DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.06.079

锚索抗滑桩在道路边坡防护中的应用

谢 东
(中国市政工程中南市政设计研究总院有限公司，湖北 武汉 430000)

摘 要：在城市道路建设中，常常会遇到道路红线受限，不得不针对红线外路基边坡进行边坡防护的问题，以福建省永泰县北江滨路与二环路交叉口范围红线外路基边坡防护为案例背景，探讨了锚索抗滑桩在保护古建筑地基稳定中的应用，并简要的论述了锚索抗滑桩的计算原理和方法，可供类似工程参考借鉴，具有一定的指导意义。

关键词：弹性地基梁；锚索抗滑桩；土拱效应；群锚效应
中图分类号：U417.1 **文献标志码**：B **文章编号**：1009-7716(2021)06-0309-04

1 工程概况

北江滨路与二环路位于福州市永泰县，根据道路工程规划，北江滨路、二环路、马洋桥呈十字交叉，在该交叉口西北侧有一座古建筑立雪书院，立雪书院的“立雪”出于宋游酢与杨时尊师的“程门立雪”典故。由书画家、收藏家、寿山石案头摩崖石刻创始人游嘉瑞先生创办，位于福州永泰城关风景优美的大樟溪畔，龙峰山上，占地 2 000 多平方米，该建筑历史悠久，无法拆迁。北江滨路与二环路交叉口改造范围见图 1。

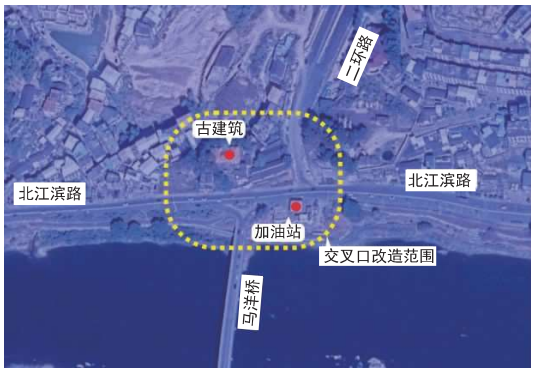

图 1 道路交叉口改造范围

其中北江滨路为旧路改造，现状为二级公路省道 203，东西走向，现状路面宽 12 m，沥青路面结构，双向两车道；该路按城市主干路设计，设计使用年限为 15 a，道路交通量饱和状态设计年限为 20 a。二环路为新建城市主干路，道路宽 30 m 沥青路面结构，双向四车道，设计速度为 50 km/h。

收稿日期：2020-11-17
作者简介：谢东(1985—)，男，硕士，高级工程师，从事道路桥梁设计工作。

按四阶段法对北江滨路进行交通量预测分析及通行能力计算，至交通量饱和设计年末，该道路高峰小时交通量预测结果为 907 pcu/h。参照美国道路通行能力手册中服务水平分级表，北江滨路按双向四车道考虑时，饱和设计年末交通量饱和度为 907/1463=0.62，可维持 C 级服务水平，交通量为稳定车流，有一定延误。

根据《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)，主干路与主干路平面交叉类型采用平 A1 型，交通信号控制，进口道需展宽交叉口。二环路进口道和北江滨路出口道分别展宽一个车道后，道路红线进入立雪书院房屋基础范围，需对该范围内基础进行边坡防护(见图 2)。

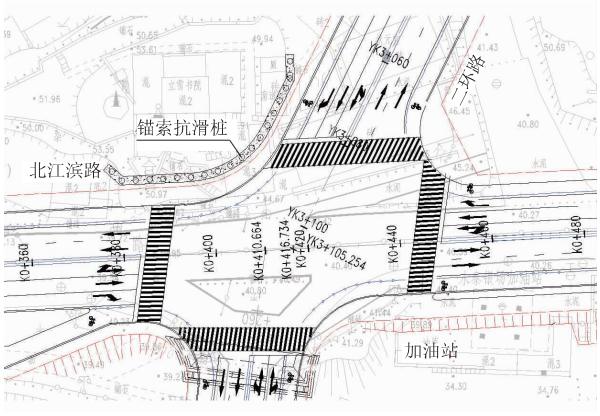

图 2 交叉口平面布置图

2 建设条件

根据现场调查和钻探孔及槽探孔揭露，立雪书院所在场地地层主要为：素填土、全风化凝灰熔岩、散体状强风化凝灰熔岩、碎块状强风化凝灰熔岩、中风化凝灰熔岩。场地地震动峰值加速度为 0.05g，反应谱特

征周期为0.45 s，场地抗震设防烈度为6度，设计地震分组为第三组，拟建场地无活动构造带通过，场地附近不具备发生强震条件。

拟建道路沿线属残丘坡地及山间凹地，自然斜坡现状稳定，在今后建设中路基段两侧将形成挖方边坡，该边坡潜在引发滑坡、崩塌等地质灾害，应采取必要的支护措施，综合判定场地稳定性较差。

本道路交叉口路面设计标高为41～42 m，边坡坡顶标高为50～52 m，边坡高差为8～10 m。

3　边坡支护方案

边坡防护采用预应力锚索抗滑桩支护，该方案一般适用于岩质滑床，主要由抗滑桩和预应力锚索组成桩—锚支挡体系，共同抵御滑坡体下滑，锚索应锚固于稳定的岩层中。这种方法已经在道路水利等边坡治理工程领域得到广泛使用。

和普通的抗滑桩受力状态不同，它通过在桩顶施加一个拉力，改变普通抗滑桩的悬臂受状态，受力更加合理，是一种主动抗滑结构，其基本的力学模式可以等价为简支梁或者其他超静定结构，具有桩身弯矩小，剪力相对小，桩身截面尺寸及配筋合理等特点。

本工程为保障立雪书院结构基础的稳定性，初步考虑抗滑桩施工方案先开挖桩顶土石方，形成工作面，然后开挖基坑，灌注桩身，待桩身混凝土强度达到设计要求的75%，再开挖桩前土石方。考虑到本工程施工条件较差，推荐采用水磨钻法挖孔施工，抗滑桩按跳桩开挖基坑，基坑护壁采用钢套筒，钢套筒直径1.3 m，

壁厚12 mm，桩身混凝土的强度等级为C35。对于有滑动迹象、顺层、滑坡段或需快速施工时，宜采用速凝或早强混凝土，桩与桩之间设置软式透水管。桩顶冠梁处通长设砂夹卵石反滤层，反滤层厚度为0.3 m，反滤层下部设置夯填黏土防渗层。抗滑桩断面布置见图3。

4　锚索抗滑桩设计与计算

抗滑桩设计的原则是，选择在滑坡厚度小，推力小，锚固段地基承载力高，利于抗滑的地段，桩的平面布置、桩间距、桩的锚固长度、截面形状和尺寸都应综合考虑确定。抗滑桩设计应根据施工现场实际地质条件及边坡变形监测信息，动态的校核与完善设计。预应力锚索抗滑桩的计算包含抗滑桩桩身内力的计算和锚索的拉力计算两部分，锚索抗滑桩计算模型见图4。

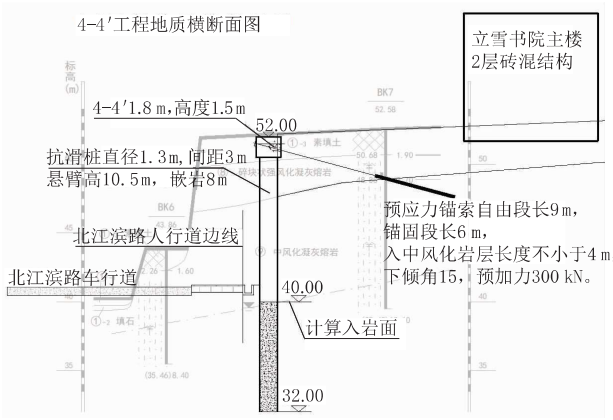

图3　锚索抗滑桩断面布置图

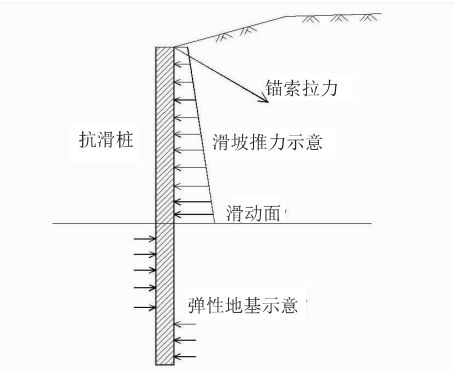

图4　锚索抗滑桩计算模型示意图

预应力锚索抗滑桩的受力过程可以分为两部分：第一阶段，抗滑桩施工完毕到锚索张拉到设计值阶段，该阶段锚索预应力作为一个集中力作用在抗滑桩上，锚固面以上的桩体受锚索拉力和岩土的反力作用，可视为弹性地基梁；第二阶段，锚索预应力张拉完，锚索和抗滑桩作为一个系统共同抵御滑坡推力，协调变形。此时抗滑桩非锚固段，相当于在桩顶受弹性固定支承，按静定结构计算。

4.1　锚索抗滑桩设计参数

抗滑桩的横截面可以是矩形，也可以为圆形，尺寸的大小根据滑坡推力的大小、桩间距、地基承载力等综合确定[1]。本工程中，抗滑桩的截面按圆形设计，直径取1 300 mm。

抗滑桩的间距既不能太大也不能太小，太大无法形成土拱效应，太小会发生群桩效应。桩间距的大小除了与桩受到的滑推力有关，还与桩后土体的c、ϕ值有关，参考国内外相关资料，对于圆形桩而言，最小间距可以取其直径的2.5倍，本工程中圆形截面抗滑桩间距近似取3 000 mm。

抗滑桩的锚索可以是单锚，也可以是多锚，为避免发生群锚效应[5]，锚索的间距根据设计锚固力和锚

固段的锚固能力确定，锚固段间距宜取 3~6 m，最小间距不得小于 1.5 m。本工程采用单桩单锚体系，锚索间距取决于抗滑桩的间距。

抗滑桩的埋置深度，对于普通悬臂桩而言，锚固深度既要满足桩周土承载力的要求，还要满足承载滑坡推力及桩顶允许位移要求；对于锚索抗滑桩，滑坡推力大部分由锚索承担，桩的锚固深度只需满足地基承载力即可，本工程中锚固桩的锚固深度取 8 m。

抗滑桩桩身采用水泥混凝土浇筑，纵向受力钢筋采用 28 根 HRB400，直径采用 25 mmm，保护层厚度取 70 mm。

4.2　锚索设计拉力

在锚索抗滑桩的设计中，锚索的刚度和抗滑桩的刚度相差较大，控制锚索的变形量，使之与抗滑桩协调变形十分重要。抗滑桩的桩顶位移 f_i 和锚索的变形量 δ_i 之间存在协调变形的关系，见图 5。

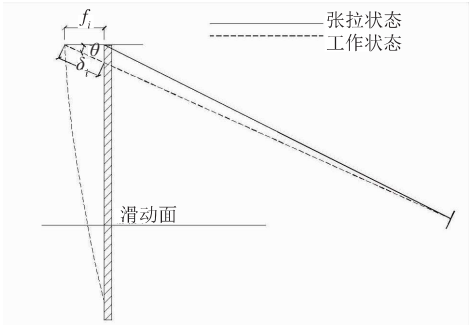

图 5　锚索与抗滑桩协调变形示意图

变形协调的方程根据几何关系可以得出：

$$\delta_i=f_i\times\cos\theta \tag{1}$$

根据材料应力应变关系式有：

$$f_i=y_0-\phi_0 L_i+\delta_{iq}-\sum_{i=1}^{n}\delta_{ij} \tag{2}$$

$$\delta_i=\mu(R_i-R_{i0}) \tag{3}$$

式中：μ 为锚索的柔度系数；δ_{iq} 为抗滑桩 i 点的水平位移；δ_{ij} 为 j 点锚索拉力的水平分量作用在桩 i 点的水平位移；R_{i0} 为锚索的初始预应力。

联立式(1)、式(2)、式(3)可以求得锚索的拉力。本工程中，锚索采用 15.24 mm 高强度、低松弛钢绞线，抗拉强度为 1 860 MPa。

4.3　滑坡推力计算

抗滑桩锚固段以上部分主要受到的荷载作用包含滑坡推力、土压力、桩前滑动体抗力、水平地震作用等。其中滑坡推力可以采用传递系数法计算[3]，考虑地震作用时，滑坡推力安全系数可以取 1.05，本地区地下水位埋藏较深，不考虑水的作用。

$$T_i=KW_i\sin\alpha_i+\phi T_{i-1}-W_i\cos\alpha_i\tan\phi i-c_iL_i \tag{4}$$

$$\phi=\cos(\alpha_{i-1}-\alpha_i)-\sin(\alpha_{i-1}-\alpha_i)\tan\phi_i \tag{5}$$

式中：T_i、K、W_i、α_i、α_{i-1}、ϕ_i、c_i、L_i、ϕ 分别代表第 i 个滑块末端的滑坡推力、安全系数、重力、滑动面倾斜角度、内摩擦角、内聚力、滑动面长度和传递系数。

为简化计算，本项目中将抗滑桩后土体划分为 2 个滑块，滑动体重度取 22.000(kN/m^3)，滑动体饱和重度取 22.500(kN/m^3)，安全系数取 1.3，不考虑动水压力和地震力作用，岩土抗剪强度取值为 c=13 kPa，内摩擦角 ϕ=18°，计算结果见表 1。

表 1　滑块推力计算结果表

滑块编号	滑面长度 /m	滑面倾角 /(°)	滑块面积 /m^2	滑块重量 /kN	剩余下滑力 /(kN·m^{-1})
1	22.03	59.6	52.6	1156.2	0
2	3.98	48.2	15.76	346.835	100.5

4.4　桩身内力及变形计算

对于普通抗滑桩可以根据桩的锚固深度 h 和变形系数 α 确定采用刚性桩或弹性桩计算模型。对于锚索抗滑桩而言，由于预拉力的存在，桩的截面尺寸及刚度较小，一般按弹性桩计算。

根据滑坡体的工程性质和厚度，推力分布图形按矩形布置，剩余下滑力按 200 kN/m 考虑，每根抗滑桩所受的推力按桩间距 3 m 计算，抗滑桩总长度取 20 m，锚固段长度取 8 m，锚固段以上的桩体按受静载作用的悬臂梁计算。锚固段以下的桩身内力及变形计算，采用弹性地基梁模型计算[2]。

根据公路路基设计规范规定，对于较完整岩层和硬黏土的地基系数取常数 K，风化破碎的岩块，桩前滑动面无超载，地基系数采用三角形分布，有超载时采用梯形分布。本工程中抗滑桩的锚固段土层为中风化凝灰熔岩，地基系数采用“m”法[5]。本工程相关设计参数见表 2。

表 2　锚索抗滑桩设计参数表

桩底支承条件	桩身混凝土强度	锚索水平刚度 /(MN·m^{-1})	入射角度	锚固体直径 /mm	水平预加力 /kN
铰接	C35	17.28	15	200	300

第 1 道锚索水平拉力取 300.000 kN，距离桩顶 1 m，抗滑桩在剩余下滑推力作用下，桩身强度计算见表 3。

由计算结果可知，计算抗滑桩桩顶位移为 14.79 mm，鉴于该边坡附近有古建筑，对于变形较为

表3　锚索抗内力及位移计算表

点号	桩顶距离/m	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	位移/mm	土反力/kPa
01	0	0.000	0.000	14.790	0.000
02	1	0.000	69.500	13.340	0.000
03	3	-150.120	69.500	10.240	0.000
04	6	-350.281	69.500	6.380	0.000
05	10	-625.501	69.500	2.230	0.000
06	14	-541.495	-120.482	0.210	13.992
07	18	0.000	-65.366	0.000	0.000

敏感，桩顶允许位移宜控制在0.005倍桩长范围，即100 mm内，满足位移控制标准。

4.5　地基承载力

本工程地层为中风化岩，桩侧地基横向容许承载力$[\delta H]=\mu R_c K_H$，其中，K_H为水平方向换算系数，与岩土形状有关，取值0.5～1.0，μ为折减系数，取值0.3～0.45，R_c为岩石单轴抗压极限强度值。此外，抗滑桩还应进行正截面承载能力与斜截面承载能力的计算，以及裂缝控制验算。

5　施工与监测

预应力锚索抗滑桩主要有先桩后锚和先锚后桩两种施工方法，由于锚索孔容易出现位移，一般采用先索后桩施工法。锚索的施工流程为：成孔→安装锚索→灌浆→张拉锁定。抗滑桩的施工流程为：抗滑桩井锁扣→隔桩开挖竖井→钢筋笼下放→灌注桩身混凝土→锚索张拉。

锚索抗滑桩施工完，应选择锚索数量总数3%以上进行张拉试验，张拉力取1～1.1倍设计锚固力，同时取1%以上进行长期应力监测。

6　结　论

抗滑桩边坡防护是一种应用广泛的工法，目前其主要的计算方法来源于弹性地基梁计算模型，弹性地基梁是一种无穷多次的超静定结构，和普通的梁相比，其内力计算必须同时考虑地基的变形。通过建立弹性地基梁的挠度曲线微分方程求解结构的内力和变形。由于锚索抗滑桩与周围岩土之间的受力过程是非常复杂的，该方法不能真实反映地基土的非弹性性质，也未考虑岩土的分层特点，是一种具有某些假定的数学模型。

本文结合福建省某工程实例为项目背景，简要的论述了锚索抗滑桩的设计原理及计算方法，并采用理正岩土软件对桩前滑推力、桩身内力和变形进行了计算。本文仅考虑了暴雨工况的剩余滑推力，地震工况可以乘以相应的安全系数1.05，剩余下滑力计算分块数量有条件时可以进行细分，鉴于理论计算参数与工程实际存在一定差距，锚索抗滑桩应采用动态设计和信息化施工。

参考文献：

[1] 门玉明，邓军涛，李金湘.锚索抗滑桩设计中的几个问题探讨[J].公路交通科技，2005(S1):52-54.

[2] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路挡土墙设计与施工技术细则[M].北京:人民交通出版社，2008.

[3] TB10025-2019，铁路路基支挡结构设计规范[S].

[4] JTG D30—2015，公路路基设计规范[S].

[5] 袁士宇.土层锚杆群锚效应的研究现状[D].辽宁沈阳:东北大学，2011.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴，为您提供平台，携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊　欢迎新老客户刊登广告

投稿网站：http://www.csdqyfh.com　电话：021-55008850　联系邮箱：cdq@smedi.com