

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.013

抗滑桩孔开挖对斜坡桥梁双桩基础影响分析

马定乐^{*1,3}, 董鹏², 晏长根³, 万琪^{3,4}

(1. 广东交通实业投资有限公司, 广东 广州 510000; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550)

摘要:为探究不同工况下抗滑桩孔开挖对斜坡桥梁桩基础的影响,在国内外已有研究成果的基础上,通过对桥梁双桩基础的受力特点进行理论分析,建立了双排桩各分段桩基的挠曲微分方程。提出了在抗滑桩孔开挖条件下的斜坡桥梁双桩基础的内力与变形计算方法,并结合工程实例分析和验证了方法的可行性。确定并揭示了斜坡桥梁桩基础在邻近抗滑桩桩孔施工过程中的破坏模式和内在原因。结果表明:在斜坡桥梁下部抗滑桩桩孔开挖前,A桩与B桩的桩顶位移分别为8.46 mm和8.41 mm,桩身最大弯矩分别为1 020 kN·m和1 023.87 kN·m,基本满足设计要求;而当桥下抗滑桩桩孔开挖后,A桩与B桩桩顶位移分别为15.30 mm和15.29 mm,桩身最大弯矩分别为1 145.18 kN·m和1 024.4 kN·m;当桥下抗滑桩桩孔及桩间土全部开挖后,A桩与B桩桩顶位移分别为21.88 mm和21.41 mm,桩身最大弯矩分别为1 277 kN·m和944.28 kN·m;通过计算方法得出2种开挖情况前后桩顶位移和最大弯矩都不满足设计要求。综合工程案例中3种工况下斜坡桥梁桩身内力和变形的计算分析,案例中桥梁桩基发生破坏主要由桥梁下部抗滑桩桩孔的开挖引起边坡滑动,桩身横向受力加剧,导致桥梁桩基的受力状况发生改变,桩身发生挠曲变形,进而引发桩基变形。

关键词:桥梁工程;计算方法;理论分析;斜坡桩基;受力变形

中图分类号:U443.15

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2023)12-0107-08

An Analysis on Influence of Anti-slide Pile Hole Excavation on Slope Bridge Double-pile Foundation

MA Ding-le^{*1,3}, DONG Peng², YAN Chang-gen³, WAN Qi^{3,4}

(1. Guangdong Transportation Industrial Investment Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510000, China;
2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;
4. Guangdong Transportation Technology Testing Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510550, China)

Abstract: In order to investigate the impact of anti-slide pile hole excavation on the pile foundation of slope bridges under different working conditions, based on domestic and international existing study results, a theoretical analysis is conducted on the stress characteristics of bridge double pile foundation, and the deflection differential equations of each segmented pile foundation of double row piles are established. A calculation method for the internal force and deformation of slope bridge double pile foundation under the condition of anti-skid pile hole excavation is proposed, and the feasibility of the method is analyzed and verified through engineering examples. The failure mode and internal reasons of the slope bridge pile foundation during the construction process of adjacent anti-slide pile holes are identified and revealed. The result shows that (1) before the excavation of the anti-slide pile hole at the lower part of the slope bridge, the top displacements of pile A and pile B are 8.46 mm and 8.41 mm respectively, and the maximum bending

收稿日期:2023-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41927806)

作者简介(*通讯作者):马定乐(1989-),男,河南南阳人,硕士。(403551356@qq.com)

moment of the pile bodies are $1\ 020\text{ kN}\cdot\text{m}$ and $1\ 023.87\text{ kN}\cdot\text{m}$ respectively, which basically met the design requirements; (2) after the excavation of the anti-slide pile hole under the bridge, the displacements of the top of pile A and pile B are 15.30 mm and 15.29 mm respectively, and the maximum bending moments of the pile bodies are $1\ 145.18\text{ kN}\cdot\text{m}$ and $1\ 024.4\text{ kN}\cdot\text{m}$ respectively; (3) after all the anti-slide pile holes and soil between the piles under the bridge are excavated, the displacements of the top of pile A and pile B are 21.88 mm and 21.41 mm respectively, and the maximum bending moments of the pile bodies are $1\ 277\text{ kN}\cdot\text{m}$ and $944.28\text{ kN}\cdot\text{m}$ respectively; (4) through calculation methods, it is found that the displacement and maximum bending moment of the pile top before and after 2 excavation situations do not meet the design requirements. The calculation and analysis of the internal force and deformation of the pile body of the slope bridge under 3 working conditions in a comprehensive engineering case show that the failure of the pile foundation of the bridge is mainly caused by the excavation of the anti-slide pile hole in the lower part of the bridge, the increase of lateral force on the pile leads to the change of the stress state of deep foundation bridge, and the deflection of the pile body, leading to the deformation of the pile foundation.

Key words: bridge engineering; calculation method; theoretical analysis; slope pile foundation; mechanical deformation

0 引言

随着公路建设规模持续扩大,山地丘陵区高等级公路建设进入快速发展,为了适应路桥建设需要及保护山区生态环境,避免大填大挖,高速公路主线一般采用隧道或高架桥的形式,桥梁桩基建设在微坡、缓坡、陡坡以及垂直坡等边坡。目前对于边坡上的桥梁较多采用抗滑桩进行加固,取得了不错效果。但是,现有针对抗滑桩的规范和试验都是考虑施工后的加固效果,对于抗滑桩在施工过程中对陡坡桥梁的影响方面的规范标准较少,施工过程多数凭借经验来进行,因此导致有些桥梁在抗滑桩施工过程中出现了严重问题,如由支座裂开变为支座剪断、墩柱倾斜变为墩柱开裂等,因此开展抗滑桩桩孔开挖对邻近桩基的影响具有实际意义。

针对边坡桥梁桩基础的受力特性,专家学者开展了大量的理论和数值分析工作,并取得了一系列的成果。杨明辉等^[1]提出了山区高陡边坡桥梁桩基要同时承受上部结构轴向与水平方向共同的荷载作用对桩侧滑坡推力的抵抗作用。刘建华等^[2]对桥基边坡稳定性,桥基埋置位置和桥基承载机理等方面进行了系统的研究。另外,抗滑桩桩孔开挖引起的土体水平位移将在邻近既有桩基桩身上产生横向荷载,导致桩基产生附加内力和变形,严重时将造成桩基破坏或上部结构位移量超限。目前,大多试验研究和数值分析都集中在基坑开挖对桩基的内力和变形影响分析方面。郑刚等^[3]利用实测及数值模拟分析了支护基坑工程中间距、桩基刚度等因素对桩

基的内力与变位影响。魏丽敏等^[4]通过现场试验获得不同开挖工况下临近桩基的工作性能,采用数值模拟研究基坑宽度、边缘净距、基坑深度等因素对桩身变形与内力的影响规律。曹周红等^[5]采用土工离心模型试验研究深基坑开挖对位于边坡上桥梁桩基的影响,得出基坑开挖越深,桩基两侧土压力的差越大,桩顶朝基坑方向运动的水平位移越大的结论。邹佳成等^[6]运用非线性有限差分数值分析结合强度折减法,分析了开挖过程中边坡的抗滑稳定性及开挖过程对临近高速公路桥梁桩基变形的影响。段书龙和朱宇^[7]通过离心机试验和室内试验和仿真模拟计算,分析河道开挖后边坡的稳定性,对比河道边坡开挖和桥梁施工顺序对桥梁桩基的受力影响,确定河道边坡开挖对不同桥梁结构类型的危害,并提出相对应的保护措施,还有较多学者在不同工况下采用数值模拟、模型试验等方法对斜坡桥梁桩基的受力及变形情况进行了分析^[8-14]。

目前,对于斜坡桥梁桩基的研究主要集中于讨论桩基在横向与竖向受力作用下和桩侧土体压力的作用下的内部应力变化规律、承载受力传递机理、桩侧岩土体的位移变化情况和挠曲变形等。然而,对于斜坡桥梁桩基在桩周岩土体不同开挖情况下的受力特性变化和影响,特别是对桥梁加固措施中抗滑桩的桩孔开挖对斜坡桩基的影响,如何保证在最合适的开挖距离范围内进行合理的施工,不对桥梁整体结构造成二次损坏,保证加固措施进行期间桥梁的正常安全稳定运营等缺乏深入系统的研究和完善的理论分析系统和成熟的设计方法。因此需要对

山区斜坡段这一地质条件下的桥梁桩基和桩周土体的受力传递机理特性和相关的问题进行更加深入的探讨和研究, 对这类的桩型的实际工程设计与施工提供更加具有实际意义的指导建议。

1 斜坡桥梁双桩基础受力与变形分析

1.1 假定条件

双桩基础分 A、B 桩来分析, 靠近滑坡前缘的为 A 桩, 靠近滑坡后缘的为 B 桩, 依据不同桩段的受荷特点, 首先将双桩在桩顶连接位置截断, 认为 A 和 B 桩联系部位只有轴力传递如图 1 所示, 将一个门架式结构转化成为两根单桩桩顶作用有竖向荷载、剪力、弯矩的情况, 以 A 桩和 B 桩桩顶的位移相等为连接条件, 而且不考虑横系梁的轴向压缩变形, 使得双桩桩内力 and 位移的计算更接近于单桩框架结构体系的受力变形特性, 根据此假定条件来推导双桩结构内力和位移的计算公式。根据以上分析可知, 斜坡桥梁桩基受力状况一般较为复杂, 为便于计算分析, 可对计算模型做适当假定:

(1) 坡体剩余下滑力

桩后坡体的滑坡推力的分布形式主要有 4 种分布形式^[15-18], 分别是梯形、矩形、三角形以及抛物线, 其分布函数通式如式 (1) 所示:

$$q(z) = az^2 + bz + c, \quad (1)$$

式中, z 为分析点距离桩顶的距离; k 为滑坡推理合力作用点位置系数, 可在表 1 中查用, a , b 和 c 均为滑坡推力的待定系数, 可根据表 1 计算求得。

(2) 桩侧岩土体抗力

考虑到桥梁桩基位于斜坡上, 须要对桩前岩土体抗力进行一定的折减, 其折减计算公式如式 (2) 所示:

$$p(x, z) = \eta_i K_i(z) b_1 x, \quad (2)$$

式中, K_i 为地基抗力系数, 用 m 法计算时, 可假定可设受荷段 $K_i(z) = mz$, 嵌固段 $K_i(z) = mz + c$; b_1 为基桩有效计算宽度; x 为基桩水平位移; η_i 为地基抗力折减系数。

(3) 桩身轴力

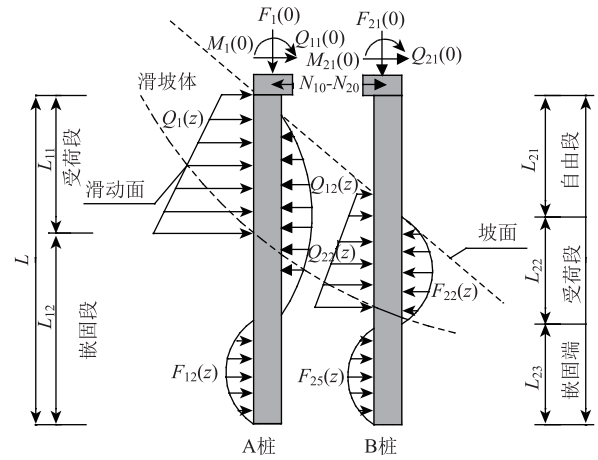
假设桩身轴力按照式 (3) 分布:

$$p_i(z) = p_{i-1} + f_i z, \quad (3)$$

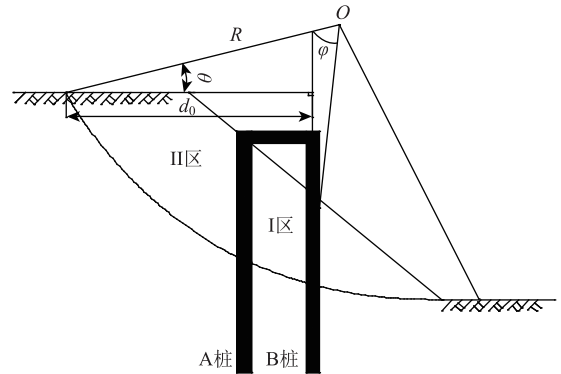
式中, $p_i(z)$ 为该段桩顶处作用的竖向荷载; f_i 为轴力增长系数 (地面以上取 $f = cA$ 其中 c 为桩身重度; A 为桩身截面面积; 地面取 $f = \gamma cA - 0.5\psi\mu\tau$; μ 为桩身周长; τ 为桩侧岩土体的极限摩阻力)。

(4) 其他假定

假设在荷载作用的过程中桩体始终处于弹性工



(a) A、B 连接部分轴力传递



(b) A、B 桩推力分配

图 1 A、B 桩理论计算模型

Fig. 1 Theoretical calculation model for pile A and pile B

表 1 剩余下滑力分布形式

Tab. 1 Distribution of residual sliding force

岩土类别	推力分布形式	推力合力作用点 (距受荷段顶位置)	坡体剩余下滑力 分布函数 $q(z)$
岩石	矩形或平行四边形	$KH_1 \left(K \text{ 取 } \frac{1}{2} \right)$	$q(z) = \frac{E}{H_1}$
散体	抛物线形 ~三角形	$KH_1 \left(K \text{ 取 } \frac{3}{5} - \frac{2}{3} \right)$	$q(z) = \frac{(36k-24) E}{H_1^2} z^2 + \frac{(18-24k) E}{H_1^2} z$
黏土	抛物线形 ~三角形	$KH_1 \left(K \text{ 取 } \frac{2}{3} - \frac{3}{4} \right)$	$q(z) = \frac{(36k-24) E}{H_1^2} z^2 + \frac{(18-24k) E}{H_1^2} z$
砂土及黏土之间	梯形	$KH_1 \left(K \text{ 取 } \frac{13}{20} \right)$	$q(z) = \frac{1.8E}{H_1^2} z + \frac{1}{10H_1} E$

作状态, 而且可以把作用在桩顶的倾斜荷载可分解为竖向荷载 $P_0 = Q_\theta \cos \theta$ 和水平荷载 $Q_0 = Q_\theta \sin \theta$ 两个

方向的力。

1.2 桩侧岩土体压力的计算

由于斜坡桥梁双桩基础 A、B 桩之间岩土体对桩的土压力无法直接计算, 桩侧岩土体压力较单桩桩侧岩土体压力更复杂。由于 A、B 桩都承受一部分滑坡推力, 但这部分滑坡推力在 A、B 桩具体的分配较难确定。B 桩阻碍了 A 桩的坡推力传递, 该传递效果主要受 A、B 桩桩间距影响。假定 A 桩后侧为整个滑坡体, B 桩位于滑动范围以外时, A 桩承受全部的滑坡推力; 当 A、B 桩桩间距为 0 时, B 桩承受全部的滑坡推力。基于线性关系, 对下面两种极限状态进行折算, 当 A、B 桩桩间距 l 为 0 时, A 桩所受到的土压力 σ'_a 为 0, 而当 A 桩后侧是整个滑坡体, B 桩在滑动范围以外, 即 $l \geq d_0$ 时, 则可不考虑 A 桩的抵挡作用, 且当 $l = d_0$ 时, 桩间土对 B 桩的作用力达到极值, 即 $\sigma'_a = \sigma_a$ (全部滑坡推力), d_0 为 A 桩到边坡滑动面后缘的距离如图 1 所示, $d_0 = R[\cos \theta -$

$\cos(\phi + \theta)]$ 。当 $0 < l < d_0$ 时, 可根据桩间土占 A 桩后面整个滑动面的重量比例建立方程如式 (4) 所示:

$$\bar{\alpha} = \frac{W_I}{W_{II} + W_I} = \frac{2l}{d_0} - \left(\frac{l}{d_0}\right)^2, \quad (4)$$

式中, l 为 A、B 桩桩间距; d_0 为 B 桩至滑动面后缘的距离; 当 $l = 0$, A 与 B 重合在一起, 滑坡推力全部由 B 桩来承担, 即 $\bar{\alpha} = 0$; 当 $l \geq d_0$ 时, B 桩处在滑面以外, 则可不考虑 B 桩的阻拦作用, 滑坡推力全部由 A 桩承担, 即 $\bar{\alpha} = 1$; 当 $0 < l < d_0$ 时, $\bar{\alpha}$ 按式 (4) 计算。

由式 (4) 可以确定作用在 B 桩的滑坡推力合力 E_{bf} 和作用在 A 桩上滑坡推力合力 E_{af} , 再根据表 1 中坡体剩余下滑力分布函数, 即可确定 A 桩滑坡推力 $q_{11}(z)$ 以及 B 桩滑坡推力 $q_{22}(z)$ 。

1.3 曲微分方程的建立

根据假定条件, 在 A、B 桩各特征桩段中选取一微元段进行受力分析, 其中 A 桩各段微元段的具体受力情况如图 2 所示。

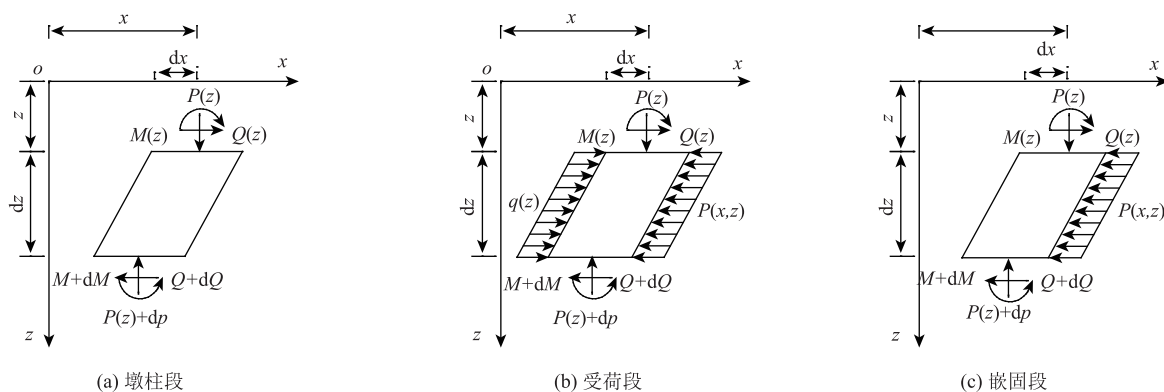


图 2 A 桩各特征段微元受力分析图

Fig. 2 Micro element force analysis diagrams of each feature segment of pile A

通过对 A 桩各特征桩段的微元进行受力分析, 可以建立其挠曲微分方程式。微分方程中

自由段: A

$$EI \frac{d^3 x}{dz^3} - (P_{10} + f_{10}z) \frac{dx}{dz} - (Q_{10} + Q_j) = 0. \quad (5)$$

受荷段: B

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} - (P_{11} + f_{11}z) \frac{d^2 x}{dz^2} - f_{11}z \frac{dx}{dz} + m_{11}zb_{11}x + c_{11}b_{11}x - \alpha f(z) = 0. \quad (6)$$

嵌入段: C

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} - (P_{12} + f_{12}z) \frac{d^2 x}{dz^2} - f_{12}z \frac{dx}{dz} + K_{12}b_{12}x = 0. \quad (7)$$

B 桩各特征段的挠曲微分方程式如式 (8) ~

(10) 所示:

自由段: D

$$EI \frac{d^3 x}{dz^3} - (P_{20} + f_{20}z) \frac{dx}{dz} - (Q_{20} + Q_j) = 0. \quad (8)$$

受荷段: E

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} - (P_{21} + f_{21}z) \frac{d^2 x}{dz^2} - f_{21}z \frac{dx}{dz} + m_{21}zb_{21}x + c_{21}b_{21}x - (1 - \alpha)f(z) = 0. \quad (9)$$

嵌入段: F

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} - (P_{22} + f_{22}z) \frac{d^2 x}{dz^2} - f_{22}z \frac{dx}{dz} + K_{22}b_{22}x = 0. \quad (10)$$

2 斜坡桥梁双桩基受力与变形分析

为了保证坡体稳定性, 在抗滑桩孔施工时一般

要求采用跳挖形式, 开挖间隔 1~2 个桩孔, 同时要求在上序桩孔浇注完毕且达到设计强度后, 方可进行下序桩孔的开挖。但实际工程中考虑到施工工期及成本, 桩孔开挖施工过程大多未严格按照规定的要求进行, 桩孔的开挖大都会出现超挖多挖的情况。桩孔的开挖并不像基坑的开挖是在坡体上开挖出一条贯通的沟槽, 使开挖位置前后岩土体彻底脱离, 抗滑桩桩孔的开挖使开挖位置前后岩土体间隔性分离, 这就使得问题比较复杂, 为了便于计算分析, 我们先做如下假定: ①在抗滑桩桩孔所在的直线上岩土体的开挖率与桥梁桩基所受的滑坡推力呈一次函数关系; ②不考虑开挖过程中其它因素对边坡稳定性的影响; ③滑面的确定, 不受抗滑桩桩孔所在的直线上岩土体的开挖率的影响。

根据以上假定我们需要确定桩孔开挖前作用在斜坡桥梁桩基上的滑坡推力及桩孔开挖成一条贯通的沟槽时作用在斜坡桥梁桩基上的滑坡推力。当坡体下部桩孔假定为一贯通的沟槽时, 沟槽将坡体分为上下两部分, 理论上讲由于沟槽截断了上部岩土体下滑力的传递, 下部分边坡稳定系数大于开挖前。上部坡体由于沟槽的原因, 上部坡体的坡脚形成一个高陡坎, 并且该沟槽必穿过原边坡滑动带, 这时候就必须对上部坡体重新进行单独的稳定性分析。由于沟槽的存在边坡的滑动面可能会改变, 在计算上部坡体的稳定性时要确定上部坡体新的滑动面, 这个滑动面我们可根据工程实际情况及原始滑动面重新搜索确定, 滑动面位置的变化会彻底改变斜坡桥梁桩基的受力形式所示。开挖后作用在斜坡桥梁上下滑力 $P_{\max}(z)$ 的计算方法同开挖前的方法, 在此不做介绍。

假定开挖率 λ 与桥梁桩基所受的滑坡推力 $q_{\lambda}(z)$ 呈一次函数关系, 如式 (11) 所示:

$$q_{\lambda}(z) = q_0(z) + \lambda q_{\max}(z) - q_{\min}(z)。 \quad (11)$$

将式 (1) 带代式 (11) 得:

$$q_{\lambda}(z) = a_{\min}z^2 + b_{\min}z + c_{\min} + \lambda(a_{\max}z^2 + b_{\max}z + c_{\max} - a_{\min}z^2 + b_{\min}z + c_{\min}), \quad (12)$$

式中, λ 为抗滑桩桩孔所在的直线上岩土体的开挖率; $q_{\lambda}(z)$ 为开挖率为 λ 时的滑坡推力; $a_{\min}$, $b_{\min}$, $c_{\min}$ 分别为开挖前坡体剩余下滑力待定系数; $a_{\max}$, $b_{\max}$, $c_{\max}$ 分别为开挖贯通沟槽时坡体剩余下滑力待定系数。根据桩孔开挖双桩基础受力, 得到 A 桩挠曲微分方程如式 (13)~(15) 所示:

自由段:

$$EI \frac{d^3x}{dz^3} - (P_{10} + f_{10}z) \frac{dx}{dz} - (Q_{10} + Q_j) = 0。 \quad (13)$$

受荷段:

$$EI \frac{d^4x}{dz^4} - (P_{11} + f_{11}z) \frac{d^2x}{dz^2} - f_{11}z \frac{dx}{dz} + m_{11}zb_{11}x + c_{11}b_{11}x - \bar{\alpha}[a_{\min}z^2 + b_{\min}z + c_{\min} + \lambda(a_{\max}z^2 + b_{\max}z + c_{\max} - a_{\min}z^2 + b_{\min}z + c_{\min})] = 0。 \quad (14)$$

嵌入段:

$$EI \frac{d^4x}{dz^4} - (P_{12} + f_{12}z) \frac{d^2x}{dz^2} - f_{12}z \frac{dx}{dz} + K_{12}b_{12}x = 0。 \quad (15)$$

B 桩各特征段的挠曲微分方程如式 (16)~(18) 所示:

自由段:

$$EI \frac{d^3x}{dz^3} - (P_{20} + f_{20}z) \frac{dx}{dz} - (Q_{20} - Q_j) = 0。 \quad (16)$$

受荷段:

$$EI \frac{d^4x}{dz^4} - (P_{21} + f_{21}z) \frac{d^2x}{dz^2} - f_{21}z \frac{dx}{dz} + m_{21}zb_{21}x + c_{21}b_{21}x - (1 - \bar{\alpha})[a_{\min}z^2 + b_{\min}z + c_{\min} + \lambda(a_{\max}z^2 + b_{\max}z + c_{\max} - a_{\min}z^2 + b_{\min}z + c_{\min})] = 0。 \quad (17)$$

嵌入段:

$$EI \frac{d^4x}{dz^4} - (P_{22} + f_{22}z) \frac{d^2x}{dz^2} - f_{22}z \frac{dx}{dz} + K_{22}b_{21}x = 0。 \quad (18)$$

3 工程实例分析

3.1 工程概况

依托工程大桥属于典型的斜坡桥梁。在建设过程中, 桥下滑坡出现了局部滑移的现象, 修建桥梁前对该滑坡进行过专项治理, 主要治理方案是沿滑坡体前缘设计了 24 根抗滑桩和滑坡面上设置排水沟, 并进行后续监测, 随后边坡逐渐趋于稳定。桥梁施工后又发现该大桥 0#桥台位置的桥梁下垫块多处被推移破坏, 桥梁与路基搭接处出现多处裂缝, 且桥梁伸缩缝处出现挤压现象, 判断该滑坡有复活的迹象。为了使桥梁所在处的边坡更加稳定, 在桥梁下部距离桥梁桩基 10 m 处的位置设计 20 根抗滑桩进行加固。在抗滑桩的施工过程中桥梁变形加剧, 桥梁上部结构和下部结构都出现不同程度的破坏。

3.2 参数选取及理论计算

双桩基础设计参数为: A, B 桩径 d 均为 1.3 m, 桩间距 6.8 m, 推力分配系数为 $\bar{\alpha}=0.27$ 。其中, 桩孔开挖前, B 桩自由段长度为 3.4 m, 受荷段长度为

15 m, 滑面以下为 13.1 m; 开挖前, A 桩自由段长度为 3.4 m, 受荷段长度为 15.4 m, 滑面以下为 12.7 m。开挖后, B 桩自由段长度为 3.4 m, 受荷段长度为 16.8 m, 滑面以下为 11.3 m; 开挖后, A 桩自由段长度为 3.4 m, 受荷段长度为 18.2 m, 滑面以下为 9.9 m。桥梁桩基桩身重度为 $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 桩身弹性模量为 25 GPa; 桩顶荷载情况: 桩顶轴力 9 500 kN, 桩顶水平荷载 100 kN, 桩顶弯矩 5 000 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。滑面以上地基抗力比例系数 $m_1 = 8 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-4}$, 滑面以下地基抗力比例系数 $m_2 = 72 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-4}$, 滑坡推力分布形式按三角形计算。根据现场勘察显示, 开挖前, B 桩桩身位置的滑坡推力为 $525.25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 开挖后, A 桩桩身上的滑坡推力为 $764.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。滑坡土体主要为亚黏土, 滑坡推力按三角形分布。

开挖前:

作用在 A 桩的滑坡推力分布形式为:

$$q(z) = 4.43\bar{\alpha}(z - 3.4)。 \quad (19)$$

A 桩受荷段桩前岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_1 z b_1 x = 8 \times 10^6 \times 2.07 z x = 1.656 \times 10^7 z x。 \quad (20)$$

A 桩锚固段岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_2 z b_1 x = 72 \times 10^6 \times 2.07 z x = 1.4904 \times 10^8 z x。 \quad (21)$$

作用在 B 桩上的滑坡推力分布形式为:

$$q(z) = 4.67(1 - \bar{\alpha})(z - 3.4)。 \quad (22)$$

B 桩受荷段桩前岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_1 z b_1 x = 8 \times 10^6 \times 2.07 z x = 1.656 \times 10^7 z x。 \quad (23)$$

B 桩锚固段岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_2 z b_1 x = 72 \times 10^6 \times 2.07 z x = 1.4904 \times 10^8 z x。 \quad (24)$$

开挖后:

作用在 A 桩上的滑坡推力分布形式为:

$$q(z) = 2.3\bar{\alpha}(z - 3.4)。 \quad (25)$$

A 桩受荷段桩前岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_1 z b_1 x = 3 \times 10^6 \times 2.07 z x = 6.21 \times 10^6 z x。 \quad (26)$$

A 桩锚固段岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_2 z b_1 x = 72 \times 10^6 \times 2.07 z x = 1.4904 \times 10^8 z x。 \quad (27)$$

作用在 B 桩上的滑坡推力分布形式为:

$$q(z) = 2.7(1 - \bar{\alpha})(z - 3.4)。 \quad (28)$$

B 桩受荷段桩前岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_1 z b_1 x = 8 \times 10^6 \times 2.07 z x = 1.656 \times 10^7 z x。 \quad (29)$$

B 桩锚固段岩土体抗力为:

$$p(x, z) = m_2 z b_1 x = 72 \times 10^6 \times 2.07 z x = 1.4904 \times 10^8 z x。 \quad (30)$$

3.3 结果分析

根据理论分析, 得到双桩基础开挖前后桩身位移分布图, 如图 3 所示。

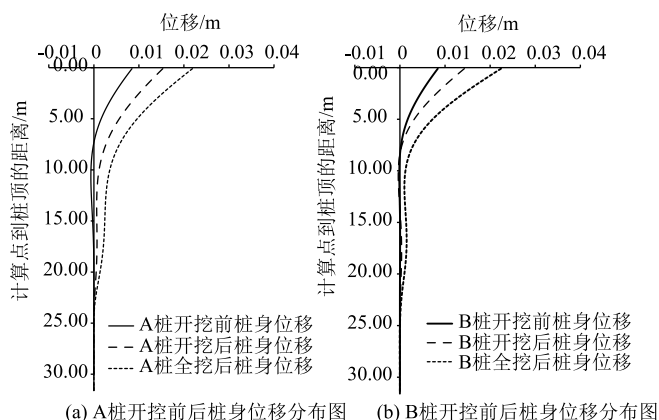


图 3 A、B 桩开挖前后桩身位移分布图

Fig. 3 Displacement distributions of pile A and pile B before and after excavation

由图 3 可知: 在开挖前后, A 桩和 B 桩的桩身位移沿桩身从上到下变小, 都在桩顶处出现位移最大值。A 桩和 B 桩在开挖前后桩身位移都有较大变化, A 桩抗滑桩桩孔开挖前桩身最大位移在桩顶处, 最大位移为 8.46 mm, 桩孔开挖后 A 桩桩身最大位移为 15.30 mm, 桩孔及桩间土开挖后 A 桩桩身最大位移为 21.88 mm。桩孔开挖后 A 桩桩顶位移增加了 6.84 mm, 位移量较开挖前增加 80.8%, 桩孔及桩间土开挖后桩身位移相对于开挖前增加了 13.42 mm, 位移量较开挖前增加 158.6%。B 桩抗滑桩桩孔开挖前桩身最大位移在桩顶处, 最大位移为 8.40 mm, 桩孔开挖后 B 桩桩身最大位移为 15.29 mm, 桩孔及桩间土开挖后 B 桩最大位移为 21.41 mm, 桩孔开挖后 B 桩桩顶位移增加了 6.89 mm, 位移量较开挖前增加 82.02%, 桩孔及桩间土开挖后桩身位移相对于开挖前增加了 13.01 mm, 位移量较开挖前增加 154.9%。根据桥梁桩基设计规范桥梁桩基桩顶位移一般不能大于 10 mm, 大于 10 mm 时桩基很可能已经出现破坏。根据计算结果可知, A 桩和 B 桩在桩孔开挖后桩顶位移都超过了规范要求, 桩基的开挖过程中可能已经破坏; 桩身变形受坡下抗滑桩桩孔的开挖的影响都非常明显, 对待邻近有斜坡桥梁的

抗滑桩施工前一定要验算对斜坡桥梁的影响, 严格控制开挖面积。

通过计算可得双桩基础抗滑桩开挖前后桩身弯矩分布图, 如图 4 所示。

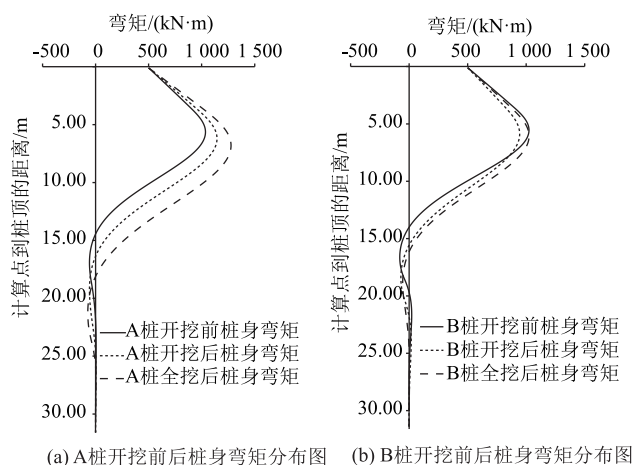


图 4 A、B 桩开挖前后桩身弯矩分布图

Fig. 4 Bending moment distributions of pile A and pile B before and after excavation

由图 4 可知: A 桩和 B 桩在开挖前后桩身弯矩都有一定的变化量, A 桩抗滑桩桩孔开挖前桩身最大弯矩在距桩顶 6.3 m 处, 最大弯矩为 $1\,020\text{ kN}\cdot\text{m}$, B 桩抗滑桩桩孔开挖前桩身最大弯矩在距桩顶 5.5 m 处, 最大弯矩为 $1\,023.87\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。桩孔全部开挖后 A 桩桩身最大弯矩在距桩顶 6.2 m 处, 最大弯矩为 $1\,145.18\text{ kN}\cdot\text{m}$, 相比开挖前最大弯矩增大了 12.25%。桩孔全部开挖后 B 桩桩身最大弯矩在距桩顶 6.1 m 处, 最大弯矩为 $1\,024.4\text{ kN}\cdot\text{m}$, 相比开挖前最大弯矩几乎没有变化, 但是桩身的弯矩分布有一定的变化。桩孔及桩间土全部开挖后 A 桩桩身最大弯矩在距桩顶 6.6 m 处, 最大弯矩为 $1\,277\text{ kN}\cdot\text{m}$, 相比开挖前最大弯矩增大了 25.2%。桩孔全部开挖后 B 桩桩身最大弯矩在距桩顶 5.9 m 处, 最大弯矩为 $944.28\text{ kN}\cdot\text{m}$, 相比开挖前最大弯矩反而减小了, 主要是因为开挖后坡体作用在桩身的滑坡推力变大, 特别是 B 桩承受主要的滑坡推力, B 桩通过承台传递 A 桩, 这样桩顶处 A 桩对 B 桩就有一个反向力, 相当于 B 桩桩顶荷载变小, A 桩桩顶荷载变大, 就导致 A 桩桩身弯矩变大, B 桩桩身弯矩变小, 这一现象与桩基 A 桩桩身出现裂缝, B 桩桩身未出现裂缝这一实际情况刚好一致。

4 结论与建议

本研究首先对斜坡上桥梁双桩基础的受力特点

进行了分析, 将桩身分段对各段基桩微元进行受力分析, 经过一定简化计算得出各分段基桩挠曲微分方程, 提出抗滑桩桩孔开挖条件下的斜坡桥梁基桩内力与位移计算方法, 并通过工程实例分析验证了方法的可行性并探寻桥梁桩基失稳的内在原因。主要研究成果和结论如下:

(1) 根据山区斜坡上桥梁桩基的受力特点, 将桩基分为 3 段进行分析, 建立了基桩内力与位移分析的挠曲微分方程, 采用幂级数法进行求解, 得出桥梁双桩基础桩身内力与位移曲线。

(2) 从边坡的稳定性角度入手, 考虑桩孔开挖后边坡滑动面的变化、滑坡推力的变化、桩前土抗力的变化等因素分析桥梁下部抗滑桩桩孔开挖对斜坡桥梁的影响。根据桩孔开挖前和桩孔及桩间土全部开挖后两种情况桩身内力及位移的分布规律, 推导出坡下抗滑桩桩孔任意开挖情况斜坡桥梁桩基内力与位移的计算公式。

(3) 根据依托工程计算结果, 该斜坡桥梁下部抗滑桩桩孔开挖前, A 桩和 B 桩顶位移分别为 8.46 mm 和 8.41 mm , 桩身最大弯矩分别为 $1\,020\text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $1\,023.87\text{ kN}\cdot\text{m}$, 都基本满足设计要求。当桥下抗滑桩桩孔开挖后, A 桩和 B 桩桩顶位移分别为 15.30 mm 和 15.29 mm , 桩身最大弯矩分别为 $1\,145.18\text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $1\,024.4\text{ kN}\cdot\text{m}$; 当桥下抗滑桩桩孔及桩间土全部开挖后, A 桩和 B 桩桩顶位移分别为 21.88 mm 和 21.41 mm , 桩身最大弯矩分别为 $1\,277\text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $944.28\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。两种开挖情况的计算结果都不满足设计要求, 开挖后桩基很有可能已经破坏, 与实际情况相符。

(4) 综合本工程案例中 3 种工况下斜坡桥梁桩身内力和变形的计算分析可知, 本案例中桥梁桩基发生破坏主要由桥梁下部抗滑桩桩孔的开挖引起边坡滑动, 桩身发生挠曲变形, 导致桥梁桩基的受力状况发生改变, 进而发生破坏。建议类似工程施工前应先对施工过程进行稳定性分析。

参考文献:

References:

- [1] 杨明辉. 岩质陡坡桥梁桩基承载机理及其分析方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
YANG Ming-hui. Analysis Method and Load Mechanics for Rock Slope Bridge Piles [D] Changsha: Hunan University, 2006.
- [2] 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 Jian-hua, ZHAO Ming-hua, YANG Ming-hui. Model Tests on Bridge Pile Foundation in High and Steep Rock Slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (3): 372-377.
- [3] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 基坑开挖对邻近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析 [J]. 岩土工程学报, 2007 (5): 638-643.
- ZHENG Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, et al. Field Observation and Finite Element Numerical Simulation Analysis of Effect on Adjacent Piles due to Excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007 (5): 638-643.
- [4] 魏丽敏, 辛学忠, 何群, 等. 邻近开挖对桥梁桩基变形与内力影响分析 [J]. 铁道工程学报, 2017, 34 (5): 38-44.
- WEI Li-min, XIN Xue-zhong, HE Qun, et al. Effect of Adjacent Excavation on Deformation and Internal Force of Bridge Pile Foundation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34 (5): 38-44.
- [5] 曹周红, 王志鹏, 汪映红, 等. 深基坑开挖边坡上桥梁桩基模型试验研究 [J]. 交通科学与工程, 2018, 34 (3): 60-63.
- CAO Zhou-hong, WANG Zhi-peng, WANG Ying-hong, et al. Model Tests on Bridge Pile Foundation in Ship Lock Deep Excavation Slope [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34 (3): 60-63.
- [6] 邹佳成, 翟祥军, 陈旭东, 等. 排洪渠开挖对桥梁桩基影响及其边坡稳定性分析 [J]. 云南水力发电, 2019, 35 (5): 48-53.
- ZOU Jia-cheng, ZHAI Xiang-jun, CHEN Xu-dong, et al. The Influence of a Drainage Channel Excavation on Pile Foundation and the Slope Stability Analysis [J]. Yunnan Water Power, 2019, 35 (5): 48-53.
- [7] 段书龙, 朱宇. 河道边坡开挖对桥梁结构的影响分析 [J]. 低温建筑技术, 2021, 43 (2): 91-93.
- DUAN Shu-long, ZHU Yu. Analysis of the Impact of River Slope Excavation on Bridge Structures [J]. Low Temperature Building Technology, 2021, 43 (2): 91-93.
- [8] 彭文哲, 赵明华, 肖尧, 等. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2020, 47 (5): 23-30.
- PENG Wen-zhe, ZHAO Ming-hua, XIAO Yao, et al. Stability Analysis of Anti-slide Pile Reinforced Slope and Determination of Optimal Pile Position [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47 (5): 23-30.
- [9] 雷达, 蒋关鲁, 孙圣杰, 等. 基于振动台试验的抗滑桩加固斜坡桥基研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (1): 127-134.
- LEI Da, JIANG Guan-lu, SUN Sheng-jie, et al. Study of Bridge Foundation on Slope Reinforced by Anti-slide Piles on Shaking Table [J]. Rock And Soil Mechanics, 2019, 40 (1): 127-134.
- [10] CHEN L J, JIANG C, PANG L, et al. Lateral Soil Resistance of Rigid Pile in Cohesionless Soil on Slope [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135 (7): 104163.
- [11] RAJA N, MUTHUKKUMARAN K. Effect of Rock-socketing on Laterally Loaded Piles Installed in the Proximity of Sloping Ground [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21 (2): 04020252.
- [12] JTG 3363—2019, 公路桥涵地基与基础设计规范 [S].
- JTG 3363—2019, Specifications for Design of Foundation of Highway Bridges and Culverts [S].
- [13] 赵明华, 彭文哲, 杨超炜, 等. 高陡横坡段桥梁双桩内力计算有限差分分解 [J]. 中国公路学报, 2019, 32 (2): 87-96.
- ZHAO Ming-hua, PENG Wen-zhe, YANG Chao-wei, et al. Finite Difference Solution of Bridge Double-pile Structure on a Steep Transverse Slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (2): 87-96.
- [14] 邓宗伟, 冷伍明, 饶杨安, 等. 高速公路桥基岸坡稳定性计算分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (3): 752-758.
- DENG Zong-wei, LENG Wu-ming, RAO Yang-an, et al. Computational Analysis of Stability of Bridge Foundation Slope for Expressway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (3): 752-758.
- [15] 张利洁, 唐辉明, 聂文波. 抗滑桩设计推力计算探讨 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2002, 24 (6): 490-492.
- ZHANG Li-jie, TANG Hui-ming, NIE Wen-bo. Inquiring into Calculation of Design Thrust of Anti-slide Pile [J]. Journal of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences), 2002, 24 (6): 490-492.
- [16] 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 Zi-hang. Study on Distribution Laws of Landslide-thrust and Resistance of Sliding Mass Acting on Antislip Piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (4): 517-521.
- [17] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 20-24.
- CHEN Zu-yu. Soil Slope Stability Analysis [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2003: 20-24.
- [18] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- ZHENG Ying-ren, CHEN Zu-huang, WANG Gong-xian, et al. Engineering Treatment of Slope and Landslide [M]. Beijing: China Communication Press, 2007.