

岩溶陡坡地区公路桥梁桩基极限承载力研究

刘雪峰, 杨和贤

(深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 岩溶和陡坡是影响桩基基础极限承载力的关键因素。为研究在不良地质条件下桩基基础极限承载力影响因素和防治措施,利用有限元软件建立了桩基础模型并依据相关规范验证了其有效性,针对5种不同坡度和4种岩溶顶板厚度进行了正交模拟试验,分析了不同工况下桩基承载力的变化和桩体承载形式。结果表明:溶洞会造成更大的沉降,地基沉降与岩溶顶板厚度呈反比,3倍桩径为岩溶地质对桩基的最大影响范围。大于45°的陡坡会造成更大的地基沉降而减少桩基的极限承载力,应极力避免坡度45°以上的陡坡在实际工程中的使用。当无法避免时,应重点考虑其对桩基承载力的影响。溶洞和陡坡降低桩体极限承载力的方式主要表现为降低桩体侧摩效应,桩体承载形式由摩擦桩转变成端承桩。

关键词: 岩溶;陡坡;桩基础;极限承载力

中图分类号: U443.15

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)03-0222-04

0 引言

我国城市化进程的加快极大地推动了国家交通设施的发展,城市间公路网更加完善。因此,公路工程往往会穿越岩溶地区,对公路桩基的要求也更高。岩溶地区特殊的地质条件对桩基有显著的影响,如果施工过程对溶洞处理不当,会对工程产生不利影响。

针对岩溶地区公路工程问题,已有众多学者开展一系列研究。冯忠居等^[1]以某桥梁工程为研究对象,通过离心模型试验分析了黄土洞穴对桥梁桩基的影响,系统研究了洞穴尺寸、洞穴距桩基距离等影响因素对桥梁桩基承载力的影响规律。赵明华等^[2]以岩溶区嵌岩桩为研究对象,利用有限元软件ABAQUS建立三维数值模型,分析了岩溶地质对桩基承载力的影响,通过参数分析研究了下伏溶洞顶板厚度对桩承载力的影响规律,并明确了下伏溶洞顶板安全厚度。张智浩等^[3]基于岩溶区嵌岩桩工程,通过数值软件分析嵌岩桩施工过程中的变形,总结了嵌岩桩的破坏模式,对某工程嵌岩桩的设计方案进行了完善。张慧乐等^[4]通过室内试验,分析岩溶区嵌岩桩的变形特征,研究了不同影响因素对嵌岩桩桩基承载力的影响。张永杰等^[5]以陡坡段双桩-柱基础为研究对象,通过理论方法给出了桩基承载力的

简化计算方法,研究了桩长、桩径等参数对桩基承载力的影响规律。程刘勇等^[6]以斜坡基桩为研究对象,通过数值模拟和模型试验相结合的方法,分析了桩水平极限承载力,系统分析了相关影响因素的影响。

此外,陡坡也是降低桩基极限承载能力的关键因素。张洪波^[7]根据现有理论结合工程实际,通过现场试验研究了桥梁桩基在陡坡条件下的工作机理和承载特性。研究表明,陡坡条件下的桩基础荷载应力传递规律相较于平坡有很大差异。杨伟良^[8]对桥梁桩基础在陡坡中的工作安全评价方法进行了梳理和改进,提出了具有针对性的防止措施。王抒扬^[9]研究了桩基挡墙在高速铁路陡坡路基中的应用,对陡坡路基桩基挡墙的作用机理和设计进行了阐述和优化。

现为研究在不良地质条件下桩基基础极限承载力影响因素和防治措施,利用有限元软件建立了桩基础模型并依据相关规范验证了其有效性,针对5种不同坡度和4种岩溶顶板厚度进行了正交模拟试验,分析了不同工况下桩基承载力的变化和桩体承载形式。

1 三维数值模拟

1.1 模型尺寸和网格划分

根据地勘资料,通过有限元软件建立三维平坡无溶洞数值模型。该桩基模型由两层土层组成,上层为28 m厚粉质黏土,下层为风化石灰岩,厚23 m。参考相关文献,本构模型选用弹塑性模型。桩长23 m,桩径2 m,采用线弹性本构模型,桩底部嵌入岩体1.5 m。各材料模型输入参数如表1所列。

收稿日期: 2022-05-23

作者简介: 刘雪峰(1978—),男,本科,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

表 1 模型各材料输入参数表

名称	弹性模量 E/kPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
杂填土	1×10^5	0.25	4.5	16.3	16.5
粉质黏土	7×10^3	0.25	22.5	19.2	9.3
风化石灰岩	8.3×10^5	0.23	—	28.0	—
混凝土桩	3.2×10^7	0.20	—	24	—

对桩模型周围进行局部加密处理,共生成 12 783 个 15 应力节点,模型网格剖面图如图 1 所示。

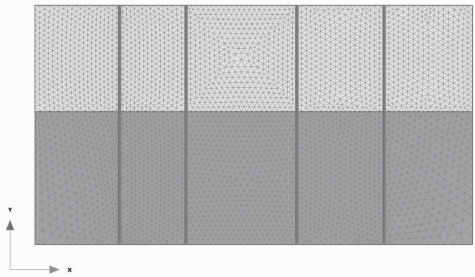


图 1 模型网格剖面图

1.2 模型验证

图 2 展示了平坡(0°)无溶洞桩基 P~S 曲线。从图中可以看出,该曲线呈现缓变型。取沉降为 40 mm 时对应的荷载值为极限承载力 22.7 MN,根据《公路桥涵地基与基础设计规范》^[10],钻孔灌注桩承载力标准值可由式(1)计算:

$$[R_a]=Q_{sk}+Q_{pk}=\mu\sum_{i=1}^nq_{sik}l_i+A_pq_{pk}\tag{1}$$

式中: μ 表示桩周长; l_i 表示土层厚度; q_{sik} 代表桩侧极限摩阻力标准值; A_p 为桩端截面面积; q_{pk} 代表桩端阻力标准值。

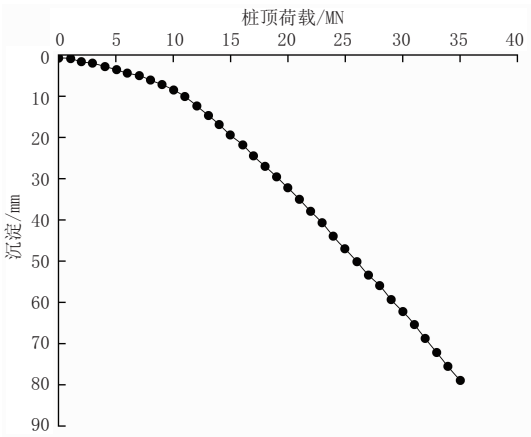


图 2 无溶洞平坡桩基 P-S 曲线图

依据公式(1)计算出该模型桩基极限承载力为 22 826.7 kN,有限元计算结果为 22 764 kN,两者相较误差为 0.23%。因此,该有限元模型在参数选取和本构模型等方面具有合理性,方法和结果可靠。

1.3 数值模拟方案

通过实地勘测,该陡坡岩溶区地质恶劣复杂,地

基桩基础经常受到各种因素干扰。为研究陡坡和岩溶对桩基极限承载力的影响,现选取岩溶顶板厚度和陡坡坡度作为模拟试验变量。表 2 为具体的模拟方案。

表 2 数值试验方案一览表

桩径 D/m	桩长 L/m	坡度 $r/(\text{°})$	溶洞高度 H/m	溶洞跨度 $L/(\text{m}\times\text{m})$	顶板厚度 h/m
2	24	0、30、45、 60、75	4	6×6	2
					4
					6
					8

2 桩基承载特性分析

2.1 顶板厚度影响

为研究岩溶顶板厚度对桩基极限承载能力的影响,在坡度 45°条件下选取不同桩径 D 倍数为 2 m (1D)、4 m (2D)、6 m (3D)和 8 m (4D),进行单一变量模拟试验。由 40 mm 沉降时对应的桩顶荷载来计算桩基极限承载力。图 3 展示了坡度 45°时不同顶板厚度下的荷载沉降曲线。

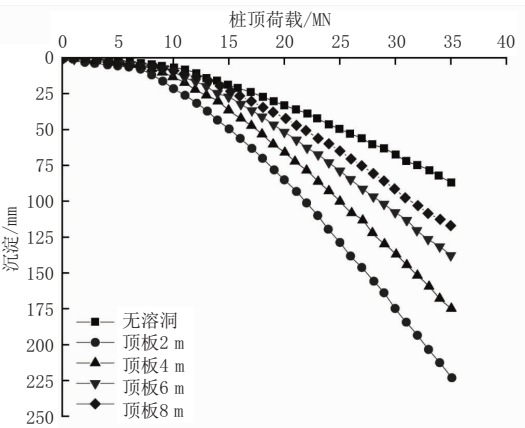


图 3 $r=45^\circ$ 时不同工况下 P-S 曲线图

从图 3 可以看出,在试验初期,各工况沉降曲线较为接近。随着试验的进行,有溶洞时由于应力集中效应会造成更大的沉降,地基沉降与顶板厚度呈反比,随着顶板厚度的增加而减小。可通过式(2)计算承载力减幅:

$$\xi=\left|\frac{P_i-P_0}{P_0}\right|\tag{2}$$

式中: P_i 表示不同岩溶顶板厚度对应的桩基极限承载力; P_0 为不包含溶洞的极限承载力。

图 4 展示了坡度 45°时不同顶板厚度下的桩基极限承载力及减小幅值。从图 4 可以看出,溶洞对地基存在破坏作用,减小了桩基础的极限承载力,而溶洞顶板减缓了这种负面效果。坡度相同时,相较于无

溶洞,8 m厚度顶板、6 m厚度顶板、4 m厚度顶板和2 m厚度顶板桩基极限承载力分别减小了11.95%、19.86%、29.13%和38.28%。减幅曲线转折点出现在顶板厚度6 m,当厚度超过6 m减幅下降。因此,3倍桩径为岩溶地质对桩基的最大影响范围。这一结果也符合赵明华等人^[2,11]对顶板厚度取值范围的预测。

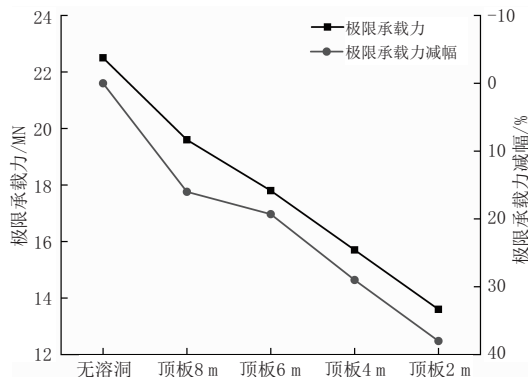


图4 $r=45^\circ$ 时不同工况下极限承载力减幅曲线图

2.2 坡度影响

图5展示了顶板4 m(2D)条件下五种坡度的沉降情况。由图可知,陡坡会造成更大的地基沉降进而减少桩基的极限承载力。随着荷载的施加,沉降与坡度成正比,沉降值随着坡度变陡而逐渐增加。而这一情况在坡度 45° 之后愈加明显。

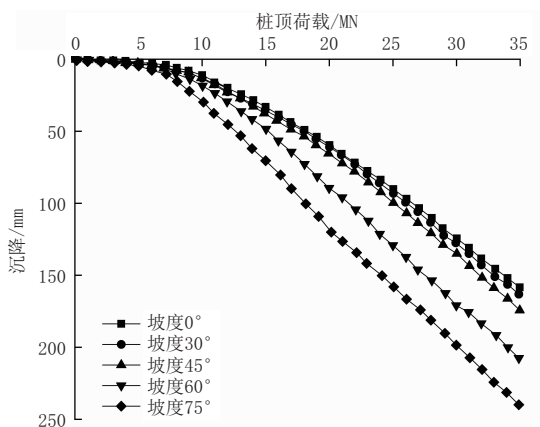


图5 $h=4$ m时各坡度P-S曲线图

图6反映了顶板4 m(2D)条件下五种坡度的桩基极限承载力和对比平坡(0°)的承载力减幅情况。从图中可以看出,坡度会减小桩基的极限承载力,坡度为 30° 、 45° 、 60° 和 75° 工况下,相较于平坡,极限承载力分别减小了1.91%、2.72%、14.73%和29.85%。坡度对桩基承载力的影响在 45° 之后作用非常显著。这是由于,当坡度增加,会加剧桩侧土体缺失和两侧分布不均匀等情况,导致桩体侧摩效应减弱,最终导致承载力的损失。综上所述,应极力避免坡度 45° 以上的陡坡在实际工程中的使用,无法避免时,应重点考虑其对桩基承载力的影响。

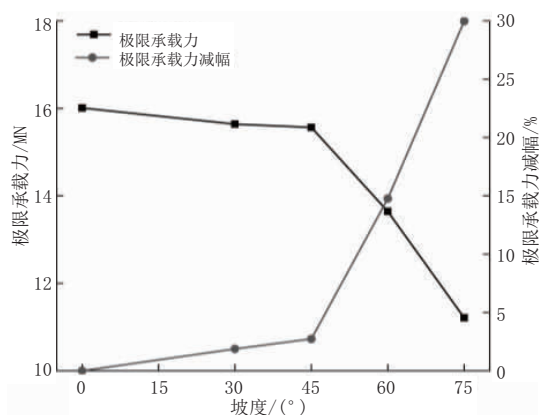


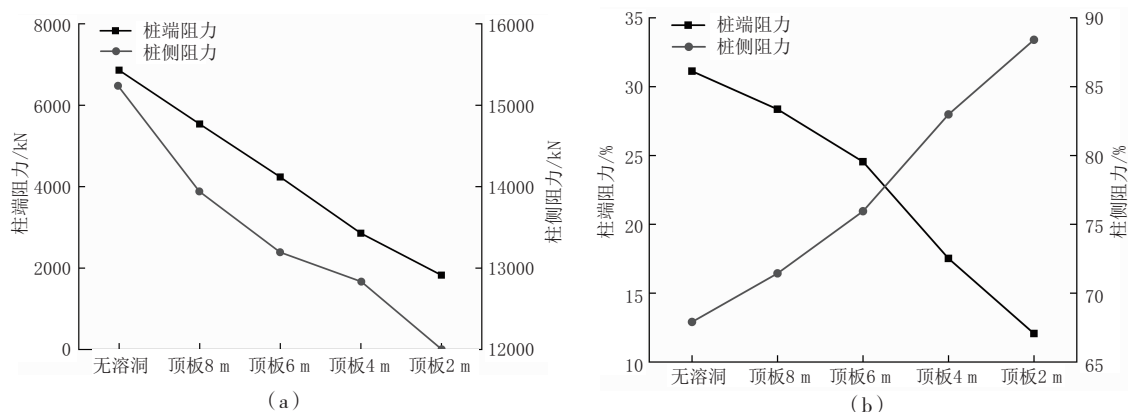
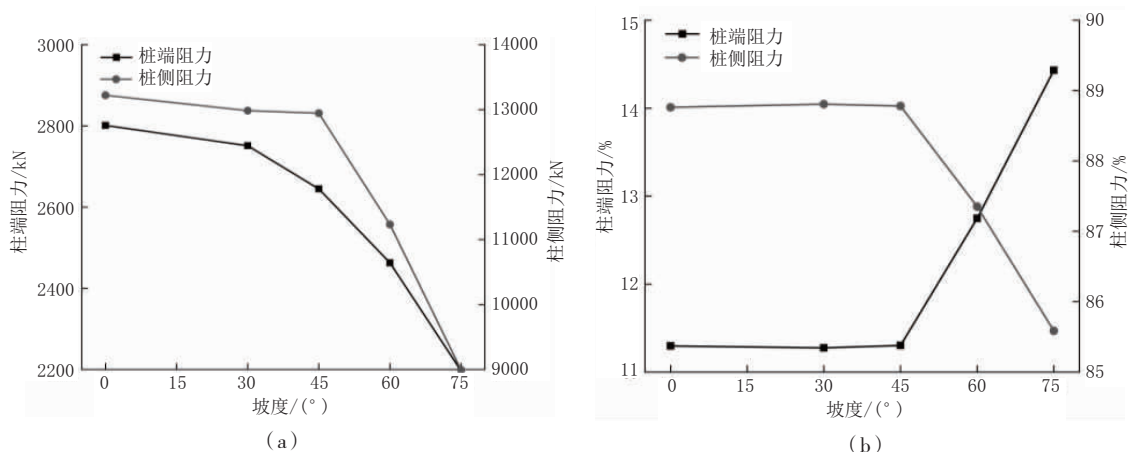
图6 $h=4$ m时各坡度极限承载力减幅曲线图

2.3 桩侧摩擦力和桩端阻力分析

桩体承载能力主要由两部分构成,分别为桩端阻力和桩侧摩擦力。图7展示了坡度 45° 时,不同顶板工况下桩端阻力和桩侧摩擦力数值大小和变化情况。图7(a)为不同工况下桩端阻力和桩侧摩擦力的数值大小和变化趋势。图中显示,桩端阻力和桩侧摩擦力随顶板厚度增加而提高,桩端阻力变化趋势接近于直线。桩侧摩擦力变化趋势在顶板厚度为6 m(3D)时出现较大转变,顶板厚度大于6 m(3D),增加趋势变缓,小于6 m(3D)时,出现较大的降低。

图7(b)展示了坡度 45° 时,不同顶板厚度工况下桩端阻力和桩侧摩擦力在桩基础极限承载力中的占比情况。从图中可以看出,在顶板厚度到达6 m时,两者占比出现较大转变。顶板厚度大于6 m,按桩体承载形式划分可发现桩体由摩擦桩逐渐演变为端承桩形式。这亦进一步验证了前文的结论。此外,该现象也说明了以顶板厚度6 m(3D)为临界点,增加或减小厚度主要是改变了桩侧摩擦力的变化,厚度大于6 m时,对桩体侧摩效应变化影响不大。

图8展示了在岩溶顶板厚度为4 m(2D)条件下,不同坡度工况中的桩端阻力和桩侧摩擦力特征。图8(a)反映了两者的数值变化,图8(b)反映了在桩基极限承载力计算中的占比情况。从图中可以看出,随着坡度增大,桩端阻力和桩侧摩擦力均有不同程度的下降,临界点出现在 45° 坡面。坡度小于 45° 时,坡度变化对桩端阻力和桩侧摩擦力影响并不太大,而一旦坡体大于 45° ,两者均出现大幅度下降,相较于 30° 坡面, 75° 坡面桩端阻力和桩侧摩擦力分别下降了22.22%和30.76%。另外,从图8(b)中可以发现,桩承载形式也是在坡体 45° 时发生转变,坡体大于 45° 之后,桩侧摩擦效应显著减弱,桩体由摩擦桩转变成了端承桩,损失了较大的桩基承载力。

图7 $r=45^\circ$ 时各工况承载特性曲线图图8 $h=4\text{ m}$ 时各坡度承载特性曲线图

3 结论

为研究在不良地质条件下桩基础极限承载力影响因素和防治措施,利用有限元软件建立了桩基础模型并依据相关规范验证了其有效性。针对5种不同坡度和4种岩溶顶板厚度进行了正交模拟试验,得出主要结论如下:

溶洞会造成更大的沉降,地基沉降与岩溶顶板厚度呈反比,3倍桩径为岩溶地质对桩基的最大影响范围。

大于 45° 的陡坡会造成更大的地基沉降进而减少桩基的极限承载力,应极力避免坡度 45° 以上的陡坡在实际工程中的使用,无法避免时,应重点考虑其对桩基承载力的影响。

溶洞和陡坡降低桩体极限承载力的方式主要表现为降低桩体侧摩效应,桩体承载形式由摩擦桩转变成端承桩。

参考文献:

- [1] 冯忠居,王富春,苏航州,等.黄土洞穴对桥梁桩基竖向承载特性影响的离心模型试验[J].长安大学学报:自然科学版,2017,37(2):35-44.
- [2] 赵明华,蒋冲,曹文贵.岩溶区嵌岩桩承载力及其下伏溶洞顶板安全厚度的研究[J].岩土工程学报,2007(11):1618-1622.
- [3] 张智浩,张慧乐,马凛,等.岩溶区嵌岩桩的破坏模式与工程设计探讨[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):4130-4138.
- [4] 张慧乐,张智浩,王述红,等.岩溶区嵌岩桩的试验研究与分析[J].土木工程学报,2013,46(1):92-103.
- [5] 张永杰,夏旖琪,冯夏庭,等.陡坡段双桩-桩基础简化计算方法及影响因素分析[J].岩土力学,2017,38(6):1705-1715.
- [6] 程刘勇,许锡昌,陈善雄,等.斜坡桩基水平极限承载力及影响因素模型试验和数值模拟[J].岩土力学,2014,35(9):2685-2691.
- [7] 张洪波.秦巴山区陡坡桥梁桩基竖向承载特性现场试验研究[D].长安大学,2011.
- [8] 杨伟良.山区陡坡地段桥梁桩基施工的安全评价及其防护技术[D].长安大学,2014.
- [9] 王抒扬.桩基挡墙在高速铁路陡坡路基中的应用[J].铁道勘察,2015(3):3.
- [10] JTG D63—2007,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [11] 曹文贵,程晔,赵明华.公路路基岩溶顶板安全厚度确定的数值流形方法研究[J].岩土工程学报,2005,27(6):621-625.