

UDC

TB

中华人民共和国行业标准

P

TB 10113—96

**粉体喷搅法
加固软弱土层技术规范**

Technical code on dry jet mixing
method to stabilize soft foundation

1996-2-26 发布

1996-4-1 实施

中华人民共和国铁道部 发布

中华人民共和国行业标准

**粉体喷搅法
加固软弱土层技术规范**

**Technical code on dry jet mixing
method to stabilize soft foundation**

TB 10113—96

主编单位：铁道部第四勘测设计院

批准单位：中华人民共和国铁道部

施行日期：1996 年 4 月 1 日

1996 北 京

中华人民共和国行业标准
粉体喷搅法加固软弱土层技术规范

TB 10113—96

铁道部建设司标准科情所组织出版发行

(北京市朝阳区门外大街 227 号, 邮编 100020)

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 1.375 字数 35.7 千字

1996 年 3 月第 1 版 1996 年 3 月第 1 次印刷

关于发布《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》和《填土密度湿度核子仪测试规程》的通知

铁建函〔1996〕69 号

工程、建筑总公司,各铁路局,广州铁路(集团)公司:

经部审查批准,现发布《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》(TB10113—96)和《填土密度湿度核子仪测试规程》(TB/T10217—96),自 1996 年 4 月 1 日起施行。

本规范由部建设司负责解释。出版发行由建设司标准科情所负责组织。

铁 道 部

一九九六年二月二十六日

目 次

1 总 则	1
2 术语、符号	2
2.1 术 语	2
2.2 符 号	3
3 设 计	4
3.1 一般规定	4
3.2 设计方法	5
4 施 工	8
4.1 施工准备	8
4.2 粉喷桩施工	8
4.3 竣工文件编制	9
5 质量检验及验收	11
5.1 质量检验	11
5.2 验 收	13
附录 A 粉喷技术室内配方试验操作规定	14
附录 B 粉喷桩施工质量监理要求	17
附录 C 粉喷桩现场抗压强度试验规定	18
附录 D 粉喷桩载荷试验规定	19
附录 E 本规范用词说明	21
附加说明	22
《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》条文说明	23

1 总 则

1.0.1 为了统一粉体喷搅法(以下简称粉喷)加固软弱土层的技术要求,保证加固质量,满足工程建设的需要,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于粉喷加固软弱土层的设计、施工、质量检验及验收。

本规范适用的加固范围为天然含水量大于 30% 的淤泥质土、粘性土和粉性土地基;当地基土 pH 值小于 4 或天然含水量大于 70% 时不宜采用。粉喷加固深度不宜大于 15m。

当地基土土质及其指标与上述不符或场地内地下水具有侵蚀性时,应通过试验,选用合理的加固料及配方,确定其加固效果。

1.0.3 粉喷加固软弱土层的设计、施工、质量检验及验收,除应符合本规范外,尚应符合国家现行有关法规和标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1 粉喷技术

用压缩空气向软弱土层内输送石灰、水泥等粉状加固料,不向地基内注入水分,使其与原位软弱土混合、压密。通过加固料与软弱土之间的离子交换作用、凝聚作用、化学结合作用等一系列物理、化学作用,达到加固地基的目的。

2.1.2 粉喷桩

采用粉喷技术使软弱土硬结成具有整体性、水稳性和一定强度的柱状加固土,它与原位软弱土层组成复合地基。

2.1.3 加固料

以加固为目的,拌入土中起主要加固作用的材料。

2.1.4 添加料

为改善加固料加固效果,在加固料中添加的材料。

2.1.5 喷粉量

在软弱土层中喷入加固料或添加料的重量。一般用加固料或添加料喷入重量与软弱湿土重的百分率表示。

2.1.6 停灰面

停止向软弱土层中喷射加固料或添加料的位置。

2.1.7 复喷

重复向软弱土层中喷射加固料或添加料的施工工艺。

2.1.8 复搅

为使加固料与软弱土搅拌均匀,重复搅拌,但不喷射加固料的施工工艺。

2.1.9 置换率

桩面积在被加固土面积中的百分率。

2.2 符 号

编号	符号	含 义
2.2.1	η	桩身强度折减系数
2.2.2	α	桩尖天然地基土的承载力折减系数
2.2.3	a_s	置换率
2.2.4	β	桩间土承载力折减系数
2.2.5	σ_{sp}	复合地基容许承载力
2.2.6	σ_s	桩间土天然地基容许承载力
2.2.7	σ_p	桩身容许承载力
2.2.8	C_{sp}	复合地基抗剪强度
2.2.9	C_p	桩身抗剪强度
2.2.10	C_s	桩间土抗剪强度
2.2.11	a_w	喷粉量
2.2.12	ΔS_1	粉喷桩群体范围内的压缩变形量
2.2.13	ΔS_2	未被加固土层的压缩变形量

3 设 计

3.1 一般规定

3.1.1 采用粉喷加固软弱土层应收集下列资料:

3.1.1.1 场地内详细的工程地质、水文地质、土工试验资料,了解软弱土层的分布范围、成层结构、地下水埋深及其性质。

特别是土的天然含水量、粘粒含量、有机质含量及土的 pH 值等资料。

3.1.1.2 了解建筑物对地基加固的要求、建筑物的类型、荷载大小及分布。

3.1.1.3 加固料的来源、贮量、质量、价格、运输及保存等方面资料,本着就地取材的原则选用加固料。

3.1.2 采用粉喷加固软弱土层时,应进行室内配方试验,提供合理的加固料种类及配方,加固土可靠的物理、力学性参数,供设计选用。室内配方试验操作应符合本规范附录 A 的规定。

3.1.3 粉喷桩桩身强度应取 90d 龄期的试块抗压强度,或根据现场载荷试验修正。

试块养护龄期可取 7d、28d、90d 三种。

3.1.4 粉喷加固软弱土层的设计主要由单桩设计、复合地基设计及工艺性设计三部分组成。

3.1.5 用粉喷技术形成的复合地基,其沉降变形应为粉喷桩群体范围内的压缩变形和粉喷桩群体底部未被加固土体的压缩变形之和。

3.1.6 根据建筑物对地基承载力和变形的要求,结合上部结构的特点,粉喷桩可采用桩状、壁状、格栅状或块状等加固型式,其布置可采用三角形或正方形。

3.1.7 粉喷桩作为一种刚塑性桩,与桩周围土一起组成复合地

基,桩、土共同作用。当桩根数较多时,可只在基础平面内布桩。但周围建筑物对其有影响时,在基础外侧应设置隔离桩。

3.1.8 粉喷桩可采用端承型或摩擦型,其长度应根据建筑物对地基承载力和变形要求,结合地层情况合理选用。

原则上粉喷桩应穿透软弱土层到达强度相对较高的土层(简称硬土层)。但以提高抗滑稳定为目的的粉喷桩,其桩长应根据危险滑弧的位置决定。

3.1.9 粉喷桩所用的加固料应符合下列要求:

(1)水泥宜选用标号为 325 号或 425 号的矿渣水泥。

(2)石灰宜选用氧化钙和氧化镁含量总和大于 85%,其中氧化钙含量不小于 80%的生石灰。

(3)水泥或石灰的掺入量应通过室内配方试验确定,可为被加固湿土重的 10%~15%。

3.1.10 粉喷桩的直径宜为 50cm。

3.2 设计方法

3.2.1 单桩承载力宜根据室内配方试验提供的桩身强度及地质报告提供的土层摩阻力按下列公式估算,取其小值。有条件时可通过单桩载荷试验验证。

$$[P] = \eta \cdot P_t \cdot A_p \quad (3.2.1-1)$$

$$[P] = U_p \cdot \sum f_i \cdot l_i + \alpha \cdot A_p \cdot q_p \quad (3.2.1-2)$$

式中 $[P]$ ——单桩容许承载力,kN;

P_t ——桩身强度,kPa;

η ——桩身强度折减系数,可取 0.3~0.4;

A_p ——桩的面积,m²;

U_p ——桩的周长,m;

f_i ——桩周围第 i 层土的容许摩阻力,淤泥可取 5~8kPa,粘性土可取 12~15kPa;

l_i ——桩周围第 i 层土的厚度,m;

α ——桩尖天然地基土的承载力折减系数,可取 0.4~0.6;

q_p ——桩尖天然地基土的承载力,kPa。

3.2.2 单桩设计应使土对桩的支承力与桩身强度所确定的承载力相近。并宜使后者略大于前者。

3.2.3 用粉喷技术形成的复合地基,其承载力可按下式估算,有条件时宜通过复合地基载荷试验验证。

$$\sigma_{sp} = a_s \cdot \sigma_p + (1 - a_s) \cdot \sigma_s \cdot \beta \quad (3.2.3)$$

式中 σ_{sp} ——复合地基容许承载力,kPa;

σ_s ——桩间土天然地基容许承载力,kPa;

σ_p ——桩身容许承载力, $\sigma_p = \eta \cdot P_t$,符号意义同前,kPa;

β ——桩间土承载力折减系数;当桩尖为软弱土层时可取 0.5~1.0;当桩尖为硬土层时可取 0.1~0.4;

a_s ——置换率,可取 10%~20%;

$$a_s = n \cdot A_p / A$$

其中 n ——桩根数;

A ——加固总面积,m²。

3.2.4 在计算用粉喷技术形成的复合地基的基础及边坡稳定性时,复合地基抗剪强度可用下式计算:

$$C_{sp} = a_s \cdot C_p + (1 - a_s) \cdot C_s \quad (3.2.4)$$

式中 C_{sp} ——复合地基的抗剪强度,kPa;

C_p ——桩的抗剪强度,可取 0.3~0.5 倍的桩身强度,kPa;

C_s ——天然地基土的抗剪强度,kPa。

3.2.5 粉喷桩群体范围内的压缩变形量宜根据建筑物荷载、桩长、桩身强度、天然地基土强度、置换率、复合地基的变形模量估算,可取 20~50mm。

3.2.6 确定粉喷桩群体底部未被加固土层的压缩变形量时,可假定粉喷桩群体形成一种假想的实体深基础。然后计算该深基础的侧摩阻力、应力扩散或按双层地基计算粉喷桩群体底部的附加应力,再按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ7)有关规定

进行下卧层地基强度的检算及压缩变形量的估算。

3.2.7 粉喷桩群体可设计成一种土挡墙,作为基坑的侧向支护,也可设计成防渗帷幕。

3.2.8 粉喷桩喷粉量不应强求上下一致。桩下部可适当减少喷粉量,桩上部可适当增加喷粉量及搅拌次数,一般情况可按设计桩长的 $1/3$ 进行复搅,求得最佳经济效果及加固效果。

3.2.9 粉喷技术的工艺性设计主要应根据土质条件、设计要求,合理选择钻机、喷粉机和空压机的操作参数。

4 施 工

4.1 施工准备

4.1.1 粉喷桩施工前应备有下列施工技术资料：

(1)施工场地的工程地质报告、土工试验报告、室内配方试验报告(7d 龄期)、粉喷桩设计桩位图以及原地面高程、加固深度与停灰面高程。

(2)测量资料,包括平面控制桩、水准点的测量记录。

(3)设计交底会议纪要。

(4)合同文件。

4.1.2 施工场地应满足下列各项要求：

(1)施工机械进出场时对道路及桥梁的要求。

(2)施工用电及电力供应的要求。

(3)查明地表、地下障碍物,尤其是地下有无大块石、树根、地下管线及空中有无高压线等。障碍物应事先清除。

(4)当施工场地不能满足施工机械走行要求时,应铺设砂土或碎石垫层。

4.1.3 粉喷所用加固料应符合设计要求的种类及规格,并具有质量合格证。严禁使用受潮、结块、变质的加固料。

加固料用料计划应根据工程规模大小,施工机械的配置数量,施工进度等因素提出。

4.2 粉喷桩施工

4.2.1 粉喷桩施工可按图 4.2.1 流程进行。在有些情况下,亦可采用在下钻时就喷加固料或复搅、复喷、加水等其它工艺措施。

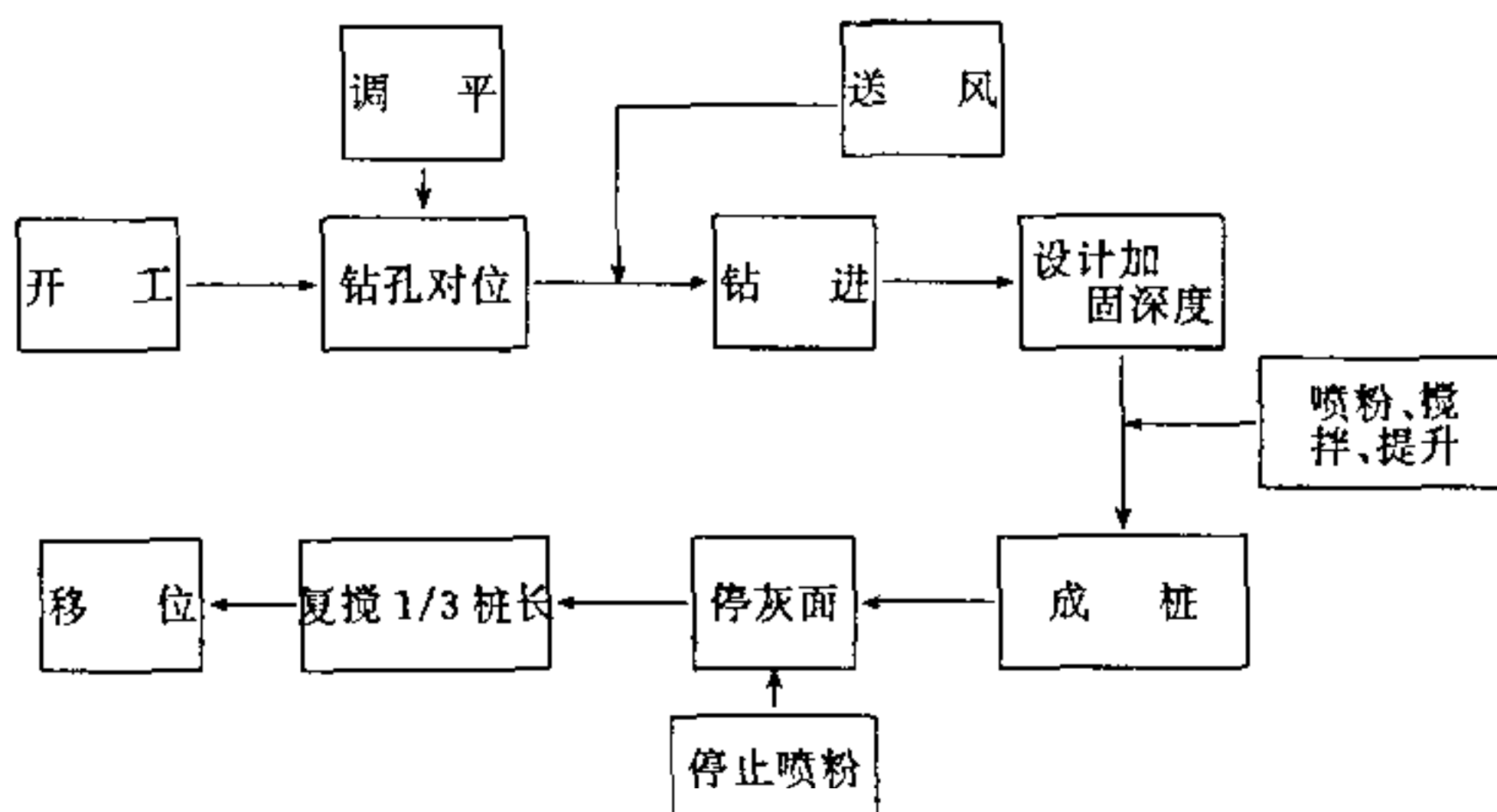


图 4.2.1 粉喷桩施工流程

4.2.2 粉喷桩施工前应根据工艺性设计进行工艺性试桩,掌握对该场地的成桩经验及各种操作技术参数。

试验桩不得少于 2 根。

4.2.3 粉喷桩施工应注意下列事项:

(1) 应控制钻机下钻深度、喷粉高程及停灰面,确保粉喷桩长度。

(2) 严禁没有粉体计量装置的喷粉机投入使用。

(3) 应定时检查粉喷桩的成桩直径及搅拌均匀程度。对使用的钻头应定期复核检查,其直径磨损量不得大于 20mm。

(4) 当钻头提升至地面以下 500mm 时,喷粉机应停止喷粉。

(5) 在喷粉成桩过程中遇有故障而停止喷粉时,第二次喷粉接桩时,其喷粉重叠长度不得小于 1m。

4.3 竣工文件编制

4.3.1 粉喷加固工程结束后,施工单位应及时做好竣工文件的编制工作,并按要求整编成册。

4.3.2 粉喷加固工程竣工文件主要应包括下列内容:

(1) 封面;

- (2)扉页;
- (3)目录;
- (4)施工合同文本及有关协议;
- (5)施工图及原始技术资料;
- (6)施工组织设计;
- (7)施工总结;
- (8)工程开、竣工报告及其批件;
- (9)施工业务联系单;
- (10)监理指令及会议纪要;
- (11)变更设计通知单;
- (12)室内配方试验报告;
- (13)施工原始记录;
- (14)工程测试报告;
- (15)质量自检及抽检报告;
- (16)加固料出厂质保单及抽检报告;
- (17)工程竣工图;
- (18)施工决算书;
- (19)工程照片集。

5 质量检验及验收

5.1 质量检验

5.1.1 粉喷桩属地下隐蔽工程,其质量控制应贯穿在施工的全过程,并应坚持全方位的施工监理。

粉喷桩施工质量监理应符合本规范附录 B 的要求。

5.1.2 施工过程中必须随时检查加固料用量、桩长、复搅长度及施工中有无异常情况,记录其处理方法及措施。

浅部开挖桩头,其深度宜为 500mm,目测检查搅拌的均匀性,量测成桩直径。检查频率为 10%。

5.1.3 粉喷桩施工质量允许偏差应符合表 5.1.3—1 的规定。质量检验后应填报粉喷桩分项工程质量检验评定表。其格式可参照表 5.1.3—2。

粉喷桩施工质量允许偏差

表 5.1.3—1

序号	项 目	允许偏差	检查方法及说明
1	桩轴线偏移 (纵横方向)	100mm	用经纬仪检查 (或钢尺丈量)
2	钻杆倾斜度	1%	用经纬仪检查
3	桩长	不小于设计 规定	喷粉前检查 钻杆长度
4	单桩喷粉量	8%	计量仪或其 他计量装置
5	桩体无侧限 抗压强度	不小于设 计规定	桩头或桩身取样

粉喷桩分项工程质量检验评定表

表 5.1.3—2

工程名称

项 目		质量情况	
保证项目	1 加固料		
	2 成桩深度及复搅长度		
	3 加固料用量		
	4 桩身强度		
允许偏差项目	项 目	允许偏差	实测值
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
	1 桩轴线偏移(纵横方向)	100mm	
	2 钻杆倾斜度	1%	
	3 桩长	不小于设计规定	
4 单桩喷粉量	8%		
检查结果	保证项目		
	允许偏差项目	实测 点,其中合格 点,合格率 %。	
评定等级	工程负责人: 工 长: 班 组 长:	核定意见	质量检查员:

注:①本表适用于粉喷桩工程质量的检验评定;

②保证项目应全数检查,1项检查加固料的合格证和复试报告,2、3项检查施工记录,4项检查试验报告;

③允许偏差项目应检查桩数的10%,但不少于3根,每项目检查1点。1项用经纬仪检查或钢尺丈量,2项用经纬仪检查,3、4项检查钻杆长度、计量装置及施工记录。

5.2 验 收

5.2.1 成桩 7d 内应采用轻便触探仪(N_{10})检查桩的质量,触探点应在桩径方向 1/4 处,抽检频率为 2%。

5.2.2 成桩 28d 后在桩体上部(桩顶以下 0.5m、1.0m、1.5m)应截取三段桩体进行现场足尺桩身无侧限抗压强度试验。试验方法应符合本规范附录 C。检查频率为 2%,每一工点不得少于 2 根。

5.2.3 在取得粉喷桩材料与波速关系的前提下,可采用小应变动测法进行桩长及成桩均匀性的定性检查。

5.2.4 在保证取岩芯质量的前提下,可用钻探取岩芯进行质量检查及进行必要的室内强度试验。

5.2.5 对于重要工程或有特殊要求的工程应做单桩及复合地基载荷试验。试验方法应符合本规范附录 D,且每项工程不得少于 3 组。

附录 A 粉喷技术室内配方试验操作规定

A. 0. 1 本规定适用于将粉状加固料加入软弱土中搅拌形成加固处理土,进行室内试验的方法。

加固处理土的强度,应以无侧限抗压强度衡量。

A. 0. 2 本规定未列的试验操作要求应按土工试验规程所规定的操作试验方法进行。

A. 0. 3 在需要加固处理的软弱土地基内,选择有代表性的土层,在取样钻孔中(或试坑)采集必要数量的试料土(数量应考虑到试验所需的富余量)。

采集的试料土,应采用塑料袋或其它方法包装,保持天然含水量;当试料土采集地点离试验室较远,运输过程中不能保持天然含水量的情况下,试料土可采用风干土料。但两者均必须采集部分原状土,满足常规土工试验要求。

A. 0. 3. 1 试料土制备时,应除去其中所夹有的贝壳、树枝、草根等杂物。

以现场施工为目的室内配合比试验应采集保持天然含水量的扰动土,当采用风干土料时,土料应粉碎、过 5mm 筛,加水在室内重新配制成相当于天然含水量的试料土,放置 24h,并防止水分蒸发。

A. 0. 3. 2 试料土含水量必须在同一地层的不同部位,至少 3 处取样测定。

A. 0. 4 加固料、添加料、拌和用水应符合下列要求:

(1)室内试验所用的加固料、添加料应与工地实际使用的加固料和添加料在品种与规格上相符。

(2)当用风干土料时,拌和用水的 pH 值应与工地软弱土的 pH 值相符,否则应采用蒸馏水作拌和用水。

A. 0. 5 试件的制作及养护应符合下列要求:

(1)试料土必须与加固料、添加料充分搅拌均匀。每个试件所需的试料土、加固料、添加料的质量事先必须按拟定的配合比用天平称好。并控制试件达到统一的单位质量,这一步骤制作时应十分仔细。

(2)试件的制模尺寸应为 $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ 的立方体。试件可在振动台上振实;振动台频率为 3000 ± 200 次/min,负载振幅 $0.35 \pm 0.05\text{mm}$,振实 3min。也可人工捣实。加固处理土放入试模时应仔细分层填塞均匀并不得产生空洞或气泡。上下两端面应采用刮刀刮平。

每个制成的试样应连制模称取质量,同一类型试件质量误差不得大于 0.5%。

(3)应将制作好的试件带模放入保湿箱内进行湿润养护。

(4)试件养护温度宜为 $20 \pm 3^\circ\text{C}$,湿度宜为 75%。

(5)试件养护龄期应为 1d、7d、28d、90d。

A. 0.6 室内抗压强度试验应采用控制应力试验方法。逐级加压并保持应力水平,量测垂直向变形量,待变形稳定后再加下一级荷载,直至破坏。

稳定标准:试件垂直变形速率小于 $0.5\text{mm}/\text{min}$;

破坏标准:应力不变,变形不断发展;试件裂纹产生,应力下降。

每组试件必须有三个以上平行试验。

A. 0.7 试验报告应包括下列内容:

A. 0.7.1 现场地层地质剖面、代表性土层的天然含水量、重度、塑限、液限、pH 值、有机质含量、无侧限抗压强度。

A. 0.7.2 试料土采集方法、位置、深度、日期。

A. 0.7.3 试料土的保存方法。

A. 0.7.4 加固料、添加料名称、化学成份分析、生产厂家及出厂日期。

A. 0.7.5 试验结果制成的图表:

- (1) 无侧限强度与龄期关系 q_u-t ;
- (2) 无侧限强度与喷粉量关系 q_u-a_w ;
- (3) 应力与应变曲线 $\sigma-\epsilon$;
- (4) 含水量与时间关系 $W-t$ 。

附录 B 粉喷桩施工质量监理要求

B.0.1 粉喷桩施工前应对下列内容进行监理：

- (1)进场施工设备的型号、性能、数量及其机械设备的可靠性；
- (2)进场施工人员的组织机构及配备；
- (3)进场加固料的质量、数量、规格；
- (4)施工图放样。

监理人员应对承包人填报的进场设备报验单、施工组织设计报审表、施工放样报验单和建筑材料报验单进行签证。

B.0.2 监理人员应详细审查承包人申报的施工技术方案报审表,并对施工方案、施工工艺、质量控制及进度计划等提出审查意见。

B.0.3 工艺性试桩时监理人员必须到场,确认其施工工艺及各种操作参数,并作为工程桩施工依据。

B.0.4 上述各项经批准后,应由总监代表签认分项工程开工申请单,作为分项工程的开工通知,承包人方可开工。未经批准,不得开工。

B.0.5 粉喷桩施工时应应对加固深度、桩长、复搅长度、喷灰量加强监理,及时指出存在的问题。对于错误的施工手段及方法应指令承包人及时纠正。

B.0.6 施工原始记录不得弄虚作假及涂改。监理人员应认真检验并签认。

附录 C 粉喷桩现场抗压强度试验规定

C. 0. 1 试件制作应在现场由监理人员指定的桩位挖取桩体。试件的取样应在深度为停灰面以下 0. 5m、1. 0m、1. 5m 挖取三段桩体,每段长度约为 500mm。试件上、下两面用水泥砂浆抹平,并应保持试件的含水量。

C. 0. 2 试验仪器及设备应由下列部件组成:

- (1)反力架:额定压力 50t。
- (2)千斤顶:最大顶出力 50t。
- (3)油压表:最大量程 60MPa,最小分刻读数 1MPa。
- (4)垂直位移量测:百分表 2 只。

C. 0. 3 试验方法应符合下列规定:

- (1)采用等级加载法:加载级差为 2MPa。
- (2)加载速率:采用快速加载法。
- (3)每次加载前读垂直变形,加载后每隔 1min 读一次百分表,连读 3 次。
- (4)记录:桩号、龄期、试件直径、试件高度、加荷量、变形量。

C. 0. 4 一般粉喷桩为脆性破坏,当出现下列情况之一时,桩体达到破坏极限状态,可终止试验。

- (1)加载时压力上不去。
- (2)百分表读数不稳定。
- (3)桩体出现裂缝。

附录 D 粉喷桩载荷试验规定

D. 0. 1 根据工程的实际布桩情况粉喷技术的载荷试验可分为单桩载荷试验、单桩复合地基载荷试验及多桩复合地基载荷试验。

D. 0. 2 载荷板尺寸应根据压板下桩、土的置换率选择,宜与工程实际布桩情况相近。当受条件限制采用较小压板尺寸时,应根据置换率修正其试验结果。

D. 0. 3 载荷试验可采用液压载荷试验设备,包括反力系统、加荷与稳压系统、量测系统等部分。

D. 0. 3. 1 反力系统有堆载式、锚杆式等多种形式。

D. 0. 3. 2 加荷与稳压系统由承压板、加荷千斤顶、立柱、油泵、稳压器等组成。其承压板应有足够的刚度,保持试验过程中不变形,可用加肋的焊接钢板。对于大型载荷试验,宜用现浇钢筋混凝土承压板。

D. 0. 3. 3 量测系统包括荷载量测和承压板沉降量测。

(1)荷载量测可用测力环或通过电测压力传感器,并用油压表校核。

(2)承压板的沉降量测可用百分表或电测位移计。

(3)地面变形应用水准仪观测。

D. 0. 4 粉喷桩载荷试验应遵守下列规定:

(1)开挖试坑的宽度不应小于承压板宽度的 3 倍,在整个试验过程中应保证粉喷桩的结构和原始含水量。

当粉喷桩周围为流塑状态的粘性土和饱和砂土时,承压板周围应铺设 200~300mm 厚的原土作保护层。在地下水位以下进行试验时,应事先将水位降至试验高程以下,安装设备,待水位恢复后再进行加荷试验。

(2)为保持承压板和粉喷桩的良好接触,粉喷桩桩顶可铺设 10~20mm 厚的中粗砂。

(3)加荷应分级进行,每级荷载增量应为预计极限荷载的 $1/8 \sim 1/10$,对于大型荷载试验,则为预计极限荷载的 $1/12 \sim 1/15$ 。

(4)每加一级荷载后,按 10、10、10、15、15min,以后为 30min 的时间间隔观测承压板沉降,到达相对稳定后加下一级荷载。相对稳定的标准为:连续 2h 每小时的沉降量不大于 0.1mm。

除了相对稳定法外,尚可采用快速法(非稳定法)。

(5)在设备条件许可的条件下,应加荷到破坏荷载。出现破坏荷载的标志宜按下列各点综合判定:

承压板周围土明显隆起或出现破坏性裂纹。

荷载不变,连续 24h 沉降呈等速或加速发展。

(6)分级卸荷,观测回弹,分级卸荷增量一般为分级加荷增量的 2 倍。

(7)拆除试验设备后,各取原状土样 2 件,送试验室分析。

D. 0. 5 粉喷桩荷载试验资料整理时,应根据现场试验记录,绘制荷载——沉降曲线($P-S$ 曲线)及沉降——时间曲线($S-t$ 曲线)。 $S-t$ 曲线上的时间轴,也可用对数形式表示。

D. 0. 5. 1 比例界限荷载 P_0 的确定:当 $P-S$ 曲线上有明显的直线段时,以直线的终点(拐点)为 P_0 ;当 $P-S$ 曲线上直线段不明显时,可作 $\lg P - \lg S$ 曲线或 $P - \Delta S / \Delta P$ 曲线,以拐点对应的荷载为 P_0 。圆滑型 $P-S$ 曲线不存在 P_0 点。

D. 0. 5. 2 极限荷载 P_f 点的确定:当荷载试验加荷至破坏荷载,应以破坏荷载的前一级荷载为 P_f ;当试验未做到破坏荷载,可用外插法推算。

D. 0. 5. 3 容许承载力 R 可用下列公式计算:

$$R = P_f / K \quad (\text{D. 0. 5—1})$$

式中 K ——安全系数,可取 2~3。

$$\text{或} \quad R = P_0. \quad (\text{D. 0. 5—2})$$

附录 E 本规范用词说明

执行本规范条文时,对于要求严格程度的用词说明如下,以便在执行中区别对待:

E. 0. 1 表示很严格,非这样做不可的用词:

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”;

E. 0. 2 表示严格,在正常情况下均应这样做的用词:

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

E. 0. 3 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的用词:

正面词采用“宜”或“可”;

反面词采用“不宜”。

附加说明

本规范主编单位和主要起草人名单

主 编 单 位:铁道部第四勘测设计院

主要起草人:王仁兴 白日升 马争鸣

徐金安 吴福宝 曹诗洲

在执行本规范过程中,如发现需要修改和补充之处,请将意见及有关资料寄交铁道部第四勘测设计院(武汉市武昌杨园,邮编 430063),并抄送铁道部建设司标准科情所(北京朝外大街 227 号,邮编 100020)供今后修订时参考。

《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》

条文说明

本条文说明系对规范重点条文的编制依据,存在问题以及在执行中应注意的事项等予以说明。为了减少篇幅,只列条文号,未抄录原条文。

1.0.2、2.1.1 水泥一般适用于淤泥质土、粘性土、粉土、素填土(包括吹填土)、杂填土、饱和黄土、中粗砂、砾砂等地基加固。

根据室内试验,一般认为用水泥作加固料,对含有高岭石、多水高岭石、蒙脱石等粘土矿物的软土加固效果较好;而对含有伊里石、氯化物和水铝英石等矿物的粘性土以及有机质含量高,pH 值较低的粘性土加固效果较差。

石灰一般适用于粘土颗粒含量大于 20%,粉粒及粘粒含量之和大于 35%,粘土的塑性指数大于 10,液性指数大于 0.7,土的 pH 值为 4~8,有机含量小于 11%,土的天然含水量大于 30%的、偏酸性的土质加固。

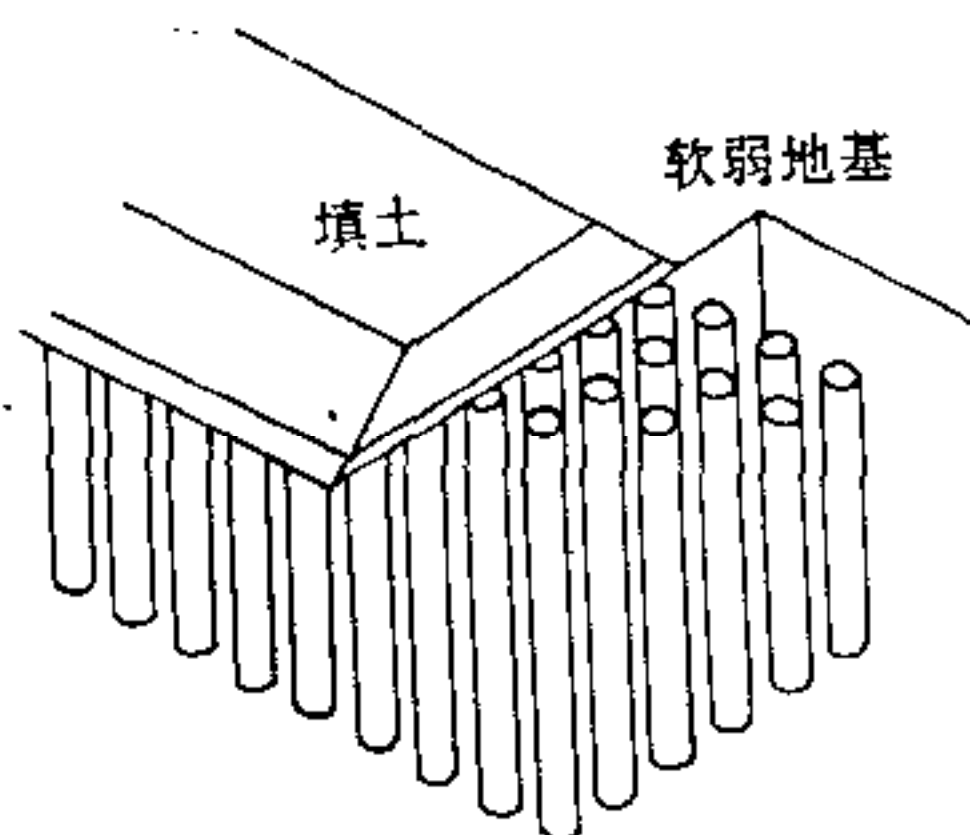
在粘粒含量不足的情况下,可以添加粉煤灰。当 pH 值小于 7 时,掺入百分之几的石灰,通常 pH 值就会大于 12。

受机械设备的限制,国内施工机械加固深度大于 15m 时,喷粉量难以保证。故规定加固深度不宜大于 15m。

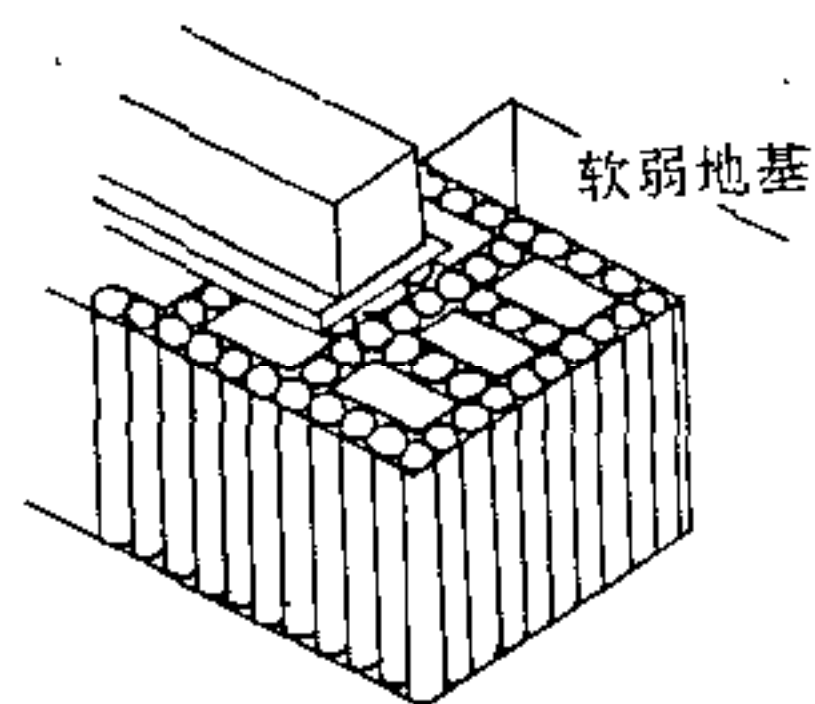
3.1.1 采用粉喷加固软弱土层应收集的资料说明如下:

(1)粉喷技术作为一种新的地基处理方法,它的选择合理与否很大程度上取决于工程地质条件。一般应有下列土的物理、力学性指标:天然密度,含水量,比重,塑、液性指数,塑、液限,粘聚力,内摩擦角,无侧限抗压强度,压缩系数及土的承载力,变形模量。

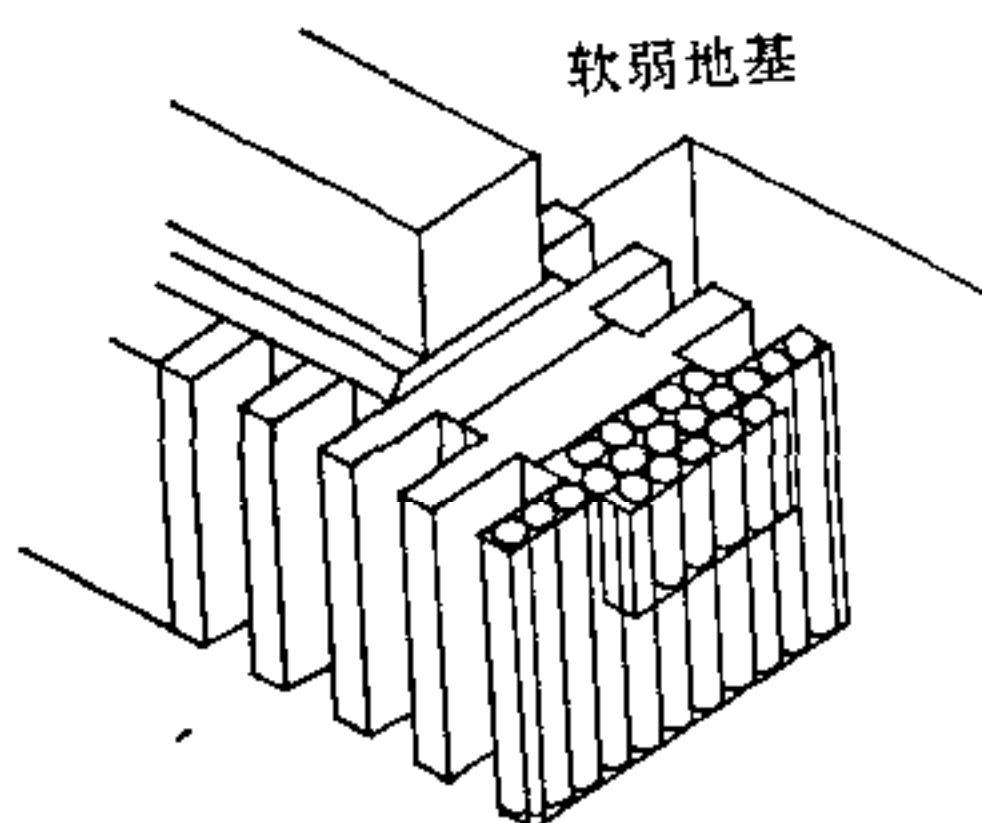
砂性土应进行颗粒级配分析。特别注意土的粘粒含量及对加固料有害的土中离子种类及数量,如 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等。



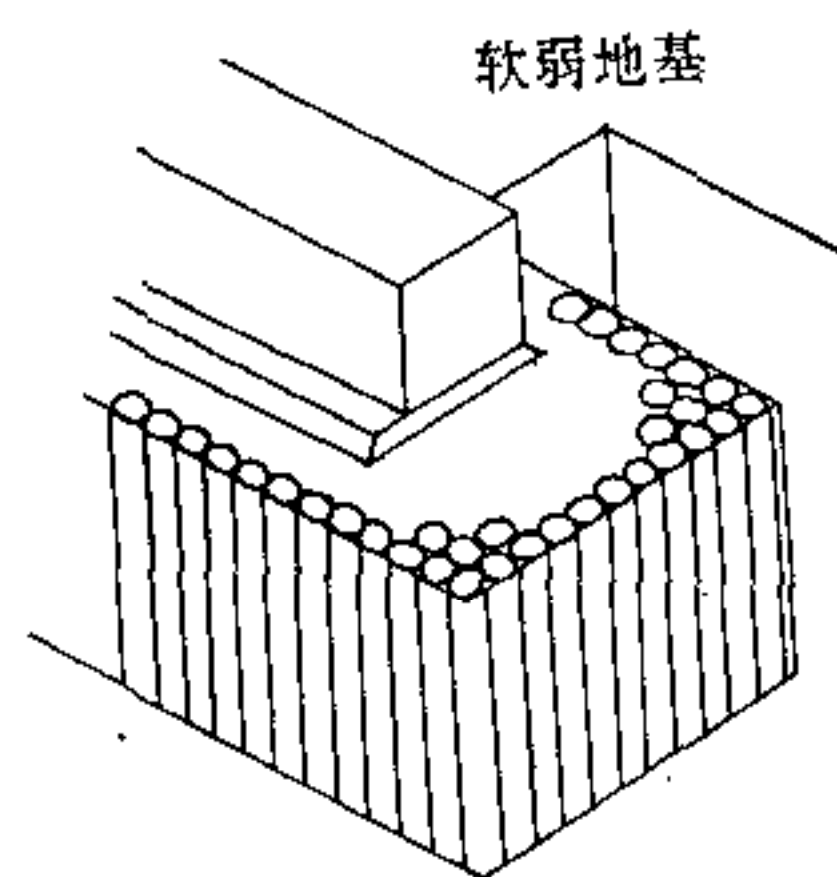
(a) 桩式加固



(c) 格子式加固

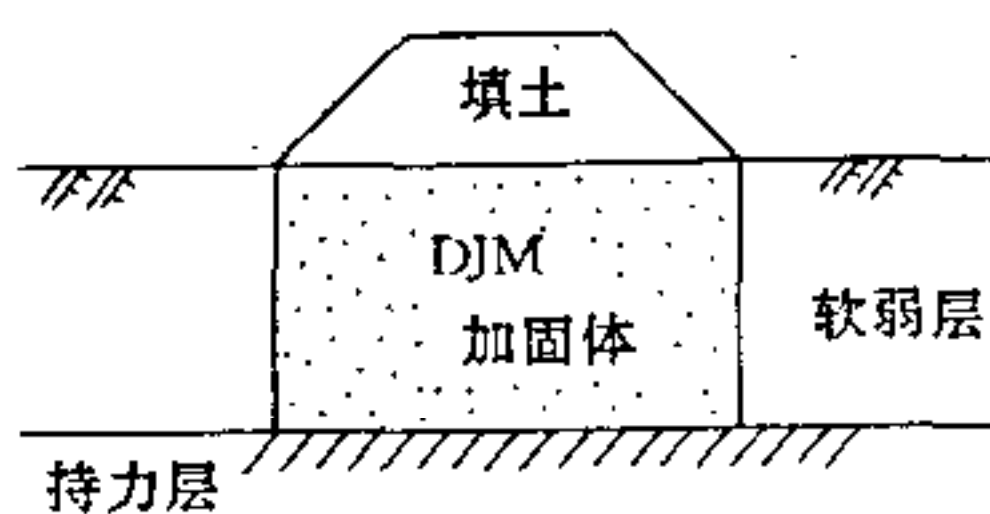


(b) 壁式中加固

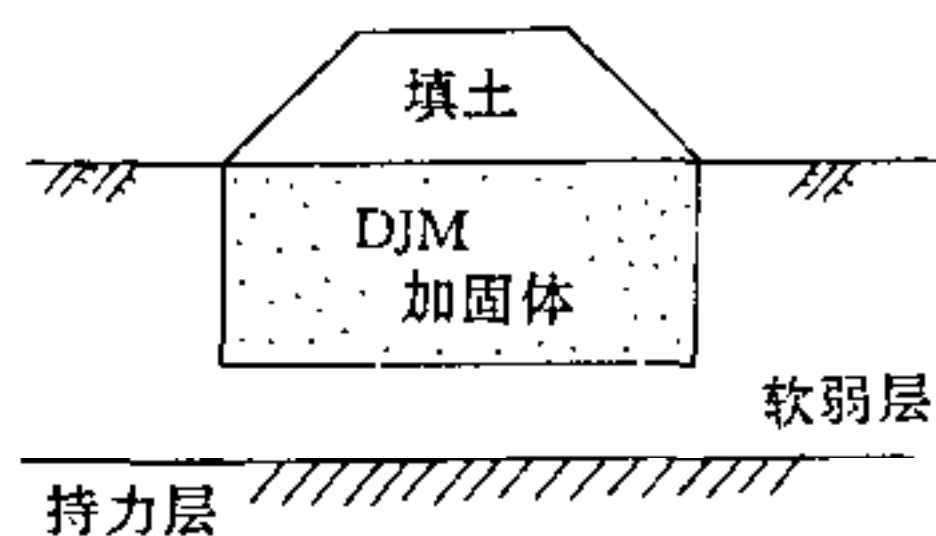


(d) 块体式加固

按加固断面形状的分类



(a) 承力层支承式

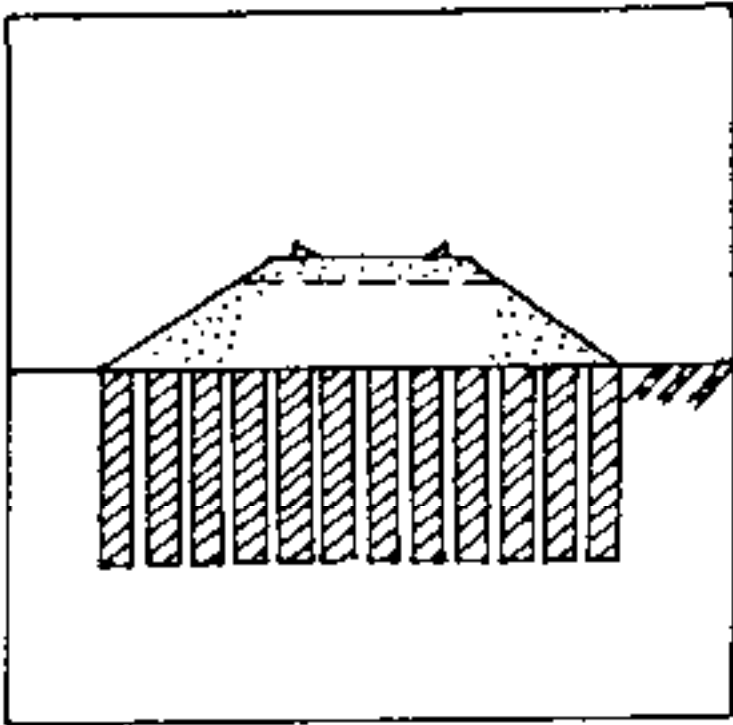


(b) 非承力层支承式

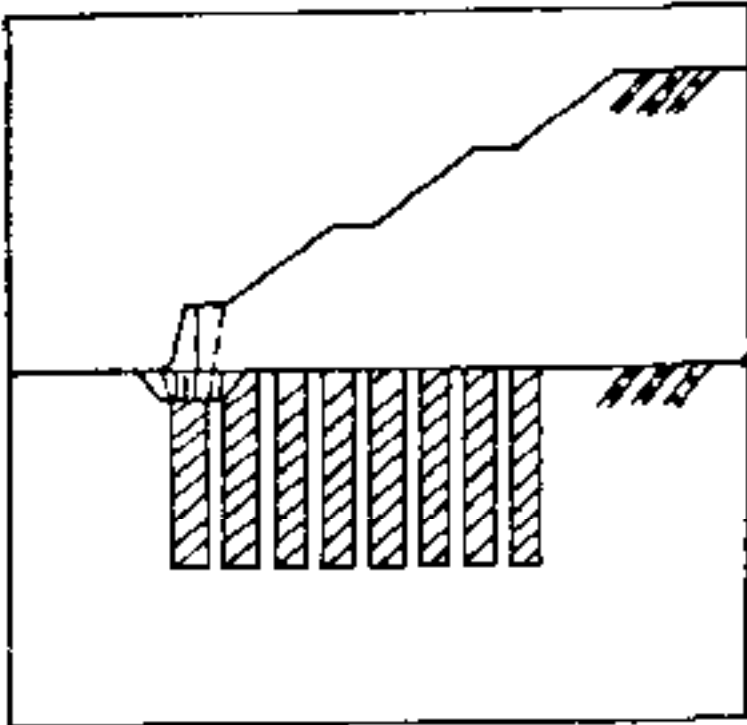
按支承形式的种类

说明图 3.1.1-1

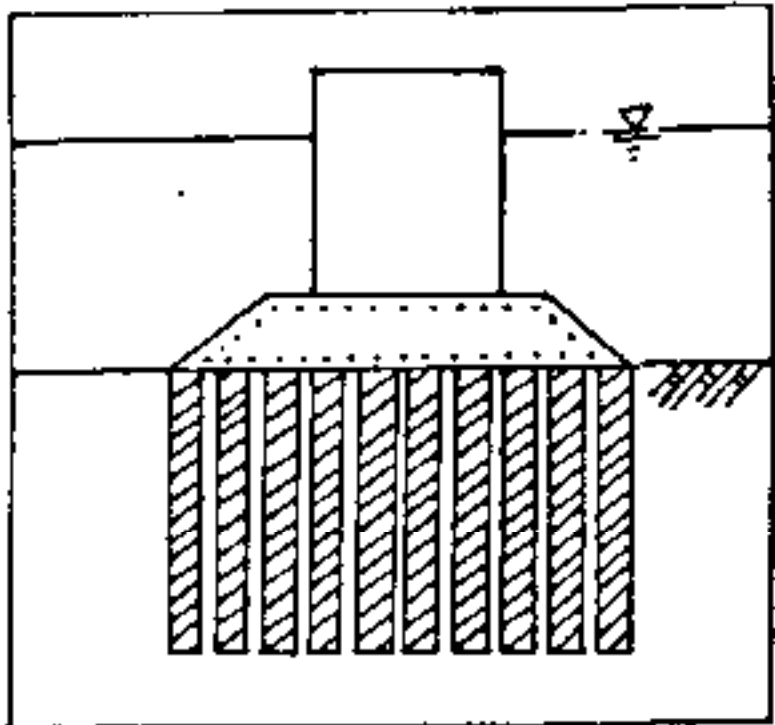
防止填土等的滑动
破坏、减小沉陷



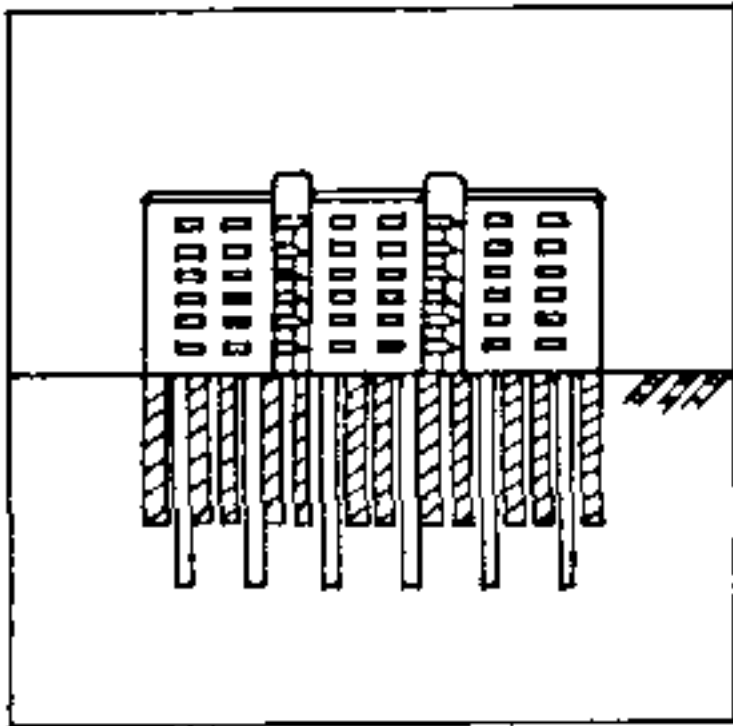
防止高填土的滑动破坏



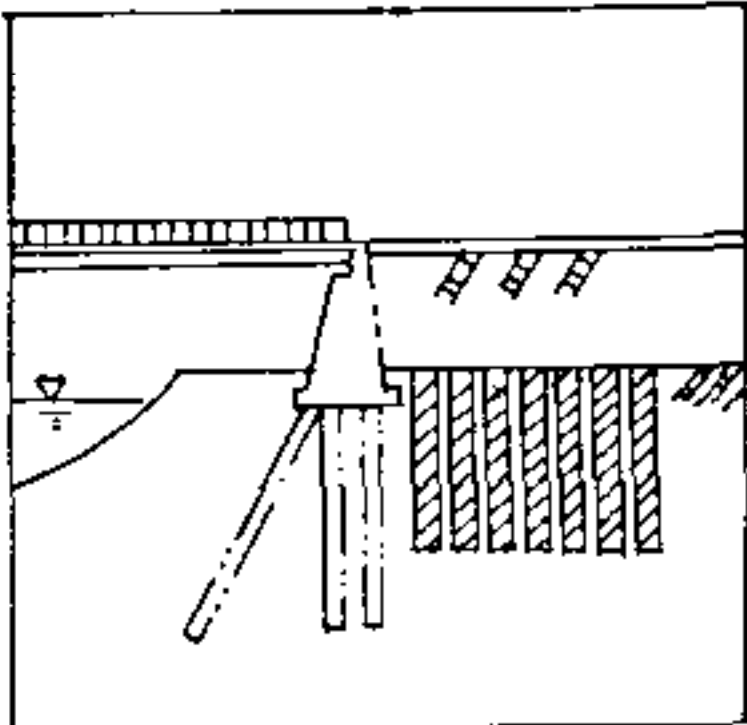
结构基础



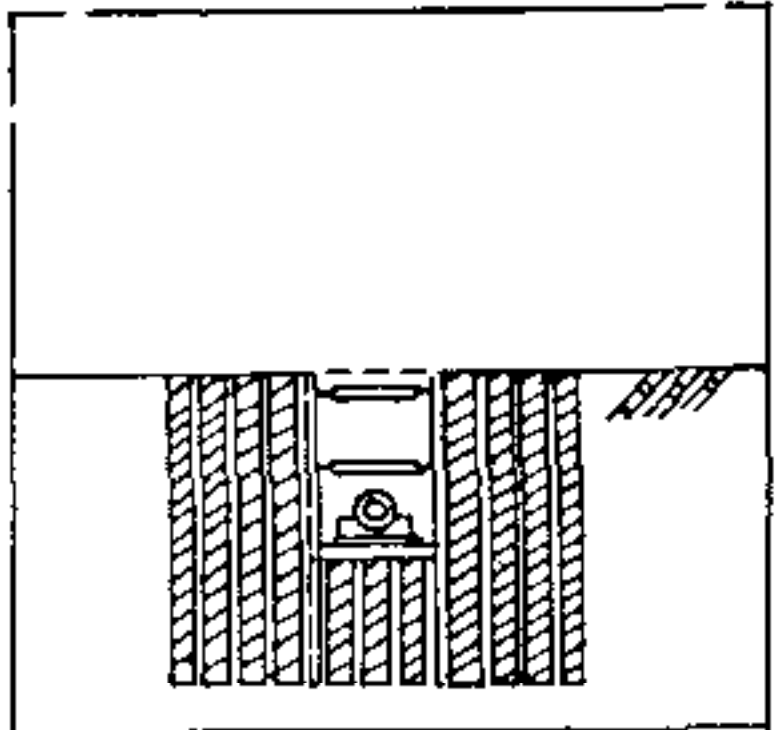
增加基础抗水平抵抗力



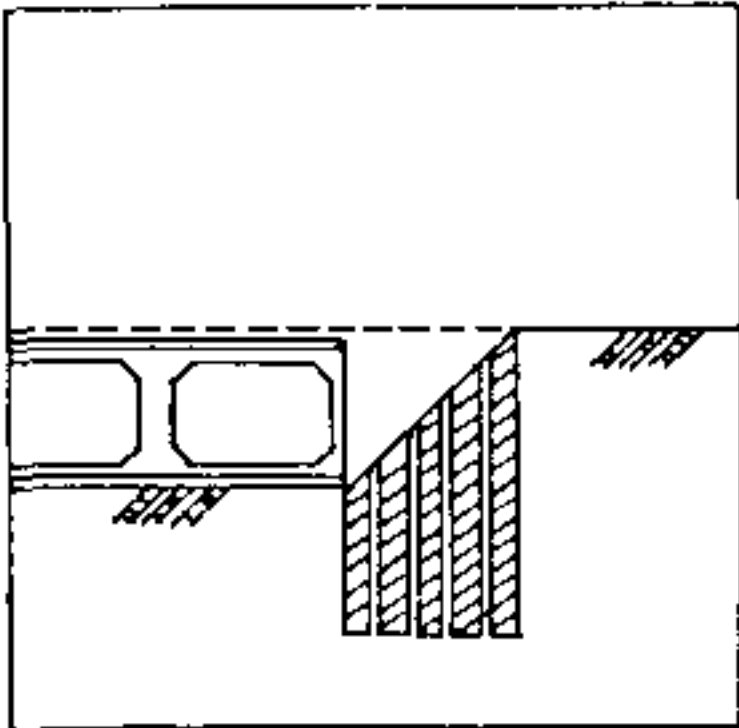
防止桥台背的滑动破坏、减少沉降



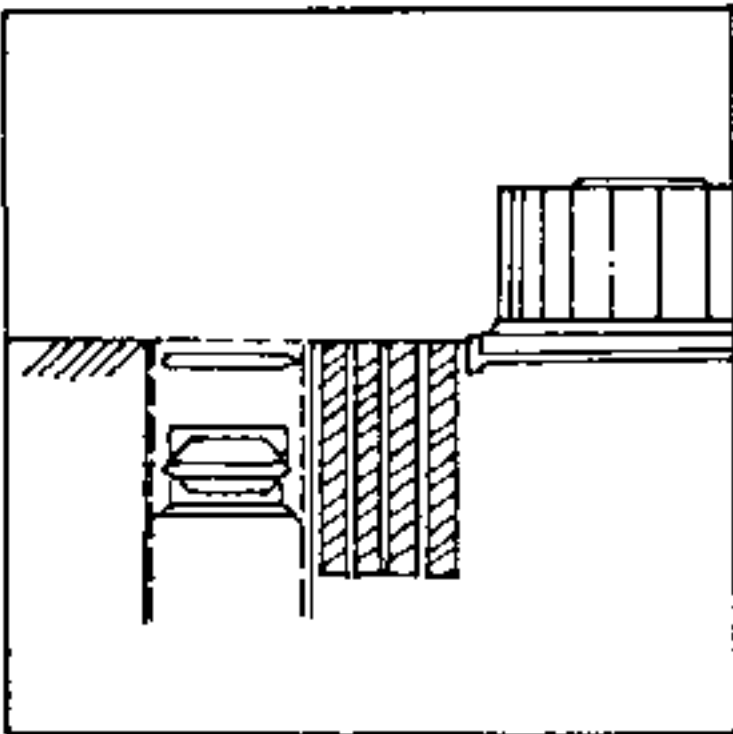
防止基坑隆起
减少板桩埋入长度



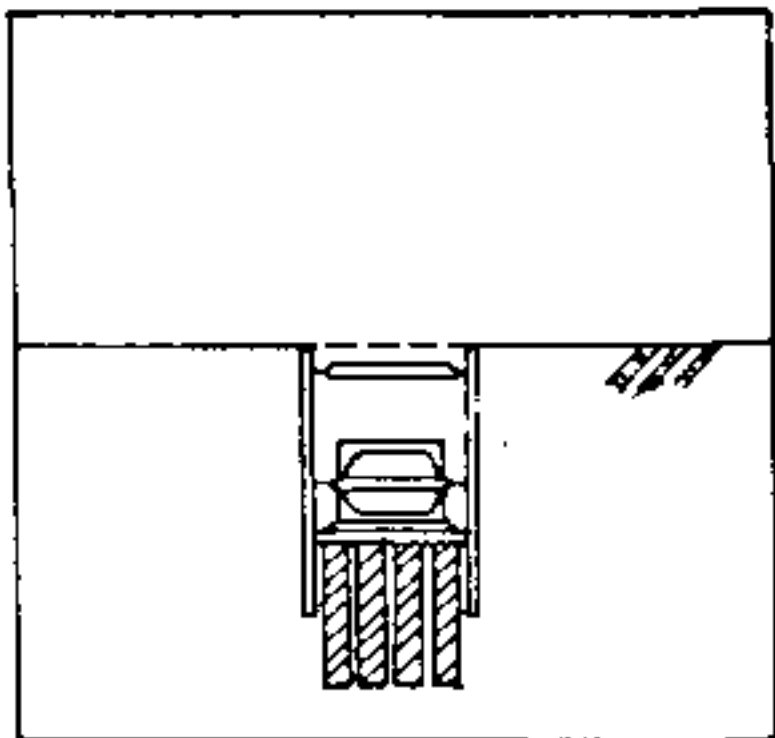
挖方坡面的稳定



防止对邻近结构物
产生不良影响



防止地下埋设物的沉陷



适用例

说明图 3.1.1-2

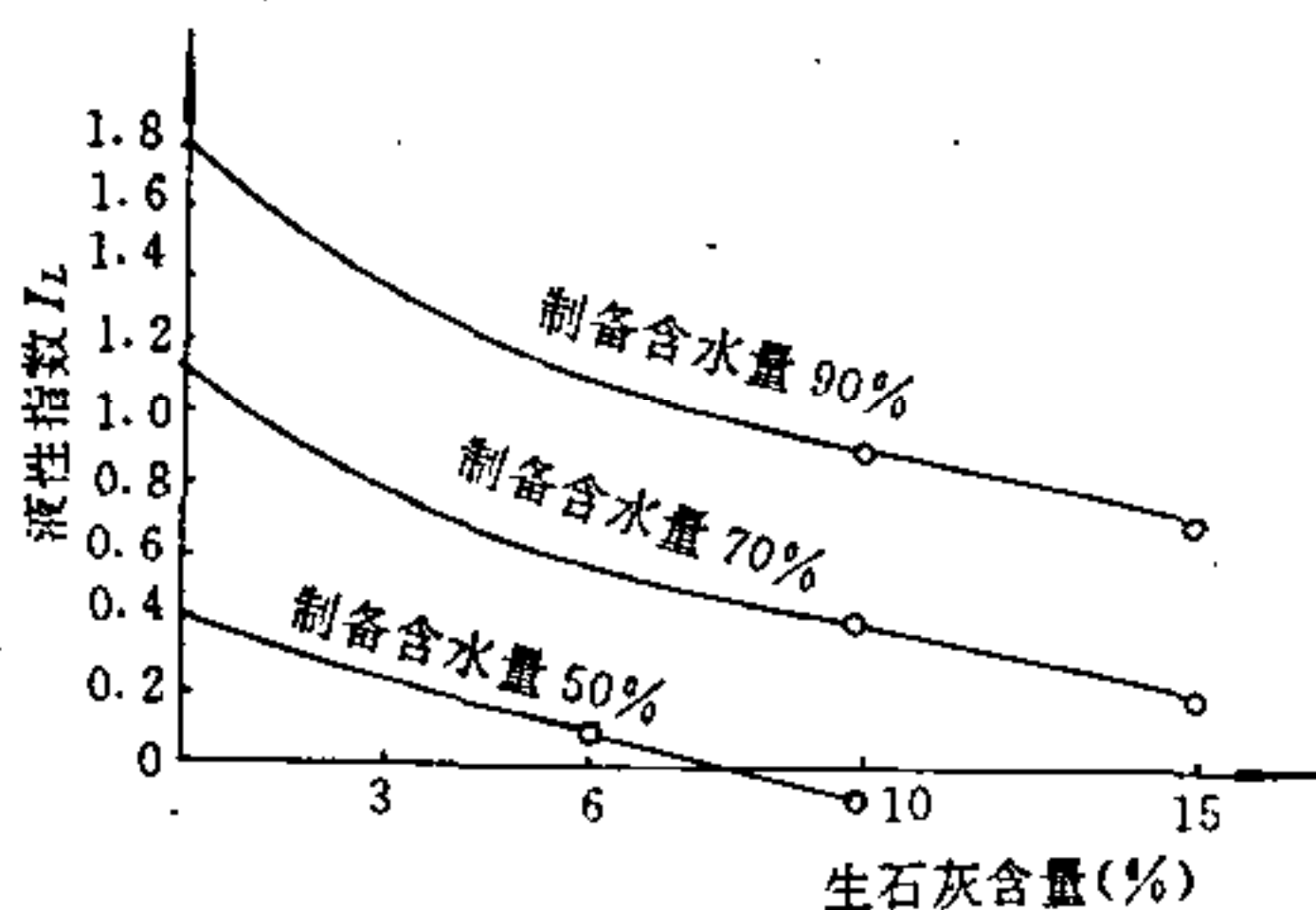
(2)建筑物上部结构与基础是一个统一体。上部结构的荷载大小及分布直接影响到地基处理的方法及型式。

常用的加固方法及型式如说明图 3.1.1—1~2。

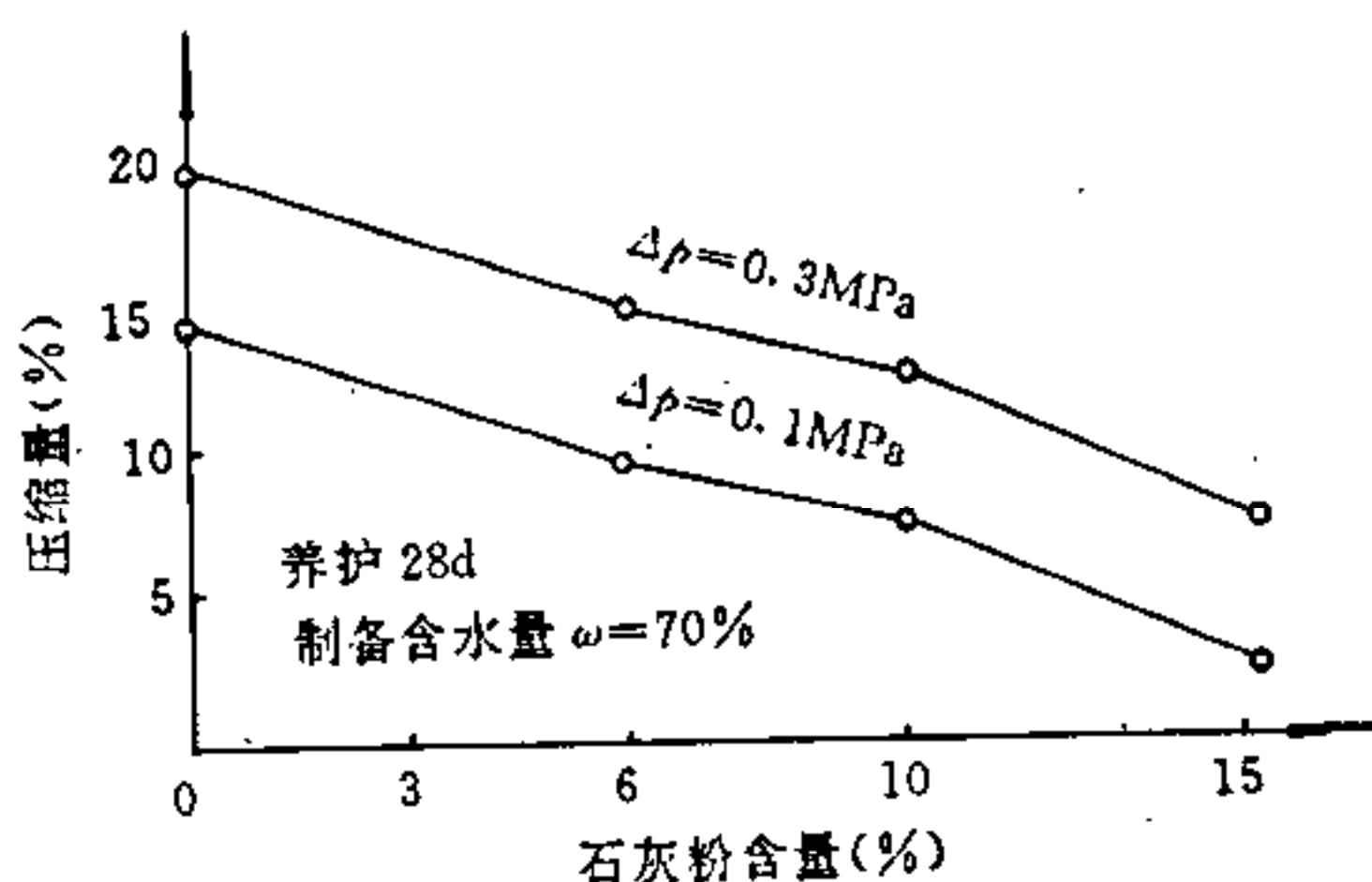
(3)加固料费用占粉喷技术加固总费用的 50%，所以加固料选用应就地取材，减少运输、保存等方面费用开支，降低工程造价。

3.1.2 为了研究不同类型软弱土用石灰加固的效果，铁道部第四勘测设计院曾先后选择了我国南方两处有机质含量较高，及中南地区一处有机质含量一般的软土，事先按不同的含水量，不同的加固料掺入量和不同的养护龄期制成试件，进行各种物理、力学性试验。结果表明：

(1)加灰后软土的液性指数 I_L 随着含灰量的增加呈线性递减。当制备含水量小于 50% 时，加灰后的液性指数 I_L 很快小于零，而使土从原来的流塑状态进入半固态或固态，提高了土的强度(见说明图 3.1.2—1)。



说明图 3.1.2—1 加灰后灰土的液性指数变化情况
(土样取自广东肇庆)



说明图 3.1.2-2 加灰后灰土的压缩量变化情况
(土样取自广东肇庆)

(2) 在一定的稳定压力下,灰土的压缩量随着石灰粉含量的增加呈线性递减(见说明图 3.1.2-2)。从说明图 3.1.2-2 可看出,当加灰量为 15%,稳定压力 $\Delta P = 0.3 \text{ MPa}$ 时,其压缩量减少近三倍。

(3) 加灰后软土的压缩系数 a_v 减小,侧限变形模量 E_0 增大(见说明表 3.1.2-1)。

$P = 0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 加灰后灰土的压缩系数 a_v 及侧限变形模量 E_0 。

说明表 3.1.2-1

	天然地基	7d 龄期	28d 龄期	90d 龄期
$a_v (\text{kPa})^{-1}$	0.0006	0.00007	0.00007	0.00005
$E_0 (\text{kPa})$	3200	27400	27400	37700

(4) 加灰后软土的无侧限抗压强度变化

软土经过加固后,其强度一般用无侧限抗压强度来表示。取自广东某地的试样表明,其原状土的无侧限抗压强度为 27 kPa ,加入生石灰并掺加少量石膏后,灰土的无侧限抗压强度明显提高。不同龄期下其无侧限抗压强度 q_0 见说明表 3.1.2-2。

加灰后土的无侧限抗压强度 说明表 3.1.2-2

龄期	7d	28d	90d
q_u (kPa)	454	785	1309

(5) 加灰后软土的抗剪强度指标 c, ϕ 值均有明显提高, 见说明表 3.1.2-3。

灰土的抗剪强度指标 说明表 3.1.2-3

龄期	天然地基	7d	28d	90d
c (kPa)	8	101	178	330
ϕ (°)	7°41'	41°59'	38°56'	35°45'

上述石灰土室内试验结果表明, 软土采用石灰搅拌加固后, 其物理力学性质均有明显的改善。实践证明在提高地基承载力, 减小地基沉降变形方面, 其加固效果是肯定的。

Brandl(1981), Erans 和 Bell(1981), Serra(1983)以及其他专家分别证明, 加入生石灰通常能增加软土的渗透性。然而 Terashi 和 Tanaka(1983)曾观察到海相粘土中掺入生石灰后, 其渗透性反而减小。当采用水泥加固时, 这种渗透性的减小是显著的。

铁道部第四勘测设计院从广东某地取土试验, 粘土颗粒含量为 49.63% 的软土当掺入 15% 的生石灰后, 其粘土颗粒含量降低至 18.98%。证明软土加入生石灰后可使颗粒粗化, 增加了土的渗透性。

软土采用水泥加固形成的水泥土其物理力学性状及其影响因素分述如下。

a. 重度: 由于拌入软土中的水泥数量较少, 且与软土的重度相近, 因此, 水泥土的重度与天然软土的重度亦相近。通常水泥土的重度仅比天然软土大 3%。故采用水泥土加固软土地基时, 其加固区对其下部未加固区不致产生过大的附加荷载, 也不会产生较大的附加沉降。

b. 水泥土无侧限抗压强度一般为 0.3~4.0MPa, 比天然软土大几十倍至数百倍, 其变形特性随强度不同而介于脆性体与弹塑

性体之间。

水泥土受力开始阶段,应力与应变关系基本上符合虎克定律,呈线性关系。当外力达到极限强度的70%~80%时,试件的应力和应变关系不再保持直线关系。当外力达到极限强度时,对于强度大于1.5MPa的水泥土则很快出现脆性破坏,破坏后残余强度很小,此时轴向应变约为0.8%~1.2%;对于强度小于1MPa的水泥土则表现为塑性破坏。

c. 水泥土的抗拉强度随抗压强度的增长而提高。当水泥土的抗压强度 $q_u=0.5\sim4.0\text{MPa}$ 时,其抗拉强度 $\sigma_t=0.1\sim0.7\text{MPa}$,即 $\sigma_t=(0.15\sim0.25)q_u$ 。

d. 用高压三轴仪进行水泥土的剪切试验表明:水泥土的抗剪强度随着抗压强度增加而提高。当 $q_u=0.5\sim4.0\text{MPa}$ 时,其粘聚力 $c=0.1\sim1.1\text{MPa}$,即 $c=(0.20\sim0.30)q_u$;其内摩擦角 ϕ 一般为 $20^\circ\sim30^\circ$;试件破坏时,其剪切面与最大主应力面夹角约 60° 。

e. 当水泥土抗压强度 $q_u=0.3\sim4.0\text{MPa}$ 时,其变形模量 $E_{50}=40\sim600\text{MPa}$ 。即 $E_{50}=(120\sim150)q_u$ 。

3.1.3 水泥、石灰等加固料加固土体后其标准强度采用90d龄期的试块强度。

一般情况下,水泥土的7d,28d强度间有下列近似关系:

$$q_{u(28d)}\approx 1.49q_{u(7d)}; q_{u(90d)}\approx 1.97q_{u(7d)}; q_{u(90d)}\approx 1.33q_{u(28d)}$$

但试验资料表明,90d龄期后其强度依然有所增长,日本研究的结果为:

普通硅酸盐水泥: $q_{u(5a)}=1.3q_{u(90d)}$;

矿渣水泥: $q_{u(5a)}=1.8q_{u(90d)}$ 。

3.1.6 粉喷桩的平面布置在垂直受力条件下,往往布置成柱状;在侧向受力条件下,因粉喷桩抗剪、抗拉强度较低,往往布置成壁状或格栅状。

3.1.7 粉喷桩不是桩基,桩间距没有严格的约束。可只在基础平面内布桩,不设护桩,但周围建筑物对其有影响时(包括应力扩散

及沉降变形),应在基础外侧设置隔离桩,以消除附加应力及负摩擦的影响。

3.1.8 粉喷桩的长度,一方面要满足强度计算要求,另一方面尚须满足变形计算要求。对于变形来说,增加桩长,对减少沉降变形是有利的。实践证明,若粉喷桩能穿透软弱土层到达强度相对较高的持力层,则沉降量是很小的。但对稳定性来说,粉喷桩的长度应由危险滑弧的位置决定。

3.1.9 当加固料为水泥时,矿渣水泥试块的前期强度低于普通水泥试块,而后期强度却正相反。所以从经济及后期强度方面考虑应用矿渣水泥。水泥标号一般用 325 号及 425 号。

国外对生石灰的要求是:

(1)CaO 总含量大于 90%;

(2)活性 CaO 含量大于 85%~90%;

(3)生石灰颗粒不小于 67 目含量大于 99%;大于 168 目含量 90%~93%。我国石灰的 CaO 含量一般为 70%~80%,根据使用经验,其生石灰掺入量为湿土重的 10%~15%。

水泥掺入量实践及室内试验表明,当掺入量低于 8%时,其加固效果较差。故取被加固湿土重的 10%~15%。

3.1.10 国产 GPP-5, GPP-7 型粉喷钻机标准搅拌翼直径均为 500mm。主要由钻机的设计扭矩所控制。当土质较软时,可以配用 500~700mm 直径钻头。

3.2.1 单桩承载力由桩身强度和土对桩的支承力决定。两者取其小者。在式 3.2.1-2 中,考虑到粉喷桩端部喷粉量较小,且原状土已被扰动,故不计粉喷桩端部的支承力。但对长度小于 10m 的桩,则应计及粉喷桩端部的支承力。

3.2.2 根据桩身强度及桩周摩阻力两者所提供的支承力相近的原则,这仅仅是指强度方面的考虑。例如当桩身强度为 1.6MPa, η 取 0.35, 桩直径为 50cm 时,按式 3.2.1-1 得 $[P]$ 112kN。满足这一要求由式 3.2.1-2 取 f_1 为 7kPa 计算所得的桩长约为 10m。故

从桩强度方面考虑,桩长由桩身强度控制。

但当软弱土层较厚,从减少地基的沉降量方面考虑,桩应设计较长,原则上,桩长应穿透软弱土层到达下卧强度较高之土层。

3.2.3 复合地基承载力按 3.2.3-1 式计算。这一公式是从垂直方向力的平衡条件导出的。

当在复合地基的表面有荷载时,粉喷桩的压缩性比桩周软土的压缩性小。在变形协调的条件下,粉喷桩上产生应力集中现象。其桩、土应力分别按下式计算:

$$\sigma_p = \sigma_0 \cdot \mu_p$$

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot \mu_s$$

$$\mu_p = n / [1 + (n-1) \cdot a_s] > 1$$

$$\mu_s = 1 / [1 + (n-1) \cdot a_s] < 1$$

式中 σ_0 ——复合地基外荷载强度, kPa;

σ_p ——粉喷桩上承担的压应力, kPa;

σ_s ——桩间土上承担的压应力, kPa;

μ_p ——桩上应力集中系数;

μ_s ——桩间土上应力减小系数;

n ——桩、土应力比;

$$n = \sigma_p / \sigma_s$$

应力比 n 值国内进行了实测。实测结果表明 n 值的影响因素十分复杂,其主要因素有:

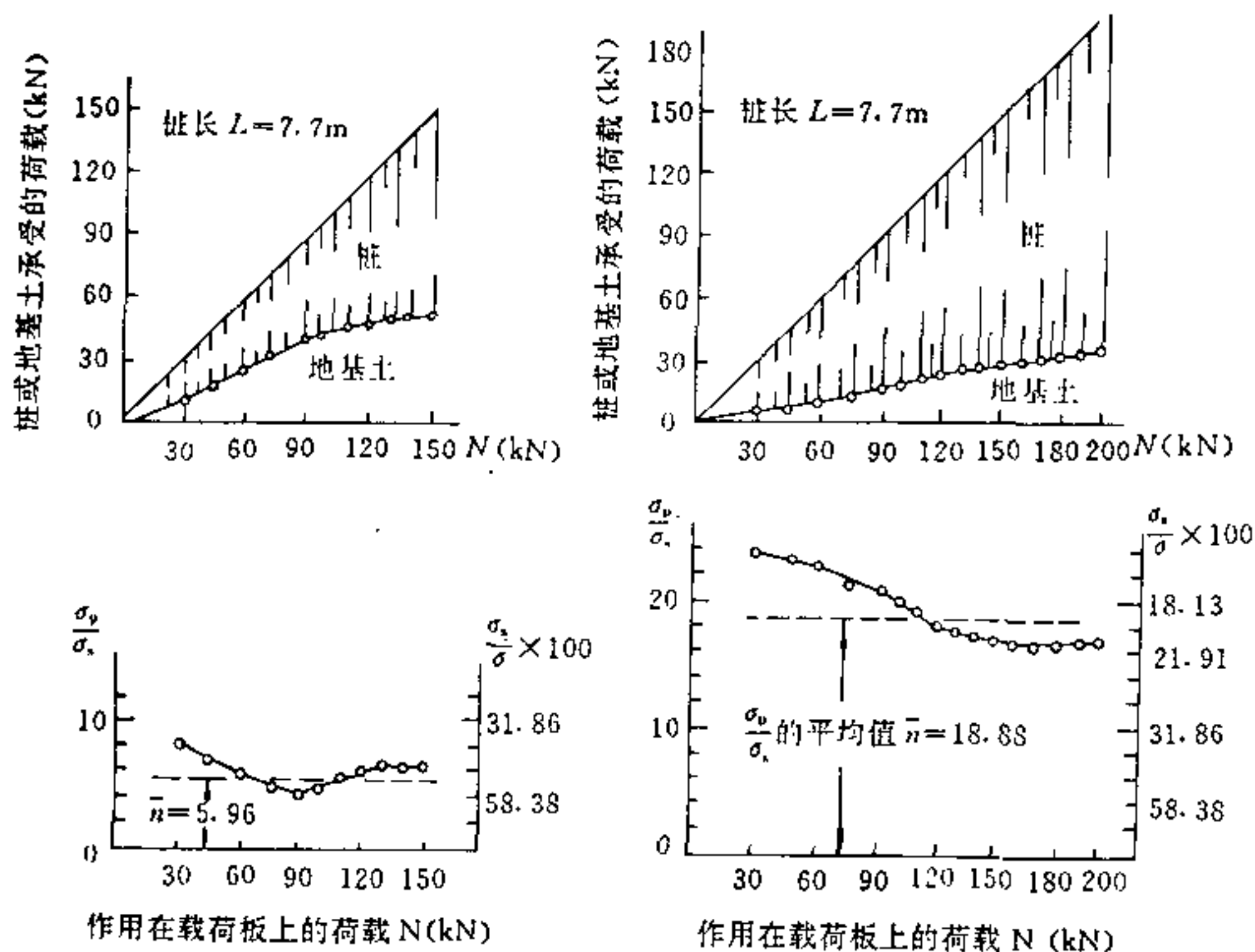
桩身及土质的变形模量、桩长、置换率、应力水平等。

根据我们的实测资料,在常用 10%~20% 的置换率、应力水平为 0.1~0.2MPa 条件下,粉喷桩其桩、土应力比 n 可取 3~10。代表性实测桩、土应力资料见说明图 3.2.3。

3.2.4 在进行稳定性计算时,一般采用桩、土形成的复合地基的综合粘聚力 C_{sp} 进行计算。

3.2.5 粉喷桩群体范围内的压缩变形量 ΔS_1 可按复合模量法、应力修正法、桩身压缩量法计算。大量的实测资料表明,加固区的压

缩变形量通常在 20~50mm 之间。现把各种方法分述如下：



说明图 3.2.3

(1)复合模量法将加固区中增强体和基体两部分视为一复合土体,采用复合压缩模量 E_{cs} 评价复合土体的压缩性。采用分层总和法计算 S_1 。其表达式为:

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot H_i / E_{csi}$$

式中 ΔP_i ——第 i 层复合土上附加应力增量;

H_i ——第 i 层复合土层的厚度;

E_{csi} ——第 i 层复合土层的压缩模量;其值为

$$E_{csi} = a_s \cdot E_p + (1 - a_s) \cdot E_{si}$$

其中 E_p ——粉喷桩的压缩模量;

E_{si} ——第 i 层土的压缩模量;

a_s ——置换率。

计算经验以及实践证明,采用该法计算结果偏大,不宜推广应用。

(2)应力修正法是根据桩间土承担的荷载 P_s ,按桩间土的压缩模量 E_s ,忽略粉喷桩的存在,采用分层总和法计算加固区的土层压缩量 S_1 。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \Delta P_{si} \cdot H_i / E_{si} = \mu_s \cdot \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot H_i / E_{si} = \mu_s \cdot S_{li}$$

式中 μ_s ——土上应力减小系数;

ΔP_i ——第 i 层土中平均附加应力增量;

S_{li} ——未加固地基在荷载作用下,相应厚度内的压缩量。

(3)桩身压缩量法当荷载作用下,桩体不发生刺入沉降的情况下,通过计算桩身的压缩量确定加固区土层的压缩量 S_1 。

$$S_1 = (\mu_p \cdot p + p') \cdot L / (2 \cdot E_p)$$

式中 μ_p ——应力集中系数;

p' ——桩底端端承力密度;

L ——粉喷桩长度,即等于加固区厚度 h ;

E_p ——桩身材料变形模量。

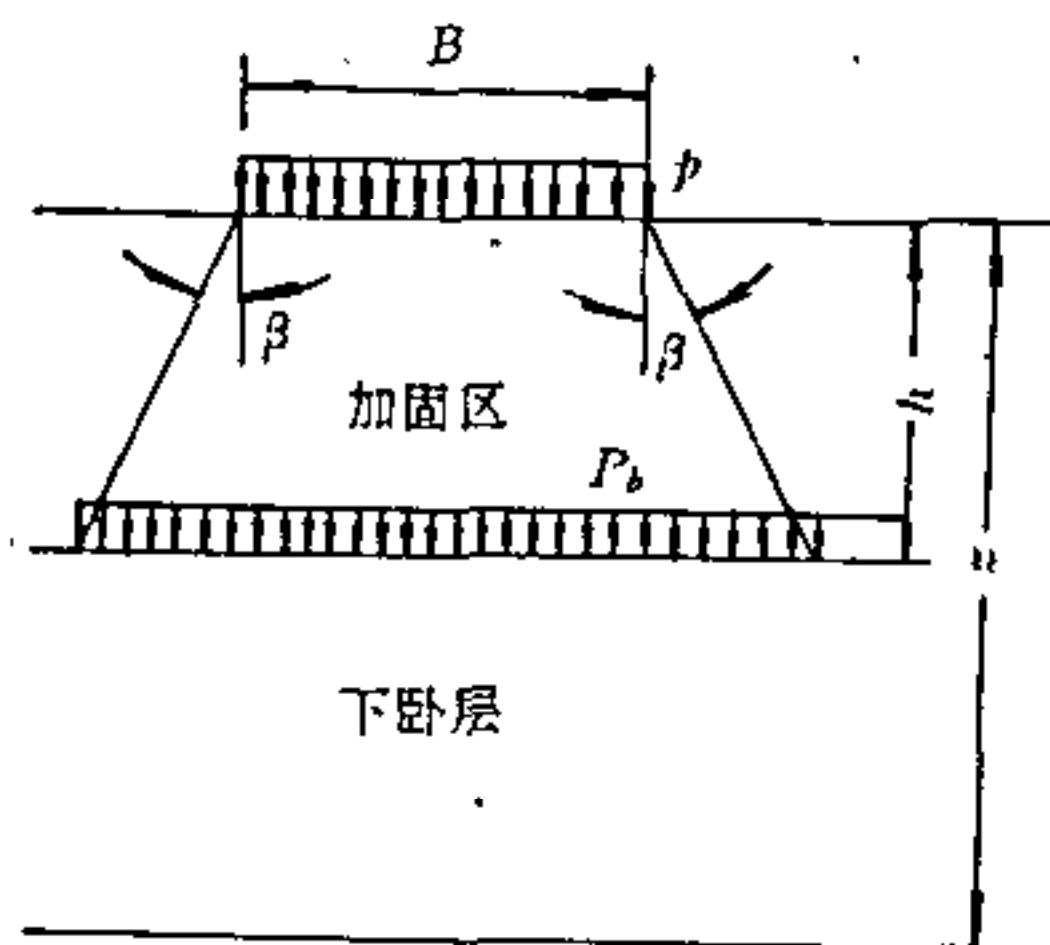
根据变形协调原则,桩间土的压缩量即等于桩身压缩量。因此,应力修正法及桩身压缩量法的计算结果是相等的,但桩身压缩量避免了繁琐的分层总和法计算程序。

3.2.6 粉喷桩群体底部未被加固土层的压缩变形量可按应力扩散法、等效实体法及双层地基法计算出未被加固土层顶部的附加应力,然后按一般分层总和法计算 ΔS_2 。现把各种方法分述如下:

(1)应力扩散法

如说明图 3.2.6-1 所示。荷载作用宽度为 B ,长度为 L ,应力扩散角为 β ,则作用在下卧层上的荷载为 P_b :

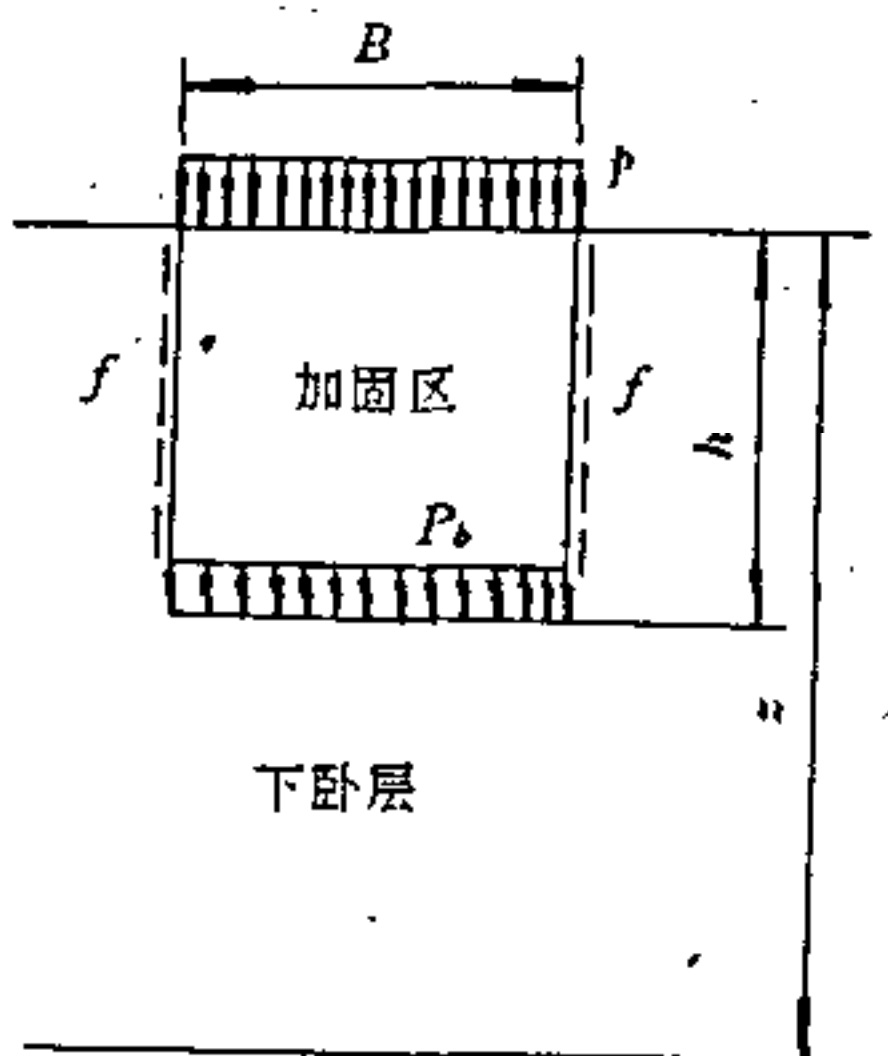
$$P_b = B \cdot L \cdot P / [(B + 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \beta) \cdot (L + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \beta)]$$



说明图 3.2.6-1

(2) 等效实体法(说明图 3.2.6-2) f 为侧摩阻力密度, L 、 B 分别为荷载作用长度和宽度。则 P_b 表达式为

$$P_b = [B \cdot L \cdot P - 2(B + L) \cdot h \cdot f] / (B \cdot L)$$



说明图 3.2.6-2

(3) 双层地基法

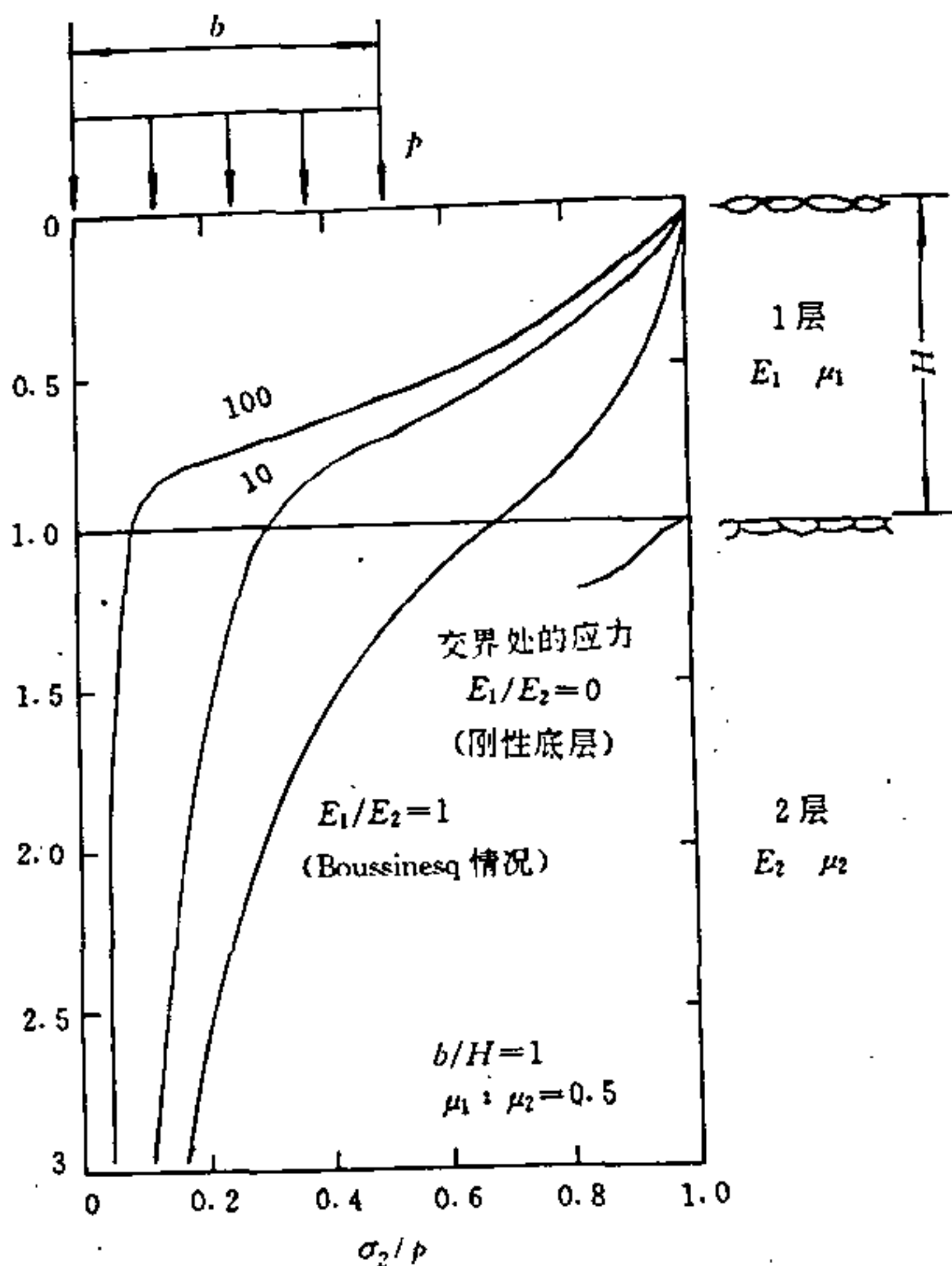
在双层地基中,采用帕克罗斯基的当量层法计算复合地基(双

层地基)在荷载作用下地基的附加应力。粉喷桩加固层换算成与下卧土层模量(E_s)相同的当量层厚度。其当量层厚度 h_1 为

$$h_1 = h \cdot \sqrt{E_{sp}/E_s}$$

式中 h ——粉喷桩加固层厚度;
 E_{sp} ——粉喷桩群体的复合模量。

双层地基中竖向应力 σ_z 的分布见说明图 3.2.6—3



说明图 3.2.6—3

3.2.7 粉喷桩平面布置一般成格栅状或连续墙,使桩、土组成一种土挡墙,用作基坑的侧向支护。利用水泥土的低透水性,设计成防渗帷幕。

3.2.8 设计者往往将粉喷桩理解为桩基,因此要求其像刚性桩那样,在桩长范围内强度一致,而且桩强度越高越好。这是违反复合地基基本假设的。我们认为粉喷桩的设计应使其符合附加应力传递的规律,上部桩身强度较高,下部桩身强度可稍低,不必强求桩身强度的一致性。

桩身强度亦不宜太高。应使桩身有一定的变形量,这样才能促使桩间土强度的发挥。否则就不存在复合地基,而成为桩基了。

4.1.1 施工技术资料的准备说明如下:

(1)施工场地的地质资料,施工前应有 7d 龄期的配方试验资料,以验证设计参数。

(2)测量资料用以控制粉喷桩的桩顶高程及桩长。

(3)详细了解设计意图、对施工的有关要求。

4.1.2 施工场地的准备说明如下:

(1)施工机械进出场地的道路及桥梁要求,必须满足 10t 加长卡车及 10t 吊机的走行要求。

(2)每台粉喷施工机械的总用电负荷为 50kW。

(3)地下、地表障碍物必须拆除。地下障碍物,例如大石块、树根、地下管线使粉喷钻机无法下钻,甚至损坏钻头。粉喷钻机井架高 16~20m,离开高压线的距离应符合安全规定。

(4)粉喷钻机在场地上走行的接地压力为 34kPa,当场地土质较差时,应铺设施工垫层。

4.1.3 加固料的进场、使用、保管必须设有专人负责,并应有防雨的料库。严禁受潮、结块、变质的加固料投入使用。

4.2.1 本条为一般的施工流程,其关键工序为钻机准确定位及调平;控制钻孔深度及喷粉、停粉时间、喷粉量及复搅长度。

4.2.2 工艺性试桩的目的是:

(1)提供满足设计喷粉量的各种操作参数。例如管道压力、灰罐压力、钻机提升速度、喷粉机转速等。

(2)验证加固料的搅拌均匀程度及成桩直径。

(3)了解下钻及提升的阻力情况,并采取相应的措施。

4.2.3 施工中必须注意下列几点:

(1)加固料从料罐到喷灰口有一定的时间延迟,严禁在没有喷粉的情况进行钻机提升作业。

(2)坚持逐桩检查加固料的喷入量,并严加控制。

(3)定时检查成桩直径及搅拌的均匀程度。

(4)粉喷桩桩长大于 10m 时,其底部喷粉阻力较大,应适当减慢钻机提升速度,以确保加固料的设计喷入量。

(5)钻头提升至地面以下 50cm 时,喷粉机即应停止喷粉,是为了防止污染环境。

5.1.1 粉喷桩属地下隐蔽工程,施工质量受人为影响的因素很多,对其事后检测亦较困难。因此,每道工序、每个操作环节都必须加强质量意识,把施工质量控制在全过程。

5.1.2 本条措施属自检范围。各施工机组应对成桩质量随时检查,及时发现问题,及时处理。开挖检查仅仅是浅部桩头部位,目测其成桩大致情况,例如成桩直径、搅拌均匀程度。

5.2.1 成桩 7d 内采用轻便触探(N_{10})方法检查桩身强度。触探点的位置一般取桩径的 1/4 处。当贯入 100mm 击数 N_{10} 小于 10 击的视为不合格。

5.2.2 采用该法可以比较直观地得出桩体强度及变形特性参数。在沪宁高速公路、沪嘉高速公路等地基处理工程中的大量实践证明,该法是一种较好的检测方法。

其缺点是检测深度受到限制。深度超过 2m 时,桩体挖掘比较困难。在瑞典利用大型取样筒可以把整个桩体取上来,目前国内尚没有该设备。

5.2.3 小应变动测法对粉喷桩进行桩长及桩体均匀性的检测是

可行的,但目前只能定性检查。在定量方面尚须进一步积累粉喷桩桩体材料与波速之间的相互关系,铁科院在这方面做了大量有益的工作。

5.2.4 在保证取岩芯质量的前提下,可采用钻探取岩芯。但该法取岩芯的工艺是关键,往往因水冲或干钻取的均为破碎岩芯,造成假象。

5.2.5 复合地基载荷试验是检测粉喷桩加固效果最可靠的方法之一。但往往因试验费用高,且检测深度受承压板宽度限制。故只在重要工程或有特殊要求的工程中采用。