

基于长短桩的桥头地基布桩方案优化设计

孔庆林¹, 闫婷², 李昕洋², 王金昌³, 张永犇²

(1. 浙江交工国际工程有限公司, 杭州 311399; 2. 沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院, 沈阳 110168;
3. 浙江大学 交通工程研究所, 杭州 310027)

摘要: 为有效增强桥头地基承载力并减少沉降, 确保桥头处在路面荷载作用下能够增加其从建造到运营的全寿命周期, 并兼顾经济性。该研究依托杭州绕城高速公路互通改建工程, 设计桩帽间加入连梁结构的长短桩复合地基对桥头地基进行加固, 运用 PLAXIS 建立桥头路段的断面模型, 结合工程需求和蚁群优化算法, 构建了相应的数学理论模型进行优化方案设计, 最终确定了最优的布桩方案。研究结果表明: 通过分析不同布桩方式下的沉降情况以及边桩的弯矩情况, 最终选定长短相间的布桩方式。同时, 结合各方案在施工期内及施工后沉降、侧向位移和桩土应力比的结果, 综合考虑承载力、沉降及工程造价等因素进行优化设计, 最终确定了两种合适的布桩方案。研究结果可为相关应用提供参考。

关键词: 长短桩复合地基; 桥头沉降; 软基加固; 布桩优化; PLAXIS 有限元

中图分类号: TU471.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0099-09

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.016

Optimization Design of Pile Layout Scheme for Bridge Approach Foundation Based on Long - Short Piles

KONG Qinglin¹, YAN Ting², LI Xinyang², WANG Jinchang³, ZHANG Yongben²

(1. ZCCC International Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311399, China; 2. School of Transportation and Geomatics Engineering ShenYang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To effectively enhance the load-bearing capacity of the bridgehead foundation and reduce settlement, ensuring the bridgehead can sustain the entire lifecycle from construction to operation under road load while also considering cost-effectiveness. This paper, based on the reconstruction project of the Liuxia Interchange on the Hangzhou Ring Expressway, designs a composite foundation with long and short piles reinforced by connecting beams between pile caps to strengthen the bridgehead foundation. Using PLAXIS, a cross-sectional model of the bridgehead section is established. Combining engineering requirements with the ant colony optimization algorithm, a corresponding mathematical theoretical model is constructed for the optimization scheme design, ultimately determining the optimal pile arrangement scheme. The research results indicate that, by analyzing the settlement conditions and the bending moment of side piles under different pile arrangements, a staggered arrangement of long and short piles was finally selected. Additionally, taking into account the

岩土力学

performance of each scheme in terms of settlement, lateral displacement, and pile - soil stress ratio during and after construction, a comprehensive optimization design was conducted considering load - bearing capacity, settlement, and construction costs, ultimately determining two suitable pile arrangement schemes. Research findings can provide references for related applications.

Key words: composite foundation of long and short piles; bridge approach settlement; soft ground improvement; pile layout optimization; PLAXIS finite element analysis

0 引言

桥头跳车是路桥过渡段的常见病害,是由于路桥连接处桥台与道路存在差异沉降,使车辆在通过时产生颠簸甚至跳跃,轻则影响乘坐舒适性,重则引发交通事故^[1-2]。因此,解决桥头地基沉降问题对公路桥梁的长期安全运行尤为重要。

导致桥头沉降的主要原因是桥头地基多为软弱土,而软土地基的承载力不足,在荷载作用下,不同地基会产生差异沉降^[3-4]。复合地基通过在天然地基中加入增强体或加筋材料,让地基土和增强体共同承担荷载,分为等长桩和长短桩复合地基^[5-6]。长短桩复合地基的浅部置换率高、加固区复合模量大,而深部置换率低、模量较小,正好适应浅部附加应力大、深部附加应力小的应力场特征,从而有利减少软弱地基总沉降^[7-8]。目前,许多学者对复合地基的布桩优化设计进行了研究。胡海英等^[9]通过切线模量法,分析了地基土体刚度对桩土应力比的影响,并以沉降值为指标,选取合适的褥垫层厚度来对复合地基进行优化设计;张泉钰^[10]运用有限元分析了持力层强度对于地基的沉降、桩身轴力、桩土荷载分担比和桩侧摩阻力的影响,并结合长短桩复合地基的沉降参数给出了地基优化思路;Wang等^[11]通过对现场试验结果的分析,提出了基于荷载、地质特征和上部结构的桩 - 土体刚度优化设计方法,采用软硬耦合、局部平衡等方法,实现了差异沉降、基础内力和资源消耗的最小化;Hu等^[12]以优化施工成本为目标,考虑桩体承载力的前提下,并采用遗传算法对几种类型的群桩进行了分析研究。

在布桩优化设计方面,国内外学者基于理论分析、数值模拟和遗传算法等方法,对桩体设计的关键参数进行了全面的优化研究^[13-14]。然而,现有研究未充分考虑布桩参数组合对复合地基加固性能的综合影响。为此,在长短桩复合地基设计中引入了

一种创新性的结构增强方案,即在桩帽间设置连梁结构^[15],以增强地基的整体稳定性。并运用有限元和蚁群优化思路相结合,综合考虑加入连梁结构和不同桩长、桩径、桩间距及桩材质对桥头地基的影响。在满足工后沉降不超过 20 cm 和承载力不低于 200 kPa 的约束条件下,综合分析各方案的沉降、承载力及工程造价,对长短桩加固桥头地基的布桩方案进行优化设计,以实现结构性能与经济效益的最佳平衡。

1 工程概况

依托杭州绕城高速公路互通改建工程,根据项目设计资料和现场调研,选取留下互通工程中的 H4 匝道的 096 - 116 段作为工点。工程地处湖沼积平原,地势较为平坦开阔,从上到下各土层分布情况如下:填土,层厚 0.70 ~ 5.40 m;粉质黏土,层厚 0.50 ~ 2.50 m;淤泥质粉质黏土,层厚 3.00 ~ 9.40 m;圆砾,层厚 0.70 ~ 18.80 m。该路段设计速度为 40 km/h,采用单向单车道,路基宽度为 9 m,平均填高为 5 m,边坡坡率为 1:1.5,位于桥头位置。原工程设计方案中选用桩长 15 m、桩径 400 mm、桩间距 2.2 m 的预应力管桩进行处理。在路面施工中,垫层格栅的设计为填筑 20 cm 碎石后铺设一层钢格栅,再填筑 30 cm 碎石后铺设一层钢格栅,最后进行路堤填筑。

2 布桩方案设计及模型建立

2.1 布桩方案设计

在考虑工程地质特性和改建工程特点的基础上,将原工程中 15 m 长的预应力管桩作为复合地基中的长桩部分,并保持其参数不变。通过调整短桩的桩体参数,探讨这些变化对桥头地基加固效果的影响。考虑到短桩需要打入持力层的要求,同时为控制变量进行研究,其桩长选用 8、14 m,桩直径选用 600 mm 并与原工程中的 400 mm 进行对比,桩间距

选用 2.6、2.2 m 进行对比。为了实现桩顶的刚性连接，设计了刚性桩帽结构，并选用 C30 混凝土作为

材料。此外，通过连梁结构将各个桩体的桩帽部分相互连接。初步拟定的布桩方案及参数见表 1。

表 1 布桩方案及参数
Table 1 Pile layout and parameters

方案	长桩桩径/mm	短桩桩径/mm	桩间距/m	长桩长/m	长桩材质	短桩长/m	短桩材质	是否设置连梁
1	400	400	2.2	15	预应力管桩	14	预应力管桩	是
2	400	400	2.2	15	预应力管桩	8	预应力管桩	是
3	400	600	2.2	15	预应力管桩	14	预应力管桩	是
4	400	400	2.6	15	预应力管桩	14	预应力管桩	是
5	400	600	2.2	15	预应力管桩	8	水泥搅拌桩	是
6	400	400	2.2	15	预应力管桩	14	预应力管桩	否

2.2 力学模型建立

采用能同时考虑压缩硬化和剪切硬化的小应变土体硬化模型（HSS 模型）作为土体的本构模型^[16]。土层厚度及土体、桩体的计算参数见表 2~4。为了在计算效率和精度之间取得平衡，整体采用适中尺寸的三角形单元进行网格划分，并对应力集中区域进行网格加密处理。考虑到计算效率，桩帽和连梁采用板单元模拟；而对于地基中的长短桩，则采用 Embedded pile 单元进行模拟。该单元通过梁单元与特殊界面单元的组合，形成具有六个自由度的复合结构，其刚度矩阵通过四点 Gauss 积分方法求解。

在此模型中，桩体可沿任意方向布置。同时，在土体单元中可以创建虚拟节点，并通过弹塑性模型将其与 Embedded pile 单元连接。土体与结构之间的相互作用通过界面单元进行模拟，具体方法是将土体强度参数乘以界面折减系数 R_{inter} 。

该研究的方法^[17]确定界面折减系数，主要包括

以下三种情况：刚性。当折减系数选择为刚性时，不对界面的强度进行折减，此时包括剪胀角在内的界面属性除了泊松比外均与材料数据组中土的属性相同；手动。此时可以手动输入 R_{inter} 的值，一般来说 $R_{inter} < 1$ ，如没有详细资料，可以假设 $R_{inter} = 2/3$ ；手动设置残余强度。选择该选项时，可以定义界面残余强度 R_{inter} 残余。当界面强度达到由 R_{inter} 确定的界面强度极限时，界面强度可以软化至由 R_{inter} 残余确定的一个降低值。

该研究的基本计算假定如下：

材料具有各向同性且均质性；模型两侧设置为不透水边界；桩体采用线弹性体模型，土体采用弹塑性体模型；桩顶荷载呈均匀分布。

表 2 土层厚度
Table 2 Soil layer thickness

种类	粉质黏土	淤泥质粉质黏土	圆砾
层厚/m	2.5	8.5	5.0

表 3 土体参数
Table 3 Soil parameters

土体	排水类型	天然重度 γ_{unsat} /(kN/m ³)	饱和重度 γ_{sat} /(kN/m ³)	弹性模量 E /MPa	卸载重加载 模量 E_{ur} /MPa	孔隙 比 e	内聚力 c /(kN/m ²)	内摩擦角 φ /(°)	剪胀角 ψ /(°)	界面折减 系数 R_{inter}
杂填土	不排水 A	18.000	20.000	10.000	30.000	0.800	5	28		0.700
粉质黏土	不排水 A	19.200	20.200	6.420	25.260	0.828	7	26		0.670
淤泥质粉质黏土	不排水 A	17.300	19.300	3.420	15.250	1.192	7	26		0.670
圆砾	排水	19.600	20.000	35.000	105.000	0.500	2	40	10	1.000
土石混合料	排水	18.000	20.000	20.000	60.000	0.500	5	40		0.670
碎石垫层	排水	22.000	22.000	125.000	450.000	0.500	1	30		0.670

表 4 桩体参数
Table 4 Pile parameters

类别	材料类型	弹性模量 /MPa	重度 /(kN/m ³)	预定义 梁类型
预应力管桩	弹性	36 000	0.25	大直径圆弧
水泥搅拌桩	弹性	100	0.15	大直径圆弧

2.3 布桩方式确定

长短桩复合地基主要有三种布桩方式：外长中短、外短中长和长短相间。其中长短相间方式在工程实践中应用最为广泛，而其他两种方式的应用相对较少。

岩土力学

采用 PLAXIS 有限元软件对这三种布桩方式进行沉降分析, 计算结果如图 1~3 所示, 其中外短中长沉降值为 234.7 mm, 外长中短沉降值为 276.4 mm, 长短相间沉降值为 255.6 mm。虽然三种布桩方式的沉降值差异不大, 且外短中方式的沉降值最小。但通过边桩弯矩分析发现, 该方式下短桩的弯矩过

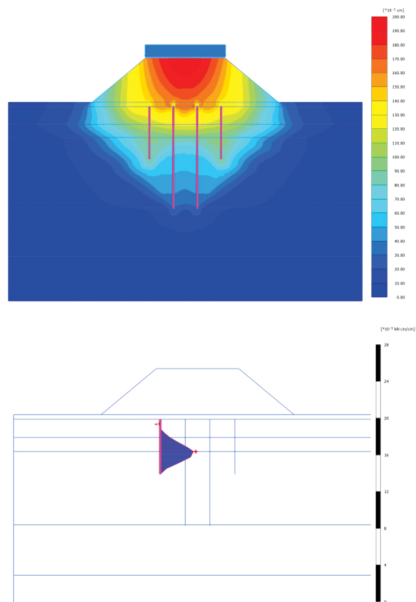


图 1 外短中长沉降与边桩弯矩图

Fig. 1 Settlement of short outer and long middle piles and bending moment diagram of edge piles

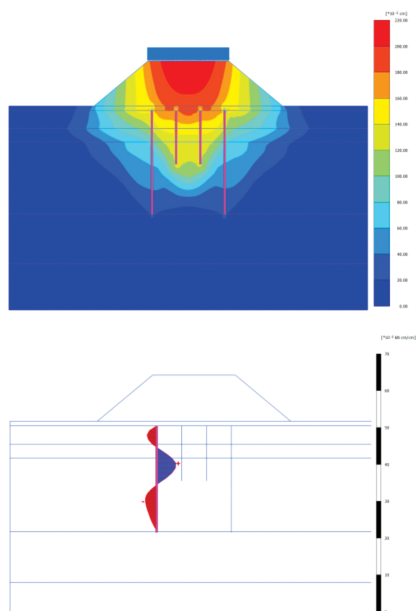


图 2 外长中短沉降与边桩弯矩图

Fig. 2 Settlement of long outer and short middle piles and bending moment diagram of edge piles

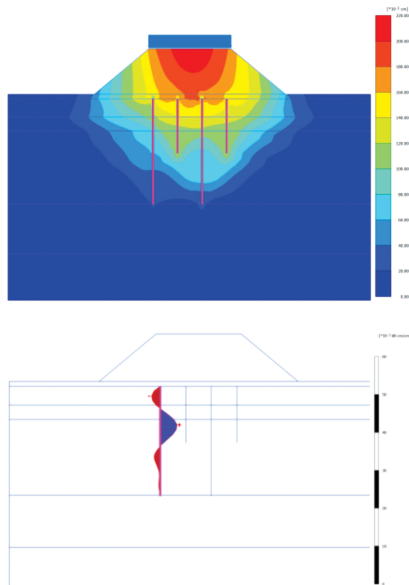


图 3 长短相间沉降与边桩弯矩图

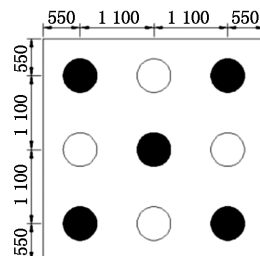
Fig. 3 Settlement of alternating long and short piles and bending moment diagram of edge piles

大, 存在加载后容易破坏的风险。综合考虑沉降控制和桩体受力安全性, 最终选择长短相间的布桩方式。布置方案如图 4 所示, 其有限元模型和网格划分如图 5~6 所示。模型的施工步设置见表 5。

表 5 施工步设置

Table 5 Construction layout

过程步	工况名称	计算类型	对应内容
第一步	初始步	K_0 过程	激活天然地基土层
第二步	打设桩体	固结	激活桩体, 时长 60 d
第三步	桩帽连梁	固结	激活桩帽连梁, 时长 30 d
第四步	铺设 20 cm 碎石土	固结	激活下部垫层碎石土, 时长 20 d
第五步	铺设第一层钢格栅	固结	激活第一层钢格栅, 时长 15 d
第六步	铺设 30 cm 碎石土	固结	激活上部垫层碎石土, 时长 20 d
第七步	铺设第二层钢格栅	固结	激活第二层钢格栅, 时长 15 d
第八步	路堤填筑	固结	激活路堤填土, 时长 150 d
第九步	预压	固结	预压期为 12 个月
第十步	固结一年	固结	激活全部结构
第十步	固结十五年	固结	激活全部结构



白色: 短桩
黑白: 长桩
(a) 平面图

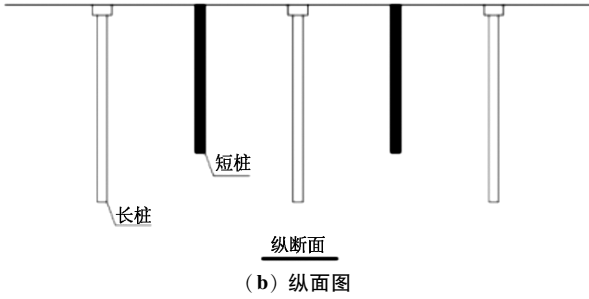


图 4 长短相间布置方案 (单位: mm)
Fig. 4 Alternating long - short arrangement scheme

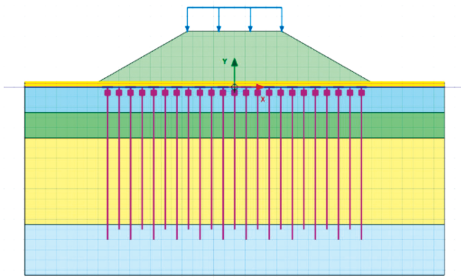


图 5 长短相间有限元模型
Fig. 5 Finite element model with an alternating long - short pattern

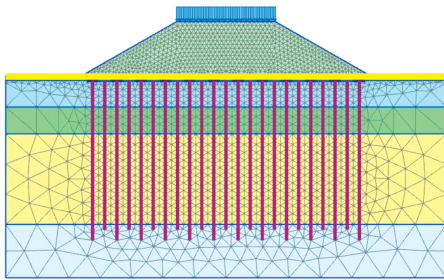


图 6 长短相间模型网格划分示意图
Fig. 6 Schematic diagram of mesh generation for the alternating long - short model

3 布桩优化设计研究

3.1 各方案加固效果分析

通过对表 1 所列 6 种布桩方案进行数值模拟分析, 获得了施工期沉降、工后沉降、侧向水平位移以及中心长桩和短桩的桩土应力比随施工时间及运营时间的演化特征, 如图 7~11 所示。方案 1 和方案 3 表现出较小的沉降值和侧向位移, 适用于以变形控制为主要优化目标的工程; 方案 4 具有较高的长、短桩桩土应力比, 适用于以承载性能提升为主要优化目标的工程; 方案 2 和方案 5 各项力学指标均处于中等水平, 可根据地基加固要求和工程经济性进行综合评估选取; 而方案 6 不仅呈现较大的沉降值和侧向位移, 且中心长、短桩的桩土应力比偏低, 表明其桩体承载性能利用率不足, 因此不建议采用。

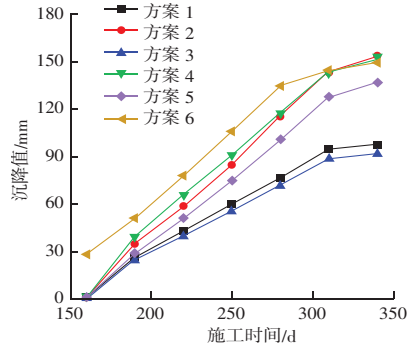


图 7 各方案施工期沉降曲线
Fig. 7 Settlement profiles during construction period for different schemes

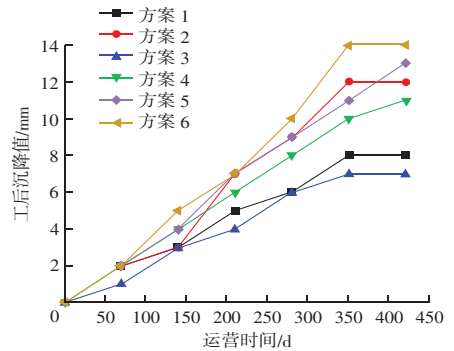


图 8 各方案工后沉降曲线
Fig. 8 Post-construction settlement profiles for different schemes

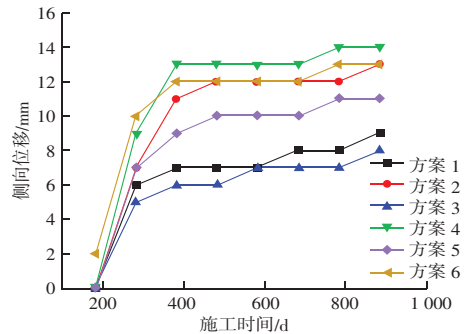


图 9 各方案侧向位移曲线
Fig. 9 Lateral displacement profiles for different schemes

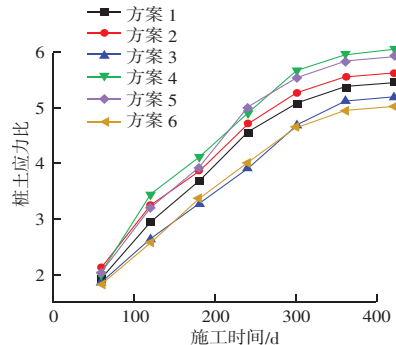


图 10 各方案中心长桩桩土应力比变化曲线
Fig. 10 Variation of pile - soil stress ratio in central long piles for different schemes

岩土力学

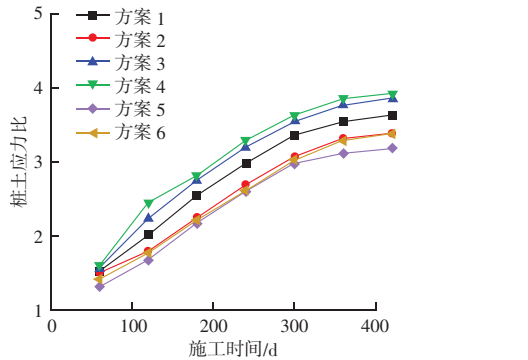


图 11 各方案中心短桩桩土应力比变化曲线

Fig. 11 Variation of pile-soil stress ratio in central short piles for different schemes

3.2 基于蚁群思路的优化设计

蚁群算法是一种启发于自然界蚂蚁群体觅食行为特征的智能仿生优化算法^[18]，其核心机制是通过信息素的正反馈机制引导种群行为以寻求最优解。

在 t 时刻，该算法的数学模型可以表示为：

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \times [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $p_{ij}^k(t)$ 为蚂蚁 k 在 i 至 j 之间的概率转移程度， $\tau_{ij}(t)$ 为 i 至 j 之间路径上信息素的大小； $\eta_{ij}(t)$ 为 i 至 j 之间路径选择时的启发信息； α 、 β 信息启发大小、期望启发因子大小； $\tau_{is}(t)$ 为 i 至目标点 s 的信息量； $\eta_{is}(t)$ 为 i 至目标点 s 的信息大小。

启发函数 $\eta_{ij}(t)$ 可以表示为：

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

式中： d_{ij} 为 i 至 j 之间的距离。

蚁群算法步骤如图 12 所示。

蚁群算法应用于长短桩复合地基的优化思路，其中蚂蚁从食物至蚁穴的最终路径选择为长短桩复合地基布桩设计的最优解，运输食物不同路径的可选择性为布桩方案的空间集，路径长度对应目标函数，包括对承载力、沉降、造价的综合评价，信息素浓度对应方案的优劣程度。

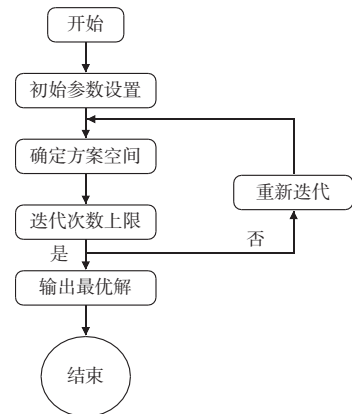


图 12 蚁群算法步骤

Fig. 12 Steps of the ant colony algorithm

以长短桩的布桩方案编码为设计变量，桩长、桩径作为连续变量，组成决策变量向量，由此建立理论模型：

$$\begin{aligned} X &= [x_1, x_2, \dots, x_n] \\ f(X) &= \min/\max \\ g_i(X) &\leq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, r) \\ g_j(X) &\leq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, p) \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $f(X)$ 为目标函数； X 为设计变量； $g_i(X)$ 、 $g_j(X)$ 为约束函数； r 为不等式约束个数； p 为等式约束个数。

依照实际工程需求，对工程造价进行考虑，即对方案中桩体的数量价格进行计算，建立目标函数：

$$V = n \times l \times \frac{\pi}{4} d^2 \quad (4)$$

式中： V 为桩体用料的总体积； n 为地基处理所用桩体的数量； l 为桩体长度； d 为桩体直径。

同时需满足工程约束条件：复合地基沉降要求：

$$\begin{aligned} S_{\text{工后沉降}} &\leq 20 \text{ cm} \\ f_{sp,k} &> [P] = 200 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $[P]$ 为地基容许承载力。

对于长短桩复合地基的承载力计算，规范^[19]中给出了公式：

$$f_{sp,k} = m_1 \frac{R_{a1}}{A_{p1}} + m_2 \frac{R_{a2}}{A_{p2}} + \beta(1 - m_1 - m_2)f_{sk} \quad (6)$$

式中： $f_{sp,k}$ 为复合地基承载力特征值； m_1 、 m_2 为长、短桩的置换率； R_{a1} 、 R_{a2} 为长、短桩单桩承载力的特征值； A_{p1} 、 A_{p2} 为长、短桩的桩截面面积； β 为桩间土承载力发挥系数，一般取 0.75 ~ 1.0； f_{sk} 为桩间土承载力特征值。

公式中相关参数的计算如下：

$$m_1 = \frac{A_{p1}}{2s_1s_2}$$

$$m_2 = \frac{A_{p2}}{2s_1s_2}$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_p A_p \quad (7)$$

式中： u_p 为桩的周长； q_{si} 为桩周第 i 层土侧阻力特征值，可按地区经验取值； l_{pi} 为桩长范围内第 i 层土的厚度； α_p 为桩端端阻力发挥系数，按地区经验确定； q_p 为桩端端阻力特征值，可按地区经验确定。 α_p 为 0.8； β 为 1。设置连梁时， f_{sk} 为 100 kPa；无连梁时， f_{sk} 为 85 kPa。

相关参数取值和计算值见表 6 和表 7，最终计算得到各方案的承载力特征值见表 8。

表 6 预应力管桩和水泥搅拌桩的 q_{si} 、 q_p 取值

Table 6 q_{si} and q_p values of prestressed pipe pile and cement mixing pile /kPa

土层	q_{si} (预)	q_p (预)	q_{si} (水)	q_p (水)
杂填土	13		10	
粉质黏土	22		19	
淤泥质粉质黏土	15	1 100	12	600
圆砾	55	3 500		

表 7 各方案 R_a 计算值

Table 7 Calculate the value of each scheme R_a /kN

方案	1	2	3	4	5	6
R_{a1}	725.3	725.3	725.3	725.3	725.3	725.3
R_{a2}	656.3	276.9	1 248.1	656.3	340.0	656.3

表 8 各方案承载力特征值 $f_{sp,k}$ 计算值

Table 8 Calculated characteristic values of load-bearing capacity $f_{sp,k}$ for each plan /kPa

方案	1	2	3	4	5	6
$f_{sp,k}$	603.4	462.3	817.0	460.4	479.3	589.9

经计算，所提出的 6 种方案的承载力均大于地基要求承载力 200 kPa，且得到原地基处理方式的复合地基承载力为 276.3 kPa。运用长短相间的布桩方式进行加固，地基的承载力明显大于原处理方式，且符合工程需求，因此布桩方案的选取均能满足地基承载力的需要，提升地基的整体强度。

对 6 种方案进行造价计算，其中长桩选用预应力管桩，短桩选用预应力管桩或水泥搅拌桩，其工程造价来源主要包括预应力管桩的用料费用、水泥搅拌桩的用料费用、桩帽和连梁的施工费用，各材质定额见表 9，各方案用料造价计算结果见表 10。

表 9 各材质定额

Table 9 Quota of each material

构件	水泥搅拌桩	预应力管桩	桩帽	连梁
单价/ m^3	344 元/ m^3	790 元/ m^3	120 元/个	270/ m^3

表 10 各方案用量及总价

Table 10 Dosage and total price of each scheme

方案编号	水泥搅拌桩用料/ m^3	预应力管桩用料/ m^3	桩帽个数/个	连梁用料量/ m^3	总价/元
1		418.9	120	36.6	355 213
2		332.2	120	36.6	285 720
3		942.5	120	36.6	768 857
4		276.8	80	31.8	236 858
5	260.0	216.7	120	36.6	284 915
6		418.9	120		345 331

表 11 各方案沉降值

Table 11 Settlement value of each scheme /mm

方案编号	施工期沉降	侧向位移	工后沉降	总沉降
1	98	9	8	106
2	154	13	12	166
3	92	8	7	99
4	152	14	11	163
5	137	11	13	150
6	152	13	15	167

起初，所有路径的信息素浓度相同，代表长短桩布桩方案的初始探索是均匀的。随着迭代过程的推进，算法通过模拟蚁群觅食行为对不同方案进行评估。根据表 8 和表 10 可得，各方案承载力由大到小的排序为方案 3 > 1 > 6 > 5 > 2 > 4，造价的排序为方案 4 < 5 < 2 < 6 < 1 < 3。表 11 为根据有限元计算得到的六种方案各阶段的沉降值大小情况，其中工后沉降整体较小且均满足约束条件的要求，同时工后沉降值的排序由小到大为 3 < 1 < 4 < 2 < 5 < 6。

在持续优化过程中，各方案的信息素浓度会呈现差异化分布，较优方案的信息素浓度得到显著增强，并通过信息素的正反馈机制，优质方案的吸引力会不断增强，使种群个体趋向于选择最优路径。

通过多目标空间中逐步筛选和淘汰不合适的方案，最终综合优选出最佳的布桩方案。研究结果显示，方案 1 和方案 3 的承载性能较好、沉降值较小，但其工程造价过高，因此予以排除。而方案 6 未设置连梁，造价较高，各阶段沉降和侧向位移均较大，且对比发现其长、短桩承载性能发挥较差，同时无连梁来分担格栅受力，整体加固性能较差，予以排除。对余下的三种方案，地基的稳定性一般用工后沉降来表征，而方案 2、4、5 的工后沉降分别为

岩土力学

12、11、13 mm，相差较小，此时沉降不作为主要优化指标，因此通过对地基的强度即承载力安全系数进行比对。

复合地基的承载力安全系数 K_1 为：

$$K_1 = \frac{P}{[P]} \quad (8)$$

式中： K_1 为承载力安全系数，一般取 2； P 为地基极限承载力； $[P]$ 为地基容许承载力。

经计算，方案 2、4、5 的承载力安全系数分别为 2.31、2.30、2.39，均大于规范要求的 2.0，方案 5 的承载力安全系数较大，可选为优化方案。方案 2、4 的承载力安全系数较接近，此时对造价进行考虑，由表 10 可知，方案 4 的造价显著方案 2，综合以上分析，同时考虑地基的强度、稳定性、工程造价进行优化选取，该研究最终得到的优化方案为方案 4、5，两种方案的布桩示意图如图 13 所示。

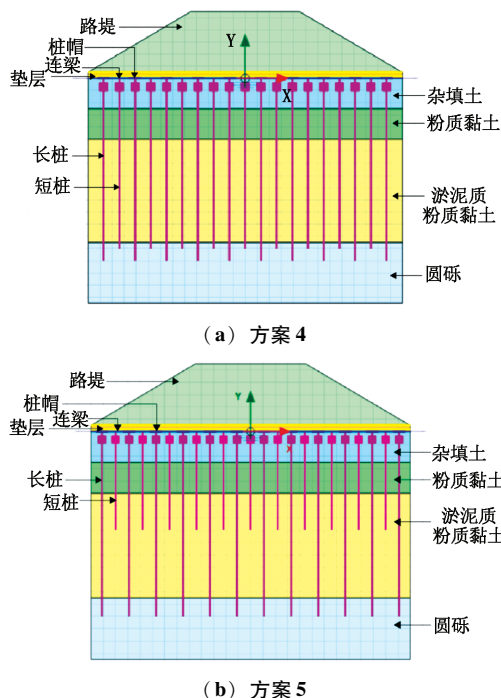


图 13 布桩示意图

Fig. 13 Pile layout diagram

4 结论

选用桩帽间加入连梁结构的长短桩复合地基对杭州绕城高速公路互通改建工程桥头路段进行加固，为有效提升桥头地基浅部土层的承载力及整体稳定性，同时为充分发挥长短桩复合地基的加固特性，

对其布桩方案进行优化设计。得出以下结论：

(1) 根据依托工程现状，拟定了六种布桩方案。运用 PLAXIS 建立桥头路段的断面模型。根据各布桩方式的沉降和边桩弯矩情况，最终选择长短相间作为布桩方式。

(2) 根据规范和相关工程资料对长短桩复合地基的布桩参数及各参数的相关性进行分析，确定优化的理论模型和思路。

(3) 利用蚁群优化思路在众多路线中快速找到“巢穴”到“食物”之间最优路线的独特优势，计算长短桩复合地基布桩设计的最优解。以工后沉降 ≤ 20 cm 及承载力大于 200 kPa 为约束条件，根据各方案的施工期及工后沉降、侧向位移和桩土应力比情况，并综合考虑承载力、沉降和工程造价进行优化选取，最终得到的两种布桩方案为桩帽间加入连梁结构。长桩为桩长 15 m、桩径 400 mm 的预应力管桩，桩间距 2.6 m 时，短桩为桩长 14 m、桩径 400 mm 的预应力管桩；桩间距 2.2 m 时，短桩为桩长 8 m、桩径 600 mm 的水泥搅拌桩。

参 考 文 献

- [1] 王林峰. 路桥工程桥头跳车原因分析与处理措施 [J]. 工程建设与设计, 2024, (13): 98–100.
- [2] JING G, XINTAO Z, JIAYAN L. Evaluation of the dynamic impact of a passing vehicle on a bridge deck due to a damaged expansion joint [J]. Symmetry, 2022, 14 (4): 813–813.
- [3] 黄秦. 软土路基过渡段水泥搅拌桩桩长优化研究 [J]. 铁道建筑技术, 2023, (2): 90–93, 160.
- [4] 路阳, 张婷婷. 长短桩复合地基在深厚软土地基处理中的应用 [J]. 红水河, 2024, 43 (3): 133–136, 148.
- [5] 吴术高, 刘旭, 吴红刚, 等. 静荷载下铁路长短桩复合地基承载特性试验研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (增刊 2): 611–616.
- [6] GAO S, CHEN C, JIANG X, et al. Transformer-based settlement prediction model of pile composite foundation under embankment loading [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 176 106783–106783.
- [7] YONG Y, JICHAO Z. Analysis of features of long and short pile composite foundation in high-rise buildings [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2022, 59 (1): 92–101.
- [8] YUANCHENG G, CHENYU L, SIQIANG H, et al. Experimental study on the pile-soil synergistic mechanism of composite foundation with rigid long and short piles [J]. (下转第 111 页)

- [3] 赵意晋, 刘恒, 蔡晓慧, 等. 深厚软土地层中异形地铁车站深基坑开挖三维数值模拟分析 [J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2023, 45 (5): 563-572.
- [4] 赵建武, 杨昊, 杨美霞, 等. 软土地区明挖车站深基坑变形影响因素数值模拟分析与优化研究 [J]. 公路, 2023, 68 (11): 349-356.
- [5] 郁志伟, 张克胜, 宋卓华, 等. 软土地层深基坑围护结构变形分析及模拟研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊2): 2373-2377.
- [6] 赵鹏飞, 王泽希, 方成全, 等. 双排桩支护下软土深基坑开挖的变形分析与控制 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (增刊1): 1087-1094.
- [7] 乔丽平, 李韵迪, 杨超. 填海区临地铁超大直径圆环撑基坑变形控制及监测分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (7): 2838-2847.
- [8] 朱殷航, 徐中华, 王卫东, 等. 软土地层超深基坑支护结构变形特性三维分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (增刊2): 767-777.
- [9] 李芳宝, 龙喜安. 佛山地区深厚软土地层地铁深基坑支护结构变形特性与适用性分析 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (增刊2): 294-304.
- [10] 裴学军, 帅彬, 王洪涛, 等. 复杂环境下深大基坑开挖变形与数值模拟分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊1): 2777-2783.
- [11] 张坤勇, 张梦, 孙斌, 等. 考虑时空效应的软土狭长型深基坑地连墙变形计算方法 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (8): 2389-2399.
- [12] 周东波, 梅源, 刘子扬, 等. 东部沿海软土车站深基坑开挖地连墙变形规律 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2024, 43 (12): 41-46.
- [13] 马昕, 孙德安, 刘树佳. 软土地区某超深圆形基坑变形特性及流固耦合分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51 (6): 74-85.
- [14] 方能榕, 李继光, 余国梁, 等. 深厚软土地区预留土台对基坑围护结构变形及稳定性影响分析 [J]. 福建建设科技, 2024 (2): 48-53.
- [15] 张雅荻. 枢纽工程软土深基坑围护结构安全监测方法 [J]. 建筑技术, 2025, 56 (3): 326-329.

(上接第 106 页)

- Mathematical Problems in Engineering, 2021.
- [9] 胡海英, 杨光华, 张玉成, 等. 基于沉降控制的刚性桩复合地基设计方法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (10): 2135-2146.
- [10] 张泉钰. 长短桩复合地基的 ABAQUS 分析及优化思路 [D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [11] WANG T, GAO W S, LIU J. Study on implementation method for optimization design of pile foundation stiffness to reduce differential settlement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010.
- [12] HU H, JI X, LIANG H. Study on construction schedule optimization of bored pile based on genetic algorithm [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 300 (2): 022020-022020.
- [13] 孔凯歌, 伍晓伟, 王晓, 等. 大直径钻孔灌注桩优化设计研究 [J]. 西部交通科技, 2022, (5): 132-135.
- [14] 何志俊. 基于数值模拟的 h 型抗滑桩优化设计研究 [J]. 山西交通科技, 2020, (4): 8-11.
- [15] 林维康, 张嘉荣. 桩帽连梁式路堤变形与荷载传递规律 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (35): 15247-15257.
- [16] 林乔宇. 厦门花岗岩残积土 HSS 模型参数的研究及工程应用 [D]. 福建: 华侨大学, 2019.
- [17] 刘硕天. 承台对群桩水平承载力影响的数值分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [18] 杨亚新. 基于改进的蚁群算法路径规划方法研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [19] JGJ 79—2012 《建筑地基处理技术规范》[M].