

# 黄土地基次生病害的夯挤桩处治技术试验研究

施渝吉<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1\*</sup>, 赵尔升<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新疆工程学院土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>兰州铁道设计院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年4月3日

## 摘要

针对既有交通工程场景下受限高限宽条件约束的区域, 黄土地基深层土体因浸水饱和引发次生病害的问题, 本研究采用水泥级配碎石夯挤桩技术开展治理效能研究, 并依托室内模型试验展开系统分析。试验过程中, 分别对天然状态未浸水地基、下部土体浸水饱和和厚度达1 m及2 m的地基开展荷载测试, 随后进一步完成水泥级配碎石夯挤桩单桩、群桩复合地基的分级加载试验。试验结果表明: 当饱和土层厚度为1 m时, 地基沉降量较未浸水工况提升16.23%; 饱和土层厚度增至2 m时, 沉降量较未浸水工况增幅达27.64%。群桩复合地基累计平均沉降量相较于单桩复合地基提升54%, 群桩效应特征显著。单桩与群桩复合地基的承载特性存在共性规律: 随着上部荷载的逐步增大, 桩身应力沿深度方向均呈现出先增大后减小的变化特征, 应力峰值位置出现在桩顶以下0.2~0.3倍桩长区间。同时, 群桩复合地基内部不同位置桩体的应力分布存在差异, 中桩桩身应力峰值最高, 边桩次之, 角桩最小; 相较于单桩复合地基, 群桩复合地基中桩间土的承载作用发挥更为充分, 桩土协同工作效应表现得更为突出。

## 关键词

铁路路基, 水泥级配碎石夯挤桩, 试验研究

# Experimental Study on Rammed Compaction Pile Treatment Technology for Secondary Diseases of Loess Foundation

Yuji Shi<sup>1</sup>, Wei Chen<sup>1\*</sup>, Ersheng Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Lanzhou Railway Design Institute, Lanzhou Gansu

Received: March 3, 2026; accepted: March 23, 2026; published: April 3, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 施渝吉, 陈伟, 赵尔升. 黄土地基次生病害的夯挤桩处治技术试验研究[J]. 土木工程, 2026, 15(4): 37-49.  
DOI: 10.12677/hjce.2026.154078

## Abstract

To address the issue of secondary distresses induced by water immersion and saturation of deep loess foundation soils in restricted height and width zones of existing traffic engineering projects, this study investigates the treatment effectiveness of cement-graded gravel tamped compaction piles, and conducts a systematic analysis via laboratory model tests. In the experimental program, load tests were performed on foundations under three conditions: natural unsaturated state, foundations with 1 m and 2 m thick saturated underlying soil layers, respectively. Graded loading tests were then carried out on single-pile and pile-group composite foundations reinforced with cement-graded gravel tamped compaction piles. The test results indicate that when the saturated soil thickness is 1 m, the foundation settlement increases by 16.23% compared with the unsaturated condition; when the saturated soil thickness increases to 2 m, the settlement increases by 27.64% relative to the unsaturated case. The cumulative average settlement of the pile-group composite foundation is 54% higher than that of the single-pile composite foundation, demonstrating a significant pile-group effect. The bearing characteristics of single-pile and pile-group composite foundations follow a similar trend: with the gradual increase of the upper load, the axial stress along the pile shaft first increases and then decreases with depth, and the stress peak occurs at a depth of 0.2~0.3 times the pile length below the pile head. Furthermore, the stress distribution of piles at different positions within the pile-group composite foundation is distinct: the peak shaft stress of the central pile is the largest, followed by the side piles, and the corner piles show the smallest value. Compared with the single-pile composite foundation, the bearing contribution of the inter-pile soil in the pile-group composite foundation is more fully mobilized, and the pile-soil synergistic interaction is more pronounced.

## Keywords

Railway Subgrade, Cement Graded Crushed Stone Rammed Pile, Experimental Research

Copyright © 2026 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

湿陷性黄土地基的处治技术, 长期以来都是黄土分布区工程建设领域的研究热点与技术难点[1] [2]。就黄土地区地基处理而言, 目前工程实践中常用的技术手段, 包含高压旋喷桩法、CFG 桩技术、注浆加固地基工艺、水泥土挤密桩法等多种方案[3] [4]。上述技术在湿陷性黄土地基处理实践中均展现出一定的应用成效, 经其加固后的地基可实现承载力提升与沉降变形控制的双重效果[4]-[6]。然而, 此类传统处理技术普遍存在水泥材料消耗量偏高的弊端, 部分工艺还会因施工过程中产生的废料堆放问题, 引发土地资源占用与生态环境污染等衍生问题。在此背景下, 水泥级配碎石夯挤桩技术应运而生。针对湿陷性黄土地区的地基加固需求, CFG 桩技术虽能显著提升地基承载力, 但采用该技术处理后的土体, 其湿陷性往往无法彻底消除。相关研究表明, 若在 CFG 桩基础上辅以夯实水泥土桩进行联合处治, 则可在保障地基承载性能的同时, 实现湿陷性的有效根除[7] [8]。实践证明, 这种 CFG 桩与夯实水泥土桩的组合式处理方案, 能够充分发挥两种技术的协同优势, 达到工程规范对场地地基的各项性能要求[9] [10]。本文依托某实际工程展开研究, 该工程场地原有地基经初步处理后, 受长期地下水水位上升的影响, 部分土体逐渐饱和, 进而导致地基承载力衰减, 难以满足工程使用要求。加之本工程属于既有建筑物的地基加固

改造项目，地层条件与施工空间的双重限制，对地基处理技术的选型提出了严苛要求。基于此，本文提出采用水泥级配碎石夯挤桩技术进行地基加固，并通过设置不同的浸水工况，系统探究该桩型在不同水文条件下的承载特性。

## 2. 试验材料及试验内容

### 2.1. 试验材料

实验用土取自兰州市，具有一定代表性。所持模型内填土分为三层填筑，自下而上分别为水泥改良土、饱和黄土及重塑黄土。土样不均匀系数  $C_u = 1.55$ ，曲率系数  $C_c = 1.78$ ，液限  $W_L = 27.2$ ，塑限  $W_P = 14.7$ ，塑限指数为 12.5。土样颗粒级配曲线见图 1。采用  $Q_1$  轻型击实，得到重塑黄土最优含水率为 15.9%，最大干密度  $1.88 \text{ g/cm}^3$ 。通过不固结不排水剪切试验得出其粘聚力为 14.9 kPa，内摩擦角为  $23.7^\circ$ 。

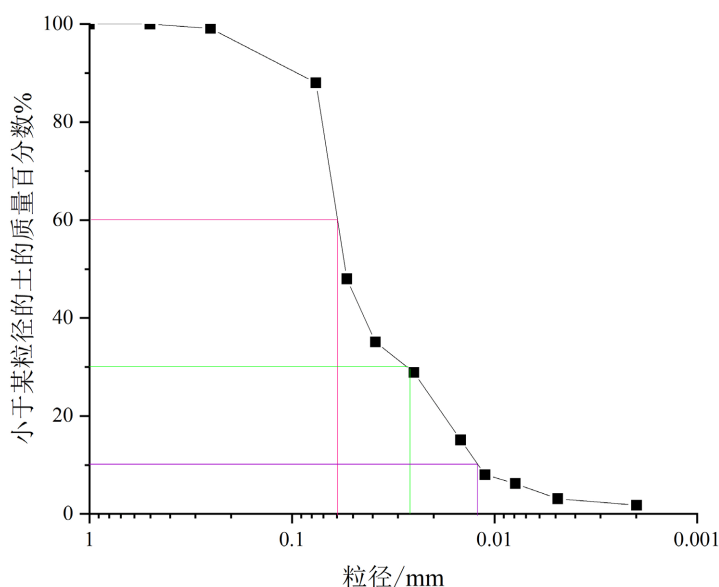


Figure 1. Particle size distribution curve

图 1. 颗粒级配曲线

对该土样开展土工特性试验可知，不均匀系数  $C_u = 1.55$ ，曲率系数  $C_c = 1.78$ ，液限  $W_L = 27.2$ ，塑限  $W_P = 14.7$ ，塑限指数为 12.5。土样颗粒级配特征详见图 1。采用  $Q_1$  轻型击实试验方法测定，得到重塑黄土的最优含水率为 15.9%，对应的最大干密度为  $1.88 \text{ g/cm}^3$ 。通过不固结不排水剪切试验进一步测得，其粘聚力为 14.9 kPa，内摩擦角为  $23.7^\circ$ 。

试验所用骨料采用粒径连续、级配优良的碎石与石屑替代，碎石最大粒径控制为桩径的 1/4，经检测其颗粒不均匀系数  $C_u = 5.1$ ，曲率系数  $C_c = 1.84$ ，各项指标均符合相关级配技术要求。为提升桩体固化效果，骨料中需掺入水泥作为胶凝材料，本试验选定的水泥品种为 325# 普通硅酸盐水泥，掺量确定为骨料质量的 8%。试验设计的水泥级配碎石夯挤桩参数如下：桩身直径为 4 cm，桩长为 100 cm，桩体布设间距为 10 cm。

### 2.2. 试验内容

本次试验所用土压力盒为 BX-1 型电阻应变式土压力盒作为土压力测量器件，其外形尺寸规格为  $\Phi 17 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。试验所用模型箱的结构示意详见图 2，土压力计的具体布设位置及方式如图 3 所示。

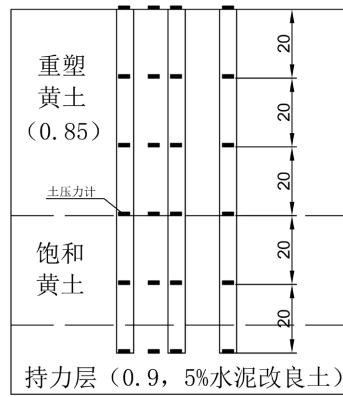


Figure 2. Schematic diagram of the model box  
图 2. 模型箱示意图

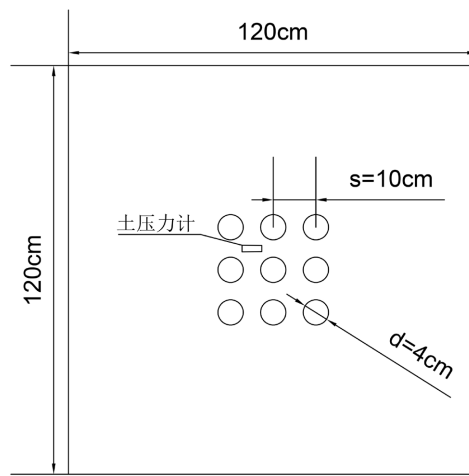


Figure 3. Layout of earth pressure cells  
图 3. 土压力计布设图

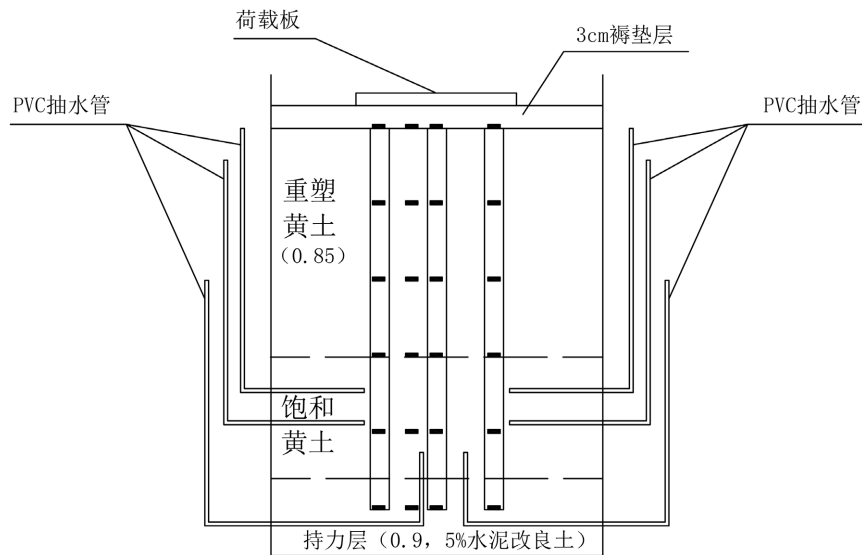


Figure 4. Schematic diagram of the model test  
图 4. 模型试验筒图

目前岩土试验领域常用的土样饱和方法包括真空抽气饱和法、水头饱和法、反压饱和法等[11] [12]。受室内试验条件的限制,试验采用在预饱土层埋设 PVC 管进行饱和的方式,具体操作如下:在预饱和和土层左侧 PVC 管中缓慢注水,右侧进行抽气饱和,以此加快土体的饱和进程,量测土体含水率,约 30%时认为土体达到饱和。试验设定的饱和终止标准为两类:一是土体含水率达到预设阈值,二是注水水头在连续 5 h 内基本保持稳定且无明显下降趋势。为避免土颗粒在注水、抽气过程中进入 PVC 管造成管路堵塞,试验前在埋入饱和土层的管壁外侧包裹了一层土工布,以保障试验操作的顺利进行。室内模型试验的整体布设方案详见图 4。本试验采用慢速维持荷载法开展加载测试,将试验总荷载划分为 10 个等级进行逐级施加,每一级荷载均需加载至地基沉降量满足相关规范规定的稳定标准后,再进行下一级荷载的施加。

### 3. 试验结果及分析

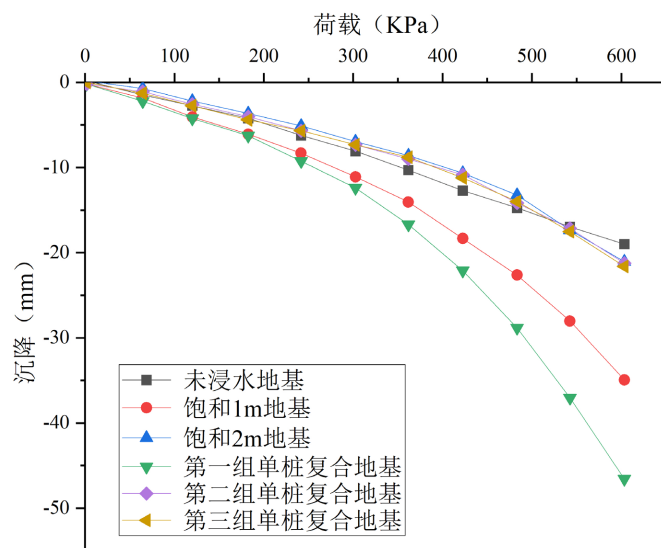
#### 3.1. 不同工况下地基载荷试验沉降分析

如表 1 所示,伴随饱和和土层厚度的持续增加,加载终止后荷载板的沉降变形,主要由下部饱和和黄土层结构失效引发的压缩变形所贡献,同时荷载板累计沉降量呈现出显著的增长态势。尤其在上部荷载逐步增大的过程中,沉降量的增幅表现得愈发明显。如图 5 所示,饱和层为 1 m 时,沉降量比未浸水工况提升 16.23%;饱和层 2 m 时,沉降量增幅达到 27.64%。进一步表明饱和黄土的高压缩性与低承载性。

**Table 1.** Cumulative settlement values under different working conditions

**表 1.** 不同工况下累计沉降值

| 工序     | 沉降量(mm) |
|--------|---------|
| 无水     | 19.19   |
| 1 m 饱和 | 35.42   |
| 2 m 饱和 | 46.83   |
| 第一组单桩  | 21.61   |
| 第二组单桩  | 21.77   |
| 第三组单桩  | 21.35   |



**Figure 5.** Settlement comparison under different working conditions

**图 5.** 不同工况下沉降对比

如图 6, 单桩情况下累计沉降为 21.58 mm, 群桩情况下累计沉降量则为 33.35 mm, 沉降量增大 54%, 这一数据差异直观体现出显著的群桩效应。深究该现象的内在机理, 相较于处于相对独立工作状态的单桩, 群桩体系中各桩体的桩端应力会出现叠加效应, 进而造成桩端下卧层的压缩变形量增大, 最终导致群桩复合地基的整体沉降量上升。

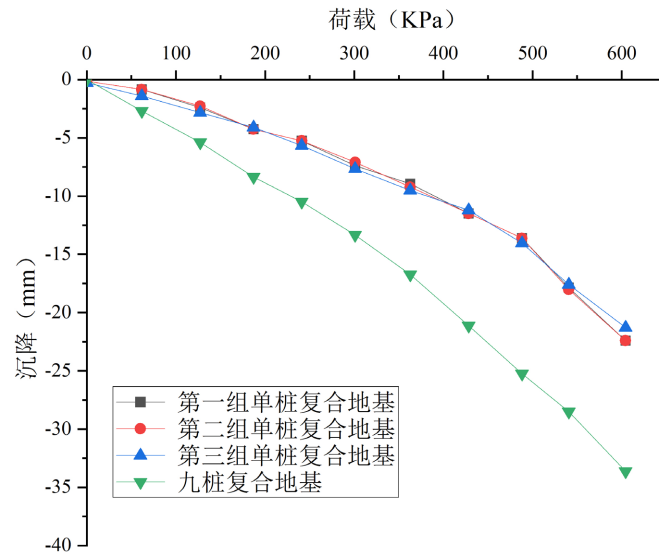


Figure 6. Settlement comparison between single pile and group pile composite foundation  
图 6. 单桩与群桩复合地基沉降对比

### 3.2. 复合地基应力分析

#### (1) 单桩复合地基应力分析

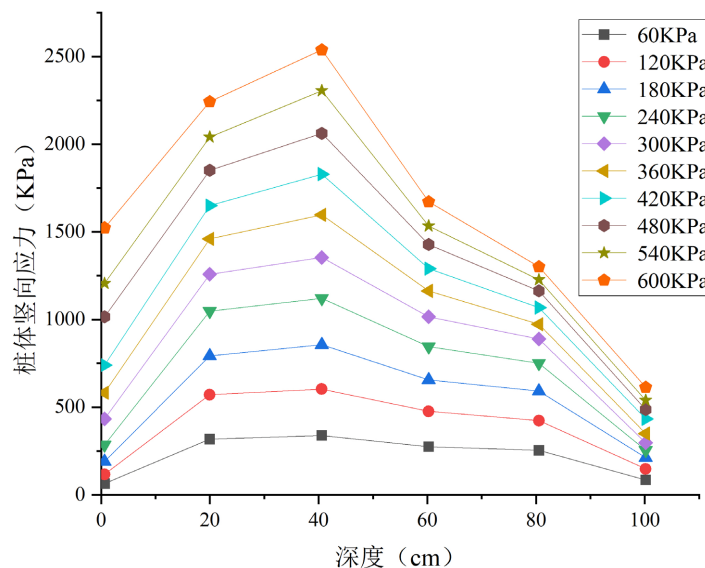


Figure 7. Vertical stress distribution of pile in single-pile composite foundation  
图 7. 单桩复合地基桩体竖向应力分布

单桩复合地基桩体竖向应力的分布特征如图 7 所示。由图中曲线变化规律可知, 桩身应力随深度的

增大先增后减：自桩顶位置起，应力值随深度增加逐步攀升，并在桩身上部的某一区间达到峰值，之后便伴随深度的进一步增加而持续降低。在外部荷载与桩土间摩擦阻力的共同作用下，桩身应力呈现出逐步衰减的变化规律。

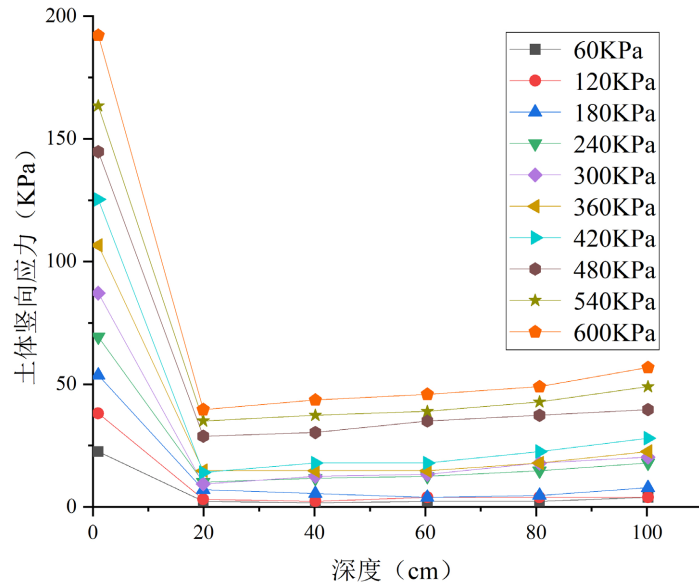


Figure 8. Vertical stress distribution of soil in single-pile composite foundation  
图 8. 单桩复合地基土体竖向应力分布

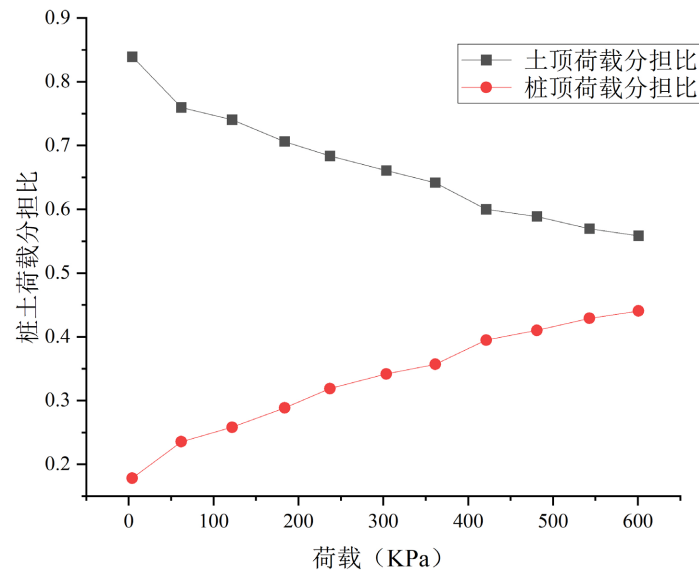


Figure 9. Load sharing ratio in the case of single pile  
图 9. 单桩情况下荷载分担比

单桩复合地基中土体的竖向应力分布规律如图 8 所示。图中数据反映了不同荷载工况下，土体竖向应力随埋深的演化特征，本部分研究重点聚焦于桩周土体的应力响应规律。试验结果表明，桩周土体的纵向应力主要于表层土体区域，且随深度的表现出快速衰减；而在桩端附近区域，土体应力则出现小幅回升现象，且这一回升趋势会随着上部荷载的增大而愈发显著。具体来看，荷载水平较低时，在表层范

围内应力衰减约 85%，接着有轻微回升，这说明荷载水平较低时主要有表层土体承担，桩体通过端部阻力和侧摩擦力协同作用，将部分应力传递至深层土体，进而引发深层土体应力的小幅增长；当荷载为 300 kPa 时，在表层范围内应力衰减约为 78%，下降趋势放慢，桩端部区域应力有显著增大，表明深度增大后，桩与土二者开始协同承载。当荷载为 600 kPa 时，应力的衰减进一步减缓，表层减至 70%，这时在二元体系中桩已成为主体，土成为辅。

如图 9 为单桩共况下桩与土荷载分担情况。随着外界荷载增大，因桩身模量远高于土体模量，土体的变形量显著高于桩体。当桩体在摩阻力作用下出现向上刺入趋势时，褥垫层结构发生适应性变形，其材料会逐步填充至桩周土体的空隙处，从而确保桩体与桩周土体在任意荷载等级下均能维持良好的协同工作状态。在荷载较小时期，桩周土体是承载主体，此时桩土间的位移协调效果尚未稳定，桩土应力比呈现出较为显著的增长趋势。随着荷载持续增大，桩顶承担的荷载占比逐步提升，桩土应力比随之增大，桩体的承载作用愈发突出。当荷载进一步提高后，上部荷载逐渐向桩体转移，最终桩顶荷载分担占比达到 0.44，桩土间趋于稳定状态，应力比峰值达到 7.4。

## (2) 群桩效应应力分析

群桩复合地基桩间土体的竖向应力分布特征如图 10 所示。由图可知，在不同荷载等级与埋深条件下，群桩复合地基桩间土的竖向应力演化规律与单桩复合地基大致相近：土体竖向应力在地表浅层范围内数值较高，且随着土层深度的增加快速下降，在桩端附近，应力有一定的提升。

群桩情况下有明显的差异。在承受上部荷载的过程中，群桩体系内各桩体的桩端阻力会产生累加效应，这种情况与荷载成正相关，这使得桩端下卧持力层的应力水平，相较于单桩复合地基中桩体处于相对独立工作状态时的应力值出现大幅提升。以荷载等级  $p = 600 \text{ kPa}$  的工况为例，群桩复合地基桩端位置的应力相较于应力最低点提升幅度达到 63%；而在相同荷载条件下，单桩复合地基桩端应力较其应力最低点的增幅仅为 32%，二者的差异直观反映出群桩端阻力叠加效应对地基应力分布的显著影响。

如图 11~13 为群桩复合地基中桩、边桩及角桩桩体竖向应力分布。应力随深度的变化与单桩基本相似，桩身最大应力在表层土体范围内逐渐增大后缓慢减小，荷载越大，趋势越明显。中桩、边桩、角桩最大桩身应力均位于距桩顶约 30 cm 处。群桩情况下桩顶、桩身和桩端应力均大于单桩，表明群桩具有更好的承载力。

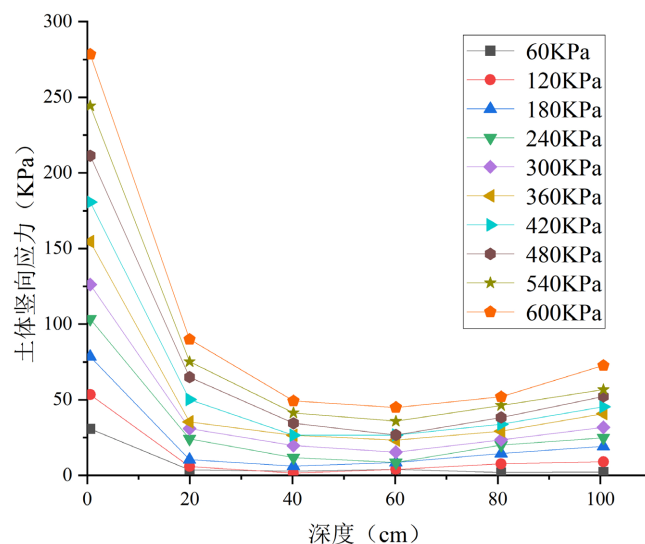


Figure 10. Stress distribution of soil between piles under group pile condition  
图 10. 群桩情况下桩间土应力分布

群桩情况下桩身应力分布有一定差异。具体表现为中桩 > 边桩 > 角桩的分布规律。外部荷载不同时，桩顶应力的分布规律表现出明显的阶段性特征：当上部荷载较小时，桩顶应力的大小关系与桩身、桩端应力一致，同样遵循中桩高于边桩、边桩高于角桩的规律；随着荷载逐步增大，中桩率先达到自身的极限承载状态，此时上部荷载开始向边桩与角桩发生转移，中桩与边桩、角桩之间的桩顶应力差值随之逐步缩小，群桩体系内部实现荷载的二次分配；当荷载提升至较高水平时，甚至会出现边桩、角桩桩顶应力略高于中桩的情况，不过二者之间的数值差值相对较小。

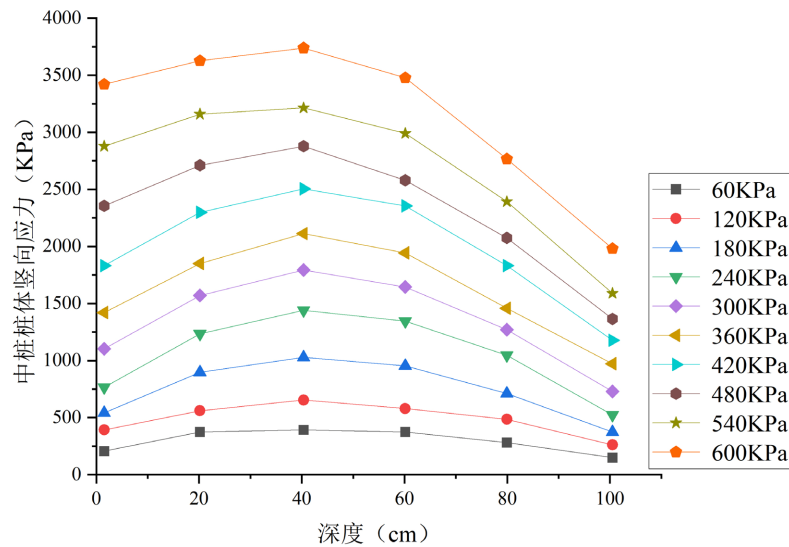


Figure 11. Vertical stress distribution of piles in group-pile composite foundation  
图 11. 群桩复合地基中桩桩体竖向应力分布

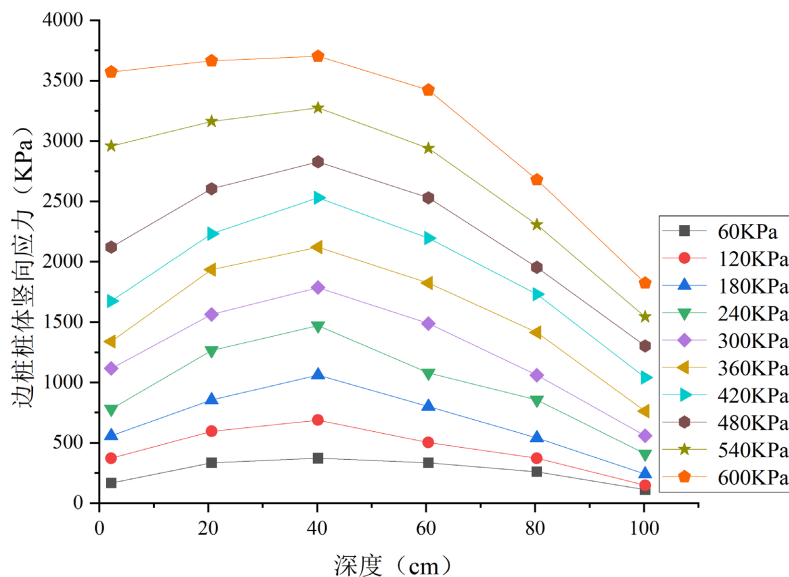


Figure 12. Vertical stress distribution of edge piles in group-pile composite foundation  
图 12. 群桩复合地基边桩桩体竖向应力分布

群桩复合地基的桩土荷载分担比变化规律如图 14 所示。由图中曲线特征可知，在逐级加载过程中，群桩复合地基的桩土应力比与荷载值呈非线性相关关系，且整体表现为随荷载增大而逐步上升的趋势。

从整体变化规律来看，群桩复合地基的桩土应力比及荷载分担比演变趋势，与单桩复合地基大致相近，但群桩体系的桩土应力比数值更高，桩体承担的荷载份额也更为显著。当加载至  $p = 600 \text{ kPa}$  时，群桩复合地基的桩土应力比达到 12.9，相较于单桩复合地基提升了 74%；此外，当加载量接近 500 kPa 时，群桩复合地基中桩体与土体承担的荷载份额趋于均衡。

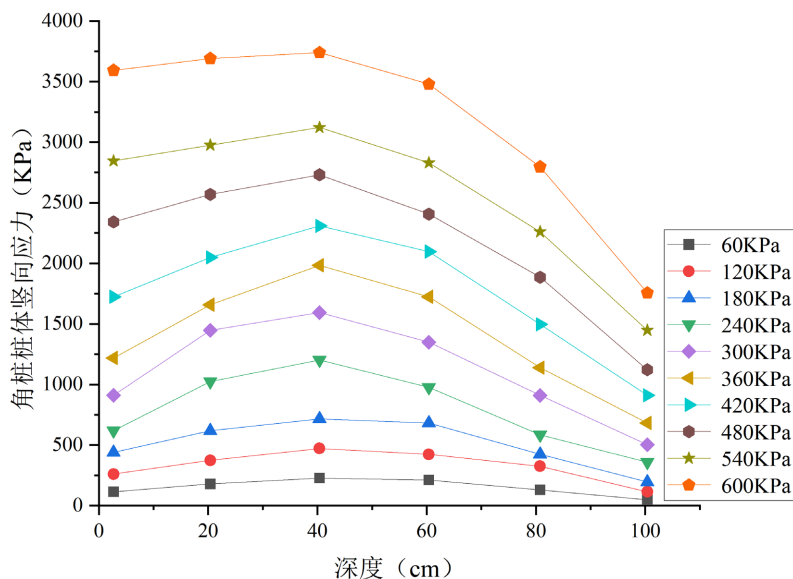


Figure 13. Vertical stress distribution of corner piles in group-pile composite foundation

图 13. 群桩复合地基角桩桩体竖向应力分布

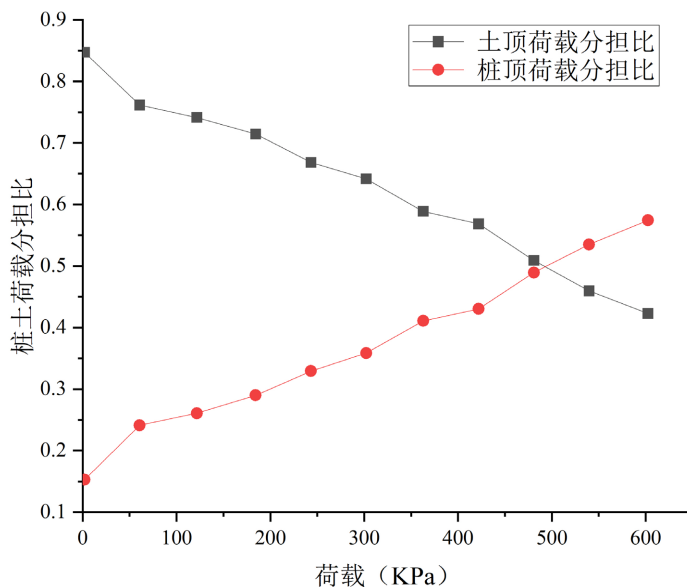


Figure 14. Load sharing ratio of group-pile composite foundation

图 14. 群桩复合地基荷载分担比

### (3) 单桩复合地基与群桩复合地基应力对比分析

由图 15 分析可得，群桩复合地基的桩土应力比整体大于单桩复合地基，且在上部荷载逐级增大的过程中，群桩桩土应力比的提升幅度略高于单桩。这一变化规律表明，群桩复合地基具有更优的承载性能

与更高的承载潜力。从图 16 的变化趋势来看,群桩复合地基的桩顶应力在整个分级加载过程中始终高于单桩复合地基,且二者的应力差值会随着荷载等级的提升呈现逐步扩大的态势。图 17 的试验数据则显示,在荷载由 60 kPa 逐步提升至 600 kPa 的过程中,单桩复合地基桩顶土体应力始终低于群桩复合地基,且两者间的应力差值随荷载增加呈持续扩大趋势。进一步分析可知,群桩复合地基呈现出“桩体承载占优、土体承载偏弱”的特性,而单桩复合地基的荷载分担模式则与之相反。这一差异的本质原因在于土体的荷载分担作用主要依赖应力扩散效应:应力扩散范围越广,土体承担的荷载份额就越高。除此之外,水泥级配碎石夯挤桩的群桩复合地基具有明显的群桩效应,具体体现为桩体对桩间土形成挟持与遮拦作用,促使桩间土应力沿深度方向产生叠加,进而减缓应力衰减速度。而单桩复合地基中,参与应力扩散的土体范围相对更大,土体对荷载的分担作用也更为显著。

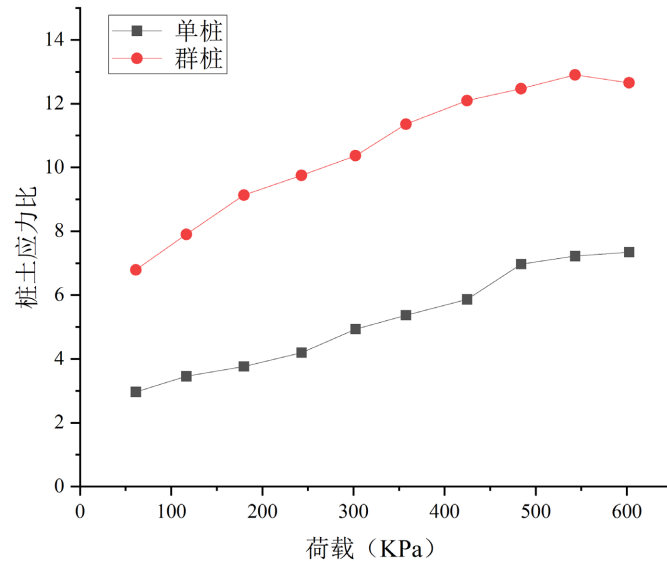


Figure 15. Pile-soil stress ratio of single pile and group piles

图 15. 单桩与群桩桩土应力比

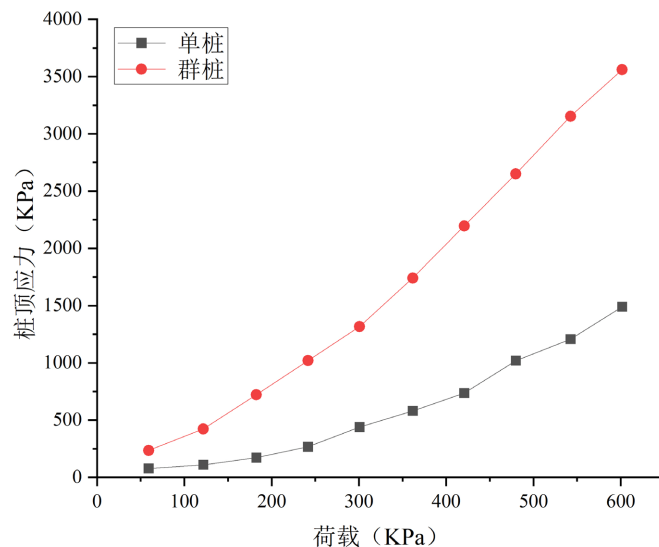


Figure 16. Pile top stress of single pile and group piles

图 16. 单桩与群桩桩顶应力

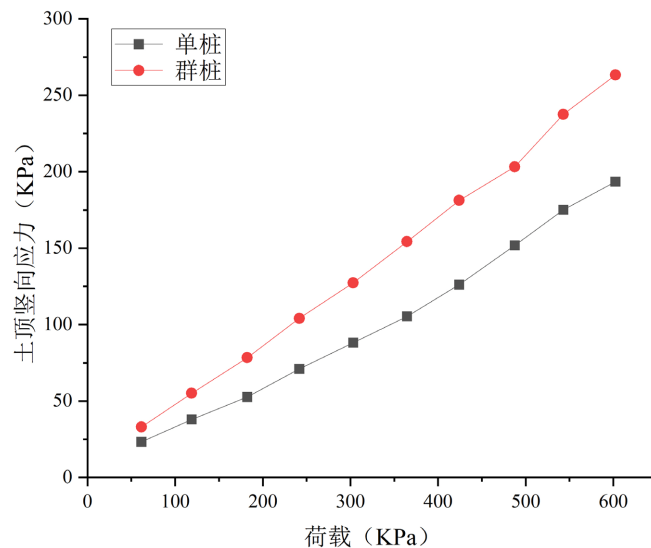


Figure 17. Soil top stress of single pile and group piles  
图 17. 单桩与群桩土顶应力

#### 4. 结语

1) 浸水饱和对黄土地基承载特性影响显著：当下层土体饱和厚度达 2 m 时，原处理地基承载力不满足设计要求，沉降显著增大；采用水泥级配碎石夯挤桩加固后，可借助竖向增强体效应有效减小沉降、提升承载力，实现浸水诱发次生病害的治理。

2) 单桩与群桩复合地基的力学响应存在一定共性：桩身应力沿深度均呈先增大后减小的分布规律，应力峰值出现在桩顶以下 0.2~0.3 倍桩长区间；桩周土体应力则表现为先衰减后回升，桩土协同承载可将荷载有效传递至深部高模量地层；桩土应力比总体随荷载水平提高呈上升趋势，且在高荷载阶段增长速率逐步趋缓。

3) 受群桩效应影响，群桩复合地基中不同位置桩体的应力分布存在明显差异：中桩初始应力峰值相对最大，随着荷载水平提升，荷载逐渐向边桩与角桩发生转移；与单桩复合地基相比，群桩复合地基整体沉降更大，桩土应力比的增长幅度更为显著，桩土协同承载作用表现得更为突出。该模型试验同样存在一定的局限性，受限于尺寸效应，建议开展现场足尺试验以验证模型试验结论的有效性。

#### 基金项目

新疆维吾尔自治区大学生创新训练计划项目(S202410994015)。

#### 参考文献

- [1] 张雁, 黄强. 半刚性桩复合地基性状分析[J]. 岩土工程学报, 1993(2): 86-93.
- [2] 龚晓南. 复合地基发展概况及其在高层建筑中的应用[J]. 土木工程学报, 1999(6): 3-10.
- [3] 何结兵, 洪宝宁, 丘国锋. 高速公路 CFG 桩复合地基褥垫层作用机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1663-1666.
- [4] 李志, 叶观宝, 徐超. 水泥土搅拌桩复合地基桩土应力比的对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 386-389.
- [5] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007(1): 1-13.
- [6] 庞旭卿. 路基黄土强度特性与地基承载力研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
- [7] 丁桂伶. 京沪高速铁路柔性荷载下 CFG 桩复合地基沉降及荷载分担特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京

---

交通大学, 2010.

- [8] 李宁, 韩焯. 复合地基中褥垫作用机理研究[J]. 岩土力学, 2000(1): 10-15.
- [9] 杨涛. 柔性基础下复合地基下卧层沉降特性的数值分析[J]. 岩土力学, 2003(1): 53-56.
- [10] 李宝平, 王智, 张玉. 关中地区重塑黄土强度特性三轴试验研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 78-82.
- [11] 曾新荣. 灰土挤密桩加固湿陷性黄土路基效果探究[J]. 绿色环保建材, 2021(12): 15-16.
- [12] 尚继红. 挤密石灰上桩的反应机理及加固效果分析[J]. 地基基础工程, 1994, 4(1): 25-30.