

DOI: 10.11779/CJGE20240528

螺槽桩桩网复合地基荷载传递特性试验研究

邓友生^{1,3}, 肇慧玲^{*1,3}, 刘军勇², 庄子颖^{1,3}, 吴阿龙^{1,3}, 陈苗^{1,3}

(1. 西安科技大学桩承结构研究中心, 陕西 西安 710054; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 螺槽桩桩网复合地基作为一种新型路用复合地基, 可有效减小地基沉降而提高其承载性能。开展圆桩和螺槽桩桩网复合地基模型试验, 对比研究路堤荷载作用下路基变形、桩-土应力比、荷载分担比、格栅应变及桩身轴力分布规律, 并进一步探究桩网复合地基中螺槽桩桩-土作用机理。结果表明: 相比于传统圆桩, 螺槽桩桩网复合地基可减小路堤顶面沉降 27.3%, 显著提高桩网复合地基变形控制效果, 且桩体材料用量仅为圆桩的 52.1%。螺槽桩桩网复合地基在路基横断面及纵断面均能有效调节不均匀沉降, 充分发挥加筋垫层柔性筏板效应。在路堤荷载下, 螺槽桩较圆桩桩网复合地基桩-土应力比显著, 其荷载分担比上升 11.8%, 螺槽桩利用桩侧螺旋形槽体结构的多端承载特性及加筋垫层应力扩散效应叠加带动土体共同承载, 增强桩-土-加筋垫层共同作用, 大幅提高桩体材料利用率, 减少原材料用量, 促进碳减排。

关键词: 螺槽桩; 复合地基; 荷载分担比; 模型试验; 承载机理

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)09-1987-08

作者简介: 邓友生(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地基基础工程等方面的研究。E-mail: dengys2009@126.com。

Experimental investigation on load transfer characteristics of screw groove pile-geogrid composite foundation

DENG Yousheng^{1,3}, ZHAO Huiling^{1,3}, LIU Junyong², ZHUANG Ziying^{1,3}, WU Along^{1,3}, CHEN Zhuo^{1,3}

(1. Pile-supported Structures Research & Test Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. National Key Laboratory of Green and Long-Life Road Engineering in Extreme Environment, CCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: As a new type of road composite foundation, screw groove pile-geogrid composite foundation can effectively reduce foundation settlement and improve foundation bearing performance. Model tests of circular pile-geogrid and screw groove pile-geogrid composite foundation are carried out to compare and study deformation of embankment, pile-soil stress ratio, load sharing ratio, strain of geogrid, and axial force distribution of piles. And further investigation on mechanical mechanism of pile-soil action of screw groove pile in pile-geogrid composite foundation are carried out. The results show that compared with traditional circular piles, the screw groove pile-geogrid composite foundation can reduce the settlement of the top surface of the embankment by 27.3%, which significantly improves the deformation control effect of the composite foundation. The material is only 52.1% of that of the circular pile. Screw groove pile-geogrid composite foundation can effectively regulate uneven settlements in both transverse and longitudinal directions of the embankment, and flexible raft of reinforced cushion is fully utilized. Under embankment loading, the pile-soil stress ratio of screw groove pile is significantly higher than that of circular pile-geogrid composite foundation, and the load sharing ratio of the piles rises by 11.8%. Screw groove pile utilizes multi-end bearing characteristics of the screw groove structure on the pile side and the superposition of the stress diffusion effect of the reinforced cushion to drive the soil around the pile to carry the load together, enhance the pile-soil-reinforced cushion interactions, significantly increase the utilization rate of the pile material, reduce the amount of cement, and promote carbon

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600400); 国家自然科学基金项目(51878554); 陕西省自然科学基础研究计划重点项目(2018JZ5012)。This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No.2021YFB2600400), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.51878554), and the Key Projects of Shaanxi Natural Science Basic Research Program (Grant No.2018JZ5012)。

收稿日期(Received): 2024-05-31 修回日期(Revised): 2025-01-12 接受日期(Accepted): 2025-01-17 网络出版日期(Online): 2025-01-18

*通信作者 (E-mail: zgbxzhl@163.com)

emission reduction.

Key words: screw groove pile; composite foundation; load sharing ratio; model test; bearing mechanism

0 引言

“十四五”规划对交通体系提出了新要求,以碳达峰、碳中和为战略目标,促进现代化高质量绿色交通运输发展。目前刚性桩桩网复合地基是地基处理技术的主要形式之一,能充分利用桩间土承载力,有效防止不均匀沉降,符合现代化地基强度及质量需求。其中采用预制刚性桩是提高施工周期、保证桩身质量、节能降损、降碳减污的有效途径^[1]。

目前大量学者对刚性桩桩网复合地基荷载传递机制进行研究,王长丹等^[2]通过刚性桩桩网复合地基模型试验,表明设置桩帽可有效地控制地基沉降量和沉降速率,减少差异沉降。詹金林等^[3]采用大直径刚性桩桩网复合地基,发现其与传统桩筏地基相比可节省投资60%,节省工期50%以上。邓友生等^[4-5]利用试验研究发现土工格栅作用于碎石垫层可充分利用其抗拉性能,形成稳定嵌锁结构,优化复合地基承载能力。赵明华等^[6]引入大挠度环形薄板考虑加筋垫层作用计算路堤荷载作用下桩网复合地基沉降,结果表明随着筋材抗拉模量增加沉降减少。Pham^[7]通过理论及数值分析研究了桩网复合地基中加筋材料和桩-土相互作用机制,并探究路堤高度、土工合成材料抗拉强度和填土性质对沉降性能的影响,表明与不加土工材料复合地基相比,桩网复合地基应力分布更为均匀。

随着工程项目建设对桩体承载要求的不断提高,相继提出各类异形桩,并被证实其具有更好的承载性能。王新泉等^[8]通过试验表明,Y形桩极限承载力是圆桩的1.6倍,桩侧表面积为圆桩的1.56倍。周佳锦等^[9]根据现场静钻根植预制桩试验,表明其施工效率相比同直径钻孔灌注桩提高3倍以上。周航等^[10]利用室内模型试验研究了X形混凝土桩与圆桩复合地基承载性能,表明X形桩会在同等条件下承担更多荷载。为进一步节省材料用量,本文提出一种新型预制混凝土螺槽桩,该桩形可发挥螺旋类桩形承载优势^[11-12],以期在桩网复合地基荷载传递中结合桩身多点端承特性和加筋垫层筏板效应,叠加增强桩网结构承载能力,大幅提升资源利用效率,契合当前国家绿色工业集约化发展。

为验证螺槽桩桩网复合地基应用可行性,开展模型试验对比分析传统圆桩与螺槽桩桩网复合地基的路基变形、桩-土应力比、荷载分担比、格栅应变及桩身轴力分布规律,揭示螺槽桩在桩网复合地基中桩-土-加筋垫层的作用机理,为螺槽桩桩网复合地基设计提

供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验设备及材料

试验采用长4 m,宽2 m,高1.8 m的自主研发多功能模型箱进行试验,箱内底板和侧板均为20 mm厚钢板,正面采用10 mm厚钢化玻璃,上部设置反力梁。螺槽桩桩网复合地基(如图1)和圆桩桩网复合地基试验模型根据《铁路路基设计规范:TB1001—2016》^[13]单线标准路基设计,基于相似原理,设定几何相似比为1:10,路基面宽度取600 mm,基床边坡坡比为1:1.5,路堤填高为330 mm,垫层厚度为30 mm,路堤底面宽为1500 mm。

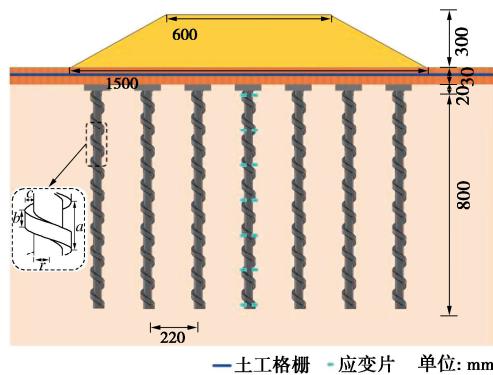


图1 螺槽桩桩网复合地基模型试验布置剖面图

Fig. 1 Profile of model test layout of screw groove pile-geogrid composite foundation

试验土体取自西安市某工程现场黄土,通过室内土工试验测得土体密度为1.75 g/cm³,黏聚力为16.2 kPa,内摩擦角为22.6°。路堤填土均用碎石土进行填筑,利用搅拌机按照质量比为黄土:砂土:石子=1:2:2进行配置,模型桩采用铝管模拟桩体。螺槽桩如图1,其螺槽间距a为80 mm,螺槽厚度b为20 mm,螺槽宽度c为10 mm,螺槽内半径r为20 mm,桩长为800 mm;圆桩桩长800 mm,直径取与螺槽桩外径相等的50 mm,本试验螺槽桩体积为圆桩的52.1%。桩帽尺寸为100 mm×100 mm×20 mm。

1.2 试验方案

模型试验开展螺槽桩及圆桩桩网复合地基对比试验,两组试验均采用正方形布桩方式,桩间距为220 mm。桩体填筑过程中每间隔100 mm进行环刀取样,测试土体含水率及密度,保证土体压实度在0.8以上。在填土过程中利用水平尺来保证桩身水平及竖向垂直

度, 直至填土至设计高度。分层布置碎石垫层, 在第1层15 mm厚碎石垫层表面平整后, 铺设土工格栅并用U形钢筋固定, 而后铺压第2层15 mm厚垫层, 桩网复合地基试验过程如图2所示。

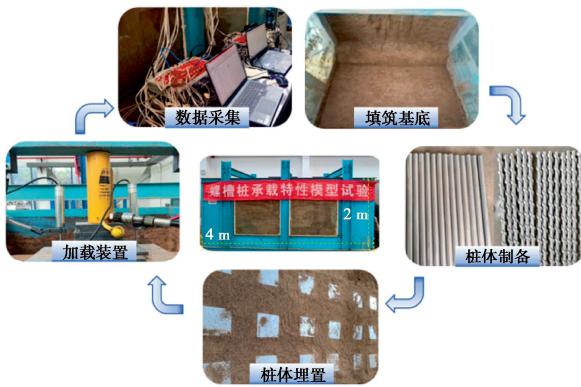


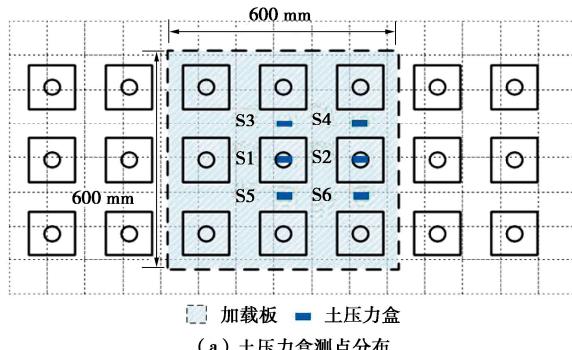
图2 桩网复合地基模型试验过程

Fig. 2 Model test process of pile-geogrid composite foundation

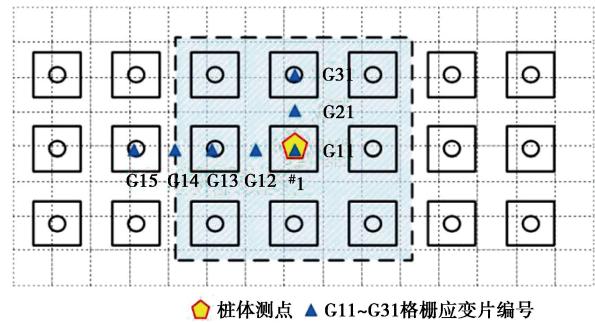
1.3 加载装置与测点布置

螺槽桩与圆柱桩网复合地基试验加载板尺寸及测点布置位置均相同, 试验加载板为600 mm×600 mm×30 mm的钢板。加载过程根据规范《复合地基技术规范: GB/T 50783—2012》^[14]进行, 采用慢速维持荷载法逐级加载。利用液压千斤顶最终加载到240 kPa, 共分8级加载, 每级加载30 kPa, 每级加载后按间隔10, 10, 10, 15, 15 min进行测读, 以后每级30 min读记一次沉降, 当连续2 h沉降速率不大于0.1 mm时, 可进行下一级加载。

为记录每级荷载下沉降、土压力、土工格栅应变、桩体应力等数值。试验布置了位移计、土压力盒、和应变片, 利用东华DH3816N应变采集仪进行数据采集。土压力盒布置如图3(a)所示, 分别测量桩顶应力S1与S2, 桩间土体应力S3~S6, 其中S1与S2的桩间土应力取S3、S5和S4、S6的均值; 如图3(b)测量复合地基中心桩#1桩身应力, 土工格栅测点布置沿路基横断面为G11~G15, 沿着纵断面布置位置为G11~G31, 桩体间隔均匀布置7组免焊应变片如图1所示。应变片在指定位置粘贴好后, 外部涂抹一层环氧树脂对其进行保护, 再粘贴绝缘胶布以保证接线在加载过程中不遭受破坏。



(a) 土压力盒测点分布



桩体测点 ▲ G11~G31格栅应变片编号

(b) 桩体及土工格栅测点分布

Fig. 3 Layout of measurement points for pile-geogrid composite foundation model tests

2 试验结果与分析

2.1 沉降规律

图4为各级荷载作用下螺槽桩与圆柱桩网复合地基的荷载-沉降曲线。在上部加载较小时, 两组桩网复合地基沉降量均随上部荷载增加而缓慢加大, 二者沉降曲线斜率相近沉降量差异较小, 桩型对刚性桩网复合地基承载性能影响有限。随着上部荷载增加圆柱桩网复合地基沉降曲线斜率显著增加, 而螺槽桩桩网复合地基沉降曲线斜率变化不大, 二者沉降差异逐渐显著。当加载至90 kPa时, 圆柱与螺槽桩桩网复合地基沉降量分别为4.2, 3.4 mm, 沉降量减少了19.0%; 当加载至240 kPa时, 圆柱桩网复合地基沉降为13.9 mm, 螺槽桩桩网复合地基的沉降为10.1 mm, 沉降量减少了27.3%, 随着荷载进一步提升, 与传统圆柱相比, 螺槽桩桩网复合地基沉降量显著降低, 说明在承受较大路堤荷载时螺槽桩桩网复合地基具有更强的变形控制效果。

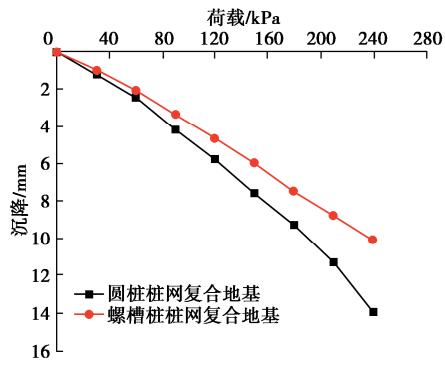


图4 荷载-沉降曲线

Fig. 4 Load-settlement curves

螺槽桩桩网复合地基中桩体的螺旋形槽体结构能够有效提高桩身竖向承载性能, 螺槽桩的侧摩阻力不仅为螺槽面与土体的摩阻力, 还因其异形构造形成一系列连续螺旋形槽面端阻力, 进而带动较大范围土体共同承载充分利用土体承载力。在承受相同上部路堤荷载时, 可以产生较小变形, 使得螺槽桩较圆柱桩网

复合地基具有更显著的承载优势。

2.2 土工格栅应变

如图 5 为圆柱与螺槽桩桩网复合地基中土工格栅应变分布。对比图 5 (a) 中土工格栅在圆柱和螺槽桩桩网复合地基桩顶上方与桩间土上方的格栅应变分布规律, 可知两组试验格栅应变均随荷载增加而提升。当上部荷载较小时, 两组格栅应变增幅均较小, 未出现明显桩-土沉降差异, 土工格栅对复合地基影响不显著。随着上部荷载逐渐加大格栅应变急剧上升, 桩顶上方应变在同等情况下要大于桩间土上方格栅应变, 说明桩顶上方格栅发生较大挠曲变形, 随着荷载增加土工格栅与垫层摩擦加剧, 致使土体与垫层协调变形, 格栅拉膜效应增大了加筋垫层水平应力和剪应力, 桩间土承受荷载不断转移至桩顶上方, 使得桩体承担上部荷载能力增强。在试验加载至 240 kPa 时, 螺槽桩桩网复合地基的格栅应变显著大于圆柱桩网复合地基, 在承受较大上部荷载时, 螺槽桩桩网复合地基的加筋材料出现较大变形。这是由于螺槽桩的螺槽结构能够高效带动纵向桩身的桩周土体共同承载, 提升桩体承载能力的同时造成了桩顶与桩顶土体差异沉降, 此时加筋材料发挥拉膜效应有效调节桩-土沉降差异, 促进了螺槽桩带动更多桩周土体承载, 形成叠加效应大幅提升桩网复合地基承载性能。

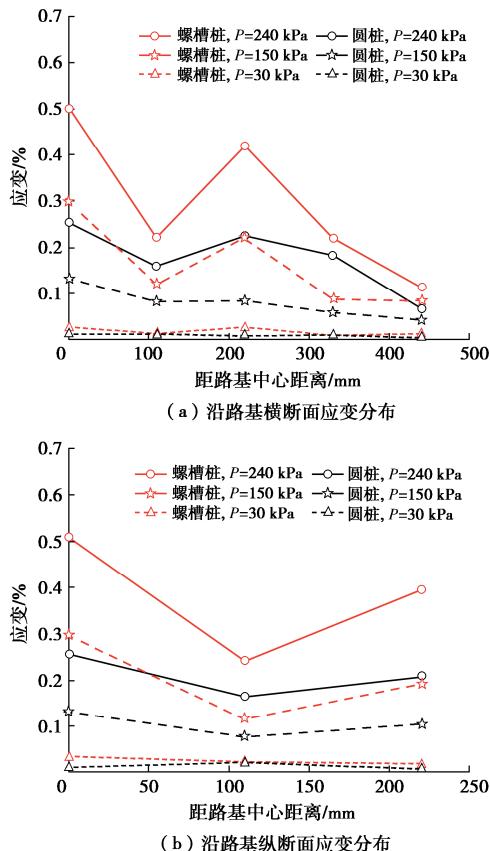


图 5 螺槽桩与圆柱桩网复合地基格栅应变分布

Fig. 5 Strain distribution of geogrid for circular pile-geogrid and screw groove pile-geogrid composite foundation

为进一步探究土工格栅在两组桩网复合地基中的整体发挥程度, 对比图 5 (a), (b) 格栅应变沿路基横断面和纵断面变化规律, 分析可知在同等荷载作用下螺槽桩桩网复合地基和圆柱桩网复合地基的不同断面桩顶土应变均大于桩间土应变, 加筋垫层在横断面及纵断面均能有效调节复合地基沉降差异, 形成整体性较好的柔性筏板, 使得上部荷载在加筋垫层作用下重新分配, 发挥加筋垫层调节作用减少地基不均匀沉降。

2.3 桩-土应力比及荷载分担比

桩-土应力比反映了桩网复合地基工作性状, 是其设计计算重要指标, 根据图 3 (b) 中测点, 得到圆柱与螺槽桩桩网复合地基受力后桩-土应力比变化曲线如图 6 所示, 此外为直观反映荷载分配过程, 对比圆柱与螺槽桩复合地基荷载传递方式, 计算两组试验荷载分担比如图 7 所示。

根据桩、土应力和面积置换率计算荷载分担比如下:

$$N = \frac{mn_d}{1-m} \quad (1)$$

式中: N 为桩-土荷载分担比; m 为面积置换率, n_d 为桩-土应力比, 其中螺槽桩桩网复合地基面积置换率计算如下:

$$m = \frac{A_{p1}}{A_1} = \frac{(1/4)\pi d^2}{s^2} = \frac{\pi \left(\sqrt{r^2 \frac{\pi(a-b)}{a} + (r+c)^2 \frac{\pi b}{a}} \right)^2}{4s^2} \quad (2)$$

式中: s 为桩间距 (m); A_{p1} 为单根桩分担的处理面积 (m^2); A_1 为正方形布桩时土体所分担的处理面积 (m^2); d 为桩体半径 (m)。

分析图 6 可以发现圆柱与螺槽桩桩网复合地基桩-土应力比均随着荷载增加而上升, 其中比值上升速率随荷载逐渐加大而减小, 这是由于桩网复合地基受荷较小时, 桩与桩间土体差异沉降不明显, 土体承担了大部分荷载, 随着荷载增加, 桩顶有刺入加筋垫层趋势, 桩与桩周土产生差异沉降, 此时加筋垫层限制桩顶向上刺入, 使荷载重分布增强结构整体性, 桩体承担了更多上部荷载使土体屈服滞后。此外, 分析图 6 与图 7 螺槽桩桩网复合地基桩-土应力比大于圆柱, 在承受相同荷载时, 加筋垫层通过调节作用将更多荷载传递给螺槽桩承担, 而根据式 (1) 计算后螺槽桩荷载分担比对于圆柱桩网复合地基上升了 11.8%, 体现螺槽桩承载优势, 其充分发挥加筋垫层对桩体限制作用。

值得注意的是, 本试验采用螺槽桩体积仅为圆桩

的 52.1%, 能够大幅降低桩体材料用量, 螺槽桩的螺槽结构使其桩体材料利用率更高, 承载过程中可以咬合土体协同变形, 充分发挥螺旋形槽体构造桩承载优势, 同时通过铺设加筋体的调节作用改善垫层协调能力, 进而实现荷载在桩体和土体之间的合理分配。两组桩网复合地基边桩-土应力比曲线均呈现随着荷载增加而上升趋势, 说明螺槽桩桩网复合地基加筋垫层产生柔性筏板效应, 均化上部荷载使得桩网复合地基中桩-土协同作用, 螺槽桩能较好调节桩-土荷载分担比, 也间接说明了加载后期圆桩与螺槽桩复合地基沉降差异逐渐增大的原因。

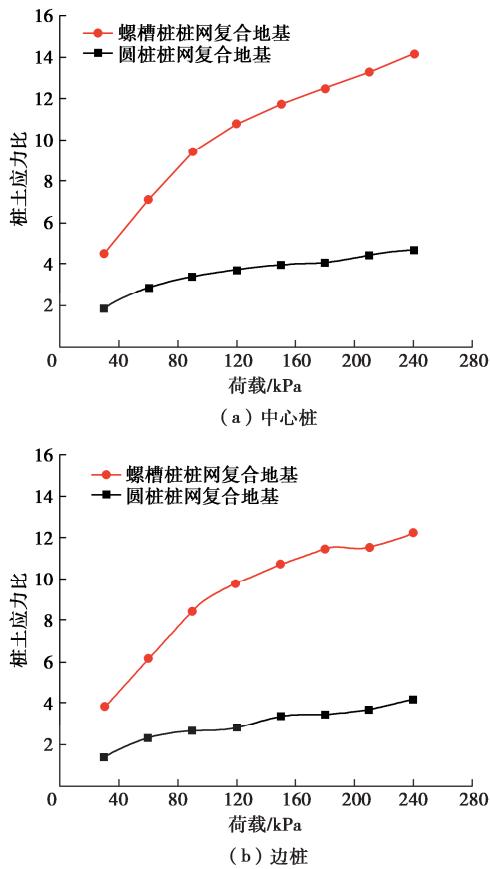
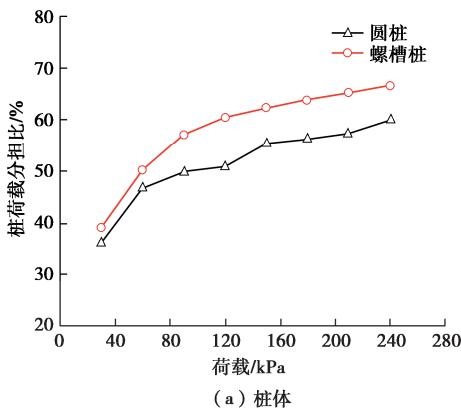


图 6 桩-土应力比

Fig. 6 Pile-soil stress ratio



(a) 桩体

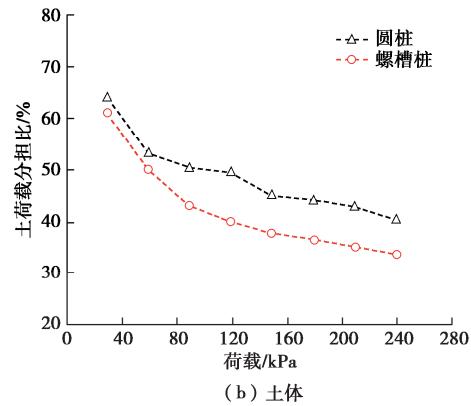


图 7 桩-土荷载分担比

Fig. 7 Pile-soil sharing ratio

2.4 桩身荷载传递特性

数据处理时桩网复合地基中圆桩桩身轴力如式(3)所示, 螺槽桩桩身结构较为复杂, 为准确分析试验结果需研究其截面特性, 通过计算其桩身轴力如式(4)所示:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E \times \varepsilon, \\ P &= \sigma \times A, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$P_n = E_p \varepsilon \left(r^2 \frac{\pi(a-b)}{a} + (r+c)^2 \frac{\pi b}{a} \right)。 \quad (4)$$

式中: σ 为桩身应力 (kPa); E 为圆桩弹性模量 (MPa); ε 为桩身应变; P 为桩身轴力 (kN); A 为圆桩截面面积 (m^2); P_n 为螺槽桩桩身轴力 (kN); E_p 为螺槽桩弹性模量 (MPa)。

图 8 为圆桩与螺槽桩桩网复合地基中桩体轴力分布图, 圆桩与螺槽桩桩身轴力均出现沿桩体深度先增加后减小情况, 这是由于上部加载时桩体与桩间土体共同承担荷载, 在土拱效应与拉膜效应用下应力不断向桩顶集中, 桩顶土体受到桩顶反力的附加应力产生压缩变形, 桩间土体通过界面摩阻力使得内部荷载转移至桩体, 产生差异沉降桩体承担向下负摩阻力, 导致桩身轴力增加; 当桩体沉降大于桩间土沉降, 桩体受到外摩阻力作用相对于桩间土产生向下趋势, 此时桩体将荷载传递至土体出现轴力递减情况。

对比桩网复合地基中螺槽桩和圆桩可知, 螺槽桩桩身轴力最大值较圆桩桩身轴力最大值显著, 在复合地基中螺槽桩承担较多荷载, 当上部加载至 240 kPa 时, 螺槽桩与圆桩端阻力约为轴力的 30.2%与 57.9%, 意味着螺槽桩较圆桩表现出更显著的轴力下降趋势, 表明螺槽结构对桩网复合地基荷载传递变化具有一定影响。因此, 以桩网复合地基中螺槽桩-土作用力学模型为基础如图 9, 研究其桩-土作用机理, 桩端土体满足 Winkler 地基模型, 路堤荷载简化作用在桩顶与桩

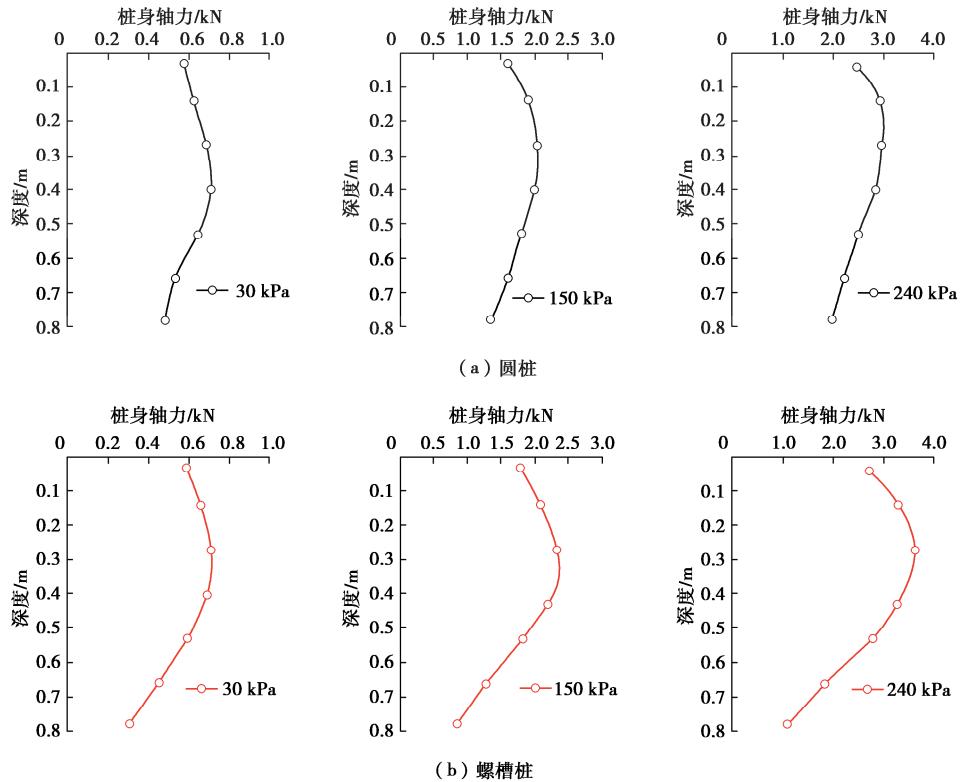


图 8 不同荷载作用下桩身轴力分布图

Fig. 8 Distribution characteristics of axial force for piles under different loads

间土的均布荷载 P_p 和 P_s 。取螺槽桩单元 dz 分析, 侧阻力引起的增量利用螺槽桩对应周长计算, 单元受力平衡分析为

$$Q_p(z) = \tau_s(z)ldz + \sigma_1(z)d(A) + Q(z) + dQ(z)。 \quad (5)$$

式中: $\tau_s(z)$ 为侧摩阻力 (kPa); $\sigma_1(z)$ 为螺槽面竖向阻力 (kPa); l 为内径 r 对应螺槽桩周长 (m); $l = 2\pi\left(r + \frac{bc}{a}\right) + 2c$; $d(A)$ 为 dz 长度螺槽面面积 (m^2), dA 计算式为

$$dA = \left[(r + c)^2 - r^2\right] \frac{b\pi}{a} = Sdz \quad (6)$$

式中: $S = \left[(r + c)^2 - r^2\right] \frac{b\pi}{a}$ 。将式 (6) 代入式 (5) 得

$$\frac{dQ(z)}{dz} = -\left\{ \tau_s(z)l + \left[(r + c)^2 - r^2\right] \frac{b\pi}{a} \sigma_1(z) \right\}。 \quad (7)$$

螺槽桩单元 dz 位移量为

$$\begin{aligned} ds_p(z) &= -\frac{Q_p(z)}{E_p A_p} dz \\ &= -\frac{Q_p(z)}{E_p \left[r^2 \frac{\pi(a-b)}{a} + (r+c)^2 \frac{\pi b}{a} \right]} dz \quad (8) \end{aligned}$$

式中: A_p 为螺槽桩截面面积 (m^2), 则螺槽桩桩-土荷载传递单元微分方程为

$$\frac{d^2 s_p(z)}{dz^2} = \frac{1}{E_p A_p} \left\{ \tau_s(z)l + \left[(r + c)^2 - r^2\right] \frac{b\pi}{a} \sigma_1(z) \right\}。 \quad (9)$$

通过螺槽桩在桩网复合地基中桩-土荷载传递力学模型分析可知其承载不仅依靠传统圆桩侧阻力和端阻力, 还充分利用螺槽结构的螺槽侧摩阻力 $\tau_s(z)$ 和竖向螺槽面端阻力 $\sigma_1(z)$ 承载。结合复合地基荷载传递特性分析可知, 当荷载作用于螺槽桩时, 桩体将荷载通过桩体侧阻力、螺槽端阻力及桩端阻力传递至下部土体, 荷载作用于桩间土时, 部分荷载通过桩侧及螺槽结构负摩阻力传递至桩体, 再由桩体通过侧摩阻力和端阻力传递至土体, 此时螺槽桩利用桩侧螺旋形槽体的多端承载结构带动桩周土体共同承载, 进而结合桩网复合地基的土拱效应、加筋垫层的柔性筏板效应与拉膜效应将应力集中至螺槽桩顶, 叠加带动桩周土体承载, 使螺槽桩桩网复合地基整体稳定性增强, 地基变形减少。因此, 螺槽桩突出的螺槽截面构造可高效增强桩-土-加筋垫层共同作用, 在桩网复合地基中的承载能力较传统圆桩显著增强, 大幅提升桩体材料利用率, 达到减少原材料用量, 节能降碳减污的目的。

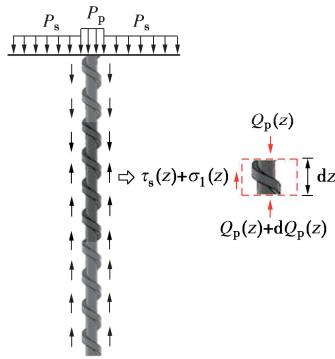


图9 螺槽桩桩-土体系力学模型简图

Fig. 9 Mechanical model of crew groove pile and soil

3 结 论

本文通过圆桩和螺槽桩桩网复合地基的对比试验, 分析了路堤荷载作用下螺槽桩与传统圆桩在桩网复合地基中承载机制的差异, 揭示了螺槽桩桩网复合地基中螺槽桩-土-加筋垫层的荷载传递机制, 主要得到以下4点结论。

(1) 与圆桩桩网复合地基相比, 螺槽桩桩网复合地基沉降量减少了27.3%, 其沉降差异会随着荷载提升而逐渐增加, 在承受较大路堤荷载时螺槽桩桩网复合地基具有更强的控制变形能力。

(2) 在路堤荷载作用下, 螺槽桩相较于圆桩在桩网复合地基结构中格栅应变更显著, 加筋材料拉膜效应调节差异沉降, 促进螺槽结构带动更多土体参与承载提升复合地基承载能力。螺槽桩桩网复合地基在沿路基横断面及纵断面方向均能有效调节不均匀沉降, 充分发挥加筋垫层柔性筏板效应。

(3) 在桩网复合地基结构中, 当螺槽桩的材料用量仅为传统圆桩的52.1%时, 其桩体荷载分担占比提升了11.8%。螺槽桩可以更好地利用桩网复合地基结构调节桩-土荷载分配的能力, 使桩体材料利用率大幅提升, 降低了桩体材料用量, 达到促进碳减排的目的。

(4) 本次试验螺槽桩与圆桩在桩网复合地基结构中端阻力约为轴力的30.2%与57.9%, 表明螺槽桩桩网复合地基在承载过程中不仅体现了桩体自身承载优势, 还充分利用了桩网复合地基中桩-土协同工作的特性, 更能发挥这种复合地基中桩-土荷载协同分配能力, 增强桩-土-加筋垫层共同作用。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 邓友生和肇慧玲设计研究内容和完成论文初稿。刘军勇提供研究指导。肇慧玲、庄子颖、

吴阿龙和陈苗参与论文的修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed and completed the first draft by DENG Yousheng and ZHAO Huiling. This study was supervised by LIU Junyong. The manuscript was revised by ZHAO Huiling, ZHUANG Ziying, WU Along and CHEN Zhuo. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115. (LIU Hanlong, ZHAO Minghua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115. (in Chinese))
- [2] 王长丹, 王炳龙, 王旭, 等. 湿陷性黄土桩网复合地基沉降控制离心模型试验[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 84-92. (WANG Changdan, WANG Binglong, WANG Xu, et al. Analysis on settlement controlling effect of pile-net composite foundation on collapsible loess by centrifugal model tests[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 84-92. (in Chinese))
- [3] 詹金林, 梁永辉, 水伟厚. 大直径刚性桩桩网复合地基在储罐基础中的应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 129-131. (ZHAN Jinlin, LIANG Yonghui, SHUI Weihou. Application of large-diameter rigid pile-net composite foundation in tank base[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 129-131. (in Chinese))
- [4] 邓友生, 李文杰, 冯忠居, 等. 刚性桩-半刚性桩-土工格栅增强路基承载及影响参数[J]. 中国公路学报, 2024, 37(2): 209-218. (DENG Yousheng, LI Wenjie, FENG Zhongju, et al. Bearing characteristics and influence parameters of rigid pile-semi-rigid pile-geogrid reinforced subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(2): 209-218. (in Chinese))
- [5] 邓友生, 姚志刚, 冯爱林, 等. 不同垫层下煤矸石桩网复合路基承载特性[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 1895-1905. (DENG Yousheng, YAO Zhigang, FENG Ailin, et al. Bearing characteristics of coal gangue pile-net composite embankment with different cushion layers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(7): 1895-1905. (in Chinese))
- [6] 赵明华, 刘猛, 张锐, 等. 路堤荷载下双向增强复合地基荷载分担比及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2161-2169. (ZHAO Minghua, LIU Meng, ZHANG Rui, et al.

- Calculation of load sharing ratio and settlement of bidirectional reinforced composite foundation under embankment loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2161-2169. (in Chinese))
- [7] PHAM T A. Analysis of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment with soil-structure interaction models[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **121**: 103438.
- [8] 王新泉, 任连伟, 杨权威, 等. Y 形桩与圆形桩承载性能对比模型试验[J]. 中国公路学报, 2016, **29**(5): 11-18. (WANG Xinquan, REN Lianwei, YANG Quanwei, et al. Comparative model tests on bearing behavior between Y-section pile and circular pile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, **29**(5): 11-18. (in Chinese))
- [9] 周佳锦, 马俊杰, 俞建霖, 等. 静钻根植桩竖向承载性能现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(3): 640-647. (ZHOU Jiajin, MA Junjie, YU Jianlin, et al. Field tests on bearing capacity of pre-bored grouted planted piles under compression and tension[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(3): 640-647. (in Chinese))
- [10] 周航, 亓戈平, 陈荣淋. 软土中 XCC 刚性桩复合地基承载特性时效性研究[J]. 中国公路学报, 2024, **37**(6): 132-143. (ZHOU Hang, QI Geping, CHEN Ronglin. Study on time effect of bearing characteristics of XCC rigid pile composite foundation in soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, **37**(6): 132-143. (in Chinese))
- [11] CHEN Y D, DENG A, LU F, et al. Failure mechanism and bearing capacity of vertically loaded pile with partially-screwed shaft: Experiment and simulations[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **118**: 103337.
- [12] 邓友生, 庄子颖, 董晨辉, 等. 竖向荷载下螺钉桩承载特性的影响因素[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2024, **44**(6): 571-580. (DENG Yousheng, ZHUANG Ziying, DONG Chenhui, et al. Influencing factors for bearing characteristics of screw pile under vertical load[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2024, **44**(6): 571-580. (in Chinese))
- [13] 铁路路基设计规范: TB 10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017. (Code for Design of Railway Earth Structure: TB 10001—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese))
- [14] 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Technical Code for Composite Foundation: GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))