Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2018, 7(3), 547-557
Published Online May 2018 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/hjce
https://doi.org/10.12677/hjce.2018.73063

Stability Evaluation and Pre-Control Methods for Typical Slope in Northwest Fujian

Jifeng Liu[1,2], Jian Jia[3]

[1]College of Architecture and Civil Engineering, Sanming University, Sanming Fujian
[2]Key Laboratory of Engineering Material & Structure Reinforcement (Sanming University), Sanming Fujian
[3]The Geological Brigade of Western Fujian Province, Sanming Fujian
Email: ph_dliujifeng@126.com

Received: May 11th, 2018; accepted: May 26th, 2018; published: May 31st, 2018

Abstract

In order to discuss stability affecting factors of a highway slope in Sanming city, Fujian Province, and to present its pre-control measures, based on the geotechnical investigation results, the geological environment and the basic characteristics of the landslide are analyzed; the influencing factors and the formation mechanism of the landslide are discussed; the monitoring and stability analysis of the landslide are carried out. The results show that there are more soil components in the landslide site; and the geological condition is complex; the landslide is middle or thick middle size tractive rock landslides; and its control engineering grade is the second grade. The preliminary classification of site category belongs to class II and characteristic cycle is 0.35 s. The landslide control should consider the causes of landslides, landslides shape, engineering geology and hydro-geological conditions, landslide stability and engineering importance etc. In order to ensure the safety of construction, the monitoring of surface cracks, groundwater level and displacement in the landslide area should be strengthened, and the comprehensive treatment of drainage, chipping, load reduction, support and anchorage methods should be adopted to pre-control the landslide.

Keywords

Northwest Fujian Province, Typical Slope, Stability Evaluation, Landslide Control

福建西北地区典型边坡稳定性评价及预控措施

刘纪峰[1,2]，贾　健[3]

[1]三明学院建筑工程学院，福建 三明
[2]工程材料与结构加固福建省高等学校重点实验室(三明学院)，福建 三明

文章引用: 刘纪峰, 贾健. 福建西北地区典型边坡稳定性评价及预控措施[J]. 土木工程, 2018, 7(3): 547-557.
DOI: 10.12677/hjce.2018.73063

[3]福建省闽西地质大队，福建 三明
Email: ph_dliujifeng@126.com

收稿日期：2018年5月11日；录用日期：2018年5月26日；发布日期：2018年5月31日

摘 要

为探讨福建三明某公路边坡的稳定性影响因素及其预控措施，基于岩土工程勘察，分析了该滑坡区的地质环境和滑坡基本特征，讨论了滑坡的影响因素及形成机制，对滑坡进行了监测和稳定性分析，结果表明：该滑坡场地内岩土体组分较多，地质条件复杂，属中厚层中型牵引式岩土质滑坡，其防治工程等级为二级；初步判定场地类别属II类，特征周期0.35 s；滑坡治理应考虑滑坡类型成因、滑坡形态、工程地质和水文地质条件、滑坡稳定性、工程重要性、施工影响等因素，宜采用排水、削方减载、支挡、锚固等工程措施进行综合治理，并加强对滑坡区地表裂缝、地下水位及位移的监测，以保障施工安全。

关键词

福建西北地区，典型边坡，稳定性评价，滑坡治理

1. 引言

福建西北部地区均为山区，地质灾害广泛分布，其中以滑坡和泥石流为甚。三明地区是福建省滑坡灾害分布最集中的区域之一[1]，每年由于滑坡灾害造成的损失就高达数千万元，治理的费用更高于此。全区地质灾害调查结果显示，滑坡在地质灾害中所占比例为 75.9%，具有点多面广、突发性强、危害性大等特征，滑坡的主要诱因是强降雨。为减少滑坡灾害造成的损失，学者们对边坡稳定性及预控措施进行了相关研究，伍宇明等[1]分析了福建地区台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线；杨金旺等[2]把降强法与倾斜抬升超载法相结合，提出了预测顺层岩质边坡稳定性的地质力学模型综合试验方法；叶龙珍等[3]探讨了福建池头古滑坡特征及其局部复活的影响因素；陈文林[4]分析了福建沿海典型潜在滑坡的稳定性；王浩等[5]研究了福建山区高速公路路堑高边坡风险分级方法；林兴旺等[6]等分析了台风暴雨条件下福建霞碧滑坡的渗流稳定性；刘纪峰等[7] [8]等探讨了含水率对边坡土性及其稳定性的影响。

在前人研究的基础上，本文分析三明市梅列区陈碧线公路扩建工程 K1 + 390~K1 + 455 段典型滑坡的稳定性并探讨滑坡影响因素及预控措施，以期为类似工程提供参考。

2. 工程概况

三明市梅列区陈大镇至碧溪段公路扩建工程，在陈碧线 K1 + 390~K1 + 455 段边坡开挖拓宽路面过程中，发现该段坡脚处出现鼓张裂缝，距离开挖坡顶约 30 m 处有不同程度的拉裂缝，经地质调查，该段勘查周界比原招标范围大一倍多(详图 1，图 2，图 2 开挖部分为原招标范围，红线部分为滑坡边界)，属工程施工引起的滑坡，滑坡土方预估达 20 万 m^3，该段滑坡存在多层滑动面，处于不稳定阶段，一旦下滑，将威胁位于坡脚的陈碧线公路及行人的生命、财产安全，需对该滑坡进行勘查、设计和治理。

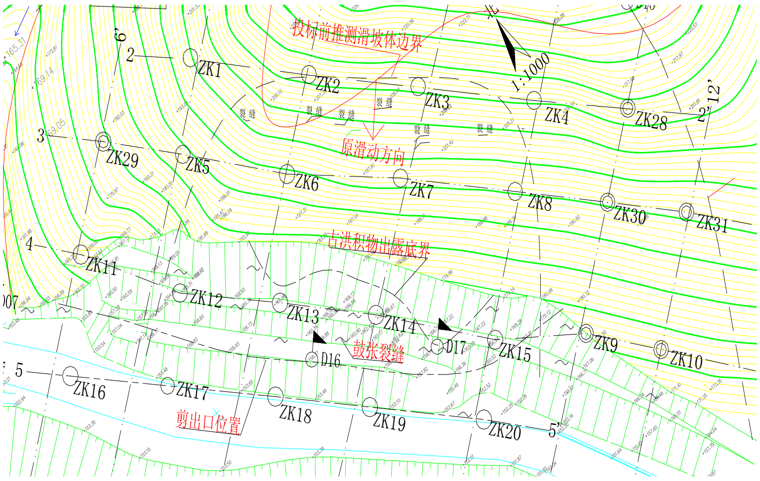


Figure 1. Original tendering slope range

图 1. 原招标范围的边坡

Figure 2. Actual landslide boundary

图 2. 实际滑坡边界

3. 滑坡区地质环境

滑坡勘查区地貌单元主要为低山丘陵区山坡坡地，局部为洪积扇堆积地，地势北东高南西低，区内种植杉木、松木等及灌木，表层植被茂盛。西南侧坡脚处为一拟建宽约 8.5 m 的二级公路，再往南为宽约 9 m 的河道，河道与公路平行，滑坡区内河流由北西向南东转变为由南西向北东迳流；西侧为“V”字型小沟谷，北东往南西走向迳流。

原始山坡坡度 37~42˚，坡顶标高 257.64 m，坡脚标高 151.0~153.5 m，坡脚处由于开挖道路，现形成高陡边坡，开挖一个台阶面，阶宽 2.1~2.8 m，坡度约 55˚，开挖边坡坡顶标高约 168~184 m。

边坡面出露古洪积扇堆积物(主要为含泥块石)、全风化花岗岩、强风化花岗岩层等，也有滑坡引起的鼓张裂缝，原始沟谷约为 230˚方向，与现有滑动面方向一致。在剖面 3、4 之间堆载砂卵石层反压层，堆载高度约 4.5~5.5 m。

滑坡勘查区出露的覆盖层为古洪积扇堆积物；下覆基岩为泥盆系桃子坑组砂岩、粉砂岩、石英砂岩及燕山期花岗岩(图 3)。

勘察期间属于枯水期~丰水期前期，地表水主要为两条常年性流水溪沟，一条位于滑坡前缘约 20~30 m 处，流向由北向南，宽约 9~15 m，实际水流宽度在 1.5~6.0 m，水深 0.3~1.2 m，流量约 0.07~0.13 m^3/s，经访问调查，丰水期可达 2.0 m^3/s；另一条位于滑坡北西侧，沟谷水流量随季节变化明显，在沟谷中上游，有人为设置拦截引水措施，引水措施之上流量在 80 ~150 m^3/d，丰水期可达 800 m^3/d；引水措施之下沟谷仅见少量渗水，常会出现干枯现象。

区内地貌单元为低山丘陵山坡坡地，属地下水补给区和迳流区。场地地下水主要赋存运移于古洪积扇含泥碎石、块石层及风化带孔隙裂隙中的潜水(风化带中局部渗透性突变部位具承压性质)。地下水的补给来源主要为大气降水，上游局部地段有沟谷地表水沿基岩裂隙渗入补给。

勘查区主要人类工程活动为扩建成二级公路，对原山体坡脚处进行开挖，由原坡脚向里侧开挖约 10~20 m 之后，在坡脚形成了一个高约 15~30 m、坡度约 55°的临空面。由于土体卸荷，使得临空面岩土体不断出现鼓张裂缝，山体顶部拉张裂隙不断加大，加剧滑坡体发育(图 4)。

4. 滑坡基本特征

滑坡后缘见圈椅状的拉张裂缝，裂缝宽度在 0.05~0.35 m，局部达 0.5 m 以上，外侧下错 0.15~0.25 m，裂缝大都呈垂直裂缝，深度在 0.5~1.0 m，两侧发育有雁形羽毛状剪切裂缝，裂缝发育长度约 150 m，并在开挖坡面 ZK13~ZK15 钻孔附近发现有不规则鼓张裂缝(图 5)，局部见坍塌现象，剪出口在公路内侧坡脚排水沟处，该滑坡体上部为古洪积扇堆积物，滑坡体主滑方向 230°。滑坡主轴长 120 m，宽 200 m，厚度 5.0~21.0 m，主滑方向较深，大部分地段大于 10 m，两侧稍浅，平均厚度约 11.0 m，实测滑坡体面积约 1.8 万 m^2，土石方量约 19.8 万 m^3。滑坡面位于古洪积扇堆积物中的软弱土层、砂土状强风化花岗岩以及全风化花岗岩层中，平面呈半圆形滑坡，为牵引式中层岩土质滑坡。

实测滑坡后缘裂缝从 ZK23 孔东侧 19 m 开始到 ZK28 孔 12 m，长度约 150 m。滑坡主滑方向为 230°，滑坡体东侧界线以山脊为界；滑坡体西侧界线以小山沟为界，滑坡前缘以实际开挖坡脚面为界。

现有滑坡滑床与滑体接触关系主要沿软弱土层、古洪积扇堆积物与基岩接触面以及岩土胶结面为标

Figure 3. Excavated slope surface
图 3. 开挖边坡坡面

Figure 4. Irregular shear cracks in the front of slope foot
图 4. 坡脚前缘地带出现不规则剪出口

Figure 5. Tensional cracks in the excavated steps
图 5. 开挖边坡台阶处出现鼓张裂缝

志面。上段主要在古洪积扇堆积层存在软弱土层，遇水易软化，透水性强，软化现象较明显，粘性土呈粘滑感。其下部风化基岩工程性质较好，透水性差，地下水主要该基岩面向下游迳流，在地下水作用下，滑坡体软化，沿岩土风化面和软弱土层下滑。下段滑带则分布在全风化~砂土状强风化花岗岩中，最低剪出口处在新建公路内侧坡脚排水沟处，现已被堆载反压覆盖(图 6)。

综合，现有滑坡可能失稳的主要原因是由于前缘坡脚地段边坡开挖，形成一个高陡临空面，对后部土体失去支撑而导致滑动，由下向上逐步发展变形。按照滑坡受力状态，滑坡应属于牵引式滑坡。

5. 滑坡影响因素及形成机制

5.1. 地形地貌

滑坡区地形较陡，原始山坡坡度在 35°~45°，在长期的重力作用下，斜坡的整体平衡状态仅保持着脆

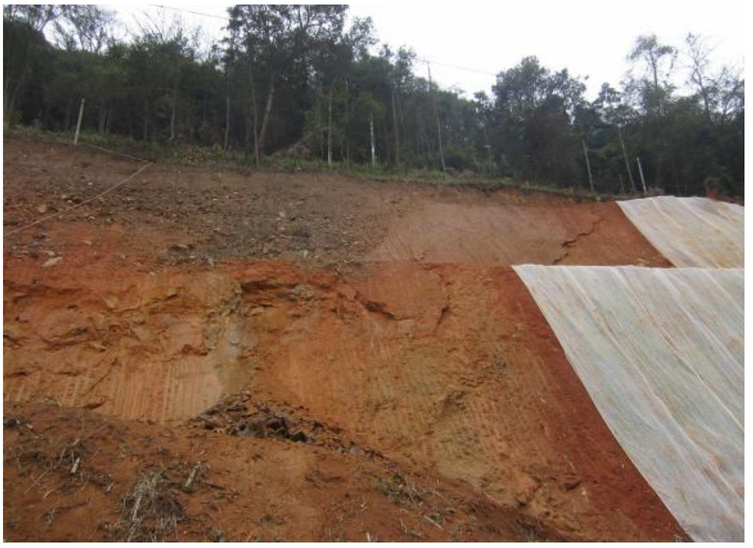


Figure 6. Collapse at the foot of the slope
图 6. 坡脚地带处出现坍塌现象

弱的平衡。

5.2. 岩层因素

滑坡体存在古洪积扇堆积物，堆积物为含泥碎石、块石层，厚度较大，透水性好，并且存在于堆积物中的软弱土层遇水后易软化，下伏基岩为强风化~中风化、砂岩、粉砂岩及花岗岩，滑坡沿软弱土层、古洪积扇堆积物与基岩接触面以及岩土胶结面滑动。

5.3. 诱发因素

在边坡开挖前，原始山坡已形成滑坡体，处在基本稳定状态(弱变形阶段，主滑段滑动带在蠕变形，滑坡体尚未沿滑动带移动，稳定系数大于 1.05)。坡脚公路建设开挖后，形成较陡边坡，产生临空面，破坏土体应力平衡，在自重力作用下，使上部土层沿软弱土层、古洪积扇堆积物与基岩接触面以及岩土胶结面产生滑动。

5.4. 水文地质因素

地下水是滑坡体形成的重要条件，上游地表水沿基岩裂隙迳流到滑坡体内，使土体饱和，软化，抗剪强度降低，使上部土体沿软弱带下滑。此外，连续强降雨是滑坡体形成的主要诱发条件。过量的水使土体饱和，沿剪切面孔隙水压力过大造成了滑动破坏的条件。

滑坡在以上各种因素的综合作用，先在一个点或一个局部范围发生剪断破坏，然后逐渐发展形成贯通的剪切破坏面、滑动面，最后在滑动力大于抗滑力时产生下滑。庆幸的是从 2014 年底至今雨量较少，尚未导致滑坡体整体下滑，目前滑坡尚处在强变形阶段，现根据剖面及实际情况，在滑坡后缘地带存在软弱土层地段，上段滑动面已形成贯通面，中段滑动面在强风化花岗岩层中，尚未形成贯通面，属欠稳定状态。

综上所述，该滑坡体属中层中型牵引式岩土质滑坡。

6. 滑坡监测

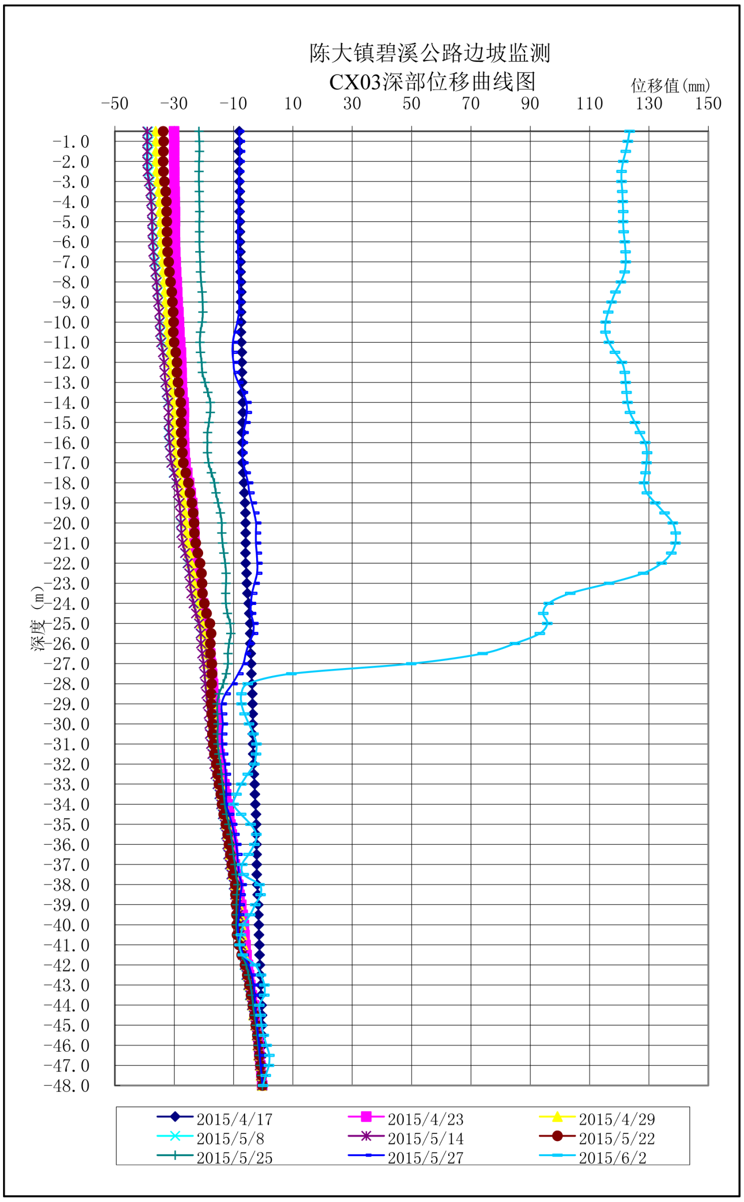
根据场地条件，布设 3 个深层水平位移监测孔(ZK3、ZK8、ZK22 孔)。从 2015 年 4 月 17 日开始进

行孔内监测，至 2015 年 6 月 2 日共监测 14 次，ZK3 和 ZK8 孔累计最大位移量分别 139.0 mm、35.9 mm，其中 ZK22 孔监测位移量很小，并在滑坡外缘，目前可认为是稳定的。5 月 19 日至 31 日，持续多天强降雨，ZK3 孔监测最大位移量比 5 月 27 日多出 141.5 mm，ZK8 孔在 16 m 处监测管断裂(图 7，图 8)。

7. 滑坡稳定性评价

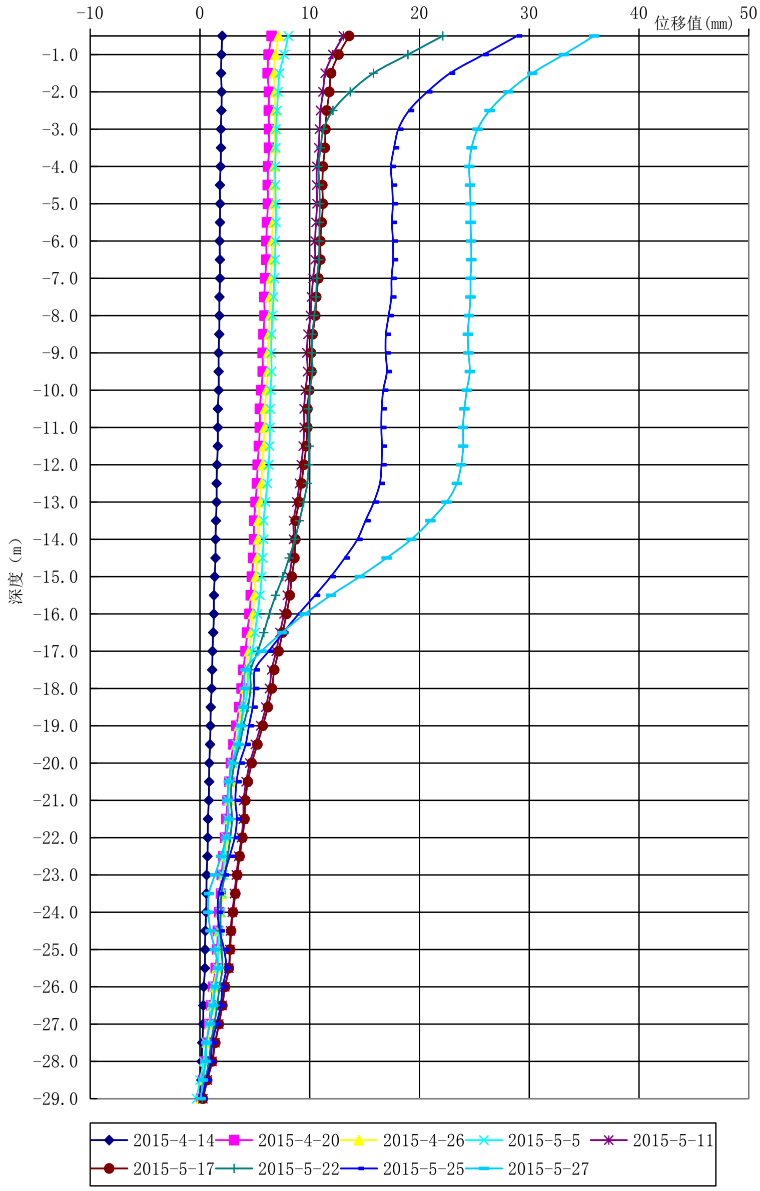
7.1. 滑坡稳定性的定性分析

目前，滑坡尚处在强变形阶段，部分已形成贯通剪切面，属欠稳定状态，安全系数在 1.0~1.05。滑



注：图中最右侧曲线为 6 月 2 日监测，最大位移出现在 20~22 m 处。根据上图可以确定 ZK3 孔滑动剪切面在 27.5 m 附近。

Figure 7. Monitoring results in ZK3 hole
图 7. ZK3 孔内监测结果



注：由于 6 月 2 日监测管断裂，图中 5 月 27 日监测值和 4 月 17 日监测(初始值)位移量一致，在 3.0~13.0 m，说明出现整体滑动。根据上图可以确定 ZK8 孔滑动剪切面在 16.0 m 附近。

Figure 8. Monitoring results in ZK8 hole
图 8. ZK8 孔内监测图表

坡主要沿软弱土层、古洪积扇堆积物与基岩接触面以及岩土胶结面滑动。现地下水位均较深，在暴雨或岩土层长期饱水状态下，软弱土层和全~强风化土层均易软化，土体中的土颗粒容易流失，从而进一步影响滑坡体稳定性，将有可能整体下滑，该滑坡体发生的破坏模式为折线形滑动。

7.2. 滑坡稳定计算

滑动面抗剪强度参数的准确取值直接影响边坡计算、分析的可靠性。本次勘查除 ZK21 孔揭露粘性土外，其余地段均未揭露粘性土层，未取得原状样。一是滑坡区浅部土层主要为古洪积扇含泥碎石、块

石等，受沉降环境影响，其土层性质不均匀，局部碎石、块石含量较高，原位测试试验困难，测试成果离散型较大。另一方面软弱土层以粘性土和碎石为主，土质变化大，干钻困难，取土器无法取得原状土样，仅采取相应的原位测试试验，测试成果离散性较大，并且，滑坡体折线形滑动面较为复杂。因此，本次相关岩土体物理力学参数主要结合现场原位测试、相同工程经验以及反算结果而得。

根据剖面情况及经验参数，选取主滑剖面 8-8、9-9 进行参数反演。计算软件为理正岩土，在通用方法中选用剩余下滑力，在自重+地下水状态或自重+地下水+暴雨状态,在已知安全系数反算 c、ϕ 值模块计算，计算结果如表 1 所示。

根据计算结果，在自重+地下水状态下，滑动面参数采用综合法取值 $c = 22.0$ MPa、$\phi = 27.85^{\circ}$。在自重+地下水+暴雨状态下，滑动面综合值取 $c = 19.0$ MPa、$\phi = 25.55^{\circ}$。

地质调查及勘查表明，滑坡形态较为复杂，根据 8-8'、9-9'两条剖面，滑坡体为折线形滑动面，可采用福建省滑坡勘查技术规范(试行)传递系数法隐式解计算相关参数选取反算结果值，其计算模型如下(图 9)。

$$
\begin{aligned}
&P_n = 0 \\
&P_i = \psi_{i-1}P_{i-1} + T_i - R_i/F_s \\
&\psi_{i-1} = \cos\left(\theta_{i-1} - \theta_i\right) - \sin\left(\theta_{i-1} - \theta_i\right)\tan\phi_i/F_s \\
&T_i = \left(G_i + G_{bi}\right)\sin\theta_i + Q_i\cos\theta_i \\
&R_i c_i l_i + \left[\left(G_i + G_{bi}\right)\cos\theta_i - Q_i\sin\theta_i - U_i\right]\tan\phi_i \\
&U_i = \frac{1}{2}\gamma_w\left(h_{wi} + h_{w,i-1}\right)l_i
\end{aligned}
\tag{1}
$$

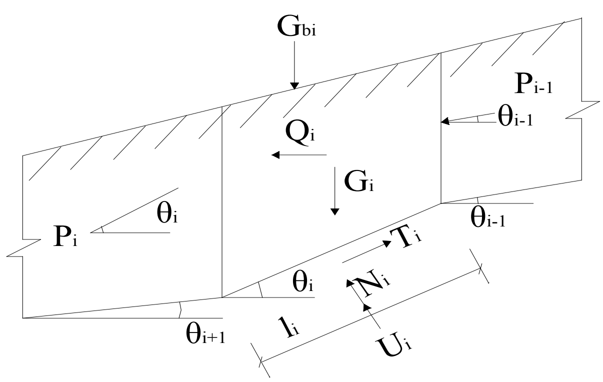


Figure 9. Calculation sketch of transfer coefficient method of folded line sliding surface
图 9. 折线形滑面传递系数法计算简图

Table 1. Back-calculation results
表 1. 反算结果

8-8 剖面天然		9-9 剖面天然		8-8 剖面饱和		9-9 剖面饱和	
c(MPa)	ϕ(˚)	c(MPa)	ϕ(˚)	c(MPa)	ϕ(˚)	c(MPa)	ϕ(˚)
22.0	27.50	24.20	27.50	17.0	26.50	17.0	25.78
21.0	28.00	20.0	28.00	18.0	26.00	18.0	25.66
20.0	28.50	15.8	28.50	19.0	25.56	19.0	25.54

式中：P_n-第 n 条块单位宽度剩余下滑力(kN/m)；

P_i-第 i 计算条块与第 $i+1$ 计算条块单位宽度剩余下滑力(kN/m)；当 $P_i < 0(i < n)$时取 $P_i = 0$；

T_i-第 i 计算条块单位宽度重力及其他外力引起的下滑力(kN/m)；

R_i-第 i 计算条块单位宽度重力及其他外力引起的抗滑力(kN/m)；

ψ_{i-1}-第 $i-1$ 计算条块对第 i 计算条块的传递系数；

F_s-滑坡稳定性系数；

c_i-第 i 计算条块滑面粘聚力(kPa)；

ϕ_i-第 i 计算条块滑面内摩擦角(°)；

l_i-第 i 计算条块滑面长度(m)；

θ_i-第 i 计算条块滑面倾角(°)，滑面倾向与滑动方向相同时取正值，反之取负值；

U_i-第 i 计算条块滑面单位宽度总水压力(kN/m)；

G_i-第 i 计算条块单位宽度自重(kN/m)；

G_{bi}-第 i 计算条块单位宽度竖向附加荷载(kN/m)；方向指向下方时取正值，指向上方时取负值；

Q_i-第 i 计算条块单位宽度水平荷载(kN/m)；方向指向坡外时取正值，指向坡内时取负值；

h_{wi}，$h_{w,i-1}$-第 i 及第 $i-1$ 计算条块滑面前端水头高度(m)；

采用理正岩土软件计算，滑坡稳定性验算结果见表 2。滑坡稳定状态划分表 3。

7.3. 滑坡稳定性评价

根据上述代表性剖面线稳定性验算，滑坡体在自重+地下水状态下安全系数为 1.00~1.00，处于欠稳定状态，小于设计规定的稳定性安全系数 1.25；在自重+地下水+暴雨状态下安全系数均小于 1.00，处于不稳定状态，需采取相应的治理措施，也说明验算结果跟实际情况是相符合的，具体计算结果详见计算书。建议滑面参数选取自重+地下水+暴雨状态下 $c = 19.0$ MPa、$\phi = 25.55°$作为设计参数。

8. 结论

通过以上研究，可得出如下结论：

1) 滑坡防治工程等级为二级，滑坡勘查地质条件复杂，该滑坡体属中厚层中型牵引式岩土质滑坡。

2) 场地内岩土体组成复杂，场地抗震设防烈度为 6 度，设计基本地震加速度为 0.05 g；设计地震分组为第一组；场地类别属 II 类，特征周期 0.35 s。

3) 滑坡治理应考虑滑坡类型成因、滑坡形态、工程地质和水文地质条件、滑坡稳定性、工程重要性、

Table 2. Stability calculation results
表 2. 稳定性验算结果表

剖面线及边坡位置	自重 + 地下水稳定性系数 F_s	稳定性安全系数 F_{st}	自重 + 地下水 + 暴雨稳定性系数 F_s	稳定性安全系数 F_{st}
8-8'剖面线	1.00	1.25	0.90	1.10
9-9'剖面线	1.01		0.90	

Table 3. Classification of stable state of slopes
表 3. 滑坡稳定状态划分

滑坡稳定系数 F_s	$F_s < 1.00$	$1.00 \le F_s < 1.05$	$1.05 \le F_s < F_{st}$	$F_s \ge F_{st}$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

施工影响等因素，采用排水、削方减载、支挡、锚固等工程措施进行综合治理。

4) 施工时应加强施工验槽。若发现异常情况(与勘察报告有差异时)，应进行施工勘察。

基金项目

三明市科技计划项目(2017-S-1)；工程材料与结构加固福建省高校重点实验室(三明学院)开放基金项目(B170001-5)。

参考文献

[1] 伍宇明, 兰恒星, 高星, 等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 255-262.

[2] 杨金旺, 陈媛, 张林, 等. 基于地质力学模型试验综合法的顺层岩质高边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 131-140.

[3] 叶龙珍, 黄国平, 柳侃. 福建池头古老滑坡特征及局部复活影响因素[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(2): 19-25.

[4] 陈文林. 福建沿海典型潜在滑坡的稳定性分析与评价——以安溪县郭厝垵滑坡为例[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(6): 68-72.

[5] 王浩, 林一夫, 梁涛, 等. 福建山区高速公路路堑高边坡风险分级方法研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 492-500.

[6] 林兴旺, 简文斌, 董岩松, 等. 台风暴雨条件下福建霞碧滑坡渗流稳定性分析[J]. 路基工程, 2015(2): 36-41.

[7] 刘纪峰, 卢明师. 含水率对边坡土性及其稳定性的影响[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 63-66.

[8] 卢明师, 刘纪峰. 含水率对厚土坡变形影响的 FLAC3D 数值模拟研究[J]. 三明学院学报, 2009, 26(4): 461-464+5.