机理

(1)物理化学作用。其中包括沉淀、阳离子交换、pH的影响、氧化-还原影响、特殊吸附、化学降解、光分解及挥发等作用。它们可除去污染物或使污染物变为毒性更小或无毒的形式。其中特殊吸附可能是去除污染物的重要作用，因为这种吸附是不可逆的，实际上使污染物变成了不迁移的离子。与此相反，阳离子交换作用中的各种离子仍然保留着某些迁移性能。

(2)生物作用。主要是微生物降解及植物摄取。微生物降解是一个重要作用，它会使污

①本节主要参考钟佐燊"地下水污染研究中的几个问题"一文　详见参考文献。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

染物变为无害或危害更小的物质，如：CO_2和H_2O；会形成吸附微量污染物的分子；会促进金属离子氧化还原等等。

⑶物理作用。主要是机械过滤稀释以及渗流速度的影响。

2．包气带中使污染物迁移性能增加的作用

⑴物理—化学作用。它包括盐类的溶解和淋滤、阳离子交换、氧化-还原及、pH 的影响。

⑵受有机物存在影响的一些作用。例如有机物的生物固定作用会产生CO_2，从而促进钙镁碳酸盐的溶解；有机金属盐和物的形成，增加了金属的迁移性能等等。

上述作用既与污染物的性质有关，也与包气带地层的介质环境作用特征有关。

第二节　黄土的物质组成与结构特征研究

土体的物质组成不仅取决于母岩成分，而且与其成土后所处的环境条件有关。土体物质组成的形式称为土体的结构，土体结构的差异是受不同的成因环境、地质历史和后生条件制约的。由于土体结构差异的存在，使得不同的土体具有各自独特的水文地质、工程地质和环境地质特性。

本节主要从粒度成分、矿物成分、化学成分和物理化学特性上研究实验场区包气带黄土的物质组成、宏观结构和微观结构的特征。

一、实验场区黄土的物质组成

从宏观上看，实验场区的包气带黄土大体上可以划分为四个层位。如图6-1所示：自地面向下，0～8.5m左右为黄土状亚砂土(工程上称为轻亚粘土)，8.8～15.7m左右为黄土状亚粘土，这两层为上更新世和全新世的堆积物；18.7～21.2m左右为褐红色粘土，该层位含水量较大、粘性较强，呈硬塑状态，内含大量钙质结核、少含粉粒；21.2～34.5m(潜水面以下)左右为黄土状亚粘土，该层颜色灰黄、微带褐红色，含水量较大、手搓稍有砂感、浸水后粘性较强，自23.5m左右向下粉粒的含量增加，岩性接近黄土状亚砂土。

为了研究这四层土的物质组成和结构特征，在实验场区内的地表试坑采原状土样一个、在钻孔剖面上采样原状样五个，用来进行有关项目的测试分析。

1．粒度成分。采用比重计法对实验场区黄土试样进行了颗粒分析，分析结果见图6-2、图6-3、图6-4和表6-1。总的看来，实验场区包气带黄土的粒度成分以粉粒为主，约占全土的50%以上；粘粒含量次之，约占全土的20～33%左右；砂粒含量较少，粒径大于0.1mm的颗粒含量小于10%；按粒度成分的分类应属于粉质亚粘土或轻粘土。

随着深度的不同，粒度成分在垂直方向上变化较大：粉粒随着埋深的增大而减少，粘粒则随着埋深的增大而增多，砂粒含量也相应有所增大。六个原状样中，只有22号样中不含砾。

2．矿物成分。根据X光衍射图谱、差热分析曲线、化学分析及物理化学性质的测试资料，结合扫描电子显微镜等技术手段进行综合半定量分析，确定实验场区黄土的各种矿物组成和含量(见表6-2给出的结果)。全土中主要有石英(约占20%)、伊利石(约占20%)、

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

地质时代	层底深度(m)	岩层厚度(m)	地层柱状成井结构 1:200	岩性简述	室内试验 湿陷系数 δ_s	渗透系数 K(cm/sec) 湿陷前 K_1	渗透系数 K(cm/sec) 湿陷后 K_2	备注
上更新统 Q_3	8.5	8.5	250mm	轻亚粘土： 浅黄、棕黄色，较密实，稍湿，虫蛀含量较高，可见大量钙质结核，呈零星状分布。 2.0m以下粘粒含量增加。	0.0039 (6)	1.83×10^{-5} (3)	6.26×10^{-4} (2)	1、4"试验孔位于本井东44M。 2、室内试验结果为4"孔试验数据的统计值（详见4"试验井柱状图）。 3、地层岩性及抽水试验结果见附件。
	18.7	10.2		亚粘土： 褐黄色，湿，较密实，内含大量钙质结核沿层理呈线状分布。呈层状富积。局部虫蛀含量较高。岩性近轻亚粘土。 底部含铁红色粘土团块。	0.0020 (7)	3.09×10^{-3} (3)	1.24×10^{-4} (3)	
中更新统 Q_2	21.2	2.5	145mm	红粘土： 褐红色，湿，结构较细，塑性状态，内含大量钙质结核，少含粉砂。	0.0015 (2)	3.4×10^{-4}	2.95×10^{-4}	
	34.5	13.3	亚粘土 过渡	亚粘土： 灰黄，褐带褐红色，湿，较密实，手压粘自粘感，浸水后粘性较强。钙质结核沿层理呈线状富积。 22.0m以下零星分布砂及小砾石。 24.3m处见厚约10-15cm黄绿色风化砂岩碎屑层。下部粉粒含量增加，岩性近轻亚粘土。	0.0013 (6)	2.11×10^{-3} (3)	1.06×10^{-4} (3)	
	59.4	24.9	粘土井 亚粘 井水带 200mm 31m	粘土： 褐黄，褐带褐红色。上部砂粒含量较高，土质较粘，可塑状态。少含钙质结核。 41.0m处见10-15cm胶结状砂砾石及卵石。 44.7m处夹三层2-5cm风化砂岩碎屑层。 45.0m处见厚约10cm结核层 46.4-46.8m处可见厚约20cm微胶结的砂层。 49.8-50.6m含大量中粗砂，半胶结状，另见三层2-5cm微胶结的钙含小砾石层。 53.5m见厚约25cm结核层。 57.5-59.0m见三层3-5cm微胶结中砾层。				

图6-1 实验场区地层柱状图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

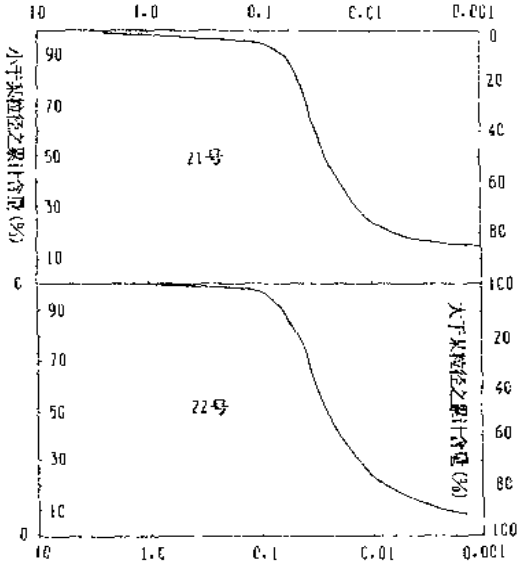


图6-2 21～22号黄土样颗粒分析曲线图

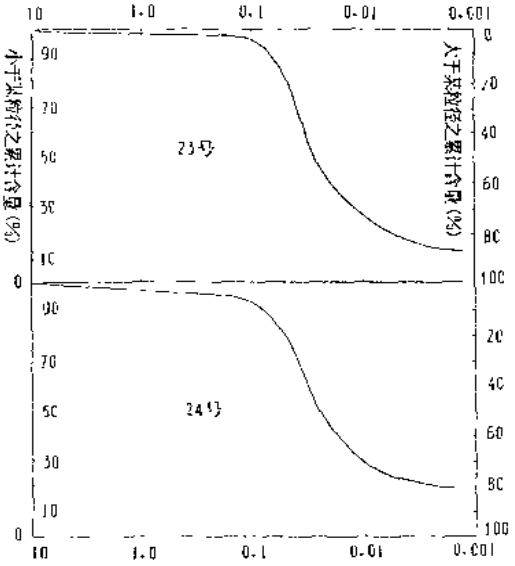


图6-3 23～24号黄土样颗粒分析曲线图

斜长石(约占15%)、正长石(约占10%)、方解石(约占10%)、高岭石(约占10%)、绿泥石(约占5～10%)和蒙脱石(大约占5～10%)；其中碎屑矿物约占总量的55%。而在＜2μm土中的矿物以伊利石为主(约占40～50%)，其次为高岭石(约占20～30%)；而绿泥石、蒙脱石、石英(各占10～20%)的含量最少。

在垂直剖面上，由地表向下矿物成分的变化并不十分明显。大体上表现为伊利石的含量减少，而蒙脱石、绿泥石的含量略有增多。

3．实验场区黄土的化学成分。

黄土样品的土化学全分析成果数据见表6-3。无论是全土还是小于2μm的黄土中，各种化学成分的含量相差很大，但均以SiO_2、Al_2O_3为主。全土中SiO_2、Al_2O_3的含量约占60～70%，其次为Fe_2O_3、Na_2O、K_2O、CaO的含量均高于一般粘性土；MnO、P_2O_5、TiO_2的含量较少；SiO_2/Al_2O_3的摩尔比较大，说

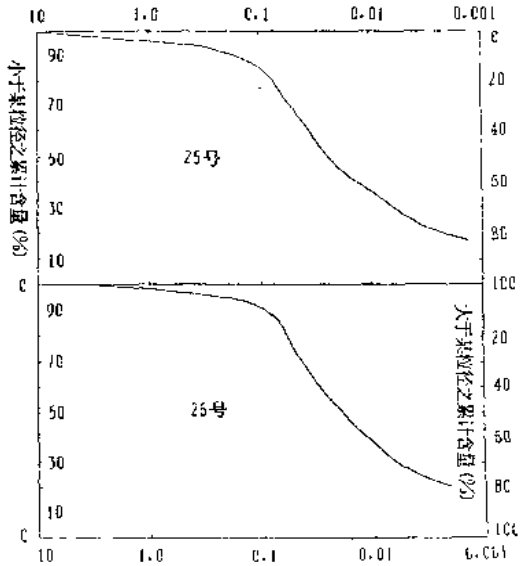


图6-4 25～26号黄土样颗粒分析曲线图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表6-1　实验场区包气带黄土粒度成分分析结果(%)

编号	深度(m)	粒径>2(mm)	2～0.5	0.5～0.25	0.25～0.10	0.10～0.05	0.05～0.01	0.01～0.005	<0.005
21	0.5～0.7	0.67	1.17	0.88	1.10	16.13	53.10	4.50	22.50
22	1.9～2.1	0.00	0.50	0.53	0.97	16.00	67.50	6.50	17.00
23	6.3～6.5	0.93	0.40	0.67	1.16	14.84	64.50	7.50	20.00
24	14.1～14.3	2.60	0.60	1.30	2.50	16.00	49.00	6.50	23.50
25	18.8～19.0	2.80	1.70	2.00	7.00	20.50	29.50	11.00	26.50
26	25.5～25.7	0.80	1.50	2.20	3.10	19.00	35.50	11.00	27.00

表6-2　实验场区包气带黄土矿物成分分析结果(%)

编号	全土矿物成分							<2μm土矿物成分			
	石英	长石	方解石	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石
21	20.0	35.0	10.0	5.0	15.0	10.0	5.0	13.0	45.0	29.0	13.0
22	20.0	30.0	10.0	5.0	20.0	10.0	5.0	13.0	51.0	25.0	11.0
23	20.0	25.0	10.0	5.0	20.0	10.0	10.0	10.0	50.0	22.0	18.0
24	20.0	25.0	10.0	10.0	20.0	10.0	5.0	19.0	39.0	28.0	14.0
25	15.0	25.0	10.0	10.0	20.0	10.0	10.0	15.0	43.0	21.0	21.0
26	20.0	25.0	10.0	5.0	30.0	10.0	10.0	13.0	47.0	20.0	20.0

表6-3　实验场区包气带黄土(全土)化学分析结果(%)

编号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	TiO_2	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	硅铝比	<2μm土硅铝比
22	59.9	11.5	3.3	1.25	0.46	0.07	8.9	1.90	2.13	1.54	8.86	4.25
23	60.2	11.9	3.2	1.20	0.48	0.07	9.3	1.79	2.06	1.57	9.13	4.04
24	58.1	11.7	3.8	0.91	0.49	0.07	9.9	1.64	2.02	1.35	8.43	3.79
25	60.4	12.8	4.2	0.96	0.52	0.09	7.5	1.75	2.14	1.24	8.04	3.90
26	59.9	12.5	4.3	0.96	0.52	0.09	7.7	1.79	2.17	1.23	7.95	4.06

明该黄土中主要以碎屑矿物石英为主。Fe_2O_3的含量高于3%，说明土中除长石外还有伊利石的大量存在。

在垂直剖面上，自地表向下，黄土中Al_2O_3、Fe_2O_3的含量增加，其中Al_2O_3、Fe_2O_3、TiO_2、MnO的含量在14～18m上下有一定的变化，其上部含量少些，下部含量稍高。而CaO、Na_2O的含量，则在其上部稍高，在其下部含量少些。SiO_2/Al_2O_3、FeO/Fe_2O_3、CaO/MnO、$(CaO+Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$等自上而下减少，而K_2O/Na_2O值则增加。这些结果不但表明其与气候的相关性，而且也大体上反应出自地表向下伊利石的减少、蒙脱石则不断增加。

4．实验场区黄土的物理化学性质。黄土的物理化学性质测试结果见表6-4。实验场区垂直剖面上黄土的pH值变化不大，而且都较高，一般在8.7～9.2之间；土层处于碱性环

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表6-4　实验场区包气带黄土物理化学分析结果

编号	PH值	游离氧化物(%)				难溶盐(%)	阳离子交换总量(meq/100g)		<2μm土比表面(m^2/g)
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	总量		全　土	<2μm土	
22	8.98	0.66	0.16	1.17	1.89	14.0	6.9	40.3	355
23	8.71	0.61	0.21	1.10	1.92	12.3	8.0	32.2	410
24	9.16	1.02	0.40	1.36	2.77	13.9	11.1	52.2	454
25	8.96	1.21	0.56	1.49	3.26	8.4	14.8	48.7	561
26	8.94	1.31	0.50	1.94	3.16	8.5	14.2	42.5	493

境，游离氧化物含量较少，约占1.9～3.2%，游离氧化物的总量最高不超过3.5%。其中，游离氧化铝的含量最低，而游离氧化硅的含量最高不超过1.5%；游离氧化铁的含量高于其它两种游离氧化物的含量，但与一般粉性土相比仍较低，它只占全铁含量的20%以下。可溶盐含量较高，但其中易溶盐含量极少，而难溶盐含量较多(可达14%)。全土的阳离子交换容量较小，最大不超过15meq／100g；而小于2μm粘粒上中阳离子交换容量则很大，最大可达52meq／100g，其中以Ca^{2+}离子为主(占95%以上)，Na^+、K^+离子的含量较少。这些结果说明实验场区黄土含较少的胶结物，土的活动性不十分强，属于中等吸附性和亲水性的土质。

从垂直剖面上的资料对比可以明显的看出：自地面向下，土中各种游离氧化物的含量在逐渐增高；全土中的阳离子交换总量明显增大，而<2μm土中阳离子交换总量则为稍有增高的趋势。这些资料说明，随着埋藏深度的增大，黄土中的粘粒含量和活性矿物的含量在不断增加，土的吸附性和亲水性在不断提高。

二．实验场区黄土的结构特征

土结构是指土粒或集合体的大小、形状、表面特征、粒间连结及相互排列关系、孔隙特征等方面特征的总和。上述各种特征的表现形式则构成了土结构的总形态。

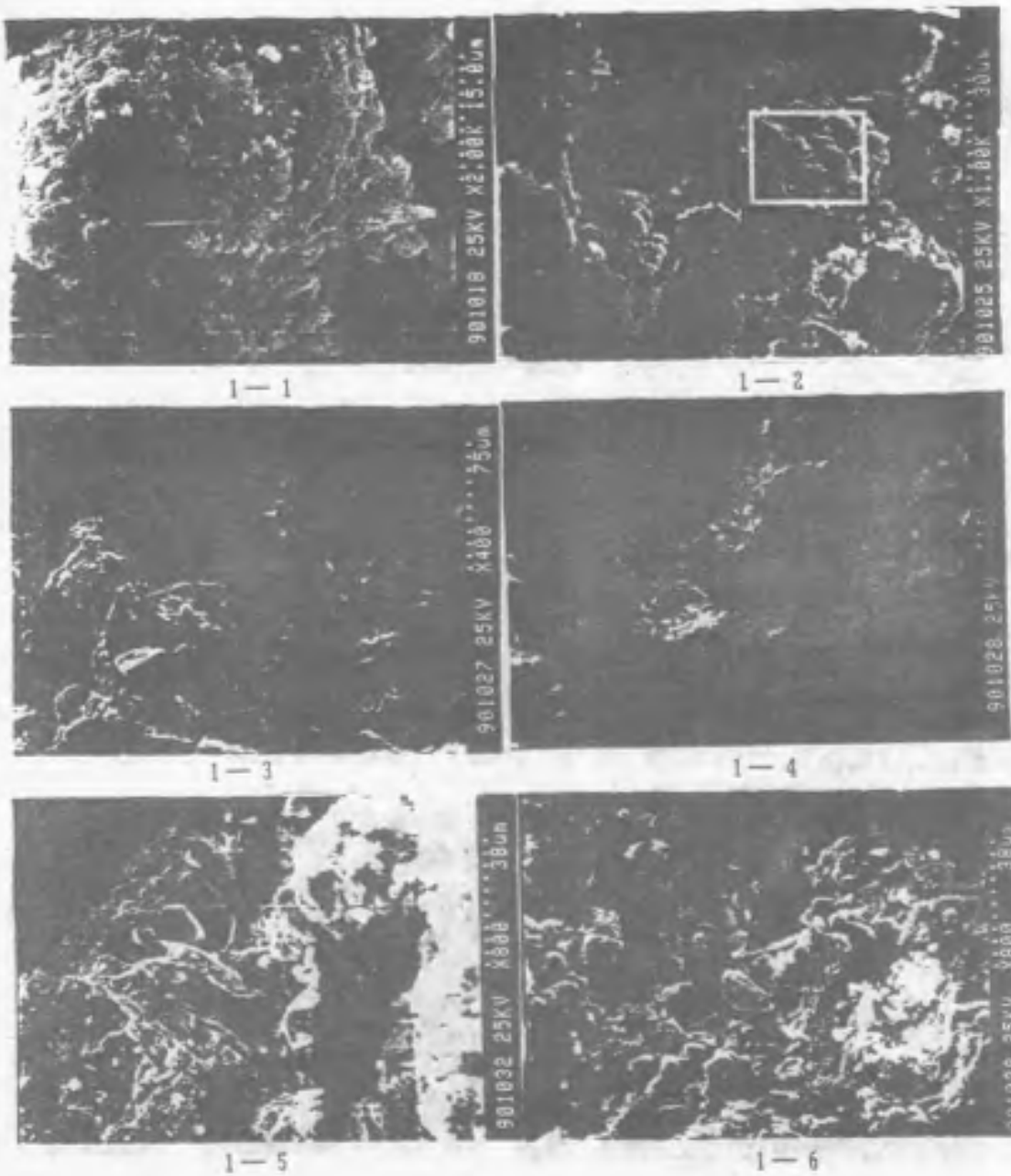
借助于放大镜(一般小于 200倍)和肉眼能观察到的土结构形态称为宏观结构，通过高倍(大于200倍)显微镜才能观察到的土结构形态称为微观结构。

1．实验场区黄土的宏观结构特征。实验场区黄土的宏观结构类形发育比较单一、特征明显，主要体现为块状结构类形；土体断面平整，自地面向下黄土粒度逐渐变细，致密程度增高颜色单一，为黄色、黄褐色，垂直节理发育。

2．实验场区黄土的微观结构特征。用电子显微镜对黄土试样的观察分析可见：在黄土中以集粒作为结构体系中的主要结构单元体。这种集粒是由许多粘土矿物和其它细小碎屑矿物、胶结物组合排列形成的团粒体（见图版1-2、1-2，图版2-4、2-5、2-6)；在黄土剖面下部的25m左右，可见有絮凝体（图版2-1）和絮凝-团粒体的过度类型（图版2-6，图版3-1）。

集粒间的胶结物主要为粘土矿物，它们胶结了大量的粉、粘粒，从而形成团粒体、絮凝体。以游离氧化物胶结的形式较少；在土层中有许多呈白色条带状分布的碳酸钙类矿物（图版1-5，图版2-2），但起胶结作用的碳酸钙类矿物则较少，只有少量的结晶或呈团粒

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



1—1　1—2

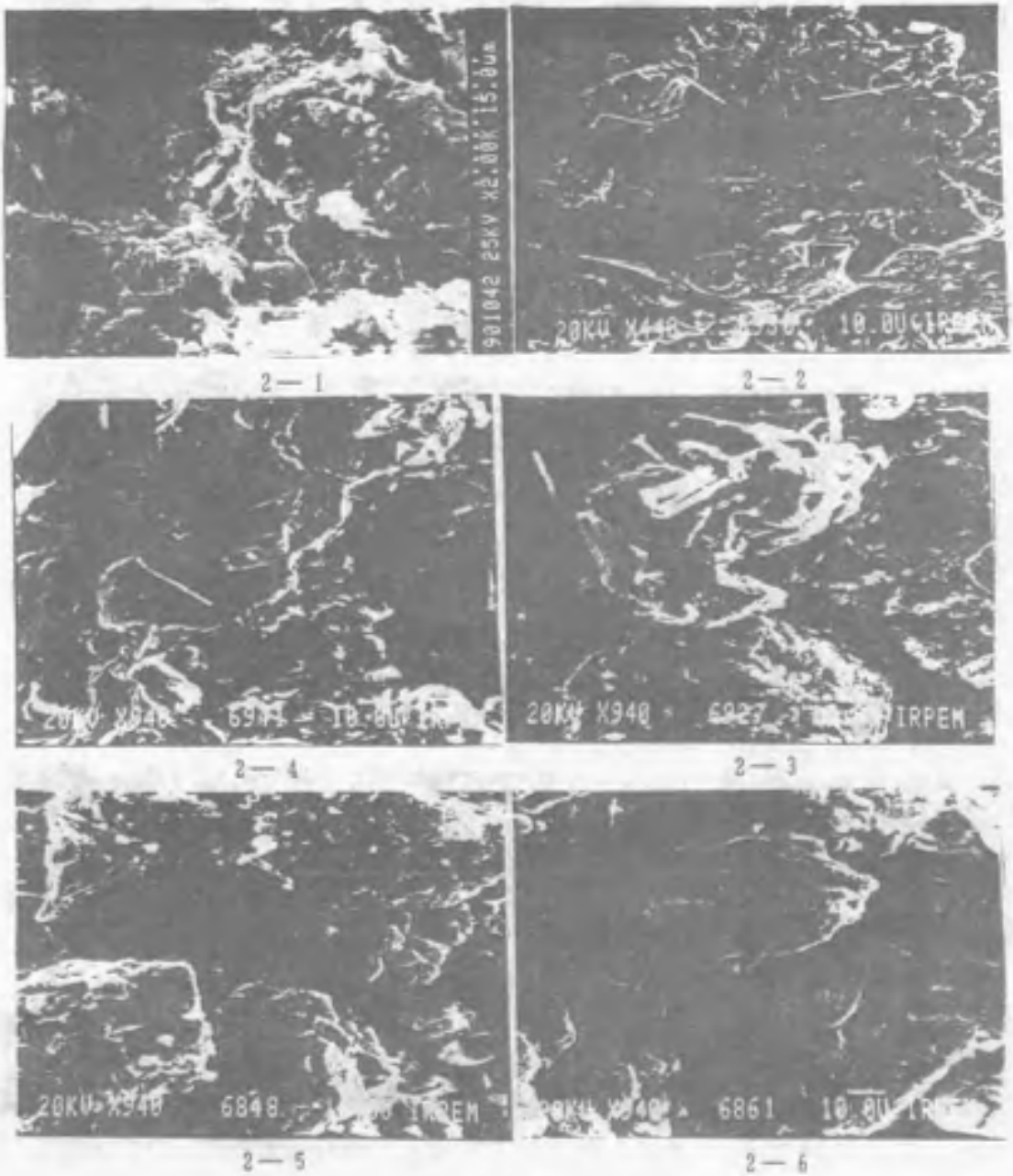
1—3　1—4

1—5　1—6

图版 1

图版 1 说明：1-1 埋深 2m处土样，团粒状结构中的粘土团，含钙质胶结；1-2 埋深 6.5 m处土样，团粒状结构；1-3 埋深14m处土样，团粒状结构，1-4 埋深14m处土样，团粒体间以粘土矿物为主的胶结物；1-5 埋深19m处土样，长石为主要碎屑矿物；1-6 埋深25m处土样，絮凝-团粒状结构。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



2—1　2—2

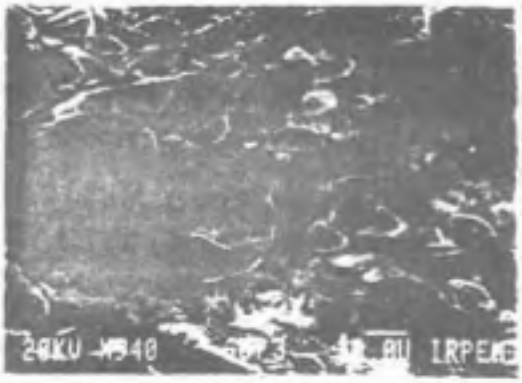
2—4　2—3

2—5　2—6

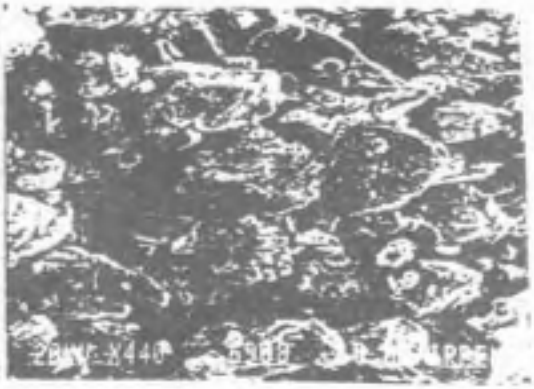
图版2

图版2说明：2-1 埋深25m处土样，由伊利石组成的絮凝体；2-2 含有碳酸钙；2-3 骨架-团粒状结构；2-4 埋深8m处土样，团粒体间的碳酸钙胶结；2-5 埋深21m处土样，团粒状结构；2-6 埋深25m处土样，絮凝-团粒状结构。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



3—1



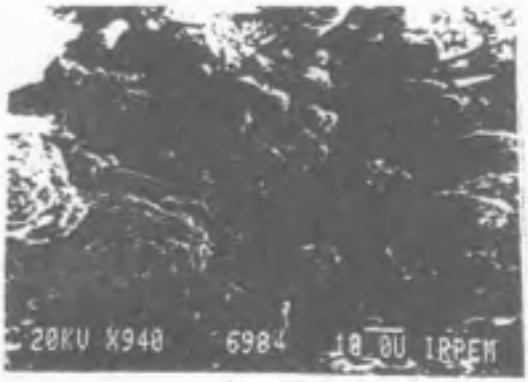
3—2



3—3



3—4



3—5

图版3

图版3说明：3-1 埋深26m处土样，团粒-絮凝状结构；3-2 埋深4 m处土样，团粒体间孔隙；3-3 埋深11m处土样，团粒状结构；3-4 埋深3m处土样，粒间结构；3-5 埋深26m处土样，团粒-絮凝状结构。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

被分布的碳酸钙类矿物在土层中起着胶结作用（图版2-1、2-2、2-4）。由于黄土的含水量较低，多产生较强的絮凝型连结形式。

由单粒构成的结构单元体在黄土剖面的上、下部都存在，主要由碎屑矿物组成。经能谱分析，结合其它技术手段综合鉴定出这些碎屑矿物以石英、长石为主。其间形成的单个孔隙较大，但孔隙率较小。其结构类型主要为团粒状结构(图版1-2、1-3，图版3-2、图版3-3）。

黄土中孔隙的存在形式主要有粒间孔隙和集粒内孔隙。按孔径的大小将孔隙分为：大（＞4μm）、中(4～0.4μm)、小(0.4～0.04μm)、微(＜0.04μm)孔隙。各级孔隙的多少及分布情况用压汞法试验求得，其试验结果可见表6-5和图6-5、6-6、6-7、6-8。其中，孔径

表6-5　实验场区包气带黄土孔隙分级分析结果(μm)

编号	孔径＞4	4～1	1～0.4	0.4～0.1	0.1～0.04	0.04～0.01	＜0.01
22	5.8	7.9	6.9	11.4	7.9	26.6	33.3
23	5.0	5.5	7.6	14.3	17.0	14.7	29.9
24	23.7	17.4	11.9	14.0	7.7	18.4	7.9
25	7.4	6.9	9.0	18.5	6.3	20.6	36.0
26	4.6	5.5	23.7	38.4	10.1	20.3	7.4

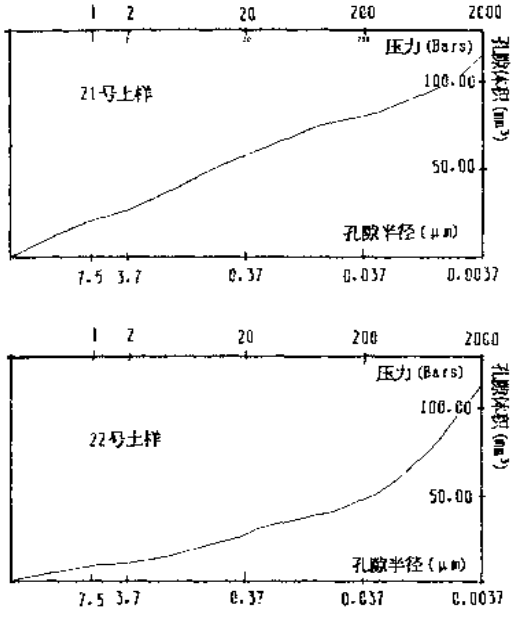


图6-5　21、22号样实测孔隙分布特征曲线

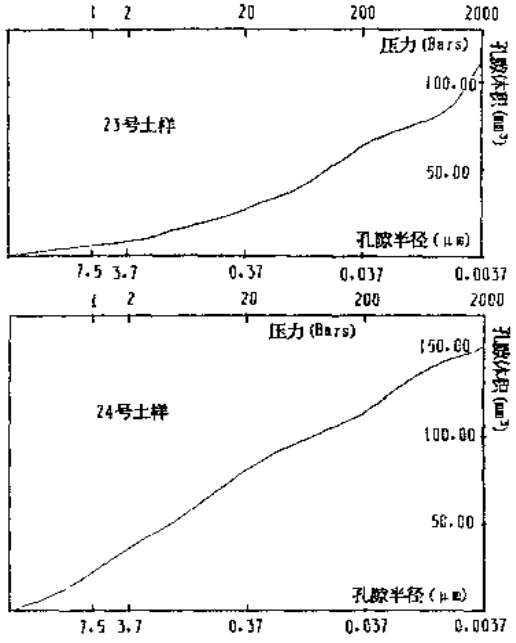


图6-6　23、24号样实测孔隙分布特征曲线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

＜0.1μm的孔隙含量较高，以集粒内孔隙为主；孔径＞0.1μm的中、小孔隙较少，主要为粒间孔隙；孔径＞4μm的大孔隙更少(4.6～22.7%)。

在垂直剖面上，自地面向下黄土的结构有着明显的差异。在上部(14～15m左右)有碎

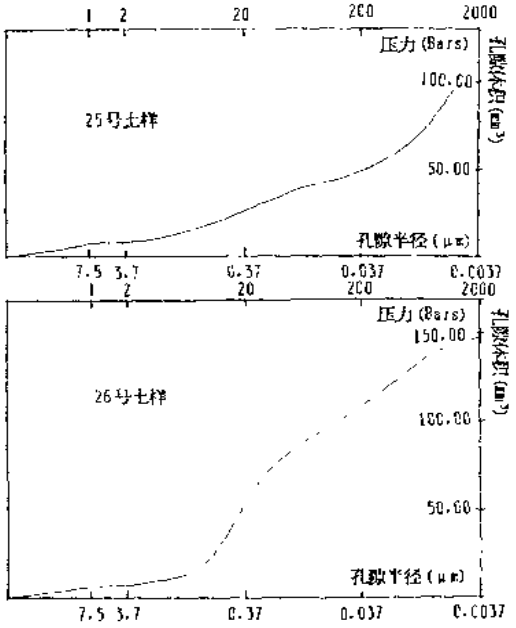


图6-7 25、26号样实测孔隙分布特征曲线

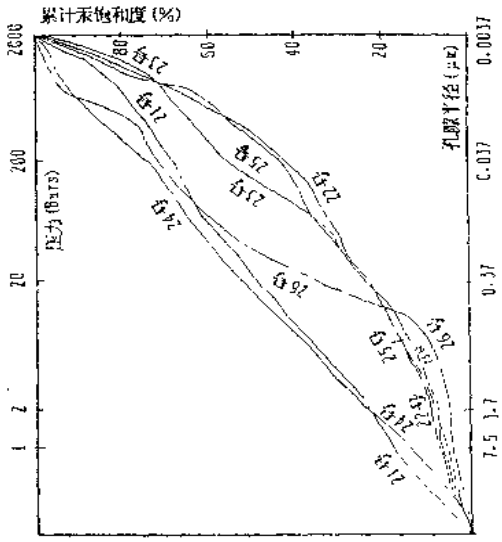


图6-8 实测压力与孔隙汞饱和度关系曲线

屑矿物构成的单粒存在；团粒体十分发育，粘土矿物作为主要胶结物胶结了许多粉粒、粘粒形成了较大的集粒(图版1-1、1-2，图版3-2、3-3)。单粒和集粒构成的结构单元体呈无定向排列，并不十分紧密，其间可见较大的单孔隙，但孔隙率则较小；粒间孔隙具有连通性，但由地表向下其连通性逐渐变弱。

在剖面的下部，黄土主要以紧密的团粒状结构、絮凝-团粒状结构(图版1-6，图版2-6)、团粒-絮凝状结构(图版3-5)为主，偶尔有骨架-团粒状结构(图版2-3)。黄土的结构单元体仍以团粒体为主，但团粒体本身的体积减小；团粒体的排列变紧密，＞4μm的孔隙减少；在粒间和团粒体内的孔隙变得少而小(图版2-4、2-5、2-6，图版3-1)。粒间胶结物由粘土质转向粘土质和游离氧化物胶结的连结方式。

三、土样饱水渗透系数K_s的确定

在黄土包气带水流数值计算过程中，试样的饱水渗透系数K_s，是进行实际资料拟合、

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

参数调试、数值预测计算时的必要约束条件。在实验场区的用冲击钻采取原状土样 8 个，四层包气带黄土，每层取两个试样。室内测试结果见表6-6。

表6-6 实验场区包气带黄土K_s值的测定结果

样号	深 度	垂向(cm/s)	水平(cm/s)	样号	深 度	垂向(cm/s)	水平(cm/s)
3	4.5～4.7	7.29×10^{-6}	1.48×10^{-6}	9	18.6～18.8	6.50×10^{-6}	8.62×10^{-6}
4	8.6～8.8	5.24×10^{-7}	1.73×10^{-6}	10	21.7～21.9	4.87×10^{-7}	7.28×10^{-6}
5	10.8～11.0	1.36×10^{-6}	2.10×10^{-6}	11	23.7～23.9	8.86×10^{-6}	1.46×10^{-5}
7	16.1～16.3	9.10×10^{-6}	7.77×10^{-7}	13	26.3～26.5	1.83×10^{-5}	1.34×10^{-5}

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第七章　包气带水文地质应用

第一节　有渗流坝体应力分布特征

一、坝体的应力分布问题

过去，有渗流坝体的应力分布状态如图7-1表示。包括坝体两侧的表面压应力、坝体的重力与浮力。实际上，在库水与坝尾水位差的作用下形成坝体中的渗流。从水动力条件看，第三章中的横向渗流流场（包括包气带和饱水带）与坝体渗流状态相同。凡是渗流就有渗透力或称为水动压力存在，渗流驱动力用水力坡度 $J = dH / dL$ 来表征。这样，便可将坝体两坡的表面压应力作用转化为体应力问题研究。

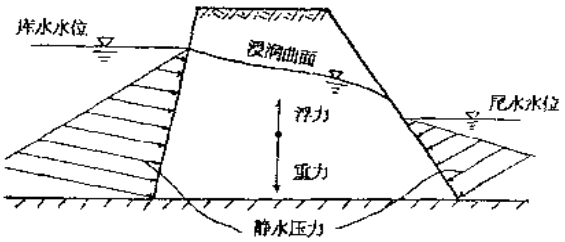


图7-1 坝体应力分布状态示意图

既然支持毛细水与饱水带水一起进行着横向渗流，那么坝体中渗流驱动力的范围不仅包括浸润曲面以下的饱水带，而且也包括浸润曲面以上的支持毛细水带。因此，坝体中的应力分布状态可分为三部分研究，如图7-2所示。在饱水带中任意一点作用的应力包括荷载重力、正值的孔隙水压力与渗流驱动力三项；在支持毛细水带包括荷载重力、负值的孔隙水压力与渗流趋动力；在支持毛细水带以上的部分受荷载重力与负值的孔隙水压力作用。根据太沙基原理，土体中任意一点的荷载重力“ σ ”与孔隙水压力“ u ”的差值称为有效应力“ σ' ”，即：

$$\sigma' = \sigma - u \qquad (7\text{-}1)$$

有效应力是对土体变形和强度起有效作用的粒间应力。与荷载重力值比较，在饱水带的有效应力减小，使土体的强度减小；在支持毛细水带的有效应力增大，使土体强度增大。因此，上述各带的应力均可用有效应力与渗流驱动力来描述。这样便可将坝体的应力分布状态划分为有渗流作用带与无渗流作用带。有渗流作用带包括饱水带与支持毛细水带，其中任意一点的应力包括垂向的有效应力与横向的渗流驱动力。无渗流作用带为支持毛细水带以上的部分，它不受横向

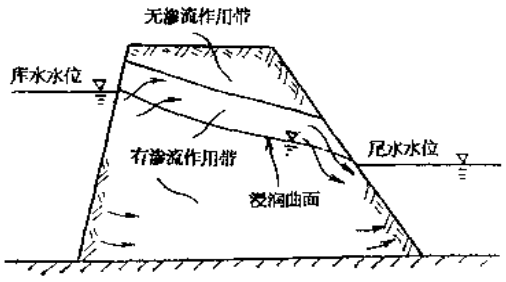


图7-2 坝体应力分带示意图

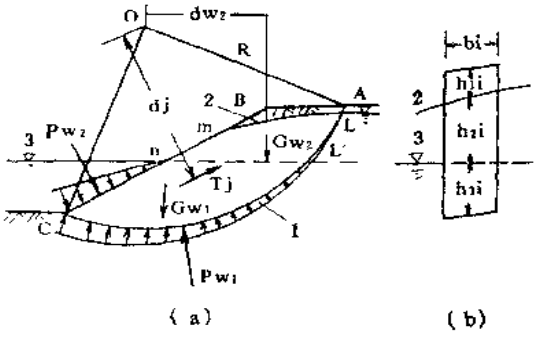
PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

渗流的作用，其中任一点的应力就是该点的有效应力。

从量纲对比看，水力坡度J的概念为：对任一点来说，在渗流方向上，单位流程上的水头损失称为该点的水力坡度。驱动渗流的压应力

$$P = -\gamma dH / dL = \gamma J \qquad (7\text{-}2)$$

其中 γ 为水的重率，一般取值为 1 。则 J 与 P 的数值相等，方向相同。因此，坝体中任一点的渗流压应力可由该点的水力坡度 J 确定。在进行土体的应力分析时所使用的渗流驱动力，实质上就是渗流压应力。当渗流驱动力达到一定数值时，土中的某些颗粒就会被渗透水流携带走，这种地下水的侵蚀作用称为机械侵蚀。机械侵蚀使土石结构变松，强度降低，这是土坝及斜坡稳定性评价中必须考虑的一个重要因素。因此，渗流驱动力的大小与分布是评价机械潜蚀作用的水动力条件与坝体应力分布特征的重要参量。



（a）　　（b）

图7-3 “代替法”分离体受力图

二、坝尾排水边坡的力分析

如第三章中图3-32所示，传统上认为是“渗出面”的部位是支持毛细水带的侧边壁，在该条件下是流面，为孔隙水压力的负值区。该段边壁附近的渗流方向受边壁形状的影响，为垂向下或斜向下方。由太沙基原理，该段负压区域土体的有效应力增大，土体的强度增大，机械潜蚀作用不可能在该段壁面发生。

在土力学中，求解有渗流影响的边坡稳定问题时，常用“代替法”和“有效应力法”，分别由图7-3和图7-4所示。它们都是取浸润曲线以下，滑动面以上所包围的土体为分离体，进行受力分析的。

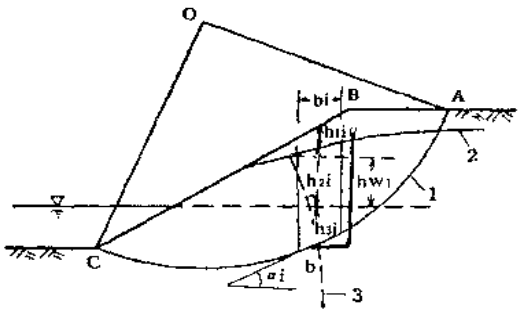


图7-4 “有效应力法”分离体受力图

这两种方法所考虑的渗流作用仅限于饱水带，同时也只考虑了渗流中的静水压力(的浮力)作用，而没有考虑动水压力的作用。在图示的排水边壁附近都画有渗出面。对此，在进一步的研究中，应予修改。既应考虑包括饱水带和包气带在内的渗流动水压力作用，也应去掉渗出面问题的考虑。这样进行坝体边坡或天然土体边坡应力分析的结果将会有所不同，对机械潜蚀问题的研究和防护设计的着重点也将会有所不同，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

这些都将会在进一步的研究中得到验证。

第二节　放射性废物的包气带地质处置方案

放射性核废物的地质处置可以有许多种方案。本节只讨论应用包气带水流屏蔽技术的几种方案以及与方案有关的处置场选址原则。

一、中、低放射性废物地质处置场的选择

中、低放射性废物地质处置场选择(简称选址)的宗旨是利用场址的自然环境条件与核废物处置库工程屏障的综合作用，把放射性核废物良好地封闭在某一地质环境中，使其同人类生活的环境隔离开来。

1．选址的原则

(1)在区域构造稳定地区选址。区域地质构造稳定性是中、低放射性核废物地质处置中选址的一个必要条件。在地质构造不稳定地区，未来的千百年中，地质构造的活动也许会损害处置库的工程屏障、改变处置库址区的地质及水文地质条件，从而削弱工程结构和地质环境的屏障作用。

(2)在黄土包气带中选址。由第三章的研究结果可知：水流屏蔽结构的屏蔽效应只有在非饱和流场中才能实现。因此，应把处置库建在具有一定厚度的包气带黄土中，尤其是大厚度的包气带黄土则更为有利。严格地讲，人工建造的水流屏蔽结构实际上也是一种工程屏蔽。只是因为该结构产生的水流屏蔽作用具有独特机制，才将其单独列出，以区别于一般的工程屏障作用。

(3)选择有利的地质环境屏障区域。在一些意外的情况下，放射性核废物处置库的工程屏蔽作用也许会失效。当有放射性核素从处置库中向外释出时，库址的地质环境屏障将起主要作用。放射性核素在地下水中的迁移能力受到放射性核素本身、土体和水化学特性的相互关系所制约。其中最重要的是介质的吸附能力和离子交换的能力。美国国立橡树岭实验所的研究结果证明：伊利石粘土能够阻滞铯－137的运移，锶的运移也受阻滞。这是因为粘粒的比表面积大、吸附能力强、阳离子交换容量较大，对中、低放射性核素具有很强的吸附和迟滞作用。因此说，中、低放射性核废物处置场的环境地层中的粘土含量和矿物的类型是选择场址工作的重要组成部分。

实际研究的结果（例如在实验场区）表明：在我国北方的黄土中，粘土的含量很高，粘土矿物以伊利石为主，其吸附力很强、阳离子交换容量很高；在南方的红土中，粘土的含量更高，粘土矿物以蒙脱石为主，它的吸附力更强、阳离子交换容量更高。

综上所述，在北方的大厚度包气带黄土和南方具有一定厚度的包气带红土层中选择中、低放射性核废物的处置场址比较有利。

2．非饱和流场的形成

在包气带中选址的目的就是要建造水流屏蔽结构。利用水流屏蔽效应来阻滞废物体中核素的浸出和迁移。这就需要保持永久的非饱和流场。

对于我国北方干旱、半干旱地区的大厚度黄土包气带，在地表没有积水的条件下，雨

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

季降水的影响很小。每次降水，在地表形成“产流”的情况下，地面以下可以形成很薄的饱水层。降水停止以后，该饱水层的水分会很快地被下覆的非饱水地层吸渗，重新形成非饱和状态。因此，降水对大厚度包气带黄土的非饱和流状态影响微弱。

即使在地表有长期积水的情况下，一定的地层结构仍能保证在包气带的非饱和流场状态。当垂向水流通量小于土层的饱水渗透系数时，即可在该土层形成非饱和流的负压区。当垂向水流通量大于或等于土层的饱水渗透系数时，则要在该土层形成正压或零压状态下的饱和水流。其前者一般出现在水流由渗透性差的地层进入到渗透性好的地层（如图7-5所示）。

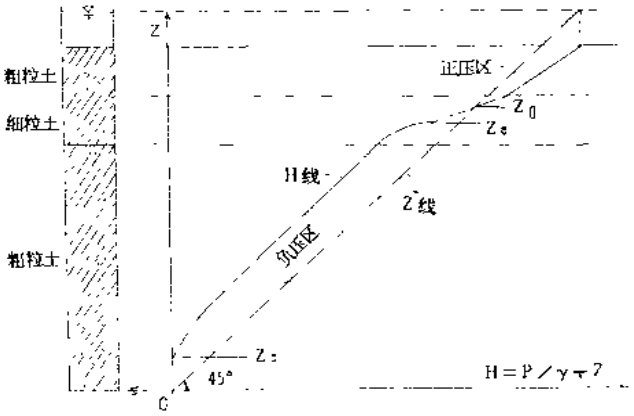


图7-5 非饱和流的形成示意图

在黄土或红土包气带地层中建立“中、低放射性核废物处置库”时，如果需要，则在封库后库顶上方的一定距离覆盖一层比环境土层更细的粘土层，便可长久地保持处置库环境土层的非饱和流动状态。

二、中、低放射性废物处置方案的探讨

1．包气带中的处置方式

利用非饱和流状态下的水流屏蔽效应理论，在包气带土层中建立水流屏蔽结构形式的中、低放射性废物处置库（如图7-6），其中包括：

(1)环境土层。将开挖后的边和底面压实并修整成平面。

(2)粗粒水流屏蔽层。可选粒径在2～5mm以上的小砾石（可用来自建筑工地的筛下料）。砾石层厚度可在30～50cm之间。这是要求砾石层的厚度大于其支持毛细水高度的两倍值。在施工时要注意砾石层和环境土层之间的界面分明，不得混杂，边装边压实。

(3)核废物处置库。用粘土或

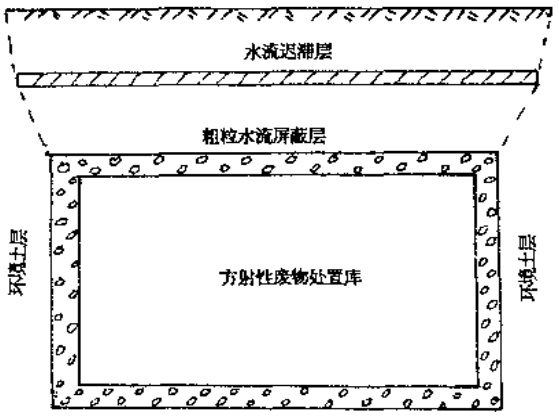


图7-6 处置库的水流屏蔽结构

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

环境土围裹核废物堆。堆中的核废物可以裸放，也可以保留运输中必需的简包装。为防止降水的影响，应在无雨季节，采取短时填库、迅速封库的方法。

(4)水流迟滞层。可用20～30cm厚的粘土层构成，其覆盖范围应略大于库顶。该层的设设置适用于多雨的地区，是为防止长时间的连续降雨而在地面形成饱水入渗所设置的。在干旱、半干旱地区的大厚度包气带黄土中，可以不设置。

2．几种处置方案

利用水流屏蔽技术，再根据场址区的气候条件、包气带的地层结构和场址范围大小的情况，可以将中、低放射性核废物的地质处置方案分为集中处置、水平分散处置和垂直分散处置三种(如图7-7)。其中，集中处置方案和垂直分散处置方案适用于北方大厚度包气带

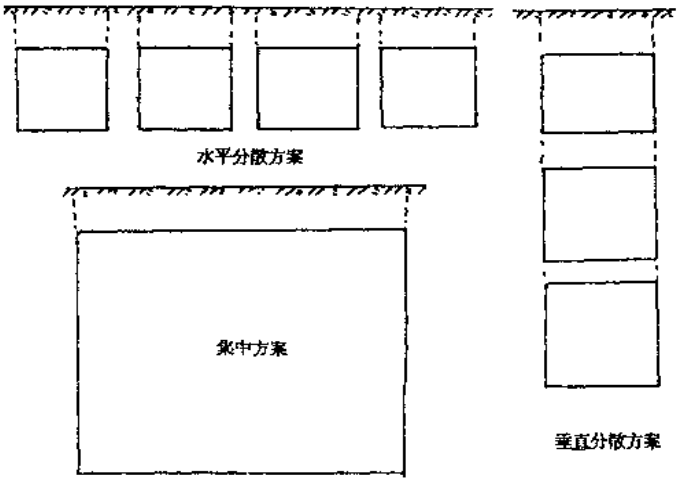


图7-7 处置库的三种设置方案

黄土。一般说来，南方红土或基岩风化带的包气带厚度很薄，加之气候多雨，应采取水平分散的处置方案。可在包气带中浅埋或浅堆处置形成人工的包气带层。

3．几种处置方案的经济效益分析

从这几种处置方案看，一般不需要包装费用，也不需要混凝土结构的工程费用。只需要建库时的环境土层开挖和用粘土或环境土围裹核废物堆回填的施工费用，以及建造水流屏蔽结构所用粗粒料(砾石)的费用。

(1)从施工的难度看。如果都是平地开挖的情况下，则属水平分散方案最容易。可以作到及时装库、迅速封闭，工程费用最低。集中处置方案(在相同土方量的情况下)需要向开挖坑外较远的地方出土，故工程费用将要增高，而且不一定作到及时装满库容量。不能迅速封库，这在多雨的南方是不可取的。垂直分散方案的开挖深度大，工程费用高。它适用于大厚度的包气带地区，而且是每次处置量不大的情况。这种方案最后形成不连续的串珠状的水流屏蔽体结构。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

(2)从粗粒料的用量上看。在相同的核废物处置量的情况下，集中处置堆的比表面最小，用量最少。水平分散和垂直分散堆的比表面都相对较大，用料也多。例如：有10000m^3的核废物堆，按集中一堆和分散成10堆、100堆三种处置方案处置。将废物堆按正方体计算，三种方案中每堆废物的边长分别为：21.54m、10m、4.64m。水流屏蔽层的粗粒料的厚度如按0.3m计，三种处置方案中每堆用料分别为：860m^3、191m^3、44m^3。按这些数据计算，三种方案每处置1m^3核废物所用粗粒料数分别为：0.086m^3、0.191m^3、0.44m^3。由此可见，将核废物集中一堆处置方案所用的粗粒料相对最少。

在实际的中、低放射性核废物地质处置选址和废物库的设计过程中，应根据具体的地质、水文地质条件选出最佳方案。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

参考文献

[1] L.G. 埃弗雷特等（籍传茂、费谨、尚若筠等译），1986，包气带水勘察和研究方法，地质出版社。

[2] 王大纯、张人权等，1986，水文地质学基础，地质出版社。

[3] 水文地质工程地质选集，1987，水文地质为人类服务（国际水文地质学家协会18届大会文集），地质出版社。

[4] 雷志栋、杨诗秀、谢森传，1988，土壤水动力学，清华大学出版社。

[5] 雷志栋等，1984，土壤给水度的初步研究，水利学报，N_0.5。

[6] 金光炎，1985，地下水埋深较浅时给水度的概念与实例，地下水，No.2。

[7] A.A. 罗戴，1964，土壤水，科学出版社。

[8] J.贝尔（李竟生、陈崇希译），1983，多孔介质流体动力学，中国建筑工业出版社。

[9] 中野政诗（郑毅译），1982，土中水的非饱和流动，世界地质，N_0.1。

[10] 张蔚榛，1981，包气带水分运移问题讲座：（一）包气带水分运移基本方长程，水文地质工程地质，N_0.1。

[11] 张蔚榛、张瑜芳，1981，包气带水分运移问题讲座：（二）土壤水分运移数测定方法，水文地质工程地质，N_0.2。

[12] 张蔚榛、张瑜芳，1981，包气带水分运移问题讲座：（四）蒸发条件下土壤水分运动（上），水文地质工程地质，N_0.4。

[13] 张蔚榛、张瑜芳，1981，包气带水分运移问题讲座：（五）蒸发条件下土壤水分运动（下），水文地质工程地质，N_0.5。

[14] 张蔚榛、张瑜芳，1983，土壤释水性和给水度数值模拟的初步研究，水文地质工程地质，N_0.5。

[15] 裴源生，1983，地下水水位匀速升降条件下土壤水分运动和给水度研究，水文地质工程地质，N_0.4。

[16] Barnes, C.J., 1990, 非饱和带土壤中溶质和水的迁移，水文地质工程地质译丛，N_0.6。

[17] 虞锁富，1991，土壤对重金属离子的竞争吸附，土壤学报，N_0.1，第28卷。

[18] 雷祥义，1984，西安附近黄土孔隙特征，水文地质工程地质，N_0.4。

[19] 陈崇希，1984，给水度的概念、定义及包气带的水份分布模型，水文地质工程地质，N_0.4。

[20] 张人权、高云福、王佩仪，1985，层状土重力释水机制初步探讨，地球科学，Vol.10，N_0.1。

[21] 高国瑞，1986，细粒土结构专门术语、概念和分类命名的初步方案，水文地质工程地质，N_0.1。

[22] 曲焕林、宋锡冰，1986，黄土层地下水向井流动的特征及参数确定方法的研究，水文地质工程地质论丛，地质出版社。

[23] 杨金忠，1987，土壤非饱和纵向和横向弥散系数确定方法的研究，水文地质工程地质

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn