

中华人民共和国水利行业标准

水利水电工程水文地质勘察规范

SL 373—2007

条 文 说 明

目 次

1 总则·····	95
3 基本规定·····	96
4 区域水文地质勘察·····	99
5 水库区的水文地质勘察·····	100
6 坝（闸）址区水文地质勘察·····	104
7 地下洞室水文地质勘察·····	108
8 渠道水文地质勘察·····	112
9 灌区水文地质勘察·····	115
10 堤防水文地质勘察·····	119
11 边坡水文地质勘察·····	121
12 岩溶区水文地质勘察·····	124
13 水文地质勘察资料整理·····	131
附录 B 水文地质勘察中物探方法的应用·····	134
附录 D 水文地质分析中渗透系数取值原则·····	137
附录 E 岩土体渗透结构类型划分·····	141
附录 F 钻孔高压压水试验·····	142
附录 G 岩体定向压水试验·····	148
附录 I 渠道的渗漏计算可采用的方法·····	151
附录 J 岩溶水文地质常用分类·····	152

1 总 则

1.0.1 在水利水电工程建设中,进行水文地质勘察的主要目的是查明工程区水文地质条件,评价地下水对工程区及建筑物的影响。水文地质勘察既是工程地质勘察的重要组成部分,同时又有其自身特点与要求。《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—99)包含了水文地质勘察工作的相关规定,本标准则是对其水文地质勘察有关内容的进一步深化、细化和补充。本标准在实施中应与GB 50287—99 配套使用。

1.0.2 本标准适用的大型水利水电工程是指按《防洪标准》(GB 50201—94)所确定的大(1)型和大(2)型工程。该标准关于工程规模的基本规定见表1。

表1 水利水电枢纽工程等别划分表

工程等别	水库		防洪		治涝	灌溉	供水	水电站
	工程规模	总库容 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	城镇及工矿企业的重要性	保护农田 (万亩)	治涝面积 (万亩)	灌溉面积 (万亩)	城镇及工矿企业的重要性	装机容量 ($\times 10^4 \text{ kW}$)
I	大(1)型	>10	特别重要	>500	>200	>150	特别重要	>120
II	大(2)型	$10 \sim 1.0$	重要	$500 \sim 100$	$200 \sim 60$	$150 \sim 50$	重要	$120 \sim 30$
III	中型	$1.0 \sim 0.10$	中等	$100 \sim 30$	$60 \sim 15$	$50 \sim 5$	中等	$30 \sim 5$
IV	小(1)型	$0.10 \sim 0.01$	一般	$30 \sim 5$	$15 \sim 3$	$5 \sim 0.5$	一般	$5 \sim 1$
V	小(2)型	$0.01 \sim 0.001$		<5	<3	<0.5		<1

对中小型工程不要求严格按照本规范执行,但可以根据具体情况参照本规范有关规定开展其水文地质勘察工作。

3 基本规定

3.0.1 水文地质勘察作为工程地质勘察的重要组成部分，与工程地质勘察联系十分密切。本条强调水文地质勘察与工程地质勘察在一般情况下应合并进行，一方面是因为从技术角度看，两者对查明工程区地形地貌、地层岩性、地质构造等基本地质条件的要求是一致的，所采用的勘察手段也大多相同；另一方面从经济角度考虑，也应该互相结合以最大限度地减少重复工作量。

本条还提出了应进行专门性水文地质勘察工作的几种情况，主要基于以下考虑：

(1) 对灌区而言，其主要问题即是水文地质问题；

(2) 严重渗漏或大面积浸没问题均是可能影响工程建设的重大问题；

(3) 在水文地质条件复杂地区，结合工程地质勘察进行的一般水文地质勘察工作深度往往难以满足工程需要；

此外，施工过程中通过开挖，可能揭露出前期勘察工作中未查明的新的水文地质条件和问题；灌浆孔、排水孔发生异常涌水，灌浆出现异常大漏量，以及水库蓄水运行后渗漏量较预计异常增大等现象，也预示着可能存在前期未发现的新的水文地质问题，必要时可布置专门性水文地质勘察予以查明；防渗、排水工程设计方案如出现重大调整，也需要针对调整后的方案重新进行专门性水文地质勘察，以便为设计提供依据。

关于勘察阶段的划分及各阶段相应工作深度，GB 50287—99中作出了明确规定。本条要求专门性水文地质勘察的阶段应与GB 50287—99的规定相一致。

3.0.2 本条提出了可确定为水文地质条件复杂区的3种情况。根据多年来水利水电工程地质勘察的经验，出现其中一种情况或多种情况时，采用与工程地质勘察合并进行的一般水文地质勘察

方法，通常难以满足查明水文地质条件和评价水文地质问题的要求，因此需进行专门性水文地质勘察工作。本条中所列情况可能包括不了所有水文地质条件复杂区，实际工作中可依据具体情况及工程相应要求确定其是否属于水文地质条件复杂区。

3.0.3 本条列举了专门性水文地质勘察大纲的主要内容。实际工作中，随着对有关问题的不断发现和揭露，对勘探工作进行适当调整有时是必要的。

3.0.4 本条主要强调在水文地质勘察工作过程中应遵循合理的工序，以保证工作进度及勘察成果质量，避免工序混乱造成的返工和浪费。

3.0.5 一般情况下，水文地质测绘应与工程地质测绘结合进行。但对需要开展专门水文地质勘察工作的工程区而言，其水文地质条件往往比较复杂，需要进行专门性的水文地质测绘。考虑到不同工程、不同的专门性水文地质问题的差异性一般较大，本条仅对测绘比例尺、测绘范围的确定提出了原则规定，实际工作中应根据具体情况予以合理选择，以保证测绘精度、范围能够满足工程需要。

遥感地质解译是一种快速的填图方法，各种影像资料含有丰富的地质信息，但也具有多解性，为避免解译错误，对遥感解译成果进行野外验证是不可缺少的。

3.0.6 物探方法轻便、高效，在水利水电工程水文地质勘察中已得到广泛应用。但其缺点是应用受场地地形和岩土物性条件的限制，探测成果往往具有多解性特点，较难得出单一的结论，因此本条强调：一是要采用有效的方法进行综合探测；二是关键地段探测成果要经钻探验证，以期获得理想效果。

3.0.7 水文地质钻探一般有其特殊要求，在施工前根据预测的钻孔地质剖面及钻探目的进行专门设计是十分必要的。设计主要应注意以下三方面问题：

(1) 考虑钻孔中安排的各项水文地质现场测试要求，在保证终孔直径的前提下，确定开孔直径，确定钻孔的换径部位及深

度，一般情况下宜尽量设法减少换径；

(2) 根据现场测试项目要求，确定钻探方法和钻探器具；

(3) 确定水文地质现场测试方法、仪器、设备和钻孔中试段位置。

本条中要求在钻探过程中应进行水文地质简易观测工作，主要是因为通过它可及时了解和掌握地层中含水层位置、地下水位、自流孔承压水头及流量等重要水文地质参数。

3.0.8 本条系对水文地质试验方法选择的原则规定。现场试验主要包括钻孔压水试验、钻孔抽水试验、钻孔注水试验、试坑注水试验、渗透变形试验等；室内试验主要包括渗透试验和渗透变形试验等。

本条强调应以现场试验为主，主要是因为地下水渗流问题比较复杂，室内试验样品规格较小，代表性差，且取样运输、样品制备中易受扰动，其试验结果一般与实际情况误差较大。现场试验则可相对准确地反映一定范围内的岩、土体渗透特性。

3.0.9 地下水动态观测主要是为了了解各含水层的水位、流量、水温、水质等随时间的变化规律，分析研究降水、库水与地下水的补排关系，为评价地下水对工程区及建筑物的影响、检验防渗与排水工程实施效果等提供可靠的观测数据。因此，从前期勘察阶段开始就应该根据具体情况和工程需要着手布置适当的地下水动态观测工作，并随着勘察阶段的深入逐步形成系统的观测网。

3.0.10 一般情况下，水文地质勘察多与工程地质勘察合并进行，水文地质勘察成果相应作为工程地质勘察成果的部分内容并入工程地质勘察报告。对开展专门性水文地质勘察的水利水电工程，则应提交相应的水文地质勘察专题报告。

4 区域水文地质勘察

4.2 勘察内容

4.2.1 区域地形地貌应包括平原、丘陵山区、岩溶地区、滨海地区、戈壁沙漠、黄土地区、草原牧区及冻土地带等。

4.3 勘察方法

4.3.1、4.3.3 鉴于水利水电工程单独开展区域水文地质勘察的项目很少，故本规范确定了以收集、分析和整编已有区域水文地质资料，加之必要的线路调查与验证的工作原则，同时鼓励应用遥感技术方法。

4.3.4 区域水文地质调查一般纳入专题水文地质勘察报告或工程地质勘察报告，内容应包括区域水文地质概况、区域水文地质条件和问题、水文地质环境的趋势性预测与评价。

5 水库区的水文地质勘察

5.1 勘察目的与任务

5.1.1、5.1.2 规定了非岩溶水库区水文地质勘察的目的与任务。对库区而言，渗漏、浸没问题是两个最主要的水文地质问题。

5.2 勘察内容

5.2.1 本条中所列内容，是查明水库区水文地质条件及评价渗漏、浸没问题所需要开展的基本工作。

5.2.2、5.2.3 分别提出了进行渗漏与浸没问题评价尚需有针对性地开展的工作内容。其中 5.2.3 条第 4 款所指浸没类型主要包括沼泽化、盐碱化、黄土类湿陷、井壁坍塌、建筑物倒坍和道路翻浆等。

5.3 勘察方法

5.3.1 本条规定了库区水文地质勘察所采用的基本方法。

5.3.2 本条对库区水文地质测绘的范围和比例尺作了规定。通常情况下，库区水文地质测绘可结合工程地质测绘一并进行。为查明严重渗漏地段水文地质条件而开展的专门水文地质测绘，其范围和比例尺均可根据需要适当扩大。

5.3.3 本条提出了库区水文地质物探工作的应用与布置原则。实践表明，综合物探方法是行之有效的库区水文地质勘察方法之一，且实施方便。因此，在地形及物性条件允许的情况下应予以充分利用。选择物探方法时应充分考虑其适用性，并尽可能选择不同方法相互验证。

5.3.4 本条规定了库区水文地质勘探的方法及布置原则。

5.3.6 在多层含水层中仅仅观测混合水位，往往会给有关问题

分析带来困难。故本条第 3 款规定对多层含水层应进行分层观测。

5.4 水文地质问题评价

5.4.1

4 本款不适用于抽水蓄能电站工程。

本款的轻微渗漏标准来源于《工程地质分析原理》成都地质学院 1981 版“一般规定不超过河流平水期流量的 1%~3%”；《工程地质学》河海大学第一版“渗漏量小于平水期流量的 1%~3%是可以允许的”；《工程地质学》河海大学第二版“渗漏总量小于河流多年平均流量的 5%则是可以允许的”。考虑河流来水量的季节性差异，轻微渗漏标准定为小于河流多年平均流量的 3%是适宜的。

严重渗漏标准目前尚无统一规定，但渗漏量为河流多年平均流量的 10%是个界限框数，大于此值水库效益必然受到大的影响，有时甚至个别机组不能正常发电。

轻微、中等、严重渗漏的三级划分标准主要是便于水库渗漏问题评价的可操作性，至于是否采取工程处理措施，尚应考虑水库的任务、开发目标、水动能条件、对环境的影响以及水库渗漏问题处理（费用、难易）与水库效益的比较等因素。

5.4.2 浸没区地层为二元结构，即上部为透水性微弱的黏性土层、下部为透水性良好的砂层或砂砾（卵）石层的情况在一般河谷阶地中较常见，其壅水计算宜采用结合水动力学方法。以往对于这类地层结构的壅水计算是采用卡明斯基方法，该方法当上层透水性很小时，计算出的壅水值几乎就是水库水位的抬高值，且以不变的数值向远处延伸，使得蓄水前后的两条地下水浸润曲线相互平行。这既扩大了浸没范围，也与实测资料不符。

结合水动力学计算方法是我国已故水文地质学家张忠胤教授提出来的。他认为黏性土中存在结合水，在 $I-V$ 直角坐标系中，结合水的渗透规律是一条通过原点向 I 轴凸出的曲线（见图 1）。

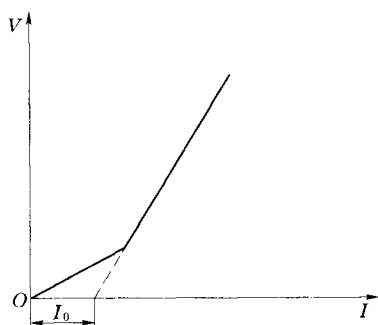


图 1 结合水动力学计算方法图

通常把黏性土的这一渗流特性简化为公式 (1):

$$V = K(I + I_0) \quad (1)$$

式中 I_0 ——起始水力坡度。

由式 (1) 可知, 当水力坡度较小时 ($I \approx I_0$), 渗透速度与水力坡度不呈直线关系, 甚至不产生渗流 ($I \leq I_0$), 只有在某一水力坡度 ($I > I_0$) 时, 才开始渗透。因此, 黏性土的渗透规律实质上是黏性土中的结合水运动的基本规律, 故称结合水动力学。

根据结合水的运动规律, 张忠胤教授阐明了处于承压状态的黏性土层, 其地下水位总是低于下卧含水层的测压水位。具体计算上述二元结构黏性土中的壅水值方法如下:

在需要了解壅水高度处布置钻孔 (见图 2), 当钻孔未揭穿黏性土之前, 可以测到一个初见水位, 钻透黏性土后, 水位上升至最高值, 即含水层的测压水头 H_0 。黏性土中含水带厚度 T 与测压水头 H_0 之间的关系如下:

$$T = \frac{H_0}{I_0 + 1} \quad (2)$$

式中 T ——初见水位距下伏含水层顶板距离 (m);

H_0 ——由含水层顶板起算的下伏含水层测压水位高度 (m);

I_0 ——起始水力坡度。

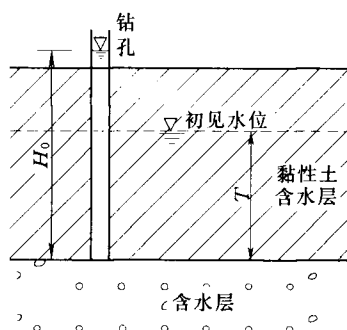


图 2 黏性土中含水带厚度 T 与测压水头 H_0 之间的关系示意图

水库蓄水后，下部承压含水层测压水头相应抬高至 H'_0 ，引起原库岸地下水位的壅高，利用公式 (3) 计算水库蓄水后黏性土层含水带厚度 T' 得到库岸地下水壅高后的水位。该水位加上地下水临界深度，即得到用于圈定浸没范围的高程。

$$T' = \frac{H'_0}{I_0 + 1} \quad (3)$$

$$H'_0 = H_0 + \Delta H_0$$

式中 ΔH_0 ——水库回水高程与河流天然水面高程之差 (m)；

I_0 ——起始水力坡度；

H'_0 ——由含水层顶板起算的下伏含水层测压水位高度 (m)；

T' ——视见水位距下伏含水层顶板距离 (m)。

含水层厚度大，相对隔水层埋藏很深时，可按附录 C.0.2 地下水壅水计算常用公式进行试算，不断增加含水层厚度可得到不同地下水位壅高值。当含水层厚度每增加 5m，地下水位壅高值增量 $\Delta h \leq 2\text{cm}$ 时，其计算底限可视为含水层的有效厚度。经验算当含水层厚度达到 100m 时，厚度每增加 5m 地下水位壅高值增量 Δh 为 1cm 左右，因此含水层有效厚度可定在 100m 以内。

6 坝（闸）址区水文地质勘察

6.1 勘察目的与任务

进行坝（闸）址区水文地质勘察，是为了在查明坝（闸）址区水文地质条件的基础上分析评价坝（闸）址区可能存在的主要水文地质问题及其影响，为水工建筑物和防渗、排水工程设计提供依据。

岩土体渗透结构类型划分和渗透性分区对于表征坝（闸）址区岩土体渗透特征具有重要意义，也是分析评价坝（闸）址区水文地质问题的重要基础。

6.2 勘察内容

6.2.1~6.2.3 这3条中所列内容，是查明坝（闸）址区水文地质条件所需要开展的基本工作，同时也是进行岩土体渗透结构类型划分和渗透性分区的基础依据。

6.2.5 本条中要求进行坝（闸）址区岩土体渗透结构类型划分，这是基于实际需要和国内有关研究进展情况提出的。渗透结构是指不同渗透性的岩土体在空间中的分布与组合方式，它反映了岩土体渗透性的空间分布规律。划分渗透结构类型，有助于从宏观上把握坝（闸）址区岩土体（尤其是岩体）渗透特征，也便于防渗、排水工程设计应用。

近年来，国内外在裂隙岩体各向异性渗透性及高水头下裂隙岩体渗透特性的理论研究与工程实践方面均取得了较大进展，但尚不十分成熟。基于工程实际需要，同时考虑到一般工程的实施难度，本规范仅要求对坝高大于200m的重大工程，宜进行高压压水试验；当需要评价工程岩体各向异性渗透性时，宜进行定向压水试验。

6.2.6 本条规定对坝基及绕坝渗漏、渗透变形、坝基基坑涌水

等主要水文地质问题进行分析评价。这些问题属于坝（闸）址区水文地质勘察中常见问题，对工程设计和施工方案确定影响较大。至于坝基扬压力分布等问题，由于影响因素众多，不宜单从水文地质方面进行评价，故未列入本标准。

6.2.7 水文地质巡视是施工期水文地质工作中承上启下的重要环节，地质技术人员应在现场巡视的基础上，提出需要立即开展的施工期水文地质工作内容；水文地质分析预报对确保施工安全和正常工期具有重要意义，是施工期水文地质工作的核心环节；水文地质观测应根据前期勘察或施工开挖中揭露的具体情况进行。

6.3 勘察方法

6.3.1 水文地质测绘是水文地质勘察的基本手段。一般情况下，坝（闸）址区水文地质测绘的范围和比例尺与坝（闸）址区工程地质测绘一致即可满足工作需要。由于具体问题的多样性和复杂性，专门性水文地质测绘的测绘比例尺和范围不宜明确规定，因此条文中仅作了原则规定。

6.3.2 本条提出了水文地质物探工作的应用与布置原则。选择物探方法时应考虑各种方法的优势和局限性，注意相互验证，以提高成果精度。

6.3.3 本条第1款提出水文地质钻探的布置原则，即在一般情况下应充分利用工程地质勘探孔收集相关的水文地质资料。对于专门性水文地质钻探，由于具体问题的多样性和复杂性，解决不同水文地质问题所需专门性钻探的工作量往往差别较大，很难统一标准，因此本条仅对专门性水文地质勘探布置作了原则规定。

本条第2款提出了水文地质钻探过程中需要观测和记录的水文地质内容与现象，这些内容与现象可从不同的侧面反映工作区水文地质条件。

6.3.4

1 本款规定了在坝基第四纪覆盖层主要含水层中进行抽水

试验的基本原则。要求各主要含水层的抽水试验不应少于 3 组，是为了与 GB 50287—99 的有关规定相一致；考虑到单孔抽水试验成果精度较低，本款同时提出对水文地质条件复杂的工程区，各主要含水层宜布置适量多孔抽水试验，以更准确地查明坝基覆盖层的渗透性和渗透各向异性。

2~4 这 3 款内容亦与 GB 50287—99 的有关规定相一致。近年来，随着一批高坝及抽水蓄能电站的修建，对裂隙岩体各向异性渗透性及其在高水头下渗透特性的勘察研究要求越来越迫切，也积累了一定的成功经验，但高压压水试验及定向压水试验实施有一定难度，故本标准中未做严格要求。

5 强透水的大断层破碎带、裂隙密集带、层间剪切破碎带等易构成集中渗漏带，水文地质意义重大。所以本款要求视具体情况，进行抽水试验或压水、注水试验以查明其渗透性。进行连通试验的目的在于判断其渗透途径。

6.3.5

2 本款规定了施工期水文地质观测 4 个方面的内容，这些内容是影响坝（闸）址区建筑物施工及运行期安全的重要水文地质因素。观测后应对资料及时整理分析，并应用于水文地质分析预报与建议工作中。

3 本款强调应对多层含水层进行分层水文地质观测，是为了保证观测资料的真实性与实际应用方便。

4 本款规定了施工期水文地质巡视 3 个方面的内容。及时发现这些可能对工程建设造成不利影响的水文地质现象意义重大。

6.3.8 由于水文地质问题的复杂性和勘察的局限性，某些不良水文地质现象可能在施工开挖过程中才能通过巡视、观测、专项勘察等手段才能被发现和查明。本条第 1 款规定了水文地质分析预报与建议的内容，第 2 款规定了提出水文地质分析预报与建议的形式与要求。

6.4 水文地质问题评价

6.4.1

1 本款是评价坝基及绕坝渗漏问题的总的要求。坝（闸）址区地形地貌条件、库水与地下水补排关系、岩土层渗透性及其分布组合特征、地质构造发育及分布特征等，均是控制坝基及绕坝渗漏问题的主要地质因素。

2 本款提出了可能存在较严重坝基或绕坝渗漏问题的 3 种情况。勘察中发现坝（闸）址区存在其中任何一种情况，即应对坝基或绕坝渗漏问题予以特别注意。

3 由于水文地质条件的复杂性，准确确定岩土体渗透参数和计算坝基及绕坝渗漏量均十分困难。基于此，本款提出了坝基及绕坝渗漏量估算的原则性意见。实际工作中宜根据具体情况采用不同方法相互验证，综合评价。

6.4.2 本条第 1 款是评价坝基基坑涌水问题的总的要求。第 2 款提出了坝基基坑涌水量估算的原则性意见。

7 地下洞室水文地质勘察

7.2 勘察内容

7.2.1~7.2.4 这4条规定了查明地下洞室区水文地质条件所要进行的基本工作内容。

7.2.6、7.2.7 涌水、突泥是地下工程可能遇到的突出水文地质问题，对施工及安全影响重大，较大的外水压力则容易导致地下洞室围岩失稳破坏或产生突水等现象。因此，对地下工程的涌水、突泥问题及外水压力问题进行分析预测和评价，对工程设计与施工方案确定十分必要。

7.2.8 水文地质巡视及分析预报是地下工程施工期水文地质工作的重要内容，对保证施工正常进行具有重要指导意义。水文地质观测应根据前期勘察或施工开挖中揭露的具体情况进行。

7.3 勘察方法

7.3.1

1 对水文地质条件复杂的地下洞室区，如岩溶发育洞段、宽大断层带及其他富水构造分布洞段等，原则上应进行专门性水文地质测绘。

2 规定了地下洞室区水文地质测绘的范围与比例尺。地下洞室区地下水的运动往往涉及较大区域，专门性水文地质测绘的比例尺和范围可视具体情况与需要扩大。

7.3.4

2 地下洞室围岩的渗透性是工程设计需要考虑的重要指标之一。因此，在勘察阶段通常要采取不同的试验方法确定岩体的渗透性。压水试验方法较为常用，注水试验多用于透水性较大且难以进行压水试验的破碎岩体孔段。抽水试验一般适用于松散含水层洞段及富水基岩洞段。工作中应根据具体情况选择合适的试

验方法。

近年来深埋隧洞工程日益增多，对于是否应在其勘探钻孔中进行全孔分段压水试验，目前存在一些不同看法。一般来说，前期勘察阶段宜尽量进行全孔分段压水试验，以便为分析预测工程区岩体渗透性随深度变化的规律积累必要的基础资料。勘察工作达到一定深度后，压水试验可适当侧重于隧洞上下一定范围。

3 常规压水试验结果难以客观反映高水头压力下岩体的渗透特征，因此本款建议对深埋隧洞及高水头压力管道地段采用高压压水试验方法。目前国内对深埋隧洞的界定尚无明确、统一的标准，但多数意见倾向于埋深大于 300m 的隧洞即可视为深埋隧洞。

7.4 主要水文地质问题评价

7.4.1 本条规定了地下洞室涌水问题的评价原则与涌水量估算方法。

1 本款提出了可能存在较严重涌水问题的 3 种情况。勘察中发现地下洞室区存在其中任何一种情况，即应对涌水问题予以特别注意。需要指出，岩溶地区地下洞室涌水往往具有以下显著特点：

(1) 涌水量大、水压高。当隧洞（特别是深埋隧洞）打穿高悬于洞顶之上的地下暗河向下连通的岩溶管道、溶蚀裂隙时，常发生大流量、高压涌水。

(2) 季节性。隧洞位于地下水位以上时，枯水期洞内无涌水现象，但雨季尤其是暴雨期，地表水可沿洼地、落水洞直接灌入洞中；当隧洞底板以下发育的暗河补给条件好而在暴雨期排泄不畅时，亦可造成地下暗河水位涌高并导致隧洞短时间大流量、高压涌水。

(3) 不均一性。涌水量与岩溶发育程度及其连通性密切相关。

(4) 突发性。隧洞打穿岩溶暗河及其他富水岩溶通道时，往

往突发短时、大量涌水。

2 本款提出了目前常用的几种估算隧洞涌水量的方法及其适用条件。关于隧洞涌水量估算方法的研究已经有半个多世纪的历史,20 世纪 80 年代以来,国内有关部门亦对隧洞涌水量预测问题进行了较为系统的研究,取得了较大进展。目前,我国水利水电、铁路、交通等部门在工程实践中常用的计算方法主要包括水均衡法、比拟法、径流模数法、同位素氡(T)法、评分法、地下水动力学法、数值模拟法等。这些方法各有特点,但估算结果与实际情况相比均可能存在一定甚至是较大的误差,选用时应充分考虑具体水文地质条件及计算方法的适用性,并尽量采取多种方法进行相互验证。

- 1) 大井法是将复杂的地下洞室系统换成一个假想的、与地下洞室系统面积相等的一个大井,大井涌水量可根据一般垂直井涌水量计算公式确定,此时垂直井的半径应采用大井的引用半径来代替。
- 2) 地下洞室所在区的含水性在各个方向上的透水性或补给条件有时差别很大时,工程区周围往往形成不规则形状的降落漏斗,表现为严重的不对称性。此种情况下,可将地下洞室区域分成若干扇形区域,然后,根据辐射流公式进行隧洞涌水量估算。
- 4) 当新建隧洞与既有隧洞或矿坑坑道水文地质条件相似并具有可比性时,可采用水文地质比拟法概略预测新建隧洞的涌水量。所谓水文地质条件相似,主要指气候、降水量及降水入渗补给条件、地形地貌、地层岩性、地质构造、含水体渗透性、地下水补给、径流、排泄条件等基本相似。
- 5) 地下水径流模数法基于假设地下径流模数等于地表径流模数的相似原理,即根据大气降水入渗补给的下降泉流量或由地下水补给的河流流量,求出隧洞通过地段的地表径流模数,作为隧洞流域的地下径流模数,

再根据隧洞集水面积，便可概略预测隧洞的正常涌水量。确定地下径流模数时，为排除降雨干扰因素，以采用枯水季节流量较为接近实际。

7.4.3 突泥是隧洞工程施工中可能遇到的重大工程水文地质问题，关系到隧洞施工的安全和工程处理措施，国内外众多的工程实例说明了突泥对工程的严重危害，故应引起足够重视。目前对于突泥问题的预测尚无成熟的理论和方法，本条仅规定了对隧洞突泥进行判断的一般原则。

8 渠道水文地质勘察

8.2 勘察内容

8.2.1、8.2.2 这两条所列内容，是查明渠道沿线水文地质条件所需要开展的基本工作。其中，岩土体的渗透性及渠道沿线地下水位分布情况对分析评价相关水文地质问题非常重要，应作为勘察工作的重点。

8.2.3 本条系针对傍山渠道水文地质勘察应注意的重点问题所提出的要求。

8.2.4 渠道渗漏、渗漏引起的浸没及盐渍、渠道开挖涌水均是渠道工程常见的水文地质问题，对工程设计与施工影响较大；渠道运行期间，其两侧水文地质条件常常发生变化并导致渠道附近区域环境水文地质条件的改变。鉴于此，本条规定应对上述问题进行分析评价或预测。

8.3 勘察方法

8.3.1 近年来，国内相继兴建了南水北调中线总干渠等工程。这些工程规模巨大，原有规程规范相关要求已显得难以满足其勘察要求。基于此，本条第1款规定渠道水文地质测绘范围为渠道两侧各200~1500m，实际工作中可根据工程规模、水文地质条件复杂程度等影响因素合理确定测绘范围。

8.3.3 本条规定了渠道水文地质勘探工作布置的基本原则。一般情况下，渠道水文地质勘探应尽量结合工程地质勘探进行，充分利用工程地质勘探孔收集相关的水文地质资料。对水文地质问题比较突出的渠段，也可根据具体情况和工程需要布置专门的勘探工作。

8.3.4 渠坡或渠底分布有含水比较丰富的砂性土层、砾质土层时，渠道渗漏、开挖涌水等问题将比较突出。本条第3款要求尽可能对主要含（透）水层进行一定数量的现场抽水或注水、渗水

试验，目的在于合理确定主要含（透）水层的渗透系数，为渗漏、涌水问题评价提供相对可靠的计算参数。

8.4 主要水文地质问题评价

8.4.1 渠道渗漏条件主要取决于渠道周围地下水位及渠基岩土渗透性。其中渠基岩土渗透性对渠道渗漏的影响因素相对复杂，《水工设计手册》（水利电力出版社）中列出了不同成因类型的渠基岩土对渠道渗漏影响的定性分析结果，见表2。

表 2 渠道渗漏地质分析

地质区段		渠道渗漏地质分析
区	段	
松散堆积物地区	残积层地段	残积物呈土状、碎石状、碎石夹土状等，一般孔隙性较大，有一定的透水性。但也有的风化残积较为密实，透水性很小，例如湖南、湖北、四川、云南、贵州等地的红黏土即如此
	坡积层及坡麓地段	坡上部堆积物颗粒较粗，坡脚处颗粒较细，而粗颗粒区可能形成渗漏带及渗流不稳定区。对于倒石堆尤应注意，它往往构成强烈渗漏带
	洪积层及洪积扇地段	洪积物各部位颗粒成分与结构复杂，应根据具体勘探资料进行渗漏分析。一般洪积物外缘较中、后部颗粒细，透水性相对较弱，若不为溪沟切割，渠线经过外缘较为有利
	冲积层及冲积扇地段	冲积物的粒度、厚度变化，受所处部位、河流年龄（老年、壮年、青年、幼年）直接影响。例如：上游区粒粗，下游区粒细；厚度上游薄，下游厚。分选性也随水流变迁而变化。应视具体勘探资料进行渗漏评价。要注意对古河道的研究，它常是构成可能渗漏的通道
	冰碛及冰水堆积地段	底碛、终碛等冰碛物的含泥量一般较高，隔水性好；而冰水堆积物透水性较强，渠线应避免开
基岩地区		岩浆岩透水性一般较弱，沉积岩与变质岩渗漏条件较复杂。渗漏可能性主要决定于岩性和地质构造。可能的渗漏通道有：①断层及断层破碎带；②节理及节理密集带；③风化裂隙及风化裂隙带；④透水的砂岩、砂砾岩层；⑤可溶蚀的岩溶层；⑥层理、不整合面、假整合面、劈理及其组合；⑦火山岩的原生节理、气孔状构造连通带等。依据地质结构特征及地下水动态具体判断其渗漏可能性

本条第3款提出了渠道渗漏计算的原则规定。渠道渗漏一般包括侧向渗漏及渠底渗漏两部分，并可分为非稳定自由渗漏阶段、稳定自由渗漏阶段和顶托渗漏阶段三个渗流阶段。非稳定自由渗漏阶段、顶托渗漏阶段渠道渗漏计算条件复杂，实际工作中主要对稳定自由渗漏阶段的渠道渗漏量进行计算。

近年来，随着对水资源及环境问题的日益重视，对存在渗漏问题渠道，一般均采用全断面衬砌等措施进行防渗处理。

8.4.3 渠道周围地下水位高于渠底板情况下，开挖时将会产生涌水现象。本条规定了进行渠道开挖涌水量估算的原则，工作中宜根据具体情况采用不同计算方法相互验证，以便为施工降、排水方案设计提供客观依据。

9 灌区水文地质勘察

9.1 勘察目的与任务

9.1.1 灌区水文地质勘察包括灌区地下水资源勘察和灌区土壤改良水文地质勘察,根据任务需要可进行专项勘察亦可合并进行综合性勘察。灌区水文地质勘察深度对应于其他行业一般为:规划阶段、可行性研究阶段、初步设计阶段对应于普查阶段、详查阶段、勘探阶段。当灌区资料齐备,水文地质研究程度较高时,勘察阶段可合并进行。

9.2 勘察内容

9.2.1 气象包括气温、多年降水量、水面蒸发量等。水文包括:区内主要河流、湖泊等水系形态,多年平均径流量等。农田水利及水资源利用状况包括:耕地面积、作物种类及产量、土壤特征,水利工程类型、规模、蓄水与排水能力、实际引水量;水井类型、数量、提水设备及采水量;灌溉面积、灌溉定额、灌溉能力等。

9.2.3 灌区地下水资源勘察侧重于主要含水层水文地质条件,土壤改良水文地质勘察侧重于包气带和潜水水文地质条件。

9.2.4 计算地下水的补给量,应以多年均衡的观点,从地下水系统或水资源系统出发,计算评价地下水的补给量。同时,还应考虑在未来开采和灌溉条件下所能获得的增补量。与地表水联系比较密切或井、渠相结合的灌溉地区,应在水资源统一评价的前提下,计算地下水的补给量,并注意扣除重复水量。

储存量起着提供取水条件、汇集补给水资源、实现以丰补欠、稳定开采量的作用。因此,必须计算评价主要含水层系统的容积储存量和弹性储存量,以及储存量的可调节量。

可开采量即允许开采量,是一个地区在经济上合理、技术上

可行、环境条件允许的情况下，所能获得的最大补给资源量。对于环境条件，主要考虑以开采中不发生危害性环境地质问题为限制条件，一般以水位作为约束指标。

9.2.7 系统整理水盐动态的观测资料，编制地下水与土壤水盐的动态变化曲线和与气象、水文、灌溉等因素关系的综合图表及不同季节各动态要素（水位、水化学、土壤盐分等）的平面图与剖面图。分析水盐的动态规律，各动态要素之间以及它们与自然和人为因素之间的关系，确定水盐动态要素的特征值，如多年和年的平均值，最大、最小值，年与多年的变化幅度，各特征出现的时间与持续时间。

9.2.8 盐渍化土壤改良水文地质评价，应在查明地下水水位埋藏深度、土体含盐量（特别是根系层）及地形—地貌条件的基础上，根据工作区所处的水文地质类型，对盐渍化土壤形成原因、地下水临界深度、地下排水模数、盐渍化土壤对作物的危害程度及其发展预测等用出综合评价。在包气带岩性变化较大的地区，应根据观测、试验或调查结果，提出地下水临界深度系列值和地下排水模数。（地下排水模数是单位面积上，单位时间内需要排走的地下水量，包括年平均值和月最大值，单位为 $[\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$ ）。

9.2.9 根据盐渍化土壤改良水文地质评价结果和相应勘察阶段要求，有针对性地分区或分地段提出改良对策与措施。改良的主要目标是，把地下水水位控制在临界深度以下，使土壤逐渐向脱盐方向发展。同时，应注意把盐渍化土壤改良与咸水利用改造结合起来。经过分析研究，应对可能形成新的土壤盐渍化的地区，提出预防措施。对于土壤盐渍化已经得到基本治理的地区，也须防止反复。

9.3 勘察方法

9.3.7 咸水利用改造试验在水资源紧缺而有大面积浅层咸水分布的地区，可开展咸水利用与改造的试验研究，提出可行的途径

与方法。对矿化度大于 5g/L 的地区，应利用咸水直接对主要植物进行生长全过程与主要用水期的灌溉试验。应定期对试验地段的地下水水位与水质、土壤盐分与含水量，以及作物生长情况等监测。在以抽咸补淡为主要形式的咸水改造试验工作中，应根据水文地质条件和淡水水源条件，合理设计排咸补淡水利工程，做到“井、沟、渠”并用，“排、灌、蓄、滞”相结合。应按试验规程，对排咸补淡前后及其运行过程中的排水量、排咸量、补淡量进行定期监测。还应在试验地段设置一定数量的观测孔，对地下水水位、水质等进行监测。在咸水与深层淡水混合开采利用试验工作中，应在先完成室内多方案配比试验的基础上，进行野外的地面或地下混合开采利用试验。在地下混合开采时，应根据地层、含水量与水力特征，设计合理的水井结构，并且，应做到不使淡水含水层水质受到污染。咸水利用改造试验工作，一般应进行 3 年以上。

在盐渍化土壤大面积分布的平原地区，可根据其成因类型与水文地质类型，选择典型地段进行盐渍化土壤改良试验工作，以提供可行的改良措施。盐渍化土壤改良试验的技术要求：①应详细查明试验地段的潜水水文地质条件、土壤与包气带土化学特征，以及地下水临界深度；②根据地区条件，以调控地下水水位为中心，以使土壤加速脱盐为目标，选定合理的盐渍化土壤改良试验方案。一般，对于滨海型盐渍化土壤，宜采用冲洗盐分、水利工程与农业生物措施相结合的试验方案；对于内陆型盐渍化土壤，宜采用以水文地质与水利工程为主要措施的试验方案；对于内陆盐渍化土壤与浅层咸水分布一致的地区，宜采用同咸水利用改造相结合的试验方案。在试验地段应布置土壤水分、盐分、养分、物理性质及地下水动态监测工作，并应对农作物生长情况与产量进行监测与记录。试验时间一般不少于 3 年。

9.3.9 根据新疆地区的有关经验，遥感水文地质解释效果较好时，可减少 10%~20% 水文地质观察点；试坑占水文地质点的 35%~55%；土样组数，为试坑数的 1~2 倍，每组土样个数根

据土层情况而定；简易抽水为水文地质点的 25%~30%；长期观测点为水文地质点的 10%~20%；水质分析，简单区占水文地质点的 30%~40%，中等区占水文地质点的 50%~60%，复杂区占水文地质点的 80%~100%。专项分析占水质分析的 5%~10%，在地下水遭到污染的地区，应有 10%的水样满足地下水环境质量评价要求；钻孔数量包括深孔和浅孔，地下水资源勘察，深孔可考虑占钻孔数的 40%~60%，土壤改良水文地质勘察，深孔可考虑占钻孔数的 10%~20%；如果普查阶段采用 1:20 万比例尺，则勘察工作量按 1:10 万减少 50%~55%。

9.4 地下水资源评价

9.4.3 应在查明或初步查明地下物理性质和化学成分的基础上，结合农作物类型、灌溉方式及土壤特征，按照地下水矿化度、盐害、及地下水污染指标等综合因素，进行水质评价。农业供水对水质要求具有多样性，它不但可以利用淡水，也可以利用微咸水、半咸水、肥水和热水。水质不能应用的地下水，可以不进行地下水开采资源和储存资源的计算与评价。在水资源紧缺的干旱—半干旱地区，一般，地下水矿化度 2~3g/L 的咸水，可用于全过程灌溉，3~5g/L 的咸水，可用于抗旱保种。

9.5 土壤盐渍化评价

9.5.2 土壤盐渍化程度划分其核心是土壤含盐多少对作物的危害程度，不同作物其耐盐量不同，同一作物在不同地区，不同土壤，其耐盐量也会有差别。所以，本标准根据土壤含盐量、盐分性质及作物耐盐程度等综合因素，将土壤盐渍化程度按一般作物和耐盐性较强作物划分为两个标准，各地区在执行中还应结合本地区的经验和特点区别对待，当地有标准的可按当地标准执行。

10 堤防水文地质勘察

10.1 勘察目的与任务

堤防工程分为新建堤防和已建堤防加固两种类型。堤防水文地质勘察一般与堤防工程地质勘察合并进行，其主要目的是查明堤防工程区的水文地质条件，分析评价可能产生的渗漏、渗透变形、被河浸没等水文地质问题，为堤防设计提供水文地质资料及相应的工程处理建议。

10.2 勘察内容

堤防工程中的地质问题，基本都与水文地质情况有关，堤防水文地质勘察内容也与工程地质勘察内容相近。鉴于此，考虑到水文地质勘察特点，这 5 条强调了与水文地质密切相关的内容。近年来，环境水文地质问题日益引起人们的注意与重视，堤防工程中垂直截渗墙的设置，对堤内外地下水的渗流状态影响很大，可能引起一系列的环境水文地质问题，应进行必要的分析评价。

10.3 勘察方法

10.3.1 堤防工程水文地质测绘内容在《堤防工程地质勘察规程》(SL 188—2005)中有相应的详细规定，本条未再列出。

10.3.2 物探是堤防水文地质勘察的一种重要手段，主要配合地质工作解决地下水位埋深、流速、流向；含水（富水、透水）介质特征、堤防隐患分布等问题。常规的物探方法已日趋成熟，并在堤防勘察中发挥了重要作用；随着高新技术的发展和应用，一些新的技术方法在不断出现并在地质勘察中得到应用。由于物探结果的解释具有多解性，并与实际工作经验有密切的关系，往往需要地质工作者结合其他勘测手段综合分析判定，因此，规定堤防水文地质物探，应根据具体工程地质、水文地质条件与探测目

的，按附录 B 选择适当的探测方法。

此外，考虑到物探探测成果存在一定的精度误差，堤防水文地质物探宜在可行性研究阶段进行，与勘察阶段的精度要求相适应。

10.3.3 一般情况下，结合堤防工程地质勘探进行的水文地质勘探已可基本满足要求，故本条仅对水文地质勘探作了原则规定。对于水文地质条件复杂地区，工作中可根据实际情况对勘探点有针对性的加密。水文地质勘探的目的是查明工程场区的水文地质条件，为工程设计提供水文地质参数，因此，水文地质勘探主要应保证各项水文地质测试和试验的要求。

10.3.4 堤防水文地质试验的主要目的是取得较为接近实际的岩土渗透系数等参数。各类原位试验方法的适应性都与工程场区的地质环境密切相关，例如：对堤防工程中地下水位埋藏较深、渗透系数较小的黏性土，一般采用注水（或渗水）试验；对地下水位埋藏较浅、渗透系数较大的砂性土或碎石土，一般采用抽水试验等。因此，本条第 1 款强调应根据具体情况合理选择适宜的试验方法。

本条第 2 款规定主要透水层室内有效试验组数不少于 6 组，与 SL 188—2005 规程相一致；原位试验技术要求高、工序相对复杂，成本较大，难以大量进行，实际工作中可根据具体情况确定试验组数，但不宜少于 3 组。

11 边坡水文地质勘察

11.1 勘察目的与任务

边坡稳定问题是水利水电工程建设中最为常见的问题之一，而地下水和地表水的作用对边坡稳定性影响很大。统计结果表明，由于水的作用所引起的边坡变形破坏所占比例在 44.4%~66.7%。因此，在查明边坡地段的水文地质条件的基础上分析评价地下水对边坡稳定性的影响，对边坡工程的设计与施工处理意义重大。

11.2 勘察内容

11.2.1~11.2.3 这 3 条中所列内容，是查明边坡水文地质条件所需要开展的基本工作。其中，边坡岩土体渗透性及地下水位分布、变化情况应作为勘察工作的重点内容。

11.2.4 地下水对边坡的作用及影响主要表现在：

(1) 潜蚀作用。渗流过程中滑带的水力坡降超出临界坡降时，可产生潜蚀现象，导致滑带性状的进一步恶化。

(2) 饱水作用。地表水渗入岩体，地下水位升高，使边坡岩土体饱水后重量增加，增大了下滑力，导致边坡失稳。

(3) 软化作用。富含亲水性、膨胀性、崩解性矿物的软弱岩层，在地下水作用下容易软化、泥化，使滑动面抗剪强度明显降低，导致边坡失稳。

(4) 水压力作用。地下水位升高，增大边坡岩土体静水压力；地下水的渗透流动，将对坡体产生动水压力；滑带饱水后，沿滑移面产生孔隙水压力。上述水压力作用均会对边坡稳定产生不利影响。

11.2.5 降水入渗和泄水雨雾可在短时间内引起边坡体骤然饱和，造成边坡体内孔隙压力升高和材料抗剪强度的降低，从而导

致边坡整体失稳。因此，勘察工作中需对其予以应有的重视。对于边坡受降水入渗和泄水雨雾引起边坡体饱和所产生的孔隙水压力，美国一些工程采用水面达地表的静水压力分布，我国一些边坡工程则常将静水压力乘以一定的折减系数后用于边坡设计，如漫湾水电站选用折减系数 0.4，三峡工程曾采用折减系数 0.3。需要注意的是，除降雨和泄水雨雾外，还可能发生其他情况造成边坡体的骤然饱和。例如，在边坡体上或其附近钻探时，钻探用水和压水试验等也会引起边坡地下水位的升高。我国某大型工程泄水建筑物进口高边坡埋设安全检测仪器钻孔时，曾发现由于钻孔水压力引起边坡不正常变形。由于发现及时，调整了钻孔工艺才避免出现事故。

11.3 勘察方法

11.3.1 边坡水文地质勘察一般与工程地质勘察一并进行，绝大多数情况下，测绘精度与工程地质勘察精度一致已能满足要求。

11.3.3 边坡水文地质勘探的目的是查明边坡地段的水文地质结构，满足必要的水文地质测试、试验及监测的要求。勘探手段的选择往往与工程地质勘探结合进行，勘探点应仔细设计，并尽量遵循一点多用的原则。

11.3.4 不同类型的边坡，其岩土体完整程度及渗透性变化较大，故本条第 1 款强调应视边坡具体情况采用相应适宜的水力试验方法测定边坡岩土体的渗透性。

边坡工程场区的水质一般对边坡稳定性影响很小。若需要评价水质对边坡混凝土工程的腐蚀性时，可取样进行水化学分析。

11.3.5 进行边坡水文地质观测的目的在于掌握边坡体中地下水的实时动态，分析预测其对边坡稳定性的影响变化情况，确保边坡安全。实际工作中，前期勘察阶段一般只针对有变形迹象的大型水库滑坡体以及特别重要的工程边坡开展必要的水文地质观测工作，施工、运行期间则多结合边坡原位监测系统的布设进行系统的水文地质观测。水文地质观测的内容主要包括地下水位、孔

隙水压力、渗透压力等，其中水位观测是用于了解边坡体中地下水变化，孔隙水压力观测用于了解滑移面附近及土质边坡体中孔隙水压力消长情况，特别是暴雨、库水骤降时的孔隙水压力状态，渗透压力观测则主要用于边坡加固处理部位的水压力监测，了解边坡挡土墙等支挡结构处水压力的变化。

12 岩溶区水文地质勘察

12.1 勘察目的与任务

岩溶区水文地质勘察目的与任务虽然与非岩溶区是一致的,但由于岩溶区存在和发育各种岩溶现象,其水文地质条件常常十分复杂。对水利水电工程而言,岩溶水文地质问题往往成为影响工程设计和建设的关键问题,岩溶区水文地质勘察工作范围及工作量也往往要远大于非岩溶区。

12.2 勘察内容

12.2.1 进行岩溶区地形地貌调查研究的目的在于判断是否存在岩溶渗漏的条件和研究可溶岩岩体中不同高程岩溶发育状况。

12.2.2 新构造运动是控制岩溶发育的重要因素之一。第四纪以来,地壳上升幅度小、速度慢的岩溶区的桂中、桂东北准平原区(中国岩溶最发育的地区),河流切割浅,河谷宽平,阶地发育,岸坡多岩溶泉出露,暗河成网,埋藏浅,坡降缓,建库往往存在比较突出的岩溶渗漏问题,工作中应予以重视。同样,断裂与褶皱的性质以及空间展布情况亦与岩溶发育密切相关。工作中,对断裂的勘察工作应侧重于其对渗漏的影响方面,如可溶岩与隔水层是否被其错断,特别应注意有无构造切口存在。

12.2.3 查明岩溶发育规律及岩溶化程度,主要目的有两个:一是分析岩溶渗漏条件;二是判断厚度较大的碳酸盐岩中是否存在可溶性较低、岩溶化程度差、可作为防渗依托的层位。岩溶化程度调查的重点,是查明工程区内是否存在贯穿性和规模较大的洞穴和管道。岩溶化岩组类型划分则旨在对不同岩层单元作出岩溶发育情况评价。

12.2.4 本条中相对隔水层的可靠性及封闭条件判定原则为:

- (1) 相对隔水层应具备弱—微透水性。

(2) 相对隔水层分布应连续, 不因断层错动或岩相变化 (相变为强透水的岩溶层组) 形成渗漏缺口。

(3) 具有足够的抵抗渗透变形能力。

11.2.6 岩溶水补给源主要有两种。一是大气降水入渗补给, 即降水通过溶隙、落水洞、漏斗等补给岩溶地下水。岩溶区降水入渗系数 (α), 一般在 0.1~0.35 之间; 岩溶化程度较高者可达 0.5~0.6, 局部岩溶化强烈发育地段可达 0.78~0.8。二是地表河流补给, 即在补排型和排泄型河谷中, 地表水直接通过岩溶系统补给地下水。岩溶水补给方式也主要有两种: 一是集中补给, 即地表水通过消水洞或较大溶隙直接补给地下水; 二是分散补给, 即大气降水或地表水通过溶隙、溶孔等分散补给地下水。

11.2.7 河谷岩溶水文地质结构系指可溶岩、非可溶岩 (隔水层或隔水层) 的空间分布及其与河流的组合关系。划分河谷岩溶水文地质结构对判断坝址和库首地段岩溶渗漏问题及其防渗处理条件意义重大。工程实践经验表明, 坝址布置在岩溶区有隔水层的横向河谷段或较为适宜的斜向谷段, 才可能从地质结构上保证不出现复杂的岩溶渗漏问题, 坝址也具有防渗处理的依托。

11.2.8 岩溶地下水位的动态变化的影响要素为大气降水、地表水系及地下水的补给、径流、排泄条件以及岩溶发育强度对透水性的控制等。通过对岩溶地下水位动态要素的分析, 可以反演岩溶的发育强度及透水介质特性。这是岩溶区水文地质勘察一项常用且非常重要的内容。

12.3 勘察方法

12.3.2 本条对物探方法在岩溶区的应用提出了原则规定。

根据经验, 库区大面积使用物探方法进行水文地质调查时, 宜首先使用可控音频大地电磁测深法 (CSAMT)、天然源大地电磁法 (MT)、天然源声频大地电磁法 (AMT) 为主的地面大地电磁法及电阻率法了解岩溶分布, 对其剖面上的异常点再使用激发极化法进行岩溶充填性质判别。坝区地形条件较好 (平缓、

开阔)时,可选择高密度电法、瞬变电磁法、地震、地质雷达,一般情况下可借助勘探孔(硐)进行层析成像法、孔中雷达及综合测井工作。

测线布置应垂直岩溶走向,并尽量与勘探线或有已知资料的地段重合,以利于综合分析解释推断。测网密度主要是根据任务要求和洞穴大小、埋深等因素综合研究决定。层析成像法钻孔间距不宜大于 50m,不应大于 80m。

覆盖层较薄及地形平缓地带,使用地面方法探测岩溶顶板埋深的精度,应不低于 80%,且对底板深度及形态基本无反应。应用 CT 法探测孔(硐)间岩溶洞穴时,对其空间位置应进行定量解释,但对其空间形态,可定性解释。当钻孔间距小于 80m 时,确定直径 2m 以上的岩溶洞穴的有效率应不低于 80%。

12.3.3 本条规定了岩溶区水文地质勘探剖面线和勘探点布置的基本原则。河间地块、河弯地带勘探剖面上钻孔间距 50~200m 主要是据贵州等地的经验提出的,工作中可根据具体情况予以适当调整。

采用平硐开挖揭露和追索岩溶洞穴是一种岩溶区特用的勘探方法,且经多年工程实践证明确实行之有效。如清江隔河岩电站坝址、东风水库右岸 K18 溶洞、贵州木浪水库右岸帷幕等,均通过此法取得了比较理想的勘探效果。

12.3.4 本条列出了常用的五种水文地质试验方法。其中压(注)水试验最为常用,同时对岩溶段投放示踪剂后进行压水或注水,对于判断岩溶管道的发育方向及实际流速是很简单实用的。

抽水试验设备复杂、费用也高,因此只布置在代表性地段,可充分利用天然岩溶水点作为观测点。根据抽水试验结果绘制试验区降深等水位线图对于分析判断地下水分布形状、流向、地下水洼槽部位、岩溶发育的差异性很有意义。

示踪试验是岩溶区水文地质试验不可缺少的手段之一。它具有试验条件简单、易于操作、效果较好和实用性强的特点,对于

判定岩溶管道发育方向,管道水实际流速、岩溶洞穴规模及形态,确定地下分水岭等效果较好。

堵洞抬水试验系采用“以水找洞”的原理,对在岩溶管道(洞穴)发育的坝址河段判断并查明岩溶管道的发育主方向、位置及其与支管道水力联系等效果较好。如乌江彭水坝址左岸对野猫洞进行封堵,利用汛期来水,使洞内水位比原来抬高了38.2m,比枯水季河水位高54m,经观测壅高后的地下水经D9孔向下游W2岩溶系统渗漏,从而查明了D9~W2岩溶系统与野猫洞主管道的关系。贵州东风水电站坝址为查明鱼洞管道系统与凉风洞地下河之间关系,对鱼洞进行封堵后,发现其上层虾洞岩溶管道出水,同时在堵体下游冲出3个漏水口,进而发现其中3号漏水通道内出现一个消水洞。而原关心的下游凉风洞地下河流量并无变化,从而判明两暗河存在分水岭且888.58m高程以下无岩溶管道发育,为防渗线路选择提供了有力的论据。

破坏性压水试验可用于确定坝基以下隐伏型充填岩溶洞穴、宽缝等。如湖南三江口水库在这方面取得了良好效果。其 $P-Q$ 曲线见图3、图4。

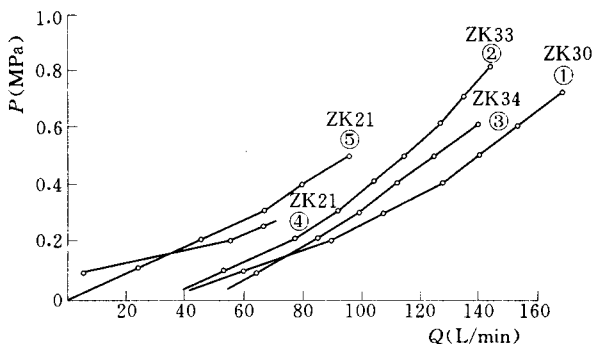


图3 三江口坝基浅部溶洞段 $P-Q$ 关系曲线

12.3.5 岩溶地下水动态观测是勘察工作中的一项重要内容,对于分析判断岩溶水文地质条件、岩溶发育强度及相对隔水

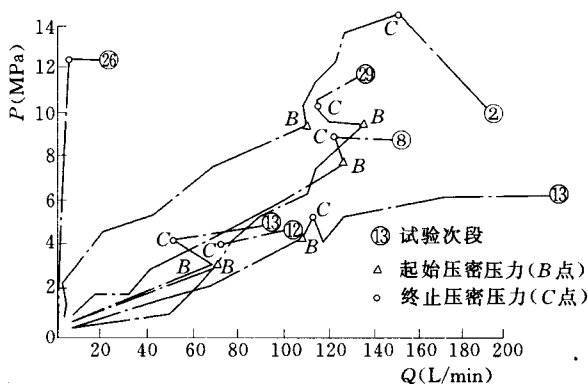


图 4 三江口坝基部分溶洞破坏性压水试验 $P-Q$ 关系曲线

层的可靠性、渗漏带位置、范围、类型均具有重要的意义。目前广泛使用的岩溶水文地质分析方法，如地下水位动态分析法、渗流场、化学场、地温场研究等都是岩溶地下水动态观测成果为主要基础的。《水利水电工程地质观测规程》(SL 245—1999)对地下水观测部分作了较详细的规定，基本上符合岩溶区的要求，可按其规定执行。

12.4 岩溶渗漏问题评价

12.4.1 本条规定了进行岩溶区渗漏问题评价应遵循的一般工作原则。

12.4.3 岩溶渗漏问题影响因素众多，渗漏条件十分复杂，分析评价也较困难。但总体上看，岩溶渗漏条件主要受地形地貌条件、地质构造条件、岩溶水动力条件及岩溶化程度条件控制。

实际工作中，应首先从地形地貌上分析有无低于库水位的邻谷或河湾，如有则可能出现渗漏，若邻谷河水位（非悬托河）高于库水位，则不存在水库渗漏。对坝址而言，坝址位于峰林山原或丘峰平原浅切河谷中，易发生绕坝渗漏，随蓄水位的抬升，渗漏范围迅速扩大，而坝基渗漏深度一般较浅；峰丛山地深切峡谷

建坝，一般绕坝渗漏范围小，坝基渗漏较深；峰林山原向峰丛峡谷过渡的河段，特别是在河流裂点上、暗河或伏流段建坝，易出现复杂的岩溶渗漏。

其次是分析有无可靠的隔水层或相对隔水层形成连续的封闭阻隔。如果不存在连续分布且封闭条件良好的隔水层或相对隔水层（可溶岩直接沟通库内外，或构造切割使库内外可溶岩组成有水力联系的统一岩溶含水系统），则可能出现渗漏。此种情况下，需进一步结合岩溶水动力条件、分水岭地下水位高低进行判断。

对水库而言，河间或河湾地块为一个岩溶含水系统时，若河间地块两侧或河湾地块上、下游存在可靠的岩溶泉，表明地块存在地下分水岭；如地下分水岭高于库水位，则不会发生渗漏；若地下水低于库水位，渗漏情况将取决于岩溶化程度。另一方面，若库内不存在可靠的岩溶泉，而受下游或远方排泄基准面控制仅在库外出现岩溶泉，则表明河谷水动力类型为河水补给地下水，将发生水库渗漏，且多为严重渗漏。对坝址而言，坝基位于一个岩溶含水系统上时，若两岸存在可靠的岩溶泉，表明河谷水动力类型为补给型，不会出现比较严重的渗漏问题；反之，若两岸或一岸不存在可靠的岩溶泉，表明河谷水动力类型可能为排泄型或悬托型，在其上建坝将发生渗漏，且渗漏可能严重、复杂。

岩溶化程度（岩溶洞穴的有无、岩溶的发育规律和贯通性）是控制岩溶渗漏的关键条件。即使存在低于库水位的地下水分水岭或地下水洼槽，如果没有贯通库内外或坝上下游的岩溶管道存在，也不会产生严重渗漏，甚至不会发生渗漏，猫跳河六级水电站、普定水电站等工程的实践均证明了这一点。究其原因，或是岩溶不发育，或是虽存在岩溶管道但尚未沟通库内外。可见，地下水位低或地下水洼槽的存在并非发生岩溶渗漏的充分条件，岩溶化程度及其连通条件才是决定渗漏状况的关键因素。

12.4.4 本条对岩溶渗漏计算提出了原则要求。由于岩溶渗漏问题非常复杂，渗漏量计算影响因素众多，渗透系数及渗漏量计算理论与方法均不成熟，目前仍只能根据具体情况进行粗略估算，

有时可能产生相当大的误差。因此，尚需结合宏观分析（特别是对是否存在管道式集中渗漏的分析）判断渗漏计算的可靠性。

在水利水电工程岩溶水文地质勘察和渗漏评价工作实践中，先后出现了许多理论分析和渗漏计算方法。各种理论和计算方法均有着各自的适用条件和特点，工作中一般应采用不同方法进行相互验证。

对于溶隙型渗漏，多按层流考虑，渗漏量计算公式可按附录C有关规定选取。

对于岩溶管道渗水量的计算，谢树庸等曾结合工程实例作了有益的探讨，提出可按水力学中的管道流公式进行计算：

$$Q = AV \quad (4)$$

$$V = HU_i \quad (5)$$

$$U_i = L/t\Delta H \quad (6)$$

式中 A ——管道断面 (m^2)，可利用溶洞详测资料、钻孔资料等确定；

V ——实际流速 (m/s)；

H ——蓄水水头 (m)；

U_i ——由连通（示踪）试验获得的比流速；

L ——连通试验投放点与连通点的间距 (m)；

t ——连通时间 (s)；

ΔH ——投放点与连通点之间的水头差 (m)。

13 水文地质勘察资料整理

13.1 目的与任务

13.1.1 本条说明了水文地质勘察资料整理的目的与任务。

13.1.2 一般情况下,水文地质勘察成果可作为工程地质勘察成果的一部分内容纳入工程地质勘察报告。但针对水文地质条件复杂地区或专门性水文地质问题而进行的水文地质勘察,也可以单独编写专题勘察报告。如水库浸没问题专题勘察报告、灌区水文地质勘察报告、库区(坝址区)岩溶水文地质专题勘察报告、隧洞严重涌水地段水文地质专题勘察报告等。

13.2 水文地质图件

13.2.1 表 13.2.1 列出了几种常用的主要水文地质图件,其中专门性水文地质图主要用于反映各类专门性的或特殊的水文地质现象及其影响因素,灌区地下水开采分区图及灌区土壤盐渍化程度分布图则为灌区专门性水文地质图件。实际工作中,也可根据需要单独编制其他一些水文地质图件,如水文地质分区图、地下水位等值线图、地下水矿化度等值线图等,或将有关内容反映在综合水文地质图中。

13.2.2 综合水文地质图是采用不同的花纹、线条、符号及颜色反映若干重要水文地质要素以及影响这些水文地质要素的其他因素(如水文、地形、地层、构造等)的图件。可用它来综合分析各水文地质要素之间的内在联系,以及其他因素对水文地质条件的影响程度。编制此图时,应遵守以下原则:

(1) 综合水文地质图一般应在具有相同比例尺地质图的基础上编制,这是因为水文地质条件与其基本地质条件是相互依存的,一个地区地下水的形成与循环条件与该区的地质结构密切相关。因此水文地质编图应在地质图的基础上进行,如无上述图件

则应先行地质测绘编制地质图，或同时进行地质—水文地质测绘；

(2) 为了不致使图面层次太多，避免过多的线条或符号，并便于分析水文地质条件与其他地质因素的内在联系，可在对地质图概化的基础上编制综合水文地质图，以便突出反映某些水文地质要素。如地层系统可适当简化；地质构造在断裂较多的地区应合理选择，区别充水与不充水的断裂等。

10 本款强调了岩溶地区综合水文地质图应重点反映的内容，以便于分析岩溶的发育范围和延伸方向，了解岩溶的发育规律。

13.2.3 渗透剖面图是反映建筑物地基岩土渗透性能及相对隔水层埋藏深度等水文地质要素的图件。它是研究建筑物地基水文地质条件、计算坝基及绕坝渗漏量、评价地基渗透稳定性、设计防排水减压等地基处理方案所必需的一项重要图件。渗透剖面图实际上主要反映两方面的内容，一是渗透边界，二是计算参数，为使其计算评价成果尽量接近实际，关键问题是渗透边界和计算参数的正确认定。只有明确边界条件，才能选出适宜的计算公式或试验研究方法。只有根据正确的参数，才能获得较确切的计算结果。

5 本款要求在渗透剖面图中反映岩土渗透性分级界线，其目的是为防渗帷幕设计提供依据。

8 本款中规定对软弱夹层应扩大比例尺标出，主要原因是：软弱层带有时虽透水性微弱，但在长期高压渗透水流的作用下可能促使其恶化，从而形成潜蚀、溶蚀、软化等，因此为研究、评价其可能发展趋势，图中宜用醒目扩大标示以便与同级渗透带区分开来。

9 本款中对实测与推测的分带界线要求严格地加以区分，这是反映一个地区勘察工作精度的需要，岩土透水性的类比与推测应慎重，只有在比较均质和各向近似同性的地层中推测才具有较高的可信度。

13.2.4 原则上,水文地质剖面图的水平比例尺宜与图面相同,垂直比例尺可适当放大,但应尽可能避免造成地形或岩层的显著变形。

1 本款规定了水文地质剖面的布置原则,其目的在于使水文地质剖面图能够充分反映工作区水文地质特征。剖面应尽量贯穿工作区,必要时也可布置具有典型意义的局部剖面。

2 本款规定了水文地质剖面图所应反映的内容。

13.3 水质分析资料

13.3.1 本条阐明了水质分析资料整理的主要工作内容,明确了进行水质分析资料整理及水质评价的原则。

13.3.2 本条规定了水质评价指标的取值原则。当含水层地下水的水化学类型变化大时,简单的取平均值可能导致评价结果出现偏差。

13.4 水文地质勘察报告

13.4.1 一般情况下,对库区、坝(闸)址区、地下洞室区、渠道、堤防、边坡等对象进行的水文地质勘察不需要提供单独的勘察报告,而是将相应内容纳入工程地质勘察报告中。此类情况下,水文地质勘察报告内容不要求面面俱到,而主要应针对不同勘察对象,阐明其水文地质条件,分析评价其存在的主要水文地质问题。实际工作中,可在本条有关规定的基础上,根据工程具体情况对相应报告内容作适当调整。

13.4.2 本条对灌区水文地质勘察报告的内容作了一般性规定,实际工作中,亦可根据具体情况对报告内容作相应的增加或简化。

13.4.3 专门性水文地质问题类型多样,且工程型式、规模也会有很大差异,很难对专门性水文地质问题勘察报告的格式、内容作出统一规定。鉴于此,本条仅对专门性水文地质问题勘察报告应包括的主要内容作了一般性规定。

附录 B 水文地质勘察中物探方法的应用

B.0.1 表 F.0.1 列出了探测不同的水文地质问题时可供选择的物探方法。

不同的物探方法探测同一问题效果往往有较大差异,故物探方法的选择有主要方法和配合方法之分。此外,表列方法及问题均为一般性的,遇到特殊问题应与物探专业人员共同研究确定合适的物探方法。

B.0.2 在第四层系地层中划分含水层和隔水层,指的是层状的透水地层,由于它们之间在电阻率、地层波速、波阻抗上一般具有比较明确的差异,所以可采用电测深法和地震勘探法勘测。但当含水层与隔水层的厚度与其埋藏深度相比为较薄时,这些地面物探方法有时不能见效,而要依靠或配合钻孔综合测井方法来解决。探测第四系松散地层中或基岩裂隙中是否赋存地下水,主要采用激发极化法,特别是在山区和地形切割严重地区,激发极化法找水显示了明显的优越性。

对于岩溶地区探测地下水位及表层岩溶溶蚀带,可采用电阻率法(电测深、电剖面、高密度电法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法),地震法(浅层折射波法、浅层反射波法、瑞雷波法)。在岩溶地区对地下水流向流速的测量基本与钻孔中水文物探工作相同,采用方法为充电法、自然电场法、同位素示踪法。对于岩溶溶洞的探测,应用各种物探方法探测均有一定的局限性,尤其是利用地面物探方法时,受各种干扰因素较多,如地形起伏的变化,覆盖层的厚薄,溶洞体积的大小及其埋藏的深浅等。当地形平缓、溶洞埋藏较浅时,采用地面电法、地震法探测,有时能发现较大的(直径 2m 以上)的溶洞,如在地面采用地震反射法探测,由于溶洞与围岩之间存在明显的波阻抗差异,在溶洞顶部通常可形成反射区,可以接收到溶洞顶部的反射波,

但在溶洞两侧追踪不到相应的反射波，也接收不到溶洞底部的反射波。

近 20 年来国内外均有不少采用地质雷达对溶洞进行探测的实例。1985 年日本 OYO 公司应用 YL—R2 型地质雷达在东风水电站进行溶洞的探测试验，1986 年应用美国 SIR—8 型地质雷达在鲁布革水电站进行岩溶与裂隙的探测，1988 年黄委会应用 SIR—8 型地质雷达在天生桥二级水电站进行岩溶探测，1990 年中国地质大学用 EKKO—IV 型地质雷达在天生桥水电站进行岩溶探测，探测结果表明，在地面采用地质雷达对深埋岩溶溶洞的探测效果都不很理想，但在地下洞室探测灰岩洞壁 20m 范围内的溶洞是有效的，对洞室掘进超前预报也可以发挥很好的作用。

对于水利水电工程来说，在岩溶地区需要探测坝址与厂房等重要建筑物基础以及库区岩溶洞穴的分布。当具备可测钻孔条件时，应充分利用孔间穿透的物探测试方法和电磁波、声波及地震波层析成像法（CT 技术），如乌江思林水电站为查明水工建筑物与地下厂房所在位置的岩溶发育情况，选择了以电磁波层析成像法为主的物探新技术，辅以地质雷达，综合测井方法，在地质与钻探的指导与配合下，取得了良好的地质效果，并节约了钻探工作量 2000 多 m。该项目被列为“国家八五科技攻关项目”——“岩溶勘测新技术”，后经鉴定认为在岩溶勘测应用方面达到国际先进水平。

测定水文地质参数和地下水运动情况，主要是在钻孔中进行物探测井工作，因此要视钻孔情况和任务需要而采用不同的测井方法。例如电测井和声测井只能在无套管、有井液的孔段进行，通过井液耦合直接作用于井壁层，若没有井液，电测井和声波测井将无法进行，当钻孔中有套管时，由于金属套管的高屏蔽而失去了探测的功效。放射性测井中的自然伽玛测井是根据岩层本身放射伽玛射线的强度，密度测井（或称伽玛测井）则是利用岩层对人工伽玛射线的散射作用，由于伽玛射线的穿透能力很强，可以穿透金属套管，井液与套管对它不起限制作用，这是放射性方

法的独特优点，因此无论钻孔有无套管及井液均可进行。钻孔电视不是通过测量地层的物理性质来进行探测，而是用工业电视技术直接对孔壁进行观察的一种方法，所以只能在无套管的干孔或清水钻孔中进行。在钻孔或水井内，采用充电法求地下水流速、流向，一般利用等位线平面图向量合成法，盐化后由井孔中心到等位圈移动距离最大的连线方向定流向，并计算流速。也可采用自然电场法，以测点为中心（井、孔）作自然电场的观测，即测量不同方位的过滤电场，则电位差最大的正电位方向为该测点地下水流向，流速的计算均为：

$$V = \Delta R / \Delta t$$

式中 ΔR ——地下水流向上等位圈或正电位方向上的位移；

Δt ——两次等位圈观察的时间间隔。

用同位素流速仪可在单个钻孔中测定地下水流向和渗透速度，用同位素示踪法则要在有比较集中的几个钻孔的地方才能进行，从地下水的上游位钻孔投放同位素溶液，在下游位钻孔观察同位素溶液出现的时间，以确定地下水的流速与流向。但孔距的选择应考虑所采用同位素的半衰期和地下水的流速大小，如果同位素半衰期短（如 I_{131} ），流速又慢，则孔距应愈小，否则有可能观测不到同位素到达下游钻孔的准确时间。

附录 D 水文地质分析中渗透系数取值原则

D.0.1 渗透性是岩（土）的一种主要的水力性质，其大小常用渗透系数值定量表示。岩（土）的渗透系数可通过室内试验和现场试验测定，它具有速度单位，常用“米/日（m/d）”或“厘米/秒（cm/s）”表示。

在水利水电工程设计过程中，渗透系数是评价水库（渠道）渗漏、库（坝）区浸没、地下洞室涌水、水工建筑物及其地基渗透稳定，以及进行基坑施工降排水设计，评价地下水对边坡稳定性影响的主要水文地质参数之一。

本条中岩（土）的空间分布特征主要指组成物质在水平方向上和垂直方向上的均一性，即指均质的还是非均质的；渗透方向性是指岩（土）的渗透性和水流方向的关系，可分为各向同性和各向异性两种类型。

D.0.2 受多方面因素的综合影响，往往由于采取的试样不能完全代表取样地点的实际地质条件而使室内试验结果和现场试验结果存在差异，有时差异性还较大，相比而言现场试验成果则较好地反映了试验地点的地质背景，故规定“渗透系数取值宜采用现场试验成果值”。

利用压水试验资料计算渗透系数的公式都是在均质各向同性的松散介质条件下推导出来的，用于裂隙岩体只能是近似的，而且当试段透水率较大时，因未计入进口压力损失，用公式计算渗透系数误差较大，不宜采用。一般认为由压水试验求得的渗透系数值是粗略的只能供参考。与之相比，对岩性变化大的松散含水层和构造发育的基岩裂隙含水岩体而进行的多孔抽水试验成果则能较好地反映试验地段的渗透性和各向异性特征，故应“优先采用现场抽水试验成果值”。

实践证明，在某些工程的基坑开挖过程中，根据实测的最大

排水量反求的渗透系数，与通过多孔抽水试验所确定的渗透系数相比其相对误差大多数为 5%~10% 左右。

D. 0. 3 自然界中地下水在非均质岩（土）层中的运动是很普遍的现象，当地下水流向与层状岩（土）层的层面平行时，整个层状岩（土）层的平均渗透系数为：

$$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n k_i m_i}{m} \quad (1)$$

式中 k_m ——岩（土）层的平均渗透系数（m/d）；

k_i ——第 i 层的渗透系数（m/d）；

m_i ——第 i 层层厚（m）；

m ——岩（土）层总厚（m）；

n ——岩（土）层层数。

当地下水流向与层状岩（土）层的层面相垂直时，整个层状岩（土）层的平均渗透系数为：

$$k'_m = \frac{m}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{k_i}} \quad (2)$$

式中 符号意义同公式（1）。

本条一是与《水利水电工程钻孔压水试验规程》（SL 31—2003）附录 C 的规定相一致；二是考虑到坝（闸）基中地下水的渗流多数情况下沿风化带或地层岩性在垂直方向上表现出较大的差异性，类似地下水在水平层状岩（土）层中的运动，故对同一层（带）的等效平均渗透系数取其加权平均值。

D. 0. 5 在均质各向异性含水层中，含水层的渗透性能随方向而改变。一些野外的实际资料表明，不同方向上的渗透系数可相差几倍甚至几十倍。以平面二维流为例，方向渗透系数 k 。满足关系式（3）：

$$k_\theta = \frac{k_{xx} k_{yy}}{k_{xx} \sin^2 \theta + k_{yy} \cos^2 \theta} \quad (3)$$

式中 θ ——为渗透方向与渗透的主方向 OX 的交角（°）；

k_θ —— θ 方向的渗透系数 (m/d);

k_{xx} 、 k_{yy} ——主渗透系数 (m/d)。

在均质各向同性介质中流线与最大水力梯度方向 (等水头线的法向) 是重合一致的, 即流线与等水头线正交的。而在均质各向异性介质中任一点的流线相对于等水头线的法向要产生偏转, 流线与等水头线并不正交, 且偏向主渗透系数大的主方向。偏转角 α 满足关系式:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{k_{xx} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_{yy} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2} \sqrt{k_{xx}^2 \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_{yy}^2 \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2}} \quad (4)$$

因此, 本条规定 “对于各向异性的岩 (土) 体, 渗透系数的取值宜考虑水利水电工程运行后岩 (土) 体中地下水的渗流方向”。

D.0.6 有时在规划、项目建议书等阶段关于渗透系数的资料较少, 即使有一些也缺乏代表性, 因此原则上可根据经验值取值。表 D.0.6 是在收集了《供水水文地质手册》、《工程地质手册》、《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—99)、《土工原理与计算》、《渗流数值计算与程序应用》、《水利水电工程地质手册》。世界银行节水灌溉项目专题研究报告 10 余份资料的基础上, 结合一些勘察报告而制定的。

按照《土的分类标准》(GB 3145—90) 的规定, 砾类土、砂类土和细粒土应分别按砾粒组。粗粒组和细粒组的含量分类, 而细粒土还应根据塑性图分类。但自原水利电力部于 1962 年颁发《土工试验操作规程》以来, 在水利系统对上述三类土一直采用三角坐标图分类 (即按粒组含量的分类方法)。在确定表 D.0.6 中的土类名称时, 一方面考虑塑性图分类法不能完全取代三角坐标图分类, 特别是塑性指数小于 7 的砂性土, 是一种较易振动液化和渗流失稳的 “危险性土”, 其黏粒含量稍有变化, 对其抗振动液化和渗透稳定性都会产生不同的影响, 这在塑性图上是反映不出来的; 另一方面三角坐标图分类法早已广泛用于水利

工程界，而塑性图分类法尚未得到广泛应用。因此决定本条细粒土的定名仍采用按黏粒含量的分类方法，利用塑性图分类法确定的黏性土的渗透系数可参照表 1 对照使用。

表 1 细粒土分类名称对照

《土工试验操作规程》 (1962) 三角坐标图分类	《土工试验规程》 SD 128—84 塑性土分类	《土的分类标准》 GBJ 145—90 塑性土分类
砂壤土，粉质砂壤土， 轻、中壤土	低液限黏质土	CL—低液限黏土
粉质壤土，重壤土	中液限黏质土	
黏土，重黏土	高液限黏质土	CH—高液限黏土
	低液限粉质土	ML—低液限粉土
砂质黏土，粉质黏土	中液限粉质土	
粉质黏土，砂质黏土	高液限粉质土	MH—高液限粉土
有机质土	低、中塑性粉质土	CLO—低液限有机质黏土
		MLO—低液限有机质粉土
	中、高塑性粉质土	CHO—高液限有机质黏土
		MHO—高液限有机质粉土

附录 E 岩土体渗透结构类型划分

本附录是在参考谷德振先生提出的水文地质结构类型划分及孙广忠先生提出的岩体水力学结构类型划分意见，并总结三峡、小浪底、溪洛渡等水利水电工程水文地质勘察研究成果的基础上制定的。

E.0.1 强调查明透（含）水层（体）和相对隔水层（体）的空间分布及组合规律是正确划分岩土体渗透结构类型的前提。

E.0.2 提出了岩土体渗透结构类型划分意见及各类渗透结构所具有的典型渗透特征。工程区的岩土体渗透结构类型往往不是单一的，而是多种渗透结构类型的叠加，实际工作中应予以注意。如小浪底坝址区二叠系、三叠系砂泥岩渗透结构类型主要表现为层状及带状，三峡坝址区闪云斜长花岗岩渗透结构类型主要表现为散体状、网络状及带状。此外，层状渗透结构中的透水岩层，局部而言亦多具有网络状渗透结构的渗透特征。

附录 F 钻孔高压压水试验

F.0.1 多年来,我国水利水电工程地质勘察工作中普遍采用常规压水试验方法测定岩体的透水率。常规压水试验一般采用三级压力、五个压力阶段,三级压力中最大压力为 1.0MPa,其试验结果往往只能反映岩体在较低压力下的透水性,而难以反映岩体在高压状态下的渗透特性。

工程实践和试验研究两方面的大量事实均表明,坝基基岩和地下隧洞围岩在高压水头作用下的渗透特性与低压水头条件下有明显不同,这主要是由于在数百米甚至上千米水头的高水压作用下,岩体中的微裂隙、节理等软弱结构面有可能张开或扩展,岩石亦可能发生水力劈裂,从而改变岩体原始状态的渗透特性。为满足引水式高水头电站、抽水蓄能电站以及高坝工程建设的需要,有必要通过高压压水试验测定高水头压力作用下工程部位岩体的渗透特性。

钻孔高压压水试验是一种用以测定岩体在高水头作用下的渗透性、渗透稳定性及结构面张开压力的现场压力试验,其最高试验压力高于常规压水试验压力,一般不宜小于建筑物工作水头的 1.2 倍。20 世纪 90 年代以来,钻孔高压压水试验在我国大型水利水电工程地质勘察中逐步得到越来越广泛的重视和应用。本附录即是在总结浙江天荒坪、北京板桥峪、广州等抽水蓄能电站以及锦屏二级水电站、黄河古贤水利枢纽等高坝坝基高压压水试验成果资料的基础上制订的。

F.0.2 本条提出了需要进行高压压水试验的几种工程条件,内容与 GB 50287—99 的相关规定基本一致。考虑到高压压水试验无论是试验设备还是试验方法、要求都有别于常规压水试验,实施难度较大,且目前试验设备、试验方法本身均不甚成熟,故本条未做严格要求。

F.0.3 目前,国外较多采用带观测孔的高压压水试验,国内工程多采用单孔高压压水试验。两者比较而言各有利弊,前者成本较高,获取资料较多,精度较高;后者成本低,可满足一般需要。

在深埋洞室地段,钻孔技术难度大,成本高,钻孔越深,不确定因素就越多,试验难度就越大,如能与地质探洞结合,在探洞内钻孔试验可有效的减小孔深,降低成本。

F.0.4

1 目前国内的钻孔高压压水试验一般均采用双栓塞封隔试验段,双栓塞试验具有以下优点:

- 1) 可以根据孔内实际情况和工程所在的部位选定栓塞放置部位和试验长度,试验成果较具有代表性;
- 2) 试验是在钻探结束之后进行,不影响钻探进度,因而费用较低;
- 3) 某些操作步骤(如洗孔、水位测量等)可一次性完成,不必重复。

2 本款对钻孔高压压水试验的试验段位置确定及试验段长度做了原则规定。

F.0.5

1 本款规定高压压水试验一般按四级压力、7个阶段进行。大量的试验成果表明,在不同的水压力作用下,岩体的裂隙状态(开度、充填物的紧密度等)以及水在裂隙内的渗流状态是不相同的,因而其渗透性也会发生变化。只有采用多级压力进行循环试验,将不同压力下的流量变化情况以及最大压力前、后同一压力下的流量变化情况进行对比分析,才能了解渗流状态和裂隙状态的具体情况,从而便于合理地确定岩体真实的渗透性。

2 本款对最大试验压力的确定做了原则规定。临界压力是为克服岩体抗拉强度和地应力所需的水压力。在试验中应施加的最大力,显然与岩体的坚硬完整程度和地应力量值的大小密切相关。北京板桥峪等抽水蓄能电站高压压水试验所获得的临界压力

值与岩体的完整程度及实测地应力相关分析表明：

(1) 完整岩体：岩石产生劈裂的临界压力远大于地应力中的最小应力值。

(2) 微小裂隙发育岩体：裂隙扩张临界压力相当或略大于地应力的最小主应力值。

(3) 张性裂隙发育岩体：试验压力在最小主应力量级以下，岩体就会产生较大渗透量。岩体高压水渗透性受地应力的影响较小。

因此，在选定试验中的最大压力时，地应力量值应作为重要参考数据。

F.0.6 本条中快速、中速、慢速三种加压过程的选择和确定，主要应根据试验目的而定，一般情况下可采用快速加压过程，只有当需研究高压渗透的时间效应时，才选择中速或慢速加压过程试验。根据部分工程钻孔岩体高压压水试验慢速加压过程成果，对于完整或微裂隙岩体，当某一试验压力小于岩体稳定临界压力时，在数小时的时间段内渗流量保持相对稳定，但当某一试验压力接近临界压力时，随着加压时间的延长岩石可能破裂而使渗流量骤然增大。

F.0.7 我国水利水电工程地质钻探的钻孔直径一般为 59～150mm，其中金刚石钻进的常用孔径为 59mm、75mm、91mm，目前高压压水试验钻孔多采用直径 75mm、91mm、110mm。孔径适中时，能较好的与金刚石钻进相结合，便于试验设备的安装。

为了减少岩粉堵塞，试验钻孔最好采用金刚石或合金清水钻进。泥浆钻进会使孔壁上形成一层泥膜，并堵塞裂隙，因此压水试验钻孔严禁使用泥浆钻进。

F.0.8

1 止水栓塞是压水试验的关键设备。目前我国水利水电工程普遍采用水压式栓塞，其特点是胶囊易与孔壁紧贴，即使在孔壁不太平直的情况下也能实现面接触，且栓塞较长、止水可靠性

好，对不同孔径、孔深的钻孔均能适应，操作比较方便。从止水可靠性的观点出发，建议首选水压式栓塞。

关于止水栓塞长度问题，国外学者伯利斯（J. C. Bliss）和拉许顿（K. R. Rushton）曾采用数学模型，对栓塞长度的影响作过研究。我国中水东北勘测设计研究有限公司也曾进行过电拟试验，对比研究过不同栓塞长度的绕渗量大小，两者研究结论类似，即当栓塞长度达到 7.5 倍钻孔孔径时，绕渗量增加速度减缓。此外，从保持栓塞附近岩体的渗流角度出发，也要求栓塞有一定长度。现行钻孔压水试验规程（SL 31—2003）中规定止水栓塞长度应不小于试验钻孔孔径的 7 倍。实践证明，高压压水试验栓塞长度为 1m（一般均大于 7 倍孔径）可以满足要求。

3 对供水设备的基本要求是压力稳定、出水均匀，应具备一定的供水能力，当岩体透水性普遍较大时，还应选用供水能力更大的水泵，或采用多台泵并联使用以增加供水量。

4 压力表目前仍是主要的测压工具。压力表的工作压力应保持在有效范围内（即极限压力值的 $1/3$ 至 $3/4$ ）。目前我国市场已能生产高压涡轮流量计，可数字显示压水过程中的累计流量和瞬时流量，并能测定正向和反向流量，可满足试验要求。

F.0.9

1 试段位置的选定除应满足工程需要外，还应考虑上下栓塞的放置位置。国内外有关规程均十分强调栓塞位置的选择，在确定试段和栓塞位置时，除了仔细观察钻孔岩芯外，必要时还应进行测井或电视观测。

5 试段的可靠隔离是试验成败的关键，栓塞的充水膨胀压力一般应大于该试段的最大试验压力，并在整个试验过程中保持不变。为此，在试验过程中随时注意检验栓塞的止水效果是非常必要的。对于单管路测试系统，当接通试段后，栓塞内压力应保持不变，并紧贴于孔壁上，检验可通过将钻机的提升钢丝绳全部放松，使钻杆的重量全部由两栓塞与孔壁的摩擦力来承担，可用粉笔等在孔口钻杆作一标记，以观察水压过程中钻杆是否产生移

动，若发生移动，表明止水不良，此时应分析原因，采取相应措施，或重新施压膨胀或移动栓塞位置等。对于双管路测试系统，可通过管路上的压力表直接全程监视栓塞膨胀效果，必要时可随时给栓塞予以补压。

F.0.10

3 多位学者对压水试验达到稳定所需时间的研究表明，该时间与试段岩体的渗透性成反比关系，即岩体渗透性愈小，达到稳定所需的时间愈长，理论上流量在向稳定值趋近的过程中，其变化值是随时间递减的。为了使试验成果可靠，要求在某一时段内流量的变化值不大于某一标准，这样试验虽未达到真正稳定，但至少已进入缓变段，因而可以把试验误差控制在一定范围之内。

4 参考国内外资料，本标准规定以 5 次流量读数的相对差不大于 10% 作为稳定标准是合适的，但前提是流量无持续增大趋势。

在压水试验过程中，当试验压力由高压压力转换到较低压力时，有时会出现水从岩体回流到钻孔的现象。产生回流的原因，是由于在试验压力下降的瞬间，钻孔附近岩体内的水压力暂时高于试验压力，因而使水自岩体流出，这个过程一般持续数分钟至十余分钟。随着岩体内水压力逐渐下降，回流量渐减至零。当岩体内水压力继续调整至低于试验压力之后，水重新流向岩体，并随着压力调整结束而趋于稳定。回流现象是岩体储水效应的反映，而储水效应的大小与岩体的弹性变形性质有关。因此圭地西尼 (G. Guidicini) 等指出，可以利用回流资料估算岩体的变形模量。

在试验过程中，当出现回流时，应尽量详细记录有关情况 (包括回流时间、回流量等)。

5 为了解岩体裂隙连通情况和压水试验的影响范围，在试验过程中，宜对试验钻孔附近的井、硐、孔泉等进行观测 (包括出水位置、水位、流量等)，必要时可配合使用示踪剂。

F. 0. 11

2 $Q-T$ 关系曲线主要用来研究岩体在高水压作用下的时间效应。试验表明某些岩体在短时间内高压水作用下透水量不大,但随着高压水作用时间的加长,岩体内裂隙可能发生扩展或在高压渗透域内沿原有结构面产生新的破裂,从而出现透水量明显增大的情况。

5 岩体渗透临界压力是指在高压压水试验过程中,当水压力大于某一压力值时,岩体透水量骤然增大,则称该压力为岩体渗透临界压力。其主要特征如下:

- 1) 完整岩体试段渗透临界压力,表现特征为达到该压力前岩体透水性极其微弱或不透水,而超过该压力后岩体才会发生劈裂,使其透水性骤然增大,此临界压力也可称为岩体的劈裂压力;
- 2) 微小闭合裂隙发育的岩体试段,渗透临界压力表现特征为前段岩体透水量极小,后段岩体透水量明显增大;
- 3) 有张性裂隙发育的岩体,在水压力作用下,渗流量与试验压力基本上成正比例线性关系,试验无明显临界压力值。

附录 G 岩体定向压水试验

G.0.1 在工程实践中，人们多把裂隙岩体视为各向同性多孔介质来处理，并多采用常规单孔压水试验测定岩体的透水性。实际上，岩体内常发育有各种成因类型及产状不同的裂隙，由于岩块本身的渗透性一般很小，裂隙岩体的透水性大小及渗透特征主要取决于裂隙的发育情况。相应的，压水试验结果也往往随钻孔方向的不同而不同。所以，当需要测定岩体的定向透水性时，进行定向压水试验可以得到较为真实、可靠的结果。

G.0.2 本条规定了岩体定向压水试验的类型及其适用条件。常规定向压水试验可视为钻孔方向特定的常规单孔压水试验，可按 SL 31—2003 的规定实施。由于常规单栓塞压水试验难以保证试验段水流处于层流状态，故仅适用于一般性了解岩体的定向透水性，但因其简便、成熟，所以在国内水电工程勘察实践中应用相对较多；三段定向压水试验法由 Louis 于 1972 年首先提出，其基本思想是用三段压水试验器（由 3 个压水段组成，中间为主压水段，亦即试验段，其两端各有一个压水段。试验时保持 3 个压水段压力相同，使试验段周围形成一个呈径向流的流场，流线平行于所研究的裂隙面流动）沿特定方向进行压水，分别确定单组裂隙的渗透系数，然后根据每组裂隙的产状把渗透系数叠加得到岩体的总渗透张量，从而确定岩体的各向异性渗透参数。三段定向压水试验原理明确，试验结果比较准确，但设备及试验方法相对复杂，故仅适于针对特定需求进行。20 世纪 80 年代以来，三段定向压水试验先后在国内小浪底、三峡、拉西瓦等水利水电工程中得到过应用。

G.0.4

1 本款进一步规定了三段定向压水试验的适用条件。岩体中通常存在多组裂隙。为准确测定某一组裂隙的渗透性，三段定

向压水试验要求压水孔仅与所研究的裂隙组相交，而与其他裂隙组平行。当岩体中裂隙组数超过 3 组时，试验条件就难以满足了。此外，试验点附近地层岩性变化大也会对结果造成较大影响。所以，三段定向压水试验一般适用于发育有 3 组正交或近于正交裂隙的、岩性均一的岩体中。

2 本款规定了试验钻孔的布置与钻探要求。由于三段定向压水试验设备比较复杂，且通常在平硐中进行，操作不便，故孔深不宜过大。同时由于裂隙渗透性通常较小，观测段又应位于试验段周围的径向流场中，故观测孔与主压水段的距离也不能太远。

3 本款规定了试验钻孔的方向确定原则。

4 本款规定三段定向压水试验的压力阶段与压力值应符合 SL 31—2003 的有关规定，是为了与现行的常规单孔压水试验有关内容相协调。三段压水试验器管路压力损失尚无比较成熟的计算方法，只能根据实测资料确定。

5 本款内容是以在小浪底工程中采用的三段压水试验设备为基础提出的。压水试验器由内管、中管、外管三套管子组成。主压水段的水由内管供给，为了与上、下段的水流分开，在中管的主压水段上端设置了一个孔眼，内管在此弯转，管口与孔眼重合，从而可使水流沿内管进入主压水段，并与中管内的水流完全隔开。上、下压水段通过中管互相连通，因而可在试验中保持水头一致。3 组栓塞均套在中管上，它们之间由外管分隔和支撑，在上压水段和主压水段的外管上均有花眼，以使水流进入压水段岩体中。为分别观测主压水段和上、下压水段的水压及流量，在试验器的内管、中管进水口分别安装压力表和流量表。实际工作中，可根据试验器基本原理和具体情况适当变通。事实上，Louis 于 1972 年发明并取得法国专利的三段压水试验器即采用了压力和流量传感器，观测孔中亦采用了点测压仪测压。

7 本款提出了三段定向压水试验的资料整理方法，其原则及主压水段透水率的计算方法实际上与 SL 31—2003 的有关规定

是一致的。本款还给出了裂隙组渗透系数及岩体总体渗透系数张量的计算公式。岩体总体渗透系数张量与所取坐标系有关，在实际岩体渗流问题求解中，可根据其总体渗透系数张量确定出渗透系数张量的主轴及主渗透系数，以更直观地表征岩体的各向异性渗透特征。

附录 I 渠道的渗漏计算可采用的方法

I. 0. 1~I. 0. 2 条所列渠道渗漏计算公式为维尔尼科夫公式，I. 0. 3 条所列公式选自《渗流计算分析与控制》（毛昶熙）中沙金宣教授论述渠道渗漏计算的公式。上述公式均适用于渠道的稳定自由渗漏阶段，其他渗漏状态情况较复杂，必要时可根据工程具体情况进行专题研究。I. 0. 4~I. 0. 6 条所列渠道渗漏计算公式均选自《水工设计手册（8）》（水利水电出版社），为已知渠道净流量（净流量在不同渠道段内值不一致，可用设计流量代替）情况下估算渠道渗漏损失水量的经验公式，同一条件下三个经验公式计算值相近。

附录 J 岩溶水文地质常用分类

J.0.1 岩溶化岩组是研究岩溶发育和岩溶含水层的基本单位。不同类型的岩溶化岩组，其岩溶发育的机理和发育程度差别甚大。岩溶化岩组类型的划分，旨在阐明碳酸盐岩因化学成分和可溶性差异及非碳酸盐岩夹层的存在对岩溶发育的影响。前者基于溶解度和溶解速度的差异导致岩溶分异，后者不同程度地限制了地下水的活动，致使岩溶发育受到影响。

岩溶化岩组类型划分的依据是碳酸盐岩岩性类型及其组合形式。

连续型是指单一的碳酸盐岩，累计厚度占统计地层总厚的 90% 以上，岩石化学成分在纯碳酸盐岩中酸不溶物含量小于 10%，并无明显的碎屑岩层。

夹层型是指碳酸盐岩厚度占岩层总厚度的 60% 以上，硫酸盐岩或碎屑岩夹层明显，且其连续厚度大于 10m。

互层型是指碳酸盐岩中石灰岩与白云岩互层（大理岩与变质白云岩互层）或碳酸盐岩与碎屑岩（变质硫酸盐岩与变质碎屑岩）互层，其厚度各占 50% 左右。

J.0.4 本条根据我国南方岩溶区地下水位动态变化特点和工程经验，对岩溶地下水位动态类型按与观测要素之间的相关关系进行了分类，并提出了与其相应的岩溶发育特征。水文型和气象型两种类型均适合于岩溶地区，此类工程实例甚多。气象型可分为四种亚类，以便于在进行岩溶水文地质勘察成果分析时参照，但对各种类型的定量分析方法，特别是在分割处理上还有待于进一步总结。应当注意的是气象型的四种亚类往往出现在一个工程中的不同位置，如乌江渡水库、观音岩水库、观音阁水库、广西大化水库等均存在此种情况。

利用观测网点上各特征时段地下水位绘制等水位线图和岩溶

地下水动力剖面图，进行岩溶发育程度分带（区），判断岩溶管道发育方向、位置是有效的，与其他手段综合利用，还可以在岩溶发育较强地区找到弱岩溶岩体，从而优化防渗帷幕。隔河岩水库罗家坳弱岩溶体、遵义水泊渡库首右岸弱岩溶带、观音岩坝址两岸弱岩溶体、松柏山水库库首两岸弱岩溶体等的划分均说明了上述方法的有效性。

J.0.5 为便于进行岩溶地区水文地质勘察及岩溶渗漏问题评价，本条依据渗漏部位、渗漏范围、渗漏介质和渗漏影响四项原则，将岩溶渗漏划分为 12 种基本类型，并给出了其相应的岩溶渗漏特征。

渗漏部位不同时，发生渗漏的边界不同，则计算渗漏量所使用的公式不同，如河间与河弯地块的渗漏，为库水直接向库外的渗漏，其渗漏边界为地下水位和隔水层（或相对隔水层）；而坝址区绕坝肩与坝基的渗漏边界则还有建筑物的轮廓线。

岩溶渗漏范围在垂向上有地下水位以上的和地下水位以下的渗漏。地下水位线以上和以下的洞穴与管道的勘察理论和方法存在较大差异，为强调勘察手段的应用，有必要按地下水位线进行划分。

由于不同渗漏介质岩体透水性及渗流状态不同，所造成的渗漏损失、危害性、处理措施、处理的难易程度和渗漏计算理论亦不同的，应获取的参数与概化要求也不一样，故渗漏类型还应按渗漏介质进行划分。

岩体渗漏造成的影响是不同的，有漏水量较大而影响水库发挥正常效益的；也有漏水量虽小，但可危及建筑物安全的；亦有两者兼有的。评价中应区分渗漏与工程的关系，对工程安全有影响的应作渗控性质的处理；漏水量过大，影响水库发挥正常效益的，应作防漏性质的处理。