

# 土工格栅加筋桥头相邻路堤的受力分析与计算

申俊敏<sup>1</sup>, 张 军<sup>1</sup>, 赵建斌<sup>1</sup>, 马 强<sup>2</sup>

(1. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;  
2. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

**摘 要:** 首先介绍了土工格栅处理桥头路堤的工作机理. 根据人体对行车时竖向加速度的要求, 对路桥搭接处路堤的沉降控制指标进行了探讨, 确定了保证行车舒适性的台背处理过渡段的长度. 假定沉降曲线为圆弧线且格栅与土界面为库伦摩擦, 对路桥搭接处采用土工格栅处理时筋材的受力进行了理论分析, 得到了格栅轴向拉力计算的解析表达式, 并通过数值模拟及实例对其进行了验证.

**关键词:** 桥头跳车; 土工格栅; 加筋路堤; 解析法; 数值模拟

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.007

## 0 引言

随着高速公路的迅速发展, 安全和舒适行车的要求越来越高, 而路堤与桥台的差异沉降, 往往会引起车辆的桥头跳车问题<sup>[1]</sup>, 影响公路使用性能和运输效益. 严重的跳车现象, 会导致车辆失控而引起交通事故<sup>[2]</sup>. 国内外普遍采用桥头搭板处理此问题, 搭板作为一种刚性结构, 在一定程度上可减轻却不能消除桥头跳车现象, 而是将跳车的位置转移到了搭板末端形成二次跳车<sup>[3]</sup>. 土工格栅作为一种柔性的加固措施, 当桥台高度小于 8 m 时<sup>[4]</sup>, 可有效减轻路堤变形引起的桥头跳车问题.

目前已有土工格栅处理桥头跳车的实例, 文献[5]中对路堤桥头采用格栅处理的相关规定采用的是经验方法, 国内外学者对此问题的研究多采用试验<sup>[6-8]</sup>和数值模拟手段<sup>[3,9-10]</sup>, 理论研究相对较少. 正确认识格栅处理桥头路堤的工作机理, 对格栅受力进行理论分析, 对加筋路堤的设计及施工具有重要的指导意义.

## 1 格栅处理桥头路堤的工作机理

桥头跳车形成的根本原因是桥台和桥台后路基间的差异沉降. 在高等级公路修建时, 应该采取措施将工后差异沉降控制在一定范围内并且使沉降平稳过渡<sup>[11]</sup>. 土工格栅具有高强度、高弹性模

量及允许较大变形等特性, 将土工格栅锚固于桥台来加固桥台相邻路堤填土, 格栅与土作为整体共同承受内外部荷载作用. 格栅加筋处理桥头台背填土结构如图 1 所示.

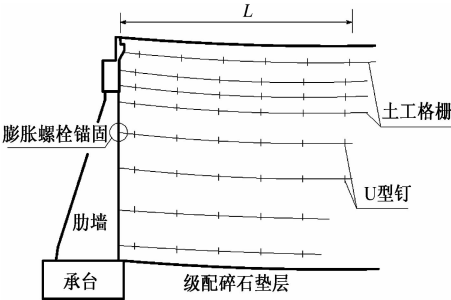


图 1 桥头台背加筋结构示意图

Fig. 1 Diagram of reinforced abutment with geogrid

土工格栅处理台背填土的作用机理主要表现为 4 个方面. ①格栅变形后存在“提兜效应”, 使台背填土中应力分布趋于均匀, 改善局部荷载作用下台背填土的受力状态, 增大荷载的扩散范围, 降低台背填土中的垂直应力, 从而减少台背填土的沉降, 起到刚性桥台和柔性路堤间过渡区的作用. ②利用格栅锚固端的张拉作用, 在台背填土一定范围内, 分层阻止填料顺台背沉降, 防止填土在台背处被拉裂, 并改善填土路基的支承刚度, 使桥台与路堤搭接处的差异沉降转变为缓坡形式的渐变沉降(如图 1 所示). ③由于格栅的网眼结构能

收稿日期:2013-05-17;修订日期:2014-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208187);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题

作者简介:申俊敏(1975-),男,山西潞城人,山西交通科学研究院高级工程师,主要从事道路工程研究,E-mail:shenlpy@sina.com.

对土体产生较大的嵌锁作用力,使土体的抗剪强度得到充分发挥,可对土体的侧向变形进行有效约束.④由于水平铺置的格栅具有良好的弹性,在反复路面荷载作用下产生的累积变形较小.

2 理论分析

2.1 路桥搭接处控制指标

将土工格栅锚固于桥台台背进行路桥搭接处的处理,差异沉降变为渐变沉降.由文献[3,6-9]中路堤及筋材沉降后的曲线形式可知,采用台背加筋方式处理的路桥搭接处路面及筋材的沉降曲线接近圆弧线.假定处理后的格栅及台背路堤在沉降稳定时呈圆弧状,汽车通行时的竖向加速度为

$$a = v^2 / R, \tag{1}$$

式中: $v$  是车辆通过桥头时的速度,  $\text{m/s}$ ;  $R$  为桥头搭接段路面的曲率半径,  $\text{m}$ .

国际标准化组织 1997 年公布的 ISO2631-1:1997(E)《人体承受全身振动评价第 1 部分:一般要求》指出人的主观感觉行车时竖向加速度  $a$  小于  $0.315 \text{ m/s}^2$  时可保证行车的舒适性<sup>[10]</sup>,则由式(1)可得不同行车速度时路堤竖向凹曲线的最小半径  $R_{m1}$ ,文献[11]中 3.0.18 条对一般路段竖向凹曲线最小半径规定值为  $R_{m2}$ ,  $R_{m1}$  与  $R_{m2}$  的值见表 1.

表 1 路堤竖向凹曲线最小半径

Tab.1 Minimum radius of rertical curve of embankment

	$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$				
	120	100	80	60	40
$R_{m1}/\text{m}$	3 516	2 450	1 563	880	390
$R_{m2}/\text{m}$	4 000	3 000	2 000	1 000	450

由表 1 中  $R_{m1}$  和  $R_{m2}$  的值可以看出,规范对路面竖向曲线半径要求较高.因此,为避免“桥头跳车”现象发生,保证桥台相邻路堤处路面能正常使用,桥头路堤竖曲线半径可按照规范取值来控制.

在路桥搭接处由工后不均匀沉降引起的路表沉降如图 2 所示,沉降后的路面为圆弧面<sup>[12]</sup>: $q = 2\alpha, \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{u}{L}\right) \approx \frac{u}{L} (u \ll L)$ ,则路面及格栅在搭接处的弯曲角度  $\theta = 2\alpha = 2 \tan^{-1}\left(\frac{u}{L}\right) \approx 2 \frac{u}{L}$ . 且  $\theta \approx \frac{L}{R}$ ,从而可得

$$L = \sqrt{2uR}, \tag{2}$$

式中: $u$  为桥台搭接范围内的路堤顶面最大沉降值,按照文献[13]中桥头搭接处路堤的工后沉降控制值  $10 \text{ cm}$  进行考虑; $L$  为台背加固段计算长度.将不同行车速度时规范要求的路堤竖向凹曲线最小半径  $R_{m2}$  代入式(2),可得不同行车速度时的台背加固段长度  $L$ .

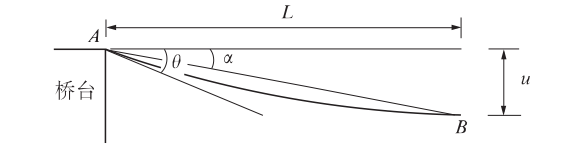


图 2 路桥搭接处路堤沉降示意图

Fig.2 Diagram of settlement at bridge approach embankment

表 2 不同行车速度的台背加固段长度

Tab.2 The length of reinforcement with vehicle speed

	$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$				
	120	100	80	60	40
$L/\text{m}$	28	24.5	20	14	9.5

文献[11]中 2.0.5 条规定高速公路路桥搭接处设计速度不应大于  $80 \text{ km/h}$ ,此时  $R = 2\,000 \text{ m}$ ,由此可计算得出桥头路堤加筋处理范围亦即路基最大沉降点与台背之间的距离  $L = \sqrt{2uR} = 20 \text{ m}$ ,此时  $q = 2\alpha \approx 1/100, \alpha \approx 0.5\%$ ,符合文献[10,14]中对不均匀沉降引起的路表纵向坡率变化值  $\alpha$  应控制在  $0.3\% \sim 0.5\%$  范围内的要求.

2.2 格栅受力分析与计算

2.2.1 格栅与土接触单元的本构模型

格栅与填土界面服从 Coulomb 破坏准则<sup>[15]</sup>,  $\tau_n = c_i + s_n \tan \varphi_i$ , 似摩擦系数  $m = \tan \varphi_i = k \tan \varphi, c_i = kc, k$  为格栅与土界面单元的界面作用系数.规定压应力为正,将格栅表面力向其中心线简化,并设其单位长度所受的切向力合力为  $\tau_n$ ,法向力合力为  $\sigma_n$ ,则

$$\tau_n = c_i + \sigma_n \mu = k(c + m_n \tan \varphi). \tag{3}$$

2.2.2 格栅变形与受力分析

如图 3 所示,普通双向格栅的平面刚度很小,在计算时不考虑其平面刚度,将其看作“柔索”,路堤发生沉降的同时格栅也随之发生挠曲变形,变形后的格栅在路桥搭接处与水平面夹角为  $q$ .

变形后加固区范围格栅对应的半径  $R$  为常数,圆弧段两端轴力分别为  $T_1$  和  $T_0$ .  $T_1$  和  $T_0$  为格栅两端的轴向拉力,设计时按照最上层格栅的受力进行考虑,最大沉降以外路堤沉降均匀,即格栅在远离台背的一段与水平面夹角为  $0$ ,由于加

固区路堤沉降控制值为 10 cm,假设沉降变形较大,格栅与填土界面达到剪切强度.为了求得  $T_1$  和  $T_0$  的关系,可分析图 3(b)中微段的平衡,图中

$n$  为微段中心角  $d\theta$  的角平分线方向, $t$  为  $n$  的正交方向.

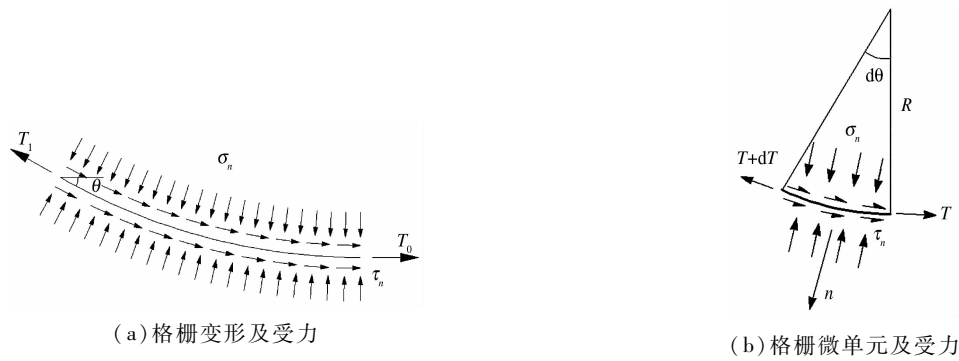


图 3 格栅受力示意图  
Fig.3 Diagram of forces in the geogrid

由  $n$  方向平衡条件  $\sum F_n = 0$  可得

$$(T + dT) \sin(d\theta/2) + T \sin(d\theta/2) = \sigma_n R d\theta$$

略去高阶微量并整理可得

$$T = \sigma_n R. \tag{4}$$

再由  $t$  方向平衡条件  $\sum F_t = 0$  可得

$$(T + dT) \cos(d\theta/2) - T \cos(d\theta/2) = \tau_n R d\theta,$$

上式化简后为

$$dT = \tau_n R d\theta. \tag{5}$$

将式(3)及式(4)代入式(5)得整理后对两边积分,即

$$\int_{T_0}^{T_1} \frac{dT}{T + \frac{c_i R}{\mu}} = \int_0^\theta \mu d\theta. \tag{6}$$

由式(6)可得格栅的轴向拉力

$$T_1 = T_0 e^{\mu\theta} + \frac{c_i R}{\mu} (e^{\mu\theta} - 1). \tag{7}$$

3 算例分析

以文献[4]中武汉阳逻长江大桥北连接线工程的桥头路堤为背景建立有限元模型,通过数值模拟对桥头台背相邻路堤采用格栅处理时的处理效果进行探讨,并将理论计算结果、数值模拟结果及文献[4]中结果进行对比.

3.1 有限元模型的建立

数值模拟的几何模型如图 4 所示,路堤高度为 8 m,最上层土工格栅距路堤表面的埋深  $h_0 = 0.15$  m,土工格栅的加筋长度采用  $L = 20$  m,加筋层数为  $n = 8$ ,间距为  $\Delta h = 1.0$  m.

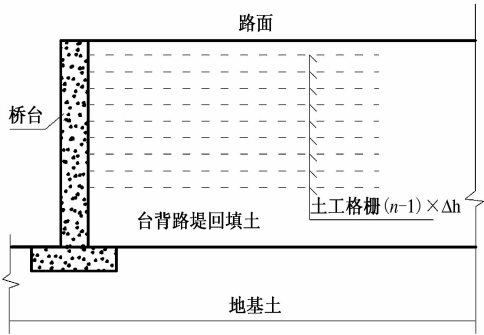


图 4 数值模拟的计算模型示意图  
Fig.4 Calculation model for numerical simulation

采用有限元软件 PLAXIS 进行数值模拟,材料重度  $\gamma$ 、模量  $E$ 、泊松比  $\nu$  等参数见表 3.路堤填土及地基土采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,桩体和土工格栅采用线弹性模型,格栅拉伸模量为 440 kN/m.

表 3 数值模拟参数表					
Tab.3 Parameters for numerical simulation					
土类	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / \text{MPa}$	$\nu$	$c / \text{kPa}$	$\varphi / (^\circ)$
路堤填土	20	20	0.3	14	30
地基土	18	8	0.38	15	18
桥台	25	$2 \times 10^5$	0.2	-	-

数值模拟给定位移边界条件  $u = 0.1$  m,  $L = \sqrt{2uR} = 20$  m,  $\alpha \approx \frac{u}{L} = 0.5\%$ . 由式(7)计算所得结果、数值模拟结果及文献[4]中格栅轴向拉力见图 6.

由图 6 可以看出,笔者理论计算结果与数值模拟结果具有一致的规律,说明笔者的理论计算

方法具有一定合理性. 笔者计算结果与文献[4]相比偏大 20% 左右,这是由于笔者的理论计算和数值模拟假定格栅与填土之间界面摩阻力达到界面极限摩阻力引起的,在工程设计计算中采用笔者计算方法是偏安全的.

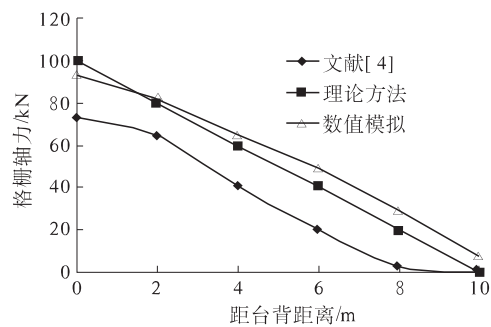


图 5 格栅的轴向拉力  
Fig.5 Axial forces of geogrid

3.2 格栅 B 端拉力对锚固端拉力的影响

通过在图 2 所示的格栅 B 端施加不同拉力来研究格栅轴向拉力的变化规律,不同拉力条件下格栅的轴向拉力如图 7 所示( $T_0$ 、 $T'_0$ 分别为有限元与理论计算时格栅 B 端轴向拉力).

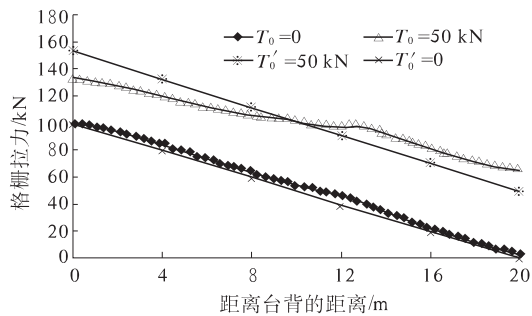


图 6 不同 B 端拉力时的格栅轴向拉力  
Fig.6 Axial tensile forces of geogrid with different tensile forces at end B

由图 7 可以看出当格栅 B 端拉力不同时,格栅轴向拉力不同. 笔者理论计算结果与数值模拟结果相差不大,具有一致的规律,笔者理论计算方法具有一定的适用性. 因此,可以通过计算格栅在锚固点 A 处的轴向拉力  $T_{A1}$  来确定格栅所需锚固力大小,并据此对格栅进行选择.

3.3 筋土作用系数对格栅锚固端拉力的影响

图 8 为不同  $k$  时格栅锚固端拉力格栅与土作用系数  $k$  对格栅锚固端拉力有较大的影响,随着  $k$  增大,格栅锚固端拉力显著提高. 在  $k$  较小时,由于格栅与土界面摩阻力不足,格栅与土相对滑移,格栅轴向拉力较小,格栅强度不能够充分发挥. 当  $k$  大于 0.7 时,理论计算值与数值模拟结果较为接近,此时格栅与土之间摩阻力得到较为充

分的发挥,可以有效约束格栅周围土体. 因此,工程中选择格栅时,应当考虑格栅与土之间的锚固及嵌锁能力,以保证格栅强度的充分发挥.

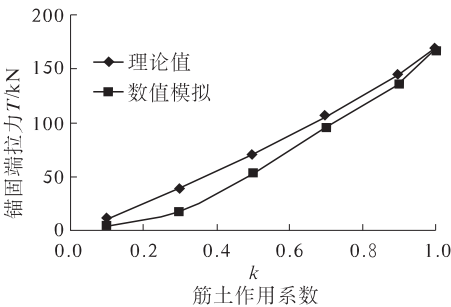


图 7 不同  $k$  时格栅锚固端拉力  
Fig.7 Forces of geogrid at anchorage end with different  $k$

4 结论

土工格栅处理桥头相邻路堤是一种柔性处理措施,加固区对差异沉降起过渡作用,使差异沉降转变为渐变差异沉降. 利用笔者计算式可通过计算格栅在锚固点处的轴向拉力,此即为格栅所需锚固力大小,其可作为不同强度格栅选取时的依据. 笔者理论计算假定路堤沉降较大,格栅-填土界面强度充分发挥,具有一定的局限性. 较小沉降条件时,考虑格栅-填土界面实际摩擦情况的格栅拉力计算解析式有待于进一步研究.

参考文献:

[1] 陈晓麟,支喜兰. 路桥过渡段沉降控制指标的研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(2): 15-18.  
[2] 葛折圣,黄晓明,张肖宁,等. 公路桥涵台背回填材料研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 67-72.  
[3] 胡幼常,许爱华,董必昌,等. 双向土工格栅处理桥头跳车的试验研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 50-54.  
[4] 牛同辉. 双向土工格栅处理桥头跳车研究[D]. 武汉: 武汉理工大学交通学院, 2006.  
[5] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. JTJ/T 019—98 公路土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.  
[6] 高燕希,陈永福,张起森. Netlon 土工网在公路桥台跳车处理中的室内试验研究与分析[J]. 长沙交通学院学报, 1995, 11(3): 44-49.  
[7] 陈永福,高燕希,张起森. Netlon 土工网在高等级公路桥台跳车处理中的试验研究[J]. 土木工程学报, 1996, 29(1): 41-47.