

中华人民共和国水利行业标准

SL/T 792—2020

水工建筑物地基处理设计规范

Design specification for ground treatment
of hydraulic structures

2020 - 05 - 15 发布

2020 - 08 - 15 实施



中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部

关于批准发布《农田灌溉建设项目
水资源论证导则》等 3 项
水利行业标准的公告

2020 年第 6 号

中华人民共和国水利部批准《农田灌溉建设项目水资源论证导则》（SL/T 769—2020）等 3 项为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	农田灌溉建设项目水资源论证导则	SL/T 769—2020		2020. 5. 15	2020. 8. 15
2	水利水电建设工程安全生产条件和设施综合分析报告编制导则	SL/T 795—2020		2020. 5. 15	2020. 8. 15
3	水工建筑物地基处理设计规范	SL/T 792—2020		2020. 5. 15	2020. 8. 15

水利部

2020 年 5 月 15 日

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排，按照 SL 1—2014《水利技术标准编写规定》的要求，编制本标准。

本标准共 11 章和 2 个附录，主要技术内容包括：

- 总则；
- 术语与符号；
- 基本规定；
- 固结灌浆；
- 防渗帷幕与排水；
- 防渗墙；
- 挖填置换；
- 强夯与强夯置换；
- 预压排水固结；
- 复合地基；
- 桩基。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：长江勘测规划设计研究有限责任公司

本标准参编单位：水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

水利部长江勘测技术研究所

长江三峡勘测研究院有限公司（武汉）

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本规范主要起草人：杨启贵 王汉辉 刘加龙 邹德兵

李洪斌 施华堂 戴济群 高长胜

杨守华 关云飞 栾约生 郝文忠

周 华 郭红亮 占鑫杰 闵征辉
牛 勇 樊少鹏 牟春霞 张志坚

本标准技术内容审查人：温续余

本标准体例格式审查人：牟广丞

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

目次

1	总则	1
2	术语与符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
4	固结灌浆	6
4.1	一般规定	6
4.2	岩基固结灌浆	6
4.3	覆盖层地基固结灌浆	8
4.4	固结灌浆试验	9
5	防渗帷幕与排水	10
5.1	一般规定	10
5.2	岩基防渗帷幕	10
5.3	岩基排水	13
5.4	覆盖层地基防渗帷幕	15
5.5	帷幕灌浆试验	16
6	防渗墙	17
6.1	一般规定	17
6.2	混凝土防渗墙结构设计	17
6.3	混凝土防渗墙连接与构造	18
6.4	高喷防渗墙	20
6.5	水泥土搅拌防渗墙	21
7	挖填置换	22
7.1	一般规定	22
7.2	断层破碎带与软弱层带挖填置换	22
7.3	岩溶挖填置换	23

7.4	特殊土挖填置换	23
8	强夯与强夯置换	24
8.1	一般规定	24
8.2	强夯	24
8.3	强夯置换	25
8.4	强夯与强夯置换试验	26
9	预压排水固结	27
9.1	一般规定	27
9.2	堆载预压	27
9.3	真空预压	30
9.4	真空和堆载联合预压	30
10	复合地基	32
10.1	一般规定	32
10.2	振冲碎石桩	33
10.3	沉管砂石桩	35
10.4	水泥土搅拌桩	36
10.5	高压旋喷桩	38
11	桩基	40
11.1	一般规定	40
11.2	布置与选型	40
11.3	桩基计算	40
11.4	特殊条件下的桩基	43
11.5	桩基构造	45
附录 A	地基处理方法选用表	46
附录 B	预压排水地基固结度计算	47
标准用词说明		49
条文说明		51

1 总 则

1.0.1 为适应水工建筑物地基处理技术发展的需要，规范水工建筑物地基处理设计，做到安全适用、质量保证、经济合理、技术先进并保护环境，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于各类水工建筑物地基处理设计。

1.0.3 水工建筑物地基处理设计应综合考虑工程地质条件、上部结构类型与施工条件等因素，根据水工建筑物的稳定、变形、渗流控制等不同目的确定地基处理范围和处理方法。

1.0.4 本标准主要引用下列标准：

GB 50007 建筑地基基础设计规范

GB 50011 建筑抗震设计规范

GB 50025 湿陷性黄土地区建筑标准

SL 191 水工混凝土结构设计规范

1.0.5 水工建筑物地基处理设计除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术 语

2.1.1 地基处理 ground treatment

提高地基的强度、抗渗性、改善地基抗变形能力而采取的处理措施。

2.1.2 承载力容许值 allowable bearing capacity

既能保证地基有抵抗破坏的容许安全裕度，又能使建筑物可能产生的沉降限制在容许范围以内的最大地基承载力。

2.1.3 桩侧极限摩阻力 ultimate pile shaft resistance

桩顶作用极限荷载时，桩身侧表面所产生的岩土阻力。

2.1.4 固结灌浆 consolidation grouting

用浆液灌入岩土体的裂隙或孔隙，以提高地基的整体性、强度和抗变形能力。

2.1.5 帷幕灌浆 curtain grouting

用浆液灌入岩土体的裂隙或孔隙，形成连续的阻水幕，以减小地基的渗流量和降低建筑物基底渗透压力。

2.1.6 强夯 dynamic compaction

用高落距重锤给地基以冲击和振动能量，将地基土处理密实。

2.1.7 强夯置换 dynamic compaction and replacement

在夯坑内回填块石、碎石等粗颗粒材料并用夯锤连续夯击，在地基土中形成置换墩。

2.1.8 堆载预压 surcharge preloading

在饱和软黏土地基中设置竖向和水平向排水通道后，对地基进行堆载，使地基排水固结，提高地基土强度。

2.1.9 真空预压 vacuum preloading

在饱和软黏土地基中设置排水通道并进行地表封闭，通过抽真空产生负压排水，以增加地基土的有效应力，加快地基土固

结, 提高强度。

2.1.10 复合地基 composite ground

天然地基土体经处理后, 部分土体被增强或被置换形成增强体, 由天然地基土体和增强体共同承担荷载的人工地基。

2.1.11 振冲碎石桩 vibroflotation stone pile

采用振冲器的振动加水冲方式在软弱地基中成孔后, 将碎石填入孔中形成的密实桩体。

2.1.12 沉管砂石桩 immersed sand-gravel pile

采用振动或锤击沉管的方式在软弱地基中成孔后, 将碎石或砂填入孔中形成的密实桩体。

2.1.13 水泥土搅拌桩 cement mixing pile

采用搅拌机械, 将水泥、石灰或其他固化材料与地基软土强制搅拌, 形成的具有整体性和有一定强度的桩体。

2.1.14 高压旋喷桩 highpressure jet grouting pile

将带有喷嘴的注浆管下入钻孔内旋转, 并以高压喷射水泥浆, 使之与周围土颗粒混合凝结硬化而成的桩体。

2.1.15 桩基 pile foundation

由设置于岩土中的桩和连接于桩顶端的建筑物底板 (承台) 组成的基础。

2.2 符 号

2.2.1 荷载和荷载效应

M_x 、 M_y ——作用于水工建筑物底板底面通过桩群形心的 x 、 y 轴的力矩;

Q_i ——偏心竖向力作用下第 i 根桩的竖向力;

Q_k ——单桩的平均竖向力;

R_a ——单桩竖向承载力容许值;

R_{Ha} ——单桩水平承载力容许值;

ΣG ——作用于底板底面的全部竖向荷载;

ΣH ——作用于底板底面的全部水平荷载。

2.2.2 材料性能参数

E_s ——桩间土的加权平均压缩模量；

E_{sp} ——复合地基的压缩模量；

E_p ——水泥土搅拌桩的压缩模量；

f_{ak} ——基础底面下天然地基承载力容许值；

f_{sk} ——处理后桩间土的承载力容许值；

f_{spk} ——复合地基承载力容许值；

f_{cu} ——与桩身水泥土配比相同的室内加固土试块（边长为70.7mm的立方体）在标准养护条件下90d龄期的立方体抗压强度平均值；

f_{rk} ——岩石饱和单轴抗压强度标准值；

q_{si} ——桩周第*i*层土的侧阻力容许值；

q_{sia} ——桩周第*i*层土的极限摩阻力；

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力容许值。

2.2.3 几何参数

A_p ——桩的截面积；

d_{15} ——覆盖层粒径指标，小于该粒径的土重占总重的15%；

D_{85} ——浆液材料粒径指标，小于该粒径的材料重占总重的85%；

m ——面积置换率；

x_i 、 x_j ——第*i*根、第*j*根桩至桩群形心的*y*轴线的距离；

y_i 、 y_j ——第*i*根、第*j*根桩至桩群形心的*x*轴线的距离。

3 基本规定

3.0.1 水工建筑物地基经处理后应符合下列规定：

1 具有足够的强度，能承受上部建筑物传递的荷载，满足地基承载能力要求和抗滑稳定要求。

2 具有足够的整体性和均匀性，满足变形控制要求。

3 具有足够的抗渗性，满足渗透稳定和控制渗流量的要求。

4 具有足够的耐久性，防止地基在水或其他外部因素的长期作用下发生劣化。

5 有抗震要求的水工建筑物地基，应在设计烈度的地震作用下不发生失稳和渗透破坏，避免产生影响建筑物使用的有害变形。

3.0.2 水工建筑物地基处理方法应根据地质条件和地基处理目的，通过技术经济比较综合确定。初选方案时，可根据工程特点按附录 A 选用。

3.0.3 水工建筑物地基处理设计应综合考虑地基与上部结构之间的相互关系，必要时采取措施调整上部结构的型式，使其与地基条件相适应。

3.0.4 应考虑环境水腐蚀性对水工建筑物地基耐久性的影响。地基处理材料选择除满足承载能力、稳定、变形、渗流要求外，还应符合耐久性要求。

3.0.5 水工建筑物地基处理设计前应收集下列基本资料：

- 相关的水文地质、工程地质及岩土体物理力学参数；
- 水工建筑物的布置、结构及相关要求；
- 邻近建筑物的相关设计、施工、竣工与运行资料；
- 其他相关资料。

3.0.6 对重要水工建筑物、条件特殊或复杂的地基，应通过专门的勘察、试验获取合理可靠的地基处理设计参数。

4 固结灌浆

4.1 一般规定

- 4.1.1 固结灌浆可用于岩石地基和砂土、碎石土等覆盖层地基。
- 4.1.2 固结灌浆应根据地质条件和水工建筑物对地基强度、变形、防渗等要求，通过现场灌浆试验或工程类比进行设计。
- 4.1.3 固结灌浆宜在有盖重条件下进行，经论证也可采用无盖重灌浆或其他灌浆方式。
- 4.1.4 固结灌浆宜布置抬动变形监测设施，抬动变形应控制在允许范围内。

4.2 岩基固结灌浆

- 4.2.1 水工建筑物岩基固结灌浆范围应符合下列规定：

- 1 重力坝坝基内上游、下游各一定范围（可各取 $1/4 \sim 1/3$ 坝底宽度范围）宜固结灌浆；坝基岩体裂隙发育且地质条件较差的，宜在全坝基范围进行固结灌浆，并根据坝基应力及地质条件适当扩大灌浆范围。
- 2 拱坝应全坝基范围固结灌浆，并应根据坝基应力及地质条件，向坝基外上游、下游适当扩大处理范围。
- 3 土石坝宜在坝体防渗体地基全范围固结灌浆。
- 4 面板堆石坝趾板地基应全范围固结灌浆。
- 5 溢洪道控制段及消能建筑物的地基宜进行固结灌浆，基岩条件较好时可不进行固结灌浆。

- 6 其他水工建筑物固结灌浆范围应根据具体情况确定。

- 4.2.2 固结灌浆孔布置宜为梅花形，孔距、排距宜为 $2 \sim 4\text{m}$ ，具体应根据水工建筑物型式、地基应力、地质条件及类似工程经验确定，必要时通过灌浆试验确定。

4.2.3 岩基固结灌浆钻孔方向应根据主要裂隙产状结合施工条件确定,使其能穿过较多的裂隙。

4.2.4 岩基固结灌浆深度应根据建筑物型式和高度、地质条件、地基应力并参照类似工程经验确定,并符合下列规定:

1 重力坝、土石坝坝体防渗体、面板堆石坝趾板地基可采用5~10m。

2 拱坝地基可采用5~15m。

3 水电站厂房、溢洪道、水闸等地基可采用3~5m。

4 地质缺陷部位、应力较大部位、防渗帷幕上下游相邻部位的固结灌浆深度可适当加深。

4.2.5 岩基固结灌浆压力应根据地质条件、灌浆工艺并结合类似工程经验、灌浆试验成果综合确定。无试验资料时宜符合下列规定:

1 重力坝、拱坝地基第1段灌浆压力,有盖重灌浆时宜采用0.4~0.7MPa,无盖重灌浆时宜采用0.2~0.4MPa;其他段灌浆压力可随孔深适当增加。

2 面板堆石坝趾板地基灌浆压力宜采用0.2~0.7MPa;土石坝防渗体地基灌浆压力,有盖重灌浆时宜采用0.2~0.7MPa,无盖重灌浆时宜采用0.1~0.3MPa。

3 溢洪道地基灌浆压力,有盖重灌浆时宜采用0.2~0.5MPa,无盖重灌浆时宜采用0.1~0.3MPa。

4 在不抬动地基岩土和盖重混凝土的情况下,宜提高固结灌浆压力。

4.2.6 岩基固结灌浆材料宜优先采用水泥,必要时也可采用其他材料。

4.2.7 断层破碎带、裂隙密集带、岩溶发育等地质缺陷部位,宜通过加密、加深固结灌浆孔,或提高灌浆压力,或调整灌浆材料等措施加强固结灌浆。

4.2.8 岩基固结灌浆效果应采用声波测试、压水试验等成果综合评价。

4.3 覆盖层地基固结灌浆

4.3.1 覆盖层地基固结灌浆应根据水工建筑物地基承载力和变形控制要求,结合地质、施工、现场试验成果或类似工程经验进行设计。

4.3.2 覆盖层地基固结灌浆前,应先查明覆盖层的成因、结构、空间分布特征,各土层的颗粒级配、密度等,以及地下水的分布规律、流速、水质等情况。

4.3.3 覆盖层地基的可灌性可按可灌比 M 或其他指标判别,并通过现场试验确定。 $M > 15$ 时可灌注水泥浆; $M > 10$ 时可灌注水泥黏土浆。 M 按式 (4.3.3) 计算:

$$M = d_{15} / D_{85} \quad (4.3.3)$$

式中 d_{15} ——覆盖层粒径指标, mm, 小于该粒径的土重占总重的 15%;

D_{85} ——浆液材料粒径指标, mm, 小于该粒径的材料重占总重的 85%。

4.3.4 覆盖层地基固结灌浆范围应大于水工建筑物基础的基底外缘,并根据覆盖层分布、水工建筑物要求、计算分析等综合确定。

4.3.5 覆盖层地基固结灌浆的孔距、排距宜为 2~3m,其具体值和孔深可根据现场灌浆试验、计算分析,并参照类似工程经验确定。

4.3.6 覆盖层地基固结灌浆可根据工程经验、现场灌浆试验选择适宜的方法,并可采取加密浅层灌浆孔、增加浆液中水泥含量、待凝等措施提高近地表覆盖层的灌浆质量。

4.3.7 覆盖层地基固结灌浆的压力应根据地质条件、现场灌浆试验成果并结合类似工程经验综合确定。

4.3.8 覆盖层地基固结灌浆宜采用水泥浆,也可采用水泥黏土浆、黏土水泥浆、粉煤灰水泥浆或水泥砂浆等。各种浆液的配比应由浆液试验确定。

4.3.9 覆盖层地基采用固结灌浆与强夯、挖填置换等其他措施综合处理时，应在其他措施完成后，再进行固结灌浆。

4.3.10 覆盖层地基固结灌浆效果宜采用压水或注水试验、地震波测试或声波测试、动力触探或静力触探等成果综合评价，必要时可进行载荷试验、坑探检查。

4.4 固结灌浆试验

4.4.1 下列情况应进行现场固结灌浆试验：

——地质条件复杂地区或有特殊要求的 1 级、2 级水工建筑物岩基固结灌浆；

——1 级和 2 级水工建筑物覆盖层地基固结灌浆；

——其他认为有必要进行现场试验的固结灌浆工程。

4.4.2 现场固结灌浆试验应包括下列试验内容：

- 1 推荐合适的灌浆布置，如孔间距、孔深等。
- 2 推荐适宜的灌浆材料、灌浆方法及工艺参数。
- 3 提出工程重大地质缺陷的灌浆处理措施。
- 4 验证质量检查方法和要求。

4.4.3 试验场地选择应综合考虑下列因素：

- 1 地质条件应具有代表性。
- 2 方便与永久工程结合。
- 3 施工干扰少，水电、交通方便，辅助工程量小。

4.4.4 试验方案设计应包括下列内容：

- 1 试验目的、项目及组数。
- 2 灌浆孔、检查孔及抬动观测孔数量及布置原则。
- 3 灌浆材料、灌浆方法及工艺参数。
- 4 质量检查与测试、室内试验数量。

5 防渗帷幕与排水

5.1 一般规定

5.1.1 防渗帷幕可用于岩石地基和碎石土、砂土等覆盖层地基。

5.1.2 水工建筑物地基防渗帷幕与排水应符合下列规定：

1 在防渗帷幕和排水的共同作用下，使地基扬压力和渗流量控制在允许值以内。

2 减小地基和两岸渗漏量，防止或降低渗流对地基及两岸边坡稳定产生不利影响。

3 防止地基软弱结构面、断层破碎带、裂隙充填物及抗渗性能差的部位产生渗透破坏。

4 具有可靠的连续性和足够的耐久性。

5.1.3 防渗帷幕轴线布置应根据水工建筑物布置、工程地质、水文地质条件等综合确定，两岸山体部位的防渗帷幕应与河床部位的防渗帷幕保持连续性。

5.1.4 防渗帷幕与排水应根据地基的工程地质、水文地质条件和灌浆试验成果，结合水工建筑物挡水高度和功能进行设计。水文地质条件复杂的地基，宜结合渗流计算综合分析确定。

5.1.5 岩溶地区的防渗帷幕与排水应根据岩溶发育特点、分布特征、充填物性质和地下水活动特点，进行针对性的设计。

5.1.6 水库蓄水前，应完成蓄水时段最高蓄水位以下的防渗帷幕。

5.1.7 防渗帷幕设计应布置抬动变形监测设施，并明确抬动变形允许范围。

5.2 岩基防渗帷幕

5.2.1 混凝土坝基防渗帷幕线的位置应根据坝基应力分布确定，

宜布置在靠近上游面的压应力区。下游高水位历时较长或岩体透水性较大的混凝土坝基，可采取抽排措施，布设封闭防渗帷幕。

5.2.2 岩基上的水闸或泵房，可根据防渗需要在闸室底板上游端或泵房底板高水位侧的齿墙下设防渗帷幕。承受双向水头的水闸或具有双向扬程的灌排结合泵站，其防渗排水布置应以水位差较大或扬程较高的一侧为主，合理选择双向布置形式。

5.2.3 岩基上的土石坝，防渗帷幕应设在坝的防渗体底部。

5.2.4 两岸山体部位防渗帷幕宜延伸到正常蓄水位与地下水位相交处或与相对隔水层相交处，相对隔水层和地下水位均较低缓时，防渗帷幕轴线方向及延伸长度应根据工程防渗要求并参考渗流分析成果确定。地质条件复杂的岩基防渗帷幕线路应经多方案技术经济比较确定。

5.2.5 岩溶地区两岸防渗帷幕线路应根据地形地质条件和岩溶分布特征选定，可采用直线式、折线式布置。防渗帷幕线路宜选择岩溶发育程度较弱的地带布置，若必须通过岩溶暗河或岩溶通道，宜与其垂直。

5.2.6 河床式厂房地基防渗帷幕设计应按大坝要求确定；坝后式及岸边式厂房的防渗帷幕设计可适当简化；下游尾水位较高的厂房，宜在下游侧周边设置防渗帷幕。

5.2.7 地下电站主厂房、主变压器室及高压开关站等主要洞室距水库或河床较近，或洞室外岩体地下水丰富时，应加强洞室上游侧及河床侧的防渗措施，必要时可在洞室外围设置防渗帷幕。

5.2.8 混凝土坝帷幕防渗标准和相对隔水层的透水率应采用下列控制标准：

——坝高在 100m 以上，透水率 $q=1\sim 3\text{Lu}$ ；

——坝高为 50~100m，透水率 $q=3\sim 5\text{Lu}$ ；

——坝高在 50m 以下，透水率 $q\leq 5\text{Lu}$ 。

5.2.9 岩基土石坝帷幕防渗标准和相对隔水层的透水率宜采用下列控制标准：

——1 级、2 级坝及坝高在 70m 以上，透水率 $q=3\sim 5\text{Lu}$ ；

——3级及其以下的坝，透水率 $q=5\sim 10Lu$ ；

——蓄水水库可取小值，滞洪水库等可用大值。

5.2.10 溢洪道控制段、岩基上水闸的帷幕防渗标准和相对隔水层的透水率控制标准宜不大于 $5Lu$ 。与大坝防渗帷幕衔接的溢洪道控制段防渗帷幕应与大坝帷幕防渗标准相一致，远离坝肩的溢洪道防渗帷幕防渗标准可适当降低。

5.2.11 防渗帷幕的深度应符合下列规定：

1 当地基下存在可靠的相对隔水层，且埋深较浅时，防渗帷幕应伸入到该岩层内不少于 $5m$ 。

2 当地基下相对隔水层埋藏较深或分布无规律时，防渗帷幕深度应参照渗流计算，考虑工程地质条件和渗控要求等因素，结合工程经验研究确定；非岩溶地区防渗帷幕深度可采用 $0.3\sim 0.7$ 倍水头；岩溶地区防渗帷幕深度应根据岩溶发育规律及渗控要求确定。

5.2.12 两岸防渗帷幕深度较深的，应分层设置灌浆隧洞，灌浆隧洞的布置应根据地形地质条件、分期蓄水高度、钻孔灌浆技术水平、施工通风和排水等因素确定，岩溶地区还应根据岩溶分布高程确定。灌浆隧洞层间高差可取 $30\sim 70m$ 。上、下相邻两层帷幕的搭接型式可采用斜接式、直接式及错列式等，搭接部位应连续封闭。单排孔灌浆隧洞断面尺寸不宜小于 $2.5m\times 3.0m$ （宽 $\times$ 高），双排孔及以上灌浆隧洞断面尺寸不宜小于 $3.0m\times 3.5m$ 。

5.2.13 防渗帷幕的排数、排距、孔距及孔向，应根据地质条件、防渗标准、挡水水头以及灌浆试验资料选定。施工过程中应根据先期钻孔与灌浆资料修正防渗帷幕设计。

1 水工建筑物挡水高度 $100m$ 及以上时，可采用两排防渗帷幕；水工建筑物挡水高度 $100m$ 以下时，可采用一排防渗帷幕。对地质条件较差、岩体裂隙发育、透水性强或可能发生渗透变形破坏的地段宜增加防渗帷幕排数。

2 两排或两排以上灌浆孔组成的帷幕，应将其中一排孔的孔深取帷幕设计深度，其余各排孔的孔深可取帷幕设计深度的

1/2~2/3。

3 帷幕孔距可为 1.5~3.0m，排距宜小于孔距。

4 帷幕孔宜穿过岩体的主要裂隙和层面。

5.2.14 帷幕灌浆应在浇筑一定厚度的混凝土作为盖重后施工；混凝土趾板、基座部位帷幕灌浆及隧洞内的帷幕灌浆可采取布置抗拉锚杆、加强配筋、增加衬砌厚度等措施满足抗抬动的要求。

5.2.15 防渗帷幕灌浆压力应通过灌浆试验确定，灌浆时不得抬动破坏结构混凝土和地基岩体。混凝土重力坝、拱坝、溢洪道控制段帷幕第 1 段宜取 1.0~1.5 倍坝前静水头，以下各段可逐渐增加，孔底段不宜小于 2 倍坝前静水头。

5.2.16 防渗帷幕宜采用水泥灌浆；在水泥灌浆达不到设计防渗要求时，可采用符合环保要求的其他材料灌浆。

5.2.17 岩溶地区灌浆材料可根据岩溶洞穴和溶蚀裂隙规模及充填情况选用纯水泥浆、水泥砂浆、黏土水泥浆、粉煤灰水泥浆等，必要时可通过大口径钻孔灌注高流态细骨料混凝土。岩溶地区帷幕灌浆应考虑不同类型的溶洞及充填物灌浆所形成防渗帷幕的允许渗透比降及耐久性。

5.3 岩基排水

5.3.1 混凝土坝（堰、闸）坝基主排水幕宜设置在基础廊道内防渗帷幕的下游，建基面处主排水幕与防渗帷幕的距离不宜小于 2m。必要时可在主排水幕下游设置 1~3 排辅助排水孔。

5.3.2 采取抽排措施时，应在抽排区设置纵、横向辅助排水孔幕，宜能分区排水及检查。

5.3.3 混凝土重力坝坝高较低、基岩条件较好且为岩体透水率小于 1Lu 的弱透水层，经论证后，地基可只设排水，不设帷幕。

5.3.4 重力坝岸坡坝段及近岸山体内，宜根据工程地质和水文地质条件，并结合建筑物布置及稳定分析，视需要设置排水设施。必要时可布置排水洞，并设排水孔。

5.3.5 中、低高度的薄拱坝经论证可简化排水布置或不设坝基

排水。高拱坝以及两岸地形较陡、地质条件较复杂的中拱坝，宜在两岸拱座岩体内布置排水洞，并设排水孔。

5.3.6 河床式厂房地基排水设计应按大坝要求确定；坝后式及岸边式厂房的排水设计可适当简化；下游尾水位较高的厂房，必要时可采取抽排措施。

5.3.7 地下电站主厂房、主变压器室及高压开关站等主要洞室的排水应符合下列规定：

- 1 洞室距水库或河床较近，或洞室外岩体地下水丰富的地区，应加强洞室前沿及河床侧的排水措施，必要时可在洞室群外围和厂房顶部设置排水洞，并在排水洞内设排水幕，形成厂外排水系统。

- 2 地下水丰富或岩体透水性强的地区，宜在主洞室开挖之前，先形成厂外排水系统。

- 3 当设有尾水调压室时，应加强尾水调压室的防渗与排水措施。

5.3.8 主排水孔的孔距可为 $2\sim 3\text{m}$ ，辅助排水孔的孔距可为 $3\sim 5\text{m}$ 。

5.3.9 排水孔孔深应根据帷幕深度及地基的工程地质、水文地质条件确定，并应符合下列规定：

- 1 主排水孔深为帷幕深的 $0.4\sim 0.6$ 倍。

- 2 辅助排水孔深可为 $6\sim 12\text{m}$ 。

- 3 当地基有承压水层或较大的深层透水区时，应对排水孔是否穿过此部位及穿过深度进行分析研究。

5.3.10 排水孔孔壁有塌落现象或排水孔穿过软弱地层、软弱结构面、断层破碎带、夹泥裂隙等可能产生渗透破坏的地段，应采取相应的孔壁保护措施。

5.3.11 坝（堰、闸）地基及地下洞室等的渗水应按高水高排、低水低排的原则通过排水廊道（管）、隧洞排出；渗水不能自流排出时，应根据水文地质条件、防渗排水工程布置及渗流计算，综合确定渗漏水量，并设置足够容积的集水井和足够抽排能力的

抽排设施。

5.4 覆盖层地基防渗帷幕

5.4.1 采用帷幕进行覆盖层地基防渗处理时，应先查明覆盖层的成因、结构、空间分布特征，各土层的颗粒级配、渗透系数、允许渗透比降等，以及地下水的分布规律、流速、水质等情况。

5.4.2 防渗帷幕的渗流控制标准应根据工程的防渗要求和地质条件，通过渗流计算及渗透试验综合确定，并应满足下列要求：

1 帷幕的渗透比降不大于允许渗透比降。

2 帷幕与其上部的防渗体之间不发生接触冲刷和接触流失。

5.4.3 覆盖层地基帷幕灌浆可按可灌比 M 或其他指标判别其可灌性，按 4.3.3 条的规定执行。

5.4.4 防渗帷幕的厚度可按式 (5.4.4) 计算。对于深度较大的多排帷幕，可根据渗流计算成果和已有工程经验沿深度逐渐减薄。

$$T = \frac{H}{J} \quad (5.4.4)$$

式中 T ——防渗帷幕厚度，m；

H ——作用于帷幕的最大设计水头，m；

J ——帷幕允许渗透比降。

5.4.5 防渗帷幕灌浆孔宜采用铅直孔。帷幕灌浆孔的排数应根据帷幕厚度要求确定，不宜少于 2 排。帷幕灌浆孔的排距和孔距宜为 1~3m，排距宜小于孔距。

5.4.6 防渗帷幕底部宜伸入相对隔水层不小于 5m。当相对隔水层较深时，可设置悬挂式帷幕，并根据渗流分析成果、类似工程经验，研究确定防渗帷幕底线。

5.4.7 防渗帷幕灌浆浆液可采用水泥浆、黏土水泥浆、黏土浆。水泥和黏土灌浆不能满足工程要求时，可采用化学材料灌浆。各种浆液的配比应由浆液试验确定。

进行多排帷幕灌浆时，边排孔和帷幕浅部宜采用水泥含量较

高的浆液，临时性工程可减少水泥含量或使用黏土浆。

5.4.8 防渗帷幕灌浆压力应通过工程类比和灌浆试验确定。

5.5 帷幕灌浆试验

5.5.1 下列情况应进行现场帷幕灌浆试验：

- 1级、2级水工建筑物岩基帷幕灌浆；
- 覆盖层地基帷幕灌浆；
- 其他有必要进行现场试验的帷幕灌浆工程。

5.5.2 帷幕灌浆试验内容、试验场地选择及方案设计等要求按照4.4.2~4.4.4条的规定执行。

6 防 渗 墙

6.1 一 般 规 定

6.1.1 混凝土防渗墙可用于风化破碎岩石地基和碎石土、砂土等覆盖层地基。

6.1.2 高喷防渗墙和水泥土搅拌防渗墙可用于淤泥质土、粉质黏土、粉土、砂土等覆盖层地基。

6.1.3 水工建筑物地基防渗墙应符合下列规定：

- 1 具有足够的抗渗性，满足渗透稳定及渗流量控制要求。
- 2 具有适宜的强度和变形能力。
- 3 具有足够的耐久性，墙体在水的长期作用下不发生破坏。

6.1.4 防渗墙设计应综合考虑墙体与上部水工建筑物结构之间的相互关系。

6.1.5 混凝土防渗墙厚度宜为 0.3~1.2m，深度不宜大于 100m。深度或厚度超出上述范围的，应进行试验论证。

6.1.6 1 级和 2 级水工建筑物地基采用高喷墙和水泥土搅拌墙防渗，应进行可行性和安全性论证。

6.1.7 重要的、地层复杂的或深度较大的高喷防渗墙、水泥土搅拌防渗墙，应选择有代表性的地层进行成墙现场试验。

6.2 混凝土防渗墙结构设计

6.2.1 防渗墙宜沿上部水工建筑物防渗体的轴线布置，墙体应与上部水工建筑物防渗体可靠连接。

6.2.2 防渗墙的深度应符合下列规定：

1 封闭式防渗墙应伸入到基岩或相对不透水层一定深度。防渗墙底部岩土体渗透性不满足防渗标准时，可在墙下接防渗帷幕。

2 悬挂式防渗墙的深度宜根据地形地质条件、渗流计算成

果、施工难度等，结合工程经验研究确定。

6.2.3 防渗墙的厚度应根据防渗要求、允许渗透比降、抗渗耐久性、墙体应力和变形、施工设备、地质条件、环境水质等因素综合确定。

6.2.4 防渗墙设计厚度可按式 (6.2.4) 计算：

$$T = \frac{H}{J} \quad (6.2.4)$$

式中 T ——防渗墙设计厚度，m；

H ——作用于防渗墙的最大设计水头，m；

J ——防渗墙允许渗透比降，根据混凝土、黏土混凝土、塑性混凝土、固化灰浆、自凝灰浆等墙体材料不同，取 20~100，有条件时也可通过试验测定防渗墙破坏时的极限渗透比降，允许渗透比降取极限渗透比降的 1/5~1/3。

6.2.5 高坝深厚覆盖层地基可布置两道或两道以上混凝土防渗墙。

6.2.6 复杂条件下混凝土防渗墙，应进行应力应变分析，核算墙体的位移、应力及地基变形，为确定墙体混凝土的强度提供依据。墙体竖直位移、水平位移与地基的变形宜协调一致，应力大小应满足强度要求，且分布合理。

6.2.7 刚性混凝土防渗墙可根据墙体受力要求和结构变形要求设置钢筋，钢筋布置应满足构造和施工要求。

6.2.8 结合地质条件和工程要求，混凝土防渗墙墙体材料可选用普通混凝土、黏土混凝土、粉煤灰混凝土、塑性混凝土、固化灰浆、自凝灰浆等。无论采用何种材料，均应考虑泥浆下浇筑条件对实际强度的不利影响。

6.3 混凝土防渗墙连接与构造

6.3.1 混凝土防渗墙与心墙、斜墙、趾板、铺盖、廊道、帷幕、混凝土结构、土工膜等相接时，应避免产生集中渗漏和影响结构

安全的不均匀变形。

6.3.2 混凝土防渗墙与上部防渗体的连接，应符合下列规定：

1 与心墙或斜墙土质防渗体连接可采用插入式、廊道式等形式。

1) 采用插入式连接，防渗墙伸入心墙或斜墙的长度宜为挡水水头的 $1/10$ ，高坝可适当降低或根据计算确定，低坝不应小于 2m 。在墙顶可填筑高塑性黏土保护。

2) 采用廊道式连接，廊道外轮廓宜采用抛物线型或城门洞型，其周围应铺填高塑性黏土保护。防渗墙顶部与廊道底板连接段宜设置成倒梯形。廊道与两岸坝肩岩体连接处，廊道底板结构缝在水平方向深入基岩不小于 3m 。

2 与沥青混凝土心墙连接可采用混凝土基座连接，防渗墙顶宜插入基座底部键槽，并设止水连接。

3 与坝前黏土铺盖连接可采用插入式，防渗墙伸入铺盖及上部黏土保护层的深度应根据计算确定且不小于 2m 。墙顶应设置黏土层、砂砾料层、块石层防护。

4 与水闸混凝土铺盖或钢筋混凝土铺盖连接可采用水平直接式或垂直顶接式，并设置止水。

5 与闸坝底板结构混凝土连接可采用插入键槽式，并设置止水。

6 与大坝混凝土面板可通过趾板、水平连接板进行连接。防渗墙与趾板、防渗墙与连接板、连接板与趾板之间均应设置止水。

7 土工膜可采用埋入式或锚固式与混凝土防渗墙连接。

6.3.3 混凝土防渗墙与下部帷幕的连接，应符合下列规定：

1 墙下为基岩时，通过墙体预埋管或钻孔进行墙下帷幕灌浆，可靠连接。

2 墙下为覆盖层时，灌浆帷幕与防渗墙的底部应设置搭接段，且搭接长度不小于 5m ，沿防渗墙底端的渗透比降应小于灌

浆帷幕的允许比降。

6.3.4 防渗墙与下部基岩相接时，宜嵌入基岩 0.5~1.0m，对风化较深的地段和断层破碎带可适当加深，或灌浆处理。

6.3.5 防渗墙与两端防渗体的连接，应符合下列规定：

- 1 与相邻的防渗帷幕可采用搭接式或插入式连接。
- 2 与两岸岸坡可采用墙体入岩的方式连接。岩体埋深较浅部位，可明挖后现浇混凝土齿墙或黏土齿墙进行连接。

6.3.6 通过在混凝土防渗墙墙体内预埋管进行墙下帷幕灌浆时，墙厚不宜小于 40cm；通过在混凝土防渗墙墙体内钻孔进行墙下帷幕灌浆时，墙厚不宜小于 60cm。

6.3.7 混凝土防渗墙内受力钢筋保护层厚度不应小于 75mm，竖直钢筋净间距宜大于混凝土粗骨料粒径的 4 倍。

6.4 高喷防渗墙

6.4.1 高喷防渗墙的轴线布置、深度可参照 6.2.1 条、6.2.2 条执行。

6.4.2 高喷防渗墙设计厚度可按式 (6.2.4) 计算，允许渗透比降宜取 50~100，有条件时，宜通过试验确定。

6.4.3 在不同地层中的高喷防渗墙墙体的渗透系数和抗压强度指标，可参照表 6.4.3 选用。

表 6.4.3 高喷防渗墙墙体性能指标

地层	渗透系数 $K/(cm/s)$	抗压强度 R_{28}/MPa
淤泥质土层	$i \times 10^{-6}$	0.5~2.0
粉土、粉质黏土层	$i \times 10^{-6}$	0.5~3.0
砂土层	$i \times 10^{-6}$	1.5~5.0
砾石层	$i \times 10^{-5} \sim i \times 10^{-6}$	3.0~10.0
碎（卵）石层	$i \times 10^{-4} \sim i \times 10^{-5}$	3.0~12.0
注 1： $i=1 \sim 9$ 。		
注 2：渗透系数 K 为现场试验指标，凝结体抗压强度 R_{28} 为室内试验指标。单管法和双管法 K 取低值， R_{28} 取高值；三管法 K 取高值， R_{28} 取低值。		

6.4.4 高喷防渗墙灌浆孔的孔距可取 $0.8\sim 2.5\text{m}$ ，排距宜小于孔距。具体排数、孔距和排距，应根据高喷防渗墙渗透系数、抗压强度、墙厚等指标要求，结合地层条件以及所采用的结构型式，通过现场试验或工程类比确定。

6.4.5 高喷防渗墙的平面连接可采用旋喷套接、旋喷摆喷搭接、旋喷定喷搭接、摆喷对接或折接、定喷折接等结构型式。

6.4.6 高喷防渗墙灌浆材料可选用普通水泥浆、黏土水泥浆等，特殊条件下，可加入膨润土、粉煤灰、砂、速凝剂、减水剂等材料。

6.4.7 封闭式高喷防渗墙的钻孔宜深入基岩或相对不透水层 $0.5\sim 2.0\text{m}$ 。

6.4.8 高喷防渗墙与其他防渗体的连接可参照 6.3.2~6.3.5 条执行，确保连接可靠。

6.4.9 高喷防渗墙平面转折处，应采取缩小孔距、加密孔数、调整喷射夹角等措施，确保墙体良好搭接。

6.5 水泥土搅拌防渗墙

6.5.1 水泥土搅拌防渗墙宜沿堤防、土坝等水工建筑物的防渗体轴线布置，且应与上部防渗体可靠连接。

6.5.2 封闭式防渗墙宜伸入到相对不透水土层一定深度，悬挂式防渗墙宜根据地质条件、渗流计算成果、施工条件综合确定。

6.5.3 水泥土搅拌防渗墙设计厚度可按式 (6.2.4) 计算，允许渗透比降可采用 $30\sim 80$ ，有条件时，宜通过试验确定。

6.5.4 搅拌桩间距可采用 $0.3\sim 1.0\text{m}$ ，具体应根据防渗墙渗透系数、墙厚、桩径等指标要求，结合地质条件、成墙工艺确定。

6.5.5 与地基土搅拌的材料宜采用普通水泥，也可掺加石灰或外加剂。

6.5.6 水泥土搅拌防渗墙与其他防渗体的连接及墙体之间的搭接可参照 6.3.2~6.3.5 条、6.4.9 条执行。

7 挖填置换

7.1 一般规定

7.1.1 挖填置换可用于岩石地基中断层破碎带、软弱层带、岩溶等缺陷及特殊土地基。

7.1.2 挖填置换设计,应结合水工建筑物的结构和运用特点,将地基与其上部结构一起研究,以满足水工建筑物对地基承载力、抗滑稳定、变形、渗流等要求。

7.1.3 当地基中存在规模较大的工程地质缺陷时,挖填置换方案应通过相应的计算或模型试验进行研究。

7.2 断层破碎带与软弱层带挖填置换

7.2.1 水工建筑物岩石地基范围内的断层破碎带或软弱层带,应根据其埋深、产状、宽度、组成物性质等,评价其对建筑物的影响,采用挖填置换或与其他处理措施相结合的综合处理方案。

7.2.2 地基范围内的陡倾角断层破碎带进行挖填置换时,应符合下列规定:

1 单独出露的断层破碎带,其组成物质主要为坚硬构造岩,对地基的强度和压缩变形影响不大的,可将表层破碎岩体挖除。

2 断层破碎带规模不大,但其组成物质以软弱构造岩为主,且对地基的强度和压缩变形有一定影响的,可用混凝土塞加固,混凝土塞的深度可采用 1.0~1.5 倍断层破碎带的宽度或根据计算确定。贯穿地基上下游的断层破碎带处理,宜向上下游地基外适当延伸。

3 规模较大的断层破碎带或断层交汇带,对地基的强度和压缩变形有较大影响的,应进行专门研究。

7.2.3 地基范围内的软弱层带进行挖填置换时,根据埋深不同可分别采用混凝土置换、混凝土深齿墙、混凝土洞塞等措施。

7.2.4 采用规模较大的混凝土塞、齿墙或混凝土洞塞进行断层破碎带与软弱层带处理时，应制定相应的温度控制、接触灌浆与监测等措施。

7.3 岩溶挖填置换

7.3.1 水工建筑物岩石地基范围内的岩溶，应根据其规模、埋深、水文地质条件、充填物的物理力学性质以及对水工建筑物结构安全的影响等，采用挖填置换或与其他处理措施相结合的综合处理方案。

7.3.2 对岩溶进行挖填置换处理，可采用下列方法：

——规模不大且埋深较小的岩溶，可清挖后回填混凝土，并对周围岩体进行灌浆；

——规模不大但埋深较大的岩溶，可清挖后钻孔灌注混凝土或水泥砂浆等；

——规模较大的岩溶，可清挖后先填砂砾石或混凝土，后灌浆。

7.3.3 岩溶处理中混凝土回填较深、范围较大时，应制定相应的混凝土温控和接触灌浆等措施。

7.3.4 岩溶处理时，对岩溶水应采取妥善的疏导措施。

7.4 特殊土挖填置换

7.4.1 可液化砂土、软土、膨胀土、湿陷性土、盐渍土、分散性土、冻土、红黏土、杂填土等特殊土可采用挖填置换处理。

7.4.2 对水工建筑物特殊土地基，应通过工程经验类比、计算或试验确定挖填置换范围、厚度，确定换填料类型、控制标准等。

8 强夯与强夯置换

8.1 一般规定

8.1.1 强夯可用于碎石土、砂土、低饱和度的粉土、粉质黏土、湿陷性土等覆盖层地基。

8.1.2 强夯置换可用于高饱和度的粉土、软塑~流塑的黏性土等覆盖层地基。

8.1.3 地下水位高时,应先采取降水等技术措施,减少地下水对强夯效果的影响。

8.1.4 强夯和强夯置换的处理范围应符合下列规定:

1 每边超出基底外缘的宽度为设计要求处理深度的 $1/3 \sim 1/2$,且不应小于 3m。

2 对于可液化地基,基底外缘的处理宽度不应小于基底下可液化土层厚度的 $1/2$,且不应小于 5m。

3 湿陷性土地基,应符合 GB 50025 的有关规定。

8.2 强 夯

8.2.1 强夯的有效加固深度应通过下列方式确定:

——现场试夯或地区经验;

——缺少试验资料或经验时,可按经验公式预估。

8.2.2 夯击点可采用等边三角形、等腰三角形、正方形布置。

8.2.3 夯点间距应根据加固土层厚度和土质条件等综合确定。第一遍夯点间距可取夯锤直径的 $2.5 \sim 3.5$ 倍,第二遍夯击点应位于第一遍夯击点之间,以后各遍夯击点间距可适当减小。需处理深度大或单击夯击能较大的工程,第一遍夯击点间距宜适当增大。

8.2.4 夯点的单点夯击次数,应根据现场试夯的夯击次数和夯沉量关系曲线确定,同时满足下列条件:

1 最后两击的平均夯沉量应满足表 8.2.4 的要求;当单击

夯击能大于 12000kN·m 时，应通过试验确定。

表 8.2.4 强夯法最后两击平均夯沉量

单击夯击能 $E/(\text{kN} \cdot \text{m})$	最后两击平均夯沉量/cm
$E < 4000$	≤ 5
$4000 \leq E < 6000$	≤ 10
$6000 \leq E < 8000$	≤ 15
$8000 \leq E \leq 12000$	≤ 20

- 2 夯坑周围地面不应发生过大的隆起。
 - 3 不因夯坑过深发生提锤困难。
- 8.2.5 夯点的夯击遍数应根据地基土性质和使用要求确定，宜采用点夯 2~4 遍，对于渗透性较差的细颗粒土，应适当增加夯击遍数。点夯后宜以低能量满夯 2 遍，满夯可采用轻锤或低落距锤多次夯击，锤印应搭接。
- 8.2.6 前后两遍夯击间隔时间应根据土中超孔隙水压力的消散状况确定。当缺少实测资料时，可根据地基土的渗透性确定。对于渗透性差的细粒土地基，两遍之间的间歇时间不宜少于 3 周；对于渗透性好的粗粒土地基，可连续夯击。
- 8.2.7 强夯后地基承载力容许值应通过现场静载荷试验确定。
- 8.2.8 强夯后地基变形计算应符合 GB 50007 的有关规定。夯后有效加固深度内土层的压缩模量应通过土工试验或原位测试确定。

8.3 强 夯 置 换

- 8.3.1 强夯置换墩的深度应根据土质条件确定，置换墩应穿透处理土层，其深度不宜超过 7m。
- 8.3.2 强夯置换墩位宜采用等边三角形、正方形布置。
- 8.3.3 强夯置换墩间距应根据变形和承载力要求确定；满堂布置时，可取夯锤直径的 2.0~3.0 倍；独立基础，可取夯锤直径的 1.5~2.0 倍。墩的计算直径可取夯锤直径的 1.1~1.2 倍。

8.3.4 强夯置换的单击夯击能和夯点的单点夯击次数应通过现场试验确定，并应符合下列规定：

- 1 墩底穿透软弱土层达到设计墩长。
- 2 累计夯沉量为设计墩长的 1.5~2.0 倍。
- 3 最后两击的平均夯沉量满足表 8.2.4 的要求。

8.3.5 强夯置换设计应预估地面抬高值，并在试夯时校正。

8.3.6 强夯置换墩材料宜采用级配良好的块石、碎石、矿渣等粗颗粒材料，粒径大于 300mm 的颗粒含量不宜超过材料总质量的 30%；强夯置换前宜在表层铺填厚 1.0~2.0m 的粗粒土。

8.3.7 强夯置换后的地基承载力允许值应通过现场单墩静载荷试验或单墩复合地基静载荷试验确定。

8.3.8 强夯置换地基宜按单墩静载荷试验确定的变形模量计算加固区的地基变形，对墩下地基土的变形可按置换墩材料的压力扩散角计算传至墩下土层的附加应力，按 GB 50007 的有关规定计算确定。

8.4 强夯与强夯置换试验

8.4.1 下列情况应进行现场强夯和强夯置换试验：

- 1 级、2 级水工建筑物地基的强夯和强夯置换；
- 其他有必要进行现场试验的地基。

8.4.2 强夯与强夯置换试验应包括下列试验内容：

- 1 确定有效加固深度。
- 2 确定夯击点布置及夯点间距。
- 3 确定单点夯击次数及夯击遍数。
- 4 确定前后两遍夯击间隔时间。
- 5 选定适宜的强夯置换材料。

8.4.3 试验场地选择应综合考虑如下因素：

- 1 地质条件应具有代表性。
- 2 试验区面积不宜小于 20m×20m。

9 预压排水固结

9.1 一般规定

9.1.1 预压排水固结可用于淤泥、淤泥质土、饱和软黏土等覆盖层地基。

9.1.2 预压排水固结可采用堆载预压、真空预压、真空和堆载联合预压。

9.1.3 重要工程，应选择有代表性的场地进行预压试验。

9.1.4 预压排水固结加固区边线与周边建筑物、地下管线等距离较小时，应考虑对周边建筑物和地下管线的影响，必要时采取相应保护措施。

9.1.5 预压排水固结处理地基时，应设置水平和竖向排水系统。当处理土层厚度不大或含较多薄粉砂夹层，且固结速率能满足工期要求时，可不设置竖向排水体。

9.2 堆载预压

9.2.1 堆载预压荷载顶面的范围不应小于水工建筑物基底外缘的范围。

9.2.2 竖向排水体可采用普通砂井、袋装砂井和塑料排水板。根据不同材料，竖向排水体的直径 d_w 可按下列规定确定：

1 普通砂井 d_w 取 300~500mm。

2 袋装砂井 d_w 取 70~120mm。

3 塑料排水板 d_w 取其当量换算直径，可按式 (9.2.2) 计算：

$$d_w = \frac{2(b + \delta)}{\pi} \quad (9.2.2)$$

式中 d_w ——塑料排水板的当量换算直径，mm；

b ——塑料排水板宽度，mm；

δ ——塑料排水板厚度，mm。

9.2.3 排水体的有效排水直径 d_e 应按下列规定确定：

- 1 普通砂井 d_e 可按式 (9.2.3-1) 计算确定：

$$d_e = (6 \sim 8)d_w \quad (9.2.3-1)$$

式中 d_e ——普通砂井的有效排水直径，mm；

d_w ——普通砂井的直径，mm。

- 2 塑料排水板或袋装砂井 d_e 可按式 (9.2.3-2) 计算确定：

$$d_e = (15 \sim 22)d_w \quad (9.2.3-2)$$

式中 d_e ——塑料排水板或袋装砂井的有效排水直径，mm；

d_w ——袋装砂井的直径或塑料排水板的当量换算直径，mm。

9.2.4 竖向排水体可采用等边三角形或正方形排列。排水体中心间距应符合下列规定：

- 1 等边三角形排列时，排水体中心间距 L 按式 (9.2.4-1) 计算：

$$L = d_e / 1.05 \quad (9.2.4-1)$$

- 2 正方形排列时，排水体中心间距 L 按式 (9.2.4-2) 计算：

$$L = d_e / 1.13 \quad (9.2.4-2)$$

9.2.5 竖向排水体的深度应根据水工建筑物对地基的稳定性、变形等要求确定，并应符合下列规定：

- 1 对于抗滑稳定控制的地基，应大于最危险滑动面以下 2.0m。

- 2 对于变形控制的地基，应根据在限定的预压时间内需完成的变形量确定，且排水体宜穿透处理土层。

9.2.6 堆载预压荷载取值应符合下列规定：

- 1 取水工建筑物的基底压力作为堆载预压荷载。
- 2 可采用超载预压，预压荷载应根据预压时间内要求完成的变形量计算确定。

9.2.7 堆载预压加载速率应根据地基土强度确定。天然地基土的强度满足预压荷载下地基的稳定性要求时，可一次性加载；不满足时，应分级加载，待前期预压荷载下地基土的强度增长满足下一级荷载下地基的稳定性要求时，方可加载。

9.2.8 堆载预压时间应根据下列原则确定：

1 变形控制的地基，预压所完成的地基变形量和平均固结度达到预定标准方可卸载。

2 抗滑稳定或承载力控制的地基，预压后地基土强度满足稳定性或承载力要求方可卸载。

9.2.9 堆载预压时，地基平均固结度应按照附录 B 计算。

9.2.10 预压荷载下，地基最终竖向变形量计算可取附加应力与自重应力的比值为 0.1 的深度作为压缩层的计算深度，压缩层的最终竖向变形量可按式 (9.2.10) 计算：

$$s_f = \xi \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i \quad (9.2.10)$$

式中 s_f ——最终竖向变形量，m；

e_{0i} ——第 i 层土中点自重应力所对应的孔隙比，由室内固结试验 $e-p$ 曲线查得；

e_{1i} ——第 i 层土中点自重应力与附加应力之和所对应的孔隙比，由室内固结试验 $e-p$ 曲线查得；

h_i ——第 i 土层的厚度，m；

n ——地基土的层数；

ξ ——经验系数，可按地区经验取值，无经验时，对正常固结饱和黏土地基可取 1.1~1.4，荷载较大或地基软弱土层厚度大时，取大值。

9.2.11 对正常固结饱和黏性土地基，堆载预压下地基土某点的抗剪强度可按式 (9.2.11) 计算：

$$\tau_{ft} = \tau_{f0} + \Delta\sigma_z U_t \tan\varphi_{cu} \quad (9.2.11)$$

式中 τ_{ft} —— t 时刻地基土某点的抗剪强度，kPa；

τ_{f0} ——地基土该点的天然抗剪强度，kPa；

- $\Delta\sigma_z$ ——预压荷载引起的该点处的附加竖向应力, kPa;
 U_t —— t 时刻地基土中某点的固结度;
 φ_{cu} ——三轴固结不排水试验求得的土的内摩擦角, ($^{\circ}$)。

9.3 真空预压

- 9.3.1 真空预压加固区边缘应大于水工建筑物基底外缘, 每边超出量不小于 3.0m。
- 9.3.2 真空预压竖向排水体的直径、间距、深度可按照 9.2.2~9.2.5 条确定。
- 9.3.3 加载方式可采用一次连续抽真空至最大压力; 当地基土为含水率高、黏粒含量高的软弱土时, 宜采用分级抽真空至最大压力的加载方式。
- 9.3.4 真空预压处理深度范围内土层的平均固结度满足预定要求时, 方可卸载。
- 9.3.5 真空预压地基固结度、地基最终变形、强度增长可按照 9.2.9~9.2.11 条计算确定其中变形计算时经验系数 ξ 可取 1.0~1.3。
- 9.3.6 对于表层存在良好的透气层或在处理范围内有充足水源补给的透水层, 应采取有效措施隔断透气层或透水层。

9.4 真空和堆载联合预压

- 9.4.1 堆载体的坡肩线宜与真空预压边线一致。
- 9.4.2 真空和堆载联合预压竖向排水体的布置、间距、深度可按照 9.2.2~9.2.5 条确定。
- 9.4.3 真空预压后的起始堆载时间应考虑地基土层的承载能力。对于饱和软黏土, 当膜下真空度稳定达到 80kPa, 抽真空 10d 后可堆载; 对于淤泥、淤泥质土, 当膜下真空度稳定达到 80kPa, 抽真空 20~30d 后方可堆载。
- 9.4.4 堆载较大时, 应分级加载, 分级数根据地基稳定计算确定。

9.4.5 真空和堆载联合预压地基固结度、变形和强度增长，可按照 9.2.9~9.2.11 条计算确定，其中变形计算时经验系数 ξ 可取 1.0~1.3。

10 复合地基

10.1 一般规定

10.1.1 复合地基可采用振冲碎石桩、沉管砂石桩、水泥土搅拌桩和高压旋喷桩等型式。

10.1.2 振冲碎石桩和沉管砂石桩可用于松散的砂土、粉土、黏性土及可液化土等覆盖层地基。处理不排水抗剪强度小于 20kPa 的饱和黏性土地基应通过现场试验确定其适用性，处理不排水抗剪强度小于 10kPa 的饱和黏性土地基不宜采用碎石桩。

10.1.3 水泥土搅拌桩可用于淤泥、淤泥质土、黏性土（软塑、可塑）、粉土（稍密、中密）、粉细砂（松散、中密）、中粗砂（松散、稍密）、饱和黄土等覆盖层地基。当用于处理泥炭土、有机质土、pH 值小于 4 的酸性土、塑性指数大于 25 的黏土，或在腐蚀性环境中以及无工程经验的地区使用时，应论证其适用性。

10.1.4 高压旋喷桩可用于淤泥、淤泥质土、黏性土（流塑、软塑和可塑）、粉土、砂土、黄土、碎石土等地基。对含有大量块石、卵石、漂石、高有机质含量地层和坚硬黏性土，以及地下水流速较大的地基，应通过现场试验确定其适用性。

10.1.5 复合地基的桩型布置应符合下列规定：

1 振冲碎石桩和沉管砂石桩宜采用等边三角形、正方形布置。

2 水泥土搅拌桩和高压旋喷桩的平面布置可采用柱状、壁状、格栅状、块状等型式。采用柱状加固时，可采用正方形、等边三角形布置。

10.1.6 复合地基的垫层设置应符合下列规定：

1 振冲碎石桩和沉管碎石桩顶部宜铺设碎石垫层，垫层厚度可取 0.3~0.5m。基础有防渗要求时，宜采用素混凝土垫层

或有一定强度的水泥石垫层。

2 水泥石搅拌桩和高压旋喷桩顶部宜铺设垫层，垫层厚度可取 0.15~0.3m，材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等，最大粒径不宜大于 20mm。基础有防渗要求时，宜采用素混凝土垫层或有一定强度的水泥石垫层。

10.2 振冲碎石桩

10.2.1 振冲碎石桩的处理范围应满足下列要求：

- 1 宜超出水工建筑物基底外缘布置 1~3 排桩。
- 2 可液化地基，在水工建筑物基底外缘扩大的宽度宜大于可液化土层厚度的 1/2，且不小于 5m。

10.2.2 振冲碎石桩的处理深度应根据工程要求和场地地质条件确定，并应符合下列规定：

- 1 相对硬层埋深不大时，按相对硬层埋深确定。
- 2 相对硬层埋深较大时，按稳定性要求及水工建筑物地基变形容许值确定。对按稳定性控制的工程，桩端应穿过最危险滑动面以下不小于 2.0m。
- 3 可液化的地基，应符合 GB 50011 的有关规定。
- 4 桩长不宜小于 4.0m。

10.2.3 振冲碎石桩的直径和间距应根据地基土性状、地基处理要求、振冲器功率、成孔和成桩方式等综合确定。振冲碎石桩的直径宜为 0.8~1.2m。30kW 振冲器的布桩间距可采用 1.3~2.0m，75kW 振冲器的布桩间距可采用 1.5~3.0m。

10.2.4 振冲碎石桩复合地基承载力容许值 f_{spk} 应通过现场复合地基静载荷试验确定。无试验资料时，可按式 (10.2.4-1) 和式 (10.2.4-2) 估算：

$$f_{spk} = [1 + m(n-1)]f_{sk} \quad (10.2.4-1)$$

$$m = d^2/d_c^2 \quad (10.2.4-2)$$

式中 f_{spk} ——复合地基承载力容许值，kPa；

f_{sk} ——处理后桩间土承载力容许值，kPa，可按地区经

验确定；如无经验时，对于黏性土地基，可取天然地基承载力容许值，松散的砂土、粉土可取天然地基承载力容许值的 1.2~1.5 倍；

n ——复合地基桩土应力比，可按地区经验确定；无经验时，可取 2.0~4.0，桩间土强度低时取大值，桩间土强度高时取小值；

m ——面积置换率，可取 0.1~0.4；

d ——桩身直径，m；

d_c ——振冲碎石桩等效影响直径，m；等边三角形布桩时， d_c 取桩中心间距的 1.05 倍。正方形布桩时， d_c 取桩中心间距的 1.13 倍。

10.2.5 振冲碎石桩复合地基变形应包括碎石桩复合土层的压缩变形与桩端下未加固土层的压缩变形。地基变形计算、软弱下卧层承载力验算应符合 GB 50007 的有关规定。碎石桩复合土层的压缩模量应根据处理后土层特性确定。

10.2.6 振冲碎石桩复合地基抗剪强度指标可按式 (10.2.6-1) ~ 式 (10.2.6-3) 确定：

$$\tan\varphi_{sp} = m\mu_p \tan\varphi_p + (1 - m\mu_p) \tan\varphi \quad (10.2.6-1)$$

$$c_{sp} = (1 - m\mu_p) c_s \quad (10.2.6-2)$$

$$\mu_p = \frac{n}{(n-1)m+1} \quad (10.2.6-3)$$

式中 φ_{sp} ——振冲碎石桩复合地基内摩擦角，(°)；

c_{sp} ——振冲碎石桩复合地基凝聚力，kPa；

φ_p ——振冲碎石桩桩体内摩擦角，(°)；

c_s ——桩间土凝聚力，kPa；

φ ——桩间天然土体的内摩擦角，(°)；

μ_p ——应力集中系数。

10.2.7 振冲填料宜采用级配良好的碎石等，最大粒径不宜大于 5cm，含泥量不宜大于 5%。

10.3 沉管砂石桩

10.3.1 沉管砂石桩的处理范围、处理深度应按照 10.2.1 条、10.2.2 条确定。

10.3.2 沉管砂石桩的直径应根据地基土性状、桩管直径等综合确定,宜为 0.3~0.8m。

10.3.3 沉管砂石桩的间距不宜大于桩直径的 4.5 倍。松散的砂土地基,应根据挤密后要求达到的孔隙比按式 (10.3.3-1) 和式 (10.3.3-2) 估算。

1 等边三角形布置时,布桩间距为:

$$s = 0.95\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (10.3.3-1)$$

2 正方形布置时,布桩间距为:

$$s = 0.89\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (10.3.3-2)$$

$$e_1 = e_{\max} - D_{r1}(e_{\max} - e_{\min}) \quad (10.3.3-3)$$

式中 s ——沉管砂石桩中心间距, m;

d ——沉管砂石桩直径, m;

ξ ——沉管砂石桩桩间距修正系数,当考虑振动下沉密实作用时,取 1.1~1.2;不考虑振动下沉密实作用时,取 1.0;

e_0 ——地基处理前土体的孔隙比,可按原状试样确定;

e_1 ——地基挤密后要求达到的孔隙比;

D_{r1} ——地基挤密后要求达到的相对密度,可取 0.70~0.85;

$e_{\max}$ 、 $e_{\min}$ ——地基砂土的最大孔隙比、最小孔隙比。

10.3.4 沉管砂石桩复合地基承载力容许值,应通过现场复合地基静载荷试验确定。无试验资料时,可按式 (10.2.4-1) 和式 (10.2.4-2) 估算。

10.3.5 沉管砂石桩复合地基变形计算、软弱下卧层承载力验算、各复合土层压缩模量计算应符合 10.2.5 条的规定。

10.3.6 沉管砂石桩复合地基抗剪强度指标计算应符合 10.2.6 条的规定。

10.4 水泥土搅拌桩

10.4.1 水泥土搅拌桩处理范围应满足复合地基应力扩散的要求，软土地基的处理范围宜超出建筑物基底外缘不小于 1.0m。

10.4.2 水泥土搅拌桩的长度，应符合下列规定：

1 应穿透软弱土层到达地基承载力相对较高的土层。

2 按抗滑稳定控制的工程，桩端应穿过最危险滑动面以下不小于 2.0m。

3 干法加固深度不宜大于 15m，湿法加固深度不宜大于 20m。

10.4.3 水泥土搅拌桩采用柱状加固时，桩距可采用 0.8~2.0m。

10.4.4 水泥土搅拌桩桩径可采用 0.5~0.6m。

10.4.5 水泥土搅拌桩复合地基承载力容许值，应通过现场单桩或多桩复合地基静载荷试验确定，无试验资料时，可采用式 (10.4.5) 估算：

$$f_{spk} = mR_n/A_p + \beta(1-m)f_{sk} \quad (10.4.5)$$

式中 f_{spk} ——复合地基承载力容许值，kPa；

f_{sk} ——处理后桩间土承载力容许值，kPa；

m ——面积置换率；

R_n ——单桩竖向承载力容许值，kN；

A_p ——桩的截面积， m^2 ；

β ——桩间土承载力折减系数，对淤泥、淤泥质土和流塑状软土，可取 0.1~0.4；对其他土层，可取 0.4~0.8。

10.4.6 水泥土搅拌桩单桩承载力容许值，应通过现场静载荷试验确定，无试验资料时，可取式 (10.4.6-1)、式 (10.4.6-2) 估算值的小值：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + a q_p A_p \quad (10.4.6-1)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (10.4.6-2)$$

式中 R_a —单桩竖向承载力容许值, kN;

u_p ——桩身周长, m;

n ——地基土层数;

q_{si} ——桩周第 i 层土的侧阻力容许值, kPa, 可按地区经验取值;

l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度, m;

a ——桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取 0.4~0.6, 承载力高时取低值;

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力容许值, kPa, 可按地区经验取值;

A_p ——桩的截面积, m^2 ;

η ——桩身强度折减系数, 干法可取 0.2~0.25, 湿法可取 0.25;

f_{cu} ——与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块 (边长为 70.7mm 或 50mm 的立方体) 在标准养护条件下 28d 龄期的立方体抗压强度平均值, kPa。

10.4.7 竖向承载搅拌桩复合地基的变形应包括搅拌桩复合土层的平均压缩变形与桩端下未加固土层的压缩变形。搅拌桩复合土层的压缩变形可按式 (10.4.7-1)、式 (10.4.7-2) 计算, 桩端以下未加固土层的压缩变形可按 GB 50007 的有关规定计算。

$$s = \frac{(p_z + p_{zl})l}{2E_{sp}} \quad (10.4.7-1)$$

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \quad (10.4.7-2)$$

式中 s ——复合土层的压缩变形;

p_z ——复合地基顶面的附加应力值, kPa;

p_{zl} ——复合地基地面的附加应力值, kPa;

l ——桩长, m;

E_{sp} ——复合地基的压缩模量, kPa;

E_p ——水泥土搅拌桩压缩模量, kPa, 可取 $(100 \sim 120) f_{cu}$, 对桩长较短或桩身强度较低者可取低值, 反之可取高值;

E_s ——桩间土的加权平均压缩模量, kPa;

m ——面积置换率。

10.4.8 水泥土搅拌桩固化剂宜选用等级为 42.5 级及以上的普通硅酸盐水泥。水泥掺量宜为 12%~20%, 湿法的水泥浆水灰比可选用 0.45~0.55。外掺剂可根据工程需要和土质条件选用早强、缓凝、减水及节省水泥等作用的材料。

10.5 高压旋喷桩

10.5.1 高压旋喷桩处理范围、处理深度应按照 10.4.1 条、10.4.2 条确定。

10.5.2 高压旋喷桩强度、直径、间距, 应根据地区经验或现场试验确定。

10.5.3 高压旋喷桩复合地基承载力容许值应通过现场复合地基静载荷试验确定。无试验资料时, 可采用式 (10.5.3) 估算:

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m) f_{sk} \quad (10.5.3)$$

式中 f_{spk} ——复合地基承载力容许值, kPa;

f_{sk} ——处理后桩间土承载力容许值, kPa;

λ ——单桩承载力发挥系数, 可按类似土质条件的工程经验取值;

m ——面积置换率;

R_a ——单桩竖向承载力容许值, kN;

A_p ——桩的截面积, m^2 ;

β ——桩间土承载力折减系数, 可根据试验或类似土质条件工程经验确定, 当无试验资料或经验时, β 可取 0.1~0.5, 桩间土承载力较低时取低值。

10.5.4 高压旋喷桩的单桩承载力容许值宜通过现场载荷试验确定。无试验资料时，可取式（10.5.4-1）和式（10.5.4-2）估算值的小值：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + a q_p A_p \quad (10.5.4-1)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (10.5.4-2)$$

式中 R_a ——单桩竖向承载力容许值，kN；

u_p ——桩身周长，m；

q_{si} ——桩周第 i 层土的侧阻力容许值，kPa，可按地区经验取值；

l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度，m；

a ——桩端天然地基土的承载力折减系数，可根据地区经验确定；

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力容许值，kPa，可按地区经验取值；

A_p ——桩的截面积， m^2 ；

η ——旋喷桩桩身强度折减系数，可取 0.33；

f_{cu} ——与高压旋喷桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块（边长为 70.7mm 或 50mm 的立方体）在标准养护条件下 28d 龄期的立方体抗压强度平均值（kPa）。

10.5.5 高压旋喷桩复合地基的变形应按 GB 50007 的有关规定进行计算。各复合土层的压缩模量应根据处理土层的性质确定。

10.5.6 高压旋喷浆液宜使用水泥浆，水泥可采用 42.5 级及以上的普通硅酸盐水泥。

11 桩 基

11.1 一 般 规 定

11.1.1 采用浅层处理措施不能满足水工建筑物地基承载能力、稳定、变形要求时，可采用桩基处理。

11.1.2 桩型和成桩工艺应根据地质条件、上部结构类型、荷载特征、施工条件及地基周围环境等因素综合比选确定。

11.1.3 同一结构单元内的桩基，宜采用相同类型的桩，材料、断面尺寸和深度不应相差过大。

11.1.4 桩身混凝土强度应满足桩的承载力设计要求。

11.1.5 承担抗剪作用的桩基，桩端进入持力层或嵌岩的深度应通过计算确定。

11.2 布 置 与 选 型

11.2.1 桩的平面布置宜使桩群形心与水工建筑物底板底面以上荷载基本组合合力作用点相接近。

11.2.2 桩基布置时，预制桩的桩中心距不宜小于3倍桩径或边长，钻孔灌注桩的桩中心距不宜小于2.5倍桩径。

11.2.3 地基有防渗要求的水工建筑物桩基，应采取防止建筑物底板底面与地基接触冲刷的措施。

11.2.4 应考虑桩基施工中挤土效应对桩基及周边环境的影响，在深厚饱和软土中不宜采用大片密集有挤土效应的桩基。

11.3 桩 基 计 算

11.3.1 桩基应根据具体条件进行下列计算：

——竖向承载力和水平承载力；

——对受水平荷载较大，或对水平位移有严格限制的水工建筑物，应计算桩基的水平位移；

——当桩端平面以下存在软弱下卧层时，应进行软弱下卧层承载力验算；

——软土地基上的摩擦型桩基和桩端平面以下存在软弱土层的桩基，应进行沉降计算；

——对位于坡地、岸边的桩基应进行整体稳定性验算。

11.3.2 桩的根数和尺寸确定可不考虑桩间土承载作用。对于摩擦型桩，经论证后可适当考虑桩间土承担部分荷载。

11.3.3 水工建筑物的单桩桩顶受力应按式 (11.3.3-1) ~ 式 (11.3.3-3) 进行计算。

1 轴心竖向力作用下：

$$Q_k = \Sigma G / n_0 \quad (11.3.3-1)$$

式中 ΣG ——作用于底板底面的全部竖向荷载，kN；

Q_k ——轴心竖向力作用下单桩平均竖向力，kN；

n_0 ——桩基中的桩数。

2 偏心竖向力作用下：

$$Q_i = \Sigma G / n_0 \pm M_x y_i / \Sigma y_j^2 \pm M_y x_i / \Sigma x_j^2 \quad (11.3.3-2)$$

式中 Q_i ——偏心竖向力作用下第 i 根桩的竖向力，kN；

M_x 、 M_y ——作用于水工建筑物底板底面，绕通过桩群形心 x 、 y 轴的力矩，kN·m；

x_i 、 x_j ——第 i 根、第 j 根桩至桩群形心的 y 轴线的距离，m；

y_i 、 y_j ——第 i 根、第 j 根桩至桩群形心的 x 轴线的距离，m。

3 水平力作用下：

$$H_k = \Sigma H / n_0 \quad (11.3.3-3)$$

式中 H_k ——作用于单桩的水平力，kN；

ΣH ——作用于水工建筑物底板底面的全部水平荷载，kN。

11.3.4 单桩承载力应按下列公式计算：

1 轴心竖向力作用下:

$$Q_k \leq R_n \quad (11.3.4-1)$$

式中 R_n ——单桩竖向承载力容许值, kN; 特殊组合中包含地震荷载时, 应将其提高 25%。

2 偏心竖向力作用下, 除满足式 (11.3.4-1) 外, 尚应满足下列要求:

$$Q_{i\max} \leq 1.2R_n \quad (11.3.4-2)$$

式中 $Q_{i\max}$ ——偏心竖向力作用下, 作用于单桩的最大竖向力, kN。

3 水平力作用下:

$$H_k \leq R_{Hn} \quad (11.3.4-3)$$

式中 R_{Hn} ——单桩水平承载力容许值, kN, 一般通过现场水平载荷试验确定。

11.3.5 单桩竖向承载力容许值的确定应符合下列规定:

1 单桩竖向承载力容许值宜通过单桩竖向静载荷试验确定。同一条件下的试桩数量, 不宜少于总桩数的 1% 且不应少于 3 根。

2 当桩端持力层为密实砂卵石或其他承载力类似的土层时, 对单桩竖向承载力很大的大直径端承型桩, 可采用深层平板载荷试验确定桩端土的承载力容许值。

3 缺乏资料时, 单桩竖向承载力容许值 R_n 可按式 (11.3.5-1) 初步估算确定:

$$R_n = \frac{1}{2} u_p \sum q_{sin} l_i + q_p A_p \quad (11.3.5-1)$$

式中 R_n ——单桩竖向承载力容许值, kN;

q_{sin} ——各土层与桩侧的极限摩阻力, 由当地静载试验获得或参考有关经验取值, kPa;

q_p ——桩端岩土未经修正的承载力容许值, 由当地静载试验结果统计分析算得或参考有关经验取值, kPa;

u_p ——桩身周长, m;

A_p ——桩的截面积, m^2 ;

l_i ——第 i 层岩土层的厚度, m。

4 桩端嵌入完整及较完整的硬质岩中, 当桩长较短且入岩较浅时, 单桩竖向承载力容许值 R_a 可按式 (11.3.5-2) 确定。

$$R_a = q_p A_p \quad (11.3.5-2)$$

11.3.6 桩下端锚固在岩石内时, 可假定弯矩由锚固侧壁岩石承受, 锚固深度可不考虑水平剪力影响, 其嵌入基岩中的深度可按下列公式计算。

1 圆形桩:

$$h = \sqrt{\frac{M_H}{0.0655 \beta f_{rk} d}} \quad (11.3.6-1)$$

2 矩形桩:

$$h = \sqrt{\frac{M_H}{0.0833 \beta f_{rk} b_h}} \quad (11.3.6-2)$$

式中 h ——桩嵌入基岩中 (不计强风化层和全风化层) 的有效深度, m, 不小于 0.5m;

M_H ——在基岩顶面处的弯矩, kN·m;

f_{rk} ——岩石饱和单轴抗压强度, kPa;

β ——系数, 取 0.5~1.0, 岩层侧面节理发育的取小值, 节理不发育的取大值;

b_h ——垂直于弯矩作用平面桩的边长, m;

d ——桩体直径, m。

11.3.7 桩身应进行承载能力和裂缝控制计算, 计算应考虑桩身材料强度、成桩工艺、环境类别等因素。混凝土桩身承载能力和裂缝控制计算应符合 SL 191 的有关规定。

11.3.8 计算桩基沉降时, 最终沉降量宜按单向压缩分层总和法计算。

11.3.9 桩基沉降量和沉降差不得超过水工建筑物的最大容许沉降量和沉降差。

11.4 特殊条件下的桩基

11.4.1 软土地基的桩基设计应符合下列规定:

- 1 桩端持力层宜选择中、低压缩性土层。
- 2 应分析桩侧负摩阻力对桩的影响。
- 3 挤土桩应考虑挤土效应对邻近构筑物 and 地基的影响。
- 4 特别深厚的软弱土层，可与其他地基处理方法结合使用。

11.4.2 季节性冻土地基和膨胀土地基的桩基设计应符合下列规定：

1 桩端进入冻深线或膨胀土的大气影响急剧层以下的深度应满足抗拔稳定要求，且不得小于 4 倍桩径及 1 倍扩大端直径，最小深度应大于 1.5m。

2 宜采用钻（挖）孔灌注桩，并采取可靠的隔冻、隔胀处理措施。

3 确定桩的竖向容许承载力时，不计入冻胀、膨胀深度范围内桩侧阻力，但应考虑地基土的冻胀、膨胀的不利影响，验算桩的抗拔稳定性和桩身抗拉承载力。

11.4.3 湿陷性地基的桩基设计应符合下列规定：

1 桩应穿透湿陷性土层，桩端持力层宜选择中、低压缩性土层或岩层。

2 自重湿陷性土地基的桩应考虑桩侧负摩阻力的影响。

3 桩的竖向承载力容许值宜通过现场桩的竖向承载力静载荷浸水试验确定。

11.4.4 地震液化地基的桩基设计应符合下列规定：

1 桩进入可液化土层以下稳定土层的长度（不包括桩尖部分）应计算确定，对于碎石土、砾、粗砂、中砂、密实粉土、坚硬黏性土，不应小于 3 倍桩身直径；对其他土层，不宜小于 5 倍桩身直径。

2 桩的水平承载力不满足计算要求时，可将承台外每侧 1/2 承台边长范围内的土进行加固。

3 应分析可液化土层地震液化情况下桩基的侧向稳定性。

11.4.5 岩溶地基的桩基设计应符合下列规定：

1 桩承受荷载较大且基岩埋深较浅时，宜采用嵌岩桩。

2 基岩面起伏且埋深较大时，宜采用摩擦型灌注桩。

11.5 桩基构造

11.5.1 端承桩桩底进入持力层的深度应根据地质条件、荷载及施工工艺确定，宜为桩身直径的 1~3 倍。在确定桩底进入持力层深度时，应考虑特殊土、岩溶以及震陷液化等影响。嵌岩灌注桩周边嵌入完整和较完整的硬质岩的最小深度，不宜小于 0.5m。

11.5.2 桩顶主筋伸入承台连接时，桩顶嵌入水工建筑物底板或承台内的长度不应小于 100mm。桩顶直接埋入承台时，当桩径（或边长）小于 0.6m 时，埋入长度不应小于 2 倍桩径（或边长）；当桩径（或边长）为 0.6~1.2m 时，埋入长度不应小于 1.2m；当桩径（或边长）大于 1.2m 时，埋入长度应不小于桩径（或边长）。

11.5.3 预制桩的最小配筋率不宜小于 0.8%（锤击沉桩）、0.6%（静压沉桩），预应力桩不宜小于 0.5%；灌注桩最小配筋率不宜小于 0.2%~0.65%（桩径小时取大值）。桩顶以下 3~5 倍桩身直径范围内，箍筋宜适当加强加密。

附录 A 地基处理方法选用表

表 A 地基处理方法选用表

地基岩土类型		地基处理方法												
		固结 灌浆	防渗 帷幕 与排 水	防渗墙			挖填 置换	强夯		预压 排水 固结	复合地基			桩基
				混凝 土	高喷	水泥 土搅 拌		强夯	强夯 置换		振冲 碎石桩 沉管 砂石桩	水泥 土搅 拌桩	高压 旋喷 桩	
破碎岩体		√	√	√	△	×	√	×	×	×	×	×	△	△
一般 土	碎石土	√	√	√	√	×	√	√	×	×	△	×	√	√
	砂土	√	√	√	√	√	√	√	×	×	√	√	√	√
	粉土	△	×	√	√	√	√	△	√	×	√	√	√	√
	黏性土	×	×	×	√	√	√	×	√	√	△	√	√	√
特殊 土	软土	×	×	×	△	△	√	×	√	√	△	√	√	√
	膨胀土	×	×	△	△	√	√	×	△	×	△	×	△	√
	湿陷性土	×	×	△	△	△	√	√	△	×	√	△	△	√
	盐渍土	×	×	△	△	△	√	△	△	×	△	△	△	√
	冻土	×	×	△	△	△	√	△	△	×	△	△	△	√
	分散性土	×	×	△	△	×	√	×	×	×	×	×	×	√
注 1：本表中“√”表示适合，“×”表示不适合或不选用，“△”表示可选用。														
注 2：土的分类依据 GB 50021《岩土工程勘察规范》。														

附录 B 预压排水地基固结度计算

B. 0. 1 当竖向排水体采用挤土方式施工时, 应考虑涂抹对土体固结的影响。当竖向排水体的纵向通水量 q_w 与天然土层水平渗透系数 k_h 的比值较小, 且排水体长度较长时, 应考虑井阻的影响。

B. 0. 2 瞬时加载条件下, 考虑涂抹和井阻影响时, 地基水平向排水平均固结度可按式 (B. 0. 2 - 1) ~ 式 (B. 0. 2 - 5) 计算:

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-\frac{8C_h}{Fd_e^2}t} \quad (\text{B. 0. 2 - 1})$$

$$F = F_n + F_s + F_r \quad (\text{B. 0. 2 - 2})$$

$$F_n = \ln n_1 - 0.75 \quad (n_1 \geq 15) \quad (\text{B. 0. 2 - 3})$$

$$F_s = \left[\frac{k_h}{k_s} - 1 \right] \ln s \quad (\text{B. 0. 2 - 4})$$

$$F_r = \frac{\pi^2 L_w^2}{4} \frac{k_h}{q_w} \quad (\text{B. 0. 2 - 5})$$

$$n_1 = d_e / d_w$$

式中 $\bar{U}_r$ ——固结时间 t 时地基水平向排水平均固结度;

c_h ——地基的水平向固结系数, cm^2/s ;

k_h ——天然土层水平向渗透系数, cm/s ;

k_s ——涂抹区的水平向渗透系数, 可取 $k_s = (1/5 \sim 1/3) k_h$, cm/s ;

s ——涂抹区直径 d_s 与竖井直径 d_w 的比值, 可取 $s = 2.0 \sim 3.0$, 对中等灵敏黏性土取低值, 对高灵敏黏性土取高值;

t ——时间, s ;

n_1 ——井径比;

L_w ——竖井深度, cm ;

q_w ——竖井纵向通水量, 为单位水力梯度下单位时间的

排水量， cm^3/s 。

B. 0.3 一级或多级等速加荷条件下，竖向排水体穿透受压土层地基的平均固结度可按式（B. 0. 3）计算：

$$\overline{U}_t = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} \left[(T_i - T_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) \right] \tag{B. 0. 3}$$

式中 $\overline{U}_t$ —— t 时间地基的平均固结度；
 $\dot{q}_i$ ——第 i 级荷载的加载速率， kPa/d ；
 $\sum \Delta p$ ——各级荷载的累加值， kPa ；
 T_{i-1} ， T_i ——第 i 级荷载加载的起始和终止时间（从零点起算）， d ，当计算第 i 级荷载加载过程中某时间 t 的固结度时， T_i 改为 t ；
 α 、 β ——参数，根据地基土排水固结条件按表 B. 0. 3 采用。

表 B. 0. 3 α 和 β 值

参数	竖向排水固结 (平均固结度 $U_z > 30\%$)	水平向排水固结	竖向和水平向排水固结 (竖井穿透受压土层)
α	$\frac{8}{\pi^2}$	1	$\frac{8}{\pi^2}$
β	$\frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$	$\frac{8c_h}{F d_e^2}$	$\frac{8c_h}{F d_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$
注 1： c_h 为土的水平向固结系数， c_v 为土的竖向固结系数，固结系数的计量单位为 cm^2/s 。			
注 2： H 为土层的竖向排水距离，计量单位为 cm 。			