

戴敬敬. 考虑筋土界面相互作用的加筋路基变形特性分析[J]. 华南地震, 2021, 41(1): 153–160. [DAI Jingjing. Analysis of Deformation Characteristics of Reinforced Subgrade Considering the Interaction of Reinforced–soil Interface[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 153–160]

考虑筋土界面相互作用的加筋路基变形特性分析

戴敬敬

(上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433)

摘要: 为了分析考虑筋土界面相互作用的加筋路基结构的变形特性, 分别采用 Timoshenko 梁模型、Pasternak 剪切层模型以及筋土界面摩尔库伦准则对加筋路基中路面结构、基层以及界面相互作用特性进行模拟。根据各层之间的相互作用, 得到加筋体的虚功方程。同时, 将计算模型退化为 Winkler 地基模型, 对比验证了模型的合理性。最后采用分析模型研究了筋材模量及界面摩擦系数、基层参数以及水平荷载的影响。结果表明: 在基层中铺设土工合成材料可以有效减小路面沉降, 提升基层的抗剪能力, 并降低路面水平荷载的影响; 提高筋材与基层间摩擦系数、筋材的抗拉模量以及基层的极限剪力可以有效提高加筋效果; 同时路面处的水平荷载会引起路面结构挠度的变化, 对筋材界面的摩擦阻力影响较大。

关键词: 加筋路基; 虚功方程; 摩擦系数; 水平荷载; 路面挠度

中图分类号: U416.01

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)01-00153-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.21

Analysis of Deformation Characteristics of Reinforced Subgrade Considering the Interaction of Reinforced–soil Interface

DAI Jingjing

(Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: In order to analyze the deformation characteristics of reinforced subgrade structures considering the interaction of reinforced–soil interface, the Timoshenko beam model, Pasternak shear layer model and the Mohr Coulomb criterion of reinforced soil interface were used to analyze the pavement, subbase and interface characteristic. According to the relationship of pavement, subbase reinforcement and foundation, the virtual work equation was obtained. Then the calculation model in this paper was degenerated into a Winkler foundation model, and the correctness of the calculation model is verified by comparison. The effects of reinforcement and interface parameters, subbase layer parameters and horizontal load were analyzed. The results showed that the

收稿日期: 2021-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678352)

作者简介: 戴敬敬(1984–), 男, 工程师, 主要从事市政高架、道路改扩建, 雨水管、污水管道施工总承包管理工作。

E-mail: 157719507@qq.com

inclusion of geosynthetics in the subbase could effectively reduce pavement settlement, strengthen the shear resistance. With the increasing tensile strength of geosynthetic, the coefficient of friction and the ultimate shear strength of subbase, the effect of reinforcement and the ability to resist the deformation increased. Horizontal load will result in change on deflection of pavement, which has great effect on the frictions between geosynthetic and subbase.

Keywords: Reinforced subgrade; Virtual work equation; Friction coefficient; Horizontal load; Pavement deflection

0 引言

在各类软土地基上,由于承载力不够,在修建公路、铁路等基础设施时会造成沉降过大影响施工以及使用等问题。面对此种情况,在各类工程中采用土工合成材料对不同结构进行加固的方法已经得到了广泛的运用^[1-2]。

目前已有许多学者对加筋土结构进行了理论分析。赵明华^[3]通过改进传统土柱模型,计算分析了考虑土拱效应的土工格室加筋路堤的受力变形。孙亮富^[4]设计了单向网格状带齿加筋,初步分析了此种三维立体加筋砂垫层的作用机理。还有很多学者从理论角度对加筋地基进行了相关研究。陈昌富^[5]分析计算了筋材-桩体组合的地基极限承载力,并通过实际工程实例对比计算。Maheshwari^[6]提出条形荷载下土工合成材料加筋软弱地基的力学模型,分析了土层的相对刚度,梁的相对抗弯刚度以及受力区域等参数的影响。此外,在加筋土结构动力响应方面,Calvarano^[7]从数值计算角度采用 ABAQUS 软件,对混合基础上未铺设路面层的加筋道路结构进行分析,得到了循环荷载作用下的动力响应。宋广^[8]基于加筋路基在交通荷载作用下的变形特点,对路面变形和路基加筋效果进行了参数影响分析。

在此基础上,学者们针对不同的计算方法对地基上加筋结构变形的影响进行了研究。王陶^[9]在进行了加筋道路计算时考虑了薄膜效应,并得出了假定薄膜挠度很小的平衡微分方程,得到加筋道路体系一般解。赵明华^[10]针对土工格室在软土路基中的受力变形特点,将其简化为连续长梁,并建立了土工格室加筋体的挠曲变形方程。边学成^[11]利用 Pasternak 模型分析了路基填料与地基土之间的剪切作用,并对土工格室加筋体进行了分析。Ghosh^[12]将软土上荷载传递平台的物理模型理想化为 Kerr 地基上的薄膜加筋 Timoshenko 梁,得到了一个较为精确的分析模型。

综上所述,本文考虑筋材在基层中的相互作用,研究加筋路基中筋材及参数、界面摩擦系数、基层参数及水平荷载等因素的影响,分析了不同参数下路面结构及筋材的变形特征,对采用加筋路基结构的实际工程具有一定的参考价值。

1 计算模型与计算公式

1.1 模型建立

图 1 为本文所采用的简化模型示意图,采用 Timoshenko 梁模拟路面结构, Pasternak 剪切层模拟基层特性;土工合成材料采用线弹性模型模拟土工合成材料特性。

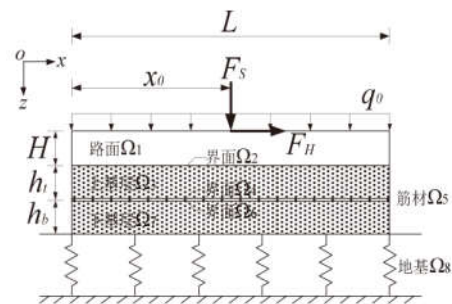


图 1 简化模型

Fig.1 Simplified model

在路面上施加均布荷载 q_0 与一竖向集中荷载 F_s 以模拟车辆荷载,同时在作用点处施加一水平荷载以模拟制动荷载。假设结构整体长为 L , 宽为 B , 路面结构厚度为 H , 上下基层厚度分别为 h_1 与 h_2 。如图所示,将路面、筋材及基层所占空间记为 Ω_i ($i=1,3,5,7$);将路面与基层、基层与筋材的接触界面分别记为 Ω_j ($j=2,4,6$);将软土地基记为 Ω_8 。

1.2 位移假定及受力分析

根据图 1 中的局部坐标, w 为竖向位移(z 方向), u 为水平位移(x 方向), θ 为截面转角。可得路面结构中局部坐标 (x_1, z_1) 和上部基层中局部坐标

(x_2, z_2) 处的水平位移与竖向位移分别为:

$$\begin{cases} u_1(x_1, z_1) = u_{10}(x_1) - \theta_1(x_1)z_1 \\ w_1(x_1, z_1) = w_1(x_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_2(x_2, z_2) = u_{20}(x_2) - \theta_2(x_2)z_2 \\ w_2(x_2, z_2) = w_2(x_2) \end{cases} \quad (2)$$

由于土工格栅的厚度较小, 筋材中横坐标处的水平位移和竖向位移分别为 $u_{30}(x_3)$ 和 $w_2(x_3)$ 。

下部基层中局部坐标为 (x_4, z_4) 处的水平位移与竖向位移分别为:

$$\begin{cases} u_4(x_4, z_4) = u_{40}(x_4) - \theta_4(x_4)z_4 \\ w_4(x_4, z_4) = w_2(x_4) \end{cases} \quad (3)$$

结合式(1)、(2)可以计算出路面与基层的相对滑移 u_{r1} 、筋材与上、下基层接触面间的相对滑移 u_{r2} 与 u_{r3} , 及下部基层与地基间的相对水平位移 u_{r4} 分别为:

$$u_{r1} = u_1(x, \frac{1}{2}H) - u_2(x, -\frac{1}{2}h_1) \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{r2} = u_2(x, \frac{1}{2}h_1) - u_{30}(x) \\ u_{r3} = u_{30}(x) - u_4(x, -\frac{1}{2}h_b) \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{r4} = u_4(x, \frac{1}{2}h_b) \quad (6)$$

根据文献[13]可知, 基层中的剪应力 τ 可以表示为:

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{1 + \frac{G_0 \cdot \gamma}{\tau_m}} \quad (7)$$

式(7)中 τ_m 为基层极限剪力, G_0 为初始剪切模量。

其中, 剪切刚度 G 为关于剪切应变的一阶导数:

$$G = \frac{G_0 \cdot \tau_m^2}{(G_0 \gamma + \tau_m)^2} \quad (8)$$

由参考文献[14]中可知竖向反力公式如下:

$$F_w = \frac{k_{s0} \cdot w}{1 + \frac{k_{s0} \cdot w}{q_f}} \quad (9)$$

式(9)中, k_{s0} 为初始反力系数, q_f 为地基极限承载力, w 为竖向位移。由此可得其切向反力系数 k_s :

$$k_s = \frac{k_{s0} \cdot q_f^2}{(k_{s0} \cdot w + q_f)^2} \quad (10)$$

对于层间摩阻力 f , 其公式为:

$$f = \left(\frac{c_a + \sigma_n \tan \delta}{u_0} \right) u \quad (11)$$

式(11)中, c_a 为界面土体黏聚力, σ_n 为界面正应力, δ 为路面-基层界面及筋土界面摩擦角, u_0 为临界相对滑移量, u 为界面相对滑移。由于考虑了各层

的轴向变形, 界面相对滑移的值较小, 假设界面相对滑移 u 保持在临界滑移值 u_0 内, 并使各层间的水平摩阻系数 $k_x = \frac{c_a + \sigma_n \tan \delta}{u_0}$ ($x=1 \sim 4$)。由此可得:

$$f_x = k_x u_{rx} \quad (x=1 \sim 4) \quad (12)$$

式(12)中, f_1 为路面与基层间水平摩阻力, f_2 、 f_3 为筋材与上、下基层间水平摩阻力, f_4 为下部基层与地基间水平摩阻力。

路面与基层间的相互作用力 F' 计算如下为:

$$\Delta w = w_1(x) - w_2(x) \quad (13)$$

$$F' = k_w \cdot \Delta w \quad (14)$$

式(14)中 k_w 接触面拉压刚度。结合以上公式, 可列出虚功方程如下:

$$\begin{aligned} & \int_{beam} [(\delta \epsilon_x) \cdot \sigma_x + (\delta \gamma_{xz}) \tau_{xz}] d\Omega_1 + \int_{Int1} (\delta u_{r1}) \cdot f_1 d\Omega_2 \\ & + \int_{Gt} [(\delta \gamma_{xz}) \tau_{xz}] d\Omega_3 + \int_{Int2} (\delta u_{r2}) \cdot f_2 d\Omega_4 \\ & + \int_{rein} [(\delta \epsilon_x) \cdot \sigma_x] d\Omega_5 + \int_{Int3} (\delta u_{r3}) \cdot f_3 d\Omega_6 \\ & + \int_{Gb} [(\delta \gamma_{xz}) \tau_{xz}] d\Omega_7 + \int_{beam-Gt} [(\delta \Delta w) \cdot F'] d\Omega_2 \\ & + \int_{soil} [(\delta w_2) \cdot F_w + (\delta u_{r4}) \cdot f_4] d\Omega_8 \\ & = \int_L (\delta w_1) q_0 dL + \left[\delta u_1(x_0, -\frac{1}{2}H) \right] \cdot F_H + [\delta w_1(x_0)] \cdot F_S \end{aligned} \quad (15)$$

2 方程求解

2.1 单元形函数

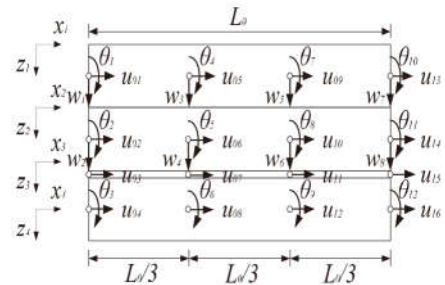


图 2 局部坐标与节点

Fig.2 Local coordinates and the nodes

如图 2 所示, 采用的有限元三次插值形式, 并在数值运算时采用减缩积分法。 L_0 为单元长度, 采用三次插值进行计算, 得到插值函数如下:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{(L_0 - 3x)(2L_0 - 3x)(L_0 - x)}{2L_0^3} \\ N_2 = \frac{9x(2L_0 - 3x)(L_0 - x)}{2L_0^3} \\ N_3 = \frac{-9x(L_0 - 3x)(L_0 - x)}{2L_0^3} \\ N_4 = \frac{x(L_0 - 3x)(2L_0 - 3x)}{2L_0^3} \end{cases} \quad (16)$$

将节点的位移向量 Ψ_n ($n=1\sim 4$) 表示如下:

$$\begin{cases} \Psi_1 = [u_{01}, w_1, \theta_1, u_{02}, w_2, \theta_2, u_{03}, u_{04}, \theta_3]^T \\ \Psi_2 = [u_{05}, w_3, \theta_4, u_{06}, w_4, \theta_5, u_{07}, u_{08}, \theta_6]^T \\ \Psi_3 = [u_{09}, w_5, \theta_7, u_{10}, w_6, \theta_8, u_{11}, u_{12}, \theta_9]^T \\ \Psi_4 = [u_{13}, w_7, \theta_{10}, u_{14}, w_8, \theta_{11}, u_{15}, u_{16}, \theta_{12}]^T \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)合并后得到单元自由度向量:

$$\delta e = [\Psi_1^T, \Psi_2^T, \Psi_3^T, \Psi_4^T]^T \quad (18)$$

根据图 2 可得, 路面梁单元的水平位移、竖向位移以及截面转角函数如下:

$$N_{u_0 beam} = [N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, \overbrace{0 \cdots 0}^8] \quad (19)$$

$$N_{w beam} = [0, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, \overbrace{0 \cdots 0}^7] \quad (20)$$

$$N_{\theta beam} = [0, 0, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, \overbrace{0 \cdots 0}^6] \quad (21)$$

同理, 基层单元的各形函数分别为:

$$\begin{cases} N_{u_0 Gt} = [\overbrace{0 \cdots 0}^3, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, \overbrace{0 \cdots 0}^5] \\ N_{w Gt} = [\overbrace{0 \cdots 0}^4, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, \overbrace{0 \cdots 0}^4] \\ N_{\theta Gt} = [\overbrace{0 \cdots 0}^5, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, \overbrace{0 \cdots 0}^3] \end{cases} \quad (22)$$

筋材单元的水平位移形函数为:

$$N_{urein} = [\overbrace{0 \cdots 0}^6, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, 0, 0] \quad (23)$$

下部基层单元的各位移和截面转角形函数为:

$$\begin{cases} N_{u_0 Gb} = [\overbrace{0 \cdots 0}^7, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, 0] \\ N_{w Gb} = N_{w Gt} = [\overbrace{0 \cdots 0}^4, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4, \overbrace{0 \cdots 0}^4] \\ N_{\theta Gb} = [\overbrace{0 \cdots 0}^8, N_1, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_2, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_3, \overbrace{0 \cdots 0}^8, N_4] \end{cases} \quad (24)$$

路面梁单元、上基层、下基层单元局部纵坐标分别为 z_1, z_2, z_3 的点水平位移形函数:

$$N_{ubeam} = N_{u_0 beam} - z_1 N_{\theta beam} \quad (25)$$

$$\begin{cases} N_{u Gt} = N_{u_0 Gt} - z_2 N_{\theta Gt} \\ N_{u Gb} = N_{u_0 Gb} - z_4 N_{\theta Gb} \end{cases} \quad (26)$$

因此, 其相对竖向位移形函数为:

$$N_{\Delta w} = N_{w G} - N_{w beam} \quad (27)$$

同理, 其应变形函数为:

$$\begin{cases} N_{\varepsilon 1} = \frac{\partial N_{ubeam}}{\partial x_1}, N_{\gamma 1} = \frac{\partial N_{ubeam}}{\partial z_1} + \frac{\partial N_{w beam}}{\partial x_1} \\ N_{\gamma 2} = \frac{\partial N_{u Gt}}{\partial z_2} + \frac{\partial N_{w Gt}}{\partial x_2} \\ N_{\varepsilon 3} = \frac{\partial N_{urein}}{\partial x_3} \\ N_{\gamma 4} = \frac{\partial N_{u Gb}}{\partial z_4} + \frac{\partial N_{w Gb}}{\partial x_4} \end{cases} \quad (28)$$

式中 $N_{\varepsilon 1}$ 为路面结构内正应变, $N_{\gamma 1}$ 为其剪应

变; 仅考虑基层中的剪切效应, $N_{\gamma 2}$ 、 $N_{\gamma 4}$ 分别为上、下部基层中的剪应变; $N_{\varepsilon 3}$ 为筋材应变。

由式(4)、(5)、(6)以及式(25)、(26)可得界面相对位移形函数:

$$\begin{cases} N_{ur1} = N_{ubeam}(x, \frac{1}{2}H) - N_{u Gt}(x, -\frac{1}{2}h_t) \\ N_{ur2} = N_{u Gt}(x, \frac{1}{2}h_t) - N_{urein}(x) \\ N_{ur3} = N_{urein}(x) - N_{u Gb}(x, -\frac{1}{2}h_b) \\ N_{ur4} = N_{u Gb}(x, \frac{1}{2}h_b) \end{cases} \quad (29)$$

2.2 公式求解

$$\begin{cases} u_1^h = N_{ubeam} \cdot \delta_e, w_1^h = N_{w beam} \cdot \delta_e \\ u_2^h = N_{u Gt} \cdot \delta_e, w_2^h = N_{w Gt} \cdot \delta_e \\ u_3^h = N_{urein} \cdot \delta_e \\ u_4^h = N_{u Gb} \cdot \delta_e, w_4^h = w_2^h \\ \varepsilon_1^h = N_{\varepsilon 1} \cdot \delta_e, \gamma_1^h = N_{\gamma 1} \cdot \delta_e \\ \gamma_2^h = N_{\gamma 1} \cdot \delta_e, \varepsilon_3^h = N_{\varepsilon 3} \cdot \delta_e, \gamma_4^h = N_{\gamma 4} \cdot \delta_e \end{cases} \quad (30)$$

上式为位移和应变的插值函数, 上边 h 表示有限元近似, 将公式离散后得到单元残值向量:

$$\begin{aligned} Re = & \int_{beam} [N_{\varepsilon 1}^T \cdot E_1(N_{\varepsilon 1} \cdot \delta e) + N_{\gamma 1}^T \cdot G_1(N_{\gamma 1} \cdot \delta e)] d\Omega_1 \\ & + \int_{Int1} [N_{ur1}^T \cdot k_1(N_{ur1} \cdot \delta e)] d\Omega_2 + \int_{Gt} [N_{\gamma 2}^T \cdot G(N_{\gamma 2} \cdot \delta e)] d\Omega_3 \\ & + \int_{Int2} [N_{ur2}^T \cdot k_2(N_{ur2} \cdot \delta e)] d\Omega_4 + \int_{rein} [N_{\varepsilon 3}^T \cdot E_g(N_{\varepsilon 3} \cdot \delta e)] d\Omega_5 \\ & + \int_{Int3} [N_{ur3}^T \cdot k_3(N_{ur3} \cdot \delta e)] d\Omega_6 + \int_{Gb} [N_{\gamma 4}^T \cdot G(N_{\gamma 4} \cdot \delta e)] d\Omega_7 \\ & + \int_{soil} [N_{w Gt}^T \cdot k_s(N_{w Gt} \cdot \delta e) + N_{ur4}^T \cdot k_4(N_{ur4} \cdot \delta e)] d\Omega_8 \\ & + \int_{beam-Gt} [N_{\Delta w}^T \cdot k_w(N_{\Delta w} \cdot \delta e)] d\Omega_2 \\ & - \int_0^{L_0} N_{w beam} \cdot q_0 dx - N_{ubeam} \Big|_{z_1=\frac{1}{2}H}^{x=x_0} \cdot F_H - N_{w beam} \Big|_{x=x_0}^{z_4} \cdot F_s \end{aligned} \quad (31)$$

根据式(31), 可得单元切向刚度矩阵:

$$\begin{aligned} Kte = \frac{\partial Re}{\partial \delta e} = & \int_{beam} (N_{\varepsilon 1}^T \cdot E_1 \cdot N_{\varepsilon 1} + N_{\gamma 1}^T \cdot G_1 \cdot N_{\gamma 1}) d\Omega_1 \\ & + \int_{Int1} (N_{ur1}^T \cdot k_1 \cdot N_{ur1}) d\Omega_2 + \int_{Gt} (N_{\gamma 2}^T \cdot G \cdot N_{\gamma 2}) d\Omega_3 \\ & + \int_{Int2} (N_{ur2}^T \cdot k_2 \cdot N_{ur2}) d\Omega_4 + \int_{rein} (N_{\varepsilon 3}^T \cdot E_g \cdot N_{\varepsilon 3}) d\Omega_5 \\ & + \int_{Int3} (N_{ur3}^T \cdot k_3 \cdot N_{ur3}) d\Omega_6 + \int_{Gb} (N_{\gamma 4}^T \cdot G \cdot N_{\gamma 4}) d\Omega_7 \\ & + \int_{soil} (N_{w Gt}^T \cdot k_s \cdot N_{w Gt} + N_{ur4}^T \cdot k_4 \cdot N_{ur4}) d\Omega_8 \\ & + \int_{beam-Gt} (N_{\Delta w}^T \cdot k_w \cdot N_{\Delta w}) d\Omega_2 \end{aligned} \quad (32)$$

3 计算分析

3.1 算例分析

本文将计算模型退化为 Winkler 地基模型(如图 3),并将其计算结果与文献[15]结果进行对比。由图 4 可知,划分结构 20 单元,即 61 节点计算得到的结果与文献[20]相近,验证了本文计算模型的可靠性。

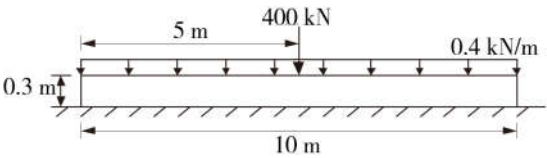


图 3 Winkler 地基上 Timoshenko 梁
Fig.3 Timoshenko beam on Winkler foundation

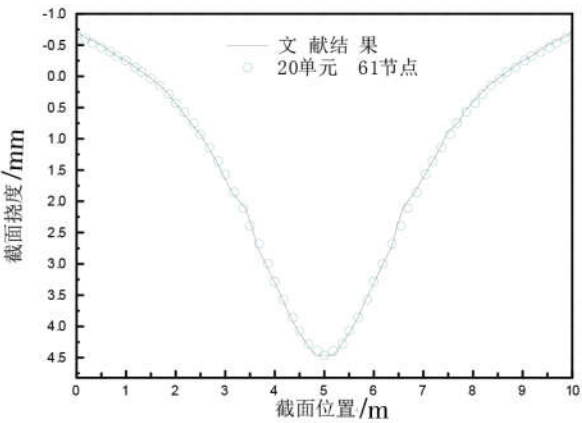


图 4 挠度结果对比
Fig.4 Comparison of deflections for different cross-sectional positions

3.2 参数分析

运用本文推导所得的模型对整体结构进行分析,初始参数值见表 1。

3.2.1 筋材参数的影响

图 5 给出了不同筋材基层间摩阻系数和抗拉模量的路面跨中挠度曲线。相比不加筋的情况,铺设筋材能够有效的减小跨中挠度。随着抗拉模量与摩阻系数的增大,其跨中截面挠度分别减小了 22.75%和 34.15%。这表明在基层中铺设土工合成材料可以有效地减小路面跨中界面挠度,增强基层抗变形能力。而采用抗拉模量较大的筋材并增大筋材与基层间的摩擦阻力,可以减小筋材与上、下基层接触面间的相对滑移,分散和抵消局部荷载,有效提高加筋路基的承载力。

表 1 数值分析计算参数取值

Table 1 Values of parameters for numerical analysis

参数名	符号及单位	参数值
路面及基层长度	L/m	12
路面高度	H/m	0.3
基层高度	$h_i=h_o/\text{m}$	0.75
路面及基层宽度	B/m	1
路面弹性模量	$E_l/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	2×10^7
路面剪切模量	$G_l/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	8×10^6
筋材拉伸模量	$E_g/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	6×10^3
路面基层间摩阻系数	$k_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	7×10^7
筋材基层间摩阻系数	$k_2=k_3/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^4
地基水平刚度系数	$k_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	1.16×10^3
地基初始反力系数	$k_{s0}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	7×10^3
地基极限承载力	q_f/kPa	200
基层初始剪切模量	$G_o/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	6×10^4
基层极限剪力	τ_m/kN	1×10^3

图 6 给出了跨中作用 1000 kN 竖向荷载时筋材与上部基层间的摩擦阻力。当摩阻系数为 $1\times10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,筋材抗拉模量增大时,跨中位置右侧界面摩阻力逐渐减小,左侧界面摩阻力逐渐增大,而后曲线趋于平缓。抗拉模量 E_g 由 $6\times10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 增大为原本的 5 倍与 10 倍时,界面摩阻力最大值分别减小了 37.74%与 55.99%,近端点处摩阻力则向正值增大,表明筋材与土相对位移略有增大;而当筋材抗拉模量保持在 $6\times10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时,摩阻系数增大为原本的 2 倍与 3 倍时,界面摩擦阻力整体有所增大,其极值分别增大了 178.57%与 374.61%。由此可看出,随着筋材抗拉模量的增大,界面间的相对滑移以及摩擦阻力减小,自身抗拉性能所提供的加筋效果更明显;而增大摩阻系数可以显著增大界面摩擦阻力,更好提升筋材的加筋效果。

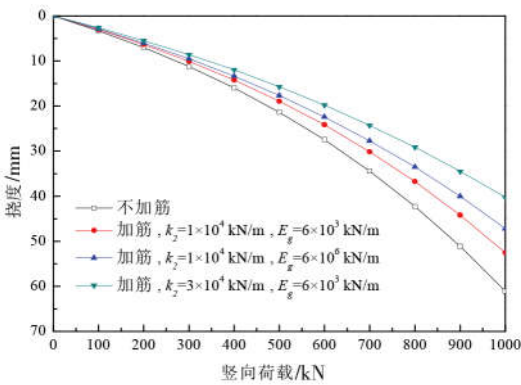


图 5 不同筋材参数对路面挠度的影响
Fig.5 Influences of different parameters of geosynthetic on pavement deflections

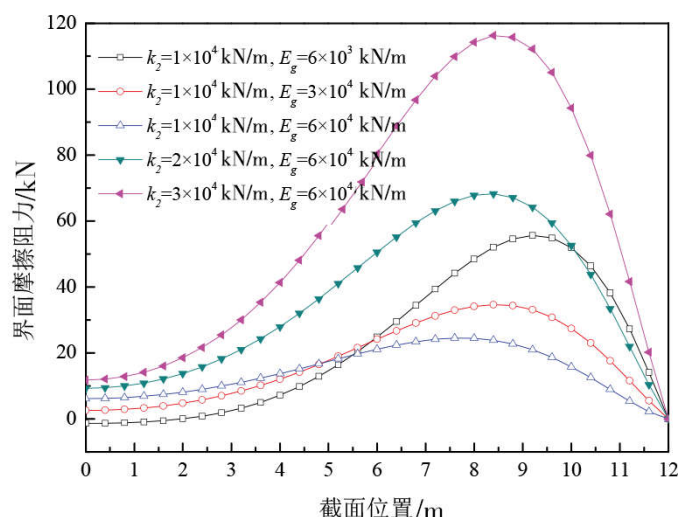


图6 不同筋材参数对界面摩擦阻力的影响

Fig.6 Influences of different parameters of geosynthetic on interface friction

图7为跨中作用1000 kN竖向荷载时不同截面位置处筋材的拉应变。当摩阻系数不变,筋材拉伸模量增大为原本的5倍与10倍时,其拉应变在正向与负向范围内皆明显减小,跨中处筋材应变值分别减小了44.31%与61.42%,表明增大拉伸模量可以防止其受拉破坏;而当筋材的拉伸模量保持不变,摩阻系数增大为原本的2倍与3倍时,筋材拉应变均有所增大,跨中处筋材拉应变值分别增大了34.89%与53.09%。

3.2.2 基层参数的影响

图8给出了加筋与不加筋时不同极限剪力的基层在荷载作用下路面的跨中挠度曲线。比较加筋与不加筋两种情况,当基层的极限剪力由10 kN增大至1000 kN,跨中作用1000 kN竖向荷载时挠

度分别减小了7.07%与4.61%,表明增加基层的极限剪力可以一定程度上减缓路面沉降。同时,基层中铺设筋材时路面的挠度会明显小于不加筋时拥有更大基层极限剪力的情况,表明通过在基层中铺设土工合成材料,可以有效地提升加筋路基的抗变形能力,从而增强道路整体的稳定性。

3.2.3 水平荷载的影响

图9给出了跨中作用1000 kN竖向荷载以及不同大小水平荷载时,路面结构的挠度变化曲线。从图中可以看出,水平荷载的增大对梁端由一定影响,其挠度变化有所增大,路面向上翘起。其原因是水平荷载与竖向荷载的耦合作用,加剧路面结构翘曲。

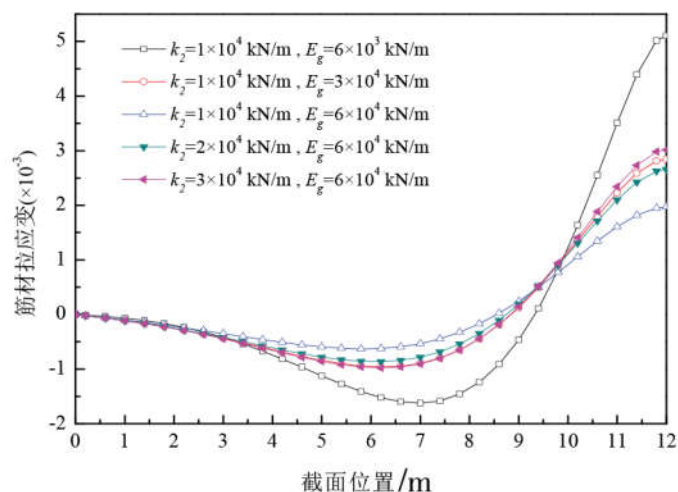


图7 不同筋材参数对筋材应变的影响

Fig.7 Influences of different parameters of geosynthetic on strains

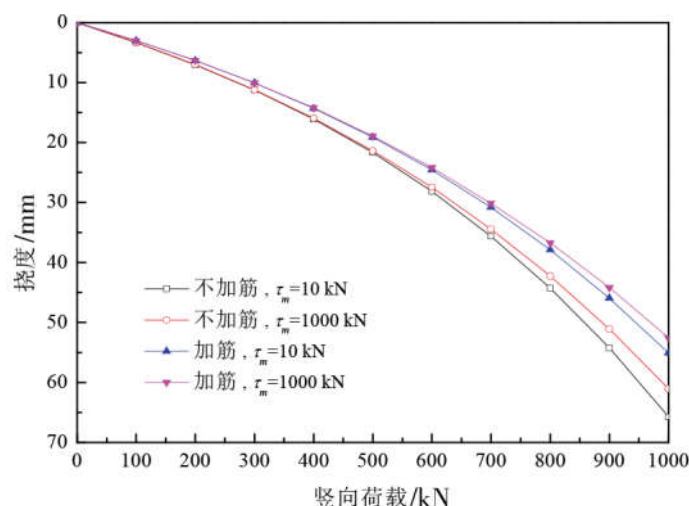


图8 不同基层参数对路面挠度的影响

Fig.8 Influences of different parameters of subbase on deflections

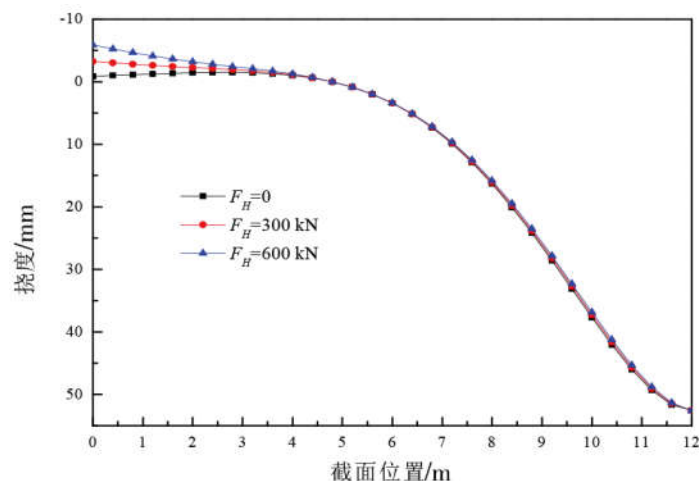


图9 水平荷载对路面挠度的影响

Fig.9 Influences of horizontal loads on pavement deflections

图10给出了跨中作用1000 kN竖向荷载与不同大小水平荷载时,筋材与上部基层间的摩擦阻力。由图可以看出,界面摩擦阻力随着距离梁端距离的增大先增大后减小;而且随着水平荷载的增大,界面整体的摩擦阻力有所增大,当荷载增大至300 kN与600 kN时,摩擦阻力极值分别增大了26.26%与52.49%,且作用点的水平摩擦有所增大。由此可见,水平荷载的大小会明显地影响筋材与基层间的相对滑移和摩擦阻力,所以通过铺设土工合成材料可以更好地减小水平荷载产生的影响,提高结构抵抗变形的能力。

4 结论

(1)提升筋材与基层间的摩擦系数可以显著增

强其加筋效果,减小路面结构挠度,增加界面摩擦阻力;而采用抗拉模量较大的筋材可以减小自身的拉伸应变,避免其受力破坏。

(2)对比加筋与不加筋两种情况,在基层中铺设筋材可以有效地减小路面挠度;同时,随着基层的极限剪力的增大,跨中挠度分别减小了7.07%与4.61%。

(3)路面处的水平荷载会明显地影响筋材与基层间的相对滑移以及摩擦阻力;铺设土工合成材料可以减少制动荷载产生的影响,提升抵抗变形的能力。

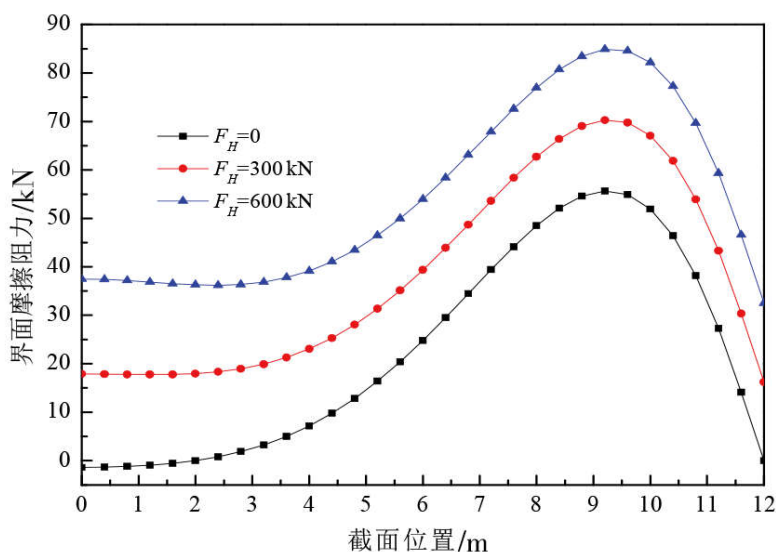


图 10 不同水平荷载大小对界面摩擦阻力的影响

Fig.10 Influences of different horizontal loads on interface frictions

参考文献

- [1] WANG, Z., JACOBS, F., ZIEGLER, M., et al. Visualisation and quantification of geogrid reinforcing effects under strip footing loads using discrete element method [J]. *Geotextile and Geomembranes*, 2020,48(1):62-70.
- [2] SUDARSANAN, N, ARULRAJAH, A, KARPURAPU, R, et al Fatigue performance of geosynthetic-reinforced asphalt concrete beams [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020,32(8),04020206.
- [3] 赵明华,陈大兴,刘猛,等. 考虑土拱效应影响的路堤荷载下土工格室加筋体变形分析[J]. *岩土工程学报*, 2020,45(04):601-609.
- [4] 孙亮富,张孟喜,林永亮,等. 单向网格状带齿加筋砂垫层加固道路软基的变形特性研究[J]. *土木工程学报*, 2011,44(S2):13-17.
- [5] 陈昌富,周志军. 路堤下水平加筋体与散体材料桩复合地基极限承载力[J]. *中国公路学报*, 2010,23(03):1-9.
- [6] Maheshwari, P., Viladkar, M. N. A mathematical model for beams on geosynthetic reinforced earth beds under strip loading[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009,33(4): 1803 - 1814.
- [7] CALVARANO L S, LENARDI G, PALAMARA. R Finite element modelling of unpaved road reinforced with geosynthetics[J]. *Procedia Engineering*, 2017,189:99-104.
- [8] 宋广,边学成,蒋建群,等. 公路加筋路基的变形和承载力分析[J]. *上海交通大学学报*, 2011,45(05):653-658.
- [9] 王陶,王钊. 考虑薄膜效应的土工合成材料加筋道路模型[J]. *岩土工程学报*, 2003,25(04):706-709.
- [10] 赵明华,张玲,曹文贵,等. 基于弹性地基梁理论的土工格室加筋体变形分析[J]. *岩土力学*, 2009,30 (12):3695-3699.
- [11] 边学成,宋广,陈云敏. Pasternak 地基中土工格室加筋体的受力变形分析[J]. *工程力学*, 2012,29(05):147-155.
- [12] GHOSH B., FATAHI B, KHABBAZ H, et al. Analytical study for double -layer geosynthetic reinforced load transfer platform on column improved soft soil [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017,45(5):508-536.
- [13] GHOSH C, MADHAV M R. Settlement response of a reinforced shallow earth bed [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1994,13 (9):643 - 656.
- [14] KONDNER R L. Hyperbolic stress -strain response: cohesive soils[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering-Transactions of the ASME*, 1963,89(SM1): 115-143.
- [15] 夏桂云,李传习,张建仁. 考虑水平摩阻和双重剪切的弹性地基梁分析[J]. *土木工程学报*, 2011,44(12):93-100.