

换填垫层的经济性与安全性研究

胡德华, 常玉峰, 贾 沛, 雷克江, 邱丹丹

(武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在外荷载作用下, 换填垫层法处理的软土地基不仅受到周边软土体侧向约束作用, 而且具有明显的双层地基应力分布特征, 因此当换填垫层的厚度超过基础宽度的0.5倍时, 采用传统的扩散角法设计, 明显偏于保守。本文从上述两方面着手, 结合工程实例, 论述换填垫层设计的经济性与安全性。

关键词: 换填垫层; 侧向约束; 双层地基; 变形模量; 安全性与经济性

中图分类号: TU427.2

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.01.021

1 换填垫层设计中的经济性问题

换填垫层是将建筑物基底的软土挖去, 代以人工回填的砂、碎石、灰土等作为持力层。因高压缩性的软土被低压缩性的垫层代换, 能大大减少基础的沉降量, 因此合理确定垫层厚度是垫层设计的关键。垫层厚度 z 应根据下卧层的承载力确定, 并符合(1)式要求^[1]:

$$p_z \mid p_{cz} \leq f_{az} \quad (1)$$

其中: p_z 为相应于荷载标准组合时垫层底面处附加压力值(kPa); p_{cz} 为垫层底面处土的自重压力(kPa); f_{az} 为垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值(kPa), p_z 按(2)式计算:

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b \mid 2z \tan \theta} \quad (2)$$

p_c 为基础底面处土的自重压力值; p_k 为荷载标准组合时基础底面处的平均压力值; θ 为垫层扩散角, 对于中密砂垫层, 当 $z/b \geq 0.5$ 时, $\theta = 30^\circ$; 当 $z/b < 0.25$ 时, 除灰土外, $\theta = 0^\circ$ 。

按上述扩散角法设计换填垫层虽比较方便, 但由于侧面软土客观存在的约束作用以及垫层内实际应力分布状况均未考虑, 因此结果偏于安全, 当垫层厚度较大时, 将造成一定的浪费。

2 换填垫层强度取值与其侧面软土约束关系分析

分析换填垫层强度取值与侧土约束关系之前假定:**a.** 垫层与侧面土体在界面处破坏符合摩尔—库仑破坏准则;**b.** 垫层侧面软土体是均质、连续、各向同性半无限直线变形体;**c.** 为便于约束关

系分析, 假定垫层为无粘性土, 即内聚力 $c=0$ 。

土的强度破坏通常是指剪切破坏^[2]。如图1, 当换填垫层界面处土中某点 P (深度为 z')应力等于土的抗剪强度时的临界状态时称为极限平衡状态。由土的平面应力理论知:

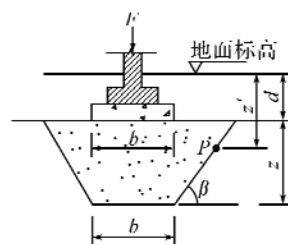


图1 换填垫层剖面

Fig. 1 The section of cushion

$$\sigma_x = (\sigma_z + \sigma_{cz}) \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (3)$$

对于中密垫层砂土, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 代入(3)式得:

$$\sigma_x = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_{cz}) \quad (4)$$

设换填垫层基坑坡角为 β , 在接触界面处作用于软土界面处的正应力 σ_s 为:

$$\sigma_s = (\sigma_z + \sigma_{cz}) \cos \beta + \sigma_x \sin \beta \quad (5a)$$

当界面处于极限平衡状态时, 将(4)式代入(5a)式经整理得界面处正应力

$$\sigma_s = (\sigma_z + \sigma_{cz}) (\cos \beta + \frac{1}{3} \sin \beta) \quad (5b)$$

对(5b)式求最大值, 令: $(\sigma_s)'|_{\beta} = 0$, 得 $\beta \approx 18.4^\circ$ 。

即当换填垫层坡角满足 $\beta = 18.4^\circ$ 时, σ_s 最大, 此时 $\sin \beta = 0.3162$, $\cos \beta = 0.9487$ 。

$$\sigma_s \approx 1.054(\sigma_z \mid \sigma_{cz}) \quad (6)$$

设垫层与软土界面点 P 处软土强度为 f_s' ; 为

保证侧土安全,该点正应力 σ_z' 必须满足:

$$\sigma_z' \leq f_s' \quad (7)$$

$$\text{其中: } \sigma_z' = 1.054(\sigma_z' + \sigma_{\alpha'}) \quad (8)$$

对于淤泥质软土,当覆盖杂填土时, $r_0 \approx 17 \text{ kN/m}^3$, $\eta_d = 1.1$, $\sigma_{\alpha'} = r_0 z'$,当软土体与垫层界面在该点处于极限平衡状态时,该点强度按各向同性考虑,即: $f_s' = f_a = f_{ak} + r_0 \eta_d (z' - 0.5)$;将 f_s' 及(8)式代入(7)式并整理得:

$$f_{ak} \geq 1.054\sigma_z' - 0.05\sigma_{\alpha'} + 9.35 \quad (9)$$

式(7)~(9)中: f_a 为微元体 P 处基坑侧面软土修正后的地基承载力特征值; f_{ak} 为基坑侧面软土承载力特征值。

当基底垫层塑性区最大开展深度为 $b/4$ 时^[2],即使垫层有足够的安全度,保证稳定性,又能充分发挥垫层的承载力。在基础外侧,当 $z' - d = 0.25b$ 时,可近似算得: $\sigma_z' \approx 0.35p_0$,考虑到双层地基应力分布特点:地基中点应力相应减少,边缘应力相应增大,应力分布总体相对均匀因素,取 $\sigma_z' \approx 0.35p_0 \times 1.2$,即当 f_{ak} 满足式(10)时

$$f_{ak} \geq 0.44p_0 + 9.35 - 0.05\sigma_{\alpha'} \quad (10a)$$

$$\text{或 } p_0 \leq 2.27(f_{ak} - 9.35 + 0.05\sigma_{\alpha'}) \quad (10b)$$

基坑侧面软土体安全;否则就应加大基础宽度,降低 p_0 值,直至满足(10)式为止。

3 双层地基应力分布的特点

3.1 条形均布荷载下双层地基界面中点 M 应力系数 K_E

换填垫层地基属于典型的双层地基,与均质土层应力分布特点相比,底部应力将明显扩散,最大应力将会减小^[2]。如图2是条形均布荷载下双层地基界面中点 M ,其应力系数 K_E 如表1^[3]:

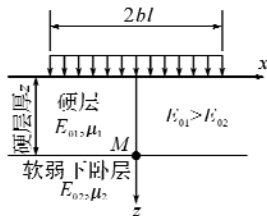


图2 双层地基中点

Fig. 2 The midpoint of double-layer

表1 条形基础下双层地基中点应力系数 K_E

Table 1 The stress coefficient of the midpoint of double-layer foundation under strip foundation

z/bl	$n=1.0$	$n=5.0$	$n=10$	$n=15$	$n \rightarrow \infty$
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.5	1.02	0.95	0.87	0.82	0.82
1.0	0.90	0.69	0.58	0.52	0.49
2.0	0.60	0.41	0.33	0.29	0.27
3.3	0.39	0.26	0.20	0.18	0.15
5.0	0.27	0.17	0.16	0.12	0.10

$$\text{表1中 } v \text{ 为: } v = \frac{E_{01}}{E_{02}} \times \frac{1 - \mu_2^2}{1 - \mu_1^2}.$$

式中 E_{01} 、 E_{02} 为分别为持力层与下卧层变形模量; μ_1 、 μ_2 分别为持力层与下卧层的泊松比, $v=1$, 相当于均质土状况; $v>1$ 时为双层地基, 从表1中可以看出: v 越大, 应扩散越明显。当 $z/bl=1 \sim 2$, $v \rightarrow \infty$ 时应力系数 K_E 约为 $v=10$ 的 0.83 倍。

3.2 矩形均布荷载下双层地基界面中点 M 应力系数 K_E

与均质地基应力分布特点类似, 矩形荷载作用下双层地基界面中点 M 应力系数也明显小于条形荷载下双层地基界面中点 M 应力系数, 限于试验条件, 仅以 $V \rightarrow \infty$ 、方形均布荷载作用下双层地基界面中点 M 应力系数^[3] K_E 为例来说明, 详见表2(b 为方形基础宽度, 其他符号意义同上)。

表2 方形基础下双层地基应力系数 $K_E (v \rightarrow \infty)$

Table 2 The stress coefficient of the midpoint of double-layer foundation under square foundation

z/b	$b=0.4$	$b=0.6$	$b=0.8$	$b=1.0$	$b=1.2$	$b=1.6$	$b=2.0$
0.5	0.45	0.40	0.36	0.34	0.32	0.31	0.28
1.0	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09
1.5	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	—

比较表1、2 可以看出: 双层地基应力系数 K_E 具有一定的尺寸效应, 尺寸越大, 应力系数越小; 当 $z=b$, 相同时, 方形荷载下双层地基应力系数 K_E 仅为条形和在下 K_E 的 $1/3 \sim 1/2$ 。

4 换土垫层合理设计分析

综上所述, 合理进行换土垫层设计, 应按以下步骤考虑:

a. 换填垫层承载力: 根据经验初步确定基础埋深与换填垫层厚度, 并按式(10)初步确定换填垫层顶面 p_0 值; 与换填垫层自身的承载力(修正后的承载力特征值减除其上部土体自重)相比较, 取两者较小者为换填垫层承载力;

b. 换填垫层自身的承载力特征值, 这主要通过施工质量与检测来保证; 侧向约束保证是关键问题, 施工时严禁扰动垫层底面与侧面软弱土层, 在碎石或卵石垫层底以及垫层侧面设置 200 厚(宽)的砂垫层或铺一层土工织物, 以防软弱土层表面局部破坏;

c. 当换填垫层分层夯实的压实系数达到 0.97 时, 若软土 $E_s \leq 3 \text{ MPa}$, 则 $E_{01}/E_{02} > 10$, 对应于上表取 $v=10.0$ 应力系数值计算, 并据此及(1)式确定换填垫层的厚度;

d. 根据经验, 换填垫层底宽可与基础宽度一

致,顶宽按当地开挖放坡经验来确定;当垫层厚度不小于基础宽度时,对于条形基础 $K_E \leq 0.33$,近70%的压缩层由垫层承担,对于独立基础, $K_E \leq 0.18$,超过80%的压缩层由垫层承担,对于荷载不大的工业与民用建筑(即丙级建筑),可不进行沉降验算;由于换填垫层坡角一般远大于 18.4° ,因此垫层侧面软土安全,并有侧限作用,即按步骤a确定垫层承载力时,安全性能得到保证。

5 工程实例

武汉市某环卫所办公楼,砖混结构,地表层杂填土厚0.8 m,重度 16 kN/m^3 ,下层为厚约10 m淤泥质土,重度 $r = 17 \text{ kN/m}^3$,承载力 $f_{ak} = 70 \text{ kPa}$, $E_s = 2.5 \text{ MPa}$,承重墙传至 ± 0.00 标高的荷载标准组合值为 157 kN/m ,传至独立柱荷载标准组合值为 354 kN ,确定采用中砂,重度为 $r = 19.5 \text{ kN/m}^3$,承载力标准值 $f_{ak} = 150 \text{ kPa}$ 。

5.1 考虑侧面软土约束,按双层地基应力解法设计(以独立柱基础为例)

5.1.1 基础设计:

a. 考虑侧面软土约束,按式(10)初步确定换填垫层强度取值:

根据经验初步确定基础埋深为0.8 m,垫层厚度为1.2 m;

$$z' = 0.8 + 1.2/4 = 1.1 \text{ m}, \sigma_{cz'} = 0.8 \times 16 + 0.3 \times 19.5 = 18.65 \text{ kPa};$$

$$p_0 \leq 2.27(f_{ak} - 9.35 + 0.05\sigma_{cz'}) = 2.27 \times (70 - 9.35 + 0.05 \times 18.65) \approx 139.8 \text{ kPa}$$

b. 换填垫层自身承载力:

查建筑地基基础设计规范 GB50007-2002 表5.2.4,对于基础地下砂垫层 $\eta_d = 4.4$ 。

$$f_a = f_{ak} + \eta_d g_0 (d - 0.5) = 150 + 16 \times 4.4 \times (0.8 - 0.5) = 171 \text{ kPa};$$

因 $f_a - rd = 171 - 0.8 \times 20 = 155 \text{ kPa} > p_0$,故取 $f_a - rd = p_0$ 为换填垫层实际承载力。

c. 基础宽度:

独立柱基础面积: $A = 354/139.8 = 2.53 \text{ m}^2$,取基础尺寸为 $l = b = 1.6 \text{ m}$,基底面积为 $A = 2.56 \text{ m}^2$ 。

$$p_0 = 354/2.56 = 138.3 \text{ kPa}.$$

5.1.2 垫层设计

a. 垫层底宽:同基础宽度一致,独立柱垫层底尺寸为 $l = b = 1.6 \text{ m}$ 。

b. 垫层厚度:换砂垫层变形模量一般在 $30 \sim 45 \text{ MPa}$ 范围^[1],故可取 $v = 10$ 验算垫层厚度:

独立柱基垫层厚 $z = 0.75 b = 1.2 \text{ m}$,用内插法保守计算 $K_E = 0.30$, $p_z = K_E p_0 = 41.5 \text{ kPa}$;

$$p_{cz} = 0.8 \times 16 + 1.2 \times 19.5 = 36.2 \text{ kPa};$$

$$f_{az} = 70 + 1.1 \times \frac{0.8 \times 16 + 1.2 \times 19.5}{0.8 + 1.2} \times (0.8 + 1.2 - 0.5) \approx 99.9 \text{ kPa};$$

$p_z + p_{cz} = 41.5 + 36.2 \approx 77.7 \text{ kPa} < f_{az}$,故其下卧层满足规范要求。

c. 垫层顶宽:当地放坡经验,取 $1:0.25 \sim 1:0.33$,根据开挖土质边坡情况,可取 $1:0.25$,柱基垫层顶部尺寸为: $l = b = 1.6 + 2 \times 0.25 \times 1.2 = 2.2 \text{ m}$,体积为 $V = 4.4 \text{ m}^3$ 。

5.2 按规范扩散角法设计

5.2.1 基础设计:同5.1.1。

5.2.2 垫层设计:

取垫层厚 $z = 1.2 \text{ m}$, $z/b = 0.75 > 0.5$,取 $\theta = 30^\circ$, $p = (354 + 20 \times 0.8 \times 1.6 \times 1.6)/(1.6 \times 1.6) = 154.3 \text{ kPa}$ 。

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

$$\frac{1.6 \times 1.6 \times (154.3 - 12.8)}{(1.6 + 2 \times 1.2 \times \tan 30^\circ)^2} \approx 40.6 \text{ kPa}$$

$p_z + p_{cz} = 40.6 + 36.2 = 76.8 \text{ kPa} < f_{az} = 99.9 \text{ kPa}$,可以

垫层底宽: $b' = 1.6 + 2 \times 1.2 \times \tan 30^\circ \approx 3 \text{ m}$,顶宽: $B = 3 + 2 \times 1.2 \times 0.25 = 3.60 \text{ m}$ 。

垫层体积: $V = 13.1 \text{ m}^3$ 。

比较两种方法结果可以看出,考虑垫层侧面软土约束与双层地基应力分布特征,进行换土垫层设计,对于柱下独立基础,节省工程量66.7%;对于墙下条形基础,同样可以算出节省工程量45%以上^[4]。本工程施工完毕后,经多年观察,无任何异常沉降现象。

6 结 语

换填垫层设计,目前大部分按扩散角法进行,很多教材也以此为例来说明,但垫层侧向软土约束以及基底垫层实际应力分布问题,一直未见国内外同行学者涉及,因此,从根本上说换填垫层设计理论仍不尽完善,特别是当 $z/b > 0.5$ 时,换填工程量将明显增大。本文依据多年软土地基处理经验及双层地基应力数值解在理论上予以初步论述,其目的是为了实现建筑地基处理技术规范总则所要求的:安全适用,技术先进,经济合理。

参考文献:

- [1] JGJ79-2002 建筑地基处理技术规范及条文说明[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:8-9;89-92.

- [2] 徐东强. 土力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2006: 62-63, 139-144, 210-211. 262.
- [3] GB50007-2002 建筑地基基础设计规范及条文说明 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 187-190, 261-262.
- [4] 胡德华, 曹希. 砂垫层设计[J]. 武汉化工学院学报, 2002, 24(4): 56-60.

Research on the economy and security of cushion

HU De-hua, CHANG Yu-feng, JIA Pei, LEI Ke-jiang, QIU Dan-dan

(School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Under the action of the external load, the cushion foundation is affected by lateral restraint from peripheral soft soil. Moreover, it has an obvious characteristic, that is to say, the stress distribution of two-layer foundation. So, it is quite conservative to use the traditional design method of dispersion angle when the thickness of cushion is 0.5 times wider than the width of foundation. The study on economy and security of the cushion design is based on these two aspects and engineering example.

Key words: cushion; sidewise restraint; double-layer foundation; modulus of deformation; economy and security

本文编辑: 龚晓宁



(上接第 69 页)

Study on temperature field and stress and the influence of massive concrete in bridge

XU Xing-jun¹, HUANG Shu-rong²

(1. Fujian Communication Technology College, Fuzhou 350007, China;

2. CCCC First Highway Engineering CO., Ltd, Xiamen 361021, China)

Abstract: The temperature control is the important aspect of quality control for massive concrete in bridge. The paper made simulation analysis and calculates the massive concrete temperature fields and temperature stress in the construction process of cap to Ningbo Yongjiang bridge, had adopted the corresponding temperature control measures, and compared the calculation results with measuring result. Result indicates that the adopted measures had controlled effectively the most increasing temperature and the difference between inside and outside temperatures, which were of certain guidance to the construction of similar concrete works.

Key words: massive concrete; temperature control; temperature field; temperature stress; simulation analysis

本文编辑: 龚晓宁