

文章编号: 1674—8247(2019)03—0030—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.03.007

双排桩加固滑坡桥基模型试验与数值模拟研究

张建文¹ 付正道²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要:滑坡段桥梁基础常采用抗滑桩作为支挡结构,但针对此类工况的研究成果却少见发表。目前,滑坡段桥基设计一般不考虑抗水平荷载作用,水平荷载常通过设计抗滑桩来承担,而实际上抗滑桩和桥基是相互作用的。文章以成兰铁路九寨沟双线大桥为研究背景,进行前后排抗滑桩支护滑坡桥基的模型试验,分析在前后两排抗滑桩的作用下桥基的变形情况和受力特性,并基于 FLAC 3D 软件讨论了不同埋置位置下双排抗滑桩对桥基的影响。结果表明:(1)后排抗滑桩水平的变形产生了较大的荷载作用于桥基上,且集中在承台附近;(2)数值模拟下的桥梁基桩受力特性与室内模型试验测试数据较为符合,证明了数值模拟的可行性;(3)后排抗滑桩和桥基之间有一个最佳距离,能起到充分减小桥基水平变形的作用,而前排抗滑桩应靠近桥基方能有效发挥其支护效果。

关键词:桥梁基础; 抗滑桩; 模型试验; 数值模拟

中图分类号:U213.1+52.1 **文献标志码:**A

Model Test and Numerical Simulation of Bridge Foundation with Front and Rear Anti-slide Piles in Landslide Section

ZHANG Jianwen¹ FU Zhengdao²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Although anti-slide piles are often used as retaining structure for bridge foundation in landslide section, few of research results have been published in the journal. At present, the anti-horizontal load is generally not considered in the design of bridge foundation in landslide section, and the horizontal load is usually borne by anti-slide pile. In fact, the anti-slide pile and the bridge foundation are interacted. Taking Jiuzhaigou double-line bridge of Chengdu-Lanzhou Railway as research background, this paper carries out the model test of the bridge foundation with front and rear anti-slide piles in landslide section, analyses the deformation and stress characteristics of the bridge foundation under the action of the front and rear anti-slide piles, and discusses the influence of the double-row anti-slide piles on the bridge foundation under different buried positions based on FLAC 3D software. The results show that: (1) the large load produced by the horizontal deformation of the rear anti-slide pile acts on the bridge foundation and concentrates near the cap; (2) the stress characteristics of the bridge foundation pile under the numerical simulation are consistent with the testing data of the indoor model test, which proves the feasibility of the numerical simulation; (3) there should be an optimum distance between the rear anti-slide pile and the bridge foundation, which can adequately reduce the horizontal

收稿日期:2018-05-31

作者简介:张建文(1980-),男,高级工程师。

基金项目:铁道部科技研究开发计划项目(Z2012-061)

引文格式:张建文,付正道. 双排桩加固滑坡桥基模型试验与数值模拟研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(3):30-36.

ZHANG Jianwen, FU Zhengdao. Model Test and Numerical Simulation of Bridge Foundation with Front and Rear Anti-slide Piles in Landslide Section [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 30-36.

deformation of the bridge foundation, but the front anti-slide pile should be close to the bridge foundation so as to effectively play its supporting role.

Key words: bridge foundation; anti-slide pile; model test; numerical simulation

在我国西南地区,铁路选线受地形地质等条件的影响,桥梁基础中设置在滑坡上^[1-3]的情况相当普遍。桥梁桩基水平承载能力有限,往往需要设置抗滑桩对桥基进行支护^[4-5]。目前,滑坡段的桥基设计一般不考虑抗水平荷载的作用,水平荷载常通过设计抗滑桩来承担,实际上抗滑桩和桥基是相互作用的。滑坡上桥基受到两部分侧向荷载的作用,即位于抗滑桩和桥基之间的滑体产生的下滑力和抗滑桩水平变形对桥基产生的荷载,抗滑桩变形及剩余下滑对桥基的影响,如图 1 所示。

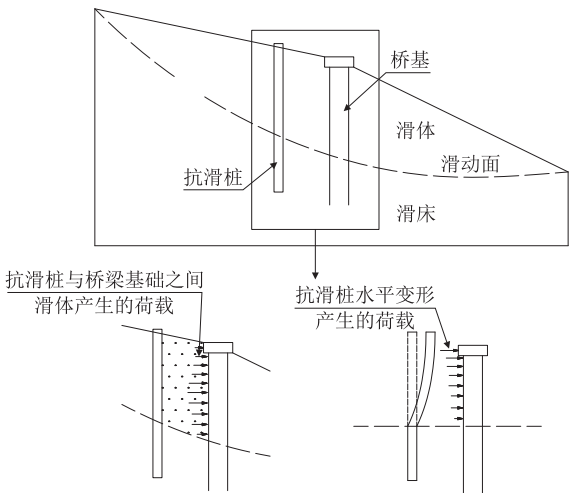


图 1 抗滑桩变形及剩余下滑力对桥基的影响

目前,Souri A^[6]等人针对侧向荷载下的桥梁桩基进行了诸多研究,但主要集中在桥基边坡稳定性^[7-9]、桥基埋置位置和桥基承载机理等方面^[10]。抗滑桩支护下滑坡段桥基的相关研究成果却少见发表。本文依托铁道部科技研究开发计划项目“滑坡岩堆加固技术及抗滑支挡工程对桥墩受力与变形影响的试验研究”,设计完成了室内大尺寸模型试验,以桥基为主要研究对象,探讨了从受荷到破坏整个过程中桥梁桩基的受力特性及其与抗滑桩的相互作用机理。并基于 FLAC 3D 程序,进行了抗滑桩埋置位置对桥基影响的数值模拟。研究结果可为今后滑坡段桥基抗滑桩的设计提供参考。

1 试验概述

1.1 试验原型介绍

试验原型为成兰铁路九寨沟双线大桥,位于四川

省九寨沟县大录乡八郎沟玉瓦寨 2 号岩堆上。据现场调查,该边坡当前状态稳定。滑坡体成份为碎石土,滑床为砂岩、板岩夹灰岩。桥基及抗滑桩尺寸如表 1 所示。桥梁基础和抗滑桩的混凝土强度等级分别为 C30 和 C35。

表 1 桥基与抗滑桩几何参数

结构物	长(高)/m	截面尺寸/m	间距/m
承台	4	16.2×21.6	—
桥梁桩基	40、32.5、27.5	R=1	5
前排抗滑桩	27	2×3	7
后排抗滑桩	47	2.3×3.5	7

1.2 试验模型介绍

1.2.1 模型相似率

依据相似理论,将质量密度和几何尺寸作为控制量,为满足原型和试验模型从开始加载至破坏过程的相似性,弹性模量相似比例取。根据相似比例,模型材料的重度为原型的 40 倍,无法满足。因此滑体产生的下滑力与抗力较小。下滑力可通过模型后部的加载装置施加,不影响桩后土压力的分布规律。考虑到滑动面以下桩身埋置于基岩之中,桩身抗力主要由基岩提供,桩前滑体段的土压力值虽偏小,但同样对桩前土压力分布规律影响不大。模型试验中桥梁基础与抗滑桩主要承受横向荷载作用,材料重度不是主控因素,可放宽此要求。试验所取各相关物理量的相似比例,如表 2 所示。

表 2 各物理量及相似关系

物理量	量纲	模型
长度 l	L	1/n
应变 ε	—	1
应力 σ	$ML^{-1}T^{-2}$	1
质量 m	M	1/n ³
密度 ρ	ML^{-3}	1
角度($^{\circ}$)	—	1
模量 E	$ML^{-1}T^{-2}$	1
加速度 g	LT^{-2}	1

试验模型仅对原型的关键部分进行模拟,用千斤顶加载系统模拟后部传递的下滑力。模型试验采用几何尺寸为 5.8 m×0.9 m×3.0 m(长×宽×高)的试验槽,模型桩的埋置位置,如图 2 所示。

1.2.2 模型材料

基岩由重晶石粉、砂子、石膏和水按一定质量比配制,掺入 5% 的水泥及早强剂搅拌,分层压实。基岩上

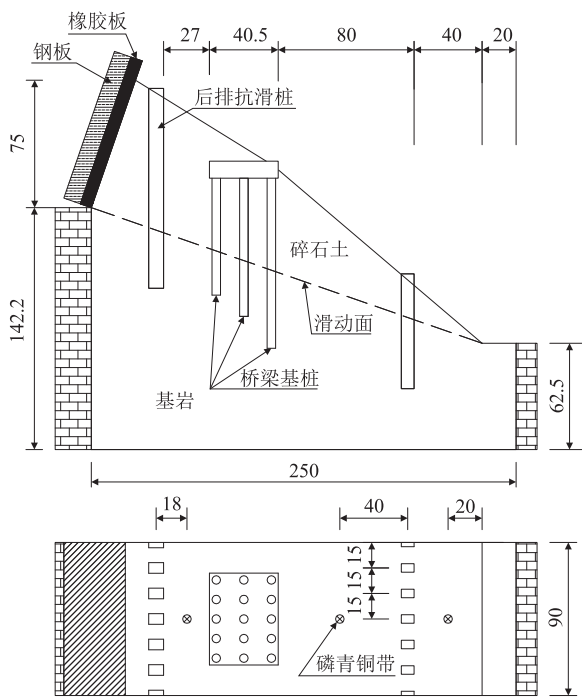


图 2 模型试验示意图(cm)

铺设薄细砂层用以模拟滑动面较弱的抗剪强度,符合滑面物理力学性质的要求。碎石土分层压实,填筑。模型土体的力学参数由前期室内试验确定,如表 3 所示。

表 3 模型岩土体的力学参数

岩土体	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	含水率 /%	弹性模量 E/GPa
碎石土	2 100	6.3	38.4	4.7	—
基岩	2 300	—	—	—	19.0

根据原型配筋率、配箍率,将桥基和前、后排抗滑桩制作成微粒钢筋混凝土模型。桥梁承台配构造钢筋,承台尺寸为 40.5 cm×54 cm×10 cm(长×宽×高);桥梁基桩取直径 5 cm,桩长分别为 100 cm、81.25 cm、68.75 cm;前排抗滑桩截面为 5 cm×7.5 cm 的矩形,桩长 67.5 cm;后排抗滑桩截面为 6.25 cm×8.75 cm 的矩形,桩长 117.5 cm。

1.3 量测项目与加载设计

根据试验的目的及要求,试验主要用到应变片、水平位移计和微型土压力盒等元件。测点均位于中轴线上,测试原件具体埋设布置如图 3、图 4 所示。

试验通过千斤顶逐步加载,荷载于滑体后缘沿滑面方向施加,直至边坡破坏。试验前须对试验模型进行预压,预压荷载为 4 kN,预压 2 h 后卸载为 0。第一级荷载取 5.9 kN,单次加载设计增量 3.4 kN,每级荷载施加完毕,需待水平位移计测点的变化速率控制在 0.01 mm/min 以内后再施加下一级荷载。试验模型发

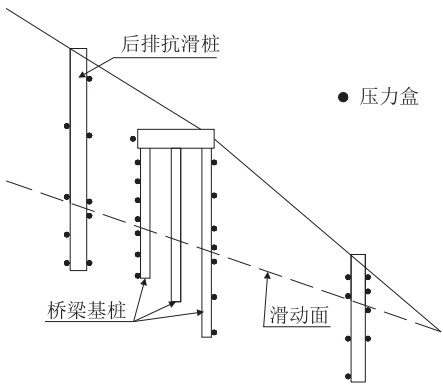


图 3 土压力盒埋设示意图

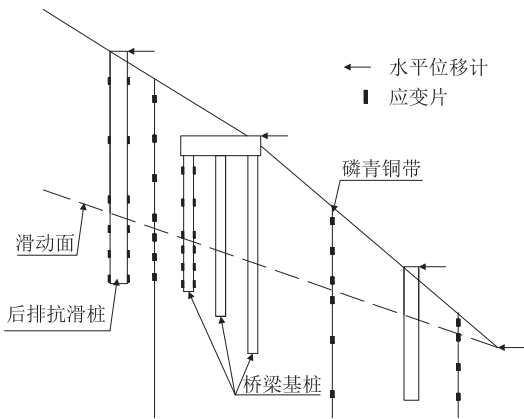


图 4 水平位移计及应变片埋设示意图

生破坏,则停止加载。

2 试验结果分析

2.1 水平位移分析

各测点水平位移与荷载的关系,如图 5 所示。

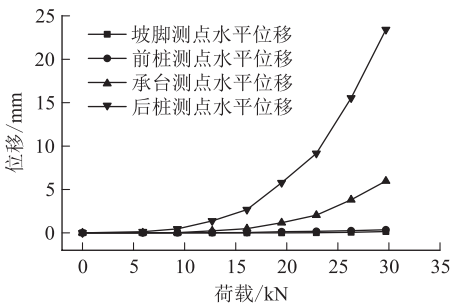


图 5 测点水平位移

从图中可以看出:后排抗滑桩测点与承台测点的位移-荷载变化规律一致,即加载初期位移和荷载呈近似线性的变化规律,当荷载超过某一限值后,位移急剧增大。但后排桩水平位移的增幅大于承台测点。在整个加载过程中,前排桩和坡脚的水平位移都远小于后排桩和承台。进一步观察后排桩和承台的位移-荷

载关系曲线可以看出:后排桩的位移-曲线有3处曲率突增点,对应荷载为12.7 kN、19.5 kN和26.3 kN;承台的位移-曲线有2处曲率突增点,对应荷载为19.5 kN和26.3 kN。对比分析后排桩、承台位移曲线变化规律,可梳理出试验的破坏过程:加载至12.7 kN时,后排抗滑桩桩身混凝土出现裂缝,随着荷载的增加,桩身裂缝不断开展;荷载加至19.5 kN后,后排抗滑桩桩身裂缝贯通,由于桩身配筋率较高,后排抗滑桩仍有一定的承载能力,与此同时,部分基桩桩身混凝土出现裂缝;加载到26.3 kN时,全部基桩桩身出现贯通裂缝。

2.2 土压力分析

桥梁桩基沿埋深的土压力曲线如图6所示。

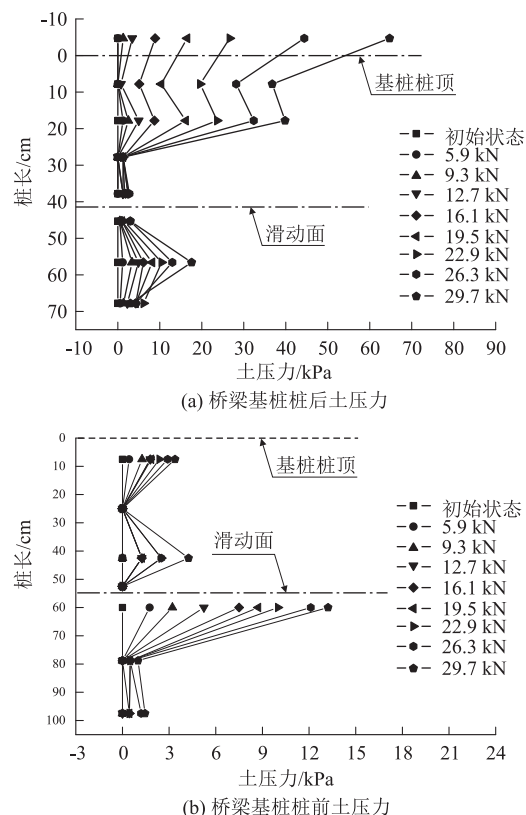


图6 桥梁桩基桩前土压力分布图

从图中可以看出:桥基桩后受荷段土压力整体呈倒三角形分布,承台处为受荷段土压力最大值位置,土压力在滑动面以上10 cm左右衰减至0;桩后嵌固段土压力呈先增大后减小的抛物线形,滑动面附近土压力基本为0,桩底土压力较小。桩前受荷段土压力呈“S”形分布,受荷段长度1/2处及滑动面附近土压力值为0;嵌固段抗力主要集中在滑动面以下0~20 cm范围,此段土压力呈倒三角形分布,滑动面以下20 cm至桩底范围土压力极小。分析桥梁基础桩前、桩后土压力随荷载的分布曲线可得:(1)承台位置附近承受

的压应力较大;(2)桥梁基桩桩前受荷段的抗力较小,嵌固段抗力较大;(3)桥梁基桩桩身开裂及破坏并未明显改变桩身土压力分布规律,桩身土压力均随荷载的增加而增大。

2.3 弯矩、应变分析

桩身各测点弯矩值可通过各点的应变值换算得到^[11]。由弯矩表达式(1)和中性层曲率表达式(2),可得式(3)。据此,可将试验中测得的应变数据转换为桩身弯矩。

$$M = E \times I \times \rho^{-1} \quad (1)$$

$$\rho^{-1} = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{t} \quad (2)$$

$$M = \frac{E \times I (\varepsilon_t - \varepsilon_c)}{t} \quad (3)$$

式中: M ——桩所受的弯矩;

E ——混凝土的弹性模量;

I ——桩的惯性矩;

ρ^{-1} ——曲率;

ε_t ——混凝土受拉区应变;

ε_c ——混凝土受压区应变;

t ——桩的横截面厚度。

桥梁基桩桩身弯矩随荷载的变化曲线,如图7所示。

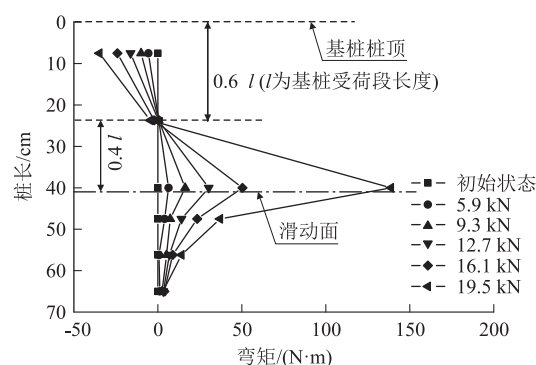


图7 桥梁基桩桩身弯矩分布图

从图中可以看出:基桩桩顶、滑动面处均存在较大弯矩,这两处为桥梁基桩主要的受力区域。这与stewart通过离心机试验研究侧向荷载下桥基的受力特性结果一致。滑动面以上,弯矩随埋深的增加呈正增长,由负弯矩转变为正弯矩,0.6倍受荷段长度处桩身弯矩值为0,滑动面处为最大弯矩截面。滑动面以下基岩段,随着深度的增加,弯矩不断减小并在桩底处衰减至0。从桥梁基桩桩身弯矩图可以看出,当荷载加至19.5 kN时,滑动面测点的应变值激增,此时该处混凝土产生细小裂缝,荷载加载至22.9 kN时,该处应变测试通道过载,应变片已完全失效。

2.4 破坏形式分析

后排抗滑桩在下滑力的作用下产生变形挤压前部土体,土体水平移动对桥基施加侧向荷载。桥基承担了后排桩剩余的、变形产生推力的以及抗滑桩和桥基之间滑体产生的下滑力,且桥梁承台存在强大的约束。因此,桥梁基础产生的荷载主要集中在承台附近。在加载等级提高的同时,后排抗滑桩首先发生破坏,之后桥梁基桩相继破坏。直至最后一级荷载加载完成,模型局部产生较明显的变形,但整个坡体并未整体失稳。

试验完毕后,桥梁基桩桩身的破坏情况,如图8所示。



图8 桩体破坏实物图

桥梁桩基础的15根基桩均产生破坏,桩身裂缝主要分布在滑动面附近、承台与桩顶连接处。裂缝位置与应变测试数据相吻合。

3 数值计算模型

3.1 模型建立

以成兰铁路九寨沟双线大桥工程为例建立计算模型,共划分24 664个单元体,27 294个节点,承台采用实体单元(zone),桥梁基桩和抗滑桩采用桩单元(pile),接触面(interface)设置在承台与滑体之间,承台和滑坡岩土体分别采用各向同性弹性本构模型(elastic)和摩尔-库伦本构模型(M-C)。在滑动面位置建立一层单元体用以模拟滑动面,该层土体参数与滑体一致,通过削减其内摩擦角来模拟外荷载作用下,滑动面抗剪参数指标的弱化。模型底部为自由边界,顶部为自由面,其他面限制法向位移。材料参数如表4所示,数值计算模型,如图9所示。

3.2 数值模拟结果与试验结果对比分析

数值计算得到的桥梁基桩(与模型试验中测试基桩一致)弯矩沿桩长分布,如图10所示。

从图中可以看出:(1)桩顶存在较大负弯矩,桩身最大弯矩截面位于滑动面附近;(2)弯矩值为0的位置在基桩0.6倍受荷段长度处和桩底处。上述规律与室内模型试验规律相同。

表4 数值计算材料参数表

材料	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/MPa	法向刚度 k_n/GPa	切向刚度 k_s/GPa
碎石土	0.15	0.13	2100	40.0	0	—	—
基岩	26.4	6.89	2300	45.0	10.0	—	—
承台	16.7	12.5	2400	—	—	—	—
桩单元	—	—	—	0.8φ	$0.8c$	$\alpha \times G/\Delta z_{\min}$	$\alpha \times G/\Delta z_{\min}$
接触面	—	—	—	0.8φ	$0.8c$	$10\text{Max}[\frac{K+4G/3}{\Delta z_{\min}}]$	$10\text{Max}[\frac{K+4G/3}{\Delta z_{\min}}]$

式中: Δz_{\min} —桩单元接触面法向连接网格最小尺寸, $\alpha=20$ 。

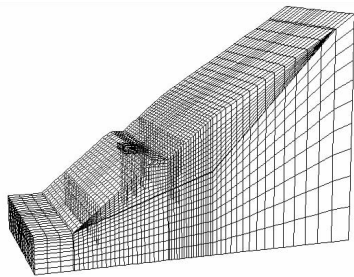


图9 数值模型网格划分图

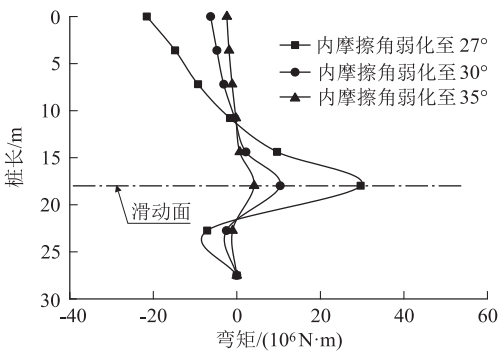


图10 数值模拟得到的基桩弯矩图

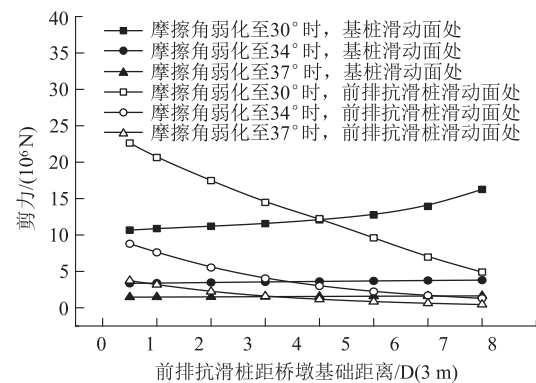
3.3 抗滑桩桩位对桥基的影响

为研究不同抗滑桩埋置位置对桥基变形情况和受力特性的影响,以抗滑桩直径 D 为间隔改变抗滑桩位

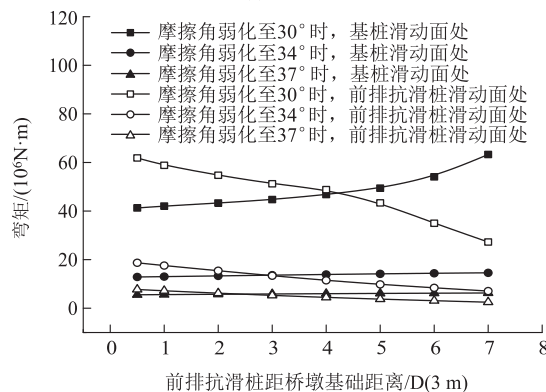
置进行数值计算。计算顺序为:(1)埋置前排抗滑桩,调整其桩位。(2)按设计位置埋设前排抗滑桩,埋置

后排抗滑桩并改变其位置。需要说明的是,桥基水平变形要求严格,日本高速公路研究基金会指出,20 mm 以内属于无害变形,20 ~ 100 mm 对结构有害但仍可正常工作,超过 100 mm 结构将可能产生破坏。本文选择 3 组滑动面残余抗剪强度参数,分别对上述 3 种工况进行模拟。通过弱化滑动面土层的内摩擦角,模拟外界因素导致的滑动面抗剪强度参数的劣化。

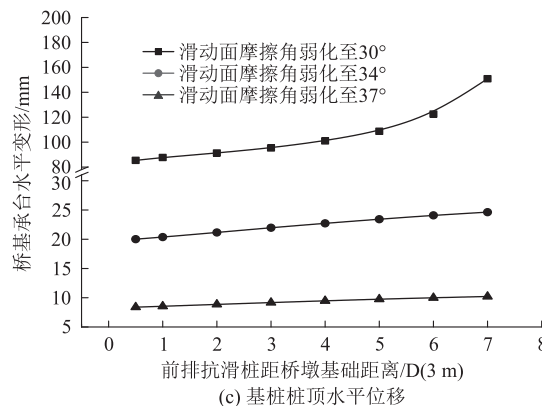
只设置前排抗滑桩时,滑动面处弯矩和剪力以及承台处水平变形的变化曲线,如图 11 所示。桥梁基桩的弯矩、剪力及承台的水平变形随着距离的增大而增大,而前排抗滑桩的桩身内力则不断减小。说明前排抗滑桩距离桥基越远,其对桥基的支护效果越不理想,越不能充分发挥其功能。若滑坡为牵引式滑坡,则须考虑滑坡下部的整体稳定性,由此选择合理的前排抗



(a) 基桩最大剪力



(b) 基桩最大弯矩

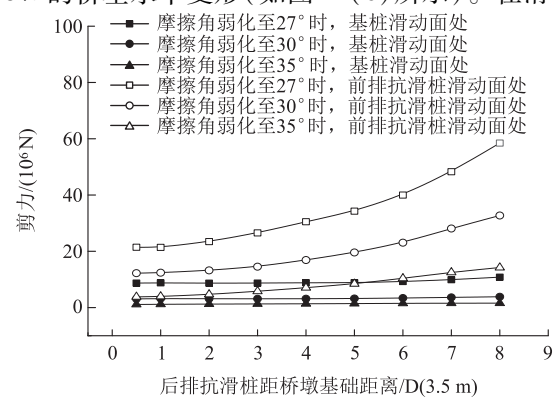


(c) 基桩桩顶水平位移

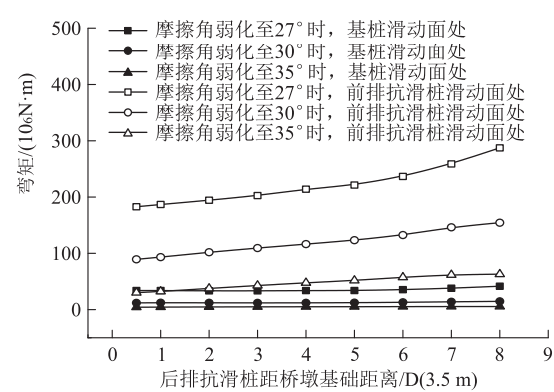
图 11 改变前排抗滑桩埋设位置对桥基影响

滑桩位。

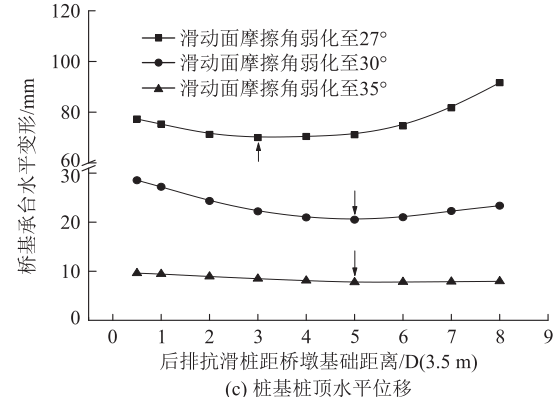
桥梁基桩、后排抗滑桩滑动面处的弯矩和剪力变化曲线如图 12(a)、(b) 所示。后排抗滑桩始终位于抗滑段,距桥基距离越近,其受到的下滑力越小。桥基和后排抗滑桩距离在 5D 范围内的,桥梁基桩的桩身内力变化不大。二者距离很近时,桥基受力以后排抗滑桩水平变形产生的荷载 E_1 为主,当距离增大时,桥基和后排抗滑桩间滑体由于滑面内摩擦角弱化产生的荷载 E_2 逐渐增大, E_1 逐渐减小。当二者距离超过 5D 时,桥基受到的荷载主要以 E_2 为主。桥基过大的水平变形直接影响铁路行车安全性及乘车舒适性,以滑动面内摩擦角弱化至 35° 时为例,后排抗滑桩距桥基 0.5D 和 5D 比较,合理的前排抗滑桩桩位能减小 23.8% 的桥基水平变形(如图 12(c) 所示)。在滑动面



(a) 基桩最大剪力



(b) 基桩最大弯矩



(c) 桩基桩顶水平位移

图 12 改变后排抗滑桩埋设位置对桥基影响

内摩擦角弱化程度增大的同时,该最佳后排抗滑桩桩位逐渐向桥基靠近。

4 结论

(1) 试验中,后排抗滑桩先于桥梁基础发生破坏,表明后排抗滑桩对桥基起到支护作用。针对本文研究的特定滑坡工点,后排抗滑桩承担了上部的下滑力。桥基设置在抗滑段,滑动面抗力抵抗了大部分后排抗滑桩和桥基之间滑体的下滑力。因此,后排抗滑桩水平变形对桥梁基础产生的推力主要集中在承台附近。

(2) 滑动面处为桥梁基桩桩身弯矩最大位置,除此之外,基桩桩顶存在较大负弯矩。当荷载超过某一限值时,桥梁基桩在滑动面和桩顶处相继产生贯通裂缝。在实际工程设计中,应对此处进行补强。

(3) 对比分析桥梁基桩桩身弯矩的室内模型试验数据和数值计算。结果显示数值计算与室内试验测试数据获得的桩身弯矩规律较一致,表明三维数值计算能较好地反映桥基在抗滑桩支护下的受力特性和变形情况。

(4) 前排抗滑桩埋置位置越接近桥基,其支护作用发挥的越好。不同于前排抗滑桩,为减小后排抗滑桩水平变形对桥基的影响,后排抗滑桩与桥基的距离应保持在一个最佳值,才能够有效减小桥基水平变形。

参考文献:

- [1] 陈宏伟,凌贤长. 强降雨下土质边坡稳定性分析方法[J]. 铁道学报, 2016, 38(1):103-110.
CHEN Hongwei, LING Xianchang. Analysis Method of Soil Slope Stability under Heavy Rainfall [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(1): 103-110.
- [2] 刘秀敏,陈从新,肖国峰,等. 西江特大桥岩锚锚碇的承载特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1):196-202.
LIU Xiumin, CHEN Congxin, XIAO Guofeng, et al. Bearing Behavior of Rock Anchorage System for West River Bridge Construction [J]. Rock & Soil Mechanics, 2013, 34(1):

196-202.

- [3] 王华. 桥基岸坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7):2034-2038.
WANG Hua. Study of Deformation and Failure Mechanism of Bridge Foundation Slope with Physical Simulation Method [J]. Rock & Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2034-2038.
- [4] Sourri A, Abufarsakh M, Voyiadjis G. Study of Static Lateral Behavior of Battered Pile Group Foundation at I-10 Twin Span Bridge using Three-dimensional Finite Element Modeling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53: 962-973.
- [5] Sawwaf M E. Lateral Behavior of Vertical Pile Group Embedded in Stabilized Earth Slope [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(7):1015-1020.
- [6] 詹志峰, 谢强, 赵文. 峡谷区岩质桥基岸坡稳定性系统分析方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(6):31-35.
ZHAN Zhifeng, XIE Qiang, ZHAO Wen. Systematic Analysis Method Research on Rocky Slope Stability of Bridge Foundation in Gorge Area [J]. Journal of Sichuan University, 2003, 35(6): 31-35.
- [7] Ruesta P F, Townsend F C. Evaluation of Laterally Loaded Pile Group at Roosevelt Bridge [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(12): 1153-1161.
- [8] 刘建华, 赵明华, 杨明辉. 高陡岩质边坡上桥梁基桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3):372-377.
LIU Jianhua, ZHAO Minghua, YANG Minghui. Model Tests on Bridge Pile Foundation in High and Steep Rock Slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 372-377.
- [9] 李春鹏. 锚固桩基础在高墩桥梁中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
LI Chunpeng. A Study of Anchored Pile Foundation for High Pier Bridge [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [10] 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.
YIN Pingbao. Design Method and Test Study of Pile-column Bridge Foundation in Steep Slope [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [11] Ismael N F. Lateral Load Tests on Bored Piles and Pile Groups in Sand [C]//International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Boston: September 24-27, 2007: 1-11.

(编辑:刘会娟 张红英)