

文章编号: 1000-4750(2015)05-0057-07

# 船闸基坑边坡中桥梁桩基力学特性研究

储诚富<sup>1,3</sup>, 董满生<sup>2</sup>, 胡 晴<sup>2</sup>, 侯超群<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学资源与环境学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学交通运输工程学院, 合肥 230009;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北, 武汉 430071)

**摘 要:** 为研究船闸软土基坑边坡中桥梁双桩基础的桩土相互作用复杂力学行为, 计及渗流作用、滑坡推力、桩侧摩阻力、轴力效应及桩间土等因数影响, 采用“*m*”法模拟桩土相互作用, 根据力和力矩平衡条件建立桩基础控制微分方程, 建立微分方程的二阶精度差分方程组, 数值模拟基桩位移及内力。理论桩顶位移与现场监测桩顶位移吻合较好, 验证了该文中理论分析方法的有效性, 该理论分析方法可做实际工程设计与研究参考方法。

**关键词:** 桩基础; 桩土相互作用; 有限差分; 结构内力; “*m*”法

中图分类号: U443.15 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.11.1027

## STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF BRIDGE PILES FOUNDATION IN THE PIT SLOPE OF A SHIP LOCK

CHU Cheng-fu<sup>1,3</sup>, DONG Man-sheng<sup>2</sup>, HU Qing<sup>2</sup>, HOU Chao-qun<sup>2</sup>

(1. School of Resources &amp; Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** To investigate the complex soil-pile interaction of bridge piles foundation in the pit slope of a ship lock, as well as the influence of seepage, landslide thrust, lateral friction, the axial force effect and soil between piles and so on, the “*m*” method was applied to simulate pile-soil interaction. According to the force and moment balance condition, governing differential equation and second order accuracy differential equations of pile foundation were established. Finite difference method was employed to solve the differential equations and analyze the displacement and internal force of the foundation piles. The results of the study shows that the foundation pit excavation of ship lock has an adverse influence on the stability of bridge piles foundation in slope and the safety of bridge. Therefore, measures needs to be taken to reinforce the bridge pile foundations. The numerical analysis results show good agreement with monitoring data, proving the effectiveness of the theoretical analysis method. This method can be used as a reference to practical engineering design and research.

**Key words:** pile foundation; pile-soil interaction; finite difference method; structure internal force; the “*m*” method

随着我国交通建设的快速发展, 桩基础的应用日益广泛, 为满足公路线形及保护环境的需要, 在地质不良边坡上建设桥梁桩基难以避免。边

坡上桥梁桩基的受力分析和安全评价成为目前国内外地基基础工程界关注和研究的热点。

边坡桥梁桩基与抗滑桩受力特性不完全一样,

收稿日期: 2013-11-06; 修改日期: 2014-06-03

基金项目: 2011年度安徽省交通科技进步计划项目(2011-0121)

通讯作者: 董满生(1973—), 男, 安徽怀宁人, 副教授, 博士, 硕导, 从事工程力学教学与研究(E-mail: dongms@hfut.edu.cn).

作者简介: 储诚富(1975—), 男, 安徽潜山人, 副教授, 博士, 从事地基处理及桩基工程方面的教学与研究(E-mail: chuchengfu@163.com);

胡 晴(1987—), 男, 江西万安人, 硕士生, 从事桩基工程研究(E-mail: 395238233@qq.com);

侯超群(1980—), 男, 安徽萧县人, 副教授, 博士生, 从事岩土工程研究(E-mail: 124015005@qq.com).

由于同时承受上部桥梁荷载和侧向土压力的双重作用,其力学行为更为复杂。边坡桥梁双桩基础侧向稳定性分析可借鉴基坑支护和边坡加固工程的抗滑桩承载力分析。抗滑桩极限承载力分析研究成果丰富,如:Polous<sup>[1]</sup>等对承受土体水平运动的桩基进行了现场试验,在此基础上,周翠英等<sup>[2]</sup>研究了桩间土对前排桩的作用模式,给出桩间土作用力计算分析模型,得出前排桩不仅受到桩间土的主动土压力作用,而且受到由于桩间土的挤压作用而产生的附加土压力的作用。鲁志杰等<sup>[3]</sup>分析了坡顶斜向受荷桩的受力特点,将桩分为自由段、受荷段、嵌固段3个特征桩段,建立了各特征桩段的微分方程,得到了单桩计算分析的幂级数解答。赵明华等<sup>[4]</sup>引入桩顶荷载对承重阻滑桩内力、位移的影响,推导出不同特征桩段的微分方程,提出了适用于承重阻滑桩内力及位移分析的有限差分法。何思明等<sup>[5]</sup>遵循 Baker 非线性破坏准则,研究了高切坡的稳定性,给出了超前支护桩加固危险性高切坡的计算方法。吕美君等<sup>[6]</sup>运用结构力学方法对门架式双排抗滑桩间的滑坡推力分配规律进行了研究。史海莹等<sup>[7]</sup>采用大型有限元软件 ABAQUS 对双排桩支护的深基坑开挖力学行为进行模拟,并考虑桩土接触的影响,分析了双排桩结构的支护力学性状和影响因素。近年来,边坡桥梁桩基力学特性研究也取得了一定的进展,如刘建华等<sup>[8]</sup>对高陡横坡地段桥梁桩基进行了模型试验与理论分析。杨明辉等<sup>[9]</sup>针对高陡横坡段嵌岩桥梁双桩结构,建立了桩基与边坡及桩间土相互作用新模式,运用有限差分求解微分方程,提出了桥梁双桩结构的内力位移计算方法。赵明华等<sup>[10]</sup>将桥梁上部结构作用简化为桩顶组合荷载,利用极限平衡理论分析边坡稳定性,得到了考虑坡-土-桩相互作用的高陡斜坡段桩柱式桥墩基础设计计算方法。

不同地区岩土地质呈现多样性和复杂性,对岩土工程界是一个挑战,岩土力学分析理论一直是研究的热点,很难有一种计算方法直接推广到所有类型边坡桩基分析。已有的边坡桥梁桩基研究主要是针对岩质边坡桥梁桩基,很少研究软土地质边坡桥梁桩基稳定性,而且均未考虑渗流的影响。本文考虑渗流作用研究深基坑边坡桥梁桩基双桩结构与桩周土相互作用的数学物理模型,采用有限差分法研究双桩的力学行为,以长江沿岸某船闸复线工程软土深基坑边坡桥梁桩基为依托工程,数值模拟研

究边坡桩基内力和位移。

## 1 工程概况

长江中下游流域某船闸的通航能力已不能满足目前的通航要求,拟在河道右岸新建船闸复线工程。为了便于交通出行,在船闸基坑施工前,先修建跨闸公路桥,桥梁线型呈U形布置,桥墩则沿闸室纵向布置。船闸基坑底设计高程为-4.03m,坡顶高程为10.5m,坡高约14.5m,离基坑边缘水平距离为73.22m。基坑开挖深度大于20m,上层软土深度大于30m。基坑开挖主要采取放坡开挖的形式,设计坡度为1:2,桥桩正好位于边坡上,如图1所示。由于扩建船闸位于原老河道内,地下水系发达且水位较高,加上施工期间长江流域进入汛期,洪水淹没了施工现场,导致土体含水率高、压缩性大、强度低、承载能力差、敏感性高。在开挖过程中软土易蠕变,导致土压力增大,直接影响边坡稳定性,也影响到桥梁结构的安全。根据室内土工试验结果及勘察报告,土体的物理参数采用原状土样试验结果的平均值,各土层主要物理力学参数详见表1。

表1 土层主要物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters for soil

层号	土层名称	层厚/m	含水量 $\omega$ (%)	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ (°)	渗透系数 $k$ (cm/s)
① <sub>1</sub>	堤身填土	1.00	33.0	18.6	15.00	16.00	$5 \times 10^{-5}$
① <sub>2</sub>	填塘土	2.20	34.5	18.9	15.00	15.00	$3 \times 10^{-5}$
② <sub>1</sub>	淤泥	6.80	40.0	17.8	9.00	7.00	$8 \times 10^{-5}$
② <sub>2</sub>	淤泥质粉质粘土	8.50	39.5	18.1	12	10	$3 \times 10^{-4}$
③	粉质粘土与粉细砂互层	—	40.0	17.8	13	15	$5 \times 10^{-5}$

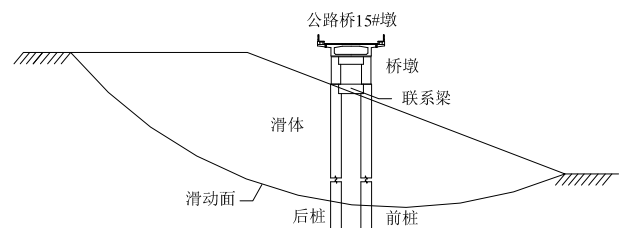


图1 桥梁桩基位置

Fig.1 Bridge foundation sketch

## 2 软土边坡桩基力学模型

### 2.1 考虑渗流的滑坡推力

边坡稳定性分析的方法很多,其中剩余推力法

也称不平衡推力传递法,适用于各种形式的滑动面,在我国工程界被广泛应用<sup>[11]</sup>。本文运用极限平衡理论对开挖边坡进行稳定性分析。从滑体中取第*i*垂直土条建立模型,如图2所示,图中虚线代表浸润线。

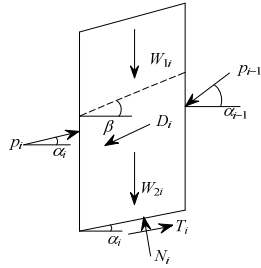


图2 条块受力分析

Fig. 2 Force analysis of element

假定上一土条的作用力  $p_{i-1}$  的作用方向与该土条的滑面方向平行,根据力的平衡条件,可得渗流作用下安全系数和滑坡推力的计算公式:

$$q_i = q_{i-1}\psi_{i-1} + [(W_{1i} + W'_{2i})\sin\alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i)] - \{c_i l_i + [(W_{1i} + W'_{2i})\cos\alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i)]\tan\varphi_i\} / F_s \quad (1)$$

式中:  $\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)\tan\varphi_i / F_s$  为传递系数;  $D_i$  为渗透压力;  $W_{1i}$  为浸润线以上土的天然重度;  $W_{2i}$  为浸润线以下土的饱和重度;  $W'_{2i}$  为浸润线以下土条的浮重度。

可用迭代法求解式(1),从上向下逐条计算,直到最后一土条的剩余下滑力为0,由此确定安全系数  $F_s$  和滑坡推力  $q_i$ 。

## 2.2 桩土相互作用模型

桥梁桩基础为双桩结构,如图1所示,通过桩顶联系梁连接。桥梁基桩与边坡构成一个复杂力学系统,为便于理论分析,对该系统进行抽象简化,其相互作用模型如图3所示。模型中,滑坡推力作用在后桩上,滑动面以下受主动土压力作用;前桩受到桩间土的主动土压力作用,将前桩和后桩受到的地基土抗力简化为弹性支承;桩顶作用有上部结构传来的荷载,桩端只受竖向链杆的约束,不能承受集中弯矩与集中剪力。下面进一步确定其中的滑坡推力、桩间土压力及桩侧所受的地基抗力。

为了便于分析,针对渗流边坡桥梁基桩的受力特性,做以下假定:

- 1) 桩体处于弹性工作状态,忽略桩顶系梁的轴向变形,前后桩桩顶的横向位移相等;
- 2) 将系梁与桩顶连接处视为弹性嵌固,前后桩桩顶转角为零;
- 3) 土体处于弹性工作状态,土的应力-应变符

合文克勒假定,土的地基抗力系数由“*m*”法确定;

- 4) 弯矩以桩身左侧受拉为正,剪力以构成顺时针力矩为正,位移向右为正,桩侧土压力右侧受压为正。

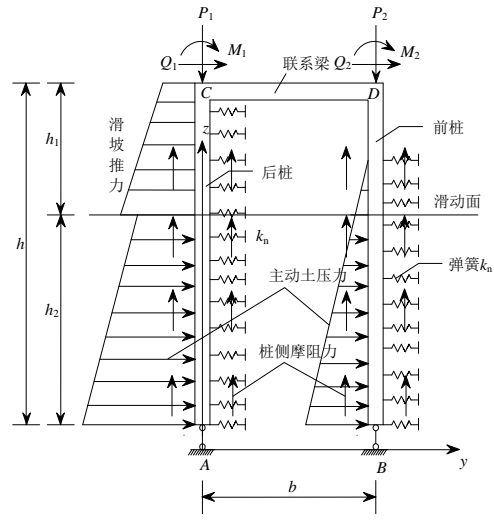


图3 桩土相互作用模型

Fig. 3 Pile-soil interaction model

### 2.2.1 滑坡推力

滑坡推力的分布受滑坡类型、滑动面、地层性质及地基系数等综合因素的影响,分布相当的复杂<sup>[12]</sup>。根据我国一些抗滑桩模型试验和现场试桩实测资料,滑坡推力在桩上的分布形式可根据滑体性质来确定。当滑体为松散体或堆积层时,可按三角形分布考虑。当滑体为粘聚力较大的粘土、土夹石、较完整的岩层时,滑体均匀向下蠕动,或整体向下移动,其推力可按矩形分布;介于两者之间的可以按梯形分布<sup>[13]</sup>。设后桩受滑坡推力的分布函数通式为:

$$q(z) = az^2 + bz + c \quad (2)$$

当  $a=0, b=0, c=0$  时,呈矩形分布;当  $a=0, c=0$ , 而  $b \neq 0$  时,呈三角形分布;当  $a=0, b, c \neq 0$  时,滑坡推力呈梯形分布。

### 2.2.2 桩间土压力

当前桩与后桩的间距  $b > 8B$  ( $B$  为桩径)时,桩间土对前桩产生的主动土压力  $q_a$  等于单排桩受到的主动土压力  $\sigma_a$ 。当  $0 < b < 8B$  时,必须考虑桩间土体对前桩的影响,前桩受到桩间土的主动土压力  $q_a$  与单桩受到的主动土压力  $\sigma_a$  之比为桩间距  $b$  和桩径  $B$  之比的二次抛物线函数<sup>[2]</sup>, 即:

$$q_a = \left[ \frac{2b}{b_0} - \left( \frac{b}{b_0} \right)^2 \right] \sigma_a, \quad b_0 = 8B \quad (3)$$

### 2.2.3 地基土抗力

将前桩和后桩受到的地基土抗力简化为水平弹簧支承,如图4所示。地基抗力为分布力,当桩侧土体的变形处于弹性阶段时,其按弹性力计算,与桩的位移量成正比。按“ $m$ ”法计算,其表达式为:

$$P_y = mzB_p y \quad (4)$$

式中: $m$ 为土的地基抗力系数随深度增长的比例系数; $z$ 为计算点至地面的深度; $B_p$ 为桩的计算宽度,对于圆形桩 $B_p = 0.9(d+1)$ , $d$ 为桩径; $y$ 为距离地面 $z$ 处桩身的横向位移。

## 3 桩基控制微分方程

若将图3所示计算模型从联系梁弯矩为零处截断,将双桩结构分解为两根单桩进行分析计算,考虑截面处剪力 $P$ 和轴力 $Q$ 的作用,再整合边界条件。由此建立前、后桩受力模型如图4所示。

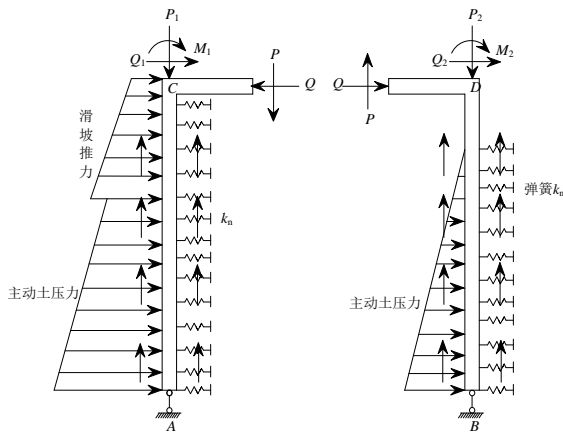


图4 前后桩受力分析图

Fig. 4 Force analysis of bi-piles

取微元体进行受力分析,桩段顶作用荷载: $Q_1$ 为水平力, $P_1$ 为轴向力, $M_1$ 为弯矩。由于桩侧摩阻力、桩体自重随深度线性变化,即桩身截面处的轴向力 $P(z) = P_1 + \sum fz$ ,其中 $f = A\gamma_c - Uq_s/2$ 为沿桩轴向单位长度所受的轴力。 $A$ 为桩身截面积, $\gamma_c$ 为桩重度(水位线下按浮重度计算), $U$ 为桩身周长, $q_s$ 为桩侧土体的极限侧摩阻力,由于分土层, $q_s$ 取值不一样。以后桩作为研究对象,以滑动面为分界面,把桩分为受滑坡推力和受主动土压力两个特征段,其微元体受力如图5所示。

根据力矩平衡条件,可得桩身的微分方程:

$$M + dM - M + P(z)dy - Qdz -$$

$$\frac{1}{2}q(z)dz^2 + \frac{1}{2}q_1(z)dz^2 = 0 \quad (5)$$

由弯曲微分方程 $EI \frac{d^2 y}{dz^2} = M$ ,化简式(5)得:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \left( \frac{P_0 + fz}{EI} \right) \frac{d^2 y}{dz^2} + \frac{f}{EI} \frac{dy}{dz} - \frac{q(z)}{EI} + \frac{q_1(z)}{EI} = 0 \quad (6)$$

其中: $q(z)$ 为滑坡推力或主动土压力,具体表达式见式(1); $q_1(z)$ 为地基土抗力。

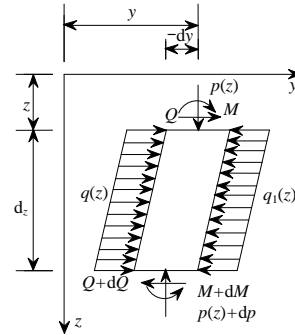


图5 后桩微元体受力示意图

Fig. 5 Force diagram for element of the back pile

## 4 桥梁桩基内力分析

### 4.1 有限差分格式

有限差分法是一种将求解微分方程和积分微分方程转化为差分方程的数值解法。文中一阶导数采用两点中心差分二阶精度,二阶导数采用三点中心差分二阶精度,三阶导数采用四点中心差分二阶精度,四阶导数采用五点中心差分二阶精度。具体差分格式如下:

$$\left( \frac{dy}{dz} \right)_i \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} \quad (7a)$$

$$\left( \frac{d^2 y}{dz^2} \right)_i \approx \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} \quad (7b)$$

$$\left( \frac{d^3 y}{dz^3} \right)_i \approx \frac{y_{i+2} - 2y_{i+1} + 2y_{i-1} - y_{i-2}}{2h^3} \quad (7c)$$

$$\left( \frac{d^4 y}{dz^4} \right)_i \approx \frac{y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}}{h^4} \quad (7d)$$

### 4.2 滑坡推力段

有限差分法的基本原理是从桩顶至桩底将全桩离散成 $N$ 段,等量差分段长为 $h$ 。如图6所示,滑坡推力段节点编号为 $-2, -1, 0, 1, \dots, k, k+1, k+2$ ,滑动面处的节点号为 $k$ , $-2, -1$ 节点是桩顶向上增加的两个虚拟节点, $k+1, k+2$ 是滑动面向下增加的两个虚拟节点。

由式(7)代入式(6), 可得滑坡推力段在*i*节点处的控制差分方程:

$$2y_{i+2} + (2\lambda^2 h^2 + 2ik^3 h^3 + k^3 h^3 - 8)y_{i+1} + (2i\alpha^5 h^5 - 4ik^3 h^3 - 4\lambda^2 h^2 + 12)y_i + 2y_{i-2} + (2\lambda^2 h^2 + 2ik^3 h^3 - k^3 h^3 - 8)y_{i-1} = 2ib^5 h^5 \quad (8)$$

其中:  $\lambda^2 = \frac{P_0}{EI}$ ,  $k^3 = \frac{f}{EI}$ ,  $\alpha^5 = \frac{mB_p}{EI}$ ,  $b^5 = \frac{q}{h_1 EI}$ .

桩顶处边界条件为:

$$(M)_0 = EI \left( \frac{d^2 y}{dz^2} \right)_0 = M_1 \quad (9a)$$

$$(S_v)_0 = \left( \frac{dM}{dz} \right)_0 + \left( P \frac{dy}{dz} \right)_0 = Q_1 - Q \quad (9b)$$

将式(8)简化为如下差分方程组:

$$y_1 - 2y_0 + y_{-1} = \frac{M_1 h^2}{EI} \quad (10a)$$

$$-y_{-2} + (2 - \lambda^2 h^2)y_{-1} + (\lambda^2 h^2 - 2)y_1 + y_2 = \frac{2(Q_1 - Q)}{EI} h^3 \quad (10b)$$

令  $a_{-1} = 2$ ,  $b_{-1} = 1$ ,  $c_{-1} = \frac{M_1 h^2}{EI}$ , 由式(10a)可得:

$$y_{-1} = a_{-1} y_0 - b_{-1} y_1 + c_{-1} \quad (11)$$

依次类推, 令式(8)中  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ , 化简得各微段位移之间连续关系为:

$$y_{-1} = a_{-1} y_0 - b_{-1} y_1 + c_{-1} \quad (12a)$$

$$y_0 = a_0 y_1 - b_0 y_2 + c_0 \quad (12b)$$

$$y_1 = a_1 y_2 - b_1 y_3 + c_1 \quad (12c)$$

⋮

$$y_m = a_m y_{m+1} - b_m y_{m+2} + c_m \quad (12m)$$

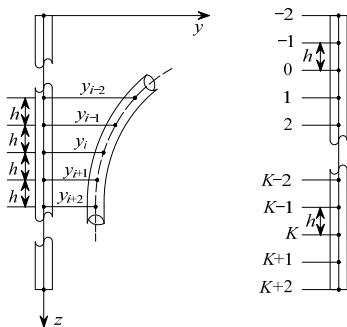


图6 滑坡推力段差分节点编号及挠曲线  
Fig. 6 Number and deflection curve of the landslide thrust section

### 4.3 主动土压力段

如图7所示, 主动土压力段节点编号为  $k'$ 、 $k'+1$ 、 $k'+2$ 、 $\dots$ 、 $N-2$ 、 $N-1$ 、 $N$ 。滑动面处的节点号为  $k'$ ,  $k'-1$ 、 $k'-2$  节点是滑动面向

上增加的两个虚拟节点,  $N+1$ 、 $N+2$  是桩底向下增加的两个虚拟节点。

由式(6), 可得主动土压力段在*i*节点处的控制差分方程:

$$2y_{i+2} + (2\lambda^2 h^2 + 2ik^3 h^3 + k^3 h^3 - 8)y_{i+1} + (2i\alpha^5 h^5 - 4\lambda^2 h^2 - 4ik^3 h^3 + 12)y_i + (2\lambda^2 h^2 + 2ik^3 h^3 - k^3 h^3 - 8)y_{i-1} + 2y_{i-2} = 2id^5 h^5 \quad (13)$$

其中:  $\lambda^2 = \frac{P_0}{EI}$ ,  $k^3 = \frac{f}{EI}$ ,  $\alpha^5 = \frac{mB_p}{EI}$ ,  $d^5 = \frac{\gamma B_p k_a}{EI}$ .

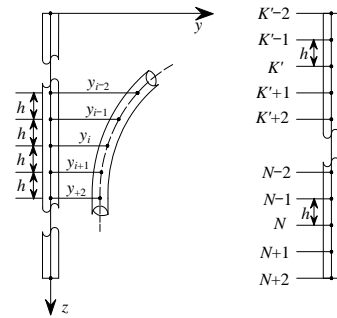


图7 主动土压力段差分节点编号及挠曲线

Fig.7 Number and deflection curve of the active earth pressure section

而桩端边界条件为:

$$(M)_N = EI \left( \frac{d^2 y}{dz^2} \right)_N = 0 \quad (14a)$$

$$(S_v)_N = \left( \frac{dM}{dz} \right)_N + \left[ (P_0 + fz) \frac{dy}{dz} \right]_N = 0 \quad (14b)$$

可得:

$$y_{N+1} - 2y_N + y_{N-1} = 0 \quad (15a)$$

$$-y_{N-2} + (2 - \lambda^2 h^2 - Nk^3 h^3)y_{N-1} + (\lambda^2 h^2 + Nk^3 h^3 - 2)y_{N+1} + y_{N+2} = 0 \quad (15b)$$

令  $a_{N+1} = 2$ ,  $b_{N+1} = 1$ ,  $c_{N+1} = 0$ , 由式(15a)可得:

$$y_{N+1} = a_{N+1} y_N - b_{N+1} y_{N-1} + c_{N+1} \quad (16)$$

依次类推, 令式(13)中  $i = N, N-1, N-2, \dots$

$m'$ , 化简求得各微段位移之间连续关系为:

$$y_{m'} = a_{m'} y_{m'-1} - b_{m'} y_{m'-2} + c_{m'} \quad (17a)$$

⋮

$$y_{N-1} = a_{N-1} y_{N-2} - b_{N-1} y_{N-3} + c_{N-1} \quad (17n-1)$$

$$y_N = a_N y_{N-1} - b_N y_{N-2} + c_N \quad (17n)$$

$$y_{N+1} = a_{N+1} y_N - b_{N+1} y_{N-1} + c_{N+1} \quad (17n+1)$$

根据桩身在滑动面处应满足位移、转角、剪力和弯矩连续性条件, 可得如下线性方程组:

$$y_m = y_{m'} \quad (18a)$$

$$y_{m+1} - y_{m-1} = -y_{m'+1} + y_{m'-1} \quad (18b)$$

$$-y_{m-2} + 2y_{m-1} - 2y_{m+1} + y_{m+2} = y_{m'-2} - 2y_{m'-1} + 2y_{m'+1} - y_{m'+2} \quad (18c)$$

$$y_{m-1} - 2y_m + y_{m+1} = y_{m'-1} - 2y_{m'} + y_{m'+1} \quad (18d)$$

联立方程组式(12)和式(17)进行求解,可求得后桩各节点处的位移,解中含有联系梁未知力 $Q$ 和 $P$ 。用同样的方法分析可得出前桩各节点的位移,再利用联系梁的变形协调条件及桩顶的刚度条件,求得双桩结构各节点位移,可进一步求得基桩的内力值。

## 5 工程案例分析

以船闸基坑北岸边坡 11 号桥墩为分析对象,运用上述理论研究边坡桥梁的力学特性。为更好研究双桩结构的作用机理,分别对桩顶有无联系梁的两种结构形式进行力学行为研究,工程桩在顶部设有联系梁。桩顶上部结构荷载:轴力 $P_1 = 1256 \text{ kN}$ 、水平力 $Q_1 = 0 \text{ kN}$ 、弯矩 $M_1 = 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。桩基参数:桩身混凝土标号为 C25,桩身容重 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量 $E = 2.8 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,前后桩间距为 $b = 4.5 \text{ m}$ ,桩径 $B = 1.6 \text{ m}$ ,惯性矩 $I = 0.32 \text{ m}^4$ ,桩长 $H = 60 \text{ m}$ 。岩土参数:淤泥质层,取 $m = 4500 \text{ kN/m}^4$ ,粉质粘土与粉细砂互层,取 $m = 8500 \text{ kN/m}^3$ 。等量差分,段长 $h = 0.05 \text{ m}$ ,运用 MATLAB 软件编写计算程序求解差分方程组,计算桩身位移和力矩如图 8 所示。

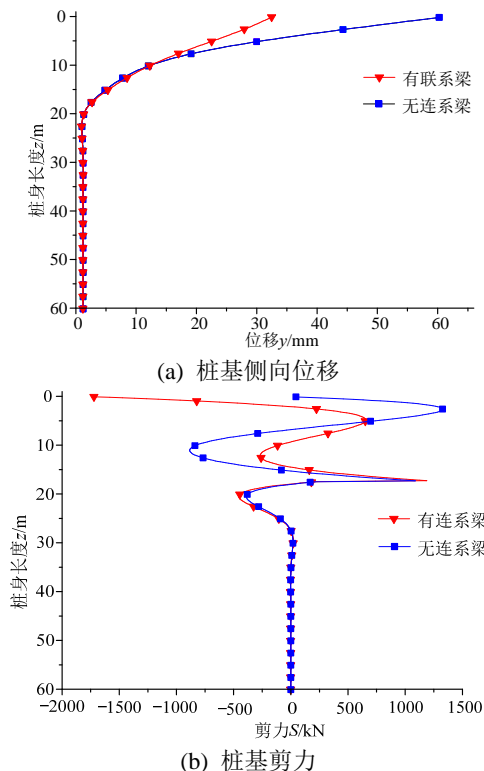


图8 后桩位移及内力

Fig. 8 Displacement and internal force of the back pile

从图8可知,工程桩身侧向位移以刚体位移为主,最大值位于桩顶,约为3.3cm,略小于实测的3.6cm,表明文中提出的计算方法可适用该类桩基分析;最大剪力出现在桩顶,约为1700kN,最大负弯矩出现在距桩顶3m附近,约为1500 kN·m,最大正弯矩出现在距离桩顶20m附近,约为2250 kN·m。

从图8对比有无联系梁下的后桩位移、内力可以看出,在有横系梁的情况下,后桩的位移明显减少,但桩身的负剪力和负弯矩也有一定的增加。联系梁极大改善了桩基的侧向刚度,使双桩结构内力的重新分配。可见,桩顶横系梁与桩基的刚性连接,是双桩结构空间组合刚度发挥的基础。

## 6 结论

文中给出软件边坡桥梁基桩-土相互作用的数学物理模型与数值计算方法,数值模拟研究船闸边坡桥梁桩基力学行为,得出以下主要有益结论:

(1) 计及渗流作用、桩侧摩阻力及轴力效应等因素建立了软土斜坡地段基桩-土相互作用的数学物理模型,建立微分方程的差分方程组,给出了一种桩土相互作用理论分析方法。

(2) 数值模拟分析两类桥梁基桩的内力及位移,设有联系梁的双桩结构整体刚度明显增大,联系梁对双桩结构的内力及位移起着分配协调作用,有效限制了桩顶的侧向位移。

### 参考文献:

- [1] Poulos H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement [J]. JSMFD, ASCE, 1973, 99(5): 391-406.
- [2] 周翠英, 刘祚秋, 尚伟, 陈恒, 温少荣. 门架式双排抗滑桩设计计算新模式[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 441-444.

- Zhou Cuiying, Liu Zuoqiu, Shang Wei, Chen Heng, Wen Shaorong. A new mode for calculation of portal double row anti-sliding piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 441—444. (in Chinese)
- [3] 鲁志杰, 年廷凯. 坡顶斜向受荷桩内力及位移分析[J]. 燕山大学学报, 2009, 33(6): 535—540.  
Lu Zhijie, Nian Tingkai. Inner-force and displacement analyses of inclined loaded piles located near slopes [J]. Journal of Yanshan University, 2009, 33(6): 535—540. (in Chinese)
- [4] 赵明华, 邬龙刚, 刘建华. 考虑 $P-\Delta$ 效应的承重阻滑桩有限差分法[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 102—106.  
Zhao Minghua, Wu Longgang, Liu Jianhua. Fitting different solution for load-bearing and anti-slide pile with consideration of  $P-\Delta$  effect [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 102—106. (in Chinese)
- [5] 何思明, 张晓曦, 欧阳朝军. 基于非线性破坏准则超前支护桩加固高切坡的静动稳定分析[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 119—125.  
He Siming, Zhang Xiaoxi, OUYang Chaojun. Static-dynamic stability of pre-piled high cutting slope with nonlinear failure criterion [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 119—125. (in Chinese)
- [6] 吕美君, 晏鄂川. 埋入式双排抗滑桩滑坡推力分配研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 4866—4871.  
Lü Meijun, Yan Echuan. Study on distribution laws of landslide-thrust in double-row embedded anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 4866—4871. (in Chinese)
- [7] 史海莹, 龚晓南. 深基坑悬臂双排桩支护的受力性状研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(10): 67—71.  
Shi Haiying, Gong Xiaonan. Study on the behavior of cantilever double-row piles supporting deep excavation [J]. Industrial Construction, 2009, 39(10): 67—71. (in Chinese)
- [8] 刘建华, 赵明华, 杨明辉. 高陡岩质边坡上桥梁基桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 372—377.  
Liu Jianhua, Zhao Minghua, Yang Minghui. Model tests on bridge pile foundation in high and steep rock slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 372—377. (in Chinese)
- [9] 杨明辉, 刘广轩, 赵明华. 高陡横坡段桥梁双桩结构计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(8): 55—59.  
Yang Minghui, Liu Guangxuan, Zhao Minghua. Study on calculation method of bridge double piles structure in high-steep transverse slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(8): 55—59. (in Chinese)
- [10] 赵明华, 尹平保, 张永杰, 杨明辉. 高陡斜坡段桩柱式桥墩基础设计计算方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 106—111.  
Zhao Minghua, Yin Pingbao, Zhang Yongjie, Yang Minghui. The design and calculation method of pile-column bridge pier foundation in high and steep slope [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 106—111. (in Chinese)
- [11] 朱大勇, 钱七虎, 周早生, 郑鸿泰. 基于余推力法的边坡临界滑动场[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 8(6): 667—670.  
Zhu Dayong, Qian Qihu, Zhou Zaosheng, Zheng Hongtai. Critical slip field of slope based on the assumption of unbalanced thrust method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 8(6): 667—670. (in Chinese)
- [12] Rollins K M, Gerber T M, Lane J D, et al. Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1): 115—125.
- [13] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517—521.  
Dai Zihang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antisliding piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517—521. (in Chinese)