

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB/T 50783 – 2012

复合地基技术规范

Technical code for composite foundation

2012 – 10 – 11 发布

2012 – 12 – 01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

复合地基技术规范

Technical code for composite foundation

GB/T 50783 - 2012

主编部门:浙江省住房和城乡建设厅

批准部门:中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期:2012年12月1日

中国计划出版社

2012 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 1486 号

住房和城乡建设部关于发布国家标准 《复合地基技术规范》的公告

现批准《复合地基技术规范》为国家标准,编号为GB/T 50783—2012,自 2012 年 12 月 1 日起实施。

本规范由我部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2012 年 10 月 11 日

前 言

本规范是根据住房和城乡建设部《关于印发〈2009年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标〔2009〕88号)的要求,由浙江大学和浙江中南建设集团有限公司会同有关单位共同编制完成的。

本规范在编制过程中,编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国内外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,最后经审查定稿。

本规范共分17章和1个附录。主要技术内容是:总则、术语和符号、基本规定、复合地基勘察要点、复合地基计算、深层搅拌桩复合地基、高压旋喷桩复合地基、灰土挤密桩复合地基、夯实水泥土桩复合地基、石灰桩复合地基、挤密砂石桩复合地基、置换砂石桩复合地基、强夯置换墩复合地基、刚性桩复合地基、长-短桩复合地基、桩网复合地基、复合地基监测与检测要点等。

本规范由住房和城乡建设部负责管理,由浙江大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送浙江大学《复合地基技术规范》管理组(地址:杭州余杭塘路388号浙江大学紫金港校区安中大楼B416室,邮政编码:310058),以供今后修订时参考。

本规范主编单位:浙江大学

浙江中南建设集团有限公司

本规范参编单位:同济大学

天津大学

长安大学

太原理工大学

湖南大学
福建省建筑科学研究院
中国铁道科学研究院深圳研究设计院
浙江省建筑设计研究院
中国水电顾问集团华东勘察设计研究院
广厦建设集团有限责任公司
中国铁建港航局集团有限公司
甘肃土木工程科学研究院
吉林省建筑设计院有限责任公司
湖北省建筑科学研究设计院
中国兵器工业北方勘察设计研究院
武汉谦诚建设集团有限公司
浙江省东阳第三建筑工程有限公司
现代建筑设计集团上海申元岩土工程
有限公司
河北省建筑科学研究院

本规范主要起草人员: 龚晓南 水伟厚 王长科 王占雷
白纯真 叶观宝 刘国楠 刘吉福
刘世明 刘兴旺 刘志宏 陈昌富
陈振建 陈 磊 李 斌 张雪婵
林炎飞 郑 刚 周 建 郭泽猛
施祖元 袁内镇 章建松 葛忻声
童林明 谢永利 滕文川

本规范主要审查人员: 张苏民 张 雁 钱力航 刘松玉
汪 稔 张建民 陆 新 陆耀忠
周质炎 高玉峰 倪士坎 徐一骐

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(4)
3	基本规定	(8)
4	复合地基勘察要点	(10)
5	复合地基计算	(12)
5.1	荷载计算	(12)
5.2	承载力计算	(13)
5.3	沉降计算	(16)
5.4	稳定分析	(19)
6	深层搅拌桩复合地基	(20)
6.1	一般规定	(20)
6.2	设计	(20)
6.3	施工	(22)
6.4	质量检验	(24)
7	高压旋喷桩复合地基	(25)
7.1	一般规定	(25)
7.2	设计	(25)
7.3	施工	(26)
7.4	质量检验	(26)
8	灰土挤密桩复合地基	(28)
8.1	一般规定	(28)
8.2	设计	(28)

8.3	施工	(30)
8.4	质量检验	(30)
9	夯实水泥土桩复合地基	(32)
9.1	一般规定	(32)
9.2	设计	(32)
9.3	施工	(33)
9.4	质量检验	(34)
10	石灰桩复合地基	(36)
10.1	一般规定	(36)
10.2	设计	(37)
10.3	施工	(38)
10.4	质量检验	(39)
11	挤密砂石桩复合地基	(40)
11.1	一般规定	(40)
11.2	设计	(40)
11.3	施工	(43)
11.4	质量检验	(44)
12	置换砂石桩复合地基	(45)
12.1	一般规定	(45)
12.2	设计	(45)
12.3	施工	(46)
12.4	质量检验	(47)
13	强夯置换墩复合地基	(48)
13.1	一般规定	(48)
13.2	设计	(48)
13.3	施工	(51)
13.4	质量检验	(52)
14	刚性桩复合地基	(54)
14.1	一般规定	(54)

14.2	设计	(54)
14.3	施工	(56)
14.4	质量检验	(57)
15	长-短桩复合地基	(58)
15.1	一般规定	(58)
15.2	设计	(58)
15.3	施工	(59)
15.4	质量检验	(59)
16	桩网复合地基	(61)
16.1	一般规定	(61)
16.2	设计	(61)
16.3	施工	(65)
16.4	质量检验	(66)
17	复合地基监测与检测要点	(68)
17.1	一般规定	(68)
17.2	监测	(68)
17.3	检测	(69)
附录 A	竖向抗压载荷试验要点	(71)
	本规范用词说明	(75)
	引用标准名录	(76)
	附:条文说明	(77)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(4)
3	Basic requirement	(8)
4	Geological exploration of composite foundation	(10)
5	Calculation of composite foundation	(12)
5.1	Load	(12)
5.2	Bearing capacity	(13)
5.3	Settlement	(16)
5.4	Stability analysis	(19)
6	Deep mixing column composite foundation	(20)
6.1	General requirement	(20)
6.2	Design	(20)
6.3	Construction	(22)
6.4	Inspection	(24)
7	Jet grouting column composite foundation	(25)
7.1	General requirement	(25)
7.2	Design	(25)
7.3	Construction	(26)
7.4	Inspection	(26)
8	Compacted lime-soil column composite foundation	(28)
8.1	General requirement	(28)

8.2	Design	(28)
8.3	Construction	(30)
8.4	Inspection	(30)
9	Compacted cement-soil column composite foundation	(32)
9.1	General requirement	(32)
9.2	Design	(32)
9.3	Construction	(33)
9.4	Inspection	(34)
10	Lime column composite foundation	(36)
10.1	General requirement	(36)
10.2	Design	(37)
10.3	Construction	(38)
10.4	Inspection	(39)
11	Compacted stone column composite foundation	(40)
11.1	General requirement	(40)
11.2	Design	(40)
11.3	Construction	(43)
11.4	Inspection	(44)
12	Replaced stone column composite foundation	(45)
12.1	General requirement	(45)
12.2	Design	(45)
12.3	Construction	(46)
12.4	Inspection	(47)
13	Dynamic-replaced stone column composite foundation	(48)
13.1	General requirement	(48)
13.2	Design	(48)
13.3	Construction	(51)

13.4	Inspection	(52)
14	Rigid pile composite foundation	(54)
14.1	General requirement	(54)
14.2	Design	(54)
14.3	Construction	(56)
14.4	Inspection	(57)
15	Long and short pile composite foundation	(58)
15.1	General requirement	(58)
15.2	Design	(58)
15.3	Construction	(59)
15.4	Inspection	(59)
16	Pile-reinforced earth composite foundation	(61)
16.1	General requirement	(61)
16.2	Design	(61)
16.3	Construction	(65)
16.4	Inspection	(66)
17	Key points of monitoring and testing	(68)
17.1	General requirement	(68)
17.2	Monitoring	(68)
17.3	Testing	(69)
Appendix A Plate loading test of composite foundation		(71)
Explanation of wording in this code		(75)
List of quoted standard		(76)
Addition,Explanation of provisions		(77)

1 总 则

1.0.1 为在复合地基设计、施工和质量检验中贯彻国家的技术经济政策,做到保证质量、保护环境、节约能源、安全适用、经济合理和技术先进,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于复合地基的设计、施工及质量检验。

1.0.3 复合地基的设计、施工及质量检验,应综合分析场地工程地质和水文地质条件、上部结构和基础形式、荷载特征、施工工艺、检验方法和环境条件等影响因素,注重概念设计,遵循因地制宜、就地取材、保护和节约资源的原则。

1.0.4 复合地基的设计、施工及质量检验,除应符合本规范外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 复合地基 composite foundation

天然地基在地基处理过程中,部分土体得到增强,或被置换,或在天然地基中设置加筋体,由天然地基土体和增强体两部分组成共同承担荷载的人工地基。

2.1.2 桩体复合地基 pile composite foundation

以桩作为地基中的竖向增强体并与地基土共同承担荷载的人工地基,又称竖向增强体复合地基。根据桩体材料特性的不同,可分为散体材料桩复合地基、柔性桩复合地基和刚性桩复合地基。

2.1.3 散体材料桩复合地基 granular column composite foundation

以砂桩、砂石桩和碎石桩等散体材料桩作为竖向增强体的复合地基。

2.1.4 柔性桩复合地基 flexible pile composite foundation

以柔性桩作为竖向增强体的复合地基。如水泥土桩、灰土桩和石灰桩等。

2.1.5 刚性桩复合地基 rigid pile composite foundation

以摩擦型刚性桩作为竖向增强体的复合地基。如钢筋混凝土桩、素混凝土桩、预应力管桩、大直径薄壁筒桩、水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)、二灰混凝土桩和钢管桩等。

2.1.6 深层搅拌桩复合地基 deep mixing column composite foundation

以深层搅拌桩作为竖向增强体的复合地基。

2.1.7 高压旋喷桩复合地基 jet grouting column composite

foundation

以高压旋喷桩作为竖向增强体的复合地基。

2.1.8 夯实水泥土桩复合地基 compacted cement-soil column composite foundation

将水泥和素土按一定比例拌和均匀,夯填到桩孔内形成具有一定强度的夯实水泥土桩,由夯实水泥土桩和被挤密的桩间土形成的复合地基。

2.1.9 灰土挤密桩复合地基 compacted lime-soil column composite foundation

由填夯形成的灰土桩和被挤密的桩间土形成的复合地基。

2.1.10 石灰桩复合地基 lime column composite foundation

以生石灰为主要黏结材料形成的石灰桩作为竖向增强体的复合地基。

2.1.11 挤密砂石桩复合地基 compacted stone column composite foundation

采用振冲法或振动沉管法等工法在地基中设置砂石桩,在成桩过程中桩间土被挤密或振密。由砂石桩和被挤密的桩间土形成的复合地基。

2.1.12 置换砂石桩复合地基 replaced stone column composite foundation

采用振冲法或振动沉管法等工法在饱和黏性土地基中设置砂石桩,在成桩过程中只有置换作用,桩间土未被挤密或振密。由砂石桩和桩间土形成的复合地基。

2.1.13 强夯置换墩复合地基 dynamic-replaced stone column composite foundation

将重锤提到高处使其自由下落形成夯坑,并不断向夯坑回填碎石等坚硬粗粒料,在地基中形成密实置换墩体。由墩体和墩间土形成的复合地基。

2.1.14 混凝土桩复合地基 concrete pile composite foundation

以摩擦型混凝土桩作为竖向增强体的复合地基。

2.1.15 钢筋混凝土桩复合地基 reinforced-concrete pile composite foundation

以摩擦型钢筋混凝土桩作为竖向增强体的复合地基。

2.1.16 长-短桩复合地基 long and short pile composite foundation

以长桩和短桩共同作为竖向增强体的复合地基。

2.1.17 桩网复合地基 pile-reinforced earth composite foundation

在刚性桩复合地基上铺设加筋垫层形成的人工地基。

2.1.18 复合地基置换率 replacement ratio of composite foundation

复合地基中桩体的横截面积与该桩体所承担的复合地基面积的比值。

2.1.19 荷载分担比 load distribution ratio

复合地基中桩体承担的荷载与桩间土承担的荷载的比值。

2.1.20 桩土应力比 stress ratio of pile to soil

复合地基中桩体上的平均竖向应力和桩间土上的平均竖向应力的比值。

2.2 符 号

2.2.1 几何参数:

a ——桩帽边长;

A ——单桩承担的地基处理面积;

A_p ——单桩(墩)截面积;

D ——基础埋置深度;

d ——桩(墩)体直径;

d_e ——单根桩分担的地基处理面积的等效圆直径;

h ——复合地基加固区的深度;

h_1 ——垫层厚度；
 h_2 ——垫层之上最小设计填土厚度；
 l ——桩长；
 l_i ——第 i 层土的厚度；
 m ——复合地基置换率；
 S ——桩间距；
 u_p ——桩(墩)的截面周长。

2.2.2 作用和作用效应：

E ——强夯置换法的单击夯击能；
 p_{cz} ——软弱下卧层顶面处地基土的自重压力值；
 p_k ——相应于荷载效应标准组合时，作用在复合地基上的平均压力值；
 p_{kmax} ——相应于荷载效应标准组合时，作用在基础底面边缘处复合地基上的最大压力值；
 p_z ——荷载效应标准组合时，软弱下卧层顶面处的附加压力值；
 Δp_i ——第 i 层土的平均附加应力增量；
 Q ——刚性桩桩顶附加荷载；
 Q_n^k ——桩侧负摩阻力引起的下拉荷载标准值；
 s ——复合地基沉降量；
 s_1 ——复合地基加固区复合土层压缩变形量；
 s_2 ——加固区下卧土层压缩变形量；
 T_t ——荷载效应标准组合时最危险滑动面上的总剪切力；
 T_s ——最危险滑动面上的总抗剪切力。

2.2.3 抗力和材料性能：

c_u ——饱和黏性土不排水抗剪强度；
 D_{r1} ——地基挤密后要求砂土达到的相对密实度；
 E_p ——桩体压缩模量；
 E_s ——桩间土压缩模量；

\bar{E}_s ——地基变形计算深度范围内土的压缩模量当量值；
 E_{sp} ——复合地基压缩模量；
 e_0 ——地基处理前土体的孔隙比；
 e_1 ——地基挤密后要求达到的孔隙比；
 e_{max} ——砂土的最大孔隙比；
 e_{min} ——砂土的最小孔隙比；
 f_a ——复合地基经深度修正后的承载力特征值；
 f_{az} ——软弱下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值；
 f_{cu} ——桩体抗压强度平均值；
 f_{sk} ——桩间土地基承载力特征值；
 f_{spk} ——复合地基承载力特征值；
 I_p ——塑性指数；
 q_p ——桩(墩)端土地基承载力特征值；
 q_{si} ——第 i 层土的桩(墩)侧摩阻力特征值；
 R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值；
 T ——加筋体抗拉强度设计值；
 σ_{ru} ——桩周土所能提供的最大侧限力；
 φ ——填土的摩擦角，黏性土取综合摩擦角；
 γ_{cm} ——桩帽之上填土的平均重度；
 γ_d ——土的干重度；
 γ_{dmax} ——击实试验确定的最大干重度；
 γ_m ——基础底面以上土的加权平均重度；
 γ_s ——桩间土体重度；
 γ_{sp} ——加固土层重度。

2.2.4 计算系数：

A_i ——第 i 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值；
 K ——安全系数；
 K_p ——被动土压力系数；

k_p ——复合地基中桩体实际竖向抗压承载力的修正系数；
 k_s ——复合地基中桩间土地基实际承载力的修正系数；
 n ——桩土应力比；
 λ_p ——桩体竖向抗压承载力发挥系数；
 λ_s ——桩间土地基承载力发挥系数；
 α ——桩端土地基承载力折减系数；
 β_p ——桩体竖向抗压承载力修正系数；
 β_s ——桩间土地基承载力修正系数；
 ψ_p ——刚性桩桩体压缩经验系数；
 ψ_s ——沉降计算经验系数；
 ψ_{s1} ——复合地基加固区复合土层压缩变形量计算经验系数；
 ψ_{s2} ——复合地基加固区下卧土层压缩变形量计算经验系数；
 ξ ——挤密砂石桩桩间距修正系数；
 η ——桩体强度折减系数；
 λ_c ——挤密桩孔底填料压实系数。

3 基本规定

3.0.1 复合地基设计前,应具备岩土工程勘察、上部结构及基础设计和场地环境等有关资料。

3.0.2 复合地基设计应根据上部结构对地基处理的要求、工程地质和水文地质条件、工期、地区经验和环境保护要求等,提出技术上可行的方案,经过技术经济比较,选用合理的复合地基形式。

3.0.3 复合地基设计应进行承载力和沉降计算,其中用于填土路堤和柔性面层堆场等工程的复合地基除应进行承载力和沉降计算外,尚应进行稳定分析;对位于坡地、岸边的复合地基均应进行稳定分析。

3.0.4 在复合地基设计中,应根据各类复合地基的荷载传递特性,保证复合地基中桩体和桩间土在荷载作用下能够共同承担荷载。

3.0.5 复合地基中由桩周土和桩端土提供的单桩竖向承载力和桩身承载力,均应符合设计要求。

3.0.6 复合地基应按上部结构、基础和地基共同作用的原理进行设计。

3.0.7 复合地基设计应符合下列规定:

1 宜根据建筑物的结构类型、荷载大小及使用要求,结合工程地质和水文地质条件、基础形式、施工条件、工期要求及环境条件进行综合分析,并进行技术经济比较,选用一种或几种可行的复合地基方案。

2 对大型和重要工程,应对已选用的复合地基方案,在有代表性的场地上进行相应的现场试验或试验性施工,并应检验设计参数和处理效果,通过分析比较选择和优化设计方案。

3 在施工过程中应进行监测,当监测结果未达到设计要求

时,应及时查明原因,并应修改设计或采用其他必要措施。

3.0.8 对工后沉降控制较严的复合地基应按沉降控制的原则进行设计。

3.0.9 复合地基上宜设置垫层。垫层设置范围、厚度和垫层材料,应根据复合地基的形式、桩土相对刚度和工程地质条件等因素确定。

3.0.10 复合地基应保证安全施工,施工中应重视环境效应,并应遵循信息化施工原则。

3.0.11 复合地基勘察和设计中应评价及处理场地中水、土等对所用钢材、混凝土和土工合成材料等的腐蚀性。

4 复合地基勘察要点

4.0.1 对根据初步勘察或附近场地地质资料和地基处理经验初步确定采用复合地基处理方案的场地,进一步勘察前应搜集附近场地的地质资料及地基处理经验,并结合工程特点和设计要求,明确勘察任务和重点。

4.0.2 控制性勘探孔的深度应满足复合地基沉降计算的要求;验算地基稳定性时,勘探孔布置和勘察孔深度应满足稳定性验算的需要。

4.0.3 拟采用复合地基的场地,其岩土工程勘察应包括下列内容:

1 查明场地地形、地貌和周边环境,并评价地基处理对附近建(构)筑物、管线等的影响。

2 查明勘探深度内土的种类、成因类型、沉积时代及土层空间分布。

3 查明大粒径块石、地下洞穴、植物残体、管线、障碍物等可能影响复合地基中增强体施工的因素,对地基处理工程有影响的多层含水层应分层测定其水位,软弱黏性土层宜根据地区土质,查明其灵敏度。

4 应查明拟采用的复合地基中增强体的侧摩阻力、端阻力及土的压缩曲线和压缩模量,对柔性桩(墩)应查明未经修正的桩端土地基承载力。对软黏土地基应查明土体的固结系数。

5 对需要进行稳定分析的复合地基应查明黏性土层土体的抗剪强度指标以及土体不排水抗剪强度。

6 复合地基中增强体施工对加固区土体挤密或扰动程度较高时,宜测定增强体施工后加固区土体的压缩性指标和抗剪强度指标。

7 路堤、堤坝、堆场工程的复合地基应查明填料或堆料的种类、重度、直接快剪强度指标等。

8 应根据拟采用复合地基中增强体类型按表 4.0.3 的要求查明地质参数。

表 4.0.3 不同增强体类型需查明的参数

序号	增强体类型	需查明的参数
1	深层搅拌桩	含水量, pH 值, 有机质含量, 地下水和土的腐蚀性, 黏性土的塑性指数和超固结度
2	高压旋喷桩	pH 值, 有机质含量, 地下水和土的腐蚀性, 黏性土的超固结度
3	灰土挤密桩	地下水位, 含水量, 饱和度, 干密度, 最大干密度, 最优含水量, 湿陷性黄土的湿陷性类别、(自重)湿陷系数、湿陷起始压力及场地湿陷性评价, 其他湿陷性土的湿陷程度、地基的湿陷等级
4	夯实水泥土桩	地下水位, 含水量, pH 值, 有机质含量, 地下水和土的腐蚀性, 用于湿陷性地基时参考灰土挤密桩
5	石灰桩	地下水位, 含水量, 塑性指数
6	挤密砂石桩	砂土、粉土的黏粒含量, 液化评价, 天然孔隙比, 最大孔隙比, 最小孔隙比, 标准贯入击数
7	置换砂石桩	软黏土的含水量, 不排水抗剪强度, 灵敏度
8	强夯置换墩	软黏土的含水量, 不排水抗剪强度, 灵敏度, 标准贯入或动力触探击数, 液化评价
9	刚性桩	地下水和土的腐蚀性, 不排水抗剪强度, 软黏土的超固结度, 灌注桩尚应测定软黏土的含水量

5 复合地基计算

5.1 荷载计算

5.1.1 复合地基设计时,所采用的荷载效应最不利组合与相应的抗力限值应符合下列规定:

1 按复合地基承载力确定复合地基承受荷载作用面积及埋深,传至复合地基面上的荷载效应应按正常使用极限状态下荷载效应的标准组合,相应的抗力应采用复合地基承载力特征值。

2 计算复合地基变形时,传至复合地基面上的荷载效应应按正常使用极限状态下荷载效应的准永久组合,不应计入风荷载和地震作用,相应的限值应为复合地基变形允许值。

3 复合地基稳定分析中,传至复合地基面上的荷载效应应按正常使用极限状态下荷载效应的标准组合,相应的抗力应用复合地基中增强体和地基土体抗剪强度标准值进行计算。

5.1.2 正常使用极限状态下,荷载效应组合的设计值应按下列规定采用:

1 对于标准组合,荷载效应组合的设计值(S_{k1})应按下式计算:

$$S_{k1} = S_{Gk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Qi k} \quad (5.1.2-1)$$

式中: S_{Gk} ——按永久荷载标准值计算的荷载效应值;

S_{Q1k} ——按起控制性作用的可变荷载标准值计算的荷载效应值;

$S_{Qi k}$ ——按其他可变荷载标准值计算的荷载效应值;

ψ_{ci} ——其他可变荷载的标准组合值系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定取值。

2 对于准永久组合,荷载效应组合的设计值(S_{k2})应按下式

计算：

$$S_{k2} = S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (5.1.2-2)$$

式中： S_{Qik} ——按可变荷载标准值计算的荷载效应值；

ψ_{qi} ——可变荷载的准永久组合值系数，按现行相关荷载规范取值。

5.1.3 作用在复合地基上的压力应符合下列规定：

1 轴心荷载作用时：

$$p_k \leq f_a \quad (5.1.3-1)$$

式中： p_k ——相应于荷载效应标准组合时，作用在复合地基上的平均压力值(kPa)；

f_a ——复合地基经深度修正后的承载力特征值(kPa)。

2 偏心荷载作用时，作用在复合地基上的压力除应符合公式 5.1.3-1 的要求外，尚应符合下式要求：

$$p_{kmax} \leq 1.2 f_a \quad (5.1.3-2)$$

式中： p_{kmax} ——相应于荷载效应标准组合时，作用在基础底面边缘处复合地基上的最大压力值(kPa)。

5.2 承载力计算

5.2.1 复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试验或综合桩体竖向抗压载荷试验和桩间土地基竖向抗压载荷试验，并结合工程实践经验综合确定。初步设计时，复合地基承载力特征值也可按下列公式估算：

$$f_{spk} = k_p \lambda_p m R_a / A_p + k_s \lambda_s (1-m) f_{sk} \quad (5.2.1-1)$$

$$f_{spk} = \beta_p m R_a / A_p + \beta_s (1-m) f_{sk} \quad (5.2.1-2)$$

$$\beta_p = k_p \lambda_p \quad (5.2.1-3)$$

$$\beta_s = k_s \lambda_s \quad (5.2.1-4)$$

$$m = d^2 / d_e^2 \quad (5.2.1-5)$$

式中： A_p ——单桩截面积(m^2)；

- R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值(kN);
 f_{sk} ——桩间土地基承载力特征值(kPa);
 m ——复合地基置换率;
 d ——桩体直径(m);
 d_e ——单根桩分担的地基处理面积的等效圆直径(m);
 k_p ——复合地基中桩体实际竖向抗压承载力的修正系数,与施工工艺、复合地基置换率、桩间土的工程性质、桩体类型等因素有关,宜按地区经验取值;
 k_s ——复合地基中桩间土地基实际承载力的修正系数,与桩间土的工程性质、施工工艺、桩体类型等因素有关,宜按地区经验取值;
 λ_p ——桩体竖向抗压承载力发挥系数,反映复合地基破坏时桩体竖向抗压承载力发挥度,宜按地区经验取值;
 λ_s ——桩间土地基承载力发挥系数,反映复合地基破坏时桩间地基承载力发挥度,宜按桩间土的工程性质、地区经验取值;
 β_p ——桩体竖向抗压承载力修正系数,宜综合复合地基中桩体实际竖向抗压承载力和复合地基破坏时桩体的竖向抗压承载力发挥度,结合工程经验取值;
 β_s ——桩间土地基承载力修正系数,宜综合复合地基中桩间土地基实际承载力和复合地基破坏时桩间土地基承载力发挥度,结合工程经验取值。

5.2.2 复合地基竖向增强体采用柔性桩和刚性桩时,柔性桩和刚性桩的竖向抗压承载力特征值应通过单桩竖向抗压荷载试验确定。初步设计时,由桩周土和桩端土的抗力可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值应按公式(5.2.2-1)计算;由桩体材料强度可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值应按公式(5.2.2-2)计算:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (5.2.2-1)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (5.2.2-2)$$

式中： R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

A_p ——单桩截面积(m^2)；

u_p ——桩的截面周长(m)；

n ——桩长范围内所划分的土层数；

q_{si} ——第 i 层土的桩侧摩阻力特征值(kPa)；

l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度(m)；

q_p ——桩端土地基承载力特征值(kPa)；

α ——桩端土地基承载力折减系数；

f_{cu} ——桩体抗压强度平均值(kPa)；

η ——桩体强度折减系数。

5.2.3 复合地基竖向增强体采用散体材料桩时，散体材料桩竖向抗压承载力特征值应通过单桩竖向抗压荷载试验确定。初步设计时，散体材料桩竖向抗压承载力特征值可按下列式估算：

$$R_a = \sigma_{ru} K_p A_p \quad (5.2.3)$$

式中： R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

A_p ——单桩截面积(m^2)；

σ_{ru} ——桩周土所能提供的最大侧限力(kPa)；

K_p ——被动土压力系数。

5.2.4 复合地基处理范围以下存在软弱下卧层时，下卧层承载力应按下列式验算：

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (5.2.4)$$

式中： p_z ——荷载效应标准组合时，软弱下卧层顶面处的附加压力值(kPa)；

p_{cz} ——软弱下卧层顶面处地基土的自重压力值(kPa)；

f_{az} ——软弱下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值(kPa)。

5.2.5 当采用长-短桩复合地基时，复合地基承载力特征值可按下列式计算：

$$f_{\text{spk}} = \beta_{\text{p1}} m_1 R_{\text{a1}} / A_{\text{p1}} + \beta_{\text{p2}} m_2 R_{\text{a2}} / A_{\text{p2}} + \beta_{\text{s}} (1 - m_1 - m_2) f_{\text{sk}} \quad (5.2.5)$$

式中： A_{p1} ——长桩的单桩截面积(m^2)；

A_{p2} ——短桩的单桩截面积(m^2)；

R_{a1} ——长桩单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

R_{a2} ——短桩单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

f_{sk} ——桩间土地基承载力特征值(kPa)；

m_1 ——长桩的面积置换率；

m_2 ——短桩的面积置换率；

β_{p1} ——长桩竖向抗压承载力修正系数，宜综合复合地基中长桩实际竖向抗压承载力和复合地基破坏时长桩竖向抗压承载力发挥度，结合工程经验取值；

β_{p2} ——短桩竖向抗压承载力修正系数，宜综合复合地基中短桩实际竖向抗压承载力和复合地基破坏时短桩竖向抗压承载力发挥度，结合工程经验取值；

β_{s} ——桩间土地基承载力修正系数，宜综合复合地基中桩间土地基实际承载力和复合地基破坏时桩间土地基承载力发挥度，结合工程经验取值。

5.2.6 复合地基承载力的基础宽度承载力修正系数应取 0；基础埋深的承载力修正系数应取 1.0。修正后的复合地基承载力特征值(f_{a})应按下式计算：

$$f_{\text{a}} = f_{\text{spk}} + \gamma_{\text{m}} (D - 0.5) \quad (5.2.6)$$

式中： f_{spk} ——复合地基承载力特征值(kPa)；

γ_{m} ——基础底面以上土的加权平均重度(kN/m^3)，地下水位以下取浮重度；

D ——基础埋置深度(m)，在填方整平地区，可自填土地面标高算起，但填土在上部结构施工完成后进行时，应从天然地面标高算起。

5.3 沉降计算

5.3.1 复合地基的沉降由垫层压缩变形量、加固区复合土层压缩

变形量(s_1)和加固区下卧土层压缩变形量(s_2)组成。当垫层压缩变形量小,且在施工期已基本完成时,可忽略不计。复合地基沉降可按式计算:

$$s = s_1 + s_2 \quad (5.3.1)$$

式中: s_1 ——复合地基加固区复合土层压缩变形量(mm);

s_2 ——加固区下卧土层压缩变形量(mm)。

5.3.2 复合地基加固区复合土层压缩变形量(s_1)宜根据复合地基类型分别按下列公式计算:

1 散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基,可按下列公式计算:

$$s_1 = \psi_{s1} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i l_i}{E_{spi}} \quad (5.3.2-1)$$

$$E_{spi} = mE_{pi} + (1-m)E_{si} \quad (5.3.2-2)$$

式中: Δp_i ——第 i 层土的平均附加应力增量(kPa);

l_i ——第 i 层土的厚度(mm);

m ——复合地基置换率;

ψ_{s1} ——复合地基加固区复合土层压缩变形量计算经验系数,根据复合地基类型、地区实测资料及经验确定;

E_{spi} ——第 i 层复合土体的压缩模量(kPa);

E_{pi} ——第 i 层桩体压缩模量(kPa);

E_{si} ——第 i 层桩间土压缩模量(kPa),宜按当地经验取值,如无经验,可取天然地基压缩模量。

2 刚性桩复合地基可按式计算:

$$s_1 = \psi_p \frac{Ql}{E_p A_p} \quad (5.3.2-3)$$

式中: Q ——刚性桩桩顶附加荷载(kN);

l ——刚性桩桩长(mm);

E_p ——桩体压缩模量(kPa);

A_p ——单桩截面积(m^2);

ψ_p ——刚性桩桩体压缩经验系数,宜综合考虑刚性桩长细比、桩端刺入量,根据地区实测资料及经验确定。

5.3.3 复合地基加固区下卧土层压缩变形量(s_2),可按下式计算:

$$s_2 = \psi_{s2} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{si}} l_i \quad (5.3.3)$$

式中: Δp_i ——第 i 层土的平均附加应力增量(kPa);

l_i ——第 i 层土的厚度(mm);

E_{si} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量(kPa);

ψ_{s2} ——复合地基加固区下卧土层压缩变形量计算经验系数,根据复合地基类型地区实测资料及经验确定。

5.3.4 作用在复合地基加固区下卧层顶部的附加压力宜根据复合地基类型采用不同方法。对散体材料桩复合地基宜采用压力扩散法计算,对刚性桩复合地基宜采用等效实体法计算,对柔性桩复合地基,可根据桩土模量比大小分别采用等效实体法或压力扩散法计算。

5.3.5 当采用长-短桩复合地基时,复合地基的沉降应由垫层压缩量、加固区复合土层压缩变形量(s_1)和加固区下卧土层压缩变形量(s_2)组成。加固区复合土层压缩变形量(s_1)应由短桩范围内复合土层压缩变形量(s_{11})和短桩以下只有长桩部分复合土层压缩变形量(s_{12})组成。垫层压缩量小,且在施工期已基本完成时,可忽略不计。长-短桩复合地基的沉降宜按下式计算:

$$s = s_{11} + s_{12} + s_2 \quad (5.3.5)$$

5.3.6 长-短复合地基中短桩范围内复合土层压缩变形量(s_{11})和短桩以下只有长桩部分复合土层压缩变形量(s_{12})可按本规范公式(5.3.2-1)计算,加固区下卧土层压缩变形量(s_2)可按本规范公式(5.3.3)计算。短桩范围内第 i 层复合土体的压缩模量(E_{spi}),可按下式计算:

$$E_{spi} = m_1 E_{p1i} + m_2 E_{p2i} + (1 - m_1 - m_2) E_{si} \quad (5.3.6)$$

式中: E_{p1i} ——第 i 层长桩桩体压缩模量(kPa);

- E_{p2i} ——第 i 层短桩桩体压缩模量(kPa)；
 m_1 ——长桩的面积置换率；
 m_2 ——短桩的面积置换率；
 E_{si} ——第 i 层桩间土压缩模量(kPa)，宜按当地经验取值，
无经验时，可取天然地基压缩模量。

5.4 稳定分析

5.4.1 在复合地基稳定分析中，所采用的稳定分析方法、计算参数、计算参数的测定方法和稳定安全系数取值应相互匹配。

5.4.2 复合地基稳定分析可采用圆弧滑动总应力法进行分析。稳定安全系数应按下式计算：

$$K = \frac{T_s}{T_t} \quad (5.4.2)$$

式中： T_t ——荷载效应标准组合时最危险滑动面上的总剪切力(kN)；

T_s ——最危险滑动面上的总抗剪切力(kN)；

K ——安全系数。

5.4.3 复合地基竖向增强体应深入设计要求安全度对应的危险滑动面下至少 2m。

5.4.4 复合地基稳定分析方法宜根据复合地基类型合理选用。

6 深层搅拌桩复合地基

6.1 一般规定

6.1.1 深层搅拌桩可采用喷浆搅拌法或喷粉搅拌法施工。深层搅拌桩复合地基可用于处理正常固结的淤泥与淤泥质土、素填土、软塑~可塑黏性土、松散~中密粉细砂、稍密~中密粉土、松散~稍密中粗砂及黄土等地基。当地基土的天然含水量小于 30% 或黄土含水量小于 25% 时,不宜采用喷粉搅拌法。

含大孤石或障碍物较多且不易清除的杂填土、硬塑及坚硬的黏性土、密实的砂土,以及地下水呈流动状态的土层,不宜采用深层搅拌桩复合地基。

6.1.2 深层搅拌桩复合地基用于处理泥炭土、有机质含量较高的土、塑性指数(I_p)大于 25 的黏土、地下水的 pH 值小于 4 和地下水具有腐蚀性,以及无工程经验的地区时,应通过现场试验确定其适用性。

6.1.3 深层搅拌桩可与堆载预压法及刚性桩联合应用。

6.1.4 确定处理方案前应搜集拟处理区域内详尽的岩土工程资料。

6.1.5 设计前应进行拟处理土的室内配比试验,应针对现场拟处理土层的性质,选择固化剂和外掺剂类型及其掺量。固化剂为水泥的水泥土强度宜取 90d 龄期试块的立方体抗压强度平均值。

6.2 设计

6.2.1 固化剂宜选用强度等级为 42.5 级及以上的水泥或其他类型的固化剂。固化剂掺入比应根据设计要求的固化土强度经室内配比试验确定。喷浆搅拌法的水泥浆水灰比应根据施工时的可喷

性和不同的施工机械合理选用。外掺剂可根据设计要求和土质条件选用具有早强、缓凝、减水以及节省水泥等作用的材料,且应避免污染环境。

6.2.2 深层搅拌桩的长度应根据上部结构对承载力和变形的要求确定,并宜穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层。为提高抗滑稳定性而设置的搅拌桩,其桩长应深入加固后最危险滑弧以下至少 2m。

设计桩长应根据施工机械的能力确定,喷浆搅拌法的加固深度不宜大于 20m;喷粉搅拌法的加固深度不宜大于 15m。搅拌桩的桩径不应小于 500mm。

6.2.3 深层搅拌桩复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试验或根据综合桩体竖向抗压载荷试验和桩间土地基竖向抗压载荷试验测定。初步设计时也可按本规范公式 5.2.1-2 估算,其中 β_p 宜按当地经验取值,无经验时可取 0.85~1.00,设置垫层时应取低值; β_s 宜按当地经验取值,当桩端土未经修正的承载力特征值大于桩周土地基承载力特征值的平均值时,可取 0.10~0.40,差值大时应取低值;当桩端土未经修正的承载力特征值小于或等于桩周土地基承载力特征值的平均值时,可取 0.50~0.95,差值大时或填土路堤和柔性面层堆场及设置垫层时应取高值;处理后桩间土地基承载力特征值(f_{sk}),可取天然地基承载力特征值。

6.2.4 单桩竖向抗压承载力特征值应通过现场竖向抗压载荷试验确定。初步设计时也可按本规范公式(5.2.2-1)和公式(5.2.2-2)进行估算,并应取其中较小值,其中 f_{cu} 应为 90d 龄期的水泥土立方体试块抗压强度平均值;喷粉深层搅拌法 η 可取 0.20~0.30,喷浆深层搅拌法 η 可取 0.25~0.33。

6.2.5 采用深层搅拌桩复合地基宜在基础和复合地基之间设置垫层。垫层厚度可取 150mm~300mm。垫层材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等,最大粒径不宜大于 20mm。填土路堤和柔性面层

堆场下垫层中宜设置一层或多层水平加筋体。

6.2.6 深层搅拌桩复合地基中的桩长超过 10m 时,可采用变掺量设计。

6.2.7 深层搅拌桩的平面布置可根据上部结构特点及对地基承载力和变形的要求,采用正方形、等边三角形等布桩形式。桩可只在基础平面范围内布置,独立基础下的桩数不宜少于 3 根。

6.2.8 当深层搅拌桩处理深度以下存在软弱下卧层时,应按本规范第 5.2.4 条的有关规定进行下卧层承载力验算。

6.2.9 深层搅拌桩复合地基沉降应按本规范第 5.3.1 条~第 5.3.4 条的有关规定进行计算。计算采用的附加应力应从基础底面起算。复合土层的压缩模量可按本规范公式(5.3.2-2)计算,其中 E_p 可取桩体水泥石土强度的 100 倍~200 倍,桩较短或桩体强度较低者可取低值,桩较长或桩体强度较高者可取高值。

6.3 施 工

6.3.1 深层搅拌桩施工现场应预先平整,应清除地上和地下的障碍物。遇有明浜、池塘及洼地时,应抽水和清淤,应回填黏性土料并应压实,不得回填杂填土或生活垃圾。

6.3.2 深层搅拌桩施工前应根据设计进行工艺性试桩,数量不得少于 2 根。当桩周为成层土时,对于软弱土层宜增加搅拌次数或增加水泥掺量。

6.3.3 深层搅拌桩的喷浆(粉)量和搅拌深度应采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动记录。

6.3.4 搅拌头翼片的枚数、宽度与搅拌轴的垂直夹角,搅拌头的回转数,搅拌头的提升速度应相互匹配。加固深度范围内土体任何一点均应搅拌 20 次以上。搅拌头的直径应定期复核检查,其磨损量不得大于 10mm。

6.3.5 成桩应采用重复搅拌工艺,全桩长上下应至少重复搅拌一次。

6.3.6 深层搅拌桩施工时,停浆(灰)面应高于桩顶设计标高

300mm~500mm。在开挖基础时,应将搅拌桩顶端施工质量较差的桩段用人工挖除。

6.3.7 施工中应保持搅拌桩机底盘水平和导向架竖直,搅拌桩垂直度的允许偏差为1%;桩位的允许偏差为50mm;成桩直径和桩长不得小于设计值。

6.3.8 深层搅拌桩施工应根据喷浆搅拌法和喷粉搅拌法施工设备的不同,按下列步骤进行:

- 1 深层搅拌机械就位、调平。
- 2 预搅下沉至设计加固深度。
- 3 边喷浆(粉)、边搅拌提升直至预定的停浆(灰)面。
- 4 重复搅拌下沉至设计加固深度。
- 5 根据设计要求,喷浆(粉)或仅搅拌提升直至预定的停浆(灰)面。
- 6 关闭搅拌机械。

I 喷浆搅拌法

6.3.9 施工前应确定灰浆泵输浆量、灰浆经输浆管到达搅拌机喷浆口的时间和起吊设备提升速度等施工参数,宜用流量泵控制输浆速度,注浆泵出口压力应保持在0.4MPa~0.6MPa,并使搅拌提升速度与输浆速度同步,同时应根据设计要求通过工艺性成桩试验确定施工工艺。

6.3.10 所使用的水泥应过筛,制备好的浆液不得离析,泵送应连续。拌制水泥浆液的罐数、水泥和外掺剂用量以及泵送浆液的时间等,应有专人记录。

6.3.11 搅拌机喷浆提升的速度和次数应符合施工工艺的要求,并应有专人记录。

6.3.12 当水泥浆液到达出浆口后,应喷浆搅拌30s,应在水泥浆与桩端土充分搅拌后,再开始提升搅拌头。

II 喷粉搅拌法

6.3.13 喷粉施工前应仔细检查搅拌机械、供粉泵、送气(粉)管

路、接头和阀门的密封性、可靠性。送气(粉)管路的长度不宜大于60m。

6.3.14 搅拌头每旋转一周,其提升高度不得超过16mm。

6.3.15 成桩过程中因故停止喷粉,应将搅拌头下沉至停灰面以下1m处,并应待恢复喷粉时再喷粉搅拌提升。

6.3.16 需在地基土天然含水量小于30%土层中喷粉成桩时,应采用地面注水搅拌工艺。

6.4 质量检验

6.4.1 深层搅拌桩施工过程中应随时检查施工记录和计量记录,并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定,应对固化剂用量、桩长、搅拌头转数、提升速度、复搅次数、复搅深度以及停浆处理方法等进行重点检查。

6.4.2 深层搅拌桩的施工质量检验数量应符合设计要求,并应符合下列规定:

1 成桩7d后,应采用浅部开挖桩头,深度宜超过停浆(灰)面下0.5m,应目测检查搅拌的均匀性,并应量测成桩直径。

2 成桩28d后,应用双管单动取样器钻取芯样做抗压强度检验和桩体标准贯入检验。

3 成桩28d后,可按本规范附录A的有关规定进行单桩竖向抗压载荷试验。

6.4.3 深层搅拌桩复合地基工程验收时,应按本规范附录A的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。载荷试验应在桩体强度满足试验荷载条件,并宜在成桩28d后进行。检验数量应符合设计要求。

6.4.4 基槽开挖后,应检验桩位、桩数与桩顶质量,不符合设计要求时,应采取有效补强措施。

7 高压旋喷桩复合地基

7.1 一般规定

7.1.1 高压旋喷桩复合地基适用于处理软塑~可塑的黏性土、粉土、砂土、黄土、素填土和碎石土等地基。当土中含有较多大直径块石、大量植物根茎或有机质含量较高时,不宜采用。

7.1.2 高压旋喷桩复合地基用于既有建筑地基加固时,应搜集既有建筑的历史和现状资料、邻近建筑物和地下埋设物等资料。设计时应采取避免桩体水泥土未固化时强度降低对既有建筑物的不良影响措施。

7.1.3 高压旋喷桩可采用单管法、双管法和三管法施工。

7.1.4 高压旋喷桩复合地基方案确定后,应结合工程情况进行现场试验、试验性施工或根据工程经验确定施工参数及工艺。

7.2 设计

7.2.1 高压旋喷形成的加固体强度和范围,应通过现场试验确定。当无现场试验资料时,亦可按相似土质条件的工程经验确定。

7.2.2 旋喷桩主要用于承受竖向荷载时,其平面布置可根据上部结构和基础特点确定。独立基础下的桩数不宜少于3根。

7.2.3 高压旋喷桩复合地基承载力特征值应通过现场复合地基竖向抗压载荷试验确定。初步设计时也可按本规范公式(5.2.1-2)估算,其中 β_p 可取1.0, β_s 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_s 可取0.1~0.5,承载力较低时应取低值。

7.2.4 高压旋喷桩单桩竖向抗压承载力特征值应通过现场载荷试验确定。初步设计时也可按本规范公式(5.2.2-1)和公式(5.2.2-2)进行估算,并应取其中较小值,其中 f_{cu} 应为28d龄期的水泥土立方

体试块抗压强度平均值; η 可取 0.33。

7.2.5 采用高压旋喷桩复合地基宜在基础和复合地基之间设置垫层。垫层厚度可取 100mm~300mm,其材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等,最大粒径不宜大于 20mm。填土路堤和柔性面层堆场下垫层中宜设置一层或多层水平加筋体。

7.2.6 当高压旋喷桩复合地基处理深度以下存在软弱下卧层时,应按本规范第 5.2.4 条的有关规定进行下卧层承载力验算。

7.2.7 高压旋喷桩复合地基沉降应按本规范第 5.3.1 条~第 5.3.4 条的有关规定进行计算。计算采用的附加应力应从基础底面起算。

7.3 施 工

7.3.1 施工前应根据现场环境和地下埋设物位置等情况,复核设计孔位。

7.3.2 高压旋喷桩复合地基的注浆材料应采用水泥,可根据需要加入适量的外加剂和掺和料。

7.3.3 高压旋喷水泥土桩施工应按下列步骤进行:

1 高压旋喷机械就位、调平。

2 贯入喷射管至设计加固深度。

3 喷射注浆,边喷射、边提升,根据设计要求,喷射提升直至预定的停喷面。

4 拔管及冲洗,移位或关闭施工机械。

7.3.4 对需要局部扩大加固范围或提高强度的部位,可采取复喷措施。处理既有建筑物地基时,应采取速凝浆液、跳孔喷射等措施。

7.4 质 量 检 验

7.4.1 高压旋喷桩施工过程中应随时检查施工记录和计量记录,并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。

7.4.2 高压旋喷桩复合地基检测与检验可根据工程要求和当地

经验采用开挖检查、取芯、标准贯入、载荷试验等方法进行检验,并结合工程测试及观测资料综合评价加固效果。

7.4.3 检验点布置应符合下列规定:

- 1 有代表性的桩位。
- 2 施工过程中出现异常情况的部位。
- 3 地基情况复杂,可能对高压喷射注浆质量产生影响的部位。

7.4.4 高压旋喷桩复合地基工程验收时,应按本规范附录 A 的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。载荷试验应在桩体强度满足试验荷载条件,并宜在成桩 28d 后进行。检验数量应符合设计要求。

8 灰土挤密桩复合地基

8.1 一般规定

8.1.1 灰土挤密桩复合地基适用于填土、粉土、粉质黏土、湿陷性黄土和非湿陷性黄土、黏土以及其他可进行挤密处理的地基。

8.1.2 采用灰土挤密桩处理地基时,应使地基土的含水量达到或接近最优含水量。地基土的含水量小于 12% 时,应先对地基土进行增湿,再进行施工。当地基土的含水量大于 22% 或含有不可穿越的砂砾夹层时,不宜采用。

8.1.3 对于缺乏灰土挤密法地基处理经验的地区,应在地基处理前,选择有代表性的场地进行现场试验,并根据试验结果确定设计参数和施工工艺,再进行施工。

8.1.4 成孔挤密施工,可采用沉管、冲击、爆扩等方法。当采用预钻孔夯扩挤密时,应加强施工控制,并确保夯扩直径达到设计要求。

8.1.5 孔内填料宜采用素土或灰土,也可采用水泥土等强度较高的填料。对非湿陷性地基,也可采用建筑垃圾、砂砾等作为填料。

8.2 设计

8.2.1 挤密桩孔宜按正三角形布置,孔距可取桩径的 2.0 倍~2.5 倍,也可按下式计算:

$$S=0.95\sqrt{\frac{\bar{D}_e\gamma_{d\max}}{\bar{D}_e\gamma_{d\max}-\gamma_{dm}}}d \quad (8.2.1)$$

式中: S ——灰土挤密桩桩间距(m);

d ——灰土挤密桩体直径(m),宜为 0.35m~0.45m;

γ_{dm} ——地基挤密前各层土的平均干重度(kN/m³);

γ_{dmax} ——击实试验确定的最大干重度(kN/m^3)；

\bar{D}_c ——成孔后,3个孔之间土的平均挤密系数。

8.2.2 灰土挤密桩桩间土最小挤密系数(D_{emin})应满足承载力及变形的要求,对湿陷性土还应满足消除湿陷性的要求。桩间土最小挤密系数(D_{emin})宜根据当地的建筑经验确定,无建筑经验时,可根据地基处理的设计技术要求,经试验确定,也可按下式计算:

$$D_{\text{emin}} = \frac{\gamma_{\text{d0}}}{\gamma_{\text{dmax}}} \quad (8.2.2)$$

式中: D_{emin} ——桩间土最小挤密系数;

γ_{d0} ——挤密填孔后,3个孔形心点部位的干重度(kN/m^3)。

8.2.3 桩孔间距较大且超过3倍的桩孔直径时,设计不宜计入桩间土的挤密影响,宜按置换率设计,或进行单桩复合地基试验确定。

8.2.4 挤密孔的深度应大于压缩层厚度,且不应小于4m。建筑工程基础外的处理宽度应大于或等于处理深度的1/2;填土路基和柔性面层堆场荷载作用面外的处理宽度应大于或等于处理深度的1/3。

8.2.5 当挤密处理深度不超过12m时,不宜采用预钻孔,挤密孔的直径宜为0.35m~0.45m。当挤密孔深度超过12m时,宜在下部采用预钻孔,成孔直径宜为0.30m以下;也可全部采用预钻孔,孔径不宜大于0.40m,应在填料回填过程中进行孔内强夯挤密,挤密后填料孔直径应达到0.60m以上。

8.2.6 灰土挤密桩复合地基承载力应通过复合地基竖向抗压载荷试验确定。初步设计时,复合地基承载力特征值也可按本规范公式(5.2.1-1)或公式(5.2.1-2)估算。

8.2.7 灰土挤密桩复合地基处理范围以下存在软弱下卧层时,应按本规范第5.2.4条的有关规定进行下卧层承载力验算。

8.2.8 灰土挤密桩复合地基沉降,应按本规范第5.3.1条~第5.3.4条的有关规定进行计算。

8.2.9 灰土的配合比宜采用 3 : 7 或 2 : 8(体积比),含水量应控制在最优含量 $\pm 2\%$ 以内,石灰应为熟石灰。

8.2.10 当地基承载力特征值以及变形不满足要求时,应在灰土桩中加入强度较高的材料,不宜用缩小桩孔间距的方法提高承载力。在非湿陷性地区当承载力要求较小,挤密桩孔间距较大时,则不宜计入桩间土的挤密作用。

8.3 施 工

8.3.1 灰土挤密桩施工应间隔分批进行,桩孔完成后应及时夯填。进行地基局部处理时,应由外向里施工。

8.3.2 挤密桩孔底在填料前应夯实,填料时宜分层回填夯实,其压实系数(λ_c)不应小于 0.97。

8.3.3 填料用素土时,宜采用纯净黄土,也可选用黏土、粉质黏土等,土中不得含有有机质,不宜采用塑性指数大于 17 的黏土,不得使用耕土或杂填土,冬季施工时严禁使用冻土。

8.3.4 灰土挤密桩施工应预留 0.5m~0.7m 的松动层,冬季在零度以下施工时,宜增大预留松动层厚度。

8.3.5 夯填施工前,应进行不少于 3 根桩的夯填试验,并应确定合理的填料数量及夯击能量。

8.3.6 灰土挤密桩复合地基施工完成后,应挖除上部扰动层,基底下应设置厚度不小于 0.5m 的灰土或土垫层,湿陷性土不宜采用透水材料作垫层。

8.3.7 桩孔中心点位置的允许偏差为桩距设计值的 5%,桩孔垂直度允许偏差为 1.5%。

8.4 质 量 检 验

8.4.1 灰土挤密桩施工过程中应随时检查施工记录和计量记录,并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。

8.4.2 施工人员应及时抽样检查孔内填料的夯实质量,检查数量

应由设计单位根据工程情况提出具体要求。对重要工程尚应分层取样测定挤密土及孔内填料的湿陷性及压缩性。

8.4.3 灰土挤密桩复合地基工程验收时,应按本规范附录 A 的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。检验数量应符合设计要求。

8.4.4 在湿陷性土地区,对特别重要的项目尚应进行现场浸水载荷试验。

9 夯实水泥土桩复合地基

9.1 一般规定

9.1.1 夯实水泥土桩复合地基适用于处理深度不超过 10m,在地下水位以上为黏性土、粉土、粉细砂、素填土、杂填土等适合成桩并能挤密的地基。

9.1.2 夯实水泥土桩可采用沉管、冲击等挤土成孔法施工,也可采用洛阳铲、螺旋钻等非挤土成孔法施工。

9.1.3 夯实水泥土桩复合地基设计前,可根据工程经验,选择水泥品种、强度等级和水泥土配合比,并可初步确定夯实水泥土材料的抗压强度设计值。缺乏经验时,应预先进行配合比试验。

9.2 设计

9.2.1 夯实水泥土桩复合地基的处理深度应根据工程特点、设计要求和地质条件综合确定。初步设计时,处理深度应满足地基主要受力层天然地基承载力计算的需要。

9.2.2 确定夯实水泥土桩桩端持力层时,除应符合地基处理设计计算要求外,尚应符合下列规定:

- 1 桩端持力层厚度不宜小于 1.0m。
- 2 应无明显软弱下卧层。
- 3 桩端全断面进入持力层的深度,对碎石土、砂土不宜小于桩径的 0.5 倍,对粉土、黏性土不宜小于桩径的 2 倍。
- 4 当进入持力层的深度无法满足要求时,桩端阻力特征值设计取值应折减。

9.2.3 夯实水泥土桩的平面布置,宜综合考虑基础形状、尺寸和上部结构荷载传递特点,并应均匀布置。

夯实水泥土桩可布置在基础底面范围内,当地层较软弱、均匀性较差或工程有特殊要求时,可在基础外设置护桩。

9.2.4 夯实水泥土桩桩径宜根据施工工具和施工方法确定,宜取300mm~600mm,桩中心距不宜大于桩径的5倍。

9.2.5 夯实水泥土桩的桩顶宜铺设厚度为100mm~300mm的垫层,垫层材料宜选用最大粒径不大于20mm的中砂、粗砂、石屑、级配砂石等。

9.2.6 夯实水泥土桩复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试验确定,初步设计时,也可按本规范公式(5.2.1-2)估算。其中 β_p 可取1.00, β_s 采用非挤土成孔时可取0.80~1.00, β_s 采用挤土成孔时可取0.95~1.10。

9.2.7 夯实水泥土桩单桩竖向抗压承载力特征值应通过单桩竖向抗压载荷试验确定,初步设计时也可按本规范公式(5.2.2-1)和公式(5.2.2-2)进行估算,并应取其中较小值。

9.2.8 夯实水泥土桩复合地基的沉降应按本规范第5.3.1条~第5.3.4条的有关规定进行计算。沉降计算经验系数应根据地区沉降观测资料及经验确定,无地区经验时可采用现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007规定的数值。其中 E_{spi} 宜按当地经验取值,也可按本规范公式(5.3.2-2)估算。

9.2.9 夯实水泥土材料的配合比应根据工程要求、土料性质、施工工艺及采用的水泥品种、强度等级,由配合比试验确定,水泥与土的体积比宜取1:5~1:8。

9.3 施 工

9.3.1 施工前应根据设计要求,进行工艺性试桩,数量不得少于2根。

9.3.2 水泥应符合设计要求的种类及规格。

9.3.3 土料宜采用黏性土、粉土、粉细砂或渣土,土料中的有机物质含量不得超过5%,不得含有冻土或膨胀土,使用前应过孔径为

10mm~20mm 的筛。

9.3.4 水泥石混合料配合比应符合设计要求,含水量与最优含水量的允许偏差为 $\pm 2\%$,并应采取搅拌均匀的措施。

当用机械搅拌时,搅拌时间不应少于 1min,当用人工搅拌时,拌和次数不应少于 3 遍。混合料拌和后应在 2h 内用于成桩。

9.3.5 成桩宜采用桩体夯实机,宜选用梨形或锤底为盘形的夯锤,锤体直径与桩孔直径之比宜取 0.7~0.8,锤体质量应大于 120kg,夯锤每次提升高度,不应低于 700mm。

9.3.6 夯实水泥石桩施工步骤应为成孔—分层夯实—封顶—夯实。成孔完成后,向孔内填料前孔底应夯实。填料频率与落锤频率应协调一致,并应均匀填料,严禁突击填料。每回填料厚度应根据夯锤质量经现场夯填试验确定,桩体的压实系数(λ_c)不应小于 0.93。

9.3.7 桩位允许偏差,对满堂布桩为桩径的 0.4 倍,条基布桩为桩径的 0.25 倍;桩孔垂直度允许偏差为 1.5%;桩径的允许偏差为 $\pm 20\text{mm}$;桩孔深度不应小于设计深度。

9.3.8 施工时桩顶应高出桩顶设计标高 100mm~200mm,垫层施工前应将高于设计标高的桩头凿除,桩顶面应水平、完整。

9.3.9 成孔及成桩质量监测应设专人负责,并应做好成孔、成桩记录,发现问题应及时进行处理。

9.3.10 桩顶垫层材料不得含有植物残体、垃圾等杂物,铺设厚度应均匀,铺平后应振实或夯实,夯填度不应大于 0.9。

9.4 质量检验

9.4.1 夯实水泥石桩施工过程中应随时检查施工记录和计量记录,并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。

9.4.2 桩体夯实质量的检查,应在成桩过程中随时随机抽取,检验数量应由设计单位根据工程情况提出具体要求。

密实度的检测可在夯实水泥石桩桩体内取样测定干密度或以

轻型圆锥动力触探击数(N_{10})判断桩体夯实质量。

9.4.3 夯实水泥土桩复合地基工程验收时,复合地基承载力检验应采用单桩复合地基竖向抗压载荷试验。对重要或大型工程,尚应进行多桩复合地基竖向抗压载荷试验。

9.4.4 复合地基竖向抗压载荷试验应符合本规范附录 A 的有关规定。

10 石灰桩复合地基

10.1 一般规定

10.1.1 石灰桩复合地基适用于处理饱和黏性土、淤泥、淤泥质土、素填土和杂填土等土层；用于地下水位以上的土层时，应根据土层天然含水量增加掺和料的含水量并减少生石灰用量，也可采取土层浸水等措施。

10.1.2 对重要工程或缺少经验的地区，施工前应进行桩体材料配比、成桩工艺及复合地基竖向抗压载荷试验。桩体材料配合比试验应在现场地基土中进行。

10.1.3 竖向承载的石灰桩复合地基承载力特征值取值不宜大于160kPa，当土质较好并采取措施保证桩体强度时，经试验后可适当提高。

10.1.4 石灰桩复合地基与基础间可不设垫层，当地基需要排水通道时，基础下可设置厚度为200mm~300mm的垫层，填土路基及柔性面层堆场下垫层宜加厚。垫层宜采用中粗砂、级配砂石等。垫层内可设置土工格栅或土工布。

10.1.5 深厚软弱土中进行浅层处理的石灰桩复合地基沉降及下卧层承载力计算，可计入加固层的减载效应，当采用粉煤灰、炉渣掺和料时，石灰桩体的饱和重度可取 13kN/m^3 。加固土层重度可按式计算：

$$\gamma_{\text{sp}} = 13m + (1 - m)\gamma_s \quad (10.1.5)$$

式中： γ_{sp} ——加固土层重度(kN/m^3)；

γ_s ——桩间土体重度(kN/m^3)；

m ——复合地基置换率。

10.2 设 计

10.2.1 石灰桩的固化剂应采用生石灰,掺和料宜采用粉煤灰、火山灰、炉渣等工业废料。生石灰与掺和料的配合比宜根据地质情况确定,生石灰与掺和料的体积比可选用 1:1 或 1:2,对于淤泥、淤泥质土等软土宜增加生石灰用量,桩顶附近生石灰用量不宜过大。当掺石膏和水泥时,掺和量应为生石灰用量的 3%~10%。

10.2.2 石灰桩成桩时,宜用土封口,封口高度不宜小于 500mm,封口材料应夯实,封口标高应略高于原地面。石灰桩桩顶施工标高应高出设计桩顶标高 100mm 以上。

10.2.3 石灰桩成孔直径应根据设计要求及所选用的成孔方法确定,宜为 300mm~400mm;可按等边三角形或矩形布桩;桩中心距可取成孔直径的 2 倍~3 倍。石灰桩可仅布置在基础底面下,当基底土的承载力特征值小于 70kPa 时,宜在基础以外布置 1 排~2 排围扩桩。

10.2.4 采用人工洛阳铲成孔时,桩长不宜大于 6m;采用机械成孔管外投料时,桩长不宜大于 8m;螺旋钻、机动洛阳铲成孔及管内投料时,可适当增加桩长。

10.2.5 石灰桩桩端宜选在承载力较高的土层中。在深厚的软弱地基中,当石灰桩桩端未落在承载力较高的土层中时,应减少上部结构重心相对于基础形心的偏心,并应加强上部结构及基础的刚度。

10.2.6 石灰桩的深度应根据岩土工程勘察资料及上部结构设计要求确定。下卧层承载力及地基的变形,应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定验算。

10.2.7 石灰桩复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试验或综合桩体竖向抗压载荷试验和桩间土地基竖向抗压载荷试验,并结合工程实践经验综合确定,试验数量不应少于 3 点。初步设计时,复合地基承载力特征值也可按本规范公式(5.2.1-2)

估算,其中 β_p 和 β_s 均应取1.0;处理后桩间土地基承载力特征值可取天然地基承载力特征值的1.05倍~1.20倍,土体软弱时应取高值;计算桩截面面积时直径应乘以1.0~1.2的经验系数,土体软弱时应取高值;单桩竖向抗压承载力特征值取桩体抗压比例界限对应的荷载值,应由单桩竖向抗压荷载试验确定,初步设计时可取350kPa~500kPa,土体软弱时应取低值。

10.2.8 处理后地基沉降应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的有关规定进行计算。沉降计算经验系数(ψ_s)可按地区沉降观测资料及经验确定。

石灰桩复合土层的压缩模量宜通过桩体及桩间土压缩试验确定,初步设计时可按本规范公式(5.3.2-2)计算。桩间土压缩模量可取天然地基压缩模量的1.1倍~1.3倍,土软弱时应取高值。

10.3 施 工

10.3.1 石灰应选用新鲜生石灰块,有效氧化钙含量不宜低于70%,粒径不应大于70mm,消石灰含量不宜大于15%。

10.3.2 掺和料应保持适当的含水量,使用粉煤灰或炉渣时含水量宜控制在30%。无经验时宜进行成桩工艺试验,宜通过试验确定密实度的施工控制指标。

10.3.3 石灰桩施工可采用洛阳铲或机械成孔。机械成孔可分为沉管和螺旋钻成孔。成桩时可采用人工夯实、机械夯实、沉管反插、螺旋反压等工艺。填料时应分段压(夯)实,人工夯实时每段填料厚度不应大于400mm。管外投料或人工成孔填料时应采取降低地下水渗入孔内的速度的措施,成孔后填料前应排除孔底积水。

10.3.4 施工顺序宜由外围或两侧向中间进行。在软土中宜间隔成桩。

10.3.5 施工前应做好场地排水设施。

10.3.6 进入场地的生石灰应采取防水、防雨、防风、防火措施,宜随用随进。

10.3.7 施工应建立完善的施工质量和施工安全管理制度,并应根据不同的施工工艺制定相应的技术保证措施,应及时做好施工记录,并应监督成桩质量,同时应进行施工阶段的质量检验等。

10.3.8 石灰桩施工时应采取防止冲孔伤人的措施。

10.3.9 桩位允许偏差为桩径的 0.5 倍。

10.4 质量检验

10.4.1 石灰桩施工过程中应随时检查施工记录和计量记录,并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。

10.4.2 石灰桩复合地基检测与检验可根据工程要求和当地经验采用开挖检查、静力触探或标准贯入、竖向抗压载荷试验等方法进行检验,并结合工程测试及观测资料综合评价加固效果。施工检测宜在施工后 7d~10d 进行。

10.4.3 采用静力触探或标准贯入试验检测时,检测部位应为桩中心及桩间土,应每两点为一组。检测组数应符合设计要求。

10.4.4 石灰桩复合地基工程验收时,应按本规范附录 A 的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。载荷试验应在桩体强度满足试验荷载条件,且在成桩 28d 后进行。检验数量应符合设计要求。

11 挤密砂石桩复合地基

11.1 一般规定

11.1.1 挤密砂石桩复合地基适用于处理松散的砂土、粉土、粉质黏土等土层,以及人工填土、粉煤灰等可挤密土层。

11.1.2 挤密砂石桩宜根据场地和工程条件选用沉管、振冲、锤击夯扩等方法施工。

11.1.3 挤密砂石桩复合地基勘察应提供场地土的天然孔隙比、最大孔隙比、最小孔隙比、标准贯入击数,以及砂石桩填料的来源和性质等资料,并应根据荷载要求和地区经验推荐地基土被挤密后要求达到的相对密实度。

11.2 设计

11.2.1 挤密砂石桩复合地基处理范围应根据建筑物的重要性和场地条件确定,应大于荷载作用面范围,扩大的范围宜为基础外缘 1 排~3 排桩距。对可液化地基,在基础外缘扩大的宽度不应小于可液化土层厚度的 1/2。

11.2.2 挤密砂石桩宜采用等边三角形或正方形布置。挤密砂石桩直径应根据地基土质情况、成桩方式和成桩设备等因素确定,宜采用 300mm~1200mm。

11.2.3 挤密砂石桩的间距应根据场地情况、上部结构荷载形式和大小通过现场试验确定,并应符合下列规定:

1 采用振冲法成孔的挤密砂石桩,桩间距宜结合所采用的振冲器功率大小确定,30kW 的振冲器布桩间距可采用 1.3m~2.0m;55kW 的振冲器布桩间距可采用 1.4m~2.5m;75kW 的振冲器布桩间距可采用 1.5m~3.0m。上部荷载大时,宜采用较小

的间距,上部荷载小时,宜采用较大的间距。

2 采用振动沉管法成桩时,对粉土和砂土地基,桩间距不宜大于砂石桩直径的 4.5 倍。初步设计时,挤密砂石桩的间距也可根据挤密后要求达到的孔隙比按下列公式估算:

等边三角形布置:

$$S = 0.95\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (11.2.3-1)$$

正方形布置:

$$S = 0.89\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (11.2.3-2)$$

$$e_1 = e_{\max} - D_{r1}(e_{\max} - e_{\min}) \quad (11.2.3-3)$$

式中: S ——桩间距(m);

d ——桩体直径(m);

ξ ——挤密砂石桩桩间距修正系数,当计入振动下沉密实作用时,可取 1.1~1.2,不计入振动下沉密实作用时,可取 1.0;

e_0 ——地基处理前土体的孔隙比,可按原状土样试验确定,也可根据动力或静力触探等试验确定;

e_1 ——地基挤密后要求达到的孔隙比;

D_{r1} ——地基挤密后要求砂土达到的相对密实度;

e_{\max} ——砂土的最大孔隙比;

e_{\min} ——砂土的最小孔隙比。

11.2.4 挤密砂石桩桩长可根据工程要求和场地地质条件通过计算确定,并应符合下列规定:

1 松散或软弱地基土层厚度不大时,砂石桩宜穿透该土层。

2 松散或软弱地基土层厚度较大时,对按稳定性控制的工程,挤密砂石桩长度应大于设计要求安全度相对应的最危险滑动面以下 2.0m;对按变形控制的工程,挤密砂石桩桩长应能满足处理后地基变形量不超过建(构)筑物的地基变形允许值,并应满足

软弱下卧层承载力的要求。

3 对可液化的地基,砂石桩桩长应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定执行。

4 桩长不宜小于 4m。

11.2.5 挤密砂石桩桩孔内的填料量应通过现场试验确定,估算时可按设计桩孔体积乘以 1.2~1.4 的增大系数。施工中地面有下沉或隆起现象时,填料量应根据现场具体情况进行增减。

11.2.6 挤密砂石桩复合地基承载力特征值,应通过现场复合地基竖向抗压载荷试验确定。初步设计时可按本规范公式(5.2.1-2)估算,其中 β_p 和 β_s 宜按当地经验取值。挤密砂石桩复合地基承载力特征值,也可根据单桩和处理后桩间土地基承载力特征值按下式估算:

$$f_{\text{spk}} = mf_{\text{pk}} + (1 - m)f_{\text{sk}} \quad (11.2.6)$$

式中: f_{spk} ——挤密砂石桩复合地基承载力特征值(kPa);

f_{pk} ——桩体竖向抗压承载力特征值(kPa),由单桩竖向抗压载荷试验确定;

f_{sk} ——桩间土地基承载力特征值(kPa),由桩间土地基竖向抗压载荷试验确定;

m ——复合地基置换率。

11.2.7 挤密砂石桩复合地基沉降可按本规范第 5.3.1 条~第 5.3.4 条的有关规定进行计算。建筑工程尚应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。其中复合地基压缩模量也可按下式计算:

$$E_{\text{spi}} = [1 + m(n - 1)]E_{\text{si}} \quad (11.2.7)$$

式中: E_{spi} ——第 i 层复合土体的压缩模量(MPa);

E_{si} ——第 i 层桩间土压缩模量(MPa),宜按当地经验取值,无经验时,可取天然地基压缩模量;

n ——桩土应力比,宜按现场实测资料确定,无实测资料时,可取 2~3,桩间土强度低取大值,桩间土强度高

取小值。

11.2.8 桩体材料宜选用碎石、卵石、角砾、圆砾、粗砂、中砂或石屑等硬质材料,不宜选用风化易碎的石料,含泥量不得大于5%。对振冲法成桩,填料粒径宜按振冲器功率确定:30kW振冲器宜为20mm~80mm;55kW振冲器宜为30mm~100mm;75kW振冲器宜为40mm~150mm。当采用沉管法成桩时,最大粒径不宜大于50mm。

11.2.9 砂石桩顶部宜铺设一层厚度为300mm~500mm的碎石垫层。

11.3 施 工

11.3.1 挤密砂石桩施工机械和型号应根据所选用施工方法、地基土性质和处理深度等因素确定。

11.3.2 施工前应进行成桩工艺和成桩挤密试验。当成桩质量不能满足设计要求时,应调整设计与施工的有关参数,并应重新进行试验和设计。

11.3.3 振冲施工可根据设计荷载大小、原状土强度、设计桩长等条件选用不同功率的振冲器,升降振冲器的机械可用起重机、自行车架式施工平车或其他合适的设备,施工设备应配有电流、电压和留振时间自动信号仪表。

11.3.4 施工现场应设置泥水排放系统,或组织运浆车辆将泥浆运至预先安排的存放地点,并宜设置沉淀池重复使用上部清水;在施工期间可同时采取降水措施。

11.3.5 密实电流、填料量和留振时间施工参数应根据现场地质条件和施工要求确定,并应在施工时随时监测。

11.3.6 振动沉管成桩法施工应根据沉管和挤密情况控制填砂石量、提升幅度与速度、挤密次数与时间、电机的工作电流等。选用的桩尖结构应保证顺利出料和有效挤压桩孔内砂石料;当采用活瓣桩靴时,对砂石和粉土地基宜选用尖锥型;一次性桩尖可采用混

凝土锥型桩尖。

11.3.7 挤密砂石桩施工应控制成桩速度，必要时应采取防挤土措施。

11.3.8 挤密砂石桩施工后，应将基底标高下的松散层挖除或夯压密实，应随后铺设并压实碎石垫层。

11.4 质量检验

11.4.1 挤密砂石桩施工过程中应随时检查施工记录和计量记录，并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。施工过程中应检查成孔深度、砂石用量、留振时间和密实电流强度等；对沉管法还应检查套管往复挤压振冲次数与时间、套管升降幅度与速度、每次填砂石量等项记录。

11.4.2 对桩体可采用动力触探试验检测，对桩间土可采用标准贯入、静力触探、动力触探或其他原位测试等方法进行检测。桩间土质量的检测位置应在等边三角形或正方形的中心。检验数量应由设计单位根据工程情况提出具体要求。

11.4.3 挤密砂石桩复合地基工程验收时，应按本规范附录 A 的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。检验数量应由设计单位根据工程情况提出具体要求。

11.4.4 挤密砂石桩复合地基工程验收时间，对砂土和杂填土地基，宜在施工 7d 后进行，对粉土地基，宜在施工 14d 后进行。

12 置换砂石桩复合地基

12.1 一般规定

12.1.1 置换砂石桩复合地基适用于处理饱和黏性土地基和饱和黄土地基,可按施工方法分为振动水冲(振冲)置换碎石桩复合地基和沉管置换砂石桩复合地基。

12.1.2 采用振动水冲法设置砂(碎)石桩时,土体不排水抗剪强度不宜小于 20kPa,且灵敏度不宜大于 4。施工前应通过现场试验确定其适宜性。

12.1.3 置换砂石桩复合地基上应铺设排水碎石垫层。

12.2 设计

12.2.1 设计前应掌握待加固土层的分布、抗剪强度、上部结构对地基变形的要求,以及当地填料性质和来源、施工机具性能等资料。

12.2.2 砂石桩的布置方式可采用等边三角形、正方形或矩形布置。

12.2.3 砂石桩的加固范围应通过稳定分析确定。对建筑基础宜在基底范围外加 1 排~3 排围扩桩。

12.2.4 砂石桩桩长宜穿透软弱土层,最小桩长不宜小于 4.0m。

12.2.5 振冲法施工的砂(碎)石桩设计直径宜根据振冲器的功率、土层性质通过成桩试验确定,也可根据经验选用。采用沉管法施工时,成桩直径应根据沉管直径确定。

砂石桩复合地基的面积置换率 m 可采用 0.15~0.30,布桩间距可根据桩的直径和面积置换率进行计算。

12.2.6 置换砂石桩复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试验确定。初步设计时,也可按本规范公式(5.2.1-2)估

算,其中 β_p 和 β_s 均应取1.0。

12.2.7 当桩体材料的内摩擦角在 38° 左右时,置换砂石桩单桩竖向抗压承载力特征值可按式计算:

$$R_a/A_p = 20.8c_u/K \quad (12.2.7)$$

式中: R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值;

A_p ——单桩截面积;

c_u ——饱和黏性土不排水抗剪强度;

K ——安全系数。

12.2.8 置换砂石桩复合地基沉降可按本规范第5.3.1条~第5.3.4条的规定进行计算,并应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的有关规定,其中复合地基压缩模量可按本规范公式(5.3.2-2)计算。

12.2.9 桩体材料可用碎石、卵石、砾石、中粗砂等硬质材料。

12.2.10 置换砂石桩复合地基上应设置厚度为300mm~500mm的排水砂石(碎石)垫层。

12.3 施 工

12.3.1 置换砂石桩可采用振冲、振动沉管、锤击沉管或静压沉管法施工。施工单位应采取避免施工过程中对周边环境的不利影响的措施。

12.3.2 施工前应进行成桩工艺试验。当成桩质量不能满足设计要求时,应调整施工参数,并应重新进行试验。

12.3.3 振冲施工可根据设计桩径大小、原状土强度、设计桩长等条件选用不同功率的振冲器。升降振冲器的机械可用起重机、自行井架式施工平车或其他合适的设备。施工过程应有电流、电压、填料量及留振时间的记录。

12.3.4 振冲施工现场应设置泥水排放系统,并组织运浆车辆将泥浆运至预先安排的存放地点,并宜设置沉淀池重复使用上部清水。

12.3.5 沉管法施工应根据设计桩径选择桩管直径,按沉管和形成密实桩体的需要控制填砂石量、提升速度、复打挤密次数和时间、电机的工作电流等,应选用出料顺利和有效挤压桩孔内砂石料的桩尖结构。当采用活瓣桩靴时,宜选用尖锥型,一次性桩尖可采用混凝土锥型桩尖。在饱和软土中沉管法施工宜采用跳打方式施工。

12.3.6 砂石桩施工后,应将场地表面约 1.0m 的松散桩体挖除或夯压密实,应随后铺设并压实碎石垫层。

12.4 质量检验

12.4.1 振冲法施工过程中应检查成孔深度、砂石用量、留振时间和密实电流强度等;对沉管法应检查套管往复挤压振冲次数与时间、套管升降幅度与速度、每次填砂石量等项记录。

12.4.2 置换砂石桩复合地基的桩体可采用动力触探试验进行施工质量检验;对桩间土可采用十字板剪切、静力触探或其他原位测试方法等进行施工质量检验。桩间土质量的检测位置应在桩位等边三角形或正方形的中心。检验数量应由设计单位根据工程情况提出具体要求。

12.4.3 置换砂石桩复合地基工程验收时,应按本规范附录 A 的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。载荷试验检验数量应符合设计要求。

12.4.4 复合地基竖向抗压载荷试验应待地基中超静孔隙水压力消散后进行。

13 强夯置换墩复合地基

13.1 一般规定

13.1.1 强夯置换墩复合地基适用于加固高饱和度粉土、软塑~流塑的黏性土、有软弱下卧层的填土等地基。

13.1.2 强夯置换应经现场试验确定其适用性和加固效果。

13.1.3 当强夯置换墩施工对周围环境的噪声、振动影响超过有关规定时,不宜选用强夯置换墩复合地基方案。需采用时应采取隔震、降噪措施。

13.2 设计

13.2.1 强夯置换墩试验方案应根据工程设计要求和地质条件,先初步确定强夯置换参数,进行现场试夯,然后根据试夯场地监测和检测结果及其与夯前测试数据对比,检验置换墩长度和加固效果,再确定方案可行性和工程施工采用的强夯置换工艺、参数。

13.2.2 强夯置换墩复合地基的设计应包括下列内容:

- 1 强夯置换深度。
- 2 强夯置换处理的范围。
- 3 墩体材料的选择与计量。
- 4 夯击能、夯锤参数、落距。
- 5 夯点的夯击击数、收锤标准、两遍夯击之间的时间间隔。
- 6 夯点平面布置形式。
- 7 强夯置换墩复合地基的变形和承载力要求。
- 8 周边环境保护措施。
- 9 现场监测和质量控制措施。

10 施工垫层。

11 检测方法、参数、数量等要求。

13.2.3 强夯置换处理范围应大于建筑物基础范围,每边超出基础外缘的宽度宜为基底下设计处理深度的 $1/3 \sim 1/2$,且不宜小于 3m。当要求消除地基液化时,在基础外缘扩大宽度不应小于基底可液化土层厚度的 $1/2$,且不宜小于 5m。对独立柱基,可采用柱下单点夯。

13.2.4 夯坑填料可采用块石、碎石、矿渣、工业废渣、建筑垃圾等坚硬粗颗粒材料,粒径大于 300mm 的颗粒含量不宜超过全重的 30%。

13.2.5 强夯置换有效加固深度为墩长和墩底压密土厚度之和,应根据现场试验或当地经验确定。在缺少试验资料或经验时,强夯置换深度应符合表 13.2.5 的规定。

表 13.2.5 强夯置换深度

夯击能(kN·m)	置换深度(m)	夯击能(kN·m)	置换深度(m)
3000	3~4	12000	8~9
6000	5~6	15000	9~10
8000	6~7	18000	10~11

13.2.6 夯点的夯击数应通过现场试夯确定,试夯应符合下列要求:

1 墩长应达到设计墩长。

2 在起锤可行条件下,应多夯击少喂料,起锤困难时每次喂料宜为夯坑深度的 $1/3 \sim 1/2$ 。

3 累计夯沉量不应小于设计墩长的 1.5 倍~2.0 倍。

4 强夯置换墩收锤条件应符合表 13.2.6 的规定。

表 13.2.6 强夯置换墩收锤条件

单击夯击能 E (kN·m)	最后两击平均夯沉量(mm)
$E < 4000$	50
$4000 \leq E < 6000$	100

续表 13.2.6

单击夯击能 $E(\text{kN} \cdot \text{m})$	最后两击平均夯沉量(mm)
$6000 \leq E < 8000$	150
$8000 \leq E < 12000$	200
$12000 \leq E < 15000$	250
$E \geq 15000$	300

13.2.7 夯击击数应根据地基土的性质确定,可采用点夯 1 遍~2 遍。对于渗透性较差的细颗粒土,夯击击数可适当增加,应最后再以低能量满夯 1 遍~2 遍,满夯可采用轻锤或低落距锤多次夯击,锤印应搭接 1/3。

13.2.8 两遍夯击之间应有一定的时间间隔,间隔时间应取决于土中超静孔隙水压力的消散时间及挤密效果。当缺少实测资料时,可根据地基土的渗透性确定,对于渗透性较差的黏性土地基,间隔时间不应少于 2 周~4 周,对于渗透性好的地基可连续夯击。

13.2.9 夯点间距应根据荷载特点、墩体长度、墩体直径及基础形式等选定。墩体的计算直径可取夯锤直径的 1.1 倍~1.4 倍。

13.2.10 起夯面标高、夯坑回填方式和夯后标高应根据基础埋深和试夯时所测得的夯沉量确定。

13.2.11 墩顶应铺设一层厚度不小于 300mm 的压实垫层,垫层材料的粒径不宜大于 100mm。

13.2.12 确定软黏性土和墩间土硬层厚度小于 2m 的饱和粉土地基中强夯置换墩复合地基承载力特征值时,其竖向抗压承载力应通过现场单墩竖向抗压载荷试验确定。饱和粉土地基经强夯置换后墩间土能形成 2m 以上厚度硬层时,其竖向抗压承载力应通过单墩复合地基竖向抗压载荷试验确定。

13.2.13 强夯置换墩复合地基沉降可按本规范第 5.3.1 条~第 5.3.4 条的有关规定进行计算,并应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。夯后有效加固深度范围内

土层的变形应采用单墩载荷试验或单墩复合地基载荷试验确定的变形模量计算。

13.2.14 强夯置换墩未穿透软弱土层时,应按本规范公式(5.2.4)验算软弱下卧层承载力。

13.3 施 工

13.3.1 夯锤应根据土质情况、置换深度、加固要求和施工设备确定。夯锤质量可取10t~60t。夯锤宜采用圆柱形,锤底面积宜按土层的性质确定,锤底静接地压力值可取80kPa~300kPa。锤底面宜对称设置若干个与其顶面贯通的排气孔或侧面设置排气凹槽,孔径或槽径可取250mm~400mm。

13.3.2 施工机械宜采用带有自动脱钩装置的履带式起重机或其他专用设备。采用履带式起重机时,可在臂杆端部设置辅助门架,或采取其他防止落锤时机械倾覆的安全措施。

13.3.3 夯坑内或场地积水宜及时排除。当场地地下水位较高,夯坑底积水影响施工时,应采取降低地下水位的措施。

13.3.4 强夯置换墩施工应按下列步骤进行:

1 应清理平整施工场地,当地表土松软机械无法行走时,宜铺设一定厚度的碎石或矿渣垫层。

2 应确定夯点位置,并应测量场地高程。

3 起重机应就位,夯锤应置于夯点位置。

4 应测量夯前锤顶高程或夯点周围地面高程。

5 应将夯锤起吊至预定高度,并应开启脱钩装置,应待夯锤脱钩自由下落后,放下吊钩,并应测量锤顶高程。在夯击过程中,当夯坑底面出现过大倾斜时,应向坑内较低处抛填填料,整平夯坑,当夯点周围软土挤出影响施工时,应随时清理并在夯点周围铺垫填料,继续施工。

6 应按“由内而外,先中间后四周”和“单向前进”的原则完成全部夯点的施工,当周边有需要保护的建构筑物时,应由邻近建筑

物开始夯击并逐渐向远处移动,当隆起过大时宜隔行跳打,收锤困难时宜分次夯击。

7 应推平场地,并应用低能量满夯,同时应将场地表层松土夯实,并应测量夯后场地高程。

8 应铺设垫层,并应分层碾压密实。

13.3.5 施工过程中应有专人负责下列监测工作:

1 夯前检查夯锤的重量和落距,确保单击夯击能符合设计要求。

2 夯前对夯点放线进行复核,夯完后检查夯坑位置,发现存在偏差或漏夯时,应及时纠正或补夯。

3 按设计要求检查每个夯点的夯击击数、每击的夯沉量和填料量。

4 施工前应查明周边地面及地下建(构)筑物的位置及标高等基本资料,当强夯置换施工所产生的振动对邻近建(构)筑物或设备会产生有害影响时,应进行振动监测,必要时应采取挖隔振沟等隔振或防振措施。

13.3.6 施工过程中的各项参数及相关情况应详细记录。

13.4 质量检验

13.4.1 强夯置换墩施工过程中应随时检查施工记录和填料计量记录,并应对照规定的施工工艺对每个墩进行质量评定。不符合设计要求时应补夯或采取其他有效措施。

13.4.2 强夯置换施工中和结束后宜采用开挖检查、钻探、动力触探等方法,检验墩体直径和墩长。

13.4.3 强夯置换墩复合地基工程验收时,承载力检验除应采用单墩或单墩复合地基竖向抗压载荷试验外,尚应采用动力触探、多道瞬态面波法等检测地层承载力与密度随深度的变化。单墩竖向抗压载荷试验和单墩复合地基竖向抗压载荷试验应符合本规范附录 A 的有关规定,对缓变型 $p-s$ 曲线承载力特征值应按相对变形

值 $s/b=0.010$ 确定。

13.4.4 强夯置换墩复合地基的承载力检验,应在施工结束并间隔一定时间后进行,对粉土不宜少于 21d,黏性土不宜少于 28d。检验数量应由设计单位根据场地复杂程度和建筑物的重要性提出具体要求,检测点应在墩间和墩体均有布置。

14 刚性桩复合地基

14.1 一般规定

14.1.1 刚性桩复合地基适用于处理黏性土、粉土、砂土、素填土和黄土等土层。对淤泥、淤泥质土地基应按地区经验或现场试验确定其适用性。

14.1.2 刚性桩复合地基中的桩体可采用钢筋混凝土桩、素混凝土桩、预应力管桩、大直径薄壁筒桩、水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)、二灰混凝土桩和钢管桩等刚性桩。钢筋混凝土桩和素混凝土桩应包括现浇、预制,实体、空心,以及异形桩等。

14.1.3 刚性桩复合地基中的刚性桩应采用摩擦型桩。

14.2 设计

14.2.1 刚性桩可只在基础范围内布置。桩的中心与基础边缘的距离不宜小于桩径的1倍;桩的边缘与基础边缘的距离,条形基础不宜小于75mm;其他基础形式不宜小于150mm。用于填土路堤和柔性面层堆场中时,布桩范围尚应考虑稳定性要求。

14.2.2 选择桩长时宜使桩端穿过压缩性较高的土层,进入压缩性相对较低的土层。

14.2.3 桩距应根据基础形式、复合地基承载力、土性、施工工艺、周边环境条件等确定。

14.2.4 刚性桩复合地基与基础之间应设置垫层,厚度宜取100mm~300mm,桩竖向抗压承载力高、桩径或桩距大时应取高值。垫层材料宜用中砂、粗砂、级配良好的砂石或碎石、灰土等,最大砂石粒径不宜大于30mm。

14.2.5 复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试

验或综合单桩竖向抗压载荷试验和桩间土地基竖向抗压载荷试验确定。初步设计时也可按本规范公式(5.2.1-2)估算,其中 β_p 和 β_s ,宜结合具体工程按地区经验进行取值,无地区经验时, β_p 可取1.00, β_s 可取0.65~0.90。

14.2.6 单桩竖向抗压承载力特征值(R_a)应通过现场载荷试验确定。初步设计时,可按本规范公式(5.2.2-1)估算由桩周土和桩端土的抗力可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值,并按本规范公式(5.2.2-2)验算桩身承载力。其中 α 可取1.00, f_{cu} 应为桩体材料试块抗压强度平均值, η 可取0.33~0.36,灌注桩或长桩时应用低值,预制桩应取高值。

14.2.7 基础埋深较大时,尚应计及复合地基承载力经深度修正后导致桩顶增加的荷载,可根据地区桩土分担比经验值,计算单桩实际分担的荷载,可按本规范第14.2.6条的规定验算桩体强度。

14.2.8 刚性桩复合地基沉降宜按本规范第5.3.1条~第5.3.4条的有关规定进行计算。

沉降计算经验系数应根据当地沉降观测资料及经验确定,无经验时,应符合表14.2.8规定的数值。

表 14.2.8 沉降计算经验系数(ψ_s)

\bar{E}_s (MPa)	2.5	4.0	7.0	15.0	20.0
ψ_s	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

注: \bar{E}_s 为地基变形计算深度范围内土的压缩模量当量值。

14.2.9 地基变形计算深度范围内土的压缩模量当量值,应按下式计算:

$$\bar{E}_s = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{E_{si}}} \quad (14.2.9)$$

式中: A_i ——第*i*层土附加应力系数沿土层厚度的积分值;

\bar{E}_{si} ——基础底面下第 i 层土的计算压缩模量(MPa), 桩长范围内的复合土层按复合土层的压缩模量取值。

14.3 施 工

14.3.1 刚性桩复合地基中刚性桩的施工, 可根据现场条件及工程特点选用振动沉管灌注成桩、长螺旋钻与管内泵压混合料灌注成桩、泥浆护壁钻孔灌注成桩、锤击与静压预制成桩。当软土较厚且布桩较密, 或周边环境有严格要求时, 不宜选用振动沉管灌注成桩法。

14.3.2 各种成桩工艺除应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定外, 尚应符合下列规定:

1 施工前应按设计要求在室内进行配合比试验, 施工时应按配合比配置混合料。

2 沉管灌注成桩施工拔管速度应匀速, 宜控制在 $1.5\text{m}/\text{min} \sim 2\text{m}/\text{min}$, 遇淤泥或淤泥质土时, 拔管速度应取低值。

3 桩顶超灌高度不应小于 0.5m 。

4 成桩过程中, 应抽样做混合料试块, 每台机械一天应做一组(3块)试块, 进行标准养护, 并应测定其立方体抗压强度。

14.3.3 挖土和截桩时应注意对桩体及桩间土的保护, 不得造成桩体开裂、桩间土扰动等。

14.3.4 垫层铺设宜采用静力压实法, 当基础底面下桩间土的含水量较小时, 也可采用动力夯实法, 夯实后的垫层厚度与虚铺厚度的比值不得大于 0.9 。

14.3.5 施工桩体垂直度允许偏差为 1% ; 对满堂布桩基础, 桩位允许偏差为桩径的 0.40 倍; 对条形基础, 桩位允许偏差为桩径的 0.25 倍; 对单排布桩桩位允许偏差应符合现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202 的有关规定。

14.3.6 当周边环境对变形有严格要求时, 成桩过程应采取减少对周边环境的影响的措施。

14.4 质量检验

14.4.1 刚性桩施工过程中应随时检查施工记录,并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。检查内容应为混合料坍落度、桩数、桩位偏差、垫层厚度、夯填度和桩体试块抗压强度。

14.4.2 桩体完整性应采用低应变动力测试检测,检验数量应由设计单位根据工程情况提出具体要求。

14.4.3 刚性桩复合地基工程验收时,承载力检验应符合下列规定:

1 应按本规范附录 A 的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。

2 有经验时,应分别进行单桩竖向抗压载荷试验和桩间土地基竖向抗压载荷试验,并可按本规范公式(5.2.1-2)计算复合地基承载力。

3 检验数量应符合设计要求。

14.4.4 素混凝土桩复合地基、水泥粉煤灰碎石桩复合地基、二灰混凝土桩复合地基竖向抗压载荷试验和单桩竖向抗压载荷试验,应在桩体强度满足加载要求,且施工结束 28d 后进行。

15 长-短桩复合地基

15.1 一般规定

15.1.1 长-短桩复合地基适用于深厚淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、砂土、湿陷性黄土、可液化土等土层。

15.1.2 长-短桩复合地基的竖向增强体应由长桩和短桩组成,其中长桩宜采用刚性桩;短桩宜采用柔性桩或散体材料桩。

15.1.3 长-短桩复合地基中长桩宜支承在较好的土层上,短桩宜穿过浅层最软弱土层。

15.2 设计

15.2.1 长-短桩复合地基的单桩竖向抗压承载力特征值应按现场单桩竖向抗压载荷试验确定,初步设计时可根据采用桩型按本规范的有关规定计算。

15.2.2 长-短桩复合地基承载力特征值可按本规范第 5.2.5 条的有关规定确定。

15.2.3 当短桩桩端位于软弱土层时,应按本规范公式(5.2.4)验算短桩桩端的复合地基承载力。

15.2.4 短桩桩端的复合地基承载力特征值可按本规范公式(5.2.1-1)或公式(5.2.1-2)估算,其中 m 应为长桩的置换率。

15.2.5 长-短桩复合地基沉降可按本规范第 5.3.5 条的有关规定进行计算。

15.2.6 长-短桩复合地基与基础间应设置垫层。垫层厚度可根据桩底持力层、桩间土性质、场地载荷情况综合确定,宜为 100mm~300mm。垫层材料宜采用最大粒径不大于 20mm 的中砂、粗砂、级配良好的砂石等。

15.2.7 长-短桩复合地基中桩的中心距应根据土质条件、复合地基承载力及沉降要求,以及施工工艺等综合确定,宜取桩径的3倍~6倍;当长桩或短桩采用刚性桩,且采用挤土工艺成桩时,桩的最小中心距尚应符合本规范第14.2.3条的有关规定。短桩宜在各长桩中间及周边均匀布置。

15.3 施 工

15.3.1 长、短桩的施工顺序应根据所采用桩型的施工工艺、加固机理、挤土效应等确定。

15.3.2 长-短桩复合地基桩的施工应符合本规范有关同桩型桩施工的规定。

15.3.3 桩施工垂直度允许偏差为1%。桩位允许偏差应符合现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202的有关规定。

15.3.4 垫层材料应通过级配试验进行试配。垫层厚度、铺设范围和夯填度应符合设计要求。

15.3.5 垫层施工不得在浸水条件下进行,当地下水位较高影响施工时,应采取降低地下水位的措施。

15.3.6 铺设垫层前应保证预留约200mm的土层,并应待铺设垫层时再人工开挖到设计标高。垫层底面应在同一标高上,深度不同时,应挖成阶梯或斜坡搭接,并按先深后浅的顺序施工,搭接处应夯实。垫层竣工验收合格后,应及时进行基础施工与回填。

15.4 质量 检 验

15.4.1 长-短桩复合地基中长桩和短桩施工过程中应随时检查施工记录,并也对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。

15.4.2 长-短桩复合地基中单桩质量检验应按本规范同桩型单桩质量检验有关规定进行。

15.4.3 长-短桩复合地基工程验收时,承载力检验应符合下列规定:

1 应按本规范附录 A 的有关规定进行复合地基竖向抗压载荷试验。

2 有经验时,应分别进行长桩竖向抗压载荷试验、短桩竖向抗压载荷试验和桩间土地基竖向抗压载荷试验,并可按本规范公式(5.2.5)计算复合地基承载力。

3 检验数量应符合设计要求。

16 桩网复合地基

16.1 一般规定

16.1.1 桩网复合地基适用于处理黏性土、粉土、砂土、淤泥、淤泥质土地基,也可用于处理新近填土、湿陷性土和欠固结淤泥等地基。

16.1.2 桩网复合地基应由刚性桩、桩帽、加筋层和垫层构成,可用于填土路堤、柔性面层堆场和机场跑道等构筑物的地基加固与处理。

16.1.3 设计前应通过勘察查明土层的分布和基本性质、各土层桩侧摩阻力和桩端阻力,以及判断土层的固结状态和湿陷性等特性。

16.1.4 桩的竖向抗压承载力应通过试桩绘制 p - s 曲线确定,并应作为设计的依据。

16.1.5 桩型可采用预制桩、就地灌注素混凝土桩、套管灌注桩等,应根据施工可行性、经济性等因素综合比较确定桩型。

16.1.6 桩网复合地基的桩间距、桩帽尺寸、加筋层的性能、垫层及填土层厚度,应根据地质条件、设计荷载和试桩结果综合分析确定。

16.2 设计

16.2.1 桩径宜取 200mm~500mm,加固土层厚、软土性质差时宜取较大值。

16.2.2 桩网复合地基宜按正方形布桩,桩间距应根据设计荷载、单桩竖向抗压承载力计算确定,方案设计时可取桩径或边长的 5 倍~8 倍。

16.2.3 单桩竖向抗压承载力应通过试桩确定,在方案设计和初步设计阶段,单桩的竖向抗压承载力特征值应按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定计算。

16.2.4 当桩需要穿过松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土层时,设计计算应计及负摩阻力的影响;单桩竖向抗压承载力特征值、桩体强度验算应符合下列规定:

1 对于摩擦型桩,可取中性点以上侧阻力为零,可按下式验算桩的抗压承载力特征值:

$$R_a \geq Ap_k \quad (16.2.4-1)$$

式中: R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值(kN),只记中性点以下部分侧阻值及端阻值;

p_k ——相应于荷载效应标准组合时,作用在地基上的平均压力值(kPa);

A ——单桩承担的地基处理面积(m^2)。

2 对于端承型桩,应计及负摩擦引起基桩的下拉荷载 Q_n^g ,并可按下式验算桩的竖向抗压承载力特征值:

$$R_a \geq Ap_k + Q_n^g \quad (16.2.4-2)$$

式中: Q_n^g ——桩侧负摩阻力引起的下拉荷载标准值(kN),按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定计算。

3 桩身强度应符合本规范公式(5.2.2-2)的要求,其中 f_{cu} 应为桩体材料试块抗压强度平均值, η 可取0.33~0.36,灌注桩或长桩时应用低值,预制桩应取高值。

16.2.5 桩网复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试验或综合桩体竖向抗压载荷试验和桩间土地基竖向抗压载荷试验,并结合工程实践经验综合确定。当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时,应根据单桩竖向抗压载荷试验结果,计及负摩阻力影响,确定复合地基承载力特征值。

16.2.6 当采用本规范公式(5.2.1-2)确定复合地基承载力特征值时,其中 β_p 可取1.0;当加固桩属于端承型桩时, β_s 可取0.1~0.4,当加固桩属于摩擦型桩时, β_s 可取0.5~0.9,当处理对象为松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时, β_s 可取0。

16.2.7 正方形布桩时,可采用正方形桩帽,桩帽上边缘应设20mm宽的45°倒角。

16.2.8 采用钢筋混凝土桩帽时,其强度等级不应低于C25,桩帽的尺寸和强度应符合下列规定:

- 1 桩帽面积与单桩处理面积之比宜取15%~25%。
- 2 桩帽以上填土高度,应根据垫层厚度、土拱计算高度确定。
- 3 在荷载基本组合条件下,桩帽的截面承载力应满足抗弯和抗冲剪强度要求。

4 钢筋净保护层厚度宜取50mm。

16.2.9 采用正方形布桩和正方形桩帽时,桩帽之间的土拱高度可按下式计算:

$$h = 0.707(S - a) / \tan\varphi \quad (16.2.9)$$

式中: h ——土拱高度(m);

S ——桩间距(m);

a ——桩帽边长(m);

φ ——填土的摩擦角,黏性土取综合摩擦角(°)。

16.2.10 桩帽以上的最小填土设计高度应按下式计算:

$$h_2 = 1.2(h - h_1) \quad (16.2.10)$$

式中: h_2 ——垫层之上最小填土设计高度(m);

h_1 ——垫层厚度(m)。

16.2.11 加筋层设置在桩帽顶部,加筋的经纬方向宜分别平行于布桩的纵横方向,应选用双向抗拉同强、低蠕变性、耐老化型的土工格栅类材料。

16.2.12 当桩与地基土共同作用形成复合地基时,桩帽上部加筋

体性能应按边坡稳定需要确定。当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时,加筋体的性能应符合下列规定:

1 加筋体的抗拉强度设计值(T)可按下列公式计算:

$$T \geq \frac{1.35\gamma_{cm}h(S^2 - a^2) \sqrt{(S - a)^2 + 4\Delta^2}}{32\Delta a} \quad (16.2.12-1)$$

式中: T ——加筋体抗拉强度设计值(kN/m);

γ_{cm} ——桩帽之上填土的平均重度(kN/m³);

Δ ——加筋体的下垂高度(m),可取桩间距的 1/10,最大不宜超过 0.2m。

2 加筋体的强度和对应的应变率应与允许下垂高度值相匹配,宜选取加筋体设计抗拉强度对应应变率为 4%~6%,蠕变应变率应小于 2%。

3 当需要铺设双层加筋体时,两层加筋体应选同种材料,铺设竖向间距宜取 0.1m~0.2m,两层加筋体之间应铺设垫层同种材料,两层加筋体的抗拉强度宜按下式计算:

$$T = T_1 + 0.6T_2 \quad (16.2.12-2)$$

式中: T ——加筋体抗拉强度设计值(kN/m);

T_1 ——桩帽之上第一层加筋体的抗拉强度设计值(kN/m);

T_2 ——第二层加筋体的抗拉强度设计值(kN/m)。

16.2.13 垫层应铺设在加筋体之上,应选用碎石、卵石、砾石,最小粒径应大于加筋体的孔径,最大粒径应小于 50mm;垫层厚度(h_1)宜取 200mm~300mm。

16.2.14 垫层之上的填土材料可选用碎石、无黏性土、砂质土等,不得采用塑性指数大于 17 的黏性土、垃圾土、混有有机质或淤泥的土类。

16.2.15 桩网复合地基沉降(s)应由加固区复合土层压缩变形量(s_1)、加固区下卧土层压缩变形量(s_2),以及桩帽以上垫层和土层

的压缩量变形量(s_3)组成,宜按下式计算:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (16.2.15)$$

16.2.16 各沉降分量可按下列规定取值:

1 加固区复合土层压缩变形量(s_1),可按本规范公式(5.3.2-1)计算,当采用刚性桩时可忽略不计。

2 加固区下卧土层压缩变形量(s_2),可按本规范公式(5.3.3)计算,需计及桩侧负摩阻力时,桩底土层沉降计算荷载应计入下拉荷载 Q_n^g 。

3 桩土共同作用形成复合地基时,桩帽以上垫层和填土层的变形应在施工期完成,在计算工后沉降时可忽略不计。

4 处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时,桩帽以上的垫层和土层的压缩变形量(s_3),可按下式计算:

$$s_3 = \frac{\Delta(S-a)(S+2a)}{2S^2} \quad (16.2.16)$$

16.3 施 工

16.3.1 预制桩可选用打入法或静压法沉桩,灌注桩可选用沉管灌注、长螺旋钻孔灌注、长螺旋压浆灌注、钻孔灌注等施工方法。

16.3.2 持力层位置和设计桩长应根据地质资料和试桩结果确定,灌注桩施工应根据揭示的地层和工艺试桩结果综合判断控制施工桩长。饱和黏土地层预制桩沉桩施工时,应以设计桩长控制为主,工艺试桩确定的收锤标准或压桩力控制为辅的方法控制施工桩长。

16.3.3 饱和软土地层挤土桩施工应选择合适的施工顺序,并应减少挤土效应,应加强对相邻已施工桩及施工场地周围环境的监测。

16.3.4 加筋层的施工应符合下列要求:

1 材料的运输、储存和铺设应避免阳光曝晒。

2 应选用较大幅宽的加筋体,两幅拼接时接头强度不应小于原有强度的 70%;接头宜布置在桩帽上,重叠宽度不得小于 300mm。

3 铺设时地面应平整,不得有尖锐物体。

4 加筋体铺设应平整,应用编织袋装砂(土)压住。

5 加筋体的经纬方向与布桩的纵横方向应相同。

16.3.5 桩帽宜现浇,预制时,应采取对中措施。桩帽之间应采用砂土、石屑等回填。

16.3.6 加筋体之上铺设的垫层应选用强度较高的碎石、卵砾石填料,不得混有泥土和石屑,碎石最小粒径应大于加筋体孔径,应铺设平整。铺设厚度小于 300mm 时,可不作碾压,300mm 以上时应分层静压压实。

16.3.7 垫层以上的填土,应分层压实,压实度应达到设计要求。

16.4 质量检验

16.4.1 桩网复合地基中桩、桩帽和加筋网的施工过程中,应随时检查施工记录,并应对照规定的施工工艺逐项进行质量评定。

16.4.2 桩的质量检验,应符合下列规定:

1 就地灌注桩应在成桩 28d 后进行质量检验,预制桩宜在施工 7d 后检验。

2 应挖出所有桩头检验桩数,并应随机选取 5% 的桩检验桩位、桩距和桩径。

3 应随机选取总桩数的 10% 进行低应变试验,并应检验桩体完整性和桩长。

4 应随机选取总桩数的 0.2%,且每个单体工程不应少于 3 根桩进行静载试验。

5 对灌注桩的质量存疑时,应进行抽芯检验,并应检查完整性、桩长和混凝土的强度。

16.4.3 桩的质量标准应符合下列规定:

- 1 桩位和桩距的允许偏差为 50mm, 桩径允许偏差为 $\pm 5\%$ 。
- 2 低应变检测 II 类或好于 II 类桩应超过被检验数的 70%。
- 3 桩长的允许偏差为 $\pm 200\text{mm}$ 。
- 4 静载试验单桩竖向抗压承载力极限值不应小于设计单桩竖向抗压承载力特征值的 2 倍。

- 5 抽芯试验的抗压强度不应小于设计混凝土强度的 70%。

16.4.4 加筋体的检测与检验应包括下列内容:

- 1 各向抗拉强度, 以及与抗拉强度设计值对应的材料应变率。
- 2 材料的单位面积重量、幅宽、厚度、孔径尺寸等。
- 3 抗老化性能。
- 4 对于不了解性能的新材料, 应测试在拉力等于 70% 设计抗拉强度条件下的蠕变性能。

17 复合地基监测与检测要点

17.1 一般规定

17.1.1 复合地基设计内容应包括监测和检测要求。

17.1.2 施工单位应综合复合地基监测和检测情况评价地基处理效果,指导施工,调整设计。

17.2 监测

17.2.1 采用复合地基的工程应进行监测,并应监测至监测指标达到稳定标准。

17.2.2 监测设计人员应根据工程情况、监测目的、监测要求等制定监测实施方案,选择合理的监测仪器、仪器安装方法,采取妥当的仪器保护措施,遵循合理的监控流程。

17.2.3 监测设计人员应根据工程具体情况设计监测断面或监测点、监测项目、监测手段、监测数量、监测周期和监测频率等。

17.2.4 监测人员应根据施工进度采取合适的监测频率,并根据施工、指标变化和环境变化等情况,动态调整监控频率。

17.2.5 复合地基应进行沉降监测,重要工程、试验工程、新型复合地基等宜监测桩土荷载分担情况。填土路堤和柔性面层堆场等工程的复合地基除应监测地表沉降,稳定性差的工程还应监测侧向位移,沉降缓慢时宜监测孔隙水压力,可监测分层沉降。

17.2.6 采用复合地基处理的坡地、岸边应监测侧向位移,宜监测地表沉降。

17.2.7 对周围环境可能产生挤压等不利影响的工程,应监测地表沉降、侧向位移,软黏土土层宜监测孔隙水压力。对周围环境振动显著时,应进行振动监测。

17.2.8 监测时应记录施工、周边环境变化等情况。监测结果应及时反馈给设计、施工。

17.3 检 测

17.3.1 复合地基检测内容应根据工程特点确定,宜包括复合地基承载力、变形参数、增强体质量、桩间土和下卧土层变化等。复合地基检测内容和要求应由设计单位根据工程具体情况确定,并应符合下列规定:

1 复合地基检测应注重竖向增强体质量检验。

2 具有挤密效果的复合地基,应检测桩间土挤密效果。

17.3.2 设计人员应调查和收集被检测工程的岩土工程勘察资料、地基基础设计及施工资料,了解施工工艺和施工中出现的异常情况。

17.3.3 施工人员应根据检测目的、工程特点和调查结果,选择检测方法,制订检测方案,宜采用不少于两种检测方法进行综合质量检验,并应符合先简后繁、先粗后细、先面后点的原则。

17.3.4 抽检比例、质量评定等均以检验批为基准,同一检验批的复合地基地质条件应相近,设计参数和施工工艺应相同,应根据工程特点确定抽检比例,但每个检验批的检验数量不得小于3个。

17.3.5 复合地基检测应在竖向增强体及其周围土体物理力学指标基本稳定后进行,地基处理施工完毕至检测的间隔时间可根据工程特点确定。

17.3.6 复合地基检测抽检位置的确定应符合下列规定:

1 施工出现异常情况的部位。

2 设计认为重要的部位。

3 局部岩土特性复杂可能影响施工质量的部位。

4 当采用两种或两种以上检测方法时,应根据前一种方法的检测结果确定后一种方法的检测位置。

5 同一检验批的抽检位置宜均匀分布。

17.3.7 当检测结果不满足设计要求时,应查找原因,必要时应采用原检测方法或准确度更高的检测方法扩大抽检,扩大抽检的数量宜按不满足设计要求的检测点数加倍扩大抽检。

附录 A 竖向抗压载荷试验要点

A.0.1 本试验要点适用于单桩(墩)竖向抗压载荷试验、单桩(墩)复合地基竖向抗压载荷试验和多桩(墩)复合地基竖向抗压载荷试验。

A.0.2 进行竖向抗压载荷试验前,应采用合适的检测方法对复合地基桩(墩)施工质量进行检验,必要时应对桩(墩)间土进行检验,应根据检验结果确定竖向抗压载荷试验点。

A.0.3 单桩(墩)竖向抗压载荷试验承压板面积应等于受检桩(墩)截面积,复合地基平板载荷试验的承压板面积应等于受检桩(墩)所承担的处理面积,桩(墩)的中心或多桩(墩)的形心应与承压板形心保持一致,且形状宜与受检桩(墩)布桩形式匹配。承压板可采用钢板或混凝土板,其结构和刚度应保证最大荷载下承压板不翘曲和不开裂。

A.0.4 试坑底宽不应小于承压板宽度或直径的3倍,基准梁及加荷平台支点(或锚桩)宜设在试坑以外,且与承压板边的净距不应小于承压板宽度或直径,并不应小于2m。竖向桩(墩)顶面标高应与设计标高相适应,应采取避免地基土扰动和含水量变化的措施。在地下水位以下进行试验时,应事先将水位降至试验标高以下,安装设备,并应待水位恢复后再进行加荷试验。

A.0.5 找平桩(墩)的中粗砂厚度不宜大于20mm。复合地基平板载荷试验应在承压板下设50mm~150mm的中粗砂垫层。有条件时,复合地基平板载荷试验垫层厚度、材料宜与设计相同,垫层应在整个试坑内铺设并夯压至设计夯实度。

A.0.6 当采用1台以上千斤顶加载时,千斤顶规格、型号应相同,合力应与承压板中心在同一铅垂线上,且应并联同步工作。加

载时最大工作压力不应大于油泵、压力表及油管额定工作压力的 80%。荷载量测宜采用荷载传感器直接测定,传感器的测量误差为 ±1%,应采用自动稳压装置,每级荷载在维持过程中变化幅度应小于该级荷载增量的 10%,应在承压板两个方向对称安装 4 个位移量测仪表。

A.0.7 最大试验荷载宜按预估的极限承载力且不小于设计承载力特征值的 2.67 倍确定。加载分级不应少于 8 级。正式试验前宜按最大试验荷载的 5%~10% 预压,垫层较厚时宜增大预压荷载,并应卸载调零后再正式试验。加载反力应为最大试验荷载的 1.20 倍,采用压重平台反力装置时应在试验前一次均匀堆载完毕。

A.0.8 每级加载后,应按间隔 10、10、10、15、15min,以后每级 30min 测读一次沉降,当连续 2h 的沉降速率不大于 0.1mm/h 时,可加下一级荷载。

处理软黏土地基的柔性桩多桩复合地基竖向抗压载荷试验、散体材料桩(墩)复合地基竖向抗压载荷试验时,可根据经验适当放大相对稳定标准。

A.0.9 单桩(墩)竖向抗压载荷试验出现下列情况之一时,可终止试验:

- 1 在某级荷载下, $s-lgt$ 曲线尾部明显向下曲折。
- 2 在某级荷载下的沉降量大于前级沉降量的 2 倍,并经 24h 沉降速率未能达到相对稳定标准。
- 3 在某级荷载下的沉降量大于前级沉降量的 5 倍,且总沉降量不小于 40mm。
- 4 相对沉降大于或等于 0.10,且不小于 100mm。
- 5 总加载量已经达到预定的最大试验荷载。
- 6 为设计提供依据的试验桩,应加载至破坏。

A.0.10 复合地基竖向抗压载荷试验出现以下情况之一时,可终止试验:

- 1 承压板周围隆起或产生破坏性裂缝。
- 2 在某级荷载下的沉降量大于前级沉降量的 2 倍,并经 24h 沉降速率未能达到相对稳定标准。
- 3 在某荷载下的沉降量大于前级沉降量的 5 倍, p - s 曲线出现陡降段,且总沉降量不小于承压板边长(直径)的 4%。
- 4 相对沉降大于或等于 0.10。
- 5 总加载量已经达到预定的最大试验荷载。

A.0.11 卸载级数可为加载级数的 1/2,应等量进行,每卸一级,应间隔 30min,读记回弹量,待卸完全部荷载后应间隔 3h 读记总回弹量。

A.0.12 单桩(墩)竖向抗压极限承载力可按下列方法综合确定:

- 1 可取第 A.0.9 条第 1 款~第 3 款对应荷载前级荷载。
- 2 p - s 曲线为缓变型时,可采用总沉降或相对沉降确定,总沉降或相对沉降应根据桩(墩)类型、地区或行业经验、工程特点等确定,总沉降可取 40mm~60mm,直径大于 800mm 时相对沉降可取 0.05~0.07,长细比大于 80 的柔性桩、散体材料桩宜取大值。

A.0.13 单桩(墩)竖向抗压承载力特征值,可按下列方法综合确定:

- 1 刚性桩单桩(墩) p - s 曲线比例界限荷载不大于极限荷载的 1/2 时,刚性桩竖向抗压承载力特征值可取比例界限荷载。
- 2 刚性桩单桩(墩) p - s 曲线比例界限荷载大于极限荷载的 1/2 时,刚性桩竖向抗压承载力特征值可取极限荷载除以安全系数 2。

A.0.14 复合地基极限荷载可取本规范第 A.0.10 条第 1 款~第 3 款对应荷载前级荷载。单点承载力特征值可按下列方法综合确定:

- 1 极限荷载应除以 2~3 的安全系数,安全系数取值应根据行业或地区经验、工程特点确定。

2 $p-s$ 曲线为缓变型时,可采用相对沉降确定,按照相对沉降确定的承载力特征值不应大于最大试验荷载的 $1/2$ 。相对沉降值应根据桩(墩)类型、地区或行业经验、工程特点等确定,并应符合下列规定:

- 1) 散体材料桩(墩)可取 $0.010\sim 0.020$,桩间土压缩性高时取大值;
- 2) 石灰桩可取 $0.010\sim 0.015$;
- 3) 灰土挤密桩可取 0.008 ;
- 4) 深层搅拌桩、旋喷桩可取 $0.005\sim 0.010$,桩间土为淤泥时取小值;
- 5) 夯实水泥土桩可取 $0.008\sim 0.01$;
- 6) 刚性桩可取 $0.008\sim 0.01$ 。

A. 0.15 一个检验批参加统计的试验点不应少于 3 点,承载力极差不超过平均值的 30% 时,可取其平均值作为承载力特征值。

当极差超过平均值的 30% 时,应分析原因,并结合工程具体情况综合确定,必要时可增加试验点数量。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《建筑地基基础施工质量验收规范》GB 50202
- 《建筑桩基技术规范》JGJ 94

中华人民共和国国家标准

复合地基技术规范

GB/T 50783 - 2012

条文说明

制 订 说 明

《复合地基技术规范》GB/T 50783—2012,经住房和城乡建设部 2012 年 10 月 11 日以第 1486 号公告批准发布。

本规范制定过程中,编制组进行了广泛的调查研究,总结了我国复合地基设计、施工和质量检验的实践经验,同时参考了国外先进技术法规、技术标准,通过试验以及实践经验给出了设计和施工重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定,《复合地基技术规范》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则	(85)
2	术语和符号	(86)
2.1	术语	(86)
3	基本规定	(88)
4	复合地基勘察要点	(95)
5	复合地基计算	(96)
5.2	承载力计算	(96)
5.3	沉降计算	(97)
5.4	稳定分析	(102)
6	深层搅拌桩复合地基	(104)
6.1	一般规定	(104)
6.2	设计	(110)
6.3	施工	(115)
6.4	质量检验	(117)
7	高压旋喷桩复合地基	(119)
7.1	一般规定	(119)
7.2	设计	(120)
7.3	施工	(120)
7.4	质量检验	(121)
8	灰土挤密桩复合地基	(122)
8.1	一般规定	(122)
8.2	设计	(123)
8.3	施工	(124)
8.4	质量检验	(125)

9	夯实水泥土桩复合地基	(126)
9.1	一般规定	(126)
9.2	设计	(126)
9.3	施工	(128)
9.4	质量检验	(129)
10	石灰桩复合地基	(131)
10.1	一般规定	(131)
10.2	设计	(132)
10.3	施工	(135)
10.4	质量检验	(135)
11	挤密砂石桩复合地基	(137)
11.1	一般规定	(137)
11.2	设计	(138)
11.3	施工	(142)
11.4	质量检验	(145)
12	置换砂石桩复合地基	(147)
12.1	一般规定	(147)
12.2	设计	(148)
12.3	施工	(150)
12.4	质量检验	(153)
13	强夯置换墩复合地基	(155)
13.1	一般规定	(155)
13.2	设计	(155)
13.3	施工	(160)
13.4	质量检验	(161)
14	刚性桩复合地基	(162)
14.1	一般规定	(162)
14.2	设计	(162)
14.4	质量检验	(165)

- 15 长-短桩复合地基..... (166)
 - 15.1 一般规定 (166)
 - 15.2 设计 (166)
 - 15.3 施工 (168)
- 16 桩网复合地基 (169)
 - 16.1 一般规定 (169)
 - 16.2 设计 (170)
 - 16.3 施工 (179)
 - 16.4 质量检验 (180)
- 17 复合地基监测与检测要点 (181)
 - 17.2 监测 (181)
 - 17.3 检测 (181)
- 附录 A 竖向抗压载荷试验要点 (184)

1 总 则

1.0.1 根据在地基中设置增强体的方向不同,复合地基可分为竖向增强体复合地基和水平向增强体复合地基两大类,考虑到水平向增强体复合地基工程实践积累较少,本规范未包含水平向增强体复合地基,只包括常用的各种竖向增强体复合地基。

1.0.2 随着地基处理技术和复合地基理论的发展,近些年来,复合地基技术在我国房屋建筑(包括高层建筑)、高等级公路、铁路、堆场、机场、堤坝等土木工程建设中得到广泛应用。本规范邀请建筑、公路、铁路、市政、机场、堤坝等土木工程领域从事复合地基设计、施工的专家编写,总结了上述土木工程领域应用复合地基的经验。本规范适用于建筑、交通、铁道、水利、市政等工程中复合地基的设计、施工及质量检验。

1.0.3 岩土问题分析应详细了解场地工程地质和水文地质条件,了解土层形成年代和成因,掌握土的工程性质,运用土力学基本概念,结合工程经验,进行计算分析。由于岩土工程分析中计算条件的模糊性和信息的不完全性,单纯力学计算不能解决实际问题,需要岩土工程师在计算分析结果和工程经验类比的基础上综合判断,所以复合地基设计注重概念设计。复合地基设计应在充分了解功能要求和掌握必要资料的基础上,通过设计条件的概化,先定性分析,再定量分析,从技术方法的适宜性和有效性、施工的可操作性、质量的可控制性、环境限制和可能产生的负面影响,以及经济性等多方面进行论证,然后选择一个或几个方案,进行必要的计算和验算,通过比较分析,逐步完善设计。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 复合地基是一个新概念。20世纪60年代国外开始采用碎石桩加固地基,并将加固后地基称为复合地基。改革开放后,我国引进碎石桩等许多地基处理新技术,同时引进了复合地基概念。复合地基最初是指采用碎石桩加固形成的人工地基,随着复合地基技术在我国土木工程建设中推广应用,复合地基理论得到很大的发展。随着搅拌桩加固技术在工程中的应用,发展了水泥土桩复合地基的概念。碎石桩是散体材料桩,水泥土桩是黏结材料桩。水泥土桩复合地基的应用促进了柔性桩复合地基理论发展。随着混凝土桩复合地基的应用,形成刚性桩复合地基概念,复合地基概念得到进一步的发展。如果将由碎石桩等散体材料桩形成的人工地基称为狭义复合地基,则可将包括散体材料桩、各种刚度的黏结材料桩形成的人工地基,以及各种形式的长-短桩复合地基称为广义复合地基。随着复合地基概念的发展和复合地基技术应用的扩大,发展形成了广义复合地基理论。本规范是基于广义复合地基理论编写的。

2.1.4、2.1.5 桩的刚柔是相对的,不能只由桩体模量确定。桩的刚柔主要与桩土模量比和桩的长细比有关,可按桩土相对刚度来进行分类。桩土相对刚度可按下式计算:

$$K = \sqrt{\frac{E_p}{G_s}} \frac{r}{l} \quad (1)$$

式中: E_p ——桩体压缩模量(MPa);

G_s ——桩间土剪切模量(MPa);

l ——桩长(m);

r ——桩体半径(m)。

有人建议当 K 大于 1 时可视为刚性桩,小于 1 时可视为柔性桩。在工程上刚性桩和柔性桩没有严格的界限。

2.1.17 工程设计人员应重视桩网复合地基和桩承堤的区别。在桩承堤中荷载通过拱作用和土工格栅加筋垫层作用,加筋垫层下桩间土不直接参与承担荷载,荷载全部由桩承担。桩承堤中的桩应是端承刚性桩。桩网复合地基中加筋垫层下桩间土直接参与承担荷载,荷载由桩和桩间土共同承担,桩网复合地基中的桩应是摩擦型桩。本规范将桩网复合地基和桩承堤的设计统一起来,也可应用于桩承堤设计和施工。

2.1.20 桩土应力比是均值概念。在荷载作用下,桩间土地基和桩体上的应力不可能是均匀分布的。因此,定点测量可能带来较大误差。桩土应力比的影响因素很多,如桩土模量比、置换率、荷载形式与荷载水平、作用时间,以及基础刚度等。在复合地基设计中将桩土应力比作为设计参数较难把握。

3 基本规定

3.0.2 复合地基形式很多,合理选用复合地基形式可以取得较好的社会效益和经济效益。复合地基形式选用应遵守下列原则:

1 坚持具体工程具体分析和因地制宜的选用原则。根据场地工程地质条件、工程类型、荷载水平,以及使用要求,进行综合分析,还应考虑充分利用地方材料,合理选用复合地基形式。

2 散体材料桩复合地基主要适用于在设置桩体过程中桩间土能够振密挤密,桩间土的强度能得到较大提高的砂性土地基。对饱和软黏土地基,采用散体材料桩复合地基加固,加固后承载力提高幅度不大,而且可能产生较大的工后沉降,应慎用。

3 对深厚软土地基,为了减小复合地基的沉降量,应采用较长的桩体,尽量减小加固区下卧土层的压缩量。可采用刚度较大的桩体形成复合地基,也可采用长-短桩复合地基。

3.0.3 本条强调对位于坡地、岸边的各类工程中的复合地基,以及填土路堤和柔性面层堆场等工程中的复合地基除应进行承载力和沉降计算外,还非常有必要进行稳定分析。满足规范规程中地基承载力要求的并不一定能满足地基稳定性要求。

3.0.4 复合地基中桩和桩间土共同直接承担荷载是形成复合地基的必要条件,在复合地基设计中要充分重视,予以保证。在荷载作用下,桩体和桩间土是否能够共同直接承担上部结构传来的荷载是有条件的,即复合地基的形成是有条件的,下面作简要分析(图1)。

图1中 $E_p > E_{s1}$, $E_p > E_{s2}$, $E_p > E_{s3}$ 。散体材料桩在荷载作用

下产生侧向鼓胀变形,能够保证桩体和桩间土共同直接承担上部结构传来的荷载。因此当竖向增强体为散体材料桩时,各种情况均可满足桩和桩间土共同直接承担上部荷载。然而,当竖向增强体为黏结材料桩时情况就不同了。不设垫层,桩端落在可压缩层[图 1(a)],荷载作用下,桩和桩间土沉降量相同,则可保证桩和桩间土共同直接承担荷载。桩落在不可压缩层上,在基础下设置一定厚度的柔性垫层[图 1(b)],在荷载作用下,通过基础下柔性垫层的协调,也可保证桩和桩间土共同承担荷载。但需要注意分析柔性垫层对桩和桩间土的差异变形的协调能力,以及桩和桩间土之间可能产生的最大差异变形两者的关系。如果桩和桩间土之间可能产生的最大差异变形超过柔性垫层对桩和桩间土的差异变形的协调能力,那么虽在基础下设置了一定厚度的柔性垫层,在荷载作用下,也不能保证桩和桩间土始终共同直接承担荷载。当桩落在不可压缩层上,而且未设置垫层[图 1(c)],在荷载作用下,开始时桩和桩间土中的竖向应力大小大致上按两者的模量比分配,但是随着土体产生蠕变,土中应力不断减小,而桩中应力逐渐增大,荷载逐渐向桩上转移。若 $E_p \gg E_{s1}$,则桩间土承担的荷载比例极小。特别是遇到地下水位下降等情况,桩间土体进一步压缩,桩间土可能不再承担荷载。在这种情况下桩与桩间土难以共同直接承担荷载,也就是说桩和桩间土不能形成复合地基以共同承担上部荷载。当复合地基中增强体穿透最薄弱土层,落在相对好的土层上[图 1(d)], $E_{s3} > E_{s1}$,在这种情况下,应重视 E_p 、 E_{s1} 和 E_{s3} 三者之间的关系,保证在荷载作用下桩和桩间土通过变形协调共同承担荷载。因此采用黏结材料桩,特别是刚性桩形成的复合地基需要重视复合地基形成条件分析。

在实际工程中如果桩和桩间土不能满足复合地基形成条件,而以复合地基理念进行设计是不安全的。把不能直接承担荷载的桩间土地基承载力计算在内,高估了复合地基承载能力,降低了安全度,可能造成工程事故,应引起设计人员的充分重视。

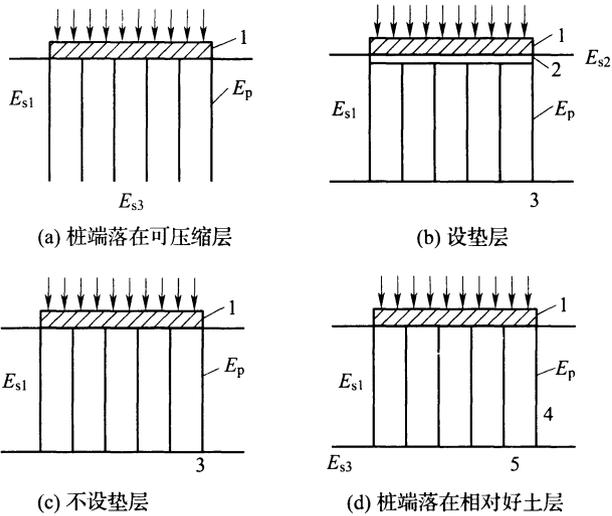


图 1 复合地基形成条件示意

1—刚性基础；2—垫层；3—不可压缩层；4—软弱土层；5—相对好土层；

E_p —桩体压缩模量； E_{s1} —桩间土压缩模量；

E_{s2} —垫层压缩模量； E_{s3} —下卧层压缩模量

3.0.6 复合地基设计中一定要重视上部结构、基础和复合地基的共同作用。复合地基是通过一定的沉降量使桩和桩间土共同承担荷载，设计中要重视沉降可能对上部结构产生的不良影响。

基础刚度对复合地基的破坏模式、承载力和沉降有重要影响。一般情况下，当处于极限状态时，混凝土基础下桩体复合地基中桩先发生破坏，而填土路堤和柔性面层堆场下桩体复合地基中桩间土先发生破坏。混凝土基础下桩体复合地基承载力大于填土路堤和柔性面层堆场下桩体复合地基承载力。荷载水平相同时，混凝土基础下桩体复合地基的沉降小于填土路堤和柔性面层堆场下桩体复合地基的沉降。

为了探讨基础刚度对复合地基性状的影响，吴慧明采用现场试验研究和数值分析方法对基础刚度对复合地基性状的影响作了

分析(图 2)。试验内容包括:①原状土地基承载力试验;②单桩竖向抗压承载力试验;③刚性板下复合地基承载力试验(置换率 $m=15\%$);④原地堆砂荷载下复合地基承载力试验(置换率 $m=15\%$)。试验研究表明基础刚度对复合地基性状影响明显,主要结论如下:

1 原地堆砂荷载下和刚性板下桩体复合地基的破坏模式不同。当荷载不断增大时,原地堆砂荷载下复合地基中土体先产生破坏,而刚性板下复合地基中桩体先产生破坏。

2 在相同的条件下,原地堆砂荷载下复合地基的沉降量比刚性板下复合地基沉降量要大,而承载力要小。

3 复合地基各种参数都相同的情况下,复合地基的桩土荷载分担比随基础刚度变小而减小,也就是说混凝土基础下复合地基中桩体承担的荷载比例要比填土路堤和柔性面层堆场下复合地基中桩体承担的荷载比例大。

4 为了提高填土路堤和柔性面层堆场下复合地基桩土荷载分担比,提高复合地基承载力,减小复合地基沉降,可在复合地基上设置刚度较大的垫层,如灰土垫层,土工格栅碎石垫层等。

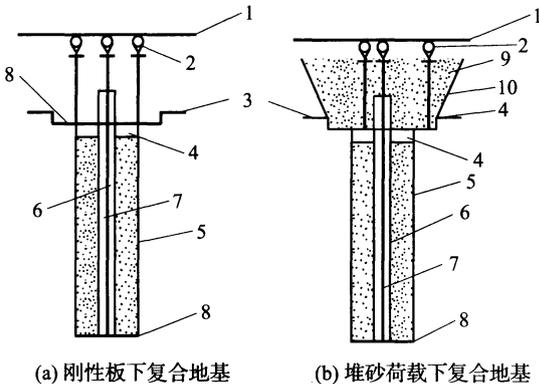


图 2 现场模型试验的示意

1—基准梁;2—百分表;3—原地地面;4—传感器;5—水泥土桩;
6—PVC管;7—钢筋;8—钢板;9—砂;10—木斗

3.0.8 按沉降控制设计理论是近年发展的新理念,对复合地基设计更有意义。下面先介绍按沉降控制设计理论,然后再讨论复合地基按沉降控制设计。

按沉降控制设计是相对于按承载力控制设计而言的。事实上无论按承载力控制设计还是按沉降控制设计都要满足承载力的要求和小于某一沉降量的要求。按沉降控制设计和按承载力控制设计的区别在于:在按承载力控制设计中,宜先按符合承载力要求进行设计,然后再验算沉降量是否满足要求。如果地基承载力不能满足要求,或验算沉降量不能满足要求,再修改设计方案。而在按沉降控制设计中,宜先按满足沉降要求进行设计,然后再验算承载力是否满足要求。下面通过一实例分析说明按沉降控制设计的思路。例如:某工程采用浅基础时地基是稳定的,但沉降量达500mm,不能满足要求。现采用250mm×250mm方桩,桩长15m。布桩200根时沉降量为50mm,布桩150根时沉降为70mm,布桩100根时沉降为120mm,布桩50根时沉降量250mm(图3)。若设计要求的沉降量小于150mm,则布桩大于90根即可满足要求。从该例可看出按沉降量控制设计的实质及设计思路。

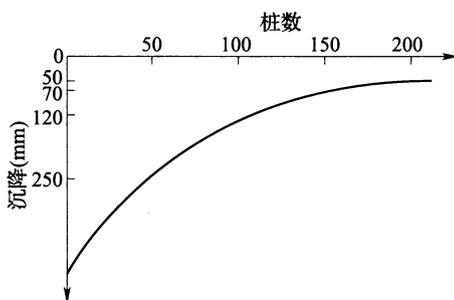


图3 桩数-沉降关系曲线示意

桩数与相应的沉降量之间的关系,实际上也可以反映工程费用与相应的沉降量之间的关系。减小沉降量意味着增加工程费用。于是按沉降控制设计可以合理控制工程费用。按沉降控制设

计思路特别适用于深厚软弱地基上复合地基设计。

按沉降控制设计要求设计人员更好地掌握沉降计算理论,总结工程经验,提高沉降计算精度,进行优化设计。

3.0.9 在混凝土基础下的复合地基上设置垫层和在填土路堤和柔性面层堆场下的复合地基上设置垫层性状和要求是不同的。是否设置垫层和垫层厚度应通过技术、经济综合分析后确定。

混凝土基础下复合地基上的垫层宜采用 100mm~500mm 的砂石垫层[图 4(a)],当桩土相对刚度较小时取小值。由于砂石垫层的存在,桩间土单元 A1 中的附加应力比桩间土单元 A2 中的大,而桩体单元 B1 中的竖向应力比桩体单元 B2 中的小。也就是说设置垫层可减小桩土荷载分担比。另外,由于砂石垫层的存在,桩间土单元 A1 中的水平向应力比桩间土单元 A2 中的要大,桩体单元 B1 中的水平向应力比桩体单元 B2 也要大。由此可得出:由于砂石垫层的存在,使桩体单元 B1 中的最大剪应力比桩体单元 B2 中的要小得多。换句话说,砂石垫层的存在使桩体上端部分中竖向应力减小,水平向应力增大,造成该部分桩体中剪应力减小,有效改善了桩体的受力状态。

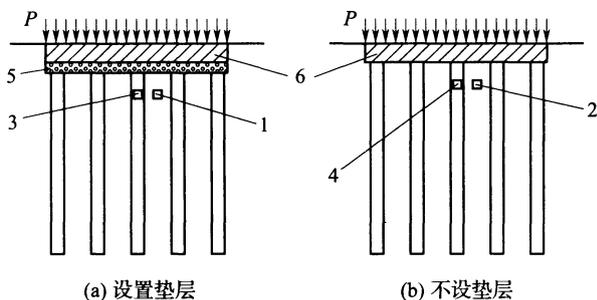


图 4 混凝土基础下复合地基示意

1—桩间土单元 A1; 2—桩间土单元 A2; 3—桩体单元 B1;

4—桩体单元 B2; 5—砂石垫层; 6—刚性基础

从上面的分析可以看到,混凝土基础下复合地基中设置砂石垫层,一方面可以增加桩间土承担荷载的比例,充分利用桩间土地基承载能力;另一方面可以改善桩体上端的受力状态,这对低强度桩复合地基是很有意义的。

混凝土基础下采用黏结材料桩复合地基形式时,视桩土相对刚度大小决定在复合地基上是否设置垫层。桩土相对刚度较大,而且桩体强度较小时,应设置垫层。通过设置柔性垫层可有效减小桩土应力比,改善接近桩顶部分桩体的受力状态。混凝土基础下黏结材料桩复合地基桩土相对刚度较小,或桩体强度足够时,也可不设置垫层。混凝土基础下设置砂石垫层对复合地基性状的影响程度与垫层厚度有关。以桩土荷载分担比为例,垫层厚度愈厚,桩土荷载分担比愈小。但当垫层厚度达到一定数值后,仍继续增加,桩土荷载分担比并不会继续减小。

与混凝土基础下设置柔性砂石垫层作用相反,在填土路堤和柔性面层堆场下的复合地基上设置刚度较大的垫层,可有效增加桩体承担荷载的比例,发挥桩的承载能力,提高复合地基承载力,有效减小复合地基的沉降。可采用灰土垫层、土工格栅加筋垫层、碎石垫层等。

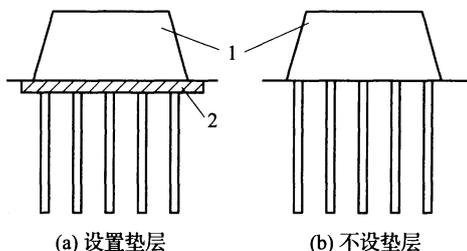


图5 路堤下复合地基示意

1—路堤;2—土工格栅加筋垫层

4 复合地基勘察要点

4.0.1 根据附近场地已有地质资料或初步勘察成果确定是否采用复合地基方案及可能的增强体类型,因此本规范中勘察要点主要针对详勘阶段或补勘阶段勘察。为了增强勘察工作的针对性和目的性,勘察要求可由设计人员制订或确认。

4.0.2 承受竖向荷载的复合地基控制性勘探孔深度,对中~低压缩性土可取地基附加应力小于或等于上覆土层有效自重应力20%的深度,对高压缩性土可取地基附加应力小于或等于上覆土层有效自重应力10%的深度。需验算地基稳定性的工程勘探孔深度应超过最危险滑动面5m或穿透软弱土层进入硬土层3m。

4.0.3 软黏土含水量高于70%,不排水抗剪强度小于15kPa时,散体材料桩(墩)或灌注桩扩孔严重,采用这些桩(墩)时需要测定软黏土的含水量和不排水抗剪强度。

采用水泥作为黏结材料的桩会受腐蚀性地下水、腐蚀性土的腐蚀,水泥与地基土拌和时水泥的黏结质量受有机质含量、土体pH的影响。因此,采用水泥作为黏结材料的桩应查明地下水、土的腐蚀性,水泥与地基土拌和时应查明地基土的有机质含量、pH值等。

欠固结软黏土对采用深层搅拌桩、高压旋喷桩、刚性桩的复合地基有影响,因此,应查明软黏土的超固结比。

填土路堤和柔性面层堆场下复合地基应进行稳定分析,应查明稳定分析需要的抗剪强度指标,包括荷载填料的抗剪强度指标。刚度较大基础下的水泥土桩复合地基、填土路堤和柔性面层堆场等工程的复合地基可能需要进行固结分析,应查明软黏土的固结系数。

5 复合地基计算

5.2 承载力计算

5.2.1 本规范公式(5.2.1-1)中 k_p 反映复合地基中桩体实际竖向抗压承载力与自由单桩竖向抗压承载力之间的差异,与施工工艺、复合地基置换率、桩间土工程性质、桩体类型等因素有关,多数情况下可能稍大于 1.0,一般情况下可取 $k_p = 1.0$; k_s 反映复合地基中桩间土地基实际承载力与天然地基承载力之间的差异,与桩间土的工程性质、施工工艺、桩体类型等因素有关,多数情况下大于 1.0,特别在可挤密地基中进行挤土桩施工后,桩间土地基实际承载力比天然地基承载力有较大幅度提高。 λ_p 反映复合地基破坏时桩体竖向抗压承载力发挥程度,混凝土基础下复合地基中桩体竖向抗压承载力发挥系数(λ_p)可取 1.0,而填土路堤和柔性面层堆场下的 λ_p 取值宜小于 1.0。 λ_s 反映复合地基破坏时桩间土地基承载力的发挥程度,混凝土基础下复合地基中桩间土地基承载力发挥系数(λ_s)取值宜小于 1.0,而填土路堤和柔性面层堆场下 λ_s 可取 1.0。

本规范公式(5.2.1-2)中 β_p 综合反映了复合地基中桩体实际竖向抗压承载力与自由单桩竖向抗压承载力之间的差异,以及复合地基破坏时桩体竖向抗压承载力发挥程度, $\beta_p = k_p \lambda_p$; β_s 综合反映了复合地基中桩间土地基实际承载力与天然地基承载力之间的差异,以及复合地基破坏时桩间土地基承载力发挥程度, $\beta_s = k_s \lambda_s$ 。

单根桩分担的地基处理面积的等效圆直径(d_e)的具体计算方法如下:对等边三角形布桩, $d_e = 1.05s$;正方形布桩, $d_e = 1.13s$;矩形布桩 $d_e = 1.13 \sqrt{s_1 s_2}$,其中 s 、 s_1 、 s_2 分别为桩间距、纵向间距和横向间距。

5.2.2 采用本规范公式(5.2.2-1)计算由桩周土和桩端土的抗力提供的单桩竖向抗压承载力特征值和采用本规范公式(5.2.2-2)计算由桩体材料强度提供的单桩竖向抗压承载力特征值时,应重视下述几点:

1 采用本规范公式(5.2.2-1)计算由桩周土和桩端土的抗力提供的单桩竖向抗压承载力特征值时,对柔性桩应重视桩的有效长度。当实际桩长大于桩的有效桩长时,应取有效桩长计算单桩竖向抗压承载力特征值。桩的有效桩长与桩土相对刚度有关。

2 采用本规范公式(5.2.2-2)计算由桩体材料强度提供的单桩竖向抗压承载力特征值时,应重视对各种刚性桩和柔性桩参数的物理意义和取值大小的差异。

3 刚性桩复合地基设计中宜使由本规范公式(5.2.2-2)计算得到的单桩竖向抗压承载力特征值大于由本规范公式(5.2.2-1)计算得到的单桩竖向抗压承载力特征值,以满足长期工作条件下,由于土体蠕变等因素造成桩土荷载分担比增大。

4 柔性桩复合地基设计中应力求由本规范公式(5.2.2-1)计算得到的单桩竖向抗压承载力特征值和由本规范公式(5.2.2-2)计算得到的单桩竖向抗压承载力特征值接近,以取得较好经济效益。

5.2.3 散体材料桩的竖向抗压承载力主要取决于桩周土所能提供的侧限力。计算桩周土所能提供的侧限力的计算方法很多,如Brauns(1978)计算式、圆孔扩张理论计算式、Wong H. Y. (1975)计算式、Hughes和Withers(1974)计算式,以及经验公式等。对重要工程建议多种计算式估算,结合工程经验合理选用桩周土所能提供的侧限力。

5.3 沉降计算

5.3.4 当复合地基加固区下卧土层压缩性较大时,复合地基沉降主要来自加固区下卧土层的压缩。复合地基加固区下卧土层压缩

变形量(s_2)计算中,作用在复合地基加固区下卧层顶部的附加压力较难计算。作用在复合地基加固区下卧层顶部的附加压力宜根据复合地基类型分别按下列公式计算:

对散体材料桩复合地基宜采用压力扩散法(见图6),可按下列式计算:

$$N = LBp_0 \quad (2)$$

$$p_z = \frac{LBp_0}{(a_0 + 2htan\theta)(b_0 + 2htan\theta)} \quad (3)$$

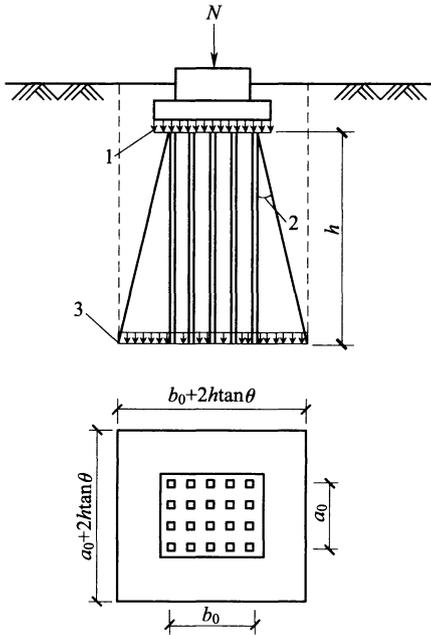


图6 压力扩散法计算

1— p_0 ; 2— θ ; 3— p_z

对刚性桩复合地基宜采用等效实体法(见图7),可按下列式计算:

$$p_z = \frac{LBp_0 - (2a_0 + 2b_0)hf}{LB} \quad (4)$$

式中： p_z ——荷载效应标准组合时，软弱下卧层顶面处的附加压力值(kPa)；

L ——矩形基础底边的长度(m)；

B ——矩形基础或条形基础底边的宽度(m)；

h ——复合地基加固区的深度(m)；

a_0 ——基础长度方向桩的外包尺寸(m)；

b_0 ——基础宽度方向桩的外包尺寸(m)；

p_0 ——复合地基加固区顶部的附加压力(kPa)；

θ ——压力扩散角($^\circ$)；

f ——复合地基加固区桩侧摩阻力(kPa)。

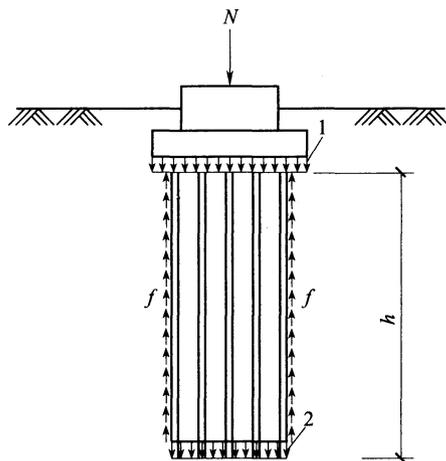


图7 等效实体法计算

1— p_0 ；2— p_z

对柔性桩复合地基，可视桩土模量比采用压力扩散法或等效实体法计算。

采用压力扩散法计算较困难的是压力扩散角的合理选用。研究表明：虽然公式(3)同双层地基中压力扩散法计算第二层土上的附加应力计算式形式相同，但要重视复合地基中压力扩散角与双

层地基中压力扩散角数值是不同的。

杨慧(2000)采用有限元法分析比较了复合地基和双层地基中压力扩散情况。在分析中将作用在复合地基加固区下卧层顶部和双层地基两层土界面上荷载作用面对应范围内的竖向应力取平均值,并依此平均值计算压力扩散角。计算中复合地基加固区深度和双层地基上一层厚度相同,取 $h=10\text{m}$ 。复合地基加固区下卧层土体和双层地基下一层土体模量相同,取 $E_2=5\text{MPa}$,复合地基加固体和双层地基上一层土体模量相同,为 E_1 。首先讨论压力扩散角(θ)随 h/B 的变化情况, B 为基础宽度。当 $E_1/E_2=1.0$ 时,此时复合地基和双层地基均蜕化成均质地基。复合地基和双层地基压力扩散角随 h/B 的变化曲线重合(图 8)。

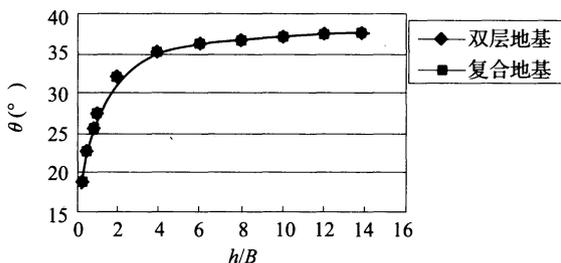


图 8 扩散角(θ)与 h/B 变化曲线($h=10\text{m}, E_1/E_2=1.0$)

随着 E_1/E_2 值的增大,复合地基和双层地基压力扩散角随 h/B 的变化曲线差距增大(图 9),双层地基扩散角大于复合地基的扩散角。

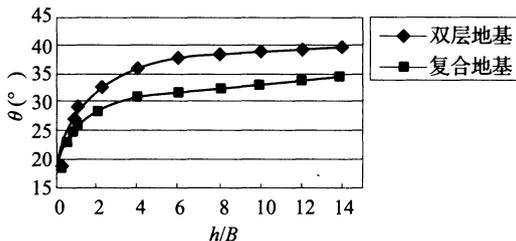


图 9 扩散角(θ)与 h/B 变化曲线($h=10\text{m}, E_1/E_2=1.4$)

取 $h=10\text{m}$, $E_2=5\text{MPa}$, $h/B=1.0$, 分析扩散角随模量比 (E_1/E_2) 变化关系 (图 10), 发现, 双层地基中压力扩散角随着模量比的增大而迅速增大, 复合地基的扩散角随着模量比的增大稍有减小。

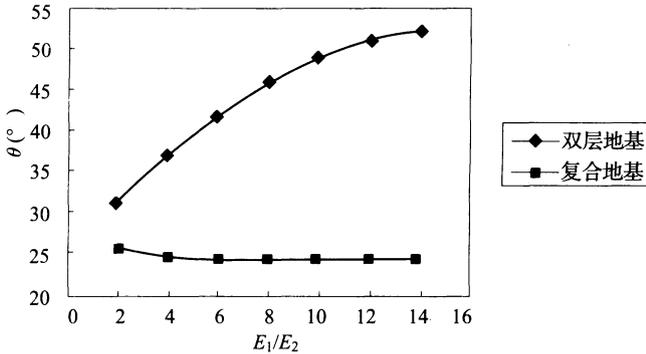


图 10 扩散角 (θ) 与模量比 (E_1/E_2) 关系曲线

根据前面分析, 在荷载作用下双层地基与复合地基中附加应力场分布及变化规律有着较大的差别, 将复合地基认为双层地基, 低估了深层土层中的附加应力值, 在工程上是偏不安全的。采用压力扩散法计算作用在加固区下卧土层上的附加应力时, 需要重视压力扩散角的合理选用。

研究表明: 采用等效实体法计算作用在加固区下卧土层上的附加应力, 误差主要来自侧摩阻力 (f) 的合理选用。当桩土相对刚度较大时, 选用误差可能较小。当桩土相对刚度较小时, 侧摩阻力 (f) 变化范围很大, f 选值比较困难, 很难合理估计其平均值。事实上, 将加固体作为一分离体, 两侧面上剪应力分布是非常复杂的。采用侧摩阻力的概念是一种近似, 应用等效实体法计算作用在加固区下卧土层上的附加应力时, 需要重视 f 的合理取值。

当桩土相对刚度较大时, 采用等效实体法计算作用在加固区下卧土层上的附加应力时误差可能较小, 而当桩土相对刚度较小时, 采用压力扩散法计算作用在加固区下卧土层上的附加应力时

误差可能较小。建议采用上述两种方法进行计算,然后通过比较分析,并结合工程经验,作出判断。

5.4 稳定分析

5.4.1 复合地基稳定分析中强调采用的稳定分析方法、分析中的计算参数、计算参数的测定方法、稳定性安全系数取值四者应相互匹配非常重要。岩土工程中稳定分析方法很多,所用计算参数也多。以饱和黏性土为例,抗剪强度指标有有效应力指标和总应力指标两类,也可直接测定土的不排水抗剪强度。采用不同试验方法测得的抗剪强度指标值,或不排水抗剪强度值是有差异的。甚至取土器不同也可造成较大差异。对灵敏度较大的软黏土,采用薄壁取土器取样试验得到的抗剪强度指标值比一般取土器取的大30%左右。在岩土工程稳定分析中取的安全系数值一般是特定条件下的经验总结。目前不少规程规范,特别是商用岩土工程稳定分析软件中不重视上述四者相匹配的原则,采用再好的岩土工程稳定分析方法也难以取得客观的分析结果,失去进行稳定分析的意义,有时会酿成工程事故,应予以充分重视。

5.4.4 复合地基稳定分析方法宜根据复合地基类型合理选用。

对散体材料桩复合地基,稳定分析中最危险滑动面上的总剪切力可由传至复合地基面上的总荷载确定,最危险滑动面上的总抗剪切力计算中,复合地基加固区强度指标可采用复合土体综合抗剪强度指标,也可分别采用桩体和桩间土的抗剪强度指标;未加固区可采用天然地基土体抗剪强度指标。

对柔性桩复合地基可采用上述散体材料桩复合地基稳定分析方法。在分析时,应视桩土模量比对抗力的贡献进行折减。

对刚性桩复合地基,最危险滑动面上的总剪切力可只考虑传至复合地基桩间土地基面上的荷载,最危险滑动面上的总抗剪切力计算中,可只考虑复合地基加固区桩间土和未加固区天然地基土体对抗力的贡献,稳定安全系数可通过综合考虑桩体类型、复合

地基置换率、工程地质条件、桩持力层情况等因素确定。稳定分析中没有考虑由刚性桩承担的荷载产生的滑动力和刚性桩抵抗滑动的贡献。由于没有考虑由刚性桩承担的荷载产生的滑动力的效应可能比刚性桩抵抗滑动的贡献要大,稳定分析安全系数应适当提高。

6 深层搅拌桩复合地基

6.1 一般规定

6.1.1 深层搅拌桩是适用于加固饱和黏性土和粉土等地基的一种较常用的地基加固方法。它是利用水泥作为固化剂通过特制的搅拌机械,就地边钻进搅拌、边向软土中喷射浆液或雾状粉体,将软土固化成为具有整体性、水稳性和一定强度的水泥加固土,提高地基稳定性,增大加固土体变形模量。以深层搅拌桩与桩间土构成复合地基。

根据施工方法的不同,它可分为喷浆搅拌法和喷粉搅拌法两种。前者是用固化剂浆液和地基土搅拌,后者是用固化剂粉体和地基土搅拌。

水泥浆搅拌法是美国在第二次世界大战后研制成功的,称为 Mixed-in-Place Pile(简称 MIP 法),当时桩径为 0.30m~0.40m,桩长为 10m~12m。1953 年日本引进此法,1967 年日本港湾技术研究所土工部研制石灰搅拌施工机械,1974 年起又研制水泥搅拌固化法 Clay Mixing Consolidation(简称 CMC 工法),并接连开发出机械规格和施工效率各异的搅拌机械。这些机械都具有偶数个搅拌轴(二轴、四轴、六轴、八轴),搅拌叶片的直径最大可达 1.25m,一次加固面积达 9.50m²。

目前,日本有海上和陆上两种施工机械。陆上的机械为双轴搅拌机,成孔直径为 1000mm,最大钻深达 40m。而海上施工机械有多种类型,成孔的最大直径为 2000mm,最多的搅拌轴有 8 根(2×4,即一次成孔 8 个),最大的钻孔深度为 70m(自水面向下算起)。

1978 年,国内开始研究并于年底制造出我国第一台 SJB-1 型双搅拌轴中心管输浆的搅拌机械,1980 年初在上海软土地基加固

工程中首次获得成功。1980年开发了单搅拌轴和叶片输浆型搅拌机,1981年开发了我国第一代深层水泥拌和船。该机双头拌和,叶片直径达1.2m,间距可自行调控,施工中各项参数可监控。1992年首次试制成搅拌斜桩的机械,最大加固深度达26m,最大斜度为19.6°。2002年为配合SMW工法上海又研制出两种三轴钻孔搅拌机(ZKD65-3型和ZKD85-3型),钻孔深度达27m~30m,钻孔直径为650mm~850mm。目前上海又研发了四轴深层搅拌机,搅拌成孔的直径为700mm,钻孔深度达25.2m,型钢插入深度24m,成墙厚度1.3m。

目前国内部分水泥浆搅拌机的机械技术参数参见表1和表2。

表1 水泥浆搅拌机技术参数(1)

水泥浆搅拌机类型		SJB-30	SJB-40	GZB-600	DJB-14D
搅拌机	搅拌轴数量(根)	2	2	1	1
	搅拌叶片外径(mm)	700	700	600	500
	转速(r/min)	43	43	50	60
	电动机功率(kW)	2×30	2×40	2×30	2×22
起吊设备	提升能力(kN)	>100	>100	150	50
	提升高度(m)	>14	>14	14	19.5
	提升速度(m/min)	0.20~1.00	0.20~1.00	0.60~1.00	0.95~1.20
	接地压力(kPa)	60	60	60	40
固化剂制备系统	灰浆拌制台数×容量(L)	2×200	2×200	2×500	2×200
	灰浆泵量(L/min)	HB6-3 50	HB6-3 50	AP-15-B 281	UBJ ₂ 33
	灰浆泵工作压力(kPa)	1500	1500	1400	1500
	集料斗容量(L)	400	400	180	—
技术指标	一次加固面积(m ²)	0.71	0.71	0.28	0.20
	最大加固深度(m)	10~12	15~18	10~15	19
	效率(m/台班)	40~50	40~50	60	100
	总质量(t)	4.5	4.7	12.0	4.0

表 2 水泥浆搅拌机技术参数(2)

水泥浆搅拌机类型		GDP-72	GDPG-72	ZKD65-3	ZDK85-3
搅拌机	搅拌轴数量(根)	2	2	3	3
	搅拌叶片外径(mm)	700	700	650	850
	转速(r/min)	46.0	46.0	17.6	16.0
	电动机功率(kW)	2×37	2×37	2×45	2×75
起吊设备	提升能力(kN)	>150	>150	250	250
	提升高度(m)	23	23	30	30
	提升速度(m/min)	0.64~1.12	0.37~1.16	轴中心距 450mm	轴中心距 600mm
	接地压力(kPa)	38	—		
移动系统	移动方式	步履	滚筒	履带	履带
	纵向行程(m)	1.2	5.5	—	—
	横向行程(m)	0.7	4.0	—	—
技术指标	一次加固面积(m ²)	0.71	0.71	0.87	1.50
	最大加固深度(m)	18	18	30	27
	效率(m/台班)	100~120	100~120	—	—
	总重量(t)	16	16	—	—

喷粉搅拌法(Dry Jet Mixing Method,简称 DJM 法)最早由瑞典人 Kjeld Paus 于 1967 年提出了使用石灰搅拌桩加固 15m 深度范围内软土地基的设想,并于 1971 年瑞典 Linden-Ali Mat 公司在现场制成第一根用石灰粉和软土搅拌成的桩。1974 年获得粉喷技术专利。生产出的专用机械成桩直径 500mm,加固深度 15m。

我国于 1983 年用 DP100 型汽车钻改装成国内第一台粉体喷射搅拌机,并使用石灰作为固化剂,应用于铁路涵洞加固。1986 年使用水泥作为固化剂,应用于房屋建筑的软土地基加固。1987 年研制成 GPP-5 型步履式粉喷机,成桩直径 500mm,加固深度 12.5m,其性能指标可参见表 3。当前国内搅拌机械的成桩直径一般为 500mm~700mm,深度可达 15m。

表 3 GPP-5 型喷粉搅拌机技术性能

搅拌机	搅拌轴规格 (mm)	108×108× (7500+5500)	YP-1 型粉 体喷 射机	储料量(kg)	2000
	搅拌翼外径 (mm)	500		最大送粉 压力(MPa)	0.5
	转速 (r/min)	正(反) 28,50,92		送粉管直径 (mm)	50
	转矩 (kN·m)	4.9,8.6		最大送粉量 (kg/min)	100
	电动机功率 (kW)	30		外形规格 (m)	2.70×1.82× 2.46
起吊 设备	井架结构高度 (m)	14(门型-3级)	技术 参数	一次加固面积 (m ²)	0.20
	提升力 (kN)	78.4		最大加固深度 (m)	12.5
	提升速度 (m/min)	0.48,0.80,1.47		总重量(t)	9.25
	接地压力 (kPa)	34		移动方式	液压步履

近十多年来,在珠江三角洲、长江三角洲等沿海软土地基中,水泥土搅拌法被广泛应用,这些工程中有沪宁、沪杭、深广等高速公路工程,港口码头、防汛墙、水池等市政工程,以及建(构)筑物(如大型油罐)的软土地基加固等工程。

存在流动地下水的饱和松散砂土中施工水泥土搅拌法,固化剂在尚未硬结时易被流动的地下水冲掉,加固效果受影响,施工质量较难控制。

地基土的天然含水量小于30%时,喷粉搅拌法施工不能使水泥充分水化,影响加固效果。

冬期施工时,应考虑负温对处理效果的影响。

6.1.2 搅拌桩用于特殊地基土及无工程经验的地区时,需采取针对性措施,以控制加固效果。因此,应通过现场试验(包括室内配比试验)确定其适用性。

水泥与有机质土搅拌会阻碍水泥水化反应,影响水泥土强度增长。在有机质地基土中采用水泥土搅拌法,宜采取提高水泥掺量,添加磷石膏(水泥中加磷石膏 5%后可使水泥土强度提高 2 倍~4 倍)等措施。

当黏土的塑性指数(I_p)大于 25 时,施工中容易在搅拌头叶片上形成泥团,无法使固化剂与土拌和。在塑性指数(I_p)大于 25 的黏土地基土中采用搅拌桩,宜调整钻头叶片、喷浆系统和施工工艺等。

地下水的 pH 值小于 4 时,水中的酸性物质与水泥发生反应,对水泥土具有结晶性侵蚀,会使水泥出现开裂、崩解而丧失强度,加固效果较差。在地下水的 pH 值小于 4 的地基土中采用水泥土搅拌法,宜采取掺加石灰,选用耐酸性水泥等措施。

6.1.3 近年来,搅拌桩与其他方法的联合应用得到了很大发展,如搅拌桩与刚性桩的联合应用(劲芯搅拌桩、刚-柔性桩复合地基、长-短桩复合地基等)。

其中,针对高速公路建设特点提出了长板-短桩工法(简称 D-M 工法)(图 11),该工法是由长的竖向排水体(砂井、袋装砂井、塑料排水板)、短的搅拌桩(浆喷桩、粉喷桩)和垫层组成。

长板-短桩工法的提出是为了发挥预压排水固结法和水泥土搅拌桩法的自身优点,克服其处理深厚软基的不足。该工法的特点是将高速公路填土施工和预压的过程作为路基处理的过程,充分利用填土荷载加速路基沉降,以达到减小工后沉降的目的。该工法适用于填方路堤下(或存在预压荷载的地基,如油罐地基)软土层厚度大于 10m 的深厚淤泥、淤泥质土及冲填土等饱和黏性土的地基处理。特别适用于地表存在薄层硬壳层和深部软土存在连续薄砂层的地基。

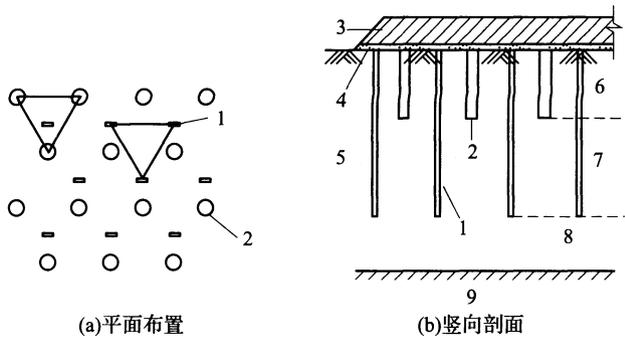


图 11 长板-短桩工法模式

1—塑料排水板;2—水泥土桩;3—填土路基;4—垫层;5—软土层;
6—复合层;7—固结层;8—未加固层;9—非软弱层

在采用长板-短桩工法处理深厚软土地基时,根据长板与短桩的作用机理与特点,在地基剖面上可划分为:①水泥土搅拌桩复合地基层(简称复合层);②预压排水固结层(简称固结层);③未加固处理的原状软土层(简称未加固层)。

长板-短桩工法处理软土路基的特点为:

- 1 搅拌桩解决了浅部路基的稳定性。
- 2 排水板解决了下卧层的排水固结。
- 3 充分利用高速公路路堤的填土期作为预压期。
- 4 对深厚软土长板和短桩的施工质量容易得到保证。
- 5 可以协调桥头段和一般路段相邻之间的工后沉降速率。
- 6 特别适用于深厚软土路基的处理。
- 7 具有可观的经济效益。

6.1.4 对拟采用搅拌桩的工程,应搜集拟处理区域内详尽的岩土工程资料,包括:

1 填土层的组成:特别是大块物质(石块和树根等)的尺寸和含量,大块石对搅拌桩施工速度有很大的影响,所以应清除大块石再施工。

2 土的含水量:当固化剂配方相同时,其强度随土样天然含水量的降低而增大。试验表明,当土的含水量在 50%~85% 范围内变化时,含水量每降低 10%,水泥石强度可提高 30%。

3 有机质含量:有机质含量较高会阻碍水泥水化反应,影响水泥石的强度增长。故对有机质含量较高的明、暗浜填土及冲填土应予慎重考虑。为提高水泥石强度宜增加水泥掺入量、添加磷石膏。对生活垃圾的填土不应采用搅拌桩加固。

4 水质分析:对地下水的 pH 值以及硫酸盐含量等进行分析,以判断对水泥侵蚀性的影响。

6.1.5 水泥石的强度随龄期的增长而增大,在龄期超过 28d 后,强度仍有明显增长,故对承重搅拌桩试块国内外都取 90d 龄期为标准龄期。从抗压强度试验得知,在其他条件相同时,不同龄期的水泥石抗压强度间关系大致如下:

$$f_{cu7} = (0.47 \sim 0.63) f_{cu28}$$

$$f_{cu14} = (0.62 \sim 0.80) f_{cu28}$$

$$f_{cu60} = (1.15 \sim 1.46) f_{cu28}$$

$$f_{cu90} = (1.43 \sim 1.80) f_{cu28}$$

$$f_{cu90} = (2.37 \sim 3.73) f_{cu7}$$

$$f_{cu60} = (1.73 \sim 2.82) f_{cu14}$$

上述 f_{cu7} 、 f_{cu14} 、 f_{cu28} 、 f_{cu60} 、 f_{cu90} 分别为 7d、14d、28d、60d、90d 龄期的水泥石抗压强度。

当龄期超过三个月后,水泥石强度增长缓慢。180d 的水泥石强度为 90d 的 1.25 倍,而 180d 后水泥石强度增长仍未终止。

6.2 设计

6.2.1 固化剂掺入比应根据设计要求的固化土强度经室内配比试验确定,目前国内大部分均采用水泥作为固化剂材料。采用水泥为固化剂时,水泥掺入比可取 10%~20%。喷浆搅拌法的水泥浆水灰比应根据施工时的可喷性和不同的施工机械合理选用,宜

取 0.45~0.60。外掺剂可根据设计要求和土质条件选用具有早强、缓凝、减水以及节省水泥等作用的材料,且应避免污染环境。

当其他条件相同时,在同一土层中水泥掺入比不同,水泥土强度将不同。当水泥掺入比大于 10%时,水泥土强度可达 0.3MPa~2.0MPa。水泥土的抗压强度随其相应的水泥掺入比的增加而增大,且具有较好的相关性,经回归分析,可得到两者呈幂函数关系,其关系可按式确定:

$$\frac{f_{cu1}}{f_{cu2}} = \left(\frac{a_{w1}}{a_{w2}} \right)^{1.77} \quad (5)$$

式中: f_{cu1} ——水泥掺入比为 a_{w1} 的水泥土抗压强度(kPa);

f_{cu2} ——水泥掺入比为 a_{w2} 的水泥土抗压强度(kPa)。

上式成立的条件是 $a_w = 10\% \sim 20\%$ 。

水泥强度等级直接影响水泥土的强度,水泥强度等级提高 10 级,水泥土抗压强度约增大 20%~30%。如达到相同强度,水泥强度等级提高 10 级可降低水泥掺入比 2%~3%。

常用的早强(速凝)剂有:三乙醇胺、氯化钠、碳酸钠、水玻璃。掺入量宜分别取水泥重量的 0.05%、2.00%、0.50%、2.00%。缓凝剂有:石膏、磷石膏。石膏兼有缓凝和早强作用,其掺入量宜取水泥重量的 2.00%。磷石膏掺入量宜取水泥重量的 5.00%。减水剂有:木质素磺酸钙,其掺入量宜取水泥重量的 0.20%,其对水泥土强度的增长影响不大。可节省水泥的掺料有:粉煤灰、高炉矿渣。当掺入与水泥等量的粉煤灰后,水泥土强度可提高 10%左右,故在加固软土时掺粉煤灰不仅可消耗工业废料,还可对水泥土强度有所提高。

6.2.2 从承载力角度看提高置换率比增加桩长的效果更好,但增加桩长有利于减少沉降。为了充分发挥桩间土的承载力和复合地基的潜力,应使由土的抗力确定的单桩竖向抗压承载力与由桩体强度所确定的单桩竖向抗压承载力接近,并使后者略大于前者较为安全和经济。当桩端穿越软弱土层到达承载力相对较高的土层

时,有利于控制沉降。搅拌桩长度宜超过危险滑弧,在软弱土层中可利用搅拌桩桩体的力学性能提高抗滑稳定性。

6.2.3 β_p 和 β_s 是反映桩土共同作用的参数。刚性基础下铺设垫层会降低桩体竖向抗压承载力的发挥度。桩体强度对 β_s 也有影响,即使桩端是硬土,当桩体强度很低,桩体压缩变形依然很大,此时桩间土就承受较大荷重, β_s 值可能大于 0.5。

确定 β_s 值还应根据工程对沉降要求而有所不同。当工程对沉降要求控制较严时,即使桩端是软土, β_s 值也应取小值,这样较为安全;当工程对沉降要求控制较低时,即使桩端为硬土, β_s 值也可取大值,这样较为经济。

6.2.4 本规范公式(5.2.2-1)中第 i 层土的桩侧摩阻力特征值(q_{si})是对现场竖向抗压载荷试验结果和已有工程经验的总结,对淤泥可取 4kPa~7kPa,对淤泥质土可取 6kPa~12kPa,对软塑状态的黏性土可取 10kPa~15kPa,对可塑状态的黏性土可取 12kPa~18kPa,对稍密砂土可取 15kPa~20kPa,对中密砂土可取 20kPa~25kPa;桩端土地基承载力特征值(q_p)可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定确定;桩端土地基承载力折减系数(α)可取 0.4~0.6,承载力高时取低值。本规范公式(5.2.2-2)中 f_{cu} 为与搅拌桩桩体水泥土配比相同的室内加固土试块(边长为 70.7mm 的立方体,也可采用边长为 50mm 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;桩体强度折减系数(η)是一个与工程经验以及拟建工程性质密切相关的参数,工程经验包括对施工队伍素质、施工质量、室内强度试验、实际加固强度,以及对实际工程加固效果等情况的掌握。拟建工程性质包括地质条件、上部结构对地基的要求,以及工程的重要性等,目前在设计中喷粉搅拌法可取 0.20~0.30,喷浆搅拌法可取 0.25~0.33。

对本规范公式(5.2.2-1)和公式(5.2.2-2)进行分析可以看出,当桩体强度足够时,相同桩长桩的竖向抗压承载力相近,而不同桩长桩的竖向抗压承载力明显不同。此时桩的竖向抗压承载力

由地基土支持力[公式(5.2.2-1)]控制,增加桩长可提高桩的竖向抗压承载力。当桩体强度有限时,承载力受桩体强度[公式(5.2.2-2)]控制。对某一地区的搅拌桩,其桩体强度是有一定限制的,也就是说,搅拌桩从承载力角度,存在一有效桩长,单桩竖向抗压承载力在一定程度上并不随桩长的增加而增大。但当软弱土层较厚,从减少地基的沉降量方面考虑,应设计较长桩长,原则上,桩长应穿透软弱土层到达下卧强度较高的土层或以地基变形控制。

6.2.5 在混凝土基础和水泥土搅拌桩之间设置垫层,能调整桩和桩间土的荷载分担作用,有利于桩间土地基承载力的发挥。在桩头的抗压强度大于基底的压应力而不至于被压坏时,桩顶面积范围内可不铺设垫层,使混凝土基础直接与搅拌桩接触,有利于桩侧摩阻力的发挥。

6.2.6 根据室内模型试验和搅拌桩的加固机理分析,其桩体轴向应力自上而下逐渐减小,其最大轴力位于桩顶3倍桩径范围内。因此,在搅拌桩单桩设计中,为节省固化剂材料和提高施工效率,设计时可采用沿桩长变掺量的施工工艺。现有工程实践证明,这种变掺量的设计方法能获得良好的技术经济效果。在变掺量设计中,在全桩水泥总掺量不变的前提下,桩体上部1/3桩长范围内可增加水泥掺量及搅拌次数,桩体下部1/3桩长范围内可减少水泥掺量。通过改变搅拌直径也可达到同样目的。

6.2.7 水泥土桩的布置形式对加固效果有很大影响,宜根据工程地质特点和上部结构要求采用柱状、壁状、格栅状和块状以及长-短桩相结合等不同加固形式。

1 柱状:每隔一定距离打设一根水泥土桩,形成柱状加固形式,适用于单层工业厂房独立柱基础和多层房屋条形基础下的地基加固,它可充分发挥桩体强度与桩侧摩阻力。柱状处理可采用正方形或等边三角形布桩形式,其总桩数可按下式计算:

$$n = mA/A_p \quad (6)$$

式中： n ——总桩数；

A ——基础底面积(m^2)；

m ——面积置换率；

A_p ——单桩截面积(m^2)。

2 壁状：将相邻桩体部分重叠搭接成为壁状加固形式，适用于建筑物长高比大、刚度小、对不均匀沉降比较敏感的多层房屋条形基础下的地基加固。

3 格栅状：它是纵横两个方向的相邻桩体搭接而形成的加固形式。适用于上部结构单位面积荷载大和对不均匀沉降要求控制严格的工程。

4 长-短桩相结合：当地质条件复杂，同一建筑物坐落在两类不同性质的地基土上时，可在长桩间插入短桩或用 3m 左右的短桩将相邻长桩连成壁状或格栅状，以调整和减小不均匀沉降量。

搅拌桩形成的桩体在无侧限情况下可保持直立，在轴向力作用下又有一定的压缩性，因此在设计时可仅在上部结构基础范围内布桩，不必像散体材料桩一样在基础外设置护桩。

对于一般建筑物，都是在满足强度要求的条件下以沉降控制的，应采用下列沉降控制设计思路：

1 根据地层结构进行地基沉降计算，由建筑物对变形的要求确定加固深度，即选择施工桩长。

2 根据土质条件、固化剂掺量、室内配比试验资料和现场工程经验选择桩体强度和固化剂掺入量及有关施工参数。

3 根据桩体强度的大小及桩的断面尺寸，由本规范公式(5.2.2-1)或公式(5.2.2-2)计算单桩竖向抗压承载力。

4 根据单桩竖向抗压承载力和上部结构要求达到的复合地基承载力，由本规范公式(5.2.1-2)计算桩土面积置换率。

5 根据桩土面积置换率和基础形式进行布桩，桩可只在基础平面范围内布置。

6.2.8 搅拌桩加固设计中往往以群桩形式出现，群桩中各桩与单

桩的工作状态迥然不同。试验结果表明,双桩竖向抗压承载力小于两根单桩竖向抗压承载力之和;双桩沉降量大于单桩沉降量。可见,当桩距较小时,由于应力重叠产生群桩效应。因此,在设计时当搅拌桩的置换率较大($m > 20\%$),且非单行排列,桩端下又存在较软弱的土层时,应将桩与桩间土视为一个假想的实体基础,以验算软弱下卧层的地基强度。

6.3 施 工

6.3.1 国产搅拌头大都采用双层(或多层)十字杆型。这类搅拌头切削和搅拌加固软土十分合适,对块径大于 100mm 的石块、树根和生活垃圾等大块物的切割能力较差,即使将搅拌头作加固处理后能穿过块石层,但施工效率较低,机械磨损严重。因此,施工前应先挖除大块物再填素土,增加的工程量不大,但施工效率却可大大提高。

6.3.2 施工前应确定搅拌机械的灰浆泵输浆量、灰浆经输浆管到搅拌机喷浆(粉)口的时间和起吊设备提升速度等施工参数,并根据设计要求通过工艺性成桩试验,确定搅拌桩的配比、喷搅次数和水泥掺量等各项参数和施工工艺。为提高相对软弱土层中的搅拌桩体强度,应适当增加搅拌次数和固化剂掺量。

6.3.4 搅拌机施工时,搅拌次数越多,则拌和越均匀,水泥土强度也越高,但施工效率降低。试验证明,当加固范围内土体任一点的水泥土经过 20 次的拌和,其强度即可达到较高值。搅拌次数(N)由下式计算:

$$N = \frac{h \cdot \cos\beta \cdot \sum Z_n}{V} \quad (7)$$

式中: h ——搅拌叶片的宽度(m);

β ——搅拌叶片与搅拌轴的垂直夹角($^\circ$);

$\sum Z$ ——搅拌叶片的总枚数;

n ——搅拌头的回转数(r/min);

V ——搅拌头的提升速度(m/min)。

6.3.6 根据搅拌法实际施工经验,在施工到顶端 300mm~500mm,因上覆土压力较小,搅拌质量较差。因此,其场地整平标高应比设计确定的基底标高再高出 300mm~500mm,桩制作时仍施工到地面,待开挖基坑时,再将上部 300mm~500mm 的桩体质量较差的桩段挖去。

根据现场实践表明,当搅拌桩作为承重桩进行基坑开挖时,桩顶和桩体已有一定的强度,若用机械开挖基坑,往往容易碰撞损坏桩顶,因此基底标高以上 300mm 宜采用人工开挖,以围护桩头质量。

6.3.8 在预(复)搅下沉时,也可采用喷浆(粉)的施工工艺。

I 喷浆搅拌法

6.3.9 每一个搅拌施工现场,由于土质差异,固化剂品种不同,因而搅拌加固质量有较大的差别。所以在正式搅拌桩施工前,均应按施工组织设计确定的搅拌施工工艺,制作数根试桩,再最后确定水泥浆的水灰比、泵送时间、搅拌机提升速度和复搅深度等参数。

6.3.10 制桩质量的优劣直接关系到地基处理的加固效果。其中的关键是注浆量、注浆与搅拌的均匀程度。因此,施工中应严格控制喷浆提升速度。

施工中要有专人负责制桩记录,对每根桩的编号、固化剂用量、成桩过程(下沉、喷浆提升和复搅等时间)进行详细记录,质检员应根据记录,对照标准施工工艺,对每根桩进行质量评定。喷浆量及搅拌深度的控制,直接影响成桩质量,采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动记录,可有效控制成桩质量。

6.3.11 搅拌桩施工检查是检查搅拌桩施工质量和判明事故原因的基本依据,因此对每一延米的施工情况均应如实及时记录,不得事后回忆补记。

6.3.12 由于固化剂从灰浆泵到达出口需通过较长的输浆管,应考虑固化剂浆液到达桩端的流动时间。可通过试打桩后再确定其

输送时间。

II 喷粉搅拌法

6.3.13 粉喷桩机利用压缩空气通过固化剂供给机的特殊装置,经过高压软管和搅拌轴(中空的)将固化剂粉输送到搅拌叶片背后的喷粉口喷出,旋转后半周的另一搅拌叶片把土与固化剂搅拌混合在一起。这样周而复始地搅拌、喷射、提升,在土体内形成一个搅拌桩体,而与固化剂材料分离出的空气通过搅拌轴周围的空隙上升到地面释放掉。粉体喷射机(俗称灰罐)位置与搅拌机的施工距离超过 60m 时,送粉管的阻力增大,送粉量不易稳定。

6.3.14 粉喷桩机一般均已考虑提升速度与搅拌头转速的匹配,在不同的提升速度下,钻头每提升不超过 16mm 搅拌一圈,从而保证成桩搅拌的均匀性。但每次搅拌时,桩体将出现极薄软弱结构面,这对承受水平剪力是不利的。可通过复搅的方法来提高桩体的均匀性,消除软弱结构面,提高桩体抗剪强度。

6.3.16 含水量小于 30% 地基土中成桩往往是指地基浅部较薄的硬壳层,不是主要处理土层,成桩时如不及时在地面浇水,将使地下水位以上区段的桩体水化不完全,造成桩体强度降低。

6.4 质量检验

6.4.1 按搅拌桩的特点,对固化剂用量、桩长、搅拌头转数和提升速度、复搅次数和复搅深度、停浆处理等的控制应在施工过程中进行。施工全过程的施工监理可有效控制搅拌桩的施工质量。对每根制成的搅拌桩须随时进行检查;对不合格的桩应根据其位置和数量等具体情况,分别采取补桩或加强附近工程桩等措施。

6.4.2 搅拌桩的施工质量检验应符合下列规定:

1 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、搅拌均匀程度等。检查量可取总桩数的 5% 左右。

2 用钻孔方法连续取出搅拌桩桩芯,可直观地检验桩体强度和搅拌的均匀性。钻芯取样,制成试块,进行桩体实际强度测定。为保证试块尺寸,钻孔直径不宜小于 108mm。在钻芯取样的同时,可在不同深度进行标准贯入检验,通过标贯值判定桩体质量。检验数量根据工程情况确定,用于交通工程和建筑工程可有不同标准,一般可取施工总桩数的 1%~2%,且不少于 3 根。

3 单桩竖向抗压载荷试验宜在成桩 28d 后进行。检验数量根据工程情况确定,一般可取施工总桩数的 1%,且不少于 3 根。

6.4.3 深层搅拌桩复合地基竣工验收时,复合地基竖向抗压载荷试验检验数量可取总桩数的 0.5%~1.0%,且每项单体工程不应少于 3 点。

6.4.4 搅拌桩施工时,由于各种因素的影响,有可能不符合设计要求。只有基槽开挖后测放了建筑物轴线或基础范围后,才能对偏位桩的数量、部位和程度进行分析和确定补救措施。因此,搅拌桩的施工验收工作宜在开挖基槽后进行。

7 高压旋喷桩复合地基

7.1 一般规定

7.1.1 实践表明,高压旋喷桩复合地基对软塑~可塑黏性土、粉土、砂土、黄土、素填土和碎石土等地基都有良好的处理效果。但对于硬黏性土,含有较多的块石或大量植物根茎的地基,因喷射流可能受到阻挡或削弱,冲击破碎力急剧下降,切削范围减小,影响处理效果。而对于含有过多有机质的土层,其处理效果取决于固结体的化学稳定性。鉴于上述几种土组成复杂、差异悬殊,高压喷射注浆处理的效果差别较大,不能一概而论,原则上不宜采用高压旋喷桩复合地基,实在要采用,应进行现场试验确定适用性。对于湿陷性黄土地基,因当前试验资料和施工实例较少,亦应预先进行现场试验。对地下水流速过大或已涌水的防水工程,由于工艺、机具和瞬时速凝材料等方面的原因,应慎重使用,必要时应通过现场试验确定。高压喷射注浆处理深度较大,我国建筑地基高压喷射注浆处理深度目前已达30m以上。

7.1.2 在制订高压旋喷桩复合地基方案时,应搜集和掌握各种基本资料。主要是:岩土工程勘察资料(土层和基岩的性状,标准贯入击数,土的物理力学性质,地下水的埋藏条件、渗透性和水质成分等)、建筑物结构受力特性资料、施工现场和邻近建筑的四周环境资料、地下管道和其他埋设物资料及类似土层条件下使用的工程经验等。高压喷射注浆处理地基时,在浆液未硬化前,有效喷射范围内的地基因受到扰动而强度降低,容易产生附加沉降,因此在即有建筑附近施工时,应防止浆液凝固硬化前建筑物的附加下沉。通常采用控制施工速度、顺序和加快浆液凝固时间等方法防止或减小附加沉降。

7.1.3 高压旋喷桩施工可采用下列工法：

- 1 单管法：喷射高压水泥浆液一种介质。
- 2 双管法：喷射高压水泥浆液和压缩空气两种介质。
- 3 三管法：喷射高压水流、压缩空气及水泥浆液三种介质。

7.1.4 高压旋喷桩的施工参数应根据土质条件、加固要求通过试验或根据工程经验确定，并在施工中严格加以控制。单管法及双管法的高压水泥浆和三管法高压水的压力应大于 20MPa。

7.2 设 计

7.2.1 旋喷桩的直径除浅层可用开挖的方法确定之外，深部的直径无法用准确的方法确定，因此只能使用半经验的方法。根据国内外施工经验，其设计直径宜符合表 4 规定的数值。

表 4 旋喷桩设计直径(m)

土质 \ 方法		单管法	双管法	三管法
黏性土	$0 < N < 5$	0.5~0.8	0.8~1.2	1.2~1.8
	$6 < N < 10$	0.4~0.7	0.7~1.1	1.0~1.6
砂土	$0 < N < 10$	0.6~1.0	1.0~1.4	1.5~2.0
	$11 < N < 20$	0.5~0.9	0.9~1.3	1.2~1.8
	$21 < N < 30$	0.4~0.8	0.8~1.2	0.9~1.5

注：表中 N 为标准贯入击数。

7.2.3 高压旋喷桩复合地基承载力通过现场复合地基竖向抗压载荷试验方法确定，误差较小。

7.3 施 工

7.3.1 高压旋喷桩复合地基施工前，应对照设计图纸核实设计孔位处有无妨碍施工和影响安全的障碍物，如有应与有关单位协商清除、搬移障碍物或更改设计孔位。

7.3.2 水泥浆中所用的外加剂或掺和料的用量，应根据水泥土的

特点通过室内配比试验或现场试验确定。当有足够实践经验时,可按经验确定。

7.3.4 在不改变喷射参数的条件下,对同一标高的土层作重复喷射时,能扩大加固范围,提高固结体强度。在实际工作中,旋喷桩通常在底部和顶部进行复喷,以增大承载力,确保处理质量。

7.4 质量检验

7.4.1 按高压旋喷桩的特点,对喷射轴转速、提升速度、喷浆量、桩长、回浆量等的控制应在施工过程中进行。施工全过程的施工监理可有效控制旋喷桩的施工质量。对每根制成的旋喷桩须随时进行检查;对不合格的桩应根据其位置和数量等具体情况,采取补救措施。

7.4.2 在严格控制高压旋喷桩复合地基施工参数的基础上,根据具体情况选定质量检验方法。钻孔取芯是检验单孔固结体质量的常用方法,选用时需以不破坏固结体和有代表性为前提,可以在28d后取芯或在未凝以前取芯(软弱黏性土地基)。在有经验的情况下也可以选用标准贯入和静力触探试验进行检验。竖向抗压载荷试验是地基处理后检验地基承载力的良好方法。

7.4.3 检验点的位置应重点布置在有代表性的加固区。对喷射注浆时出现过异常现象和地质复杂的地段亦应检验。

7.4.4 高压旋喷桩复合地基的强度离散性大,在软弱黏性土中,强度增长速度较慢。质量检验宜在喷射注浆后28d进行,以防由于固结体强度不高时,桩体因检验而受到破坏,影响检验的可靠性。检验数量根据工程情况确定,一般可取施工总桩数的0.5%~1.0%,且每项单体工程不应少于3点。

8 灰土挤密桩复合地基

8.1 一般规定

8.1.1 灰土挤密桩复合地基中灰土挤密桩有置换作用,但主要是挤密作用。在灰土挤密桩成桩过程中对桩间土施加横向挤压力,挤密桩间土以改变其物理力学性质,并与分层夯实的桩体共同形成复合地基。因此,灰土挤密桩复合地基的核心是对桩间土的挤密。在湿陷性黄土地区,它是一种常用的消除黄土湿陷性提高地基承载力的方法,也适用于处理深度较大、垂直方向处理困难的欠固结土。

8.1.2 当需处理的地基土的含水量在最优含水量附近时,桩间土的挤密效果较好。参考普通的室内击实试验结果,略低于最优含水量时,挤密效果最好。当整个处理深度范围内地基土含水量小于12%,桩间土挤密效果不好或施工很困难,应预先采取注水等增湿措施。当含水量较大时,成孔困难、挤密效果差,不宜直接选用。若工程需要一定要选用时,应采取必要的措施,如对土体进行“吸湿”处理,并增强孔内填料的强度。在遇到施工机械无法穿越的地层时,其应用也受到限制,在这类场地不宜采用。

8.1.3 对于有此类施工经验地区的一般建筑物,了解场地的岩土工程条件以及一些必要的物理力学指标,并掌握建(筑)筑物的使用情况,按本节的条文规定进行设计计算,可以满足设计要求,只需在施工结束后进行检测就可以,这与现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 的要求是一致的。对于比较重要的建(构)筑物和缺乏工程经验的地区,则应在地基处理前,在现场选用有代表性的场地进行试验性施工,根据实际的试验结果对设计参数及施工参数进行调整。

8.1.4 挤密成孔可根据设计要求、现场环境、地基土性质等情况,选用沉管、冲击、爆扩等方法,以上方法均在成孔过程中实现了对桩间土的挤密作用,施工质量易控制,便于现场质量监督。预钻孔夯扩挤密是近年在陕西、甘肃等地区采取的挤密施工,成孔采用螺旋钻孔、冲击钻孔等取土的成孔方法,因而其成孔过程对桩间土没有挤密作用,而在夯填桩体材料时对桩间土产生横向挤密作用。夯填桩径是否达到设计要求是直接判定挤密效果的方法。该法由于挤密效果控制较困难,质量基本由施工控制,因此使用时,应加大检测工作量。目前爆扩法成孔应用较少。

8.1.5 根据大量的试验研究和工程实践,满足施工质量要求的灰土,其防水、隔水性能不如素土(指符合一般施工质量要求的素填土),但孔内回填灰土(或其他强度高的填料),对于提高复合地基承载力效果明显。湿陷性场地桩体严禁采用透水性高的填料。当地基处理对承载力要求不高,桩体填料可采用素土;要较大幅度提高承载力时,桩体材料可采用灰土、水泥石土等,或可采用素混凝土。对于非自重湿陷性土,夯扩桩内可夯填建筑垃圾、砂砾等材料以提高承载力。此类工程在陕西、山西等地亦有成功经验。

8.2 设计

8.2.1 灰土挤密桩复合地基的布孔原则和孔心距的确定方法,参考现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 的规定。

8.2.2 最小挤密系数对于湿陷性黄土地基,甲类、乙类建筑应大于 0.88,丙类及以下建筑应大于 0.84。其他地区无经验可参考时,应根据处理要求经试验确定,以达到设计所要求的处理效果,但应保证沉降和承载力的要求,湿陷性黄土地区则应满足消除湿陷性的要求。

8.2.3 桩间距超过 3 倍桩孔直径时,桩间土挤密效果较差。因此,设计时不再考虑桩间土的挤密作用,仅考虑置换作用。

8.2.4 处理深度小于 4m 时用挤密法不经济,且处理效果也不显

著。处理范围,除了考虑地基变形的要求外,对湿陷性黄土尚应考虑消除湿陷性的要求,对路基和建筑物要求不同。以上主要是湿陷性黄土地区的施工经验,其他地区仍需积累经验。

8.2.5 挤密深度以 12m 为界,是由我国目前常用的施工机械能处理的深度一般为 12m 确定的,随着施工机械能力增加,此值亦可增大。采用非预钻孔挤密法效果优于采用预钻孔,非预钻孔在成孔过程中对周围土体已经挤密,孔内回填时对周围土体进行二次挤密。

在整个挤密施工中,成孔过程就能完成绝大部分挤密任务。如采用全部预钻孔施工,成孔时对周围土体无挤密作用,整个挤密发生在孔内回填的过程中,要求回填夯实的能量较大,应满足回填挤密所需的能量要求,桩间土挤密效果完全由夯填桩孔施工控制,实际上是“夯扩”的概念,对施工单位要求较高,应加强对此类地基的检测工作。

8.2.6 采用复合地基竖向抗压载荷试验确定灰土挤密桩复合地基的承载力比较可靠。采用本规范公式(5.2.1-1)或公式(5.2.1-2)估算复合地基承载力需要工程经验的积累,式中参数合理选用是关键。

8.2.9 孔内回填灰土在最优含水量附近时,夯填效果好。为防止灰土吸水产生膨胀,灰土采用熟石灰,不得使用生石灰拌和土料,拌和的灰土宜于当日使用完毕。石灰中的活性氧化物愈多,灰土的强度愈高,使用前应用清水充分熟化,储存时间不宜超过三个月。

8.3 施 工

8.3.1 挤密施工间隔分批及时夯填,可以使挤密地基均匀有效,提高处理效果。在局部处理时,应由外向里施工,否则挤密不好,影响处理效果。在整片处理时,从外缘开始分行、分批、间隔,在整个拟处理场地范围内均匀分布,逐步加密进行施工。

8.3.4 不同的挤密方法应预留不同的松动层厚度。

8.3.5 施工参数的确定直接影响处理效果,因此本条规定通过夯填试验,确定合理的施工参数,以保证夯填质量,并为施工监督提供依据。对预钻孔挤密法,通过夯填试验确定桩径是否达到设计要求尤为重要。

8.4 质量检验

8.4.1 灰土挤密桩复合地基的质量控制应在施工过程中进行。施工过程可有效控制成孔深度、直径,分层填料数量和夯击情况等。对每根灰土挤密桩和桩间土挤密情况随时进行检查,如发现不合格情况,应采取补救措施。

8.4.2 对灰土挤密桩复合地基,孔内填料的质量检验尤其重要。对于湿陷性黄土不仅要检测密实度,还应对处理范围内的湿陷性消除情况进行检测,且应保证检测的数量。对预钻孔挤密地基,尚需重点检测桩体直径。

8.4.4 对于乙类以上的建筑物,在现场进行载荷试验或原位测试非常必要,且需在处理深度范围内取样测定挤密土体及孔内填料的湿陷性及压缩性,保证湿陷性消除且密实度达到要求。对特别重要的项目,还应进行现场浸水载荷试验以确保工程质量。用探井的方式取原状土样能反映现场实际情况,确保检测的有效性。

9 夯实水泥土桩复合地基

9.1 一般规定

9.1.1 根据桩的受力情况,桩体最大应力在桩顶下3倍~5倍桩径范围内,此处以下应力变小。桩的最小长度不宜太短,桩长不宜小于2.5m。夯实水泥土桩的强度高于散体材料桩,低于刚性桩,当桩体过长时,其技术经济指标不佳,故推荐桩长在10m以内,且桩端要进入相对硬土层。

夯实水泥土桩复合地基主要用于地下水水位以上地基土的处理。如果遇到浅层土有少量滞水、但可疏干的情况,对孔底进行处理后,也可采用该工艺。

对湿陷性黄土地基,应经过现场试验,评价是否消除湿陷性,以便设定合理参数。夯实水泥土桩成桩对桩间土有一定挤密效果,但不明显,桩体起到置换作用。因此,处理湿陷性黄土时宜采用挤土成孔工艺或加大置换率。

9.1.2 为避免人工成孔造成的孔径大小不均、上大下小、垂直度保证率低、场地混乱、不安全、劳动强度大等问题,应尽可能采用螺旋钻等机械成孔,使桩的施工机械化、现代化、标准化。

9.1.3 水泥土桩桩体强度与加固时所用的水泥品种、标号、掺量,被加固土性质,以及养护龄期等因素有关。不同的施工工艺可以得到不同的桩体密实度,从而影响桩体强度,夯实水泥土桩桩体强度可达到3MPa~5MPa,特殊的土层中,桩体强度可达到3MPa~6MPa,工程中可结合实践经验确定。

9.2 设计

9.2.3 夯实水泥土桩是一种具有一定压缩性的柔性桩,在正常置

换率的情况下,荷载大部分由桩承担,通过侧摩阻力和端阻力传至深层土中。在桩和土共同承担荷载的过程中,土的高压力区增大,从而提高了地基承载力,减少地基沉降变形,所以在基础边线内布桩,就能满足上部建筑物荷载对复合地基的要求。一般桩边到基础边线的距离宜为 100mm~300mm。如果新建场地与即有建筑物相邻,或新建建筑物的基础埋深大于原有建筑物基础深度,或新建建筑物中高低建筑物规模差异大且基础埋深差别大时,可在基础外适量布置抗滑桩或护桩。

9.2.4 夯实水泥土桩桩径一般为 300mm~600mm,多数为 350mm~400mm;面积置换率一般为 5%~15%。

9.2.5 夯实水泥土桩的强度一般为 3MPa~6MPa,也可根据当地经验取值,其变形模量远大于土的变形模量,设置垫层主要是为了调整基底压力分布,使桩间土地基承载力得以充分发挥。当设计桩体承担较多的荷载时,垫层厚度取小值,反之,取大值。垫层材料不宜选用粒径大于 20mm 的粗粒散体材料。

9.2.6 夯实水泥土桩和桩周土在外荷载作用下构成复合地基,载荷试验是确定复合地基承载力和变形参数最可靠的方法。同一场地处理面积较大时或缺少经验时,应先进行复合地基竖向抗压载荷试验,按试验取得的参数进行设计,使设计合理并且经济。

9.2.7 夯实水泥土桩工艺由于规定先夯实孔底,成桩过程中分层夯实,其中 q_p 的取值常沿用灌注桩干作业条件下给定的桩端阻力参数,可根据地区经验确定,也可选用岩土工程勘察报告提供的参数。

本规范公式(5.2.2-2)中 f_{cu} 为与桩体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 28d 龄期的立方体抗压强度平均值。水泥土为脆性材料,而且其均匀性不如混凝土,加之施工工艺的不同,所以在验算桩体承载力时,应对水泥土标准强度值进行不同程度的折减,作为水泥土强度的设计值,桩体强度折减系数(η)可取 0.33。

9.2.8 夯实水泥土桩复合地基的沉降由复合土层压缩变形量和加固区下卧土层压缩变形量两部分组成。由于缺少系统的现场沉降监测资料,基本思路仍采用分层总和法,按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定执行。复合土层压缩模量的计算,采用载荷试验沉降曲线类比法。

9.2.9 夯实水泥土桩施工工艺、材料配合比决定着桩体的均匀度和密实度,这是决定桩体强度的主要因素。

9.3 施 工

9.3.1 对重要工程、规模较大工程、岩土工程地质条件复杂的场地以及缺乏经验场地,在正式施工前应选择有代表性场地进行工艺性试验施工,并进行必要的测试,检验设计参数、处理效果和施工工艺的合理性和适用性。

9.3.2 水泥是水泥土桩的主要材料,其强度及安定性是影响桩体的主要因素。因此应对水泥按规定进行复检,复检合格后方可使用。

9.3.4 夯实水泥土桩混合料在配制时,如土料含水量过大,需风干或另掺加其他含水量较小的土料或换土。含水量过小应适量加水,拌和好的混合料含水量与最优含水量允许偏差为 $\pm 2\%$ 。在现场可按“一攥成团,一捏即散”的原则对混合料的含水量进行鉴别。配制时间超过 2h 的混合料严禁使用。

9.3.6 夯实水泥土桩复合地基的质量好坏关键在于桩体是否密实、均匀,由于夯实水泥土桩夯实机械的夯锤质量及起落高度一定,夯击能为常数,桩体质量保证率较高。而人工夯实,受人的体能影响,夯锤质量小,起落高度不一致,桩体质量的保证率较低。本规范中夯实水泥土桩适用于夯实机成桩的设计与施工,一般情况下不宜采用人工夯实方法。为减轻劳动强度,夯实水泥土桩水泥土配合料也应尽量采用机械搅拌。

夯实水泥土桩的强度,一部分为水泥胶结体的强度,另一部分

为夯实后密实度增加而提高的强度,桩体的夯实系数小于 0.93 时,桩体强度明显降低。

夯实水泥土桩一般桩长较短,端阻力较大。因此,孔底应夯实,夯实击数不应少于 3 击。若孔底含水量较高,可先填入少量碎石或干拌混凝土,再夯实。

夯实填料时,每击填料量不应过多,否则影响桩体的密实性及均匀性。严禁超厚和突击填料,一般每击填料控制送料厚度为 50mm~80mm。

9.3.8 控制成桩桩顶标高,首先是为保证桩顶质量;其次防止在桩体达到设计高度后,不能及时停止送料,造成浪费和环境污染。

9.3.10 垫层铺设宜分层进行,每层铺设应均匀,如铺设的散体材料含水量低,可适当加水,以保证密实质量。

9.4 质量检验

9.4.2 根据夯实水泥土桩成桩和桩体硬化特点,桩体夯实质量的检查应在成桩后 2h 内进行,随时随机抽取。抽检数量根据工程情况确定,一般可取总桩数的 2%,且不少于 6 根。检验方法可采用取土测定法检测桩体材料的干密度,也可采用轻型圆锥动力触探试验检测桩体材料的 N_{10} 击数,相关试验要符合下列规定:

1 采用环刀取样测定其干密度,质量标准可按设计压实系数 (λ_c) 评定,压实系数一般为 0.93,也可按表 5 规定的数值。

表 5 不同配比下桩体最小干密度 (g/cm^3)

土料种类 \ 水泥与土的体积比	1 : 5	1 : 6	1 : 7	1 : 8
	粉细砂	1.72	1.71	1.71
粉土	1.69	1.69	1.69	1.69
粉质黏土	1.58	1.58	1.58	1.57

2 采用轻型圆锥动力触探试验检测桩体夯实质量时,宜先进行现场试验,以确定具体要求,试验方法应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 有关规定,成桩 2h 内轻型圆锥动力触探击数(N_{10})不应小于 40 击。

9.4.3 本条强调工程竣工验收检验,应该采用单桩复合地基或多桩复合地基竖向抗压载荷试验。

9.4.4 夯实水泥土桩复合地基竖向抗压载荷试验数量根据工程情况确定,一般可取总桩数的 0.5%~1%,且每个单体工程不少于 3 点。

夯实水泥土桩复合地基静载试验 $p-s$ 曲线多为抛物线状,根据 $p-s$ 曲线确定复合地基承载力特征值的原理是:

当 $p-s$ 曲线上极限荷载能确定,其值大于对应比例界限荷载值的 2 倍时,复合地基承载力特征值可取比例界限;当 $p-s$ 曲线上极限荷载能确定,而其值小于对应的比例界限荷载值的 2 倍时,复合地基承载力特征值可取极限荷载的 1/2;当比例界限、极限荷载都不能确定时,夯实水泥土桩按相对变形值 $s/b = 0.006 \sim 0.010$ (b 为载荷板宽度或直径)所对应的荷载确定复合地基承载力特征值,桩端土层为砂卵石等硬质土层时 s/b 取小值,桩端土层为可塑等软质土层时 s/b 取大值,但复合地基承载力特征值不应大于最大加载值的一半。

10 石灰桩复合地基

10.1 一般规定

10.1.1 石灰桩是以生石灰为主要固化剂与粉煤灰或火山灰、炉渣、矿渣、黏性土等掺和料按一定的比例均匀混合后,在桩孔中经机械或人工分层振压或夯实所形成的密实桩体。为提高桩体强度,还可掺加石膏、水泥等外加剂。

石灰桩的主要作用机理是通过生石灰的吸水膨胀挤密桩周土,继而经过离子交换和胶凝反应使桩间土强度提高。同时桩体生石灰与活性掺和料经过水化、胶凝反应,使桩体具有 $0.3\text{MPa}\sim 1.0\text{MPa}$ 的抗压强度。

石灰桩属可压缩的低黏结强度桩,能与桩间土共同作用形成复合地基。

由于生石灰的吸水膨胀作用,特别适用于新填土和淤泥的加固,生石灰吸水后还可使淤泥产生自重固结。形成一定强度后的石灰桩与经加固的桩间土结合为一体,使桩间土欠固结状态得到改善。

石灰桩与灰土桩不同,可用于地下水位以下的土层,用于地下水位以上的土层时,如土中含水量过低,则生石灰水化反应不充分,桩体强度较低,甚至不能硬化。此时采取减少生石灰用量或增加掺和料含水量的办法,经实践证明是有效的。

石灰桩复合地基不适用于处理饱和粉土、砂类土、硬塑及坚硬的黏性土,含大孤石或障碍物较多且不易清除的杂填土等土层。

10.1.2 石灰桩可就地取材,各地生石灰、掺和料及土质均有差异,在无经验的地区应进行材料配比试验。由于生石灰膨胀作用,其强度与侧限有关,因此配比试验宜在现场地基土中进行。

10.1.3 石灰桩桩体强度与土的强度有密切关系。土强度高时,对桩的约束力大,生石灰膨胀时可增加桩体密度,提高桩体强度;反之当土的强度较低时,桩体强度也相应降低。石灰桩在软土中的桩体强度多在 0.3MPa~1.0MPa 之间,强度较低,其复合地基承载力不超过 160kPa,多在 120kPa~160kPa 之间。如土的强度较高,复合地基承载力可提高。同时应当注意,在强度高的土中,如生石灰用量过大,则会破坏土的结构,综合加固效果不好。

10.1.4 石灰桩属可压缩性桩,一般情况下桩顶可不设垫层。石灰桩根据不同的掺和料有不同的渗透系数,数值为 10^{-3} cm/s~ 10^{-5} cm/s,可作为竖向排水通道。

10.1.5 石灰桩的掺和料为轻质的粉煤灰或炉渣,生石灰块的重度约为 10kN/m^3 ,石灰桩体饱和后重度为 13kN/m^3 。以轻质的石灰桩置换土,复合土层的自重减轻,特别是石灰桩复合地基的置换率较大时,减载效应明显。复合土层自重减轻即是减少了桩底下卧层软土的附加应力,以附加应力的减少值反推上部荷载减少的对应值是一个可观的数值。这种减载效应对减少软土变形作用很大。同时考虑石灰的膨胀对桩底土的预压作用,石灰桩底下卧层的变形较常规计算小,经过湖北、广东地区四十余个工程沉降实测结果的对比(人工洛阳铲成孔、桩长 6m 以内,条形基础简化为筏基计算),变形较常规计算有明显减小。由于各地情况不同,统计数量有限,应以当地经验为主。

10.2 设 计

10.2.1 块状生石灰经测试其孔隙率为 35%~39%,掺和料的掺入数量理论上至少应能充满生石灰块的孔隙,以降低造价,减少由于生石灰膨胀作用产生的内耗。

生石灰与粉煤灰、炉渣、火山灰等活性材料可以发生水化反应,生成不溶于水的水化物,同时使用工业废料也符合国家环保政策。

在淤泥中增加生石灰用量有利于淤泥的固结,桩顶附近减少

生石灰用量可减少生石灰膨胀引起的地面隆起,同时桩体强度较高。当生石灰用量超过总体积的 30% 时,桩体强度下降,但对软土的加固效果较好,经过工程实践及试验总结,生石灰与掺和料的体积比为 1:1 或 1:2 较合理,土质软弱时采用 1:1。

桩体材料加入少量的石膏或水泥可以提高桩体强度,当地下水渗透较严重或为提高桩顶强度时,可适量加入。

10.2.2 由于石灰桩的膨胀作用,桩顶上覆压力不够时,易引起桩顶土隆起,增加沉降,因此其封口高度不宜小于 500mm,以保证一定的上覆压力。为了防止地面水早期渗入桩顶,导致桩体强度降低,其封口标高应略高于原地面。

10.2.3 试验表明,石灰桩宜采用细而密的布桩方式,这样可以充分发挥生石灰的膨胀挤密效应,但桩径过小则施工速度受影响。目前人工成孔的桩径以 300mm 为宜,机械成孔以 350mm 左右为宜。

过去的习惯是将基础以外也布置数排石灰桩,如此则造价剧增,试验表明在一般的软土中,围扩桩对提高复合地基承载力的作用不大。在承载力很低的淤泥或淤泥质土中,基础外围增加 1 排~2 排围扩桩有利于对淤泥的加固,可以提高地基的整体稳定性,同时围扩桩可将土中大孔隙挤密,起止水作用,可提高内排桩的施工质量。

10.2.4 洛阳铲成孔桩长不宜超过 6m,指的是人工成孔,如用机动洛阳铲可适当加长。机械成孔管外投料时,如桩长过长,则不能保证成桩直径,特别在易缩孔的软土中,桩长只能控制在 6m 以内,不缩孔时,桩长可控制在 8m 以内。

10.2.5 大量工程实践证明,复合土层沉降仅为桩长的 0.5%~0.8%,沉降主要来自于桩底下卧层,因此宜将桩端置于承载力较高的土层中。

正如本规范第 10.1.5 条说明中所述,石灰桩具有减载和预压作用,因此在深厚的软土中刚度好的建筑物有可能使用“悬浮桩”。

无地区经验时,应进行大压板载荷试验,确定加固深度。

10.2.7 试验研究证明,当石灰桩复合地基荷载达到其承载力特征值时,具有下列特征:

1 沿桩长范围内各点桩和土的相对位移很小(2mm 以内),桩土变形协调。

2 土的接触压力接近桩间土地基承载力特征值,即桩间土发挥度系数为 1.0。

3 桩顶接触压力达到桩体比例界限,桩顶出现塑性变形。

4 桩土应力比趋于稳定,其值为 2.5~5.0。

5 桩土的接触压力可采用平均压力进行计算。

基于以上特征,可按常规的面积比方法计算复合地基承载力。在置换率计算中,桩径除考虑膨胀作用外,尚应考虑桩周 20mm 左右厚的硬壳层,故计算桩径取成孔直径的 1.1 倍~1.2 倍。

桩间土地基承载力与置换率、生石灰掺量以及成孔方式等因素有关。

试验检测表明生石灰对桩周厚 0.3 倍桩径左右的环状土体显示了明显的加固效果,强度提高系数达 1.4~1.6,圆环以外的土体加固效果不明显。因此,桩间土地基承载力可按下式计算:

$$f_{sk} = \left[\frac{(k-1)d^2}{A_e(1-m)} + 1 \right] f_{ak} \quad (8)$$

式中: f_{ak} ——天然地基承载力特征值;

k ——桩边土强度提高系数,软土取 1.4~1.6;

A_e ——一根桩分担的地基处理面积;

m ——复合地基置换率;

d ——桩径。

按上式计算得到的桩间土地基承载力特征值约为天然地基承载力特征值的 1.05 倍~1.20 倍。

10.2.8 如前所述石灰桩桩体强度与桩间土强度有对应关系,桩体压缩模量也随桩间土模量的不同而变化,此大彼大,此小彼小,

鉴于这种对应性质,复合地基桩土应力比的变化范围缩小。经大量测试,桩土应力比的范围为 2.0~5.0,大多为 3.0~4.0,桩间土压缩模量的提高系数可取 1.1~1.3,土软弱时取高值。

石灰桩桩体压缩模量可用环刀取样,作室内压缩试验求得。

10.3 施 工

10.3.1 生石灰块的膨胀率大于生石灰粉,同时生石灰粉易污染环境。为了使生石灰与掺和料反应充分,应将块状生石灰粉碎,其粒径 30mm~50mm 为佳,最大不宜超过 70mm。

10.3.2 掺和料含水量过少则不易夯实,过大时在地下水水位以下易引起冲孔(放炮)。

石灰桩体密实度是质量控制的重要指标,由于周围土的侧向约束力不同,配合比也不同,桩体密实度的定量控制指标难以确定,桩体密实度的控制宜根据施工工艺的不同凭经验控制。无经验的地区应进行成桩工艺试验。成桩 7d~10d 后用轻型圆锥动力触探击数(N_{10})进行对比检测,选择适合的工艺。

10.3.3 管外投料或人工成孔时,孔内往往存水,此时应采用小型软轴水泵或潜水泵排干孔内水,方能向孔内投料。

在向孔内投料的过程中如孔内渗水严重,则影响夯实(压实)桩的质量,此时应采取降水或增打围扩桩隔水的措施。

石灰桩施工中的冲孔(放炮)现象应引起重视。其主要原因在于孔内进水或存水使生石灰与水迅速反应,其温度高达 200℃~300℃,空气遇热膨胀,不易夯实,桩体孔隙大,孔隙内空气在高温下迅速膨胀,将上部夯实的桩料冲出孔口。此时应采取减少掺和料含水量,排干孔内积水或降水,加强夯实等措施,确保安全。

10.4 质 量 检 验

10.4.2 石灰桩加固软土的机理分为物理加固和化学加固两个作用,物理加固作用(吸水、膨胀)的完成时间较短,一般情况下 7d 以

内均可完成。此时桩体的直径和密度已定型,在夯实力和生石灰膨胀力作用下,7d~10d 桩体已具有一定的强度。而石灰桩的化学作用则速度缓慢,桩体强度的增长可延续 3 年甚至 5 年。考虑到施工的需要,目前将一个月龄期的强度视为桩体设计强度,7d~10d 龄期的强度约为设计强度的 60%左右。

龄期 7d~10d 时,石灰桩体内部仍维持较高的温度(30℃~50℃),采用静力触探检测时应考虑温度对探头精度的影响。

桩体质量的施工检测可采用静力触探或标准贯入试验。检测部位应为桩中心及桩间土,每两点为一组。检测组数可取总桩数的 1%。

10.4.3、10.4.4 大量的检测结果证明,石灰桩复合地基在整个受力阶段,都是受变形控制的,其 $p-s$ 曲线呈缓变型。石灰桩复合地基中的桩土具有良好的协同工作特征,土的变形控制着复合地基的变形。所以石灰桩复合地基的允许变形应与天然地基的标准相近。

在取得载荷试验与静力触探检测对比经验的条件下,也可采用静力触探估算复合地基承载力。关于桩体强度的确定,可取 $0.1p_s$ 为桩体比例界限,这是桩体取样在试验机上作抗压试验求得比例极限与原位静力触探 p_s 值对比的结果。但仅适用于掺和料为粉煤灰、炉渣的情况。

地下水位以下的桩底存在动水压力,夯实效果也不如桩的中上部,因此底部桩体强度较低。桩的顶部由于上覆压力有限,桩体强度也有所降低。因此石灰桩的桩体强度沿桩长变化,中部最高,顶部及底部较差。试验证明当底部桩体具有一定强度时,由于化学反应的结果,其后期强度可以提高,但当 7d~10d 比贯入阻力很小($p_s < 1\text{MPa}$)时,其后期强度的提高有限。

石灰桩复合地基工程验收时,复合地基竖向抗压载荷试验数量可按地基处理面积每 1000m²左右布置一个点,且每一单体工程不应少于 3 点。

11 挤密砂石桩复合地基

11.1 一般规定

11.1.1、11.1.2 碎石桩、砂桩和砂石混合料桩总称为砂石桩,是指采用振动、沉管或水冲等方式在地基中成孔后,再将碎石、砂或砂石混合料挤压入已成的孔中,形成大直径的砂石体所构成的密实桩体。视加固地基土体在成桩过程中的可压密性,可分为挤密砂石桩和置换砂石桩两大类。挤密砂石桩在成桩过程中地基土体被挤密,形成的砂石桩和被挤密的桩间土使复合地基承载力得到很大提高,压缩模量也得到很大提高。置换砂石桩复合地基承载力提高幅度不大,且工后沉降较大。挤密砂石桩成桩过程中除逐层振密外,近年发展了多种采用锤击夯扩碎石桩的施工方法。填料除碎石、砂石和砂以外,还有采用矿渣和其他工业废料。在采用工业废料作为填料时,除重视其力学性质外,尚应分析对环境可能产生的影响。挤密砂石桩法主要靠成桩过程中桩周围土的密度增大,从而使地基的承载能力提高,压缩性降低,因此,挤密砂石桩复合地基适用于一切可压密的需加固地基,如松散的砂土地基、粉土地基、可液化地基、非饱和的素填土地基、黄土地基、填土地基等。

国内外的工程实践经验也证明,不管是采用振冲法,还是沉管法,挤密砂石桩法处理砂土及填土地基效果都比较显著,并均已得到广泛应用。国内外(国外主要是日本)一般认为当处理黏粒(小于 0.074mm 的细颗粒)含量小于 10% 的砂土、粉土地基时,挤密效应显著,而我国浙江绍兴等地的工程实践表明,黏粒含量小于 10% 并不是一个严格的界限,在黏粒含量接近 20% 时,地基挤密效果仍较显著。因此,在采用挤密砂石桩法处理黏粒含量较高的砂性土地基时,应通过现场试验确定其适用性。砂石桩处理可液

化地基的有效性已为国内不少实际地震和试验研究成果所证实。

11.1.3 采用挤密砂石桩法处理软土地基除应按本规范第4章要求进行岩土工程勘察外,针对挤密砂石桩复合地基的特点,本条还提出了应该补充的一些设计和施工所需资料。砂石桩填料用量大,并有一定的技术规格要求,故应预先勘察确定取料场及储量、材料的性能、运距等。

11.2 设计

11.2.1 考虑到基底压力会向基础范围外的地基中扩散,而且外围的1排~3排桩挤密效果较差,因此本条规定挤密砂石桩处理范围要超出基础外缘1排~3排桩距。原地基越松散则应加宽越多。重要的建筑以及荷载较大的情况应加宽多些。

挤密砂石桩法用于处理液化地基,应确保建筑物的安全使用。基础外需处理宽度目前尚无统一的标准,但总体认为,在基础外布桩对建筑物是有利的。按美国经验,基础外需处理宽度取处理深度,但根据日本和我国有关单位的模型试验认为应取处理深度的 $2/3$ 。另外,由于基础压力的影响,使地基土的有效压力增加,抗液化能力增强,故这一宽度可适当降低。同时根据日本挤密砂石桩处理的地基经过地震考验的结果,发现需处理的宽度也比处理深度的 $2/3$ 小,据此规定每边放宽不宜小于处理深度的 $1/2$ 。

11.2.2 挤密砂石桩的设计内容包括桩位布置、桩距、处理范围、灌砂量及需处理地基的承载力、沉降或稳定验算。

挤密砂石桩的平面布置可采用等边三角形或正方形。砂性土地基主要靠砂石桩的挤密提高桩周土的密度,所以采用等边三角形更有利,可使地基挤密较为均匀。

挤密砂石桩直径的大小取决于施工方法、设备、桩管的大小和地基土的条件。采用振冲法施工的挤密砂石桩直径宜为 $800\text{mm}\sim 1200\text{mm}$,与振冲器的功率和地基土条件有关,一般振冲器功率大、地基土松散时,成桩直径大;采用沉管法施工的砂石桩直径与

桩管的大小和地基土条件有关,目前使用的桩管直径一般为300mm~800mm,但也有小于200mm或大于800mm的。小直径桩管挤密质量较均匀但施工效率低,大直径桩管需要较大的机械能力,工效高。采用过大的桩径,一根桩要承担的挤密面积大,通过一个孔要填入的砂料多,不易使桩周土挤密均匀。沉管法施工时,设计成桩直径与套管直径比不宜大于1.5,主要考虑振动挤压时较大的扩径会对地基土产生较大扰动,不利于保证成桩质量。另外,成桩时间长、效率低给施工也会带来困难。

11.2.3 挤密砂石桩处理松砂地基的效果受地层、土质、施工机械、施工方法、填料的性质和数量、桩的排列和间距等多种因素的影响,较为复杂。国内外虽然已有不少实践,也进行过一些试验研究,积累了一些资料和经验,但是有关设计参数如桩距、灌砂石量以及施工质量的控制等仍需通过施工前的现场试验才能确定。

对采用振冲法成孔的砂石桩,桩间距宜根据上部结构荷载和场地情况通过现场试验,并结合所采用的振冲器功率大小确定。

对采用沉管法施工的砂石桩,桩距一般可控制在3.0倍~4.5倍桩径之内。合理的桩径取决于具体的机械能力和地层土质条件。当合理的桩距和桩的排列布置确定后,一根桩所承担的处理范围即可确定。土层通过减小土的孔隙,把原土层的密度提高到要求的密度,孔隙要减小的数量可通过计算得出。这样可以设想只要灌入的砂石料能把需要减小的孔隙都充填起来,那么土层的密度也就能够达到预期的数值。据此,如果假定地层挤密是均匀的,同时挤密前后土的固体颗粒体积不变,即可推导出本条所列的桩距计算公式。

对粉土和砂土地基,本条公式的推导是假设地面标高施工后和施工前没有变化。实际上,很多工程都采用振动沉管法施工,施工时对地基有振密和挤密双重作用,而且地面下沉,施工后地面平均下沉量可达100mm~300mm,甚至达到500mm。因此,当采用振动沉管法施工砂石桩时,桩距可适当增大,修正系数建议取

1.10~1.20。

地基挤密要求达到的密实度是从满足建筑地基的承载力、变形或防止液化的需要而定的,原地基土的密实度可通过钻探取样试验,也可通过标准贯入、静力触探等原位测试结果与有关指标的相关关系确定。各相关关系可通过试验求得,也可参考当地或其他可靠的资料。

这种计算桩距的方法,除了假定条件不完全符合实际外,砂石桩的实际直径也较难确定。因而有的资料把砂石桩体积改为灌砂石量,即只控制砂石量,不必注意桩的直径如何。其实两者基本上是一样的。

桩间距与要求的复合地基承载力及桩和原地基土的承载力有关。如按要求的承载力算出的置换率过高、桩距过小,不易施工时,则应考虑增大桩径和桩距。在满足上述要求条件下,桩距宜适当大些,可避免施工时对原地基土过大扰动,影响处理效果。

11.2.4 挤密砂石桩的长度,应根据地基的稳定和沉降验算确定,为保证稳定,挤密砂石桩长度应超过设计要求安全度相对应的最危险滑动面以下 2.0m;当软土层厚度不大时,桩长宜超过整个松散或软弱土层。标准贯入和静力触探沿深度的变化曲线也是确定桩长的重要资料。

对可液化的砂层,为保证处理效果,桩长宜穿透可液化层,如可液化层过深,则应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011有关规定确定。

另外,砂石桩单桩竖向抗压载荷试验表明,砂石桩桩体在受荷过程中,在桩顶以下 4 倍桩径范围内将发生侧向膨胀,因此设计深度应大于主要受荷深度,且不宜小于 4 倍桩径。鉴于采用振冲法施工挤密砂石桩平均直径约 1000mm,因此规定挤密砂石桩桩长不宜小于 4m。

建筑物地基差异沉降若过大,则会使建筑物受到损坏。为了减少其差异沉降,可分区采用不同桩长进行加固,用以调整差异

沉降。

11.2.5 挤密砂石桩桩孔内的填料量应通过现场试验确定。考虑到挤密砂石桩沿深度不会完全均匀,同时可能侧向鼓胀,另外,填料在施工中还会有所损失等,因而实际设计灌砂石量要比计算砂石量大一些。根据地层及施工条件的不同增加量约为计算量的20%~40%。

11.2.6 挤密砂石桩复合地基中桩间土经振密、挤密后,其承载力提高较大,因此本规范公式(11.2.6)中桩间土地基承载力应采用处理后桩间土地基承载力特征值,并且宜通过现场载荷试验或根据当地经验确定。

11.2.7 挤密砂石桩复合地基沉降可按本规范第5.3.1条~第5.3.4条的有关规定进行计算,其中复合地基压缩模量可按本规范公式(5.3.2-2)计算,但考虑到砂石桩桩体压缩模量的影响因素较多且难以确定,所以本条建议采用本规范公式(11.2.7)计算挤密砂石桩复合地基压缩模量。

11.2.8 关于砂石桩用料的要求,对于砂土地基,只要比原土层砂质好同时易于施工即可,应注意就地取材。按照各有关资料的要求最好用级配较好的中、粗砂,当然也可用砂砾及碎石,但不宜选用风化易碎的石料。

对振冲法成桩,填料粒径与振冲器功率有关,功率大,填料的
最大粒径也可适当增大。

对沉管法成桩,填料中最大粒径取决于桩管直径和桩尖的构造,以能顺利出料为宜,本条规定最大不应超过50mm。

考虑有利于排水,同时保证具有较高的强度,规定砂石桩用料中小于0.005mm的颗粒含量(即含泥量)不能超过5%。

11.2.9 砂石桩顶部采用碎石垫层一方面起水平排水的作用,有利于施工后土层加快固结,更大的作用是可以起到明显的应力扩散作用,降低基底层砂石桩分担的荷载,减少砂石桩侧向变形,从而提高复合地基承载力,减少地基变形。如局部基础下有较薄的

软土,应考虑加大垫层厚度。

11.3 施 工

11.3.1 挤密砂石桩施工机械,应根据其施工能力与处理深度相匹配的原则选用。目前国内主要的砂石桩施工机械类型有:

1 振冲法施工采用的振冲器,常用功率为 30、55kW 和 75kW 三种类型。选用时,应考虑设计荷载的大小、工期、工地电源容量及地基土天然强度的高低等因素。

2 沉管法施工机械主要有振动式砂石桩机和锤击式砂石桩机两类。除专用机械外,也可利用一般的打桩机改装。

采用垂直上下振动的机械施工的方法称为振动沉管成桩法,振动沉管成桩法的处理深度可达 25m,若采取适当措施,最大还可以加深到约 40m;用锤击式机械施工成桩的方法称为锤击沉管成桩法,锤击沉管成桩法的处理深度可达 10m。砂石桩机通常包括桩机架、桩管及桩尖、提升装置、挤密装置(振动锤或冲击锤)、上料设备及检测装置等部分。为了使砂石桩机配有高压空气或水的喷射装置,同时配有自动记录桩管贯入深度、提升量、压入量、管内砂石位置及变化(灌砂石及排砂石量),以及电机电流变化等检测装置。国外有的设备还装有自动控制装置,根据地层阻力的变化自动控制灌砂石量并保证均匀挤密,全面达到设计标准。

11.3.2 地基处理效果常因施工机具、施工工艺与参数,以及所处理地层的不同而不同,工程中常遇到设计与实际不符或者处理质量不能达到设计要求的情况,因此本条规定施工前应进行现场成桩试验,以检验设计方案和设计参数,确定施工工艺和技术参数(包括填砂石量、提升速度、挤压时间等)。现场成桩试验桩数:正三角形布桩,至少 7 根(中间 1 根,周围 6 根);正方形布桩,至少 9 根(按三排三列布 9 根桩)。

11.3.3 采用振冲法施工时,30kW 功率的振冲器每台机组约需电源容量 75kW,成桩直径约 800mm,桩长不宜超过 8m;75kW 功率的

振冲器每台机组约需电源容量 100kW,成桩直径可达 900mm~1200mm,桩长不宜超过 20m。在邻近既有建筑物场地施工时,为减小振动对建筑物的影响,宜用功率较小的振冲器。

为保证施工质量,电压、密实电流、留振时间要符合要求,因此,施工设备应配备相应的自动信号仪表,以便及时掌握数据。

11.3.4 振冲施工有泥水从孔内排出。为防止泥水漫流地表污染环境,或者排入地下排水系统而淤积堵塞管路,施工时应设置沉淀池,用泥浆泵将排出的泥水集中抽入池内,宜重复使用上部清水。沉淀后的泥浆可用运浆车辆运至预先安排的存放地点。

11.3.5 振冲施工可按下列步骤进行:

1 清理施工场地,布置桩位。

2 施工机具就位,使振冲器对准桩位。

3 启动供水泵和振冲器,水压可用 200kPa~600kPa,水量可用 200L/min~400L/min,将振冲器缓慢沉入土中,造孔速度宜为 0.5m/min~2.0m/min,直至达到设计深度,记录振冲器经各深度的水压、电流和留振时间。

4 造孔后边提升振冲器投料边冲水直至孔口,再放至孔底,重复两三次扩大孔径并使孔内泥浆变稀,开始填料制桩。

5 大功率振冲器投料可不提出孔口,小功率振冲器下料困难时,可将振冲器沉入填料中进行振密制桩,当电流达到规定的密实电流值和规定的留振时间后,将振冲器提升 300mm~500mm。

6 重复以上步骤,自下而上逐段制作桩体直至孔口,记录各段深度的填料量、最终电流值和留振时间,并均应符合设计规定。

7 关闭振冲器和水泵。

振冲法施工中,密实电流、填料量和留振时间是重要的施工质量控制参数,因此,施工过程中应注意:

1 控制加料振密过程中的密实电流。密实电流是指振冲器固定在某深度上振动一定时间(称为留振时间)后的稳定电流,注意不要把振冲器刚接触填料的瞬间电流值作为密实电流。为达到

所要求的挤密效果,每段桩体振捣挤密终止条件是要求其密实电流值超过某规定值:30kW 振冲器为 45A~55A;55kW 振冲器为 75A~85A;75kW 振冲器为 80A~95A。

2 控制好填料量。施工中加填料要遵循“少量多次”的原则,既要勤加料,每批又不宜加得太多。而且注意制作最深处桩体的填料量可占整根桩填料量的 $1/4 \sim 1/3$ 。这是因为初始阶段加的料有一部分从孔口向孔底下落过程中粘在孔壁上,只有少量落在孔底;另外,振冲过程中的压力水有可能造成孔底超深,使孔底填料数量超过正常用量。

3 保证有一段留振时间。即振冲器不升也不降,保持继续振动和水冲,使振冲器把桩孔扩大或把周围填料挤密。留振时间一般可较短;当回填砂石料慢、地基软弱时,留振时间较长。

11.3.6 振动沉管法施工,成桩应按下列步骤进行:

1 移动桩机及导向架,把桩管及桩尖对准桩位。

2 启动振动锤,把桩管下到预定的深度。

3 向桩管内投入规定数量的砂石料(根据经验,为提高施工效率,装砂石也可在桩管下到便于装料的位置时进行)。

4 把桩管提升一定的高度(下砂石顺利时提升高度不超过 $1\text{m} \sim 2\text{m}$),提升时桩尖自动打开,桩管内的砂石料流入孔内。

5 降落桩管,利用振动及桩尖的挤压作用使砂石密实。

6 重复 4、5 两工序,桩管上下运动,砂石料不断补充,砂石桩不断升高。

7 桩管提至地面,砂石桩完成。

施工中,电机工作电流的变化反映挤密程度及效率。电流达到一定不变值,继续挤压将不会产生挤密效果。然而施工中不可能及时进行效果检测,因此按成桩过程的各项参数对施工进行控制是重要环节,应予以重视,有关记录是质量检验的重要资料。

11.3.7 挤密砂石桩施工时,应间隔进行(跳打),并宜由外侧向中间推进;在邻近既有建(构)筑物施工时,为了减少对邻近既有建

(构)筑物的振动影响,应背离建(构)筑物方向进行。

砂石桩施工完毕,当设计或施工投砂量不足时地面会下沉,当投料过多时地面会隆起,同时表层 0.5m~1.0m 常呈松散状态。如遇到地面隆起过高也说明填砂石量不适当。实际观测资料证明,砂石在达到密实状态后进一步承受挤压又会变松,从而降低处理效果。遇到这种情况应注意适当减少填砂石量。

施工场地土层可能不均匀,土质多变,处理效果不能直接看到,也不能立即测出。为保证施工质量,在土层变化的条件下施工质量也能达到标准,应在施工中进行详细的观测和记录。

11.3.8 砂石桩桩顶部施工时,由于上覆压力较小,因而对桩体的约束力较小,桩顶形成一个松散层,加载前应加以处理(挖除或碾压)才能减少沉降量,有效地发挥复合地基作用。

11.4 质量检验

11.4.1 对振冲法,应详细记录成桩过程中振冲器在各深度时的水压、电流和留振时间,以及填料量,这些是施工控制的重要手段;而对沉管法,填料量是施工控制的重要依据,再结合抽检便可以较好地作出质量评价。

11.4.2 挤密砂石桩处理地基最终是要满足承载力、变形和抗液化的要求,标准贯入、静力触探以及动力触探可直接提供检测资料,所以本条规定可用这些测试方法检测砂石桩及其周围土的挤密效果。

应在桩位布置的等边三角形或正方形中心进行砂石桩处理效果检测,因为该处挤密效果较差。只要该处挤密达到要求,其他位置就一定会满足要求。此外,由该处检测的结果还可判明桩间距是否合理。

检测数量可取不少于桩孔总数的 2%。

如处理可液化地层时,可用标准贯入击数来衡量砂性土的抗液化性,使砂石桩处理后的地基实测标准贯入击数大于临界贯入

击数。这种液化判别方法只考虑了桩间土的抗液化能力,未考虑砂石桩的作用,因而在设计上是偏于安全的。

11.4.3 复合地基竖向抗压载荷试验数量可取总桩数的 0.5%,且每个单体建筑不应少于 3 点。

11.4.4 由于在制桩过程中原状土的结构受到不同程度的扰动,强度会有所降低,饱和土地基在桩的周围一定范围内,土中孔隙水压力上升。待休置一段时间后,超孔隙水压力会消散,强度会逐渐恢复,恢复期的长短视土的性质而定。原则上,应待超静孔隙水压力消散后进行检验。根据实际工程经验规定对粉土地基为 14d,对砂土地基和杂填土地基可适当减少。对非饱和土地基不存在此问题,在桩施工后 3d~5d 即可进行。

12 置换砂石桩复合地基

12.1 一般规定

12.1.1 当加固地基土体在成桩过程中不可压密时,如在饱和黏性土地基中设置砂石桩,形成的复合地基承载力的提高主要来自砂石桩的置换作用。

采用振冲法施工时填料一般为碎石、卵石。采用沉管法施工时填料一般为碎石、卵石、中粗砂或砂石混合料,也可采用对环境无污染的坚硬矿渣和其他工业废料。置换砂石桩法适用于处理饱和黏土和饱和黄土地基。

采用置换砂石桩复合地基加固软黏土地基,国内外有较多的工程实例,有成功的经验,也有失败的教训。由于软黏土含水量高、透水性差,形成砂石桩时很难发挥挤密效果,其主要作用是通过置换与软黏土构成复合地基,同时形成排水通道利于软土的排水固结。由于碎石桩的单桩竖向抗压承载力大小主要取决于桩周土的侧限力,而软土抗剪强度低,因此碎石桩单桩竖向抗压承载力小。采用砂石桩处理软土地基承载力提高幅度相对较小。虽然通过提高置换率可以提高复合地基承载力,但成本较高。另外在工作荷载作用下,地基土产生排水固结,砂石桩复合地基工后沉降较大,这点往往得不到重视而酿成工程事故。置换砂石桩法用于处理软土地基应慎重。用置换砂石桩处理饱和软黏土地基,最好先预压。

12.1.2 一般认为置换砂石桩法用振冲法处理软土地基,被加固的主要土层十字板强度不宜小于 20kPa,被加固的主要土层强度较低时,易造成串孔,成桩困难,但近年来在珠江三角洲地区采用振冲法施工大粒径碎石桩处理十字板强度小于 10kPa 的软土取

得成功,所用碎石粒径达 200mm。也有采用袋装(土工布制成)砂石桩和竹笼砂石桩形成置换砂石桩复合地基。

12.1.3 采用置换砂石桩复合地基加固软黏土地基时,砂石桩是良好的排水通道。为了加快地基土体排水固结,应铺设排水碎石垫层,与砂石桩形成良好的排水系统。地基土体排水固结,地基承载力提高,但产生较大沉降。置换砂石桩复合地基如不经过预压,工后沉降较大,对工后沉降要求严格的工程慎用。

12.2 设 计

12.2.1 采用置换砂石桩法处理软土地基除应按本规范第 4 章要求进行岩土工程勘察外,设计和施工还需要掌握地基的不排水抗剪强度。上部结构对地基的变形要求是考核置换砂石桩能否满足要求的重要指标。

施工机械关系到设计参数的选择、工期和施工可行性,设计前应加以考虑。

所需的填料性质也关系到设计参数的选择,并且要有足够的来源。填料的价格涉及工程造价和地基处理方案的比选,因此事先应进行了解。

12.2.2 本条规定了置换砂石桩的平面布置方式。对于大面积加固,一般采用等边三角形布置,这种布置形式在同样的面积置换率下桩的间距最大,施工处理后地基刚度也比较均匀,当采用振冲法施工,可以最大限度避免窜孔;对于单独基础或条形基础等小面积加固,一般采用正方形或矩形布置,这种布置比较方便在小面积基础下均匀布置砂石桩。

12.2.3 对于小面积加固,基础附加应力扩散影响范围有限,并且由于砂石桩的应力集中作用应力扩散范围较均质地基更小。因此,单独基础砂石桩不必超出基础范围,条形基础砂石桩可布置在基础范围内或适当超出基础范围。对于加固面积较大的筏板式、十字交叉基础,基础附加应力扩散影响范围较大,而柔性基础往往

有侧向稳定要求,故需在基础范围外加 1 排~3 排围扩桩。

12.2.4 为了控制置换砂石桩复合地基的变形,一般情况下桩应穿透软弱土层到达相对硬层。当软弱土层很厚,桩穿过整个软弱土层所需桩长过大,施工效率很低,且造价过高无法实现,这时桩长应按地基变形计算来控制。存在地基稳定问题时,桩长应满足稳定分析要求。

关于最小桩长,根据室内外试验结果,散体材料桩在承受竖向荷载时从桩顶向下约 4.0 倍桩径范围内产生侧向膨胀。振冲砂石桩用于置换加固,桩径一般为 0.8m,沉管砂石桩则多为 0.4m~0.6m。另外,若所需桩长很短说明要加固的软土层很薄,这时采用垫层法等其他浅层处理方法可能更有效。故规定最小桩长不宜小于 4.0m。

12.2.5 采用振冲法施工时砂石桩的成桩直径与振冲器的功率有关。通常认为当振冲器功率为 30kW 时,砂石桩的成桩直径为 800mm 左右,55kW 时为 1000mm 左右,75kW 时为 1500mm 左右。

面积置换率与复合地基的强度和变形控制直接相关,面积置换率太小,加固效果不明显。如天然地基承载力特征值为 50kPa 的软土,面积置换率 0.15 的砂石桩复合地基承载力为 70kPa 左右。但面积置换率过高会给施工带来很大困难,采用振冲法施工容易窜孔,采用沉管法施工挤土效应很大,当面积置换率大于 0.25 施工已感到困难,因此,推荐面积置换率取 0.15~0.30。

12.2.6 复合地基承载力特征值原则上应通过复合地基竖向抗压载荷试验确定。有工程经验的场地或初步设计时可按本规范推荐的方法进行设计。已有的实测数据表明,无论是采用振冲法还是沉管法施工,桩间饱和软土在制桩刚结束时由于施工扰动其强度有不同程度降低,但经过一段时间强度会恢复甚至有所提高,因此按本规范公式(5.2.1-2)估算, β_p 和 β_s 均应取 1.0。

12.2.7 置换砂石桩单桩竖向抗压承载力主要取决于桩周土的侧

限力,估算方法不少,当桩体材料的内摩擦角在 38° 左右时,单桩竖向抗压承载力特征值可按本规范公式(12.2.7)计算。也可采用圆孔扩张理论或其他方法计算桩周土的侧限力,然后得到单桩竖向抗压承载力。

12.2.9 置换砂石桩填料总体要求是采用级配较好的碎石、卵石、中粗砂或砂砾,以及它们的混合料,采用振冲法施工时一般用碎石、卵石作为填料。无论哪种施工方法都不宜选用风化易碎的石料。当有材质坚硬的矿渣也可作为填料使用。关于填料粒径:振冲法成桩 30kW 振冲器 20mm~80mm,55kW 振冲器 30mm~100mm,75kW 振冲器 40mm~150mm;沉管法成桩,最大粒径不宜大于 50mm。填料含泥量不宜超过 5%。

振冲法施工填料最大粒径与振冲器功率有关,振冲器功率大,填料的粒径也可适当增大。对同一功率的振冲器,被加固土体的强度越低所用填料的粒径可越大。

沉管法施工填料级配和最大粒径对桩体的密实有明显的影响,建议填料最大粒径不应超过 50mm。

12.2.10 置换砂石桩复合地基设置碎石垫层一方面起水平排水作用,有利于施工后加快土层固结,更大的作用在于碎石垫层可以起到明显的应力扩散作用,降低基底处砂石桩分担的荷载,并使该处桩周土合理承担附加应力增加其对桩体的约束,减少砂石桩侧向变形,从而提高复合地基承载力,减少地基变形。

12.3 施 工

12.3.1 置换砂石桩施工机械,应根据其施工能力与处理深度相匹配的原则选用。目前国内主要的砂石桩施工机械类型有:

1 振冲法施工采用的振冲器,常用功率为 30、55kW 和 75kW 三种类型。选用时,应考虑设计荷载的大小、工期、工地电源容量及地基土天然强度的高低等因素。

2 沉管法施工机械主要有振动式砂石桩机和锤击式砂石桩

机。除专用机械外,也可利用一般的打桩机改装。

采用垂直上下振动施工的方法称为振动沉管成桩法,振动沉管成桩法的处理深度可达 25m,若采取适当措施,最大处理深度可达约 40m;用锤击式机械施工成桩的方法称为锤击沉管成桩法,锤击沉管处理深度可达 20m。

选用成桩施工机械还要考虑不同机械施工过程对周边环境的不利影响,如采用振冲机械施工需评价振动和泥浆排放的影响。

12.3.2 地基处理效果常因施工机具、施工工艺与参数,以及所处理地层的不同而不同,工程中常遇到设计与实际不符或者处理质量不能达到设计要求的情况,因此本条规定施工前应进行现场成桩试验,以检验设计方案和设计参数,确定施工工艺和技术参数(包括填砂石量、提升速度、挤压时间等)。现场成桩试验桩数:正三角形布桩,至少 7 根(中间 1 根,周围 6 根);正方形布桩,至少 9 根(按三排三列布 9 根桩)。

12.3.3 采用振冲法施工时,30kW 功率的振冲器每台机组约需电源容量 75kW,桩长不宜超过 8m;75kW 功率的振冲器每台机组约需电源容量 100kW,桩长不宜超过 20m。一定功率的振冲器,施工桩长过大施工效率将明显降低,例如 30kW 振冲器制作 9m 长的桩,7m~9m 这段桩的制作时间占总制桩时间的 39%。在邻近既有建筑物场地施工时,为减小振动对建筑物的影响,宜用功率较小的振冲器。

振冲法施工中,密实电流、填料量和留振时间是重要的施工质量控制参数,因此,施工过程中应注意:

1 控制加料振密过程中的密实电流。密实电流是指振冲器固定在某深度上振动一定时间(称为留振时间)后的稳定电流,注意不要将把振冲器刚接触填料的瞬间电流值作为密实电流。为达到所要求的挤密效果,每段桩体振捣挤密终止条件是要求其密实电流值超过某规定值:30kW 振冲器为 45A~55A;55kW 振冲器为 75A~85A;75kW 振冲器为 80A~95A。

2 控制好填料量。施工中加填料要遵循“少量多次”的原则，既要勤加料，每批又不宜加得太多。注意制作最深处桩体的填料量可占整根桩填料量的 $1/4 \sim 1/3$ 。这是因为初始阶段加的料有一部分从孔口向孔底下落过程中粘在孔壁上，只有少量落在孔底；另外，振冲过程中的压力水有可能造成孔底超深，使孔底填料数量超过正常用量。

3 保证有一段留振时间，即振冲器不升也不降，保持继续振动和水冲，使振冲器把桩孔扩大或把周围填料挤密。留振时间可较短，回填砂石料慢、地基软弱时，留振时间较长。

12.3.4 振冲施工有泥水从孔内排出。为防止泥水漫流地表污染环境，或者排入地下排水系统而淤积堵塞管路，施工时应设置沉淀池，用泥浆泵将排出的泥水集中抽入池内，宜重复使用上部清水。沉淀后的泥浆可用运浆车辆运至预先安排的存放地点。

12.3.5 沉管法施工，应按下列步骤进行：

- 1 移动桩机及导向架，把桩管及桩尖对准桩位。
- 2 启动振动锤或桩锤，把桩管下到预定的深度。
- 3 向桩管内投入规定数量的砂石料（根据施工试验经验，为提高施工效率，装砂石也可在桩管下到便于装料的位置时进行）。
- 4 把桩管提升一定的高度（下砂石顺利时提升高度不超过 $1\text{m} \sim 2\text{m}$ ），提升时桩尖自动打开，桩管内的砂石料流入孔内。
- 5 降落桩管，利用振动及桩尖的挤压作用使砂石密实。
- 6 重复 4、5 两工序，桩管上下运动，砂石料不断补充，砂石桩不断升高。
- 7 桩管提至地面，砂石桩完成。

施工中，电机工作电流的变化反映挤密程度及效率。电流达到一定不变值，继续挤压将不会产生挤密效果。然而施工中不可能及时进行效果检测，因此按成桩过程的各项参数对施工进行控制是重要环节，应予以重视，有关记录是质量检验的重要资料。

砂石桩施工时，应间隔进行（跳打），并宜由外侧向中间推进；

在邻近既有建(构)筑物邻近施工时,为了减少对邻近既有建(构)筑物的振动影响,应背离建(构)筑物方向进行。

砂石桩施工完毕,当设计或施工投砂量不足时地面会下沉,当投料过多时地面会隆起,同时表层 0.5m~1.0m 常呈松散状态。如遇到地面隆起过高也说明填砂石量不适当。实际观测资料证明,砂石在达到密实状态后进一步承受挤压又会变松,从而降低处理效果。遇到这种情况应注意适当减少填砂石量。

施工场地土层可能不均匀,土质多变,处理效果不能直接看到,也不能立即测出。为保证施工质量,在土层变化的条件下施工质量也能达到标准,应在施工中进行详细的观测和记录。

12.3.6 砂石桩顶部施工时,由于上覆压力较小,因而对桩体的约束力较小,桩顶形成一个松散层,加载前应加以处理(挖除或碾压)才能减少沉降量,有效地发挥复合地基作用。

12.4 质量检验

12.4.1 对振冲法,应详细记录成桩过程中振冲器在各深度时的水压、电流和留振时间,以及填料量,这些是施工控制的重要手段;而对沉管法,套管往复挤压振冲次数与时间、套管升降幅度和速度、每次填砂石料量等是判断砂石桩施工质量的重要依据,再结合抽检便可以较好地作出质量评价。

12.4.2 置换砂石桩复合地基的砂石桩可以用动力触探检测其密实度,采用十字板、静力触探等方法检测处理后桩间土的性状。桩间土应在桩位布置的等边三角形或正方形中心进行砂石桩处理效果检测,因为该处排水距离远,施工过程产生的超静孔压消散最慢,处理后强度恢复或提高也需要更长时间。此外,由该处检测的结果还可判明桩间距是否合理。检测数量根据工程情况由设计单位提出,可取桩数的 1%~2%。

12.4.3 载荷试验数量由设计单位根据工程情况提出具体要求,一般可取桩数的 0.5%~1%,且每个单体工程不少于 3 点。

12.4.4 由于在制桩过程中原状土的结构受到不同程度的扰动,强度会有所降低,土中孔隙水压力上升。待休置一段时间后,超孔隙水压力会消散,强度会逐渐恢复,恢复期的长短视土的性质而定。原则上,应待超孔隙水压力消散后进行检验。黏土中超静孔隙水压的消散需要的时间较长,根据实际工程经验一般规定为28d。

13 强夯置换墩复合地基

13.1 一般规定

13.1.1、13.1.2 强夯置换的加固效果与地质条件、夯击能量、施工工艺、置换材料等有关,采用强夯置换墩复合地基加固具有加固效果显著、施工工期短、施工费用低等优点,目前已广泛用于堆场、公路、机场、港口、石油化工等工程的软土地基加固。采用强夯置换墩复合地基加固可较大幅度提高地基承载力,减少沉降。有关强夯置换加固机理的研究在不断深入,已取得了一批研究成果。目前,强夯置换工程应用夯击能已经达到 $18000\text{kN}\cdot\text{m}$,但还没有一套成熟的设计计算方法。也有个别工程因设计、施工不当,处理后出现沉降量或差异沉降较大的情况。因此,特别强调采用强夯置换法前,应在施工现场有代表性的场地进行试夯或试验性施工,确定其适用性和处理效果。精心设计、精心施工,以达到预定加固效果。

强夯置换的碎石墩是一种散体材料墩体,在提高强度的同时,为桩间土提供了排水通道,有利于地基土的固结。墩体上设置垫层的主要作用是使墩体与墩间土共同发挥承载作用,同时垫层也起到排水作用。

13.1.3 强夯置换施工,往往夯击能量较大,强大的冲击除能造成场地四周地层较大的振动外,还伴随有较大的噪声,因此周边环境是否允许是考虑该法可行性时必须注意的因素。

13.2 设计

13.2.1 试夯是强夯置换墩处理的重要环节,试夯方案的完善与否直接影响到后续的施工过程和加固效果。试夯过程不但要确定

施工参数,还要反馈信息校正设计,所以要进行加固效果的各项测试。

13.2.2 设计内容应在施工图纸中明确,才能确保现场的施工效果。对施工过程中出现的异常情况,相关各方应加强沟通,结合工程实际情况调整设计参数。

墩体布置是否合理直接影响夯实效果,可根据上部荷载的要求进行选择。对于大面积加固区域,可采用正方形、等边三角形、正方形加梅花点布置。对于工业和民用建筑,可以根据柱网或承重墙的位置布置夯点。

13.2.3 由于基础的应力扩散作用和抗震设防需要,强夯置换处理范围应大于建筑物基础范围,具体放大范围可根据建筑结构类型和重要性等因素确定。对于一般建筑物,每边超出基础外缘的宽度宜为基底下设计处理深度的 $1/3 \sim 1/2$,并不宜小于 3m。对可液化地基,根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定,扩大范围不应小于可液化土层厚度的 $1/2$,并不应小于 5m;对独立柱基,当柱基面积不大于夯墩面积时,可采用柱下单点夯,一柱一墩。

13.2.4 墩体材料块石过大过多,容易在墩体中留下比较大的孔隙,在建筑物使用过程中容易使墩间软土挤入孔隙,导致局部下沉,所以本条强调了对墩体填料粒径的要求。

13.2.5 强夯置换深度是选择该方法进行地基处理的重要依据,又是反映强夯处理效果的重要参数。对于淤泥等黏性土,置换墩应尽量加长。大量的工程实例证明,置换墩体为散体材料,没有沉管等导向工具的话,很少有强夯置换墩体能完全穿透软土层,着底在较好土层上。而对于厚度比较大的饱和粉土、粉砂土,因墩下土在施工中密度会增大,强度也有所提高,故在满足地基变形和稳定性要求的条件下,可不穿透该土层。

强夯置换的加固原理相当于下列三者之和:强夯置换=强夯(加密)+碎石墩+特大直径排水井。因此,墩间和墩下的粉土或

黏性土通过排水与加密,其性状得到改善。本条明确了强夯置换有效加固深度为墩长和墩底压密土厚度之和,应根据现场试验或当地经验确定。墩底压密土厚度一般为 $1\text{m}\sim 2\text{m}$ 。单击夯击能大小的选择与地基土的类别有关,粉土、黏性土的夯击能选择应当比砂性土要大。此外,结构类型、上部荷载大小、处理深度和墩体材料也是选择单击夯击能的重要参考因素。

实际上有效加固深度影响因素很多,除夯锤重和落距外,夯击数、锤底单位压力、地基土性质、不同土层厚度和埋藏顺序以及地下水位等都与加固深度有密切的关系。鉴于有效加固深度问题的复杂性,且目前尚无适用的计算式,所以本条规定有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定。

考虑到设计人员选择地基处理方法的需要,有必要提出有效加固深度,特别是墩长的预估方法。针对高饱和度粉土、软塑~流塑的黏性土、有软弱下卧层的填土等细颗粒土地基(实际工程多为表层有 $2\text{m}\sim 6\text{m}$ 的粗粒料回填,下卧 $3\text{m}\sim 15\text{m}$ 淤泥或淤泥质土),根据全国各地50余项工程或项目实测资料的归纳总结(见图12),并广泛征求意见,提出了强夯置换主夯击能与置换深度的建议值(见表13.2.5)。图12中也绘出了现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2002条文说明中的18个工程数据。初步选择时也可以根据地层条件选择墩长,然后参照本图选择强夯置换的能级,而后必须通过试夯确定。同时考虑到近年来,沿海和内陆高填方场地地基采用 $10000\text{kN}\cdot\text{m}$ 以上能级强夯法的工程越来越多,积累了大量实测资料,将单击夯击能范围扩展到了 $18000\text{kN}\cdot\text{m}$,可满足当前绝大多数工程的需要。

需要注意的是表13.2.5中的能级为主夯能级。对于强夯置换法,为了增加置换墩的长度,工艺设计的一套能级中第一遍(工程中叫主夯)的能级最大,第二遍次之或与第一遍相同。每一遍施工填料后都会产生或长或短的夯墩。实践证明,主夯夯点的置换墩长要比后续几遍大。因此,工程中所讲的夯墩长度指的是主夯

夯点的夯墩长度。对于强夯置换法,主夯击能指的是第一遍夯击能,是决定置换墩长度的夯击能,即决定有效加固深度的夯击能。

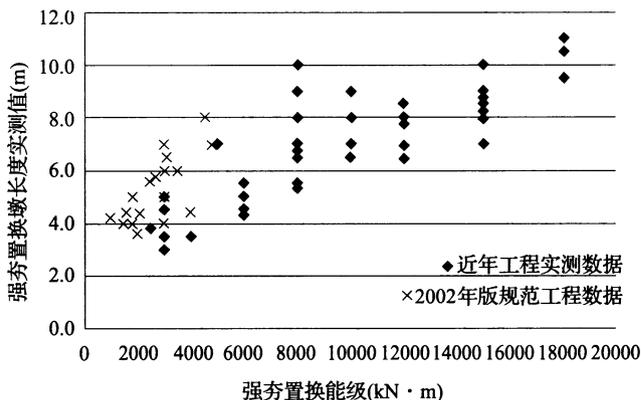


图 12 强夯置换主夯击能级与置换墩长实测值

13.2.6 夯击击数对于强夯设计来说是一个非常重要的参数,往往根据工程的具体情况,如压缩层厚度、土质条件、容许沉降量等进行选择。当土体的压缩层越厚、渗透系数越小,同时含水量较高时,需要的夯击击数就越多。国内外目前一般采用 8 击~20 击。总之,夯击击数应通过现场试夯确定,以夯墩的竖向压缩量最大,而夯坑周围隆起量最小为原则。如果隆起量过大,表明夯击效率降低,则夯击击数适当减少。此外,还应考虑施工方便,不会因夯坑过深而导致起锤困难等情况的发生。

累计夯沉量指单个夯点全部夯击击数各夯沉量的总和。累计夯沉量为设计墩长的 1.5 倍~2.0 倍是个最低限值,其目的是为了保证墩体的密实度,与充盈系数的概念有些相似,此处以长度比代替体积比,工程实测中该比值往往很大。

13.2.11 强夯置换墩复合地基上垫层主要是为了使地基土承受的荷载均匀分布,也与墩体的散体材料一起形成排水通道。粒径不宜大于 100mm 是为了使垫层具有更好的密实度,便于

压实。

13.2.12 本条规定实际上是指在软弱地基土,如淤泥等土体中不应考虑墩间土的作用。强夯置换墩法在国外亦称为动力置换与混合法(Dynamic replacement and mixing method),因为墩体在形成过程中大量的墩体材料与墩间土混合,越浅处混合得越多,可与墩体共同组成复合地基,但目前由于实际施工的不利因素,往往混合作用不强,墩间的淤泥等软土性质改善不够,因此目前暂不考虑墩间土地基承载力较为稳妥,也偏于安全。实际工程中,强夯置换墩地基浅层的承载力往往都能满足要求,大部分工程是按照变形控制进行设计,因此此处建议不考虑软黏土地基上墩间土地基承载力。

如山东某工程采用 $12000\text{kN}\cdot\text{m}$ 的强夯置换工艺(第一、二遍为 $12000\text{kN}\cdot\text{m}$,第三遍为 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$)进行处理,大致地层分布如下: $0\sim 2.2\text{m}$ 为杂填土, $2.2\text{m}\sim 3.6\text{m}$ 为淤泥质粉质黏土, $3.6\text{m}\sim 8.1\text{m}$ 为吹填砂土, $8.1\text{m}\sim 13.0\text{m}$ 为淤泥质粉细砂, 13.0m 以下为强风化花岗岩。试验载荷板的尺寸为 $7.1\text{m}\times 7.1\text{m}$,板面积为 50.4m^2 ,堆载量为 31000kN 。柔性承压板的中心位于第三遍夯点位置,承压板四角分别放置于第一、二遍夯点 $1/4$ 面积位置。试验在钻探、动力触探和瑞利波测试的基础上又进行了以下测试工作:①载荷板沉降观测;②土压力观测;③孔隙水压力观测;④分层沉降观测;⑤深层水平位移观测;⑥载荷板板底土体竖向变形观测(水平测斜仪);⑦载荷板周边土体隆起变形观测。

测试结果发现在附加压力达到 600kPa 时,平均沉降量为 62mm ,深度 4m 以下土体水平位移为 2mm ,荷载对周边土体挤密作用小。夯后墩间土地基承载力特征值不小于 300kPa ,压缩模量不小于 20MPa 。地基变形较为均匀,碎石置换墩承担荷载的 $60\%\sim 80\%$,即载荷板所承受的荷载绝大部分传递至强夯置换墩上,因此软黏土地基静载试验时暂不考虑墩间土地基承载力是符

合实际受力情况的。

13.3 施 工

13.3.1 夯锤质量应根据处理深度要求和起重机起重能力进行选择。夯锤底面形式是否合理也在一定程度上影响地基处理效果。锤底面积可按土的性质确定。为了提高夯击效果,锤底应对称设置若干个与其顶面贯通的排气孔,以利于夯锤着地时坑底空气迅速排出和起锤时减小坑底的负压力。

13.3.3 本条主要是为了在夯坑内或场地地表形成硬层,以支承起重设备,确保机械设备通行和顺利施工,同时还可以增加地下水和地表面的距离,防止夯坑内积水。

13.3.4 当夯坑过深而发生起锤困难时停夯,向坑内填料至坑深的 $1/3\sim 1/2$,如此重复直至满足规定的夯击击数及控制标准,从而完成一个墩体的夯击。

13.3.5 本条要求施工过程由专人监测,是由下列原因决定的:

1 若落距未达到设计要求,将影响单击夯击能。落距计算应从起夯面算至落锤时的锤底高度。

2 由于强夯置换过程中容易造成夯点变位,所以应及时复核。

3 夯击击数、夯沉量和填料量对加固效果有着直接的影响,应严加监测。

4 当场地周围有对振动敏感的精密仪器、设备、建筑物或有其他需要时宜进行振动监测。测点布置应根据监测目的和现场情况确定,可在振动强度较大区域内的建筑物基础或地面上布设观测点,并对其振动速度峰值和主振频率进行监测,具体控制标准及监测方法可参照现行国家标准《爆破安全规程》GB 6722 执行。对于居民区、工业集中区,振动可能影响人居环境,宜参照现行国家标准《城市区域环境振动标准》GB 10070 和《城市区域环境振动测量方法》GB 10071 的有关规定执行。经监测,振动超过规范允许

值时可采取减振隔振措施。施工时,在作业区一定范围设置安全禁戒,防止非作业人员、车辆误入作业区而受到伤害。

5 在噪声保护要求较高区域内用锤击法沉桩或有其他需要时可进行噪声监测。噪声的控制标准和监测方法可按现行国家标准《建筑施工场界环境噪声排放标准》GB 12523 的有关规定执行。

13.3.6 由于强夯置换施工的特殊性,施工过程中难以直接检验其效果,所以本条强调对施工过程的记录。

13.4 质量检验

13.4.1 强夯置换施工中所采用的参数应满足设计要求,并根据监测结果判断加固效果。未能达到设计要求的加固效果时应及时采取补救措施。

13.4.2 强夯置换墩的直径和墩长较难精确测量,宜采用开挖检查、钻探、动力触探等方法,并通过综合分析确定。墩长的检验数量不宜少于墩点数的 3%。

13.4.4 由于复合地基的强度会随着时间延长而逐步恢复和提高,所以本条指出应在施工结束一段时间后进行承载力的检验。其间隔时间可根据墩间土、墩体材料的性质确定。

承载力检验的数量应根据场地复杂程度和建筑物的重要性确定,对于简单场地上的一般建筑物,每个建筑地基的载荷试验检验点不应少于 3 点;对于复杂场地或重要建筑地基应增加检验点数。强夯置换复合地基竖向抗压载荷试验检验和置换墩长检验数量均不应少于墩点数的 1%,且不应少于 3 点。

14 刚性桩复合地基

14.1 一般规定

14.1.1 实际上刚性桩复合地基适用于可以设置刚性桩的各类地基。刚性桩复合地基既适用于工业厂房、民用建筑,也适用于堆场及道路工程。

14.1.2 本规范中刚性桩包括各类实体、空心 and 异型的钢筋混凝土桩和素混凝土桩,钢管桩等。

水泥粉煤灰碎石桩复合地基(CFG 桩复合地基)是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌和而成的混凝土,经钻孔或沉管施工工艺,在地基中形成具有一定黏结强度的低强度混凝土桩。

二灰混凝土桩的桩体材料由水泥、粉煤灰、石灰、石子、砂和水等组成,采用沉管法施工。

14.1.3 在使用过程中,通过桩与土变形协调使桩与土共同承担荷载是复合地基的本质和形成条件。由于端承型桩几乎没有沉降变形,只能通过垫层协调桩土相对变形,不可知因素较多,如地下水位下降引起地基沉降,由于各种原因,当基础与桩间土上垫层脱开后,桩间土将不再承担荷载。因此,本规范指出刚性桩复合地基中刚度桩应为摩擦型桩,对端承型桩进行限制。

14.2 设计

14.2.3 当刚性桩复合地基中的桩体穿越深厚软土时,如采用挤土成桩工艺(如沉管灌注成桩),桩距过小易产生明显的挤土效应,一方面容易引起周围环境变化,另一方面,挤土作用易产生桩挤断、偏位等情况,影响复合地基的承载性能。

采用挤土工艺成桩(一般指沉管施工工艺)时,桩的中心距应符合表 6 的规定。

表 6 桩的最小中心距

土的种类	最小中心距	
	一般情况	排数超过 2 排,桩数超过 9 根的群桩情况
穿越深厚软土	3.5 <i>d</i>	4.0 <i>d</i>
其他土层	3.0 <i>d</i>	3.5 <i>d</i>

注:表中 *d* 为桩管外径;采用非挤土工艺成桩,桩中心距不宜小于 3*d*。

桩长范围内有饱和粉土、粉细砂、淤泥、淤泥质土,采用长螺旋钻中心压灌成桩时,宜采用大桩距。

14.2.4 垫层设置的详细介绍见本规范第 3.0.9 条条文明。

14.2.5 复合地基承载力由桩的竖向抗压承载力和桩间土地基承载力两部分组成。由于桩土刚度不同,两者对承载力的贡献不可能完全同步。一般情况下桩间土地基承载力发挥度要小一些。式中 β_s 反映这一情况。 β_s 的影响因素很多,桩土模量比较大时, β_s 取值较小;建筑混凝土基础下垫层较厚时, β_s 取值较大;建筑混凝土基础下复合地基 β_s 取值较路堤基础下复合地基小;桩的持力层较好时, β_s 取值较小。 β_s 取值应通过综合分析确定。

14.2.6 按本规范公式(5.2.2-1)估算由桩周土和桩端土的抗力可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值,考虑到刚性桩刚度一般较大,桩端土地基承载力折减系数(α)可取 1.00。

对水泥粉煤灰碎石桩、二灰混凝土桩等有关规范刚性桩提出桩体强度应符合下式规定:

$$f_{cu} \geq 3 \frac{R_a}{A_p} \quad (9)$$

式中: f_{cu} ——桩体试块标准养护 28d 的立方体(边长 150mm)抗压强度平均值(kPa);

R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

A_p ——单桩截面积(m^2)。

有关桩基规范对钢筋混凝土桩桩体强度提出应符合下式规定：

$$f_c \geq \frac{R_a}{\psi_c A_p} \quad (10)$$

式中： f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值(kPa)，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定取值；

A_p ——单桩截面积(m^2)；

ψ_c ——桩工作条件系数，预制桩取 0.75，灌注桩取 0.6~0.7（水下灌注桩、沉管灌注桩或长桩时用低值）。当桩体的施工质量有充分保证时，可以适当提高，但不得超过 0.8。

混凝土轴心抗压强度标准值(f_{ck})与立方体抗压强度标准值(f_{cu})之间的关系在现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中有详细说明， $f_{ck} = 0.88\alpha_1\alpha_2 f_{cu}$ ， α_1 为棱柱强度与立方体强度的比值，C50 及以下普通混凝土取 0.76，高强混凝土 C80 取 0.82，中间按线性插值， α_2 为 C40 以上混凝土考虑脆性折减系数，C40 取 1.00，高强混凝土 C80 取 0.87，中间按线性插值。经计算 f_{ck} 与 f_{cu} 的大致关系为 $f_{ck} = 0.67f_{cu}$ 。按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定，混凝土轴心抗压强度设计值(f_c)与混凝土轴心抗压强度标准值(f_{ck})之间的关系为 $f_c = f_{ck}/1.4$ 。结合上面分析将公式(10)表示为 $0.67f_{cu}/1.4 \geq R_a/\psi_c A_p$ ，代入相关的参数发现公式(10)与公式(9)基本一致。

因此本规范中，刚性桩按公式(5.2.2-2)估算由桩体材料强度可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值时，其中桩体强度折减系数(η)建议取 0.33~0.36。灌注桩或长桩时用低值，预制桩取高值。

14.4 质量检验

14.4.2 采用低应变动力测试检测桩体完整性时,检测数量可取不少于总桩数的 10%。

14.4.3 刚性桩复合地基工程验收时,检验数量由设计单位根据工程情况提出具体要求。一般情况下,复合地基竖向抗压载荷试验数量对于建筑工程为总桩数的 0.5%~1.0%,对于交通工程为总桩数的 0.2%,对于堆场工程为总桩数的 0.1%,且每个单体工程的试验数量不应少于 3 点。单桩竖向抗压载荷试验数量为总桩数的 0.5%,且每个单体工程的试验数量不应少于 3 点。

15 长-短桩复合地基

15.1 一般规定

15.1.2 长-短桩复合地基中长桩常采用刚性桩,如钻孔或沉管灌注桩、钢管桩、大直径现浇混凝土筒桩或预制桩(包括预制方桩、先张法预应力混凝土管桩)等;短桩常采用柔性桩或散体材料桩,如深层搅拌桩、高压旋喷桩、石灰桩以及砂石桩等。

长-短桩复合地基上部置换率高、刚度大,下部置换率低、刚度小,与荷载作用下地基上部附加应力大,下部附加应力小相适应。

长-短桩复合地基长桩和短桩的置换率是根据上部结构荷载大小、单桩竖向抗压承载力、沉降控制等要求综合确定的。

短桩选用种类与浅层土性有关。

15.1.3 长桩的持力层选择是复合地基沉降控制的关键因素,大量工程实践表明,选择较好土层作为持力层可明显减少沉降,但应避免长桩成为端承桩,否则不利于发挥桩间土及短桩的作用,甚至造成破坏。

15.2 设计

15.2.1、15.2.2 长-短桩复合地基工作机理复杂,因此,其承载力特征值应通过现场复合地基竖向抗压载荷试验来确定。在初步设计时,按本规范公式(5.2.5)计算复合地基承载力时需要参照当地工程经验,选取适当的 β_{p1} 、 β_{p2} 和 β_s 。这三个系数的概念是,当复合地基加载至承载能力极限状态时,长桩、短桩及桩间土相对于其各自极限承载力的发挥程度,不能理解为工作荷载下三者的荷载分担比。

对 β_{p1} 、 β_{p2} 和 β_s 取值的主要影响因素有基础刚度,长桩、短桩

和桩间土三者间的模量比,长桩面积置换率和短桩面积置换率,长桩和短桩的长度,垫层厚度,场地土的分层及土的工程性质等。

当长-短桩复合地基上的基础刚度较大时,一般情况下, β_s 小于 β_{p2} , β_{p2} 小于 β_{p1} 。此时,长桩如采用刚性桩,其承载力一般能够完全发挥, β_{p1} 可近似取 1.00, β_{p2} 可取 0.70~0.95, β_s 可取 0.50~0.90。垫层较厚有利于发挥桩间土地基承载力和柔性短桩竖向抗压承载力,故垫层厚度较大时 β_s 和 β_{p2} 可取较高值。当刚性长桩面积置换率较小时,有利于发挥桩间土地基承载力和柔性短桩竖向抗压承载力, β_s 和 β_{p2} 可取较高值。长-短桩复合地基设计时应注重概念设计。

对填土路堤和柔性面层堆场下的长-短桩复合地基,一般情况下, β_s 大于 β_{p2} , β_{p2} 大于 β_{p1} 。垫层刚度对桩的竖向抗压承载力发挥系数影响较大。若垫层能有效防止刚性桩过多刺入垫层,则 β_{p1} 可取较高值。

15.2.3 在短桩的桩端平面,复合地基承载力产生突变,当短桩桩端位于软弱土层时,应验算此深度的软弱下卧层承载力,这也是确定短桩桩长的一个关键因素(另一关键因素是复合地基的沉降控制要求)。短桩桩端平面的附加压力值可根据短桩的类型,由其荷载扩散或传递机理确定。对散体材料桩或柔性桩,按压力扩散法确定,对刚性桩采用等效实体法计算。

15.2.5 复合地基沉降采用分层总合法计算时,主要作了两个假设:①长-短桩复合地基中的附加应力分布计算采用均质土地基的计算方法,不考虑长、短桩的存在对附加应力分布的影响;②在复合地基产生沉降时,忽略长、短桩与桩间土之间因刚度、长度不同产生的相对滑移,采用复合压缩模量来考虑桩的作用。

上述假设带来的误差通过复合土层压缩量计算经验系数来调整。在计算时,需要根据当地经验,选择适当的经验系数。

15.2.6 为充分发挥桩间土地基承载力和短桩竖向抗压承载力,垫

层厚度不宜过小,但垫层厚度过大时,既不利于长桩竖向抗压承载力发挥,又增加成本,因此根据经验,建议垫层厚度采用 100mm~300mm。

垫层材料多为中砂、粗砂、级配良好的砂石等,不宜选用卵石。

15.2.7 如果长-短桩复合地基中长桩为刚性桩、短桩为柔性桩,为了充分发挥柔性桩的作用,使刚性长桩与柔性短桩共同作用形成复合地基,要合理选择刚性桩的桩距。对挤土型刚性桩,应严格控制布桩密度,特别是对于深厚软土地区,应尽量减少成桩施工对桩间土的扰动。

15.3 施 工

15.3.1 长桩与短桩的施工顺序可遵守下列原则:

1 挤土桩应先于非挤土桩施工。如果先施工非挤土桩,当挤土桩施工时,挤土效应易使已经施工的非挤土桩偏位、断裂甚至上浮,深厚软土地基上这样施工的后果尤为严重。

2 当两种桩型均为挤土桩时,长桩宜先于短桩施工。如先施工短桩,长桩施工时易使短桩上浮,影响其端阻力的发挥。

15.3.5 当基础底面桩间土含水量较大时,应进行试验确定是否采用动力夯实法,避免桩间土地基承载力降低,出现弹簧土现象。对较干的砂石材料,虚铺后可适当洒水再进行碾压或夯实。

15.3.6 基础埋深较浅时宜采用人工开挖,基础埋深较深时,可先采用机械开挖,并严格均衡开挖,留一定深度采用人工开挖,以围护桩头质量。

16 桩网复合地基

16.1 一般规定

16.1.1 桩网复合地基适用于有较大工后沉降的场地,特别适用于新近填海地区软土、新近填筑的深厚杂填土、液化粉细砂层和湿陷性土层的地基处理。当桩土共同作用形成复合地基时,桩网复合地基的工作机理与刚性桩复合地基基本一致。当处理新近填土、湿陷性土和欠固结淤泥等地基时,工后沉降较大,桩间土不能与桩共同作用承担上覆荷载,桩帽以上的填土荷载、使用荷载通过填土层、垫层和加筋层共同作用形成土拱,将桩帽以上的荷载全部转移至桩帽由桩承担。此时桩网地基是填土路堤下桩承堤的一种形式。

16.1.2 桩网复合地基一般用于填土路堤、柔性面层的堆场和机场跑道等构筑物的地基加固,已广泛应用于桥头路基、高速公路、高速铁路和机场跑道等严格控制工后沉降的工程,具有施工进度快、质量易于控制等特点。

16.1.3 当采用桩网复合地基时,还应着重查明加固土层的固结状态、震陷性和湿陷性等特性,判断是否会发生较大的工后沉降。对于大面积新近填土的软土层、未完成自重固结的新近填土层、可液化的粉细砂层和湿陷性土层,均有可能产生较大的工后沉降。在该类地层采用刚性桩复合地基时,应按本规范桩网复合地基的规定和要求进行设计和施工。

16.1.4 桩网复合地基以桩承担大部分或全部桩顶以上的填土荷载和使用荷载,桩的竖向抗压承载力、变形性能直接影响复合地基的承载力和变形性状,所以该类地基在正式施工前应进行现场试桩,确定桩的竖向抗压承载力和 $p-s$ 曲线。

16.1.5 桩网复合地基中的桩可采用刚性桩,也可选用低强度桩。实际上采用低强度桩时布桩间距较密,桩顶不需要设置荷载传递所需的桩帽、加筋层,对填土层高度也无严格要求,在形式上与桩网复合地基不一致。所以,桩网复合地基中的桩普遍指的是刚性桩。

刚性桩的形式有多种,应根据施工可行性和经济性比选桩型。在饱和软黏土地层,不宜采用沉管灌注桩;采用打(压)入预制桩时,应采取合理的施工顺序和必要的孔压消散措施。填土、粉细砂、湿陷性土等松散的土层宜采用挤土桩。

塑料套管桩是专门开发用于桩网复合地基的一种塑料套管就地灌注混凝土桩,桩径为150mm~250mm,先由专门的机具将带铁靴的塑料套管压入地基土层中,后灌注混凝土,桩帽可一次浇筑,具有施工速度快,饱和软土地层施工影响小等特点。

16.1.6 为了充分发挥桩网复合地基刚性桩桩体强度,宜采用较大的布桩间距。但是,加大桩间距时,需加大桩长、增加桩帽尺寸和配筋量,加筋体应具有更高的性能,以及加大填土高度以满足土拱高度要求,结果有可能导致总体造价升高。所以,应综合地质条件、桩的竖向抗压承载力、填土高度等要求,确定桩间距、桩帽尺寸、加筋层和垫层及填土层厚度。

16.2 设计

16.2.1 应该根据桩的设计承载力、桩型和施工可行性等因素选用经济合理的桩径,根据国内的施工经验,就地灌注桩的桩径不宜小于300mm,预应力管桩直径宜选300mm~400mm,桩体强度较低的桩型可以选用较大的桩径。桩穿过原位十字板强度小于10kPa的软弱土层时,应考虑压曲影响。

16.2.2 正方形布桩并采用正方形桩帽时,桩帽和加筋层的设计计算较方便。同时加筋层的经向或纬向正交于填方边坡走向时,加筋层对增强边界稳定性最有利。三角形布桩一般采用圆形桩

帽,采取等代边长参照正方形桩帽设计方法。

根据实际工程统计,桩网复合地基的桩中心间距与桩径之比大多在 5~8 之间。当桩的竖向抗压承载力高时,应选较大的间距桩径比。但 3.0m 以上的布桩间距较少见。过大桩间距会导致桩帽造价升高,加筋体的性能要求提高,以及填土总厚度加大,在实际工程中不一定是合理方案。

16.2.3 单桩竖向抗压承载力应通过试桩确定,在方案设计和初步设计阶段,可根据勘察资料采用现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 规定的方法按下式计算:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p \quad (11)$$

式中: u_p ——桩的截面周长(m);

n ——桩长范围内所划分的土层数;

q_{si} ——第 i 层土的桩侧摩阻力特征值(kPa);

l_i ——第 i 层土的厚度(m);

q_p ——桩端土地基承载力特征值(kPa)。

16.2.4 参照现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 中第 5.4.4 条计算下拉荷载(Q_n^g)。计算时要注意负摩阻力取标准值。

16.2.5 当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时,桩间土的沉陷是一个较缓慢的发展过程,复合地基的载荷试验不能反映桩间土下沉导致不能承担荷载的客观事实,所以不建议采用复合地基竖向抗压载荷试验确定该类地质条件下的桩网复合地基承载力。桩网复合地基主要由桩承担上覆荷载,用桩的单桩竖向抗压载荷试验确定单桩竖向抗压承载力特征值,推算复合地基承载力更为恰当。

对于有工后沉降的桩网复合地基,载荷试验确定的单桩竖向抗压承载力应扣除负摩擦引起的下拉荷载。注意下拉荷载为标准值,当采用特征值计算时应乘以系数 2。

16.2.6 当复合地基中的桩和桩间土的相对沉降较小时,桩间土

能发挥作用承担一部分上覆荷载,桩网复合地基的工作机理与刚性桩复合地基一致,属于复合地基的一种形式, β_p 和 β_s 按刚性桩复合地基的规定取值。当桩和桩间土有较大的相对沉降时,不应考虑桩间土分担荷载的作用, β_p 取 1.0, β_s 取 0。

16.2.7 当采用圆形桩帽时,可采用面积相等的原理换算圆形桩帽的等效边长(a_0)。等效边长按下式计算:

$$a_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} d_0 \quad (12)$$

式中: d_0 ——圆形桩帽的直径(m)。

16.2.8 桩帽宜采用现浇,可以保证对中和桩顶与桩帽紧密接触。当采用预制桩帽时,一般在预制桩帽的下侧面设略大于桩径的凹槽,安装时对中桩位。桩帽面积与单桩处理面积之比宜取 15%~25%。当桩径为 300mm~400mm 时,桩帽之间的最大净间距宜取 1.0m~2.0m。方案设计时,可预估需要的上覆填土厚度为最大间距的 1.5 倍。

桩帽作为结构构件,采用荷载基本组合验算截面抗弯和抗冲剪承载力(图 13)。

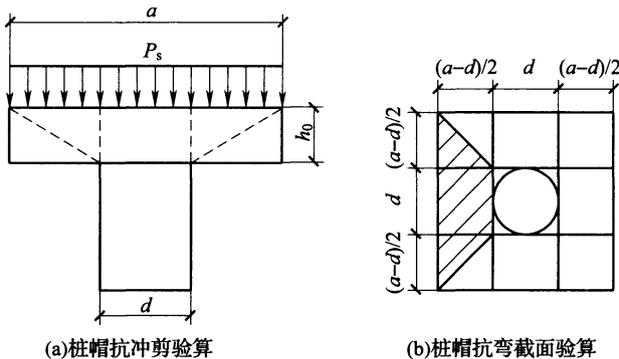


图 13 桩帽计算示意

桩帽抗冲剪按下列公式计算:

$$V_s / u_m h_0 \leq 0.7 \beta_{hp} f_t / \eta \quad (13)$$

$$V_s = P_s a^2 - (\tan 45^\circ h_0 + d)^2 \pi P_s / 4 \quad (14)$$

$$u_m = 2(d/2 + \tan 45^\circ h_0 / 2) \pi \quad (15)$$

式中: V_s ——桩帽上作用的最大冲剪力(kN);

P_s ——相应于荷载效应基本组合时,作用在桩帽上的压力值(kPa);

β_{hp} ——冲切高度影响系数,取 1.0;

f_t ——混凝土轴心抗拉强度(kPa);

η ——影响系数,取 1.25。

桩帽截面抗弯承载力按下列公式计算:

$$M_R \geq M \quad (16)$$

$$M = \frac{1}{2} P_s d \left(\frac{a-d}{2} \right)^2 + \frac{2}{3} P_s \left(\frac{a-d}{2} \right)^3 \quad (17)$$

式中: M_R ——截面抗弯承载力(kN·m);

M ——桩帽截面弯矩(kN·m)。

16.2.9 当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时,确定土拱高度是桩网地基填土高度设计的前提,也是计算确定加筋体的依据。实用的土拱计算方法主要有英国规范法、日本细则法和北欧规范法等。

英国规范 BS 8006 法根据 Hewlett、Low 和 Randolph 等人的研究成果,假定土体在压力作用下形成的土拱为半球拱。提出了桩网土拱临界高度的概念,认为路堤的填土高度超过临界高度 [$H_c = 1.4(S-a)$]时,才能产生完整的土拱效应。该规定忽视了路堤填土材料的性质,在对路堤填料有严格限制的条件下,英国规范的方法方便实用。

北欧规范法引用了 Carlsson 的研究成果,假定桩网复合地基平面土拱的形式为三角形楔体,顶角为 30° 。可计算得土拱高度为 $H_c = 1.87(S-a)$ 。

日本细则法采用了应力扩散角的概念,同样假定桩网复合地基平面土拱的形式为三角形楔体,顶角为 2φ , φ 为材料的内摩擦

角，黏性土取综合内摩擦角(图 14)。

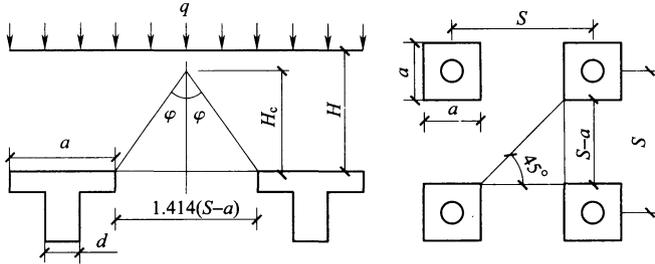


图 14 土拱高度计算示意

桩网复合地基采用间距为 S 的正方形布桩，正方形桩帽边长为 a ，土拱高度计算应考虑桩帽之间最大的间距， $H_c = 0.707(S - a) / \tan\varphi$ 。当 $\varphi = 30^\circ$ 时， $H_c = 1.22(S - a)$ ；日本细则法另外规定土拱高度计算取 1.2 的安全系数，设计取值时 $H_c = 1.46(S - a)$ 。

目前各国采用的规范方法略有不同，但是考虑到路堤填料规定的差异，各国关于土拱高度计算方法实质上差异较小。

16.2.12 当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时，根据桩网地基的工作机理，土拱产生之后，桩帽以上以及土拱部分填土荷载和使用荷载均通过土拱作用，传递至桩帽由桩承担。当桩间土下沉量较大时，拱下土体通过加筋体的提拉作用也传递至桩帽，由桩承担。目前国外规范关于加筋体拉力的计算方法主要有以下几种：

1 英国规范 BS8006 法。

将水平加筋体受竖向荷载后的悬链线近似看成双曲线，假设水平加筋体之下脱空，得到竖向荷载 (W_T) 引起的水平加筋体张力 (T) 按下式计算：

$$T = \frac{W_T(S - a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}} \quad (18)$$

式中： S ——桩间距(m)；

a ——桩帽宽度(m)；

ϵ ——水平加筋体应变；

W_T ——作用在水平加筋体上的土体重量(kN)。

当 $H > 1.4(S-a)$ 时, W_T 按下列公式计算:

$$W_T = \frac{1.4S\gamma(S-a)}{S^2 - a^2} \left[S^2 - a^2 \left(\frac{C_c a}{H} \right)^2 \right] \quad (19)$$

对于端承桩:

$$C_c = 1.95H/a - 0.18 \quad (20)$$

对于摩擦桩及其他桩:

$$C_c = 1.5H/a - 0.07 \quad (21)$$

式中: H ——填土高度(m);

γ ——土的重度(kN/m³);

C_c ——成拱系数。

2 北欧规范法。

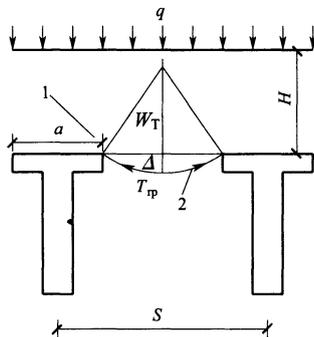


图 15 加筋体计算

1—路堤; 2—水平加筋体

北欧规范法的计算模式采用了三角形楔形土拱的假设(图 15), 不考虑外荷载的影响, 则二维平面时的土楔重量(W_{T2D})按下式计算:

$$W_{T2D} = \frac{(S-a)^2}{4 \tan 15^\circ} \gamma \quad (22)$$

该方法中水平加筋体张拉力的计算采用了索膜理论,也假定加筋体下面脱空,得到二维平面时的加筋体张拉力(T_{rp2D})可按下式计算:

$$T_{rp2D} = W_{T2D} \left(\frac{S-a}{8\Delta} \right) \sqrt{1 + \frac{16\Delta^2}{(S-a)^2}} \quad (23)$$

式中: Δ ——加筋体的最大挠度(m)。

瑞典 Rogheck 等考虑了三维效应,得到三维情况下土楔重量(W_{T3D})可按下式计算:

$$W_{T3D} = \left(1 + \frac{S-a}{2} \right) W_{T2D} \quad (24)$$

则三维情况下水平加筋体的张拉力(T_{rp3D})可按下式计算:

$$T_{rp3D} = \left(1 + \frac{S-a}{2} \right) T_{rp2D} \quad (25)$$

3 日本细则法。

日本细则法考虑拱下三维楔形土体的重量,假定加筋体为矢高 Δ 的抛物线,土拱下土体荷载均布作用在加筋体上,推导出加筋体张拉力可按下式计算:

$$W = \frac{1}{2} h \gamma \left(S^2 - \frac{1}{4} a^2 \right) \quad (26)$$

格栅上的均布荷载:

$$q = \frac{W}{2(S-a)a} \quad (27)$$

加筋体的张力:

$$T_{\max} = \sqrt{H^2 + \left(\frac{q\Delta}{2} \right)^2} \quad (28)$$

$$H = q(S-a)^2/8\Delta \quad (29)$$

式中: h ——土拱的计算高度(m);

W ——土拱土体的重量(kN)。

4 本规范方法。

本规范采用应力扩散角确定的土拱高度,考虑空间效应计算加筋体张拉力(图 16)。

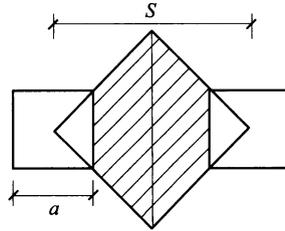


图 16 加筋体计算平面示意

土拱设计高度 $h = 1.2H_c$, $H_c = 0.707(S - a) / \tan\varphi$ (图 16)。加筋体张拉力产生的向上的分力承担图中阴影部分楔体土的重量, 假定加筋体的下垂高度为 Δ , 变形近似于三角形, 土荷载的分项系数取 1.35, 则加筋体张拉力可按下式计算:

$$T \geq \frac{1.35\gamma h(S^2 - a^2) \sqrt{(S - a)^2 + 4\Delta^2}}{32\Delta a} \quad (30)$$

5 不同方法计算结果的对比。

此处以一个算例, 对比上述不同规范计算土拱高度和加筋拉力的结果。算例中: 布桩间距 2.0m, 桩帽尺寸 1.0m, 填料内摩擦角取 35° 、 30° 和 25° 三种情况, 填土的重度取 20kN/m^3 , 填土的总高度大于 2.5m, 加筋体最大允许下垂量 0.1m。土拱的高度和加筋体的拉力分别按照不同的规范方法计算, 结果列于表 7。

表 7 不同规范土拱高度和加筋体拉力计算比较

采用方法		英国规范 BS8006 法	北欧 规范法	日本 细则法	本规范 方法
$\varphi = 35^\circ$	土拱高度(m)	1.68	2.24	1.45	1.45
	加筋拉力(kN/m)	64.10	101.90	49.90	58.30
$\varphi = 30^\circ$	土拱高度(m)	1.68	2.24	1.76	1.76
	加筋拉力(kN/m)	64.10	101.90	60.70	69.40
$\varphi = 25^\circ$	土拱高度(m)	1.68	2.24	2.18	2.18
	加筋拉力(kN/m)	64.10	101.90	75.20	85.32

在本规范确定总填土厚度时,考虑了 20%的安全余量。能够保证桩网复合地基形成完整的土拱,不至于在路面产生波浪形的差异沉降。工程实际和模型试验都表明,增加加筋层数能够有效地减小土拱高度。但是,目前这方面还没有定量的计算方法,建议采用有限元等数值方法和足尺模型试验确定多层加筋土土拱高度。

加筋层材料应选用土工格栅、复合土工布等具有铺设简便、造价便宜、材料性能适应性好等特点的土工聚合物材料。宜选用尼龙、涤纶、聚酯材料的经编型、高压聚乙烯和交联高压聚乙烯材料等拉伸型土工格栅,或该类材料的复合土工材料。热压型聚苯稀、低密度聚乙烯等材料制成的土工格栅强度较低、延伸性大、蠕变性明显,不宜采用。玻纤土工格栅强度很高,但是破坏时应变率较小,一般情况下也不适用。

桩与地基土共同作用形成复合地基时,桩帽上部加筋按边坡稳定要求设计。加筋层数和强度均应该由稳定计算的结果确定。多层加筋也可以解决单层加筋强度不够的问题。从桩网加筋起桩间土提兜作用的机理分析,选择两层加筋体时,两层筋材应尽量靠近。但是贴合会减少加筋体与垫层材料的摩擦力,要求之间有 10cm 左右的间距,所填的材料应与垫层相同。由于两层加筋体所处的位置不同,实际产生的变形量也不同,所以强度发挥也不同。两层相同性质的加筋体,上层筋材发挥的拉力只有下层的 60% 左右。

加筋体的允许下垂量与地基的允许工后沉降有关,也关系到加筋体的强度性能。当工后沉降控制严格时,允许下垂量 Δ 取小值。规定的加筋体下垂量越小,加筋体的强度要求就越高。所以,一般情况下本规范推荐取桩帽间距的 10%。

16.2.13 当桩间土发生较大沉降时,加筋层和桩间土可能脱开,为了避免垫层材料漏到加筋层之下,填料的最小粒径不应小于加筋体的孔径尺寸。如果加筋体的孔径较大,垫层材料粒径不能满

足要求时,可在加筋层之上铺设土工布,或者采用复合型的土工格栅。

16.2.15、16.2.16 当复合地基中的桩和桩间土发生较大相对沉降时,导致桩帽以上荷载通过土拱作用转移至桩帽,根据土体体积不变的原理,推导出形成稳定土拱所导致的地面沉降量 s_3 的计算公式(16.2.16)。在实际工作中往往更关心工后沉降,桩网复合地基的工后沉降主要由桩受荷后的沉降和桩间土下沉而产生的地面沉降组成,所以控制加筋层的下垂量,对于控制工后沉降有重要作用。

16.3 施 工

16.3.2 在饱和软土地层施工打入桩、压桩时,随着打入或压入地层的桩数增加,会引起软土层超静孔隙水压力升高,导致打桩或压桩的阻力减小,很难实现施工初期确定的收锤标准和压桩力标准。所以本条规定“饱和黏土地层预制桩沉桩施工时,应以设计桩长控制为主,工艺试桩确定的收锤标准或压桩力控制为辅的方法控制施工桩长。”在工艺试桩过程中,应记录在不同地层、设计桩长时的贯入量或压桩力,结合桩的载荷试验结果,总结出收锤标准和压桩力控制标准。对于成孔就地灌注桩,主要根据钻孔揭示的土层判断持力层来控制桩长。

16.3.3 饱和软土地层采用挤土桩施工时,可以采取较长间隔时间跳打、由中间往两侧施工等办法,减小超静孔隙水压力升高对成桩质量和周边环境的影响。必要时在饱和软土层中插塑料排水板或打设砂井等竖向排水通道,促使超静孔隙水压力消散。

16.3.4 聚合物土工材料在紫外线强烈曝晒下,都会有一定的强度损失,即发生老化现象。所以在材料的运输、储存和铺设过程中,应尽量避免阳光曝晒。

加筋层的接头可采用锁扣连接、拼接或缝接,加筋层接头的强度不应低于材料抗拉强度设计值的 70%。

16.3.5 现浇桩帽施工时,要注意桩帽和桩的对中,桩头与桩帽的连接,必要时可在桩顶设构造钢筋与桩帽连接。预制桩帽一定要有可靠的对中措施,安装时桩帽和桩对中、两者密贴。桩帽之间土压实困难,故应采用砂土、石屑等回填。

16.3.6 当加筋层以上铺设碎石垫层时,采用振动碾压很容易损伤加筋层。垫层应选用强度高、变形小的填料,铺设平整后可不作压实处理。

16.4 质量检验

16.4.4 土工合成加筋体抗老化性能测试采用现行国家标准《塑料实验室光源暴露试验方法 第2部分:氙弧灯》GB/T 16422.2 光照老化试验的有关规定。光照老化法是指氙弧灯光照辐射强度 $55\text{W}/\text{m}^2$,照射 150h,测试加筋体的拉伸强度不小于原有强度的 70%。加筋体的其他检测与检验按照现行行业标准《公路工程土工合成材料试验规程》JTGE 50 的有关规定和要求进行试验。

17 复合地基监测与检测要点

17.2 监 测

17.2.1 复合地基技术目前还处于半理论、半经验状态,应重视监测,利用监测成果指导施工、完善设计。

17.2.2 不少工程事故归因于监控流程不畅通,宜成立以建设管理单位代表为组长包括监理、设计、监测、施工等各方的监控小组,遵循合理可行的监控流程,这对于发挥施工监控的作用,保证工程质量十分必要。

17.2.5 上海地区采用沉降控制桩复合地基的部分工程长期监测表明,桩承担荷载逐渐增加,桩间土承担荷载逐渐减少。因此,对重要工程、试验工程、新型复合地基工程等应监测桩土荷载分担情况。

17.2.8 应根据施工进度、周边环境等判断监测指标是否合理,工程事故通常伴随地面裂缝或隆起等,因此合理分析监测数据,监测时应记录施工、周边环境变化等情况。

17.3 检 测

17.3.1 当荷载大小、荷载作用范围、荷载类型、地基处理方案等不同时,检测内容有所不同,应根据工程特点确定主要检测内容。填土路堤和柔性面层堆场等工程的复合地基往往受地基稳定性和沉降控制,应注重检测竖向增强体质量。

17.3.3 检测方案宜包括以下内容:工程概况、检测方法及其依据的标准、抽样方案、所需的机械或人工配合、试验周期等。

复合地基检测方法有平板载荷试验、钻芯法、动力触探试验、土工试验、低应变法、高应变法、声波透射法等,应根据检测目的和工程特点选择合适的检测方法(表8)。

表 8 适宜的检测和监测方法

被 检 体	PLT	BCM	SPT	DPT	CPT	LSM	HSM
桩间土	√	√	√	√	√	—	—
桩端持力层	—	√	√	√	—	—	—
挤密砂石桩及其复合地基	√	—	—	√	—	—	—
置换砂石桩及其复合地基	√	—	—	√	—	—	—
强夯置换墩及其复合地基	√	—	—	√	—	—	—
深层搅拌桩及其复合地基	√	√	√	√	—	—	—
高压旋喷桩及其复合地基	√	√	√	√	—	—	—
素土挤密桩及其复合地基	√	√	√	√	—	—	—
灰土挤密桩及其复合地基	√	√	—	—	—	—	—
夯实水泥土桩及其复合地基	√	√	—	—	—	—	—
石灰桩及其复合地基	√	√	√	√	√	—	—
灌注桩及其复合地基	√	√	—	—	—	√	√
预制桩及其复合地基	√	—	—	—	—	√	√

注：表中 PLT 为平板载荷试验，BCM 为钻芯法，SPT 为标准贯入试验，DPT 为圆锥动力触探，CPT 为静力触探，LSM 为低应变法，HSM 为高应变法。

散体材料桩或抗压强度较低的深层搅拌桩、高压旋喷桩采用平板载荷试验难以反映复合地基深处的加固效果，宜采用标准贯入、钻芯(胶结桩)、动力触探等手段检查桩长、桩间土、桩体质量。由于钻芯法适用深度小，难以反映灌注桩缩径、断裂等缺陷，所以小直径刚性桩应采用低应变法、高应变法或静载试验进行检测。复合地基检测方法和数量宜由设计单位根据工程具体情况确定。由静载试验检测散体材料桩、柔性桩复合地基浅层的承载力以及刚性桩复合地基的承载力。对于柔性桩复合地基，单桩竖向抗压载荷试验比复合地基竖向抗压载荷试验更易检测桩体质量。

17.3.5 为真实反映工程地基实际加固效果，应待竖向增强体及其周围土体物理力学指标稳定后进行质量检验。地基处理施工完毕至检测的间隙时间受地基处理方法、施工工艺、地质条件、荷载特点等影响，应根据工程特点具体确定。

不加填料振冲挤密处理地基，间歇时间可取 7d~14d；振冲桩复合地基，对粉质黏土间歇时间可取 21d~28d，对粉土间歇时间

可取 14d~21d;砂石桩复合地基,对饱和黏性土应待孔压消散后进行,间歇时间不宜小于 28d,对粉土、砂土和杂填土地基,不宜小于 7d;水泥土桩复合地基间歇时间不应小于 28d;强夯置换墩复合地基间歇时间可取 28d;灌注桩复合地基间歇时间不宜小于 28d;黏性土地基中的预制桩复合地基间歇时间不宜小于 14d。

17.3.7 验证检测应符合以下规定:

1 可根据平板载荷试验结果,综合分析评价动力触探试验等地基承载力检测结果。

2 地基浅部缺陷可采用开挖验证。

3 桩体或接头存在缺陷的预制桩可采用高应变法进行验证。

4 可采用钻芯法、高应变法验证低应变法检测结果。

5 对于声波透射法检测结果有异议时,可重新检测或在同一根桩进行钻芯法验证。

6 可在同一根桩增加钻孔验证钻芯法检测结果。

7 可采用单桩竖向抗压载荷试验验证高应变法单桩竖向抗压承载力检验结果。

扩大抽检的数量宜按不满足设计要求的点数加倍扩大抽检:

1 平板载荷试验、单桩竖向抗压承载力检测或钻芯法抽检结果不满足设计要求时,应按不满足设计要求的数量加倍扩大抽检。

2 采用低应变法抽检桩体完整性所发现的Ⅲ、Ⅳ类桩之和大于抽检桩数的 20%时,应按原抽检比例扩大抽检。两次抽检的Ⅲ、Ⅳ类桩之和仍大于抽检桩数 20%时,该批桩应全部检测。Ⅲ、Ⅳ类桩之和不大于抽检桩数 20%时,应研究处理方案或扩大抽检的方法和数量。

3 采用高应变法和声波透射法抽检桩体完整性所发现的Ⅲ、Ⅳ类桩之和大于抽检桩数的 20%时,应按原抽检比例扩大抽检。当Ⅲ、Ⅳ类桩之和不大于抽检桩数的 20%时,应研究处理方案或扩大抽检的方法和数量。

4 动力触探等方法抽检孔数超过 30%不满足设计要求时,应按不满足设计要求的孔数加倍扩大抽检,或适当增加平板载荷试验数量。

附录 A 竖向抗压载荷试验要点

A. 0. 1 复合地基采用的桩往往与桩基础的桩不同,前者有时采用散体材料桩、柔性桩,后者均采用刚性桩,相应的载荷试验方法应有区别。

A. 0. 3 单桩(墩)复合地基竖向抗压载荷试验的承压板可用圆形或方形,多桩(墩)复合地基竖向抗压载荷试验的承压板可用方形或矩形。

A. 0. 5 垫层的材料、厚度等对复合地基的承载力影响较大,承压板底面以下可铺设 50mm 的中、粗砂垫层,桩(墩)顶范围内的垫层厚度为 100mm~150mm(桩体强度高时取大值)。垫层厚度对桩土荷载分担比和复合地基 $p-s$ 曲线影响很大,有条件时应采用设计要求的垫层材料、厚度进行试验。为尽量接近工程实际的侧向约束条件、减少垫层受压流动和压缩产生的沉降,垫层应在整个试坑内铺设并夯至设计密实度。

A. 0. 6 采用并联于千斤顶油路的压力表或压力传感器测定油压,根据千斤顶率定曲线换算荷载时,压力表精度应优于或等于 0.4 级。

A. 0. 7 按照本规范第 A. 0. 15 条确定一个检验批承载力特征值的做法,3 点中,2 点承载力特征值的试验值为设计承载力特征值的 0.9 倍,一点为 1.2 倍时最易出现误判现象。为避免误判,试验荷载(P)应符合下式要求:

$$P \geq \frac{2.4R_{sp}n}{n-1} \quad (31)$$

式中: P ——最大试验荷载(kN);

R_{sp} ——承压板覆盖范围设计承载力特征值(kN);

n ——破坏时的加载级数。

采用 8 级荷载时, P 为 R_{sp} 的 2.75 倍; 采用 10 级时, P 为 R_{sp} 的 2.67 倍。为避免 p - s 曲线承载力偏小的试验点过少, 加载分级宜大于 8 级。

预压的目的是减少接触空隙及垫层压缩量。垫层较厚时, 垫层本身的压缩量较大, 对确定地基承载力可能产生误导, 因此建议增大预压荷载。

A. 0. 8 处理对象为软黏土地基, 散体材料桩(墩)复合地基、柔性桩复合地基承载板宽度(直径)大于 2m 时, 达到沉降稳定标准的时间较长, 应适当放宽稳定标准以缩短试验时间。深圳规定当总加载量超过设计荷载时, 沉降速率小于 0.25mm/h 时可以加下一级荷载; 国家现行标准《上海地基处理技术规范》DG/TJ 08—40 对碎(砂)石桩、强夯置换墩复合地基, 稳定标准取 0.25mm/h; 国家现行标准《火力发电厂振冲法地基处理技术规范》DL/T 5101、《石油化工钢储罐地基处理技术规范》SH/T 3083 对饱和黏性土地基中的振冲桩或砂石桩复合地基竖向抗压载荷试验稳定标准取 0.25mm/h。

A. 0. 9、A. 0. 10 相对沉降为总沉降与承压板宽度或直径之比。载荷试验确定承载力特征值的相对沉降是根据大量载荷试验承载力特征值对应的相对沉降统计分析得到的, 起源于其他方法确定的承载力特征值, 没有具体的物理意义, 与上部结构的容许变形、实际变形均无必然联系。即使承压板尺寸与基础尺寸相同, 由于荷载作用时间不同测定的沉降也与实际沉降不同, 载荷试验只是测定承载力, 不能代替沉降验算; 另外, 不同行业、不同增强体类型相对沉降差别较大, 可操作性差。为减少需要采用相对沉降确定承载力特征值的概率, 对终止试验的相对沉降由现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 中规定的 0.06 增大至 0.10。

A. 0. 12~A. 0. 14 散体材料桩、柔性桩复合地基采用比例界限对应的荷载确定承载力特征值往往严重偏小, 应用价值不大, 本规范

未采用。

单桩竖向抗压极限承载力对应的总沉降、相对沉降主要参考现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106,并考虑散体材料桩(墩)、柔性桩桩体压缩性较大的特点。

散体材料桩(墩)与桩(墩)间土变形协调,复合地基形状与天然地基类似,参考天然地基取值。淤泥地基中深层搅拌桩、高压旋喷桩竖向抗压承载力受桩体强度限制,桩体破坏时沉降较小,因此采用较小的相对沉降。复合地基承载力特征值对应的相对沉降参考表 9 规定的数值。

复合地基承载力特征值也可按下式计算:

$$f_{\text{spk}} = \frac{mf_{\text{puk}} + \beta(1-m)f_{\text{suk}}}{K_c} \quad (32)$$

式中: f_{spk} ——复合地基承载力特征值(kPa);

β ——桩间土地基承载力折减系数;

f_{puk} ——桩竖向抗压极限承载力标准值(kPa);

f_{suk} ——桩间土地基极限承载力标准值(kPa);

K_c ——综合安全系数。

除散体材料桩(墩)外,综合安全系数 K_c 必然大于 2,因此复合地基承载力特征值取极限承载力除以 2~3 的安全系数。

表 9 复合地基承载力特征值对应相对沉降标准

国家现行标准	砂石桩	强夯置换墩	CFG 桩、素混凝土桩、夯实水泥土桩	高压旋喷桩	深层搅拌桩、劲性搅拌桩	石灰桩、柱锤冲扩桩	灰土挤密桩	刚性桩
建筑地基处理技术规范 JGJ 79	黏性土为主 0.015, 粉土、砂土为主 0.010	黏性土为主 0.015, 粉土、砂土为主 0.010	卵石、圆砾、密实中粗砂为主 0.008, 黏性土、粉土为主 0.010	0.060	0.060	0.012	0.008	—
建筑地基基础检测规范 DBJ 15—60	黏性土为主 0.013, 粉土、砂土为主 0.009	黏性土、粉质黏土为主 0.010	同 JGJ 79	黏性土、粉质黏土为主 0.007	黏性土、粉质黏土为主 0.005, 小区道路 0.010	—	—	—
建筑地基处理技术规范 DBJ 15—38	同 JGJ 79	—	0.010~0.015	0.006~0.010, 多桩取值, 淤泥等软黏土取低值	0.006~0.010, 多桩取高值, 淤泥等软黏土取低值	—	—	—
深圳地区地基处理技术规范 SJG 04—96	—	0.015~0.020	—	0.006~0.010	0.006~0.010	—	—	—
上海地基处理技术规范 DG/TJ 08—40	0.070(极限承载力)	0.070(极限承载力)	—	0.050(极限承载力)	—	—	—	—

续表 9

国家现行标准	砂石桩	强夯置换墩	CFG桩、素混凝土桩、夯实水泥土桩	高压旋喷桩	深层搅拌桩、劲性搅拌桩	石灰桩、柱锤冲扩桩	灰土挤密桩	刚柔性桩
石油化工储罐地基处理技术规范 SH/T 3083	黏性土为主 0.020, 粉土、砂土为主 0.015	—	—	—	—	0.010~0.015	0.008	—
CM 三维高强度复合地基技术规范 JG/T 021	—	—	—	—	—	—	—	0.008
劲性搅拌桩技术规范 DB 29-102	—	—	—	—	0.006	—	—	—
火力发电厂振动冲法地基处理技术规范 DL/T 5101	黏性土为主 0.020, 粉土、砂土为主 0.015	—	—	—	—	—	—	—
水电水利工程冲法地基处理技术规范 DL/T 5214	黏性土、粉土为主 0.015, 砂土为主 0.010	—	—	—	—	—	—	—
港口工程碎石桩复合地基设计与施工规范 JTJ 246	黏性土为主 0.015, 粉土、砂土为主 0.010	—	—	—	—	—	—	—