

第一章 概 述

隧道是铁路、道路、水渠、各类管道等遇到岩、土、水体障碍时开凿的穿过山体或水底的内部通道，是“生命线”工程。铁路隧道、公路隧道和地铁隧道属交通隧道，是主要的隧道类型。

铁路隧道、公路隧道和地铁隧道都是在岩土天然介质中开挖形成，处于相同或类似的地层环境中。铁路隧道和公路隧道的施工方法、支护结构相同，只是断面型式有差别；地铁隧道也和铁路隧道、公路隧道有许多共同之处。

铁路隧道、公路隧道和地铁隧道的主体是人工地下结构，处于天然介质的环境中，在运营中会出现渗漏水、水害、衬砌裂损、隧道冻害、衬砌腐蚀、震害和洞内空气污染等病害，还有火灾威胁。这些病害和危害对隧道的安全、舒适、正常运营有重要影响和威胁。因此，在隧道规划和设计阶段要预防可能的病害、危害，进行合理设计；在隧道施工阶段要采用合理的施工工艺、方法、措施和材料，以保证施工质量；在隧道运营阶段要及时检查、发现病害，分析病害成因，采用合理的整治设计和施工方法。如此，才能保证铁路隧道、公路隧道和地铁隧道这些生命线工程的安全、畅通运营。

截止 2003 年 5 月，我国大陆现有运营铁路隧道约 5700 多座，累计总长约 2800km，公路隧道近 2000 座，总长度约 835km；地下铁道运营里程约 200km。而且，铁路隧道、公路隧道和地下铁道仍保持快速建设势头，我国已成为世界上隧道工程最多、最复杂、发展最快的国家。

我国地域辽阔，各地自然条件差异大，隧道所穿越山体的工程地质及水文地质条件复杂多变，既有隧道又受修建时期的设计与施工的技术条件限制，20 世纪五六十年代的隧道多采用抗渗性较差的一般模筑混凝土衬砌或砌石衬砌，因此，往往出现下列现象：隧道防水和排水设备不完善；对局部软弱围岩地质、有膨胀特性围岩地质和对衬砌有侵蚀性的环境水等调查研究不足，未能采用加强的衬砌结构或防治措施不力；一些地段隧道衬砌施工质量有缺陷等。这些现象造成了许多既有隧道产生隧道漏水、衬砌腐蚀、衬砌裂损、隧道冻害、洞内空气污染等病害。

要保证现有和即将交付使用的铁路隧道、公路隧道与地下铁道的安全、畅通运营，必须对隧道可能出现的病害、灾害进行预防和整治。

本书以铁路隧道、公路隧道和地铁隧道为对象，论述渗漏水、衬砌裂损、隧道冻害、衬砌腐蚀、震害、洞内空气污染和火灾 7 种主要病害、危害及其防治理论、技术和方法。

一、隧道病害概况

(一) 铁路隧道

为了掌握运营隧道的技术状态，铁路工务部门每年秋季对隧道的技术状态进行一次全面检查，根据检查结果把病害严重需进行大修的隧道定为“失格”隧道，铁道部颁发的《铁路

《桥隧建筑物大修维修规则》中隧道状态失格标准见表 1-1。

表 1-1 隧道技术状态失格标准表

病害项目	单位	失格标准	附注
严重漏水及严寒地区渗水	处/m	拱部滴水、边墙滴水、隧底冒水、有冻害地区隧道渗水	包括季节性漏水、渗水，滴水不成线者不计
仰拱或铺底变形损坏	处/m	裂缝、错牙、变形、下沉	经整治已稳定者不计
衬砌严重腐蚀裂损	处/m	严重腐蚀、裂缝、错牙、变形	腐蚀深度 > 10mm, $f_{R1} > 0.3m$ 为严重腐蚀
坍方落石	处/m	洞门仰坡落石，危及行车安全	
整体道床损坏	m	道床下沉、上凸、变形、损坏、翻浆	经整治已稳定，轨距、水平无变化者不计
限界不足	座	隧道限界不能满足国标要求	
通风不足	座	有害气体浓度超过规定的容许浓度值	
照明不良	座	未按规定安装照明或照明设施损坏不能正常使用	

根据 1997 年隧道技术状态检查统计，我国运营铁路有隧道 5000 余座，总延长 2500km 左右，这些隧道大部分存在不同程度的病害，有的还相当严重，失格隧道 3270 座，占运营隧道总数的 65%。其中：严重漏水的 1502 座，占失格隧道的 46%；衬砌严重腐蚀裂损的 710 座，占 22%；仰拱或铺底变形损坏的 318 座，占 9.8%；坍方落石的 404 座，占 12.4%。陇海、成昆、襄渝、阳安、宝成、贵昆、焦柳、京原、襄黔等干线隧道的主要失格项目如表 1-2 所示。

表 1-2 铁路干线的隧道失格率

线别	隧道总座数	严重漏水(座)	衬砌裂损(座)	仰拱、铺底损坏(座)	坍方落石(座)	失格座数 / 失格率(%)
陇海	232	80	134		33	207 / 89.2
成昆	276	170	58	28	36	235 / 85.1
襄渝	400	224	88	117	86	333 / 83.8
阳安	148	92	48	3	18	122 / 82.4
宝成	344	66	17	4	37	267 / 77.6
贵昆	180	63	32	34	31	134 / 74.4
焦柳	436	95	27	4	8	195 / 44.7
京原	128	19	4	1	6	83 / 64.8
襄黔	319	33	3	43	5	117 / 36.7

注：1. 有的隧道多种病害失格项目并存，但总失格座数只计其中一项；

2. “失格座数 / 失格率”一项按“规则”规定全项目统计。

我国铁路运营隧道病害之所以如此严重，设计标准偏低、设计方案不完善和施工工艺水平不高是主要因素。以设计为例，隧道勘测中地质钻孔较少，工程及水文地质资料不足，对隧道通过的断层带、破碎带的位置判断不准，设计中大多套用定型图，缺乏针对性的加强设计。因此尽管隧道富水等特殊地层只是部分地段，但处理不当会对整座隧道带来危害。寒冷地区的隧道，缺少完善的保温设施，导致冻害产生。对辅助坑道亦缺乏有效的利用和管理，如成昆线沙木拉达隧道、贵昆线梅花山隧道，施工时都有水平导洞，均未考虑用来作为运营排水；相反，隧道交付运营后水平导洞因未衬砌而坍塌积水倒灌正洞，导致隧道水害严重，长期间速运行。

隧道水害及大量排水引发地质灾害的事件时有发生，以著名的大瑶山隧道为例，由于长期大量排水引发严重的地质灾害，隧道四周班古坳地区 1999 年发生大面积地面下陷，造成 4.5hm² 农田下陷，139 间房屋损坏，16 户居民拆迁。铁路部门为此补偿给当地群众 1371.77 万元。据有关部门查明，其地陷原因为：大瑶山隧道穿越地段有变质的碎屑岩与石灰岩，地质构造复杂、岩层松散。隧道在施工中至 1988 年通车后，9 号断层及周围裂隙大量涌水，水涌砂出。因 9 号断层沟通岩溶地层，岩溶水大量排出，使这一带地下水遭到破坏。由于地下水位下降，原来地表土体失去浮力支撑，加上列车振动及加压，促使地下水涌出。地面土体在重力作用下，发生了常见的地质灾害——地陷，给人民生命财产带来巨大损失。

（二）公路隧道

公路隧道普遍存在渗漏水现象，20 世纪 60 年代以前修建的隧道大多未作防水处理，渗漏水问题突出。近年来一些新建的公路隧道，也存在较严重的渗漏水。公路隧道渗漏水已被列为公路工程十大通病之一。

公路隧道内以内燃机动车为主，废气、有害气体排放量大，通风不良引起的洞内空气污染问题普遍存在。另外，由于照明设计或运营管理不善，隧道内部亮度及照度达不到规范要求，导致交通事故。这些问题极有可能引发灾难性的火灾事故。

（三）地铁隧道

一般来讲，采用盾构法施工的单洞圆形地铁隧道，每环衬砌由 5~7 块管片组成，每一环的接缝长度约为 20~30m 在饱和软土中的隧道受盾构施工工艺、地铁运营循环载荷、土质分布不均等影响，在水头压力作用下，渗漏水是目前地铁隧道的通病，随着服务期限的增加，其他病害也会出现。除此之外，地铁隧道人流密集，通风不良引起人的感觉不适；火灾引发重大伤亡事故的威胁始终存在。

二、隧道病害防治

隧道病害给隧道的正常运营和安全都带来影响，有时影响十分严重；而且，病害整治和保持运营之间矛盾突出，病害整治干扰正常运营，造成运营损失，而病害整治在空间、时间和施工条件都局限的条件下进行，困难重重。因此，首先要预防为主，必须在设计阶段就要采取预防措施，防止病害产生；另一方面对出现的病害须查清病害原因，采取合理的措施进行整治，提高隧道病害整治的工程质量和经济效益。同时，还应反馈信息，改进和优化新建隧道的设计方法与施工工艺。

（一）隧道病害防治的原则

随着对隧道病害产生后果、病害机理认识的深化以及对环保和运营舒适度要求的提高，

人们对隧道病害防治原则的认识不断深化，趋于科学合理。以隧道防水为例，以前为降低工程成本片面强调“以排为主”。新的《地下工程防水技术规范》提出“地下工程防水的设计和施工应遵循‘防、排、截、堵相结合，刚柔相济，因地制宜，综合治理’的原则”，还提出地下工程防水的设计和施工必须符合环境保护的要求，并采取相应措施，传统采用的排水型隧道设计日益受到质疑。再如，以前对隧道防火认识尚嫌不足，连接意大利、法国，穿越阿尔卑斯山的勃郎峰隧道火灾，韩国大邱地铁大火使人警醒，深感隧道防火的重要性和迫切性。

（二）隧道病害防治技术

隧道病害防治技术进步显著，特别表现在病害防治设计和施工趋于规范化，新材料和新技术不断出现，相对来讲病害防治理论尚待进一步深化。

1. 隧道病害防治理论

由于隧道病害类型较多，成因往往十分复杂，理论研究有一定困难。但是，理论和机理研究是隧道病害防治的基础。以隧道震害为例，不清楚地震作用下隧道的变形模式和规律，设计则缺乏可靠基础。因此，加强对各种类型隧道病害的产生机理、影响因素及其影响规律的研究十分重要。

2. 隧道病害防治设计与施工

为使隧道病害防治的设计和施工符合确保质量、技术先进、经济合理、安全适用的要求，国家和铁路、公路、市政各行业部门都制订了相应的技术规范，规范隧道病害防治的设计与施工。

以隧道防排水为例，国家标准《地下工程防水技术规范》早在1987年就发布实施了，1998和2001年分别进行了修订，现行国家标准为GB50108—2001。铁道部2000年发布了行业标准《铁路隧道防排水技术规范》(TB10119—2000)。

3. 隧道病害防治新材料与新技术

随着材料科学的长足进步，许多新材料、新技术引入隧道病害防治，病害防治设计和施工有了更多的选择。以隧道防水为例，许多新型的性能优异的防水堵漏材料和柔性防水层近年来引入隧道防水。

三、隧道病害与防治的发展

铁路隧道、公路隧道和地铁隧道这些交通隧道投入运营后，一旦出现病害，整治成本高、难度大，施工与运营互相干扰。因此，隧道病害重在预防，提高工程地质、水文地质勘测水平和质量，根据隧道实际条件采用先进可靠的预防病害的设计，这是做好隧道病害防治的基础和关键。随着人的认识水平的提高，病害防治观念和原则会进一步深化、完善，通过修订的技术规范、规则，最终反映在隧道病害预防的设计上。所以，加强隧道病害防治理论研究非常重要。

隧道病害防治受技术和经济水平控制，并不是成本越高、越保险越好，而要同隧道结构特点、功能和设防等级相适应，综合考虑技术、经济及环境因素，确保隧道技术质量、经济合理，并具有可持续性。

隧道病害防治是一项系统工程，要求业主、设计、施工、材料供应、运营等单位紧密配合，既要求设计在业主的支持下，采用先进可靠的预防技术和优化设计，又要求施工在现场监理的严格监督和密切配合下，严格施工工艺，保证设计意图的实现。

隧道病害和灾害的检测、预警对防治十分重要，探地雷达应用于隧道病害检测已取得良好效果，类似的无损检测技术、自动化预警系统、信息技术在未来隧道病害和灾害防治中能够发挥更重要的作用，促使运营隧道的管理实现现代化和信息化。

我国已成为拥有隧道数量和长度最多的国家，同时也是隧道病害最严重的国家之一，隧道病害防治的工作任重道远。

第二章 隧道水害与隧道防水

隧道和地下工程处于岩土层中，修建后成为所穿过山体附近地下水集聚的通道。当隧道穿过或靠近含水地层，时刻受地下水的渗透作用，如衬砌的防水及排水设施不完善，地下水就会侵入隧道，发生隧道渗漏水病害。据统计，截止 1998 年底我国 5 000 余座运营铁路隧道有水害的隧道约占 70%，水害严重导致状态失格的有 1362 座，占运营隧道总数的 30% 以上。特别是长大越岭隧道，一般水量较大，危害也甚。如京广线大瑶山隧道、南岭隧道，襄渝线大巴山隧道，贵昆线梅花山隧道，浑白线枫叶岭隧道，京原线释马岭隧道等，在施工期间及交付运营后，都曾发生过严重水害。

隧道水害对隧道稳定、洞内设施、行车安全、地面建筑和隧道周围水环境产生诸多不良影响甚至威胁，影响内部结构及附属设施，降低使用寿命，严重时将危害到隧道及地下工程的运营安全。因此，研究隧道水害成因，进行合理的防水技术设计，采用正确的方法、工艺进行整治，成为隧道设计、施工和养护的重要内容。

本章主要讨论隧道水害成因，防水设计，衬砌自防水、附加防水层和注浆等防水技术，隧道排水，盾构、顶管和沉管等特殊隧道施工法的结构防水，以及隧道渗漏的整治。

第一节 隧道水害类型、成因与水源分析

隧道水害是指在隧道修建和运营过程遇到的水的干扰和危害，是最常见的隧道病害。

一、隧道水害的种类及其危害

隧道水害主要指运营隧道水害，即围岩的地下水和地表水直接或间接地以渗漏或涌出的形式进入隧道内造成的危害。

(一) 隧道渗漏水 and 涌水

1. 概念与类型

隧道渗漏，按其发生的部位和流量可分为：拱部有渗水、滴水、漏水成线和成股射流四种，边墙有渗水、淌水两种，少数隧道有隧道涌水病害。它受漏水、涌水规模以及隧道结构、牵引类型、地质条件等的影响。

隧道渗漏按水源补给情况，又分为地下水补给和地表水补给两种。地下水补给有稳定的地下水源补给，其流量四季变化不大；地表水补给，其流量随地表水季节性变化而变化。同一渗漏水处所也可能有两种补给水源。

2. 隧道渗漏水的影响与危害

隧道渗漏水对隧道稳定、洞内设施、行车安全、地面建筑和隧道周围水环境产生诸多不良影响甚至威胁。

(1) 渗漏水促使混凝土衬砌风化、剥蚀，造成衬砌结构破坏；渗漏水还会软化围岩，引起

围岩变形；有些隧道渗水中含有侵蚀性介质，造成一般的衬砌混凝土和砌筑砂浆腐蚀损坏，降低衬砌的承载能力；在寒冷和严寒地区，隧道漏水会造成边墙结冰、拱部挂冰，侵入隧道建筑限界，还会造成衬砌冻胀裂损。

(2) 渗漏水加快内部设备（通讯、照明、钢轨等）锈蚀，影响设备的正常使用，缩短线路设备的使用寿命，增加维修费用。

(3) 水害引发路基下沉、基底裂损、翻浆冒泥等病害，导致铁路线路轨距水平变形超限，冻胀引发洞内线路起伏不平，以及洞内漏水潮湿降低轮轨粘着力，均会影响行车安全；水害使电绝缘失效、短路、跳闸，影响安全运营，引发漏电伤人事故；少数隧道，暴雨后隧道铺底破坏涌水，造成淹没轨道，冲空道床，影响行车安全。

(4) 严重渗漏水引发地面和地面建筑物的不均匀沉降和破坏。

(5) 隧道渗漏造成地表水和含水层水大量流失，破坏周围水环境，造成环境灾害。

(二) 衬砌周围积水

指运营隧道中地表水或地下水向隧道周围渗流汇集，如不能迅速排走，会引起的病害有：

1. 水压较大时导致衬砌破裂。
2. 围岩浸水软化，承载力降低，对衬砌压力加大，导致衬砌破裂。
3. 膨胀性围岩体积膨胀，导致衬砌破裂。
4. 寒冷地区引发冻胀病害。

(三) 潜流冲刷

指由于地下水渗流和流动而产生的冲刷和溶蚀作用，其危害有：

1. 衬砌基础下沉，边墙开裂或仰拱、整体道床下沉开裂。
2. 围岩滑移错动导致衬砌变形开裂。
3. 超挖围岩回填不实或未全部回填者，引起围岩坍塌，导致衬砌破坏。

以上为运营隧道水害。隧道水害的另一类是施工中的隧道水害，主要指隧道施工过程中围岩的地下水或部分地表水，以渗漏或涌出方式进入隧道内造成的危害。施工隧道水害，轻则造成洞内空气潮湿影响施工人员身体健康 机械设备锈蚀 绝缘设备失效 电路短路 漏电伤人 重则威胁人员安全 冲毁洞内机械设备 造成塌方 淹没工作面 中断施工 造成重大经济损失 危害环境，如大瑶山隧道因突水造成班古坳竖井淹没，丧失作用。本书主要讨论运营隧道水害。

二、水的来源与分析

水的可能来源见表 2-1。

表 2-1

水的来源

自然的	人为的
含水层的储蓄水	隧道施工用水
含水层局部聚集水	其他隧道
地层中流水	探孔或钻孔
断层、裂隙等构造水	煤矿、水库、渠道、管道
溶洞	废弃工程、古代工程
河流、湖泊、海	

细致分析水的可能来源非常重要。隧道水文地质报告应详细给出水压、渗透性、水质、水化学分析。在此基础上，可以采用最经济的防水解决方法——回避，也可以在设计中将隧道、竖井布置在天然不透水地层或非含水层，或者能经济地采取处理措施的地层。例如，国外一座隧道位于地压很大的地层，但将隧道设计在粘土的地层中，不受外部水的影响，内向与外向均不漏水。

三、水害的成因

成因、机理是我们解决工程问题的基础。隧道水害的成因是，修建隧道，破坏了山体原始的水系统平衡，隧道成为所穿过山体附近地下水集聚的通道。当隧道围岩与含水地层连通，而衬砌的防水及排水设施、方法不完善时，就必然要发生隧道水害。

也可以将隧道水害归结为客观和主观两方面的原因。

（一）隧道穿过含水的地层

1. 砂类土和漂卵石类土含水地层。
2. 节理、裂隙发育，含裂隙水的岩层。
3. 石灰岩、白云岩等可溶性地层，当有充水的溶槽、溶洞或暗河等与隧道相连通时。
4. 浅埋隧道地段，地表水可沿覆盖层的裂隙、孔洞渗透到隧道内。

（二）隧道衬砌防水及排水设施不完善

1. 原建隧道衬砌防水、排水设施不全。
2. 混凝土衬砌施工质量差 蜂窝、孔隙、裂缝多 自身防水能力差。
3. 防水层（内贴式、外贴式或中间夹层）施工质量不良或材质耐久性差，经使用数年后失效。
4. 混凝土的工作缝、伸缩缝、沉降缝等未做好防水处理。
5. 衬砌变形后，产生的裂缝渗透水。
6. 既有排水设施 如衬砌背后的暗沟、盲沟 无衬砌的辅助坑道、排水孔、暗槽等 年久失修阻塞。

隧道建设是一个过程，分为勘测与设计、施工、验收等阶段，在每个阶段或材料供应等关键环节出现问题，都可能引发隧道水害。例如，施工中经常出现的附加防水层接缝处理不好导致漏水，防水材料品质不过关导致防水失效，防水材料与基面粘结不良或不适应，等等。

第二节 隧道防水设计

隧道防水要“防患于未然”，首先从设计做起，要在水文地质调查的基础上，从工程规划结构设计、材料选择、施工工艺等方面进行合理设计。防水设计应考虑地表水、地下水、毛细管水等的作用，以及由于人为因素引起的附近水文地质改变的影响。防水设计要遵循隧道防水原则 定级准确、方案可靠、施工简便、经济合理。

隧道与地下工程防水设计内容包括：

- （1）防水等级和防水方案；
- （2）防水混凝土的抗渗等级和其他技术措施、质量保证措施；
- （3）其他防水层选用的材料及其技术指标、质量保证措施；

- (4) 工程细部结构的防水措施，选用的材料及其技术指标、质量保证措施；
- (5) 工程的防排水系统，地面挡水、截水系统及工程各种洞口的防倒灌措施。

一、防水原则

隧道与地下工程防水原则在不断变化，这反映了防水观念和技术的进步。其提法较多，因与行业和工程结构的特点有关。

(一) 国家标准

2001年12月31日实施的中华人民共和国《地下工程防水技术规范》(GB50108—2001)提出：地下工程的设计和施工应遵循“防、排、截、堵相结合，刚柔并济，因地制宜，综合治理”，同时强调必须符合环境保护的要求，并采取相应措施；应采用经过试验、检测和鉴定并经实践检验质量可靠的新材料，行之有效的新技术、新工艺。

(二) 铁道行业

2001年4月1日实施的《铁路隧道防排水技术规范》(TB10119—2000, J72—2001)提出铁路隧道防排水应采取“防、排、截、堵结合 因地制宜 综合治理”的原则。

“防”是指隧道衬砌应具有一定的防水能力，防止地下水渗入。

“截”是指在洞外和衬砌外侧采用工程措施，把流向隧道的水源拦截引航。如增设洞顶截水沟、防渗漏铺砌填补工程和修建截水泄水洞等。地表水应截流、汇集排除，防止积水下渗。隧道衬砌背后的地下水宜引排，减少衬砌的渗水压力和渗水量。

“堵”是指在隧道内对衬砌表面可见的渗漏处所，封堵归槽引排。如衬砌圻工内压浆、喷浆、喷涂乳化沥青和抹面封闭等内贴式防水层。堵水应归槽，使地下水按预定路径排除。

“排”是指工程有自流排水条件或可采用机械排水时，将地下水排除，为防水创造有利环境。

(三) 城市建设部门

以排为主 以防为辅 防排结合 综合治理。

(四) 国防

以排为主，防排结合。

(五) 人防

防为基础 防排结合 因地制宜 综合治理。

(六) 北京地下铁道

以防为主，以排为辅。

表 2-2 比较了不同防水观念的优缺点。

目前，国内传统采用的排水型隧道设计日益受到质疑，主要是因为，大量排水会破坏地下水的原有平衡，造成地下水资源流失。隧道在施工过程中遇到各种各样的水文地质条件，涌水量较大的区段多为裂隙发育的岩层或为断层破碎带，它们与地下水有着不同的复杂的联系。如果对地下水以排为主，则会造成当地地下水位下降，影响植被生长和生态平衡，对当地工农业生产造成长期不良影响，使地下水资源大量无谓流失。其次，渗流携带泥砂对围岩稳定和排水通畅不利。隧道开挖加快了地下水的流速，在渗流中会夹带着泥砂或岩层中的微细填充物。这些填充物的流失，一则造成在地层中岩块间的结合逐渐疏松，自稳能力变差，使围岩对衬砌的压力增加，威胁衬砌的安全；二则泥砂在流动过程中在管道的低凹处淤

积,天长日久造成排水管路堵塞,使衬砌壁后水压增大,导致隧道渗漏。

而全封闭防水型隧道,需要采取措施将水封堵在隧道衬砌之外,势必增加工程成本。因此,对于具体隧道要辩证地采用综合性防排水技术。山岭隧道,特别是长大隧道,为保护地面生态环境;城市地下工程为防止水压在衬砌背后聚集而破坏结构,均不宜单独采用排水型设计,而应采用“排堵结合,以堵为主”的原则,或者称为“以堵为主,适量排放”的原则。

表 2-2 不同防水观念优缺点

	优点	缺点
以防为主	水害少,运营成本低	成本高,施工复杂
以排为主	工程简单,投资节约	水害多,发展快,影响行车安全 洞顶地表水枯竭 地表土坍塌、下沉

二、防水设计的依据——水文地质勘测

水文地质勘测应分为施工前调查和施工后调查两个阶段。各阶段调查的内容、顺序、范围、精度等,应根据隧道所通过的地形、地貌、工程地质及水文地质等条件及其相关特点确定。

勘测方法有调查、测绘、勘测和试验。

防水设计前,应根据工程特点,搜集下列有关资料:

- (1) 最高水位的标高,出现的年代,近几年的实际水位标高和随季节变化情况。
- (2) 地下水类型、补给水源、水质、流量、流向、渗透系数、压力。
- (3) 工程地质构造、岩层走向、倾角、节理及裂隙,含水地层及不透水地层的特性和分布情况,溶洞、陷穴及填土区和松软地层情况。
- (4) 区域地形及水文资料 地形、地貌、天然水流、水库、水井、山谷、废弃坑井、洪水和给水排水系统资料。
- (5) 历年气温变化情况、降水量、蒸发量及地层冻结深度。
- (6) 地震、地热及含瓦斯等有害物质资料。
- (7) 施工技术水平和材料来源。

隧道钻探深度应达到隧底高程以下 3~5m,当遇暗河、溶洞等不良地质,还应适当加深。

地下水应做简易水文地质观测,取水样化验,抽水实验,测定地下水流向、流速和进行地下水动态观测。

三、地下工程的防水等级

(一) 地下工程的防水等级

地下工程的防水等级分为四级,各级的标准应符合表 2-3 的规定。地下工程的防水等级,应根据工程的重要性和使用中对防水的要求按表 2-4 选定。

一般来讲,电气化铁路隧道、寒冷地区铁路隧道、地铁运行区间隧道和城市公路隧道应按二级防水等级设计;非电气化铁路隧道、一般公路隧道和 underwater 隧道应按三级防水等级设计;取水隧道和污水排放隧道、人防疏散干道和涵洞应按四级防水等级设计。

表 2-3

地下工程防水等级标准

防水等级	标 准
一级	不允许渗水,结构表面无湿渍
二级	不允许渗水,结构表面无湿渍。 工业与民用建筑:总湿渍面积不应大于总防水面积(包括顶板、墙面、地面)的 1/1000;任意 100m ² 防水面积上的湿渍不超过 1 处,单个湿渍的最大面积不大于 0.1m ² 。 其他地下工程:总湿渍面积不应大于总防水面积的 6/1000;任意 100m ² 防水面积上的湿渍不超过 4 处,单个湿渍的最大面积不大于 0.2m ²
三级	有少量漏水点,不得有线流和漏泥砂。 任意 100m ² 防水面积上的漏水点数不超过 7 处,单个漏水点的最大漏水量不大于 2.5L/d,单个湿渍的最大面积不大于 0.3m ²
四级	有漏水点,不得有线流和漏泥砂。 整个工程平均漏水量不大于 2.5L/(m ² ·d),任意 100m ² 防水面积的平均漏水量不大于 4L/(m ² ·d)

表 2-4

不同防水等级的适用范围

防水等级	适用范围
一级	人员长期停留的场所,因有少量湿渍会使物品变质、失效的储物场所及严重影响设备正常运转和危及工程安全运营的部位,极重要的战备工程
二级	人员经常活动的场所;在有少量湿渍的情况下不会使物品变质、失效的储物场所及基本不影响设备正常运转和工程安全运营的部位;重要的战备工程
三级	人员临时活动的场所,一般战备工程
四级	对渗漏水无严格要求的工程

表 2-5 给出了国外既有隧道渗漏量的统计资料,表 2-6 为国外一种隧道防水分级方法。

表 2-5

国外既有隧道渗漏量

隧道类型	记录的渗漏量和单位	相当于 L/d/ m ²
输水	1L/长度 m/内径 m/h	8
污水 A	268.5L/直径 cm/km/d	5
污水 B	0.06L/周长 mm/d/10m 长度	6
铁路隧道 A	3.73L/s/km/(内径 4.5m)	2.3
铁路隧道 B	0.32L/min/30.5(内径 5.4m)	1.5
铁路隧道 C	318L/d/30.5(内径 3.85m)	1
高压电缆线	5.38L/m ² /d	6
邮政电缆线	0.5L/min/长度 5m(内径 2.13m)	21

表 2-6

国外一种隧道防水分级

隧道防水分级	最大允许渗漏量(L/d/ m ²)
O	肉眼看不出
A	1
B	3
C	13
D	30
E	100
U	不限制

实际中，以下隧道渗漏水分类术语是有用的。

- (1) 潮湿补丁：衬砌表面部分斑渍，潮湿痕迹。
- (2) 渗漏：表面有可见的水薄膜移动。
- (3) 滴漏 在 1min 内水滴不落下。
- (4) 滴水 水滴以至少 1 滴/min 的速度落下 (1L/d 即 3~4 滴/min)。
- (5) 连续渗漏 细流水(1 滴滴流水)或喷流水。

(二) 渗漏水的量测

一座隧道中，总渗漏量可以从一个已知面积的竖井储存槽水位的定时上升来计算，或从隧道中流满一池已知体积的水所需的时间来计算，或从一个横过隧道的溢水堰的 V 型凹槽来计算，或从泵水装置流量记录来计算。

局部漏水的渗漏可以由设置的带有密封边缘和规定尺寸型号的一个方框来计算，该结构密贴地放在需要量测的隧道表面，将渗流水导入量桶，在标记的面积上，自由滴水 and 连续渗漏可直接收集量测。也可用简单的目测量测来初略估测渗流量。

四、防水方案

表 2-7 给出了地下工程的防水方案，根据使用功能、结构形式、环境条件、施工方法及材料性能等因素合理确定。

另外，处于侵蚀性介质中的工程，应采用耐侵蚀的防水砂浆、混凝土、卷材或涂料等防水材料；结构刚度较差或受振动作用的工程，应采用柔性防水卷材或涂料等防水方案；处于冻土层的工程，当采用混凝土结构时，其混凝土抗冻融循环不得少于 100 次。

铁路隧道电气化区段接触网支架，照明灯具支架等孔眼，应作防水处理。衬砌结构中的埋设件宜预埋。

洞内还要设置排水系统，洞顶进行地表水截堵工程，这些将在以后的章节中论述。

表 2-7

地下工程防水方案

工程部位		主体				内衬砌施工缝					内衬砌变形缝、诱导缝				
防水措施		复合 式衬 砌	离壁式 衬砌、 衬套	贴壁 式衬 砌	喷射 混凝 土	外贴 式止 水带	遇水膨 胀止水 条	防水 嵌缝 材料	中埋 式止 水带	外涂 防水 涂料	中埋 式止 水带	外贴 式止 水带	可卸 式止 水带	防水 嵌缝 材料	遇水膨 胀止水 条
防 水 等 级	一级	应选 1 种			—	应选 2 种				应选	应选 2 种				
	二级	应选 1 种			—	应选 1~2 种				应选	应选 1~2 种				
	三级	—			应选 1 种	宜选 1~2 种				应选	宜选 1 种				
	四级	—			应选 1 种	宜选 1 种				应选	宜选 1 种				

隧道防水结构多采用塑料板防水层和防水混凝土，而且多寄希望于塑料板防水层，这不太科学。因为限于施工条件，塑料板的焊接工艺目前仍不过关，因此对重要的地下工程，除做好地下水限量引排外，防水混凝土的“三缝”处理也要给予足够的重视。

对于承受高压水的隧道防水或防水要求较高的地下工程，应考虑多道防线、层层设防，首先进行地层超前预注浆 充填裂隙 加固地层 增大地下水流动阻力 其次是喷射防水混凝土或在喷混凝土表面涂抹防水砂浆；然后将剩余水量设盲沟引排，铺设塑料防水层，施作防水混凝土衬砌，在衬砌背后注浆充填空隙，对施工缝、变形缝进行处理，以形成多道防线 抵御高压水。

总之 隧道和地下工程结构防排水是一项综合工程 要贯彻‘防、排、截、堵相结合 刚柔并济 因地制宜 综合治理’的原则 才能取得良好的防水效果。

第三节 防水混凝土——衬砌自防水

衬砌自防水是通过加入减水剂、防水剂等外加剂，增加混凝土的密实度，以衬砌结构本身的混凝土密实性实现防水功能的一种防水方法。它具有造价低、工序简单、施工方便等优点。

一、防水混凝土原理

混凝土是一种微孔结构材料，其中的部分开放式毛细孔、各种缝隙及混凝土自身收缩形成的开裂是造成隧道渗漏水的主要原因。

防水混凝土是通过加入少量外加剂或高分子聚合物材料并通过调整混凝土的配合比，抑制混凝土孔隙率，改善孔结构，提高自身密实度和抗渗性，达到防水的目的。防水混凝土除用于防水外，更主要的是防渗（普通混凝土抗渗标号不大于 S4）。以防水混凝土作为隧道自防水体系代表了国内外隧道防水的发展方向。

防水混凝土按提高混凝土密实度的不同途径，分为：（1）普通防水混凝土：调整配合比；（2）外加剂防水混凝土：掺少量有机或无机物外加剂；（3）膨胀性防水混凝土：以膨胀剂、减水剂或膨胀水泥胶结料配制。根据施工工艺又可分为普通工艺防水混凝土和泵送工艺防水混凝土，目前，重点大型工程常采取外加剂防水混凝土泵送工艺。

二、防水混凝土的抗渗等级与隧道防水混凝土

根据防水混凝土的设计壁厚及地下水的最大水头的比值按表 2-8 选用。

表 2-8 防水混凝土抗渗等级

工程埋置深度(m)	设计抗渗等级
<10	S6
10~20	S8
20~30	S10
30~40	S12

注：本表适用于Ⅳ、Ⅴ级围岩；山岭隧道防水混凝土的抗渗等级根据《铁路隧道防排水技术规范》不得小于 S8。

隧道防水混凝土的规定为：

- (1) 抗渗等级不得小于 S8；
- (2) 隧道防水混凝土结构。

隧道防水混凝土结构的具体要求如下：

- (1) 衬砌厚度不应小于 30cm；
- (2) 迎水面主筋保护层厚度大于 5cm；
- (3) 裂缝宽度不得大于 0.2mm 并不得贯通。

三、防水混凝土的原材料

(一) 水泥

(1) 宜采用普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥或粉煤灰硅酸盐水泥，如采用矿渣硅酸盐水泥，则需掺用外加剂以降低泌水率。

(2) 受冻害作用时，应优先选用普通硅酸盐水泥，不宜采用火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥。

(3) 不得使用过期或受潮结块的水泥，并不得将不同品种或标号的水泥混合使用。

(4) 水泥标号不宜低于 425 号，当采用 325 号时需掺外加剂，并经试验合格后才可使用。

(二) 碎石或卵石

粒径宜为 5~40mm 含泥量不得大于 1.0% 泥块含量不得大于 0.5%。碎石和卵石各有优缺点，碎石表面粗糙多棱角，与水泥的粘着比卵石优越，混凝土强度高，但和易性差，不便施工。

碎石或卵石要求粒径 < 40mm 及以下连续级配，具体粒径还应考虑结构本身的厚度、布筋稀密而定。

(三) 砂

宜采用中砂，含泥量不得大于 3.0% 泥块含量不得大于 1.0%。

(四) 水

不含有害物质的洁净水。

(五) 外加剂

技术性能应符合国家或行业标准一等品及以上的质量要求。

(六) 粉煤灰

掺量不宜大于 20% 硅粉掺量不应大于 3%，其他掺合料的掺量应通过实验确定。

四、防水混凝土的配合比

(1) 抗渗水压值比设计值提高 0.2MPa。

(2) 水泥用量：隧道工程防水混凝土的水泥用量不得小于 $320\text{kg}/\text{m}^3$ ，当掺有活性粉细料时不得小于 $280\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(3) 砂率宜为 35%~45% 水灰比宜为 1.2~1.2.5。

足够的水泥用量和适宜的砂率，可以保证混凝土中水泥砂浆的数量和质量，才能充分填充石子空隙并包裹石子，同时具有一定厚度砂浆层。

砂率过大，砂用量过多，水泥浆不够包裹砂子，混凝土结构不密实；要足够的水泥浆包裹砂子，必须增加水泥和水的用量，混凝土流动性就不大，粗骨料易产生不均匀沉降，混凝土硬化后收缩大，降低抗渗性。

防水混凝土中砂率选择必须和水泥用量相适宜。一般对于卵石防水混凝土，砂率为 35%左右 对于碎石防水混凝土 砂率以 35%~40%为宜。水泥用量不低于 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(4) 水灰比不得大于 0.55

混凝土拌和物的水灰比对硬化后混凝土孔隙的大小数量起决定作用，直接影响混凝土结构的密实度。

从理论上讲，在满足水泥安全水化及湿润砂石所需水量前提下，水灰比越小，混凝土密实度越好 但水灰比过小 施工操作困难 反而使混凝土不密实 反之 水灰比过大 剩余水分多，蒸发后留下的毛细孔径越粗，渗水可能性越大。实践证明，防水混凝土最大水灰比不宜超过 0.55。

(5) 坍落度不宜大于 50mm 泵送时泵坍落度宜为 100~140mm。

五、防水混凝土的施工

(1) 按质量配合比准确称重，允许偏差：水泥、水、外加剂、掺合料为 $\pm 1\%$ ，砂、石为 $\pm 2\%$ 。

(2) 减水剂宜预溶成一定浓度的溶液。

(3) 机械搅拌，搅拌时间不应小于 2min。

(4) 如果运输到施工场地发生离析，需二次搅拌，坍落度损失控制在容许范围内。

(5) 应连续浇筑，少留施工缝。

(6) 终凝后立即养护，不少于 14d 保湿、保温。

(7) 大体积混凝土的施工。

从国内外大量的试验资料、工程实例来看，防水混凝土衬砌，特别是大体积、全断面、快速机械化连续灌注的隧道衬砌，不可避免地出现裂缝。其开裂的主要原因是：水泥水化热引起的体积膨胀与降温后的收缩、沉缩及干缩引起的变形，这些都是引起裂缝的内部因素。

防止防水混凝土裂缝产生的措施有：

(一) 降低水化热法

为降低因水泥用量大、拌合温度高引起的混凝土内部温升，以往曾采用掺加粉煤灰以降低水泥用量，采用低水化热水泥，添加膨胀剂以减少混凝土收缩，夏季采用降温措施降低混凝土的拌合温度等措施，能收到一定的效果，局部裂缝有所减少。

(二) 分散应力法

分散应力法即将全断面整体衬砌改为分部（先墙后拱）衬砌，这样，一方面可以使水化热散失一部分，另一方面使原隧道一次整体浇注时的超静定结构变为分部浇注的拱墙衬砌，使其有沉缩变形的余地，这一方法在大秦铁路西段进行了试验，并在大秦铁路东段隧道衬砌中推广应用。然而该法虽然消除了混凝土裂缝，但在拱墙接触处却形成了水平施工缝，需做专门防水处理。同时，该法亦不适应于机械化快速施工。

(三) 消除约束法

消除约束法就是消除一次支护表面对二次衬砌的约束力。大量实践证明，对隧道衬砌来说，外部约束（即一次支护表面对二次衬砌的约束）是主要的，消除约束法就是在一次支护与二次衬砌之间设隔离层，以消除外部约束应力。

六、防水混凝土的质量检查

- (1) 原材料要检查，如有变化，应及时调整混凝土配合比。
- (2) 每班原材料称量不少于 2 次。
- (3) 每班坍落度测定不少于 2 次。
- (4) 掺引气剂的防水混凝土含气量测定，每班不少于 1 次。
- (5) 连续浇筑混凝土 500m³以下时应留两组抗渗试块 每增加 250~500m³ 应增留两组。

七、防水混凝土工程应用实例

大秦新线大岭沟 1 号、桃园、大黑山、花果山、摩天岭等 9 座隧道。

设计防水混凝土抗渗标号 $\geq S_8$ 。

采用理论配合比为 拱部 1 : 2.15 : 3.45 边墙两组 1 : 2.75 : 4.37 与 1 : 2.86 : 4.04。

八、防水混凝土的适用条件

- (1) 新建和改建隧道衬砌。
- (2) 对既有严重裂损变形侵入隧道建筑限界的衬砌拆除重建。
- (3) 新建明洞衬砌。
- (4) 防腐蚀水沟衬砌。

第四节 附加防水层

防水混凝土是集支护与防水为一体的防水型式，它结构合理、工序简单、造价较低，国外倾向于大量采用防水混凝土作衬砌，实现结构自防水。但是，在下列情况下仍需用附加防水层：

- (1) 存在很高的水压。

- (2) 腐蚀性水环境。
- (3) 存放易受潮物资的仓库。
- (4) 人的居留空间。
- (5) 存在很大的围岩压力和山体沉陷。
- (6) 混凝土的温度应力和收缩应力不能控制。

所以，附加防水层适用于需增强其防水能力、受侵蚀性介质作用或受振动作用的地下工程。

附加防水层是附加在围护结构上的防水层，既可作外防水层，又能作内防水层或夹层防水层，在工程上可以单独使用，又可以复合使用。

一、附加防水层的类型

(一) 按材料划分

- (1) 塑料防水板防水层。
- (2) 水泥砂浆防水层。
- (3) 卷材防水层。
- (4) 涂料防水层。
- (5) 金属防水层。

从国内外来看，防水层一般选择防水板（膜）等卷材，选用涂料的少。其主要原因是：防水板（膜）等卷材系工业定型产品，质量保证、施工方便、对环境无污染；而涂料等现场施作，厚度难以控制，工作面窄，施作干扰大，对环境有污染。

(二) 按施作位置划分

- (1) 外贴防水层。
- (2) 夹层防水层。
- (3) 内贴防水层。

规范推荐，附加防水层宜设在迎水面或复合衬砌之间。在结构迎水面或复合衬砌之间作附加防水层，防水效果一般比作背水面好，但考虑工程施工等各种不同环境，例如明挖工程、暗挖工程，前者作外防水层便于施工，后者作外防水层施工就比较困难，有的甚至无法施工，因此必要时也可作内防水层。

二、塑料防水板防水层

(一) 塑料防水板类型

随着化学工业的发展和科技进步，可作为塑料防水层的材料日益增多，常用的防水层材料主要技术性能如表 2-9 所示。

由表 2-9 可见，上述材料主要性能指标均能满足防水层的要求，但 PVC 板技术性能稍差，而且幅宽较小，施工工艺较复杂，结合我国国情，考虑在满足防水要求的前提下，尽量降低造价，建议选用 EVA 及 LDPE 膜较合适。