

高填方路堤滑坡成因分析及防护对策

王鹏^{1,2}, 杨龙伟³, 李永勤^{1,2}, 李小兵^{1,2}, 赵冬^{1,2}

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 西安中交公路岩土工程有限责任公司, 陕西 西安 710075;
3. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430064)

摘要: 以某高速公路互通匝道高填方路堤边坡失稳为例, 综合考虑填方区原始地形地貌、地层岩性及施工工艺对路堤边坡稳定性的影响, 分析了土-岩二元结构填方边坡的变形特征和破坏机理, 认为岩土界面可能为填方边坡的最薄弱层面而非填筑界面。同时, 根据滑坡成因分析和稳定性评价结果, 借助 ABAQUS 有限元分析软件对填方边坡的破坏机理做了进一步验证, 并对抗滑桩支挡结构的受力状态进行了数值分析。分析可知, 滑坡滑面主要在岩土界面处, 滑面形态呈折线状; 通过开挖台阶、设置宽平台和抗滑桩支挡可有效抑制路堤边坡变形, 同时应加强排水; 在抗滑桩支挡作用下, 高填方路堤边坡潜在滑动面表现为由深层向浅层的演化破坏; 滑动面以上桩身应力逐渐减小, 在滑面处形成“三角状”高应力区, 滑动面以下桩-土接触段桩身应力主要集中在桩前; 桩身主要受弯段在潜在滑面以下; 桩身主要受推力部位在滑面以上桩长 1/5~1/3 处, 而主要抗力部位在滑面以下桩前部分。

关键词: 高填方路堤边坡; 成因分析; 稳定性评价; 数值分析; 抗滑桩

中图分类号: U41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0095-08

Analysis and countermeasures of landslides in high fill embankments

WANG Peng^{1,2}, YANG Long-wei³, LI Yong-qin^{1,2}, LI Xiao-bing^{1,2}, ZHAO Dong^{1,2}

(1. CCCG First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;

2. Xi'an CCCG Highway Geotechnical Engineering Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;

3. CCTEG Wuhan Engineering Company, Wuhan 430064, Hubei, China)

Abstract: Taking the instability of a high fill embankment slope at a highway interchange ramp as an example, this study comprehensively considers the influence of original terrain topography, geological lithology, and construction technology on the stability of embankment slopes. It analyzes the deformation characteristics and failure mechanism of the soil-rock binary structure embankment slope, suggesting that the rock-soil interface may be the weakest zone of the embankment slope rather than the fill interface. Besides, based on the landslide analysis and instability evaluation, the failure mechanism of the fill slope was further verified by ABAQUS finite element analysis software, and the stress state of the anti-slide pile support structure was analyzed. It is concluded that the sliding surface of the landslide is mainly located at the rock-soil interface, and exhibits a polyline shape. Applying bench excavation, wide platforms, and anti-slide pile support can effectively suppress the deformation of embankment slopes, while drainage measures should be strengthened. Under the action of anti-slide pile support, the potential sliding surface of the high fill embankment slope exhibits evolutionary failure from deep to shallow layers. The stress on the pile body above the sliding surface gradually decreases, forming a “triangular” high stress zone at the sliding surface. The stress of the pile body in the pile-soil contact section below the sliding surface is mainly concentrated in front of the pile. The main bending section of the pile body is below the potential sliding surface. The main thrust area of the pile body is 1/5-1/3 of the pile length above the sliding surface, while the main resistance area is in the front part of the pile below the sliding surface.

Key words: high fill embankment slope; cause analysis; stability evaluation; numerical analysis; anti-slide pile

0 引言

高填方路堤具有填筑高度大、填筑断面面积大、路堤本身累积沉降量大等特点，路堤边坡的稳定性需进行专门的分析和验证。伴随着我国公路建设事业的发展，针对填方边坡稳定性问题，人们通过大量的技术研究和工程实践积累了丰富的经验。例如，边宏光等^[1]基于试验和强度折减法探究了碎石含量对填方路堤边坡稳定性的影响；程辉等^[2]采用FLAC 3D讨论了不同挖方坡度、不同填方坡度以及不同结合形式在不同工况下对黄土高填方边坡稳定性的影响；夏怡等^[3]通过极限平衡法研究了路基填料、高度、坡率等不同因素对特殊土高填方路基稳定性的影响；高岳权^[4]以黄土地区某高填方路堤滑坡为例，分析了黄土下卧层不均匀湿陷性沉降对路堤稳定性的影响；孙红月等^[5]介绍了松散覆盖土层上高填方路基滑坡的内在机理；凌露^[6]则分析了不同边坡级数、不同坡率、不同平台宽度等因素对高填方路堤边坡稳定性的影响。然而，由于高填方区地形地貌、地层岩性及填筑工艺等差别，使得路堤边坡的稳定性、力学状态及变形机理也表现出迥异性，同时，针对高填方路堤边坡支挡结构的受力机制研究也相对较少。

本文以某土-岩二元结构地层^[7-8]高填方路堤失稳为例，对高填方路堤滑坡成因和稳定性进行分析评价，同时结合路堤填方区原始地形地貌、地层岩性和已填筑路堤边坡变形情况，借助ABAQUS有限元分析软件对高填方路堤边坡的破坏机理做了

进一步验证，并对抗滑桩支挡结构的受力状态进行了数值分析，探究高填方路堤滑坡的防护对策，为类似工程实践提供参考。

1 工程概况

某高速公路互通匝道采用高填方路堤，原设计进行4级边坡填筑，坡率为1:2~1:1.5，最大填筑高度约39.3 m，每级边坡平台均宽2 m，并在第二级边坡处设置20 m宽平台，填料选用碎石土，滑坡地质断面如图1所示。

当路堤填筑至15~16 m时，已填筑部分产生滑坡，造成填筑区后缘拉裂和前缘村道鼓胀破坏。滑坡区基本地貌单元为低中山沟谷地貌，地势较缓，斜坡自然坡度约为10°，地层结构较为简单，为典型的土-岩二元结构，上层残坡积层主要成分为黏土，下伏基岩为厚层灰岩(310°∠9°)，岩质较硬，呈顺倾状产出，与滑坡主滑方向夹角为30°~36°。

区内气候湿润，多阴雨天，属亚热带湿润多雨气候，多年平均降雨量为1 077.3 mm，最大降雨量为1 438.9 mm，最小降雨量为774.5 mm，降雨主要集中在每年4—10月，降雨量为933.0 mm，占全年降雨量的86.7%，11月至翌年3月，降雨量为144.3 mm，仅占全年降雨量的13.3%。

滑坡滑体物质主要为粉质黏土混灰岩、砂泥岩碎、块石，中密-密实状，为透水层；滑带物质组成为黏土，稍湿-湿，呈可塑状，该处属于相对隔水层，易于地下水富集；滑床为灰岩地层。岩芯照片见图2。

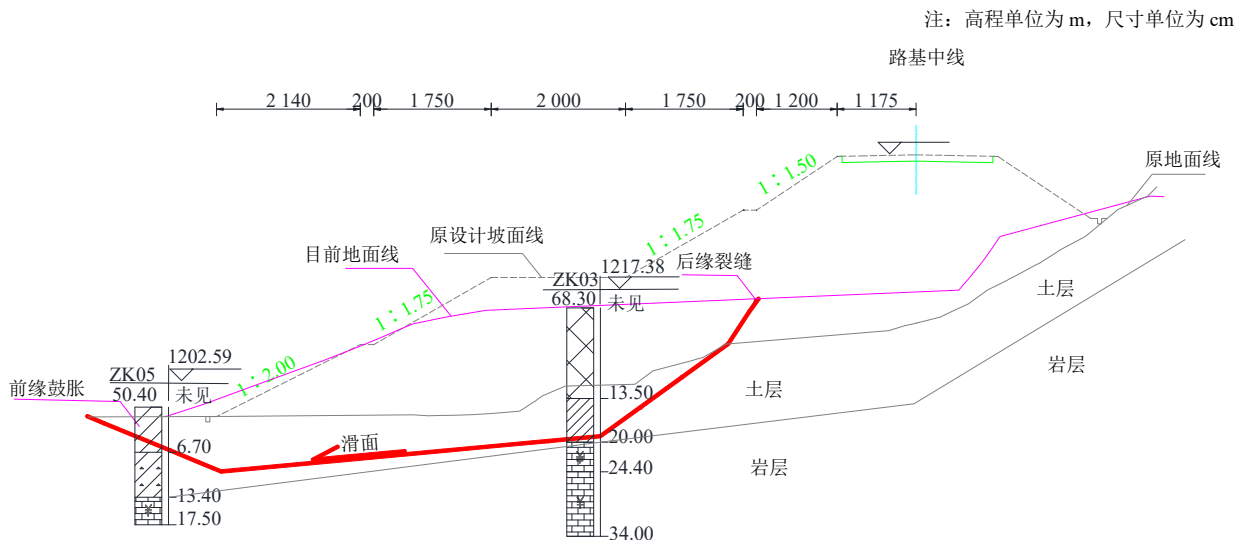


图1 滑坡地质断面

Fig. 1 Geological section of landslide



图 2 岩芯照片

Fig. 2 Photos of core samples

2 滑坡变形特征

据滑坡调查资料分析, 滑坡区属于侵蚀型低中山沟谷地貌, 斜坡自然坡度在 10° 左右, 为灾害弱发育区域, 发生滑坡破坏异于常规。滑坡变形特征显著, 整体呈“簸箕状”。滑坡后缘形成了 3 条很长的张拉裂缝, 基本贯通, 延伸长度约为 120 m, 宽为 0.2~0.3 m, 下错高度约为 0.85 m; 滑坡前缘则有多条鼓胀裂缝, 造成村道整幅损坏, 滑坡全貌如图 3 所示。经实地测量判定, 滑坡纵长约为 100 m, 横宽约为 250 m, 滑体厚为 6.3~14.2 m, 均厚约为 11.8 m, 体积约为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为中型中层滑坡。



图 3 滑坡全貌

Fig. 3 Overall view of landslide

3 滑坡成因分析及稳定性评价

3.1 滑坡成因

在路堤填筑过程中, 当填筑至 15~16 m 时, 填方平台后缘首先出现拉裂现象, 且填方前缘道路逐渐鼓胀开裂, 并伴有纵向裂缝产生, 而随着滑坡变形加剧, 滑坡后缘裂缝逐渐向两侧延伸收拢, 使得裂缝贯通, 发生整体滑动, 即说明该滑坡呈推移式

滑动破坏。

通过对滑坡区地形条件、降水、地层结构特征进行分析, 结合滑坡变形过程判断, 滑坡区为土-岩二元结构地层, 为易滑地层, 而区内降水丰富, 多年平均降雨量为 1 077.3 mm, 是滑坡发生的重要条件, 且路基碎石土填料透水、压实地基黏土滞水也是滑坡产生的重要诱因。在路堤填筑过程中, 随着填土荷载增加, 地基土受到的压力增大, 被逐渐压密, 而地表水入渗滞留于地基土层中, 滞水饱和, 软化了地基土, 致使其强度迅速降低, 加之下伏灰岩地层顺倾, 最终使路堤填土同原地基土沿岩-土界面发生滑动破坏, 滑面照片如图 4 所示。此外, 岩-土界面处形成的隔水层润滑滑面, 也加剧了滑坡的变形, 进一步佐证高填方路堤边坡最薄弱区可能为 岩-土界面, 而非填筑界面。



图 4 滑面照片

Fig. 4 Slippery surface

3.2 滑坡稳定性评价

由于持续强降雨, 路堤滑坡产生显著滑动变形, 坡脚处鼓胀、坡后缘开裂, 即认为暴雨状态下填方路堤处于不稳定状态, 结合勘察查明的滑面位置对滑坡稳定性进行评价。滑坡稳定性评价所采用

的岩土物理力学参数通过试验测定,同时结合现场调查和工程实践经验反算作为最终评价所采用的参数。岩土物理力学参数见表1。根据勘察查明的滑面形态,结合滑坡变形情况,采用传递系数法隐

式解对滑坡的稳定性进行计算(见表2)。通过分析可知,天然工况下填筑路堤处于欠稳定-基本稳定临界状态,而暴雨工况下为不稳定状态,易产生滑坡破坏。

表1 岩土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil

地层	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	弹性模量 E/kPa	泊松比 ν
填土(碎石土)	18.0 (18.5)	35.0 (34.0)	10 (8.0)	5×10^4	0.32
地基土(黏土)	19.0 (19.5)	9.0 (8.0)	14 (13.8)	4×10^4	0.35
基岩(灰岩)	26.4	32.5	1 132	4×10^6	0.23
抗滑桩	25.0	—	—	2×10^7	0.16

注: ()内为饱和条件下的参数。

表2 滑坡稳定性计算

Table 2 Calculation of landslide stability

方法	工况	稳定系数	安全系数	稳定性评价
传递系数法	天然工况	1.05	1.30	欠稳定-基本稳定
	暴雨工况	0.95	1.20	不稳定

综上所述,根据滑坡变形发展过程及其特征,判断该滑坡沿岩-土界面呈推移式滑动破坏,滑面较薄且光滑。诱发滑坡变形的主要原因是在暴雨状态下,地表水大量渗入坡体,同时加载造成地基土压实、滞水效果更为显著,形成隔水带,而随着填方荷载的增大,在地基土滞水情况下,地基土体强度迅速降低、滑体下滑力增大,从而诱发滑坡破坏。

基本稳定临界状态,而暴雨工况下则为欠稳定状态。

4 高路堤边坡滑坡治理及防护对策

针对原设计高填方路堤滑坡的成因和变形特征,考虑地基土含水量较高,采用以下初步治理方案。清除滑体至基岩面,清底后在基岩面处设置1.2m宽台阶,并分4级边坡进行路堤填筑,第1级边坡高为8m,坡率为1:1.50,第2~4级边坡高均为10m,坡率为1:1.75~1:2.00,并在第2级平台处设置5m宽平台,拟填筑路堤如图5所示。

采用 Bishop 法对该初步治理方案进行稳定性分析,通过分析可知,天然工况下拟填筑路堤处于

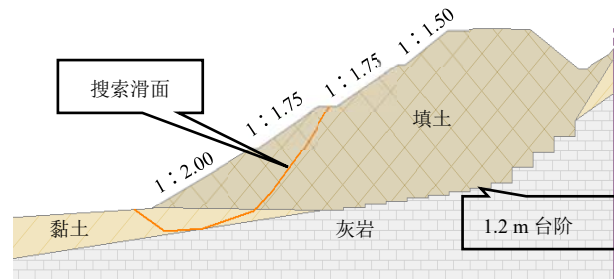


图5 拟填筑路堤

Fig. 5 Proposed embankment filling

在 Bishop 法搜索滑面的基础上,考虑路堤前缘地基土的影响,采用传递系数法显式解对拟填筑路堤稳定性进行分析,计算结果与 Bishop 法基本一致,且暴雨工况下路堤前缘剩余下滑力为362.08 kN/m,不满足路基设计规范要求(稳定性计算见表3),故在坡脚处设置长15m(进入滑床7.5m)、直径1.8m、桩间距4.5m的圆形抗滑桩用以提高路堤边坡的抗滑能力。

表3 高填方路堤稳定性计算

Table 3 Stability calculation of high fill embankment

方法	工况	稳定系数	安全系数	稳定性评价
Bishop 法	天然工况	1.21	1.30	基本稳定
	暴雨工况	1.04	1.20	欠稳定
传递系数法	天然工况	1.12	1.30	基本稳定
	暴雨工况	1.03	1.20	欠稳定
	设置抗滑桩(暴雨)	1.31	1.20	稳定

5 数值分析验证

5.1 基本理论

本次数值分析采用有限元软件 ABAQUS, 土体采用弹塑性本构模型。其中, 弹性部分选用线弹性模型, 基于广义胡克定律, 通过设定弹性模量和泊松比计算介质的应变-应力关系 (桩结构采用线弹性模型); 塑性部分选用 Mohr-Coulomb 塑性模型, 其主要适用于单调荷载作用下的颗粒状材料, 屈服准则为剪切破坏准则, 也可设置为受拉破坏准则, 在岩土工程中应用广泛。

(1) 剪切屈服面函数

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c \quad (1)$$

式中: φ 为 $q-p$ 应力面上 Mohr-Coulomb 屈服面的倾斜角, 即材料摩擦角; c 为材料黏聚力; q 为偏应力; p 为球应力。

$R_{mc}(\theta, \varphi)$ 函数控制屈服面在 π 平面的形状, 见式 (2):

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{3} \cos(\theta + \frac{\pi}{3}) \tan \varphi \quad (2)$$

$$\cos(3\theta) = \frac{r^3}{q^3} \quad (3)$$

式中: θ 为极偏角; r 为第三偏应力不变量。

(2) 硬化规律

通过控制黏聚力 c 的大小在软件中实现剪切塑性面的硬化或软化, 必须指定 c 与等效塑性应变间的变化关系。等效应变见式 (4):

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} e_{ij} e_{ij}} \quad (4)$$

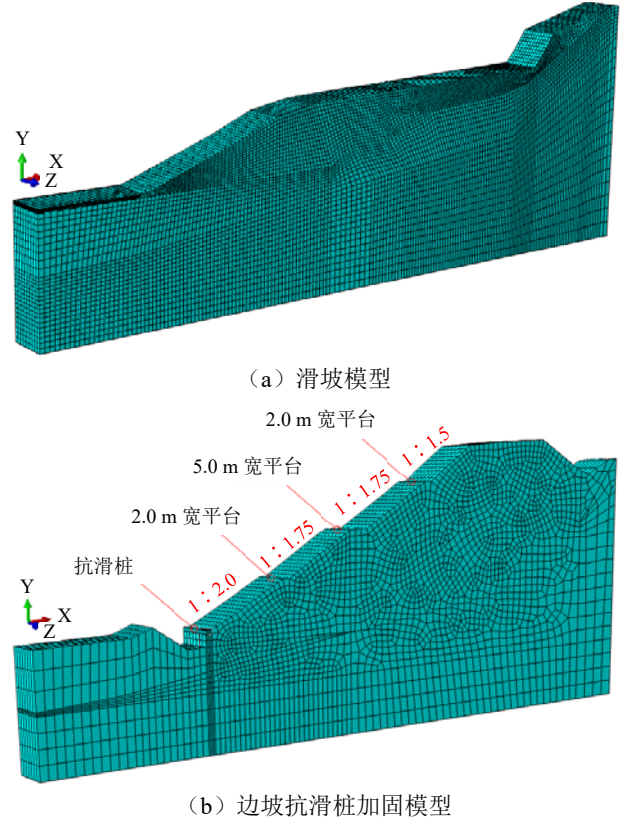
式中: e_{ij} 为偏应变张量。

5.2 模型建立

本次数值模拟分析建立 2 个计算模型, 即高填方路堤滑坡模型和边坡抗滑桩加固模型。其中, 滑坡模型尺寸为 $172 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 62 \text{ m}$, 采用八节点线性六面体单元 (C3D8R) 划分网格, X、Z 方向约束水平位移, Y 方向约束竖直和水平位移, 模拟未进行地基处理直接填筑路堤而失稳的滑坡模型, 如图 6 (a) 所示。抗滑桩加固模型尺寸为 $172 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 68 \text{ m}$, 加固措施为: (1) 清底开挖台阶后填筑路堤; (2) 在坡脚处设置长 15 m 、直径 1.8 m 的圆形抗滑桩, 桩顶由 $1.8 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 的冠梁连接。同样采用八节点线性六面体单元 (C3D8R) 划分网格, X、Z 方向约束水

平位移, Y 方向约束竖直和水平位移, 模拟采用抗滑桩加固后高填方路堤填筑变形情况, 同时分析抗滑桩的受力机制并验证其支护效果^[9-13], 边坡抗滑桩加固模型如图 6 (b) 所示。

数值分析计算所采用的物理力学参数同表 1。



(a) 滑坡模型

(b) 边坡抗滑桩加固模型

图 6 计算模型

Fig. 6 Calculation model

5.3 计算结果

由直接填筑路堤工况计算可知, 若对原地基不进行处理而直接填筑路堤至 15 m 左右时, 填筑边坡变形较大, 计算不收敛, 而当地基黏土内摩擦角 φ 增大为 40° 、黏聚力 c 增大至 69.45 kPa 时, 计算可收敛, 即说明直接填筑路堤工况无法使路堤成型, 需增设支挡结构增强路堤边坡稳定性。在直接填筑路堤过程中, 地基黏土受填土挤压产生变形, 且变形向坡脚扩展, 并在坡脚处发生隆起, 即图 7 (a) 水平位移云图中“蓝色变形区”, 计算结果与滑坡前缘村道鼓胀破坏变形特征基本一致。同时, 由于填筑工艺、顺序影响, 填方区产生差异性变形, 表现为在填筑高度大、临空面、陡基底区形成较大变形 (见图 7 (a))。填筑路堤首先在填筑界面后缘发生变形 (见图 7 (b) 等效塑性应变云图), 即与填方平台后缘首先出现拉裂现象一致, 滑动面形态基本与图 1 滑坡调查的滑动面基本一致, 位于岩-土界面处, 而非填方界面处, 说明路堤首先在填筑界面后缘产生拉裂破坏, 进一

步证明该滑坡呈推移式滑动破坏。

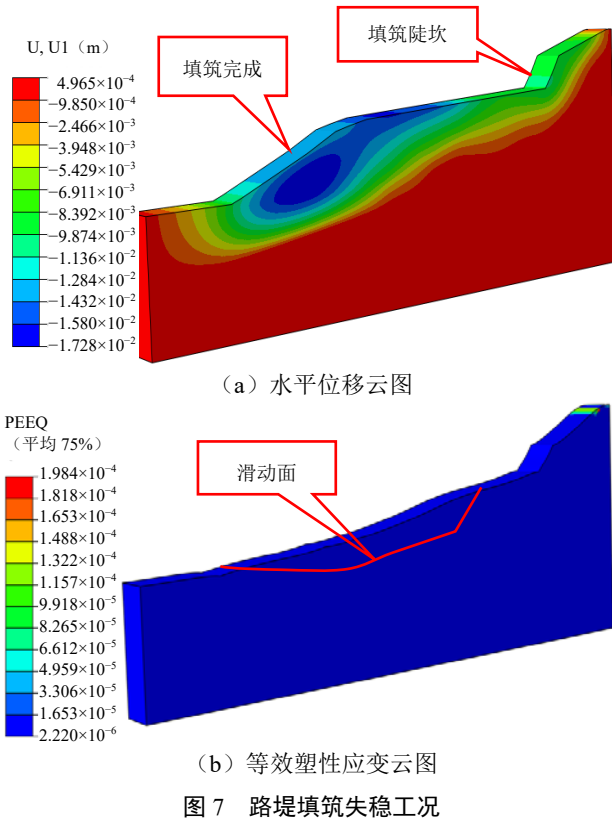


图7 路堤填筑失稳工况

Fig. 7 Unstable working conditions of embankment

由于直接进行填筑无法使得路堤成型，故在路堤边坡坡脚处设置长 15 m、直径 1.8 m 的圆形抗滑桩。图 8 为抗滑桩加固路堤填筑工况位移云图，计算前进行了地应力平衡^[13]，即认为填筑前地基变形为 0，路堤填筑完成后最大变形量为 18.2 cm，其中最大水平位移量为 7.6 cm，最大沉降量为 17.2 cm，即说明路堤变形主要以沉降为主。路堤变形随填筑深度增大逐渐减小，而在坡脚抗滑桩处仅为 2.4 cm，说明抗滑桩对路堤边坡进行了有效支护。此外，填筑路堤内部变形带多呈现反翘的圆弧状。

抗滑桩加固路堤填筑工况应变云图如图 9 所示，由图 9 (a) 可以看出，填筑路堤潜在变形部位主要分布于填筑界面后缘陡壁、第 1 级、第 3 级和第 4 级边坡坡脚，而在第 2 级边坡处设置了 5 m 宽平台，故而未发生显著塑性变形，说明设置坡脚抗滑桩和宽平台可有效抑制路堤边坡变形。此外，由图 9 (b) 利用强度折减法^[14] 迫使路堤边坡失稳破坏可知，路堤边坡破坏为多层破坏，因抗滑桩支挡作用，潜在滑动面表现出由深层向浅层的演化破坏，即首先在填筑界面后缘陡壁发生变形，而由于填土 c 和 φ 的减小，变形逐渐向浅层发展，且伴随着 c 和 φ 的进一步减小，滑面阻滑段变形范围逐渐

扩大贯通，最终导致路堤整体失稳。

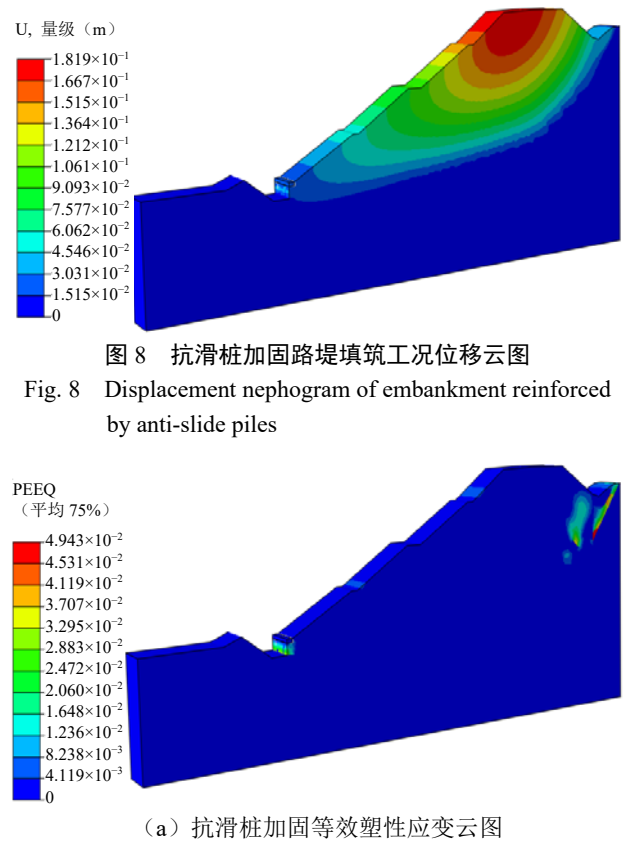


图8 抗滑桩加固路堤填筑工况位移云图

Fig. 8 Displacement nephogram of embankment reinforced by anti-slide piles

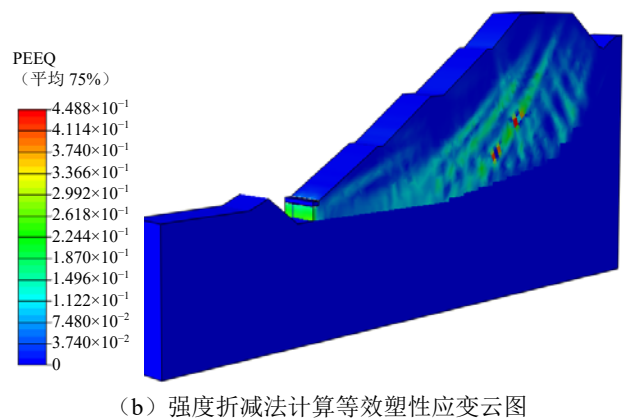


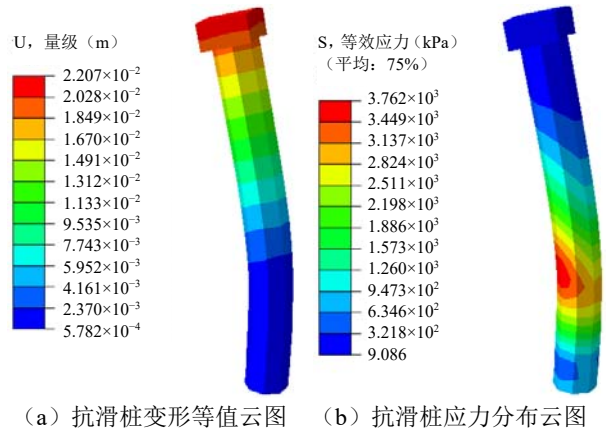
图9 抗滑桩加固路堤填筑工况应变云图

Fig. 9 Strain nephogram of embankment reinforced by anti-slide piles

图 10 为抗滑桩变形、受力云图，由图 10 (a) 可知，悬臂抗滑桩桩顶连梁处变形最大，约 2.2 cm；变形将随着桩深增加逐渐减小，而在 10 m 以下无显著变形，说明路堤潜在滑动面深约 10 m，处于岩-土界面处，同时也说明在坚硬地层中嵌固 1/3 桩长的合理性。由图 10 (b) 可知，桩深 9.3~10.45 m 处等效应力最大，应力分布图平面上为“三角形”状，钝角角尖在桩深 10.1 m 处，10.1 m 以上桩身应力逐渐减小，12 m 以下桩-土接触段桩身应力主要集中在桩前，该结果与刘洪佳等^[15] 和张涛等^[16]

在悬臂式抗滑桩模型试验研究中的成果基本一致。

图 11 为抗滑桩位移、弯矩、剪力分布图, 由图 11 (a) 可知, 桩身水平位移在深度 10m 以上随着桩深增加逐渐减小, 在 10m 以下则无显著变形, 进一步说明路堤潜在滑动面深约 10 m; 由图 11 (b) 可知, 深度 10.58 m 处桩身弯矩最大, 为 1 108 kN·m, 说明主要受弯段在潜在滑动面以下; 由图 11 (c) 可知, 桩身受到的剪力随桩深增加逐渐增大, 而在深度 8~12 m 处发生突变, 并在 10.1 m 处出现剪力方向的改变, 说明桩身主要受推力部位在滑动面以上桩长 1/5~1/3 处, 而主要抗力部位应在滑动面以下桩前部分^[15-18]。



(a) 抗滑桩变形等值云图 (b) 抗滑桩应力分布云图

图 10 抗滑桩变形、受力云图

Fig. 10 Deformation and stress nephogram of anti-slide pile

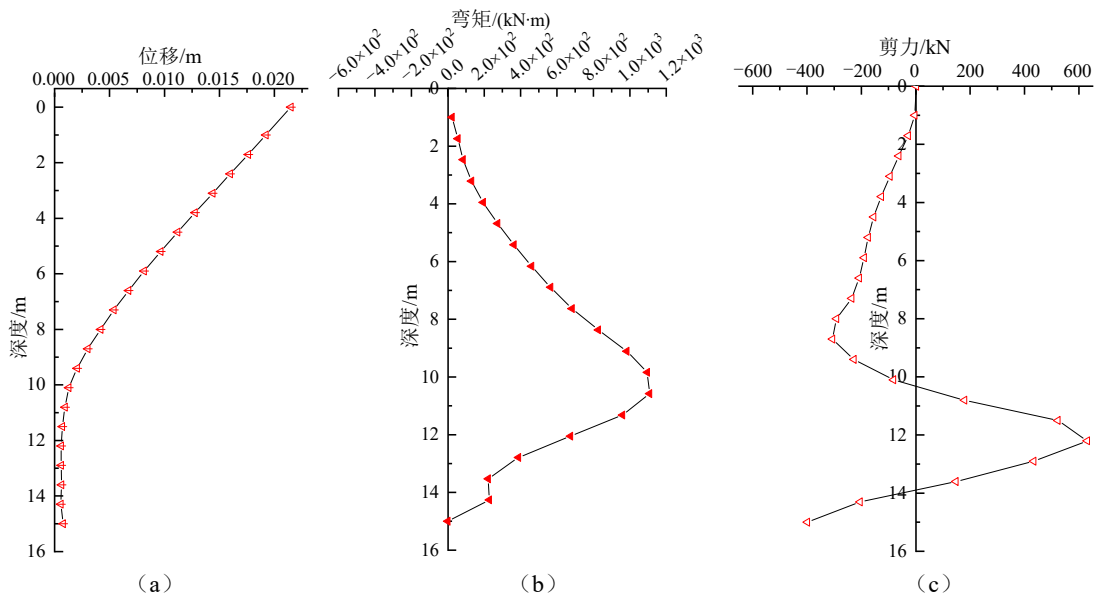


图 11 抗滑桩位移、弯矩、剪力分布图
Fig. 11 Displacement, bending moment and shear force distribution of anti-slide pile

6 结 论

(1) 填方区原始地形地貌、地层岩性影响填方路堤稳定性, 若未查清地层岩性或未进行地基处理而直接进行路堤填筑则极易诱发填方路堤整体失稳破坏。

(2) 在土-岩二元结构地层上填筑路堤时, 原地基土受填土荷载作用压实, 滞水作用加强。而岩-土界面成为最薄弱层面, 路堤失稳滑动后形成较薄且光滑的滑面。为此, 针对此类高填方路堤应加强清底和排水设计, 例如设置排水盲沟、仰斜排水孔等。

(3) 斜坡填筑路堤失稳首先多在填筑界面后缘发生破坏, 产生张拉裂缝, 且随着填土荷载作用挤压加强, 地基土逐渐产生变形, 并向坡脚处扩展而使坡

脚地面隆起, 即此类滑坡常呈推移式滑动破坏。

(4) 通过基岩面开挖台阶、填料设置宽平台和抗滑桩支挡等措施可有效抑制路堤边坡变形。而由于抗滑桩支挡作用, 路堤边坡潜在滑动面表现出由深层向浅层的演化破坏。

(5) 在滑动面以上, 桩身应力逐渐减小, 在滑动面处形成“三角状”高应力区, 滑动面以下桩-土接触段桩身应力主要集中在桩前; 桩身主要受弯段在潜在滑动面以下; 桩身主要受推力部位在滑动面以上桩长 1/5~1/3 处, 而主要抗力部位在滑动面以下桩前部分。

参考文献

[1] 边宏光, 王顺, 李典庆, 等. 碎石含量对填方路堤边坡

- 稳定性影响分析[J/OL]. 工程力学, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20240221.1905.020>.
- BIAN Hong-guang, WANG Shun, LI Dian-qing, et al. Influence of gravel content on the stability of filling embankment slope[J/OL]. Engineering Mechanics, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20240221.1905.020>.
- [2] 程辉, 许锐, 王广璐, 等. 延安新区黄土高填方边坡稳定性研究[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(10): 52-57.
CHENG Hui, XU Rui, WANG Guang-lu, et al. Study on the stability of loess high fill slope in Yan'an new area[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(10): 52-57.
- [3] 夏怡, 方正峰. 基于极限平衡法的特殊土高填方路基稳定性分析[J]. 土工基础, 2021, 35(3): 356-358, 364.
XIA Yi, FANG Zheng-feng. Stability analysis of high embankment with special soil using limit equilibrium method[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(3): 356-358, 364.
- [4] 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 Yue-quan. Study on the landslide mechanism and control measures of high embankment in loess area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 393-399.
- [5] 孙红月, 吕庆. 高填方路基诱发滑坡机理分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 168-171.
SUN Hong-yue, LÜ Qing. Mechanism analysis of landslide induced by high-filled roadbed[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5): 168-171.
- [6] 凌露. 高填方土质路基稳定性分析与填筑技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2015.
LING Lu. Research on the stability of high soil-filled subgrade and filling technology[D]. Changsha: Central South University, 2015.
- [7] 赵江彬. 降雨条件下残坡积土-砂岩二元结构边坡稳定性分析及防治措施[D]. 南昌: 东华理工大学, 2024.
ZHAO Jiang-bin. Stability analysis and prevention measures for slopes with residual soil-sandstone binary structure under rainfall conditions[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2024.
- [8] 孙巍锋. 土-岩二元结构路堑边坡失稳机理与智能预警研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
SUN Wei-feng. Study of instability mechanism and intelligent pre-warning for cutting slope with soil-rock binary structure[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [9] 贺嘉, 陈国兴. 基于 ABAQUS 软件的大直径桩承载力-变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 306-310.
HE Jia, CHEN Guo-xing. Analysis of bearing capacity-deformation of the large diameter pile by the ABAQUS software[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 306-310.
- [10] 陈晶, 高峰, 沈晓明. 基于 ABAQUS 的桩侧摩阻力仿真分析[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 27-29.
CHEN Jing, GAO Feng, SHEN Xiao-ming. Simulation for pile friction based on ABAQUS[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 27(1): 27-29.
- [11] 费康, 彭劼. CAE 分析大系: ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
FEI Kang, PENG Jie. CAE Analysis Series: Detailed Explanation of ABAQUS Geotechnical Engineering Examples[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017.
- [12] 王国斌, 叶铭, 代先尧, 等. 基于 ABAQUS 的斜坡桩土模型的地应力平衡方法研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 158-163.
WANG Guo-bin, YE Ming, DAI Xian-yao, et al. Research on geo-stress balance method of slope pile-soil model based on ABAQUS[J]. Highway, 2022, 67(12): 158-163.
- [13] 陈富. 软土表面硬壳层超固结比对路堤填筑影响数值模拟[J]. 地基处理, 2020, 2(6): 497-503.
CHEN Fu. Numerical simulation of overconsolidation ratio of hard crust layer in soft soil on the embankment construction[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(6): 497-503.
- [14] 李春忠, 陈国兴, 樊有维. 基于 ABAQUS 的强度折减有限元法边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(2): 207-212.
LI Chun-zhong, CHEN Guo-xing, FAN You-wei. The analysis of slope stability by strength reduction FEM based on ABAQUS software[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(2): 207-212.
- [15] 刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等. 悬臂式抗滑桩模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2960-2966.
LIU Hong-jia, MEN Yu-ming, LI Xun-chang, et al. Study of model test on cantilever anti-slide pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2960-2966.

