

UDC

中华人民共和国行业标准

SL

P

SL264—2001

水利水电工程岩石试验规程

**Specifications for rock tests in water conservancy
and hydroelectric engineering**

2001—02—28 发布

2001—04—01 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国行业标准

水利水电工程岩石试验规程

**Specifications for rock tests in water conservancy
and hydroelectric engineering**

SL264—2001

主编单位:长江水利委员会长江科学院

批准部门:中华人民共和国水利部

施行日期:2001年4月1日

中华人民共和国水利部

关于批准发布《水利水电工程
岩石试验规程》SL264—2001 的通知

水国科[2001]61号

部直属各单位,各省、自治区、直辖市、计划单列市水利(水务)厅(局),新疆生产建设兵团水利局:

根据部水利水电技术标准制定、修订计划,由水利水电规划设计总院主持,以水利部长江水利委员会长江科学院为主编单位修订的《水利水电工程岩石试验规程》,经审查批准为水利行业标准,并予以发布。标准的名称和编号为:

《水利水电工程岩石试验规程》SL264—2001(代替 SLJ2—81)。

本标准自2001年4月1日起实施。在实施过程中,请各单位注意总结经验,如有问题请函告主持部门,并由其负责解释。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

二〇〇一年二月二十八日

前 言

根据 1997 年水利部水利水电标准编制、修订计划和水利部水利水电规划设计管理局水规局[1997]1 号文,按 SL01—97《水利水电技术标准编写规定》的要求,对《水利水电工程岩石试验规程》DLJ204—81、SLJ2—81 和《水利水电工程岩石试验规程(补充部分)》DL5006—92 进行修订,修订后合订为一本。

本规程的修订由水利部水利水电规划设计总院主持。在修订过程中,采取了以长江水利委员会长江科学院为主编单位和以成都勘测设计研究院、黄河水利委员会勘测规划设计研究院、松辽委东北勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、广东省水利水电科学研究所、湖南省水利水电勘测设计研究院和长江科学院等单位的专家组成的专家组相结合的组织形式,在广泛收集国内外资料,总结国内外的新经验、新方法、新技术,并结合国内水利水电工程建设需要的基础上,经广泛征求意见,反复讨论后定稿。

《水利水电工程岩石试验规程》主要包括以下内容:

- 岩块物理力学性质试验;
- 岩体变形和强度试验;
- 岩体应力测试;
- 岩体声波测试;
- 工程岩体观测;
- 岩石试验工作管理的基本要求等附录。

对 DLJ204—81、SLJ2—81 和 DL5006—92 进行修订的主要内容包括以下几个方面:

——删除了岩石抗拉强度试验的轴向拉伸法、岩石变形试验的弹性常数测定仪法、钻孔横向位移观测的挠度计法、弱面抗剪的楔形体法及残余强度试验方法;

——增加了岩块颗粒密度试验的水中称重法、岩块变形试验的千分表法、岩块断裂韧度试验、钻孔径向加压法岩体变形试验的

钻孔千斤顶法、岩体应力测试的水压致裂法、岩体表面倾斜观测、岩体锚杆应力观测、岩体渗压观测和岩体声波观测等方法；

——岩体变形试验中增补了柔性承压板法计算公式，试验成果综合整理方法中增补了确定试验参数标准值的方法，并将岩体应力测量套钻孔应力解除法实测数据整理专门列为附录 H。

本规程解释单位：水利水电规划设计总院

本规程主编单位：长江水利委员会长江科学院

本规程主要起草人：夏熙伦 龚壁新 邬爱清 周火明
胡月兰 李云林 郭 玉 钟作武
高鹏飞 何沛田 韩 军 徐 平

目 次

1	总则	(9)
2	符号	(10)
3	基本规定	(12)
4	岩块物理性质试验	(15)
4.1	含水率试验	(15)
4.2	吸水性试验	(16)
4.3	颗粒密度试验	(18)
4.4	块体密度试验	(20)
4.5	膨胀性试验	(24)
4.6	耐崩解性试验	(28)
4.7	冻融试验	(30)
5	岩块力学性质试验	(33)
5.1	单轴压缩变形试验	(33)
5.2	单轴抗压强度试验	(37)
5.3	三轴压缩强度试验	(38)
5.4	抗拉强度试验	(40)
5.5	直剪强度试验	(42)
5.6	点荷载强度试验	(44)
5.7	断裂韧度试验	(48)
6	岩体变形试验	(53)
6.1	承压板法试验	(53)
6.2	狭缝法试验	(62)
6.3	单(双)轴压缩法试验	(65)
6.4	钻孔径向加压法试验	(67)
6.5	隧洞液压枕径向加压法试验	(70)
6.6	隧洞水压法试验	(76)

7	岩体强度试验	(80)
7.1	混凝土与岩体接触面直剪试验	(80)
7.2	结构面直剪试验	(85)
7.3	结构面直剪蠕变试验	(89)
7.4	岩体直剪试验	(91)
7.5	岩体三轴压缩试验	(93)
7.6	岩体载荷试验	(97)
8	岩体应力测试	(100)
8.1	孔壁应变法测试	(100)
8.2	孔底应变法测试	(103)
8.3	孔径变形法测试	(105)
8.4	水压致裂法测试	(109)
8.5	表面应变法测试	(111)
9	岩石声波测试	(115)
9.1	岩块声波测试	(115)
9.2	岩体声波测试	(118)
10	工程岩体观测	(121)
10.1	洞室收敛观测	(121)
10.2	钻孔轴向岩体位移观测	(122)
10.3	钻孔横向岩体位移观测	(125)
10.4	岩体表面倾斜观测	(127)
10.5	岩体应变观测	(130)
10.6	岩体应力观测	(132)
10.7	岩体锚杆载荷观测	(134)
10.8	岩体锚杆应力观测	(136)
10.9	岩体渗压观测	(138)
10.10	岩体声波观测	(142)
附录 A	岩石试验工作管理基本要求	(144)
附录 B	试样采取要求	(146)
附录 C	比重瓶校正	(147)

附录 D	试验洞开挖要求	(150)
附录 E	地质描述内容规定	(152)
附录 F	液压千斤顶、液压枕和滚轴排率定	(153)
附录 G	试验成果综合整理方法	(157)
附录 H	岩体应力测试套钻孔应力解除法实测数据整理	(161)
	本规程的用词和用语说明	(173)

1 总 则

1.0.1 为统一水利水电工程岩石试验方法,提高试验成果质量及其可比性,特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于水利水电工程的岩石试验工作。

1.0.3 水利水电工程岩石试验工作应根据试验大纲或试验计划要求按室内与现场、静力与动力各项试验互相结合和互相补充的原则,针对工程不同阶段的主要岩石力学问题进行。

1.0.4 水利水电工程岩石试验除应符合本规程外,尚应符合国家及水利水电行业现行有关标准的规定。

2 符 号

ω_0 ——天然含水率	ρ_p ——颗粒密度
ω_a ——自然吸水率	ρ_w ——试验温度下试液密度
ω_s ——饱和吸水率	ρ_1 ——石蜡密度
m_0 ——试件烘干前质量	ρ_n ——高分子树脂胶密度
m_d ——试件烘干后质量	ρ_{w0} ——温度为 T_0 时水的密度
m_r ——残留试块烘干质量	ρ_{wn} ——温度为 T_n 时水的密度
m_a ——试件浸水 48h 质量	T_0 ——校正比重瓶时比重瓶内纯水温度
m_s ——试件强制饱和后质量	T_n ——试验时比重瓶内纯水温度
m_w ——强制饱和试件水中称量	D_e ——点荷载试验等价岩心直径
m_{1p} ——蜡封试件质量	σ ——正应力、法向应力、均方差
m_{1w} ——蜡封试件水中称量	P ——载荷,置信概率
m_n ——涂封高分子树脂胶试件质量	E_e ——弹性模量
m_{nw} ——涂封高分子树脂胶试件水中称量	E_0 ——变形模量
m_{10} ——比重瓶内纯水温度为 T_0 时瓶水总质量	E_{50} ——应力为抗压强度 50% 时的割线模量
m_{1n} ——比重瓶内纯水温度为 T_n 时瓶水总质量	μ ——岩石泊松比
C_v ——玻璃体膨胀系数、偏差系数	U_n ——纵向变形量
C_1 ——比重瓶校正计算系数	U_d ——横向变形量
ρ_0 ——天然密度	V_n ——轴向自由膨胀率
ρ_d ——干密度	V_d ——径向自由膨胀率
ρ_s ——饱和密度	

V_{hp} ——	有侧限时轴向膨胀率	W_R ——	两点间的相对变形
P_s ——	膨胀压力	Δd ——	钻孔径向变形
U_{hp} ——	有侧限时轴向变形量	ΔR ——	岩体表面径向变形
L_f ——	冻融质量损失率	K ——	岩体抗力系数
R_f ——	冻融后饱和单轴抗压强度	K_0 ——	岩体单位抗力系数
K_f ——	冻融系数	p_0 ——	内水压力
R ——	单轴抗压强度、半径	E_f ——	承压板弹性模量
R_c ——	标准单轴抗压强度	μ_f ——	承压板泊松比
e_h ——	轴向应变	φ ——	内摩擦角
e_d ——	横向应变	G ——	剪切模量
σ_t ——	抗拉强度	f ——	摩擦系数
τ ——	剪切应力	C ——	粘聚力
Q ——	剪切载荷、推力载荷	V_p ——	纵波速度
I_d ——	耐崩解性指数	V_s ——	横波速度
I_s ——	未经修正的岩石点荷载强度指数	t_p ——	纵波传播时间
$I_{s(50)}$ ——	经尺寸修正后岩石点荷载强度指数	t_s ——	横波传播时间
$P_{s(50)}$ ——	D_c^2 为 2500mm ² 时对应的破坏载荷	f_p ——	换能器频率
P_c ——	修正后的断裂载荷	G_d ——	动剪切模量
K_{Kc} ——	断裂韧度	λ_d ——	动拉梅系数
K_{Kc}^c ——	修正后的断裂韧度	K_d ——	动体积模量
p ——	单位面积压力	S_H ——	最大平面主应力
W ——	岩体表面变形	S_h ——	最小平面主应力
W_Z ——	深度 Z 处的岩体变形	S_v ——	铅直向主应力
W_A ——	变形测点 A 处的绝对变形	P_b ——	岩体破裂压力
		P_s ——	瞬时关闭压力
		P_r ——	岩体重张压力
		P_h ——	静水压力
		f_K ——	参数标准值

3 基本规定

3.0.1 水利水电工程岩石试验应包括岩石物理力学性质试验、岩体强度和变形特性试验、岩体应力测试、岩石声波测试及工程岩体观测等内容。

3.0.2 岩石试验工作应在详细了解工程规模、工程地质条件、设计意图、建筑物特点和施工方法的基础上进行。试验内容、试验方法、试验数量等应与工程建设的各个勘察设计阶段的深度相适应，并应符合下列规定：

1 规划阶段应充分利用与建筑物地段工程地质条件相类似工程的岩石试验成果。根据实际情况，可布置少量室内岩块试验。对近期开发工程，可布置少量现场点荷载试验及声波测试。

2 可行性研究阶段应根据划分的工程地质单元布置室内岩块试验和现场岩体声波测试。对坝址和其他建筑物方案选择起重要作用的主要岩石力学问题，应布置现场岩体试验项目。

3 初步设计阶段应根据工程岩体条件及建筑物特点，拟定出关键的岩石力学问题，采取岩块和岩体试验相结合的原则，并满足试验数量的要求，进行深入的试验研究。

4 技施设计阶段应根据初步设计审查后新发现的工程地质问题和新提出的岩石力学问题以及建筑物基础加固与处理的需要，进行专门性岩石试验。

3.0.3 工程施工和运行期间，应对主要建筑物部位的工程岩体进行工程岩体原位观测。

3.0.4 水利水电工程各勘察设计阶段的岩石试验工作，应根据岩石试验任务书或合同的要求确定。

提出试验任务的单位应提供相应勘察设计阶段有关岩石试验的枢纽设计和工程地质资料。

3.0.5 试验单位在开展工作之前，应收集和分析工程地质资料，结合设计方案和勘察工作，编制岩石试验大纲。

岩石试验大纲在执行过程中可根据地质条件和设计情况的变化适当进行调整修改。

3.0.6 岩石试验大纲应包括下列内容：

- 1 工程概况及地质条件。
- 2 水工建筑物特点和主要岩石力学问题。
- 3 试验目的、试验内容和技术要求。
- 4 试验布置。
- 5 仪器设备和人员安排。
- 6 计划进度。
- 7 提交试验成果的名称及数量。

3.0.7 各设计阶段的岩石试验工作均应指定技术负责人。技术管理、设备管理和安全管理应符合本规程附录 A 的规定。

3.0.8 岩块试验的试样可在钻孔、平洞、竖井、坑槽中或岩石露头处采取,同组试样的岩性应基本相同。取样位置和数量应根据地质条件、工程特点和试验要求由试验人员和地质人员共同研究确定。试样采取应符合本规程附录 B 的规定。

3.0.9 岩体试验应布置在建筑物所在位置或附近具有代表性岩体中。试验宜在试验洞中进行,试验洞开挖应符合本规程附录 D 的规定。

3.0.10 对试点(体)和试验洞段应进行地质描述。地质描述内容应符合本规程附录 E 的规定。

3.0.11 应加强与地质、设计和施工单位的配合,共同研究试验过程中出现的问题。

3.0.12 当极软岩、软弱夹层、断层破碎带的厚度较大且性质均一时,除进行必要的原位岩体试验外,还可取样进行室内试验。

3.0.13 岩体变形试验方法应根据岩石坚硬程度和岩体完整性确定。

3.0.14 当地质条件和建筑物结构比较复杂时,可根据工程需要在初步设计阶段或技施设计阶段布置隧洞液压枕径向加压法试验或隧洞水压法试验。

3.0.15 岩体本身和结构面直剪试验应根据建筑物特点,在分析影响抗滑稳定的主要因素和可能破坏形式的基础上进行布置。混凝土与岩体接触面的直剪试验应布置在与建筑物直接接触或与其岩层、岩性相同的岩体上。

3.0.16 当岩体中存在对建筑物稳定性起控制作用的结构面且结构面的时间效应会对建筑物产生不利影响时,宜布置结构面直剪蠕变试验。

3.0.17 岩体应力测试应根据工程的区域地质构造、构造应力场分析、建筑物类型和设计要求进行布置,并选择试验方法。

3.0.18 岩石声波测试应根据不同的勘察设计、施工及运行阶段的工程需要进行布置,可与岩块试验、岩体试验和工程岩体观测配套进行。

3.0.19 工程岩体观测项目应根据工程观测目的和具体地质条件确定,选择在建筑物的关键地段、岩体性状变化最大或岩体稳定条件最不利等部位的工程岩体中布置观测断面。

3.0.20 岩石试验及观测仪器设备应合理选型配套,定期进行计量率定。比重瓶校正、液压千斤顶、液压枕和滚轴排率定应符合本规程附录 C 和附录 F 的规定。

3.0.21 试验成果综合整理方法应符合本规程附录 G 的规定。

3.0.22 试验工作结束后,应编制和提交试验报告。

4 岩块物理性质试验

4.1 含水率试验

4.1.1 本试验采用烘干法,适用于矿物不含结晶水和含结晶水的岩石。

4.1.2 试件制备应符合下列规定:

1 试件应在现场采取,不得采用爆破取样,室内不得采用湿法加工。试件在采取、运输、储存和制备过程中,含水率的变化不应超过1%。

2 试件尺寸应大于组成岩石最大颗粒粒径的10倍。

3 试件质量不得小于40g。

4 每组试件数量不宜少于6个。

4.1.3 试件描述应包括下列内容:

1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。

2 为保持试件天然含水状态所采取的措施。

4.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

——烘箱和干燥器;

——天平(感量 0.01g);

——具有密封盖的试样盒。

4.1.5 试验步骤应符合下列规定:

1 制备试件并称其质量。

2 对于不含矿物结晶水的岩石,应在105~110℃的恒温下烘24h。对于含有矿物结晶水的岩石,应降低烘干温度,可在 $40\pm 5^{\circ}\text{C}$ 恒温下烘24h。

3 将试件从烘箱中取出,放入干燥器内冷却至室温,称试件质量。

4 重复本条2、3款步骤,直到相邻两次称量之差不超过后一次称量的0.1%。

5 称量精确至0.01g。

4.1.6 试验成果整理应符合下列规定：

1 岩石天然含水率按下式计算：

$$\omega_0 = \frac{m_0 - m_d}{m_d} \times 100 \quad (4.1.6)$$

式中 ω_0 ——天然含水率，%；

m_0 ——试件烘干前的质量，g；

m_d ——试件烘干后的质量，g。

2 计算值精确至0.01。

4.1.7 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试件编号、试件描述、试件烘干前后的质量、试验人员、试验日期。

4.2 吸水性试验

4.2.1 本试验可分为自然吸水率试验和饱和吸水率试验，岩石自然吸水率采用自由吸水法测定，饱和吸水率采用煮沸法或真空抽气法测定。适用于遇水不崩解、不溶解和不开缩湿胀的岩石。

4.2.2 试件制备应符合下列规定：

1 试件宜采用规则形状，在试件制备困难时可采用不规则形状。

2 规则试件尺寸应符合下列规定：

1) 圆柱体直径或方柱体边长宜为48~54mm。

2) 含大颗粒岩石的试件直径或边长应大于最大颗粒尺寸的10倍。

3) 试件高度与直径或边长之比宜为2.0~2.5。

3 不规则试件应符合下列规定：

1) 边长为40~50mm的浑圆形岩块或直径为48~54mm的圆柱体；

2) 试件质量宜为150~200g。

4 每组试件块数不得少于3块。

4.2.3 试件描述应包括下列内容：

1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。

2 裂隙分布。

3 试件形状。

4.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——钻石机、切石机、磨石机；

——烘箱、干燥器；

——天平(感量 0.01g)；

——水槽；

——真空抽气设备和煮沸设备。

4.2.5 试验步骤应符合下列规定：

1 清除试件表面的尘土和松动颗粒。对软岩和极软岩，试件应采取保护措施，防止试件在吸水过程中掉块或崩解。

2 试件烘干应符合本规程 4.1.5 条 2~4 款的规定。

3 采用自由吸水法测定岩石自然吸水率时，应将试件放入水槽，先注水至试件高度的1/4处，以后每隔 2h 分别注水至试件高度的 1/2 和 3/4 处，6h 后全部浸没试件。试件全部浸入在水中自由吸水 48h 后，取出试件拭干表面水分并称量。

4 对自由吸水后的试件进行强制饱和。采用煮沸法饱和试件时，煮沸容器内的水面应始终高于试件，煮沸时间不得少于6h。经煮沸的试件应放置在原容器中冷却至室温，取出试件拭干表面水分并称量。

采用真空抽气法饱和试件时，饱和试件的容器内的水面应高于试件，真空压力表读数宜为100kPa，直至无气泡逸出为止，但抽气时间不得少于 4h。经真空抽气的试件应放置在原容器中，在大气压力下静置 4h，取出试件拭干表面的水分并称量。

5 称量精确至0.01g。

4.2.6 试验成果整理应符合下列规定：

1 岩石的自然吸水率、饱和吸水率按下列公式计算：

$$\omega_a = \frac{m_a - m_d}{m_d} \times 100 \quad (4.2.6-1)$$

$$\omega_s = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (4.2.6-2)$$

- 式中 ω_a ——自然吸水率, (%);
 ω_s ——饱和吸水率, (%);
 m_a ——试件浸水 48h 后的质量, (g);
 m_s ——试件强制饱和后的质量, (g);

2 计算值精确至 0.01。

4.2.7 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试件编号、试件描述、试验方法、干试件质量、浸水后试件质量、强制饱和后试件质量、试验人员、试验日期。

4.3 颗粒密度试验

4.3.1 岩石颗粒密度试验可分为比重瓶法和水中称量法。比重瓶法适用于各类岩石,水中称量法适用于除遇水崩解、溶解和干缩湿胀以及密度小于 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 的其他各类岩石。

4.3.2 比重瓶法试件制备应符合下列规定:

1 将岩石试件用粉碎机粉碎成岩粉,使之全部通过 0.25mm 筛孔,用磁铁吸去铁屑。

2 对含有磁性矿物的岩石,应采用瓷研钵或玛瑙研钵粉碎,使之全部通过 0.25mm 的筛孔。

4.3.3 水中称量法试件制备应符合下列规定:

- 1 试件可采用规则或不规则形状。
- 2 试件尺寸应大于组成岩石最大颗粒粒径的 10 倍。
- 3 每个试件质量不宜小于 150g。

4.3.4 试件描述应包括下列内容:

- 1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。
- 2 试件粉碎方法。
- 3 试件形状。

4.3.5 主要仪器和设备应包括下列各项:

——钻石机、切石机、磨石机;

- 粉碎机、瓷研钵或玛瑙研钵、磁铁块；
- 筛(孔径0.25mm)；
- 天平(感量 0.001g)；
- 烘箱和干燥器；
- 真空抽气设备或煮沸设备；
- 恒温水槽；
- 短颈比重瓶(容积 100ml)；
- 温度计(量程 0~50℃)；
- 水中称量装置。

4.3.6 比重瓶法试验步骤应符合下列规定：

1 将制备好的岩粉置于105~110℃的恒温下烘干,烘干时间不得少于 6h,然后放入干燥器内冷却至室温。

2 用四分法取其中两份岩粉,每份岩粉质量为15g。

3 将称量后的岩粉装入烘干的比重瓶内,注入试液(纯水或煤油)至比重瓶容积的一半处。对含水溶性矿物的岩石,应使用煤油作试液。

4 当使用纯水作试液时,可采用煮沸法或真空抽气法排除气体。当使用煤油作试液时,应采用真空抽气法排除气体。

5 当采用煮沸法排除气体时,煮沸后加热时间不应少于1h。

6 当采用真空抽气法排除气体时,真空压力表读数宜为 100kPa,抽气应抽至无气泡逸出,且抽气时间不少于 1h。

7 将经过排除气体的试液注入比重瓶至近满,然后置于恒温水槽内,使瓶内温度保持稳定,上部悬液澄清,测量瓶内试液的温度。

8 塞好瓶塞,使多余的试液自瓶塞毛细孔中溢出,将瓶外擦干,称瓶、试液和岩粉的总质量。

9 洗净比重瓶,注入经排除气体并与试验同温度的试液至比重瓶内,按本条7、8款规定称瓶和试液的总质量。

10 本试验应进行两次平行试验。

11 称量精确至0.001g。

4.3.7 水中称量法试验步骤应符合下列规定：

- 1 按本规程4.2.5条2~4款的规定对试件进行烘干、自然吸水 and 强制饱和。
- 2 将强制饱和的试件置于水中称量装置上,称试件在水中的质量,并测量水温。
- 3 称量精确至0.01g。

4.3.8 试验成果整理应符合下列规定：

- 1 比重瓶法试验岩石颗粒密度按下式计算：

$$\rho_p = \frac{m_d}{m_1 + m_d - m_2} \cdot \rho_w \quad (4.3.8-1)$$

式中 m_1 —— 比重瓶和试液总质量,g;
 m_2 —— 比重瓶、试液和岩粉总质量,g;
 ρ_p —— 颗粒密度,g/cm³;
 ρ_w —— 试验温度条件下试液密度,g/cm³。

- 2 比重瓶法试验两次平行测定的允许偏差为0.02g/cm³,取两次测值的平均值作为试验结果。

- 3 水中称量法试验岩石颗粒密度按下式计算：

$$\rho_p = \frac{m_d}{m_d - m_w} \cdot \rho_w \quad (4.3.8-2)$$

式中 m_w —— 强制饱和试件在水中的称量(g)

- 4 计算值精确至0.01g/cm³。

4.3.9 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试件编号、试件描述、试验方法、试验人员、试验日期。

比重瓶法试验还应记录比重瓶编号、试液温度、试液密度、干岩粉质量、瓶和试液总质量、瓶、试液及岩粉总质量。水中称量法试验还应记录试件的干质量、浸水后质量、强制饱和后质量、试件在水中称量、水密度。

4.4 块体密度试验

4.4.1 岩石块体密度试验可分为量积法、水中称量法和密封法。

量积法适用于能制备成规则试件的各种岩石,水中称量法适用于除遇水崩解、溶解和干缩湿胀外的其它各类岩石,密封法适用于不能用量积法或直接在水中称量进行试验的岩石。当采用密封法进行块体密度试验时,应同时测定岩石的天然含水率,密封材料可选用石蜡或高分子树脂胶涂料。

4.4.2 量积法试件制备应符合下列规定:

- 1 试件尺寸应符合本规程4.2.2条2款的规定。
- 2 试件高度、直径或边长的允许偏差为 $\pm 0.3\text{mm}$ 。
- 3 试件两端面的不平整度允许偏差为 $\pm 0.05\text{mm}$ 。
- 4 端面应垂直于试件轴线,允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。
- 5 方柱体或立方体试件相邻两面应互相垂直,允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

4.4.3 水中称量法试件制备应符合本规程 4.3.3 的规定。

4.4.4 密封法试件宜采用边长为 40~60mm 的近似立方体或浑圆状体。

4.4.5 进行块体干密度试验时每组试件数量不得少于 3 个,进行块体湿密度试验时试件数量不宜少于 5 个。

4.4.6 试件描述应包括下列内容:

- 1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。
- 2 裂隙分布。
- 3 试件形状。

4.4.7 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 钻石机、切石机、磨石机和车床;
- 烘箱和干燥器;
- 天平(感量 0.01g);
- 测量平台;
- 石蜡及融蜡设备;
- 水中称量装置;
- 高分子树脂胶涂料及配制涂料的用具。

4.4.8 量积法试验步骤应符合下列规定:

1 测量试件两端和中间三个断面上相互垂直的两个方向的直径或边长,按平均值计算截面积。

2 测量两端面周边上对称四点和中心点处的高度,计算高度平均值。

3 称试件在天然状态下的质量。

4 按本规程4.2.5条2~4款中的规定将试件烘干并进行自由吸水和强制饱和。

5 长度测量精确至0.01mm,称量精确至0.01g。

4.4.9 水中称量法试验步骤应符合本规程4.3.7的规定。

4.4.10 石蜡密封法试验步骤应符合下列规定:

1 制备试件并称量。

2 将试件系上细线,置于温度60℃左右的融蜡中1~2s,使试件表面均匀涂上一层蜡膜,厚度约1mm。当蜡膜有气泡时,应用热针刺穿并用蜡液涂平,待冷却后称蜡封试件质量。

3 将蜡封试件置于水中称量。

4 取出试件,拭干表面水分后再次称量。当浸水后的蜡封试件质量增加时,应重新进行试验。

5 称量精确至0.01g。

4.4.11 高分子树脂胶涂料密封法试验步骤应符合下列规定:

1 制备试件并称量。

2 配制高分子树脂胶。

3 用毛笔将高分子树脂胶均匀涂抹于试件表面,宜涂刷两遍。待溶剂挥发,在试件表面形成一层薄膜后,称涂层与试件总质量。

4 其余步骤应符合本规程4.4.10条3~5款的规定。

4.4.12 试验成果整理应符合下列规定:

1 量积法岩石块体密度按下列公式计算:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{AH} \quad (4.4.12-1)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{AH} \quad (4.4.12-2)$$

$$\rho_d = \frac{m_d}{AH} \quad (4.4.12-3)$$

式中 ρ_0 ——天然密度, g/cm^3 ;
 ρ_d ——干密度, g/cm^3 ;
 ρ_s ——饱和密度, g/cm^3 ;
 A ——试件截面积, cm^2 ;
 H ——试件高度, cm 。

2 水中称量法岩石块体密度按下列公式计算:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{m_s - m_w} \cdot \rho_w \quad (4.4.12-4)$$

$$\rho_d = \frac{m_d}{m_s - m_w} \cdot \rho_w \quad (4.4.12-5)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s - m_w} \cdot \rho_w \quad (4.4.12-6)$$

3 石蜡密封法岩石块体密度按下列公式计算:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{\frac{m_{ip} - m_{iw}}{\rho_w} - \frac{m_{ip} - m_0}{\rho_1}} \quad (4.4.12-7)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_0}{1 + 0.01 \omega_0} \quad (4.4.12-8)$$

式中 m_{ip} ——蜡封试件质量, g ;
 m_{iw} ——蜡封试件水中称量, g ;
 ρ_1 ——石蜡密度, g/cm^3 。

4 高分子树脂胶涂料密封法岩石块体密度按下列公式计算:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{\frac{m_n - m_{nw}}{\rho_w} - \frac{m_n - m_0}{\rho_n}} \quad (4.4.12-9)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_0}{1 + 0.01 \omega_0} \quad (4.4.12-10)$$

式中 m_n ——涂封高分子树脂胶试件质量, g ;
 m_{nw} ——涂封高分子树脂胶试件水中称量, g ;
 ρ_n ——高分子树脂胶密度, g/cm^3 。

5 计算精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 。

4.4.13 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试件编号、试件描述、试验方法、试件在各种含水状态下的质量、试件水中称量、试件尺寸、水密度、石蜡或高分子树脂胶的密度、试验人员、试验日期。

4.5 膨胀性试验

4.5.1 本试验可分为自由膨胀率试验、侧向约束膨胀率试验和体积不变条件下膨胀压力试验。自由膨胀率试验适用于遇水不易崩解的岩石,侧向约束膨胀率试验和体积不变条件下膨胀压力试验适用于各类岩石。

4.5.2 试件制备应符合下列规定:

1 试样应在现场采用干钻法采取,并保持天然含水状态,不得采用爆破或湿钻法取样。试样的天然含水率变化不宜超过1%。

2 自由膨胀率试验每组试件数量不得少于3个。

1)圆柱体试件直径宜为50~60mm,高度宜等于直径。两端面不平行度允许偏差为 $\pm 0.05\text{mm}$,垂直度允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

2)正方体试件边长宜为50~60mm,两端面不平行度允许偏差为 $\pm 0.05\text{mm}$,垂直度允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

3 侧向约束膨胀率试验每组试件数量不得少于3个,试件应为圆柱体,直径宜为50mm,尺寸偏差为0~ -0.1mm ,高度不宜小于20mm,且应大于岩石最大颗粒粒径的10倍。两端面不平行度允许偏差为 $\pm 0.05\text{mm}$,且应垂直于试件轴线,垂直度允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

4 体积不变条件下岩石膨胀压力试验,试件数量视所要求的受力方向而定,每种情况不得少于3个。试件规格和精度应符合本条3款的规定。

4.5.3 试件描述应包括下列内容:

1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。

2 膨胀变形和加载方向分别与层理、片理、裂隙之间的关系。

4.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 钻石机、切石机、磨石机和车床；
- 测量平台、角尺、千分卡尺、放大镜；
- 天平(称量大于 500g,感量为 0.01g)；
- 自由膨胀试验仪(图 4.5.4-1)；

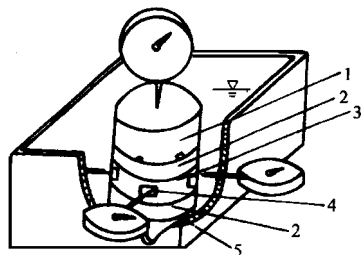


图 4.5.4-1 自由膨胀试验仪示意图

1—铝板；2—金属透水板；3—试样；4—紫铜片；5—容器

- 侧向约束膨胀率试验仪；
- 膨胀压力试验仪(图 4.5.4-2)；

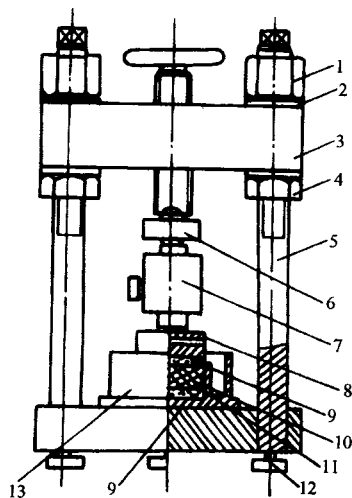


图 4.5.4-2 岩体膨胀压力试验仪示意图

1—螺母；2—平垫圈；3—横梁；4—螺母；5—摆柱；6—接头；7—压力传感器；
8—上压板；9—金属透水板；10—试件；11—套环；12—调整件；13—容器

- 千分表；
- 压力传感器；
- 温度计。

4.5.5 自由膨胀率试验步骤应符合下列规定：

1 将试件放入自由膨胀试验仪内，在试件上、下端分别放置透水板，顶部放置一块金属板。

2 在试件上部和四侧对称的中心部位分别安装千分表，四侧千分表与试件接触处宜放置一块紫铜片。

3 每隔10min 记录千分表读数一次，直至连续三次读数不变。

4 缓慢向容器内注入蒸馏水，直至淹没上部透水板并立即读数。

5 在第一小时内，每隔10min 测读变形一次，以后每隔 1h 测读变形一次，直至相邻三次读数差不大于0.001mm 即可认为稳定，但浸水试验时间不得少于 48h。

6 整个试验过程中应保持水位不变，水温变化不得大于2℃。

7 试验结束后，应详细描述试件的崩解、开裂、掉块、表面泥化或软化现象。根据需要可对试块进行矿物镜检、X 衍射分析和差热分析。

4.5.6 侧向约束膨胀试验步骤应符合下列规定：

1 在内壁涂有凡士林的金属套环内，先在其底部放置一块金属透水板和一张薄型滤纸，接着放置试件，其上再放置一张薄型滤纸和一块金属透水板，最后在顶部放置固定金属载荷板，并安装千分表。金属载荷板的质量应能对试件产生5kPa 的压力。

2 试验步骤及稳定标准应符合本规程4.5.5 条 3~6 款的规定。

3 试验结束后，应描述试件表面的泥化和软化现象。根据需要可对试件进行矿物镜检、X 衍射分析和差热分析。

4.5.7 体积不变条件下的膨胀压力试验步骤应符合下列规定：

1 将试件放入内壁涂有凡士林的金属环内，并在试件上、下

端分别放置一张薄型滤纸和金属透水板。

2 安装加压系统及测量试件变形的千分表,使仪器各部位和试件在同一轴线上,不得出现偏心载荷。

3 对试件施加10kPa的压力,测记千分表读数,每隔10min测读一次,连续三次读数不变时,重新调整千分表并记录千分表读数。

4 向盛水容器内缓慢注入蒸馏水,直至淹没上部透水板。观测千分表的变化,当变形量达到0.001mm时,调节所施加的压力,使试件膨胀变形在整个试验过程中保持不变。

5 开始时每隔10min读数一次,连续三次读数差小于0.001mm时,改为每小时读数一次,连续三次读数差小于0.001mm时,即可认为稳定并记录试验压力。浸水后总的试验时间不得少于48h。

6 试验过程中应保持水位不变,水温变化不得大于2℃。

7 试验结束后,应描述试件表面的泥化和软化现象。根据需要可对试件进行矿物镜鉴、X衍射分析和差热分析。

4.5.8 试验成果整理应符合下列规定:

1 岩石自由膨胀率、侧向约束膨胀率和膨胀压力按下列公式计算:

$$V_h = \frac{U_h}{H} \times 100 \quad (4.5.8-1)$$

$$V_d = \frac{U_d}{D} \times 100 \quad (4.5.8-2)$$

$$V_{hp} = \frac{U_{hp}}{H} \times 100 \quad (4.5.8-3)$$

$$P_s = \frac{P}{A} \quad (4.5.8-4)$$

式中 V_h ——轴向自由膨胀率,%;
 V_d ——径向自由膨胀率,%;
 V_{hp} ——侧向约束轴向膨胀率,%;
 P_s ——膨胀压力,MPa;

- U_h ——试件轴向变形量,mm;
- H ——试件高度,mm;
- U_d ——试件径向平均变形量,mm;
- D ——试件直径或边长,mm;
- U_{hp} ——侧向约束轴向变形量,mm;
- P ——轴向载荷,N;
- A ——试件截面积,mm²。

2 计算值取三位有效数字。

3 分别绘制轴向自由膨胀率 V_h 与时间 t 及径向自由膨胀率 V_d 与时间 t 的关系曲线,确定最大轴向及径向自由膨胀率。

4 绘制膨胀压力 P_s 与时间 t 的关系曲线,确定最大膨胀压力。

4.5.9 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试件编号、试件描述、试件尺寸、试验温度、试验时间、径向变形、轴向变形、轴向载荷、试验人员、试验日期。

4.6 耐崩解性试验

4.6.1 本试验适用于粘土类岩石和风化岩石。

4.6.2 试件制备应符合下列规定:

- 1 现场采取的试样应保持天然含水量,并密封装箱。
- 2 试件为浑圆形,每块质量为40~60g。
- 3 每组试件数量不应少于 20 块。

4.6.3 试件描述应包括:岩石名称、颜色、矿物成分、裂隙、颗粒大小。

4.6.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 烘箱及干燥器;
- 天平(称量大于 2000g,感量 0.01g);
- 温度计;
- 耐崩解性试验仪,由动力装置、圆柱形筛筒和水槽组成

(图4.6.4)。其中圆柱形筛筒长 100mm,直径 140mm,筛孔直径 2mm。

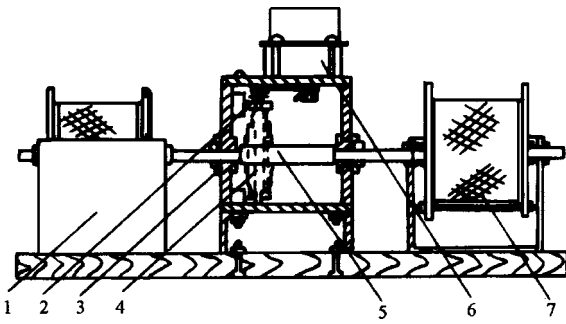


图 4.6.4 耐崩解性试验仪示意图

1—水槽;2—蜗杆;3—轴套;4—蜗轮;5—大轴;6—马达;7—筛筒

4.6.5 试验步骤应符合下列规定:

1 烘干筛筒并称量。

2 将试件装入耐崩解试验仪的圆柱形筛筒内,经105~110℃恒温烘干至恒量后(烘干时间不少于 24h),在干燥器内冷却至室温并称量。

3 将装有试件的圆柱形筛筒放置入水槽内,向水槽内注入纯水,使水位保持在转动轴下约20mm,圆柱形筛筒以 20r/min 的转速转动 10min 后,将圆柱形筛筒和残留试块经 105~110℃恒温烘干至恒量后(烘干时间不少于 24h),在干燥器内冷却至室温并称量。

4 重复本条 2、3 款,取得第二循环后的圆柱形筛筒和残留试件的质量。

5 根据工程重要性和岩石耐崩解性能可进行3~5 次循环。

6 试验过程中水温应保持在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 范围内。

7 试验结束后,应对残留试件、水的颜色和水中沉积物进行描述。根据需要,对水中沉积物进行颗粒分析、界限含水量测定和粘土矿物分析。

8 称量精确至0.1g。

4.6.6 试验成果整理应符合下列规定:

1 岩石耐崩解性指数按下式计算:

$$I_d = \frac{m_r}{m_d} \times 100 \quad (4.6.6)$$

式中 I_d ——岩石耐崩解性指数, %;
 m_d ——原试件烘干质量, g;
 m_r ——残留试件烘干质量, g。

2 计算精确至0.1。

3 岩石耐崩解性以第二次循环的 I_d 表示。

4 根据需要可绘制耐崩解性指数 I_d 与循环次数 N 关系图。

5 根据需要可绘制第二次循环的耐崩解性指数 I_d 与塑性指数 I_p 分类图。

4.6.7 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样位置、试件编号、试件描述、水温、试件在试验前后的烘干质量、试验人员、试验日期。

4.7 冻融试验

4.7.1 本试验采用直接冻融法,适用于能制备成规则试件的各类岩石。

4.7.2 试件制备应符合下列规定:

1 标准试件为圆柱形,可用钻孔岩心或坑探槽中采取岩块加工制成。试件在采取、运输和制备过程中应避免扰动。

2 制备试件时应采用纯净水作冷却液。

3 对于遇水崩解、溶解和干缩湿胀的岩石,应采用干法制备试件。

4 试件直径宜为48~54mm,但应大于岩石最大颗粒粒径的10倍。

5 试件高度与直径之比为2.0~2.5。

6 对于非均质粗粒岩石或非标准钻孔岩心,可采用非标准尺寸的试件,但高径比不宜小于2.0。

7 试件精度应符合本规程 4.4.2 条 2~5 款的规定。

8 每组试件不应少于 6 个。

4.7.3 试件描述应包括下列内容：

- 1 岩石名称、颜色、矿物成分、颗粒大小、风化蚀变特征。
- 2 裂隙分布。
- 3 加载方向与层理、片理及裂隙之间的关系。

4.7.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 低温冰箱(最低制冷温度不高于 -25°C)；
- 钻石机、切石机、磨石机和车床；
- 测量平台、角尺、千分卡尺和放大镜；
- 天平(称量大于 2000g ,感量 0.01g)；
- 烘箱和干燥器；
- 试件饱和设备；
- 白铁皮盒(容积为 $210\text{mm}\times 210\text{mm}\times 200\text{mm}$)和铁丝架(可放入白铁皮盒中,铁丝架分为9格,每格可放一个试件)；
- 材料试验机。

4.7.5 试验步骤应符合下列规定：

1 试件的干燥、吸水、饱和处理及称量应符合本规程 4.2.5 条 2~5 款的规定。

2 取三块饱和试件进行冻融前的单轴抗压强度试验。

3 将另外三块饱和试件放置入白铁皮盒内的铁丝架中,一起放置入低温冰箱,在 $-20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 温度下冻 4h,然后取出白铁皮盒,往盒内注水浸没试件,水温应保持在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$,融解 4h,即为一个循环。

4 根据工程需要确定冻融循环次数,以 20 次为宜,严寒地区不应少于 25 次。。

5 每进行一次冻融循环,详细检查各试件有无掉块、裂缝等,观察其破坏过程。试验结束后进行一次总的检查,并详细记录。

6 冻融循环结束后,从水中取出试件拭干表面水分并称量,进行单轴抗压强度试验。

4.7.6 试验成果整理应符合下列规定：

1 冻融质量损失率、冻融后的饱和单轴抗压强度和冻融系数

按下列公式计算：

$$L_f = \frac{m_s - m_f}{m_s} \times 100 \quad (4.7.6-1)$$

$$R_s = \frac{P_s}{A} \quad (4.7.6-2)$$

$$R_f = \frac{P_f}{A} \quad (4.7.6-3)$$

$$K_f = \frac{\bar{R}_f}{\bar{R}_s} \quad (4.7.6-4)$$

式中 L_f ——冻融质量损失率，%；
 R_s ——冻融前的饱和单轴抗压强度，MPa；
 R_f ——冻融后的饱和单轴抗压强度，MPa；
 K_f ——冻融系数；
 m_s ——冻融试验前试件饱和质量，g；
 m_f ——冻融试验后试件饱和质量，g；
 P_s ——冻融前饱和试件破坏载荷，N；
 P_f ——冻融后饱和试件破坏载荷，N；
 A ——垂直于加载方向的试件横截面积，mm²；
 \bar{R}_f ——冻融试验后的饱和单轴抗压强度平均值，MPa；
 \bar{R}_s ——冻融试验前的饱和单轴抗压强度平均值，MPa。

2 饱和单轴抗压强度取三位有效值。

3 冻融质量损失率和冻融系数精确至0.01。

4.7.7 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样地点、试件编号、试件描述、试件尺寸、干试件质量、冻融前后饱和试件质量、破坏载荷、试验人员、试验日期。

5 岩块力学性质试验

5.1 单轴压缩变形试验

5.1.1 本试验可分为电阻应变片法和千分表法,适用于能制成规则试件的各类岩石。坚硬和较坚硬的岩石宜采用电阻应变片法,较软岩宜采用千分表法,对于变形较大的软岩和极软岩,可采用百分表测量变形。

5.1.2 试件制备应符合下列规定:

1 试件可用岩心或岩块加工制成,在采取、运输和制备过程中应避免扰动。

2 试件尺寸应符合本规程 4.2.2 条 2 款的规定。

3 试件加工精度应符合本规程 4.4.2 条 2~5 款的规定。

4 试件含水状态可根据需要选择天然含水状态、烘干状态和饱和状态。试件烘干和饱和应符合本规程 4.2.5 条 2~4 款的规定。

5 同一含水状态下每组试件数量不应少于 3 个。

5.1.3 试件描述应包括下列内容:

1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。

2 试件的层理、节理、裂隙及其与加载方向的关系。

3 试件加工过程中出现的问题。

4 贴片位置或测表触点部位。

5 含水状态。

5.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

—— 钻石机、锯石机、磨石机;

—— 测量平台;

—— 烘箱和饱和设备;

—— 万用电表、兆欧表;

—— 静态电阻应变仪;

- 千(百)分表;
- 测量表架;
- 材料试验机。

5.1.5 加载方法和稳定标准应符合下列规定:

1 加载方法宜采用逐级一次连续加载法,根据需要可采用逐级一次循环法或逐级多次循环法,每次循环退载至0.2~0.5kN的接触载荷。

2 最大循环载荷为预估极限载荷的50%,宜等分五级施加,至最大循环载荷后再逐级加载直至破坏。

3 加载采用时间控制,施加一级载荷后立即读数,1min后再读数一次,即可施加下一级载荷。

5.1.6 电阻应变片法试验步骤应符合下列规定:

1 选择电阻应变片。应变片栅长应大于岩石矿物最大颗粒的10倍,小于试件半径。同一组试件的工作片与温度补偿片的规格和灵敏系数应相同,电阻值允许偏差为±0.1Ω。

2 在试件中部选定互相垂直的两对面,以相对面为一组,分别为贴纵、横向应变片的位置,贴片位置应尽量避免开裂或斑晶。在互相垂直且与纵轴成45°的方向上用零号砂纸将贴片位置打磨,并用酒精擦洗干净。

3 在贴片位置均匀涂抹一层防底潮胶液,厚度不应大于0.1mm,面积约为20mm×30mm。

4 应变片应牢固地贴在试件上,纵、横向电阻应变片的数量均不应少于2片。

5 焊接导线。在应变片表面涂抹一层防潮胶液,厚约2mm。系统绝缘电阻值应大于200MΩ。

6 将试件置于试验机承压板中心,上、下承压板与试件之间放置与试件相同直径的刚性垫块,垫块厚度与直径之比不应小于0.5。

7 调整球形座,使刚性垫块与试验机上下承压板均匀接触,受力对中。在试件调平过程中,接触载荷范围内相对两纵向应变

值之差不得大于一倍。

8 按规定的加载方式和载荷分级,以每秒0.5~1.0MPa的速率加载,逐级测读载荷与应变值,直至试件破坏。测值不宜少于10组。

9 记录加载过程及破坏时出现的现象,对破坏后的试件进行描述。

5.1.7 千分表法试验步骤应符合下列规定:

1 采用千分表法测量岩石试件变形时,对于较软岩,可将测量表架直接安装在试件上测量试件的纵、横向变形。对于变形较大、强度较低的软岩和极软岩,可将测表安装在磁性表架上,磁性表架安装在试验机的下承压板上,纵向测表表头与上承压板边缘接触,横向测表表头直接与试件接触,测读初始读数。两对相互垂直的纵向测表和横向测表应分别安装在试件直径的对称位置上。

2 其它步骤应符合本规程5.1.6条6~9款的规定。

5.1.8 试验成果整理应符合下列规定:

1 各级应力按下式计算:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5.1.8-1)$$

式中 σ ——应力,MPa;

P ——载荷,N;

A ——试件截面面积,mm²。

2 千分表法纵向应变与横向应变按下式计算:

$$\varepsilon_h = \frac{\sum_1^4 (U_h - U_{h0})}{4L} \quad (5.1.8-2)$$

$$\varepsilon_d = \frac{\sum_1^4 (U_d - U_{d0})}{2D} \quad (5.1.8-3)$$

式中 ε_h ——纵向应变;

ε_d ——横向应变;

U_h ——纵向测表读数,mm;

U_d —— 横向测表读数, mm;
 U_{h0} —— 纵向测表初始读数, mm;
 U_{d0} —— 横向测表初始读数, mm;
 ΔU_h —— 纵向测表读数差, mm;
 ΔU_d —— 横向测表读数差, mm;
 L —— 纵向测量标距, mm;
 D —— 试件直径、横向测量标距, mm。

3 绘制应力 σ 与应变 ε 关系曲线。

4 弹性模量、变形模量和泊松比按下式计算：

$$E_e = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (5.1.8-4)$$

$$\mu_e = \frac{\varepsilon_{db} - \varepsilon_{da}}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (5.1.8-5)$$

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{h50}} \quad (5.1.8-6)$$

$$\mu_{50} = \frac{\varepsilon_{d50}}{\varepsilon_{h50}} \quad (5.1.8-7)$$

式中 E_e —— 岩石弹性模量, MPa;
 μ_e —— 岩石弹性泊松比;
 σ_a —— 应力与纵向应变关系曲线上直线段起始点的应力值, MPa;
 σ_b —— 应力与纵向应变关系曲线上直线段终点的应力值, MPa;
 ε_{ha} —— 应力为 σ_a 时的纵向应变值;
 ε_{hb} —— 应力为 σ_b 时的纵向应变值;
 ε_{da} —— 应力为 σ_a 时的横向应变值;
 ε_{db} —— 应力为 σ_b 时的横向应变值;
 E_{50} —— 岩石变形模量, 即割线模量, MPa;
 σ_{50} —— 抗压强度 50% 时的应力值, MPa;
 ε_{h50} —— 应力为 σ_{50} 时的纵向应变值;

$\epsilon_{\sigma 50}$ ——应力为 σ_{50} 时的横向应变值；

μ_{50} ——与 $\epsilon_{\sigma 50}$ 和 $\epsilon_{\sigma 50}$ 相应的泊松比。

5 岩石应力、弹性模量和变形模量值取三位有效数，泊松比计算值精确至0.01。

5.1.9 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样位置、试件编号、试件描述、试件尺寸、试验方法、载荷、纵横向应变值或测表读数、试验人员、试验日期。

5.2 单轴抗压强度试验

5.2.1 本试验适用于能制备成规则试件各类岩石。

5.2.2 试件制备除应符合本规程 4.7.2 条 1~3 款的规定外，还应符合下列规定：

1 试件尺寸应符合本规程 4.2.2 条 2 款的规定。

2 试件加工精度应符合本规程 4.4.2 条 2~5 款的规定。

3 试件含水状态可根据需要选择天然状态、烘干状态或饱和状态，并应符合下列规定：

1) 天然状态应在试样拆除密封后立即制备试件，并测定其天然含水率。

2) 烘干状态应符合本规程 4.1.5 条 2~4 款的规定。

3) 饱和状态应符合本规程 4.2.5 条 3、4 款的规定。

4 同一含水状态下每组试件数量不应少于 3 个。

5.2.3 试件描述应包括下列内容：

1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。

2 试件层理、裂隙及其与加载方向的关系。

3 试件在制备过程中出现的问题。

4 试件尺寸和加工精度。

5 含水状态。

5.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——钻石机、锯石机、磨石机和车床；

——测量平台、角尺、千分卡尺、放大镜；

- 烘箱、干燥器和饱和设备；
- 材料试验机。

5.2.5 试验步骤应符合下列规定：

- 1 试验安装应符合本规程 5.1.6 条 6 款的规定。
- 2 试验调平应符合本规程 5.1.6 条 7 款的规定。
- 3 以每秒 0.5~1.0MPa 的速率加载直至破坏。
- 4 试验结束后,描述试件的破坏形态。

5.2.6 试验成果整理应符合下列规定：

- 1 岩石单轴抗压强度和软化系数按下列公式计算：

$$R = \frac{P}{A} \quad (5.2.6-1)$$

$$\eta = \frac{\bar{R}_s}{\bar{R}_d} \quad (5.2.6-2)$$

式中 R ——岩石单轴抗压强度,MPa;

P ——破坏载荷,N;

A ——试件截面面积,mm²;

η ——软化系数;

\bar{R}_s ——饱和状态下单轴抗压强度平均值,MPa;

\bar{R}_d ——干燥状态下单轴抗压强度平均值,MPa。

- 2 强度计算值取三位有效值,软化系数计算值精确至 0.01。

5.2.7 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样位置、试件编号、试件描述、试件尺寸、破坏载荷、破坏形态、试验人员、试验日期。

5.3 三轴压缩强度试验

5.3.1 本试验采用等侧向压力($\sigma_2 = \sigma_3$),适用于能制成圆柱体试件各类岩石。

5.3.2 试件制备除应符合本规程 4.7.2 条 1~3 款的规定外,还应符合下列规定：

- 1 试件尺寸应符合本规程 4.2.2 条 2 款的规定。

2 试件加工精度应符合本规程 4.4.2 条 2~5 款的规定。

3 同一含水状态下每组试件的数量不得少于5个。

5.3.3 试件描述内容应符合本规程 5.2.3 的规定。

5.3.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——钻石机、锯石机、磨石机和车床；

——测量平台、角尺、千分卡尺、放大镜；

——三轴试验机。

5.3.5 侧向压力选择应符合下列规定：

1 侧向压力大小应根据工程需要和岩石特性确定。

2 侧向压力宜按等差级数进行分级，也可按等比级数分级，分级数不得少于 5 级。

5.3.6 试验步骤应符合下列规定：

1 试件应采取防油措施，先在试件表面涂抹上薄层防油胶液，胶液凝固后套上耐油的薄橡皮套或塑料套。

2 根据三轴试验机要求安装试件，排出压力室内的空气。

3 先以每秒0.05MPa 的加载速率同步施加侧向压力和轴向压力至预定的侧压力值，并保持侧压力在试验过程中始终不变。

4 以每秒0.5~1.0MPa 的加载速率施加轴向载荷直至试件破坏，记录试验全过程的轴向载荷和变形值。

5 对破坏后的试件进行描述。当有完整破裂面时，应测量破裂面与试件轴线之间的夹角。

5.3.7 试验成果整理应符合下列规定：

1 不同侧压条件下岩石三轴压缩强度和应变值按下列公式计算：

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \quad (5.3.7-1)$$

$$\varepsilon_{\text{m}} = \frac{U_{\text{mp}}}{H} \quad (5.3.7-2)$$

$$\varepsilon_{\text{du}} = \frac{U_{\text{dp}}}{D} \quad (5.3.7-3)$$

式中 σ_1 ——轴向应力,MPa;
 P ——轴向破坏载荷,N;
 A ——试件截面面积, mm^2 ;
 ε_{hu} ——轴向应变;
 U_{hp} ——试件轴向压缩变形量,mm;
 H ——试件高度,mm;
 ε_{du} ——横向应变;
 U_{dp} ——试件横向变形,mm;
 D ——试件直径,mm;

2 根据轴向应力 σ_1 及相应的侧向应力 σ_3 ,在 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 坐标内用最小二乘法绘制最佳关系曲线,在最佳关系曲线上选定若干组对应值,在剪应力 τ 与正应力 σ 坐标图上以 $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 为圆心,以 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 为半径绘制莫尔应力圆,根据莫尔—库仑强度理论确定三轴应力状态下岩石的抗剪强度参数值。

3 绘制轴向与侧向应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)与轴向应变 ε_{hu} 关系曲线、轴向与侧向应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)与横向应变 ε_{du} 关系曲线。根据需要,可分别计算弹性模量、泊松比等三轴压缩变形参数。

5.3.8 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样地点、试件编号、试件描述、试件尺寸、侧向压力、轴向载荷、轴向变形、横向变形、试验人员、试验日期。

5.4 抗拉强度试验

5.4.1 本试验采用劈裂法,适用于能制成规则试件各类岩石。

5.4.2 试件制备除应符合本规程 4.7.2 条 1~3 款的规定外,还应符合下列规定:

1 试件劈裂面的受拉方向应与岩石单轴抗压试验的受力方向一致。

2 试件应采用圆柱体,直径宜为 48~54mm,高度与直径之比宜为 0.5~1.0,试件高度应大于岩石最大颗粒粒径的 10 倍。

3 试件加工精度应符合本规程 4.4.2 条 2~5 款的规定。

4 试件的含水状态可根据需要选择,其天然状态、烘干状态
和饱和状态应符合本规程 5.2.2 条 3 款的规定。

5.4.3 试件描述应符合本规程 5.2.3 的规定。

5.4.4 主要仪器和设备应符合本规程 5.2.4 的规定。

5.4.5 试验步骤应符合下列规定:

1 通过试件直径的两端,在试件的侧面沿轴线方向画两条加
载基线,将两根垫条沿加载基线固定。对于坚硬和较坚硬岩石应
选用直径为 1mm 钢丝为垫条,对于软弱和较软弱的岩石应选用宽
度与试件直径之比为 0.08~0.1 的硬纸板或胶木板为垫条。

2 将试件置于试验机承压板中心,调整球形座,使试件均匀
受力,作用力通过两垫条所确定的平面。

3 以每秒 0.1~0.3MPa 的速率加载直至试件破坏,软岩和较
软岩应适当降低加载速率。

4 试件最终破坏应通过两垫条决定的平面,否则应视为无效
试验。

5 记录破坏载荷和加载过程中出现的现象,并对破坏后的试
件进行描述。

5.4.6 试验成果整理应符合下列规定:

1 岩石抗拉强度按下式计算:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DH} \quad (5.4.6)$$

式中 σ_t ——岩石抗拉强度,MPa;

P ——破坏载荷,N;

D ——试件直径,mm;

H ——试件高度,mm。

2 计算值取三位有效数。

5.4.7 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样地点、试件编号、
试件描述、试件尺寸、破坏载荷、试验人员、试验日期。

5.5 直剪强度试验

5.5.1 本试验采用平推法,适用于岩块、结构面和混凝土与岩石接触面。

5.5.2 试件制备应符合下列规定:

- 1 试件在采取、运输和制备过程中应防止扰动和失水。
- 2 试件宜采用边长不小于150mm的立方体或直径不小于150mm的圆柱体。
- 3 结构面试件的结构面应位于试件的中部。
- 4 混凝土与岩石接触面试件应采用钢模具或直接采用剪切盒制备,接触面应位于试件中部,起伏差为边长的1~2%。
- 5 混凝土原材料和配合比应根据设计要求确定,骨料最大粒径不得大于试件边长的1/6。
- 6 在制备混凝土与岩石接触面试件的同时,应制备混凝土抗压试件3块。
- 7 混凝土与岩石接触面的直剪试件和混凝土抗压试件应进行养护,达到规定的龄期后进行试验。同组试验宜在同一龄期下进行。

8 根据需要试件可采用天然含水状态或饱和状态。

9 每组试件不得少于5个。

5.5.3 试件描述应包括下列内容:

- 1 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。
- 2 层理、片理、裂隙以及与剪切方向的关系。
- 3 结构面的充填物性质、充填厚度以及试件在采取和制备过程中受扰动的情况。
- 4 混凝土与岩石接触面的起伏差、混凝土配合比和混凝土强度等级。

5.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 锯石机;
- 钢模具;

- 试件养护设备；
- 直剪试验仪；
- 位移测表。

5.5.5 试验安装应符合下列规定：

- 1 试件受剪切方向宜与工程岩体受力方向一致。
- 2 法向载荷和剪切载荷的作用方向应通过预定剪切面的几何中心。法向和切向位移测表均不应少于两只，并应对称布置。

5.5.6 法向载荷施加应符合下列规定：

- 1 法向载荷最大值宜为工程压力的1.2倍。对于结构面中含有软弱充填物的试件，最大法向载荷应以不挤出充填物为限。
- 2 法向载荷宜按等差级数分级，分级数不应少于5级。
- 3 对于不需要固结的试件，法向载荷可一次施加完毕，立即测读法向位移，5min后再测读一次，即可施加剪切载荷。
- 4 对于需要固结的试件，在法向载荷施加完毕后的第一个小时内，每隔15min读数一次，然后每半小时读数一次。当每小时法向位移不超过0.05mm时，可施加剪切载荷。
- 5 试验过程中法向载荷应始终保持常数。

5.5.7 剪切载荷施加应符合下列规定：

- 1 按预估最大剪切载荷分10~12级，每级载荷施加后，立即测读剪切位移和法向位移，5min后再测读一次，即可施加下一级剪切载荷，当剪切位移明显增大时，可适当减小级差。峰值前施加剪切载荷不宜少于10级。
- 2 剪切破坏后，先后分别将剪切载荷和法向载荷退至零。试件复位后，调整测表，按本条1款进行同一法向载荷下的摩擦试验。

5.5.8 剪切破坏标准应符合下列规定之一：

- 1 剪切载荷加不上或无法稳定。
- 2 剪切位移明显变大，在剪应力 τ 与剪切位移 u 关系曲线上出现明显突变段。
- 3 剪切位移增大，在剪应力 τ 与剪切位移 u 曲线上未出现明

显突变段,但总剪切位移已达到试件边长的10%。

5.5.9 剪切破坏后剪切面的描述应包括下列内容:

- 1 有效剪切面积。
- 2 剪切面破坏情况、擦痕分布、方向和长度。
- 3 剪切面起伏差及沿剪切方向变化曲线。
- 4 当结构面内有充填物时,应描述剪切面的准确位置、充填物的组成成分、性质、厚度和含水状态。根据需要可取代表性样品作矿物鉴定。

5.5.10 试验成果整理应符合下列规定:

- 1 法向应力和剪应力按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5.5.10-1)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (5.5.10-2)$$

式中 σ ——法向应力,MPa;

τ ——剪应力,MPa;

P ——法向载荷,N;

Q ——剪切载荷,N;

A ——有效剪切面积,mm²。

- 2 绘制剪应力 τ 与剪切位移 u_s 及剪应力 τ 与法向位移 u_n 的关系曲线,确定各剪切阶段特征点的剪应力值。

- 3 根据各剪切阶段特征点的剪应力和法向应力值,采用图解法或最小二乘法绘制剪应力 τ 与法向应力 σ 关系曲线,并确定相应的抗剪强度参数。

5.5.11 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样位置、试件编号、试件描述、剪切面积、法向位移、剪切位移、试验人员、试验日期。

5.6 点荷载强度试验

5.6.1 本试验适用于除极软岩以外的各类岩石。

5.6.2 试件制备应符合下列规定：

1 试件可采用钻孔岩心或从岩石露头、勘探坑槽、洞室中采取的岩块。试件在采集和制备过程中应避免扰动。

2 试件尺寸应符合下列规定：

1)作径向试验的岩心试件,长度与直径之比应大于1.0;作轴向试验的岩心试件,长度与直径之比宜为0.3~1.0。

2)方块体试件或不规则块体试件,其尺寸应为 $50 \pm 35\text{mm}$,两加载点间距与试件加载处平均宽度之比宜为0.3~1.0。

3 试件数量应符合下列规定：

1)试件应按岩石含水状态和各向异性特征分组。

2)每组岩心试件数量不应少于10块。

3)每组方块体或不规则块体试件数量不应少于20块。

5.6.3 试件描述应包括下列内容：

1 采集地点。

2 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。

3 试件形状、尺寸及制备方法。

4 层理、裂隙以及与加载方向的关系。

5 含水状态。

5.6.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——点荷载试验仪(载荷容量不小于50kN);

——游标卡尺。

5.6.5 试验前的准备工作应符合下列规定：

1 率定压力计及位移计。

2 检查液压泵的贮油量。

3 连接加载系统、测量系统。

4 对加载系统排气、检查点荷载试验仪工作状态。

5.6.6 试件安装应符合下列规定：

1 径向试验时,将岩心试件置于两球端圆锥之间,调节上、下球圆锥使之与试件紧密接触,两加载点的连线应通过试件直径。加载点至试件自由端的距离应大于两加载点间距的0.5倍。

2 轴向试验时,将岩心试件置于两球端圆锥之间,上、下球端圆锥位于试件圆心处并紧密接触。

3 方块体和不规则块体试验时,选择试件最小尺寸一方为加载方向,将试件置于两球端圆锥之间,上、下球端圆锥位于试件中心处并紧密接触,加载点距试件自由端的长度应大于两加载点间距的0.5倍。

4 各向异性岩石试验时,应使加载方向平行层面作一组径向试验,再使加载方向垂直于层面作一组轴向试验。

5.6.7 加载前的测量应符合下列规定:

1 径向试验应测量试件加载点的间距,允许偏差为±2%。

2 轴向试验应测量加载点间的距离及试件直径,前者允许偏差为±2%,后者允许偏差为±5%。

3 方块体和不规则块体试验应测量加载点间的距离及垂直于加载方向的试件最小宽度或平均宽度,前者允许偏差±2%,后者允许偏差为±5%。

5.6.8 试验时应连续均匀加载,使试件控制在10~60s内破坏。当破坏面贯穿整个试件并通过两加载点时,方为有效试验。

5.6.9 试验成果整理应符合下列规定:

1 未经修正的岩石点荷载强度指数按下式计算:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (5.6.9-1)$$

式中 I_s —— 未经修正的点荷载强度指数,MPa;

P —— 破坏载荷,N;

D_e —— 等价岩心直径,mm。

2 径向试验 D_e 应按下式计算:

$$D_e = D \quad (5.6.9-2)$$

式中 D —— 加载点间距,mm。

3 轴向试验 D_e 应按下式计算:

$$D_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5.6.9-3)$$

式中 A ——通过两加载点的最小截面积, mm^2 。

4 方块体和不规则块体试验 D_e 应按下式计算:

$$D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}} \quad (5.6.9-4)$$

式中 W ——通过两加载点的最小截面宽度或平均宽度, mm 。

5.6.10 两加载点间距不等于 50mm 时, 点荷载强度指数应按下列规定进行修正:

1 当试验数据较多, 且同一组试件中的等价岩心直径具有多种尺寸, 应根据试验结果绘制等价岩芯直径 D_e^2 与破坏载荷 P 之间的关系曲线, 并根据该曲线找出 $D_e^2=2500\text{mm}^2$ 对应的 P 值, 按下式计算修正后的点荷载强度指数:

$$I_{s(50)} = \frac{P_{s(50)}}{2500} \quad (5.6.10-1)$$

式中 $I_{s(50)}$ ——经尺寸修正后的岩石点荷载强度指数, MPa ;

$P_{s(50)}$ —— D_e^2 为 2500mm^2 时对应的 P 值(N)。

2 当试验数据较少时, 应按下列公式计算修正后的点荷载强度指数:

$$I_{s(50)} = FI_s \quad (5.6.10-2)$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^m \quad (5.6.10-3)$$

式中 F ——修正系数。可根据不同的 D_e 值, 用统计方法确定其平均值和标准差;

m ——修正指数。可取 $0.40\sim 0.45$, 也可根据同类岩石的实测资料确定。

3 对于单轴饱和抗压强度小于 30MPa 的软岩, D_e 宜按下列公式进行修正:

1) 岩心试件

$$D_e = \sqrt{DL'} \quad (5.6.10-4)$$

式中 L' ——加载点发生贯入后, 破坏瞬间加载点间的距离, mm 。

2) 方块体或不规则岩块试件

$$D_e = \sqrt{\frac{4WL}{\pi}} \quad (5.6.10-5)$$

5.6.11 岩石点荷载强度各向异性指数应按下列式计算：

$$I_{a(50)} = \frac{I'_{s(50)}}{I''_{s(50)}} \quad (5.6.11)$$

式中 $I_{a(50)}$ —— 点荷载强度各向异性指数；
 $I'_{s(50)}$ —— 垂直于层面的岩石点荷载强度指数平均值，
MPa；
 $I''_{s(50)}$ —— 平行于层面的岩石点荷载强度指数平均值，
MPa。

5.6.12 点荷载强度指数平均值的确定应符合下列规定：

- 1 当同一组试验数据不超过10个时，舍去一个最大值和一个最小值，计算算术平均值；
- 2 当同一组试验的数据超过10个时，舍去两个最大值和两个最小值，计算算术平均值。

5.6.13 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样位置、试件编号、试件描述、试验类型、破坏载荷、破坏特征、试验人员、试验日期。

5.7 断裂韧性试验

5.7.1 本试验采用直切口或V型切口试件圆柱梁三点弯曲法测定岩石的断裂韧性，适用于坚硬和较坚硬岩石。

5.7.2 试件制备应符合下列规定：

- 1 试件可采用钻孔岩心或者由勘探坑槽、洞室内采取的岩块加工制成。试件在采取、运输和制备过程中，应避免扰动。
- 2 制备试件时应采用净水作为冷却液。
- 3 试件几何形状及尺寸应符合下列规定：
 - 1) 试件采用带直切口或V型切口的圆柱体(图5.7.2)。

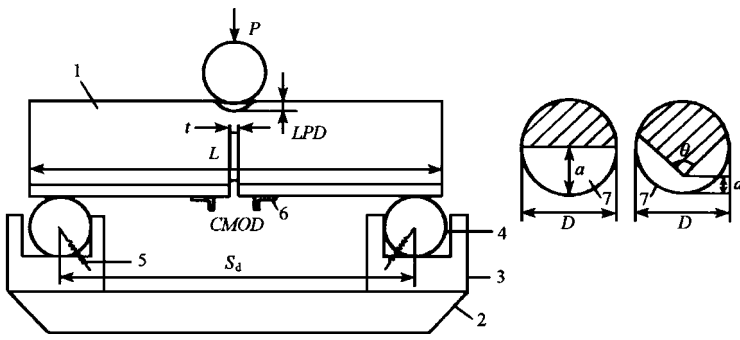


图 5.7.2 试件几何形状及尺寸标记

1—试件;2—三点弯曲试验夹具;3—支座;4—滚轴;5—弹簧;6—夹式引伸计刀口;7—切口
 D —试件直径; L —试件长度; S_d —两支承点间距离; a —切口深度;
 t —切口宽度; θ —V型顶角; P —载荷; LPD —载荷点位移; $CMOD$ —切口张开位移

- 2) 试件直径为 48~54mm, 应大于岩石最大颗粒尺寸的 10 倍。
 - 3) 试件长度与直径之比宜为 3.5~4.0。
 - 4) 两支承点间距离与直径之比为 3.33 ± 0.02 。
 - 5) 对直切口试件, 切口深度与直径之比宜为 0.35~0.50; 对 V 型切口试件, 切口尖端深度与直径之比宜为 0.10~0.20。
 - 6) 切口应垂直于试件轴线, 允许偏差为 $\pm 1^\circ$ 。V 型切口顶角应为 90° , 允许偏差为 $\pm 1^\circ$ 。
 - 7) 切口宽度不得大于 1.5mm。
- 4 试件含水状态应符合下列规定:
- 1) 天然状态应在试件排除密封后, 立即进行试件制备, 并测定其天然含水率。
 - 2) 烘干状态应符合本规程 4.1.5 条 2~4 款的规定。
 - 3) 饱和状态应符合本规程 4.2.5 条 4 款的规定。
- 5 同一含水状态下每组试件数量不应少于 3 个。

5.7.3 试件描述应包括下列内容：

- 1 岩石名称、颜色、矿物成份、结构、颗粒大小、风化程度。
- 2 层理、裂隙以及与加载方向的关系。
- 3 试件在加工中出现的问题。
- 4 试件尺寸。
- 5 含水状态。

5.7.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 钻石机、锯石机、磨石机、锯缝机；
- 测量平台、游标卡尺、放大镜；
- 烘箱和干燥器；
- 材料试验机；
- 三点弯曲试验夹具；
- 载荷传感器、位移传感器、夹式引伸计；
- 自动记录系统。

5.7.5 试验步骤应符合下列规定：

1 将试件准确对中置于三点弯曲试验夹具上,使试件切口中心线位于两支承点正中间,允许偏差为跨度的±1%。

2 安装载荷传感器、位移传感器和夹式引伸计,并与记录系统连接。

3 以 3~5N/s 的速率加载直至试件破坏,记录初裂载荷、断裂破坏载荷及加载过程中出现的现象。

4 进行位移测量时宜采用载荷点位移或切口张开位移速率控制,位移速率宜小于 $6 \times 10^{-4} \text{mm/s}$ 。

5 根据需要,试验过程中,可在最大载荷前后进行加卸载循环,总循环次数不应少于 4 次,每次卸载到最大破坏载荷的 10%~20%时再加载。

6 绘制载荷 P 与载荷点位移 LPD 关系曲线和载荷 P 与切口张开位移 $CMOD$ 关系曲线。

7 试验结束后应描述试件的裂缝扩展情况,包括扩展方向和断口形状。

5.7.6 试验成果整理应符合下列规定：

1 断裂韧度 K_{IC} 按下列公式计算：

1) 直切口试件

$$K_{IC} = 0.25 \left(\frac{S_d}{D} \right) \frac{P_{max}}{D^{1.5}} y \left(\frac{a}{D} \right) \quad (5.7.6-1)$$

$$y \left(\frac{a}{D} \right) = \frac{12.75 \left(\frac{a}{D} \right)^{0.5} [1 + 19.65 \left(\frac{a}{D} \right)^{4.5}]^{0.5}}{\left(1 - \frac{a}{D} \right)^{0.25}} \quad (5.7.6-2)$$

式中 K_{IC} ——断裂韧度 ($N/cm^{1.5}$)；

D ——试件直径, cm；

S_d ——两支承点间距离, cm；

P_{max} ——断裂破坏载荷, N；

a ——直切口深度, cm。

2) V型切口试件

$$K_{IC} = \frac{A_{min} P_{max}}{D^{1.5}} \quad (5.7.6-3)$$

$$A_{min} = \frac{S_d}{D} [1.84 + 7.15 \left(\frac{a}{D} \right) + 9.85 \left(\frac{a}{D} \right)^2] \quad (5.7.6-4)$$

式中 a ——V型切口尖端深度, cm。

3) 计算值精确至 $0.01 N/cm^{1.5}$ 。

2 根据需要可对断裂韧度作非线性修正。

非线性修正的断裂韧度按下式计算：

$$K_{IC}^c = \left[\frac{(1 + p_n)}{(1 - p_n)} \right]^{0.5} \frac{P_c}{P_{max}} K_{IC} \quad (5.7.6-5)$$

式中 K_{IC}^c ——修正后的断裂韧度, $N/cm^{1.5}$ ；

p_n ——非线性修正系数；

P_c ——修正后的断裂载荷, N。

非线性修正系数 p_n 与修正后的断裂载荷 P_c 的确定应符合下列规定(图 5.7.6):

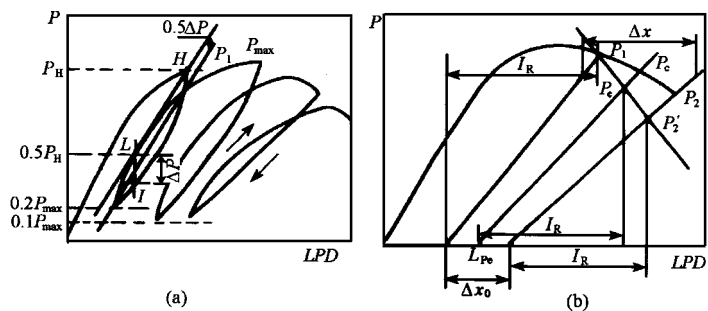


图 5.7.6 非线性修正原理示意图

在循环加载的试验曲线上,第一次加载的最大载荷 P_H 对应加载曲线的 H 点,在第二次加载曲线上取 $P = 0.5P_H$ 的 L 点,连接 LH ,过 L 点作垂线,与第一次卸载曲线交于 I 点,过 I 的中点作 LH 的平行线 P_1 ,作为辅助线[图 5.7.6(a)]。

图 5.7.6(b)中 P_1 和 P_2 为按前述方法确定的两条辅助线。两条辅助线与横坐标相交,其间距为 Δx_0 ,另取他们的载荷平均值 $P = (P_1 + P_2)/2$ 作水平线,与两条辅助线相交,其交点的间距为 Δx 。非线性修正系数按下式计算:

$$p_n = \frac{\Delta x_0}{\Delta x} \quad (5.7.6-6)$$

在 P_2 线上确定点 P'_2 点,连接 $P_1 P'_2$,然后在他们的连线上确定另一点 P_e ,连接横坐标点 L_{pe} 与 P_e 的直线并与 $P \sim LPD$ 关系曲线相交,交点即为 P_c 。

5.7.7 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样地点、试件编号、试件尺寸、试件描述、含水状态、切口型式、切口尺寸、支承点间距、载荷、载荷点位移、切口张开位移、试验人员、试验日期。

6 岩体变形试验

6.1 承压板法试验

6.1.1 本试验可分为刚性承压板法和柔性承压板法。柔性承压板法又可分为双枕法、四枕法、环形枕法和中心孔法。刚性承压板法适用于各级岩体,柔性承压板法适用于完整和较完整的岩体。

6.1.2 试验宜在平洞内进行,特殊情况下也可在露天或竖井内进行。

6.1.3 试点制备应符合下列规定:

1 试点受力方向宜与工程岩体实际受力方向一致。

2 承压面积不宜小于 2000cm^2 。

3 试点边缘至洞壁边缘距离应大于承压板直径或边长的1.5倍,至洞口或掌子面距离应大于承压板直径或边长的2倍,至临空面距离应大于承压板直径或边长的6倍,试点间距应大于承压板直径或边长的3倍。

4 试点表面以下3倍承压板直径或边长范围内的岩性宜相同。

5 试点表层受扰动的岩体应清除干净。

6 承压面应加凿平整,并用砂轮打磨,起伏差应小于承压板直径或边长的1%。承压面以外1.5倍承压板直径范围内岩体表面应平整,无松动块石。

7 中心孔法试验前,应在试点中心钻孔并取岩心,钻孔深度不应小于承压板直径的6倍,钻孔直径应与钻孔多点位移计设备配套。

6.1.4 试验前地质描述应符合本规程附录E规定。

6.1.5 主要仪器和设备应包括下列各项:

——液压千斤顶;

——液压枕;

- 测力枕；
- 液压泵；
- 管路；
- 压力表；
- 稳压装置；
- 刚性承压板；
- 钢垫板；
- 传力箱；
- 传力柱；
- 楔形垫块；
- 反力装置；
- 测量支架；
- 测表；
- 测量表架；
- 钻孔多点位移计；
- 测量标点；
- 钻机及辅助设备。

6.1.6 刚性承压板法试验加压系统与传力系统安装应符合下列规定：

1 清洗试点表面，铺垫一层水泥浆，放置刚性承压板并挤压出多余水泥浆，使承压板平行试点表面。水泥浆厚度应小于承压板直径或边长的1%。

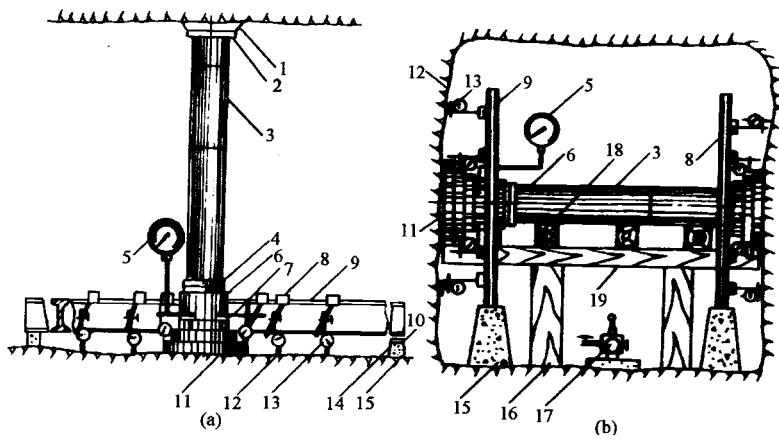
2 试验完成前，不得移动刚性承压板。

3 承压板应满足刚度要求，单块承压板厚度不宜小于6cm，当刚度不足时，可采用叠置钢垫板或传力箱的方式提高承压板的刚度。

4 在承压板上依次安装千斤顶、钢垫板、传力柱、钢垫板，在钢垫板和岩体间填筑砂浆或安装反力装置(图6.1.6)。

5 施加接触压力使整个系统接触紧密。

6 整个系统应具有足够刚度和强度，所有部件中心应保持在



(a)铅直方向加压 (b)水平方向加压

图 6.1.6 刚性承压板法试验安装示意图

1—砂浆;2、4、10—钢垫板;3—传力柱;5—压力表;6—液压千斤顶;7—管路;

8—测量表架;9—测量支架;11—刚性承压板;12—测量标点;13—测表;14—滚轴;15—支墩;

16—木柱;17—液压泵;18—木垫;19—木梁

同一轴线上,轴线应与加压方向一致。

6.1.7 柔性承压板法试验加压系统与传力系统安装应符合下列规定:

1 中心孔法试验,应在放置液压枕之前,在钻孔内安装钻孔多点位移计,测点可按承压板直径的0.25、0.50、0.75、1.00、1.50、2.00、3.00倍孔深进行布置,孔口及孔底应设置测点。孔口应设置测表测量岩体表面变形(图 6.1.7)。

2 双枕法和四枕法的液压枕应对称试点中心放置,枕间缝隙不宜大于 3cm。

3 清洗试点表面,铺垫水泥砂浆,放置凹面已用水泥砂浆填平并经过养护的液压枕或无凹面的液压枕,挤出多余的水泥砂浆,并使液压枕平行试点表面。

4 在液压枕上叠置钢垫板,必要时叠置传力箱,并依次安装钢垫板、加载设备、钢垫板、传力柱、钢垫板,在钢垫板和岩体间填

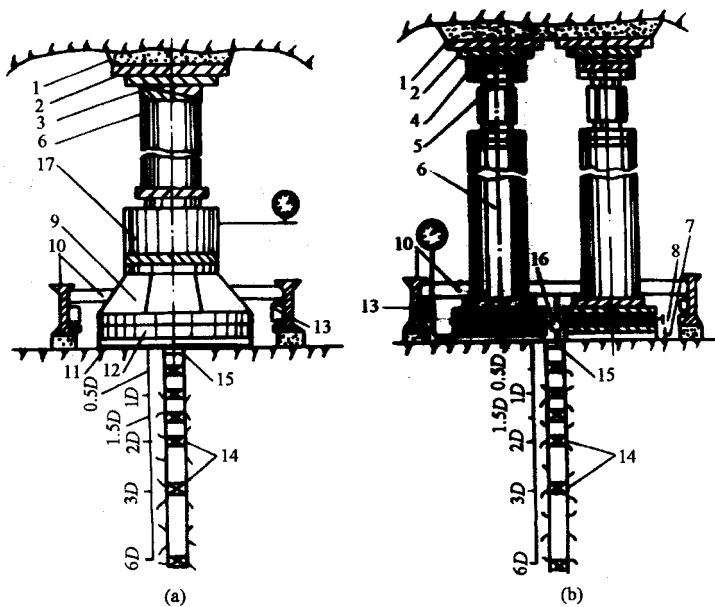


图 6.1.7 柔性承压板中心孔法试验安装示意图

(a) 环形枕法

(b) 四枕法

1—砂浆; 2、4—钢板; 3—楔形钢垫板; 5—螺旋千斤顶; 6—传力柱; 7—测力枕;

8—加压设备; 9—环形传力箱; 10—测表支架; 11—液压枕; 12—环形钢垫板;

13—小螺旋顶; 14—多点位移计; 15—锚头; 16—变形测表; 17—加压装置

筑砂浆或安装反力顶板。

5 施加接触压力,使整个系统接触紧密。

6 整个系统应具有足够刚度和强度,所有部件中心应保持在同一轴线上,轴线应与加压方向一致。

6.1.8 变形测量系统安装应符合下列规定:

1 在承压板两侧各放置筒支测量支架一根,测量支架应满足刚度要求。支点宜设置在距试点中心 4 倍承压板直径(或边长)以外。

2 刚性承压板法试验应在承压板上对称布置 4 个测表。

3 柔性承压板法试验应在中心布置 1 个测表。双枕法或四枕

法试验除在中心布置 1 个测表外,在液压枕间缝隙的中线上对称
 试点中心分别距中心 0.25 倍缝长处布置 2 个或 4 个测表(图 6.1.
 8)。

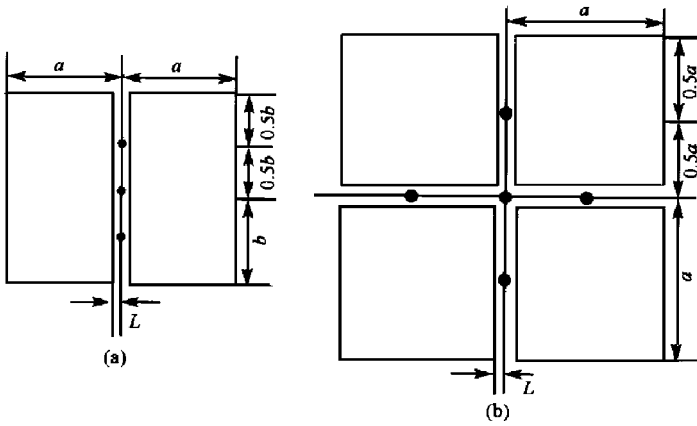


图 6.1.8 柔性承压板法测表布置示意图

(a)双枕法; (b)四枕法

4 根据需要,可在承压板外通过承压板中心沿洞轴方向或垂
 直洞轴方向对称布置若干测表。

5 测量表架应满足刚度要求。

6.1.9 试验加压及稳定标准应符合下列规定:

1 试验最大压力不宜小于工程设计压力的 1.2 倍,宜等分 5
 级施加。

2 加压前应对测表进行初始稳定读数观测,每隔 10min 同时
 测读各测表一次,连续三次读数不变后开始加压。

3 加压方式宜采用逐级一次循环法,根据需要可采用逐级多

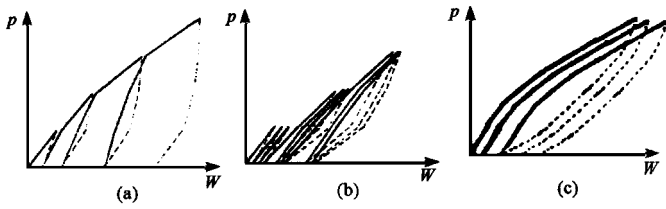


图 6.1.9-1 加压方法示意图

(a)逐级一次循环法;(b)逐级多次循环法;(c)大循环法

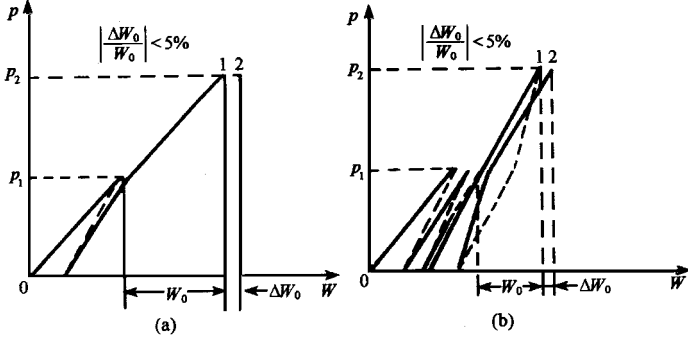


图 6.1.9-2 相对变形变化的计算图

(a)逐级一次循环法;(b)逐级多次循环法

次循环法或大循环法(图6.1.9-1)

4 每级压力加压或退压后应立即读数,以后每隔10min 读数一次,当所有测表相邻两次读数差与同级压力下第一次读数和前一级压力下最后一次读数差之比小于5%时,即可施加或退至下一级压力(图6.1.9-2)。退压稳定标准与加压相同。

5 试验期间应控制试验环境温度,变化幅度不宜大于1℃,避免由于人员进出、照明、取暖等人为因素造成试验洞段温度变化过大。当试点距离洞口较近时,应设置隔温门。

6.1.10 试验成果整理应符合下列规定:

1 刚性承压板法试验应采用板上 4 个测表的变形平均值作为岩体变形值,当其中一个测表失效时,可采用另外三个测表(变形均匀时)或另一对称的两个测表(变形不均匀时)的平均值作为变形值,并予以说明。

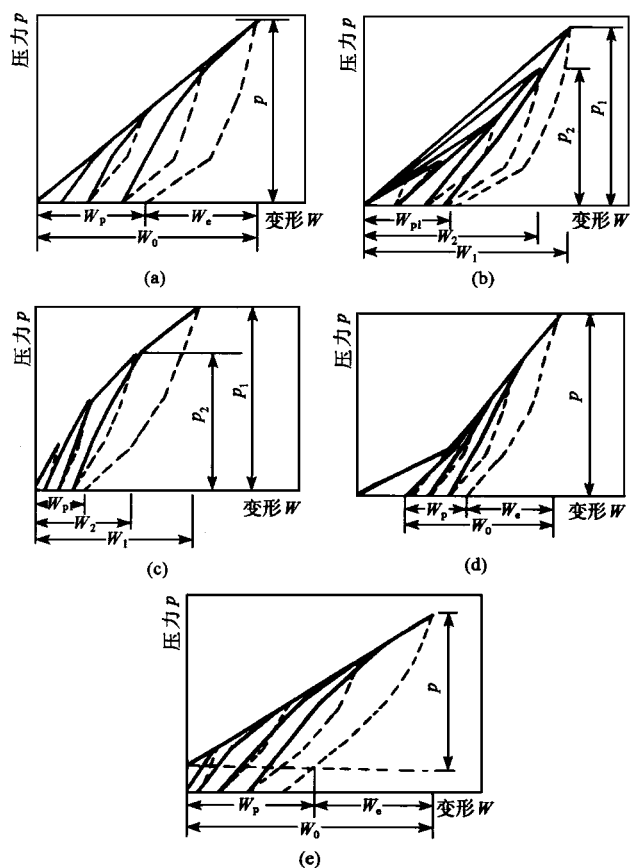


图 6.1.10 压力—变形关系曲线类型示意图

W_e —弹性变形; W_p —残余变形; W_0 —全变形; p —压力; W —变形

2 绘制压力 P 与变形 W 之间的关系曲线,根据曲线类型确

定变形值,计算岩体变形参数(图 6.1.10)。(a)、(d)、(e)类型取直线段计算,(b)、(c)类型可逐级分别计算。

3 刚性承压板法试验变形参数按下列公式计算:

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(1-\mu^2)pD}{W} \quad (6.1.10-1)$$

式中 E ——变形模量或弹性模量,MPa。当以全变形 W_0 代入式中计算时为变形模量 E_0 ;当以弹性变形 W_e 代入式中计算时为弹性模量 E_e ;

μ ——岩体泊松比;

p ——按承压面单位面积计算的压力,MPa;

D ——承压板直径,cm;

W ——岩体表面变形,cm。

4 环形枕法试验测量表面中心点岩体变形时,变形参数按下列公式计算:

$$E = \frac{2(1-\mu^2)p}{W} \cdot (r_1 - r_2) \quad (6.1.10-2)$$

式中 W ——环形枕中心表面岩体变形,cm;

r_1 ——环形承压面外半径,cm;

r_2 ——环形承压面内半径,cm。

5 双枕法试验测量表面岩体变形时,变形参数按下列公式计算:

1)当测点位于双枕受压面中心点时:

$$E = \frac{4(1-\mu^2)p}{\pi W} \left[\left(a \operatorname{sh}^{-1} \frac{b}{a} - L \operatorname{sh}^{-1} \frac{b}{L} \right) + b \left(\operatorname{sh}^{-1} \frac{a}{b} - \operatorname{sh}^{-1} \frac{L}{b} \right) \right] \quad (6.1.10-3)$$

2)当测点位于双枕之间缝隙中心线上距试点中心 0.25 倍缝长处时:

$$E = \frac{2(1-\mu^2)p}{\pi W} \left[a \left(\operatorname{sh}^{-1} \frac{b}{2a} + \operatorname{sh}^{-1} \frac{3b}{2a} \right) - L \left(\operatorname{sh}^{-1} \frac{b}{2L} + \operatorname{sh}^{-1} \frac{3b}{2L} \right) + \frac{b}{2} \left(\operatorname{sh}^{-1} \frac{2a}{b} - \operatorname{sh}^{-1} \frac{2L}{b} \right) \right]$$

$$+ \frac{3b}{2} \left(\operatorname{sh}^{-1} \frac{2a}{3b} - \operatorname{sh}^{-1} \frac{2L}{3b} \right) \quad (6.1.10-4)$$

式中 a ——承压面外缘至缝隙中心线的距离, cm;
 b ——缝隙中心线上试点中心至缝隙端部的距离, cm;
 L ——承压面内缘至双枕缝隙中心线的距离, cm。

6 四枕法(方形枕)试验测量表面岩体变形时, 变形参数按下列公式计算:

1) 当测点位于四枕受压面中心点时:

$$E = \frac{8(1-\mu^2)p}{\pi W} \left[0.88(a+L) - \left(a \operatorname{sh}^{-1} \frac{L}{a} + L \operatorname{sh}^{-1} \frac{a}{L} \right) \right] \quad (6.1.10-5)$$

2) 当测点位于四枕之间缝隙中心线距试点中心 0.25 倍缝长时:

$$\begin{aligned} E = & \frac{2(1-\mu^2)p}{\pi W} \left[3.34a - L \operatorname{sh}^{-1} \frac{a}{2L} - \frac{a}{2} \operatorname{sh}^{-1} \frac{2L}{a} \right. \\ & - L \operatorname{sh}^{-1} \frac{3a}{2L} - \frac{3a}{2} \operatorname{sh}^{-1} \frac{2L}{3a} + a \operatorname{sh}^{-1} \frac{a/2-L}{a} \\ & + \left(\frac{a}{2} - L \right) \operatorname{sh}^{-1} \frac{a}{a/2-L} - a \operatorname{sh}^{-1} \frac{a/2+L}{a} \\ & - \left(\frac{a}{2} + L \right) \operatorname{sh}^{-1} \frac{a}{a/2+L} + L \operatorname{sh}^{-1} \frac{a/2+L}{L} \\ & + \left(\frac{a}{2} + L \right) \operatorname{sh} \frac{L}{a/2+L} - L \operatorname{sh}^{-1} \frac{a/2-L}{L} \\ & \left. - \left(\frac{a}{2} - L \right) \operatorname{sh}^{-1} \frac{L}{a/2-L} \right] \quad (6.1.10-6) \end{aligned}$$

式中 a ——承压面外缘至缝隙内中心线距离, cm;
 L ——承压面内缘至缝隙内中心线距离, cm。

7 柔性环形枕法试验测量中心孔深部岩体变形时, 变形参数按下列公式计算:

$$\begin{aligned} E = & \frac{2(1-\mu^2)p}{W_z} \left(\sqrt{r_1^2 + Z^2} - \sqrt{r_2^2 + Z^2} \right) \\ & + \frac{(1+\mu)p}{W_z} \left(\frac{Z^2}{\sqrt{r_2^2 + Z^2}} - \frac{Z^2}{\sqrt{r_1^2 + Z^2}} \right) \quad (6.1.10-7) \end{aligned}$$

式中 W_z ——深度为 Z 处岩体变形(cm);

Z ——测点深度,cm。

8 四枕法(方形枕)试验测量中心孔深部岩体变形时,变形参数按下列公式计算:

$$E = \frac{2(1+\mu)P}{\pi W} \left[(2\mu-1) Z \operatorname{tg}^{-1} \frac{a^2}{Z \sqrt{2a^2+Z^2}} \right. \\ + 4(1-\mu) a \operatorname{sh}^{-1} \frac{a}{\sqrt{a^2+Z^2}} - 2(2\mu-1) Z \operatorname{tg}^{-1} \frac{aL}{Z \sqrt{L^2+a^2+Z^2}} \\ - 4(1-\mu) L \operatorname{sh}^{-1} \frac{a}{\sqrt{L^2+Z^2}} - 4(1-\mu) a \operatorname{sh}^{-1} \frac{L}{\sqrt{a^2+Z^2}} \\ \left. + (2\mu-1) Z \operatorname{tg}^{-1} \frac{L^2}{Z \sqrt{2L^2+Z^2}} + 4(1-\mu) L \operatorname{sh}^{-1} \frac{L}{\sqrt{L^2+Z^2}} \right] \quad (6.1.10-8)$$

9 中心孔法试验应绘制不同压力 P 时变形 W 沿孔深 h 的分布曲线。

6.1.11 必要时应在试验设备拆除后在试点处切槽检查。

6.1.12 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试点编号、试点位置、试验方法、试点描述、测表布置、测表编号、压力表编号、承压板尺寸、压力、变形、试验人员、试验日期。

6.2 狭缝法试验

6.2.1 本试验适用于完整和较完整岩体。

6.2.2 试点制备应符合下列规定:

1 狭缝边缘至洞壁边缘距离应大于1.5倍狭缝长度,至洞口和掌子面距离应大于2倍狭缝长度,两试点狭缝之间的距离应大于3倍狭缝长度,至临空面距离应大于6倍狭缝长度。

2 清除试点及边界条件范围内受扰动的岩体,狭缝两侧1.5倍狭缝长度范围内的岩性应均一,表面应平整,起伏差不宜大于狭缝宽度的2%。

3 在选定的试点位置,刻凿一条狭缝,方向应与预定加压方

向垂直,狭缝宽度宜大于液压枕厚度 1cm,狭缝长度宜大于液压枕长度 5%,狭缝深度宜大于液压枕宽度 5%。

6.2.3 试验前地质描述内容应符合本规程附录 E 规定。

6.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 矩形液压枕(宽长比不宜小于 0.6);
- 液压泵;
- 管路;
- 压力表;
- 稳压装置;
- 测量支架;
- 测表;
- 测量表架;
- 测量标点。

6.2.5 液压枕埋设应符合下列规定:

- 1 液压枕置于狭缝中央,狭缝外侧的液压枕鼓边出露一半。
- 2 液压枕两端及底部填塞细砂。
- 3 液压枕两侧填筑掺有速凝剂的高强度砂浆,并进行养护。

6.2.6 变形测量系统安装应符合下列规定:

1 在试点表面狭缝两侧中心线上,对称埋设标点各 3 个,标点与狭缝中心线距离分别为 0.33 倍、0.67 倍、1.00 倍狭缝长度(图 6.2.6)。

2 测量支架应具有足够的刚度和满足边界条件的长度。

6.2.7 试验加压及稳定标准应符合本规程 6.1.9 的规定。

6.2.8 试验成果整理应符合下列规定:

- 1 绘制压力 P 与变形 W 关系曲线。
- 2 用绝对变形计算时,变形参数按下列公式计算:

$$E = \frac{pl}{2W_A \rho} \left[(3 + \mu) - \frac{2(1 + \mu)}{\rho^2 + 1} \right] \quad (6.2.8-1)$$

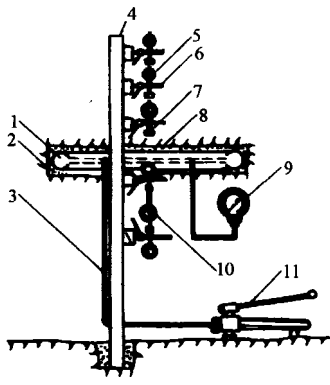


图 6.2.6 狭缝法试验安装示意图

1—液压枕;2—槽壁;3—管路;4—测杆;5—绝对位移测表;6—表架;
7—测量标点;8—砂浆;9—压力表;10—相对位移测表;11—液压泵。

$$\rho = \frac{2y + \sqrt{4y^2 + l^2}}{l} \quad (6.2.8-2)$$

式中 E ——变形模量或弹性模量,MPa。当以全变形 W_0 代入式中计算时为变形模量 E_0 ;当以弹性变形 W_e 代入式中计算时为弹性模量 E_e ;
 p ——施加狭缝两侧岩体上的压力,MPa;
 W_A ——变形测点 A 处的岩体变形,cm;
 l ——狭缝长度,cm;
 y ——测点距狭缝中心线距离,cm。

3 用相对变形计算时,变形参数按下式计算:

$$E = \frac{pl}{2W_R \rho_1 \rho_2} \left\{ [(3 + \mu) \cdot (\rho_2 - \rho_1) + 2(1 + \mu)] \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2^2 + 1} - \frac{\rho_2}{\rho_1^2 + 1} \right) \right\} \quad (6.2.8-3)$$

式中 W_R —— A_1 、 A_2 两点间的相对变形,cm;
 ρ_1 、 ρ_2 ——与测点位置有关的系数,分别用 y_1 、 y_2 (图 6.2.8)代入式(6.2.8-2)计算。

6.2.9 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试点编号、试点位

置、狭缝尺寸、试验方法、试点描述、测表布置、测表编号、压力表编号、液压枕尺寸、压力、变形、试验人员、试验日期。

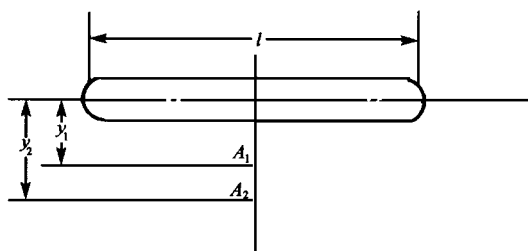


图 6.2.8 相对变形计算示意图

6.3 单(双)轴压缩法试验

6.3.1 本试验适用于完整和较完整岩体。

6.3.2 试点制备应符合下列规定：

1 试点表层受扰动岩体应清除干净，岩体表面应平整，起伏差小于试点边长2%。

2 试点尺寸不宜小于50cm×50cm。

3 在选定的试点位置刻凿四条狭缝，相邻两狭缝应互相垂直。缝宽宜大于液压枕厚度1cm，缝深宜大于液压枕宽度5%。

6.3.3 试验前地质描述应符合本规程附录 E 规定。

6.3.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——矩形液压枕(宽长比不宜小于 0.6)；

——液压泵；

——管路；

——压力表；

——稳压装置；

——测量支架；

——测表；

——测量表架；

——测量标点。

6.3.5 液压枕埋设应符合下列规定：

- 1 采用单轴压缩法试验时,在相对的两条狭缝内各埋设1个液压枕。
- 2 采用双轴压缩法试验时,同时在四条狭缝内各埋设1个液压枕。
- 3 液压枕埋设应符合本规程 6.2.5 的规定。
- 4 相对的一对液压枕加压管路采用并联方式连接。

6.3.6 在试点岩面上安装测量系统,沿岩体受压方向和垂直岩体受压方向靠近试点中心各布置两个变形测表,测点位置距狭缝边壁距离应大于0.25倍狭缝长度(图 6.3.6)。

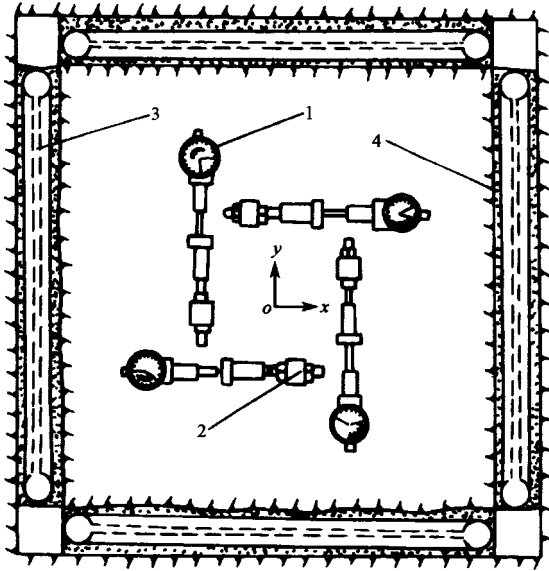


图 6.3.6 单(双)轴压缩法变形试验安装示意图

1—测表;2—标点;3—液压枕;4—砂浆

6.3.7 试验加压及稳定标准应符合本规程 6.1.9 的规定外,还

应符合下列规定：

1 试验最大压力及侧压力应根据工程岩体实际受力方向和大小确定。

2 进行单轴压缩法试验时，液压枕应同步加压；进行双轴压缩法试验时，两两相对的液压枕应分别等比例同步加压。

6.3.8 试验成果整理应符合下列规定：

1 绘制压力 p 与变形 W 关系曲线。

2 各方向应变按下列公式计算：

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L_i}{L_i} \quad (6.3.8-1)$$

式中 ε_i —— i 方向的应变；

L_i —— i 方向两测点间的距离，cm；

ΔL_i —— i 方向两测点间岩体相对变形，cm。

3 岩体变形参数按下列公式计算：

$$E = \frac{p_x^2 - p_y^2}{\varepsilon_x p_x - \varepsilon_y p_y} \quad (6.3.8-2)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_x p_y - \varepsilon_y p_x}{\varepsilon_x p_x - \varepsilon_y p_y} \quad (6.3.8-3)$$

式中 E —— 变形模量或弹性模量，MPa。当以全变形 W_0 代入式中计算时为变形模量 E_0 ；当以弹性变形 W_e 代入式中计算时为弹性模量 E_e ；

μ —— 泊松比；

ε_x —— x 方向平均应变；

ε_y —— y 方向平均应变；

p_x —— x 方向岩体所受单位压力，MPa；

p_y —— y 方向岩体所受单位压力，MPa。

6.3.9 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试点编号、试点位置、狭缝尺寸、试验方法、试点描述、测表布置、测点编号、压力表编号、液压枕尺寸、压力、变形、试验人员、试验日期。

6.4 钻孔径向加压法试验

6.4.1 本试验可分为钻孔膨胀计法、钻孔压力计法和钻孔千斤顶法,适用于完整及较完整岩体。

6.4.2 试点制备应符合下列规定:

1 钻孔应采用金刚石钻头钻进,孔壁应平直光滑。

2 试验段岩性应基本一致。

3 相邻两加压段边缘之间的距离应大于1倍加压段长,加压段边缘距孔口距离应大于1倍加压段长,距孔底距离应大于0.5倍加压段长。

6.4.3 试验前地质描述除应符合本规程附录E的规定外,还应绘制钻孔柱状图。

6.4.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

——钻孔膨胀计、钻孔压力计或钻孔千斤顶;

——液压泵及高压软管;

——压力表;

——扫孔器;

——模拟管;

——校正仪;

——起吊设备。

6.4.5 试验加压及稳定标准应符合下列规定:

1 试验前应对钻孔膨胀计、钻孔压力计或钻孔千斤顶进行标定。

2 放入钻孔膨胀计、钻孔压力计或钻孔千斤顶前,应向钻孔内注水至孔口,并用扫孔器扫孔,孔内无岩石碎块后,将模拟管放入孔内至孔底,畅通无阻时,开始进行试验。

3 将钻孔千斤顶(或钻孔膨胀计、钻孔压力计)放入孔内预定试验段,定向后施加0.5MPa的初始压力固定千斤顶,读取初始读数。

4 试验最大压力应根据岩体强度和工程设计要求确定。分

级宜按最大压力等分 7~10 级。

5 加压方式宜采用逐级一次循环法或大循环法。

6 采用逐级一次循环法时,每级压力加压或退压后应立即读数,以后每隔 3~5min 读数一次,当相邻两次读数差与同级压力下第一次读数和前一级压力下最后一次读数差之比小于 5%时,施加或退至下一级压力。

7 采用大循环法时,每级压力加压或退压后应立即读数,以后每隔 3~5min 读数一次,当相邻二次读数差与同级压力下第一次读数前一级压力下最后一次读数差之比小于 5%时,施加或退至下一级压力。

8 每一循环退压时,最低压力应退至初始压力。

6.4.6 试验结束后,压力退至零并保持一段时间,取出径向加压设备,对橡皮囊等设备上的压痕进行描述。

6.4.7 试验成果整理应符合下列规定:

1 绘制压力 p 与径向变形 Δd 关系曲线。

2 采用钻孔膨胀计法或钻孔压力计法进行试验时,岩体变形参数按下式计算:

$$E = \frac{(1 + \mu) pd}{\Delta d} \quad (6.4.7-1)$$

式中 E ——变形模量或弹性模量, MPa 。当以径向全变形 Δd_0 代入式中计算时为变形模量 E_0 ;当以径向弹性变形 Δd_e 代入式中计算时为弹性模量 E_e ;

μ ——泊松比;

p ——计算压力,为试验压力与初始压力之差, MPa ;

d ——钻孔直径, cm ;

Δd ——钻孔岩体径向变形, cm 。

3 采用钻孔千斤顶法进行试验时,岩体变形参数按下式计算:

$$E = K \cdot \frac{(1 + \mu) pd}{\Delta d} \quad (6.4.7-2)$$

式中 K ——包括三维效应系数以及与传感器灵敏度、承压板的接触角度及弯曲效应等有关的系数,根据率定确定。

4 绘制变形模量 E_0 及弹性模量沿 h 孔深 E_e 的分布图。

6.4.8 试验记录应包括工程名称、岩石名称、钻孔编号、钻孔位置、钻孔直径、钻孔柱状图、测点编号、测点深度、试验方法、钻孔千斤顶、钻孔膨胀计或钻孔压力计率定资料、测点方向、压力、变形、试验人员、试验日期。

6.5 隧洞液压枕径向加压法试验

6.5.1 本试验适用于相应洞径条件下有自稳能力的岩体。

6.5.2 试验洞应符合下列规定:

1 试验洞直径宜为 $2\sim 3\text{m}$, 试验段不得欠挖, 半径误差不宜大于 5% , 起伏差不宜大于 5cm 。

2 加压段长度宜为试验洞直径的 1 倍, 必要时可为试验洞直径的 0.5 倍、 2.0 倍或 3.0 倍。

3 洞口自由段长应大于试验洞直径 2 倍。

4 洞末端约束段长应大于试验洞直径 2 倍。

5 上覆岩体厚度应能满足最高试验压力下岩体的稳定要求。

6 相邻两洞室中心间距及试验洞中心至临空面距离应大于试验洞直径的 6 倍。

6.5.3 试验段地质描述应符合本规程附录 E 的规定。

6.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

——承力框架;

——液压枕;

——液压泵;

——压力表;

——测表;

——测量支架;

——管路。

6.5.5 混凝土浇筑应符合下列规定:

1 混凝土各条块厚度按下列公式计算:

$$h_c = R - h_z - r_A \quad (6.5.5)$$

式中 h_c ——混凝土条块厚度,cm;

R ——试验洞半径,cm;

h_z ——液压枕与砂浆厚度,cm;

r_A ——承力框架外半径,cm。

2 混凝土条块应从底部向顶部依次浇筑。

3 混凝土各条块之间应设置分块缝,使用涂抹黄油的油毛毡作为分缝材料。

4 浇筑顶部混凝土时,应填满捣实。

6.5.6 变形测量断面布置应符合下列规定:

1 在试验段中部布置一个主断面,加压段长为试验洞直径 2 倍时,主断面两侧应各布置一个辅助断面。

2 根据需要可在试验段两端各设置一个参考断面。

6.5.7 承力支撑及液压枕安装应符合下列规定:

1 将液压枕凹面用水泥砂浆抹平。

2 先浇筑底部第一块传力混凝土块,待混凝土初凝后将液压枕按预定位置安置于混凝土条块表面。

3 24h 后将承力框架逐个安置,排列完成后联成整体。

4 从底部向顶部依次安装液压枕,在液压枕与岩面之间依次浇筑混凝土块。

6.5.8 变形测点埋设应符合下列规定:

1 每个断面应安装不少于 4 支直径向测表或不少于 8 支半径向测表(图 6.5.8)。

2 根据需要可在钻孔内埋设多点位移计,钻孔孔深不应小于试验洞直径的 3 倍。

3 当采用半径向测表测量岩体变形时,刚性中心轴的支点与试验段边缘距离不宜小于试验洞直径的 0.75 倍。

4 穿过传力混凝土埋设于基岩上的测点,测杆不得与混凝土接触。

6.5.9 各液压枕之间采用紫铜管或带快速接头的高压软管连接，按试验要求可采用并联、串联或混合联接方式。

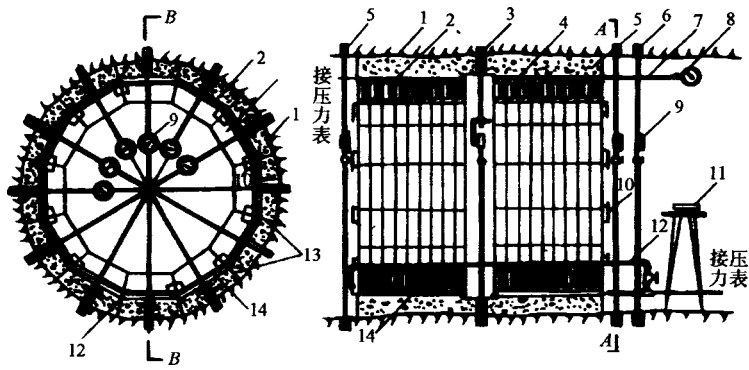


图 6.5.8 隧洞液压枕径向加压法变形试验 2 米试段安装示意图

1—传力混凝土条块；2—液压枕；3—主测断面；4—承力框架；5—辅助测量断面；
6—参考测量断面；7—接压力表管路；8—压力表；9—变形测表；10—管路；
11—测读仪器；12—进液管路；13—传力混凝土分缝；14—砂浆垫层。

6.5.10 试验加压及稳定标准应符合下列规定：

1 对于破碎岩类、软弱岩类、遇水软化、遇水膨胀等特殊岩类，应进行预压，预压值为最大试验压力值的5%。

2 加压前测表初始读数应充分稳定，每隔15min 读数一次，直至所有测表连续三次读数不变。

3 试验最大压力宜为工程设计压力的1.2倍，等分 5~10 级加压。

4 加压方式宜采用逐级一次循环法，必要时可采用逐级多次循环法。

5 每级压力加压或退压后应立即读数，以后每隔10min 读数一次，当所有测表相邻两次读数差与同级压力下第一次读数和前一级压力下最后一次读数差之比小于 5%时，施加或退至下一级压力。

6 压力退至零,变形稳定后终止试验。

6.5.11 试验成果整理应符合下列规定:

1 绘制压力 p 与径向变形 ΔR 关系曲线。

2 岩体变形模量按下列公式计算:

$$E_0 = p(1 + \mu) \frac{R}{\Delta R} \quad (6.5.11-1)$$

式中 E_0 ——变形模量,MPa;

p ——作用于岩体表面的单位压力,MPa;

μ ——泊松比;

R ——试验洞半径,cm;

ΔR ——主断面岩体表面径向变形,cm。

3 岩体抗力系数按下列公式计算:

$$K = \frac{p}{\Delta R} \quad (6.5.11-2)$$

式中 K ——抗力系数,MPa/cm。

4 岩体单位抗力系数按下列公式计算:

$$K_0 = \frac{p}{\Delta R} \cdot \frac{R}{100} \quad (6.5.11-3)$$

式中 K_0 ——单位抗力系数,MPa/cm。

5 当试验段长度小于 3 倍洞径时,岩体变形模量与单位抗力系数按下列公式计算:

$$E_0 = \Phi p(1 + \mu) \frac{R}{\Delta R} \quad (6.5.11-4)$$

$$K_0 = \Phi \cdot \frac{p}{\Delta R} \cdot \frac{R}{100} \quad (6.5.11-5)$$

$$\Phi = \Phi_1 \Phi_2 \quad (6.5.11-6)$$

式中 Φ ——变形修正系数,与试段长度、试段间距、岩体性质有关;

Φ_1 ——试段有限加压长度变形修正系数(有限长受压与无限长受压变形比值);

Φ_2 ——试段间距变形修正系数。

Φ_1 、 Φ_2 值按表 6.5.11 的规定取值。

表 6.5.11—1 1m 试段端部变形修正系数

μ	$m=L/D$										
	0.333	0.345	0.357	0.370	0.385	0.400	0.417	0.434	0.454	0.476	0.500
	ϕ_1										
0.20	0.365	0.369	0.374	0.379	0.384	0.390	0.395	0.399	0.404	0.410	0.416
0.25	0.360	0.365	0.369	0.374	0.379	0.385	0.389	0.394	0.399	0.404	0.410
0.30	0.354	0.358	0.363	0.367	0.373	0.378	0.383	0.387	0.393	0.398	0.405
0.35	0.347	0.351	0.356	0.361	0.366	0.372	0.377	0.382	0.387	0.393	0.400
0.40	0.339	0.344	0.348	0.353	0.358	0.364	0.369	0.374	0.380	0.387	0.394

表 6.5.11—2 1m 试段中间断面变形修正系数

μ	$m=L/D$										
	0.333	0.345	0.357	0.370	0.385	0.400	0.417	0.434	0.454	0.476	0.500
	ϕ_1										
0.20	0.550	0.560	0.568	0.578	0.589	0.600	0.610	0.620	0.632	0.646	0.660
0.25	0.537	0.545	0.554	0.564	0.575	0.586	0.596	0.606	0.618	0.632	0.646
0.30	0.522	0.531	0.540	0.550	0.561	0.572	0.583	0.593	0.606	0.619	0.634
0.35	0.507	0.516	0.525	0.535	0.546	0.557	0.567	0.577	0.588	0.601	0.615
0.40	0.491	0.500	0.509	0.519	0.530	0.540	0.551	0.561	0.573	0.586	0.600

表 6.5.11—3 2m 试段中间断面变形修正系数

μ	$m=L/D$										
	0.670	0.690	0.715	0.740	0.770	0.800	0.834	0.870	0.910	0.953	1
	ϕ_1										
0.20	0.730	0.740	0.755	0.760	0.770	0.780	0.790	0.800	0.810	0.820	0.830
0.25	0.720	0.730	0.740	0.750	0.760	0.770	0.780	0.790	0.800	0.810	0.825
0.30	0.710	0.720	0.730	0.740	0.750	0.757	0.765	0.775	0.790	0.800	0.812
0.35	0.700	0.710	0.715	0.720	0.730	0.740	0.750	0.760	0.780	0.790	0.800
0.40	0.680	0.690	0.700	0.705	0.710	0.714	0.725	0.745	0.760	0.773	0.786

表 6.5.11—4 4m 试段中间断面变形修正系数

μ	$m=L/D$										
	1.33	1.38	1.43	1.48	1.54	1.60	1.67	1.74	1.82	1.91	2
	Φ_1										
0.20	0.885	0.890	0.897	0.902	0.909	0.914	0.920	0.925	0.931	0.938	0.943
0.25	0.878	0.884	0.890	0.895	0.903	0.910	0.916	0.921	0.927	0.934	0.940
0.30	0.870	0.877	0.883	0.888	0.894	0.900	0.908	0.915	0.921	0.927	0.934
0.35	0.865	0.872	0.878	0.883	0.889	0.895	0.903	0.909	0.916	0.923	0.930
0.40	0.850	0.858	0.865	0.872	0.878	0.886	0.894	0.901	0.907	0.914	0.923

表 6.5.11—5 2m 试段(间距 20cm)间距变形修正系数 Φ_2

μ	n_1	n_2 ($m=1.1$ 时)	$\Phi_2=n_1/n_2$
0.20	0.7034	1.0201	0.690
0.25	0.7332	1.0518	0.697
0.30	0.7622	1.0814	0.705
0.35	0.7916	1.1084	0.715
0.40	0.8182	1.1327	0.722

表 6.5.11—6 4m 试段(间距三个共 60cm)间距变形修正系数 Φ_2

μ	n_0	$n_3=n_0+n_1$	n_4 ($m=2.3$ 时)	$\Phi_2=n_3/n_4$
0.20	0.0900	0.7934	1.1475	0.691
0.25	0.0988	0.8320	1.1911	0.690
0.30	0.1084	0.8706	1.2338	0.706
0.35	0.1190	0.9106	1.2752	0.714
0.40	0.1308	0.9490	1.3752	0.690

注: m —— 试洞受压段长度 L 与试洞洞径 D 之比;

- L ——试洞受压段长度,包括加压段之间的间距,m;
- D ——试洞直径,m;
- n_0 ——相距 0.2m 的四个 1m 长加压段,仅两端加压时中间断面的变形系数值;
- n_1 ——相距 0.2m 的两个 1m 长加压段同时加压时中间断面的变形系数值;
- n_2 ——2.2m 长加压段加压时,中间断面的变形系数值;
- n_3 ——相距 0.2m 的四个 1m 长加压段,四个加压段同时加压时,中间断面的变形系数值;
- n_4 ——4.6m 长加压段加压,中间断面的变形系数值。

6 绘制各测点压力 p 与岩体表面径向变形 ΔR 关系曲线。

7 绘制各级压力下观测断面径向变形分布曲线。

8 采用孔内多点位移计测量岩体变形时,应绘制变形随钻孔深度分布曲线。

6.5.12 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试验洞位置及编号、测量断面位置及编号、试验洞描述、试验洞半径、混凝土条块厚度、试验方法、测表布置、测表编号、压力表编号、压力、变形、试验人员、试验日期。

6.6 隧洞水压法试验

6.6.1 本试验适用于较完整的各级岩体。

6.6.2 试验洞应符合下列规定:

1 试验洞直径宜为 2~3m,试验段不得欠挖,半径误差不宜大于 5%,起伏差不宜大于 5cm。

2 加压段长度应大于试验洞直径的 6 倍。

3 洞口自由段应大于试验洞直径 2 倍。

4 上覆岩体厚度应能满足试验最大内水压力下岩体的稳定要求。

5 相邻洞室中心间距及试验洞至临空面距离应大于试验洞直径的 6 倍。

6.6.3 试验段地质描述应符合本规程附录 E 的规定。

6.6.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 测表；
- 渗压计；
- 液压泵；
- 压力表；
- 温度计；
- 流量计。

6.6.5 试验段混凝土浇筑应符合下列规定：

1 试验段采用分块式薄混凝土衬砌或涂抹柔性防渗层，衬砌分块不宜少于八块。

2 环向施工缝至位移观测断面距离宜大于试验洞直径的1.5倍。

3 环向缝和轴向缝应采取止水措施。

4 浇筑顶部混凝土时应进行回填灌浆。

5 根据试验压力、围岩性质和渗透性设计试验段堵头。

6 浇筑混凝土时，应同时制备测定抗压强度的混凝土试件，并在相同条件下进行养护。

7 堵头施工前，应铺设好供水管、测压管、排气管、出线管和门框等。

8 修建蓄水池，并保持池水水温与试验洞水温相同。

6.6.6 试验段中部布置一个主断面，根据需要可在两侧每隔0.5倍试验洞直径处布置一个辅助断面。

6.6.7 变形测点埋设应符合下列规定：

1 每个断面安装不少于 4 支直径向测表或不少于 8 支半径向测表(图 6.6.7)。

2 根据需要可在主断面钻孔，埋设多点位移计，钻孔孔深不应小于试验洞直径的 3 倍。

3 穿过传力混凝土衬砌埋设柱脚时，柱脚应嵌入基岩内，测杆不得与混凝土接触。

6.6.8 试验加压及稳定标准应符合下列规定：

1 试验洞内水温变化应小于 0.5℃。

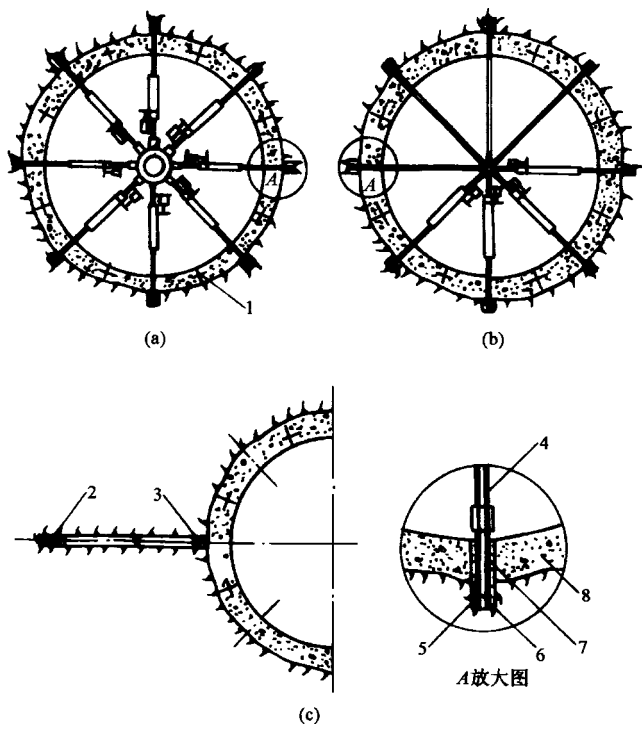


图 6.6.7 变形测量系统安装示意图

(a)半径向测量系统 (b)直径向测量系统 (c)多点位移计半径向测量系统

1—止水片;2—位移计;3—测量点;4—测杆;5—水泥砂浆;6—柱脚;
7—止水软填料;8—混凝土衬砌

2 试验最大压力宜采用工程设计压力的1.2倍,等分5~10级加压。

3 加压方式宜采用逐级一次循环不去,必要时可采用逐级多次循环不去。

4 每级压力加压或退压后应立即读数,以后每隔15min 读数一次,直至1h。1h后当所有测表相邻两次读数差与同级压力下第一次读数和前一级压力下最后一次读数差之比小于5%时,可施加或退至下一级压力。

5 将压力退至零,变形稳定后终止试验。

6.6.9 试验成果整理应符合下列规定：

1 绘制压力 p 与变形 ΔR 关系曲线。

2 岩体变形模量按下式计算：

$$E_0 = p(1 + \mu) \frac{R}{\Delta R} \quad (6.6.9-1)$$

式中 E_0 ——岩体变形模量,MPa;
 p ——作用于围岩表面上的单位压力,MPa;
 μ ——岩体泊松比;
 R ——试验洞半径,cm;
 ΔR ——主断面岩体表面径向变形,cm。

3 岩体抗力系数按下列公式计算：

$$K = \frac{p}{\Delta R} \quad (6.6.9-2)$$

$$p = p_0 \frac{r}{R} \quad (6.6.9-3)$$

式中 K ——抗力系数,MPa/cm;
 p_0 ——内水压力,MPa;
 r ——衬砌内半径,cm;
 R ——试验洞半径,cm。

4 岩体单位抗力系数按下式计算：

$$K_0 = \frac{p}{\Delta R} \cdot \frac{R}{100} \quad (6.6.9-4)$$

式中 K_0 ——单位抗力系数,MPa/cm。

5 绘制各测点压力 p 与围岩表面径向变形 ΔR 关系曲线、各级压力下观测断面径向变形分布曲线。

6 采用钻孔多点位移计测量岩体变形时,应绘制变形随钻孔深度分布曲线。

6.6.10 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试验洞位置及编号、测量断面位置及编号、试验洞描述、试验洞尺寸、试验方法、衬砌厚度、测表布置、压力、变形、渗压计读数、流量、温度、试验人员、试验日期。

7 岩体强度试验

7.1 混凝土与岩体接触面直剪试验

7.1.1 本试验适用于各级岩体。

7.1.2 试体布置及加工尺寸应符合下列规定：

1 每组试体数量不宜少于 5 个。

2 同一组试验岩体的岩性应基本相同,基岩面下部不得有贯通裂隙通过。

3 剪切面面积不宜小于 2500cm^2 ,最小边长不宜小于 50cm。

4 加工的基岩面尺寸应大于剪切面尺寸 $10\sim 15\text{cm}$,各试体间距不宜小于 1 倍最小边长。

5 基岩面起伏差应为推力方向边长的 $1\%\sim 2\%$,同一组试验基岩面起伏差宜一致。

6 试体的推力部位应留有安装千斤顶的足够空间,平推法应开挖千斤顶槽。剪切面周围的岩体应大致凿平,浮渣应清除干净。

7.1.3 试验采用平推法或斜推法,推力方向宜与工程的受力方向一致。斜推法的推力中心线与剪切面夹角宜为 $12^\circ\sim 17^\circ$ 。

7.1.4 地质描述除应符合本规程附录 E 的规定外,还应着重对基岩面裂隙产状、长度、分布情况进行详细描述。

7.1.5 主要仪器和设备应包括下列各项：

——液压千斤顶或液压枕；

——液压泵及管路；

——压力表；

——钢垫板；

——滚轴排；

——传力柱及传力块；

——斜垫板；

——测量支架；

——测量表架；

——测表。

7.1.6 混凝土试体制备应符合下列规定：

1 浇筑混凝土前应将基岩表面冲洗干净。混凝土试体高度略大于推力方向边长的 $2/3$ 。

2 按工程设计采用的混凝土配合比浇筑试体。混凝土可直接浇筑在基岩面上，也可先在基岩面上浇筑一层厚度为 5cm 的砂浆垫层，再浇筑混凝土试体。

3 制备混凝土试体的同时，在试体预定部位埋设测量位移的标点。

4 在浇筑混凝土和砂浆垫层同时，应制备一定数量的混凝土和砂浆试件，试验前定期测定其抗压强度。

5 混凝土试体顶面应平行剪切面，推力面与剪切面垂直，或按预定的推力夹角浇筑成斜面（斜推法）。

6 对混凝土试体和试件进行养护，养护时间不宜少于 28d 。

7 试体可在天然含水状态下剪切。需要时，可在人工浸水条件下剪切。

8 载荷的反力部位应有足够的强度，反力部位岩体表面应大致凿平。

7.1.7 安装载荷系统时，宜先安装法向再安装剪切向。法向载荷与剪切载荷的合力作用点应位于剪切面中心（图 7.1.7—1、图 7.1.7—2）。

7.1.8 法向载荷系统安装应符合下列规定：

1 在试体顶部铺设一层水泥砂浆，放上钢垫板，垫板应平行预定剪切面。

2 在垫板上依次安放滚轴排、垫板、千斤顶（或液压枕）、垫板、传力柱、顶部垫板。

3 在顶部垫板和岩面之间浇筑混凝土或砂浆，或安装反力装置。

4 整个法向载荷系统的所有部件，应保持在加载方向的同一

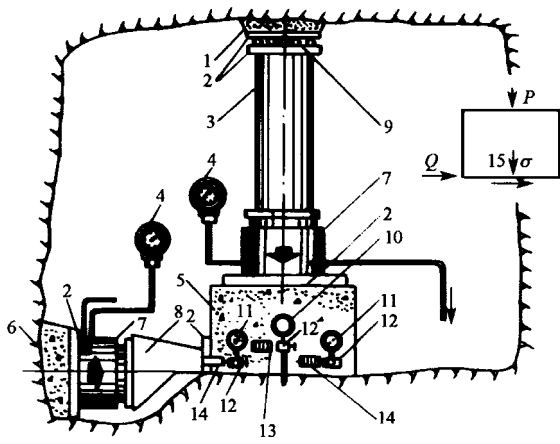


图 7.1.7-1 平推法混凝土与岩体接触面直剪试验安装示意图

1—砂浆;2—垫板;3—传力柱;4—压力表;5—混凝土试体;6—混凝土后座;7—液压千斤顶;8—传力块;9—滚轴排;10—相对垂直位移测表;11—绝对垂直位移测表;12—测量标点;13—相对水平位移测表;14—绝对水平位移测表;15—试体受力简图

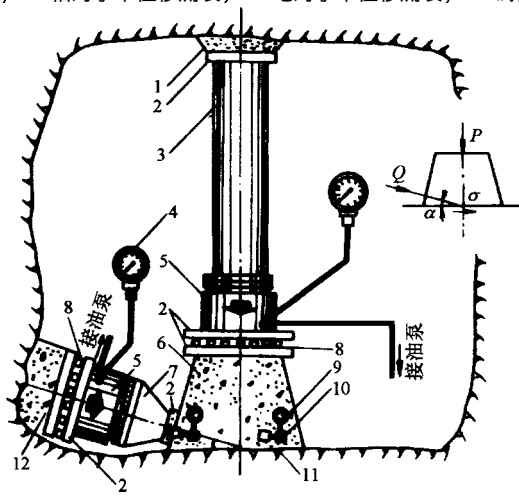


图 7.1.7-2 斜推法混凝土与岩体接触面直剪试验安装示意图

1—砂浆;2—垫板;3—传力柱;4—压力表;5—液压千斤顶;6—混凝土试体;
7—传力块;8—滚轴排;9—垂直位移测表;10—测量标点;
11—水平位移测表;12—混凝土后座

轴线上,垂直预定剪切面。

5 法向载荷系统应具有足够的强度和刚度。当剪切面为倾斜或载荷系统超过一定高度时,应对法向载荷系统进行支撑。

6 安装完毕后,启动千斤顶,施加接触压力使整个法向载荷系统接触紧密。千斤顶活塞应预留足够的行程。

7 在露天场地或无法利用洞室顶板作为反力支撑时,可采用地锚作为反力装置。当法向载荷较小时,也可采用压重法。

7.1.9 剪切载荷系统安装应符合下列规定:

1 在试体剪切载荷受力面用水泥浆粘贴一块条形垫板,垫板底部与剪切面之间应预留约 1cm 间隙。

2 在条形垫板后依次安放传力块、千斤顶、垫板。斜推法还应加装滚轴排(图 7.1.7—2)。在垫板和反力座之间浇筑混凝土或砂浆。

3 当混凝土试体推力面与剪切面垂直且采用斜推法时,在垫板后依次安装斜垫块、千斤顶、垫板。

4 安装剪切载荷系统时,千斤顶应严格定位。平推法推力中心线应平行预定剪切面,且与剪切面的距离不应大于剪切方向试体边长的 5%;斜推法推力中心线应通过剪切面中心。

7.1.10 测量系统安装应符合下列规定:

1 测量支架的支点应在基岩变形影响范围以外,支架应具有足够的刚度。

2 在支架上依次安装测量表架和测表。在试体两侧的对称部位分别安装测量切向和法向(绝对位移)的测表,每侧法向、切向位移测表均不得少于 2 只。

3 根据需要可布置测量试体与基岩面之间相对位移的测表。

7.1.11 应根据混凝土试件抗压强度试验结果确认混凝土强度达到设计要求后,进行试验。同一组试体的混凝土抗压强度应基本一致。

7.1.12 试验加载应符合下列规定:

1 根据本规程附录 F 对千斤顶(或液压枕)作的率定曲线和

试体剪切面面积,计算施加的载荷和压力表读数。

2 检查各测表的工作状态,测读初始读数。

3 每个试体上应分别施加不同的法向载荷,其值为最大法向载荷的等差值。剪切面上的最大法向应力宜大于工程应力。

4 每个试体的法向载荷宜分为**3~5**级施加。

5 法向载荷施加采用时间控制,加载后立即测读法向位移,5min后再测读一次,即可施加下一级载荷。加至预定载荷后,仍按每5min测读一次,当连续两次法向位移之差不大于0.01mm时,可开始施加剪切载荷。

6 剪切载荷按预估的最大值分**8~10**级施加,当剪切位移增量为前级位移增量的1.5倍时,宜将级差减半。

7 剪切过程中法向应力应始终保持为常数。采用斜推法时,应同步降低因施加剪切载荷而产生的法向分量的增量,保持法向载荷不变。

8 剪切载荷施加采用时间控制,每5min加载一级,施加前后对法向和切向位移测表各测读一次。接近剪断时,应加密测读载荷和位移,峰值前不得少于10组读数。

9 试体被剪断时,测读剪切载荷峰值。根据需要可继续施加剪切载荷,直到剪切载荷值趋于稳定。

10 当剪切载荷无法稳定或剪切位移明显增大时,测读剪切载荷峰值。在剪切载荷缓慢退至零的过程中,法向应力应保持常数,测读试体回弹位移读数。

11 调整设备与测表按本条6~9款的规定沿剪断面进行抗剪(摩擦)试验。剪切载荷可根据抗剪断试验的终点稳定值为最大值进行分级。

7.1.13 试验过程中,对加载设备和测表使用情况、试体发出的响声、混凝土和岩体中出现松动、掉块和裂缝开裂等现象,均应作详细描述和记录。

试验结束后,翻转试体,测量实际剪切面面积。详细记录剪切面的破坏情况、擦痕的分布、方向及长度。应描述岩体和混凝土内

局部被剪断的部位和大小、剪切面上碎屑物质的性质和分布。

7.1.14 试验成果整理应符合下列规定：

1 平推法试验按下列公式计算各法向载荷下的法向应力和剪切应力：

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (7.1.14-1)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (7.1.14-2)$$

式中 σ ——作用于剪切面上的法向应力,MPa;

τ ——作用于剪切面上的剪应力,MPa;

P ——作用于剪切面上的总法向载荷,N;

Q ——作用于剪切面上总剪切载荷,N;

A ——剪切面面积,mm²。

2 斜推法试验按下式计算法向应力和剪切应力：

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{Q}{A} \sin \alpha \quad (7.1.14-3)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \cos \alpha \quad (7.1.14-4)$$

式中 α ——斜向载荷施力方向与剪切面之间的夹角。

3 绘制各法向应力下的剪应力 τ 与剪切位移 u_s 及法向位移 u_n 关系曲线。根据关系曲线,确定各法向应力下的抗剪断峰值和抗剪峰值。

4 绘制法向应力 τ 与其对应的抗剪断峰值及抗剪峰值关系曲线,按库伦表达式确定相应的抗剪强度参数。

5 试验成果整理还应符合本规程附录 G 的相应规定。

7.1.15 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试体编号、试体位置、试验方法、混凝土强度、剪切面面积、测表布置、法向载荷、剪切载荷、法向位移、剪切位移、试验人员、试验日期。

7.2 结构面直剪试验

7.2.1 本试验适用于岩体中的各类结构面。

7.2.2 试体布置及加工尺寸应符合下列规定：

- 1 探明岩体中结构面的部位和产状,将结构面作为预定剪切面。
- 2 每组试体的数量不宜少于5个,同一组试验结构面性状应基本相同。
- 3 在岩体的预定部位加工试体,试体宜加工成方形。
- 4 结构面剪切面积不宜小于 2500cm^2 ,边长不宜小于 50cm ,试体高度不宜小于试体边长的 $2/3$ 。试体间距宜大于试体边长。

7.2.3 试验采用平推法或斜推法,推力方向宜与工程岩体的受力方向一致。斜推法的推力中心线与剪切面夹角为 $12^\circ\sim 17^\circ$ 。

试体的推力部位应留有安装千斤顶的足够空间,平推法应开挖千斤顶槽。

7.2.4 试体制备应符合下列规定：

- 1 当结构面上侧岩体为 I、II 级或完整性好的 III 级岩体时,制备试体可不浇筑保护套,但试体各面应大致修凿平整,顶面宜平行预定剪切面。
- 2 对可能出现破裂或松动的岩体,应浇筑钢筋混凝土保护套,对混凝土或水泥砂浆应进行养护,保护套应具有足够的强度和刚度,顶面应平行预定剪切面。保护套底部应预留 2cm 的剪切缝。
- 3 对结构面倾斜的试体或有夹泥层的试体,加工时应采取保护措施,避免结构面产生位移和试体下滑。
- 4 反力部位的岩体应能承受足够的反力,在浇筑混凝土反力座或安装反力装置的岩体表面应大致凿平。
- 5 试体可在天然含水状态下剪切,需要时。可在人工浸水条件下剪切。

7.2.5 地质描述除应符合附录 E 的规定外,还应对结构面的产状、成因、类型、连续性、起伏差、充填物厚度、矿物成分、泥化软化程度、结构面两侧岩石名称、面壁强度进行详细描述。需要时,对夹泥进行矿物鉴定、颗粒分析和含水量测定。

7.2.6 主要仪器和设备应符合本规程 7.1.5 的规定。

7.2.7 应先安装法向后安装剪切向的载荷系统。法向载荷与剪切载荷的合力作用点应通过剪切面中心,且位于剪切缝或结构面厚度 1/2 处。

用于施加法向和剪切载荷的千斤顶的容量宜按结构面的性质选用。

7.2.8 法向载荷系统安装应符合下列规定:

1 在试体顶部铺设一层水泥浆,放上钢垫板,垫板应平行预定剪切面。

2 待水泥浆凝固后,在垫板上依次安放滚轴排、垫板、千斤顶(或液压枕)、垫板、传力柱及顶部垫板。

3 在顶部垫板和岩面之间浇筑混凝土或安装反力装置。

4 整个法向载荷系统所有部件应保持在加载方向的同一轴线上,并垂直预定剪切面。

5 法向载荷系统应具有足够的强度和刚度。当剪切面倾斜或载荷系统超过一定高度时,应对法向载荷系统进行支撑。

6 安装完毕后,启动千斤顶施加接触压力使整个法向载荷系统接触紧密。千斤顶活塞应预留足够的行程。

7.2.9 剪切载荷系统安装应符合下列规定:

1 在试体受推力作用面上,用水泥浆粘贴一块垫板,垫板底部与剪切面之间应留有约1cm间隙,垫板应垂直预定剪切面。

2 在垫板后依次安装传力块(平推法)或斜垫板(斜推法)、千斤顶、垫板。在垫板和反力座之间浇筑混凝土。

3 平推法推力中心线应平行剪切面,且与剪切面距离不应大于剪切方向试体边长的 5%,斜推法推力中心线应通过剪切面中心。

7.2.10 测量系统安装应符合下列规定:

1 测量支架的支点应在基岩变形影响范围以外,支架应具有足够的刚度。

2 在支架上依次安装测量表架和位移测表。在试体的对称部位,分别安装测量切向和法向绝对位移的测表,每侧法向、切向

位移测表均不宜少于2只。

3 根据需要可布置测量试体与基岩面之间相对位移的测表。

7.2.11 试验加载应符合下列规定：

1 剪切面上的最大法向应力不宜小于工程应力。当剪切面有软弱充填物时，最大法向应力应以不挤出充填物为限。

2 根据本规程附录 F 对千斤顶(或液压枕)作的率定曲线和试体剪切面积，计算施加载荷与压力表读数。

3 检查各测表的工作状态，读取初始读数。

4 对每个试体分别施加不同的法向载荷，其值为最大法向载荷的等差值。

5 对每个试体，法向载荷宜分3~5级施加，每隔 5min 施加一级，并测读法向位移。在最后一级法向载荷作用下，法向位移应相对稳定后，再施加剪切载荷。

6 法向位移稳定标准：对硬性结构面，每隔5min 测读一次，连续两次读数之差不超过0.01mm；对软弱结构面，每隔 10min 测读一次，连续两次读数之差不超过0.03mm。

7 剪切载荷按预估的最大值等分8~12级施加，当剪切位移增量为前级位移增量的1.5倍时，宜将级差减半。峰值前不得少于10组读数。

8 剪切过程中法向载荷应始终保持常数，采用斜推法时，应同步降低因施加剪切载荷而产生的法向分量的增量，保持法向载荷不变。

9 剪切载荷施加应采用时间控制。对无充填或充填硅质、铁质、钙质的结构面，每隔5min 加载一级；对充填软弱物质结构面，可根据剪切位移的大小，每隔 10min 或 15min 加载一级。加载前后均应测读各位移测表。

10 试体被剪断时，测读剪切载荷峰值。根据需要可继续施加剪切载荷，直至剪切位移达到 1.5cm。

11 将剪切载荷缓慢退至零的过程中，法向应力应保持为常数，测读试体回弹位移读数。

12 根据需要,调整设备和位移测表,按本条7~9款规定进行抗剪(摩擦)试验,剪切载荷可按抗剪断试验的峰值为最大值进行分级。

7.2.12 试验结束后,翻转试体,测量实际剪切面面积,详细描述剪切面的破坏情况、擦痕的分布、方向和长度、结构面性质与厚度,测定剪切面的起伏差,绘制沿剪切方向剪断面起伏差变化的曲线。

7.2.13 试验成果整理应符合本规程 7.1.14 的规定。

7.2.14 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试体编号、试体位置、试验方法、剪切面面积、位移测表布置、法向载荷、剪切载荷、法向位移、剪切位移、试验人员、试验日期。

7.3 结构面直剪蠕变试验

7.3.1 本试验适用于岩体中各类结构面。

注:实验室结构面直剪蠕变试验可参照本试验的规定进行。

7.3.2 试体布置除应符合本规程 7.2.2 的规定外,还应符合下列规定:

- 1 试验宜在专门开挖的支洞内进行。
- 2 试验段内应尽量保持温度和湿度恒定。
- 3 试验宜采用平推法。

7.3.3 试体制备应符合本规程 7.2.4 的规定。

7.3.4 地质描述应符合本规程 7.2.5 的规定。试验前后应对主剪面及影响带进行大比例尺的专门描述。

7.3.5 主要仪器和设备除应符合本规程 7.1.5 的规定外,还应配备稳压装置和隔温装置。

7.3.6 载荷系统安装除应符合本规程 7.2.7~7.2.9 的规定外,还应安装稳压装置。

7.3.7 测量系统安装应符合本规程 7.2.10 的规定。

7.3.8 试验加载除应符合本规程 7.2.11 条 1~6 款的规定外,还应符合下列规定:

- 1 每级法向载荷下剪切载荷分级数不应少于5级。

2 剪切载荷较高或当剪切位移明显增大时,应减小剪切载荷级差。

3 剪切载荷加完一级后应立即测读瞬时位移,然后分别在5min、10min、15min、30min、1h、2h、4h、8h、16h、24h测读剪切蠕变位移。24h以后,每天定时测读蠕变位移一次。每级剪切载荷加载历时不宜少于5d。

4 剪切蠕变位移稳定标准:对于硬性结构面,24h两次读数差不大于0.002mm;对于软弱结构面,24h两次读数差不大于0.003mm。满足稳定标准后即可施加下一级剪切载荷。

5 在较高的剪切载荷下,剪切位移速率明显增大时,应加密测读。

6 试验过程中法向载荷应始终保持为常数,每级剪切载荷应保持为一个定值,直至在某一级剪切载荷下试体发生蠕变破坏。

7 试验过程中,应尽量保持试验环境温度、湿度不变,温度变化不宜大于1℃。

7.3.9 试验结束后应对剪切面进行描述,描述应符合本规程7.2.12的规定。

7.3.10 试验成果整理除应符合本规程7.1.14条1款的规定外,还应符合下列规定:

1 绘制剪切位移 u 与时间 t 关系曲线(图7.3.10—1)。

2 根据剪切位移 u 与时间 t 关系曲线,绘制剪应力 τ 与剪切位移 u 等时簇曲线(图7.3.10—2)。

3 长期剪切蠕变强度 τ_{∞} 可按下列方法之一确定:

1) 在某级剪切载荷下,当剪切位移 u 与时间 t 关系曲线发生由等速蠕变转变为加速蠕变,出现转折点(A)时(图7.3.10—1),该级剪切载荷对应的应力值即为 τ_{∞} 。

2) 在剪应力 τ 与剪切位移 u 等时簇曲线上(图7.3.10—2),确定各历时的屈服极限,各屈服极限点组成的水平渐近线所对应的剪应力值即为 τ_{∞} 。

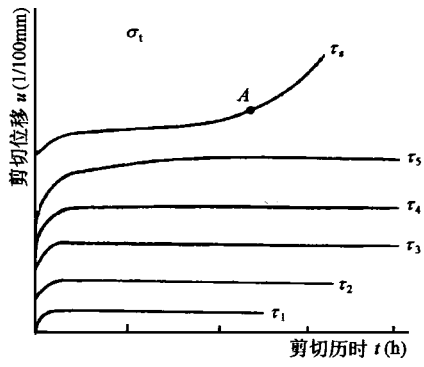


图 7.3.10-1 剪切位移 u 与时间 t 关系曲线

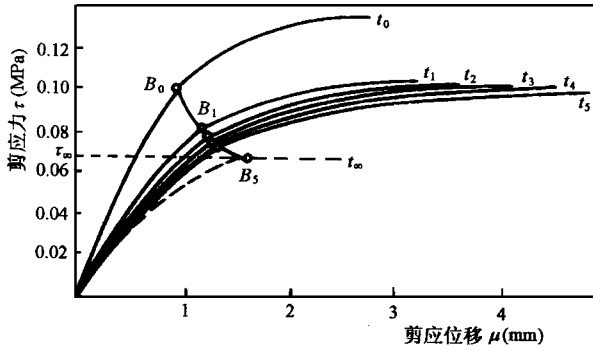


图 7.3.10-2 蠕变试验等时簇曲线

t_0 —快剪试验; $t_1 \sim t_5$ —不同历时下的蠕变试验; B_0 —快剪屈服极限;

$B_1 \sim B_5$ —蠕变屈服极限; τ_{∞} —长期(蠕变)强度

4 绘制法向应力 σ 和对应的长期剪切蠕变强度 τ_{∞} 关系曲线,按库伦表达式确定结构面长期抗剪强度参数 $\text{tg}\varphi_{\infty}$ 、 C_{∞} 。

7.3.11 试验记录除应符合本规程 7.2.14 的规定外,还应记录试验过程中的温度和湿度。

7.4 岩体直剪试验

7.4.1 本试验适用于各级岩体。

7.4.2 试体布置应符合本规程 7.1.2 条 1~3 及 6 款的规定。

7.4.3 试体制备应符合下列规定：

- 1 试体宜加工成方形，底部剪切面面积不宜小于 2500cm^2 ，高度不宜小于最小边长的 $2/3$ 。
- 2 试体间距应大于最小边长的 1.5 倍，周围岩面宜修凿平整。
- 3 对裂隙发育，易被压坏的岩体，需浇筑钢筋混凝土保护套。保护套应具有足够的强度和刚度。保护套底部与基岩之间应预留 2cm 剪切缝(图7.4.3)。
- 4 试体或保护套顶面应平行预定剪切面。

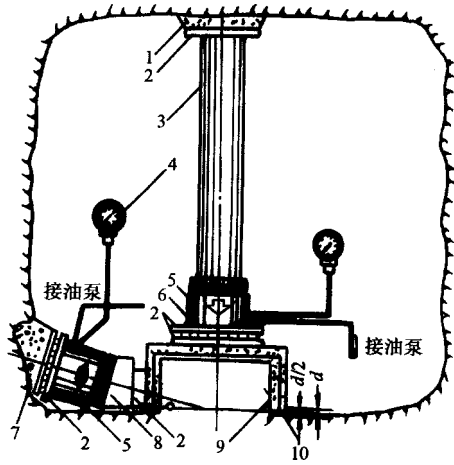


图 7.4.3 岩体直剪试验示意图

- 1—砂浆；2—垫板；3—传力柱；4—压力表；5—液压千斤顶；6—滚轴排；
7—混凝土后座；8—斜垫块；9—钢筋混凝土保护罩；10—剪切缝

7.4.4 试验采用平推法或斜推法，平推法推力方向宜与工程剪切方向一致。斜推法的推力方向与剪切面夹角为 $12^\circ\sim 17^\circ$ 。

7.4.5 地质描述除应符合本规程附录 E 的规定外，还应对结构面的类型、产状、延伸性、密度、充填物性质、与受力方向的关系，以及试验段岩体完整程度、风化程度、地下水情况进行详细描述，提出

试验段地质素描图、试体展示图。

7.4.6 主要仪器和设备应符合本规程 7.1.5 的规定。

7.4.7 应先安装法向后安装剪切向的载荷系统。法向载荷与剪切载荷的合力作用点应通过预定剪切面中心。

7.4.8 法向载荷系统和剪切载荷系统安装应符合本规程 7.1.8 和 7.1.9 的规定。

7.4.9 测量系统安装应符合本规程 7.1.10 的规定。

7.4.10 试验加载应符合本规程 7.1.12 的规定。

7.4.11 试验结束后,翻转试体,测量实际剪切面面积。详细描述剪切面破坏情况、擦痕分布、方向及长度、剪切面上碎屑物质的性质、分布。各类结构面的充填及连通情况。

对剪切面进行地质素描,测定剪切面的起伏差,绘制沿剪切方向高差的变化曲线。

7.4.12 试验成果整理应符合本规程 7.1.14 的规定。

7.4.13 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试体编号、试体位置、试验方法、剪切面积、位移测表布置、地质素描、法向载荷、剪切载荷、法向位移、剪切位移、试验人员、试验日期。

7.5 岩体三轴压缩试验

7.5.1 本试验采用等侧向压力($\sigma_2 = \sigma_3$),适用于Ⅲ级以下(含Ⅲ级)的岩体。

7.5.2 试体布置和试体制备应符合下列规定:

1 试体采用断面为正方形的柱体,边长不宜小于30cm,高度应为边长的2~2.5倍。

2 每组试体不宜少于5个,同一组试体的岩性应基本相同。

3 试体加工时应减小对岩体的扰动。

4 试体加载的反力部位应具有足够的强度。

5 试体侧面应垂直底面,顶面应平行底面。

6 试体表面应修凿平整,需要时可用水泥砂浆抹平。

7.5.3 地质描述除应符合本规程附录 E 的规定外,还应对试体的

裂隙分布、宽度、产状进行详细描述,并绘制试体展示图。

试体破坏后应进行破坏形态的描述,绘制破坏形态立体图。

7.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 液压千斤顶或液压枕;
- 液压泵和管路;
- 压力表;
- 钢垫板;
- 传力柱;
- 传力架(箱);
- 侧向反力框架;
- 测量支架;
- 测量表架;
- 测表。

7.5.5 载荷系统安装时,应先安装侧向再安装轴向载荷系统。侧向载荷和轴向载荷均应垂直受力面。

7.5.6 侧向载荷系统安装应符合下列规定:

1 试体侧面安放垫板,垫板与试体侧面之间放置两层中间夹黄油的塑料薄膜作垫层。

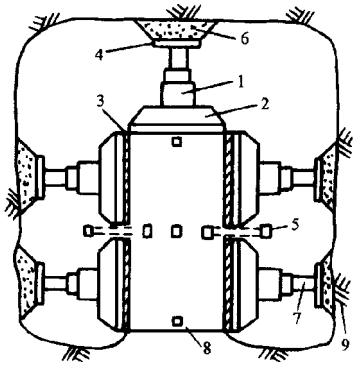


图 7.5.6—1 反力台式(千斤顶施加压力)三轴试验安装示意图

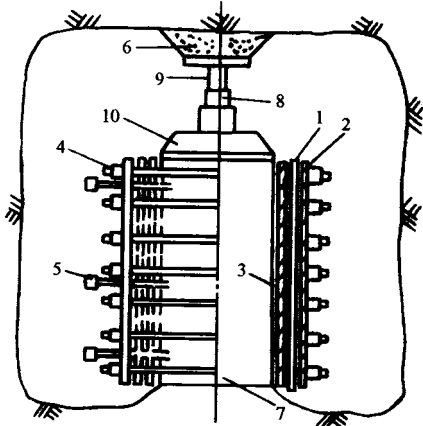
1—千斤顶;2—传力架;3—柔性垫层;4—垫板;5—测量标点;

6—水泥砂浆;7—传力柱;8—试体 9—反力座

2 采用千斤顶加载时,宜采用反力座(图7.5.6—1)。垫板后依次安装传力架、千斤顶(垫板、传力柱)、垫板,在垫板与反力座之间浇筑混凝土或砂浆。

3 安装千斤顶时,应呈轴对称布置,安装多个千斤顶时应并联加载。千斤顶活塞伸出量应不小于 2cm 的行程。

4 采用液压枕加载时,宜采用反力框架(图7.5.6—2),反力框架应具有足够的强度。垫板后依次安装液压枕、垫板、反力框架。液压枕应采用多个并联加载。



7.5.6—2 反力框架式(液压枕施加压力)三轴试验安装示意图

1—液压枕;2—垫板;3—柔性垫层;4—传力框架;5—测量标点;

6—水泥砂浆;7—试体;8—千斤顶;9—传力柱;10—传力架

5 安装完毕,启动千斤顶或液压枕施加接触压力,使整个侧向载荷系统接触紧密。

7.5.7 轴向载荷加压系统安装应符合下列规定:

1 轴向载荷宜采用千斤顶施加,载荷中心线应通过试体中心。

2 试体顶面与垫板之间放置两层中间夹黄油的塑料薄膜作垫层。

3 轴向载荷系统安装时,垫板上依次安装传力架、千斤顶(垫板、传力柱)、垫板,在顶部垫板与反力座之间浇筑混凝土或砂浆。

4 安装完毕,启动千斤顶施加接触压力。

5 轴向载荷系统应具有足够的刚度和强度。

7.5.8 测量系统安装应符合下列规定:

1 测量支架的支点应设置在基岩变形影响范围以外,支架应具有足够的刚度。

2 在支架上通过测量表架安装测量试体轴向变形的测表,测表不应少于2只,应对称布置。

3 测量试体横向变形的测表不应少于4只,应对称布置。

7.5.9 试验及稳定标准应符合下列规定:

1 根据本规程附录 F 对千斤顶(或液压枕)作的率定曲线和试体面积,计算施加的载荷和压力表读数。

2 检查各测表的工作状态,读取初始读数。

3 对每个试体分别施加不同的侧向压力($\sigma_2 = \sigma_3$),其值为最大侧向压力的等差值。最大侧向压力应根据工程设计要求确定。

4 侧向和轴向载荷应同步施加至预定的侧向载荷值 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$,稳定 5min 后测读变形,然后单独继续施加轴向载荷。

5 轴向载荷采用逐级连续加载,按预估最大轴向载荷等分 8~12 级施加,当变形明显增大时应减小级差。必要时可采用逐级一次循环加载。

6 轴向载荷施加过程中,侧向压力应始终保持不变。

7 轴向载荷施加采用时间控制,每 5min 施加一级,每级载荷施加前后各测读一次变形,直至试体破坏。

7.5.10 试验结束后应描述试体的破坏形式、原有裂隙的延伸和开裂情况、破坏面分布、产状、擦痕的分布、方向和长度。

7.5.11 试验成果整理应符合下列规定:

1 计算各试体破坏时轴向应力值。

2 对于一组试验,绘制各试体破坏时轴向应力 σ_1 与对应侧向应力 σ_3 的关系曲线(图 7.5.11)。

3 不同侧压力下岩体三轴抗压强度可按下列公式计算：

$$\sigma_1 = F\sigma_3 + R \quad (7.5.11-1)$$

$$F = \operatorname{tg} \alpha \quad (7.5.11-2)$$

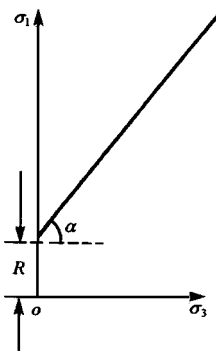
式中 σ_1 ——轴向压力,MPa;

σ_3 ——侧向压力,MPa;

F —— $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系直线的斜率;

R —— $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系直线在纵坐标轴上的截距,MPa;

α —— $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系直线与 σ_3 轴的夹角。



7.5.11 轴向单位压力 σ_1 与侧向单位压力 σ_3 关系曲线

4 三向应力状态岩体抗剪强度参数按下列公式计算：

$$f = \frac{F-1}{2\sqrt{F}} \quad (7.5.11-3)$$

$$C = \frac{R}{2\sqrt{F}} \quad (7.5.11-4)$$

式中 f ——摩擦系数;

C ——粘聚力,MPa。

5 三向应力状态岩体抗剪强度参数也可根据各试体破坏时轴向应力 σ_1 和对应侧向应力 σ_3 ,在剪应力 τ 与正应力 σ 的坐标系中绘制莫尔应力圆簇,按莫尔—库伦强度理论确定。

7.5.12 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试体编号、试体位置、试验方法、试体尺寸、变形测表布置、侧向载荷、轴向载荷、侧向变形、轴向变形、试验人员、试验日期。

7.6 岩体载荷试验

7.6.1 本试验适用于Ⅲ级以下(含Ⅲ级)岩体。

7.6.2 试点制备应符合本规程 6.1.3 的规定、承压面积不应小于 500cm^2 。

7.6.3 主要仪器和设备应符合本规程 6.1.5 的规定,刚性承压板

宜为圆形。

7.6.4 载荷系统安装应符合本规程 6.1.6 的规定。

7.6.5 测量系统安装除应符合本规程 6.1.8 条 1、2 和 5 款的规定外,还应在板外沿径向对称设置变形测表,每侧宜设置 2 个。

7.6.6 试验加载应符合下列规定:

1 试验宜采用千斤顶加载。根据附录 F 对千斤顶作的率定曲线和承压面积,计算施加的载荷值与压力表读数。

2 检查各测表的工作状态,进行初始稳定读数观测,每隔 10min 测读一次,连续三次读数不变,开始加压。

3 载荷的级差应由大到小递减,先预估极限载荷 P_{max} ,载荷小于 $0.50 P_{max}$ 时,级差为 $0.1 P_{max}$;载荷为 $0.50 \sim 0.75 P_{max}$ 时,级差为 $0.05 P_{max}$;载荷大于 $0.75 P_{max}$ 时,级差为 $0.025 P_{max}$ 。

4 当载荷与变形关系曲线不再呈直线或承压板周围岩面出现裂缝时,应减小载荷级差,最小级差可取 $0.01 \sim 0.02 \text{MPa}$ 。

5 试验采用逐级连续加载,直至试点破坏。

6 加载应采用变形控制。每级载荷施加后立即读数,以后每隔 10min 读数一次,当各测表相邻两次读数之差与同级载荷下第一次读数和前一等级载荷下最后一次读数差之比小于 5% 时,可施加下一级载荷。

7 可在承压板上测表读数稳定后测读承压板外测表一次。

8 加载结束后分 3~5 级缓慢卸载,每级卸载后应测读一次变形。卸载完成后,每隔 10min 测读测表一次,持续 1h。

7.6.7 当出现下列情况之一时,可终止加载:

1 某级压力下,承压板上和板外测表的读数不停的变化,且在一定时间间隔内,这种变化有不断增大的趋势,可认为岩体已破坏。

2 压力表读数显示载荷加不上或勉强加上但很快降下来,可认为岩体已破坏。

3 承压板周围岩面发生明显隆起或径向裂缝持续发展,可认为岩体已破坏。

4 当设备出力不够,岩体未能达到破坏,但载荷已经达到工程设计压力的2倍。

7.6.8 试验结束后,应描述裂缝发生及发展情况,裂缝产状及性质,承压板周围岩面隆起程度、位置及范围。必要时应切槽检查。

7.6.9 试验成果整理应符合下列规定:

1 压力按下式计算:

$$p = \frac{P}{A} \quad (7.6.9)$$

式中 p ——作用于试点上的单位压力,MPa;

P ——作用于试点上的法向载荷,N;

A ——试点承压面积,mm²。

2 根据测表读数计算各级压力下承压板上和板外岩体变形。

3 绘制压力 p 与变形 W 关系曲线,确定各特征点的压力。

7.6.10 试验记录应包括工程名称、岩石名称、试点编号、试点位置、试验方法、承压面积、测表布置、载荷、变形、试验前后地质素描图、试验人员、试验日期。

8 岩体应力测试

8.1 孔壁应变法测试

8.1.1 本测试可分为浅孔孔壁应变法、浅孔空心包体孔壁应变法和深孔水下孔壁应变法,适用于完整、较完整岩体。

8.1.2 测点布置应符合下列规定:

1 测段内及测段附近岩性应均一完整。

2 每一测段内宜布置 2~3 个测点,各测点应尽量靠近,避开断层、裂隙等不良地质构造。

3 在测试岩体初始应力时,测试深度应大于闷室断面最大尺寸的 2 倍。

8.1.3 地质描述应符合下列规定:

1 钻孔钻进过程中的情况。

2 岩石名称、结构及主要矿物成份。

3 结构面的类型、产状、宽度、充填物性质。

4 测点区的地应力现象。

8.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

——钻机及附属设备;

——大、小口径金刚石钻头;

——扩孔器;

——磨平钻头及导向钻头;

——孔壁应变计(浅孔孔壁应变计、空心包体孔壁应变计、深孔水下孔壁应变计);

——静态电阻应变仪及接线箱;

——安装工具;

——试孔器;

——清洗及烘烤器具;

——岩心围压率定器。

8.1.5 测试准备应符合下列规定：

- 1 根据工程和测试要求，选择场地安装钻机。
- 2 用大口径钻头钻至预定的测试深度。
- 3 用卡簧整齐地拉断并取出岩心，再用磨平钻头磨平孔底，用导向钻头钻导向孔。
- 4 用带扩孔器的小口径金刚石钻头钻测试孔，孔深约 50cm 并与大孔同轴，两孔孔轴允许偏差为 2mm，在钻进过程中均匀施压，不应停钻，不得更换钻头。
- 5 取出岩心进行描述，当岩心破碎或不能满足测试要求时，应重复本条 2~4 款，直至取到完整岩心并满足测试要求。
- 6 用试孔器测试孔深。根据所选类型的孔壁应变计，对测孔孔壁进行清洗或干燥处理。

8.1.6 浅孔电阻丝式孔壁应变计安装应符合下列规定：

- 1 在测试孔孔壁和应变计上均匀涂抹粘结剂。
- 2 用安装器将应变计送入测试孔，定向就位，施加并保持一定的预压力，使应变计牢固地粘结在孔壁上。
- 3 粘结剂充分固化后，检查系统绝缘值，绝缘值不应小于 50M Ω 。
- 4 取出安装器，记录测点深度及方位。

8.1.7 浅孔空心包体孔壁应变计安装应符合下列规定：

- 1 在应变计内腔的胶管里注满粘结剂。
- 2 用安装器将应变计送入测试孔，定向就位，然后推动安装杆，切断定位销钉，挤出粘结剂。
- 3 按本规程 8.1.6 条 3、4 款的规定测定绝缘值、测点深度及方位。

8.1.8 深孔水下孔壁应变计安装应符合下列规定：

- 1 在应变计前端的胶罐里注满粘结剂。
- 2 用安装器将应变计送入测试孔，利用安装器的自重，将应变计牢固地粘结在孔壁上。
- 3 接通电源加热定向罗盘，30min 后切断电源，使定向罗盘

自冷定向。

4 按本规程 8.1.6 条 3、4 款的规定测定绝缘值、测点深度及方位。

8.1.9 浅孔孔壁应变法或空心包体孔壁应变法测试及稳定标准应符合下列规定：

1 从钻具中引出应变计电缆，接通仪器。向钻孔内冲水，每隔 5min 读数一次，连续三次相邻读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 且冲水时间不少于 30min 时，取最后一次读数作为稳定读数，并记为初始值。

2 按预定深度分 10 级，开始每级解除深度可为 5cm，在接近应变片粘结部位时宜为 2cm。逐级钻进，进行套心解除，每解除到一级深度时，停钻不停机连续读数两次。

3 套钻最终解除深度应超过测孔孔底应力集中影响区，应变计读数趋于稳定时可终止解除。但最终解除深度（即从测点到孔底的距离）不得小于解除孔孔径的 2.0 倍。

4 继续向钻孔内冲水，每隔 5min 读数一次，当连续三次相邻读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 且冲水时间不少于 30min 时，取最后一次读数为稳定读数。

5 解除过程中发现异常情况时，应及时停机检查并记录。

6 检查系统绝缘值，卸下钻具，小心取出带有应变计的岩心进行描述。

8.1.10 深孔水下孔壁应变法测试及稳定标准应符合下列规定：

1 接通仪器，每隔 5min 读数一次，当连续三次相邻读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 时，取最后一次读数作为初始稳定读数。

2 提升安装器，切断应变计与安装托架间的引线，将应变计单独留在测孔中，读取定向罗盘所指示的方位。

3 进行连续套钻解除，套心解除深度应满足本规程 8.1.9 条 3 款的规定。

4 取出带有应变计的岩心，立即将切断的引线再次与安装器托架上的引线连接起来，检查系统绝缘值并保持岩心的环境温度不变。

5 接通仪器,读取解除后的应变计读数,每 5min 读数一次,连续三次相邻读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 时,取最后一次读数作为稳定读数。

6 对岩心进行描述。

8.1.11 岩心围压试验应符合下列规定:

1 现场测试结束后,将解除后带有应变计的岩心放入围压器中,在现场进行围压试验。

2 当采用大循环法加压时,压力宜分 5~10 级施加。最大压力应大于预估的岩体最大主应力,循环次数不应少于三次。

3 当采用逐级一次循环法加压时,每级压力下每隔 5min 读数一次,相邻两次读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 时,即为稳定读数。

4 绘制压力 p 与应变 ϵ 关系曲线,计算岩石弹性模量和泊松比。

8.1.12 测试成果整理应符合下列规定:

1 根据岩心解除应变值和解除深度,绘制解除过程曲线,选取合理的解除应变值。

2 根据围压试验或在现场取样进行的室内岩块力学试验,确定岩石的弹性模量和泊松比。

3 岩体三维应力计算应符合本规程附录 H 的规定。

8.1.13 测试记录应包括工程名称、岩石名称、测点编号、测点位置、试验方法、地质描述、测试深度、相应于各解除深度的电阻片的应变值、灵敏系数、系统绝缘值、冲水时间、各电阻片及应变丛布置方向、钻孔轴向方位角、倾角、围压试验资料、测试过程中发生的异常现象、测试人员、测试日期。

8.2 孔底应变法测试

8.2.1 本测试适用于完整、较完整的岩体,要求钻孔内无水。

8.2.2 测点布置应符合本规程 8.1.2 的规定。当测量岩体中某一点的三向应力状态时,宜在同一平面内,布置交会于岩体某点的三个钻孔(如 45° 、 90° 、 -45°)。

8.2.3 地质描述应符合本规程 8.1.3 的规定。

8.2.4 主要仪器和设备除应符合本规程 8.1.4 中的孔壁应变计换成孔底应变外,其它同规程 8.1.4 的规定。

8.2.5 测试准备应符合下列规定:

1 根据测试要求,选择场地,安装钻机。钻进到预定深度,取出岩心,观察节理、裂隙发育情况,判断是否满足试验条件,否则应继续钻进,直至满足试验条件。

2 粗磨、细磨孔底至平整光滑。

3 用清洁剂洗净孔底并用烘烤器烘干。

8.2.6 应变计安装应符合下列规定:

1 在孔底及孔底应变计底表面均匀涂上一层粘结剂。

2 用安装杆将带有孔底应变计的安装器送入孔中,当接近孔底时定向就位,将孔底应变计压贴在孔底平面中部 $1/3$ 直径范围内,并保持一定的预压力,使应变计与孔底岩面紧密粘贴。

3 粘结剂固化后,检查系统绝缘值,绝缘值不应小于 $50M\Omega$ 。

4 取出安装器。

8.2.7 测试及稳定标准应符合下列规定:

1 从钻具中引出测量电缆,接通仪器。向钻孔内冲水,每隔 5min 读数一次,当连续三次相邻读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 且冲水时间不少于 30min 时,取最后一次读数作为稳定读数,并作为初始值。

2 按预定深度逐级钻进,进行套心解除。每级解除深度,开始时宜为 1cm ,当解除至解除孔径 0.6 倍后宜为 2cm ,每解除一级,停钻不停机读数,连续读数两次。

3 套钻最终解除深度应超过孔底应力集中影响区,最小解除深度应大于解除孔孔径的 1.5 倍。

4 继续向钻孔内冲水,每隔 5min 读数一次,当连续三次相邻读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 且冲水时间不少于 30min 时,取最后一次读数作为稳定读数。

5 在解除过程中,发现异常情况时,应立即停机检查,作好记录。

6 检查系统绝缘值,卸下钻具,取出带有应变计的岩心进行描述。

8.2.8 岩心围压试验应符合本规程 8.1.11 的规定。

8.2.9 测试成果整理应符合本规程 8.1.12 的规定。

8.2.10 测试记录应符合本规程 8.1.13 的规定。

8.3 孔径变形法测试

8.3.1 本测试可分为压磁应力计法和四分向环式变形计法,适用于完整和较完整岩体。

8.3.2 测点布置应符合本规程 8.1.2 的规定。

8.3.3 地质描述应符合本规程 8.1.3 的规定。

8.3.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 钻机及其附属设备;
- 大、小口径金刚石钻头;
- 磨平钻头及导向钻头;
- 压磁应力计及读数仪或四分向环式变形计及静态应变仪;
- 围压率定器;
- 安装设备。

8.3.5 测试准备应符合下列规定:

- 1 选择场地,安装钻机。
- 2 用大口径钻头钻至预定部位,取出岩心。
- 3 用磨平钻头磨平孔底,用导向钻头钻深约 4~5cm 的导向孔。
- 4 用测试钻头钻测试孔,孔深约 50cm,要求与大孔同轴,允许偏差为 2mm。取出测试孔岩心并冲洗钻孔。
- 5 观测岩心并进行描述,当岩心不满足试验要求时应重复本条 2~4 款。
- 6 四分向环式变形计,应在安装前进行率定。

8.3.6 压磁应力计安装应符合下列规定:

1 对铅直测量孔,应先将应力计定向底座送入孔底定向,再将应力计送至孔底,将尾部插入底座定向凹槽内,对应力计施加预压力。

2 对水平测量孔,采用钻杆将应力计和水平定向器送至孔底定向固定,并施加预压力。

3 预压力的大小宜为应力计最大读数范围的 $1/3 \sim 2/3$,并保持该预压力不变。

4 记录安装定向方向。

8.3.7 四分向环式变形计安装应符合下列规定:

1 将变形计中各组钢环的引出线按顺序连接在应变仪的接线箱上,并预调平衡。

2 接上定向器,与变形计一起用安装杆缓慢送入测量孔内,并不断监视应变仪,读数压缩值宜控制在 $2000\mu\epsilon$ 。

3 用铁锤轻击安装杆端部,使变形计锥体与测量孔孔口紧密接触。

4 记录安装定向方向。

8.3.8 压磁应力计法的测试及稳定标准应符合下列规定:

1 将应力计导线从钻具中引出接入二次仪表上,冲水读数,每隔 5min 读数一次,连续三次相邻读数差不超过 3 个仪器最小读数单位且冲水时间不少于 30min 时,取最后一次读数作为稳定读数,并记为初始值。

2 每钻进解除 2cm ,停钻不停机读数一次。

3 最终解除深度(即从测点到孔底的距离)不得小于解除孔孔径的 1.5 倍。

8.3.9 四分向环式变形计法的测试及稳定标准应符合下列规定:

1 将应变计导线从钻具中引出,接入二次仪表上,冲水读数,每隔 5min 读数一次,连续三次相邻读数差不超过 $5\mu\epsilon$ 且冲水时间不少于 30min 时,取最后一次读数作为稳定读数,并记为初始值。

2 每钻进 2cm ,停钻不停机读数一次。

3 最终解除深度(即从测点到孔底的距离)不得小于解除孔

径的1.5倍。

8.3.10 围压试验应符合本规程 8.1.11 的规定。

8.3.11 测试成果整理应符合下列规定：

1 压磁应力计法：

1) 绘制解除深度 h 与应力计各元件读数差 Δu 的解除全过程关系曲线, 确定最终稳定值。

2) 绘制应力计各元件率定曲线, 各元件率定系数按下式计算：

$$K = \frac{S_w}{\Delta u} \quad (8.3.11-1)$$

式中 K —— 元件率定系数；

S_w —— 围压器压力, MPa；

Δu —— 仪器读数差。

3) 记录应力值 S_{ij} 按下式计算：

$$S_{ij} = K_i \cdot \Delta u \quad (8.3.11-2)$$

式中 S_{ij} —— 对于空间问题为 S_{ij} , 对于平面问题为 S' 、 S'' 和 S''' 。

4) 平面应力计算。当符合平面问题假设, 且压磁应力计各元件互成 60° 布置时, 平面应力按下式计算：

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{3}(S' + S'' + S''') \pm \frac{2}{3} \sqrt{(S' - S'')^2 + (S'' - S''')^2 + (S''' - S')^2} \quad (8.3.11-3)$$

$$\tan 2\theta = \frac{\sqrt{3}(S'' - S''')}{2S' - S'' - S'''} \quad (8.3.11-4)$$

式中 σ_1, σ_2 —— 最大、最小主应力, MPa；

S', S'', S''' —— 三个测试方向的记录应力, MPa；

θ —— 当 $\frac{(S'' - S''')}{2S' - S'' - S'''} < 0$ 时为最大主应力 σ_1 与记录应力 S' 的夹角；

当 $\frac{(S'' - S''')}{2S' - S'' - S'''} > 0$ 时为最小主应力 σ_2 与记录应力 S' 的夹角。

5)空间应力计算。根据三个不同方向的钻孔测试所取得的各个应力值 S_{ij} ,空间应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 按下列公式计算:

$$S_{ij} = \frac{1}{3} (A_{ij}\sigma_x + B_{ij}\sigma_y + C_{ij}\sigma_z + D_{ij}\tau_{xy} + E_{ij}\tau_{yz} + F_{ij}\tau_{zx}) \quad (8.3.11-5)$$

$$\begin{cases} A_{ij} = a_{ij}l_{i1}^2 + b_{ij}l_{i2}^2 + c_{ij}l_{i3}^2 + d_{ij}l_{ij}l_{i3} \\ B_{ij} = a_{ij}m_{i1}^2 + b_{ij}m_{i2}^2 + c_{ij}m_{i3}^2 + d_{ij}m_{ij}m_{i3} \\ C_{ij} = a_{ij}n_{i1}^2 + b_{ij}n_{i2}^2 + c_{ij}n_{i3}^2 + d_{ij}n_{ij}n_{i3} \\ D_{ij} = 2(a_{ij}l_{i1}m_{i1} + b_{ij}l_{i2}m_{i2} + c_{ij}l_{i3}m_{i3}) + d_{ij}(l_{i1}m_{i3} + l_{i3}m_{i1}) \\ E_{ij} = 2(a_{ij}m_{i1}n_{i1} + b_{ij}m_{i2}n_{i2} + c_{ij}m_{i3}n_{i3}) + d_{ij}(m_{i1}n_{i3} + m_{i3}n_{i1}) \\ F_{ij} = 2(a_{ij}n_{i1}l_{i1} + b_{ij}n_{i2}l_{i2} + c_{ij}n_{i3}l_{i3}) + d_{ij}(n_{i1}l_{i3} + n_{i3}l_{i1}) \end{cases} \quad (8.3.11-6)$$

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 + 2\cos 2\theta_{ij} \\ b_{ij} = -\mu \\ c_{ij} = 1 - 2\cos 2\theta_{ij} \\ d_{ij} = 4\sin 2\theta_{ij} \end{cases} \quad (8.3.11-7)$$

式中 i ——钻孔序号;
 j ——测试方向序号;
 θ ——钻孔内某点测试方向与钻孔坐标系 ε_{ij} 的夹角;
 l_{i1} 、 m_{i1} 、 n_{i1} 、 l_{i2} 、 m_{i2} 、 n_{i2} 、 l_{i3} 、 m_{i3} 、 n_{i3} 分别为相应测点钻孔坐标系各轴对大地坐标系的方向余弦。

2 四分向环式钻孔变形计法:

- 1)绘制解除深度 h 与各钢环应变 ε_i 关系曲线。
- 2)根据 $h \sim \varepsilon_i$ 关系曲线,参照地质条件和试验情况,确定最终稳定读数 ε_{ni} 。
- 3)绘制各元件率定的千分表读数 S_i 与电阻应变仪读数 ε_i 的关

系曲线。各元件率定系数按下式计算：

$$K_i = \frac{\varepsilon_i}{S_i} \quad (8.3.11-8)$$

式中 K_i ——元件 i 的率定系数, 1/mm;

ε_i ——各元件的应变值;

S_i ——千分表读数, mm。

4) 钻孔径向变形按下式计算：

$$\Delta d = \frac{\varepsilon_{mi} - \varepsilon_{oi}}{K_i} \quad (8.3.11-9)$$

式中 Δd ——钻孔径向变形, mm;

i ——测试元件的序号;

ε_{oi} ——元件 i 的初始应变值;

ε_{mi} ——元件 i 的最终稳定应变值。

5) 岩体三维应力计算应符合本规程附录 H 的规定。

8.3.12 测试记录应符合本规程 8.1.13 的规定。

8.4 水压致裂法测试

8.4.1 本测试适用于完整和较完整岩体。

8.4.2 钻孔测试段布置应符合下列规定：

1 在测试段上下 1.5m 范围内, 岩性应均一完整。

2 测点处岩体的渗透系数宜小于 1 吕容值。

8.4.3 地质描述除应符合本规程 8.1.3 的规定外, 还应描述测试段岩体的渗透性。

8.4.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——钻机及附属设备;

——橡胶封隔器(与钻孔孔径匹配)及高压软管;

——压力传感器和流量传感器;

——函数记录仪;

——高压大流量电动压力泵;

——印模器或钻孔电视录像设备。

8.4.5 测试准备应符合下列规定：

- 1 根据钻孔地质资料或钻孔录像资料选择测段。
- 2 清洗钻孔。
- 3 率定传感器,并进行封隔器预压试验。
- 4 对加压管路进行高压密封试验,试验压力不应小于20MPa。
- 5 检查定向设备。

8.4.6 测试应符合下列规定：

- 1 串接两个橡胶封隔器,用安装工具放至选定的压裂段,加压至预定的座封压力,使封隔器膨胀座封于孔壁上。
- 2 对压裂段注水加压,打开函数记录仪连续记录压力 p 与时间 t 关系曲线和流量 Q 与时间 t 关系曲线。
- 3 从函数记录仪上观察时间与压力关系曲线走势,当泵压上升至某一临界值 p_b 时,曲线出现拐点,岩壁破裂,立即关闭压力泵停止加压。
- 4 当曲线下拐并逐步趋于稳定后,打开压力泵阀门卸压,并关闭记录仪。
- 5 按本条2~4款连续进行3~4次加压循环。
- 6 测试完毕后,封隔器卸压,排出封隔器内的液压剂,从钻孔中移动封隔器,按本条1~5款进行下一测试段测试,直至全孔测试完成后,从钻孔中取出封隔器。
- 7 用定向印模器或钻孔录像仪记录压裂缝。当使用定向印模器记录压裂缝时应选择破裂压力明显的压裂段。

8.4.7 测试成果整理应符合下列规定：

- 1 根据实测压裂过程曲线,确定压裂过程中各特征点参数。
- 2 根据印模或钻孔录像资料,绘制压裂缝形状,确定压裂缝方位。
- 3 测试成果应包括各测试段的破裂压力 p_b 、瞬时关闭压力 p_s 、重张压力 p_r 、孔隙压力 p_0 、静水压力 p_h 、岩体抗拉强度 σ_t 、钻孔横截面上大主应力 S_H 及方位和小主应力 S_h 。

4 按下列公式计算岩体应力:

$$S_h = p_s \quad (8.4.7-1)$$

$$S_H = 3S_h - p_b - p_0 + \sigma_t \quad (8.4.7-2)$$

或
$$S_H = 3S_h - p_r - p_0 \quad (8.4.7-3)$$

式中 S_H 、 S_h ——分别为钻孔横断面上的大、小平面主应力;

p_b ——岩体破裂单位压力,MPa;

p_0 ——岩体孔隙单位压力,MPa;

σ_t ——岩体抗拉强度,MPa;

p_s ——瞬时关闭单位压力,MPa;

p_r ——岩体重张单位压力,MPa。

当压力传感器安置在地面时,实测的应力还需叠加静水压力 p_h (MPa)。

5 当钻孔为铅直方向时,钻孔横截面上大、小主应力为最大和最小水平主应力,最大水平主应力方向为水平面内破裂缝的方向。

8.4.8 测试记录应符合本规程 8.1.13 的规定。

8.5 表面应变法测试

8.5.1 本测试可分为解除法和恢复法,适用于完整和较完整岩体。

8.5.2 测区布置应符合下列规定:

1 测区及附近岩性应均一完整。

2 每一测区应布置 2~3 个测点,各测点应尽量靠近,并避开断层、裂隙等不良地质构造。

8.5.3 地质描述应符合本规程 8.1.3 的规定。

8.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

——掏槽机具及配套设备;

——应变计及读数仪;

- 液压枕及压力表；
- 防护器具；
- 率定设备。

8.5.5 测试准备应符合下列规定：

1 根据测试要求选择适当场地和试点。

2 试点周围岩面的修整范围对于解除法应大于解除岩心直径的2倍,对于恢复法,在粘贴应变计的一边,其长和宽各应为2倍的槽长。岩面起伏差不得超过0.5cm。

3 在已修整的试点范围内,选定粘贴应变计的位置并进行细加工,其范围应大于应变计长度的2倍。

4 清洗应变计粘贴部位,进行防潮处理并作好粘贴准备。

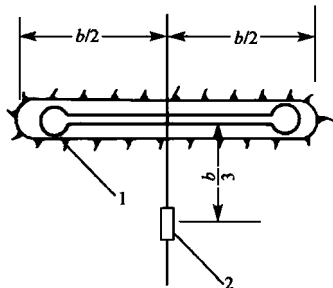
5 率定应变计和液压枕。

8.5.6 解除法仪器安装应符合下列规定：

1 在已处理好的测试面上布置一组应变计,每组应变计不应少于3只。

2 粘贴的应变计及测试系统绝缘度不应小于50MΩ。

3 安装应变计防护罩,引出测量导线。



8.5.7 恢复法仪器安装应符合下列规定：

1 在已处理好的试点面上,安装应变计,其方向应与解除槽方向垂直,应变计的中心点到解除槽中心线的距离为槽长的1/3(图8.5.7)。

2 应变计的粘贴、防潮及防护处理应符合本规程8.5.6条2、3款

图8.5.7 应变计埋设位置图

1—液压枕,2—应变计

的规定。

3 应变计安装完毕后,每隔5min读数一次,连续三次相邻读数差,钢弦应变计不大于3Hz,电阻应变计不超过5με,即为稳定读

数,并记为初始值。

4 按解除槽预定深度及宽度掏槽,每掏槽 2cm 深测读应变计读数一次,直至满足埋设压力枕要求。

5 掏槽结束后,按本条 3 款规定的稳定标准测读应变计读数。

6 清洗解除槽,埋入液压枕,填筑并捣实砂浆,养护 7d。

8.5.8 解除法测试及稳定标准应符合下列规定:

1 从钻具中引出应变计电缆并接通仪器,向测试点连续冲水 30min,检查隔温、防潮效果,并在冲水过程中,检查应变计读数有无漂移。稳定要求符合本规程 8.5.7 条 3 款的规定后,可开始解除。

2 用钻机分级解除,每级深 2cm 或按 $h/D=0.1$ 分级(h 为解除槽深度, D 为解除岩心直径),每级解除后测读应变计稳定读数。

3 解除结束后,按本规程 8.5.7 条 3 款的稳定标准测读应变计读数。

4 最终解除深度不应小于解除岩心直径的 0.5 倍。

8.5.9 恢复法测试应符合下列规定:

1 加压恢复时宜采用大循环法分级加压,级数不得少于 6 级,测试时应记录每级压力下的应变计读数。

2 最大一级压力,应大于掏槽解除结束时稳定应变值的相应压力。

3 取出液压枕,并描述其埋设情况。

8.5.10 测试成果整理应符合下列规定:

1 计算各级解除深度时的应变值:

1)采用钢弦应变计时按下式计算:

$$\varepsilon_i = \zeta(f_{ni}^2 - f_0^2) \quad (8.5.10-1)$$

式中 ε_i ——解除应变值, $\mu\varepsilon$;

f_{ni} ——与解除深度对应的应变计读数,Hz;

f_0 ——应变计初始读数,Hz;

ζ ——应变计的率定系数, $\mu\varepsilon/\text{Hz}^2$ 。

2)采用电阻片应变计时按下式计算:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n - \varepsilon_0 \quad (8.5.10-2)$$

式中 ε_i ——解除应变值, $\mu\varepsilon$;
 ε_n ——与解除深度对应的应变仪读数, $\mu\varepsilon$;
 ε_0 ——应变仪初始读数, $\mu\varepsilon$ 。

2 绘制应变丛各应变计的应变值 ε_i 与相对解除深度 h/D 的关系曲线。

3 根据 $\varepsilon_i \sim h/D$ 关系曲线,结合试点面地质条件和试验情况,确定各应变计的解除应变值。

4 最大及最小主应力按下式计算:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \end{cases} \quad (8.5.10-3)$$

式中 E ——岩石弹性模量, MPa;
 μ ——岩石泊松比;
 ε_1 、 ε_2 ——最大、最小主应变, $\mu\varepsilon$,按应变丛不同布置形式计算。

5 绘制恢复压力 p 与恢复应变 ε 的关系曲线,确定相应的应力值。

8.5.11 测试记录应包括工程名称、岩石名称、测点编号、测点位置、测试方法、应变计布置方式、各应变计的率定资料、相应于各级解除深度时的各应变计读数、测试人员、测试日期,恢复法还应记录各级加卸载时应变计读数。

9 岩石声波测试

9.1 岩块声波测试

- 9.1.1 本测试适用于能加工成规则试件的各类岩石。
- 9.1.2 试件制备和试件尺寸应符合本规程 4.7.2 和 4.7.3 的规定。
- 9.1.3 试件描述应包括下列内容：
- 1 岩石名称、颜色、矿物成分和风化程度。
 - 2 测试方向与试件中的层理、裂隙间的关系。
 - 3 试件尺寸和加工精度。
 - 4 含水状态。
- 9.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项：
- 岩石声波参数测试仪；
 - 纵、横波换能器；
 - 游标卡尺；
 - 标准试棒；
 - 测试架。
- 9.1.5 岩石声波参数测试仪和有机玻璃标准试验棒应按 SL120—95《岩石专用测试仪器校验方法》进行校验。
- 9.1.6 岩石声波参数测试仪主要技术要求应符合下列规定：
- 1 具有波形显示装置,显示波形应稳定、清晰,可调。
 - 2 发射脉冲电压不得低于250V。
 - 3 接收放大器的频带宽为50kHz~1MHz。总增益应大于80dB,并分档连续可调。
 - 4 计时器的最小读数为0.1 μ s,量程不应小于10000 μ s。
 - 5 在环境温度为-10~+40℃,相对湿度不大于90%,交流电电压为220 \pm 20V(直流电电压为18 \pm 1V)的条件下能正常工作。
- 9.1.7 换能器的选择应符合下列规定：

- 1 频带范围宜为实际工作频率的 2~3 倍。
- 2 阻抗低,内损耗小,电声转换效率高。
- 3 具有较大的功率。
- 4 具有较高的灵敏度。
- 5 测试所用换能器的频率,应根据试件直径与试件材料性质在 50kHz~1MHz 选用,并满足下列公式要求:

$$f_p \geq \frac{2V_p}{D} \quad (9.1.7)$$

式中 f_p ——换能器频率,Hz;
 V_p ——岩块纵波速度,m/s;
 D ——试件直径,m。

9.1.8 测试应符合下列规定:

- 1 测试前应测定声波在一套有机玻璃标准试验棒中的传播时间,绘制时距曲线,确定仪器系统的零延时。每次更换换能器时,应将发射、接收换能器对接,直接测读零延时。
- 2 测定试件的纵波速度时,宜采用凡士林或黄油作耦合剂;测定试件的横波速度时,宜采用铝箔或铜箔作耦合材料。
- 3 采用直达波法(即直透法)时,应将换能器布置在试件两端面,采用折射波法(即平透法)时,应将换能器布置在试件同侧面,并用游标卡尺测量发射换能器与试件接触面中心点到接收换能器与试件接触面中心点之间的距离。
- 4 非受力状态下的测试时,应将试件置于测试架上,对发射和接收换能器施加接触压力,测读纵波或横波在试件中的传播时间。
- 5 根据需要,可进行受力状态下的声波测试,宜与单轴压缩变形试验同时进行。试验时应采用特制的承压式声波换能器,测定试件受力方向纵波或横波在试件中的传播时间。

9.1.9 测试成果整理应符合下列规定:

- 1 岩块纵波速度和横波速度按下列公式计算:

$$V_p = \frac{L}{t_p - t_0} \quad (9.1.9-1)$$

$$V_s = \frac{L}{t_s - t_0} \quad (9.1.9-2)$$

- 式中 V_p —— 纵波速度, m/s;
 V_s —— 横波速度, m/s;
 L —— 发射与接收换能器中心点间的距离, m, 精确至 0.001m;
 t_p —— 纵波在试件中的传播时间, s, 精确至 0.1 μ s;
 t_s —— 横波在试件中的传播时间, s, 精确至 0.1 μ s;
 t_0 —— 仪器系统的零延时, s。

2 岩块动弹性参数按下列公式计算:

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \times 10^{-3} \quad (9.1.9-3)$$

$$E_d = \rho V_s^2 (1+\mu) \times 10^{-3} \quad (9.1.9-4)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (9.1.9-5)$$

$$G_d = \rho V_s^2 \times 10^{-3} \quad (9.1.9-6)$$

$$\lambda_d = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \times 10^{-3} \quad (9.1.9-7)$$

$$K_d = \rho [(3V_p^2 - 4V_s^2)/3] \times 10^{-3} \quad (9.1.9-8)$$

- 式中 E_d —— 动弹性模量, MPa;
 ρ —— 试件的密度, g/cm³;
 μ —— 泊松比;
 G_d —— 动刚性模量或动剪切模量, MPa;
 λ_d —— 动拉梅系数, MPa;
 K_d —— 动体积模量, MPa。

3 在整理同组试件测试成果时, 应给出每一试件的测值。

4 计算值取三位有效数字。

9.1.10 测试记录应包括工程名称、岩石名称、取样部位、试件编号、试件描述、试件尺寸、测试方法、换能器间的距离、传播时间、仪

器系统的零延时、测试人员、测试日期。

9.2 岩体声波测试

9.2.1 本测试适用于各级岩体。

9.2.2 测试布置应符合下列规定：

- 1 测区宜布置在具有代表性的工程岩体部位。
- 2 测线布置应平行和垂直于主要结构面或主要受力方向。
- 3 测点宜布置在岩石较均匀、表面较平整的部位。
- 4 当采用换能器激发时,发射与接收换能器间距宜为 1~3m;当采用电火花激发时,该间距宜为 10~30m;当采用锤击激发时,间距应大于 3m。换能器宜根据间距选定。

5 单孔测试时,发射点至接收点的间距宜为 0.3~0.5m。换能器每次移动距离宜为 0.2m。

6 用于作孔间穿透测试的两钻孔轴线宜在同一平面内且相互平行。进行孔间穿透测试时,换能器每次移动距离宜为 0.2~1.0m,并应对发射点至接收点之间的距离进行校正。

9.2.3 地质描述应包括下列内容：

- 1 测区岩石名称、结构及主要矿物成分。
- 2 结构面产状、宽度、充填物性状、延伸方向及其与测线的相互关系。
- 3 测区地质展示图及剖面图。
- 4 钻孔柱状图。

9.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 岩石声波参数测定仪；
- 增压式柱状换能器；
- 一发双收换能器；
- 弯曲式接收换能器；
- 夹心式发射换能器；
- 供水及止水设备；
- 干孔换能器；

- 声波激发装置；
- 换能器扶位器；
- 标准试验棒；
- 钢卷尺、测绳。

9.2.5 岩体表面声波测试准备应符合下列规定：

- 1 测点应进行编号，测点表面应修凿平整。
- 2 测量发射换能器和接收换能器两者中心的间距，相对误差应小于1%。
- 3 换能器与岩体间应采用水、黄油、凡士林或石膏材料耦合。

9.2.6 钻孔内岩体声波测试准备应符合下列规定：

- 1 测孔应进行编号，冲洗钻孔并注满清水。
- 2 进行孔间穿透测试时，换能器应装上扶位器，测量两孔口中心点的距离，相对误差应小于1%；当两孔轴线不平行时，应测量钻孔的倾角和方位角，计算不同深度处两测点间的距离。
- 3 对向上倾的测孔，应采取有效的供水、止水措施。
- 4 对软岩宜采用干孔换能器测试。
- 5 岩石声波参数测试仪应按 SL120—95《岩石声波参数测试仪校验方法》进行校验。
- 6 测试前应测定仪器与换能器系统的零延时。

9.2.7 测试及稳定标准应符合下列规定：

- 1 将波形显示屏上的时标关门讯号调至纵、横波初至位置，测读声波传播时间，对智能化声波仪亦可利用自动关门装置测读声波传播时间。
- 2 横波测试，可按下列方法判别横波的初至时间：
 - 1) 横波传播时间等于或大于纵波传播时间的1.7倍。
 - 2) 横波频率小于纵波频率。
 - 3) 横波振幅明显大于纵波振幅。
 - 4) 采用锤击法改变锤击方向时，横波相位反向。采用换能器发射，改变发射电压的极性，横波相位改变180°。
- 5) 反复调整仪器放大器的增益或衰减档，在荧光显示屏上

可见清晰的光波,然后增大增益,可较准确地测读横波初至时间。

6) 利用专用横波换能器测定横波传播时间。

3 每一测点应测读两次,取其平均值为读数值。对异常测段和测点,必须测读三次,读数差不宜大于该读数的3%,以测值最接近的两次测值平均值作为读数值。

9.2.8 测试成果整理应符合下列规定:

1 对各向同性或近似各向同性的岩体,应按本规程9.1.9的规定计算岩体的动弹性参数。

2 对层状岩体,垂直层面测量单一岩层时,若纵波波长大于或等于层厚2~5倍,动弹性模量按下式计算:

$$E_d = \rho V_p^2 (1 - \mu^2) \times 10^{-3} \quad (9.2.8)$$

9.2.9 测试记录应包括工程名称、岩石名称、测点编号、测点位置、测试方法、测点布置、测点间距、传播时间、仪器系统的零延时、测试人员、测试日期。

10 工程岩体观测

10.1 洞室收敛观测

10.1.1 本观测适用于各级岩体。

10.1.2 观测布置应符合下列规定：

1 观测断面应选择洞室中具有代表性、岩体位移较大或岩体稳定条件最不利的部位。观测断面应尽量靠近掌子面，距离不宜大于 1m。

2 测点(线)应根据观测断面的形状、大小以及能测到较大位移等条件进行布置。

10.1.3 观测洞段的地质描述应包括下列内容：

1 岩石名称、结构及主要矿物成份。

2 结构面类型、产状、宽度及充填物性质。

3 观测断面地质剖面图。

10.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——收敛计；

——标点及保护装置；

——钻孔工具；

——温度计。

10.1.5 观测准备应符合下列规定：

1 观测前应对收敛计进行率定。

2 清除测点埋设处的松动岩石。

3 用钻孔工具垂直洞壁打孔，孔深不宜大于 20cm，将标点牢固地安装在孔内，并在孔口设置保护装置。

10.1.6 仪器安装应符合下列规定：

1 观测前应将标点端头擦洗干净。

2 将收敛计两端分别固定在基线两端的标点上，按预计的测距固定尺长。

10.1.7 观测及稳定标准应符合下列规定：

1 调节拉力装置,使钢尺达到恒定张力,读记收敛值,然后松开拉力装置。

2 应进行三次重复观测,三次读数差不应大于收敛计的精度值,取三次读数的算术平均值作为稳定值。

3 观测的同时测记收敛计的环境温度。

4 观测时间间隔应根据工程需要或围岩收敛的速率而定。仪器埋设初期或在观测断面附近开挖时,宜每天观测 1~2 次;正常情况下,每周 1~2 次;长期观测时,每月 1~2 次。

10.1.8 观测成果整理应符合下列规定：

1 应于 24h 内对原始数据进行校对、整理、计算、绘图。

2 实际收敛值按下式计算：

$$u = u_n + K_\varphi L(t_n - t_0) \quad (10.1.8)$$

式中 u ——实际收敛值,mm;

u_n ——收敛读数值,mm;

K_φ ——收敛计系统温度线胀系数;

L ——基线长,mm;

t_n ——收敛计观测时的环境温度,℃;

t_0 ——收敛计标定时环境温度,℃。

3 绘制收敛值 u 与时间 t 的关系曲线。

4 绘制收敛值 u 随开挖距离 D 变化关系曲线及断面的收敛位移分布图。

10.1.9 观测记录应包括工程名称、岩石名称、观测洞和观测断面及观测点的位置与编号、收敛计编号、基线长度、率定资料、观测时的环境温度、收敛计读数、开挖进度、工程施工情况、地质描述、观测人员、观测日期。

10.2 钻孔轴向岩体位移观测

10.2.1 本观测适用于各级岩体。

10.2.2 观测布置应符合下列规定：

1 观测断面及每个断面上观测孔的数量,应根据工程规模、工程特点及地质条件确定。

2 观测孔的位置、方向和深度应根据观测目的和地质条件确定,同时应考虑预期的岩体位移方向和大小、岩体位移的影响范围和同一断面上其它观测仪器的安装位置和性能。观测孔孔深应大于最深测点0.5m。

3 观测孔内测点的位置宜根据位移变化梯度确定。位移变化大的部位应加密测点。测点应避开构造破碎带等不良地质构造。钻孔中的位移基准点应设置在变形影响范围以外的岩体中。

4 位移计宜在开挖之前埋设。地下工程观测可在掌子面超过预设观测断面 0.5~1.0m 时,对观测断面进行仪器埋设。边坡工程岩体位移观测可在下一台阶开挖之前埋设。

10.2.3 地质描述应包括下列内容:

1 观测段的岩石名称、结构、主要矿物成份、结构面产状、宽度及充填物的性状。

2 水文地质条件。

3 观测孔钻孔柱状图。

4 观测断面的地质剖面图。

10.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

——钻机;

——钻孔轴向位移计(位移传感器、读数仪、锚头、金属杆或金属丝、保护套管);

——仪器率定设备;

——灌浆设备;

——仪器安装和回收设备。

10.2.5 观测准备应符合下列规定:

1 在预定部位按要求的孔径、方向和深度钻孔,钻孔轴线应保持直线,铅直钻孔孔斜不得大于 1° ,水平钻孔每 10 米钻孔弯曲度不得大于钻孔半径。

2 清除孔口部位的松动岩石,保持孔口部位岩面平整。

3 仪器安装前,应清洗钻孔,检查钻孔的通畅情况。对于地下洞室观测,还应在孔口预留安装防护设施所需的坑槽及锚固小孔。

4 按观测要求及钻孔岩性情况选择锚头类型及安装部位。

5 安装前应逐个率定待安装的传感器。

10.2.6 仪器安装应符合下列规定:

1 按照设计的测点深度和间隔将锚头、位移传递杆(含护管)组装起来,利用固定支架将各个位移杆捆扎在一起,根据需要每两个锚头之间可安装隔离体。

2 按选定的位置由孔底向孔口逐点安装测点或固定锚头。应防止测点或固定锚头之间传递位移的连接件相互干扰。当使用灌浆锚头时应预置灌浆管和排气管。

3 封闭孔口,进行灌浆或对固定锚头加压。

4 浆材初凝后,安装位移计并调整每个测点的初始读数。

5 安装孔口及电缆保护装置。

6 记录现场安装情况。

10.2.7 观测及稳定标准应符合下列规定:

1 首次观测时间应尽早进行,以灌浆材料固化后的稳定读数作为观测基准值。

2 每次观测时应读取稳定读数。每个测点应连续重复测读三次,三次读数差不应大于仪器精度范围,取其算术平均值作为稳定值。

3 观测时间间隔应符合本规程 10.1.7 条 4 款的规定。

10.2.8 观测成果整理应符合下列规定:

1 绘制测点位移 u 与时间 t 的关系曲线。

2 绘制钻孔轴向位移 u 沿钻孔深度 h 的分布曲线。

3 绘制观测断面上所有观测孔的位移 u 沿相应钻孔深度 h 的分布曲线。

4 绘制测点位移 u 随开挖距离 D 变化的过程曲线。

10.2.9 观测记录应包括工程名称、岩石名称、观测断面和观测孔

及测点的位置与编号、地质描述、率定资料、测点位移读数、观测时温度、开挖进度、观测人员、观测日期。

10.3 钻孔横向岩体位移观测

10.3.1 本观测适用于各级岩体。

10.3.2 观测孔布置应符合下列规定：

1 观测断面及每个观测断面观测孔的数量，应根据工程规模、工程特点及地质条件确定。

2 观测孔的布置应根据工程岩体受力情况和地质条件重点布置在最有可能发生滑移、倾斜或对工程施工及运行安全影响最大的部位。

3 观测孔的深度应根据观测目的和地质条件确定，当观测岩体滑移时应超过预定滑移带 2m。

10.3.3 地质描述应包括下列内容：

1 观测段的岩石名称、结构、主要矿物成份、结构面产状、宽度及充填物的性状。

2 水文地质条件。

3 观测孔钻孔柱状图。

4 观测断面的地质剖面图。

10.3.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——钻孔设备；

——伺服加速度计式滑动测斜仪；

——测斜管及管接头；

——灌浆设备；

——安装设备(包括吊装设备、各类工具和配套材料)；

——模拟探头。

10.3.5 观测准备应符合下列规定：

1 在选定的观测地段按要求的孔径和深度钻孔，孔径应大于测斜管的连结套管外径 30mm。

2 钻孔深度小于 50m 时，孔斜允许偏差为 $\pm 3^\circ$ 。

3 钻进过程中应随时记录钻进情况。

4 钻孔完成后,冲洗钻孔,检查钻孔深度及钻孔的通畅情况。

10.3.6 测斜管安装应符合下列规定:

1 检查测斜管,按埋设长度要求将测斜管逐根进行预接。对接处导槽必须对准,对接孔应避开导槽。密封测斜管底端,并设置承重吊绳的固定装置。

2 按测斜管预先做好的对接标记和编号逐根对接,并固定和密封,用承重绳将已对接好的测斜管缓慢地放入测孔内,确认下放到孔底后,松开承重绳。

3 检查、调整导槽方向,使其中一对导槽方向与预计的岩体最大位移方向一致。

4 将模拟探头放入测斜管,检查并确认导槽畅通无阻时,固定测斜管。

5 将灌浆管沿测斜管外侧下放到测孔内距孔底 1m 处。按要求的配合比配制浆液,自下而上进行灌浆。灌浆宜采用灌浆泵。灌浆时宜预先在测斜管内注入清水,平衡浆液浮托力。

6 灌浆结束后,冲洗测斜管,安装孔口保护设施。待浆材凝固后,测量测斜管导槽方位、管口坐标及高程。

7 当测孔深度大于50m时,应采用测扭仪测定导槽的扭曲度。

8 详细记录安装埋设情况。

10.3.7 观测应符合下列规定:

1 观测应在测斜管周围浆材固化后开始进行。观测前应用模拟探头检查测斜管导槽通畅情况。

2 启动测斜仪,将探头导轮插入测斜管的导槽内,缓慢地下至孔底。首次测量时,探头应在孔底停留 15min 后开始自下而上沿孔深一定间距测读一次,记录测量深度与相应读数。然后将探头旋转 180°,插入同一对导槽内放到孔底,等待 5min,按上述步骤沿孔深重复观测一次。

3 当采用单向测斜仪时,应将探头旋转 90°,按本条 2 款的程

序,测量另一对导槽的两个方向的读数。

4 将开始观测以后的两次以上稳定观测值的平均值作为观测基准值。

5 每次观测时,探头应保持在测孔相应深度的同一位置上。

6 当采用的观测间距为 2 倍轮距时,其观测结果应乘以 2。

7 观测时间间隔应根据工程需要或岩体位移变化情况确定。

10.3.8 成果整理应符合下列规定:

1 绘制测孔初始管形曲线、扭转曲线。

2 绘制相对位移 Δu 与测孔深度 h 的关系曲线。

3 绘制累积位移 u 与测孔深度 h 的关系曲线。

4 绘制位移 u (或相对位移 Δu) 与时间 t 的关系曲线。

5 根据需要可绘制位移方向与测孔深度 h 的关系曲线。

10.3.9 观测记录应包括工程名称、岩石名称、观测孔的编号和位置、导槽方向、测斜管安装情况、观测读数、观测时温度、现场巡视记录、观测人员、观测日期。

10.4 岩体表面倾斜观测

10.4.1 本观测适用于各级岩体。

10.4.2 观测布置应符合下列规定:

1 根据岩体工程类型及设计技术要求确定需要观测岩体范围。

2 基准板布置的位置和数量应根据工程规模、工程特点、地质条件及可能的扰动范围等进行选择。参照基准板应布置在岩体扰动范围以外的稳固基岩面上。

3 基准板位置应便于观测,并应避免岩石掉块、施工机械或岩体开挖爆破等因素引起的损坏。

4 基准板的布置和安装方式应能反映测点部位岩体的整体变形趋势。根据测点部位岩体表面风化层厚度及完整性等情况,基准板可直接安装于岩体表面,也可通过浇筑混凝土墩使基准板锚固于岩体内。

5 基准板的布置应考虑与其它位移观测设备联合使用。

10.4.3 地质描述应包括下列内容：

- 1 测点部位岩石名称、结构及主要矿物成分。
- 2 测点部位岩体主要结构面类型、产状、宽度、充填物性质。
- 3 测点部位岩体风化程度及测点深度。
- 4 测点所在区段工程地质平面图。

10.4.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 倾角计传感器；
- 基准板；
- 倾角计读数仪；
- 钻孔机具；
- 岩石清面工具。

10.4.5 观测准备应符合下列规定：

- 1 根据设计要求进行测点放样。
- 2 对有明显的松动块体或岩石表面不平整的测点基座部位，应进行清面处理。
- 3 在安装基准板的岩面上人工挖槽，长×宽×深为 50cm×50cm×5cm。
- 4 清理人工槽，在槽底打 4 个风钻孔，孔深1.0~1.5m，并进行冲洗。
- 5 基准板安装前，应对其外观及各组件的完好性进行检查。基准板外观不能有机机械损伤、变形及化学侵蚀等缺陷。
- 6 观测读数前，应对倾角计传感器的灵敏性进行检验，对其正、负方向进行检查和确认。

10.4.6 基准板安装应符合下列规定：

- 1 在人工挖槽槽底风钻孔内灌注水泥浆，插入螺纹钢筋。浇筑混凝土基座，基座尺寸长×宽×高为 50cm×50cm×30cm。
- 2 在基座上先安装基准板保护钢套管及套管端头盖帽。
- 3 基座混凝土凝固后，在已安装的保护钢套管内，用粘结剂将基准板固定在基座表面中心上。固定基准板时，基准板上应

有一个导向与所要观测的岩体最大转动位移方向一致。

4 测点部位为新鲜完整岩体时,可将基准板直接固定在被观测的岩体表面上。

10.4.7 观测及稳定标准应符合下列规定:

1 观测时倾角传感器底板上的固定装置与基准板上的固定装置应准确接触。

2 将基准板和传感器底板表面擦净。根据基准板上固定装置所规定的方向,将倾角计沿某测读方向安装在基准板上,然后读数。卸下倾角计,重擦基准板表面后,再装上倾角计并读数。重复读数三次,取其平均读数记为 A_0 。

3 将倾角计旋转 180° 安装,按本条第 2 款规定对传感器进行读数,记为 A_{180} 。

4 将倾角计安装在与初始位置成 90° 的方位上,按本条 2、3 款规定,对基准板固定装置所规定的另一对导向分别进行观测,相应读数分别记为 B_0 和 B_{180} 。

5 基准板安装完成后,应读取 3~4 组读数,当相邻 2 组读数差值不超过仪器精度值时,取其算术平均值作为观测基准值。

6 根据读数变化大小或设计要求,定期对各基准板进行读数。记录与读数变化相关的环境因素变化情况。

10.4.8 成果整理应符合下列规定:

1 每次读数后应在 24h 内整理资料,核实数据的可靠性。

2 根据倾角计传感器对基准板固定装置所确定的每个方向上的两个读数,按下式计算基准板在相应方向上相对水平面的倾角:

$$\theta_A = \sin^{-1}\left(\frac{A_0 - A_{180}}{5} \times 10^{-4}\right) \quad (10.4.8-1)$$

$$\theta_B = \sin^{-1}\left(\frac{B_0 - B_{180}}{5} \times 10^{-4}\right) \quad (10.4.8-2)$$

式中 θ_A 、 θ_B —— 基准板分别在 A 、 B 方向上相对水平面的倾角($^\circ$)。

3 根据基准板倾角变化观测结果绘制平面矢量图和倾角变化 $\Delta\theta$ 与时间 t 过程曲线。

4 分析和确定基准板最大倾角的变化量值和方向。

10.4.9 观测记录应包括工程名称、岩石名称、基准板位置及编号、基准板测读方向、安装时间、观测读数值、观测时温度、观测人员、观测日期。

10.5 岩体应变观测

10.5.1 本观测适用于各级岩体。

10.5.2 观测布置应符合下列规定：

1 观测断面应根据工程规模、工程特点及地质条件进行布置。

2 应根据工程需要和岩体应变分布规律在观测断面布置测点。

3 采用锚杆应变计观测岩体结构面两侧的相对变形时，锚杆应变计应跨越结构面。

10.5.3 地质描述应包括下列内容：

1 测点部位岩石名称、结构及主要矿物成份。

2 测点部位岩体中主要结构面类型、产状、宽度、充填物性质。

3 测点所在区段岩体工程地质纵横剖面图及平面图。

4 测孔岩心柱状图。

10.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——钻孔设备；

——应变计及读数仪；

——电缆及其保护装置；

——硫化设备；

——灌浆设备；

——安装设备；

——仪器率定装置。

10.5.5 观测准备应符合下列规定：

- 1 根据需要选择适宜的应变计类型。在选定地点按选择的应变计类型和尺寸造孔,记录孔向和岩性变化。
- 2 严格检查应变计,并按仪器说明书要求进行率定。
- 3 当需要加长测量导线时,电缆接头应严格密封,并进行硫化。
- 4 清洗应变计埋设部位。
- 5 按埋设部位的深度组装应变计组。

10.5.6 差动电阻应变计安装应符合下列规定：

- 1 应变计埋设前应检查芯线总电阻,测量并记录三芯电阻、四芯电阻和电阻比。
- 2 将应变计放入预定部位,定位后注入水泥浆或其它粘结材料,粘结材料的弹性模量应小于被测岩体的弹性模量,但应大于或等于应变计的弹性模量。
- 3 应变计埋设后立即进行检测,待工作状态稳定后,安装保护设施。
- 4 及时绘制安装图,编写安装说明。

10.5.7 钢弦应变计安装除应符合本规程 10.5.6 的规定外,应变计埋设前应作频率检测。

10.5.8 观测及稳定标准应符合下列规定：

- 1 应变计埋设后每天测读一次,以浆材固化后的两次以上稳定读数值值的算术平均值作为初始基准值。
- 2 每次读数时至少测读两次。当相邻两次的读数差不超过仪器精度时,取其算术平均值作稳定读数值。
- 3 观测时间间隔应根据岩体应变读数变化大小或设计要求确定。

10.5.9 成果整理应符合下列规定：

- 1 根据仪器说明书整理应变观测读数。
- 2 绘制应变 ε 与时间 t 的关系曲线。
- 3 绘制应变分布图。

4 绘制应变速率变化曲线。

5 需要计算出相应的应力变化值时,应测定岩石弹性模量和泊松比。

10.5.10 观测记录应包括工程名称、岩石名称、测孔或测点位置及编号、率定资料、观测时温度、观测读数、观测人员、观测日期。

10.6 岩体应力观测

10.6.1 本观测适用于完整和较完整岩体。

10.6.2 观测布置应符合下列规定:

1 观测断面及测点应根据地质条件及设计要求确定。

2 应力计应成对或成组安装在同一位置。观测不同方向的应力。相邻应力计间距不宜小于其液压枕最大尺寸。

3 测点不宜布置在温度有显著变化的部位。

4 应力计距被测岩体边界的最小距离应大于3倍液压枕最大尺寸。

10.6.3 地质描述应包括下列内容:

1 测点部位岩石名称、结构及主要矿物成分。

2 测点部位岩体中主要结构面类型、产状、宽度及充填物性质。

3 测点所在区段岩体工程地质剖面图及开挖面裂隙展布图。

10.6.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

——液压应力计及配套设备;

——读数装置;

——切槽或钻孔设备;

——安装工具。

10.6.5 观测准备应符合下列规定:

1 按本规程附录 *F* 的规定率定液压枕。

2 液压应力计埋设前,应将应力计与测量系统一起进行系统检测。

3 率定并计算温度修正系数。

10.6.6 仪器安装应符合下列规定：

- 1 在选定的测点部位,对埋设液压应力计的孔、槽表面或岩体与结构物间的接触面进行加工,起伏差应小于 1.0cm。
- 2 液压应力计受力面应与应力观测方向垂直。
- 3 固定液压应力计,用砂浆回填密实。
- 4 液压管路沿建筑物或挖槽铺设,各管路按编号顺序分别连接到集油箱上。

10.6.7 观测及稳定标准应符合下列规定：

- 1 固定液压应力计的砂浆应养护 3~5d。
- 2 对液压应力计施加一定的预压力,压力稳定后,测定应力计的初始值。
- 3 每次观测时,连接液压枕进液管,用加压泵逐渐加大液压,直至见到稳定回流,再保持 1min 以上,记录相应的压力值,缓慢卸载至初始值。重复该加压过程,记录稳定回流(3~4ml/min)下的压力值,该值即为最小流量下的压力值,即应力计压力观测值。
- 4 对应力计的每次读数,重复测量不应少于两次。当相邻两次读数差小于压力表最小刻度时,取其算术平均值为稳定读数值。
- 5 每次读数完毕后,供油管中还应保持一定压力,避免空气进入。
- 6 观测时间间隔应根据工程要求和岩体应力变化速率确定,并应符合本规程 10.1.7 条 4 款的规定。

10.6.8 成果整理应符合下列规定：

- 1 测点部位作用于液压应力计上的应力变化值按下式计算：

$$p = \beta(p_r - p_i - p_t) \quad (10.6.8-1)$$

式中 p —— 岩体或结构物与岩体间应力变化值,MPa;

p_r —— 压力表读数,MPa;

p_i —— 应力计预压稳定后压力表读数,MPa;

p_t —— 温度修正应力值,MPa;

β —— 液压枕修正系数。

- 2 温度修正应力值 p_t 按下式计算：

$$p_t = k_t(t_1 - t_p) \quad (10.6.8-2)$$

式中 k_t —— 测量系统温度修正系数；
 t_1 —— 应力计读数时的环境温度，℃；
 t_p —— 预压时的环境温度，℃。

3 绘制应力变化值 p 与时间 t 关系曲线。

10.6.9 观测记录应包括工程名称、岩石名称、观测断面和观测点的位置与编号、率定资料、压力读数、观测时环境温度、工程进度、观测人员、观测日期。

10.7 岩体锚杆载荷观测

10.7.1 本观测适用于岩体预应力锚固工程。

10.7.2 观测布置应符合下列规定：

1 观测锚杆的布置应根据锚固设计及工程需要确定。

2 测力计容量应与锚杆所施加的预应力大小相匹配。

3 观测锚杆的数量应视工程的重要性确定，一般宜为锚杆总数的5%，重要工程或重点部位宜为10%。

4 观测锚杆的结构形式宜与总体锚杆设计所采用的结构形式一致。对有特殊要求的锚杆载荷观测，可采用其他结构形式的锚杆。

10.7.3 地质描述应包括下列内容：

1 锚固区岩性、风化程度、结构类型和主要矿物成分。

2 观测锚杆附近节理、裂隙、断层和软弱夹层等主要结构面产状及所在位置。

3 锚固区工程地质图。

10.7.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——测力计及读数仪；

——传力板；

——电缆及其保护装置；

——硫化设备；

——锚固张拉和锁定设备。

10.7.5 观测准备应符合下列规定：

1 根据设计要求，选用相应容量的压力机，按下列步骤对测力计进行率定：

1)根据测力计工作特点，选择合适的测力计前后传力板。将测力计及其传力板一起放置于压力机上，对中安装，并连接好测试线路。

2)将预定的最大率定载荷分为7~10级，逐级加载至预定载荷，然后逐级卸载，重复进行三次，测读各级载荷下的读数值。在同级载荷下，测力计三次率定的差值不应大于测力计满量程的1%。

3)根据需要，将测力计依次转动90°、180°和270°，分别按本条2款规定进行率定。

4)绘制载荷 P 与应变 ϵ (或频率 f)的关系曲线。

2 各种测力计均应进行温度影响系数率定。

3 当需要加长测量导线时，电缆接头应严格密封，并进行硫化。

10.7.6 测力计安装应符合下列规定：

1 应在锚杆内锚段及锚孔孔口支承墩达到设计强度后安装测力计，并对锚杆实施张拉。

2 在观测锚杆孔口钢垫板上用点焊固定测力计垫板。测力计平面应与钻孔轴线垂直，测力计垫板孔中心应与锚杆孔轴线重合，允许偏差为±5mm。

3 安装环式测力计或带专用传力板的测力计，并在测力计外侧安装传力板。

4 安装工作锚板、锁定螺帽(锚塞或夹片)、限位板、千斤顶、工具锚及张拉锁定夹片。

5 测力计垫板与工作锚板应平直光滑，与测力计上下面紧密接触，并具有足够的刚度。

6 施工观测的锚固张拉测力计应安装在工作锚板的外侧。

7 在施工安排上应优先张拉观测锚杆。

10.7.7 观测及稳定标准应符合下列规定：

- 1 锚杆张拉前应观测测力计读数,连续三次读数之差不超过仪器的精度值时,取其算术平均值作为初始读数。
- 2 每级张拉载荷开始和结束,均应对测力计进行读数。最后一级张拉载荷锁定后,应及时测读锁定载荷。锁定后,每 5min 读数一次,连续三次读数差不超过仪器的精度值时,取最后一次读数作为稳定观测读数。
- 3 测力计锁定后,每天应测读一次,持续时间不宜少于两周,以后可根据载荷变化速率确定观测时间间隔。锚杆工作环境有显著变化时,应加密观测。
- 4 当观测锚杆附近有锚杆张拉施工时,施工期间或施工前后应对观测锚杆上的测力计进行读数。
- 5 预应力锚杆补偿张拉过程中和锁定后,均应对测力计按本条 1~4 款的规定观测。

10.7.8 成果整理应符合下列规定：

- 1 观测锚杆张拉完成后,应在 24h 内对原始数据进行校对、整理和绘图。遇有异常读数,应及时分析原因,并采取补救措施。
- 2 根据所用测力计的载荷值计算方法计算实际载荷值。
- 3 绘制测力计载荷 P 与张拉千斤顶出力关系曲线。
- 4 根据锁定前后的观测值,计算载荷锁定损失。
- 5 绘制测力计载荷 P 与时间 t 关系曲线。

10.7.9 观测记录应包括工程名称、岩石名称、观测锚杆位置及编号、锚杆结构类型及参数、率定资料、观测读数、观测人员、观测日期。

10.8 岩体锚杆应力观测

10.8.1 本观测适用于各级岩体的锚固工程。

10.8.2 观测布置应符合下列规定：

- 1 观测锚杆的布置应根据锚固设计及工程需要确定。
- 2 根据工程设计要求和地质条件布置观测点,其数量应为工

程锚杆数量的 3%~5%。

3 锚杆应力计应布置在岩体应力变化较大的部位,通常布置在距岩体表面 2~3m 处的岩体内。

4 需要了解锚杆轴向应力分布时,沿锚杆轴向布置应力计的数量不宜少于 3 支。

10.8.3 地质描述应包括下列内容:

1 锚固区岩性、风化程度、结构类型和主要矿物成份。

2 观测锚杆附近主要节理、裂隙、断层等结构面的产状及所在位置。

3 锚固区工程地质图。

10.8.4 主要仪器和设备应包括以下各项:

——造孔机具;

——锚杆应力计及读数仪;

——率定装置;

——电缆及其保护装置;

——硫化设备。

10.8.5 观测准备应符合下列规定:

1 率定锚杆应力计。选择容量适宜的压力机逐级加载,测读每级载荷下的锚杆应力计的电阻值及电阻比,每级载荷下,三次测试结果的差值不应超过锚杆应力计满量程的 1%。

2 对锚杆应力计进行温度影响系数率定:

1) 将锚杆应力计置于温度率定槽中,加入水并加入冰块,使水温降至零度,每隔 15min 读记一次电阻及电阻比值,连续测读,直至满足本条 1 款稳定标准时,取稳定读数作为初始值。

2) 启动加热装置给率定槽加温,水温每增加 5~10℃读记一次电阻及电阻比值,直至达到预测工程部位的最高温度时,连续测读,直至满足本条 1 款稳定标准时,取稳定读数作为终值。

3 锚杆应力计的电缆线应视安装要求适当加长,电缆线的连

接应防止脱焊、假焊,电缆线各芯的绝缘度应大于 $100M\Omega$,然后进行密封硫化处理。

4 按设计要求裁截钢筋,并与应力计对焊,应力计焊接应与钢筋保持在一条直线上,并防止焊接时高温对应力计传感器的影响。

10.8.6 锚杆应力计埋设应符合下列规定:

1 在预埋部位按要求钻孔,孔深应符合设计要求,孔径尺寸应与应力计的外形尺寸相匹配。

2 组装锚杆应力计,将锚杆应力计裹上胶带,并作好电缆线的保护。

3 检查电阻值、电阻比及绝缘度等各项数据。

4 安装前检查钻孔的通畅情况。

5 插入观测锚杆并注浆,注浆应密实。

6 设置观测站,作好警示标志并对电缆进行保护。

10.8.7 观测及稳定标准应符合下列规定:

1 安装初期宜每天观测 1~2 次,连续测读 5~7d,每次观测读数 2 次,当相邻两次读数值差小于满量程的 1%时,取算术平均值为稳定读数值。

2 正常观测期,每周观测 1~2 次。发现异常情况,应适当增加观测次数。

10.8.8 成果整理应符合下列规定:

1 应在 24h 内对原始数据进行校对、整理。

2 根据锚杆应力计率定资料,计算实际载荷值和应力值。

3 绘制温度 T 与时间 t 的关系曲线。

4 绘制应力 σ 与时间 t 的关系曲线。

10.8.9 观测记录应包括工程名称、岩石名称、观测锚杆位置及编号、应力计编号、率定资料、电阻值及电阻比值、观测人员、观测日期。

10.9 岩体 渗压 观测

10.9.1 本观测适用于各级岩体。

10.9.2 观测布置应符合下列规定：

1 在地质条件简单、地形平缓开阔地区,观测孔可按方格网状布置。观测线应平行或垂直地下水流向,其间距不宜大于 400m。

2 在地形狭窄地区,当无地表水时,观测孔可按三角形布置;有地表水时,观测线应垂直地表水的岸边线布置。

3 水位变化大的地段、上层滞水或裂隙水聚集地带,应布置观测孔。

4 有多层含水层时,可分层设置观测孔或同一测孔中分层设置观测段。

5 岩体地下水位动态观测可利用已有的水井、地下水的天然露头、钻孔或探井直接进行。

6 地下水渗透压力观测应采用渗压计或钻孔测压管。当采用渗压计观测时,所选用的渗压计量程应与岩体中预测的渗透压力大小相匹配。

10.9.3 地质描述应包括下列内容：

1 测区地形、地貌及地下水赋存形式和类型。

2 测孔部位岩石名称、结构及主要矿物成分。

3 观测孔钻孔柱状图。

4 观测孔岩体透水性检测资料。

10.9.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——钻孔设备；

——钻孔压水试验设备；

——渗压观测设备及读数仪；

——灌浆设备；

——仪器率定装置。

10.9.5 观测准备应符合下列规定：

1 在选定的观测地段,按要求的孔径和深度造孔。对岩体中

控制性结构面进行渗压观测时,测孔深度应超过结构面0.5~1m。钻孔铅直度应满足设计要求。

2 记录钻进过程中涌水及塌孔等异常情况,并对钻孔岩心进行描述,确定主要结构面位置。

3 宜采用钻孔压水试验检测钻孔孔壁岩体透水性。可在钻孔中每隔5m选取一个压水试验段。

4 检查观测系统的各部分组件和仪器。

5 渗压计在埋设前,应进行室内检验、率定、钢膜片涂油、电缆接长和仪器充分预饱和等准备工作。

10.9.6 测压管埋设应符合下列规定:

1 测压管可选用金属管或塑料管,其内径不宜大于 $\varnothing 60\text{mm}$ 。测压管进水花管段长宜为1~2m。进行花管段下端应有管端帽盖封闭。

2 渗压观测孔孔径为 $\varnothing 110\sim 150\text{mm}$ 。观测孔进水段应位于透水岩体中,进水段长度宜大于3m。

3 在观测孔进水段底部充填粒径为10~20mm砂砾石垫层,厚度不宜小于30cm。

4 将测压管下部进水花管段和导管依次连接放入孔内,使花管段底部位于砂砾石垫层上。各管段应连接严密,吊系牢固,保持管身顺直。

5 在测压管进水花管段范围内填入粒径为10~20mm的砂砾石,再填入不小于100cm厚的细砂,细砂的上部注入水泥浆或水泥膨润土浆。

6 当观测孔进水段可能产生塌孔或管涌时,测压管花管段外部应有反滤设施。所使用的反滤设施在满足透水的情况下,应能防止测孔周围细颗粒进入测压管。

7 一孔多管式测压管的埋设方法应符合本条1~5款规定。测孔孔径应根据埋入测压管的根数确定。相邻测压管测试段间应封闭隔离。

10.9.7 渗压计埋设应符合下列规定:

1 根据渗压计外型尺寸和埋设要求确定钻孔孔径大小。观测孔进水段的确定应符合本规程 10.9.6 条 2 款的规定。

2 在观测孔进水段底部充填粒径为 10~20mm 的砂砾石垫层,厚度不应小于 30cm,再填入中粗砂至设计高程。

3 将装有渗压计的细砂包放至已充填中粗砂的顶部。渗压计在放入和定位过程中,应检查仪器的灵敏度。

4 在渗压计测试段范围内依次填入中粗砂和细砂,细砂的厚度不宜小于 100cm。然后注入水泥浆或水泥膨润土浆。

5 同一钻孔中安装多支渗压计时,埋设方法应符合本条 1~4 款的规定。各渗压计的安装和注浆应分别进行,相邻渗压计之间应封闭隔离。

10.9.8 观测及稳定标准应符合下列规定:

1 无压测压管管内水位可采用电测水位计进行观测。观测管内水位时,每次观测读数不少于两次,当相邻两次读数之差不大于 1cm 时,取其平均值为稳定读数值。

2 有压测压管可采用安装在测压管孔口的压力表进行观测。根据管口可能产生的最大压力值选用压力表。压力表精度不宜低于 0.5 级。

3 利用渗压计进行观测时,每次读数不少于两次,当相邻两次读数差不超过仪器的精度值时,取其算术平均值为稳定读数值。

4 测压管和渗压计安装完成后,应每天观测一次。5~7d 后,可根据岩体渗透压力变化速率或设计要求确定观测时间间隔。

10.9.9 成果整理应符合下列规定:

1 根据测压管读数和孔口高程计算岩体测试段地下水位。

2 对渗压计观测,可根据渗压计室内率定结果、渗压计读数和渗压计埋设高程计算测试段岩体渗压大小或地下水位高程。

3 绘制测试段岩体地下水位 H 和渗透压力 p 随时间 t 的变化曲线。

4 条件允许时还应记录与岩体渗压变化或岩体地下水位变化密切相关的地表降水资料,绘制地表降水与时间的动态变化曲

线以及地下水等水位线图。

10.9.10 观测记录应包括工程名称、岩石名称、仪器类型、测试段位置及编号、安装时间、渗压计率定资料、观测值、观测人员、观测日期。

10.10 岩体声波观测

10.10.1 本观测适用于各级岩体。

10.10.2 观测孔布置应符合下列规定：

1 根据工程规模、地质条件、施工方法，选择有代表性的断面，确定每个断面上的观测孔数。

2 观测孔的深度应超出应力扰动区，观测孔的方位应根据观测目的和地质条件确定。

3 根据需要可布置单孔测试或孔间穿透测试，必要时可预埋换能器。

4 用于孔间穿透测试的两个观测孔轴线宜在同一观测平面内且相互平行。

10.10.3 地质描述应包括下列内容：

1 岩石名称、结构、风化程度及主要矿物成分。

2 结构面产状、延伸情况及充填物性质。

3 观测部位地质平面图。

4 观测孔布置图。

5 钻孔柱状图。

10.10.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

——岩石声波参数测定仪；

——一发双收换能器；

——增压式柱状换能器；

——供水和止水设备；

——带刻度撑杆；

——钢卷尺、测绳。

10.10.5 观测准备应符合下列规定：

1 将钻孔冲洗干净,校对孔位,检验孔深,注满清水。

2 进行孔间穿透测试时,测量两孔口中心点的距离,测距相对误差应小于1%;当两孔轴线不平行时,应测量钻孔的倾角和方位角,计算不同深度处两测点间的距离。

3 当采用水耦合时,对向上倾和漏水严重的测孔,应采用有效的供水和止水措施。

4 对需要重复观测的观测孔应采取保护措施。

10.10.6 岩石声波参数测试仪的校验应符合本规程 9.1.5 的规定。

10.10.7 观测前应测定仪器与换能器系统的零延时值。

10.10.8 观测及稳定标准应符合下列规定:

1 将换能器用带刻度撑杆准确地推至测点位置,待接收到的波形稳定后,调节时标至纵波初至位置,测读纵波传播时间。

2 观测时换能器每次移动距离宜为 0.2m。

3 每一测点重复两次读数,对异常测点必须测读三次,取相邻两次读数的算术平均值为稳定读数值。

4 在施工和运行过程中需要进行重复观测的测孔,每次测试时测距相对误差应小于1%,走时相对误差不应大于2%,纵波速度 V_p 值的累计误差不应大于3%。

5 根据设计要求确定观测时间间隔,施工期宜每月1~2次;工程运行期,可根据工程需要调整观测时间间隔。

10.10.9 成果整理应符合下列规定:

1 绘制波速 V_p 沿钻孔深度 h 的分布曲线。

2 绘制各测点波速 V_p 随时间 t 的变化曲线。

3 对于灌浆处理的岩体,绘制灌浆前后岩体波速 V_p 沿孔深 h 的分布曲线。

4 动弹性参数计算应符合本规程9.1.9的规定。

10.10.10 观测记录应包括工程名称、岩石名称、测孔编号、测孔方位、孔口高程、观测部位、观测值、观测仪器、仪器编号、仪器校验资料、观测人员、观测日期。

附录 A 岩石试验工作管理基本要求

A.0.1 技术管理

- 1 试验人员应详细了解设计意图和地质条件,掌握试验任务书、试验大纲及有关规程的内容和要求。
- 2 按分工做好试验前的准备工作。
- 3 准确测读、详细记录和描述,发现问题应及时报告并采取
措施。
- 4 试验工作中应加强与地质、设计和施工人员的联系。
- 5 应做好交接班工作。
- 6 各项试验资料应签名负责,作好资料的保管和归档工作。

A.0.2 设备管理

- 1 根据试验技术要求和工作条件,进行仪器设备选型,并检验其稳定性和重复性,对现场测试仪器和设备应检查其坚固性及防潮性能。
- 2 试验前,试验人员应熟悉仪器的结构性能、操作方法及技术要求。
- 3 仪器设备应定期维修和率定,并有专人管理。
- 4 仪器设备搬运过程中应采取措施防止损坏。

A.0.3 安全管理

- 1 试验前应协同有关人员
对试验洞进行安全检查,清除松动围岩,对严重渗水和漏水地段宜采取措施处理。当试验洞较深时,宜采取通风措施。
- 2 应对试验场地进行合理布置和清扫,清除杂物,将常用设备和工具置于合适部位。
- 3 对试洞的用电线路和设备应进行安全检查和维护。
- 4 试验人员进洞应佩戴安全帽,当试洞内有可燃气体或有毒时,应采取安全措施。

- 5 当试点距离爆破工作面较近时,应对测试仪器采取保护措施。
- 6 在试验全过程中,应有专人负责安全工作。

附录 B 试样采取要求

- B.0.1** 供制备试件的试样应在勘探地点采取。
- B.0.2** 取样应符合下列规定：
- 1** 同组试样的岩层和岩性应相同。
 - 2** 不得用爆破方式采取试样。
 - 3** 对于干缩湿胀和易风化的试样，取样后应立即密封，并置于不透风的阴凉环境中储存，避免温度和湿度的影响。
 - 4** 采取含有软弱夹层或其它类型结构面的直剪试样时，应避免试样受扰动。
- 5** 试样数量应按试验项目和制备试件的需要确定。
- B.0.3** 对取样地点应进行地质描述。
- B.0.4** 取样记录应符合下列规定：
- 1** 应标明试样编号、层位、方位或受力方向，并造册登记。
 - 2** 绘制取样地点的平面位置图，填写送验单。送验单的内容应包括工程名称、取样地点、取样深度、地层年代、岩石名称、试样编号、取样方法、取样数量、取样日期、试验目的、试验项目、试验要求、送样日期、送样人、验收人。
 - 3** 取样记录应与试验原始记录一并归档。
- B.0.5** 试样在装箱和运输过程中，应采取防护措施避免试样损坏。
- B.0.6** 试样应进行登记、验收，并妥善贮存。不符合要求的试样应及时通知取样单位采取补救措施。

附录 C 比重瓶校正

C.0.1 新购置的比重瓶试验前应进行校正,以后每使用一段时间校正一次。校正宜采用计算校正法。

C.0.2 主要仪器设备应包括下列各项:

- 比重瓶(容量 100ml);
- 天平(称量 200g,感量 0.001g);
- 温度计(量程 0~50℃,最小刻度 0.5℃);
- 纯水或蒸馏水。

C.0.3 计算校正法应符合下列规定:

1 将比重瓶洗净、烘干,称量两次,每次准确至 0.001g,两次称量之差不得超过 0.002g。取算术平均值作为比重瓶的质量。

2 将煮沸并冷却至室温的纯水注满比重瓶,塞好瓶塞,排出多余水分,称室温 T_0 时瓶和水总质量,准确至 0.001g,重复进行两次,两次称量差不得超过 0.002g。取算术平均值作为 T_0 时的瓶和水总质量。

3 任意温度下的瓶和水总质量按下式计算:

$$m_{T_n} = (m_{T_0} - m_3) \times C_1 + m_3 \quad (\text{C.0.3-1})$$

$$C_1 = \frac{\rho_{w_n}}{\rho_{w_0}} [1 + C_v(T_n - T_0)] \quad (\text{C.0.3-2})$$

式中 m_{T_0} —— 比重瓶内纯水温度为 T_0 时,瓶和水总质量, g;

m_{T_n} —— 比重瓶内纯水温度为 T_n 时,瓶和水总质量, g;

m_3 —— 比重瓶质量, g;

T_0 —— 校正比重瓶时比重瓶内纯水温度, °C;

T_n —— 试验时比重瓶内纯水温度, °C;

ρ_{w_0} —— 温度 T_0 时水的密度, g/cm³;

ρ_{w_n} —— 温度 T_n 时水的密度, g/cm³;

C_v —— 玻璃体膨胀系数 24×10^{-6} , 1/°C;

C_1 —— 比重瓶校正计算系数。

不同温度时水的密度按表 C.0.3—1 的规定取值。计算式中的 C_1 值也可按不同的温度值直接按表 C.0.3—2 的规定取值。

表 C.0.3—1 不同温度时水的密度 ρ_w 值

温度 $T(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho_w(\text{g}/\text{cm}^3)$	温度 $T(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho_w(\text{g}/\text{cm}^3)$	温度 $T(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho_w(\text{g}/\text{cm}^3)$
4	1.000000	15	0.999127	26	0.996813
5	0.999992	16	0.998970	27	0.996542
6	0.999968	17	0.998802	28	0.996262
7	0.999930	18	0.998623	29	0.995974
8	0.999876	19	0.998433	30	0.995676
9	0.999809	20	0.998232	31	0.995369
10	0.999728	21	0.998021	32	0.995054
11	0.999633	22	0.997799	33	0.994731
12	0.999525	23	0.997567	34	0.994399
13	0.999404	24	0.997326	35	0.994059
14	0.999271	25	0.997074		

表 C.0.3—2 不同温度时的 C_1 值

校正温度 $T_0(^{\circ}\text{C})$	5	10	15	20	25	30	35	
计算 温度 T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	5	1.00000	1.00014	1.00062	1.00135	1.00245	1.00373	1.00524
	10	0.99998	1.00000	1.00084	1.00125	1.00202	1.00358	1.00510
	15	0.99987	0.99952	1.00000	1.00077	1.00178	1.00310	1.00462
	20	0.99860	0.99874	0.99922	1.00000	1.00104	1.00233	1.00384
	25	0.99756	0.99770	0.99818	0.99895	1.00000	1.00128	1.00279
	30	0.99628	0.99642	0.99668	0.99769	0.99872	1.00000	1.00175
	35	0.99478	0.99493	0.99541	0.99617	0.99884	0.99850	1.00000

附录 D 试验洞开挖要求

D.1 基本要求

- D.1.1** 试验洞应布置在具有代表性的岩体中,其方向宜满足试体受力方向与工程岩体实际受力方向一致的要求。
- D.1.2** 试验洞不宜布置在勘探平洞的转弯、交岔、上覆岩体较薄及离临空面较近处。
- D.1.3** 当利用勘探平洞进行试验时,如平洞断面尺寸不符合试验要求,应局部扩大或修整试验地段,清除爆破松动层。
- D.1.4** 试验洞开挖时,应避免对试验段岩体产生扰动和破坏。可采用光面爆破或预裂爆破方法,采用常规爆破方法时,应布置防震孔。
- D.1.5** 试验洞断面尺寸应满足试验边界条件要求。
- D.1.6** 平行试验洞的洞间间距不应小于试验洞直径的 6 倍。
- D.1.7** 试验洞底板宜微向洞口倾斜。当渗水量较大时,应在洞的一侧开挖排水沟。
- D.1.8** 试验洞开挖完成后,应清除松动岩块,清洗洞周,进行地质描述。
- D.1.9** 根据试验洞地质情况,必要时应进行支护。

D.2 特殊要求

- D.2.1** 承压板法变形试验洞中,承压板所在底板或侧壁尺寸不应小于承压板直径或边长的4倍,该范围内岩体应避免扰动。
- D.2.2** 狭缝法和单(双)轴压缩法变形试验洞中,试体表面松动岩块及爆破影响带必须清除干净。
- D.2.3** 隧洞液压枕径向加压法变形试验洞宜专门开挖,总长度应大于受压段与两端影响范围长度之和的1.2倍,轴线方向宜与工程建筑物的轴线平行。

D.2.4 隧洞水压法变形试验洞宜避开断层破碎带及影响带。

D.2.5 直剪试验洞的轴线宜与预定剪切面走向一致。防震孔与剪切面之间应预留厚度为 50cm 的岩层。

D.2.6 岩体应力测试试验洞断面尺寸应满足钻机工作要求,表面应变法测试试验洞断面形状宜为圆形。

附录 E 地质描述内容规定

E.0.1 岩体现场试验段地质描述应包括下列内容：

- 1 试验洞编号、位置、方位、洞深、底板高程、断面形状和尺寸。
- 2 试点编号、位置和尺寸。
- 3 岩石名称、结构、主要矿物成分和颜色。
- 4 层理、片理、劈理、节理、裂隙等各类结构面及断层带的出露位置、产状、宽度、延伸情况、连续性、密度、与受力方向的关系等,各类结构面的成因类型、力学属性、粗糙程度、充填物性质和成分、软化泥化情况,岩脉穿插情况及其与围岩接触关系。
- 5 风化程度和风化特点。
- 6 渗水出露位置和渗水量。
- 7 岩爆和岩体变形情况。

E.0.2 隧洞液压枕径向加压法变形试验应重点描述受压段及其两端各两倍洞径范围内洞周岩体的岩性及完整情况。

E.0.3 隧洞水压法变形试验除应重点描述试验洞段岩体的岩性及裂隙充填物情况外,还应描述岩体的渗透特性。

E.0.4 岩体应力测试应重点描述试验洞和试点埋藏深度、地形地貌、地质构造和岩体结构。

E.0.5 试验成果应包括下列有关地质资料：

- 1 试验段地质说明。
- 2 试验段地质简图。
- 3 试验布置示意图。
- 4 基坑平面图、试验洞或竖井展示图及钻孔柱状图。
- 5 试点地质素描、试验洞或试点纵横剖面图。

附录 F 液压千斤顶、液压枕和滚轴排率定

F.1 液压千斤顶率定

F.1.1 液压千斤顶应一年率定一次。长期搁置未用时,使用前必须率定。率定千斤顶时应采用主动加压方式。

F.1.2 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 压力机;
- 测力计;
- 压力表;
- 液压泵及管路;
- 钢垫板;
- 传力柱。

F.1.3 利用压力机率定液压千斤顶应符合下列规定:

1 将千斤顶置于压力机活塞承压板上,千斤顶活塞应与压力机活塞的圆心重合。

2 安装与千斤顶连接的压力表和液压泵。

3 启动压力机,使压力机横梁承压板与千斤顶活塞接触,压力机刻度盘对零。

4 启动千斤顶液压泵,按千斤顶出力分 6~8 级对千斤顶逐级加压,测读压力机刻度盘和相应的千斤顶压力表读数。打开液压泵逐级退压,同时测读压力机刻度盘和各级压力下压力表读数。重复循环不宜少于三次。记录格式应符合本规程表 F.1.3 的规定。

5 千斤顶出力重复性检验。加压过程中,刻度盘某一指示值下压力表三次读数中最大与最小读数之差与三次读数算术平均值之比不得大于 3%。千斤顶出力重复性 δ 按下式计算:

$$\delta = \frac{F_{1\max} - F_{1\min}}{\bar{F}_1} \times 100\% \quad (\text{F.1.3})$$

- 式中 δ —— 千斤顶出力重复性, %;
- $F_{1\max}$ —— 加压过程中同一检验点的三次压力表读数中的最大值, MPa;
- $F_{1\min}$ —— 加压过程中同一检验点的三次压力表读数中的最小值, MPa;
- \bar{F}_1 —— 加压过程中同一检验点的三次压力表读数算术平均值, MPa。

表 F.1.3 液压千斤顶率定记录表

序号	压力机 (测力计)读数 (kN)	千斤顶压力表读数(MPa)						备注
		循环 I		循环 II		循环 III		
		加压	退压	加压	退压	加压	退压	

6 计算各级压力下千斤顶出力的算术平均值, 绘制压力机出力与千斤顶出力关系曲线。

F.1.4 利用测力计率定液压千斤顶时应符合下列规定:

- 1 利用试验洞浇筑的专用平台作为反力架时, 在被率定的千斤顶活塞上安放测力计和被动千斤顶。
- 2 利用压力机作反力架时, 在被率定的千斤顶上安放测力计。
- 3 按被率定千斤顶额定出力分 6~8 级, 启动千斤顶液压泵逐级加压。按本规程 F.1.3 条 4~6 款的规定进行率定。绘制测力计测值与千斤顶出力关系曲线。

F.2 液压枕率定

F.2.1 试验前应对液压枕进行率定。率定工作可在试验洞内浇筑的专用平台或室内压力机上进行。

F.2.2 主要仪器和设备除应符合本规程 F.1.2 的规定外, 还应备有经校验的千斤顶。

F.2.3 率定应符合下列规定：

- 1 向液压枕内充油，率定时应使液压枕被动加压。
- 2 液压枕安放在专用平台上或压力机活塞承压板上，再放垫板，分别安装与千斤顶和液压枕连接的压力表，连接液压泵。
- 3 根据液压枕设计压力分 6~8 级，启动千斤顶或压力机，按本规程 F.1.3 条 3~6 款的规定进行率定。绘制液压枕压力表读数与千斤顶出力或压力机出力关系曲线。

F.3 滚轴排率定

F.3.1 滚轴排应进行率定。率定可在浇筑的专用平台上进行。

F.3.2 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 液压千斤顶；
- 钢垫板；
- 压力表；
- 液压泵及管路；
- 传力柱。

F.3.3 率定应符合下列规定：

- 1 率定采用双层滚轴排，中间安放钢垫板的方法，钢垫板应有足够长度(图 F.3.3)。
- 2 最大法向载荷按实际应用时的最大载荷确定，施加法向载荷不宜少于 5 级，分级不宜少于 5 级。
- 3 每施加一级法向载荷后，再均匀缓慢地施加水平推力，顶推两个滚轴排中间的钢垫板，直到滚轴排滚动为止。
- 4 滚轴排滚动时，测读法向载荷和水平推力压力表读数。法向载荷加至最大值后，逐级退压。
- 5 拉回滚轴排中间的钢垫板，按本条 3、4 款规定重复进行率定。重复循环不宜少于三次。
- 6 计算各压力表读数算术平均值，绘制推力载荷与法向载荷关系曲线。当关系曲线为直线时，滚轴排滚动摩阻力系数按下式计算：

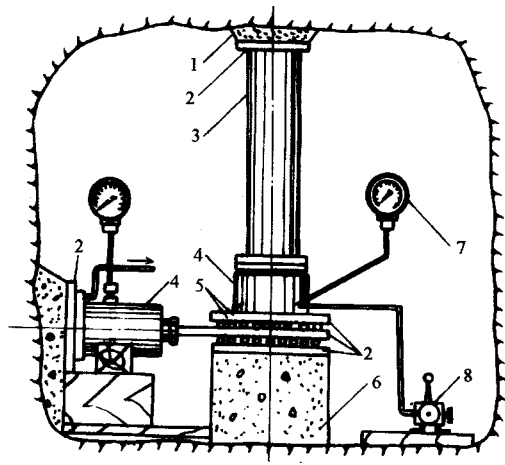


图 F.3.3 滚轴排率定装置图

1—砂浆顶板；2—钢垫板；3—传力柱；4—液压千斤顶；
5—滚轴排；6—混凝土平台；7—压力表；8—液压泵

$$f = \frac{Q}{2P} \quad (F.3.3)$$

式中 f ——滚轴排滚动摩阻力系数；
 Q ——推力载荷，kN；
 P ——法向载荷，kN。

附录 G 试验成果综合整理方法

G.0.1 岩石试验各项试验成果应进行综合整理分析和归纳,提出试验最佳值或满足给定置信概率的试验参数标准值。

G.0.2 成果整理应符合下列规定:

1 对全部试验资料进行逐项逐类的检查和核对,分析试验成果的代表性、规律性和合理性。

2 试验成果应按已划分的工程地质单元进行归类,编制各项试验成果汇总表。

3 按地质单元对试验成果进行综合整理,提出各项试验成果最佳值。

G.0.3 岩块物理力学性参数采用试验值的算术平均值作为试验最佳值。根据需要可计算相应的均方差、偏差系数、绝对误差及精度等指标。

G.0.4 变形特性参数整理应符合下列规定:

1 对不均匀变形反映敏感的某些建筑物或建筑物的某些关键部位,在已划分的工程地质单元的基础上,宜划分成更小的单元整理试验成果。

2 取统计范围内各试点变形特性参数的算术平均值作为试验最佳值。

G.0.5 直剪强度试验成果可选取下列方法进行整理:

1 对同一地质单元内的各组参数进行统计,确定试验最佳值。

2 将同一地质单元内全部试验成果点绘在 $\tau \sim \sigma$ 坐标图上,用图解法或最小二乘法确定该地质单元抗剪强度参数的试验最佳值。

3 将同一地质单元内全部试验成果按正应力分组统计,确定各级正应力下的最佳剪应力值,用图解法或最小二乘法确定该地质单元抗剪强度参数的试验最佳值。

G.0.6 三轴压缩强度试验成果可选取下列方法进行整理：

1 对同一地质单元的各组三轴强度参数进行算术平均，确定相应工程地质单元的抗剪强度试验最佳值。

2 将同一工程地质单元的全部试验成果按侧向应力分组统计，确定各侧向应力下的最佳轴向应力值，并按下列步骤确定该工程地质单元的抗剪强度试验最佳值：

1) 在坐标图上点绘侧向应力和相应的最佳轴向应力点。

2) 用图解法或最小二乘法拟合直线。

3) 在直线上等距地取 6~8 个点，确定各点相应的轴向应力和侧向应力值，并在 $\tau \sim \sigma$ 坐标图上绘制相应的莫尔圆。

4) 作这些莫尔圆的破坏包线。根据直线段的斜率和截距，确定抗剪强度参数 $tg\varphi$ 和 C 。

G.0.7 图解法确定抗剪强度参数时，按下列步骤进行：

1 将不同正应力下的最大剪应力(单值或统计值)点绘在 $\tau \sim \sigma$ 坐标上，纵、横轴比例尺宜相同。

2 用目估方式作直线，直线至所有的点距离应最近。

3 按直线的斜率和截距确定抗剪强度参数 $tg\varphi$ 和 C 。

G.0.8 最小二乘法确定抗剪强度参数时按下列公式计算：

$$tg\varphi = \frac{n\sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - (\sum_{i=1}^n \sigma_i)^2} \quad (G.0.8-1)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i}{n\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - (\sum_{i=1}^n \sigma_i)^2} \quad (G.0.8.-2)$$

式中 $tg\varphi$ —— 摩擦系数；

C —— 内聚力,MPa；

σ_i —— 正应力值, $i = 1, \dots, n$ ；

τ_i —— 与 σ_i 相对应的剪应力值, $i = 1, \dots, n$ ；

n —— 测定总次数。

G.0.9 试验成果数理统计可包括下列内容：

1 算术平均值按下式计算：

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (\text{G.0.9-1})$$

式中 \bar{x} ——算术平均值；

x_i ——试验值。

2 均方差按下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{G.0.9-2})$$

式中 σ ——均方差。

3 偏差系数按下式计算：

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (\text{G.0.9-3})$$

式中 C_v ——偏差系数。

4 绝对误差按下式计算：

$$m_x = \pm \frac{\sigma}{n} \quad (\text{G.0.9-4})$$

式中 m_x ——绝对误差。

5 精度指标按下式计算：

$$P_x = \pm \frac{m_x}{\bar{x}} \quad (\text{G.0.9-5})$$

式中 P_x ——精度指标。

G.0.10 非代表性试验值可按下式确定,并予以舍弃：

$$|x_i - \bar{x}| > g\sigma \quad (\text{G.0.10-1})$$

式中 x_i ——试验值；

g ——采用三倍标准差方法或 *Grubbs* 准则判别时给出的系数。用三倍标准差方法时, $g=3$; 用 *Grubbs* 准则, g 按表G.0.10的规定取值。

表 G.0.10 Grubbs 判别准则中 g 取值表

样本数	置信水平		样本数	置信水平		样本数	置信水平	
	95%	99%		95%	99%		95%	99%
3	1.15	1.15	9	2.11	2.32	15	2.41	2.71
4	1.46	1.49	10	2.18	2.41	20	2.56	2.88
5	1.67	1.75	11	2.23	2.48	25	2.66	3.01
6	1.82	1.94	12	2.29	2.55	30	2.75	3.10
7	1.94	2.10	13	2.33	2.61	40	2.87	3.24
8	2.03	2.22	14	2.37	2.66	50	2.90	3.34

G.0.11 试验参数标准值可按下列方法确定：

对于相同地质单元中具有足够数量的试验值，可以计算满足给定置信概率条件下的试验参数标准值。根据给定的置信概率 $P=1-\alpha$ ，标准值 f_k 可按下列公式计算：

$$f_k = \gamma_s \bar{x} \quad (G.0.11-1)$$

$$\gamma_s = 1 \pm \frac{t_\alpha(n-1)}{n} C_v \quad (G.0.11-2)$$

式中 f_k —— 试验参数标准值；
 γ_s —— 统计修正系数，其正负号按不利组合考虑；
 $t_\alpha(n-1)$ —— 置信概率为 $1-\alpha$ (α 为风险率)，自由度为 $n-1$ 的 t 分布单值置信区间系数值，可按 t 分布单值置信区间 t_α 系数表规定取值。置信概率为 90% 和 95% 时， $t_\alpha(n-1)$ 按表 G.0.11 的规定取值。

表 G.0.11 t 分布单值置信区间 t_α 系数表

自由度 n-1	置信概率		自由度 n-1	置信概率		自由度 n-1	置信概率	
	90%	95%		90%	95%		90%	95%
3	1.64	2.35	9	1.38	1.83	15	1.34	1.75
4	1.53	2.13	10	1.37	1.81	20	1.33	1.72
5	1.48	2.02	11	1.36	1.80	25	1.32	1.71
6	1.44	1.94	12	1.36	1.78	30	1.31	1.70
7	1.42	1.90	13	1.35	1.77	40	1.31	1.69
8	1.40	1.86	14	1.35	1.76	60	1.30	1.67

附录 H 岩体应力测量套钻孔应力解除法实测数据整理

H.1 岩体应力试验成果整理计算的基本要求

H.1.1 岩体应力试验成果整理的基本要求应符合本规程中 G.0.1、G.0.2 的规定外,还应符合以下规定。

H.2 坐标系及测量元件序号规定

H.2.1 坐标系应符合下列规定:

- 1 岩体应力测试计算坐标系应采用右手系。
- 2 大地坐标系 $o-xyz$:轴 z 为铅垂向上,轴 x 为建筑物轴线方向或正北向,其方位为 β_0 。
- 3 钻孔坐标系 $o-x_i y_i z_i$:轴 z_i 为钻孔轴向,指向孔口为正,轴 x_i 为水平向,以按右手系确定的轴 y_i 位于上半空间的指向为正。

H.2.2 钻孔方向应符合下列规定:

钻孔倾角 α_i 以仰角为正,方位角 β_i 为钻孔在水平面投影线的方位,如果钻孔为铅垂向, β_i 为轴 x_i 的方位,这时 β_0 为垂直建筑物轴线(轴 y) 的方位或正西向。

H.2.3 测量元件序号应符合下列规定:

- 1 钻孔孔壁应变计: i 为布置在孔壁上的应变丛序号, j 为应变丛内应变片序号。 γ 为应变计安装偏斜角,以水平轴起始逆时针向度量。
- 2 钻孔孔径变形计: i 为测量钻孔序号, j 为安装在测量钻孔内变形计的触头序号, d 为测孔孔径。
- 3 钻孔孔底应变计: i 为测量钻孔序号, j 为布置在测量钻孔孔底上应变片的序号。

H.3 观测值方程

H.3.1 钻孔孔壁应变测量法、钻孔孔径变形测量法和钻孔孔底

应变测量法的观测值方程均归纳为下列形式表达：

$$E \cdot \varepsilon_k = A_{k1} \sigma_x + A_{k2} \sigma_y + A_{k3} \sigma_z + A_{k4} \tau_{xy} + A_{k5} \tau_{yz} + A_{k6} \tau_{zx} \quad (\text{H.3.1})$$

式中 ε_k —— 观测值,对孔壁和孔底应变测量法,为解除应变测量值,对孔径变形测量法,为孔径相对变形 u/d 测量值;

k —— 观测值方程序号, $k = m(i-1) + j$ ($i = 1 \sim 3, j = 1 \sim m, m$ 为应变计内应变丛中应变片或变形计内触头的个数);

$A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{k6}$ —— 观测值方程的应力系数,根据不同测量方法确定。

H.3.2 钻孔孔壁应变测量法观测值方程应力系数的确定:

在钻孔岩壁上的第 i 应变丛处二次应力状态与以钻孔坐标系表达的地应力关系为

$$\begin{cases} \sigma_{\theta i} = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta_i - 4\tau_{xy} \sin 2\theta_i \\ \sigma_{z i} = -2\mu[(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta_i + 2\tau_{xy} \sin 2\theta_i] + \sigma_{z0} \\ \tau_{\theta z i} = 2\tau_{yz} \cos \theta_i - 2\tau_{zx} \sin 2\theta_i \end{cases} \quad (\text{H.3.2-1})$$

式中: μ —— 岩石的泊松比
 σ_{z0} —— 原始轴向正应力分量

注:式(H.3.2-1)适用一般形式的钻孔三向应变计,对空心包体式钻孔三向应变计不适用。

第 i 应变丛第 j 应变片实测的应变值与轴向、切向正应变和剪应变的关系为

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{zi} \cos^2 \varphi_{ij} + \varepsilon_{\theta i} \sin^2 \varphi_{ij} + \gamma_{z\theta i} \sin 2\varphi_{ij} \quad (\text{H.3.2-2})$$

利用应力应变关系的虎克定律,并代入式(H.3.2-1)得到观测值方程(H.3.1),应力系数 $A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{k6}$ 用下列公式确定:

$$\begin{cases} A_{k1} = [K_1 + \mu - 2(1 - \mu^2) K_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \varphi_{ij} - \mu \\ A_{k2} = [K_1 + \mu + 2(1 - \mu^2) K_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \varphi_{ij} - \mu \\ A_{k3} = 1 - (1 + \mu K_1) \sin^2 \varphi_{ij} \\ A_{k4} = -4(1 - \mu^2) K_2 \sin 2\theta_i \sin^2 \varphi_{ij} \\ A_{k5} = 2(1 + \mu) K_3 \cos \theta_i \sin 2\varphi_{ij} \\ A_{k6} = -2(1 + \mu) K_3 \sin \theta_i \sin 2\varphi_{ij} \end{cases} \quad (\text{H.3.2-3})$$

式中： $K_1、K_2、K_3、K_4$ ——应变片是否直接粘贴在钻孔岩壁上的修正系数。

对深钻孔三向应变计和浅钻孔三向应变计， $K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = 1$ ；对空心包体式钻孔三向应变计，修正系数 $K_i (i=1\sim 4)$ 由钻孔半径 R ，应变计内半径 R_1 ，应变片嵌固部位的半径 ρ ，围岩的弹性模量 E 、泊松比 μ 和环氧树脂层的弹性模量 E_1 、泊松比 μ_1 确定：

$$\begin{cases} K_1 = d_1(1 - \mu\mu_1)(1 - 2\mu_1 + R_1^2/\rho^2) + \mu\mu_1 \\ K_2 = d_2(1 - \mu_1)\rho^2 + d_3 + d_4\mu_1/\rho^2 + d_5/\rho^4 \\ K_3 = d_6(1 + R_1^2/\rho^2) \\ K_4 = [\mu_1 - d_1(\mu_1 - \mu)(1 - 2\mu_1 + R_1^2/\rho^2)]/\mu \end{cases} \quad (\text{H.3.2-4})$$

$$\begin{cases} d_1 = 1/[1 - 2\mu_1 + m^2 + \xi(1 - m^2)] \\ d_2 = 12(1 - \xi)m^2(1 - m^2)/(R^2 D) \\ d_3 = [m^4(4m^2 - 3)(1 - \xi) + \chi_1 + \xi]/D \\ d_4 = -4R_1^2[m^6(1 - \xi) + \chi_1 + \xi]/D \\ d_5 = 3R_1^4[m^4(1 - \xi) + \chi_1 + \xi]/D \\ d_6 = 1/[1 + m^2 + \xi(1 - m^2)] \end{cases} \quad (\text{H.3.2-5})$$

$$\begin{cases} D = (1 + \chi\xi)[\chi_1 + \xi + (1 - \xi)(3m^2 - 6m^4 + 4m^6)] \\ \quad + (\chi_1 - \chi\xi)m^2[(1 - \xi)m^6 + (\chi_1 + \xi)] \\ \xi = [E_1(1 + \mu)]/[E(1 + \mu_1)] \\ m = R_1/R \\ \chi = 3 - 4\mu \\ \chi_1 = 3 - 4\mu_1 \end{cases} \quad (\text{H.3.2-6})$$

H.3.3 钻孔孔径变形测量法观测值方程应力系数的确定:

在第 i 钻孔岩壁上, 变形计的第 j 对触头测得的相对孔径变形 u_{ij}/d , 与钻孔坐标系 $o-x_i y_i z_i$ 表达的地应力的关系为

$$E \cdot (u_{ij}/d) = [1 + 2(1 - \mu^2)\cos 2\theta_j]\sigma_{x_i} + [1 - 2(1 - \mu^2)\cos 2\theta_j]\sigma_{y_i} - \mu\sigma_{z_i} + 4(1 - \mu^2)\sin 2\theta_j \cdot \tau_{x_i y_i} \quad (\text{H.3.3-1})$$

式中: σ_{x_i} 、 σ_{y_i} 、 σ_{z_i} 和 $\tau_{x_i y_i}$ 分别为由钻孔坐标系表达的应力分量。在实测数据整理计算时, 必须利用应力分量坐标变换, 转换到由大地坐标系表达。

钻孔坐标系 $o-x_i y_i z_i$ 与大地坐标系 $o-xyz$ 的相互关系如图 H.3.3, 钻孔坐标系各坐标轴相对大地坐标系的方向余弦如表 H.3.3。

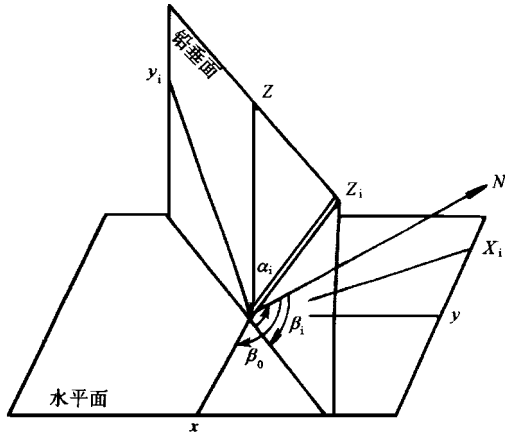


图 H.3.3 钻孔坐标系与大地坐标系相互关系

表 H.3.3 钻孔坐标系 $o-x_i y_i z_i$ 各坐标轴相对大地坐标系 $o-xyz$ 的方向余弦

	x	y	z
x_i	$l_1 = -\sin(\beta_0 - \beta_i)$	$m_1 = \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$n_1 = 0$
y_i	$l_2 = -\sin \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$m_2 = -\sin \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$n_2 = \cos \alpha_i$
z_i	$l_3 = \cos \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$m_3 = \cos \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$n_3 = \sin \alpha_i$

将表 H.3.3 中的方向余弦,代入应力分量坐标变换公式和式 (H.3.3-1),得到观测值方程 (H.3.1),而应力系数 A_{k1} 、 A_{k2} …… A_{k6} 用下式确定:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{k1} = 1 - (1 + \mu) \cos^2 \alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) \\ \quad + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j [1 - (1 + \sin^2 \alpha_i) \cos^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\ \quad + 2(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k2} = 1 - (1 + \mu) \cos^2 \alpha_i \sin^2 (\beta_0 - \beta_i) \\ \quad + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j [1 - (1 + \sin^2 \alpha_i) \sin^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\ \quad - 2(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k3} = (1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \cos^2 \alpha_i - \mu \\ A_{k4} = -(1 + \mu) [\cos^2 \alpha_i + 2(1 - \mu)(1 + \sin^2 \alpha_i) \cos 2\theta_j] \\ \quad \cdot \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k5} = -(1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin 2\alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) \\ \quad + 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \cos \alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k6} = -(1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin 2\alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \\ \quad - 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \cos \alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) \end{array} \right. \quad (\text{H.3.3-2})$$

当交汇测量的 3 个钻孔处于同一水平面上(即 $\alpha_i = 0$),则应力系数 A_{k1} 、 A_{k2} …… A_{k6} 用下式表达:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{k1} = (1 + \mu) [1 + 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin^2 (\beta_0 - \beta_i) - \mu \\ A_{k2} = (1 + \mu) [1 + 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) - \mu \\ A_{k3} = 1 - 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j \\ A_{k4} = -(1 + \mu) [1 + 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k5} = 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \cos (\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k6} = -4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin (\beta_0 - \beta_i) \end{array} \right. \quad (\text{H.3.3-3})$$

H.3.4 钻孔孔底应变测量法的观测值方程应力系数的确定:

在第 i 钻孔孔底中心部位的二次应力状态与钻孔坐标系表达的地应力的关系用下式表达

$$\begin{cases} \sigma'_{xi} = a\sigma_{xi} + b\sigma_{yi} + c\sigma_{zi} \\ \sigma'_{yi} = b\sigma_{xi} + a\sigma_{yi} + c\sigma_{zi} \\ \tau'_{x\dot{y}i} = d\tau_{x\dot{y}i} \end{cases} \quad (\text{H.3.4-1})$$

式中： a 、 b 、 c 、 d ——钻孔孔底平面中心部位的应力集中系数。

第 i 钻孔孔底第 j 应变片实测的应变值与轴向、切向正应变和剪应变的关系为：

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{xi} \cos^2 \varphi_{ij} + \varepsilon_{yi} \sin^2 \varphi_{ij} + \gamma_{x\dot{y}i} \sin 2\varphi_{ij} \quad (\text{H.3.4-2})$$

利用应力应变关系的虎克定律，并代入式(H.3.4-1)，同样，把表 H.3.3 中的方向余弦代入应力分量坐标变换公式，将钻孔坐标系表达的应力分量 σ_{xi} 、 σ_{yi} 、 σ_{zi} 、 $\tau_{x\dot{y}i}$ ，转换到由大地坐标系表达，从而得到观测值方程(H.3.1)，而应力系数 A_{k1} 、 A_{k2} …… A_{k6} 用下式确定：

$$\begin{cases} A_{k1} = B_1 - (B_1 - B_2 \sin^2 \alpha_i - B_3 \cos^2 \alpha_i) \cos^2(\beta_0 - \beta_i) \\ \quad + \frac{1}{2} B_4 \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k2} = B_1 - (B_1 - B_2 \sin^2 \alpha_i - B_3 \cos^2 \alpha_i) \sin^2(\beta_0 - \beta_i) \\ \quad - \frac{1}{2} B_4 \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k3} = B_2 \cos^2 \alpha_i + B_3 \sin^2 \alpha_i \\ A_{k4} = -(B_1 - B_2 \sin^2 \alpha_i - B_3 \cos^2 \alpha_i) \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ \quad - B_4 \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k5} = -(B_2 - B_3) \sin 2\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) + B_4 \cos \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k6} = -(B_2 - B_3) \sin 2\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) - B_4 \cos \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) \end{cases} \quad (\text{H.3.4-3})$$

$$\text{式中} \quad \begin{cases} B_1 = (b - \mu a) + (1 + \mu)(a - b)\cos^2 \varphi_{ij} \\ B_2 = (a - \mu b) - (1 + \mu)(a - b)\cos^2 \varphi_{ij} \\ B_3 = (1 - \mu)c \\ B_4 = (1 + \mu)d\sin 2\varphi_{ij} \end{cases} \quad (\text{H.3.4-4})$$

当交汇测量的 3 个钻孔处于同一水平面上(即 $\alpha_i=0$),则应力系数 $A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{k6}$ 用下式表达:

$$\begin{cases} A_{k1} = (1 - \mu)c + [(b - c) - \mu(a - c) \\ \quad + (1 + \mu)(a - b)\cos^2 \varphi_{ij}] \sin^2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k2} = (1 - \mu)c + [(b - c) - \mu(a - c) \\ \quad + (1 + \mu)(a - b)\cos^2 \varphi_{ij}] \cos^2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k3} = (a - \mu b) - (1 + \mu)(a - b)\cos^2 \varphi_{ij} \\ A_{k4} = [-(b - c) + \mu(a - c) \\ \quad - (1 + \mu)(a - b)\cos^2 \varphi_{ij}] \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k5} = (1 + \mu)d\sin 2\varphi_{ij} \cos(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k6} = -(1 + \mu)d\sin 2\varphi_{ij} \sin(\beta_0 - \beta_i) \end{cases} \quad (\text{H.3.4-5})$$

注: a, b, c, d 由实验或数值计算获得。冯·海尔登通过实验得到的 $a = d = 1.25, b = 0, c = -0.75(0.5 + \mu)$, 长沙矿冶研究院和兰州大学通过有限元计算得到 $a = 1.37, b = -0.14, c = -0.62, d = 1.484$ 。

H.3.5 钻孔孔径变形计在单钻孔中进行二维应力测试时观测值方程的应力系数的确定:

在单钻孔测量时,第 i 钻孔第 j 对触头测得的相对孔径变形 u_j/d , 与钻孔坐标系 $o-x_i y_i z_i$ 表达的应力分量的关系为式 H.3.3-1, 则观测值方程仍用式 (H.3.1) 表达, 而应力系数 $A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{k6}$ 可分两种基本假定情况, 分别确定。

作平面应力问题假定时:

$$\begin{cases} A_{k1} = 1 + 2(1 - \mu^2)\cos 2\theta_j \\ A_{k2} = 1 - 2(1 - \mu^2)\cos 2\theta_j \\ A_{k4} = 4(1 - \mu^2)\sin 2\theta_j \\ A_{k3} = A_{k5} = A_{k6} = 0 \end{cases} \quad (\text{H.3.5-1})$$

作平面应变问题假定时:

$$\begin{cases} A_{k1} = (1 - \mu^2)(1 + 2\cos 2\theta_j) \\ A_{k2} = (1 - \mu^2)(1 - 2\cos 2\theta_j) \\ A_{k4} = 4(1 - \mu^2)\sin 2\theta_j \\ A_{k3} = A_{k5} = A_{k6} = 0 \end{cases} \quad (\text{H.3.5-2})$$

H.4 岩体应力分量计算公式

H.4.1 岩体应力分量最佳值计算公式:

岩体应力测试属多值测量,即观测值方程数多于6个应力分量的未知数,利用数理统计的最小二乘法原理,按下列正规方程组求解应力分量 σ_x 、 σ_y 、 \dots 、 τ_{xy} 最佳值

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k2} & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k6} \\ \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k1} & \sum_{k=1}^n A_{k2}^2 & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k1} & \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k2} & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k6}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \dots \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = E \cdot \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1} \varepsilon_k \\ \sum_{k=1}^n A_{k2} \varepsilon_k \\ \dots \\ \sum_{k=1}^n A_{k6} \varepsilon_k \end{Bmatrix} \quad (\text{H.4.1})$$

H.4.2 钻孔孔壁应变测量法测得的应力分量的坐标转换

钻孔孔壁应变测量法测得的应力分量,是由钻孔坐标系表达的,在实际应用时必须按下式转换到大地坐标系上来:

用 σ_1 、 σ_2 、 \dots 、 σ_6 分别表示 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{zx} ,大地坐标系表达的应力分量可按下式计算:

$$\sigma_j = C_{j1} \sigma_{x1} + C_{j2} \sigma_{y1} + C_{j3} \sigma_{z1} + C_{j4} \tau_{xy1} + C_{j5} \tau_{yz1} + C_{j6} \tau_{zx1}$$

$$j = 1 \sim 6$$

(H.4.2-1)

$C_{11} \sim C_{16}$ 为相对应的应力系数,按下列公式计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{11} = \cos^2 \gamma_1 \sin^2(\beta_0 - \beta_1) + \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1) \\ \quad + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_1 \sin \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\ C_{12} = -C_{11} + \sin^2(\beta_0 - \beta_1) + \sin^2 \alpha_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1) \\ C_{13} = \cos^2 \alpha_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1) \\ C_{14} = -\sin 2\gamma_1 [\sin^2(\beta_0 - \beta_1) - \sin^2 \alpha_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1)] \\ \quad + \cos 2\gamma_1 \sin \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\ C_{15} = -\cos \gamma_1 \sin 2\alpha_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1) + \sin \gamma_1 \cos \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\ C_{16} = -\sin \gamma_1 \sin 2\alpha_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1) - \cos \gamma_1 \cos \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \end{array} \right. \quad (\text{H.4.2-2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{21} = \cos^2 \gamma_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1) + \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha_1 \sin^2(\beta_0 - \beta_1) \\ \quad - \frac{1}{2} \sin 2\gamma_1 \sin \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\ C_{22} = -C_{21} + \cos^2(\beta_0 - \beta_1) + \sin^2 \alpha_1 \sin^2(\beta_0 - \beta_1) \\ C_{23} = -C_{13} + \cos^2 \alpha_1 \\ C_{24} = -C_{14} - \sin 2\gamma_1 \cos^2 \alpha_1 \\ C_{25} = -C_{15} - \cos \gamma_1 \sin 2\alpha_1 \\ C_{26} = -C_{16} - \sin \gamma_1 \sin 2\alpha_1 \end{array} \right. \quad (\text{H.4.2-3})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{31} = \sin^2 \gamma_1 \cos^2 \alpha_1 \\ C_{32} = \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \alpha_1 \\ C_{33} = \sin^2 \alpha_1 \\ C_{34} = \sin 2\gamma_1 \cos^2 \alpha_1 \\ C_{35} = \cos \gamma_1 \sin 2\alpha_1 \\ C_{36} = \sin \gamma_1 \sin 2\alpha_1 \end{array} \right. \quad (\text{H.4.2-4})$$

$$\left\{ \begin{aligned}
C_{41} &= \frac{1}{2} (-\cos^2 \gamma_1 + \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha_1) \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\
&\quad - \frac{1}{2} \sin 2 \gamma_1 \sin \alpha_1 \cos 2(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{42} &= -C_{41} - \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{43} &= \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{44} &= \frac{1}{2} \sin 2 \gamma_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) (1 + \sin^2 \alpha_1) - \cos 2 \gamma_1 \sin \alpha_1 \cos 2(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{45} &= -\frac{1}{2} \cos \gamma_1 \sin 2 \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) - \sin \gamma_1 \cos \alpha_1 \cos 2(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{46} &= -\frac{1}{2} \sin \gamma_1 \sin 2 \alpha_1 \sin 2(\beta_0 - \beta_1) + \cos \gamma_1 \cos \alpha_1 \cos 2(\beta_0 - \beta_1)
\end{aligned} \right.$$

(H.4.2-5)

$$\left\{ \begin{aligned}
C_{51} &= -\sin \gamma_1 \cos \alpha_1 [\sin \gamma_1 \sin \alpha_1 \sin(\beta_0 - \beta_1) - \cos \gamma_1 \cos(\beta_0 - \beta_1)] \\
C_{52} &= -C_{51} - \frac{1}{2} \sin 2 \alpha_1 \sin(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{53} &= \frac{1}{2} \sin 2 \alpha_1 \sin(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{54} &= -\cos \alpha_1 [\sin 2 \gamma_1 \sin \alpha_1 \sin(\beta_0 - \beta_1) - \cos 2 \gamma_1 \cos(\beta_0 - \beta_1)] \\
C_{55} &= \cos \gamma_1 \cos 2 \alpha_1 \sin(\beta_0 - \beta_1) - \sin \gamma_1 \sin \alpha_1 \cos(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{56} &= \sin \gamma_1 \cos 2 \alpha_1 \sin(\beta_0 - \beta_1) + \cos \gamma_1 \sin \alpha_1 \cos(\beta_0 - \beta_1)
\end{aligned} \right.$$

(H.4.2-6)

$$\left\{ \begin{aligned}
C_{61} &= -\sin \gamma_1 \cos \alpha_1 [\sin \gamma_1 \sin \alpha_1 \cos(\beta_0 - \beta_1) + \cos \gamma_1 \sin(\beta_0 - \beta_1)] \\
C_{62} &= -C_{61} - \frac{1}{2} \sin 2 \alpha_1 \cos(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{63} &= \frac{1}{2} \sin 2 \alpha_1 \cos(\beta_0 - \beta_1) \\
C_{64} &= -\cos \alpha_1 [\sin 2 \gamma_1 \sin \alpha_1 \cos(\beta_0 - \beta_1) + \cos 2 \gamma_1 \sin(\beta_0 - \beta_1)] \\
C_{65} &= -C_{63} + \cos(\gamma_1 - \beta_0 + \beta_1) (\cos 2 \alpha_1 + \sin \alpha_1) \\
C_{66} &= -C_{65} + \sin(\gamma_1 + \beta_0 - \beta_1) (\cos 2 \alpha_1 - \sin \alpha_1)
\end{aligned} \right.$$

(H.4.2-7)

当 $\gamma_i=0$ 时,则岩体应力分量按下式计算:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{xi} \sin^2(\beta_0 - \beta_1) + (\sigma_{yi} \sin^2 \alpha_1 + \sigma_{zi} \cos^2 \alpha_1 - \tau_{yzi} \sin 2\alpha_1) \\ &\quad \cdot \cos^2(\beta_0 - \beta_1) + (\tau_{xyi} \sin \alpha_1 - \tau_{zxi} \cos \alpha_1) \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\ \sigma_y &= \sigma_{xi} \cos^2(\beta_0 - \beta_1) + (\sigma_{yi} \sin^2 \alpha_1 + \sigma_{zi} \cos^2 \alpha_1 - \tau_{yzi} \sin 2\alpha_1) \\ &\quad \cdot \sin^2(\beta_0 - \beta_1) - (\tau_{xyi} \sin \alpha_1 - \tau_{zxi} \cos \alpha_1) \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\ \sigma_z &= \sigma_{yi} \cos^2 \alpha_1 + \sigma_{zi} \sin^2 \alpha_1 + \tau_{zxi} \sin 2\alpha_1 \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{2} (-\sigma_{xi} + \sigma_{yi} \sin^2 \alpha_1 + \sigma_{zi} \cos^2 \alpha_1 - \tau_{yzi} \sin 2\alpha_1) \sin 2(\beta_0 - \beta_1) \\ &\quad - (\tau_{xyi} \sin \alpha_1 - \tau_{zxi} \cos \alpha_1) \cos 2(\beta_0 - \beta_1) \\ \tau_{yz} &= \frac{1}{2} [(-\sigma_{yi} + \sigma_{zi}) \sin 2\alpha_1 + 2\tau_{yzi} \cos 2\alpha_1] \sin(\beta_0 - \beta_1) \\ &\quad + (\tau_{xyi} \cos \alpha_1 + \tau_{zxi} \sin \alpha_1) \cos(\beta_0 - \beta_1) \\ \tau_{zx} &= \frac{1}{2} [(-\sigma_{yi} + \sigma_{zi}) \sin 2\alpha_1 + 2\tau_{yzi} \cos 2\alpha_1] \cos(\beta_0 - \beta_1) \\ &\quad - (\tau_{xyi} \cos \alpha_1 + \tau_{zxi} \sin \alpha_1) \sin(\beta_0 - \beta_1) \end{aligned} \right. \quad (\text{H.4.2-8})$$

H.5 岩体主应力大小及其方向计算公式

H.5.1 主应力的大小按下列公式计算:

当 $(\frac{P}{3})^3 + (\frac{Q}{2})^2 = 0$ 时

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= 2\sqrt[3]{-\frac{Q}{2}} + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = -\sqrt[3]{-\frac{Q}{2}} + \frac{1}{3} J_1 \end{aligned} \right. \quad (\text{H.5.1-1})$$

当 $(\frac{P}{3})^3 + (\frac{Q}{2})^2 < 0$ 时

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{\omega}{3} + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_2 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{\omega+2\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_3 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{\omega+4\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1 \end{aligned} \right. \quad (\text{H.5.1-2})$$

$$\begin{cases} P = -\frac{1}{3} J_1^2 + J_2 \\ Q = -\frac{2}{27} J_1^3 + \frac{1}{3} J_1 J_2 - J_3 \end{cases} \quad (\text{H.5.1-3})$$

$$\omega = \cos^{-1} \left[-\frac{Q}{2} / \sqrt{-\left(\frac{P}{3}\right)^3} \right] \quad (\text{H.5.1-4})$$

$$\begin{cases} J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ J_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \\ \quad = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \\ J_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + 2 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} \end{cases} \quad (\text{H.5.1-5})$$

H.5.2 主应力的方向按下列公式计算：

$$\begin{cases} \alpha_i = \sin^{-1} n_i \\ \beta_i = \beta_0 - \sin^{-1} \frac{m_i}{\sqrt{1 - n_i^2}} \end{cases} \quad (\text{H.5.2-1})$$

式中： l_i, m_i, n_i ——主应力的方向余弦
 α_i, β_i ——主应力的倾角、方位角

$$\begin{cases} l_i = A / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \\ m_i = B / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \\ n_i = C / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \end{cases} \quad (\text{H.5.2-2})$$

$$\begin{cases} A = \tau_{xy} \tau_{yz} - (\sigma_y - \sigma_i) \tau_{zx} \\ B = \tau_{xy} \tau_{zx} - (\sigma_x - \sigma_i) \tau_{yz} \\ C = (\sigma_x - \sigma_i)(\sigma_y - \sigma_i) - \tau_{xy}^2 \end{cases} \quad (\text{H.5.2-3})$$

注：式中主应力的倾角和方位角仍记为 α_i 和 β_i ，这里注意，此处的 α_i 和 β_i ，不同于钻孔的倾角和方位角。

本规程的用词和用语说明

为便于执行本规程,对要求严格程度不同的用词说明如下:

——表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”。

——表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。

——表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”。表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

本规程用语说明如下:

规程条文中,“条”、“款”之间承上启下的连接用语写法,宜采用“符合下列规定”、“遵守下列规定”或“符合下列要求”等。

在规程条文中引用本规程中的其他条文时,采用“符合本规程×.×.×的规定”等典型用语。

在规程条文中引用本规程中的其他表、公式时,采用“按本规程表×.×.×的规定取值”或“按本规程公式(×.×.×)计算”等典型用语。

相关标准应采用“……,除应符合本规程外,尚应符合国家现行有关标准的规定”典型用语。