

DOI: 10.11779/CJGE2024S10031

成层地基微型桩加固浅基础的离心模型试验研究

周玮宁, 李子曦, 张 嘎

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 对比了成层地基微型桩加固浅基础与不加固情况的离心模型试验, 分析地基土和基础的变形破坏响应, 阐明复杂地层条件下微型桩的加固机理。结果表明微型桩显著减小了浅基础的沉降量。微型桩加固的主要范围在淤泥质粉质黏土层深度 4 m 上方。微型桩加固下, 地基的沉降更为规律均匀, 粉质黏土层与淤泥质粉质黏土层的分界层附近位移变化更缓和。微型桩加固下, 荷载影响区域深度减小, 粉质黏土层影响区域宽度的减小幅度大于淤泥质粉质黏土层。微型桩抑制荷载向下层地层的传导, 约束了下层地基的水平位移, 提高地基承载力。研究得出的规律为微型桩在现实工程中的应用提供参考。

关键词: 离心模型试验; 复杂地层; 微型桩; 承载力

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0081-05

作者简介: 周玮宁(2004—), 女, 本科生, 主要从事基础加固、微型桩相关方面的研究工作。E-mail: zhouwn22@mails.tsinghua.edu.cn。

Centrifugal model tests on micro-pile-reinforced shallow foundation in layered soils

ZHOU Weining, LI Zixi, ZHANG Ga

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The centrifugal model tests are conducted on the micro-pile-reinforced and unreinforced shallow foundations buried in complex formation during vertical loading. The deformations of soil base and the foundation are observed and compared for the micro-pile reinforcement effects. The results show that the micro-piles significantly reduce the settlement of shallow foundations. The main scope of the micro-pile reinforcement is above a depth of 4 m in the silty clay layer. Under the reinforcement of the micro-piles, the settlement of the foundation is more regular and uniform, and the displacement change near the boundary layer between the clay layer and the silty clay layer is more gentle. The depth of the load influence zone decreases if the micro-piles are used, and the width of the influence area of the clay layer is reduced by a greater extent than that of the silty clay layer. The micro-piles suppress the transmission of loads to the lower strata and constrain the horizontal displacement of the soils, thus increase the bearing capacity of shallow foundation. The rules obtained from this study may provide reference for the application of micro-piles in practice.

Key words: centrifugal model test; complex formation; micro-pile; bearing capacity

0 引 言

微型桩长细比较大^[1], 具有适应复杂土层、对原结构和基础扰动小、施工方便快捷等优点, 因此在边坡抗滑^[2]、建筑加固^[3]等领域有着越来越多的应用。20 世纪 90 年代开始, 国内外学者已进行了大量的现场测试、模型试验和数值模拟, 对微型桩的加固规律进行了较为系统的探究^[4]。例如, Borthakur 等^[5]确定了不同变量对微型桩群承载能力的影响程度, 并建立了微型桩群承载能力的经验方程。Tsukada 等^[6]引入了系统效应指数定量评估微型桩对地基承载能力的增强效果。Richards 等^[7]研究了桩间距及其荷载对微型桩的支护效果所产生的影响。

以上研究多基于单一地层开展, 而道路、隧道等实际工程中由于地下水、生物化学作用等影响, 往往为复合地层结构, 如珠海隧道工程项目^[8]。淤泥质粉质黏土与粉质黏土相比, 通常含水率较高、有机质含量较多, 力学性能弱, 对岩土工程结构的施工有很大影响。由于微型桩在工程中的应用历史比较短, 目前尚缺乏对其与成层地基相互作用及破坏模式等的系统研究, 也未能发展出成熟的计算理论和设计思路。离心模型试验中土工离心机产生的超重力场, 能够使模型达到与原型应力相等、变形和破坏机理高度相似的效果, 因而是广泛应用于岩土工程的模型试验方法^[9],

收稿日期: 2024-04-29

被用于探究边坡加固^[10]等。

本文考虑成层地基情况,进行了微型桩加固浅基础的离心模型试验,对比分析成层地基和浅基础的受力变形响应,探究微型桩与浅基础及土体的相互作用特性,阐明成层地基条件下微型桩的加固机理。

1 离心模型试验

1.1 试验设备

试验在清华大学土工离心机上进行,它是在小模型上施加离心惯性力实现重力场与原型等价的工作平台,有效半径为 2 m,可以施加的最大离心加速度为 250g。

在离心模型试验运行过程中,试验模型置于一个铝合金模型箱中。模型箱的内部尺寸(长宽高)为 60 cm×20 cm×50 cm,为观察模型变化,模型箱长度方向的侧壁为 40 mm 厚的有机玻璃板。

竖向加载通过液压伺服系统进行。该系统的加载能力为 10 kN,可实现 0.5~50 N/s 的加载速率。

1.2 试验模型

模型包括两层土层,以模拟实际工程中粉质黏土-淤泥质黏土多元地层。上层为粉质黏土层,厚度 100 mm,密度为 1.55 g/cm³,下层为淤泥质粉质黏土层,厚度为 350 mm,干密度为 1.45 g/cm³,控制其含水率大于液限(17%),为非饱和土样。其制样过程为:两层地基内部,按 5 cm 的厚度水平分层击实,每层施工完成后对已击实土表面划毛,再添加下一层,以减少单层地层内部分层。为保持试验过程初始含水率的稳定,试验过程中,模型上方采用塑料薄膜封口。在离心机运行过程中通过排风系统避免试验环境温度过高影响含水率。

多元地层形成后,设置外标志点,开挖基坑,将微型桩与浅基础埋入土层,最后放置托梁,为了形成随机分布的灰度差,便于地基不同位置的点位移的测量,在靠近有机透明玻璃一侧的土体中随机嵌入白色小石子。

1.3 试验方案

为探究成层地基中微型桩对浅基础的加固特性,本文设计了离心模型对比试验。“加固”方案采用微型桩加固浅基础;“未加固”方案则把微型桩和托梁移除,使加载板直接作用于空浅基础的中线,从而对浅基础进行加载试验。“加固”方案用的试验模型如图 1 所示。

试验模型大小为原型大小的 1/40。如图 1 所示,条形浅基础与微型桩均采用实心铝块和铝柱模拟,其长、宽、高、直径等尺寸参数见表 1。条形浅基础埋深为 17 mm,通过宽 70 mm、高 15 mm 的铝块模拟的

托梁与微型桩连接,不进行另外加固。微型桩桩距为 40 mm,为满足对称性,模型箱最外侧靠近箱壁的微型桩采用半桩模拟。

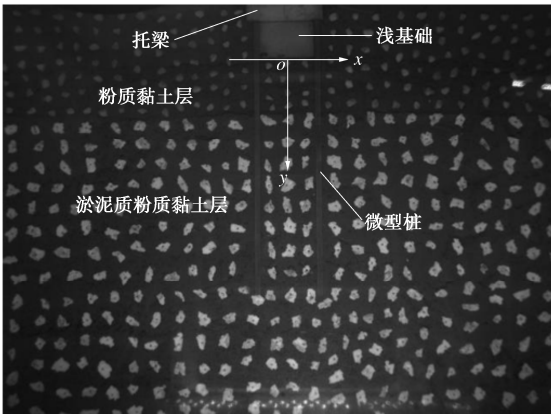


图 1 “加固”方案试验模型

Fig. 1 Model photo of reinforcement scheme

1.4 试验过程

未加固与加固方案的试验过程相同。加载的过程分为两个阶段。第一阶段,对模型施加目标为 40g 的离心加速度,每次增加 5g 并等待土体变形不再增长后继续增加离心加速度。达到目标离心加速度后,稳定 10 min,开启第二阶段。以每级 100 N 的荷载增速,逐级对基础施加竖向荷载,施加后稳定一段时间,确保荷载引起的地基沉降趋于稳定,最大荷载为 4000 N。

表 1 原型与模型尺寸对应表

Table 1 Specific parameters of prototype and model

参数	原型/m	模型/mm
条形基础宽度	2.00	50.0
条形基础高度	1.33	33.3
条形基础埋深	0.668	16.7
微型桩桩径	0.20	5.0
微型桩桩长	10	250.0
微型桩桩距	1.6	40.0
微型桩与条形基础边距	0.232	5.8
粉质黏土层厚度	4	100.0
淤泥质粉质黏土层厚度	14	350.0
托梁(铝)宽度	2.868	71.7
托梁高度	0.668	16.7
托梁埋深	0.0	0.0

1.5 测量

试验过程中,竖向荷载大小通过荷载传感器实时测量。地基的变形情况采用激光位移传感器测量,传感器在试验前均已完成标定。

离心机吊篮内壁上的高精度相机可以采集试验过程模型图像,利用非接触图像测量系统(GIPS),可以分析图片得到模型任意一点的沉降过程^[11]。根据离心模型试验中的相似比例尺,40g 离心加速度下,模

型的尺寸应设置为相应原型尺寸的 $1/40$ 。为换算成与原型相等的位移与荷载, 应将模型位移乘以 40, 模型荷载乘以 40^2 (即 1600)。下文展示的试验结果均已换算为原型尺寸。

本文规定基础底部中心为原点、向右和向下为 x 轴和 y 轴的正方向, 建立直角坐标系 (如图 1)。

2 基础承载力

“加固”方案和“未加固”方案中基础的荷载-沉降关系如图 2 所示。可以看出在压力达到 0.8 MN 前的初始加载段, 未加固情况下浅基础的沉降量与加固情况下相近。达到 0.8 MN 后, 微型桩加固方案的压力-沉降曲线的斜率在同一压强条件下相较于未加固方案明显较小, 且随荷载的增加, 加固与未加固情况沉降量之差增大。与未加固方案相比, 相同荷载下加固后方案的基础沉降量显著降低。这一结果表明, 微型桩对提升基础承载力具有明显作用。

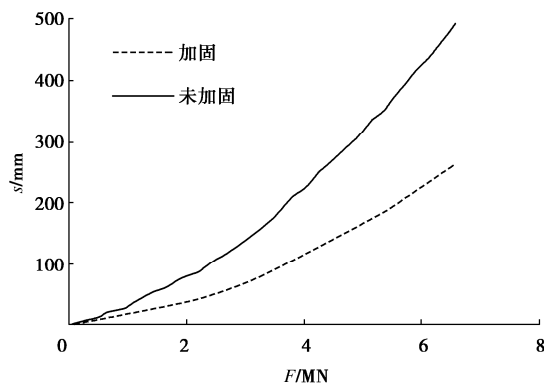


图 2 基础荷载-位移关系

Fig. 2 Relationship between load and displacement

3 地基变形

3.1 位移分布

图 3, 4 分别展示了微型桩未加固及加固方案, 不同荷载不同深度的地基沉降分布曲线。由于模型具有对称性, 图 3, 4 中给出了位于基础中心左侧的加载点的变化情况。同一高程下, 地基沉降在基础中心处达到最大值, 随与浅基础的水平距离增大而减小。伴随施加的荷载增大, 地基沉降量也增大, 且荷载越大, 中心与两边的竖直位移差距越显著。

$y/B=1$ 是粉质黏土层与淤泥质粉质黏土层的分界线, 当 $y/B<1$ 时位于粉质黏土层, 当 $y/B>1$ 时位于淤泥质粉质黏土层。未加固方案下, 淤泥质粉质黏土层深度 4 m 上方时, 以浅基础边界为界线, 地基沉降变化斜率出现突增, 加固方案下, 浅基础下方及外侧的

沉降变化斜率之差减小, 而淤泥质粉质黏土层深度 4 m 下斜率增幅不明显, 这表明微型桩对浅基础正下方土体的加固效果最显著, 且加固的主要范围在淤泥质粉质黏土层深度 4 m 上方, 与粉质黏土层厚度相同。

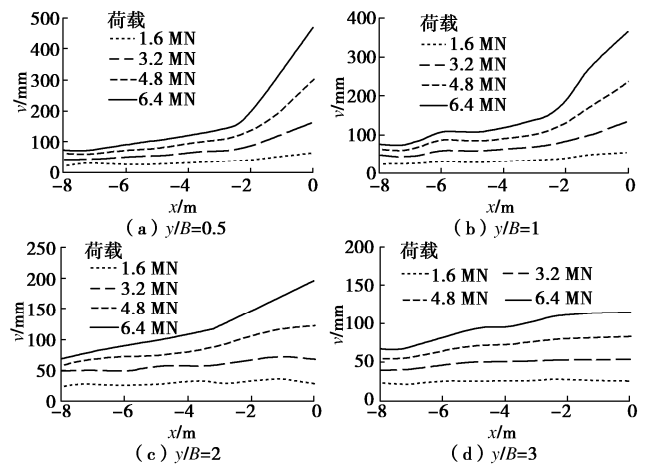


图 3 未加固方案地基沉降分布 (B , 浅基础宽度)

Fig. 3 Settlement distribution in horizontal direction of soils for unreinforced scheme (B , breadth of shallow foundation)

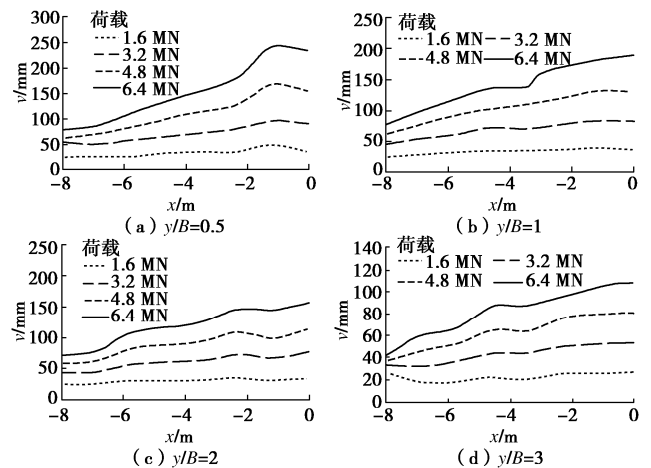


图 4 加固方案地基沉降分布 (B , 浅基础宽度)

Fig. 4 Settlement distribution in horizontal direction of soils for reinforced scheme (B , breadth of shallow foundation)

图 5, 6 分别给出了微型桩未加固与加固方案下, 不同荷载不同水平位置处, 地基沉降随深度的变化情况。同一水平位置处, 地基沉降随深度增大而增大, 随荷载增大, 模型上下两端的竖直位移差距更显著。相同荷载下, 地基沉降曲线接近线性变化, 但在粉质黏土层与淤泥质粉质黏土层内部的变化斜率不同, 且在二者的分界层 ($y=2$ m, 图中水平参考线) 附近, 地基沉降随深度的变化速度明显小于土层内部。在未加固方案下, 模型中心与两端处沉降曲线斜率两次改变时的深度均不同, 中心的过渡深度 (斜率两次改变处的深度差) 大于两端。在加固方案下, 中心与两端的过渡深度相近, 且大致沿分界层对称。这表明微型

桩加固减小了因两层地层密度等性质的差异带来的位移的变化，整体上使得地基的变形更为均匀。

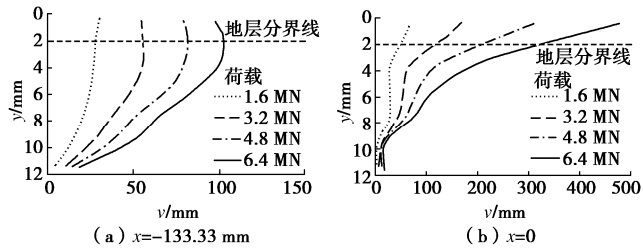


图 5 未加固方案不同荷载下地基沉降竖直分布

Fig. 5 Vertical distribution of soil settlement for unreinforced foundation under different loading levels

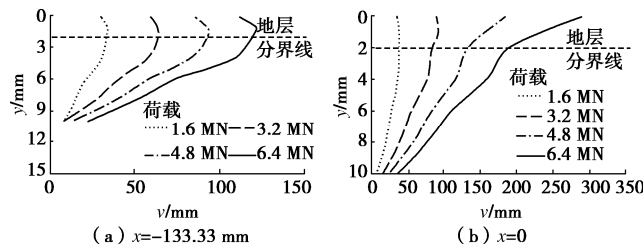


图 6 加固方案不同荷载下地基沉降竖直分布

Fig. 6 Vertical distribution of soil settlement for reinforced foundation under different loading levels

3.2 荷载影响区域

本文规定沉降大于 20 mm（相当于基础宽度的 1%）的地基部分为受加载影响显著的区域（荷载影响区域）。基于此标准，分析不同高程处地基沉降分布，得到了图 7，8 中的“加固”和“未加固”方案的荷载影响区域。从图 7，8 中可以对比荷载对地基土体的影响程度及微型桩加固效果。

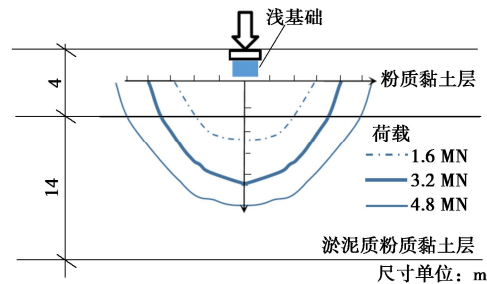


图 7 未加固方案荷载影响区域

Fig. 7 Loading influence zones for unreinforced foundation

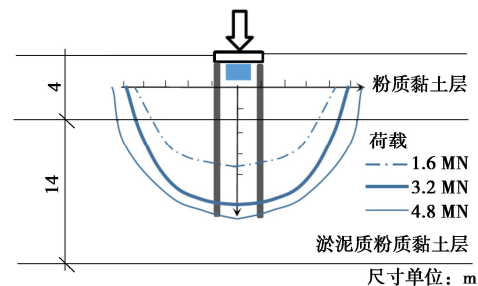


图 8 加固方案荷载影响区域

Fig. 8 Loading influence zones for reinforced foundation

结果表明，微型桩加固与未加固情况下，荷载影

响区域均近似半椭圆形状。随着荷载的增加，影响区域的宽度与深度均增大。

未加固方案下，相同的荷载增量引起的影响区域的深度和宽度的增加相近。加固方案受荷载显著影响土体的水平宽度与深度均减小，且伴随荷载的增大，相同荷载增量下影响区域的扩展减慢，微型桩加固效果越明显。且微型桩加固下，与淤泥质粉质黏土层相比，粉质黏土层中影响区域的宽度减小更为明显。

4 微型桩加固机理

图 9 给出了“加固”与“未加固”方案地基水平位移的水平分布对比图。地基水平位移整体方向为以浅基础为中心向外，从两端到中心呈先增加后减少的趋势。微型桩加固下，粉质黏土层水平位移大于未加固方案，而分界层及淤泥质黏土层中水平位移整体小于未加固方案，微型桩内侧淤泥质黏土层的水平位移显著减小，且变化较为平缓，说明微型桩抑制上层地层将荷载传导至力学性能较弱的下层地层，约束了下层地基的水平位移，从而减小荷载影响区域，提高地基承载力。

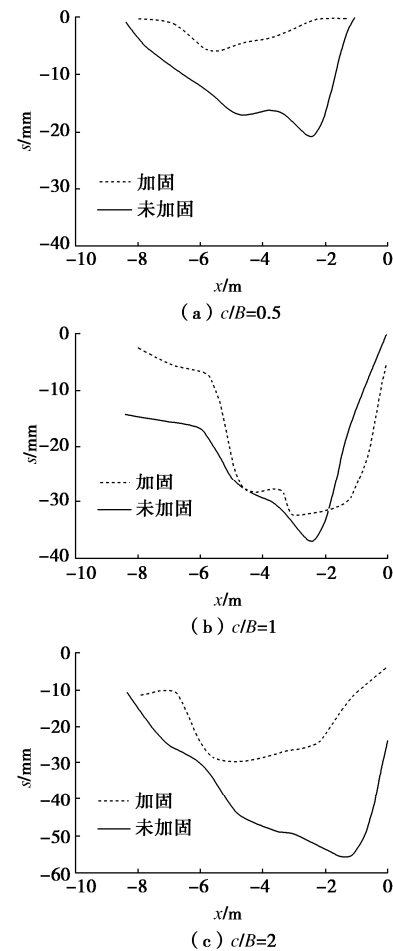


图 9 加固与未加固方案地基水平位移分布（荷载：6.4 MN）

Fig. 9 Horizontal distribution of horizontal displacements for reinforced and unreinforced foundations (load: 6.4 MN)

5 结 论

本文考虑成层地基情况,进行了粉质黏土-淤泥质黏土多元地层中未加固与加固离心试验,观测并对比了加固和不加固条件下基础和多元地层的变形响应,分析了成层地基条件下微型桩的加固规律和机理。主要得出以下 4 点结论。

(1) 微型桩对浅基础的加固效果明显,地基变形的变化速度减小,整体变形更为均匀,微型桩对浅基础正下方土体的加固效果最显著,其加固主要范围在淤泥质粉质黏土层深度 4 m 上方。

(2) 微型桩加固下,地基的沉降更为均匀,粉质黏土层与淤泥质粉质黏土层的分界层附近位移变化更缓和。

(3) 微型桩加固下,荷载影响区域深度减小,随荷载增加扩张的速度减小,粉质黏土层影响区域宽度的减小幅度大于淤泥质粉质黏土层。

(4) 微型桩抑制荷载向下层地层的传导,约束了下层地基的水平位移,从而减小荷载影响区域,提高地基承载力。

参考文献:

- [1] BRUCE D A, DIMILLIO A F, JURAN I. Introduction to micropiles: an international perspective[M] //Geotechnical Special Publication, ASCE, 1995: 1-26.
- [2] YAN J, LIU X, ZHANG Z, et al. Model test of micro-pile group reinforcing high steep landslide[J]. Applied Sciences, 2022, **12**(19): 10017.
- [3] ELSAWWAF A, EL SAWWAF M, FAROUK A, et al. Restoration of tilted buildings via micropile underpinning: a case study of a multistory building supported by a raft foundation[J]. Buildings, 2023, **13**(2): 422.
- [4] 李子曦, 罗方悦, 张 嘎. 微型桩加固浅基础的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 56-59. (LI Zixi, LUO Fangyue, ZHANG Ga. Centrifugal model tests on micro-pile-reinforced shallow foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 56-59. (in Chinese))
- [5] BORTHAKUR N, DEY A K, et al. Evaluation of group capacity of micro-pile in soft clayey soil from experimental analysis using SVM-based prediction model[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(3): 04020008.
- [6] TSUKADA Y, MIURA K, TSUBOKAWA Y, et al. Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles[J]. Soils and Foundations, 2006, **46**(3): 367-376.
- [7] RICHARDS T D Jr, ROTHBAUER M J. Lateral loads on pin piles (micropiles)[C]// GeoSupport 2004. Orlando, 2004.
- [8] 董睿文. 超大直径泥水平衡盾构法在珠海淤泥质粉质黏土地层中的泥水处理技术提升试验研究[J]. 建筑监督检测与造价, 2023, **16**(3): 17-23. (DONG Ruiwen. Experimental study on the improvement of slurry treatment technology by extra-large diameter slurry pressure shield method in Zhuhai muddy silty clay layer[J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2023, **16**(3): 17-23. (in Chinese))
- [9] 王年香, 章为民. 土工离心模型试验技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Geotechnical Centrifuge Model Test Technology and its Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [10] LIU S J, LUO F Y, ZHANG G. Centrifuge model tests on pile-reinforced slopes subjected to drawdown[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, **12**(6): 1290-1300.
- [11] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2009, **42**(1): 87-96.

(编校: 孙振远)