

文章编号: 1000-7598-(2008)10-2687-05

桩顶加筋灰土垫层理论分析与工程设计探讨

苏 谦¹, 李安洪², 罗照新², 王 迅¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 铁道第二勘察设计院, 成都 610031)

摘 要: 目前, 加筋垫层的工程实践超前于其理论研究, 桩顶加筋灰土垫层设计方法受到普遍关注。以郑一西客运专线深厚湿陷性黄土地基处理为工程背景, 建立了桩顶加筋灰土垫层理论模型, 分析了桩顶垫层荷载特征, 提出了灰土垫层设计极限状态理论。考虑不同桩径、不同桩间距、不同路基高度和不同格栅强度情况, 对灰土垫层厚度等进行了参数影响性分析。建议高速客运专线路基桩顶垫层设计中宜采用双层、双向土工格栅结构形式, 并优先选用延伸率小的筋材。

关 键 词: 加筋灰土垫层; 荷载分析; 设计方法; 垫层厚度; 格栅强度

中图分类号: TU 472.2⁺2

文献标识码: A

Theoretical analysis of reinforced lime soil cushion above pile and its engineering design

SU Qian¹, LI An-hong², LUO Zhao-xin², WANG Xun¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. The Second Survey and Design Institute of Railways, Chengdu 610031, China)

Abstract: Up till now, the theories of reinforced cushion cannot meet the needs of practice, the designing method of reinforced lime-soil cushion attracts most researchers' attention. According to the ground treatment of the deep collapsible loess in the Zhengzhou-Xi'an Passenger Dedicated Railway Engineering, the limit state theory model of the reinforced lime-soil cushion above pile is established; the loading feature is analyzed; and the design method is presented. Considering pile diameter, pile space, subgrade height and geogrid strength, the parameters such as the cushion thickness etc., are analyzed. It is suggested that the double layer structure and the double direction reinforced geogrid with small elongation rate should be used first to reinforced lime-soil cushion in the Passenger Dedicated Railway.

Key words: reinforced lime-soil cushion; loading analysis; design method; cushion thickness; geogrid strength

1 引 言

加筋垫层是在地基与路堤之间设置的, 由 1 层或多层具有较高强度和抗拉模量的土工合成材料与土组成的加筋复合结构。加筋垫层能明显提高地基的承载力和稳定性^[1-4], 有效地改善地基的应力分布, 对下卧地基可起到扩散应力、均化应力的作用, 实测应力扩散角大于 20°。加筋垫层也能有效地改变和阻止塑性区的形成和发展, 控制软基塑性变形, 增强地基刚度, 增强整个地基的稳定性, 提高了加筋土体的承载能力。P. Kurian Nainan^[5]的三维非线性弹性有限元分析以及文献[1]的室内大模

型试验表明, 由于加筋材料的侧向约束作用使地基中的应力状态发生变化, 加筋垫层能够增强松软地基的抗变形能力, 减小地基的下沉。所有这些研究成果为加筋垫层的实际工程应用提供了可靠的理论依据。

在铁路、公路、水电等行业的许多工程中, 加筋垫层均得到了应用, 取得了较好的工程效果。郑西(郑州—西安)客运专线设计时速为 350 km/h, 要求全线一次性铺设无碴轨道, 控制工后沉降已成为路基设计的最大特点和难点, 仅 20 mm 的严格工后沉降控制给地基处理提出了更高的要求。郑一西客运专线湿陷性黄土地基的处理, 采用了包括

收稿日期: 2006-09-02

基金项目: 铁道第二勘察设计院科技攻关项目(科 2006-03)资助。

作者简介: 苏谦, 男, 1972 年生, 副教授, 博士, 主要从事高速铁路路基工程研究。E-mail: suqian@126.com

CFG 桩、灰土桩、水泥土桩、DDC 桩等措施。为了有效扩散路基本体及其上部轨道列车荷载,促进桩土共同作用,强化群桩的整体效果,防止雨水及地表径流的浸入等目的,还在桩的顶部设置了加筋灰土垫层。

目前加筋垫层的工程实践超前于其理论研究,其设计方法还不够完善^[6]。现有垫层计算方法中,主要考虑加筋垫层的当量侧向约束力效应和网兜效应,并以此计算承载力提高值^[4-10]。在以往铁路路基设计中,垫层厚度一般根据经验取值,格栅则作为起补强作用的构造措施。在设计中一般均未能将格栅强度、垫层厚度两个关键的设计指标有效联系起来。在郑一西客运专线设计咨询中,外方咨询专家对于格栅的设计强度和垫层厚度的确定等提出了质疑,在武一广客运专线设计咨询中,也出现了此类问题,为此引发了设计人员关于垫层设计理论与方法的深入思考。为解决这一困扰设计、施工的难题,本文重点分析研究了桩顶加筋灰土垫层的设计理论和计算方法,供我国高速铁路以及相关工程的设计、施工参考。

2 桩顶加筋灰土垫层理论分析

2.1 理论模型

灰土垫层在湿陷性黄土地区筑路中经常采用,是一项有效的工程措施,但对于高速客运专线复合地基中的桩顶灰土垫层,由于桩体与桩间土变形的不协调,易导致灰土垫层破坏失效,为此在灰土垫层中加入模量较高的筋材,以增强其抗拉能力,更有效地均化与扩散应力,防止地面水浸入造成黄土湿陷,提高桩土复合地基整体工作性能。高速铁路加筋灰土垫层的典型设计断面如图 1 所示。

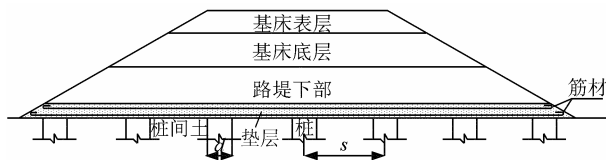


图 1 高速客运专线加筋灰土垫层设计图示

Fig.1 The scheme of the reinforced lime-soil cushion for the passenger dedicated railway

高速铁路加筋垫层是沿路基基底横向满铺、沿线路纵向延伸较长的结构。设计计算中可取线路横向一排桩的垫层作为分析单元,并将其视为沿线路横向的以桩为支撑的连续梁,计算图式如图 2 所

示。设定垫层梁的计算宽度为 b 、承载点间距为 l ,可以根据已知设计桩径 d 、设计桩间距 s 导出,垫层的计算宽度取为单排桩的影响范围,如果桩采用等三角形布置,则 $b = 0.866s$; 如果桩采用正方形布置,则 $b = s$ 。位于桩体截面范围内的上部荷载由桩直接承担,在分析垫层受力时可不考虑,在计算承载点间距时应予以折减。将圆形桩截面换算为垫层计算宽度范围内的连续墙,可得连续墙换算长度 $a = \frac{\pi d^2}{4b}$, 则 $l = s - a = s - \frac{\pi d^2}{4b}$ 。

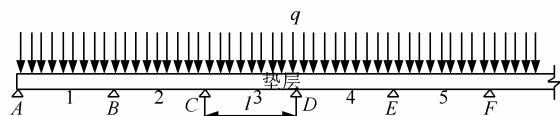


图 2 加筋灰土垫层受力分析模型

Fig.2 The analyzing model for the reinforced lime soil cushion

加筋灰土垫层连续梁是一多跨结构,其设计弯矩的确定是垫层设计的主要环节。取路基中部受荷最大的垫层部分进行受力分析与设计。垫层所受荷载为上部结构(路基、轨道)荷载、列车荷载及桩间地基土的支承力的矢量和,并将之简化为分布荷载 q 。连续梁的最大弯矩随跨数的增多而逐渐趋于稳定,超过 5 跨以后变化十分微弱。对于垫层受力分析来说,取 5 跨进行分析,可满足设计要求。于是可得垫层的最大正负弯矩如下: $M_+ = 0.078ql^2$, $M_- = -0.105ql^2$ 。为安全起见可取垫层的设计弯矩 $M = 0.105ql^2$ 。

2.2 计算方法

加筋灰土垫层截面的应力状态可分为 3 个阶段,即整体工作阶段、带裂工作阶段和破坏阶段,这 3 个应力阶段可以作为不同要求的计算依据。当垫层不允许出现裂缝时,应以即将开裂状态作为计算抗裂性的依据。但由于灰土的抗拉强度较低,使用阶段都是带裂工作的,所以正常使用状态计算是以带裂工作阶段作为计算的依据,承载能力极限状态则以破坏阶段作为计算依据。

加筋灰土垫层在受力时假定:(1)为平截面。该假定虽不严格成立,但由此引起的误差在工程允许范围之内;(2)受拉区灰土不参与受力。在即将破坏时在开裂截面中性轴附近的受拉区,虽有一小部分面积上有很小的拉应力(小于灰土的极限抗拉强度),但其合力(很小)与其内力偶臂(较小)的乘积远远小于受拉格栅的抗弯承载力,略去不计

以简化计算, 且偏于安全。根据灰土垫层承载能力的极限状态, 并采用等效矩形应力图形来代替理论应力图形, 可得灰土垫层的理论计算图式如图 3 所示。

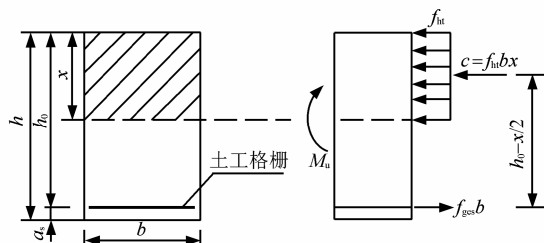


图 3 垫层截面受力极限状态与计算图式

Fig.3 The scheme of limit state for calculation of the reinforced lime-soil cushion

由静力平衡条件可建立基本计算公式, 由 $\Sigma H = 0$, 得

$$f_{ges}b = f_{ht}bx \quad (1)$$

由 $\Sigma M_{ges} = 0$, 得

$$M_u = f_{ht}bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (2)$$

式中: M_u 为受弯承载力; f_{ges} 为土工格栅抗拉强度设计值; f_{ht} 为灰土垫层弯曲抗压强度设计值; h_0 为垫层有效高度; h 为垫层厚度; b 为垫层计算宽度; x 为垫层受压区高度; a_s 为格栅重心至垫层边缘的距离。则有

$$\left. \begin{aligned} x &= f_{ges} / f_{ht} \\ h_0 &= h - a_s \\ M_u &= f_{ht}bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据式 (3), 检验弯矩设计值是否满足受弯承载力要求, 即可进行垫层设计的多因素分析, 确定合理的桩间距、垫层厚度、格栅强度等。

2.3 荷载分析

高速铁路灰土加筋垫层所受荷载 q 可分为路基本体自重:

$$q_1 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (4)$$

式中: n 为路基填土分层总数; γ_i , h_i 为各分层的重度 and 厚度。

轨道及列车荷载: 采用扩散角理论计算垫层所承受的轨道及列车荷载部分。设扩散角为 α , 轨道及列车荷载集度为 p , 轨道板宽度为 b , 路基高度为 H , 则轨道及列车荷载为

$$q_2 = p / (b + 2H \tan \alpha) \quad (5)$$

地基土的支撑力:

设桩间土的容许承载力为 f , 承载力发挥系数为 k , 则地基土的支撑力为

$$q_3 = kf \quad (6)$$

若地基土具有较强的湿陷性, 则可不计桩间土的支撑力, 取 $k = 0$ 。

根据以上分析, 可得作用在垫层上均布荷载:

$$q = (q_1 + q_2 + q_3)b \quad (7)$$

3 桩顶加筋灰土垫层工程设计

以郑一西客运专线某深厚湿陷性黄土地层为例, 进行桩顶加筋灰土垫层的设计和计算分析, 供类似工程参考。

3.1 构造分析

桩顶加筋灰土垫层主要由灰土和筋材两部分组成, 在高速铁路设计中灰土一般采用 2:8 灰土或 3:7 灰土, 筋材则为土工格栅。文献[4]曾做过土工带加筋碎石薄垫层的原位平板载荷试验, 分析了筋材布置对地基承载力的影响, 并对极限稳定时筋带的设计拉力进行了讨论, 提出用筋带的设计强度预估加筋地基极限承载力, 认为双层筋材加筋效果好于单层。土工格栅的材料类型和布置形式是垫层结构设计中考虑的主要问题之一。由于高速铁路桩顶垫层沿路基横、纵向均受到上部荷载的作用, 因此建议筋材采用双向受拉的土工格栅。根据高速铁路路基实际荷载情况, 桩顶部位垫层的上部受拉、下部受压; 桩间垫层则为上部受压、下部受拉。因此, 建议设计中采用两层土工格栅, 以承受相应部位的拉应力, 对于垫层中部铺设一层筋材的结构形式, 在桩顶灰土垫层设计中不宜采用。布置形式如图 4 所示, 由于土工格栅一般只用来承受拉力, 在计算中可不考虑受压侧格栅的作用。因高速铁路路基沉降较小, 建议加筋垫层应优选延伸率小的土工格栅筋材, 以在变形小的情况下充分发挥筋材的作用。

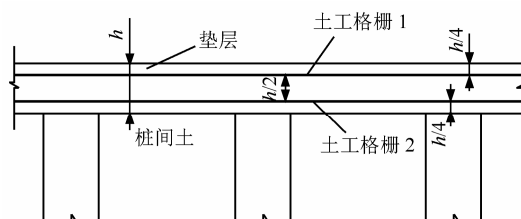


图 4 土工格栅布置形式

Fig.4 The scheme of geogrid in the lime-soil cushion

3.2 计算分析

某深厚湿陷性黄土地基工点,拟采用 CFG 桩进行处理,轨道结构为双块式无碴轨道,列车荷载为 ZK 活载。考虑不同桩径、不同桩间距、不同路基高度和不同格栅强度情况,设计 2:8 灰土垫层厚度,从而对参数影响进行分析。参数分析的标准工况为:桩径为 0.4 m,桩间距为 1.2 m,路基高度为 5.0 m,双向格栅抗拉强度为 80 kN/m。

桩间距的影响分析如表 1 和图 5 所示,其中垫层设计厚度在计算厚度基础上考虑了 1.2 的安全系数。桩间距 s 从 1.2~1.8 m 逐渐增加,垫层厚度 h 随之大致呈线性增加,且具有如下拟合关系式:

$$h = 0.576s - 0.348 \quad (R^2 = 0.997\ 4) \quad (8)$$

表 1 桩间距影响性分析
Table 1 The pile space analyses

桩间距 /m	垫层计算厚度 /m	垫层设计厚度 /m
1.2	0.29	0.35
1.4	0.38	0.46
1.6	0.47	0.56
1.8	0.58	0.70

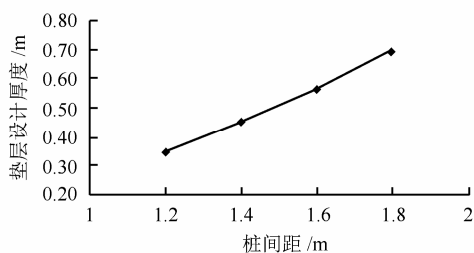


图 5 垫层厚度与桩间距关系

Fig.5 The relation between cushion depth and pile space

桩径 d 从 0.2~0.5 m 逐渐增加,垫层设计厚度 h 随之线性减小,且有如下拟合关系式:

$$h = -0.240d + 0.444 \quad (R^2 = 1) \quad (9)$$

路基高度 H 从 2.0~6.5 m 逐渐增加,垫层厚度 h 随之线性增加,且有如下拟合关系式:

$$h = 0.042H + 0.141 \quad (R^2 = 0.997\ 9) \quad (10)$$

格栅强度的影响性分析如图 6 所示。格栅强度 f_{ges} 从 20~80 kN/m 逐渐增加,垫层厚度 h 随之呈非线性迅速减小,且有如下拟合关系式:

$$\left. \begin{aligned} h &= 0.000\ 2f_{\text{ges}}^2 - 0.031\ 7f_{\text{ges}} + 1.458 \\ R^2 &= 0.988\ 6 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

在郑一西客运专线具体工点设计中采用如下 3 种方案:(1)桩径为 0.4 m,桩间距为 1.2 m;(2)

桩径为 0.5 m,桩间距为 1.4 m;(3)桩径为 0.5 m,桩间距为 1.5 m;其中格栅抗拉强度均为 80 kN/m。当路基高度为 5.0 m 时 3 种方案的垫层设计厚度值分别为 0.35, 0.42, 0.48 m,可供设计中参考。

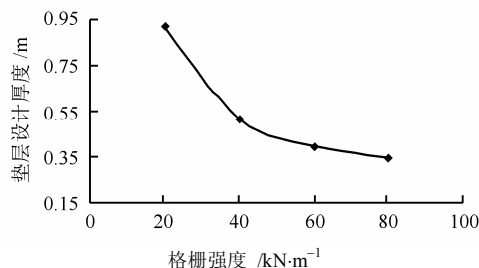


图 6 垫层厚度与格栅强度关系

Fig.6 The relation between cushion depth and geogrid strength

4 结 语

本文以郑一西客运专线为工程背景,建立了桩顶灰土垫层的理论模型,分析了垫层所受荷载,提出了灰土垫层设计理论。

建议设计中采用两层双向土工格栅结构形式,分别布置在垫层上下表面附近;对于垫层中部铺设一层筋材的结构形式,在桩顶灰土垫层设计中不宜采用。应优选延伸率小的土工格栅筋材,以在变形小的情况下充分发挥筋材的作用。考虑不同桩径、不同桩间距、不同路基高度和不同格栅强度情况,对灰土垫层厚度进行了参数影响性分析,以资我国高速铁路和相关路基工程设计、施工参考。今后将通过现场试验等方面对灰土垫层设计理论作进一步分析和验证。

参 考 文 献

- [1] 苏谦,蔡英.土工格栅、格室加筋砂垫层大模型试验及抗变形能力分析[J].西南交通大学学报,2001,36(2):176—180.
SU Qian, CAI Ying. Geogrid and geocell-reinforced sand blanket: model test and the ability to reduce deformation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(2): 176—180.
- [4] 黄仙枝,白晓红.加筋带布置对地基承载力的影响[J].岩土力学,2004,25(9):1475—1479.
HUANG Xian-zhi, BAI Xiao-hong. Influence of geobelt arranges on bearing capacity of foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1475—1479.

- [5] 王伟, 王俭, 薛剑豪. 土工格栅加筋垫层加固软土地基模型试验分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 885—1 891.
- WANG Wei, WANG Jian, XUE Jian-hao. Analysis of model tests on soft soil subgrade reinforced by geogrid[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1 885—1 891.
- [6] 黄仙枝, 岂连生, 白晓红. 软土地基土工带加筋碎石垫层的应力扩散研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2 992—2 997.
- HUANG Xian-zhi, QI Lian-sheng, BAI Xiao-hong. Study of stress distribution in belt geosynthetic-reinforced gravel on soft soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(17): 2 988—2 993.
- [7] KURIAN N P, BEENA K S, KUMAR R K. Settlement of reinforced sand in foundation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(9): 721—733.
- [8] 王钊, 王协群. 土工合成材料加筋地基的设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 731—733.
- WANG Zhao, WANG Xie-qun. Design of foundation reinforced with geosynthetics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 731—733.
- [9] RQJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R, LATHA G M. Behaviour of sand confined with single and multiple geocells[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1999, (17): 171—184.
- [10] HENKEL D J, GILBERT G D. The effect of the rubber membrane on the measured triaxial compression strength of clay samples[J]. **Geotechnique**, 1952, 3(1): 20—29.
- [11] HAYASHI S. Changes in interface stresses during pullout tests on geogrid strip reinforcement[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1999, 22(3): 32—38.
- [12] 梁波, 蔡英. 土工合成材料在高速铁路路桥过渡段中的应用[J]. 铁道学报, 1999, 21(4): 64—67.
- LIANG Bo, CAI Ying. Application of geosyn thetics at approach section on bridge of high speed railway[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1999, 21(4): 64—67.