

ICS 27. 140
P 13

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL/T 264—2020
替代 SL 264—2001

水利水电工程岩石试验规程

Code for rock tests in water and hydropower projects

2020 - 04 - 15 发布

2020 - 07 - 15 实施



中华人民共和国水利部 发布

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》等 4 项水利行业标准的公告

2020 年第 3 号

中华人民共和国水利部批准《水利水电工程岩石试验规程》
(SL/T 264—2020) 等 4 项为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水利水电工程岩石试验规程	SL/T 264—2020	SL 264—2001	2020. 4. 15	2020. 7. 15
2	水工钢闸门和启闭机安全运行规程	SL/T 722—2020	SL 240—1999 SL 722—2015	2020. 4. 15	2020. 7. 15
3	水利水电工程过电压保护及绝缘配合设计规范	SL/T 781—2020		2020. 4. 15	2020. 7. 15
4	堤防工程安全监测技术规程	SL/T 794—2020		2020. 4. 15	2020. 7. 15

水利部

2020 年 4 月 15 日

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排,按照 SL 1—2014《水利技术标准编写规定》的规定,对 SL 264—2001《水利水电工程岩石试验规程》进行修订。

本标准共 12 章和 7 个附录,主要技术内容包括岩块物理与力学性质试验、岩体变形与强度试验、岩石蠕变试验、岩体应力测试、岩石声波测试及工程岩体观测等。

本次修订的主要内容如下:

- 对原规程部分条款进行了修订:岩块物理性质试验中的冻融试验内容,提出了常规冻融试验和特殊冻融试验及相应的制冷温度要求;岩块力学试验中的三轴压缩强度试验,提出了高应力条件下的试验要求;工程岩体观测中的岩体应力观测,提出了钻孔空心包体式应变计法观测方法;岩体声波测试中增加了横波测试,并列出了相应的计算公式。
- 增加了岩块物理性质试验中的硬度试验、磨耗性试验,岩块力学性质试验中的动三轴试验、阻尼比试验,工程岩体应力观测中的岩体声发射观测,附录 G 岩体应力实测数据计算方法中的水压致裂法三维应力测量观测值方程等;删除了原规程第 10.5 节“岩体应变观测”。
- 增加“岩石蠕变试验”一章,除包含原规程第 7.3 节“结构面直剪蠕变试验”内容外,还增加了岩块单轴压缩蠕变试验、岩块三轴压缩蠕变试验、承压板法蠕变试验及岩体三轴压缩蠕变试验等内容。
- 增加术语和符号一章,将原规程附录 G“试验成果综合整理方法”调整为第 12 章“试验成果综合整理”。
- 重新编写了各项试验方法,对部分试验及成果示意图进

行了修订。

本标准所替代标准的历次版本为：

——SL 264—2001

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：长江水利委员会长江科学院

本标准参编单位：中国水利水电科学研究院

黄河勘测规划设计有限公司

长江三峡勘测研究院有限公司

长江岩土工程总公司（武汉）

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：邬爱清 朱杰兵 周火明 钟作武

尹健民 李会中 颜慧明 王玉杰

路新景 肖国强 刘元坤 张宜虎

卢波 汪斌 蒋昱州 熊诗湖

吴相超 周黎明 房后国 赵宇飞

本标准审查会议技术负责人：王志强

本标准体例格式审查人：牟广丞

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条2号；邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供今后修订时参考。

目次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	6
4	岩块物理性质试验	9
4.1	含水率试验	9
4.2	吸水性试验	10
4.3	颗粒密度试验	12
4.4	块体密度试验	15
4.5	膨胀性试验	19
4.6	耐崩解性试验	23
4.7	冻融试验	25
4.8	硬度试验	28
4.9	磨耗性试验	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	45
5.7	断裂韧度试验	49
5.8	动三轴试验	52
5.9	阻尼比试验	56
6	岩体变形试验	60

6.1	承压板法试验	60
6.2	狭缝法试验	71
6.3	单（双）轴压缩法试验	74
6.4	钻孔径向加压法试验	76
6.5	隧洞液压枕径向加压法试验	78
6.6	隧洞水压法试验	85
7	岩体强度试验	89
7.1	混凝土与岩体接触面直剪试验	89
7.2	结构面直剪试验	95
7.3	岩体直剪试验	98
7.4	岩体三轴压缩试验	100
7.5	岩体载荷试验	106
8	岩石蠕变试验	109
8.1	岩块单轴压缩蠕变试验	109
8.2	岩块三轴压缩蠕变试验	112
8.3	承压板法蠕变试验	113
8.4	结构面直剪蠕变试验	115
8.5	岩体三轴压缩蠕变试验	117
9	岩体应力测试	119
9.1	孔壁应变法测试	119
9.2	孔径变形法测试	122
9.3	孔底应变法测试	127
9.4	水压致裂法测试	129
9.5	表面应变法测试	131
10	岩石声波测试	136
10.1	岩块声波测试	136
10.2	岩体声波测试	139
11	工程岩体观测	143
11.1	围岩收敛观测	143
11.2	钻孔轴向岩体位移观测	145

11.3	钻孔横向岩体位移观测	148
11.4	岩体表面倾斜观测	150
11.5	岩体锚杆载荷观测	153
11.6	岩体锚杆应力观测	155
11.7	岩体应力观测	157
11.8	岩体渗压观测	161
11.9	岩体声波观测	164
11.10	岩体声发射观测	166
12	试验成果综合整理	169
12.1	一般规定	169
12.2	几种主要的成果整理方法	170
附录 A	岩石试验管理基本要求	174
附录 B	试样采取要求	175
附录 C	试验洞开挖要求	176
附录 D	地质描述内容规定	178
附录 E	比重瓶校正	179
附录 F	液压千斤顶、液压枕和滚轴排率定	182
附录 G	岩体应力测试实测数据计算方法	186
	标准用词说明	198
	标准历次版本编写者信息	199
	条文说明	201

1 总 则

1.0.1 为统一水利水电工程岩石试验方法，增强试验成果可靠性和可比性，提高试验成果质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水利水电工程的岩石试验。

1.0.3 水利水电工程岩石试验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 本标准主要引用下列标准：

GB 50487 水利水电工程地质勘察规范

1.0.5 水利水电工程岩石试验除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 岩石 rock

岩块与岩体的总称。

2.1.2 岩样 rock sample

未经加工的岩石样品。

2.1.3 岩体 rock mass

赋存于一定地质环境，含不连续结构面且具有一定工程地质特征的地质体。

2.1.4 岩石标准试件 standard specimen for rock test

由钻孔岩心或坑探槽中采取岩块加工制成的圆柱体试件。试件直径应大于岩石最大颗粒粒径的 10 倍，高度与直径之比应为 2.0~2.5。

2.1.5 岩石含水率 water content of rock

试件在 105~110℃ 温度下烘至恒量时所失去水的质量与试件干质量的比值，以百分数表示。

2.1.6 岩石颗粒密度 grain density of rock

单位体积的岩石固相物质的质量。

2.1.7 岩石块体密度 block density of rock

单位体积的岩石试件质量。

2.1.8 岩石单轴抗压强度 uniaxial compressive strength of rock

岩石试件在无侧限条件下受轴向力作用破坏时，单位面积上所承受的载荷。

2.1.9 岩石直剪强度 direct shear strength of rock

岩石在不同的法向载荷条件下进行直剪试验，所获得的岩石的抗剪强度指标。

2.1.10 岩石变形模量 deformation modulus of rock

岩石试样在无侧限条件下轴向压应力与相应的轴向应变之比值。

2.1.11 岩石蠕变性质 creep property of rock

岩石蠕变是岩石流变的一种特殊形式，指当应力不变时，变形随时间延长而增大的现象。

2.1.12 岩体应力 rock stresses

岩体初始应力场或工程岩体经开挖扰动后应力场的总称。

2.1.13 岩石声波测试 sound wave measurement of rock

通过向岩石激发不同频率范围的声波信号，并被安装在岩石表面或内部的声波换能器所接收，以获得声波信号在岩石中传播的信息，如波速、振幅和频率等。

2.2 符 号

C_v ——玻璃体膨胀系数、偏差系数

C_1 ——比重瓶校正计算系数

CAI——耐磨指数值

c ——凝聚力

D_e ——点荷载试验等价岩心直径

E ——岩体变形模量或弹性模量

E_d ——动弹性模量

E_e ——弹性模量

E_0 ——变形模量

E_{50} ——岩石变形模量，即割线模量

f ——摩擦系数、试件振动频率

f_K ——参数标准值

f_p ——换能器发射频率

G ——剪切模量

G_d ——动剪切模量

H'_s ——校正后的回弹硬度值

$\overline{H_s}$ ——回弹硬度实测值的平均值

H_{si} ——第 i 个测点回弹硬度实测值
 I_d ——岩石耐崩解性指数
 I_s ——未经修正的岩石点荷载强度指数
 $I_{s(50)}$ ——经尺寸修正后岩石点荷载强度指数
 K ——岩体抗力系数
 K_{IC} ——断裂韧度
 K_d ——动体积模量
 K_f ——冻融系数
 k_w ——饱水系数
 K_0 ——岩体单位抗力系数
 L_f ——冻融质量损失率
 m_{T_0} ——比重瓶内水温度为 T_0 时, 瓶和水总质量
 m_{T_n} ——比重瓶内水温度为 T_n 时, 瓶和水总质量
 m_a ——试件浸水 48h 后的质量
 m_d ——试件烘干后的质量
 m_f ——冻融试验后试件饱和质量
 m_n ——涂封高分子树脂胶试件质量
 m_{nw} ——涂封高分子树脂胶试件水中称量
 m_r ——残留试件烘干质量
 m_s ——试件强制饱和后的质量
 m_w ——强制饱和试件在水中的称量
 m_0 ——试件烘干前的质量
 m_{lp} ——蜡封试件质量
 m_{lw} ——蜡封试件水中称量
 P_f ——冻融后饱和试件破坏载荷
 p_b ——岩体破裂压力
 p_r ——岩体重张压力
 p_s ——瞬时关闭压力
 p_v ——膨胀压力
 R ——单轴抗压强度、半径

R_f ——冻融试验后饱和单轴抗压强度
 R_s ——冻融试验前饱和单轴抗压强度
 S_H ——钻孔横截面上的最大平面主应力
 S_h ——钻孔横截面上的最小平面主应力
 V_d ——径向自由膨胀率
 V_h ——轴向自由膨胀率
 V_{hp} ——有侧向约束轴向膨胀率
 V_p ——纵波速度
 V_s ——横波速度
 δ_n ——试件自由振动的对数衰减率
 λ_d ——动拉梅系数，试件振动阻尼比
 μ ——岩石泊松比
 μ_d ——动泊松比
 ρ_d ——干密度
 ρ_l ——石蜡密度
 ρ_n ——高分子树脂胶密度
 ρ_p ——颗粒密度
 ρ_s ——饱和密度
 ρ_w ——试验温度下水的密度
 ρ_{wn} ——温度为 T_n 时水的密度
 ρ_{w0} ——温度为 T_0 时水的密度
 ρ_{wl} ——试验温度下试液密度
 ρ_0 ——天然密度
 σ_t ——抗拉强度
 φ ——内摩擦角
 ω_a ——自然吸水率
 ω_s ——饱和吸水率
 ω_0 ——含水率

3 基本规定

3.0.1 水利水电工程岩石试验应包括岩块物理力学性质试验、岩体变形试验、岩体强度试验、岩石蠕变试验、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 岩石试验应在了解工程地质条件、枢纽布置方案、设计意图、工程载荷作用方向及大小、建筑物特点和施工方法的基础上进行。岩石试验项目、试验方法、试验数量等应与 GB 50487 要求的各勘察设计阶段的深度相适应。

3.0.3 试验开展前，应收集和分析工程地质资料，结合设计方案和地质勘察工作编制岩石试验大纲。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。

3.0.4 岩石试验的技术管理、设备管理和安全管理应符合附录 A 的规定。

3.0.5 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与地质人员共同研究确定。试样采取应符合附录 B 的规定。

3.0.6 岩块物理力学性质试验用水宜采用洁净水。

3.0.7 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，试验洞开挖应符合附录 C 的

规定。

3.0.8 试验洞段以及试点或试体均应进行地质描述，地质描述内容应符合附录 D 的规定。

3.0.9 对于软岩、极软岩、软弱夹层以及断层破碎带，除应进行现场试验外，还应取样进行室内试验。试验过程中应收集试样的原状结构、颗粒成分、矿物成分、含水率等相关资料。

3.0.10 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招标设计和施工详图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。

3.0.11 岩体直剪试验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确定。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的岩体上或布置在岩层、岩性与之相同的岩体上。

3.0.12 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明显，或岩石蠕变对建筑物产生不利影响时，宜布置岩石蠕变试验。

3.0.13 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，并选择相应的岩体应力测试方法。

3.0.14 岩石声波测试应根据勘察设计、施工及运行阶段的需要布置，可与岩块试验、岩体试验和工程岩体观测配套进行。

3.0.15 工程岩体观测项目应根据观测目的和地质条件确定，观测断面应选择在建筑物关键地段、岩体性状变化最大或岩体稳定条件最不利位置以及其他代表性地段。

3.0.16 岩石试验及观测仪器设备应合理选型，定期进行计量或率定。比重瓶校正、液压千斤顶、液压枕和滚轴排率定应符合附录 E 和附录 F 的规定。

3.0.17 试验工作结束后，应编制试验报告。试验报告应包括下列内容：

1 报告正文包括工程概况、工程地质条件、主要岩石力学

问题、试验目的、试验内容、试验布置、试验方法、试验数量、试验成果整理与分析、试验最佳值及主要结论。

2 报告附图包括地质图、试验洞（坑、槽）或露头的展示图、钻孔柱状图、试件或试点（体）地质素描图、试验布置图、试验安装图、试验成果曲线。

3 报告编写、校核及逐级审核人员签名。



4 岩块物理性质试验

4.1 含水率试验

4.1.1 岩石含水率试验应采用烘干法，适用于各类岩石。

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、储存和制备过程中应保持天然含水率状态。

2 试件尺寸应大于组成岩石最大颗粒粒径的 10 倍。

3 试件质量宜为 40~200g。

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：

1 烘箱和干燥器。

2 天平（感量 0.01g）。

3 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 将试件放入烘箱，在 105~110℃ 的恒温下烘干，烘干时间不应少于 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 款、3 款步骤，直到相邻两次称量之差不超过一次称量的 0.1%。

5 称量准确至 0.01g。

4.1.6 试验成果整理应符合下列规定：

1 岩石含水率应按式 (4.1.6) 计算:

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

式中 ω_0 ——岩石含水率, %;

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 岩石吸水性试验可分为自然吸水率试验和饱和吸水率试验。岩石自然吸水率应采用自由吸水法测定, 饱和吸水率应采用煮沸法或真空抽气法测定。该试验适用于遇水不崩解、不溶解和干缩湿胀的岩石。

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) 试件高度不宜小于 50mm。

3 不规则试件应符合下列规定:

1) 边长为 40~60mm 的浑圆形岩块。

2) 试件质量宜为 150~200g。

4 含大颗粒岩石的试件直径或边长应大于最大颗粒粒径的 10 倍。

5 每组试件块数不应少于 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：
 - 1 钻石机、切石机、磨石机。
 - 2 烘箱、干燥器。
 - 3 天平（感量 0.01g）。
 - 4 水槽。
 - 5 真空抽气设备或煮沸设备。
- 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 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应强制饱和，并应符合下列规定：
 - 1) 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。
 - 2) 采用真空抽气法饱和试件时，饱和试件容器内的水面应高于试件，真空压力表读数宜为试验所在地大气压值，直至无气泡逸出为止，且抽气时间不得少于 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、饱和吸水率及饱水系数应分别按式 (4.2.6-1) ~ 式 (4.2.6-3) 计算：

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

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

$$k_w = \frac{\omega_a}{\omega_s} \quad (4.2.6-3)$$

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;

k_w ——饱水系数。

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采用比重瓶法或水中称量法。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 将岩石试样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 试件最小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 每组试件块数不应少于 3 块。

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：

- 1 钻石机、切石机、磨石机。
- 2 粉碎机、瓷研钵或玛瑙研钵、磁铁块。
- 3 筛（孔径 0.25mm）。
- 4 天平（称量 200g，感量 0.001g）。
- 5 烘箱和干燥器。
- 6 真空抽气设备或煮沸设备。
- 7 恒温水槽。
- 8 短颈比重瓶（容积 100mL）。
- 9 温度计（量程 0~50℃，最小分度值 0.5℃）。
- 10 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，每份岩粉质量宜为 15g。

3 将称量后的岩粉装入烘干的比重瓶内，注入试液（水或煤油）至比重瓶容积的 1/2 处。对含水溶性矿物的岩石，应使用煤油作试液。

4 当使用水作试液时，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。当采用真空抽气法排除气体时，真空压力表读数宜为试验所在地大气压值，抽气应抽至无气泡逸出为止，且继续抽气时间应不少于 1h。

6 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。

7 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。

8 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 6 款、7 款规定称瓶和试液的总质量。

9 本试验应进行两次平行试验。

10 称量应准确至 0.001g，温度应准确至 0.5℃。

4.3.7 水中称量法试验步骤应符合下列规定：

1 按 4.2.5 条 2~4 款的规定对试件烘干、自然吸水和强制饱和。

2 将强制饱和的试件置于水中称量装置上，将试件在水中称量，并测量水温。

3 称量准确至 0.01g，温度应准确至 0.5℃。

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应按式 (4.3.8-1) 计算：

$$\rho_p = \frac{m_{dp}}{m_1 + m_d - m_2} \rho_{w1} \quad (4.3.8-1)$$

式中 ρ_p ——颗粒密度，g/cm³；

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；

m_{dp} ——烘干岩粉的质量，g；

ρ_{w1} ——试验温度条件下试液密度，g/cm³。水的密度可按附录 E 中表 E.0.3-1 取值。

2 对于用煤油作试液时，煤油的密度应按式 (4.3.8-2) 计算：

$$\rho'_0 = \frac{m'_1 - m_3}{m_{10} - m_3} \rho_w \quad (4.3.8-2)$$

式中 ρ'_0 ——煤油密度，g/cm³；

ρ_w ——水的密度，g/cm³；

m'_1 ——瓶和煤油总质量，g；

m_{10} ——瓶和水总质量，g；

m_3 ——比重瓶质量，g。

3 比重瓶法试验两次平行测定的允许偏差为 $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ ，应取两次测值的平均值作为试验结果。

4 水中称量法试验岩石颗粒密度应按式（4.3.8-3）计算：

$$\rho_p = \frac{m_d}{m_d - m_w} \rho_w \quad (4.3.8-3)$$

式中 m_w ——强制饱和试件在水中的称量，g。

5 计算值精确至 0.01g/cm^3 。

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、瓶和试液及岩粉总质量。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、试件在水中的称量、水的密度。

4.4 块体密度试验

4.4.1 岩石块体密度试验可采用量积法、水中称量法或密封法。量积法适用于能制备成规则试件的各类岩石，水中称量法适用于除遇水崩解、溶解和干缩湿胀的其他各类岩石，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 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 试件两端面的不平行度允许偏差为 $\pm 0.05\text{mm}$ 。
- 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 4.3.3 条的规定。

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，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：

- 1 钻石机、切石机、磨石机和车床。
- 2 烘箱和干燥器。
- 3 天平（称量 200g，感量 0.01g）。
- 4 游标卡尺（量程 200mm，最小分度值 0.01mm）。
- 5 测量平台。
- 6 石蜡及融蜡设备。
- 7 水中称量装置。
- 8 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 测量天然密度时，应称试件在天然状态下的质量。

4 测量烘干密度和饱和密度时，应按 4.2.5 条 2~4 款中的规定将试件烘干后称量和饱和后称量。

5 长度测量准确至 0.01mm，称量准确至 0.01g。

4.4.9 水中称量法试验步骤应符合 4.3.7 条的规定。

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蜡膜，厚度宜为 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，应重新试验。

5 称量准确至 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。可取聚氯乙烯树脂和环己酮质量之比为 1：4，先将粉末状的树脂倒入磨口玻璃瓶内，然后再将环己酮加入，用玻璃棒搅拌均匀，盖好瓶口，待粉末完全溶解呈透明状胶液后即可使用。

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 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应按式 (4.4.12-1)～式 (4.4.12-3) 计算：

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

$$\rho_d = \frac{m_d}{AH} \quad (4.4.12-2)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{AH} \quad (4.4.12-3)$$

式中 ρ_0 ——天然密度，g/cm³；

ρ_d ——干密度，g/cm³；

ρ_s ——饱和密度，g/cm³；

A ——试件截面积，cm²；

H ——试件高度，cm。

2 水中称量法岩石块体密度应按式 (4.4.12-4) ~ 式 (4.4.12-6) 计算:

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

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

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

3 石蜡密封法岩石块体密度应按式 (4.4.12-7) 和式 (4.4.12-8) 计算:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{\frac{m_{lp} - m_{lw}}{\rho_w} - \frac{m_{lp} - m_0}{\rho_l}} \quad (4.4.12-7)$$

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

式中 m_{lp} ——蜡封试件质量, g;

m_{lw} ——蜡封试件水中称量, g;

ρ_l ——石蜡密度, g/cm³。

4 高分子树脂胶涂料密封法岩石块体密度应按式 (4.4.12-9) 和式 (4.4.12-10) 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/cm³。

5 岩石孔隙率应按式 (4.4.12-11) 计算:

$$n_p = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_p}\right) \times 100 \quad (4.4.12-11)$$

式中 n_p ——岩石孔隙率, %。

6 密度计算精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ，孔隙率计算精确至 0.01% 。

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、水的密度、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 岩石膨胀性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。

2 自由膨胀率试验每组试件数量不应少于 3 个，试件尺寸应符合下列规定：

1) 圆柱体试件直径宜为 $50\sim 60\text{mm}$ ，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 $50\sim 60\text{mm}$ ，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应少于 3 个，试件应为圆柱体，直径宜为 50mm ，其尺寸与试验金属套环直径的允许偏差为 $-0.1\sim 0\text{mm}$ ，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，同一膨胀方向每组试件的数量不应少于 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。

3 试件加工方法。

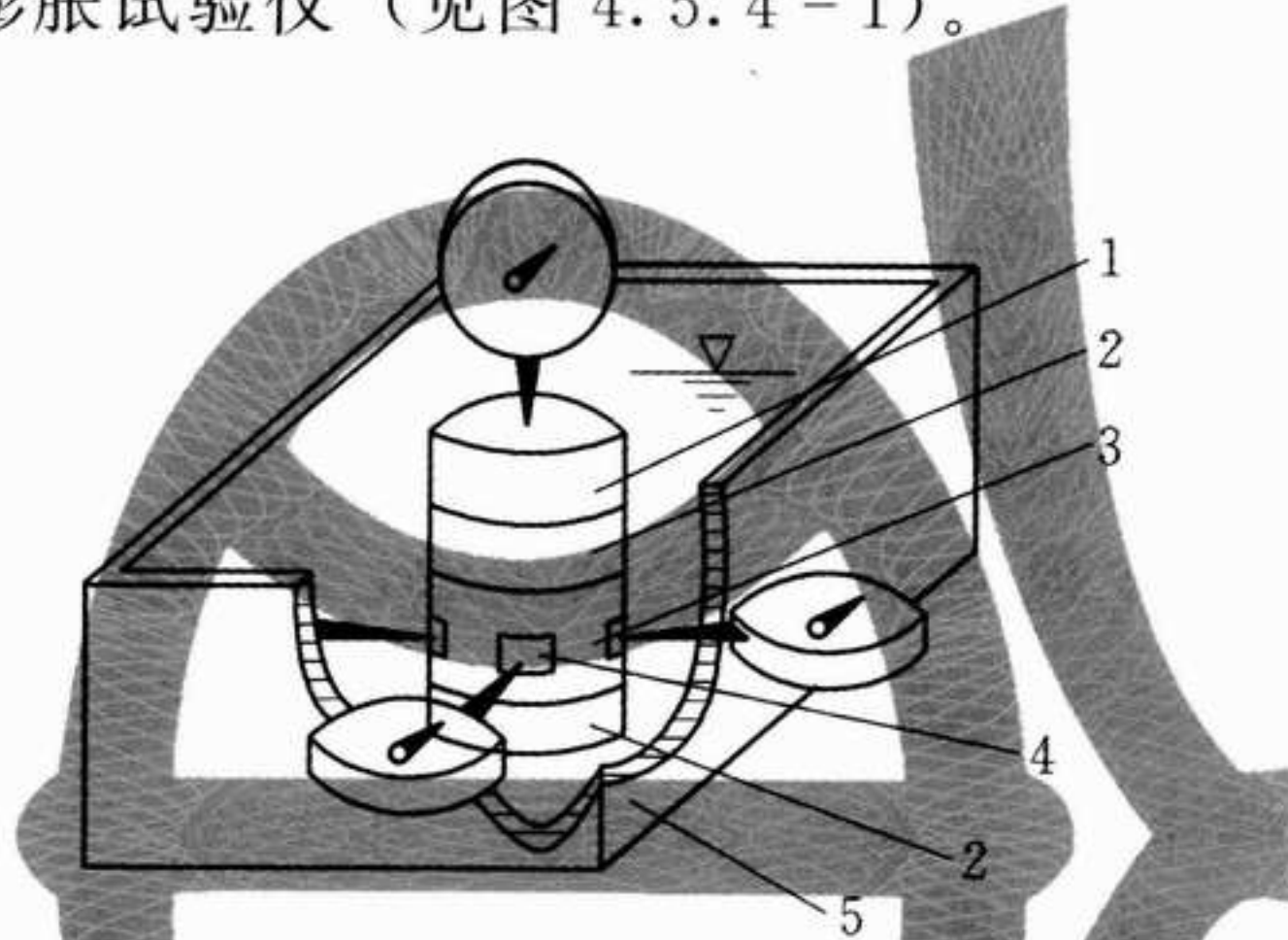
4.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

1 钻石机、切石机、磨石机和车床。

2 测量平台、角尺，游标卡尺、放大镜。

3 天平（称量不小于 500g，感量为 0.01g）。

4 自由膨胀试验仪（见图 4.5.4-1）。



1—铝板；2—透水板；3—试样；4—紫铜片；5—容器

图 4.5.4-1 自由膨胀试验仪示意图

5 侧向约束膨胀率试验仪。

6 膨胀压力试验仪、压力传感器（见图 4.5.4-2）。

7 千分表。

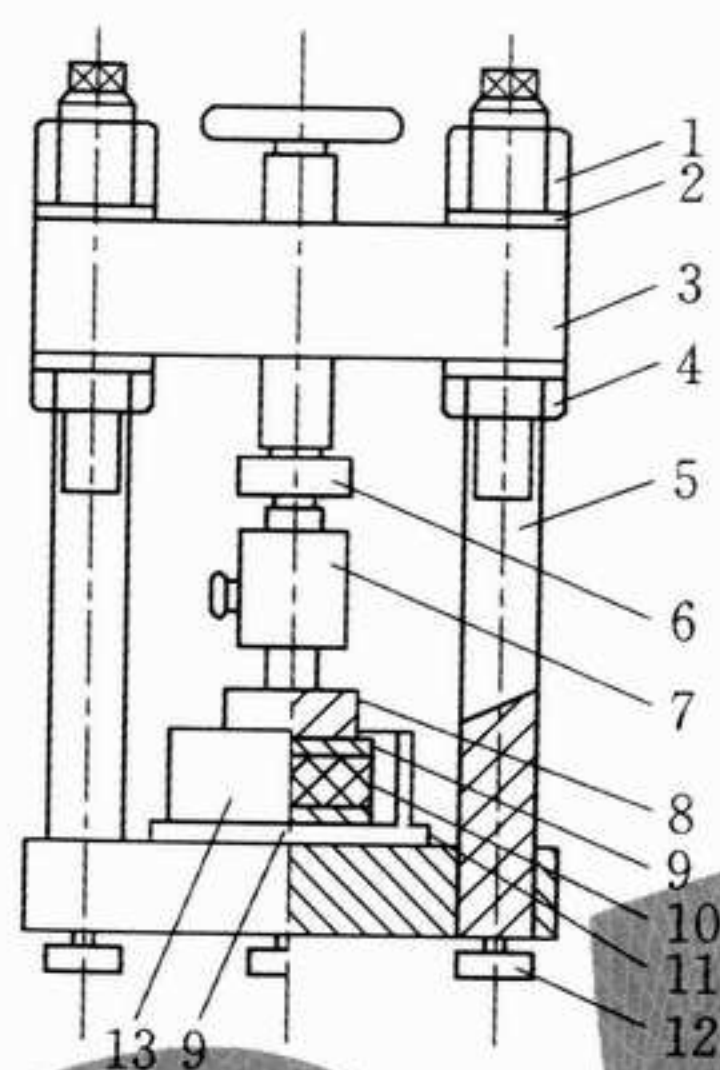
8 温度计（量程 50℃，最小分度值 0.5℃）。

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粘贴一块紫铜片。

3 每隔 10min 记录千分表读数一次，直至连续三次读数不变。



- 1—螺母；2—平垫圈；3—横梁；4—螺母；5—立柱；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

图 4.5.4-2 岩石膨胀压力试验仪示意图

- 4 缓慢向容器内注水，直至淹没上部透水板并立即读数。
- 5 第一小时，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，但浸水试验时间不应少于 48h。
- 6 整个试验过程中应保持水位不变，水温变化不应大于 2℃。
- 7 试验过程及试验结束后，应详细描述试件的崩解、开裂、掉块、表面泥化和软化现象。根据需要可对试块进行矿物鉴定、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。金属载荷板质量应对试件产生 5kPa 的压力，金属套环高度不应小于试件高度和两块透水板厚度之和。

- 2 试验步骤及稳定标准应符合 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鉴定、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,使加压的中心线和试件中心线同轴,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维持在 0.001mm 以内。

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 1h 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应少于 48h。

6 试验过程中应保持水位不变,水温变化不应大于 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鉴定、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应按式 (4.5.8-1) ~ 式 (4.5.8-4) 计算:

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

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

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

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

式中 V_h ——轴向自由膨胀率, %;
 V_d ——径向自由膨胀率, %;
 V_{hp} ——有侧向约束轴向膨胀率, %;
 p_v ——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 绘制侧向约束轴向膨胀率 V_{hp} 与时间 t 的关系曲线, 确定最大侧向约束轴向膨胀率。

5 绘制膨胀压力 p_v 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 岩石耐崩解性试验可适用于遇水易崩解的各类岩石。

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率, 并密封装箱。

2 试件为浑圆形, 每个试件质量应为 40~60g。

3 每组试件数量不应少于 20 个。

4.6.3 试件描述应包括岩石名称、颜色、矿物成分、结构、构造、风化程度、胶结物性质。

4.6.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 烘箱及干燥器。
- 2 天平（称量大于 2000g，感量 0.01g）。
- 3 温度计（量程 0~50℃，最小分度值 0.5℃）。
- 4 耐崩解性试验仪。由动力装置、圆柱形筛筒和水槽组成（见图 4.6.4），其中圆柱形筛筒长 100mm，直径 140mm，筛孔直径 2mm。

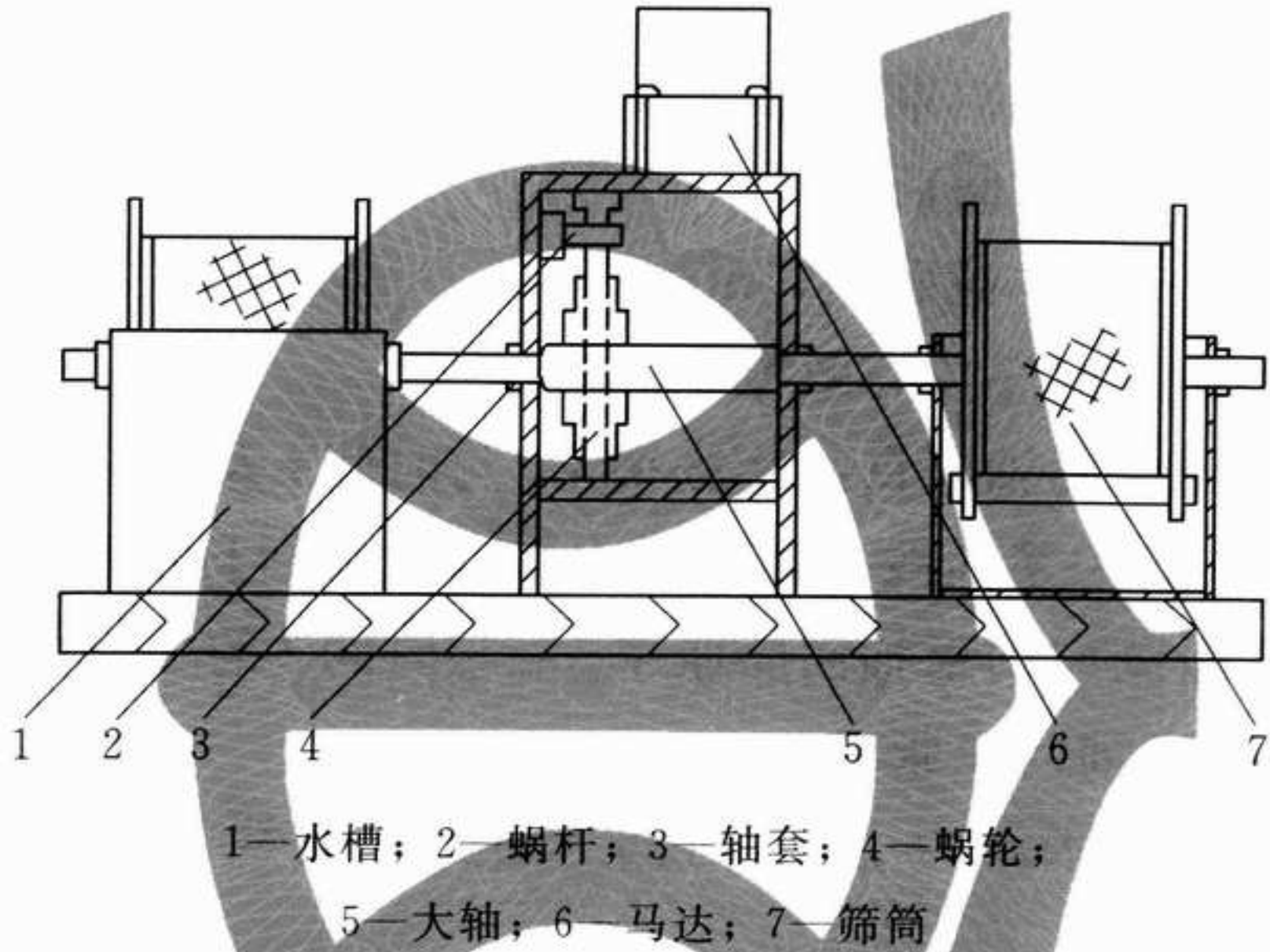


图 4.6.4 耐崩解性试验仪示意图

4.6.5 试验步骤应符合下列规定：

- 1 烘干筛筒并称量。
- 2 将试件装入耐崩解性试验仪的圆柱形筛筒内，按 4.1.5 条 2 款规定烘干，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于水槽内，向水槽内注水，宜使水位保持在转动轴下 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按 4.1.5 条 2 款规定烘干，在干燥器内冷却至室温并称量。
- 4 重复本条 2 款、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 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

7 试验结束后，应描述残留试件、水的颜色和水中沉积物。根据需要，可对水中沉积物进行颗粒分析，含水量测定和黏土矿物分析。

8 称量准确至 0.01g 。

4.6.6 试验成果整理应符合下列规定：

1 岩石耐崩解性指数应按式 (4.6.6) 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耐崩解性指数 I_{d2} 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。

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 岩石冻融试验应采用直接冻融法，分为常规冻融试验和特殊冻融试验，适用于可制备成规则试件各类岩石。

4.7.2 试件制备应符合下列规定：

1 试件应采用标准试件，对于非均质粗粒岩石或非标准钻孔岩心，可采用非标准试件。

2 标准试件可用钻孔岩心或坑探槽中采取岩块加工制成。试件直径宜为 $48 \sim 54\text{mm}$ ，且应大于岩石最大颗粒粒径的 10 倍。试件高度与直径之比应为 $2.0 \sim 2.5$ 。试件在采取、运输和制备过程中应避免扰动。

3 对于非标准试件，试件高径比不宜小于 2.0。

4 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。

5 试件精度应符合 4.4.2 条 2~4 款的规定。

6 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、裂隙分布、风化蚀变特征。

2 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：

1 低温冰箱（常规冻融试验最低制冷温度 -25°C ，特殊冻融试验最低制冷温度 -50°C ）。

2 钻石机、切石机、磨石机和车床。

3 测量平台、角尺、游标卡尺和放大镜。

4 天平（称量不小于 2000g，感量 0.01g）。

5 烘箱和干燥器。

6 试件饱和设备。

7 材料试验机。

8 白铁皮盒（长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 210mm $\times$ 210mm $\times$ 200mm）和铁丝架。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。

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 4.2.5 条 2~5 款的规定。

2 取 3 块饱和试件进行冻融前的单轴抗压强度试验。

3 将另外 3 块饱和试件置入白铁皮盒内的铁丝架中，再一起置入低温冰箱，在 $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 温度下冷冻时间不应小于 4h，然后取出白铁皮盒，往盒内注水浸没试件，水温应保持在 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ，融解时间不应小于 4h，完成一个循环。特殊冻融试验在 $(-40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 温度下冷冻时间不应小于 8h，融解时间不应小于 8h。

4 冻融循环次数应不少于 25 次。根据工程需要,冻融循环次数可选用 50 次或 100 次。

5 每完成一次冻融循环,应检查各试件有无掉块、裂缝等,观察其破坏过程和裂隙开度变化情况。试验结束后全面检查,并记录。

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应按式 (4.7.6-1) ~ 式 (4.7.6-4) 计算:

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

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

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

$$K_f = \frac{\overline{R_f}}{\overline{R_s}} \quad (4.7.6-4)$$

式中 L_f ——冻融质量损失率, %;

R_s ——冻融前饱和单轴抗压强度, MPa;

R_f ——冻融后饱和单轴抗压强度, 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 ——试件截面积, mm^2 ;

$\overline{R_f}$ ——冻融试验后饱和单轴抗压强度平均值, MPa;

$\overline{R_s}$ ——冻融试验前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数字。

3 冻融质量损失率和冻融系数计算精确至 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、冻融循环次数、冻融前后饱和试件质量、破坏载荷、试验人员、试验日期。

4.8 硬度试验

4.8.1 岩石的硬度试验可采用施密特回弹法，适用于除极软岩以外的各类岩石。

4.8.2 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、洞室中采取方块状岩块。试件在采集和制备过程中应避免扰动。

2 岩心试件直径不宜小于 50mm，试件长度与直径之比不宜小于 2.0；方块状试件边长不宜小于 160mm，且回弹方向厚度不宜小于 100mm。

3 试件试验面应平整并除尘，不得有凹坑和裂纹等缺陷。

4 现场实施回弹测试时，测点处岩体的试验面局部范围内无裂隙或结构面。

5 每个试件同一冲击方向试点数量不应少于 20 个。

4.8.3 试件描述应包括下列内容。

1 岩样采集地点。

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、裂隙以及与试验方向的关系。

5 含水状态。

4.8.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

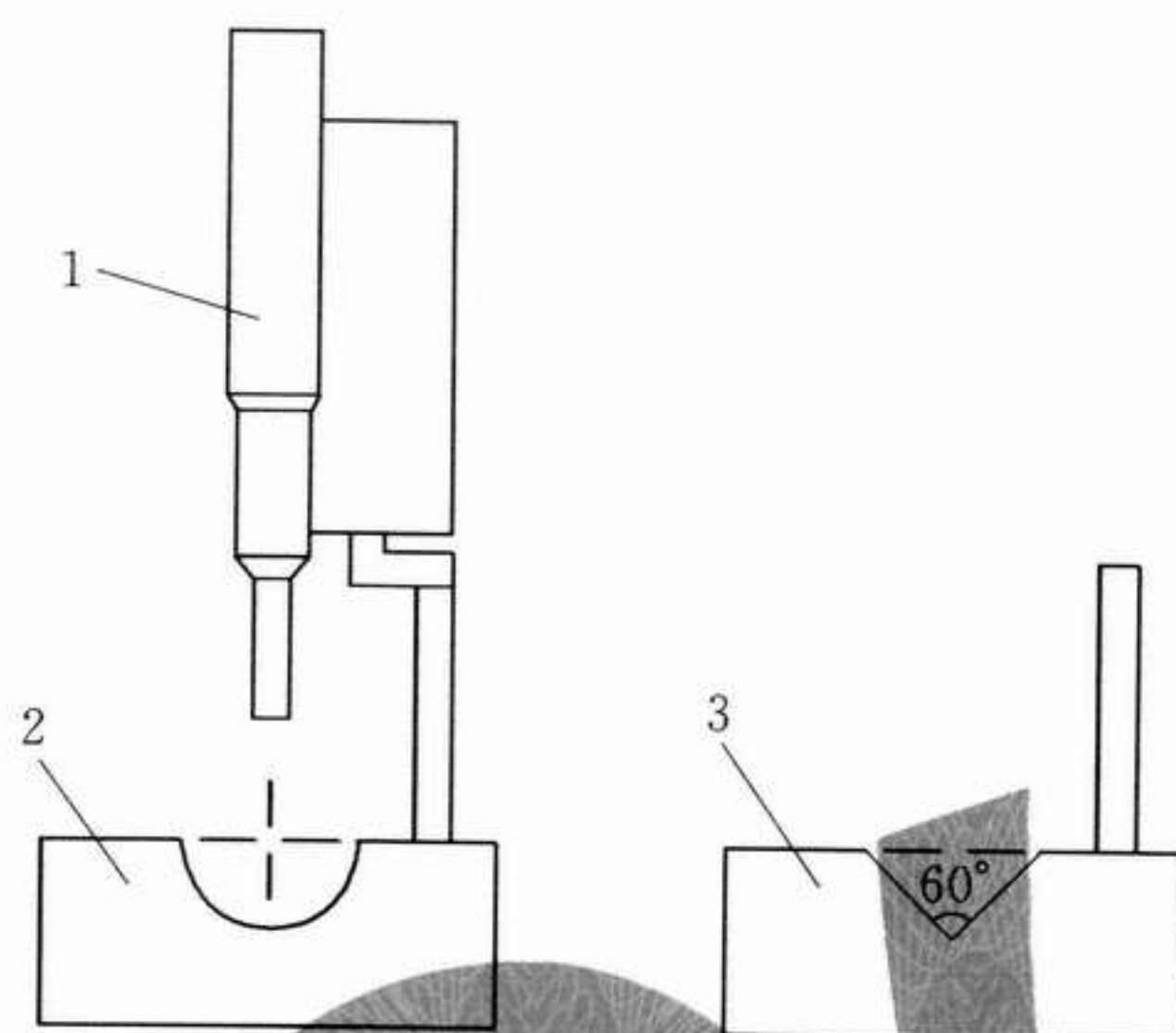
1 钻石机、切石机、磨石机。

2 游标卡尺（量程 0~200mm，最小分度值 0.01mm）、靠尺。

3 施密特回弹仪（见图 4.8.4）。

4 带槽金属底座（质量不小于 20kg）。

5 标准钢砧。



1—施密特回弹仪（L型或N型）；2—带半圆形槽的底座；3—带V形槽底座

图 4.8.4 施密特回弹仪和试件安装底座

4.8.5 试验步骤应符合下列规定：

1 试验前应使用标准钢砧率定施密特回弹仪，率定数据不应少于 10 个回弹硬度测试值。

2 室内岩心试件应充分夹持在半圆形槽形底座或 V 形槽底座内，且槽面至少能容纳岩心 120° 的弧形侧面，在试验过程中底座应固定。方块试件可通过夹具直接固定在试验台面上。

3 对试件目标测点进行回弹冲击。在确定目标测点时，岩心试样的测点离边缘最小距离不应小于试件半径；方块试样的测点离边缘最小距离不应小于 0.5 倍的厚度。同一冲击方向试点最小间距不应小于 20mm。当岩心试件某一方位冲击测点不够时，可将岩心转动 90° 或 180° ，重新固定，选择测点进行回弹冲击。

4 现场测试时，施密特回弹仪冲击回弹方向可采用水平向、垂直向上及垂直向下等 3 种方向，每种方向误差不应大于 5° 。现场测试方向不满足以上要求时，应根据回弹方向校正曲线对测试结果校正，并记录测试方向。

5 当试件表面开裂或破坏，试验数据无效。

6 每个试件的测点不应少于 20 个，舍去 3 个最大值和 3 个

最小值后计算算术平均值。

4.8.6 试验成果整理应符合下列规定：

- 1 回弹硬度值 H_s 的校正系数 F 应按式 (4.8.6-1) 计算：

$$F = \frac{H}{H_m} \quad (4.8.6-1)$$

式中 F ——回弹仪的校正系数；

H ——钢砧的回弹硬度标准值；

H_m ——在标准钢砧上测试 10 次的回弹硬度平均值。

- 2 校正后的回弹硬度值 H'_s 应按式 (4.8.6-2)、式 (4.8.6-3) 计算，计算值取整数：

$$H'_s = F \overline{H_s} \quad (4.8.6-2)$$

$$\overline{H_s} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{si}}{n} \quad (4.8.6-3)$$

式中 H'_s ——校正后的回弹硬度值；

$\overline{H_s}$ ——回弹硬度实测值的平均值；

H_{si} ——第 i 个测点回弹硬度实测值；

n ——有效测点数。

4.8.7 试验记录应包括岩石名称、岩样编号、试件编号、含水状态、试验面编号、试件尺寸、施密特回弹仪类型（L 型或 N 型）、夹持底座类型、测试方向、测试方向与试件各向异性关系、试验读数、试验人员、试验日期。

4.9 磨耗性试验

4.9.1 岩石磨耗性试验可采用矿物硬度划痕法，适用于各类岩石。

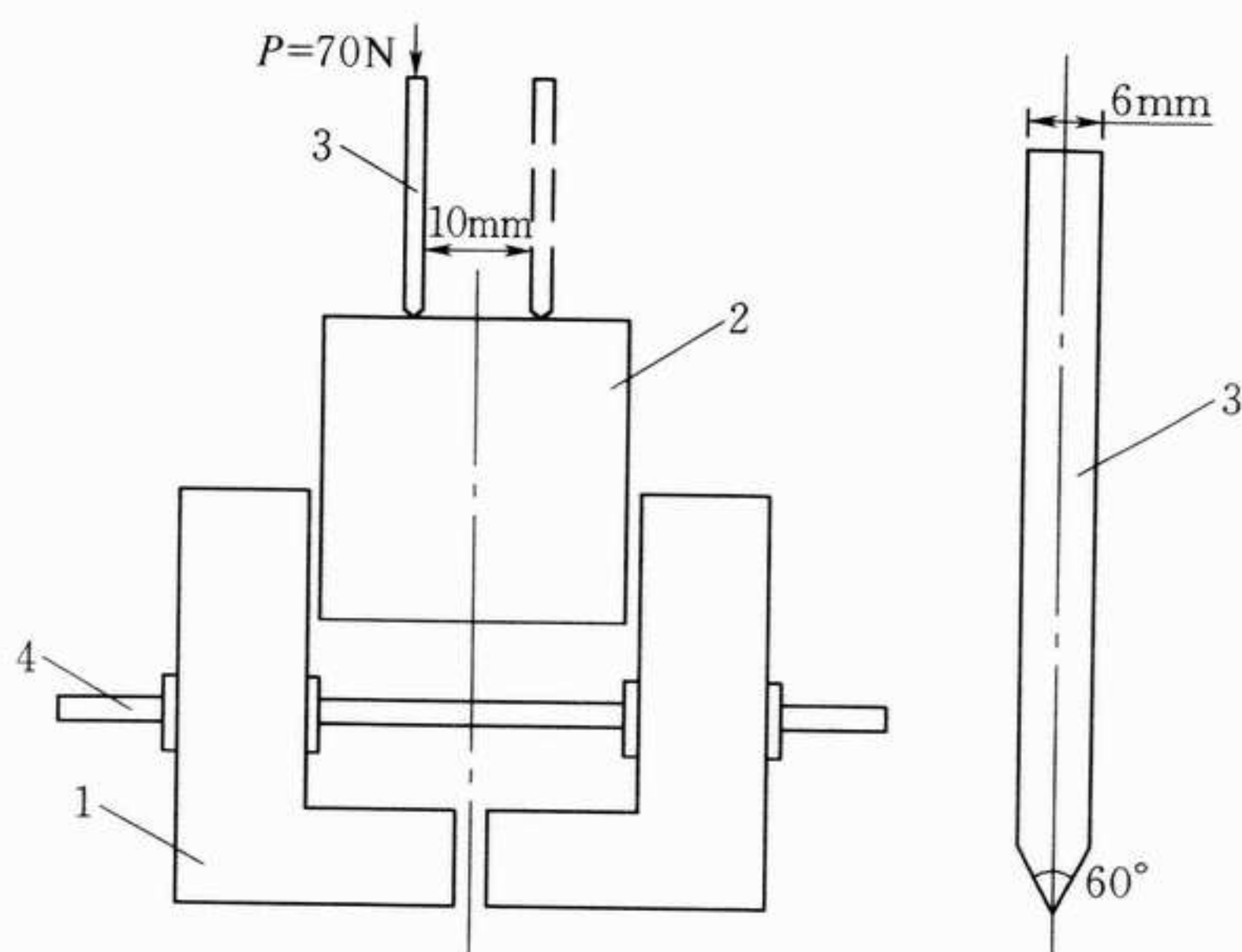
4.9.2 试件制备应符合下列规定：

- 1 试件可采用圆柱体或方柱体形状。

- 2 圆柱体直径宜为 48~54mm，高度宜为 20~30mm；方柱体试件最小边长不宜小于 60mm。

- 3 试验面宜为岩样的新鲜断口面或金刚石锯片切割面。

- 4 应选择每块试件相邻的三个面作为划痕面。
- 5 每组试件块数不应少于 5 块。
- 4.9.3 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 含水状态。
 - 4 试件加工过程中出现的问题。
- 4.9.4 试验设备应包括下列各项：
 - 1 岩石磨耗性测试仪（见图 4.9.4）。
 - 2 专用钢针 [洛氏硬度 HRC (55±1)，抗拉强度 2000MPa]。
 - 3 显微镜（最小放大倍数 25 倍）。



1—试件固定架；2—岩石试样；3—专用钢针；4—固定杆件

图 4.9.4 岩石磨耗性测试仪

4.9.5 试验步骤应符合下列规定：

- 1 每组试样应备 30 根钢针。试验前应在显微镜下测量每根钢针针尖直径的初值 d_{i1} ，准确至 0.01mm。
- 2 在磨耗仪构架上安装钢针并使针尖与试件划痕面轻轻接触，应避免钢针针尖撞磨造成人为误差。
- 3 安装好钢针后，先保持垂直恒定重力 70N，然后施加水

平力使钢针在 1s 内沿水平方向直线移动 10mm。

4 取下划痕后的钢针，可采用侧视或者俯视方法在显微镜下测量钢针直径终值 d_{i2} 。钢针磨耗后的端面直径在显微镜下测量时，最小放大倍数为 25 倍，读数准确至 0.01mm。

5 应在每个试件的三个相邻面上划痕两次，两次划痕方向近似正交，取其平均值作为每个面的耐磨值。应取三个面的耐磨值的平均值作为该试件的岩石耐磨指数值。

6 按本条 2~4 款步骤进行其余试件的磨耗性试验。

4.9.6 试验成果整理应符合下列规定：

1 每根钢针的岩石耐磨值应按式 (4.9.6-1) 计算：

$$CAI_i = \frac{d_{i2} - d_{i1}}{d_0} \times 10 \quad (4.9.6-1)$$

式中 CAI_i ——第 i 根钢针的岩石耐磨指数值；

d_{i1} ——第 i 根钢针针尖直径的初值，mm；

d_{i2} ——第 i 根钢针针尖磨损后的直径终值，mm；

d_0 ——单位系数，取 1mm。

2 岩石耐磨指数值应按式 (4.9.6-2) 计算：

$$CAI = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} CAI_i \quad (4.9.6-2)$$

式中 CAI ——耐磨指数值。

3 当试验所用的钢针硬度与本标准所规定的硬度不符时，可采用式 (4.9.6-3) 进行校正或等效计算。

$$CAI = \frac{0.415CAI_{(x)}}{1 - 0.0107x} \quad (4.9.6-3)$$

式中 x ——洛氏硬度值；

$CAI_{(x)}$ ——采用洛氏硬度为 x 值时计算的耐磨指数值。

4 计算值精确至 0.1。

4.9.7 试验记录应包括岩石名称、岩样编号、试件编号、钢针编号、试验前钢针针尖直径初值、钢针磨损后的针尖直径终值、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 岩石单轴压缩变形试验应采用电阻应变片法或位移计法,适用于可制备成规则试件的各类岩石。较软岩、软岩和极软岩宜采用位移计法。

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 4.7.2 条 1~5 款的规定。

3 试件加工精度应符合 4.4.2 条 2~4 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 4.2.5 条 2~4 款的规定。

5 同一含水状态、同一加压方向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 含水状态。

4 试件加工过程中出现的问题。

5 贴片位置或位移计触点部位。

5.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

1 钻石机、锯石机、磨石机。

2 测量平台。

3 烘箱和饱和设备。

4 万用电表、兆欧表。

5 静态电阻应变仪。

6 电阻应变片或位移计(机械式或电测式)。

7 测量表架。

8 游标卡尺（量程 0~200mm，最小分度值 0.01mm）。

9 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，每次循环应退载至 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粒径的 10 倍，并应小于试件半径。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 $\pm 0.1\Omega$ 。

2 在试件中部选定互相垂直的两对面，以相对面为一组，分别为贴轴向、径向应变片的位置，贴片位置应避开裂隙或斑晶。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，并用酒精或丙酮擦洗干净。

3 在贴片位置均匀涂抹一层防潮底胶，厚度不应大于 0.1mm，范围宜为 20mm×30mm。

4 应变片应牢固地贴在试件上，轴向、径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，厚宜为 2mm。系统绝缘电阻值应大于 200M Ω 。宜采用半桥连接方式把应变片连接到静态电阻应变仪上。

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，接触载荷内相对两轴向应变值两次读数之差不得大于 1 倍。

8 按规定的加载方式和载荷分级，以 $0.2 \sim 1.0 \text{ MPa/s}$ 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，描述破坏后的试件。

5.1.7 位移计法试验步骤应符合下列规定：

1 采用位移计法测量岩石试件变形时，测量轴向变形和径向变形的位移计均不宜少于 2 支。

2 对于变形较小的坚硬岩和较坚硬岩，可先将位移计安装在专用夹具上，再把夹具卡在试件上，直接测量试件中部的轴向、径向变形。对于变形较大的软岩和极软岩，可将位移计安装在磁性表架上，磁性表架安装在试验机的下承压板上，轴向位移计触点与上承压板边缘接触，径向位移计触点直接与试件接触，测读初始读数。

3 两对相互垂直的轴向和径向位移计应分别安装在试件直径的对称位置上。

4 其他步骤应符合 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 各级应力应按式 (5.1.8-1) 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， mm^2 。

2 位移计法的轴向应变值、径向应变值应按式 (5.1.8-2)、式 (5.1.8-3) 计算：

$$\epsilon_h = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.1.8-2)$$

$$\epsilon_d = \frac{\Delta D}{D} \quad (5.1.8-3)$$

式中 ϵ_h ——轴向应变；

ϵ_d ——径向应变；

ΔL ——轴向变形平均值，mm；

ΔD ——与 ΔL 同载荷下径向变形平均值，mm；

L ——轴向测量标距或试件高度，mm；

D ——试件直径，mm。

3 绘制应力 σ 与应变 ϵ 关系曲线。

4 弹性模量、变形模量和泊松比应按式 (5.1.8-4) ~ 式 (5.1.8-7) 计算：

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

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\epsilon_{h50}} \quad (5.1.8-5)$$

$$\mu_e = \frac{\epsilon_{db} - \epsilon_{da}}{\epsilon_{hb} - \epsilon_{ha}} \quad (5.1.8-6)$$

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

式中 E_e ——岩石弹性模量，MPa；

E_{50} ——岩石变形模量，即割线模量，MPa；

μ_e ——岩石弹性泊松比；

μ_{50} ——与 ϵ_{d50} 和 ϵ_{h50} 相应的泊松比。

σ_a ——应力与轴向应变关系曲线上直线段起始点的应力值，MPa；

σ_b ——应力与轴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 时的轴向应变值；

ϵ_{hb} ——应力为 σ_b 时的轴向应变值；

ϵ_{da} ——应力为 σ_a 时的径向应变值；

ϵ_{db} ——应力为 σ_b 时的径向应变值；

σ_{50} ——抗压强度 50% 时的应力值，MPa；

ϵ_{h50} ——应力为 σ_{50} 时的轴向应变值；

ϵ_{d50} ——应力为 σ_{50} 时的径向应变值。

5 岩石应力、弹性模量和变形模量值取三位有效数字，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、轴径向应变值或位移计读数、试验人员、试验日期。

5.2 单轴抗压强度试验

5.2.1 岩石单轴抗压强度试验适用于可制备成规则试件的各类岩石。

5.2.2 试件制备除应符合 4.7.2 条 1~4 款的规定外，还应符合下列规定：

- 1 试件加工精度应符合 4.4.2 条 2~4 款的规定。
- 2 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 4.1.5 条 2~4 款的规定。

- 3) 饱和状态应符合 4.2.5 条 3 款、4 款的规定。

- 3 需要测试软化系数时，应同时制备烘干状态和饱和状态试件各 1 组。

- 4 同一含水状态、同一加压方向下每组试件数量不应少于 3 个。

5.2.3 试件描述应符合 5.1.3 条 1~4 款的规定。

5.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻石机、锯石机、磨石机和车床。

- 2 测量平台、角尺、游标卡尺（量程 0~200mm，最小分度值 0.01mm）、放大镜。

- 3 烘箱，干燥器和饱和设备。

- 4 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 5.1.6 条 6 款的规定。
- 2 试验调平应符合 5.1.6 条 7 款的规定。
- 3 以 0.2~1.0MPa/s 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应按式 (5.2.6-1)、式 (5.2.6-2) 计算：

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

$$\eta = \frac{\overline{R_s}}{\overline{R_d}} \quad (5.2.6-2)$$

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；

$\overline{R_s}$ ——饱和状态下单轴抗压强度平均值，MPa；

$\overline{R_d}$ ——烘干状态下单轴抗压强度平均值，MPa。

- 2 强度计算值取三位有效数字，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、试件含水状态、试件尺寸、加载方向、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 岩石三轴压缩强度试验应采用等侧向压力，适用于可制备成圆柱体试件各类岩石。

5.3.2 试件制备除应符合 4.7.2 条 1~4 款的规定外，还应符合下列规定：

- 1 试件加工精度应符合 4.4.2 条 2~4 款的规定。

2 同一含水状态下每组试件的数量不应少于 5 个, 高应力条件下每组试件的数量不应少于 10 个。

5.3.3 试件描述应符合 5.1.3 条 1~4 款的规定。

5.3.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

1 钻石机、锯石机、磨石机和车床。

2 测量平台、角尺、游标卡尺 (量程 0~200mm, 最小分度值 0.01mm)、放大镜。

3 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, 先在试件表面涂抹防油胶液薄层, 胶液凝固后套上耐油薄橡皮套或塑胶套。

2 试件安装应满足三轴试验机要求, 并排出压力室内的空气。

3 先以 0.05MPa/s 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 0.2~1.0MPa/s 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。采用人工读数时, 测值不宜少于 10 组。

5 描述破坏后的试件。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应按式 (5.3.7-1) ~ 式 (5.3.7-3) 计算:

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

$$\epsilon_{hu} = \frac{U_{hs}}{L} \quad (5.3.7-2)$$

$$\epsilon_{du} = \frac{U_{ds}}{D} \quad (5.3.7-3)$$

式中 σ_1 ——轴向应力, MPa;

ϵ_{hu} ——轴向应变;

ϵ_{du} ——径向应变;

P ——轴向破坏载荷, N;

A ——试件截面面积, mm^2 ;

L ——轴向测量标距, mm;

U_{hs} ——试件轴向压缩变形量, mm;

U_{ds} ——试件径向变形, 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拟合关系曲线, 在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 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与径向应变 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。

4 高应力条件下的三轴压缩强度参数宜采用莫尔-库仑强度准则按 2~3 段分段拟合确定。

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、径向变形、试验人员、试验日期。

5.4 抗拉强度试验

5.4.1 岩石抗拉强度试验应采用劈裂法, 适用于可制成规则试件各类岩石。

5.4.2 试件制备应符合下列规定:

1 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。

2 试件加工精度应符合 4.4.2 条 2~4 款的规定。

3 试件的含水状态可根据需要选择。天然状态、烘干状态和饱和状态应符合 5.2.2 条 2 款的规定。

4 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。

5 同一含水状态、同一加压方向下每组试件数量不应少于 3 个。

5.4.3 试件描述应符合 5.1.3 条 1~4 款的规定。

5.4.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

1 钻石机、锯石机、磨石机和车床。

2 测量平台、角尺、游标卡尺（量程 0~200mm，最小分度值 0.01mm）、放大镜。

3 烘箱，干燥器和饱和设备。

4 垫条（钢丝垫条或胶木板垫条）。

5 材料试验机。

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，对于软岩和较软岩应选用宽度与试件直径之比为 0.08~0.1 的胶木板为垫条。

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，作用力应通过两垫条确定的平面。

3 以 0.1~0.3MPa/s 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确定的平面，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，描述破坏后的

试件。

5.4.6 试验成果整理应符合下列规定：

- 1 岩石抗拉强度应按式 (5.4.6) 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字。

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 岩石直剪强度试验可采用平推法，适用于岩块、结构面以及混凝土与岩石的接触面直剪试验。

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 岩石直剪试件的直径或边长不宜小于 50mm，试件高度宜大于直径或边长。

- 3 结构面直剪试件的边长不宜小于 150mm，试件高度宜与边长相等，含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宜为正方体，边长不宜小于 150mm。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，起伏差宜为边长的 1%~2%。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。

- 5 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。

- 6 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，达到规定的龄期后试验。同组试验应在同一龄期下进行。

7 根据需要试件可采用天然含水状态或饱和状态。

8 同一含水状态每组试件不应少于 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況。

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：

1 试件制备设备。

2 锯石机。

3 钢模具。

4 试件养护设备。

5 直剪试验仪。

6 位移测表。

5.5.5 试验安装应符合下列规定：

1 将试件置于直剪试验仪的剪切盒内，用填料将试件与剪切盒内壁的间隙填实，应使试件与剪切盒成为一整体。试件安装受剪方向宜与工程岩体受力方向一致，预定剪切面应位于剪切缝中部。

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 2 支，并应对称布置。

3 预留剪切缝宽度应为试件剪切方向长度的 5%，或为结构面充填物的厚度。

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 各试件施加的法向载荷宜按等差级数分别施加,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 30min 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不变。

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 剪切位移增量明显变大,在剪应力 τ 与剪切位移 u_s 关系曲线上出现明显突变段。

2 总剪切位移达到试件边长的 10%。

5.5.9 剪切破坏后剪切面的描述应包括下列内容:

1 剪切面破坏情况、擦痕分布、方向和长度。

2 剪切面起伏差及沿剪切方向变化曲线。

3 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测定填充物物理性质和黏土矿物成分。

5.5.10 试验成果整理应符合下列规定:

1 法向应力和剪应力应按式 (5.5.10-1)、式 (5.5.10-2) 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 ——剪切面积, mm^2 。

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, 点绘到坐标图上, 采用最小二乘法或图解法拟合剪应力 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 岩石点荷载强度试验可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, 或在岩石露头处、勘探坑槽、洞室中采取的岩块。试件在采取、制备和运输过程中应避免扰动。

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, 尺寸应为 (50 ± 35) 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) 岩心试件每组数量不应少于 10 块。
- 3) 方块体或不规则块体试件每组数量不应少于 20 块。

5.6.3 试件描述应包括下列内容：

- 1 采取地点。
- 2 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度。
- 3 含水状态。
- 4 试件形状、尺寸及制备方法。
- 5 层理、裂隙以及与加载方向的关系。

5.6.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 点荷载试验仪（载荷容量不小于 50kN，试验仪球端的曲率半径应为 5mm，圆锥体顶角应为 60° ）。
- 2 游标卡尺（量程 0~200mm，最小分度值 0.01mm）。

5.6.5 试验前的准备工作应符合下列规定：

- 1 率定压力计。
- 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 径向加载试验时，将岩心试件横向置于两球形圆锥之间，调节上、下圆锥使之与试件紧密接触，两加载点的连线应通过试件圆心。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 轴向加载试验时，将岩心试件轴向置于两球形圆锥之间，上、下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 $\pm 2\%$ 。

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 $\pm 2\%$,后者允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

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 $\pm 2\%$,后者允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

5.6.8 试验时应连续均匀加载,使试件控制在 $10\sim 60\text{s}$ 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应按式(5.6.9-1)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 应按式(5.6.9-2)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 应按式(5.6.9-3)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 应按式(5.6.9-4)计算:

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

式中 W_b ——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破坏载荷 P 与等价岩心直径 D_e^2 之间的对数关系曲线, 并根据该曲线确定 $D_e^2 = 2500\text{mm}^2$ 对应的 $P_{s(50)}$ 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:

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

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

式中 K_d ——尺寸效应修正系数, 可根据不同的 D_e 值, 用统计方法确定平均值和标准差;

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, 通过在对数坐标图上绘制不同等效直径的 $P \sim D_e^2$ 关系图, 用作图法确定。

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

1) 岩心试件轴向试验, D_e 应按式 (5.6.10-4) 计算:

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

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 应按式 (5.6.10-5) 计算:

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

5.6.11 岩石点荷载强度各向异性指数应按式 (5.6.11) 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 断裂韧度试验

5.7.1 岩石断裂韧度试验应采用圆柱梁试件三点弯曲法，适用于坚硬岩和较坚硬岩石。

5.7.2 试件制备应符合下列规定：

1 试件可采用钻孔岩心，或在勘探坑槽、洞室内采取岩块加工制成。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：

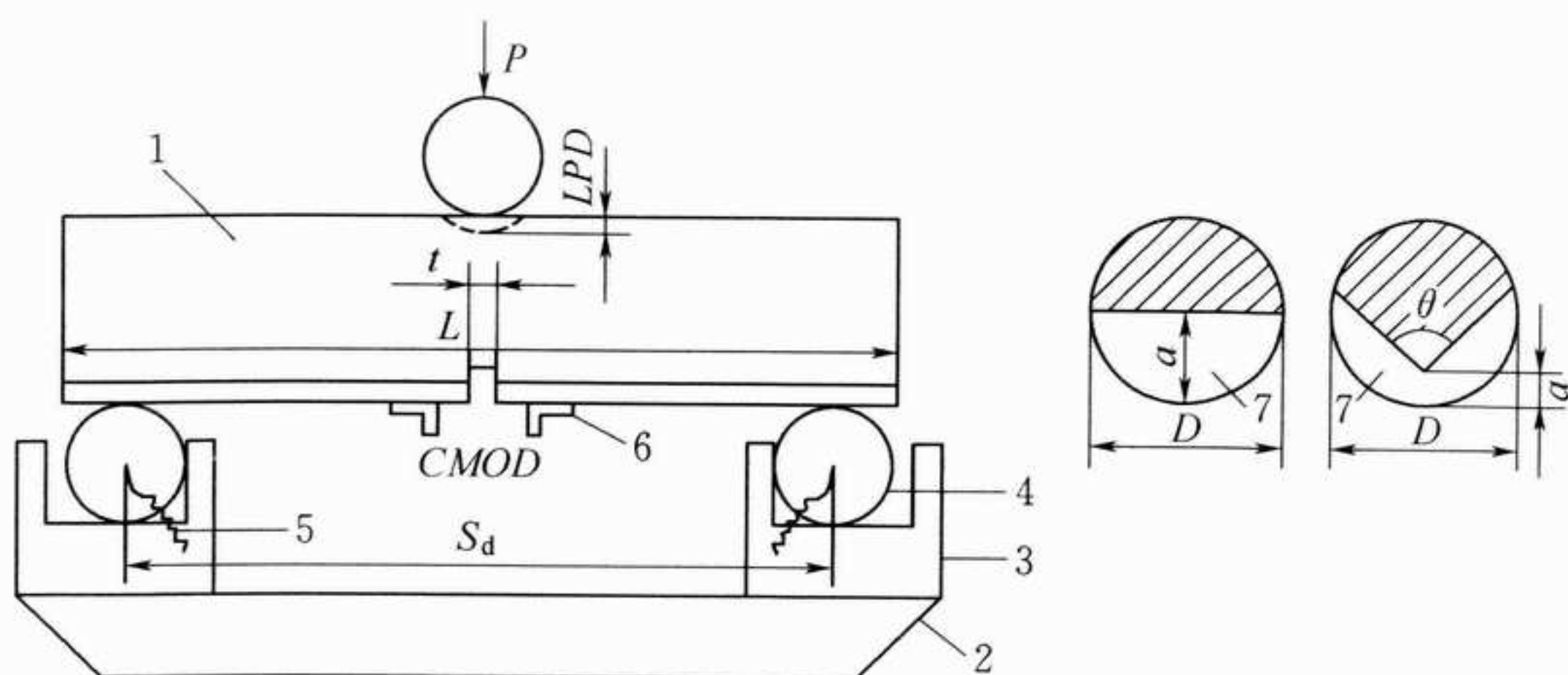
1) 试件应采用带直切口或 V 形切口的圆柱体（见图 5.7.2）。

2) 试件直径为 48~54mm，应大于岩石最大颗粒粒径的 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 形切口试件，切口尖端深度与直径之比宜



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；

a —切口深度； t —切口宽度； θ —V形顶角；

P —载荷； LPD —载荷点位移； $CMOD$ —切口张开位移

图 5.7.2 试件几何形状及尺寸标记

为 0.10~0.20。

6) 切口应垂直于试件轴线，V 形切口顶角应为 90° ，允许偏差为 $\pm 1^\circ$ 。

7) 切口宽度不应大于 1.5mm。

4 试件含水状态应符合下列规定：

1) 天然状态应在试件解除密封后，立即进行试件制备，并测定天然含水率。

2) 烘干状态应符合 4.1.5 条 2~4 款的规定。

3) 饱和状态应符合 4.2.5 条 3~4 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、矿物成分、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 含水状态。

4 试件尺寸。

5 试件在加工中出现的问题。

5.7.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻石机、锯石机、磨石机、锯缝机。
- 2 测量平台、游标卡尺（量程不小于 20cm，最小分度值 0.01mm）、靠尺、放大镜。
- 3 烘箱和干燥器。
- 4 三点弯曲试验夹具，直径不应小于试件直径的 0.25 倍。
- 5 载荷传感器（精度为 0.5%F·S）。
- 6 位移传感器及夹式引伸计（精度均为 0.1%F·S）。
- 7 数据采集系统。
- 8 材料试验机。

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 $\pm 1\%$ 。

2 安装载荷传感器、位移传感器和夹式引伸计，并与数据采集系统连接。

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 试验采用位移控制时，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，可在预估的断裂破坏载荷 $P_{\max}$ 前进行加卸载循环，总循环次数不应少于 4 次，每次卸载到预估的断裂破坏载荷的 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 直切口试件断裂韧性 K_{IC} 应按式 (5.7.6-1) 和式 (5.7.6-2) 计算：

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

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

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, cm ;

$P_{\max}$ ——断裂破坏载荷, N ;

a ——直切口深度, cm ;

$y \left(\frac{a}{D} \right)$ ——计算系数。

2 V形切口试件断裂韧度 K_{IC} 应按式 (5.7.6-3) 和式 (5.7.6-4) 计算:

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

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

式中 a ——V形切口尖端深度, cm ;

$A_{\min}$ ——计算系数。

3 计算值精确至 $0.01N/cm^{1.5}$ 。

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。

5.8 动三轴试验

5.8.1 岩石动三轴试验宜采用等侧向压力的单轴向振动试验法,

适用于能制成圆柱体试件的各类岩石。

5.8.2 试件制备除应符合 4.7.2 条 1~4 款的规定外,还应符合下列规定:

1 试件宜选择标准试件,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 试件加工精度应符合 4.4.2 条 2~4 款的规定。

3 宜选择 3~5 个侧向压力,每个侧向压力下试件数量不应少于 3 个。

5.8.3 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 试件尺寸和加工精度。

4 含水状态。

5.8.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

1 钻石机、切石机、磨石机。

2 测量平台、角尺、游标卡尺(量程 0~200mm,最小分度值 0.01mm)、放大镜。

3 动三轴试验仪。

4 动态电阻应变仪。

5 数字信号采集仪。

5.8.5 侧向压力应根据测试对象所处的岩体应力环境和埋深确定,并应符合 5.3.5 条 2 款的规定。

5.8.6 试件安装应符合 5.3.6 条 1~2 款的规定。

5.8.7 动载荷的施加应符合下列规定:

1 根据所受动载荷的实际情况及工程设计要求,设置动载荷的上限和下限、振动频率及振动持续时间等试验参数;无特殊要求时,动载荷上、下限取值范围宜为相应围压下试件抗压强度的 0.2~0.7 倍,频率宜采用 3Hz。

2 动载荷的波形宜采用正弦波,实际加载的波形应对称,且其上、下两个半周的幅值和持时的相对偏差不应大于 10%。

5.8.8 试验步骤应符合下列规定：

- 1 启动试验设备，预热时间不宜少于 15min，量测系统调零。
- 2 按照 5.3.6 条 3 款的规定，同步施加侧向压力和轴向压力至预定值。
- 3 施加动载荷进行试验。
- 4 试验结束，取出试件，描述试件的形态。

5.8.9 试验成果整理应符合下列规定：

- 1 绘制试件轴向动应力 σ_{dh} 与动应变 ϵ_{dh} 滞回曲线（见图 5.8.9）。

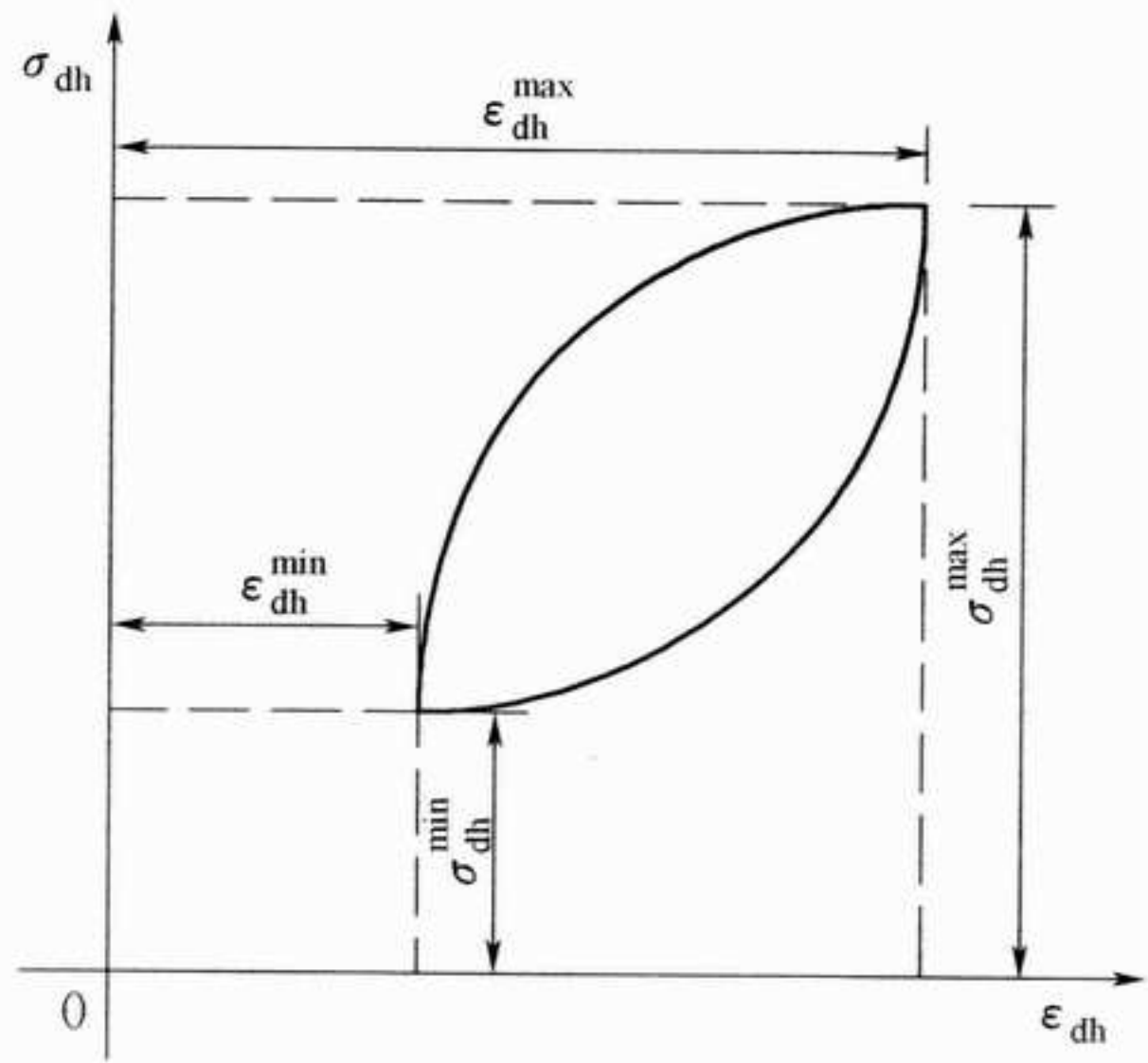


图 5.8.9 应力应变滞回圈

2 岩石动弹性模量、动泊松比及动剪切模量应按式 (5.8.9-1) ~ 式 (5.8.9-3) 计算：

$$E_d = \frac{\sigma_{dh}^{max} - \sigma_{dh}^{min}}{\epsilon_{dh}^{max} - \epsilon_{dh}^{min}} \tag{5.8.9-1}$$

$$\mu_d = \frac{\epsilon_{dd}^{max} - \epsilon_{dd}^{min}}{\epsilon_{dh}^{max} - \epsilon_{dh}^{min}} \tag{5.8.9-2}$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \tag{5.8.9-3}$$

式中 E_d ——动弹性模量，MPa；

μ_d ——动泊松比；
 G_d ——动剪切模量，MPa。
 $\sigma_{dh}^{\max}$ ——轴向动应力上限值，MPa；
 $\sigma_{dh}^{\min}$ ——轴向动应力下限值，MPa；
 $\epsilon_{dh}^{\max}$ ——轴向动应变上限值；
 $\epsilon_{dh}^{\min}$ ——轴向动应变下限值；
 $\epsilon_{dd}^{\max}$ ——径向动应变上限值；
 $\epsilon_{dd}^{\min}$ ——径向动应变下限值。

3 轴向动应力上限值 $\sigma_{dh}^{\max}$ 、轴向动应力下限值 $\sigma_{dh}^{\min}$ 、轴向动应变上限值 $\epsilon_{dh}^{\max}$ 、轴向动应变下限值 $\epsilon_{dh}^{\min}$ 、径向动应变上限值 $\epsilon_{dd}^{\max}$ 和径向动应变下限值 $\epsilon_{dd}^{\min}$ 应按式 (5.8.9-4) ~ 式 (5.8.9-9) 计算：

$$\sigma_{dh}^{\max} = \frac{P_d^{\max}}{A} \quad (5.8.9-4)$$

$$\sigma_{dh}^{\min} = \frac{P_d^{\min}}{A} \quad (5.8.9-5)$$

$$\epsilon_{dh}^{\max} = \frac{U_{dh}^{\max}}{H} \quad (5.8.9-6)$$

$$\epsilon_{dh}^{\min} = \frac{U_{dh}^{\min}}{H} \quad (5.8.9-7)$$

$$\epsilon_{dd}^{\max} = \frac{U_{dd}^{\max}}{D} \quad (5.8.9-8)$$

$$\epsilon_{dd}^{\min} = \frac{U_{dd}^{\min}}{D} \quad (5.8.9-9)$$

式中 $P_d^{\max}$ ——轴向动载荷，荷载曲线上波峰的荷载值，N；
 $P_d^{\min}$ ——轴向动载荷，荷载曲线上波谷的荷载值，N；
 A ——试件截面面积， mm^2 ；
 $U_{dh}^{\max}$ ——试件轴向动变形曲线上的波峰值变形量，mm；
 $U_{dh}^{\min}$ ——试件轴向动变形曲线上的波谷值变形量，mm；
 H ——试件高度，mm；
 $U_{dd}^{\max}$ ——试件径向动变形曲线上的波峰值变形量，mm；
 $U_{dd}^{\min}$ ——试件径向动变形曲线上的波谷值变形量，mm；

D ——试件直径，mm。

5.8.10 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样地点、试验编号、试件编号、试件描述、试验设备、试件尺寸、侧向压力、动载荷加载参数、试验人员、试验日期。

5.9 阻尼比试验

5.9.1 岩石阻尼比试验可采用动三轴应力-应变滞回圈法或自由振动法。动三轴应力-应变滞回圈法可适用于有侧压的各类岩石，自由振动法适用于坚硬岩和较坚硬岩。

5.9.2 动三轴应力-应变滞回圈法试件制备应符合 5.8.2 条的规定。

5.9.3 自由振动法试件制备应符合下列规定：

1 试件形状宜为圆柱体或方柱体，直径或边长不宜小于 50mm，高度宜为直径或边长的 5~8 倍。

2 圆柱体试件高度、直径的允许偏差为 $\pm 1.0\text{mm}$ ；试件两端面的不平行度允许偏差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ；端面应垂直于试件轴线，允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

3 方柱体试件高度、边长的允许偏差为 $\pm 1.0\text{mm}$ ；试件面的不平行度允许偏差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，端面应垂直于试件轴线，端面与轴线垂直度的允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ ，试件相邻两面应互相垂直，允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

4 每组试件数量不应少于 3 个。

5.9.4 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、风化程度。

2 试件的层理、节理、裂隙分布及其与荷载方向的关系。

3 试件形状、尺寸和加工精度。

4 含水状态。

5.9.5 主要仪器和设备应包括下列各项：

1 钻石机、切石机、磨石机。

2 测量平台、角尺、游标卡尺（量程 0~200mm，最小分

度值 0.01mm)、放大镜。

3 动三轴试验仪。

4 动态电阻应变仪。

5 数字信号采集仪。

6 电荷放大器。

7 电阻应变片、加速度计及粘结剂（加速度计的质量不宜大于 50g）。

8 刚性试验台。

9 敲击锤。

5.9.6 动三轴应力-应变滞回圈法的压力确定及试验步骤应符合下列规定：

1 动三轴应力-应变滞回圈法的侧向压力选择应符合 5.8.5 条的规定。

2 试件安装应符合 5.8.6 条的规定。

3 动载荷的施加应符合 5.8.7 条的规定。

4 试验步骤应符合 5.8.8 条的规定。

5.9.7 自由振动法的试验步骤应符合下列规定：

1 将试件固定在试验台上，试件与试验台面垂直。试件一端固定，另一端自由。

2 在距试件固定端 50mm 位置的两侧面中心线部位粘贴电阻应变片，贴片方向与轴向一致。电阻应变片的选择、贴片部位的打磨、应变片粘贴、焊接接线及防潮处理应符合 5.1.6 条 1 款、3 款、5 款的规定。

3 在距试件自由端 50mm 位置的两侧面中心线部位粘贴加速度计。加速度计布设方向应与试件振动方向一致。

4 启动试验设备，预热时间不宜少于 15min，量测系统调零。

5 在试件自由端施加敲击载荷。敲击点应与测点在同一平面上，使试件产生自由横向振动。记录其振动衰减的全过程曲线，重复试验不宜少于 3 次。

5.9.8 动三轴应力-应变滞回圈法试验成果整理应符合下列规定:

1 绘制试件轴向动应力-动应变滞回曲线 (见图 5.9.8-1)。

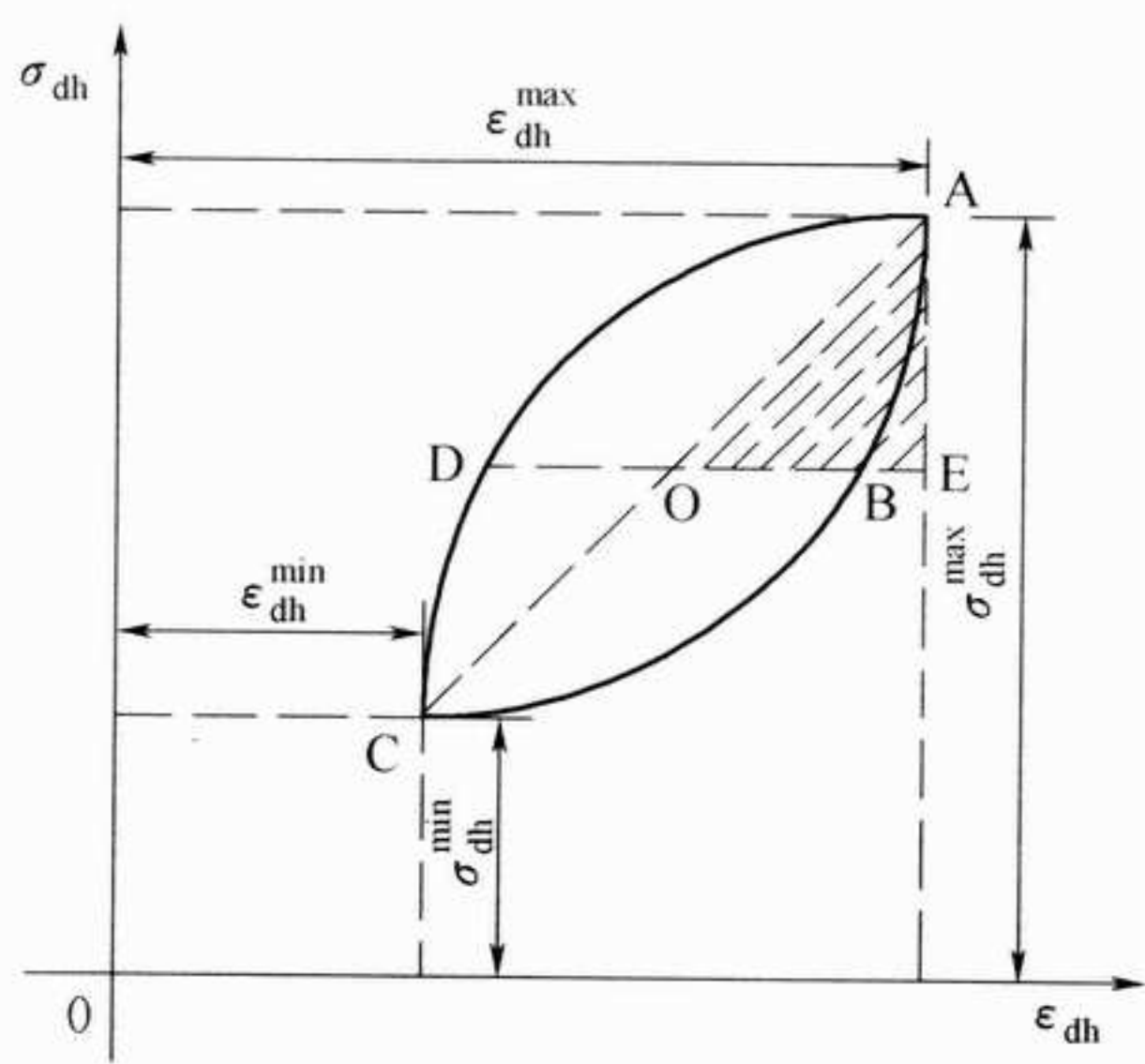


图 5.9.8-1 应力应变滞回圈

2 试件阻尼比应按式 (5.9.8) 计算:

$$\lambda_d = \frac{1}{4\pi} \times \frac{A_r}{A_s} \tag{5.9.8}$$

式中 λ_d ——试件振动阻尼比;
 A_r ——滞回圈 ABCDA 面积大小的数值;
 A_s ——三角形 OAE 面积大小的数值。

3 必要时应绘制阻尼比与动应变关系曲线, 如图 5.9.8-2 所示。

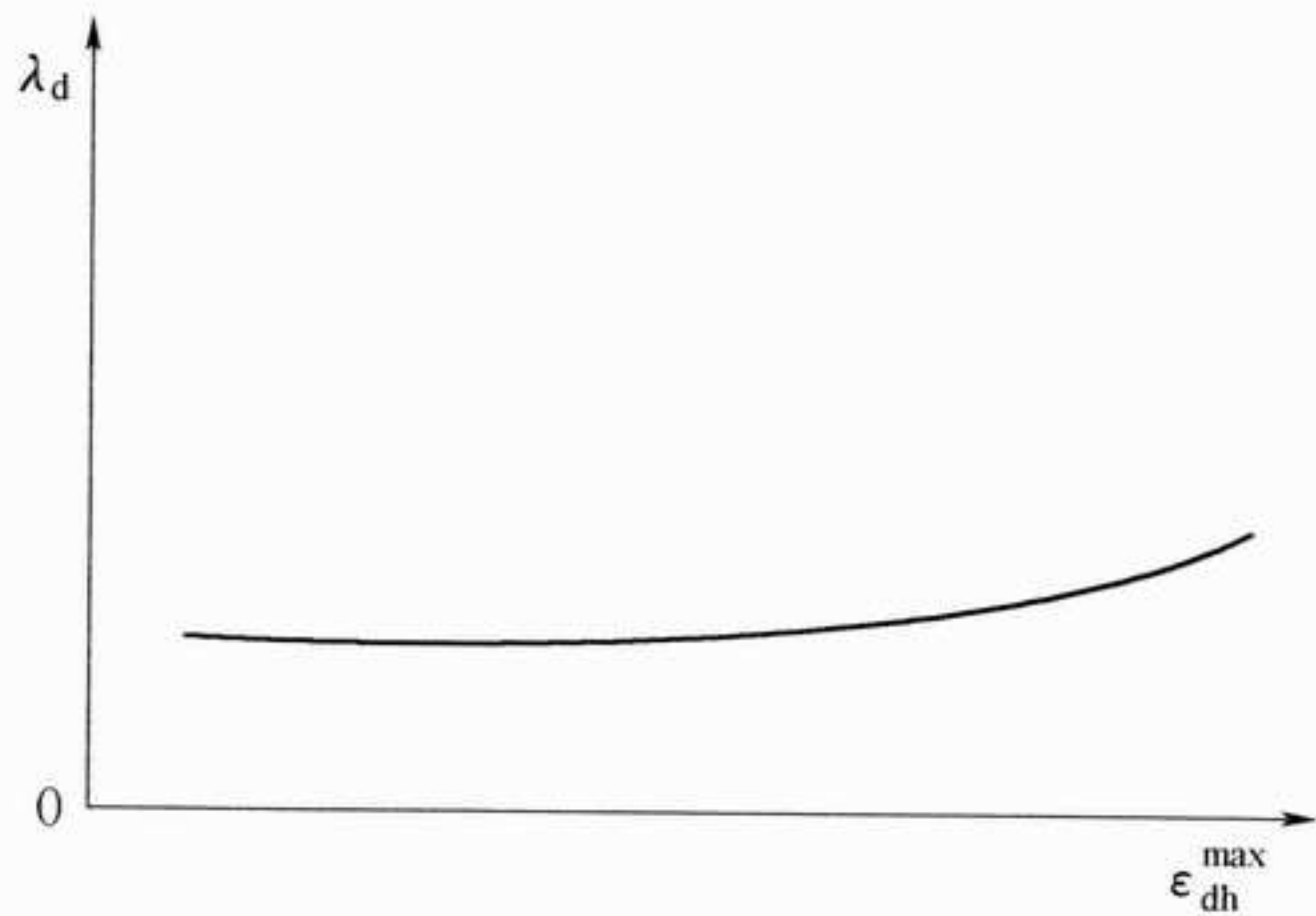


图 5.9.8-2 阻尼比与动应变关系曲线

5.9.9 自由振动法的试验成果整理应符合下列规定：

1 绘制试件振幅随时间的变化曲线（见图 5.9.9）。

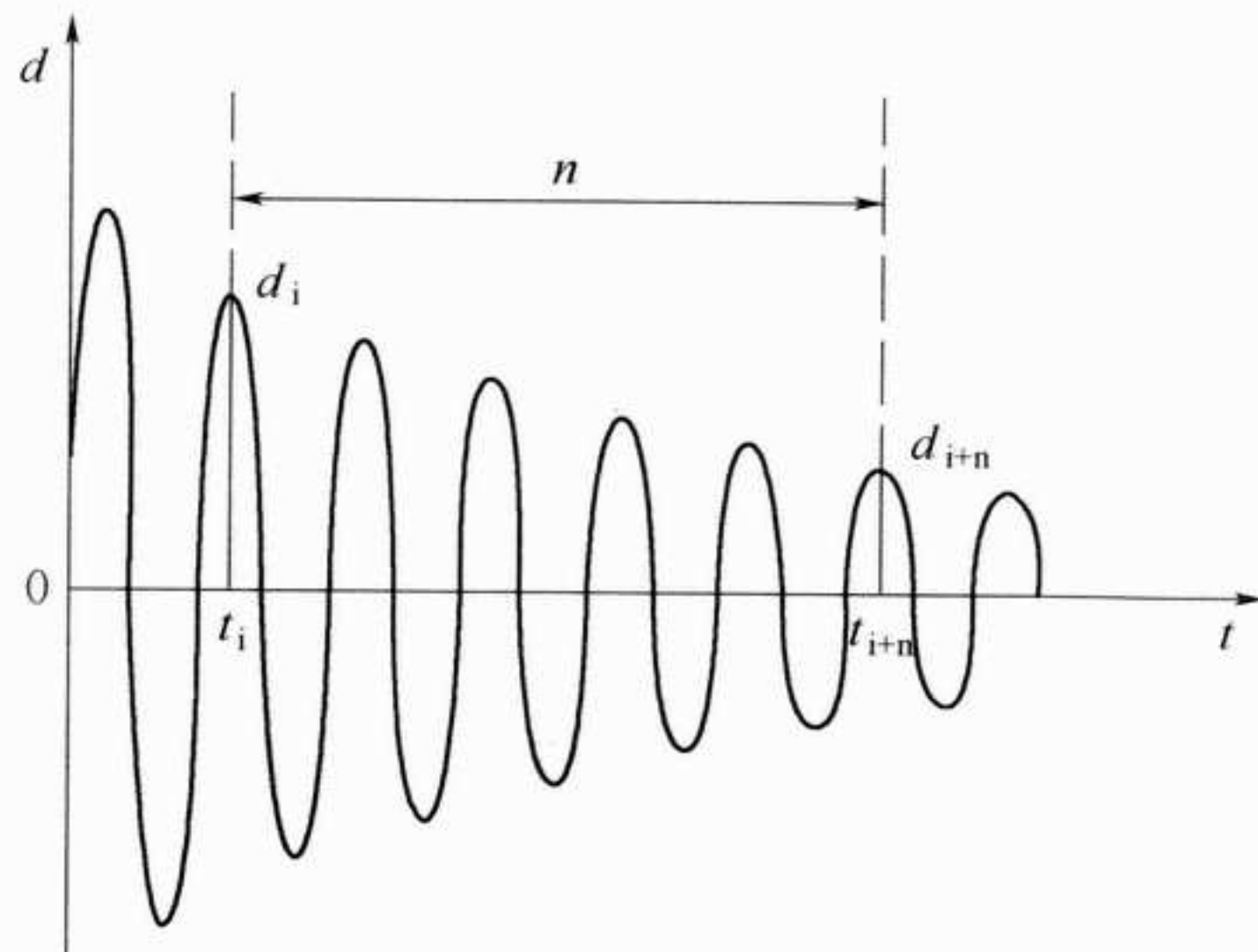


图 5.9.9 振幅随时间的衰减关系曲线

2 试件振动频率、对数衰减率及阻尼比应按式（5.9.9-1）～式（5.9.9-3）计算：

$$f = \frac{n}{\Delta t_n} \tag{5.9.9-1}$$

$$\delta_n = \frac{1}{n} \ln \frac{d_i}{d_{i+n}} \tag{5.9.9-2}$$

$$\lambda_d = \frac{\delta_n}{2\pi} \tag{5.9.9-3}$$

式中 n ——周期数；

f ——试件振动频率，Hz；

Δt_n —— n 个振动波峰间的时间间隔，s；

δ_n ——试件自由振动的对数衰减率；

d_i ——第 i 振动周期应变或加速度的振幅；

d_{i+n} ——第 $i+n$ 振动周期应变或加速度的振幅；

λ_d ——试件振动阻尼比。

5.9.10 试验记录应包括工程名称、岩石名称、取样地点、试验编号、试件编号、试件描述、试件形状、试件尺寸、敲击方式、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 岩体承压板法变形试验可采用刚性承压板法或柔性承压板法。柔性承压板法可分为双枕法、四枕法、环形枕法。刚性承压板法适用于各类岩体，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坑槽或竖井内进行。

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 试点边缘至试验洞侧壁或底顶板距离，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；至临空面的距离，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，并与岩体实际承压面处于同一层面上。
 - 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，无松动岩石。
 - 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 地质描述除应符合附录 D 的规定外，还应包括试段开挖和试点制备的方法、试点地质素描图及试点中心钻孔柱状图。

6.1.5 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 液压千斤顶。
- 2 液压枕。
- 3 测力枕。
- 4 液压泵。
- 5 液压管路。
- 6 压力表。
- 7 稳压装置。
- 8 刚性承压板。
- 9 滚轴排。
- 10 钢垫板。
- 11 传力箱。
- 12 传力柱。
- 13 楔形垫块。
- 14 反力装置。
- 15 测量支架。
- 16 位移测表。
- 17 测量表架。
- 18 钻孔多点位移计。
- 19 测量标点。
- 20 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。铺垫的水泥浆中应减少气泡，放置刚性承压板并挤压出多余水泥浆，水泥浆厚度应小于承压板直径或边长的 1%，并使承压板平行试点表面。可在水泥浆中掺入适量的速凝剂缩短水泥浆养护时间，但水泥标号不宜低于 425 号，养护时间不宜少于 7d。

2 试验完成前，不得移动刚性承压板。

3 承压板为圆形，应满足刚度要求，单块承压板厚度不应

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。采用叠置钢垫板增大承压板厚度的方式提高承压板的刚度时,叠置厚度应满足式 (6.1.6) 的要求。

$$h > r \times \sqrt[3]{\frac{6E}{E_f} \times \frac{1-\mu_f^2}{1-\mu^2}} \quad (6.1.6)$$

式中 h ——承压板叠置厚度, cm;

r ——承压板半径, cm;

E ——岩体弹性模量, MPa;

E_f ——承压板弹性模量, MPa;

μ ——岩体泊松比;

μ_f ——承压板泊松比。

4 依次在承压板上安装千斤顶、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 (见图 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。

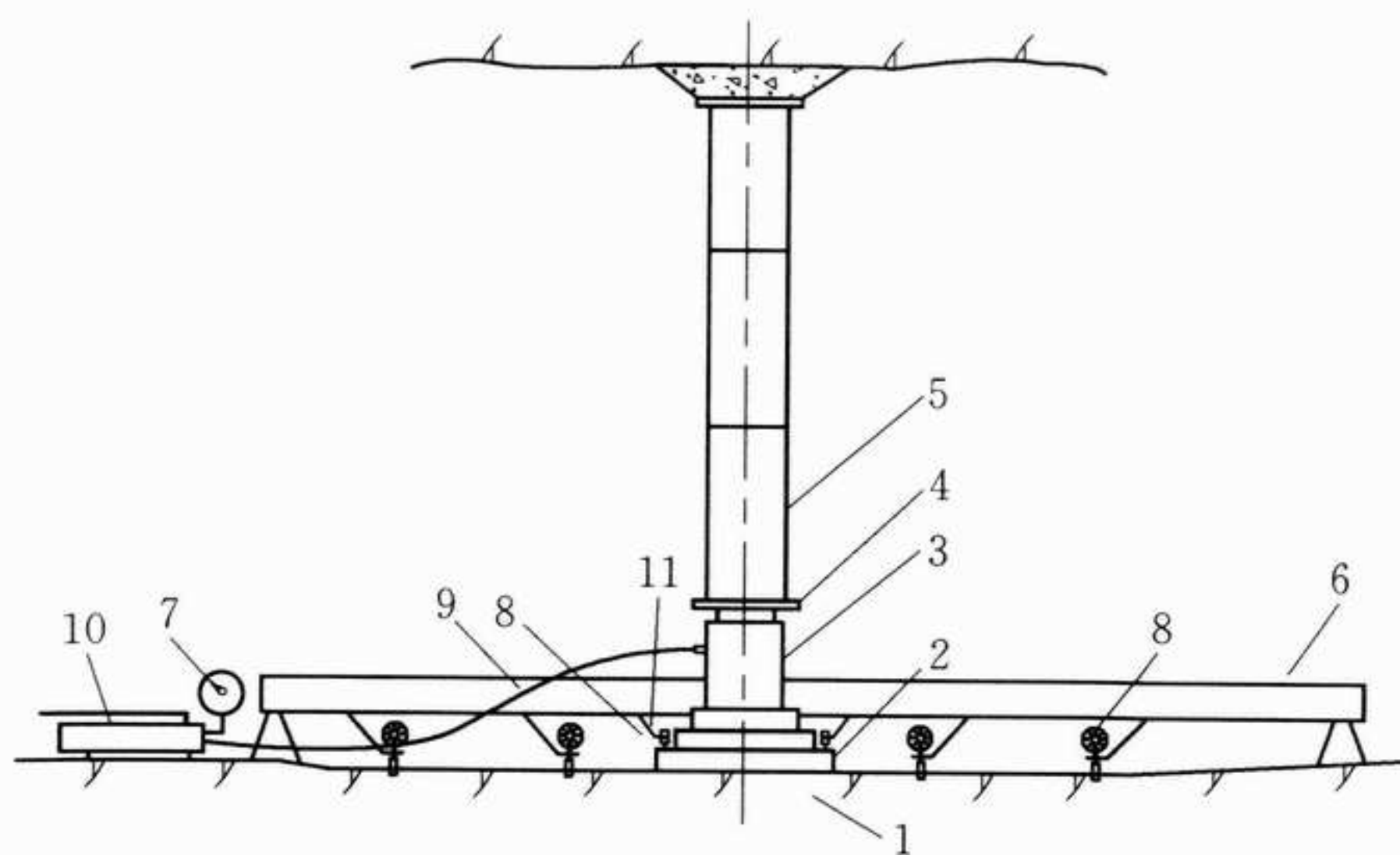
6.1.7 柔性承压板法试验加压系统与传力系统安装应符合下列规定:

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 (见图 6.1.7),测点可按承压板直径的 0.25 倍、0.50 倍、0.75 倍、1.00 倍、1.50 倍、2.00 倍、3.00 倍孔深进行布置,孔口及孔底应设置测点。孔口应设置位移测表测量岩体表面变形,并与多点位移计测量值进行比较。

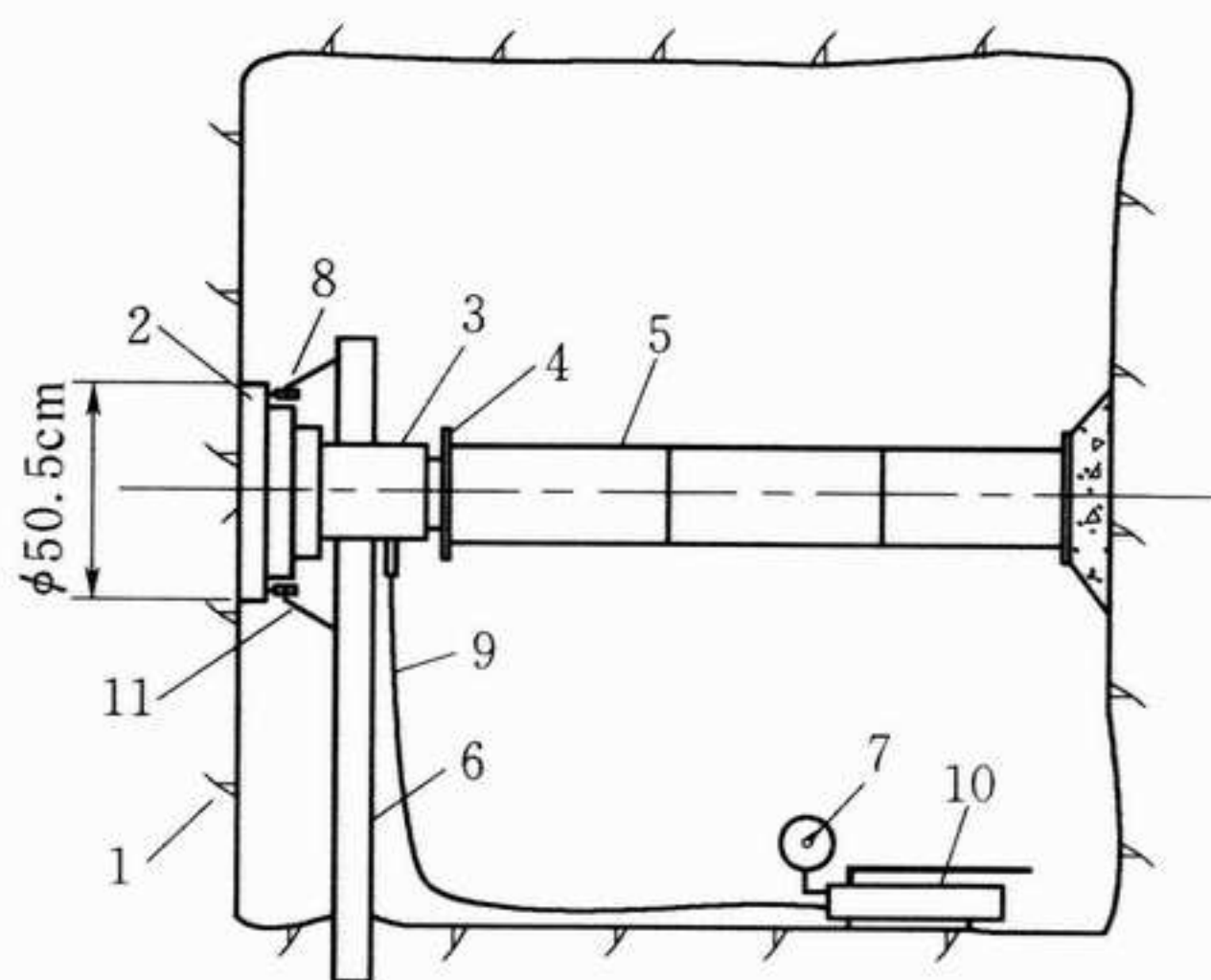
2 双枕法和四枕法的液压枕应对称试点中心放置,枕间缝隙应小于 3cm。

3 清洗试点表面,铺垫水泥砂浆,放置无凹面的液压枕,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筑砂浆或安装反力顶板。



(a) 铅直方向加压



(b) 水平方向加压

1—岩体；2—刚性承压板；3—液压千斤顶；4—钢垫板；5—传力柱；6—测量支架；
7—压力表；8—位移测表；9—液压油管；10—液压泵；11—测量表架

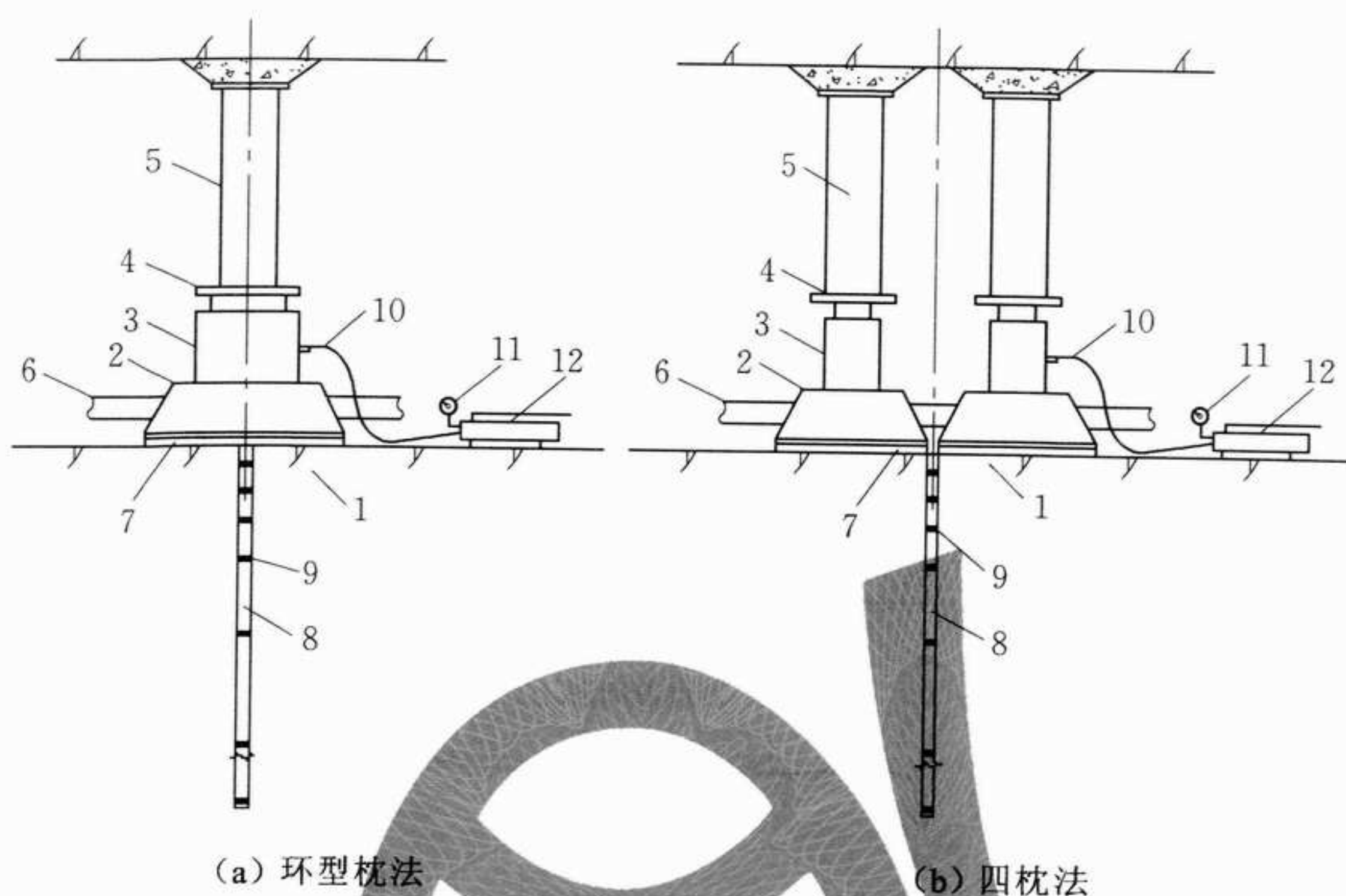
图 6.1.6 刚性承压板法试验安装示意图

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简支测量支架一根，测量支架应满足刚度要求。可选用 20 号及以上的工字钢。其支点应设置在距试点中心 4 倍承压板直径（或边长）以外。



1—岩体；2—传力箱；3—液压千斤顶；4—钢垫板；5—传力柱；
6—测量支架；7—液压枕；8—中心孔；9—多点位移计测点；
10—液压管路；11—压力表；12—液压泵

图 6.1.7 柔性承压板中心孔法试验安装示意图

2 刚性承压板法试验应在承压板上对称布置 4 支测表。

3 柔性承压板法试验应在试点中心布置 1 支测表。双枕法或四枕法试验除在中心布置 1 支测表外，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 支或 4 支测表（见图 6.1.8）。

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，直径不宜小于 2cm，悬臂长度不宜大于 10cm。

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。

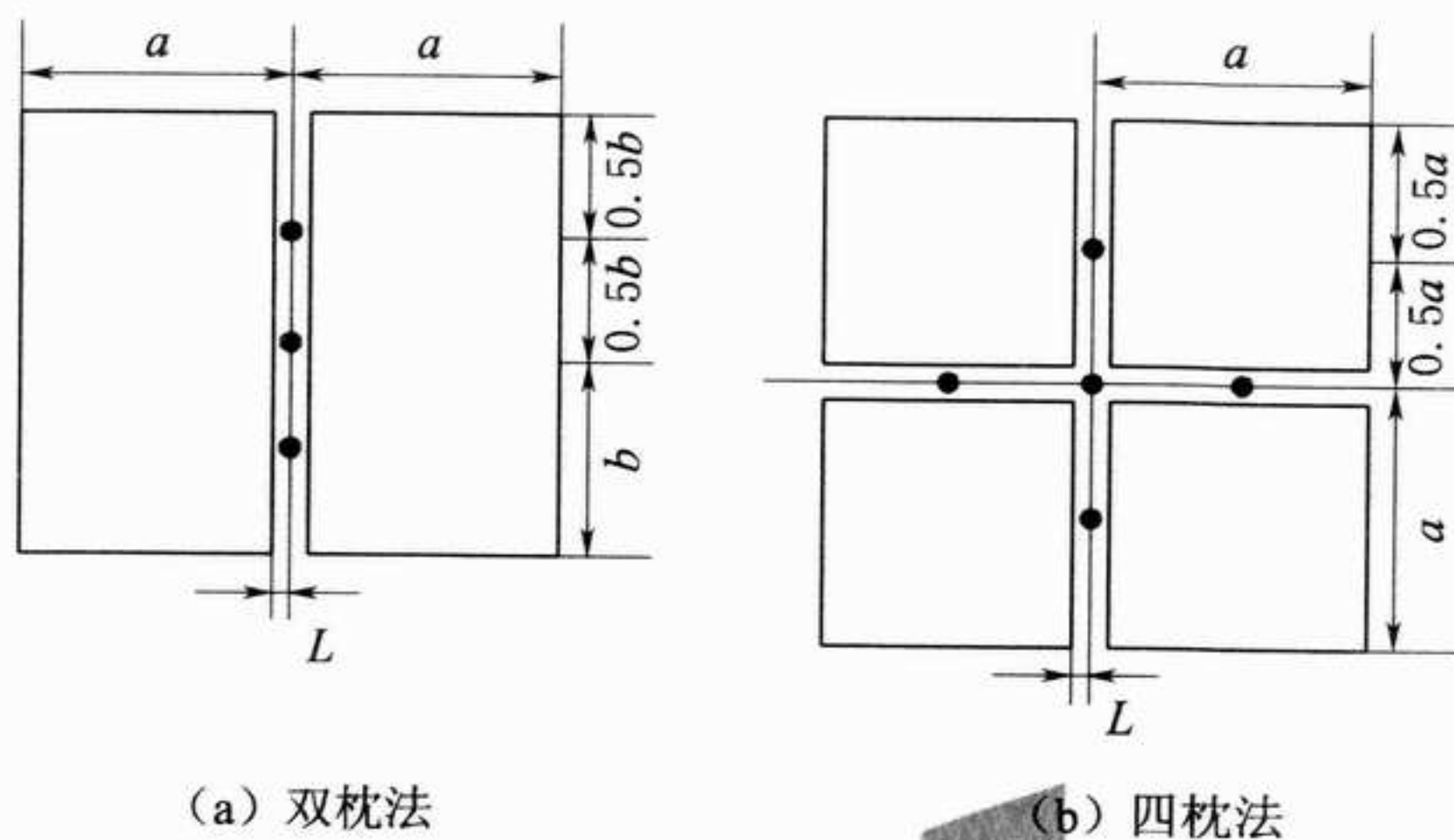


图 6.1.8 柔性承压板法测表布置示意图

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次循环法或大循环法（见图 6.1.9）。

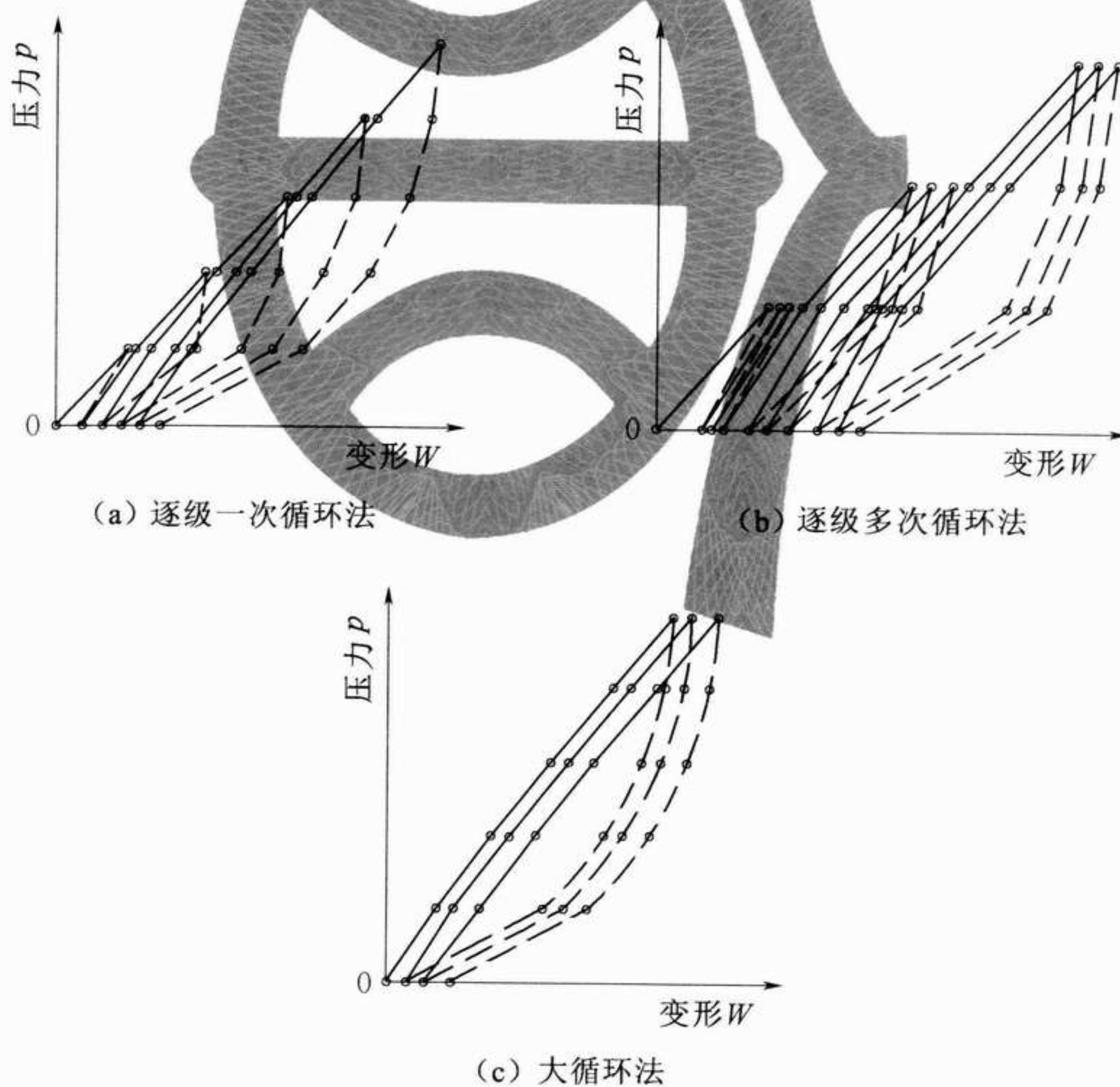


图 6.1.9 加压方法示意图

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。

5 试验期间应控制试验环境温度，变化幅度不宜大于 1℃。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 支测表的变形平均值作为岩体变形值，当其中 1 支测表失效，变形均匀时，可采用另外 3 支测表的平均值作为变形值；变形不均匀时，应采用对称的 2 支测表的平均值作为变形值，并予以说明。

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（见图 6.1.10）。图 6.1.10（a）、图 6.1.10（d）和图 6.1.10（e）所示类型取直线段计算，图 6.1.10（b）和图 6.1.10（c）所示类型可逐级分别计算。

3 刚性承压板法试验岩体变形参数应按式（6.1.10-1）计算：

$$E = \frac{\pi}{4} \times \frac{(1 - \mu^2) p D}{W} \quad (6.1.10-1)$$

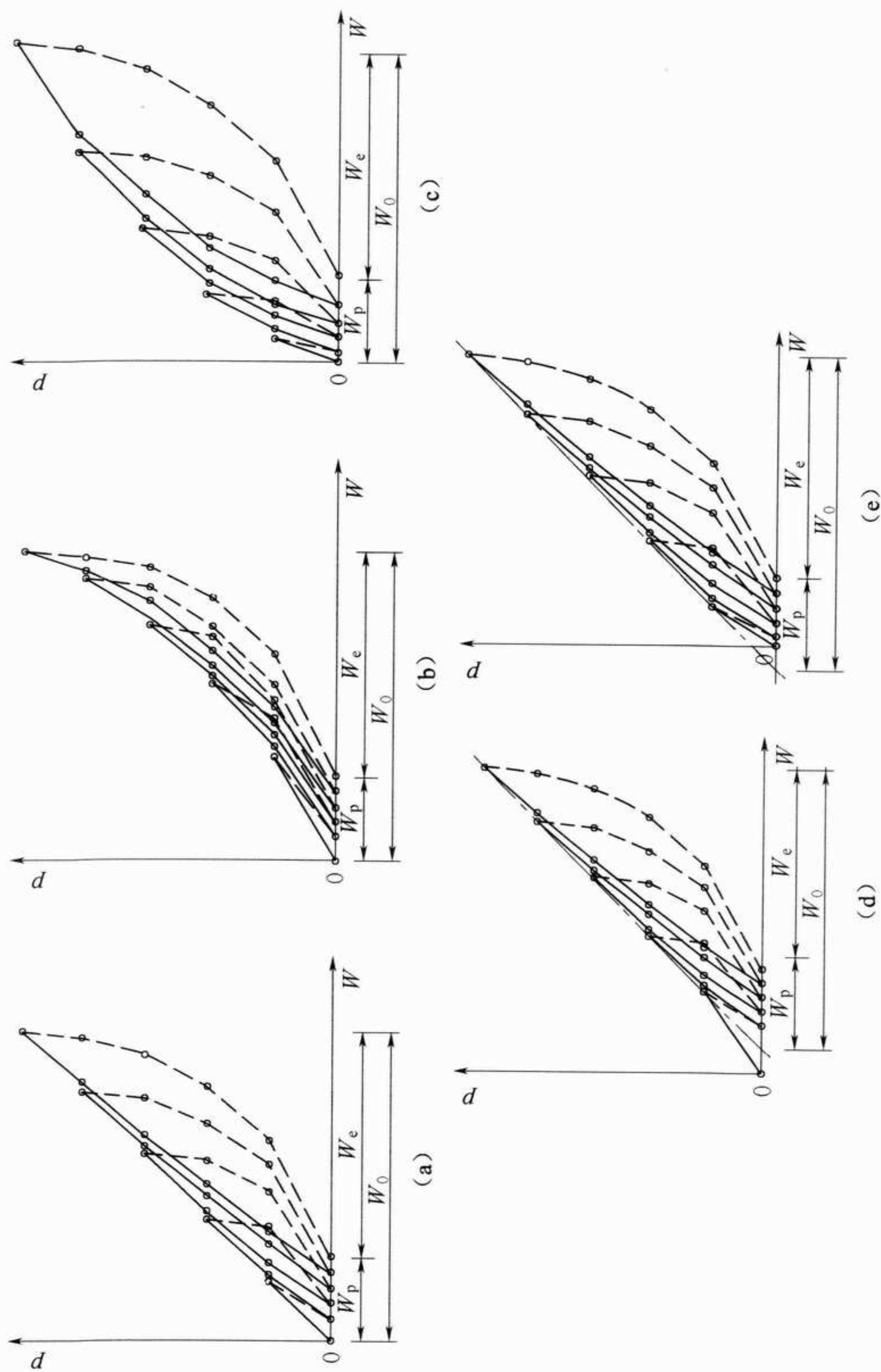
式中 E ——岩体变形模量或弹性模量，MPa，当以全变形 W_0 代入式中计算时为变形模量 E_0 ，当以弹性变形 W_e 代入式中计算时为弹性模量 E_e ；

μ ——岩体泊松比，为非实测值，可根据其他试验成果或类比确定；

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。



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

图 6.1.10 压力-变形关系曲线类型示意图

4 环形枕法试验测量表面中心点岩体变形时, 变形参数应按式 (6.1.10-2) 计算:

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

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, 变形参数应按式 (6.1.10-3)、式 (6.1.10-4) 计算:

1) 当测点位于双枕受压面中心点时:

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

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:

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

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, 变形参数应按式 (6.1.10-5)、式 (6.1.10-6) 计算:

1) 当测点位于四枕受压面中心点时:

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

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:

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

式中 a ——承压面外缘边界至缝隙内中心线的垂直距离, cm;

L ——承压面内缘边界至缝隙内中心线的垂直距离, cm。

7 柔性环形枕法试验测量中心孔深部岩体变形时, 变形参数应按式 (6.1.10-7) 计算:

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

式中 W_z ——深度 Z 处的岩体变形, 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, 变形参数应按式 (6.1.10-8) 计算:

$$E = \frac{2(1+\mu)p}{\pi W} \left[(2\mu-1)Z \arctan \frac{a^2}{Z\sqrt{2a^2+Z^2}} \right. \\ + 4(1-\mu)a \operatorname{arsinh} \frac{a}{\sqrt{a^2+z^2}} \\ \left. - 2(2\mu-1)Z \arctan \frac{aL}{Z\sqrt{L^2+a^2+Z^2}} \right]$$

$$\begin{aligned}
& -4(1-\mu)L\operatorname{arsinh}\frac{a}{\sqrt{L^2+Z^2}} \\
& -4(1-\mu)a\operatorname{arsinh}\frac{L}{\sqrt{a^2+Z^2}} \\
& + (2\mu-1)Z\arctan\frac{L^2}{Z\sqrt{2L^2+Z^2}} \\
& + 4(1-\mu)L\operatorname{arsinh}\frac{L}{\sqrt{L^2+Z^2}} \Big] \quad (6.1.10-8)
\end{aligned}$$

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。

10 柔性承压板法试验，当测点位于液压枕的角点时，岩体变形（弹性）模量应按式（6.1.10-9）计算。柔性承压板中心孔法试验，当测孔位于液压枕的角点时，岩体变形（弹性）模量应按式（6.1.10-10）计算。采用柔性双枕法及四枕法时，可根据叠加原理计算岩体变形参数。

$$E = \frac{(1-\mu^2)p}{\pi W} \times \left(a\operatorname{arsinh}\frac{b}{a} + b\operatorname{arsinh}\frac{a}{b} \right) \quad (6.1.10-9)$$

$$\begin{aligned}
E = \frac{(1+\mu)p}{2\pi W} \times & \left[(2\mu-1)Z\arctan\frac{ab}{Z\sqrt{a^2+b^2+Z^2}} + \right. \\
& \left. + 2(1-\mu)a\operatorname{arsinh}\frac{b}{\sqrt{a^2+Z^2}} + 2(1-\mu)b\operatorname{arsinh}\frac{a}{\sqrt{b^2+Z^2}} \right] \quad (6.1.10-10)
\end{aligned}$$

式中 a 、 b ——承压面边长，cm；

Z ——测点深度，cm。

6.1.11 必要时应在试验设备拆除后在试点处切槽检查岩体的裂隙、风化等地质情况。

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、位移测表布置、位移测表编号、压力表编号、承压板尺寸、液压枕尺寸及编号、压力、变形、试验人员、试验日期。

6.2 狭缝法试验

6.2.1 岩体狭缝法变形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 狭缝边缘至洞壁或底板和顶板距离应大于 1.5 倍狭缝长度，至洞口或掌子面距离应大于 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长度的 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 地质描述内容除应符合附录 D 的规定外，还应包括试段开挖和试点制备的方法以及试点地质素描图。

6.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 矩形液压枕（宽长比不宜小于 0.6）。
- 2 液压泵。
- 3 液压管路。
- 4 压力表。
- 5 稳压装置。
- 6 测量支架。
- 7 位移测表。
- 8 测量表架。
- 9 测量标点。

6.2.5 液压枕埋设应符合下列规定：

- 1 液压枕埋设前应在 1.2 倍工程应力下进行率定。
- 2 液压枕置于狭缝中央，狭缝外侧的液压枕鼓边应出露一半。

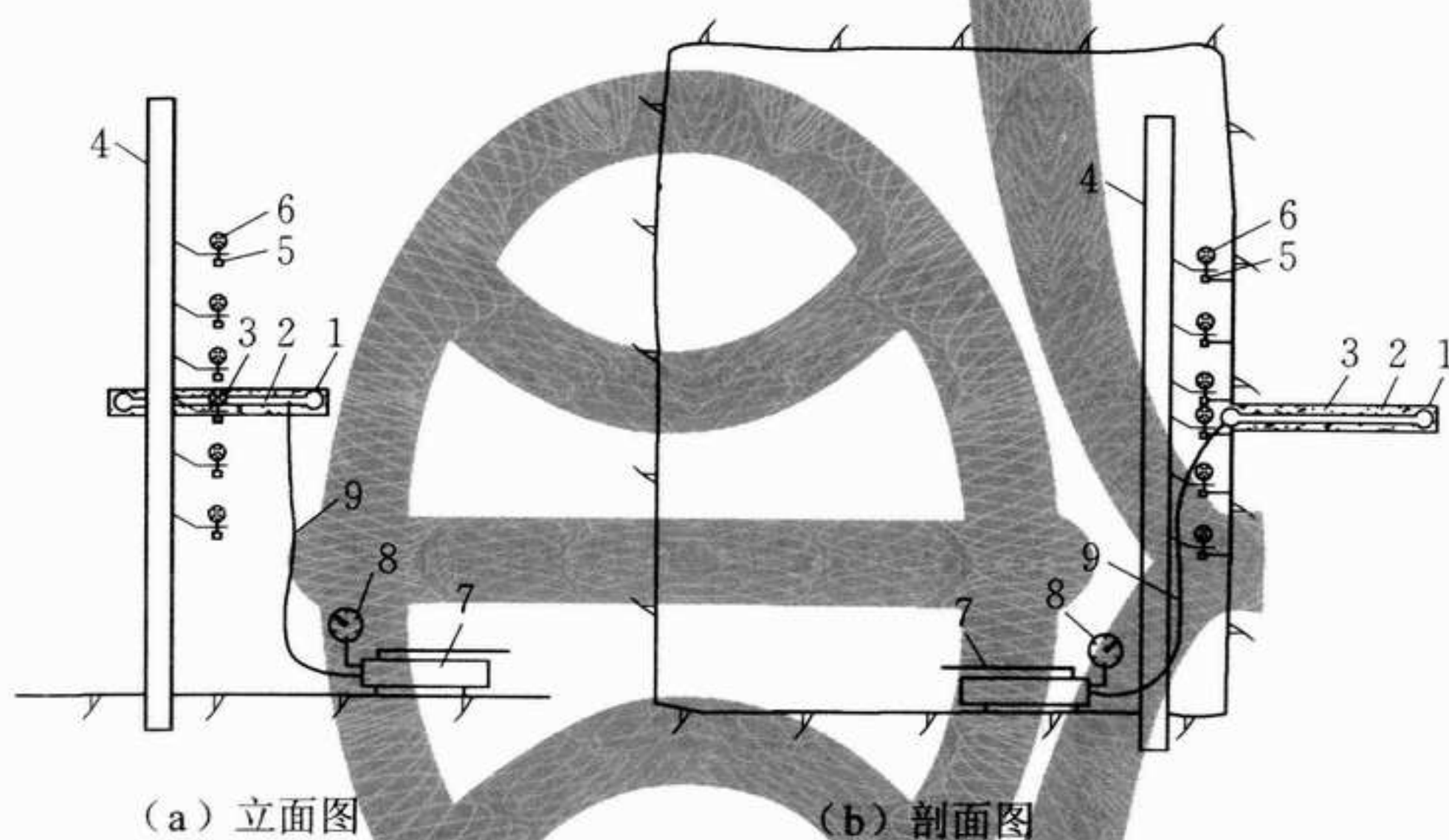
3 液压枕两端及底部宜填塞细砂。

4 液压枕两侧应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，应对称埋设标点各 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（见图 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。



1—槽壁；2—砂浆；3—液压枕；4—测量支架；5—位移测点；
6—位移测表；7—液压泵；8—压力表；9—液压管路

图 6.2.6 狭缝法试验安装示意图

6.2.7 试验加压及稳定标准应符合 6.1.9 条的规定。

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，变形参数应按式 (6.2.8-1)、式 (6.2.8-2) 计算：

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

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

式中 E ——岩体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 ——施加于狭缝两侧岩体上的单位压力, 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, 变形参数应按式 (6.2.8-3) 计算:

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

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 (见图 6.2.8) 中的 y_1 、 y_2 代入式 (6.2.8-2) 计算。

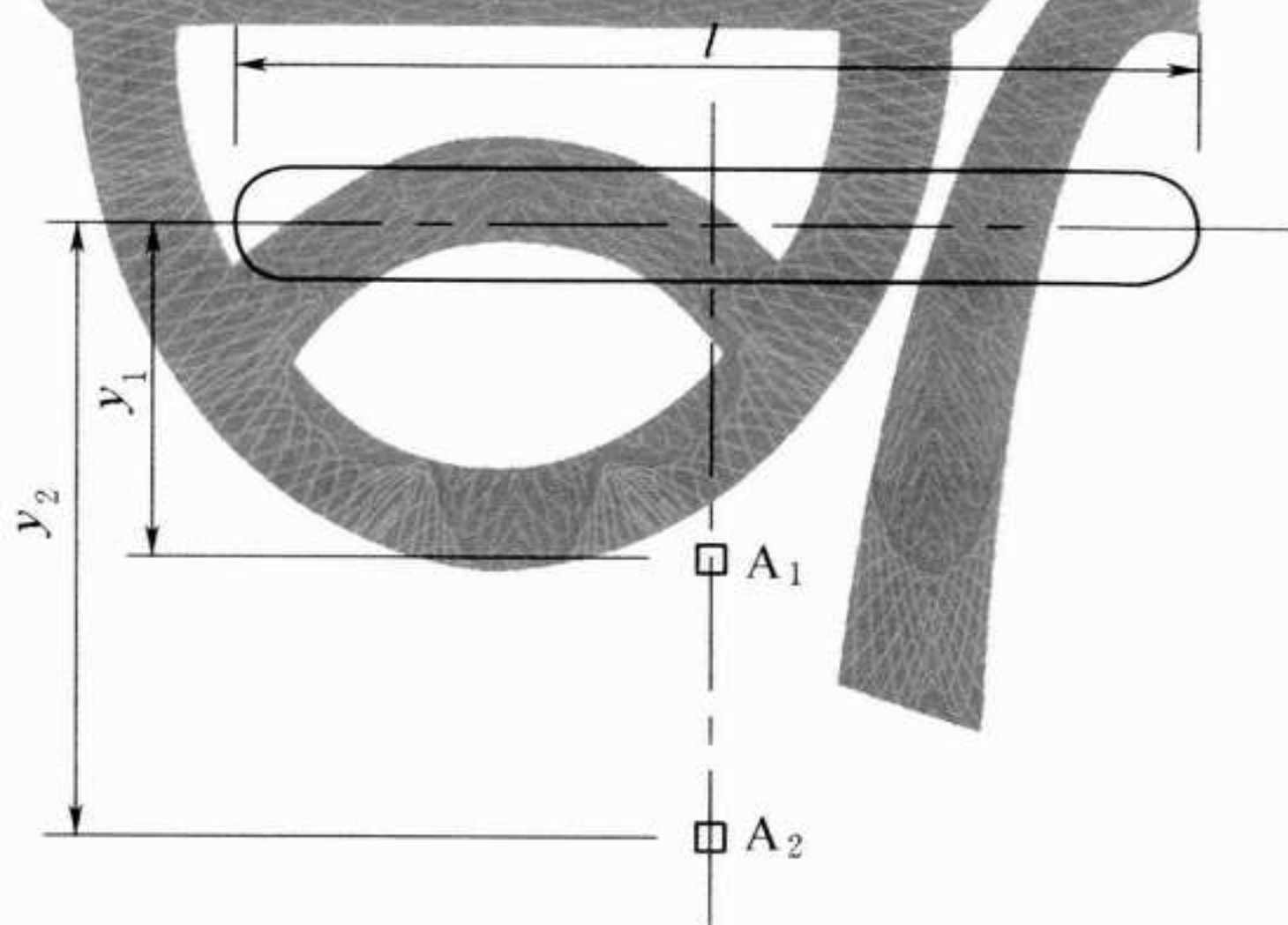


图 6.2.8 相对变形计算示意图

4 当狭缝两端出现拉裂缝时, 不得采用式 (6.2.8-1) ~ 式 (6.2.8-3) 计算岩体变形参数。

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、位移测表布置、位移测

表编号、压力表编号、液压枕尺寸及编号、压力、变形、试验人员、试验日期。

6.3 单（双）轴压缩法试验

6.3.1 岩体单（双）轴压缩法变形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，起伏差应小于试点边长 2%。

2 试点尺寸不宜小于 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 。

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 地质描述除应符合附录 D 的规定外，还应包括试段开挖和试点制备的方法以及试点地质素描图。

6.3.4 主要仪器和设备应符合 6.2.4 条的规定。

6.3.5 液压枕的埋设除应符合 6.2.5 条的规定外，还应符合下列规定：

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。

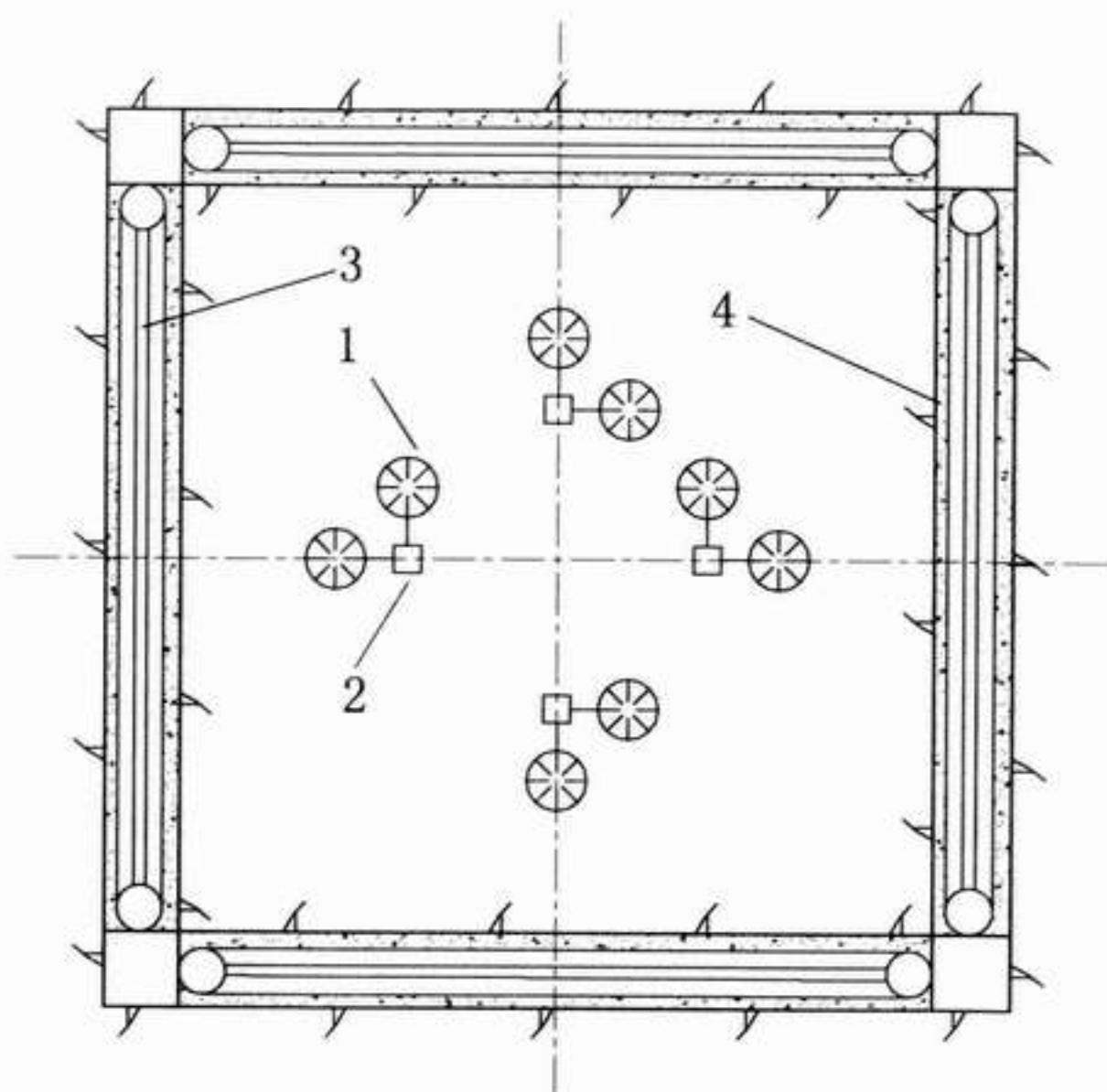
3 相对的一对液压枕加压管路应采用并联方式连接。

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 2 支变形测表，测点位置距狭缝边壁距离应大于 0.25 倍狭缝长度（见图 6.3.6）。

6.3.7 试验加压及稳定标准除应符合 6.1.9 条的规定外，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，相对的液压枕应同步加压；进



1—测表；2—标点；3—液压枕；4—砂浆

图 6.3.6 单（双）轴压缩法变形试验安装示意图

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 各方向应变应按式 (6.3.8-1) 计算：

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

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 岩体变形参数应按式 (6.3.8-2)、式 (6.3.8-3) 计算：

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

$$\mu = \frac{\epsilon_x p_y - \epsilon_y p_x}{\epsilon_x p_x - \epsilon_y p_y} \quad (6.3.8-3)$$

式中 E ——岩体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、位移测表布置、位移测点编号、压力表编号、液压枕尺寸及编号、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 钻孔径向加压法变形试验可采用钻孔千斤顶法、钻孔膨胀计法或钻孔压力计法, 适用于完整和较完整岩体。

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 2 倍加压段长, 距孔底距离应大于 2 倍加压段长。

6.4.3 地质描述除应符合附录 D 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:

- 1 钻孔千斤顶、钻孔膨胀计或钻孔压力计。
- 2 液压泵及高压软管。
- 3 压力表。
- 4 扫孔器。
- 5 模拟管。
- 6 校正仪。
- 7 起吊设备。

6.4.5 试验加压及稳定标准应符合下列规定：

1 试验前应对钻孔千斤顶、钻孔膨胀计或钻孔压力计进行率定。

2 放入钻孔千斤顶、钻孔膨胀计或钻孔压力计前，应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。加压或退压稳定标准应符合 6.1.9 条 4 款的规定。

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。加压或退压稳定标准应符合 6.1.9 条 4 款的规定。大循环次数不应少于 3 次。

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，取出径向加压设备或移至下一试点进行试验。

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 采用钻孔千斤顶法进行试验时，岩体变形参数应按式 (6.4.7-1) 计算：

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

式中 E ——岩体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；

K_b ——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。

3 采用钻孔膨胀计法或钻孔压力计法进行试验时，岩体变形参数应按式（6.4.7-2）计算：

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

4 绘制变形模量 E_0 及弹性模量 E_e 沿孔深 h 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、钻孔千斤顶编号、钻孔膨胀计或钻孔压力计编号及率定资料、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 隧洞液压枕径向加压法变形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 2~3m，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 地质描述除应符合附录 D 的规定外，还应包括试段开挖

和试点制备的方法、试点地质素描图及观测断面钻孔柱状图。

6.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 承力框架。
- 2 液压枕。
- 3 液压泵。
- 4 压力表。
- 5 位移测表。
- 6 钻孔多点位移计。
- 7 测量支架。
- 8 液压管路。
- 9 采集系统。

6.5.5 混凝土浇筑应符合下列规定：

- 1 混凝土各条块厚度应按式 (6.5.5) 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缝，宜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测量断面，加压段长为试验洞直径 2 倍时，主测量断面两侧应各布置一个辅助测量断面。

- 2 根据需要可在试验段两端各设置一个参考测量断面。

6.5.7 承力框架及液压枕安装应符合下列规定：

- 1 液压枕埋设前应在 1.5 倍工程应力下进行率定。

- 2 将液压枕凹面用水泥砂浆抹平。

- 3 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。

4 24h 后将承力框架逐个安装，排列完成后连成整体。

5 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（见图 6.5.8）。

2 根据需要可在测量断面部位沿隧洞径向用金刚石钻头钻孔，并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、串联或混合连接方式。

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。

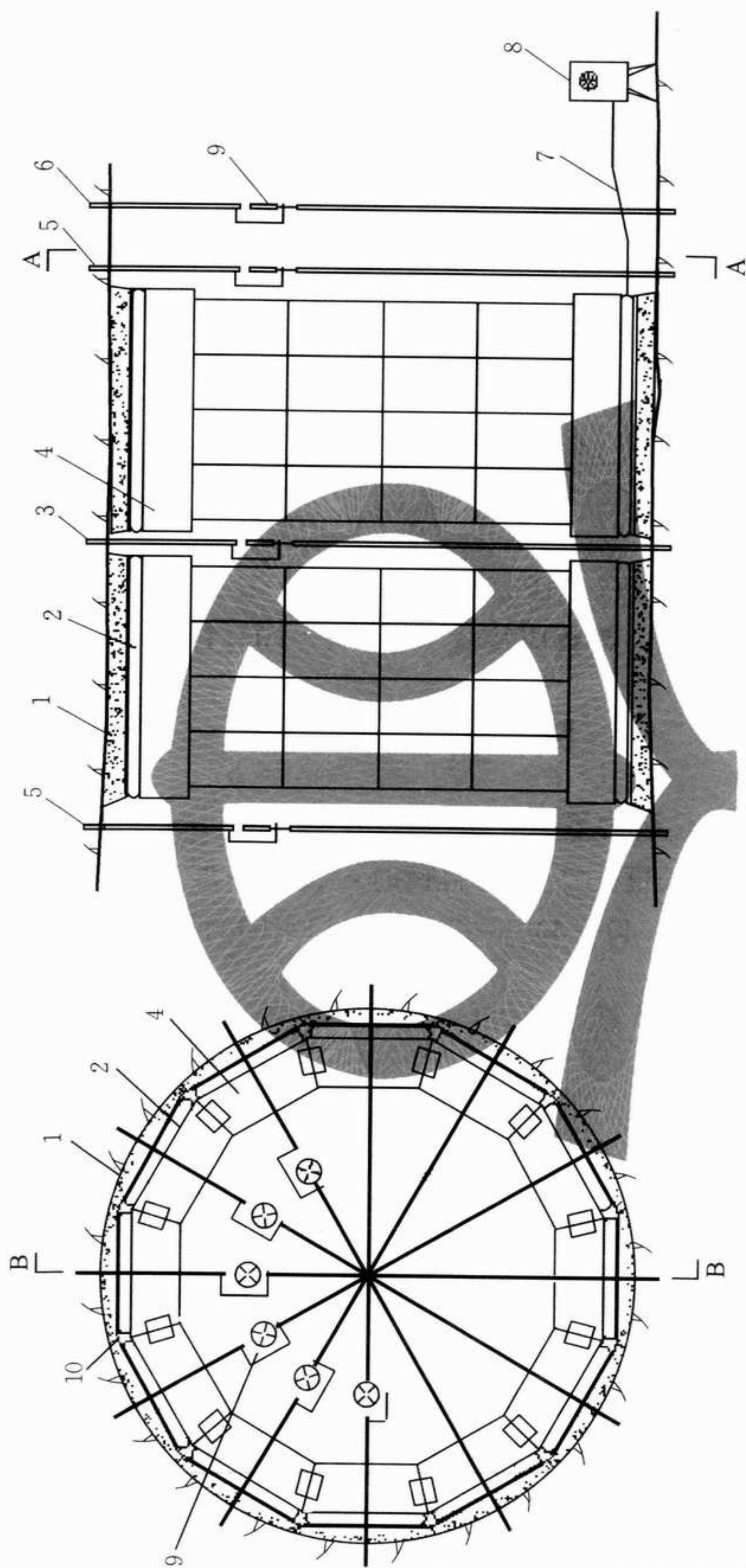
4 加压方式宜采用逐级一次循环法，必要时可采用逐级多次循环法。

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。加压或退压稳定标准应符合 6.1.9 条 4 款的规定。

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。



(a) 变形试验横剖面 (A—A剖面)

(b) 变形试验纵剖面 (B—B剖面)

1—传力混凝土条块；2—液压枕；3—主测量断面；4—承力框架；5—辅助测量断面；
6—参考测量断面；7—液压管路；8—液压泵；9—位移测表；10—混凝土分缝

图 6.5.8 隧洞液压枕径向加压变形试验安装示意图

2 岩体变形模量应按式 (6.5.11-1) 计算:

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

式中 E_0 ——岩体变形模量, MPa;

p ——作用于岩体表面的单位压力, 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 岩体抗力系数应按式 (6.5.11-2) 计算:

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

式中 K ——抗力系数, MPa/cm。

4 岩体单位抗力系数应按式 (6.5.11-3) 计算:

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

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应按式 (6.5.11-4) ~ 式 (6.5.11-6) 计算:

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

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

$$\phi = \phi_1 \phi_2 \quad (6.5.11-6)$$

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, ϕ_2 ——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) 与试段间距变形修正系数; ϕ_1, ϕ_2 值按表 6.5.11-1 ~ 表 6.5.11-6 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
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。											

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	0.583	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	1.000
	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	2.00
	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（3 个间距段共 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： n_0 —相距 0.2m 的 4 个 1m 长加压段，仅两端加压时中间测量断面的变形系数值；
 n_1 —相距 0.2m 的 2 个 1m 长加压段同时加压时中间测量断面的变形系数值；
 n_2 —2.2m 长加压段加压时，中间测量断面的变形系数值；
 n_3 —相距 0.2m 的 4 个 1m 长加压段，4 个加压段同时加压时，中间测量断面的变形系数值；
 n_4 —4.6m 长加压段加压，中间测量断面的变形系数值。

- 6 绘制各测点压力 p 与岩体表面径向变形 ΔR 关系曲线。
- 7 绘制各级压力下测量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、液压枕尺寸及编号、位移测表布置、位移测表编号、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 隧洞岩体水压法变形试验适用于完整和较完整的岩体。

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 洞口自由段长度应大于试验洞直径 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 地质描述除应符合附录 D 的规定外，还应包括试段开挖和试点制备的方法、试点地质素描图及观测断面钻孔柱状图。

6.6.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 位移计。
- 2 液压泵。
- 3 压力表。
- 4 温度计。
- 5 流量计。
- 6 采集系统。

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 8 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密实。

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 主测量断面应布置在试验段中部,根据需要可在主测量断面两侧间隔 0.5 倍试验洞直径处各布置一个辅助测量断面。

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 支直径向位移计或不少于 8 支半径向位移计(见图 6.6.7)。

2 根据需要可在主测量断面钻孔,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。

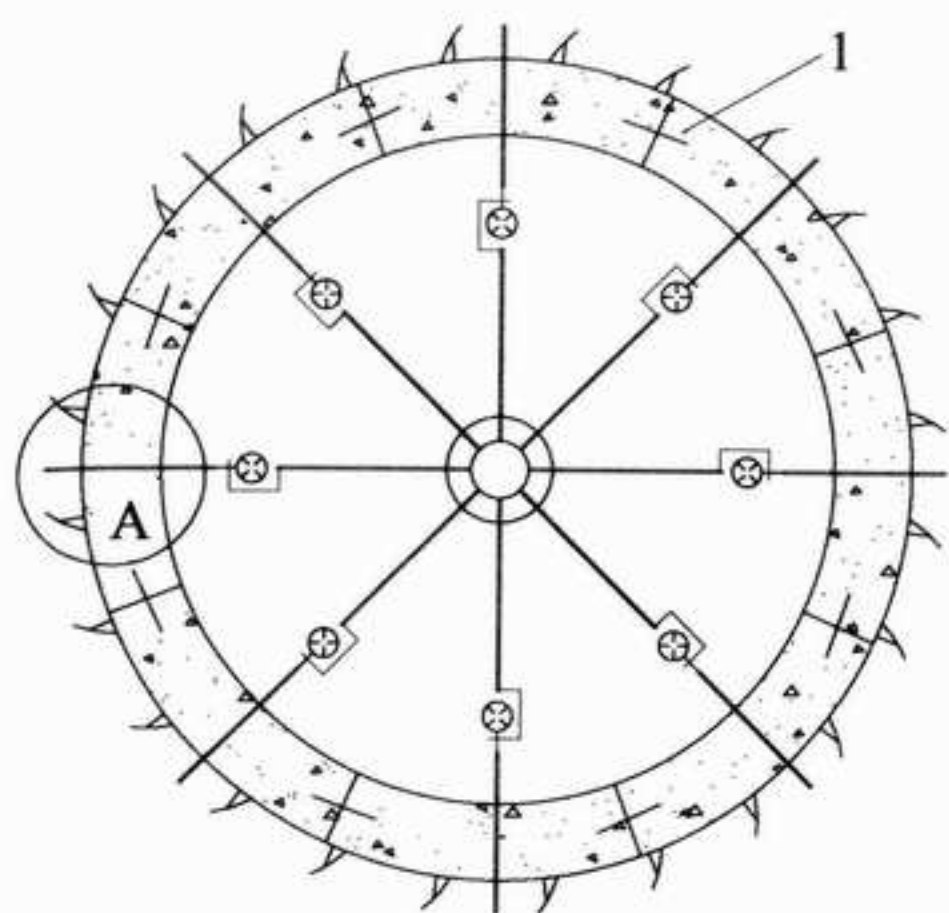
6.6.8 试验加压及稳定标准应符合下列规定:

1 试验洞内水温变化应小于 0.5°C 。

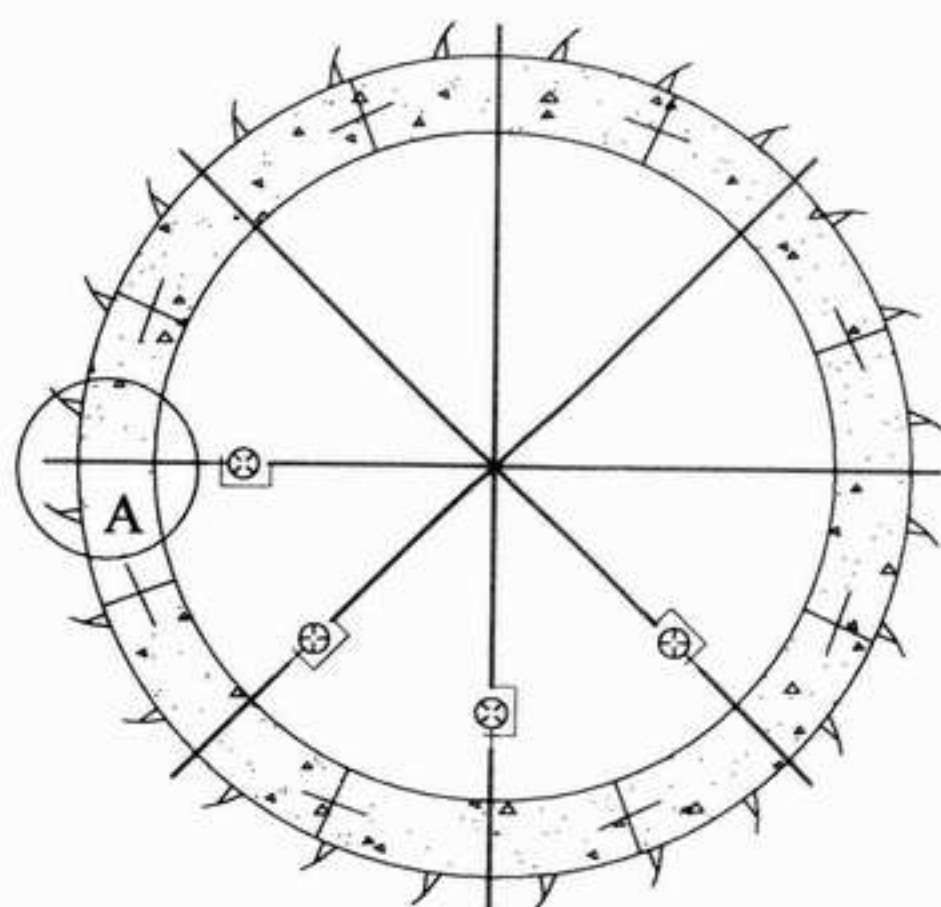
2 试验最大压力宜采用工程设计压力的 1.2 倍,等分 5~10 级加压。

3 加压方式宜采用逐级一次循环法,必要时可采用逐级多次循环法。

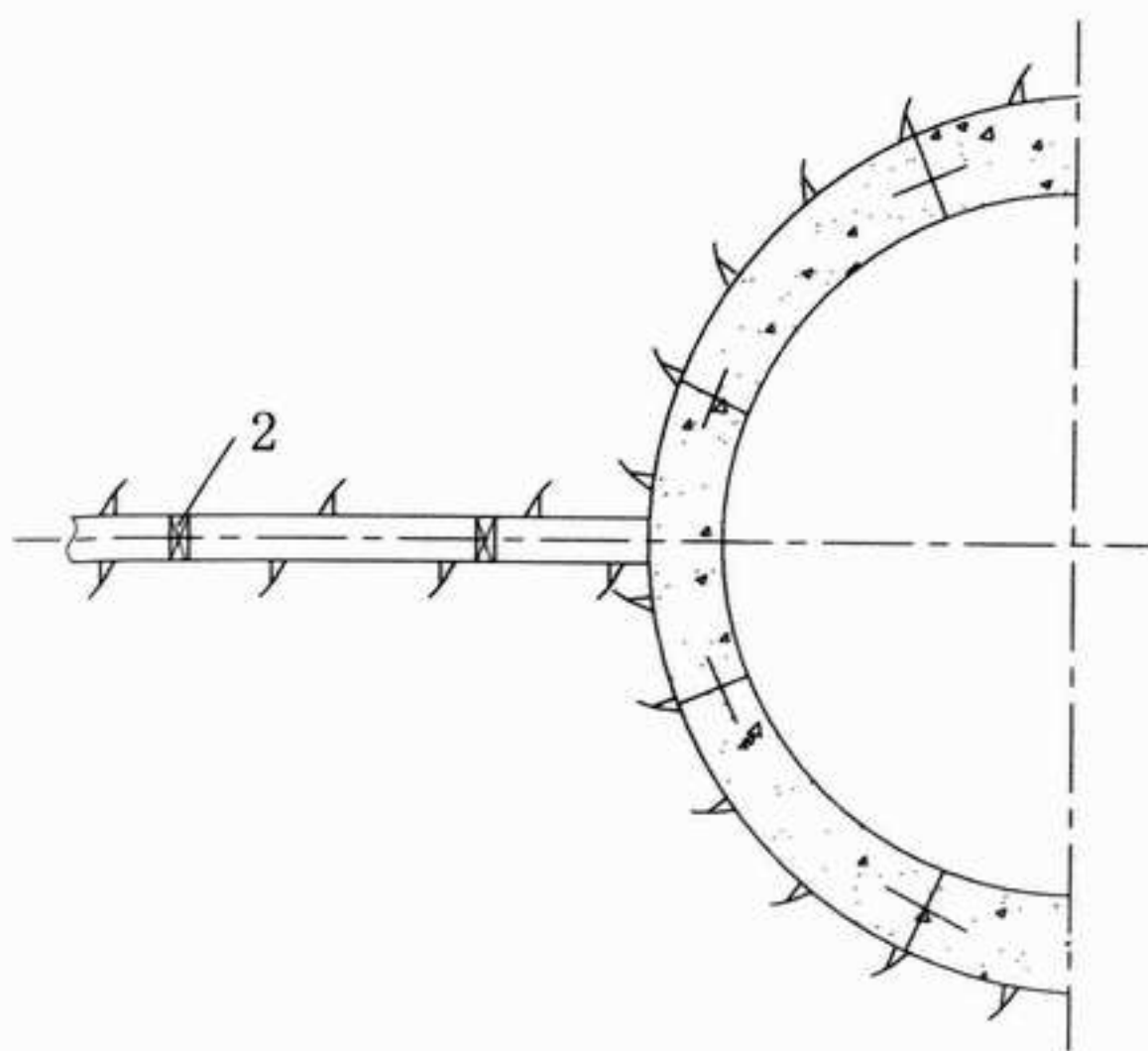
4 每级压力加压或退压后应立即读数,以后每隔 15min 读数一次,直至 1h。1h 后,按 6.1.9 条 4 款的加压或退压稳定标准规定施加或退至下一级压力。



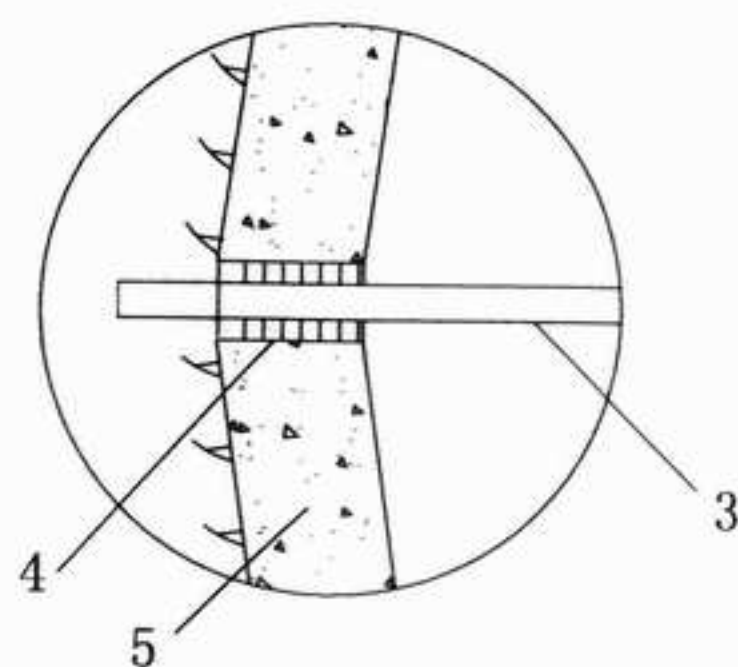
(a) 测量径向绝对位移



(b) 测量径向相对位移



(c) 多点位移计测量位移



(d) A局部放大

1—止水片；2—位移计；3—测杆；4—止水软填料；5—混凝土衬砌

图 6.6.7 变形测量系统安装示意图

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 岩体变形模量应按式 (6.6.9-1) 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 ——主测量断面岩体表面径向变形 (亦可参考辅助测量断面岩体表面径向变形), cm。

3 岩体抗力系数应按式 (6.6.9-2)、式 (6.6.9-3) 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 岩体单位抗力系数应按式 (6.6.9-4) 计算:

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

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、位移测表布置、压力、变形、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 混凝土与岩体接触面直剪试验可采用平推法或斜推法，适用于各类岩体。

7.1.2 试体布置及制备应符合下列规定：

- 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 试验推力方向宜与工程的受力方向一致。试验剪切面宜为矩形，最小边长不应小于 50cm。
 - 4 加工的基岩面尺寸应大于剪切面尺寸 10~15cm，各试体间距不应小于 1 倍最小边长。
 - 5 基岩面起伏差应为推力方向边长的 1%~2%，同一组试验基岩面起伏差应一致。
 - 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 地质描述除应符合附录 D 的规定外，还应对基岩面裂隙产状、长度、分布情况进行详细描述。

7.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 液压千斤顶或液压枕。
- 2 液压泵及管路。
- 3 压力表。
- 4 钢垫板。
- 5 滚轴排。
- 6 传力柱及传力块。
- 7 斜垫板。

8 测量支架。

9 测量表架。

10 位移测表。

7.1.5 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。混凝土试体高度宜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。宜先在基岩面上铺垫一层砂浆，试体浇筑时应保证接触面以上 5cm 范围内混凝土振捣密实。

3 制备混凝土试体的同时，应在试体预定部位埋设测量位移的标点。

4 在浇筑混凝土试体的同时，应制备一定数量的混凝土试件，在试验前测定其抗压强度。

5 平推法推力面应与剪切面垂直，斜推法的推力中心线与剪切面夹角宜为 $(15\pm 2)^\circ$ 。混凝土试体顶面应平行剪切面。

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。需要开展饱水条件下剪切试验时，可在试验前对试体泡水，泡水时间不应少于 48h 。

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。

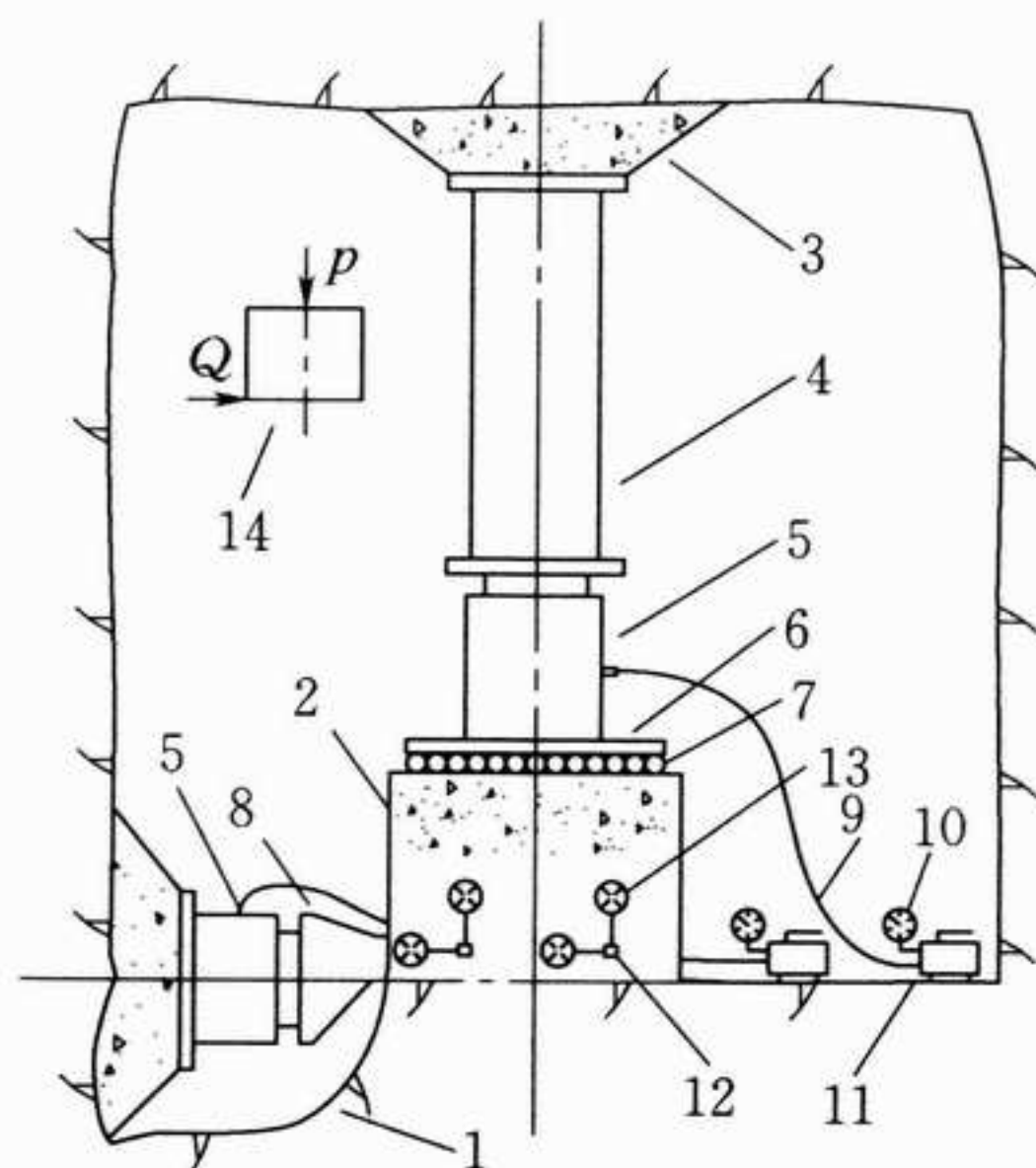
7.1.6 安装载荷系统时，宜按先法向后剪切向的次序进行。法向载荷与剪切载荷的合力作用点应位于剪切面中心（见图 7.1.6-1 和图 7.1.6-2）。

7.1.7 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。

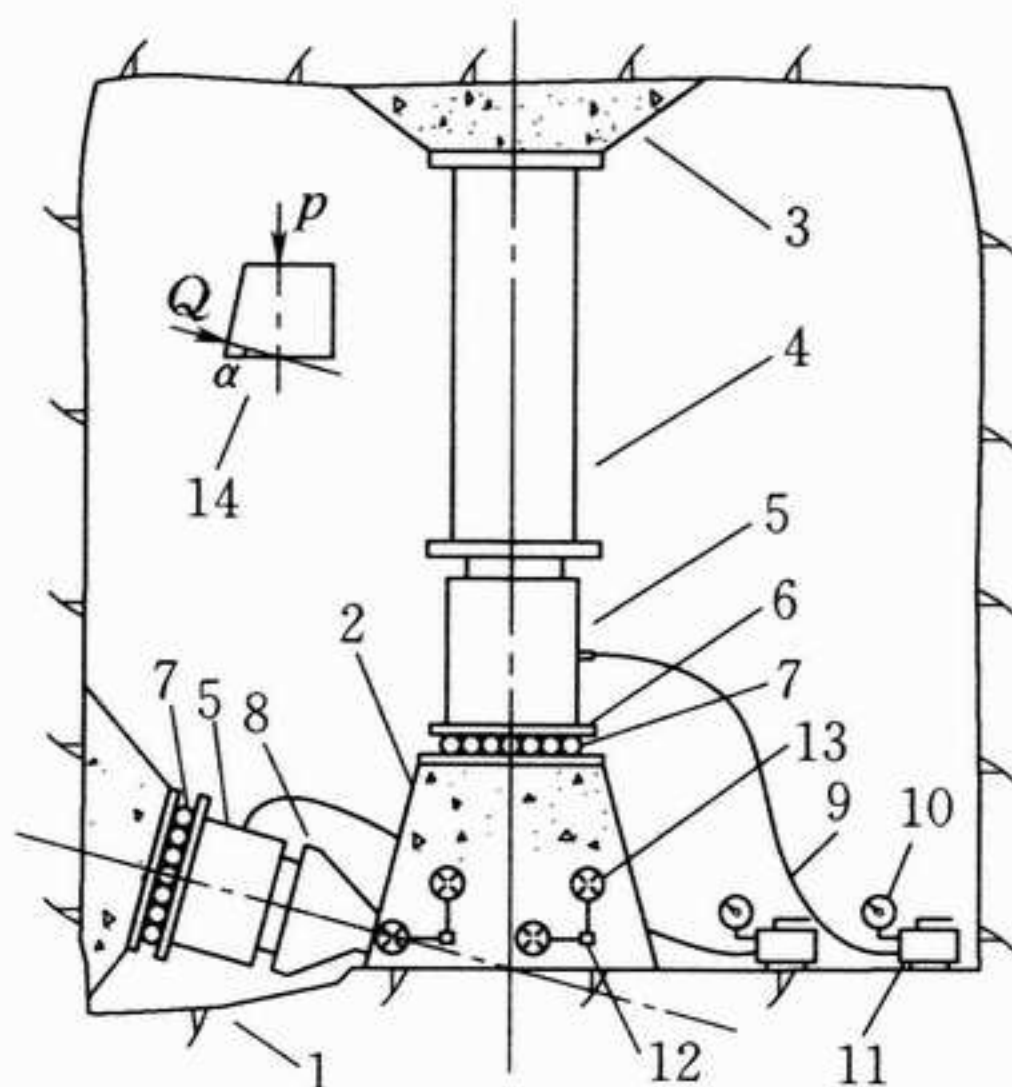
2 在垫板上依次安放滚轴排、垫板、千斤顶（或液压枕）、垫板、传力柱、顶部垫板。

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。



- 1—岩体；2—混凝土试体；3—砂浆；4—传力柱；5—液压千斤顶；
6—钢垫板；7—滚轴排；8—传力箱；9—液压管路；10—压力表；
11—液压泵；12—测量标点；13—位移测表；14—受力简图

图 7.1.6-1 平推法混凝土与岩体接触面直剪试验安装示意图



- 1—岩体；2—混凝土试体；3—砂浆；4—传力柱；5—液压千斤顶；
6—钢垫板；7—滚轴排；8—传力箱；9—液压管路；10—压力表；
11—液压泵；12—测量标点；13—位移测表；14—受力简图

图 7.1.6-2 斜推法混凝土与岩体接触面直剪试验安装示意图

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，可采用地锚或压重法作为反力装置。

7.1.8 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（见图 7.1.6-2）。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。

7.1.9 测量系统安装应符合下列规定：

1 测量支架应具有足够的刚度，支架的支点应在基岩变形影响范围以外，宜放置在 1.5 倍试体边长以外。

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 支。

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。

7.1.10 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。

7.1.11 试验加载应符合下列规定：

- 1 施加的最大法向载荷最大值宜为工程压力的 1.2 倍。
- 2 根据附录 F 对千斤顶（或液压枕）作的率定曲线和试体剪切面面积，计算施加的载荷和对应的压力表读数。
- 3 检查各测表的初始工作状态，测读初始读数。
- 4 各试体施加的法向载荷宜按等差级数分别施加，分级数不宜少于 5 级。
- 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。加载至预定载荷后，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 剪切过程中法向载荷应始终保持定值。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，加载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，法向载荷应保持不变，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试验。剪切载荷可根据抗剪断试验的最后稳定值作为最大值进行分级。
- 12 当需要测定残余剪切强度时，可在抗剪试验后反复剪切，直到剪切载荷趋于稳定。

7.1.12 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

做详细描述和记录。

试验结束后，应翻转试体，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。

7.1.13 试验成果整理应符合下列规定：

1 平推法试验应按式（7.1.13-1）、式（7.1.13-2）计算各法向载荷下的法向应力和剪切应力：

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (7.1.13-1)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (7.1.13-2)$$

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切应力，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， mm^2 。

2 斜推法试验应按式（7.1.13-3）、式（7.1.13-4）计算法向应力和剪切应力：

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{Q}{A} \sin \alpha \quad (7.1.13-3)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \cos \alpha \quad (7.1.13-4)$$

式中 α ——斜向载荷施力方向与剪切面之间的夹角。

3 式（7.1.13-1）～式（7.1.13-4）中的剪切面面积 A ，应采用试验结束后翻转试体测量的实际破坏面的面积。应根据不同的载荷方向，在试体的法向和切向荷载上，增减设备和试件的重量。剪切荷载 Q 应计入滚轴排摩阻力的影响。

4 绘制各法向应力下的剪切应力 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。必要时，还应确定比例极限值、屈服值和残余

强度。

5 根据法向应力 σ 与其对应的抗剪断峰值及抗剪峰值，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。

6 试验成果整理还应符合第 12 章的相应规定。

7.1.14 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、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 岩体结构面直剪试验可采用平推法或斜推法，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 应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 试验推力方向宜与工程岩体的受力方向一致。

4 在岩体的预定部位加工试体，试体宜加工成方柱体。

5 剪切面宜为矩形，边长不应小于 50cm，结构面以上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 试体制备应符合下列规定：

1 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，斜推法的推力中心线与剪切面夹角宜为 $(15 \pm 2)^\circ$ 。

2 当结构面上侧岩体为较坚硬岩至坚硬岩、岩体结构较完整至完整岩体时，制备试体可不浇筑保护套，但试体各面应修凿平整，顶面宜平行预定剪切面。

3 对可能出现破裂或松动的岩体，应浇筑钢筋混凝土保护套或套钢模，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。

4 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。

5 反力部位的岩体应能承受足够的反力, 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。

6 试体可在天然含水状态下剪切, 需要开展饱水条件下剪切时, 可在试验前对试样泡水, 泡水时间不应少于 48h。

7 当有特殊需要时, 应预留保护层, 采取保护措施, 并施加一定的法向应力后再行制样, 避免因应力释放扰动岩体结构面。

7.2.4 地质描述除应符合附录 D 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, 测定充填物的物理性质和黏土矿物成分。

7.2.5 主要仪器和设备应符合 7.1.4 条的规定。

7.2.6 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试验所需载荷和行程选用。

7.2.7 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。

7.2.8 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。

7.2.9 测量系统安装应符合下列规定：

1 测量支架应具有足够的刚度，支架的支点应在基岩变形影响范围以外。

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 支。

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。

7.2.10 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，应在法向位移相对稳定后，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 剪切载荷宜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定值,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 在剪切载荷缓慢退至零的过程中,法向载荷应保持定值,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 款规定进行抗剪试验,剪切载荷可按抗剪断试验的最后稳定值为最大值进行分级。

7.2.11 试验结束后,翻转试体,测量实际剪切面面积,详细描述剪切面的破坏情况、擦痕的分布、方向和长度、结构面性质与充填物厚度、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。

7.2.12 试验成果整理应符合 7.1.13 条的规定。

7.2.13 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。

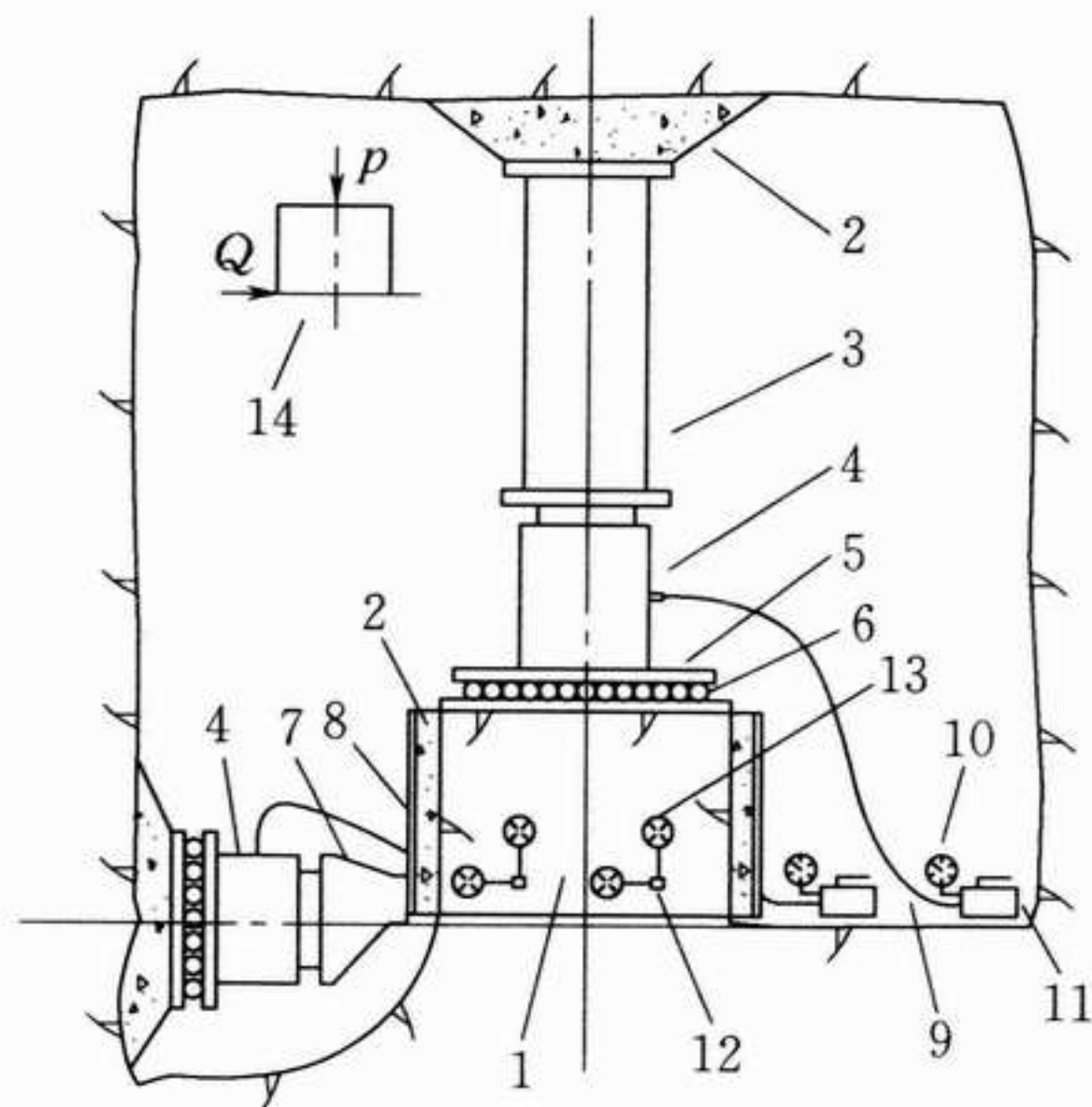
7.3 岩体直剪试验

7.3.1 岩体直剪试验可采用平推法或斜推法,适用于各类岩体。

7.3.2 试体布置应符合 7.1.2 条 1~3 款及 6 款的规定。

7.3.3 试体制备应符合下列规定:

- 1 平推法推力方向宜与工程剪切方向一致。斜推法的推力中心线与剪切面夹角宜为 $(15 \pm 2)^\circ$ 。
- 2 试体剪切面宜加工成矩形，边长不应小于 50cm，高度不宜小于最小边长的 $2/3$ 。
- 3 试体间距应大于最小边长的 1.5 倍，周围岩面宜修凿平整。
- 4 对裂隙发育、易被压坏的岩体，需浇筑钢筋混凝土保护套或套钢模。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（见图 7.3.3）。
- 5 当有特殊需要时，应预留保护层，采取保护措施，并施加一定的法向应力后再行制样，避免因应力释放扰动岩体。
- 6 试体或保护套顶面应平行预定剪切面。



1—试体；2—砂浆；3—传力柱；4—液压千斤顶；5—钢垫板；6—滚轴排；
7—传力箱；8—钢模；9—液压管路；10—压力表；11—液压泵；
12—测量标点；13—位移测表；14—受力简图

图 7.3.3 岩体直剪试验安装示意图

7.3.4 地质描述应符合附录 D 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、试验段岩体完整程度、风化程度、地下水情况进行详细描述，绘制

试验段地质素描图、试体展示图。

7.3.5 主要仪器和设备应符合 7.1.4 条的规定。

7.3.6 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。

7.3.7 法向载荷系统和剪切载荷系统安装应符合 7.1.7 条和 7.1.8 条的规定。

7.3.8 测量系统安装应符合 7.1.9 条的规定。

7.3.9 试验加载应符合 7.1.11 条的规定。

7.3.10 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, 绘制起伏差沿剪切方向的变化曲线。

7.3.11 试验成果整理应符合 7.1.13 条的规定。

7.3.12 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、剪切面积、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。

7.4 岩体三轴压缩试验

7.4.1 岩体三轴压缩试验可采用等侧向压力试验法或不等侧向压力试验法, 适用于可制成规则试体的各类岩体。

7.4.2 试体布置和试体制备应符合下列规定:

1 试体应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相同。

3 试体加工时应采取保护措施, 减小对岩体的扰动。

4 试体侧面应垂直底面, 顶面应平行底面。

5 试体表面应修凿平整, 需要时可用水泥砂浆抹平。

6 试体加载的反力部位应具有足够的强度。

7.4.3 地质描述除应符合附录 D 的规定外, 还应对试体的裂隙

分布、宽度、产状及充填物性状进行详细描述，并绘制试体展示图。

7.4.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 液压千斤顶或液压枕。
- 2 液压泵和管路。
- 3 压力表。
- 4 钢垫板。
- 5 传力柱。
- 6 传力架（箱）。
- 7 侧向反力框架。
- 8 测量支架。
- 9 测量表架。
- 10 电子位移测表或千分表。
- 11 采集装置。

7.4.5 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。

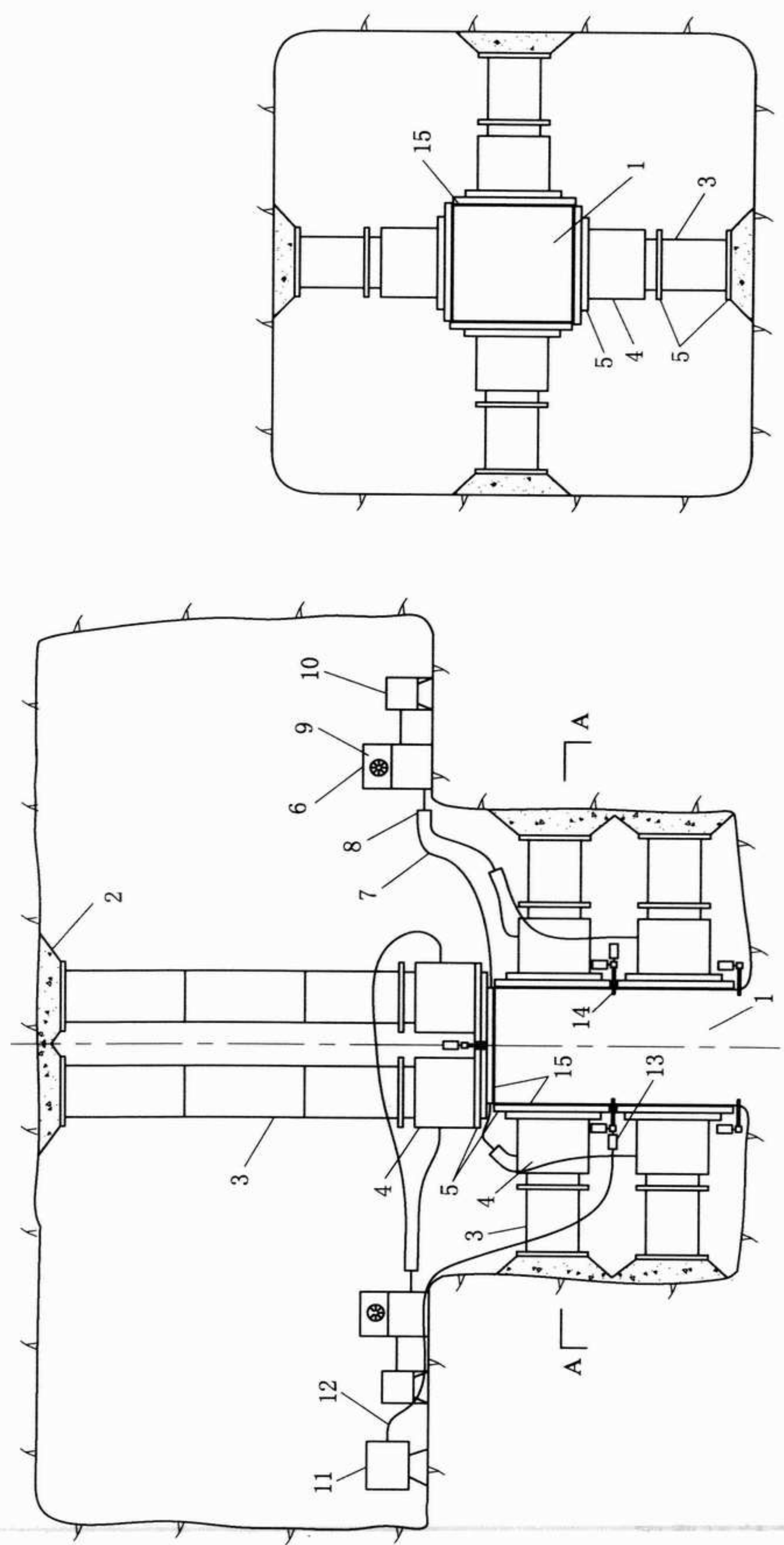
7.4.6 侧向载荷系统安装应符合下列规定：

1 试体侧面安放垫板，垫板与试体侧面之间须放置两层中间夹黄油的塑料薄膜作减摩层。

2 采用千斤顶加载时，宜采用反力座（见图 7.4.6-1）。减摩层及垫板后依次安装传力架、千斤顶垫板、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。千斤顶应呈轴对称布置。安装多个千斤顶时，相对两个面上的千斤顶应并联加载。千斤顶活塞伸出量应不小于 2cm 的行程。

3 采用液压枕加载时，宜采用反力框架（见图 7.4.6-2），反力框架应具有足够的强度。减摩层及垫板后依次安装液压枕、垫板、反力框架。相对两个面上的液压枕应采用并联加载。

4 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。

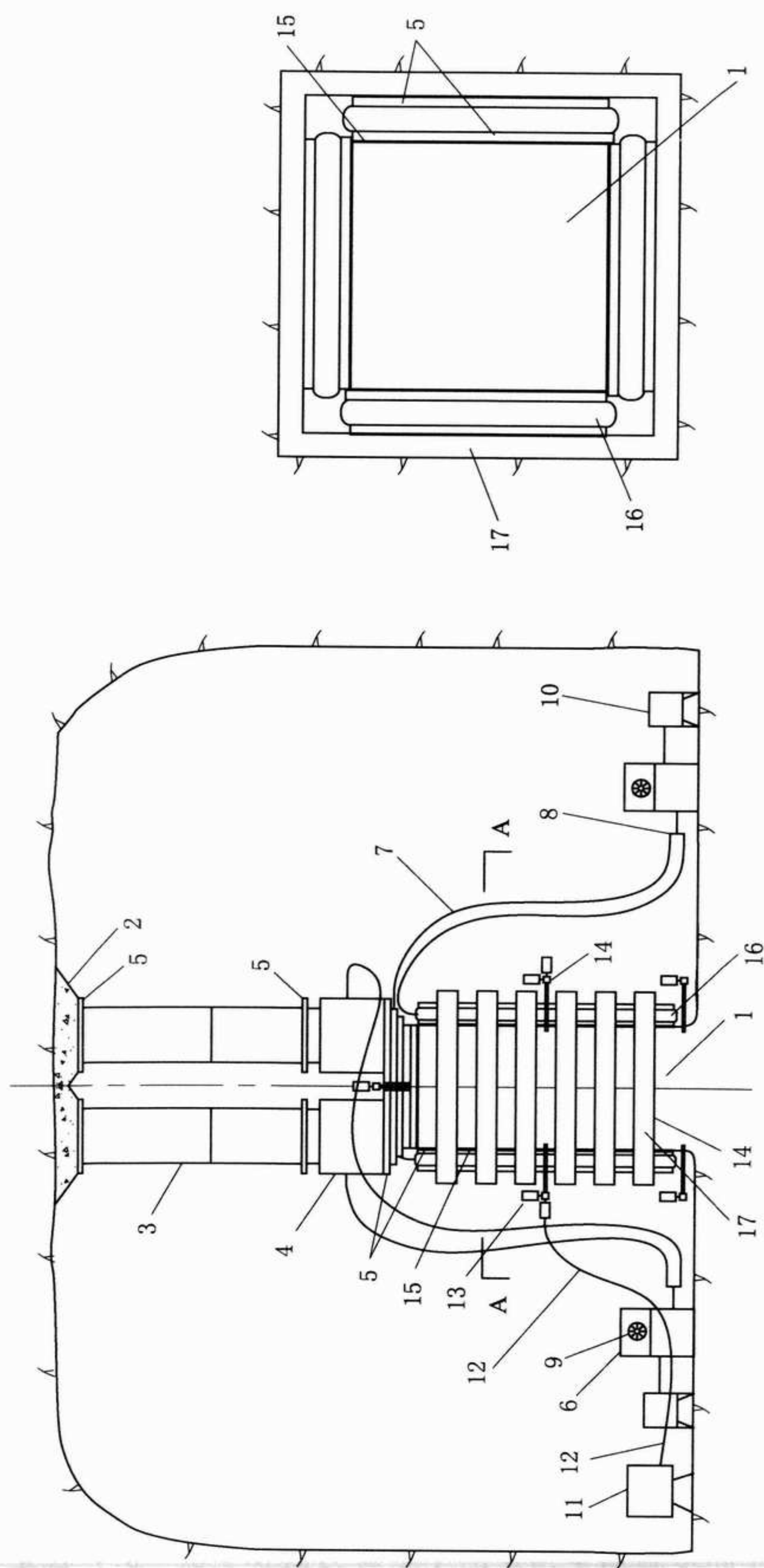


(a) 立视图

(b) A-A水平剖面图

1—试件；2—水泥砂浆；3—传力柱；4—液压千斤顶；5—钢板；6—稳压装置；7—液压管；8—液压管接头；9—压力表；10—油泵；11—数据采集装置；12—数据线；13—位移测表；14—位移测量标点；15—减摩层

图 7.4.6-1 三轴试验安装示意图 (采用液压千斤顶加载侧压)



(a) 立视图

(b) A—A水平剖面图

1—试件；2—水泥砂浆；3—传力柱；4—液压千斤顶；5—钢板；6—稳压装置；7—液压管；8—液压管接头；9—压力表；10—油泵；11—数据采集装置；12—数据线；13—位移测量点；14—位移测量标点；15—减摩层；16—液压力；17—反力框架

图 7.4.6-2 三轴试验安装示意图 (采用液压力加载侧压)

7.4.7 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应放置两层中间夹黄油的塑料薄膜作减摩层。
- 3 减摩层及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 安装多个千斤顶时，千斤顶应并联加载。
- 5 安装完毕，启动千斤顶施加接触压力。
- 6 轴向载荷系统应具有足够的强度和刚度。

7.4.8 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 在顶面中心、4个侧面中心、底面4侧边中点布置变形测点。
- 2 全部测点均应布置轴向变形测表。
- 3 4个侧面中心应布置侧向变形测表。
- 4 对电子位移测表，应连接测量数据采集装置。

7.4.9 试验步骤及稳定标准应符合下列规定：

- 1 根据附录 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 等侧向压力试验时，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。侧向和轴向压力应同步施加至预定的侧向压力值 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ，稳定 5min 后测读变形，然后单独继续施加轴向压力。
- 4 不等侧向压力试验时，可依据工程岩体应力变化特点先确定中间主应力，再确定小主应力量值及其级差。最大、最小和中间主应力应先同步施加至预定的小主应力值 $\sigma_3 = \sigma_2 = \sigma_1$ ，稳定

5min 后测读变形，然后稳定小主应力 σ_3 ，同步施加大主应力 σ_1 和中间主应力 σ_2 至预定的中间主应力值 $\sigma_2 = \sigma_1$ ，稳定 5min 后测读变形，最后稳定 σ_2 、 σ_3 ，继续施加轴向压力。

5 轴向压力应采用逐级连续加载，按预估最大轴向压力等分 8~12 级施加，当变形明显增大时应减小级差。需要时可采用逐级一次循环加载。

6 轴向压力施加过程中，侧向压力应始终保持不变。

7 轴向压力施加采用时间控制，每 5min 施加一级，每级压力施加前后各测读一次变形，直至试体破坏。

8 根据需要可开展其他应力路径三轴试验。

7.4.10 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，绘制破坏形态立体图。

7.4.11 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（或给定 σ_2 条件），绘制各试体破坏时轴向应力 σ_1 与对应小主应力 σ_3 的关系曲线（见图 7.4.11）。

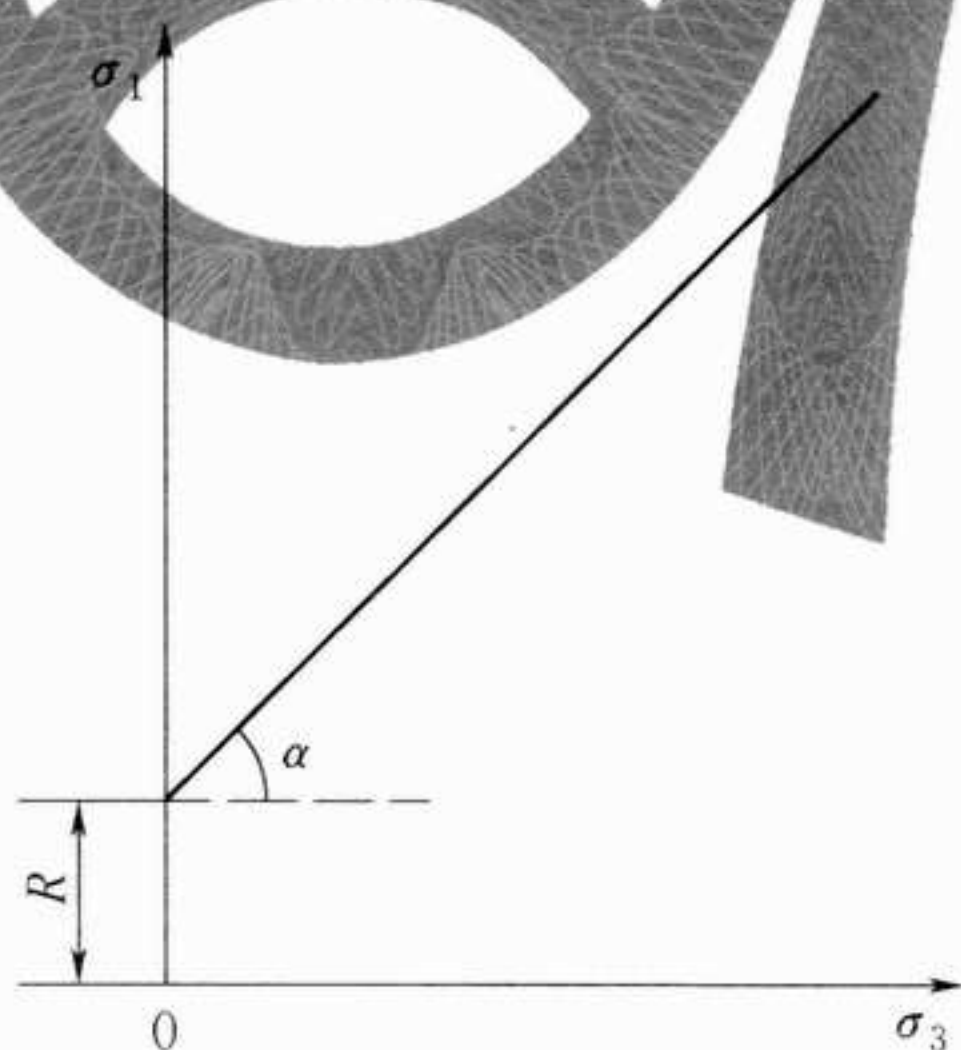


图 7.4.11 轴向应力 σ_1 与小主应力 σ_3 关系曲线

3 不同侧压力下岩体三轴抗压强度应按式（7.4.11-1）、式（7.4.11-2）计算：

$$\sigma_1 = F\sigma_3 + R \quad (7.4.11-1)$$

$$F = \tan\alpha \quad (7.4.11-2)$$

式中 σ_1 ——轴向压力, MPa;

σ_3 ——侧向压力, MPa;

F —— σ_1 — σ_3 关系直线的斜率;

R —— σ_1 — σ_3 关系直线在纵坐标轴上的截距, MPa;

α —— σ_1 — σ_3 关系直线与 σ_3 轴的夹角。

4 三向应力状态岩体抗剪强度参数应按式 (7.4.11-3)、式 (7.4.11-4) 计算:

$$f = \frac{F-1}{2\sqrt{F}} \quad (7.4.11-3)$$

$$c = \frac{R}{2\sqrt{F}} \quad (7.4.11-4)$$

式中 f ——摩擦系数;

c ——凝聚力, 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-库仑强度理论确定。

7.4.12 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、破坏形态、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。

7.5 岩体载荷试验

7.5.1 岩体载荷试验应采用刚性承压板加载方法, 适用于Ⅲ级及以下岩体。

7.5.2 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 承压面积不应小于 500cm^2 。

3 试点边缘至洞壁或底板和顶板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，无松动岩石。

7.5.3 地质描述应符合 6.1.4 条的规定。

7.5.4 主要仪器和设备应符合 6.1.5 条的规定，刚性承压板宜为圆形。

7.5.5 载荷系统安装应符合 6.1.6 条的规定。

7.5.6 测量系统安装除应符合 6.1.8 条 1 款、2 款和 5 款的规定外，还应在板外沿径向对称布置变形测表，每侧宜布置 2 支。

7.5.7 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，观测稳定初始读数，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 $0.50P_{\max}$ 时，级差为 $0.1P_{\max}$ ；载荷为 $(0.50 \sim 0.75)P_{\max}$ 时，级差为 $0.05P_{\max}$ ；载荷大于 $0.75P_{\max}$ 时，级差为 $0.025P_{\max}$ 。

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。每级载荷稳定标准应符合 6.1.9 条 4 款的规定。

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。

7.5.8 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 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。

3 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 3 倍。

7.5.9 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，必要时切槽检查。

7.5.10 试验成果整理应符合下列规定：

1 压力应按式 (7.5.10) 计算：

$$p = \frac{F}{A} \quad (7.5.10)$$

式中 p ——作用于试点上的单位压力，MPa；

F ——作用于试点上的法向载荷，N；

A ——试点承压面积， mm^2 。

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。

7.5.11 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 岩石蠕变试验

8.1 岩块单轴压缩蠕变试验

8.1.1 岩块单轴压缩蠕变试验适用于各类岩石。

8.1.2 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 4.7.2 条 2~3 款的规定。

3 试件加工精度应符合本 4.4.2 条 2~4 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 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。

8.1.3 试件描述应符合 5.1.3 条的规定。

8.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

1 钻石机、锯石机、磨石机。

2 测量平台。

3 烘箱和饱和设备。

4 蠕变试验机。

5 位移计或引伸计。

6 采集系统。

7 室内温度、湿度控制装置。

8.1.5 试验环境应符合下列规定：

1 试验过程中应保持温度和湿度恒定，温度变幅不宜超过 1℃，湿度变幅不宜超过 5%。

2 应记录整个试验过程中的温度和湿度，温度准确到 0.1℃，湿度准确到 1%。

3 试验过程中试件应采用橡皮套密封，保持试件含水状态不变，对于饱和试件的蠕变试验应配置饱水装置。

8.1.6 根据蠕变试验要求,分级不宜少于5级,可采用单级加载或分级增量加载方式。单级加载应对同一组多个试件分别施加不同的轴向应力;分级增量加载应对同一组单个试件逐级施加不同轴向应力。

8.1.7 试验步骤和稳定标准应符合下列规定:

1 在试验平台上安装岩石试件的轴向及侧向变形测量装置。

2 将已安装变形测量装置的岩石试件置于蠕变试验机承压板中心,上下承压板与试件之间放置与试件相同直径的刚性垫板,垫板厚度与直径之比不应小于0.5。

3 将试件变形测量装置(位移计或引伸计)与试验机固定测量端口连接,启动试验控制系统,缓慢抬升试验机承压板,使刚性垫板与试验机上下承压板均匀接触,受力对中。

4 以每秒0.2~0.5MPa的速率加载直至预定某一轴向应力值,加载过程中应同步采集应力与应变值。

5 试验过程中应保持压力稳定,压力允许偏差为所加压力的 $\pm 1\%$ 。

6 试验过程中压力和应变宜采用自动采集和储存。在试验初期阶段数据采集间隔不宜大于5min;在减速蠕变阶段,数据采集间隔不宜大于30min。

7 每级应力水平下蠕变稳定标准应符合下列规定:

1) 对于软岩,24h内应变差不大于 $10\mu\epsilon$ 。

2) 对于较硬岩及坚硬岩,24h内应变差不大于 $5\mu\epsilon$ 。

8 每级压力下的单轴蠕变试验时间不宜少于7d。

9 记录试验过程及破坏时出现的现象,对破坏后的试件进行描述。

8.1.8 试验成果整理应符合下列规定:

1 轴向应力计算应符合5.2.6条1款的规定。

2 绘制轴向应变 ϵ_h 、径向应变 ϵ_d 与时间 t 关系曲线、(见图8.1.8-1)、应力 σ 与时间 t 关系曲线及应力 σ 与轴向应变 ϵ_h 、径向应变 ϵ_d 关系曲线。

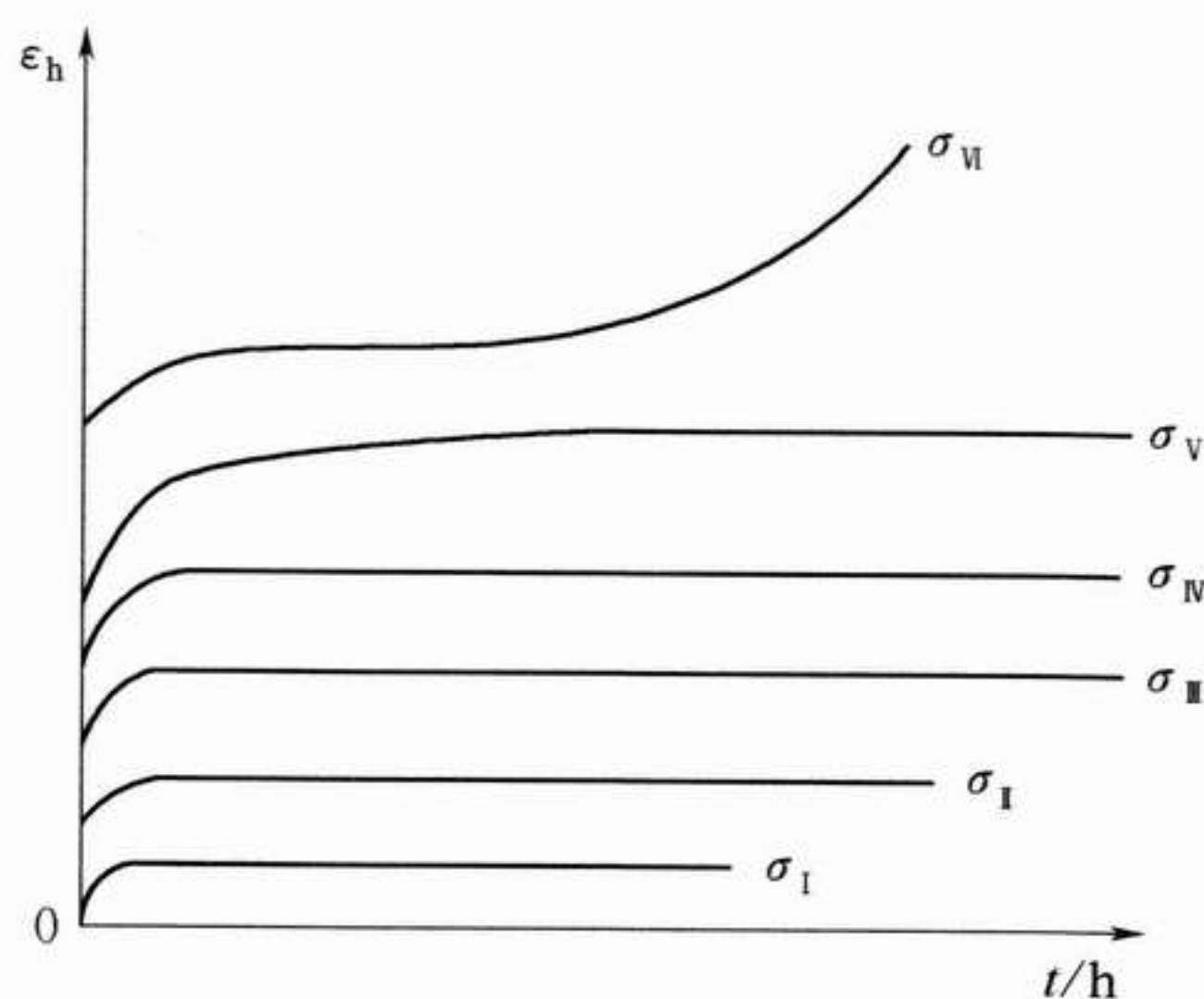
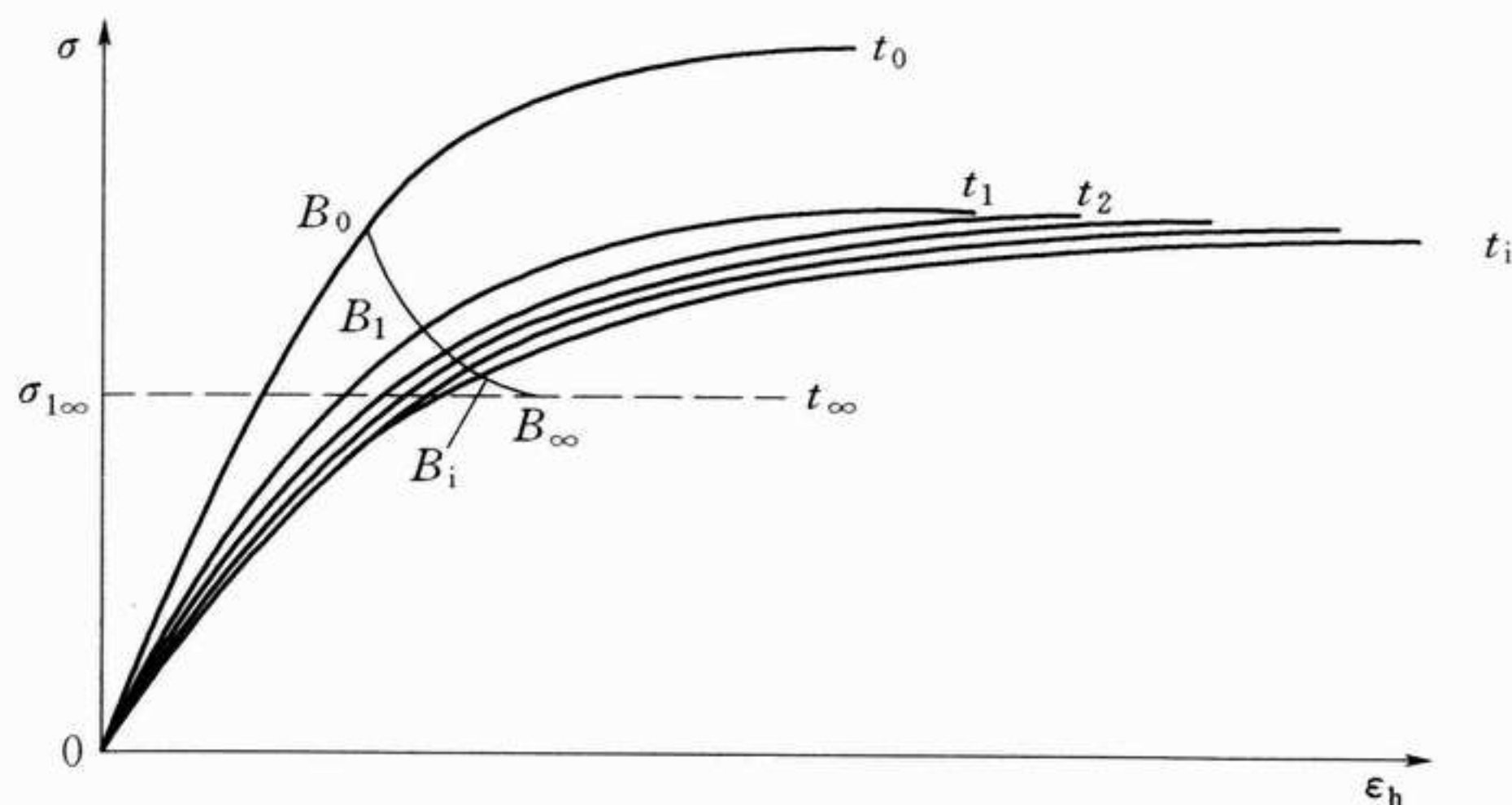


图 8.1.8-1 不同轴向应力水平下轴向应变 ϵ_h 与时间 t 关系曲线

3 对于分级增量加载方式，整理试验成果时，某一级应力下的瞬时变形和蠕变变形应考虑前一级应力的影响，绘制该应力水平下的应变 ϵ_h 与时间 t 关系曲线。

4 绘制轴向应力 σ 与轴向应变 ϵ_h 等时簇曲线。确定各历时应力 σ 与应变 ϵ_h 曲线中的屈服极限，可根据各屈服极限点组成的水平渐近线所对应的轴向应力值确定单轴压缩长期强度 $\sigma_{1\infty}$ (见图 8.1.8-2)。



t_0 —单轴压缩破坏试验； $t_1 \sim t_i$ —不同历时单轴压缩应力 σ 与应变 ϵ 曲线； B_0 —单轴压缩破坏试验屈服极限； $B_1 \sim B_i$ —不同历时应力 σ 与应变 ϵ 曲线中的屈服极限； $\sigma_{1\infty}$ —长期强度

图 8.1.8-2 单轴压缩蠕变试验等时簇曲线

5 岩石应力、变形值取三位有效数。

6 根据轴向应变 ϵ_h 与时间 t 关系曲线,可拟合确定蠕变模型与蠕变参数。

8.1.9 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、轴向和径向应变值、温度、湿度、时间、试验人员、试验日期。

8.2 岩块三轴压缩蠕变试验

8.2.1 岩块三轴压缩蠕变试验采用等侧向压力,适用于可制成圆柱体试件的各类岩石。

8.2.2 试件制备应符合 8.1.2 条 1~4 款的规定,且同一含水状态下每组试件的数量不应少于 5 个。

8.2.3 试件描述内容应符合 5.1.3 条的规定。

8.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

- 1 钻石机、锯石机、磨石机和车床。
- 2 测量平台、角尺、游标卡尺、放大镜。
- 3 三轴蠕变试验机。
- 4 位移计或应变式引伸计。
- 5 采集系统。

8.2.5 试验环境应符合 8.1.5 条的规定。

8.2.6 侧向压力选择应符合 5.3.5 条的规定。

8.2.7 轴向压力加载应符合下列规定:

- 1 轴向压力施加应采用分级增量加载方法。
- 2 三轴压缩蠕变试验前,应根据同组岩样的常规三轴压缩强度试验成果,确定各侧向压力下的分级加载增量。

3 分级增量加载级数不宜少于 5 级,宜采用等差级数进行分级。当轴向应变明显增大时,应减小轴向压力级差。

8.2.8 试验步骤和稳定标准应符合下列规定:

- 1 试件应首先采取防油措施,并按 8.1.7 条 1~3 款的规定将试件安装于三轴压缩蠕变试验机承压板上。

2 启动试验控制系统, 安装三轴蠕变试验机压力室, 排出压力室内的空气。

3 先以 0.05MPa/s 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恒定。

4 以 $0.2\sim 0.5\text{MPa/s}$ 的速率轴向加载直至预定某一轴向压力值, 同时采集应力与应变值。

5 蠕变试验过程中应保持压力稳定, 允许偏差为所加压力值的 $\pm 1\%$, 应力应变采集时间间隔应符合 8.1.7 条 6 款的规定。

8 每级压力水平下蠕变稳定标准应符合 8.1.7 条 7 款的规定。

9 记录试验过程及破坏时出现的现象, 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。

8.2.9 试验成果整理应符合下列规定:

1 每一级侧向压力下的长期强度 $\sigma_{1\infty}$ 应按 8.1.8 条 1~4 款的规定确定。

2 绘制侧向压力 σ_3 和对应的长期三轴压缩蠕变强度 $\sigma_{1\infty}$ 关系曲线, 按库仑表达式确定岩石的三轴压缩蠕变长期抗剪强度参数 f_{∞} , c_{∞} 。

3 根据轴向应变 ϵ_h 、径向应变 ϵ_d 与时间 t 关系曲线, 根据需要可分别拟合确定岩石三轴压缩蠕变模型与参数。

8.2.10 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、轴向与径向应变值、温度、湿度、时间、试验人员、试验日期。

8.3 承压板法蠕变试验

8.3.1 承压板法岩体蠕变试验可采用刚性承压板蠕变试验法或柔性承压板蠕变试验法。刚性承压板蠕变试验法适用于各类岩体, 柔性承压板蠕变试验法适用于完整和较完整的岩体。

8.3.2 试验宜在平洞内进行。试验区域应保持温度和湿度恒定,

温度变化不宜大于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，湿度变化不宜大于 $\pm 5\%$ 。

8.3.3 试点制备应符合 6.1.3 条的规定。

8.3.4 地质描述应符合 6.1.4 条的规定。

8.3.5 主要仪器和设备除应符合 6.1.5 条规定外，还应包括下列各项：

- 1 隔温装置。
- 2 稳压装置。
- 3 采集系统。

8.3.6 刚性承压板蠕变试验法载荷系统安装应符合 6.1.6 条的规定，柔性承压板蠕变试验法载荷系统安装应符合 6.1.7 条的规定。蠕变试验载荷系统还应安装稳压装置。

8.3.7 变形测量系统安装除应符合 6.1.8 条的规定外，还应安装测量数据采集系统。

8.3.8 试验加载应符合下列规定：

1 试验加载可采用单级加载或分级增量加载方式。单级加载蠕变试验应对同一组多个试点分别施加不同的载荷；分级增量加载蠕变试验应对同一个试点逐级施加不同的载荷。

2 试验最高压力不宜小于工程设计压力的 1.2 倍。分级增量加载或分级增量循环加载时，载荷分级不宜少于 3 级，各级试验载荷宜采用等差分级。

3 试验过程中压力应保持稳定，压力允许偏差为所加压力值的 $\pm 1\%$ 。

8.3.9 试验步骤及稳定标准应符合下列规定：

1 检查各测表的初始状态，读取初始读数。

2 采用单级加载方式进行蠕变试验，加载至预定压力后立即读数。保持压力稳定，测读蠕变变形，直至变形稳定。变形测读时间间隔应符合 8.1.7 条 6 款的规定。当 24h 内变形不大于 0.002mm 时可认为变形稳定，但每级加载蠕变试验时间间隔不应少于 7d。

3 采用分级增量加载方式进行蠕变时，在每级荷载蠕变试

验结束后，直接加载至下一级载荷水平，并按本条 2 款的规定，进行该级载荷水平下的蠕变试验。

4 单级加载蠕变试验时，当某级载荷蠕变试验达到本条 2 款的稳定标准后，可卸除载荷，并按 8.1.7 条 6 款的读数规定进行卸荷蠕变试验。

8.3.10 试验成果整理应符合下列规定：

1 绘制不同载荷水平条件下的变形 W 与时间 t 关系曲线。

2 根据变形 W 与时间 t 关系曲线，可拟合确定蠕变模型和相应蠕变参数。

8.3.11 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、温度、湿度、时间、试验人员、试验日期。

8.4 结构面直剪蠕变试验

8.4.1 岩体结构面直剪蠕变试验宜采用平推法，适用于岩体中各类结构面。室内结构面直剪蠕变试验可参照本试验的规定进行。

8.4.2 试验宜在专门开挖的支洞内进行，试验段内应保持温度和湿度恒定。允许温度变化宜为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，允许湿度变化宜为 $\pm 5\%$ 。

8.4.3 试体布置及加工尺寸应符合 7.2.2 条的规定。

8.4.4 试体制备应符合 7.2.3 条的规定。

8.4.5 地质描述应符合 7.2.4 条的规定。

8.4.6 主要仪器和设备除应符合 7.1.4 条的规定外，还应配备法向载荷和剪切载荷稳压装置、隔温装置和数据采集系统。

8.4.7 载荷系统安装除应符合 7.2.6 条、7.2.7 条和 7.2.8 条的规定外，还应安装法向载荷和剪切载荷稳压装置。

8.4.8 测量系统安装除应符合 7.2.9 条的规定外，还应安装数据采集系统。

8.4.9 试验加载除应符合 7.2.10 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,试验过程中法向载荷应始终保持定值,每级剪切载荷应保持为一个定值,压力允许偏差为所加压力值的 $\pm 1\%$ 。

2 剪切载荷加完一级后,应立即测读瞬时位移。在加载初期和减速蠕变阶段,变形测读时间间隔应符合 8.1.7 条 6 款的规定。

3 剪切蠕变变形稳定标准。对于硬性结构面 24h 变形不大于 0.002mm;对于软弱结构面 24h 变形不大于 0.003mm,可认为变形稳定。

4 每级剪切蠕变试验时间不宜少于 7d。

5 满足蠕变试验稳定标准后可施加下一级剪切载荷。当剪切位移明显增大时,应减小剪切载荷级差。当剪切位移速率明显增大时,应加密测读,直至在某一级剪切载荷下试体发生蠕变破坏。

8.4.10 试验结束后应按 7.2.11 条的规定对剪切面进行描述。

8.4.11 试验成果整理除应符合 7.1.13 条 1 款的规定外,还应符合下列规定:

1 绘制剪切位移 u_s 与时间 t 关系曲线。

2 根据剪切位移 u_s 与时间 t 关系曲线,绘制剪应力 τ 与剪切位移 u_s 等时簇曲线。

3 在剪应力 τ 与剪切位移 u_s 等时簇曲线上,确定各历时条件下的剪应力 τ 与剪切位移 u_s ,绘制相应历时条件剪应力 τ 与剪切位移 u_s 关系曲线,并在曲线上确定相应的屈服极限点,按各屈服极限点组成的水平渐近线确定长期剪切蠕变强度 τ_∞ 。

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,按库仑表达式确定结构面长期抗剪强度参数 f_∞ 、 c_∞ 。

5 根据剪切蠕变试验曲线可拟合确定蠕变模型和蠕变参数。

8.4.12 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、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、试验环境温度和湿度、试验人员、试验日期。

8.5 岩体三轴压缩蠕变试验

8.5.1 岩体三轴压缩蠕变试验采用等侧向压力 ($\sigma_2 = \sigma_3$)，适用于可制成规则试件的各类岩体。

8.5.2 试验宜布置于平洞内，试验区域应保持温度和湿度恒定。洞口应设置隔温装置，允许温度变化宜为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，允许湿度变化宜为 $\pm 5\%$ 。

8.5.3 试体布置和试体制备应符合 7.4.2 条的规定。

8.5.4 地质描述应符合 7.4.3 条的规定。

8.5.5 主要仪器和设备除应符合 7.4.4 条规定外，还应配备稳压装置和数据采集系统。

8.5.6 侧向载荷系统、轴向载荷系统安装除应符合 7.4.5 条、7.4.6 条和 7.4.7 条规定外，应分别增加侧向载荷稳压装置和轴向载荷稳压装置。

8.5.7 测量系统安装除应符合 7.4.8 条规定外，还应安装数据采集系统。

8.5.8 试验压力的确定应符合下列规定：

1 最大侧向压力应根据工程设计要求确定，宜按试体数量等分确定各试体的侧向压力。单个试体试验过程中应保持侧向压力不变。

2 最大轴向压力宜根据侧向压力和相应的岩体三轴压缩强度值估计。每个试点的轴向压力分级不宜少于 5 级，宜按应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 采用等差级数进行分级。当轴向变形明显增大时，应减小轴向压力级差。

8.5.9 试验步骤及稳定标准应符合下列规定：

1 检查各测表的初始状态，读取初始读数。

2 宜采用分级增量加载方式，侧向和轴向压力应同步施加

至预定的压力值 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), 测读轴向和侧向变形。

3 当轴向和侧向 24h 变形不大于 0.002mm 时, 施加第一级轴向压力, 测读轴向和侧向变形。

4 保持轴向和侧向压力稳定, 压力允许偏差为所加压力值的 $\pm 1\%$ 。测读蠕变变形, 直至变形稳定。变形采集时间间隔应符合 8.1.7 条 6 款的规定。

5 当 24h 内侧向变形和轴向变形不大于 0.002mm 时, 认为基本稳定, 可加载下一级轴向压力。

6 每级压力下蠕变试验时间不宜少于 7d。

7 当某级压力作用下试体出现加速蠕变, 可终止试验。

8.5.10 试验结束后试体描述应符合 7.4.10 条规定。

8.5.11 试验成果整理应符合 8.2.9 条的规定。

8.5.12 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、侧向压力、轴向压力、侧向变形、轴向变形、试验环境温度和湿度、试验人员、试验日期。

9 岩体应力测试

9.1 孔壁应变法测试

9.1.1 孔壁应变法测试可采用直贴式孔壁应变法或空心包体式孔壁应变法，适用于完整、较完整岩体。

9.1.2 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，测试深度应大于洞室断面最大尺寸的 2 倍。

9.1.3 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、结构及主要矿物成分。
- 3 结构面的类型、产状、宽度、充填物性质。
- 4 测点区的高地应力现象。

9.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻机及附属设备。
- 2 大、小口径金刚石钻头。
- 3 扩孔器。
- 4 磨平钻头及导向钻头。
- 5 孔壁应变计。
- 6 静态电阻应变仪及接线箱。
- 7 安装工具。
- 8 试孔器。
- 9 清洗及烘烤器具（浅孔直贴式孔壁应变法用）。
- 10 岩心围压率定器。

9.1.5 测试准备应符合下列规定：

1 根据工程和测试要求,布置测孔,安装钻机。用于应解除法全过程测试的浅孔孔壁应变法的测试孔,深度不宜超过30m。用于浅孔直贴式孔壁应变法的测试孔,宜为近水平向,并上倾 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。

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深度约50cm的中心测试孔,测试孔径宜比应变计的外径大0.2~0.7mm。中心测试孔应与大孔同轴,两孔孔轴允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$,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。

9.1.6 直贴式孔壁应变计安装应符合下列规定:

1 在孔壁应变计上均匀涂抹黏结剂。水平略向上浅孔还应在中心测试孔孔壁上均匀涂抹黏结剂。

2 用安装杆(或安装器)将应变计送入中心测试孔,利用安装杆推力(或安装器的自重)定向就位,并施加一定的预压力,使应变计牢固地粘结在孔壁上。应变计在中心测试孔中的深度不应小于解除孔孔径的1.5倍。

3 黏结剂充分固化后,检查系统绝缘值,绝缘值不应小于 $50\text{M}\Omega$ 。

4 取出安装器,记录测点深度及方位。

9.1.7 空心包体式孔壁应变计安装应符合下列规定:

1 在应变计内腔的胶筒里注满黏结剂。

2 用安装杆(或安装器)将应变计送入中心测试孔,利用安装杆推力(或安装器的自重)定向就位,将应变计牢固地粘结在孔壁上。应变计在中心测试孔中的深度不应小于解除孔孔径的

1.5 倍。

3 按 9.1.6 条 3 款、4 款的规定测定绝缘值、测点深度及方位。

9.1.8 孔壁应变法全过程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。向钻孔内冲水不少于 30min 后，每隔 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，并记为初始值。

2 按预定深度分 10~15 级进行套心应力解除。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，每解除到一级深度时，停钻不停机连续读数两次。

3 套心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终止解除，但最终解除深度（从测点到孔底的距离）不得小于解除孔孔径的 2 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 卸下钻具，取出带有应变计的岩心进行描述。

9.1.9 孔壁应变法解除前后应变差测试及稳定标准应符合下列规定：

1 应变计安装完成待黏结剂固化后，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，将应变计留在测孔中，读取定向罗盘所指示的方位。

3 进行套心解除，套心解除深度应满足 9.1.8 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，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，每隔 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。

9.1.10 测点部位岩石弹性模量和泊松比应由解除后带有应变计的岩心进行围压试验确定。当岩心不具备围压试验条件时，可取测点附近岩块进行室内力学试验确定。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 岩心围压试验宜采用逐级一次循环试验。

3 逐级一次循环法加压过程中，每级压力下每隔 5min 读数一次，相邻两次读数差不大于 $5\mu\epsilon$ 时，取最后一次读数作为稳定读数。

4 绘制应力 p 与应变 ϵ 关系曲线，计算岩石弹性模量和泊松比。

9.1.11 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，确定解除应变值。

2 根据测点部位岩石弹性模量和泊松比按附录 G 的规定计算岩体应力参数。

9.1.12 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、相应于各解除深度应变计的应变值、灵敏系数、系统绝缘值、冲水时间、各应变片及应变丛布置方向、钻孔轴向方位角与倾角、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。

9.2 孔径变形法测试

9.2.1 孔径变形法测试可采用四分向钢环式变形计法或压磁应力计法，适用于完整和较完整岩体。

9.2.2 测点布置应符合 9.1.2 条的规定。当测量岩体中某一点的三向应力状态时，宜布置交会于该空间点、两两正交的 3 个钻孔，其中一个钻孔应为铅直钻孔。

9.2.3 地质描述应符合 9.1.3 条的规定。

9.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻机及其附属设备。
- 2 大小口径金刚石钻头。
- 3 磨平钻头及导向钻头。
- 4 四分向钢环式变形计及应变仪（或压磁应力计及读数仪）。
- 5 围压率定器。
- 6 安装设备。

9.2.5 测试准备应符合下列规定：

- 1 布置钻孔，安装钻机，按预定方位进行钻进。
- 2 钻进至预定深度，取出岩心。磨平孔底，用导向钻头钻深 4~5cm 的导向孔。
- 3 钻中心测试孔，孔深约 50cm，应与大孔同轴，两孔孔轴偏差不应大于 2mm。取出中心测试孔岩心并冲洗钻孔。
- 4 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 款、3 款。
- 5 安装前应对四分向钢环式变形计或压磁应力计进行率定。

9.2.6 四分向钢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中心测试孔内，同时监视应变仪，压缩读数值宜控制在 $2000\mu\epsilon$ 。
- 3 用铁锤轻击安装杆端部，使变形计锥体与中心测试孔孔口紧密接触。
- 4 记录安装定向方向。

9.2.7 压磁应力计安装应符合下列规定：

- 1 对铅直向中心测试孔，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 对水平向中心测试孔，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。

9.2.8 四分向钢环式变形计法的测试及稳定标准应符合下列规定：

1 将变形计导线从钻具中引出，接上应变仪，向钻孔内冲水不少于 30min 后，每隔 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，并记为初始值。

2 每钻进 2cm，停钻不停机读数两次。

3 测点到孔底的最终解除深度不应小于解除孔孔径的 1.5 倍。

9.2.9 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读数仪上，向钻孔内冲水不少于 30min 后，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时，取最后一次读数作为稳定读数，并记为初始值。

2 按 9.2.8 条 2 款、3 款的规定，进行钻孔套心解除，并读数。

9.2.10 围压试验应符合 9.1.10 条的规定。

9.2.11 测试成果整理应符合下列规定：

1 四分向钢环式钻孔变形计法，成果整理步骤如下：

1) 绘制解除深度 h 与各钢环应变 ϵ_i 关系曲线。

2) 根据 $h-\epsilon_i$ 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 与应变仪读数 ϵ_i 的关系曲线。各元件率定系数应按式 (9.2.11-1) 计算：

$$K_i = \frac{\epsilon_i}{S_i} \quad (9.2.11-1)$$

式中 K_i ——元件 i 的率定系数, mm^{-1} ;

ϵ_i ——各元件的应变值;

S_i ——千分表读数, mm 。

4) 钻孔径向变形应按式 (9.2.11-2) 计算:

$$\Delta d = \frac{\epsilon_{ni} - \epsilon_{0i}}{K_i} \quad (9.2.11-2)$$

式中 Δd ——钻孔径向变形, mm ;

i ——测试元件的序号;

ϵ_{0i} ——元件 i 的初始应变值;

ϵ_{ni} ——元件 i 的最终稳定应变值。

5) 岩体应力参数计算应符合附录 G 的规定。

2 压磁应力计法, 成果整理步骤如下:

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, 各元件率定系数应按式 (9.2.11-3) 计算:

$$K = \frac{S_w}{\Delta u} \quad (9.2.11-3)$$

式中 K ——元件率定系数;

S_w ——围压器单位压力, MPa ;

Δu ——仪器读数差。

3) 记录应力值 S_{ij} 应按式 (9.2.11-4) 计算:

$$S_{ij} = K_i \Delta u \quad (9.2.11-4)$$

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, 平面应力应按式 (9.2.11-5)、式 (9.2.11-6) 计算:

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

(9.2.11-5)

$$\tan 2\theta = -\frac{\sqrt{3}(S'' - S''')}{2S' - S'' - S'''} \quad (9.2.11-6)$$

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} 应按式 (9.2.11-7) ~ 式 (9.2.11-9) 计算：

$$S_{ij} = \frac{1}{3}(A_{ij}\sigma_x + B_{ij}\sigma_y + C_{ij}\sigma_z + D_{ij}\tau_{xy} + E_{ij}\tau_{yz} + F_{ij}\tau_{zx}) \quad (9.2.11-7)$$

$$\begin{cases} A_{ij} = a_{ij}l_{i1}^2 + b_{ij}l_{i2}^2 + c_{ij}l_{i3}^2 + d_{ij}l_{i1}l_{i3} \\ B_{ij} = a_{ij}m_{i1}^2 + b_{ij}m_{i2}^2 + c_{ij}m_{i3}^2 + d_{ij}m_{i1}m_{i3} \\ C_{ij} = a_{ij}n_{i1}^2 + b_{ij}n_{i2}^2 + c_{ij}n_{i3}^2 + d_{ij}n_{i1}n_{i3} \\ D_{ij} = 2(a_{ij}l_{i1}m_{i1} + b_{ij}l_{i2}m_{i2} + c_{ij}l_{i3}m_{i3}) + d_{ij}(l_{i1}m_{i3} + l_{i3}m_{i1}) \\ E_{ij} = 2(a_{ij}m_{i1}n_{i1} + b_{ij}m_{i2}n_{i2} + c_{ij}m_{i3}n_{i3}) + d_{ij}(m_{i1}n_{i3} + m_{i3}n_{i1}) \\ F_{ij} = 2(a_{ij}n_{i1}l_{i1} + b_{ij}n_{i2}l_{i2} + c_{ij}n_{i3}l_{i3}) + d_{ij}(n_{i1}l_{i3} + n_{i3}l_{i1}) \end{cases} \quad (9.2.11-8)$$

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 + 2\cos 2\theta_{ij} \\ b_{ij} = -\mu \\ c_{ij} = 1 - 2\cos 2\theta_{ij} \\ d_{ij} = 4\sin 2\theta_{ij} \end{cases} \quad (9.2.11-9)$$

式中

i ——钻孔序号；

j ——测试方向序号；

θ ——测量直径与位于 $x-y$ 平面内的钻孔坐标轴的夹角；

l_{i1} 、 m_{i1} 、 n_{i1} 、 l_{i2} 、 m_{i2} 、 n_{i2} 、 l_{i3} 、 m_{i3} 、 n_{i3} ——相应测点钻孔坐标系各轴对大地坐标系的方向余弦。

9.2.12 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、测量元件的率定系数、相应于各解除深度的测量元件的读数、灵敏系数、系统绝缘值、冲水时间、测量元件的布置方向、钻孔轴向方位角与倾角、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。

9.3 孔底应变法测试

9.3.1 孔底应变法测试适用于完整、较完整的岩体，要求钻孔内无水，测试深度不宜大于 30m。

9.3.2 测点布置应符合 9.1.2 条的规定。当测量岩体中某一点的三向应力状态时，应布置交会于该空间点、两两正交的三个钻孔，其中一个钻孔应为铅直向上钻孔。

9.3.3 地质描述应符合 9.1.3 条的规定。

9.3.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻机及附属设备。
- 2 大、小口径金刚石钻头。
- 3 扩孔器。
- 4 磨平钻头。
- 5 孔底应变计。
- 6 静态电阻应变仪及接线箱。
- 7 安装工具。
- 8 清洗及烘烤器具。

9.3.5 测试准备应符合下列规定：

1 根据测试要求，布置钻孔，钻孔宜向上倾斜 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。安装钻机，按预定方位进行钻进。

2 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。当不能满足试验条件时，继续钻进，直至满足试验条件。

3 粗磨孔底，再细磨至平整光滑。

4 用清洁剂洗净孔底并用烘烤器烘干。

9.3.6 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黏结剂。

2 用安装杆将带有孔底应变计的安装器送入孔中，当接近孔底时应定向就位。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 黏结剂固化后，检查系统绝缘值，绝缘值不应小于 $50\text{M}\Omega$ 。

4 取出安装器。

9.3.7 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。向钻孔内冲水不少于 30min 后，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 0.8 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，做好记录。

6 卸下钻具，取出带有应变计的岩心进行描述。

9.3.8 测试成果整理应符合附录 G 的规定。

9.3.9 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、解除深度、相应于各解除深度的应变计的应变值、灵敏系数、系统绝缘值、冲水时间、各应变片及应变丛布置方向、钻孔轴向方位角与倾角、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。

9.4 水压致裂法测试

9.4.1 水压致裂法测试适用于完整和较完整岩体。

9.4.2 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 1Lu （吕荣）。
- 3 当测量岩体中某一点的三向应力状态时，宜布置交汇于该空间点、两两正交的三个钻孔，其中一个钻孔应为铅直钻孔。

9.4.3 地质描述除应符合 9.1.3 条的规定外，还应描述测试段岩体的渗透性。

9.4.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻机及附属设备。
- 2 橡胶封隔器（与钻孔孔径匹配）及高压软管。
- 3 压力传感器和流量传感器。
- 4 数据采集仪或函数记录仪。
- 5 高压大流量电动压力泵。
- 6 印模器或钻孔电视录像设备。

9.4.5 水压致裂法仪器设备的选择应符合下列规定：

1 压力泵的选择宜采用大流量和高压力的电动压力泵。泵压不应小于 40MPa ，流量不应小于 8L/min ，可两台并联。

2 压力传感器的量程范围宜为 $0\sim 60\text{MPa}$ ，精度应优于 $0.5\%F\cdot S$ 。

3 流量传感器的量程不应小于 20L/min ，精度优于 0.5L/min 。

9.4.6 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 率定压力传感器与流量传感器，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。

9.4.7 测试过程应符合下列规定：

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，打开数据采集仪或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 观察压力与时间关系曲线走势，当泵压上升至某一峰值压力 p_b 时，压力突然下降或曲线出现拐点，岩壁破裂；继续保持压力泵流量不变，压力持续下降或保持某一稳定压力，压裂缝扩展，即可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至零。

5 按本条 2~4 款连续进行加压与卸压循环的压裂缝重张试验，循环次数不应少于 3 次。

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 款进行下一测试段的测试，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方向。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。

9.4.8 三孔交汇钻孔的水压致裂法地应力测量，应依次对三个钻孔按 9.4.6 条的规定进行测试。

9.4.9 测试成果整理应符合下列规定：

1 根据实测压裂过程曲线，确定压裂过程中测段的破裂压力 p_b 、瞬时关闭压力 p_s 和重张压力 p_r 等特征压力参数。

2 根据印模或钻孔录像资料，绘制压裂缝形态，确定压裂缝方位。

3 当钻孔为铅直方向时，且压裂缝方向平行于钻孔轴线时，压裂缝方向即为钻孔横截面上最大水平主应力 S_H 方向。最大水平主应力 S_H 和最小水平主应力 S_h 应按式 (9.4.9-1) ~

(9.4.9-3) 计算:

$$S_h = p_s \quad (9.4.9-1)$$

$$S_H = 3S_h - p_b - p_0 + \sigma_t \quad (9.4.9-2)$$

或 $S_H = 3S_h - p_r - p_0 \quad (9.4.9-3)$

式中 S_H 、 S_h ——钻孔横断面上的大、小平面对称主应力, MPa;

p_b ——岩体破裂压力, MPa;

p_0 ——岩体孔隙压力, MPa;

σ_t ——岩体抗拉强度, MPa;

p_s ——瞬时关闭压力, MPa;

p_r ——岩体重张压力, MPa。

4 当压力传感器安置在地面时, 实测的压力还需叠加静水压力 p_h , MPa。

5 采用多向交汇钻孔时, 岩体空间应力参数计算应符合附录 G 的规定。

9.4.10 测试记录应包括工程名称、岩石名称、钻孔编号与位置及其方位、测段编号与深度、试验方法、地质描述、压力表率定资料、压力传感器与流量传感器率定资料、破裂压力、瞬时关闭压力、重张压力、测试过程中发生的异常现象、测试人员、测试日期。

9.5 表面应变法测试

9.5.1 表面应变法测试可采用表面应力解除法或表面应力恢复法, 适用于完整、较完整岩体。

9.5.2 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。

9.5.3 地质描述应符合 9.1.3 条的规定。

9.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项:

1 掏槽机具及配套设备。

2 测量元件 (应变计、位移计)。

- 3 读数仪。
- 4 液压枕及压力表。
- 5 防护器具。
- 6 率定设备。

9.5.5 测试准备应符合下列规定：

- 1 根据测试要求选择试验区域、测点和试验方法。
- 2 修整安装测试元件的岩面。采用应变计掏槽解除法时，测点周围岩面的修整范围应大于解除岩心直径的 2 倍；采用位移计掏槽解除法时，测点周围岩面的修整范围应大于掏槽长度的 2 倍；对于表面应力恢复法，在安装测量元件的岩面，其长和宽各应为槽长的 2 倍。岩面起伏差不应超过 0.5cm。
- 3 采用应变计掏槽解除法时，在已修整的测点范围内，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。清洗应变计粘贴部位，并进行防潮处理。采用位移计掏槽解除法时，在已修整的测点范围内，选定安装位移计标点的位置，两个标点之间的距离应大于掏槽长度的 2 倍，并对位移计安装部位进行防潮和防护处理。

- 4 率定应变计、位移计、液压枕。

9.5.6 表面应力解除法仪器安装应符合下列规定：

- 1 在经处理的岩面上布置测量元件。采用应变计时每组不应少于 3 支。
- 2 安装测量元件。检查应变计的测试系统绝缘度，绝缘度不应小于 50M Ω 。
- 3 安装测量元件防护罩，引出测量导线。

9.5.7 表面应力恢复法仪器安装应符合下列规定：

- 1 在经处理的岩面上，安装测量元件，其方向应与解除槽方向垂直，测量元件的中心点到解除槽中心线的距离为槽长的 1/3。
- 2 测量元件的安装、防潮及防护处理应符合 9.5.6 条 2 款、3 款的规定。

3 测量元件安装完毕后,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 $5\mu\epsilon$,位移计不超过 $5\mu\text{m}$,可视为稳定,取最后一次读数作为初始值。

4 按解除槽预定深度及宽度掏槽,每掏槽 2cm 测读测量元件读数一次,直至满足埋设液压枕要求。

5 掏槽结束后,按本条 3 款规定的稳定标准测读测量元件读数。

6 清洗解除槽,埋入液压枕,填筑并捣实砂浆,养护 7d。

9.5.8 表面应力解除法测试及稳定标准应符合下列规定:

1 从掏槽机具中引出测量元件电缆并接通仪器,向测试点连续冲水 30min,检查隔温,防潮效果,并在冲水过程中,检查测量元件读数有无漂移。稳定要求在符合 9.5.7 条 3 款的规定后,方可开始解除。

2 用掏槽机具分级解除,每级 2cm,每级解除后测读测量元件稳定读数。

3 解除结束后,按 9.5.7 条 3 款的稳定标准测读测量元件读数。

4 圆形掏槽解除最终解除深度不应小于解除岩体岩心直径的 0.5 倍。长槽形解除最终解除深度不应小于解除槽长的 0.6 倍。

9.5.9 表面应力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测量元件读数。

2 最大一级压力,应大于掏槽解除结束时测量元件稳定值的相应压力。

3 取出液压枕,并描述其埋设情况。

9.5.10 测试成果整理应符合下列规定:

1 计算各级解除深度时的测量元件变化值:

1) 采用钢弦应变计时应按式 (9.5.10-1) 计算:

$$\epsilon_i = \zeta (f_{ni}^2 - f_0^2) \quad (9.5.10-1)$$

式中 ϵ_i ——解除应变值, $\mu\epsilon$;

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, $\mu\epsilon/\text{Hz}^2$ 。

2) 采用电阻片应变计时应按式 (9.5.10-2) 计算:

$$\epsilon_i = \epsilon_n - \epsilon_0 \quad (9.5.10-2)$$

式中 ϵ_i ——解除应变值, $\mu\epsilon$;

ϵ_n ——与解除深度对应的应变计读数, $\mu\epsilon$;

ϵ_0 ——应变计初始读数, $\mu\epsilon$ 。

3) 采用位移计时应按式 (9.5.10-3) 计算:

$$W_i = W_n - W_0 \quad (9.5.10-3)$$

式中 W_i ——解除位移值, μm ;

W_n ——与解除深度对应的位移计读数, μm ;

W_0 ——位移计初始读数, μm 。

2 绘制各测量元件读数与相应解除深度的关系曲线。

3 根据各测量元件读数与相应解除深度的关系曲线, 结合测点地质条件和试验情况, 确定各测量元件的最终解除变化值。

4 表面应力解除法最大及最小主应力计算应符合下列规定:

1) 采用位移计测量时应按式 (9.5.10-4) ~ 式 (9.5.10-6) 计算:

$$\sigma_n = \frac{2W\rho E}{l \left[(3 + \mu) - \frac{2(1 + \mu)}{\rho^2 + 1} \right]} \quad (9.5.10-4)$$

式中 σ_n ——槽缝的初始法向应力, 垂直于槽缝延伸方向, MPa;

l ——槽缝长度, cm;

W ——测点切槽解除后的岩体法向解除位移值, cm;

E ——岩石弹性模量, MPa;

μ ——岩石泊松比;

ρ ——与位移计测点位置相关的系数, 可按式 (6.2.8-2) 计算。

按照 0° 、 90° 和 45° 向进行切槽解除法测试, 按式 (9.5.10-5)

即可求得洞壁表面二维应力结果：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{n1} \\ \sigma_y &= \sigma_{n2} \\ \tau_{xy} &= \sigma_{n3} - \frac{\sigma_{n1} + \sigma_{n2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (9.5.10-5)$$

式中 σ_{n1} 、 σ_{n2} 、 σ_{n3} —— 0° 、 90° 和 45° 方向槽缝的初始法向应力。

由式 (9.5.10-5) 求得二维平面应力状态 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ 之后，其主应力量值 (σ_1, σ_2) 及其方向 (α) 为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2} \\ \alpha &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (\sigma_x - \sigma_y > 0) \\ \alpha &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} + 90^\circ \quad (\sigma_x - \sigma_y < 0) \end{aligned} \right\} \quad (9.5.10-6)$$

2) 采用应变计测量时应按式 (9.5.10-7) 计算：

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu\epsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu\epsilon_1) \end{aligned} \right. \quad (9.5.10-7)$$

式中 E ——岩石弹性模量，MPa；

μ ——岩石泊松比；

ϵ_1 、 ϵ_2 ——最大及最小主应变， $\mu\epsilon$ ，可按应变丛不同布置形式计算。

5 表面应力恢复法的测试应力应按下列方法进行：绘制表面应力恢复压力 p 与测量元件读数的关系曲线，确定测点部位垂直槽缝岩体应力值。

9.5.11 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、测量元件布置方式、测量元件的率定资料、相应于各级解除深度时的测量元件读数、表面应力恢复法各级加卸载时测量元件的读数、测试人员、测试日期。

10 岩石声波测试

10.1 岩块声波测试

10.1.1 岩块声波测试可分为纵波速度测试或横波速度测试，适用于能制成规则试件的各类岩石。

10.1.2 试件制备应符合 4.7.2 条 2 款的规定。

10.1.3 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 试件中的层理、裂隙及其与测试方向间的关系。
- 3 含水状态。
- 4 试件尺寸。

10.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻石机、锯石机、磨石机。
- 2 岩石声波参数测试仪。
- 3 纵、横波换能器。
- 4 游标卡尺。
- 5 标准玻璃棒。
- 6 带加力装置的测试架。

10.1.5 岩石声波参数测试仪主要技术要求应符合下列规定：

- 1 发射脉冲电压不应小于 250V。
- 2 接收放大器的频带宽宜为 50kHz~1MHz，总增益应大于 80dB，并分档连续可调。
- 3 计时器的最小读数为 $0.1\mu\text{s}$ ，量程不应小于 $10000\mu\text{s}$ 。

10.1.6 换能器的选择应符合下列规定：

- 1 换能器频带范围宜为实际工作频率的 2~3 倍。
- 2 换能器频率应根据试件直径与试件材料性质在 50kHz~1MHz 选用，并应满足式 (10.1.6) 的要求：

$$f_p \geq \frac{2V_p}{D} \quad (10.1.6)$$

式中 f_p ——换能器发射频率, Hz;

V_p ——岩块纵波速度, m/s;

D ——试件直径, m。

10.1.7 测试步骤应符合下列规定:

1 测试前应测定声波在不同长度的标准玻璃棒中的传播时间, 绘制时距曲线, 确定仪器系统的零延时。

2 测定纵波速度时, 应采用纵波换能器, 并用凡士林或黄油作耦合剂; 测定横波速度时, 应采用横波换能器, 并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的两个端面上, 换能器的中心在试件的轴线上。采用折射波法 (即平透法) 时, 应将换能器布置在试件同一侧, 并用游标卡尺测量发射换能器与试件接触面的中心点到接收换能器与试件接触面的中心点之间的距离。

4 非受力状态下, 测试时应将试件置于测试架上, 对发射和接收换能器施加约 50kPa 的压力, 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。测试时应采用承压式声波换能器, 测定试件受力方向纵波或横波在试件中的传播时间。

6 更换换能器时, 应按本条 1 款规定测定仪器系统的零延时。

7 距离测量应准确至 0.1mm, 时间测量应准确至 0.1 μ s。

10.1.8 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应按式 (10.1.8-1)、式 (10.1.8-2) 计算:

$$V_p = \frac{L}{t_p - t_0} \quad (10.1.8-1)$$

$$V_s = \frac{L}{t_s - t_0} \quad (10.1.8-2)$$

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;

t_p ——纵波在试件中的传播时间, s;

t_s ——横波在试件中的传播时间, s;

t_0 ——仪器系统的零延时, s。

2 岩块动弹性参数应按式 (10.1.8-3) ~ 式 (10.1.8-8) 计算:

$$\mu_d = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (10.1.8-3)$$

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d} \times 10^{-3} \quad (10.1.8-4)$$

$$E_d = 2\rho V_s^2 (1 + \mu_d) \times 10^{-3} \quad (10.1.8-5)$$

$$G_d = \rho V_s^2 \times 10^{-3} \quad (10.1.8-6)$$

$$\lambda_d = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \times 10^{-3} \quad (10.1.8-7)$$

$$K_d = \rho \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{3} \right) \times 10^{-3} \quad (10.1.8-8)$$

式中 μ_d ——动泊松比;

E_d ——动弹性模量, MPa;

G_d ——动剪切模量, MPa;

λ_d ——动拉梅系数, MPa;

K_d ——动体积模量, MPa;

ρ ——试件的密度, g/cm³。

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。

10.1.9 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。

10.2 岩体声波测试

10.2.1 岩体声波测试可分为表面声波测试、单孔声波测试或孔间穿透声波测试，适用于各类岩体。

10.2.2 测试布置应符合下列规定：

- 1 测区应布置在具有代表性的工程岩体部位。
- 2 测线布置宜平行或垂直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 采用换能器激发震源时，震源与接收点的距离不应大于3m；采用锤击震源时，震源与接收点的距离宜为3~10m；采用电火花震源时，震源与接收点的距离宜为10~30m。

5 单孔声波测试发射换能器与接收换能器的距离宜为0.3m或0.5m，测试点距宜为0.2m。

6 孔间穿透声波测试的两钻孔轴线宜在同一平面内且相互平行，测试点距宜为0.2~1.0m。

10.2.3 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。

10.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 岩石声波参数测定仪、地震仪等信号记录仪。
- 2 声波激发装置。
- 3 增压式柱状换能器。
- 4 一发双收换能器。
- 5 弯曲式接收换能器。
- 6 夹心式发射换能器。
- 7 供水及止水设备。

- 8 干孔换能器。
- 9 换能器扶位器。
- 10 标准玻璃棒。
- 11 钢卷尺、测绳。
- 12 绞车。

10.2.5 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 测量震源与换能器中心的距离应准确至 0.01m。
- 3 纵波换能器与岩体应采用清水、黄油、凡士林或石膏材料进行耦合。横波换能器与岩体应采用铝箔或铜箔进行耦合。

10.2.6 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。
- 2 钻孔应冲洗干净，孔内应注满清水。
- 3 单孔声波测试时，应采用一发双收换能器，并安装扶位器。
- 4 孔间穿透声波测试时，换能器应安装扶位器，测量两孔口中心点的距离、钻孔的倾角和方位角，距离测量应准确至 0.01m，角度测量应准确至 0.1° ，计算不同深度处两测点间的距离。
- 5 对上倾的测孔或不能储水的钻孔，应采取有效的供水、止水措施。

- 6 对软岩应采用干孔换能器。

7 测试前，可利用浅水池模拟现场测试，将换能器按间距从小至大平行移动，逐点测记初至波到达时间，绘制时距曲线，确定仪器与换能器系统零延时。

10.2.7 测试及稳定标准应符合下列规定：

1 设定采集参数，观察显示屏上的波形，波形稳定后，调整时标至纵波或横波初至位置，测读声波传播时间，对智能化仪器可利用自动关门装置测读声波传播时间，准确至 $0.1\mu\text{s}$ 。

- 2 每一测点应读数 3 次，3 次读数相对误差不应大于 3%，

测点的读数应取 3 次读数的平均值。

3 横波的初至时间可按下列方法判别：

- 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) 采用锤击震源，正向和反向锤击，横波相位改变 180° ；采用换能器震源，调整发射电压极性，横波相位改变 180° 。
- 5) 利用横波换能器测定横波的传播时间。

10.2.8 测试成果整理应符合下列规定：

1 表面声波测试和单孔声波测试时，岩体速度应按式 (10.2.8-1)、式 (10.2.8-2) 计算：

$$V_p = \frac{L}{t_{p2} - t_{p1}} \quad (10.2.8-1)$$

$$V_s = \frac{L}{t_{s2} - t_{s1}} \quad (10.2.8-2)$$

式中 V_p ——纵波速度，m/s；

V_s ——横波速度，m/s；

L ——两接收换能器中心点的距离，m；

t_{p1} 、 t_{p2} ——第 1、第 2 接收换能器纵波初至时间，s；

t_{s1} 、 t_{s2} ——第 1、第 2 接收换能器横波初至时间，s。

2 孔间穿透声波测试时，岩体波速应按式 (10.2.8-3)、式 (10.2.8-4) 计算：

$$V_p = \frac{L}{t_p - t_0} \quad (10.2.8-3)$$

$$V_s = \frac{L}{t_s - t_0} \quad (10.2.8-4)$$

式中 V_p ——纵波速度，m/s；

V_s ——横波速度，m/s；

L ——震源与接收换能器的距离，m；

t_p ——纵波从震源传播到接收换能器的时间，s；

t_s ——横波从震源传播到接收换能器的时间, s;

t_0 ——仪器系统的零延时, s。

3 对各向同性或近似各向同性的岩体, 应按 10.1.8 条 2 款的规定计算岩体的动弹性参数。

4 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, 动弹性模量应按式 (10.2.8-5) 计算:

$$E_d = \rho V_p^2 (1 - \mu_d^2) \times 10^{-3} \quad (10.2.8-5)$$

式中 E_d ——岩体动弹性模量, MPa。

5 岩体完整性系数应按式 (10.2.8-6) 计算:

$$K_v = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}} \right)^2 \quad (10.2.8-6)$$

式中 K_v ——岩体完整性系数;

V_{pm} ——岩体纵波速度, m/s;

V_{pr} ——岩块纵波速度, m/s。

6 应绘制岩体速度与孔深的关系曲线, 必要时, 可绘制动弹性参数、完整性系数与孔深的变化曲线。

7 计算值取三位有效数字, 岩体完整性系数精确至 0.01。

10.2.9 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。

11 工程岩体观测

11.1 围岩收敛观测

11.1.1 围岩收敛观测适用于各类岩体。

11.1.2 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。

11.1.3 地质描述应包括下列内容：

1 观测洞段的岩石名称、结构、岩层产状及主要矿物成分。

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。

11.1.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

1 收敛计。

2 标点及保护装置。

3 钻孔工具。

4 温度计。

11.1.5 观测准备及仪器安装应符合下列规定：

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。

11.1.6 观测及稳定标准应符合下列规定：

1 收敛计使用前应使钢尺与洞室温度一致。

2 观测前应将标点端头擦洗干净。

3 将收敛计两端分别固定在测线两端的标点上，按测线长

度固定尺长，钢尺不应折扭。

4 调节拉力装置，使钢尺达到恒定张力，读取观测值，然后松开拉力装置。

5 每次观测应重复测读 3 次，当 3 次读数差不大于收敛计的精度值时，取 3 次读数的算术平均值作为观测读数。第 1 次观测读数应作为观测基准值。

6 观测的同时应测记收敛计的环境温度。

7 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。

8 对同一部位进行观测应使用同一收敛计。需对收敛计进行更换时，应重新建立基准值。

11.1.7 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 经温度修正后的实际收敛值应按式 (11.1.7) 计算：

$$\Delta u = L_0 - [L_i + K_\varphi L_0 (t_i - t_0)] \quad (11.1.7)$$

式中 Δu ——经温度修正后的实际收敛值，mm；

L_0 ——测线基准长度，mm；

L_i ——测线观测长度，mm；

K_φ ——收敛计系统温度线胀系数，1/℃；

t_i ——收敛计观测时的环境温度，℃；

t_0 ——收敛计第一次读数时的环境温度，℃。

3 绘制收敛值 Δu 与时间 t 的关系曲线。

4 绘制收敛值 Δu 随开挖距离 D 变化关系曲线及断面的收敛位移分布图。

11.1.8 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、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。

11.2 钻孔轴向岩体位移观测

11.2.1 钻孔轴向岩体位移观测适用于各类岩体。

11.2.2 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、深度应根据观测目的和地质条件确定，宜与预期的岩体位移方向、影响范围一致。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。位移梯度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 对地下洞室观测仪器埋设，在有条件预埋时，最深测点距开挖临空面的距离不宜大于 1.0m；无条件预埋时，观测断面仪器埋设应在开挖后尽早进行，观测断面与掌子面距离不宜大于 1.0m。对分台阶开挖的边坡，观测仪器宜在下一台阶开挖之前埋设。

11.2.3 地质描述应包括下列内容：

- 1 观测段的岩石名称、结构、主要矿物成分。
- 2 结构面产状、宽度及充填物的性状。
- 3 水文地质条件。
- 4 观测孔钻孔柱状图。
- 5 观测断面的地质剖面图。

11.2.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻机。
- 2 多点位移计或滑动测微计、二次仪表。
- 3 仪器率定设备。
- 4 灌浆设备。
- 5 仪器安装设备。

6 保护装置。

11.2.5 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 10m 钻孔弯曲度不得大于钻孔半径。

2 多点位移计钻孔直径不宜小于 75mm。滑动测微计钻孔直径不宜小于 110mm。

3 清除孔口部位的松动岩石，保持孔口部位岩面平整。

4 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孔。

5 按观测要求及钻孔岩性情况选择位移计的锚头类型及安装部位。

6 滑动测微计测管应由 ABS 材料制成，灌浆管及排气管应选用橡胶管或塑料管。

7 安装前应逐个率定待安装的传感器。

11.2.6 多点位移计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连接杆捆扎在一起，每两个锚头之间应安装隔离体。

2 按选定的位置由孔底向孔口逐点安装测点。应防止测点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，固定锚头。

4 浆材固化后，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。

11.2.7 滑动测微计测试孔安装应符合下列规定：

1 检查测管，按埋设长度要求将测管逐根预接，做好对接标记和编号。

2 测管外侧应每隔 1m 安装一个金属测环。金属测环与测

管不宜固定太紧，并应准确就位。

3 安装金属测环之前，应在测管外表面涂抹油脂避免测管与灌浆体的整体性粘结。

4 在测管最深处应用底盖密封，按测管预先做好的对接标记和编号逐根对接，并固定和密封，安装到孔底。对于向下的斜孔或铅直孔，宜用承重绳辅助安装。

5 灌浆管宜用胶带固定在测管外侧。对水平孔或仰孔，应布设排气管，排气管末端应比测管底部长 0.5m。

6 灌浆前，应在测管内注清水；灌浆结束后，应及时冲洗测管，安装孔口保护设施。

7 测管灌浆材料应为按要求配比的水泥浆，浆液宜通过灌浆管按从低向高的原则进行注浆，并应充满测管与孔壁间的空间。

8 灌浆结束后，盖上保护盖，并标识。

11.2.8 观测及稳定标准应符合下列规定：

1 首次观测应及时进行，以灌浆材料固化稳定后的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 3 次，3 次读数差不应大于仪器精度值，取其算术平均值作为稳定值。

3 观测时间间隔应符合 11.1.6 条 7 款的规定。

11.2.9 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 绘制钻孔测点位移 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。

11.2.10 安装及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、仪器名称、仪器型号、仪器编号、率定资料、安装过程记录、测点位移读数、观测

时温度、开挖进度、观测人员、观测日期。

11.3 钻孔横向岩体位移观测

11.3.1 钻孔横向岩体位移观测适用于各类岩体。

11.3.2 观测孔布置应符合下列规定：

1 观测断面位置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。

11.3.3 地质描述应包括下列内容：

- 1 观测段的岩石名称、结构、主要矿物成分。
- 2 结构面产状、宽度及充填物的性状。
- 3 水文地质条件。
- 4 观测孔钻孔柱状图。
- 5 观测断面的地质剖面图。

11.3.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻孔设备。
- 2 滑动测斜仪。
- 3 测斜管及管接头。
- 4 灌浆设备。
- 5 安装设备（包括吊装设备、各类工具和配套材料）。
- 6 模拟探头。
- 7 测扭仪。

11.3.5 观测准备应符合下列规定：

1 在选定的观测部位按要求的孔径和深度钻铅直孔，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 钻进过程中应记录钻进情况，进行地质描述。

4 钻孔完成后，冲洗钻孔，检查钻孔深度及钻孔的通畅情况。

11.3.6 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，对接固定销孔应避开导槽。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后，固定测斜管。

5 灌浆管宜在测斜管外侧与测斜管同步下放到测孔内距孔底 1m 处。

6 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。灌浆前宜预先在测斜管内注入清水，平衡浆液浮托力。

7 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。

8 当测孔深度大于 50m 时，应采用测扭仪测定导槽的扭曲度。

9 详细记录安装埋设情况。

11.3.7 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每 50cm 测读一次直至孔口，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 款的规定，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 观测时间间隔应根据工程需要或岩体位移变化情况确定。

11.3.8 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 绘制累积位移 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。

11.3.9 安装及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、观测读数值、观测时温度、现场巡视记录、观测人员、观测日期。

11.4 岩体表面倾斜观测

11.4.1 岩体表面倾斜观测适用于各类岩体。

11.4.2 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的岩体范围。

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他位移观测设备联合使用。

11.4.3 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 主要结构面类型、产状、宽度、充填物性质。
- 3 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、沿测线工程地质剖面图。

11.4.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 倾角计传感器。
- 2 基准板。
- 3 倾角计读数仪。
- 4 钻孔机具。
- 5 岩石清面工具。

11.4.5 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 $\times$ 宽 $\times$ 深为 50cm $\times$ 50cm $\times$ 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。

11.4.6 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 $\times$ 宽 $\times$ 高为 50cm $\times$ 50cm $\times$ 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。

11.4.7 观测及稳定标准应符合下列规定:

1 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3次,取其平均读数记为 A_0 。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 将倾角计旋转 180° 安装,按本条第1款规定对传感器进行读数,记为 A_{180} 。

3 将倾角计安装在与初始位置成 90° 的方位上,按本条1款、2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} 。

4 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。

5 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。

11.4.8 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 应按式(11.4.8-1)、式(11.4.8-2)计算基准板在相应方向上相对水平面的倾角:

$$\theta_A = \arcsin\left(\frac{A_0 - A_{180}}{5} \times 10^{-4}\right) \quad (11.4.8-1)$$

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{B_0 - B_{180}}{5} \times 10^{-4}\right) \quad (11.4.8-2)$$

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 绘制平面矢量图和倾角变化 $\Delta\theta$ 与时间 t 过程曲线。

4 确定基准板最大倾角的变化量值和方向。

11.4.9 安装与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、安装过程记录、观测读数值、观测时温度、观测人员、观测日期。

11.5 岩体锚杆载荷观测

11.5.1 岩体锚杆载荷观测应采用无粘结预应力锚杆，适用于各类岩体预应力锚固工程。

11.5.2 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。观测锚杆的数量应视工程的重要性确定，宜为锚杆总数的 3%~5%，且不少于 6 根。重要工程或重点部位宜为锚杆总数的 10%。

2 测力计量程应与锚杆所施加的预应力大小相匹配。

3 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。

11.5.3 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、宽度及充填物性状。

3 锚固区工程地质图。

11.5.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

1 测力计及读数仪。

2 传力板。

3 电缆及其保护装置。

4 硫化设备。

5 锚固张拉和锁定设备。

11.5.5 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°，分别按本款第 2 项的规定进行率定。
- 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，按所用仪器类型及要求加长电缆。

11.5.6 测力计安装应符合下列规定：

1 测力计应在锚杆内锚段及锚孔孔口支承墩达到设计强度后安装。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 $\pm 5\text{mm}$ 。

2 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。

3 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。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。

4 对安装完测力计的锚杆实施张拉。张拉时先按设计的载荷要求对单束钢绞线进行预紧，预紧时按对角线多次重复进行，确保各钢绞线受力均匀，然后再进行锚杆的整体张拉。

5 施工观测的锚固张拉测力计应安装在工作锚板的外侧。

6 锚杆施工工序安排应优先对观测锚杆进行张拉。

11.5.7 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 3 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 3 次读数差不超过仪器的精度值时，取最后一次读数作为锚杆锁定后观测读数。

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。

11.5.8 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核，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。

11.5.9 安装及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、安装过程记录、观测读数、观测人员、观测日期。

11.6 岩体锚杆应力观测

11.6.1 岩体锚杆应力观测适用于各类岩体的锚固工程。

11.6.2 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，在锚杆长度范围内沿轴向布置应力计的数量不宜少于 3 支。

11.6.3 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 观测锚杆附近主要节理、裂隙、断层等结构面的产状、宽度及充填物性状。

3 锚固区工程地质图。

11.6.4 主要仪器和设备应包括以下各项：

1 造孔机具。

2 锚杆应力计及读数仪。

3 率定装置。

4 电缆及其保护装置。

5 硫化设备或接线装置。

11.6.5 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，按照锚杆应力计类型测读每级载荷下锚杆应力计因变量读数，每级载荷下应反复测读 3 次，3 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率定，获取温度影响系数。率定温度不应低于应力计最高环境温度。

3 当需要加长测量导线时，按所用仪器类型及要求加长电缆。电缆连接应防止脱焊、虚焊，并满足绝缘度要求。

4 按设计要求裁截钢筋，并与应力计对接，应力计应与钢筋保持在同一条直线上。

11.6.6 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 检查锚杆应力计工作性能。

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，做好警示标志并对电缆进行保护。

11.6.7 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，当相邻两次读数差小于满量程的 1% 时，取算术平均值为稳定读数。

2 正常观测期，每周观测 1~2 次。发现异常情况，应加密观测。

11.6.8 成果整理应符合下列规定：

1 应在 24h 内对原始数据进行校核、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 绘制锚杆应力 σ 与时间 t 的关系曲线。

11.6.9 安装及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、埋设过程记录、应力计读数、观测人员、观测日期。

11.7 岩体应力观测

11.7.1 岩体应力观测可采用液压枕应力计法或钻孔空心包体式应变计法，适用于完整和较完整岩体。

11.7.2 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（应变计）距被测岩体边界的最小距离应大于 3 倍应力计（应变计）最大尺寸。

3 测点不宜布置在岩层突变或温度有显著变化的部位。

4 液压枕应力计法观测时，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。

11.7.3 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、钻孔柱状图及开挖面裂隙展布图。

11.7.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 液压枕应力计或钻孔空心包体式应变计。
- 2 液压枕应力计进、出油转换控制阀。
- 3 切槽或钻孔设备。
- 4 安装工具。
- 5 二次仪表。
- 6 温度计。

11.7.5 观测准备应符合下列规定：

- 1 按附录 F 的规定率定液压枕应力计。
- 2 液压枕应力计埋设前，应将应力计与测量系统一起进行系统。
- 3 对液压枕应力计或钻孔空心包体式应变计进行温度影响率定，并计算温度修正系数。

11.7.6 液压枕应力计法仪器安装应符合下列规定：

- 1 在选定的测量部位，对埋设液压枕应力计的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 液压枕应力计受力面应与应力观测方向垂直。
- 3 固定液压枕应力计，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。

11.7.7 钻孔空心包体式应变计法仪器安装应符合下列规定：

- 1 在选定的测量部位，按给定的钻孔方向用大口径金刚石

钻具钻孔，并获取岩心，钻孔孔径宜选择 $\phi 75\text{mm}$ 或 $\phi 91\text{mm}$ 。

2 根据测点布置要求和钻孔岩心完整情况，选择观测孔段。观测孔段部位岩体应均一和完整。

3 在选择的钻孔观测孔段，按 9.1.5 条 4 款、5 款的规定，钻小口径中心观测孔，孔径宜选择 $\phi 36\sim\phi 38\text{mm}$ 。

4 按 9.1.7 条的规定，在小口径中心观测孔中用环氧树脂粘结剂将空心包体应变计与钻孔孔壁固结。

5 空心包体式应变计安装完成后，钻孔的其余孔段宜用水泥浆封堵。

11.7.8 岩体液压枕应力计法观测及稳定标准应符合下列规定：

1 固定液压枕应力计的砂浆应养护 3~5d。

2 对液压枕应力计施加一定的预压力，预压力值应小于预估的作用于液压枕上的围压压力。压力稳定后，测定液压枕应力计的压力作为初始工作压力。

3 每次观测时，连接液压枕进液管，用加压泵逐渐加大液压，当液压启动进、出油转换控制阀，并见到稳定回流，再保持 1min 以上，记录相应的压力值，缓慢卸载至初始工作压力值。重复该加压过程，直至再次启动转换控制阀，记录稳定回流 3~4mL/min 下的压力值，该值为最小流量下的压力值，即液压枕应力计测得的岩体应力观测值。

4 每次对液压应力计的读数，重复测量不应少于两次。当相邻两次读数差小于读数仪的精度值时，取其算术平均值为稳定读数。

5 每次读数完毕后，供油管中应保持液压枕应力计的初始工作压力，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 11.1.6 条 7 款的规定。

11.7.9 钻孔空心包体式应变计法观测及稳定标准应符合下列规定：

1 固定空心包体式应变计的环氧树脂粘结剂应固化 2~3d

后, 测量应变计的初始值。

2 对空心包体式应变计读数应采用半桥或全桥测量, 并应测量测点部位环境温度。

3 对应变计的每次读数, 重复测量不应少于两次; 当相邻两次读数差小于二次读数仪表的精度值, 取其算术平均值为稳定读数值。

4 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 11.1.6 条 7 款的规定。

11.7.10 成果整理应符合下列规定:

1 测点部位作用于液压枕应力计上的应力变化值应按式 (11.7.10-1) 计算:

$$p = \beta(p_i - p_0 - p_t) \quad (11.7.10-1)$$

式中 p ——岩体或结构物与岩体间应力变化值, MPa;

p_i ——第 i 次读数液压枕应力观测值, MPa;

p_0 ——应力计初始读数时液压枕应力观测值, 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 应按式 (11.7.10-2) 计算:

$$p_t = k_t(t_i - t_0) \quad (11.7.10-2)$$

式中 k_t ——测量系统温度修正系数;

t_i ——应力计读数时的环境温度, °C;

t_0 ——应力计初始读数时的环境温度, °C。

3 测点部位作用于应变计上的应力变化值应根据应变计相应部位的应变变化值, 并按附录 G 的规定计算确定。

4 绘制岩体应力变化值 p 与时间 t 关系曲线。

11.7.11 安装和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、液压应力计率定资料、应变计率定资料、应变计型号及编号、应力计压力读数值、应变计读数值、观测时环境温度、工程进度、观测人员、观测日期。

11.8 岩体渗压观测

11.8.1 岩体渗压观测适用于各类岩体。

11.8.2 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，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在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。

11.8.3 地质描述应包括下列内容：

- 1 观测区地形、地貌及地下水赋存形式和类型。
- 2 观测孔部位岩石名称、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。

11.8.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 钻孔设备。
- 2 钻孔压水试验设备。
- 3 渗压观测设备及读数仪。
- 4 灌浆设备。
- 5 率定装置。

11.8.5 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，观测孔深度应超过结构面0.5~1m。

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 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估的渗透压力大小相匹配。

5 无压测压管水位宜采用水位计或测绳进行观测，观测读数准确至 0.01m。

6 有压测压管水位宜在孔口安装压力表进行观测，压力表精度不应低于 0.5 级。预估的水压力值宜在压力表量程的 $1/3 \sim 2/3$ 之间。

7 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。

11.8.6 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 $\phi 60\text{mm}$ 。测压管进水花管段长宜为 1~2m，进水花管段下端应有管端帽盖封闭。

2 渗压观测孔孔径宜为 $\phi 110 \sim \phi 150\text{mm}$ ，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 0.3m。

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 1m 厚的细砂，细砂的上部注入水泥浆或水泥膨润土浆至孔口。

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。

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。

11.8.7 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 11.8.6 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 0.3m,再填入中粗砂至装有经预饱和渗压计的细砂包的底部。

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,应检查渗压计的工作状态。

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 1m。然后注入水泥浆或水泥膨润土浆至孔口。

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。

11.8.8 观测及稳定标准应符合下列规定:

1 采用水位计或测绳观测管内水位时,每次观测读数不少于 2 次,相邻 2 次读数之差不应大于 0.01m,取其算术平均值为观测读数值。

2 采用安装在测压管孔口的压力表进行观测时,每次观测读数不少于 2 次,相邻 2 次读数之差不应大于压力表精度,取其算术平均值为观测读数值。

3 采用渗压计进行观测时,每次读数不少于 2 次,相邻 2 次读数差不应大于仪器的精度值,取其算术平均值为观测读数值。

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。

11.8.9 成果整理应符合下列规定:

- 1 岩体测试段地下水位应根据测压管读数和孔口高程计算。
- 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 当地表降水与渗压有关联时，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 Q_w 与时间 t 的关系曲线。

11.8.10 安装及观测记录应包括工程名称、岩石名称、仪器类型及编号、测试段位置及编号、安装时间、渗压计率定资料、安装过程记录、观测值、降水资料、观测人员、观测日期。

11.9 岩体声波观测

11.9.1 岩体声波观测适用于各类岩体。

11.9.2 观测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 根据需要可采用单孔声波测试或孔间穿透声波测试，必要时可预埋换能器进行观测。
- 4 孔间穿透声波测试的两个观测孔轴线宜在同一观测平面内，且相互平行。

11.9.3 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、测孔间地质剖面图。
- 4 观测孔布置图。
- 5 钻孔柱状图。

11.9.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 岩石声波参数测定仪。
- 2 一发双收换能器。
- 3 增压式柱状换能器。
- 4 供水和止水设备。
- 5 带刻度安装杆。
- 6 钢卷尺、测绳、绞车。

11.9.5 观测准备应符合下列规定：

- 1 建立深度基准点标识，标识应清晰，不易破坏。
- 2 应将钻孔冲洗干净，校对孔位，检验孔深，注满清水。
- 3 孔间穿透测试时，应测量两孔口中心点的距离；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。
- 4 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。
- 5 对需要长期观测的测孔应采取保护措施。
- 6 距离测量应准确至 0.01m，角度测量应准确至 0.1° 。

11.9.6 观测前应按 10.2.6 条 7 款的规定测定仪器与换能器系统的零延时。

11.9.7 观测及稳定标准应符合下列规定：

- 1 设置采样间隔、采样长度等测量参数，重复观测时测量参数应保持一致。
- 2 将换能器用带刻度安装杆或绞车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。每一测点读数 3 次，3 次读数相对误差不应大于 3%，取 3 次读数的平均值为稳定读数。测量准确至 $0.1\mu\text{s}$ 。
- 3 单孔观测时，换能器每次移动距离宜为 0.2m；孔间穿透测试时，接收、发射换能器应同步移动，移动距离宜为 0.5m 或 1.0m。
- 4 观测时间间隔应根据设计要求确定，施工期不宜少于 2 次/月；工程运行期可根据工程需要调整观测时间间隔。

11.9.8 成果整理应符合下列规定：

- 1 岩体声波速度应按 10.2.8 条计算。
- 2 绘制波速 V_p 沿钻孔深度 h 的分布曲线。
- 3 绘制各测点波速 V_p 随时间 t 的变化曲线。
- 4 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。
- 5 动弹性参数计算应符合 10.1.8 条的规定。

11.9.9 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。

11.10 岩体声发射观测

11.10.1 岩体声发射观测适用于坚硬岩及较坚硬岩。

11.10.2 观测布置应符合下列规定：

1 根据岩体工程类型、场地情况、地质条件、施工方法，选择有代表性的观测断面，断面数量不宜少于 2 个，观测断面宜平行布置。

2 观测孔数量不宜少于 3 个，孔深与方位应根据观测目的和地质条件确定。

3 传感器应安装在观测孔内，传感器总数量不宜小于 4 个，且 4 个传感器不宜在同一个平面，传感器频率不宜大于 30kHz。

11.10.3 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。
- 6 岩体开挖进度图。

11.10.4 主要仪器和设备应包括下列各项：

- 1 前置放大器。

- 2 传感器。
- 3 耦合剂。
- 4 安装杆及辅助工具。
- 5 声发射数据采集系统。
- 6 处理软件。

11.10.5 观测准备应符合下列规定：

- 1 在选定的部位用钻机钻孔，孔径宜为 75~90mm。
- 2 观测前应校对孔位，检验孔深，冲洗孔壁。
- 3 利用声波仪测试岩体的单孔或跨孔波速。

11.10.6 仪器设备安装应符合下列规定：

- 1 传感器应安装于观测孔内，用锚固剂、黄油或水与孔壁耦合。
- 2 传感器和前置放大器可封装在保护套内。
- 3 传感器应与岩体表面耦合紧密；对于使用保护套的装置，传感器与保护套的耦合与封装应满足声发射观测的要求。
- 4 观测数据线宜采用塑料软管封装保护。

11.10.7 观测及分析标准应符合下列规定：

- 1 传感器应通过安装杆放置孔底，或通过导向筒及连接管放入观测孔预定位置。
- 2 应测量各个通道背景噪声强度，检测通道灵敏度的一致性，设置声发射观测门槛值，门槛值不宜低于 30dB。
- 3 洞室和边坡开挖应不间断连续观测，波形采样频率宜为 5~10MHz，每一开挖进深的观测时间应为爆破开始至下一进深爆破钻孔开钻时结束。
- 4 岩体开挖初始阶段，资料分析周期不宜超过 1d；开挖结束 7d 内，资料分析周期不宜超过 2d；开挖结束后的长期声发射观测，资料分析周期不宜小于 7d。
- 5 定位方式应根据岩体工程实际情况进行建模定位。

11.10.8 成果整理应符合下列规定：

- 1 利用滤波功能剔除原始数据中由噪声和干扰信号产生的

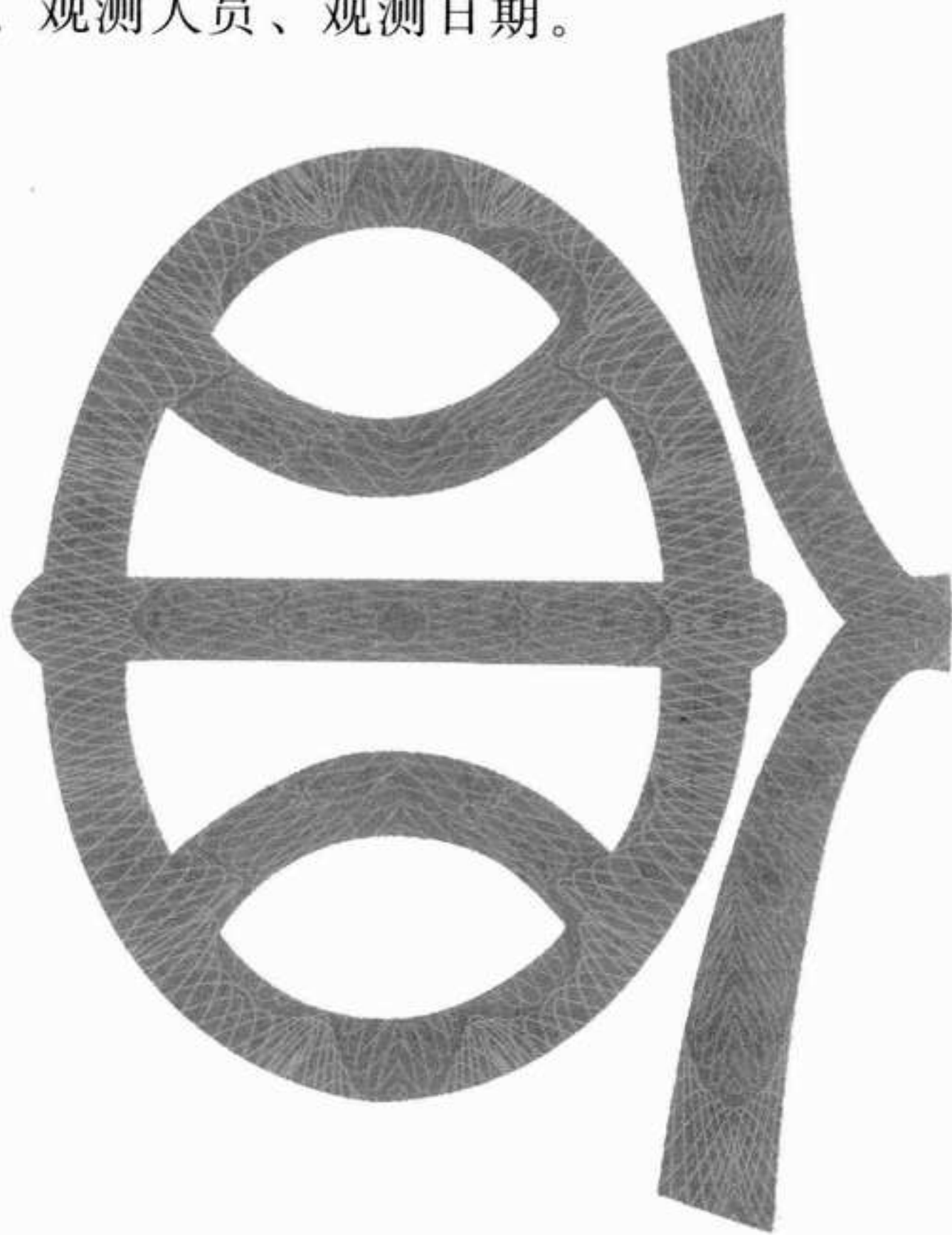
异常数据。

2 绘制声发射事件、能率随时间的累计曲线。

3 绘制声发射事件空间分布图。

4 对声发射信号进行频谱分析，绘制声发射信号幅值分布图、声发射信号中心频率、峰值频率分布图。

11.10.9 观测记录应包括工程名称、岩体名称、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。



12 试验成果综合整理

12.1 一般规定

12.1.1 岩石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。

12.1.2 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。经充分论证可舍去不合理或不具有地质代表性的试验值。

2 试验成果应按已划分的工程地质单元归类，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。

4 根据需要，在充分了解工程区内地质条件和工程设计方案基础上，可依据试验成果最佳值，并考虑试验地质代表性、岩体参数尺寸效应等因素，提出工程设计采用参数的试验建议值。

12.1.3 岩石的物理性指标以及单轴抗压强度等单指标力学参数可采用试验值的算术平均值作为试验最佳值。

12.1.4 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。

12.1.5 直剪强度试验成果应按下列方法整理：

1 对同一地质单元内的各组参数统计，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 $\tau-\sigma$ 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。

4 直剪强度试验成果可分别按峰值、屈服值、比例极限值、残余强度值等整理。

12.1.6 三轴压缩强度试验成果应按下列方法进行整理:

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参数试验最佳值。

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参数试验最佳值:

- 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 $\tau-\sigma$ 坐标图上绘制相应的莫尔圆。
- 4) 做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 f 和 c 值。

12.2 几种主要的成果整理方法

12.2.1 图解法确定抗剪强度参数时,应按下列步骤进行:

1 将不同正应力下的最大剪应力(单值或统计值)点绘在 $\tau-\sigma$ 坐标上,纵、横轴比例尺宜相同。

2 用目估方式作直线,直线至所有点的距离应最近。

3 按直线的斜率和截距确定抗剪强度参数 f 和 c 。

12.2.2 最小二乘法确定抗剪强度参数时,应按式 (12.2.2-1)、式 (12.2.2-2) 计算:

$$f = \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \quad (12.2.2-1)$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \quad (12.2.2-2)$$

式中 f ——摩擦系数；

c ——凝聚力，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。

12.2.3 试验成果数理统计应包括下列内容：

1 算术平均值应按式 (12.2.3-1) 计算：

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (12.2.3-1)$$

式中 $\bar{x}$ ——算术平均值；

x_i ——试验值。

2 均方差应按式 (12.2.3-2) 计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (12.2.3-2)$$

式中 σ ——均方差。

3 偏差系数应按式 (12.2.3-3) 计算：

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (12.2.3-3)$$

式中 C_v ——偏差系数。

4 绝对误差应按式 (12.2.3-4) 计算：

$$m_x = \pm \frac{\sigma}{n} \quad (12.2.3-4)$$

式中 m_x ——绝对误差。

5 精度指标应按式 (12.2.3-5) 计算:

$$P_x = \pm \frac{m_x}{x} \tag{12.2.3-5}$$

式中 P_x ——精度指标。

12.2.4 非代表性试验值应按式 (12.2.4) 确定, 并予以舍弃:

$$|x_i - \bar{x}| > g\sigma \tag{12.2.4}$$

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 准则时, g 应按表 12.2.4 的规定取值。

表 12.2.4 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

12.2.5 试验参数标准值应按下列方法确定:

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 应按式 (12.2.5-1)、式 (12.2.5-2) 计算:

$$f_k = \gamma_s \bar{x} \tag{12.2.5-1}$$

$$\gamma_s = 1 \pm \frac{t_\alpha(n-1)}{\sqrt{n}} C_v \tag{12.2.5-2}$$

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, 应按 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, $t_{\alpha}(n-1)$ 应按表 12.2.5 的规定取值。

表 12.2.5 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 A 岩石试验管理基本要求

A. 0.1 技术管理应符合下列规定：

- 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、试验大纲及有关标准的内容和要求。
- 2 应按分工做好试验前的准备工作。
- 3 准确测读各项试验数据、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，做好资料的保管和归档工作。

A. 0.2 设备管理应符合下列规定：

- 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还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设备的结构性能、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 安全管理应符合下列规定：

- 1 试验前应协同有关人员对试验洞进行安全检查，清除松动岩石。当试验洞内有有害气体或有害物质时，应商请有资质部门对安全进行评估，并采取有效的安全措施。
- 2 对试验洞的用电路路和设备应进行安全检查和维护。
- 3 试验人员进洞应佩戴安全帽。
- 4 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。
- 5 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他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 试验洞开挖要求

C.1 基本要求

C.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。

C.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。

C.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，可局部扩大或修整试验地段。

C.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。

C.1.5 试验洞断面尺寸应满足试验边界条件要求。

C.1.6 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。

C.1.7 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。

C.1.8 根据试验洞地质情况，必要时应进行支护。

C.2 特殊要求

C.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。

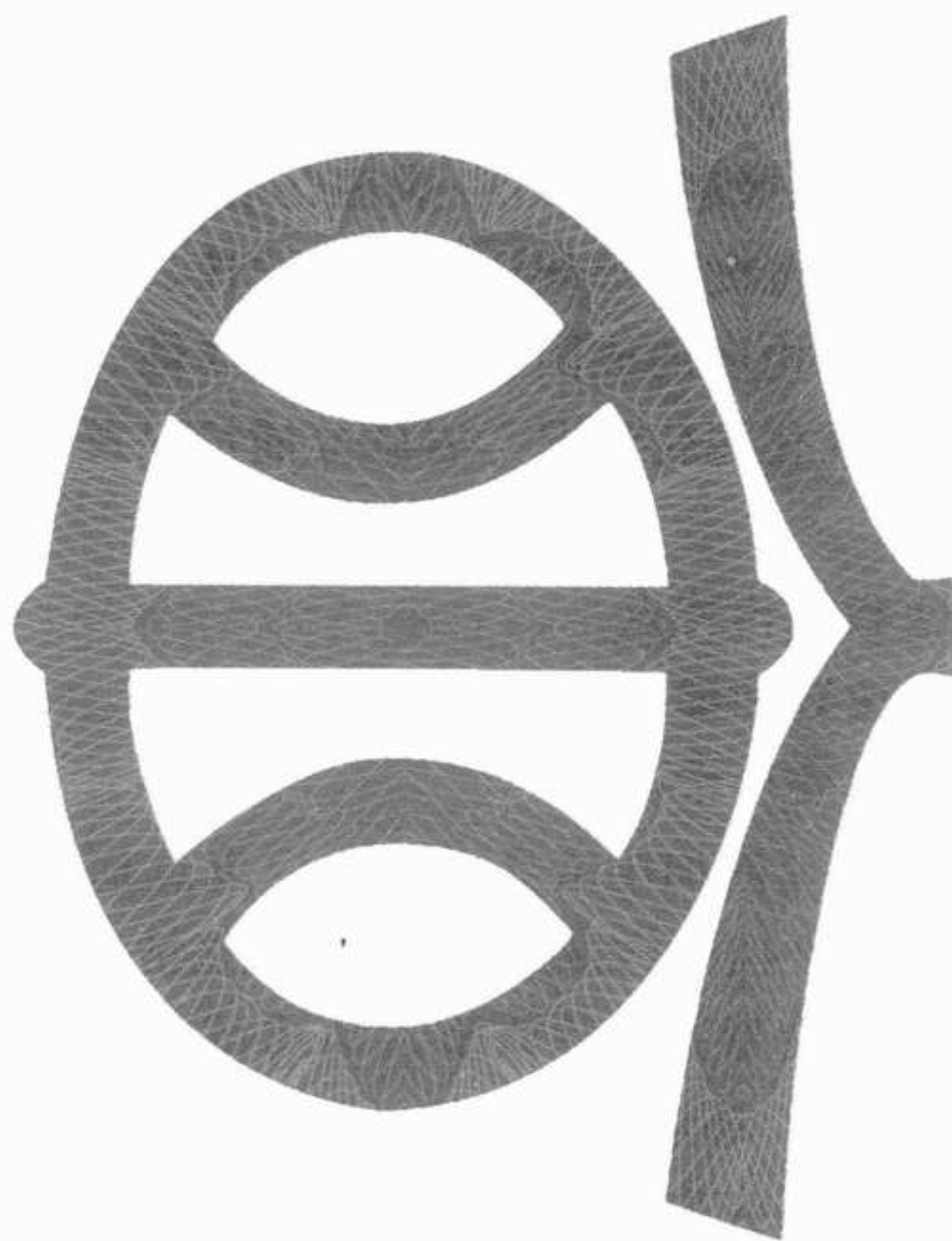
C.2.2 狭缝法和单（双）轴压缩法变形试验洞中，试体表面松动岩块及爆破影响带必须清除干净。

C.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。

C.2.4 隧洞水压法变形试验洞宜避开断层破碎带及影响带。

C.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。

C.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 D 地质描述内容规定

D.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。

D.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。

D.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。

D.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。

D.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 E 比重瓶校正

E. 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。

E. 0. 2 主要仪器设备应包括下列各项：

- 1 比重瓶（容量 100mL）。
- 2 天平（称量 200g，感量 0.001g）。
- 3 温度计（量程不小于 50℃，最小刻度 0.5℃）。

E. 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水注满比重瓶，塞好瓶塞，排出多余水分，称室温 T_0 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应按式（E. 0. 3 - 1）、式（E. 0. 3 - 2）计算：

$$m_{T_n} = (m_{T_0} - m_3)C_1 + m_3 \quad (\text{E. 0. 3 - 1})$$

$$C_1 = \frac{\rho_{w_n}}{\rho_{w_0}} [1 + C_v (T_n - T_0)] \quad (\text{E. 0. 3 - 2})$$

式中 m_{T_0} ——比重瓶内水温度为 T_0 时，瓶和水总质量，g；

m_{T_n} ——比重瓶内水温度为 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水温度，℃；

T_n ——试验时比重瓶内水温度，℃；

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 $24 \times 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$;
 C_1 ——比重瓶校正计算系数。

不同温度时水的密度应按表 E. 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 E. 0. 3 - 2 的规定取值。

表 E. 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 $\rho_w/(\text{g}/\text{cm}^3)$
4.0	0.999972	14.5	0.999173	25.0	0.997043
4.5	0.999970	15.0	0.999099	25.5	0.996914
5.0	0.999964	15.5	0.999022	26.0	0.996782
5.5	0.999954	16.0	0.998943	26.5	0.996648
6.0	0.999940	16.5	0.998860	27.0	0.996511
6.5	0.999923	17.0	0.998774	27.5	0.996373
7.0	0.999901	17.5	0.998686	28.0	0.996231
7.5	0.999877	18.0	0.998595	28.5	0.996088
8.0	0.999848	18.5	0.998501	29.0	0.995943
8.5	0.999816	19.0	0.998404	29.5	0.995795
9.0	0.999781	19.5	0.998305	30.0	0.995645
9.5	0.999742	20.0	0.998203	30.5	0.995493
10.0	0.999699	20.5	0.998099	31.0	0.995339
10.5	0.999654	21.0	0.997991	31.5	0.995182
11.0	0.999605	21.5	0.997882	32.0	0.995024
11.5	0.999553	22.0	0.997769	32.5	0.994863
12.0	0.999497	22.5	0.997655	33.0	0.994700
12.5	0.999439	23.0	0.997537	33.5	0.994535
13.0	0.999377	23.5	0.997417	34.0	0.994369
13.5	0.999312	24.0	0.997295	34.5	0.994200
14.0	0.999244	24.5	0.997170	35.0	0.994029

表 E. 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_n $/^\circ\text{C}$	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	0.99937	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 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：

- 1 压力机。
- 2 测力计。
- 3 压力表。
- 4 液压泵及管路。
- 5 钢垫板。
- 6 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 级对压力机逐级加压，测读压力机和相应的千斤顶压力读数。打开液压泵逐级退压，同时测读压力机和各级压力下千斤顶压力读数。重复循环不宜少于三次。记录格式见表 F.1.3。

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 1		循环 2		循环 3		
		加压	退压	加压	退压	加压	退压	

5 千斤顶出力重复性检验。加压过程中, 压力机某一指示值下千斤顶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%。千斤顶出力重复性系数 δ 应按式 (F. 1. 3) 计算:

$$\delta = \frac{F_{1\max} - F_{1\min}}{\bar{F}_1} \times 100 \quad (\text{F. 1. 3})$$

式中 δ ——千斤顶出力重复性系数, %;

$F_{1\max}$ ——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。

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 利用压力机做反力架时, 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 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 F. 1. 2 条的规定外, 还应备有已校验的千斤顶。

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 液压枕应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 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：

- 1 液压千斤顶。
- 2 钢垫板。
- 3 压力表。
- 4 液压泵及管路。
- 5 传力柱。

F.3.3 率定应符合下列规定：

1 率定应采用双层滚轴排，中间安放钢垫板的方法，钢垫板应有足够长度（见图 F.3.3）。

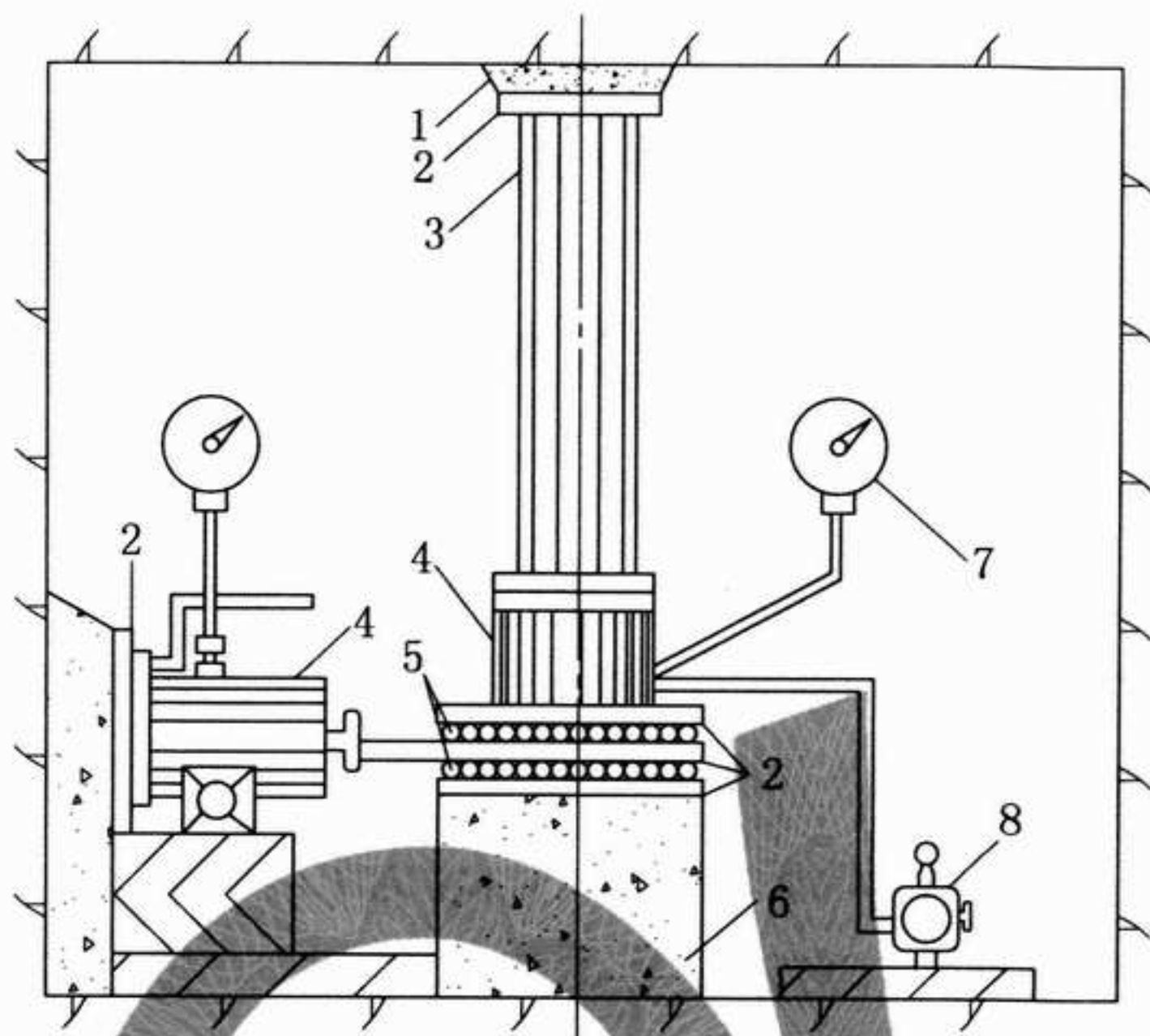
2 最大法向载荷应按实际应用时的最大载荷确定，分级不宜少于 5 级。

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 款、4 款规定重复进行率定。重复循环不宜少于 3 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应按式（F.3.3）计算：



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

图 F.3.3 滚轴排率定装置图

$$f = \frac{Q}{2P}$$

(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 岩体应力测试实测数据计算方法

G.1 坐标系及测试序号规定

G.1.1 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。

G.1.2 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，轴 x_i 的方位为 β_i ，这时 β_0 为垂直建筑物轴线（轴 y ）的方位或正西向。

G.1.3 套钻孔应力解除法测量元件序号应符合下列规定：

- 1 钻孔孔壁应变法： 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 钻孔孔径变形法： 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 钻孔孔底应变法： 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。

G.1.4 水压致裂法测段序号应符合下列规定：在水压致裂法三维应力测量中，规定 i 为测量钻孔序号， j 为布置在 i 测量钻孔完整岩体段水压致裂测量测段的序号。

G.2 套钻孔应力解除法观测值方程

G.2.1 钻孔孔壁应变法，钻孔孔径变形法和钻孔孔底应变法的

岩体应力测试观测值方程经归纳可统一用式 (G. 2. 1) 表达:

$$E\epsilon_k = A_{k1}\sigma_x + A_{k2}\sigma_y + A_{k3}\sigma_z + A_{k4}\tau_{xy} + A_{k5}\tau_{yz} + A_{k6}\tau_{zx} \quad (\text{G. 2. 1})$$

式中 ϵ_k ——观测值, 对孔壁和孔底应变法, 为解除应变测量值; 对孔径变形法, 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, 根据不同测试方法确定。

G. 2. 2 钻孔孔壁应变法测试观测值方程应力系数应按式 (G. 2. 2-1) 计算:

$$\left. \begin{aligned} A_{k1} &= [K_1 + \mu - 2(1 - \mu^2)K_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \varphi_{ij} - \mu \\ A_{k2} &= [K_1 + \mu + 2(1 - \mu^2)K_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \varphi_{ij} - \mu \\ A_{k3} &= 1 - (1 + \mu K_4) \sin^2 \varphi_{ij} \\ A_{k4} &= -4(1 - \mu^2)K_2 \sin 2\theta_i \sin^2 \varphi_{ij} \\ A_{k5} &= 2(1 + \mu)K_3 \cos \theta_i \sin 2\varphi_{ij} \\ A_{k6} &= -2(1 + \mu)K_3 \sin \theta_i \sin 2\varphi_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 2-1})$$

式中 θ_i —— i 应变丛对应的极角, ($^\circ$);

φ_{ij} —— i 应变丛的第 j 应变片相对钻孔轴线的角度, ($^\circ$);

K_1, K_2, K_3, K_4 ——修正系数, 按应变片是否直接粘贴在钻孔岩壁上的情况确定。

对直贴式钻孔三向应变计, $K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = 1$; 对空心包体式钻孔三向应变计, 修正系数 K_i ($i=1\sim 4$) 应由钻孔半径 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 以及环氧树脂层的弹性模量 E_1 、泊松比 μ_1 , 应按式 (G. 2. 2-2) ~ 式 (G. 2. 2-4) 确定:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= d_1(1 - \mu\mu_1)(1 - 2\mu_1 + R_1^2/\rho^2) + \mu\mu_1 \\ K_2 &= d_2(1 - \mu_1)\rho^2 + d_3 + d_4\mu_1/\rho^2 + d_5/\rho^4 \\ K_3 &= d_6(1 + R_1^2/\rho^2) \\ K_4 &= [\mu_1 - d_1(\mu_1 - \mu)(1 - 2\mu_1 + R_1^2/\rho^2)]/\mu \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 2 - 2})$$

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= 1/[1 - 2\mu_1 + m^2 + \xi(1 - m^2)] \\ d_2 &= 12(1 - \xi)m^2(1 - m^2)/(R^2D) \\ d_3 &= [m^4(4m^2 - 3)(1 - \xi) + \chi_1 + \xi]/D \\ d_4 &= -4R_1^2[m^6(1 - \xi) + \chi_1 + \xi]/D \\ d_5 &= 3R_1^4[m^4(1 - \xi) + \chi_1 + \xi]/D \\ d_6 &= 1/[1 + m^2 + \xi(1 - m^2)] \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 2 - 3})$$

$$\left. \begin{aligned} D &= (1 + \chi\xi)[\chi_1 + \xi + (1 - \xi)(3m^2 - 6m^4 + 4m^6)] \\ &\quad + (\chi_1 - \chi\xi)m^2[(1 - \xi)m^6 + (\chi_1 + \xi)] \\ \xi &= [E_1(1 + \mu)]/[E(1 + \mu_1)] \\ m &= R_1/R \\ \chi &= 3 - 4\mu \\ \chi_1 &= 3 - 4\mu_1 \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 2 - 4})$$

G. 2. 3 钻孔孔径变形法测试观测值方程应力系数的确定应符合下列规定：

1 建立钻孔坐标系 $o-x_iy_iz_i$ 与大地坐标系 $o-xyz$ 的相互关系（见图 G. 2. 3），钻孔坐标系各坐标轴相对大地坐标系的方向余弦见表 F. 2. 3。

表 G. 2. 3 钻孔坐标系 $o-x_iy_iz_i$ 各坐标轴相对大地坐标系 $o-xyz$ 的方向余弦

坐标轴	x	y	z
x_i	$l_{i1} = -\sin(\beta_0 - \beta_i)$	$m_{i1} = \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$n_{i1} = 0$
y_i	$l_{i2} = -\sin\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$m_{i2} = -\sin\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$n_{i2} = \cos\alpha_i$
z_i	$l_{i3} = \cos\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$m_{i3} = \cos\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$n_{i3} = \sin\alpha_i$

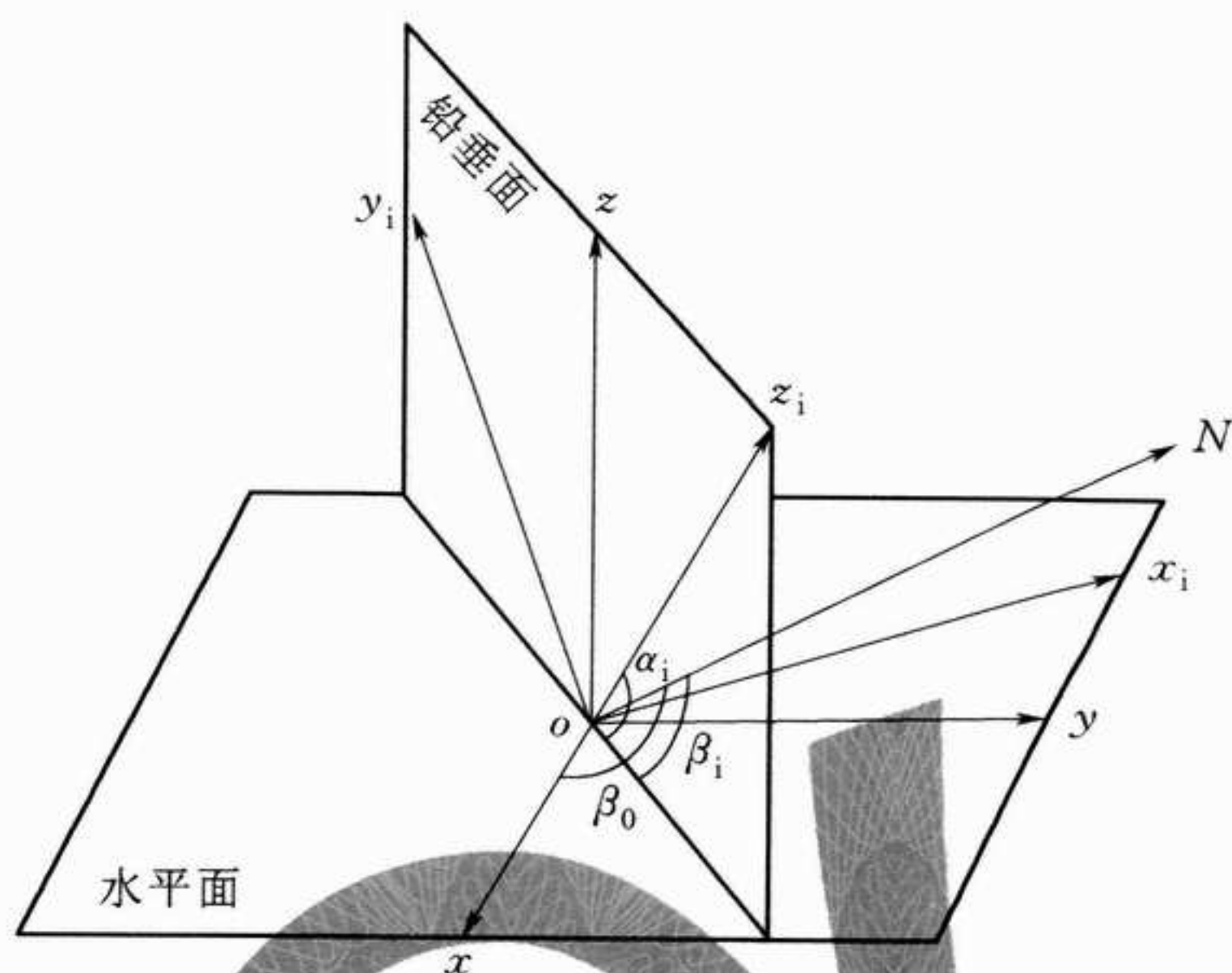


图 G. 2. 3 钻孔坐标系与大地坐标系相互关系

2 应力系数 $A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{k6}$ 应按式 (G. 2. 3) 计算:

$$\begin{aligned}
 A_{k1} &= 1 - (1 + \mu) \cos^2 \alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) \\
 &\quad + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j [1 - (1 + \sin^2 \alpha_i) \cos^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\
 &\quad + 2(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
 A_{k2} &= 1 - (1 + \mu) \cos^2 \alpha_i \sin^2 (\beta_0 - \beta_i) \\
 &\quad + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j [1 - (1 + \sin^2 \alpha_i) \sin^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\
 &\quad - 2(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
 A_{k3} &= (1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \cos^2 \alpha_i - \mu \\
 A_{k4} &= -(1 + \mu) [\cos^2 \alpha_i + 2(1 - \mu)(1 + \sin^2 \alpha_i) \cos 2\theta_j] \\
 &\quad \times \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\
 A_{k5} &= -(1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin 2\alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) \\
 &\quad + 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \cos \alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \\
 A_{k6} &= -(1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin 2\alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \\
 &\quad - 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \cos \alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i)
 \end{aligned}
 \tag{G. 2. 3}$$

式中 θ_j ——安装在第 i 测量钻孔内变形计的 j 触头极角, ($^\circ$);

α_i ——钻孔的倾角, ($^\circ$);

β_0, β_i ——大地坐标轴 x 及 i 钻孔在水平面上投影的方位角, ($^\circ$)。

G. 2. 4 钻孔孔底应变法测试的观测值方程应力系数应按式 (G. 2. 4 - 1)、式 (G. 2. 4 - 2) 计算:

$$\left. \begin{aligned} A_{k1} &= B_1 - (B_1 - B_2 \sin^2 \alpha_i - B_3 \cos^2 \alpha_i) \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad + \frac{1}{2} B_4 \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k2} &= B_1 - (B_1 - B_2 \sin^2 \alpha_i - B_3 \cos^2 \alpha_i) \sin^2 (\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad - \frac{1}{2} B_4 \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k3} &= B_2 \cos^2 \alpha_i + B_3 \sin^2 \alpha_i \\ A_{k4} &= -(B_1 - B_2 \sin^2 \alpha_i - B_3 \cos^2 \alpha_i) \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad - B_4 \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k5} &= -(B_2 - B_3) \sin 2\alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) + B_4 \cos \alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \\ A_{k6} &= -(B_2 - B_3) \sin 2\alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) - B_4 \cos \alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 4 - 1})$$

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= (b - \mu a) + (1 + \mu)(a - b) \cos^2 \varphi_{ij} \\ B_2 &= (a - \mu b) - (1 + \mu)(a - b) \cos^2 \varphi_{ij} \\ B_3 &= (1 - \mu)c \\ B_4 &= (1 + \mu)d \sin 2\varphi_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 4 - 2})$$

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 $a=d=1.25, b=0, c=-0.75 (0.5+\mu)$, 长沙矿冶研究院和兰州大学通过有限元计算得到 $a=1.37, b=-0.14, c=-0.62, d=1.484$ 。

G. 2. 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应符合下列规定:

1 作平面应力问题假定时:

$$\left. \begin{aligned} A_{k1} &= 1 + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j \\ A_{k2} &= 1 - 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j \\ A_{k4} &= 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \\ A_{k3} &= A_{k5} = A_{k6} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 5 - 1})$$

2 作平面应变问题假定时:

$$\left. \begin{aligned} A_{k1} &= (1 - \mu^2)(1 + 2\cos 2\theta_j) \\ A_{k2} &= (1 - \mu^2)(1 - 2\cos 2\theta_j) \\ A_{k4} &= 4(1 - \mu^2)\sin 2\theta_j \\ A_{k3} &= A_{k5} = A_{k6} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 2. 5} - 2)$$

G. 3 水压致裂法三维应力测试观测值方程

G. 3. 1 单钻孔坐标系内, 钻孔横截面上大、小次主应力与其应力分量之关系应由式 (G. 3. 1) 确定:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x_{ij}} + \sigma_{y_{ij}} &= \sigma_{A_{ij}} + \sigma_{B_{ij}} \\ \sigma_{x_{ij}} - \sigma_{y_{ij}} &= (\sigma_{A_{ij}} - \sigma_{B_{ij}})\cos 2A_{ij} \\ 2\tau_{x_{ij}y_{ij}} &= (\sigma_{A_{ij}} - \sigma_{B_{ij}})\sin 2A_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 3. 1})$$

式中 $\sigma_{A_{ij}}$ 、 $\sigma_{B_{ij}}$ —— i 钻孔的第 j 测试段横截面上水压致裂法测得的最大、最小次主应力;

A_{ij} ——在钻孔横截面上以钻孔坐标系水平轴 x_i 起始逆时针向到破裂缝的角度, ($^\circ$);

$\sigma_{x_{ij}}$ 、 $\sigma_{y_{ij}}$ 、 $\tau_{x_{ij}y_{ij}}$ ——钻孔坐标系下的应力分量。

G. 3. 2 完整岩体段常规压裂试验的观测值方程应由式 (G. 3. 2) 确定:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{A_{ij}} + \sigma_{B_{ij}} &= \sigma_x [1 - \cos^2 \alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\ &\quad + \sigma_y [1 - \cos^2 \alpha_i \sin^2 (\beta_0 - \beta_i)] + \sigma_z \cos^2 \alpha_i \\ &\quad - \tau_{xy} \cos^2 \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{yz} \sin 2\alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad - \tau_{zx} \sin 2\alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \\ (\sigma_{A_{ij}} - \sigma_{B_{ij}})\cos 2A_{ij} &= \sigma_x [1 - (1 + \sin^2 \alpha_i)\cos^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\ &\quad + \sigma_y [1 - (1 + \sin^2 \alpha_i)\sin^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\ &\quad - \sigma_z \cos^2 \alpha_i - \tau_{xy} (1 + \sin^2 \alpha_i)\sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad + \tau_{yz} \sin 2\alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad + \tau_{zx} \sin 2\alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) \\ (\sigma_{A_{ij}} - \sigma_{B_{ij}})\sin 2A_{ij} &= \sigma_x \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad - \sigma_y \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - 2\tau_{xy} \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad + 2\tau_{yz} \cos \alpha_i \cos (\beta_0 - \beta_i) - 2\tau_{zx} \cos \alpha_i \sin (\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad (i = 1 \sim n_i, j = 1 \sim 3n_j + n_{j1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 3. 2})$$

式中 n_i ——测量钻孔数量, $n_i \geq 3$;

n_j, n_{j1} ——完整岩体段常规压裂试验有裂缝记录 and 没有裂缝记录的测段数量, 有裂缝记录的每个测段可提供 3 个观测值方程 [方程组 (G. 3. 2) 第 1~3 式], 无裂缝记录的每个测段可提供 1 个观测值方程 [方程组 (G. 3. 2) 第 1 式]。

G. 4 岩体应力分量计算公式

G. 4. 1 当观测值方程数多于 6 个应力分量的未知数, 应利用数理统计的最小二乘法原理, 按式 (G. 4. 1) 求解应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{xy}$ 最佳值:

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k2} & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k6} \\ \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k1} & \sum_{k=1}^n A_{k2}^2 & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k1} & \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k2} & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k6}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \vdots \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = E \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1} \epsilon_k \\ \sum_{k=1}^n A_{k2} \epsilon_k \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k6} \epsilon_k \end{Bmatrix} \quad (\text{G. 4. 1})$$

G. 4. 2 钻孔孔壁应变法测得的钻孔坐标系应力分量转换为大地坐标系下的应力分量时, 应按式 (G. 4. 2 - 1) 计算, 应力系数应按式 (G. 4. 2 - 2) ~ 式 (G. 4. 2 - 7) 计算:

$$\begin{aligned} \sigma_j &= C_{j1} \sigma_{xi} + C_{j2} \sigma_{yi} + C_{j3} \sigma_{zi} + C_{j4} \tau_{xii} \\ &\quad + C_{j5} \tau_{yizi} + C_{j6} \tau_{zixi} \end{aligned} \quad (\text{G. 4. 2 - 1})$$

$$j = 1 \sim 6$$

$$C_{11} = \cos^2 \gamma_i \sin^2 (\beta_0 - \beta_i) + \sin^2 \gamma_i \sin^2 \alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) \\ + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_i \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i)$$

$$C_{12} = -C_{11} + \sin^2 (\beta_0 - \beta_i) + \sin^2 \alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i)$$

$$C_{13} = \cos^2 \alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i)$$

$$C_{14} = -\sin 2\gamma_i [\sin^2 (\beta_0 - \beta_i) - \sin^2 \alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i)] \\ + \cos 2\gamma_i \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i)$$

$$C_{15} = -\cos \gamma_i \sin 2\alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) + \sin \gamma_i \cos \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i)$$

$$C_{16} = -\sin \gamma_i \sin 2\alpha_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) - \cos \gamma_i \cos \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i)$$

(G. 4. 2 - 2)

$$C_{21} = \cos^2 \gamma_i \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) + \sin^2 \gamma_i \sin^2 \alpha_i \sin^2 (\beta_0 - \beta_i) \\ - \frac{1}{2} \sin 2\gamma_i \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i)$$

$$C_{22} = -C_{21} + \cos^2 (\beta_0 - \beta_i) + \sin^2 \alpha_i \sin^2 (\beta_0 - \beta_i)$$

$$C_{23} = -C_{13} + \cos^2 \alpha_i$$

$$C_{24} = -C_{14} - \sin 2\gamma_i \cos^2 \alpha_i$$

$$C_{25} = -C_{15} - \cos \gamma_i \sin 2\alpha_i$$

$$C_{26} = -C_{16} - \sin \gamma_i \sin 2\alpha_i$$

(G. 4. 2 - 3)

$$C_{31} = \sin^2 \gamma_i \cos^2 \alpha_i$$

$$C_{32} = \cos^2 \gamma_i \cos^2 \alpha_i$$

$$C_{33} = \sin^2 \alpha_i$$

$$C_{34} = \sin 2\gamma_i \cos^2 \alpha_i$$

$$C_{35} = \cos \gamma_i \sin 2\alpha_i$$

$$C_{36} = \sin \gamma_i \sin 2\alpha_i$$

(G. 4. 2 - 4)

$$\left. \begin{aligned}
C_{41} &= \frac{1}{2}(-\cos^2 \gamma_i + \sin^2 \gamma_i \sin^2 \alpha_i) \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
&\quad - \frac{1}{2} \sin 2\gamma_i \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{42} &= -C_{41} - \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{43} &= \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{44} &= \frac{1}{2} \sin 2\gamma_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) (1 + \sin^2 \alpha_i) \\
&\quad - \cos 2\gamma_i \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{45} &= -\frac{1}{2} \cos \gamma_i \sin 2\alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
&\quad - \sin \gamma_i \cos \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{46} &= -\frac{1}{2} \sin \gamma_i \sin 2\alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
&\quad + \cos \gamma_i \cos \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i)
\end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 4. 2 - 5})$$

$$\left. \begin{aligned}
C_{51} &= -\sin \gamma_i \cos \alpha_i [\sin \gamma_i \sin \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) - \cos \gamma_i \cos(\beta_0 - \beta_i)] \\
C_{52} &= -C_{51} - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{53} &= \frac{1}{2} \sin 2\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{54} &= -\cos \alpha_i [\sin 2\gamma_i \sin \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) - \cos 2\gamma_i \cos(\beta_0 - \beta_i)] \\
C_{55} &= \cos \gamma_i \cos 2\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) - \sin \gamma_i \sin \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{56} &= \sin \gamma_i \cos 2\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) + \cos \gamma_i \sin \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)
\end{aligned} \right\}$$

(G. 4. 2 - 6)

$$\left.
\begin{aligned}
C_{61} &= -\sin\gamma_i \cos\alpha_i [\sin\gamma_i \sin\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) + \cos\gamma_i \sin(\beta_0 - \beta_i)] \\
C_{62} &= -C_{61} - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{63} &= \frac{1}{2} \sin 2\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
C_{64} &= -\cos\alpha_i [\sin 2\gamma_i \sin\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) + \cos 2\gamma_i \sin(\beta_0 - \beta_i)] \\
C_{65} &= -C_{56} + \cos(\gamma_i - \beta_0 + \beta_i) (\cos 2\alpha_i + \sin\alpha_i) \\
C_{66} &= -C_{55} + \sin(\gamma_i + \beta_0 - \beta_i) (\cos 2\alpha_i - \sin\alpha_i)
\end{aligned}
\right\} \quad (G. 4. 2 - 7)$$

式中 $C_{j1 \sim j6}$ —— 应力系数；

γ_i —— 应变计安装偏斜角，以水平轴起始逆时针向度量，(°)。

当 $\gamma_i = 0$ 时，岩体应力分量应按式 (G. 4. 2 - 8) 计算。

$$\left.
\begin{aligned}
\sigma_x &= \sigma_{xi} \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + (\sigma_{yi} \sin^2\alpha_i + \sigma_{zi} \cos^2\alpha_i - \tau_{yzi} \sin 2\alpha_i) \\
&\quad \times \cos^2(\beta_0 - \beta_i) + (\tau_{xiyi} \sin\alpha_i - \tau_{zixi} \cos\alpha_i) \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
\sigma_y &= \sigma_{xi} \cos^2(\beta_0 - \beta_i) + (\sigma_{yi} \sin^2\alpha_i + \sigma_{zi} \cos^2\alpha_i - \tau_{yzi} \sin 2\alpha_i) \\
&\quad \times \sin^2(\beta_0 - \beta_i) - (\tau_{xiyi} \sin\alpha_i - \tau_{zixi} \cos\alpha_i) \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
\sigma_z &= \sigma_{yi} \cos^2\alpha_i + \sigma_{zi} \sin^2\alpha_i + \tau_{zixi} \sin 2\alpha_i \\
\tau_{xy} &= \frac{1}{2} (-\sigma_{xi} + \sigma_{yi} \sin^2\alpha_i + \sigma_{zi} \cos^2\alpha_i - \tau_{yzi} \sin 2\alpha_i) \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
&\quad - (\tau_{xiyi} \sin\alpha_i - \tau_{zixi} \cos\alpha_i) \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\
\tau_{yz} &= \frac{1}{2} [(-\sigma_{yi} + \sigma_{zi}) \sin 2\alpha_i + 2\tau_{yzi} \cos 2\alpha_i] \sin(\beta_0 - \beta_i) \\
&\quad + (\tau_{xiyi} \cos\alpha_i + \tau_{zixi} \sin\alpha_i) \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
\tau_{zx} &= \frac{1}{2} [(-\sigma_{yi} + \sigma_{zi}) \sin 2\alpha_i + 2\tau_{yzi} \cos 2\alpha_i] \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
&\quad - (\tau_{xiyi} \cos\alpha_i + \tau_{zixi} \sin\alpha_i) \sin(\beta_0 - \beta_i)
\end{aligned}
\right\} \quad (G. 4. 2 - 8)$$

G.5 岩体主应力大小及其方向计算公式

G.5.1 主应力的大小计算应符合下列规定:

1 当 $\left(\frac{P}{3}\right)^3 + \left(\frac{Q}{2}\right)^2 = 0$ 时, 应按式 (G.5.1-1) 计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= 2\sqrt[3]{-\frac{Q}{2}} + \frac{1}{3}J_1 \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = -\sqrt[3]{-\frac{Q}{2}} + \frac{1}{3}J_1 \end{aligned} \right\} \quad (\text{G.5.1-1})$$

2 当 $\left(\frac{P}{3}\right)^3 + \left(\frac{Q}{2}\right)^2 < 0$ 时, 应按式 (G.5.1-2) ~ 式 (G.5.1-5) 计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{\omega}{3} + \frac{1}{3}J_1 \\ \sigma_2 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{\omega + 2\pi}{3} + \frac{1}{3}J_1 \\ \sigma_3 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{\omega + 4\pi}{3} + \frac{1}{3}J_1 \end{aligned} \right\} \quad (\text{G.5.1-2})$$

$$\left. \begin{aligned} P &= -\frac{1}{3}J_1^2 + J_2 \\ Q &= -\frac{2}{27}J_1^3 + \frac{1}{3}J_1J_2 - J_3 \end{aligned} \right\} \quad (\text{G.5.1-3})$$

$$\omega = \arccos \left[-\frac{Q}{2} / \sqrt{-\left(\frac{P}{3}\right)^3} \right] \quad (\text{G.5.1-4})$$

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ J_2 &= \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \\ &= \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \\ J_3 &= \sigma_1\sigma_2\sigma_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (\text{G.5.1-5})$$

G.5.2 主应力的方向应按式 (G.5.2-1) ~ 式 (G.5.2-3)

计算：

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= \arcsin n_i \\ \beta_i &= \beta_0 - \arcsin \frac{m_i}{\sqrt{1 - n_i^2}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 5. 2 - 1})$$

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。

$$\left. \begin{aligned} l_i &= A / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \\ m_i &= B / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \\ n_i &= C / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 5. 2 - 2})$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \tau_{xy} \tau_{yz} - (\sigma_y - \sigma_i) \tau_{zx} \\ B &= \tau_{xy} \tau_{zx} - (\sigma_x - \sigma_i) \tau_{yz} \\ C &= (\sigma_x - \sigma_i)(\sigma_y - \sigma_i) - \tau_{xy}^2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{G. 5. 2 - 3})$$

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。

标准用词说明

标准用词	严格程度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应、不得	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件下可以这样做

标准历次版本编写者信息

SL 264—2001

本标准主编单位：长江水利委员会长江科学院

本标准主要起草人：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

中华人民共和国水利行业标准

水利水电工程岩石试验规程

SL 264—2020

条文说明



目 次

1	总则	203
3	基本规定	205
4	岩块物理性质试验	207
5	岩块力学性质试验	213
6	岩体变形试验	220
7	岩体强度试验	223
8	岩石蠕变试验	231
9	岩体应力测试	236
10	岩石声波测试	242
11	工程岩体观测	244
12	试验成果综合整理	255

1 总 则

1.0.1 岩石力学试验及其测试技术是岩石力学理论及其工程应用研究的基础。我国系统开展水利水电工程中的岩石力学试验研究工作起步于 1958 年三峡工程的岩石力学试验研究工作。近半个世纪以来,岩石力学试验及其测试技术的研究为解决我国水利、能源、交通、矿山、人防和铁道等领域工程中的岩石力学问题作出了重大贡献。1981 年电力工业部和水利部颁发的 DLJ 204—81、SLJ 2—81《水利水电工程岩石试验规程》及 1992 年颁布的 DL 5006—92《水利水电工程岩石试验规程(补充部分)》首次对水利水电工程岩石试验方法进行了统一和规范。2001 年,以长江科学院作为主编单位编制的 SL 264—2001《水利水电工程岩石试验规程》按 SL 01—97《水利水电技术标准编写规定》对当时水利水电工程涉及的岩石力学试验新经验、新方法、新技术等进行了系统总结和归纳。该规程的制定与颁布,对以三峡工程为代表的中国水利水电工程建设进入世界领先水平起到重要技术支撑作用,同时对交通、铁路、矿山及核电等领域的岩石力学试验技术的发展,也起到了重要示范作用。

当前,水利水电工程开发向西部等复杂地质条件发展,以深埋长隧洞工程建设为代表的水资源配置工程建设正处于高峰建设期,高地震烈度地区建设引起的岩石力学动力问题、高地应力、复杂应力路径条件下的岩石试验及复杂工程岩体观测技术等为水利水电工程建设提出了新挑战。岩石力学试验仪器及原位观测设备发展迅速,高围压、电液伺服、计算机自动采集、滚轴丝杠加载等先进原理及技术的发展,为进一步推动岩石力学试验技术的进步奠定了基础。SL 264—2001《水利水电工程岩石试验规程》已颁布十几年,总结该规程实施以来的应用实践,通过对原规程

进行修订，适当调整并纳入一些有针对性的新的试验技术，对推动岩石力学理论及试验技术在工程中的应用，解决水利水电工程建设面临的新的技术挑战以及提高试验成果质量等具有重要意义。



3 基本规定

3.0.2 根据 GB 50487《水利水电工程地质勘察规范》的规定,水利水电工程勘察设计分为规划、可行性研究、初步设计、招标设计和施工详图设计共五个阶段,各阶段岩石力学试验研究内容与数量应具有相对的针对性。具体而言,各阶段岩石力学试验工作应把握的总体思想是: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岩石声波测试。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地质条件及建筑物特点,拟定出关键岩石力学问题,采取岩块和岩体试验相结合的原则,进行深入的试验研究,并满足试验数量的要求。④招标设计和施工详图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。⑤工程施工以及运行期间,应对主要建筑物部位的工程岩体进行工程岩体原位观测。

在 GB 50287《水电发电工程地质勘察规范》中,将水电工程的勘察设计分为规划、预可行性研究、可行性研究、招标设计及施工详图设计共五个阶段,在执行本规程时,可参考使用。

3.0.3 编制岩石试验大纲是保障试验成果质量的重要手段。在编制试验大纲前宜收集和分析工程地质资料,并结合设计方案和地质勘查,以便制定的大纲符合试验实际实施过程。

3.0.6 本条对室内岩石物理与力学试验的用水进行了规定。按 GB/T 50266《工程岩体试验方法标准》要求,将原规程室内岩石物理力学试验中所提及的“纯水”“水”等术语,改为洁净水。

这里的洁净水主要是满足国家生活饮用水卫生标准的纯洁、干净，不含杂质或细菌的自来水。为表达方便，规程室内试验各章节中，所提及的水均为洁净水。

3.0.11 进行岩体直剪试验时，其试点的环境条件和岩性应与实际工程建筑物区的环境条件和岩性相似，即两者受力状态与受力方向应一致，饱水或浸水状态应相似，岩体性状应相似。

4 岩块物理性质试验

4.1 含水率试验

4.1.1 岩石含水率是试件在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度下烘至恒量时所失去水的质量与试件干质量的比值，以百分数表示。对于不易成型的较松散或松散岩石可采用带有密封盖的试样盒进行测定。

4.1.2 为与 GB/T 50266 保持一致，本条 3 款试件质量修订为 $40\sim 200\text{g}$ 。

4.1.5 本条规定岩石含水率试验采用称量控制，规定具体操作应将试件反复烘干至称量达到恒量。本条规定的 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的恒温烘干温度，是针对不含矿物结晶水的岩石。对含有矿物结晶水的岩石，这里不做具体规定。

4.2 吸水性试验

4.2.1 自由吸水率试验法是指试件在大气压力和室温条件下吸水的方法。岩石自然吸水率是采用自由吸水法吸入的最大吸水量与试件固体质量的比值，以百分数表示。岩石饱和吸水率是试件在强制饱和状态下的最大吸水量与试件固体质量的比值，以百分数表示。

4.2.2 试件形态对岩石吸水率的试验成果有影响，这与试件与水的接触面积的大小有很大关系。本条规定吸水性试验试件宜采用规则形状，只有当试件制备有困难时，才允许采用不规则试件。对不规则试件除了要求采用浑圆形试件外，还有一定的质量要求，以保证试验成果的精度。参照 GB/T 50266 及实际试验中通常采用的试件尺寸及要求，本条将原规程中规则试件高径比宜为 $2.0\sim 2.5$ 修订为试件高度不宜小于 50mm 。

4.2.5 考虑到国内西藏、青海等地区大气压力明显偏低，本条 4 款 2) 项将真空抽气法的压力表读数由 100kPa 修订为当地大气

压值，与 GB/T 50266 一致。

4.2.6 岩石饱水系数是水利水电工程较常用的水理性指标，本条增加了饱水系数的计算公式。

4.3 颗粒密度试验

4.3.1 岩石颗粒密度是岩石固相物质的质量与体积的比值。本规程推荐比重瓶法和水中称量法。比重瓶法为基本方法，但比重瓶法操作比较烦琐，不宜作大量的试验。水中称量法具有可用不规则试件、操作简便、可同时测定岩石的颗粒密度、块体密度、吸水率、饱和吸水率等物理指标的优点。由于水不可能完全充满岩石中的闭合裂隙，致使水中称量法测定的颗粒密度略偏小，但对于中小型水利工程以及大型工程的可行性阶段甚至初设阶段都是可以满足精度要求的。

4.3.2 试件可采用块体密度试验后的试件岩粉，旨在减少岩石不均匀性的影响。实测资料表明，采用粉碎后最大粒径 1mm 的岩粉，对试验成果影响甚微。参照国内外相关规程，本条规定岩粉必须全部通过 0.25mm 筛孔。

4.3.3 本条说明参见 4.2.2 条文说明。

4.3.6 采用比重瓶法测定颗粒密度时，岩粉的烘干时间可根据不同岩石而定。根据经验，坚硬岩类一般 6~8h，黏土岩类 8~10h，本条规定，烘干时间不少于 6h。

4.4 块体密度试验

4.4.1 岩石块体密度是岩石试件质量与试件体积的比值。根据岩石含水状态，岩石块体密度可分为天然密度、干密度和饱和密度。选择试验方法时应主要考虑试件制备的难度和水对岩石的影响。密封法试验当以石蜡为密封材料时，由于石蜡的熔点较高，在蜡封过程中会引起试件含水率的变化，同时试件也会产生干缩，影响岩石天然含水率和块体密度计算的准确性。而高分子树脂胶是在常温下凝固的涂料，密封过程中不会引起试件含水率和

试件体积的变化。因此，对于干缩湿胀的岩石宜采用高分子树脂胶密封试件来测定岩石的块体密度。

4.4.11 本条 2 款规定了高分子树脂胶的一种配方制备方法，可以参照使用。

4.4.12 石蜡的密度采用水中称量法测定。高分子树脂涂料的密度，可按涂料的配合比确定，聚氯乙烯树脂密度为 $1.35 \sim 1.46\text{g/cm}^3$ ，环己酮密度为 0.95g/cm^3 。

4.5 膨胀性试验

4.5.1 岩石膨胀性试验是测定岩石吸水后的膨胀特性。岩石自由膨胀率分径向自由膨胀率和轴向自由膨胀率，分别是岩石试件吸水后产生的径向变形、轴向变形与试件吸水前的直径、高度的比值，以百分数表示。岩石侧向约束膨胀率是岩石试件在有侧向约束条件下，轴向受有限载荷（5kPa）时吸水后产生的轴向变形与吸水前试件高度的比值，以百分数表示。体积不变条件下岩石膨胀压力是岩石试件在有侧向约束条件下，测定试件吸水后保持轴向尺寸不变所需施加的轴向压力。

4.5.2 侧向约束膨胀率和体积不变条件下岩石膨胀压力试验，规定试件直径允许偏差为 $-0.1 \sim 0\text{mm}$ ，以确保试件吸水后不产生径向变形又便于安装。

4.5.6 侧向约束膨胀率试验仪器的金属套环高度不应小于试件高度和两块透水板厚度之和，以保证试件吸水后不产生侧向变形。

4.5.7 体积不变条件下岩石膨胀压力试验，为使试件体积保持不变，应随时调节所施加载荷，在观测变形时扣除仪器的系统变形。

4.6 耐崩解性试验

4.6.1 岩石耐崩解性试验是测定岩石试件在经过烘干和浸水 2 个标准循环后，试件的质量与其原质量的比值，以百分数表示。

4.6.5 参照 GB/T 50266 的要求，本条试件称量由准确至 0.1g 修订为准确至 0.01g。

4.7 冻融试验

4.7.1 岩石冻融破坏是由于裂隙中的水结冰，体积膨胀导致岩石破裂。岩石冻融试验是测定岩石经过多次反复冻融后的质量损失率和饱和冻融系数，分别是冻融后的试件质量和饱和单轴抗压强度与冻融前的质量和饱和单轴抗压强度的比值，质量损失率以百分数表示。

考虑当前水利水电工程时常有在极端严寒地区建设，冻融问题比较突出。本标准将冻融试验分为常规冻融试验和特殊冻融试验，并增加了特殊冻融试验下的相关规定。特殊冻融试验规定在 $(-40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 温度环境下开展试验，现有的制冷技术可以满足要求。

4.7.5

3 关于特殊冻融试验，冷冻和融解规定不小于 8h，主要根据现有经验制定。实际应用时，可根据实际经验积累不断完善。

4 参照 GB/T 50266 的要求，冻融循环次数由 20 次修订为 25 次，且增加根据工程需要，冻融次数还可以采用 50 次或 100 次的要求。

4.8 硬度试验

4.8.1 岩石硬度是岩石的可钻性评价的重要指标，本次修订新增岩石硬度试验。岩石的可钻性是指在 TBM 破岩过程中岩石的综合表现的评价指标，包括岩石抵抗刀具破岩的能力和岩石对刀具的磨损能力。

岩石的硬度测试方法有施密特回弹法、肖氏硬度法、摩氏硬度法等。由于施密特回弹方法所需仪器设备简单、轻便及经济适用等优点而广泛应用于岩石硬度、强度及弹模等参数的估测，本规程推荐该方法。

4.8.4 施密特回弹法测试原理是应用一弹簧驱动弹击锤并通过弹击杆弹击试件（试点）表面所产生的瞬时弹性变形的恢复力，使弹击锤带动指针回弹并指示出回弹的距离。硬度值以回弹的距离与冲击前弹击锤至弹击杆的距离的比值乘以 100 的数值表示。施密特回弹仪可分为 L 型和 N 型。L 型回弹仪最大释放冲击能 $0.735\text{N} \cdot \text{m}$ ，适用于室内岩石试件；N 型回弹仪最大释放冲击能 $2.207\text{N} \cdot \text{m}$ ，适用于现场岩体试件。

4.9 磨耗性试验

4.9.1 岩石的耐磨性是岩石的可钻性评价的重要指标，本次修订中新增岩石磨耗性试验。岩石磨耗性试验原理是采用具有一定刚度和硬度的钢针，对其施加一定载荷刻划岩石表面，然后在显微镜下观测测量钢针的磨损程度，并用钢针的直径磨损程度作为评价岩石耐磨性指标。

4.9.5 本条规定了测量磨耗后的钢针直径的两种方法。图 1 为按照侧视或俯视方法进行磨耗后钢针的测量方法。磨蚀后的钢针针尖为不对称状、具有小碎片或毛刺伸出形成的无规则状时，采用俯视测量磨损针尖的直径有困难时，应按如图 2、图 3 所示进行合理取舍。

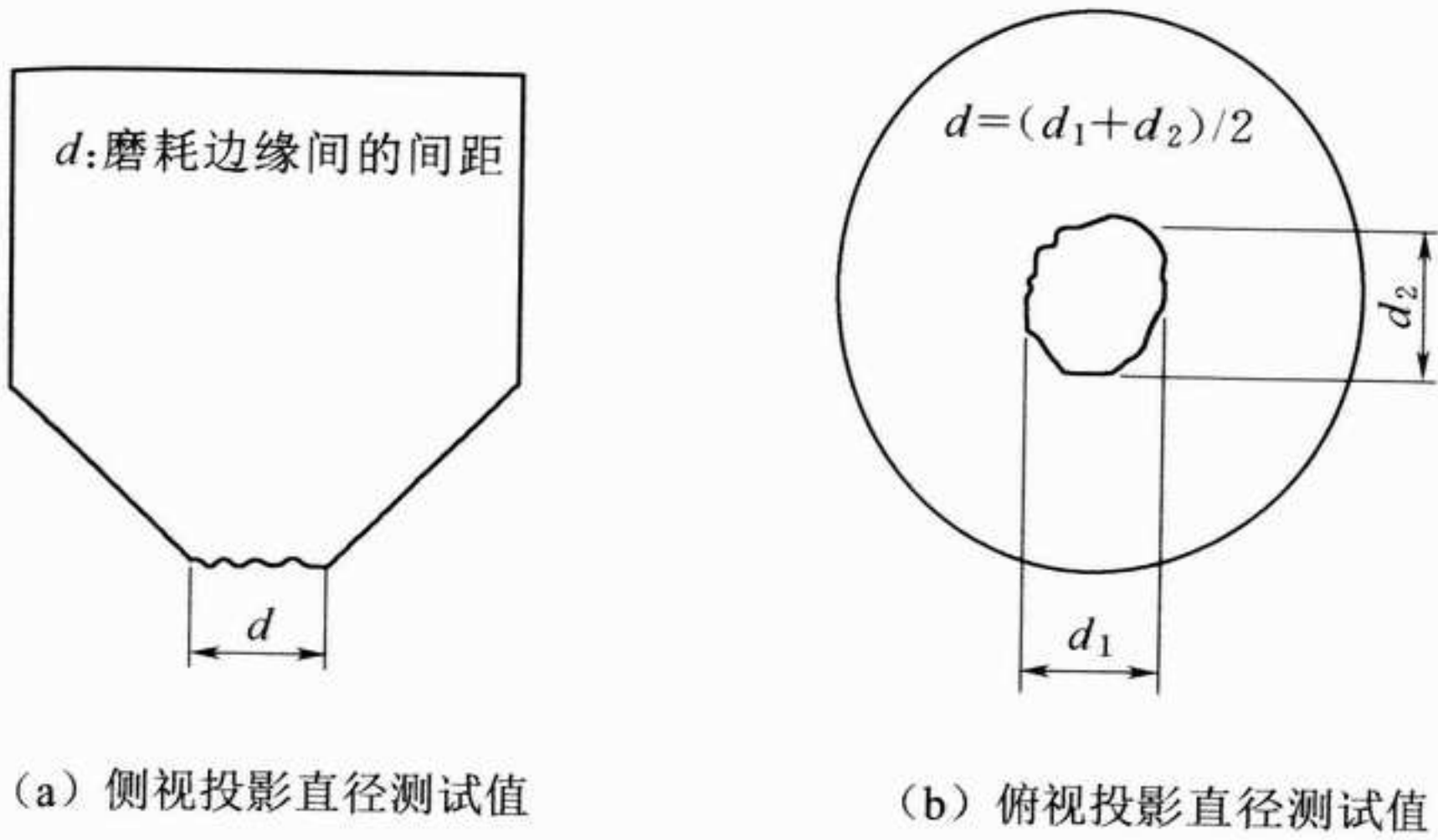
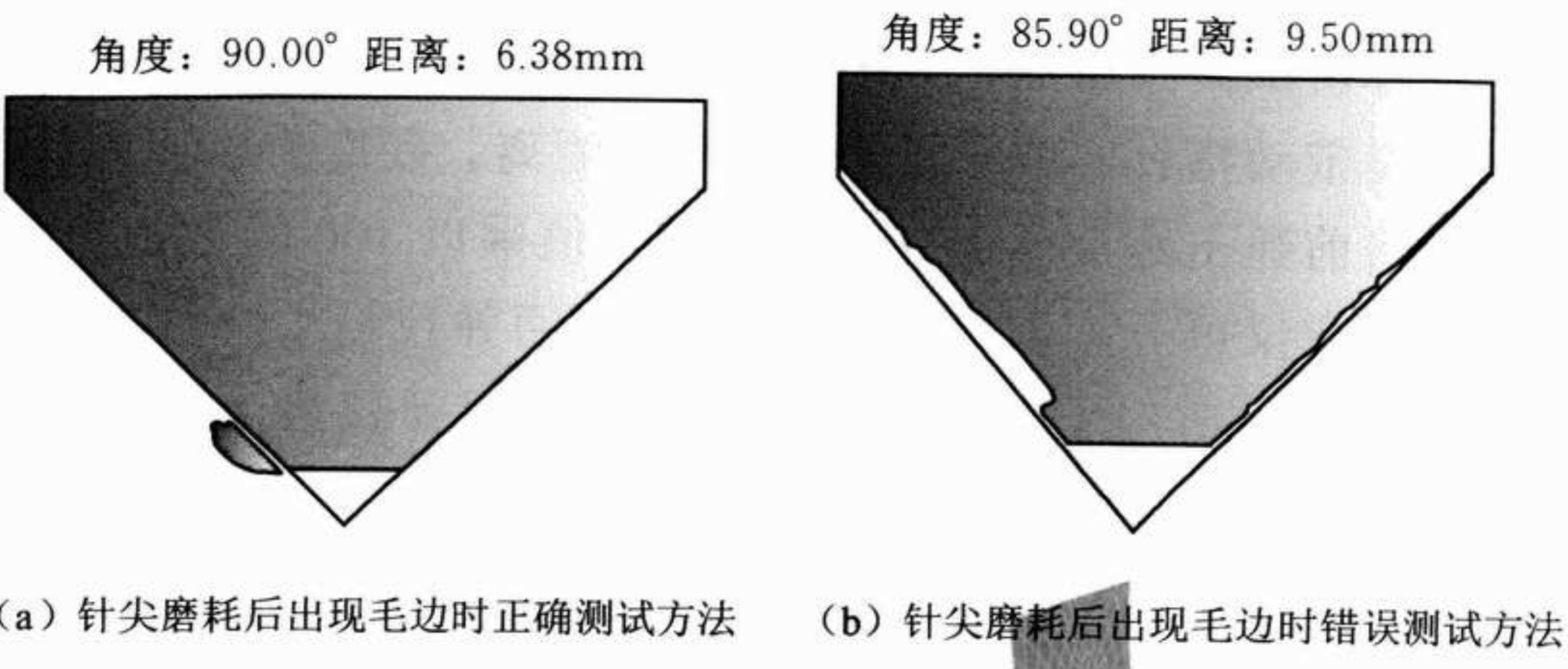
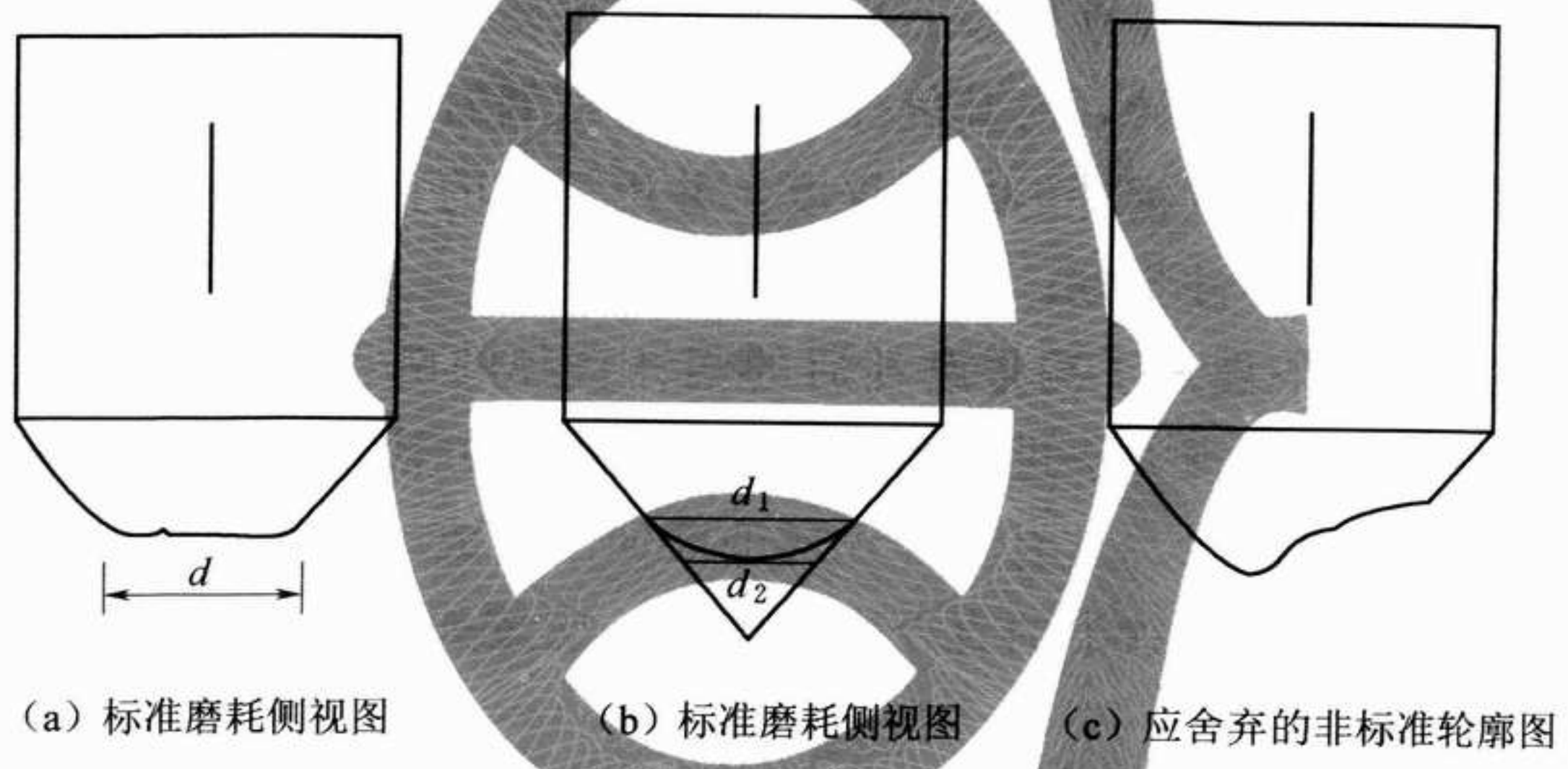


图 1 光学显微镜下针头直径的测量方法 [(a)、(b) 方法为推荐方法]



(a) 针尖磨损后出现毛边时正确测试方法 (b) 针尖磨损后出现毛边时错误测试方法

图 2 针尖磨损侧视图



(a) 标准磨损侧视图 (b) 标准磨损侧视图 (c) 应舍弃的非标准轮廓图

图 3 针尖磨损后侧视轮廓图

5 岩块力学性质试验

5.1 单轴压缩变形试验

5.1.1 岩石单轴压缩变形试验是通过测定岩石试件在轴向压力作用下的轴向和径向应变值，据此计算岩石弹性模量、变形模量和泊松比。本试验采用电阻应变片法和位移计法。考虑测试技术的进步，本试验将原规程推荐的千分表法修订为位移计法。位移计可分为机械式（如千分表、百分表）和电测式（如 LVDT 位移计、引伸计等）两类。

5.1.5 为了取得完整的应力应变关系曲线，循环加载至预定的最大循环荷级之后，仍应继续逐级加载并读数，直至岩石破坏。

5.1.6 电阻应变片采用半桥连接方式，以利于检查试件受力的偏心程度，便于及时调平试件使之均匀受力。试件上下各垫一块与试件同直径的垫块，有利于减小试件的端部效应，使试件内部应力分布均匀。

5.1.7 对于软岩与极软岩，因岩石试件变形相对较大，上下压板与试件之间的缝隙变形对测试成果影响较小，因此可将测量到的上下压板之间的变形作为试件的轴向变形。对于较软岩以及硬岩类岩石，可通过专用夹具，测量试件轴向一定标距范围内的岩石变形。

5.1.8 按本条规定计算得到的弹性模量是应力—应变关系曲线直线段的斜率，变形模量是应力—应变曲线原点与 50% 抗压强度点连线的斜率，也称割线模量。位移计法测得的是岩石变形，计算变形参数之前应先将变形值除以两测量标点间的距离，获得应变值。

5.2 单轴抗压强度试验

5.2.1 岩石单轴抗压强度是试件在无侧限条件下受轴向力作用破坏时单位面积所承受的载荷。本试验采用直接压坏试件的方法确定岩石单轴抗压强度。也可以在一个试件上先进行岩石单轴压

缩变形试验后再将试件压坏，测定岩石单轴抗压强度。

5.2.2 本标准推荐圆柱体试件作为标准试件，当没有条件加工成圆柱体试件时，可采用方柱体试件。

5.2.5 加载速率对岩石强度有一定影响，本标准规定 $0.2 \sim 1.0 \text{MPa/s}$ 的加载速率与目前国内外常用的加载速率一致。实际操作时可根据岩石软硬程度选用，对于软岩类岩石加载速率宜适当降低。

5.3 三轴压缩强度试验

5.3.1 岩石三轴压缩强度试验采用等侧压 ($\sigma_2 = \sigma_3$)，是三向应力状态下的一种特殊情况。

5.3.2 西部水利水电工程建设面临越来越多的高应力岩石力学问题，根据 GB/T 50218《工程岩体分级标准》规定，工程部位岩石的强度应力比小于 7 时，通常会发生高应力条件下的相关力学现象，试验过程中应考虑高应力条件下的岩石力学强度非线性特征。为此，本条增加了“高应力条件下每组试件的数量不应少于 10 个”的规定。实际应用表明，围压在 50MPa 以下岩样的高应力条件下三轴试验，一组 10 个岩样基本可反映出岩石的非线性强度特征。

5.3.6 对试件采取防油措施，是避免油液渗入试件内产生孔隙压力，影响试验成果。

5.3.7 高应力条件下岩石强度曲线的非线性特征显著，为便于工程应用，本条增加了采用莫尔-库仑强度准则分段拟合的规定。

5.4 抗拉强度试验

5.4.1 本标准推荐劈裂法。劈裂法又称巴西法，为间接拉伸法。其原理是沿试件直径轴面方向施加一对线载荷，使试件沿直径轴面方向劈裂破坏，根据弹性力学理论计算岩石的抗拉强度。

5.4.2 为便于成果分析，本条规定试件劈裂面的拉力方向应与单轴抗压强度试件的受力方向一致。

5.4.5 垫条硬度过大，易产生贯入；垫条硬度过低，垫条本身易变形，对试验成果会产生较大的影响。因此，垫条应根据岩石

软硬程度选定，垫条的硬度应与试件硬度匹配。

5.5 直剪强度试验

5.5.1 岩石直剪强度试验是岩石试件在不同的法向载荷下进行直接剪切，根据库仑强度准则确定岩石抗剪强度参数。

5.5.2 考虑到地质钻孔岩心通用尺寸，参照 GB/T 50266 规定的试件尺寸，规定了试件的最小尺寸。

5.6 点荷载强度试验

5.6.1 岩石点荷载强度试验是指将岩石试件置于点荷载试验仪上下两个球形圆锥之间，施加集中载荷直至试件破坏，测定岩石点荷载强度指数和各向异性指数的一种试验方法。该试验方法成本低廉，操作方便，实用性强，可为岩石分级及按经验公式计算岩石的抗压强度参数提供依据。

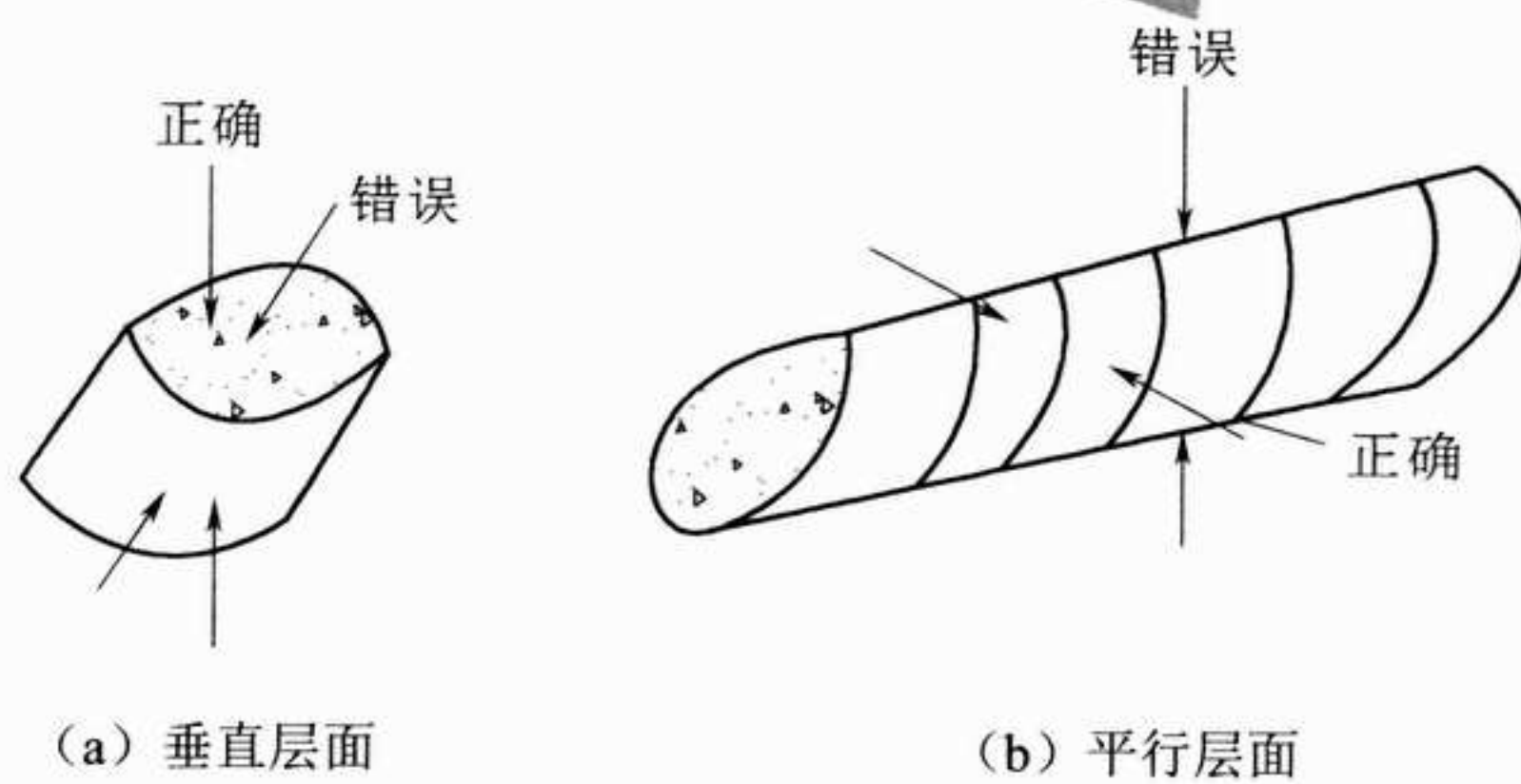
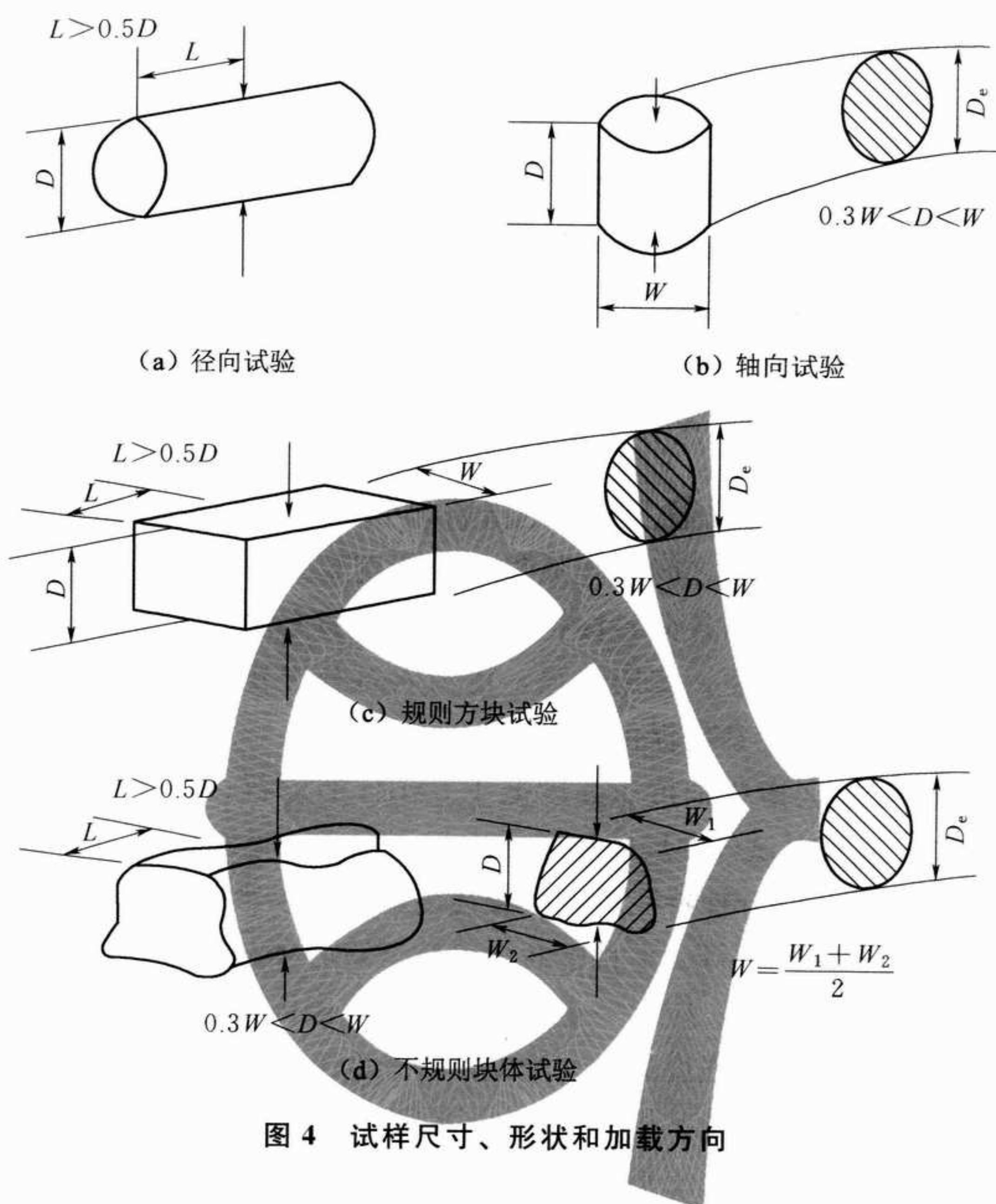
极软岩是指单轴抗压强度低于 5MPa 的岩石。

5.6.2 本条对试件的尺寸和形状进行了规定（见图 4）。由于岩石含水状态及各向异性特征对点荷载强度试验成果影响甚大，故对不同含水状态以及平行、垂直层面加载的试验必须分别分组进行。为保证试验成果精度，应有一定的试件数量。国内外的资料表明，对岩心试件的点荷载强度试验，当试件数量大于 10 块时，岩石点荷载强度指数 I_s 趋于定值。故本条规定了每组岩心试件数量不少于 10 块。

5.6.6 本条对试件的加载方式进行了规定（见图 4 和图 5）。当试件中存在层面时，加载方向应分别平行层面和垂直层面，以获取各向异性岩石的最小和最大点荷载强度指数。

5.6.8 本条规定了有效试验的判定方法。当破坏面未通过两加载点时，认为试验是无效的（见图 6）。

5.6.9 对非标准试件，在计算点荷载强度指数 I_s 时，引入了等价岩心直径 D_e 的概念，并对径向试验、轴向试验、方块体和不规则块体试件等价岩心直径的计算作出了规定。对于径向试验，计算 I_s 时所取的等价岩心的直径 D_e ，即为两加载点间的距离 D 。



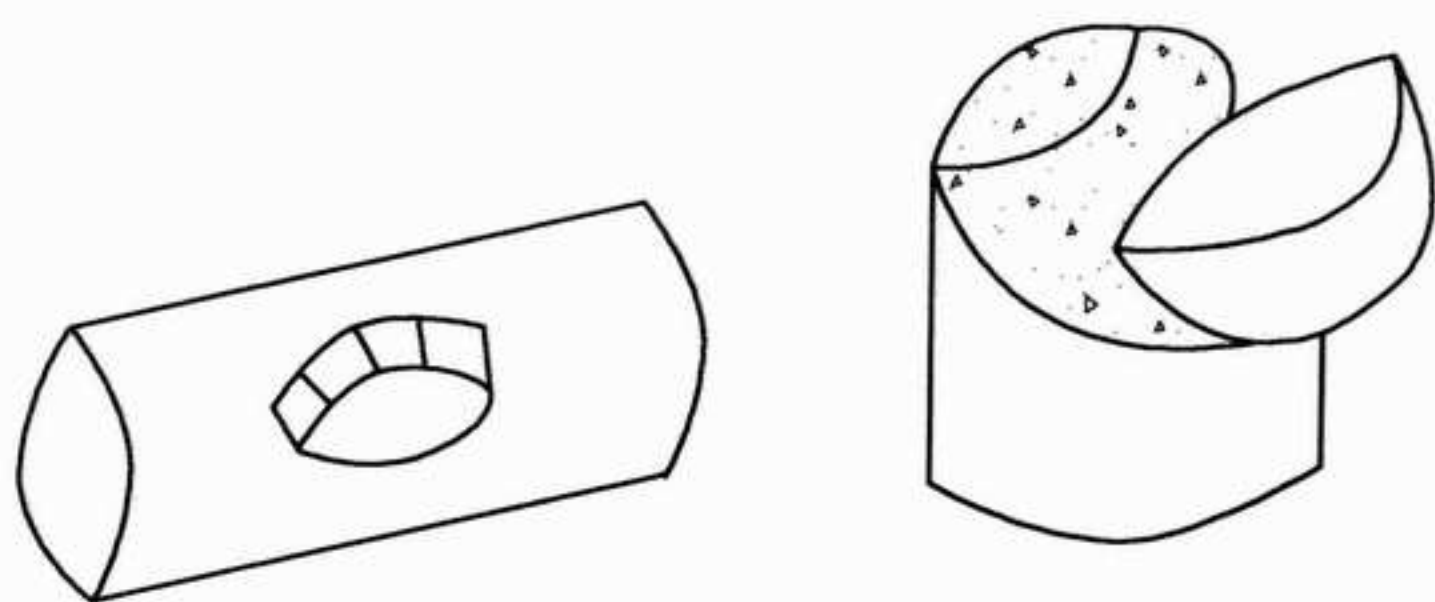


图 6 无效试验破坏模式

对于轴向试验、方块体及不规则块体试验，计算 I_s 的 D_e 则必须由计算确定。

5.6.10 为了获得标准的点荷载强度指数，必须进行尺寸修正。本条规定以加载点间距 $D=50\text{mm}$ 的岩心径向试验所测定的 I_s 作为标准值，表征为岩石点荷载强度指数 $I_{s(50)}$ 。凡两加载点间距离不等于 50mm 时，均应予以修正。

关于修正指数 m 值的确定，国内外对不同 D 或 D_e 值的试件所进行的试验表明： $m=2(1-n)$ ，其中 n 为 $\lg P - \lg D_e^2$ 关系曲线的斜率（见图 7）。当数据较少，不能绘制该图时，可取， $n=0.77\sim 0.80$ ，因而一般取 $m=0.40\sim 0.45$ 。

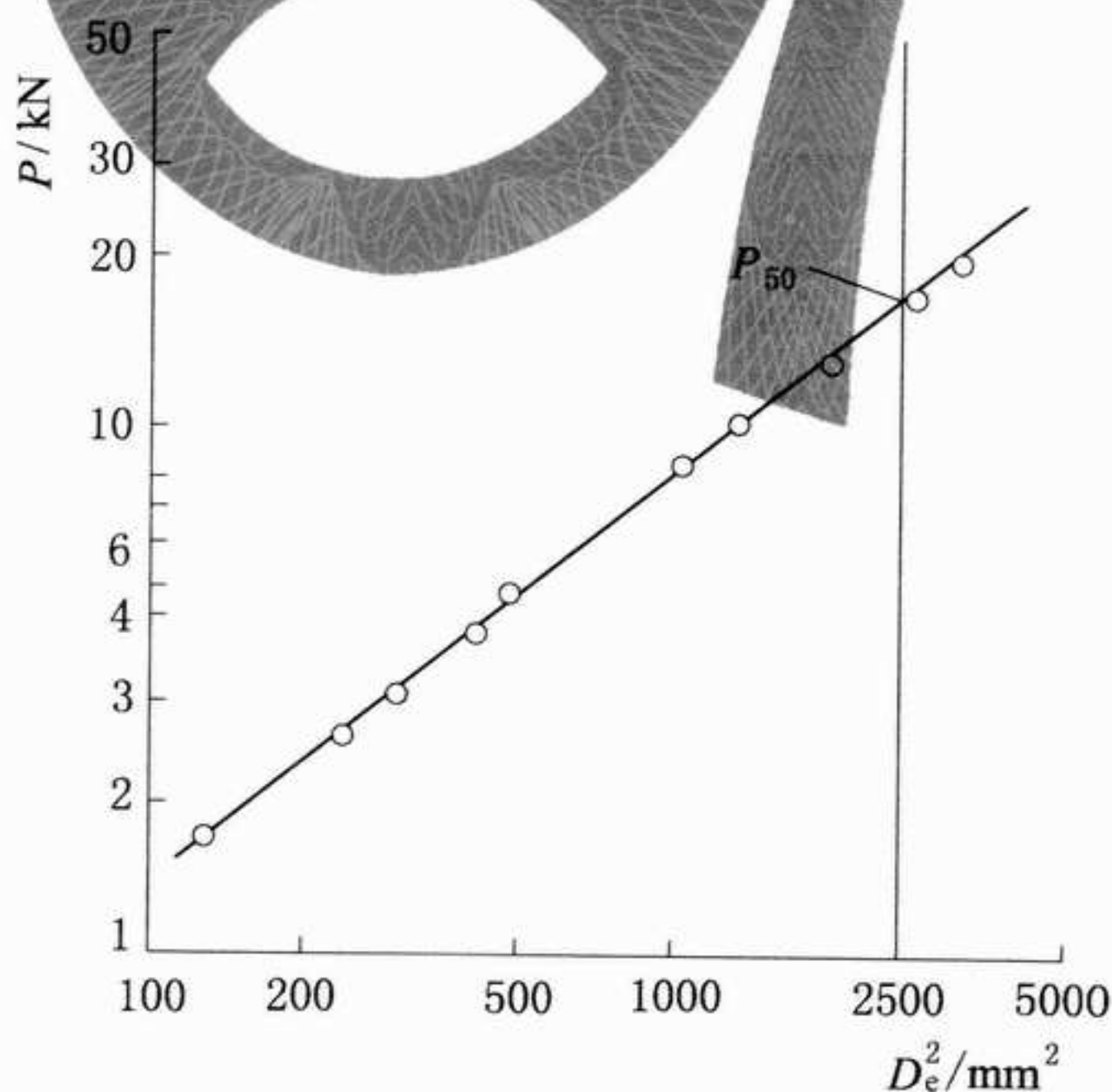


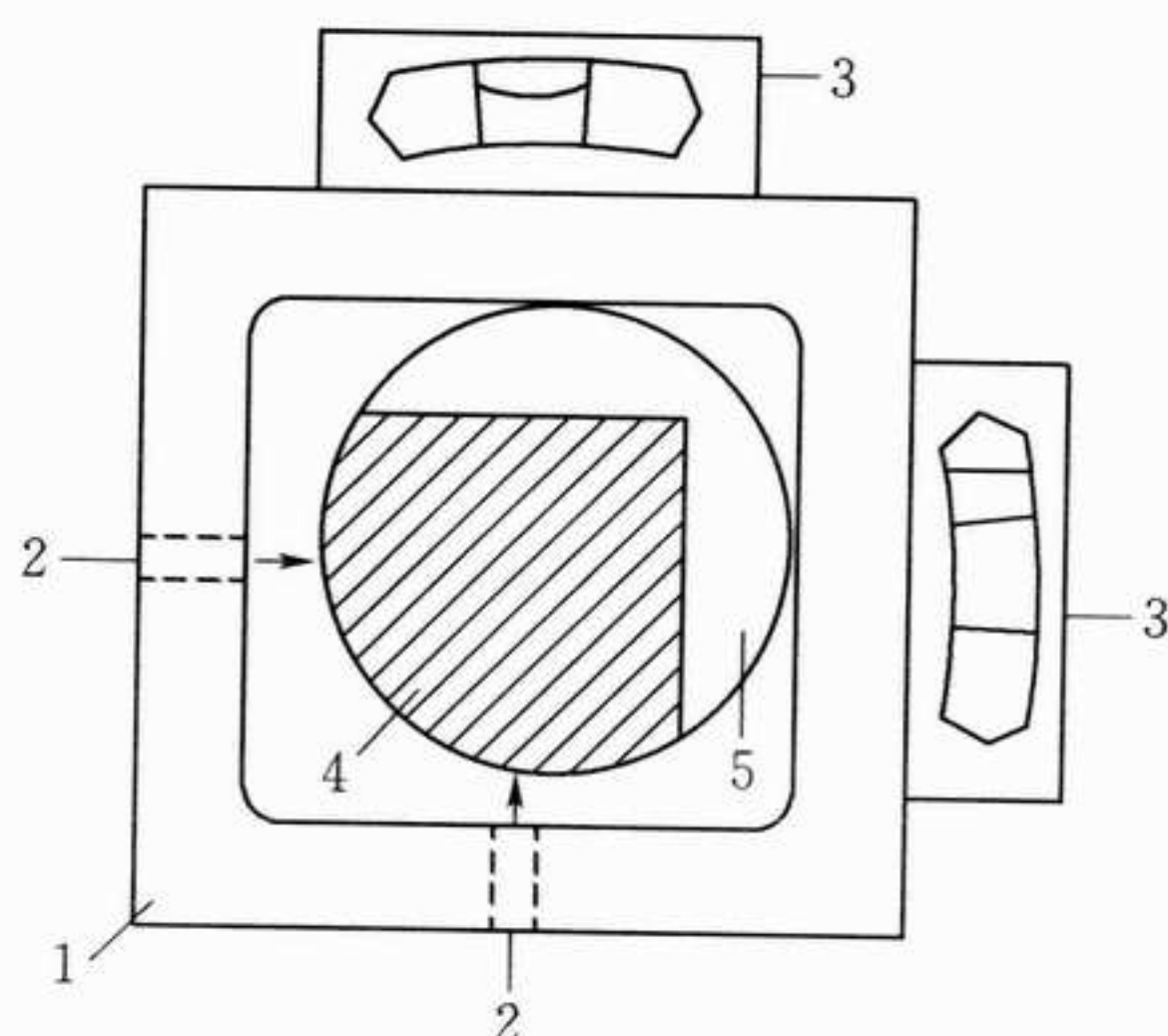
图 7 $P-D_e^2$ 的对数关系曲线

5.7 断裂韧度试验

5.7.1 岩石的断裂韧度表征了岩石阻止裂缝扩展的能力，是岩石抵抗断裂的力学指标。

为了解岩石断裂过程中裂缝的位移特征，加载过程中可同时进行位移测量。

5.7.2 采取的岩样应满足试件数量和尺寸加工要求。为满足 V 形切口顶角为 $90^\circ \pm 1^\circ$ 的要求，加工 V 形切口时可采用 V 形切口切割的夹具（见图 8）。用千分卡尺测量初始切口深度，作为计算采用的切口深度 a 。对直切口试件，应在试件厚度方向的两侧及中部测量初始切口深度，取其平均值。



1—金属框架；2—紧固螺杆；3—水准仪；4—试件；5—切口

图 8 V 形切口切割夹具

5.8 动三轴试验

5.8.1 水利水电工程的岩石地基、地下洞室、边坡，在地震或其他动荷载（频率 $< 10\text{Hz}$ ）作用下的动力反应分析和安全评价，需要岩石的动力参数。岩石动三轴试验是在轴向与侧向等压或不等压条件下，通过施加轴向等幅周期循环荷载，测定应力、应变的变化，获得岩石的动力参数。

5.8.4 岩石动三轴试验所采用的动三轴试验仪应满足有关仪器设

备和基于测试目的所需激振能力的基本要求。动三轴试验仪的主机动力加载系统宜具有按设定任意数字信号波形进行激振的能力。

5.9 阻尼比试验

5.9.1 阻尼是指任何振动系统在振动中,由于外界作用和/或系统本身固有的原因,引起的振动幅度逐渐下降的特征,是结构动力学中的一个重要概念。在岩体地震等动力问题研究中,阻尼比是一个重要的力学参数。阻尼比是指阻尼系统与临界阻尼系数之比,用以表达结构体标准化后的阻尼大小。目前在进行岩体动力问题力学分析时,因无实测数据,更多的是依赖假定或经验。本标准推荐采用岩石试验动三轴应力—应变滞回圈法及岩样柱体悬臂梁自由振动法,用以测试岩石阻尼比。当动荷载作用下试件应力—应变滞回圈曲线规整、面积较大时,宜采用动三轴应力—应变滞回圈法;当无侧向压力要求且试件坚硬的条件下,宜采用悬臂梁自由振动法测试岩石动力参数。

5.9.7 自由振动法测定岩石阻尼比,即固定约束岩石试样的一端,在试样的另一端通过激振器施加激振力,使得试样自由振动。由于阻尼作用,振动的振幅越来越小,最后停止振动,试验应记录振幅随时间的衰减全过程曲线。

5.9.9 采用自由振动法时,同时测试岩样的应变与加速度幅值衰减过程,选择其中规律性较好的全过程曲线,计算岩石阻尼比。阻尼比公式推导如下:

$$\delta_n = \frac{1}{n} \ln \frac{d_i}{d_{i+n}} = \frac{2\pi\lambda_d}{\sqrt{1-\lambda_d^2}} \quad (1)$$

由于 λ_d^2 数值较小,式(1)可以简化为:

$$\delta_n = \frac{1}{n} \ln \frac{d_i}{d_{i+n}} = \frac{2\pi\lambda_d}{\sqrt{1-\lambda_d^2}} \approx 2\pi\lambda_d \quad (2)$$

由此获得正文中的式(5.9.9-3):

$$\lambda_d = \frac{\delta_n}{2\pi} \quad (3)$$

6 岩体变形试验

6.1 承压板法试验

6.1.3 承压板法岩体变形试验是通过刚性或柔性承压板局部加载于半无限空间岩体表面,测量岩体变形,按弹性理论公式计算岩体变形参数。本条规定试验边界条件近似满足半无限体空间条件。

6.1.7 柔性承压板法中,与基岩接触的液压枕应采用无凹面的液压枕,主要是充分保证柔性承压板法试验中,作用于岩体承压面上的应力相等的条件。

双枕法试验一般采用2个 $30\text{cm}\times 50\text{cm}$ 矩形液压枕。四枕法试验一般采用4个 $40\text{cm}\times 40\text{cm}$ 矩形液压枕。柔性承压板法中,上部加载设备根据需要可以采用千斤顶或加力液压枕。

6.2 狭缝法试验

6.2.2 狭缝法又称刻槽法,是通过埋设在岩体狭缝中的液压枕对狭缝两侧岩体施加压力,测量岩体表面变形,并近似地按无限弹性平板中有限长狭缝加压的平面应力问题的解析解计算岩体变形参数。本条规定狭缝法变形试验边界条件近似满足这一条件。

6.3 单(双)轴压缩法试验

6.3.1 单(双)轴压缩法试验是通过在试点四周切开的狭槽内埋入液压枕对岩体施加压力,测量试件表面岩体变形,按弹性力学单向(或双向)受压公式计算岩体变形参数。当夹层、断层带和裂隙密集带能制备成试体且试体内岩性匀一时,也可采用本试验方法。

6.4 钻孔径向加压法试验

6.4.1 钻孔径向加压法试验是通过放入钻孔中的钻孔千斤顶、

钻孔膨胀计或钻孔压力计，对钻孔孔壁施加径向压力，测量钻孔岩体径向变形，按弹性理论公式计算岩体变形参数。本试验适用范围取决于仪器类型和测试精度，如仪器测试精度达到0.001mm，可适用于坚硬和较坚硬岩体。

刚性加压直接测量岩体径向变形的仪器称为钻孔千斤顶。通过柔性加压间接测量岩体径向变形（通过测体积变化换算孔壁径向变形）的仪器称为钻孔膨胀计。柔性加压直接测量岩体径向变形的仪器称为钻孔压力计。

6.4.7 本试验计算出的弹性模量是应力—变形关系曲线直线段的斜率。变形模量是应力—变形曲线预压点与工程应力点连线的斜率，也称割线模量。

6.5 隧洞液压枕径向加压法试验

6.5.1 隧洞液压枕径向加压法试验原理是依据弹性理论中文克尔假定。在工程实际应用中，为方便使用和利于比较，引入了单位抗力系数 K_0 的概念。

6.5.2 本条规定了试验应满足的边界条件。

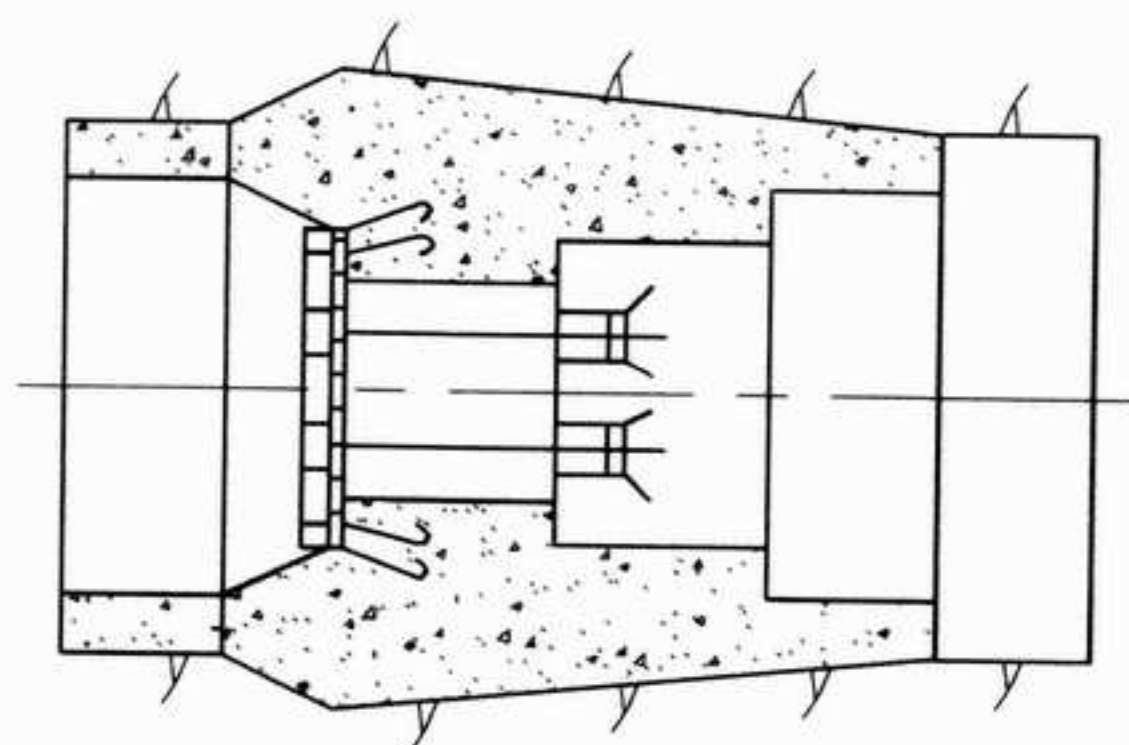
6.5.5 在浇筑顶部混凝土时，要求与围岩接触密实。在有条件的情况下，可采用灌浆回填。

6.6 隧洞水压法试验

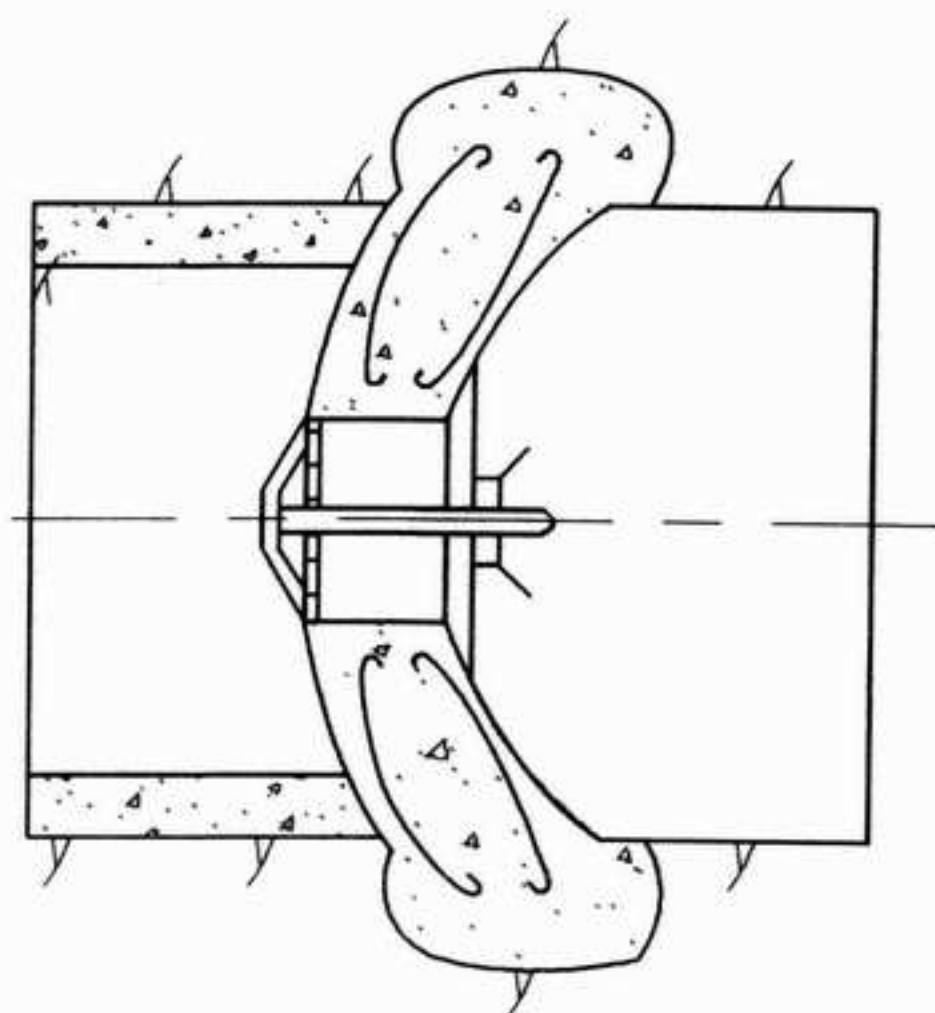
6.6.1 隧洞水压法试验与水工隧洞运行具有力学上的相似性，受力面积大，能较为真实地反映建筑物工作特性并能测定出岩体抗力系数。

6.6.5 试验洞采用混凝土衬砌或涂抹柔性防渗层的方法是防止内水外渗，避免内水压力向围岩内传递。控制水温变化是避免影响试验成果精度。试验洞堵头可参考采用塞形堵头、球面堵头、凹面堵头等（见图9）。

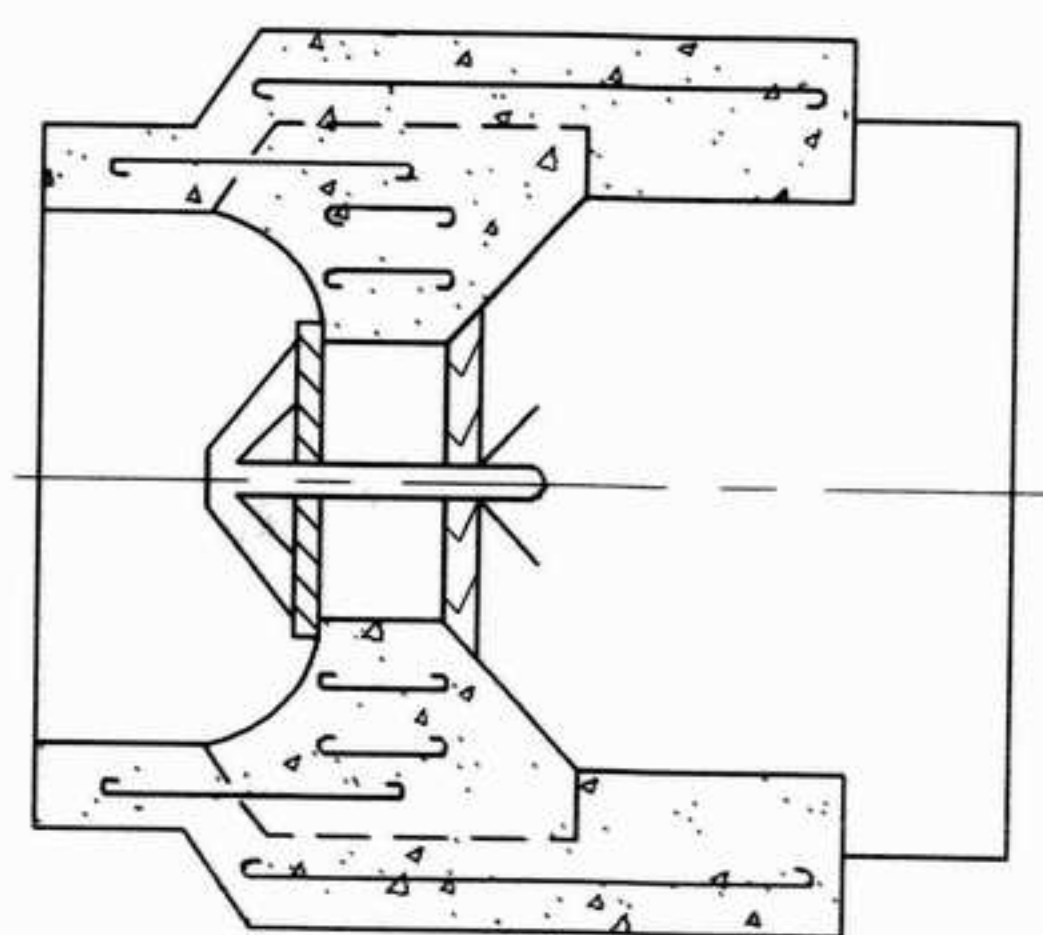
6.6.9 试验成果整理时，因边界条件的要求，一般采用主测量断面岩体表面径向变形计算相关参数，采用辅助测量断面岩体表



(a) 塞形堵头



(b) 球面堵头



(c) 凹面堵头

图 9 隧洞水压法试验堵头类型图

面径向变形计算作为参考。

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 混凝土与岩体接触面的抗剪强度，是指在外力作用下沿混凝土与岩体接触面所具有的抵抗剪切破坏的能力。通过本试验可以获得混凝土与岩体接触面剪应力与剪切位移关系特征和抗剪强度参数。

沿接触面剪断试验称为抗剪断试验，剪断以后仍沿剪断面进行直剪称为抗剪试验，对试体不施加法向载荷的直剪称为抗切试验。

7.1.2 岩体性质和存在条件是复杂的，要求同组试验岩体的性状完全相同难以做到，本条要求同组试验岩体性状基本相同以避免试验结果过于分散。试体基岩面下部若有较大裂隙通过，则抗剪强度可能受该裂隙控制，试验结果反映的是裂隙的强度，而不是本试验要求的混凝土与岩体接触面的强度。

岩体是地质体，裂隙切割破坏了岩体的完整性，试验结果应反映裂隙的存在，即剪切面应包含一定数量的裂隙，故本条对剪切面规定了允许的最小尺寸。

试体间最小间距的规定是考虑对一个试体进行直剪试验时，若发生部分沿基岩的破坏而不会影响相邻试体，又能充分利用试验洞段。若试验场地允许或岩体裂隙发育，可适当增大试体间距，这也有利于加载系统和位移测量系统的安装，改善试验条件。

7.1.5 为便于工程设计采用试验成果，本条规定制备试体的混凝土应采用工程设计所要求的混凝土配合比和强度等级。在制备混凝土试体时，应注意振捣和养护。从试验角度而言，为尽量少受不可预见因素对试验成果的干扰，在处理混凝土强度和养护时间关系方面，不应有各类添加剂等因素的影响。

本条规定接触面以上 5cm 范围内混凝土应振捣密实，是利于混凝土与基岩面处接触（胶结）紧密。

试验实践表明，平推法和斜推法的试验结果无明显差别，本标准将这两种方法并列，根据需要选用。斜推法试验要求斜向推力中心线与剪切面有一个夹角，范围在 $13^{\circ}\sim 17^{\circ}$ ，一般选用 15° 。

7.1.6 安装加载系统时，使法向荷载与剪切荷载的合力作用点位于剪切面中心，是确保试验质量的重要环节。法向荷载中心线垂直剪切面并通过其中心，剪切荷载中心线与法向荷载中心线在剪切面中心相交，可最大限度地改善剪切面上的受力条件，避免产生弯矩，使剪切面上的应力分布比较均匀。

7.1.7 滚轴排安置在千斤顶底部，便于法向加载系统安装，有利于法向加载系统整体稳定。安置在传力柱顶部可使试验过程法向荷载中心始终处于剪切面中心，试验时可根据经验选用。

法向荷载系统是由若干部件叠置而成的。安装和试验时的安全要给予足够的重视。安装完毕用千斤顶稍加压力，使整个系统接触紧密，从而大大增加法向加载系统的整体稳定性。

7.1.8 从受力条件考虑，直剪应力应在剪切面上均匀分布。平推法试验，最佳受力条件是推力中心线通过剪切面，但这在制备试体和安装时均较困难；推力中心线与剪切面的间距过大，在施加推力时受力面上会产生过大的力矩。试验实践表明按本条规定对推力中心线与剪切面的间距所作的限制，在安装技术上是可行的，也能满足试验受力条件。

7.1.10 混凝土强度是影响混凝土与岩体接触面的抗剪强度试验结果的重要因素。试验前应对预先制备的混凝土试件进行强度测定，以控制直剪试验的混凝土强度达到设计强度等级。

7.1.11 施加给每个试体的法向荷载宜为最大法向荷载的等分值，这有利于试验成果的整理。

试验采用快剪方法，剪切荷载分级施加，以时间控制。一个试体的最大剪切荷载值，可根据经验预估接触面摩擦系数 f 、凝聚力 c 和施加于该试体上的最大法向荷载值来确定，也可按已有

的试验结果来确定。在施加剪切载荷过程中，当剪切位移明显增大时，宜适当减小剪切载荷级差，增加分级数。

7.1.12 试验过程中所发生的各种现象应进行详细描述。试验结束后翻转试体准确测量剪切面积，详细描述破坏情况，这些资料有助于对试验结果和破坏机理进行分析。

7.1.13 在确定抗剪强度参数时，根据剪切应力 τ 与正应力 σ 关系曲线，按库仑表达式用作图法或最小二乘法，确定抗剪强度参数的摩擦系数 f 和凝聚力 c 值。

根据混凝土与岩体接触面直剪试验中剪应力 τ 与剪切变形 u_s 曲线特征，通常可将直剪试验中的剪切变形与破坏概括成脆性破坏型和塑性破坏型，如图 10 中的曲线 A 和曲线 B。按照剪切过程中，剪切变形曲线所表现的弹性、塑性屈服和剪断破坏状态，可相应确定比例极限点（见图 10 中的 1、1' 点）、屈服极限点（见图 10 中 2、2' 点）、峰值点（见图 10 中 3、3'）以及残余强度点（见图 10 中 4 点）。

从偏于安全角度出发，工程应用中一般的做法是：对于坚硬脆性岩石，将比例极限作为发生剪切破坏的强度控制点，对于软岩（或弱面）取屈服极限为发生剪切破坏的强度控制点。

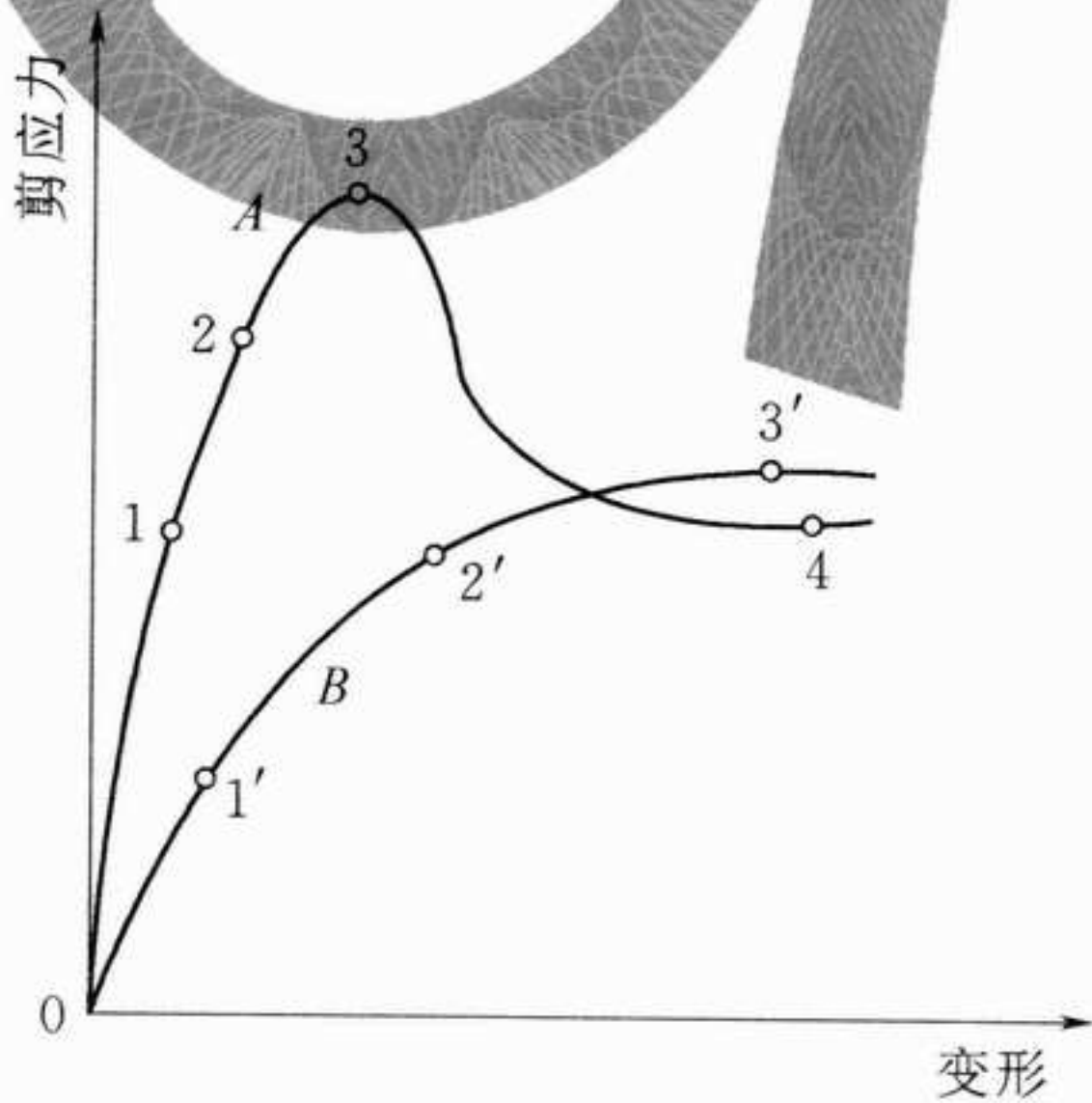


图 10 岩体典型剪应力与位移全过程曲线

峰值极限点（见图 10 中 3、3'）和比例极限点（剪应力 τ 与剪切变形 u 线弹性阶段的终点，如图 10 中的 1、1' 点）的确定比较容易，而屈服点（见图 10 中 2、2'）则不容易判断。岩石试验实践中发现，屈服点并不是一个唯一的点，而是一个区段。岩体进入屈服阶段后，剪切荷载由粒间联结承担转而由岩石矿物颗粒体的滑移、转动而产生的摩阻力来承担。将屈服点当作一个点来判断，必然带来一定程度的不确定性，在实际应用屈服极限值时应当对此有充分的认识。

7.2 结构面直剪试验

7.2.1 结构面是指岩体内已开裂的和易开裂的面，如层面、软弱夹层、节理、裂隙、片理、断层等。按结构面胶结（或充填）物质的性质，通常又分为硬性结构面和软弱结构面。硅质、铁质、钙质等物质胶结的或无充填的硬质岩中的结构面称为硬性结构面；泥质、岩屑等充填或结构面被软化、泥化的称软弱结构面。

岩体中的结构面是控制工程岩体稳定性的主要因素之一。在评价和核算工程岩体稳定性时，结构面抗剪强度参数是主要的岩体力学参数。

7.2.2 影响结构面抗剪强度的因素是多方面的，如结构面充填物的性质、厚度、含水状态、两侧壁岩石粗糙程度和坚硬程度等。它们的存在条件有一定的随机性，要求同组试验结构面性状完全相同是困难的，只能要求基本相同。

7.2.3 当需要对试体浇筑钢筋混凝土保护套时，保护套应与基岩完全脱离，立模时在模板下部沿试体四周铺设厚度与预定剪切缝宽度相同的木条，待混凝土初凝后再去掉。

结构面性状差且倾角较大时，在制备试体时应防止试体滑移。

对于具有膨胀性软弱结构面，在制备试体时，应采取限制膨胀的措施。为避免试体浸水膨胀，应先施加法向荷载，再向下切

割制备试体。

7.2.10 若充填物被挤出，就改变了软弱结构面的性状。因此，在确定最大法向载荷时，对软弱结构面应以不破坏充填物结构（不被挤出）为限。

对硬性结构面和软弱结构面，在施加法向荷载时的位移稳定标准和剪切载荷的时间控制均应区别对待。在快剪条件下，硬性结构面抗剪强度基本上不受稳定时间长短的影响；软弱结构面受力后变形大，变形完成较慢，法向和剪切载荷均应缓慢施加。

7.3 岩体直剪试验

7.3.1 在外力作用下，岩体中的实际破坏面决定于应力分布状态，破坏面可能在结构面上，也可能通过结构面之间的岩体本身发生，即“岩桥”问题。在进行工程岩体稳定性核算时，不仅需要结构面抗剪强度参数，也需要岩体本身抗剪强度参数。岩体抗剪强度参数通过岩体直剪试验获取。

岩体直剪试验方法和混凝土与岩体接触面直剪试验方法基本相同，条文说明同 7.1 节。

7.4 岩体三轴压缩试验

7.4.1 建筑物地基和地下洞室围岩一般处于三向应力状态，三向应力状态下的试验成果更符合工程岩体实际。现场岩体三轴强度试验可采用在等侧压（ $\sigma_2 = \sigma_3$ ）或不等侧压（ $\sigma_2 \neq \sigma_3$ ）应力状态下测定岩体强度。

7.4.2 作为地质体的岩体，试验结果应反映裂隙的存在，本条规定试体最小周边尺寸，是为了使试体包含一定数量的裂隙。若在原位进行试验，制备试体可在开挖支洞时预留岩柱或采用抬高平洞底板，在底板上挖槽凿制试体。如加载设备容量足够大，可适当加大试体尺寸。若利用平洞内专门浇筑的试验平台进行试验，则试体不宜过大，一般试体横向尺寸为 $30\text{cm} \times 30\text{cm} \sim 35\text{cm} \times 35\text{cm}$ ，便于搬运和安装。

试体高宽比的要求，实质上是消除端部力学效应使试体应力分布均匀。本条要求试体高度不小于 2 倍横向边长，可基本消除试体底部约束影响。

7.4.5 先安装侧向加载设备并施加接触压力，随后安装轴向加载设备，可避免试体破损，这对裂隙发育的试体尤其重要。

7.4.6 传力垫板与试体侧面（和顶部）之间存在的摩擦力，使得试体内应力分布复杂，应采取措施尽量减少这种摩擦力。本条推荐的减摩方法在实践中证明是有效的。

侧向千斤顶安装时应注意对称布置，以保证试体受力均匀，不产生致使试体发生偏转的力矩。侧向千斤顶安装时，其活塞伸出量应不小于 2cm，以保证试体受轴向载荷时便于横向膨胀变形。

7.4.7 在试验过程中，试体轴向发生较大的压缩变形，活塞千斤顶在工作时能很好地适应这种变形和破坏。根据预计试验破坏极限选用容量相适应的千斤顶，以满足试验精度。试体较大、强度较高时，可采用多个容量相等的千斤顶并联同步施加轴向载荷。多个千斤顶应对称排列，合力通过试体中心，不得产生偏心受压。

7.4.9 等侧压三轴压缩试验时，同一组中各个试件应采用不同的侧向压力。开始采用静水压力加载方法，对侧向和轴向载荷缓慢、同步地加至预定的侧向载荷值（即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ），然后保持侧向压力不变，继续施加轴向载荷，直至试体破坏。对某一个试体而言，试体破坏时的轴向载荷即为该侧向压力下的抗压强度。

实际工程岩体多处于三向不等压状态。如边坡和地下洞室开挖时，平行坡面走向或平行洞轴线方向的应力往往变化不明显，平行坡面倾向或沿洞室环向的应力往往明显增加，垂直坡面方向或沿洞径向的应力往往明显减小。不等侧压三轴试验时，同一组中各个试体可采用同样的中间主应力，给定不同小主应力值，通过施加轴向应力获得岩体三轴破坏时的大主应力。

7.4.11 岩体三轴抗剪强度参数的确定，本条 4 款、5 款给出了两种成果整理方法，便于比较分析，一般情况下建议采用公式计算方法。

7.5 岩体载荷试验

7.5.1 本试验是在法向荷载作用下，测定岩体在半无限边界条件下所能承受的极限载荷。坚硬完整岩体，强度及变形模量高，一般不存在由于承载能力不够而引起工程岩体的稳定问题，本标准规定载荷试验适用于Ⅲ级以下（含Ⅲ级）的岩体。

GB 50487 中给出了坝基岩体工程地质分类，GB/T 50218 中提出了岩体基本质量分级，明确了各级岩体的基本规定，在试验中可供参考。

7.5.2 本条规定试验最小承压面积，主要是考虑加载设备容量不够大的条件下，能保证使岩体发生破坏。若加载设备容量较大，岩体又较软弱破碎，可适当增加承压面积。

7.5.4 承压板和测量系统的刚度应予以足够重视。承压板的刚度与板的大小、厚度以及岩体性质有关。承压板应具有足够的刚度，以避免在加载试验过程中承压板发生翘曲和变形。承压板可采用整体式、叠加式或加肋式，以增加刚度。

7.5.7 岩体载荷试验应确定的各特征点分别是比例极限点、屈服极限点和极限载荷点。与极限载荷点对应的压力为极限承载力，是本试验所要测定的最重要的岩体强度参数，表征被测岩体所能承受的最大承载能力。屈服极限点在压力与变形关系曲线上往往不易判断，这时就需要借助其他试验资料。根据板外测表，加载开始板外岩面下沉，随着载荷增加，板外岩面由下沉转为上抬，此转折点对应于关系曲线上的屈服极限点。由于板外各测表所测变形的转折点发生时间常不一致，此时通常根据较晚发生的转折点来判断。破坏极限点可根据承压板周围岩面出现第一条径向裂缝来判断。

7.5.8 试验加载过程中，当出现本条 1~2 款情况之一时，均表

明岩体已破坏。此时，单位面积的载荷值即为岩体极限承载力。根据经验，岩体的极限承载力一般要比工程设计压力要高出很多。从工程安全角度以及试验技术的发展，试验过程中，因设备出力不够，但岩体仍未能达到破坏，试验载荷规定为工程设计压力的 3 倍，这与一般岩体工程基础承载力要求的安全系数取值相当。

8 岩石蠕变试验

8.1 岩块单轴压缩蠕变试验

8.1.1 岩块单轴压缩蠕变试验测定岩块在恒定荷载作用下变形随时间变化的规律。岩块蠕变一般包括三个阶段：衰减蠕变阶段、稳定蠕变阶段以及加速蠕变阶段。当岩石所受应力小于某一临界应力值时，蠕变趋于稳定，岩块不会发生破坏。当岩石所受应力大于这一临界应力值时，岩块经历蠕变最后发展至蠕变破坏。这一临界应力值称为长期强度值。

8.1.2 岩块单轴压缩蠕变试验通常采用标准岩心试件进行，便于与岩块单轴抗压强度试验结果的比较。对于软岩或极软岩，其蠕变特性往往是影响工程岩体稳定性的重要因素，但取其岩心样困难，可以利用能制备成规则的非标准试件进行试验。

8.1.6 岩块单轴压缩蠕变试验加载方式可分为单级加载和分级增量加载两种。单级加载方式是指对同一组多个岩样分别施加不同的轴向应力，单个岩样只施加单级应力。分级增量加载是指对同一组单个岩样逐级施加不同的应力，同一组的不同岩样应力加载路径相同（见图 11）。

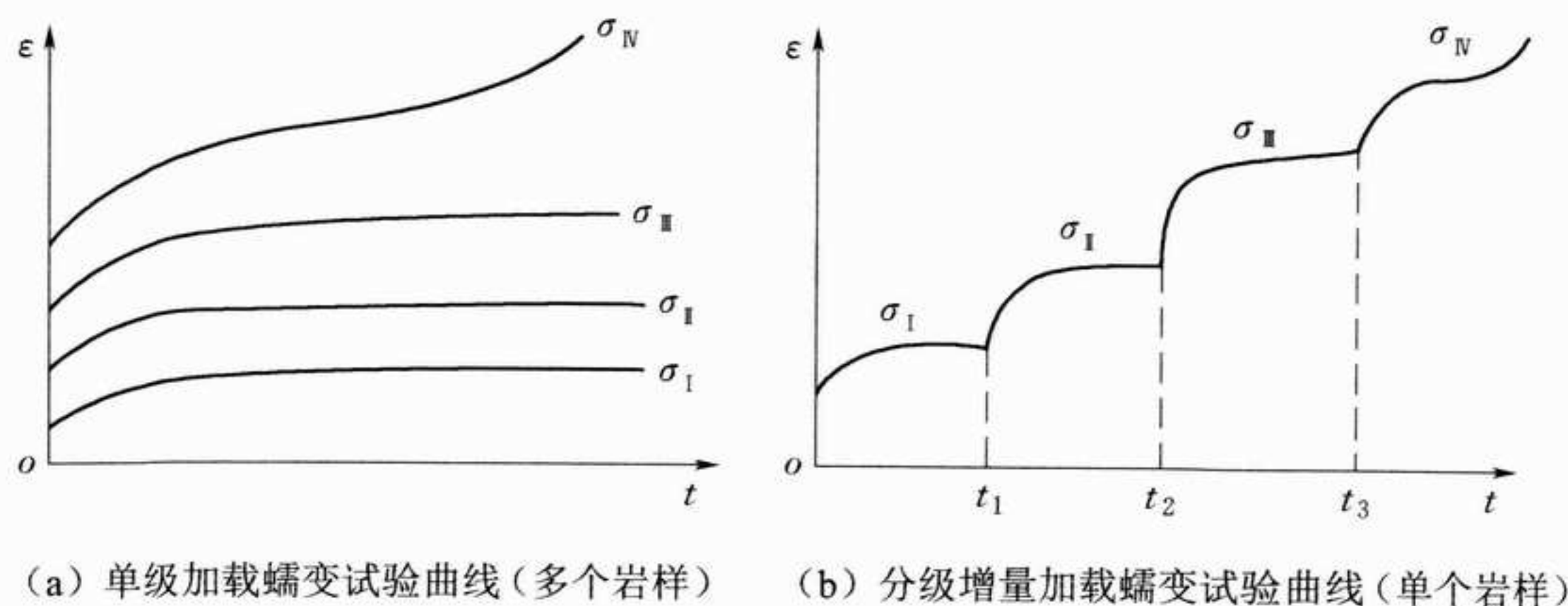


图 11 单轴压缩蠕变试验中的单级加载和分级加载方式

8.1.7 软岩的蠕变变形相对较大,考虑现有的试验设备条件,本标准规定蠕变稳定标准 24h 内应变变化不大于 $10\mu\epsilon$;较硬岩及坚硬岩蠕变变形相对较小,变形测量要求精度更高,规定 24h 内应变变化不大于 $5\mu\epsilon$ 。

8.1.8 对于分级增量加载方式的蠕变试验,整理试验成果时,某一级应力下的瞬时变形和蠕变变形应考虑前一级应力的影响,可按线性叠加原理进行数据处理,即在过去某时刻 t 总荷载到任一时刻 t 引起的变形等于此前各级荷载到时刻 t 引起变形的总和。

8.2 岩块三轴压缩蠕变试验

8.2.1 岩块三轴压缩蠕变试验目的是测试岩块在等侧向压力 ($\sigma_2 = \sigma_3$) 状态下岩块受轴向应力作用时的蠕变力学行为。

8.2.4 岩块蠕变试验设备所施加载荷的长期稳定性及试验环境是岩石蠕变试验的关键。室内岩石蠕变试验的试件尺寸小,应变值小,测试时间长,对岩块蠕变试验设备及试验环境的要求更高。长江科学院与长春市朝阳试验仪器有限公司研制的 TLW-2000 型岩块三轴蠕变试验机首次在岩块蠕变试验中采用电动滚轴丝杠技术应用于蠕变试验稳压控制,相对传统的气—液稳压系统,蠕变试验压力可大幅提高,并有停电保护功能。该三轴蠕变试验系统,围压可达 40MPa,轴压 2000kN。变形测量采用位移引伸计,轴向位移量程 0~8mm,径向位移量程 0~2mm,位移计相对误差在 $\pm 0.5\%$ 之间。

8.3 承压板法蠕变试验

8.3.1 在承压板变形试验方法基础上增加稳压装置后,常规承压板变形试验方法可用于开展岩体承压板法蠕变试验。与本标准 6.1 节承压板法载荷实施方式相对应,分别有刚性承压板蠕变试验法和柔性承压板蠕变试验。

8.3.5 承压板法蠕变试验的稳压装置可根据承压板法试验压力

情况，选用合适的稳压技术。一般情况，在数个兆帕压力以内，可采用气—液稳压技术；对于 10MPa 压力以上的蠕变试验问题，可选用电动滚轴丝杠稳压技术。

8.3.8 蠕变试验加载方式可分为单级加载试验和分级增量加载试验两种（见图 12）。单级加载试验是对试点在某级压力 p_1 下进行蠕变试验，试验完成后，直接卸载 [见图 12 (a)]。分级增量加载试验是将试点压力分若干级，对每级荷载下进行蠕变试验后，直接加下一级荷载进行蠕变试验 [见图 12 (b)]。

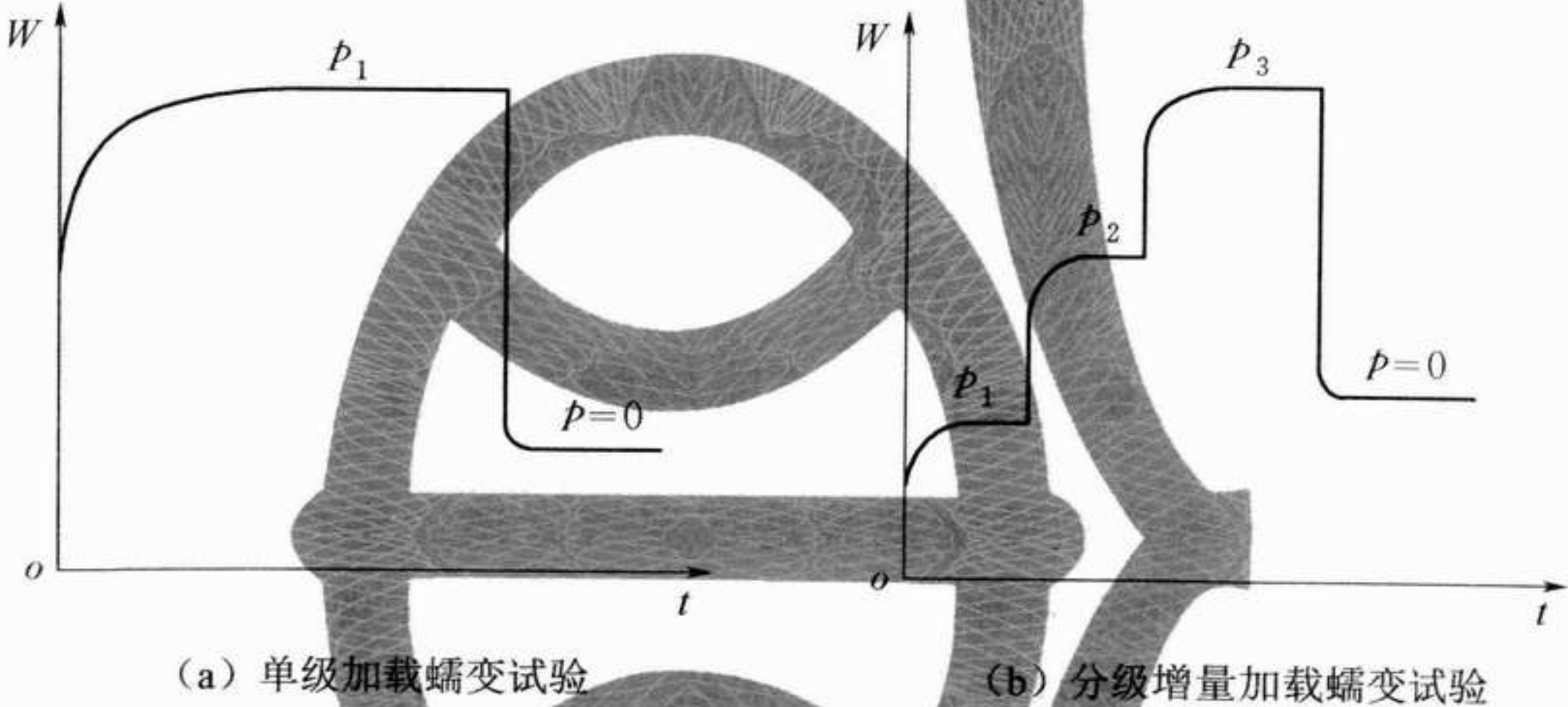


图 12 承压板法蠕变试验加载方式示意图

8.4 结构面直剪蠕变试验

8.4.1 结构面在恒定剪切载荷作用下，剪切位移随时间不断增加，这一现象称为剪切蠕变。结构面直剪蠕变试验是在恒定的法向载荷和剪切载荷长时间作用下测定结构面的长期抗剪强度的一种结构面直剪试验。

该试验宜采用平推法，从而能在施加剪切和法向荷载时，相互不干扰，剪切面上受力简单明确，试验过程中补压时易操作。

8.4.2 试验要求在恒定温度、恒定湿度条件下进行。为满足这一试验条件，本标准要求开挖专门的试验支洞和设置隔温装置。

8.4.9 结构面直剪蠕变试验就是寻求在某一恒定法向载荷作用下，由衰减蠕变过渡到加速蠕变的临界剪切载荷。这就要求剪切

载荷分级施加，荷载高时适当减小级差。当剪切位移明显增大时，应减小原来预计的级差，并加密测读时间。变形测读间隔宜根据加载完成后的蠕变变形速率确定，当蠕变变形速率较快时，应减小读数时间间隔加密读数，当变形速率变缓时，可延长读数时间间隔。

8.4.11 本试验成果整理需要确定结构面剪切长期强度 τ_{∞} 。要准确确定结构面的长期强度往往是困难的，根据多年的试验经验推荐采用等时簇曲线确定长期强度的方法。原规程中建议在某级剪切载荷下，当剪切位移 u_s 与时间 t 关系曲线发生由等速蠕变转变为加速蠕变，出现转折点时，该级剪切载荷对应的应力值即为 τ_{∞} ，该方法物理意义不明确，本次修订不再推荐此方法。

8.5 岩体三轴压缩蠕变试验

8.5.1 岩体三轴压缩蠕变试验是在现场岩体三轴压缩试验装置条件下，通过增加侧向和轴向压力稳压装置，在现场实现围压和轴压恒定条件下的岩体蠕变力学试验。基于三轴条件下的岩体蠕变试验，可测得岩体三轴应力条件下的长期三轴压缩蠕变强度和长期岩体抗剪强度参数。

本标准推荐岩体三轴蠕变试验是在等侧向压力条件下进行。实际上，岩体三轴试验装置的三个方向压力是独立施加和控制的，对三向不等压条件下的岩体三轴压缩蠕变试验，可参照执行。

8.5.5 岩体三轴压缩蠕变试验的侧向和轴向稳压装置可分别对两对侧向压力和轴向压力分别稳压，通常利用电动滚轴丝杠控制技术实现。

8.5.9 岩体三轴压缩蠕变试验系统中，压力控制和变形测试通常采用自动控制和采集的方式。变形测读可自动连续进行，对变形测度时间间隔规定试验初期阶段和减速蠕变阶段分别按不同的测读频次进行是蠕变试验的基本要求，也可根据需要

调整。

考虑现场三轴压缩蠕变试验的试件通常含一定数量裂隙，每级荷载条件试验读数稳定标准不区分软岩、较硬岩及坚硬岩两种稳定标准，而采用每级载荷下的变形稳定控制标准按 24h 变形不大于 0.002mm 和每级载荷蠕变时间不少于 7d 的两个控制标准，根据现场试验经验是可行的。

9 岩体应力测试

9.1 孔壁应变法测试

9.1.1 孔壁应变法又称钻孔三向应变计法,是利用电阻应变片作为传感元件,测量套钻解除后钻孔孔壁应变,根据弹性理论求解岩体内的三维应力状态。该方法的主要优点是在一个钻孔内通过一次成功的测试,即可确定岩体的三维应力状态。

孔壁应变法测试按测试孔深度包括浅孔孔壁应变法及深孔水下孔壁应变法等测试方法,按其应变计结构和适用环境分为直贴式孔壁应变法和空心包体式孔壁应变法两类。均需钻孔解除测量应力解除前后的应变,通过相关理论计算获取应力,不同的是直贴式孔壁应变片法是在钻孔应力测试过程中,直接将应变片粘贴在钻孔孔壁上;空心包体式孔壁应变法是将应变元件按预定结构先浇注在环氧树脂类空心包体中,再通过环氧树脂胶液将其胶结在钻孔孔壁上。

9.1.2 在地下洞室进行岩体初始应力状态测试时,测点深度应超过应力扰动影响区,规定测点深度应大于洞室断面最大尺寸的2倍。

为保证测试成果的可靠性,需在同一钻孔中同一测段附近连续进行数次测试,并保证至少2个有效测点。

9.1.3 测点区高地应力现象是指岩体中因地应力集中产生的钻孔岩心饼化、巷道变形、剥落、岩爆及基坑开挖产生的位错等。

9.2 孔径变形法测试

9.2.1 孔径变形法测试包括四分向钢环式钻孔变形计和压磁应力计测试两种方法。它是在钻孔预定孔深处安放四分向钢环式钻孔变形计或压磁应力计,然后套钻解除,测量解除前后的变形或应变差值,按弹性理论建立的孔径变化与应力之间的关系式,计

算出岩体中钻孔横截面上的平面应力状态。

9.2.2 当需要通过孔径变形法测试获得岩体的空间应力状态时,可采用三孔交汇测试方法,采用两两正交的三个钻孔,其中一个钻孔应为铅直钻孔。

9.2.4 本条列出了测试所需的主要仪器设备。

孔径变形计。测量孔径变形的测量元件,可以归纳为电阻片、钢弦、电感元件三类;因电阻片作为测量元件应用最为广泛,正文的相关测试条款是采用电阻片作为测量元件来制定。

电阻片作为测量元件的孔径变形计,是在变形计内部安装四个预先粘贴好电阻片的弹性钢环,当触头受力后钢环变形,通过电阻应变仪测量钢环的应变,根据率定曲线换算成钻孔直径的变化。这种元件具有防水性好、适应性强、操作简便、能测量解除应变的全过程、并能重复使用等优点。缺点是在单孔内只能测求平面应力,若需测量岩体三向应力时,则必须布置交会于某点的三个钻孔。

孔径变形计灵敏度计算。用同样的元件在不同的岩石和不同的应力状态下测量岩体应力的灵敏度是不一样的。假定在 $E=50\text{GPa}$ 的岩石上,处于平面应力状态下, $\sigma_1=\sigma_2$, 以应力变化为 0.1MPa 、钻孔直径为 $\phi 36\text{mm}$ 时其直径变化作为灵敏度设计的根据。计算公式如下:

$$\Delta d = \frac{2\sigma D}{E} = \frac{2 \times 0.1 \times 36}{50 \times 10^3} = 1.44 \times 10^{-4} (\text{mm})$$

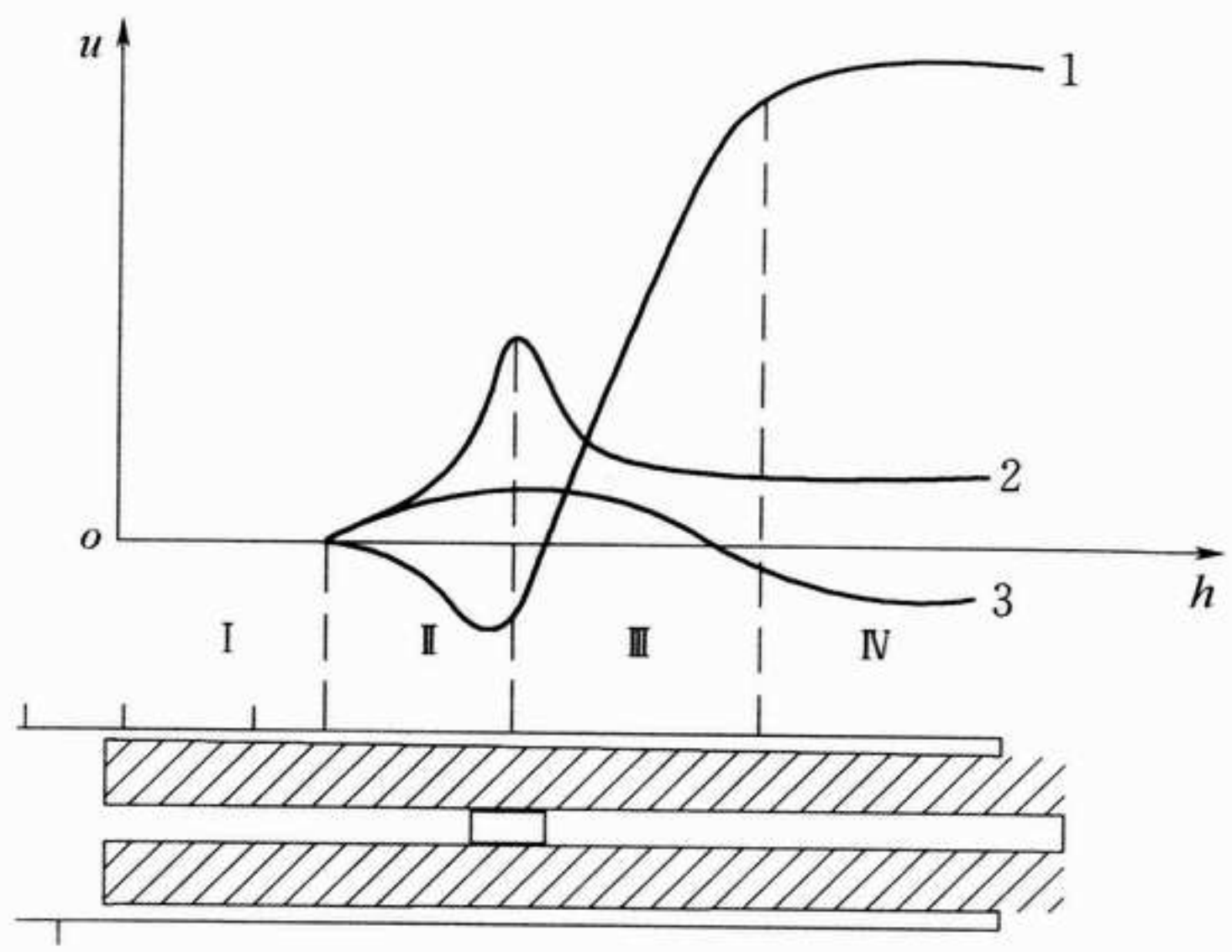
如果岩体弹性模量低,在设计时可以适当降低灵敏度。

孔径变形计的应变钢环设计。用电阻片法测量钻孔直径变化,必须通过传感器将位移量变化值转换为电量变化值。常用的应变钢环有圆形环、C形环以及非环式的悬臂梁三种。

压磁应力计。压磁应力计由 3 个互成 60° 的元件组成。元件是根据压磁原理设计的,其感应部位是一个铁镍合金心轴的自感线圈。如果沿着心轴施加的压力发生变化,则心轴的磁导率和自感线圈的电感量(或阻抗、电压降)也随之改变。测量元件产生

的信号，反映了元件承受压力的大小。

9.2.11 绘制解除深度 h 与应力计各元件读数差 u 的解除全过程关系曲线（见图 13），曲线一般可划分为 I、II、III、IV 四个区。在计算应变时，应采用稳定应变值为 u 。如果 III、IV 阶段不明显， u 可根据具体情况分析确定。



I—无应力影响区，解除时无变化；II—应力集中区，由于施钻引起的应力集中；III—应力释放区，随着解除过程应力的变化；
IV—应变稳定区，应变值随解除深度加深逐渐趋于稳定

图 13 解除深度与释放应变的关系曲线图

9.3 孔底应变法测试

9.3.1 孔底应变法测试，是采用电阻应变计（或其他感应元件）作为传感元件，粘贴于钻孔孔底表面，测量套钻解除前后钻孔孔底岩面应变变化，根据经验公式，求出孔底周围的岩体应力状态，适用于各向同性岩体的应力测试。主要优点为所需的完整岩心长度较短，在较软弱或完整性较差的岩体内较易成功。在满足工程测试深度要求的同时，考虑安装、定向、解除的难度，孔深不宜超过 30m。

9.3.5 孔底应变计的安装工艺要求烘烤孔底，需在钻孔无水状

态下进行。为排除钻孔孔内积水，钻孔宜向上倾斜 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。

9.4 水压致裂法测试

9.4.1 水压致裂法测试是采用两个长约 1m 串接起来可膨胀的橡胶封隔器阻塞钻孔，形成一密闭的压裂段（长约 1m），对压裂段加压直至孔壁岩石产生张拉破裂，获取岩体破裂压力等压力参数及破裂缝方向，按弹性理论公式计算钻孔横断面的主应力及其方向。本方法测量地应力对岩体做了下列假定：岩石是均匀和各向同性的线弹性体；当岩石为多孔介质时，注入的流体依据达西（Darcy）定律在岩石孔隙中流动；岩体应力场三个主应力中有一个主应力方向与钻孔轴线平行。

9.4.2 由于水压致裂法需对测试孔压裂段加压直至破裂，故要求测试段串联起来的封隔器加上压裂段共约 3m 长的岩体透水性小，根据计算公式的假定及目前工程实例统计，岩体渗透系数应小于 1 吕容 $[1Lu=1L/(\min \cdot m \cdot MPa)]$ 。

水利水电工程地下洞室勘察设计中，已广泛采用三孔交汇水压致裂法确定测区的空间应力参数，本次修订增加了此方法。

9.4.3 钻孔柱状图应包括岩性、裂隙密度、岩心获取率、RQD 及岩体渗透系数 ω 值。

9.4.6 水压致裂法可利用原有符合封隔器尺寸的钻孔（宜为金刚石钻孔）。在利用原有成孔时间较长的勘探钻孔时，应利用钻机进行扫孔清洗。

9.4.7 本条规定了对测试的要求：

座封压力的确定。原则上座封压力应大于橡胶封隔器的扩张压力，小于测试岩体破裂缝的重张压力，宜在现场通过试验或用同类岩体测试的经验确定。

由于水压致裂过程较短（2~4min）压裂曲线（压力与时间关系）变化很快，试验时应采用自动记录显示仪或流量及压力传感器采集仪，连续记录和绘制压裂曲线，以便实时控制，判断压裂过程特征点。

记录破裂缝。破裂缝的记录通常采用两种方法，一种方法是采用定向印模器，即利用扩张印模胶筒外层的生橡胶和能自动定向的定向器来记录破裂缝的形状及方位；另一种是采用井下电视记录破裂缝。印模器的加压时间通常为 3~4h，也可根据生橡胶的性能现场试验确定。印模器的加压量值原则上应大于破裂缝的重张压力，小于破裂压力。

9.4.9 根据实测压裂过程曲线（见图 14）确定压裂特征参数，具体步骤如下：

- (1) 利用两个串联的可膨胀橡胶封隔器（中间以花管或高压软管连接）加压座封于孔壁上，形成压裂段。
- (2) 向压裂段注水加压，使其孔壁承受着逐渐增强的液压作用。
- (3) 当泵压上升到某一临界值 p_b （称为破裂压力）时，由于岩石破裂导致泵压值急剧下降，而流量值急剧上升。
- (4) 关闭压力泵，当泵压开始趋向稳定时，此段压裂过程曲线的拐点即为瞬时关闭压力 p_s 。
- (5) 当泵压趋向稳定时，打开压力泵阀卸压，压裂段液压作用被解除后破裂缝完全闭合，泵压降为零。
- (6) 重张，连续多次（宜为 3~4 次）加压循环（此时压力

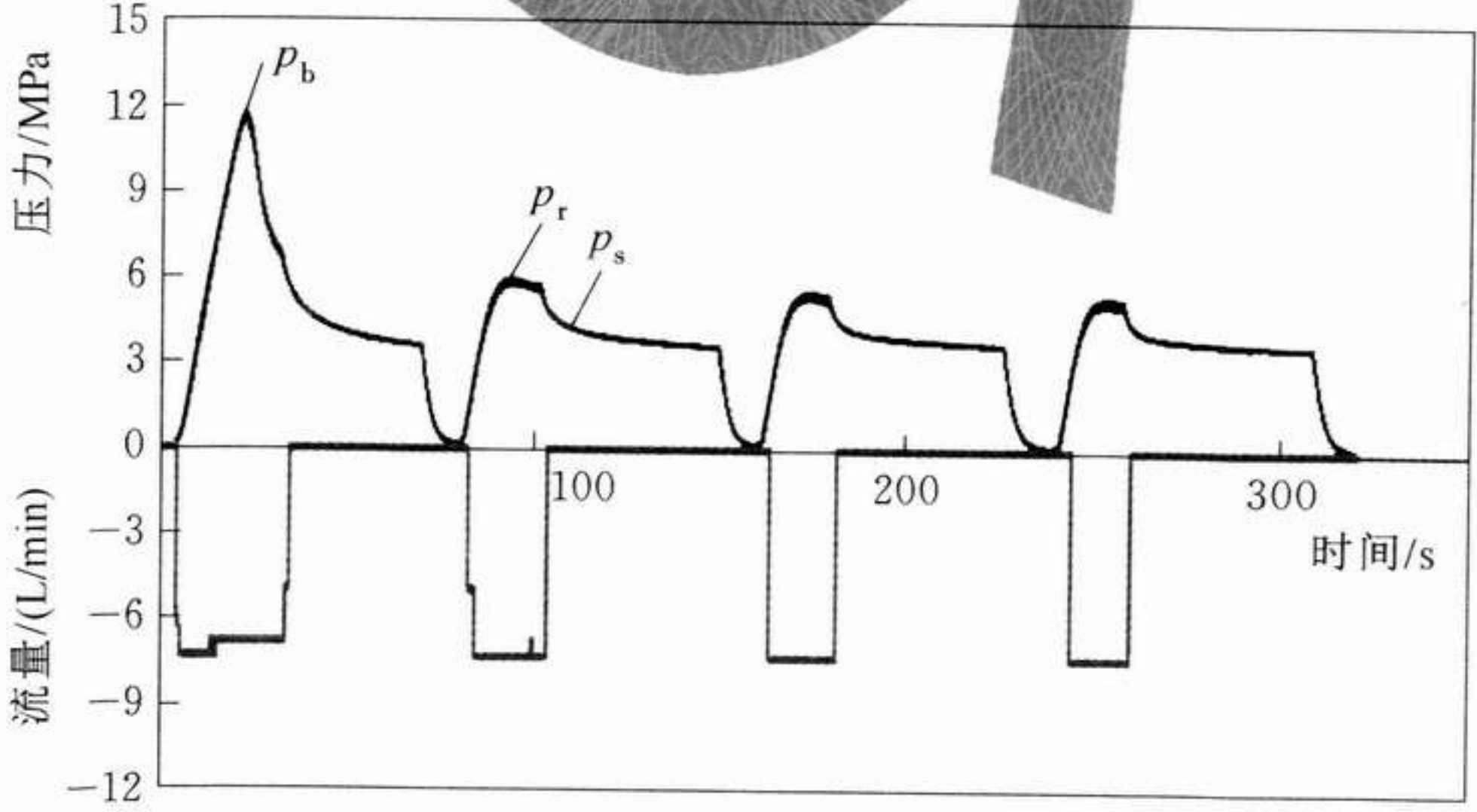


图 14 水压致裂压力—时间过程曲线

与时间关系曲线上的最高点即为重张压力 p_r)，以便取得合理的压裂参数以及正确地判断岩石破裂和破裂延伸的过程。

9.5 表面应变法测试

9.5.1 岩体表面应力测试是通过测量岩体表面应变或位移来计算应力，用于测量岩体表面或地下洞室围岩表面受扰动后重新分布的岩体应力状态。本测试方法包括表面应力解除法和表面应力恢复法两种。采用应力恢复法需已知测点部位岩体某一主应力的方向，然后根据主应力方向来确定液压枕和应变计或位移计埋设方向。

9.5.4 本标准推荐钢弦式和电阻式两种应变计测试元件，可根据具体情况选用。采用位移计测量时，位移传感器精度不宜低于 0.001mm。

9.5.8 掏槽宜采用大口径旋转钻头进行套心解除，如用风钻解除时，宜采用旋转掏槽法。

关于套心解除深度，大量实测资料表明，在解除深度达到 0.5 倍岩心直径时，因应力解除而产生的应变值已基本达到稳定，故规定解除深度应不小于 0.5 倍岩心直径。

9.5.10 本条中式 (9.5.10-4) 的推导主要以 6.2 节 6.2.8 条式 (6.2.8-1) 和式 (6.2.8-2) 为依据。在计算过程中，认为岩体的变形模量为已知参数，根据在垂直狭缝的中线某测点（距离为 y ）的岩体变形 W 值计算垂直于狭缝面的应力分量。

10 岩石声波测试

10.1 岩块声波测试

10.1.1 岩块声波测试是采用具有波形显示、且能采集储存声波参数和波形数据功能的岩石声波参数测试仪，测定超声波（纵、横波）在岩石试件中的传播时间，据此计算声波在岩块中传播的速度。

准确识别纵、横波的初至时间，是岩石声波测试的关键，纵波幅值较小而且是最先到达的波，初至时间容易读准；横波在后，要准确识别其初至位置，除采用专用横波换能器外，测试人员必须是经过专门训练、具有丰富经验的专业人员。

10.1.6 换能器频率选取要求声波波长应小于试件直径的 $1/2$ ，使试件边界对声波传播所产生的影响控制在可以忽略的范围内。据此，推导出本标准式（10.1.6）。

10.1.7 采用直达波法布置换能器时应将换能器的中心布置在试件的轴线上，并且将换能器与试件压紧，挤出多余的耦合剂，以减少耦合层厚度对测试成果的影响。折射波法测试横波速度时，如果使用切变振动模式换能器，必须保持收、发换能器的振向一致，折射波法的两换能器应布置在试件的同一侧面。

10.1.8 受岩石层理和裂隙的影响，岩块具有各向异性的特征，在整理同组试件的测试资料时，要求给出每一试件的测值。

10.2 岩体声波测试

10.2.1 岩体声波测试是在岩体中布置收、发换能器，利用电脉冲、电火花、锤击等方式在岩体中激发产生声波，测试声波在岩体中的传播时间，根据收、发换能器间的距离和传播时间计算声波在岩体中的传播速度。这一速度为收、发换能器间岩体的平均传播速度。

10.2.2 收、发换能器间的距离较大或岩体较破碎时，表面测试宜采用锤击作震源，孔间测试宜采用电火花作为震源。

10.2.4 岩体声波测试可采用喇叭型换能器和圆管型换能器，分别用于表面测试和钻孔中测试。

11 工程岩体观测

11.1 围岩收敛观测

11.1.1 围岩收敛观测是用收敛计测量洞室围岩表面两点连线（基线）方向上的相对位移，即收敛值。根据观测结果，可以判断岩体的稳定状况及支护效果，为优化设计方案、调整支护参数、指导施工以及监测工程实际运行情况提供快捷可靠的现场观测成果。

收敛计结构简单，价格便宜，方便易行。本标准围岩收敛观测推荐采用卷尺式收敛计，对于其他形式的收敛计，亦可参照使用。

本观测也适用于地面工程岩体表面两点间距离变化的观测。

11.1.2 当地质条件、洞室尺寸和形状、施工方法确定时，地下洞室围岩的位移主要受“空间效应”“时间效应”两种因素的影响。“空间效应”即因掌子面约束作用对围岩位移所产生的影响。掌子面距观测断面越远，掌子面对观测断面围岩的约束作用越小，观测断面的围岩位移量越大，根据实测资料分析，当掌子面距观测断面 1.5~2.0 倍洞径后，“空间效应”基本消除。因此，要求测点埋设应尽量接近掌子面。“时间效应”通常是指变形随时间而增大的现象。为观测“时间效应”的影响，预定的观测断面一经形成，就应立即布点测量。在“空间效应”消除后，所观测到的围岩位移变化值即为通常所指的“时间效应”。

11.1.6 拉紧钢尺必须施加一恒定的拉力，该力的大小应根据测距的长短确定，尺长则需加大拉力，尺短则需相应减小拉力，具体大小可参照收敛计说明书确定。

观测间隔时间通常可根据位移变化速率确定。当遇到下列情况之一时，应减小观测时间间隔：掌子面距观测断面 2 倍洞径以内时；观测断面附近正在施工时，测值出现异常时。

11.1.7 观测资料应及时整理分析，以便及时对围岩的稳定性作出评估。

采用收敛计观测的围岩位移，只是两测点间距离的相对变化。若需求出各点的位移，可用“坐标法”“联立方程法”“余弦定理法”或“测角计算法”近似计算确定，在选择计算方法时，要考虑方法的假定是否接近所测洞室的实际情况。

11.2 钻孔轴向岩体位移观测

11.2.1 钻孔轴向岩体位移观测是通过钻孔轴向位移观测设备（多点位移计或滑动测微计）测量钻孔轴线方向不同深度的岩体位移。

多点位移计按结构特点，分为并联式和串联式两大类。并联式位移计的传感器固定在孔口，通过金属杆或金属丝将测点（锚头）的位移传递给传感器。串联式位移计的传感器串接在金属杆上，传感器往往与锚头连在一起，固定在观测孔内不同深度的几个测点上。本观测方法采用并联式多点位移计，当采用串联式位移计时可参照本方法进行。

滑动测微计观测是利用滑动测微计沿钻孔轴向重复移动和全程覆盖测试的特点，实现对钻孔内固定间距范围岩体沿钻孔轴向的变形测量，因此测点数量可根据观测需要灵活设置。传统的滑动测微计需在钻孔中安装齿槽环（齿槽环间距一般 1m），每次测试时，仅需沿钻孔轴线测定相邻齿槽环间的变形，以实现沿钻孔轴向岩体变形的测量。近年来，通过在钻孔倾斜仪 ABS 材料测管外侧安装和固定金属环，基于磁感应进行两相邻金属环间的变形测量，使得滑动测微计安装和观测更为便捷，工程应用效果较好。

11.2.4 钻孔轴向位移计由位移传感器（包括电传感器或机械传感器）、锚头（包括机械胀壳式、抗缩水泥或化学材料粘结式、楔缝式或液压式锚头）、金属杆或金属丝及保护套管构成。

电传感器具有测试快速、读数精度高和可遥控读数的优点，

但价格较高；机械传感器简单可靠，但测量麻烦，不能遥控。在选择传感器时，可根据工程及地质情况选用不同类型的传感器。

锚头应根据工程及地质情况选用，在爆破振动范围内宜选用粘结式锚头或水泥灌浆式锚头，需要回收则选用机械胀壳式锚头或液压式锚头。

滑动测微计埋设件包括测管和测环，测管一般要求由 ABS 材料制成，测环套在测管外侧，沿测管轴向 1m 布置一个，一般要求为金属磁环。

11.2.6 隔离体通常由橡胶制成，其作用是隔离各锚头、测点的导线和金属杆（丝）使其不致相互干扰。

11.2.7 对于向下的斜孔或铅直孔，滑动测微计测管下放到孔内时，如果孔内有水，为平衡孔内地下水对测管的浮托力，可在测管内也注入清水。或者采用在下放测管时及时疏排孔内地下水的方式减小地下水对测管的浮托力。

11.3 钻孔横向岩体位移观测

11.3.1 钻孔横向岩体位移观测是测量钻孔中不同深度的岩体在垂直于钻孔轴线方向上的位移。钻孔横向岩体位移观测方法有测斜仪法和挠度计法。本观测方法采用单向伺服加速度计式滑动测斜仪。当采用挠度计法、双向伺服加速度计式滑动测斜仪或固定测斜仪时，可参照本方法。

11.3.2 测孔应有足够深度，保证至少有 2m 的导管位于预计滑动面（带）以下的稳定岩体内，以使位移测量有可靠的基准点。

11.3.4 测斜管一般由工程塑料或铝合金材料制成，在永久性观测中，宜选用铝合金管。

每节测斜管用管接头连接。管接头有固定式和伸缩式两种，固定式接头适用于横向位移不明显的地段。

11.3.6 用承重绳吊装测斜管时应注意将每节测斜管的同一方向导槽与承重绳固定，使承重绳在吊装过程中承担测斜管的重量，并防止测斜管扭转。

灌浆浆材的弹性模量宜尽量与岩体一致，并采取措施保证灌浆密实。

在可能出现位移突变的测段，可用砂或其他材料充填测斜管与钻孔孔壁间间隙，防止由于岩体位移过大造成测斜管折裂或剪断，确保测头顺利通过。

当测孔深度较大时采用测扭仪测定导槽的扭曲度，以校正计算位移大小和方向。

11.3.7 测斜仪沿孔深每隔 50cm 测读一次，主要是测斜仪的导轮轮距一般为 50cm。测斜仪的观测间距，多采用导轮轮距控制，也可采用导轮轮距的整数倍。

11.3.8 钻孔横向位移分为相对位移与累计位移。相对位移指计算点相对于本身的初始位移变化值，累计位移指计算点相对于孔底（一般认为是不动点）的位移值。位移方向分为 A 向（一般为主滑方向）和 B 向（与 A 向成 90° 夹角的方向）。

对于位移明显的部位，应及时绘制位移 u 与时间 t 的关系曲线，以便及时了解钻孔横向位移变化情况。

绘制位移方向随深度 h 变化曲线，在于了解边（滑）坡位移的方向，并通过位移方向的变化了解位移的发展和岩体的稳定性。

11.4 岩体表面倾斜观测

11.4.1 岩体表面倾斜观测是指观测岩体表面的转角。岩体表面倾斜观测可采用表面倾角计。倾角计的类型、测量范围及精度等技术参数的选择，应根据测点部位岩体表面可能的转角大小及观测设计要求确定。关于倾角计的埋设要求、观测规定及资料整理等主要以 Sinco50344 地表便携式倾角计及实际应用情况作为基础。对于其他类型地表倾角计，在仪器埋设、观测及资料整理方面，可参照本方法。

11.4.2 岩体表面倾角计包括倾角计传感器、读数仪和基准板。一个倾角计传感器可以对多个固定在岩体表面上的基准板进行观测。因此，岩体表面倾斜观测布置实际上是在岩体观测范围内选

择倾角计基准板位置。

11.4.6 倾角计基准板可通过浇筑混凝土基座使基准板锚固在较均一的岩体内，或直接将基准板固定在新鲜完整的岩体表面。若测点部位岩体风化层较厚，则基准板宜采用混凝土基座将其锚固在岩体内。混凝土基座深度的确定应保证拟浇筑的混凝土基座能与测点部位岩体一起变形。若测点部位岩体新鲜完整，该部位又不便于钻孔和浇筑混凝土基座，可以利用环氧树脂等胶结材料将基准板直接固定于基岩面上，并注意做好基准板保护工作。

根据观测要求倾角计基准板在岩体表面上的安装可以是水平向，也可以是垂直向。本规程中关于倾角计基准板的安装和读数主要针对水平向安装情况。对于垂直向安装的倾角计基准板，其安装和观测与水平向安装类似，可参考相应的仪器说明书。

11.4.8 平面失量图表示方法：在观测岩体范围内，用矢量的位置、方向和几何长度表示相应的基准板安装位置、测量方向和倾角变化大小。

11.5 岩体锚杆载荷观测

11.5.1 岩体锚杆载荷观测是在用预应力锚杆（锚索可视为柔性锚杆）加固地下洞室围岩、岩体边坡和基础等工程时，为了解加固效果和预应力锚杆长期工作状态，对锚固载荷的大小和变化进行的观测。

11.5.2 观测锚杆孔口位置、孔深及内锚固段长度的确定应符合总体锚固设计要求。

根据 SL 212—2012《水工预应力锚固施工规范》，为了克服摩阻损失、锁定损失及锁定后预应力损失，锚杆应张拉至设计张拉力的 110%，特殊情况下，不宜超过设计张拉力的 115%。所选取的测力计容量应考虑锚杆的超张拉因素。

在布置锚杆载荷观测时，要求观测锚杆与工程锚杆的类型、材料、尺寸和结构形式一致。

11.5.4 目前常用的测力计类型有轮辐式、环式和液压式三种。

按所采用传感器类型又可分为差动电阻式、钢弦式和电阻应变片式。可根据使用条件、精度要求和经济条件合理选择。

11.5.5 为使测力计的率定结果能反映现场的工作条件，率定时上下传力板应尽量与现场使用的传力板相同。条件允许时，可考虑将测力计、千斤顶及压力表配套进行率定。

测力计一般在其周边上对称地布置有四个传感元件。因此，在率定时，应测量各测点在各级载荷下加载时的应变（频率），并绘制载荷—应变（频率）关系曲线。根据有效测点在各级载荷下应变（频率）值的平均值绘出测力计的率定曲线。

对测力计进行三个循环的加卸载率定测试，是为了检测测力计的重复性能指标。为检测测力计各元件的性能情况，在实际率定时，当完成三个循环的加卸载的测量后，根据实际需要，可将测力计在压力机上依次转动 90° 、 180° 、 270° ，并分别重复上述过程。

测力计的所有测量元件都是用钢材制造的，其率定曲线都将受温度变化的影响。在现场实测时，应以率定时的温度值为标准，进行温度修正。

11.5.6 测力计安装时，应尽量保证测力计传力板孔中心与锚杆孔中心线重合。根据实际经验，最大允许偏差为 5mm 的限制是可以达到的。

如果测力计垫板和工作锚板的刚度不足，则可能影响测力计载荷与千斤顶出力间的线性相关性。

在施工安排上优先安装观测锚杆的主要目的是，施工人员可以利用其初期成果指导施工，设计人员可以据此进一步检验并修正设计参数。

11.6 岩体锚杆应力观测

11.6.1 岩体锚杆应力观测是当采用锚杆加固地下洞室围岩、岩体边坡和基础等工程时，在锚杆上焊接锚杆应力计等测量设备，与锚杆一起埋进岩体中，对锚固应力的大小及其变化进行的观

测，目的是为了了解岩体锚杆的加固效果，监控岩体的稳定性，修改设计和指导施工提供现场观测数据。

10.6.2 根据现场观测经验，锚杆应力计布置在距岩体表面 2~3m 处的岩体内，测得的锚杆应力值较大，该部位岩体应力变化梯度也较大。

11.6.5 为保证锚杆应力计与锚杆钢筋焊接在一条直线上，可利用角钢或双联管将应力计与钢筋固定在同一条线上进行焊接。为保证锚杆应力计与钢筋对焊时不受焊接时产生的高温影响，应在焊接时将锚杆应力计端部包上湿棉纱，并适时浇水冷却。

11.6.6 为使钻孔孔径与应力计外形尺寸相匹配，安装锚杆应力计的锚杆孔宜用潜孔钻钻进或用风钻打出联环槽孔，便于锚杆应力计测量线的引出和避免损伤测量电缆线。

锚杆孔为水平孔时应略向下倾斜，便于灌浆密实。

电缆线的保护罩应设置在便于读数又不妨碍施工的地方，并做好警示标志。

11.7 岩体应力观测

11.7.1 岩体应力观测是测量岩体内部或岩体与结构物接触面上压应力的变化。本规程推荐液压枕应力计法或钻孔空心包体式应变计法进行岩体应力变化的观测。其中，液压枕应力计法为应力观测方法，直接测量垂直于液压枕方向上的岩体应力值；钻孔空心包体式应变计法为应变测量方法，通过观测各应变片方向上的应变值变化情况，并考虑测点部位应变计和岩体弹性模量，计算测点部位岩体应力变化趋势。

11.7.2 本条关于 3 倍应力计（应变计）最大尺寸的规定，是为了消除应力计（应变计）所在岩体边界的边缘效应。

相邻两液压枕应力计的间距不宜小于液压枕的最大尺寸的规定，是为了避免应力计的相互影响。

11.7.4 液压枕应力计包括液压枕及转换器。为了取得良好的应力传递性能，液压枕应具有下列要求：直径（边长）与厚度之比

应大于 20，制造液压枕的材料应能防止周围介质和地下水以及枕内液体的腐蚀，以防止使用期内产生渗漏。转换器的膜片应能严格将液压枕和测量系统分开。选择膜片的材料应使膜片的惯性最小，且应保证在使用年限内膜片的弹性和形状不变。

读数装置一般为移动式，包括储油箱、压力表、控制液流的阀门及加压泵等。压力表量程应与应力大小相适应，一般为预估最大应力的 1.5 倍，精度为 0.5 级。

连接管路一般为内径 $\phi 2 \sim \phi 5 \text{mm}$ 的金属管或高压软管，耐压不小于 20MPa。为防止管路堵塞，应在管路中设置滤油器。

11.7.5 为率定液压枕边缘效应，可将液压枕浇筑在大于该枕最大尺寸 3 倍以上的混凝土或砂浆试件的中部，并将其置于压力机上。通过加卸载循环，反复测读压力机压力和液压应力计的读数，并计算其比值。率定压力一般为测点部位预计应力变化值的 1.2 倍。

应力计埋设前应对整个测量系统进行检测，以判断系统工作状态是否正常，并测量膜片惯性和管路损失大小。

为修正温度影响，可将试件置于隔温的环境中，进行升、降温的测试，求得 P_t 值。作为温度修正计算的补充或校核，可以在现场同时埋设一个专测温度影响的无应力计，在计算时扣除无应力计的变化值。

11.7.8 对应力计施加预压是为了使应力计与岩体紧密接触。

11.7.10 本标准式 (11.7.10-1) 中， p_0 为液压应力计埋设完成后，应力计初始读数时液压枕应力观测值。该值已经包括液压枕与读数装置之间高程差产生的压力差值 p_h 和管路摩擦损失 p_f 。若 p_0 不包括 p_h 和 p_f 两项压力影响因素，则应在式 (11.7.10-1) 中应考虑 p_h 和 p_f 的影响。

11.8 岩体渗压观测

11.8.1 岩体渗压观测是以工程范围内岩体地下水渗透压力或地下水位为对象的岩体原位观测。

11.8.2 岩体渗压观测布置应根据现场的具体地质条件及地下水特征确定。布置观测孔应以能够获取满足设计或监测技术要求的地下水压力资料为原则。

11.8.3 本条除规定了岩体渗压观测在地质描述方面的一般要求外，还重点强调了对观测范围内岩体水文地质条件的描述。

11.8.5 岩体控制性结构面主要指坝基岩体中的软弱夹层、构成岩质边坡潜在滑动面的结构面。对其进行渗压观测的测孔孔深要求是参照 SL 601—2013《混凝土大坝安全监测技术规范》中的规定确定的。

本条 4 款推荐了岩体渗压观测中的两类主要的观测仪器。关于渗压计和测压管的适用性要求，一方面，测压管坚固耐用，使用年限比渗压计长；另一方面，测压管测量滞后时间比渗压计长。因此，低渗透性岩体中测量变化快的渗透压力以及不宜埋设测压管的部位，可采用渗压计。

有压测压管压力表精度的选取由与预计的岩体渗透压力变化幅度及压力观测精度要求确定。本条规定压力表精度不低于 0.5 级，是从较高精度要求提出的。如果渗透压力变化幅度大，可对压力表精度做相应调整。应用实践证明，压力值在压力表量程的 $1/3 \sim 2/3$ 之间时，有较好的线性度，同时又有一定的富裕度，故作此规定。

11.8.6 关于测压管的进水花管段是指测压管下部有透水孔的管体部分。管体外被反滤料充填的测孔段称为观测孔的进水段。

由于岩体渗流主要表现为裂隙渗流，岩石本身的透水性一般很小。为使测压管进水花管段有一定的渗透水源，要求观测孔进水段要穿过一定数量的岩体结构面。根据经验，规定测压管进水花管段长宜为 $1 \sim 2\text{m}$ 。

测压管上部所充填的细砂主要起反滤作用，其厚度的规定以保证测压管上部灌浆浆液不进入观测孔进水段，使测压管不被堵塞为原则。

当观测孔进水段位于岩体断层破碎带等部位时，测压管进水

花管段应加设反滤保护装置。通常是在进水花管段外侧包裹无纺土工织物布，周围填反滤料。要求反滤料既能防治细颗粒进入测压管，又有足够的透水性。

11.8.7 在现有的有关技术规程中，渗压计钻孔孔径有不小于 $\phi 90\text{mm}$ 的要求，随着技术的进步，渗压计尺寸已越来越小。不同渗压计类型的尺寸各异，加之已有在 $\phi 75\text{mm}$ 的钻孔中安装一孔多支渗压计的工程实践，故钻孔孔径以满足安装即可，本标准不做具体规定。

11.9 岩体声波观测

11.9.1 岩体声波观测是利用岩体声波测试的方法对高边坡、地下洞室围岩等工程岩体的松弛层厚度的发展过程进行观测，为边坡及洞室围岩加固处理设计提供依据。

利用灌浆孔或灌浆检测孔，测定灌浆前后声波特性参数（如纵波速度、振幅、衰减系数等）的变化，可检查灌浆效果。

11.9.2 选择在高边坡和洞室围岩一定距离的测点预埋换能器是为了在边坡和洞室开挖全过程进行定期重复测试，比较各测点波速的变化情况，从而达到监测松弛层厚度变化的目的。

11.9.5 在孔间穿透测试中，必须校验钻孔平行度。可根据钻孔的倾角、方位角，计算钻孔中不同深度中各测点的孔间距离。

采取有效的供水、止水措施的目的是保证换能器与岩壁耦合良好。

11.9.8 测试成果整理中绘制波速 V_p 与深度 h 的分布曲线以及绘制各测点每次测试所得波速的变化曲线，是为了更准确地判断开挖过程中松弛层厚度的变化趋势。

对于灌浆处理的岩体，绘制灌浆前、后岩体波速 V_p 和孔深 h 的分布曲线，用以评价沿钻孔不同深度处的灌浆效果。

11.10 岩体声发射观测

11.10.1 岩体声发射观测是通过观测岩体微破裂产生的声发射

信息，可以判断围岩损伤时空演化情况、损伤机制及微破裂的强弱等。

11.10.2 观测孔的深度应超过应力扰动区，传感器布置于孔中可以减少环境噪音影响。

11.10.6 通过断铅试验检查传感器与保护套的耦合状况与封装效果。铅笔芯折断型声发射模拟源可采用直径 0.3mm 的 2H 自动铅笔芯或者直径 0.5mm 的 HB 自动铅笔芯，使用时将自动铅笔芯伸出约 2.5mm，在保护套表面约 30° 夹角折断，声发射仪观测到该传感器接收的声发射信号可满足要求。若断铅检测不能达到要求的话，则需要将传感器卸下重装，直至其满足要求方可进行后续步骤。

11.10.7 为了消除仪器本身对岩体声发射采集信号的影响，在采集之前需对采集信号阈值进行验证。在埋设的传感器不受扰动的情况下，当信号阈值设定值较小时，声发射主机仍能够接收到少量信号，这些信号应作为噪声进行过滤。当信号阈值设定正确时，在同样的环境下再次进行采集验证，可以发现此时主机接收到的信号为零。以此为据，可以设置声发射采集阈值。

声发射信号衰减就是信号的幅值随着离开声源距离的增加而减小。衰减控制了声源距离的可检测性，关系到每个传感器可观测的距离范围，在源定位中成为确定传感器间距或工作频率的关键因素。在声发射观测中，可根据观测对象要求及范围特点，确定合适的观测阈值及采样频率。

12 试验成果综合整理

12.1 一般规定

12.1.3 岩块物理性试验相关试验结果，如含水率、吸水率、颗粒密度、块体密度等通常为单指标试验测试成果，岩石的单轴抗压强度、弹性模量、变形模量、泊松比、岩石的点荷载强度等属岩石力学试验中的单指标力学参数。上述参数在成果整理时，可在 12.1.1 条、12.1.2 条的基础上，采用试验值的算术平均值作为试验最佳值。

12.1.5 直剪试验的主要成果是不同正应力下的剪应力与剪位移关系曲线以及剪应力与正应力关系曲线。本条 2 款建议的两种方法，第一种方法适用于试验数量不多的情况；第二种方法在试验数量较多时候使用。通常可以同时采用两种方法分别进行资料整理和相互比较。

12.1.6 岩石三轴试验是在三轴应力状态下测定岩石强度和变形的一种方法。三轴试验的主要成果是不同侧向应力下的轴向应力与轴向应变关系曲线、轴向应力与侧向应力关系曲线以及在剪应力与正应力坐标上绘制的莫尔圆和破坏包线。

本条主要是利用三轴试验中轴向应力与侧向应力试验成果整理出相应的抗剪强度指标。关于利用三轴试验成果整理变形特性指标，可参考 12.1.4 条的规定进行。

12.2 几种主要的成果整理方法

12.2.1 因为岩石的非均一性，一组 5~6 个试件可能存在较大差异导致很难较好地数字回归关系曲线，现场试验人员基于经验和在现场对试件描述的认识，采用目估法初步绘制曲线是一种简便快捷的方法，以便根据结果及时判断是否需要针对性地补充试点。

12.2.3 本条列出了试验成果数理统计分析中用于反映试验成果分布特征的几个主要数字特征值计算式。最常用的是算术平均值和均方差。使用数理统计分析时,要求测值有一定的样本数量。

算术平均值表示测值的优势取值。

均方差表示测值的离散程度。因均方差具有因次,不便于表示因次不同的指标变化范围。为便于该值能够用于不同因次间的比较,可用偏差系数来表示。

绝对误差用以表示用算术平均值代替真值时的误差,其绝对值实际上是将算术平均值作为随机变量时的均方差。

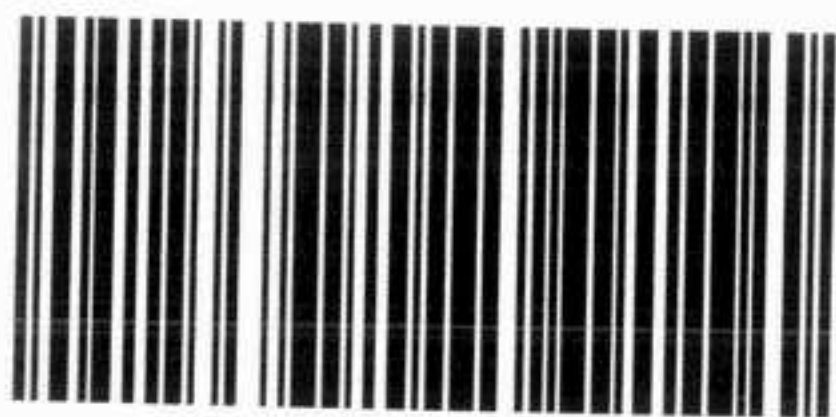
12.2.4 关于非代表性测值的舍弃标准(误差分析中也称粗大误差),常用的方法有正负三倍标准差法、Chauvenet 方法和 Grubbs 方法等。本标准采用三倍标准差法和 Grubbs 判别准则,应用时可根据参数类型、工程经验等实际情况选用。

12.2.5 岩体参数的可靠性估值是在统计学区间估计理论上得到的关于参数母体平均值置信区间的单侧置信界限值。在风险率 $\alpha=0.05$ 条件下,对本标准式(12.2.5-2)进行拟合分析,可写成样本容量 n 的显函数形式:

$$\gamma_s = 1 \pm \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) C_v$$

GB 50021《岩土工程勘察规范》中推荐用上述计算公式直接计算统计修正系数 γ_s ,本标准在计算 γ_s 时也可参考使用。

按工程的类型和重要性,参数的变异性 and 统计数据的个数,也可以根据经验确定统计修正系数 γ_s ,然后按本标准式(12.2.5-1)计算标准值 f_k 。



155170.561

中华人民共和国水利行业标准
水利水电工程岩石试验规程
SL/T 264—2020

*

中国水利水电出版社出版发行
(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)
网址: www.waterpub.com.cn
E-mail: sales@waterpub.com.cn
电话: (010) 68367658 (营销中心)
北京科水图书销售中心 (零售)
电话: (010) 88383994、63202643、68545874
全国各地新华书店和相关出版物销售网点经售
清淤永业 (天津) 印刷有限公司印刷

*

140mm×203mm 32开本 8.25印张 222千字
2020年3月第1版 2020年3月第1次印刷

*

书号 155170·561

定价 90.00 元

凡购买我社规程,如有缺页、倒页、脱页的,
本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

水利水电技术标准
咨询服务中心



微信二维码,扫一扫
信息更多、服务更快

销售分类:
水工建筑物/材料与试验