

湿陷性黄土地区桩网复合地基的承载特性研究

陈浩, 张文贵, 龚子罕

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年5月9日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月10日

摘要

黄土因其特殊构成, 遇水后极易发生湿陷变形, 当地基土层为湿陷性黄土时, 需要对地基进行处理。桩网复合地基技术作为一种有效且经济的地基处理方式, 探究其在湿陷性黄土地区的承载特性尤为重要。本文采用室内模型试验的方法对湿陷性黄土地区桩网复合地基的承载特性进行研究。

关键词

桩网复合地基, 湿陷性黄土, 承载特性分析, 室内模型试验

Study on Bearing Characteristics of Pile-Net Composite Foundation in Collapsible Loess Region

Hao Chen, Wengui Zhang, Zihan Gong

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 9th, 2025; accepted: Jun. 2nd, 2025; published: Jun. 10th, 2025

Abstract

Due to its special composition, loess is prone to collapsible deformation when exposed to water. When the local soil layer is collapsible loess, it is necessary to treat the foundation. As an effective and economical foundation treatment method, it is particularly important to explore the bearing characteristics of pile net composite foundation technology in collapsible loess areas. This article uses indoor model tests to study the bearing characteristics of pile net composite foundation in collapsible loess areas.

Keywords

Pile-Net Composite Foundation, Collapsible Loess, Load-Bearing Characteristic Analysis, Indoor Model Testing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近十年来,中国经济的持续增长为铁路基础设施建设注入强劲动力。在这一宏观背景下,铁路网络规模呈现跨越式发展。根据2017年11月发布的《铁路“十三五”发展规划》[1]和《国家公路网规划(2013~2030年)》[2]显示,至2020年全国铁路运营里程将达15万公里,其中高铁运营里程3万公里。

在高速铁路工程实践中,路基的稳定性和施工精度面临着远高于常规铁路的技术要求。我国黄土高原广泛分布湿陷性黄土,其中黄土高原西北部地区,黄土地层不仅厚度异常(局部超过30米),其湿陷系数普遍高于0.07的临界值,这种地质特征与“一带一路”战略中规划的铁路干线走向存在显著空间重叠,为工程建设带来了特殊挑战。为消除湿陷性黄土(尤其是大厚度湿陷性黄土)对铁路路基造成的不良影响,可以采用桩网复合地基技术。该项技术中桩基的作用是提供竖向支撑,减少路基沉降,提升地基的承载力。最早应用于日本河堤岸的改造工程[3]。

2. 室内模型试验

2.1. 试验材料

- 1) 选用人工制备湿陷性黄土为土体,配比为石英粉、砂、膨润土、石膏、工业盐 = 0.3:0.25:0.3:0.1:0.05 [4]。
- 2) 采用模型箱,尺寸为120 cm × 120 cm × 120 cm。
- 3) 本次模型试验中模型桩由亚克力棒制作而成,共有两种尺寸的桩,分别为桩径85 mm、100 mm,长度均为800 mm;桩帽部分由相同材质的亚克力块制成,设计为直径165 mm、高度85 mm的圆柱形结构。
- 4) 应变片沿桩长间隔80 mm布置,每个位置沿轴线前后对称粘贴,共粘贴十组。

2.2. 试验方案

本次模型试验主要对加筋材料、桩顶桩帽的设置、桩基的布置、桩径的不同与是否接触持力层几个因素对湿陷性黄土复合地基的承载特性展开研究,根据这些因素设计了10组模型试验试验方案见表1。

Table 1. Model test design scheme

表1. 模型试验设计方案

组别	加筋材料	桩帽布置	模型桩桩径(mm)	是否接触持力层
试验组 1	-	-	-	-
试验组 2	-	-	85	-

续表

试验组 3	-	-	85	是
试验组 4	单向土工格栅	-	85	-
试验组 5	单向土工格栅	1.5 倍桩径	85	-
试验组 6	双向土工格栅	1.5 倍桩径	85	-
试验组 7	双向土工格栅	2 倍桩径	85	-
试验组 8	三向土工格栅	2 倍桩径	85	-
试验组 9	双向土工格栅	1.5 倍桩径	100	-
试验组 10	双向土工格栅	2 倍桩径	85	是

3. 模型试验数据整理分析

3.1. 沉降分析

如图 1 所示为室内模型试验第 1 组、第 2 组和第 4 组中部沉降对比图。通过对 1、2、4 三组试验的对比，三组试验的最终沉降量呈阶梯式下降的趋势，这种趋势直观的揭示了地基处理措施的协同作用。

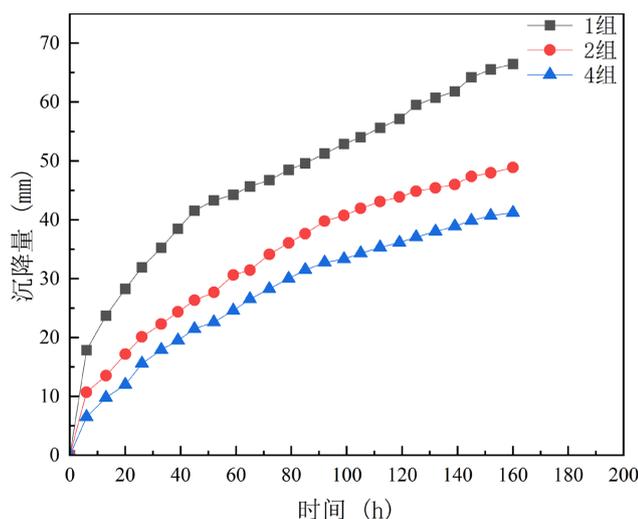


Figure 1. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 1, 2, and 4

图 1. 试验组 1、2、4 中部沉降对比图

如图 2、图 3 所示为室内模型试验第 5 组、第 6 组、第 7 组和第 8 组中部沉降对比图。通过分析发现，双向土工格栅的网状结构在水平和垂直方向均能有效分散荷载。三向土工格栅在加筋体系中展现出更好的结构特性，具有更强的变形抑制能力，有效控制了地基的沉降。

如图 4、图 5 所示为室内模型试验第 4 组、第 5 组、第 6 组和第 7 组中部沉降对比图。对比试验组 4、5 的沉降量，表明桩帽构造在调节地基沉降方面具有显著作用。对比试验组 6、7 的沉降量，说明桩帽的直径更大能更好的控制地基沉降。

如图 6、图 7 所示为室内模型试验第 1 组、第 2 组、第 6 组和第 9 组中部沉降对比图。对比试验组 1、2、6、9 的沉降量，表明桩基结构的设置显著的改善了地基的承载性能，而桩径尺寸的合理调整则进一步优化了沉降控制效果。

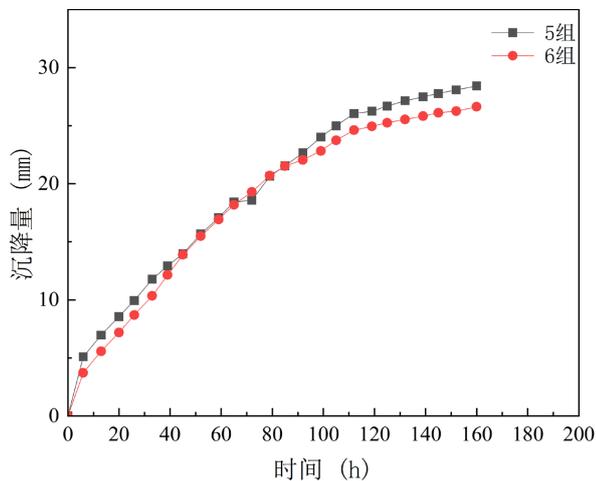


Figure 2. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 5 and 6
图 2. 试验组 5、6 中部沉降对比图

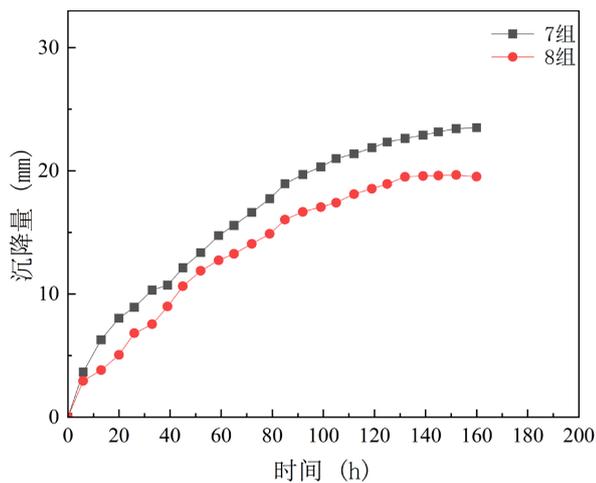


Figure 3. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 7 and 8
图 3. 试验组 7、8 中部沉降对比图

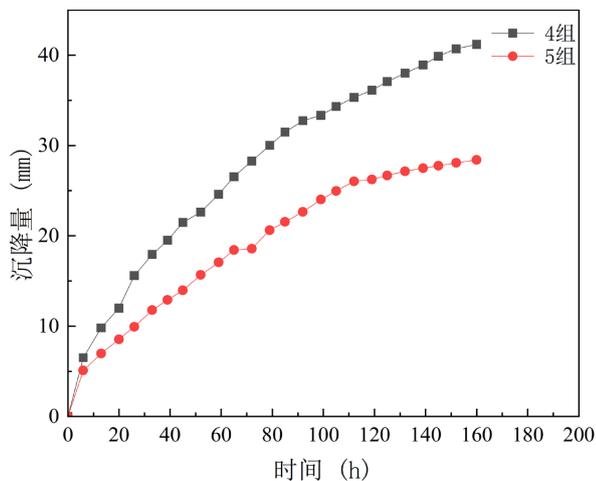


Figure 4. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 4 and 5
图 4. 试验组 4、5 中部沉降对比图

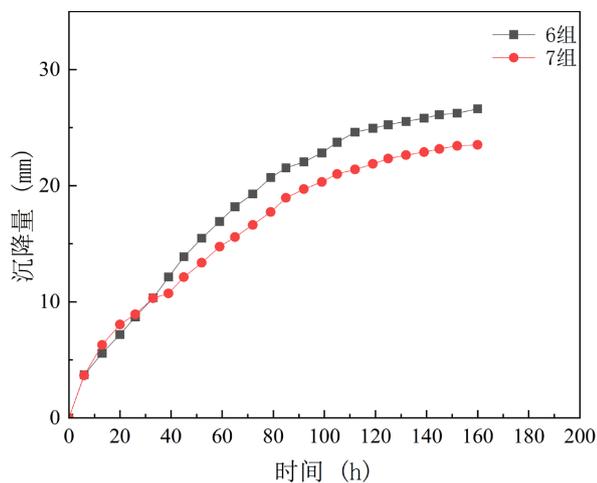


Figure 5. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 6 and 7
图 5. 试验组 6、7 中部沉降对比图

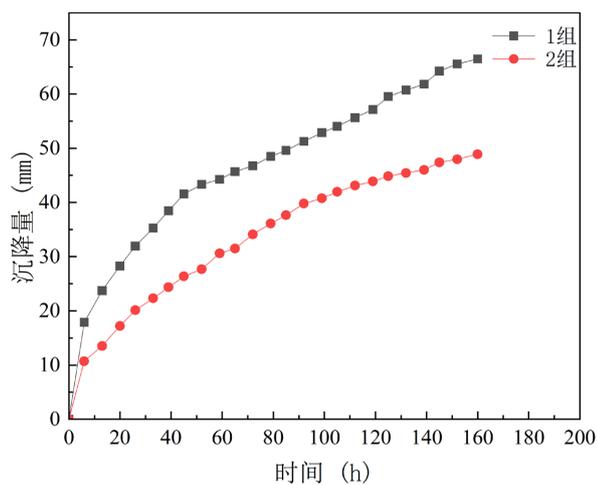


Figure 6. Comparison of settlement in experimental groups 1 and 2
图 6. 试验组 1、2 中部沉降对比图

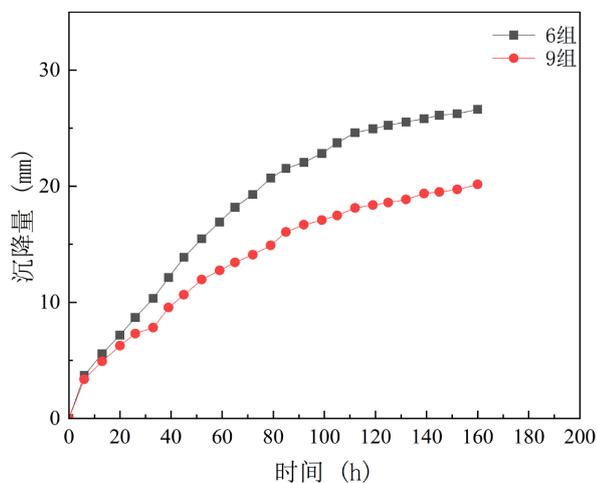


Figure 7. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 6 and 9
图 7. 试验组 6、9 中部沉降对比图

如图 8、图 9 所示为室内模型试验第 2 组、第 3 组、第 8 组和第 10 组中部沉降对比图。对比试验组 2、3、8、10 的沉降量。说明桩是否直接接触持力层，会影响桩的受力情况，桩直接接触持力层，会使沉降量减小。

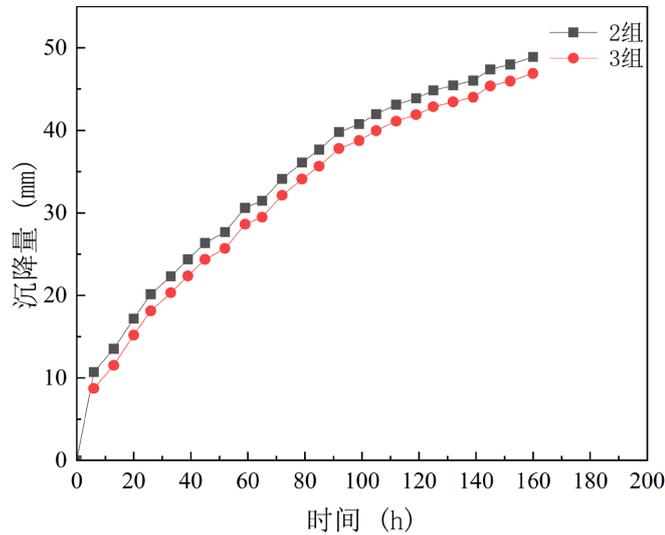


Figure 8. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 2 and 3
图 8. 试验组 2、3 中部沉降对比图

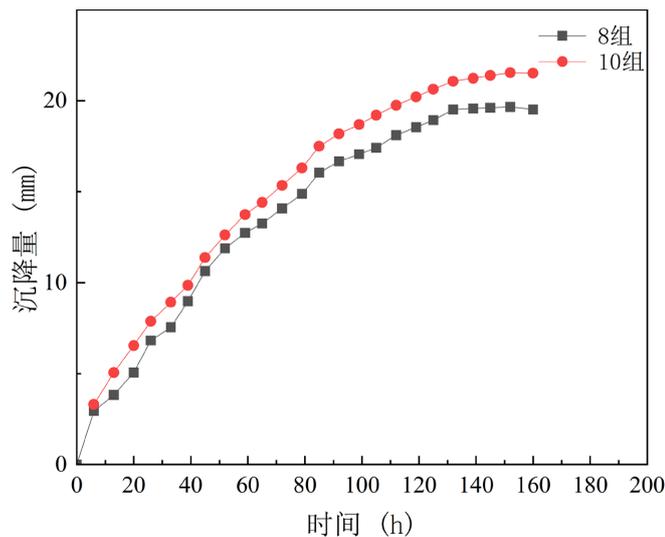


Figure 9. Comparison of settlement in the middle of experimental groups 8 and 10
图 9. 试验组 8、10 中部沉降对比图

3.2. 桩土应力比分析

如图 10~12 所示为室内模型试验第 2 组、第 3 组、第 4 组、第 5 组、第 6 组、第 7 组和第 8 组桩土应力比对比图。反映了加筋材料对应力比的促进作用。在加筋垫层配置条件下，双向土工格栅工况(试验组 6)的应力比增幅较单向格栅工况(试验组 5)更为显著。同理对比试验组 7 与试验组 8，说明三向土工格栅结构在改善桩 - 土体系荷载传递机制方面具有显著优势，其性能表现明显优于双向土工格栅，而后者又较单向土工格栅展现出更优的应力调控能力。

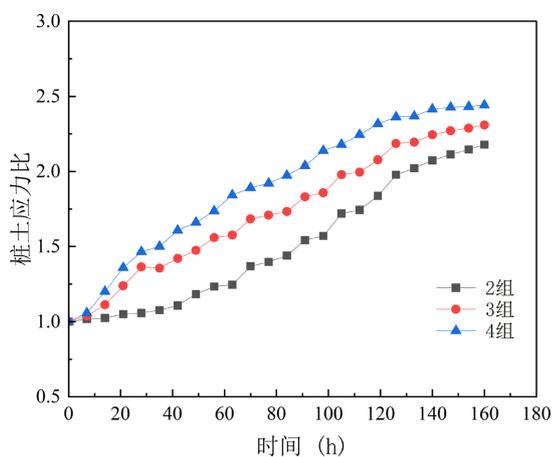


Figure 10. Stress ratio of pile soil in test groups 2, 3, and 4
图 10. 试验组 2、3、4 桩土应力比

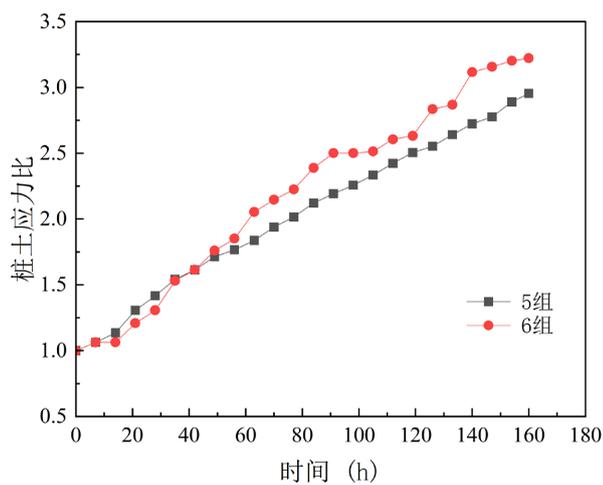


Figure 11. Stress ratio between piles 5 and 6 in experimental group
图 11. 试验组 5、6 桩土应力比

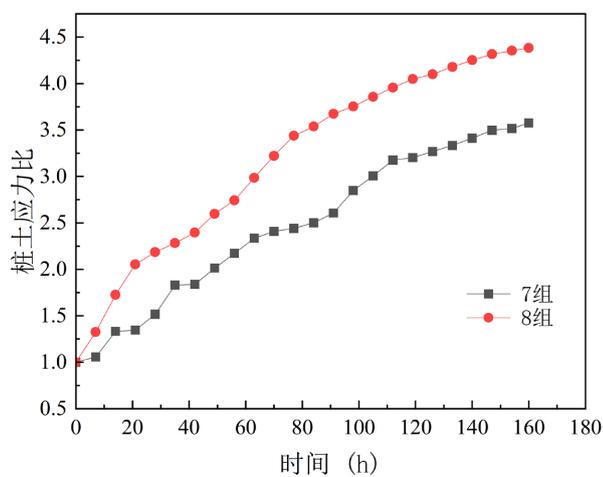


Figure 12. Comparison of soil stress ratios between test groups 7 and 8 piles
图 12. 试验组 7、8 桩土应力比对比

如图 13、图 14 所示为室内模型试验第 4 组、第 5 组、第 6 组和第 7 组桩土应力比对比图。通过对比试验组 4、5 的结果，凸显了桩帽结构在荷载分配系统中的关键作用。对比试验组 6 与试验组 7，说明桩帽的设置可以增加桩土间的荷载分担比。

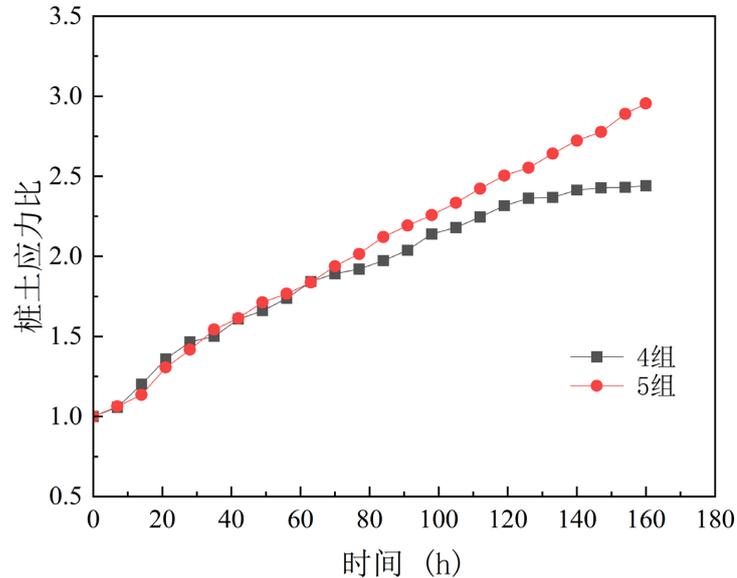


Figure 13. Comparison of soil stress ratios between test groups 4 and 5 piles
图 13. 试验组 4、5 桩土应力比对比

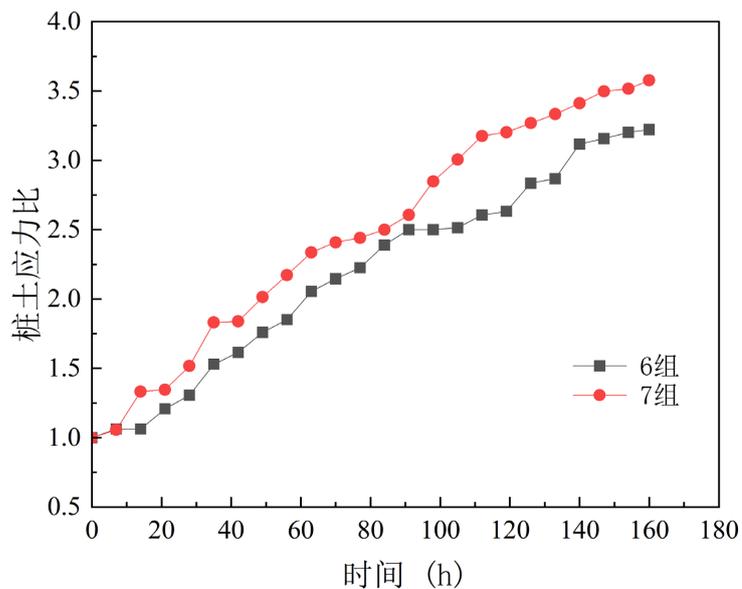


Figure 14. Comparison of soil stress ratios between test groups 6 and 7 piles
图 14. 试验组 6、7 桩土应力比对比

如图 15 所示为室内模型试验第 6 组和第 9 组桩土应力比对比图。对比试验组 6 与试验组 9，说明模型桩的桩径的增大也可以增加桩土间的荷载分担比。

如图 16、图 17 所示为室内模型试验第 2 组、第 3 组、第 7 组和第 10 组桩土应力比对比图。对比试验组 2 与试验组 3 以及试验组 7 与试验组 10，说明模型桩底部接触持力层会增加桩土间的荷载分担比。

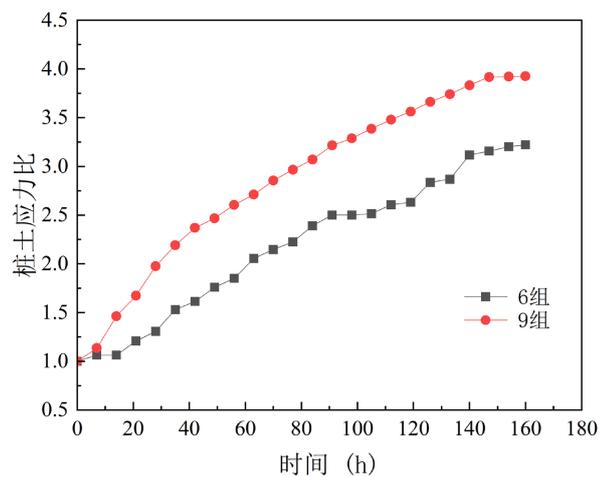


Figure 15. Comparison of the time varying curve of pile soil stress ratio
图 15. 桩土应力比随时间变化曲线对比

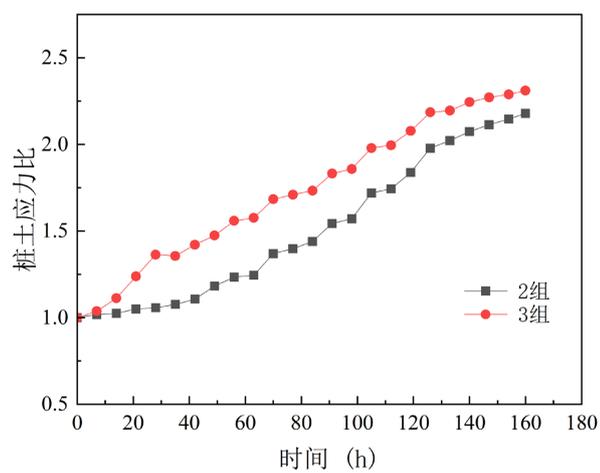


Figure 16. Comparison of experimental groups 2 and 3
图 16. 试验组 2、3 对比

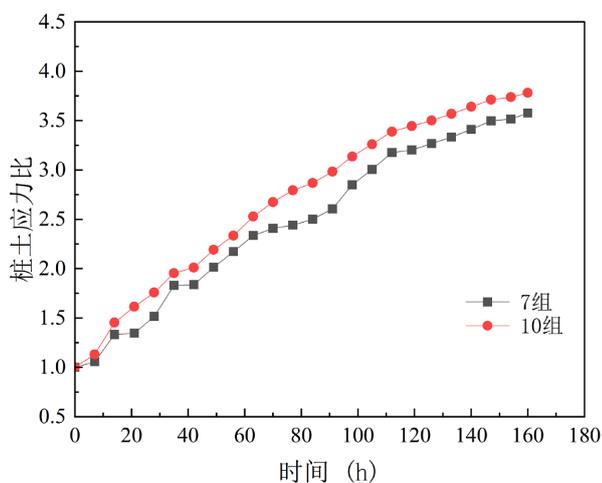


Figure 17. Comparison of experimental groups 7 and 10
图 17. 试验组 7、10 对比

3.3. 加筋材料应变分析

选取试验组 5、6 和 8 作为研究对象,通过监测不同阶段各测点的应变变化规律去分析不同加筋材料的应变分布形态。

图 18 展示了不同格栅类型在相同加载周期下的应变响应特征。对比分析发现,试验组 5(单向格栅)、试验组 6(双向格栅)和试验组 8(三向格栅)的应变分布具有明显的差异性,各试验组峰值应变集中出现在距左侧边界 60~80 cm 的中部区域,呈现典型的抛物线分布特征。

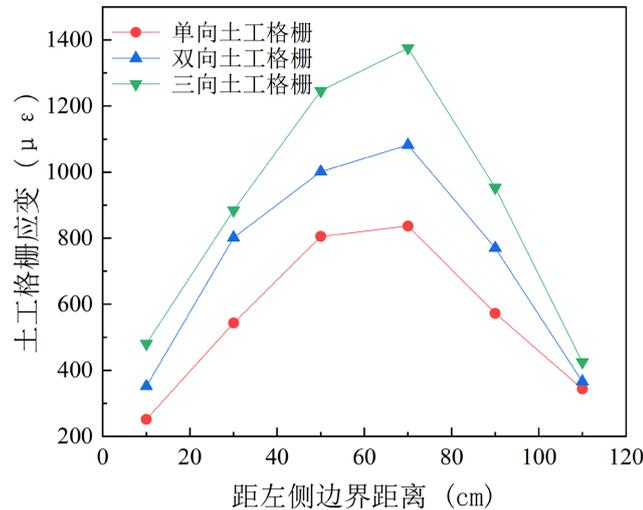


Figure 18. Comparison of strain at different positions of geogrids in each experimental group
图 18. 各试验组土工格栅不同位置处应变对比

3.4. 桩身轴力分析

如图 19、图 20 所示为试验组 2、试验组 4、试验组 7 和试验组 8 的桩身轴力对比图,说明土工格栅对上部荷载传递至桩体的影响依次为三向土工格栅 > 双向土工格栅 > 单向土工格栅。

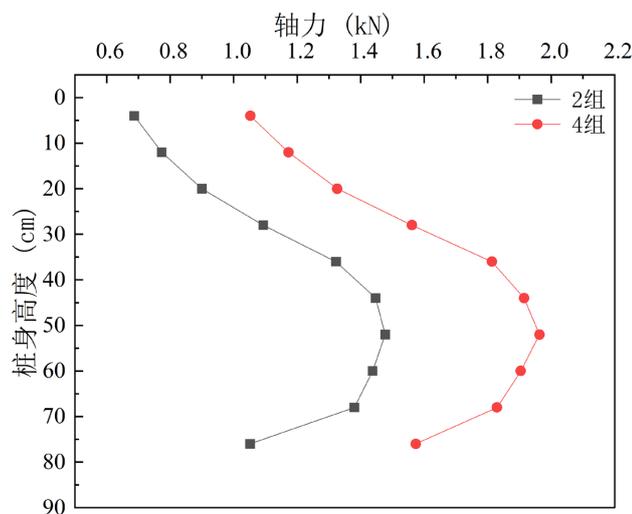


Figure 19. Comparison of axial forces on pile bodies of test groups 2 and 4
图 19. 试验组 2、4 桩身轴力对比

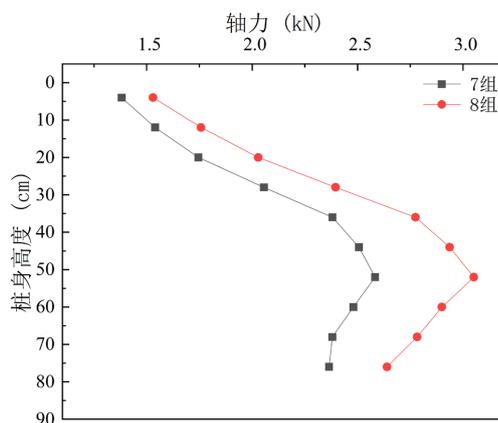


Figure 20. Comparison of axial forces on pile bodies of test groups 7 and 8
图 20. 试验组 7、8 桩身轴力对比

如图 21、图 22 所示为试验组 4、试验组 5、试验组 6 和试验组 7 的桩身轴力对比图，说明桩顶桩帽的设置能较大幅度的促进上部荷载向桩基础的传递。

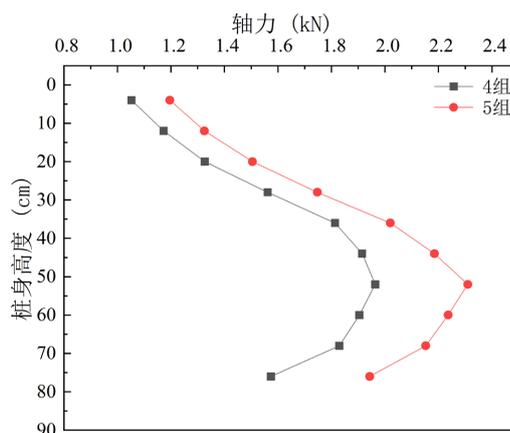


Figure 21. Comparison of axial forces on pile bodies of test groups 4 and 5
图 21. 试验组 4、5 桩身轴力对比

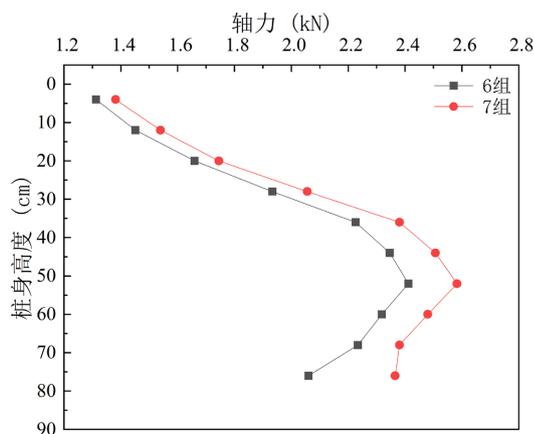


Figure 22. Comparison of axial forces on pile bodies of test groups 6 and 7
图 22. 试验组 6、7 桩身轴力对比

如图 23、图 24 所示为试验组 2、试验组 3、试验组 7 和试验组 10 的桩身轴力对比图。说明桩体底部接触持力层也能一定程度上促使上部荷载向桩体的传递。

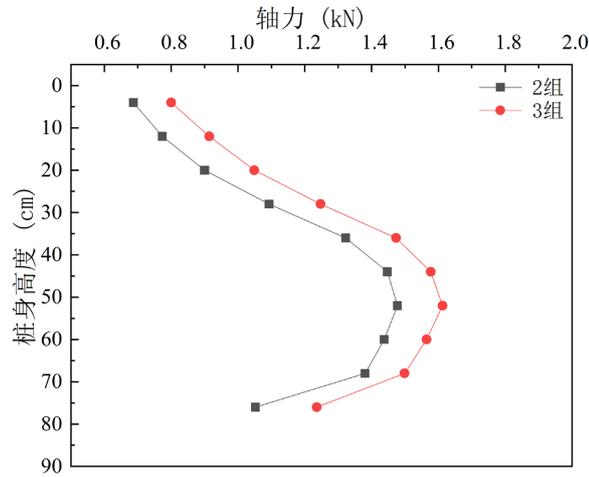


Figure 23. Comparison of axial forces on pile bodies of test groups 2 and 3
图 23. 试验组 2、3 桩身轴力对比

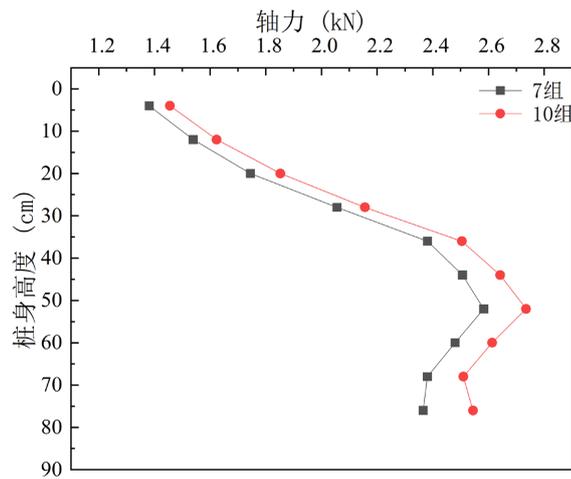


Figure 24. Comparison of axial forces on pile bodies of test groups 7 and 10
图 24. 试验组 7、10 桩身轴力对比

数据分析揭示了桩身轴力沿深度呈现先增后减的抛物线形态，最大轴力值出现在桩体中下部区域，这一规律印证了上部荷载通过桩体向下传递的力学机制。

4. 结论

通过室内模型试验得出如下结论：

1) 地基中设置桩可以有效的控制地基沉降，褥垫层中设置土工格栅可以增强刚度进一步提升沉降控制效果，其中三向土工格栅优于双向和单向土工格栅。通过设置桩帽可以增加桩体与垫层的接触面积，使上部荷载更多的通过桩体向下传递，从而减少整体沉降。桩基直接接触坚硬持力层，主要通过桩端传递荷载，从而显著减小土体沉降。

2) 加筋垫层的设置，可以将荷载有效传递至桩顶，使桩土应力比达到一个更加合理的比例，从而使

加筋垫层和桩的性能发挥更明显,在本次试验所用加筋材料中,三向土工格栅效果最优。桩顶桩帽的设置显著提升桩土应力比,模型桩是否接触持力层也对其有一定影响。

3) 在加载条件相同的情况下,加筋材料的应变值三向土工格栅最大,单向土工格栅最小,其应变值的规律呈现中间大两端小的态势。

4) 土工格栅的设置使上部荷载更好的传递至桩身,增加了桩体承担荷载的比例,桩顶桩帽的设置有助于充分发挥土工格栅的性能,且桩顶桩帽尺寸越大,效果越显著。此外,桩体底部接触持力层也能在一定程度上提高上部荷载的传递比例。

参考文献

- [1] 周锐. 《铁路“十三五”发展规划》发布[J]. 城市轨道交通研究, 2017(12): 37.
- [2] 《国家公路网规划(2013-2030年)》[J]. 建筑机械, 2013(16): 38-44.
- [3] Han, J. and Gabr, M.A. (2002) Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced and Pile-Supported Earth Platforms over Soft Soil. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **128**, 44-53.
- [4] 张延杰. 人工制备湿陷性黄土工程性质与深基础竖向承载力计算方法研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.