

富水隧道复合结构体系 防排水技术

吴祖松 王元清 何春梅 张开顺 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前言

随着我国交通基础设施建设的发展,隧道的应用地位愈加重要,特别是在山岭地区的公路工程中,隧道率一般为25%~35%,局部路段可达到50%,隧道工程的广泛应用推动了隧道工程技术的快速发展。隧道穿越的地层具有水文地质复杂、地形地貌多样等特点。在修建隧道时常常遇到一系列地质问题,如地下水、断层、软弱破碎带、高地应力、高水压及岩溶等,其中地下水引起的工程地质问题是隧道工程施工及运营中最具危害的问题之一,该问题处理得是否得当直接关系到隧道施工及运营期间的安全。为了满足交通建设新形势的需要,不断提高隧道工程技术水平,本书作者结合我国隧道实际建设情况,将富水隧道地下水渗流及结构防排水技术编写成《富水隧道复合结构体系防排水技术》一书,以满足长期从事岩溶富水地区隧道设计、施工及灾害防治技术人员的需要,同时也可作为公路工程、桥梁隧道工程,以及地下工程等相关专业大中专、高职在校师生的学习参考用书。

本书从隧道工程技术人员角度出发,充分分析了隧道防排水的设计要点,详细阐明了富水及岩溶地区隧道施工、灾害治理的要点和措施,突出了“实用性、先进性、可操作性和示范意义”的原则,力求反映现代隧道工程设计施工新技术及新工艺,以满足新时期人才培养和专业的需求。

本书结构合理、内容翔实,基于地下水与隧道复合结构体系之间的相互作用,从模型试验、数值分析及处治方法上对岩溶富水隧道复合结构体系防排水技术进行了深入论述。本书共十章,主要内容包括隧道衬砌微裂隙渗流理论基础及腐蚀劣化作用、止水带抗水压模型试验、有限元及非连续变形数值计算方法在衬砌结构抗水压能力和突水突泥分析中的应用,并结合实际项目,对岩溶隧道在渗流作用下的处治措施及方法进行了实例讲解。

本书引用了较多的参考书籍和文献,在此,谨向这些文献资料的作者表示衷心的感谢!同时,感谢重庆交通大学的山区桥梁及隧道工程国家重点实验室对本书提供的大力支持!

由于本书作者的水平和能力有限,书中难免有疏漏之处,恳请各位同行专家不吝赐教、批评指正。

编著者

第一章 绪 论	(1)
1.1 衬砌结构的作用及结构形式	(1)
1.1.1 衬砌结构的构成及作用	(1)
1.1.2 衬砌结构的分类	(3)
1.2 地下水与衬砌结构的关系	(5)
1.2.1 地下水及含水层	(5)
1.2.2 地下水对隧道的影响.....	(11)
1.3 隧道衬砌耐久性与地下水的关系.....	(13)
1.3.1 地下水对隧道衬砌结构耐久性的影响.....	(13)
1.3.2 隧道防排水的作用.....	(13)
1.4 本章小结.....	(14)
第二章 地下水与隧道复合结构的化学物理作用	(15)
2.1 工程与水文地质特征对衬砌结构的影响.....	(15)
2.2 地下水与混凝土的化学作用.....	(17)
2.2.1 盐类腐蚀对结构的影响.....	(17)
2.2.2 电化学腐蚀对结构的影响.....	(18)
2.2.3 酸性腐蚀对结构的影响.....	(19)
2.3 地下水与隧道复合结构的物理作用.....	(20)
2.4 孔隙水压作用下混凝土结构的力学特性分析.....	(21)
2.4.1 孔隙水压作用下混凝土材料的有效应力.....	(21)
2.4.2 衬砌结构抗水压能力数值模拟试验.....	(22)
2.5 本章小结.....	(27)
第三章 隧道防排水系统及水害治理	(29)
3.1 隧道衬砌微裂隙渗流计算.....	(29)
3.2 隧道衬砌结构的防排水系统.....	(31)
3.3 隧道防排水设计及规范要求.....	(34)
3.3.1 隧道防排水对结构使用寿命的影响.....	(34)
3.3.2 隧道防排水分类及特点.....	(36)

3.3.3	隧道防排水技术规范及其要点	(38)
3.3.4	隧道防排水设计要求	(39)
3.4	衬砌渗透常见病害及处治	(46)
3.4.1	隧道衬砌水害诱因	(46)
3.4.2	隧道水害处治技术	(47)
3.4.3	隧道防渗新技术及其应用	(52)
3.5	本章小结	(53)
第四章	隧道防水材料及应用	(54)
4.1	概 述	(54)
4.2	隧道防水材料分类及应用	(54)
4.3	混凝土防渗新材料及其应用	(58)
4.3.1	Intercrete	(58)
4.3.2	透水混凝土	(60)
4.3.3	防水宝	(60)
4.3.4	XYPEX (赛柏斯)	(61)
4.4	本章小结	(63)
第五章	高水压作用下衬砌结构防水试验研究	(64)
5.1	止水带抗水压试验工况设置	(64)
5.1.1	加压系统设计	(64)
5.1.2	试验模型设计与制作	(65)
5.2	止水带抗水压试验分析	(70)
5.2.1	不同侧边距下止水带抗水压试验	(70)
5.2.2	溶腔段施工缝抗水压模拟试验	(75)
5.3	本章小结	(78)
第六章	钻爆法隧道防排水施工技术	(79)
6.1	概 述	(79)
6.2	防水系统设计	(81)
6.2.1	防水要求	(81)
6.2.2	衬砌结构自防水	(82)
6.2.3	防水布及防水板防水	(85)
6.2.4	其他防水辅助措施	(90)
6.3	结构缝防水处理	(90)
6.3.1	防水材料的选取	(90)
6.3.2	防水技术措施	(91)
6.4	排水系统设计	(94)
6.4.1	技术要求	(94)
6.4.2	中心排水管(沟)排水	(95)

6.4.3	边沟排水	(98)
6.5	注浆堵水技术	(99)
6.5.1	技术要求	(99)
6.5.2	小导管预注浆	(102)
6.5.3	超前帷幕注浆	(103)
6.6	本章小结	(104)
第七章	盾构隧道防排水施工技术	(105)
7.1	盾构施工的特点	(105)
7.2	地层分段注浆堵水技术	(106)
7.2.1	密封掘进模式下壁后回填注浆	(106)
7.2.2	敞开掘进模式下壁后回填注浆	(107)
7.2.3	分段隔水方案及效果分析	(108)
7.3	管片结构防水要求	(112)
7.4	管片接缝密封防水	(114)
7.5	涌水抽排技术方案研究	(118)
7.6	涌水抽排系统设计	(119)
7.7	本章小结	(130)
第八章	岩溶隧道高压区施工工艺分析	(131)
8.1	岩溶地质状况预测技术	(131)
8.2	高压岩溶开挖方案分析	(132)
8.2.1	工况介绍	(133)
8.2.2	施工方案设计	(133)
8.3	高压溶腔泄压开挖技术	(141)
8.4	本章小结	(147)
第九章	高水压岩溶地层释能泄压技术	(148)
9.1	释能泄压基本原理	(148)
9.2	释能泄压力学特性分析	(149)
9.3	释能泄压技术应用分析	(151)
9.3.1	高位独立释能泄压泄水	(151)
9.3.2	穿越溶腔群超前支护技术	(152)
9.3.3	局部限量定位爆破开挖及双层衬砌综合施工技术	(154)
9.4	本章小结	(158)
第十章	岩溶灾害数值预测模型研究与应用	(159)
10.1	DDA 方法应用简介	(159)
10.2	岩溶分类及灾害诱因	(160)
10.2.1	岩溶分类	(160)
10.2.2	岩溶灾害诱因	(163)

10.3 突水、突泥数值模型理论分析..... (164)

10.4 突水、突泥 DDA 建模及效果分析 (168)

10.5 本章小结..... (178)

参考文献..... (179)

第一章

绪论

隧道衬砌是赋存于地质体中的结构物，地下水、地应力和地热温度场等因素都会对其正常运营与功能产生影响。其中，地下水是隧道正常施工与运营永远面临的难题，它不仅单独影响隧道结构性能的正常发挥，还与地热温度场、地应力等产生耦合作用，共同影响隧道结构的受力特征及耐久性。在不同环境下，地下水含有不同矿物成分，对隧道结构有不同程度的腐蚀作用，严重影响隧道结构的防水效果及使用寿命。因此，深入了解隧道结构与地下水之间的相互作用，明确隧道结构防排水的重要性，对隧道建设及其结构功能的发挥具有重要作用。

1.1 衬砌结构的作用及结构形式

隧道洞室按设计尺寸开挖成型后，将对开挖面进行稳定处理，根据围岩的稳定情况，其处理方式也不尽相同，导致衬砌结构的作用也随之发生变化，但其核心是保持隧道围岩的稳定，确保隧道运营安全。

1.1.1 衬砌结构的构成及作用

隧道衬砌是指支持和维护隧道长期稳定的结构物。衬砌简单说来就是内衬，其结构形式有整体式模筑混凝土衬砌、装配式衬砌、锚喷式衬砌、复合式衬砌，其作用包括支持和维护隧道稳定、保持隧道运营所需的空间、防止围岩的风化等。因此，隧道衬砌必须有足够的强度，必要的耐久性，一定的抗冻、抗渗和抗侵蚀性。

隧道衬砌结构主要由拱圈、边墙、仰拱或底板几部分构成，图 1.1 所示的复合式衬砌结构，其附属设施还包括排水沟（中心排水沟或侧沟）、电缆沟及其他装饰结构物，图中数值单位为 cm。山区公路隧道衬砌一般分两次浇筑，分别是初次支护和二次衬砌。支护体系与隧道壁紧密接触，与松动岩体协调变形，支护结构与围岩相互作用产生形变压力，即围岩对衬砌的挤压力。初次支护骨架一般为钢拱架或格栅拱架，采用喷射的方法喷射混

凝土进行覆盖成型，初次支护一般分为喷射混凝土支护、锚喷式衬砌；而二次衬砌则是以钢筋骨架为核心，整体浇筑成型；初次支护和二次衬砌统称为复合式衬砌。装配式衬砌主要用在城市隧道等采用机械开挖的隧道结构中，其管片预制成型后在现场组装而成。

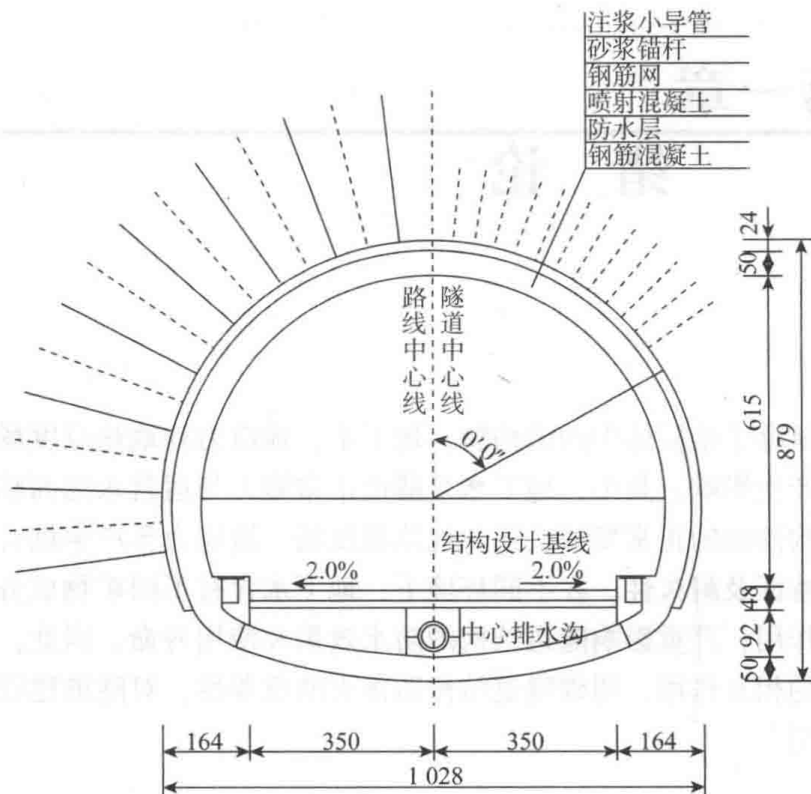


图 1.1 复合式衬砌结构

作用在支护体系上的荷载通常分为偶然荷载、可变荷载和永久荷载三类。可以将支护体系看作一种闭合环形或拱形的结构体，衬砌与松动区围岩贴合，产生协调变形。同时，衬砌为隧道壁岩体提供支护阻力，挤压松动区围岩，改善了失稳围岩的受力状态。由于设计时，为围岩预留了一定的变形空间，使得岩体位移在径向具有富裕的空间来释放聚集的变形能，因此衬砌自身所承受的压力将大大减少。支护体系与围岩的相互作用，目前有两种主流观点：一种是地层-结构模型，将衬砌视为承载拱或组合梁，与围岩一起组成承载体系，共同承担外荷载及自身重力；另一种是荷载-结构模型，支护体系承担地层荷载和结构自身重力，并反作用于松动区围岩，改善了隧道壁附近岩体的受力状态。衬砌同时能起到加固的效果，提高松动区围岩的强度指标，进而提高隧道松动区围岩的承载能力。

为了保证衬砌支护结构的支护效果，必须同时满足两个条件：一是衬砌自身具备足够的强度；二是衬砌与围岩之间必须具备足够的黏结强度。具体来说，随着衬砌厚度增加，刚度显著提高，约束隧道位移效果好，但衬砌厚度过大不利于围岩与衬砌结构协调变形，围岩内力所产生能量释放也会受阻，容易引起衬砌结构局部压碎或开裂；当衬砌厚度一定时，随着衬砌弹性模量的增大，其承载能力也随之增强；衬砌或支护混凝土与围岩黏结紧密，且填满了围岩临空面的空隙和裂隙，增强了围岩块体之间的咬合力，使围岩整体性变强，提高了围岩自稳能力，有助于隧道结构的整体稳定。

1.1.2 衬砌结构的分类

常用的隧道衬砌材料有钢筋混凝土、现浇素混凝土、喷射混凝土、混凝土预制块、片石混凝土、料石等。隧道衬砌的结构形式主要是根据隧道所处的工程地质条件，考虑其结构受力的合理性、施工方法和施工技术水平等因素来确定。隧道衬砌的构造、形状和尺寸因其用途，地形、地质、施工和结构性能等条件的差异而不同。

一般来说，隧道衬砌可按其结构、功能等划分为多种形式。按构件类型可分为半衬砌、无仰拱的衬砌及有仰拱的衬砌，其中半衬砌仅由拱圈组成；无仰拱的衬砌由拱圈和边墙组成，也称非封闭式衬砌；有仰拱的衬砌由拱圈、边墙及仰拱组成，也称封闭式衬砌。按使用功能，可分为饰面衬砌、构造衬砌、承载衬砌以及特殊承载衬砌。按位置，可分为洞口段衬砌及洞身衬砌。常用的隧道衬砌有以下几种。

1) 整体式衬砌

整体式衬砌是指在隧道开挖后，以较大厚度和刚度的整体模筑混凝土作为隧道主要结构的一种衬砌。整体式衬砌按照工程类比法，针对不同的围岩类别采用不同的衬砌厚度，其形式主要有直墙式衬砌和曲墙式衬砌两种。直墙式衬砌由上拱圈、两侧直边墙和下部铺底三部分组成，主要用于地质条件较好，以垂直围岩压力为主而水平围岩压力较小的情况；曲墙式衬砌由顶部拱圈，侧面曲边墙和底板组成，适合于地质条件稍差，有较大水平围岩压力的情况。除了在无地下水且基础不产生沉降的情况下可不设仰拱，只做平铺底外，一般均设仰拱，使衬砌形成一个环状、封闭的整体结构，从而提高衬砌的承载能力，以抵制隧道底部围岩压力和防止衬砌沉降，图 1.2 为整体式衬砌结构浇筑完成后的现场效果图。



图 1.2 整体式衬砌结构浇筑完成后的现场效果图

2) 装配式衬砌

装配式衬砌是指在工厂或现场预先制备成若干构件，运入隧道内，用机械将其拼装成环的衬砌。装配式衬砌的优点是：一经装配成环，不需要养护时间，即可承受围岩压力；

构件是预先在工厂成批生产的，可以保证质量；在洞内采用机械化拼装，缩短了工期，改善了劳动条件；拼装时不需要临时支撑，可节省大量的支撑材料和劳力。但装配式衬砌在实际应用中也存在着一些缺点，如需要坑道内有足够的拼装空间，制备构件尺寸要求一定的精度，接缝多，防水较困难等。基于以上原因，装配式衬砌多用在盾构法施工的城市隧道中，在我国的铁路和山区公路隧道中还未能推广应用。图 1.3 为装配式衬砌组装示意。

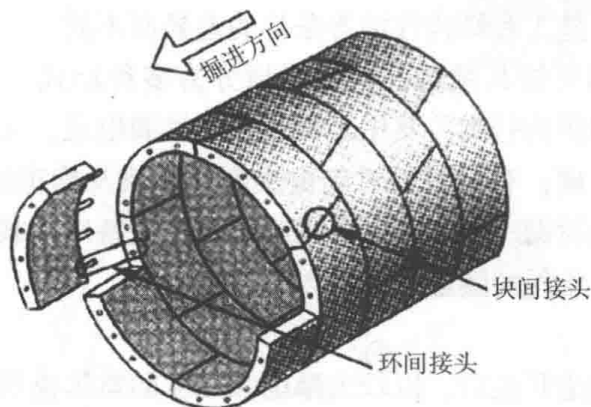


图 1.3 装配式衬砌组装示意

3) 锚喷式衬砌

锚喷式衬砌是指锚喷结构既作为隧道临时支护，又作为隧道永久支护结构的衬砌，具有隧道开挖后支护及时、施工方便和成本低廉等显著特点，特别是其采用了纤维喷射混凝土技术，显著改善了喷射混凝土的性能，广泛应用于围岩较好的军事工程和各类使用期限较短、重要性较低的隧道中。在现有公路和铁路隧道设计规范中，都有根据隧道围岩地质条件、施工条件和使用要求确定是否采用锚喷式衬砌的规定。《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)规定，锚喷式衬砌设计应满足下列要求：一方面，锚喷式衬砌内轮廓比整体式衬砌要适当加大，除考虑施工误差和位移量外，应再预留 10 cm 作为必要时补强用；另一方面，当具备地下水发育或大面积淋水、能造成衬砌腐蚀或特殊膨胀的围岩、最冷月平均气温低于 5 ℃ 的情况之一时，不能采用锚喷式衬砌。

4) 复合式衬砌

复合式衬砌是由两层或两层以上可以用同一种形式、方法和材料施作的衬砌组合而成的，根据围岩条件不同可分别采用不同的断面形式和支护衬砌参数，目前已成为世界各国以及地区高速铁路、山岭隧道衬砌结构的主流。在我国客运专线铁路隧道衬砌结构类型的选择中，针对围岩稳定性差、地下水发育地段推荐采用复合式衬砌。

复合式衬砌是先在开挖好的洞壁表面喷射一次早强混凝土，混凝土凝固后形成薄层柔性支护结构，既容许围岩有一定的变形，又限制围岩产生有害变形，其厚度多在 5 ~ 20 cm，待支护与围岩变形基本稳定后再施作内衬（即二次衬砌）。为了防止地下水流入或渗入隧道内，可在外衬和内衬之间施作防水层，其材料可采用软聚氯乙烯薄膜、聚异丁烯片、聚乙烯烯等防水材料，或者喷射防水涂料等。复合式衬砌可以满足初次支护施作及时、刚度小、易变形的要求，且与围岩密贴从而保护和加固围岩，充分发挥围岩的自承作用。二次衬砌施作后可以防止外层风化，衬砌内表面光滑、平整，经过装饰后能增加安全感，是目前公路、铁路隧道的主要结构形式。

5) 连拱衬砌

连拱衬砌是洞室衬砌结构相连的一种特殊双洞结构形式，两隧道之间的岩体用混凝土替代，中间的连接部分通常称为中墙。此结构主要用于隧道施工场地狭窄、双线隧道无法独立施工的场合；同时，连拱衬砌结构具有较强的抗偏压能力，适于偏压严重的地质地貌区域施工。图 1.4 为连拱隧道洞门断面结构图。



图 1.4 连拱隧道洞门断面结构图

1.2 地下水与衬砌结构的关系

隧道衬砌结构体系施工完成后，衬砌结构与围岩形成受力共同体，相互影响、相互作用。围岩的工程与水文地质特征决定了隧道衬砌结构的受力状态，如围岩的物理特性、力学状态及水文地质情况等都将影响隧道结构的应力-应变特性。其中，地下水的存在形式是造成隧道结构运营过程中出现常见灾害的主要因素之一。

1.2.1 地下水及含水层

地下水在岩体中的赋存形式与岩体的物理特性、岩体力学特性、流体的物理性质等有关。以不同形式存在于岩体中的地下水，在岩体中的渗流特性和规律也不同，对岩体的整体稳定也会产生不同程度的影响。下面对含水地层的一些概念和性质作简要叙述。

1. 定义

1) 含水层

含水层是具有下述两种性质的地层和岩层：(1) 含有水；(2) 在一般的野外条件下允许大量的水在其中运动。

2) 阻水层

与含水层的意思相反，阻水层是一种可以含水，甚至大量含水，但在一般的野外条件下不能大量导水的地层，黏土层就是一个例子。从实用的观点来看，阻水层可以认为是不透水的地质。

3) 弱含水层

弱含水层是一种导水速度十分缓慢的半透水层。如果在大的水平范围内，相邻含水层之间有弱含水层存在，则弱含水层可以大量导水，这种弱含水层通常称为越流层。

4) 非含水层

非含水层是既不含水又不导水的地层。

5) 地下水系

地下水系指地面以下的所有水。在本书中，地下水主要表示饱和带中的水。

6) 空隙空间

空隙空间指岩体中没有被固体颗粒占据的那一部分空间（或孔隙空间、孔隙、空隙、裂隙）。空隙空间含有水和空气，在地层内只有连通的空隙才能起导水通道的作用。空隙的大小可以从巨大的石灰岩洞穴变化到亚毛细孔洞，其中的水主要靠自身的吸着力存在。岩石的空隙一般分为两种：(1) 原生空隙，主要在沉积岩和火成岩中，是岩石形成时的地质作用产生的；(2) 次生空隙，主要是节理、裂隙和岩溶通道，它们是在岩石形成之后逐渐发展而成的。图 1.5 为岩石孔隙的几种类型。其中，由于砾石本身是多孔的，因此整个沉积物孔隙率较高；而胶结物的存在会使整个沉积物孔隙率降低。

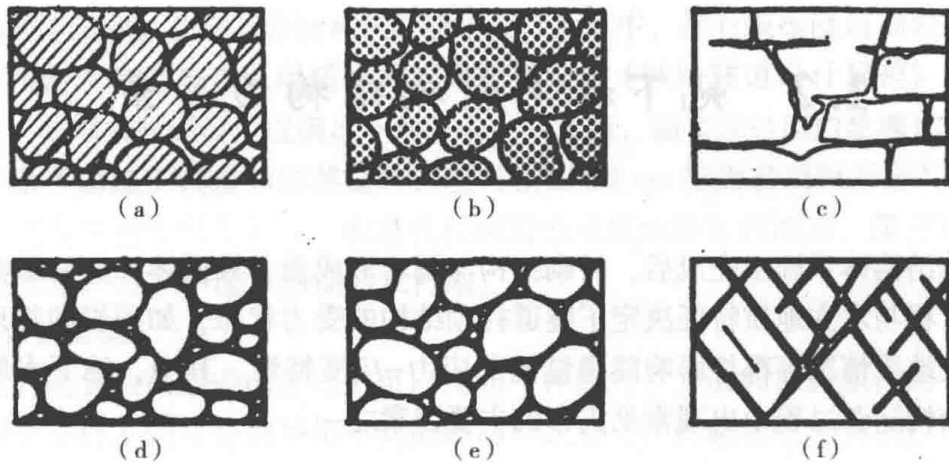


图 1.5 岩石孔隙的几种类型

- (a) 分选好、孔隙率高的沉积物；
- (b) 分选差、孔隙率低的沉积物；
- (c) 砾石组成的沉积物；
- (d) 分选好、有胶结物的沉积物；
- (e) 溶蚀作用形成的多孔岩石；
- (f) 断裂形成的多孔岩石

2. 地层中水分分布状况

地面以下的水在垂直剖面上的分布可以按照空隙空间中含水的相对比例划分成两个带：饱和带和充气带。饱和带中的全部空隙充满了水；充气带位于饱和带之上，其中同时包含着气体（主要是空气和水蒸气）和水。

图 1.6 为地面以下水的分布状况。大气降水和（或）灌溉水自地面渗入，在重力作用下运动和聚集，最后存在于某些不透水层之上、充满岩石且相互连通的空隙中，这样就在

不透水层之上形成了饱和带。饱和带的上界面为潜水面（见图 1.6），潜水面是一个表面上压力等于大气压力的面。如果井孔打入基本上为水平流动的含水层中，则井孔中的水面就是潜水面。实际上，饱和带要高出潜水面一定距离，此段距离的大小与土的种类有关，因为不同种类的土，其毛细作用不同。井、泉和某些河流靠来自饱和带的水补给。

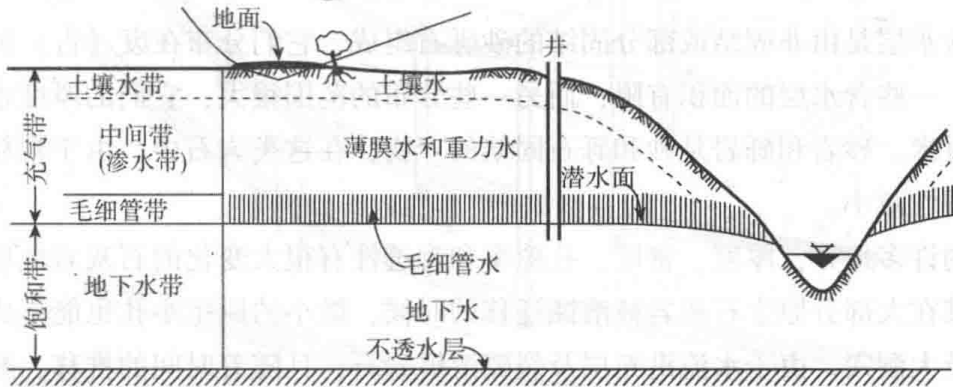


图 1.6 地面以下水的分布状况

充气带从潜水面延伸至地面，它通常由 3 个亚带，即土壤水带、中间带（渗水带）和毛细管带组成。土壤水带邻近地表，向下延伸通过植物根系带。土壤水带水分分布不仅受降水、灌溉、空气温度及湿度、季节性变化和日照变化等地表条件的影响，而且受埋藏浅的潜水位的影响。在渗水期（如降水、地面洪泛和灌溉时期）该带的水向下运动，而蒸发与植物的蒸腾作用则使该带的水向上运动。在过量渗水的短时期内，该带土壤可以暂时完全为重力水所饱和。

在土壤表面没有供水的情况下，经长期排水之后残留于土中的水分含量称为野外容水率。在野外容水率以下的土壤中包含着毛细管水，它靠表面张力保持在土壤颗粒周围形成连续水膜，在毛细作用下运动，对植物有用。当水分含量小于吸湿度的时候，土壤中所含的水称为吸着水。所谓吸湿度就是在 20℃ 时使原来的干土与相对湿度为 50% 的大气接触所能吸收的最大水分含量。由于吸着水形成极薄的薄膜牢固地黏附在土颗粒表面，因而对植物无用，但对土颗粒之间的相互作用有一定影响。

中间带自土壤水带的下缘延伸至毛细管带的上缘。如果潜水面太高，致使毛细管带扩展到土壤水带，甚至达到地表时，中间带便不复存在。中间带中停止着的水（即薄膜水）靠附着力及毛细力保持在空隙中。重力水可暂时通过该带向下运动。

毛细管带自潜面向上扩展，其厚度取决于土的性质及空隙大小的均匀性。毛细上升高度从粗粒物质中的零变化到细粒物质（如黏土）中的 2~3 m 或更高。通常，毛细管带内的水分含量随着潜水面高度的增加而逐渐减小。稍高出潜水面的空隙实际上是饱和的；再向上，只有较小的、连通的空隙含水；在更高的地方，饱和的只是那些连通的最小的空隙。因此，毛细管带的上界具有不规则形状。实际上取某个平均的光滑曲面作为毛细管带的上界面，而在这个曲面以下可以认为土是饱和的（如土体饱和度大于 75%）。

在毛细管带中，压力小于大气压力，水可以发生水平流动及垂直流动。当潜水面以下饱和带的厚度比毛细管带大得多时，通常忽略毛细管带的流动。但在许多排水问题中，研

究非饱和带的流动具有重要意义。

很明显,上述水分分布剖面是从空隙大小的多变性、透水地层的存在及暂时性渗入水的运动等许多复杂情况中概括出来的。

3. 含水层的分类

大多数含水层是由非固结或部分固结的砂砾石组成,它们分布在废(古)河道、平原和山谷之中。一些含水层的面积有限,而另一些分布的范围很大,它们的厚度也可以从几米变化到几百米。砂岩和砾岩是砂和砾石固结的产物,在这类岩石中,由于颗粒被胶结在一起,故渗透性减小。

在世界的许多地方,厚度、密度、孔隙率和渗透性有很大变化的石灰岩地层是重要的含水层,尤其在大部分原生石灰岩被溶蚀迁移的时候,微小的原生小孔也能形成地下河道般的大裂缝及大洞穴。由于水流沿断层及裂隙溶解岩石,且随着时间的推移,断层和裂隙不断扩大,因此增大了岩石的渗透性。最后,石灰岩地区发展成岩溶(喀斯特)地区。就大范围而言,喀斯特含水层的宏观性状大致与砂砾石含水层相似;但从小范围来看,相似性能否成立还是一个问题。

火山岩可以构成含水层,如玄武岩是较好的含水层。玄武岩含水层的空隙即使比松散砂砾石含水层小,但由于大多数孔穴具有连通的特性,其透水性可以比砂砾石含水层大很多倍。以岩床、岩脉和岩颈等形式出现的许多浅层侵入岩,其透水性都很小且绝大多数不透水,因此可以作为地下水流的阻隔边界。

结晶岩与变质岩属于相对不透水层,它们构成弱含水层。当这类岩石出现在地表附近时,由于风化与破碎,渗透性会逐渐变大。

黏土及黏土与粗粒物质的混合物,虽然孔隙率一般很高,但由于空隙小,故为相对不透水层。

含水层可以看成是受降水和河流自然补给或通过井孔及其他人工方式补给的地下水水库,其中的水可以通过泉和河流自然的排泄,也可以用人工方法从井中排出。

含水层的厚度及其他垂向尺寸通常比所研究的水平长度小得多。因此在本书中表示含水层中流动的所有图形都不是按比例绘制的,读者不应当由此产生误解。

含水层的类型如图 1.7 所示,根据是否存在潜水面,将含水层划分为无压含水层和承压含水层两大类。

承压含水层又叫压力含水层,这种含水层的上部和下部均被不透水层封闭。当井孔揭露承压含水层时,水位会上升到封闭层底面以上,有时甚至达到地表。打入含水层的许多观测孔中的水位确定了一个假想的面,这个假想的面称为测压面或等压面。如果含水层中的水基本上为水平流动,那么等势面是垂直的,此时观测孔打入含水层中的深度并不重要。否则,观测孔深度的标高不同,得到的测压水位也不一样。除了在非完整井或泉之类的出水口附近以外,含水层中的水基本上是水平流动的。

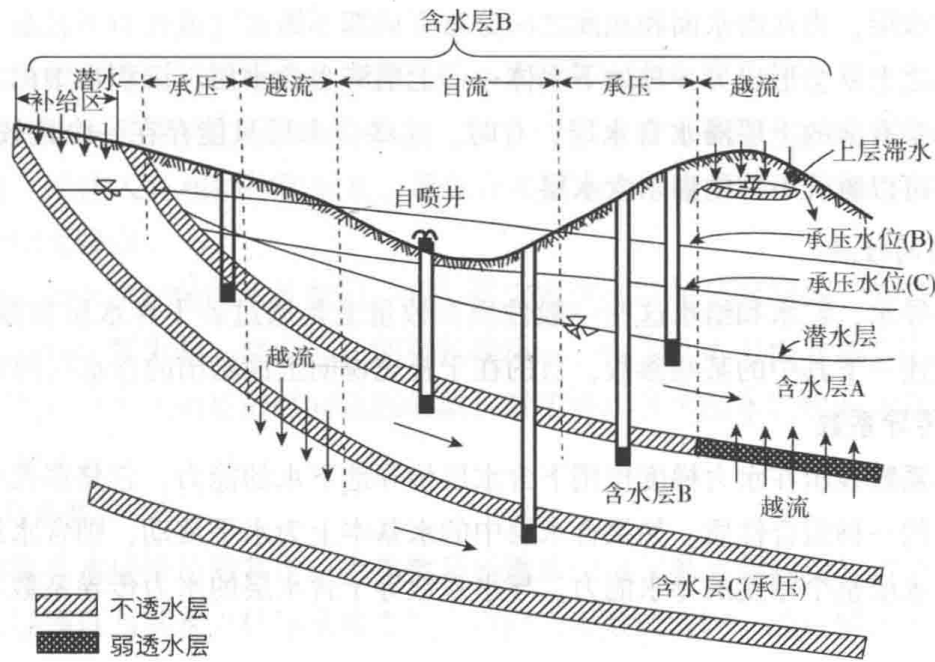


图 1.7 含水层的类型

自流含水层是一种测压面高度（相对于封闭层底面的高度），是高出地表的承压含水层或承压含水层的一部分。因为这种含水层中的水在井孔不抽水的情况下也会自由出流，所以称为自流井或自喷井。有时候人们也用自流含水层这一术语表示承压含水层。

地表水和大气降水通过承压含水层在地面出露地区，或者通过不透水层在地下尖灭而使承压含水层变为无压含水层的地区流入承压含水层。这样的地区通常称为补给区。

无压含水层又叫潜水含水层，是一种具有潜水的含水层，潜水含水层的上部边界就是潜水面，潜水面以上为毛细管带，在地下水研究中通常忽略不计。除了在潜水面和地表之间局部存在水平不透水层的地区以外，潜水含水层的补给一般来自地表。

不论是承压含水层还是无压含水层均能通过其上或（和）其下的封闭地层获得水或漏失水，这种含水层叫越流含水层。虽然这类封闭地层具有较高的渗透阻力，但是当它们在大范围内与所研究的含水层接触时，大量的水可以通过它们流入或流出含水层。在各种情况下，越流量和越流方向均受弱透水地层两侧测压水头差的控制。显然，在每一种具体条件下，决定含水层上覆的某个地层是不透水层还是弱透水层或仅仅是渗透性与所考虑的含水层不同的另一种透水地层并不是一件容易的事情。通常，考虑成弱透水层的地层（及越流层）都比主含水层的厚度小。

位于弱透水层之上的潜水含水层（或其一部分）是有越流的潜水含水层，至少有一个弱透水封闭层的承压含水层（或其一部分）称为有越流的承压含水层。

图 1.7 中还表示了几种含水层和观测孔。上部为潜水含水层，其下部有两个承压含水层。在补给区，含水层 B 变为潜水含水层；含水层 A、B 和 C 的一部分是有越流的，越流方向及越流量的大小取决于每个含水层的测压水面高度。由于潜水位和承压水头高度的变化，各含水层承压和无压部分之间的界限可以随时间而变化。潜水含水层的一种特殊情形

是上层滞水含水层，当在潜水面和地面之间分布有局部不透水（或相对不透水）层时，在这种不透水层之上就会形成另一种地下水体——上层滞水含水层。沉积物中的黏土及亚黏土透镜体上经常有薄的上层滞水含水层。有时，这些含水层只能存在一个比较短的时间，因为上层滞水可以流入下部的潜水含水层。

4. 含水层的性质

含水层的导水、贮水和给水这些一般性质在数量上是通过若干含水层参数来定义的。在此扼要地描述一下其中的某些参数，目的在于补充说明上面给出的含水层的定义。

1) 水力传导系数

水力传导系数表示在水力梯度作用下含水层传导地下水的的能力，它是多孔介质和其中流动着的流体的一种组合性质。如果含水层中的水基本上为水平流动，则含水层的导水系数表示通过含水层整个厚度的导水能力。导水系数等于含水层的水力传导系数与含水层厚度的乘积。

2) 贮水系数

含水层的贮水系数表示贮在含水层中的水量变化和相应的测压面（或潜水含水层的潜水面）高度变化之间的关系。图 1.8 为定义贮水系数的示意。

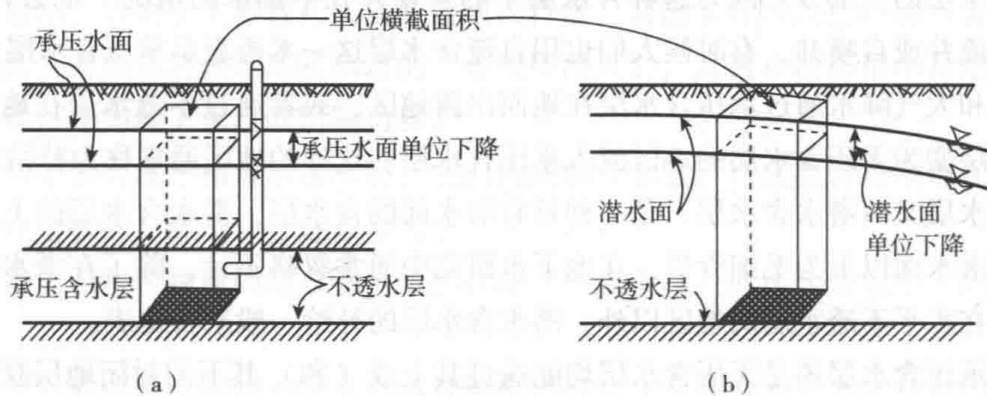


图 1.8 定义贮水系数的示意

(a) 承压含水层；(b) 潜水含水层

承压含水层的贮水系数定义为水头降低（或升高）一个单位时，从水平横截面积为一个单位的含水层垂直柱体中释出（或存入）的水的体积。承压含水层的贮水性质是由水的压缩性和作为整体的含水层的弹性引起的，固体颗粒和微粒等的弹性一般可忽略不计。

在潜水含水层中，除了降低的是潜水面这一点以外，上面给出的贮水系数在定义本质上没有变化。但是，潜水含水层造成含水层柱体内贮存水量变化的机理却不同。在潜水含水层的情况下，水实际上是由于潜水位降低而从空隙空间中排出并被空气所代替。然而，重力排水（由抽水所引起的地下潜水位的降低）并不能排出包含在空隙空间中全部的水，一定量的水在分子引力与表面张力的支持下能够抗住重力从而保持在固体颗粒之间的空隙中。因此，潜水含水层的贮水系数比孔隙率小，其差值称为持水率（土样中反抗重力作用而保持下来的水分与土样总体积之比）。为了反映这种现象，通常把潜水含水层的贮水系

数称为给水度。

由含水层和水的压缩性所引起的弹性贮水系数要比给水度小得多。具体地说,大多数承压含水层的贮水系数变化范围为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$, 而大多数冲积层的给水度为 $10\% \sim 25\%$ 。这说明排出(或注入)相同体积的水,承压含水层中水头高度的变化要比潜水含水层中水头高度的变化大得多。

在定义承压含水层的贮水系数时,我们假定不存在时间延迟问题,并且认为水是随着水头的下降而瞬间释出的。然而,在细颗粒物质中,由于低水力传导系数限制着水自贮存中释放,因而可以发生明显的时间延迟现象。对于潜水含水层来说也是如此,因为疏干过程也需要一定的时间。

3) 阻力系数

表示越流含水层特征的其中一个参数是弱透水层(又称半封闭层)的阻力系数,其定义为弱透水层厚度与其水力传导系数之比。当阻力系数较大时,通过弱透水层的越流量则较小。

4) 越流因数

另一个表示越流含水层的参数称为越流因数,它等于含水层的导水系数与弱透水层的阻力系数的乘积的平方根。

在确定某一地层是否为含水层以及为何种类型的含水层时,上述各种参数均可以作为指标。

1.2.2 地下水对隧道的影响

隧道衬砌是埋置于地层结构中维护隧道稳定、保证隧道正常工作的结构体,不同的地质条件对隧道衬砌会产生不同程度的影响。其中,地下水的作用是导致隧道结构灾害的常见因素,因为地下水与隧道衬砌结构的相互作用复杂多变,故其治理难度大,治理效果不理想。

1. 隧道衬砌水害现状

随着我国交通运输业的蓬勃发展,运营隧道的数量和里程快速增加。根据原铁道部与交通运输部统计资料,截至2019年底,我国铁路营业里程达139 000 km。其中,投入运营的铁路隧道16 084座,总长18 041 km;2019年新增开通运营线路铁路隧道967座,总长1 710 km,其中长度10 km以上的特长隧道27座,总长369 km;在建铁路隧道2 950座,总长6 419 km;规划铁路隧道6 395座,总长16 326 km。根据《2020—2026年中国公路隧道行业产业发展动态及投资方向分析报告》统计,截至2019年末,全国公路隧道17 738座,总长17 240 km。其中,特长隧道超过815座,总长超过3 622.7 km,长隧道超过3 520座,总长超过6 045.5 km;全国公路隧道总量年增长率的波动非常剧烈,从2014年到2019年,增长率经历了“大升-大降-大升”的过程。在1997年年底前建成的5 000余座铁路运营隧道中,有水害的隧道占隧道总数的70%左右。其中,因渗漏水严重而影响运营的达1 520座,占隧道总数的30%左右。隧道涌水是一个潜在的危害,不但影响隧道稳