

软土段路堤失稳原因分析及处治措施研究

代先尧

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年6月22日; 录用日期: 2024年7月12日; 发布日期: 2024年7月23日

摘要

近年来软土路基处置之后出现失稳现象的情况时有发生,对软基失稳原因进行分析,开展失稳风险评估,研究整改措施具有重要的意义。目前关于公路软土路基坡脚开挖引起路基失稳的研究较少,通过分析某软基失稳路段的勘察、设计和施工情况,并对该路段在施工时出现路基失稳的原因进行了分析,提出了处治措施,可为相似项目提供参考。

关键词

公路, 市政, 路堤失稳, 处治

Study on Cause Analysis and Treatment Measures of Embankment Instability in Soft Soil Section

Xianyao Dai

Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jun. 22nd, 2024; accepted: Jul. 12th, 2024; published: Jul. 23rd, 2024

Abstract

In recent years, the instability phenomenon of soft soil subgrade after disposal often occurs. It is of great significance to analyze the reasons for the instability of soft foundation, carry out the risk assessment of the instability, and study the rectification measures. At present, there are few studies on roadbed instability caused by slope excavation of highway soft soil roadbed. This paper analyzes the investigation, design and construction of a roadbed instability section with soft foundation, analyzes the causes of roadbed instability during construction, and puts forward

treatment measures, which can provide reference for similar projects.

Keywords

Highway, Municipal, Embankment Instability, Treatment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来软土路基处置之后出现失稳现象的情况时有发生,对软基失稳原因进行分析,开展失稳风险评估,研究整改措施具有重要的意义。

仇红超等[1]对某路段施工过程中路堤失稳的原因进行了分析,并采用有限元法对施工过程及滑塌后采用反压护道处治的方案进行了计算分析。王超[2]通过对采用环向加筋碎石桩加固路堤时边坡失稳破坏模式进行三维有限元分析,揭示了路堤失稳时环向加筋碎石桩的破坏模式和路堤失稳模式,研究了地基土强度对路堤边坡的安全系数的影响。张鹏[3]为研究软弱地层对斜坡软基高填路堤变形和稳定性的影响,采用 FLAC3D 软件建立斜坡软基路堤有限元模型,分别研究了不同软弱地层特性下高填路堤的最大变形量及稳定系数变化规律。张淑真等[4]结合某高速路的路堤在软基下失稳的现象,用有限元软件模拟分析其原因,并采用反压护道和变面积置换率深层搅拌法补救处理。周小文等[5]提出了改进的施工稳定控制标准,它比只考虑道中沉降和坡脚水平位移速率,更加符合路堤失稳机制。苏海亮[6]以广东某高速公路路基在施工期间,局部路段左右幅先后出现失稳为例,提出了相应的处理方式。熊平华等[7]结合四川省遂宁-资阳-眉山高速公路软基监测项目,采用 FLAC3D 强度折减分析方法对典型路段进行路堤分级加载稳定性分析。张翠花[8]分析了张家口市近年来新建公路由软土地基引发的主要问题。罗成才[9]分析了修筑在软土地基上的高速公路路堤稳定性分析评价,影响高速公路软基路堤稳定的因素。余峰等[10]通过对目前广东省高速公路软基路堤 9 处滑塌事故的介绍和分析原因,从设计、施工、监控方面提出了滑塌的防止措施。

目前关于公路软土路基坡脚开挖引起路基失稳的研究较少,通过分析某软基失稳路段的勘察、设计和施工情况,并对某路段在施工时出现路基失稳的原因进行了分析,提出了处治措施,可为相似项目提供参考。

2. 项目概况

2.1. 项目背景

某工程总长约 2 公里鱼塘段因地质条件差,采用碎石桩进行软基处理。路基形成后,现场巡视发现 WK8+500~WK8+900 段部分路基二级平台局部出现纵向裂缝,见图 1。

2.2. 地层岩性

鱼塘段属软土区:表层为素填土、种植土;上部为厚约 1.50~8.30 m 的淤泥质粉质粘土,其下为 2-3 层硬塑粉质粘土、2-4 层可塑粉质粘土;下部为 3-1 层更新统硬塑状含砾粉质粘土。下伏基岩为中风化灰岩(表 1)。



Figure 1. Current situation of soft base segment
图 1. 软基段现状图

Table 1. List of engineering geological characteristics of site strata
表 1. 场地地层工程地质特征一览表

地层编号及岩土名称	年代成因	颜色	状态	压缩性	地层包含物特征
2-2 淤泥质粉质黏土	Q_4^I	灰黑色	流塑、饱和	高压缩性	含腐殖质，具臭味，局部可见白色贝壳，土质均匀。
2-4 粉质黏土	Q_3^{al}	黄褐色	可塑	中压缩性	含少量铁锰质氧化物，土质均匀。
3-1 含砾粉质黏土	Q_3^{al+pl}	黄褐色、棕红色	硬塑	中压缩性	含少量铁锰质氧化物，角砾含量约占 28%，土质不均匀。

3. 路堤坍塌原因分析

根据施工现场反馈情况，部分二级边坡坡顶和坡面出现贯穿的裂缝(见图 2)。说明路基边坡处于不稳定状态。

基于本工程的场地条件，鱼塘段路基失稳的原因归纳起来包括以下因素。

1) 地基条件。该路段位于冲湖积平原地貌区，地势平坦、开阔、沟渠纵横；地层岩性为淤泥质粉质黏土；地基土基本处于饱和状态，软土的抗剪强度较低、压缩性高，地基承载力低，在路基压力作用下容易形成圆弧形失稳滑动。

2) 工程地质条件特殊性。路基横向范围内软土分布厚度变化大，利于形成滑动面；地基土层中有一层 1.50~8.30 m 厚度不均匀的软土，软土层下伏稳定土层面存在一定坡度，在路堤填筑过程中，整个路堤以及软土层有沿倾斜下伏稳定土层面向下滑动的趋势。可见，由于此路基工程所处场地的工程地质条件特殊，使得路堤填筑完成后出现过大变形。

3) 桩身材料因素。采用碎石桩的目的在于用碎石桩复合地基提高软土地基承载力，并且形成竖向排水通道加速软土地基的固结，减小工后沉降。但软土强度低，且碎石桩属于散体材料加固体，粘结强度小，提供抗滑阻力的能力较弱。

4) 人为因素。路基坡脚鱼塘清淤，掏空了坡脚土体形成水深 2~3 米的鱼塘临空面，进而影响碎石桩复合地基的整体稳定。



Figure 2. Photos of roadbed slip
图 2. 路基滑移照片

4. 路堤失稳风险评估

4.1. 典型断面计算分析

代表路段 WK8+700~WK8+728, 以 WK8+720 为例进行典型断面分析。碎石桩桩径为 0.5 m, 桩间距 1.1 m, 单根桩长 9 m, 平均处理宽度 43.7 m, 均匀布置在路基以下, 碎石桩桩顶高程 13.0 m, 路基填土高度为 3.87 m。武汉中和工程技术有限公司在本段范围内共计布设了 3 个沉降观测点, 4 个位移观测点(图 3)。

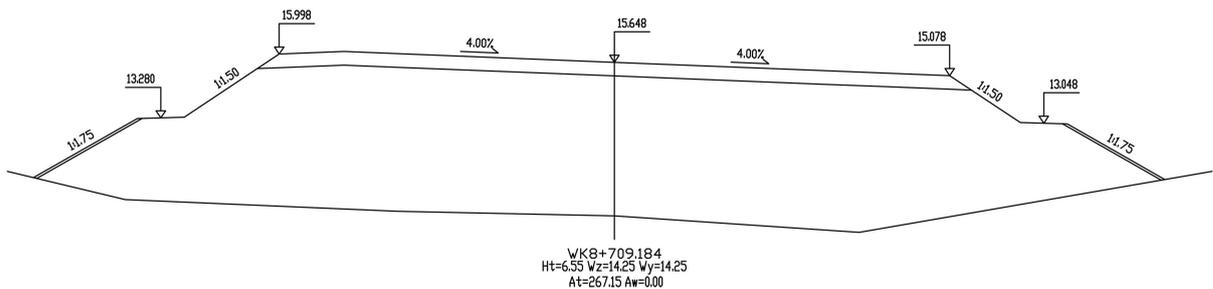


Figure 3. Subgrade cross section design drawing
图 3. 路基横断面设计图

坡脚无开挖, 路基整体稳定性计算结果见图 4。

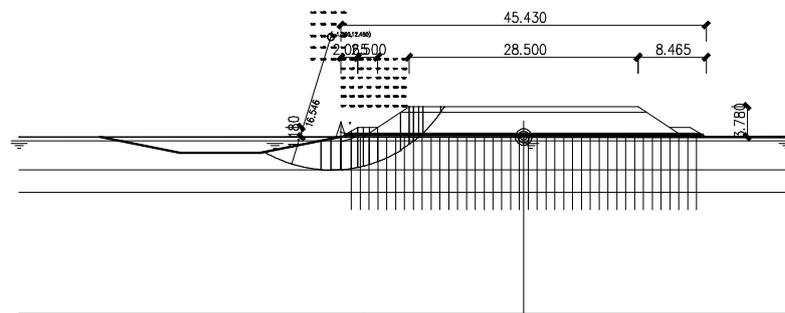


Figure 4. Subgrade stability calculation diagram (no excavation)
图 4. 路基稳定性计算图(无开挖)

坡脚清淤开挖，路基整体稳定性计算结果见图 5：

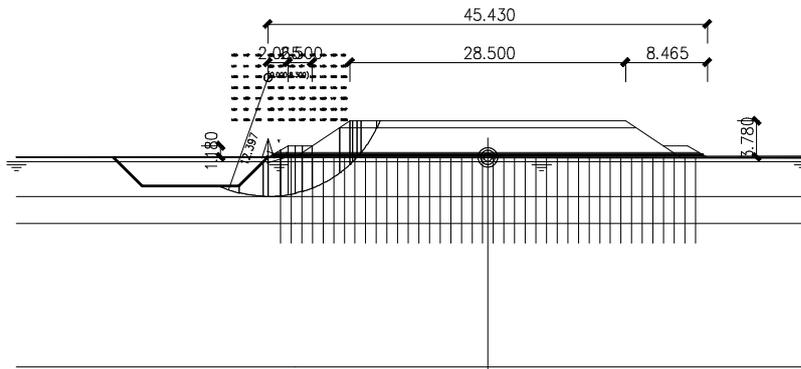


Figure 5. Subgrade stability calculation diagram (the excavation slope toe)
图 5. 路基稳定性计算图(开挖坡脚)

从上述计算可知，在公路汽车荷载作用下，坡脚无开挖时，路堤边坡整体稳定(稳定性系数 = 1.209)；坡脚清淤开挖时，路堤边坡整体不稳定(稳定性系数 = 0.980)。

通过理正岩土 6.5 软件计算可知，在增加行车荷载后(无鱼塘清淤时)路堤边坡安全系数为 1.520 (WK7+900)、1.268 (WK8+100)和 1.209 (WK8+720)；在增加行车荷载后(鱼塘清淤开挖坡脚)路堤边坡安全系数为 1.396 (WK7+900)、1.099 (WK8+100)和 0.980 (WK8+720)。按照上述评价标准可知，该路段边坡安全系数 F_s 均大于 1.2；鱼塘清淤开挖坡脚后，WK7+419~WK7+922 路段边坡安全系数 F_s 大于 1.2，WK7+922~WK8+728 路段边坡安全系数 F_s 小于 1.2，因此，该路段边坡处于不稳定状态。

4.2. 地基深层水平位移监测分析

根据《公路软基处理施工监测报告》，WK7+900 段软土路基施工填筑期(2018.12.19~2021.11.30)，位移监测数据累计变化量为 17.2~18.6 mm，平均位移速率 0.0 mm/d~0.3 mm/d，WK7+900 段软基累计位移变化曲线见图 6。所有监测数据均没有超出预警值及巡查现场未出现异常情况。根据位移监测情况，路基填筑后期路基水平位移有明显收敛趋势。

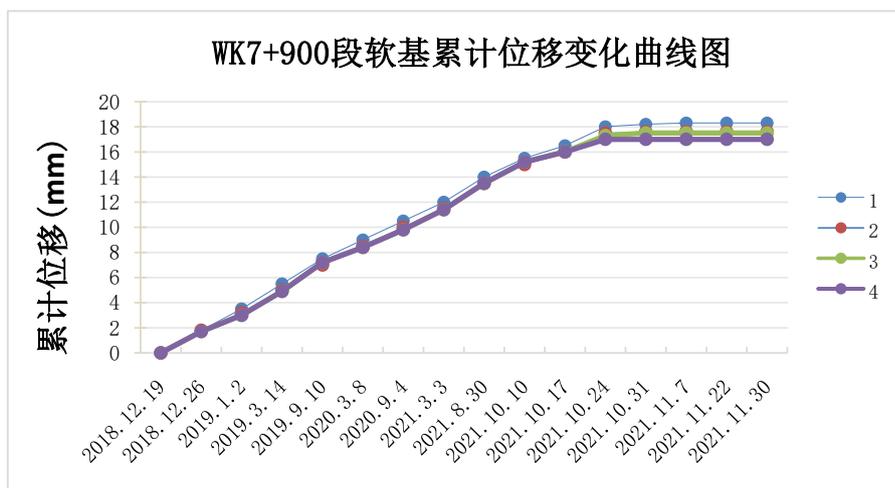


Figure 6. Curve of cumulative displacement change of soft foundation in section WK7+900
图 6. WK7+900 段软基累计位移变化曲线图

WK8+100 段软土路基施工填筑期(2018.12.19~2021.11.30), 位移监测数据累计变化量为 18.6~19.8 mm, 平均位移速率 0.0 mm/d~0.3 mm/d, WK8+100 段软基累计位移变化曲线见图 7。所有监测数据均没有超出预警值及巡查现场未出现异常情况。根据位移监测情况, 路基填筑后期路基本水平位移有明显收敛趋势。

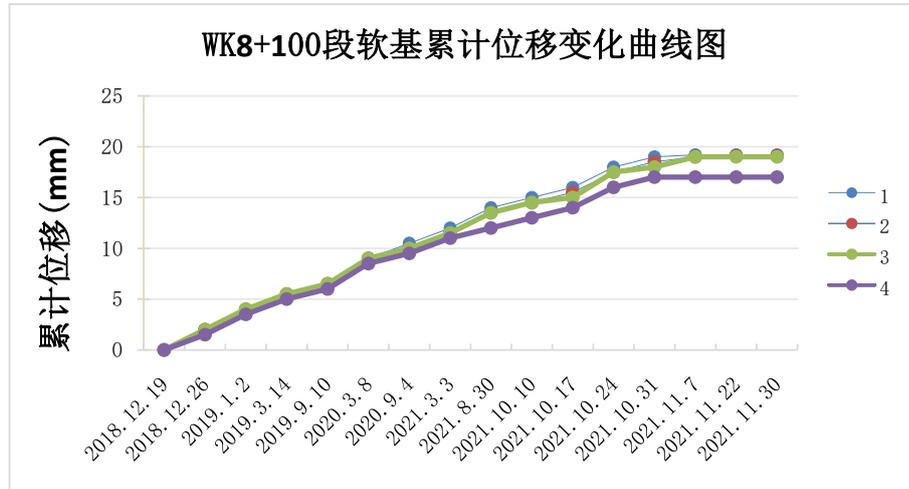


Figure 7. Curve of cumulative displacement change of soft foundation in section WK8+100
图 7. WK8+100 段软基累计位移变化曲线图

WK8+720 段软土路基施工填筑期(2018.12.19~2021.11.30), 位移监测数据累计变化量为 18.3~20.2 mm, 平均位移速率 0.0 mm/d~0.3 mm/d, WK8+720 段软基累计位移变化曲线见图 8。所有监测数据均没有超出预警值及巡查现场未出现异常情况。根据位移监测情况, 路基填筑后期路基本水平位移有明显收敛趋势。

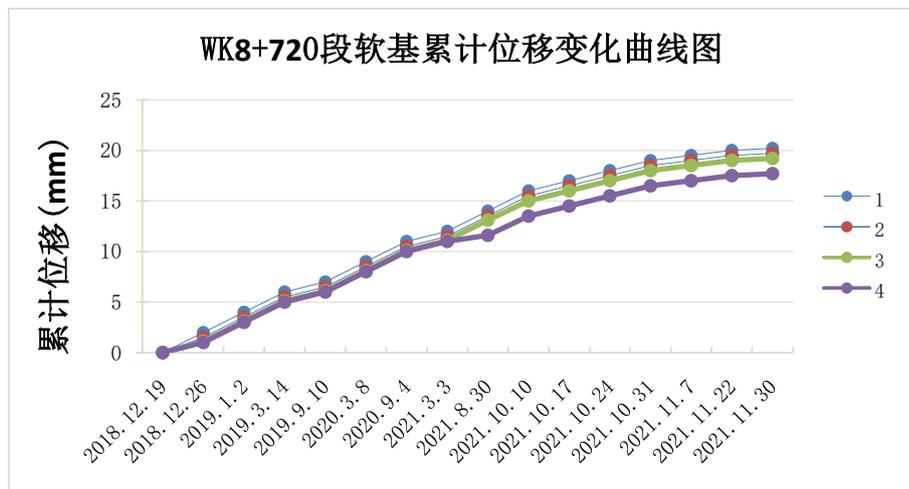


Figure 8. Curve of cumulative displacement change of soft foundation in section WK8+720
图 8. WK8+720 段软基累计位移变化曲线图

观测地基深层土体水平位移, 确定土体剪切破坏的位置, 掌握潜在滑动面发展变化, 评价地基稳定性; 用于路堤施工过程中的稳定性控制。根据监测资料可以判断路基边坡现状均处于稳定状态。

5. 整改建议方案

项目主体工程已基本完工,但由于鱼塘路段边坡失稳,经过实地察看,查阅了相关设计、施工资料、计算分析后,认为坡脚挖淤是引起路基滑塌的主要原因之一。对全线过水塘路段防治挖塘失稳的预防性措施,提出“征地勘界”、“坡脚补桩”和“护脚工程”三种方案。建议后期对软土路基段进行变形、沉降监测。

(1) “征地勘界”方案

对本项目,满足“填土高度大于3 m,软基深度大于3 m”的过水塘路基,采用“征地勘界”的措施防止塘主开挖路基坡脚,新增至少10 m宽的水塘用地,采用钢丝绳+木桩进行勘界,并在钢丝绳上挂“公路用地、禁止开挖”的警告标示牌。基于安全考虑,新增勘界范围需填平,利用其他项目的弃土或采购土方将勘界范围填平,形成反压护坡道。

(2) “坡脚补桩”方案

基于路堤发生裂缝原因的分析,在现状过塘路堤两侧补充设置粉喷桩,并在其上填筑反压护坡道平衡路堤受力状态,确保路堤运营过程中的稳定性。

以断面WK8+100为例进行处治措施稳定性验算,路基坡脚开挖后 $F_s = 1.099$,反算碎石桩处理后软土复合地基的抗剪强度参数,得出复合地基极限状态下地基土 $c = 6 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 7.5^\circ$ 。处理后边坡稳定安全系数为 $1.314 > 1.2$ 。

对本项目,满足“填土高度大于3 m,软基深度大于3 m”的过水塘路基,采用水泥搅拌桩的方式进行坡脚加固处理,水泥搅拌桩采用粉喷法施工,桩径0.6 m,采取正三角形布置,桩间距1.2 m,处理深度7 m,布置3排。反压护道与原护道标高相同,边坡坡率采用1:1.75。在坡脚2.4 m宽范围内补桩,需新增2.4 m宽的水塘用地。

(3) “护脚工程”方案

进行护脚工程设计,投体护脚可选用石笼,防止鱼塘段坡脚开挖,确保路堤运营过程中的稳定性。处理深度2~3 m,宽度2 m,石笼平台顶部高程应高于设计枯水位0.5 m~1.0 m。

各方案优缺点等情况见表2。

Table 2. Comparison table of rectification proposals

表 2. 整改建议方案对比表

序号	设计方案	优缺点	工程措施及工程量	新增征地(亩)
1	征地勘界	优点: 工程费用少。 缺点: 新增征地多。	无, 暂未考虑土方	39.3
2	坡脚补桩	优点: 新增征地少, 能有效解决挖坡脚问题。 缺点: 费用较高。	粉喷桩, 直径0.6 m, 单根长7 m, 共6548根。新增桩顶反压平台土方6283 m ³ 。	9.5
3	护脚工程	优点: 新增征地少, 能有效解决挖坡脚问题。 缺点: 费用较高。	石笼 15,708 方	7.9

6. 结论

通过分析该路段的勘察、设计和施工情况,并对该路段在施工时出现路基失稳的原因进行了分析,得出结论如下:

1) 基于本工程的场地条件,鱼塘段路基失稳的原因归纳起来包括以下因素。① 地基条件。地层岩性为淤泥质粉质粘土,在路基压力作用下容易形成圆弧形失稳滑动;② 工程地质条件特殊性。路基横向

范围内软土分布厚度变化大, 利于形成滑动面; ③ 人为因素。通过路堤稳定性计算结果, 在增加行车荷载后(无鱼塘清淤时)该路堤边坡整体处于稳定状态; 鱼塘清淤开挖坡脚后, 该路段边坡处于不稳定状态。所以, 在多因素共同作用下导致鱼塘段路堤边坡失稳。

2) 提出了三种整改建议方案, 考虑到鱼塘段路基边坡在未清淤开挖坡脚时处于稳定状态, 建议现阶段以巡查为主, 若出现路基失稳则采取相应措施进行治理。

3) 建议软基变形段两端设置警示牌; 建议后期对软土路基段进行变形、沉降监测。

4) 建议行业主管部门对已经失稳段路基进行加固处理, 且在公路开通运行后依照《公路安全保护条例》加强巡查力度, 禁止在公路(县道)用地外缘起向外 100 米进行取土作业。

参考文献

- [1] 仇红超, 刘吉福, 钱尼贵. 软土路基排水固结法滑塌原因及处治[J]. 广东公路交通, 2022, 48(6): 48-53.
- [2] 王超. 环向加筋碎石桩复合地基路堤稳定性分析[J]. 河北水利电力学院学报, 2021, 31(2): 17-22.
- [3] 张鹏. 软弱地层对高填路堤变形及稳定性的影响[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(3): 97-102.
- [4] 张淑真, 陈坤. 某高速公路路堤失稳的有限元模拟及补救[J]. 低碳世界, 2017(18): 197.
- [5] 周小文, 陈凌伟, 程展林, 汪明元. 软基路堤施工稳定性控制标准研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2631-2635.
- [6] 苏海亮. 广东某高速公路软基段路堤失稳滑塌的成因及处理方案研究[J]. 科技展望, 2016, 26(17): 41.
- [7] 熊平华, 赵其华, 陈继彬. 基于 FLAC~(3D)软土路堤稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(2): 28-31+87.
- [8] 张翠花. 高等级公路软基处治与施工质量控制[J]. 交通世界(建养.机械), 2011(11): 146-147.
- [9] 罗成才. 高速公路软基路堤失稳风险分析方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [10] 余峰, 罗炳华. 浅析高速公路软基路堤失稳滑塌[J]. 广东公路交通, 2001(1): 8-10.