地 基 处 理

Ground Treatment

Dr. Han WX

置换、垫层

地 基 处 理

Ground Treatment

教师 *Instructor*

Dr. Wenxi Han **韩文喜**

联系方式

Phone: 13880536952

E-mail: hwx@cdut.edu.cn

本课程必备条件 ***Prerequisites:***

《土力学》

《地基与基础》

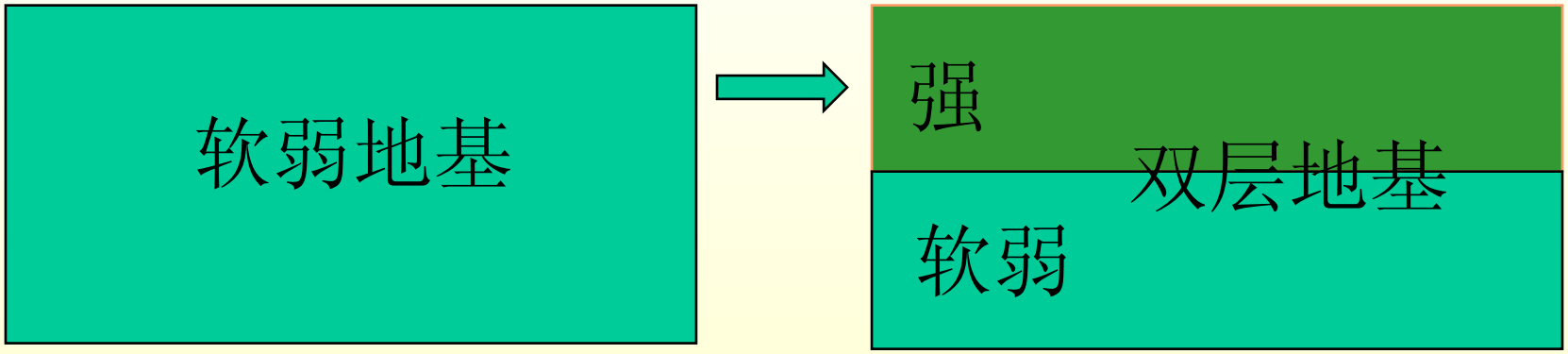
《岩土工程施工》

第四章 置换（垫层）

4.1 概述

Dr. Han WX

置换法是指应用物理力学性质较好的岩土材料置换天然地基中的部分或全部软弱土体或不良土体，形成双层地基或复合地基，以达到提高地基承载力、减少沉降目的一类地基处理方法。



以置换为主的地基处理方法主要有：换土垫层法、挤扮置换法、褥垫法、强夯置换法以及碎石桩置换法和砂桩置换法、石灰桩法、气泡轻质料填土法和EPS超轻质料填土法等。

本章主要介绍换土垫层法、强夯置换法、石灰桩法和EPS超轻质料填土法。

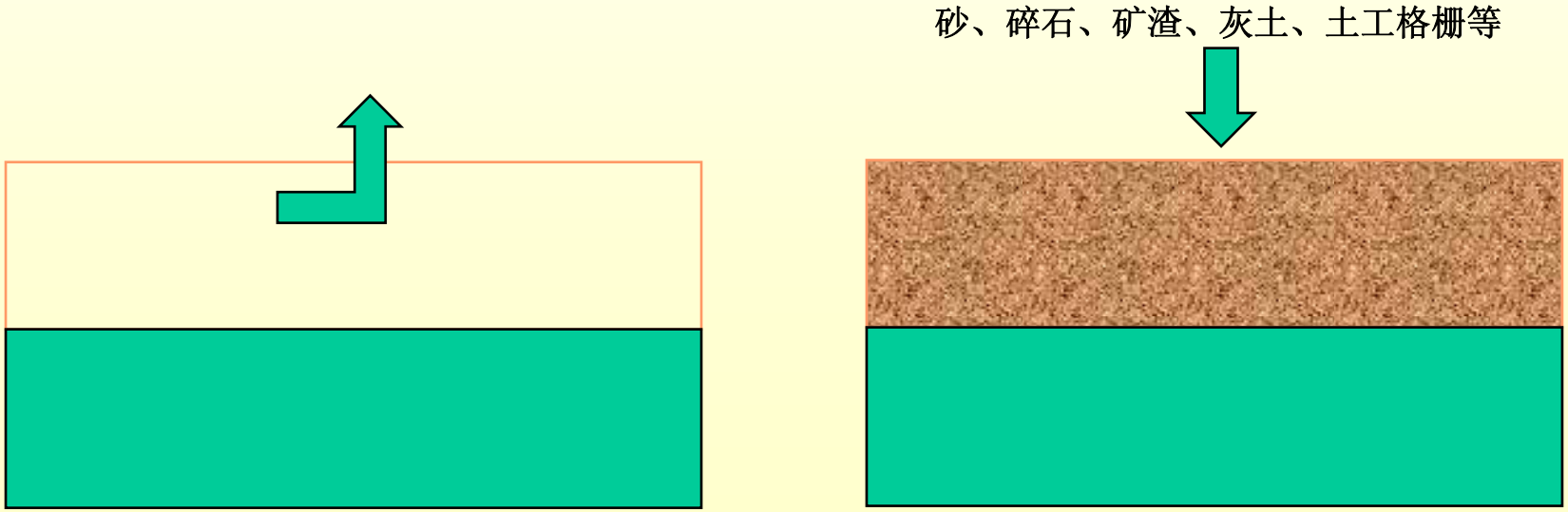
4.2 换土垫层法

Dr. Han WX

4.2.1 加固机理和适用范围

换土垫层法就是将基础底面以下不太深的一定范围内软弱土层挖去，然后用强度高、压缩性能好的岩土材料，如砂、碎石、矿渣、灰土、土工格栅加砂石料等材料分层填筑，采用碾压、振密等方法使垫层密实。通过垫层将上部荷载扩散。传到垫层下卧层地基中，以满足提高地基承载力和减少沉降的要求。

换土垫层法适用于软弱土层分布在浅层且较薄的各类不良地基的处理。



4.2 换土垫层法

4.2.2 设计

换土垫层法加固地基设计包括垫层材料的选用，垫层铺设范围、厚度的确定，以及地基沉降计算等。

1. 垫层材料选用

采用换土垫层法处理地基，垫层材料可因地制宜地根据工程的具体条件合理选用下述材料：

(1)砂、碎石、或砂石料；

(2)灰土；

(3)粉煤灰或矿渣；

(4)土工合成材料加碎石垫层等。

4.2 换土垫层法

Dr. Han WX

2. 确定垫层铺设范围

垫层铺设范围应满足基础底面应力扩散的要求。对条形基础，垫层铺设宽度 B 可根据当地经验确定，也可按下式计算：

$$B \geqslant b + 2z\tan\theta \tag{4-2-1}$$

式中 B——垫层宽度，m；

b——基础底面宽度，m；

z——垫层厚度，m；

θ——压力扩散角，可按表 4-2-1 采用；当 $z/b < 0.25$ 时，仍按表 4-2-1 中 $z/b = 0.25$ 值。

整片垫层的铺设宽度可根据施工的要求适当加宽。垫层顶面每边宜超出基础底边不小于 300mm，或从垫层底面两侧向上，按当地开挖基坑经验放坡。

压 力 扩 散 角（°） 表 4-2-1

换填材料 / z/b	中砂、粗砂、砾砂圆砾、角砾、卵石、碎石、石屑、矿渣	粉质黏土、粉煤灰	灰土
0.25	20	6	28
≥0.50	30	23	

4.2 换土垫层法

Dr. Han WX

3．确定垫层厚度

垫层铺设厚度根据需要置换软弱土层的厚度确定，要求垫层底面处土的自重应力与荷载作用下产生的附加应力之和不大于同一标高处的地基承载力特征值，如图 4-2-1 所示。其表达式为：

$$p_z + p_{cz} \leqslant f_{az} \qquad (4\text{-}2\text{-}2)$$

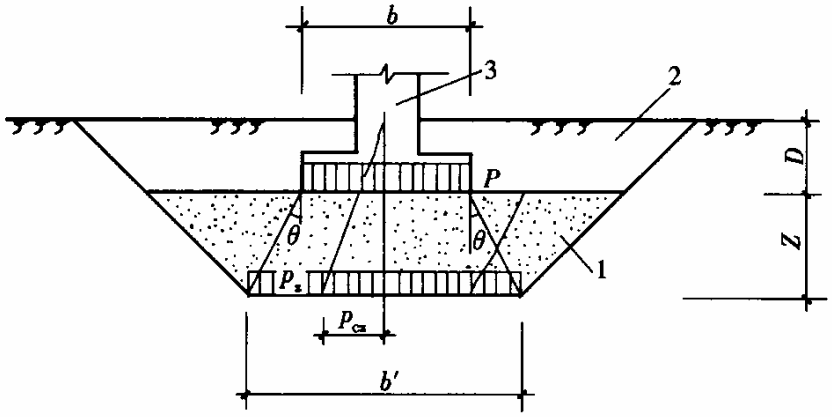


图 4-2-1 垫层内压力的分布

1—垫层；2—回填土；3—基础

p_z——荷载作用下垫层底面处的附加应力，kPa。

p_{cz}——垫层底面处土的自重压力，kPa；

f_{az}——垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值，kPa。

设计计算时，先根据垫层的地基承载力特征值确定出基础宽度，再根据下卧层的承载力特征值确定垫层的厚度。一般情况下，垫层厚度不宜小于 0.5m，也不宜大于 3m。垫层太厚成本高而且施工比较困难，垫层效用并不随厚度线性增大。

4.2 换土垫层法

Dr. Han WX

3．确定垫层厚度

垫层底面处的附加压力，对条形基础和矩形基础分别按式（4-2-3）和式（4-2-4）计算。

条形基础

$$p_z = \frac{b\ (p_k - p_c)}{b + 2z\tan\theta} \tag{4-2-3}$$

矩形基础

$$p_z = \frac{bl\ (p_k - p_c)}{(b + 2z\tan\theta)\ (l + 2z\tan\theta)} \tag{4-2-4}$$

式中 p_k——荷载作用下，基础底面处的平均压力，kPa；

p_c——基础底面处土的自重压力，kPa；

l、b——基础底面的长度和宽度，m；

z——垫层的厚度，m；

θ——垫层的压力扩散角，可按表 4-2-1 采用。

垫层地基的承载力宜通过试验确定。

4.2 换土垫层法

Dr. Han WX

4. 沉降验算

一般垫层地基的沉降中仅考虑下卧层的变形，但对沉降要求较严或垫层较厚的情况，还应计算垫层自身的变形。

采用垫层法加固地基可采用分层总和法计算沉降量。

垫 层 模 量（MPa） 表 4-2-2

垫层材料 \ 模量	压缩模量 E_S	变形模量 E_0
粉煤灰	8～20	
砂	20～30	
碎石、卵石	30～50	
矿渣		35～70

注：压实矿渣的 E_0/E_S 比值可按 1.5～3 取用。

采用垫层法加固地基可采用分层总和法计算沉降量。

4.2 换土垫层法

Dr. Han WX

4.2.3 施工和质量检验

换土垫层法施工包括开挖换土和铺填垫层两部分。

开挖换土应注意避免坑底土层扰动，应采用干挖土法。

铺填垫层应根据不同的换填材料选用不同的施工机械。垫层需分层铺 填，分层密实。砂石垫层宜采用振动碾碾压；粉煤灰垫层宜采用平碾、振动碾、平板振动器、蛙式夯等碾压方法密实；灰土垫层宜采用平碾、振动碾等方法密实。

垫层法施工质量检验应分层进行。每层施工后经检验符合设计要求后才能进行下一层施工。

对灰土、粉煤灰和砂石垫层的施工质量检验可采用环刀法、贯人仪、静力触探、轻型动力触探或标准贯人试验等方法；对砂石、矿渣垫层可用重型动力触探检验垫层质量。

4.3 强夯置换法

Dr. Han WX

4.3.1 加固机理和适用范围

强夯置换法是指利用强夯施工方法，边夯边填碎石在地基中设置碎石墩，在碎石墩和墩间土上铺设碎石垫层形成复合地基以提高地基承载力和减小沉降一种地基处理方法。碎石墩设置深度一般与夯击能和地基土性质有关，深厚软黏土地基中碎石墩一般可达5-8m深。

强夯置换法适用于加固粉土地基、黏性土地基等。

强夯置换法常应用于堆场、高等级公路地基处理，有时也应用于多层住宅地基处理。

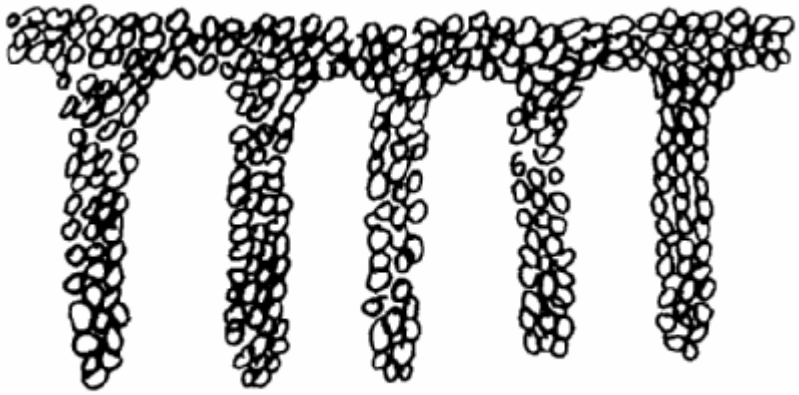


图 4-3-1 强夯置换碎石墩复合地基示意图

4.3 强夯置换法

4.3.2 设计

强夯置换法设计包括：

1.置换材料选用：

级配良好的块石、碎石、矿渣、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30%；

2.强夯置换碎石墩设置深度和单击夯击能的确定：

墩体的设置深度可根据设计承载力要求确定；

墩体可能设置的深度主要取决于地基土质条件和单击夯击能量。当软弱土层不厚时应穿透软弱土层到达较硬土层。对深厚软黏土地基墩体设置深度一般不宜超过7m。墩体深度国内虽有达到10m，但达到一定深度后，增加墩体深度需要增加的夯击能是很大的。

单击夯击能，即锤重和落距需通过试验确定。强夯置换法使用的夯锤与强夯法使用的夯锤应有所区别，可采用具有较小的底面积的高夯锤。每夯点夯击击数通过试验确定，应保证墩体达到设计深度。

4.3 强夯置换法

3. 夯锤和落距的选用：

通过试验确定。

4. 夯击范围和置换点布置：

置换点可采用等边三角形或正方形布置。对独立基础可根据基础形状相应布置。

置换点距离可根据荷载大小和天然地基承载力情况确定，一般可取夯锤直径的2-3倍。

强夯置换范围应大于荷载作用范围，一般每边宜超出处理深度的1/3—1/2，并不宜小于3m。

5.垫层

在墩间土和墩顶应铺设一厚度不小于300mm的砂石垫层，以协调墩体和墩间土的承载效能，在碎石垫层中加铺1—2层土工格栅更好。

4.3 强夯置换法

6.检测方法的确定：

可通过现场载荷试验测定墩体和复合地基承载力。

在采用强夯置换加固软黏土地基时，为了加速墩间土中超孔隙水压力的消散，可在强夯置换前，在置换点中间，即墩间土中预先设置排水通道，如预插塑料排水带、设置普通砂井等。

4.4 石灰桩法

Dr. Han WX

4.4.1 加固机理和适用范围

先用机械或人工的方法在地基中成孔，然后灌人生石灰块，或灌人掺有粉煤灰、炉渣等掺合料的生石灰混合料，并进行振密或夯实形成石灰桩桩体。石灰桩桩体与桩间土形成石灰桩复合地基，以达到提高地基承载力、减小沉降的目的，称为石灰桩法。

采用石灰桩法加固地基的机理有下述几个方面：

(1)置换作用

在软弱土层中设置具有一定强度和刚度的石灰桩基承载力和减小沉降的目的。

（2）吸水、升温使桩间土强度提高。

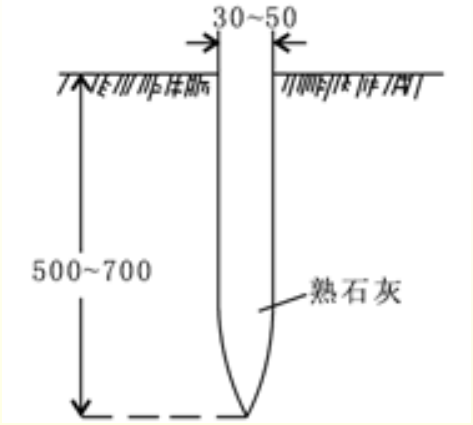
1kg生石灰在熟化过程中吸取0.8～0.9kg水，并放出1172kJ热量。

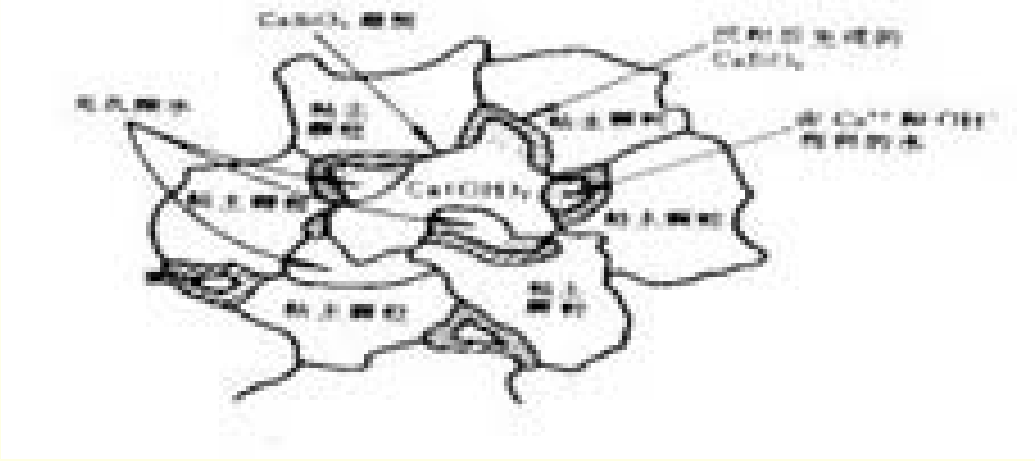
实测表明：石灰桩中的生石灰在熟化过程中可使桩体内温度达到200—400˜C，这种热量可提高地基土的温度(根据报道，实测桩间土温度可达50˜C左右)，使地基土体中水分蒸发，有利于地基土体固结。

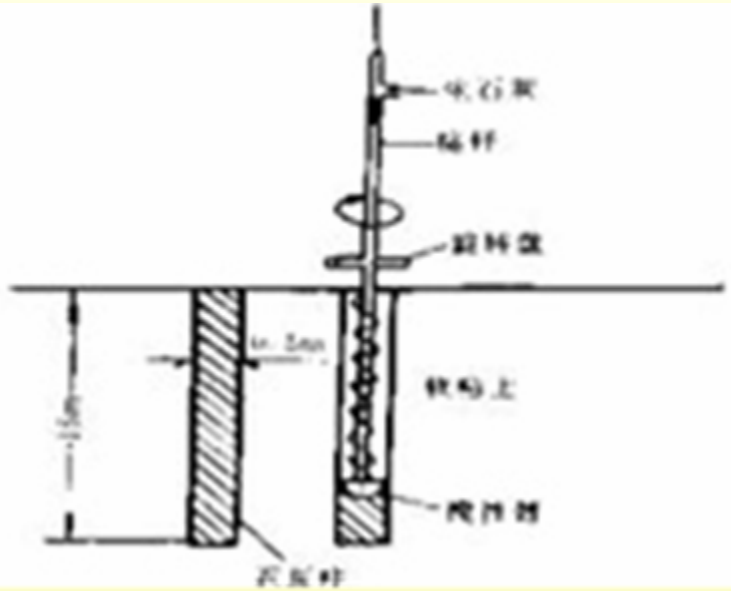
第四章 置换（垫层）

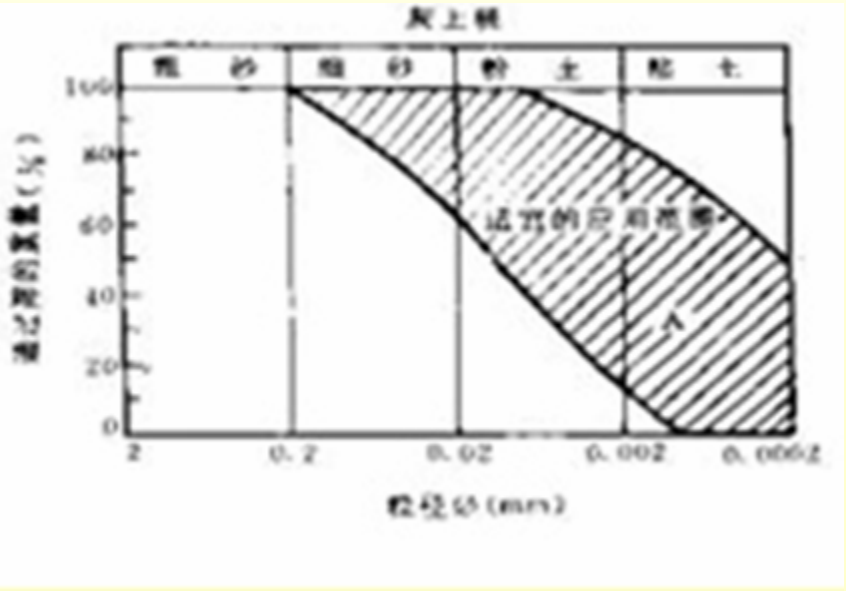
4.4 石灰桩法

Dr. Han WX









4.4 石灰桩法

生石灰熟化过程中吸水也使地基土中含水量降低，土体产生固结，土体孔隙比减小。生石灰熟化过程中吸水、升温作用使桩周土排水固结，因此桩间土的抗剪强度得到提高。

（3）胶凝、离子交换和钙化作用使桩周土强度提高。

石灰桩与桩间土之间能产生离子交换，使土体产生钙化和胶凝作用。通过在石灰桩体与四周土体接触处形成硬壳体，提高桩身强度有利于提高地基承载力。

上述加固机理对桩间土的加固作用与到桩体的距离有关。距离桩体愈远，加固效果愈弱。因此，石灰桩复合地基中桩间土强度靠近桩体最高，中间最低，可近似认为成线性比例分布。

从上面分析可知石灰桩加固地基机理是多方面的。置换产生的加固作用只是其中的一部分，也可能不是占主要部分。

4.4 石灰桩法

4.4.2 设计

石灰桩加固地基设计主要包括：

1. 桩孔直径的选用

根据工程地基条件、施工方法和机具选用石灰桩桩孔直径。一般选用Φ300—500mm的较多。

2. 填料的选用

新鲜的生石灰，其中CaO含量不宜低于70%，生石灰粒径在50mm以下，含粉量不得超过20%，未烧透的石灰块或其他杂物含量不得超过5%。

3. 桩位布置和桩间距设计

桩位布置一般选用等边三角形、正方形或矩形布置。桩间距一般选用桩孔直径的2.5—3.5倍。具体尺寸可根据复合地基承载力公式计算。

$$p_{cf}=mp_{pf}+\lambda\ (1-m)\ p_{sf}$$

4.4 石灰桩法

Dr. Han WX

3. 桩位布置和桩间距设计

$$p_{cf}=mp_{pf}+\lambda(1-m)p_{sf}$$

对等边三角形布置，复合地基置换率 m 表达式为：

$$m=0.9069\frac{d^2}{S^2} \tag{4-4-2}$$

式中 S——桩孔中心距；

d——桩孔直径。

结合式（4-4-1）和式（4-4-2），可得等边三角形布置桩孔间距 S，其表达式为：

$$S=0.95d\sqrt{\frac{p_{pf}-\lambda p_{sf}}{p_{cf}-\lambda p_{sf}}} \tag{4-4-3}$$

类似，可得正方形布置桩孔间距 S，其表达式为：

$$S=0.886d\sqrt{\frac{p_{pf}-\lambda p_{sf}}{p_{cf}-\lambda p_{sf}}} \tag{4-4-4}$$

对矩形布置也可采用类似算法。

4.4 石灰桩法

4. 桩长设计

确定石灰桩桩长主要从下述几方面考虑：

- 若需加固的软弱土层不厚，可考虑加固至软弱土层底面，也就是石灰桩穿透软弱土层。
- 若软弱土层较厚，则根据加固区下卧层承载力要求和建筑物沉降控制确定加固深度。加固区下卧层承载力要求可用下式表示：

$$p_z + p_{cz} \leqslant f_z \qquad (4\text{-}4\text{-}5)$$

pz—加固区下卧层顶面处附加压力；pcz——加固区下卧层顶面处自重应力； fz—加固区下卧层顶面经深度修正后的承载力

- 按建筑物沉降量控制确定加固深度，可通过试算确定石灰桩桩长。沉降计算按复合地基沉降计算方法计算。加固区复合地基压缩模量X，可采用下式计算

$$E_c = mE_p + (1-m)E_s \qquad (4\text{-}4\text{-}6)$$

m —复合地基置换率； Ep —石灰桩桩体压缩模量； Es —桩间土压缩模量

5. 布桩范围的确定

加固范围宜大于基础宽度，当大面积满堂布桩时，一般在基础外缘增1—2排

4.4 石灰桩法

4.4.3 施工

在地基中设置石灰桩通常有三种方法：

(1)沉管法成孔提管投料压实法；

沉管法成孔提管投料压密法是采用沉管打桩机在地基中沉管成孔，然后提管—填料—压实—再提管—再填料-再压实，重复直至成桩，再填土封口压实。封口土体高度不宜小于0．5m，孔口封土高度应高于地面，防止地面水浸泡桩顶。沉管法成孔提管投料压实法施工过程中要避免塌孔和缩孔，一次提升高度1.5m左右。

(2)沉管法成孔投料提管压实法；

沉管法成孔投料提管压密法是采用沉管打桩机在地基中沉管成孔后，先向管内填料—再拔管—压实，再填料—拔管-压实，重复直至成桩，再填土封口压实。沉管法成孔投料提管压实法成桩施工过程中要避免堵管。沉管法成孔投料提管压密法较适用于地下水位较高的软黏土地区。

4.4 石灰桩法

4.4.3 施工

在地基中设置石灰桩通常有三种方法：

(3)挖孔填料夯实法；

挖孔填料夯实法主要指采用特制的洛阳铲，人工挖土成孔，再分层填料夯实，并填土封口。

(4)长螺旋钻施工法。

长螺旋钻施工法是采用长螺旋钻机将钻杆钻至设计深度后提钻，取土成孔，然后再将钻杆插入孔内，反转将填放到孔口的石灰桩填料送人孔内，在反转过程中钻杆螺片将桩填料压实，最后封口压实。

4.4 石灰桩法

4．4．4 质量检验

施工质量检验主要包括桩位布置、填料质量和桩体密实度的检验。桩体密实度可采用轻便触探检验，也可取样进行室内土工试验检验。

石灰桩复合地基效果检验可采用载荷试验，也可采用十字板剪切试验、轻便触探试验，或静力触探试验检验加固效果。

第四章 置换（垫层）

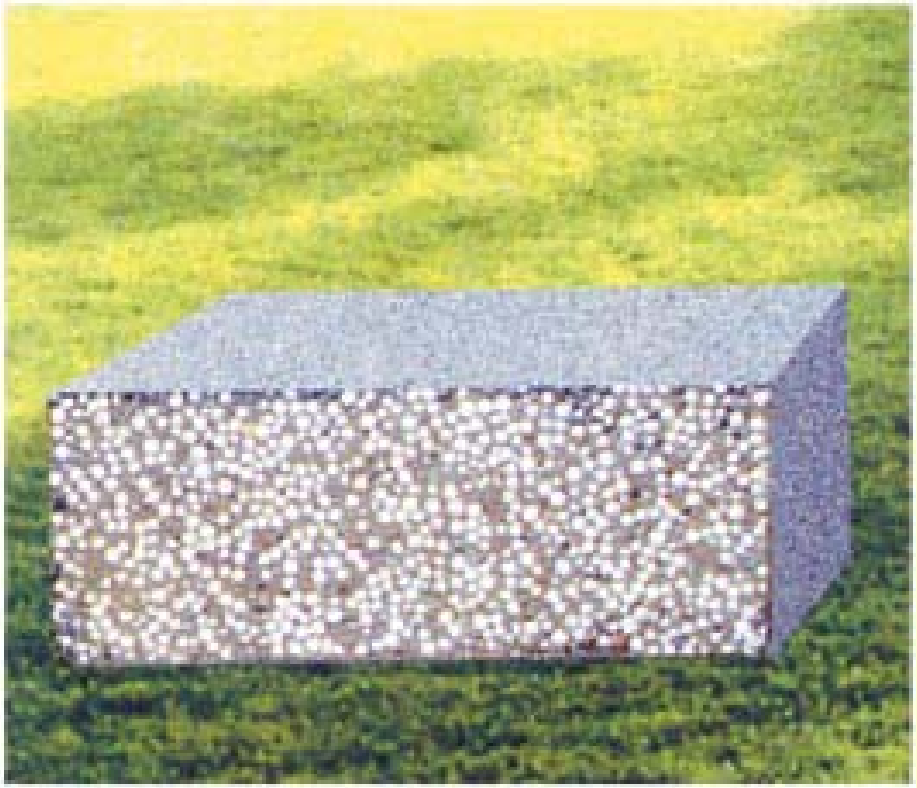
4.4 ESP超轻质料填土法

Dr. Han WX

泡沫苯乙烯(简称EPS)是一种化工产品。

现浇施工工艺

1. 清洁浇筑工作面。
2. 根据设计厚度、坡度确定标高。
3. 按照设计密度等级对应的配比进行搅拌。
4. 现场浇筑、拍实、按规范要求留伸缩缝。
5. 用10-20mm厚1:3防裂砂浆罩面。如设计有饰面铺装（石材、地砖、装饰等），此罩面层可作为铺装基层。
6. 按常规混凝土养护方法养护。



检测报告

4.4 ESP超轻质料填土法

泡沫苯乙烯(简称EPS)是一种化工产品。 岩土工程中应用的EPS材料具有下述特点：

(1)超轻质性

常用EPS材料重度为0.2—0.4kN/m^3，是土的重度的1/50-1/100。

(2)耐压缩性

EPS材料抗压强度约为100-350kPa，变形模量一般为2.5-115kPa。EPS材料用于填方工程具有较大的刚度和强度，是砌筑和填方的好材料。

(3)摩擦特性

根据试验研究，EPS块体与砂的摩擦系数为：对干燥砂，f = 0.58(密)—0.46(松)；对湿砂，f =0.52(密)—0.25(松)。EPS块体相互之间，以及EPS块与砂浆面的摩擦系数，f =0.55—0.76。

4.4 ESP超轻质料填土法

泡沫苯乙烯(简称EPS)是一种化工产品。 岩土工程中应用的EPS材料具有下述特点：

(4)耐水性

EPS为合成树脂泡沫，由于有憎水性，通常在施工中不会因为雨水和一时的渗透而发生由于吸水而使其材料特性变化。由于EPS内含发泡集合体的独立气泡，水很难浸入其内。当它在地下水中长期浸泡，气泡间可能产生吸水，但限于表层。挪威曾有报道，在地下水位以下长期浸泡达9年，EPS的最大吸水量为其体积的9%。泡水后EPS材料强度和变形特征不变。

(5)化学特性

耐热性方面，EPS材料在70℃以下强度和变形特性不会改变。日本曾进行了实验工程的火灾试验。试验表明只要以一定土厚加铺覆盖，地面发生火灾，对地面以下的EPS影响很小。EPS材料在制造工艺中还可添加难燃剂，称为阻燃型EPS。阻燃型EPS离开火源后，在3s内自行熄灭。

4.4 ESP超轻质料填土法

泡沫苯乙烯(简称EPS)是一种化工产品。 岩土工程中应用的EPS材料具有下述特点：

(5)化学特性

EPS材料不会受任何微生物、细菌或酵素的侵入，也不会受白蚁的食害。

EPS的化学性从其本质上来说聚苯乙烯树脂相同，对于一般的酸、碱、动植物油、盐类等有较好的抗化学性，而对于芳香族碳化氢、卤族碳化氢、酮类等矿油系药品具有易溶解的性质。

EPS材料在紫外线作用下会产生老化，故需在EPS材料填方外覆盖土层或其他遮盖体。

(6)施工方便

EPS材料切割容易、方便，也可按要求形状铸模加工。

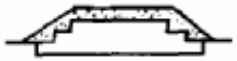
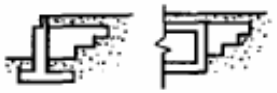
EPS材料很轻，人工搬运、叠砌很方便。在大型机械不能进入的狭窄场地，施工机械不能通行的软弱地基上施工也很方便。

第四章 置换（垫层）

4.4 ESP超轻质料填土法

Dr. Han WX

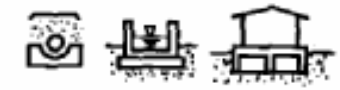
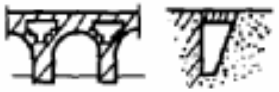
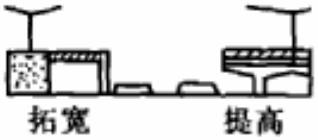
EPS超轻质料填土法主要用途一览表　　表 4-5-1

用途		简图	超轻性	自立性	施工方便	实用意义	主要适用范围
路堤	路堤		○		○	减小沉降 确保抗滑安全度 减小维修成本	道路、铁路、公园、宅地等处填土
路堤	拓宽路堤		○		○	抑制引起沉降 防止沉降差 缓和对周围的影响	车道拓宽、用地拓宽、防洪堤背面填土
路堤	拓宽路堤（挡版）		○	○	○	确保抗滑安全度 简化挡土构造物 有效利用用地	车道拓宽、用地拓宽、自用地内扩建（用于公园、停车场、人道等）
构造物背面填土	台背填料		○	○		减小背面侧压力 减小侧向移动 防止差异沉降	桥台背面，构造物背面，浅埋地下构造物
构造物背面填土	自立壁		○	○	○	减小沉降 减轻基础 节约用地	后台引道填土，立体交叉部分填土
构造物背面填土	挡墙、护岸、填料		○	○		减小背面侧压力 提高结构物安全度	挡墙、护岸等抗土压缩构物

4.4 ESP超轻质料填土法

Dr. Han WX

续表

用途	简图	超轻性	自立性	施工方便	实用意义	主要适用范围
基础	 暗埋管 水槽 建筑物	○		○	减小沉降 防止差异沉降 基础整体化	涵管、水渠基础、简易构造物基础
结构物保护		○	○		减轻既设构造物荷重 防止差异沉降和局部沉降	保护地下结构物、保护既设构造物
填充、暗埋	 拱桥	○		○	减轻结构物荷载重 确保空间	拱桥、大型桥墩的填充、在狭窄处填土的填空
拓宽、填高	 拓宽 提高	○	○	○	快速施工 简易施工 减轻对原有构造物的荷重	需要拓宽或填高
临时设置、修复	 临时铺设 修复	○		○	快速施工，快速撤除 施工容易 确保空间	临时道路、临时车站、灾害修复、临时修复

4.4 ESP超轻质料填土法

思考题