

斜坡段桥梁基桩竖向承载力试验及数值模拟研究<sup>\*</sup>

尹平保, 邹靖, 曹先慧, 申盛, 吴乙扬, 伊冰冰

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**以某斜坡段桥梁基桩为原型建立室内模型进行竖向承载力试验,并与三维数值模拟计算结果进行对比,分析其竖向承载特性及破坏模式。结果表明,桩顶竖向荷载相同时,基桩顶沉降量随斜坡坡度及基桩自由段长度的增加而增大,基桩的荷载位移曲线上没有出现较明显的拐点;数值模拟计算结果比模型试验结果大,但两者变化规律基本一致,其误差除 60°边坡达到 15.54% 外,其他均在 10% 以内;边坡坡度越大,基桩极限承载力越小,减小幅度为 5%~25%;不同坡度下基桩桩身轴力均随深度增加而减小,坡度越小减小幅度越大;斜坡基桩的竖向荷载主要由桩端承担,桩端阻力占比为 70%~80%,坡度越大桩端承担的荷载比例越大;随基桩自由段长度的增加,基桩极限承载力减小,减小幅度为 5%~15%;竖向荷载作用下斜坡段桥梁基桩主要表现为变形过大所导致的基桩屈曲失稳破坏。

**关键词:**桥梁;桩基础;竖向荷载;斜坡;竖向承载力

**中图分类号:**U443.15

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2019)03-0119-04

斜坡段桥梁基桩的竖向承载破坏特性与其桩顶受力与变形密切相关。对于平地桩,基桩竖向承载力主要与桩侧摩阻力、桩端阻力及桩材性质有关。而对于斜坡段基桩,因斜坡体的存在,桩前后土体不再对称,基桩的侧摩阻力有所不同。与平地桩相比,斜坡基桩受陡坡作用影响,其受力、承载特性及失效机理更复杂,更易产生安全隐患。

赵明华等针对邵怀(邵阳—怀化)高速公路中的斜坡桩,开展了承载与受力特性研究;张永杰等以高陡斜坡段桥梁群桩基础为研究对象,考虑边坡滑移作用对桩基受力特性的影响,分析了群桩设计的影响因素;程刘勇等通过三维数值模拟和模型试验,分析了斜坡基桩的水平受力特性及其影响因素;李彰明等以土质边坡中的水平受荷桩为研究对象,通过静载试验分析了水平受荷斜坡基桩的承载与变形特性。上述研究多从基桩水平承载特性方面探讨其受力变形性状,而实际工程中的桥梁基桩以承受竖向荷载为主。高璇通过模型试验,分析了不同坡度、桩长及直坡等工况下陡坡段桥梁嵌岩桩的竖向承载特性及其对桥梁桩基竖向承载力的影响;陈帝江通过有限元仿真分析,对斜坡段桥梁桩基竖向承载特性进行分析,发现坡度对桩基承载力影响较大;程刘勇等通过竖向荷载下斜坡桩基模型试验和数值分析,

提出了一种斜坡桩基竖向极限承载力实用计算方法。但现有关于斜坡段桥梁基桩竖向承载的研究尚不系统。该文采用室内模型试验和数值模拟相结合的方式,对比分析斜坡段桥梁基桩的竖向承载特性及破坏模式。

## 1 斜坡基桩竖向承载模型试验分析

室内模型试验以湖南张家界至花垣高速公路某桥梁基桩为原型。该基桩位于 30°~50°斜坡上,桩侧上覆土体主要为含砾粉质黏土,中层为中风化~强风化灰岩,桩端嵌入中风化灰岩内(见图 1)。桩径 2.0 m,桩长 25 m(含系梁高 1.6 m),前后桩中心距 6.7 m。采用 C25 砼和 HRB335 钢筋现场浇筑。



图 1 斜坡上的桥梁基桩

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(51408066);湖南省教育厅科研项目(16B013);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(16ZDXK02)

试验采用三型聚丙烯管材即 PPR 管作为模型桩,外径 6.3 cm,内径 5.1 cm,壁厚 0.6 cm;弹性模量为 1 680 MPa,惯性矩为  $2.18 \times 10^{-7} \text{ m}^4$ ,抗弯刚度为  $0.366 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。模型边坡由粗砂填筑而成,粗砂含水率为 2.43%,重度为  $15.65 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角为  $39^\circ$ ,曲率系数为 1.05,不均匀系数为 8.57,为级配良好的粗砂(见图 2)。模型试验方案见表 1。

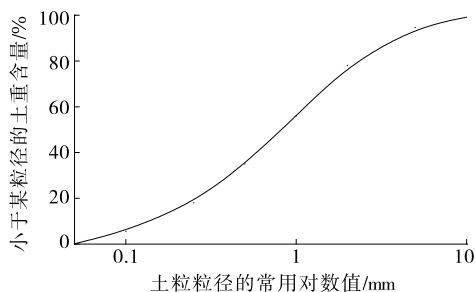


图 2 粗砂的级配曲线

表 1 模型试验方案

模型编号	$h/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	桩长 $L/\text{mm}$	坡度 $\alpha/(\circ)$
M0	800	400	1 200	0
M1	800	400	1 200	30
M2	800	400	1 200	45
M3	800	400	1 200	60
M4	800	600	1 400	45
M5	800	800	1 600	45

注:  $h$  为基桩埋入坡体中的长度;  $l$  为基桩自由段长度; 基桩总长  $L = h + l$ 。

模型试验布置见图 3。试验采用慢速维持荷载法进行加载,即逐级施加桩顶竖向荷载,第一级施加 2 kN,其后每级施加 1 kN。当某级荷载下桩顶沉降量小于  $0.1 \text{ mm/h}$  时,认为已稳定,然后施加下一级荷载直至模型破坏。试验中测定桩顶沉降量、桩身



(a) 模型桩



(b) 试验加载

图 3 模型桩及模型试验布置

应力、桩端阻力。

## 2 斜坡基桩竖向承载数值模拟分析

### 2.1 砂土本构模型

以模型试验桩为例,采用 ABAQUS 有限元软件建立数值分析模型,模型中土体采用均质不排水砂土。采用摩尔-库伦本构模型模拟砂土的弹塑性特性,其屈服面表示为:

$$J - \left( \frac{c}{\tan \varphi} + p' \right) g(\theta) = 0 \quad (1)$$

$$g(\theta) = \frac{\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta \sin \varphi} \quad (2)$$

式中:  $J$  为偏应力不变量;  $c$  为土体粘聚力;  $\varphi$  为土体内摩擦角;  $p'$  为平均有效应力;  $\theta$  为应力罗德角。

### 2.2 模型建立及边界条件

建立三维实体模型,桩与坡体均采用三维八节点缩减积分实体单元(C3D8R),模型及网格划分见图 4。桩土界面接触属于非线性问题,采用主-从接触对算法建立桩土接触关系,模拟界面接触、滑移和分离等过程。桩土之间的界面摩擦系数为:

$$\mu = \tan[\sin \varphi \times \cos \varphi / (1 + \sin^2 \varphi)] \quad (3)$$

模型的约束条件为:坡体底部为固定约束,模型侧面边界为水平约束,释放竖向约束,确保土体产生竖向位移;模型桩嵌入土体中,不作约束。

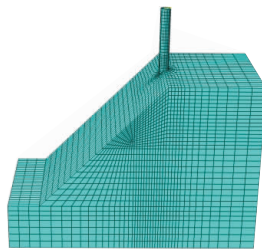


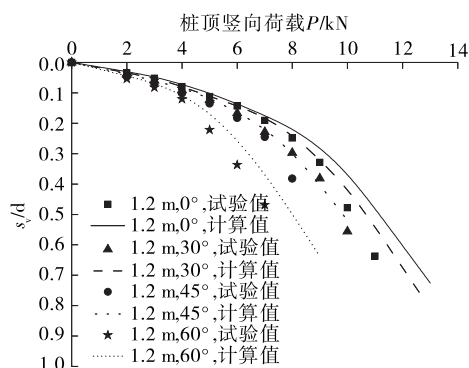
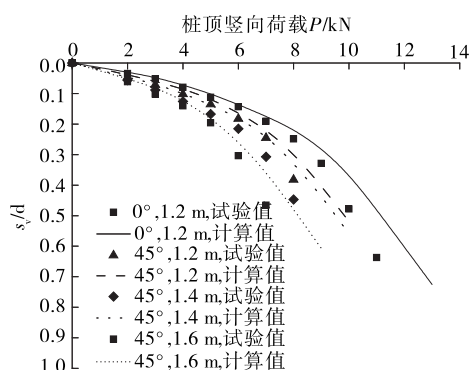
图 4 基桩计算模型网格划分

## 3 基桩竖向承载机理及承载力分析

### 3.1 试验与数值模拟对比验证

根据不同坡度及桩长下基桩竖向加载室内模型试验结果及数值模拟计算结果,得到图 5、图 6 所示基桩桩顶竖向荷载  $P$  与桩顶沉降、桩径比  $s_v/d$  之间的关系曲线。

由图 5、图 6 可知:当基桩桩顶竖向荷载相同时,桩顶沉降量随斜坡坡度及基桩自由段长度的增加而增大,且  $P-s_v/d$  曲线均无明显拐点,斜坡基桩主要表现为因变形过大而趋于破坏;数值模拟与

图 5 不同坡度下基桩  $P-s_v/d$  曲线图 6 不同桩长下基桩  $P-s_v/d$  曲线

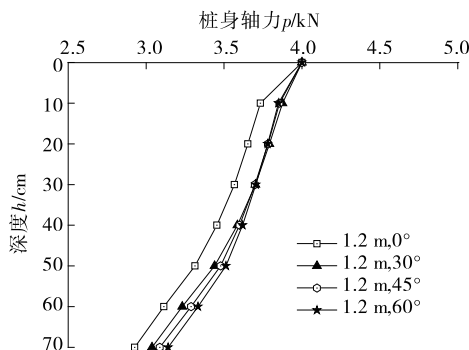
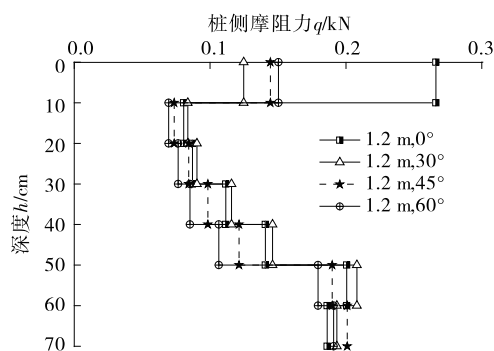
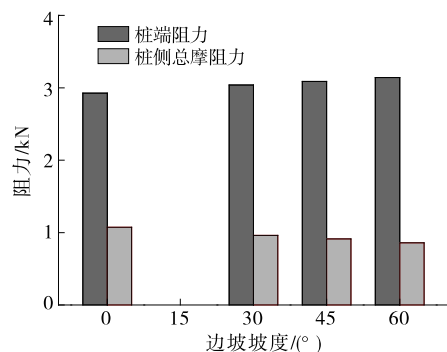
室内模型试验结果的变化规律相似,验证了数值模型的可行性。

### 3.2 基桩竖向荷载传递规律分析

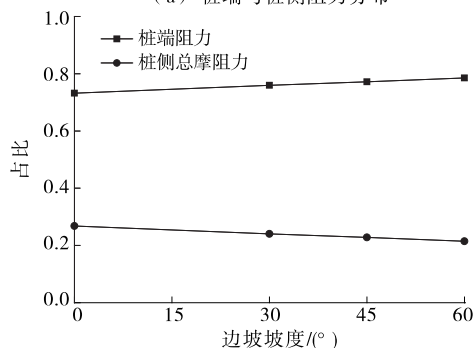
以桩顶竖向荷载  $P=4$  kN 为例,不同坡度下基桩桩身轴力和桩侧摩阻力分别见图 7、图 8,桩端阻力占比见图 9。

由图 7 可知:不同坡度下基桩桩身轴力均随着深度的增加而减小,相对来说平地桩(M0)的减小幅度较大。

由图 8 可知:桩顶荷载为 4 kN 时,桩侧摩阻力先增大后减小再增大,坡度越小,桩侧摩阻力变化幅度越大。

图 7 变坡度条件下桩顶竖向荷载  $P=4$  kN 时桩身轴力图 8 变坡度条件下桩顶竖向荷载  $P=4$  kN 时桩侧摩阻力

(a) 桩端与桩侧阻力分布



(b) 桩端与桩侧阻力占比

图 9 变坡度条件下桩顶竖向荷载  $P=4$  kN 时  
桩侧与桩端阻力分布

由图 9 可知:斜坡段桥梁基桩的竖向荷载主要由桩端承担,0°、30°、45°及 60°边坡中的基桩桩端阻力占比分别为 73.2%、76.0%、77.2%及 78.5%,对应桩侧总摩阻力占比分别为 26.8%、24.0%、22.8%及 21.5%。说明坡度越大,桩端承担的荷载比例越大,桩侧分担的荷载比例减小。

### 3.3 基桩极限承载力及破坏模式分析

根据单桩极限承载力确定方法及现有研究成果,取桩顶沉降量  $0.3d$  对应的桩顶竖向荷载作为基桩极限承载力  $P_u$ ,结果见表 2。

由表 2 可知:1) 由数值模拟计算结果确定的基桩极限承载力  $P_u$  比按试验结果确定的  $P_u$  大,其误

表 2 基桩极限承载力  $P_u$ 

模型编号	$P_u$ 试验 结果/kN	$P_u$ 计算 结果/kN	误差/%
M0	8.93	9.26	3.70
M1	8.21	8.77	6.82
M2	7.51	8.01	6.66
M3	5.60	6.47	15.54
M4	7.15	7.52	5.17
M5	6.12	6.48	5.88

差除 60°边坡达到 15.54%外,其他均在 10%以内,进一步验证了试验和数值计算结果的可靠性。试验过程中,随着竖向荷载的增大,桩土相对位移增大,导致桩和土脱开,而数值模拟中桩和土始终是一个连续体,因而数值模拟计算结果比试验结果大。2) 对比 M0、M1、M2 和 M3,随着边坡坡度的增大,基桩极限承载力  $P_u$  减小,减小幅度为 5%~25%;对 M2、M4 和 M5,随着基桩自由段长度的增加,基桩极限承载力  $P_u$  减小,减小幅度为 5%~15%。结合图 5、图 6,竖向荷载作用下斜坡段桥梁基桩的破坏模式主要表现为因桩身变形过大所导致的基桩屈曲失稳破坏。

#### 4 结论

(1) 桩顶竖向荷载相同时,桩顶沉降随坡度及桩长(自由长度)的增加而增大,且其  $P-s_v/d$  曲线无明显拐点;数值模拟与室内模型试验结果的变化规律相似,数值计算结果比试验结果大,其误差除 60°边坡达到 15.54%外,其他均在 10%以内。

(2) 不同坡度下基桩桩身轴力均随深度增加而减小,坡度越小减小幅度越大;斜坡段桥梁基桩的竖向荷载主要由桩端承担,桩端阻力占比为 70%~80%,桩侧总摩阻力占比为 20%~30%;坡度越大

桩端承担的荷载比例越大。

(3) 随边坡坡度增大,基桩极限承载力减小,减小幅度为 5%~25%;随基桩自由段长度增加,基桩极限承载力减小,减小幅度为 5%~15%。

(4) 竖向荷载作用下斜坡段桥梁基桩的破坏模式主要表现为因桩身变形过大所导致的基桩屈曲失稳破坏。

#### 参考文献:

- [1] 尹平保,杨莹,贺炜,等.考虑斜坡效应的基桩屈曲临界荷载分析[J].岩土力学,2017,38(9).
- [2] 尹平保,贺炜,张建仁,等.斜坡基桩的斜坡空间效应及其水平承载特性研究[J].土木工程学报,2018,51(4).
- [3] ZHAO Heng, YIN Ping-bao, LI Xi-bing. Mechanical response of bridge piles in high-steep slopes and sensitivity study [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(10).
- [4] JTG D63—2007,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [5] 赵明华,刘建华,杨明辉.倾斜荷载下高陡边坡桥梁基桩内力计算[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11).
- [6] 张永杰,李侑军,赵明华,等.高陡斜坡作用下群桩基础设计计算方法[J].中国公路学报,2014,27(10).
- [7] 程刘勇,许锡昌,陈善雄,等.斜坡基桩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).
- [8] 李彰明,全国权,刘丹,等.土质边坡建筑桩基水平荷载试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6).
- [9] 高璇.陡坡地段桥梁嵌岩桩基竖向承载特性模型试验研究[D].西安:长安大学,2011.
- [10] 陈帝江.斜坡地区大直径桥梁桩基竖向承载特性研究[D].西安:长安大学,2009.
- [11] 程刘勇,陈善雄,余飞,等.竖向荷载下斜坡桩基承载力及影响因素数值研究[J].科学技术与工程,2013,13(18).

收稿日期:2018—08—28

\*\*\*\*\*  
(上接第 105 页)

- [2] 陈忠炎.预应力混凝土箱梁桥局部锚固应力[J].中外公路,1994,14(6).
- [3] 郑建超.混凝土桥梁预应力锚固区的力流模型及抗裂设计方法研究[D].南京:东南大学,2017.
- [4] 周建民,杨玉金,赵勇,等.后张预应力混凝土锚固区传力性能试验和有限元分析[J].力学季刊,2010,31(3).
- [5] 李国平.桥梁预应力混凝土技术及设计原理[M].北京:人民交通出版社,2004.

- [6] Burdet O. Analysis and design of anchorage for post-tensioned concrete bridges[D]. The University of Texas at Austin, 1990.
- [7] 黄华琪.基于拉压杆模型的后张端部锚固区配筋设计研究[D].南京:东南大学,2012.
- [8] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

收稿日期:2018—09—06