

工程地质学报 Journal of Engineering Geology ISSN 1004-9665,CN 11-3249/P

《工程地质学报》网络首发论文

题目:	舟曲江顶崖滑坡抗滑桩桩身响应监测分析
作者:	周勇,王仲凯,杨校辉
DOI:	10.13544/j.cnki.jeg.2020-467
收稿日期:	2020-08-27
网络首发日期:	2021-01-18
引用格式:	周勇, 王仲凯, 杨校辉. 舟曲江顶崖滑坡抗滑桩桩身响应监测分析. 工程地
	质学报.https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-467



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编 辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

舟曲江顶崖滑坡抗滑桩桩身响应监测分析

周 勇 123 。王仲凯 123 。杨校辉 123

(① 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室 兰州 730050,中国)
(② 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心 兰州 730050,中国)
(③ 兰州理工大学 土木工程学院 兰州 730050,中国)

摘 要 目前复杂地质条件滑坡抗滑桩工作状态下的受力变形研究仍不够充分。为了研究江顶崖堆积体滑坡抗滑桩的桩身响应,在抗滑桩内布置弦 式钢筋应力计和埋入式应变计,对抗滑桩进行长期桩身应力应变监测,基于监测数据建立计算模型计算抗滑桩全桩弯矩,用有限元软件 PLAXIS 3D 建立模型对抗滑桩进行研究。研究结果表明:监测到的单根钢筋最大应力为 112.5 MPa,远小于设计值,弦式应变计最大应变为 34µɛ;建立单筋矩 形截面受弯构件计算模型,给出根据监测数据计算抗滑桩弯矩的方法;有限元软件计算所得弯矩小于设计弯矩,两者变化趋势相同:抗滑桩目前处 于安全状态,滑坡治理效果显著。

关键词 滑坡;抗滑桩;应力应变;现场监测 中图分类号: P642.22 文献标识码: A doi:10.13544/j.cnki.jeg.2020-467

MONITORING ANALYSIS OF ANTI-SLIDE PILES FOR JIANGDINGYA LANDSLIDE IN ZHOUQU

ZHOU Yong¹²³, WANG Zhongkai¹²³, YANG Xiaohui¹²³

(1) Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2) Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

(③ School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: At present, the research on the internal force and deformation of landslide anti-slide piles under complex geological conditions is still insufficient. In order to study the response of the anti-slide piles for the Jiangdingya talus landslide, we installed string wire stress gauges and embedded strain gauges in the anti-slide piles to monitor the stress and strain. We established a new calculation model based on monitoring dates and mechanical calculations. We established a model of anti-slide piles on PLAXIS 3D software for further study. The results show that the maximum stress of a single steel bar monitored is 112.5MPa, which is much smaller than the design value. The calculation model based on mechanical is reliable, it can be used on actual project. The bending moment calculated by the finite element software is much smaller than the design value, but their change trends are consistent, which can prove that the experimental dates are authentic and the model is reliable. The anti-slide piles are currently in a safe state, and the treatment effect of Jiangdingya talus landslide is remarkable.

Key words Landslide; Anti-slide pile; Stress-strain; Field monitoring

0 引 言

高边坡泥石流滑坡等地质灾害治理问题因其复 杂性给我国工程地质工作者带来了巨大的挑战。抗 滑桩是滑坡治理中主要的治理措施之一,已在边坡 工程中得到广泛应用。抗滑桩的受力变形是目前国 内外学者研究的重要课题之一。由于滑坡内部土石 分布复杂且易受降雨等因素影响,仅凭地质勘察进 行抗滑桩的设计施工,不能完全地掌握滑坡内部的 真实力学作用效应,因此,需要在施工后一定时间 段内监测抗滑桩的真实受力情况,分析其监测数据,

收稿日期: 2020-08-27; 修回日期: 2020-11-30.

基金项目:国家自然科学基金(资助号: 51568042),教育部长江学者和创新团队发展计划(资助号: IRT_17R51).

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51568042) and Yangtze River Scholars and Innovation Team Development Plan of the Ministry of Education (Grant No. IRT_17R51).

第一作者简介:周勇(1978—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事深基坑开挖支护和边坡加固方面的教学与研究工作.E-mail: gsutzhouy@163.com

为抗滑桩的合理设计提供科学依据,同时,监测结 果也可以检验滑坡防治工程的治理效果(王秀丽等, 2015)。

目前滑坡治理方法研究成果丰富,各种监测技 术不断进步:施斌等(2018)介绍了一种可以获得 地面沉降过程中多场多参量数据,实现全断面精细 化监测的分布式光纤监测技术,但缺乏大量的实际 监测工程为依据。刘永莉等(2012)成功运用 BOTDR 技术监测分析了某滑坡的抗滑桩应变:畅建伟等 (2013) 对深层滑坡体人工挖孔抗滑桩受力进行了 长期监测和研究,但缺乏一定的理论支撑; 冯树荣 (2014)等针对某边坡抗滑桩的受力进行了监测和 三维数值分析,研究了其稳定性:张会远等(2015) 对滑坡进行了长期 GPS 地表位移和抗滑桩应力监测, 建立单筋矩形截面受弯构件模型计算抗滑桩弯矩, 并分析了抗滑桩的工作状态; 王贵华等(2019)基 于桩-锚变形协调原理,考虑到滑坡的滑床为多层复 合的条件,建立多层复合滑床下锚索抗滑桩计算分 析模型,并编写了改进的算法计算程序,进行了模 型改进和程序编写,但缺乏大量的实际监测数据作 为其支撑; 罗勇等(2019)依托保宜高速车峰坪大 型碎石堆积层滑坡治理工程,采用实际位移监测, 并对比 Slide 数值模拟计算加固后边坡的安全系数, 研究了斜坡的稳定状态;李登峰等(2018)分析了 桩截面尺寸对土拱性状的影响,结合力学计算解释 了土共效应中土拱类型和高度变化的原因,但缺乏 实际工程中大量的工程监测数据作为其理论支撑; 张磊等(2019)采用 BOTDR 分布式光纤感测技术 对某滑坡抗滑桩变形进行长期监测分析,在监测数 据的基础上,对抗滑桩内力进行反演分析并与抗滑 桩设计值进行对比,从抗滑桩内力分布状态及外在 环境影响因素对抗滑桩稳定性进行了分析和评价: 胡时友等(2017)进行了抗滑桩加固滑坡体模型试 验三维模拟,分析了滑体位移、应力、桩身位移和 弯矩变化,补充研究了抗滑短桩加固滑坡体的抗滑 机理:韩贺鸣等(2018)采用光纤监测和 PSO-SVM 预测模型对马家沟滑坡深部位移进行了短期预测, 预测结果较好;张静等(2018)采用 SBAS-InSAR 技术提取了盘锦地区地面沉降,完成了沉降速率和 累积沉降量的监测。以上学者从不同方面极大地丰 富了滑坡治理中的理论及实践方法研究,并取得一 定的成果,但是沿抗滑桩深度方向的全桩应力、应 变监测仍相对缺乏,相应的全方位监测数据收集分 析和方法研究有待学者进一步发掘。

本文以舟曲江顶崖滑坡治理工程为背景,采用

弦式钢筋应力计、弦式埋入应变计、数据采集系统 和无线传输系统,对抗滑桩内部钢筋应力与混凝土 应变进行监测,对监测结果进行研究,分析了抗滑 桩的内力与变形及抗滑桩工作状态和影响因素,对 同类抗滑桩工程具有一定的参考价值。

1 工程概况与特点

舟曲县地处青藏高原东缘,西秦岭西翼与岷山山脉交汇地区,属构造侵蚀中高山地貌。舟曲县属北亚热带向北温带的过渡区,降水主要集中在 5~9 月份,春秋两季降水量各占年降水量的 25.1%和 24.7%,夏季平均 219.8mm,占年降水量的 49.2%, 冬季仅为 4.9mm,占降水量的 1.1%。

江顶崖滑坡地处舟曲县南峪乡南峪村,位于白 龙江北岸,紧临白龙江河道,地理坐标为东经 104°25′33″,北纬 33°43′15″。本滑坡抗滑桩治理位 置如图 1 所示位于滑坡下部,工程区斜坡地势总体 向西南方向倾斜,山顶海拔 2052m,坡脚海拔 1241m, 相对高差 811m,地形起伏大,山坡坡度 20~45°。



图 1 滑坡平面图 Fig.1 Planar graph of the landslide

江顶崖滑坡位于斜坡体下部,前缘高程 1241m, 后缘高程 1418m,相对高差 177m,整体上缓下陡, 后部、中部较为平缓,坡度 13 ~ 15 °;下部、前缘 较为陡峭,坡度 20 ~ 25 °,整体平均 20 °,坡面地形 起伏大。滑坡体后部发育滑坡洼地,中部、下部及 前缘裂缝发育。工程区内分布的地层较复杂,岩层 主要由志留系、泥盆系的碎屑岩一灰岩组成,土体 有滑坡堆积碎石土与冲洪积碎石土;工程区地处秦 岭东西褶皱带,构造活动强烈,断层发育;水文地 质条件简单,滑坡体内含有地下水。 江顶崖滑坡体为老滑坡的复活,多年来一直处 于蠕滑变形状态,加之坡体结构破碎,岩土体松散, 在连续强降雨、白龙江河水冲刷、掏蚀等外界诱发 因素共同作用下处于不稳定状态。本次治理采用矩 形抗滑桩,如图 1 所示,抗滑桩位于滑坡体下部, 为避免桩心距过大,难以形成土拱效应,也难发挥 桩前土的抗力,采用桩心距为 5.5m 的单排桩进行支 挡,桩平面尺寸为:4m×3m。抗滑桩共计 39 根,为 人工挖孔桩,长度 40m,伸入滑动面以下约 20m 左 右。背筋根数为 172 根,面筋根数为 30 根,面筋和 背筋均采用 HRB400 级钢筋,保护层厚度 100mm, 面筋间距 155mm,桩混凝土强度等级 C35,桩箍筋 级别 HRB335,间距 400mm。

2 抗滑桩监测方案

在滑坡前缘选取某根抗滑桩进行监测,监测内 容包含弦式钢筋应力计监测抗滑桩钢筋应力和埋入 式应变计监测抗滑桩混凝土的应变。分别在抗滑桩 受拉侧布置钢筋应力计,在抗滑桩受压侧布置钢筋



Fig.2 Arrangement of sensors monitoring on anti-slide pile 应力计和弦式埋入应变计。监测采用的仪器为 JMZX-425HAT 型高性能智能数码弦式钢筋计和 JMZX-215HAT 高性能智能数码弦式埋入应变计,采用 JMZX-32A 型和 JMZX-16A 型数据采集系统,配合数据无线传输系统远程收集数据使用。监测仪器自 2019 年 8 月 30 日开始收集数据,每日于 0:00 和 12:00 收集 2 次监测数据,由无线传输系统传送回收集终端。

监测仪器的布置与特点:抗滑桩桩长 40m,单 根抗滑桩内选取靠山侧中部、靠河侧中部共计 a 和 b 两个平面点位,每个点位内沿深度方向每隔 5m 布 置一个弦式钢筋应力计,共布置 7 个弦式钢筋应力 计,分别在 5m、10m、15m、20m、25m、30m、35m 深处;弦式钢筋计与单根 HRB400 级钢筋牢固焊接, 焊接时采用湿毛巾缠绕浇水降温以防焊接温度过高 烧坏弦式钢筋计。与弦式钢筋计布置方式相似,埋 入式应变计沿抗滑桩深度方向每隔 5m 布置一个, 一个点位布置 7 个弦式埋入应变计,分别在 5m、10m、 15m、20m、25m、30m、35m 深处,弦式埋入应变 计与单根 HRB400 级钢筋扎丝绑扎连接,绑扎过程 中必须用扎丝绑扎在应变计两端较粗部位,避免绑 扎在弦式应变计中部细杆影响监测效果。

3 监测结果分析

江顶崖滑坡治理工程中抗滑桩自施工完成后开 始进行全桩监测,自8月30日开始进行监测,数据 分析时选取每周周五12:00的数据进行整理并分析, 得出江顶崖抗滑桩桩身监测点在监测期间的变化情 况。

3.1 弦式钢筋应力监测分析

抗滑桩监测 a 点位于抗滑桩靠山一侧,由钢筋 应力曲线图 3 可以看出,该点位钢筋单根最大拉应 力在 35m 深处,为 112.5MPa,最大压应力在 10m 深处为 6.3MPa。在监测时间段内单筋受力在-6.3 MPa~112.5MPa 范围,钢筋均未达到弹塑性或塑性 状态,处于弹性工作状态。

a 点位压应力只出现在埋深 10m 处,此深度单 筋压应力周增加值由 8 月 30 日的-0.9MPa/周减小为 9 月 13 日的-4.5MPa/周,在 9 月 20 日此处钢筋既不 受压也不受拉,在此时间之后不再受压,此深度单 根钢筋拉应力周增加值由 9 月 27 日的 2.7MPa/周递 减为 10 月 4 日的 0.1MPa /周并保持 3 周递减为 0.9MPa,在 11 月 8 日之后应力值保持为 9MPa 不再 发生变化。而 15m 深度抗滑桩钢筋在 8 月 30 日之 后 5 周内应力稍有变化,在 10 月 6 日之后保持为 16.2MPa



图 3 a 点钢筋应力曲线 Fig.3 Stress curve of steel bar at point a

不再发生变化。此点位 35m 深单根钢筋拉应力周增 加值逐渐减小,由 10月4日的 4.5MPa/周减小为 11 月 10日的 1.8MPa/周。由 a 点监测数据可以看出抗 滑桩的周应力变化量有一个递减的趋势并逐步趋于 稳定,抗滑桩在抵抗滑坡推力并逐渐达到一个平衡。



Fig.4 Stress curve of steel bar at point b

抗滑桩监测 b 点处于抗滑桩靠河(受压)一侧, 钢筋应力曲线图如图 4 所示(20m 深度的弦式钢筋 应力计在抗滑桩施工中遭到损坏,无法读取数据)。 该点位钢筋单根最大拉应力在 30m 深处为 20.4MPa, 全过程中未出现压应力。钢筋应力在监测时间段内 整体较小,钢筋均未达到弹塑性或塑性,处于弹性 工作状态。

b 点处单根钢筋拉应力周增加值的最大值为 0.8MPa/周,此峰值分别在 8 月 30 日深度 25m 处、9 月 27 日深度 25m 和深度 35m 处达到。此处周平均 应力最大值在 30m 深度处,为 19.3 MPa。10m 深处 的钢筋应力平均值为 3.08 MPa,且钢筋应力平均周 变化量小于 0.03MPa,应力几乎不发生变化。

b 点与 a 点相比在 5m 深度处单根钢筋受拉应力 较小,说明此抗滑桩在 5m 深处由靠山(受拉)一 侧承受较大的应力,抗滑桩作为支挡结构抵抗了很 大部分应力。a位置处平均周应力改变量最大值发生 在 5~10m 深度内, 而 b 位置处平均周应力改变量最 大值发生在 25~30m 深度, 江顶崖滑坡治理还包含 削坡工程,将滑坡上部和东西两侧进行了削坡减载, 使得滑坡下滑力减小, 江顶崖滑坡在治理后经历了 降雨,滑坡表面并无明显积水,但由于岩土体松散 和巨大的降雨量使得大部分土体处于饱水状态,土 体变重,引起下滑力变大。抗滑桩施工完成后,滑 坡推力先作用在抗滑桩靠山(受压)一侧,滑坡岩 土体和桩产生接触,压实滑坡岩土体同时给抗滑桩 施加水平方向推力,逐渐产生变形协调,变形逐渐 变小,滑坡体与抗滑桩共同作用并逐步趋向稳定。 监测阶段钢筋应力出现先增大后趋于稳定的趋势, 是因为江顶崖滑坡是在原有老滑坡基础上产生的新 滑坡,断层多滑带深,滑坡推力作用于桩上,抗滑 桩发挥自身刚度特点抵抗滑坡推力,从而逐渐趋向 于受力平衡。

3.2 弦式埋入应变监测分析

弦式埋入应变计布置于 a 位置处,抗滑桩混凝 土应变曲线如图 5 所示(25m 深度的弦式埋入应变 计在抗滑桩施工中遭到损坏,无法读取数据; 35m 深度的弦式埋入应变计连接线被破坏,仅有 5 组数 据)。



图 5 抗滑桩混凝土应变曲线

Fig.5 Concrete strain curve of the anti-slide pile

由图 5 可以看出,弦式应变计的监测数据规律 性较差,尤其在 15m 深度处。其中 8 月 30 日和 11 月 18 日的数据为负值与其他数据不符,应该舍弃。 在 10m 深度以上均为负值,表示此区域此时受压, 最大压应变为-18.35με, 15m 以下以及 30m 以上均 为正值 (不包含缺失部分),说明此深度范围受拉, 最大拉应变为 34με。混凝土应变的变化区间为 -18.35~34με,变化范围较小,均小于设计值。

混凝土应变在监测时间段内显著变大,在深度

10~25m 范围呈现较大峰形。这是因为抗滑桩承受滑 坡体推力产生微小变形。由于此次遭到不可抗力因 素(实验中个别传感器损坏),数据并不十分完整, 不能完全体现滑坡推力作用下的抗滑桩的响应,仍 需要持续监测以获取更多长期优质监测数据。

4 抗滑桩弯矩计算

4.1 弦式钢筋计应力计算

弦式钢筋计生产厂家提供的应力计算公式以及 温度改变对应力计算的修正公式分别如下:

$$F_{0} = K \left[K_{0} \left(f_{i}^{2} - f_{0}^{2} \right) \right]$$
(1)

$$F_{1} = K \left[K_{0} \left(f_{i}^{2} - f_{0}^{2} \right) \cdot \left(T - T_{0} \right) \left(M - M_{0} \right) \right]$$
(2)

式中: F_0 为应力计的应力值 (kN); F_1 为修正后的 应力值 (kN); K 为弦式钢筋应力计的标定系数; $K_0=0.00071186$; f_0 为零点频率 (Hz); f_i 为测量频率 (Hz); T 为测量温度; T_0 为基准温度; M 为混凝土 温度系数; M_0 为温度系数初始值 ($M_0=12.2$)。

4.2 弯矩计算模型

抗滑桩弯矩由单筋矩形截面受弯构件模型(如 图 6)计算,采用此计算模型要满足的条件如下:

(1) 满足正截面承载力计算的基本假定:

 构件正截面在弯曲变形后依然保持平面,即 截面中的应变按线性规律分布;

2)不考虑截面受拉区混凝土承受拉力,即拉力 全部由受拉钢筋承担;

3)当混凝土的压应变 $\epsilon_{e} \leq \epsilon_{0}$ 时,应力与应变关系 曲线为抛物线; $\epsilon_{e} > \epsilon_{0}$ 时,应力与应变关系曲线为水 平线,其极限压应变取 ϵ_{eu} ,相应的最大压应力为 σ_{0} 。

4) 钢筋应力 σ_s , 取等于钢筋应变 ε_s 与其弹性模量 E_s 的乘积, 但不得大于其设计强度 f_{y^o} 。



图 6 单筋矩形正截面受弯构件模型 Fig.6 Single-side reinforced rectangular flexural member

simplified mode

(2)为使所设计的截面保持在适筋梁的范围内, 应满足:

$$\xi \leq \xi_b \tag{3}$$

或

$$x \le x_{\scriptscriptstyle b} = \xi_{\scriptscriptstyle b} h_{\scriptscriptstyle 0} \tag{4}$$

$$\rho \ge \rho_{\min} \tag{5}$$

(3) 不考虑混凝土和钢筋应力发展阶段性;

(4) 不考虑受压侧钢筋的应力。

式中: ϵ_e 为受压区混凝土压应变; ϵ_0 为对应于混凝土 压应力刚达到混凝土轴心抗压强度设计值时的混凝 土压应变; ϵ_{cu} 为正截面处于非均匀受压时的混凝土 极限压应变; ξ 为相对受压区高度; ξ_b 为相对界限受 压区高度; ρ 为配筋率; ρ_{min} 为最小配筋率。

将由弦式钢筋应力计拉力计算式所得单根钢筋 应力值 *F*₁ 与受拉侧钢筋的设计根数 *n* 相乘即可得到 受拉侧钢筋总应力 *F*。图 6 中,由力学平衡条件可 得:

$$\alpha_{1}f_{c}bx = F \tag{6}$$

 $x = \frac{nF_1}{\alpha_1 f_c b} \tag{7}$

根据力矩平衡,可以求得深度 x 处的弯矩为:

$$M = nF_1(h_0 - \frac{x}{2})$$
 (8)



图 7 基于监测数据计算的抗滑桩弯矩 Fig.7 Bending moment of anti-slide pile based on monitoring data

式中: *F* 为受拉端钢筋总拉力 (kN); *f_c* 为混凝土轴 心抗压设计强度 (kN/m); *α_l* 为混凝土受压区等效 矩形应力系数; *b* 为截面宽度 (m); *x* 为应力图形换 算成矩形后的受压区高度 (m); *M* 为受弯构件弯矩 $(kN m)_{\circ}$

经上述模型方法可将监测数据带入公式(7)和 (8) 求得不同深度处的弯矩,并可绘制弯矩随深度 变化曲线如图7所示。

从图 7 可知,抗滑桩监测数据计算所得到的最 大弯矩值为 11 月 15 日的 3618.8 kN m, 远小于设计 弯矩最大值, 抗滑桩还具备很大的安全储备空间。 抗滑桩设计的最大弯矩出现在 27~33m 深度范围内, 由监测计算得到的弯矩图可以看出与设计最大弯矩 位置基本一致。弯矩变化最大的时间主要在浇筑完 成的5周时间内,平均周增加量达652kNm,主要 原因是: 江顶崖滑坡处于南峪滑坡群内, 此滑坡长 期处于蠕动微弱变形状态,抗滑桩的施工使得原有 坡体受力状态发生改变,滑坡推力变为由抗滑桩承 担,且这个时间段内有强烈降雨,增大了土体的含 水率,使得滑坡推力变大,抗滑桩弯矩明显增大。 随着时间的增加,原有坡体与抗滑桩形成新的受力 模式,改善了滑坡状态。在 2019 年 10 月 4 日之后 弯矩的增量逐渐减小,表明新的桩土受力模式已经 形成,大大改善了原有滑坡紧张的地层岩性,使得 滑坡逐渐趋于平稳,抗滑桩起到了有效的抗滑作用, 在监测期间抗滑桩处于安全稳定工作状态。

其中抗滑桩采用桩单元,抗滑桩材料为混凝土,具体 材料参数取值见表 1, 计算过程中不考虑桩后土体对 桩的作用力,也不考虑桩周围的护壁尺寸,假定抗 滑桩在整个过程中满足变形协调, 土体本构模型采 用莫尔-库伦模型。模型尺寸 350m×28m×300m, 其 中沿滑坡方向为 350m, 沿纵向为 300m, 土层参数 见



5 数值模拟

为深入研究类似滑坡体抗滑桩桩身应力应变, 积累抗滑桩设计研究经验,借助有限元软件 PLAXIS 3D 建立三维分析模型,对抗滑桩桩身响应进行分析。

图 8 模型网格划分和桩位置图

Fig.8 Model meshing diagram and position of pile diagram

衣 1 反 1 参 奴 衣									
Table 1 List of design parameters									
	项目	容重/(kN/m ³)		弹性模量/	ንታተለ ሆ	黏聚力/	山麻坡舟 ((の)		
		天然状态	饱和状态	(N/mm^2)	们们了几	(kPa)	内摩捺用へう		
	滑带土	20.5	22	12000	0.3	6	12		
	新堆积体	20.5	22	14300	0.3	13.6	16.2		
	91 年堆积体	20.5	22.5	15000	0.3	9	21		
	老堆积体	20.5	22	18000	0.3	18	24		
	抗滑桩	26	26	3×10^{7}	0.3				

表	1设计参数表
1 I	ist of design parame

表1,模型底面采用固定约束,上表面采用自由边界, 计算模型中土单元数 28527 个, 节点数 44291 个。 模型网格划分如图 8 所示。模型施工抗滑桩前取自 重应力为初始应力,并在自重应力下计算至平衡状 态,清零速度场和位移场,并以此为初始状态进行 模拟。在初始状态之后,模拟施工抗滑桩,考虑到 滑坡上部有部分土体,施加外荷载用以模拟上部土 体自重计算,模拟外荷载沿竖直方向(如图8所示),

大小为 2000kN/m²。通过 PLAXIS 3D 建立三维分析 模型计算并导出结果,得到抗滑桩的弯矩变化数据 整理如图9所示。

由图 9 可知,有限元软件 PLAXIS 3D 所模拟的 抗滑桩所得弯矩与设计弯矩变化趋势相似,在0至 10m 深度模拟弯矩变化量逐渐递增, 抗滑桩在 10m 以下模拟弯矩变化量递增量减小,在20m 深度以下 弯矩又有明显剧增,并在 30m 深度位置弯矩达到最 大值,与设计弯矩变化基本保持一致。设计弯矩总 是略大于软件模拟弯矩,说明设计存在一定的安全 度,抗滑桩目前处于安全状态。PLAXIS 3D 软件可 以较好地模拟抗滑桩地工作状态,为数值模拟研究 抗滑桩提供了新方法。



图 9 模拟抗滑桩弯矩与设计弯矩对比图 Fig.9 Comparison diagram of simulated anti-slide pile bending moment and design bending moment

6 结论

通过分析江顶崖滑坡抗滑桩的监测结果可得出 以下结论:

(1)监测结果表明:智能弦式钢筋应力计监测 到的单根钢筋最大应力为112.5 MPa,远小于设计值, 弦式应变计监测到的最大应变为34µɛ,监测数据周 变化量逐渐减小并缓慢趋于稳定,抗滑桩与周围岩 土体正在形成新的变形协调,抗滑桩有效地支挡了 滑坡,处于安全工作状态。

(2) 江顶崖滑坡是老滑坡堆积体上产生的新滑坡,滑坡层次结构复杂多样,抗滑桩桩身受到不均匀的推力,从监测数据可知钢筋应力和混凝土应变值在 27~33m 深度范围发生明显突变,此深度范围与设计滑面吻合。

(3) 采用矩形截面受弯构件计算得到的抗滑桩 弯矩曲线与设计曲线基本吻合,表明了抗滑桩在保 证监测准确和数据有效的基础上可以进行内力的简 化计算。对比 PLAXIS 3D 软件模拟弯矩值和设计弯 矩,两者变化趋势基本一致,软件模拟是可靠有效 的研究手段之一。

参考文献(References):

Second survey and Design Institute of the Ministry of railways. Design

and calculation of anti-slide piles [M]. 1983. Beijing: China Railway Press: 2-13.

- Wang X L, Jin Z X, Dong W Y, et al. 2015. Monitoring and analysis of anti-slide pile of Sucertou landslide in Zhouqu [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 42 (5): 123-128.
- Shi B, Gu K, Wei G Q, et al. 2018. Full section monitoring of land subsidence borehole using distributed fiber optic sensing techniques[J]. Journal of Engineering Geology, 26(2): 356-364.
- Liu Y L, Sun H Y, Yu Y, et al. 2012. BOTDR monitoring and analysis of internal force of anti-slide pile [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 46 (2): 243-249.
- Chang J W, Zhang Z J, Li D W. 2013. Stress monitoring and analysis of super long anti-slide pile in deep landslide [J]. Construction Technology, 42 (S2): 260-263.
- Feng S R, Jiang Z M, Qin W X, et al. 2014. Study on the mechanical characteristics and stability of the bedding rock slope support structure at the intake of Jiangping river hydropower station [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 41 (6): 51-56 + 69.
- Zhang H Y, Wu R, Jin Z F, et al. 2015. Monitoring and analysis of the treatment effect of a landslide anti-slide pile [J]. Coal Field Geology and exploration, 43 (5): 69-73 + 78.
- Wang G H, Li C D, Chen W Q, et al. 2019. Study on the stress characteristics of anchor cable anti slide pile under the condition of multi-layer sliding bed [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38 (11): 2219-2230.
- Luo Y, Yuan C, Zhang Y F, et al. 2019. Landslide treatment and monitoring analysis of large gravel accumulation [J]. Subgrade Engineering, (5): 205-209.
- Li D F, Zhao X Y, Hu X W, et al. 2018. Influence of sectional dimension of stabilizing piles on soil arching characteristics[J]. Journal of Engineering Geology, 26(2): 484-493.
- Zhang L, Shi B, Zhang D, et al. 2019. Evaluation and analysis of working state of anti-slide pile based on BOTDR [J]. Journal of Engineering Geology, 27 (6): 1464-1472.
- Hu S Y, Cai Q, Li Q K, et al. 2018. Three dimensional FEM simulation of slope reinforcement by short anti-sliding pile[J]. Journal of Engineering Geology, 26(4): 969-977.
- Han H M, Zhang L, Shi B, et al. 2019. Prediction of deep displacement of Majiagou landslide based on optical fiber monitoring and PSO-SVM model[J]. Journal of Engineering Geology, 27(4): 853-861.
- Zhang J, Feng D X, Qi W, et al. 2018. Monitoring land subsidence in Panjin region with SBAS-INSAR method[J]. Journal of Engineering Geology, 26(4): 999-1007.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50010-2010 Code for design of concrete structures [S]. 2010. Beijing: China Building Industry Press.

- 铁道部第二勘测设计院. 1983. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京:中国铁道出版社: 2-13.
- 王秀丽,金兆鑫,董文燕,等. 2015. 舟曲锁儿头滑坡抗滑桩监测及 分析[J]. 水文地质工程地质,42(5):123-128.
- 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 2018. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J].工程地质学报, 26(2): 356-364.
- 刘永莉,孙红月,于洋,等.2012. 抗滑桩内力的BOTDR监测分析[J]. 浙江大学学报(工学版),46(2):243-249.
- 畅建伟, 张志军, 李德武. 2013. 深层滑坡体特长抗滑桩受力监测及 分析[J]. 施工技术, 42(S2): 260-263.
- 冯树荣, 蒋中明, 秦卫星, 等. 2014. 江坪河水电站进水口顺层岩体 边坡支护结构受力特性及稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 41(6): 51-56+69.
- 张会远, 吴锐, 靳喆菲, 等. 2015. 某滑坡抗滑桩治理效果监测分析[J]. 煤田地质与勘探, 43(5): 69-73+78.
- 王贵华,李长冬,陈文强,等. 2019. 复合多层滑床条件下锚索抗滑 桩受力特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,38(11): 2219-2230.
- 罗勇, 袁超, 张宇飞, 等. 2019. 大型碎石堆积层滑坡治理及监测分 析[J].路基工程, (5): 205-209.
- 李登峰,赵晓彦,胡卸文,等. 2018. 抗滑桩截面尺寸对土拱性状的 影响[J]. 工程地质学报, 26(2): 484-493.
- 张磊, 施斌, 张丹, 等. 2019. 基于 BOTDR 的滑坡抗滑桩工作状态评价及分析[J]. 工程地质学报, 27(6): 1464-1472.
- 胡时友, 蔡强, 李乾坤, 等. 2018. 抗滑短桩加固滑坡体模型试验三 维数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 26(4): 969-977.
- 韩贺鸣,张磊,施斌,等.2019. 基于光纤监测和 PSO-SVM 模型的 马家沟滑坡深部位移预测研究[J].工程地质学报,27(4): 853-861.
- 张静, 冯东向, 綦巍, 等. 2018. 基于 SBAS-InSAR 技术的盘锦地区 地面沉降监测[J]. 工程地质学报, 26(4): 999-1007.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2010. GB50010—2010 混凝土结 构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社.