

2.1

换填垫层法



2.1.1换填垫层法的概念与应用



换填垫层法 (cushion) 也称换填法 , 是将基础下一定深度范围内的软弱土层全部或部分挖除 , 然后分层回填砂、碎石、素土、灰土、粉煤灰、高炉干渣等强度较大 , 性能稳定且无侵蚀性的材料 , 并分层夯实 (或振实) 至要求的密实度(compactness)。换填法也包括低洼地域筑高 (平整场地) 或堆填筑高 (道路路基) 。



2.1.1换填垫层法的概念与应用



当软弱地基(soft clay ground)的承载力(bearing capacity)和变形(deformation)不能满足建筑物要求,且软弱土层的厚度又不很大时,换填垫层法是一种较为经济、简单的软土地基浅层处理方法。根据不同的回填材料,可分为砂垫层、碎石垫层、素土或灰土垫层、粉煤灰垫层及煤渣垫层等。换填垫层法可就地取材,施工方便、机械设备简单、工期短、造价低。

2.1.2换填垫层法的使用范围



换填垫层法的处理深度常控制在3~5 m。如换填垫层太薄,其作用不甚明显,因此换填垫层的厚度不宜小于0.5 m,也不宜大于3 m。换填法各种垫层的适用范围见表2.1。

表 2.1 各种垫层的适用范围

垫层种类	适用范围
砂垫层(碎石、沙砾)	中、小型建设工程的滨、塘、沟等局部处理;软弱土和水下黄土处理(不适用于湿陷性黄土);也可有条件用于膨胀土地基
素土垫层	中小型工程,大面积回填,湿陷性黄土
灰土垫层	中小型工程,膨胀土,尤其湿陷性黄土
粉煤灰垫层	厂房、机场、港区路线和堆场等大、中小型大面积填筑
干渣垫层	中小型建筑工程,地坪、堆场等大面积地基处理和场地平整;铁路、道路路基处理

2.1.3换填垫层法的加固机理



换填垫层处理软土地基，其加固机理和作用主要体现在以下几个方面。

- ①提高浅层地基承载力。
- ②减少地基的变形量。
- ③加速软土层的排水固结。
- ④防止土的冻胀。
- ⑤消除地基土的湿陷性、胀缩性或冻胀性。

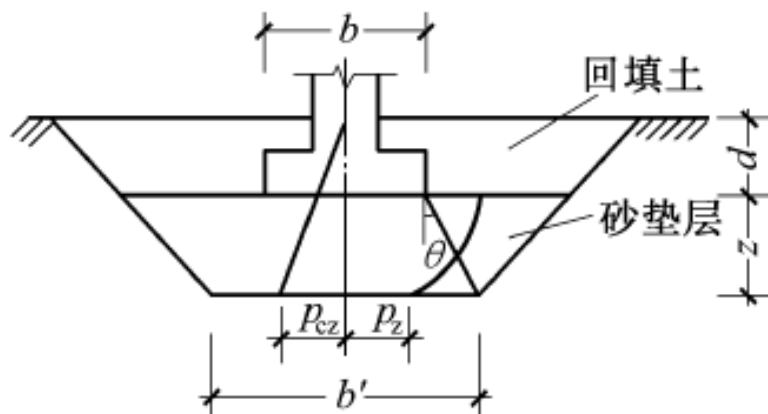
2.1.4换填垫层法的设计计算



1.垫层的厚度确定

如图2.1所示，垫层厚度 z 应根据需置换软弱土层的深度或下卧土层的承载力确定，并符合下式要求：

式中 p_z ——
(kPa) ;
 p_{cz} ——
 f_{az} ——



加压力值

$\bar{\sigma}$ (kPa) 。

图 2.1 垫层内应力分布

2.1.4换填垫层法的设计计算



垫层底面处的附加压力设计值 p_z 可按压力扩散角 θ 进行简化计算：

①条形基础： $p_z = b(pk - p_c) / (b + 2z \tan \theta)$

②矩形基础：

$$p_z = bl(pk - p_c) / (b + 2z \tan \theta) + (l + 2z \tan \theta)$$

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 ——基础底面下垫层厚度（m）；

θ ——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2.2选用。

2.1.4换填垫层法的设计计算



表 2.2 土和矿石材料压力扩散角 $\theta(^{\circ})$

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

注:1. 当 $z/b < 0.25$ 时,除灰土取 $\theta = 28^{\circ}$ 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, θ 值可内插求得。

3. 土工合成材料加筋垫层其压力扩散角宜由现场荷载试验确定。

2.1.4换填垫层法的设计计算



2.垫层的宽度确定

垫层底面的宽度应以满足基础底面应力扩散和防止垫层向两侧挤出为原则，可根据当地经验由下式确定：

$$b' \geq b + 2z \tan \theta$$

式中 b' ——垫层底面宽度（m）；

θ ——压力扩散角（°），可按表2.2选取，当 $z / b < 0.25$ 时，仍按 $z / b = 0.25$ 取值。

2.1.4换填垫层法的设计计算



3. 垫层承载力的确定

垫层承载力宜通过现场荷载试验确定。当无试验资料时，可按表2.3选用，并应进行下卧层承载力验算。

表 2.3 各种垫层的承载力

施工方法	换填材料类别	压实系数 λ_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、圆砾、角砾		150~200
	粉质黏土		130~180
	灰土	0.95	200~250
	粉煤灰	0.90~0.95	120~150

注:①压实系数 λ_c 为土控制干密度 ρ_d 与最大干密度 ρ_{dmax} 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 $(2.0\sim 2.2)\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

②采用轻型击实试验时,压实系数 λ_c 宜取高值;采用重型击实试验时,压实系数 λ_c 宜取低值。重锤夯实土的承载力标准值取低值,灰土取高值。

③矿渣垫层的压实指标为最后两遍压实的压陷差小于 2 mm。

2.1.4换填垫层法的设计计算



4 . 垫层材料的选用

(1) 砂石(gravel)

砂石垫层材料宜选用碎石屑(粒径小于2 mm的部分)物残体、垃圾等杂质,其径小于0.075 mm的部分的碎石或卵石。砂石的量不得选用砂石等透水材料



或石
含植
粉(粒
30%
也基,

2.1.4换填垫层法的设计计算



含有冻土或膨胀土。当含有



2.1.4换填垫层法的设计计算



(4) 粉煤灰

粉煤灰可用于道路、堆场以及小型建筑垫层上宜覆土0.3~0.5 m。粉煤灰垫层应确定其性能及适用条件。作为建筑物垫层应满足标准的要求。粉煤灰垫层中的金属含量填筑粉煤灰时应考虑对地下水和土



2.1.4换填垫层法的设计计算



(5) 矿渣

垫层矿渣是指高炉重矿渣，可分为分级矿渣、混合矿渣及原状矿渣。矿渣垫层主要用于堆场、道路和地坪，也可用于小型建（构）筑物地基。

矿渣的松散重度不小于 11 kN/m^3 。设计、施工前必须对选用的矿渣进行规定后方可使用。作为建筑物垫层，易受酸、碱影响的基础或地下管沟，应考虑对地下水和土壤的环境影响。



2.1.4换填垫层法的设计计算



(6) 其他工业废渣

在有可靠试验结果或成功工程经验时，对质地坚硬、性能稳定、无腐蚀性和放射性危害的工业废渣等亦可用于填筑换填垫层。工业废渣的粒径、级配和施工工艺等应通过试验确定。

(7) 土工合成材料

由分层铺设的土工合成材料与地基土构成加筋垫层。土工合成材料的品种、性能及填料的土类应根据工程特性和地基土条件，按照《土工合成材料应用技术规范》(GB 50290—1998)的要求，通过设计并进行现场试验后确定。

2.1.5换填垫层法的施工技术



1. 机械碾压法

机械碾压法是采用各种压实机械来压实地基土的密实方法。此法常用于基坑底面积宽大、开挖土方量较大的工程。

机械碾压法的施工设备有平碾、振动碾、羊足碾、振动压实机、蛙式夯、插入式振动器和平板振动器等。一般粉质黏土、灰土宜采用平碾、振动碾或羊足碾；中小型工程也可采用蛙式夯、柴油夯；砂石等宜用振动碾；粉煤灰宜采用平碾、振动碾、平板振动器、蛙式夯；矿渣宜采用平板振动器或平碾，也可采用振动碾。

2.1.5换填垫层法的施工技术



工程实践中，对垫层碾压质量的检验，要求获得填土最大干密度。其关键在于施工时控制每层的铺设厚度和最优含水量，其最大干密度和最优含水量宜采用击实试验确定。所有施工参数(如施工机械、铺填厚度、碾压遍数与填筑含水量等)都必须由工地试验确定，对现场试验应以压实系数 λ_c 与施工含水量进行控制。不具备试验条件的场合，可按表2.4选用垫层的每层铺填厚度及压实遍数。

表 2.4 垫层的每层铺填厚度及压实遍数

施工设备	每层铺填厚度/mm	压实遍数
平碾	200~300	6~8
羊足碾 516	200~350	8~16
蛙式夯 200 kg	200~250	3~4
振动碾 815	600~1 300	6~8
振动压力机 2 t, 振动力 98 kN	1 200~1 500	1~0
插入式振动器	200~500	—
平板振动器	150~250	—

2.1.5换填垫层法的施工技术



2. 重锤夯实法

重锤夯实法是用起重机将夯锤提升到某一高度，然后自由落锤，不断重

复夯击以加固地基。重锤夯实法适用于处理地下水位距地表0.5m以上、

稍湿的黏性土、砂土、湿陷性

主要设备为起重机械、夯锤、

当直接用钢丝绳悬吊夯锤时，

采用脱钩夯锤时，起重能力应



2.1.5换填垫层法的施工技术



夯锤宜采用圆台形，如图2.2所示。锤重宜大于2 t，锤底面单位静压力宜为15 ~ 20 kPa，夯锤落距宜大于4 m。垫层施工中，应进行现场试验，确定符合夯击密实度要求的最少夯击遍数、最后下沉量(最后两击的平均下沉量)、总下沉量及有效夯实深度等。黏性土、粉土及湿陷性黄土最后下沉量不超过10 ~ 20 mm，砂土不超过5 ~ 10 mm时应停止夯击。施工时夯击遍数应比试夯时确定的最少夯击遍数增加1或2遍。实践经验表明，夯实的有效影响深度约为锤底直径的1倍。

2.1.5换填垫层法的施工技术

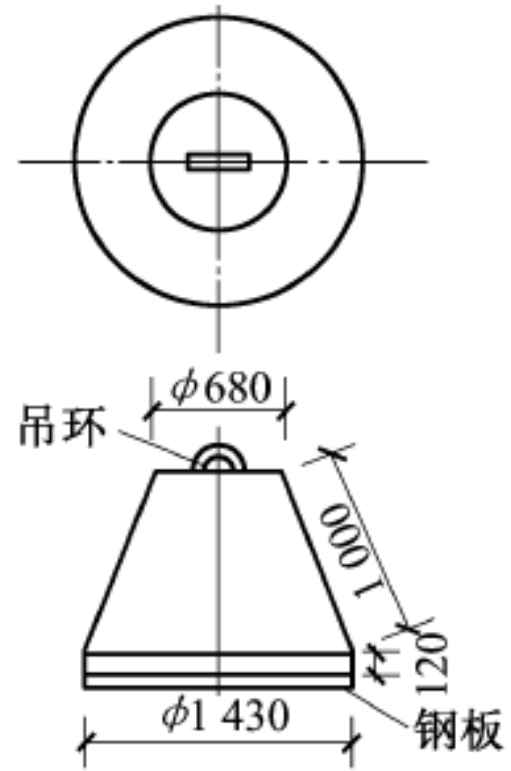


图 2.2 夯锤

2.1.5换填垫层法的施工技术



重锤夯实法施工要点如下。

- ①重锤夯实施工前应在现场试夯，试夯面积不小于 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ ，试夯层数不少于2层。
- ②夯击前应检查坑(槽)中土的含水量，并将土的含水量进行处理。
- ③在条基或大面积基坑内夯击时，第一遍宜一夯挨一夯进行，第二遍应在第一遍的间隙点夯击，如此反复，最后两遍应一夯套半夯；在独立柱基基坑内，宜采用先外后里或先周围后中间的顺序进行夯打；当基坑底面标高不同时，应先深后浅逐层夯实。
- ④注意边坡稳定及夯击对邻近建筑物的影响，必要时应采取有效措施。

2.1.5换填垫层法的施工技术



3 . 平板振动法

平板振动法是使用振动压实机来处理无黏性土或黏粒含量少、透水性较好的松散杂填土地基的一种方法。



2.1.5换填垫层法的施工技术



如图2.3所示，振动压实机的工作原理是由电动机带动两个偏心块以相同速度反向转动，由此产生较大的垂直振动力。这种振动机的频率为1 160~1 180 r/min，振幅为3.5 mm，激振力可达50~100 kN。该振动压实机可通过操纵使之前后移动或转弯。

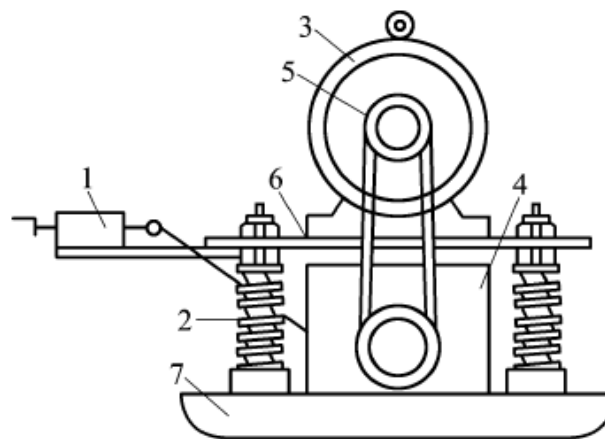


图 2.3 振动压实机示意

1—操纵机构；2—弹簧减振器；3—电动机；4—振动器；
5—振动机槽轮；6—减振架；7—振动夯板

2.1.5换填垫层法的施工技术



振动压实的效果与填土成分、振动时间等因素有关，但振动时间超过某一值后，振动引起的下沉基本稳定，再继续振动压实作用已不明显。为此，需要施工前进行试振，得出稳定下沉量和时间的关系。一般，对建筑垃圾，振动时间在1 min以上；对含炉灰等细粒填土，为3~5 min，有效振实深度为1.2~1.5 m。施工时若地下水位太高，将影响振实效果。

2.1.5换填垫层法的施工技术



4. 砂石垫层施工

砂石垫层的施工要点如下。

①砂石垫层施工宜采用振动碾和振动压实机等机具，其压实效果、分层铺填厚度、压实遍数、最优含水量等，应根据具体施工方法及施工机具等通过现场试验确定。当无试验资料时，可参考表2.4选取。

②对于砂石料可按经验控制适宜的施工含水量，用平板式振动器时可取15%~20%，用平碾或蛙式夯时可取8%~12%，用插入式振动器时，宜为饱和的碎石、卵石。

③垫层底部存在古井、古墓、洞穴、旧基础、暗塘等软硬不均的部位时，应先予清理，再用砂石或好土逐层回填夯实，经检查合格后，再铺填垫层。

2.1.5换填垫层法的施工技术



④严禁扰动垫层下卧的淤泥和淤泥质土层，防止践踏、受冻、浸泡或暴晒过久。如淤泥和淤泥质土层厚度过小，可先在软弱土层面上堆填块石、片石等，然后将其压入以置换或挤出软弱土。

⑤砂石垫层的底面宜铺设在同一标高上。若深度不同，基底应挖成阶梯或斜坡搭接，并按先浅后深的顺序施工，搭接处应夯压密实。垫层竣工后，应及时施工基础，回填基坑。

⑥地下水高于基坑底面时，宜采取排降水措施，并注意边坡稳定，以防坍土混入垫层中。

2.1.5换填垫层法的施工技术



5. 土垫层施工

土垫层的施工要点如下。

- ①素土及灰土料垫层的施工，其施工含水量应控制在 $w_{op} \pm 2\%$ 的范围内。 w_{op} 可通过室内击实试验确定，或根据当地经验取用。
- ②土垫层施工时，不得在柱基、墙角及承重窗间墙下接缝，上下两层的缝距不得小于0.5 m，接缝处应夯压密实，灰土、二灰土应拌和均匀并应当日铺填压实，灰土压实后3天内不得受水浸泡，冬季应防冻。
- ③其他要求参见砂垫层的施工要点。

2.1.6工程实例



本工程某局部砂石地基，基础底面积和埋深如图2.4所示。 $b \times l = 4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ，埋深 $d = 3 \text{ m}$ ，作用基础顶面竖向荷载 $F = 10\,000 \text{ kN}$ ，土层 $0 \sim 8 \text{ m}$ 皆为细砂，重度为 $17 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，地基承载力不能满足设计要求。现采用换填垫层法进行地基处理，填料为碎石，重度为 $19.5 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，换填垫层厚度为 2 m ，分层压实，使土的内摩擦角达到 30° 。下卧层承载力是否满足要求？

2.1.6 工程实例



解(1)垫层底面处的附加压力值

$$p_k = F + GA$$

$$= 10\,000 \text{ kN} + 4 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 20 \text{ kN/m}^3$$

$$= 560 \text{ kPa}$$

(2)下卧层承载力验算

①由碎石垫层 $\varphi_k = 36^\circ$ ，查《建筑地基基础设计规范》表5.2.5，得承载力系数：

$M_b = 4.2$ ， $M_d = 8.25$ ，则有

$$f_a = M_b \gamma_b + M_d \gamma_m d$$

$$= 4.2 \times 19.5 \text{ kN/m}^3 \times 4 \text{ m} + 8.25 \times 17 \text{ kN/m}^3 \times 3 \text{ m}$$

$$\approx 748.4 \text{ kPa} > 560 \text{ kPa}$$

2.1.6 工程实例



② 下卧层承载力验算：查表压力扩散角 $\theta=30^\circ$ ，有：

$$\begin{aligned} p_{cz} &= 19.5 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} + 17 \text{ kN/m}^3 \times 3 \text{ m} \\ &= 90 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_z &= bl(pk - pc)(b + 2z \tan \theta) + (l + 2z \tan \theta) \\ &= 4 \times 5 \times (560 - 51)(4 + 2 \times 2 \times \tan 30^\circ) + (5 + 2 \times 2 \times \tan 30^\circ) \\ &= 220.8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

由于 $\eta b = 2$

$$\gamma_m = (17 \times 3 + 19.5 \times 2) \text{ kN/m}^3 = 18 \text{ kN/m}^3,$$

$\eta d = 3$ ，则有：

$$\begin{aligned} f_{az} &= f_{ak} + \eta b \gamma (b - 3) + \eta d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 190.7 \text{ kPa} + 2 \times 17 \times (4 - 3) \text{ kPa} + 3 \times 18 \times (5 - 0.5) \text{ kPa} = 467.7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

2.1.6工程实例



$$p_z + p_{cz} = 220.8 \text{ kPa} + 90 \text{ kPa}$$

$$= 310.8 \text{ kPa} < f_{az}$$

$$= 467.7 \text{ kPa}$$

故下卧层承载力满足要求。