

# 考虑加筋垫层作用的软基路堤临界高度确定方法初探

徐林荣, 彭巨为

(中南大学土木建筑学院, 长沙 410075)

摘要: 临界填筑高度是软基路堤工程中关注的一个问题, 路堤填筑高度小于临界填筑高度时, 地基的变形和稳定均能得到控制。以往的理论公式中对加筋垫层的影响考虑较少。本文根据加筋垫层的应力扩散理论及筋材摩阻力的减载作用, 研究了加筋垫层作用下的临界高度确定方法, 并对其中的参数选取作了初步探讨。

关键词: 软基路堤; 临界高度; 加筋垫层; 参数选取

中图分类号: P642.3; U416.212

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)03-0032-03

所谓路堤临界高度, 是指在天然软土地基上路堤填筑过程中, 地基不发生沉降量突然增大和失稳破坏时所允许的最大路堤填筑高度。而沉降稳定和路堤的整体稳定性是路堤临界高度的两个主要控制因素<sup>[1,2]</sup>。因此, 加筋垫层的使用势必对路堤临界高度产生影响。在目前的研究中, 针对变形和稳定的要求各有其临界填筑高度的评价和计算体系, 但已有的评价体系中对加筋垫层影响的考虑较少。本文针对临界高度中如何考虑加筋垫层作用进行了初步探讨。

## 2 临界填筑高度的理论分析方法

目前计算临界填筑高度的方法可以分为两类: 一类从地基土变形机理出发, 比较地基土屈服前后的变形机理, 得到按变形控制的临界填筑高度, 该体系以Leroueil模型为代表, Leroueil研究了路堤填筑过程地基的超静孔隙水压力和侧向变形的增长规律, 认为高速公路按变形控制的临界荷载可以按下式确定:

$$rh_{crit} = \frac{p'_c - p'_0}{I(1 - B_1)} \quad (1)$$

式中:  $h_{crit}$  ——按变形控制的临界填筑高度;

$p'_c$  ——地基的前期固结压力(kPa);

$p'_0$  ——地基的有效上覆压力(kPa);

$\gamma$  ——填筑材料的容重(kPa/m<sup>3</sup>);

$I$  ——附加应力系数, 对高速公路工程浅层软土而言  $I$  可以取为 1;

$B_1$  ——深度修正系数, 其表达式为  $B_1 = 0.6 - 2.4 \left[ \frac{z}{D} - 0.5 \right]^2$ 。

式中:  $z$  ——软土层埋藏深度;

$D$  ——软土层与硬壳层的厚度和。

另一类研究了地基土在高速公路荷载作用下的剪应力和塑性区开展的模式, 根据 Mohr-Coulomb 破坏准则得到按稳定性控制的临界填筑高度, 这项研究以 Fellenius 为代表。Fellenius 根据 Prandtl 解计算得到路堤荷载作用下的地基应力, 而后根据摩尔库仑理论计算得到塑性区最大开展深度为 0.25 倍路堤宽度时, 临界荷载为:

$$P_{crit} = \mathcal{M}H_{crit} = 5.52C_u \quad (2)$$

式中:  $P_{crit}$  ——地基临界荷载;

$H_{crit}$  ——按稳定控制的临界填筑高度;

$C_u$  ——地基土的快剪粘聚力。

## 2 加筋垫层作用下基底附加应力变化

### 2.1 考虑加筋垫层的应力扩散作用

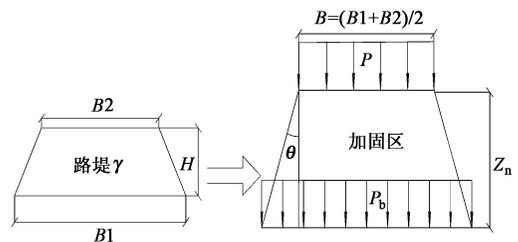


图 1 考虑加筋垫层应力扩散后的路堤荷载

Fig. 1 Embankment load considered the diffusion of cushion

对于路堤荷载作用下, 软土地基中加筋垫层对附加应力的扩散影响问题, 比较简单的解决方法是用应

收稿日期: 2007-04-02; 修订日期: 2007-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578159)和西部交通建设科技项目(200431882206)

作者简介: 徐林荣(1964), 男, 博士生导师, 主要从事软基处理及土工合成材料应用研究。

E-mail: esuxlr@126.com

力扩散角(见图 1), 条形荷载按角扩散后, 并假设均匀分布存在扩散后的面积上, 根据前后总压力相等的条件, 得到界面附加应力  $p_b$  的计算公式:

$$p_b = \frac{Bp}{B + 2Z_n \tan \theta} \quad (3)$$

式中:  $Z_n$  ——加筋垫层的厚度;

$B$  ——荷载作用的宽度。

因此, 加筋地基因加筋垫层的应力扩散作用而为下卧层减小的附加应力为:

$$\Delta p_b = p - p_b = \frac{2pZ_n \tan \theta}{B + 2Z_n \tan \theta} \quad (4)$$

### 2.2 考虑筋材拉力的减载作用

加筋地基中, 土体和筋材的相对位移(或有位移趋势)在土体与筋材界面之间形成摩擦力, 进而在筋材中产生拉力。筋材拉力对软弱层顶附加应力的贡献主要为拉力向上的分力对附加应力的抵消作用。

经应力扩散后, 加筋地基因筋材拉力作用而抵消的上部附加应力为:

$$\Delta p_1 = \frac{2nT \sin \beta}{B + 2Z_n \tan \theta} \quad (5)$$

式中:  $\Delta p_1$  ——筋材拉力作用抵消的上部附加应力;

$T$  ——假设各筋材的抗拉强度发挥一样, 均取为  $T$ ;

$n$  ——筋材层数;

$\beta$  ——筋材与水平方向的夹角。

综上所述, 铺设加筋垫层后, 基底附加应力为:

$$p' = p - \Delta p_b - \Delta p_1 = \frac{Bp - 2nT \sin \beta}{B + 2Z_n \tan \theta} \quad (6)$$

### 3 考虑加筋垫层作用的路堤临界高度确定及参数选取

将加筋垫层本身视为无限均布荷载  $\gamma_0 Z_n$ , 与应力扩散后的路堤条形荷载  $p'$  一起作为外荷载加在软土层上, 简化情况如图(2)。

本问题按平面应力考虑, 软土地基中应力的求解

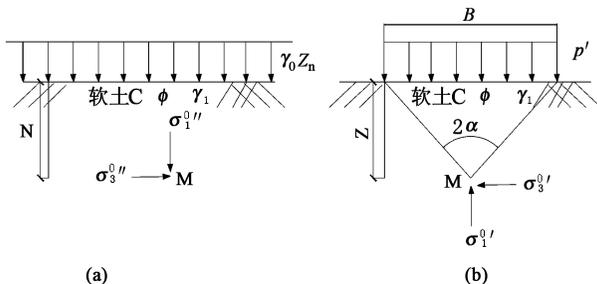


图 2 软土地基中点应力求解

Fig. 2 Solving the stress of point in the soft ground

为图 2(a) 和图 2(b) 两种情况叠加。

(1) 在条形均布荷载  $p'$  的作用下, 土中任意点  $M$  由  $p'$  引起的竖向应力为:

$$\sigma_1^{\circ} = \frac{p'}{\pi} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (7)$$

式中:  $p'$  ——条形均布荷载, kPa;

$2\alpha$  ——点  $M$  到均布条形荷载两端的夹角。

(2) 在加筋垫层和软土自重作用下, 点  $M$  处引起的竖向有效压应力  $\sigma_1^{\circ}$  为:

$$\sigma_1^{\circ} = \gamma_0 Z_n + \gamma_1 Z \quad (8)$$

式中:  $Z_n$  ——为加筋垫层的厚度;

$Z$  ——为点  $M$  到软土层顶面的距离;

$\gamma_0$  ——分别为垫层容重(在水位线以下的部分采用有效重度);

$\gamma_1$  ——软土的有效重度。

(7) + (8) 式即得软土中任意点  $M$  的有效上覆压力:

$$p'_0 = \sigma_1^{\circ} + \sigma_1^{\circ} = \frac{p'}{\pi} (2\alpha + \sin 2\alpha) + \gamma_0 Z_n + \gamma_1 Z \quad (9)$$

将式(9)和式(6)代入(1)式可得按变形控制的临界填筑高度  $h_{crit}$  表达式:

$$\gamma H_{crit} = \frac{\pi(B + 2z_n \tan \theta) (p'_c - \gamma_0 z_n - \gamma_1 z) + 2nT \sin \beta (2\alpha + \sin 2\alpha)}{B(2\alpha + \sin 2\alpha) + I\pi(1 - \bar{B}_1)(B + 2z_n \tan \theta)} \quad (10)$$

设稳定控制的路堤临界填筑高度为  $H_{crit}$ , 路堤产生的压力  $p$  经加筋垫层作用后在地基表面单位面积上产生的压力转变为  $p'$ , 即当路堤达到临界高度时:

$$p' = P_{crit} = 5.52 C_u \quad (11)$$

将式(6)代入则有:

$$p_{crit} = p' = \frac{B \gamma H_{crit} - 2nT \sin \beta}{B + 2z_n \tan \theta} = 5.52 C_u \quad (12)$$

公式简化得:

$$\gamma H_{crit} = \frac{5.52 C_u (B + 2z_n \tan \theta) + 2nT \sin \beta}{B} \quad (13)$$

临界高度的理论预估准确与否, 取决于公式参数选择的是否合适, 建议采用最薄弱的软土层控制。为了简化计算, 公式中参数值可按下列建议选用。

式中:  $\theta$  ——对机织土工织物加筋垫层, 取  $\theta = 40^\circ \sim 45^\circ$ , 对土工网加筋垫层, 取  $\theta = 45^\circ \sim 50^\circ$ , 对土工格栅加筋垫层, 取  $\theta = 50^\circ \sim 55^\circ$ ;

$\beta$  —— $\sin \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b}{4s}\right)^2}}$ , 本文按 Nishigata

Yamaoka 的建议: 一般取  $\beta = 10^\circ \sim 17^\circ$  [4];

$T$  ——筋材的极限抗拉强度;

$p_c$  ——前期固结压力取软土层中的最小值;

$C_u$  ——地基土的快剪粘聚力, 采用最薄弱的软土层控制。

### 4 实例计算及分析

浙江省某高速公路计划于 2007 年年底通车, 某试验断面原设计堤高为 3.9m, 软土层厚 7.8m, 塑料排水板处理, 路基填筑过程中铺设了 0.5m 厚砂垫层+ 两层土工格栅, 并在填筑过程中对断面进行了现场观测以更好的控制路堤稳定性。

本文采用推导公式对加筋路堤临界高度进行了计算, 表 1 为计算中选取的各项主要指标( 其中的筋土界面参数  $\phi_{soil-ribs}$  取值参见文献 [5]), 计算结果见表 2。

表 1 计算参数表

Table 1 The chart of calculative parameter

$B$ (m)	$P_c$ (kPa)	$\gamma_0$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\Gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$Z$ (m)	$Z_n$ (m)
30	120	19	8.7	19	7.8	0.5
$\theta$ (°)	$T$ (kN/m)	$\phi_{soil-ribs}$ (°)	$\beta$ (°)	$C_u$ (kPa)	1	$B_1$
50	105	31.5	17	7.8	1	0

表 2 路堤临界高度计算结果

Table 2 The calculative result of critical height

理论计算方法	不加筋	加筋		实测值
		一层	两层	
按变形控制的临界填筑高度(m)	1.148	1.221	1.273	2.6
按稳定控制的临界填筑高度(m)	2.266	2.464	2.572	

据计算结果: 一层加筋后, 按变形控制的临界填筑高度提高了 6.36%, 按稳定控制的临界填筑高度提高了 8.74%; 两层加筋后, 分别提高 10.89% 和 13.51%。考虑两层加筋后的稳定控制临界高度与实测值非常接

近, 相差仅为 0.028m。

加筋前后, 按稳定控制的临界填筑高度均为按变形控制的临界填筑高度的两倍左右。一般来说, 在高速公路路堤填筑期, 对沉降的要求比较低, 而对稳定性要求比较高, 故在工程填筑过程中建议采用稳定控制的临界高度, 以加快施工进度。

### 5 结论及建议

(1) 土工织物加筋垫层在于应力扩散及筋材摩阻力的减载作用, 改变了地基的应力状态。本文分析考虑了这两个因素, 使计算的路堤填筑临界高度更接近实测结果。

(2) 本文在按变形控制和稳定控制的临界填筑高度的理论公式的基础上分别推导出了其考虑加筋垫层作用的计算公式, 并对其中参数的选取作了初步探讨。

(3) 本文通过实例计算得出: 一层加筋后, 按变形控制的临界填筑高度和按稳定控制的临界填筑高度分别提高 6.36% 和 8.74%, 两层加筋后临界高度分别提高 10.89% 和 13.51%, 为加筋路堤的施工提供了参考依据。

(4) 按变形控制的临界填筑高度要远小于按稳定控制的临界填筑高度, 建议在路堤填筑阶段采用后者进行控制。

#### 参考文献:

- [1] 郑晓国, 刘松玉, 经纬. 软土地基路堤临界高度确定方法探讨[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 35-39.
- [2] 邓永锋, 刘松玉. 高速公路工程中动态临界填筑高度的应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1579-1582.
- [3] 王钊, 王协群. 加筋地基设计方法的探讨// 全国第五届土合成材料学术会议论文集[M]. 北京: 现代知识出版社, 2000, 22(6): 731-733.
- [4] 胡幼常. 土工格栅加筋地基承载力计算[J]. 土工基础, 1996, 10(3): 14-18.
- [5] 徐林荣. 筋土界面参数取值国内外调研报告// 国家自然科学基金研究中期报告(50578159) [R]. 长沙: 中南大学, 2006, 9.

## Research on the methods to evaluate critical height of embankment on soft ground considered effect of reinforced cushion

XU Lirong, PENG Jurwei

(Civil Engineering Department, Center South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Critical height is a key problem in embankment on soft ground engineering. When embankment height is less than the critical height, settlement and stability of foundations can be controlled. The effect of the reinforced cushion is considered little in the previous theoretical formula. This paper studies the critical height when the reinforced cushion play the role, based on the diffusion theory and the deloading of synthetic materials' friction drag. At last, the choice of the parameter is discussed.

**Key words:** embankment on soft ground; critical height; reinforced cushion; choice of the parameters

责任编辑: 王宏