

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.03.003

水闸深基坑开挖对紧邻桥梁桩基的影响分析

王 恒, 吕艳平, 陈福全, 林良庆

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 以厦门马銮湾水闸深基坑工程为研究对象, 邻近大桥位于水闸深基坑开挖区域之中, 下部结构为钻孔桩基础, 基坑开挖降水对该桩基础会造成显著影响, 为评估紧邻桥梁桩基产生的附加变形, 采用土工有限元分析软件, 考虑桩土相互作用, 建立基坑开挖模型, 土体采用 HS 模型模拟, 深入分析桩身水平位移和弯矩的变化特性, 并研究了基坑降水开挖时基坑与邻近桩基的间距、桩基刚度、支护刚度、桩头约束以及降水等各种影响因素。研究表明: 基坑的开挖降水对紧邻桥桩的影响效应明显。

关键词: 基坑开挖; 邻近桩基; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)03-00010-07

Analysis on Effect of Sluice's Deep Foundation Pit Excavation on Adjacent Piles of Bridge

WANG Heng, LYU Yan-ping, CHEN Fu-quan, LIN Liang-qing

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Based on the deep foundation pit of Maluanwan sluice in Xiamen, the near bridge is located in the excavation area of the pit. The lower structure of the bridge is a bored-pile foundation, so the excavation and dewatering will have a significant impact on the pile foundation. For evaluating the additional deformation of adjacent bridge piles, the geotechnical finite element analysis software is used to simulate the process of excavation. Considering the soil behaviors and the interaction between the piles and soil, Hardening-Soil model is adopted, and the excavation model is set up. The behaviors of the deflection and bending moments of piles are studied detailedly, and the effects of many factors on the behaviors of adjacent piles are investigated, including the net distance between excavation and pile, stiffness of pile, stiffness of diaphragm wall, constraint conditions of pile head, and dewatering. This study suggests that the excavation and dewatering have significant influence on the adjacent piles.

Keywords: foundation pit excavation; adjacent pile; numerical simulation

1 引 言

地下空间的利用和高层建筑的发展都与基坑开挖直接相关, 受到周围环境的限制, 基坑开挖引发的环境效应会对邻近基坑现有的建筑物或者桥梁的正常安全使用造成威胁。例如受基坑开挖作用, 土体不仅对邻近桥梁桩基产生水平推力, 而且土体的沉降会在桩基上产生负摩阻力, 在竖向和水平荷载的耦合作用下, 桩基受力复杂, 甚至可能使桥梁丧失功能, 如何使用有限元软件模拟预先估算量级, 有效控

制基坑开挖引发的效应, 评估各种因素对邻近桥梁桩基的影响, 对实际工程具有重要意义。

已有很多学者从理论公式的推导、有限元模拟以及离心试验等方面对基坑开挖与邻近桩基相互影响进行研究, 如 Polous^[1]等、Finno^[2]等。Goh^[3]通过有限元软件模拟, 研究了隧道基坑支撑开挖对邻近桩基的影响, 表明数值模拟结果与理论方法估算结果相差不大。Lee^[4]使用有限元软件研究黏性土固结沉降对单桩和群桩的影响, 重点探讨不同桩土界面设置的影响。Leung^[5]通过离心试验及反分析法

研究表明挡墙支护的稳定程度对邻近桩基性质有很大影响。

杨敏^[6]等采用三维弹塑性有限元法,对双层地基条件下的基坑开挖与邻近桩基的相互作用进行研究,讨论了各种影响因素,为设计提供了一定理论指导。郑刚等以某实际工程为算例,采用三维有限元法计算,研究表明桩身抗弯刚度、桩顶荷载等均对桩基受基坑开挖作用的影响大小和性状有显著影响。杜金龙^[7]等则考虑了基坑开挖的时间效应,利用有限元分析探讨了本构模型、应力历史、降水等对桩基受力变形性状的影响。陈福全^[8]等进行了基坑开挖时邻近桩基性状的数值分析,考虑了不同开挖深度、支护桩的刚度、桩基刚度、桩基距基坑开挖面距离、桩身的约束和桩长条件下桩身水平位移和弯矩的变化特性。

杨庆年^[9]等采用有限差分的方法,模拟邻近高架桥的深基坑开挖,重点探讨开挖各个阶段以及不同支护埋深下,高架桥桩基的变形特性,但模拟中土体的模型都采用摩尔库伦本构模型,模拟开挖卸载时产生的土体位移偏大,与实际不符。梁发云^[10]将土体位移作为边界条件输入,讨论不同土体侧移模式对邻近桩基承载和变形性状的影响。褚峰^[11]、黎科^[12]、张羽^[13]等学者也对各种基坑开挖影响邻近桩基的因素开展相应研究,并取得一定成果。

本文以厦门马銮湾水闸开挖工程为算例,采用土工有限元软件 Plaxis8.5,建立二维有限元分析模型,探讨实际土层分布情况下,桩基与基坑间距、桥梁桩基刚度、桥梁桩顶约束、降水以及支护刚度等桩基附加弯矩、位移的影响。

2 工程背景

所选取的分析断面中钻孔揭露深度范围内的岩土层按成因、形成顺序和岩性可分为:淤泥、素填土、回填土、抛石、抛砂、填砂、含泥中粗砂、残积砂质粘性土、全风化花岗岩共9层。马銮海堤西侧为马銮湾,湾内水体水面相对稳定,平均黄海标高为-0.5 m左右,水位波动幅度一般在0.5 m左右;马銮海堤东侧为厦门西港,根据厦门鼓浪屿观潮站资料,该海域高潮位为黄海标高3.70 m。新阳桥下部结构采用直径1.2 m双柱式钢筋混凝土桥墩,埋置式桥台,钻孔灌注桩基础,桩基直径1.5 m。

工程基坑总长304 m,西边为新阳大桥,两者相距只有24.3 m(中心线距离),如图1及图2所示。基坑抽水、开挖区域基本在新阳大桥桥下进行,其相

对位置与相关尺寸见图3。

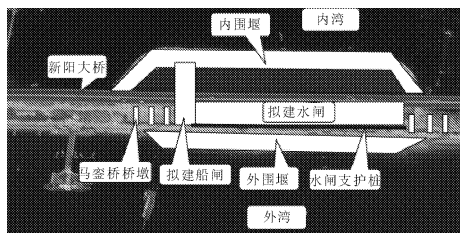


图1 工程平面图

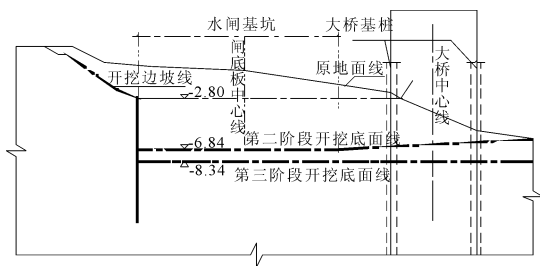


图2 开挖断面图(单位:m)

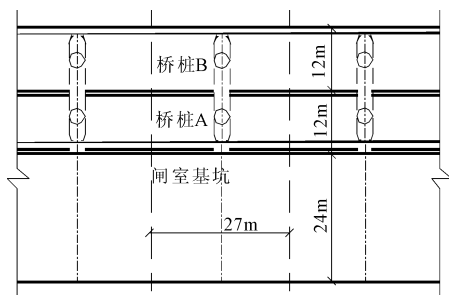


图3 桥梁桩基与闸室基坑相对位置图

3 二维有限元模拟

3.1 简化及假定

对于桩中心距小于3倍桩径时,采用平面有限元分析,考虑空间效应,可将桩基等效为板桩,通常弹性模量可按式^[14]计算。

$$E = \frac{E_p d + E_s (u - d)}{u} \quad (1)$$

其中: E_p 为桩基弹性模量, E_s 为土体杨氏模量, d 为桩边长, u 为桩间距。

基坑开挖的长度为304 m,宽度为24 m,长宽比远大于6,基坑变形可以简化为二维分析模型分析。对邻近大桥桩基础的影响分析分两部分,一是降水和开挖产生的推力均作用于桩基上,采用平面应变分析;二是桥间土体绕流分析,忽略桩的影响,计算降水时和开挖时计算域变形与潜在破坏机制,分析中施工过程模拟基本按施工方案进行。

3.2 本构模型的选取

本文采用HS本构模型进行土体应力应变关系

模拟。为了分析基坑开挖过程对邻近桥梁桩基的影响,考虑固结沉降分析以及工后沉降分析。着重分析土体变形的短期效应,故渗透性差的粘土层设为

不排水材料,渗透性高的砂石土层设定为排水材料,即进行有效应力法分析,分析的土体强度参数用勘察报告中给出的建议计算值见表 1。

表 1 土层计算参数

类别	素填土	抛石	抛砂	含泥中粗砂	残积砂质粘土	抛石淤泥	回填土	填砂	全风化花岗岩
土体模型	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	线弹性
排水类型	不排水	排水	排水	排水	不排水	不排水	不排水	排水	不排水
天然重度 $\gamma_{\text{天然}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	19.0	20.0	18.5	18.5	18.6	15.0	20.0	20.0	21.0
饱和重度 $\gamma_{\text{饱和}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	19.5	21.0	19.0	19.0	19.0	16.0	21.0	20.5	21.0
渗透系数 $k_x/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	3.4000	0	0	0	0.0780	0.0004	0.0780	0	3.1000
$k_y/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	3.4000	0	0	0	0.0780	0.0004	0.0780	0	3.1000
黏聚力 $c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	10	1	2	5	18.4	5	5	5	
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	15	38	30	28	29.7	15	15	30	
变形模量 $E_{\text{S0}}^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	6000	15000	9000	10000	13000	15000	13000	3000	
$E_{\text{od}}^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	6000	15000	9000	10000	13000	15000	13000	3000	
$E_{\text{ut}}^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	18000	45000	27000	30000	39000	45000	39000	9000	
$E^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$									100000
幂值 m	0.8	0.5	0.5	0.5	0.7	1.0	0.7	0.5	
强度折减系数 R_{inter}	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8				

3.3 建立模型

Plaxis 中选择平面应变模型,输入几何模型,整个几何模型使用几何直线选项产生。模型宽度取为 150 m,高度取为 40 m,基坑最大开挖深度为 8.24 m,基坑边缘到模型边界的距离大于 5 倍的基坑开挖深度,故所选取模型的高度和宽度能够满足基坑开挖所引起影响范围的要求,模型中土层单元采用 6 节点二阶三角形单元进行模拟,支撑采用锚杆单元模拟,见表 2。支护墙体、桥梁桩基采用梁单元模拟,见表 3。网格划分如图 4 所示。

表 2 锚杆属性

材料	材料类型	等效截面刚度	平面外距离
		$EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	L_x/m
腰梁	弹性	2.56×10^6	4

表 3 桩基材料特性

类别	大桥桥墩
材料类型	弹性
等效截面刚度 $EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	5.09×10^7
等效截面抗弯刚度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1})$	4.271×10^6
等效厚度 d/m	1.003
泊松比 ν	0.12

4 基本算例与桩土相互作用

土层参数详见表 1,计算步骤按照基坑降水开

挖过程进行,施工工况如表 4 所示,表中所设的时间都为分析所假设的时间。

基坑的开挖降水势必引起周边场地土体的应力和地下水位发生改变,使土体产生变形,对邻近桩基产生影响。图 5~图 7 为不同阶段施工过程完成后邻近桩基变形图。(向基坑方向为内侧,背离基坑方向为外侧)。

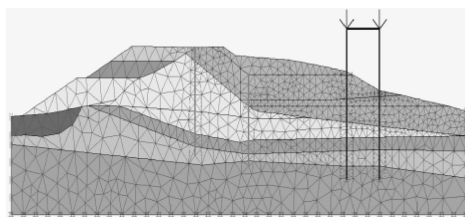


图 4 网格划分图

图中基本规律为:开挖过程中桩基向外侧偏移,降水过程中桩基向内侧偏移,降水开挖施工的交替进行,桩基的偏移量反复变化,最终变化趋势为向基坑方向偏移,最大偏移均位于桩顶处。桩基弯矩大小随开挖深度的增加而增加,施工各个过程中桩基下部的最大弯矩,主要集中于不同土层的分界面处;在上覆土体开挖完成后,桩基上部弯矩呈直线分布。

由于桩顶的固定约束产生的变形协调作用以及土层分布不同,B 桩基的弯矩曲线分布与 A 桩基有较大区别,但弯矩值处于同一数量级。B 桩基上部

的弯矩由于覆盖的土体较少,施工过程中弯矩呈直线分布,而下部的最大弯矩主要集中在不同土层的分界面处。

表 4 工况

工况	计算类型	时间/d	说明
1(初始平衡)	塑性分析	0	形成地应力场
2(桩基激活)	塑性分析	0	位移归零
3(一级降水)	固结	5	降水
4(一级开挖)	固结	5	开挖至 -1.8 m
5(支护激活)	固结	5	
6(固结)	固结	30	
7(二级降水)	固结	5	降水
8(二级开挖)	固结	5	开挖至 -6.84 m
9(固结)	固结	30	
10(三级降水)	固结	2	降水
11(三级开挖)	固结	3	开挖至 -8.34 m
12(固结)	固结	100	

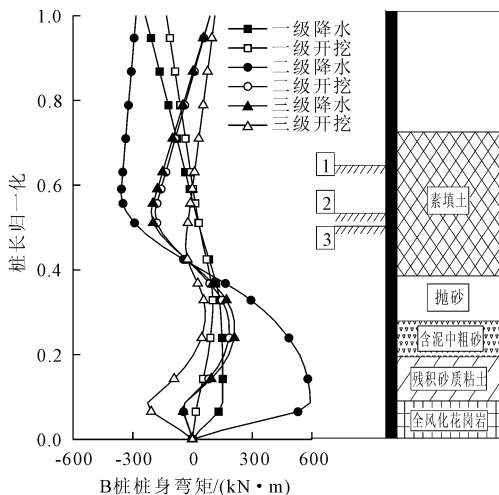


图 7 桩基 B 弯矩图

上述现象可按如下解释,随着开挖深度加大,周围受扰动土体范围增大,土体位移增大,在降水引起的渗透力作用下,桩基变形受力加大,并且由于土层分布的特点,基坑内土方呈斜坡式,造成降水和开挖所引起的土体位移方向不同,在降水过程中,水从土体中排出,土体发生沉降,向外侧移动作用于桥桩;开挖过程中卸荷,基坑底部土体产生隆起,基坑两侧土体向内偏移。

施工各个过程中桩基下部的最大弯矩,主要集中于不同土层的分界面处,这是由于土层交界面处模量发生突变造成的。

5 参数分析

为进一步了解基坑开挖对邻近桩基的影响,以上述所建立的有限元模型为基础,进一步探讨分析基坑与桥桩间距、桥桩刚度、支护桩刚度、桥梁桩顶承台等对桩基附加弯矩和偏移的影响。分析中不考虑桥梁桩基的长度的影响,假定长度不变,图形进行归一化处理,即距离桩底的距离与桩长的比值,取桩基 A 进行分析。

5.1 桩和基坑距离的影响

上文分析可知第二阶段施工对邻近桩基影响最大,取第二阶段施工产生的影响进行分析,桥梁桩基距基坑开挖面支护桩净距离 L 分别取为 27.5 m, 32.5 m, 37.5 m, 土层参数等条件与前面的工程一致。图 8 和图 9 为第二阶段施工完成后邻近桥梁桩基 A 的阶段偏移和最终弯矩分布规律图。

研究表明开挖阶段中,开挖区域与被动桩越邻近,弯矩就越大,嵌固下卧层的桩身最大弯矩仍然都是发生在土层的交界处;在上部软土层作用,距离越

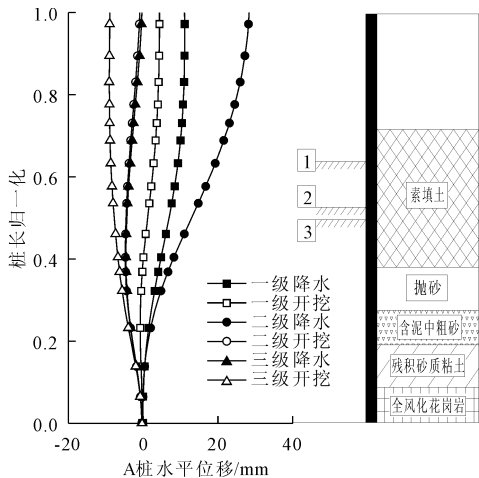


图 5 桩基 A 侧向位移图

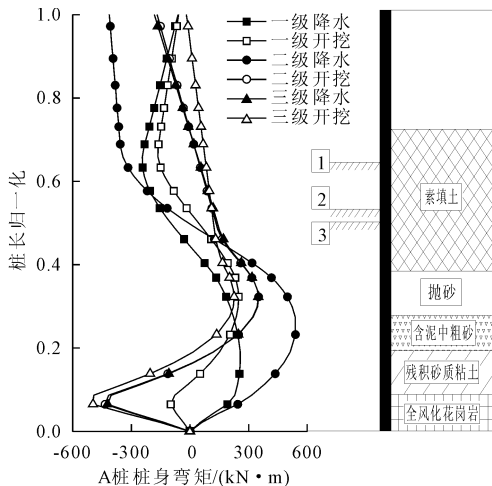


图 6 桩基 A 弯矩图

近,桩基弯矩曲线变为线性变化。桩的最大的侧向位移都发生在桩顶,随作用距离的增大而减小。这与 Leung^[5]的离心模拟试验结果相同。

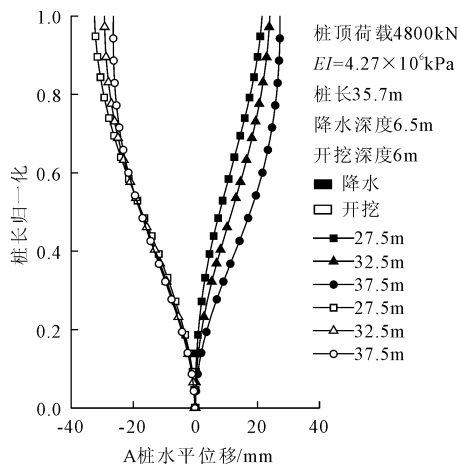


图 8 不同间距时桩基 A 侧向位移图

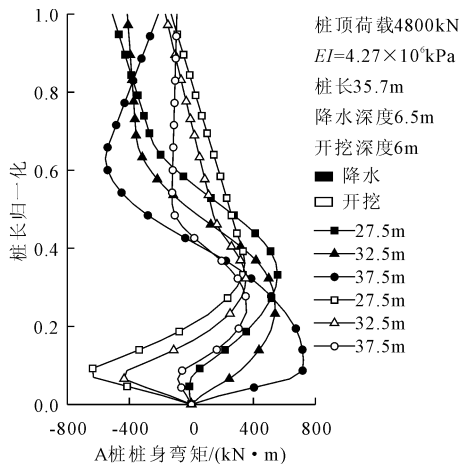


图 9 不同间距时桩基 A 弯矩图

在降水阶段,开挖区域与被动桩越邻近,桩身的水平位移越小,这是因为第二阶段降水主要作用于桥桩下的斜坡土体,桩基位移量大小取决于 A 桩基与斜坡的相对位置。

基坑开挖与降水导致的土体位移对桩基的作用呈相反的趋势,基坑降水过程中应注意场地情况。

5.2 桥梁桩基刚度的影响

由于桩基受到土体位移作用后,产生了桩身附加弯矩和偏移,这种作用的效果与桥桩本身的刚度有很大的联系,分别取桩身弹性模量 4.27×10^5 kPa、 4.27×10^6 kPa、 4.27×10^7 kPa 三种情况进行对比,取第二阶段施工进行分析,土层参数条件与前述基坑工程一致。临近基坑的桥梁桩基的阶段偏移和弯矩变化如图 10 和图 11 所示。

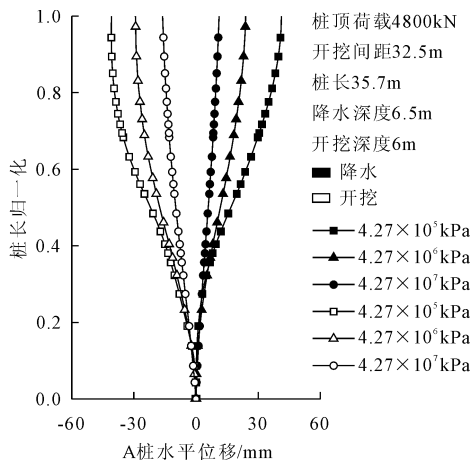


图 10 不同桩基刚度时桩基 A 侧向位移图

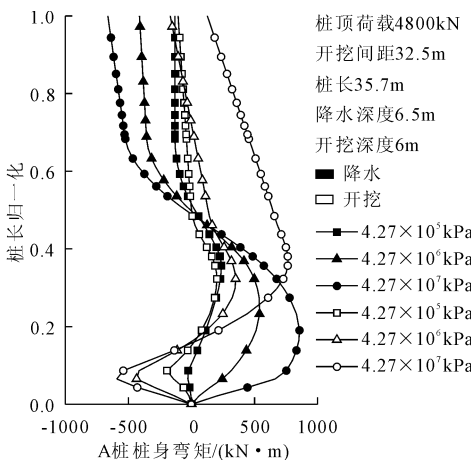


图 11 不同桩基刚度时桩基 A 弯矩图

随着桩基刚度的减小,桩身偏移量增大,而弯矩却减小,表现为柔性桩的性状,而当桩基刚度增大时,桩身偏移量减小,弯矩增大,表现出刚性桩的性状。可以初步地认为不管对于开挖阶段或者降水阶段,刚性桩和柔性桩在侧向位移的土体作用下的变形性状相似,桩体刚度越小,其侧移越大,桩基的最大偏移发生在桩顶,刚度越大,位移呈线性直线。

分析还表明柔性桩的桩身弯矩远远小于刚性桩,但它们随桩身分布曲线相似,弯矩曲线有明显转折点。开挖阶段最大的负弯矩都是发生在硬软土层交界面,而最大正弯矩发生软土层中部;降水阶段中最大的负弯矩发生在桩基的顶部,而最大正弯矩发生硬软土层交界面。

杨敏^[6]指出当桩基刚度较小时,桩基侧移较大,桩基上部所支撑的建筑物可能先发生破坏。而当刚度较硬时,桩基可能先破坏。

5.3 桥梁桩顶约束的影响

为了考察桩顶约束对被动桩性状的影响,在桩顶均采用梁单元模拟承台,分别取前排桩、后排桩桩

顶自由,前排桩后排桩桩顶有承台约束的情况进行分析,取第二阶段开挖施工进行分析,土层参数条件与前述基坑工程一致,其中桩基 A 较桩基 B 更靠近基坑。邻近基坑的桥梁桩基阶段偏移和最终弯矩的变化情况见图 12 和图 13。

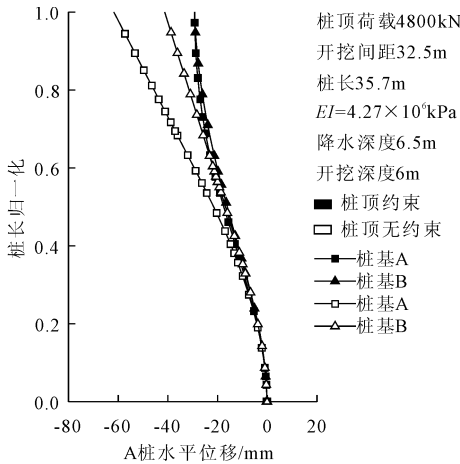


图 12 不同桩顶约束桩基 A 侧向位移图

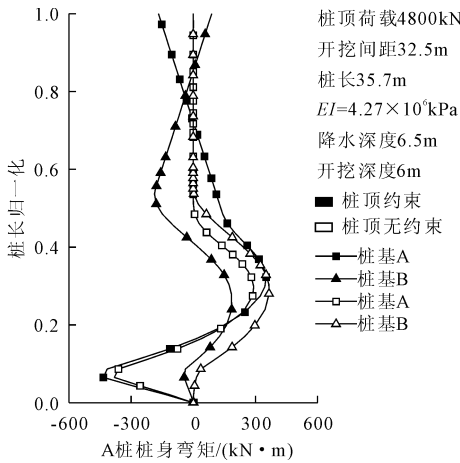


图 13 不同桩顶约束桩基 A 弯矩图

Poulos^[1]的试验结果表明:桩头固定时,在桩上部会产生较大的负弯矩。图中表明:桩基顶部自由时,桩基顶部的偏移变大很多,越靠近基坑的桩基 A 桩顶偏移越大;对于有承台约束的桩基,由于承台限制了桩的变形,桩顶偏移量减少了约 50%,承台起到了抑制桩身位移的作用。

对于桩身上部附加弯矩,顶部自由时,桩顶弯矩为零;桩顶约束时,由于承台的联结作用,双排桩协同变形,有一定量级的弯矩产生,曲线呈线性分布。开挖底面以下嵌固部分,弯矩曲线有明显转折点,有无承台约束对应桩基弯矩曲线变化趋势极其一致,但大小有所不同。

5.4 降水的影响

在基坑施工过程中,为避免产生流砂、管涌、坑

底突涌保证施工安全和减少基坑开挖对周围环境的影响,当基坑开挖深度内存在饱和软土层和含水层及下部承压水对基坑底板产生影响时,就需选择合适的降低地下水位或水头的方法对基坑进行降水。研究表明降水会引起地层压密而产生地面沉降,是由于含水层地下水位下降,土层内液压力降低,使颗粒间应力,即有效应力增加的结果,降水导致的地面沉降将对邻近桩基受力变形产生影响。模型模拟设定中为一次性降水至开挖面下 1.5 m 再进行开挖,取为工况一,共降水 5 m,工况二为降水 6 m,工况三为降水 7 m,土层参数条件与前述基坑工程一致,桩身偏移以及弯矩的变化规律如图 14 和图 15 所示。

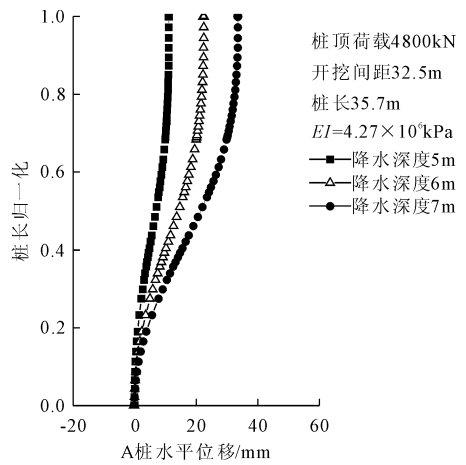


图 14 不同降水深度时桩基 A 侧向位移图

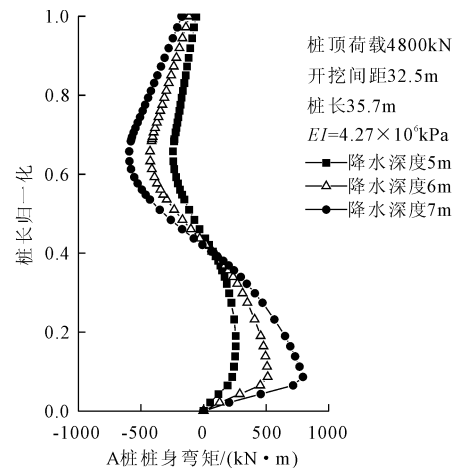


图 15 不同降水深度时桩基 A 弯矩图

分析表明工况三桥梁桩基的偏移达到 30 mm,这是因为降水后,坑内外的水头差导致坑外土体发生渗流,使土体位移显著增大,桩基发生较大的偏移;工况二时,桥梁桩基的偏移也达到 22 mm;对于工况一,桩基偏移为 11 mm,远小于上述两种工况产生的偏移。随着一次性降水深度的增加,桩基偏移增加。

对比图 15 中的各条曲线可以发现,工况三桩身的最大弯矩绝对值达到了 $794 \text{ kN}\cdot\text{m}$,工况二桩身的最大弯矩绝对值也达到了 $514 \text{ kN}\cdot\text{m}$,而工况一桩身的最大弯矩绝对值仅为 $258 \text{ kN}\cdot\text{m}$,远小于前述工况对应产生的弯矩,随着一次性降水深度的增加,桩基弯矩急剧增加。以上分析表明,在基坑降水开挖施工中,必须严格控制降水的高程,采取分步降水开挖交替进行的方式,严格按照规范规定降水至每级开挖底面以下 1.5 m ,同时应采取设置止水帷幕等措施,减少降水对周围环境的影响。

5.5 支护刚度的影响

一般来说,当支护桩墙刚度不同时,基坑开挖引起邻近的土体变形场是不同的,在此工程中支护桩和桥梁桩基分别位于基坑的两侧,为了分析这种效应,分别取支护墙体的弹性模量为 $5.04 \times 10^5 \text{ kPa}$, $5.04 \times 10^6 \text{ kPa}$, $5.04 \times 10^7 \text{ kPa}$ 三种情况进行对比,土层开挖深度取第三阶段开挖完成后的深度,土层参数条件与前述基坑工程一致,邻近基坑的桥梁桩基桩身偏移和弯矩的变化情况见图 16 和图 17。

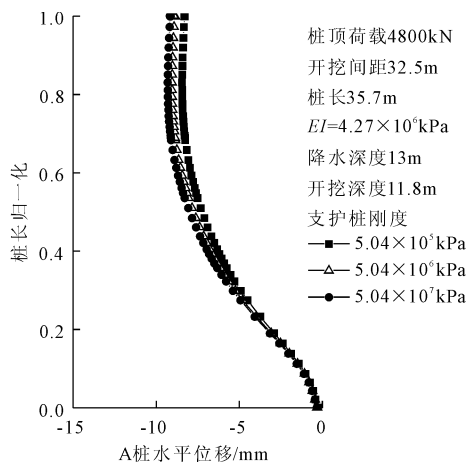


图 16 不同支承刚度时桩基 A 侧向位移图

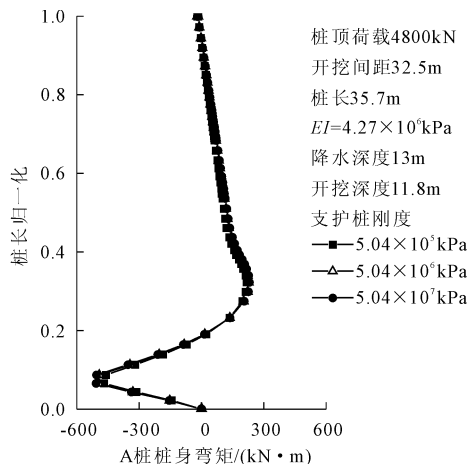


图 17 不同支承刚度时桩基 A 弯矩图

从上图中可以看出,此算例中支护桩距离桥桩较远,支护桩刚度越大,桥梁桩身略微增大,这是因为土体开挖卸荷,基坑底面发生隆起,支护桩刚度越大时,支护桩侧的土体向基坑内位移减小,桥梁桩基侧的土体,向基坑内位移量增大,导致桥梁桩基向基坑方向偏移增大,但变化量非常小。对于桩身弯矩而言,支护桩刚度的变化对其没有太大影响。

6 结 论

(1) 基坑开挖时,由于土体开挖卸荷,造成土体向开挖区域位移,促使桥梁桩基础向基坑开挖侧位移,在邻近桩基附近进行基坑开挖,会对桥梁桩基产生很大的影响。

(2) 降水对临近大桥桩基产生较大推力,桩基的存在起到了一定的遮拦阻挡效应,桩基产生较大侧移和附加弯矩,特别是大幅度降水会对桩基产生较大的影响,在施工便利条件下,降水速率与开挖速率尽量一致,分步交替开挖降水,可以使对大桥的桩基产生不利影响大幅度降低。

(3) 通过参数研究表明基坑与桥桩间距、桥桩刚度、支护桩刚度、桥梁桩顶承台等影响因素对桩基受力变形性状有明显影响,考虑土层的实际分布情况十分重要。

参考文献:

- [1] Poulos H G, Chen L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2): 94-99.
- [2] Finno R J, Lawrence S A, Allawh N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(6): 934-955.
- [3] Goh A T C, Wong K S, Teh C I, et al. Pile response adjacent to braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 383-386.
- [4] Lee C J, Ng C W W. Development of downdrag on piles and pile groups in consolidating soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 905-914.
- [5] Leung C F, Ong D E, Chow Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: Collapsed wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 45-53.
- [6] 杨 敏,周洪波,杨 桦. 基坑开挖与临近桩基相互作用分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 91-96.
- [7] 杜金龙,杨 敏. 软土基坑开挖对邻近桩基影响的时效分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1038-1043.

(下转第 22 页)