

# 软土地区路基失稳机理及治理对策案例研究

陈涛<sup>1</sup>, 陈新国<sup>2</sup>, 吴慧明<sup>3\*</sup>, 马泉坤<sup>3</sup>

(1. 宁波市高等级公路建设管理中心, 浙江 宁波 315192; 2. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030;  
3. 浙江开天工程技术有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 软土地基路基失稳治理是公路工程中的难点问题, 针对某高速公路软土区路堤滑移现象, 根据现场工程资料, 分析了路基滑移产生的原因, 采用有限元强度折减法反演复杂条件下路基模型计算参数, 估算临界滑裂面, 提出了有效的治理措施, 并对不同工况下治理后的路基稳定性进行分析。结果表明: 软土地区应注意考虑气候及地下水因素, 下雨及地下水丰富的地区更易发生路基失稳现象; 公路工程范围内旧河道地形及后期淤积土体性质对路基的稳定性有较大的影响; 抗滑桩加固可以减小土的侧向力传递, 有效降低路基对抗滑桩外侧土体的影响, 提高地基稳定性; 用高压旋喷桩、抗滑桩及反压护道等措施相结合治理软土路段路基是可行的, 可为类似软土地基治理提供参考。

**关键词:** 软土地基; 路基失稳; 模型计算; 高压旋喷桩; 抗滑桩; 有限元强度折减法

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)02-0178-07

## A case study on mechanism analysis and treatment measures of subgrade instability in soft soil area

CHEN Tao<sup>1</sup>, CHEN Xin-guo<sup>2</sup>, WU Hui-ming<sup>3\*</sup>, MA Quan-kun<sup>3</sup>

(1. Ningbo High Grade Highway Construction Management Center, Ningbo 315192, Zhejiang, China;  
2. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, Zhejiang, China;  
3. Zhejiang Kaitian Engineering Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

**Abstract:** The instability of soft soil subgrades poses a significant challenge in highway engineering. This study investigated the cause of a case of subgrade slippage observed in an expressway, based on engineering data. Using the Finite Element Method (FEM) strength reduction method, the calculation parameters of the subgrade model under complex conditions were inverted, and the critical slip surface was estimated. Effective control measures were proposed, and the stability of the subgrade after the treatment of different working conditions was analyzed. The findings underscore the importance of considering climatic and groundwater influences in soft soil regions, highlighting that areas with heavy rainfall and high groundwater levels are more susceptible to subgrade instability. Moreover, the topography of ancient river channels and the characteristics of silted soil significantly impact subgrade stability. The use of anti-slide piles to mitigate lateral soil force transfer, thus reducing the impact of subgrade on soil and enhancing foundation stability, is emphasized. The study concludes that combining high pressure jet grouting piles, anti-slide piles, and counterpressure berms offers a viable solution for soft soil subgrade stabilization, providing a reference for similar future projects.

**Key words:** soft soil foundation; subgrade instability; model calculation; high pressure jet grouting pile; anti-slide pile; FEM strength reduction method

## 0 引言

边坡路基失稳是指填方路堤基底因承受巨大

填方土压力及车辆运营过程中的动荷载而产生变形的现象。该现象广泛存在于公路建设工程中<sup>[1-3]</sup>, 尤其是在深厚软土地区, 降雨作用更加容易导致失

收稿日期: 2022-11-04

基金项目: 宁波市水利科技计划项目 (NSKA202106); 宁波市交通运输科技计划项目 (202106); 宁波市科技计划项目 (2019B10047)。

作者简介: 陈涛 (1977—), 男, 浙江宁波人, 博士, 正高级工程师, 主要从事公路、桥梁等工程领域科研与建设管理工作。E-mail: 9350750@qq.com。

\*通信作者: 吴慧明 (1967—), 女, 江苏南通人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程领域科研与生产工作。E-mail: 1242739931@qq.com。

稳路基进一步发育形成滑坡<sup>[4-5]</sup>,若处理不当容易引发路基滑塌等现象,对行车安全造成威胁,路基滑塌的治理难度和处治费用较大,并且会造成巨大的经济损失和社会负面影响。

目前,关于边坡稳定性的研究主要侧重于引起边坡失稳的原因方向,而对如何因地制宜,采取合适手段进行边坡处理,防止失稳发生这一方向却严重缺乏。如付静等<sup>[6]</sup>借助有限元软件分析了由于水位上升导致的路基病害演变过程,发现了河流冲刷和挡土墙基础埋深是影响路基边坡稳定性的重要因素。秦浩等<sup>[7]</sup>采用数值模拟的方法对边坡的稳定性和受降雨入渗影响程度进行了评估,研究了未降雨和降雨条件下的稳定性变化规律。吉萌<sup>[8]</sup>模拟了河水冲刷路基边坡并得到其稳定性系数,发现河流水深、流速、路基边坡土的黏聚力、渗透系数、边坡坡度、河流弯道转角等因素与长时间冲刷下的边坡安全系数的关系。郭昊亮<sup>[9]</sup>以三门湾工程为研究对象,分析了该工程的软土地基特征,选取发生滑坡路段对工程概况进行了详细介绍。而国外研究多集中于边坡稳定性理论方面<sup>[10-12]</sup>,以实际工程为研究对象的较少。

综上所述,引发公路边坡失稳因素众多,选择合适的处理方法预防边坡失稳情况的发生,对边坡公路工程具有十分重要的意义。本文以三门湾大桥及接线工程软土路堤滑坡路段为例,在现场调研的基础上,结合该区域工程地质特征,初步推测其边坡失稳原因,结合有限元强度折减法进行模拟计算,分别对抗滑桩、高压旋喷桩和反压护道三项防护治理措施进行了对比计算。经工程检验发现,处理结果产生较小沉降且行车质量得到了保证,可为以后的工程提供借鉴。

## 1 滑坡及工程概况

### 1.1 工程概况

本次路基滑坡路段位于三门湾大桥及接线工程第5合同段K75+030~K75+130段路基左幅,为山间软土路段。该段为整体式路基,路基宽度26m,路基填高为6.90~7.28m。设计方案K75+030~K75+050段采用素混凝土灌注桩处理,桩长3.0~8.0m,桩间距2.5m,正方形布置,C20素混凝土灌注桩桩身直径600mm。K75+050~K75+130段采用管桩处理,平均桩长8.0m,桩间距2.0m,正方形布置,管桩采用直径400mm,管壁厚不小于60mm。布桩及路基失稳范围平面图如图1所示。

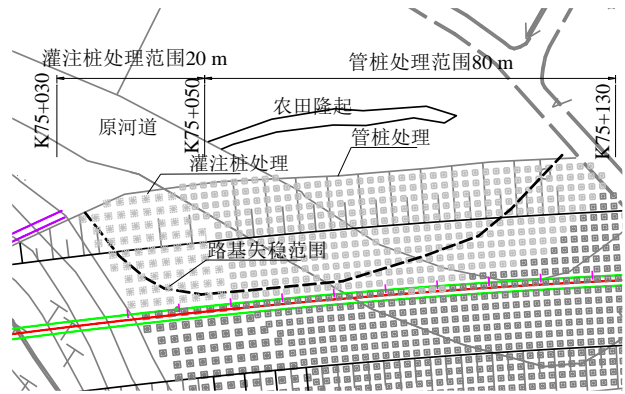


图1 布桩及路基失稳范围平面图

Fig. 1 Layout of piles and subgrade instability range

### 1.2 滑坡概况

滑坡平面形态呈近似圆弧状,滑坡体前缘及后缘高程约6~8m,滑坡体长约95m,中部宽约10m,面积约1803m<sup>2</sup>,体积约12621m<sup>3</sup>,路基裂缝及错台如图2所示。



(a)



(b)

图2 路基裂缝及错台

Fig. 2 Subgrade cracks and mismatches

## 2 滑坡形成机制

### 2.1 地形地质因素

滑坡路段位于山间软土路段,两侧傍山段淤泥底部直接下伏中风化凝灰岩;中间段淤泥下伏为含黏性土角砾层,角砾层下为中风化凝灰岩。沿路基左侧坡脚线的地质纵断面如图3所示,中间位置地质横断面如图4所示。主线桩号K75+075~K75+100处两侧均为断头河,路基正下方为原废弃河道。推

测废弃河道处存在一个纵向突变的沟谷地形,该河道原为山涧,河道断流废弃后原河床范围内后期堆积了大量淤泥至现状地表,后期堆积形成的淤泥比

原生海积的淤泥层物理力学性质更差,且更容易形成地下水汇集区。对路基稳定的影响较大,是导致路基滑移的重要原因。

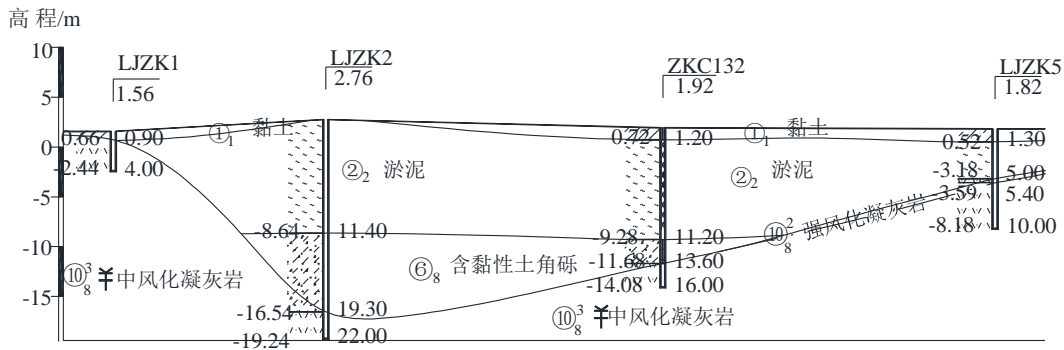


图3 左侧坡脚线的地质纵断面  
Fig. 3 Geological profile along the toe of the left slope

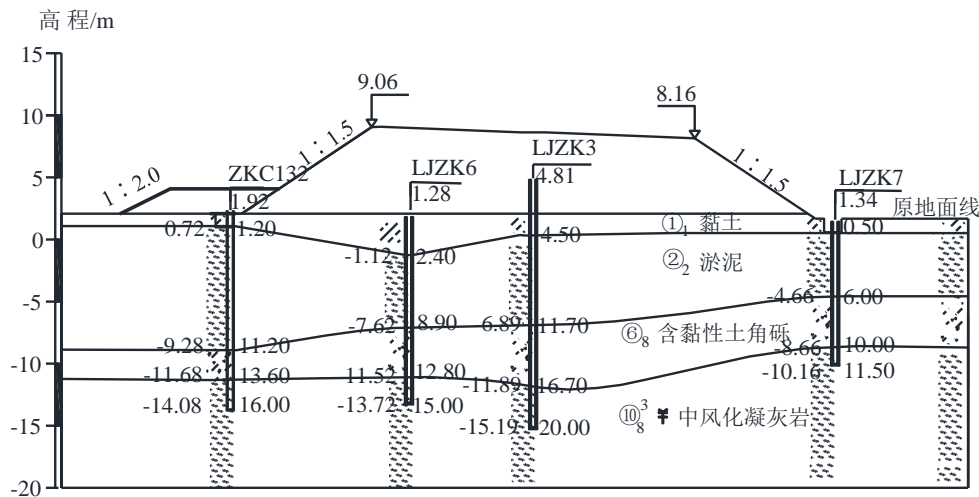


图4 K75+090地质横断面  
Fig. 4 Geological profile of K75+090 cross-section

### 2.2 气候因素

工程区地处浙江东南沿海,雨量丰富,年平均降水量 1 310~1 740 mm, 平均降水天数 150~171 d。6 月梅雨季降水量平均在 180~250 mm, 8 月由于台风影响, 降雨多为大强度集中降雨, 平均降水量 140~300 mm, 这对软土路基滑坡的产生创造了良好的条件, 连续性及集中性降雨渗入坡体, 使排水条件差的软土含水量增大, 形成滑坡面, 导致路基变形, 出现沉降、位移变形及裂缝。

### 2.3 地下水发育

工程区孔隙潜水含水层出露地表, 直接接受大气降水的补给, 也接受河网地表水及农田灌溉水的补给, 动态变化大, 坡洪积地下水与地表河流常表现为“互补互排”关系, 使原地面下黏土层、淤泥层等始终处于近饱和状态, 土体强度降低, 在上部荷载条件下, 路基下部软土经长期蠕变, 导致上部路基拉裂。

## 3 边坡处治方案

综合技术、经济、安全及工期要求, 拟采用以下 3 种处治方案对边坡进行治理。工况一, 仅采用高压旋喷桩加固; 工况二, 采用高压旋喷桩+抗滑桩加固; 工况三, 采用高压旋喷桩+抗滑桩+反压护道进行加固。其中治理方案剖面图如图 5 所示, 高压旋喷桩及抗滑桩布置方案如下:

### (1) 高压旋喷桩

K75+030~K75+130 段左幅路基宽度为 13.0 m, 在原管桩、灌注桩范围内新增高压旋喷桩, 新增高压旋喷桩在平面上以长方形布置, 横向间距为 1.2 m, 在原灌注桩处理范围内纵向间距为 2.5 m, 在原管桩处理范围内纵向间距为 2.0 m。高压旋喷桩处理深度范围为 8.0~14.5 m, 桩长控制应以桩端穿透淤泥层, 进入下部含碎石角砾层 0.5 m 为准。

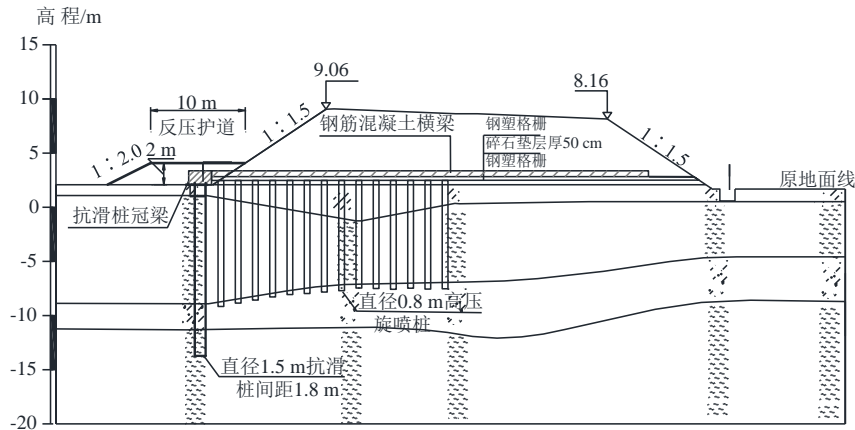


图 5 治理方案剖面图

Fig. 5 Profile of ground improvement plan

(2) 抗滑桩

K75+030~K75+120 范围左侧坡脚设置抗滑桩, 桩径 1.5 m, 桩间距 1.8 m, 桩长 3.3~23.7 m。每两根桩间空隙设置一根直径 0.8 m 的旋喷桩。

(3) 反压护道

左侧坡脚设置反压护道, 宽度为 10 m, 高度为 2 m, 反压护道边坡坡率为 1:2。

### 4 边坡治理效果计算分析

#### 4.1 计算模型参数反演

由于原路堤下软土已采用管桩进行处理, 土体参数复杂, 因此需采用强度折减理论<sup>[13]</sup> 进行土体参数计算, 通过反算的方法确定土体的抗剪强度指标, 从而得到安全系数  $F_0=1.0$  时对应的临界稳定模型。根据路基滑动调查的实际情况, 已出现较大裂隙且风险最大, 根据原有废弃河道位置, 判断 K75+090 为最危险滑动面, 作为模型断面。地基土为软弱土层, 考虑最不利状态, 软弱土层采用最大厚度进行计算。建立初始有限元模型, 如图 6 所示, 计算模型长 50 m, 高 29 m, 路基填高 7.4 m, 边坡坡率为 1.0:1.5, 高压旋喷桩桩长为 12 m, 抗滑桩桩长为 20 m, 反压护道高 2 m, 长 10 m。

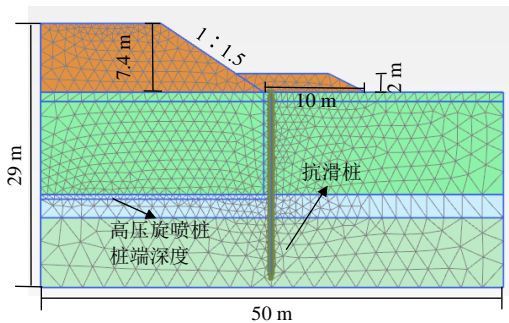


图 6 初始有限元模型

Fig. 6 Initial finite element model

模型在达到临界稳定状态时的边坡滑裂面如图 7 所示, 滑裂面为圆弧形, 滑坡滑移剪出点在坡脚的位置。

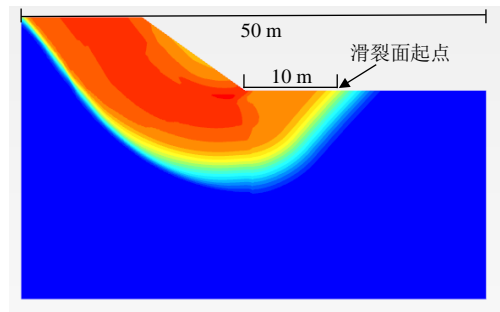


图 7 临界稳定状态时的边坡滑裂面

Fig. 7 Slope slip surface at critical stable state

由图 7 可知, 滑裂面起点距离路基边缘约 10 m, 实测得到本次滑坡断面裂缝距离路基前缘约 11 m。模拟的结果和实际相比接近, 考虑到实际地质情况的复杂性, 本文所建立的临界稳定模型合理, 能对滑坡的发展作出较为准确的预测。临界稳定状态模型参数见表 1。

表 1 临界稳定状态模型参数

Table 1 Model parameters at critical stable state

土体类型	黏聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\phi/(\text{°})$	重度 $\gamma/$ $(\text{kN}/\text{m}^3)$	厚度/ m
①路基填土	2	36.0	22	7.4
②黏土	20	10.0	19	1.2
③原软土加固	12	10.5	17	10.0

在临界稳定模型的基础上, 分别对 3 种工况治理后边坡在运营状态时的稳定性进行计算, 计算时行车荷载采用 10.5 kN/m 均布荷载, 抗滑桩采用板模型模拟, 通过对比弹性板截面内力与桩的抗剪和抗压强度检验桩的强度是否满足要求。具体边坡治理模拟参数如表 2 所示。

表2 边坡治理模拟参数

Table 2 Slope treatment simulation parameters

类型	重度 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	$EI$ / (kN/m <sup>2</sup> )	$EA$ / (kN/m)
高压旋喷桩	25	47.8	11.4	—	—
抗滑桩	—	—	—	49 680	353 300
反压护道	22	0	35.0	—	—

4.2 安全系数计算

《公路软土地基路堤设计规范》(DB33/T 904—2021)规定,公路软土地基设计进行路堤的稳定性计算时,采用直接快剪指标对应的最小安全系数为  $F_s=1.2$ 。采用工况一处理得到的临界滑裂面如图8(a)所示,此时对应的边坡整体安全系数  $F_1=1.195$ ,相较于临界状态安全系数增加了约19.5%,尚未达到规范要求的  $F_s=1.2$ 。采用工况二处理得到的临界滑裂面如图8(b)所示,边坡安全系数得到了进一步的提高,

$F_2=1.244$ ,相较于工况一加固时提高4.1%,且  $F_2=1.244 > F_s=1.2$ ,满足规范稳定性要求。采用工况三处理得到的临界滑裂面如图8(c)所示,计算得到边坡整体的安全系数为1.312。增加前缘反压的设计,安全系数从1.244提升至1.312,安全系数提高了5.5%。可以看出,经工况三处理后的路基边坡稳定性最好。

4.3 边坡应力分布

图9为不同工况条件下场地主应力分布情况,由图9(a)与图9(b)比较可以看出,两种工况应力场变化不大,是因为高压旋喷桩主要作用为加固土体,不改变土体中的应力分布。从图9(c)与图9(d)中可以看出,采用抗滑桩加固后场地应力场发生改变,抗滑桩中下部出现局部应力集中的现象,表明抗滑桩中下部承担了较大的土体应力,发挥了加固作用。反压护道使应力集中现象更加明显,因此采用工况三加固效果更好。

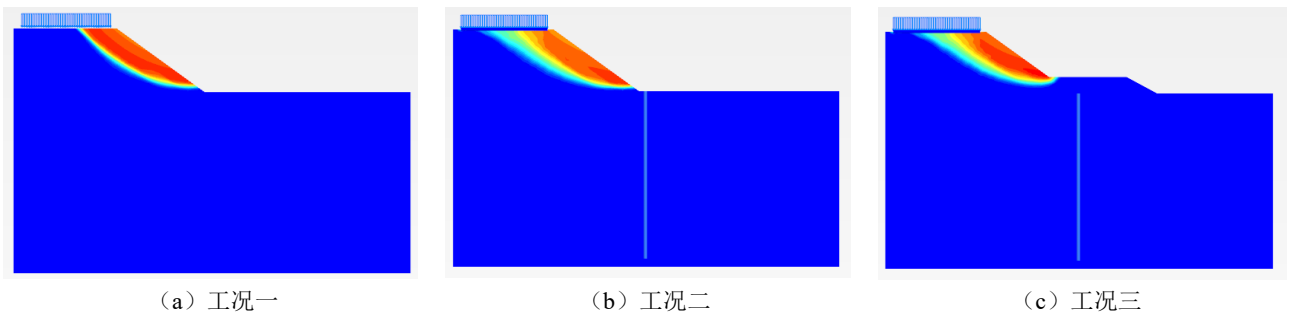


图8 临界滑裂面  
Fig. 8 Critical slip surface

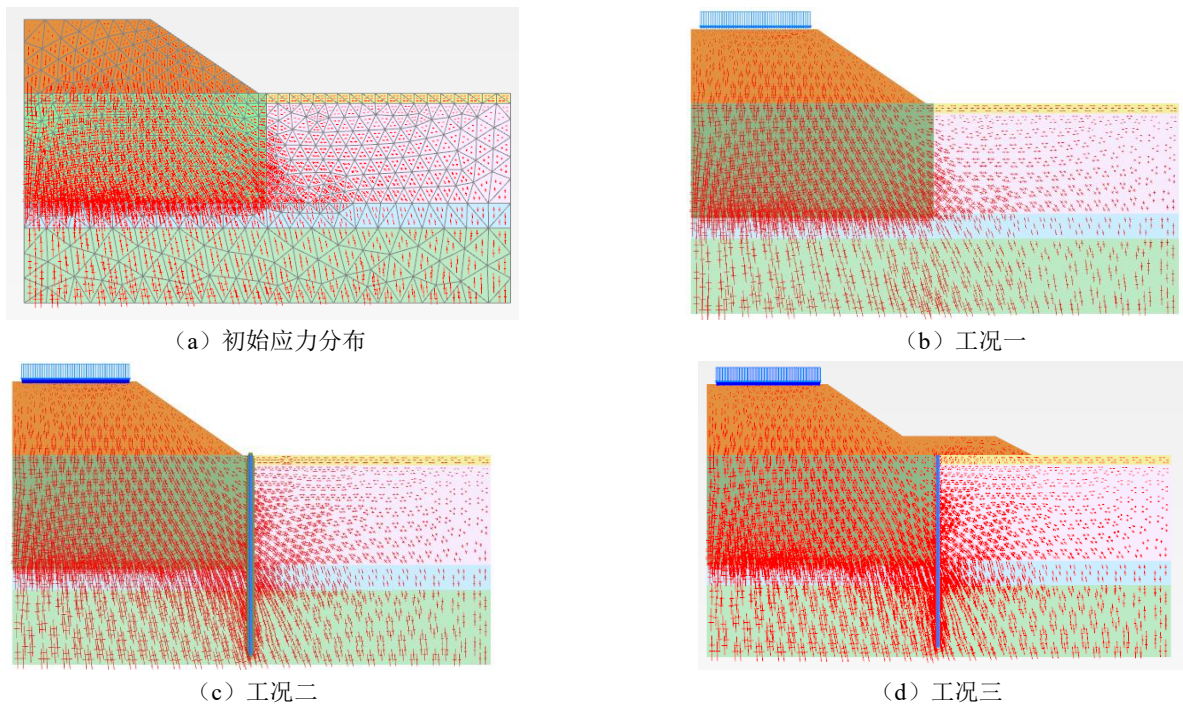


图9 不同工况条件下场地主应力分布

Fig. 9 Distribution of principal stress in the embankment and the soils under different working conditions

经模拟发现, 3 种工况垂直方向应力变化不大, 因此不对其进行讨论。图 10 为 3 种工况下土体水平向有效应力  $\sigma_x$  分布图, 通过对比可以较为明显地看出桩左右两侧应力发生突变, 抗滑桩加固减小了土的侧向力传递, 有效降低了路基对抗滑桩右侧土体的影响, 提高地基稳定性。

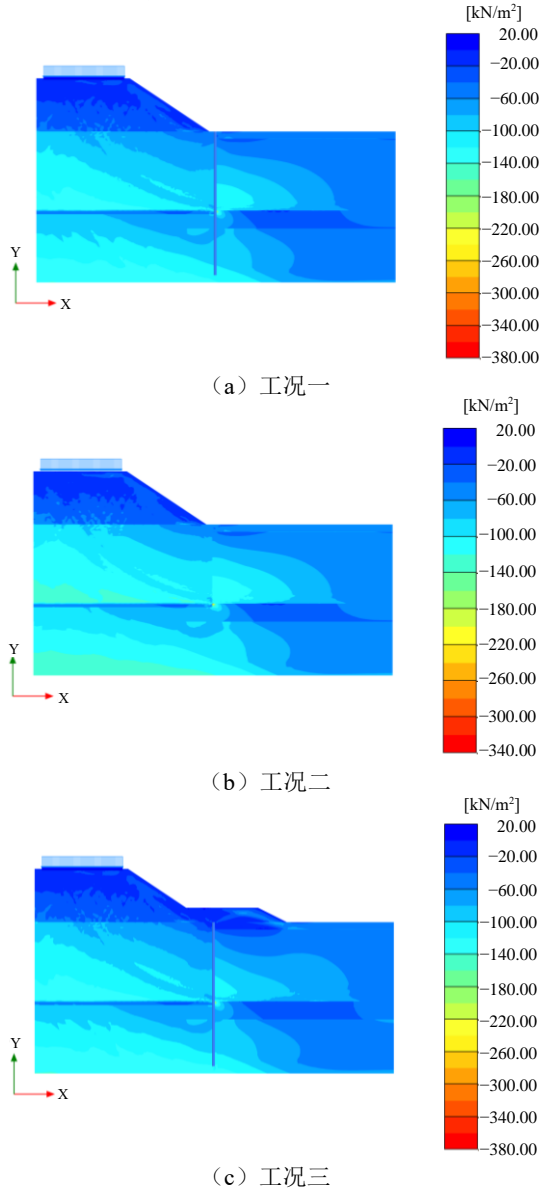


图 10 不同工况下土体水平向有效应力  $\sigma_x$  分布图

Fig. 10 Distribution of horizontal effective stress  $\sigma_x$  under different working conditions

#### 4.4 抗滑桩内力分布

以上分析可知, 工况三进行地基处理对边坡稳定性最好, 对该工况下抗滑桩内力进行验算, 图 11 为工况三抗滑桩的内力图。由图 11 可以看出, 抗滑桩在软土加固层与含黏土角砾层分界处所受到的剪力和弯矩值达到最大, 最大剪力值为 4.16 kN/m, 最大弯矩值为 1.641 kN·m/m, 均未超过抗滑桩的允许值, 这是因为路基下部土体经过两次加固后已经达

到一定的强度和稳定, 抗滑桩所承载的抗滑力减小。

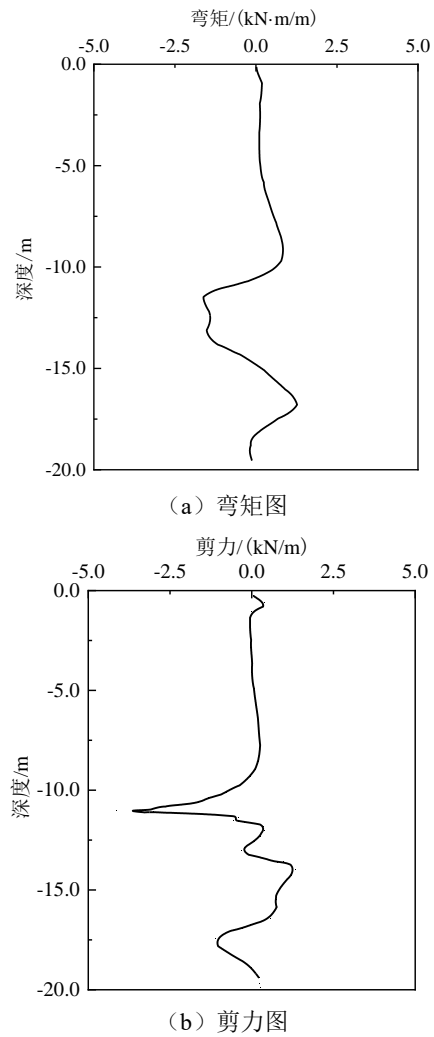


图 11 抗滑桩内力图

Fig. 11 Internal forces of the anti-slide pile

## 5 结 论

以软土地基路基滑移为例, 分析滑坡形成机制, 采用强度折减理论反演复杂条件下的滑坡土体参数, 结合有限元方法对路基治理前后的整体稳定性进行分析, 得出以下结论:

- (1) 公路工程建设时, 应关注软土地区旧河道地形及其土体性质的影响, 河道后期堆积形成的淤泥容易引发路基滑塌等现象。
- (2) 降雨量丰富的软土地区, 纵向突变沟谷地形处应做好截、排水措施, 防止软土地基软化失稳。
- (3) 结合路基滑塌的滑裂面几何特点, 采用强度折减理论反演复杂条件下滑坡土体参数, 估算临界滑裂面是可行的。
- (4) 进行边坡治理时, 根据失稳机制采取多种技术相结合是一种有效的治理手段, 高压旋喷桩+

抗滑桩+反压护道进行加固可提高边坡稳定性。

(5) 抗滑桩加固后场地应力场出现局部应力集中的现象, 并且可以减小土的侧向力传递, 有效降低路基对土体的影响。抗滑桩在软土加固层与含黏土角砾层分界处所受到的剪力和弯矩值达到最大。

## 参考文献

- [1] 夏志远, 王率, 任延斌. 某山区高填方路基边坡失稳机制分析研究[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(5): 371-376.  
XIA Zhi-yuan, WANG Shuai, REN Yan-bin. Analysis and research on instability and sliding mechanism of high fill subgrade slope in a mountainous area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2022, 36(5): 371-376.
- [2] 郑万里. 山区公路路基边坡稳定性分析及支护设计[J]. 交通世界, 2021(11): 47-48.  
ZHENG Wan-li. Stability analysis and support design of subgrade slope of mountain highway[J]. TranspoWorld, 2021(11): 47-48.
- [3] 杨勇, 敖祥. 野三关某公路路基挡土墙失稳分析及治理措施[J]. 公路与汽运, 2020(5): 64-66.  
YANG Yong, AO Xiang. Instability analysis and treatment measures of subgrade retaining wall of a highway in Yesanguan[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(5): 64-66.
- [4] 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 Zhi-guo, 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.
- [5] 郭钊. 考虑降雨入渗的边坡三维稳定性分析[D]. 陕西咸阳: 西北农林科技大学, 2021.  
GUO Zhao. Three-dimensional stability analysis of slope considering rainfall infiltration[D]. Xianyang, Shaanxi: Northwest A & F University, 2021.
- [6] 付静, 毛雪松, 吴谦, 等. 沿河半填半挖路基失稳机制[J]. 中国科技论文, 2022, 17(10): 1099-1104.  
FU Jing, MAO Xue-song, WU Qian, et al. Instability mechanism of a cut-and-fill subgrade along a river[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(10): 1099-1104.
- [7] 秦浩, 余洁. 基于 FLAC3D 的公路边坡稳定性及降雨入渗的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 244-246.  
QIN Hao, YU Jie. The stability of highway slope based on FLAC3D and the influence of rainfall infiltration on it[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 50(2): 244-246.
- [8] 吉萌. 基于 CPF D Barracuda 软件的沿河路基边坡冲刷研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
JI Meng. Study on scour of subgrade slope along rivers based on CPF D barracuda software[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [9] 郭昊亮. 三门湾软土地基沉降及稳定问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
GUO Hao-liang. Study on the settlement and stability of soft soil subgrade in Sanmen Bay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [10] POULOS H G. Analysis of the settlement of pile groups[J]. Géotechnique, 1968, 18(4): 449-471.
- [11] POULOS H G, DVAIS E H. Pile Foundation Analysis and Design[M]. Toronto: John Wiley & Sons, 1980.
- [12] ASIF IMRAN S, BARMAN M, COMMURI S, et al. Artificial neural network-based intelligent compaction analyzer for real-time estimation of subgrade quality[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(6): 04018048.
- [13] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.  
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343-346.