

一. 地基	1
二. 地基及地基处理	1
三. 软基处理	2
四. 岩石地基处理	2
五. 灌浆	2
(一) 概述	2
(二) 灌浆设计基本原则	3
(三) 幕灌浆	3
1、防渗线路	3
2、幕深	4
3、幕厚	4
4、灌浆方法	6
5、灌浆压力	6
6、灌浆材料和浆液	8
7、防渗标准和质量检查方法	8
8、岩溶地区灌浆	10
9、GIN 灌浆法	11
10、其他	13
(四) 固结灌浆	14
1、布置设计	15
2、孔深	15
3、施工	16
(五) 高压喷射灌浆	22
1、概述	22
2、适用范围	22
3、方法	22
4、主要结构型式	23
5、参数选择	25
6、施工	26
六. 混凝土防渗墙	32
(一) 概述	32
(二) 混凝土防渗墙的特点	34
(三) 槽孔型混凝土防渗墙施工	34
1、成槽方法选择	34
2、施工定额	36
3、施工机械	37
4、护壁泥浆	42
(四) 墙体材料	45
(五) 常见造孔事故的预防及处理	52
(六) 常见混凝土浇筑事故的预防和处理	53
(七) 墙体质量检测	56
(八) 验收	57
七. 振冲	59
(一) 概述	59

(二) 振冲机具	59
(三) 施工工序	61
(四) 制桩	61
(五) 质量控制	61
(六) 施工中常见问题及处理方法	63
(七) 质量检测	63
八. 预应力锚固	68
(一) 概述	68
(二) 预锚类型	69
(三) 施工程序	70
(四) 主要材料和机具	74
(五) 试验与监测	79
九. 灌注桩	82
(一) 概述	82
(二) 分类	83
(三) 适应性	84
(四) 抗滑桩设计	85
(五) 施工组织设计	86
(六) 机械成孔桩	86
1、正循环钻孔桩	86
2、反循环钻孔桩	90
3、潜水电钻成孔桩	92
4、旋挖成孔桩	93
5、冲抓成孔桩	94
6、钻孔压浆桩	95
7、CFG 桩	98
8、短螺旋钻孔灌注桩	98
9、全套管钻孔灌注桩	100
10、沉管灌注桩	101
11、异形截面灌注桩	103
(七) 人工挖孔桩	105
1、挖孔桩的使用范围	105
2、挖孔桩的使用范围	105
3、基本规定	105
4、施工程序	106
5、桩孔开挖	106
6、桩孔护壁	107
7、钢筋制作与安装	109
8、灌注桩身混凝土	109
9、施工注意事项	109
10、常见质量问题及预防处理	110
11、挖孔桩扩底	111
12、施工安全	111
(八) 工程质量检查和验收	112

1、 基本规定.....	112
2、 工序质量检查	113
3、 成桩质量检查	116
十. 沉井	119
(一) 概述	119
(二) 沉井的构造	119
(三) 施工方案	120
(四) 施工程序	120
(五) 主要施工技术	122
(六) 特殊地层中沉井施工.....	122
(七) 沉井下沉的纠偏措施.....	123
(八) 井底的地基处理.....	123
(九) 填心混凝土施工.....	124
(十) 沉井井间接缝处理.....	124
(十一) 沉井的质量要求.....	124
(十二) 沉井施工的安全措施.....	125
结语	126

水利水电工程地基与基础处理

郑 治

(中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院)

万丈高楼平地起，百米大坝基础稳。

许多工程之所以久远而不摧，是因为它有良好的地基和基础；有一些建筑物失事，大都与基础处理不良有关。

地基与基础处理工程技术种类繁多，传统的技术、方法不断发展与改进，每一种技术都有一定的适用范围和局限性。水工建筑物的基础处理与工业民用建筑、交通工程的基础处理要求也不相同。

一. 地基

基础是建筑物的一个组成部分，位于建筑物的下部，其作用是将上部结构的自重及其承受的荷载均衡地传递给地基，并与地基协调地共同作用，保持建筑物的长期稳定。

水工建筑物中的各种防渗墙、防冲墙、齿墙、刺墙等，其作用是为了截断或消减地基中的渗流，有的兼承重、传力的功能，均属于基础工程之列。

基础可分为浅基础和深基础。埋深小于 5m 的为浅基础，大于 5m 的为深基础。建筑在软弱或透水地基上的水工建筑物通常采用桩基础、防渗墙、沉井等形式，将上部结构重量传递至深层较坚硬的土层或岩层上，显然都属于深基础。

二. 地基及地基处理

地基是承受由基础传来荷载的地层（土层和岩层）。

地基有天然地基和人工地基。天然地基是指不需要人工加固即可满足建筑物要求的地基。由于水工建筑物规模大、结构复杂，对地基要求高，不仅要承受垂直荷载，还要承受水平荷载（水压力、土压力），并且有防渗要求，其受力状态比工业民用建筑、交通建筑更复杂。则大多数地基均需要经过人工加固，提高其强度、抗变形能力和抗渗能力。

地基处理时是采用人工措施，改善地基土（或岩体）的性质，使之满足上部结构（包括基础）要求。水工建筑物对地基的要求一般有：承载能力（抗压强度）、刚度（变形模量）、抗滑稳定性（抗剪强度）和抗渗性能（渗透系数或透水率，渗透破坏比降）等。针对不同的地层和不同的水工建筑物，地基处理有多种多样的技术和方法。

三. 软基处理

加固软基的方法主要有：开挖置换、预压、排水、夯实固结、灌浆挤密、振冲挤密、深搅拌、高喷固结、土锚杆、高真空击密法等。

软基防渗处理的方法有：帷幕灌浆、高喷灌浆防渗墙、深搅拌防渗墙、槽孔型防渗墙（混凝土防渗墙、自凝灰浆或固化灰浆防渗墙）、桩柱或防渗墙等。

四. 岩石地基处理

岩石地基处理是从整体上改善岩基的强度，刚度和防渗性能，以及对局部软弱岩体的加固，常用的方法有：水泥灌浆、化学灌浆、预应力锚固。混凝土塞(键)、锚杆、局部开挖置换等。

地基的防渗处理是“堵”与“排”相结合，“堵”是指采用混凝土和灌浆的方法堵塞渗水通道，“排”是指设排水孔、减压井、排水隧洞，减压井等工程措施，疏导、排除地层中的渗透水，以降低渗透压力，提高建筑物的安全度。

五. 灌浆

（一）概述

灌浆是水利水电工程地基加固处理中最常用的措施。

我国春秋战国时期(公元前 722—211 年)《韩非子·喻志篇》中有“千丈之堤以蝼蚁穴溃，……白圭之行堤也，察其穴……是以白圭无水难。”这是对黄河堤用泥土堵漏的最早文字记载。

灌浆技术起源于 1802 年，法国迪耶普 Dieppe 修闸时，查理士·贝利尼使用木制冲击泵灌入粘土和石灰浆液加固地层，1886 年英国人成功采用压缩空气灌浆进行水泥灌浆。我国有规模的水工建筑物灌浆始于 20 世纪 50 年代，岩基工程有丰满、狮子滩、上犹江、佛子岭、新安江、丹江口等工程，软基灌浆工程有下马岭、密云、岳城等工程。70 年代乌江渡电站强岩溶地层采用孔口封闭高压灌浆法取得成功，此后在全国推广，成为水利水电工程灌浆的最主要方法。80 年代中期以后，在灌浆工艺、机具、材料等取得了大量的成果。推动了地基处理技术的进步，水泥灌浆技术标准也日臻完善，在国际上也达到了很高的水平：

- 1、我国成功地建成了一批如三峡、三滩、小浪底、东风、隔河岩、龙羊峡等大型工程，成功地处理了这些工程的地基，确保它们的长期安全运行。
- 2、小口径无塞高压灌浆法得到推广应用，它高效、简便、质量可靠。
- 3、以水泥灌浆为主，各种灌浆材料和浆液综合使用，适应复杂多样的地基地质条件。
- 4、计算机及自动记录仪的应用基本普及。

灌浆工程在很大程度上还是一门技艺，我们更多还是依靠经验，其理论研究和设计方法尚不成熟，我国的钻灌机械质量检测技术与世界发达国家相比仍有较大差距。

（二） 灌浆设计基本原则

1、灌浆理论不成熟，灌浆只是一门技艺，则灌浆设计宜采用工程类比法，以工程经验为主。

2、要深入了解，认识被灌体的工程地质和水文地质条件，结合水工建筑物的功能、规模，确定灌浆布置与参数、防渗线路、轮廊、孔排距、灌浆方法、灌浆压力、灌浆材料结束标准，检测方法与质量标准。

3、灌浆参数要相互协调，是和谐的。

4、依据《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》结合工程具体条件，编写《灌浆施工技术要求》，该要求高于规范，要具有可实施性。

5、灌浆工程是复杂的系统工程，灌浆设计不能一成不变，需在施灌过程中调整设计。

6、灌浆设计既要安全性、可实施性，也要经济性。

（三） 幕灌浆

设置防渗帷幕目的在于控制坝基渗流，帷幕性能应满足：

- 1、幕体后水流渗透压力满足坝体抗滑稳定要求；
- 2、控制基础渗流量，减少水量损失；
- 3、幕体抗侵蚀、溶滤，满足渗透稳定要求；
- 4、幕体后其它部位，如岸坡、堆积体等满足渗透稳定要求。

帷幕主要是防渗，在岩溶发育地区和水资源特别宝贵的地区，尤其如此。至于坝基的渗透稳定问题，应根据工程等级、坝型、坝体结构和坝地质条件，通过技术经济比较，选择“堵”“排”结合的方式，如对岩体透水性强或含可溶性物质较多的坝基，宜选用以“堵”为主，否则，宜选用以“排”为主。

防渗帷幕设计有如下几个主要问题。

1、 防渗线路

1) 根据枢纽布置和工程地质、水文地质条件，在满足防渗要求的前提下，线型要简单，少转弯。

2) 和结构面、岩溶管道交角要大。

3) 有地下分水岭时，沿分水岭布置。

4) 左、右岸端点尽可能接隔水层，确保防渗效果。如工程量太大，或施工条件差，可以渗径分析确定端点，建两岸“悬挂”幕。

2、幕深

- 1) 坝基隔水层较浅时，幕体应接隔水层。
- 2) 坝基隔水层较深时，按渗径估算，在满足坝基渗流梯度时，可采用悬挂式帷幕的深度。
- 3) 根据地质钻孔压水试验值，结合枢纽建筑物等级，确定防渗标准，幕体接相对隔水层，建悬挂式帷幕。
- 4) 不宜坚持建完全封闭的帷幕体。
- 5) 依渗径法则，假定垂直防渗相当于水平防渗的 2 倍，幕深按(1)式计算：

$$d \geq \frac{1}{4} \left(\frac{H - h}{[J_0]} - d \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：d —— 防渗体深度，m；
 H —— 防渗体上游水头，m；
 h —— 防渗体下游剩余水头，m；
 [J₀] —— 地层允许渗流梯度；
 δ —— 防渗体厚度。

3、幕厚

依据渗流理论，以坝基渗流量和幕体允许渗流量的连续原理，并与坝基其它部位渗透稳定相适应，按(2)式估算幕体厚度：

$$d \geq \frac{H - h}{[J_c] \left(1 - \frac{k_c}{k_0}\right)} - d \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：δ —— 防渗体厚度(m)；
 [J_c] —— 防渗体允许渗流梯度；
 K_c —— 防渗体渗透系数；
 K₀ —— 坝基地层渗透系数。

其余符号同(1)式

按(2)式计算的 δ 值是按理想均质体分析的成果，仅供参考。

实际工程有单排孔、二排孔、三排孔或更多排孔灌浆形成的防渗体，其幕厚可按下列公式估算：

$$\text{一排孔：} \quad \delta = 0.58D \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{二排孔：} \quad \delta = 1.45D \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{三排孔：} \quad \delta = 2.32D \quad \dots\dots\dots (5)$$

幕厚与排距，幕厚与扩散半径的关系见下列公式：

$$\delta = (1.5N - 0.5)R \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\delta = (N - 0.33)L \quad \dots\dots\dots (7)$$

上列式中：D——孔距，m；
 L ——排距，m；
 N——钻孔排数；
 R——扩散半径，m。

以上计算公式适用于填筑围堰和覆盖层灌浆的防渗帷幕，是采用等边三角形(低压灌浆)几何关系得的见图 1。

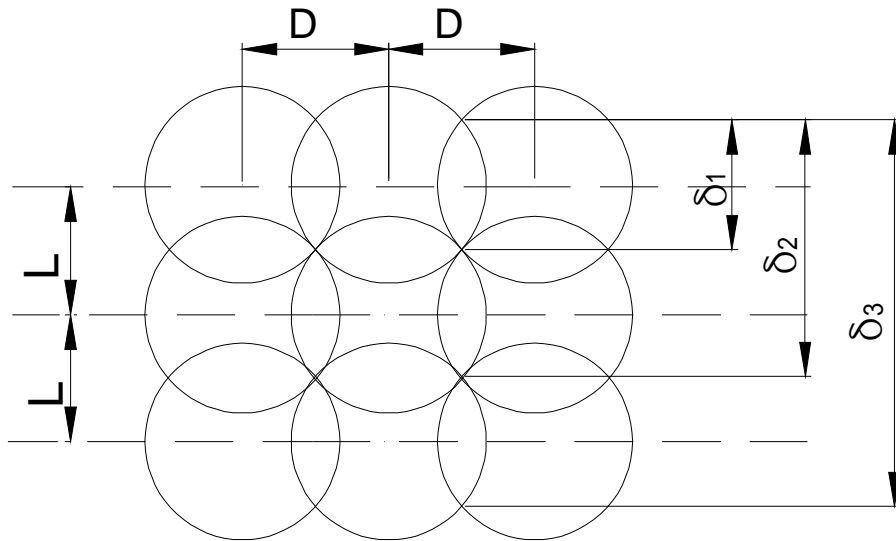


图 1

在岩体中灌浆，浆液是沿着裂隙灌入，呈树枝状，单排孔帷幕的厚度约为孔距 80%，多排孔的帷幕厚度为两边排之间的距离加上边排孔孔距的 70%。

浆液扩散半径和裂隙宽度、灌浆压力、灌浆材料、灌浆时间有密切关系，参考(8)和(9)式结算：

$$R = \sqrt{\frac{2k_0 T \frac{m_1}{m_2} \sqrt{pr}}{n}} \dots\dots\dots (8)$$

$$R = \frac{Pt}{2c} \dots\dots\dots (9)$$

式中：T——灌浆的延续时间，s；

p——灌浆压力，取最大值，以水柱高度计算，m；

r——钻孔半径,m；

m₁——水的粘滞系数；

m₂——浆液的粘滞系数；

t——裂隙的宽度,m ；

c——浆液的内聚力。

由于岩体裂隙发育的随机性，钻孔排距过大或孔距过大，帷幕难以形成，容

易出现漏灌部位，产生渗漏。一般情况下，排距小于孔距，(三峡大坝基础灌浆帷幕排距 0.2m，孔距 1~2m。索风营坝基帷幕排距 0.5m，孔距 2.0m~2.5m)。

4、灌浆方法

- 1) 钻孔一次灌浆法
- 2) 自上而下分段灌浆法
- 3) 自下而上分段灌浆法
- 4) 综合灌浆法
- 5) 孔口封闭灌浆法

从保证灌浆质量和灌浆安全来讲，以自上而下分段灌浆和孔口封闭灌浆法为好，在复杂地基和岩溶地区宜优先采用。但这两种方法施灌较慢、繁琐、造价高，对地基地质条件较好，防渗要求不高的帷幕工程可采用自下而上纯压式灌浆，无需采用孔口封闭灌浆法。

5、灌浆压力

1) 基本原则

- (1)、设计灌浆压力不得破坏被灌地层的岩体结构。
- (2)、被灌地层的表层一般难以满足设计灌浆压力，应采取工程措施。
- (3)、坝基接触段(表层段)灌浆压力不宜小于 1.5 倍水头。
- (4)、灌浆压力不能对建筑物基础产生抬动，否则应采取工程措施。

2) 拟定方法

(1)、工程类比法

依据已建工程资料，结合坝体型式，承受水压力，工程地质条件，施工技术等级等拟设。

(2)、估算法

① 按建筑物使用情况估算

以坝基承受水压力，基岩特性，水压力长期作用，灌注浆液阻力，孔深等因素，按(10)式估算：

$$P = K\alpha_1\alpha_2H - nd \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中： P——设计灌浆压力；

K——安全系数，一般取 1.1~2；

α_1 ——浆液阻力系数，取 1.05~1.5；

α_2 ——水压长期作用系数，取 1.1~1.3；

H ——防渗体承受水压力；

n——随岩层加深每米减小压力，一般取 $n=(0.25-0.5)10^5\text{Pa}$ ；

d——钻孔内止浆塞处孔深。

②按不破坏岩体结构估算

岩体结构不被破坏时，根据抗剪理论，将灌浆压力和岩体抗剪强度与地下水压力相平衡按(11)式估算：

$$P \leq (\sigma_3 + f_r) \tan \phi + C_r + U \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：P——设计灌浆压力

σ_3 ——岩体最小主应力；

f_r ——岩体抗拉强度；

ϕ ——岩体内摩擦角(°)；

C_r ——岩体凝聚力；

U ——地下水压力。

按(10)、(11)式估算，采用小值。

③现场灌浆试验

对于重要的高等级水电水利枢纽工程或地质条件复杂的工程，为了工程的安全和施工安全，宜进行现场灌浆试验，依据勘测资料，类比工程拟定灌浆参数，供试验参考并待试验成果修正，这是最常用最可靠的方法，但现场试验费用高昂，宜结合施工在主体工程上进行，中小型水电水利工程可在先导孔中进行灌浆试验，既可补充勘探资料，也可初步确定灌浆技术参数。

目前国内外多数人都主张采用尽可能高一些的灌浆压力，使灌浆体能最大程度的致密，又不使岩体结构遭受破坏。

小口径钻孔、孔口封闭、孔内循环无塞高压灌浆适用于大型水电水利基础工程和地质条件特别复杂的工程，其施工工艺应满足以下要求：

①孔口管必须镶铸结实；

②各灌浆段射浆管距孔底不得大于 50cm；

③钻孔采用小口径钻具，孔径宜为 60mm 左右；

④孔口管以下 2-3 灌浆段，段长宜短，压力递增快，尽快达到设计最大灌浆压力；但灌浆压力随深度的加深而加大是不科学的，应予以纠正。

⑤灌浆注入率不大于 1L/min，持续时间不少于 60min，灌浆全过程在设计压力下灌注时间不少于 90min，两条件同时满足才能结束该灌浆段的灌浆；

⑥灌浆压力不小于 3MPa。

目前该种灌浆工艺被曲解，被滥用，不论工程规模和地基条件，千篇一律地采用孔口封闭灌浆法，应予以纠正。灌浆压力宜采用分级控制，一般分三段：0.4P、0.7P、1.0P，见图 2。

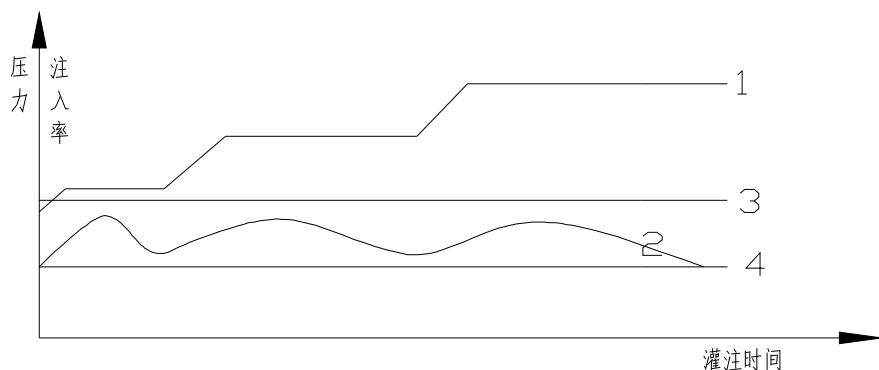


图 2 分段升压灌浆过程示意图

- 1、压力过程线
- 2、注入率过程线
- 3、注入率上限
- 4、注入率下限

6、灌浆材料和浆液

灌浆材料分两类，一类是固粒浆材，如水泥、粘土、粉煤灰、砂、膨润土、外加剂等，另一类是呈真溶液的化学浆材，如：水玻璃、丙烯酰胺、聚氨脂、环氧树脂等。

灌浆用的水泥对细度有较高的要求，一般要达到“通过 $80\mu\text{m}$ 方孔筛的筛余量不应大于 5%”，帷幕灌浆所用水泥强度不应低于 P.O 42.5。

粉煤灰中含有 70-90% 的酸性氧化物(SiO_2 、 Al_2O_3)它能与水泥水化析出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙，提高浆液结合的后期强度和抗侵蚀的耐久性。其细度比水泥还细，比表面积可达 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上，有良好的可灌性；具有良好的保水性，利于浆液的稳定；玻璃微珠含量多，利于浆液的输送；其密度为 $2.1\sim 2.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，具有良好的填充性，可节约水泥，降低成本，是良好的灌浆材料。

粘土是高分散性材料，颗粒比水泥细，水泥粘土浆流动性好，稳定性高，费用低。其塑性指数应大于 14，粘粒含量大于 25%，有机物含量小于 3%。

自 1990 年新安江 2、3 号坝段帷幕补强采用超细水泥开始，对微细裂隙、微弱透水地层积极采用超细水泥，如鱼洞、万安、大黑河、桃林口等工程，三峡 35.5 万 m 帷幕灌浆均采用湿磨超细水泥灌注，超细水泥对裂隙宽度 0.015——0.024mm 的岩体灌注是有效的。

化学灌浆常用于基础和结构物的缺陷处理和复杂的地基处理，化学材料除了比常规浆材昂贵几倍之外，尚有两大缺点：(1)耐久性问题，硅酸盐和丙烯酸盐凝胶的抗老化性能较差，除脱水作用外，还可能发生软的凝胶变成溶液的可逆反应，被渗流带走，或者被挤出，失去防渗能力；(2)毒性问题，大多数化学材料都有一定毒性，仅程度不同而已，既伤害施工人员，也污染环境。则采用化学灌浆应慎重决策，是不得已而为之。

浆液浓度宜由稀到浓，逐级变换。二十世纪 50~80 年代开灌水灰比 10 或 8，分八级变换至 0.5，施工繁琐、弃浆多、结石质量差、帷幕耐久性差。其愿望是用稀浆多灌一些浆液。笔者在东风水电站帷幕灌浆设计时开灌比采用 2，其后在左、右岸库区帷幕中，采用水胶比为 0.6 或 0.5 一种浆液灌注，取得良好效果，大大简化了施工程序，弃浆少，节约工程投资。最近几年施工的洪家渡，索风营电站均采用水胶比为 0.7、0.5(0.6)的水泥粉煤灰浆液灌注，施工特性较好。检查结果表明，帷幕防渗能力均能满足设计要求。

为了改善浆液的性能，需要掺入相应的外加剂：

(1)减水剂：亲水性表面活性材料，改善浆液的流动性，分散颗粒时常用萘磺酸盐，木质磺酸盐。其掺量应通过浆液试验确定。

(2)速凝剂：加速水泥水化，增加结石的早期强度，常用的速凝剂有氯化钙，水玻璃(硅酸钠)等，其掺量为胶凝材料总量的 3-5%。

(3)稳定剂：提高浆液的稳定性，触变性，降低析水率，常用膨润土，当水灰比为 0.6、0.8、1.0、2.0，其对应加入量分别为 1%、3%、5%、10%。

7、防渗标准和质量检查方法

水利水电工程灌浆帷幕的防渗标准应根据建筑物级别、坝型、水压力大小，

坝地质特性采用不同的防渗标准。下表 1 列出了世界上一些国家或学者建议的防渗标准。从表 1 可见，中国规定的防渗标准和其他国家基本一致，而某些学者的建议是偏低的。

帷幕灌浆质量检查主要是看透水率是否满足设计要求，采用钻孔压水试验的方法进行，检查孔位一般都选在地质条件较差和灌浆质量较差的部位，对地质条件较好或灌浆质量较好的地段，也适当布置检查孔，每一个单元均应有一个检查孔，以便全面评价防渗帷幕的质量。检查孔数按总孔数的 10% 控制。检查孔应设在帷幕中心线部位。

表 1 一些国家防渗标准

序号	国家	规范或建议	坝型	防渗标准 (Lu)	备注
1	早期各国	吕荣法 (法)		1	1932 年起
2	中国	混凝土重力坝、拱坝设计规范	坝高 $H > 100\text{m}$ 中坝 $H = 50 \sim 100\text{m}$ 低坝 $< 50\text{m}$	1-3 3-5 5	DL/T5108-1999
	中国	碾压式土石坝设计规范	I、II 级坝及高坝 III 级以下中低坝	3~5 5~10	水利电力部颁 SDJ218-84
	中国	混凝土面板堆石坝设计规范	I、II 级 其它	3~5 5~10	DL/T5016-1999
3	德国	库茨纳尔		5~10	小于 1~3Lu 不灌浆
4	美国		混凝土重力坝、拱坝	3~4	《重力坝设计》一书 1981 年
5	日本	坝工设计规范	拱坝、混凝土重力坝土石坝	1~2 2~5	日本大坝委员会 1978 年制定
6	澳大利亚	霍尔比	混凝土坝 土石坝	5~7 7~10	1976 年《水泥灌浆设计和施工》
7	法国		混凝土坝 $H > 50\text{m}$	≤ 1	
8	捷克	坝工设计规范	$H < 30\text{m}$ $H > 30\text{m}$	≤ 3 ≤ 1	
9	前苏联	建筑法规 混凝土和钢筋 混凝土坝	$H < 60\text{m}$ $H = 60 \sim 100\text{m}$ $H > 100\text{m}$	5 3 1	chu II .2.06.85
10	瑞士	一般规定		1	因水资源珍贵

灌浆孔具有下述现象的，需在其附近布置检查孔：

- 1) 透水率和注入量特别大的；
- 2) 后序孔注入量大于前序孔，或递减不明显的；
- 3) 因故中断或变浆不当，即使原来大吸浆孔段复灌或变浆后吸浆很小或不吸浆的；
- 4) 未满足灌浆结束条件，如灌浆压力或最终注入率没有达到要求的；
- 5) 发生串浆，大量冒浆，漏浆等事故的；
- 6) 透水率大单位注入量小或反之，两者互不适应的；
- 7) 钻孔偏斜过大的部位。

压水试验使用单点法或五点法，建议采用单点法。它简单易行，省工省时，压水试验只是一种模糊的表征方法，因为地基岩体是一个复杂的各向异性体。压水压力应视灌浆压力，幕前承受水压力等确定，一般采用 1.0MPa，低压灌浆帷

幕检查压力不得大于灌浆压力的 80%，对水头大于 100m 的高坝，为了检验帷幕的防渗能力，可以选取少数孔，采用 1.5 倍坝前水深的压力进行检查。

由于检查孔布置不是“随机”的，而是有针对性、有意的，其检查结果是偏于安全的，而有些检查孔也是具有补强灌浆作用的。

帷幕灌浆还有其它一些辅助检查项目，如：取芯进行各种室内检测，孔内电视录像、弹性波测试等，以便综合评价帷幕灌浆质量及其防渗能力。

合格标准按 DL/T5148-2001《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》规定：经检查孔压水试验检查，坝体混凝土与基岩接触段及其下一段的透水率的合格率为 100%，其余各段的合格率不小于 90%；当设计防渗标准小于 $2L_u$ 时，不合格试段的透水率，不超过设计规定的 200%；当设计防渗标准大于或等于 $2L_u$ 时，不合格试段的透水率不超过设计规定的 150%；不合格试段的分布不集中。

对防渗标准国内外一直在争论不休，从已建工程失事统计分析，尚无因防渗能力不足导致水工建筑物失事的，说明防渗标准尚可适当放宽，这方面的研究应深入下去。

8、岩溶地区灌浆

我国在岩溶地区已成功修建了一批高坝，如乌江渡、东风、隔河岩、观音阁、洪家渡、引子渡、索风营、天生桥一级、江垭等水电站工程，积累了岩溶地基处理的丰富经验。在岩溶地层灌浆，其一般工艺和非岩溶地层基本相同，但有岩溶地区灌浆的重要特点：

- 1) 岩溶地质条件复杂，不可预见因素多，设计和施工工艺需随时变更。
- 2) 灌浆注入量大，大多发生在岩溶发育的孔段中，15%的灌浆段吸入 85% 的灌浆量。
- 3) 岩溶处理方式多样，视岩溶性状、地下水活动情况、施工条件而定，可采用开挖回填混凝土、防渗墙、高(旋)喷、限流限量多次重复灌浆等措施。
- 4) 灌浆施工复杂，工程量大，处理费用高。
- 5) 孔序注入量递减总体上符合一般规律，局部可能后序孔注入量高于前序孔。
- 6) 多层灌浆时宜先进行下层灌浆，再作上层灌浆，两层相应部位帷幕完成后进行搭接灌浆。

由于岩溶地区地质条件的复杂性，综合国内外岩溶地区筑坝成库的经验，可采取以下措施：

- 1) 加强地质勘察工作
岩溶地区筑坝建库除一般勘测工作外，还应采用先进的物探仪器，查明地基性状，详细绘制地质平面剖面图，标明构造、裂隙、溶洞、破裂带等的位置、规模、渗透条件、发育规律。
- 2) 充分利用坝趾区有利地质条件
对弱透水地层，如泥灰岩、泥岩、白云岩等可用作隔水层和相对隔水层，查明的地下分水岭可合理应用，帷幕防渗效果易于保证。
- 3) 认真选择防渗帷幕线路，避开岩溶强透水地带。
- 4) 帷幕结构型式要多样化
岩溶地区灌浆以堵漏为主，通过各种堵漏措施将管道型渗漏变为裂隙性渗

流, 辅以适量的钻孔灌浆建成防渗帷幕, 一般地区如岩溶不发育可少排、大孔距灌注或不灌。对充填型溶洞可用多排孔灌注, 或作防渗墙、高喷墙等截断渗漏通道, 不宜全按三排孔灌浆成幕, 固然帷幕耐久性较好, 但工程量大, 工期长, 也无必要。

5) 选择合适的灌浆材料

(1) 岩溶地区灌浆材料多种多样, 浆液的配比, 没有一定的规律和比值, 但应遵循有效、经济、施工方便的原则。强岩溶发育孔段, 应根据岩溶发育性状, 施工条件等选定。所用材料是多种多样的, 为了节省费用, 常选用混合浆液, 在水泥中加入细砂、粉煤灰、粘土等掺合料。无充填溶洞, 先向孔内投入干净碎石, 再灌注混合浆液。西班牙的卡马拉扎坝采用水泥矿渣、砂、砾石、锯末、沥青等多种材料堵塞溶洞, 单位注入量达 3800kg/m。

(2) 弱岩溶地区, 仍采用水泥为主的混合浆, 如水泥粘土浆、水泥粉煤灰浆, 如有流动的地下水, 可适当掺入速凝剂。

6) 大渗漏通道的灌浆

岩溶地区常遇溶蚀通道, 注入量很大, 如不采取措施, 浆液会流得很远, 造成浪费。

(1) 降低压力, 浓浆(水胶比为 0.45~0.5)灌注。

(2) 限量间歇反复灌注; 按 10t、5t、2t、1t 次序限量间歇一次, 间歇时间 4-6h, 待其注入率小于 20L/min 时加压灌注成幕。

(3) 在水泥浆中加入水玻璃。

7) 地下流动水条件下的灌浆

(1) 级配料灌浆

创造条件向溶洞填入级配料。钻孔孔径不宜小于 150mm, 级配料粒径不得大于 40mm, 使用水力冲填。如遇堵塞, 重新扫孔。级配料按大小分置, 先投大料, 后填小料。级配料填满后, 地下水已经减速, 即可进行灌浆, 如仍有困难, 改灌速凝浆液。

(2) 模袋灌浆

模袋由特殊的纺织工艺织成, 其基本材料为尼龙, 聚酯和聚丙烯等。织物强度高, 在注浆作用下膨胀, 适应不同溶洞的形状, 利于堵塞各种类型洞穴。向袋内注入水胶比为 0.5、0.7 的浆液, 在注浆压力作用下, 浆液中水分可以由袋内析出, 水泥等不外漏, 在模袋内凝结, 缩短了固结时间, 达到迅速堵漏效果。

9、GIN 灌浆法

这是上世纪 90 年代, 瑞士学者隆巴迪(Lombardi)等人提出的控制灌浆工程的方法, 灌浆强度值(Grouting Intensity Number 缩写为 GIN)法在国际上一些国家应用, 取得了良好的效果。

1) 基本原理

灌浆是一种能量消耗, 近似等于该孔段最终灌浆压力 P 和灌入浆液体积 V 的乘积 PV , PV 即为灌浆强度值, 即 GIN。

GIN 法就是根据选定的灌浆强度值控制灌浆过程, 控制的目标是值 $PV=GIN=常数$, 如图 3。为了避免在小注入量的微细裂隙岩体中使用过高的浆压力, 导致岩体破坏, 需要确定一个压力上限 P_{max} , 为了避免在宽大裂隙岩体注入

过量的浆液，需要确定一个累计极限注入量 V_{\max} ，灌浆结束条件受三个因素制约， P_{\max} 、 V_{\max} 、 PV 。整个灌浆过程在 ABCD 的包络线内，BC 为双曲线。

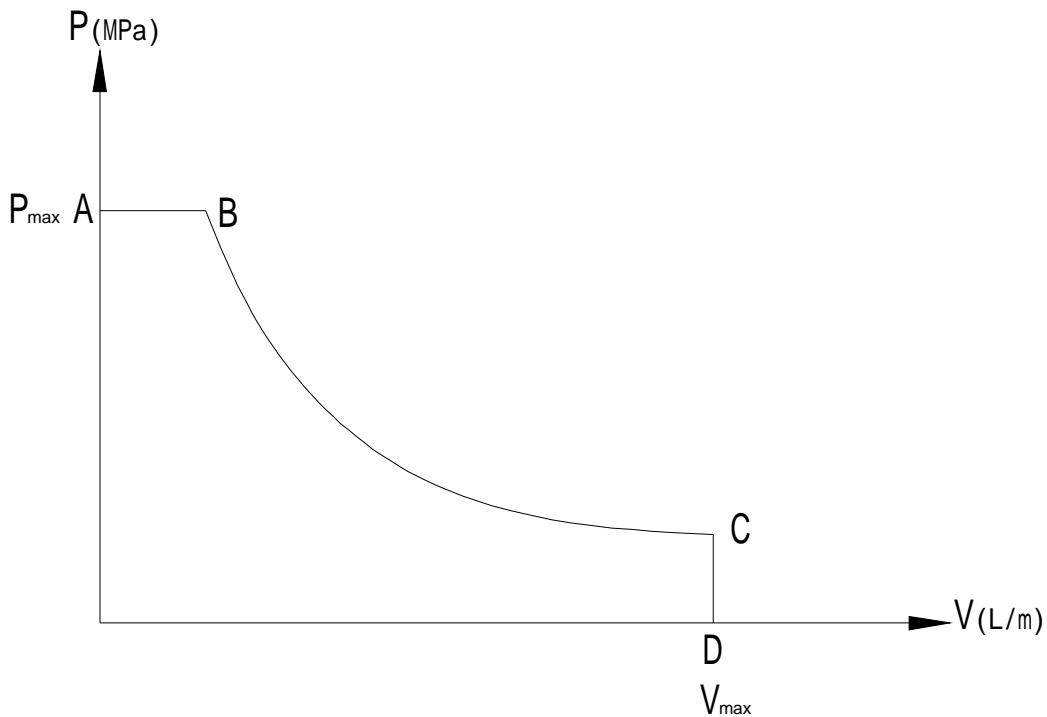


图 3

2) 灌浆技术

- (1) 采用稳定浆液，减少沉淀，防止堵塞通道，浆液结石紧密。
- (2) 灌浆全过程中采用一种配合比的浆液。简化工艺，减少故障，提高效率。
- (3) 微细裂隙较完整岩体中，尽理使用较高的压力，宽大裂隙破碎岩体中降低压力灌注，避免浪费浆液。
- (4) 由电子计算机监控灌浆过程，实时控制注浆压力的注入率，绘制 $P \sim V$ 、 $P \sim T$ 、 $V \sim T$ 、 $F/P \sim V$ 以及 P 与累计注入量曲线，根据 $P \sim V$ 的变化情况和逼近 GIN 的程度，控制灌浆过程中灌浆参数的调节和结束灌浆的时机。
- (5) 采用自下而上纯压式灌浆方式。

3) GIN 法的缺点

(1) 不适宜在微细裂隙和岩溶洞穴、宽大裂隙中灌浆。在微细裂隙地层中灌注，大多数孔段的灌浆过程很快完成，甚至一开始就会达到最大压力值而结束，在宽大裂隙地层中灌浆，大多数孔段又会很快达到注入量限值而过早地结束灌浆。

(2) 不适于建造高防渗标准($q \leq 1\text{Lu}$)的帷幕。

(3) 保持 GIN 值为一常数，对于复杂岩体的灌浆防渗显然是不合理的，这将一个本来是极为复杂的技术问题变得过于简单化。如对每个灌浆段据岩体特性拟定 GIN 值，这固然是合理，但又偏于繁琐。

(4) 对岩溶洞穴，宽大裂隙灌注保持 GIN 为一常数，可能产生隐患：

- ① 在最大注入量的限制下不能充填饱满；
- ② 在较低的压力下不能充填饱满；
- ③ 在较低的压力下浆液结石不够密实。

4) GIN 法的应用情况

GIN 灌浆法在美洲国家应用较多,取得了较好的效果,我国首次在湖南江垭水利枢纽试验,以后又在小浪底与三峡水利枢纽进行灌浆试验,有关参数见表 2。

表 2 有关工程 GIN 法灌浆参数

工程	地基岩性	孔深(m)	20~35	35~50	50~70	70~90	水灰比
江垭	石灰岩	p_v (MPa · L/m)	50	100	150	200	0.7
		P_{max} (MPa)	1.5	2.25	3.0	4.0	
		V_{max} (L/m)	100	150	200	250	
三峡	云斜长花岗岩	孔深 (m)	0~10	10~20	20~40		0.7
		p_v (MPa · L/m)	100	150	250		
		P_{max} (MPa)	1.5	3.0	5.0		
		V_{max} (L/m)	200	250	300		
小浪底	硅质砂岩 粉砂质 粘土岩	孔深 (m)	≤ 20	20~40	≥ 40		0.75
		p_v (MPa · L/m)	80~10 0	150~2 00	200~2 50		
		P_{max} (MPa)	1.5	2.25	3.0		
		V_{max} (L/m)	150	200	250		

我国进行 GIN 灌浆法现场试验,并将试验成果用于工程的仅黄河小浪底枢纽工程 2 号灌浆洞中段 (0+764~0+807),其中 0+764~0+770 为三排孔,0+770~0+807 为单排孔,采用稳定性浆液灌注, I、II、III序孔单位注入量分别为 235、172、88kg/m,总平均值为 149kg/m。孔段纯灌时间分别为 1h43min、1h44min、1h17min,总平均 1h32min,经压水试验检查,透水率均小于 3Lu,常规灌浆法单位注入率 274kg/m,灌注时间 2h07min,可见 GIN 法灌浆有较大优势。

在实施 GIN 灌浆法时,对其不足之处进行了相应的改进:

- (1)对集中渗漏部位先作堵漏工作,待其注入率足够小时,再按 GIN 法施工;
- (2)对不同深度的灌浆段拟定不同的 GIN 值;
- (3)以孔口封闭灌浆法取代自下而上纯压式灌浆法;
- (4)在各级灌浆达到 GIN 值后,还必须达到注入率,灌浆压力和持续时间的结束条件。

GIN 灌浆法具有科学性和先进性,要求施工单位具有较高的技术素质和技术水平。

10、其他

1) 灌浆廊道

重力坝防渗帷幕应尽可能靠近大坝的上游面,以降低坝基场压力,灌浆廊道位置距上游面一般为上游水深的 5-10%,如图 4:

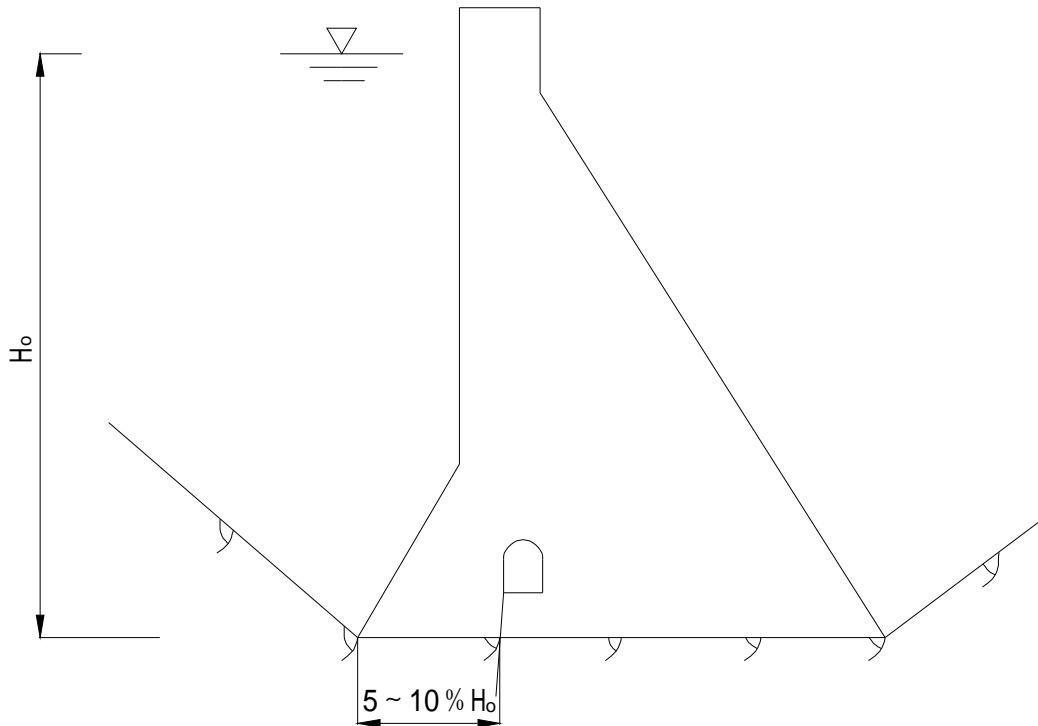


图 4

灌浆廊道的断面宜根据帷幕灌浆工程量、工期、灌浆机械性能等因素确定。为方便施工,改善施工条件,灌浆廊道(隧洞)的宽度不宜小于 2.5m,其高度应视工程量而定,一般不小于 3.0m。

拱坝灌浆廊道位置由混凝土的允许渗透梯度确定,一般不小于 3.0m。

为加快施工进度,廊道混凝土结构可以预制。

2) 冲洗

为了取得良好的灌浆效果,灌浆前应情况钻孔中残积的岩粉,碎屑等,孔内残积厚度不大于 20cm。

对于防渗帷幕灌浆,地基岩体的裂隙冲洗并非完全必要。裂隙充填物可以通过灌浆压力挤压密实,使其抗渗能力满足要求。

3) 简易压水

简易压水是为了了解灌浆过程中,各排各序孔送注时总岩体透水率的变化趋势,以评估灌浆设计和灌浆参数的正确性,以往工程每段灌浆前均进行简易压水,压水时间 20min,每 5min 测读一次压入流量,取最后的流量值计算透水率。该值使用价值不大,一般工程人员是在作统计资料时分析灌浆效果的,有关方面(地质、设计、监理、施工)并不分析各段的简易压水成果,则本人认为可大大简化,仅对各排 I 序孔进行简易压水即可,在东风水电站帷幕灌浆时,简易压水只作 I 序孔,其它各序施工单位根据需要确定,简化了施工程序,受到普遍欢迎。

(四) 固结灌浆

在岩石地基上建坝,一般都进行固结灌浆。因为岩基开挖爆破产生许多裂隙,深 1-3m。岩体本身有断层、裂隙、软弱夹层等缺陷,需要通过固结灌浆消除上

述缺陷的影响，提高坝基岩体的承载能力和均匀变形能力，降低岩体的透水性。固结灌浆的施工工艺和帷幕灌浆相似，但仍有其特点。

1、布置设计

1) 固结灌浆的范围应根据大坝基础地质条件、坝型、基础岩体应力条件等确定。

重力坝坝基灌浆应重视上游坝踵、下游坝趾基础应力较大的部位、断层、裂隙发育带、破碎带、软弱夹层集中的部位，坝基中部基础应力一般较小，可以少灌或不灌，不宜进行坝基全面积等距同深度的固结灌浆。

对于拱坝，因作用于基础岩体上的荷载较大、又集中，一般都是整个坝基进行全面固结灌浆，尤其是坝肩岩体，受拱坝推力很大，拱座需加强固结灌浆。法国的蒙特纳尔拱坝、日本的下笠拱坝，我国恒山、龙羊峡、东风拱坝(局部)的拱座基础进行了特殊的固结灌浆处理。

2) 固结灌浆孔的布置一般采用方格形、梅花形和方角形，前二者居多。方格形的优点是便于布置加强孔，如地基较好，灌后无需补强的可采用梅花形，六角形实质上是梅花形，不同之处在于分序少，便于施工，度快。

3) 固结灌浆孔距一般为 2.5~5m，排距可等于或略小于孔距。对于拱坝除基础全面灌浆外，对基础应力大又集中的部位布设加强灌浆孔分期施工。一期 5-7m 深，采用中、低压力灌注，二期固结在拱坝的上、下游钻深孔，或从灌浆廊道内钻进，钻孔呈放射状，待混凝土浇筑到一定高度后，用较高的压力灌浆。

2、孔深

固结灌浆孔深尚无统一标准，可根据坝基地质条件(如岩石的破碎程度，风化深度，裂隙发育程度，弹性波速等)、坝型、坝高、坝基应力分布及大小，综合分析确定。采用非线性有限元计算时，孔深可达第一主应力的 50% 处。

按孔深分类可分为浅孔、中孔、深孔固结灌浆。

浅孔孔深 5m 以内，孔径小于 38mm，可大面积提高表岩体的承载能力和变形模量，减少大坝基础沉陷和不均匀变形，由于孔深小，可采用全孔一次灌浆法。

中深孔孔深 5-12m，孔径 38-50mm，在坝踵设 1-2 排中孔固结灌浆，可作辅助帷幕。天生桥二级引水发隧洞穿过岩溶破碎带时，对洞周围进行孔深 8m，压力 4-6MPa 的高压固结灌浆。

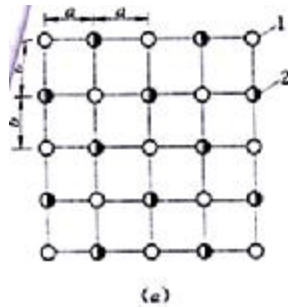
深孔孔深在 12m 以上，采用钻机/钻孔，孔径 46-65mm，对地基深处的破碎带或软弱夹层，裂隙密集带，坝较高，基础压力较大的工程常用深孔固结。大型隧洞穿岩溶破碎带，为改善补砌受力状态，在洞内钻放射状孔进行深孔固结灌浆。恒山拱坝，坝高 69m，拱座固结灌浆深 30-40m。日本下笠拱坝，高 98m，坝肩固结灌浆深 20-30m，其左岸坝肩岩体碎，在深 40-80m 处设三层固结灌浆洞。

3、施工

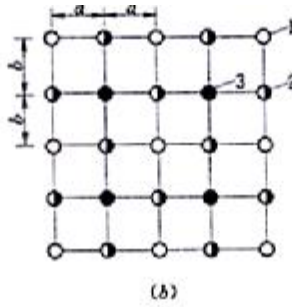
1) 灌浆次序

坝基固结灌浆采用分排分序逐渐加密的原则, 见图 5、图 6

隧洞固结灌浆采用环间分序环内加密的方法, 环间可分为两序或三序。



(a)



(b)

图 5 方格形布孔图

(a)两个次序灌浆; (b)三个次序灌浆

a—孔距; b—排距

1—○第 I 次序孔; 2—○第 II 次序孔; 3—●第 III 次序孔

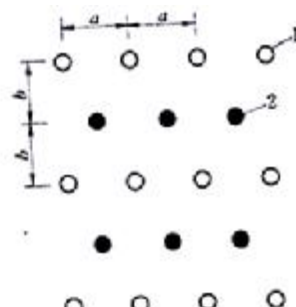


图 6 梅花形布孔图

a—孔距; b—排距

1—○第 I 次序孔; 2—●第 II 次序孔

b=a 时, 为等腰三角形布孔;

b=0.866a 时, 为等边三角形布孔

深孔固结和中深孔固结为了保证灌浆质量, 宜采用三个次序。

2) 材料和浆液

固结灌浆主要目的是提高基础岩体的承载能力, 一般以水泥浆为主, 为了改善浆液的可灌性和稳定性, 可掺入少量的粉煤灰和膨润土。粉煤灰掺量宜少于 30% 水泥重, 膨润土掺量宜少于 10%。不掺用粘土。遇节理、裂隙发育带, 注入量较大时, 可掺入细砂, 用砂浆泵灌注。当地下水有侵蚀性时, 应采用抗侵蚀性的水泥。

浆液可采用稳定浆液, 水灰(胶)比小于 0.7。

3) 钻孔冲洗

固结灌浆需要进行孔壁冲洗和裂隙冲洗, 尤其是地质条件较差, 岩体破碎, 含泥质充填的裂隙, 应该重视钻孔冲洗工序。

冲洗方法有单孔法和群孔法, 冲洗压力为灌浆压力的 80%。

4) 灌浆方法

浅孔固结灌浆常用全孔灌浆法。单位注入量小于 20L/m 时, 可并联灌注, 但孔数不宜超过 3 个。

中深孔和深孔固结灌浆可采用自上而下或自下而上灌浆法, 对重要工程和复杂地基, 根据工程需要可采用孔口封闭、孔内循环灌浆法。已建工程采用纯压式灌浆居多。

5) 灌浆压力及其控制

一般情况下固结灌浆压力不大, 常采用小于 1.0MPa 的压力。如对地基处理有特殊要求, 采用较高压力灌注, 应经过论证, 防止基础垫层混凝土和隧洞衬砌开裂, 防止上部结构被抬动, 影响抗滑稳定。在条件允许时, 尽量采用较大的压力灌注。

- (1) 工程类比法确定灌浆压力;
- (2) 通过灌浆试验确定灌浆压力;
- (3) 防止抬动破坏的措施:
 - ① 要设抬动观测仪器, 限制抬动值为 0.2mm;
 - ② 钻孔四周埋设插筋;
 - ③ 垫层混凝土(盖重)布置钢筋;
 - ④ 垫层混凝土要达到设计龄期后灌浆;
 - ⑤ 采用浓浆灌注;
 - ⑥ 合理控制灌浆压力和注入率, 注入量大时采用低压, 当注入率 < 10L/min 时逐步加压;
 - ⑦ 将灌浆塞卡在基岩中。

6) 盖重

为了提高固结灌浆的效果, 普遍采用有盖重灌浆。以下部位灌浆必须有盖重混凝土:

- (1) 防渗帷幕上游兼作辅助帷幕的固结灌浆。
- (2) 规模较大不良地质部位的固结灌浆;
- (3) 结构有特殊要求的部位的固结灌浆;
- (4) 地基表面严重冒浆的部位。

盖重混凝土的厚度一般不小于 3m。

由于枯水季节基础混凝土浇筑和地基固结灌浆相互干扰, 往往建设单位要求抢工期, 施工单位提出无盖重固结灌浆的方案。

无盖重灌浆分二种, 一是在找平混凝土后灌浆, 二是在裸露基岩上灌浆, 找平混凝土可以采用喷混凝土。

长江三峡大坝基础固结采用“找平混凝土”, 其强度等级和基础混凝土相同, 厚 30-40cm, 以填平低洼坑槽为主, 待找平混凝土达到 70% 的设计强度值后, 开始固结灌浆作业。

黄河小浪底进水塔基岩上浇筑了 20-50cm 的混凝土后, 先进行 3m 深岩体灌浆, 形成盖板, 而后进行下部岩体的灌浆。

二滩坝基固结灌浆自无盖重开始, 至有盖重结束, 在裸露的岩体中进行固结灌浆, 3m 以下岩体固结灌浆, 3m 以上岩体通过埋管引向坝后集中, 待浇坝体基础混凝土后再行固结灌浆。

7) 质量检查

固结灌浆质量检查应以岩石力学性能改善程度是否满足设计要求为准, 检查地基岩体经过固结灌浆后坝基岩体的变形模量和强度指标, 过去以压水试验检查岩基的透水性是否小于 3Lu(或 5Lu)是不合适的。可以想象, 页岩、泥岩、粘土充填带的透水率可以满足要求, 但其承载能力是很低的, 而花岗岩、石灰岩、片麻岩等有裂隙发育, 压水检查其透水率可能较大, 不满足要求, 但其承载能力却是很高的。

检查坝基固结灌浆后其物理力学性能的改善可利用弹性模量(弹性波速)检测, 采用千斤顶作变形试验或钻孔弹模仪(ZY-110 钻孔压力计、ZT-1 型孔弹仪、OYO-200 孔内弹力计、钻孔膨胀剂等)量测, 根据变形估计算静弹模或静变模, 采用地震仪, 声波仪[SYC-2 型岩石声波仪, CE9201 检测仪, 美国拜森 1575B(单道), 1580(六道)和 ES1210 型(12 道)信号增强地质仪, OYOMc-160 信号增强地震仪(24 道), PROBES-1 型孔弹仪等仪器, 测定岩体弹性波速, 再计算出岩体的

动弹性模量。

静弹模测试比较复杂，其测值代表岩体的范围也很小，而动弹模测试比较简便，速度快，且能反映出深部岩层及大范围的岩体弹性模量，故被普遍应用。

为了评定灌浆效果，宜在同一地点附近检测灌浆前后的弹性波速。

(1) 静弹模和静变模的计算

使用千斤顶做弹性模量试验按(12)式计算静弹模 E_j ，按(13)式计算静变模 E 。

$$E_j = \frac{pD(1-m^2)w}{s} \dots\dots\dots (12)$$

$$E_0 = \frac{pD(1-m^2)w}{s_0} \dots\dots\dots (13)$$

式中：P——承受的压力(MPa)；

D——承压板的尺寸，圆形板指直径，方形板为边长(cm)；

S——弹性变形；

S₀——全变形；

μ——岩石波松比；

W——与承压板刚度、形状、测量位置有关的等比数系数(刚度系数)，见表 3、表 4。

表 3 测点在加压板下的 W 值

加压板形状	柔 性 板			刚性板
	角(边)点	中心	平均	
圆形	0.64	1.00	0.85	0.79
方形	0.56	1.12	0.95	0.88

表 4 测点在加压板(圆形板)外的 W 值

r/a	1/1.5	1/2	1/3	备 注
刚性板	0.365	0.262	0.170	r 为加压板的半径
柔性板	0.237	0.129	0.057	a 为测点到板中心的距离

(2) 动弹模的计算

采用动力法测得岩体的声波速度后用(14)式计算泊松比 μ，用(15)式计算动弹性模量 E_d ：

$$m = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \dots\dots\dots (14)$$

$$E_d = rV_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \dots\dots\dots (15)$$

$$E_d = V_p^2 \frac{r(1+m)(1-2m)}{1-m} \dots\dots\dots (16)$$

式中： V_p ——岩体纵波波速；
 V_s ——岩体横波波速；
 ρ ——岩体密度。

坝工设计中有限元计算常用静弹模或静变模，静弹模或变模与动弹模、弹性波速有一定的关系。但由于各大坝的基础岩体各异，物理力学性能相差甚大， E_J 与 E_d 、 E_o 与 E_d 难以找到一个通用的关系式。对某个大坝工程，可在坝趾区测得多组动、静态弹性参数，通过数据统计分析，得出 E_o 、 E_J 与 V_p 、 E_d 的关系式。

清江水布垭面板堆面坝趾板， E_J 、 E_o 与 V_p 有如下关系：

$$E_o = 4.0 \times 10^{-18} V_p^{5.7601}$$

式中： E_o ——弹性模量，MPa；
 V_p ——声波速度，m/s。

向家坝采用 PROBEX-1 膨胀仪检测孔内变模，结果如下：

$$E_o = a V_p^b = 3.03 \times 10^{-22} V_p^{6.10528}$$

龙羊峡坝基岩体 $E_o \sim V_p$ 见表 5。

表 5 龙羊峡坝基岩石纵波速度与静变模间的关系

纵波速度 V_p (m/s)	2000	3000	3500	4000	4550
静变模 E_o (10^5N/cm^2)	1	2.8	4.3	7.8	17

河南故县大坝基础岩体 $E_o(E_J) \sim V_p$ 见表 6。

表 6 故县坝基岩石静弹模与静变模间的关系

纵波速度 V_p (m/s)	3000	3500	4000	4500	5000
静弹模 $E_J(10^5 \text{N/cm}^2)$	1.5	4.5	10.3	21.2	41.5
静变模 $E_o(10^5 \text{N/cm}^2)$	1	3	6.3	11.9	21.2

其力学表达式为：

$$V_p = 2.74 E_J^{0.163}$$

$$V_p = 2.85 E_o^{0.184}$$

岩体完整性系数 K_v 按(17)式计算

$$K_v = \left(\frac{V_p}{V_r} \right)^2 \dots\dots\dots (17)$$

式中： V_p ——岩体固结灌浆后的纵波速度，m/s；
 V_r ——完整岩块纵波速度，m/s。

溪洛渡大坝对弱风化上部岩体经固结灌浆后，要求 $K_v=0.41-0.65$ ，弱风化下部岩体 $K_v=0.65-0.78$

坝基岩体经固结灌浆后，其刚度有一定提高，如原岩体裂隙多，灌浆效果好，提高的百分比大，反之，如原岩较为完整致密，单位注入量小，其提高的百分比就低，据不完全统计，坝基岩体经固结灌浆后，纵波速度可以提高 5-30%，灌浆效果很好的可以提高 50-200%

表 7 列出国外一些土坝地基固结灌浆前后的 V_p 变化值, 表 8 列了 E_d 的变化资料, 表 9 列出 E_r 的变化数值, 可供参考。

表 7 岩石灌浆后弹性波速 V_p 的改进

坝名及灌浆区位置	国 别	岩石名称	测点数	V_p 平均值(m/s)		增 加 值 (%)
				灌浆前	灌浆后	
费雷拉 左岸 水平 左岸 垂直 河床段 右岸	意大利	石英千枚岩	3	3600	5400	50
		石英千枚岩	4	4350	5380	24
		石英千枚岩	9	4225	5330	26
		石英千枚岩	7	3325	5095	53
法瑞拉.帕拉维	伊朗	坚硬砂岩	2	2300	2620	14
罗斯兰	苏丹	片 岩	---	2750	3800	38
鲁雅纳耳	法国	云母片岩	10	2920	3620	24
阿坎塔拉	西班牙	古生沉积岩	30	3500	4090	17
英古里(灌浆试验成果)	原苏联	石灰岩	12	2080	3130	50

表 8 岩石灌浆后动弹性模量 E_d 的改进

坝名及灌浆区位置	国别	岩石名称	测点数	E_d 平均值 (10^5Pa)		增加值 %
				灌浆前	灌浆后	
阿韦纳 浅层 深层 右岸 地段 A 右岸 地段 B 右岸 平硐 B-C 右岸 平硐 D-E	法国	片状石英岩	1	100000	140000	40
		片状石英岩	1	345000	350000	1.5
		片状石英岩	1	60000	125000	175
		片状石英岩	2	135000	190000	41
		片状石英岩	2	125000	155000	24
		片状石英岩	2	55000	150000	175
伯勒扎尔 浅层 深层(20m 以下)	西班牙	花岗岩	2	67500	102500	52
		花岗岩	2	340000	355000	4.5
皮特拉.德.波尔特斯罗 试区 B 固结灌浆区	意大利	砾岩、砂岩	3	91000	250000	175
		砾岩、砂岩	9	234000	272000	17
絮斯卡达	西班牙	花岗岩	2	145000	160000	10
朱特·德·沙(水渠)	西班牙	花岗岩	3	230000	330000	43
弗雷拉 左岸 水平 左岸 垂直 河床段 右岸	意大利	石英千枚岩	3	300000	662000	121
		石英千枚岩	4	430000	655000	52
		石英千枚岩	9	402000	651000	62
		石英千枚岩	7	250000	594000	138

表 9 岩石灌浆后静弹性模量 E_s 的改进

坝名及灌浆区位置图	国别	岩石名称	测点数	E_d 平均值 (10^5Pa)		增加值 %
				灌浆前	灌浆后	
阿韦纳 廊道	法国	片状石英岩	4	41250	147000	257
鲁雅纳耳	法国	云母片岩	8	33600	49000	46
絮斯卡达 廊道 C 廊道 11	西班牙	花岗岩	2	71000	104500	47
		花岗岩	2	43500	785000	80
圣.卡西昂 良好岩石区 软弱岩石区	法国	片麻岩	3	110000	126000	15
		片麻岩	4	49000	66250	35
格雷乌 坚硬岩石区 软弱岩石区	法国	石灰岩	2	121500	15400	27
		石灰岩	5	64000	106000	66
巴克拉 高程 1428ft 高程 1548ft	印度	砂岩	3	23400	36300	55
		砂岩	2	98500	176000	78
皮维.吉.卡多拉	意大利	裂隙石灰岩	---	35000	52000	49
皮卡吉斯	西班牙	花岗岩	---	50000	150000	200
依姆.福特	摩洛哥	云母片岩	---	57000	100000	76
英古里 灌浆试验区	原苏联	石灰岩	6	48500	80800	67
契尔格依 灌浆试验区	原苏联	白垩纪片状石灰岩	5	68210	210660	209
卡塞布 灌浆试验区	突尼斯	奥陶纪沥青质灰岩	8	61340	145430	139
萨兰曼	葡萄牙	花岗岩	---	28000	57000	103
卡尼萨达	葡萄牙	花岗岩	2	20000	34500	72
卡皮瑞		轻微风化花岗岩	2	118500	185000	6

弹性波速测试可采用地震法和声波法,后者测值比前者高 10% 左右,工程应用有跨孔地震波测试和电磁波测试,单孔声波测试,以单孔声波测试法较好些。

采用声波测试法检查固结灌浆质量的验收标准时,可明确以下规定:

- (1) 检查方法:采用单孔声波法;
- (2) 弹性波波速 V_p 平均应达到的指标(按有限元计算确定);
- (3) 基本消除低速区,小于 V_p 平均值的 85% 的测试值不超过 3%,且不集中;
- (4) 85% 的测试值应达到设计值。

设计要求灌后岩体声波速度较灌前提高的百分数是不科学的。

(五) 高压喷射灌浆

1、概述

高压喷射(以下简称高喷)灌浆技术是用钻机在地层中造孔,将带有喷头的喷射管下至孔内预定位置,用高压泵形成的高速液流、空压机形成的气流从喷嘴中同轴喷射出去,直接冲击、切割、剥蚀地层,地层破坏后剥落下来的土石料湿化崩解、升扬置换,而灌注的水泥浆或其他复合料浆液中的胶凝颗粒与被破坏的地层土石颗粒之间发生充分的强制性掺搅混合,充填挤压,移动包裹,至凝结硬化,从而构成坚固的凝结体,成为结构密实、强度高、有足够防渗性能的构筑物,以满足工程需要的一种技术措施。

高压喷射灌浆于 1968 年首创于日本。70 年代初,我国铁路、煤炭、水利水电及冶金系统相继引进并开始研究高压喷射灌浆技术。80 年代以来,意大利、荷兰及前苏联等国也大规模采用这项技术。我国水利系统于 1980 年首先将此技术用于山东白浪河土坝。目前,该技术已经普遍地应用于我国许多行业的建筑工程中。在水利水电建设方面,多用于低水头土坝坝基防渗、围堰和松散地层的防渗堵漏、截潜流,还可进行地下工程缺陷的修补等。

2、适用范围

高压喷射灌浆防渗和加固技术适用于软土层,如第四纪的冲(淤)积层、残积层以及人工填土等。我国的实践证明,砂类土、黏性土、黄土和淤泥等地层均能进行喷射加固,效果较好。对粒径过大的含量过多的砾卵石以及有大量纤维质的腐殖土地层,一般应通过现场试验确定施工方法。对含有较多漂石或块石的地层,应慎重使用。

对于地下水流速过大,无填充物的岩溶地段、永冻土和对水泥有严重腐蚀的地基,不宜采用高压喷射灌浆。前一种情况下,喷射浆液无法在喷射管周围凝固。

在水利水电建设中,高喷灌浆广泛应用于坝基防渗、围堰及边坡挡土、基础防冲、帷幕修复等工程。

3、方法

高压喷射灌浆方法有单管、两管、三管和多管之分。

单管法是用高压泥浆泵以 20-25MPa 或更高的压力,从喷嘴中喷射出水泥浆液射流,冲击破坏土体,同时提升或旋转喷射管,使浆液与土体上剥落下来的土石掺搅混合,经一定时间后凝固,在土中形成凝结体。这种方法形成凝结体的范围(桩径或延伸长度)较小,一般桩径为 0.5-0.9m,板状凝结体的延伸长度可达 1-2m。其加固质量好,施工速度快,成本低。

二管法是用高压泥浆泵等高压发生装置产生 20-25MPa 或更高压力的浆液,

用压缩空气机产生 0.7-0.8MPa 压力的压缩空气。浆液和压缩空气通过具有两个通道的喷射管，在喷射管底部侧面的同轴双重喷嘴中同时喷射出高压浆液和空气两种射流，冲击破坏土体。

在高压浆液射流和它外围环绕气流的共同作用下，破坏土体的能量比单管法显著增大。喷嘴一边喷射一边旋转和提升，最后在土体中形成直径明显增加的柱状固结体，其直径达 0.8-1.5m。除上述情况下，二管法也有的采用高压水和低压浆液两种介质。二管法使用的喷射管初期都是一种同轴的双重钢管，内管内输浆，内管和外管之间的环形通道输气，故又称为二重管法，至今工业民用建筑行业仍沿用此名。

三管法是使用能输送水、气、浆的三个通道的喷射管，从内喷嘴中喷射出压力为 30-50MPa 的超高压水流，水流周围环绕着从外喷嘴中喷射出压力为 0.7-0.8MPa 的圆管状气流，同轴喷射的水流与气流冲击破坏土体。由泥浆泵灌注压力为 0.2-0.7MPa、浆量 80-100L/min、密度 1.6-1.8g/cm³ 的水泥浆液进行充填置换。这种方法的水压力一般很高，在高压水射流和压缩空气的共同作用下，喷射流破坏土体的有效射程显著增大。喷嘴边旋转喷射边提升，在地基中形成较大的负压区，携带同时压入的浆液进入被破坏的地层进行混合、充填，在地基中形成直径较大、强度较高的固结体，起到加固地基的作用。其直径一般有 1.0-2.0m，较二管法大，较单管法要大 1-2 倍。三管法也称三重管法。

新三管法是用高压水和气冲击切割地层土体，然后再用高压浆和气对地层土体进行三次切割和喷入。水、气喷嘴和浆、气喷嘴铅直间距约 0.5-0.6m。由于水的黏滞性小，易于进入较小空隙中产生水楔劈裂效应，对于冲切置换细颗粒有较好的作用。高压浆液射流对地层二次喷射不仅增大了喷射半径，使浆液均匀注入被喷射地层，而且由于浆液和气喷嘴与水、气喷嘴间距较大，水对浆液的稀释作用减小，使实际灌入的浆量增多，浆液密度增大，提高了凝结体的结石率和强度。该法高喷质量优于三管法，适用于含较多密实性充填物的大粒径地层。

近几年，在上述几种基本的喷射灌浆工法的基础上，日本、意大利等国又先后开发出了能够施工大直径桩的超高压大流量、交叉射流工法、多管喷射等工法。它们各具特色，但都处于初始阶段。

根据喷射介质不同，高压喷射灌浆又可分为单介质喷射、双介质喷射及多介质喷射等类别。后两种在国内应用尚少。

4、主要结构型式

高压喷射灌浆防渗板墙常用的结构布置有如图 7 所示几种型式。在实际工程中应依据工程的具体情况和地质条件，进行技术经济比较确定，通常应注意如下几点。

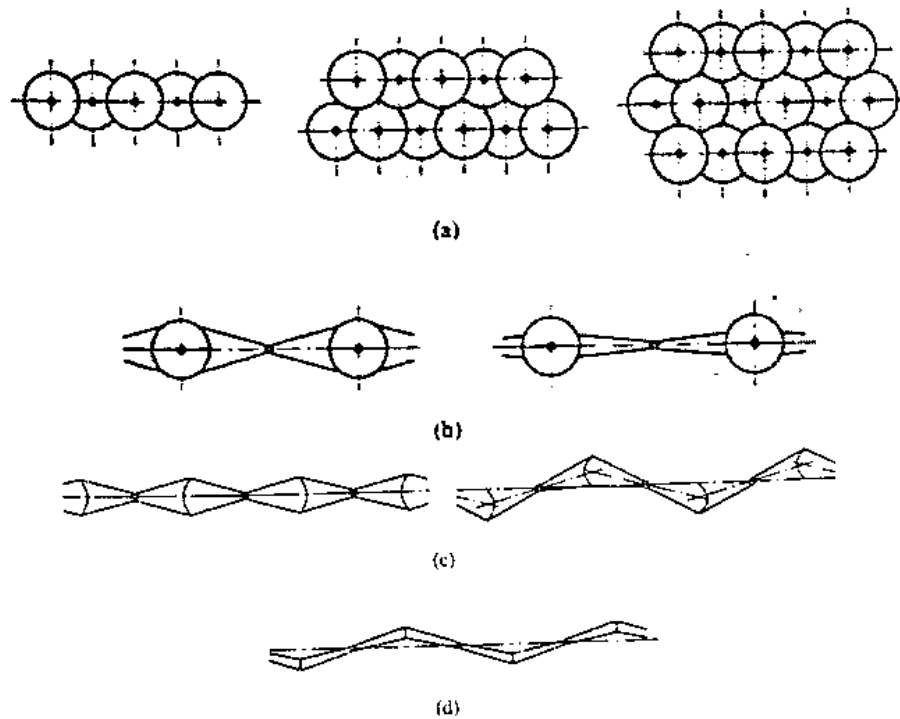


图7 高喷灌浆板墙典型结构型式

(a) 单排或多排旋喷套接; (b) 旋喷、旋定结合; (c) 摆喷、折接;
(d) 定喷折接

(1) 定喷和小角度摆喷适用于粉土和砂土地层。

(2) 承受水头较小的或水头虽较大但历时短暂的工程,可采用小角度摆喷或定喷折接型式。

(3) 在卵(碎)砾石地层中,深度小于 25m 时,可采用摆喷对接或折接型式。摆喷对接时,摆角不宜小于 60° ,摆喷折接时,摆角不宜小于 30° 。深度大于 25m 时,可采用单排旋喷套接、旋摆结合型式。当深度超过 35m 时,宜采用两排或三排旋喷套接的型式。

(4) 各种结构型式高喷墙的结构参数和特点可参见表 10。

表 10 高喷墙的结构参数和特点

编号	墙体形式	孔距(m)	厚度(cm)	特点
A	旋喷套接	08-1.4	20-40	套接可靠性差
B	旋摆、旋定搭接	1.4-2.0	>10	便于连接,结构稳定性好
C	摆喷对接或折接	1.6-2.2	20-40	便于连接
D	定喷折接	1.6-2.5	10-30	便于连接

5、参数选择

施工工艺技术参数选择直接影响着高压喷射灌浆的质量、工效和造价。

高喷施工工艺技术参数包括水、气、浆的压力及其流量、喷嘴直径大小及数量、喷射管旋转速度、摆角及摆动频率、提升速度、浆液配比及密度、孔距与板墙的布置形式等。施工实践表明，要获得较大的防渗加固体，一般应加大泵压，但限于国内机械水平，常用的喷射水压力为 20-40MPa，最大达 70MPa。

我国目前高喷灌浆常用的工艺参数见表 11。

表 11 高喷灌浆常用工艺参数

项目		单管法	两管法	三管法	新三管法
水	压力(MPa)			35-40	35-40
	流量(L/min)			70-80	70-100
	喷嘴(个)			2	2
	喷嘴直径(mm)			1.7-1.9	1.7-1.9
压缩空气	压力(MPa)		0.6-1.2	0.6-1.2	0.6-1.2
	流量(m ³ /min)		0.8-1.5	0.8-1.5	0.8-1.5
	喷嘴(个)		2	2	2
	喷嘴间隙(mm)		1.0-1.5	1.0-1.5	1.0-1.5
水泥浆	压力(MPa)	22-35	25-40	0.1-1.0	35-40
	流量(L/min)	70-120	75-150	70-80	70-110
	密度(g/cm ³)	1.4-1.5	1.4-1.5	1.6-1.7	1.4-1.5
	喷嘴(出浆口)(个)	2	2	1-2	2
	喷嘴直径(mm)	2.0-3.2	2.0-3.2	6-10	2.0-3.2
	孔口回浆密度(g/cm ³)	≥1.3	≥1.3	≥1.2	≥1.2
提升速度 u(cm/min)	粉土	15-25	15-25	10-15	15-30
	砂土	15-30	15-30	10-20	15-35
	砾石	10-20	10-20	8-15	10-25
	卵(碎)石	8-15	8-15	5-10	8-20
旋(摆)速度	旋喷(r/min)	宜取 U 值的 0.8-1.0 倍②			
	摆喷(次/min)	宜取 U 值的 0.8-1.0 倍②			
	摆角 (°)	粉土、砂土	15-30		
		砾石、卵(碎)石	30-90		

注：①摆动一个单程为一次。

②单喷嘴取高限，双喷嘴取低限。

高喷灌浆的孔距应根据墙体结构型式、墙深、防渗要求和地层条件，综合考虑确定。

高喷灌浆的工艺参数和钻孔布置初步确定以后，一般宜进行现场试验予以验证和调整。特别重要的、地层复杂的、深度较大(≥40m)的高喷灌浆防渗工程，一定要进行这样的试验。高喷灌浆试验可按照下述原则进行：

(1) 确定有效桩径或喷射范围、施工工艺参数和浆液种类等技术指标时，宜分别采用不同的技术参数进行单孔高喷灌浆试验。

(2) 确定孔距和墙体的防渗性能时，宜分别采用不同的孔距和结构型式进行群孔高喷灌浆试验。

6、施工

需根据高喷类型和型式选择高喷设备，根据地层情况选择合适的钻孔设备。

高压喷射灌浆设备在现场宜集中布置。设备安放位置以距喷射孔不超过 50m 为宜。现场布置时还应考虑喷射架与水、气、浆管的移动以及冒浆的处理。

1) 施工顺序

高喷灌浆应分排分序进行。在坝、堤基或围堰中，由多排孔组成的高喷墙应先施工下游排孔，后施工上游排孔，最后施工中间排孔。在同一排内如采用钻、喷分别进行的程序施工时，应先施工 I 序孔，后施工 II 序孔。先导孔应最先施工。

高喷墙的合拢段应当选择在地层条件相对较好的部位。

2) 工艺流程

施工程序为钻孔、下置喷射管、喷射提升、成桩成板或成墙等。图 8 为施工流程示意图。三重管高喷施工工艺流程如图 9 所示。

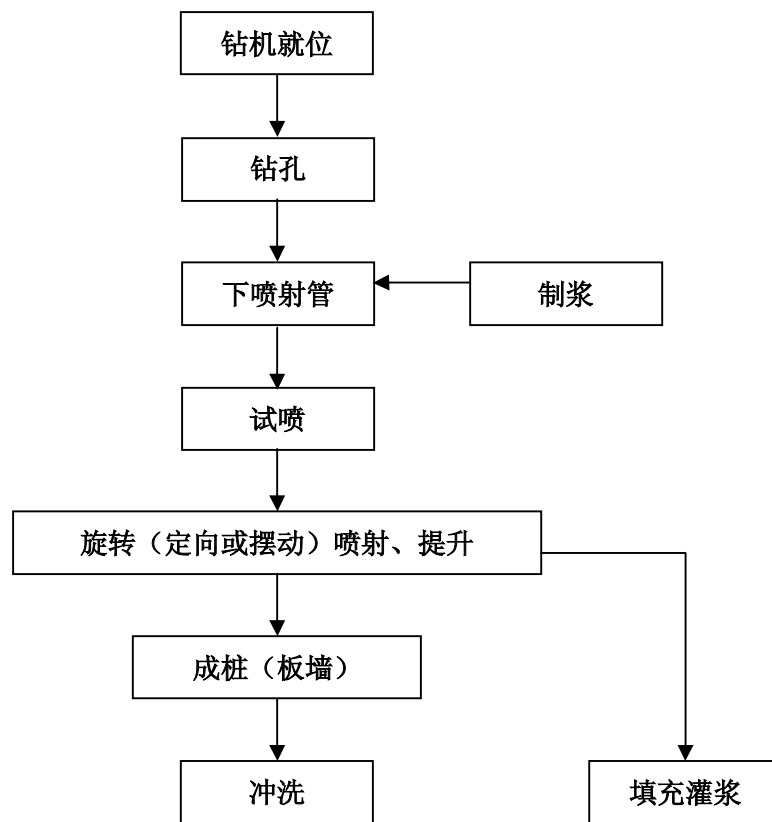


图 8 高压喷射灌浆施工流程图

(1) 钻机就位。将使用的钻机安置在设计孔位上，使钻杆对准孔位中心。钻机就位后，用水平尺校正机身，使钻杆轴线垂直对准钻孔中心位置，以确保钻孔

达到设计要求的垂直度。孔位偏差不大于 5cm。

(2) 钻孔。根据地层情况和加固深度选择合适钻机。在标准贯入击数小于 40 的砂类土和黏性土层进行单管旋喷时,多使用旋转振动钻机,钻进深度可达 30m。对于较密实、标贯击数较大的地层宜用地质钻机钻孔,砂砾层中可采用跟管钻进工艺。在二重管和三重管高喷中,为了提高工效,降低造价,宜优先使用跟管钻进。也可采用地质钻机钻孔,泥浆护壁。

采用套管或跟管方法钻进时,在起拔管前应向钻孔内注满护壁泥浆,或下入特制的 PVC 花管护壁。PVC 花管的性能应满足设计要求。也可采用下入喷射管后起拔套管再进行喷射灌浆。

当在钻孔中直接进行高喷时,钻孔孔径应大于喷射管直径 20mm。高喷灌浆孔的深度,对于封闭式防渗板墙,深入相对不透水层或岩层不宜小于 0.5m;对于悬挂式防渗板墙,应大于设计深度 0.3m。钻孔的孔斜,当孔深小于 30 m 时,孔斜率应不大于 1%。

(3) 插管。使用旋转振动钻机钻孔时,插管与钻孔两道工序合二为一,钻孔完毕,插管作业即完成。使用地质钻机钻孔完毕,须取出钻具,换上旋喷管插入预定深度。在插管过程中,为防止泥沙堵塞喷嘴,可采取包扎塑料膜或胶布的防护措施,也可边低压送水、气、浆边下管。水压力一般不超过 1MPa,如压力过高则易将孔壁射塌。

在砂卵石地层采用跟管钻进,钻孔达到设计孔深后注入护壁泥浆,再拔出套管。护壁泥浆应根据施工机械、工艺及穿越土层情况进行配合比设计和试验,在现场配制使用。

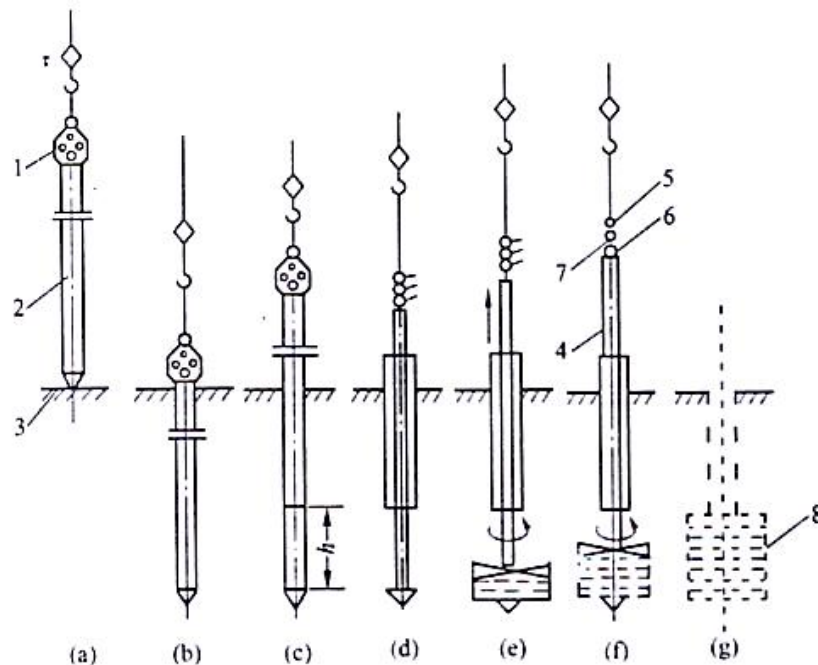


图 9 三重管旋喷法施工工艺流程

(a) 定位、放桩靴、立套管、安震动锤; (b) 套管沉入设计位置; (c) 拔套管、卸下上段套管,使下段露出地面(使 h 要求的旋喷长度); (d) 套管中插入三重管,开始旋喷、边提升; (e) 不断旋喷和提升,直至预定要求的旋喷长度; (f) 拔出三重管和套管,移至下一桩位

1-震动锤; 2-钢套管; 3-桩靴; 4-三重管; 5-高压水胶管; 6-水泥浆胶管; 7-压缩空气胶管; 8-旋喷桩

(4) 喷射。喷射管下到设计深度后,先输入符合要求的水、气、浆静喷 1-3min,待灌入浆液冒出后,按预先定好的提升、旋转或摆动速度,自下而上进行喷射作业,直到设计高度方可停送水、气、浆,提出喷射管。喷射过程中必须时刻注意检查浆液的流量、压力、气量以及旋、摆、提升速度等参数是否符合要求,并随时做好记录,绘制作业过程曲线。

旋喷柱的喷浆量 Q (L/根)可按(18)式计算:

$$Q = \frac{H}{v} q(1 + \beta) \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中: H ——旋喷长度, m;

v ——旋喷管提升速度, m/min;

q ——泵的排浆量, L/min;

β ——浆液损失系数, 一般取 0.1~0.2。

旋喷过程中, 冒浆应控制在 10%-25% (单管或二管法)

(5) 冲洗。当喷射管提升到设计标高后, 喷射完毕, 应及时将各管路冲洗干净, 管内、机内不得残存水泥浆, 以防堵塞。通常把浆液换成水, 在地面上喷射, 以便把泥浆泵喷射管内的浆液全部排出, 直至出现清水为止。

(6) 充填灌浆。喷射结束后浆液凝固析水, 凝结体顶部会出现凹陷, 应随即在喷射孔内进行静压充填灌浆, 直至孔口液面不再下沉。

(7) 移动机具。喷射灌浆结束后, 把钻机等机具设备移到新孔位上, 进行下一孔的施工作业。

3) 施工要点及过程控制

(1) 施工要点

①施工前先进行场地平整, 挖好排浆沟, 做好钻机定位。要求钻机安放保持水平, 钻杆保持垂直, 其倾斜度不得大于 5%。

②单管法和两管法可用喷射管射水成孔至设计深度后, 再一边提升一边进行喷射注浆。三管法施工须预先用钻机或振动打桩机钻成直径 110-150mm 的孔, 然后将三重喷射管插入孔内, 按旋喷、定喷或摆喷的工艺要求, 由下而上进行喷射注浆, 喷射管分段提升的搭接长度不得小于 200mm。

③在插入旋喷管前先检查高压水与空气喷射情况, 各部位密封圈是否封闭, 插入后先做高压水射水试验, 合格后方可喷射浆液。如因塌孔插入困难时, 可用低压(0.1-2MPa)水冲孔喷下, 但须把高压水喷嘴用塑料布包裹, 以免泥土堵塞。

④当采用三管法旋喷, 开始时先送高压水, 再送水泥浆和压缩空气。在一般情况下, 压缩空气可迟送 30s。在柱底部就地旋转喷射 1min 后, 再进行提升喷射。

⑤喷射时, 先应达到预定的喷射压力和喷浆量后, 且孔口冒出浆液, 再逐渐提升喷射管。中间发生故障时, 应停止提升和旋喷, 以防桩体或板墙中断, 同时立即进行检查, 排除故障; 如发现有浆液喷射不足, 影响桩体的设计直径时, 应进行复喷。

⑥当处理既有建筑地基时, 应采取速凝浆液或大间隔孔距旋喷和及时回灌等措施, 以防旋喷过程中地基产生附加变形和地基与基础间出现脱空现象, 影响被加固建筑及邻近建筑的安全。

⑦对需要扩大加固范围或提高强度的工程, 可采取复喷措施, 即先喷一遍清水, 再喷一遍或两遍水泥浆。

⑧喷到桩顶设计高程后迅速拔出喷射管, 用清水冲洗管路, 防止凝固堵塞。

相邻两桩施工间隙时间应不小于 48h，间距不得小于 4-6m。

⑨在含黏粒较少的地层中进行高喷灌浆，孔口回浆应经处理后方可重复使用；在黏性土或软塑一流塑状淤泥质土层中，孔口回浆不宜重复使用。

(2) 特殊情况处理

①喷射深层长桩。从多数情况来看，旋喷注浆地基，主要是第四纪冲积层。由于天然地基的土质情况沿着深度变化较大，土质种类、密实程度、地下水状况等一般都有明显的差异。在这种情况下，旋喷时若只采用固定的旋喷工艺参数，势必形成上部较粗、下部较细的固结体，严重影响旋喷固结体的承载或抗渗能力。因此，在旋喷深层长桩时，应按地质剖面图及地下水资料等，在不同深度，针对不同土质情况，选用合适的旋喷参数，才能获得均匀、密实的长桩。对深层硬土，可采用增加压力和流量或适当降低旋转和提升速度等方法。

②重复喷射。根据喷射机理可知，在不同的介质环境中有效喷射长度差别很大。对土体进行第一次喷射时，喷射流冲击对象为破坏原状结构土。若在原位进行第二次喷射，则喷射流冲击破坏对象发生改变，成为浆土混合液体。冲击破坏所遇到的阻力较第一次喷射时小，因此在一般情况下，重复喷射有增加固结体直径的效果，增大的数值主要随土质密度而变。

虽然重复喷射有增径效果，但由于增径率难以控制和影响施工速度，因此在实际中不把它作为增径的主要措施。通常在发现浆液喷射不足，可能影响固结质量时，或工程要求较大的直径时，才进行重复喷射。

③大量漏浆和冒浆处理。在旋喷过程中，往往有一定数量的土粒，随着一部分浆液沿着喷射管管壁冒出地面。通过对冒浆的观察，可以及时了解土层状况、旋喷的大致效果和旋喷参数合理性等。根据经验，冒浆(内有土粒、水及浆液)量小于注浆量 20%者为正常现象，超过 20%或完全不冒浆时，应查明原因并采取相应的措施。

a) 地层中有较大空隙引起不冒浆或严重漏浆。如在钻孔中发生漏浆，则应当加大钻进泥浆的浓度，在泥浆中掺加砂子，或向孔内填入其他堵漏材料，使其恢复孔口正常返浆。在喷射时漏浆，则可在浆液中掺加适量的速凝剂，缩短固结时间，使浆液在一定土层范围内凝固。另外，还可在空隙地段增大注浆量，填满空隙后再继续正常旋喷。

b) 冒浆量过大的主要原因，一般是有效喷射范围与注浆量不相适应，注浆量大大超过旋喷固结所需的浆量所致。

减少冒浆量的措施有三种：a 提高喷射压力；b 适当缩小喷嘴孔径或减少注浆量；c 加快提升和旋转速度。

对于冒出地面的浆液，如能迅速地进行过滤、沉淀除去杂质和调整浓度达到要求后，可予以回收再利用。但回收处理后的浆液中难免会有砂粒，故只有三重管旋喷注浆法可以利用冒浆再注浆。

④控制固结形状。固结体的形状，可以通过调节旋转速度和提升速度、增减喷射压力或更换喷嘴孔径以改变流量，或改变喷射方法予以控制。

a) 圆柱状：边提升边旋转。

b) 圆盘状：只旋转不提升或少提升。

c) 异型圆柱状：如大帽状，旋转到顶端时加大压力或做重复旋喷或减低旋喷管旋转提升速度；大底状，在底部喷射时，加大压力或做重复旋喷或减低喷嘴的旋转提升速度；糖葫芦状，在旋喷过程中分段加大压力，减低旋喷管的旋转提升速度。

d) 半圆柱状：单喷嘴摆动 180° 。

e) 扇形柱体：单喷嘴摆动不同角度。

⑤消除固结体顶部凹穴。当采用水泥浆液进行旋喷时，在浆液与土搅拌混合后的凝固过程中，由于浆液析水作用，一般均有不同程度的收缩，造成在固结体顶部出现一个凹穴。凹穴的深度随土质、浆液的析出性、固结体的直径和桩长等因素而不同，一般深度在 0.3-1.0m。

这种凹穴现象，对于地基加固或防渗堵水是极为不利的，必须采取措施予以消除。目前通常采用以下几种措施。

a) 对于新建工程的地基，当旋喷完毕后，开挖出固结体顶部，对凹穴灌注混凝土或直接从旋喷孔中再次注入浆液直至填满凹穴为止。

b) 对于已有构筑物地基，目前采用两次注浆的办法较为有效，即旋喷注浆完成后，固结体的顶部与构筑物基础的底部之间有间隙。在原旋喷孔位上，进行第二次注浆，浆液的配方应不收缩或具有膨胀性的材料。国外有一种掺加铜粉的配比：1000L 水泥浆液中，水泥为 983kg，铅粉 29kg，水为 688kg。

其他操作工艺有：(a)喷射时，严密注视各系统的运转情况，发现异常及时处理；(b)接、卸换管时，迅速防止坍孔和堵嘴；(c)喷射中，接、卸换管及事故处理后下管时，应比原停喷高度下落 50cm 以上进行复喷搭接，以使板墙(桩)上下连贯；(d)深层喷射时，喷浆开始时即转动和提升，以防喷射管的扭断或埋管；(e)施工结束后，立即拔出喷射管，彻底清洗喷射管路，保证下一孔的正常喷射。

4) 工程质量检查

(1) 检查项目

防渗工程的高喷灌浆工程质量检查项目是墙体的渗透性，同时要求墙体连续、均匀、厚度符合要求。重要工程高喷板墙应检验其渗透稳定和结构安全。

当有特殊要求时，可检查高喷凝结体的密度、抗压强度、弹性模量、抗溶蚀性等。

单排孔高喷板墙在不同地层中的渗透性能和抗压强度一般可按表 12 要求选取。

表 12 高喷板墙性能指标要求

地层	渗透系数 $K(\text{cm/s})$	抗压强度 $R_{28}(\text{MPa})$
粉土层	$n \times 10^{-6}$	0.5-3.0
砂土层	$n \times 10^{-6}$	1.5-5.0
砾石层	$n \times 10^{-5} - n \times 10^{-6}$	3.0-10
卵(碎)石层	$n \times 10^{-4} - n \times 10^{-5}$	3.0-12

注：①渗透系数 K 为墙体渗透试验结果，抗压强度 R_{28} 为高喷固结体室内实验结果。

② $1 \leq n < 10$ 。单管法和两管法 K 取较低值， R 取较高值；三管法 K 取较高值， R 取较低值。定、摆喷时， K 取较低值， R 取较高值；旋喷时， K 取较高值， R 取较低值。

(2) 质量检查方法

高喷灌浆工程质量难以进行直观地检查，通常采取的检查方法有，开挖观察、取样试验，钻孔取芯和压水试验、围井渗透试验、整体效果观察等。必要时应进行电探、渗流原型观测、载荷试验等。应当根据设计对喷射桩体或板墙的技术要求，选取适宜的方法对适当的部位进行抽样检验。

(3) 渗透系数的计算

利用围井进行渗透试验时，可按照《水工建筑物防渗工程高压喷射灌浆技术规范》的规定计算高喷板墙的渗透系数。在均质透水地基中进行注水试验时，按照式(19)计算板墙的渗透系数。

$$K = \frac{2Qt}{LS(H + h_0)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中：K——渗透系数，m/d；
 Q——稳定注水量，m³/d；
 t——高喷板墙厚度，m；
 L——围井板墙中心线周长，m；
 S——围井内外水头差，m；
 H——井内注水面至井底的高度，m；
 h₀——地下水位至井底的高度，m。

检查孔一般应每单元工程布置1孔。自上而下分段钻孔，分段进行静水头压水试验。获得的试验成果按 DL/T5148—2001《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》中压水试验的要求计算透水率。这里所说的静水头即指由水柱形成的静水压力，以避免使用水泵脉动压力造成对墙体的破坏。静水头的高度根据工程具体情况而定，为方便起见，通常可与孔口齐平。

(4) 其他检查方法

①物探法检查。在防渗板墙墙体上或上下游两侧钻孔，对墙体进行弹性波探测，检查防渗板墙连续性和密实性。

②载荷试验。当高喷固结体是用于加固地层，具有承载作用时，有时需要对旋喷固结体进行垂直或水平的载荷试验。进行这种试验之前应对固结体的加载部位进行加强处理，以防加载时固结体受力不均匀而损坏。也可以钻检查孔，使用钻孔膨胀计测定高喷体的变形系数。

③整体效果观测检查。通过观测对比防渗板墙施工前后下游渗漏量的大小，观测上下游测压管水位的变化，检查高喷板墙的整体防渗效果。

六. 混凝土防渗墙

(一) 概述

混凝土防渗墙是在松散透水地基或土石坝体中以泥浆固壁连续造孔成槽，在泥浆下浇筑混凝土或回填其他防渗材料筑成的、起防渗作用的地下连续墙。

水利水电工程混凝土防渗墙的厚度一般为 60~100cm，与大坝相比十分单薄。但由于它深埋于地基中，水平荷载主要由墙后地基承担，相当于弹性地基上的薄板，所以降低墙体材料的弹性模量与强度的比值，有利于改善墙体的应力状态。坝基和坝体防渗墙虽然也属于地下连续墙的范畴，但其工作条件与一般起承重、挡土作用的地下连续墙是不同的，故对墙体材料的要求也不同。防渗墙的底部一般要求嵌入基岩或不透水层中一定深度（0.5~1.0）m，其顶部则需要与坝体防渗设施连接。混凝土防渗墙对墙体材料无严格的限制。目前有专用的施工技术规范，尚无专用的设计规范。

我国混凝土防渗墙的建设开始于 20 世纪 50 年代末期。1958 年湖北省明山水库创造了预制连锁柱桩防渗墙。同年在山东省青岛月子口水库用这种方法在砂砾石地基中首次建成了深 20m、有效厚度 43cm 的桩柱式混凝土防渗墙。

1959 年在北京密云水库砂砾石地基中创造出一套用钻劈法建造深 44m、厚 80cm 的槽孔型混凝土防渗墙的新方法，取得了成功。

1967 年，四川省大渡河上的龚嘴水电站，首次将防渗墙用作大型土石围堰的防渗设施。这一工程的顺利建成为我国水电施工找到了一种多、快、好、省的围堰防渗结构。

此后，混凝土防渗墙技术就在我国迅速地推广普及，成为覆盖层地基、土石坝（堰）体和堤防的主要防渗工程措施。

20 世纪 60 年代后期，许多地质条件很差的坝（闸）基都纷纷采用了混凝土防渗墙方案。如四川省映秀湾水电站闸基防渗墙和渔子溪一级水电站的闸基防渗墙，这两个工程都处于高山峡谷中，河床坡降很陡，巨石散布于河床表面，有的直径十多米，且岩性十分坚硬，这对刚刚发展起来的我国防渗墙施工技术提出了严峻的挑战。经过反复试验，创造了泥浆下岩石表面聚能爆破和钻孔爆破的方法，解决了大漂石的钻进问题；用投黏土球和水泥、锯末的方法解决了架空地层大量漏浆问题；用回填坚硬碎石轻打慢放的方法解决了槽孔纠偏的问题。这些防渗墙的建成为山区河谷的大粒径漂卵石地层中修建防渗墙积累了经验，标志着我国防渗墙施工技术达到了一个新水平。

20 世纪 70 年代，混凝土防渗墙作为病险土石坝处理的最佳手段被广泛应用。主要工程有 1974 年建成的广西壮族自治区澄碧河水库大坝防渗墙，甘肃省武威黄羊河水库坝体防渗墙，以及 1978 年建成的江西省永修柘林水库坝体防渗墙。

20 世纪 80 年代初，万里长江第一坝——葛洲坝水利枢纽大江围堰防渗墙施工首次引进了日本液压导板抓斗挖槽机，首次进行了用拔管法施工防渗墙接头的试验。

1986 年，四川省铜街子水电站建成了左深槽承重防渗墙和围堰固化灰浆防渗墙。承重墙设有两道，其间用 5 道横隔墙连接，部分墙段连接采用拔管法施工，在 4 个部位埋设了观测仪器。大型防渗墙兼作承重，这是第一例，并首次使用了

固化灰浆墙体材料。

1989 年在河北省岳城水库建成了 44 个“工”字形断面单元墙段组成的溢洪道出口防冲墙，“工”字高 12.6m，宽 7.3m，墙厚 1.3m。其施工难度是前所未有的。

1990 年建成了福建省水口水电站主围堰防渗墙。该墙首次应用塑性混凝土，取得良好效果，防渗效率达 98%。自那以后很多工程相继采用了塑性混凝土，如山西省册田水库防渗墙、北京市十三陵水库防渗墙、河南省小浪底水利枢纽上游围堰防渗墙及长江三峡大江围堰防渗墙等。该工程在部分地段还首次采用了“两钻一抓法”建造防渗墙，这种方法比单纯用冲击钻机造孔提高工效 1 倍以上，降低成本 23%。现在，两钻一抓法已是最常用的防渗墙造孔施工方法。

1992 年建成的四川省宝珠寺水电站左岸下游护坡防冲墙，墙厚 1.4m，是我国目前厚度最大的防渗墙。

1997 年我国至今最深的混凝土防渗墙在四川省冶勒水电站完成试验施工。该试验墙段深 100m、长 7.8m、厚 1.0m，由一个槽孔、一个单孔和一个双反弧接头孔组成，为我国防渗墙施工跨越 100m 深度准备了条件。

1998 年建成的小浪底主坝防渗墙是迄今为止我国最深的、墙体材料强度最高的混凝土防渗墙。小浪底主坝防渗墙深 81.9m、厚 1.2m，墙体混凝土设计强度 35MPa。施工中右岸部分采用了缓凝型高强混凝土，解决了墙体混凝土强度过高给钻凿接头带来的困难。左岸部分使用钢丝绳抓斗挖槽，以先施工的塑性材料横向短墙保护墙段间的接缝，此法连接可靠、施工简便、工效很高。

长江三峡工程一、二期围堰防渗墙是我国已建防渗墙工程中最大、综合难度最大的防渗墙，其中二期围堰防渗墙是三峡工程的关键技术之一。为确保在一个枯水期完成任务，引进了德国 BC-30 型液压铣槽机、各种抓斗、钻机等先进设备与国产设备相配合，将一大批科研成果应用于施工工程，主要技术成果有：

(1) 对引进的液压铣槽机进行消化吸收，掌握了世界上最先进的防渗墙造孔技术。同时针对三峡二期围堰堰体含风化砂等多种填筑料及堰基地层复杂的特点，与抓斗等其他造孔设备配合施工，形成了适应工程实际的综合施工能力，取得了高效成槽、保证围堰按期完成的效果。这种施工设备配套方式，在国内改变了以钢绳冲击钻机为主的传统施工方法，实现了防渗墙施工技术的突破。

(2) 研制了 GSD 型钢丝绳抓斗，改进完善了 CZF-1500、CZF-2000 型冲击反循环钻机等钻孔设备；研究开发了“铣、砸、爆”、“铣、抓、钻、爆”、块球体钻孔预爆、双反弧接头槽等防渗墙造孔新工艺。

(3) 采用优质泥浆，并在强漏失地层中预灌浓浆，解决了在风化砂等松散填筑体内造孔的固壁问题。

(4) 用特制的定位架在墙内成功地预埋基岩灌浆管 1.1 万余米，并在墙下进行帷幕灌浆；还采用拔管成孔法在墙内埋设了观测仪器。

(5) 在平均坡度 70°的岩坡上采用定位钻孔爆破技术形成台阶，解决了在防渗墙嵌入基岩的技术难题，确保了工程质量。

三峡工程二期上游围堰防渗墙代表了我国迄今防渗墙技术的最高水平。

从 20 世纪 90 年代初期开始，陆续开发出了多种适用江河堤防垂直防渗的设备和工艺，这些技术的共同特点是防渗体较薄（一般为 15~40cm）、造价较低。薄型混凝土防渗墙施工技术也开始大量用于处理江河堤防的渗漏问题。

四十多年来，我国的防渗墙施工技术不断发展，在各项水利水电工程中建造的混凝土防渗墙已不计其数，许多工程的难度和规模，在世界上都是罕见的。我国的防渗墙施工技术在整体上已达到国际先进水平。

（二）混凝土防渗墙的特点

与其他防渗型式相比较，混凝土防渗墙有如下特点：

（1）墙体的结构尺寸（厚度、深度）、墙体材料的渗透性和力学性能可根据工程要求和地层条件设计和控制。

（2）施工方法成熟，检测手段简单直观，工程质量可靠。

（3）几乎可适应于各种地质条件，从松软的淤泥到密实的砂卵石，甚至漂石和岩层中。虽然施工上有难易之分，但以目前的技术都可以建成防渗墙。

（4）用途广泛，既可防水，防渗，又可挡土、承重；既可用于大型深基础工程，也可用于小型的基础工程；既可作为临时建筑物，也可作为永久建筑物。

（5）一般情况下，混凝土防渗墙施工要借助于大型的施工机械并在泥浆固壁的条件下进行，工艺环节较多；因此，要求有较高的技术能力、管理水平和丰富的施工经验。

（6）与其他的防渗措施相比，混凝土防渗墙耐久性较好，防渗效率较高。

（三）槽孔型混凝土防渗墙施工

按墙体结构型式分。可分为桩柱型防渗墙、槽孔型防渗墙和混合型防渗墙三类，槽孔型防渗墙使用更为广泛。其施工程序见图 10（下页）。

防渗墙施工临建设施主要包括泥浆系统、混凝土系统供水供电系统、现场值班室、修配车间、材料仓库、水泥库和场内外道路等，应尽量靠近防渗墙施工现场布置。其规模大小、结构形式应根据工程实际情况决定。

1、成槽方法选择

根据地层条件设计要求和工期等因素选择成槽方法。目前国内外常用的成槽方法有钻劈法（主孔钻进，副孔劈打）、纯抓法、（主副孔均用抓斗直接抓取）、钻抓法（主孔钻进，副孔抓取）、铣槽法（液压铣槽机铣削）、多头回转钻机成槽法、射水成槽法、锯槽法等。各种成槽法的适用条件参见表 13。

表 13 造孔成槽方法一般适用范围 参照表

造孔成槽法	地层适应性							墙深 (m)	墙厚 (cm)	备注
	黏	壤	砂	卵	漂	软	硬			
钻劈法	○	○	○	○	○	○	△	≤70	60~120	
纯抓法	○	○	○	△	×	△	×	≤50	30~100	重锤配合
钻抓法	○	○	○	○	×	△	△	≤70	30~120	重锤配合
铣槽法	○	○	○	△	×	○	△	≤50	60~120	
多头钻法	△	○	○	△	×	△	×	≤50	50~100	
射水法	○	○	○	△	×	×	×	≤30	15~40	
锯槽法	○	○	○	×	×	×	×	≤30	15~30	

注：○—好 △—较差 ×—差

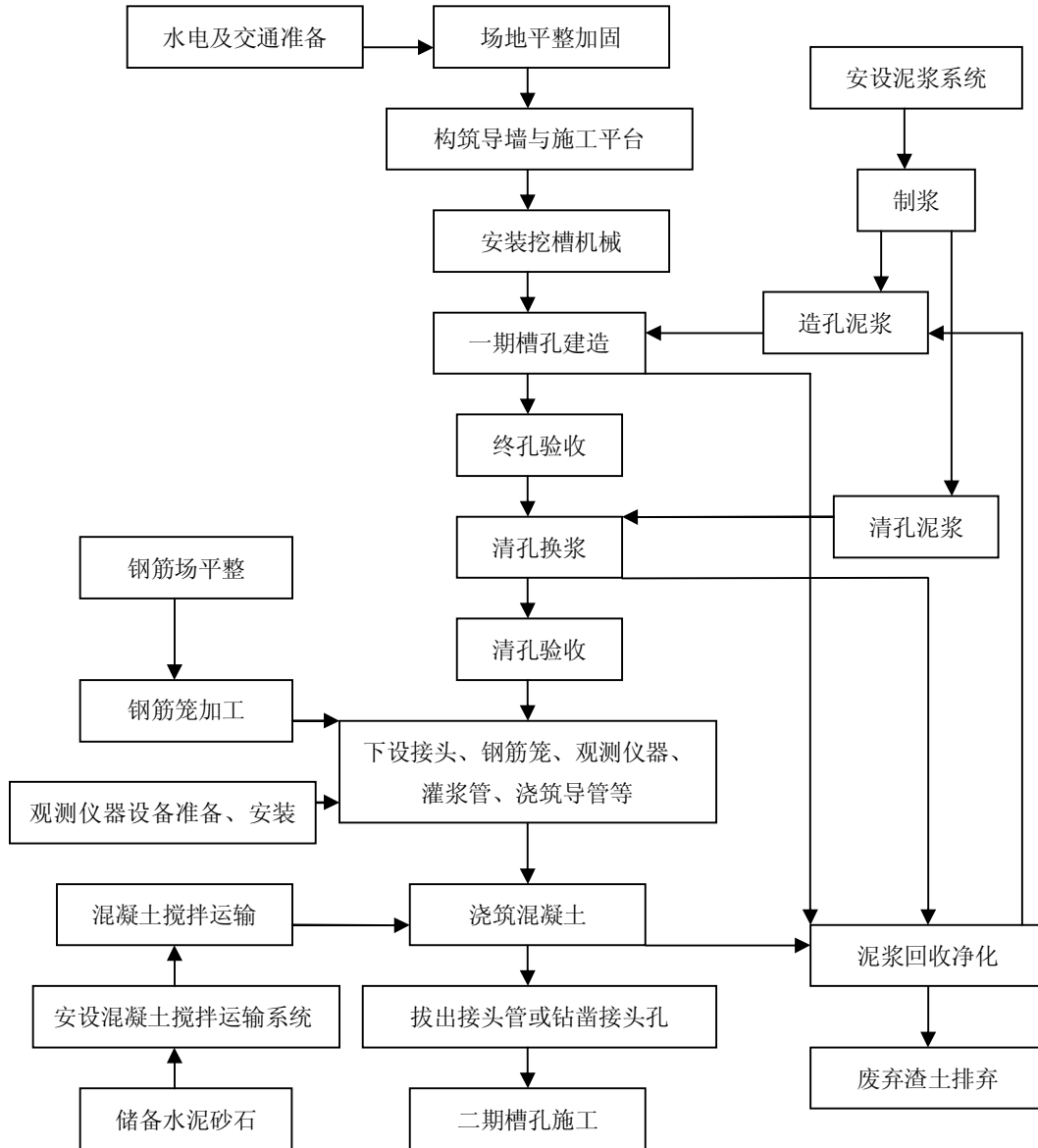


图 10 槽孔型混凝土防渗墙的施工程序

2、施工定额

施工定额指标与地层的组成和性质密切相关，同时受机械性能钻孔直径、钻孔深度和操作人员的技术熟练程度等影响。可按国家有关定额，并参考类似的工程实例来选用。

造孔施工定额可参考表 14——表 16。

表 14 防渗墙造孔施工定额参照表 $m^2/台日$

造孔方法	黏土	壤土	粉细砂	中粗砂	砾石	卵石	漂石	软岩	较软岩	较硬岩	混凝土
冲击钻机	6.0	9.0	3.6	5.0	4.0	3.0	1.9	2.5	1.7	0.8	5.0
冲击反循环钻机	6.0	12.0	6.0	9.0	7.5	5.0	2.5	3.0	2.0	1.0	8.0
纯抓法	70.0	140	60.0	120	80.0	30.0	6.0	6.0	4.0	2.0	---
钻抓法	回转钻机	12.0	24.0	18.0	30.0	20.0	----	6.0	4.5	3.0	6.0
	冲击钻机	6.0	8.0	3.5	4.0	3.5	3.0	2.5	4.0	2.5	0.8
	冲击反循环钻机	6.0	16.0	6.0	10.0	7.5	5.5	3.0	6.0	3.6	1.2
抓斗	150	200	100	150	150	50.0	15.0	18.0	12.0	6.0	----
铣槽法	220	300	250	300	240	60.0	20.0	45.0	30.0	15.0	80.0

注：1. 墙厚 0.8m，孔深 40m 以内。

2. 回转钻机载基岩中钻孔时须配牙轮钻头；抓斗在漂石和基岩中造孔时须配重锤。

表 15 防渗墙造孔施工定额墙厚修正系数

墙厚(m) 机型	≤0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.30	1.40
CZ-22 型冲击钻机	-----	1.1	1.0	0.8	-----	-----	-----
CZ-30 型冲击钻机	-----	-----	1.1	1.0	0.85	0.7	0.5
CZF1200 型冲击反循环钻机	-----	1.1	1.0	0.8	-----	-----	-----
CZF1500 型冲击反循环钻机	-----	-----	1.1	1.0	0.85	0.7	0.5
抓斗挖槽机	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
液压铣槽机	-----	-----	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6

表 16 防渗墙造孔施工定额孔深修正系数

孔深 (m)	<20	20~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80
系数	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6

3、施工机械

(1) 钢绳冲击式钻机

这种钻机适用于各种地基，结构简单，操作、维修和运输方便，价格低廉，应用普遍，但效率较低。

其技术性能见表 17。

表 17 常用冲击式钻机的主要技术性能

型号	CZ-20	CZ-22	CZ-30
开孔直径 (mm)	635	710	1000
钻具最大重量 (kg)	1000	1300	2500
钻具冲程 (m)	1.00~0.45	1.00~0.35	1.00~0.50
钻具冲击次数 (次/min)	40,45,50	40,45,50	40,45,50
钻进深度 (m)	120	150	180
工具、抽砂、辅助卷扬起 重力 (kN)	15,10	20,13,15	30,20,30
工具卷筒平均绳速 (m/s)	0.52,0.58,0.65	1.1~1.4	1.1,1.25,1.42
抽砂卷筒平均绳速 (m/s)	0.96,1.08,1.27	1.2~1.6	1.21,1.38,1.68
辅助卷筒平均绳速 (m/s)	—	0.80~1.0	0.95~1.22
工具卷筒钢丝绳直径 (mm)	19.5	21.5	26.0
抽砂卷筒钢丝绳直径 (mm)	13.0	15.5	17.5
辅助卷筒钢丝绳直径 (mm)	—	15.5	21.5
工具卷筒容绳量 (m)	250	250	350
抽砂卷筒容绳量 (m)	250	250	350
辅助卷筒容绳量 (m)		135	210
桅杆高度 (m)	12.0	13.5	16.0
桅杆起质量(t)	5.0	12.0	25.0
电机功率(kW)	20	30	40
电机转速(r/min)	970	975	735
钻机质量(t)	6.27	6.87	11.15
工作状态的外形尺寸 (长× 宽×高) (mm)	5800×1850×12300	5600×2300×14000	7700×2840×16000
牵引速度(km/h)	20	20	20

(2) 冲击式反循环钻机

冲击式反循环钻机适用于软土、砂砾石、漂卵石和基岩等多种地层。冲击式正循环钻机在国内用得较少。

反循环抽渣方式有泵吸、气举及射流法三种。泵吸法一般适用于孔深 50m 以内的钻孔，此时效率较高。深孔用气举法较好，30 m 以内钻孔效率较差。射流法在孔深 50m 以内效果较好。一般多用泵吸法和气举法配合使用。其技术特性见表 18（见下页）。

表 18 部分国产冲击式反循环钻机主要技术性能

	CZF-1200	CZF-1500	GJD-1500
一、基本性能			
最大造孔直径 (mm)	1200	1500	1500(岩): 2000 (土)
最大造孔深度 (m)	80	100	50
最大冲击行程 (mm)	1000	1000	100~1000
冲击频率 (次/min)	40	40	0~30
主电动机功率 (kW)	30	45	37~45
钻孔质量 (t)	8.3	12.5	15.7
外形尺寸 (长×宽×高) (m)	2.8×2.33×8.5 (工作时) 8.5×2.33×2.8 (运输时)	6.6×2.84×10 (工作时) 10×2.84×3.6 (运输时)	5.0×2.36×6.38 (工作时)
二、同步平衡双筒卷扬			
提升能力 (kN)	20	30	39.2
提升速度 (m/s)	1.5	1.6	4.08
钢绳直径 (mm)	19.5	24.0	
三、副卷扬			
提升能力 (kN)	26	40	
提升速度 (m/s)	0.65	0.61	
钢绳直径 (mm)	15.5	17.0	
四、辅助卷扬			
提升能力 (kN)	15	30	
提升速度 (m/s)	0.81	0.95	
钢绳直径 (mm)	15.5	15.5	
四、排渣系统			
6PS-210 型砂石泵组			
流量 (m ³ /h)	180	210	
扬程 (m)		16	
吸程 (m)		8	
砂石泵电机 (kW)		30	
3PNL 泵流量 (m ³ /h)		108	
配用电机 (kW)		22	
配用钻杆内径 (mm)		150	
质量 (kg)		1600	
外形尺寸 (mm)		1750×1400×1010	
六、泥浆净化机	JHB-100	JHB-200	
上层筛网除泥沙 (t/h)		1.8~2.2 (200 目)	
下层筛网处理泥浆		150~200(μm)	
总功率 (kW)		17.2	
质量 (kg)		2450	
外形尺寸 (mm)		3178×1753×3200	
七、钻头			
形式	套筒阶梯式、双层弧式、双反弧式		冲击, 刮刀, 滚刀
直径 (mm)	600~1500		≤1500, ≤1500, ≤2000,
质量 (t)	1.2~3.0		2.94

CZF/200 冲击式反循环钻机造孔平均工效见表 19。

表 19 CZF-1200 型冲击式反循环钻机造孔平均工效

试验或施工地点	地层	桩（槽）孔尺寸（m）	深度（m）	纯钻效率（m/台日）	平均工效（m/台日）
河南小浪底	粉细砂、漂卵石、砂石	0.8×6.8 槽孔	68.0	10.02	6.38
三峡一期围堰	风化砂、粉细砂、块球体、花岗岩	0.8×（4.8~6.8）槽孔	平均 32.0	11.52	7.06
		φ0.8 主孔和 φ1.2 副孔各一个	22.0	15.96	11.23
四川冷勒水电站	粉质壤土、黏土、钙质胶结砾岩	φ1.0 孔	101.4	6.54	4.09
		1×5.4 槽孔	100.0	6.21	2.22
三峡羊家湾码头水上沉桩	粉细砂、砾夹块石、斜长花岗岩	φ0.8 桩孔	15.0	26.1	24.15
昆明新茶花宾馆联锁支护墙	人工填土、黏土碎石土、黏性土夹粉沙	0.9 墙厚	24.5	45.2	20.0
北京地铁（东单、王府井段）灌注桩	砂卵石、亚黏土、细沙	φ1.25 桩孔	28.5	14.7	6.33

(3) 回转式钻机

使用回转式钻机在我国建造防渗墙的实例不多。浙江横山水库、内蒙古察尔森水库等工程采用回转式钻机进行防渗墙造孔的工效见表 20。

表 20 回转式钻机造孔工效

工程名称	地层	钻机型号	使用钻头类型	深度（m）	平均工效（m/台日）
浙江横山水库防渗墙	黏土心墙	GPS 回转正循环	加重导向刮刀	72	36.00
内蒙古察尔森水库防渗墙	砂卵石层	ZWY—550 回转反循环	三翼式刮刀	20	28.15

(4) 抓斗挖槽机

抓斗挖槽机（简称抓斗）适用的地形比较广泛，除大块的漂卵石、基岩以外，一般的覆盖层均可。不过当地层的标准贯入度 N 值大于 40 时，使用抓斗的效率很低。对含有大漂石的地层，需配合采用重锤冲击才可完成钻进。

抓斗挖槽也用泥浆护壁，但泥浆不再有悬浮钻渣的功能，用量较少。

抓斗结构比较简单，易于操作维修，运转费用较低，在较软弱的冲击层中造墙被广泛应用。各种抓斗可挖掘宽度为 30~150cm，最大深度可达 130m。

部分抓斗的技术参数见表 21。

(5) 槽孔掘进机

槽孔掘进机（Trench Cutters，曾用名碾磨机、液压铣槽机、双轮铣）是 1973 年由法国索列丹斯公司首先研制成功的，现在法国、德国、意大利和日本等国家都有生产。我国于 1996 年首次引进了一台槽孔挖掘机用于三峡工程二期围堰防渗墙施工。这种机械适用于均质地层，包括比较坚硬的岩层，但不适用于漂卵石地层或疏松层内夹有大块石（卵石）的地层。

主要技术规格性能见表 22。

表 21 钢绳抓斗的技术参数

型号	意大利 DH3000 型				国产 BSD 型			国产 GSD 型			
成槽宽度 (cm)	60	80	100	120	30	40	50	60	80	100	120
开斗宽度 (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
闭斗宽度 (m)	7.3	7.3	7.3	7.3	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2
斗容量 (m^3)	1.0	1.2	1.6	2.0	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5
斗自重 (t)	11.0	11.4	11.8		7.5	8.0	8.5	11.0	11.6	12.2	
		12.2							12.8		
挖掘深度 (m)	100	100	100	100	60	60	60	100	100	100	100

表 22 BC30 型槽孔掘进机的主要技术性能

项目	指标	项目	指标	项目	指标
A. 起重机		B. 掘进头		C. 液压站	
起重机型号	BS110	钻铤深度 (m)	80	液压站型号	H7475
发动机型号 (水冷型卡特彼勒)	3176B	铤槽长度 (mm)	2790	主液压泵流量 (L/min)	170/143
		铤槽宽度 (mm)	640~2200		
功率 (kW)	297	掘进头高度 (m)	15.4	最大工作压力 (MPa)	30
主卷扬 (kW)	160	最大扭矩 (kN.m)	81	功率 (kW)	235
提升速度 (单绳) (m/min)	0~60	铤轮转速 (r/min)	0~25	质量 (t)	8.9
		导向装置	有		
钢绳直径 (mm)	26	砂石泵口径 (mm)	152.4		
掘进机总高 (m)	24	砂石泵流量 (m^3/s)	450		
起重机自重 (t)	100	掘进头自重 (t)	35		

(6) 其他钻孔机械

为了适应堤防防渗工程的需要,近年来我国开发了多种施工浅槽孔薄防渗墙的钻孔机械。

① 射水成槽机

该机以高压射水冲击破坏土体,土渣和水混合回流溢出地面,或反循环抽出,经矩形成槽箱修整后形成槽孔。造孔过程中采用自然泥浆固壁,成槽后用直升导

管法浇注混凝土成墙。射水成槽机主要由正反循环泵组、成型器和拌合浇注机组组成。各厂家产品的技术性能略有不同，表 23 所示为 CSF30 型射水成槽机主要技术性能。该机主要适用于粒径不大于 10cm 的细颗粒地层，其成墙深度不超过 30m、厚度不超过 0.5m、垂直偏差小于 1/300。一般工效为 100~120m²/台日，高峰时可达 150~200 m²/台日。

表 23 射水成槽机主要技术性能

项	目	型 号	性 能 指 标
泵 组	灰渣泵	4PH60	180~288m ³ /h
	砂石泵	6BS	180 m ³ /h
	质 量		1.1~1.7t
	宽 度		18~45cm
	长 度		200cm
成 型 器	主 卷 扬	JK25	5.0t
	副 卷 扬	JK0.5	0.5t
	电动葫芦	CD ₁ 3—6	3.0t
混 凝 土 搅 拌 机		JZM350	8~12 m ³ /h
整 机	冲击行程		1.5m
	冲击频率		10~30 次/min
	造孔深度		30m
	功 率		165kW
	尺 寸		13.5m×4.2m×7.5m
	质 量		16t

② 锯槽机

锯槽机是通过钢管的上下往复运动，以锯齿克取土体，形成连续的沟槽，再浇注墙体材料成墙，技术性能见表 24。该种机械适宜于含少量砾石，最大粒径不大于 80mm、标贯击数 N 不大于 30 的地层，以及对墙底高程无严格要求的悬挂式帷幕。当槽底有起伏不平的岩面、陡坡时，施工难度大。

表 24 锯槽机技术性能

项 目	性能参数	项 目	性能参数	项 目	性能参数
锯槽宽度 (mm)	200~500	起吊能力 (kN)	180	发电机组 (kW)	200
锯槽深度 (m)	5~50	轨距 (mm)	2500	外 形 尺寸 (m)	6.0×2.0×3.0 (运输)
行程 (mm)	650, 750	切削驱动电机	Y280S-4		
反循环泵 6BS	180 (m ³ /h)	功率 (kW)	75	整机质量 (t)	22
扬程 (m)	12	转速 (r/min)	1500		

③ 链斗式挖槽机

悬臂式链斗挖槽机是通过串联的链条及链条上的链斗，对地层进行连续挖掘和排出钻渣，形成沟槽。挖掘好的沟槽中可以浇注混凝土或其他墙体材料，也可以铺设土工膜。

该设备适于在砂壤土中施工，土层中夹杂的卵石粒径应小于 130mm。其最

大挖掘深度 12m，槽宽 0.15~0.30m。挖掘的槽孔宽度一致，连续性好，工效高，平均工效 450~600m²/d。

4、护壁泥浆

泥浆是黏土颗粒分散在水中的悬浮液。用于稳定孔壁或槽壁的泥浆叫护壁泥浆，它是混凝土防渗墙施工不可缺少的介质材料。

护壁泥浆一般由水、黏土及化学处理剂组成。泥浆用水有淡水和矿化水，不同的水配成的泥浆具有不同的性能。黏土是泥浆中的主要固相成分，其颗粒粒径大多数小于 0.005mm，它具有带电、吸附离子、水化膨胀以及分散或絮凝等性能。常用的膨润土是一种以蒙脱石为主要矿物成分的特殊黏土，它的制浆性能优于其他黏土。加入化学处理剂的目的，是为了改善泥浆的性能，以满足不同工艺的要求。有时为了提高泥浆的比重或防漏失能力，在泥浆中加入重晶石粉、石灰石粉、方铅矿粉、纤维等惰性材料。

基础工程使用泥浆源于地质钻探和石油钻井采用泥浆，故广义的泥浆也称冲洗液，它包括聚合物泥浆、乳化泥浆、植物胶泥浆等特殊泥浆。防渗墙施工用的泥浆与地质钻探和石油钻井用的泥浆在作用、性能要求及使用条件等方面均不完全相同，特殊泥浆较少使用。

护壁泥浆有普通黏土泥浆、膨润土泥浆和混合泥浆三类，表 25 列出了普通黏土泥浆和膨润土泥浆的特性比较。

表 25 普通黏土泥浆与膨润土泥浆特性比较表

项目/类型	普通黏土泥浆	膨润土泥浆	备注
密度（比重） （g/cm ³ ）	1.15~1.25,较大	1.03~1.10, 较小	
浓度（%）	32~45, 较大	4~12, 较小	100mL 水中含土量 （g）
含沙量（%）	≤5, 较大	≤1, 较小	
漏斗黏度（s）	30~60	30~60	946/1500mL 漏斗
造浆率（m ³ /t）	2.6~3.5, 较小	7~25, 较大	
失水量 （mL/30min）	20~30, 较大	10~20,较小	
泥皮厚（mm）	2~4, 较厚	0.5~2, 较薄	
悬浮钻渣能力	较大	较小	
混凝土置换效果	较差	较好	
外 观 性 状	天然产状，有结块，含水量较大	经过加工的商品，袋装粉末，含水量较低	
制 浆	用低速叶片式搅拌机搅拌，搅拌时间长（30~45min）	用高速搅拌机搅拌，搅拌时间短（3~7min）	
使用与管理	不便循环使用，耗量大，设备维修及管理工作量大	便于循环使用，耗量小，设备维修及管理工作量小	
价格（元/m ³ ）	10~30, 较低	30~60, 较高	

膨润土泥浆的密度较小，浇筑混凝土时的置换效果较好，有利于成墙质量，同时也便于泥浆循环使用；故在采用循环出渣方式造孔或用抓斗成槽时，宜优先选用膨润土泥浆。随着施工技术的进步，膨润土泥浆的应用越来越普遍。鉴于水利水电工程经常遇到含有大粒径漂卵石和严重渗漏地层的情况，以及各施工单位的现有装备水平，黏土泥浆仍然具有一定的实用价值，不会被完全淘汰。黏土泥浆的密度较大，悬浮钻渣和封堵防塌的能力较强；且料源广，成本廉价。使用常规冲击钻井（抽砂筒出渣）在含有漂卵石的地层中造孔时，以选用普通黏土泥浆或混合泥浆。为避免密度和黏度过大对混凝土浇筑质量的不利影响，在浇筑前清孔时可换入密度和黏度较小的泥浆。

按泥浆中黏土颗粒含量的多少，护壁泥浆还可分为高固相、低固相和无固相三类泥浆。低固相泥浆是指黏土颗粒含量小于 10% 的泥浆，膨润土泥浆一般在此范围内。无固相的聚合物泥浆在水利水电工程混凝土防渗墙施工中较少使用。

用于混凝土防渗墙施工的护壁泥浆应具备以下基本性质：

（1）良好的物理稳定性。泥浆在静置一段时间后，其中的黏土颗粒不会在重力的作用下析水、沉淀的性质，是对护壁泥浆最基本的要求。泥浆表面的析水量越少，其稳定性越好。析水量大的泥浆是没有护壁作用的。

（2）良好的化学稳定性。泥浆在使用的过程中，环境中的阳离子等会使泥浆的性质逐渐发生变化，即从悬浮分散状态向凝集状态转化。这种影响发展到一定的程度，泥浆就会脱水絮凝，失去护壁作用。泥浆抵抗化学侵蚀的能力越强，重复使用的时间越长，则其化学稳定性越好。

（3）适当的密度（比重）。泥浆的密度大有利于孔壁稳定和悬浮钻渣；但不利于混凝土浇筑质量，并要求有较大的泵送能力，动力和材料消耗较多。泥浆的密度应根据地质条件、施工阶段和施工经验确定，不宜过大或过小。松散易塌地层和造孔阶段宜使用密度较大的泥浆；密实稳定地层和清孔时宜使用密度较小的泥浆。

（4）适当的黏度。黏度是流体内部阻碍其相对流动的一种特性。黏度的作用和影响与密度类似，两者关系密切，一般同类泥浆的黏度随密度的加大而加大。黏度大则护壁、防渗、堵漏以及悬浮、钻渣的能力强，过大则输送和混凝土置换困难。

（5）良好的流变性。流变性是指泥浆、水泥浆等塑性流体搅拌后变稀（静切力降低），静置后变稠（静切力升高）的特性。触变性好的泥浆，在静止时有较强的护壁能力，在流动时泵送阻力较小，有利于孔壁稳定和提高施工效率。

（6）较好的滤失性。在孔内泥浆向周围地层渗漏的过程中，相同体积的泥浆在相同的压力差作用下，经过相同的时间，失水量较小且形成的泥皮薄而致密，则其滤失性较好。膨润土泥浆的滤失性一般要优于普通黏土泥浆。

（7）较小的含砂量。砂是泥浆中的惰性有害物质。含砂量高会给泥浆性能和成墙质量带来多种不利的影响，故必须将泥浆的含砂量控制在一定的范围内。

护壁泥浆控制性能见表 26，表 27。

表 26 黏土泥浆性能表

项目	新制泥浆		造孔时 孔内泥浆	清孔 用浆	混凝土 浇筑前 孔底泥浆	备注
	一般地层	松散地层				
相对密度	1.15~1.20	1.20~1.25	≤1.30	≤1.20	≤1.3	1002 型比重称
漏斗黏度 (s)	18~28	25~35	20~35	18~23	18~30	500/700mL 漏斗
含砂量 (%)	≤5	≤5	≤8	≤5	≤10	
胶体率 (%)	≥96	≥96	≥95	≥96	——	
稳定性	≤0.03	≤0.03	≤0.04	≤0.03	——	上、下比重差
失水量 (mL/30min)	<30	<30	<50	<30	——	1009 型失水仪
泥饼厚 (mm)	≤4	≤4	≤6	≤4	——	1009 型失水仪
10min 静切力 (Pa)	2.0~5.0	4.0~10.0	2.5~12.0	1.5~4.0	——	旋转黏度剂
pH 值	7~9	7~9	7~9	7~11	——	

表 27 膨润土泥浆性能指标

项目	新制泥浆		造孔时 孔内泥浆	清孔 用浆	混凝土 浇筑前 孔底泥浆	备注
	一般地层	松散地层				
相对密度	1.03~1.07	1.06~1.10	≤1.25	≤1.05	≤1.15	1002 型比重称
漏斗黏度 (s)	32~50	45~60	32~60	32~38	32~50	946/1500mL 漏斗
含砂量 (%)	≤1	≤1	≤1	≤1	≤6	
胶体率 (%)	≥98	≥98	≥95	≥98	——	
稳定性	≤0.01	≤0.01	≤0.02	≤0.01	——	上、下比重差
失水量 (mL/30min)	<30	<30	<50	<30	——	ZNS 型失水仪
泥饼厚 (mm)	≤3	≤3	≤5	≤3	——	ZNS 型失水仪
塑性黏度 (cP)	8~20	16~30	≤40	8~20	——	旋转黏度计
10min 静切力 (Pa)	1.0~4.0	3.0~8.0	1.5~10.0	1.0~3.0	——	旋转黏度计
pH 值	7.5~11	7.5~11	7.5~11	7.5~11	——	

制浆粘土的选择应根据工程具体条件, 进行经济技术比较后确定, 选择粘土的指标参数表 28 (下页)。选择膨润土的评价指标参考表 29 (下页)。

表 28 造浆黏土的性能参考指标

性能	物 理 性 能								造浆性能	
	单位	塑性 指数	塑限 (%)	吸水量 (%)	膨胀率 倍	颗粒组成(mm)			造浆率 m ³ /t	失水量 ml/30min
						>0.1	<0.005	<0.001		
指标	数值	≥20	<12	>150	>3	(%)	(%)	(%)	>3	<30
	数值	≥20	<12	>150	>3	<5	>45	>20	>3	<30
性能	矿 物 成 分				化 学 性 质					
	优	良			主要化学成分					
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	SiO ₃ /Al ₂ O ₃	PH 值
指标	单位	蒙脱石多 于伊里石 和高岭土		伊里石高于 高岭土	(%)	(%)	(%)	(%)		
	数值				>50	<30	少量	少量	3~4	>7

表 29 造浆膨润土的评价指标

评价项目	指标要求	钠膨润土	优质钙膨润土	一般钙膨润土
物理化学性能	蒙脱石含量(%)	>65	>65	>65
	胶质价(%)	95~100	50~70	50~70
	湿胀度 ml/g	>8	3~5	3~5
离子含量(mmol/100g 土)	阳离子交换容量	>70	>70	>70
	盐基总量 B	>70	>70	>70
造浆性能	造浆率(m ³ /t)	>16	10~16	6~10
	API 失水量(ml/30min)	≤15	≤17	≤22
加工要求	含水量(%)	≤10	≤10	≤12
	筛余量(200 目)(%)	≤4	≤4	≤4
	干筛分析(100 目)(%)	>98	>98	>98

在进行泥浆的配合比试验之前,须根据地质条件确定所需的泥浆黏度,以确定泥浆的基本配合比.易坍塌的地基应选择较高的黏度,但是很少有单一的土质构成的地层;对于复合地基,应以最容易坍塌的土层为主确定泥浆的性能和配合比.孔壁的稳定性与地基土的种类、密实程度及地下水位的高低有关.当地基土的颗粒较粗、密实度较低,且地下水位较高时,容易发生塌孔事故.不同的地基条件下孔壁坍塌的可能性大小和泥浆黏度的经验值见表 30 (见下页)。

(四) 墙体材料

防渗墙的墙体材料多种多样,性能各异.不同种类的墙体材料有不同的性能适用范围,其材料组成\施工方法以及造价也各不相同,应根据具体用途和工程条件选择墙体材料.墙体材料各项性能指标之间的匹配应该合理,否则在施工中难以兼顾各项性能要求,既造成资源浪费,也不利于工程质量评定.各种墙体材料性能的一般适用范围见表 31 (见下页)。

表 30 不同地基条件下孔壁坍塌的可能性和需要的泥浆黏度

土质	孔壁坍塌可能性/泥浆粘度(s)					
	地下水位低(埋深 $h \geq 5m$)			地下水位高(埋深 $h < 5m$)		
	密实 $N > 30$	稍密或中密 $10 < N \leq 30$	松软或漏失 $N \leq 10$	密实 $N > 30$	稍密或中密 $10 < N \leq 30$	松软或漏失 $N \leq 10$
黏土	无/17~19	无/18~21	略有/22~24	无/18~20	无/19~22	略有/23~25
粉土	无/18~21	略有/21~23	有/25~27	无/19~21	略有/23~25	有/25~27
细砂	略有/22~24	略有/22~24	有/25~27	略有/22~24	有/25~27	略大/27~29
中粗砂	略有/23~25	有/24~26	略大/27~29	略有/23~25	有/21~23	大/21~23
沙砾石	略有/23~25	有/25~26	大/29~31	有/21~23	略大/27~29	大/21~23
沙卵石	有/25~27	略有/21~23	大/30~32	略大/21~23	大/29~31	很大/32~34
漂卵石	有/25~27	略有/21~23	很大/32~34	大/29~31	很大/31~33	很大/33~35

注：表中泥浆粘度值为 500/700ml 漏斗黏度计测值。

(1) 普通混凝土

防渗墙用普通混凝土是指胶凝材料除水泥外,原则上不加掺和料的高流动性混凝土。

配置这种混凝土的水泥用量一般不小于 350kg/m^3 ,水灰比不宜大于 0.6.不小于 40%为宜.随着技术的发展,为节约水泥或者改善混凝土的性能,现在也有在普通混凝土中加入粉煤灰等活性掺和料的。普通混凝土经常用在除防渗以外还兼有挡土、承重等作用的防渗墙工程上。表 31 为我国若干普通混凝土防渗墙工程实例。

表 31 防渗墙墙体材料性能的一般适用范围

墙体材料 种类	塌落 度 (cm)	扩散 度 (cm)	抗压 强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)	抗渗 等级	渗透系数 (cm/s)	允许 渗透 坡降	密度 (t/m^3)
普通混凝土	18~22	34~40			$\geq W_6$	$\leq 4.19 \times 10^{-9}$	150~200	2.4~2.5
黏土混凝土	18~22	34~40	7~12	12000~20000	$\geq W_4$	$\leq 7.8^{-9}$	80~150	2.3~2.4
塑性混凝土	18~22	34~40	18~22	300~2000		22000~31500	50~80	2.1~2.3
固化灰浆	—	0.3~1.0	—	50~200	—	$n \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-8}$	30~50	1.4~1.7
自凝灰浆	—	0.1~0.5	—	20~150	—	$n \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-7}$	20~30	1.3~1.4

(2) 黏土混凝土

为降低弹性模量,在胶凝材料中掺用了一定数量黏土的高流动性混凝土叫黏土混凝土。黏土的掺量一般为水泥和黏土总量的 20%左右,最多不大于 25%。黏土混凝土的早期强度较低,后期强度增长较多,通常 180d 强度可达到 28d 强度的 1.5 倍。黏土混凝土拌和物具有良好的和易性。

配置黏土混凝土的水泥用量不宜小于 350kg/m^3 , 水灰比不宜大于 0.65, 砂率不宜小于 36%。一般要求所掺黏土的塑性指数不小于 17, 黏粒含量不低于 40%, 含砂量小于 5%, 有机物含量小于 3%。黏土混凝土对砂石料的含泥量要求可适当放宽, 砂的含泥量不大于 8% 即可。

表 32 国内部分防渗墙工程普通混凝土基本配合比及性能

工程名称	坝高 (m)	防渗墙深度 (m)	混凝土配合比 (kg/m ³)							抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	抗渗等级	完工年份
			水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	水	钢筋				
四川映秀湾水电站	17.0	14.9	368		565	534	534	254	有	15.5~20.0	19.0	W8	1966
贵州窄巷子水电站	39.5	28.3	336		742	1067		235	有	16.9	28.5	W9	1967
四川渔子溪电站	27.8	32.0	410		764	401	602	221		20.0		W8	1969
葛洲坝二期上游围堰	I 墙 II 墙	47.0	47.5		350	950	900	200		30.1	30.8	W8	1982
					245	105	900	900	212	20.3	26.6		
河北岳城水库防冲墙	32.5	15.3	305		671	1200		184	有	20.0			1989
河南小浪底主坝	154	81.9	400		904	905		180	有	35.0	30.0	W8	1994

我国已修建的防渗墙中约有 76% 的工程用的是黏土混凝土。表 33 列出了密云水库等若干防渗墙工程所用的黏土混凝土的配合比及性能指标。

表 33 国内部分防渗墙工程黏土混凝土基本配合比及性能表

工程名称	坝高 (m)	防渗墙深度 (m)	混凝土配合比 (kg/m ³)						抗压强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)	抗渗等级	完工年份
			水泥	黏土	砂	小石	中石	水				
北京密云水库	66.0	44.0	375	57	580	1075		240	10.0	20.0	W8	1960
云南毛村电站	80.5	40.0	378	94.5	534	1083		260	8.5~11.0	21.4	W8	1962
金川峡坝体加固	21.0	38.0	330	80	605	1100		240	8.0~11.9		W8	1966
北京十三陵水库	29.0	60.0	320	80	595	1028		260	8.0~10.0	17.0	W8	1970

(续表 33)

甘肃碧口 电站宽墙	101. 0	37.8	366	92	566	922		274	11.12	22.0	W8	1971
甘肃碧口 电站深墙	101. 0	65.5	246	105	670	600	490	229	9.52	16.0	W6	1973
广西澄碧 水库	70.0	55.2	310	55	580	545	545	250	10.0	24	W8	1974
葛洲坝 一期纵向 围堰		30.0	230	98	613	1245		213	10.0~ 11.8	21.5	W4	1976
江西拓林 水库	63.5	61.2	294	73	599	649	433	235	9.0~ 10.0	15.0	W8	1977
河北邱庄 水库	24.5	58.7	400	59	518	1000		247	8.95	16.0	W6	1983
浙江牛头 山水库	49.3	62.0	322	80	630	567	378	233	11.9	16.0	W8	1984
云南松花 坝水库	62.0	53.2	351	88	598	414	622	250	13.1	26.3	W8	1990
云南瑞丽 姐勒水库	40.0	49.0	342	85	499	594	396	265	10.36	13.9	W6 ~W 8	1993
山东太河 水库	48.5	51.9	245	95	696	516	516	234	10.0	15.0	W8	1997
河北黄壁 庄水库	30.7	60.0	318	粉煤 灰 51 膨润 土 31	657	492	492	237	10.0	17.5	W8	2002

(3) 塑性混凝土

以黏土、膨润土等混合材料取代普通混凝土中大部分水泥的低强度、低变形模量和大极限变形的高流动性水下浇筑混凝土，称塑性混凝土。

塑性混凝土拌合物的密度一般为 $2100 \sim 2300 \text{ kg/m}^3$ ，泌水率不超过 3%，和易性很好，坍落度和扩散度随时间的增加而减少，但在 3h 内变化不大，初凝 8h 左右，终凝 48h 左右。

塑性混凝土抗压强度的设计值一般不大于 5MPa，早期强度增长较慢，后期增长速率较高，通常 60d 和 180d 强度可达 28 天强度的 1.5 倍和 1.8 倍；其抗拉强度一般为抗压强度的 $1/12 \sim 1/7$ 。塑性混凝土的变形模量一般不超过 2000MPa，与抗压强度基本呈线性关系；其无侧限极限应变可达到 0.33% ~ 0.70%（普通混凝土的极限应变为 0.08% ~ 0.3%）；其破坏渗透比降可达 300 以上；其渗透系数随时间的增加而降低。

塑性混凝土的水泥用量为 $80 \sim 200 \text{ kg/m}^3$ ，膨润土的用量不宜小于 40 kg/m^3 ，胶凝材料总用量（包括土料、粉煤灰等）不宜小于 240 kg/m^3 ，砂率不宜小于 45%；宜采用一级配骨料，当采用二级配骨料时，小石与中石的用量比不宜小于 1.0。评价塑性混凝土配合比设计的标准是：在强度一定的条件下，弹性模量与抗压强度的比值（弹强比）大小，比值越小越好。塑性混凝土的弹强比一般为 200 ~ 400，

大大低于普通混凝土。

国内外若干混凝土防渗墙工程的有关情况见表 34。

表 34 国内外部分混凝土防渗墙工程塑性混凝土基本配合比及性能表

工程名称		坝高 (m)	防渗墙 深度 (m)	混凝土配合比 (kg/m ³)						抗压 强度 R28 (MPa)	弹性 模量 (MPa)	渗透 系数 (10 ⁻⁷ cm/s)	完工 年份
				水 泥	黏 土	膨 润 土	砂	卵 石	水				
国 外	巴尔德赫 坝 (英)	48.0	46.4	200		41.7	1425		333.3		27~826	0.6~ 2.0	1968
	坎文托· 维约坝 (智利)	37.0	55.0	82	75	25	850	850	300	0.50	75.0	31.0	1977
	孔本托· 别霍坝 (智利)		55.0	84	92	8	1740		320	0.4~ 0.6	300~600	10 ~ 30	1977
	维尔尼坝 (法)	40.0	50.0	47.7	117	11	994	662	312	1.2~ 1.3	200~ 300	0.1 ~ 10	1977
	科尔文坝 (智利)	116.0	68.0	75	121	19	1483		423	1.40	320~ 650		1982
	只见坝 (日)	24.0	20.0	125	—	25	792	928	279	2.10	500	4.40	1982
	佛朗西斯 科坝 (西班牙)	88.0	40.0	150		40	1170	700	372	2.0~ 3.0	100.0	10.00	1987
	布龙巴赫 (德国)	39.0		100	160	石粉 160	750	450	400				1993
国 内	福建水口 电站 主围堰	44.5	44.0	170	85	40	748	888	275	4.58	823.2	0.06	
	册田水库 (副坝)	41.5	33.0	80	140	50	700	740	370	1.20	379	0.20	1990
	十三陵抽 水蓄 能电站尾 水围堰	20.0	31.6	120	240	40	770	630	360	2.32	560	7.00	1990
	小浪底上 游围堰	60.0	73.4	150	80	40	760	910	230	3.80	221.6	0.30	
	山东太河 水库	48.5	51.9	95	195		829	899	238	1.60	400~500	2.00	1994
	岭澳核电 站防波堤		24.0	125		125	886	725	310	2.10	250 ~500	0.10	1997

(续表 34)

国内	三峡二期上游围堰	82.5	73.5	180	粉煤灰 80	100	1341	72	282	5.19	1032.7	0.76	1998
	三峡二期下游围堰	65.5	68.0	200		40	850	750	260	4~5	500~700	0.10	1998
	广东英德市防洪堤	10.8	13.0	158		84	916	800	242	5.10	566.4	0.042	1998
	高坝洲电站一期围堰		10.0	210	128		1300		378	2.61	302.5	0.44	1999
	武汉长江干堤鹦鹉堰		15.0	100	110	20	1670		300	2.00	1000	1.00	2001

(4) 自凝灰浆和固化灰浆

自凝灰浆和固化灰浆都是以护壁泥浆为基本浆材，在泥浆中加入水泥等固化材料后凝固而成防渗墙墙体材料。所不同的是，自凝灰浆在制浆时就加入了固化材料和缓凝剂，在造孔挖槽时它起护壁作用，在造孔结束后的一定时间内自行凝固成墙；而固化灰浆是在单槽造孔结束后才在护壁泥浆中加入固化材料。为了不影响造孔，对自凝灰浆的稠度有所限制，因此其密度和强度也相对较小。自凝灰浆和固化灰浆具有水泥土的性质。使用自凝灰浆和固化灰浆作为防渗墙墙体材料，省去或简化了浇筑工序，具有泥浆废弃少、墙段连接施工简便、接缝质量高、造价较低、便于拆除等优点。

①自凝灰浆

自凝灰浆凝固后的无侧限抗压强度为 0.2~0.5MPa。当灰水比为 0.2~0.4 时，变形模量为 40~150MPa，无侧限极限应变为 0.6%~1.0%，当侧限压力为 0.1~0.3MPa 时，极限应变为 3%~5%，这与土层和砂砾石层十分接近。自凝灰浆的渗透系数为 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ ，破坏渗透比降大于 200。

自凝灰浆在低水头堤、坝基础防渗工程和临时围堰防渗工程中应用较多。国外使用该种材料的最大墙深已达 50m。

自凝灰浆还可用于配合装配式钢筋混凝土防渗墙和钢板桩防渗墙施工。即在槽孔完成后插入预制的墙板或钢板桩，墙板或钢板桩与槽壁之间的空隙由自凝灰浆所充填，使预制墙板或钢板桩与地层紧密连接，预制墙板或钢板桩之间的接缝防渗也由自凝灰浆承担。

1985 年，在深圳大亚湾核电站，由法国地基公司施工，做成了我国第一道自凝灰浆防渗墙。该墙长约 1004m，平均深度 12.5 m，最大深度 16 m，墙厚 0.8 m。自凝灰浆的 28d 抗压强度不低于 0.2MPa，渗透系数为 $n \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 。

2002 年 11 月，自凝灰浆防渗墙成功地应用于三峡三期围堰防渗工程中。该段墙长 144.51m，最大深度 26.1 m，墙厚 0.8 m，其配合比见表 35。

表 35 三峡三期围堰自凝灰浆防渗墙的配合比

灰水比	水泥 (kg)	膨润土 (kg)	水 (kg)	缓凝剂 (kg)	分散剂 (kg)
0.26	236	45	907	0.7~0.9	1.8
0.28	236~254	45	900~907	0.7~0.9	1.8

其中：自凝灰浆的 28d 抗压强度为 0.42~0.47MPa，弹性模量为 83~231MPa，渗透系数为 $(2.39\sim 9.22)\times 10^{-7}\text{cm/s}$ ，允许渗透比降大于 40。

② 固化灰浆

固化灰浆是在槽段造孔完毕后，向泥浆中加入水泥等固化材料，砂子、粉煤灰等掺合料、水玻璃等外加剂，经机械搅拌或压缩空气搅拌后形成的固结体。

泥浆固化工艺有原位搅拌法和置换法。当采用原位搅拌法时，固化灰浆的密度宜为 $1.3\sim 1.5\text{g/cm}^3$ ，当采用置换法时，固化灰浆的密度不宜小于 1.7g/cm^3 。

配置固化灰浆的泥浆，其黏度为 25~45s(500/700mL 漏斗黏度)，其密度应根据固化灰浆的配合比控制。固化灰浆单位体积的水泥用量不宜少于 200kg/m^3 ，新拌混合浆液失去流动性的时间不宜少于 5h，固化时间不宜大于 24h。

某工程用原位搅拌法施工的固化灰浆配合比见表 36；置换法施工的固化灰浆配合比见表 37。固化灰浆物理力学性能见表 38。

表 36 原位搅拌法固化灰浆配合比

kg/m^3

护壁泥浆	水泥	水	水玻璃	粉煤灰	砂	外加剂	泥浆 L	备注
黏土浆	200	80.3	35	27	143	0.54	770	泥浆密度 1.25g/cm^3
膨润土浆	250	90.0	36	30	160	0.60	760	泥浆密度 1.15g/cm^3

表 37 置换法固化灰浆配合比

kg/m^3

水泥	黏土	水	粉煤灰	砂	外加剂
200~250	60~200	400~600	40~60	500~800	适量

表 38 固化灰浆物理力学性能

固化灰浆类型	密度 (g/m^3)	抗压强度 R_{28} (MPa)	弹性模量 E_{28} (MPa)	变形模量 E_1 (MPa)	渗透系数 K_{28} (cm/s)	抗剪强度	
						c (MPa)	ϕ (°)
黏土浆	1.4~1.7	0.5~1.0	80~500	50~200	$10^{-7}\sim 10^{-8}$	0.12~0.21	30~40
膨润土浆	1.3~1.4	0.3~0.5	50~100	30~80	$10^{-6}\sim 10^{-7}$	0.08~0.17	20~30

(五) 常见造孔事故的预防及处理

防渗墙造孔施工中常见的故障有导墙变形或破坏、槽墙坍塌、漏浆、孔斜、挖槽机具卡在槽内等。常见造孔事故的原因、预防措施及处理措施见表 39。

表 39 常见造孔事故的原因、预防措施及处理措施

事故类型	主要原因	预防措施	处理措施
导墙变形破坏	<ol style="list-style-type: none"> 1. 导墙的强度或刚度不足。 2. 导墙的底部发生坍塌或受到淘刷破坏。 3. 作用于导墙的荷载过大。 4. 导墙没有设置支撑或支撑受到破坏。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 根据地基土的性质及导墙的荷载大小、作用方式等，作好导墙的设计和施工作业。 2. 对导墙地基进行加固处理。 3. 在布置施工机械时，要使作用在导墙上的荷载分散在作用地面上。 4. 要避免施工机具冲撞导墙。 5. 导墙的支撑必须完整，并具有足够的强度。 	<p>当导墙变形不大且尚未断裂时，可采取加强顶撑、减小荷载、用钢梁加固。用塑性混凝土等低强度材料封堵导墙底部等措施处理。</p> <p>当导墙变形过大或已断裂时，一般应回填槽孔，将已变形、破坏部位的导墙拆除，重新建造导墙。当槽孔深度较大且接近完成时发生局部导墙破坏，为减少工期和经济损失，也可不回填槽孔，不恢复破坏部位的导墙，而采用沿墙轴力方向架设大型型钢的方法继续施工。</p>
孔斜	<ol style="list-style-type: none"> 1. 造设备安装不当，固定不稳。 2. 钻进中遇到大漂石、探头石或陡坡岩面。 3. 钻槽混凝土接头孔时混凝土强度过高。 4. 钻孔操作不当，开孔不正，放绳过多，进尺过快。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 保证施工平台的修筑质量和造孔设备的安装、施工质量。 2. 用钢丝绳冲击钻机造孔时应选择适当的钻进参数和钻头参数。 3. 冲击钻进时要开好孔，轻重适当，勤放绳、少放绳，使钻头能左右旋转。 4. 经常检查孔斜情况，发现问题及时处理。 5. 抓斗挖槽时，每抓 2—3 斗，将斗体旋转 180° 后再抓。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 孔斜超标严重时，一般需回填孔斜段后重新钻孔。回填材料可用坚硬的块石或低标号的混凝土。重新钻孔时须向与孔斜相反的方向适当移动钻孔中心，并注意轻打慢放，随时检查修孔效果，直至满足垂直度要求。 2. 对由于探头石造成的孔斜，可将探头石爆破后再修孔。 3. 利用抓斗、液压铣槽机的侧斜纠偏装置进行纠偏。
槽壁坍塌	<ol style="list-style-type: none"> 1. 槽内泥浆漏失或泥浆循环时未能及时补充泥浆，槽内泥浆液面降至安全范围一下，导致泥浆静水压力过小。 2. 泥浆性能不适应地址情况或泥浆质量差。 3. 施工平台过低，地下水位过高或地下水流速过大。 4. 地层松散、软弱，而未作处理。 5. 在处理地下障碍（如大孤石）时，所用方法不当。 6. 单元槽段过长。 7. 地表荷载过大或振动力过大。 8. 槽孔施工时间过长。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 修筑施工平台之前加密松散地基，提高其抗剪强度；特别是孔口一下 6m 以内的土体。 2. 导墙要牢固，能承受各种施工荷载，发生塌孔时导墙不会断裂。最好修建钢筋混凝土导墙。 3. 槽孔划分要因地制宜，在地层稳定性较差和渗漏量较大的部位采用较短的槽孔。 4. 采用适当的泥浆性能指标，保证泥浆的质量，防止废水流入槽内。 5. 储备足够的泥浆和堵漏材料，发生大量漏浆时，及时堵漏和补浆，避免槽内浆面下降过多。 6. 孔内爆破的装药量适当，孔深较小时不得进行孔内爆破。 7. 孔口至少高于地下水位 2m。 8. 当孔口可能被淹时，用黏土回填槽孔，暂停施工。未完成的槽孔长时间搁置时，亦应回填黏土。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 槽口坍塌且导墙断裂。孔深较小时应回填槽孔，拆除原有导墙。成槽孔深较大时，为减少损失，可沿墙轴方向铺设数根 30 号以上的型钢跨过塌坑支承枕木铁轨，使钻机能继续工作，直至槽孔完成。 2. 槽口坍塌单导墙尚未断裂。一般可采用下述方法处理： <ol style="list-style-type: none"> (1) 紧贴导墙外缘每隔 20~30cm 向下斜插钢筋或钢管，并打入塌坑形成的斜坡体内，然后用袋装土封堵塌坑下部，用混凝土封堵塌坑上部。 (2) 沿墙轴方向跨过塌坑铺设数根 16~20 号型钢支承造孔设备，减轻导墙的荷载。 (3) 孔深较小时也可回填槽孔，下部用土料或砂砾料回填，上部用低标号混凝土或固化灰浆回填；然后重新开孔。 3. 必要时重新划分槽孔，缩短槽孔长度。

(续表 39)

漏浆	<ol style="list-style-type: none"> 1. 地层较松散, 砂砾石、大漂石等地层中存在架空现象。 2. 基岩中存在溶洞、溶槽、断层、裂隙等渗漏通道。 3. 坝体填筑质量不好, 存在渗漏通道。 4. 坝基中存在长期渗漏、管涌造成的集中渗漏通道。 5. 泥浆的防渗性能差, 质量不好。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 对槽孔两侧一定深度内的土体进行振冲加密。 2. 在槽孔两侧预先进行高压喷射注浆或水泥灌浆。 3. 使用防渗性能良好、黏度较大的固壁泥浆。 4. 在松散、漏失地层中钻进, 应随时向孔内投入适量黏土并少抽砂, 以增加孔底泥浆的稠度。 5. 漏失地层中单槽的主孔未打完时不得劈打副孔。 6. 必要时在泥浆中加入防漏失材料。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 发生大量漏浆时应立即起钻, 中断造孔, 迅速向槽孔内补充泥浆, 保持浆面高度不低于导墙底部。 2. 在泥浆中掺入膨润土、粉煤灰、锯末、棉子壳、纸屑、麻屑、人造纤维等堵漏材料。 3. 向孔底投入黏土、水泥、砂、碎石、黏土球等堵漏材料, 并钻头捣实, 将其挤入漏浆孔洞。
挖槽机具卡在槽内	<ol style="list-style-type: none"> 1. 停钻时, 钻具没有提出槽孔, 以至泥浆中的钻渣沉淀时将钻具卡住。 2. 地层中有较多的漂石和孤石。 3. 孔斜、孔曲过大, 孔形不规则。 4. 下钻时或钻进中, 上部孔壁掉落石块。 5. 钻具的形状和尺寸不符合要求, 钻头补焊不及时, 补焊的直径过大。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 停钻时须将钻具提出孔外, 至少脱离孔底 2m。 2. 及时处理孔内的漂石、孤石和探头石。 3. 钻进速度不要过快, 保持孔形垂直和圆整。 4. 下孔时要慢、稳、要避免挂落孔壁上的石块。 5. 钻具的形状和尺寸要符合要求。 6. 及时补焊钻头, 避免钻头直径变化过大。 7. 当有塌孔的迹象时, 要尽快将钻具提出孔口, 以防卡钻或埋钻。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 查明卡钻的原因, 确定适当的处理方法。避免处理不当损伤钢丝绳或钻头提梁造成掉钻。 2. 如果卡钻是由于泥浆中钻渣沉淀造成, 可用高压射水装置和空气升液法清除钻头四周的渣土。 3. 先用反冲击、下加重杆振动等简单的方法处理。 4. 如果是探头石卡钻, 可采用爆破的方法处理。 5. 如果是由于钻孔弯曲造成卡钻, 可采用直径稍大的空心钻具扩孔, 使被卡钻头脱离孔壁。 6. 在承载力许可的范围内用滑轮组增力提拉钻头。 7. 在承载力许可的范围内用千斤顶拔钻头。

(六) 常见混凝土浇筑事故的预防和处理

防渗墙混凝土浇筑是施工中最主要的工序之一。要充分做好各项准备工作, 预防事故的发生。常见混凝土浇筑事故的原因、预防措施及处理措施见表 40 (见下页)。

表 40 常见混凝土浇筑事故的原因、预防及处理

事故类型	主要原因	预防措施	处理措施
卡塞	<ol style="list-style-type: none"> 1. 导管的形状和材料不当。 2. 导管的管节受损变形过大。 3. 开浇时不先浇筑砂浆，或砂浆中含有碎石。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 采用空心橡胶球或塑料球等变形性能较好的，且能被泥浆浮起的球形导管塞。 2. 下管前认真检查导管是否受损。 3. 开浇时要先浇筑适量的砂浆，并避免砂浆中混入碎石。 	<p>如果开浇就发生堵管，可判别为卡塞。若多次提动导管混凝土仍下不去，应立即拆卸部分导管，直至取出被卡住的导管，然后重新下管。</p>
堵管	<ol style="list-style-type: none"> 1. 混凝土的配合比不当。 2. 新拌混凝土的质量不符合要求（流动性过小、严重离析，骨料超径等） 3. 混凝土的运输方法不当，造成混凝土严重离析。 4. 浇筑混凝土的方法不当，浇筑速度过慢或中断时间过长。 5. 混凝土导管内径过小，或同一根导管中采用了不同的内径的管节。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 正确设计混凝土的配合比，保证其施工性能能满足泥浆下的浇筑要求。应尽量采用同一级配的混凝土。 2. 严格控制新拌混凝土的质量，防止和易性不合格的混凝土和超径卵石进入导管。 3. 采用适当的混凝土拌制和运输方法，减少倒运环节，保证供料强度满足混凝土面上升速度的要求。 4. 做好各项组织、准备工作，确保混凝土浇筑连续进行。 5. 混凝土的导管内径应上下一致，并尽量采用内径较大的导管。 6. 混凝土的浇筑过程中应经常提动导管，特别时浇筑速度较慢时。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 分析堵管原因和部位，查对记录，确定管底位置和埋深，采取措施避免其它导管同时堵管。 2. 上下反复抖动导管，每次提升不要过高，不得猛墩导管，以防导管破裂或混凝土离析。 3. 抖动无效时，可在导管埋深许可的范围内提升导管，以增加导管内的压力，减少混凝土流出的阻力了。 4. 若仍然无效，堵管部位不深时可下钻杆捅；较深时可用压缩空气顶锥管内混凝土（事先制作带进气管的导管封头），所用压力应在导管强度允许的范围。 5. 若以上处理方法均无效，应抓紧时间取出导管重新下管。重新开浇时，管底应插入混凝土 0.5—1.0m。并用小抽筒抽出管内泥浆，并至少先注入 1.0m 砂浆。
埋管	<ol style="list-style-type: none"> 1. 导管埋深过大。 2. 提升机械状况不好，提升能力不足。 3. 浇筑速度过慢，长时间不活动导管。 4. 导管形式不好、连接法兰盘直径过大等。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 事先检修好导管提升设备，使之具有良好状态和足够的提升能力。 2. 采用阻力小的导管接头形式，减小导管接头的直径和数量。 3. 浇筑过程中勤活动，勤起拔、拆卸导管，埋深不超过 6m。 	<ol style="list-style-type: none"> 1 查对浇筑记录，确认导管埋深。 2. 暂停或降低浇筑速度，避免继续增加导管埋深。 3. 改换吊车或以千斤顶配合等措施增加起拔力。 4. 必要时也可在导管上垫上厚木板，用钻头往下轻击导管，从反方向活动导管。 5. 若上述处理方法无效，应尽快在其旁重新下一根备用导管重新开浇。具体方法与堵管处理相同。 6. 长度小于 7m 且下有 3 根导管的槽孔，当中间的导管拔不出来时，若浇筑速度较快，也可不再下管；而采取向中间适当移动其它导管，并保持适当埋深的措施。

(续表 40)

事故类型	主要原因	预防措施	处理措施
导管破裂	1. 孔深较大, 管内压力较大。 2. 导管的强度不够或制作质量不满足要求。 3. 处理堵管事故时向下墩管。 4. 各导管下料不均, 造成导管倾斜过大。	1. 按可能遇到的最不利情况设计导管。最不利的情况包括可能遇到的最大孔深, 混凝土满管及墩管时的冲击载荷。 2. 保证导管的制作质量, 特别是焊接质量。 3. 新制导管及每次开工前, 应对导管进行加压试验。 4. 下管时, 各管节的连接应牢固。如采用法兰连接, 螺栓的直径和数量应符合规定要求。 5. 提升和下放导管的动作要慢, 避免过大的冲击载荷。特别是下管和开浇时, 要注意防止管底冲击孔底基岩。	导管破裂的位置一般在底部的一、二节导管, 不易及时发现, 往往造成全槽混凝土混浆报废的严重后果。故对于深度较大的槽孔, 开浇阶段拆卸导管时, 必须严密监视管内的情况, 发现管内混凝土面过低, 漏浆等异常情况时, 应立即下放导管增加埋深, 在以后的浇筑中继续保持较大的埋深, 防止泥浆进入管内。若破裂位置较高, 则应起出破裂的导管, 重新下管。处理的关键时要及时发现事故。
导管脱出混凝土面	1. 导管下设的长度和深度与计划严重不符, 致使该导管的埋深误判, 始终是脱空浇筑。 2. 拆卸导管记录错误, 已拆的管节未记或少记, 造成以后拆管时将导管提出混凝土面。 3. 混凝土面以上堆积的沉渣和混浆混凝土过多, 难以测到真正的混凝土面, 造成混凝土面误判。 4. 拆管时操作不当, 提管过高。 5. 混凝土面测量工具不当。	1. 下设导管时记录员应始终在旁边并做记录; 每根导管下设完毕, 应接触孔底后再提起 15—25cm。 2. 各根导管拆下的管节分别堆放; 每次拆管前后, 应核对拆管记录和实际拆卸的管节。 3. 采用优质泥浆和严格控制清孔的质量, 同时还应注意防止混凝土从导管外掉进管内。 4. 由熟练人员操作钻机, 拆管时不要拆管过高。 5. 采用适当的混凝土面测量工具和测量方法。	1. 当发现导管内混凝土面过低, 或有泥浆进入管内时, 应立即下放导管, 增加管底插入深度, 直至管内情况恢复正常。为避免意外情况造成管底再次脱出混凝土面, 在以后的浇筑过程中该导管应保持较大的埋深。 2. 若应导管拔出混凝土面, 发现及时, 除管内进入泥浆外, 无其它已浇筑混凝土严重混浆的迹象, 可在下放导管的同时用小抽筒抽出管内泥浆, 然后继续浇筑。 3. 若长时间或反复处于脱管状态浇筑, 经核对浇筑记录, 槽内浇筑的混凝土已发生大范围的严重混浆, 则应果断决定停止浇筑, 尽快清除全部已浇混凝土, 重新清孔, 重新浇筑。
断墙	机械故障、浇筑事故等原因造成的浇筑中断和浇筑速度过低, 均可能导致孔内混凝土丧失流动性, 使浇筑施工不能继续进行, 发生断墙事故。	1. 做好浇筑施工的各项组织准备工作; 避免混凝土供应的中断。对混凝土的拌制、运输机械事先应进行检修, 对其可能发生的故障应有应急措施; 同时还应有备用的浇筑设备或浇筑方案。 2. 混凝土浇筑系统的布置, 设备的选择, 混凝土供应能力的确定, 必须全面考虑在最不利情况下混凝土上升速度的要求, 并留有足够的余地。 3. 混凝土的配合比试验和设计应满足泥浆下浇筑所必须的流动性和黏聚性要求, 其塌落度损失速度应控制在允许的范围内。新配合比在投入使用前应进行试拌。 4. 保证混凝土的拌制、运输和浇筑质量, 避免发生堵管、导管破裂、导管脱出混凝土面等浇筑事故。 5. 事先准备好处理各种浇筑事故的工具有措施, 并与协作单位商定好处理意外情况的配合事项, 以确保一旦发生事故能迅速处理完毕恢复正常浇筑。	1. 发生断墙事故将严重影响该墙断的完整性, 一般情况下应凿除已浇混凝土, 重新清孔, 重新浇筑。特别是当断墙位置较低时, 应果断决定返工。一般不应由断墙处接浇二次混凝土。否则以后处理断墙接缝夹层的难度和损失更大, 且难以达到预期的效果。 2. 对于临时工程和次要部位, 受工期或其它条件限制, 不宜凿除已浇混凝土时, 经监理工程师同意, 可在凿除表层混凝土并用反循环泥浆泵彻底清除沉渣后, 接浇二次混凝土。待凝 14d 后, 再对断墙接缝用静压灌浆或高压喷射灌浆的方法进行加固处理。 3. 若断墙的位置较高, 离设计终浇高程差不多, 在条件允许时, 可将孔内泥浆、沉渣及表层混凝土清除后接浇水上混凝土, 二次浇筑前须在第一次浇筑混凝土顶部开凿槽槽或镶止水带。 4. 对于重要的防渗墙工程和有钢筋笼的防渗墙工程, 发生了断墙事故又不可能返工时, 除静压灌浆和高压喷射灌浆等处理方法外, 还可采用在原墙的上游侧贴补一段墙的方法处理。

(七) 墙体质量检测

对于混凝土防渗墙成墙质量的检查,现行的方法有钻孔取芯法、超声波法和地震透视层析成像(CT)法。

1) 钻孔取芯法

钻孔取芯法是使用岩芯钻机载混凝土防渗墙体上获取试样,通过对试验的检查试验了解墙体混凝土的情况,既有无夹泥和水平冷缝、混凝土密实程度、强度、与基岩面接触情况、墙底沉渣厚度等。这种检验方法的优点是比较简单直观,缺点是钻孔及试验时间长,要求施工人员有一定的专业技术水平,成本较高,检验的结果实际上钻孔通过部分的混凝土样本的情况;另外钻孔对墙体有一定的削弱作用甚至破坏作用。

根据中国工程建设标准化委员会标准 CECS03: 1988《钻芯法检测混凝土技术规程》,钻芯法检测主要用于对试块抗压强度的测试结果有怀疑时等情况。混凝土强度等级低于 C10 的结构,不宜采用钻芯法检测。有时混凝土强度等级虽较高,但龄期较短,一般也不能钻取芯样。

宜采用内径 100mm 或 150mm 的金刚石或人造金刚石薄壁钻头钻取芯样,水工混凝土防渗墙钻芯取样时最好采用双管单洞钻具取芯。钻取的芯样直径一般不宜小于骨料最大粒径的 3 倍。芯样抗压试件的高度和直径之比应在 1~2 的范围内,芯样试件内不应含有钢筋。

对芯样试件进行抗压强度试验测得的混凝土强度可以换算成相应与测试龄期、边长为 150mm 的立方体试块的抗压强度值(即芯样试件的混凝土强度换算值)。计算公式为:

$$f_{cu}^c = \alpha \frac{4F}{pd^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中: f_{cu}^c ——芯样试件混凝土强度换算值, MPa;

F——芯样试件抗压试验测得的最大压力, N;

D——芯样试件的平均直径, mm;

α ——不同高径比的芯样试件混凝土强度换算系数,按表 41 选用。

表 41 芯样试件混凝土强度换算系数

高径比 (h/d)	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
系数 α	1.00	1.04	1.07	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.23	1.22	1.24

规程还规定,高度和直径均为 100mm 或 150mm 芯样试件的抗压强度测试值,可直接作为混凝土换算值。

综合国内外的经验,当使用钻孔取芯的方法检测墙体质量时,应当注意:

(1) 当混凝土强度低于 10MPa 时,不宜在墙体上取芯检查。

(2) 当需要对墙身取芯检查时,需按中国工程建设标准化委员会标准 CECS03: 1988 中的有关钻孔取芯的规定进行施工。

(3) 不能指望对墙体钻孔取芯试样所进行的抗压强度试验结果能够达到机口取样试样的强度指标。国内外的经验都证明, 防渗墙钻孔取芯试样的抗压强度只有机口取样的抗压强度的 50%~80%, 而且离散性很大, 钻孔取芯试样的抗压强度离差系数 C_v 值是机口取样试件 C_v 值的 3 倍, 因此要求钻孔取芯试件的抗压强度达到设计指标是不切实际的。

(4) 不应当以防渗墙钻孔取芯的抗压强度值作为评判防渗墙混凝土强度是否合格的依据, 而只能作为了解混凝土防渗墙整体质量均匀性的参考。

(5) 如果设计对防渗墙体混凝土质量有特殊要求, 应当提高混凝土强度, 使其有足够的安全保障。

2) 超声波

测试前, 须先在防渗墙中心线上预埋若干根垂直测管(或在混凝土达到设计龄期后在墙体内钻孔), 然后在相邻的管(孔)内作跨孔声波测试, 通过波速计算墙体混凝土的密实度。质量好的混凝土对弹性波有很好的传播性能, 频率 $5 \times 10^4 \text{Hz}$ 范围内的超声波在混凝土中的速度接近 4000m/s , 当混凝土中夹有泥沙等软弱材料和密实度差时, 其波速减少, 振幅衰减大, 从而可以判断墙体混凝土质量。但此法须先进行若干室内试验, 求得各种混凝土的强度和波速之间的关系式。

3) 地震透射层析成像(CT)技术

地震透射层析成像(CT)技术的基本原理是利用激发地震波对被测剖面进行透射, 然后利用各个方向上的投影值(弹性波走时)来重构剖面物性(弹性波波速)图。常规的地震透射 CT 的解算方法是首先把剖面划分成许多等面积小方格(单元), 单元大小一般应满足所画单元可视为均一的地质体, 并保证每个特定值单元至少要有两条射线通过。然后利用弹性波投影值, 通过解大型线性方程组来得到单元物性(波速)值。这样, 一般只要异常体大于 2 倍单元尺寸, 物性差异(波速)大于 5%, 即可确定出异常体的位置和性质。

黄河小浪底水利枢纽工程主坝防渗墙(右岸)中进行了旨在对墙体质量进行评价的地震层析成像试验, 用此法对黄河小浪底水利枢纽主坝防渗墙 25 个槽孔 8200m^2 面积的墙体进行了检测试验, 检测结果的图像显示出了波速的低速区、中速区和高速区, 从而显示了墙体混凝土强度在剖面上分布的不均匀情况(这是正常的), 后来与钻孔取芯的结果和开挖检查结果基本一致。

(八) 验收

(1) 强度等级在 10MPa 以上防渗墙混凝土(普通混凝土), 强度评定可采用 DL/T5144—2001 中规定的标准。

(2) 强度等级在 10MPa 以下的防渗墙体材料(黏土混凝土和塑性混凝土), 其实际强度的离散性较大, 故强度评定不宜采用 DL/T5144—2001 中规定的标准。其强度合格标准应予适当放宽, 并与其施工配置强度的保证率相适应。因此, 在 2004 年版的《水电水利混凝土防渗墙施工规范》中规定: 黏土混凝土和塑性混凝土强度的保证率不应小于 80%, 强度最小值不应小于设计标准值的 75%。

混凝土质量控制水平按表 42 评价，匀质性 C_v 值按表 43 评定，强度保证率按表 44 评定。

表 42 混凝土生产质量水平等级

评定标准		质量等级			
		优秀	良好	一般	差
不同强度等级下的混凝土 强度标准差 σ (MPa)	$\leq C_{20}$	<3.0	3.0~3.5	3.5~4.5	>4.5
	$C_{20} \sim C_{35}$	<3.5	3.5~4.0	4.0~5.0	>5.0
	$> C_{35}$	<4.0	4.0~4.5	4.5~5.5	>5.5
强度不低于强度标准值的百分率 P_s (%)		≥ 90		≥ 80	<80

表 43 防渗墙材料抗压强度离差系数 C_v 评定标准值

强度等级		20~16	15~10	9~6	5~3	2~1	<1
C_v 标准 值	优秀	<0.16	<0.19	<0.22	<0.25	<0.29	<0.33
	良好	0.16~0.19	0.19~0.22	0.22~0.25	0.25~0.28	0.29~0.32	0.33~0.39
	一般	0.20~0.23	0.23~0.26	0.26~0.29	0.29~0.33	0.33~0.38	0.40~0.50
	较差	>0.23	>0.26	>0.29	>0.33	>0.38	>0.50

表 44 防渗墙体材料强度保证率 P 评定标准值

墙体材料类型		普通混凝土	黏土混凝土	塑性混凝土	固化灰浆
强度等级 (MPa)		>12	12~7	6~1	<1
强度保证率 (%)	优秀	≥ 95	≥ 90	≥ 85	≥ 80
	良好	90~94	85~89	80~84	75~79
	一般	85~89	80~84	75~79	70~74
	较差	<85	<80	<75	<70

七. 振冲

(一) 概述

振冲法于 20 世纪 30 年代始创于德国,1937 年首次用于处理柏林某大楼砂基。我国在 20 世纪 70 年代中期引进,目前已经广泛应用于水利水电、火力发电厂、公路、铁路及石油、化工等工业和民用建筑工程的地基处理。

水利水电系统是我国最早引进振冲技术的行业,早在 1978 年采用振冲法成功地处理了北京官厅水库主坝坝基的中细砂层,使该层砂土达到了 IX 度(烈度)地震时防止液化的要求。1982 年北京向阳闸闸基处理是我国新建水利水电工程中最早应用振冲法的。1986 年在四川铜街子水电站穿过 8m 厚漂卵石夹沙层加密下卧粉细砂层,建成 40 余米高的堆石坝,这是目前国内外已知振冲法贯穿最粗粒径的地层。1997 年、2000 年分别在三峡水利枢纽二期围堰水下抛填风化砂和黄壁庄水库副坝振冲法处理深度超过 30m,表明我国在国产电动型振冲器,振冲技术及处理深度等方面已经达到了国际先进水平。

振冲技术不断发展,早期振冲技术的发展主要体现在振冲器的改善,如国内振冲器从 13kw 发展到 150kw 的电动型振冲器。动力源上由电动机向液压型驱动发展,使振冲器的功率加大、体积减小,具有更大穿透地层能力。近年来,国内外技术人员针对振冲法处理地基的缺点,如大量排放泥浆、在软粘土层中碎石桩承载力不高等进行了改进,研究试验出振冲混凝土桩技术及和碎石桩后压浆技术,就是利用振冲设备施工混凝土桩和利用水泥浆固结松散的碎石桩,提高桩体承载力,减少排浆量,这是建筑地基处理技术的一种新型复合桩基。

振冲技术在水利水电工程土石堤坝的松软地基处理,已建病险堤坝加固中,提高堤坝构筑物的强度和抗滑、抗震稳定性。

振冲法加固地基施工机具简单,操作方便,加固质量易控制,加固时不需要钢材水泥,仅用当地产的碎石,工程造价低,具有明显的经济效益和社会效益。

振冲法使用于各种土层,用于提高地基的强度和抗滑稳定性,减少沉降量。振冲法是砂土抗震、防止液化的有效处理措施。但是对不排水抗剪强度 C_u 小于 20KPa 的软黏性土,采用振冲法处理应通过现场试验,确定桩的可能性和桩的强度。对卵石采用振冲法处理,要通过现场造孔试验,验证选定的振冲器造孔能否达到要求处理的深度。

(二) 振冲机具

1、 振冲器

振冲器是一种通过自激震动并辅以压力水冲贯入土中,并对土体进行加固(密实)的器具。振冲的震动方式有水平震动,水平震动加垂直震动,目前国内外振冲器均以单项水平震动为主。振冲器的震动源有电动机和液压马达两种,国产的振冲器均采用潜水电机驱动。液压马达驱动振冲器,转速可以变化能更广泛的使用于不同土类的造孔和加固。液压马达由柴油动力机驱动,因此可在缺乏电源的条件下施工。目前国内还没有厂家生产液压驱动振冲器,有的施工单位已经

从国外引进了 130、150kW 型机组，但数量较少。

国产振冲器主要技术参数见表 45，国外厂商生产的振冲器技术参数见表 46。

表 45 国产电动型振冲器技术参数

项目型号		电动机功率 (kw)	转速 (r/min)	额定电 流 (A)	震动力 (kN)	振幅 (mm)	振冲器外 径(mm)	振冲器长 度(mm)	质量 (kg)
30KW	BJ30	30	1450	60	100	10	375	2000	800
	ZCQ30	30	1450	60	90	4.2	351	2470	940
	HS30	37	1450	70	90	10	351	2005	900
55 KW	BJ55	55	1450	110	120	10	375	2017	1000
	ZCQ55	55	1450	107	130	5	351	2785	1130
	HS55	55	1450	103	130	9.3	377	2450	
75 KW	BJ75	75	1450	150	160	7	426	2700	2100
	ZCQ55	75	1450	160	160	10	402	3210	1800
	HS75	75	1450	160	160	8.7	426	2600	
95 KW	HS95	95	1450	180	180	8.3	426	2850	
120 KW	BJ120	100	1450	220	180	7.5	426	2806	2300
125 KW	ZCQ125	125	1450	240	220	10.5	402	3655	2300
150 KW	BJ150	130	1450	260	200	8.5	426	2980	2600

表 46 国外厂商生产的振冲器技术参数

型号	动力	功率 (kW)	转速 (r/min)	额定电流 (A)	振动力 (kN)	振幅 (mm)	外径 (mm)	长度 (mm)
V23	电动	130	1800	250	300	23	350	3250
V32	电动	130	1200--1800	250	450	32	350	3250
S150	电动	150	1775	300	206	17/18.5	400	2900
S300	电动	150	0-3600	300	290	25	400	2900
PENINE130	液压	130	1200-1800	0-36*	200	3	310	2000
V281	液压	130	0-3600		280	23	360	3440
PENINE150	液压	150	1200-1800	0-36*	290	3.5	310	2200
V481	液压	212	0-3600		480	25	450	4050
TR75	液压	224	1200-1800		295	10.5	406	

注：*指工作压力（MPa）。

2、辅助机具

振冲法施工主要辅助机具和设施有起吊机械、填料机械、电器控制设备，供水设备、排泥浆设施及其他配套的电缆、水管等。

(三) 施工工序

振冲法施工一般包括造孔、清孔、填料、加密四个工序。常用振冲加密技术参数见表 47。

表 47 常见振冲加密技术参数

机型	加密电流 (A)	留振时间 (s)	加密段长 (mm)	水压 (MPa)
30kW 型振冲器	45~60	5~10	200~500	0.1~0.4
75kW 型振冲器	70~100	5~20	200~500	0.1~0.4

(四) 制桩

单项振冲法加固工程施工顺序可采用排打法、围打法、跳打法。

- (1) 排打法。由一端开始，依次到另一端结束。
- (2) 围打法。先施工外围的桩孔，逐步向内施工。
- (3) 跳打法。一排孔施工完后隔一排孔再施工，反复进行。

一般情况下常采用排打法。该法施工方便、难度小。当地基为强度低的软黏土或易液化的粉土、粉细砂，可采用跳打法。对中粗砂，采用围打法可以取得良好的效果，但在孔距较小的情况下，围打法施工可能出现地基土加密后造孔困难的情况。

当桩（孔）附近为建筑物时，宜从靠近建筑物一侧施工，逐步向外推移。

为了提高振冲桩的承载能力，造孔振密后贯入混凝土，形成混凝土桩，或在碎石桩中心打入灌浆管进行灌浆，浆液水胶比为 0.5~0.6。注浆压力 0.3~0.6MPa，形成压浆桩。

(五) 质量控制

施工过程中质量控制主要有：桩位偏差、成桩深度、填料质量和数量、施工工艺参数的控制，以及在施工过程中对桩体密实度和桩间土加密效果进行跟踪抽检。

(1) 桩位偏差

要使成桩后的偏差达到规范要求，首先在造孔时要控制孔位偏移。造孔过程中发生孔位偏移原因及纠正方法如下。

① 由于土质不均匀，造孔时向土质软的一侧偏移。纠正方法可使振冲器向硬土一边开始造孔，偏移量多少在现场施工中确定，也可在软土一侧倒入填料阻止桩位偏移。

② 振冲器导管上端横拉杆拉绳拉力方向或松紧程度不合适造成振冲器偏移。纠正方法为调整拉绳方向和松紧度。

③ 导管弯曲或减振器变形导致振冲器、导管不在同一垂直线上。纠正方法为调直导管修理减振器或更换导管和减振器。

④ 施工从一侧填料挤压振冲器导致桩位偏移。纠正方法为改变填料方向从

孔的四周均匀加入填料。

⑤ 当制桩结束发现桩位偏移超过规范或设计要求时，应找准桩位重新造孔，加密成桩。

(2) 桩长

桩长的控制应注意以下事项

① 在振冲器和导管安装完后，应用钢尺丈量并在振冲器和导管上做出长度标记，一般 0.5m 为一段，使操作人员据此控制振冲器入土深度。

② 应了解地面高程变化情况，依据地面高程确定应造孔深度。

③ 施工中当地面出现下沉或淤积抬高时，振冲器入土深度也要做相应的调整，以确保成桩长度。

(3) 填料

① 填料质量

(a) 填料质量应符合《水利水电工程振冲法处理地基技术规范》规定要求，即桩体骨料宜采用含泥量不大于 10%，有一定级配的碎石、砾石、矿渣或其他无腐蚀性、无环境污染的硬质材料。粒径要求：30kW 型振冲器 20~100mm；75kW 型振冲器 20~150mm。

(b) 当设计有特殊要求时，填料质量应符合设计要求。

(c) 当缺乏设计或规范要求的填料时，对小型土石堤坝，通过试验并得到设计许可，弱风化、中风化石料也可以作为填料使用。

(d) 在填料中含一定数量(一般小于 20%)的 0.5~20mm 细粒料，有利于提高桩体的密实度和强度。砂类土加密时，0.5~20mm 粒料也可作为填料使用。

② 填料数量

(a) 采用装载机填料时要注意每次铲斗装料多少及落在孔外的数量。

(b) 手推车填料时每车装石料量应基本相同，并记录入孔数量。

(c) 要核对进入施工场地的填料的总量和填入孔内填料的总量，发现后者大于前者时，应检查施工记录并妥善处理。

(4) 施工技术参数控制

施工技术参数有加密电流、留振时间、加密段长、水压、填料数量。

当采用加密电流、留振时间、加密段长作为综合指标时，填料数量受上述这些指标所约束。但在振冲置换处理时，填料量多少关系到成桩直径的大小和置换率大小，因此，当填料数量比设计要求过多或过少时，应分析原因，必要时通过设计变更，适当改变加密电流、留振时间，以保证工程质量。

施工工艺参数控制时应注意下列事项：

① 为保证加密电流和留振时间准确性，施工中应采用电器自动控制装置。在振冲施工过程中，设定的加密电流、留振时间可能发生变化，应及时核定和调整。

② 施工中应确保加密电流、留振时间和加密段长都要达到设计要求，否则不能结束一个段长的加密。

③ 为掌握振冲施工中加密电流、留振时间、水压、振冲器贯入地层深度等全过程情况，目前国内外已逐步开始采用数字式自动记录仪，通过计算机可检测施工中任意时间的电流、水压、深度等参数。

④ 应定期检查电气设备，不合格、老化、失灵的元器件应及时更换。

(5) 跟踪检测

指在施工过程中对碎石桩密实度和桩间土加密效果进行跟踪检测，以便及时

发现问题和质量缺陷，采取改进措施。

① 检查桩体密实度宜用重型动力触探，以每次贯入 10cm 深度的锤击数确定。锤击数应通过现场原位试验确定。

② 桩间土加密效果检测。可以采用轻便触探、标贯试验、重型动力触探、静力触探等。

（六） 施工中常见问题及处理方法

施工中常见的问题及处理方法见表 48。

表 48 振冲施工中常见问题及处理方法

类别	问 题	原 因	处 理 方 法
造孔	贯入速度慢	土质坚硬	加大水压
	振冲器电流大	振冲器贯入速度快	减小贯入速度
		砂类土被加密	加大水压，必要时可增加旁通管射水，减小振冲器振动力；采用更大功率振冲器
	孔位偏移	周围土质有差别	调整振冲器造孔位置，可在偏移一侧倒入适量填料
		振冲器垂直度不好	调整振冲器垂直度，特别注意减震器部位垂直度
孔口返水	孔口返水少	遇到强透水性砂层	加大供水量
		孔内有堵塞部分	清孔，增加孔径，清除堵塞
填料	填料不畅	孔口窄小，孔中有堵塞孔段	用振冲器扩孔口，铲去孔口泥土
		石料粒径过大	选用粒径小的石料
		填料把振冲器导管卡主，填料下不去	填料过快、过多所致。暂停填料，慢慢上下活动振冲器直至消除石料抱导管
加密	电流上升满	土质软，填料不足	加大水压，继续填料
		加密电流标准过高	适当降低加密电流标准
加密	振冲器电流过大	土质硬	加大水压，减慢填料速度，放慢振冲器下降速度
串桩	已经成桩的碎石进入附近施工的孔中	土质松软； 桩距过小； 成桩直径过大	减小桩径或扩大桩距。被串桩应重新加密，加密深度应超过串桩深度。当在原桩位不能贯入实现重新加密，可在旁边补桩，补桩长度超过串桩深度

（七） 质量检测

振冲法处理工程属隐蔽工程，应严格按设计和规范规定的要求进行质量检测与验收。检测验收内容有：碎石桩的桩数、桩位、桩径、桩体质量、桩间土加密效果、复合地基承载力、变形模量等(见下页表 49)。

检测点的布置应具有代表性，并应分布均匀。在建筑物重要部位、不同土质有代表性地区，施工过程中出现异常的地段应布置检测点。

表 49 振冲处理工程质量标准与检测方法

项 目	质 量 标 准	检 测 方 法
桩 数	符合设计桩数	检查施工记录、开槽验桩
桩 径	符合设计桩径	按填料计算、开槽实测桩径
桩位偏差	箱基、筏基、堤坝满堂布桩 $d/4$	测量放桩、抽检数量不小于总桩数的 5%，90%达到检测标准工程合格
	条形基础 $d/5$	开槽放出建筑物轴线测定桩位偏差
	柱基边桩 $d/5$ 、内部桩 $d/4$	开槽放出建筑物轴线测定桩位偏差
桩体密实度	符合设计要求	灌砂法或灌水法测碎石桩重度
		重型动力触探一般应大于 7 击或设计要求
桩体承载力与变形模量	符合设计要求	现场载荷试验
桩间土的 g 、 e 、 c 、 f 、 E_s	符合设计要求	取原状土样做土物理力学试验
桩间土承载力	符合设计要求	现场载荷试验、标准贯入试验、静力触探、轻便触探、旁压试验等
符合地基承载力	符合设计要求	单桩或多桩符合地基载荷试验 单桩桩间土载荷试验按计算确定

1、 检测恢复期时间

振冲法处理低级土受振动应力作用，土体内部存在超孔隙水压力，检测宜在土体内超孔隙水压力消散后进行，因此一般应在恢复期后进行处理效果原位测试。按规范规定，振冲法处理后恢复期时间，砂土为 7d，粉土为 15d，黏性土为 30d。砂土渗透系数大，一般 7d 土体内超孔隙水压力可消散，粉土一般为 15d，其中黏质粉土可延长至 30d。当黏性土的强度比较高，振冲器振动应力不足以破坏土的结构力，一般可取恢复期 30d。对软黏土振动会使其结构力有所破坏，特别对灵敏度高的软黏土，强度有较大的降低，因此，一般恢复期大于 30d。表 50 为某软土地基振冲后强度变化，振后十字板试验强度较振前明显降低，振后恢复 30d 仍未达到振前水平，振后 80d 比天然强度普遍有所提高，说明软黏土振冲处理时强度降低是暂时性的。

表 50 软土地基强度变化

深度 (m)	现场十字板强度(kPa)			增长的百分比(%)		
	天然	振冲后	间歇 80d	振冲后/天然	间歇 80d/天然	间歇 80d/振冲后
2.00~2.75	46.5	36.5	53.3	-22	15	46
2.75~3.75	33.4	21.0	34.8	-37	4	66
3.75~4.75	24.4	15.2	25.6	-38	6	68
4.75~5.75	25.0	17.0	31.0	-32	24	82
5.75~6.75	31.4	20.7	33.3	-34	6	61
6.75~7.75	30.2	20.7	32.3	-31	7	58
7.75~8.75	13.5	20.4	30.1	49	17	48
8.75~9.30	40.3	35.6	46.6	-12	16	31

可见只要控制施工强度和施工时间,软黏土振冲后可以取天然土强度。对大、中型工程振冲施工时间长,为满足工程建设需要,可以分阶段进行检测,但受检测桩及其周围二排桩恢复期应满足规范要求。

2、桩位检测与验收

桩位检测与验收时,地基开挖至基础底面高程以上 0.5m,再用人工清理桩头,然后量测桩的直径和桩中心位置。大面积满堂布桩,桩位可按设计桩位测量放线确定,当工程量大时,也可采用随机抽测,桩位合格率达到 90%以上的工程为合格,95%以上为优良。对条基、柱基,当桩偏出基础范围,应根据具体情况进行必要处置。

3、碎石桩体密实度检测

碎石桩体密实度可在现场采用灌砂法或灌水法测干重度,也可采用动力触探、静力触探法根据贯入击数或贯入阻力间接确定桩体的密实度。

灌砂法和灌水法可比较准确测定碎石桩体的干重度,但一般只能确定基础底面附近碎石桩体干重度,测定深处时桩体受破坏,难以恢复,因此使用受到限制。

动力触探或静力触探可以贯入碎石桩体深部,可获得桩体沿深度处贯入击数或贯入阻力情况。根据贯入击数或贯入阻力变化可确定桩体密实度变化情况。碎石桩重型动力触探锤击数的密实度判别标准宜通过现场试验确定,当设计未提出要求,一般密实的桩体重型动力触探击数应大于 7 击。对桩体要求承载力高,重型动力触探锤击数宜大于 10 击。由于目前施工中使用的振冲器功率增大,桩体也更密实,碎石桩重型动力触探锤击数可达 20~30 击,甚至更高。因此有些单位采用超重型动力触探检测桩体密实度。采用静力触探测碎石桩密实度,需要特殊静力触探的设备,国内只有个别单位有这种设备和测试经验。

根据工程级别与重要性,碎石桩密实度检测数量宜为总桩数的 1%~3%,单项工程不少于 3 根。

4、桩间土处理后的效果检测

一般可采用下列常规的原位试验或室内试验检测桩间土的处理效果。这些试验包括:静力触探、标准贯入触探、轻便触探、钻孔旁压试验,原位取土做物理力学性质指标试验。测试组数应符合 GBJ 50287—1999《水利水电工程地质勘察规范》的规定或设计要求。

5、复合地基承载力的确定方法

确定复合地基承载力可采用单桩或多桩复合地基静载荷试验确定,也可通过单桩和桩间土分别做载荷试验,再按规范推荐的计算式计算复合地基承载力。

(1) 复合地基载荷试验

① 单桩复合地基载荷试验的压板可采用圆形或方形,面积为一根桩所承担的处理面积。多桩复合地基载荷试验的压板可采用方形或矩形,压板面积应与试验桩所承担的处理面积相同。

② 压板的高程应符合设计要求。碎石垫层是复合地基的组成部分,压板下设 150mm 厚的碎石垫层和 20~40mm 厚的中粗砂找平层。

③ 试验设备和堆载反力选择应大于设计要求值的 2 倍。

④ 试验加荷分等级为 8~12 级,总加载量不得小于设计要求值的 2 倍。

⑤ 每加一级荷载 Q ,加荷前后应各读记压板沉降量 S 一次。以后每 0.5h 读记一次。当 1h 内沉降量小于 0.10mm 时,即可加下一级荷载。

⑥ 当出现下列情况之一时可终止试验：

- a) 沉降量急剧增大，土被挤出或压板周围土出现明显的隆起。
- b) 累计的沉降量已大于压板宽度或直径的 6%。
- c) 总加载量已为设计要求值的 2 倍以上。

⑦ 卸载可分为三级等量进行，每卸一级，读取回弹量，直至 1h 内的变形量小于 0.1mm。

⑧ 复合地基承载力特征值应按下列规定之一确定。

- a) 当 $Q-S$ 曲线上有明显的比例极限时，可取该比例极限对所对应的荷载。
- b) 当极限荷载小于比例极限荷载之值的 2 倍时，可取极限荷载的 1/2。
- c) 按相对变形取值。对黏性土 粉质黏土黏质粉土 为主的地基，可取 S/b 或 $S/d=0.015\sim0.020$ 所对应的荷载值（ b 和 d 分别为压板宽度和直径），砂质粉土砂土为主的地基可取 S/B 或 $S/D=0.010\sim0.015$ 所对应的荷载值。

⑨ 试验点的数量应不少于 3 个，当满足其级差不超过平均值的 30%，可取平均值为复合地基承载力特征值。

（2）碎石桩荷载试验

① 碎石桩荷载试验的压板宜用圆形，直径与设计桩的直径相同。

② 压板底高程应符合设计要求，压板宜嵌入试坑面 100~200mm，压板下碎石桩应有 20~40mm 厚的细砾或中粗砂找平层。

③ 试验设备和堆载反力选择应大于设计要求值的 2 倍。

④ 试验加荷分等级 8~12 级，总加荷载重量不得小于设计要求值的 2 倍。

⑤ 每加一级荷 Q ，在加荷前应各读记压板沉降量 S 一次，以后每 0.5h 读记一次，当 1h 内沉降量小于 0.10mm 时，即可加下一级荷载。

⑥ 当出现下列情况之一时可中止试验：

- a) 累计的沉降量大于压板直径的 6%。
- b) 总加载量已为设计要求值的 2 倍以上。

⑦ 卸载可分三级等量进行，每卸一级，读取回弹量，直至 1h 内变形量小于 0.1mm。

⑧ 碎石桩承载力特征值应按下列比例之一确定。

- a) 当 $Q-S$ 曲线上有明显得比例极限时，可取该比例极限所对应的荷载值。
- b) 当极限荷载小于比例极限荷载值的 2 倍时，可取极限荷载得 1/2。
- c) 按相对变形取值。碎石桩周围土为黏性土、粉质黏土、黏质粉土，可取 $S/d=0.015\sim0.020$ 所对应的荷载（ d 为压板直径），碎石桩周围土为砂质粉土、砂土可取 $S/d=0.010\sim0.015$ 所对应的荷载值。

⑨ 试验点的数量应不少于 3 个，当满足其级差不超过平均值的 30%，可取其平均值为复合地基承载力特征值。

（3）桩间土荷载试验

① 桩间土荷载试验的压板宜用圆形，直径宜大于 500mm，试坑宽度不应小于压板直径的 3 倍。

② 压板底高程应符合设计要求，压板宜嵌入试坑底面 100~200mm，压板下应有 20~40mm 厚的细砾或中粗砂找平层。

③ 试验设备和堆载反力选择应大于设计要求值的 2.5 倍。

④ 试验加荷分等级 8~12 级，总加荷载重量不得小于设计要求值的 2 倍。

⑤ 每级加载后，按 10min 10min 15min 15min 读一次沉降量，以后每 0.5h 读计一次，当连续 2h 内沉降量小于 0.10mm 时则认为趋于稳定，可加下一级荷载。

⑥ 当出现下列情况之一时可中止加载。

- a) 承压板周围土明显地侧向挤出。
- b) 累计的沉降量大于压板直径的 6%。
- c) 载某级荷载下，24h 内沉降速度不能达到稳定标准。
- d) 总加载量已为设计要求值的 2 倍以上。

⑦ 桩间土承载力特征值的确定。

- a) 当 $Q \sim S$ 曲线上有明显的比例极限时，可取该比例极限对所对应的荷载值。
- b) 当极限荷载小于比例界限荷载值的 2 倍时，可取极限荷载的 1/2。
- c) 不能按上述两点确定时，对低压缩性土和砂土，可取 $S/d=0.01 \sim 0.015$ 所对应的值，对中高压缩性土可取 $S/d=0.015 \sim 0.020$ 所对应的荷载值。

⑧ 同一土层参加统计的试验点应不少于 3 个，基本值的级差不超过平均值的 30%，可取平均值为桩间土承载力特征值。

由于荷载试验时间长、费用高、设备笨重，因此有些单位采用瑞利波法，附加质量法、静力触探法确定复合地基或桩和桩间土承载力。这些方法比较简便，但与静荷载试验相比都存在一定的误差。对大型或重要工程这些方法通过与荷载试验对比后可作为检测的辅助手段，也可作为小型工程确定承载力的方法。但当与荷载试验结果有矛盾时应以荷载试验为准。

检测数量应按《水利水电工程振冲法处理地基技术规范》规定执行：大（1）型工程或重要的一级建筑物试验点应不少于 5 点（组）；大（2）型工程试验点不少于 4 点（组）；中型工程或二级建筑物试验点不宜少于 3 点（组）。

八. 预应力锚固

(一) 概述

预应力锚固是预应力混凝土技术在岩土工程领域的延伸和发展,是现代岩土工程中的一个重要分支。预应力锚固的对象包括混凝土构筑物,而更多的是复杂、多变的工程地质体,它是一项涉及岩土体及其工程环境的整治、改造和利用的专项技术手段。大型预应力锚固起源于 20 世纪 30 年代,1934 年法国工程师柯恩(A.Coyne)将刚刚兴起不久的预应力混凝土技术,引进到阿尔及利亚切尔伐斯坝的加高改造工程中,利用 37 根、单孔张拉吨位达 10MN (1000t) 级的预应力锚索,来保证加高后的坝体的稳定性,并取得完全成功。这极大地激发了工程技术界应用此项技术的热情,并使其得到长足进步,至 20 世纪 60 年代,它的应用已扩张到世界各地。目前预应力锚固已广泛应用于包括从黏结较松散的土层直到较坚硬的岩体在内的各类工程地质体和构筑物,单孔安装荷载已达到 16.5MN (澳大利亚)。

我国大型预应力锚固技术的应用始于 20 世纪 60 年代,1965 年安徽梅山水库运用 102 根,单孔最大张拉荷载达 2.4~3.2MN (240~320t) 级的预应力锚索,圆满解决了坝肩稳定问题,并结合我国实际创造出用水泥浆作永久防护的黏结式锚索。在 60 年代中期至 80 年代中期这 20 年间,又有陈村、双牌、麻石、龙羊峡、葛洲坝等水电工程,在各自不同的环境下,成功地应用该项技术解决了重大技术难题,并取得了巨大经济效益。在这一时期,预应力锚固技术主要应用在坝基稳定、闸墩结构、岩体加固及混凝土结构裂缝修补等方面。实际应用的预应力锚固形式,大吨位锚索主要为拉力型水泥黏结式;小吨位锚索除了黏结式外,也有涨壳式、‘75’二次灌浆式等;无黏结型预应力锚索作为工程检测手段,一直应用在锚固工程中;而既能充分利用工程环境,又能简化施工程序的‘对穿锚’已在工程中得到较充分的运用。这一时期所运用的锚具主要有混凝土柱状锚,钢质墩头锚和螺丝端杆锚具,独立锚固夹片式锚具刚刚进入水电工程,单孔锚固荷载最大为 4.5MN 级 (1984 年),该锚索应用在碧口水电站进水口边坡加固工程中。

从 20 世纪 80 年代中期至 80 年代末,当时在建或改建的几乎所有水电工程,如龙羊峡、安康、丰满、白山等较广泛地应用了此项技术。大吨位预应力锚索的应用数量累计已达 5000 余根,单孔锚固荷载多为 1~3MN 级。龙羊峡水电站不仅在闸墩结构中应用了锚固技术,而且将其应用在抗滑洞塞中,在一个抗滑洞中就集束安装数根大吨位锚索,总的安装吨位可达 10MN 级,提高了岩体的抗滑稳定性。1988 年,单孔张拉荷载达到 6MN 级的预应力锚索,在丰满水电站坝基加固工程中应用成功;随后具有塑料套管和专用油脂防护的 2.2MN 级新型无黏结锚索作为永久工作锚索获得首次应用;由大直径、高强度、精扎螺纹钢筋制作的大吨位锚杆在丰满、桦树川等工程也得到应用,获得满意效果。在这一时期,随着国内锚夹具研究开发水平的逐步提高,独立锚固夹片式锚具(XM、QM)已得到广泛应用。

进入 20 世纪 90 年代以后,国内在岩土边坡、基坑支护、坝基稳定,结构抗倾与抗浮、隧道、地下洞室等工程大力推行预应力锚固技术,取得了显著的经济效益和社会效益。在这一阶段预应力锚固的发展主要有以下几个特点:

(1) 应用规模越来越大, 范围越来越广, 水平越来越高。云南漫湾水电站一次采用 2600 余根 1~6MN 级锚索有效治理了大面积山体滑坡, 为整个工程的顺利进行提供了可靠保障。这是一项集预应力锚固技术、抗滑桩等多种综合治理措施于一体, 有效治理滑动边坡的范例。举世瞩目的三峡水利枢纽工程, 在永久船闸边坡加固中应用 4300 余根锚索, 控制陡坡和直立边坡的变形并保持边坡的稳定, 取得巨大成功。天生桥二级水电站, 采用包括无黏结预应力锚固技术在内的综合措施, 成功治理 380 余米高的典型层状高边坡, 体现了预锚科研、设计、施工的新水平。

(2) 预应力锚固单孔荷载从 6MN、8MN 逐步加大, 目前已达到 10MN 级, 这从一个侧面反映出我国预应力锚固技术应用水平, 已进入世界先进行列。陕西石泉水电站采用 30 根 6~8MN 级锚索, 提高了坝基稳定性。李家峡水电站应用 3000 余根锚索(锚杆)加固高陡山体并试验应用 6MN、8MN、10MN 级锚索加固拱坝坝肩, 将国内单孔张拉荷载提高到 10MN 级。

国内单孔锚固荷载从 3MN 提高到 6MN, 大约摸索了 23 年的时间, 而从 6MN 提高到 10MN, 仅用 12 年, 这充分反映出国内预应力锚索技术研究、应用水平迅猛发展之势。

(3) 新型合理的锚固结构不断涌现, 满足不同应用环境的需要。二滩水电站、黄河小浪底水利枢纽、大朝山水电站等工程, 大量采用具有多层防腐结构的无黏结锚索技术, 成功解决了岩体、地下厂房的稳定问题。具有全长防腐措施的锚索, 在三峡永久船闸边坡试验成功并应用到其它工程; 拉力分散型锚索在漫湾、潘家口、十三陵抽水蓄能电站得以广泛采用; 压力分散型锚索、拉压复合型锚索在大桥水库等工程均取得良好的加固效果。

(4) 理论研究取得丰硕成果, 进一步指导了工程实践。通过国家“六五”、“七五”、“八五”科技攻关项目使预应力锚固的理论研究、科研和施工水平进入世界先进行列。在群锚加固机理研究中, 提出群锚加固“岩壳效应”及加固实质为“功能转换”的新观念, 合理解释了预应力群锚加固岩质高边坡的增稳机理, 提高了群锚设计水平。黏结式锚固段传力机制, 内锚段长度的计算均有可喜的研究成果。近年来提出的单孔复合锚固理论, 对在软岩中如何加大锚固力, 提高锚固效果具有较大的指导意义。

在预应力锚固技术发展的同时, 有关的技术规程、规范相继问世, 主要有: 2001 年颁布的 GB50086-2001《锚杆喷射混凝土支护技术规范》、DL/T5181-2003《水电水利工程锚喷支护施工规范》, DL/T5176-2003《水电工程预应力锚固设计规范》。这些标准的实施, 使岩体预应力锚固的设计和施工达到一个新水平。

(二) 预锚类型

预锚按工作对象、形态、工作特点等分类, 见表 51。

表 51 预应力锚固主要类型

序号	分类原则	类别	名 称	特 点
1	按应用对象	I	岩体预应力锚固	加固对象为岩体
		II	土体预应力锚固	加固对象为土层
		III	工程结构预应力	加固对象为混凝土结构、混凝土结构裂缝等
2	按工作年限	I	临时性锚固	工作年限 2 年以内
		II	永久性锚固	工作年限超过 2 年
3	按锚孔形态	I	端头预应力锚固	锚孔一端处于地层（结构）深处，另一端处于人员可以直接施工的地方
		II	对穿预应力锚固	锚固孔为对穿通透孔，可方便施工，提高锚固效果，充分利用工程环境
4	按自由段与孔壁是否永久黏结	I	全长黏结性预应力锚固	束体受到水泥浆的良好保护，即使内、外锚头失效，预应力也能长久保存
		II	无黏结（自由式）预应力锚固	束体受到油脂、塑料等的多层防护，自由段应力可调，耐冲击力强

（三）施工程序

以岩体预应力锚固工程中的黏结式端头锚索为例，锚固施工程序见图 11。

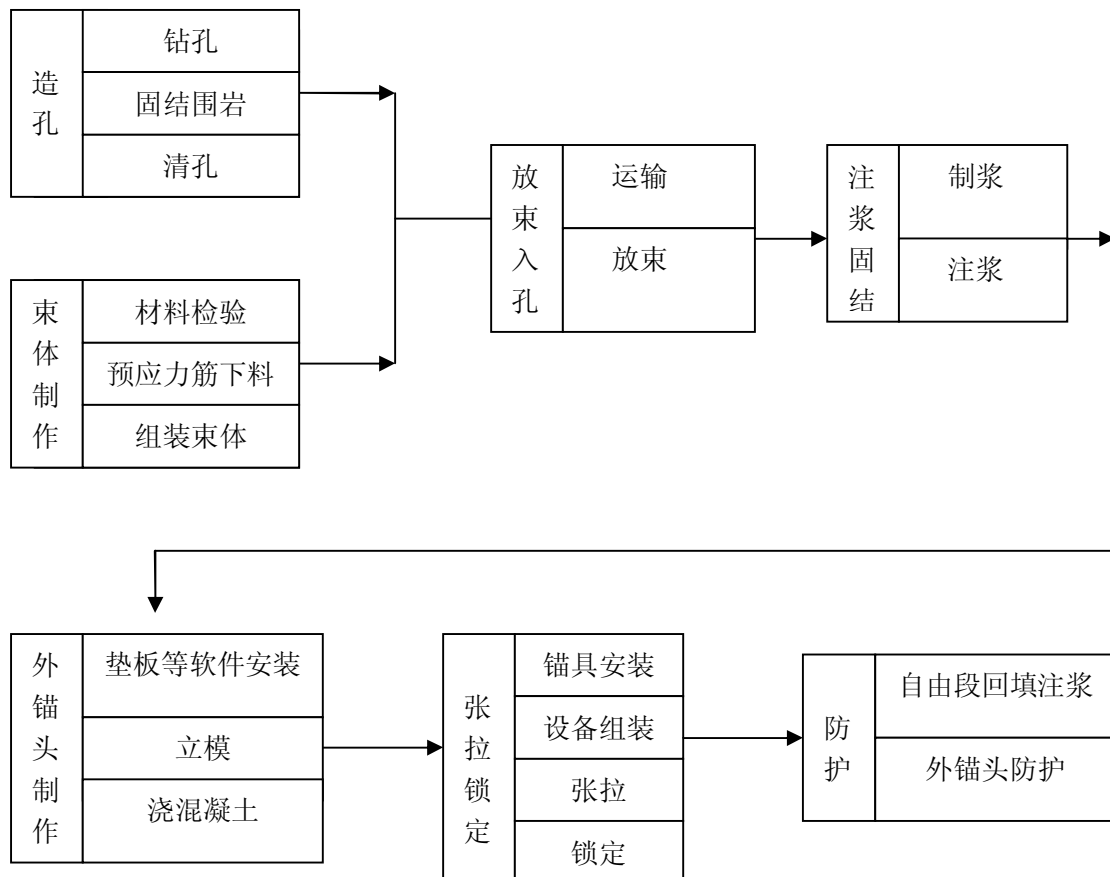


图 11 预应力锚固工作单元施工程序

1、造孔

造孔工序主要内容有：施工准备（包括施工方法选择，施工机具选择河进场、施工放线，设备就位等）、钻进、检测、灌浆、扫孔和终孔验收等。

在岩土工程中大量采用机械钻凿的方式成孔，它分为湿式成孔和干式成孔。是湿式成孔以清水作为循环液，既可带走钻屑，又能冷却钻头。湿式成孔工艺成熟，设备简单。但是由于钻孔过程中有大量循环水存在，使得它的应用范围受到一定的限制。干式成孔以压缩空气为动力，驱动潜孔锤成孔，用风带走钻渣并冷却钻具，具有成孔速度快、质量好、工艺简单、易于掌握等优点。在破碎带和滑坡体中成孔，没有诱发滑动的危险，适应性强。目前干式潜孔回转成孔工艺在锚固工程中采用的较多。

对锚固孔进行的固结灌浆包含安设注浆管路、止浆塞、制备水泥浆、压力注浆以及事前所需进行的压水试验等一系列内容。在岩体较完整、渗水较小，或者束体本身防腐措施较完备的情况下，可以根据实际情况简化或省略此项工作。一些抢险加固工程，由于工期紧迫、环境危险，不便进行此类灌浆工作。但当抢险过后，岩体已经稳定，可考虑补充做一些固结灌浆工作。

2、束体制作

束体工序最终目的是制造出满足设计要求的预应力束体，主要内容有编制场地的准备，材料检验，隔离架、止浆环等元件的制备及按图组装束体，束体检验及存放时的临时防护等。由于预应力锚固工作单元结构形式的不断改进制作束体的具体方法会有很大的不同。

在制备束体过程中，应遵循的原则有：

（1）编束场地可依现场条件选定，可选后方工厂，也可选靠近锚孔的施工平台。原则上应靠近施工现场，以方便后续工序作业，减少周转。

（2）编束场地应有防雨、防潮、防污染措施。

（3）束体最好随加工随用。已制备好的束体应尽早使用，避免长期存放，增加维护费用。

（4）对高强预应力筋不得采用热切割，不得对其焊接。要防止高温烘烤、焊接火花、接地电流等对预应力筋造成损害。

（5）对编束过程要有技术交底、有检查、有记录、有标识、有追溯。束体编制完成存放时以及将束体放入锚孔中时，均需经过质检、监理人员共同验证，准确无误后方能进行。现场应核对的主要内容有预应力筋的规格、数量、束体长度、各元件绑扎位置、牢固程度、束体防腐、防污状况各种管路通畅完好情况等。

（6）注意施工安全。施工中应针对预应力束体编制过程存在的安全隐患，制定施工操作与用电设备的安全措施。

3、放束入孔和要点

放束入孔工序是将已检验合格的束体安全、快速、完好地放入锚固孔中。目前都以人工放束为主，但也有利用吊车、缆机、塔吊、卷扬机和自制的滚轮等机械放束入孔。机械放束速度快，且很安全。

4、注浆固结

注浆固结是使束体一端与锚孔连接在一起。由于锚固工作单元类型的不同，这种固结不一定非采用注浆方式来完成。例如机械式内锚头，是靠机械式啮合力完成固结的；对穿锚使用工作锚板即可完成束体和岩壁的结合。

5、外锚头制作

外锚头一般由承力墩座，工作锚板和伸出工作锚板外的束体共同组成。工作

锚板一般到专业工厂采购，束体已在其他工序完成，因此承力墩座是此道工序成型的主要构件。承力墩座一般有钢筋混凝土和全钢两种形式。水电工程中经常使用的是钢筋混凝土承力墩座，施工时就有立模、架立钢筋、浇注混凝土等内容。

对承力墩座中的软件安装位置、孔口管与锚孔轴线吻合程度、模版稳定性和刚度、混凝土制备和浇筑、混凝土在规定龄期的强度及锚索性能等的检验和核查是这道工序的主要检验测试的内容。

张拉锁定

6、张拉锁定

张拉锁定是预应力锚固关键施工工序。主要包括张拉设备的检修、检验、配套标定等，以及张拉时的设备组装、张拉锁定。

目前大量使用高强度、低松弛预应力材料，由材质引起的预应力损失已经很小，且可用超张拉方法予以解决。但是由于被加固体的压缩变形、徐变，以及内锚段的滑移变形等原因产生的一些较大的预应力损失，就需要再次张拉方能将损失的预应力予以补偿。也存在另外一种情况，由于被加固体的位移，可能引起预应力荷载的增加，当超过一定限度后，就需要采取“放张”措施，降低锚固荷载，以免发生重大事故。

预应力张拉中需注意以下问题：

- (1) 在任何情况下，张拉应力不得超过预应力筋强度的 69%（岩体中）或 75%（水工建筑物内）。
- (2) 张拉过程中当实测位移值大于计算伸长值 10% 或小于 5% 时，应暂停张拉，查明原因并采取措施给予调整后，方可继续张拉。
- (3) 张拉时，升荷速率每分钟不宜超过设计应力的 1/10，卸荷速率每分钟不超过设计应力的 1/5。
- (4) 对经检验不需要补偿张拉的锚索，应尽快（最好在 12h 内）封孔注浆，使其受到良好的防护，经检验需补偿张拉的锚索，不得提前注浆和切除张拉段束体。
- (5) 当预应力损失超过设计张拉力的 10% 时，应进行补偿张拉。补偿张拉应在锁定值基础上一次张拉至超张拉荷载。
- (6) 对锚索进行的补偿张拉，最多进行两次，否则对束体材料和锚板夹片均会有损害。

7、防护

防护质量是影响预应力锚固耐久性的主要因素之一。对工作单元的防护不全在这一工序中完成，它贯穿在锚固施工的全过程中。此工序主要完成自由段的封孔注浆和外锚头的防护。

多数有黏结、端头型锚固工作单元，张拉后续对自由段进行封孔注浆，使预应力筋受到水泥浆体的长期防护并永久保存预应力。有些无黏结锚索在注浆固结工序中，将内锚段注浆与自由段注浆一并完成。注浆时需要作的工序有：浆体制备、循环灌注、压力并浆以及浆体取样、试件制备、检测等。

外锚头防护的主要对象为工作锚具、钢垫板、部分束体及所有外露的零部件。防护的主要目的，是使上述部件能够免受锈蚀侵害，安全可靠地长久工作。对外锚头的防护主要采用隔离法，具体手段很多，一般有黏结锚索多采用将一定厚度的混凝土，把上述零部件封裹起来的方法。一些无黏结性锚索，为满足日后调整预应力的需要，在外锚头处需采用涂专用油脂并加盖密封帽的方式进行防护。此工序需要做的具体工作包括切除伸出锚杆外的多余束体，立模浇注混凝土，对束

体、锚具涂油或者注油并加盖密封帽等。

预应力筋的防腐问题，一般应根据具体工作环境、预应力锚固工作年限及其重要性，并借鉴大型工程成功的防护经验来确定防护措施。目前应用的主要防护方法，大致可分为隔离法和电化学法两类：后者设备复杂，维护麻烦，成本高，故在岩体锚固中应用甚少；隔离法是在不消除腐蚀来源的情况下，采用一系列措施防止有害离子或物质接触预应力筋，或改造创建一个良好的工作环境，使预应力筋免受腐蚀。隔离法工艺简便，造价较低，效果明显，是国内岩（土）体锚固工程广泛采用的方法。

一般来讲，全面锈蚀只发生在金属表面，且可产生大致连续的膜，从而抑制腐蚀进一步发生。局部腐蚀与预应力筋的防护材料或防护膜局部受损形成孔穴和缝隙有很大关系，也有预应力筋的材质不纯净、有杂物、存在加工缺陷有直接关系。局部腐蚀的结果会使预应力筋产生锈坑和裂纹，截面锐减，造成破断，对锚固工作单元危害性很大。应力腐蚀和氢脆，均是在拉应力状态下发生局部腐蚀的结果。应力腐蚀是腐蚀→应力集中→再腐蚀→再应力集中的恶性循环，最终导致预应力筋的突然断裂，对预应力锚固危害很大。而氢脆则是由游离的氢原子遇到预应力筋后，渗入其晶格内，在此处发生聚集形成氢分子，同时体积猛增致使应力集中，产生并扩展裂纹。随着氢原子的再度聚集，裂纹不断扩张，如此恶性循环，使预应力筋变脆，最后断裂，氢脆对预应力锚索危害甚大。国内外实践证明，只要采取适当的、有效的防腐措施，预应力锚固工作单元的耐久性、可靠性是可以得到充分保证的。优质水泥（砂浆）浆具有高碱性，且具备长期防止环境腐蚀功能，材料来源广泛、经济，是首选的防护隔离材料，表 52 列出了主要防护措施，供参考选用。

表 52 主要防护措施

实施阶段	实施对象	主要措施	应用场合		
			临时	永久	特殊
工厂制造加工阶段	普通松弛预应力筋	选用优质碳素钢（80#）：含碳量 0.77%~0.85%，含锰量 0.30%~0.60%、含磷量 \geq 0.040%。 盘条拉拔前经过铅淬回火处理、酸洗并涂润滑层保证拉拔后获得良好的表面质量。 成型后采用矫直回火工艺降低松弛率	○	○	×
	低松弛预应力筋	选择高性能碳素钢：含碳量 0.80%~0.85%，含锰量 0.60%~0.90%，磷、硫含量 \geq 0.030%。 盘条拉拔前经过“斯太尔摩”控冷处理，获得细小、均匀的显微组织和优良的机械性能。盘条经酸洗并涂润滑层保证拉拔后获得良好的表面质量。 实行“稳定化”处理：消除内部应力、使结构变得紧密从而获得对应力腐蚀敏感性低的松弛预应力筋。	○	○	○
	无黏结预应力筋	在预应力筋外表面加工制作无黏筋专用防腐蚀油脂层和高压聚乙烯塑料护套保护层，这种保护层可多重设置，提高防护效果。	×	○	○
	环氧涂层钢绞线	在预应力筋外采用静电喷涂工艺制作致密的环氧保护层，这种保护法可单独使用，也能与油脂、塑料护套结合，多重设置，大大提高防护效果。	×	○	○

(续表 52)

施工现场	锚孔周围环境	采用压力灌浆固结孔壁，封堵渗漏通道，防止有害离子侵入束体，此种方法扩大了防护区域，效果可靠。	×	○	○
	锚固浆体	采用添加外加剂的方法，降低水灰比，提高流动性，降低泌水，提高浆体密实性，提高抗渗效果。	○	○	○
	孔中束体	对放入孔中的束体用注饱和石灰水（ $\text{ph}>12$ ）的方法进行临时保护。	○	×	×
		将束体放入连续的、性能稳定的大塑料套管（如高压聚乙烯管）中，进行全长防护。	○	○	○
	内锚段束体	用普通砂浆、水泥浆固结	○	○	○
		用高性能锚固浆体固结	○	○	○
		用环氧砂浆固结		○	○
	自由段束体	现场人工制作双层（油脂和塑料护套）防护体系	○	○	×
		张拉后用锚固浆体防护（厚度 $>20\text{mm}$ ）	○	○	○
		机械（人工）制作环氧保护层	×	○	○
外锚头		对外锚头处锚具、预应力筋等用混凝土、砂浆永久封裹，保护层厚度一般不小于 5cm	○	○	○
		对锚具、预应力筋用油脂、密封帽等封闭保护	×	○	○

注：① 要求固结层的厚度 $>20\text{mm}$ （无其他措施时）或 $>10\text{mm}$ （在有塑料套管防护时）。

② 对自由段束体采用有压循环灌浆和并浆措施进行防护时，要求注浆饱满，浆体密实。

其中：○—适用；×—不适用。

（四）主要材料和机具

1、钢绞线

钢绞线的规格和力学性能应符合国家标准 GB/T5224—2003《预应力混凝土用钢绞线》的有关规定。常用的规格有 $\Phi 15.2$ 和 $\Phi 12.7$ 钢绞线，强度级别为 1960MPa 和 1860MPa 。常用钢绞线尺寸及允许偏差，以及力学性能见表 53 和表 54。

 表 53 1×7 结构钢绞线的尺寸及允许偏差

钢绞线结构	公称直径 (mm)	直径允许偏差 (mm)	钢绞线参考截面积 (mm^2)	每米钢绞线参考质量 (g/m)	中心钢丝直径加大范围不小于 (%)
1×7	12.70	+0.40	98.7	775	2.5
	15.20		140	1101	
	15.70	-0.20	150	1178	
	17.80		191	1500	
1×7 (模拔)	12.70	+0.40	112	890	
	15.20	-0.20	165	1295	
	18.00		223	1750	

表 54 1×7 结构预应力钢绞线的力学性能

钢绞线结构	公称直径 (mm)	抗拉强度 (MPa) 不小于	整根钢绞线的最大力 (kN) 不小于	规定非比例延力 (kN) 不小于	最大力总伸长率 ($L_0 \geq 500\text{mm}$) (%) 不小于	应力松弛性能	
						初始负荷相当于最大力的百分数 (%)	1000h 后应力松弛率 (%) 不小于
1×7	12.70	1860	184	166	对所有规格 3.5	对所有规格 60	对所有规格 1.0
		1960	193	174			
	15.20	1860	260	234		70	2.5
		1960	274	247			
	17.80	1860	279	251		80	4.5
		1720	327	294			
		1860	353	318			
1×7 (模拔)	12.70	1860	208	187			
	15.20	1820	300	270			
	18.00	1720	384	346			

注：1.规定非比例延伸力不小于整根钢绞线公称最大力的 90%。

2.钢绞线弹性模量为 (195±10) GPa，但不作为交货条件。

一些特殊规格超高强度 (2000MPa) 的钢绞线的性能见表 55。

表 55 特殊规格高强度钢绞线性能

绞线标识符号	公称直径 (mm)	强度级别 (MPa)	抗拉力 (KN)	公称截面积 (mm ²)	公称重量 (kg/km)	最小荷载 (1%伸长) (KN)	备注
18	17.80	1725	327.8	190.00	1500	295.0	江西新华厂标准
	17.78	1860	353.0	190.00	1492	317.7 (低松弛)	上海申佳厂标准
13	12.70	2000	197.4	98.71	775	177.7	江西新华厂及上海申佳厂标准
15	15.24		280.0	140.00	1102	252.0 (低松弛)	

2、无黏结预应力筋

该材料是利用挤压涂塑工艺在钢绞线 (钢丝束) 外包塑料套管，内涂防腐专用油脂后获得的产品。护套材料宜采用高密度聚乙烯或聚丙烯，但不宜采用聚氯乙烯。国产无黏结筋的主要规格及其性能见表 56 (下页)。

表 56 无黏结预应力筋的主要规格与性能

项目	规格和性能		
	碳素钢丝束 7Φ5	钢绞线	
		1×7 Φ12.7	1×7 Φ15.2
拉力试验： 抗拉强度 (N/mm ²)	1570	1860	1860
屈服荷载 (KN)	1340	156×3.5	220×3.5
屈服强度伸长率 δ _{0.2} (N/mm ₂)	4		
弯曲试验： 次数不小于	4	—	—
弯曲半径 R (mm)	15	—	—
弹性模量 (N/mm ²)	2.0×10 ⁵	1.95×10 ⁵	1.95×10 ⁵
1000h 松弛值 (%)	I 级松弛	8.0	8.0
(初始负荷为 70% 破断负荷) 不大于	II 级松弛	2.5	2.5
截面积 (mm ²)	137.41	98.7	139
重量 (kg/m)	1.08	0.774	1.101
防腐润滑脂重量 (g/m)	50	43	50
高密度聚乙烯护套厚度 (mm)	0.80~1.2	0.80~1.2	0.80~1.2
摩擦试验： 无黏结预应力筋与壁之间的摩擦系数 μ	0.1	0.12	0.12
考虑无黏结预应力筋壁每米长度局部偏差对摩擦的影响系数 κ	0.0035	0.004	0.004

注： 1.由 7 根 Φ5 钢丝组成无黏结束，其中心钢丝应比周边钢丝粗 5%~7%。

2.若工程采用镦头锚具，在订货时应提出“具有可镦性”的要求。

3.一般不推荐使用钢丝束无黏结筋。

4. 镦头锚板不能使无黏结筋良好密封，亦不推荐使用。

其中：*指屈服荷载，是整根钢绞线破断负荷的 85%。

无黏结预应力筋采用专门防腐油脂，作为润滑和永久防腐。该油脂具有良好的化学稳定性，对周围材料无侵蚀作用，不透水，不吸潮，抗腐蚀性能强，润滑性能好，在额定温度范围内不流淌，低温不变脆，并具有一定韧性。其技术要求见表 57（见下页）。

普通黄油易吸潮、透水、耐久性差，含有腐蚀预应力钢材的有害成分，因此在永久工程或重要部位绝对禁止使用普通黄油作为预应力锚固的永久防护。

3、 锚、夹具

施工中常用的锚具有四种，分别是群锚夹片式锚具、镦头式锚具、螺杆式锚具、精扎螺纹钢筋锚具。四种锚具中群锚夹片式锚具的夹持性能优良、适应性强、施工操作简单方便、因而更具有生命力。

国内专业厂家生产的各种锚具，大多数能满足国际预应力混凝土板的协会标准 FIP93《后张预应力体系验收建议》的要求。随着预应力技术的不断发展，预应力锚具将沿着锚固粗直径、大规格、高强度预应力材料的方向发展，而自身结

构经过合理优化，也会变得更加轻巧。

国产系列锚具见表 58。

表 57 无黏结预应力筋专用防腐润滑脂技术要求

序号	项 目	质 量 指 标		试 验 方 法
		I 号	II 号	
1	工作锤入度 (1/10mm)	296~325	265~295	GB/T269
2	滴点 \geq (°C)	160	160	GB/T4929
3	水分 \leq (%)	0.1	0.1	GB/T512
4	钢网分油量 (10 °C, 24h) \leq (%)	8.0	8.0	SH/T0324
5	腐蚀试验 (45 号钢片, 10 °C, 24h)	合格	合格	SH/T0331
6	蒸发量 (99 °C, 22h) \leq (%)	2.0	2.0	GB/T7325
7	低温性能 (-40°C, 30min)	合格	合格	SH0387/附录
8	湿热试验 (45 号钢片, 30d) (级)	≤ 2	≤ 2	GB/T2361
9	盐雾试验 (45 号钢片, 30d) (级)	≤ 2	≤ 2	SH/T0031
10	氧化安定性 (99°C, 100h, 78.5×10^4 Pa)	≤ 0.147	≤ 0.147	SH/T0325 GB/T264
	A 氧化后压力降 (N/mm ²)	≤ 1.0	≤ 1.0	
	B 氧化后酸值 (mgKOH/g)			
11	对套管的兼容性 (65°C, 40d)	≤ 10	≤ 10	HG2-146 GB1040
	A 系吸油率 (%)	≤ 30	≤ 30	
	B 拉伸强度变化率 (%)			

表 58 系列锚具常用符号含义

符号	含 义 简 介	备 注
XM	斜开缝三片式群锚体系	锁定时需用专用顶楔器
QM	直开缝三片式群锚体系	用限位板锁定预应力筋
OVM	直开缝二片式群锚体系	带弹性槽用限位板锁定
HVM	直开缝二片式不带弹性槽群锚体系	系 OVM 改进型，可锚固强度级别为 2000MPa 的钢绞线
XYM	斜开缝二片式群锚体系	XM 锚改进型、用限位板锁定
JM	夹片式锚具体系	在一个锤孔中固定多根预应力筋，目前已很少使用
DM	墩头锚体系	
LM	螺丝端杆锚具系列	
JLM	精扎螺纹钢锚具	
B&S	含直开口三片式、斜开口三片式、直开口二片式三种系列群锚体系	可锚固三丝 $\Phi 8.6$ ~七丝 $\Phi 18$ 模拔钢绞线

国产系列常用锚具技术性能见表 59。

表 59 常用锚具种类及其性能

类别	楔紧类	支撑类			
型式	独立锚固夹片式	墩头式	螺帽旋紧式		挤压式
夹持对象	高强钢丝束、钢绞线	高强钢丝束	精扎螺纹钢	热轧钢筋	钢绞线、高强钢丝
特 性	<p>1.组成: 锚板、夹片(一付三片或二片)、紧固圈(钢丝或橡胶圈)</p> <p>2.特点: 锤孔数量与钢绞线根数对应, 一付夹片与一个锤孔配合, 仅夹持一根钢绞线; 夹片外锤面光滑, 内表面有齿; 锚板上一个锤孔锚固实效, 不会影响其它锤孔的锚固效果。一块锚板可承受 10MN 以上的张拉力, 承载能力强。</p> <p>3.锁定方式: ①用限位板, 使夹片自动跟进锁定; ②用专用顶楔器, 将夹片顶进锤孔锁定</p> <p>4.回缩损失: $\leq 6\text{mm}$</p> <p>5.品牌产品: XM、QM、OVM、B&S、HVM、XYM、YM、VLM 等</p>	<p>1.组成: 锚杯、螺母等</p> <p>2.特点: 锚杯底部规律地布满孔洞, 钢丝从孔洞穿过后, 端部墩粗, 即可张拉, 用外螺母锁定。锚具加工简单, 张拉方便, 锚固可靠, 成本低廉。要求钢丝等长下料且精度高, 有一定技术难度</p> <p>3.锁定方式: 旋紧螺母</p> <p>4.回缩损失: 1mm 左右</p> <p>5.常用代号: DM</p>	<p>1.组成: 螺帽、垫板、连接器等</p> <p>2.特点: 螺帽与精扎螺纹钢杆体配合, 简单、易行。锚具符合 I 类锚具标准, 效率系数 $\eta \geq 0.95$, 延伸率 $\epsilon \geq 2\%$。螺帽、连接器材质为优质 45 号碳素钢, 垫板为 A3 钢</p> <p>3.锁定损失: 1mm 左右</p> <p>4.常用代号: JLM</p>	<p>1.组成: 螺帽、螺丝端杆等</p> <p>2.特点: 螺丝端杆与粗钢筋焊接(如采用闪光堆焊), 拧紧螺帽即可锁定, 制作简单, 司机嗅共方便</p> <p>3.锚固回缩损失: 1mm 左右</p> <p>4.常用代号: LM</p>	<p>1.组成: 套筒、衬套(有异型钢丝衬套、圆形钢丝衬套和两半圆筒衬套等)</p> <p>2.原理: 套筒在被挤压机挤过模具的过程中, 自身变长变细, 同时衬套发生脆断, 一半嵌入套筒, 一般嵌入钢绞丝, 增加了套筒与钢绞丝间的摩阻力。套筒与钢绞线紧密结合, 形成可靠锚固</p> <p>3.特点: 承受集中力大、结构尺寸小、占用空间小</p>
适 用 范 围	<p>1.预应力筋的强度可为: 1570、1860、2000MPa</p> <p>2.钢绞线直径: 12~17.8mm</p> <p>3.锤孔数量: 1~55 孔</p> <p>4.工作锚板、限位板(顶楔器)、千斤顶、工具锚必须同品牌配套选购, 否则会給施工带来不便</p> <p>5.夹持钢丝会造成中心丝回抽, 不提倡使用</p>	<p>1.钢丝强度: 1670MPa</p> <p>2.钢丝直径: $\Phi 7$、$\Phi 9$</p> <p>3.主要应用在束体长度较短要求预应力锁定损失小的场合</p> <p>4.锚固吨位: 3~4MN</p>	<p>1.适用于束体长度较短的场合</p> <p>2.以单根筋的形式应用最方便</p> <p>3.用 YC70 型单作用穿心式千斤顶张拉较方便</p>	<p>1.用于粗钢筋系列锚固</p> <p>2.用于小吨位(一般 $< 300\text{kN}$) 锚杆</p>	<p>1.主要用来制作挤压式内锚头</p> <p>2.夹持钢绞线效果较好</p>

(五) 试验与监测

1、 试验内容

试验和监测所获得的数据 主要集中在如下几个方面:

(1) 预应力荷载在各个阶段的状况及发展变化过程,包括锚固单元极限荷载、施工过程中的张拉荷载、锁定荷载、预应力荷载长期变化过程,孔内摩阻状况及其对预应力传递的影响等。

(2) 束体伸长量及其变化规律,包括束体弹性伸长、塑体伸长、蠕变量等。

(3) 加固对象的受力状况和位移(应变)状况。

(4) 束体预应力筋的受力均匀性。

2、 监测参数取值原则和计算,参考表 60~表 62。

表 60 主要试验参数的获取和计算

参数名称	获取方法	简 要 说 明
张拉荷载	据测力计的示数,查标定曲线	测力计与千斤顶配套标定,以便相互验证,但以测力计示数为准
极限荷载 R_u	测力计显示的最高荷载	在岩体锚固中指工作单元所能承受的最大荷载;而在土层锚固中去最大荷载的 95%,作为极限荷载
锚固安全系数 K_0	通过公式计算	是锚固工作单元极限荷载 (R_u) 与设计承载力 (N_t) 的比值: $K_0 = R_u / N_t$
锁定荷载	从测力计获得	测力计安装在工作锚板下面,锁定后立即测读示数,经查率定曲线获得
锁定损失	经计算获得	锁定损失=张拉荷载-锁定荷载
孔壁摩擦阻力损失	由测力计与测试元件获取	张拉端施加的荷载,传递到非张拉段(如内锚段上部)过程中,由于孔壁弯曲、束体结构形式、张拉方式等原因造成的预应力损失。 张拉端荷载可用测力计获取,而非张拉力端要通过安装在预应力筋上的测试元件获得。 国内一些工程,例如三峡、白山大坝等均进行过这方面的试验,所测得的情况见表 58
蠕变系数 K_c	通过蠕变试验获得的蠕变量经计算获取	$K_c = (S_2 - S_1) / (\lg t_2 - \lg t_1)$ 式中: S_1 — t_1 时刻测得的蠕变量; S_2 — t_2 时刻测得的蠕变量。 对于一个合格的工作单元,在最后一级荷载作用下,蠕变系数不应大于 2.0mm
束体位移(伸长)值	用百分表或钢尺测得	必须用量程足够大的仪器量测。 正常施工用钢板尺量测,已可满足施工精度要求
束体受力不均匀系数 η ^①	依据实测数据经计算获得	在预应力筋上粘贴应变片或并联应变计等方法,检测其受力状态。 每根筋的实际受力 T_i 与预应力筋理论受力 T 之比,称为不均匀系数 η 。 国内一些工程实测情况见表 62。

注: ①——其计算方法规范没有明文规定。

表 61 孔壁摩擦阻力损失实测值

工程名称	三峡永久船闸 边坡试验	三峡永久船闸 边坡施工	李家峡边坡 加固工程	白山水电站 大坝加固工程
(孔口-孔底)/孔口 (%)	1.7%	0.9%	30%	22%

注：由于试验方法不统一，以及锚固具体应用环境存在较大差异，因而表中数据的可比性较差。

表 62 束体预应力筋受力不均匀系数

工程名称	双牌	白山地下厂房	白山 15 号 坝段锚固	丰满坝基加固	镜泊湖 进水口	小浪底隧洞开 挖试验	丰满 600t 级锚索试 验	漫湾加 固工程
不均匀系数	0.95~1.11	0.66~1.25	0.7~1.17	0.8~1.17	0.87~1.13	0.4~1.67	0.91~1.03	0.95~1.05

3、试验监测项目

对预应力锚固及其加固对象需进行全过程的监测与试验，监测项目及要求见表 63。

表 63 主要试验（监测）项目

规范名称	试验项目	试验要点综述
水工预应力锚固施工规范	受力性能试验	<p>1.试验应在正式施工前完成。试验数量一般不小于 3 束。当锚固对象或抵制条件有明显变化时，要增加试验数量。</p> <p>2.试验使用的锚固夹具 i，张拉机具及施工工艺应与工程实际采用的相同。</p> <p>3.试验中的张拉力值应以测力装置示数为准。束体伸长值，锚束中预应力筋的受力均匀性和摩阻损失等参数均应在分级张拉中同步量测。</p> <p>4.张拉分级如下：初始应力为设计应力的 0.2 倍，各分级张拉力分别为设计值得 0.25、0.50、0.75、1.0、1.15 倍，但最大张拉力不得超过预应力钢材强度标准值的 75%。</p> <p>5.资料整理：依据获得数据，绘制张拉应力与伸长值的关系曲线。</p>
	验收试验	<p>1.应按设计要求随即抽样，进行验收试验。抽样数量应不小于 3 束，验收试验与竣工抽样检查合并进行，其数量为锚索总数的 5%。</p> <p>2.高边坡预应力锚固工程，验收试验必须在张拉后及时进行；对有黏结性的锚固工作单元，试验时间可由施工条件确定。</p> <p>3.合格标准。实测束体应力值不得大于设计值得 5%，也不得小于设计值的 3%。当抽样检查有一束不合格时，应加倍扩检；扩检中如再发现不合格时，必须会同设计及有关单位研究处理。</p> <p>4.试验结束后，应汇总各孔的张拉力，评定预锚加固效果。</p>
	长期观测	<p>1.必须按设计文件施工，并应尽早安排施工，以便将测试成果用于指导锚固施工。</p> <p>2.长期观测时间不宜小于 5 年。</p> <p>3.观测所用仪表、线路应妥加保护。当仪表受到撞击或观测数据出现异常时，必须及时查明原因，进行补救处理，才能继续观测。</p> <p>4.长期观测资料应及时整理、分析，做好信息反馈。</p>

(续表 63)

水 工 预 应 力 锚 固 设 计 规 范	锚杆的 整体 性 试 验	<p>1.目的: 验证预应力锚固设计, 检验预应力锚固施工工艺, 指导安全施工。</p> <p>2.数量: 按工作锚杆的 3%控制, 有特殊要求时, 可适当增加。</p> <p>3.试验方法。</p> <p>(1) .非破坏性试验。</p> <p>1).张拉采用逐级张拉、逐级稳压方式进行。每级稳压 5min, 最大张拉力达到设计张拉力的 115% 时停止加载。</p> <p>2).结果判定: 当张拉力达到设计张拉力的 115%时, 荷载、位移稳定, 围岩变形正常, 即可认为锚固力满足设计要求。</p> <p>(2) .破坏性试验。</p> <p>1).试验场地的确定。试验场地的地质条件, 应与实际工程类似。不得选在正式工程部位。试验工作单元的长度, 可比正式工作单元短, 但应满足试验要求。</p> <p>2).按设计拟定的张拉程序, 逐级施加张拉力且在每级荷载施加后, 持荷 5min, 进行相应观测。</p> <p>3).破坏判据。当锚固段产生连续性位移, 或有 30%的预应力筋拉断, 即可认为预应力锚杆已达到破坏。当未出现上述现象, 但张拉力已达到钢材极限抗拉强度时, 也结束试验, 此时锚固力的值由实测的荷载与变形关系曲线来确定。</p> <p>4.资料整理。绘制应力—应变曲线, 确定破坏荷载和最高荷载。整理围岩变形资料。对预锚设计、施工工艺作相应评价。</p>
	监 测 参 数	<p>1.工作单元预应力。</p> <p>2.束体伸长值。</p> <p>3.预应力的损失。</p> <p>4.被锚固体位移。</p>

九. 灌注桩

(一) 概述

灌注桩是采用机械或人工方法成孔,在孔内下设钢筋笼和浇注混凝土所形成的桩基础。灌注桩在各个建筑领域的应用都十分广泛,在水利水电建设中主要用于水闸、渡槽、输电线塔、变电站、防洪墙、工作桥等的基础,也经常应用于防冲、挡土、和边坡治理等工程中。

灌注桩包括人工挖孔桩和机械钻孔桩两大类。人工挖孔桩于 1983 年在美国问世,当时美国芝加哥、底特律等大城市由于土地紧张,高层建筑不断增加;但这些城市地表以下存在着很厚的软土或中等强度的黏性土层,如仍然沿用当时通行的摩擦桩,必然会产生很大的沉降。于是工程师们不得不考虑把桩设在很深的持力层,并且为满足承载力要求,还必须把其截面积设得较大。但预制桩难以打至必要的深度,人工挖孔桩就在这样的情况下试验成功。

在 20 世纪 40 年代初,随着大功率钻孔机具的研制成功,钻孔灌注桩也是首先在美国问世。随着二次世界大战后各地经济的复苏和发展,超高层建筑和重型构造物不断兴建,它们绝大多数都选择了钻孔灌注桩。尤其是 20 世纪 70~80 年代以来,钻孔灌注桩在世界范围内出现了蓬勃发展的局面,其数量逐年上升。小直径的灌注桩与 20 世纪 50 年代初在意大利脱颖而出。从此,灌注桩一方面向大直径发展,另一方面也向小直径发展。

我国应用灌注桩始于 20 世纪 60 年代初,当时先在南京、上海、天津等地作为桥梁和港口建筑物的基础;自 70 年代中期以后又陆续在广州、深圳、北京、厦门等城市应用于高层和重型建(构)筑物;至 80 年代末 90 年代初,随着改革开放步伐的加快,灌注桩迅速发展,仅数年间已普及于全国除西藏外的各省、市、自治区。据估计,近年我国应用灌注桩数量之多已堪称世界各国之最,可谓起步虽晚而发展迅猛。

灌注桩有以下主要特点:

(1) 灌注桩属非挤土或少量挤土桩,施工时基本无噪声、无振动、无地面隆起或侧移、无浓烟排放,因而对环境的影响小,对周围建筑物、路面和地下设施的损害小;

(2) 可采用较大的桩径和桩长,单桩承载能力高,可达数百万至数千万牛顿。需要时还可以扩大桩底面积,更好地发挥桩端土的作用;

(3) 桩径、桩长以及桩顶、桩底高程可根据需要选择和调整,易于适应持力层面高低不平的变化,可设计成变截面桩、异型桩,也可沿深度变化配筋量;

(4) 桩身刚度大,除能承受较大的竖向荷载外还能承受较大的横向荷载;

(5) 在钻、挖孔过程中,能进一步核查地质情况,根据要求调整桩长和桩径;

(6) 避免了搬运、吊置、锤击等作业对桩身的不利影响,因此灌注桩的配筋率远低于预制桩,可节省钢材,其造价约为预制桩的 40%~70%;

(7) 施工设备比较简单、轻便,开工快,所需工期较短;

(8) 可穿过各种软硬夹层,也可将预制桩置于坚实土层或嵌入基岩;

(9) 施工方法、工艺、机具及桩身材料的种类多,而且日新月异;

(10) 施工过程隐蔽, 工艺复杂, 成桩质量受人为因素和工艺因素的影响较大, 施工质量较难控制;

(11) 除沉管灌注桩外, 成孔作业时需要出土, 尤其是湿作业时要用泥浆护壁, 排浆、排渣等问题对环境有一定的影响, 需要妥善解决。

灌注桩的发展可归纳为以下几个方面:

(1) 人工挖孔桩的应用范围不断扩大。不仅适用于地下水位低且土质较好的地区, 也广泛应用于地下水位高且土质软弱的地区; 而且在一些环境制约十分严格的条件下也适用, 如施工场地不大的地方用人工挖孔桩可避免大型机械进出场的麻烦;

(2) 扩底桩和变径桩的应用越来越多。近年国内外有许多实例证明, 当桩较长时, 由于场地沉降或地震液化等原因可能导致桩侧阻力不可靠或产生负摩擦阻力。采用扩底桩或变径桩是提高和确保单桩承载力的有效方法;

(3) 扩底桩和变径桩的形式和施工方法越来越多。随着认识的深化和机具的改进, 扩底桩和变径桩的形式更合理。锅底形扩底桩、挤扩桩等桩型都将得到更广泛的应用;

(4) 条形、矩形、“十”字形断面等异型桩将更多地应用于重型构筑物的基础。用抓斗挖槽机施工的各种异型桩具有表面积大、稳定性好、节省材料等优点。

(5) 采用预埋管灌浆、夯扩桩底混凝土等方法消除桩底隐患, 提高桩端和桩端土的承载力;

(6) 用长螺杆钻机和钻孔压浆成桩法施工的各种小直径灌注桩不仅可以用于地下水位以上, 而且可以用于地下水位以下, 桩底材料也将多样化;

(7) 与预应力锚固相结合的抗滑挡土桩将得到更广泛的应用;

(8) 部分人工挖孔桩将设计成空心桩。它与实心桩相比, 可节省混凝土 50% 以上, 并可减少废土外运量。空心桩可以自上而下分段施工, 工艺安全, 结构合理。

(二) 分类

1、按受力分类

(1) 摩擦型桩: 桩的承载力以侧摩擦阻力为主。摩擦型桩又可分为摩擦桩和端承摩擦桩。

(2) 端承型桩: 装的承载力以桩端阻力位主。端承型桩又可分为端承桩和摩擦端承桩。

2、按成孔方法分类

(1) 机械成孔桩

采用正反循环钻机, 潜水电钻、冲击钻机、旋挖钻机、抓斗等机械钻孔取(挖)土成孔。

(2) 人工挖孔桩

地下水位较低, 涌水量较少时, 桩的尺寸较大, 常用人工挖土(石)成孔。

(三) 适应性

灌注桩适用于各种土层、风化岩层，以及地址情况复杂、夹层多、风化不均、软硬变化较大的地层。桩径和桩深较大，而且不受地下水位限制，可在地下水丰富的地层中成孔，但在岩溶发育地区应慎用。冲孔灌注桩还能穿透旧基础、大孤石等障碍物。

沉管灌注桩适用于黏性土、粉土、淤泥质土、砂土及填土，在厚度较大、灵敏度较高的淤泥和流塑状态的黏性土或软弱土层中采用时，为防止因缩孔而影响桩径，应制定质量保证措施，并经工艺试验成功后方可实施。

干作业成孔灌注桩一般只适用于地下水位以上的黏性土、粉土、中等密实以上的砂土层。人工挖孔灌注桩在地下水位较高，特别是有承压水的砂土层、滞水层、厚度较大的高压缩性淤泥层和流塑淤泥质土层中施工时，必须有可靠的技术措施和安全措施。

套管护壁灌注桩施工安全准确，能紧贴已有建筑物施工；除硬岩及含水厚细沙层外，第四纪地层均可用。由于设备庞大，施工需要占用较大的场地。

选择灌注桩成孔方法时可参考表 64。

表 64 灌注桩成孔方法选择参考表

成孔方法	桩径 (cm)	桩长 (m)	穿越土层							桩端进入持力层				地下水位		对环境的影响	
			一般性黏土及填土	黄土		淤泥和淤泥质土	粉土	砂土	碎石土	硬黏土	密实砂土	碎石土	软岩和 风化岩	以上	以下	振动和噪声	排浆
				非自重湿陷	自重湿陷												
长螺旋钻成孔	30~80	≤30	○	○	△	×	○	△	×	○	○	×	×	○	×	无	无
短螺旋钻成孔	30~150	≤30	○	○	×	×	○	△	×	○	○	×	×	○	×	无	无
机动洛阳铲成孔	30~50	≤20	○	○	△	×	×	×	×	○	○	×	×	○	×	无	无
潜水电钻成孔	50~200	≤50	○	△	×	○	○	○	×	○	○	△	×	○	○	无	无
正循环回转钻成孔	50~100	≤70	○	○	×	○	○	△	×	○	○	△	○	○	○	无	有
反循环回转钻成孔	60~300	≤70	○	○	×	○	○	○	△	○	○	△	○	○	○	无	有
旋挖成孔灌注桩	50~150	≤50	○	○	×	○	○	○	△	○	○	△	△	○	○	无	有
抓斗挖槽机成孔	翼宽 60~120 翼长 120~300	≤50	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	无	有
钢丝绳冲击钻成孔	60~130	≤70	○	×	×	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	有	有
钻孔扩底灌注桩	桩身 60~120 底 100~160	≤20	○	○	×	○	○	×	×	○	×	×	△	○	○	无	有

(续表 64)

振动沉管灌注桩	27~40	≤20	○	○	○	△	○	△	×	○	○	×	×	○	○	有	无
锤击沉管灌注桩	30~50	≤20	○	○	○	△	○	△	×	○	○	△	×	○	○	有	无
锤击振动沉管成孔	27~40	≤24	○	○	○	△	○	△	×	○	○	○	○	○	○	有	无
全套管法灌注桩	80~160	≤50	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	无	无
冲抓成孔灌注桩	70~120	≤40	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	有	有
人工挖孔桩	≥100	≤30	○	○	○	△	△	△	△	○	○	○	○	○	△	无	无

注：○—比较合适；△—有可能采用；×—不宜采用。

(四) 抗滑桩设计

1、主要内容

- (1) 确定抗滑桩由于滑体移动所承受的推力及弯矩值。
- (2) 确定桩的形式及尺寸；
- (3) 确定施工方案；
- (4) 确定加固边坡的稳定安全系数

2、抗滑桩设计一般程序

- (1) 确定使边坡稳定的安全系数达到设计要求值所需要增加的抗剪力；
- (2) 确定每根桩所能承受的最大滑坡推力；
- (3) 确定桩的位置、类型及根数

3、抗滑桩的受力分析

将抗滑桩概化为弹性地基梁，土体为弹性连续介质。抗滑桩每个离散单元的侧向位移与其抗弯刚度和桩—土作用的水平应力有关，而相应的土体单元的侧向应力与土体的模量、桩——土的作用应力及地表处土的位移有关。当桩—土作用的侧向应力一定时，考虑到土体内有局部的塑性变形，宜采用非线性方法分析。

当桩—土的界面保持弹性状态时，每个离散单元处桩—土的水平位移相协调，按下列方程求解：

$$\left[[D] + \frac{[I]^{-1}}{K_R n^4} \right] \{ \Delta P \} = \frac{[I]^{-1}}{K_R n^4} \{ \Delta P_s \} \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中： $K_R = EI/E_s L^4$ ——无量纲挠曲系数；

$[D]$ ——桩弯曲的有限差分系数矩阵；

$[I]^{-1}$ ——土位移系数逆矩阵；

ΔP ——桩的水平位移增量；

ΔP_s ——地表处土的水平位移增量；

EI ——桩的挠曲系数；

E_s ——沿桩身方向土的平均杨式模量；

L ——桩身长度；

n ——桩离散单元数。

（五）施工组织设计

灌注桩的施工组织设计主要包括以下内容：

- （1）工程概况、设计要求、质量要求、工程量、地质条件、施工条件；
- （2）确定施工设备、施工方案和施工顺序，绘制工艺流程图；
- （3）进行工艺技术方案设计，包括成孔工艺、钢筋笼制作安装、混凝土配制、混凝土灌注以及泥浆制备运输、处理的具体要求和措施；
- （4）绘制施工平面布置图。标明桩位、编号、施工顺序、水电线路和临时设施的位置；采用泥浆护壁成孔时，应标明泥浆制备设施及其循环系统；
- （5）施工作业计划、进度计划和劳动力组织计划；
- （6）机械设备、备件、工具（包括质量检查工具）、材料供应计划；
- （7）工程质量、施工安全保证措施和文物、环境保护措施；
- （8）冬、雨季施工措施，防洪水、防台风措施。

（六）机械成孔桩

1、正循环钻孔桩

正循环回转钻进是以钻机的回转袋带动钻具旋转切削岩土，同时利用泥浆泵向钻杆输送泥浆（或清水）冲洗孔底，携带岩屑的冲洗液沿钻杆与孔壁之间的环状空间上升，从孔口流向沉淀池，净化后再用（泥浆），反复运行，随着钻渣的不断排出，钻孔不断深入，直至预制孔深，其排渣能力，主要取决于泥浆泵的流量，孔径以及泥浆性能。泥浆由孔内返回的流速一般为 $0.05\sim 0.2\text{m/s}$

正循环回转钻进设备的体积、重量、功率均较小，移动方便，适合于狭窄场地，基坑底部及山地施工。其管路设有严格的真空要求，有少量泄露时，排渣过程不会中断，启动简便。

（1）正循环回转钻孔工艺

① 一般操作要领

（a）钻进开始前应全面检查钻机，并进行润滑。

（b）下钻至孔底后，应提起 $50\sim 80\text{mm}$ ；先启动泥浆泵，使泥浆循环 $2\sim 3\text{min}$ ，再开动转盘；然后慢慢将钻头放入孔底，轻压慢转数分钟后再逐渐增加钻压和转速。

（c）在初始时应稍提吊钻杆，低档慢速钻进，孔深未超过 10m 时不应加压，以免发生孔斜。

（d）当护筒底部出现漏浆时，应提起钻头，向土内倒入黏土块，再放入钻头倒转，直至胶泥挤入孔壁堵住泥浆后，方可继续钻进。

（e）加接钻杆时应先将钻具提离孔底，待泥浆循环 $3\sim 5\text{min}$ 后，再拧紧，加接钻杆。

（f）在松散、软弱土层中钻进应少加压或不加压（一般用钻具自重加压即可），并根据泥浆补给情况适当控制钻进速度。

(g) 在易塌孔地层中钻进时，应适当加大泥浆的密度和黏度。

(h) 钻进一般岩层，钻速应不超过 80r/min；钻进叫坚硬岩层和卵砾石层，转速应不超过 40r/min。

(i) 在基岩中钻进一般需通过配重加压；利用钻杆加压时，在钻具中应加设扶正器。

② 钻进参数

不同地层中正循环回转钻进的钻压选择参见表 65，钻速选择参照表 66。

表 65 正循环回转钻进钻压选择参考表

岩土类别	单轴抗压强度 (MPa)	孔径 (m)				
		0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
		钻压 (kN)				
砂层、砂土层		2~8	3~11	4~15	5~19	6~23
黏性土		8~15	11~26	15~35	19~40	23~52
含砾黏土、强风华泥岩、泥灰页岩	<5	15~20	25~30	35~44	40~55	52~65
强风化—中风化砂页岩、卵砾岩	5~30	20~50	33~75	40~100	55~120	65~150
中风化—微风化砂页岩、软石灰岩	30~60	50~65	75~100	100~130	125~170	150~200
石英砂岩	60~100	65~80	90~120	130~170	170~215	200~260
片麻岩、花岗岩	100~200	85~110	120~170	170~200	215~240	260~360

表 66 正循环回转钻进转速选择参考表

岩土类别	线速度 (m/s)	孔径 (m)				
		0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
		转速 (r/min)				
稳定性好的土层	1.5~3.5	72~167	48~111	36~84	29~67	24~56
稳定性较差的土层	0.7~1.5	33~72	22~48	17~36	13~29	11~24
较不稳定的砂层、漂卵石层	0.5~0.7	24~33	16~22	12~17	10~13	8~11
软质岩 ($\sigma_c < 30\text{MPa}$)	1.7~2.0	81~95	54~64	41~48	32~38	27~32
硬质岩 ($\sigma_c = 30 \sim 60\text{MPa}$)	1.4~1.7	67~81	45~54	33~41	27~32	22~27
极硬岩 ($\sigma_c > 60\text{MPa}$)	1.0~1.4	48~67	32~45	24~33	19~27	16~22

③ 覆盖层钻进

(a) 黏性土层钻进。黏性土层中钻进的特点是可利用钻头的旋转在孔内自行造浆，钻进速度较快。但黏土容易糊钻，造成钻头包泥，增大了钻具的回转阻力，在较软的黏性土中还存在缩颈问题。因此，钻进中要适当控制钻进速度，经常上下活动钻具扫孔，并冲洗钻具，以提高钻进效率。黏性土层中的钻屑尺寸较大，宜选用排屑通畅的长齿尖底翼形刮刀钻头，并采用低钻压、中等转速、大泵量、稀泥浆的钻进方法。随着钻孔深度增加，泥浆黏度也逐渐增大，应注意不断稀释泥浆，降低泥浆黏度至适当范围。

(b) 砂层钻进。砂层钻进的特点是回转阻力较小，钻进速度快；但岩屑量大，孔口返浆含沙量大；孔壁稳定性较差，易发生塌孔、埋钻事故。因此，钻进

中必须采用密度和黏度较高的泥浆护壁；并注意控制升降钻具的速度，减少对孔壁的抽吸和冲击。砂层钻进宜选用稳定性较好的长齿平底翼形刮刀钻头，并采用低钻压、中低转速、大泵量的钻进方法。

(c) 卵砾石层钻进。卵砾石层钻进的特点是回转阻力较大，钻进速度慢，钻具经常跳动，容易发生憋车、憋泵、孔斜、漏浆、塌孔等故障；同时，在正循环回转钻进的过程中，卵砾石既不易破碎，也不易排出，往往跟随钻头下行，堆积于孔底。因此，卵砾石层宜采用冲击反循环法钻进；当卵砾石层占的比例不大时，也可以采用滚刀钻头、组合牙轮钻头或冲击钻头钻进。钻进卵砾石层应采用导向性较好的钻头和大钻压、低转速、大泵量的钻进办法，并使用密度较大、失水率较低的泥浆护壁。用刮刀钻头钻进含有少量粒径较大的卵石，可采用装有取石装置的钻头将其接取上来。对于漂石和孤石，除冲击破碎外，也可用孔内爆破的方法进行处理。地层漏浆时，应及时投入黏土球等堵漏材料，并补充泥浆。钻进中应随时注意侧斜纠偏。

④ 基岩钻进

(a) 大口径钢粒取心钻进。大口径钢粒取心钻进多用于坚硬岩层。钻进的转速，按线速度计，一般在 1.5~2.0m/s 左右；钻压应根据岩性和动力机的功率确定；冲洗液量一般根据岩性变化和钻头直径等因素适当调整。采用多次投砂法时，根据岩性不同每次投砂量约为 30~50kg。钻进中，三班的投砂量要大体一致，中途补砂要均匀，补砂时要活动钻具。应尽量采用较长的钻具和孔底加压的方法钻进。回次终了时，应将钻具提离孔底 0.2~0.3m，进行冲孔后，再提升钻具。孔径 1.0m 左右的钢粒取心钻进技术参数见表 67。

表 67 大口径钢粒取心钻进技术参数

岩石可钻性级别	岩石名称	压力 (Pa)	冲洗液量/min)	一次投砂法的投砂量 (kg/回次)
10	石英板岩	1.5~2.0	600~750	100~150，以后酌情补投
8~9	花岗岩	0.8~1.0	650~750	80~120，以后酌情补投
6~7	砂岩	0.4~0.5	600~700	40~60，以后酌情补投
4~5	黏土岩	0.2~0.3	600~700	20~30，以后酌情补投

(b) 组合牙轮钻和滚刀钻头全断面钻进。组合牙轮钻头和滚刀钻头全断面钻进是基岩钻进常用的钻进方法，这种钻进方法需要较大的钻压。当采用滚刀钻头时，每个钻头安装滚刀的数量和单只滚刀所需要的钻压见表 68 和表 69

(2) 施工注意事项

① 布置施工现场时，应首先考虑泥浆循环、排污、清渣系统的布局，使钻孔作业时泥浆能正常循环，污水及钻渣能顺利排除，以保持良好的施工环境。

② 钻进过程中，应随时注意掌握孔底地层、钻孔垂直度、钻进速度、钻机和钻具的工作状况的变化情况，发现问题应及时调整钻进参数。

③ 钻进过程中，应适当调整升降机钢丝绳的松紧程度，以减少钻杆和水龙头晃动。

④ 在钻进过程中应根据不同的地质条件，随时检查、调整泥浆的性能指标。

⑤ 在同一钻孔中采用多种方法钻进时，要注意换用的方法与地层条件和孔底情况的适应性。如基岩钻进由钢粒钻头改为牙轮钻头时，需注意防止钻头与孔

底不吻合及未捞净的钢粒损坏牙轮。

⑥ 若遇停电或接卸故障而停机时，应将钻具提离孔底 0.2~0.3m，并将其吊住。

⑦ 粗径钻具应装有沉淀管。

⑧ 应备有通用和专用的打捞工具，钻具上应设有便于打捞的装置。

⑨ 钻进过程中应注意防止扳手、管钳、垫叉等工具和金属器物掉落孔内。

(3) 常见事故的预防和处理

如果对地层情况不够了解，没有编制详细的施工组织设计，在钻孔过程中没有采取事故预防措施或违规操作，则极易造成塌孔、孔斜、卡钻、埋钻等事故。常见事故的预防和处理方法见表 70。

表 68 钻头直径和滚刀数量表（个）

钻头直径（mm）	中心刀	边刀	正刀
800~900	1	3	1
900~1200	2	3~4	1
1200~1500	2	4~6	2

注：表中所列滚刀是指 8 系列滚刀，即大头直径为 200mm。

表 69 单只滚刀钻压表

岩层类型			单只滚刀 所需钻压（kN/只）
分类	岩石名称	可黏性等级	
软岩	土、砂、黏土岩	2~4	10~20
中硬岩	石灰岩、砂页岩	5~6	20~30
硬岩	石英砂岩、花岗岩	7~8	30~50

表 70 常见事故的预防和处理方法

事故	事故原因	预防措施	处理方法
塌孔	1. 冲洗液选择不当，不分地层一律采用清水钻进，或泥浆性能达不到要求。 2. 护筒埋设不当，孔内的静水压力不足，或护筒外部填土不密实，有外部水渗入孔内。 3. 松散的底层进尺过快。 4. 大量漏浆，浆面急剧下降。	1. 根据地层条件合理选择冲洗液 2. 按要求埋设护筒，开孔时避免钻头撞击护筒。适当提高护筒内的液注静水压力 3. 适当控制钻进速度 4. 防止漏浆、亏浆，及时补浆。	1. 及时补浆，及时堵漏 2. 当塌孔不严重时可采用增大泥浆比重、黏度和提高泥浆面的措施 3. 上部坍塌时应加长护筒，并在四周回填黏土；下部坍塌时，应及时向孔内填入黏土，将已塌部分全部填实，加大泥浆比重后，再于钻孔下部重新开孔。

(续表 70)

偏孔	1.钻机安装不稳,天轮与孔中心不在一条直线上。 2.钻进中遇到大卵石或软硬不均地层。 3.钻杆的直径和壁厚过小。 4.钻机运转过程中振动过大。 5.钻压、转速过大,给进过快。 6.钻具配重不够。 7.钻头上部没有导正装置。	1.施工前平整场地,对松软的地基进行换土或加固。 2.调整钻机的垂直度,对准孔中心。 3.在易偏孔的孔段采取导向措施。 4.根据地层合理选择钻进参数,不用过高的转速。 5.根据地层和孔径合理选择钻杆规格和钻具配重。	根据偏斜程度的不同,分别采取扫、铲、填的方法。扫就是用翼片较多的钻头轻压慢转,从偏斜处上方往下扫孔,反复多次使钻孔修直;铲孔是用带有加重管和导正管的工具,从偏斜处的上部以垂直冲击力将偏斜部分铲掉,一般冲程为2m,铲出台阶后再用扩孔钻头扩大已铲过的孔段,铲扩交替,直到孔底;纠偏困难时,回填孔斜部位,捣密后再用筒状钻头减压钻进。
卡钻埋钻	1.钻速过快,孔形不好。 2.钻头上部没有扩孔装置。 3.泵量过小或中途停泵,钻渣不能及时排出。 4.钻进基岩时孔壁掉块。	1.控制钻速,保持良好孔形。 2.采用有扩孔装置的钻头。 3.采用适当的泵量,保持孔底清洁,防止供浆中断。 4.防止孔壁掉块。	冲击层中卡钻时,先使钻具降至原来位置,然后边钻边提,直到钻具提出。基岩中卡钻时,先要判明卡钻原因,轻微卡钻可用千斤顶、绞车提出钻具;较严重的卡钻可用捶击振动的方法解决卡钻事故。

2、反循环钻孔桩

(1) 反循环回转钻进的原理和特点

① 反循环回转钻进的原理

泥浆反循环排渣是针对大口径全断面孔钻而开发的关键技术,最大钻孔直径可达3m以上。反循环回转钻进的破岩方式与正循环回转钻进相同,但排渣方式不同,孔内泥浆的流向相反。反循环钻进时,钻杆(排渣管)内泥浆的压力小于钻杆外泥浆的压力;在内外压力差的作用下,孔内泥浆沿钻具与孔壁之间的环状空间流向孔底,与岩屑一起进入钻头吸渣口,通过钻杆内腔返回地面,经沉淀或机械净化处理后再流进孔内。在钻进过程中,随着孔深的增加,不断向孔内补充新鲜泥浆。泥浆反循环的排渣能力主要取决于排渣管内外的压力差、排渣流量和排渣系统的通径。

② 反循环钻进的特点

反循环主要有以下优点:

(a) 泥浆回流的速度比正循环要大的多,一般可达到2~4m/s,而且不受孔径大小的影响,因此它能直接排出粒径较大的钻渣,能满足大口径钻孔的排渣要求。

(b) 减少了钻渣的重复破碎,排渣速度快,钻进效率高,钻头寿命长。

(c) 钻孔环状空间冲洗液的流速慢，对孔壁的破坏作用小；钻孔的超径率比正循环小，减少了混凝土的灌注量。

(d) 可自行清孔，清孔效果好，淤积厚度可不超过 5cm，有利于保证桩端承载力。

(e) 除沙层和卵砾层外，一般可用清水直接造孔，利用钻头的旋转在孔内自行造浆。

反循环钻进的主要缺点：

(a) 泥浆用量多，泥浆净化及废浆处理的工作量大；相应的动力消耗也较大；当钻进速度较慢、排渣量不大时，经济效果较差。

(b) 当卵石粒径接近或超过排渣管路通径时，容易发生吸渣口和管路堵塞故障，处理较困难，影响钻进效率。

(c) 对排渣系统的密封性要求较高，因泄漏引起的故障和工时消耗较多。

(d) 配套设备较多，需占用较大的施工场地。

反循环钻进理想的应用条件是：①有较充足的水源；②地层中没有大于钻杆内径 4 / 5 的卵石或杂物，卵石含量不大于 20 %；③地下水位适当，地下水位过高或过低都会带来不利影响；④没有自重湿陷性黄土层；⑤孔径 600 ~ 3000 mm，孔深不大于 100 m。

(2) 反循环钻进的类型和适用条件

按反循环成因和动力来源不同，反循环钻进可分为泵吸法、气举法和射流法三种类型。孔深 50 m 以内泵吸法和射流法的排渣效率优于气举法，孔深超过 50 m 时，气举法的排渣效率较高，且适用深度不受大气压的限制，但孔深 10 m 以内气举法的排渣效果很差，不宜采用。

(3) 反循环钻机的型号与性能，详见表 71。

表 71 国内反循环回转钻机的主要型号和技术性能

类型	型号	最大孔径(mm)	最大孔深(mm)	转速(r/min)	最大扭矩(kN·m)	主机动力(kw)	质量(t)	制造厂家
动力头式	GSD-50	1200	50	12-32	16	55	8	北京勘探机械厂
	GJD-1500	1200	50	6.3-30.6	39.2		21	张家口探钻机械厂
	GQ-15	1500	50	13.5-98.5	22.1	37	5.9	重庆探钻机械厂
	GMD-18	2600	50	12-50	24	37		西安探钻机械厂
	GD-1200	1200	70	16.7-33.5	9.81	28	13.2	洛阳矿山机械厂
	GD-1500	1500	70	10.6-32.0	19.3	25*2	20.8	
	GZY-2500	2500	100	0-15	90	110	30	
	KT1500	1500	100	6.8-88	24.7	40	24	郑州勘察机械厂
	GQ-12	1200	50	21-80	12	30	4	西北探矿机械厂
	GQ-12B	1200	50	21-157	12	30	7.5	连云港黄海机械厂
	GQ-15A	1500	50	18-70	15	30	7.5	
	GJD-12	1200	50					上海勘探机械厂
	GJD-15A	1500	50	12.1-45.8	17.37	45	12	江汉建筑机械厂

(续表 71)

转 盘 式	GPS-15	1500	50	13-42	17.7	52	8	上海探矿机械厂
	GPS-20	2000	80	8-56	30.0	59	10	
	GJC-40H F	1500	40	40-123	13.61	118	15	天津探钻机械厂
	GJ-20	2000	80	13-42	20	35	15	衡阳探钻机械厂
	GPF-2000 D	2000	100		25		11	张家口探钻机械 厂
	GZY-3000	3000	90	0-16	200	210	55	洛阳矿山机械厂
	KP3500	3500	130	0-24	210	203	47	郑州勘察机械厂
	KP2000	2000	100	10-63	43.8	45	12	
	KP1500	1500	100	15-78	23.5	37	11	
	QJ250-1	2500	100	7.8-26	117.6	95	20	江西万通工程机 械有限公司
	GW-25	2500	80	8-24	80	75	20	
	GW-30	3000	90	8-29	120	145	25	河北建设勘察 研究院
	GF-300	3000	120	6-35	130	90	42	
	GM-20	2000	80	12-88	36	45	13	连云港黄海 机械厂
	GPY-26	2600	100	8-24	80	75	20	
	ZY3000	3000	80	4-8	150	225	35	
	GPF-12	1200	80	24-78	10	30	6	河北裕隆机械有 限责任公司(邯 郸探钻机械厂)
	GPF-18	1800	80	14-45	20	37	8	
	GPF-24	2500	80	10-70	40	45	10	

(4) 反循环系统故障的预防与处理

① 反循环系统启动后运转不正常。检查钻杆法兰、砂石泵盘根、水龙头压盖等有无松动、漏水、漏气。

② 管路堵塞，泥浆突然中断。在沙卵石层钻进时，应防止抽吸钻渣过多使混合浆液的比重过大。宜采用钻进一段后，稍停片刻再钻的方法。为防止大卵石吸进管内，钻头吸入口的直径小于钻杆内径 10 ~ 20 mm；也可在钻头吸入口中央横焊一根直径 6 mm 的短钢筋，但这种方法对排渣粒径的限制过大。发生堵管时，把钻头略为提升，用锤敲打钻杆及管路中的各处弯头，或反复启闭出浆控制闸门，使管内压力突增、突减，将堵塞物冲出。

常见钻孔事故的处理。

(5) 反循环钻进常见钻孔事故的处理与正循环基本相同(参见表 70)。

3、 潜水电钻成孔桩

(1) 潜水钻机成孔的特点及其适用范围

潜水钻机成孔属底动力钻进，电动机通过减速机构与钻头直接连接，一起潜入水(泥浆)下工作；其上部与钻杆连接，钻杆一般不兼作送浆、排渣管，只起提供旋转反力的作用。潜水钻机具有结构简单、重量轻、体积小、操作和维修方

便等特点。由于其动力在孔底，钻杆不回转；故功率损耗小、钻进效率高，易于实现反循环；钻进时基本无噪声、无振动，对孔壁的扰动很小。

潜孔钻机成孔的原理与正、反循环回转钻机成孔的原理相同，既可正循环排渣，也可反循环排渣。当采用反循环排渣时，有泵吸反循环（砂石泵置于地面）、泵举反循环（砂石泵和潜水电钻安装在一起）和气举反循环三种方式。其中泵举反循环最为先进，砂石泵在孔底工作时，其反循环系统的工作压力不受大气压力的限制，可使用较高扬程的砂石泵，排渣效率更高，且能适应更大的钻孔深度。

潜水钻机适用于在淤泥、黏土、砂层、软岩、强风化岩及含有少量砾石的粘土层等地层中钻进，尤其适用于钻进地下水位较高的地层。其钻孔直径为 450~2500 mm，最大钻孔深度为 80 m。将数台潜水钻机的主机组合成群钻，可进行条形截面桩或地下连续墙的施工。

(1) 潜水钻机性能，见表 72。

表 72 国产 KQ 型潜水钻机的主要技术性能

机型		KQ-800	KQ-1250	KQ-1500	KQ-2000
钻孔直径 (mm)		800	1250	1500	2000
钻孔深度 (m)		50	50	80	80
钻杆 (mm)		80×80、90×90	96×96	Φ127	Φ150
潜水钻主机	主轴转速 (r/min)	200	60	38.5	21.3
	主轴扭矩 (kN.m)	1.20	4.46	5.57	13.72
	电机功率 (kW)	22	22	22	37
	电机转速 (r/min)	970	970	970	975
	主机质量 (kg)	550	700	1000	1900
卷扬机	最大提升力 (kN)	19.6	19.6	49.0	
	提升速度 (m/s)	0.067	0.067	0.230	
	电机功率 (kW)	10	10	13	
砂石泵	型号	3PS	3PS	Q4PS	6PS
	排量 (m ³ /s)	80	80	120	180
	功率 (kW)	22	22	30	45
整机质量 (t)		7.28	10.46	15.43	20.18

由于钻机是在充满含砂泥浆的孔内工作，所以密封必须可靠。钻机密封共有三部分：①上部中心送水管与机体间的密封（没有中心送水管则没有该密封）；②主轴下端与机体之间的密封；③电机上下轴端均有一组机械密封装置，以防止电机的内外渗漏。

4、旋挖成孔桩

(1) 旋挖成孔的特点及适用范围

① 工作原理

在泥浆护壁的条件下，旋挖钻机上的转盘或动力头带动可伸缩式钻杆和钻杆底部的钻斗旋转，用钻斗底端和侧面开口上的切削刀具切削岩土，同时切削下来的岩土从开口处进入钻斗内。待钻斗装满钻屑后，通过伸缩钻杆把钻口提到孔口，自动开底卸土，再把钻斗下到孔底继续钻进。如此反复，直到钻到设计孔深。

② 旋挖成孔的特点

(a) 在一般地层中均使用泥浆护壁，在无地下水的粘土层中可不使用稳定液。

(b) 泥浆不循环，钻渣由钻斗直接提出孔外，泥浆只起护壁作用，因此泥浆的耗量和处理工作量均较小，附属设备也较小。

(c) 一般采用多层套装伸缩钻杆，钻进时不需接长钻杆，起、下钻速度快，操作简便，成孔效率高。一般在土层、砂层中的钻进速度可达 8~10m/h，在粘土层中可达 4~6m/h。

(d) 一般采用履带吊车作为装载主机，钻机移动和安装方便，但占用面积较大，钻机的价格和台班费用较高。

(e) 由于钻机需频繁在孔内上下，其吸抽、刮削作用对孔壁稳定不利，因此对泥浆质量和泥浆管理的要求较高。

(f) 当地基中有较大的承压水时，护壁困难，且成桩质量不易保证。

③ 适用范围

(a) 旋挖法在黏土、粉土、砂土等软土地基及粒径小于 10cm 的卵砾石层中均可施工，但在有承压水的地层中应用要慎重。

(b) 旋挖钻孔直径一般为 0.8~2.0m，最大可达 3.0m；钻孔深度一般不超过 50m，最大可达 90m。当孔深超过 35m 时，宜将孔径限制在 900~1200mm 的范围内。

(2) 主要机械和规格，见表 73。

表 73 部分国内外旋挖钻机的型号和主要技术规格

型号	最大孔径 (mm)	最大孔深 (m)	最大扭矩(kNm)	主卷扬拉力 (kN)	功率 (kW)	质量 (t)	生产厂家
ZY120	1500	48	120	160	179	50	北京经纬巨力工程 机械有限公司
ZY160	1800	48	160	160	223	55	
ZY200	2000	60	200	180	246	60	
ZKL1500D	1500	40	105	250	附机 113HP		北京城市建设 工程机械厂
ZKL2000D	2000	60	200	400	附机 160HP		
TR-2000C	2000	62	220	200	224		杭州天锐公司组装
R-518	1800	66	172	148	300HP	59	意大利 SOILMFC 公司
NCB12	1500	48	120	120	113	38	意大利 NCB 公司
NCB16	1800	58	160	170	195	55	
NCB18	2000	64	200	185	303HP	62	
NCB22	2200	67	220	200	303HP	66	
LB-400	2000	40	400	400	400	88	德国 LIEBHERR 公司
LRB-250	1500	36	250	350	400	72	
BG9	1200	36	93	100	125	39	德国 BAUER 公司
BG12	1500	48	123	100	169	52	
BG15	1800	55	145	160	160	63	
BG22	2000	60	220	200	222	70	
BG30	3000	63	360	268	180	80	
BG40	3000	90	360	300	297	117	

5、 冲抓成孔桩

(1) 特点

冲抓成孔是在泥浆护壁的条件下，用特制的多瓣冲抓锤直接抓取岩土成孔。它的冲击作用使锤瓣能深入切入土体中，而不以击碎石块为主要目的。空中的泥浆只起护壁作用。地层较稳定时，也可用清水在孔内造浆护壁。冲抓成孔具有以

下特点:

- ① 设备和机具简单, 投资少, 成本低。
- ② 工艺简单, 操作技术容易掌握, 适于在小型灌注桩工程中推广使用。
- ③ 对地层和孔径的适用性较强, 较大的卵石可直接抓出孔外。
- ④ 泥浆不循环, 也不需要泥浆携渣, 因而泥浆和动力的消耗均较少。

(2) 冲抓成孔的使用范围

冲抓成孔适用于黏土、砂土、黄土、较松散的砂砾、卵石和卵石夹小漂石等地层。它的钻进速度因锤重、地层、孔深、孔径不同而有差异。冲抓锤在漂石层和基岩中钻孔需与冲击钻头配合, 先砸后抓, 不适于单独使用。冲抓成孔的施工孔径一般为 700~1200mm, 最大可达 1600mm。成孔深度一般为 20m, 最大可达 40m。

(3) 冲抓机具

① 钻机和钻架

冲抓钻具可用特制的冲抓成孔机吊挂, 也可用其他性能适宜的定型钻机吊挂。对于小型工程, 用木制钻架配合卷扬机也能施工。钻架的形式和规格根据具体施工要求而定, 其支撑能力应不小于锤重的 2.5 倍。架顶滑轮的安全系数应不小于 6.0。滑轮直径不宜小于 18 倍钢丝绳直径, 且不宜小于 40cm。

② 卷扬机

冲抓过程中经常会遇到各种不正常情况, 使卷扬机的负荷超过锥重很多, 所以锥重 1~2t 时, 一般要用提升力 3t 的卷扬机; 锥重 2~3t 时, 要用 5t 的卷扬机。卷扬机钢丝绳的速度应依据钻孔深度和操作人员的熟练程度以及孔壁稳定情况等决定。对于 20m 以内的桩孔, 一般使用 18m/min 左右的绳速; 对于深孔, 可用 30m/min 左右的绳速, 这样可以减少提锥出孔的时间。

③ 冲抓锥

冲抓锥由外套筒、内套筒锥瓣、连杆、闭斗滑轮组及自动挂钩装置等部件组成。冲抓锥的瓣锥有两瓣、三瓣、四瓣和六瓣等类型, 以两瓣和四瓣较为普遍。冲抓锥的锥径(锥半张开时的最大直径)宜为孔径的 85%~90%, 疏松地层采用低值, 密实地层采用高值。锥重视孔径和土层而定, 锥重越大冲抓进度越大。冲抓锥的高度不宜小于直径的 1.5 倍, 也不宜过高。常用的锥径为 1.1~1.5m, 重量为 1.5~2.8t, 高度为 1.7~2.7m。

按操纵锤瓣开合方法的不同, 冲击锥分双绳和单绳两种形式。

6、 钻孔压浆桩

(1) 基本原理

钻孔压浆灌注桩是先用长螺旋钻机和带有中心管的长螺旋钻具钻孔, 钻至设计深度后, 用高压注浆泵通过输送管和钻杆向孔底压送水泥浆, 借助水泥浆的压力, 将钻杆慢慢提起, 直至提出地面。移开钻具后, 在孔内放置钢筋笼, 同时插入一根二次注浆管至孔底; 然后将孔内投放砾石或碎石直至桩顶, 再通过二次注浆管补浆, 直至浆液溢出孔口, 浆面不断下降。至此, 成桩工作全部完成。

钻孔压浆灌注桩的桩体材料为无砂混凝土, 强度等级一般为 C20。

(2) 特点:

- ① 桩体密实、局部能扩径, 单桩承载能力高, 沉降量小。
- ② 不用泥浆护壁, 可避免水下灌注混凝土的不利影响。

- ③ 采用高压灌浆工艺，对桩孔周围地层有明显的渗透、挤密加固作用。
- ④ 不需清理孔底虚土，可有效防止断桩、缩颈等情况发生，质量可靠。
- ⑤ 能在流沙、淤泥、松散、漏失对那个复杂地质条件及高地下水位的情况下顺利成桩。
- ⑥ 辅助设备少，施工速度快、成本低。
- ⑦ 排污量小，低噪声，低振动，施工现场清洁文明。

(3) 适用范围

钻孔压浆灌注桩适用于黏性土、粉土、淤泥质土、湿陷性黄土、砂土、砂砾等地层。既可干作业成孔，也能在地下水位以下成孔；采用特制钻头可在抗压强度不大于 40MPa 的风化岩层、盐渍土层和砂卵石层中成孔；采用特殊措施还可用于有地下水位的流沙层；可用作支撑桩、抗拔桩、基坑支护桩、防水帷幕桩等。桩径使用范围为 300~1000mm，常用桩径为 400~800 mm；最大桩长可达 33m，常用的桩长为 10~20m。

(4) 施工机具及材料

① 施工机具

主要施工机具具有长螺旋钻机、长螺旋钻具、注浆泵、注水器、铲车、高压注浆管、制浆设备等。

(a) 长螺旋钻机。应选用钻孔孔径、深度及功率满足钻孔要求的长螺旋钻机。

(b) 注浆泵。通常采用 SNC-300 型泵车，其压力为 4.5~30MPa，相应的排量为 1040~154L/min。当桩径、桩长较小时，也可用 BW-320 型泥浆泵代替。由于水泥浆的密度一般大于 1.6g/cm³，黏度大于 35s，且为高压注浆工况，因此对注浆泵的吸程、泵量、泵压及功率储备都有严格的要求。

(c) 注水器。注水器是注浆管与动力头之间的高压密封装置，是实现在钻杆旋转的同时进行高压注浆的关键装置。

(d) 长螺旋钻杆。用于钻孔压浆灌注桩施工的长螺旋钻杆在结构和外形上与一般长螺旋钻杆相同，但各节之间的连接处必须有密封装置，不得漏浆；故不宜采用插接方式。

(e) 高压注浆管。用于连接注浆泵和螺旋钻杆，根据桩径和桩长选配。一般采用 B25×4S-275 型或 B32×4S-210 型高压胶管。

② 材料

(a) 水泥。压浆采用纯水泥浆，水灰比一般为 0.55。宜采用 42.5 级及以上的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，必须新鲜无结块。低温季节施工可使用早强型普通硅酸盐水泥。

(b) 粗骨料。粗骨料常用粒径 20~40mm 的碎石或卵石，也有 16~31.5mm、31.5~63mm、10~20mm 与 16~31.5mm 混合级配、20~40mm 与 31.5~63mm 混合级配等规格；桩径、桩长较大且易穿孔时骨料粒径宜大，反之骨料粒径宜小。最大骨料粒径应不大于钢筋最小净距的 1/2。骨料中粒径 10mm 以下的含量宜控制在 5% 以内，含泥量应小于 3%。石子与浆液的体积比一般为 1: 0.75。

(c) 钢筋。钻孔压浆桩使用的钢筋笼与普通灌注桩完全相同。主筋采用热轧带肋钢筋，常用规格有为 Φ12~Φ32；螺旋箍筋采用热轧圆盘条，常用规格为 Φ6~Φ12；架立箍筋场采用热轧光圆钢筋，常用规格为 Φ10~Φ16。

(d) 外加剂。以提高桩身混凝土强度为目的时宜用 FDN、UNF、NNO 等奈系高效减水剂或缓凝型高效减水剂。当桩径较大，注浆能力不足时，可使用缓

凝剂或缓凝型减水剂。

(5) 操作要点

① 定桩位、钻机就位及钻孔可按常规长螺旋钻进方法进行。开钻前必须用棉纱团将钻头上的出浆口堵塞严实。

② 钻至设计高程后，钻机空转，开始注浆。确认浆液到达孔底后开始边注浆边提钻。提钻速度应根据注浆量决定，注浆量应略大于提钻形成的空间，以保证钻头始终浸没在浆面以下 1.0m 左右提钻压浆应慢速进行，一般控制在 0.5~1.0m/min，过快易塌孔或缩孔。注浆压力一般为 4~8MPa，根据地层情况适当调整。

③ 当钻杆提至没有埋钻危险的位置时停止转动，继续按原来速度注浆和提钻。

④ 当浆面达到没有塌孔危险的高度或地下水位以上 0.5~1.0m 处时停止注浆，在空口清理干净时，将钻具全部提出孔外，立即安放护筒，并加盖孔口盖板。

⑤ 安装补浆管。将 $\Phi 20\text{mm}$ 的聚氯乙烯管穿入钢筋笼内，并做简易固定；其下端距孔底 1.0m，上端露出地面 0.5m 左右并安装快速接头。当桩长超过 13m 时，宜放两根补浆管，增加的一根补浆管长度为桩长的 1/2 即可。

⑥ 下设钢筋笼。钢筋笼的结构、材料及制作、安装方法与一般灌注桩相同。

⑦ 投放骨料。钢筋笼就位后应立即在孔口安放漏斗，并用铲车向孔内投放骨料。骨料顶面应高出桩顶高程 0.5~1.0mm，并做好记录。骨料投放量不应少于桩的理论计算体积的 80%。

⑧ 补浆。补浆前先用土将桩孔四周围高 0.3m 左右。在投料完成约 15 分钟后先对长补浆管进行补浆，补浆压力 2~4MPa。补浆时现场人员需退离桩孔 5m 以外。首次补浆应将泥水返净，每次补浆都应见纯净水泥浆开始从桩孔流出方可终止。长管补浆结束 15min 后可开始短管补浆（有两根补浆管时），方法与长管补浆相同。由于水泥浆析水等原因，浆面会反复下降，因此必须多次补浆直至浆面停止下降方可结束全部补浆工序。

⑨ 基础桩的末次补浆应采用花管补浆振捣，花管插入桩头下约 4m。花管为长 5m、直径 32mm 的钢管，上端焊有快速接头，下端封堵，下部 0.5m 范围内钻有若干 $\Phi 5\text{mm}$ 孔。补浆后采用插入式振捣器振捣，快插慢拔，且不得长时间在一处振捣，振捣深度应大于 1.5m。

⑩ 制浆。制浆岗在得到钻机制会指令后方可开始搅浆。搅好的浆必须用 16 目的筛网过滤后方可放入储浆池。水泥浆的水灰比应控制在 0.45~0.6。

(6) 注意事项

① 当在软土层中成孔，且桩距小于 3.5 倍桩径时，宜跳打成桩，以防高压注浆使邻桩断裂；中间桩须待相邻一序桩混凝土强度达到 50% 设计强度后方可施工。

② 钻孔时应随时清理排出的土渣，并将邻近为完成补浆的桩孔盖好；投料和注浆时严防孔口的泥块调入孔内。

③ 遇到较大的漂石或孤石钻进受阻时，一般应做移位处理。

④ 压浆结束后应立即下设钢筋和投放碎石，并进行补浆，间隔时间应不大于 30min。

⑤ 已配置的水泥浆应在初凝时间内完成，超过时间不得加水或掺水泥后再用。

⑥ 当土质松散，拔钻后塌方不能成孔时，可先灌注水泥浆，待凝 2h 后再

二次钻孔。

- ⑦ 在同一水灰比情况下，每班成型 2 组水泥浆试块。
- ⑧ 注意保护已完成桩的桩头，防止被车辆、钻机碾压。

7、 CFG 桩

(1) 基本原理

CFG 桩也称水泥粉煤灰碎石桩，它的施工方法是先用长螺旋钻机钻孔或沉管成孔，然后用混凝土泵向孔内压送一种由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂等混合料加水拌制而成的特殊混凝土，边压注混凝土边提升钻具，直至达到预定的高程，成桩后不再下设钢筋笼。

CFG 桩的桩体材料具有一定的胶结强度和变形性能，它与桩间土和褥垫层共同组成符合地基，桩、土共同承担荷载，与碎石桩的作用基本相同，但比碎石桩复合地基的承载能力更大。

(2) CFG 桩的特点

① CFG 桩的单桩承载能力主要来自全桩长的摩阻力及桩端承载力，而碎石桩的承载力主要靠桩顶以下的有限长度内桩周土的侧向约束力。在同等置换条件下，CFG 桩承担荷载占总荷载的比值为碎石桩的 1~2 倍。

② CFG 桩复合地基的承载力有较大的可调性，可提高地基的承载力 2~5 倍。

③ 与碎石桩相比，增加 CFG 桩的桩长可有效地减少变形，总变形量较小。

④ 与素混凝土桩相比，CFG 桩复合地基的承载力与其相近，但由于压缩模量的增大而显著地降低了荷载作用下的变形，使建筑物的沉降在短期内趋于稳定。同时，大量工业废料的利用可使处理费用节约 20%~30%，经济、社会效益显著。

⑤ 可采用长螺旋钻机快速施工，且不用泥浆，无污染、无振动，不受地下水位限制；施工简便，成本低廉。

(3) 适用范围

CFG 桩使用于黏性土、粉土、砂土和自重固结的素填土等地基，对于淤泥质土应按地区经验或通过现场试验确定其适用性。当采用长螺旋钻机成孔时，适用孔径为 400~800mm，最大孔深可达 30m。

(4) 施工方法与机具

① 施工方法

CFG 桩的施工方法有：长螺旋钻孔灌注成桩；长螺旋钻孔、钻杆内泵送混凝土成桩；振动沉管灌注成桩等方法。其中以长螺旋钻孔、钻杆内泵送混凝土成桩法效果最好，成桩速度最快，应用最广。

② 施工机具

CFG 桩的施工机具主要有双动力头长螺旋钻机及钻具、混凝土泵、混凝土搅拌机及混凝土输送管路等。

8、 短螺旋钻孔灌注桩

(1) 基本原理

短螺旋钻孔是用回转钻机带动钻杆和短螺旋钻头旋转破土钻进，钻杆上无

输土螺旋板，每回次的钻渣由短螺旋钻具直接提出孔外，快速反转卸土；不用泥浆护壁，也无需泥浆循环排渣。成孔后下设钢筋笼，明浇混凝土成桩。

(2) 施工特点

① 因钻孔分回次进行，不用长螺旋钻杆全程排土，钻进阻力小，且可使用伸缩钻杆，因此适用的孔径、孔深较大。

② 不使用泥浆，辅助设备少，节省动力和费用，施工成本较低。

③ 施工现场无泥浆污染、无振动、低噪声，对周围环境的影响较小。

④ 可采用伸缩钻杆和反转卸土工艺，起下钻杆不用接卸钻杆，操作简便，钻进速度较快。

⑤ 适用的钻头类型较多，且更换方便，钻进基岩和含卵、漂石层的能力优于长螺旋钻进。

⑥ 钻具对孔壁无支护能力，在松散地层中塌孔的可能性较长螺旋钻进大。

(3) 适用范围

短螺旋钻进一般只适用于地下水位以上较密实的土层、砂层及含有少量卵砾石的地层。遇地下水时需下设套管护壁，否则不仅孔壁容易坍塌，而且钻渣叶不易排出。最大钻孔深度根据钻机的动力大小和所配伸缩钻杆的长度而定，一般不超过 50m。钻孔直径一般为 500~1500mm，最大可达 2000mm。

(4) 钻进技术

① 短螺旋钻进应根据地层情况、钻机的提升能力和钻头长度确定回次进尺。钻进砂土、粉土层回次进尺可达 0.8~1.2m，而黏土层的回次进尺宜控制在 0.6m 以下。回次进尺一般不宜超过短螺旋钻头长度的 2/3。

② 钻进一般不用加压，主要依靠钻具重量给进；当孔深较大时，为保持钻孔垂直，应适当减压钻进，使钻头处于半悬吊状态。钻进基岩可适当加压。

③ 钻进转速应根据地层性质和钻孔直径确定，可参照表 74 选择。卸土反转转速一般为 130~160r/min。

表 74 短螺旋钻进转速选择参照表

孔径 (mm)	500~800	900~1200	1300~1600	1700~2000	>2000
砂土	45~50	40~45	35~40	30~35	25~30
粉土	40~45	35~40	30~35	25~30	20~25
黏土	35~40	30~35	25~30	20~25	15~20
砂砾石	30~35	25~30	20~25	15~20	10~15
砂卵石	25~30	20~25	15~20	10~15	5~10

④ 遇有粒径较大的卵石或漂石时，应采用带有取石装置的筒形钻头钻进，对于较大的探头石，可先用环形钻头切割后再用取石钻头捞出。

⑤ 开孔时需埋设护筒。护筒直径大于桩径 100mm，高度根据地层情况确定，一般不小于 3m。埋设前先用直径较大的钻头钻孔至需要的深度，然后吊装护筒，并用钻机将护筒压入孔内。

(5) 注意事项：

① 钻进时注意钻机的复合变化情况，发现负荷过大时应立即降低钻压和转速。

② 钻进时应保持钻杆垂直，每次下钻都要对准孔位。

③ 发现钻具跳动过大时应查明情况，若遇粒径较大的卵石或漂石应及时换用其他钻头处理。

④ 现场必须有良好的排水设施，防止地面水流入或渗入孔内。孔口积土应及时清理。

⑤ 坚持“随钻随浇”的原则，雨天不得进行钻孔作业，并遮盖好孔口。

9、 全套管钻孔灌注桩

(1) 基本原理

全套管钻孔灌注桩是国外应用最广的一种灌注桩施工技术。它的成功方法是用大功率履带式钻机配以各种冲抓、旋挖、短螺旋等直接出渣钻具钻孔，同时以打、压、拧等方法沉入大型钢套管护壁，而不使用泥浆护壁和携渣，直至达到设计孔深。遇大漂石或基岩，则先用冲击钻头击碎后再用上述钻具取渣钻进。清底的方法根据具体的情况而定。混凝土浇筑方法和泥浆护壁钻孔灌注桩相同，也是采用直升导管法。在浇筑混凝土的同时，用顶拔、振动等方法拔出套管。

在遇到松散易塌地层时，一般的冲抓、旋挖、短螺旋等的钻孔方法均可全孔用钢套管护壁，但在沉拔管能力和成孔深度、孔径方面均存在一定的局限性。最具代表性、最能发挥套管作用的是贝诺特法，它的最大沉管成桩深度可达 70m，桩径可达 2.0m。

贝诺特法在 20 世纪 50 年代初期由法国贝诺特国内公司首创。由于这种工法具有一些重要的特点，特别是对环境设计没有不利影响，所以很快受到一些先进国家的重视，并大力推广应用，经过几十年的发展，施工机具和施工工艺均已十分成熟。我国在 20 世纪 80 年代后期也应用了该工法的施工设备。实践证明，同比条件下它的施工速度快，成桩质量好，且对环境无不利影响，是一种有发展前途的新桩型。下面以贝诺特法为例介绍全套管钻孔灌注桩。

(2) 特点

① 优点

(a) 使用套管护壁成孔，不用泥浆护壁，避免了因使用泥浆所引起费用、环境污染和质量问题。

(b) 挖掘时可直观了解地层情况，持力层判断准确，便于确定桩长，承载力可靠。

(c) 垂直度偏差小，孔壁不会坍塌，孔形圆整，超浇方量少，成孔质量高。

(d) 成孔设备功率大，机械化程度高，成桩直径、深度较大，施工速度快，地层适用范围广。

(e) 钢筋不受泥浆污染无混凝土混浆和桩周夹泥的问题，桩身质量好。

(f) 施工无噪声、无振动，作业面积干净，现场文明。

(g) 主机可以自行，在现场移动方便，可以靠近已有建筑物施工。

② 缺点

(a) 需要使用大型机械和套管，机械设备费用高，施工时需要较大的场地。

(b) 在水上施工需要搭设兼顾庞大的施工平台，以提供拧管反力，很不经济。

(c) 遇到地下水位以下的、较厚的粉细砂层时，沉管和掘进都很困难，而且有拔不出套管的危险。

(d) 受套管直径和沉拔管能力所限，还不能满足直径 2m 以上的特大型灌注桩的施工要求。

(3) 适用范围

贝诺特桩适用于各种土质，在漂卵石层和风化岩层中也可使用，特别适用在松散易塌地层中以及对环境保护有严格要求的地区适用，还可用于打斜桩，但不宜用于有地下水的厚度超过 5m 的粉、细砂层。

(4) 机具设备

贝诺特法的主要成孔机械是各种型号的履带式冲抓钻机，配套机具设备有：冲抓斗、第一节套管、标准节套管、液压沉拔管机、汽车吊、装载机、自卸汽车、钢筋加工机械、混凝土搅拌机、混凝土浇筑导管、潜水砂石泵（清孔用）等。部分贝诺特钻机的型号和技术规格见表 75。

表 75 部分贝诺特钻机的型号和技术规格

型号	MT-130	MT-150	MT-200	EDF-55	THC-20	THC-30	THC-50
桩径(mm)	900~1200	1400	1800	1100	1200	1480	2000
挖掘深度(m)	50	50	50	50	40	40	50
压进力(kN)	200	250	350	500	150	260	1180
拔出力(kN)	600	920	920	600	420	924	900
摇动扭矩(kN.m)	680	1150	1800				
主机质量(t)				36	23	35	50
冲抓斗质量(kg)	1600~2000	3200	4000				
冲抓斗斗容(m ³)	0.18~0.27	0.30	0.50				
制造厂家	日本三菱重工			法国贝诺特	日本加藤		

10、 沉管灌注桩

(1) 沉管灌注桩的原理及类型

沉管灌注桩是采用振动沉管桩机等将带有封口桩尖的桩管直接打入地层至设计深度成孔，然后放入钢筋笼，边浇筑混凝土边拔出桩管而形成的混凝土灌注桩。

沉管灌注桩按沉管机具和方法的不同，可分为振动沉管灌注桩、锤击沉管灌注桩和振动冲击沉管灌注桩。

(2) 沉管灌注桩的特点

- ① 施工设备简单，成桩速度快，工期短。
- ② 孔形好，成桩质量高，超径系数小，节省材料。
- ③ 不用冲洗液，无泥浆排放问题，现场整洁。
- ④ 对地层和环境有挤土和振动影响。
- ⑤ 对软土中成桩易产生缩颈缺陷。

(3) 沉管灌注桩的适用范围

振动沉管灌注桩适用于一般黏性土、粉土、淤泥质土、松散至中密的砂土及人工填土层。不宜用于标准贯入击数 N 值大于 12 的砂土和 N 值大于 15 的黏性土以及碎石土。在厚度较大的高流塑淤泥层中不宜采用桩径小于 340mm 的沉管灌注桩。

(4) 常见质量事故及预防

沉管灌注桩常见的质量事故的发生原因及其预防措施见表 76。

表 76 沉管灌注桩常见质量事故的预防措施

名称	事故原因	预防措施
桩身缩径	<ol style="list-style-type: none"> 1.含水量高的淤泥质软土在沉管时受到振动、挤压后，产生很高的孔隙水压力，桩管拔出后作用到新浇筑的混凝土桩上。 2.拔管过快，孔隙水压力来不及扩散。 3.桩管内的混凝土过少，混凝土自重压力不够。 4.混凝土和易性不好。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.控制拔管速度，采用反插法施工。 2.拔管时多灌混凝土，管内的混凝土面始终高于地面，或高于地下水位 1.5m 以上。 3.控制混凝土坍落度在 8.0~10cm 范围内。
断桩	<ol style="list-style-type: none"> 1.桩距过小，混凝土终凝不久，强度不高，临时沉管时受到振动和挤压造成断桩。 2.打长桩时混凝土加料不及时，桩管拔离混凝土面，使孔壁的泥土塌入孔内造成断桩。 3.地下水位过高，桩管与桩尖之间封底不当，使地下水进入桩管，造成混凝土严重离析，使桩身失去整体性而造成断桩。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.桩距大于 3.5 倍桩径，或采用跳打加大桩的施工间。 2.在邻桩混凝土终凝之前，将影响范围内的桩施工完毕。 3.随时监测管内混凝土面深度，严格控制拔管速度和拔管时间，防止拔离混凝土。 4.合理安排桩机的行走路线。 5.混凝土面高于地下水位 1.5m 左右，防止地下水位进入桩管。 6.在沉管过程中防止桩尖与桩管脱离或离开孔底，并灌入 1m 高混凝土封底。
悬桩 (吊脚桩)	<ol style="list-style-type: none"> 1.混凝土桩尖强度不够，被打碎进入桩管，水和泥土挤入桩管，与灌入的混凝土混合而成松散软弱层。 2.在使用活瓣桩尖时，沉管到底后被周围土体包裹而打不开，或拔至一定高度时才打开，而此时孔底部已被孔壁回落的泥土填塞而形成悬桩。 3.封底混凝土高度不足以抵抗地下水的侵蚀而使混凝土离析而造成悬桩。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.严格控制和检查混凝土桩尖的强度。 2.沉管时用吊钩检查桩尖是否缩入管内；如果是，及时拔出更换新的桩尖，或将桩孔回填，重新沉管。 3.在地下水位较高的地层施工时，尽量不采用活瓣桩尖，而使用混凝土预制桩尖。 4.增加桩管内的混凝土量，使桩管内混凝土高于地下水位 2.0m 以上。

11、 异形截面灌注桩

(1) 概述

异形截面灌注桩是指非圆截面灌注桩，如条形桩、“丁”字桩、“工”字桩、“十”字桩等。这是一种在泥浆护壁条件下，用专用挖槽机械成孔，然后整体下设钢筋笼并浇筑混凝土形成的大型灌注桩。异性截面桩是地下连续墙技术在桩基工程中的应用，它适用于各种建筑物，能适应各种承载力要求。最简单的异形截面桩是条形桩，其截面宽度为 0.6~1.2m，截面长度 2.2~7.0m，最小长宽比为 2.0，最大长宽比可达 10.0 以上。其他截面形状均由条形截面变换而来，但并非几个条形桩的简单拼凑，而是整个截面钢筋和混凝土均须连成一体。异形截面灌注桩的界面形式、布置结构见图 12 和图 13。

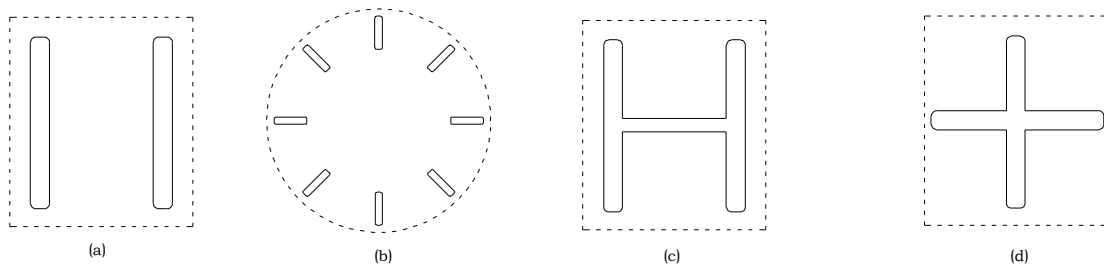


图 12 异形截面桩的布置及截面形式

(a) 条形桩的平行布置； (b) 条形桩辐射型布置； (c) “工”字型独桩； (d) “十”字形独桩

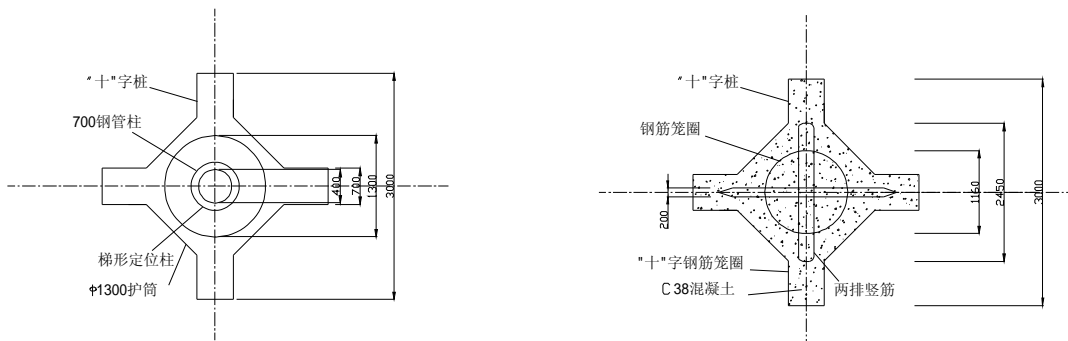


图 13 北京地铁某车站的“十”字形截面灌注桩

我们知道在面积一定的情况下，圆的周长最小，正方形较大，长方形更大。在桩基工程中，在使用同样数量的混凝土条件下，长方形的桩能获得更大的侧面积以及侧面摩阻力，提高了摩擦桩的承载力。用异性桩代替圆桩，如保持承载力不变，则可节约 10%~30% 的混凝土，施工效率提高 5~10 倍；如保持截面积不变，则桩周面积和侧桩摩阻承载力可增加 1.2~2.5 倍。此外，矩形断面的抗弯刚度比圆形断面大，而且在两个互相垂直的方向上具有不同的抗弯刚度，我们可以利用这一特性，合理布置条桩的位置和方向，既可保持工程安全，又可节省混凝土，降低工程造价。天津某科贸大厦原设计为圆

桩方案，后改为条桩方案，两方案的对比情况见表 77。

表 77 条桩和圆桩技术经济指标对比表

类别	根数	断面 (m)	有效 桩长 (m)	混凝土 土量 (m ³)	单桩承 载力 (kN)	单位混凝土承载力 (kN/m ³)	工期
条桩	54	2.5×0.6	24	1944	7500~8500	292~361	1 台抓斗 31d
圆桩	182	Φ0.8	24	2184	2200	183	6 台钻机 30d

异性截面桩的布置和结构形式可根据具体条件和实际需要灵活掌握。用 1~4 根条桩代替很多圆桩可减少承台尺寸，提高整体刚度和水平承载力。大直径圆桩可用多根条桩代替；也可用多翼单桩（十字桩、工字桩）代替，可做成一柱一桩形式，在承载力和抗弯刚度相同的情况下，同样可以节省大量的材料和费用。条桩结构简单，容易施工；多翼桩结构紧凑，整体性好，可根据具体情况选择。在满足使用要求的前提下，应尽量采用条桩。

异形截面灌注桩适用于除漂石外的各种土层，特别适用于较密实的黏性土、粉土、砂土和碎石土层，也可以嵌入风化基岩。桩的截面积一般为 1.5~12.0m²，桩周长度一般为 6~20m，最大成桩深度可达 50m 以上。异形截面桩主要用作建筑物、桥梁和其他结构的大型桩基础，也可用作大型抗滑桩和大型挡土、防冲排桩。

到目前为止，我国仅条桩就已建成 2000 多根，浇筑水下混凝土约 8 万 m³，约相当于直径 0.8m 的圆柱 7000 根。最大条桩面积已达 8.4m²，深度已达到 53.2m。北京新建的几条高速路和城市快速路都使用了很多条桩。

（2）施工特点

① 在泥浆护壁条件下用专用履带式挖槽机械成孔，机械化程度高，施工安全，移机灵活。

② 以长条形孔为施工单元，一次成孔面积大，施工速度快。

③ 常用抓斗挖槽机成孔，对地层的适应能力较强；泥浆不循环，泥浆的用量和对环境的污染均较小。

④ 桩孔的宽度与挖槽机具的规格性能有关，桩孔的长度和形状可根据需要灵活变换。

（3）施工机具

异形截面灌注桩的施工机具与地下连续墙的施工机具基本相同，主要包括成孔机具、清孔机具、泥浆拌制处理机具、钢筋笼制作安装机具和混凝土搅拌浇筑机具，其中关键设备是成槽机具。

成槽宜采用抓斗挖槽机。抓斗挖槽机的适应性能较强，施工速度快，布置移动方便。实际工程中多用抓斗挖槽机成槽。条形桩也可用于多头反循环回转钻机或钢丝绳冲击钻机成槽。但前者只适用于细颗粒地层，后者的施工速度太慢。单头的正、反循环回转钻机均不适于成槽施工，但可用于配合抓斗挖槽机施工，如打导孔、局部扩孔等。

抓斗挖槽机有钢丝绳抓斗、液压抓斗、导板抓斗、长导杆抓斗、短导杆转斗等类型。其中以斗体能够转向的短导杆抓斗最适用。在施工截面复杂的桩孔时，此类抓斗在履带吊主机不移动的情况下，斗体可以左右转动，既可抓横向槽孔，又可抓纵向槽孔。常用的抓斗挖槽机由履带式吊车和斗体两大部分组成，两者之

间以钢丝绳向连接；斗体有导向装置、开闭斗装置、纠偏装置和斗壳组成。通过更换斗壳，一台抓斗挖槽机可用于多种宽度槽孔的成槽施工。

当用抓斗挖槽机成槽时，需另配潜水砂石泵等清孔机具。抓斗本身不能彻底清除孔底沉积物，也不能进行换浆。当地层中有粒径较大的卵石或漂石时，应配备质量 3~5t 的凿石重锤，必要时重锤还可用于破碎基岩。

（七）人工挖孔桩

人工挖孔灌注桩是指配置简易的施工机具人工挖掘成孔，然后安装钢筋笼，浇注混凝土而成为高承载力的大截面桩。桩的底部根据设计要求还可以扩大。

1、挖孔桩的使用范围

- (1) 桩身截面大，单桩承载力高，结构传力明确，沉降量小。
- (2) 施工机具设备简单，占地面积小，操作简单。
- (3) 施工无振动、无噪声、无泥浆污染，对周围的建筑物无影响。
- (4) 可采用明浇方法浇注混凝土，避免了水下浇注的不利影响，不用凿桩头。
- (5) 施工质量可全面直接检查，持力层可以准确判断，成桩质量可靠。
- (6) 成桩截面灵活，可设计成圆形、方形、矩形、孔底扩大形等不同形式。
- (7) 施工速度快，工程造价低。

2、挖孔桩的使用范围

(1) 人工挖孔桩适用于无地下水或者地下水较少的人工填土、黏土、粉质黏土和含少量砂，砂卵石、姜卵石、的黏土层，特别适用于黄土层，可潜入风化岩层一定的深度。在有流沙、地下水位较高、涌水量大的冲积地带以及近代沉积的含水量高的淤泥、淤泥质土层不宜采用。

(2) 人工挖孔桩适用于直径 0.8m 以上的桩，桩径一般为 1~3m，最大桩径已达到 6m；深度一般不宜超过 25m，最大可达 40m。人工挖孔桩可以用于高层建筑、公用建筑、水工结构、在水利水电工程中可以用于泵站、桥墩、抗滑、档土、拉锚等。

3、基本规定

- (1) 人工挖孔桩的桩位、桩径和垂直度偏差应符合设计要求。
- (2) 人工挖孔桩应进行单桩承载力检验和桩身质量检验，检验的方法和要求与钻孔灌注桩相同。
- (3) 砂、石、水泥、钢材等原材料的质量检验项目、标准、批量和检验方法，应符合国家现行的有关标准的规定。
- (4) 为了核对地质资料、检验工艺和设备，正式施工前宜复验孔底持力层的性质，嵌岩桩必须有桩端持力层的岩性报告。

(5) 人工挖孔桩在地下水位比较高，特别是在有承压水的沙土层、滞水层、高压压缩性淤泥层和流塑淤泥土层中施工时，必须有可靠的技术措施和安全措施。

(6) 孔径（不含护壁）不的小于 0.8m，孔深不宜大于 40m。

(7) 当桩的静距小于 2 倍桩径且小于 2.5m 时，应间隔开挖，排桩跳挖的最小施工静距不的小于 4.5m。

(8) 混凝土护壁的厚度、拉结钢筋、配筋、混凝土强度等级均应符合要求。上下节护壁的搭接长度不的小于 50mm，混凝土强度等级不低于桩身混凝土强度的等级，采用多节护壁时，上、下节护壁间宜用钢筋搭结。

4、施工程序

人工挖孔桩的施工护壁有混凝土护壁、红砖衬砌护壁、钢套管护壁等方式。采用分段护壁的人工挖孔桩施工施工工艺流程见图 14。

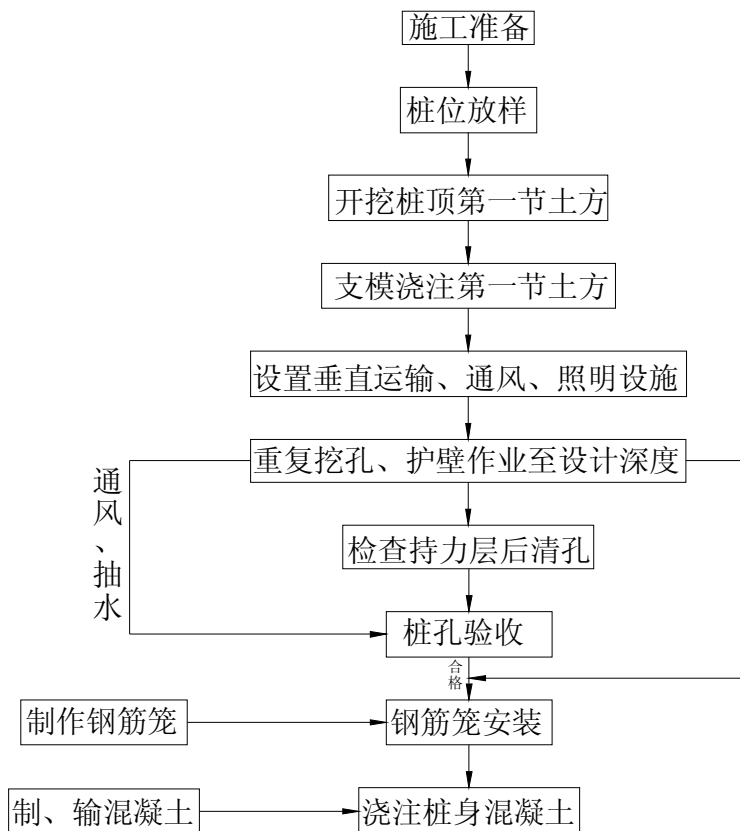


图 14 挖孔桩施工工艺流程图

5、桩孔开挖

挖孔由人工自上而下逐层用镐、锹进行，先挖中间，后挖周边，允许尺寸误差 30mm。遇坚硬土层、用锥、钎破碎；遇孤石或岩层时，先钻孔用小药量爆破

予以松动，然后用钢钎、风镐进行撬挖和清理。开挖断面为设计桩径加 2 倍的护壁厚度。明节的高度根据地质条件而定，一般为 0.9~1.2m。每挖一节，必须由孔口吊线检查并修边，使孔壁上下顺直一致。

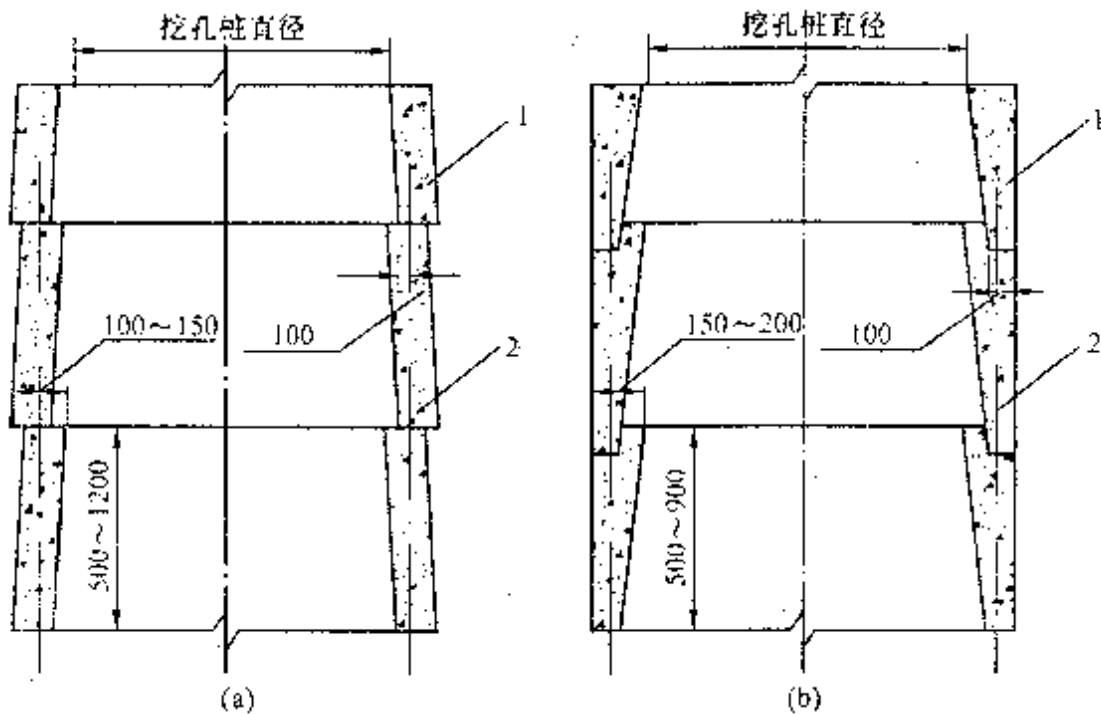
6、桩孔护壁

为防止塌孔和保证施工安全，挖桩孔施工一般应设混凝土或钢筋混凝土井圈支护，各井圈之间预埋钢筋连接；以现浇钢筋混凝土井圈的支护效果最好。当桩孔直径不大、深度较浅、土质较好、在地下水位以上时，也可采用砌砖支护或者挂钢筋网喷射混凝土支护的方法。

(1) 混凝土护壁。护壁厚度根据桩径、地质、地下水等因素决定。混凝土护壁的形式有内外齿式和内齿式两种。设外齿可以将部分井圈荷载分散传递给桩孔四周地层，但超挖放量较大；设内齿的目的是为了便于浇注井圈混凝土。支护厚度一般为 15~20cm。

单节护壁的高度决定于土壁保持直立状态的能力，一般为 0.5~1.2m。遇到厚度大于 1.5m 的流动淤泥和可能出现涌土涌沙时，护壁长度可以减少到 0.3~0.5m，并且随挖、随验、随浇注混凝土。详见图 15。

图 15 混凝土护壁形式



(a) 内外齿式；(b) 内齿式；

1--混凝土护圈；2--上下护圈间的连接钢筋

第一节井圈应比地面高出 150~200mm，壁厚比下井壁厚度增加 100~150mm。在第一节井圈的上口应做桩位“十”字控制点、轴线和高程标记，该井圈的中心线与设计轴线的偏差不大于 20mm。

混凝土护壁模板根据施工条件可以用钢模、木模、夹板模。预制组合式钢模板在孔内拼装成形，拆上节支下节循环使用。模板之间用“U”形卡连接，在每节

模板的上下连端各设一道有两半圆组成的型钢将其顶紧，不设横向支撑，以方便井内的升降操作。每节模板的上口应高于上节井圈底部 100mm 左右，以抬高浇灌口，使上、下节井圈的混凝土紧密接触。

护壁混凝土强度等级不宜低于 C20，地下水较多时宜在 C25 以上。护壁中宜加配光圆钢筋，配置规格为：环向钢筋 $\Phi 6 \sim \Phi 12$ ，间距 200mm；纵向钢筋 $\Phi 10 \sim \Phi 14$ ，间距 300~400mm；上下护圈之间的连接钢筋采用 $\Phi 8 \sim \Phi 12$ ，间距 350~410mm。当桩孔土质较好时也可以采用 C30 素混凝土。冬季施工时，为加快挖孔桩施工进度，可以在混凝土中加入水泥用量 1%~2% 的早强剂。

每节挖土完毕后应立即立模浇筑混凝土。浇筑采用吊桶运输，人工撮料入仓，刚钎捣实，混凝土坍落度控制在 8~10cm。混凝土浇筑完毕 24h 后，或强度达到 1MPa 时方可拆模，每节护壁均应在当日连续施工完毕。护壁混凝土必须密实，遇土层渗水时可视情况使用速凝剂。拆模后发现护壁有蜂窝、漏水现象时，应及时用高强度水泥砂浆进行修补。

(2) 砌砖护壁。砌砖护壁适用于少水或污水的较好土层。砌筑采用标准红砖和不少于 M5.0 的水泥砂浆。护壁厚度一般为 1/2 砖 (115mm)，每节护壁长度 0.5~0.8m。为了确保施工过程中的人生安全，应用木楔插入竖缝中将各层砖环向挤紧。

可在水泥砂浆中加入水泥用量的 1%~2% 早强剂，以加速其硬化。

每节砌砖护壁完成 24h 后，方可进行下一节的开挖施工。

(3) 挂网喷射混凝土护壁。挂网喷射混凝土护壁适用于在无地下水的密实稳定地层中施工桩径 1.0m 以下的人工挖孔桩。其具体做法是：

- ① 自上而下分段挖孔，挖孔时预留出护壁厚度。
- ② 分段将 $\Phi 6$ 钢筋全或钢筋网用插筋固定在孔壁上，钢筋圈的间距不大于 100mm。
- ③ 向孔壁喷射豆石混凝土或涂抹快硬早强水泥砂浆，厚度约 30mm。
- ④ 继续挖孔或护壁，直至达到终孔深度。

(4) 钢套管护壁。钢套管护壁适用于在地下水位较高，且夹有较厚的淤泥层或细沙土层的情况下施工挖孔桩。钢套管壁厚 8~12mm，直径宜为 1.0~1.8m，每节长度 1~2m，可采用焊接、内螺旋连接、卡扣连接等连接方式。下沉钢套管的施工设备根据桩径大小可选用打桩机、振动锤、摇管机等。在成孔之后，边浇筑混凝土边起拔套管。

在用混凝土护圈或砌砖护壁的方法难以拦挡流沙时，为保证施工进度和挖孔人员的安全，也可中途将部分孔段改为钢套管护壁。其具体做法是：

- ① 将高 1~2m，直径略小于混凝土护壁内径的钢套管（钢护筒）放入孔内。
- ② 利用上部混凝土井圈作支点，用小型油压千斤顶将钢套管逐渐压入土中。
- ③ 钢套管一个接一个地下沉，压入一段开挖一段，直至桩孔穿过流沙层 0.5~1.0m。
- ④ 转入正常挖土和设置混凝土井圈支护。
- ⑤ 桩体混凝土浇至该部位时，边浇边拔出套管，或不拔出。

7、钢筋制作与安装

桩径 0.8~2.0m 挖孔桩钢筋笼的制作安装方法与一般灌注桩相同，可在地面上分节制作，然后逐节吊放孔中，并在孔口连接。桩径超过 2m 的挖孔桩，受施工条件的限制，钢筋笼往往难以整体预制和吊装，特别是矩形钢筋笼，这时可在孔内按常规钢筋安装方法绑扎焊接钢筋，由下至上逐段连接成为整体。在与地面制作安装不同的是，需在孔内搭设脚手架。脚手架可用 $\Phi 50$ 钢管搭设，管扣连接，钢筋由孔口的升降设备运送。

钢筋笼应按设计要求制作安装，运输及吊装时应防止变形。对于直径和长度较大的钢筋笼，一般在主筋内侧每隔 2.5m 加焊一道 $\Phi 25 \sim \Phi 30$ 的加强箍筋，每隔一箍筋设一井字架支撑。主筋和主筋的连接可采用对焊、双面搭接焊合双面绑条焊，接头数按 50% 错开；主筋和箍筋之间用间隔点焊固定，控制平整度误差不大于 50mm。钢筋笼四侧主筋上每隔 3~5m 焊 $\Phi 20$ 钢筋耳环或绑扎一个砂浆垫块，以控制钢筋保护层为 70mm。

8、灌注桩身混凝土

桩身混凝土最大骨料粒径应不大于 50mm，水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥，坍落度 8~10cm，机械搅拌，用溜槽向桩孔内浇筑混凝土。

当空底积水小于 10cm，可采用常规混凝土浇筑方法。当高度超过 3m 时，应使用串筒防止混凝土离析，串筒末端离孔底高度不宜大于 2m。孔深超过 12m 时，宜采用混凝土导管浇筑。混凝土浇筑应连续进行，分层用插入式振捣器振实，分层高度视振捣工具而定，但不宜大于 1.5m。

当孔底积水大于 10cm，且难以排干时，应采用浇筑水下混凝土的直升导管法浇筑，并严格执行水下混凝土施工规范的规定。

9、施工注意事项

- (1) 安装护壁模板必须用桩心点校核模板位置，并由专人负责。
- (2) 挖至设计标高时，孔底不应积水。终孔后应清理护壁上的淤泥和孔底残渣、积水，然后进行隐蔽工程验收。验收合格后立即封底和浇筑桩身混凝土。
- (3) 当渗水量过大，应采取有效措施保证混凝土的浇筑质量。
- (4) 在安装滑轮和吊桶时，注意使吊桶中心与桩孔中心重合，以作为挖土和支模的中心线。
- (5) 当用吊桶已不能满足排水要求时，应先在孔底挖积水坑，用高扬程潜水泵抽水，边降水边挖土。地下水位较高时，应先采取统一降水措施，再进行开挖。
- (6) 已挖好的孔必须盖好，并及时安放钢筋、浇筑混凝土，间隔时间不得超过 4h。
- (7) 钢筋笼不应被污染。浇筑混凝土时，要固定好钢筋笼顶部，防止钢筋笼上浮。

(8) 施工过程中要妥善保护桩位控制点、轴线点、桩头和桩头钢筋。

10、常见问题及预防处理

人工挖孔桩常见的质量问题有由于地质条件引起的涌砂、涌泥、桩端基岩有夹层；由于施工工艺原因造成的有沉渣过厚、桩身混凝土质量不佳、桩孔偏斜等。针对以上问题的 预防、处理方法见表 78。

表 78 常见问题及其预防、处理方法

序号	常见问题	产生原因	预防、处理措施
1	涌砂、涌泥	1.地下水位高，土层中加有粉细砂或淤泥质土层。 2.护壁方案选择不合理	1.人工降低地下水位至设计桩底标高以下。 2.采用钢套管护壁方案。
2	沉渣厚度大于设计厚度	1.地下水位高，降低水位不够，致使清孔后地下水渗入时夹带泥沙。 2.安装钢筋笼时或下浇筑导管时碰撞孔壁，使孔底沉渣增厚。	1.降低地下水位至设计桩底标高以下。 2.混凝土浇筑前再次清孔。
3	桩端基岩有夹层	地质条件较复杂，在较薄的微风化下面有破碎带或夹有中风化夹层。	进一步核实地质资料，在挖至终孔面时立即钻探 4.5m，取样检验。
4	桩身混凝土质量不佳	1.浇筑混凝土时跌落高度大于 2m，造成混凝土离析。 2.孔内有地下水渗出，而浇筑混凝土又不连续，量少且间隔时间长。 3.混凝土配合比不当。 4.混凝土振捣不密实或漏浆。	1.采用串筒或导管浇筑，串筒的下口距浇筑面不大于 2m。 2.混凝土搅拌要有足够的供料能力，保证混凝土浇筑的连续性。 3.孔底积水尽量抽排干净，无法抽干时采用水下混凝土浇筑方式。 4.混凝土配合比满足设计要求。 5.保证混凝土的振捣，不漏浆。
5	桩孔歪斜	1.挖孔时未严格控制垂直度。 2.成孔后未及时浇筑混凝土，停止时间过长，孔壁变形。	1.挖孔时严格控制桩位及垂直度，发现歪斜及时修正。 2.成孔后及时检验，并及时浇筑混凝土。

11、挖孔桩扩底

人工挖孔桩采用扩底措施可以大幅度地提高单桩承载力；因此，凡是有条件的工程均应实施桩端扩大。扩大头的形状和大小取决于地基的土质条件、施工的可能性，以及扩底后桩的受力性能。典型的扩大头形状如图 16 所示，采用下列尺寸关系较为合理： $D/d=1.5\sim 2.0$ ；土层内 $b/h\leq 1/4$ ，岩层内有 $b/h\leq 1/2$ ； $h_1=300\sim 500\text{mm}$ ； $\delta=200\text{mm}$ 。

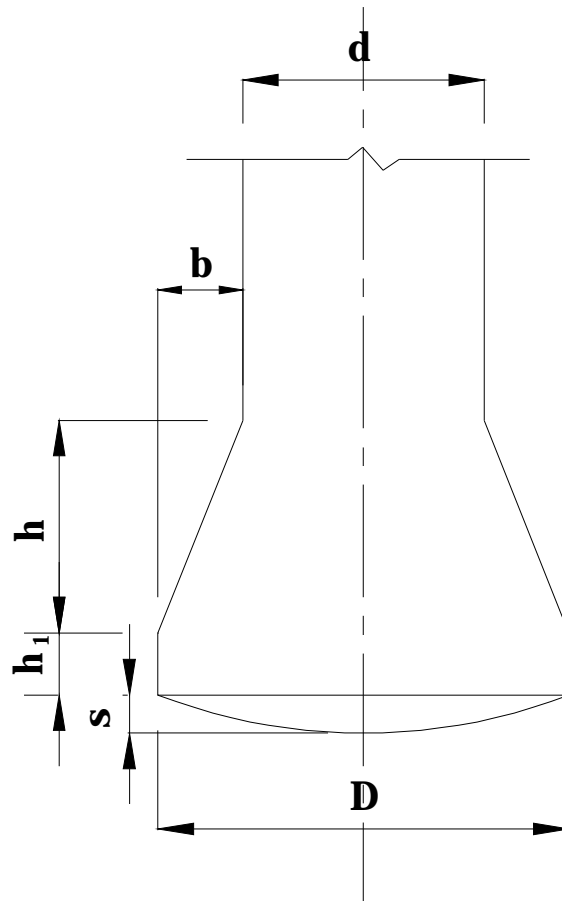


图 16 挖孔桩扩大头

对有扩底要求的挖孔桩，应按设计要求的尺寸进行凿岩扩底，清除岩渣后及时验收，然后吊放钢筋笼，尽快浇筑混凝土。

12、施工安全

挖孔桩是以人工挖掘为主进行成孔作业的，因此施工安全问题尤为重要。挖孔桩施工除遵守一般安全规定外，还应遵守下列规定：

- (1) 应根据桩径大小、截面形状和地质条件，采用可靠的施工方法和技术措施保持孔壁的稳定。
- (2) 孔口工作平台应自成稳定结构，防止在护壁下沉时被拉垮。

(3) 开挖前应掌握现场地质情况，错开桩位开挖，每节高度要适当，操作进程要紧凑，以避免塌孔。

(4) 孔内应设应急软爬梯，爬梯的吊挂必须牢固、稳定，不得脚踏井壁上、下。

(5) 电动葫芦、卷扬机和提升设备、工具应配有保险装置，使用前必须检查其起吊、承载能力和完好情况。

(6) 孔深超过 20m 时应向井下送风，送风管直径不小于 10cm，风量不得小于 25L/s，出分管口距操作人员不大于 2m。

(7) 每班开工前，必须检测井下有无有毒、有害气体，并应有安全防护措施。

(8) 孔口应设活动盖板，孔口四周必须设置护栏；吊桶提出孔口后应立即盖好盖板，需要升降吊桶时再打开，无关人员不得靠近孔口。

(9) 孔内人员应戴安全帽，地面人员要系好安全带。地面人员要随时注意井下人员的情况，应有井上井下人员相互联络、报警的讯号装置。

(10) 挖出的土渣应及时运离孔口，不得堆放在孔口四周 2m 的范围内。

(11) 机动车辆不得影响井壁安全，孔口四周 5m 范围内禁止 8t 以上的车辆通行。

(12) 施工现场的一切电气作业必须由持证电工操作，所有的电器设备必须有可靠的漏电保护装置，孔内照明应采用 36V 以下的安全电压和防水安全矿灯，并严格遵守 JGJ46《施工现场临时用电安全技术规范》的规定。

(13) 挖土尽量在抽干积水的情况下进行，抽水时要注意观察桩孔附近的地面和建筑物的变化，发现下沉、裂缝等现象应立即停止抽水 and 开挖作业。

(14) 现场应设专职安全员，在施工前和施工中进行认真检查，发现问题及时处理。

(八) 工程质量和验收

1、 基本规定

(1) 钻孔灌注桩是隐蔽工程，不仅要成桩质量进行检查，也要对施工过程中的成孔及清孔、钢筋笼制作及安装、浇筑等各道工序进行质量检查。工序质量控制是成桩质量的保证。

(2) 工序质量应根据不同桩型按照设计要求进行检查。

(3) 为了确保单桩竖向极限荷载达到设计要求，工程桩应根据工程重要性、地质条件及设计要求及施工情况进行承载力检验。

(4) 对于施工前未进行单桩静载试验的一级桩基，或地质条件复杂、成桩质量可靠性低，桩数多的二级桩基，应采用静载荷试验的方法进行检验，检验桩数应不少于总桩数的 1%，且不少于 3 根；当总桩数少于 50 根时，应不少于 2 根。

(5) 下列情况之一的桩基工程，可采用可靠的动测法进行单桩竖向承载力检测：①施工前已进行单桩静载试验的一级桩基；②施工前未进行单桩静载试验，但地质条件简单、施工质量较好、单桩竖向承载力可靠、桩数较少的二级桩基；③三级建筑桩基；④作为一二级建筑桩基静载试验检测的辅助检测。

(6) 桩身质量应进行检查。对于一级建筑桩基或地质条件复杂、成桩质量可

靠性低的灌注桩，抽检数量应不少于总数的 30%，且不少于 20 根。其他桩基工程的抽检数量应不少于总桩数的 20%，且不少于 10 根。对于在地下水位以上终孔，且终孔后经过核检的灌注桩，检验数量应不少于总桩数的 10%，且不少于 10 根。每根柱子承台下不少于 1 根。桩身质量检查可采用较可靠的动测方法、对于大直径桩还可采用钻孔取芯、预埋管超声波检验等方法。

(7) 对砂子、石子、水泥、钢材等原材料的质量、检验项目、批量和检验方法，应符合国家现行的有关标准规定。

2、 工序质量检查

(1) 成孔质量检查

① 孔位、孔深检查

孔位检查的方法是用钢尺测量护筒或桩孔中心至控制点或控制线的距离。孔深一般在钻孔时用钻具测量，也可在清孔后专用测量工具测量。

② 孔形检查

孔形检查包括孔径、孔曲和垂直度的检查。孔形可用超声波孔壁测定仪、井径仪、圆环、小钢筋笼及重锤等方法检测。其中以超声波法的检测方法最为准确，适用范围最广，且能测出各测点处孔壁的具体位置；用其他检测方法难以全面了解孔形情况，特别是超径、超挖（塌孔）情况。一般沿深度方向每隔 2m 测一个点，各种孔形检测方法的原理及操作简述如下：

(a) 声波孔壁测定仪。声波孔壁测定仪由超声波发生器、发射换能器探头、放大器、记录仪和提升机构组成。超声波孔壁测定仪测孔示意图见本卷第七章，用于桩孔孔形检测时，需安装 4 个发射探头和 4 个接收探头，可以同时测定两个正交方向孔壁至孔中心的距离。探头由卷扬装置提升或下降，它和记录仪的走纸速度同步或成比例调节。因此，随着探头的升降，可以自动在记录纸上绘出各个方向孔壁至孔中心距离变化曲线，据此，可计算出不同深度的孔径、垂直度偏差值和孔斜率。检测前应先清孔，将泥浆密度和含砂量降至适宜的范围内。

(b) 井径仪。井径仪由测头、放大器和记录仪三部分组成，测头是机械式的，它可检测孔径小于 1.2m 的钻孔。将测头放入孔底，提升时侧腿张开与孔壁接触，随着孔壁的凹凸状态变化，测腿依次张开和并拢，并带动密封筒内的活塞杆上下移动，从而使电阻来回滑动。将电阻变化转换为电压信号放大后，通过静电显影记录仪，可自动绘出孔壁形状。见图 17。

(c) 圆环法。根据设计要求的孔径，用 $\Phi 25 \sim \Phi 30$ 的钢筋或 $10\text{mm} \times 100\text{mm}$ 钢板制作与孔径相等的圆环，圆环内侧用“十”字形钢筋架支撑，并在支撑杆的四个顶点位置拴挂提升绳索，支撑杆中间设置加重块。测量孔径时将侧环放入孔中，自上而下检查各测点的孔径，以是否可以顺利通过来判断孔径是否合格。

(d) 重锤法。当采用钢丝绳冲击钻机成孔时，常用直径不小于设计孔径的冲击钻头来检测孔形和孔深。通过测量钢丝绳在孔口处偏离孔中心的距离、天轮中心至孔口的钢丝绳长度和测点处的孔深，可根据相似三角形原理近似计算出测点处在同一方向的偏斜值和孔口处钢丝绳位置偏差值。

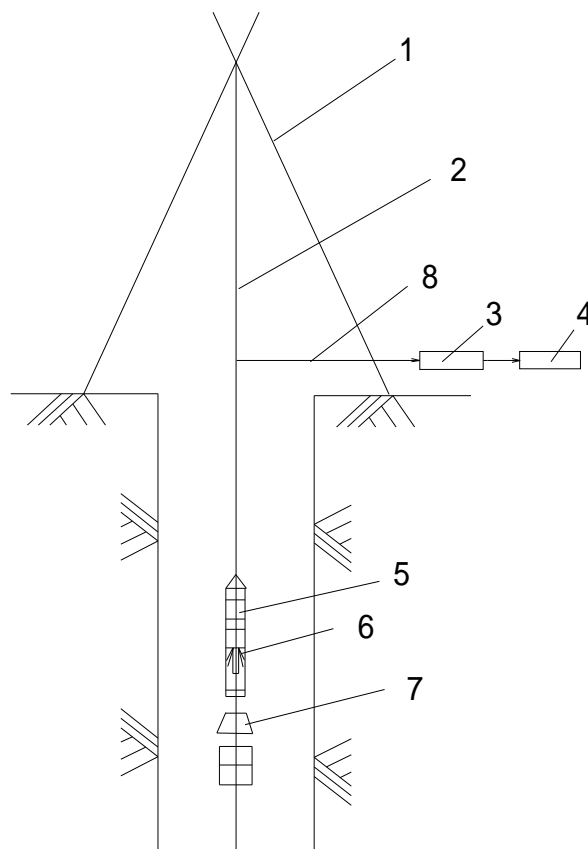


图17 井径仪测孔示意图

1--三脚架；2--钢丝绳；3--放大器；4--记录仪；
5--密封筒；6--测腿；7--锁腿装置；8--电缆

(e) 小钢筋笼法。用小钢筋笼检测孔形的原理和方法与重锤基本相同，小钢筋笼的高度应不小于 2m。当没有超声波测井仪时，为了保证顺利下设钢筋笼，宜先试下直径相同的小钢筋笼或单节钢筋笼。特别是孔形质量较差、孔壁上由探头石的情况下，这道工序是必不可少的。

③ 嵌岩深度检查

端承桩的嵌岩鉴定十分重要。有时由于误判岩面高程而给工程造成很大损失。因此基岩鉴定不仅要参考该工程提供的地质资料，还要根据施工区域内的实际地质条件进行综合判断。若地质资料不足，正式施工之前可根据实际需要进行补充勘探，以确保对基岩岩性和岩面高程的准确判定。

对旋转钻机成孔的灌注桩，可根据钻进速度、钻压大小等参数和钻渣岩性来判断是否进入基岩；对于冲击钻机成孔的灌注桩，以鉴别钻渣的岩性和含量为主，同时还要对照钻进时手扶钢丝绳的感觉、钻进速度和钻头磨损情况。对于全风化基岩，可在钻头底部焊一简易取芯管直接取样判定是否进入基岩。当采用以上方法鉴定仍有疑问时，应在终孔前在桩孔内用岩芯钻机取样鉴定。根据终孔孔深和鉴定的岩面深度即可确定桩的嵌岩深度。

(2) 清孔质量检查

灌注桩在浇筑混凝土之前须进行清孔。清孔质量检查的内容包括孔底沉渣厚

度检查和孔内泥浆性能检查。泥浆护壁成孔灌注桩的清孔质量检查应在清孔结束 1h 后进行。

① 孔底沉渣厚度检查

孔底沉渣厚度,端承桩应不大于 5cm,摩擦端承、端承摩擦桩应不大于 10cm,摩擦桩应不大于 30cm。灌注桩孔底沉渣太厚,将影响桩端承载力的发挥。孔底沉渣厚度的检查有测饼法、电阻率法、电容法等方法。

(a) 测饼法。测饼法是将系上测绳的测饼慢慢放入孔内,凭检测人员的手感判断沉渣顶面的位置。根据测得的沉渣顶面深度和已知的终孔深度计算沉渣厚度。这种检测方法人为的因数很大,检测的结果不精确。

(b) 电阻率法。电阻率法是根据水、泥浆、沉渣的颗粒间具有不同的导电性能,通过测定电阻值的变化来判断孔底沉渣的厚度。电阻率沉渣测定仪由侧头、放大器、指示器组成。

(c) 电容法。电容法的原理是两金属极板的尺寸和间距不变时其电容量与期间介质的电解率成正比。水、泥浆、沉渣等介质的电解率有明显的差异,从而可通过两侧电解率的变化得到沉渣厚度。电容法仪器由测头、放大器、蜂鸣器和电机驱动源等组成。

② 孔内泥浆性能检查

当采用泥浆护壁成孔灌注桩时,灌注混凝土时应在距孔底 50cm 以内取样检查泥浆的性能指标。合格标准为:密度小于 1.25g/cm^3 ,黏度不大于 28s(500/700mL 漏斗黏度计),含沙量不大于 8%。取样应使用专用的取样器,不得使用抽砂筒取样。

(3) 混凝土浇筑质量检查

① 检查内容

灌注桩的混凝土浇筑是地下隐蔽施工,必须加强对各个环节的质量控制。除按规定检查原材料的质量以外,对混凝土拌制要检查配合比、称量精度、坍落度和混凝土强度,对浇筑过程要检查浇筑设备的结构、布置和工艺是否符合要求。

② 取样

混凝土试样应在混凝土浇筑地点随机抽样。灌注桩混凝土应在浇筑漏斗中取样;当搅拌机就设在施工现场时,也可在搅拌机出料口取样。取样应具有随机性,不得故意挑选。

③ 混凝土施工性能检查

混凝土施工性能是指新拌混凝土的流动性、保水性、黏聚性和初、终凝时间。

对于反映混凝土流动性的坍落度和扩散度要定时抽检,一般每隔 2h 取样检查一次;头一盘料必须在搅拌机出料口取样检查,并根据检查结果调整配合比和拌制方法。对于水下浇筑的混凝土,坍落度应在 18~22cm,扩散度为 28~34cm。在检查混凝土流动性的同时,要注意观察混凝土的保水性和黏聚性,严重离析的混凝土不得放入孔内。

④ 混凝土强度检查

(a) 试件数量。每浇筑 50m^3 必须有一组试件;小于 50m^3 的单桩每根桩必须有一组试件。同一配合比的混凝土,每班至少有一组试件。每组三块试件应在同一盘混凝土中取样制作。

(b) 试件尺寸。抗压强度试件一般为 15cm 的立方体,用其他尺寸试件测得的强度值应乘以相应的折算系数换算成标准试件的强度值。如,试件边长为 10cm 时应乘以系数 0.95;试件边长为 20cm 时应乘以系数 1.05。

(c) 试件成型。试件成型的方法视混凝土的浇筑方法和稠度而定。坍落度不大于 7cm 的明浇混凝土可用振动态振实；坍落度大于 7cm 的明浇混凝土可用捣棒人工捣实；水下浇筑混凝土的坍落度很大，施工时不能振捣，成型时只需稍作振动和插捣将空气排出即可。

(d) 试件养护。试件成型后应覆盖，在室温 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 条件下静置一昼夜后拆模编号。拆模后移至标准养护室养护 28d，然后进行抗压强度试验。灌注桩混凝土试件一般是放在 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 的静水中养护。

(e) 试件强度取值。每组 (3 块) 试件的强度代表值按下列规定确定：

I. 取三个试件试验结果的平均值作为该组试件的强度代表值。

II. 当三个试件中的最大或最小强度值与中间值之差超过中间值的 15% 时，以中间值作为该组试件的强度代表值。

III. 当三个试件中的最大和最小强度值与中间值之差都超过中间值的 15% 时，该组试件的试验结果作废，不参加统计。

IV. 试件强度评定。试件强度的评定一般采用统计评定法。当试件数量较少时候也可以采用非统计评定法，合格标准详见标准 GBJ 107《混凝土强度检验标准》中的规定。

⑤ 浇筑过程检查

浇筑过程质量控制是混凝土浇筑质量的根本保证。浇筑过程质量的检查方法主要是现场查看施工机械、施工布置施工方法是否符合施工要求

(4) 钢筋笼制作安装质量检查

钢筋笼制作应对钢筋的规格，焊条规格、品种、焊口规格、焊缝长度、焊缝质量、钢筋笼的长度、直径、主筋间距、主筋条数、箍筋间距及圈数等进行检查、并填写相应的检查记录。

钢筋笼安装应对钢筋笼下设位置、长度、保护层厚度、分节连接质量、顶端锚筋长度进行检查。

3、 成桩质量检查

成桩质量检查主要包括桩身混凝土质量检查和单桩承载力检查，检查的方法有垂直静载法、动测法、钻孔取心法、超声波探伤法。

确定单桩竖向极限承载力可按下列方法综合分析确定：

(1) 根据沉降随荷载变化的特征确定对于陡降型 Q-S 曲线，取 Q-S 曲线明显发生陡降的起始点。

(2) 根据沉降量确定，对于缓变型 Q-S 曲线一般可取 $S=40\sim 60\text{mm}$ 对应的荷载，对于大直径桩可取 $S=0.03D\sim 0.06D$ (D 为桩端直径，大桩可取低值，小桩取高值) 所对应的荷载值；对于细长桩 ($L/d>80$) 可取 $S=60\sim 80\text{mm}$ 对应的荷载。

(3) 根据沉降随时间变化的特征确定。取 s-lgt 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值

钻孔取芯检查，是用岩芯钻机在成桩的中心，从桩顶钻至桩底以下 1.5 倍桩径处终孔，取出芯样进行检查。

钻孔取芯是一种较可靠、较直观的桩身质量检查方法，通过对芯样的检查可以判断桩身是否存在断桩、夹泥、空洞等质量问题可以更清楚地了解混凝土的密实程度以及桩底的沉渣厚度；但是钻孔取芯法要求有良好的钻孔机具和较高钻孔

技术，且检测费用较高，需要的时间较长。当混凝土的等级低于 C10 时不宜采用钻孔取芯法检查。

钻孔取芯检查应在混凝土浇筑 28d 以后进行，其检查数量可控制在桩数的 5%~15% 左右。应使用质量和性能较好的岩心钻机和金刚石钻具钻孔和取芯，取芯率一般应在 98% 以上不的低于 95%。在钻具达到桩底之前不的钻出桩身，不的因钻进不当而影响芯样质量一般钻进回次进尺控制在 0.5~1.5m。钻孔位置一般在桩的中心钻孔直径应大于混凝土最大骨料直径的 3 倍，宜优先采用直径不小于 75mm 的金刚石钻进工具。钻取的混凝土芯样直径不宜小于 59mm，取出的芯样应在样品箱内沿深度编号摆好。

进行强度试验的试件宜采用锯切法成型，每一单桩的芯样应制作 3 件混凝土试件和 1 件基岩试件。芯样的测试强度应换算成边长为 150mm 立方体标准试块的抗压强度值。计算公式为：

$$f_{cu} = 4aF / pd^2$$

式中： f_{cu} ——芯样试件混凝土强度换算值，MPa；
 F ——芯样试件抗压试验测的的最大压力，N
 d ——芯样试件的平均直径，mm；
 a ——不同高径比的芯样试件混凝土强度换算系数，按表 79 选用。

表 79 芯样试件混凝土强度换算系数

高径比 h/d	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
换算系数	1.00	1.04	1.07	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.22	1.23	1.24

采用动力检测法是用冲击、震动等方法，给桩顶施加一定的能量，在桩头测定桩土的相应信号，根据信号进行分析计算，判断桩体质量的方法，桩身混凝土质量与波速的关系见表 80。

表 80 桩身质量与波速的关系

质量类别	波速 (m/s)	混凝土强度 (MPa)
优良	>4120	>25
良好	3300~4120	20~25
可疑	2750~3300	15~25
较差	1920~2750	10~15
差	<1920	<10

机械阻抗法是一种结构分析方法。是通过测定给桩施加的激励（输入）函数和桩的相应函数（输出）来识别桩的动态特性，判定桩身混凝土的浇筑质量，缺乏的类型及位置，估算桩的承载力。

表 81 给出判断桩身质量的参考依据（见下页）。

表 81 机械阻抗法桩身混凝土质量的判别依据

测量桩长 L_m 施工桩长 L	实测导纳 N_m 计算导纳 N_c	动刚度 E_d	完整性
$L_m \approx L$	$N_m \approx N_c$	一般	完整桩
$L_m \approx L$	$N_m > N_c$	低	缩颈或低质混凝土
$L_m \approx L$	$N_m \geq N_c$	很低	断桩
$L_m \approx L$	$N_m > N_c$	很高	扩颈
$L_m \approx L$	$N_m > N_c$	高	扩底桩
$L_m \approx L$	$N_m \approx N_c$	高	桩尖嵌固好的完整的桩
$L_m \approx L$	$N \approx N_c$	低	桩尖嵌固差的完整的桩
多种 L_m	$N_m < N_c$	高	断面不规则（扩大）
多种 L_m	$N_m > N_c$	低	断面不规则（缩小）

注：表中

L_m —桩的测量长度， $L_m = 2\Delta f$ ；

N_m —导纳几何平均值， $N_m = PQ$ ；

N_c —导纳理论值， $N_c = 1/PC_0A$ ；

E_d —桩的动刚度， $E_d = 2\rho f_m / |v/F| m$ ；

C_0 —整个工程完好桩波速的平均值， $C_0 = 2L\Delta f$ ；

Δf —分析谱线间距；

P —导纳曲线极大值；

Q —导纳曲线极小值；

A —桩横截面积；

ρ —桩身混凝土密度；

f_m —量测曲线初始端近似为直线部位任一点的频率；

$|v/F| m$ —量测曲线初始端近似为直线部位任一点的导纳值。

十. 沉井

(一) 概述

沉井是在预制好的钢筋混凝土井筒内挖土,依靠井筒自重克服井壁与地层的摩擦阻力逐步沉入地下,以实现工程目标的一项施工技术。沉井技术具有结构可靠、所需机械结构设备简单、施工安全等优点。

沉井技术在国内的煤炭、铁路、交通等行业中应用较早,20世纪60年代已经达到相当的规模 and 水平,其应用途径逐步扩大,适应地层逐步拓宽,施工环境由旱地发展到水下甚至可在河水急流中施工深度最大达到200m。水电建设在60年代开始引入沉井技术先在一些大型水利水电工程中应用,主要用于治理大规模山体滑坡、河流防冲护岸,桥梁墩台防冲及取水井筒等;对某些建筑物基础承载能力不足、又不宜明挖的情况下,也可以采用沉井加固基础。沉井技术是一项通用性技术,单因行业间特性的差异其设计和施工特点也有所不同。国内有 GB 50202—2002《建筑地基基础工程施工质量验收规范》、《电力建设施工及验收技术规范》、TB10203—2002《铁路桥涵施工规范》、JTJ041—1989《公路桥涵施工技术规范》等多项标准对沉井施工的有关技术或质量要求作了规定。

沉井适用于土层或砂砾石层,也可在风化和软弱岩层中沉入;必要时,也可沉入坚硬的岩石,以达到嵌入基岩的目的。在地下水位较高及渗水量较大的地层,沉井技术应慎用。

(二) 沉井的构造

沉井是钢筋混凝土结构,主要用于井筒、隔墙和刃脚等组成。

(1) 井筒。井筒一般为重度较大的和刚度较大的钢筋混凝土结构,可根据需要制成方形、圆形或椭圆形断面。一个井筒通常有多节井筒组成,每一节井筒上下敞开,接头处由钢筋和混凝土连接。

钢筋混凝土井筒的壁厚应根据承受的土压力、水压力、下沉时的摩阻力等通过计算确定,通常厚度为0.4~1.2m。

(2) 隔墙。即井筒内的间隔墙。其作用时减少井筒跨度,改善受力条件,增强筒体刚度。隔墙厚度一般为0.5m。

(3) 刃脚。指底节井筒下端的钢制尖角,其作用是保护底节井筒和便于沉井切入土体。刃脚踏面宽度一般为200~300mm,内侧倾角40°~60°。

沉井下沉至设计高程后,根据其工程要求需要进一步完善,如进行封底,填心等。

在实际工程中,按需要可以是单个沉井布置,也可以是多个沉井(沉井群)的布置形式。

（三）施工方案

水利水电工程大型沉井多位于湍急河岸坡，其井筒加工预制好以后无法采用浮运就位的方法，而多采用旱地现场浇筑制作，然后下沉的方法施工。这种施工方法是在地下水位线以上的旱地上修建始沉平台，在平台上布置施工临时设施就地制作井筒。旱地下沉的沉井按出渣方式主要有以下两种。

（1）抽水吊渣法。抽除井内渗水，由配置的吊渣机械出渣，沉井在下沉的过程中及时纠偏，下沉到预定位置后进行基础处理。

（2）水下机械出渣法。配置水下开挖机械或者向井内灌水抽渣，潜水吊石（含爆破），待沉到一定的位置后，再有潜水工检查和处理基础。

选定下沉方式要根据地下水、地层渗透系数、地质条件及工期、造价等综合分析确定。对井内渗水能够采取措施排除渣中卵砾石颗粒较大且有大孤石，或需要在岩石中下沉的沉井施工，宜采用抽水吊渣下沉法。对渗水量很大可能有大量流沙涌入井内，砾石颗粒较小，大孤石较少的沉井，可采用水下机械出渣法。水工沉井一般处在河床深覆盖层上，通常砾石颗粒较大，或夹有大量漂卵石和孤石，或要求建在坚硬的基岩上，如果采用水下机械出渣法，工作量大，工期较长，因此宜采用抽水吊渣法施工。

（四）施工程序

1、单口沉井的一般施工程序如图 18 所示。

- （1）准备工作，搬迁、平场、碾压、施工机械安装、布设临时设施。
- （2）扑砂砾石层及摆平垫木。
- （3）刃脚制作，安装。
- （4）底节沉井制作（支承桁架，模板制作安装及钢筋绑扎）。底节沉井混凝土浇筑、养护至规定强度。
- （5）底节沉井混凝土浇筑、养护至规定强度。
- （6）支撑桁架及模板拆除。
- （7）抽除垫木，开挖下沉。
- （8）第二节沉井制作（内外模板及钢筋绑扎）及混凝土浇筑、养护至规定强度。
- （9）开挖下沉（含纠偏），再浇筑上一节井身混凝土。依次循环，直至沉井下沉至设计高程。
- （10）基岩内的齿槽开挖（根据设计需要设置）。
- （11）按设计要求进行封底及填心。

沉井封底及填心视沉井的作用及需要而定，如作为大口径抽水井使用，则不需要封底，沉到含水层一定深度即可。如沉井作为建筑物的基础或抗滑建筑物，则需要在沉到设计要求深度的基岩后，浇筑钢筋混凝土封底层，以上井身可填充贫混凝土或达到设计要求重度的卵砂石，或采取其他措施。

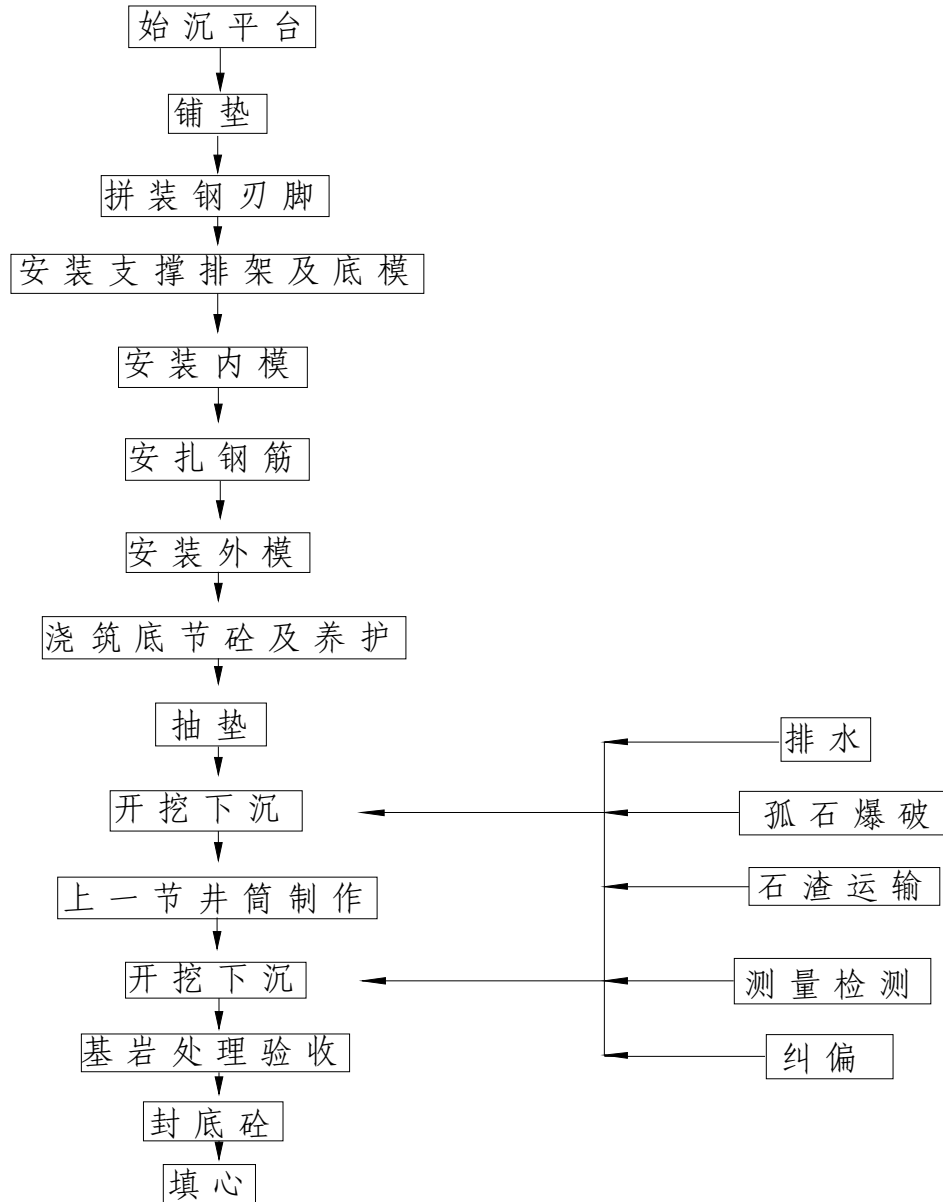


图 18 单个沉井施工程序

2、井群的施工程序

沉井群是由大小不一，深浅不同的沉井组成的群体。它的施工具有井间距小，相邻沉井沉放过程中相互制约的特点。恰当地选取井群的开挖顺序是确保沉井施工质量和进度的关键之一。

(1) 沉井群的分区与分期。根据井群的布置、工期要求和施工场地情况，将沉井群分成若干个区（3~5 个沉井作为一个区段），选择两个区段先行施工，后续区段逐步开展。

(2) 先行井。在前期施工的的区段内根据地质及地下水情况选择一个具有典型特点的先行井领先施工，它对井群的施工起到探索作用。也可以作为降低地下水位的措施。

(3) 平行交叉流水作业。当多个井群依次排列井间距离较小时，为确保施

工安全及减少在沉井下沉过程中的互相干扰（如爆破震动影响），一般应在某个沉井第一节开挖下沉停止后才进行相邻沉井的混凝土浇筑。可将沉井按单，双序号分成两组，先施工第一组，待其下沉开挖高度超过 $2/3H_1$ （ H_1 为第一节井筒的高度）后，即开始第二组沉井施工，而第一组沉井照常开挖下沉。如此往复循环，平行交叉流水作业。

（五） 主要施工技术

施工中可能出现的难点因地质条件、设计和施工经验等的不同，其内容有所差别，一般要点如下。

（1） 底节（从施工程序也可称首节）施工平台（即始沉平台）的高程应根据施工季节的河水或地下水位确定。如地下水位较低，侧地下水位以上可采用明挖方式以减小下沉的高度。难以压实的和承载力太低的土层应予以清除、换填。

（2） 底节沉井的施工质量是整个沉井顺利下沉的关键，其各道工序如平台压实、刃脚制安、井深混凝土浇筑及抽垫下沉等均应切实做好。

（3） 沉井下沉过程中可能遇到的问题有，在不均匀地层内的下沉；通过流沙层的下沉；地下集水喷涌；夏季地下水位的升高；沉井位置偏移或倾斜；井筒内出渣方法及井内施工安全等。应针对以上问题，制定单项技术措施。

（4） 沉井的地基处理，水电水利工程对沉井地基处理一般要求较严，要保证稳定，可靠。承受侧向力较大的沉井应座落在岩石基础上，并采取锚筋和钢筋混凝土封底。为确保沉井基础工程质量，施工中的排水特别重要。因此在沉井内如何进行岩石爆破、如何设置水泵抽水等均应提出详尽的措施。

混凝土井筒应按设计图纸分节施工。底节井筒带有刃脚，在他的围护下边挖边下沉，并逐节接高，然后再开挖、再下沉，直至设计深度。底节井筒的最小高度应以能抵抗纵向破裂为标准。

（六） 特殊地层中沉井施工

（1） 下沉中若局部范围有大孤石顶住，应立即停止下沉，及时进行处理，以免应力集中，拉裂刃脚，或使井筒偏斜。处理上可用小炮爆破，每孔药量控制在 0.2kg 以内，最小抵抗线方向不要朝向刃脚。

（2） 下沉中若局部范围遇到流沙，可用麻袋装混凝土堵塞。待井内挖渣只留支撑点时将麻袋采用小炮爆破，最后挖出支撑点下沉。

（3） 当沉井刃脚局部接触到基岩顶板（即遇到软硬地基时），应立即停止对软基的开挖，先挖岩石地基，待基岩开挖底面低于软基层面，再挖软基层，以防止沉井偏斜和局部承重。开挖基岩时由边长的中间向两头掘进。

（4） 水利水电工程中，沉井往往位于河岸边或山坡脚下，施工过程中可能渗水较大，井内除配备足够的水泵和正常供电（包括配置备用电源）外，还可以采用一下措施。

① 井群间辅助排水。井群平行交叉施工中，在一个沉井开挖时，可利用相邻间井内开挖高差，把临井当作一个大渗井（也可用先行井），进行辅助排水，

以减少该井渗水量，保证开挖面施工。

② 黄土铺盖防渗。用麻袋装黄土加少量砾石（或开挖出的渣料）填堵渗水带，减小渗水量。必要时，可用黄土与帆布铺盖联合防渗，此法用来解决浅层防渗较好。

（5）水下机械开挖法。对渗水量大加大排水能力和采取堵漏措施后仍不能奏效时，若再加大排水能力，井内外渗水压力加大，可能导致井外土沙等细颗粒随渗水大量涌入井内，严重时将出现井外地表下沉。这是，井筒不但不能下沉，还可能产生倾斜等严重后果。在这种情况下应考虑其他特殊措施，如水下机械挖渣和潜水作业，或在井外钻孔灌浆堵水等。

（七）沉井下沉的纠偏措施

1、沉井产生偏斜的原因

（1）沉井的构筑质量偏差，尺寸不规矩。比如刃脚水平面与沉井中心线不垂直，刃脚与井壁不垂直，井壁不光滑等。

（2）没有对称的抽除垫木并及时回填卵砾石。

（3）地基软硬不均。

（4）没有均匀挖渣，使井底面出现高程差。

（5）刃脚一角或一侧被障碍物顶住，未及时发现和处理。

（6）井内涌沙。

（7）地下水和雨水侵入井内，井壁四周土方因地下水浸泡而坍塌，导致井身倾斜或变形断裂，以致产生位移。

2、纠偏措施

沉井倾斜和偏位调整的关键是搞清倾斜发生的原因，经过分析研究后再确定纠偏方法。在下沉过程中要经常测量及时纠偏，措施有以下几种：

（1）严格控制井筒施工的外形尺寸，要求井筒外壁垂直、光滑，避免由于结构引起的阻力增加。

（2）严格按照程序抽除垫木，并及时回填卵砾石，确保沉井正位下沉。

（3）在井壁高的一侧施加偏压，直至井壁端正。

（4）井外单侧挖土，将偏移部位压向正确位置。此法在首节沉井下沉时使用效果较好。

（5）井内均匀开挖，每层开挖在 0.3~0.5m 范围内，先中间，后四周。

（6）井外壁单侧注水或泥浆以减小井壁与土层的摩擦力。

（7）及时堵住涌沙

（8）有控制地使用炮震法，排除障碍物和局部卡塞点。

（9）基底出现软硬岩层时，应先挖除硬岩层，后挖软土，最后挖除支撑点。

（八）井底的地基处理

沉井下部一般需要在基岩中有一定的埋置深度。施工单位应提交施工记录、测量资料，会同有关部门进行基础验收，合格后即可进行井底地基处理。具体做

法如下:

(1) 按设计要求打好插筋,清除岩面浮渣物,浇筑封底混凝土和填心混凝土。打插筋、清基、封底、填心各工序必须紧密衔接,缩短工期。如果工期拖延过长,井内长时间排水,既增加排水费用,又可能淘空四周地层中的砂及小粒径卵石,对沉井安全不利且增加了清理量。

(2) 沉井下至设计位置后,如设有深挖齿槽,为了保证齿槽的顺利施工,应将井周刃脚部位封堵。齿槽可沿长度方向分段跳块开挖,一般分四块(或三块),分两个阶段开挖。第一阶段先开挖1~2块,立模先浇混凝土。第二阶段可全部开挖,该阶段齿槽混凝土可与封底混凝土一起施工。

齿槽开挖前槽口边沿应打插筋、齿槽开挖的边坡可采用喷混凝土支护,若遇破碎层可用锚喷支护。

(3) 井间齿槽可采用平洞开挖,并回填混凝土至刃脚底面。

(九) 填心混凝土施工

(1) 作为一般基础沉井,可用C15混凝土封底,高度为2~5m。

(2) 若渗水量不大,填心、封底可采用分期施工的方法。第一期可采用预留泵坑,一边排水,一边从一端向另一端封堵填心,最后水泵撤出封堵水泵坑。

(3) 若渗水量较大,无法采用排水法封堵,也可采用导管法水下浇筑混凝土封堵。水下混凝土浇筑厚度可为3~5m,以上部分将积水排出后仍采用普通混凝土方法浇筑填心混凝土。用导管法浇筑水下混凝土时,应按照《水工混凝土施工规范》中“特性混凝土”的有关规定执行。水下浇筑混凝土的强度等级应较混凝土设计强度提高一级。

(4) 井底封堵后若要进行防渗处理,则井底可以作为防渗处理的工作面。井底混凝土封堵后,其上应根据设计需要,浇筑贫混凝土或填砂砾石。

(十) 沉井井间接缝处理

井间接缝处理措施,应根据沉井的用途由设计确定。水工沉井井间一般采用钢筋混凝土连接墙连接,在相邻沉井的相应位置预浇牛腿。下沉完毕后,可用两种方法施工钢筋混凝土连接墙:

(1) 使用冲击钻建造槽孔,浇筑钢筋混凝土连接墙。

(2) 用钢钎法挡住井间石渣,再进行人工开挖浇筑钢筋混凝土连接墙。

(十一) 沉井的质量要求

对沉井的质量要求应视沉井的作用和重要性而定,水工建筑物中一般用与支护、防冲的沉井精度要求较低。GBJ301—1988《建筑工程质量检验评定标准》对沉井的质量要求如下:

(1) 沉井制作中的模板、钢筋、混凝土、钢刃脚等分项工程均应符合有关规范的规定。其中保证项目为混凝土抗压强度、抗渗等级和下沉前的混凝土强度,且沉井封底必须满足设计要求。

(2) 沉井外形和位置的允许偏差及检验方法见表 82。

表 82 沉井允许偏差和检验方法

项目			允许偏差 (mm)	检验方法
制作质量	平面尺寸	长度, 宽度	$\pm l/200$ 且不大于 100	尺量检查
		曲线部分半径	$\pm l/200$ 且不大于 50	拉线和尺量检查
		对角线差	b/100	尺量检查
	井壁厚度		± 15	
下沉位置	刃脚平均标高		± 100	水准仪检查
	底面中心位置偏移	H>10mm	H/100	吊线和尺量检查 或经纬仪检查
		H≤10mm	100	
	刃脚底面高差	L>10m	$\pm l/200$ 且不大于 100	水准仪检查
		L≤10m	100	

注: l —长度或宽度, r —半径, H —下沉总深度, L —最高与最低两角间距。

(十二) 沉井施工的安全措施

沉井施工除应遵循土石方开挖、混凝土浇筑的安全操作规程外, 还应采取以下措施:

(1) 沉井的施工现场应进行充分碾压, 对形成的边坡应做相应的保护。施工机械尤其是大型吊运设备应建在坚实(或经过处理)的基础上。沉井下沉到一定深度后, 井外临近的地面可能出现下陷、开裂, 应经常检查基础变形情况, 及时调整加固起重机的道床。

(2) 施工区内的地表水应该排到施工场地以外, 井内排出的渗水严禁反流井下。

(3) 井顶四周应设临时钢筋栏杆和挡板, 以防坠物伤人。

(4) 起重机械进行吊运作业时, 施工人员应躲避到安全部位, 指挥人员应与司机进行密切配合, 井内井外指挥和联系信号要明确, 严防事故发生。

(5) 石方爆破时, 起爆前应切断照明及动力电源, 并妥善保护水泵。爆破后加强通风, 排除粉尘和有害气体。

(6) 施工电源(包括备用电源)应能保证沉井连续施工。水泵和照明电源尤应可靠, 严防淹溺事故发生。

(7) 井内吊出的石渣应及时运到渣场, 以免对沉井造成偏压, 造成沉井下沉过成中的倾斜。

(8) 对装运石渣的容器及其吊具要经常检查其安全性, 渣斗升降时井下人员应回避。

结语

地基处理属于隐蔽工程，地基条件复杂且环境多变，一般难以全面了解。在进行地基处理设计和施工时，需尽可能地进行调查研究，掌握详细的，比较准确的勘测试验、环境和材料资料，才能确定相应的技术措施。在施工过程中还要不断地搜集资料，根据变化的条件，及时分析问题，提出处理措施，确保工程质量，不留隐患。

实践出真知，随着水利水电工程的建设的大发展，我国地基处理水平也有了大幅度的提高。有些已达到世界先进水平。但有些方面和发达国家还有较大的差距，如地基处理机械、材料等。

展望前景，令人振奋。根据我国今后 15 年的规划，主要江河上条件较好的水利水电工程都将建成。在这些复杂地基条件下大型工程建设中，地基处理技术必将得到更快更好的发展，达到一个新水平。

本文汇集了多年来水利水电工程地基处理的资料 and 主要技术，可供查阅使用。由于水平有限，时间和精力所限，文中错误在所难免，也有不妥不全之处，敬请理解并予指正。

参考文献：

1. 水利水电工程施工手册“地基与基础工程”；
2. 孙钊《坝基岩灌浆》，中国水利水电出版社，2004 年版。