

复合地基对临近基坑稳定性影响的数值模拟研究

曾力¹,蔡云鹏¹,李明宇¹,杨潇²,李玉涛³

(1. 郑州大学水利与土木工程学院,河南 郑州 450001;2. 武汉地铁集团有限公司,湖北 武汉 430070;
3. 中建交通建设集团有限公司,北京 100071)

摘要 目的 基于已有基坑稳定性分析的建模方法,开展邻近复合地基深基坑变形与稳定性问题的精细化研究。**方法** 结合某基坑工程实例利用 PLAXIS 3D 软件建立三维数值计算模型,分析支护桩水平位移、基坑稳定性系数、基坑滑裂面位置与状态等不同变形特征参数对基坑性状的影响,进而研究既有建筑复合地基桩体条件变化对基坑稳定性的影响。**结果** 邻近复合地基的基坑稳定性系数均大于桩基础和天然地基,且支护桩水平位移峰值较天然地基减小 40%;复合地基和桩基下的基坑滑裂面形态大致相近,均从基础中部向基坑底部延伸;CFG 桩桩长在超过 1 倍开挖深度、桩径超过 0.7 m 及桩体刚度达到 500 kPa 后,滑裂面与地表的交点位置不再变化,复合地基与临近基坑距离超过 1 倍开挖深度后,对基坑影响可以忽略不计。**结论** 提出邻近复合地基的基坑整体稳定性系数优于桩基础和天然地基,CFG 桩桩长、桩径、桩体模量和临近基坑距离的变化均对基坑开挖呈有利作用等影响规律,结果可供工程实际应用参考。

关键词 基坑工程;复合地基;基坑稳定性;滑裂面;数值模拟

中图分类号 TU472 文献标志码 A

Numerical Simulation Study on the Effect of Composite Foundation on the Stability of Adjacent Foundation Pit

ZENG Li¹, CAI Yunpeng¹, LI Mingyu¹, YANG Xiao², LI Yutao³

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. Wuhan Metro Group Co. Ltd., Wuhan, China, 430070; 3. China Construction Communications Construction Group Co. Ltd., Beijing, China, 100071)

Abstract: Based on the existing modeling methods of foundation pit stability analysis, a detailed study on the deformation and stability of deep foundation pit adjacent to composite foundation is carried out. A three-dimensional numerical calculation model was established based on the foundation pit project in Zhengzhou, and the influence of different deformation characteristic

收稿日期:2022-09-02

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42107196)

作者简介:曾力(1972—),男,副教授,博士,主要从事基坑工程设计理论等方面研究。

parameters, such as the horizontal displacement of retaining pile, the stability coefficient of foundation pit, the position and state of sliding surface of foundation pit, on the behavior of the foundation pit was analyzed, and then the influence of pile conditions of existing building composite foundation on the stability of the foundation pit was studied. Results show that the stability coefficients of foundation pit adjacent to composite foundation are greater than those of pile foundation and natural foundation, and the peak value of horizontal displacement of retaining pile is 40% less than that of natural foundation; the sliding surface of foundation pit under composite foundation and pile foundation is similar, extending from the middle of foundation to the bottom of foundation pit; when the length of CFG pile exceeds one time of the excavation depth, the pile diameter exceeds 0.7 m, and the pile rigidity reaches 500 kPa, the intersection position between the sliding surface and the ground will not change. When the distance between composite foundation and the adjacent foundation pit exceeds one time of the excavation depth, the impact on the foundation pit can be ignored. So the stability coefficient of foundation pit adjacent to composite foundation is better than that of pile foundation and natural foundation. All the changes of CFG pile length, diameter, pile modulus and distance from the foundation pit are beneficial to foundation pit excavation.

Key words: foundation pit works; composite foundation; foundation pit stability; slip surface; numerical simulation

复合地基是一种通过协调桩土变形共同承担上部荷载的人工加固地基,通常在天然地基中通过设置纵向或横向增强体而成^[1-2],通过设置增强体分担天然地基承担的荷载,将基底部分附加荷载通过桩体传至桩端,再传给桩端以下弹性模量及承载能力较大的岩土层^[3-4],从而达到减少或有效控制地基基础沉降量的效果。随着我国城镇建设的快速发展,很多基坑工程在密集楼群之间展开。同一基坑工程的周边,不同结构建筑类型采用不同的地基基础形式,附加荷载对基坑的影响及其之间存在的联系与区别都值得讨论^[5-7]。围绕上述问题,韩建勇等^[8-10]基于现场实测分析了深基坑开挖对邻近不同基础、建筑物内力及变形的影响,同时揭示了支护结构变形与基础沉降的内在联系。谢波、梁发云^[11-12]利用数值计算对邻近桩基的基坑开挖引起的土体变形问题进行了讨论,认为地下室和桩基的存在会降低基坑的水平位移,对基坑开挖存在有利作用。白璐^[13]通过室内试验并结合数值分析,发现基坑开挖会使得复合地基桩群中出现土拱效应及遮拦效应,并得到复合地基侧向卸载桩群

出现侧向位移的特征。综上所述,近年来已有成果主要围绕基坑开挖对临近天然基础、桩基础的承载力、变形及内力的影响进行相关分析,而对邻近复合地基的基坑滑裂面的位置与状态、基坑稳定性等方面的研究较少述及。通过对基坑滑裂面研究,分析滑面形状、位置以及支护结构的变形与内力,基于基坑滑裂面位置及状态确定基坑开挖的影响范围和程度,对基坑的稳定性具有重要意义。

综上所述,笔者依托郑州市黄河路西延隧道工程,以深基坑周围建筑物基础为研究对象,利用 PLAXIS 3D 软件分析了复合地基对基坑稳定性的影响,研究紧邻复合地基基坑开挖过程中基坑滑裂面分布特征和支护结构变形规律,并深入探究复合地基桩体参数变化对基坑稳定性的影响规律。

1 工程背景

郑州市黄河路西延隧道工程,设计全长 1 035 m,其中 U 型槽段长 62.3 m,过渡段长 80 m,明挖暗埋段长 591.87 m。笔者选择该工况典型断面进行模拟分析。基坑断面示意图如图 1 所示。

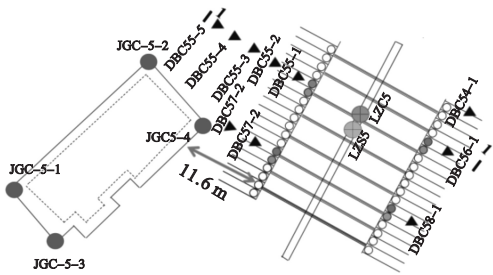


图1 基坑断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foundation pit section

基坑开挖深度为25.1 m,围护结构采用钻孔灌注桩(ϕ 1 200@1 500)加内支撑/预应力锚索。第一道支撑采用钢筋混凝土撑,水平间距4 m,第二、三道支撑采用钢管支撑,水平间距4 m;锚索水平间距1.5 m,竖向间距2.0 m,钻孔直径200 mm。距坑边11.6 m处有一砖混结构,地上7层,无地下室,基础为扩大基础,埋深约4 m。

地质勘探报告表明场地地基土均属第四系沉积地层,勘察期间地下水初见水位埋深为19.70~25.80 m,稳定水位埋深为19.20~25.30 m。

2 有限元分析

2.1 基本假定

依据工程实际,在有限元分析时做如下假定:①土体为各向同性的均质体,采用Mohr-Coulomb本构模型的实体单元进行模拟;②不考虑邻近基坑的建筑对初始地层位移的影响;③为简化分析,假定基坑开挖前,土体在自重作用下已经完成固结;④利用等效刚度原理将钻孔灌注桩等效为地下连续墙计算。

2.2 有限元建模

为了分析复合地基对邻近基坑稳定性的影响,利用有限元软件对基坑开挖进行全过程施工模拟。基坑开挖深度23 m,考虑到基坑的边界效应和周围建筑情况,模型长 \times 宽 \times 厚为200 m \times 200 m \times 100 m。

在计算中,地下连续墙使用板单元模拟,

板与土体间设置接触,厚度0.8 m,深度40 m;内支撑采用钢混支撑,水平间距5 m,均用梁单元模拟,坑外建筑物基础为天然地基基础,采用实体单元模拟,板和梁单元采用弹性本构模型。根据建筑结构荷载规范,考虑在天然地基上施加竖向荷载,模拟建筑荷载,砖混结构每层约为12 MPa。

2.3 计算模型准确性验证

本工程中每个监测断面基坑外地表沉降测点间距为2 m、7 m、14 m、22 m、30 m。为了能有效验证模型所采取的本构关系、边界条件的正确性,笔者根据基坑外地表沉降监测断面1(见图1)所测得的数据与本模型计算结果进行对比(见图2)。计算值与现场监测吻合度较高,这表明计算模型精度基本满足要求。

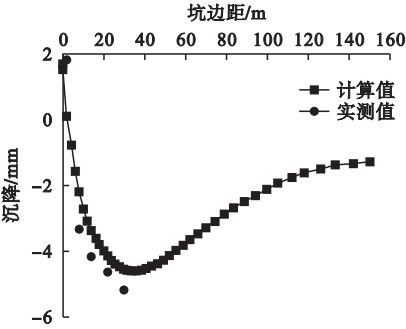


图2 截面1-1坑外地表沉降实测值与计算值对比

Fig. 2 Comparison curve between measured and calculated surface settlement of section 1-1 pit

2.4 邻近天然地基基坑模型

本模型开挖深度23 m,宽度20 m,支护体系采用上述方式,为简化计算,开挖长度一半分析。基坑右侧距离12 m处有一砖混结构,为扩大基础,埋深约4 m,基础采用实体单元进行计算。

2.5 邻近桩基础基坑模型

支护体系同邻近天然地基基坑稳定性研究,模拟数据借鉴其他资料中的桩基进行计算。桩体长为20 m,桩径为0.7 m,桩间距为2 m,刚度为1 100.0 (MN \cdot m²)/m,泊松比为

0.16,采用线弹性本构模型^[14],模型网格划分如图 3 所示。

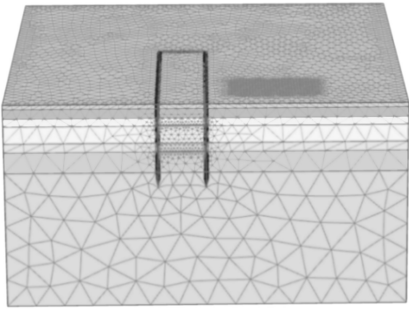


图 3 邻近天然地基基坑网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of meshing for foundation pit adjacent natural foundation

2.6 邻近复合地基基坑模型

支护体系同邻近天然地基基坑稳定性研究,模拟复合地基状态下的基坑开挖,数据借鉴其他资料中的 CFG 桩数据进行模拟^[15]。本次模拟增加褥垫层和 CFG 桩桩体,褥垫层厚度为 0.3 m,CFG 桩混凝土等级为 C25,桩间距为 2 m,长度为 20 m,桩径为 0.7 m,采用线弹性本构模型^[17]。模型网格划分如图 4 所示。

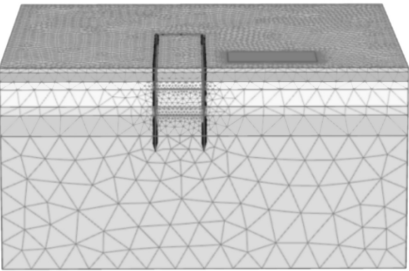


图 4 邻近复合地基基坑网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of meshing for foundation pit adjacent composite foundation

3 计算结果分析与对比

3.1 支护结构深层水平位移

紧邻天然地基、桩基和复合地基,沿支护结构深层水平位移对比曲线如图 5 所示。不同地基下支护桩水平位移随深度的增加都呈现出先增加后减小的趋势,其峰值均出现在

开挖面以上 20 m 位置处。邻近天然地基的基坑支护桩水平位移整体大于桩基础和复合地基,位移最大值达到 28 mm,较桩基和复合地基工况增大 40%,这是由于基坑开挖时复合地基和桩基中桩体分担了大部分上部荷载,使得桩间土所分担的荷载减小,导致作用在支护桩上的附加土压力减小,进而导致支护桩水平位移的减小,表明当临近建筑地基基础形式为桩基础或复合地基时,桩体对土体水平位移的约束作用,会给基坑开挖带来有利影响。

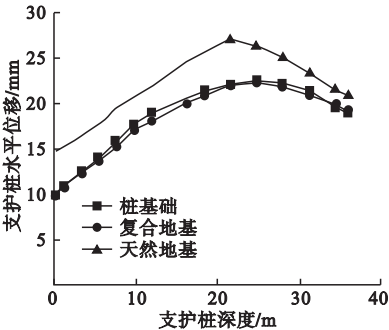


图 5 基坑支护桩水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curve of foundation pit supporting pile

桩基和复合地基桩身位移曲线尽管非常相似,但是复合地基和桩基础对上部荷载的传递方式及路径有很大区别,使得邻近两种地基下支护桩水平位移也有所差异。在桩端位置两者位移曲线存在交点,桩长深度为 10 m 和 15 m 时,桩基础下的桩身位移略微大于复合地基,这是由于相同上部荷载条件下,桩基础通过基础直接传递给桩体,而复合地基是通过褥垫层调节桩体和桩间土共同承担荷载,桩和桩间土共同形成“加固区”,承担了较大的侧向土压力,使得基坑开挖后,支护桩水平位移明显减小,表明复合地基的存在对基坑稳定性呈有利作用。

3.2 基坑稳定性计算

在进行整体稳定性分析时,PLAXIS 自带有内核程序 Phi-c 折减分析步,基本原理为将土体的强度参数黏聚力 c 和内摩擦角的

正切值 $\tan\varphi$ 同时除以一个折减系数 F , 得到一组新的参数值再进行计算, 直至达到极限平衡状态, 发生剪切破坏^[16]。其衰减函数为:

$$\tau = c/F + \arctan(\varphi/F).$$

(1)

经过这次折减后的剪切强度参数为 $c' = c/F$ 、 $\varphi' = \arctan(\tan\varphi/F)$ 。其失稳破坏的依据:①剪切面上位移突变;②产生很大并且无限制的塑性变形。整体稳定性系数 ΣM_{sf} 如下:

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan\varphi_{input}}{\tan\varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}} = \frac{S_{u,input}}{S_{u,reduced}}.$$

(2)

式中:下标 input 表示计算中强度参数初始输入值;下标 reduced 表示每一计算步强度参数折减后的值; φ 为土体内摩擦角; C 为土体黏聚力系数。

邻近不同形式基础基坑稳定性系数对比如表 1 所示。随着开挖进行, 基坑周围土体向坑内水平移动, 由于邻近复合地基桩体的存在阻碍了土体的水平移动, 使得荷载向下传递, 形成竖向土拱效应, 并且分担了一部分原来传到围护结构上的土压力, 有利于基坑支护结构的安全, 从而提高基坑的稳定性。

表 1 天然地基、桩基及复合地基稳定性系数对比

Table 1 Comparison of stability coefficients of natural foundation, pile foundation and composite foundation

地基类型	ΣM_{sf} 计算值	规范安全值	是否安全
天然地基	2.663	1.2	是
桩基础	2.704	1.2	是
复合地基	2.885	1.2	是

3.3 基坑滑裂面位置与状态

临近天然地基、桩基础及复合地基的基坑破坏滑裂面形态分别如图 6 ~ 图 8 所示。当临近基坑既有建筑物地基为天然地基时, 滑裂面位置由基础端部向基坑底部延伸; 桩基础和复合地基模型下, 基坑滑裂面形态大致相近, 从基础中部向基坑底部延伸, 减小了基坑开挖的影响范围。这是由于复合地基的

存在, 桩体与其周围土体互相作用形成的加固区对上部荷载起到应力传递的作用, 土的荷载分担比较天然地基大大减小, 并且加固区的桩间土刚度增大, 进一步限制土体滑裂面的增大, 对基坑的稳定性呈现有利作用。

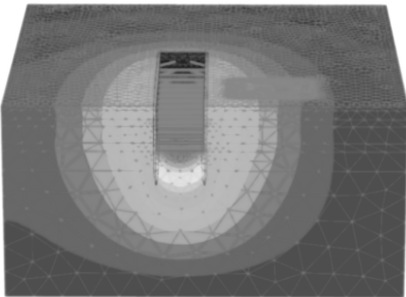


图 6 天然地基下基坑破坏滑裂面形态

Fig. 6 Slip surface shape of foundation pit failure under natural foundation

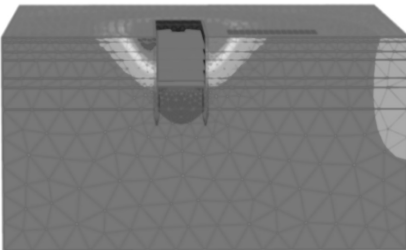


图 7 桩基础下基坑破坏滑裂面形态

Fig. 7 Shape of failure sliding surface of foundation pit under pile foundation

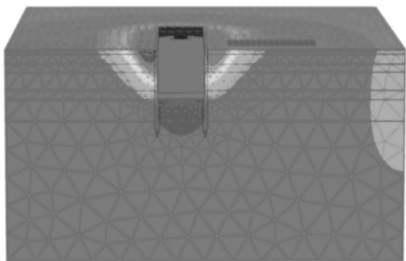


图 8 复合地基下基坑破坏滑裂面形态

Fig. 8 Slip surface shape of foundation pit failure under composite foundation

4 复合地基设计参数变化对基坑稳定性的影响

4.1 桩长变化对基坑稳定性的影响

在复合地基的基础上, 将复合地基中的

CFG 桩桩长与开挖深度比值分别设置为 0、0.25、0.5、0.75、1 和 1.25,分析复合地基桩长变化对基坑整体稳定性的影响。

图 9 给出了不同桩深比下基坑滑裂面位置的计算及拟合结果曲线。可以看出,随着桩深比增加,基坑滑裂面与地表交点的位置逐渐向靠近基坑方向移动;当桩长与基坑开挖深度的比值达到 1 后,基坑滑裂面位置由基础中部向基坑底部延伸,并保持不变。表明桩长在超过基坑开挖深度 1 倍后,桩长对基坑滑裂面位置的影响可以忽略不计;当桩深比介于 0.75~1 时,基坑滑裂面位置变化不大。

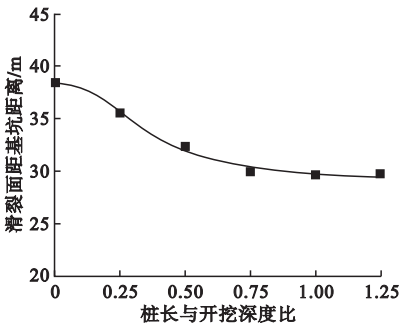


图 9 不同桩深比下基坑滑裂面位置变化曲线

Fig. 9 Variation curve of sliding surface position of foundation pit under different pile depth ratio

不同桩深比下基坑稳定性系数的计算及拟合结果如图 10 所示。整体上,基坑稳定性系数随着桩长的增加而增大。在桩深比小于 0.25 时,基坑稳定性系数变化不大,破坏形态与天然地基相似;在桩深比大于 0.25 后,基坑稳定性系数随着桩长的增加而明显增大;在桩深比达到 1 后,基坑稳定性系数增大不明显。结果表明:在桩长增加后,桩间土被加强范围沿着桩长增加,基坑稳定性逐渐增大;随着桩长的增大,更大范围内的土体水平位移被约束,基坑稳定性和滑裂面位置变化明显,此外桩分担的荷载也不断增加,桩间土分担的荷载就相应减小,使得桩体的遮拦作用越加明显,限制了土体的侧向位移,滑裂面位置向基坑方向移动。

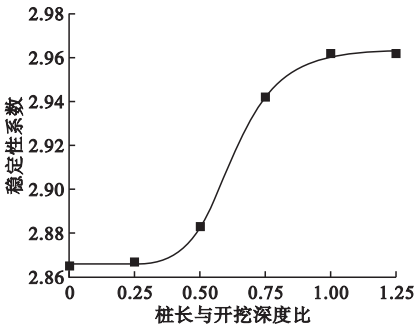


图 10 稳定性系数随桩深比的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of stability coefficient with pile depth ratio

4.2 桩径变化对邻近基坑稳定性的影响

在复合地基的基础上,将复合地基中的 CFG 桩桩径分别设置为 0.35 m、0.45 m、0.55 m、0.65 m 和 0.75 m,分析复合地基桩径变化对基坑整体稳定性的影响。

不同桩径下基坑滑裂面位置的计算及拟合结果如图 11 所示。整体上,桩径变化对基坑滑裂面影响不大,滑裂面位置大致都是从基础中部向基坑底部延伸。在桩径小于 0.55 m 时,滑裂面的位置随着桩径的增大越来越靠近基坑边缘,桩径的变化对滑裂面位置有明显影响;在桩径大于 0.55 m 时,虽然桩径的变化对滑裂面位置仍呈有利作用,但影响不明显;在桩径大于 0.65 m 时,滑裂面位置基本不变。

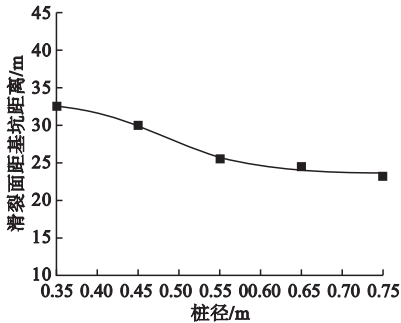


图 11 不同桩径下基坑滑裂面位置变化曲线

Fig. 11 Variation curve of sliding surface position of foundation pit under different pile diameters

不同桩径下基坑稳定性系数的计算及拟合结果如图 12 所示。在桩径达到 0.45 m 时,基坑稳定性系数存在最大值,之后随着桩

径的增大逐渐减小,在桩径达到 0.65 m 后,基坑稳定性系数保持不变。表明:CFG 桩径介于 0.45 ~0.55 m 时,对基坑稳定性存在有利作用,在桩径超过 0.55 m 后,对基坑稳定性的作用效果会随着桩径的增大而降低。基坑稳定性系数之所以会随着桩径的变化存在峰值点是因为桩径的改变,不仅改变了桩土荷载分担比,使桩间土所分担的荷载减小,桩间土应力也会减小(桩间土应力减小,桩间土达到受剪屈服的空间也就增大),进而对支护桩的附加作用力减小,基坑开挖时侧向位移量就会相对减小,同时桩径增大,意味着置换率增大,遮拦效应也在增大,进而限制了坑外土体的侧向位移,提高了基坑稳定性;之所以减小是因为基于 PLAXIS 的强度折减法,只对土体强度参数进行折减,并不对支撑结构进行折减,在桩径增大后,复合地基桩间土体积减小而在强度折减时过早失效,导致桩径增加而稳定性降低。

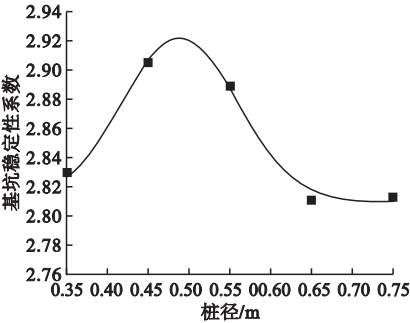


图 12 基坑稳定性系数随桩径的变化曲线

Fig. 12 Variation curve of foundation pit stability coefficient with pile diameter

4.3 桩体模量变化对邻近基坑稳定性的影响

根据混凝土强度等级的不同,将复合地基中的 CFG 桩桩体模量分别设置为 300 kPa、400 kPa、500 kPa、600 kPa、700 kPa,分析复合地基桩体模量变化对基坑整体稳定性的影响。

不同桩体模量下基坑滑裂面位置的计算及拟合结果如图 13 所示。当桩体模量小于

500 kPa 时,基坑滑裂面位置随着桩体模量的增大不趋向基坑内部,增大了桩间土体的刚度,使得土体滑裂面不断前移,进而减小基坑开挖卸荷对土体的影响范围。当桩体模量大于 500 kPa 后,基坑滑裂面位置无明显变化,且距基坑距离在 1 倍开挖深度左右,这是由于桩体刚度变化没有改变复合地基的面积置换率,仅仅使得桩间土体刚度增大,但土体加强区域并没有改变,因此滑裂面位置没有发生明显变化。

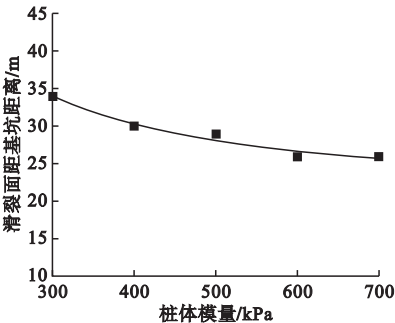


图 13 不同桩体模量下基坑滑裂面位置变化曲线

Fig. 13 Variation curve of sliding surface position of foundation pit under different pile modulus

不同桩体模量下基坑稳定性系数的计算及拟合结果如图 14 所示。整体上,随着 CFG 桩体模量的增大,基坑稳定性系数也在不断增大,在桩体模量为 500 kPa 时基坑稳定性系数存在最大值。这是由于桩身刚度增大到一定值后,对桩和桩间土的荷载分担比已然影响不大,坑外土体的应力场也不会随着桩身刚度变化出现明显变化,而桩体对土

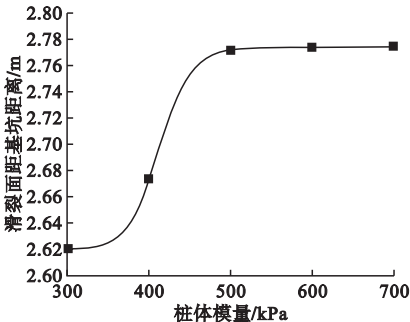


图 14 基坑稳定性系数随桩体模量的变化曲线

Fig. 14 Variation curve of foundation pit stability coefficient with pile modulus

体位移的遮拦作用又是相同的(桩数和桩径没有变化),因此存在峰值点。在桩体刚度超过500 kPa后,基坑稳定性系数保持最大值且不变,这是由于在强度折减法计算中只会对土体进行强度折减,所以桩体刚度增大到一定程度后,强度未发生变化的土体在计算中由于折减先发生破坏,使得计算得出的基坑稳定性变化较小。

4.4 基坑与复合地基距离的变化对邻近基坑稳定性的影响

在复合地基的基础上,将复合地基中的基坑与复合地基的距离和基坑深度比值设置为 0.2、0.6、1、1.4 和 1.8,分析基坑与复合地基距离的变化对邻近基坑整体稳定性的影响。

复合地基不同作用位置下基坑滑裂面位置的计算及拟合结果如图 15 所示。基坑滑裂面位置随着复合地基与基坑距离的减小而向坑内移动,在距离超过 1 倍开挖深度后,滑裂面位置基本不变。文献[17-18]提出,复合地基对基坑的最大影响范围为 1 倍基坑深度,笔者模型计算结果与之相近。

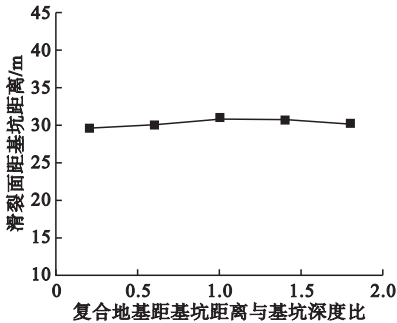


图 15 复合地基不同作用位置下基坑滑裂面位置变化曲线

Fig. 15 Variation curve of sliding surface position of foundation pit under different action positions of composite foundation

复合地基不同作用位置下基坑稳定性系数的计算及拟合结果如图 16 所示。整体上,随着复合地基与基坑的距离增大,基坑的稳定性系数几乎呈线性增大。在复合地基与邻近基坑距离超过 1.5 倍开挖深度后,邻近复

合地基对基坑稳定性系数尽管呈现有利作用,但几乎无变化,进而表明一定范围内复合地基对基坑稳定性呈有利作用。

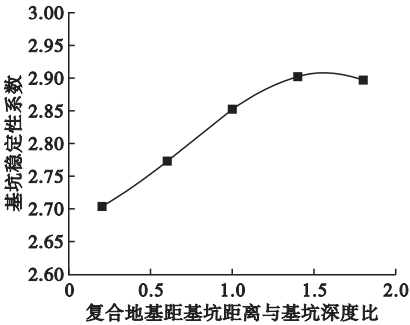


图 16 基坑稳定性系数随复合地基作用位置的变化
Fig. 16 Variation of stability coefficient of foundation pit with action positions of composite foundation

5 结 论

(1)邻近复合地基的基坑滑裂面位置由基础中部向坑底延伸,形态大致与邻近桩基础相近,而邻近天然地基下,基坑滑裂面位置由基础端部向基坑底部延伸。表明复合地基的存在抑制了开挖卸荷的影响范围,对基坑开挖呈有利作用。

(2)邻近复合地基的基坑整体稳定性系数约为 2.9,大于桩基础和天然地基,且支护桩水平位移峰值较天然地基减小 40%,表明复合地基的存在能够有效减少支护结构的水平变形,提高基坑稳定性。

(3)CFG 桩桩长在 1 倍基坑开挖深度内,对基坑滑裂面变化影响较大,桩长在等于 1 倍开挖深度时,基坑稳定性系数达到最大值且之后不再变化;在桩径超过 0.7 m 后,基坑滑裂面位置与稳定性系数均不再变化;在桩体模量超过 500 kPa 后,桩体模量对基坑的稳定性影响不再变化。表明 CFG 桩桩长、桩径、桩体模量的变化均对基坑开挖呈有利作用。

(4)复合地基距离基坑小于 1 倍基坑开挖深度时,对基坑滑裂面形态和位置变化影响较大,超出此范围,几乎无影响。

参考文献

- [1] 李连祥,白璐,陈天宇,等.复合地基与临近基坑支护结构之间距离影响规律[J].山东大学学报(工学版),2019,49(3):63-72.
(LI Lianxiang, BAI Lu, CHEN Tianyu, et al. Influence rule of foundation pit supporting structure and its adjacent composite foundation distance [J]. Journal of Shandong university (engineering science), 2019, 49(3): 63-72.)
- [2] 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 Xiaonan. Generalized composite foundation theory and engineering application [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2007, 29(1): 1-13.)
- [3] GHANBARI A, TAHERI M. An analytical method for calculating active earth pressure in reinforced retaining walls subject to a line surcharge [J]. Geotextiles and geomembranes, 2012(34):1-10.
- [4] 佟建兴,闫明礼,王明山,等.刚性桩复合地基侧向土压力试验研究[J].岩土力学,2014,35(6):1572-1578.
(TONG Jianxing, YAN Mingli, WANG Mingshan, et al. Experimental study on lateral earth pressure of rigid pile composite foundation [J]. Geotechnical mechanics, 2014, 35(6): 1572-1578.)
- [5] SHAO Y, CHEN C X, ZHENG Y, et al. Preliminary numerical analysis of the influence of pit-in-pit excavation on the stability of the foundation pit supported by diaphragm wall [J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2020, 570(11):23-26.
- [6] PUTRA P A, CHRISTADY H H, FIKRI F. Parametric study of the effect of ground anchor on deep excavation stability [J]. Journal of the civil engineering forum, 2020, 6(1):19-26.
- [7] XIA W Y, WANG W, YUAN J Q. The application of principal component analysis in stability evaluation of foundation pit [J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2020, 782(4):42-45.
- [8] 韩健勇,赵文,关永平,等.近接浅基础建筑物深基坑变形特性及关键参数[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(10):1463-1468.
(HAN Jianyong, ZHAO Wen, GUAN Yongping, et al. Deformation characteristics and key parameters of deep excavation adjacent to buildings with shallow foundations [J]. Journal of northeast university (natural science), 2018, 39(10): 1463-1468.)
- [9] YAO A J, ZHANG J T, ZHOU Y J. Study on the dynamic response of the steel pipe pile foundation during construction of neighborhood deep excavation [J]. Procedia engineering, 2016, 165:58-68.
- [10] ZHANG X M, YANG J S, ZHANG Y X, et al. Cause investigation of damages in existing building adjacent to foundation pit in construction [J]. Engineering failure analysis, 2018, (83):117-124.
- [11] 谢波.地下室及桩基础对邻近基坑开挖的影响研究[D].上海:同济大学,2007.
(XIE Bo. The influence to the excavation of foundation pit by the basement and piles nearby [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.)
- [12] 梁发云,李彦初.土体侧移模式对邻近桩基性状影响的三维数值分析[J].岩土工程学报,2011,33(增刊2):399-403.
(LIANG Fayun, LI Yanchu. Numerical analysis for effects of lateral soil movement on adjacent piles [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(S2): 399-403.)
- [13] 白璐.复合地基邻近基坑支护结构侧压力计算研究[D].济南:山东大学,2019.
(BAI Lu. Study on lateral pressure calculation of retaining structure of foundation pit to composite foundation [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019.)
- [14] 陈福全,汪金卫,刘毓胤,等.基坑开挖时邻近桩基性状的数值分析[J].岩土力学,2008,29(7):1971-1976.
(CHEN Fuquan, WANG Jinwei, LIU Yuchuan, et al. Numerical analysis of pile response due to braced excavation-induced soil lateral movement [J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(7): 1971-1976.)
- [15] 李连祥,张海平,徐帮树,等.考虑CFG复合地基对土体侧向加固作用的基坑支护结构优化[J].岩土工程学报,2012,34(增刊1):500-506.
(LI Lianxiang, ZHANG Haiping, XU Bangshu, et al. Optimization of excavation supporting structure considering foundation lateral reinforcement effect of CFG composite foundation on soils [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 500-506.)
- [16] 于鸿.桩锚支护体系基坑稳定性分析方法及应用研究[D].南京:南京理工大学,2013.
(YU Hong. Study on analysis methods and application about stability of deep excavation with pile-anchor structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2013.)
- [17] FU Q H, LI L X. Vertical load transfer behavior of composite foundation and its responses to adjacent excavation: centrifuge model test [J]. Geotechnical testing journal, 2021, 44(1):191-204.
- [18] 余蓉.地基基础形式的变化对邻近基坑性状影响的研究[D].太原:太原理工大学,2013.
(YU Rong. The research on behavior of adjacent excavation with changes of the forms of foundation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.)

(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)