

DOI: 10.11779/CJGE201802014

# 高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础现场试验研究

赵明华<sup>1</sup>, 杨超炜<sup>1</sup>, 陈耀浩<sup>1</sup>, 尹平保<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为分析高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础承载特性及荷载传递机理, 依托湖南省张花(张家界—花垣)高速公路泗溪河一桥#6 桩开展了现场试验研究。通过采集施工过程中不同工况条件下桩身应力数据, 分析了桩身轴力, 桩侧摩阻力以及桩身弯矩分布规律。试验结果表明: 试桩桩身所受轴向荷载全部由桩侧摩阻力承担, 荷载较小时基本由上部土层承担; 坡面以下 2~5 倍桩径范围内桩土极限摩阻力较小, 土层与岩层所提供摩阻力之比随荷载增大而降低; 桩顶存在负弯矩, 前、后桩与横系梁为受力整体。基于有限杆单元方法建立了双桩结构整体分析模型, 并通过反算拟合确定了前、后桩土压力分布规律及大小, 计算结果与实测值吻合良好, 可为同类工程提供参考。

**关键词:** 桥梁工程; 桩基础; 高陡横坡; 现场试验

中图分类号: TU443.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)02-0329-07

**作者简介:** 赵明华(1956-), 男, 湖南洞口人, 教授, 博士生导师, 主要从事桩基础及软土地基处理等研究。E-mail: mhzhaohd@21cn.com。

## Field tests on double-pile foundation of bridges in high-steep cross slopes

ZHAO Ming-hua<sup>1</sup>, YANG Chao-wei<sup>1</sup>, CHEN Yao-hao<sup>1</sup>, YIN Ping-bao<sup>1,2</sup>

(1. Geotechnical Institute of Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha

University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To analyze the bearing capacity and load transfer mechanism of double-pile bridge foundation in high-steep cross slopes, field tests are carried out located on pier No. 6 in Sixi bridge of Zhangjiajie-Huayuan highway. On the basis of the received measurements of stresses, the distribution rules of the axial force, shaft resistance and moment are obtained. The in-situ results indicate that all the applied loads can be carried by the shaft resistance. In particular, the upper soil layer carries most of the applied loads in the condition that the applied loads are relatively small. The ultimate shaft resistance in the depth whose range varies from 2 to 5 times the pile diameter is very small. The ratio of shaft resistances respectively supported by soils to rocks decreases with the increase of the loads. The negative bending moment occurs near the pile top, and the fact shows that the front pile, back pile as well as tie beam, as an integration, support the external load together. A double-pile analysis model is established based on the finite bar element method, and the distribution form and magnitude of earth pressure are proposed through fitting calculation. The calculated results match well with the measured values, which can provide a reference for similar projects.

**Key words:** bridge engineering; pile foundation; high and steep cross slope; field test

## 0 引言

在高速公路和铁路向西部山区延伸过程中, 为保护现有自然环境同时避免对自然边坡进行大开大挖, 许多路段采用桥梁跨越, 致使桥梁桩基坐落在陡坡上。此类桩基的受力情况较常规桩基更为复杂, 除直接承受上部结构荷载外, 通常还承受来自坡体的土压力作用, 横向荷载大, 现行规范中尚无针对性的设计方法。因此, 研究陡坡段桥梁桩基承载机理及受力特性具有重要的理论价值和工程意义。

国内外有部分学者从不同角度展开了陡坡桩基的

承载特性研究。理论分析方面, 杨明辉<sup>[1]</sup>采用幂级数法推导了陡坡单桩内力与位移的解答。赵明华等<sup>[2]</sup>提出了适用于陡坡基桩分析的改进有限杆单元方法。尹平保<sup>[3]</sup>通过合理简化建立了陡坡段桥梁双桩基础分析模型, 并得到了桩身内力与位移分析的幂级数解答。上述设计理论计算方法所得计算结果能满足工程设计要求, 但是理论分析往往基于大量假定与实际情况相比仍存有区别, 因此部分学者以数值模拟或模型试验

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278187, 51408066)

收稿日期: 2016-11-15

研究为手段开展了复杂受荷桩分析研究。Sawant 等<sup>[4]</sup>基于三维有限元软件分析了水平荷载作用下的基桩在坡度变化时的弯矩与偏移量分布规律。Charles 等<sup>[5]</sup>利用三维有限差分软件对比分析了普通陡坡桩和桩周加可压缩套管的陡坡桩在水平荷载作用下的桩身响应量。陈仁朋等<sup>[6]</sup>完成了饱和粉土地基中单桩与群桩水平循环加载试验,得到了各基桩荷载分担比。尹平保等<sup>[7]</sup>基于陡坡段桥梁双桩基础模型试验,分析了不同坡度和墩柱高度影响下前后桩内力位移及侧土压力的分布规律。现场试验是了解复杂荷载下基桩承载特性的最直接可靠方式,但实施难度大,费用高。戴自航等<sup>[8]</sup>依托福建浦南高速公路滑坡现场进行了大型推桩试验。赵明华等<sup>[9]</sup>完成了汨水河特大桥嵌岩桩现场大直径基桩荷载传递机理试验研究,得出了桩侧阻力-位移关系曲线、桩顶荷载-位移关系曲线及桩端与桩侧阻力分担比。

综上所述,目前国内外有关陡坡桩承载特性研究多集中于理论分析与模型试验研究,鲜有陡坡条件下桩基现场试验研究报导,实测数据极少,因此有必要对此开展研究。本文依托湖南张花高速公路泗溪一桥<sup>#</sup>6墩的两根桩开展了高陡横坡条件下桥梁双桩基础现场试验研究,分析了桩身轴力、桩侧摩阻力以及桩身弯矩分布规律,并对比分析实测值以与理论分析结果,反算拟合了土压力分布规律,以期同类工程设计与施工提供参考。

## 1 工程概况

张(家界)花(垣)高速公路位于湖南省西部地区,是湖南省高速公路网的重要组成部分。此高速公路位于山岭区,地形条件复杂,桥梁总长 29211 m,占路线长度的 20.4%,其中有 7 座桥梁架设在高陡横坡地段。

泗溪一桥位于张花高速公路 K100+980—K105+800 处,属于典型高陡横坡段高架桥,如图 1 所示。桥梁全长 416.2 m,上部结构为  $2 \times 40+50+4 \times 40$  后张预应力混凝土 T 梁,下部结构为柱式墩配桩基,桥梁上、下部结构设计均按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)及《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)执行。为了获得高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础在桥梁建设及运营过程中桩身应力发展规律,并深入探讨双桩基础的承载特性,选取泗溪一桥左幅<sup>#</sup>6墩为工程试桩,采集施工全过程中双桩桩身应力,并完成成桥试验。

### 1.1 试桩设计

本次试验选取的试桩为泗溪一桥左幅<sup>#</sup>6墩,试桩

设计如图 2 所示,双桩桩径  $d_1=d_2=2$  m,设计桩长  $h_1=h_2=25$  m,为人工挖孔灌注桩,墩柱平均高度 8.88 m。试桩纵筋为 HRB335 钢筋 46 $\phi$ 25,通长配置,箍筋为  $\phi$ 12@150 螺旋筋,钢筋笼制作完成后实测直径为 1900 mm。



图 1 高陡横坡段桥梁现场试验桩基

Fig. 1 Test piles in high-steep cross slope

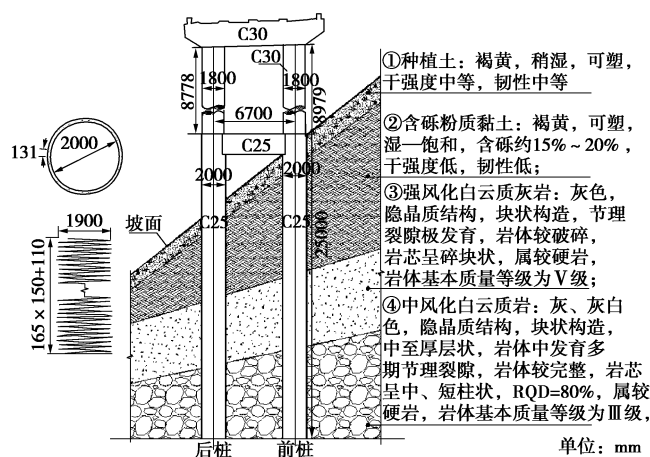


图 2 试桩尺寸及岩土层分布

Fig. 2 Geometric dimensions of test piles and layers of soil

桩基及系梁采用 C25 混凝土,墩柱及盖梁采用 C30 混凝土。为保证试验结果准确,桩身混凝土弹性模量应当根据试块的室内试验结果确定,因此在试桩浇筑过程中,对桩身混凝土取样并制成试块,试块尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ,在标准养护室中养护至龄期足够后,用压力试验机进行试验,混凝土弹性模量表达式为<sup>[10]</sup>

$$E_c = \frac{F_a - F_0}{A} \cdot \frac{L}{\Delta n} \quad (1)$$

式中  $E_c$  为混凝土弹性模量 (MPa);  $F_a$  取混凝土轴心抗压强度的  $1/3$  (N);  $F_0$  取混凝土试块应力为 0.5 MPa 时的试验初始荷载 (N);  $A$  为试块承压面积 ( $\text{mm}^2$ );  $L$  为测量标距 (mm);  $\Delta n$  为最后一次从  $F_0$  加载至  $F_a$  时试块两侧变形的平均值 (mm)。

实际桩身弹性模量  $E_p$  为

$$E_p = \frac{E_c A_c + E_s A_s}{A_p} \quad , \quad (2)$$

式中,  $E_c$ ,  $E_s$  分别为混凝土和钢筋的弹性模量 (MPa),  $A_c$ ,  $A_s$  分别为混凝土与钢筋截面积 ( $\text{m}^2$ ),  $A_p$  为试桩截面积 ( $\text{m}^2$ )。

本次试验共制作 6 个试件, 混凝土试块试验结果误差控制在 15% 以内, 因此取试验结果平均值作为桩身混凝土弹性模量。按式 (1) 计算的  $E_c$  平均值为  $2.84 \times 10^4$  MPa。HRB335 钢筋  $E_s=2.0 \times 10^5$  MPa, 因此, 根据桩身设计参数及式 (2) 可计算出桩身实际弹性模量  $E_p=2.96 \times 10^4$  MPa。

基桩截面惯性矩根据规范方法<sup>[11]</sup>计算:

$$I_p = \frac{\pi d^2}{32} \left[ d^2 + 2(a_E - 1)\rho_g d_0^2 \right] \quad , \quad (3)$$

式中,  $I_p$  为基桩截面惯性矩 ( $\text{m}^4$ ),  $d$  为基桩直径 (m),  $d_0$  为扣除保护层厚度的桩直径 (m),  $a_E$  为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值,  $\rho_g$  为桩身截面配筋率。

根据试桩设计参数及式 (3) 可计算试桩截面惯性矩  $I_p=0.81 \text{ m}^4$ 。

1.2 工程场地岩土工程条件

桥位区为低山地貌, 山间为冲沟, 两端桥台落在冲沟两侧的山体上, 桥位中部横跨泗溪河冲沟。冲横断面呈哑口的 U 型, 冲沟沿线宽度变化较大, 桥线位跨越的宽度为 200 m, 两端桥台处的残积土层及强风化层较厚。山坡地势陡峻, 地形起伏变化较大, 最大高差为 60 m。试桩桩位处边坡坡度约为  $41^\circ$ , 根据桩位处钻孔结果, 试桩处所揭露的地层如图 2 所示。根据现场原位试验及 12 件原状土试料所进行的室内土工试验结果, 场地内埋藏各地层主要的物理力学性质指标如表 1 所示, 试桩桩位处各土层厚度如表 2 所示。

表 1 岩土层物理力学参数

Table 1 Soil layers and parameters					
地层名称	天然 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	承载力 特征值 $f_{ak}/\text{kPa}$	压缩 模量 $E_s/\text{MPa}$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩 擦角 $\varphi/(^\circ)$
种植土	1.90	160	6.0	25	18
含砾粉质 黏土	1.95	180	7.0	25	20
强风化白云 质灰岩	2.15	380	80	40	25
中风化白云 质灰岩	2.30	1200	280	60	40

表 2 试桩桩位处岩土层厚度

Table 2 Soil layers at piles site (m)					
地层名称	自由段	种植土	含砾粉质黏土	强风化白云质灰岩	中风化白云质灰岩
后桩	0	1.8	9.7	6.1	7.4
前桩	5.7	1.5	6.3	5.5	6.0

2 试桩监测系统

为监测试桩桩身应力发展规律, 在桩内和桩底埋设了一定数量的测试仪器, 包括桩身应力测量系统及土压力盒。

为测量试桩桩身轴力分布, 桩基在承受上部荷载和山体推力过程中的内力发展规律以及桩侧摩阻力分布规律, 在绑扎好的钢筋笼上安装钢筋应力计及应变计, 沿桩轴线从地面以下每隔一定距离选择一个测试截面放置一组直到桩底, 共 12 组, 如图 3 所示。每一断面埋设 2 只钢弦式钢筋应力计和 2 只电阻式钢筋应变计, 钢筋应力计沿边坡倾向对称布置, 钢筋应变计沿边坡走向对称布置。此外, 在桩底埋设了 2 只土压力盒。测试仪器具体埋设位置如图 4 所示。

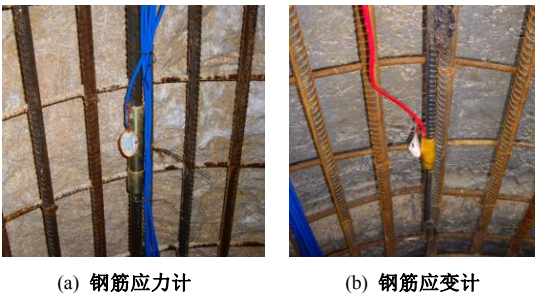


图 3 传感器安装图

Fig. 3 Installation of sensors

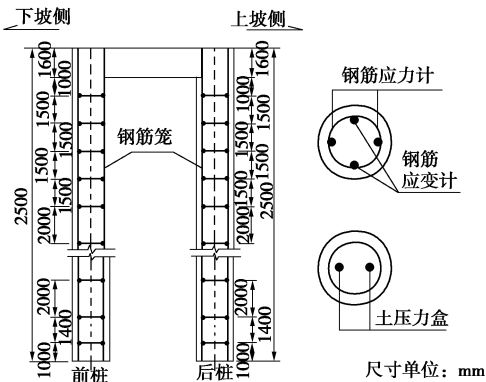


图 4 传感器布置示意图

Fig. 4 Arrangement of sensors

3 试验方法

由于试桩处于山区陡坡地段, 难以实施静荷载试验, 故本次试验结合桥梁施工进度, 采集了桥梁在上、下部结构自重及成桥后车辆加载等 6 种工况下双桩结构桩身应力分布, 6 种工况条件如下: ①前、后双桩浇筑完成, 待混凝土凝固后读取桩身应力作为初始值; ②下部结构完成建造, 包括系梁、墩柱及盖梁; ③T 梁架设完成, 试桩所在位置跨径 40 m, 每跨有 5 片 T 梁; ④桥面混凝土与防水层铺装完成, 混凝土厚度 8 cm; ⑤桥面沥青铺装完成、防护栏安装到位, 沥青厚

度 10 cm, 至此桥梁整体结构建造完成; ⑥成桥试验加载采用 4 台 280 kN (前轴 60 kN, 后轴 220 kN) 的汽车在墩顶位置按横桥向对称加载, 加载 24 h 后采集数据, 加载布置方式及轴距如图 5 所示。

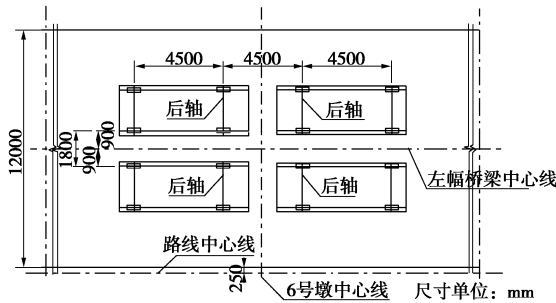


图 5 车辆加载示意图

Fig. 5 Vehicle loading

## 4 试验结果分析

### 4.1 桩身轴力

根据施工进度, 采集了前述 6 种工况条件下钢筋应力计数据, 以工况 1 条件下钢筋应力为初值, 根据各桩身轴力计算表达式为

$$P_i = \frac{\sigma_{1i} + \sigma_{2i}}{2} \cdot \frac{E_p A_p}{E_s} \quad (4)$$

式中  $P_i$  为第  $i$  测量面轴力 (kN);  $\sigma_{1i}$ ,  $\sigma_{2i}$  分别为测量截面下坡侧与上坡侧钢筋应力 (kPa);  $E_s$  为钢筋弹性模量 (MPa);  $E_p$  为桩身实际弹性模量 (MPa);  $A_p$  为桩身截面积 ( $\text{m}^2$ )。

由于各工况条件下桩底土压力盒读数均保持不变, 表明传递到桩端的荷载为零, 各工况条件下桩身轴力如图 6 所示。

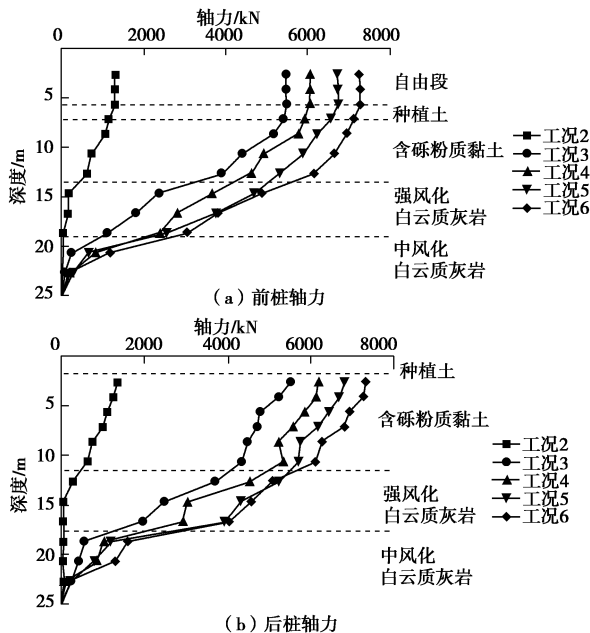


图 6 桩身轴力分布曲线

Fig. 6 Distribution of axial forces of pile body

由图 7 不难发现, 工况 2 条件下桩身荷载较小, 桩顶以下 15 m 处轴力已趋近于零, 桩身荷载基本由上部土层摩阻力分担。其他各工况条件下, 前桩与后桩轴力变化趋势较为一致, 但前、后轴力变化斜率随埋深增加而不同, 两桩轴力在粉质黏土及含砾粉质黏土层变化斜率较小, 而进入强风化岩层以后变化斜率显著增加, 桩底附近轴力变化幅度减小, 桩端轴力为零。表明在本次试验工况条件下, 试桩侧阻先于端阻发挥, 荷载全部由桩侧摩阻力承担, 如果上部荷载继续增加至桩侧摩阻力不足以承担时端阻力才会发挥, 因此试桩具有典型端承摩擦桩特性。

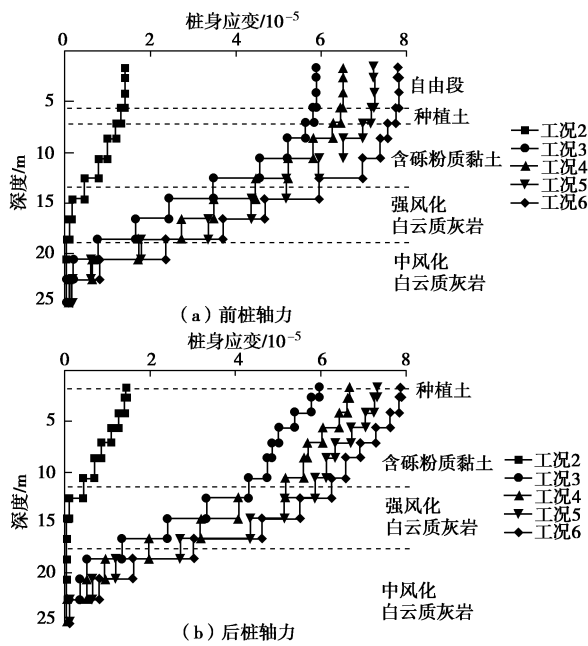


图 7 桩身应变分布曲线

Fig. 7 Distribution of strains of pile body

### 4.2 桩身应变

根据桩身轴力可计算各桩段平均应变量  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \frac{P_i + P_{i+1}}{2E_p A_p} \quad (5)$$

由图 7 可以看出, 桩身各段应变自上而下递减, 与轴力大小是相关, 根据各桩段应变可计算出桩身压缩量, 五种工况下前桩压缩量分别为 0.14, 0.77, 0.93, 1.05, 1.17 mm, 后桩压缩量为 0.11, 0.72, 0.87, 1.01, 1.09 mm。工况 6 条件下前后桩压缩量差值最大, 为 0.08 mm。

### 4.3 桩侧摩阻力

为进一步分析各土层摩阻力的发挥, 假定各测点断面之间土层摩阻力不变, 由桩身轴力计算求得桩侧摩阻力:

$$q_i = \frac{P_i - P_{i+1}}{d\pi l_i} \quad (6)$$



式中  $q_i$  为桩侧摩阻力 (kPa);  $P_i$  为桩身第  $i$  测量面轴力 (kN);  $d$  为桩身直径 (m)。

最终可计算桩侧摩阻力分布情况如图 8 所示。

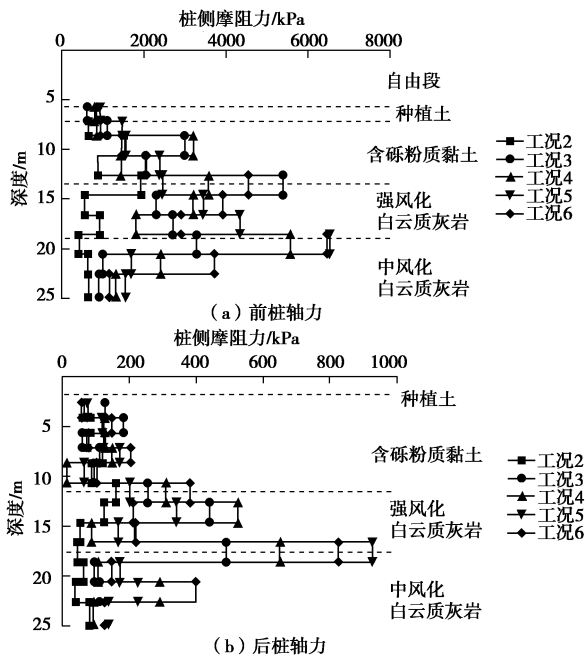


图 8 桩身摩阻力分布曲线

Fig. 8 Distribution of side friction resistances

桩侧摩阻力分布曲线表明, 前、后桩桩侧摩阻力大致呈现出先增大后减小的趋势, 且分别在桩顶以下 20, 18 m 左右达到最大, 而该位置大致为基桩进入中风化层处。此外, 由于坡面的存在, 基桩临空面一侧不再是半无限空间, 可以看出, 桩顶以下一定深度范围内土体所能提供的摩阻力非常有限, 观察图 8 发现, 这一深度大约在坡面以下 2~5 倍桩径范围, 因而在设计计算过程中应考虑对坡面以下一定深度范围内土体提供的摩阻力进行折减。摩阻力分布数据显示, 土层与岩层所提供的摩阻力之比随荷载的增大而降低, 种植土层及黏土层所提供的最大摩阻力在 1200 kN 以内, 嵌岩段摩阻力远大于桩侧土阻力。

#### 4.4 桩身弯矩

本试验试桩属于典型横坡条件下双桩结构, 桩身所受横向荷载基本与双桩结构处于同一平面内。对比前、后桩钢筋应力计读数后发现, 双桩下坡侧钢筋应力斜率较上坡侧更大, 这表明桩身存在弯矩。为更直观地分析桩身弯矩, 根据式 (7) 可换算出桩身各截面测点所在平面内的弯矩, 所得结果如图 9 所示。

$$M_i = \frac{\sigma_{1i} - \sigma_{2i}}{b} \cdot \frac{E_p I_p}{E_s} \quad (7)$$

式中,  $b$  为同一截面内钢筋应力计距离, 即钢筋笼直径, 取 0.19 m。

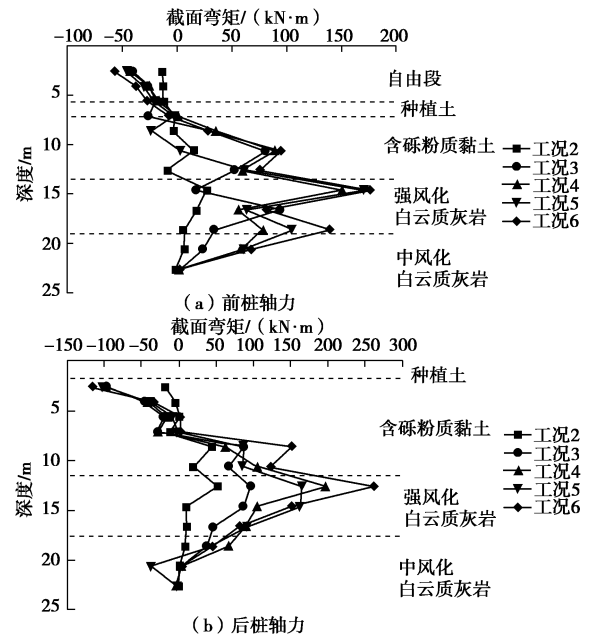


图 9 桩身弯矩分布曲线

Fig. 9 Distribution of bending moments of piles

试验中桩身弯矩主要由两部分因素引起, 其一是上部结构偏心荷载及风荷载作用, 其二是桩侧土压力作用。从实测数据可以发现, 工况 3 条件下, 上部结构片梁架设完成, 上部荷载增加且风荷载作用面积增大, 因此较工况 2 条件下桩身弯矩有明显增加。此外, 桩侧土压力作用也是不可忽视的因素, 施工过程难免对边坡尤其是上层土体产生扰动, 施工便道修筑以及降水等因素综合作用, 导致边坡坡面一下一定深度范围内土体附加应力增大、岩土体抗剪强度降低, 边坡产生变形, 引起桩侧土压力, 如图 10。



图 10 边坡位移

Fig. 10 Displacements of slope

从整体来看, 双桩桩身弯矩最大值随荷载增加而增加, 各工况条件下桩身弯矩分布趋势较为一致, 前、后桩桩身弯矩最大值分别位于 15, 13 m 左右。其中工况三条件下桩身弯矩增幅最为明显, 前桩增幅 253%, 后桩增幅为 87%, 其原因一方面是由于上部结构荷载加大, 且风荷载作用面积增加, 另一方面可能是由

于施工过程对边坡扰动引起坡体变形或者由于降雨导致岩土体抗剪强度降低产生了土压力。此外值得注意的是,双桩结构的桩身弯矩分布与单桩不同之处在于前、后桩上部弯矩为负,下部弯矩为正,弯矩零点位于桩顶以下8 m左右,出现桩身弯矩“上负下正”的原因在于前桩、后桩与横系梁形成整体,桩顶边界条件非自由,横系梁参与了双桩结构受力,起到了调整上部结构传递下来的弯矩与水平力作用。

## 5 桩身内力计算分析

本文基于文献[2]所提分析方法,建立双桩整体平面受力分析模型,基于合理假定计算桩身弯矩值与工况6条件实测值进行比较并互相校核,简化计算分析模型如图11所示。

双桩结构所受荷载包括柱顶荷载及桩身土压力力,根据桥梁设计资料及工况6下上部结构荷载条件可以简化得到  $P_1=P_2=7312$  kN,  $Q_1=Q_2=50$  kN,  $M_1=M_2=520$  kN·m。因本次试验无法获得桩顶水平位移,因此依据工程场地岩土工程条件及勘察结果并结合规范<sup>[12]</sup>分别取各土层水平抗力系数比例系数  $m_1=1.5$  MN/m<sup>4</sup>,  $m_2=4$  MN/m<sup>4</sup>, 岩层抗力系数  $C_3=80$  MN/m<sup>3</sup>,  $C_4=420$  MN/m<sup>3</sup>。

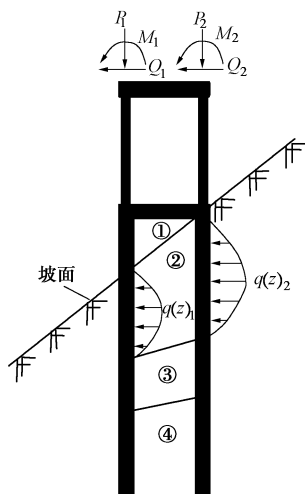


图 11 理论计算分析模型

Fig. 11 Theoretical model

由于桩侧土压力大小难以测定,本文依据文献[13]结论,假定强风化与中风化岩层为稳定地层,土压力影响深度为种植土及含砾粉质黏土层深度,桩侧土压力为抛物形分布,再根据实测工况6条件下桩身弯矩对土压力进行反算拟合,得到前、后桩土压力分别为  $q(z)_1=-0.53z^2+10.1z-40.47$  ( $5.7\text{ m}\leq z\leq 13.5\text{ m}$ ),  $q(z)_2=-0.24z^2+2.7z$  ( $0\leq z\leq 11.5\text{ m}$ ), 计算结果如图12所示。

所得结果显示,土压力分布假定合理,使用反算拟合得到的土压力计算桩身弯矩分布规律与实测值吻

合较好,桩身弯矩最大值及最大弯矩位置基与实测情况本一致。在此条件下,前桩与后桩所受土压力合力分别为  $E_1=38.67$  kN,  $E_2=62.22$  kN, 比值约为 0.62。

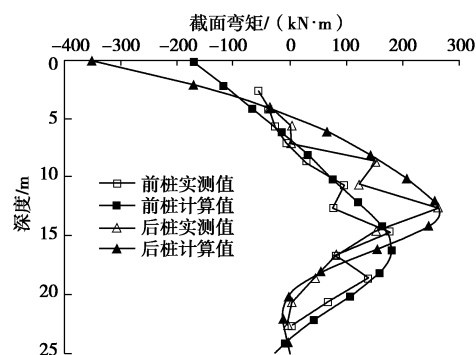


图 12 计算与实测桩身弯矩

Fig. 12 Computed and test bending moments of piles

## 6 结 论

本文通过采集与分析某高陡横坡段桥梁建设全过程及成桥试验中桩身应力数据,得到了以下4点结论。

(1) 本次试验各工况条件下,桩侧摩阻力先于桩端阻力发挥,桩身轴力均全部由桩侧摩阻力承担,桩身荷载较小时基本由上部土层承担。

(2) 由于桩前临空,坡面以下2~5倍桩径范围内土体所能提供的摩阻力较小,设计计算时应考虑折减,土层与岩层所提供的摩阻力之比随荷载的增大而降低。

(3) 桩身弯矩最大值随荷载增加而增加,基桩弯矩上部为负下部为正,表明前、后桩与横系梁为一受力整体,设计计算过程中宜考虑横系梁的作用。

(4) 基于有限杆单元方法结合实测桩身弯矩,通过反算拟合确定了桩侧土压力大小及分布模式,分析结果显示理论计算结果与实测值吻合有良好的一致性,可为同类工程设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 杨明辉, 赵明华, 刘建华, 等. 高陡边坡桥梁基桩内力计算的幂级数解[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(3): 561 - 566. (YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, et al. Power-progression solution for inner-force analysis of bridge pile in steep slope[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2007, 38(3): 561 - 566. (in Chinese))
- [2] 赵明华, 杨超伟, 杨明辉, 等. 基于有限杆单元法的陡坡段桥梁基桩受力分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(6): 51 - 58, 108. (ZHAO Ming-hua, YANG Chao-wei, YANG Ming-hui, et al. Mechanical analysis of bridge pile foundation in high

- and steep slopes based on finite bar element method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, **27**(6): 51 - 58, 108. (in Chinese))
- [3] 尹平保, 赵明华, 杨明辉, 等. 考虑  $P-\Delta$ 效应的陡坡段桥梁双桩结构受力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, **39**(1): 1 - 6. (YIN Ping-bao, ZHAO Ming-hua, YANG Ming-hui, et al. Force analysis of bridge double-pile in high and steep slope[J]. Journal of Hunan University (Natural Science) 2012, **39**(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [4] SAWANT V A, SHUKLA S K. Three-dimensional finite element analysis of laterally loaded piles in sloping ground[J]. Indian Geotechnical Journal, 2012, **42**(4): 278 - 286.
- [5] NG W W C, ZHANG L M. Three-dimensional analysis of performance of laterally loaded sleeved piles in sloping ground[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(6): 499 - 509.
- [6] 陈仁朋, 顾明, 孔令刚, 等. 水平循环荷载下高桩基础受力性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 1990 - 1996. (CHEN Ren-peng, GU Ming, KONG Ling-gang, et al. Large-scale model tests on high-rise platform pile groups under cyclic lateral loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 1990 - 1996. (in Chinese))
- [7] 尹平保, 赵明华, 杨超炜, 等. 复杂荷载下横坡段桥梁桩基承载特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(5): 110 - 117. (YIN Ping-bao, ZHAO Ming-hua, YANG Chao-wei, et al. Experimental study on bearing capacity of bridge piles in cross slopes under complex loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(5): 110 - 117. (in Chinese))
- [8] 戴自航, 张晓咏, 邹盛堂, 等. 现场模拟水平分布式滑坡推力的抗滑桩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1513 - 1518. (DAI Zi-hang, ZHANG Xiao-yong, ZOU Sheng-tang, et al. Field modeling of laterally distributed landslide thrusts over anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1513 - 1518. (in Chinese))
- [9] 赵明华, 罗卫华, 雷勇, 等. 汨水河特大桥嵌岩桩承载特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, **41**(3): 1 - 6. (ZHAO Ming-hua, LUO Wei-hua, LEI Yong, et al. In-site load-carrying characteristics test of Rock-socketed piles of Mishui river bridge[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, **41**(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [10] GB50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 2003. (GB50081—2002 Standard for test method mechanical properties on ordinary concrete[S]. 2003. (in Chinese))
- [11] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [12] JTG D63—2007 公路桥涵地基基础设计规范[S]. 2007. (JTG D63—2007 Code for design of ground base and foundation of highway bridge and culverts[S]. 2007. (in Chinese))
- [13] 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 anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(4): 517 - 521. (in Chinese))