

土工合成材料加筋地基的设计*

Design of foundation reinforced with geosynthetics

王 钊^{1,2}, 王协群³

(1. 武汉水利电力大学 土木与建筑学院, 湖北 武汉 430072; 2. 清华大学 水利水电系, 北京 100084; 3. 武汉工业大学, 湖北 武汉 430071)

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2000) 06- 0731- 03

作者简介: 王 钊, 男, 1945 年生, 博士, 教授, 博士生导师。

1 引言*

土工合成材料加筋土垫层可以提高软土地基的承载力, 减小建筑物的沉降, 并且具有施工简便、快捷和投资省的优点。80 年代, 加筋地基被用于海堤、路堤和油气罐地基的处理^[1~3], 90 年代初被用于 4~7 层楼房地基的处理^[4]。在地基承载力设计中, 大多采用改进的太沙基公式^[5]或宾奎特(Binquet)公式^[6], 对加筋材料的有效布置范围亦作了大量的模型试验和现场试验, 取得了丰硕的成果。目前存在的问题主要有: ①在加筋土垫层中, 土工合成材料(筋材)的长度和设计拉力如何确定; ②如何正确估计筋材拉力对地基承载力的改善; ③运用地基承载力设计公式时, 怎样考虑压力扩散和埋深修正作用。笔者对以上问题提出一些看法, 从而给出加筋土垫层较完整的设计方法, 并结合湖北省黄石市合兴闸的改建工程, 说明该法的应用。

2 土工合成材料的布置

在加筋土垫层中, 土工合成材料的布置方式对地基承载力有明显影响, 例如, 最靠近基底的第一层筋材布置太深, 滑动面可能发生在筋材上方土中; 又如筋材数目太少或太短, 筋材可能发生拔出破坏。筋材的布置方式可用下列参数描述: 层数 n ; 第一层到基底面距离 Z_1 ; 第 n 层到基底面距离 Z_n 和第 i 层筋材长度 L_i , 见图 1。

地基承载力的改善用承载力比(BCR)表示, 宾奎特(1975)^[7]定义

$$BCR = q/q_0 \quad (1)$$

式中 q_0 为天然地基极限承载力, kPa; q 为加筋地基极限承载力, 其沉降等于天然地基在 q_0 作用下的沉降, kPa。宾奎特完成了 65 组加筋地基的试验, 其后, Guido(1985)^[8], Miyazaki(1992)^[9]和 Ju(1996)^[10]等人对筋材布置也完成了大量试验工作, 总结他们得出的试验规律, 当 $Z_1 \leq 0.67b$, $Z_n \leq 2b$ 时, BCR 值在 2~4, 在此有效布置范围内, BCR 随 n 而增加, 当 $n=4$ 时, BCR 已接

近最大值。对筋材的长度, 试验结果相差较大, 文献[7]认为 $L \leq 9b$, 文献[10]的试验结果表明: $L=6b$, BCR 最大, 但与 $L=4b$ 的 BCR 相比, 改善不大; 试验结果还表明, 如果在砂垫层两端将筋材反包, 则垫层水平长度增大至 $1.5b$ 时, BCR 即增加很少了。文献[8]对方形基础建议 $L=2.5b$ 。Soni(1992)^[11]总结各家试验推荐的筋材长度, 从 $3.39b \sim 7.33b$, 并根据朗肯理论推导出计算长度的公式, 计算结果和试验结果较吻合。

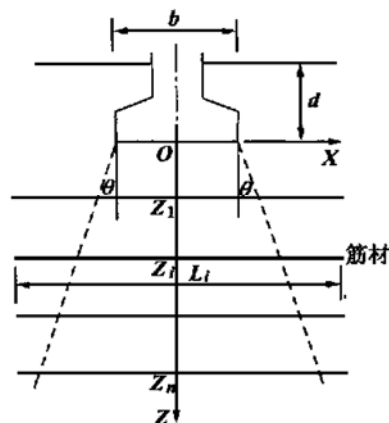


图 1 加筋地基的布置

Fig. 1 Arrangement of reinforcements

从理论上分析, 只有当筋材长度和深度覆盖了整体破坏的完整滑动面范围, BCR 才停止增长。根据 Prandtl-Reissner 地基极限荷载理论可以求得基础两侧完整滑动面总长度 L_u , 在过渡区的滑动面为对数螺旋线, 求深度的极值, 可得滑动面最大深度 D_u 。

$$L_u = b \left[1 + 2 \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \exp \left(\frac{\pi}{2} \tan \varphi \right) \right] \quad (2)$$

$$D_u = \frac{b \cos \varphi}{2 \cos \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \tan \varphi \right] \quad (3)$$

根据式(2)和(3)可求得不同 φ 值对应的 L_u 和 D_u 列于表 1。从表 1 可见, 筋材布置的有效深度($Z_n \leq 2b$)已达到滑动面的深度, 但根据滑动面长度确定筋

材长度,则太长了,不仅用料增加,而且增加了基坑(槽)开挖的宽度。适当短些,损失一些地基承载力可能是恰当的。此外,很多研究^[7,12,13]发现,加筋地基的破坏面并非向基础某侧发展的完整滑动面,而是从基础边缘向下方近似垂直的发展,或与铅直方向形成一定的压力扩散角。Love(1987)^[14]等人发现地基的压力扩散角并不因布置了筋材而增加。故本文建议取没有筋材情况下基底压力扩散线为滑动面,并按两滑动面外侧筋材的抗拔出稳定计算筋材的长度。在计算筋材上摩擦力时,只计算上覆土重引起的正应力,不计基底压力产生的附加应力,则

$$L_i = b + 2Z_i \tan \theta + T_a F_{sp} / [f_p \gamma(d + Z_i)] \quad (4)$$

式中 θ 为压力扩散角,度,可从《建筑地基基础设计规范》GBJ7—89 查得; T_a 为筋材允许抗拉强度, kN/m; F_{sp} 为抗拔出安全系数,可取 $F_{sp} = 2.5$; f_p 为筋材与土的界面摩擦系数,由试验确定,无试验资料时,土工织物可取 $\frac{2}{3} \tan \varphi$, 土工格栅可取 $0.8 \tan \varphi_c$, φ_c 为垫层土的内摩擦角^[15]。

表1 滑动面长度和深度

Table 1 Length and depth of sliding surface

$\varphi/(\circ)$	0	5	10	15	20	25	30	35
$L_u(\times b)$	3.00	3.50	4.14	4.97	6.06	7.53	9.58	12.53
$D_u(\times b)$	0.71	0.79	0.89	1.01	1.16	1.35	1.59	1.90

3 加筋地基的承载力和土工合成材料的设计拉力

在条形基础加筋地基承载力设计公式中,宾奎特公式的依据是布辛尼斯克解,将地基视为均质弹性体;改进的太沙基公式适用于软土表面一层筋材的情况,至少在完整滑动面的宽度和深度范围内为均质材料。因此,严格讲,这两个公式均不能应用于加筋砂垫层的设计。

在加筋地基中,土和筋材的相对位移(或位移趋势)形成了土与筋材界面的摩擦力,从而在筋材中产生拉力。筋材拉力对地基承载力的贡献包括以下几个方面:一是拉力向上的分力,二是拉力对基土隆起的约束作用,相当于旁侧荷载,这两个作用出现在改进的太沙基公式中,其中第二个作用仅限于基础外侧假想圆的一半,并未作用于整个滑动面范围,严格讲不能视为旁侧荷载,该项应去掉。第三种作用是筋材拉力反作用力所起的侧限作用^[12]。笔者建议筋材拉力的侧限作用,可根据极限平衡条件计算,具体作法是将 n 层筋材设计拉力的水平分力除以 Z_n , 得到水平限制应力增量 $\Delta\sigma_3 = nT \cdot \cos \alpha / Z_n$, α 为筋材拉力与水平面夹角,用极限平衡条件求 $\Delta\sigma_3$ 对应的竖向应力增量 $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_1$ 即

为提高的极限承载力。再考虑到筋材拉力的向上分力,则筋材提高的地基承载力设计值 γ 可用式(5)表示:

$$\gamma = \frac{nT}{K} \left[\frac{2 \sin \alpha}{b + 2Z_n \tan \theta} + \frac{\cos \alpha}{Z_n} \cdot \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \right] \quad (5)$$

式中 K 为地基承载力安全系数, $K = 2.0 \sim 3.0$ 。

从式(5)可见 γ 取决于 T 和 α 的大小,对土工合成材料设计拉力 T 有三种不同的选择:极限抗拉强度,允许抗拉强度和达一定应变时的拉力。根据《土工合成材料应用技术规范》GB50290—98,土工合成材料允许抗拉强度的安全系数大于等于 2.5,该值和地基承载力的安全系数 K 以及抗拔出的安全系数 F_{sp} 相近,为避免安全储备的重复设置,建议式(5)中 T 取极限抗拉强度,同时式(4)中 $T_a F_{sp}$ 以 T 代替,即

$$L_i = b + 2Z_n \tan \theta + T / [f_p \gamma(d + Z_i)] \quad (6)$$

对拉力方向 α 的取值存在不同意见,文献[7]取 $\alpha = 90^\circ$,王钊等(1996)^[16]取 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$,赵柄新,陈镇威(1989)^[17]取 $\alpha = 10^\circ$ 等,文献[9]分析 α 的影响因素,指出 α 和 b 及沉降 s 有关,当 b 或 s 增加时, α 增大。文献[10]发现,当 s 增加时, α 逐渐增加,直到 α 等于 70° 。笔者仍建议取 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$,即筋材变形后沿朗肯主动滑动面方向。

严格讲,水平限制应力 $\Delta\sigma_3$ 的计算和用极限平衡条件计算提高的极限承载力,都要求筋材的长度和布置深度覆盖完整滑动面范围。而大多数工程问题达不到这一要求,应对式(5)修正,式中第二项的 Z_n 取滑动面深度 D_u ,参见表1或式(3);而 φ 值取原地基土的内摩擦角。

$$\gamma = \frac{nT}{K} \left[\frac{2 \sin(45^\circ + \varphi/2)}{b + 2Z_n \tan \theta} + \frac{\cos(45^\circ + \varphi/2)}{D_u} \cdot \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \right] \quad (7)$$

4 加筋地基的设计

从式(7)可以看出,一层筋材提高的地基承载力是很小的,正确的布置方式是采用多层筋材,形成加筋土(砂)垫层。土工合成材料加筋土垫层属于换土垫层的范畴,在承载力设计中,必须考虑垫层的压力扩散作用和垫层下软土因埋深修正而提高的承载力,将其叠加于 γ 即得到加筋土垫层增加的地基承载力设计值 γ_R 。

$$\gamma_R = \eta_d \gamma(d + Z_n - 0.5) + p \frac{2Z_n \tan \theta}{b + 2Z_n \tan \theta} + \gamma \quad (8)$$

式中 η_d 为基础埋深的地基承载力修正系数; p 为基底压力设计值, kPa。

加筋土(砂)垫层地基承载力设计公式可写成

$$p - f_k \leq \gamma_R \quad (9)$$

式中 f_k 为垫层下软土地基承载力标准值, kPa。

土工合成材料的布置深度沿用试验结果: $Z_1 \leq 0.67b$ 和 $Z_n \leq 2b$, 而长度用式(6)确定。对于需要进行变形验算的建筑物还应作变形计算。

5 工程实例

湖北省黄石市合兴闸始建于1876年,1956年曾经改建,闸基座落在10~18 m厚的淤泥质土层上,其下为粉土。由于地基未作处理,加之闸室结构严重老化,发生裂缝变形,成为黄石市长江干堤上重大隐患。根据《黄石市城市防洪规划》和初步设计,决定重建该闸(二级建筑物),拟在闸室下采用外径50 cm,长10 m的桩,共93根处理地基,后改为土工格栅加筋砂垫层。笔者用本文提出的方法进行了设计计算。

合兴闸基底宽 $b = 5$ m, 基底压力设计值 $p = 280$ kPa, 埋深 $d = 3.37$ m, 淤泥质土 $f_k = 100$ kPa, $\gamma = 18.4$ kN/m³, $c = 40$ kPa, $\varphi = 16^\circ$ 。拟用三层土工格栅加筋闸基, $Z_1 = 0.6$ m, $Z_3 = 1.6$ m, 筋材间距0.5 m, 砂垫层内摩擦角 $\varphi_c = 33^\circ$ 。

从式(9)计算得 $\gamma_R = 180$ kPa, 查得式(8)中, $\eta_1 = 1.1$, $\theta = 25^\circ$, 计算埋深修正增加的承载力为90.47 kPa, 压力扩散增加的承载力为64.36 kPa, 需筋材拉力提供的承载力仅为 $\gamma = 25.17$ kPa, 式(7)中, $\varphi = 16^\circ$, 从表1或式(3)得 $D_u = 5.2$ m, 计算得 $T = 46.61$ kN/m, 其中拉力向上分力和侧限应力提高的地基承载力设计值分别为13.76, 11.41 kPa。将 $T = 46.61$ kN/m代入式(6), 取 $f_p = 0.8 \tan \varphi_c$, 计算得从上向下三层格栅长度分别为6.79, 7.12和7.47 m。设计采用极限抗拉强度为50 kN/m的土工格栅, 等长布置, 长度为7.50 m。

加筋砂垫层于1999年1月竣工, 施工期仅一个月。合兴闸竣工后, 闸室稳定, 在1999年防洪中发挥了作用。

6 结 语

以均质地基为前提的宾奎特法和改进的太沙基法, 原则上不适用于加筋砂垫层的设计; 将筋材拉力的水平分力除以极限平衡区深度就得到筋材的水平限制应力, 根据极限平衡条件可求得相应增加的极限地基承载力; 土工合成材料的作用是拉力沿水平和铅直两个方向分力作用之和, 其设计拉力应和极限抗拉强度相比较, 以免安全系数的重复设置; 土工合成材料加筋砂垫层提高的地基承载力还必须考虑压力扩散作用和埋深修正值; 土工合成材料布置的深度范围, 可沿用 $Z_1 \leq 0.67b$ 和 $Z_n \leq 2b$ 的试验结果, 筋材的长度应由压力扩散线外侧抗拔出的稳定性确定。

参考文献:

- [1] Rathmayer H G, Korhonen O E. Geotextile reinforced land reclamation in the ray of river vantaa[A]. Proc 11th conf. SMFE[C], Helsinki, 1985. 1795~ 1800.
- [2] 凌旭初, 严洪林, 彭瑞洪. 沪嘉公路应用土工织物补强稳定软基的研究[A]. 全国第二届土工织物学术会议论文集[C]. 1989. 304~ 310.
- [3] 王铁儒, 吴炎曦, 祁思明. 土工织物在一气柜软基上的应用[A]. 中国土工织物学术讨论会论文集[C]. 1987. 175~ 184.
- [4] 林晓玲. 土工织物加筋垫层在建筑软基中的应用[J]. 工业建筑, 1994(4): 54~ 55.
- [5] Yamanouch T, Gotoh K. A proposed practical formula of bearing capacity for earth work method on soft clay ground using a resinous mesh[R]. Technology Report of Kyushu University, 1979, 52(3): 201~ 207.
- [6] Binquet J, Lee K. L. Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs[J]. J Geotech Engng, Div ASCE, 1975, GT12(101): 1257~ 1276.
- [7] Binquet J. Bearing capacity tests on reinforced earth slabs[J]. J Geotech Engng, Div ASCE, 1975, GT12(101): 1241~ 1255.
- [8] Guido V A, et al. Bearing capacity of geotextile reinforced foundation[A]. Proc 11th conf SMFE[C]. 1985. 1777~ 1780.
- [9] Miyazaki K, Hirokawa E. Fundamental study of reinforcement of sand layer in model test[A]. Proc Int Symposium on Earth Reinforcement[C]. Fukuoka, 1992. 647~ 652.
- [10] Ju J W. Bearing capacity of sand foundation reinforced by geonet[A]. Proc Int Symposium on Earth Reinforcement[C]. Fukuoka, 1996. 603~ 608.
- [11] Soni K M, et al. Effect of reinforcement length on bearing capacity[A]. Proc Int Symposium on Earth Reinforcement[C]. Fukuoka, 1992. 690~ 694.
- [12] Hirao, et al. Laboratory model tests on the application of composite fabrics to soft clay[A]. Proc Int Symposium on Earth Reinforcement[C]. Fukuoka, 1992. 601~ 605.
- [13] Takemura J, et al. Bearing capacity and deformations of sand reinforced with geogrids[A]. Proc Int Symposium on Earth Reinforcement[C]. Fukuoka, 1992. 695~ 700.
- [14] Love J P, et al. Analytical and model studies of reinforcement of a layer of granular fill on a soft clay subgrade[J]. Can Geotech J, 1987, 24: 611~ 622.
- [15] GB 50290—98, 土工合成材料应用技术规范[S].
- [16] 王 钊, 乔忠森, 等. 土工织物在泵站基础工程中的应用[A]. 全国第四届土工合成材料学术会议论文集[C]. 1996. 104~ 107.
- [17] 赵柄新, 陈镇威. 用土工织物加固岸滩道路的机理及试验研究[A]. 全国第二届土工织物学术会议论文集[C]. 1989. 355~ 360.