

## 第二篇 均质人工地基

### 第3章 换填垫层法

#### 3.1 概述

当软弱土地基的承载力和变形满足不了设计要求，而软弱土层的厚度又不是很大时，将基础底面下处理范围内的软弱土层部分或全部挖除，然后分层换填强度较大的砂（碎石、素土、灰土、炉渣、粉煤灰）或其他性能稳定、无侵蚀性的材料，并压实至要求的密实度为止，这种地基处理方法称为换填法，它多用于公路构筑物的地基处理，在建筑工程中也有一定范围的应用。

机械碾压、重锤夯实、平板振动可作为压（夯、振）实垫层的不同施工方法，这些施工方法不但可处理分层回填，又可加固地基表层土。

按回填不同材料形成的垫层，命名为该种材料的垫层，如砂垫层、碎石垫层、素土垫层、干渣垫层和粉煤灰垫层。

虽然不同材料的垫层，其应力分布稍有差异，但从试验结果分析其极限承载力还是比较接近的。通过沉降观测资料发现，不同材料垫层的特点基本相似，故可以近似地按砂垫层的计算方法进行计算。但对湿陷性黄土、膨胀土、季节性冻土等某些特殊土采用换土垫层法处理时，因其主要处理目的是为了消除或部分消除地基土的湿陷性、膨胀性和冻胀性，所以在设计时所需考虑解决问题的关键也应有所不同。

换填法的加固原理是根据土中附加应力分布规律，让垫层承受上部较大的应力，软弱层承担较小的应力，以满足设计对地基的要求。

#### 3.2 垫层的作用

垫层具有以下作用：

##### （1）提高持力层的承载力

通过扩散作用使传到垫层下软弱层的应力减小。

##### （2）减少沉降量

一般地基浅层部分的沉降量在总沉降量中所占的比例是比较大的。以条形基础为例，在相当于基础宽度深度范围内的沉降量约占总沉降量的 50% 左右，如以密实砂或其他填筑材料代替上部软弱土层，就可以减少这部分的沉降量。由于砂垫层或其他垫层对应力的扩散作用，使作用在下卧层土的压力较小，这样也会相应减少下卧层土的沉降量。

##### （3）加速软弱土层的排水固结

不透水基础直接与软弱土层相接触时，在荷载的作用下，软弱土地基中的水被迫绕基础两侧排出，因而使基底下的软弱土不易固结，形成较大的孔隙水压力，还可能导致由于地基强度降低而产生塑性破坏的危险，砂垫层和砂石垫层等垫层材料透水性大，软弱土层受压后，垫层可作为良好的排水面，使基础下面的孔隙水压力迅速消散，加速垫层下软弱土层的固结和提高其强度，避免地基土塑性破坏。

##### （4）防止冻胀

因为粗颗粒的垫层材料孔隙大,不易产生毛细现象,因此可以防止寒冷地区土中的冰所造成的冻胀,这时,砂垫层的底面应满足当地冻结深度的要求。

#### (5) 消除膨胀土的胀缩作用

在各类工程中,垫层所起的主要作用有时也是不同的,对膨胀土地基而言则主要是消除膨胀土的胀缩作用。

换填法适用于淤泥、淤泥质土、湿陷性黄土、素填土、杂填土地基及暗沟、暗塘等的浅层处理。

通常基坑开挖后,利用分层回填压实,也可处理较深的软弱土层,但经常由于地下水位高而需要采取降水措施;坑壁放坡占地面积大或需要基坑支护,以及施工土方量大、弃土多等因素,从而使处理费用增高、工期拖长,因此换填法的处理深度通常宜控制在 3m 以内,也不宜小于 0.5m,因为垫层太薄,则换土垫层的作用也不显著。

### 3.3 土的压实原理

当粘性土的土样含水量较小时,粒间引力较大,在一定的外部压实功能作用下,如还不能有效地克服引力而使土粒相对移动,这时压实效果就比较差;当增大土样含水量时,结合水膜逐渐增厚,减小引力,土粒在相同压实功能条件下易于移动而挤密,所以压实效果较好;但当土样含水量增大到一定程度后,孔隙中就出现了自由水,结合水膜的扩大作用就不大了,因而引力的减小也不显著,此时自由水填充在孔隙中,从而阻止土粒移动的作用,所以压实效果又趋下降,这就是土的压实机理。

在工程实践中,对垫层碾压质量的检验,要求能获得填土的最大干密度  $\theta = 28^\circ$ 。其最大干密度可用室内击实试验确定。在标准的击实方法条件下,对于不同含水量的土样,可得到不同的干密度  $\rho_d$ ,从而绘制干密度  $\rho_d$  和制备含水量  $w$  的关系曲线,在曲线上  $\rho_d$  的峰值,即为最大干密度  $\rho_{d\max}$ ,与之相应的制备含水量为最优含水量  $w_{op}$ ,如图 3-1 所示。理论曲线高于实验曲线,其原因是由于理论曲线假定土中空气被全部排出,而孔隙完全被水所占据导出的,但事实上空气不可能被完全排除,因此实际的干密度就比理论值小。

上述分析是对某一特定压实功能而言的,如果改变压实功能,则曲线的基本形态不变,但曲线位置却发生移动。如图 3-2 所示,在加大压实功能时,最大干密度增大,最优含水量却减小,亦即压实功能愈大,则愈容易克服粒间引力,因此在较低含水量下可达到更大的密实程度。

相同的压实功能对不同土料的压实效果并不完全相同,粘粒含量较多的土,土粒间的引力就较大,只有在比较大的含水量时,才能达到最大干密度的压实状态,如图 3-1 中的粉质粘土和粘土所示。

击实试验是用锤击方法使土的密度增加,以模拟现场土压实的室内试验。实际上击实试验是土样在有侧限的击实筒内,不可能发生侧向位移,力作用在有侧限体积的整个土体上,且夯击均匀,在最优含水量状态下所获得的最大干密度。而现场施工的土料,土块大小不一,含水量和铺填厚度又很难控制均匀,实际压实土的均质性差。因此,对现场土的压实,应以压实系数  $\lambda$  (土的控制干密度  $\rho_d$  与最大干密度  $\rho_{d\max}$  之比) 与施工含水量 (最优含水量  $w_{op} \pm 2\%$ ) 来进行检验。

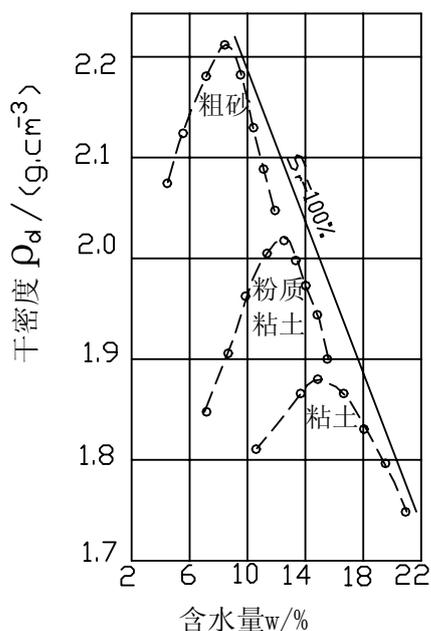
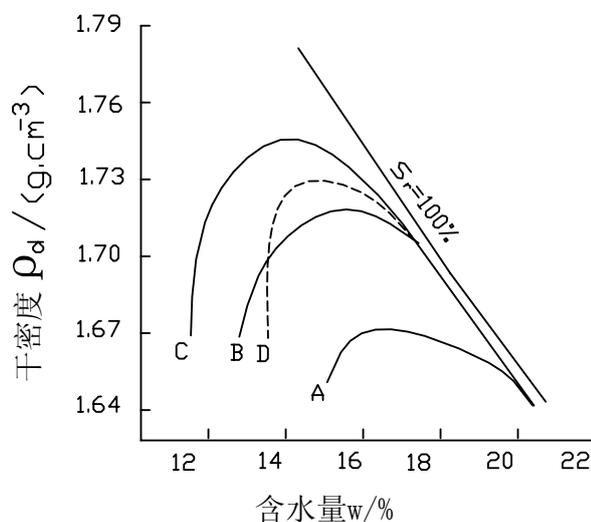


图 3-1 砂土和粘土的压实曲线



A: 碾压 6 遍; B: 碾压 12 遍;  
C: 碾压 24 遍; D: 室内击实试验

图 3-2 工地试验与室内击实试验的比较

### 3.4 垫层设计

#### 3.4.1 垫层的厚度的确定

垫层的厚度  $z$  (图 3-3) 应根据需置换软弱土的深度或下卧土层的承载力确定, 并符合式 (3-1) 要求

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (3-1)$$

式中  $p_z$  —— 相应于荷载效应标准组合时, 垫层底面处的附加压力值 (kPa);

$p_{cz}$  —— 垫层底面处土的自重压力值 (kPa);

$f_{az}$  —— 垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值 (kPa)。

垫层厚度不宜小于 0.5m, 也不宜大于 3m。

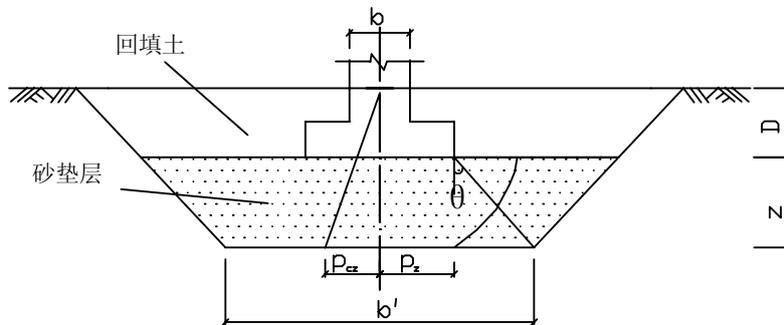


图 3-3 垫层内应力分布

垫层底面处的附加压力值  $p_z$  可按压力扩散角  $\theta$  分别按下两式, 进行简化计算:  
对条形基础

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \operatorname{tg} \theta} \quad (3-2)$$

对矩形基础

$$p_z = \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2z \operatorname{tg} \theta)(l + 2z \operatorname{tg} \theta)} \quad (3-3)$$

- 式中  $b$ ——矩形基础或条形基础底面的宽度 (m);  
 $l$ ——矩形基础底面的长度 (m);  
 $p_k$ ——相应于荷载效应标准组合时, 基础底面处的平均压力值 (kPa);  
 $p_c$ ——基础底面处土的自重压力值 (kPa);  
 $z$ ——基础底面下垫层的厚度 (m);  
 $\theta$ ——垫层的压力扩散角, 宜通过试验确定, 当无试验资料时, 可按表 3-1 采用。

表 3-1 压力扩散角  $\theta$  (°)

换 填 材 料  $z/b$	中砂、粗砂、砾砂、圆砾、 角砾、石屑、卵石、碎石、 矿渣	粉质粘土、 粉煤灰	灰土
	$0.25 \leq$	20	6
0.50	30	23	28

- 注: 1. 当  $z/b < 0.25$  时, 除灰土仍取  $\theta = 28^\circ$  外, 其余材料均取  $\theta = 0^\circ$ , 必要时, 宜由试验确定;  
 2. 当  $0.25 < z/b < 0.5$  时,  $\theta$  值可内插求得。

### 3.4.2 垫层宽度的确定

垫层底面的宽度应满足基础底面应力扩散的要求, 可按下式确定:

$$b' \geq b + 2z \operatorname{tg} \theta \quad (3-4)$$

式中  $b'$ ——垫层底面宽度 (m);

$\theta$ ——压力扩散角, 可按表 3-1 采用; 当  $z/b < 0.25$  时, 仍按表中  $z/b = 0.25$  取值。

垫层顶面每边超出基础底边不宜小于 300mm, 或从垫层底面两侧向上按当地开挖基坑经验的要求放坡, 整片垫层的宽度可根据施工的要求适当加宽。

### 3.4.3 垫层承载力的确定

经换填处理后的地基, 由于理论计算方法尚不够完善, 垫层的承载力宜通过现场载荷试验确定, 当无试验资料时, 可按表 3-2 选用, 并应验算下卧层的承载力。

表 3-2 各种垫层的承载力

施工方法	换填材料类别	压实系数 $\lambda_c$	承载力特征值 $f_{ak}$ (kPa)
碾压、振密 或重锤夯实	碎石、卵石	0.94~0.97	200~300
	砂夹石（其中碎石、卵石占全重的 30%~50%）		200~250
	土夹石（其中碎石、卵石占全重的 30%~50%）		150~200
	中砂、粗砂、砾砂、角砾、圆砾、石屑		150~200
	粉质粘土		130~180
	灰土	0.95	200~250
	粉煤灰	0.90~0.95	120~150
	石屑		120~150
	矿渣		200~300

注：1 压实系数  $\lambda_c$  为土的控制干密度  $\rho_d$  与最大干密度  $\rho_{d\max}$  的比值；土的最大干密度宜采用击实试验确定，碎石或卵石的最大干密度可取  $2.0\sim 2.2\text{t/m}^3$ ；

2 当采用轻型击实试验时，压实系数  $\lambda_c$  宜取高值，采用重型击实试验时，压实系数  $\lambda_c$  可取低值；

3 矿渣垫层的压实指标为最后两遍压实的压陷差小于 2mm；

4 压实系数小的垫层，承载力特征值取低值，反之取高值；

5 原状矿渣垫层取低值，分级矿渣或混合矿渣垫层取高值。

#### 3.4.4 沉降计算

对于垫层下存在软弱下卧层的建(构)筑物，在进行地基变形计算时应考虑邻近基础对软弱下卧层顶面应力叠加的影响。当超出原地面标高的垫层或换填材料的重度高于天然土层重度时，宜早换填，并应考虑其附加的荷载对建(构)筑物及邻近建(构)筑物的影响。

垫层地基的变形由垫层自身变形和下卧层变形组成。粗粒换填材料的垫层在满足本节前面的条件下，在施工期间垫层自身的压缩变形已基本完成，且量值很小，垫层地基的变形可仅考虑其下卧层的变形。但对于细粒材料的尤其是厚度较大的换填垫层或对沉降要求严格的建(构)筑物，应计算垫层自身的变形，有关垫层的模量应根据试验或当地经验确定。在无试验资料或经验时，可参照表 3-3 选用。

表 3-3 垫层模量

(单位: MPa)