

DOI: 10.11779/CJGE2017S2010

考虑桩体破坏模式差异的路堤下刚性桩复合地基 稳定分析方法研究

俞建霖^{1,2}, 李俊圆^{1,2}, 王传伟¹, 张甲林¹, 龚晓南^{1,2}, 陈昌富³, 宋二祥⁴

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 4. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 针对路堤下刚性桩复合地基稳定性分析方法仍不够完善的现状, 采用数值分析方法对路堤下不同位置桩体的损伤发展过程和破坏模式进行了模拟分析, 指出刚性桩对路堤稳定性的贡献因其所处位置不同而具有明显差异, 其破坏模式可分为受压破坏、受弯破坏和受拉破坏三类, 并根据破坏模式的差异对路堤下的桩体进行了分区和分类。基于极限平衡法基本原理, 提出了考虑桩体破坏模式差异的路堤下刚性桩复合地基稳定分析方法, 并通过算例与常用的其他四种稳定分析方法进行了对比分析。结果表明: 所提出的稳定分析方法与数值分析方法的计算结果最为接近, 是合理可行的。

关键词: 路堤; 刚性桩复合地基; 稳定分析; 破坏模式

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0037-04

作者简介: 俞建霖(1972-), 男, 福建福清人, 博士, 副教授, 主要从事软黏土力学、基坑工程、地基处理及土工数值分析的研究。E-mail: yujianlin72@126.com。

Stability of composite foundation improved by rigid piles under embankment considering different failure modes of piles

YU Jian-lin^{1,2}, LI Jun-yuan^{1,2}, WANG Chuan-wei¹, ZHANG Jia-lin¹, GONG Xiao-nan^{1,2},
CHEN Chang-fu³, SONG Er-xiang⁴

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The stability analysis methods for composite foundation improved by rigid piles under embankment are imperfect at present. The finite element method is used to analyze the damage process and failure mode of the piles under embankment. Due to the position of piles, there are significant differences between rigid piles to the contribution of embankment stability. The failure modes of piles can be divided into three categories: compression failure, bending failure and tensile failure, and the piles can be classified and partitioned according to their failure modes. Based on the principle of the limit equilibrium methods, the stability analysis method for rigid pile composite foundation under embankment considering the difference of failure modes is put forward and compared with other four kinds of stable analysis methods. It is shown that the results of this method are the closest to those of numerical analysis method, and this method is reasonable and feasible.

Key words: embankment; rigid pile composite foundation; stability analysis; failure mode

0 引 言

随着土木工程建设的蓬勃发展, 各种形式的复合地基技术在高速公路、铁路等领域得到了广泛的应用和推广, 并取得了良好的经济效益和社会效益。刚性桩复合地基由于其承载力高、工后沉降小、施工速度快的优点, 在软土地基道路工程中的应用越来越多。

但近年来我国珠三角、长三角及内地软土地区的路堤采用刚性桩加固后仍时有滑坡事故发生, 因此路堤下刚性桩复合地基的稳定问题引起了学术界和工程界的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51378467)

收稿日期: 2017-08-02

重视。

目前柔性基础下黏结材料桩复合地基的稳定分析大多沿用传统散体材料桩复合地基的稳定分析方法^[1-2],假定不同位置桩体均发生剪切破坏并引发土体产生剪切滑动面破坏,采用极限平衡法进行分析。国内外学者^[3-5]通过模型试验发现:对于黏结材料桩来说,路堤失稳时复合地基可能发生桩体弯曲破坏、受压破坏、受拉破坏、剪切破坏、倾斜和桩间土绕流破坏等多种破坏形式。Broms^[6]指出路堤下搅拌桩存在剪切破坏以外的其他破坏模式,并对搅拌桩可能的破坏模式进行了分区和分类,提出了稳定分析新方法。郑刚^[7]指出桩体发生剪切破坏的假定将显著高估路堤的稳定性,并提出采用等效抗剪强度法来计算路堤的稳定性。《英国加筋土及加筋填土规范》(BS 8006:1995)^[8]则采用滑动面以下桩体的竖向承载力作为作用在滑动面上的阻滑力来计算抗滑力矩。

已有的研究成果表明,假定桩体发生剪切破坏的稳定分析方法高估了路堤稳定性,由此设计出的工程往往处于不安全状态。现有的研究主要侧重于复合地基失稳时桩体的破坏形式,并提出了一些改进的稳定分析方法,但仍假定复合地基中所有桩体的破坏模式是相同的。事实上,在上部荷载和桩间土体的作用下,不同位置的桩体受力状态存在较大差异,路堤发生失稳时很可能出现多种破坏模式,目前还缺少考虑桩体破坏模式差异的路堤下复合地基稳定分析方法。

本文采用数值方法对路堤下不同位置桩体的损伤发展过程和破坏模式进行了分析,对不同位置桩体的破坏模式进行了分区和分类,最后提出了考虑桩体破坏模式差异的路堤下刚性桩复合地基稳定分析方法。

1 路堤下刚性桩复合地基性状分析

张甲林^[9]采用三维数值分析方法和混凝土损伤模型对路堤下刚性桩复合地基在加载过程中桩体的受力和破坏特征进行了分析。计算模型中路堤高度为 3.0 m,垫层厚度 0.5 m;复合地基中混凝土桩的桩长为 15.0 m,桩端进入下部持力层中 3.0 m,桩径为 0.6 m,桩间距 2.0 m,布置#1~#9 共 9 根桩(图 1)。

随着路堤顶面均布荷载 q 的增大,复合地基中各桩的拉伸损伤和变形发展过程如图 2 所示(图 2 中从左至右依次为#1~#9 桩)。由图 2 可见:①在路堤填筑完成($q=0$ kPa)时,只有路堤坡脚处的#9 桩在深度 11.5 m 处(软硬土层交界)出现轻微的拉伸损伤;②加载至 100 kPa 时,坡脚的#8 和#9 桩已接近完全拉伸损伤状态, #6 和#7 桩拉伸损伤程度增大,说明#8 和#9 桩下部开裂后产生了内力迁移现象;③加载至 120 kPa

时, #8 和#9 桩损伤程度变化不大,但路肩下的#4~#7 桩在桩身中段左侧出现新的拉伸损伤区,且桩顶的水平位移明显,说明此时#4~#7 桩承担较大的水平力;④加载至 130 kPa 时, #4~#7 桩桩身中部的拉伸损伤区进一步扩大, #3 桩出现了一定程度的拉伸损伤, #8 和#9 桩中段出现二次损伤区,且存在明显的向上位移,说明#8 和#9 桩受到了土体的上拔力作用;⑤在加载过程中, #1 和#2 桩未出现拉伸损伤且水平位移很小,说明#1 和#2 桩主要承受竖向压力。

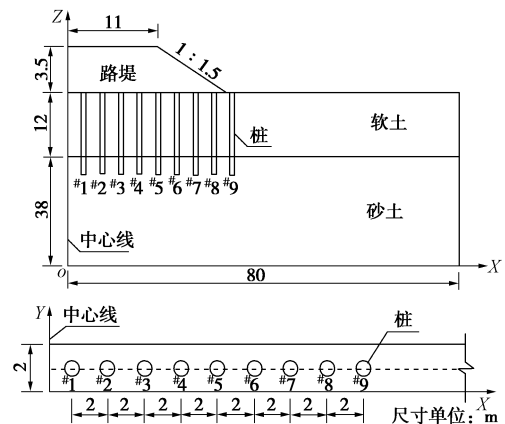


图 1 数值计算模型和桩位编号

Fig. 1 Numerical model and number of piles

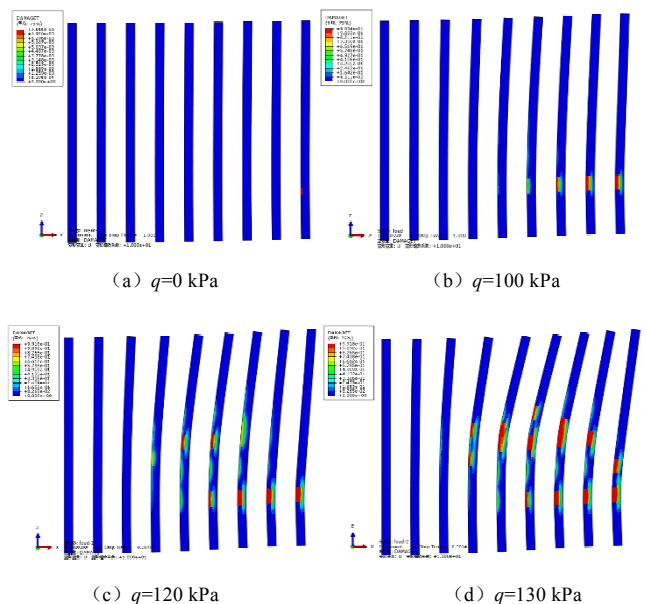
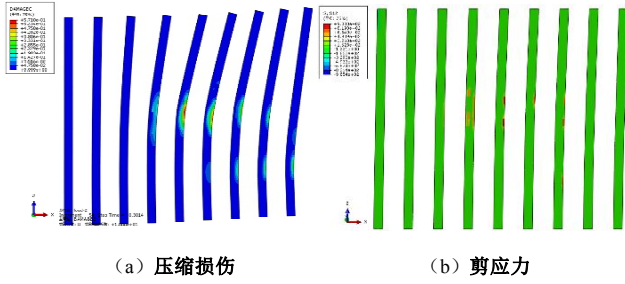


图 2 各级荷载下桩体拉伸损伤及变形分布图

Fig. 2 Tensile damages and deformations of piles under various loads

从图 3 可见,当 $q=130$ kPa 时:①桩身左侧出现严重拉伸损伤的#5~#7 桩,在右侧对应位置也出现了不同程度的压缩损伤,说明桩身承受较大弯矩;②当路堤加载至桩体出现严重损伤和较大位移时各桩身剪应力值仍较低,发生剪切破坏的可能性较小。

图 3 $q=130$ kPa 时桩体压缩损伤和剪应力分布图Fig. 3 Compression damages and shear stresses of piles at $q=130$ kPa

2 桩体破坏模式的分区和分类

根据上述分析的结果, 可将路堤下不同位置的桩体的破坏模式进行分区和分类 (图 4): ①受压破坏, 如图 4 中 AB 段下方的桩体 (#1 和 #2 桩), 主要位于路堤中心以下区域, 以承受竖向荷载为主, 桩身水平位移和弯矩较小, 当竖向荷载较大或桩身抗压强度较低时产生受压破坏; ②受弯破坏, 如图 4 中 BC 段下方的桩体 (#3~#7 桩), 该区域各桩的桩身弯矩和水平位移均较大, 其破坏模式主要表现为受弯破坏; ③受拉破坏, 如图 4 中 CD 段下方的桩体 (#8 和 #9 桩)。该区域桩体同时承受土体上拔力和水平力作用, 其破坏模式主要表现为受拉破坏。

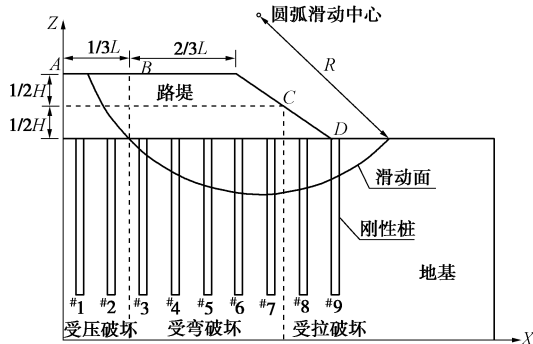


图 4 桩体破坏模式分区和分类

Fig. 4 Classification and partition of failure modes of piles

3 考虑桩体破坏模式差异的稳定性分析方法

基于前文分析结果和极限平衡法基本原理, 本节提出了简化的路堤下刚性桩复合地基稳定分析方法: ①对处于受压破坏区域的桩体, 取滑动面以下桩体的竖向抗压承载力和抗压强度的较小值作为阻滑力, 提供抗滑力矩 M_{RPC} ^[8]; ②对处于受拉破坏区域的桩体, 取滑动面以下桩体的竖向抗拉承载力和抗拉强度的较小值作为阻滑力, 提供抗滑力矩 M_{RPT} ^[8]; ③对处于受弯破坏区域的桩体, 采用等效抗剪强度法来计算抗滑力矩 M_{RPM} ^[7]。

根据前述假定, 简化方法计算模式如图 5 所示。路堤边坡稳定安全系数 F_s 为:

$$F_s = \frac{M_{RS} + M_{RPT} + M_{RPC} + M_{RPM}}{M_D} \quad (1)$$

式中, M_D 为滑动力矩, M_{RS} 为土体提供的抗滑力矩。

(1) 土体自重产生的滑动力矩 M_D

$$M_D = \sum (w_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot R_d \quad (2)$$

式中 w_i 为土条 i 的自重; α_i 为土条 i 圆弧底部切线与水平线的夹角; R_d 为圆弧滑动面的半径。

(2) 各土条自重产生的抗滑力矩 M_{RS}

$$M_{RS} = \sum (c_i \cdot b_i \sec \alpha_i + w_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \varphi_i) \cdot R_d \quad (3)$$

式中 c_i 为土条 i 的黏聚力; b_i 为土条 i 的宽度; φ_i 为土条 i 的内摩擦角。

(3) 受拉区桩体抗滑力矩 M_{RPT}

$$M_{RPT} = \sum F_{PTi} \cdot X_{PTi} \quad (4)$$

式中 F_{PTi} 为受拉区滑动面以下第 i 根桩体竖向抗拉承载力与抗拉强度的较小值; X_{PTi} 为受拉区第 i 根桩体到滑动面圆心的水平距离。

(4) 受压区桩体抗滑力矩 M_{RPC}

$$M_{RPC} = \sum F_{PCi} \cdot X_{PCi} \quad (5)$$

式中 F_{PCi} 为受压区滑动面以下第 i 根桩体竖向抗压承载力与抗压强度的较小值; X_{PCi} 为受压区第 i 根桩体到滑动面圆心的水平距离。

(5) 受弯区桩体抗滑力矩 M_{RPM}

$$M_{RPM} = \sum (3M_u \cos \alpha_i / L_i) \cdot (R_d - L_i \cos \alpha_i / 3) \quad (6)$$

式中 M_u 为桩身极限抗弯强度; L_i 为第 i 根桩滑动面以上的长度; α_i 为桩与圆弧相交位置圆弧切线与水平线的夹角。

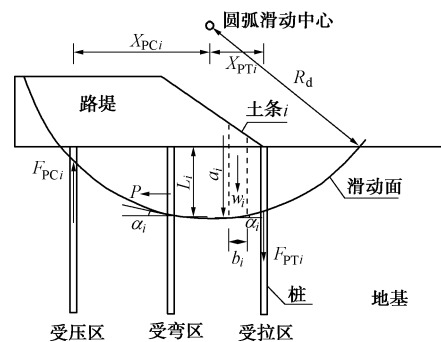


图 5 简化方法计算模型

Fig. 5 Computational model of simplified method

4 算例分析

算例 1 采用基于京津城际高速铁路刚性桩复合地基实例^[10]所建立的简化模型及计算参数。算例 2 将算例 1 中混凝土桩的横向中心距改为 2.5 m, 其余参数不变。分别采用传统复合地基稳定分析方法、英国 BS8006 规范方法、等效抗剪强度法、强度折减有限

元法及本文提出的简化分析方法计算上述两个算例的路堤稳定安全系数，结果如表 1 所示。

由表 1 可见：①在 5 种方法的计算结果中，传统复合地基稳定分析方法的稳定安全系数最大，英国 BS8006 规范方法次之，本文方法与强度折减有限元法的计算结果最为接近，而等效抗剪强度法的计算值最小；②传统的复合地基稳定分析方法假设所有桩体为剪切破坏，严重高估了复合地基的稳定性，计算所得安全系数偏不安全；③英国 BS8006 规范方法计算结果与传统稳定分析方法相比有了较大改善，但仍高估了路堤稳定性；④等效抗剪强度法假设所有桩体为受弯破坏，所得安全系数偏小；⑤在两个算例分析中，本文方法与强度折减有限元法的计算结果均较为接近，说明本文方法在柔性基础下刚性桩复合地基的稳定分析中具有较好的适用性。

表 1 不同分析方法计算所得稳定安全系数

分析方法	F_s	
	算例 1	算例 2
传统复合地基稳定分析方法	3.164	2.292
英国 BS8006 规范方法	1.960	1.673
等效抗剪强度法	1.542	0.903
强度折减有限元法	1.674	1.429
本文方法	1.564	1.315

5 结 论

本文通过上述分析，得到以下主要结论：

（1）随着路堤顶面荷载的增加，复合地基中起主要抗滑作用的桩体损伤情况不断发展。在临界状态下，不同位置桩体所承受土体作用力的大小和方向不同，对路堤稳定性的抗滑贡献具有明显差异。

（2）路堤下刚性桩复合地基中的桩体根据受力特征和破坏机理的不同，可分为受压破坏、受弯破坏、受拉破坏 3 种破坏模式。其中受压破坏主要出现在路堤中心下区域，桩体主要承受竖向压力的作用，当竖向荷载较大或桩身抗压强度较低时产生受压破坏；受拉破坏主要发生在坡脚附近区域，桩体同时承受土体上拔力和水平力的作用；发生受弯破坏的桩体同时承受较大竖向压应力和水平力的作用。

（3）本文提出的柔性基础下刚性桩复合地基稳定分析方法，考虑了路堤下不同位置桩体的受力情况和破坏模式差异，所求得的安全系数与数值分析方法结果较为吻合，说明该方法是合理可行的。

参考文献：

[1] JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京：人民交通

出版社, 2004. (JTG D30—2004 Specification for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))

[2] TB 10035—2006 铁路特殊路基设计规范[S]. 北京：中国铁道出版社, 2006. (TB 10035—2006 Specification for design of special railway subgrade[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006. (in Chinese))

[3] KITAZUME M, KENJI MARUYAMA. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment[J]. Soils and Foundations, 2006, 46(3): 323 - 340.

[4] 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.

[5] 郑 刚, 李 帅, 刁 钰, 等. 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, et al. 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))

[6] KIVELO M, BROMS B. Mechanical behaviour and shear resistance of lime/cement columns[C]// International Conference on Dry Mix Methods: Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. 1999: 193 - 200.

[7] 郑 刚, 刘 力, 韩 杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(II)——群桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1811 - 1820. (ZHENG Gang, LIU Li, HAN Jie. Stability of embankment on soft subgrade reinforced by rigid inclusions(II) - Group piles analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1811 - 1820. (in Chinese))

[8] British Standard BS8006 Code of Practice for Strengthened Soils and Other Fills[S]. 1995.

[9] 张甲林. 柔性基础下刚性桩复合地基受力及破坏特征分析[D]. 杭州：浙江大学, 2014. (ZHANG Jia-lin. Stress and failure mechanism analysis on the composite foundation reinforced by rigid piles under flexible foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))

[10] 郑 刚, 纪颖波, 刘双菊, 等. 桩顶预留净空或可压缩垫块的桩承式路堤沉降控制机理研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 125 - 132. (ZHENG Gang, JI Ying-bo, LIU Shuang-ju, et al. Mechanism of settlement control of piled raft with gap or compressible block at pile top for support of railway embankment[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 125 - 132. (in Chinese))

(本文责编 明经平)