

# 陡坡桥梁桩基水平承载特性分析

张建仁, 刘海辉, 马亚飞, 彭安银

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 本研究以某陡坡桥梁桩基为研究对象, 建立了倾斜荷载作用下桩基的有限元模型, 分析了荷载加载顺序、荷载类型、桩身弹模和土体主要力学特性等因素对陡坡桥梁桩基水平承载特性的影响规律。研究表明: 施加竖向荷载会增加桩顶水平位移和桩基内力, 竖向荷载对桩顶水平位移的作用机理应同时考虑“P- $\Delta$ ”效应和桩周侧向的土压力效应。本研究提出了坡顶荷载-桩身最大弯矩关系的三阶段特征, 揭示了土体黏聚力、内摩擦角和弹性模量均与桩顶水平位移呈递减关系。该研究成果可为山区陡坡桥梁的设计与施工提供参考。

**关键词:** 桥梁桩基; 陡坡; 水平承载能力; 有限元方法

中图分类号: TU375

文献标志码: A

## Analysis of horizontal bearing characteristics of bridge pile foundation on steep slope

ZHANG Jianren, LIU Haihui, MA Yafei, PENG Anyin

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In this study, a steep-slope bridge pile foundation was taken as the research object, and a finite element model of the pile foundation under the action of inclined loads was established. The influences of load sequence, load type, elastic modulus of pile body, and main mechanical characteristics of soil on the horizontal bearing characteristics of pile foundation of a steep-slope bridge were analyzed. The results show that the horizontal displacement of the pile top and the internal force of the pile foundation increase when the vertical load is applied. The mechanism of vertical load acting on the horizontal displacement of pile top should consider the effect of "P- $\Delta$ " and the effect of lateral soil pressure around the pile. The three-stage characteristics of the relationship between the load on the slope top and the maximum bending moment of the pile body are proposed. The exponential variation rule of improving soil cohesion, internal friction angle, and elastic modulus to reduce horizontal displacement of reduce is revealed. The results can provide a reference for the design and construction of steep slope bridges in mountainous areas.

**Key words:** bridge pile foundation; steep slope; horizontal bearing capacity; finite element method

随着中国交通基础设施建设向西南地区纵深发展, 山区桥梁数量大幅提高。为满足符合平纵线形、保护自然环境等要求, 一些桥梁桩基建设在工程条件异常复杂的陡坡上。与平坡桩相比, 处于陡坡上桥梁桩基的水平承载特性有明显的不同, 桩基受陡坡非均匀约束效应影响明显<sup>[1]</sup>。现有研究对陡坡路段

桥梁桩基的设计主要以平坡桩为依据, 相关设计规范亟待完善。因此, 陡坡路段桥梁桩基的水平承载特性分析对既有工程的设计具有重要的参考意义。

由于坡体的存在, 陡坡路段桥梁桩基既承受桥梁上部结构传递到桩顶的倾斜荷载(即竖向和水平荷载), 又承受陡坡土体变形产生的剩余下滑力, 桩

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078055)

作者简介: 张建仁(1958—), 男, 长沙理工大学教授, 博士。

基受荷载作用比平坡桩的更复杂<sup>[2]</sup>。目前,国内外学者已开展对倾斜荷载下桩的承载力和变形的研究。ZHANG等<sup>[3]</sup>建立了倾斜荷载作用下桩的水平承载力的计算模型。一些学者基于有限元模拟<sup>[4-5]</sup>和单桩承载特性的室内模型试验及现场试验<sup>[6-7]</sup>,研究了竖向及水平荷载下桩身荷载传递规律和变形特点。这些研究主要考虑竖向荷载对平坡桩水平承载能力的影响规律,且荷载加载顺序均为先施加竖向荷载,后施加水平荷载,未考虑陡坡条件下的不同荷载施加顺序对桥梁桩基水平承载特性的影响。

在施工过程中,在陡坡上铺设施工便道,架设重型施工设备,且桥梁桩基施工完成后,由于受地形的限制,钻孔挖取的土体很难运输到堆土场。因此,就近选择将其堆放于桥墩周围,堆载在桥墩周围的土体变成了施加在桥梁桩基上的外荷载。对于陡坡桥梁桩基,该堆载作用增加了桩基上方边坡土体下滑的可能性,使得桥梁桩基上的侧压力增大。已有学者开展了堆载作用对陡坡桥梁桩基承载的受力分析<sup>[8-10]</sup>。相关研究多采用荷载作用组合形式,堆载作用对陡坡-桥梁桩基体系的影响机理尚未明确,单因素的影响程度仍需进一步量化。此外,陡坡上桩基的水平承载能力不仅受荷载参数影响,还与桩身参数和岩土体参数密切相关。吴婷婷等<sup>[11]</sup>研究了桩宽和桩间距对桩基内力和位移的影响,指出随着桩宽和桩间距的增加,桩顶水平位移和桩身弯矩均减小。贺炜等<sup>[12]</sup>分析了坡角对陡坡土体剪切变形和桩身残余弯矩的影响。岳红亚等<sup>[13]</sup>揭示了土体弹性模量对管桩群桩水平承载特性的影响规律。针对桥梁桩基水平承载力分析中参数不确定的情况,李焕强等<sup>[14]</sup>将岩土材料参数视为随机变量,分析了桩土间摩擦系数、土体黏聚力及土体弹性模量等对桩基工作性能的影响。ZHANG等<sup>[15]</sup>指出与岩土体重度和弹性模量相比,外荷载对桩顶位移的影响更大。桩基础水平承载力模型参数及其敏感性分析多集中在平坡桩和抗滑桩,而陡坡桥梁桩基的受力特性有待深入研究。

本研究结合某陡坡桥梁工程案例,运用ABAQUS有限元软件,建立了桩土作用模型,验证了陡坡下桩基变形结果的有效性,研究了荷载类型及大小、桩身材料和场地环境参数对桩顶水平位移和桩身弯矩的影响规律,揭示了桩土交互作用机理。

## 1 工程概况

以张-花高速公路某陡坡段的一座桥梁桩基为工程背景。桩基为人工挖孔灌注桩,混凝土强度等级为C25,该桩基配置46束HRB335Φ25通长钢筋。桩径为2.0 m,桩长为25.0 m。桩基钢筋混凝土的弹性模量 $E_p$ 为 $2.96 \times 10^4$  MPa,泊松比 $\nu_p$ 为0.2。陡坡倾角约为 $37^\circ$ 。桩位处的地层情况如图1所示,各土层主要物理力学参数见文献<sup>[16]</sup>。

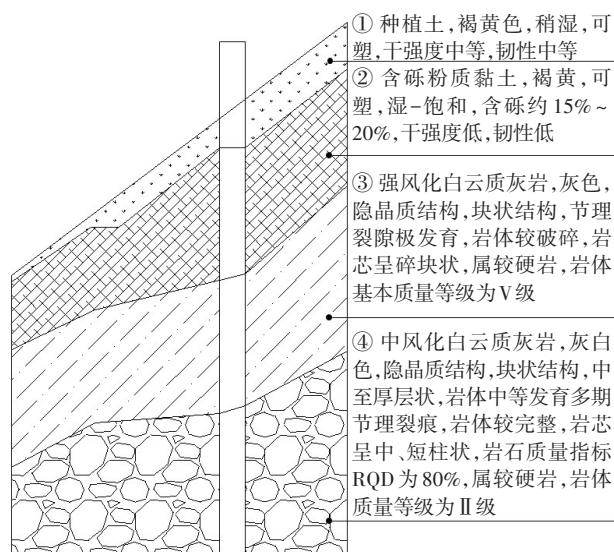


图1 岩土层分布

Fig. 1 Distribution of rock and soil layers

## 2 数值分析模型

### 2.1 桩土参数

采用ABAQUS有限元分析软件,建立斜坡-桩基三维数值模型,模拟桩-土体系的交互作用,并对桩基水平承载力模型的影响参数进行研究。在分析过程中,不考虑桩的屈曲破坏,即假定桩为弹性体。对于桩周的岩土体,采用Mohr-Coulomb模型,该模型为描述岩土体的最常用模型,其控制方程可表示为:

$$f = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)\sin\varphi - c\cos\varphi \quad (1)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为土的第一、第二、第三主应力; $\varphi$ 为土的摩擦角; $c$ 为土的黏聚力。

陡坡和桩基的网格模型均采用C3D8R单元。根据边坡工程的地质情况,将桩周土体简化为三层,厚度分别为11.5、6.0和7.5 m。地质情况从上至下依次为含砾粉质黏土、强风化白云质灰岩和中风化白云质灰岩。桩基的平面布置如图2所示。岩土体弹性模量 $E_0$ 取 $2.0E_s \sim 5.0E_s$ <sup>[17]</sup>, $E_s$ 为压缩模数,得到桩周三层土体的弹性模量,分别为24.5、400.0和1 400.0 MPa。用于有限元模型计算的桩土参数见表1。由于桩身几何尺寸及边坡在 $z$ 方向对称,因此,取一半结构模型进行分析, $z$ 方向模型厚度设置为10 m(设置10倍桩的半径,用于减小边界条件对模型计算结果的影响)。

边坡模型的主要材料参数有密度 $\rho$ 、岩土体弹性模量 $E_0$ 、泊松比 $\nu_s$ 、内摩擦角 $\varphi$ 、土的黏聚力 $c$ 。桩体的主要计算参数有密度 $\rho$ 、桩基钢筋混凝土的弹性模量 $E_p$ 和泊松比 $\nu_p$ 。模型计算荷载参数包括外荷载和自重荷载。外荷载为作用在桩顶上的竖向荷载 $P_v$ 和水平荷载 $P_H$ ,以及作用在坡顶的均布荷载 $P_N$ 。自重荷载为桩体和边坡土体的自重。模型受外荷载的作用如图3所示。

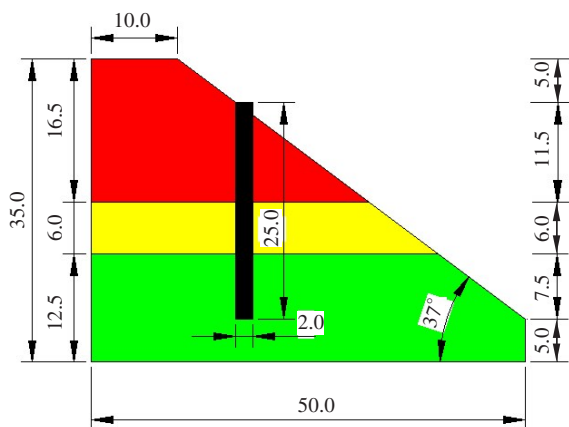


图2 桩基平面布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of pile foundation(unit:m)

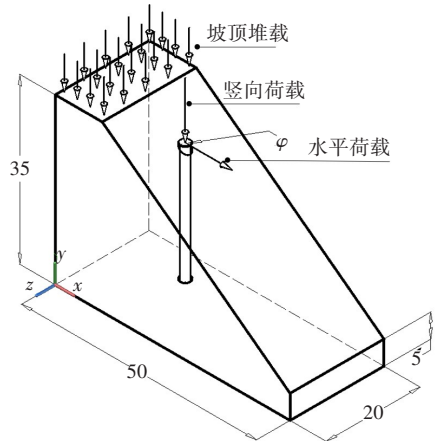


图3 模型受外荷载作用示意(单位:m)

Fig. 3 Model subjected to external load(unit:m)

表1 有限元模型计算参数

Table 1 Calculation parameters for finite element model

土层名称	厚度/ m	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量/ MPa	泊松 比
含砾粉质黏土	11.5	19.5	25	20	24.5	0.35
强风化白云质灰岩	6.0	21.5	40	25	400.0	0.30
中风化白云质灰岩	7.5	23.0	60	40	1 400.0	0.25

在桩土接触模拟中,桩为主控面,岩土体为从属面。接触面之间的相互作用分为法向作用和切向作用,法向作用为“硬”接触,切向作用为常用摩擦模型。每层桩土的摩擦系数 $\mu$ 可表示为<sup>[18]</sup>:

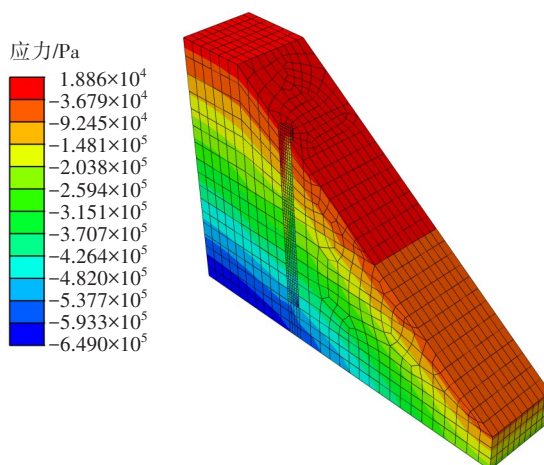
$$\mu = \tan \left\{ \tan^{-1} \left[ \sin \varphi \cdot \cos \varphi / (1 + \sin^2 \varphi) \right] \right\} \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为内摩擦角。

## 2.2 结果验证

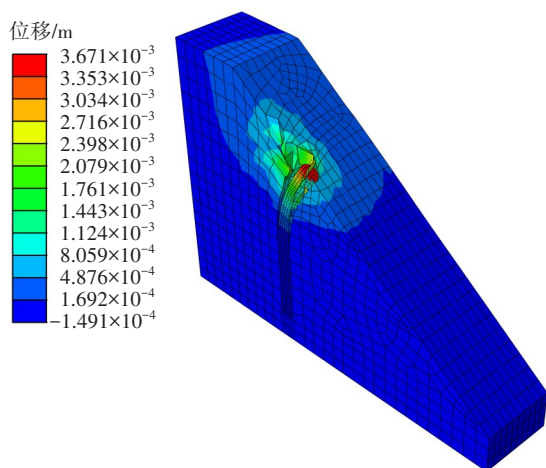
本研究建立的有限元模型可分三步进行计算分析:①对整个模型施加自重荷载。②平衡地应力。首先,对边坡土体进行自动地应力平衡,将桩单元桩处土体设置无效,同时激活桩单元及桩土接触面,再对桩土进行自动地应力平衡。③进入荷载分析步,在桩顶处施加竖向荷载和水平荷载,并在坡顶施加均布荷载。

为验证模型的有效性,在桩顶施加 3 600 kN 的竖向荷载和 150 kN 的水平荷载,计算得到陡坡段桥梁桩基内力和变形结果,如图3所示。此时,桩顶水平位移为 3.671 mm,桩身最大弯矩为 491.1 kN·m,这与文献[16]的数值模拟结果吻合较好。最大弯矩点距地面 5.21 m,陡坡基桩的桩身最大弯矩位于地面以下 3~6 倍桩的半径范围内,这与文献[19]中结论一致。数值计算结果如图4所示。

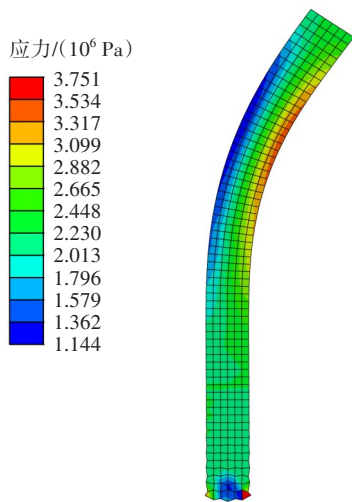


(a) 地应力平衡后竖向应力分布





(b) 水平位移



(c) 桩身Mise等效应力

图4 数值计算结果

Fig. 4 Numerical calculation results

### 3 参数分析

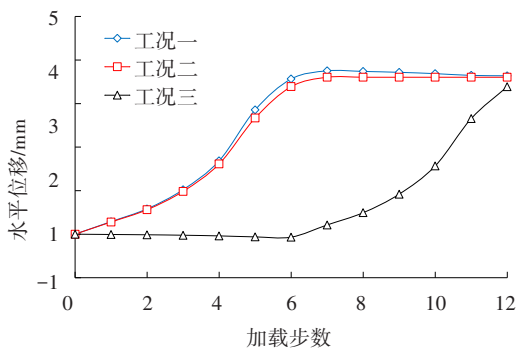
#### 3.1 荷载参数对桩基水平承载力影响

##### 3.1.1 荷载施加顺序

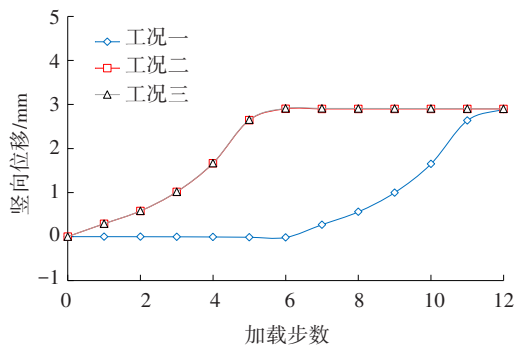
已有研究表明,先施加竖向荷载施加水平荷载的受力情况与高层建筑桩基础的受力情况接近,而先施加水平荷载后施加竖向荷载的受力状况与桥墩桩基础受力情况相似<sup>[4]</sup>。为研究竖向荷载和水平荷载的加载顺序对桩身弯矩及桩顶水平位移的影响,本文共设置了三种工况。工况一:先施加水平荷载,后施加竖向荷载;工况二:同时施加水平荷载及竖向荷载;工况三:先施加竖向荷载,后施加水平荷载。

不同加载顺序下的桩顶位移及桩身弯矩的变化规律如图5所示。从图5可以看出,不同荷载加载顺序会对桩顶水平位移及桩身弯矩产生明显影响,而不同加载顺序对桩顶的竖向位移基本无影响

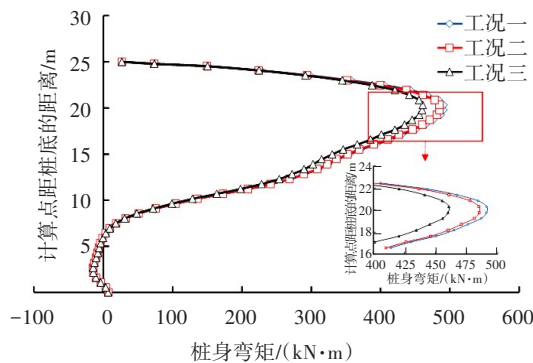
响。如工况三的桩顶水平位移为3.39 mm,而工况一的桩顶水平位移较工况三的增大了7.4%。这表明后施加竖向荷载会增大水平荷载产生的桩顶水平位移。后施加竖向荷载在一定程度上增大了由水平荷载引起的桩身最大弯矩(图5(c))。如工况三的桩身最大弯矩为460.8 kN·m,而工况一的桩身最大弯矩较工况三的增大了6.6%。这表明:桥梁桩基施工过程中,随着桩基承受竖向荷载作用增大,水平荷载引起的桩基变形和内力进一步增大,削弱了桩的水平承载力,因此,需在设计和施工时予以考虑该作用的影响。关于陡坡桥梁桩基,在后续的参数分析中,桩顶荷载加载顺序为先施加水平荷载,后施加竖向荷载。



(a) 水平位移



(b) 竖向位移



(c) 桩身弯矩

图5 不同荷载加载顺序桩顶位移及桩身弯矩曲线

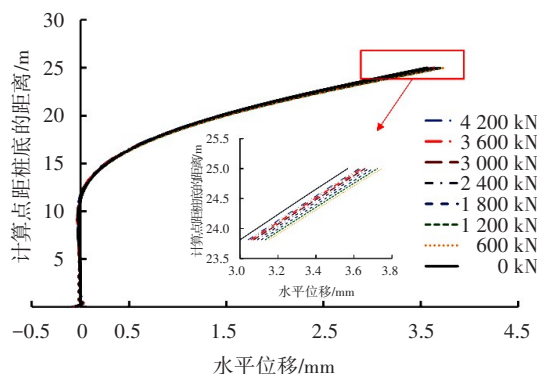
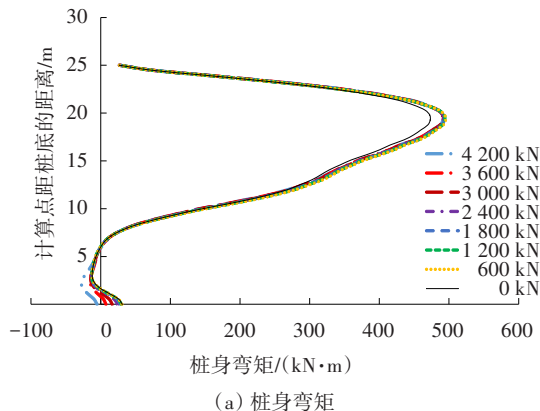
Fig. 5 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment with different loading sequences

### 3.1.2 竖向荷载

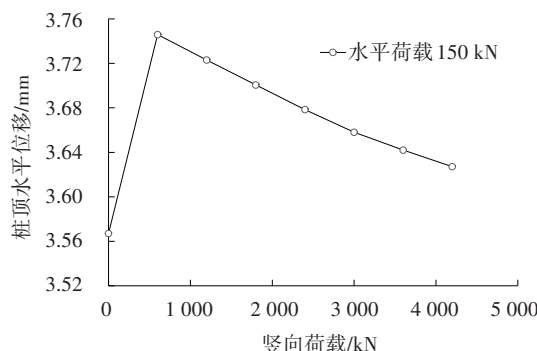
作用在桩顶的竖向荷载 $P_v$ 分别设置为0、600、1 200、1 800、2 400、3 000、3 600和4 200 kN。不同竖向荷载作用下桩顶的水平位移及桩身弯矩的变化规律如图6所示。从图6可以看出,与无竖向荷载工况相比,有竖向荷载工况桩身弯矩明显增大(图6 a)。这是由于竖向荷载因桩身弯曲变形导致“P- $\Delta$ ”效应。施加竖向荷载后,桩顶水平位移增大(图6 b)。当 $P_v=600$  kN时,桩顶水平位移比无竖向荷载时的增加5.01%。随着竖向荷载的增大,桩顶水平位移逐渐减小(图6 c)。这是由于竖向荷载增大使得桩周土体的竖向应力变大,导致桩周土体单元的主应力差减小,桩周土体强度提高,桩顶水平位移减小<sup>[4]</sup>。由于“P- $\Delta$ ”效应,不同竖向荷载工况下的桩顶水平位移均大于无竖向荷载工况下的。这表明竖向荷载产生的竖向分力对桥梁桩基水平承载的有利影响要小于“P- $\Delta$ ”效应带来的不利影响。因此,竖向荷载对桩顶水平位移分析中,不仅需考虑“P- $\Delta$ ”效应,还需考虑竖向荷载作用下侧向土压力改变的影响。

### 3.1.3 水平荷载

陡坡上桥梁桩基承受车辆制动力、弯道离心力、风力以及温变推力等产生水平荷载的情况不可避免,而水平荷载对桩基的水平承载力影响较大。因此,保持竖向荷载 $P_v=3\ 600$  kN不变,在桩顶处沿顺坡方向分别施加50、100、150、200和250 kN的水平荷载 $P_H$ 。不同水平荷载作用下,桩顶水平位移及桩身弯矩的变化规律如图7所示。从图7可以看出,当水平荷载增加时,桩顶水平位移和桩身最大弯矩呈近似线性增加,桩-土体系产生的变形为弹性变形。当水平荷载由100 kN分别增大至150、200、250 kN时,桩顶水平位移分别增加49.6%、94.4%、142.8%,桩身最大弯矩分别增加了40.2%、75.5%、115.8%。因此,水平荷载是陡坡段桥梁基桩水平承载的重要影响因素之一。



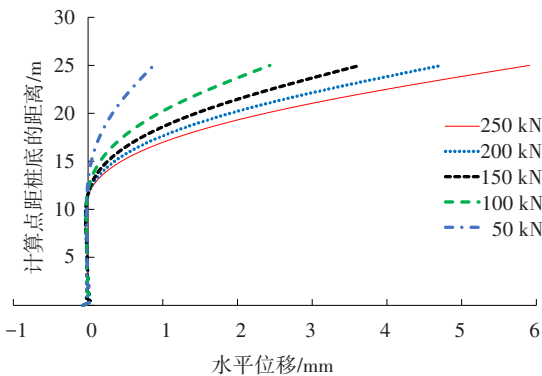
(b) 桩顶水平位移



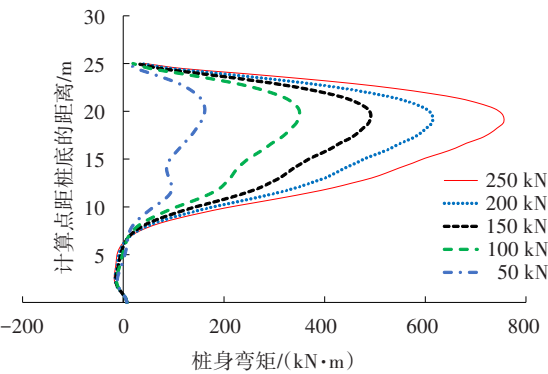
(c) 竖向荷载-桩顶水平曲线

图6 竖向荷载下桩顶水平位移及桩身弯矩曲线

Fig. 6 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment under the vertical load



(a) 桩顶水平位移



(b) 桩身弯矩

图7 水平荷载下桩顶水平位移及桩身弯矩曲线

Fig. 7 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment under the horizontal load

### 3.1.4 坡顶堆载

根据各种不利施工荷载工况,有研究<sup>[8]</sup>指出施工高峰期坡顶堆载约为  $20 \text{ kN/m}^2$ 。本文拟保持竖向荷载  $P_v=3\ 600 \text{ kN}$ ,水平荷载  $P_H=150 \text{ kN}$  不变的条件下,在坡顶施加分别为  $0$ 、 $10$ 、 $20$ 、 $30$ 、 $40$ 、 $50$  和  $60 \text{ kPa}$  的均布荷载  $P_N$ ,模拟坡顶荷载对桥梁桩基的桩顶水平移及桩身弯矩的影响。

不同坡顶堆载作用下,桩顶水平位移及桩身弯矩的变化规律如图8所示。从图8可以看出,桩顶水平位移随坡顶荷载的增加近似呈线性增加(图8(a)),这说明土体变形处于线性阶段。当坡顶堆载增加到  $60 \text{ kPa}$  时,桩顶水平位移达  $11.23 \text{ mm}$ ,比坡顶堆载  $P_N=0 \text{ kPa}$  时的水平位移增加了  $208.5\%$ ,超过了一般结构地面处最大位移  $10 \text{ mm}$  的限值。因此,坡顶堆载对桥梁桩基水平位移的影响不可忽略,在施工过程中应限制坡顶堆载。随着坡顶堆载的增大,桩身最大弯矩值逐渐增大,分别为  $491.7$ 、 $499.0$ 、 $540.0$ 、 $647.7$ 、 $767.7$ 、 $894.9$  和  $1\ 056.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$  (图8(b))。堆载作用导致桩基上方陡坡下滑力增大,从而使得桩身内力变大。随着坡顶堆载增加,桩身最大弯矩随呈三阶段变化。从图8(b)可以看出,当  $P_N$  分别为  $0$ 、 $10 \text{ kPa}$  时,桩身最大弯矩点位置距桩顶分别为  $5.21 \text{ m}$  和  $6.25 \text{ m}$ ,发生在含砾粉质黏土土层内;荷载超过  $20 \text{ kPa}$  时,桩身最大弯矩点位于距桩顶  $11\sim 12 \text{ m}$  处,该位置为两土层交界处,即滑动面附近。当上、下土层的强度差较大时,较大坡顶堆载作用导致交界面桩身出现应力集中,且随着坡顶荷载继续增大,桩身最大弯矩点位置向下移动。

桩身最大弯矩-坡顶堆载曲线存在临界荷载,坡顶堆载超过临界荷载后,陡坡中部分土体进入塑性状态<sup>[8]</sup>。从图8(b)可以看出,模拟工况的临界荷载约为  $20 \text{ kPa}$ 。桩身最大弯矩与坡顶荷载的变化规律如图9所示。从图9中可以看出,坡顶堆载超过临界荷载后,陡坡土体的变形向塑性阶段过渡,桩身最大弯矩大幅度增加。当  $P_N$  为  $180 \text{ kPa}$  时,桩身最大弯矩点距桩顶  $13.02 \text{ m}$ ,大小为  $14\ 980 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。在该工况下,边坡发生滑动,桩基破坏为流动模式,即不稳定且处于可塑状态的土体,绕过桩基流动,最大弯矩出现在滑动面下稳定土层中,桩位移比土体位移小。

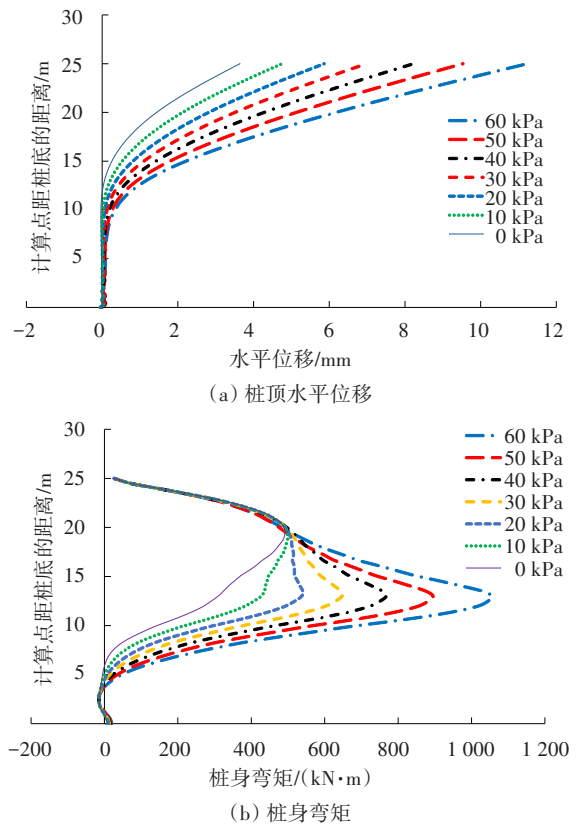


图8 坡顶堆载下桩顶水平位移及桩身弯矩曲线  
Fig. 8 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment under slope top loading

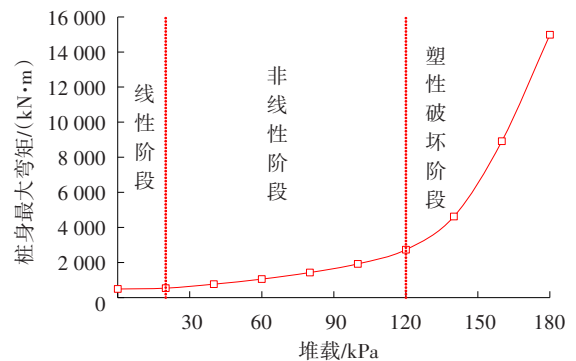


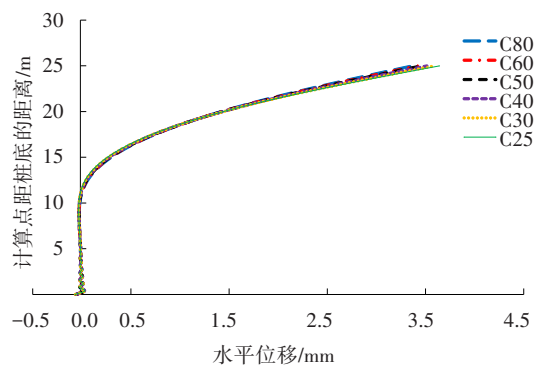
图9 桩身最大弯矩随坡顶荷载变化曲线  
Fig. 9 The variation curve of the maximum bending moment of pile and the slope top loading

因此,对于破坏模式为流动模式的陡坡桩基体系,桩身最大弯矩-坡顶荷载关系曲线的变化趋势分为3个阶段:①线性阶段:坡顶堆载相对较小,桩承担的边坡下滑力较小,桩-土体系的变形为弹性变形,桩最大弯矩点位于上部土体内。②非线性阶段:随着坡顶堆载增加,桩-土的应力应变关系向塑性变形过渡,桩最大弯矩点发生在滑动面附近。③塑性破坏阶段:桩身弯矩随荷载增加呈迅速发展趋势,桩周一定范围内的土体发生破坏,失去了承担坡顶堆载的能力,桩-土体系失效破坏,最大弯矩点位

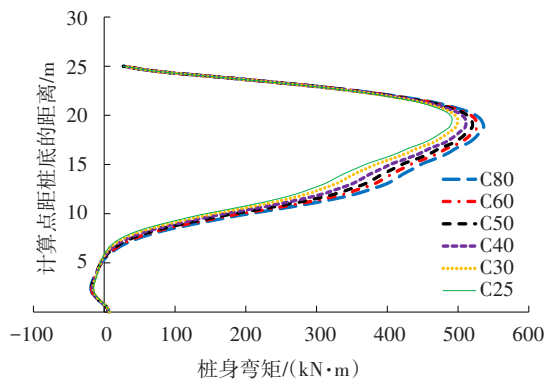
于滑动面以下的稳定土层中。因此,陡坡桥梁桩基水平承载力受坡顶荷载影响。当荷载较小时,边坡保持稳定状态;当坡顶荷载足够大时,边坡稳定性临近极限状态,桩前土体所提供的抗力减少,承载力迅速下降,对桥梁桩基的正常使用产生不良影响。

### 3.2 桩身弹性模量对桩基水平承载力影响

选取 C25、C30、C40、C50、C60 和 C80 混凝土,其换算的弹性模量分别为:  $2.96 \times 10^4$ 、 $3.12 \times 10^4$ 、 $3.37 \times 10^4$ 、 $3.57 \times 10^4$ 、 $3.72 \times 10^4$  和  $3.92 \times 10^4$  MPa,其他参数保持不变。不同桩基弹性模量下桩顶水平位移及桩身弯矩的变化规律如图 10 所示。从图 10(a)可以看出,桩顶侧移随弹性模量的增加而减小。从图 10(b)可以看出,桩身最大弯矩随弹性模量的增加而增大,这是因为桩弹性模量越大,桩和土相对刚度越大。桩土相对刚度越大,桩自身变形越小,桩基内力越大<sup>[20]</sup>。桩基桩顶位移和桩身最大弯矩与其弹性模量近似呈线性关系。总体而言,桩顶水平位移及桩身最大弯矩不随桩身刚度的增加发生大幅变化。与 C25(工程实际值)相比, C80 的桩顶位移减小 8.1%, 桩身最大弯矩增加 9.1%。因此,实际工程中,不应靠增加桩身混凝土强度达到提高桩基水平承载力的目的。



(a) 桩顶侧移



(b) 桩身弯矩

图 10 不同桥梁桩基弹性模量下桩顶水平位移及桩身弯矩曲线

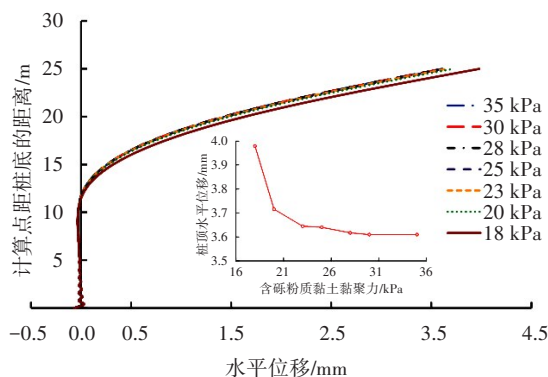
Fig. 10 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment under different elastic modulus of bridge pile foundation

### 3.3 土层物理参数对桩基水平承载力影响

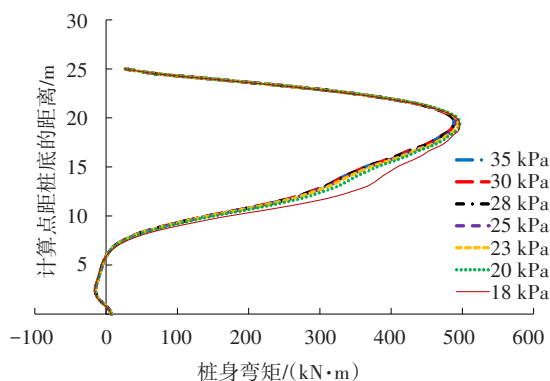
从现场实测和模型试验发现,上部土层为影响桩身位移及内力的主要因素,深层土体对桩身位移及内力基本无影响<sup>[21]</sup>。本文仅研究含砾粉质黏土的土层物理参数对桥梁桩基水平承载力的影响。

#### 3.3.1 黏聚力

黏聚力作为岩土体的抗剪强度指标之一,其变化会影响坡体上桩基的下滑推力。保持其他参数不变,浅层土体黏聚力  $c$  分别取 18、20、23、25、28、30 和 35 kPa,分析上部土层黏聚力的变化对桥梁桩基内力和变形的影响。不同土体黏聚力下桩顶水平位移及桩身弯矩的变化规律如图 11 所示。从图 11 可以看出,黏聚力越小,其变化对桩顶位移的影响越明显。随着黏聚力的增大,其对桩顶位移的影响逐渐减小(图 11(a))。黏聚力对桩身弯矩影响较小,在不同黏聚力下,桩身最大弯矩值在 487~497 kN·m,最大减小量小于 2%(图 11(b))。由原始数据可知,当黏聚力  $c$  为 15 kPa 时,桩顶侧移和最大弯矩显著增大,最大弯矩点位于滑动面附近。这是由于黏聚力过小,边坡强度较低,边坡开始发生滑动失稳。



(a) 桩顶水平位移及其随黏聚力变化曲线



(b) 桩身弯矩

图 11 不同上部土体黏聚力下桩顶水平位移及桩身弯矩曲线

Fig. 11 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment under different soil cohesion of upper soil



### 3.3.2 土体内摩擦角

内摩擦角的变化会影响陡坡桩基的内力分布。为研究浅层土体内摩擦角对桥梁桩基位移和弯矩的影响,分别取7个不同内摩擦角 $\varphi$ ( $12^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $16^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $22^\circ$ 、 $24^\circ$ )进行数值模拟。由式(2)可知,浅层土在不同 $\varphi$ 值下桩土接触面的摩擦系数分别为0.195、0.222、0.246、0.268、0.288、0.305和0.319。不同土体内摩擦角桩顶水平位移及桩身弯矩的变化规律如图12所示。从图12可以看出, $\varphi$ 值越小,其变化对桩顶位移的影响越明显; $\varphi$ 值越大,其对桩顶位移的影响越小(图12(a))。陡坡土体 $\varphi$ 值与平地土体 $\varphi$ 值对弯矩的影响不同,当陡坡土体 $\varphi$ 值较小时,土体强度变小,斜坡开始产生滑动现象,滑坡周界与稳定区域土层出现应力集中(图12(b))。当 $\varphi$ 分别为 $12^\circ$ 和 $14^\circ$ 时,桩身最大弯矩点分别发生在距桩顶11.98 m和11.46 m处的滑动面附近。当 $\varphi$ 为 $12^\circ$ 时,其桩身最大弯矩比其他工况的显著增大,这表明边坡开始滑动失稳。当 $\varphi > 14^\circ$ 时,上部土体内摩擦角对桩身弯矩分布无明显影响,桩身最大弯矩值变化幅度不大。

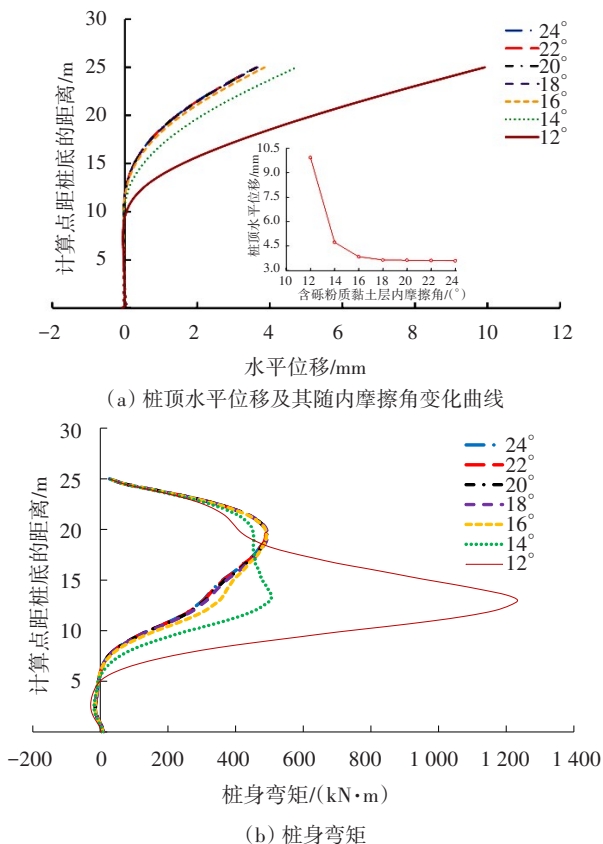


图12 不同上部土体内摩擦角下桩顶水平位移及桩身弯矩曲线  
Fig. 12 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment under different internal friction angle of upper soil

### 3.3.3 土体弹性模量

桩前土体失稳是导致陡坡-桩基体系破坏的主要原因,土体弹性模量作为衡量土抵抗弹性变形能力的指标,是影响桥梁桩基水平承载能力重要参数之一。为分析不同浅层岩土体弹性模量 $E_0$ 、桩身水平位移和弯矩的分布规律,弹性模量分别取4.5、9.5、14.5、19.5、24.5、29.5、34.5和39.5 MPa。不同土体弹性模量、桩顶水平位移及桩身弯矩的变化规律如图13所示,从图13可以看出, $E_0$ 越小,其变化对桩顶位移的影响越明显。从图13(a)可以看出,随着 $E_0$ 的增大,其变化对桩顶位移的影响逐渐减小,这与 $c$ 、 $\varphi$ 对桩顶位移的影响相似。从图13(b)可以看出,随着 $E_0$ 值增大,桩身最大弯矩点从两个土层交界处逐渐向上移动,弯矩分布形式发生改变。

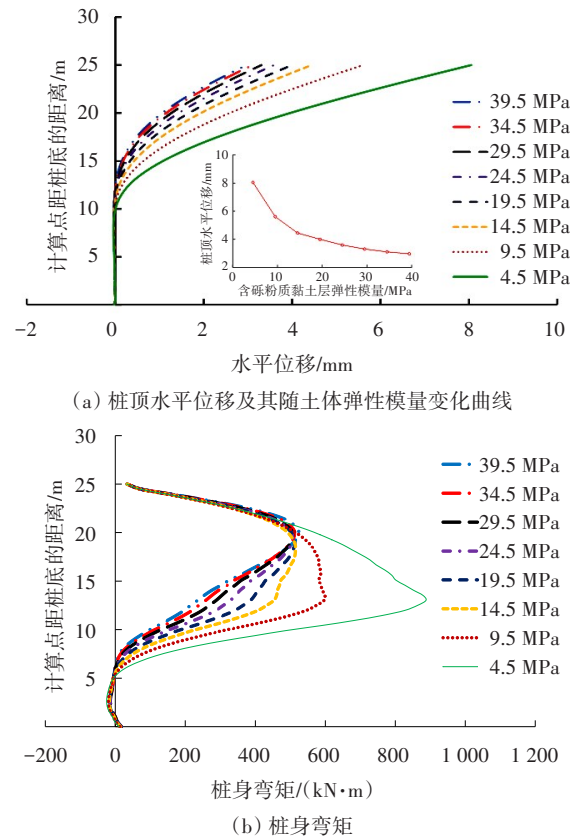


图13 不同上部土体弹性模量下桩顶水平位移及桩身弯矩曲线  
Fig. 13 The curves of pile top horizontal displacement and pile bending moment under different elastic modulus of upper soil

综上所述,陡坡上部土体的力学性能与桩顶水平位移间呈递减关系。当桩周土体力学性能参数值较低时,加固陡坡对桥梁桩基的稳定性非常有效;当桩周土体力学性能参数值较高时,加固



陡坡土体来减小桩顶水平位移的措施不可取。上层土体强度变化会影响桩身弯矩分布形式:上层土体力学性能较低时,陡坡不稳定,最大桩身弯矩点发生在滑动面附近;桩周土强度较高时,最大桩身弯矩发生在距地面5~6 m内。

## 4 结论

1) 本研究明确了桩顶荷载加载顺序对桩顶水平承载力的影响。与同时施加水平竖向荷载相比,先施加水平荷载再施加竖向荷载下的桩顶水平位移较大。桩顶竖向位移基本不受荷载加载顺序变化的影响。后施加竖向荷载在一定程度上会增大由水平荷载引起的桩身最大弯矩。

2) 与无竖向荷载工况相比,先施加水平荷载再施加竖向荷载下的桩身最大弯矩及桩顶位移均会增大。随着竖向荷载进一步增大,桩顶水平位移减小,但大于无竖向荷载工况下的。因此,竖向荷载对桩顶位移的影响不仅需考虑“P- $\Delta$ ”效应,还需考虑竖向荷载作用下侧向土压力改变的影响。

3) 陡坡桥梁的桩基水平承载力受坡顶荷载影响。桩身最大弯矩-坡顶荷载分为线性阶段、非线性阶段和塑性破坏阶段3个阶段。

4) 桩顶位移和桩身最大弯矩与桩身弹性模量近似呈线性关系。当桩身弹性模量达一定阈值时,即使提高了弹性模量,也不能有效降低桩顶水平位移。

5) 陡坡上部土体的力学性能与桩顶水平位移呈递减关系。上部土体强度变化会影响桩身弯矩分布形式。

## 参考文献(Reference):

- [1] 蔡德钩,吴春冬,陈锋,等.既有线开行重载列车路基边坡稳定性分析[J].土木工程学报,2015,48(S2):252-256.  
CAI Degou, WU Chundong, CHEN Feng, et al. The embankment slope stability and failure modes impact analysis of heavy haul railway [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 252-256.
- [2] 赵明华,尹平保,杨明辉,等.高陡斜坡上桥梁桩基受力特性及影响因素分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2733-2739.  
ZHAO Minghua, YIN Pingbao, YANG Minghui, et al. Analysis of influence factors and mechanical characteristics of bridge piles in high and steep slopes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(7): 2733-2739.
- [3] ZHANG X L, XUE J Y, XU C S, et al. An analysis method for lateral capacity of pile foundation under existing vertical loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 142: 106547.
- [4] 郑刚,王丽.竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J].岩土工程学报,2008,30(12):1796-1804.  
ZHENG Gang, WANG Li. Effect of loading level and sequence of vertical and lateral load on bearing capacity of single pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1796-1804.
- [5] 郑建国,王永玮,阮浩.竖向荷载对海洋单桩水平承载特性影响数值模拟[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(S2):76-82.  
ZHENG Jianguo, WANG Yongwei, RUAN Hao. Numerical simulation of influence of vertical load on horizontal bearing capacity of offshore single pile [J]. Periodical of Ocean University of China (Nature Science), 2019, 49(S2): 76-82.
- [6] 朱克文,吕国顺,马超.水平-竖向耦合荷载下单桩承载性状试验研究[J].建筑结构,2018,48(S2):861-864.  
ZHU Kewen, LYU Guoshun, MA Chao. Study on bearing behavior of a single pile under combined vertical and lateral load [J]. Building Structure, 2018, 48 (S2): 861-864.
- [7] 赵春风,王卫中,赵程,等.组合荷载下单桩承载特性现场试验[J].中国公路学报,2013,26(6):59-64,72.  
ZHAO Chunfeng, WANG Weizhong, ZHAO Cheng, et al. Field test study on bearing capacity of single pile under combined loads[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 59-64, 72.
- [8] 余继东,马焱藩,汪益敏,等.陡坡地段桥梁桩基的施工监测和有限元分析[J].公路,2006,51(7):100-104.  
YU Jidong, MA Chifan, WANG Yimin, et al. Construction monitoring and FEM analyses of bridge pile bottom constructed in steep slopes[J]. Highway, 2006, 51 (7): 100-104.
- [9] 王嘉.基于FLAC3D的顺层岩质边坡中桩基受力与变形研究[D].成都:西南交通大学,2016.  
WANG Jia. Study on stress and deformation of pile foundation in bedding rock slope based on FLAC3D[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

- [10] 梁月华. 边坡上桥梁桩基的受力分析及其在抗滑支护中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.  
LIANG Yuehua. Mechanical analysis and application research in anti-slide supporting of bridge pile foundation in slopes [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2014.
- [11] 吴婷婷. 抗滑桩设计的 $p$ - $y$ 曲线法及其工程应用研究[J]. 交通科学与工程,2018,34(2):26-30,51.  
WU Tingting. Study on the design method of the  $p$ - $y$  curve and its engineering application [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 26-30, 51.
- [12] 贺伟,陈宇林. 土体震致剪切变形条件下斜坡桩的受力特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):53-59.  
HE Wei, CHEN Yulin. Mechanical characteristics of slope piles under soil seismic shear deformation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 53-59.
- [13] 岳红亚,亓乐,庄培芝,等. 群桩水平承载特性关键影响因素数值模拟研究[J]. 公路,2015,60(9):109-113.  
YUE Hongya, QI Le, ZHUANG Peizhi, et al. Numerical simulation study on key influencing factors of horizontal bearing characteristics of pile groups[J]. Highway, 2015, 60(9): 109-113.
- [14] 李焕强,桂炎德,郑束宁,等. 岩土参数对桩基性能影响的随机有限元分析[J]. 工程勘察,2009,37(S2):544-551.  
LI Huanqiang, GUI Yande, ZHENG Shuning, et al. The sensibility analysis of variables influencing pile foundation performances by stochastic FEM [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(S2): 544-551.
- [15] ZHANG X L, JIAO B H, HOU B W. Reliability analysis of horizontally loaded pile considering spatial variability of soil parameters [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 143: 106648.
- [16] 贾文文. 斜坡段桥梁基桩三向承载模型试验及数值模拟研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.  
JIA Wenwen. Study on three-way load bearing characteristics of In-slope bridge piles by model experiment and numerical simulation [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [17] 陈勇华. 土体压缩模量、变形模量和弹性模量的讨论[J]. 城市建设,2010(16):135-136.  
CHEN Yonghua. Discussion on compressive modulus, deformation modulus and elastic modulus of soil [J]. City Construction, 2010(16): 135-136.
- [18] RANDOLPH M F, WROTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. Géotechnique, 1981, 31(1): 143-157.
- [19] 尹平保,贺伟,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):94-101.  
YIN Pingbao, HE Wei, ZHANG Jianren, et al. Study on spatial effect of slope and horizontal bearing behavior of piles in sloping ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 94-101.
- [20] POULOS H G, CHEN L T, HULL T S. Model tests on single piles subjected to lateral soil movement[J]. Soils and Foundations, 1995, 35(4): 85-92.
- [21] 彭文祥,赵明华. 成层地基中倾斜荷载作用下桩的受力研究[J]. 中南公路工程,1999,24(1):27-30.  
PENG Wenxiang, ZHAO Minghua. Study on pile stress under inclined load in layered foundation [J]. Central South Highway Engineering, 1999, 24(1): 27-30.

(责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:栗森)