

# 第10章 石灰桩法

## 10.1 概述

### 10.1.1 发展概况

用机械或人工的方法成孔，然后将不同比例的生石灰（块或粉）和掺合料（粉煤灰、炉渣等）灌入，并进行振密或夯实形成石灰桩桩体，桩体与桩间土形成石灰桩复合地基，以提高地基承载力，减小沉降，称为石灰桩法。

我国将石灰作为建筑材料，始于距今五、六千年的仰韶文化期。目前我国石灰年产量约4000万吨，产地遍布全国，是价廉易得的建筑材料。

石灰作为建筑物基础垫层材料以及石灰稳定土体的技术在我国历史久远，石灰桩技术也最早发源于我国。石灰桩法系统的研究和应用自1953年开始，天津大学等单位通过室内外试验开始对石灰桩进行研究。当时首次应用于塘沽地区的软土中，仅限于3层以下建筑物，由于施工工艺水平及其他原因，难于保证石灰桩质量，故石灰桩应用未得到推广。

1975年，铁道科学院、北京铁路局勘测设计所、西南交通大学、交通部第一公路工程局在塘沽新港低路基下进行了石灰桩、换填土、砂垫层、长砂井、短密砂井的加固对比试验。在地下水位很高的条件下，实验结果是石灰桩效果最佳。在1976年地震及长期动荷条件下，石灰桩显示出其变形小且均匀的独特优点。1979年，江苏省建筑设计院开展了石灰桩的研究，并于1981年迅速大规模应用于工程实践。浙江省建筑科研院、浙江轻工业设计院、浙江工学院等有关单位在杭州地区进行了石灰桩试验，其特点是管内投料、灌注桩机施工的纯生石灰桩。

1983年湖北省建筑科学研究设计院、华中理工大学共同进行了石灰桩的研究，在吸取经验的基础上，试验成功了一套人工成孔的简易可行的方法。研究和工程实践紧密结合，并首次成功地将石灰桩用于11层的高层建筑中。有了一套用静力触探获取参数和检验质量的方法。

针对石灰资源丰富、粉煤灰废料难以处理的特点，太原工业大学等单位于1985年也开始了石灰桩的研究和应用。施工用以类似南京，采用灌注桩机施工，管外投料，少数采用套管夯实法施工。由于材料价格低廉，石灰桩在山西具有明显得竞争优势。此外，同济大学、东南大学、南京大学、南京建工学院、河海大学、天津市建筑科研院、上海勘察设计院、浙江工学院、宁波大学等20余个单位都进行了石灰桩的试验研究。

20世纪80年代末，天津、湖北、浙江等省市已制定了石灰桩设计和施工的地区性规程。

1987年，根据建设部“七五”计划重点科研课题计划的要求，由湖北省建筑科学研究设计院、中国建筑科学院研究院地基基础研究所、江苏省建筑设计院共同开展了石灰桩复合地基的设计计算和成桩工艺的实验研究。通过大规模的模型试验，在国内外首次测得了石灰桩复合地基变形场以及桩体应力分布规律，据此提出了石灰桩复合地基承载力和变形的计算方法。同时对石灰桩的水下硬化机理、桩边土固结机理、加固层的减载效应等重要机理作了深入的研究和全面的阐述。

截止目前为止，据不完全统计，我国已有千余栋建（构）筑物采用了石灰桩加固地基，建筑面积超过300万 $m^2$ 。全国已有十几个省市自治区有过应用石灰桩的工程经验，台湾省也有研究应用石灰桩处理淤泥的报道。作为一种地基处理手段，石灰桩法受到了广泛的重视。

20 世纪 60 年代，正当我国中断研究工作之际，日本、美国、瑞典、原苏联、法国、联邦德国、澳大利亚等国开展了石灰桩加固软弱地基的研究和应用。日本的石灰桩技术广泛应用，最为发达。日本的石灰桩施工机械自动化程度高，桩长和桩径都很大，拓宽了应用领域。

当前，石灰桩的研究工作还在进一步深入，研究的重点是各种施工工艺的完善和实测总结设计所需的各种计算参数，使设计施工更加科学化、规范化。与此同时，各地正努力扩大石灰桩的应用范围，以取得更好的经济效益和社会效益。

### 10.1.2 适用范围

石灰桩法适用于处理饱和粘性土、素填土和杂填土等地基，有经验时可用于粉土、淤泥和淤泥质土地基。用于地下水位以上的土层时，宜增加掺合料的含水量并减少生石灰用量，或采取土层浸水等措施。加固深度从数米到十几米。不适用于有地下水的砂类土。

石灰桩法可用于提高软土地基的承载力，减少沉降量，提高稳定性，适用于以下工程：

- (1) 深厚软土地区七层以下，一般软土地区八层以下住宅楼或相当的其他多层工业与民用建筑物。
- (2) 如配合箱基、筏基，在一些情况下，也可用于 12 层左右的高层建筑物。
- (3) 有工程经验时，也可用于软土地区大面积堆载场地或大跨度工业与民用建筑物独立柱基下的软弱地基加固。
- (4) 石灰桩法也可用于机器基础和高层建筑深基开挖的支护结构中。
- (5) 适用于公路、铁路桥涵后填土，涵洞及路基软土加固。
- (6) 适用于危房地基加固。

## 10.2 加固原理

### 10.2.1 桩体材料及配合比

#### 一、生石灰

石灰是用主要成分为  $\text{CaCO}_3$  的石灰岩作原料，经过适当温度煅烧所得的一种胶凝材料，其主要成分为  $\text{CaO}$ ，也叫生石灰。

石灰外观具有细微裂缝、多孔，一般呈乳白色的块状物，含杂质多的石灰往往呈灰色，蛋黄色，过烧则为灰黑色。

石灰块易碎，天然密度为  $0.8 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$ ，过烧石灰的密度较大，可达  $1.3 \sim 1.7 \text{g/cm}^3$ ，硬度也大。

石灰有气硬性和水硬性两种，石灰桩所用的石灰系指气硬性石灰。按  $\text{MgO}$  的含量多少分为钙质石灰、镁质石灰。分类界限见表 10-1。

表 10-1 石灰分类界限

品种	钙质石灰	镁质石灰
	MgO 含量 (%)	
生石灰	$\leq 5$	$> 5$
消石灰	$\leq 4$	$> 4$

对石灰质量的要求：

#### 1. 石灰活性

石灰桩要求石灰具有高活性。活性与石灰中活性氧化钙和氧化镁含量总和有关。活性氧

化钙和氧化镁能与含硅材料发生化学反应产生胶凝物质的化合物，国家标准中称它为有效氧化钙和有效氧化镁，并以符号  $A-CaO$  和  $A-MgO$  表示。生石灰品质是以活性高低划分等级的。

## 2. 氧化镁含量

因为  $MgCO_3$  分解温度低 ( $730\sim 760^\circ C$ )，而  $CaCO_3$  分解温度较高 ( $900^\circ C$ )。石灰的煅烧温度常在  $1000\sim 1200^\circ C$ 。因此，氧化镁常被煅烧成“死烧”状态，其结构致密，消化缓慢，如用于硅酸盐制品及其他工程上，常常是后期才逐渐消化，此时体积膨胀，构件产生裂缝，强度下降。但作为石灰桩的原料，氧化镁的缓慢消化性质有利于加固地基。在使用中不论是钙质或镁质石灰，粉末含量不宜超过 20%。同时在现场非密封条件下存放天数也不能过长，因为有效钙含量会大幅度降低。活性钙的减少不仅削弱了熟化中的膨胀力，还会影响桩体材料之间的水化胶凝效果，不利于地基加固。

小颗粒（粒径小于 2 cm）石灰的加固效果优于块灰。模型试验的结果证明小颗粒石灰桩承载力是块状石灰桩的 1.42 倍。由于粉尘的污染较大、价格贵，实际应用中多用块灰。在采用块灰的时候，应尽量将石灰块破碎成小颗粒。

## 二、掺合料

石灰桩的生石灰用量很大，为了节约生石灰，宜加入掺合料。掺合料的作用是减少生石灰用量和提高桩体强度，应选用价格低廉、方便施工的活性材料。

在实际工程及试桩中，采用过砂、石屑、粉煤灰、火山灰、煤渣、粘性土、电石渣作主要掺合料，有时附加少量石膏、水泥。其中以粉煤灰、火山灰应用最多，煤渣次之。

粉煤灰、矿渣、火山灰、粘性土为活性材料，这些材料中含有大量  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ ，可与  $Ca(OH)_2$  反应生成具有水硬性的水化硅酸钙和水化铝酸钙。这些反应的原理早已为硅酸盐制品、粘土制品和无熟料水泥的生产所证明。粉煤灰是一种烧粘土质火山灰质材料，是火力发电厂除尘器收集的烟道中的细灰，还包括炉底排出的少量烧渣，是我国一种数量很大的工业废料。

$SiO_2$  及  $Al_2O_3$  为粉煤灰成分的主要成分，含量高者将提高桩体强度。粉煤灰是当前石灰桩最理想的掺合料。

## 三、桩体材料配合比

为了充分发挥掺和料的填充作用，减少膨胀力内耗，掺合料的数量在理论上至少应该能充满生石灰的孔隙。经测定，生石灰块天然孔隙率为 40% 左右，因此，掺合料的用量大多为 30%~70%（体积比）。

桩体材料配比的效果与生石灰及掺合料质量、土质、地下水状况、桩距、施工密实度等因素相关。合理的配合比在满足施工要求和经济指标的前提下，首先要使桩体具有较高强度。在选择配合比时，必须考虑以下因素：

(1) 生石灰有效钙含量愈高，或同样的有效钙含量，但  $MgO$  含量高者，桩体强度有升高趋势，但不显著。

(2) 掺合料中  $Al_2O_3$  含量高者，桩体强度高。 $SiO_2$  含量的大小对桩体强度的影响尚不清楚，但必须有相当高的  $SiO_2$  含量。

(3) 周围土的强度愈高，桩体强度相应有所增高。

(4) 在地下水位以下，土的渗透系数小，桩的强度相应增高。其原因是延长生石灰消

化时间，减少了生石灰猛烈消化时产生的土体隆起而导致桩体密度降低。同时水流不致早期大量渗入桩内，阻碍化学反应的进行，而使强度受到影响。

(5) 地下水位以上，土的渗透系数大，孔隙比大对桩体强度的提高有利。如杂填土中的石灰桩即可利用气硬性的性质，使桩具有较高的强度。但早期土中需有一定的水供给石灰熟化凝固。如土的含水量很小，桩体材料得不到水化时所需的水分，又无水源补充，养护条件干燥，此时桩强度降低。

(6) 施工密实度（干密度）高者，桩强度高。

以上诸点因素中，尤以施工密实度的影响最大，是一个控制因素，密实度过低的桩体饱和和粗时呈膏状。

上述衡量桩体配合比效果的指标是桩体强度，试验研究中直接从桩上采样在试验机上测定无侧限抗压强度。

实用中衡量桩体配合比效果的最终指标是复合地基整体的强度。桩强度高，复合地基强度不一定也高。归纳试验数据及过去研究和应用的成果，整理得出下述规律：

(1) 掺合料的重量在总材料重量的 30%~70% 之间较为适宜。实用中采用体积比较方便。

(2) 在上述配合比的范围内，只要施工密实度有保证，使用各种常用的掺合料时，桩体均能达到 0.2MPa 以上的无侧限抗压强度，能满足一般的使用要求。以粉煤灰和煤渣作掺合料效果较好，土作掺合料效果较差。

(3) 常用体积比为

生石灰与掺合料体积比为 1: 2 (甲) 或 1: 1 (乙) 或 1.5: 1 (丙)

按粉煤灰或煤渣折合重量计，生石灰与掺合料重量比为 4: 6 (甲) 或 6: 4 (乙) 或 7: 3 (丙)

(4) 配合比的选用可参考以下意见：

甲种：适用于  $f_k > 80\text{kPa}$  的土，结构性强的土，封口深度小于 0.8m 时的桩顶部（防止隆起）。

乙种：适用于  $f_k = 60 \sim 80\text{kPa}$  的土， $f_k > 80\text{kPa}$  的土中桩体下部 0.5m 左右范围内（扩大桩尖，增加桩端土的加固效果）。

丙种：适用于  $f_k \leq 60\text{kPa}$  的淤泥、淤泥质土、素填土等饱和软土。

特种配合比指在上述常用配合比的材料中在加入 5%~10% 的水泥或石膏等材料，此时的桩体强度可提高 30%~50% 左右，主要适用于地下水渗透严重情况下桩的底部，或为增强桩顶抗压能力而在桩顶部分采用。

(5) 石灰用量超过 30%~34% 时，一般情况下，桩体强度降低，但对土的挤密效果较好（在桩顶，由于上覆压力不够，造成土体隆起者除外）。

(6) 在无特殊添加剂加入时，桩体配合比在前述范围内时，桩在土中侧限时的强度为 250~500kPa，供设计时参考。

## 10.2.2 物理加固作用

### 一、挤密作用

(1) 成桩中挤密桩间土

主要发生在不排土成桩工艺，静压、震动、击入成孔和成桩夯实桩料的情况不同，桩径和桩距不同，对土的挤密效果也不同。挤密效果还与土质，上覆压力及地下水状况有密切关系。

作为浅层加固的石灰桩，由于被加固土层的上覆压力不大，且有隆起现象，成桩过程中的挤密效应不大，对于一般粘性土、粉土，可考虑 1.1 左右的承载力提高系数，而杂填土和含水量适当的素填土，可根据具体情况（桩距和施工工艺）考虑 1.3 左右的提高系数。对饱和和软粘土则不考虑。

## （2）生石灰吸水膨胀挤密桩间土

大量的原位测试及土工试验结果分析表明，石灰桩仅对桩边一定范围内的土体显示了加固效果，而桩周边以外的桩间土在加固前后力学性能并无明显变化（由于成孔中挤密桩间土的情况除外）。

由于土的不同约束力以及桩体材料的质量、配合比、密实度不同，所以石灰桩在土中的体胀率也不同。一般情况下，有掺合料的桩直径增大系数为 1.1~1.2，相当于体胀系数约 1.2~1.4。

对膨胀挤密作用的定量研究是困难的，因为这个问题与桩径、桩长、桩距、桩体材料、地下水状况、土质情况及打桩顺序等多因素有关。大量测试结果表明，经挤密后桩间土强度为原来强度的 1.1~1.2 倍。

## 二、桩和地基土的高温效应

1 千克CaO水化生成Ca(OH)<sub>2</sub>时，理论上放出 278 千卡的热量。日本的纯生石灰桩测得的桩内温度最高达 400℃，我国加掺合料的石灰桩，桩内温度最高达 200~300℃。在通常置换率的情况下，桩间土的温度最高达 40~50℃。

当水化温度小于 100℃时，升温可以促进生石灰与粉煤灰等桩体掺合料的凝结反应。高温引起了水中水分的大量蒸发，对减少土的含水量，促进桩周土的脱水起了积极作用。

## 三、置换作用

石灰桩作为纵向的增强体与天然地基土体（基体）组成复合地基，桩土共同工作。桩体强度通常为 300~450kPa，石灰桩通常分担了 35%~60%的荷载，应力向桩上集中，使得复合地基承载力得到极大的提高。这种所谓的置换作用不同于局部的换填，它的实质是桩体发挥作用。它在复合地基承载特性中起重要作用。

## 四、排水固结作用

由于桩体采用了渗透性较好的掺合料，在不同配合比时，测得的渗透系数在  $4.07 \times 10^{-3}$ cm/s 至  $6.13 \times 10^{-5}$ cm/s 之间，相当于粉细砂，较一般粘性土的渗透系数大 10~100 倍，表明石灰桩桩体排水作用良好。

沉降观测资料表明，采用石灰桩加固地基的建筑物，开始使用后沉降已基本完成，沉降速率都小于 0.04mm/d。

石灰桩桩径多采用 300~400mm。桩数多，桩距小（2~3d），水平向的排水路径短，有利于桩间土的排水固结，当桩体掺合料采用煤渣、矿渣、钢渣时，排水固结的作用更加显著。

## 五、加固层的减载作用

由于石灰的密度为 0.8~1.0g/cm<sup>3</sup>，掺合料的干密度为 0.6~0.8g/cm<sup>3</sup>，显著小于土的密

度。即使桩体饱和后，其密度也小于土的天然密度。

石灰桩的桩数较多，当采用排土成桩时，加固层的自重减轻，如果桩有一定长度时，作用在桩底平面的自重应力减少，即可减少桩底下卧层顶面的附加压力。如果下卧层强度低时，这种减载将有一定的作用。

### 10.2.3 石灰桩的化学加固作用

#### 一、桩体材料的胶凝反应

生石灰与活性掺合料的反应是很复杂的，总的看来是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与活性掺合料中的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应生成硅酸钙及铝酸钙水化物。华中理工大学、武汉工业大学进行了桩体材料的电子显微镜扫描和X光衍射。结果表明：由石灰和粉煤灰组成的桩体，反应后由6种化合物组成，其中以 $\text{Ca}_3\text{SiO}_7$ 为主，其次为 $\text{CaSiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。新生物不仅是单一硅酸盐类，还有复式盐及碳酸盐类。这些盐不溶于水，在含水量很高的土中可以硬化。

#### 二、石灰与桩周土的化学反应

生石灰熟化中的吸水、膨胀、发热等物理效应是在短期内完成的，一般约4个星期趋于稳定，称之为速效效应。这正是石灰桩能迅速取得改良软土效果的原因。下述的化学反应则要进行很长时间。

##### (1) 离子化作用（熟石灰的吸水作用）

生石灰熟化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处于绝对干燥状态，仍保持很高的吸水能力，它将继续吸取周围土中的水分。

##### (2) 离子交换

组成粘土的粘性矿物的板状、针状结晶，由 $\text{SiO}_2$ 骨架组成。其表面带负电，颗粒表面吸附着水中的阳离子，水中的阴离子又经常吸附水分子。于是土颗粒就被厚的弱结合水膜所包围，所以粘土塑性大，抗剪强度低。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 离子化产生的钙离子和粘土颗粒表面的阳离子进行交换并吸附在颗粒表面，改变了粘土颗粒带电状态，使表面弱结合水膜减薄，土粒凝聚，团粒增大，塑性减小，抗剪强度增大，这种作用称为水胶连结。

##### (3) 固结反应

离子交换对粘土的塑性减小有一定限度。当石灰量超过某个限值时，塑性就不再减小，但仍存在着钙离子与粘土中的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 化合发生化学固结反应。同时在PH值增高的环境下，硅的溶解性提高，土中游离硅增多， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和土中胶态硅和胶态铝发生化学反应生成复杂的化合物。这些反应进行得很缓慢，成为胶结剂后，土强度就显著提高。而且这个强度随时间延续而增大，具有长期稳定性。这是石灰桩周一定厚度的环形内土体强度很高的另一原因。

##### (4) 石灰的碳酸化

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 $\text{CO}_2$ 反应后生成 $\text{CaCO}_3$ 结晶又与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶相结合，构成 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$ 合成结晶，这种碳化作用，也使桩周土形成强度较高的硬壳层。碳酸化的反应很缓慢，只能作为长期的强度储备来考虑。

### 10.2.4 石灰桩的水下硬化机理

石灰桩在水下软化（糖心）的现象，曾经是石灰桩研究和应用中的重大障碍。引起对石

灰桩怀疑的原因是石灰为气硬性材料，在水下不能硬化的旧观念所致。

针对石灰桩的特定环境，工程实践和室内外试验表明，只要保持桩体密实度即可防止桩体软化，但对生石灰水下硬化的机理没有确切的全面认识。

上个世纪 30 年代苏联建材专家 И·В·斯米尔诺夫的研究结果证明，生石灰在水化过程中是可以迅速硬化的。但这种水化凝固需要 4 个条件：第一，要求生石灰有一定的磨细度；第二，要求放出大量水化热；第三，要求一定的水灰比；第四，石灰和水作用到一定程度时，不能扰动石灰和水，如搅拌或扰动持续到整个消化期，则生石灰不能硬化。上述机理的发现，在建材工业中得到运用，许多情况下用生石灰代替消石灰或其他材料具有良好的经济效益。

生石灰水化硬固原理不能用消石灰的干燥和碳酸化来解释，这种反应是在“石灰—水—空气”三相系中发生的。生石灰的水化和水泥水化反应有许多相似之处，它是在“石灰—水”两相系中完成的，空气的影响很小，不予考虑。它的水化硬固分为以下 4 个过程：表面水化期、胶体化期、凝聚期和结晶期。这四个过程是生石灰在四个条件限制下无约束硬化时的反应。石灰桩中的生石灰不具备一定的磨细度，但是由于土和水的导热系数是空气的 20~50 倍，可以引出大量水化热，能满足第二个条件。石灰桩内生石灰在消化工程中没有扰动，符合第四个条件。关键是第三个条件的研究，即要求一定的水灰比的条件。

夯填在桩内的生石灰块，周围受到约束，体胀系数仅为 1.2~1.4，形状上仍保持着原来的块状外观，结构没有完全破坏，其吸水量也受到限制。为了进一步证实桩内生石灰吸水量的限制，进行了空气中消化和石灰桩内消化后石灰含水量的试验，试验结果表明，干燥的熟石灰变成石灰膏需吸收相当于本身重量的水（换算为生石灰的吸水量，则为本身重量的 1.32 倍），而在石灰桩内的熟石灰，饱和后仅能吸收相当于本身重量一半的水（换算为生石灰的吸水量，则为本身重量的 0.66 倍），吸水量减少约 1 倍，因此，桩内的石灰达不到膏状的含水量，即是水灰比受到了限制，基本可以满足第三个条件。

由于石灰桩体采用了块状生石灰，不满足第一个条件磨细度的要求。因此挖开的桩体内石灰块内部仅保持了一定的机械强度，一经扰动即可成膏状。而已反应溶解的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和粉状石灰与桩掺合料水化反应后生成了强度较高的水化物。

上述研究又一次表明，石灰桩中的生石灰应采用小颗粒状，这样可提高桩体强度。

### 10.2.5 石灰桩的龄期

如上所述，石灰桩加固软土的机理分为物理加固作用和化学加固作用。物理加固作用（吸水、膨胀）的完成时间较短，视土的含水量和渗透系数而定，一般情况下 7 天以内均可完成，而化学加固作用则速度缓慢。

不同龄期的桩体取样所进行的无侧限抗压强度试验表明，由于桩体材料及配合比多变，结果离散性较大。用静力触探试验检测桩体强度，大体上一个月强度可达半年强度的 70% 左右，7 天龄期的强度约为 30 天龄期强度的 60%~70%。国内外均以 1 个月龄期的强度作为桩体的设计强度。至于石灰桩强度的长期发展规律，由于试验工作不系统，未能获得明确的结论。从施工后三年、五年挖出的桩体来观察，其强度仍有增长。

关于桩间土加固效果长期稳定性的问题，对龄期为两年的复合地基作了取样试验，结果是桩边土的孔隙比较天然地基减少 5.8%（上部）、19.8%（中部）、3.2%（下部），桩间土

分布减少 3.7%、10.1%、5.1%，压缩模量为天然地基的 1.1~1.6 倍，证明了桩间土的长期稳定性。但  $c$ 、 $\varphi$  值（快剪）与天然地基接近，其原因估计是土样中仅只能包括少部分桩边加固效果好的土，其他原因需进一步研究。

## 10.3 设计计算

### 10.3.1 设计参数及技术要点

#### 1 桩径

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。石灰桩设计桩径一般为 300~400mm，当排土成孔时，实际桩径取 1.1~1.2 倍设计直径。管内投料时，桩管直径视为设计桩径。管外投料时，应根据试桩情况测定实际桩径。

#### 2 桩长

当相对硬层埋藏不深时，桩长应至相对硬层顶面；当相对硬层埋藏较深时，应按桩底下卧层承载力及变形计算决定桩长。避免将桩端置于地下水渗透性大的土层。当用洛阳铲成孔时不宜超过 6m，机械成孔管外投料时，不宜超过 8m。

#### 3 桩距及置换率

应根据复合地基承载力计算确定，桩中心距一般取 2~3 倍成孔直径，相应的置换率为 0.09~0.20，膨胀后实际置换率约为 0.13~0.28。

#### 4 桩体抗压强度

在通常置换率的情形下，桩分担了 35%~60% 的总荷载，桩土应力比在 3~4 之间，长桩取大值，桩体抗压强度的比例界限值可取 350~500kPa。

#### 5 桩间土承载力

与置换率、施工工艺和土质情况有关。可取天然地基承载力的 1.05~1.20 倍。土质软弱或置换率大时取高值。

#### 6 复合地基承载力

复合地基承载力特征值一般为 120~140kPa，不宜超过 160kPa。

#### 7 沉降

试验及大量工程实践表明，当施工质量较好，设计合理时，加固层沉降约为 1~5cm，为桩长的 0.5%~0.8%。当石灰桩未能穿透软弱土层时，沉降主要来自于软弱下卧层，设计时应予以重视。

#### 8 布桩

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 1~2 排围护桩。

#### 9 垫层

一般情况下桩顶可不设垫层，当地基需要排水通道时，可在桩顶以上设 200~300mm 厚的砂石垫层。

#### 10 桩身材料配合比

生石灰与掺合料的体积比可选用 1:1 或 1:2，对淤泥、淤泥质土或填土可适当增加生石灰的用量。桩顶附近生石灰用量不宜过大。当掺石膏和水泥时，掺加量为生石灰用量的 3%~10%。



### 10.3.2 石灰桩复合地基的承载特性

在石灰桩复合地基中，桩与土的模量比一般情况下小于 10 ( $E_p/E_s < 10$ )，具有协同工作的条件。从室内及现场测试的结果可以看出：当试桩的荷载板底无砂垫层时，应力首先向桩上集中，随着荷载的增加，桩产生变形，桩土应力比陡降，应力向土上转移，桩土开始共同处于弹性压缩状态；当荷载板底设有砂垫层（厚 10cm）时，此时土承受相对无垫层时较大的荷载，随着荷载的增加，土的变形加大，荷载迅速向桩上转移，桩土应力比陡增，继而桩发生变形，桩土应力比降低，桩土开始共同处于弹性压缩状态。以上阶段为桩土变形的调整阶段，这一阶段由于基础与地基接触面不平整，垫层密实度不同等因素，桩土应力比的变化比较剧烈。此阶段变形微小，如图 10-1 中之 OA 段。

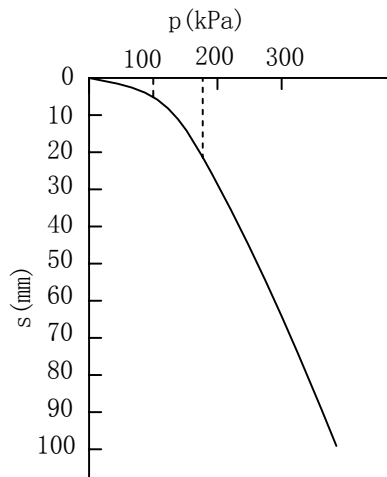


图 10-1 群桩荷载试验  $p-s$  曲线

随着荷载的继续增加，桩土应力比不断发生不大的调整。桩土的弹性变形不断增加，桩土应力比逐渐减小，一直持续到复合地基荷载达到比例界限，此阶段为弹性压缩阶段。此阶段已产生可以容许的变形，如图 10-1 中之 AB 段。继续增加荷载，桩土应力比仅发生微小的调整，桩土应力比缓慢减小，接近某一定值。桩和土均产生塑性变形，基础周边发生局部剪切变形。由于桩体的作用，继续增加荷载时，基础下土体不会发生整体剪切破坏；同时，由于土对桩的围护作用，桩又不会发生脆性失稳破坏，基础下的桩和土继续同时被压实，基础呈冲切形式，不断下沉而不破坏。此阶段为塑性变形阶段，复合地基持续产生较大的塑性变形，如图 10-1 中之 BC 段。

石灰桩复合地基在整个受力阶段，都是受变形所控制，因此其承载力问题的实质是变形问题。石灰桩复合地基中桩土具有良好的协同工作的特性，土的变形控制着复合地基的变形，所以复合地基的容许变形的标准应当与天然地基的标准相一致。根据大量的荷载试验分析，石灰桩复合地基的比例界限多在  $0.012b$  ( $d$ ) 所对应的荷载附近。因此用沉降为  $0.012b$  ( $d$ ) 的标准来控制石灰桩复合地基的承载力是适宜的。

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，具有以下特征：

- (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) 土的接触压力接近达到桩间土承载力特征值，即桩间土发挥度系数为 1；
- (3) 桩顶接触压力达到桩体的比例界限，桩顶出现塑性变形；
- (4) 桩土应力比趋于稳定，其值在 2.5~5 之间，大多为 3~4；

(5) 桩土的接触压力可采用平均压力进行计算。

### 10.3.3 计算模型

#### 一、双层地基模型

在非深厚软土地区，当加固层的天然地基土承载力在 80kPa 以上时，可将石灰桩加固层看作一层复合垫层，下卧层为另一层地基，在强度和变形计算时按一般双层地基进行计算(图 10-2)。

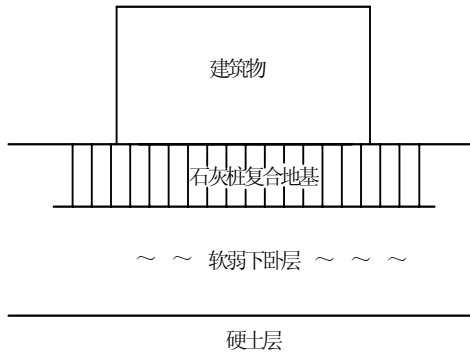


图 10-2 双层地基计算模型

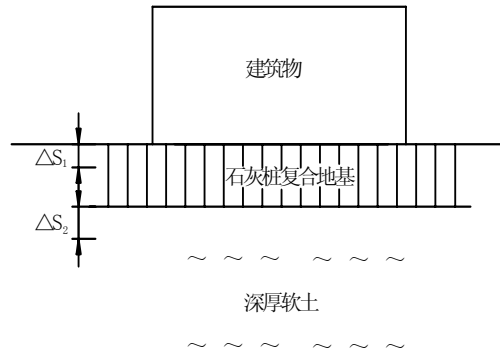


图 10-3 群桩地基计算模型

#### 二、群桩地基模型

在深厚软土地区，可按群桩地基模型计算（图 10-3）。这时，可将石灰桩群桩看成一个假想实体基础进行地基承载力和变形的验算。沉降观测表明，按群桩地基模型计算时，计算值往往大于实测值。

### 10.3.4 石灰桩复合地基承载力计算

根据静力平衡条件可得：

$$\sigma_{sp} = m \cdot \sigma_p + (1 - m) \cdot \sigma_s \quad (10-1)$$

式中  $\sigma_{sp}$  ——复合地基平均应力；  
 $\sigma_p$  ——桩顶平均接触应力；  
 $\sigma_s$  ——桩间土平均接触应力；  
 $m$  ——面积置换率。

当  $\sigma_p$  达到桩体比例界限  $f_{pk}$  时， $\sigma_s$  达到桩间土承载力特征值  $f_{sk}$ ， $\sigma_{sp}$  即达到复合地基承载力特征值  $f_{spk}$ ，因此式 (10-1) 可改写为：

$$f_{spk} = m f_{pk} + (1 - m) f_{sk} \quad (10-2)$$

$$m = d^2 / d_e^2 \quad (10-3)$$

式中  $f_{spk}$  ——石灰桩复合地基承载力特征值 (kPa)；  
 $f_{pk}$  ——石灰桩桩身抗压强度比例界限值 (kPa)；  
 $f_{sk}$  ——石灰桩处理后桩间土的承载力特征值 (kPa)，取天然地基承载力特征值的 1.05~1.20 倍，土质软弱或置换率大时取高值；  
 $m$  ——石灰桩面积置换率；  
 $d$  ——桩身平均直径 (m)，按 1.1~1.2 倍成孔直径计算，土质软弱时宜取高值；  
 $d_e$  ——一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径。

等边三角形布桩时  $d_e = 1.05s$

正方形布桩时  $d_e = 1.13s$

矩形布桩时  $d_e = 1.13\sqrt{s_1s_2}$

$s$  为等边三角形布桩和正方形布桩时的桩间距,  $s_1$ 、 $s_2$  分别为矩形布桩时的纵向桩间距和横向桩间距。

由式 (10-2) 还可得:

$$m = \frac{f_{spk} - f_{sk}}{f_{pk} - f_{sk}} \quad (10-4)$$

在设计时可直接利用式 (10-4) 预估所需的置换率。桩体的比例界限, 可通过单桩竖向静载荷试验测定, 或利用桩体静力触探试验  $p_s$  值确定 (经验值为  $f_{pk} \approx 0.1 p_s$ ), 也可取  $f_{pk} = 350 \sim 500 \text{kPa}$  进行初步设计。施工条件好、土质好时取高值; 施工条件差、地下水渗透系数大、土质差时取低值。

大量的试验研究结果表明, 石灰对桩周边厚 0.3d 左右的环状土体具有明显的加固效果, 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, 可采用下式计算桩间土承载力  $f_{sk}$ :

$$f_{sk} = \left[ \frac{(K-1)d^2}{A_e(1-m)} + 1 \right] \mu f_{ak} \quad (10-5)$$

式中  $f_{ak}$  ——天然地基承载力特征值;

$K$  ——桩边土强度提高系数, 取 1.4~1.6, 软土取高值;

$A_e$  ——一根桩分担的地基处理面积;

$m$  ——面积置换率;

$d$  ——桩身平均直径;

$\mu$  ——成桩中挤压系数, 排土成孔时  $\mu = 1$ , 挤土成孔时  $\mu = 1 \sim 1.3$  (可挤密土取高值, 饱和软土取 1)。

根据大量的实测结果和计算, 加固后桩间土的承载力  $f_{sk}$  和天然地基承载力  $f_{ak}$  存在如下关系:

$$f_{sk} = (1.05 \sim 1.20) f_{ak} \quad (10-6)$$

通常情况下, 土较软时取高值, 否则取低值。

当石灰桩复合地基存在软弱下卧层时, 应按下式验算下卧层的地基承载力

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (10-7)$$

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

$p_{cz}$  ——软弱下卧层顶面处的自重压力值 (kPa);

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

### 10.3.5 石灰桩复合地基沉降计算

#### 一、复合地基的变形特征

(1) 石灰桩复合地基桩土变形协调, 桩与土之间无滑移现象。基础下桩、土在荷载作用下变形相等。

(2) 可以按桩间土分担的荷载  $\sigma_s$ ，用天然地基的计算方法计算复合地基加固层的沉降。

(3) 可以按复合地基总荷载  $\sigma$ ，用天然地基的计算方法计算复合地基加固层以下的下卧层的沉降。

## 二、复合地基变形的计算方法

由于石灰桩复合地基中桩土变形协调，因此，以复合地基的复合压缩模量来进行加固层的变形计算也是简单可行的。规范规定，石灰桩复合土层的压缩模量宜通过桩身及桩间土压缩试验确定，初步设计时可按下式估算：

$$E_{sp} = \alpha [1 + m(n-1)]E_s \quad (10-8)$$

式中  $E_{sp}$  ——复合土层的压缩模量 (MPa)；

$\alpha$  ——修正系数，可取 1.1~1.3，成孔对桩周土挤密效应好或置换率大时取高值；

$n$  ——桩土应力比，可取 3~4，长桩取大值；

$E_s$  ——为天然地基土的压缩模量 (MPa)。

## 10.4 施工

### 10.4.1 施工工艺

#### 一、管外投料法

石灰桩的桩体掺合料具有一定的含水量，当掺合料与生石灰拌合后，生石灰与掺合料中的水分迅速发生反应，生石灰体积膨胀，极易发生堵管现象。

管外投料法避免了堵管，可利用现有的混凝土灌注桩机施工。但管外投料法也存在以下不足：首先，在软土中成孔，当拔出桩管时易发生塌孔现象；第二，在软土中成孔深度不宜超过 6m；第三，桩径和桩长的保证率相对较低。

#### (1) 施工方法

采用打入、振入、压入的灌注桩机施工。

#### (2) 工艺流程

桩机定位——沉管——提管——填料——压实——再提管——再填料——再压实，最后填土封口压实。

#### (3) 施工控制

##### ①灌料量控制

控制灌料量的目的是保证桩径和桩长，同时要保证桩体密实度。根据室内外试验结果，当掺合料为粉煤灰及煤渣时，桩料干密度达到  $1.00 \sim 1.10 \text{g/cm}^3$ ，即可保证桩体密实度。

确定灌料量时，首先根据设计桩径计算每延米桩料体积，然后将计算值乘以压实系数 1.4 作为每延米的灌料量。

##### ②打桩顺序

应尽量采用封闭式，即从外圈向内圈施工，为避免生石灰膨胀引起邻近孔塌孔，宜间隔施打。

#### (4) 技术安全措施

①生石灰与掺合料应随拌随灌，以免生石灰过早遇水膨胀消解影响质量。拌合过早容易引起冲孔“放炮”。

②防止冲孔的主要措施是保证桩料填充的密实度。要求孔内不能大量进水，掺合料的含

水量不宜大于 50%。

③做好施工准备，采取可靠的场地排水措施，保证施工顺利进行。

④封填孔口宜用含水量适中的粘土，封填高度不宜小于 0.5m，封口的填土标高应不低于地面，防止地面水早期浸泡桩顶。

⑤桩顶宜高出基底标高 20cm 以上。

## 二、管内投料法

管内投料施工法适用于地下水位较高的地区，在浙江地区大量采用此法。

管内投料施工工艺与振动沉管灌注桩的施工工艺类似。

### (1) 施工要点

①石灰及其他掺合料应符合设计要求，生石灰堆放时间不得超过三天。

②石灰灌入量不应小于设计要求，拔出套管后，用盲板将套管底封住，将桩顶石灰压入约 800mm，然后用粘土将桩孔填平夯实。

③石灰桩施工应在有实践经验的技术人员指导下进行，并做好施工记录。

### (2) 施工主要机具

DZ-40Y 振动打桩机， $\phi 377$ mm 钢管和盲板，小车及配套工具。

## 三、挖孔投料法

人工挖孔投料法是湖北省建筑科学研究设计院试验成功并广泛应用的一种施工方法。该方法利用特制的洛阳铲，人工挖孔，投料夯实。由于洛阳铲在切土、取土过程中对周围土体扰动很小，在软土甚至淤泥中均可保持孔壁稳定。

这种简易的施工方法避免了振动和噪音，能在极狭窄的场地和室内作业，大量节约能源，特别是造价很低、工期短、质量可靠，应用的范围较广。

挖孔投料法主要受到深度的限制，一般情况下，桩长不宜超过 6m。地下水位以下的砂类土及塑性指数小于 10 的粉土中难以成孔。

### (1) 施工方法

①利用洛阳铲人工挖孔，孔径随意。当遇杂填土时，可用钢钎将杂物冲破，然后用洛阳铲取出。取土成孔也可在水下进行。

在软土中宜用大直径洛阳铲，在杂填土及硬土中宜用小直径洛阳铲。

### ②灌料夯实

成孔完毕，经验收合格后，将生石灰和掺合料用斗车运至孔口分开堆放。然后用小型污水泵（功率 1.1kW，扬程 8~10m）将孔内水排干，立即在铁板上按配合比拌合桩材，每次拌合的数量为 0.3~0.4m 桩长的用料量，拌均匀后灌入孔内，用铁夯夯击密实。

夯实时，三人持夯，加力下击，夯重在 30kg 左右即可保证夯击质量。也可采用小型卷扬机吊锤或灰土桩夯实机夯实。

### (2) 工艺流程

定位——十字镐、钢钎或铁锹开口——人工洛阳铲成孔——孔径、孔深检查——孔内抽水——孔口拌合桩料——下料——夯实——再下料——再夯实，直至桩顶用粘土封口夯实。

### (3) 技术安全措施

①在挖孔过程中一般不宜抽排孔内水，以免塌孔。

②每次人工夯击次数不少于 10 击，从夯击声音可判断是否夯实。

③孔底泥浆必须清除，可采用长柄勺挖出，浮泥厚度不得大于 15cm。

④灌料前孔内水必须抽干。遇有孔口或上部土层往孔内流水时，应采取措施隔断水流，确保夯实质量。

⑤为保证成孔质量，应采用量孔器逐孔检查孔深和孔径。

#### 四、国外的施工方法

##### (1) 工艺特点

日本的石灰桩施工工艺比较先进。先由振入、打入套管的成孔方法后来发展成为旋转下沉套管，管内投料，压缩空气送料冲压密实的施工方法。其主要特点为：

①机械化、自动化程度高；

②施工文明，输送、储存材料系统密封，振动和噪音小。

③加固深度大，桩长可达 35m。

④有一套标准的配套设备，包括空压机、发电机、吊车等。机械台班费用较高。

⑤一般采用纯生石灰块。

⑥其主要技术特点是套管正转旋入时，底部桩尖活门封闭，至设计深度将材料投入管内后，送入压缩空气，反转套管上提时，桩底活门能自动开启。另一个特点是利用压缩空气将材料从套管送入桩孔内，不单是利用压缩空气施加给桩材的压力，主要利用压缩空气从桩材的空隙中运动，以射流的原理将桩材及空气的混合体送入，由于射流的冲压，使桩体具有较高的密实度。

##### (2) 工艺流程

①把打桩机移到规定位置，将打桩机导向杆调整到垂直状态；

②使套管边旋转、边向下贯入，直至设计深度；

③套管达到设计深度后，螺旋杆停止旋转，从套管顶部的加料斗投入生石灰；

④投料完毕，关闭套管上端的气密阀；送入压缩空气，使套管内的空气压力达到规定值；

⑤待套管内压力到达规定值，即启动打桩机，使套管边回转（向反方向转动），边向上提升。同时调整套管内的空气压力；

⑥拔出套管后，地面如有空洞，可用砂土将其填平。

#### 10.4.2 施工质量控制

施工质量控制的主要内容包括：桩点位置、灌料质量和桩体密实度等，其中尤以灌料质量和桩体密实度为检验重点。

(1) 桩点位置及场地标高应与施工图相符。桩位偏差不宜大于 0.5 倍桩身直径。

(2) 成孔质量要求孔径误差 $\pm 3\text{cm}$ ，孔深误差 $\pm 15\text{cm}$ ，垂直度偏差小于 1.5%。

(3) 施工材料应符合质量要求。石灰材料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，含粉量（即消石灰）不宜超过 15%。

(4) 掺合料应保持适当的含水量，使用粉煤灰或煤渣时含水量宜控制在 30%左右。无经验时宜进行成桩工艺试验，确定密实度的施工控制指标。

(5) 填料时必须分段压（夯）实，人工夯实时，每段填料厚度不应大于 400mm，每次下料夯击次数不少于 10 击。

(6) 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。

## 10.5 质量检验

(1) 石灰桩加固软土的机理分为物理加固作用和化学加固作用，物理作用（吸水、膨胀）的完成时间较短，一般情况下 7d 以内均可完成。此时桩身的直径和密度已定型，在夯实力和生石灰膨胀力作用下，7~10d 桩身已具有一定的强度。而石灰桩的化学作用则速度缓慢，桩身强度的增长可延续 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身的设计强度，7~10d 的龄期的强度约为设计强度的 60% 左右。因此，石灰桩施工检测宜在施工后 7~10d 后进行，竣工验收检测宜在施工 28d 后进行。

(2) 施工检测可采用静力触探、动力触探或标准贯入试验。用静力触探的手段可对成桩质量和桩体密实度进行检验。一般在成桩后 7~10 天内进行桩体静力触探或  $N_{10}$  轻便触探检验。成桩的其他条件相同，土质和配合比不同时，桩身  $p_s$  值将不尽相同，其数据表明：成桩质量符合要求的桩，7~10 天内桩身  $p_s$  值的变化范围在 2.5~4.0MPa 之间。表 10-2 列出了桩身质量的判别标准。

表 10-2 石灰桩桩身质量标准

天然地基承载力特征值 $f_{ak}$ / kPa	桩身 $p_s$ 值 / MPa		
	不合格	合格	良
$f_{ak} < 70$	< 2.0	2.0~3.5	> 3.5
$f_{ak} > 70$	< 2.5	2.5~4.0	> 4.0

$p_s$  值不合格的桩，参考施工记录确定补桩范围，在施工结束前完成补桩，如用  $N_{10}$  轻便触探检验，以每 10 击相当于  $p_s = 1\text{MPa}$  按上表换算。试验证明当底部桩身具有一定强度时，由于化学反应的结果，其后期强度可以提高，但当 7~10d 比贯入阻力很小（ $p_s$  值小于 1MPa）时，其后期强度的提高有限。

(3) 目前国内应用较普遍的方法是载荷试验和静力触探，少数单位采用过十字板剪切试验和动探（标贯）法。经验尚不成熟的地区可同时采用载荷试验与静力触探（或动探、轻便触探）等方法，待积累到较多的数据足以得到两种方法判定复合地基承载力的相关关系以后，即可以用静力触探或轻便触探一种方法进行检测。

个别土质特殊或重要的工程，根据设计要求还要取桩或桩间土样进行有关的室内试验。

用静力触探来确定石灰桩复合地基的加固效果是较简捷的方法。它主要通过载荷试验对比来间接地得到  $p_s$  值与复合地基承载力  $f_{spk}$  及压缩模量  $E_{sp}$  值的关系。静力触探应在地基加固区的不同部位随机抽样进行测试，检测部位为桩中心及桩间土，每两点为一组，检测组数不少于总桩数的 1%。静力触探检测深度应大于桩长，如有异常情况，应增加测点并判明原因（如探头是否偏出桩体等）。关于桩体强度的确定，可取 0.1  $p_s$  为桩体比例界限，这是经过桩体取样在试验机上作抗压试验求得比例界限与原位静力触探  $p_s$  值对比的结果。根据比例极限值及桩间土承载力可用式 (10-2) 计算复合地基承载力。但仅适用于掺合料为粉煤灰、煤渣的情况。

(4) 石灰桩复合地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验。一般应作单桩复合地基载荷板试验，有条件或有要求时最好进行群桩复合地基载荷试验，以便对比分析。

单桩复合地基的压板大小应等于单桩单元面积,群桩复合地基的压板大小亦为相应各桩单元面积之和。载荷试验数量宜为地基处理面积每 200m<sup>2</sup>左右布置一个点,且每一单体工程不应少于 3 点。

(5) 大量的检测结果证明,石灰桩复合地基在整个受荷阶段,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宜与天然地基的控制标准相近。石灰桩复合地基载荷试验的沉降比  $s/b$  或  $s/d$  取 0.012。

(6) 其他

1. 基础开挖至设计标高后,有关单位应会同验槽,进一步确认石灰桩施工质量。
2. 基础施工完成后,应及时设置沉降观测点,监测建筑物施工及一定使用期内的沉降情况。

## 10.6 工程实例

### 10.6.1 实例一

#### 一、工程概况

襄阳轴承厂 12 街坊住宅为 7 栋 6 层砖混结构;四单元组合,长 48m,宽 10m;三单元组合,长 36m,宽 10m;总建筑面积 20000m<sup>2</sup>。

#### 二、地基条件

建筑场地原为一口 20,000m<sup>2</sup>的大鱼塘,水深 2m。准备将水抽干后挖除塘底淤泥,然后采用条基或筏基。水抽干后,发现塘泥深 1m,人不能下塘作业,同时周围鱼塘水不断渗入已抽干水的塘内。要挖除近 20,000m<sup>3</sup>的淤泥,施工十分困难,造价较高,工期较长。决定采用先填土后处理的方案。填土过程中由于塘泥承载力极低,机械无法运行,因此填土厚度为 2.5m,压实效果很差。

填土后用静力触探进行了地质勘察,典型断面如图 10-4 所示,第 I 层新填土均匀性很差,第 II 层淤泥经填土挤淤与土混合后,  $p_s$  值在 0.3MPa 左右,第 III 层粉质粘土厚约 2m,  $p_s$  值为 0.8MPa,  $f_{ak} = 100\text{kPa}$ ,  $E_s = 4\text{MPa}$ ,第 IV 层粘土,厚度 6m 以上,  $p_s$  值为 1.8MPa,  $f_{ak} = 180\text{kPa}$ ,  $E_s = 7.5\text{MPa}$ 。

设计单位原拟采用沉管灌注桩,因造价高,工期长,故改用石灰桩方案。



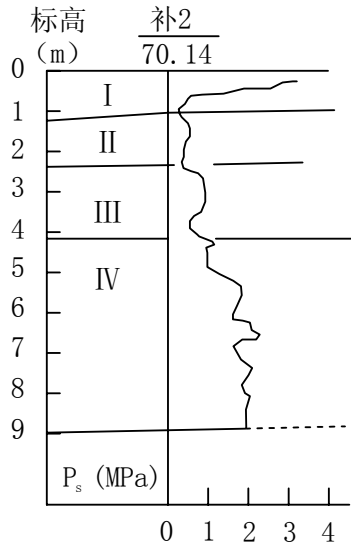


图 10-4 静力触探  $P_s$  值

### 三、石灰桩设计

由于在填土后立即进行石灰桩施工，石灰桩能否消除新填土自重固结，过去尚无经验。为了安全，采取了加大面积置换率，满堂加固的措施。设计桩径 300mm，桩距 700mm，正方形布置，复合地基承载力设计值 140kPa，桩长 2.8m，桩端置于第III层粉质粘土顶面，经验算桩端下卧层满足承载力要求。为了降低造价，基础采用浅埋钢筋混凝土条形基础，基底标高-1.4m。

设计验算如下：

设计桩径  $d = 350\text{mm}$ ，膨胀后实际桩径  $d_1 = 1.1d = 385\text{mm}$ ，外加桩边 2cm 厚硬壳层，则  $d_1 = 425\text{mm}$ 。桩中心行距  $s_1 = 700\text{mm}$ ，列距  $s_2 = 700\text{mm}$ ，正方形布桩。

$$\text{面积置换率} \quad m = \frac{0.785d_1^2}{s_1 \cdot s_2} = 0.29$$

天然地基承载力特征值  $f_{ak} = 70\text{kPa}$ 。

加固后桩间土承载力

$$f'_{sk} = \left[ \frac{d_1^2(K-1)}{s_1 s_2 - 0.785d_1^2} + 1 \right] f_{ak}$$

式中  $K$  —— 桩边土加强系数 1.4~1.8，取 1.6。

$$f'_{sk} = 91.8 \text{ kPa}$$

复合地基承载力

$$f_{spk} = f'_{sk} [1 + m(n-1)]$$

桩土应力比  $n = 3.5$ 。

$f_{spk} = 158.4 \text{ kPa}$  满足设计要求（计算从略）。

### 四、石灰桩施工

采用人工洛阳铲成孔，成孔过程中地下水（填土内上层滞水及周围塘内渗水）渗水较大，采取建筑物周围加打一排围护桩的措施，围护桩间距 650mm，打完，基础下工程桩孔内

渗水明显减少。灌料前用软轴水泵排干孔内水，立即下料。每次下料 30cm，采用人工夯实。由于填土面标高未达设计要求，孔口粘土封填高度仅 30cm，在施工基础前对基槽进行了表面夯实，以消除由于封口高度不足而引起的地面隆起。

桩体配合比（体积比）为生石灰：粉煤灰=1：1（下部 1m）或 1：2（上部）。七栋住宅楼共施工石灰桩 6820 根，工期 59 天，除去雨雪天气，平均每天完成 120 根桩。共用工日 2412 个，平均每工日完成 2.8 根桩。

### 五、加固效果

为了确保建筑物安全，工程桩施工前，在建筑物场地选取了一个试验区进行石灰桩复合地基与混凝土桩复合地基的对比试验。施工石灰桩 20 根，混凝土桩 1 根。共完成石灰桩单桩复合地基静荷载试验两组，天然地基静荷载试验一组，混凝土单桩复合地基静荷载试验一组，结果如图 10-5 所示。

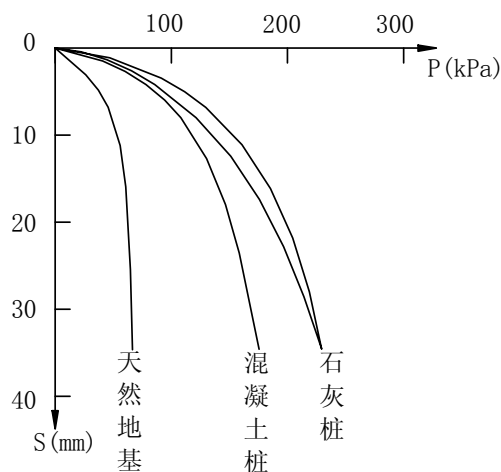


图 10-5 荷载试验  $p - s$  曲线

试验用压板尺寸为 707mm×707mm，等于加固单元面积。设计桩径 350mm，桩中心距 700mm，桩长 2.6m。试验结果表明，天然地基承载力（当  $s=0.02b$  时）为 72kPa，石灰桩复合地基承载力（当  $s=0.015b$  时）平均值为 168kPa，混凝土桩复合地基承载力（当  $s=0.015b$  时）为 150kPa。取样试验结果为：桩体无侧限抗压强度平均值 0.51MPa，桩周边 10cm 左右厚度圆环区土的强度提高至原来强度的 1.6 倍，桩间土强度提高 21%。上述结果说明了石灰桩对新填土的显著的加固效果。试验结果与设计计算值基本相符。

在建筑物施工及使用过程中，进行了沉降观测。图 10-6 为其中一栋四单元建筑物的沉降—时间曲线。建筑物使用一年后总沉降平均值为 33mm，最大差异沉降 9mm。

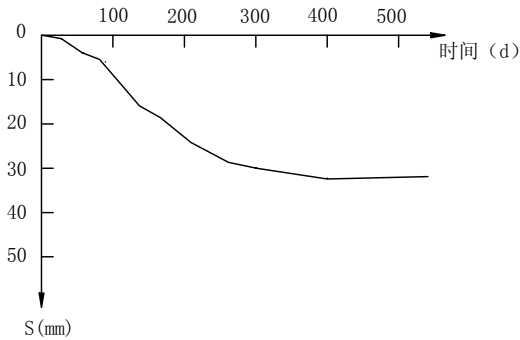


图 10-6 时间—沉降曲线

根据上述情况，在 1991 年该厂再次兴建相同类型的 10 栋住宅楼时，石灰桩的桩距由 700mm 扩大到 750mm，而且取消了围护桩，再一次降低了工程造价。

该工程共 29 个单元，每个单元石灰桩合同价 1.1 万元，共计 31.9 万元，平均每建筑平方米地基处理造价为 16 元，较混凝土灌注桩节约投资 50% 以上，较深层搅拌及碎石桩的造价也低 30% 左右，而且工期缩短。本工程是石灰桩应用中较成功的一个范例。

### 10.6.2 实例二

#### 一、工程概况

某印刷厂拟在其宿舍区内兴建一幢七层砖混结构住宅楼（该住宅楼每层均设有圈梁），总建筑面积 3000m<sup>2</sup>。该场区地势平坦，地貌形态属长江冲击一级阶地。据勘察，土层自上而下分别为杂填土、粘土、粉质粘土夹粉土、淤泥质粘土、粉砂夹粉质粘土。各土层物理力学性质指标见表 10-3。各土层特征分述如下：

- (1) 杂填土：层厚 1.0~1.5m，由粘性土夹生活垃圾组成，结构杂乱，土质不均。
- (2) 粘土：层厚 3.5~4.7m，黄褐色，稍湿~湿，可塑，属中压缩性土层。
- (3) 粉质粘土夹粉砂：层厚 1.8~3.2m，褐灰色~灰色，很湿~饱和，软~流塑，属中~高压压缩性土层。
- (4) 淤泥质粘土：层厚 4.3~5.9m，灰色，湿，软~流塑，属高压压缩性土层。
- (5) 粉砂夹粉质粘土：层厚 5.1~5.8m，灰色，很湿~饱和，稍密，属中~高压压缩性土层。

表 10-3 各土层物理力学指标

指 标	含水量 $w$ (%)	天然密 度 ( $g/cm^3$ )	天然孔 隙比 $e$	饱和度 $S_r$ (%)	塑性指 数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_a$ (MPa)	承载力 $f_k$ (kPa)
层 粘 土	310.8	1.88	1.12	98	20.2	0.74	4.5	100
粉质粘土	33.2	1.91	0.88	48	14.1	0.89	3.2	80
淤泥质粘土	410.3	1.73	1.46	97	110.7	1.22	3.0	80
粉砂	25.5	1.91	0.86	96			4.5	130

#### 二、工程设计

基础占地面积为  $426\text{m}^2$ ，原设计采用深层搅拌桩，桩长为  $13\text{m}$ ，总桩数  $456$  根。若采用沉管灌注桩、钻孔灌注桩或预制桩，则造价更高。后经计算论证，决定采用人工石灰桩处理浅层地基。

由于人工石灰桩施工深度有限，仅对地表下  $5\text{m}$  内  $f_k = 100\text{kPa}$  的粘土进行浅层处理，对于其下  $f_k = 80\text{kPa}$  的软土必须进行下卧层强度验算。

根据探头桩的设计思想，在该住宅楼的四角和中部将基础挑出，同时在挑出部分的基础下布置探头桩，既可减小基底压力，又增加了基础的惯性矩，使建筑物抗倾覆能力大大增强。

原设计基底压力  $150\text{kPa}$ ，采用上述措施后，基底压力减至  $143\text{kPa}$ ，基底附加压力为  $125\text{kPa}$ 。按地基基础设计规范，压力扩散角  $\theta = 23^\circ$ 。基础总面积为  $470\text{mm}$ ，压力扩散后下卧层面积  $A = 661\text{m}^2$ ，下卧层顶面附加压力  $P_z = 88.9\text{kPa}$ ，下卧层顶面自重压力  $P_{cz} = 88\text{kPa}$ ，软弱下卧层顶面处经深度修正后地基承载力设计值  $f_z = 177.2\text{kPa} > 176.9\text{kPa}$ ，即  $P_z + P_{cz} < f_z$ ，因此，软弱下卧层验算满足要求。

由于石灰桩复合地基不同于一般的柔性桩复合地基，例如石灰桩的减载作用、排水固结作用、挤密作用等均是深层搅拌桩复合地基所不具备的，因此石灰桩复合地基的设计有其特殊性。

本工程中，选取  $f_{sk} = 1.08 f_{ak} = 108\text{kPa}$ ， $f_{pk} = 300\text{kPa}$ 。

$$\text{平均置换率} \quad m = \frac{f_{spk} - f_{sk}}{f_{pk} - f_{sk}} = \frac{150 - 108}{300 - 108} = 0.219$$

理论布桩总数

$$n = \frac{mA}{(\pi/4)d_1^2} = \frac{0.219 \times 470}{0.785 \times 0.35^2} = 1070$$

实际布桩总数  $1108$  根，行、列间距为  $0.7\text{m}$ ，桩长  $4.5\text{m}$ ，石灰桩桩径  $300\text{mm}$ 。

### 三、工程施工

本工程石灰桩施工采用人工洛阳铲成孔工艺。人工洛阳铲成孔具有施工条件简单、施工速度快、不受场地条件限制和造价低等优点。

石灰桩桩体材料为生石灰和活性掺合料。规定生石灰  $\text{CaO}$  含量不得小于  $80\%$ ，石灰块直径不超过  $5 \sim 8\text{cm}$ 。根据该场地地质条件，掺合料选用粉煤灰，材料配比为石灰：粉煤灰 =  $1:2$ （体积比）。粉煤灰含水量在  $30\%$  左右。在石灰桩施工过程中，成孔、清底、抽水、夯填、封口过程中施工质量均进行严格把关。孔深、孔径均达到设计要求，填料均在孔口充分拌匀，而且每次下料厚度都不大于  $0.4\text{m}$ ，夯填密实度大于设计配合比最佳密实度  $90\%$ 。为防止石灰桩向上膨胀，在桩顶部分用粘土夯实，且封土厚度均不小于  $0.4\text{m}$ ，这样可使石灰桩侧向膨胀，将地基土挤密。

由于生石灰与粉煤灰容重小于地基土，因此排土成孔石灰桩施工工艺具有使加固层减载的优点。由于桩体材料置换土体，使得石灰桩比原桩体部分的土体重量减小了  $1/3$  以上，因而对软弱下卧层的压力减小，此因素在该工程设计计算中未考虑，作为安全储备。

为使桩间土得到最佳的挤密效果，该工程施工顺序为从外向里，隔排施工。先施工最外排石灰桩可起到隔水的作用，场地地下水因石灰桩灌孔时抽水外排而不断降低，这对于保证

成桩速度和成桩质量都起到积极作用。

石灰桩施工进度较快，全部石灰桩 20 天时间即施工完毕。

#### 四、加固效果

石灰桩 28 天龄期的桩身强度仅为后期强度的 50%~60%，通常以 28 天检测结果确定石灰桩复合地基承载力。由于该工程工期较紧，石灰桩施工完毕一周后，建设单位即要求对加固效果进行检验。共对 12 根桩和桩间土 12 个点进行了静力触探检测。结果表明，桩体强度  $f_{pk} = 350\text{kPa}$ ，桩间土承载力  $f_{sk} = 110\text{kPa}$ ，石灰桩复合地基承载力  $f_{spk} = 162\text{kPa}$ ，满足设计要求。

建筑施工过程中进行了沉降观测，竣工后一年，沉降基本均匀且趋于稳定，最大沉降量 7.8cm。加固效果良好，这是石灰桩在深厚软土地基上的成功范例。