

软基路堤拓宽对原路堤桩体受力特性的影响

陈希贤¹, 倪嘉¹, 汪林威¹, 薛鸾鸾^{1,2,✉}

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641; 2. 华南理工大学华南岩土研究院, 广州 510641)

摘要: [目的] 交通量日趋饱和与建设用地日益紧张促使道路需要进行拓宽改建, 为了进一步研究路堤拓宽时的稳定性, 对软基路堤拓宽时原路堤下桩体受力特性的变化进行分析。[方法] 采用Abaqus对离心机模型验证后, 分别建立拓宽路堤与原路堤有限元三维数值模型进行对比分析, 研究拓宽路堤自重、不同拓宽路堤土体参数对原路堤下不同位置桩体的受力和变形性状以及破坏模式的影响。[结果] 数值仿真结果表明: 路堤下各桩对抗滑的贡献不同, 接近坡脚的桩主要受弯剪作用, 远离坡脚的桩主要受轴力作用; 拓宽路堤土体自重使得原路堤下桩体所受弯矩及剪力减小, 所受轴力增大, 越靠近拓宽路堤的桩受影响越大, 原路堤下桩体的位移增大, 其中靠近原坡脚处的竖向位移增量最大, 横向位移增量最大处位于原路堤中部; 拓宽路堤土体重度能显著影响原路堤的竖向位移, 而其变形模量和强度参数对原路堤的竖向位移影响不明显; 路堤拓宽后在荷载作用下, 原路堤下桩体的受力特性较拓宽前会发生改变, 潜在破坏模式由弯剪区、压弯区和受压区三个分区变为压弯区和受压区。[结论] 所建模型能较好验证离心机试验结果, 研究结果能对路堤拓宽的稳定性分析提供指导。

关键词: 软土; 桩基; 路堤拓宽; 数值模拟; 破坏模式

中图分类号: TU473.1; U445.55

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0148-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Soft Foundation Embankment Widening on Mechanical Characteristics of Piles in the Original Embankment

CHEN Xixian¹, NI Jia¹, WANG Linwei¹, XUE Luanluan^{1,2,✉}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. South China Institute of Geotechnical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: [Introduction] The increasing traffic and the increasingly tight construction cause the roads to be widened and rebuilt. In order to further study the stability of the embankment, the change of the mechanical characteristics of the pile under the original embankment is analyzed when the soft foundation embankment is widened. [Method] After verifying the centrifuge model, a three-dimensional numerical model of the widened embankment and the original embankment was established using Abaqus. Based on the comparative analysis, the influence of gravity, deformation modulus, strength parameters of widened embankment on the mechanical characteristics, deformation behavior and failure mode were carried out. [Result] The numerical simulation results show that the piles under the embankment had different contributions to anti-sliding. The piles close to the slope are mainly subjected to bending and shearing, and the piles far away from the slope are mainly affected by the axial force. The weight of the widened embankment affects the mechanical characteristics of the pile in the original embankment: the main performance is that the bending moment and shearing for piles in the original embankment reduced, and the axial force increased; the displacement of piles in the original embankment increased, in which the vertical displacement increment near the original slope foot is the largest and the largest lateral one is located in the middle of the original embankment. The soil weight of the widened embankment significantly affects the vertical displacement of the original embankment, but its deformation modulus and strength parameters almost have no obvious effect. After the embankment is widened, the mechanical characteristics of the pile in the original embankment change under the

收稿日期: 2019-09-11 修回日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209097); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目(2020ZB23); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(x2tjD2171760)

load. The potential failure mode is changed from bending-shear zone, bending zone and compression zone to bending zone and compression zone. [Conclusion] The model can verify the centrifuge test results, and the results can provide guidance for the stability analysis of embankment widening.

Key words: soft soil; pile foundation; embankment widening; numerical simulation; failure mode

0 引言

《粤港澳大湾区发展规划纲要》今年正式出台,大湾区作为“一带一路”的重要支撑,要求提供全面对外开放的发展环境,深化国家和地区的互联互通,道路交通建设是其首要任务。目前各地区道路交通量随着经济的快速发展呈现饱和态势,为避免大量增加建设用地,道路拓宽可以在短时间内经济、环保地缓解这一情况,如广佛高速公路、沪宁高速、石黄高速等部分路段进行了拓宽处理^[1-4]。

软基上修建或拓宽路堤需要考虑因地基沉降较大和承载力较低带来的稳定性问题。为了克服上述问题,目前用来处理软土地基的方法有:排水固结、桩基复合地基、振密及挤密技术、土工合成材料加筋技术、灌入固化物、托换与迁移等^[5],如某滨海软土路基采用抛石填筑路基强夯处理^[6],广东某软基高速公路采用了真空联合堆载预压法处理^[7]。桩基复合地基因施工时间短且能显著减小沉降变形被广泛应用于大量实际工程中^[8]。

近年来随着国内外对桩基加固拓宽路堤的研究不断展开,成果也逐渐丰富。翁效林^[9]、凌建明等^[10]结合离心机试验与数值模型分析了拓宽工程中桩基复合地基处治技术的适用情况及其优势。李国维^[11]、高成雷^[12]、杜浩^[13]等通过现场试验对拓宽路堤下桩体的挤土效应、应力特性及加固效果进行分析。吕伟华^[14]通过对桩-网加固拓宽路堤的土拱效应进行研究并指出现有设计方法的不足。刘观仕^[1]通过数值计算对粉喷桩加固拓宽路堤做了敏感性分析。於慧^[15]比较了不同截面类型的现浇桩在路堤拓宽过程中的变形和受力。Hiroshi^[16]、Lambrechts^[17]、Habib^[18]研究并分析了桩基复合地基加固拓宽软基的设计方法。Han^[19]通过数值计算比较了原路堤拓宽时原路堤下布桩与不布桩两种情况下所产生的变形和位移。

虽然目前对桩基加固拓宽路堤的研究成果非常丰富,但主要集中在对新老路堤的沉降变形、拓宽路堤下桩体的受力分析以及设计方法等方面,而路

堤拓宽后对原路堤下桩体受力特性影响的研究较少。本文基于Abaqus建立桩体路堤数值模型,与某一离心机试验的测量数据进行对比,以验证本模型的合理性和正确性;随后建立路堤拓宽的三维有限元数值模型,研究路堤拓宽后对原路堤下桩体的受力特性进行分析,并进行了相应的敏感性分析。敏感性分析表明拓宽填土的重度对原路堤的位移影响最为显著;拓宽后路堤下桩体受力特性发生改变,相同位置的桩在拓宽后对抗滑的贡献发生改变,潜在破坏模式由弯剪区、压弯区和受压区三个分区变为压弯区和受压区。所得研究结果对路堤拓宽的稳定性分析提供指导。

1 模型验证

某路堤为粉质黏土,重度 $\gamma=20.55\text{ kN/m}^3$,路基土自上而下依次为软黏土和砂土。桩基采用PHC管桩,外径为0.8 m,壁厚0.11 m,桩长19 m。为了更好地研究该桩基受力特性以及离心机试验模型制作的方便,同时满足桩体抗弯强度与工程实际相似,离心机试验模型比尺取为 $n=80$,桩长为237.5 mm,模型桩选外径10 mm,壁厚0.5 mm的圆形空心铝合金管,其弹性模量为 $7.87\times 10^4\text{ MPa}$,泊松比为0.3,密度为 2.7 g/cm^3 ,采用标准砂来模拟砂土。离心机试验整体模型尺寸 $685\text{ mm}\times 350\text{ mm}\times 337.5\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),路堤高62.5 mm,坡比为1:1.5^[20],详见图1。

本文首先基于离心机试验模型,采用Abaqus建立相应的有限元三维数值模型(如图2所示),模型侧向边界限制垂直边界方向水平位移,底部边界限制竖向及水平方向位移,模型中土体采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)弹塑性本构模型,桩体采用理想弹性本构模型,桩土之间的摩擦系数为0.4。桩体与土体材料参数见表1。

为便于比较,对桩身弯矩进行归一化处理,取桩身弯矩与桩身最大弯矩 M/M_0 进行对比,80 g重力加速度时,2#和4#桩身的 M/M_0 随深度变化的对

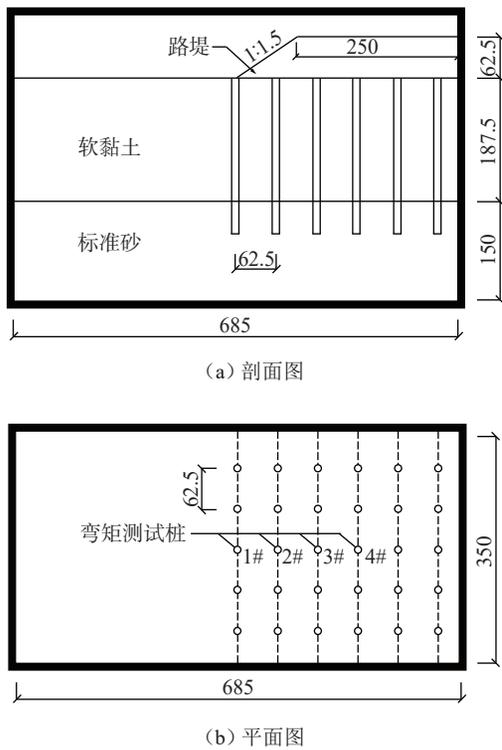


图1 离心机试验布置图
Fig. 1 Centrifuge test layout

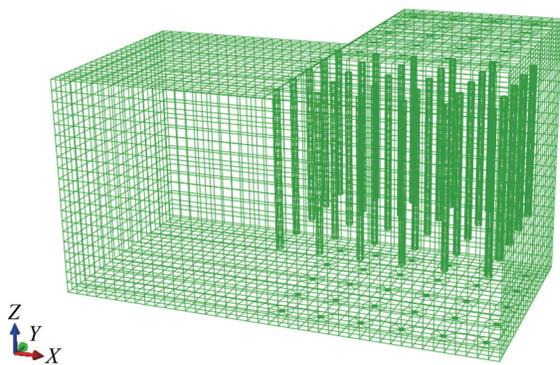


图2 路堤有限元网格
Fig. 2 Finite element mesh of embankment

表1 桩体及土体参数

Tab. 1 Parameters of pile and soil

类型	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
桩	27	78 700	0.3	—	—
粉质黏土	20.55	4.32	0.4	16.52	10.34
软黏土	19.47	2.5	0.49	13	0
标准砂	20.1	48	0.3	0	38

比如图3所示。分析可知桩身弯矩最大位置点的数值模拟结果与试验结果一致，位于软黏土与砂土交

界面处，且桩身弯矩沿深度的分布规律与试验数据基本一致，以此验证了本数值模型的合理性和正确性。

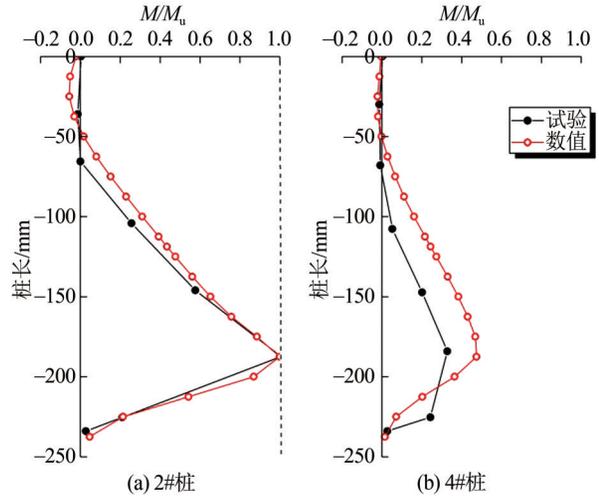


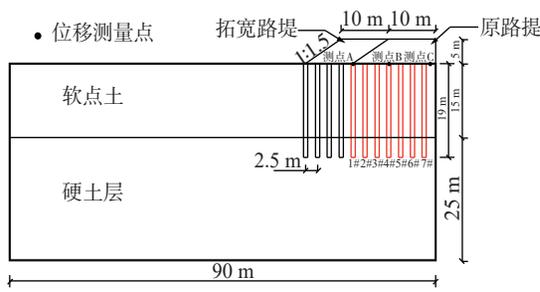
图3 桩身弯矩对比图
Fig. 3 Bending moment of piles

2 路堤拓宽数值模拟

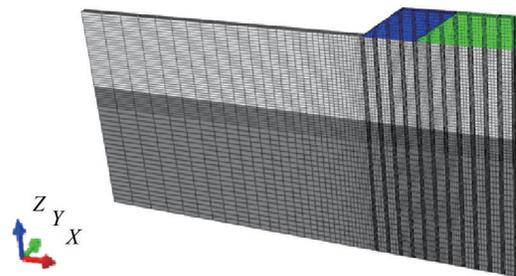
依据上述验证模型，为进一步研究路堤拓宽后原路堤下桩体的受力特性，建立三维路堤拓宽后的数值模型（如图4所示）。原路堤顶面宽度10 m，路堤高5 m，边坡比为1:1.5，路堤分5层填筑，每层填土高度为1 m。桩体为外径0.8 m，壁厚0.11 m的圆形管桩，桩长19 m，桩间距2.5 m，正方形布置。根据对称性，计算模型取路堤的一半宽度，厚度为桩间距的一半为1.25 m，模型长度取90 m，确保边界效应可以忽略。土层总厚度为40 m，其中上层为15 m软黏土，下层为25 m硬土层，路堤填土为粉质黏土。为模拟路堤拓宽过程，在原路堤填筑完成后按照相同的高度及边坡比将路堤向左拓宽10 m，在拓宽的路堤下布置拓宽桩，拓宽桩尺寸与布置方式与原路堤下桩体相同。侧向边界限制垂直边界方向水平位移，底部边界限制竖向及水平方向位移。

考虑拓宽的路堤快速填筑，即假定土体处于不排水状态。桩体及土体材料参数如表2所示。

数值模拟时，为了研究原路堤下桩体在路堤拓宽后抗滑机理的变化，将原路堤逐层添加在路基上，以20 kPa为一级，在原路堤顶部逐级施加均布荷载至80 kPa。为了得到原路堤下桩体在拓宽后的



(a) 桩基路堤纵剖面图



注: ■ 拓宽路堤; ■ 原路堤; □ 软黏土; ■ 硬土层。
(b) 桩基路堤数值分析网格

图 4 路堤拓宽数值模型

Fig. 4 Numerical model of widening embankment

表 2 桩体及土体参数

Tab. 2 Pile and soil parameters

类型	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
桩	25	38 000	0.26	—	—
粉质黏土	18.5	30	0.3	10	32
软黏土	17	10	0.45	15	0
硬土	19	40	0.3	30	32

受力情况, 先移除均布荷载, 将拓宽桩的单元属性变为桩的属性, 逐层激活拓宽路堤后以 20 kPa 为一级在拓宽后的路堤顶部逐级施加均布荷载至 80 kPa。

3 结果分析

3.1 拓宽路堤自重对原路堤下桩体的影响

仅考虑拓宽路堤的自重对原路堤下桩体的受力特性影响, 对路堤拓宽前后原路堤下不同位置桩体的弯矩、剪力、轴力以及桩顶位移进行对比分析, 以期得到拓宽路堤对原路堤下不同位置桩体受力的影响, 如图 5 所示为 4#桩所受弯矩、轴力、剪力对比图。可以看出路堤拓宽后, 4#桩所受的弯矩减小, 在软硬两层土交接面处减小了 45.01%, 所受剪力延桩身均有不同程度的减小, 所受轴力增大, 在软硬土交接面处增大了 23.99%。

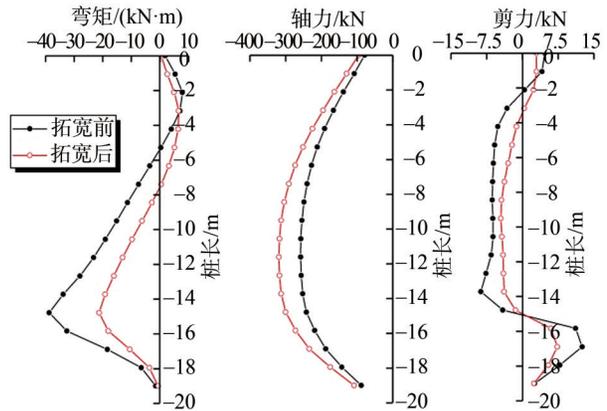


图 5 4#桩在拓宽前后的受力随深度变化图

Fig. 5 Mechanical characteristics for 4# pile after widening

路堤拓宽后原路堤下各桩弯矩和轴力的变化值(拓宽前-拓宽后)的对比图如图 6 所示。各桩体所受弯矩拓宽后均呈减小趋势, 其中 4#桩减小最为明显, 各桩弯矩减小程度最大处均位于软硬土交界面处; 各桩所受轴力拓宽后增大, 其中 1#桩增大趋势最为明显, 1#~7#增大趋势依次减弱。路堤在 1#桩左侧开始拓宽, 由于 1#~7#桩体逐渐远离拓宽路堤, 即离拓宽处越远的桩受到的影响越小, 所以 6#、7#桩弯矩与轴力的变化都比较小。

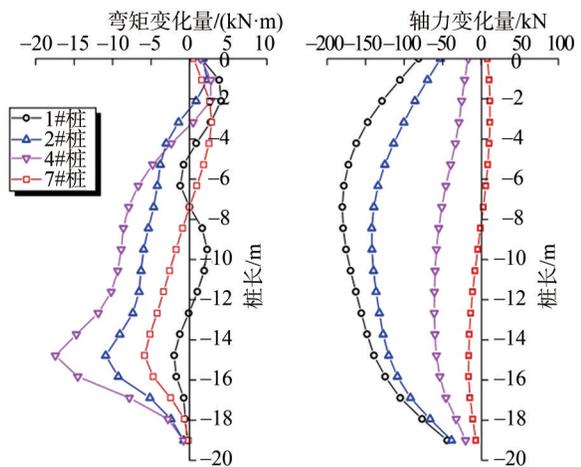


图 6 路堤拓宽后各桩弯矩、轴力随深度变化量对比图

Fig. 6 Bending moment and axial force of each pile after widening

路堤拓宽前后路堤总位移云图如图 7 所示, 拓宽前后路堤位移最大处均位于路堤底部中心桩顶附近。路堤变形以竖向沉降为主, 拓宽后 1#顶部右侧土体位移量增加了 10.2%。

各桩基在路堤拓宽后桩顶处横向和纵向位移如

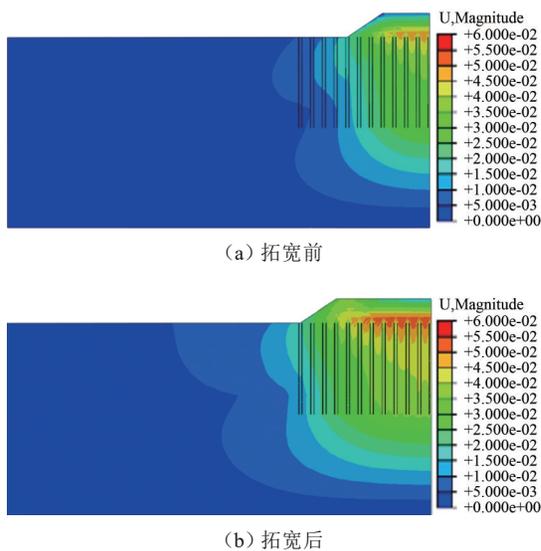


图7 拓宽前后路堤总位移云图

Fig. 7 Displacement distribution of embankment

图8所示。从图中可以看出,仅1#桩的桩顶横向位移在拓宽后增加了,其余桩的桩顶横向位移均在减小,其中4#桩的桩顶横向位移减小最多,故4#桩的弯矩的减小量也是最大,6#、7#桩顶横向位移变化较小,所以弯矩与剪力的变化较小;1#~7#桩的竖向位移增大量由大到小,所以1#桩身轴力的增量最大,7#最小。

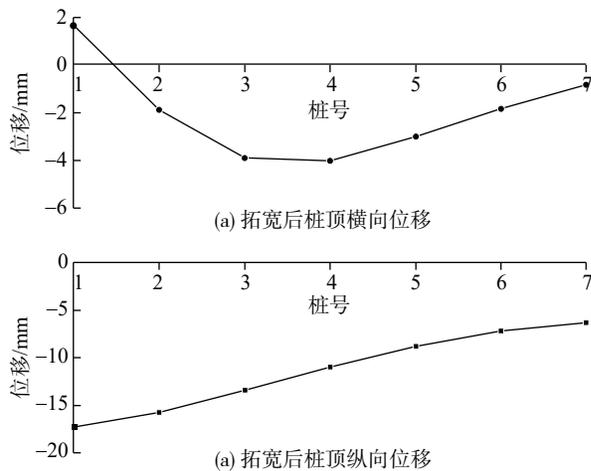


图8 拓宽后原路堤各桩顶部的横向与纵向位移变化图

Fig. 8 Lateral displacement and vertical displacement of piles

路堤拓宽后由于拓宽路堤自重的加入对原路堤下桩体的受力特性会产生影响,且各不同位置处桩体所受影响程度不同:弯矩总体呈减小趋势,原路堤中部弯矩减小最多,轴力呈增大趋势,越接近于原路堤坡脚处增量越大;对于桩体位移,桩顶横向

位移总体呈减小趋势,桩顶纵向位移总体呈增大趋势。

3.2 拓宽路堤土体参数对原路堤下桩体位移的敏感性分析

为深入分析拓宽路堤土体参数对原路堤下桩体位移的影响,分别改变拓宽路堤土体的重度、压缩模量以及强度参数,计算相应工况下原路堤的桩体顶部关键测点A、B和C(如4(a)所示)的位移。

图9所示为拓宽路堤土体自重对原路堤竖向位移的影响。可以看出随着拓宽路堤土体重度的增大,竖向位移曲线趋势向下,整体沉降有增大的趋势,拓宽路堤土体重度增加50%时,原路堤竖向位移会增加超过50%。可见,拓宽路堤重度对整个原路堤在拓宽过程中的竖向位移影响显著,实际拓宽工程中应当严格控制拓宽路堤的重度。

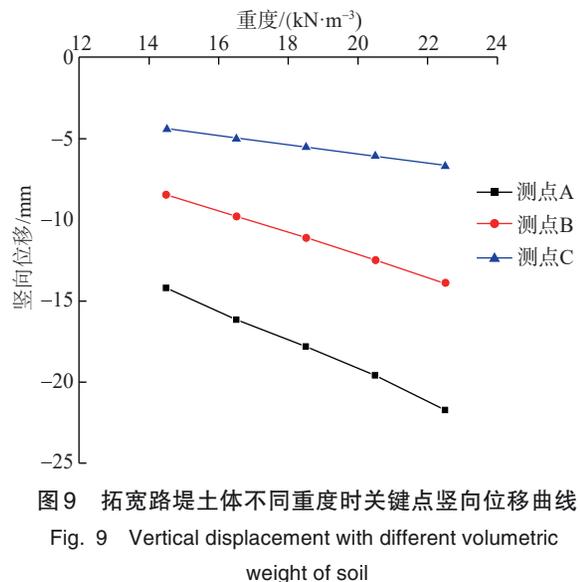


图9 拓宽路堤土体不同重度时关键点竖向位移曲线

Fig. 9 Vertical displacement with different volumetric weight of soil

原路堤竖向位移与拓宽路堤土体变形模量和强度参数的关系曲线图分别如图10~图11所示。从图中可以看出,改变拓宽路堤土体的参数时,原路堤竖向位移变化较小,即原路堤竖向位移对拓宽路堤土体的变形模量和强度参数的变化不太敏感。增加拓宽路堤土体的弹性模量可以减少原路堤坡脚处竖向位移;黏聚力增大时,原路堤坡脚处竖向位移略有减小;摩擦角增加时,原路堤竖向位移基本无变化。

3.3 桩抗滑机制区域划分

俞建林等^[21]应用数值模拟对路堤受力时桩体的受力特性进行分析,将路堤下桩体的破坏模式分为受拉破坏、受弯破坏与受压破坏。郑刚^[20]等通

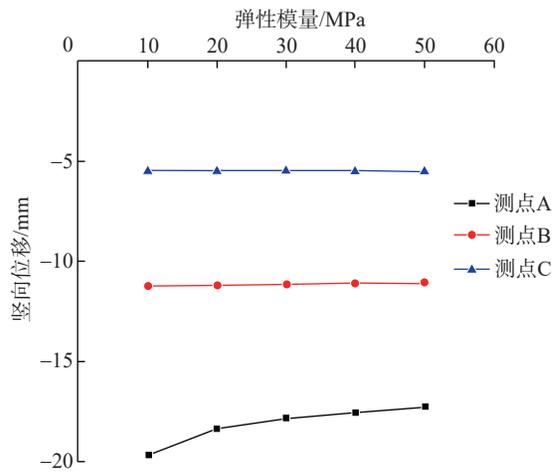


图 10 拓宽路堤土体不同弹性模量时关键点竖向位移
Fig. 10 Vertical displacement with different deformation modulus of soil

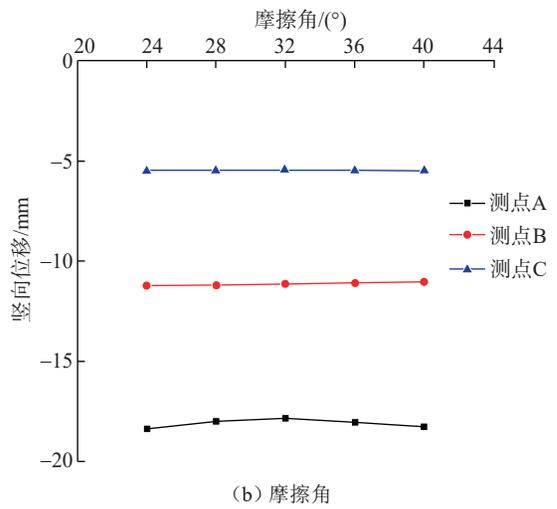
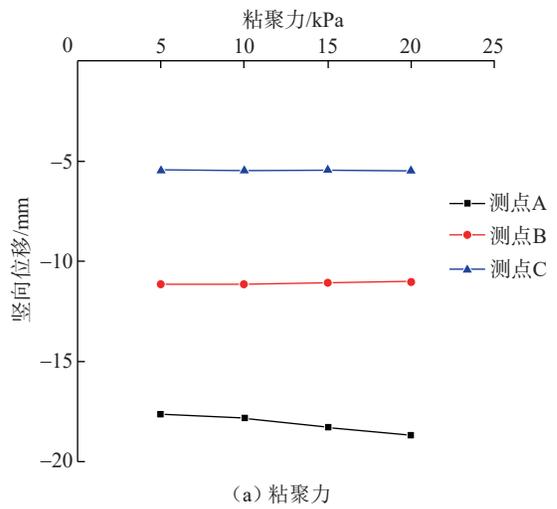


图 11 拓宽路堤土体不同强度参数时关键点竖向位移
Fig. 11 Vertical displacement with different strength parameters

过试验和数值分析依据路堤不同位置处桩体的受力特性, 将桩体的破坏模式分为 4 个区域: 拉弯区、弯剪区、压弯区和承压区。

原路堤与拓宽路堤顶部施加 80 kPa 均布荷载, 为更好地分析各不同位置处桩体在路堤拓宽前后的受力变化。拓宽前原路堤下桩体所受的最大弯矩值、轴力值、剪力值分别记为 M 、 N 、 Q , 各桩体所受最大弯矩值、轴力值、剪力值分别为 M_i 、 N_i 、 Q_i ; 拓宽后原路堤下桩受最大弯矩值、轴力值、剪力值分别为 M' 、 N' 、 Q' , 各桩所受最大弯矩值、轴力值、剪力值分别为 M'_i 、 N'_i 、 Q'_i 。对以上数据进行归一化处理, 横坐标为桩号, 纵坐标为各桩受力比值, 对比图如图 12 所示。

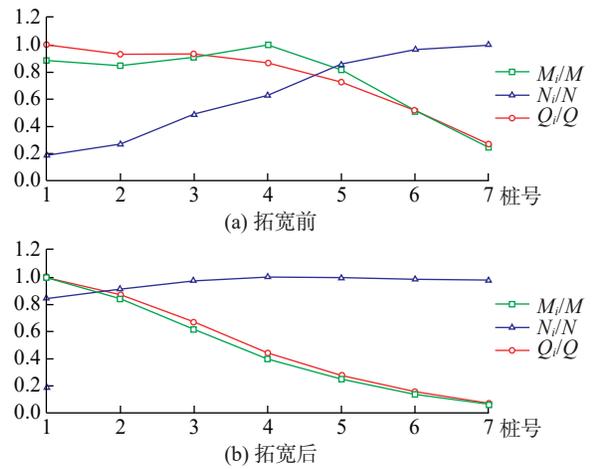


图 12 拓宽前后各桩综合受力图

Fig. 12 Comprehensive force diagram of each pile after widening

根据图 12, 将原路堤下桩按照综合受力的情况分为如下情况: 1#、2#、3#桩主要受到的力为弯矩与剪力作用, 4#、5#桩主要受弯矩和轴力作用, 6#、7#桩主要受轴力作用, 故可将其分为弯剪区、压弯区和受压区三个部分。路堤拓宽后加载时原路堤桩的综合受力情况如下: 所有桩体受力均变为以轴力为主, 弯矩与剪力随桩号增加而减小。1#、2#、3#桩所受弯矩、轴力、剪力均处于较高值, 为压弯区; 4#、5#、6#、7#只有轴力维持在较高水平, 为受压区。

路堤拓宽后在荷载作用下, 原路堤下桩体的受力情况会发生改变, 特别是接近于坡脚的桩所受主要荷载会发生较大的改变, 其潜在破坏模式也会随之改变, 从而对路基的整体稳定性产生影响。

4 结论

路堤拓宽后由于新荷载的加入会对原路堤下不同位置桩的受力产生不同影响。拓宽路堤土体自重使得原路堤下桩体所受弯矩及剪力减小,所受轴力增大,越靠近拓宽路堤的桩受影响越大,原路堤下桩体的位移增大,其中靠近原坡脚处的竖向位移增量最大,横向位移增量最大处位于原路堤中部。

拓宽路堤土体的重度对原路堤的竖向位移影响显著,而拓宽路堤土体的变形模量和强度参数对原路堤的竖向位移影响较小。

路堤拓宽后在荷载作用下,原路堤下桩体的受力特性会发生改变,靠近坡脚出的桩变化最为显著,相应的潜在破坏模式由弯剪区、压弯区和受压区3个分区变为压弯区和受压区。

参考文献:

- [1] 刘观仕,孔令伟,李雄威,等. 高速公路软土路基拓宽粉喷桩处治方案分析与验证[J]. 岩石力学与工程学报,2008(2):309-315.
LIU G S, KONG L W, LI X W, et al. Analysis and verification of treatment scheme for widening powder-jetting piles in soft soil roadbed of expressway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(2):309-315.
- [2] 刘金龙,张勇,陈陆望,等. 路基拓宽工程的基本特性分析[J]. 岩土力学,2010,31(7):2159-2163.
LIU J L, ZHANG Y, CHEN L W, et al. Analysis of basic characteristics of roadbed widening engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7):2159-2163.
- [3] 贾宁,陈仁朋,陈云敏,等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. 岩土工程学报,2004(6):755-760.
JIA N, CHEN R P, CHEN Y M, et al. Theoretical analysis and monitoring of widening engineering of Hangzhou-Ningbo expressway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(6):755-760.
- [4] 苏阳. 广佛高速公路扩建工程软基路段施工简介[J]. 水运工程,2001(2):51-55+58.
SU Y. Brief introduction to the construction of soft foundation section of Guangfo expressway expansion project [J]. Water Transport Engineering, 2001(2):51-55+58.
- [5] 刘汉龙,赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报,2016,49(1):96-115.
LIU H L, ZHAO M H. Progress in ground treatment research [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1):96-115.
- [6] 马成龙,曾轶,杨荣胜. 某核电站厂址道路抛石填筑路基强夯处理探讨[J]. 南方能源建设,2016,3(增刊1):158-160+172.
MA C L, ZENG Y, YANG R S. Discuss on dynamic compaction treatment on rubble foundation in coastal road of nuclear power plant [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3 (Supp. 1):158-160+172.
- [7] 徐晓斌,肖广平,王清,等. 真空联合堆载预压软土路基失稳分析[J]. 南方能源建设,2017,4(增刊1):107-110.
XU X B, XIAO G P, WANG Q, et al. Instability analysis of vacuum combined with preloaded soft soil roadbed [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(Supp. 1):107-110.
- [8] LIU H L, CHARLES W W, FEI K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12):1483-1493.
- [9] 翁效林,张留俊,李林涛,等. 拓宽路基差异沉降控制技术模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):159-164.
WENG X L, ZHANG L J, LI L T, et al. Experimental study on model control of differential settlement control of widened roadbed [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1):159-164.
- [10] 凌建明,钱劲松,黄琴龙,等. 路基拓宽工程处治技术及其效果[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007(1):45-49.
LING J M, QIAN J S, HUANG Q L, et al. Treatment technology and effect of roadbed widening engineering [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007(1):45-49.
- [11] 李国维,边圣川,陆晓岑,等. 软基路堤拓宽静压PHC管桩挤土效应现场试验[J]. 岩土力学,2013,34(4):1089-1096.
LI G W, BIAN S C, LU X C, et al. Field test of soil compaction effect of soft foundation embankment with wide static pressure PHC pipe pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4):1089-1096.
- [12] 高成雷,凌建明,杜浩,等. 拓宽路堤下带帽刚性疏桩复合地基应力特性现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(2):354-360.
GAO C L, LING J M, DU H, et al. Field test study on stress characteristics of composite foundation with rigid piles under capped embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(2):354-360.
- [13] 杜浩,陈小琪,凌建明,等. 拓宽路堤下PHC桩复合地基变形特性监测分析[J]. 土木工程学报,2009,42(9):139-144.
DU H, CHEN X Q, LING J M, et al. Monitoring and analysis of deformation characteristics of PHC pile composite foundation under widened embankment [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9):139-144.
- [14] 吕伟华,缪林昌,王非,等. 桩-网加固拓宽路堤土拱效应试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(8):2316-2322.
LÜ W H, YU L C, WANG F, et al. Experimental study on soil arching effect of pile-net reinforcement for widening embank-

- ment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(8): 2316-2322.
- [15] 於慧, 丁选明, 孔纲强, 等. 高速公路拓宽工程现浇X形桩与圆形桩变形特性数值模拟对比分析 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊2): 170-176.
- YU H, DING X M, KONG G Q, et al. Comparative analysis of deformation characteristics of cast-in-situ X-shaped piles and circular piles in highway widening project [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Supp. 2): 170-176.
- [16] HIROSHI M, MITSUO N. Design and numerical analysis of road embankment with low improvement ratio deep mixing method [C]// *GeoTrans. Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans 2004*. California, StatesUnited, July 27-31, 2004. Reston, VA: ASCE, 2004: 1395-1402.
- [17] LAMBRECHTS J R, GANSE M A, LAYHEE C A. Soil mixing to stabilize organic clay for i-95 widening, alexandria, va [J]. *Geotechnical specialpublication*, 2002, 1(120): 575-585.
- [18] HABIB H A A, BRUGMAN M H A, UILTING B G. Widening of Road N247 founded on a geogrid reinforced mattress on piles [C]// *Anon. Seventh International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, September 22-27, 2002. Lisse: Wets & Zeitlinger, 2002: 369-372.
- [19] HAN J, OZTOPRAK S, PARSONS R L, et al. Numerical analysis of foundation columns to support widening of embankments [J]. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34(6): 435-448.
- [20] 郑刚, 李帅, 刁钰. 刚性桩复合地基支承路堤稳定破坏机理的离心模型试验 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(11): 1977-1989.
- ZHENG G, LI S, DIAO Y. Centrifugal model test of stability failure mechanism of rigid pile composite foundation supporting embankment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(11): 1977-1989.
- [21] 俞建霖, 李俊圆, 王传伟, 等. 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 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增刊2): 37-40.
- YU J L, LI J Y, WANG C W, et al. Study on stability analysis method of rigid pile composite foundation under embankment considering the difference of pile failure modes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (Supp. 2): 37-40.

 作者简介:


陈希贤

陈希贤

1995-, 男, 四川广安人, 华南理工大学, 水利工程, 硕士, 主要从事岩土工程数值仿真分析的研究工作 (e-mail) 627827422@qq.com。

倪嘉

1994-, 女, 广西桂林人, 华南理工大学, 建筑与土木工程, 硕士, 主要从事岩土工程数值仿真分析的研究工作 (e-mail) 2643189437@qq.com。

薛雯鸾 (通信作者)

1982-, 女, 湖北随州人, 副教授, 工学博士, 华南理工大学, 主要从事裂隙岩体多场耦合的数值仿真等方面的研究与教学工作 (e-mail) xueluanluan@scut.edu.cn。

 项目简介:

项目名称 深部EGS系统中裂隙岩体热-水-力 (THM) 耦合机理研究 (51209097)

承担单位 华南理工大学

项目概述 增强地热系统 (EGS) 是指从地下 3~10 km 低渗透性高温岩体中建立人工热储并获取热能的系统。项目主要以 EGS 系统开发为依托领域, 研究深部地热能开采过程中压剪耦合作用与热水力耦合作用对裂隙变形、岩体渗透特性、以及岩体物理力学特性的影响机理, 建立高温裂隙岩体热水力耦合数值模型, 实施 EGS 系统数值试验和参数反演, 深入揭示深部 EGS 系统中裂隙岩体 THM 耦合演化机理, 为 EGS 系统开发提供理论基础和科学依据。

主要创新点 (1) 构建高温复杂裂隙岩体热水力耦合数值模型, 可有效模拟裂隙与相邻岩块间的水、热流量交换规律, 兼具等效连续介质力学和不连续介质力学方法的优点; (2) 裂隙网络的前处理技术可动态模拟裂隙网络的分布, 当有新裂隙产生时, 不用改变岩体母单元网格的拓扑结构, 同时满足计算精度要求; (3) 开发针对 EGS 系统的全程数值仿真技术, 可直观、准确的反映 EGS 人工热储中裂隙的变化特征、开发过程中热能的迁移规律等, 实现 EGS 系统的“智能化”开发。

(责任编辑 李辉)

《南方能源建设》摘要和参考文献格式

《南方能源建设》是南方电网数字传媒科技有限公司主管、中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司主办的能源行业科技类期刊，2014年12月创刊，季刊，刊号为CN 44-1715/TK，ISSN 2095-8676，国内外公开发行人。《南方能源建设》论文模板详见网址 <http://nynf.cbpt.cnki.net/>，其中中英文摘要和参考文献格式如下：

1 中英文摘要

中英文摘要严格按照 [目的 Introduction]、[方法 Method]、[结果 Result]、[结论 Conclusion] 四要素撰写；600字以内，独立成篇，意义完整，用词准确无误，简明扼要，信息具体，以文字叙述为主，避免使用公式，严禁使用图和表。[目的]——研究、研制、调查等的前提、目的和任务以及所涉及的主题范围；[方法]——涉及的原理、理论、条件、对象、材料、工艺、结构、手段、装备、程序等；[结果]——课题的结果、数据，被确定的关系，观察的结果，得到的效果、性能等；[结论]——结果的分析、研究、比较、评价、应用，以及提出的课题、假设、启发、建议、预测等。

2 参考文献

参考文献只列出作者阅读过、在正文中被引用过、正式发表的主要文献资料（以连续出版物为主，尽量避免引用图书），不应有二次文献出现，同时近5年的文献应占70%，总数量10篇以上为宜；按正文中对参考文献引用的先后顺序，对其编码。如果是非英文文献，则必须同时提供相应的英文。

- 期刊：[序号]作者.题名[J].刊名，年，卷(期)：页码范围。
- [1] 徐伟，廖民传，郑志源，等. 500 kV海底电缆雷电过电压研究[J]. 南方能源建设，2016，3(2)：62-66.
XU W, LIAO M C, ZHENG Z Y, et al. Research on lightning overvoltage of 500 kV submarine cable lines [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 62-66.
- [2] ARAKI H, SAJIS, OKABE T, et al. Solidation of mechanically alloyed Al-10.7%Ti powder at low temperature and high pressure of 2 GPa [J]. Mater. Trans. JIM., 1995, 36 (3): 465.
- 专著：[序号]著者.题名[M].出版地：出版者，出版年。
- [3] 戴树森，费鹤良，王玲玲，等. 可靠性试验及其统计分析[M]. 北京：国防工业出版社，1983.
DAI S S, FEI H L, WANG L L, et al. Reliability test and statistical analysis [M]. Beijing: National Defense Industrial

Press, 1983.

会议论文：[序号]作者.题名[C]//会议举办者.会议名称，会议地点，会议时间.出版地：出版者，出版年：页码范围。

- [4] TORRES-OLGUIN R E, MOLINAS M, UNDELAND T M. A model-based controller in rotating reference frame for hybrid HVDC [C]//ATLANTA G A. Energy Conversion Congress and Exposition, Toronto, Canada, Feb. 1-8, 2015. Toronto: IEEE, 2010:1578-1584.

学位论文：[序号]作者.题名[D].城市：大学，年代。

- [5] 郑永超. 密云铁矿尾矿制备高强结构材料研究[D]. 北京：北京科技大学，2010.
ZHENG Y C. Study on high-strength structural material with iron tailings of Miyun [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010.

报告：[序号]作者.题名[R].城市：单位，年代。

- [6] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的LBB分析[R]. 北京：清华大学核能技术设计研究院，1997.

专利：[序号]专利所有者.专利题名：专利号[P].专利国别，公开日期。

- [7] 李谋渭，边新孝，陈工，等. 活套辊式平坦度检测装置：201034548 [P]. 中国专利，2008-03-12.
LI M W, BIAN X X, CHEN G, et al. Strip flatness measurement device of looper type: 201034548 [P]. China Patent. 2008-03-12.

标准：[序号]责任者.标准名称：标准代号[S].出版地：出版者，出版年。

- [8] 中国工程建设标准化协会. 城市综合管廊工程技术规范：GB 50838—2015 [S]. 北京：中国计划出版社出版，2015.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical code for urban utility tunnel engineering: GB 50838—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.

电子文献：[序号]责任者.题名[J/OL].出版者(更新或修改日期)[引用日期].获取和访问路径。

- [9] 范杜平. 混煤哈氏可磨性指数[J/OL]. 中国科技论文在线.(2007-12-27) [2010-09-10]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/200712-756>.
FAN D P. Hargrove grindability index of the coal blended [J/OL]. Sciencepaper Online. (2007-12-27) [2010-09-10]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/200712-756>.

网络优先出版：[序号]作者.题名[J].刊名，DOI号。

- [10] 张夏平. 天然气网络对含新能源电力系统短期调度运行影响[J]. 南方能源建设，2019，doi: <http://dx.doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001>.
ZHANG X P. Impact of natural gas system on short-term scheduling with volatile renewable energy [J]. Southern Energy Construction, 2019, online, doi: <http://dx.doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001>.

(《南方能源建设》编辑部)