

岩体原位试验新技术 及其工程应用

周火明 张宜虎 范 雷
钟作武 熊诗湖 李维树 编著



科学出版社

岩体原位试验新技术 及其工程应用

周火明 张宜虎 范 雷 钟作武 熊诗湖 李维树 编著

科学出版社

北京

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229, 010-64034315, 13501151303

内 容 简 介

岩石参数是工程优化设计的基本依据, 原位试验是工程岩体参数研究最有效的手段之一。针对我国西部地区复杂条件下岩体的力学特性与参数取值问题, 本书在总结我国岩石力学试验研究实践的基础上, 研发岩体原位高压变形试验与直剪试验、真三轴试验及流变试验新技术, 集成创新岩体结构及微细观破坏过程精细探测技术, 对复杂条件下工程岩体变形特性、强度特性、流变特性及微细观破坏机理进行深入研究。本书涵盖作者团队近十年研究成果, 旨在推动我国复杂条件下水工岩体原位试验方法的发展, 解决我国西部复杂条件下水利水电工程建设中的岩石力学关键技术问题。

本书可供水利水电、矿山、交通或土木建筑工程学科的工程技术人员和研究人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

岩体原位试验新技术及其工程应用/周火明等编著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061683-8

I. ①岩… II. ①周… III. ①岩石试验-原位试验-研究 IV. ①TU459

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 117716 号

责任编辑: 杨光华 何 念 / 责任校对: 高 嵘

责任印制: 彭 超 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/16

2019 年 6 月第 一 版 印张: 18

2019 年 6 月第一次印刷 字数: 427 000

定价: 228.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

岩体作为一种天然的地质体,包含不同尺度的节理和裂隙,赋存于地应力和地下水环境之中,其变形破坏机理十分复杂。岩体原位试验是评价岩体力学特性、解决复杂岩石工程问题不可缺少的手段。

自 20 世纪 50 年代开始,为了解决水利水电工程坝基、地下洞室和边坡的岩石力学问题,我国从国外引进了承压板法岩体变形试验、岩体单位抗力系数试验等岩体原位试验技术,起草了《岩石力学(实验室)试验操作规程(初稿)》。1958 年,随着三峡水利枢纽研究工作的开展,提出了一系列重大的岩石力学研究课题,并组建“三峡岩基专题组”开始系统的岩石力学试验研究工作。70 年代以后,为解决葛洲坝水利枢纽工程在软弱复杂岩基上建坝等工程技术难题,继而开展了大规模的岩石力学原位试验研究工作,先后研究了压力钢枕技术、岩体三轴试验技术、隧洞岩体抗力试验技术、岩体大型抗力试验技术、软弱夹层原位剪切流变试验技术等,系统分析了试验环境温度、承压板刚度、试验点边界条件等对岩体变形强度试验结果的影响。通过总结分析,1981 年颁布《水利水电工程岩石试验规程(试行)》(DLJ 204—81, SLJ 2—81),1992 年颁布《水利水电工程岩石试验规程(补充部分)》(DL 5006—92),1999 年颁布国家标准《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—99),2001 年颁布《水利水电工程岩石试验规程》(SL 264—2001),促进了我国岩石力学原位试验技术的迅速提高。

随着我国西南水电工程建设规模的巨型化和工程条件的复杂化,超高水坝、超大规模地下洞室、超深埋超长引水隧洞、高陡深切岩质边坡等工程所涉及的岩石力学问题很多已超出有规范和工程经验,复杂岩体给工程建设带来的挑战越来越明显,对岩石力学基础理论与岩体原位试验技术提出了更高的要求。

伴随着五十多年来岩石力学的发展,长江科学院一直密切关注和跟踪国内外岩体原位试验技术的进展,努力探索和创新。针对大型水利水电工程高应力及复杂地质条件下岩体力学特性和岩体力学参数的取值问题,在现有规范规定的原位岩石力学试验方法基础上,开展了复杂条件下岩体原位试验新技术及其应用的研究,研发了刚性承压板中心孔法岩体高压变形试验技术、岩体原位高压真三轴试验技术、岩体原位高压三轴和承压板流变试验技术及岩体破坏过程中微裂纹扩展精细探测技术,发展了岩体原位试验技术与成果分析方法,形成了复杂条件下系列岩体原位试验新方法,成功应用并解决了白鹤滩水电站柱状节理玄武岩修建高拱坝适宜性、锦屏二级引水隧洞高应力条件下深埋岩体力学参数取值、大渡河丹巴水电站石英云母片岩软岩成洞特性研究、乌东德水电站地下洞室软岩流变特性等关键技术问题。为展示岩体原位试验新技术及其工程应用研究成果,总结并整理成本书出版。

全书共分 7 章。第 1 章为绪论,第 2 章为岩体原位抗剪试验新技术,第 3 章为高应力条件下岩体原位变形试验,第 4 章为复杂应力路径岩体原位真三轴试验,第 5 章为岩体原位流变试验,第 6 章为裂隙岩体变形破坏过程精细测试,第 7 章为工程岩体力学参

数取值。

本书由周火明、张宜虎、范雷、钟作武、熊诗湖、李维树编著，周火明、范雷统稿。长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室工程岩体力学特性学科组（武汉）的各位同志参加了岩体原位试验新技术研发工作和工程应用试验研究工作。感谢国家自然科学基金重点项目“深部岩体工程特性的理论与实验研究”（50639090）、“十一五”国家科技支撑计划项目专题“复杂地质条件下岩体工程特性及评价方法”（2008BAB29B01-1）、水利部“948”项目“声发射技术引进及应用研究”（200901）的资助及项目组各位成员的帮助。特别感谢中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、长江勘测规划设计研究院二滩水电开发有限责任公司有关领导的关心和支持。

作者

2018年10月28日于武汉

目 录

第 1 章 绪论 1

- 1.1 岩体变形及强度性质常规原位试验技术 1
 - 1.1.1 承压板法岩体变形试验 1
 - 1.1.2 隧洞径向加压法岩体变形试验 5
 - 1.1.3 岩体强度特性原位直剪试验 6
- 1.2 岩体原位三轴试验技术现状 7
- 1.3 岩体原位流变试验现状 7
- 1.4 裂隙岩体破坏过程精细测试研究现状 8
 - 1.4.1 岩体结构螺旋 CT 扫描成像 8
 - 1.4.2 岩石试验红外热成像 9
 - 1.4.3 岩石破坏过程声发射测试技术 10
- 1.5 岩体力学参数取值现状 11
 - 1.5.1 岩体变形模量取值方法 11
 - 1.5.2 岩体强度参数取值方法 12
 - 1.5.3 软弱结构面抗剪强度参数取值方法 12
 - 1.5.4 工程岩体力学参数取值存在的问题 13

第 2 章 岩体原位抗剪试验新技术 14

- 2.1 坝基软岩大型抗力体试验 15
 - 2.1.1 试验概况 15
 - 2.1.2 岩体变形特征 15
 - 2.1.3 岩体变形破坏机制分析 20
 - 2.1.4 岩体抗剪强度及允许抗力 20
- 2.2 边坡岩体拉剪强度试验 21
 - 2.2.1 试验概况 21
 - 2.2.2 试验成果 21
 - 2.2.3 岩体拉剪强度准则 22

2.3 岩体高压直剪试验	24
2.3.1 试验设备	24
2.3.2 试验方案	25
2.3.3 试验成果	25
2.3.4 岩体强度参数分析	26
2.3.5 试样直剪破坏特征	31

第3章 高应力条件下岩体原位变形试验

3.1 岩体原位高压变形试验技术研发	33
3.1.1 刚性承压板中心孔法岩体高压变形试验技术	33
3.1.2 中心孔法岩体变形模量分层反演取值方法	36
3.1.3 岩体原位试验微机伺服控制试验技术	39
3.2 深埋隧洞岩体刚性承压板中心孔法高压变形试验	41
3.2.1 高应力环境岩体松弛及试样制备	41
3.2.2 中心孔岩体波速测试及高精度钻孔电视摄像	42
3.2.3 刚性承压板中心孔法变形试验	44
3.2.4 高地应力环境下不同深度岩体的变形参数	46
3.2.5 应力水平对岩体变形参数的影响	49
3.3 柱状节理玄武岩变形模量分层反演分析	52
3.3.1 试验研究目的	52
3.3.2 柔性板中心孔法岩体变形试验	52
3.3.3 柱状节理玄武岩变形模量分层反演	56
3.3.4 柱状节理玄武岩变形模量综合分析	57
3.4 石英云母片岩伺服控制原位变形试验	58
3.4.1 试验研究目的	58
3.4.2 伺服控制承压板变形试验	58
3.4.3 石英云母片岩变形特性各向异性特征	60

第4章 复杂应力路径岩体原位真三轴试验

4.1 YXSW-12 岩体原位真三轴试验系统	63
4.1.1 试验系统组成	63
4.1.2 工作原理	66

4.1.3	系统功能	67
4.1.4	试样制备	67
4.1.5	试验方法	68
4.1.6	成果处理	70
4.2	柱状节理岩体力学特性原位真三轴试验	73
4.2.1	岩体原位真三轴试验应力路径	73
4.2.2	三向应力作用下柱状节理玄武岩变形特性	74
4.2.3	柱状节理玄武岩三轴强度特性	79
4.2.4	柱状节理玄武岩卸侧压破坏特征	80
4.3	深埋岩体原位高压真三轴卸侧压破坏试验	81
4.3.1	试样制备及试验方案	81
4.3.2	深埋大理岩原位真三轴应力-应变曲线特征	83
4.3.3	深埋大理岩原位真三轴强度特性	85
4.3.4	深埋大理岩原位真三轴破坏特征	91
4.4	薄层大理岩化白云岩力学特性原位真三轴试验	92
4.4.1	试验布置及试验方案	92
4.4.2	薄层大理岩化白云岩各向异性变形特征	94
4.4.3	薄层大理岩化白云岩卸侧压破坏强度特性	98
4.4.4	薄层大理岩化白云岩卸侧压破坏模式	100
4.5	石英云母片岩变形破坏特性原位真三轴试验	100
4.5.1	试样制备及试验方案	100
4.5.2	石英云母片岩各向异性变形特性	102
4.5.3	石英云母片岩真三轴强度特性	105
4.5.4	石英云母片岩原位真三轴试验破坏特征	110
第 5 章 岩体原位流变试验		111
5.1	岩体原位流变试验新技术	112
5.1.1	岩体原位载荷流变试验技术	112
5.1.2	岩体原位真三轴流变试验技术	117
5.2	三峡永久船闸花岗岩原位单轴、三轴压缩流变试验	124

5.2.1	单轴压缩流变试验	124
5.2.2	常规三轴压缩流变试验	126
5.2.3	流变模型及流变参数	126
5.2.4	三峡永久船闸边坡岩体长期变形分析	127
5.3	薄层大理岩化白云岩真三轴流变试验	129
5.3.1	试验布置与加载方案	129
5.3.2	岩体流变曲线与流变特征	130
5.3.3	流变模型及流变参数	131
5.3.4	长期强度	134
5.4	高应力条件下大理岩原位真三轴流变试验	136
5.4.1	试验布置	137
5.4.2	高应力下大理岩流变特征	137
5.4.3	深埋大理岩流变模型及流变参数	139
5.4.4	深埋大理岩流变破坏特征	141
5.5	石英云母片岩真三轴卸侧压流变试验	143
5.5.1	试样制备与加载方案	143
5.5.2	石英云母片岩真三轴卸侧压流变特征	144
5.5.3	石英云母片岩真三轴卸侧压流变模型及流变参数	146
5.5.4	石英云母片岩长期强度	148
5.6	柱状节理玄武岩原位载荷流变试验	150
5.6.1	试验目的与加载方案	150
5.6.2	流变曲线与流变特征	151
5.6.3	流变模型及流变参数	152
5.7	软岩地基载荷流变试验	153
5.7.1	试验目的与试验方案	153
5.7.2	页岩地基流变特征与流变模型	156
5.7.3	桩-页岩复合地基流变特征与流变模型	159
5.7.4	桩-页岩复合地基流变机理分析	160

第 6 章 裂隙岩体变形破坏过程精细测试	162
6.1 精细测试综合集成技术	163
6.1.1 岩体结构超声 CT 成像	163
6.1.2 SCT 扫描成像	164
6.1.3 声发射定位技术	166
6.1.4 红外热成像	171
6.2 岩体破坏过程波速-应力-应变关系及特征强度判断	173
6.2.1 岩体单轴压缩全过程波速-应力-应变关系	174
6.2.2 岩体真三轴加载破坏全过程波速-应力-应变关系	175
6.2.3 岩体真三轴卸侧压破坏波速-应力-应变关系	177
6.2.4 基于波速-应力-应变关系的岩体强度特征值判定	178
6.3 含裂纹岩块单轴压缩破裂过程精细探测	180
6.3.1 含裂纹岩块渐进破坏过程的红外热成像	180
6.3.2 岩块破裂过程微裂纹空间形态 CT 扫描重建	183
6.3.3 基于声发射技术的含裂纹岩块渐进破坏过程的精细描述	185
6.3.4 含裂纹岩块渐进破坏过程的断裂机制分析	190
6.4 岩体直剪破坏声发射特征及微裂纹平面定位	192
6.4.1 原位直剪试验过程声发射测试	192
6.4.2 岩体直剪破坏声发射信号时序特征	192
6.4.3 岩体直剪破坏声发射信号频谱特性	193
6.4.4 岩体直剪破坏声发射平面定位分析	194
6.5 岩体真三轴破坏微裂纹三维空间定位	195
6.5.1 岩体真三轴试验过程声发射测试	195
6.5.2 柱状节理玄武岩卸侧压破坏过程声发射特征及空间定位	196
6.5.3 深埋大理岩卸侧压破坏过程声发射特征及空间定位	203
6.5.4 石英云母片岩真三轴卸侧压破坏试验过程声发射特征	208
6.6 岩体开挖松弛过程声发射监测及锚固效果评价	211
6.6.1 洞室开挖围岩声发射监测及松弛圈划分	211
6.6.2 洞室底板松弛特性声发射精细监测	214
6.6.3 基于声发射精细监测的岩体锚固效果评价	218

第 7 章 工程岩体力学参数取值	222
7.1 工程岩体力学参数取值方法.....	223
7.1.1 工程岩体力学参数值常用方法.....	223
7.1.2 工程岩体力学参数取值规范要求.....	224
7.1.3 工程岩体力学参数取值存在的问题.....	225
7.2 岩体力学参数取值影响因素.....	226
7.2.1 开挖松弛效应.....	226
7.2.2 尺寸效应.....	228
7.2.3 应力水平效应.....	229
7.2.4 复杂应力路径效应.....	232
7.2.5 中间主应力效应.....	233
7.2.6 不同试验方法对岩体强度参数取值的影响.....	236
7.3 岩体变形强度参数统计分析与经验取值.....	238
7.3.1 岩体变形模量统计.....	238
7.3.2 岩体抗剪强度参数统计.....	241
7.3.3 结构面抗剪强度参数地质建议值统计.....	243
7.3.4 岩体抗压强度和抗拉强度取值.....	245
7.4 典型工程岩体力学参数取值.....	246
7.4.1 葛洲坝 202 号泥化夹层剪切强度参数取值.....	246
7.4.2 三峡永久船闸边坡岩体变形强度参数取值.....	249
7.4.3 清江水布垭地下厂房岩体变形强度参数取值.....	251
7.4.4 锦屏二级深埋引水隧洞围岩力学参数取值.....	257
7.5 岩体力学参数取值研究展望.....	266

参考文献	269
-------------------	------------



第1章 绪论

岩体作为一种天然的地质体,在其形成过程中经受了构造变动、风化作用和卸荷作用等各种内外力地质作用的破坏和改造,包含不同尺度的节理和裂隙,具有不连续性、非均质性和各向异性,并赋存于地应力和地下水环境之中,其力学特性以及影响其力学与工程特性的各种因素的相互作用机理非常复杂。工程岩体力学特性与力学参数是工程优化设计的基本依据,合理确定这些参数对工程安全性和经济性影响极大。岩体原位试验是研究岩体力学特性,确定其力学参数的最有效手段之一。

我国有关岩石力学试验的系统研究工作始于 20 世纪 50 年代,并随着三峡水利枢纽、葛洲坝水利枢纽工程建设的开展,先后进行了岩体原位变形试验技术、岩体三轴试验技术、隧洞岩体抗力试验技术、岩体大型抗力试验技术、软弱夹层原位剪切流变试验技术等研究,促进了我国岩石力学原位试验技术的提高^[1-10]。自 2000 年,随着我国西南水利水电工程建设规模的巨型化和工程条件的复杂化,岩体结构高度不确定性和时空变异性、高应力赋存环境、强卸荷工程作用等导致的岩爆、塌方、大变形等岩石力学问题逐渐显现,对岩石力学基础理论与原位试验技术要求已超出现有规范^[11],亟须针对复杂条件下岩石力学问题进行岩体原位试验新技术研究,以应对复杂岩体给工程建设带来的新挑战。

1.1 岩体变形及强度性质常规原位试验技术

我国岩体力学性质原位试验始于 20 世纪 50 年代, 历经五十余年, 试验技术不断发展和进步。岩体变形性质试验从刚性承压板法岩体变形试验发展到柔性承压板法岩体变形试验、狭缝法岩体变形试验、单(双)轴压缩试验; 引进苏联双筒法 K_0 试验作为研究压力隧洞围岩变形性质及其与衬砌结构联合作用最直接的手段, 进而发展了隧洞水压法试验和径向液压枕法试验。岩体强度试验从混凝土与岩石接触面抗剪强度试验开始, 发展到岩体和结构面抗剪强度直剪试验及岩体载荷试验与三轴强度试验。以《水利水电工程岩石试验规程(试行)》(DLJ 204—81, SLJ 2—81)、《水利水电岩石试验规程(补充部分)》(DL 5006—92)及《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—99)为标志, 总结了我国岩石试验经验, 统一了我国岩体力学性质原位试验方法。

1.1.1 承压板法岩体变形试验

岩体变形试验的目的是通过试验获得岩体应力-应变关系曲线, 研究岩体变形性质, 取得各种岩体变形参数。根据不同的加载方式, 岩体原位变形试验可分为半无限平面加载、圆形孔洞径向加载和轴向加载三种类型。

半无限平面加载试验主要是模拟基岩(坝基、建筑物基础等岩体)的受力条件, 最具有代表性的试验方法是承压板法岩体变形试验, 该试验方法直观, 应用最早也最普遍, 多年来针对各类岩体积累了大量数据, 在工程设计中得到普遍的应用。

承压板法岩体变形试验是现行有关标准和规程推荐的主要方法^[12], 有刚性承压板法岩体变形试验、柔性承压板法岩体变形试验及柔性承压板中心孔法岩体变形试验等。承压板法岩体变形试验模拟地基受压的加载方式, 假定加载平面为半无限平面, 试验荷载影响范围内的岩体为均匀、各向同性的弹性介质, 根据半无限平面地基承压板加载公式, 计算岩体变形模量和弹性模量。

1. 刚性承压板法岩体变形试验

岩体原位变形试验以圆形承压板法应用最早和最普遍, 也是《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)推荐的主要变形试验方法。

刚性承压板法岩体变形试验是通过刚性承压板对半无限岩体表面局部加压的岩体变形试验(图 1.1)。计算岩体变形模量(或弹性模量)的公式如下:

$$E_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(1 - \mu_0^2) p D_c}{W_0} \quad (1.1a)$$

或

$$E_e = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(1 - \mu_0^2) p D_c}{W_e} \quad (1.1b)$$

式中: E_0 为岩体变形模量, MPa; W_0 为承压板下岩体表面总变形, cm; E_e 为岩体弹性模量, MPa; W_e 为承压板下岩体表面弹性变形, cm; p 为按承压面积计算的压力, MPa;

D_c 为承压板直径, cm; μ_0 为岩体泊松比。

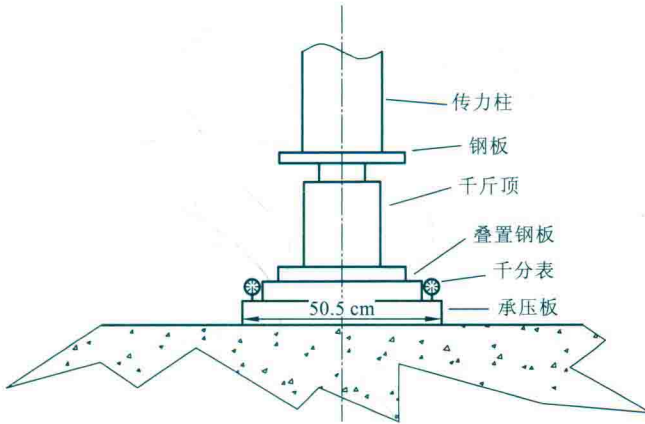


图 1.1 刚性承压板法岩体变形试验安装示意图

2. 柔性承压板法岩体变形试验

柔性承压板法岩体变形试验是通过柔性承压板（液压枕）对半无限岩体表面局部加压的岩体变形试验，当采用中心孔测量岩体变形时，称为柔性承压板中心孔法岩体变形试验（图 1.2）。

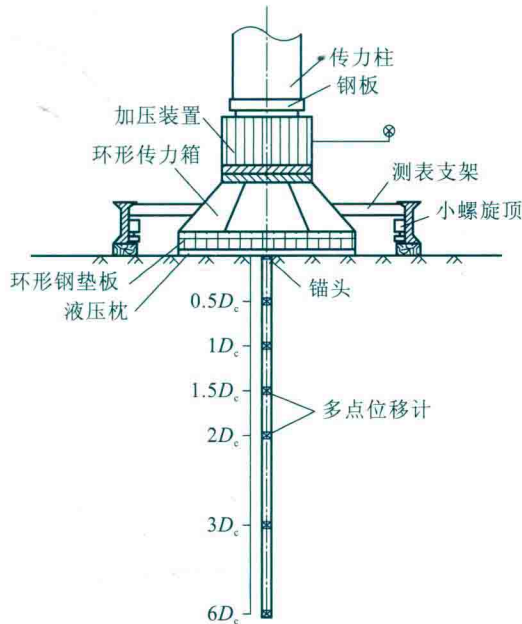


图 1.2 柔性承压板中心孔法岩体变形试验安装示意图

采用柔性环形枕加压测量表面中心点岩体变形时，岩体变形模量按式（1.2）计算：

$$E_0 = \frac{2(1-\mu_0^2)P}{W_{h0}}(r_1 - r_2) \quad (1.2)$$

式中： W_{h0} 为环形枕中心表面岩体变形，cm； r_1 为环形承压面外半径，cm； r_2 为环形承压面内半径，cm。

采用柔性四枕法（方形枕）加压测量表面中心点岩体变形时，岩体变形模量按式（1.3）计算：

$$E_0 = \frac{8(1-\mu_0^2)P}{\pi W_{s0}} \left[0.88(a_0 + L_0) - \left(a_0 \operatorname{arsh} \frac{L_0}{a_0} + L_0 \operatorname{arsh} \frac{a_0}{L_0} \right) \right] \quad (1.3)$$

式中： W_{s0} 为承压表面中心点岩体变形，cm； a_0 为承压面外缘至缝隙内中心线距离，cm； L_0 为承压面内缘至缝隙内中心线距离，cm。

3. 岩体变形试验承压板刚度与边界条件

1) 刚性承压板刚度

刚性承压板法岩体变形试验采用的承压板应有足够的刚度，承压板的刚度相对于试验岩体来说应是绝对刚性的。苏联学者戈尔布诺夫-波萨道夫提出如下公式判别承压板的绝对刚性和绝对柔性：

$$S = 3 \times \frac{1-\mu_c^2}{1-\mu_0^2} \times \frac{E_c}{E_e} \times \frac{R_c^3}{h_c^3} \quad (1.4)$$

式中： S 为圆形承压板柔性指数； μ_c 为承压板的泊松比； E_c 为承压板的弹性模量，GPa； μ_0 为岩体的泊松比； E_e 为岩体的弹性模量，GPa； R_c 为承压板半径，cm； h_c 为承压板厚度，cm。

当 $S < 0.5$ 时，为绝对刚性； $0.5 \leq S \leq 10$ 时，为有限刚性； $S > 10$ 时，为绝对柔性。从式（1.4）可以看出，承压板的柔性指数（ S ）除与板的材料性质有关外，还与板的尺寸有关。岩体弹性模量越高，承压板的半径越大，要求板的弹性模量（刚性）越高，厚度越大。可见，刚性承压板仅采用一块 6 cm 厚钢板对于坚硬岩体是远远不够的。例如，弹性模量为 20 GPa、泊松比为 0.30 的岩体，采用直径为 50.5 cm 的钢质承压板时，板厚必须大于 21.2 cm 时才能符合绝对刚性的条件。

2) 变形试验点的边界条件

承压板法岩体变形试验有两个理论假定，其一是承压板所在平面为无限，其二是承压板下的半无限地基为均匀、各向同性的弹性体。这些假定实际上难以满足，只能达到某种程度的近似。为尽量接近理论假定条件，往往将试验点选择在岩性相对均匀的岩体内，避开断层、夹层、溶洞等。另外，原位试验一般在洞室内进行，受硐室尺寸和测试技术条件的限制，试验加载表面有限，只要求这个加载表面近似于一个平面，空间范围达到适当大，尽量控制由不完全满足“无限大”这个条件所导致的相对变形误差在允许范围（10%）以内。“试点边界条件”问题就是要确定这个“适当大的空间范围”，允许的误差取为 10%。

以刚性承压板法岩体变形试验为例, 设承压板下的平均压力为 p , 承压板直径为 D_c , 承压板外距板中心 r_n 处的位移 W_n 的计算公式如下:

$$W_n = \frac{1}{2} \cdot \left(\arcsin \frac{R_c}{r_n} \right) \cdot \frac{(1-\mu^2)pd}{E} \quad (1.5)$$

计算承压板外某一点的沉陷与承压板沉陷的比值

$$\delta_w = \frac{W_n}{W_0} = \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{R_c}{r_n} \right) = 0.64 \left(\arcsin \frac{R_c}{r_n} \right) \quad (1.6)$$

式中: W_n 为承压板外距板中心 r_n 处的位移; R_c 为承压板半径; r_n 为承压板外距板中心的距离。

由式 (1.6) 可以算出, 当 $R_c/r_n=1/7$, 即板外点距承压板边缘三倍直径时, 岩体沉陷为承压板位移的 9.2%。因此, 当承压板边缘外有三倍直径的平面时, 误差已小于 10%。

1.1.2 隧洞径向加压法岩体变形试验

隧洞径向加压法岩体变形试验分为径向液压枕法和水压法两种加压方法, 该方法模拟压力隧洞围岩的受力状况, 对圆形断面试验洞施加均匀径向压力, 测定岩体径向位移, 据此计算岩体的弹性抗力系数和岩体变形模量。在设计压力隧洞衬砌时, 还可以研究衬砌结构与围岩联合受力的工作状况。该方法承受荷载的岩体尺寸较大, 包含了更多结构面影响, 能研究岩体的各向异性特征。岩体弹性抗力系数 (K_e) 为作用于围岩表面的压力与变形之比, 它随隧洞直径 (圆形隧洞) 增大而减小。半径为 1 m 的圆形隧洞的 K 值称为岩体单位抗力系数 (K_0)。

径向液压枕法岩体变形试验将充油的液压钢枕沿隧洞围岩周边布置, 在反力框架支撑下向围岩施加压力并观测岩体径向变形, 试验安装见图 1.3。

为了满足平面应变条件, 隧洞径向加压法的试验洞加压段长度要求不小于三倍的隧洞直径, 此时, 岩体弹性抗力系数 (K_e)、岩体单位抗力系数 (K_0)、岩体变形模量按下式计算:

$$K_e = \frac{p'}{\Delta R} \quad (1.7)$$

$$K_0 = \frac{p'}{\Delta R} \cdot \frac{R_0}{100} \quad (1.8)$$

$$E_0 = p'(1+\mu_0) \frac{R_0}{\Delta R} \quad (1.9)$$

式中: K_e 为岩体弹性抗力系数, MPa/cm; K_0 为岩体单位抗力系数, MPa/cm; E_0 为岩体变形模量, MPa; p' 为作用于围岩表面上的压力, MPa; ΔR 为主断面岩体表面径向变形, cm; R_0 为试验洞半径, cm; μ_0 为岩体泊松比。

当试验洞加压段长度小于三倍的隧洞直径时, 需要对计算结果进行修正^[13]。

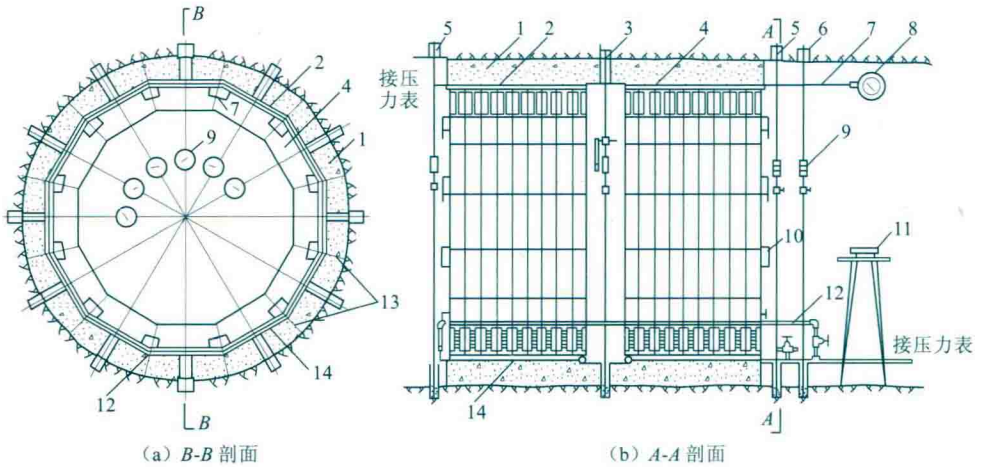


图 1.3 径向液压枕法岩体变形试验安装示意图

- 1—传力混凝土条块；2—液压枕；3—主测断面；4—反力支撑；5—辅助量测断面；6—影响范围量测；
7—管路；8—压力表；9—量测仪表；10—油管；11—读数仪器；12—进液管路；13—传力混凝土分缝；
14—砂浆垫层

1.1.3 岩体强度特性原位直剪试验

岩体原位直剪试验因其操作简单，适用于多种岩土体材料的原位抗剪强度测试，在科研与工程中得到广泛运用，试验安装见图 1.4。试验步骤如下：首先在原状试样上套一钢模，然后填充水泥砂浆并凝固，对试样施加垂直压力，再对试样施加水平推力至试样破坏，记录整个过程中的水平推力和位移。根据多个试样不同垂直压力下的剪切应力，按莫尔-库仑强度准则确定岩体的抗剪强度参数。

$$\tau = f \cdot \sigma_n + c \quad (1.10)$$

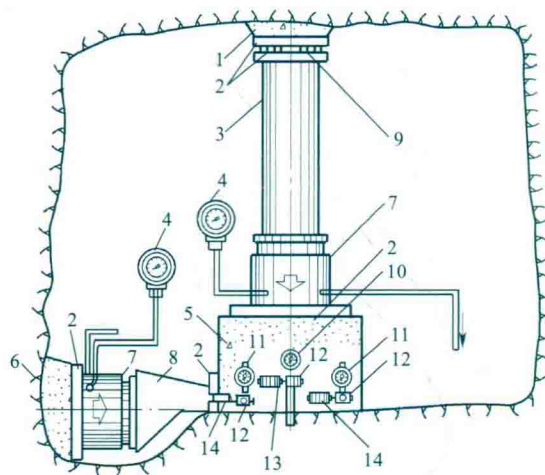


图 1.4 岩体直剪试验安装示意图

- 1—砂浆；2—钢板；3—传力柱；4—压力表；5—试样；6—后座；7—千斤顶；8—传力块；
9—滚轴排；10、11—垂直测表；12—标点；13、14—水平测表