

DOI: 10.11779/CJGE2021S2013

# 微型桩加固浅基础的离心模型试验研究

李子曦, 罗方悦, 张 嘎\*

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 微型桩被广泛应用于建筑物加固等工程领域。进行了微型桩加固浅基础与不加固情况的加载离心模型试验, 观测并对比了加固和不加固条件下基础和地基的变形响应, 分析了微型桩加固浅基础的规律。结果表明微型桩将荷载传导至持力层, 承担的荷载占比在 75%以上。微型桩显著减小了浅基础的沉降量且使得地基变形更均匀。微型桩对地基沉降的影响范围主要在浅基础宽度的 1.5 倍范围内。与未加固方案相比, 微型桩加固方案的荷载影响区域深度偏小。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; 微型桩; 浅基础; 加固; 承载力; 变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0056-04

**作者简介:** 李子曦(2001—), 男, 本科生, 主要从事基础工程方面的研究。E-mail: lizixi20@mails.tsinghua.edu.cn。

## Centrifugal model tests on micro-pile-reinforced shallow foundation

LI Zi-xi, LUO Fang-yue, ZHANG Ga

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Micro-piles are widely used in geotechnical projects such as foundation reinforcement. The centrifugal model tests are conducted on the micro-pile-reinforced and unreinforced shallow foundations during vertical loading. The deformations of the foundation and soil base are observed and compared for the micro-pile reinforcement effect. The test results show that the micro-piles transfer the vertical loads to the bearing stratum. The micro-piles bear the loads with a proportion of more than 75%. The micro-piles significantly decrease the settlement of shallow foundation and cause the soil deformation to a more uniform distribution. The micro-piles influence the soil deformation within a zone with a 1.5 times the width of the shallow foundation. The depth of the load influence zone decreases if the micro-piles are used. The new findings may provide references for the applications of micro-piles in practice.

**Key words:** centrifugal model test; micro-pile; shallow foundation; reinforcement; bearing capacity; deformation

## 0 引 言

微型桩(又名树根桩)一般指桩径小于 300 mm, 长细比大于 30 的工程桩。因其有施工快, 对原建筑影响小, 适用于狭窄作业区, 布置可直可斜等优势, 被广泛应用于建筑物和边坡加固等工程领域<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 已经对微型桩加固模式和应用进行了试验和数值模拟研究。Borthakur 等<sup>[3]</sup>通过 SVM 模型试验研究了微型桩群的承载特性, 并给出了基于试验结果微型桩群承载的经验公式。Zhang<sup>[4]</sup>研究了微型桩加固中桩土基础三者相互影响的特性。微型桩抗震是近年来研究热点, 已采用三维有限元分析、动力试验等手段研究了震动条件下微型桩的加固效果<sup>[5]</sup>。还有学者通过模型模拟试验等手段研究了微型桩抗拔与水平承载力特性<sup>[6]</sup>。另外, 环境模拟试验等手段也用来研究施工方式对微型桩加固效果的影响<sup>[7]</sup>。由于微型桩工程应用起步较晚, 在微型桩与原基础的相互作用、

微型桩加固机理规律及影响因素等方面尚缺乏深入研究。离心模型试验通过对模型施加高离心加速度使其与原型应力相等, 变形相似, 已经成为岩土工程的主流模型试验手段。离心模型试验于 19 世纪 60 年代起步, 不断发展, 目前已广泛应用于岩土工程研究各领域, 如抗震分析<sup>[8]</sup>、边坡加固<sup>[9]</sup>等。本文进行了微型桩加固浅基础的离心模型试验, 测得了荷载作用下基础和地基的变形过程, 分析了微型桩的加固规律。

## 1 离心模型试验

### 1.1 试验设备

试验的主要设备是清华大学 50 gt 土工离心机。

基金项目: 清华大学自主科研计划课题; 国家自然科学基金重点项目(52039005)

收稿日期: 2021-08-15

\*通信作者(E-mail: zhangga@tsinghua.edu.cn)

离心机有效半径为 2 m, 可施加的极限离心加速度为 250g。试验采用内部长 60 cm、宽 20 cm、高 50 cm 的铝合金模型箱。模型箱在长度方向上有个侧面为厚有机透明玻璃, 用以观察、记录试验过程中模型的变形破坏过程。在试验运行过程中, 本试验采用液压伺服系统通过宽 50 mm 的加载板实现竖向加载。该系统可以对加载过程进行精准控制, 最大施加荷载 10 kN。

## 1.2 试验方案

为了研究微型桩对浅基础加固的作用, 本文主要进行两组离心模型试验进行对比。第一组对浅基础进行加载试验, 称之为“未加固”方案; 第二组对微型桩加固浅基础进行加载试验, 称之为“加固”。图 1 给出了微型桩加固浅基础的试验模型, 未加固方案中把微型桩和托梁移除, 加载板直接作用于基础的中线。

两组试验的试验过程相同。首先将模型放于离心机吊篮上, 之后逐渐增加离心加速度至 30g, 期间每间隔 5g 稳定离心加速度一段时间, 使地基变形基本稳定。在离心加速度达到 30g 并稳定 10 min 后, 对基础分级施加竖向荷载。每级荷载增量为 10 kPa, 施加后稳定一段时间待地基沉降稳定。试验全程录像。

## 1.3 试验模型

如图 1 所示, 条形浅基础采用宽 50 mm、高 33 mm 的铝块模拟, 埋深为 50 mm。微型桩采用直径 5 mm、长 300 mm 的实心铝柱模拟, 桩距为 67 mm 并插入持力层。微型桩通过托梁与浅基础共同承载, 托梁由宽 70 mm、高 15 mm 的铝块模拟。原型的大小为模型大小的 30 倍。需要说明的是, 根据对称性, 有机玻璃侧的微型桩采用半桩来模拟。

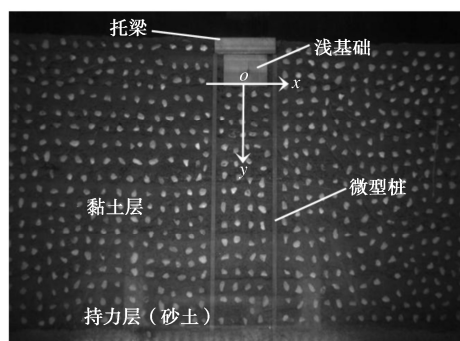


图 1 微型桩加固浅基础模型照片

Fig. 1 Photo of model for reinforced shallow foundation

地基模型包含厚 300 mm 的黏土层及其下的持力层 (砂土)。黏土层由粉质黏土构成, 其液限为 30, 塑限为 14, 颗粒相对质量密度为 2.7。控制其含水量为 15%、干密度为 1.6 g/cm<sup>3</sup>。砂土为标准砂, 干密度为 1.6 g/cm<sup>3</sup>。采用分层击实的方法制作地基。黏土层分 6 层, 砂土层分 2 层分别击实。地基制样完成后, 插入微型桩, 埋入浅基础并放置托梁, 并在黏土层侧面随机嵌入白色小石子, 以形成随机分布的灰度差,

从而通过相关分析进行地基位移的测量。图 1 给出了制样完成后的模型照片。

## 1.4 测量

加载系统中包含荷载传感器, 可以实时测量荷载大小。用荷载除以基础的面积可以得出施加的压强, 其模型与原型的数值相等。本试验采用激光传感器测量基础的沉降过程。试验前传感器均进行了标定。

采用地基模型的照片系统, 通过相关分析可以测得地基任意一点位移的变化过程<sup>[10]</sup>。根据离心模型试验相似律, 模型的尺寸和位移乘以离心加速度 (30) 即为相应的原型尺寸和位移。下文中给出的试验结果均基于原型尺寸给出。

本文以基础底部中心为原点建立直角坐标系 (图 1), 规定 x 轴和 y 轴的正方向分别为向右和向下。

## 2 承载力分析

图 2 (a) 展示了未加固和加固情况下基础的荷载-沉降关系曲线。从图中看出, 未加固情况下浅基础的沉降量随荷载的增加而近似线性增加, 且沉降较大。微型桩加固情况下, 基础的沉降量变化与未加固情况不同, 表现为两个阶段。在初始加载段, 沉降随着荷载的增加, 增加量很小; 当压强达到 120 kPa 后进入第二阶段, 此时沉降-荷载关系曲线的斜率增大。在同一压强条件下, 微型桩加固后的基础沉降量明显小于未加固方案, 说明微型桩加固效果显著。

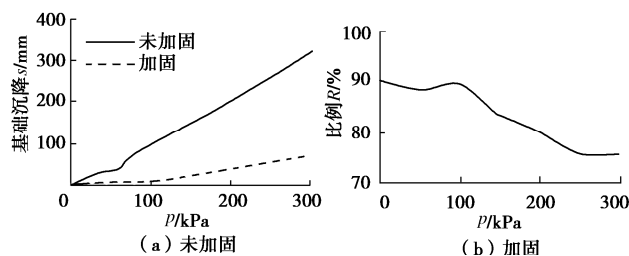


图 2 微型桩加固基础承载特性

Fig. 2 Bearing capacities of micro-pile-reinforced foundation

假设浅基础与微型桩的承载力无耦合效应, 可以认为, 微型桩承担的压强为同一沉降量对应的加固和未加固情况下压强之差。图 2 (b) 给出了基于上述方法算得的微型桩承载占微型桩加固浅基础承载力的比例。在初始加载阶段, 基础所受的荷载主要由微型桩承担, 大约占 90%。原因是微型桩的持力层承载力较高, 在沉降很小的情况下微型桩可以提供较大的承载能力, 而浅基础的承载能力发挥需要相对较大的沉降。

随着荷载的增加, 基础的沉降随之增加, 浅基础的承载能力也逐渐发挥, 微型桩承担荷载的比例也逐渐下降, 最终稳定在 75% 作用。这表明, 当微型桩的持力层承载力较高时, 微型桩承担了大部分荷载, 表现出显著的加固效果。

### 3 地基变形分析

#### 3.1 位移分布

图3给出了竖向压强300 kPa时地基位移的矢量图。从图中可以看出,在微型桩加固和未加固条件下,地基的位移均以竖直向的沉降为主,未发生明显的水平位移。与未加固方案对比,微型桩加固基础的地基位移显著减小,分布更为均匀。

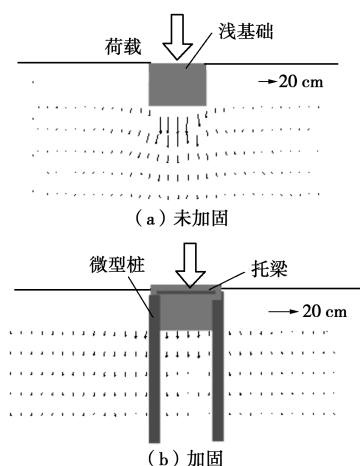


图3 加固和未加固方案的地基位移矢量图

Fig. 3 Displacement vectors of soil base for reinforced and unreinforced foundations

图4进一步给出了微型桩加固条件下,不同压强不同深度的地基沉降分布。根据对称性,图中的分布只给出加载点的左半部分。地基沉降总体上随荷载的增大而增大,随着离基础的距离增大而减小。地基沉降均呈现出在基础中心处最大、向两边逐渐减小的分布规律,且荷载越大,该规律越明显。

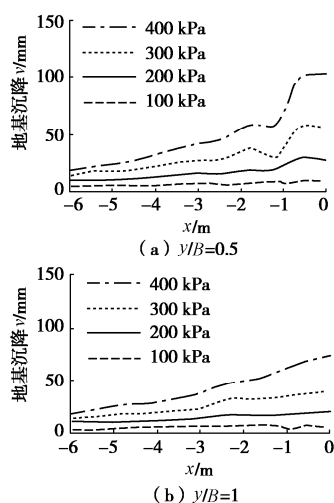


图4 加固方案典型高程的地基沉降水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of soil settlement for reinforced foundation

#### 3.2 荷载影响区域

为了深入分析荷载对地基变形的影响规律,本文

规定地基沉降超过基础宽度的1.5% (22.5 mm) 的土体为受到荷载的显著影响,并以此确定荷载的影响区域。根据不同深度出地基沉降的分布曲线(图4),分别确定微型桩加固与未加固基础的荷载影响区域。

图5直观展示出了荷载影响区域随荷载的变化。从图中可以看出,荷载影响区域总体呈椭圆形,并且随着荷载的增加而逐渐向水平和深度两个方向扩展。这表明荷载增大后,对地基变形影响也随之增强。

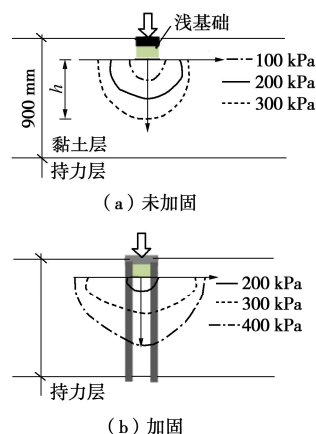


图5 荷载影响区域

Fig. 5 Load influence zones

### 4 微型桩加固特性

图6对比了未加固和微型桩加固方案的荷载影响区域。可以看出,微型桩使得荷载影响区域的深度减小,而宽度增大。这说明,微型桩由于与周围土体摩擦等作用扩大了地基上层的受载范围,这与将部分荷载传导至持力层共同提高了基础的承载力,并减小了土体受载的深度。

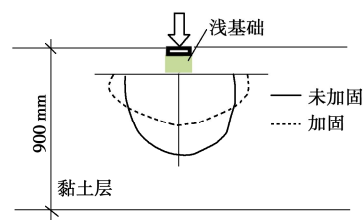


图6 300 kPa 压强作用下加固和未加固方案的荷载影响范围

Fig. 6 Load influence zones of various foundations

图7给出了荷载影响区域深度和宽度随压强增大的发展过程。未加固方案的荷载影响区域深度和宽度均随压强增加而近似线性增加,而加固方案的荷载影响区域深度和宽度随压强增大呈现出先缓慢增加后明显增加两个阶段。这与两个方案的基础荷载-沉降关系曲线的特性是一致的。

在加载过程中,加固方案的荷载影响区域的深度始终小于未加固方案。在荷载较小时,加固方案的荷载影响区域的宽度小于未加固方案,但在加载过程中

增长较快,并在压强为 260 kPa 时超过了未加固方案。

图 8 对比了加固与未加固方案的地基沉降水平分布。加固和未加固的地基沉降在基础附近差别较大,该差别随着离基础轴线的距离增大而减小,到约 1.5 倍浅基础宽度时已经很小。这说明微型桩对地基沉降的影响范围主要在浅基础宽度的 1.5 倍范围内。

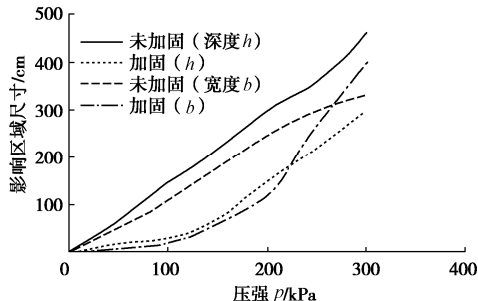


图 7 荷载影响区域随荷载的变化

Fig. 7 Variation of load influence zone with increasing pressure

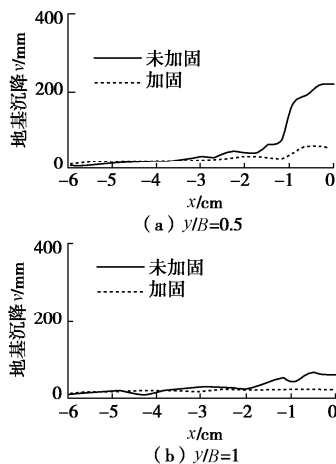


图 8 加固与未加固方案的地基沉降水平分布

Fig. 8 Horizontal distribution of soil settlement for reinforced and unreinforced foundations

## 5 结 论

(1) 微型桩将荷载传导至持力层,其承担的荷载占比在 75%以上,加固效果显著。

(2) 微型桩显著减小了浅基础的沉降量,使得地基的变形更为均匀,且明显限制了地基的水平位移。

(3) 微型桩对地基沉降的影响范围主要在浅基础宽度的 1.5 倍范围内。

(4) 与未加固方案相比,微型桩加固方案的荷载影响区域深度偏小;影响区域宽度在荷载较小时偏小但增长速度较快。荷载压强达到 260 kPa 时,微型桩加固方案的荷载影响区域宽度超过了未加固方案。

## 参考文献:

[1] 孙书伟, 朱本珍, 马惠民, 等. 微型桩群与普通抗滑桩抗滑特

性的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1564 - 1570. (SUN Shu-wei, ZHU Ben-zhen, MA Hui-min, et al. Model tests on anti-sliding mechanism of micropile groups and anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1564 - 1570. (in Chinese))

[2] JURAN H, BENSLIMANE A, BRUCE D A. Slope stabilization by micropile reinforcement[J]. Landslides, 1996: 1718 - 1726.

[3] BORTHAKUR N, DEY A K. Evaluation of group capacity of micropile in soft clayey soil from experimental analysis using SVM-based prediction model[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3): 4020008.

[4] ZHANG S J. A mechanism analysis of pile-soil interaction of micro-pile in building heightening and transformation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501/502/503/504: 258 - 262.

[5] TURAN A, HAFEZ D, EL NAGGAR M H. The performance of inclined secant micro-pile walls as active vibration barriers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 55: 225 - 232.

[6] 龚 健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3541 - 3546. GONG Jian, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Prototype testing study on micropiles under lateral loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3541 - 3546. (in Chinese))

[7] HUANG F Y, SHAN Y L, HE L F, et al. The mechanical behavior of predrilled-hole concrete micro-pile in integral abutment jointless bridges (IAJBs)[C]//2020 International Conference on Intelligent Transportation(ICITBS), Vientiane, 2020: 399 - 404.

[8] WANG L P, ZHANG G. Centrifuge model test study on pile reinforcement behavior of cohesive soil slopes under earthquake conditions[J]. Landslides, 2014, 11(2): 213 - 223.

[9] 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.

[10] 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: 胡海霞)