

# 填方路堤水毁滑坡机理及加固措施比选研究

胡明华<sup>1,2</sup>, 张百永<sup>1,2</sup>, 许魁<sup>1,2</sup>

(1.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,安徽 合肥 230088;

2.公路交通节能环保技术交通运输行业研发中心,安徽 合肥 230088)

**摘要:**路堤水毁病害严重影响公路正常运行,确保路堤的稳定极其重要,故开展填方路堤水毁滑坡机理分析及安全控制措施研究非常必要。该文以某高速公路路基填方路段为例,通过现场变形监测及稳定性计算,定性分析滑坡原因及形成机理,计算不同加固方案的稳定性系数,并考虑工程造价、施工工艺及施工周期等因素,推荐适宜的加固方案。结果表明:受持续强降雨影响,路堤地层不均匀沉降是造成滑塌的根本原因;因路堤左侧现存洼地,降雨汇集并渗入土层,使黏土层膨胀软化及排水通道堵塞,进一步加快滑坡的形成;采用钢管桩与回填反压的复合加固方案,其稳定性满足要求,现场监测表明加固效果良好。

**关键词:**路堤边坡;水毁滑坡;稳定性分析;加固措施;方案比选

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

## Mechanism of Water-Damaged Landslides of Embankments and Comparison of Reinforcement Measures

HU Minghua<sup>1,2</sup>, ZHANG Baiyong<sup>1,2</sup>, XU Kui<sup>1,2</sup>

(1.Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China; 2.Highway Traffic Energy Saving and Environmental Protection Technology Transportation Industry R&D Center, Hefei, Anhui 230088, China)

**Abstract:** Water damage to embankments seriously affects the normal operation of highways, so it is extremely important to ensure the stability of the embankment. In addition, it is necessary to analyze the mechanism and study the safety control measures for water-damaged landslides of the embankment. A highway subgrade embankment was studied, and the causes and formation mechanism of the landslide were qualitatively analyzed based on the on-site deformation monitoring and stability calculation. Then, the stability coefficients of different reinforcement schemes were calculated. An appropriate reinforcement scheme was recommended by considering the project cost, construction technology, and construction period. The results indicate that uneven settlement of the embankment stratum is the fundamental cause of landslides under the influence of continuous rainfall. As rainfall accumulates in the depression on the left side of the embankment and penetrates into the soil layer, swelling and softening of clay layers and blockage of drainage channels further accelerate the formation of landslides. The composite reinforcement scheme of steel pipe piles and backfill back pressure meets the stability requirements, and the reinforcement effect is good.

**Keywords:** embankment slope; water-damaged landslide; stability analysis; reinforcement scheme; comparison of schemes

## 0 引言

降雨等不利气候条件极易影响基础工程的安全

性<sup>[1]</sup>。由于高速公路选线及环保要求,在山区修建公路往往采用高填方路堤,且利用开挖碎渣来填筑路堤边坡易形成旁洼地,在持续强降雨时,填方路堤易

收稿日期:2023-05-02

基金项目:国家重点实验室开放基金资助项目(编号:SKLMRDPC21KF13)

作者简介:胡明华,男,硕士,工程师.E-mail:664261450@qq.com

出现开裂甚至滑坡现象<sup>[2-4]</sup>。因此,有必要开展填方路堤水毁滑坡机理分析及安全控制措施相关研究。

近年来,国内外学者对降雨条件下边坡稳定性影响开展了大量研究,曾铃等<sup>[5]</sup>基于强度理论,通过数值模拟,对比分析了不同降雨强度对边坡性状及稳定性的影响;王一兆等<sup>[6]</sup>通过渗流理论,分析了浅层滑动面渗透系数、孔隙水压力稳定性的变化规律;覃小华等<sup>[7]</sup>以 Green-Ampt 入渗模型为基础,建立降雨入渗计算模型,分析了基岩面稳定性的变化规律;石振明等<sup>[8]</sup>提出降雨入渗的边坡稳定性分析方法,采用强度折减法计算了边坡安全系数;张玉等<sup>[9]</sup>依据现场勘测,定性评价了西南地区降雨入渗机制和稳定性现状;常金源等<sup>[10]</sup>建立了浅层滑坡的概念模型,推导了边坡安全系数与降雨时间的关系表达式。目前,针对边坡防治措施主要分为主动和被动两个方面,王子鹏<sup>[11]</sup>通过两次公路损毁研究,归纳了水毁破坏形式,并分析了主要影响原因;张永闯<sup>[12]</sup>针对某边坡基底与上部风化土层渗透性差异,实施了降雨渗透模拟,再现了降雨边坡破坏机理;靳青<sup>[13]</sup>总结了西北地区公路水毁的成因及处置方式;杨欣<sup>[14]</sup>通过 Geo-studio 有限元软件研究了不同降雨条件下软弱夹层路堑高边坡坡顶、坡中及坡底位置渗流特性;夏怡等<sup>[15]</sup>采用非饱和渗流分析方法对不同降雨条件下弃土场边坡的渗流场进行了分析,并探讨了降雨入渗对弃土边坡稳定性的影响。

综上所述,已有大量学者<sup>[16-17]</sup>对路基水毁机理开展研究,并取得了丰硕成果。但针对江淮地区公路水毁的研究相对较少,此外,鲜有综合经济性、施工工艺和施工周期等方面对滑坡加固措施进行比选。

本文针对江淮地区某高速公路填方路堤水毁路段,通过现场监测及计算,分析滑坡的原因和机理,并结合工程实际应用,对加固措施方案进行综合评价。

## 1 工程概况

巢(湖)黄(山)高速公路位于长江下游黑沙洲路段和芜裕河段交界区,采用双向四车道高速公路标准建设。K46+070~K46+160 段路基填方高度为 7~12 m,为填石路基,边坡采用片石码砌,坡率为 1:1.5。左侧坡脚设置路堤挡墙,挡墙最大高度约 6 m,最小高度为 4 m,基础埋深大于 1 m,墙身采用 M7.5 浆砌片石。

路基地形地貌属沿江丘陵平原区,微地貌属低丘,地面标高一般为 19~65 m。区域所处场地上部为高速公路填土( $Q_4^{me}$ );基底为第四系覆盖层,主要为上更新统残坡积层,该层粉质黏土厚度 5.1~11.2 m,可塑至硬塑,弱膨胀性,层底含水率高,土层相对较软;下伏基岩为三叠系下统南陵湖组( $T_{1n}$ )白云质灰岩。具体填方路段典型路基断面如图 1 所示。该地区降水时间分配不均,6 月份最多,12 月份最少,多年平均降水量 1 200~1 400 mm。地表处地下水埋深 0.70~2.10 m,标高 19.75~21.96 m。

## 2 水毁滑坡现状及机理分析

### 2.1 水毁滑坡状况

#### 2.1.1 路面裂缝观测

2020 年 6—7 月,由于工程区域内出现持续强降雨,K46+070~K46+160 段右幅路面出现裂缝,边坡码砌台阶出现错台,因此,立即对裂缝和码砌错台开

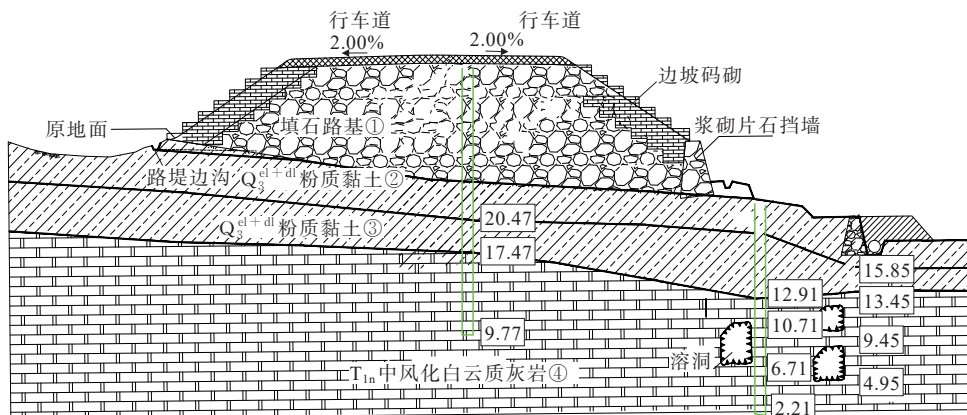


图1 填方路段典型路基断面(单位:m)

Figure 1 Typical subgrade section of embankment (unit:m)

展持续观测。图2为路面裂缝与码砌错台变形随时间变化情况,图3为路面裂缝示意图。

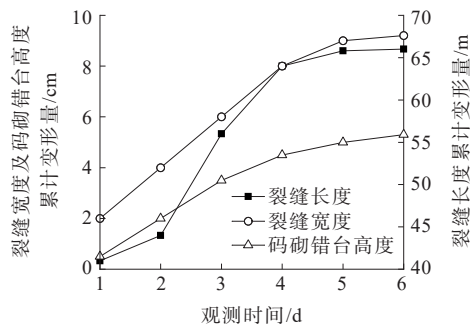


图2 路面裂缝与码砌错台变形随时间变化情况

Figure 2 Variation of pavement cracks and staggered deformation with time

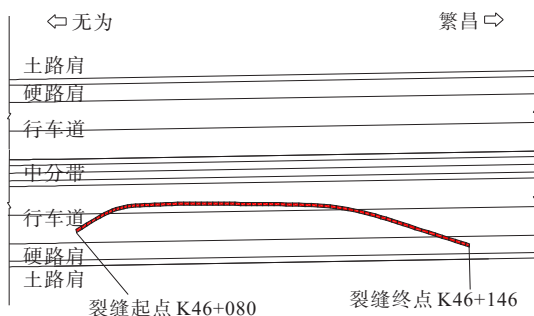


图3 路面裂缝示意图

Figure 3 Illustration of pavement cracks

## 2.1.2 既有防护病害及排水现状

图4为既有防护病害现场图。



(a) 码砌台阶错位



(b) 墙脚外裂缝

图4 既有防护病害现场

Figure 4 On-site indication of existing protective diseases

由图4可以看出:路基边坡码砌台阶出现明显变形,错位3.0~5.0 cm,K46+130处的路堤挡墙墙身出现鼓包变形,错台约10.0 cm,地方挡墙也出现变形、开裂,路堤挡墙与地方挡墙间原地面处出现众多细小裂缝,宽0.5~1.0 cm。

图5为既有排水现场图,路基左侧三角洼地产生汇水,深度约50.0 cm,未能及时排出。路基右侧路堤挡墙的泄水孔被细小颗粒堵塞而失效。在右侧路堤坡脚处,发现两处泉眼,出水量约10 L/min。



(a) 泄水孔失效



(b) 墙脚处泉眼

图5 既有排水现场情况

Figure 5 Existing drainage site conditions

## 2.2 水毁滑坡机理分析

### 2.2.1 滑坡因素分析

图6为水毁滑坡过程示意图,由于连续强降雨,导致滑体本身的不均匀沉降,进而产生滑坡现象。分析滑坡产生原因主要有以下几个方面:

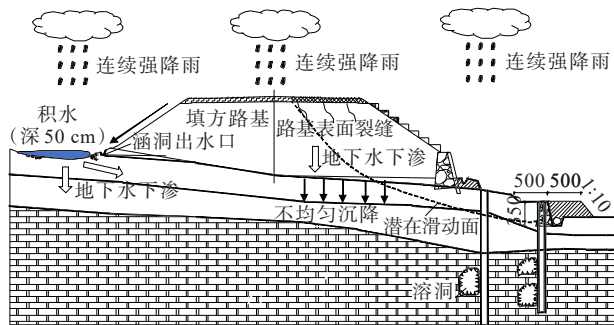


图6 水毁滑坡过程示意图(单位:cm)

Figure 6 Illustration of water-damaged landslide process(unit:cm)



(1) 地形地貌因素。该段路基左侧三面环山,路基处于山间洼地处,左侧山体与路基间的凹地为周边降雨主要汇集处,地表坡度 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,路基两侧存在明显的水力梯度。根据现场调查,路基左侧存在一处凹地,由于施工误差,凹地底部较涵洞出水口约低50 cm,且凹地内存有大量积水,无法通过涵洞排出。

(2) 降雨因素。项目区域内出现持续强降雨,暴雨时雨水迅速形成地表径流向该段路堤左侧相对低洼处汇集,凹地汇水和地下水从左侧沿填筑界面以及填筑路堤内部往右侧渗流,长期浸润地基土和路堤填土。

(3) 地层因素。原场地上部覆盖层为粉质黏土,具有弱膨胀性,吸水膨胀、软化,受地表水、地下水影响大的特点,在持续浸润下地层软化严重,导致路基产生滑塌现象。

(4) 路基填土因素。该段路基填料以碎石夹黏性土为主,碎石分布不均。持续强降雨时,雨水通过边部码砌边坡进入路基内部,一方面使路基处于饱水状态,增加已处于软化状态地基土的荷载;另一方面,强降雨入渗带走填石路基骨架间的细小颗粒,堵塞挡墙排水孔,致使填石路基内部排水通道堵塞。

2.2.2 稳定性分析

(1) 安全系数标准及计算结果

采用国内外具有代表性的不平衡推力算法,运用GEO5、理正等软件进行分析与计算,得到各状态下的安全系数见表1。滑坡为堆积层滑坡,滑动面为折线形,因此采用传递系数法公式进行稳定性验算<sup>[18]</sup>,见式(1):

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \left[ (W_i B - R_{D_i}) \tan \varphi_i + c_i L_i \right] \prod_{j=i}^{n-1} \varphi_j \right\} + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \left[ W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) + T_{D_i} \right] \prod_{j=i}^{n-1} \varphi_j \right\} + T_n}$$

(1)

式中: $K_f$ 为稳定性系数; $W_i$ 为第*i*条块的重量(kN/m); $B=(1-r_i)\cos\alpha_i-A\sin\alpha_i$ ;  $c_i$ 为第*i*条块的内聚力(kPa); $\varphi_i$ 为第*i*条块内摩擦角( $^{\circ}$ ); $L_i$ 为第*i*条块滑面长度(m); $\alpha_i$ 为第*i*条块滑面倾角( $^{\circ}$ ); $A$ 为地震加速度( $g$ ); $r_i$ 为第*i*条块传递系数; $R_n$ 为第*n*条块的抗滑力(kN/m); $T_n$ 为第*n*条块的下滑力(kN/m); $T_{D_i}$ 为渗透压力平行滑面的分力; $R_{D_i}$ 为渗透压力垂直滑面的分力; $R_n=\{[W_n(1-r_n)\cos\alpha_n-A\sin\alpha_n]-R_{D_n}\}\tan\varphi_n+c_nL_n$ ; $T_n=W_n(\sin\alpha_n+A\cos\alpha_n)+T_{D_n}$ ;  $\prod_{j=1}^{n-1}\varphi_j=\varphi_1\varphi_{i+1}\varphi_{i+2}\cdots K\varphi_{n-1}$ ;  $\varphi_i=\cos(\alpha_i-\alpha_{i+1})-\sin(\alpha_i-\alpha_{i+1})\tan\varphi_{i+1}$ ; $T_{D_i}=\gamma wh_{iw}L_i\tan\beta_i\cos(\alpha_i-\beta_i)$ ;  $R_{D_i}=\gamma wh_{iw}L_i\tan\beta_i\sin(\alpha_i-\beta_i)$ ; $\beta_i$ 为第*i*条块地下水流向。

表1 安全系数标准  
Table 1 Safety factor standard

工况	不同状态下的安全系数			
	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
正常工况	$<1.00$	$1.00\leq F_s\leq 1.05$	$1.05<F_s<1.25$	$F_s\geq 1.25$
暴雨工况	$<1.00$	$1.00\leq F_s\leq 1.05$	$1.05<F_s<1.15$	$F_s\geq 1.15$

根据现场调查场地开裂、变形位置的情况,推测潜在剪出口可能位于:①路堤边坡挡墙坡脚处;②现状菜地处;③排洪沟挡墙处。具体潜在滑动面如图7所示。根据滑动带力学参数结合试验和反演法计算综合确定参数,结果如表2所示。

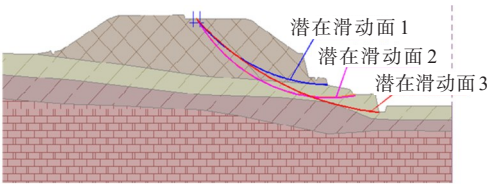


图7 潜在滑动面示意图

Figure 7 Illustration of potential sliding surface

表2 潜在滑动面安全系数计算结果

Table 2 Calculation results of safety factor of potential sliding surface

工况	岩性	密度/( $g\cdot cm^{-3}$ )	抗剪强度参数		K46+110断面处安全系数		
			$c/kPa$	$\varphi/(^{\circ})$	潜在滑动面1	潜在滑动面2	潜在滑动面3
正常工况	①填土	2.05	12.0	27.0	1.22	1.07	1.08
	②粉质黏土	1.90	18.0	12.0			
	③粉质黏土	1.95	30.0	16.0			
	④中风化白云质灰岩	2.40	100.0	30.0			
暴雨工况	①填土	2.10	10.0	25.0	1.10	0.97	0.96

续表 2

工况	岩性	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗剪强度参数		K46+110断面处安全系数		
			$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	潜在滑动面 1	潜在滑动面 2	潜在滑动面 3
	②粉质黏土	2.00	16.0	11.0			
	③粉质黏土	2.00	28.0	14.0			
	④中风化白云质灰岩	2.50	98.0	28.0			

通过定性分析、定量计算,该路堤边坡天然状态下处于欠稳定至基本稳定状态,饱水状态下处于不稳定状态。

### (2) 剩余下滑力计算结果

滑坡为堆积层滑坡,并且滑动面为折线形,滑坡推力按照传递系数法计算<sup>[17]</sup>,见式(2):

$$P_i = P_{i-1} \times \psi + K_s \times T_i - R_i \quad (2)$$

式中: $P_i$ 为第*i*条块的推力( $\text{kN/m}$ ); $P_{i-1}$ 为第*i*条块的剩余下滑力( $\text{kN/m}$ ); $\psi$ 为传递系数, $\psi = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i$ ;  $K_s$ 为稳定系数; $T_i$ 为下滑力, $T_i = W_i(\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) + \gamma w h_{iw} L_i \tan \beta_i \cos(\alpha_i - \beta_i)$ ;  $R_i$ 为抗滑力, $R_i = W_i(\cos \alpha_i + A \sin \alpha_i) - N_{w_i} - \gamma w h_{iw} L_i \tan \beta_i \cos(\alpha_i - \beta_i) \tan \varphi_i + c_i L_i$ ;  $N_{w_i}$ 为孔隙水压力, $N_{w_i} = \gamma_w h_{iw} L_i$ 。

对比现场开裂、变形位置的情况和软件计算结果,发现滑坡最不利面滑面是以高速公路裂缝为后缘,以地方挡墙处为剪出口的滑面。图8为该滑动面的剩余下滑力分布图。

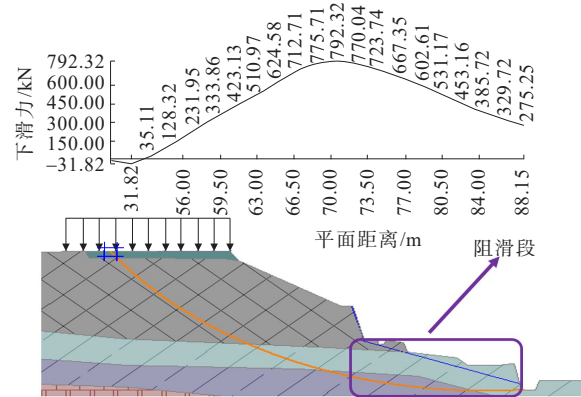


图8 滑动面的剩余下滑力分布图

Figure 8 Distribution of residual sliding force on sliding surface

### 2.3 应急处置方案

根据2020年7月7日至12日的连续观测发现,路面裂缝快速发展,并且降雨仍在持续,为避免滑坡进一步扩展,采取“临时排水+路基卸载+坡脚反压+临时钢管桩支护”的临时应急处置方案(图9)。

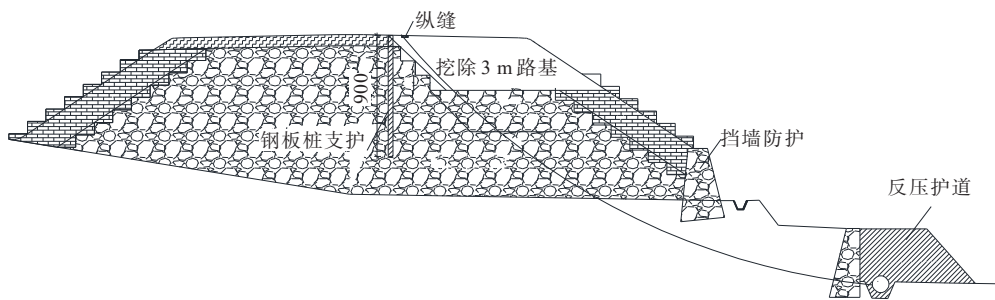


图9 现场临时应急处置方案

Figure 9 On-site temporary emergency treatment scheme

(1) 临时排水。在路基左侧凹地处设置排水泵,将凹地内积水及时抽至既有涵洞出水口。同时疏通既有挡墙泄水孔,及时排出路基内部水。

(2) 路基卸载。对裂缝范围内的路基进行开挖卸载,开挖长度为裂缝范围往两侧各扩展3 m,宽度为整个右幅车道。卸载深度为3 m,开挖处设置台阶,台阶高1.0 m,宽1.0 m。

(3) 坡脚反压。按照在阻滑段加载反压的滑坡处置思路,将上部路基卸载开挖土堆放至地方挡墙坡脚设置应急反压护道,上底宽大于6 m,反压土体压实度大于85%。

(4) 临时钢管桩支护。待应急反压护道完成后,沿路面开挖线打入一排钢管桩作为路基临时支护,以保证左侧半幅路基的正常通行。钢管桩桩径16.8

cm,壁厚6.5 mm,桩长9 m,桩间距0.8 m。

临时应急处置方案施工完成后,对滑坡体进行不间断监测,结果表明临时应急处置方案效果良好,滑坡体未出现进一步滑动。

### 3 加固方案比选评价

#### 3.1 加固方案及稳定性分析

##### 3.1.1 方案1

考虑到路基下部地层粉质黏土含水率高且灰岩岩溶发育,采取反压护道+换填轻质土+钢管桩方案(方

案1)。即在高速公路挡墙与地方挡墙间采用回填土进行反压,平均反压填土高度4 m,反压方量约2 300 m<sup>3</sup>。考虑地下水长期下渗影响,原基底承载力较难满足路基整体稳定性要求,采用钢管桩复合地基处理方案,加固下部软弱地基土层;钢管桩采用梅花形布设,间距2 m;平均设计桩长19 m,埋入完整基岩深度1 m,打桩时遇溶洞适当增加桩长。上部路基减载3 m后,采用轻质混凝土回填,轻质混凝土底部满铺一层40 cm厚碎石垫层,钢管桩顶部应埋入轻质混凝土10 cm,形成“群锚效应”,方案1的具体加固措施如图10所示。

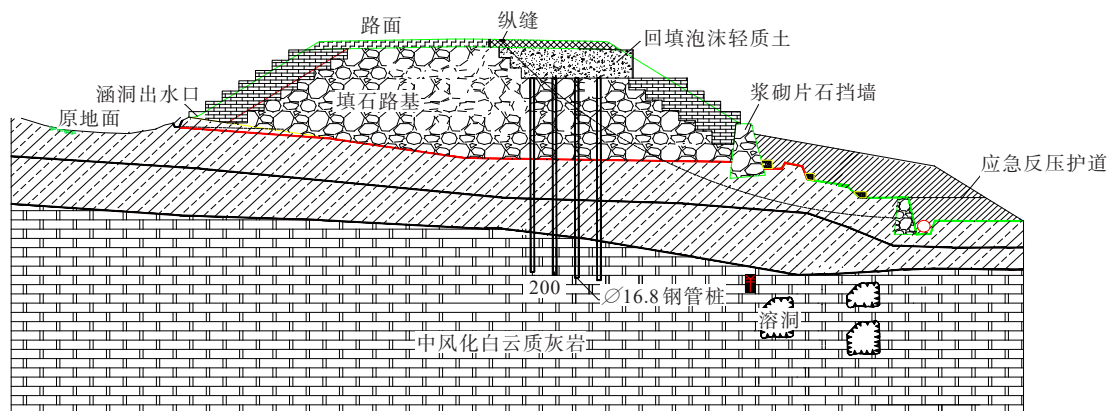


图10 方案1加固措施示意图(单位:cm)

Figure 10 Reinforcement measures in scheme 1 (unit:cm)

采用GEO5软件对加固后的路堤边坡模型进行稳定性分析。采用方案1加固后暴雨工况下安全系数为1.24,虽大于规范要求高值1.15,但边坡稳定性满足要求,如图11所示。

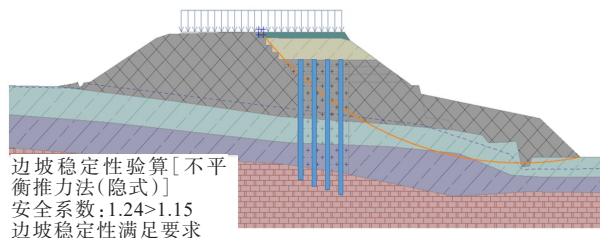


图11 方案1安全系数计算

Figure 11 Calculation of safety factor in scheme 1

##### 3.1.2 方案2

图12为方案2加固措施示意图。在路堤挡墙外立面上设置锚索框架进行加固,锚索长度的选取需要综合考虑坡体覆土层的厚度、溶洞发育情况及潜在滑动面深度等因素,并且要求埋入完整岩层8~10 m。锚索框架梁尺寸为60.0 cm×50.0 cm,纵向间

距3 m,每根竖肋设置3根锚索,锚索平均长度35 m,采用6束钢绞线,设计抗拉拔力应不小于600 kN。

采用GEO5软件对加固后的路堤边坡模型进行稳定性分析。采用方案2加固后暴雨工况下安全系数为1.26,大于规范要求值1.15,边坡稳定性满足要求。

##### 3.1.3 方案3

图13为方案3加固措施示意图。在路堤挡墙后5 m处设置抗滑桩,路堤挡墙及抗滑桩间进行堆载,堆载平均高度3 m。抗滑桩采用方形抗滑桩,尺寸为2.2 m×1.8 m,平均桩长25 m,进入完整基岩11 m,抗滑桩间进行预制挂板。在距桩顶1 m处预留锚索孔,视后期桩顶位移,可施加锚索进行补强。

采用理正岩土软件对抗滑桩加固后路堤边坡模型进行稳定性分析,桩后的剩余下滑力水平分力为530 kN/m,桩顶最大位移66.0 mm,小于100 mm,满足规范要求。采用方案3加固后暴雨工况下安全系数为1.36,虽大于规范要求值1.15,但边坡稳定性满足要求。

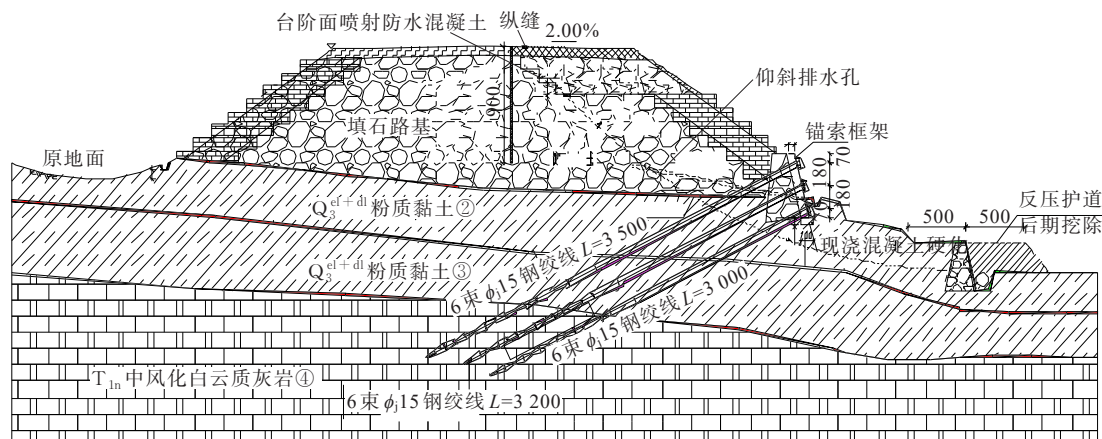


图 12 方案 2 加固措施示意图(单位:cm)

Figure 12 Reinforcement measures in scheme 2 (unit:cm)

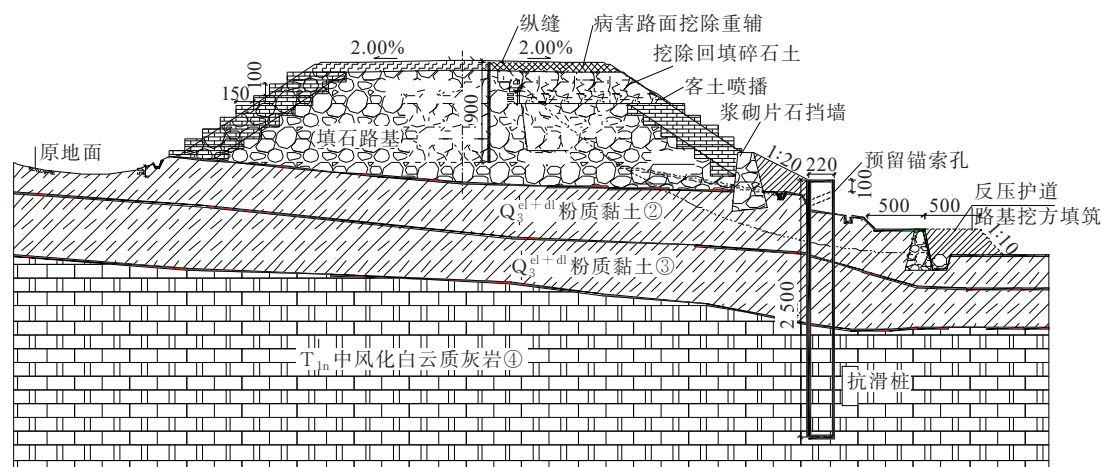


图 13 方案 3 加固措施示意图(单位:cm)

Figure 13 Reinforcement measures in scheme 3 (unit:cm)

3.2 方案比选

表 3 为从工程造价、施工工艺、施工周期、占地等方面对 3 种永久加固方案进行对比分析的结果。

由表 3 可知:方案 1 施工周期短,且能够快速保证恢复通行;其施工工艺较方案 2、3 更简单,受下部软弱土层及岩溶影响小,不稳定因素少,对整体稳定

表 3 3 种方案对比分析

Table 3 Comparative analysis of three schemes

方案	优点	缺点	施工周期	工程造价/万元	占地情况
1	整体稳定性较高,受下部岩溶影响较少,施工周期短,施工工艺简单	需要少量征地	施工周期 2 个月,限制因素少	425.6	新增占地面积约 2 666.68 m <sup>2</sup> ,需进行协调
2	总造价较低,无须新增占地面积	锚索长,成孔困难;锚索预应力后期存在损失的风险,施工周期长	施工周期 4 个月,受锚索成孔难度的限制	402.8	无须新增占地面积
3	整体稳定性高,安全系数高	造价高,受下部岩溶影响大,施工存在一定风险	施工周期 2 个月	478.5	新增占地面积 1 200.01 m <sup>2</sup>



性提高明显;且方案1造价中等,相比方案2无须后期再次进行投入。经过与地方协调征地问题后,综合考虑各方面因素,最终选用加固方案1。

### 3.3 实施效果

图14为加固方案实施效果图。按照先做好坡体排水,再反压护道、然后植入钢管桩,最后进行上部路基路面恢复的施工顺序,完成此段路基的水毁滑坡的永久加固,施工周期约为70 d。目前,高速公路已恢复运行,通过持续的观测,加固方案效果良好。



(a) 加固后路堤现场图



(b) 加固后高速公路运营图

图14 加固方案实施效果图

Figure 14 Implementation effect of reinforcement scheme

## 4 结论

通过对江淮地区某填方路堤水毁滑坡机理进行工程地质分析,并进行相应的安全系数计算,进一步提出相应的加固措施,综合工程造价、施工工艺、施工周期和占地等方面对加固方案进行比选,得出以下主要结论:

(1) 路基底部的软弱土层因持续强降雨导致不均匀沉降是诱发路堤滑坡的主要因素,地下水位影响较大的路堤边坡,应重视路基的排水设计,避免雨水进入长期软化地基。

(2) 左侧山体与路基间的凹地为降雨提供了汇集区,并渗入至软弱粉质黏土层软化路基。此外,路面裂缝为降雨入渗提供新的通道,进一步加剧了路堤滑坡。

(3) 与锚索框架加固方案和抗滑桩加固方案相比,采用反压护道、换填轻质土与钢管桩复合方案后

路堤整体稳定性较高,受下部岩溶影响较小,施工周期短及施工工艺更简单。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 黄明奎,马璐.试论异常气候事件对山区工程建设的影响[J].灾害学,2016,31(1):17-21.  
HUANG Mingkui, MA Lu. Influences of unusual climate events on mountain project construction[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 17-21.
- [2] 高岳权.黄土地区高填方路堤滑坡机理及控制措施研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(增刊1):393-399.  
GAO Yuequan. Study on the landslide mechanism and control measures of high embankment in loess area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(sup 1): 393-399.
- [3] 陈瑞考,魏学利,陈宝成,等.新疆昌吉硫磺沟K0+500处路基滑塌病害成因分析及处置对策[J].灾害学,2018,33(增刊1):34-39.  
CHEN Ruikao, WEI Xueli, CHEN Baocheng, et al. Cause analysis and treatments of subgrade collapse in K0+500 Changji in Xinjiang[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(sup 1): 34-39.
- [4] 王志斌,李亮,杨小礼,等.水平条分法在贴坡高填方路堤稳定性分析中的应用[J].中国公路学报,2007,20(3):29-34.  
WANG Zhibin, LI Liang, YANG Xiaoli, et al. Application of horizontal slice method in stability analysis of high fill embankments at slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 29-34.
- [5] 曾铃,李光裕,史振宁,等.前期降雨对非饱和覆盖层边坡性状及稳定性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(1):238-246.  
ZENG Ling, LI Guangyu, SHI Zhenning, et al. Effect of antecedent rainfall on characteristics and stability of unsaturated overburden slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 238-246.
- [6] 王一兆,隋耀华.降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响[J].长江科学院院报,2017,34(4):122-125.  
WANG Yizhao, SUI Yaohua. Influence of rainfall infiltration on slope stability at shallow layer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4): 122-125.
- [7] 覃小华,刘东升,宋强辉,等.强降雨条件下基岩型层状边坡入渗模型及稳定性研究[J].岩土力学,2016,37(11):3156-3164.



- QIN Xiaohua, LIU Dongsheng, SONG Qianghui, et al. Infiltration model of bedrock laminar slope under heavy rainfall and its stability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3156-3164.
- [8] 石振明, 沈丹祎, 彭铭, 等. 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 977-985.
- SHI Zhenming, SHEN Danyi, PENG Ming, et al. Slope stability analysis by considering rainfall infiltration in multi-layered unsaturated soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(8): 977-985.
- [9] 张玉, 徐卫亚, 邹丽芳, 等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 833-841.
- ZHANG Yu, XU Weiya, ZOU Lifang, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 833-841.
- [10] 常金源, 包含, 伍法权, 等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 995-1001.
- CHANG Jinyuan, BAO Han, WU Faquan, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 995-1001.
- [11] 王子鹏. 太行山区公路水毁引发的山区公路防洪设计思考[J]. 公路, 2017, 62(8): 284-287.
- WANG Zipeng. Thoughts on flood control design of mountain roads caused by highway flooding in Taihang mountain area[J]. Highway, 2017, 62(8): 284-287.
- [12] 张永闯. 基于全尺寸斜面模型试验的降雨边坡破坏机理研究[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 43-50.
- ZHANG Yongchuang. Study on failure mechanism of rainfall slope based on full-scale slope model experiment [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 43-50.
- [13] 靳青. 西北地区公路水毁成因及防治措施浅析[J]. 公路, 2014, 59(12): 222-225.
- JIN Qing. Analysis on the causes and prevention measures of highway water damage in Northwest China[J]. Highway, 2014, 59(12): 222-225.
- [14] 杨欣. 降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡渗流特性数值分析[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 38-42.
- YANG Xin. Numerical analysis of seepage characteristics of high slope with soft interlayer under rainfall infiltration condition[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 38-42.
- [15] 夏怡, 柳治国, 邹飞, 等. 降雨对山区高速公路弃土场边坡稳定性影响分析[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 7-11.
- XIA Yi, LIU Zhiguo, ZOU Fei, et al. Analysis of influence of rainfall on spoil slope stability of mountainous highway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 7-11.
- [16] 陈贺, 鲁志强, 李果, 等. 滇西北高原山区不同降雨条件下斜坡深部响应的试验研究[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 11-18.
- CHEN He, LU Zhiqiang, LI Guo, et al. Field experiment on deep response of slope subjected to different rainfalls in Plateau mountainous area of Northwest Yunnan[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 11-18.
- [17] 中华人民共和国国土资源部. 滑坡防治工程设计与施工技术规范: DZ/T 0219—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of design and construction for landslide stabilization: DZ/T 0219—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [18] 彭楠琦, 高惠瑛, 吕文舒. 弃土场边坡稳定性降雨预警标准及锚固排水耦合处治研究[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 7-14.
- PENG Nanqi, GAO Huiying, LYU Wenshu. Study on rainfall warning standard for abandoned soil site slope stability and relative coupling treatment of anchorage and drainage[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 7-14.
- [19] 王晨, 方正, 尹浩然, 等. 强降雨地区超宽高速公路雨水排除方法及积水改善措施研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 27-30.
- WANG Chen, FANG Zheng, YIN Haoran, et al. Study on drainage method and ponding improvement measures of super wide expressway in heavy rainfall area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 27-30.