

PHC桩-网复合地基承载特性

李浩楠, 石振武*

(东北林业大学 土木与交通学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 针对PHC桩-网复合地基承载性能不明确及参数优化的需求, 采用现场静载试验与ABAQUS三维有限元模拟相结合的方法, 研究其载荷传递机制与沉降特性。研究结果表明: PHC桩-网复合地基承载性能良好, 桩身轴力沿深度呈先增后减趋势, 侧摩阻力自上而下逐步发挥。土工格室加筋褥垫层可有效抑制沉降, 较普通褥垫层沉降降低7.5%。参数分析表明, 桩长增至10 m后沉降控制效果趋缓, 褥垫层模量提升至80 MPa可减少沉降31.7%, 土工格室模量提高至2 GPa可降沉23.1%, 褥垫层厚度存在0.3~0.6 m的最优区间。研究结论为类似工程的优化设计与沉降控制提供理论依据与决策参考。

关键词: PHC桩; 复合地基; 承载特性; 土工格室; 沉降控制; 桩-土相互作用

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0728-08

Bearing characteristics of PHC pile net composite foundation

LI Haonan, SHI Zhenwu*

(Faculty of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To address the unclear bearing performance and parameter optimization requirements of PHC pile-net composite foundations, this study combines on field static load tests with three-dimensional finite element simulation via ABAQUS to investigate its load transfer mechanism and settlement foundations. The axial force along the pile depth first increases and then decreases nonlinearly, while the side friction resistance develops progressively from top to bottom. The geocellular-reinforced cushion layer effectively restrains foundation settlement, reducing settlement by 7.5% compared with a conventional cushion. Parameter analysis indicates that increasing the pile length from 6 m to 12 m cumulatively reduces settlement by 42%, with the reduction rate slowing beyond 10 m. Raising the cushion modulus from 10 MPa to 80 MPa decreases total settlement by 31.7%, and increasing the geocell modulus to 2 GPa reduces settlement by 23.1%. An optimal cushion thickness range of 0.3–0.6 m was identified. The research conclusions provide a theoretical basis and decision-making support for the optimized design and settlement control of similar projects.

Keywords: PHC pile; composite foundation; bearing behavior; geocell; settlement control; pile-soil interaction

0 引言

随着中国交通路网的不断完善, 公路运输量呈几何级数增长, 这对道路工程建设提出了更高要求^[1]。在新基建背景下, 如何提升地基结构承载能力已成为公路工程发展的核心课题。由桩基、加筋层和土体共同构成的复合地基体系, 凭借其协同工作机理, 有效提高了地基的承载能力与综

合性能, 已成为现代公路建设中的主流技术方案^[2-3]。在该体系中, 不同桩型具有差异化的载荷传递机制。其中, 预应力高强度混凝土管桩(PHC)作为典型的摩擦桩, 可充分发挥深部桩侧摩阻力的优势, 不仅可提升地基承载力、控制工后沉降, 且施工经济高效, 在工程实践中备受青睐^[4-7]。另外, 三维立体结构的土工格室相较于传统平面加筋材料, 具有更强的侧限效应, 既能抑

收稿日期: 2025-06-07 修回日期: 2025-07-02 接受日期: 2025-07-16 责任编辑: 朱含露

基金项目: 黑龙江省建投集团项目(HFW230500018); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572023AW76)

作者简介: 李浩楠(1999-), 男, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 主要从事道路工程方面的研究。E-mail: 1577125709@qq.com

通信作者: 石振武(1963-), 男, 吉林四平人, 博士, 教授, 主要从事道路工程方面的研究。E-mail: shizhenwu@126.com

制土体的横向变形,又能提高褥垫层的整体刚度,从而满足复合地基更高的承载需求^[8-9]。

近年来,学者围绕PHC管桩及土工格室在地基中的承载性能开展了大量研究。在PHC管桩方面,杨毅等^[10]以荣乌高速公路PHC预应力管桩基础为研究对象,分别对单桩及复合地基的承载力进行对比分析,发现PHC预应力管桩复合地基的承载力约为单桩的1.5倍。凌造等^[11]基于泥质粉砂岩地区的现场静载破坏试验,分析了不同条件下嵌岩PHC管桩的桩端承载性能与宏观破坏模式,并提出了相应的桩端承载力计算方法。李波等^[12]通过现场竖向抗压静载试验,实测得到桩侧摩阻力分布规律,证明随着桩顶载荷增大,桩身轴力也随之增大,且沿桩身自上而下逐渐衰减。史永强等^[13]根据辽沈地区典型地质条件下静压PHC管桩的静载荷试验与内力测试数据,分析了桩身压缩量与桩顶沉降的关系,指出静压PHC管桩在该地区的应用具有明显的区域特点。王卿等^[14]为验证PHC管桩在洞庭湖区地质条件下的适应性,分别采用堆载试验法和自平衡试验法对其竖向承载力进行研究,结果表明锤击沉桩工艺适用于该地区地质条件。在土工格室研究方面,朱春生等^[15]通过大型直剪试验,探讨土工格室规格等技术参数对绿洲灌区公路路基承载力与变形的影响,证实土工格室能有效减小地基沉降。张玲等^[16]采用室内模型试验,对比分析了软土地基及三种加固方案(土工格室加筋、碎石桩复合地基、土工格室-碎石桩协同加固)的竖向承载力,发现双向增强型复合地基的承载力显著高于单一加固方式。邓友生等^[17]通过静载试验对比研究不同复合路基结构,证

明三维土工格室在改善桩土应力分布与抑制路基沉降方面优于传统平面土工格栅。金家庆等^[18]通过对比三种褥垫层的破坏特征,验证了加筋处理对提升路堤稳定性与变形控制能力具有积极作用。

基于此,为进一步提高公路地基的承载力并抑制不均匀沉降,可将土工格室与PHC桩结合使用,形成优势互补的联合加固方案。该方案通过协同发挥土工格室的加筋约束作用与PHC桩的深层承载作用,共同满足地基在承载能力与变形控制方面的要求。本文基于现场静载试验,运用大型有限元软件ABAQUS对竖向载荷作用下的PHC桩-土工格室复合地基进行数值模拟,从沉降、桩身轴力、桩侧摩阻力等角度,分析不同因素对其承载特性的影响,以期对相关工程实践提供理论依据。

1 现场试验

1.1 工程概况

试验现场位于哈尔滨市某PHC管桩施工场地,该场地位于岗阜状平原区,地势平坦开阔,局部略有起伏。场地地层主要由第四系中更新统湖积层、冲积层以及下更新统冲洪积层等构成,现场土层分布见表1,其中粉质黏土为主要软弱土层。试验采用PHC桩进行地基加固,桩长为8 m,桩径为0.4 m,桩身混凝土强度等级为C80,桩帽截面尺寸为1.2 m×1.2 m,采用C30混凝土现浇施工。桩间距为2~2.4 m,按正方形布置。桩顶铺设30 cm厚的中粗砂褥垫层,并在其中部夹铺一层高强土工格室,格室高为50 mm,网孔尺寸为400 mm×400 mm。

表1 现场土层分布情况
Tab.1 distribution of soil layers on site

土层名称	层厚/m	容重/(kN·m ⁻³)	含水率/%	液限/%	塑限/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土①	3.7	18.3	34.3	37.5	21.3	13.6	18.3
粉质黏土②	5.1	19.3	23.9	30.6	19.4	25.4	25.7
粉质黏土③	2.1	18.8	31.1	31.9	18.3	16.3	15.6
粉质黏土④	7.2	19.3	24.3	30.4	17.6	25.8	22.7

注:含水率为质量分数,后文同。

1.2 试验过程

试验遵循《公路工程地质原位测试规程》(JTG 3223—2021)要求,采用2.4 m×2.4 m的钢板作为承压板,其刚度与强度均满足规范规定。板底铺设厚度不超过20 cm的中砂找平层,并确保千斤顶合力中心与承压板中心重合。反力系统采用

堆载平台法,通过压块提供反力,其承载力为最大加载量的1.2倍。沉降测量使用4个大量程百分表,位移测点对称布置于承压板边缘内侧25~50 mm范围内,以保证测量数据的一致性。试验总加载量为300 kPa,采用慢速维持载荷法,按10级逐级施加,每级增量30 kPa。每级加载完成后,初始观

测间隔为 1~15 min, 待沉降速率趋于稳定后延长至每 30 min 观测一次。稳定判定标准为: 连续 2 h 内沉降速率小于 0.1 mm/h, 即可认为该级载荷下沉降稳定, 并进行下一级加载。终止加载的判定依据包括: ①土体出现明显挤出或隆起, 累计沉降量 s 与承压板宽度 b 之比大于 0.06; ②载荷-沉降曲



图1 现场加载装置
Fig.1 on-site loading device

2 有限元模型建立及分析

根据现场静载试验的实际尺寸建立数值模型。为消除边界效应的影响, 土体计算域在水平方向(径向)取 20 倍桩径, 深度方向取 2 倍桩长。采用实体单元进行建模, 土体尺寸为 10 m×10 m×20 m。PHC 桩长为 8 m, 外径为 0.4 m, 内径为 0.095 m, 桩帽尺寸为 1.2 m×1.2 m×0.3 m, 承

线(p - s)出现陡降段, 或 24 h 内沉降未能收敛; ③本级载荷下的沉降速率超过稳定阈值; ④累计加载量达到设计值的 200%。

现场加载装置见图 1。静载试验的 p - s 曲线见图 2。可见试验过程中未触发任何终止加载条件, 表明桩-土协同作用抑制了土体的塑性变形发展。

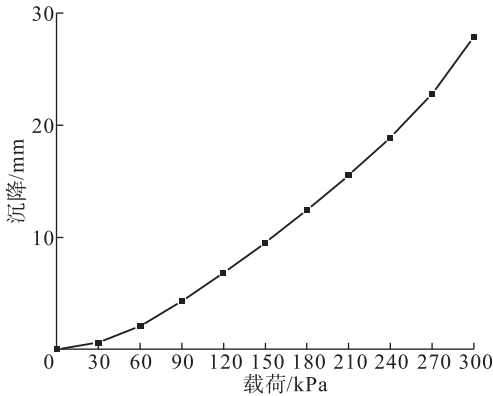


图2 现场静载试验的 p - s 曲线
Fig.2 p - s curve of on-site static load test

压板尺寸为 2.4 m×2.4 m×0.03 m。土工格室采用壳单元建模, 高度为 0.05 m, 网格单元为 0.4 m×0.4 m 的正方形。材料方面, 桩体和土工格室视为弹性体, 土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型^[19], 具体计算参数依据现场土工试验结果确定, 见表 2 和表 3, 其中褥垫层的黏聚力为 1 kPa, 内摩擦角为 36.0°。

表2 有限元模型土层计算参数

Tab.2 calculation parameters of soil layers in finite element model

层号	层厚/m	弹性模量/MPa	容重/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土①	3.7	8.4	18.3	0.35	13.6	18.3
粉质黏土②	5.1	22.6	19.3	0.32	25.4	25.7
粉质黏土③	2.1	10.3	18.8	0.37	16.3	15.6
粉质黏土④	7.2	24.5	19.3	0.32	25.8	22.7

表3 有限元模型构件计算参数

Tab.3 calculation parameters of components in finite element model

材料	弹性模量/MPa	容重/(kN·m ⁻³)	泊松比
褥垫层	4.0×10 ¹	18.3	0.24
土工格室	1.0×10 ³	19.6	0.32
桩身	3.8×10 ⁴	24.0	0.25
桩帽	3.0×10 ⁴	23.0	0.23
加载板	2.0×10 ⁶	78.0	0.30

模型中桩-土、桩-褥垫层、土-承压板以及土工格室-褥垫层之间的接触属性均通过相互作用模块定义。法向作用采用“硬接触”, 切向作用采用摩擦系数为 0.4 的“罚”函数。模型四周约束水平

位移(x 、 y 方向)及转角, 底部约束全部位移和转角(x 、 y 、 z 方向)^[20]。采用 10 级加载方式, 在加载板上施加竖向载荷 300 kPa 模拟实际载荷, 每级增量 30 kPa, 变形量以加载板中心点的沉降值表示。

在网格划分方面, 考虑到几何非线性效应, 土工格室采用“膜”单元进行离散, 其余构件均采用 C3D8R 单元。为提高桩-土接触区的计算精度, 对桩帽、土体、土工格室和承压板采用全局布种方式, 桩身则采用局部加密布种。最终模型共划分土体网格 63 200 个, 桩体网格 5 440 个, 格室网格 9 830 个, 承压板网格 8 350 个。所建立的有限元模型见图 3。

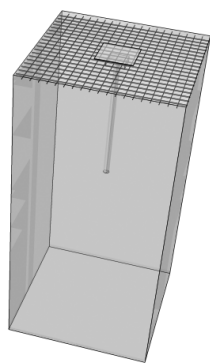


图3 有限元计算模型
Fig3 finite element model

为验证模型合理性,采用现场试验工况进行数值模拟,对比结果见图4。由图4可见,数值模拟与现场试验结果整体趋势吻合良好,说明有限元模型计算结果可靠。

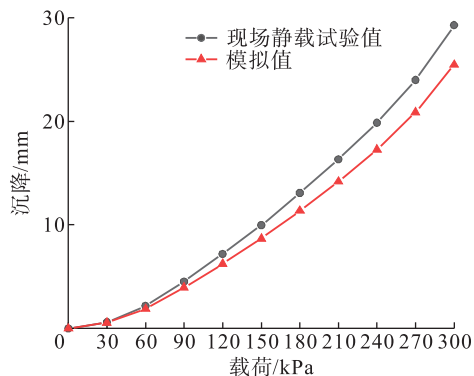


图4 现场试验与模拟结果对比
Fig.4 comparison of field test and simulation results

3 有限元结果分析

3.1 沉降

土工格室加筋褥垫层与单一褥垫层对比结果见图5。

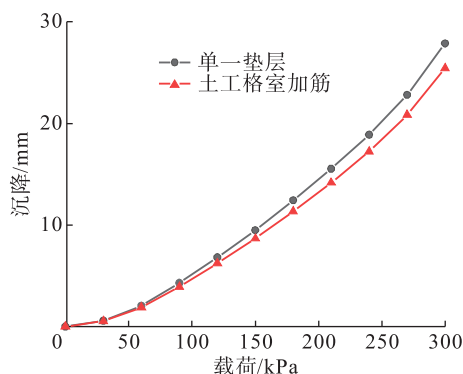


图5 土工格室加筋褥垫层与单一褥垫层对比
Fig.5 comparison between geogrid reinforced mattress layer and single mattress layer

由图5可见,现场试验与数值模拟的沉降-载荷曲线均呈现近似线性关系,表明复合地基在该阶段仍处于弹性变形状态。在加载初期(0~200 kPa),2种褥垫层的沉降曲线基本重合。当载荷超过200 kPa后,加筋褥垫层的沉降增速明显低于单一褥垫层。加载至300 kPa时,单一褥垫层的累计沉降为27.8 mm,而加筋褥垫层仅为25.7 mm,沉降减少约7.5%。这一差异说明,三维土工格室通过侧向约束作用可改善土体中的应力分布,从而抑制塑性变形的发展。其作用机制主要源于格室对土体位移的限制以及应力扩散角的增大。

3.2 桩身轴力

桩身轴向应力分布见图6。可知,加载初期,桩身轴向应力整体较低且变化平缓,表明桩-土界面摩阻力未充分发挥。与单桩体系中轴力随深度线性递减的典型特征不同,复合地基桩身轴力沿深度呈先增大后减小的非线性分布。在浅层区域,桩周土体沉降大于桩体沉降,产生方向向上的负摩阻力,桩体受上部载荷与负摩阻力的叠加作用,轴力逐渐增大。深层区域桩体沉降大于周边土体,产生向下的正摩阻力,桩身轴力逐步减小。

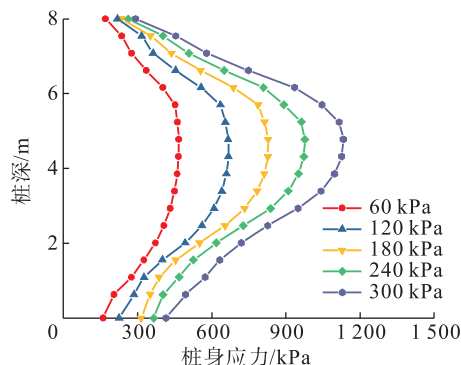


图6 桩身轴向应力分布
Fig.6 distribution of axial stress in pile body

3.3 桩侧摩阻力

不同载荷等级下桩侧摩阻力沿桩深的分布状况见图7。由图7可见,桩-土界面摩阻力呈现出由上至下逐步发挥的趋势,其沿深度的分布具有明显的非线性特征。在距桩顶3~4 m内存在显著的负摩阻力区,这是由于该区域桩身压缩变形小于周围土体的沉降,土体对桩身产生向下的拖曳作用。中性点位于桩侧摩阻力为0的深度,该处桩-土相对位移趋于0。试验结果表明,随着载荷增大,中性点位置逐渐上移,且桩顶区域的最大负摩阻力值增加,说明适当提高载荷水平可限制负摩阻区的向下扩展。

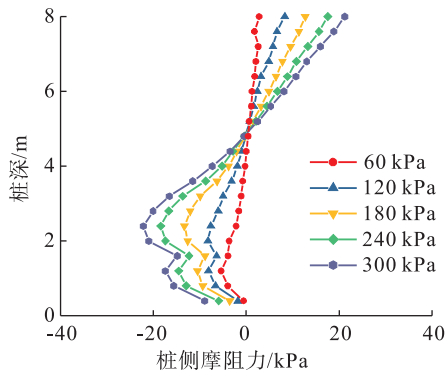


图7 桩侧摩阻力分布

Fig.7 distribution of pile side friction resistance

3.4 影响因素研究

(1) 桩长

桩长是影响复合地基承载力与沉降特性的关键因素。为分析桩长对PHC桩复合地基承载性状的影响规律,保持其他参数不变,分别选取桩长为6 m、8 m、10 m和12 m进行模拟,结果见图8。

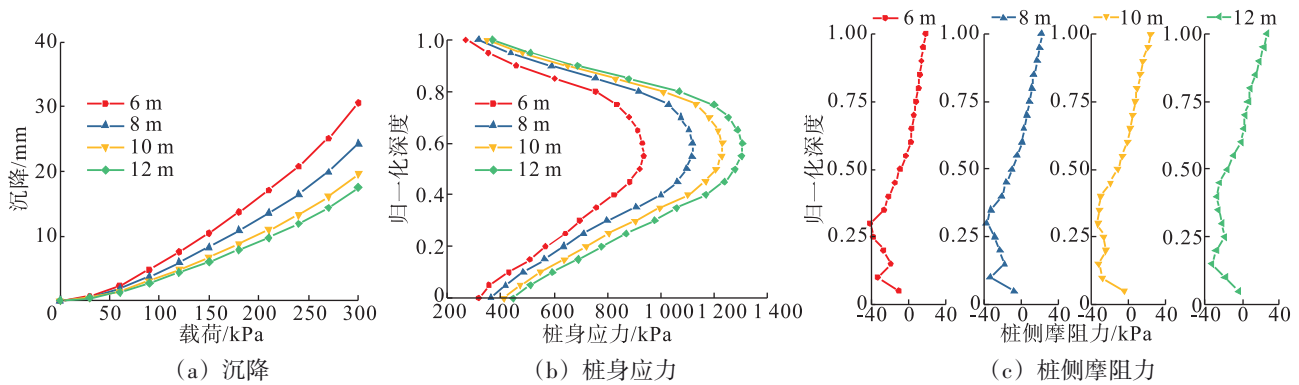


图8 桩身长度对地基承载性能的影响

Fig.8 influence of pile length on the bearing performance of foundation

(2) 褥垫层弹性模量

褥垫层作为复合地基中的关键组成部分^[22-24],通过调节桩-土载荷分配关系,可有效调动地基土的承载潜力。为研究褥垫层弹性模量对复合地基

由图8(a)可知,桩长从6 m增至12 m时,复合地基累计沉降降幅为42%。桩长超过10 m后,沉降减小幅度明显趋缓($\Delta s/\Delta L < 5\%$),表明存在临界桩长阈值。其力学机制体现为两点:一是桩长增加提升复合地基的整体抗弯刚度,增强其抵抗竖向变形的能力;二是长桩将载荷传递至深层低压缩性土层,优化应用扩散路径减小浅层土体附加应力,抑制压缩变形发展。

由图8(b)可知,桩身轴向应力随桩长增加呈非线性增长。桩长从6 m增至12 m时,桩顶区域应力增加43%,而桩端应力仅增加14%,表明在长桩体系中载荷更集中于桩顶区域,该变化规律与雷金波等研究结论相符^[21]。由图8(c)可知,桩长为6 m(短桩)时摩阻力沿深度分布不均,最大值出现在桩身中上部。而桩长为12 m(长桩)时的摩阻力分布更为均匀,峰值向深层转移。这主要由于长桩减小了桩-土相对位移梯度,削弱了浅层负摩阻效应,促使中性点下移。

性能的影响,在其他参数不变的条件下,对弹性模量分别为10 MPa、20 MPa、40 MPa、60 MPa和80 MPa的工况开展数值模拟分析,结果见图9。

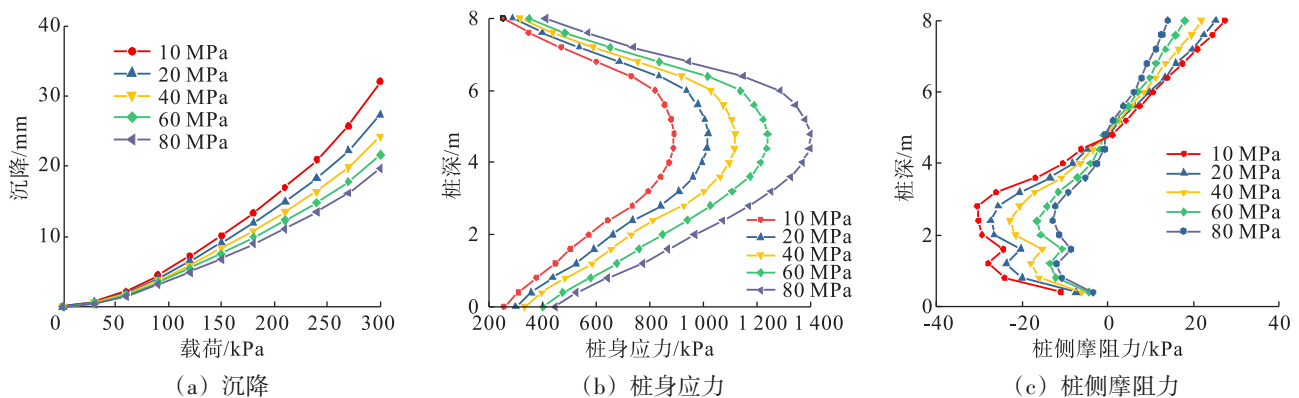


图9 褥垫层模量对地基承载性能的影响

Fig.9 influence of cushion elastic modulus on the bearing performance of foundation

由图9(a)可知,褥垫层弹性模量从10 MPa增至80 MPa时,复合地基的最大沉降降低了31.7%。其主要原因是:褥垫层自身压缩量随弹性模量提高而减小,刚度增强有效抑制了其压缩变形;同时载荷传递路径得到优化,高模量褥垫层能够更有效地扩散载荷,使更多载荷通过桩体传递至深层承载力较高的土层,减小桩间土的载荷分担比例,从而控制整体沉降。

由图9(b)可知,褥垫层弹性模量从10 MPa增至80 MPa时,桩身应力增加42.3%,且相同位

置处低模量工况的桩身应力均低于高模量工况,说明降低褥垫层弹性模量有助于缓解桩身应力集中现象。结合图9(c)中的桩侧摩阻力分布可知,在高模量褥垫层工况下,负摩阻力作用范围明显减小,中性点位置上移。

(3) 褥垫层厚度

为分析褥垫层厚度变化对复合地基受力与变形特性的影响,在保持其他参数不变的条件下,分别对厚度为0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.5 m和0.8 m的工况进行数值模拟,结果见图10。

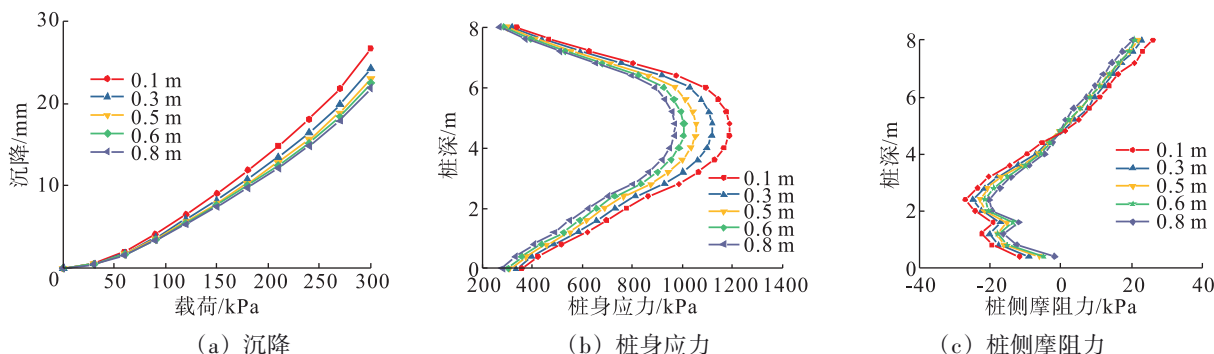


图10 褥垫层厚度对地基承载性能的影响

Fig.10 influence of cushion thickness on the bearing performance of foundation

由图10(a)可知,当褥垫层厚度从0.1 m增至0.3 m时,沉降减少18.1%。继续增至0.8 m时,沉降仅减少9.7%,表明厚度对沉降的控制效应随厚度增加而逐渐减弱。这是由于应力扩散能力增强,厚度增大扩大了载荷扩散角,提高了载荷分布的均匀性。而桩-土协同作用优化,增厚的褥垫层增强了桩土之间的变形协调能力,促使桩体更早参与承担载荷,从而减少土体压缩量。

由图10(b)可知,随着褥垫层厚度从0.1 m增加至0.8 m,桩顶及桩身应力显著降低,总体降幅达21.2%,但应力减少的幅度随厚度增大而逐渐衰减。综合经济性与工程效果,建议最佳厚度范

围为0.3~0.6 m。由图10(c)可知,厚度增加会导致桩侧摩阻力整体降低,且中性点位置下移。其机理在于:厚垫层增大了桩顶的刺入沉降,带动桩身整体下移,使桩身中下部的桩-土相对位移更易超过临界值,从而激发该区段摩阻力的发挥。

(4) 土工格室模量

土工格室可将上部载荷传递至桩体与桩间土,抑制桩-土之间的差异沉降。格室模量过低易导致结构断裂失效,过高则可能造成材料浪费。因此在保持其他参数不变的条件下,选取格室模量为0.5 GPa、1.0 GPa、1.5 GPa和2.0 GPa进行数值模拟,结果见图11。

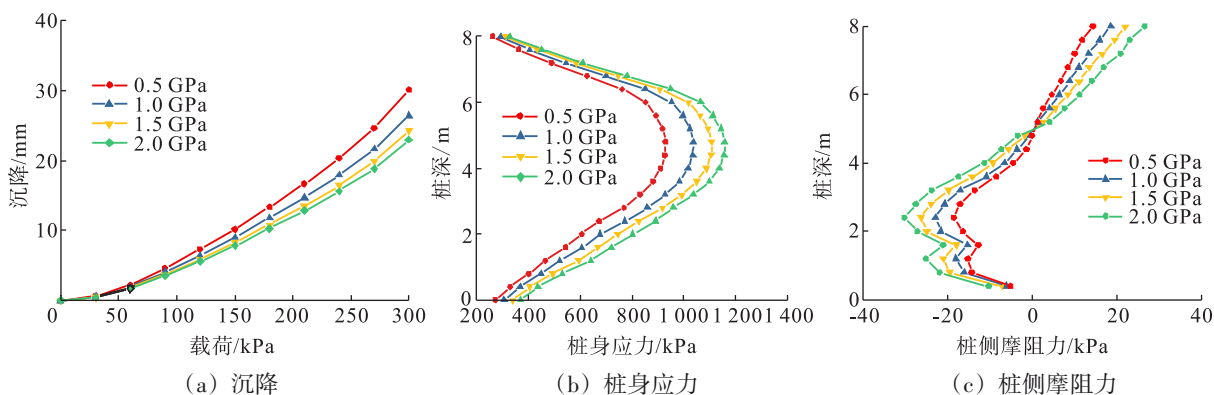


图11 土工格室模量对地基承载性能的影响

Fig.11 influence of geocell modulus on the bearing performance of foundation

由图11(a)可知,当土工格室模量从0.5 GPa增至2.0 GPa时,复合地基的沉降减少了23.1%。这主要由于模量的提高增强了载荷向桩顶的传递效率,提升了褥垫层的整体刚度,使载荷更均匀地传递至桩体及深层土体,减小了桩间土的压缩变形。

由图11(b)、图11(c)可知,格室模量从0.5 GPa增加至2.0 GPa时,桩身应力增大了25.7%;同时,桩侧负摩阻力作用范围减小,正摩阻力峰值增大,中性点位置上移。这是因为较高的格室模量可约束桩周土体的竖向变形,减小桩-土相对位移,削弱负摩阻力的影响范围,促使中性点向上移动。

4 结论

基于现场复合地基静载试验及有限元模拟分析,对PHC桩-网复合地基承载性能进行数值模拟,讨论了桩长、褥垫层及土工格室对PHC桩-网复合地基承载性能的影响,得到如下结论。

(1) PHC桩-网复合地基模拟试验与现场静载试验误差小于10%,所建有限元模型合理。

(2) 土工格室加筋的褥垫层能有效提升PHC桩-网复合地基的协同工作性能。其核心优势在于优化桩-土应力分配,将更多载荷向桩体集中,从而显著抑制地基的总沉降(降幅达7.5%),并增强整体承载能力。

(3) 参数敏感性分析表明,复合地基的承载性能存在关键参数的优化区间。桩长临界值约为10 m,超过后对沉降的控制效益降低。褥垫层弹性模量和土工格室模量的增加均能有效提升复合地基刚度、减少沉降。

参考文献(References):

- [1] 交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2024(15): 31-35.
Ministry of Transport. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2023[J]. China Water Transport, 2024 (15): 31-35.
- [2] 陈瑞生,侯向阳,周小勇. 悬臂式钢板桩弹性地基梁模型修正及嵌固深度算法优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025, 44(1):35-42.
CHEN Ruisheng, HOU Xiangyang, ZHOU Xiaoyong. Modification of cantilever steel sheet pile elastic foundation beam model and optimization of embedding depth algorithm[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(1):35-42.
- [3] LI B J, ZHOU J J, ZHANG R H, et al. Research on load transfer mechanism of pre-stressed high-strength concrete nodular pile embedded in deep soft soil[J]. Applied Sciences, 2024, 14(22): 10714.
- [4] JIA Z L, WU H, HE S Q, et al. Study of the pore water pressure development characteristics of PHC pipe piles in soft soil foundations[J]. Buildings, 2024, 14(7): 1976.
- [5] 余升友,乐绍林,丁继辉. PHC管桩承载特性分析研究[J]. 公路, 2021, 66(6): 335-339.
YU Shengyou, LE Shaolin, DING Jihui. Analysis of bearing characteristics of PHC pipe pile [J]. Highway, 2021, 66(6): 335-339.
- [6] HU J H, LIU H Y, QIAN J S, et al. Numerical analysis of soil arching effect in piles-reinforced airport foundation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2024, 177(5): 383-391.
- [7] 杨志坚,周瑞. 竖向荷载下GFRP-PHC管桩沉降性能有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2025,41(3):337-347.
YANG Zhijian, ZHOU Rui. Finite element analysis of settlement performance of GFRP-PHC pipe piles under vertical load[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2025, 41(3): 337-347.
- [8] 党昱敬. 刚性桩复合地基应用热点问题探讨[J]. 建筑结构, 2022, 52(24): 106-113.
DANG Yujing. Discussion on hot issues in the application of rigid pile composite foundation[J]. Building Structure, 2022, 52(24): 106-113.
- [9] CHENG B W, HUANG J H, WANG H Y, et al. Influences of geocell reinforcement on shear strength of railway roadbeds[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, 2678(8): 1029-1045.
- [10] 杨毅,凌松耀,石长洪. 考虑桩-土共同作用的PHC预应力管桩复合地基承载力研究[J]. 公路, 2023, 68(4): 186-190.
YANG Yi, LING Songyao, SHI Changhong. Study on bearing capacity of PHC prestressed pipe pile composite foundation considering pile-soil interaction[J]. Highway, 2023, 68(4): 186-190.
- [11] 凌造,唐孟雄,胡贺松,等. 非挤土嵌岩预应力高强度混凝土管桩的桩端承载性能研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 97-107.
LING Zao, TANG Mengxiong, HU Hesong, et al. Bearing capacity of pile toe of non-displacement rock-socketed PHC pipe piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(1): 97-107.
- [12] 李波,余建飞. 基于PHC管桩现场静载试验的基桩承载特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10): 96-102.
LI Bo, YU Jianfei. Research on bearing characteristics of foundation piles based on on-site static load tests of PHC pipe piles [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(10): 96-102.
- [13] 史永强,杨军,刘晓伟. 静压PHC管桩承载特性的试验研究[J]. 混凝土, 2023(11): 196-199, 205.
SHI Yongqiang, YANG Jun, LIU Xiaowei. Experimental study on bearing behaviors of static pressed PHC pipe pile[J]. Concrete, 2023(11): 196-199, 205.
- [14] 王卿,盖永斌,李瑜,等. 洞庭湖区高速公路桥梁PHC管桩适应性研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(9): 99-105.

- WANG Qing, GAI Yongbin, LI Yu, et al. Study on adaptability of PHC pipe piles for expressway bridges in Dongting Lake area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(9): 99-105.
- [15] 朱春生, 舒星宇, 陆慧裕, 等. 土工格室技术参数对绿洲区公路路基承载特性的影响[J/OL]. 中外公路, 2025: 1-10. (2025-04-15). <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.u.20250414.1811.002>.
- ZHU Chunsheng, SHU Xingyu, LU Huiyu, et al. The influence of geogrid technical parameters on the bearing characteristics of highway roadbeds in oasis areas[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 2025: 1-10. (2025-04-15). <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.u.20250414.1811.002>.
- [16] 张玲, 赵明华, 马宾辉, 等. 土工格室-碎石桩双向增强复合地基大比例室内模型试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 1-8.
- ZHANG Ling, ZHAO Minghua, MA Binhui, et al. Large scale laboratory experiments on two-directional composite foundation reinforced with geocell and stone columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 1-8.
- [17] 邓友生, 冯爱林, 杨敏, 等. 煤矸石桩-土工格室复合路基承载特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(4): 833-841.
- DENG Yousheng, FENG Ailin, YANG Min, et al. Bearing characteristics of coal gangue pile-geocell composite subgrade[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(4): 833-841.
- [18] 金家庆, 徐超, 梁程, 等. 土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 86-94.
- JIN Jiaqing, XU Chao, LIANG Cheng, et al. Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 86-94.
- [19] SHAO Y, WANG S C, GUAN Y. Numerical simulation of soil squeezing effects of a jacked pipe pile in soft foundation soil and in foundation soil with an underlying gravel layer[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(2): 493-499.
- [20] 宋金华, 要晓迪, 杨涛. 基于ABAQUS的PHC桩网复合地基沉降变形特性研究[J]. 公路, 2019, 64(12): 34-41.
- SONG Jinhua, YAO Xiaodi, YANG Tao. Research on settlement deformation characteristics of PHC pile-net composite foundation based on ABAQUS[J]. Highway, 2019, 64(12): 34-41.
- [21] 雷金波, 杨康, 周星, 等. 带帽有孔管桩复合地基桩土应力比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3607-3617.
- LEI Jinbo, YANG Kang, ZHOU Xing, et al. Experimental study on pile-soil stress ratio of composite foundation with capped perforated pipe pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Suppl.1): 3607-3617.
- [22] 张波, 刘汉龙. 现浇薄壁管桩复合地基竖向承载特性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1251-1255.
- ZHANG Bo, LIU Hanlong. Analysis of bearing performance of composite foundation with cast-in-situ concrete thin-wall pipe piles under vertical loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1251-1255.
- [23] 常洪林, 孔纲强, 王福慧, 等. 褥垫层作用下预应力高强混凝土能量桩热力响应特性现场试验[J]. 岩土力学, 2025, 46(4): 1240-1251.
- CHANG Honglin, KONG Gangqiang, WANG Fuhui, et al. Field tests on thermo-mechanical response characteristics of prestressed high-strength concrete energy pile under the action of cushion layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(4): 1240-1251.
- [24] 刘光秀, 党发宁, 马小莉, 等. 水泥土搅拌桩复合地基桩土应力比计算与垫层优化[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(4): 1373-1383, 1393.
- LIU Guangxiu, DANG Faning, MA Xiaoli, et al. Calculation of pile-soil stress ratio of cement-soil mixing pile composite foundation and cushion optimization design[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(4): 1373-1383, 1393.