

土工合成材料加筋地基设计中的几个问题*

Some problems on design of foundation reinforced with geosynthetics

王 钊

(武汉水利电力大学土木与建筑学院土力学教研室, 武汉, 430072; 清华大学水利水电工程系岩土工程研究所, 北京, 100084)

王协群

(武汉工业大学土木与建筑学院地基基础教研室, 武汉, 430071)

中图法分类号 TU472 文献标识码 A 文章编号 1000-4548(2000)04-0503-03

作者简介 王 钊, 男, 1945 年生, 博士, 教授, 博士生导师。

1 引 言*

从目前工程实例看, 土工合成材料加筋地基主要应用于海堤、路堤、围堰和油罐、房屋等浅基础的地基加筋。在设计和分析方法上, 对条形浅基础主要应用改进的太沙基极限承载力公式^[1], 对软基上的堤仍沿用圆弧滑动面法。应用中发现, 这些公式和分析方法往往低估了土工合成材料加筋地基的作用, 现就地基基础设计的三个主要内容, 包括承载力、变形和稳定性计算, 对土工合成材料加筋地基的设计, 以及对土工合成材料设计拉力的选择等问题作一些探讨。

2 加筋地基的承载力

改进的太沙基极限承载力公式如下:

$$q_u = c_u N_c + \frac{2T \sin \alpha}{b} + \frac{T}{r} + \gamma s \quad (1)$$

式中 q_u 为加筋地基的极限承载力, kPa; c_u 为地基土的粘聚力, kPa; γ 为地基土容重, kN/m³; N_c 为承载力因数, 无量纲; T 为土工合成材料拉力, kN/m; α 为土工合成材料拉力与水平面夹角, 度; r 为基础两侧地基土隆起的假想圆半径, m; b 为基础宽度, m; s 为基础沉降, m。

式(1)中, 第一项为原地基的极限承载力, 第二项表示土工合成材料的张力膜作用, 第三、四项为旁侧荷载的影响, 隐含了承载力因数 $N_q = 1.0$ 的假定。取承载力的安全系数为 K , K 值在 2~3, 可得到土工合成材料增加的地基承载力容许值 Δf ,

$$\Delta f = \frac{1}{K} \left(\frac{2T \sin \alpha}{b} + \frac{T}{r} \right) \quad (2)$$

从式(2)可见, Δf 与 T 成正比, 如用多层筋材, 例如层数为 n , 则式(2)中 T 为单层筋材拉力的 n 倍, 但不管各层间距多大, 其效果是相同的, 即不能考虑加筋层厚度的影响。对 r 和 α 的取值, 存在不同意见。文

献[2]指出, 当 b 和 s 增大时, r 减小, α 增加。文献[3]发现当 s 增加时, α 逐渐增加直到 $\alpha = 70^\circ$, r 则从 2.0 m 减至 0.2 m, 本文按文献[4]建议, 取 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$, $r = 3$ m, 并取 b 分别为 2, 10, 20 m, 计算一层筋材提高的地基承载力 Δf , 计算中, T 分别取 20, 50, 110 kN/m, $\varphi = 30^\circ$, $K = 2.5$, 计算结果列于表 1。

表 1 加筋地基提高的地基承载力

Table 1 Increment of bearing capacity of reinforced foundation

筋材拉力 T / (kN·m ⁻¹)	一层筋材的 Δf / kPa			三层筋材的 Δf_R / kPa		
	$b = 2$ m	10 m	20 m	$b = 2$ m	10 m	20 m
20	9.6	4.1	3.4	89.1	72.5	70.4
50	24.0	10.1	8.4	105.0	63.1	57.9
110	52.7	22.3	18.5	186.0	94.3	82.9

从表 1 可见增加的 Δf 随 b 的增加而减小, 因此, 对筏形基础和宽的堤基而言, 单层筋材的效果是很差的。正确的布置方式是采用加筋土垫层, 筋材多层布置, 在设计中考虑垫层对基底压力的扩散作用和原地基的承载力经理深修正后的增加值。设计公式为

$$p \frac{b'}{b} - f \leq \Delta f \quad (3)$$

式中 p 为基底压力设计值, kPa; b' 为应力扩散在垫层底部的作用宽度, $b' = b + 2z \tan \theta$, z 为垫层厚度, m, θ 为地基压力扩散角, 度, 查有关规范, 不计筋材对 θ 的影响; f 为经理深修正后的地基承载力设计值。

将埋深修正值和应力扩散作用叠加于 Δf 即得到加筋土垫层增加的地基承载力设计值 Δf_R , 即

$$\Delta f_R = \Delta f + \eta_k \gamma (d + z - 0.5) + p \frac{2z \tan \theta}{b + 2z \tan \theta} \quad (4)$$

式中 η_k 为基础埋深的地基承载力修正系数; d 为基础埋深, m。则式(3)可改写为

$$p - f_k \leq \Delta f_R \quad (5)$$

* 到稿日期: 1999-08-25

式中 f_k 为地基承载力标准值, kPa。

现将三层筋材, $z = 1.5$ m 的 Δf_R 值也列于表 1。计算中, 取 $\eta_d = 1.1$, $\gamma = 19.5$ kN/m³, $\theta = 23^\circ$, $d = 0$, $p = 100$ kPa。从表中数据可见, 多层筋材的加筋土垫层明显提高了地基承载力。对油罐和房屋地基, 可采用开挖的方式布置筋材和砂垫层; 对处于具有表面硬壳层的堤基, 可将筋材布置在堤身最低一级平台中, 此时, 没有地基承载力的埋深修正。

3 加筋地基的沉降

文献[5]首先用立体摄影技术观测软基上加筋堤模型的变形特性, 发现当堤基铺设一层筋材时, 堤中心的最大沉降减小, 而堤脚处沉降增加, 沉降的分布趋于均匀, 但一层筋材减小的沉降是很小的。这是因为一层筋材的 Δf 很小, 而计算沉降的基底压力仅减小 Δf , 故沉降 s 无明显减小。

但从式(1)可见, s 可提高地基的极限承载力, 即在式(2)的 Δf 中应增加一项 $\gamma s/K$, 因此沉降计算应反复进行, 直到增加的承载力和减小的沉降相吻合为止。对于多层筋材的加筋土垫层, 因 Δf_R 较大, 垫层下地基土在 $p - \Delta f_R$ 作用下, 沉降减小幅度较大, 这种情况可忽略 s 对承载力增大的影响。

4 加筋地基的稳定性

地基稳定性可用圆弧滑动面法验算, 但对地基承载力满足设计要求的情况, 如果建筑物不承受较大水平荷载, 或不是建筑在斜坡上, 可以不进行圆弧滑动分析, 因为式(1)就是从整体破坏、形成完整的滑动面推导出的地基极限承载力。实践证明, 对于承载力不满足设计要求的情况, 例如一些软土地基上的堤, 可能出现地基土的剪切破坏, 表现为大的沉降变形, 但不一定产生整体滑动, 这时必须进行圆弧滑动分析。抗滑稳定安全系数计算式为

$$F_s = \frac{\sum (c_{ui} l_i + w_i \cos \alpha \tan \varphi_{ui}) + T}{\sum w_i \sin \alpha} \quad (6)$$

式中 w_i 为分条土重, kN; c_{ui} , φ_{ui} 为地基土不排水剪粘聚力和内摩擦角。

不少工程实践表明, 堤基铺设的土工合成材料可显著提高地基的稳定性, 但用圆弧滑动面法分析, 即使假设加筋力与滑弧相切(参见式(6)), 一层土工织物仅能提高 0.04~0.10 的安全系数^[6,7]。对此, 不少学者投入研究, 例如, 文献[8]认为, 在圆弧滑动分析中还应考虑筋材摩擦力对地基应力状态的影响, 应力状态用有限元法分析, 然后再用圆弧滑动分析来计算安全系

数。文献[9]用极限分析证明, 当筋材具有足够强度时, 不可能发生圆弧滑动, 唯一可能的破坏模式是伴随沉降而产生的横向挤出, 由于筋材改变了地基剪应力的方向, 从而能大幅度提高地基承载力。

对单层筋材提高地基承载力或稳定性的解释, 笔者认为, 可归结为筋材的隔离作用, 只要筋材有足够的拉伸变形, 则可适应大的下垂变形, 而不断裂, 使堤身整体且较均匀地沉降, 堤两侧地基土受挤压隆起, 产生如下作用:

- (1) 埋深增加而提高承载力;
- (2) 两侧地基土挤压排水, 抗剪强度提高;
- (3) 沉降底面为垂线型, 中间大, 两边小, 对堤身顶部有挤压作用, 减小堤顶形成纵向裂缝的可能性。

如用圆弧滑动分析法, 考虑到堤顶无裂缝和堤身沉到地基内的部分, 则通过堤身的滑弧增长, 而堤身的抗剪强度是较高的, 此外, 因两侧地基土隆起也延长了滑弧, 因挤压排水, 也提高了抗剪强度, 总的作用是提高了抗滑稳定的安全系数。设想没有筋材的隔离, 堤身材料混入软土, 就像船中货物沉入水中一样, 是不可能产生上述作用的。然而单层土工合成材料对地基承载力和稳定性的改善, 无论怎样分析, 也不允高估, 特别是对筋材断裂, 隔离失效的情况。文献[10]介绍的现场试验结果的对比, 是一个强有力的论证, 其中天然地基和一层土工织物加筋地基上的试验堤均在堆堤起的第 43 天破坏, 填土高度分别为 4.04 m 和 4.35 m (此时土工织物拉断), 加筋地基堤的破坏高度(极限地基承载力)仅增加 7.7%, 相当于稳定安全系数增加 0.04 左右。可见用圆弧滑动分析法计算筋材断裂时的安全系数是合理的, 不能笼统讲该法偏于保守。

5 土工合成材料的设计拉力

在式(1)和式(6)中, 土工合成材料的拉力 T 有三种不同的选择, 一是极限抗拉强度, 二是允许抗拉强度, 三是达一定应变时的拉力。显然第一种选择方法将提高地基的承载力或抗滑动安全系数。根据《土工合成材料应用技术规范》(GB 50290-98), 土工合成材料允许抗拉强度的安全系数最小为 2.5, 该值和地基承载力的安全系数 K 相近, 故在式(1)中, T 值应取极限抗拉强度; 在式(6)中, 因堤坡稳定的安全系数在 1.05~1.35^[11], 考虑到土工合成材料要求的安全系数要大一倍, 故式(6)中的 T 值应取极限抗拉强度的一半。这样可避免安全系数的重复设置, 充分发挥筋材的作用。

针对不同公式选用不同的筋材设计拉力, 源于地基承载力和圆弧滑动分析要求的安全系数不同, 两者

相差近一倍。这是因为在圆弧滑动分析中,安全系数是在同一滑动面上抗剪切力与实际滑动剪切力之比,较准确,故安全系数可取较小值;而地基承载力的安全系数是由完整滑动面上抗剪强度确定的极限承载力与基底压力设计值之比,后者并不是由滑动面上动用的剪切力确定的,不够准确,故安全系数取较大值。

6 结 论

(1) 一层土工合成材料在加筋堤基中主要起隔离作用,使堤身整体较均匀地下沉,因埋深增加而提高地基承载力;因滑弧长度增大,而提高抗滑稳定性。

(2) 考虑到土工合成材料可能拉断,用圆弧滑动分析法计算稳定安全系数是合理的。

(3) 正确的地基加筋方法是多层筋材的加筋土垫层,其作用包括筋材的拉力、垫层的应力扩散和埋深修正而提高承载力,设计时应和《建筑地基基础设计规范》相结合。

(4) 土工合成材料的设计拉力,在地基承载力计算中应选材料的极限抗拉强度;在圆弧滑动分析中应选极限抗拉强度的一半。

参 考 文 献

1 Yamanouch T, Gotoh K. A proposed practical formula of bearing capacity for earthwork method on soft clay ground using a resinous

mesh. Technology Report of Kyushu University, 1979, 52(3): 201~207

2 Makiuchi K, Minegishi K. An estimation of improvement effects of geotextile on bearing capacity of soft ground. In: Proc Int Symposium on Earth Reinforcement. Fukuoka, Japan, 1992. 637~640

3 Tanabashi Y. In situ investigation and numerical estimation for bearing capacity improvement of very soft ground reinforced with geotextiles. In: Proc Int Symposium on Earth Reinforcement. Fukuoka, Japan, 1996. 685~690

4 陆士强,王 钊,刘祖德.土工合成材料应用原理.北京:水利电力出版社,1994

5 Andrawes K Z, McGown A. Stereophotogrammetric measurement of the kinematics within plane strain model of reinforced embankments. In: Developments in SMFE-1. London, 1983. 231~261

6 郑祖桢,徐雄军.土工织物在秦山核电厂海堤工程中的应用.见:中国土工织物学术讨论会论文集,1987. 84~89

7 陈洪江,杨书遂.土工合成材料在大港海堤中的应用.见:全国第三届土工合成材料学术会议论文集,1992. 131~136

8 刘吉福,龚晓南,王盛源.一种考虑土工织物抗滑作用的稳定分析方法.地基处理,1996,7(2): 1~5

9 沈珠江.土工合成物加强软土地基的极限分析.岩土工程学报,1998,20(4), 82~96

10 赵九斋,龙国英,徐啸海等.土工织物加固路堤和天然路基对称破坏及其分析.岩土工程学报,1991,13(2): 73~81

11 GB 50286—98 堤防工程设计规范.北京:中国计划出版社,1998

同济大学第二期土木工程施工监测技术培训班通知

(2000年10月14~21日)

随着土木工程建设的发展和工程质量要求的提高,施工检测作为设计和施工信息的反馈手段已日益成为土木工程建设中必不可少的组成部分。与此同时,对监测仪器、监测技术和监测技术人员素质的要求也愈来愈高。为满足广大工程技术人员系统地掌握土木工程监测的方法、仪器和技术的要求,同济大学土木工程学院将举办第二期土木工程监测技术培训班,由地下建筑与工程系承办,主要内容有:

- (1) 建筑物变形(沉降、水平位移、倾斜和裂缝)观测;
- (2) 深基坑工程施工监测;
- (3) 地铁盾构、顶管工程施工监测;
- (4) 公路隧道、地下洞室、井巷工程施工监测;

(5) 道路路基与路面工程施工监测;

(6) 桥梁工程施工监测;

(7) 边坡工程施工监测;

(8) 地质雷达在土木工程中的应用。

培训时间:2000年10月14~21日,共8天,即日起报名。

报到时间和地点:2000年10月13日,上海市赤峰路53号神往大酒店(近四平路口)。

联系方式:上海同济大学土木工程学院地下建筑与工程系(邮编200092)夏才初 杨慧芳,电话021-65983387,021-65981011,传真021-65985210。E-mail: tjxiaceb@online.sh.cn

(同济大学土木工程学院地下建筑与工程系 供稿)