

地基改良技术对基底抗冲刷稳定性的有限元分析

齐国明

(中铁十八局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 064000)

摘要: 为了提高土工织物管系统整体的稳定性, 本文使用 Plaxis 对四个方法案例进行有限元分析, 模拟土工织物管系统的外部故障, 评估预防措施的性能。分析结果表明: 与传统土工织物管的施工方法相比, 采用地基改良技术后, 极限水平位移相对较小, 但整体稳定安全系数没有显著提高。应用凹陷基底结构法和砾石改良地基法之后, 能在一定程度上改善土工织物管系统支撑路堤的整体性能和稳定性。但两种方法的组合却不能提高土工织物管系统的整体性能, 反而会增加施工成本, 耽误施工进度。整体而言, 凹陷基底结构法在降低极限水平位移和提高整体稳定安全系数方面是一个相对更好的选择。

关键词: 土工管; 路堤; 整体稳定性; 抗冲刷

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Finite Element Analysis of Anti-scour Stability of Foundation Improvement Technology

QI Guoming

(The Second Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group, Tangshan 064000, Hebei, China)

Abstract: In order to improve the overall stability of the geotextile pipe system, this paper uses Plaxis to perform finite element analysis on four method cases to simulate the external failure of the geotextile pipe system and evaluate the performance of preventive measures. The analysis results show that compared with the traditional construction method of geotextile pipe, the ultimate horizontal displacement is relatively small after the foundation improvement technology is adopted, but the overall stability safety factor is not significantly improved. The overall performance and stability of the embankment supported by the geotextile pipe system can be improved to a certain extent after the application of the concave base structure method and the gravel modified foundation method. However, the combination of the two methods can not improve the overall performance of the geotextile pipe system, but will increase the construction cost and delay the construction progress. Overall, the concave base structure method is a relatively better choice in reducing the limit horizontal displacement and improving the overall stability safety factor.

Key words: geotechnical pipe; embankment; overall stability; anti-scour

1 引言

由于长期的填海造地活动, 用于修建海岸防护堤所需的岩石或预制混凝土块的成本不断增加。土工织物管的出现为海岸线保护提供了更经济实惠的选择, 如果设计和施工得当, 与传统的岩石或预制混凝土结构相比, 土工织物管是一种

更具成本效益的解决方案^[1]。因此, 土工织物管在世界各国得到广泛应用。与传统的混凝土结构相比, 土工织物管具有相同的强度特性, 但更节省成本和时间。但是, 其与传统混凝土结构一样, 受到静态力和动态力的影响, 如波浪荷载、路堤填料重量、表面叠加荷载产生的侧向压力以及覆盖层压力^[2-3]。这些力和载荷的作用可能导

收稿日期: 2022-06-20

作者简介: 齐国明, 工程师, 本科, 研究方向为工程技术施工及管理

致一些潜在的问题，如冲刷等，从而降低结构整体的稳定性。由于土工织物管的形状特殊，对其进行稳定性分析较为复杂。因此，本文通过使用 Plaxis 软件进行有限元（FE）分析，充分研究这些潜在问题可能导致的后果，并评估替代结构和设计方法的性能，来减少和预防这些问题的发生。

2 试验准备

2.1 土工织物管

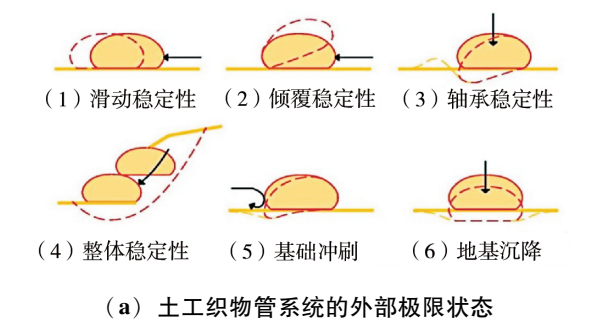
土工织物管是由可渗透水但不透土的土工材料制成，主要采用疏浚的海洋土壤或沙子液压填充。土工织物管本质上是一个包含土壤的结构单元块，目前被广泛应用于海岸工程项目，如海岸线保护和防波堤。此外，土工织物管也有助于储存和隔离来自疏浚过程中产生的污染物质。填充后的水化和胶结有助于提高管道的稳定性，并作为水体保持结构的一部分来共同抵抗外部载荷，因此由编织或非编织土工织物制成的管壳都可增强结构。

2.2 冲刷原因

冲刷是土工织物管等结构都要面对的一个重要问题。面向海岸的土工织物管侧面会出现明显的冲刷现象，这是由波浪破碎和暗流驱动造成的^[4-5]。土工织物管系统的外部典型极限状态如图 1a 所示，主要有六种：滑动稳定性、倾覆稳定性、轴承稳定性、整体稳定性、基础冲刷和地基沉降；图 1b 为土工织物管系统外部稳定性失效的示例。

2.3 Plaxis 软件

Plaxis 是专门用来分析岩土工程项目中变形和稳定性的软件。该软件基于有限元法（FEM），旨在对土壤结构的变形和稳定性以及地下水进行二维（2D）、三维（3D）的岩土分析，分析结果可用于地质工程，如开挖、基础、路堤和隧道^[6-7]。本研究用 Plaxis FEM 模拟研究地下管道系统的外



(b) 土工织物管系统外部故障图

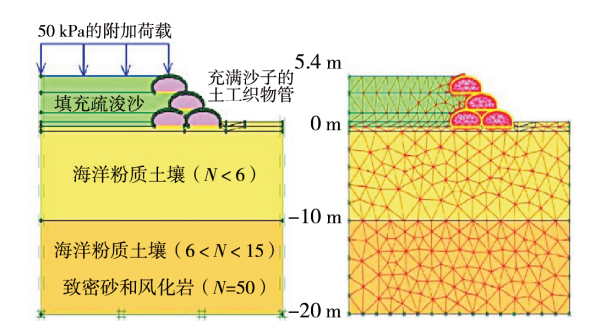
图 1 冲刷

部潜在故障，并评估替代结构和设计方法的相关性能。

3 模拟研究

3.1 路堤结构

本文应用 Plaxis 对图 2a 所示的路堤结构进行分析。其中，路堤高 5.4 m，由三层堆叠的土工织物管支撑，所有管道的理论直径为 3.0 m。填海路堤下的土壤剖面是典型海洋粉质土壤剖面之一。图 2b 所示为 Plaxis 的典型有限元网格，对其施加 50 kPa 的附加荷载，以模拟刚性路面上交通拥挤产生的叠加荷载。



(a) 路堤横断面 (b) Plaxis 有限元网格

图 2 路堤结构

3.2 材料特性

各土层的材料特性如表 1 所示。土工织物管的厚度为 3 mm，弹性模量为 7.0346×10^6 kPa。

3.3 Plaxis 有限元模拟

本文将对以下 4 个案例进行有限元分析，其中案例 2 至案例 4 提出了一种改造地基基础的方法，用来提高土工织物管系统结构的稳定性；算出每种情况下，有冲刷和无冲刷时路堤剖面的极限水平位移和整体稳定安全系数；通过塑性分析得出极限水平位移（ u_x ），通过 phi - c 折减法分析获得整体稳定安全系数（FS）。

(1) 案例 1：不采用地基基础改造方法，模

表1 各土层的材料特性

特性	填充疏浚沙(路堤)	沙填充土工织物管	海洋粉质土壤 ($N < 6$)	海洋粉质土壤 ($N > 6$)
饱和单位重量, $\gamma_{\text{sat}} / (\text{kN/m}^3)$	18	18	18	20
不饱和单位重量, $\gamma_{\text{unsat}} / (\text{kN/m}^3)$	16	17	16	18
土壤模量, $E / (\text{kN/m}^2)$	1×10^4	1.5×10^4	1×10^4	1×10^4
泊松比 ν	0.3	0.3	0.35	0.33
凝聚力 $c / (\text{kN/m}^2)$	1	2	5	4
摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	30	30	25	25

拟研究有冲刷和无冲刷时土工织物管路堤剖面的整体稳定性,最后分别算出两种情况下的极限水平位移(u_x)和安全系数(FS)。结果如图3所示,冲刷是通过物理方法去除了土工织物管路堤底部和趾部的一些土壤团,Plaxis 根据其几何形状进行模拟。

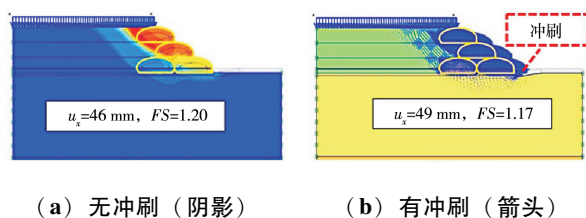


图3 案例1

(2) 案例2:如图4所示,案例2应用地基修正方法-凹陷基底结构法来分析土工织物管路堤剖面整体的稳定性。主要目的是为未来的冲刷效应提供余量。当冲刷不存在时,将在趾部产生图5所示的额外消极阻力。

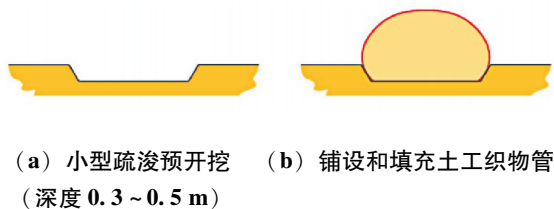


图4 凹陷基底结构

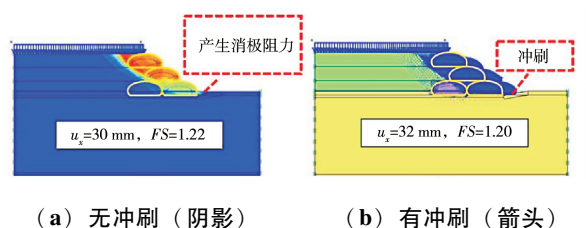


图5 案例2

(3) 案例3:应用地基修正方法-砾石改良地基法来分析土工织物管路堤剖面整体的稳定

性。主要是利用图6所示的地基底部砾石和土工织物管的聚合互锁机制,使基底滑动摩擦阻力更大而不易启动,地基也更加坚固。Plaxis 通过增加摩擦角和土壤-砂砾复合材料的折减系数($R_{\text{inter}} = 0.9 \sim 1.0$),来模拟修改后的基础。

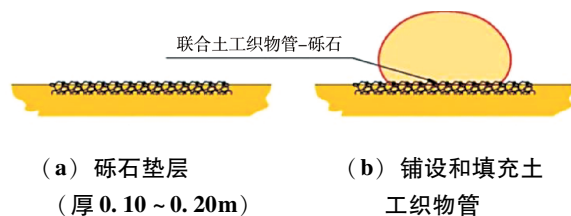


图6 砾石改良地基法

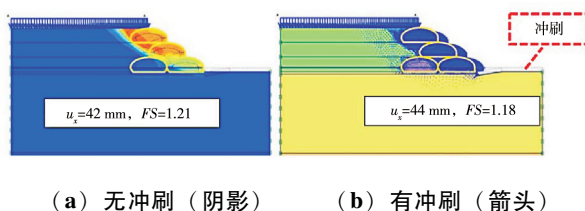


图7 案例3

对比图7和图3所示的结果,可知在应用砾石改良地基的方法后,降低了土工织物管系统的极限水平位移,同时系统整体稳定性和安全系数也有了轻微改善。

(4) 案例4:同样应用地基修正方法-砾石垫层改造凹陷基底结构法,即该方法是案例2和案例3的集合体(见图8),通过组合方法来分析土工织物管路堤剖面整体的稳定性,结果如图9所示。

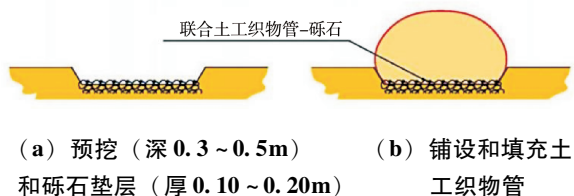


图8 砾石垫层改造凹陷基底结构法

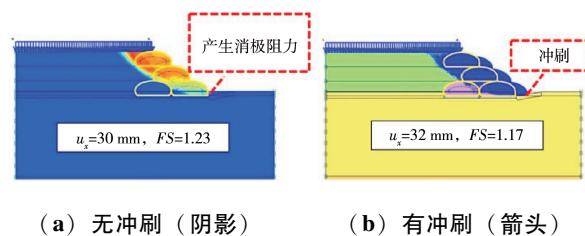


图9 案例4

结合4个案例进行分析,分析结果如表2所示。

(下转第67页)

[12] CHEN B. Study on comprehensive evaluation index system of rural highway traffic safety[J]. China Science and Technology Journal, 2019, 56(11):143-144.

[13] CHEN G L, CHEN J Y, GE C R. Dynamic evolution mechanism of road traffic safety[J]. Enterprise Science and Technology Development, 2019, 25(7):65-52.

[14] LI Y J. Research on comprehensive evaluation system of road traffic safety based on deep correlation analysis [J]. Police Technology, 2020, 18(5): 91-95.

[15] LAN X Z. Research on emergency response capability of urban road traffic accidents based on rough set fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Water Transport, 2018, 18(5):63-64, 66.

[16] LI G D. Study on urban road traffic safety evaluation based on entropy weight matter element model [J]. Highways & Automotive Applications, 2018, 20(1): 45-48,53.

[17] KANG W, GONG X L. Evaluation model and application of road traffic safety degree based on entropy weight method and BP neural network[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology (natural science edition), 2019,2(4):11-17,60.

[18] XU L X, YUAN R N, WANG X S. Evaluation of road traffic safety based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Northern Communications, 2019, 12(3): 31-34,39.

(上接第 40 页)

表 2 案例分析结果

指标		案例 1：没有应 用地基基础改造 的方法	应用地基基础改造的方法		
			案例 2：凹陷基 底结构法	案例 3：砾石改 良地基法	案例 4：砾石垫层改造 凹陷基底结构法
无冲刷的土 工织物管路 堤系统	极限水平位移， u_x /mm	46	30	42	30
	极限水平位移下降百分比/%	0.00	34.80	8.70	34.80
	整体稳定安全系数（FS）	1.20	1.22	1.21	1.23
	整体稳定安全系数上升百分比/%	0.00	1.70	0.80	2.50
有冲刷的土 工织物管路 堤系统	极限水平位移， u_x /mm	49	32	44	32
	极限水平位移下降百分比/%	0.00	37.70	10.20	34.70
	整体稳定安全系数（FS）	1.17	1.2	1.18	1.18
	整体稳定安全系数上升百分比/%	0.00	2.60	0.80	0.90

4 结论

本文通过 Plaxis 软件对 4 个案例进行有限元分析，模拟了土工织物管系统的外部潜在故障，并评估了各种缓解措施和预防措施的性能，如替代结构和设计方法。在应用地基基础改造方法后，能在一定程度上改善填砂土工织物管系统支撑路堤的整体性能和稳定性。与传统的土工织物管设计和施工方法相比，采用地基改良技术后，极限水平位移有所减小，但整体稳定安全系数没有显著提高。此外，两种方法的组合并未提升土工织物管系统的整体性能，反而会增加施工成本、耽误施工进度。在 4 个案例中，凹陷基底结构法在降低极限水平位移和提高整体稳定安全系数方面是一个较好的选择。总的来说，在决定是否需要应用地基基础改造技术时，附加成本、延长施工进度等通常会对提高土工织物管路堤系统性能起到决定性的作用。

参考文献：

[1] 李洪,苏金强,王钊. 土工织物管的设计和应用[J]. 人民珠江,2004(1):38-39,48.

[2] 赵铁成. 薄壁管桩及土工织物在道路加宽改造中的应用[J]. 天津建设科技,2014,24(3):69-70.

[3] 庄亚芳,赵彦霞,者东梅,等. 聚丙烯长丝土工织物水利性能和耐久性研究[J]. 材料研究与应用,2023,17(3): 586-592.

[4] 郭超. 基于洪水冲刷作用下的某碎石土边坡稳定性分析[J]. 山西交通科技,2020(5):23-26.

[5] 张芝永,曾剑,史英标,等. 浙江省河口海岸地区海塘塘脚冲刷问题探讨[J]. 浙江水利科技,2022,50(1): 1-49.

[6] 韩靖,凌文轩. 利用 PLAXIS 中的 UBC3D-PLM 组成律模拟土壤液化[J]. 科学技术创新,2023(17):141-145.

[7] 王捷. 基于 PLAXIS 的地下空间基坑开挖对周边防汛管线设施的影响分析[J]. 中国水能及电气化,2023(1):32-37.