

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911032

大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究

向俐蓉, 陈伟志, 郭在旭, 叶 丹, 姜 雷

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 在复杂艰险山区修建无砟轨道路基时, 现有常规抗滑桩或桩板结构等均难以同时解决大型滑坡区潜在滑移和沉降控制问题。为适应无砟轨道路基通过大型滑坡区的需要, 创新设计了抗滑桩-桩板结构, 并结合贵阳至广州高速铁路建设, 开展了大型滑坡抗滑桩-桩板结构现场监测试验。结果表明: 抗滑桩和桩板结构基桩的最大侧向位移均位于桩顶, 沿深度方向侧向位移先缓慢衰减再加速衰减; 滑面附近侧向约束作用的差异, 往往会导致桩身侧向位移发生突变; 抗滑桩和基桩的桩身弯矩均呈先增大至峰值点再减小的趋势, 沿桩深方向具有单峰曲线变化特征; 雨季降水作用导致桩身弯矩增加, 旱季蒸发作用导致桩身弯矩减小; 结构系统中抗滑桩充分发挥了承担滑坡推力控制滑体稳定的作用, 基桩则主要用于承担竖向荷载控制路基沉降, 承担的滑坡推力较小。抗滑桩-桩板结构可作为滑坡区无砟轨道路基通过的加固型式, 对今后类似复杂艰险山区高速铁路修建具有重要的参考价值。

关键词: 无砟轨道; 大型滑坡; 抗滑桩; 桩板结构; 受力变形

中图分类号: U213.1⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0125-07

A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide

XIANG Lirong, CHEN Weizhi, GUO Zaixu, YE Dan, JIANG Lei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: When the ballastless track subgrade is constructed in complex and dangerous mountainous areas, it is difficult to solve the potential slip constraint of landslides and settlement control of subgrade by using the existing conventional anti-slide piles or pile-plate structures. To meet the needs of the ballastless track subgrade passing through large landslides, an innovative anti-slide pile and pile-plate structure is designed, and combined with the construction of the Guiguang high-speed railway, the field monitoring tests of the combination structure in large landslides are carried out. The results show that the maximum lateral displacement of both the anti-slide pile and pile-plate structure is located at the top of piles, meanwhile, the lateral displacement decreases with depth. The difference in lateral constraint of the slip surface will cause sudden changes in the lateral displacement of the pile body. The bending moments of anti-slide piles and foundation piles first increase to the peak point and then decrease with the depth, which can be described as a unimodal curve along the pile depth. The bending moments of piles increase in the rainy season, but decrease in the dry season. The anti-slide pile of the combination structure system can be used to control the stability of landslides, and the pile-plate structure is mostly used to control the settlement of the ballastless track subgrade. Therefore, the combination structure can be used as a reinforcement type of ballastless track subgrade in landslides.

Keywords: ballastless track; large landslide; anti-slide pile; pile-plate structure; deformation

收稿日期: 2019-11-14; 修订日期: 2020-10-20

基金项目: 四川省科技计划项目资助(2019YFG0460)

第一作者: 向俐蓉(1973-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事高速铁路路基工程设计研究。E-mail: 1098988742@qq.com

通讯作者: 陈伟志(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事特殊岩土及特种路基结构研究。E-mail: chenweizhi55@163.com

随着我国高速铁路建设的快速发展,铁路向复杂艰险山区延伸,这给高标准严要求的高铁建设带来了新的难题^[1-4],特别是西南地区,广泛分布不良地质体(滑坡、岩堆等)。高铁选线时难以彻底绕避山区不良地质体,当采用路基通过时,需保证满足路基稳定和变形控制要求。目前国内外路基沉降控制方法包括挖除换填、冲击碾压、堆载预压、强夯、复合地基、桩网结构、桩板结构等^[5-11],如付铭川等^[6]采用袖阀管注浆法有效控制了过渡段超限沉降,李彬等^[7]通过挖除换填消除了弥勒有轨电车路基工后沉降,韩竹青^[8]采用水泥土搅拌桩、预应力管桩以及塑料排水板处理了某高速铁路动车段淤泥质土地基,时兴隆等^[9-10]认为强夯地基处理可以有效控制高速铁路黄土地基沉降,陈胜^[11]以可靠度理论为基础研究了高速铁路地基正常使用的极限状态设计方法。

桩板结构是控制路基沉降的有效方法,广泛应用于软土等沉降难以控制的高速铁路地段。在国外,桩板结构最早应用于芬兰从 Turku 到 Toijala 的重载铁路,该线路通过大片沼泽地,采用了总长 400 m 的桩板结构路基来控制沉降^[12];荷兰至比利时高速铁路 HLS-S,修建了一段 500 m 的“无沉降桩板结构”通过软弱土地基,很好地满足了运行要求^[12];德国纽伦堡—英戈尔斯塔特线北段地基土为极易膨胀的黏土,且地下水位较高,为了达到运行速度 300 km/h 的要求,修建了一段长 3 443 m 的桩板结构^[12]。

我国最早应用桩板结构的工程实例是遂渝高铁无砟轨道桩板结构试验段^[12];京津城际高速铁路存在深厚层松软土地基,致使路基工后沉降过大,设计采用了桩板结构加固^[13];武广客运专线也采用了桩板结构路基来满足无砟轨道的沉降控制要求^[14];在郑西客运专线,对于深度超过 20 m 的深厚湿陷性黄土地基,普通复合地基难以满足要求,苏谦等^[15]以桩板结构有效处理了深厚黄土地基的湿陷性问题。目前,极少有关无砟轨道路基通过滑坡的工程案例,若要在滑坡、岩堆上修建高速铁路无砟路基,需要同时满足稳定和沉降控制要求。设计若采用桩板结构控制滑坡地基沉降,其存在的问题在于桩板结构承担的滑坡推力非常有限,此时抗滑桩则可较好弥补其不足^[16],但二者协同受力机制尚不清楚。

为揭示抗滑桩-桩板结构在滑坡的协调受力机制,本文结合贵阳至广州高速铁路建设^[17],开展了平寨滑坡抗滑桩-桩板结构现场监测试验研究。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

贵阳至广州高速铁路 DK51+902—DK52+110 段为滑坡地段,位于麻芝铺二号隧道与平寨隧道之间(该滑坡以下称为“平寨滑坡”),滑坡平面如图 1 所示。该工点地形属剥蚀低山地貌,位于扬子准地台滇黔褶皱区黔南拗陷褶皱束的东北部及江南地轴雪峰迭隆起的西南边缘。大地构造格局呈 EW 向、NE 向展布,主体构造为摆郎背斜,场地位于摆郎背斜北侧边缘,近东西向,断层较为密集。

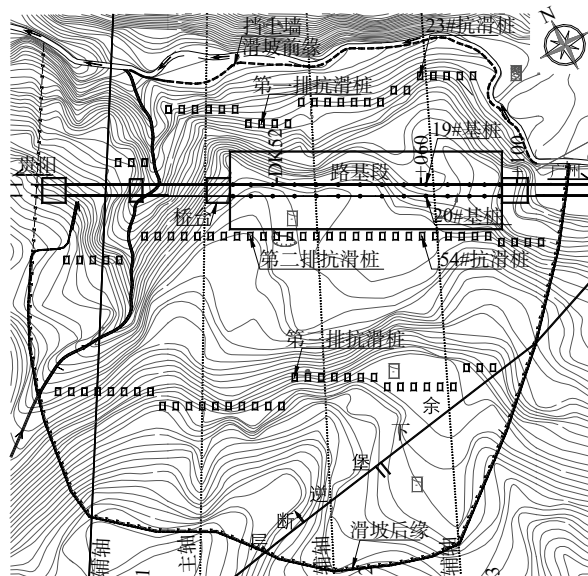


图 1 滑坡平面及工程措施

Fig. 1 Landslide plane and engineering measures

平寨滑坡后缘有余下堡逆断层通过,并与后缘线小角度相交、与线路呈斜交(约 40°),断层走向 N80°E,倾向 NW,倾角约 70°,该断层在地表迹象不明显。滑坡岩层产状主要在 N30°~60°W/18°~30°NE 之间变化,地下水主要为第四系孔隙潜水及基岩裂隙水,地下水化学类型为 HCO₃·Cl—Ca·Mg 型及 HCO₃·Cl—Na·Ca 型,水质对混凝土结构具有酸性侵蚀,侵蚀等级为 H1。

平寨滑坡主轴方向长约 220 m,前缘宽约 190 m。滑坡前缘靠近冲沟,略微向前鼓出。中下部为堆积层滑坡,滑体物质成分主要为块石土,后部为顺层基岩滑坡,滑体物质成分主要为基岩岩块,总厚度 6~25 m。粗略计算滑坡体积约 4.8×10⁵ m³,根据《铁路工程不良地质勘察规程》(TB 10027—2012)^[18]判定属于大型滑坡。

滑坡体内岩性以石英砂岩为主,滑坡后缘外有区

域性大断层通过,受其影响,岩体完整性较差,宽张节理裂隙发育,且岩层倾向山外,石英砂岩岩质坚硬,所夹页岩质软,石英砂岩发生风化剥落、崩塌,在斜坡上形成经短距离搬运堆积下来的坡崩积体,物质成分以石英砂块石及粉质黏土为主。在漫长的地质年代中,斜坡上方坡面坡度逐渐趋近自然休止角,坡残积体厚度也逐渐增厚。后期由于表水长期下渗,形成一定的软弱面,滑坡前缘长期受沟水冲刷形成临空面,最终使得早期形成的坡崩积体向下推移滑动;滑动后的坡体造成后缘形成高陡边坡,使后缘边坡局部蠕变及滑移,发生基岩顺层滑动。故该滑坡属一堆积体厚层、多期、多级次的大型顺层牵引式滑坡,前部为堆积层滑坡,后部为基岩顺层滑坡。

根据现场地质调查及钻孔勘察可知,平寨滑坡体天然容重为 22 kN/m^3 ,饱和容重为 23 kN/m^3 ,黏聚力为 0 kPa ,内摩擦角 45° 。岩层地基系数为 $140\,000 \text{ kN/m}^3$,横向容许承载力为 $1\,400 \text{ kPa}$ 。

1.2 工程措施

勘察期间滑坡体表面未见明显变形,整体处于基本稳定状态。线路以低路堤或浅路堑通过平寨古滑坡中下部,全长 208 m ,见图 1。路堑施工开挖减载形成临空面以及暴雨季节地表水的大量入渗均有可能引起滑坡复活或局部失稳坍塌,对工程产生安全威胁。

为满足无砟轨道运营要求,同时避免滑坡滑动引发地质灾害,经比选确定该段路基采用抗滑桩-桩板结构,代表性断面如图 2 所示。

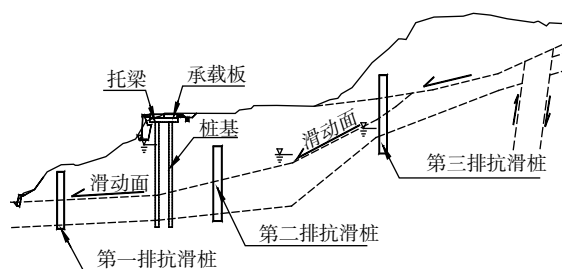


图 2 滑坡辅助 2 断面

Fig. 2 Auxiliary shaft 2 section in the landslide

(1) 抗滑桩

如图 1 所示,线路左侧设第一排抗滑桩共 27 根,桩截面为 $1.50 \text{ m} \times 2.25 \text{ m} \sim 1.50 \text{ m} \times 2.50 \text{ m}$,桩间距 5.5 m ,桩长 $14 \sim 16 \text{ m}$;线路右侧设第二排抗滑桩共 32 根,桩截面为 $1.50 \text{ m} \times 2.50 \text{ m} \sim 2.00 \text{ m} \times 3.25 \text{ m}$,桩间距为 5.5 m ,桩长 $15 \sim 24 \text{ m}$;线路右侧还设了第三排抗滑桩共 34 根,桩截面为 $1.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \sim 2.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$,桩间距为

$5.0 \sim 5.5 \text{ m}$,桩长 $13 \sim 25 \text{ m}$ 。

(2) 桩板结构

路基段落设双线路基非埋式桩板结构(由基桩、托梁及承载板组成),长 114.22 m 。每片托梁下设置 2 根直径为 1.25 m 的钻孔灌注桩,桩端嵌入持力层石英砂岩、砂岩、白云岩夹页岩完整岩层内不小于 1.5 m 。

1.3 抗滑桩-桩板结构协调受力机制

已有文献通过数值模拟研究了抗滑桩-桩板结构协调受力机制^[17]。结果表明:若滑坡体未设置抗滑桩,桩板结构基桩承担所有滑坡推力,桩顶位移大,难以满足无砟铁路设计要求。当滑坡体内设置抗滑桩后,再设计桩板结构路基,桩板结构基桩承担的滑坡推力及桩顶水平位移很小。同时,桩板结构若设置在抗滑桩后面(以下简称“工况 1”),应尽量靠近抗滑桩,以充分利用抗滑桩提供的水平抗力,减小基桩侧向受力和位移;若桩板结构设置在抗滑桩前面(以下简称“工况 2”),应尽量远离抗滑桩,靠近滑坡抗滑段,以充分利用抗滑段水平抗力,减小基桩侧向受力和位移。对于滑坡体剩余下滑力同步增大的工况,工况 2 桩板结构基桩承担的滑坡推力及其产生的水平位移小于工况 1 桩板结构,可见,抗滑桩桩前设置桩板结构更合理,安全性能更高。

另一方面,由于滑坡体内桩板结构基桩不可避免受到一定的滑坡推力作用,且基桩最大弯矩在滑面附近,最大位移在桩顶。故在结构整体设计时,应适当考虑滑坡推力对桩板结构的影响;托梁应重点加强基桩和托梁连接处的设计,基桩应适当加强抗剪、抗弯设计。

2 现场监测试验

2.1 监测方案

试验监测断面选择在 DK52+060,该断面填方高度 4.62 m ,平面位置如图 1 所示,断面见图 3。监测对象包括桩板结构基桩 19#与 20#,桩板结构前方(山脚侧)的 23#抗滑桩和桩板结构后方(靠山侧)的 54#抗滑桩。钢筋计、测斜管的布设方案见图 3。

现场监测内容主要包括:

(1) 监测施工期及工后桩板结构基桩及抗滑桩的侧向变形,即在桩内布设测斜管,测斜管将跟随桩一起变形,通过测斜仪测出施工期及工后桩的侧向变形。

(2) 监测施工期及工后桩板结构基桩及抗滑桩的主筋内力,即采用钢筋计测试桩迎土面和背土面主筋所受的力。

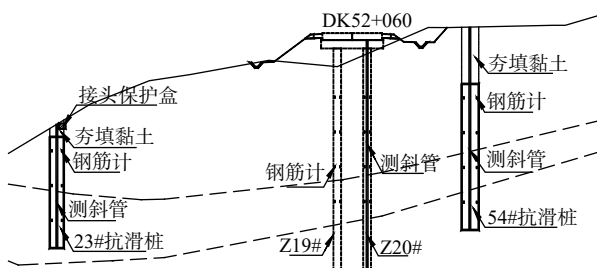


图3 现场测试断面
Fig. 3 Field test section

2.2 现场实施

(1) 抗滑桩: 在绑扎钢筋笼时, 将对应主筋在测点位置处截断, 采用焊接方式将钢筋计接入主筋对应位置; 测斜管绑扎在钢筋笼承受滑坡推力的面上, 然后浇筑混凝土。

(2) 桩板结构桩基: 桩板结构钢筋笼采用预制式, 由于桩长较长, 预制时要把钢筋笼分段, 再通过吊装的方式将其组装完整。同理, 测斜管与钢筋计也分段安装。

3 试验结果分析与讨论

3.1 桩基侧向位移

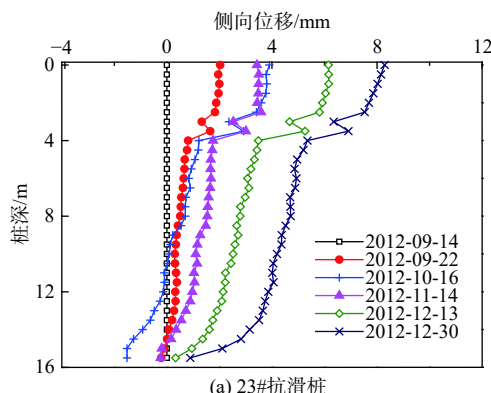
采用测斜仪观测可得桩板结构基桩和抗滑桩在滑坡推力及其他荷载作用下产生的水平位移情况。

本文设定桩顶为桩深0点, 图4为不同时期抗滑桩侧向位移沿深度分布规律。由图4(a)可知, 对于23#抗滑桩(桩长16 m, 矩形桩截面1.50 m×2.25 m), 在桩深0~4.0 m范围内侧向位移较大, 侧向位移总体上由桩顶沿桩深呈衰减变化, 大部分侧向位移指向滑坡前缘; 不同时期抗滑桩侧向位移的最大值均位于桩顶, 截至2012年12月30日, 桩顶最大侧向位移为8.29 mm。

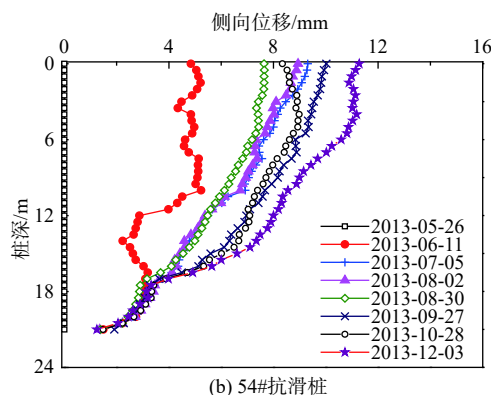
由图4(b)可知, 对于54#抗滑桩(桩长21 m, 矩形桩截面1.75 m×2.75 m), 在距桩顶6.0 m范围内侧向位移较大, 且不同时期侧向位移沿桩深的衰减幅度较小, 从6.0 m深以下侧向位移急剧衰减, 总体上侧向位移指向滑坡前缘, 抗滑桩侧向位移的最大值也均位于桩顶, 截至2012年12月30日, 桩顶最大侧向位移为11.67 mm。

图5为桩板结构基桩侧向位移沿深度的分布。需要说明的是20#基桩(桩长32 m, 钻孔桩桩径1.25 m)测斜管底部深度12 m范围内存在堵塞, 导致测斜仪无法触底, 故测试数据按剩余长度(即21 m)测试。由图5可知, 在桩深0~7 m范围内侧向位移较大且缓慢衰减, 在桩深7~15 m范围内侧向位移衰减加快, 而后在桩深15~21 m范围, 侧向位移急剧衰减并越过零点

指向滑坡后缘; 不同时期基桩侧向位移的最大值均位于桩顶, 截至2014年1月5日, 桩顶最大侧向位移为4.52 mm。



(a) 23#抗滑桩



(b) 54#抗滑桩

图4 抗滑桩侧向位移

Fig. 4 Lateral displacement of anti-slide pile

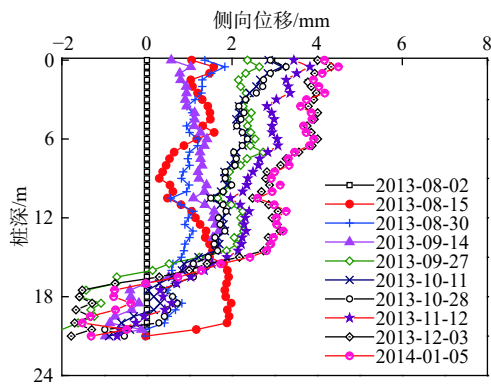


图5 20#基桩侧向位移

Fig. 5 Lateral displacement of the 20# foundation pile

3.2 桩基桩身弯矩

本文桩身弯矩以逆时针方向为正值。图6为抗滑桩桩身弯矩分布。由图6可以看出, 对于不同时期, 23#和54#抗滑桩桩身弯矩沿桩深方向均呈单峰曲线变化, 即桩身弯矩沿桩身方向呈先增大至最大值(峰值点)、而后减小的趋势; 其中23#和54#抗滑桩桩身

弯矩峰值点最大值分别为 $1\,268\text{ kN}\cdot\text{m}$ (2012 年 9 月 14 日)、 $1\,101\text{ kN}\cdot\text{m}$ (2013 年 8 月 15 日)。

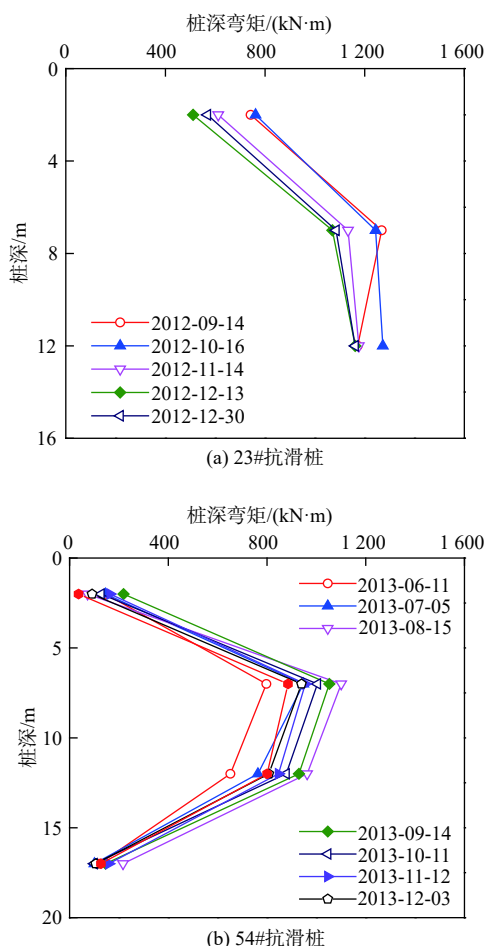


图 6 抗滑桩桩身弯矩分布

Fig. 6 Distribution of the bending moment of anti-slide pile body

图 7 为基桩桩身弯矩分布。由图 7 可以看出, 对于不同时期, 19#和 20#基桩桩身弯矩沿桩深方向也均呈单峰曲线变化, 即桩身弯矩从桩顶往下呈逐渐先增大至最大值 (即峰值点)、而后减小的趋势; 其中在 2013 年 8 月 15 日 19#和 20#基桩桩身弯矩峰值点均达到最大值, 分别为 $501, 930\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。由图 7 还可知, 对于 19#、20#抗滑桩桩身弯矩峰值点深度均为 17.0 m 。

3.3 讨论

根据现场测试结果本文对抗滑桩和基桩受力变形特征进行讨论。

(1) 桩身侧向位移突变现象

结合图 4 和图 5 可以发现, 无论是抗滑桩还是基桩, 在滑面附近的侧向位移极易发生突变, 其突变特征往往是指向滑坡前缘侧向位移突然转而指向滑坡后缘。通过分析认为, 滑面以上桩身由于滑坡推力作

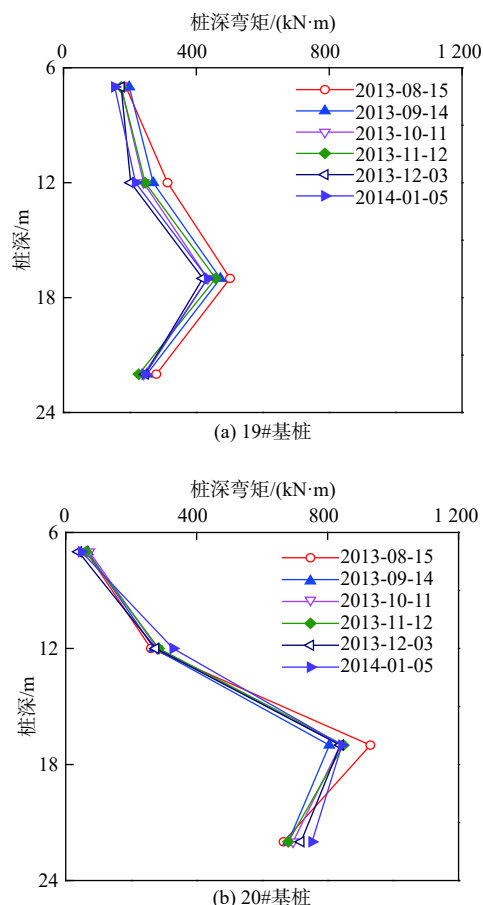


图 7 基桩桩身弯矩分布

Fig. 7 Distribution of bending moment of the foundation pile

用及较弱的土层侧向约束作用^[19-20], 导致桩身在推力作用下容易产生柔性变形, 滑面以下桩身大多嵌入稳定岩层, 侧向约束作用显著加强, 而桩身不易继续发生柔性变形, 从而导致桩身侧向位移发生“交错突变”现象。

(2) 桩基承担的滑坡推力

对比图 6(a)(b) 可以发现, 同一深度处, 23#抗滑桩桩身弯矩大于 54#抗滑桩, 说明 23#抗滑桩承受更大的滑坡推力。然而, 需要说明的是 23#抗滑桩 (即第一排抗滑桩) 主要用于抵抗滑坡下部推力, 防止滑坡下部滑移, 从而影响滑坡整体稳定性, 也就是说该抗滑桩主要用于承担滑坡推力并控制滑坡稳定性; 而 54#抗滑桩 (即第二排抗滑桩) 不仅要抵抗上方滑坡推力, 控制滑坡稳定, 还得防止桩体侧向变形过大, 从而影响桩板结构正常使用, 换言之, 该抗滑桩不仅用于承担滑坡推力还需保证自身侧向变形不宜过大。

对比图 7(a)(b) 也可以发现, 同一深度处, 20#基桩桩身弯矩大于 19#基桩, 此结果说明 20#基桩承受更大的滑坡推力, 19#基桩弯矩产生主要由于两桩之间

的剩余滑坡推力以及上部竖向荷载造成的。

而从图6、图7对比可知,抗滑桩和基桩承担的滑坡推力由小到大的顺序为:19#基桩(靠近滑坡前缘基桩)、20#基桩(靠近滑坡后缘基桩)、54#抗滑桩(第二排抗滑桩)、23#抗滑桩(第一排抗滑桩)。

(3)气候对桩基受力的影响

由图6、图7还可看出,同一深度处,桩身弯矩的最大值往往出现在8—9月份,侧向位移也出现了类似规律。分析认为,上述现象与当地的气候变化有关,即5—9月是当地的雨季期,降水量较大,水分经滑体入渗到达滑动面。在水的软化作用下,滑动面岩土体强度参数发生了一定衰减,导致滑坡推力增大,桩基承载(侧向推力)负担增加,经过一定时间的累积,桩身同一深度的弯矩也就累积至最大值;而10月至次年的4月为当地旱季,降水量较小,期间土层水分蒸发,蒸发作用也带动减小了滑动面的含水率,岩土体强度又会略有增长,此时滑坡推力作用将减小,从而降低桩基承载负担,这也就导致了桩身弯矩出现减小的现象。

4 结论

(1)无论是抗滑桩还是桩板结构基桩,最大侧向位移均位于桩顶且浅层桩身侧向位移均较大,但沿深度方向衰减较缓慢,随着深度增加,桩身侧向位移衰减速度加快;滑面附近侧向约束作用的差异往往会导致桩身侧向位移发生突变。

(2)对于抗滑桩和桩板结构基桩,桩身弯矩沿桩深方向均呈单峰曲线变化,即桩身弯矩沿桩身方向先增大至峰值点,而后逐渐减小至桩底;雨季期的降水作用会导致桩身弯矩增加,旱季期的蒸发作用会导致桩身弯矩减小。

(3)抗滑桩和基桩承担的滑坡推力由小到大的顺序为:19#基桩(靠近滑坡前缘基桩)、20#基桩(靠近滑坡后缘基桩)、54#抗滑桩(第二排抗滑桩)、23#抗滑桩(第一排抗滑桩),抗滑桩在组合结构中有效发挥了承担大部分滑坡推力、控制滑体下滑的作用,而桩板结构基桩则实现了承受上部竖向荷载、控制路基沉降的目标。

(4)现场实测结果表明:抗滑桩-桩板结构可作为滑坡无砟轨道路基通过的结构加固型式,对今后类似复杂艰险山区,特别是川藏铁路修建都具有重要的参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015. [State Railway Administration. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015 (in Chinese)]
- [2] 陈伟志, 李安洪, 蒋关鲁, 等. 铁路路基下膨胀土长短微型桩抗隆起研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 413—423. [CHEN Weizhi, LI Anhong, JIANG Guanlu, et al. Study on resisting upheaval of long-short micropiles of expansive soils under railway subgrade[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 413—423. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈伟志, 蒋关鲁, 赵慧爽, 等. 铁路路基下膨胀土地基浸水响应现场试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1507—1514. [CHEN Weizhi, JIANG Guanlu, ZHAO Huishuang, et al. Field tests on soaking response of expansive soil foundation under railway subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1507—1514. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈伟志, 李安洪, 李楚根, 等. 无砟轨道粗颗粒盐渍土路基设计方法[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 58—63. [CHEN Weizhi, LI Anhong, LI Chugen, et al. Design methods of coarse grained saline soil subgrade in ballastless track[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 58—63. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 崔国东. 高速铁路路基变形控制的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2016. [CUI Guodong. Research on deformation control about subgrade of high speed railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 付铭川, 陈伟志, 黄百川, 等. 基于袖阀管注浆法的铁路路基过渡段沉降超限整治[J]. 路基工程, 2019(5): 213—218. [FU Mingchuan, CHEN Weizhi, HUANG Baichuan, et al. Over-limit settlement treatment of railway subgrade transition section based on sleeve-valve-pipe grouting method[J]. Subgrade Engineering, 2019(5): 213—218. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李彬, 骆飞. 浅谈现代有轨电车路基沉降控制方法[J]. 广州建筑, 2019, 47(3): 32—35. [LI Bin, LUO Fei. Brief analysis on the control method of modern tramway subgrade settlement[J]. Guangzhou Architecture, 2019, 47(3): 32—35. (in Chinese with English abstract)]

- [8] 韩竹青. 某高速铁路动车段地基处理沉降研究分析[J]. 铁道勘察, 2019, 45(1): 81 - 85. [HAN Zhuqing. Comparison of foundation treatments of a certain high speed railway EMU depot based on settlement analysis[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(1): 81 - 85. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 时兴隆. 黄土地区某高速铁路路基沉降控制技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018. [SHI Xinglong. Research on the settlement control technology of a high speed railway subgrade in loess area[D]. Lanzhou : Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 许兴旺. 湿陷性黄土地区高速铁路路基地基沉降控制技术[J]. 铁道建筑, 2017, 57(4): 83 - 86. [XU Xingwang. Technology to control subsidence of high speed railway subgrade foundation in collapsible loess region[J]. Railway Engineering, 2017, 57(4): 83 - 86. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈胜. 高速铁路桩网复合地基正常使用极限状态可靠度研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018. [CHEN Sheng. Research on reliability of pile-net composite foundation for serviceability limit state in high-speed railway[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 詹永祥. 高速铁路无砟轨道桩板结构路基设计理论及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007. [ZHAN Yongxiang. Study on design method of pile-plank embankment of ballastless track in high-speed railway by tests[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 荆志东. 深厚软基新型桩板结构路基结构设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010. [JING Zhidong. Research on new embankment construction of pile-plate in deep soft-clay region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 詹永祥, 蒋关鲁, 牛国辉, 等. 武广线高边坡陡坡地段桩板结构路基的设计理论探讨[J]. 铁道工程学报, 2007(增刊1): 94 - 96. [ZHAN Yongxiang, JIANG Guanlu, NIU Guohui, et al. Theoretical exploration on design of pile-plate structure subgrade in steep slope section of high side slope on Wuchang-Guangzhou Railway passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(Sup1): 94 - 96. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 苏谦, 李安洪, 丁兆锋, 等. 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基桩板结构设计分析[J]. 铁道建筑技术, 2007(2): 1 - 4. [SU Qian, LI Anhong, DING Zhaofeng, et al. Design and analysis on pile-board structure of deep collapsible loess ground along Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated railway line[J]. Railway Construction Technology, 2007(2): 1 - 4. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李安洪, 周德培, 冯君. 顺层岩质路堑边坡破坏模式及设计对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 2915 - 2921. [LI Aonghong, ZHOU Depei, FENG Jun. Failure modes of bedding rock cutting slope and design countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1): 2915 - 2921. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 尹伟, 杨明, 姚裕春, 等. 平寨滑坡区桩板结构路基稳定性分析及优化设计[J]. 铁道建筑, 2013, 43(3): 101 - 103. [YIN Wei, YANG Ming, YAO Yuchun, et al. Stability analysis and optimization design of pile-slab structure subgrade in Pingzhai landslide area[J]. Railway Engineering, 2013, 43(3): 101 - 103. (in Chinese)]
- [18] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程不良地质勘察规程: TB 10027—2012[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012. [Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for unfavorable geological condition investigation of railway engineering: TB 10027—2012[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese)]
- [19] 张玲, 朱幸仁, 欧强. 考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 72 - 80. [ZHANG Ling, ZHU Xingren, OU Qiang. Analysis of forced deformation of double row supportpiles considering pile interaction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 72 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王鳌杰. 预应力锚索抗滑桩支挡结构在路基边坡防护中的应用研究[J]. 公路工程, 2018, 43(1): 145 - 148. [WANG Aojie. Application of stabilizing piles with pre-stressed anchor cables retaining structure in subgrade slope protection[J]. Highway Engineering, 2018, 43(1): 145 - 148. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华