

DOI: 10.11779/CJGE2019S1013

桩体刚度对复合地基支承路堤失稳破坏模式的影响研究

郑刚^{1,2}, 郭知一^{1,2}, 杨新煜^{1,2}, 周海祚^{1,2}, 于晓旋^{1,2}, 赵佳鹏^{1,2}, 夏博洋^{1,2}

(1. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 在已有研究基础上, 对理想塑性、脆性拉裂两种破坏后性状对应桩体的抗弯、抗剪承载力的进行了分析比较, 脆性拉裂破坏后性状可以更好地反映桩体弯曲破坏后抗弯及抗剪承载力的降低。对于复合地基支承路堤的有限差分数值模拟表明, 路堤荷载、桩体材料弹性模量不同时桩体受力以及路堤失稳时桩体的破坏模式并不相同, 当桩体弹性模量、路堤荷载较大时, 桩体发生受拉弯曲破坏, 需考虑桩体的脆性拉裂破坏后性状以描述桩体抗弯、抗剪承载力的降低以及不同位置桩的连续破坏。

关键词: 复合地基; 破坏后性状; 破坏模式; 稳定性

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0049-04

作者简介: 郑刚(1967—), 男, 贵州贵阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程的教学与科研工作。

E-mail: zhenggang1967@163.com。

Influences of stiffness of piles on failure modes of embankment of composite foundation

ZHENG Gang^{1,2}, GUO Zhi-yi^{1,2}, YANG Xin-yu^{1,2}, ZHOU Hai-zuo^{1,2}, YU Xiao-xuan^{1,2}, ZHAO Jia-peng^{1,2}, XIA Bo-yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The post-failure simulations of ideal elastic-plastic and brittle cracks are adopted to analyze the bearing capacities of piles based on the existing researches. The weakening of flexural and shear capacities when cracks are generated can be better reflected by the brittle crack model. A finite difference method is adopted to analyze the stability of pile-supported embankment. The analysis reveals the failure modes of piles are different under different elastic moduli of materials and embankment loads. When the stiffness and strength of piles reach a certain value, bending-tensile failure happens. The brittle crack model should be used to describe the weakening of the flexural and shear capacities of piles as well as the progressive failure of different piles.

Key words: composite foundation; post-failure simulation; failure mode; stability

0 引言

在软土地基上修筑路堤时, 必须提高路堤的稳定性^[1-2]。为此, 砂桩、碎石桩等散体材料柱状加固体以及水泥土搅拌桩、CFG桩、素混凝土桩等刚性桩、半刚性桩常被用来加固路堤。然而, 近年来, 中国部分软土地区发生了一些由加固体破坏引发的路堤滑坡事故^[3-5]。

不同类型的桩体, 由于桩身强度、布置方式等的不同, 在路堤失稳时会呈现不同的破坏模式。对于传统的散体材料桩复合地基, 桩体式加固体沿滑动面发生剪切破坏是最常见的破坏模式^[6]。对于刚性桩、半刚性桩, 可能发生桩体剪切破坏、弯曲破坏、受压破坏、倾斜、侧移以及桩间土绕流等多种形式的破坏^[8-10]。例如, Broms^[7]研究发现路堤下不同位置的水泥土搅拌桩可能发生弯曲破坏或拉伸破坏。Kitazume等^[9]通过离

心机试验观察到了路堤荷载较大时桩体弯曲破坏的现象, 并提出了相应的路堤稳定计算公式。郑刚等^[10]通过离心机试验发现, 刚性桩的弯曲破坏具有明显的脆性特征, 且桩体之间存在连续破坏的现象。

本文提出了可以较为精确表现刚性桩、半刚性桩弯曲破坏时破坏后性状的脆性拉裂模型, 通过该模型研究了不同弹性模量桩体的破坏模式, 揭示了桩体弹性模量以及路堤荷载对于桩体破坏模式及路堤稳定性的影响。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805407); 国家自然科学基金项目(41630641); 天津市科技计划项目(16YDLSF00040)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者(E-mail: zhzrobby@163.com)

1 计算模型及破坏后性状的模拟

由上文分析可知，桩体破坏后性状可以分为理想弹塑性、受拉软化型、脆性拉裂型。不同类型桩体的黏聚力、弹性模量等相差较大，因而破坏模式并不相同，对应的破坏后性状也不相同。为了研究复合地基失稳时不同类型桩体的破坏模式及破坏后性状的适用性，利用有限差分软件 Flac^{3D} 建立如图 1 所示三维路堤算例。土体及桩体参数如表 1 所示，为分析路堤失稳破坏模式，在路堤顶面分级施加均布荷载作为路堤超载，以 1 kPa 为一级。

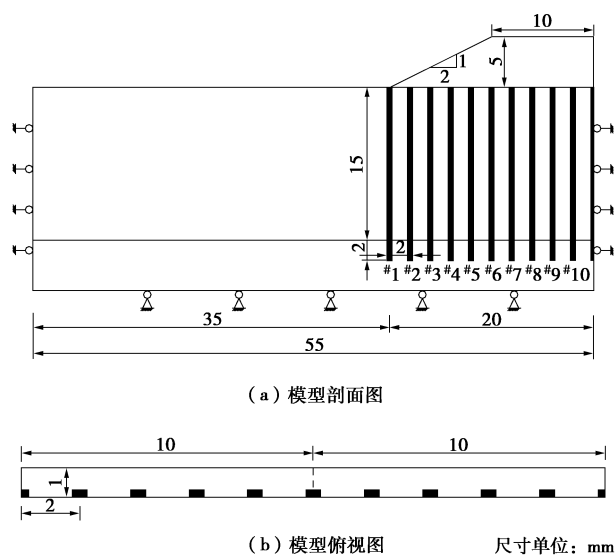


图 1 数值模型示意图
Fig. 1 Numerical model

已往对于复合地基稳定性的研究^[11]，大都采用莫尔库仑屈服准则描述桩体的弹性极限，在软土地区，短期荷载作用下桩体呈不排水状态，取摩擦角 $\varphi=0$ ，并根据桩体强度选取相应黏聚力 c ^[13]。计算模型中桩体采用莫尔库仑屈服准则，考虑了理想弹塑性、受拉软化、脆性拉裂 3 种破坏后性状^[14]。

表 1 土体及桩体材料^[14]

Table 1 Properties of soils and materials						
材料	E /MPa	ν	c_u /kPa	f_t /kPa	φ /($^\circ$)	γ /(kN·m ⁻³)
填土	200 c_u	0.3	10	—	32	18
黏土	200 c_u	0.45	15	—	0	18.1
砂土	100	0.3	0	—	30	17.9
水泥搅拌桩 1	200	0.2	500	100	0	25
水泥搅拌桩 2	800	0.2	2000	400	0	25
素混凝土桩	25500	0.2	6700	1540	0	25

2 不同桩型稳定性及破坏模式

2.1 不同桩型及破坏后性状下极限超载

为研究 3 种破坏后性状对不同类型桩体的适用性，对表 1 所述 3 种桩体分别按照理想弹塑性、受拉软化、脆性拉裂 3 种模型进行模拟，得到 9 种工况下极限路堤荷载如表 2 所示。对于水泥土搅拌桩 1，3 种模型下的稳定极限路堤荷载基本相同；对于水泥土搅拌桩 2，采用受拉软化及脆性拉裂模型得到的稳定极限路堤荷载相同，略低于理想弹塑性模型；对于素混凝土搅拌桩，不同模型得到的稳定极限路堤荷载相差较大，考虑脆性拉裂破坏后性状的拉裂破坏模型得到的极限荷载较低，仅为 76 kPa，而理想弹塑性及受拉软化模型分别为 140，111 kPa。

表 2 不同破坏后性状下极限超载

Table 2 Limit overloads with different post-failure behaviors		
桩体类型	破坏后性状	极限超载/kPa
水泥搅拌桩 1	理想弹塑性	58
	受拉软化	57
	脆性拉裂	56
水泥搅拌桩 2	理想弹塑性	119
	受拉软化	106
	脆性拉裂	106
素混凝土桩	理想弹塑性	140
	受拉软化	111
	脆性拉裂	76

2.2 不同桩型桩体受力特性

由上文分析可知，桩体破坏后性状对于水泥土搅拌桩复合地基极限荷载影响不大，而对素混凝土桩复合地基影响很大，为进一步研究不同类型桩体的受力特性，对表 1 中 3 种桩体发生脆性拉裂破坏后性状过程中的受力情况进行分析。

路堤顶面均布荷载为 20 kPa 时，分别采用 3 种类型桩体得到的各桩最大剪应力及竖向拉应力（桩体在弯矩、轴力共同作用下竖直方向拉应力最大，因而本文仅研究竖向拉应力，后文简称拉应力）的分布情况如图 2、图 3 所示。3 种类型桩体均是#5~#10 桩剪应力较大，#1~#4 桩剪应力较小且数值相近。水泥搅拌桩 1 中#5~#10 桩剪应力相同并低于其余两个模型，这是由于低强度水泥土搅拌桩剪切进入塑性，剪应力无法进一步增加。相比于水泥搅拌桩 2，素混凝土桩剪应力更大，但是相差幅度很小。

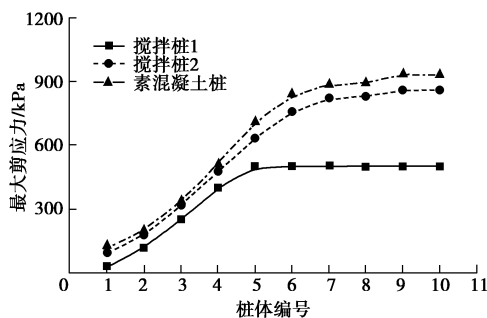


图 2 各桩最大剪应力

Fig. 2 Maximum shear stresses of various piles

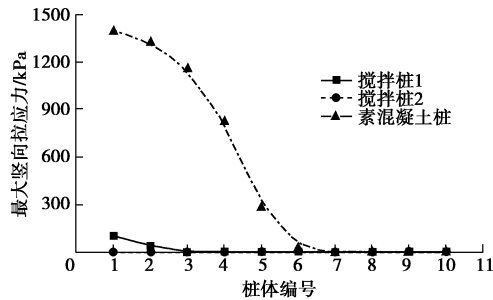


图 3 各桩最大竖向拉应力

Fig. 3 Maximum tensile stresses of various piles

不同类型桩体的拉应力空间分布具有很大不同。采用素混凝土桩 3 的模型中, #1~#5 桩均承受了很大的拉应力, 其中#1 桩拉应力最大; 采用水泥搅拌桩 1 的模型中, #1、#2 桩有一定的拉应力, 但远小于素混凝土桩; 采用强度、弹性模量介于上述两种桩体之间的水泥搅拌桩 2 的模型中, 各桩均不存在拉应力。

综上可得, 素混凝土桩承受更大的拉应力, 更易发生弯曲破坏, 水泥土搅拌桩承受拉应力较小, 不易发生受拉破坏, 因此桩体破坏后性状对素混凝土桩极限超载影响较大, 对水泥土搅拌桩影响较小。

2.3 不同桩型桩体受力随荷载变化情况

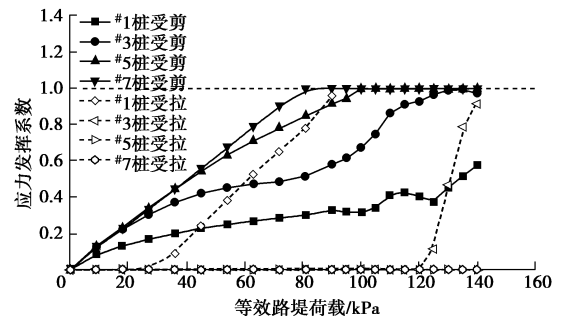
由上文分析可知, 不同类型桩体的受力情况在空间分布上具有很大不同。桩体拉应力、剪应力随路堤填筑高度及超载的变化也可能具有不同的趋势。为了统一路堤填筑高度及路堤超载, 将路堤自重与路堤超载的加和称为路堤荷载。

对低强度水泥搅拌桩 1、高强度水泥搅拌桩 2 及素混凝土桩 3 考虑脆性拉裂破坏后性状时, 桩体拉应力及剪应力随路堤荷载变化情况进行分析。为了更为直观地反映桩体剪应力及拉应力的应力水平, 令剪应力与极限剪应力之比为剪应力发挥系数, 拉应力与极限拉应力之比为拉应力发挥系数, 当应力发挥系数到 1 时, 表明桩体发生破坏。采用上述 3 种桩体材料得到的#1、#3、#5、#7 桩剪应力及拉应力发挥系数随等效路堤荷载变化情况如图 4 所示。

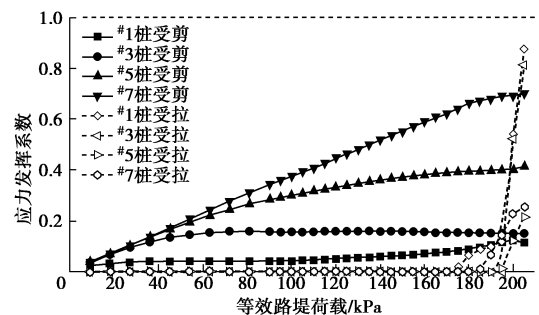
由图 4 (a) 可知, 对于低强度水泥土搅拌桩 1, 自填土开始即存在剪应力, 随着路堤荷载的增加, 各桩剪应力发挥系数近似正比例增加, 其中#5、#7 桩剪应力增长较快, #1、#3 桩剪应力增长较慢, 最终#3、#5、#7 桩剪应力发挥系数都达到 1, 发生剪切破坏。但仅有#1、#3 桩存在拉应力, 且在路堤荷载达到一定值后依次出现, 与剪应力发挥系数相比, 拉应力发挥系数增加较快, 受拉破坏具有突然性。当#1 桩和#3 桩发生受拉破坏时, 其剪应力均有一定的减小, 体现了受拉破坏对桩体抗剪承载力的削弱作用。

由图 4 (b) 可知, 高强度水泥搅拌桩 2 剪应力发挥系数变化规律与水泥搅拌桩 1 基本相同, 但是由于

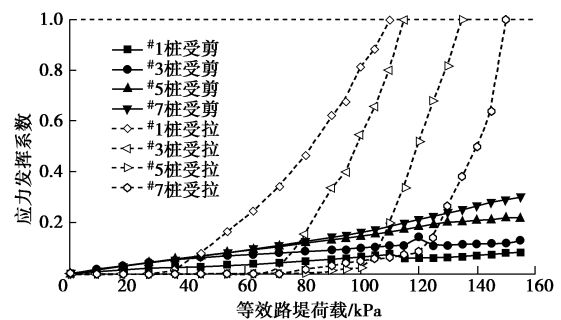
其桩体黏聚力较大、抗剪承载力较高, 剪应力发挥系数增长相对较缓慢。当路堤荷载达到 170 kPa 时, #1 桩开始受拉, 路堤荷载达到 180 kPa 时, #3 桩开始受拉, 随后#1、#3 桩拉应力迅速增加并接近发生受拉破坏, 此时#7 桩也接近发生受剪破坏, 呈现为#1、#3 桩受拉破坏, #5、#7 桩受剪破坏的混合型破坏模式, 因此采用理想弹塑性破坏后性状高估了路堤坡脚处桩体的抗拉承载力, 略微高估了路堤稳定性。



(a) 水泥土搅拌桩1



(b) 水泥土搅拌桩2



(c) 素混凝土桩

图 4 应力发挥系数随路堤荷载变化情况

Fig. 4 Relationship between efficiency factor of stress and embankment load

由图 4 (c) 可知, 随着路堤荷载不断增加, 素混凝土桩的剪应力发挥系数一直较低, 路堤荷载为 160 kPa 时, #7 桩剪应力最大, 但数值仅为其极限剪应力的 30%。然而路堤坡脚处#1 桩在路堤荷载 30 kPa 时即出现拉应力, 并当路堤荷载达到 110 kPa 时迅速增加至极限拉应力发生受拉破坏, 之后#2~#7 桩也发生连续破坏。因而素混凝土桩复合地基各桩均首先发生受拉破坏, 且坡脚处桩体先受拉破坏后引发其余位置桩

体受拉连续破坏,路堤稳定性受桩体抗拉承载力控制,必须考虑桩体的脆性拉裂破坏后性状。

3 结 论

本文对桩体受拉破坏后性状进行了研究,计算了不同桩体破坏后性状下桩体承载能力,对比了不同类型桩体是路堤失稳过程中发生的破坏类型,评估了不同破坏后性状的适用性,并提出了判别桩体破坏类型的方法以选择合适的桩体破坏后性状,得出以下结论:

(1) 对于水泥土搅拌桩复合地基,采用理想弹塑性破坏后性状及脆性拉裂破坏后性状得到的极限路堤超载基本一致,而对于素混凝土桩复合地基,两者差别很大,理想弹塑性破坏后性状显著高估了路堤稳定性。

(2) 相同荷载下,不同类型桩体剪应力分布比较接近,拉应力大小及分布均有较大不同,这主要是由于不同弹性模量桩体承受弯矩有很大不同,桩体弹性模量越高,越靠近路堤边坡承受拉应力越大。

(3) 在路堤荷载作用下,水泥土搅拌桩易在路堤中心处首先发生弯剪破坏,并逐渐向边坡处发展,素混凝土桩易在边坡下部首先发生弯曲破坏,并向路堤中心处发展形成渐进破坏。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 1 - 13. (GONG Xiao-nan. Generalized composite foundation theory and engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 1 - 13. (in Chinese))
- [2] 郑 刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127 - 146. (ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State of the art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127 - 146. (in Chinese))
- [3] 刘吉福. 沉管灌注桩断桩率减小措施试验研究[J]. 公路, 2012, 6(6): 96 - 103. (LIU Ji-fu. Experiment and study on measures to deduce broken pile of sinking-pipe concrete piles[J]. Highway, 2012, 6(6): 96 - 103. (in Chinese))
- [4] 刘吉福, 郑 刚, 安关峰. 刚性桩复合地基路堤绕流滑动稳定分析[J]. 工程勘察, 2013(6): 17 - 22. (LIU Ji-fu, ZHENG Gang, AN Guan-feng. Stability analysis of flow-slide of embankment on rigid-piles composite ground[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2013(6): 17 - 22. (in Chinese))
- [5] 莫景逸, 黄向平. 某矿料堆场地基失稳原因分析[J]. 水运工程, 2013(10): 212 - 217. (MO Jing-yi, HUANG Xiang-ping. Analysis of foundation failure of mineral ore yard[J]. Port and Waterway Engineering, 2013(10): 212 - 217. (in Chinese))
- [6] ABUSHARAR S W, HAN J. Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay[J]. Engineering Geology, 2011, 120: 103 - 110.
- [7] BROMS B B. Can lime/cement columns be sued in Singapore and Southeast Asia 3rd GRC Lecture[R]. Singapore: Nanyang Technological University and NTU-PWD Geotechnical Research Centre, 1999.
- [8] HAN J, HUANG J, PORBAHA A. 2D numerical modeling of a constructed geosynthetic-reinforced embankment over deep mixed columns[C]// ASCE GSP 131, Contemporary Issues in Foundation Engineering. Singapore, 2005.
- [9] KITAZUME M, KENJI MARUYAMA. Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(3): 437 - 455.
- [10] 郑 刚, 李 帅, 刁 珏. 刚性桩复合地基支承路堤破坏机理的离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 1977 - 1989. (ZHENG Gang, LI Shuai, DIAO Yu. Centrifugal model tests on failure mechanisms of embankments on soft ground reinforced by rigid piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 1977 - 1989. (in Chinese))
- [11] ZHANG Z, HAN J, YE G B. Numerical analysis of failure modes of deep mixed column-supported embankments on soft soils[J]. Ground Improvement and Geosynthetics, 2014, 168: 78 - 87.
- [12] SADRNEJAD S A. Numerical modelling for the evaluation of progressive damage to plain concrete structures[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2010, 52(2): 19 - 30.
- [13] NAVIN M P, FILZ G M. Numerical stability of embankments supported on deep mixed columns[C]// ASCE Geotechnical Special Publication No.152: Ground Modification and Seismic Mitigation. Shanghai, 2006.
- [14] 郑 刚, 杨新煜, 周海祚, 等. 基于连续破坏的刚性桩支承路堤的稳定性分析和稳定性控制[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 581 - 591. (ZHENG Gang, YANG Xin-yu, ZHOU Hai-zuo, et al. Researches on stability and control strategy of embankments reinforced by rigid piles based on the concept of progressive failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 581 - 591. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)