

基于广义可靠度指标相对安全率的桩板结构路基 沉降安全判据研究

李宝地¹, 李锦良¹, 冯超²

(1. 陕西路桥集团有限公司, 陕西 西安, 710065; 2. 陕西交通职业技术学院, 陕西 西安, 710018)

摘要:【目的】为建立桩板结构路基确定性安全设计和可靠度设计间的联系,【方法】首先推导了桩板结构路基沉降计算解析解,建立了桩板结构路基可靠度分析模型,研究了地基土弹性模量变异系数、上部荷载和桩间距对路基沉降失效概率的影响,然后提出了基于广义可靠度指标相对安全率的桩板结构路基沉降安全判据框架,分析了广义可靠度指标相对安全率和安全系数相对安全率的关系,进而探讨了上覆荷载对临界桩间距的影响。【结果】结果表明,本文沉降计算方法能较好反映桩板结构路基沉降变形特征;桩板结构路基沉降由上部荷载和桩板组合刚度共同决定,其失效概率与荷载水平的关系曲线随地基土弹性模量变异系数的增大由陡增型转变为线性增长;广义可靠度指标相对安全率和安全系数相对安全率近似呈线性关系,通过允许失效概率标定结构允许安全系数,保证了桩板结构路基确定性设计和可靠度设计的设计可行域基本一致;此外,上覆荷载的增加将导致临界桩间距呈对数非线性减少。【结论】研究成果有助于桩板结构路基的沉降变形预测和结构优化设计。

关键词: 道路工程; 桩板结构; 路基沉降; 解析解; 可靠度; 相对安全率

中图分类号: TU 47

文献标志码: A

Safety Criteria for Settlement of Pile Plate Structure Subgrade Based on the Generalized Reliability Ratio of Safety Margin

Li Baodi¹, Li Jinliang¹, Feng Chao²

(1. Shaanxi Road and Bridge Group Co. LTD; 2. Shaanxi College of Communications Technology)

Abstract: 【Objective】To establish the relationship between the deterministic safety design and reliability design of pile plate structure subgrade. 【Method】 This paper first derives the analytical solution for settlement calculation of pile plate structure subgrade and establishes the reliability analysis model for the subgrade. The influence of the variability coefficient of subgrade soil elastic modulus, upper load, and pile spacing on the failure probability of subgrade settlement is studied. Subsequently, a framework for settlement safety criteria of pile plate structure subgrade based on the generalized reliability ratio of safety margin is proposed. The relationship between the relative safety margin of the generalized reliability index and the safety factor's relative safety margin is analyzed, and the effect of overlying load on the critical pile spacing is discussed. 【Result】 The results show that the settlement calculation method in this paper can better reflect the settlement deformation characteristics of the pile plate structure subgrade. The settlement of the pile plate structure subgrade is jointly determined by the upper load and the combined stiffness of the plate, and its failure probability curve with the load level changes from a steep increase to linear growth as the variability coefficient of the subgrade soil elastic modulus increases. The relative safety margin of the generalized reliability index and the safety factor's relative safety margin exhibit an approximately linear relationship, and by allowing the failure probability to calibrate the allowable safety factor, the basic consistency of deterministic design and reliability design of the pile plate structure subgrade is ensured.

【Conclusion】 In addition, an increase in overlying load will lead to a logarithmic non-linear decrease in the critical pile spacing. The research findings are conducive to the deformation prediction and optimal design of of

pile-plate structure subgrades.

Key words: Roadway Engineering; Pile plate structure; Subgrade settlement; Analytical calculation; Reliability; Ratio of safety margin

【研究意义】桩板结构由钢筋混凝土桩基与承载板组成,具有强度高、稳定性好、施工工艺简单等优点,尤其在处理深厚软土、松软土以及深厚湿陷性黄土等地质结构时具有显著的优势^[1-2],为公路拓宽改建工程提供了新的解决方案。

【研究进展】针对桩板结构路基沉降变形规律及影响因素,国内外学者开展了较为全面的研究。对于桩板路结构基的沉降变形特征,詹永祥等^[3]依托遂渝线无砟轨道桩板结构路基工程开展了离心模型试验,发现路基施工完成放置5个月后累积沉降逐渐稳定;荆志东等^[4]开展了探究软土地基中桩板结构沉降变形的离心模型试验,发现铺设混凝土板可有效降低12%的地基沉降;黄龙等^[5]采用离心模型试验研究了软土地基上桩板结构路基施工阶段的沉降,发现超载预压可降低路基工后沉降;Kim等^[6]采用SLOPILE软件模拟了一个桩板加固的桥台,发现桩板组合结构能有效地防止软土地基的侧向流动;隋孝民和许志勇^[7]通过数值模拟发现桩板结构形式路基可以有效控制岩溶覆盖层的沉降。此外,秦旗^[8]、王鑫越等^[9]通过动力试验发现桩板组合结构路基还表现出较好的变形协调特性和抗振动特性。对于桩板结构路基沉降变形的影响因素,陕耀等^[10]基于离心模型试验研究了桩板结构路基运营期间的差异沉降,发现土体应力历史会显著影响路基差异沉降;崔宏环和王志阳^[11]通过数值模拟发现车重是桩板结构路基沉降最主要影响因素;唐宏华^[12]也发现沉降变形随荷载的增加而增大;王岩涛和陆梦婉^[13]、赵涵秀等^[14]和陈想明^[15]通过数值模拟发现桩间距对桩板路基沉降较敏感;宋扬等^[16]采用有限元软件Abaqus分析了超大粒径块石布放参数与路基沉降量之间的关系,发现超大粒径块石越多,路基沉降越小;林锋^[17]采用有限差分程序FLAC3D分析了膨胀土地基对桩板结构路基沉降变形的影响,发现膨胀变形会增大路基的差异沉降。

不难发现,以上研究均采用试验和数值模拟方法,而桩板结构路基沉降的理论分析还比较有限。此外,现有研究主要对桩板结构路基沉降进行了确定性分析,较少考虑地基土体和上覆荷载变异性对路基沉降的影响。Chen等^[18]发现地基土由于受沉

积条件、风化作用等影响导致其存在一定的变异性;路基上部荷载受施工、车辆运行情况等人为干扰因素影响,导致其也表现出较强的变异性。因此开展沉降可靠度研究对指导桩板结构设计具有重要的意义。与确定性的安全判据(如安全系数)相比,可靠度设计方法采用考虑参数变异性的可靠度指标或失效概率作为安全判据。广义可靠度指标相对安全率将两种方法的安全判据结合起来,采用目标失效概率实现容许安全系数的标定^[19]。目前基于广义可靠度指标相对安全率的安全判据仅对挡土墙抗滑稳定和地基承载力开展了研究^[20],而桩板结构路基基于广义可靠指标相对安全率标定确定性设计安全判据的方法与流程尚不清晰。

【创新特色】基于此,本文首先推导桩板结构路基沉降计算解析解,并考虑地基土弹性模量、泊松比和上覆荷载的不确定性,建立桩板结构路基可靠度分析模型,然后提出基于广义可靠度指标相对安全率的桩板结构路基沉降安全判据框架。通过桩板结构路基算例研究地基土弹性模量变异系数、上部荷载和桩间距对路基沉降失效概率的影响,分析广义可靠度指标相对安全率和安全系数相对安全率的关系,基于相对安全率提出了临界桩间距,并探讨上覆荷载对临界桩间距的影响。

【关键问题】研究适用于桩板结构路基沉降变形的预测方法,提出基于广义可靠度指标相对安全率的桩板结构路基沉降安全判据框架,有助于优化桩板结构路基设计施工方法,对保障桩板结构路基安全运营具有重要意义。

1 桩板结构路基沉降计算方法

桩板结构的最大沉降往往出现在板底附近,因此,该结构沉降计算的重点是求解板的沉降量。本文将承载板假定为沿垂直于道路延伸方向的弹性梁,左右边界固定。在集中荷载 P 作用下,承载板AB分别在 O_1O_2 段和 O_2B 段发生 $S_1(x)$ 和 $S_2(x)$ 的沉降变形。

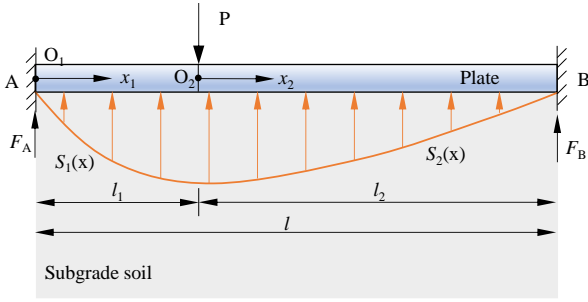


图1 桩板结构路基力学计算模型

Fig.1 Mechanical model of pile plate structure subgrade

1.1 力学模型

根据 Winkler 地基梁模型确定地基变形的微分方程:

$$EI \frac{d^4 S(x)}{dx^4} + KS(x) = 0 \quad (1)$$

式中, EI 为承载板的抗弯刚度; K 是桩板组合刚度, 可根据 Randolph 的解析解^[21]得到:

$$K = \frac{0.38K_p e^{2.4(A_{gp}/A_r)} + K_r(1-2\alpha_{pr})}{1 + \alpha_{pr}^2 K_r/K_p} \quad (2)$$

式中, 承载板刚度

$K_r = E_s(1-\mu_s)/[(1+\mu_s)(1-2\mu_s)A_r^{1/2}]$, A_r 为承载板面积,

$A_r = L_r B_r$, L_r 为承载板的长度, B_r 为承载板的宽度 (如图 2 所示), E_s 和 μ_s 分别为地基土的弹性模量和泊松比;

群桩刚度 $K_p = E_p A_p n_p (e^\eta - 2)/L_p A_{gp}$, 群

桩关联系数 $\eta = 1 - 0.4 \log_{10}[1 - A_{gp}/A_r - D_p/(2s_r)]$, A_p 和

n_p 为桩的横截面面积和数量, L_p 和 D_p 分别为桩长和桩径,

E_p 为桩的弹性模量, s_r 为桩间距, 群桩影响面积 $A_{gp} = n_p \pi D_p^2 / 4$;

桩板相互作用系数 $\alpha_{pr} = 1 - \ln(r_r/r_p) / \ln(r_m/r_p)$, r_p 为桩的半径, 每根桩对

应的承载板有效半径 $r_r = (A_r/\pi n)^{1/2}$,

$r_m = 2.5 + L_p [2.5(1-\mu_p) - 0.25]$, μ_p 为桩的泊松比。

对式 (1) 进行求解, 分别得到 AO_2 和 O_2B 段的沉降表达式:

$$S_1(x) = N_1 f_1(\lambda x) + N_2 f_2(\lambda x) - N_3 f_1(-\lambda x) + N_4 f_2(-\lambda x) \quad (3-1)$$

$$S_2(x) = M_1 f_1(\lambda x) + M_2 f_2(\lambda x) - M_3 f_1(-\lambda x) + M_4 f_2(-\lambda x) \quad (3-2)$$

式中, $f_1(\lambda x) = e^{\lambda x} \sin \lambda x$; $f_2(\lambda x) = e^{\lambda x} \cos \lambda x$;

$$\lambda = (K/4EI)^{1/4}。$$

为求解沉降表达式中分量 $N_1 \sim N_4$ 和 $M_1 \sim M_4$, 对式 (3-1) 分别进行四次求导, 可以得到:

$$\begin{cases} S_1'(x) = \lambda [N_1 f_3(\lambda x) + N_2 f_4(\lambda x) + N_3 f_3(-\lambda x) - N_4 f_4(-\lambda x)] \\ S_1''(x) = 2\lambda^2 [N_1 f_2(\lambda x) - N_2 f_1(\lambda x) - N_3 f_2(-\lambda x) - N_4 f_1(-\lambda x)] \\ S_1'''(x) = 2\lambda^3 [N_1 f_4(\lambda x) - N_2 f_3(\lambda x) - N_3 f_4(-\lambda x) - N_4 f_3(-\lambda x)] \\ S_1^{(4)}(x) = 4\lambda^4 [-N_1 f_1(\lambda x) - N_2 f_2(\lambda x) + N_3 f_1(-\lambda x) - N_4 f_2(-\lambda x)] \end{cases} \quad (4)$$

式中, $f_3(\lambda x) = e^{\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x)$;

$$f_4(\lambda x) = e^{\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x)。$$

相应地, 对式 (3-2) 分别进行四次求导, 可以得到:

$$\begin{cases} S_2'(x) = \lambda [M_1 f_3(\lambda x) + M_2 f_4(\lambda x) + M_3 f_3(-\lambda x) - M_4 f_4(-\lambda x)] \\ S_2''(x) = 2\lambda^2 [M_1 f_2(\lambda x) - M_2 f_1(\lambda x) - M_3 f_2(-\lambda x) - M_4 f_1(-\lambda x)] \\ S_2'''(x) = 2\lambda^3 [M_1 f_4(\lambda x) - M_2 f_3(\lambda x) - M_3 f_4(-\lambda x) - M_4 f_3(-\lambda x)] \\ S_2^{(4)}(x) = 4\lambda^4 [-M_1 f_1(\lambda x) - M_2 f_2(\lambda x) + M_3 f_1(-\lambda x) - M_4 f_2(-\lambda x)] \end{cases} \quad (5)$$

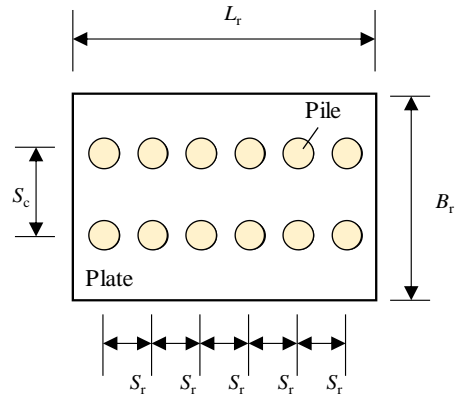


图2 桩板路基布置图

Fig.2 Layout of pile plate subgrade

1.2 模型边界条件

当 $x_1=0$ 时, 根据 $S_1(0)=0$ 和 $S_1'(0)=0$, 可得:

$$\begin{cases} N_2 + N_4 = 0 \\ N_1 + N_2 + N_3 - N_4 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当 $x_1=l_1$, $x_2=0$ 时, 根据 $S_1(l_1)=S_2(0)$,

$$S_1'(l_1)=S_2'(0), \quad S_1''(l_1)=S_2''(0) \text{ 和 } -S_1(l_1)+S_2(0)=P/EI,$$

可得:

$$\begin{cases} N_1 f_1(\lambda_1) + N_2 f_2(\lambda_1) - N_3 f_1(-\lambda_1) + N_4 f_2(-\lambda_1) = M_2 + M_4 \\ N_1 f_3(\lambda_1) + N_2 f_4(\lambda_1) - N_3 f_3(-\lambda_1) + N_4 f_4(-\lambda_1) = M_1 + M_2 + M_3 - M_4 \\ N_1 f_2(\lambda_1) - N_2 f_1(\lambda_1) - N_3 f_2(-\lambda_1) + N_4 f_1(-\lambda_1) = M_1 - M_3 \\ N_1 f_4(\lambda_1) - N_2 f_3(\lambda_1) + N_3 f_4(-\lambda_1) + N_4 f_3(-\lambda_1) = \frac{-P}{2\lambda^3 EI} + M_1 - M_2 + M_3 + M_4 \end{cases} \quad (7)$$

当 $x_2=l_2$ 时, 根据 $S_2(l_2)=0$ 和 $S_2'(l_2)=0$, 可得:

$$\begin{cases} M_1 f_1(\lambda_2) + M_2 f_2(\lambda_2) - M_3 f_1(-\lambda_2) + M_4 f_2(-\lambda_2) = 0 \\ M_1 f_3(\lambda_2) + M_2 f_4(\lambda_2) - M_3 f_3(-\lambda_2) + M_4 f_4(-\lambda_2) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

1.3 方程求解

假定 M_4 作为已知量, 则 $M_i (i=1, 2, 3)$ 可以写成关于 N_3 和 N_4 的方程:

$$M_1 = (2N_4 - N_3) f_2(\lambda_1) + N_4 f_1(\lambda_1) + N_3 f_1(-\lambda_1) - N_4 f_2(-\lambda_1) + M_4 \quad (9-a)$$

$$M_2 = (2N_4 - N_3) f_1(\lambda_1) - N_4 f_2(\lambda_1) - N_3 f_1(-\lambda_1) + N_4 f_2(-\lambda_1) - M_4 \quad (9-b)$$

$$M_3 = (N_3 - N_4) f_2(-\lambda_1) + (N_3 + N_4) f_1(-\lambda_1) + M_4 \quad (9-c)$$

将式 (9-a) ~ (9-c) 代入式 (7) 化简可得:

$$N_3 = N_4 m - M_4 n + Q_1 \quad (10)$$

式中, $m = \frac{f_2(\lambda_1)}{f_1(-\lambda_1)}$; $n = \frac{1}{f_1(-\lambda_1)}$; $Q_1 = \frac{P}{8\lambda^3 EI f_1(-\lambda_1)}$ 。

将式 (10) 代入 (9-a) 化简可得:

$$M_1 = Q_2 + N_4 j - M_4 k \quad (11)$$

式中, $\begin{cases} j = [2f_2(\lambda_1) + f_1(\lambda_1) - f_2(-\lambda_1)] - m \times [f_2(\lambda_1) - f_1(-\lambda_1)] \\ k = -n \times [f_2(\lambda_1) - f_1(-\lambda_1)] - 1 \\ Q_2 = -Q_1 \times [f_2(\lambda_1) - f_2(-\lambda_1)] \end{cases}$ 。

将式 (10) 代入 (9-b) 化简可得:

$$M_2 = Q_3 + N_4 g - M_4 h \quad (12)$$

式中, $\begin{cases} g = [2f_1(\lambda_1) - f_2(\lambda_1) + f_2(-\lambda_1)] - m \times [f_1(\lambda_1) - f_2(-\lambda_1)] \\ h = -n \times [f_1(\lambda_1) - f_1(-\lambda_1)] + 1 \\ Q_3 = -Q_1 \times [f_1(\lambda_1) - f_1(-\lambda_1)] \end{cases}$ 。

将式 (10) 代入 (9-c) 化简可得:

$$M_3 = Q_4 + N_4 r - M_4 t \quad (13)$$

式中, $\begin{cases} r = [f_1(-\lambda_1) - f_2(-\lambda_1)] + m \times [f_1(-\lambda_1) + f_2(-\lambda_1)] \\ t = -n \times [f_1(-\lambda_1) + f_2(-\lambda_1)] - 1 \\ Q_4 = Q_1 \times [f_2(-\lambda_1) + f_2(-\lambda_1)] \end{cases}$ 。

将式 (11) ~ (13) 代入式 (8) 化简可得:

$$N_4 = \frac{Q_6 v - Q_5 w}{v s - w u} \quad (14-a)$$

$$M_4 = \frac{Q_6 u - Q_5 s}{v s - w u} \quad (14-b)$$

式中, $\begin{cases} u = j f_1(\lambda_2) + g f_2(\lambda_2) - r f_1(-\lambda_2) \\ v = k f_1(\lambda_2) + h f_2(\lambda_2) - t f_1(-\lambda_2) - f_2(-\lambda_2) \\ Q_5 = -Q_2 f_1(\lambda_2) - Q_3 f_2(\lambda_2) + Q_4 f_1(-\lambda_2) \end{cases}$;

$$\begin{cases} s = j f_3(\lambda_2) + g f_4(\lambda_2) + r f_3(-\lambda_2) \\ w = k f_3(\lambda_2) + h f_4(\lambda_2) + t f_3(-\lambda_2) + f_4(-\lambda_2) \\ Q_6 = -Q_2 f_3(\lambda_2) - Q_3 f_4(\lambda_2) + Q_4 f_3(-\lambda_2) \end{cases}$$

进行方程求解时, 先依次求解 $Q_1 \sim Q_6$, 然后再计算 M_4 和 N_4 , 其次计算 $M_1 \sim M_3$ 和 $N_1 \sim N_3$, 最后将 $M_1 \sim M_4$ 和 $N_1 \sim N_4$ 分别代入式 (3-1) 和 (3-2) 计算 $S_1(x)$ 和 $S_2(x)$ 。

2 桩板结构路基沉降计算方法验证

选取文献^[22]中的桩板结构路基案例验证本文桩板结构路基沉降计算方法。其中, 承载板长度为 30 m, 宽度为 10 m, 厚度为 0.7 m, 由 C40 混凝土浇筑成型。沿横向 (平行承载板宽度方向)、纵向 (垂直承载板宽度方向) 分别布设 2 和 6 排 C30 混凝土钻孔灌注方桩, 边长为 1.2 m, 桩间距均为 5.0 m。路基填料的弹性模量为 150 MPa, 泊松比为 0.25。荷载组合 P 包括上部结构自重荷载 G 和列车荷载 L :

$$P = (1.2 \times G + 1.4 \times L + 0.5 \times L) \times 1.1 \quad (15)$$

式中, 1.2 和 1.4 分别为恒载与活载的分项系数; 0.5 为列车活载的冲击系数; 1.1 为结构重要性系数。

基于式 (1) ~ 式 (14) 计算的路基最大沉降为 0.85 mm, 略小于文献^[22]中有限元计算结果 0.99 mm, 这主要是因为本文模型假定地基土体发生弹性变形, 未考虑其塑性变形量。但二者的相对差值小于 15%, 这表明本文方法计算桩板结构路基沉降是合理的, 可以用于下面的桩板路基沉降可靠度分析。

3 基于广义可靠度指标相对安全率的桩板结构路基安全判据分析框架

为了标定目标失效概率下桩板结构路基沉降容许安全系数, 本文基于广义可靠度指标相对安全率建立桩板结构路基安全判据分析框架。首先介绍广义可靠度指标相对安全率, 然后建立基于沉降的桩板结构路基安全系数和可靠度模型, 进而确定桩板结构路基的设计可行域, 最后提出基于广义可靠

度指标相对安全率的桩板路基安全判据分析框架。

3.1 广义可靠度指标相对安全率

为了建立确定性安全系数与可靠度指标的关系,陈祖煜^[23]假定安全系数服从正态分布或对数正态分布提出了安全系数的相对安全率 η_F 。

$$\eta_F = \frac{F_{Sk}}{F_{Sa}} \quad (16)$$

式中, F_{Sk} 为确定性安全系数设计标准值, F_{Sa} 为安全系数的允许值。

在此基础上,李典庆等^[19]基于安全系数的累积概率密度函数,提出了安全系数服从任意分布的广义可靠度指标相对安全率 η_{GR} 。

$$\eta_{GR} = CDF_{F_s}^{-1}(P_T) \quad (17)$$

式中, $CDF_{F_s}^{-1}(\cdot)$ 为安全系数 F_s 累积概率密度函数的逆函数, P_T 为允许失效概率。

$$P_T = P[(F_s - \Delta F_s) < 1] \quad (18)$$

式中, F_s 为安全系数, ΔF_s 为 η_{GR} 与失效边界的距离。

3.2 基于沉降的桩板结构路基安全系数和可靠度模型

根据桩板结构路基沉降与容许极限沉降的关系,建立基于沉降的安全系数 F_s 和基于沉降的功能函数 Z :

$$F_s = \frac{S_{ult}}{S_{max}(X)} \quad (19)$$

$$Z = F_s - 1 \quad (20)$$

式中, S_{ult} 为桩板路基容许极限沉降,根据《高速公路改扩建设计规范》^[24],本文取 20 mm; $S_{max}(X)$ 为桩板路基最大沉降,是关于随机变量 X 的函数。本文考虑的随机变量为土体弹性模量、泊松比和荷载。当 $Z < 0$ 时,桩板路基失效,其失效概率 $P_f(S)$ 和可靠度指标 β 可由下式表示:

$$P_f(S) = P(F_s - 1 < 0) \quad (21)$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f(S)) \quad (22)$$

式中, $P(\cdot)$ 为桩板路基失效发生的概率, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的逆函数。

3.3 桩板结构路基设计可行域确定

根据目标失效概率对桩板路基允许安全系数进行标定,实现可靠度设计指导确定性设计的目

标。具体步骤如下:

(1) 建立桩板路基沉降计算模型。

(2) 确定随机变量空间和设计变量空间。基于地基土弹性模量和泊松比以及荷载具有较强的不确定性分布特征,建立随机变量空间。桩板路基设计中桩间距是需要考虑的重要设计参数,本文选取典型的桩间距建立设计变量空间。

(3) 在设计变量空间内进行可靠度计算。根据选取的典型桩间距,计算桩板路基沉降失效概率。本文还对比分析了蒙特卡罗法和一阶可靠度法在计算失效概率时的异同点。

(4) 标定允许安全系数。根据设计变量空间内的失效概率等于允许失效概率,确定典型桩间距,然后计算典型桩间距下的确定性设计标准值 F_{Sk} 。其中,随机变量的取值采用分位值,一般取 0.2 分位值^[14],并将此时的 F_{Sk} 取为允许安全系数 F_{Sa} 。

(5) 计算相对安全率。根据公式(16)~式(17)分别计算确定性安全系数相对安全率和广义可靠度指标相对安全率。

(6) 确定设计参数可行域。取同时满足 η_F 和 η_{GR} 大于 1 的设计参数空间作为设计参数可行域。

桩板结构路基设计可行域确定流程图如图 3 所示。

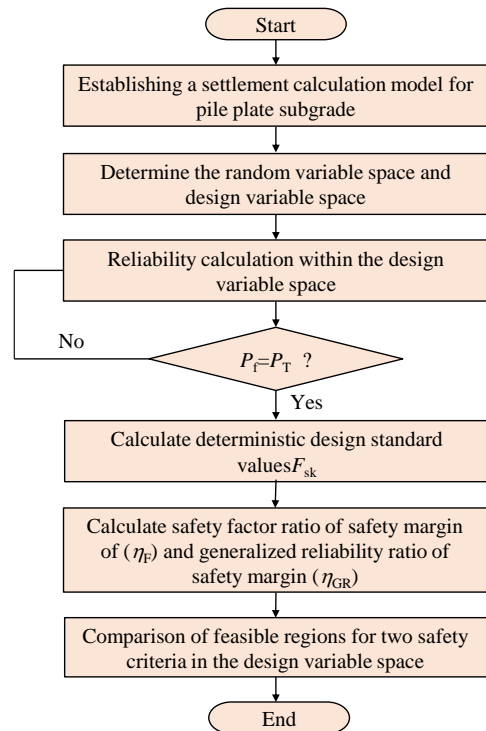


图 3 桩板结构路基设计可行域确定流程图
Fig.3 Flow chart of determining the allowable safety factor of pile plate structure subgrades

4 桩板结构路基算例

桩板结构路基布置如图 2 所示，参考文献^[22]中的设计参数，确定本文承载板长度和宽度分别取 30 m 和 10 m，桩径取 1.5 m，沿承载板长度和宽度方向的桩间距均取 5 m。

4.1 随机参数分布

路基土弹性模量和泊松比以及荷载具有较强的不确定性，如 PHOON 和 KULHAWY^[25]发现黏土参数表现为对数正态分布；CHEN 等^[18]指出路基荷载也服从对数正态分布。参考 CHEN 等^[18]研究结果确定随机参数分布，如表 1 所示。

表 1 桩板路基土随机参数分布^[18]

Tab.1 Distribution of random parameters of pile plate subgrade

| | Elastic modulus/MPa | Poisson's ratio | Load/kPa |
|--------------------------|---------------------|-----------------|----------|
| Mean value | 20 | 0.3 | 30 |
| Coefficient of variation | 0.2 | 0.05 | 0.2 |

4.2 桩板结构路基沉降失效概率

根据式 (19)~式 (21) 采用蒙特卡洛法 (MCS) (样本数量取 10^6 个) 和验算点法 (AFORM) 计算桩板路基沉降失效概率。由图 4 可见，随着地基土弹性模量变异系数的增大，结构沉降失效概率呈非线性增长。特别地，当 $COV_{Es}=0.3$ 时，失效概率增长速度最为明显。此外，两种方法计算结果基本一致，因而为提高计算效率，失效概率可采用验算点法进行计算。

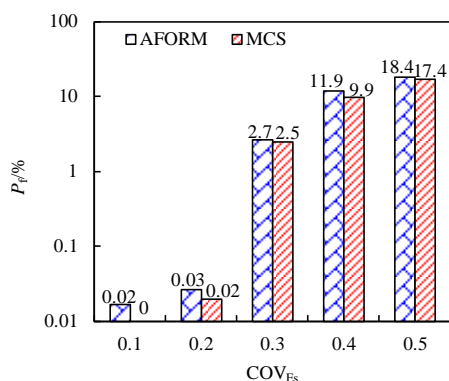


图 4 地基土参数变异性对沉降失效概率的影响

Fig.4 Effect of soil parameter variability on failure probability

图 5 为不同荷载条件下桩板路基沉降失效概率。由图可见，桩板结构路基失效概率与荷载水平的关系曲线随变异系数的增大由陡增型转变为线

性增长。沉降由上部荷载和桩板组合刚度共同决定，当桩板组合刚度一定时，荷载增大加剧了沉降变形，进而导致失效概率增大。当上部荷载达到 150 kPa，地基土弹性模量变异系数为 0.5 时，桩板路基沉降失效概率接近 1。此时需要采取一定的地基土加固技术，提高土体的弹性模量以减小沉降，降低桩板路基的失效概率。

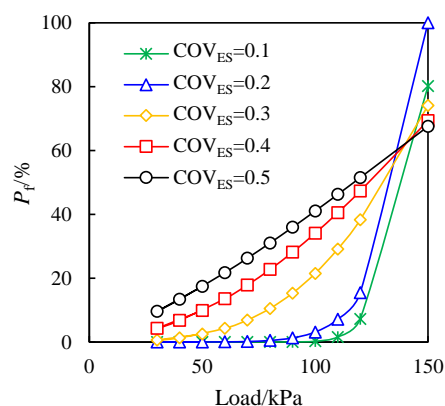


图 5 荷载对沉降失效概率的影响

Fig.5 Effect of upper load on failure probability

图 6 为桩间距对桩板结构路基沉降失效概率的影响。由图可知，随着桩间距的增大，桩板结构失效概率逐渐增大；弹性模量变异系数主要改变失效概率大小，而对失效概率和桩间距关系曲线增长模式影响较小。由式 (2) 可知，群桩刚度与桩间距为负相关。桩间距的增大减小了群桩刚度和桩板组合刚度，引发桩板路基沉降增大，最终导致沉降失效概率增加。

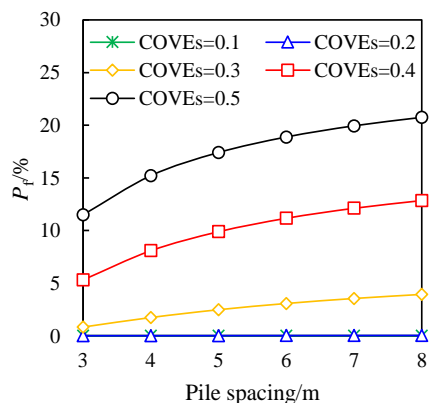


图 6 桩间距对沉降失效概率的影响

Fig.6 Effect of pile spacing on failure probability

4.3 桩板结构路基允许安全系数标定

本文以桩间距作为设计参数 (本文仅考虑了沿承载板长度方向的桩间距)，分析桩板结构路基安全判据和设计可行域。桩间距的设计区间取 [3.1 m, 5.3 m]，每隔 0.1 m 取一个设计点，对应的桩数量取

整数值。

在设计空间内计算桩板路基的失效概率, 根据允许失效概率对应的桩间距确定典型设计值, 计算此时的安全系数标准值, 进而标定允许安全系数。为确定允许失效概率, 本文统计分析沉降可靠度, 假定路基的目标可靠度指标为 $3.7^{[18]}$, 对应的允许失效概率为 1.08×10^{-4} 。当桩间距为 4.47 m 时, 失效概率为 1.07×10^{-4} , 与允许失效概率最为接近。因此, 选取 4.47 m 为典型设计桩间距。随机变量 (弹性模量、泊松比和荷载) 的标准值取 0.2 分位值, 得到对应的安全系数标准值 $F_{sk} = 2.61$ 。由于典型设计对应的安全系数相对安全率和广义可靠度指标相对安全率关系为 $\eta_F = \eta_{GR} = 1$, 即 $F_{sa} = F_{sk}$, 由此确定桩板路基的允许安全系数为 2.61。

4.4 桩板结构路基设计可行域

图 7 对比分析了基于安全系数和可靠度指标的桩板结构路基相对安全率。可以发现, 二者近似呈线性关系, 但其斜率为 $\eta_{GR}/\eta_F = 0.86$, 表明基于可靠度指标的相对安全率略大于基于安全系数的相对安全率。由图可见, 当 $\eta_F > 1$ 时, $\eta_{GR} > 1$, 本文标定的允许安全系数 2.61 满足目标可靠度要求。

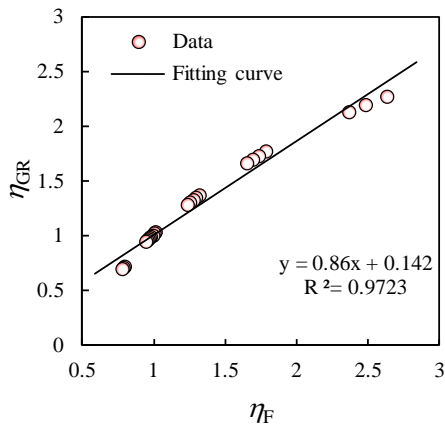


图 7 桩板结构路基的 η_F 和 η_{GR} 对比

Fig.7 Comparison of η_F and η_{GR} of pile plate subgrade

图 8 为不同桩间距下基于安全系数和可靠度指标的桩板结构路基相对安全率。可以发现, 当桩间距小于 4.47 m 时, η_F 和 η_{GR} 同时满足大于 1 的条件, 此时在阴影区域范围内的桩间距构成了设计可行域。通过允许失效概率标定结构允许安全系数, 保证了桩板结构路基确定性设计和可靠度设计的设计可行域基本一致。

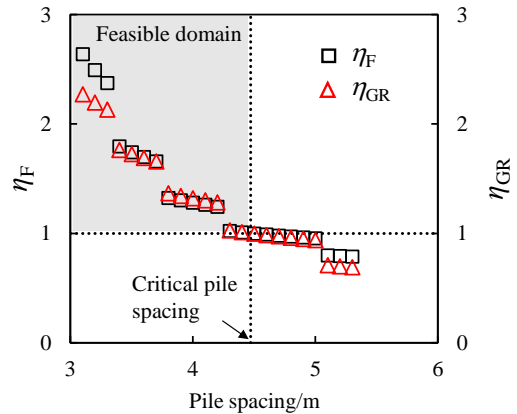


图 8 桩间距对桩板结构路基相对安全率的影响

Fig.8 Effect of pile spacing on η_F and η_{GR}

4.5 桩板结构路基临界桩间距

将 $\eta_F = \eta_{GR}$ 时的桩间距定义为临界桩间距。当桩间距大于临界桩间距时, $\eta_F < 1$ 或者 $\eta_{GR} < 1$, 此时桩间距不在设计可行域内。图 5 显示上覆荷载会显著影响桩板路基的失效概率, 这将导致临界桩间距也相应地发生改变。图 9 为不同荷载水平下临界桩间距的变化。由图可知, 桩板路基临界桩间距随着荷载增大呈对数型曲线非线性减少。当荷载由 20 kPa 增加至 30 kPa 时, 临界桩间距由 6 m 迅速下降至 4.47 m; 当荷载由 30 kPa 继续增大时, 临界桩间距下降速率放缓。

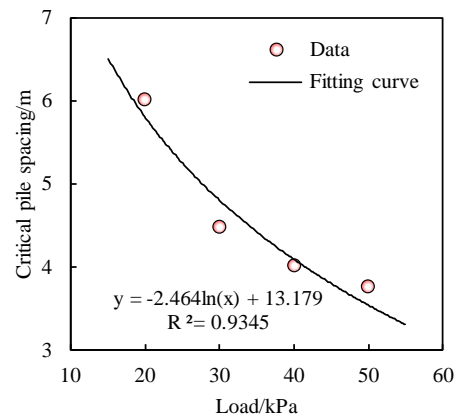


图 9 荷载对桩板结构路基临界桩间距的影响

Fig.9 Effect of upper load on critical pile spacing of pile plate structure subgrade

5 结论

本文基于弹性地基梁模型推导了桩板结构路基沉降计算解析解, 进一步提出桩板结构路基基于广义可靠度指标的相对安全率安全判据分析框架, 考虑地基土弹性模量、泊松比和荷载的不确定性,

研究了桩板结构路基沉降失效概率,研究了基于安全系数和可靠度指标的桩板结构路基相对安全率间的关系,分析了临界桩间距与上部荷载的分布规律。得到以下结论:

(1) 本文提出的桩板路基沉降计算方法与数值模拟结果较为接近,能够合理反映桩板结构路基的沉降变形。

(2) 桩板结构路基沉降由上部荷载和桩板组合刚度共同决定。桩板结构路基失效概率与荷载水平的关系曲线随地基土弹性模量变异系数的增大由陡增型转变为线性增长。

(3) 基于安全系数和可靠度指标的桩板结构路基相对安全率近似呈线性关系,通过允许失效概率标定结构允许安全系数,保证了桩板结构路基确定性设计和可靠度设计的设计可行域基本一致。

(4) 上部荷载会影响桩板路基的安全系数和失效概率,导致临界桩间距随上覆荷载增大呈对数非线性减少。

参考文献:

- [1] 梁浩毅,项瑞聪,狄宏规等.基坑开挖引起邻近桩板路基的变形及分区[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(06): 18-27.
LIANG H Y, XIANG R C, DI H G, et al. Deformation and partition of pile foundation caused by excavation of foundation pit adjacent to pile-plank subgrade [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 35(05): 32-35.
- [2] 王长丹,陈凯祥,陕耀,等.深厚软土区有轨电车桩板结构路基沉降变形离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3444-3452.
WANG C D, CHEN K X, SHAN Y, et al. Centrifugal test on settlement of tram pile plate structure embankment in deep soft area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3444-3452.
- [3] 詹永祥. 高速铁路无砟轨道桩板结构路基设计理论及试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2006.
ZHAN Y X. Study on Design method of pile-plank foundation of ballastless track in high-speed railway by tests[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [4] 荆志东,郭永春,邱恩喜,等. 新型桩板结构对高速铁路路基软基沉降控制作用离心试验[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2565-2569, 2574.
JING Z D, GUO Y C, QING E X, et al. Centrifuge test of new pile-plate structure embankment settlement of soft soil of high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2565-2569, 2574.
- [5] 黄龙,王炳龙,周顺华. 软土地基桩板结构路基离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 192-196.
HUANG L, WANG B L, ZHOU S H. Centrifugal model test of pile-plank subgrade in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 192-196.
- [6] Kim T H. Estimation of the effect of lateral flow on piled bridge abutments in soft ground considering piled slabs as a countermeasure of the abutments[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2009, 27(1): 34-52.
- [7] 隋孝民,许志勇. 桩板结构在强发育岩溶无砟轨道中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(04): 54-59+70.
SUI X M, XU Z Y. Application study of the structure of RC pile-plank in strong development of karst and ballastless track railway[J]. Journal of railway engineering society, 2015, 32(04): 54-59+70.
- [8] 秦旗. 桩板结构路桥过渡段的动力学仿真分析研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(12): 40-44+49.
QIN Q. Segment with pile-plate structure analysis and study of dynamic simulation of the road-bridge transition[J]. Journal of railway engineering society, 2021, 38(12): 40-44+49.
- [9] 王鑫越,余雷,褚宇光等. 架空式桩板结构路基静动力特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(11): 4128-4139.
WANG X Y, YU L, CHU Y G, et al. Experimental study on static and dynamic characteristics of overhead pile-plate structure subgrade[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(11): 4128-4139.
- [10] 陕耀,陆义,周顺华,等.有轨电车桩板结构路基与道路路基横向差异沉降离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 1049-1060.
SHAN Y, LU Y, ZHOU S H, et al. Centrifugal model test study on lateral differential settlement between the tram pile-plank subgrade and the road subgrade[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5): 1049-1060.
- [11] 崔宏环,王志阳. 冲积扇粉质黏土路基在交通荷载作用下的沉降变形影响因素分析[J]. 中外公路, 2018, 38(05): 1-7.
CUI H H, WANG Z Y. Analysis of the influence factors of settlement deformation in shallow mountain area alluvial fan silt under traffic load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(05): 1-7.
- [12] 唐宏华. 高速铁路岩溶路基段桩板结构沉降变形分析

- [J]. 铁道建筑技术, 2023(10): 209-212.
TANG H H. Settlement and deformation analysis of pile slab structure in karst roadbed section of high-speed railway[J]. Railway construction technology, 2023(10): 209-212.
- [13] 王岩涛, 陆梦婉. 高速铁路路基浅埋式桩板结构力学性能分析[J]. 路基工程, 2022, 224(5):162-166.
WANG Y T, CHEN M W. Analysis of mechanical properties of shallow buried pile plate structure for high speed railway subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2022, 224(5): 162-166.
- [14] 赵涵秀, 冯多, 徐林荣. 桩板结构在深厚软基高速公路过渡段处理中的应用[J]. 公路, 2022, 67(06): 8-15.
ZHAO H X, FENG D, XU L R. Application of pile plate structure in treatment of transition section of expressway with deep soft foundation[J]. Highway, 2022, 67(06): 8-15.
- [15] 陈想明. 西北地区黄土路基沉降变形分析及治理[J]. 路基工程, 2023(04): 188-193.
CHEN X M. Analysis and Treatment of Loess Subgrade Settlement Deformation in Northwest China[J]. Subgrade Engineering, 2023(04): 188-193.
- [16] 宋杨, 王诚杰, 孙文君等. 超大粒径块石在土石混填路基中稳定性数值模拟研究[J]. 中外公路, 2018, 38(05): 18-22.
SONG Y, WANG C J, SUN W J, et al. Numerical simulation on stability of earth-rock mixed filling subgrade containing large stone[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(05): 18-22.
- [17] 林锋. 中-强膨胀土地基桩板结构路基沉降分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(S2): 240-244.
LIN F. Analysis of settlement of pile plate structure roadbed in medium strong expansive soil foundation[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2018, 31(S2): 240-244.
- [18] CHEN R P, JIANG P, YE X W, et al. Probabilistic analytical model for settlement risk assessment of high-speed railway subgrade[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(3): 04015047.
- [19] 李典庆, 周强, 曹子君. 基于广义可靠指标相对安全率的岩土工程设计安全判据[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3977-3986.
LI D Q, ZHOU Q, CAO Z J. Safety criteria for geotechnical design based on the generalized reliability ratio of safety margin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3977-3986.
- [20] 周强, 黎康平, 段亚辉, 等. 基于广义可靠指标相对安全率的地基承载力安全判据研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 11.
ZHOU Q, LI K P, DUAN Y H, et al. Safety criteria for bearing capacity of foundation based on the generalized reliability ratio of safety margin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 11.
- [21] RANDOLPH M F. Design methods for pile groups and piled rafts[C]. Proc. 13th ICSMGE, 1994, 5: 61-82.
- [22] 詹永祥, 蒋关鲁, 牛国辉, 等. 武广线高边坡陡坡地段桩板结构路基的设计理论探讨[J]. 铁道工程学报, 2007, S1: 94-96, 101.
ZHAN Y X, JIANG G L, NIU G H, et al. Theoretical exploration on design of pile-plate structure subgrade in steep slope section of high side slope on Wuchang-Guangzhou railway passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(S1): 94-96, 101.
- [23] 陈祖煜. 建立在相对安全率准则基础上的岩土工程可靠度分析与安全判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 521-5.
CHEN Z Y. Reliability analysis and safety criterion in geotechnical engineering based on the index of safety margin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 521-544.
- [24] 上海市路政局组织. DG/TJ 08-2174-2015 高速公路改扩建设计规范[S]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
Shanghai Municipal Road Administration Organization. DG/TJ 08-2174-2015 Code for design of expressway reconstruction and expansion[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.
- [25] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian geotechnical journal, 1999, 36(4): 612-624.



通信作者: 李宝地(1977—), 男, 工程师(公路工程), 研究方向为道路桥梁工程技术。E-mail: 3243758128@qq.com。