

高陡边坡桥梁桩基受力特征研究

叶维强, 马海涛, 李 佳

(中铁工程设计咨询集团有限公司, 河南 郑州 450001)

摘 要: 在山地复杂的工程地质条件下, 位于高陡边坡上的桥梁桩基不仅承担着桥梁上部结构传递下来的竖向力、水平力和弯矩作用, 同时也承担着边坡变形引起的侧向力, 桩基与边坡组成了复杂的承载体系。为了探究高陡边坡位置桥梁桩基与边坡土体之间的相互作用, 首先要对边坡土体的稳定性进行研究, 找出可能发生的滑动体以及这些滑动体对桩身施加的滑动推力; 然后将桩基划分成若干段, 逐段分析每一段桩的受力状况, 建立起高陡边坡路段滑动面以上和以下基桩受力的微元模型, 据此建立桩基受力的挠曲方程; 最后得出基桩的内力和位移变形, 为高陡边坡路段桩基设计提供依据。

关键词: 陡边坡; 桥梁; 桩基; 高速公路

中图分类号: U443.15

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0165-04

Study on Mechanical Characteristics of Bridge Pile Foundation in High and Steep Slope

YE Weiqiang, MA Haitao, LI Jia

(China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In the complex geological conditions of mountainous areas, the bridge pile foundation located in high and steep slopes not only bears the vertical and horizontal forces and bending moments transmitted by the bridge superstructure, but also bears the lateral forces caused by slope deformation. The pile foundation and slope form a complex bearing system. In order to explore the interaction between the bridge pile foundation located in high steep slope and the slope soil, the stability of the slope soil is studied to find the possible sliding bodies and the sliding thrust exerted by these sliding bodies on the pile body. Then the foundation pile is divided into several sections, and the load condition of each section is analyzed in turn. The microelement model of the pile force above and below the sliding surface in the high and steep slope road section is established. On this basis, the bending equation of the pile foundation load is established. Finally, the internal force and displacement deformation of the pile are obtained, which provides the basis for the design of pile foundation in the road section of high-steep slope.

Keywords: steep slope; bridge; pile foundation; expressway

0 引 言

随着我国高速公路建设的不断进步, 山区高速公路的建设也在不断加速。考虑到工程投资、工程地质、环境保护等多方面因素的影响, 山区高速公路的线路一般沿着沟谷地带展开, 有些路段会经过陡峭的地形, 为了减少对自然山体的开挖, 其结构通常采用全部桥梁或者半路半桥的形式。但是, 在陡坡上修建桥梁时, 桥梁桩基不仅需要承受桥梁上部传递的竖向力、水平力和弯矩作用, 还需要对抗陡坡的下滑力, 因此桩基必须具备负荷和防滑的双重功能,

其结构受力情况较为复杂。

道路上的桥梁大多采用桩基结构形式建造。本文探讨了位于高陡边坡上桥梁桩基的承载特性, 通过分析在陡坡位置上的桩基受力情况和稳定性, 为陡坡桥梁设计提供理论支持。

1 高陡边坡桥梁桩基受力特点分析

在20世纪六七十年代, 国内外的专家学者已经开始探讨陡坡地形中桩基础的横向受力情况, 并分别进行了模拟试验和相关的数值分析研究, 发现了桩基在陡坡地形中的受力特点, 提出了桩基内力和位移的计算公式。

在路基工程中, 位于陡坡路段的抗滑桩主要承担受土压力和滑动体的下滑力; 而在高陡边坡段, 桥梁

收稿日期: 2024-05-06

作者简介: 叶维强(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

桩基不仅要承担上部结构传来的竖向荷载和弯矩,同时还要承担因土体侧向变形引起的水平荷载^[1-7],受力情况比较特殊。此外,基础的施工工艺、基础直径、基础长度以及周围土体的特性等因素都会对其承载性能产生影响,使得基础的受力情况异常复杂。

在陡峭地段进行建设时,其地表通常会有一层覆盖层或强风化岩层。在进行便道施工、施工平台挖掘、基础施工时都会对地质造成干扰,容易对原有边坡的自然平衡状态造成破坏,引起边坡变形甚至滑移,对桩基形成向邻坡面向外的侧向土压力。在上部产生的竖向力、水平力和陡坡因变形引起的推力共同作用下,桩基会向邻坡面外侧发生位移变形,从而对桥梁桩基邻坡面外侧的土体产生水平挤压,而桩基邻坡面外侧土体也会对桩基产生反作用力,限制桩身变形,最终形成复杂的边坡-桩基-边坡之间相互作用的体系。

高陡边坡上桥梁桩基与土体之间发生的相互影响力包括:

- (1)作用在桩基上的坡体滑坡推力 $P(z)$;
- (2)桩前岩土体抗力 $q(x)$;
- (3)潜在滑动面以下,基础承受的稳定岩土对桩基的抗力 $q'(x)$;
- (4)桥梁上部竖向荷载 P_0 ;
- (5)桥梁上部水平荷载 Q_0 ;
- (6)桥梁上部弯矩 M_0 。

高陡边坡段桥梁桩基受力模型见图1。

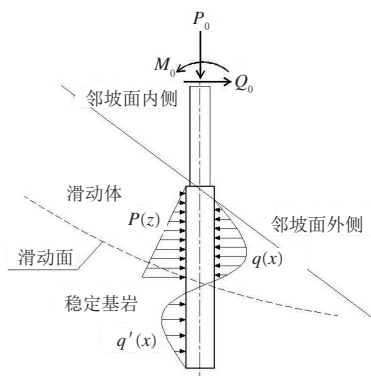


图1 高陡边坡段桥梁桩基受力模型

如果桩基邻坡面内侧的边坡推力过大,引起桩身变形过大,则会影响桩基邻坡面外侧坡体的稳定。当变形超过一定值后,会引起桩基邻坡面外侧土体失稳,造成桩侧土对桩基的体抗力减小甚至消失,从而导致边坡垮塌,引起严重的工程事故。

为了探究高陡边坡位置桥梁桩基与边坡土体之间的相互作用,首先需要对边坡土体的稳定性进行

研究,找出可能发生的滑动体以及这些滑动体对桩身施加的滑坡推力 $P(z)$;确认桩侧滑坡推力之后,需将桩基划分成若干段,逐段分析每一段桩的受力状况,然后建立高陡边坡路段桥梁桩基的计算模型,分别取桩基不同受力段的一个微单元,建立桩基不同受力段微单元的挠曲变形微分方程;最后分析得出桩基的内力和位移变形公式。

2 坡体滑坡推力分析研究

根据目前的研究结果,根据滑坡体的特征、滑坡体厚度、内摩擦角、黏聚力等各项物理参数,可将滑坡体的推力分成三角形、方形、长方形和梯形4种分布模式。位于不同类型滑坡体土层的桩基,滑坡体对其推力的分布方式也不同。对于像土夹石、岩石等液性指数小、刚度大和较密实的滑动体,滑动面上下层土体的滑动速度相差不大,作用在抗滑桩上的滑坡体推力可以按矩形分布考虑;对于像黏土、砂土等液性指数大、刚度小和不密实的塑性滑动体,滑动面上下层土体的滑动速度相差较大,上层滑动速度快,下层滑动速度慢,作用在抗滑桩上的滑坡体推力可以按三角形分布考虑;对于介于上述两者之间的滑坡体,可以假设推力呈梯形分布^[6]。

我国学者做的桩基破坏试验和模型试验研究成果表明:如果滑动体为比较松散的砂砾土,滑动体推力按三角形分布;如果滑动体为黏性土,滑动体推力基本上也按三角形分布,但在滑动体顶点位置的推力接近于抛物线分布;如果滑坡体坡积层、堆积体、岩石破碎带等是以抗剪特征为主的土体时,土体稳定性由内摩擦角的大小确定,则滑动体推力的曲线接近于抛物线,地表处为零,最大值在滑动面略上部位。将模型试验结果与现场实际测量结果进行对比发现,两者基本一致。在高陡边坡段的桥梁桩基所在位置,一般多为坡积层、堆积体、岩石破碎带等,因此,计算此类桩基所受滑动体的推力时,采用抛物线分布相对比较合理^[5]。

在实际工程中,受地形、地貌、水文、地质等情况的影响,山区高陡边坡处滑动体对桩基推力的分布不仅与滑动体种类、滑动面轮廓、位置等有关,还与桩基自身变形和地基土的水平抗力有关。若抗滑桩为柔性支挡结构,则桩基上端变形比下端大,其受力小于下端,而滑动体与滑动面间又存在摩擦力,抵抗了滑动面附近的部分水平力,因此在滑动面附近桩基的受力又有所减小。

国内学者通过大量试验研究,归纳总结了不同岩土体条件下,桩前土体抗力的分布函数公式,见表 1^[6-7]。表 1 中: h_1 为滑动面以上桩长; E 为滑动体

抗力; z 为抗滑桩深度; $q(z)$ 为深度 z 位置的滑动体抗力; k 为滑坡抗力作用点距桩顶距离与滑动面以上桩长的比值。

表 1 桩前土体抗力的分布函数公式

滑坡岩土类别	滑坡推力分布形式	滑坡推力分布函数	土抗力合理作用点
岩石	矩形或平行四边形	$q(z) = \frac{E}{h_1}$	$\frac{h_1}{2}$
砂土、散粒体	三角形-抛物线	$q(z) = \frac{(36k - 24)E}{h_1^3} z^2 + \frac{(18k - 24)E}{h_1^2} z$	$\frac{3h_1}{5} \sim \frac{2h_1}{3}$
黏土	抛物线-三角形	$q(z) = \frac{(36k - 24)E}{h_1^3} z^2 + \frac{(18k - 24)E}{h_1^2} z$	$\frac{2h_1}{3} \sim \frac{3h_1}{4}$
介于砂土和黏土之间	梯形	$q(z) = \frac{18E}{h_1^3} z + \frac{E}{10h_1} z$	$\frac{13h_1}{20}$

3 高陡边坡条件下桩柱式桥梁基桩受力及变形研究

在高陡边坡段桥梁桩基设计中,桩顶有上部结构传下来的竖向力和水平力作用,桩身又有滑坡面以上土体下滑引起的桩前土体抗力和桩后坡体推力的作用,多种作用力叠加后,形成了一个复杂的受力结构体系。与处于较平缓位置的桩基相比较,其受到的水平作用力更大。当横向荷载作用在桩基上时,会对桩基产生弯矩,引起桩基水平向变形,使得上部结构的竖向力相对桩基引起偏心,此时又会对桩基产生附加弯矩。集中作用相互叠加后,就会对桩基形成非线性的 2 阶效应——“ $P-\Delta$ ”效应,使得桩基的受力形式变得十分复杂。

另外,在高陡边坡段的桥梁,因地表覆盖层相对较薄,桩基一般都是嵌入基岩,按端承桩来设计。按照《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)要求,桩基要嵌入岩层一定深度,在陡坡范围内桩前存在临空面,一般情况下在临空面距离桩基 $3 \sim 5d$ (d 为桩基直径) 的土层不能有效地为桩基提供侧向抗力,导致其水平变形过大,影响桩基甚至整个桥梁的安全。

结合前面对滑动体推力和桩前土体抗力分布规律的研究,在分析位于高陡边坡段桥梁桩基的受力特征时,可将桩基分为受荷段和嵌固段来分别计算。受荷段为滑动面以上非稳定段的桩体,通过建立邻坡面外侧、内侧的土体推力模型进行计算;嵌固段为滑动面以下稳定的桩体,稳定基岩对桩基的作用力通过地基反力系数法进行计算。其受力模型如图 1 所示。

3.1 计算假定条件

根据上述分析结果,在高陡边坡段的桥梁基桩所在的位置,一般多为坡积层、堆积体、岩石破碎带

等,滑动面以上非稳定段的桩体受滑动体的推力可采用抛物线分布;桩基为钢筋(钢管)混凝土结构,受力在达到极限荷载情况下可以按弹性变形考虑;桩基嵌固段都是稳定的岩层,整体性好,按照《公路桥涵地基与基础设计规范》附录 L,岩体的地基系数在一定埋深内呈线性增长。因此,为方便分析计算,可对桩基计算模型作适当假定:

(1) 滑动面以上桩基受滑动体的推力 $P(z)$ 为抛物线分布:

$$P(z) = az^2 + bz \tag{1}$$

式中: z 为滑动面以上桩基长度; a 、 b 为待定系数。

(2) 桩基变形为弹性变形。

(3) 滑动面以下岩体的地基系数服从 $(mz+C)$ 的线性增长规律,其中 m 为地基抗力比例系数; C 为地基抗力分项系数。

根据以上假定条件,分别对滑动面以上的桩基受力和滑动面以下的桩基受力情况建立挠曲微分方程。

3.2 滑动面以上桩基受力挠曲微分方程

图 2 为土体中滑动面以上基桩微单元受力示意图。

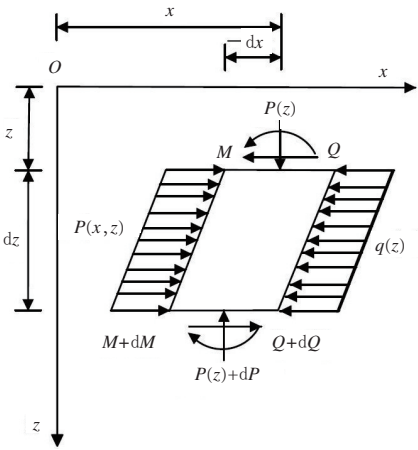


图 2 滑动面以上基桩微单元受力示意图

如图2所示,微单元两端作用有弯矩 M 和 $M+dM$ 、剪力 Q 和 $Q+dQ$ 、轴力 $P(z)$ 和 $P(z)+dP$, 两侧作用有下滑推力 $P(x+z)$ 和岩体抗力 $q(z)$ 。同时,沿桩轴向还有桩侧岩体的摩阻力和桩身自重的作用。通过对图2中单元体的下端中点取矩可得:

$$(M + dM) - M + Pdx - Qdz + \frac{1}{2}q(dz)^2 - \frac{1}{2}P(dz)^2 = 0 \quad (2)$$

略去2阶微分得:

$$\frac{dM}{dz} + P \frac{dx}{dz} - Q = 0 \quad (3)$$

又 $\Sigma x = 0$, 得 $dQ + qdz = 0$, 即:

$$\frac{dQ}{dz} = P(z) - b_1 q(x, z) \quad (4)$$

将式(3)对 z 求导, 得:

$$\frac{d^2 M}{dz^2} + \frac{d}{dz} \left(P \frac{dx}{dz} \right) - \frac{dQ}{dz} = 0 \quad (5)$$

再将 $M = EI \frac{d^2 x}{dz^2}$ 和式(4)代入式(5), 可得土体中滑动面以上桩基的挠曲微分方程:

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + \frac{d}{dz} \left(P \frac{dx}{dz} \right) + b_1 q(x, z) - P(z) = 0 \quad (6)$$

式中: EI 为桩基抗弯刚度。

3.3 滑动面以下桩基受力挠曲微分方程

对于滑动面以下的桩基部分, 可采用相同的思路, 得到的微单元体结构如图3所示。图3与图2的不同之处在于其左侧没有下滑推力。因此, 土体中滑动面以下桩基挠曲微分方程可用下式表示:

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + \frac{d}{dz} \left(P \frac{dx}{dz} \right) + b_1 q(x, z) = 0 \quad (7)$$

根据式(6)、式(7), 可以进一步分析计算出桩基在某一微单元的位移、内力、弯矩。

4 结 语

(1) 位于高陡边坡段的桥梁桩基, 因其所在位置的环境情况特殊, 其受力相当复杂, 除了要承受上部

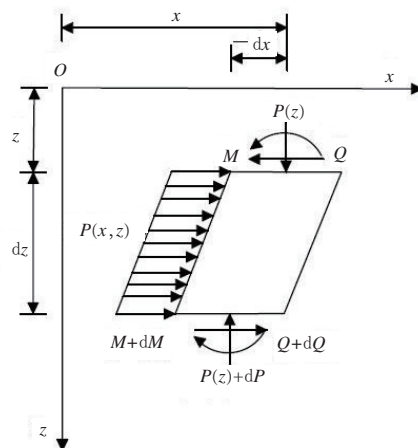


图3 滑动面以下基桩微单元受力示意图

结构传来的竖向力、水平力和弯矩作用外, 还要承受来自侧向土体分布力的影响。土体滑动上下变形不同, 作用给桩基的力也有所不同, 正确地分析桩基的受力情况, 是陡坡桥梁桩基计算的关键。

(2) 高陡边坡段桥梁桩基的受力情况与普通地段的桩基有较大差异, 设计过程中要针对不同的地段, 结合工程地质情况, 合理分析桩基受力, 采取有效可靠的技术措施, 避免桩基受力过大而导致破损, 从而影响桥梁的整体质量和使用安全。

参考文献:

- [1] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑动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.
- [2] 刘建华, 赵明华, 杨明辉. 陡坡桩柱式桥墩双排桩施工数值模拟研究[J]. 公路工程, 2010, 35(4): 1-6.
- [3] 杨进, 巢万里. 高陡边坡下桥梁桩基受力分析及防护设计[J]. 公路工程, 2013, 38(4): 40-43.
- [4] 赵明华, 刘建华, 杨明辉. 倾斜荷载下高陡边坡桥梁桩基内力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2352-2357.
- [5] 尹平保. 陡坡段桩柱式桥梁桩基设计计算方法及试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [6] 杨明辉. 岩质陡坡桥梁桩基承载力机理及其分析方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [7] 刘建华. 岩质边坡桥梁桩基受力分析的理论与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

