

水域水位变化对邻近复合地基支承路堤稳定性的影响研究

王乾坤^{1,2,3}, 徐国宾^{1,2}, 王传宏³

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300354; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300354; 3. 邹平市水利局, 山东 邹平 256200)

摘要: 针对在水域边发生的复合地基支承路堤滑塌事故的问题,为研究水域及其水位变化对邻近复合地基支承路堤稳定性的影响,采用有限差分方法建立了三维数值模型,研究了水域及其水位变化对于桩体受力以及路堤变形的影响。结果表明:水域的存在将大幅提高桩体的受力,水域与路堤形成的先后顺序不同其影响也不一致,水位的突然降低将大幅增加桩体发生弯曲破坏的风险,对路堤的稳定性产生不利影响。不考虑水域以及水域水位变化的影响采用传统复合地基稳定分析方法将显著高估路堤稳定性。

关键词: 路堤; 复合地基; 水位; 路堤稳定性; 有限差分方法

中图分类号: U416.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0216-05

The influence of water level on the stability of the adjacent composite foundation embankment reinforced by piles

WANG Qiankun^{1,2,3}, XU Guobin^{1,2}, WANG Chuanhong³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 3. Zouping Water Resources Bureau, Zouping 256200, China)

Abstract: In allusion to the instability of embankment reinforced by piles when placed near the water area, a finite difference method was adopted to establish a three-dimensional numerical model to investigate the influence of water and water level on the stability. The changes of pile stress and settlement affected by water as well as water level were studied. The results revealed that the water area led to a significant increase of the pile stress which varied from the order of the formation of the water level and the embankment. The sudden decrease of water level greatly increased the risk of pile bending failure, which had an adverse impact on the stability of embankment. Without considering the influence of water area and water level change, the traditional composite foundation stability analysis method will significantly overestimate the stability of embankment.

Key words: embankment; composite foundation; water level; stability of embankment; finite difference method

1 研究背景

港口、水系、鱼塘等水域边常常有道路经过,富水条件下土质情况可能不满足路堤稳定性的需求,为此,工程中常通过砂桩、水泥土搅拌桩、预应力管

桩等加固地基土,形成复合地基支承路堤以提高路堤的稳定性^[1-2]。然而,即便采用桩体进行地基处理,桩体发生破坏进而引发路堤失稳的事故依然时有发生,尤其当路堤附近具有水域分布时,路堤滑塌的概率有所增加^[3-5]。

收稿日期:2019-08-24; 修回日期:2019-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51621096)

作者简介:王乾坤(1992-),男,山东邹平人,在读硕士生,研究方向为水利水电工程。

通讯作者:徐国宾(1956-),男,河北石家庄人,博士,教授,博士生导师,从事工程水力学与工程泥沙、河床演变、河道整治及模拟、水沙调度与环境生态工程和水利信息化管理方面的教学与研究工作。

复合地基支承路堤的稳定性破坏主要分为两类,一类是桩体发生剪切、弯曲、鼓胀等导致的复合地基内部破坏^[6];另一类是桩体未发生结构性破坏,而是土体的绕流、桩体的倾覆、水平滑移等引发的复合地基外部破坏^[7],本文主要研究复合地基内部破坏的情况,随着桩体材料的不同,其破坏类型也存在明显差异。砂桩、碎石桩等传统的散体材料桩主要发生剪切破坏^[8]。水泥土搅拌桩、CFG 桩、素混凝土桩等刚性桩或半刚性桩则主要发生桩体弯曲破坏^[9]。目前针对散体材料桩复合地基的稳定分析已经较为成熟,采用《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)^[10]所提倡的圆弧滑动法可以较好地评估路堤稳定性;针对刚性桩与半刚性桩,现有的稳定分析方法无法考虑桩体的弯曲破坏及连续破坏,显著高估了路堤的稳定性^[11],且现有的针对该类复合地基稳定性的分析均未考虑邻近水域以及水位变化的影响,导致了工程中邻水复合地基的稳定性难以评估,易引发路堤失稳。

基于上述存在的问题,本文采用有限差分方法^[12]建立考虑临近水域及水位变化影响的复合地基支承路堤模型,通过该模型研究了水位变化等对于桩体受力以及复合地基稳定性的影响,揭示了水位下降可能会造成桩体发生弯曲破坏,为邻水复合地基支承路堤工程的设计与建设提供了一定的依据。

2 数值模型

由于桩体的非连续性,桩体的破坏以及路堤的失稳是三维问题,且失稳过程中桩土相对变形较大,为更好地分析水位变化等对路堤稳定性的影响,本文采用有限差分软件 Flac3D 进行建模分析。图 1 所示为数值模型的平面及剖面示意图,模型中软土厚度为 15 m,其下部为 5 m 厚砂土,路堤底面宽度为 40 m,基于对称性,仅取一侧进行建模,路堤填土高度 5 m,边坡比为 1:2,水域距路堤坡脚 10 m,其总深度为 5 m,侧向边坡的边坡比为 1:1,考虑到一般情况下,水域及路堤沿纵向延伸长度均较大,依据对称性以及桩体间布置的重复性,计算模型长度取为桩间距的一半^[13],采用面荷载模拟水与土体间的相互作用,其压强大小依据水位情况通过帕斯卡定理进行计算。

为减小边界效应的影响,数值模型宽度取为 50 m,模型的左右及前后边界限制垂直于边界的平动(左右边界限制 x 方向运动,前后边界限制 y 方向运

动),底部边界限制 3 个方向的平动(限制 x 、 y 、 z 方向运动)。

由于本文主要研究路堤稳定性特点,因此模型中的土体采用了服从摩尔-库仑破坏准则的理想弹塑性模型^[14],考虑到我国东部沿海富水地区土体大都渗透性较差,依据稳定性计算时的不利工况,模拟路堤快速填筑的工况,假定黏土处于完全不排水状态,砂土处于完全排水状态,土体及桩体参数如表 1 所示,黏土的弹性模量取为 200 倍黏聚力。

由于桩体是复合地基的主要受力构件,为简化计算,忽略成桩过程中对土体的扰动,通过改变土体参数模拟成桩过程^[15],桩体采用弹性模型进行模拟^[16],变形参数按照混凝土进行取值以模拟常见的刚性桩材料,桩土之间建立接触面单元,接触面符合摩尔-库仑屈服准则,参数取为桩周土体强度参数的 2/3^[17],为方便后续对不同位置桩体受力情况进行描述,将桩体自坡脚向路堤中心位置依次编号,模拟路堤填筑时为贴合工程实际并保证计算的稳定性,采用分层填筑的方式模拟填土高度的增加,以 0.5 m 为一级,待一级填筑完成且模型计算稳定性再填筑下一级土体,直至路堤达到预定高度。

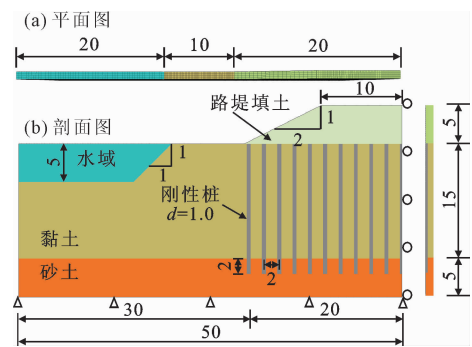


图 1 复合地基路堤数值模型示意图(单位:m)

表 1 路堤土体及桩体材料参数^[11]

材料	E/MPa	ν	c_u/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
填土	2	0.30	10	32	18
黏土	3	0.45	15	0	18
砂土	100	0.30	0	30	16
桩体	30000	0.20			25

3 水域对桩体受力的影响

为研究水域的存在对复合地基中桩体受力的影响,通过数值模拟水域的形成,首先去除水域位置土体,随后通过在水域覆盖范围内土体表面施加面荷

载模拟水土相互作用,依据水域的形成以及复合地基施工的先后,分3种工况进行模拟,工况1为不存在水域的情况,即水域位置为原状土体,不施加任何变化;工况2为水域本身已经存在,在该情况下施工复合地基以及路堤;工况3为水域本身并不存在,复合地基以及路堤施工完成后,水域才开挖并形成。在上述3种工况下对比以分析水域的影响。

图2所示为3种工况不同位置桩体软硬土层交界面及埋深7.5 m处的最大拉应力以及最大剪应力,其中工况2和工况3均为水域满水(水面与地表等高)状态。

由图2(a)可知,不论水域是否存在,以及水域形成时间如何,复合地基中均是在软硬土层交界面处局部存在较大拉应力,且越靠近坡脚拉应力越大,这是由于软硬土层交界面具有较强的嵌固作用易形成较大弯矩,坡脚位置桩体上部填土厚度较小,因此竖向荷载较小,而桩周土体水平运动趋势较大,桩体承担了较大弯矩与较小的轴力,导致桩体拉应力较大,而路堤中心处桩体情况与之相反,其上部填土

厚度较大,而桩周土体水平运动趋势较小,因此在轴力与弯矩合成后并不存在拉应力。当水域存在时,坡脚位置的拉应力有所增加,且越靠近坡脚位置桩体的增幅越大。当路堤填筑完成后再形成水域时,桩体拉应力的提升更为明显,这是由于水体的重度相对土体更小,因此形成水域后,无论竖向还是水平向应力均有所降低,导致土体发生一定的向水域方向的变形,进而增大了桩土的水平相互作用,加大了桩身弯矩。

由图2(b)可知,埋深7.5 m处桩身剪应力大于软硬土层交界面处,这是由于深度较大时土体存在负摩阻力,减小了桩身剪力,对于工况1以及工况2,5、6号桩承担最大的剪应力,然而对于工况3,其最大剪应力在4号桩处,其原因是,桩体的剪应力主要受竖向荷载及轴力控制,而水域的存在主要对桩土水平相互作用产生影响,进而改变桩体弯矩,尤其当水域形成晚于路堤形成时,其弯矩增大效果更为显著,进而导致拉应力、剪应力的增加,以及最大剪应力对应桩体的改变。

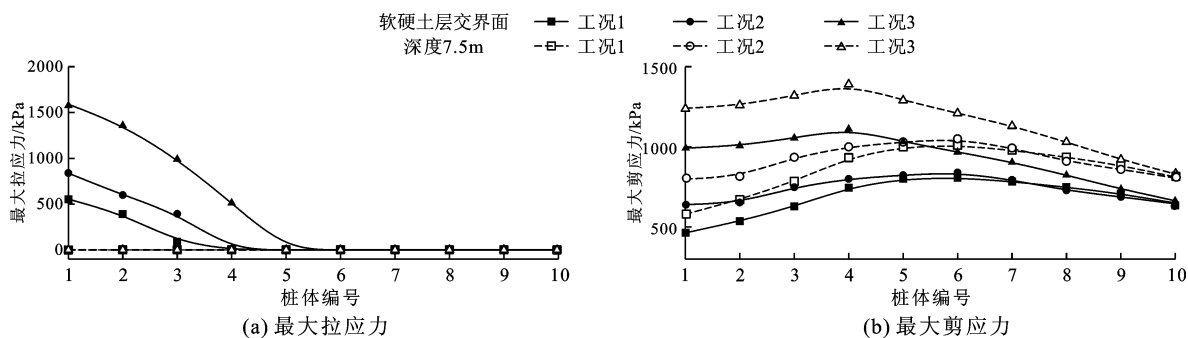


图2 3种工况下水域对不同位置桩体应力的影响

综上所述,水域对桩体受力有着显著的影响,3种工况下均是最大拉应力与最大剪应力接近,考虑到桩体材料的抗拉承载力远低于抗剪承载力,因此水域的存在更易加剧桩体发生弯曲破坏的风险,且影响范围主要集中在坡脚位置的桩体,后文将主要对桩体发生弯曲破坏的情况进行分析。

4 水位变化对桩体受力的影响

由上文分析可知,水域对桩体受力有着显著的影响,在实际施工过程中,水位高度可能发生改变进而影响桩体受力及路堤的稳定性,为此本小节将分析水位变化对于桩体拉应力分布情况的影响,由于软土地基中土体渗透性较低,排水周期较长,因此数值模拟过程中仅考虑水面变化对于静水压力的影响,不考虑土体内水位的变化。

图3所示为两种工况不同水位情况下不同位置桩体的最大拉应力,由图3可知,不论水域的形成与路堤填筑的先后顺序如何,随着水位的降低,邻近坡脚位置桩体的最大拉应力均有显著提高,且越靠近水域其变化越明显,对于工况2,水位由5 m下降至0时,1号桩的最大拉应力上升了215%,发生弯曲破坏的风险大幅增加,对于工况3,随着水位的降低,1号桩最大拉应力上升112%。因此水位的变化会对路堤下桩体尤其是坡脚位置桩体的拉应力产生非常显著的影响,为此进一步分析1号桩的拉应力分布情况。

图4所示为两种工况不同水位情况下1号桩拉应力分布。由图4可看出,水位的变化对于1号桩拉应力分布特点影响不大,最大拉应力均位于软硬土层交界面处,这也与既有的不考虑水域影响的结

论相一致^[11],随着水位的降低,软硬土层交界面处拉应力明显提高。针对水域在路堤前形成的工况,当水位降低至底面时,桩体最大拉应力约 2 500 kPa,已经接近工程中常用素混凝土的极限抗拉强

度^[18],具有较大的发生弯曲破坏的风险,而对于路堤填筑后形成水域的工况,其最大拉应力已超过 3 000 kPa,素混凝土桩极易发生弯曲破坏并引发相邻桩体连续破坏,导致路堤失稳,必须预防加固。

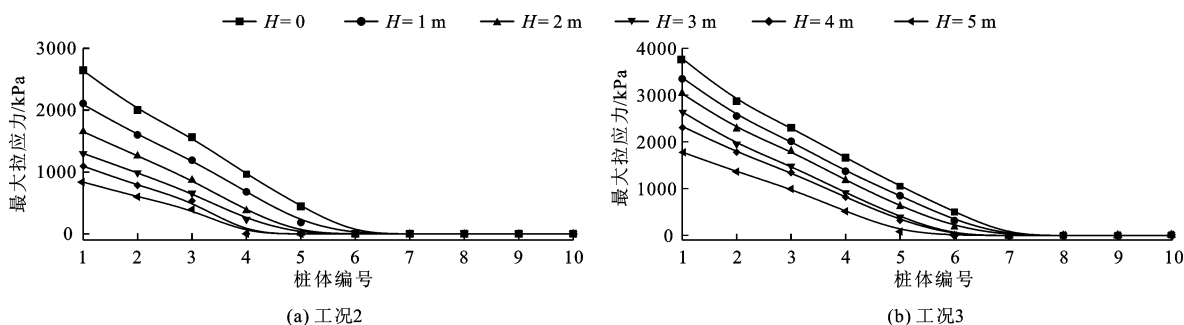


图3 两种工况下不同水位对桩体最大拉应力影响

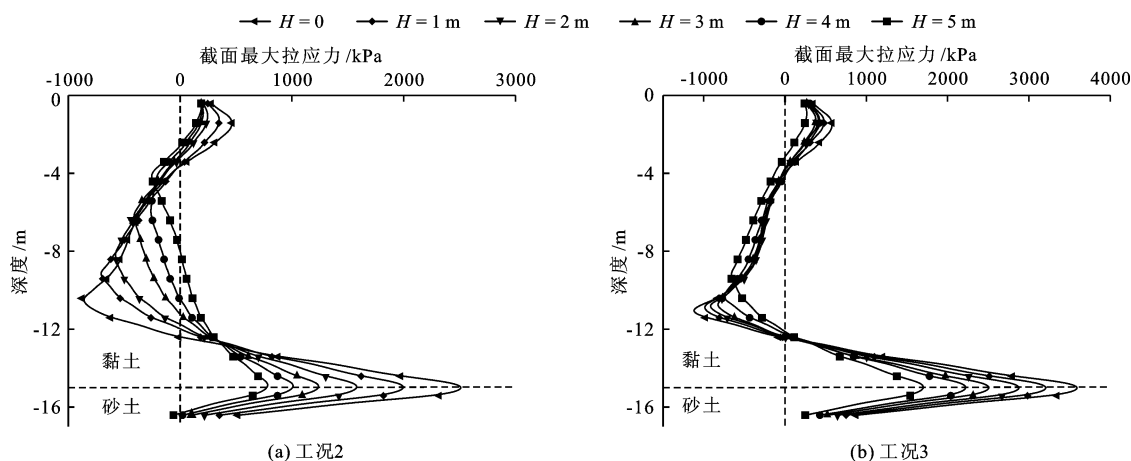


图4 两种工况下不同水位对1号桩拉应力分布的影响

5 水位变化对路堤稳定性的影响

水域的存在以及水位的变化会引起桩体拉应力的显著改变,增大桩体发生弯曲破坏的风险,进而影响路堤的稳定性,然而目前的复合地基支承路堤的稳定分析方法以及既有研究均未考虑上述因素的影响,为此本文基于桩体连续破坏的思想,采用单桩弯曲安全系数法^[19]对考虑水域影响的复合地基支承路堤的稳定性进行分析。

该方法假定在考虑桩体连续破坏的情况下,复合地基支承路堤的稳定性受第1根桩体的弯曲破坏控制,即路堤的稳定安全系数等于坡脚位置桩体弯曲破坏的安全系数,虽然后续研究表明坡脚处桩体弯曲破坏与路堤失稳对应的路堤荷载存在一定差异,但差异并不明显^[11],因此采用该方法可以保守地预测路堤稳定性。

图5所示为两种工况不同水位高度下路堤稳定

安全系数的变化情况,由图5可知,水域的存在以及水位的变化对于路堤稳定性有很大的影响,当水域在路堤前形成时(工况2),其水位变化对于路堤稳定性影响很大,随着水位降低,安全系数显著降低,然而当路堤填筑后形成水域时(工况3),水位变化对于安全系数的影响相对较小,当水位低于2 m时,安全系数已低于临界安全系数,必须采用适当方法提高路堤的稳定性。

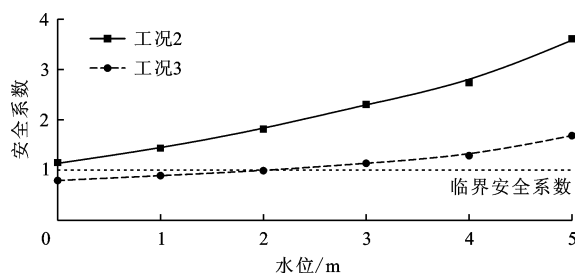


图5 水位对路堤稳定安全系数的影响

6 结 论

本文针对复合地基支承路堤旁存在水域的工况进行了分析,计算了水域与路堤形成先后对路堤稳定性的影响,对比了不同水位情况时路堤下桩体受力情况,评估了不同工况下复合地基支承路堤失稳破坏的类型,并针对性地提出了可以考虑水域影响的路堤稳定性判别方法,得出以下结论:

(1)对于刚性桩复合地基支承路堤,当其旁边存在水域时,会显著增大边坡位置桩体的拉应力以及剪应力,其中拉应力提升更为显著,因此桩体发生弯曲破坏的风险大幅增加。

(2)水域与路堤形成的先后顺序不同对桩体受力的影响也有所不同,当水域形成后进行路堤填筑,桩体拉应力增加相对较小,当路堤填筑完成后开挖并形成水域,则桩体拉应力增加较大。

(3)水位变化对于路堤稳定性具有显著影响,水位越低,桩体拉应力越大,路堤发生稳定破坏的可能越高,路堤稳定性分析时必须考虑水域以及水位变化的影响。

(4)为简化问题,研究水域及水位对于路堤稳定性的影响,本文仅基于特定的水域及复合地基几何尺寸进行研究,上述参数的改变会对路堤稳定性产生影响,将会在今后的工作中进行后续研究。

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.
- [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.
- [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): 96-103.
- [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, 41(6): 17-22.
- [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.
- [6] KITAZUME M, KENJI M. Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading [J]. Soils and Foundations, 2007, 47(3): 437-455.
- [7] KITAZUME M, KENJI M. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading [J]. Soils Found, 2006, 46(3): 323-340.

- [8] ABUSHARAR S W, HAN Jie. Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay [J]. Engineering Geology, 2011, 120(1-4): 103-110.
- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 郑刚, 杨新煜, 周海祚, 等. 基于渐进破坏的路堤下刚性桩复合地基的稳定性分析及控制[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 581-591.
- [12] LARSSON S, MALM R, CHARBIT B, et al. Finite element modelling of laterally loaded lime-cement columns using a damage plasticity model [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 44: 48-57.
- [13] NAVIN M P. Stability of embankments founded on soft soil improved with deep-mixing-method columns [D]. Blacksburg VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [14] 李帅. 刚性桩复合地基支承路堤的失稳破坏机理及其稳定分析方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [15] CHAI Jingchun, SHRESTHA S, HINO T, et al. 2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil-cement columns [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 68: 28-37.
- [16] ZHANG Zhen, HAN Jie, YE Guanbao. Numerical analysis of failure modes of deep mixed column-supported embankments on soft soils [J]. Ground improvement and geosynthetics, 2014, 168: 78-87.
- [17] ZHENG Gang, YANG Xinyu, ZHOU Haizuo, et al. Numerical modeling of progressive failure of rigid piles under an embankment load [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(1): 23-34.
- [18] 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.
- [19] JAMSAWANG P, VOOTIPRUEX P, BOATHONG P, et al. Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows [J]. Engineering Geology, 2015, 188: 159-167.