

# 咬合桩围护结构在桥梁浅基加固中的应用

——以陇海线坝河大桥加固工程为例

贺帅帅<sup>1</sup>, 王方旭<sup>2</sup>

(1. 中铁第五勘察设计院集团有限公司郑州分院, 郑州 450001; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 为探究咬合桩围护结构在浅基础加固中的力学特性,以陇海线坝河大桥为工程背景,选用 Mohr-Coulomb 本构方程,通过有限元软件 MIDAS/GTS 建立三维仿真模型,分析桩侧土体冲刷掏空对结构的影响,研究结构同一断面在不利工况下位移和内力的分布规律,并分析 II 序桩的种类、冠梁布置、桩径对加固效果的影响。结果表明:土体冲刷后控制位移发生在桩顶长边方向且方向向内;土体冲刷掏空后土压力达到峰值且桩底弯矩为零,同时桩顶产生一定弯矩且反弯点位于桩基中部偏下;左、右侧面与迎水面背水面在受力和变形上均对称;在 II 序桩为有筋桩时,其刚度对结构位移起到较大作用,无筋桩较有筋桩水平位移提高了 2.75 倍;冠梁作为边界约束对结构位移产生数量级影响,未冠梁较设冠梁水平位移提高 43 倍;咬合桩桩径与结构水平位移成反比,桩径对结构位移起到较大作用,桩径由 0.8 m 增加到 1 m,桩顶位移由 0.18 mm 增加到 0.41 mm。

**关键词:** 咬合桩围护结构; 浅基础加固; 数值分析; II 序桩; 冠梁; 桩径

**中图分类号:** TU470+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0249-06

随着经济发展,铁路运输需求增加,早期修建的部分浅基础桥梁土体流失问题日益凸显,使得桥梁乃至铁路的服役性能下降。特别是过洪桥梁,运行存在安全隐患,需对其结构技术状况进行评估并结合现场实际进行加固<sup>[1]</sup>。

常用的加固方式有局部防护、整孔防护和加深基础等<sup>[2]</sup>。局部防护适用于跨度较大、天然河床下切且河段冲刷较小、护基顶面设置在一般冲刷线以下的桥梁<sup>[3]</sup>。整孔防护适用于梁跨较小且净空允许。加深基础包括高压旋喷桩加固与咬合桩加固。高压旋喷桩加固法通过在基础周边施工大直径的旋喷桩,加固范围能深入至基础下方的基底,同时旋喷桩还能起到闭水及防冲刷作用<sup>[4-5]</sup>,旋喷桩对墩台基础进行加固时,可以采用水平或垂直方向,其加固效果也相当显著,但受限于加固静压灌浆难以改良的土体,如淤泥质软土和细粉砂等<sup>[6-7]</sup>。咬合桩加固桥梁扩大基础,通过形成一道密闭的钢筋混凝土桩墙,将桥梁扩大基础整体包围起来,以此作为永久性结构,其优点在于减少开挖土体对桥墩的干扰,围护结构可有效防止扩大基础以下土体被水流冲毁,从而避免水上交通等对桥梁的影响<sup>[8-9]</sup>。

以陇海线坝河大桥浅基加固为工程背景,建立三维有限元模型对加固过程及不利环境下的加固效果进行动态仿真模拟,研究咬合桩外侧土体冲刷动态变化引起扩大基础下部土体应力响应及加固结构内力响应。同时探讨了配置有矩形钢筋咬合桩的加固左右及桩径、II 序桩为有筋或者无筋、桩顶是否设置冠梁对加固效果的影响。

## 1 计算理论分析

### 1.1 土体本构模型

摩尔-库仑 (Mohr-Coulomb, M-C) 弹塑性本构模型涉及 5 个参数,分别为控制弹性行为的参数弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$ ,控制塑性行为的参数黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  和剪胀角  $\psi$ 。假定对一般的岩土非线性分析来说结果是可靠的,不同土体由不同参数决定<sup>[11-12]</sup>。与其他土木材料不同,土体几乎不抗拉,大部分情况下会发生剪切破坏。

在自重或外部力的作用下,岩土内部会产生剪切应力,随着应力的增加,应变也会增加。进而会沿某一平面剪坏,即为剪切破坏<sup>[13-14]</sup>。根据摩尔-库仑准则(图 1),土壤的剪切强度  $\tau$  可以表示为

$$\tau = c + \tan\varphi$$

**收稿日期:** 2023-11-08

**作者简介:** 贺帅帅(1992—),男,内蒙古呼和浩特人,助理工程师,硕士,研究方向为桥梁、岩土工程设计;王方旭(1992—),男,甘肃天水人,工程师,博士研究生,研究方向为桥梁工程理论。

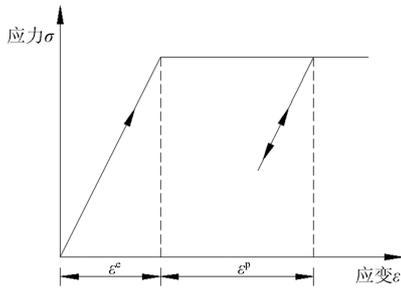


图 1 摩尔-库仑 (M-C) 准则

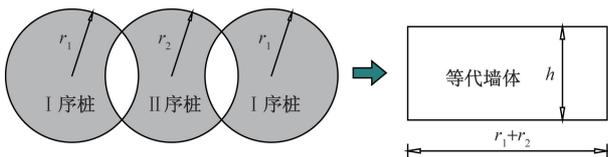
### 1.2 咬合桩等效抗弯刚度计算原理

咬合桩的结构形式:有筋桩与有筋桩、有筋桩与无筋桩。后者通常采用矩形配置的有筋桩或工字型钢配置的有筋桩。根据咬合桩的结构特点(即桩身相互连接形成连续桩墙),在实际工程计算中,咬合桩结构常被等效为抗弯刚度相等地下连续墙。等效原理如图 2 所示。

I 序桩与 II 序桩都提供抗弯刚度。当咬合桩结构采用有筋桩相互咬合的结构形式时,在等效地下连续墙后,推导其墙体厚度。I 序桩的截面惯性矩计算示意图如图 3 所示。

I 序桩的截面惯性矩为

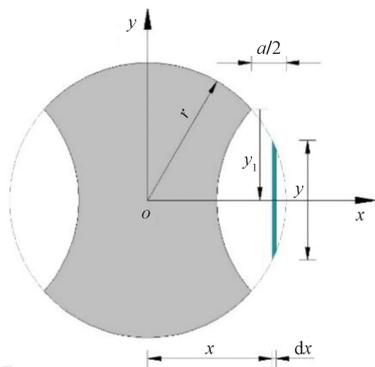
$$I_1 = 1/4\pi r_1^4 \quad (1)$$



$r_1, r_2$  分别为 I 序桩和 II 序桩的半径;

$h$  为咬合桩等效墙体的厚度

图 2 等效原理示意图



$r$  为桩的半径;  $y_1$  为咬合面处桩体厚度的一半;

$a$  为咬合量

图 3 I 序桩的截面惯性矩计算示意图

II 序桩的截面惯性矩为

$$I_2 = \frac{1}{4}\pi r_2^4 - 4 \int_{y_2}^{y_1} \left[ y^2 \sqrt{(r_2^2 - y^2)} - y^2 \left( r_2 - \frac{a}{2} \right) \right] dy = \frac{1}{4}\pi r_2^4 - y_1 \sqrt{(r_2^2 - y^2)} (2y_1^2 - r_2^2) + \frac{r_2^4 \sin^{-1} y_1}{r} - \frac{4}{3} y_1^3 (2r_2 - a) \quad (2)$$

再由刚度等效  $\frac{I_1 + I_2}{2} = \frac{(r_1 + r_2 - a)h^3}{12}$ , 即计算

算出咬合桩等效墙体的厚度为

$$h = \sqrt[3]{\frac{6(I_1 + I_2)}{r_1 + r_2 - a}} \quad (3)$$

咬合桩中 I 序桩、II 序桩承受的桩身弯矩按刚度分配进行计算:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{I_1}{I_1 + I_2} (2r_1 + 2r_2 - a)M \\ M_2 = \frac{I_2}{I_1 + I_2} (2r_1 + 2r_2 - a)M \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $M_1$  为 I 序桩的弯矩标准值,  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ;  $M_2$  为 II 序桩的弯矩标准值,  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ;  $M$  为换算墙体每延米的墙身弯矩标准值,  $(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$ 。

参考文献[15]与工程实践可发现,将咬合桩等效为地下连续墙进行计算得出的结果与真实情况更加符合,并且安全性也有保证。

## 2 工程概况

### 2.1 水文地质

本工程为陇海线坝河大桥浅基加固,根据陇海线 K859+727 坝河大桥的竣工文件及相关资料,该桥的孔跨样式为  $7 \times 27.7 \text{ m}$  预应力钢筋混凝土 T 形梁,梁底标高 440.93 m,全长 213.2 m,共有 6 个圆端型桥墩,且桥台和桥墩均为扩大基础。

该桥的设计流量  $Q_{100} = 1700 \text{ m}^3/\text{s}$ ,设计流速  $V_{100} = 3.44 \text{ m/s}$ ,洪水位高程  $H_{100} = 428.42 \text{ m}$ 。

经计算,在百年一遇洪水作用下,陇海线 K859+727 坝河大桥一般冲刷后,桥下局部冲刷线高程为 415.411 m。4# 墩处的局部冲刷深度  $h_b$  为 7.09 m,基底高程为 421.17 m,局部冲刷线在 4# 基底以下,小于基底埋置深度安全值,评定为浅基础<sup>[16]</sup>。

结合工程水文地质资料,由于坝河河道流量较大,局部冲刷较深,需对浅基采取防护。综上,本次防护采用咬合桩防护。

### 2.2 材料参数

材料参数见表 1。

表 1 材料参数

名称	卵石夹砂砾	泥质页岩夹砂岩	140 级片石混凝土	C30 混凝土
本构	M-C	M-C	—	—
$E/\text{MPa}$	487.8	$2 \times 10^4$	$2.2 \times 10^4$	$3 \times 10^4$
$\gamma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	17.8	20.9	24	26
泊松比 $\mu$	0.26	0.24	0.2	0.3
$c/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	0.2	0.5	—	—
$\varphi/(\text{°})$	48	50	—	—

### 2.3 构造尺寸

4# 桥墩咬合桩如图 4 所示,主要结构参数如下。

上承台:  $3.62 \times 11.52 \times 1 \text{ m}$ ; 下承台:  $4.72 \times 11.62 \times 1 \text{ m}$ 。

18 m 高墩顶截面: 半圆 ( $R=1.26$ ) +  $1.7 \times 7.90$  + 半圆 ( $R=1.26$ ), 以上部截面按 70:1 坡度扩大到墩底。

咬合桩: 桩径为 0.8 m, 桩间距为 0.6 m, 咬合 0.2 m, 桩长 14 m。

冠梁:  $1.0 \times 1.0 \text{ m}$ 。

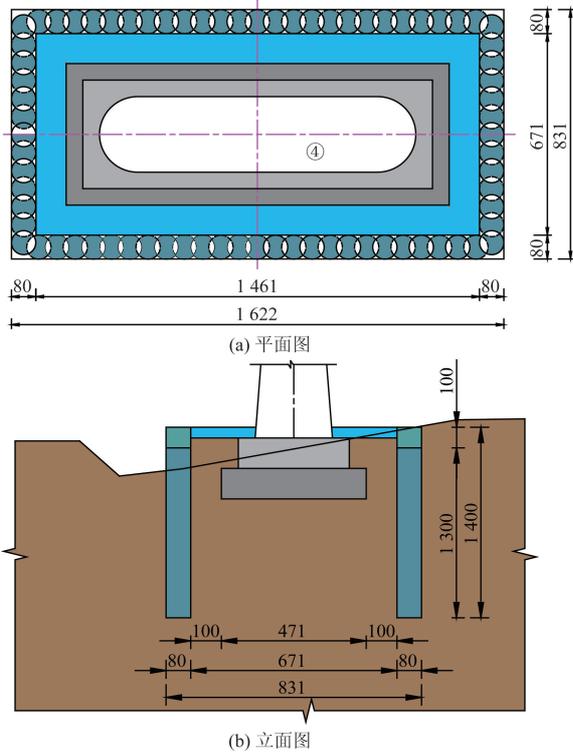


图 4 4# 桥墩咬合桩  
单位: cm

### 2.4 数值模拟

在数值模拟分析中,采用有限元软件 MIDAS/GTS。考虑到空间效应,有效影响范围沿  $x$ 、 $y$  方向各取 50 m。考虑尺寸效应,网格尺寸选用  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。

全过程模拟: ①初始应力场模拟。根据现有铁

路数据,考虑土体参数,计算应力场,位移清零。

②材料模拟。土体本构采用摩尔-库仑(M-C)模型,土层、基础、桥墩采用三维实体单元;咬合桩采用二维板单元模拟;冠梁采用线单元模拟。梁部荷载按照铁路桥梁设计荷载查取,并换算为均布力荷载施加在桥墩上。③边界条件模拟。顶面取为自由面,底面为竖向约束,其他表面均为法向约束。④施工阶段模拟。通过有限元软件的“激活”和“钝化”单元对现有桥梁基础概况不利工况进行模拟,划分为初始应力、围护结构施工、水流掏空土体 3 个阶段。模型如图 5 所示。

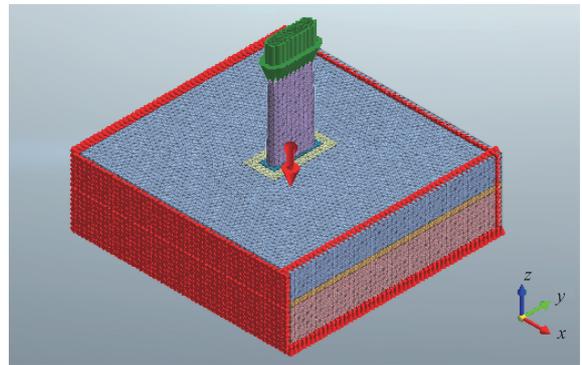


图 5 模型

## 3 结果分析

### 3.1 位移分析

通过建模分析,本工程引起地连墙顶沉降云图如图 6 所示,墙顶位移见表 2<sup>[17-18]</sup>。

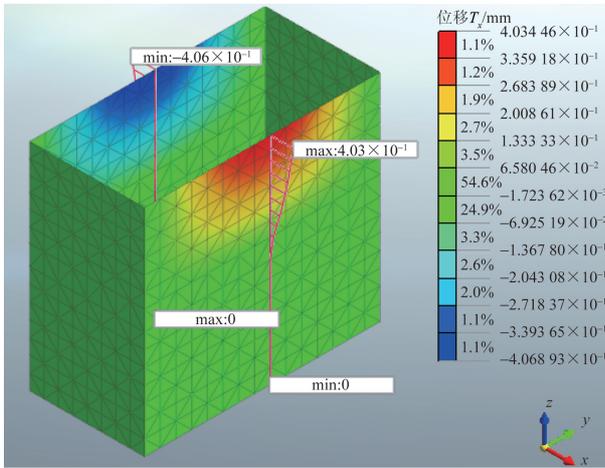
由图 6、表 2 可知: ①咬合桩外侧土体被全部冲刷掏空后,主动土压力达到峰值,这是因为侧向土体约束取消,此时桩顶位移也达到最大值,约为 0.410 mm。②计算得到的长宽比为  $15.4/7.5 = 2.065$ 。可以观察到,  $x$  方向位移远大于  $y$  方向位移,这种趋势对于整体位移起到了控制作用。桩顶位移趋势为长边外凸,短边内凹。③由于结构具有对称性,在不利工况下,左、右侧面桩顶位移均向外,位移为结构最大位移。

表 2 墙顶位移

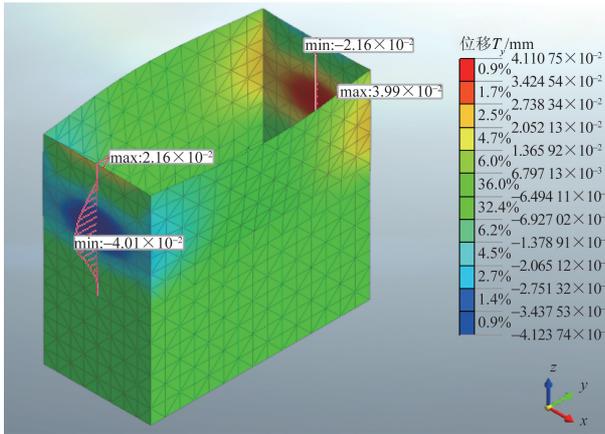
位移位置	迎水面	背水面	左侧面	右侧面
$T_x/\text{mm}$	0	0	0.406	0.403
$T_y/\text{mm}$	0.040	0.040	0	0
$T_z/\text{mm}$	-0.031	-0.031	-0.049	-0.049
总位移/mm	0.051	0.051	0.409	0.406
控制值/mm	10	10	10	10

### 3.2 内力分析

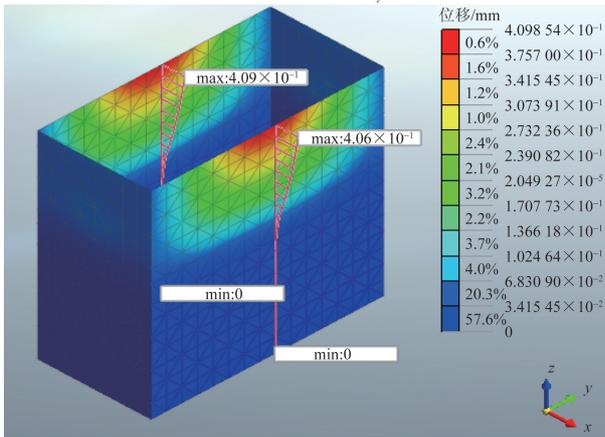
本工程引起地连桩顶弯矩云图如图 7 所示。咬合桩弯矩见表 3<sup>[19]</sup>。



(a) 墙顶x向位移 $T_x$



(b) 墙顶y向位移 $T_y$



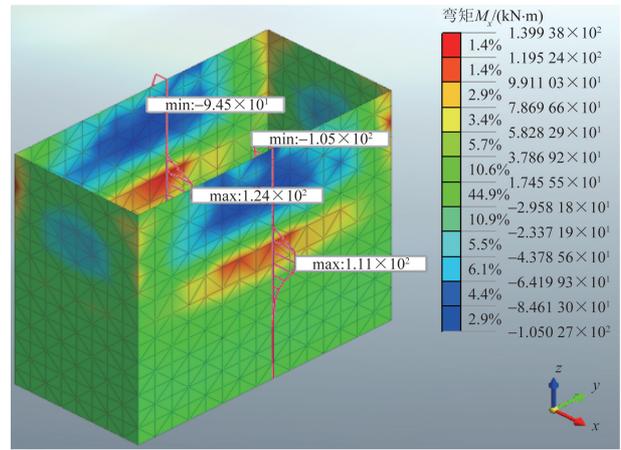
(c) 墙顶总位移

图 6 沉降云图

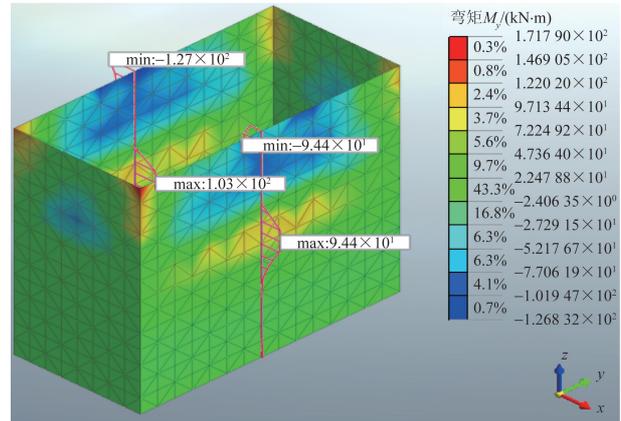
表 3 咬合桩弯矩

项目	$M_x/(kN \cdot m)$	$M_y/(kN \cdot m)$
最大值	139.9	171.8
最小值	-105.0	-126.8
设计值	139.9	171.8
容许值	696	696

由图 7、表 3 可知：①当咬合桩外侧土体被全部冲刷掏空后，侧向土体约束被取消，咬合桩受到的主动土压力达到峰值。在此情况下，桩底的弯矩为零，



(a) 绕x轴弯矩 $M_x$



(b) 绕y轴弯矩 $M_y$

图 7 桩顶弯矩云图

而桩顶由于冠梁的约束作用，其弯矩为  $-55 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。反弯点位于桩的中部偏下，最大弯矩为  $139.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，同时最大负弯矩为  $105 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，符合规范要求。②由于结构具对称性，在不利工况下，左、右侧面桩弯矩对称，反弯点高度一致，最大弯矩发生在下部弯曲段；迎水面、背水面桩弯矩对称，最大值发生在桩中部，不存在反弯点。

#### 4 参数分析

参考文献[20]，对咬合桩位移影响较大的有Ⅱ序桩的种类、冠梁及桩径，故选取这 3 个参数分析其对浅基础咬合桩加固形式中的变形影响。

##### 4.1 Ⅱ序桩的种类、冠梁设置

影响咬合桩内力位移的一个重要因素是桩身刚度。因此，有筋桩与有筋桩、有筋桩与无筋桩这两种不同的布置形式会对结构的位移和内力产生不同的影响。同时根据力学知识，桩顶的约束也会对结构的内力和变形产生一定的影响。基于这些基础，建立有限元模型，并分析在Ⅱ序桩不同布置形式下以及桩顶是否布置冠梁的情况下，桩顶、桩身水平位移，结果如图 8、图 9 所示。

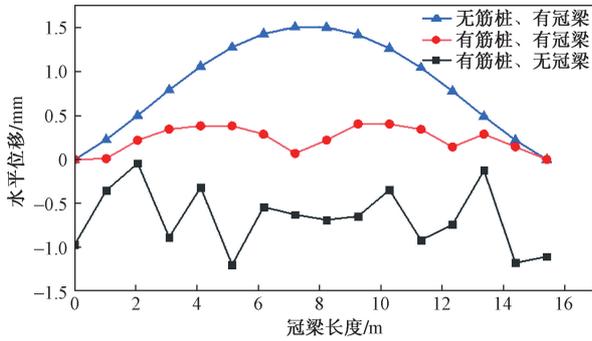


图8 不同布桩情况下桥梁扩大桩顶(或冠梁)水平位移

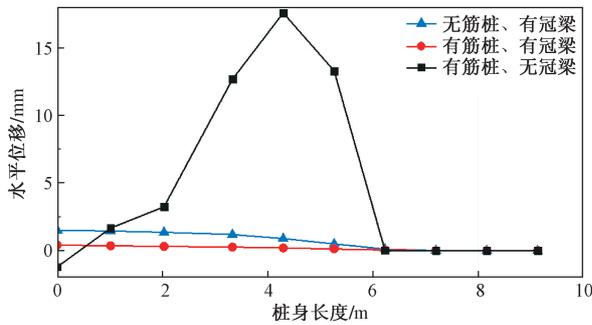


图9 不同布桩情况下咬合桩水平位移

根据图8和图9的数据分析可得,当Ⅱ序桩为无筋桩时,桩身的最大位移和桩顶(或冠梁)的最大位移均出现在桩顶位置,大小为1.50 mm,相较于有筋桩模型提高了2.75倍。

在没有冠梁的情况下,桩顶从横向约束转变为自由端,导致桩身的最大位移向下移动,在距离桩顶下方4.3 m处,其大小为17.58 mm,较有筋桩模型提高了43倍。

通过对比分析可以发现,Ⅱ序桩为无筋桩与有筋桩相比,结构位移明显不同,有筋桩的刚度对结构位移有显著影响;而有冠梁与无冠梁相比,结构位移发生数量级的变化,表明冠梁作为边界约束对结构位移有着重要的影响。

综上所述,Ⅱ序桩的刚度以及冠梁的约束作用都是不可忽略的。针对本工程,结合相关规范,建议采用有筋桩,并在桩顶设冠梁。

#### 4.2 桩径

桩径是影响咬合桩桩身刚度的一个重要因素。针对不同的桩径(1.2、1.0、0.8 m)建立模型,分析不同桩径下桩顶(即冠梁)的位移以及咬合桩桩身水平位移的变化情况,如图10、图11所示。

从图10、图11可以观察到,桩径的变化对桩顶(即冠梁)的位移以及咬合桩结构的水平位移产生了明显的影响。当桩径分别为0.8、1.0、1.2 m时,桩顶

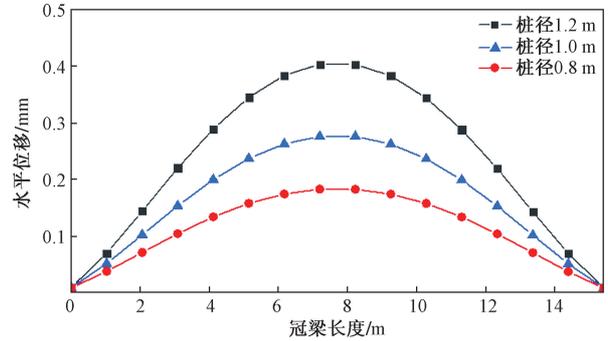


图10 不同桩径情况下桥梁扩大桩顶水平位移

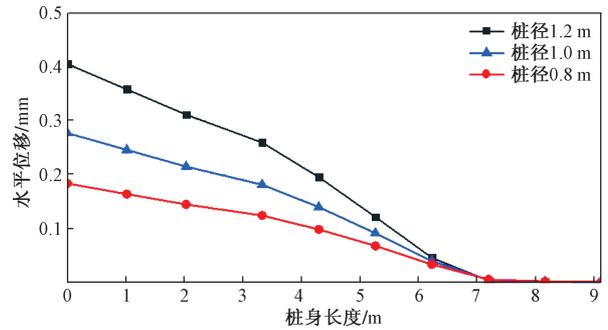


图11 不同桩径情况下咬合桩水平位移

(即冠梁)和桩身的最大水平位移发生在桩顶位置,其数值从0.41 mm降低到0.18 mm,减小了1.3倍。

由此可见,咬合桩桩径与结构水平位移成反比。根据实际工程中,可结合规范要求,选择合适的桩径,达到加固的最优效果。

## 5 结论

(1)在咬合桩受主动土压力的情况下,当咬合桩外侧土体被全部冲刷掏空后,侧向土体约束被取消,导致咬合桩受到的主动土压力达到峰值,并且桩顶的位移也达到最大值。

(2)根据计算得出长宽比为 $15.4/7.5=2.065$ ,发现 $y$ 方向位移远大于 $x$ 方向位移,桩顶位移趋势为长边外凸,短边内凹。长边方向起到了控制作用。

(3)结构具有对称性,在不利工况下,左、右侧面桩顶位移均向外位移为结构最大位移。

(4)在咬合桩外侧土体被全部冲刷掏空后,侧向土体约束取消,咬合桩受到的主动土压力达到峰值。此时桩底弯矩为零,而桩顶由于冠梁的约束作用存在一定的弯矩,反弯点位于桩中部偏下。

(5)在不利工况下,左、右侧面桩弯矩对称,反弯点的高度一致,最大弯矩发生在下部弯曲段;而迎水面和背水面的桩弯矩对称,最大值发生在桩的中部,并不存在反弯点。

(6)在比较Ⅱ序桩为无筋桩与有筋桩的情况

时,发现有筋桩的刚度对结构位移起到较大的影响;而在比较有冠梁与无冠梁时,发现结构位移发生了数量级的变化,冠梁作为边界约束对结构位移有着极大的影响。同时,咬合桩桩径与结构位移成反比,桩径对结构位移有较大的影响。

### 参考文献

- [1] 陈树礼,柳墩利,田波,等.重载铁路水冲受损桥墩组合加固技术[J].中国安全科学学报,2020,30(1):42-47.
- [2] 王礼兵.高压旋喷桩在现有桥梁基础加固中的应用[J].安徽建筑,2016,23(3):148-149.
- [3] 刘新乐,姬建华,王静波.复杂条件下超大深基坑入岩地下连续墙关键施工技术[J].施工技术,2020,49(13):76-80.
- [4] 朱琦,李帅,魏东旭,等.基坑支护结构的综合选型及受力与变形特性[J].科学技术与工程,2020,20(32):13369-13378.
- [5] 唐福源,衣利伟,曹勇,等.填海地层深基坑支护参数优选与基坑变形分析[J].科学技术与工程,2022,22(2):707-714.
- [6] 陈树礼,柳墩利,田波,等.重载铁路水冲受损桥墩组合加固技术[J].中国安全科学学报,2020,30(1):42-47.
- [7] 吴云鹏,陈明华,成定林,等.深水库区咬合桩围堰施工技术研究及监测分析[J].公路,2021,66(6):127-132.
- [8] 唐福源,衣利伟,曹勇,等.填海地层深基坑支护参数优选与基坑变形分析[J].科学技术与工程,2022,22(2):

707-714.

- [9] 牛东兴,王延玲,张晓林,等.某地铁深基坑咬合桩止水技术研究[J].科技和产业,2023,23(13):202-206.
- [10] 芮福才.水利工程基坑施工对临近桥梁墩台影响的数值模拟研究[J].水利科技与经济,2022,28(7):106-109.
- [11] 王延昭,梁汝鸣,秦春晖,等.某海边建筑深基坑支护方案探讨[J].建筑结构,2020,50(23):134-137.
- [12] 陈志乐,杨静思,刘林.双排咬合灌注桩在河道整治工程中的应用[J].水运工程,2020(7):164-167.
- [13] 谢欣,罗文升,周俊,等.混凝土咬合桩止水围护体系在基坑支护中的应用[J].建筑技术,2021,52(11):1297-1299.
- [14] 王军生.咬合桩在既有有线桥梁基础冲刷防护中的应用[J].高速铁路技术,2012,3(3):30-33.
- [15] 咬合式排桩技术标准:JGJ/T 396—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [16] 铁路路基支挡结构设计规范:TB 10025—2019[S].北京:中国铁道出版社,2019.
- [17] 欧阳明.圆形截面钢筋混凝土结构受弯配筋实用计算和应用研究[J].路基工程,2020(1):152-155.
- [18] 铁路桥梁检定规范:铁运涵 2004[S].北京:中国铁道出版社,2004.
- [19] 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [20] 黄文钰.咬合桩在桥梁扩大基础加固工程中的应用研究[D].成都:西华大学,2022.

## Application of the Concentration Pile Fence Structure in the Shallow Base Reinforcement of the Bridge: Taking Longhai Line Bahe Bridge Reinforcement Project as an Example

HE Shuaishuai<sup>1</sup>, WANG Fangxu<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou Branch of China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to explore the mechanical properties of occlusive pile retaining structure in shallow foundation reinforcement, the Longhai Line Bahe Bridge was taken as the engineering background. The Mohr-Coulomb constitutive equation was selected, and the three-dimensional simulation model was established by the finite element software MIDAS/GTS to analyze the influence of soil erosion and hollowing out on the pile side on the structure. The distribution of displacement and internal force of the same section of the structure under unfavorable working conditions was studied. The effects of II. sequence pile types, crown beam layout, and pile diameter on the reinforcement effect were analyzed. The results show that the controlled displacement of the soil after erosion occurs in the direction of the long side of the pile top and the direction is inward. After the soil is scoured and hollowed out, the earth pressure reaches the peak and the bending moment at the bottom of the pile is zero, and a certain bending moment is generated at the top of the pile and the reverse bending point is located in the middle of the pile foundation. The left and right sides are symmetrical with the backwater surface of the frontal surface in terms of force and deformation. When the sequence pile is a reinforced pile, its stiffness plays a greater role in the structural displacement, and the horizontal displacement of the unreinforced pile is increased by 2.75 times compared with the reinforced pile, the crown beam has an order of magnitude impact on the structural displacement as a boundary constraint, and the horizontal displacement of the uncrowned beam is increased by 43 times compared with the crown beam; the pile diameter of the occlusive pile is inversely proportional to the horizontal displacement of the structure, and the pile diameter plays a greater role in the structural displacement, the pile diameter increases from 0.8 to 1. m, and the displacement of the top of the pile diameter increases from 0.18 mm to 0.41 mm.

**Keywords:** bite pile encirclement structure; shallow foundation reinforcement; numerical analysis; order II pile; crown beam; pile diameter