

# 某二线船闸开挖方式对跨线桥梁桩的影响规律



曾 勃<sup>1</sup>, 陈明芳<sup>2</sup>, 吕文舒<sup>3</sup>, 李 谦<sup>4</sup>

(1. 中国葛洲坝集团勘测设计有限公司, 湖北 武汉 430058; 2. 湖南联智科技股份有限公司, 湖南 长沙 410019;  
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 4. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 针对不同基坑开挖方式对邻近桥梁桩基的影响, 采用有限元建模分析法, 对某二线船闸工程确定2种不同的开挖方案: 方案1通过三级梯度以较大平均坡度方式开挖, 方案2通过四级梯度以较缓坡度方式开挖。计算分析2种基坑开挖方式对跨线桥梁桩水平位移、拉应力及弯矩的影响。结果表明: 平均坡度越陡的开挖方式其位移越大, 拉应力在开挖16 m处达到峰值, 同时方案2的弯矩值远小于方案1。成果完善了复杂船闸基坑工程施工领域的研究, 对今后该领域的工程设计及研究具有重要意义。

**关键词:** 二线船闸; 基坑开挖; 跨线桥梁桩; 方案对比

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0213-07

## Influential law of excavation mode of second-lane ship lock on beam pile of span bridge

ZENG Bo<sup>1</sup>, CHEN Ming-fang<sup>2</sup>, LYU Wen-shu<sup>3</sup>, LI Qian<sup>4</sup>

(1.China Gezhouba Group Survey and Design Co., Ltd., Wuhan 430058, China;  
2.Hunan Lianzhi Technology Co., Ltd., Changsha 410019, China;  
3.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;  
4.CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

**Abstract:** In view of the influence of different excavation methods on pile foundations of adjacent bridges, two different excavation schemes are determined by using finite element modeling analysis method for a second-lane ship lock project: Scheme 1 is excavation using a three-level slope with a larger average gradient, while Scheme 2 is excavation using a four-level slope with a smaller gradient. The influence of two kinds of excavation methods on the horizontal displacement, tensile stress, and bending moment of the bridge beam pile is calculated and analyzed. The results show that the steeper the average slope is, the greater the displacement is, the greater the tensile stress reaches its peak value at the excavation point of 16 m, and the bending moment value of Scheme 2 is far less than that of Scheme 1. The research results have improved the research in the field of complex lock foundation pit construction and are of great significance for future engineering design and research in this field.

**Keywords:** second-lane ship lock; excavation of foundation pit; beam pile of span bridge; scheme contrast

水运工程普遍在偏远、开阔地带建设, 随着工程升级改造力度不断加大, 出现了大量的扩改建工程, 由于征地及整体规划要求, 新建工程通常紧邻已有建筑物, 且需同时确保已有建构建筑物的正常运行, 因此, 对水运工程基坑工程的开挖方案有较高的要求。

某些船闸工程在施工范围内有跨越船闸的公

路桥梁, 在基坑开挖过程中需要保护桥梁桩基, 且由于开挖深度较大, 须考虑各类影响因素。对不同开挖方案进行科学比选, 以满足较高的基坑开挖要求。文献[1-4]利用非线性有限元计算方法, 研究基坑坡度和基坑离船闸范围等对已建工程的影响, 文献[5-7]对二线船闸基坑支护新形式和围堰进行全过程数值计算分析, 文献[8-10]利用

有限元计算, 进行软土地区深基坑开挖对临近桩基础建筑物的影响研究。本文利用 ABAQUS 有限元分析软件, 构建三维模型对 2 种基坑开挖方式下桩身拉应力、桩身水平位移、桩身弯矩进行计算分析, 并比对分析不同开挖方案对公路跨线桥梁桩的影响, 为复杂船闸基坑工程施工提供借鉴。

## 1 工程概况

某工程一、二线船闸相邻, 二线船闸在施工范围内有跨越船闸的公路桥梁, 在基坑开挖过程需要保护桥梁桩基。在船闸基坑未开挖时, 已将 4 根混凝土灌注桩打进坑内零号桥桩附近, 基坑开挖工程在浇筑加固承台后实施。桥梁桩基断面见图 1。

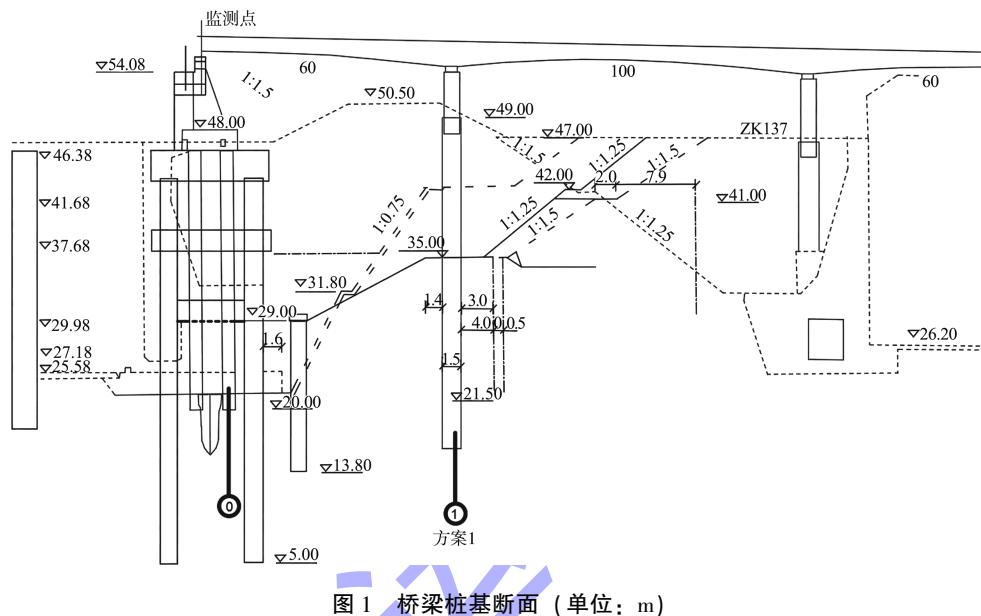


图 1 桥梁桩基断面 (单位: m)

基坑开挖有 2 种方案(图 2)。

1) 方案 1: 一梯级开挖边坡坡比为 1:1.5, 开挖深度为 5 m; 二梯级开挖边坡坡比为 1:0.75, 开挖深度为 10 m; 三梯级开挖边坡坡比为 1:0.75, 开挖深度为 10 m。

2) 方案 2: 一梯级开挖边坡坡比为 1:1.25, 开挖深度为 5 m; 二梯级开挖边坡坡比为 1:1.25, 开挖深度为 7 m; 三梯级开挖边坡坡比为 1:2, 开挖深度为 6 m; 四梯级开挖边坡坡比为 1:2, 开挖深度为 7 m。

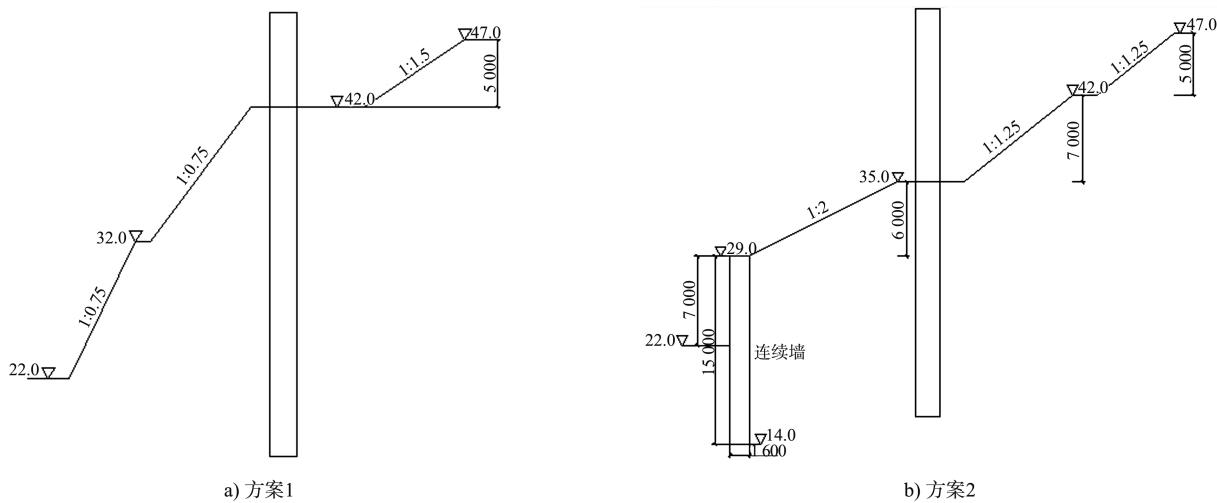


图 2 基坑开挖方案 (高程: m; 尺寸: mm)

## 2 模型的建立

采用ABAQUS软件构建三维数学模型, 根据 $1g$ 重力加速度条件下的原型尺寸选择模型域, 宽度区域设 $100\text{ m}$ , 深度区域设定为宽度值0.5倍, 厚度区域设定 $20\text{ m}$ 。以 $Y$ 轴反方向为下游方向,  $X$ 轴正方向为下游方向靠其右侧岸,  $Z$ 轴正方向作为桩基深度正方向。同时, 分别约束作为顺水流方向观测面及右侧岸观测面的 $Y$ 轴和 $X$ 轴方向, 底面六面体在3个方向上都约束。把桥梁桩体、和岩土体等则都选定成六面体八节点的三维单元实体, 其中规定岩土体单元的边线尺寸为 $2\text{ m}$ , 规定桥桩、桥梁、桥台单元的边线尺寸为 $1\text{ m}$ , 选定最大偏离因子为0.1。模型利用结构化网格划分技术, 并基于Mohr-Coulomb弹塑性屈服准则, 模拟岩土层开挖的方法选择生死单元法(Birth and Death)。方案1、2的数学模型如图3所示。

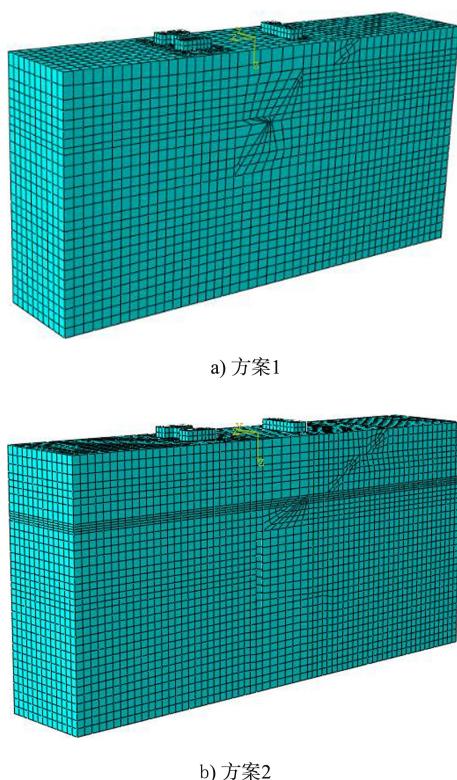


图3 有限元模型及网格划分

根据现场勘查报告, 分析各类土体的相关物理力学参数, 粉质黏土的天然密度为 $1.97\text{ t/m}^3$ 、

含水率为26.20%、压缩模量 $v$ 为 $8.25\text{ MPa}$ 、泊松比为0.30、黏聚力为 $31.30\text{ kPa}$ 、内摩擦角为 $14.50^\circ$ 。结果见表1。

表1 基坑开挖区域土体及桩基混凝土的物理力学指标

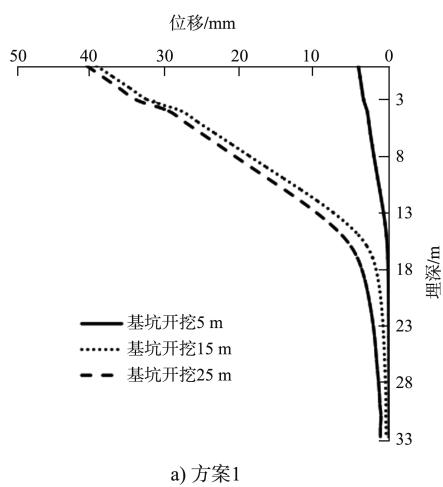
名称	天然密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	泊松比 $v$
圆砾	2.650	20	-	28	-
中风化砾岩	2.350	500	200	35	0.15
强风化含砾砂岩	2.050	1 500	20	25	0.25
中风化含砾砂岩	2.200	3 000	50	30	0.20
C30混凝土	2.400	28 000	-	-	0.20
C50混凝土	2.400	30 000	-	-	0.20

## 3 计算分析

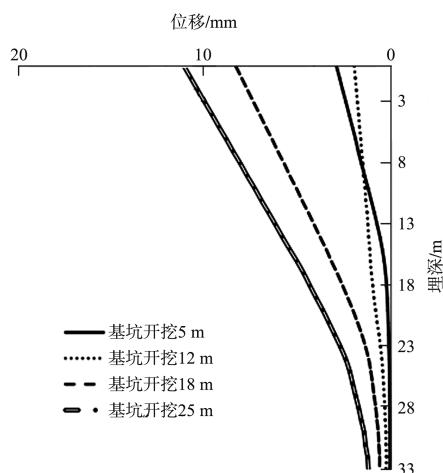
### 3.1 桩身水平位移变化

采用方案1开挖时1号桥桩桩身水平位移沿埋深变化趋势见图4a)。从图4a)可以看出1号桩身随深度的水平位移累计数值在埋深深度为 $16\text{ m}$ 处出现了较明显的变化。随着开挖深度的不断加大, 桩基朝着基坑 $X$ 负方向弯曲的位移也不断增加。由于桩基的下半部分位于硬质的岩层中, 第1~2层土开挖后上部桩体两边土压力荷载差值不断加大, 因此才会导致1号桥桩往基坑的方向产生了相对大的弯曲。

采用方案2开挖时1号桥桩桩身水平位移沿埋深变化趋势见图4b)。从图4b)可知, 开挖至 $5\text{ m}$ 时, 在埋深 $16\text{ m}$ 处水平位移变化明显, 以向 $X$ 反方向方式出现; 开挖至 $12\text{ m}$ 后, 1号桩身水平位移主要集中在桩顶至 $23\text{ m}$ 埋深处, 随着基坑开挖加深, 桩体朝反方向位移的幅度增大。在埋深 $10\text{ m}$ 处, 桩身位移有回弹趋势, 原因是方案2开挖方式离桩体较近, 上部原土压力差随着第1层土的开挖卸载后变小。随着基坑开挖加大, 桩基的下半部分位于硬质的岩层中, 而桩体上半部分在第2层土开挖完成后, 第3层土开挖使得桩两侧承受土压力荷载的差值继而增大, 所以桩体向基坑方向出现较大位移。2个方案水平位移累计值见表2。



a) 方案1



b) 方案2

图4 桩身水平位移沿深度分布

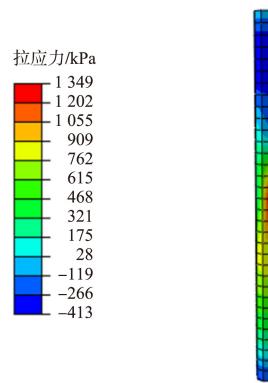
表2 1号桩桩身顶部水平位移累计值

方案	开挖深度/m	水平位移累计值/mm	
		5	4.2
1	15	39.1	
	25	40.4	
2	5	2.9	
	12	2.0	
	18	8.3	
	25	11.1	

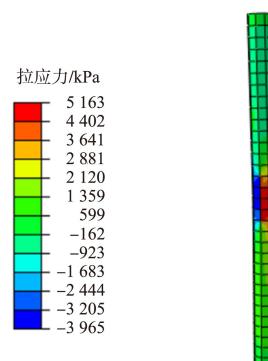
在数值计算的模型中,由于零号桩周边打入了加固灌注桩,并在基坑开挖完毕后,其向X正方向位移仅为1 mm,无明显位移变化,故不对其沿埋深方向的水平位移进行分析,也暂不讨论其桩身拉应力和弯矩变化情况。

### 3.2 桩身拉应力

根据如方案1桩身拉应力计算结果(图5),开挖至5 m时,第1层土的卸载导致1号桩体两侧的土压力变化,从而对桩身受拉情况产生影响。从图5a)可知,16 m深度的右侧桩身截面处为拉应力峰值,即1.35 MPa;基坑开挖深度至15 m后,从图5b)得出桩身侧面的土压力差达到峰值,右侧桩身的受拉程度也到达顶峰,拉应力峰值位置大致和前一开挖阶段保持一致,其值为5.16 MPa,此时的桥桩拉应力大于桥桩混凝土抗拉强度设计值(标准值 $f_{tk} = 1.78$  MPa);当基坑开挖25 m深时,桩身侧面的土压力差达到峰值,从桩身水平位移的变化可知,桩底产生少许偏移,所以右侧桩身受拉程度降低,此时的拉应力峰值的位置和前一开挖阶段大致相当,为4.69 MPa。综上,开挖过程中需要采取相应措施防止桩体因拉裂而产生破坏。



a) 基坑开挖5 m



b) 基坑开挖15 m

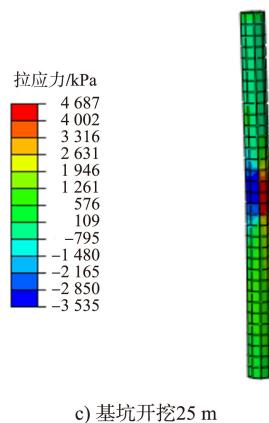


图5 方案1基坑开挖各阶段1号桥桩拉应力云图

根据方案2桩身拉应力计算结果(图6)可知:开挖至5 m时,随着1号桥桩周围土压力变化,桩身受拉程度受到影响。在16 m处右侧桩身桩截面处拉应力到达峰值,为1.1 MPa。当土层开挖深度到12 m后,右侧桩身受拉程度随着桥桩两侧土

压力差的不断增加而增加,1号桥桩上部的裸露部分在这一过程中也持续变多,拉应力峰值也会发生转移,从16 m埋深的右侧桩身桩截面处移动到23 m埋深处,为1.6 MPa;土层开挖深度到18 m后,桩身受拉程度与前一阶段一致,右侧桩身受拉程度继续随着桥桩两侧土压力差的增加而增加,拉应力峰值位置保持不变,为1.9 MPa,但是,此时的桥桩拉应力大于桥桩混凝土抗拉强度设计值(标准值 $f_{tk} = 1.78$  MPa);当开挖深度达到25 m后,桩身侧面土压力差达到最大,根据桩身水平位移变化规律,桩底产生了相比方案1偏移数值更大的现象,右侧桩身受拉程度减轻,拉应力峰值位置依旧和前一开挖阶段保持一致,为1.5 MPa。但是因为 $f_{tk} = 1.78$  MPa,所以方案2开挖阶段也需要采取相关保护措施,以避免桥桩因产生拉裂而被破坏。

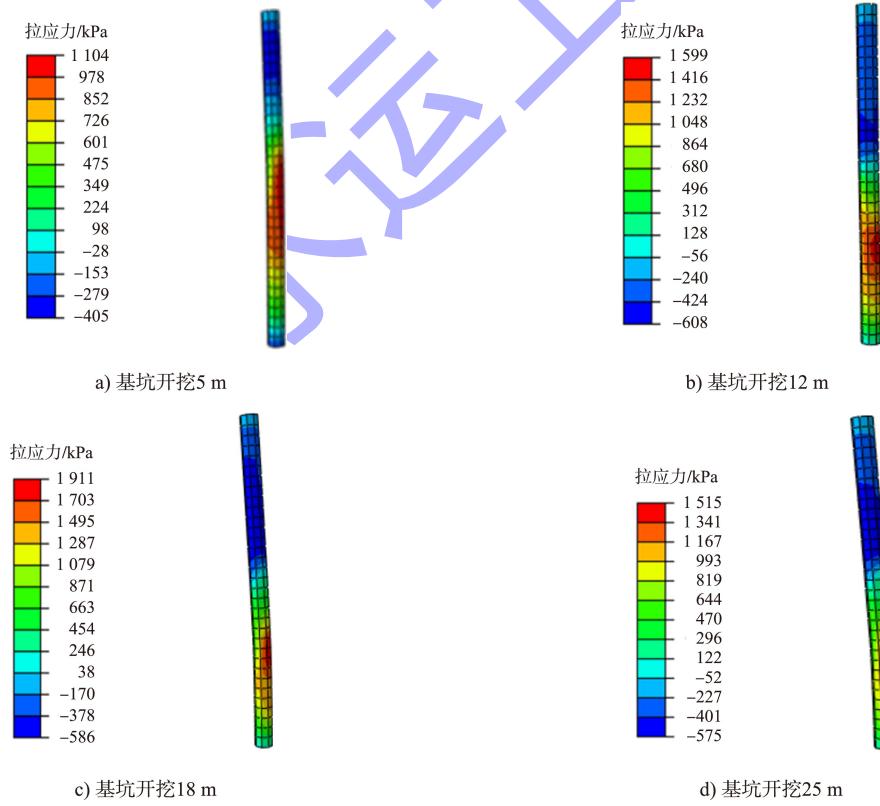


图6 方案2基坑开挖各阶段1号桥桩拉应力云图

### 3.3 桩身弯矩变化

方案1桩身弯矩沿深度分布见图7a),由图7a)可知:第1层土开挖至5m时,卸载使桩身周围产生土压力差,右侧桩身受拉,桩身向X正

方向产生弯曲,其弯矩分布为向正方向凸起;正弯矩峰值出现在位于中风化砾岩层的16 m深桩截面处,为778.5 kN·m;土层开挖深度到15 m时,右侧桩身受拉增大,桩侧土压力差及桥桩弯曲程

度不断变大, 正弯矩峰值出现的位置不变, 为 5 587 kN·m; 土层开挖深度到 25 m 后, 桩侧土压力差到达峰值, 由方案 1 桩身水平位移变化可知桩底发生轻微滑移现象, 桩身整体弯矩发生下降现象, 正弯矩峰值还是发生在 16 m 埋深处的桩截面, 为 5 027 kN·m。

方案 2 桩身弯矩分布见图 7b), 第 1 层土开挖至 5 m 后, 右侧桩身受拉, 桩身向基坑方向发生弯曲, 其弯矩分布表现为右侧凸起; 弯矩最大值发生在 16 m 深度中风化砾岩层桩截面处, 为

422.3 kN·m; 土层开挖深度到 12 m 后, 桩两侧土压力差、桩体弯曲程度及右侧桩身受拉继续增大, 1 号桥桩上部的裸露部分在这一过程中也持续增多, 正弯矩峰值移动至 23 m 埋深桩截面处, 为 359.5 kN·m; 土层开挖到 18 m 深时, 正弯矩峰值位置保持不变, 数值变为 926.2 kN·m; 土层开挖到 25 m 深后, 桩侧土压力差达到峰值, 由 1 号桩身水平位移变化可知桩底产生轻微滑移现象, 桩身整体弯矩下降, 正弯矩峰值依然处于 23 m 埋深的桩截面处, 数值为 800.4 kN·m。

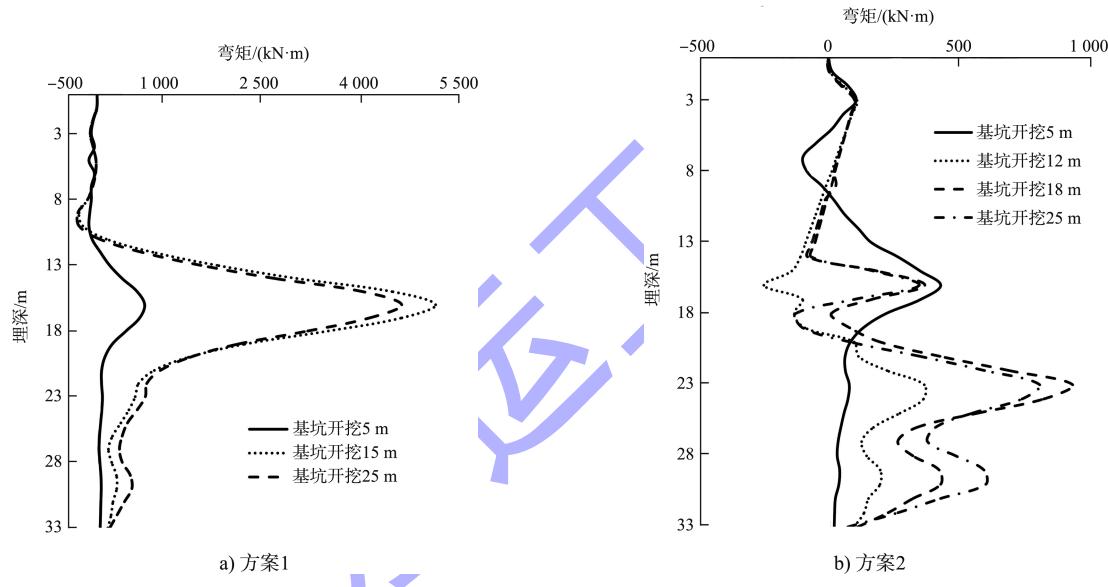


图 7 桩身弯矩沿深度分布

## 4 方案对比

### 4.1 桩身水平位移

对 2 种方案进行对比分析。1 号桩是桩身水平位移、桩身拉应力和桩身弯矩的主要集中处, 因而仅将 1 号桩的各项数据进行对比。

2 种基坑开挖方案至 25 m 后其桩身位移累计值(水平)见表 3。可以看出, 方案 1 水平位移值为 40.4 mm; 方案 2 水平位移值为 11.1 mm, 根据文献[11]第 6 节中关于单桩水平静载试验的规定, 得知 2 种基坑开挖方案均符合规范要求, 但是方案 2 桩身水平位移值远小于方案 1 的值, 因此在施工条件允许的条件下, 此基坑最佳开挖方案为方案 2。

表 3 1 号桥桩不同基坑开挖方式的  
桩身水平位移与实测位移值对比

方案	开挖 25M 水平位移累计值/mm	实测位移值/mm
1	40.40	38.54
2	11.10	12.38

### 4.2 桩身拉应力

1) 方案 1: 基坑开挖至深度 15 m 时, 1 号桩身拉应力为 5.16 MPa, 大于设计值( $f_{tk} = 1.78$  MPa), 因此要在开挖阶段采取相应的保护措施, 以避免桥桩产生拉裂破坏。

2) 方案 2: 基坑开挖至 18 m 深度时, 桥桩拉应力达到最大为 1.9 MPa, 大于设计值( $f_{tk} = 1.78$  MPa), 应在开挖阶段采取相应的保护措施, 防止桥桩出现拉裂破坏, 但其比方案 1 更为安全。

由上可知, 在施工条件允许的条件下, 基坑最佳开挖方案为方案2。

### 3) 桩身弯矩

方案1: 桩身右侧的受拉弯矩值设定为正值, 峰值为5 587 kN·m;

方案2: 桩身右侧的受拉弯矩值设定为正值, 峰值为926.2 kN·m。

因此在施工条件允许的条件下, 基坑最佳开挖方案为方案2。

## 5 结论

1) 基坑开挖深度不断加大, 桩身拉应力、桩身水平位移和弯矩值都会在一定程度上加大, 因此施工时应对相临边桩进行加固处理。

2) 2种方案均可以采用, 采用方案1时须采取保护措施, 且通过1号桩桩身拉应力、水平位移以及弯矩值的综合对比可知: 施工条件允许时, 基坑最佳开挖方案为方案2。

3) 有限元计算结果符合实测数据, 能很好地反映工程实际情况, 但未考虑桥梁上部分对桩基的作用、地下水及桩基土体接触等问题, 将作为下一阶段计算分析的重点。

## 参考文献:

- [1] 罗鹏飞, 刘晓平, 曹周红, 等. 邻近船闸基坑开挖安全影响因素[J]. 水运工程, 2016(4): 113-117.
- [2] 扈世龙, 刘晓平, 曹周红, 等. 复杂地基对坞式船闸结构的影响研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 124-130.
- [3] 郭力群, 程玉果, 陈亚军. 不同间距下相邻基坑相互影响数值分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 92-96.
- [4] 裴利剑, 屈本宁, 钱闪光. 有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3337-3341.
- [5] 杨光华, 黄忠铭, 姜燕, 等. 深基坑支护双排桩计算模型的改进[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 1-15.
- [6] 姜燕, 杨光华, 谢志杰, 等. 清远二线船闸典型基坑支护结构计算分析[J]. 广东水利水电, 2020(2): 20-28.
- [7] 黄忠铭. 基坑双排桩计算模型的探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [8] 吴迪. 基坑施工对临近既有建筑影响的数值分析[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(10): 100-102.
- [9] 米然. 深基坑开挖支护结构刚度变化对近邻建筑影响的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- [10] 詹兴家, 白才仁, 常晨曦, 等. 软土地区深基坑开挖对临近桩基础建筑物影响的规律分析[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(10): 163-164.
- [11] 中国建筑科学研究院. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第206页)

- [10] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified real-time object detection[C]// IEEE conference on computer vision and pattern recognition. New York: IEEE computer society, 2016: 779-788.
- [11] ABDEL-HAMID O, MOHAMED A, JIANG H, et al. Applying convolutional neural networks concepts to hybrid NN-HMM model for speech recognition[C]// International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). Washington D C : IEEE, 2012: 4277-4280.
- [12] ABDEL-HAMID O, MOHAMED A, JIANG H, et al. Convolutional neural networks for speech recognition[J]. IEEE/ACM transactions on audio, speech, and language processing, 2014, 22(10): 1533-1545.
- [13] DONG J, ZHANG J W, ZHU H H, et al. A remote diagnosis service platform for wearable ECG monitors[J]. Intelligent

systems, IEEE, 2012, 27(6): 36-43.

- [14] KADI I, IDRI A, FERNANDEZ-ALEMAN J L. Knowledge discovery in cardiology: A systematic literature review[J]. International journal of medical informatics, 2017, 97: 12-32.
- [15] XU J M, WANG P, TIAN G H, et al. Short text clustering via convolutional neural networks[C]// Proceedings of NAACL-HLT. Denver: ACL Anthology, 2015: 62-69.
- [16] 高君宇, 杨小汕, 张天柱, 等. 基于深度学习的鲁棒性视觉跟踪方法[J]. 计算机学报, 2016, 39(7): 1419-1434.
- [17] 王惠君, 赵桂萍, 李良, 等. 基于卷积神经网络(CNN)的泥质岩源岩TOC预测模型: 以鄂尔多斯盆地杭锦旗地区为例[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 103-112.

(本文编辑 武亚庆)