

HUNNINGTU MIANBAN DUISHIBA
SHIYONG JIANCE JISHU

混凝土面板堆石坝 实用检测技术

冷元宝 何 剑 朱文仲 乔惠忠
赵圣立 郑光和 胡伟华 编著

黄河水利出版社

混凝土面板堆石坝实用检测技术

冷元宝 何 剑 朱文仲 乔惠忠

赵圣立 郑光和 胡伟华 编 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了混凝土面板堆石坝地基测试、筑坝材料检测、堆石料的工程特性、堆石料填筑质量检测、混凝土面板接缝止水材料检测、混凝土面板与趾板质量无损检测、大坝面板脱空检测、环境放射性和环境介质腐蚀检测方法与技术、大坝原型观测方法以及小浪底水利枢纽工程检测实例。内容系统、全面、翔实,具有先进性及可操作性。

本书可供从事水利水电工程混凝土面板堆石坝设计、施工检测、试验、监理、监测和管理的各类人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板堆石坝实用检测技术/冷元宝等编著.

郑州:黄河水利出版社,2003.10

ISBN 7-80621-729-0

I.混… II.冷… III.混凝土面板堆石坝-检测
IV.TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 090647 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:15.625

字数:361 千字

印数:1—1 000

版次:2003 年 10 月第 1 版

印次:2003 年 10 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-729-0/TV·333

定价:35.00 元

前 言

我国自 1985 年开始用现代技术修建混凝土面板堆石坝,起步虽晚,但发展迅速。目前,无论是从工程数量和规模上,还是从技术进展上,都处于国际领先水平。在建设实践过程中,从引进、吸收国际先进技术开始,到结合国内具体情况进行全面的技术创新和发展,积累了丰富的经验。为确保混凝土面板堆石坝工程建设的质量,编著者根据国内有关标准、科研成果、经验资料,针对混凝土面板堆石坝地基、坝料特性、坝体填筑、接缝止水、混凝土面板与趾板混凝土结构、面板脱空、环境放射性、环境介质腐蚀、大坝原型观测等工程项目检测中的新技术及常见的技术问题,编著了本书。本书以推动混凝土面板堆石坝工程质量管理在水利水电工程中的广泛应用为目的,有较强的系统性和实用性,可供从事混凝土面板堆石坝工程设计、施工、监理、检测及管理等各类人员参考。

在本书编写过程中,王锐、李新、黄建通等同志给予了帮助,龙振球同志对全书进行了审订,在此表示衷心的感谢。书中引用了一些参考资料及有关标准的内容,谨向这些文献的编著者致以谢意。

由于编著者水平有限,书中难免存在各种错误和不足之处,希望读者批评指正。

编著者

2003 年 6 月

目 录

前 言

第一章 混凝土面板堆石坝地基测试	(1)
第一节 地基检测	(1)
第二节 测试方法	(5)
第二章 筑坝材料检测	(51)
第一节 岩石基本性质的检测方法	(51)
第二节 岩石单轴抗压强度和变形试验	(62)
第三节 岩石结构及抗剪强度试验	(72)
第四节 岩体软弱夹层剪切蠕变试验	(75)
第五节 岩石点荷载强度试验	(78)
第三章 堆石料的工程特性	(80)
第一节 估算岩石的抗拉强度、抗压强度和确定岩石的强度各向异性	(80)
第二节 岩石分类和风化在分类研究中的应用	(81)
第三节 堆石料的工程性质	(83)
第四节 岩石物理力学参数	(95)
第四章 混凝土面板堆石坝填筑检测	(107)
第一节 直接法检测技术	(107)
第二节 间接法检测技术	(112)
第五章 混凝土面板接缝止水材料检测	(133)
第一节 柔性填料检测指标	(133)
第二节 铜止水片检测指标	(140)
第三节 接缝止水材料施工质量控制	(144)
第六章 混凝土面板与趾板质量无损检测	(147)
第一节 超声波无损检测技术	(147)
第二节 混凝土结合面质量及表面损伤检测技术	(155)
第三节 超声回弹综合法检测混凝土强度技术	(157)
第四节 探地雷达检测方法	(160)
第七章 大坝面板脱空无损检测	(162)
第一节 探测方法概述及其原理	(162)
第二节 现场试验	(163)
第三节 大坝面板脱空探测技术评价	(166)
第八章 环境介质检测	(168)
第一节 环境放射性检测	(168)

第二节	环境介质腐蚀性检测·····	(169)
第三节	环境空气质量标准及其腐蚀性分类与检测·····	(173)
第四节	水的腐蚀性检测方法·····	(179)
第五节	土的测试·····	(182)
第六节	环境保护·····	(191)
第九章	大坝原型观测方法·····	(194)
第一节	观测项目和测次的确定·····	(195)
第二节	观测仪器的安装、埋设方法与要求·····	(197)
第三节	观测方法 and 要求·····	(203)
第四节	观测资料的整理分析·····	(212)
第十章	小浪底水利枢纽工程检测试验·····	(216)
第一节	概 述·····	(216)
第二节	喷混凝土厚度快速测试与控制·····	(218)
第三节	黏土斜墙压实密度检测与控制·····	(224)
第四节	大坝堆石体压实密度检测与控制·····	(231)
第五节	弹性波层析成像(CT)技术的应用·····	(238)

第一章 混凝土面板堆石坝地基测试

混凝土面板堆石坝地基测试包括原位地基测试及处理后地基测试,主要有原位测定岩(土)体的各种工程性质及渗流特性、建基岩体质量检测、灌浆质量检测、防渗墙质量检测等。

第一节 地基检测

一、建基岩体质量检测

(一)物探检测建基岩体质量的主要内容及方法

物探检测建基岩体质量的主要内容有进行岩体质量分级,确定可利用岩体的高程和厚度,评价和复核已开挖的建基岩体质量。可用于检测建基岩体质量的物探方法有钻孔声波法(包括单孔声波、跨孔声波和声波 CT)、地震波法(时距曲线法、跨孔地震波和地震波 CT)、电阻率 CT、孔内静弹模测试以及探地雷达等。

(二)建基岩体质量检测的方法技术

(1)在各勘测设计阶段,配合工程地质勘察,充分利用两岸坝肩平硐及河床坝基钻孔进行弹性波测试,根据地震波或声波速度的分布规律,为岩体质量分级和确定可利用岩体高程提供定量指标。

(2)在施工阶段,应利用各种施测条件进行坝基岩体质量检测,核定可利用基岩面的深度和需要预留保护层的厚度。同时,应将检测成果快速反馈,并可配合现场施工监理,以便有效地控制开挖质量。

(3)在水利水电工程坝肩和坝基开挖过程中,由于施工爆破及岩体卸荷的影响,建基面浅表部岩体往往受到不同程度的损伤。为准确评价建基岩体的质量,应在爆破前、后进行钻孔声波检测,对比爆破前、后的波速差异以确定松弛带厚度及岩体质量,为岩体分类提供定量依据。

(4)坝基开挖竣工后,应系统地进行钻孔声波测试、建基面地震波速层析成像及地震跨孔层析成像,检测成果可为建基岩体质量的全面复核及综合评价提供依据。同时,也为基础处理方案设计及固结灌浆效果检查获取了必要的资料。

(5)收集坝基各类岩体的变形模量试验资料,并结合弹性波测试成果进行静动对比分析,选择岩体质量具有代表性的钻孔,进行声波测试与孔内弹模原位对比试验,建立声波速度与变形模量的对应关系,以确定岩体质量的波速控制标准。

(6)单孔声波测试和孔间声波穿透一般是利用开挖前在坝轴线和开挖后在建基面所布置的检测孔中进行的。检测孔的布置方案及孔深应符合坝基岩体质量检测的要求。

(7)孔间穿透的孔距一般为 2~3m,可综合利用声波检测孔同时取得单孔连续波速和

孔间穿透波速资料,以便于岩体各向异性特征的对比分析。

(8)选择具有代表性的各类岩体质量的孔段,进行孔内静弹模和声波速度原位试验,建立声波速度与变形模量的对比关系。

(9)地震波 CT 或声波 CT 宜在坝基开挖竣工后,利用建基面或坝踵、坝趾和中轴线上的钻孔,按坝块和坝段合理地划分测试区域进行测试。

(10)可以采用地震直达波、折射波和反射波等方法对建基面进行检测。检测时,坝基应开挖到位并全面清基,建基面上测网布置应合理。

(11)地震直达波检测应用于地质因素较为单一的区段,可采用单支或相遇时距观测系统。检波器用石膏与岩面固结,点距宜为 1~2m,以锤击为震源。

(12)地震折射波检测可采用小排列相遇与追逐多重观测系统,在建基面上布置测线进行折射波检测,检波点距以 1m 为宜,以锤击为震源,连续探测坝基岩体浅表部松弛带厚度及下伏岩体地震波速度。

(13)当建基面平坦时,可以用地震反射波检测,采用小偏移距、小排列进行多次覆盖观测,以锤击为震源,高频检波器接收,偏移距一般以 3~5m 为宜,检波点距为 1m。该方法需经试验以论证其应用效果,方可推广使用。

(14)在灰岩地区可以用探地雷达探测建基面以下是否存在溶洞。

(三)建基岩体质量检测资料分析与综合评价

(1)对单孔和对穿声波测试曲线归纳出基本类型,分析其与地层岩性、地质构造、风化卸荷和岩体质量等地质因素的关系。具体包括:①根据声波曲线浅部孔段速度突变情况,并参照开挖前的测试资料,确定建基岩体的松弛范围;②根据静动对比关系,确定建基岩体质量的波速验收标准,并以此统计各声波测试孔的岩体波速达标率及确定未达标孔段的空间部位,并分析其原因;③按工程部位和地质单元分类,进行波速概率密度统计,并计算其声波速度的平均指标及变化范围。

(2)对平面和剖面地震波 CT 和声波 CT 检测成果进行分析,明确低速异常区域是因开挖爆破和应力松弛造成,还是建基岩体本身的质量问题。具体包括:①平面波速图像仅反映坝基浅表部情况,由于开挖扰动、应力释放,会导致节理、裂隙松弛和波速明显下降,可根据地震波速的分布规律评价坝基岩体开挖质量;②剖面波速图像可反映开挖爆破和应力松弛的影响深度,根据波速等值线的变化梯度及相应的波速指标确定松弛范围;③松弛带一般出现在坝基岩体的浅表部,而深部的低速异常应与地质构造及岩体质量有关。

(3)由于声波检测受到穿透距离和钻孔数量的限制,采用地震波检测可以补充大量的弹性波测试资料。具体包括:①采用时距法进行直达波观测时,可利用锤击扣板,正反向敲击,取得横波资料,进而计算出泊松比、动弹模量、剪切模量等动力学参数;②采用类似折射分层的解释方法,不仅可以确定松弛带厚度,同时也对坝基岩体起到速度检层的作用;③多次覆盖观测的反射波资料除利用时间剖面解释松弛带深度外,还可进行复数道分析,取得瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率时间剖面,为建基岩体质量评价提供更多的动力学信息。

(4)建基岩体质量检测应提交下列图件:①钻孔声波检测应提交单孔和对穿声波速度曲线图、各坝块或坝段速度概率分布图,按地质单元和岩体质量分类的速度概率分布图及

统计表;②钻孔原位静动对比试验所建立的声波速度与变形模量关系曲线图;③建基岩体平面和剖面地震波 CT 和声波 CT 图像及相应的变形模量分区图;④地震连续波速测试的时距曲线及速度剖面图;⑤与上述图件对应的解释成果图。

(四)检测精度

检测精度要注重波速测试成果,按工程部位和地质单元进行分类统计、对比分析,建立坝基岩体质量波速分级的量化指标,确定可利用的岩体波速判别标准。根据弹性波速度及相关的物理力学参数,综合评价坝基岩体质量,为基础处理方案设计提供定量依据,并满足设计和施工的要求。

二、灌浆质量检测

(一)物探检测灌浆效果的目的及主要内容

物探检测灌浆效果可以了解灌浆施工改善基础力学性能的状况、增强基础或建筑物整体性的作用及提高基础强度和防渗能力的情况。灌浆效果检测的内容是岩土体的声波波速、岩体低强度区(低速区)在灌浆前后的改善情况及灌浆物的充填情况,固结灌浆还应检测岩土体的弹性模量。

(二)灌浆质量物探检测主要方法及要求

固结灌浆物探检测方法主要有单孔声波、跨孔声波、孔内静弹模等,也可以用声波 CT、地震波 CT 和孔内电视检查灌浆前后低强度区的改善情况。帷幕灌浆主要用声波 CT、地震 CT、钻孔电视录像,也可用同位素示踪和单孔声波等方法。

灌浆效果检测的物探方法技术除应符合有关规程及技术规定外,还应满足下列要求:

(1)应在灌浆试验时,使用多种物探检测方法进行检测,为后续大规模正式施工提供对比分析资料。

(2)帷幕灌浆的物探检测孔和剖面应布置在帷幕中心线上。

(3)固结灌浆的物探检测孔或剖面应布置在断层、岩体破碎、裂隙发育、强岩溶等条件复杂的部位。

(4)固结灌浆的物探检测孔应布置在末序孔注入量大的孔段附近。

(5)钻孔偏斜过大、灌浆过程不正常等经分析资料认为可能对灌浆质量有影响的部位。

(6)检测孔的抽样数量应约为灌浆孔总数的 10%,一个单元内至少有一组检查孔。

(7)在灌浆施工阶段进行物探检查时,灌前检测孔不少于总检测孔的 1/3。

(8)灌浆试验阶段的物探检测应在原孔位进行灌前和灌后测试。

(9)采用弹性波类和静弹模法进行灌后检查时应在灌后 7 天方能检测。

(10)声波 CT 进行灌前灌后检测时,应保持观测系统、反演算法和反演约束条件不变。

(三)灌浆检测资料成果分析

检测资料分析应视具体工程情况,选用灌浆检测数据对比分析法、达标分析法或现象描述法。对比分析法可选择直接对比分析或间接对比分析。具体包括:

(1)直接对比分析应在同一位置测试的灌前和灌后的单孔 v_p 值和(或) v_s 值、跨孔

v_p 值和(或) v_s 、 E_D 和(或) E_s 值分别进行对比,计算出各自的提高率或提高量,将其与设计值进行比较,以评价灌浆效果。

(2)统计对比分析应将同一个灌浆单元内的灌前和灌后的单孔 v_p 值和(或) v_s 值、跨孔 v_p 值和(或) v_s 、 E_D 和(或) E_s 值分别进行统计,计算和绘出灌前和灌后的统计曲线,计算出灌浆前后统计量的提高率和提高量,与设计值进行对比分析,以评价灌浆单元内的灌浆效果。统计对比分析用于抽样检测具有统计意义的基础上,即检测数据足够多并且在灌浆单元内分布足够均匀。统计分段数量的多少及间隔大小取决于灌浆单元的复杂程度。

(3)达标分析法应将灌浆单元内灌后的单孔 v_p 值和(或) v_s 值、跨孔 v_p 值和(或) v_s 、 E_D 和(或) E_s 值依据地质情况分别与设计所规定的设计值(达标值)进行比较,并将比较结果分别进行统计分析,以得出达标率,依据达标率对灌浆效果进行评价。

(4)现象描述适用于声波 CT 和孔内电视录像。灌浆前后基础低强度、渗漏不密实区的变化情况由声波 CT 来描述,灌后岩体张性裂隙、岩溶、破碎带的充填情况由孔内电视录像来观察描述。

用声波 CT 检测灌前、灌后效果时,也可使用统计法和达标法对 CT 剖面内的波速进行分析,以评价灌浆效果。

帷幕灌浆检测所进行的水文地质参数测试可根据测试方式(灌前、灌后均测试或仅进行灌后测试)的不同采取对比或达标的分析方法进行评价。

检测图件应根据检测方法,相对应地提交如下图件:

- (1) 检测钻孔的布置图。
- (2) 单孔“ $v_p \sim L$ ”、“ $v_s \sim L$ ”波速曲线,跨孔“ $v_p \sim L$ ”、“ $v_s \sim L$ ”波速曲线。
- (3) E_D 、 E_s 数值和点位应标注在相应的声波检测图上。
- (4) CT 波速图像及等值线图。
- (5) v_p 、 v_s 、 E_D 、 E_s 按一定数据间隔进行的百分比统计图或累积百分比统计图。
- (6) 灌前和灌后存在对比性的图件应绘制在一张图上,以便于对比。

检测精度要求单孔 v_p 、 v_s 和跨孔 v_p 、 v_s 测试的相对误差小于 10%, E_D 和(或) E_s 相对误差小于 20%。

三、防渗墙质量检测

(一)检测目的及主要方法

主要检测防渗墙的深度、缺陷、密实情况(均匀性、渗透系数),了解防渗墙的深度、连续性和密实度是否达到设计及防渗要求。

检测防渗墙质量的物探方法主要有:地面物探方法中的弹性波垂直反射法、可控源音频大地电磁法(CSAMT)和探地雷达法;井中物探方法中有弹性波 CT 和同位素示踪法。

(二)检测方法及技术

检测防渗墙的深度、缺陷、均匀程度宜采用可控源音频大地电磁法、高密度电法、探地雷达、地震反射(含地震映像)、弹性波 CT 等方法。检测过程应注意:

(1)检测前应收集防渗墙的施工、墙体材料特性、设计、水文地质资料,分析研究后确定检测方案。

(2)检测应先进行地面物探,发现异常后,在异常段进一步采取综合物探检测方法。

(3)地面物探测线应沿墙中轴线布置,测点密度应根据防渗墙类型、墙体宽度和设计要求综合考虑。

(4)探地雷达、地震反射、高密度电法宜检测深度在 10m 左右的墙体,探地雷达宜检测浸润面以上的墙体。当检测的墙体较深时,宜选用可控源音频大地电磁法(CSAMT)。

(5)弹性波 CT 宜用于详细检测墙体缺陷,应布置在地面物探方法发现的异常部位处。

检测防渗墙渗透系数宜采用同位素示踪法。检测时应注意:

(1)进行渗透系数测定宜选在有压力差的部位进行布孔,测试段应选在地下水位以下,土层中的钻孔应下花管。

(2)同位素示踪法可进行单孔测试,也可进行双孔或多孔测试。

(三)资料分析

(1)防渗墙检测资料的收集和准备应包括:防渗墙设计、施工的资料,现场试验防渗墙体和围岩(土)的物理性质(电阻率、导磁率、波速),并比较其差异,通过试验得出防渗墙缺陷的异常幅值及异常特点。

(2)地下水位面以上的物性剖面呈现出局部高阻或低声速、低吸收异常,或反射类物性剖面中呈现出局部早于墙底的反射信号,应解释为缺陷;地下水位面以下的物性剖面呈现出局部低阻或低声速、高吸收异常,或反射类物性剖面中呈现出局部早于墙底的反射信号,应解释为缺陷。

(3)物性剖面或反射剖面局部存在严重图像不连续时,宜解释为墙体不连续。

(4)同位素测定墙体渗透系数必须计算出渗透速度、渗漏方向。

(5)防渗墙检测应绘制的图件包括:检测的物性剖面、检测剖面综合成果解释图,物性剖面可以采用彩色图、灰度图、等值线图表示,防渗墙深度、渗漏参数以及缺陷的性质、位置和范围应在综合成果解释图中标明。

(四)防渗墙检测精度

(1)检测防渗墙深度的误差不宜大于 20%。

(2)防渗墙渗透系数测试误差不宜大于 15%。

第二节 测试方法

一、原位测试方法

(一)概述

原位测试是在坝基天然条件下原位测定岩(土)体的各种工程性质,它所取得的数据远比勘探取样所得的数据准确可靠,更符合岩(土)体的实际情况。原位测试检测无扰动试样的岩(土)体(如砂土、流动淤泥层、贝壳层、破碎带等)的有关工程性质,可避免采样过程中应力释放的影响,并缩短勘探和室内试验的周期。

(二)岩体原位变形测试方法

岩体原位变形测试是通过加压设备将力施加在选定的岩石面上,测量岩体的变形。其方法有静力法和动力法两类,如表 1-1 所示。

表 1-1 原位变形测试方法分类表

类别	方法名称
静力法	承压板法、狭缝法、单(双)轴压缩法、水压法、双筒法、径向千斤顶法、钻孔变形计法
动力法	声波法、地震波法

岩石变形特性指标通常包括变形模量、弹性模量、岩石泊松比、岩石抗力系数等。岩石模量分切线模量和割线模量,一般将后者称变形模量。

本试验的目的:研究原位岩体变形特征,为工程设计中地(坝)基、地下建筑物和边坡稳定提供变形(或弹性)模量和泊松比等指标。

(三)承压板法

1. 试验原理

承压板法是采用刚性或柔性承压板上的千斤顶(或压力枕)来施力于半无限空间岩体表面,测量岩体的变形,并按均匀连续、各向同性板无限弹性体的布西奈斯克公式计算岩体变形特性指标。

承压板据其刚度可分为刚性承压板和柔性承压板两种。刚性承压板通常以钢板或钢筋混凝土组成,其形状多为圆形;柔性承压板多用压力枕下垫以硬木或砂浆,形状多为环形和矩形。

承压板法岩石变形(弹性)模量计算公式为

$$E = K_1 \frac{Pd(1 - \nu^2)}{W_0} \quad (1-1)$$

式中 E ——变形模量,MPa;

P ——承压板单位面积上的压力,MPa;

ν ——岩石泊松比;

d ——承压板直径,cm;

W_0 ——承压板中心表面岩石的变形,cm,代以全变形值可获得岩石变形模量,代以弹性变形值时计算所得为岩石弹性模量;

K_1 ——变形系数,其随承压板的形状、刚性或柔性、测点的位置不同而不同,对圆形刚性板中心点 K_1 为 0.88,圆形柔性板中心点 K_1 为 1.0。

2. 施加压力及测定

1) 试验的最大压力及其分级

根据工程设计要求,确定试验的最大压力,通常取工程岩基设计压力的 1.2 倍,然后将最大压力分成几个等级压力加压观测。一般分为五级。在加压之前,应读取测量系统中各种测量仪表的初始值,并取稳定值(即每隔 5~10min 读记一次,连续三次读数不变才开始加压)。

2) 加压方式

加压方式原则上依岩体性状和建筑物实际工作状态来确定。在工程试验中主要有三种方式:逐级一次循环加压法、逐级多次循环加压法、大循环加压法。此外,还有一些进行专门研究的加压法,如研究岩石的蠕变时,有时在上述加压过程中进行较长时间的岩石蠕变观测。当试验压力较高、分级压力差较大时,在每一级压力下,往往再分几级过程进行压力观测。

3. 变形稳定标准

在加压试验之前,还应先确定变形稳定标准。通常采用的变形稳定标准有如下三种:

(1)以一定时间内变形的绝对变化值为标准。如每级压力下规定每隔 10min 读数一次,相邻三次读数的变化不超过 0.001mm(或 0.003mm)。

(2)以一定时间内变形的相对变化值为标准。如设定两次读数差 ΔW 与相邻两级压力下总变量($W_2 - W_1$)之比 $\frac{\Delta W}{W_2 - W_1}$ 不超过 0.05。

(3)以时间作为变形稳定指标。设定每级压力下读数时间为 20min 或 30min,不论此时岩石变形值是否已达到稳定标准,即施加下一级压力。

上述三种变形稳定标准,在坚硬岩石条件下,变形值一般不存在较大差异,但对中等强度以下岩石,则高、低压力下变形稳定值会有很大不同,尤其当选取变形绝对值为稳定标准时,低压力下的岩石变形稳定性会变差,有时稳定时间需很长,故在岩石试验中建议采用相对变化值作为变形稳定标准。

变形稳定的依据读数常以承压板范围内的测表为主,对过程压力只进行一次读数,不求其变形稳定值。在退荷时,其过程压力的观测与加荷时间相同,但在零荷载下要求观测至变形稳定。

4. 计算岩石变形(弹性)模量

首先分别计算出各级压力下的全变形 W_0 、弹性变形 W_E 和不可恢复变形 W_{pd} 。按公式(1-1)计算出岩石的变形(弹性)模量。当承压板为环形柔性板时,其相应计算公式为

$$E = \xi_1 \frac{(1 - \nu^2)P}{W_0} \quad (1-2)$$

$$\xi_1 = 2(r_2 - r_1) \quad (1-3)$$

式中 r_1 、 r_2 ——承压板的内、外半径;

其余符号的含义同式(1-1)。

当没有测定岩石的横向变形时,可采用室内试验所得的岩石泊松比(或选定一个 ν 值)进行变形(弹性)模量计算。

5. 绘制压力与变形关系曲线

通常在现场测试时,边观测边绘制压力—变形曲线,以便及时发现问题。试验结束后,应进一步检查记录,核对曲线,同时舍弃不合理的读数。绘制正式压力—变形曲线,按变形量取合适的比例,点绘的图形既可是每一个测表的变形曲线,也可取各测表的平均值绘制。

(四)狭缝法

1. 试验原理和适用范围

狭缝法又称刻槽法。它是在岩体中挖凿一狭槽,埋入一压力枕,通过压力枕给岩体施加压力,测量岩体的变形,并按均匀连续、各向同性的无限弹性平面问题,计算出岩体的变形特性指标。本方法适用于工程地基的坚硬岩体和半坚硬岩体。

2. 试验程序

从选点到试点制备、仪器设备率定、安装及加压观测的流程顺序见图 1-1。

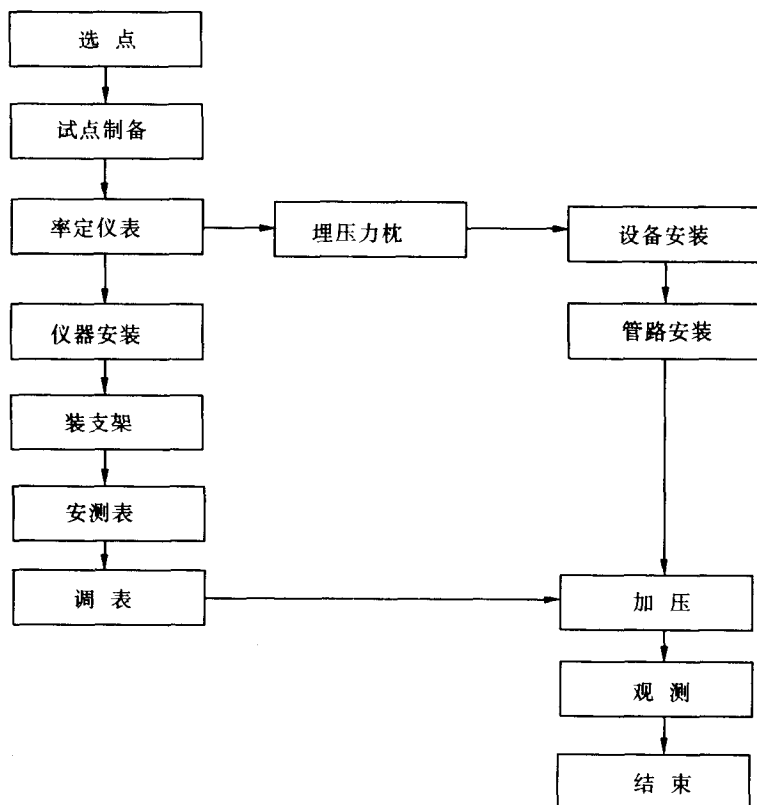


图 1-1 狭缝法试验流程图

3. 施加压力与测定

试验的最大压力及其分级的确定、初始稳定读数观测、加压方式、变形稳定标准及过程压力下读数规则和退零(压力)读数等各项要求与承压板法完全相同。

4. 计算方法及资料整理

(1)在现场记录整理、复核后绘制压力变形曲线。

(2)确定岩石的全变形和弹性变形,分别按式(1-4)计算出变形模量和弹性模量。

$$E = \frac{PL}{2W_A} \left[(1 - \nu) + \frac{2(1 + \nu)P^2}{P^2 + 1} \right] \quad (1-4)$$

$$P = \frac{2y + \sqrt{4y^2 + 1}}{L} \quad (1-5)$$

式中 P ——岩体单位面积上实际所受的压力, MPa;

W_A ——压力枕对称轴(中心线)上测点 A 处的绝对变形, cm;

L ——狭缝长度, cm;

ν ——岩石的泊松比;

y ——测点距狭槽轴线的距离, cm。

需要注意的是, 狭缝法在按公式(1-4)计算时, 会出现测点不同所得结果不同的现象。因此, 一般宜取距中心线 $1/3$ 处的测点数据来计算变形(或弹性)模量。

(五)单(双)轴压缩法

1. 试验原理和适用范围

单(双)轴压缩法是在试点岩体周围(四边)切槽, 埋入单(双)向压力枕, 对岩体施加压力, 测定岩体的变形, 并假设岩体为匀质连续各向同性弹性体, 按弹性力学相应的公式计算岩石的变形特性指标。本方法适用于坚硬、半坚硬又有一定厚度的岩体。

2. 施加压力与测试

单(双)轴压缩法的试验最大压力及其分级的确定、初始稳定读数观测、加压方式、变形稳定标准、过程压力下读数及退零读数等各项的要求与承压板法完全相同。

单轴压缩法要求施加压力时, 一对压力枕应同步加压; 双轴压缩法施加压力时, 要求两对压力枕分别同步加压。

3. 成果试算及资料整理

(1) 首先整理记录, 并绘出压力与变形关系曲线, 随后计算各测表的应变值 ϵ_i 。

$$\epsilon_i = \frac{\Delta W_i}{D_i} \quad (i = x, y) \quad (1-6)$$

式中 ϵ_i —— i 方向的应变;

D_i —— i 方向两个测点间的距离, cm;

ΔW_i —— i 方向两测点之间岩体的相对位移, cm。

(2) 按同一方向两只测表的平均应变值 $\bar{\epsilon}_i$ ($i = x, y$) 计算岩石弹性模量 E 和泊松比 ν

$$E = \frac{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}{\bar{\epsilon}_x \sigma_x - \bar{\epsilon}_y \sigma_y} \quad (1-7)$$

$$\nu = \frac{\bar{\epsilon}_x \sigma_y - \bar{\epsilon}_y \sigma_x}{\bar{\epsilon}_x \sigma_x - \bar{\epsilon}_y \sigma_y} \quad (1-8)$$

式中 σ_x —— x 方向的应力, MPa;

σ_y —— y 方向的应力, MPa;

$\bar{\epsilon}_i$ —— i 方向岩体中两测表的平均应变($i = x, y$)。

需要指出的是, 单(双)轴压缩试验结束后应及时将压力枕取出, 避免损坏。岩石试验规程推荐的取出方法是: 在狭槽一侧, 平行狭槽凿一新槽(比原槽稍长、稍深), 再将压力枕施加一定压力, 使岩石松动, 可较易取出压力枕。

(六)水压法

1. 试验原理和优缺点

水压法(国外称为压力法)是指在现场隧洞(勘探平洞)内截取一段或重新开挖一试验

洞来进行试验的方法。试验段(洞)的一端(或两端)以堵头封闭后,通过向洞内压水对洞壁施加内水压力,由埋设在岩体内的仪表元件测出洞壁岩石变形,并按弹性理论厚壁圆管公式或 Winkler 假定公式计算岩石的变形(弹性)模量或岩石的抗力系数。

此方法与水工隧洞在受力情况方面相似性好,受力面积大,可在一次试验里同时获取多种资料,可为工程设计提供有关岩体变形特征和岩体稳定等方面有价值的成果。但是,其试验周期较长,设备仪器种类较多,试验技术要求较高,费用较大,宜在工程初步设计后期进行。

2. 试洞充水与加压

(1)水压法的试验流程如图 1-2 所示。

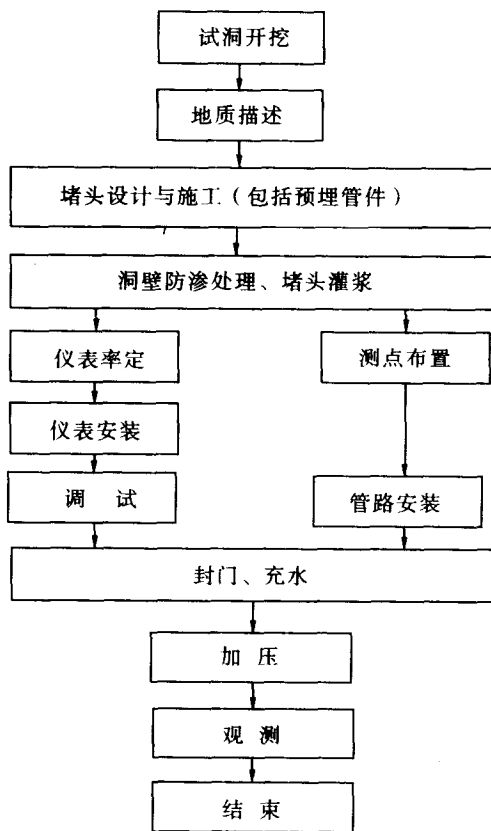


图 1-2 水压法试验流程图

仪器安装完毕,并进行测量元件调试,待各测表处于正常状态后,方可封闭入孔闸门。往洞内充水,充水前先打开排气管上阀门,待洞内水由排气管流出时,关闭此阀门。试洞内水温稳定(要求温度变化小于 0.5°C)后,开始进行正式观测。

(2)试验的最大压力及其分级、初始读数观测、加压方式、变形稳定标准及过程压力下读数等项要求均与承压板法相同。若试验要求与衬砌结构受力研究试验合并进行时,则加压方式另行制定。

(3)水压法中测量元件较多,当观测断面多于一个时,测表的变形稳定选取主观观测断

面的仪表读数为基准。因为水压法试验的周期较长,费用大,宜尽可能地结合试验开展多项岩石指标的测定。如在水压法试验前,条件许可时先进行声波测试;在水压法试验的最后一级压力下,一般也可进行较长时间的稳定变形观测,以获取时间效应资料。

水压法试验中,经充水后在观测过程中出现仪表不正常现象时,应权衡利弊,必要时应放空洞内水,开启闸门,检查导线接头和测表,然后重新调试,待测表读数正常后再封闭闸门,重新充水继续进行试验。

3. 计算公式及资料整理

(1)首先整理记录。舍弃不当数据后,绘出测表的压力与变形的关系曲线。

(2)电阻应变计元件需依导线长度(当大于 100m)进行测定值修正,电阻值随导线长度增大而增加。当水温变化过大时,测表支杆亦将受温度影响,需加以修正。

(3)进行变形特征指标的计算。

a. 分块衬砌及无衬砌时,计算式为

$$E_0 = \frac{PR(1+\nu)}{\Delta R} \quad (1-9)$$

$$K = \frac{P}{\Delta R} \quad (1-10)$$

$$K_0 = KR \quad (1-11)$$

式中 E_0 ——变形模量,MPa;

K, K_0 ——抗力系数(MPa/m)和单位抗力系数(即试洞半径为 1m 时的抗力系数,MPa);

$\Delta R, R$ ——试洞表面岩石变形和试洞半径,m;

P ——孔壁应力,MPa;

ν ——泊松比。

b. 整体衬砌时,计算式为

薄壁衬砌

$$K = \frac{P}{\Delta R} - \frac{tE}{R^2} \quad (1-12)$$

厚壁衬砌

$$K = \frac{2R_B^2(\frac{P}{\Delta R} - \frac{(R_H^2 - R_B^2)E}{R_H})}{(R_H^2 - R_B^2) - \nu(R_H^2 - R_B^2)} \quad (1-13)$$

式中 R_H ——衬砌外半径(即试洞半径),m;

R_B ——衬砌内半径,m;

t ——衬砌厚度,m;

E ——衬砌的弹性模量,MPa。

(七)径向千斤顶法

1. 试验原理

径向千斤顶法是在现场隧洞(勘探平洞)内选取或重新开挖试验洞来进行岩体变形测