

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.04.005

柔性楔形桩复合地基承载特性试验研究

汤磊华, 何杰, 王亚涛, 高建喜, 王忍

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了研究夯实水泥土楔形桩复合地基在粉质黏土地基中的承载特性, 对碎石垫层作用下, 3组不同楔角的夯实水泥土楔形单桩复合地基和1组等直径单桩复合地基进行竖向静载对比试验。分析复合地基中桩顶沉降、桩周土沉降、桩-土平均沉降差随荷载变化的规律, 以及桩的荷载传递规律。试验结果表明: 在相同地质条件下, 夯实水泥土楔形桩承载性状比等直径桩好, 且能更好地调节桩土之间的沉降; 此外, 桩身轴力的分布与桩体的楔角有关, 在合理楔角范围内, 桩体分担基础上部的荷载随楔角的增大而增加; 土体距离桩心一定范围内的沉降曲线呈“勺子”型趋势变化。

关键词: 楔形桩; 合理楔角; 桩身轴力; 桩周土; 柔性桩复合地基; 沉降

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)04-0020-06

Experimental Study on Bearing Behavior of Composite Foundation with Flexible Tapered Column

Tang Leihua, He Jie, Wang Yatao, Gao Jianxi, Wang Ren

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: For the study of bearing performance of composite foundation with rammed soil-cement piles in silty clay ground, conducted vertical static load contrast experiments under the action of the gravel cushion on three groups of composite foundation with single rammed soil-cement tapered pile of different wedge angle and a group of composite foundation with single rammed soil-cement cylindrical pile, respectively. Analyzed the variation law of pile top settlement, soil around pile settlement and average pile-soil settlement difference with load and the load transferring law of pile. The test results show: Under the same geological condition, the bearing behavior of rammed soil-cement tapered pile is better than that of cylindrical pile, and the tapered pile can better adjust the settlement between pile and soil, in addition the distribution of axial force is relative to the wedge angle of pile, and in rational wedge angle range, the pile sharing load of upper foundation increased with increment of wedge angle; In a certain scope of soil to pile core, the settlement curve appeared the varying tendency of “spoon” type.

Keywords: tapered pile; rational wedge angle; axial force; soil around pile; flexible pile composite foundation; settlement

1 研究背景

柔性桩复合地基被广泛应用于加固软土地基, 其中, 水泥土桩是一种较典型的柔性桩。根据施工工

艺不同, 水泥土桩又分为水泥土搅拌桩和夯实水泥土桩。针对该技术, 国内外学者开展了较深入的研究。其中, G. A. Lorenzo 等^[1]基于渗透原理, 考虑了桩周土中孔隙水压力对水泥土桩固化的影响, 推导

收稿日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108176), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2014B425, CX2015B571)

作者简介: 汤磊华(1990-), 男, 江西抚州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为地基处理, E-mail: tlh0321@163.com

出了水泥土桩固化与桩周土固结相互作用下, 桩的荷载传递解析算式及水泥土桩的承载力估算公式; Yin J. H.等^[2]对水泥土桩复合地基进行了模型试验研究, 探讨了水泥土桩复合地基的沉降与固结特性; 郭忠贤等^[3-7]自2000年以来针对夯实水泥土桩及其复合地基展开了一系列的研究, 得出夯实水泥土桩为摩擦桩特性, 桩身轴力沿深度逐渐衰减等结论。近年来, 何杰等^[8-11]基于对柔性桩复合地基、楔形桩工作特性^[12-17]的归纳与总结, 提出了采用夯实水泥土楔形桩复合地基方法加固软土地基, 并为之开展了较为深入的研究, 推导出复合地基中桩-桩、桩-土及土-土相互作用柔度系数计算公式, 提出了桩-土-垫层共同作用的复合地基分析方法^[18]。研究表明, 在相同的地质条件下, 楔形桩桩侧摩阻力比等直径桩桩侧摩阻力大, 且桩侧摩阻力与楔形桩侧壁倾角成正比; 楔形桩侧壁更有利于发挥桩-土共同作用, 提高单桩承载力, 降低桩基沉降。

为进一步揭示楔形柔性桩复合地基的工作特性, 本文以夯实水泥土楔形桩复合地基为研究对象, 进行夯实水泥土楔形桩复合地基与夯实水泥土圆柱形桩复合地基的室内大比例对比模型试验, 探讨复合地基中桩身轴力分布、荷载-沉降及桩周土的沉降规律。以期提高人们对夯实水泥土楔形桩复合地基的认识, 并为楔形桩复合地基的相关研究与工程应用提供参考依据。

2 模型试验

模型试验在钢制模型箱中进行, 模型箱长、宽、高分别为2.0, 2.0, 2.5 m。试验用土在株洲市某工地进行现场采取的粉质黏土层, 其粒径控制在8 mm以内。填土在实验室中经加水充分拌合后, 其含水率控制在35%左右, 并分层回填至钢制模型箱中夯实, 控制每层填土松铺厚度约为20 cm, 直至模型箱全部回填完。为避免因水分蒸发而影响试验结果, 在回填土的表面铺上一层塑料薄膜, 密封养护28 d后, 经土工试验测得填土的物理力学参数如表1所示。

表1 填土的物理力学参数

含水率 w / %	最大干密度 ρ_d / (g · cm ⁻³)	液限含水率 w_l / %	塑限含水率 w_p / %
30.8	1.89	30.5	19.3
压缩模量 E_s / Mpa	内黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	
2.1	13.3	5.32	

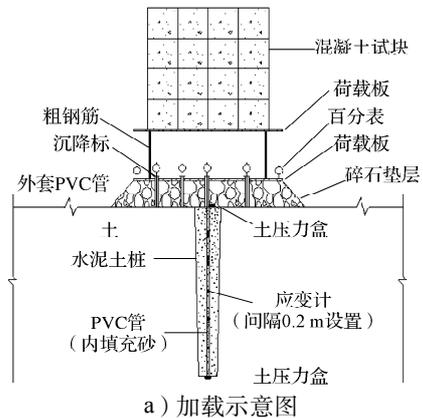
夯实水泥桩沉桩在填土完成28 d后进行。将粉质黏土自然烘干后, 并碾磨至较小颗粒。再将细颗

粒土与一定掺量的水泥(质量比为12%)拌合均匀, 然后加水搅拌成水泥土混合料。经室内试验测得水泥土的物理力学参数如表2所示。沉桩过程中, 先用凡士林涂摸均匀后, 采用静压方式将木桩模型沉入土体中, 将木桩底达到设计标高后, 静置一段时间, 然后将木桩慢速旋转抽出; 再将贴有应变计的PVC管竖直放入孔中, 并保证管中心与孔中心重合; 最后按相同的夯实度(95%), 将一定体积的水泥土混合料分层填入桩孔中并夯实, 直至桩顶, 再将细砂灌入PVC管内且封顶。桩体施工完成后, 进行自然养护。

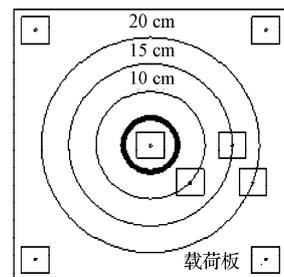
表2 水泥土的物理力学参数

水泥等级	水泥掺入比 / %	含水率 / %	干密度 / (g · cm ⁻³)	90 d 弹性模量 / MPa
32.5	12	19	1.99	289

载荷试验在成桩28 d之后进行, 加载示意图如图1a所示。首先, 在地基表面铺上一层薄细沙作为找平层, 并在距桩中心0, 10, 15, 20 cm的位置放置沉降标, 如图1b所示; 然后, 在地基表面设置碎石垫层, 垫层厚度为20 cm, 碎石垫层的力学指标见表3。最后, 在垫层上架设尺寸为0.5 m × 0.5 m的刚性荷载板, 并在荷载板的4个对角布置百分表, 将连接应变计的导线的另一端连接至数据采集仪(DH3815N静态测试系统)。



a) 加载示意图



b) 测点布置图

图1 模型试验示意图

Fig. 1 Sketch of model test

表3 碎石垫层物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical properties of gravel cushion

天然重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对密度 ρ	孔隙比 e	抗剪强度 τ MPa	内摩擦角 φ ($^\circ$)
19.9	2.71	0.61	0.23	38

为对比研究夯实水泥土楔形桩与夯实水泥土圆柱形桩，以及不同楔角的夯实水泥土楔形桩的工作特性，本文共进行4种工况的模型试验。试验荷载共分8级加载，采用快速维持载法。试验工况与模型参数如表4所示。

表4 试验工况与桩模型参数

Table 4 Experimental condition and model pile parameters

工况 编号	桩体 类型	桩体 直径/cm	楔角/ ($^\circ$)	桩长/m	垫层变形模量/ MPa
1#	等截面桩	$D=7.5$	0	1.2	14.2
2#	楔形桩	$D_{\text{上}}=7.1$	0.5	1.2	
		$D_{\text{下}}=5.0$			
3#	楔形桩	$D_{\text{上}}=10$	1.2	1.2	
		$D_{\text{下}}=5.0$			
4#	楔形桩	$D_{\text{上}}=11.3$	1.5	1.2	
		$D_{\text{下}}=5.0$			

3 试验结果与分析

3.1 桩顶荷载-沉降曲线

通过对布置于桩顶沉降标的数据进行整理，可得4种工况下桩顶的荷载-沉降关系，如图2所示。

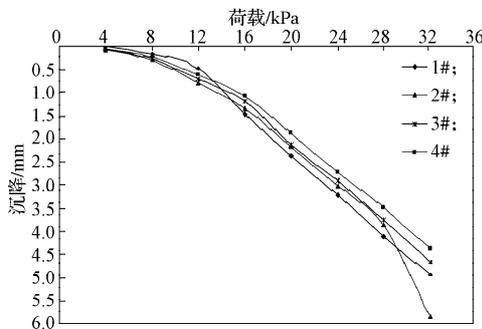


图2 桩顶荷载-沉降曲线

Fig. 2 Load-settlement curve of pile top

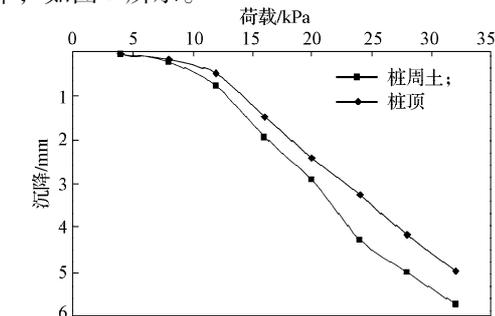
由图2可看出：1) 随着荷载的增加，桩顶的沉降不断增大，荷载-沉降曲线为缓变形曲线。2) 在较小荷载（小于13 kPa）作用下，工况1#的桩顶沉降最小，工况2#的桩顶沉降最大，工况3#的桩顶沉降大于工况4#的桩顶沉降。3) 当荷载增大到约13 kPa之后，夯实水泥土楔形桩的承载优势显现出来：工况2#、3#、4#的桩顶沉降随荷载的增大而缓慢发展，而工况1#的桩顶沉降速率随荷载的增大而增大，且当荷载约大于14 kPa后，工况1#的桩顶沉降量大于3#工况的桩顶沉降（桩体平均直径相等）；在相同荷载作用下，夯实水泥土楔形桩的侧壁倾角越大，夯实水泥土楔形桩的桩顶沉降越小。4) 根据JGJ79—

2012《建筑地基处理技术规范》中夯实水泥土桩承载力特征值的取值要求，工况1#、2#、3#、4#复合地基的承载力特征值分别为32、28、34、35 kPa。

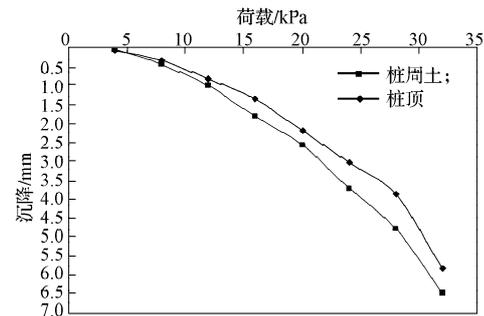
以上现象表明：1) 当受小荷载作用时，摩擦型单桩复合地基的承载能力主要靠桩端与土相互作用而产生的桩端阻力来维持上部施加荷载的平衡，等截面桩由于具有较其他楔形桩大的底面积，从而能承受更大的荷载，其沉降较小。2) 当荷载较大时，夯实水泥土桩的桩侧摩阻力开始发挥其作用，相同荷载作用下，夯实水泥土楔形桩的倾斜侧壁对桩周土的侧向挤压大于等直径桩，桩-土相互作用较强，使得楔形桩的沉降比等直径桩的沉降小，且桩顶沉降随桩体合理范围内楔角的增大而减小。3) 复合地基受到较大荷载作用时，楔形桩的承载性能优于等直径桩。

3.2 桩-土平均沉降差

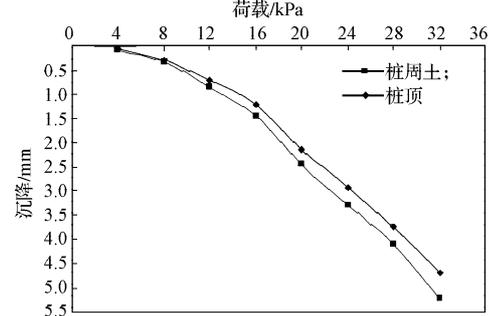
根据埋设在地基土表面不同位置处的沉降标读数取加权平均值，并与桩顶的沉降值进行对比，可得出4种工况下桩顶与桩周土的沉降随荷载的变化规律，如图3所示。



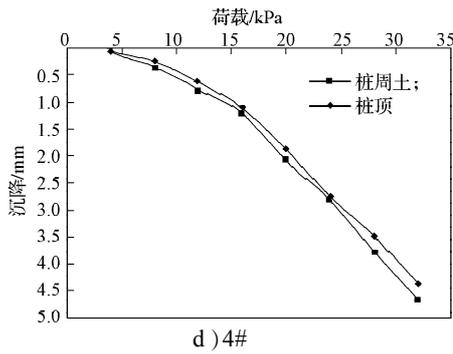
a) 1#



b) 2#



c) 3#



3 桩周土与桩顶的荷载-沉降曲线

Fig. 3 Load-settlement curve of pile top and soil around pile

由图3可看出：1) 随着荷载的增加，桩顶的沉降速率小于桩周土的平均沉降速率。2) 在荷载作用初期，桩顶的沉降量略小于桩周土的平均沉降量，但随着荷载的增大，两者沉降差逐渐增大。3) 工况1#的桩-土沉降差随荷载的增大而逐渐增大，而其它3种工况的桩-土沉降差随荷载的增大，其数值变化范围较小，且楔角越大，夯实水泥土楔形桩的桩-土平均沉降差变化越小。

以上现象表明：1) 夯实水泥土圆柱形桩调节桩-土平均沉降差的能力较夯实水泥土楔形桩的能力差。2) 在荷载作用下，夯实水泥土楔形桩的倾斜侧壁增强了桩-土间的相互作用，减小了桩-土平均沉降差，且楔角越大，夯实水泥土楔形桩调节桩-土平均沉降差的能力越强，从而可达到降低地基沉降的目的。

3.3 桩周土体沉降范围

对距离桩中心不同位置处的百分表读数进行处理（竖向荷载为16 kPa时的情况），可得到4种工况的桩周土体在径向方向的沉降变化规律，如图4所示。

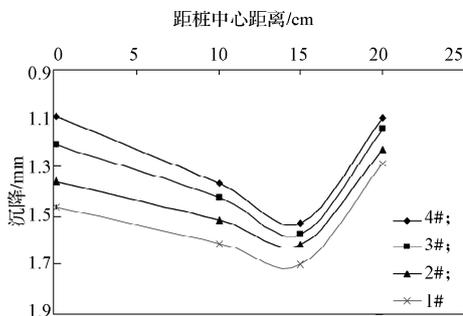


图4 土体沉降与距桩中心距离的关系曲线
 Fig. 4 The relative curve of soil settlement and distance to pile core

由图4可以看出：1) 夯实水泥土桩复合地基中，径向方向的桩周土体沉降，随距桩中心距离的增加呈现为先增大后减小的“勺子状”。在距离桩中心

15 cm 范围内，桩周土的沉降随距离的增大而逐渐增大，并在距桩心 15 cm 的位置处，桩周土的沉降达到最大值；在距桩中心的距离大于 15 cm 后，桩周土的沉降逐渐减小。2) 4种工况的桩周土在径向方向的沉降大小依次是：1#, 2#, 3#, 4#。

以上现象表明：夯实水泥土楔形桩能减小径向方向桩周土的影响范围，且楔角越大，夯实水泥土楔形桩的这种“减负”能力越强。

3.4 桩身轴力分布规律

对应变采集仪的数据进行整理与换算，可得工况4#在各级荷载作用下桩身轴力随桩体深度的变化规律，如图5所示。

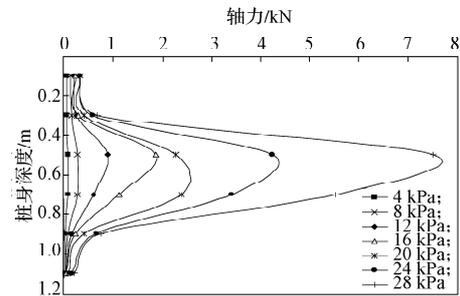


图5 4#桩身轴力分布曲线

Fig. 5 Distribution curve of axial force for pile 4#

由图5可看出：1) 在每级荷载下，桩身轴力随桩身深度先增大至最大值，且轴力增长的幅度随荷载的加大而加大，轴力超过最大值后开始递减；各级荷载下，桩身轴力最大值位于距桩顶平面 0.5 m 处，桩端的轴力均较小且增大的幅度随荷载增大不明显。2) 加载初期，桩身轴力沿桩身深度的变化很平缓，荷载为 4 kPa 时，桩身轴力只有 0.1 kN。这表明，复合地基在受小荷载时桩周土体承担大部分荷载。3) 荷载为 20, 24, 28 kPa 时，对应的桩身轴力最大值分别为 2.5, 4.2, 7.8 kN。这说明，随着荷载的增大，复合地基在垫层作用下，荷载逐渐作用在桩身，桩体承担的荷载逐渐增大。

以上现象表明：1) 楔形桩的特殊外形能有效地调节桩身轴力分布，且上部荷载越大，楔形桩的这种调节能力越强。2) 夯实水泥土楔形桩是一种非常典型的摩擦型桩，桩端阻力所占桩体承担荷载的比例极小，且随荷载的增大，其变化范围也越小。

为进一步揭示夯实水泥土楔形桩荷载传递的特性，将上部荷载为 28 kPa 时，4种工况的应变值进行换算，可得4种工况时的桩身轴力随桩体深度的变化规律曲线，如图6所示。

由图6可以看出：1) 各桩的轴力都是呈现中间大两端小的变化趋势，轴力最大值位于 1/4~1/2 的桩长处。2) 在相同荷载下，2# 桩身轴力峰值为 4 kN，1#

桩身轴力峰值为6 kN,都小于3#桩身轴力峰值6.8 kN(桩体平均直径相等);4#桩身轴力峰值最大达到7.8 kN。这说明桩身轴力与桩体楔角的大小有一定关系。3)等直径桩相比楔形桩与土的相互作用较小,使得桩身轴力沿深度的变化速率小于相同体积楔形桩的变化速率。这说明楔形桩与土的相互作用比等直径桩明显,且随着桩体侧壁倾角的增加,轴力沿深度的变化速率先变小后增大。从现有的试验结果可以看出,桩体存在一个临界楔角值使其桩土相互作用优于等直径桩。

以上现象说明:1)夯实水泥土桩属于较典型的摩擦型桩。2)夯实水泥土楔形桩的桩身轴力较夯实水泥土圆柱形桩能较好地促进上部土层应力的发挥,且加速上部土层的固结,从而实现桩身轴力的合理分布。3)楔角越大,夯实水泥土楔形桩调节桩身轴力分布的作用越明显。

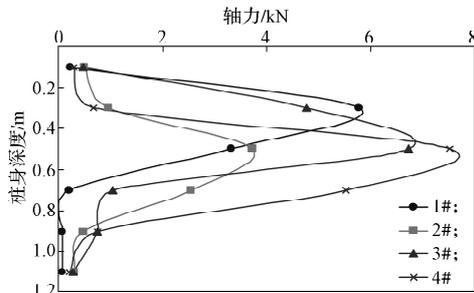


图6 荷载为28 kPa时桩身轴力分布曲线

Fig. 6 Distribution curve of axial force with load of 28 kPa

4 结论

1)在相同地质条件下,复合地基受较大荷载作用时,楔形桩的承载性能优于等直径桩。

2)夯实水泥土楔形桩较等直径桩能更好地协调桩与土的沉降,增强桩-土的相互作用,减小径向方向桩周土的影响范围;桩周土体的沉降随着楔角的增大而减小,桩周土沉降最大值位于距桩心 $2D\sim 2.5D$ 的范围。

3)夯实水泥土桩属于较典型的摩擦型桩,夯实水泥土楔形桩的特殊外形,能有效地调节桩身应力分布,且楔角越大,楔形桩调节桩身应力分布的作用越强;

4)在相同荷载下,楔形桩相比同体积的等直径桩能分担更多的上部荷载;在合理楔角范围内,桩体分担的荷载随楔角的增大而增加。

参考文献:

[1] Lorenzo G A, Bergado D T. New Consolidation Equation

for Soil-Cement Pile Improved Ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 265-275.

- [2] Yin J H, Fang Z. Physical Modeling of Consolidation Behaviour of a Composite Foundation Consisting of a Cement-Mixed Soil Column and Untreated Soft Marine Clay [J]. Geotechnique, 2006, 56(1): 63-68.
- [3] 郭忠贤,杨志红,宋杰,等.夯实水泥土桩的荷载传递特性[J].岩土力学,2000,21(3):284-288.
Guo Zhongxian, Yang Zhihong, Song Jie, et al. Load Transfer Behavior of Compacted Cement-Soil Pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 284-288.
- [4] 郭忠贤,杨志红,王占雷.夯实水泥土桩荷载传递规律的试验研究[J].岩土力学,2006,27(11):2020-2024.
Guo Zhongxian, Yang Zhihong, Wang Zhanlei. Experimental Study of Load Transfer Behavior of Rammed Soil-Cement Piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2020-2024.
- [5] 郭忠贤,王占雷,杨志红.夯实水泥土桩复合地基承载力性状试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1494-1501.
Guo Zhongxian, Wang Zhanlei, Yang Zhihong. Experimental Study on Bearing Capacity Behavior of Compacted Cement-Soil Pile Composite Foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1494-1501.
- [6] 郭忠贤,王占雷,杨志红.夯实水泥土桩复合地基共同作用的试验研究[J].岩土力学,2007,28(4):763-768,773.
Guo Zhongxian, Wang Zhanlei, Yang Zhihong. Experimental Study of Piles-Cushion-Soil Interaction of Rammed Soil-Cement Pile Composite Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 763-768, 773.
- [7] 杨志红,郭忠贤.夯实水泥土桩复合地基垫层效应研究[J].岩土工程学报,2010,32(增2):578-581.
Yang Zhihong, Guo Zhongxian. Cushion Effect of Composite Foundation with Rammed Soil-Cement Pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 578-581.
- [8] 何杰.软土地基中楔形桩工作特性研究[D].株洲:湖南工业大学,2008.
He Jie. Behavior Characteristics Research on Tapered Pile in Soft Clay Foundation[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2008.
- [9] 何杰,刘杰,张可能,等.夯实水泥土楔形桩复合地基承载特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1506-1512.
He Jie, Liu Jie, Zhang Keneng, et al. Experimental Study of Bearing Behavior of Composite Foundation with Rammed Soil-Cement Tapered Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1506-1512.
- [10] 何杰,张可能,刘杰,等.夯实水泥土楔形桩复合

- 地基工作性状试验研究[J].中南大学学报:自然科学版, 2012, 43(5): 1920-1925.
- He Jie, Zhang Keneng, Liu Jie, et al. Experimental Research on Bearing Behavior of Composite Foundation with Rammed Soil-Cement Tapered Piles[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(5): 1920-1925.
- [11] 王垠翔, 刘杰, 何杰, 等. 柔性基础楔形桩复合地基变形规律有限元分析[J]. 土工基础, 2010, 24(5): 39-42.
- Wang Yinxiang, Liu Jie, He Jie, et al. Finite Element Analysis of Deformation Laws of Tapered Pile Composite Ground Under Flexible Foundation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(5): 39-42.
- [12] Robinsky E I, Morrison C F. Sand Displacement and Compaction Around Model Friction Piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1964, 1(2): 81-93.
- [13] Zil'berberg S D, Sherstnev A D. Construction of Compaction Tapered Pile Foundations[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1990, 27(3): 96-101.
- [14] Wei J Q, EI Naggar M H. Experimental Study of Axial Behaviour of Tapered Piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(4): 641-654.
- [15] EI Naggar M H, Wei J Q. Uplift Behaviour of Tapered Piles Established from Model Tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 56-74.
- [16] EI Naggar M H, Wei J Q. Response of Tapered Piles Subjected to Lateral Loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 52-71.
- [17] EI Naggar M H, Wei J Q. Axial Capacity of Tapered Piles Established from Model Tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1185-1194.
- [18] 刘杰, 何杰, 闵长青. 夯实水泥土楔形桩复合地基中桩的合理楔角范围研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 122-127.
- Liu Jie, He Jie, Min Changqing. Study of the Rational Wedge Angle Range in a Composite Foundation with Rammed Soil-Cement Tapered Piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 122-127.

(责任编辑: 邓光辉)

(上接第9页)

- [6] 李忠群, 刘强. 基于频响函数的高速铣削颤振稳定域快速分析与研究[J]. 制造技术与机床, 2008(4): 53-61.
- Li Zhongqun, Liu Qiang. Rapid Analysis on Chatter Stability Lobes for High Speed Milling Based on Frequency Response Function[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(4): 53-61.
- [7] 李忠群, 刘强. 圆角铣削颤振稳定域建模与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 181-186.
- Li Zhongqun, Liu Qiang. Modeling and Simulation of Chatter Stability for Circular Milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 181-186.
- [8] Li Zhongqun, Liu Qiang, Ming Xingzu, et al. Cutting Force Prediction and Analytical Solution of Regenerative Chatter Stability for Helical Milling Operation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1): 433-442.
- [9] 金晓亮, 刘强, 袁松梅. 基于虚拟仪器的数控机床动态特性测试与分析系统研究[J]. 制造技术与机床, 2007(6): 77-80.
- Jin Xiaoliang, Liu Qiang, Yuan Songmei. Virtual Instrument Based Testing and Analysis System for Dynamic Characteristics of NC Machine Tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007(6): 77-80.
- [10] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 96-104.
- Fu Zhifang, Hua Hongxing. Modal Analysis Theory and Application[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000: 96-104.

(责任编辑: 邓光辉)