

滨海城市道路边坡滑移的现场观测 与理论分析

高焰林^{1,2}, 黄茂隆^{1*}, 周权³, 常岳³

(1. 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司, 广东 深圳 518055; 2. 中国京冶工程技术有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518055;
3. 珠海市建设安全科学研究院有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要: 本研究通过对某滨海城市道路工程中的边坡滑移进行分析, 采用现场观测与有限元分析相结合的方法, 系统探讨了边坡滑移的原因和机制。通过现场观测, 明确了边坡后仰及土体变形的情况, 通过地貌特征确定了滑移区域。借助理正和 PLAXIS 软件, 对比了极限平衡法与强度折减法在稳定性分析中的差异, 揭示了在复杂地质条件和降雨等不利工况下, 边坡稳定性的动态变化。本研究强调了现场观测在数值模拟中的指导作用, 将现场观测结果用于滑移面范围的确定, 并通过与模拟结果的交叉验证, 提升了模型的准确性和科学性。分析结果显示, 因排水不良等各种因素导致了地基强度下降, 在暴雨荷载的共同作用下引发了滑移; 该项目中, 当土体实际强度降至设计强度的 50% 以下时, 路基出现失稳。本研究同时表明, 现场观测与数值模拟相结合的方法能够更准确地分析边坡滑移的机制, 为类似地质工程问题提供新的研究思路和分析方法。

关键词: 滨海城市; 边坡稳定; 现场观测; 强度折减法; 毕肖普法

中图分类号: U416.1+4

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0103-08

Field observations and theoretical analysis of road slope failure in coastal cities

GAO Yan-lin^{1,2}, HUANG Mao-long^{1*}, ZHOU Quan³, CHANG Yue³

(1. Central Research Institute of Building and Construction (Shenzhen) Co., Ltd. MCC Group, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

2. Jingye Engineering Technology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong, China;

3. Zhuhai Institute of Civil Construction-Safety Research Co., Ltd., Zhuhai 519000, Guangdong, China)

Abstract: This study analyzes the slope failure in a coastal city's road project, utilizing a combination of field observations and finite element analysis to systematically investigate the causes and mechanisms of slope failure. Field observations confirmed the backward tilting and deformation of the slope, and the slip areas were identified based on geomorphological features. By using the limit equilibrium method and strength reduction method in the software PLAXIS, this study compared the differences of these two methods in stability analysis under complex geological conditions and adverse operational conditions such as rainfall, revealing the dynamic changes in slope stability. The study highlights the guiding role of field observations in numerical simulations, using the observed data to define the extent of the slip surface and enhancing model accuracy and scientific validity through cross-validation with simulation results. The analysis indicates that the coupled effect of storms and various factors such as poor drainage, which contributes to the reduction in foundation strength, triggers slope instability. The subgrade becomes unstable when the actual strength of the foundation falls below 50% of the designed strength. This research also demonstrates that the combination of field observations and numerical simulation can more accurately analyze the mechanisms of slope failure, providing new research approaches and analytical methods for similar geological engineering problems.

Key words: coastal city; slope stability; field observations; strength reduction method; Bishop method

收稿日期: 2024-05-08

作者简介: 高焰林(1984—), 男, 安徽安庆人, 本科, 中级工程师, 主要从事岩土工程的技术咨询及项目管理工作。E-mail: 249786452@qq.com。

*通信作者: 黄茂隆(1997—), 男, 广东汕头人, 硕士, 主要从事岩土工程检测的相关研究工作。E-mail: 15820441862@163.com。

0 引言

随着全球气候变化和城市化进程的加速,滨海及河流附近的城市地区面临越来越多的地质灾害风险挑战^[1-2]。这些区域通常存在软土或液化土等工程性质不友好的土层,易导致地基不均匀沉降和路基失稳^[3-4]。这些灾害不仅威胁到人民群众的生活安全,还可能导致重大的经济损失和环境破坏。因此,利用土钉、搅拌桩、旋喷桩等方法进行有效的地基处理,对于确保上部结构的安全性和可靠性至关重要^[5-6]。

边坡稳定性分析是保证城市环境及交通安全的重要一环^[7-8]。常用评价边坡稳定性的方法可分为以下两大类:(1)定性分析。通过边坡尺寸、形状、地质结构和环境等因素,对比相似案例,分析判断边坡的稳定状况。(2)定量分析。假设岩、土等介质为刚体,通过分析可能的滑动面计算出边坡的稳定性系数,或利用有限元法,结合土体的物理参数和相应的强度准则计算出滑动的稳定性系数。当前最常用的方法是定量分析中的极限平衡法,或在有条件的情况下使用有限元法。如王晓鸿^[9]采用极限平衡法中的 Sarma 法评价了龙羊峡水库边坡的稳定性。肖山喜^[10]比较了理正岩土边坡和 Slide 两款软件在边坡设计中的应用,分析显示两种方法的结果相近。王萌^[11]基于不同的有限元法对高填方边坡稳定性进行计算分析,并与传统极限平衡法的计算结果进行对比,探讨不同算法之间存在较为一致的相对安全系数大小关系。

有限元法可以模拟和分析复杂的地质行为过程中土体的力学响应,因此在稳定性分析中,有限元法能够提供土体单元的应力路径,结合适当的强度参数分析出最有可能的滑移面,可以更详细地提供灾害预防和重要信息。郑宏等^[12]详细讨论了有限元法中对边坡稳定性安全系数的定义问题,认为安全系数定义为沿某一特定滑面的抗滑力与滑动力的比值会出现不合理问题。陈涛等^[13]基于有限元分析讨论了某软土路基的失稳情况,认为软土地区设计应考虑气候及地下水因素,利用高压旋喷桩、抗滑桩及反压护道措施可有效治理软土路基的不良地质情况。董梅等^[14]考虑基质吸力影响,基于研究区的实际降雨监测数据,采用数值模拟手段开展了老虎岭遗址边坡在实际降雨条件下的稳定性分析,为遗址保护工作提供指导。上述研究体现了有限元数值分析在稳定性分析中的适用性和重要性。

然而,单靠理论模型有时无法全面地捕捉到现场

情况的复杂性。因此,现场观察的数据和分析对于验证有限元模型具有重要的价值。例如黄绍铨等^[15]对某膨胀土边坡进行了为期2年的监测,汇总分析了其各物理参数变化的规律。缪伟等^[16]通过对现场监测数据的分析,根据侧向位移状态的过程曲线预测边坡滑动面,结果与地质调查较为吻合。上述研究表明了现场观测可以定性总结出规律,同时可以类比已知项目,为理论分析提供方向指引和必要的佐证。

本文基于某滨海城市一个具体的滑坡案例,通过对现场观测得出的初步结论和有限元模型的详细分析,揭示了滑坡发生的机制。通过这种跨学科技术的应用,本文期望提高对地质灾害的应对能力,为地质灾害评估和风险管理领域的研究和实践贡献新的见解和方法。

1 工程概况

1.1 项目概况

某沿海城市滨河路道路工程设计全长 1 980 m,红线宽度 20~25 m,道路等级为次干道,设计行车速度为 40 km/h。道路规划紧邻河道并保持平行。同时根据现场地形情况,部分区段通过回填抬高路基,确保路线顺畅。回填区段路基主要采用旋喷桩进行地基加固处理,并在临水面布置扶壁式挡土墙以保证整体稳定。由于该路段下卧淤泥层平均厚度为 16 m,淤泥层上覆盖约 5 m 厚的填石层,采用挖 2.3 m 厚填石层、引孔 3.9 m、高压旋喷桩处理下卧淤泥层。回填 50 cm 碎石垫层,路床采用原状填石土层筛分后分层回填碾压,侧挡土墙基底采用 1.2 m 间距的高压旋喷桩处理。该路段典型剖面示意图如图 1 所示。

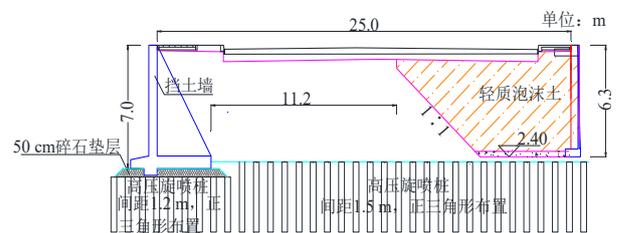


图 1 道路典型剖面示意图

Fig. 1 Typical profile of the road

1.2 工程地质条件

场地地层结构主要由人工填土和第四系全新统冲洪积层组成。从上至下依次为①₃杂填土、①₄粉质黏土、②₁淤泥、②₂淤泥质土、②₃砾砂,典型工程地质剖面图如图 2 所示。杂填土层回填时间小于 8 年,尚未完成自固结,且混有少量建筑垃圾,颗粒变

化大, 呈稍密-中实状, 性质不均匀, 容易产生不均匀变形沉降; 淤泥及淤泥质土层欠固结, 芯样中夹杂贝壳, 具有高压缩性、低透水性等特性, 结构单一、稳定性差, 土体工程性质较差。土层物理力学指标如表 1 所示。

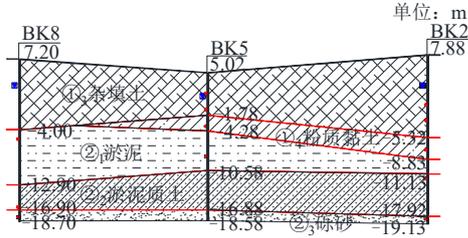


图 2 典型工程地质剖面图
Fig. 2 Typical geological profile

表 1 土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil layers

地层编号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	渗透系数 $k/(\text{cm}/\text{s})$	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa	压缩模量 E_s/MPa
① ₃	杂填土	20.0	12	15	5×10^{-3}	140	8
① ₄	粉质黏土	18.5	18	10	1×10^{-6}	120	5
② ₁	淤泥	16.5	8	3	6×10^{-7}	70	2
② ₂	淤泥质土	17.0	10	5	4×10^{-6}	80	4
② ₃	砾砂	20.0	—	30	7×10^{-2}	180	30

注: 黏聚力和内摩擦角由固结快剪试验确定。

1.3 水文条件

场地内地下水主要为孔隙潜水。据钻探揭露, 孔隙水赋存于第四系松散堆积层孔隙中, 以潜水形式储存, 为无压水。地下水的补给主要为大气降水的垂向补给和周边地下水的侧向径流补给; 排泄方式以侧向径流和蒸发为主。水位变化幅度约为 1~2 m。本项目土层的富水性与渗透性如表 2 所示。

表 2 土层的富水性与渗透性

Table 2 Water-richness and permeability of soil layers

地层	富水性	渗透性
杂填土	中等富水	中等透土层
粉质黏土	富水性弱	弱透土层
淤泥/淤泥质土	富水性贫乏	弱透土层
砾砂	富水性强	强透土层

从上述情况可以看出, 该区域存在深厚淤泥(质)土, 敏感性高、强度低。淤泥层上卧有透水性较好的土层。在这种组合下, 如果未能处理好该

区域的排水系统, 对淤泥层的处理不当, 则当该区域遇到强降水时, 雨水将渗透路基, 降低该区域的地基强度, 进而导致该区域出现失稳。

2 目击者描述滑移过程

某日上午 7 时许, 现场施工巡视人员突然注意到已填筑的路床开始出现异常变化。最初, 地面上仅有轻微的震动, 但几分钟后, 路床中央部分开始下沉, 并伴有混凝土开裂的声音。随着沉降的加剧, 临河扶壁式挡土墙逐渐向路床方向倾斜。当沉降和倾斜达到最严重的程度时, 整个滑移区域的地面已经发生了明显变形。据目击者描述: “路床就像被一股力量向下拉。墙体开始缓慢倾斜, 变化几乎肉眼可见。我们可以看见混凝土挡墙被挤坏, 然后赶紧往外(远离破坏区域)跑”。事件发生后, 现场立即启动应急预案, 开始缓慢卸载, 并加强现场的监测力度, 后期情况得以控制。

根据现场的环境调查, 现场当月受台风天气影响, 共经历雷阵雨 12 d、大雨 3 d、中雨 9 d、阵雨 1 d、阴 1 d、多云 4 d。事件发生前两日平均降水 10 mm/d, 属于小到中雨至中雨级别, 且有近 10 d 的连续降水记录, 降水影响持久。

3 现场调查分析

为了更好地指导后续的调查, 回溯事件的经过, 分析发生的原因, 相关单位组织开展了系统性的现场观察和观测工作。现场观测通过无人机航拍和高精度 LiDAR 扫描技术, 从整体和细节不同维度记录边坡滑移后地形的变化情况。图 3 展示了倾斜摄影和局部拍摄记录的扶壁式挡土墙倾斜情况, 挡土墙整体向路床方向后仰, 墙体后仰角度约 10° (图 3 (a)), 错位最大近 80 cm (图 3 (b))。



(a) 后仰情况



(b) 错位情况

图 3 扶壁式挡土墙倾斜

Fig. 3 Inclination of counterforted retaining wall

图4展示了平移的倾斜摄影(图4(a))和LiDAR扫描扶壁式挡土墙的点云信息(图4(b))。图4(a)可看出挡土墙在外观上连续,除了墙头有破损外,外观依旧完好。图4(b) LiDAR点云图为较完整的片状,进一步说明了墙体的完整性。由此可知,挡土墙出现了整体后仰的情况。

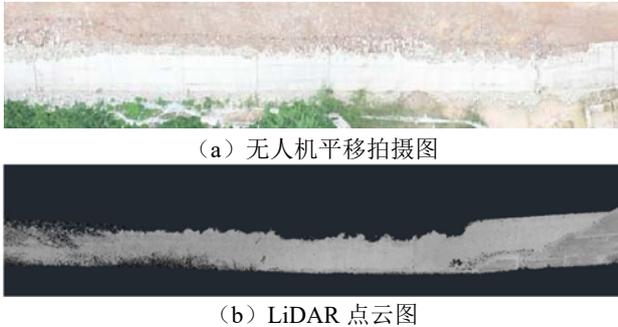


图4 扶壁式挡土墙临水面图

Fig. 4 Water side of counterforted retaining wall

现场观测过程中特别注意到了滑移区域的地貌特征变化。在邻近的河道区域,观察到显著的地面隆起现象(图5(a))和“醉树”地貌(图5(b))。“醉树”地貌指的是树木因地基不稳定而倾斜的现象,表明地基土体发生了显著的位移或滑移。



图5 现场观察情况
Fig. 5 Field investigation

经研判,“醉树”地貌与路基滑移后的地面隆起现象密切相关。该现象表明滑移面从路基中间开始,以类弧形状延伸至河道区域,导致了地表土体的隆起变形以及树木的歪斜。这种地貌特征为滑移区域的确定提供了重要的指示,同时为数值模拟中滑移面的范围判断提供了可靠依据。

综上,现场观测首先观察到扶壁式挡土墙出现了后仰;根据倾斜摄影以及LiDAR点云图,进一步

可知挡墙虽然出现了后仰但整体依旧保持完整,挡墙呈现整体后仰;同时,观察到河边土体呈现不正常隆起,且出现“醉树”地貌,表示该地区出现了大规模的土体滑移。结合该地区地质条件情况,经综合研判后认为现场出现了如图6所示的典型路基整体失稳现象。

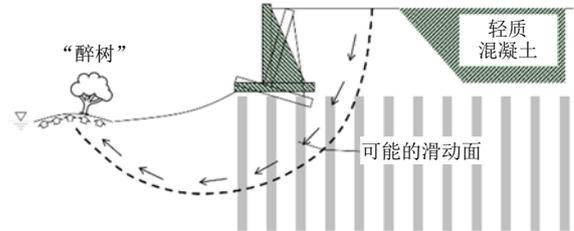


图6 路基失稳示意图

Fig. 6 Illustration of subgrade instability

由于道路远水路基回填材料采用轻质混凝土,荷载较小,可能的滑动面应从填土路基中间开始至河道中隆起(“醉树”)的区域。由于滑动面通常表现为圆弧或类圆弧形,因此挡墙出现后仰倾斜的同时整体结构依旧保持相对完整。根据滑动面通常为圆弧形的特点,结合滑动范围和现场地质条件等因素进行综合研判,后期的分析应着重于淤泥土层中出现的不良情况。

4 稳定性数值模拟分析

4.1 模拟分析

为进一步探明滑移原因,复现滑移过程,定量分析该区段的稳定性,采用业界常用软件理正岩土边坡模块和PLAXIS交叉进行边坡的稳定性分析。根据前述现场观测的结果,应着重分析淤泥土层中的不良情况。另外,边坡滑移发生时正处于台风季,需考虑强降雨下荷载增加的同时地基强度下降导致滑移的产生。

理正与PLAXIS两款软件均根据滑移段的设计剖面建立2D模型,但在分析计算上存在区别。理正软件采用相关规范所推荐的条分法进行滑移面搜索,采用极限平衡法计算出滑移面的安全系数,并以其中安全系数最小的结果作为最危险滑移面。PLAXIS则采用强度折减法进行计算分析,通过定义强度折减系数 F_s ,在每一次计算中将土体的抗剪强度参数 c 和 φ 除以相同的强度折减系数 F_s ,得到经折减后的土体参数 c_1 和 φ_1 ,以此作为新的计算参数代入模型重新计算,折减计算公式如式(1)~(2)所示。直至边坡土体达到极限平衡状态而后失稳,此时强度折减系数 F_s 为该边坡的稳定性安全系数,

对应的滑移破坏面为失稳破坏面。两种方法的比较如表 3 所示。

$$c_1 = \frac{c}{F_s} \quad (1)$$

$$\varphi_1 = \frac{\arctan(\tan \varphi)}{F_s} \quad (2)$$

式中: c 和 φ 分别为土的黏聚力和内摩擦角; c_1 和 φ_1 为折减后的参数; F_s 为强度折减系数。

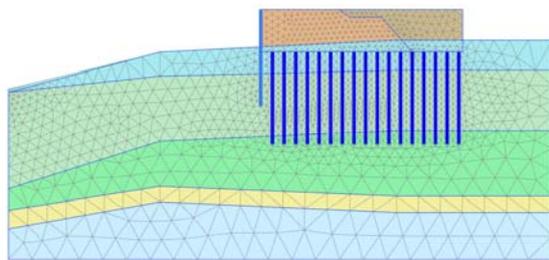
表 3 毕肖普法与强度折减法对比

Table 3 Comparison between Bishop method and strength reduction method

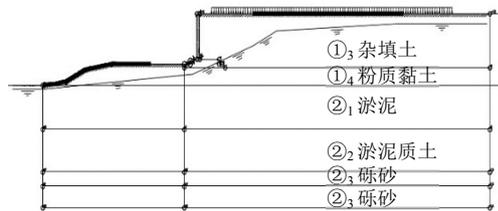
方法	优点	不足
毕肖普法	计算过程直观, 易于理解, 计算迅速, 适合快速筛选分析。适用于圆弧滑移面。	对非圆形滑移面的适用性有限。
强度折减法	适用于各种复杂地质和地形条件。基于有限元, 能较好地模拟应力和变形。可提供较详细的安全系数评估和破坏模式分析。	对计算资源要求高, 计算时间长。结果依赖于高质量的地质参数和数值模型。

4.2 计算模型

根据道路路基设计剖面, 建立 PLAXIS 和理正模型, 如图 7 所示。



(a) PLAXIS 模型



(b) 理正模型

图 7 计算模型

Fig. 7 Calculation model

在图 7 (a) 中, PLAXIS 为有限元软件, 可以直接设置物理参数对旋喷地基进行模拟。由于模拟涉及土体加载-卸载过程, 因此土体本构模型选用

硬化模型。参考地勘报告, 部分土层硬化模型参数如表 4 所示。

表 4 部分土层硬化模型参数

Table 4 Parameters of HS model for part of soil layers

土层名称	E_{50}^{ref} /MPa	E_{oed}^{ref} /MPa	E_{ur}^{ref} /MPa	m
① ₃ 杂填土	8	8.00	24	0.5
① ₄ 粉质黏土	5	5.00	15	0.5
② ₁ 淤泥	2	3.58	6	0.5
② ₂ 淤泥质土	4	4.00	12	0.5

为了模拟在降雨条件下的稳定性, 将路基填土区地下水位设为与路面齐平以模拟该区域地下水无法顺利排出的情况。同时考虑超孔隙水压和渗流作用的影响, 对模型进行水-土耦合分析。

在图 7 (b) 中, 理正软件由于无法直接建立旋喷桩单元, 根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) [17] 中公式 7.7.7-1 对旋喷复合地基强度进行等效计算。

$$\tau_{ps} = \eta \tau_p + (1 - \eta) \tau_s \quad (3)$$

式中: τ_{ps} 为复合地基抗剪强度; τ_p 为桩体抗剪强度; τ_s 为桩间土抗剪强度; η 为桩土面积置换率, 参考《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012) [18] 中的公式 7.1.5-1。

4.3 计算结果分析

理正计算滑移面示意图如图 8 所示, 理正分析结果显示, 设计截面在正常工况下安全系数可达 1.5, 满足相关规范和设计要求。当截面处在暴雨季时, 由于积水无法及时排出, 填土容重增加至饱和状态, 安全系数降至 1.4, 此时路基依旧处于安全状态。

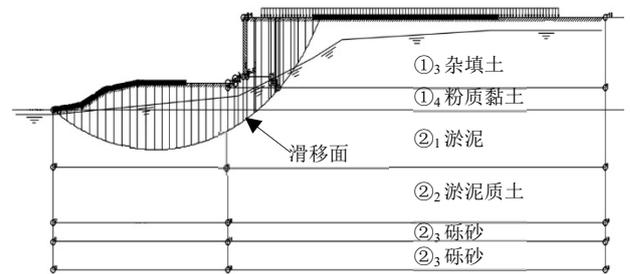


图 8 理正计算滑移面示意图

Fig. 8 Slip surface estimated from Lizheng software

根据现场观测结果, 初步判断滑移的原因是淤泥层复合地基在不利工况下的强度降低所致。为了进一步探究复合地基加固效果与安全系数的关系, 在理正模型中, 结合式 (3), 设定完全符合设计要求的复合地基的等效强度为 100%, 然后通过逐步

降低该等效强度值来模拟不利工况，并计算每种情况下的安全系数变化，如图9所示。

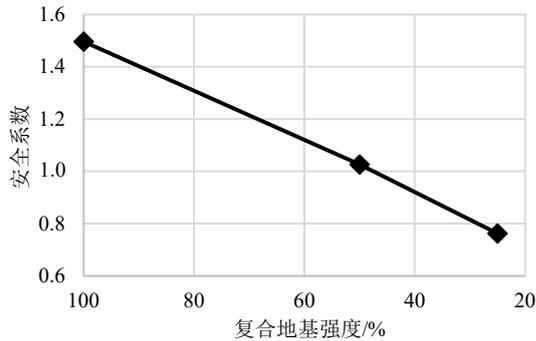


图9 安全系数随复合地基强度折减的变化

Fig. 9 Variation of safety factor with strength reduction of the foundation

可以看出，当复合地基强度减小至50%左右时，安全系数将小于1，意味着此时路基将出现失稳。

PLAXIS 强度折减后的位移矢量云图如图10所示。根据强度折减法计算安全系数为1.3，相较于毕肖普方法得出的安全系数较小。导致该结果的原因之一是 PLAXIS 计算出的滑移面并不是严格的圆弧形，而是沿着最易发生破坏的方向发展。同时可以观察到，滑移面从路基中间开始至河道区域终止，与现场观测的现象较为吻合。据此可以推测有限元模型一定程度上能较好地描述现场的滑移情况。

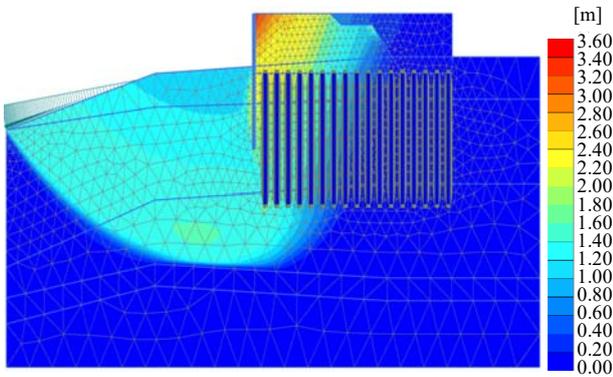


图10 PLAXIS 强度折减后的位移矢量云图

Fig. 10 Displacement vector nephogram of stability analysis (strength reduction) result in PLAXIS

图11~12分别为 PLAXIS 的竖向位移和水平位移云图。由竖向位移云图可知，当该路段排水不良时，传统路基土区域与轻质泡沫土区域将出现明显的差异性沉降，因此在后期使用时需注意路基可能出现不均匀沉降所带来的影响。

由水平位移云图可知，在路基荷载作用下路基出现了相对较大的水平位移。扶壁式挡土墙下方，在淤泥层与砾砂层交界位置产生一较大的水平向滑动趋势。这意味着如果软基加固未能较好处理淤

泥层，则容易产生整体失稳滑移现象。

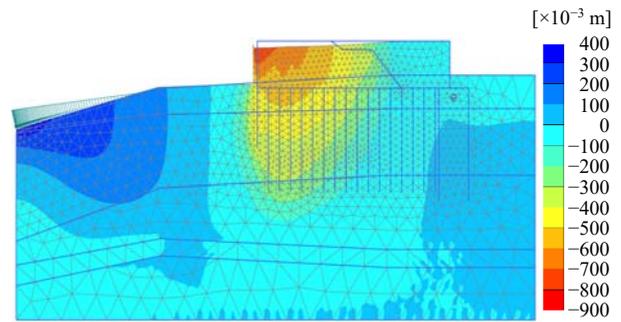


图11 竖向位移云图

Fig. 11 Nephogram of vertical displacement

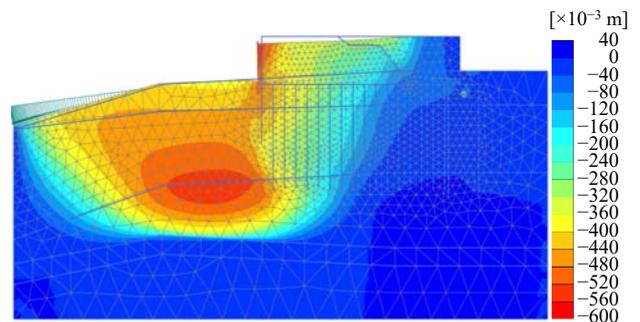


图12 水平位移云图

Fig. 12 Nephogram of horizontal displacement

5 结论

本文采用现场观测与有限元分析相结合的方法，探讨某滨海城市路基工程滑移的原因和机制。通过现场的观测和数据收集，获取了挡墙后仰和地貌变化特征等关键信息，结合地质条件确定了滑移区域。这些现场观测所得的信息提供了真实可靠的第一手资料，为数值分析提供了更为合理准确的模型参数和校准依据。在理论模型分析中，采用理正和 PLAXIS 软件分别进行边坡稳定性计算，比较了毕肖普法和强度折减法在稳定性分析中的差异。然后进一步考虑暴雨自然条件下路基荷载增加及地基强度下降等不良工况对其稳定性的影响，探讨路基滑移的原因，得到以下结论：

(1) 现场观测可得出定性结果。在该项目中，现场观测结果指向该区域发生了整体失稳破坏，为后续的理论模型分析提供重要参考。

(2) 在降雨工况下，由于现场排水系统尚未完善，路基容重增加，安全系数下降，有限元结果揭示滑移面出现在淤泥层中。

(3) 根据理论分析可得出复合地基强度变化与安全系数之间的关系，当复合地基强度仅为设计强度的50%时，路基出现滑移。

(4) 在稳定性分析中，毕肖普法仅考虑土条之

间的法向力而忽略了切向力, 因此计算速度快于有限元分析。然而, 由于两者使用的假设条件不同, 其结果无法直接进行简单的对比, 在得出稳定性结论时亦需要明确其计算方法及相应的假设条件。

参考文献

- [1] 张玉成, 杨光华, 钟志辉, 等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2334-2343.
ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, et al. Discussion on some key problems in soft soil foundation pit design and application analysis of design examples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2334-2343.
- [2] 金磊. 软土地基常见问题及处理对策探讨[J]. 建筑知识, 2016(1): 85, 230.
JIN Lei. Discussion on common problems and treatment strategies of soft soil foundation[J]. Architectural Knowledge, 2016(1): 85, 230.
- [3] 袁静, 龚晓南. 基坑开挖过程中软土性状若干问题的分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001, 35(5): 465-470.
YUAN Jing, GONG Xiao-nan. Analysis of soft clay during excavation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2001, 35(5): 465-470.
- [4] 马平川, 罗砚. 公路工程软土路基设计问题分析[J]. 运输经理世界, 2023(20): 16-18.
MA Ping-chuan, LUO Yan. Analysis of soft soil roadbed design issues in highway engineering[J]. Transport Business China, 2023(20): 16-18.
- [5] 中堀和英. 软土地基处理[M]. 张文全, 译. 北京: 人民交通出版社, 1982.
NAKAHORI K. Soft Soil Foundation Treatment[M]. ZHANG Wen-quan, trans. Beijing: China Communications Press, 1982.
- [6] 马小锋. 浅谈软土地基处理方法[J]. 山西建筑, 2008, 34(1): 121-122.
MA Xiao-feng. On the treatment method of soft foundation[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(1): 121-122.
- [7] 吴健生, 罗宇航, 王小玉, 等. 城市滑坡灾害生态风险不确定性分析及风险管理——以深圳市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3612-3621.
WU Jian-sheng, LUO Yu-hang, WANG Xiao-yu, et al. Uncertainty analysis and risk management of ecological risk of urban landslide disaster: a case of Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3612-3621.
- [8] 吴强, 董轩成, 文琪鑫. 川东某城市道路滑坡分析与治理[J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48(1): 70-79.
WU Qiang, DONG Xuan-cheng, WEN Qi-xin. Analysis and controlling of an urban road landslide in eastern Sichuan[J]. Sichuan Building Science, 2022, 48(1): 70-79.
- [9] 王晓鸿. 龙羊峡库岸水-岩相互作用及其环境效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1996.
WANG Xiao-hong. Research on water-rock interaction and environmental effects on the bank of Longyangxia Reservoir[J]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1996.
- [10] 肖山喜. 基于 Slide 和理正岩土边坡软件的某建筑高边坡设计[J]. 现代物业(中旬刊), 2022(11): 67-69.
XIAO Shan-xi. Design of high slope for a building based on Slide and Lizheng rock and soil slope software[J]. Modern Property Management, 2022(11): 67-69.
- [11] 王萌. 某机场高填方边坡稳定性数值法和极限平衡法对比分析[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊): 65-71.
WANG Meng. Comparative analysis of numerical method and limit equilibrium method for stability of high fill slope in an airport[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S): 65-71.
- [12] 郑宏, 田斌, 刘德富, 等. 关于有限元边坡稳定性分析中安全系数的定义问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2225-2230.
ZHENG Hong, TIAN Bin, LIU De-fu, et al. On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2225-2230.
- [13] 陈涛, 陈新国, 吴慧明, 等. 软土地区路基失稳机理及治理对策案例研究[J]. 地基处理, 2024, 6(2): 178-184.
CHEN Tao, CHEN Xin-guo, WU Hui-ming, et al. A case study on mechanism analysis and treatment measures of subgrade instability in soft soil area[J]. Journal of Ground Improvement, 2024, 6(2): 178-184.
- [14] 董梅, 郭青岭, 孔梦悦, 等. 考虑降雨入渗的良渚古城老虎岭遗址边坡稳定性分析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 231-237.
DONG Mei, GUO Qing-ling, KONG Meng-yue, et al. Slope stability analysis of Laohuling site in Archaeological Ruins of Liangzhu city considering real rainfall conditions[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 231-237.
- [15] 黄绍铿, 柯尊敬, 范秋雁, 等. 天然膨胀土边坡现场气

