

膨胀土地区减阻泥浆配比试验研究

Experimental Study on Ratio of Drag Reducing Mud in Expansive Soil Area

张兴其¹, 张坤勇^{2,3}, 张梦⁴, 沈小锐³, 李俊吉³

(1. 合肥市市政设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230071; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024; 4. 南京市房屋安全服务中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 地下空间开发向大断面、长距离发展, 顶推力随距离增加而增大, 合理控制顶推力成为关键。减阻泥浆作为施工重要材料, 具有减阻润滑和支撑地层作用, 其性能直接影响施工效果。依托合肥滨湖科学城庐州大道浅埋隧道段, 开展膨胀土地区减阻泥浆配比研究, 以提升大断面管幕箱涵顶进效率。通过正交试验, 研究膨润土、羧甲基纤维素钠 (CMC) 和纯碱对泥浆减阻性能的影响, 测试漏斗黏度、析水率和失水量以评估效果。结果表明: 膨润土可显著降低失水量和析水率, 但过高会降低流动性; CMC 含量为 0.1% 时析水率最小; 纯碱含量为 0.3% 时效果最佳。最终确定最优配比为膨润土: CMC: 纯碱为 8%: 0.1%: 0.3%, 为膨胀土地区管幕箱涵顶进施工提供了可靠配方。

关键词: 减阻泥浆; 管幕箱涵; 减阻性能; 泥浆配比

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0068-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.013

ZHANG Xingqi¹, ZHANG Kunyong^{2,3}, ZHANG Meng⁴, SHEN Xiaorui³, LI Junji³

(1. Hefei Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Hefei 230071, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210024, China; 4. Nanjing Housing Safety Service Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: The development of underground spaces is advancing towards larger cross-sections and longer distances, with jacking force increasing proportionally to the jacking distance. Therefore, effectively controlling the jacking force has become essential. Anti-friction slurry, as a crucial construction material, plays a role in reducing friction, providing lubrication, and supporting the surrounding strata, with its performance directly affecting construction outcomes. Relying on the shallow-buried tunnel section of Luzhou Avenue in the Binhu Science City of Hefei, this study focuses on optimizing the anti-friction slurry mix ratio for expansive soil areas to enhance the efficiency of large-section pipe-jacking construction. Using orthogonal experiments, the effects of bentonite, carboxymethyl cellulose (CMC), and soda ash on the slurry's anti-friction performance were studied. Funnel viscosity, water separation rate, and water loss were tested to evaluate the performance. The results showed that increasing the bentonite content significantly reduces water loss and water separation rates, but excessive amounts decrease

fluidity. A CMC content of 0.1% achieves the lowest water separation rate, while soda ash demonstrates optimal performance at a content of 0.3%. The final optimal mix ratio was determined as bentonite: CMC: soda ash = 8%:0.1%:0.3%, providing a reliable formula for pipe-jacking construction in expansive soil areas.

Keywords: drag reduction mud; pipe curtain box culvert; drag reduction performance; ratio of slurry

0 引言

随着我国城市现代化建设加快,合理开发和利用地下空间成为趋势。管幕箱涵顶进施工作为一种典型的非开挖技术,因其施工周期短、对周围环境影响小而被广泛应用。该方法具有灵活的断面设计、大尺寸、快速施工进度等优点,能够节约工期和工程投资,同时施工造成的地表沉降较小,尤其适用于城市建筑密集和交通繁忙地区的浅埋大断面隧道工程。

在管幕箱涵施工中,为控制变形常采用注浆减阻措施,而减阻泥浆的性能直接影响施工效果。减阻泥浆是由膨润土、水和外加剂按一定比例混合而成,具有触变性,能够在流态和凝胶体之间交替转换^[1]。流态时,膨润土颗粒呈分散状态;凝胶体时,颗粒呈絮凝状态。在搅拌、泵送或流动等外界扰动下,浆液状态可由凝胶体变为流态,起到润滑作用,减少箱涵与土体间的摩擦,降低顶进过程中的摩阻力,确保施工顺利进行。静置后,浆液可从流态恢复为凝胶态,填充管幕与箱涵间的空隙,支撑上覆土体,减小地表沉降和地层扰动。因此,研究减阻泥浆的性能在管幕箱涵施工中至关重要。

目前,已有一些专家学者对触变泥浆的性能开展了相关研究。井浩^[2]研究了触变泥浆套的形成机理及其物理性质,并且验证了泥浆套的减阻效果;喻军等^[3]研究了泥浆套的物理性质,并指出了解土层分布情况且配制性能最佳的泥浆是保证泥浆套完整性的关键因素;王明胜等^[4]通过室内泥浆性能试验确定了触变泥浆的配合比,通过土压力理论计算和现场实测验证了触变泥浆良好的减阻效果;袁为岭等^[5]通过开展类比试验分析触变泥浆中各原材料含量对泥浆性能的影响,最终根据郑州市顶管隧道工程地质条件得出了适合的泥浆配合比;诸葛恒源^[6]通过试验研究减阻泥浆的比重、漏斗黏度、析水率、滤失量等指标,为类似地质条件的工程提供

相关泥浆性能参数;张雪等^[7]通过开展不同材料配比的正交试验优选出触变泥浆的最优配比,开展缩尺模型试验探究触变泥浆的减阻效果,通过扫描电镜显微观察研究了触变泥浆的微观结构和减阻机理;高增奎等^[8]对减阻泥浆中膨润土种类及含量对泥浆性能的影响进行了实验研究;汪雨珍等^[9]通过室内摩阻试验测定触变泥浆及浆土混合物的摩阻参数,研究泥浆不同成分分配比对浆液减阻性能的影响;刘常利等^[10]通过触变泥浆配比试验确定了制浆剂及泥浆最佳配比范围,优化了注浆参数,减阻效果显著;胡凯等^[11]对比了不同掺量下3种外加剂对减阻泥浆工作性能、流变性能与触变性能的影响,表明外加剂可显著增大浆液黏度,降低失水量;王梓任等^[12]结合富水砂层顶管摩阻力特性以及高分子聚合物的作用机理,通过实验得到了优选泥浆配方;郑蕻等^[13]通过对顶进阻力和触变泥浆各影响成分分配比的分析,配制的优化触变泥浆使大口径顶管顶进一次成功;刘慧明^[14]依托苏州人民路矩形顶管工程,通过室内正交实验对大断面矩形顶管减阻泥浆配制与注入技术进行研究;缪高远等^[15]通过室内试验研究膨润土泥浆配比对基本指标的影响规律并分析其渗透特点。关于触变泥浆配比研究大多针对砂土或软土地层,适用于膨胀土地区大断面管幕箱涵顶进施工的减阻泥浆配比研究较少,故对该技术问题开展室内减阻泥浆配比正交试验,研究触变泥浆原材料对减阻性能的影响,得到适用于膨胀土地区管幕箱涵顶进施工的减阻泥浆配比。

1 工程概况

1.1 工程简介

庐州大道(繁华大道-锦绣大道)为市政新建道路,工程位于合肥市骆岗中央公园区域,北起繁华大道以北,南至锦绣大道,道路呈南北走向,道路全长约4.5 km。工程含地下隧道一座,实施范围14+00~K40+05,总长度2.605 km,开挖深度0~

岩土力学

18.51 m。入口 14+00~14+70 设置敞口 U 型槽, 14+70~39+45 段隧道暗埋下穿骆岗机场跑道(主跑道 17+95~19+33 下采用管幕法顶进施工)。隧道在 K3+780~K3+880 范围内下穿骆岗机场主跑道, 长约 138 m, 线路与机场跑道纵向夹角约为 45°。该节点采用预制隧道顶进法施工, 顶进长度 138 m。路线平面位于直线段, 由南向北下坡, 结构纵坡 -0.5%, 隧道顶最小覆土深度 5.1 m, 最大 6.3 m。

隧道断面为矩形, 主体为单箱两孔矩形框架结构, 结构宽度 29.4 m, 箱涵主体周围施工 44 根长 137 m 直径 1.6 m 的钢管以形成管幕, 隧道最大埋深约为 15 m, 如图 1 所示。

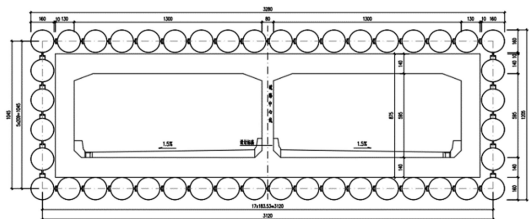


图 1 管幕箱涵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pipe curtain box culvert

1.2 工程地质条件

施工区域分布有①层杂填土、②层粉质黏土、③₁层黏土、③₂层黏土、④层粉质黏土、⑤层黏土, 除填土外其余土层均为硬塑状态、具有低压缩性、可作为天然地基持力层。规划设计中, 箱涵均在⑤₂层黏土进行顶进。⑤₂层黏土最大揭示厚度 34.3 m, 硬塑状态为主, 底部局部坚硬状态, 湿, 含铁锰质结核(局部富集)、氧化物、高岭土等, 局部间夹薄层粉质黏土, 底部局部含钙质结核、残积风化物等, 光滑, 无摇振反应, 干强度及韧性高。

地下水主要为上层滞水和深部承压水。上层滞水主要赋存于①层杂填土, 分布不连续, 一般无稳定的自由水面, 静止水位埋深 0.90~2.80 m, 静止水位高 14.8~23.41 m。承压水主要赋存与④层粉质黏土, 埋深约 4.70~9.50 m, 静止水位标高 13.51~17.77 m, 水位呈周期性变化, 年变化幅度为 1~3 m。

2 减阻泥浆性能指标试验

2.1 触变泥浆性能指标

对管幕箱涵法工程顶进影响较大的主要是以下三个指标: 漏斗黏度、失水量和析水率。

2.2 试验方法

采用正交试验研究减阻泥浆各项性能指标。通过测定减阻泥浆性能参数, 研究单一材料含量改变对减阻泥浆性能的影响规律, 最终得到适应于膨胀土地层管幕箱涵顶进施工的泥浆配比见表 1。

表 1 试验方案
Table 1 Experimental Plan

组号	膨润土含量	CMC 含量	纯碱含量 /%
1	2	0.10	0.3
	4	0.10	0.3
	6	0.10	0.3
	10	0.10	0.3
	12	0.10	0.3
2	8	0	0.3
	8	0.05	0.3
	8	0.15	0.3
	8	0.20	0.3
	8	0.25	0.3
3	8	0.10	0.1
	8	0.10	0.2
	8	0.10	0.4
	8	0.10	0.5
	8	0.10	0.6

2.3 试验步骤

试验内容及步骤如下:

黏度试验采用 1006 型泥浆漏斗黏度计。析水率试验使用 1 000 mL 具塞量筒, 将配制完成并充分搅拌后的泥浆倒入 1 000 mL 量筒内并盖上玻璃塞, 置于恒温室内静置 24 h 后析水体积与 1 000 mL 的比值即为析水率。

失水量试验采用 ZNS-2A 型中压失水仪。检查气阀密闭性后打气至压力表显示 1.1~1.2 MPa。堵住泥浆杯底部小孔, 倒入泥浆, 放置密封圈和滤纸并拧紧杯盖, 将泥浆杯倒置并连接至三通接头, 20 mL 量筒置于出液孔下方。逆时针打开放空阀, 将压力调至 0.69 MPa, 开启进气阀, 滤液滴出时开始计时, 30 min 后取下量筒并释放余气, 量筒内滤液体积即为失水量。

3 试验结果分析

3.1 膨润土含量对泥浆性能的影响

图 2 为不同膨润土含量对触变泥浆三大性能指标的影响规律。当泥浆中 CMC 和纯碱含量一定时, 随着膨润土含量增加, 泥浆的失水量不断降低, 主要

是因为膨润土含量增大时，泥浆中固相会占绝对优势，从而影响到泥浆黏度，使失水率降低，当膨润土含量大于8%时，失水量变化趋于平缓。膨润土含量会影响泥浆的析水率大小，膨润土含量越大，析水率越低，当膨润土含量达到6%时，泥浆析水率为0，再增大膨润土含量对泥浆析水率影响较小。在相应的配合比下，随着膨润土含量的增大，泥浆漏斗黏度不断增大，特别是当膨润土含量大于8%时，黏度的增加将非常显著，导致浆液流动性较差、注浆困难，在管壁外侧难以形成良好的泥浆套。考虑到当膨润土含量增大后，泥浆由减阻状态变成流塑状态，不再满足试验要求，故最大膨润土含量定为8%，此时浆液易形成较好的泥浆套。

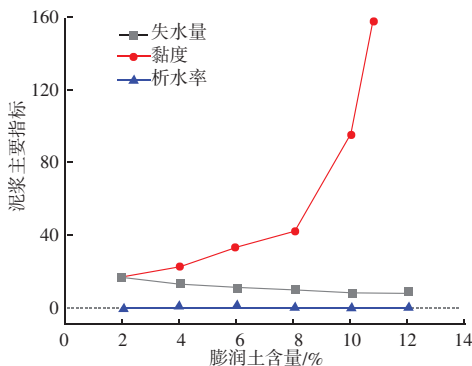


图2 膨润土含量对泥浆指标影响

Fig. 2 Influence of bentonite content on mud index

3.2 CMC 含量对泥浆性能的影响

图3为不同CMC含量对触变泥浆三大性能指标的影响规律。当泥浆中膨润土和纯碱含量一定时，随着CMC含量增加，泥浆的失水量逐渐减小，当增大至0.1%之后，失水量变化不明显，几乎可以不用考虑。随着CMC含量的增大，泥浆漏斗黏度大体上呈增加趋势，当超过0.2%之后，增大趋势愈发明显，这主要是CMC起到了增稠作用。显然，CMC可以明显改善泥浆的稠度。随着CMC含量的增大，泥浆的析水率几乎没有变化，当其含量达到0.1%时，泥浆析水率变为0。因此根据试验数据，减阻泥浆中CMC含量为0.1%是合适的。

3.3 纯碱含量对泥浆性能的影响

图4为不同纯碱含量对触变泥浆三大性能指标的影响规律。当泥浆中膨润土和CMC含量一定时，随着纯碱含量增加，泥浆的失水量呈先减小后增加的

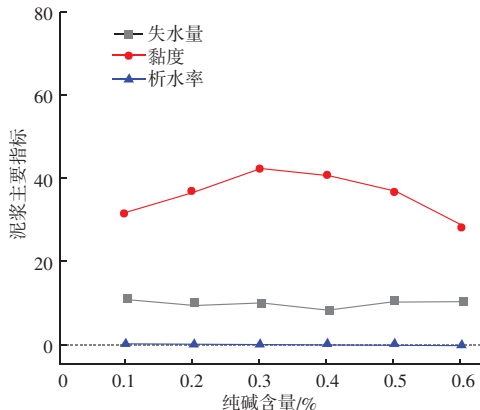


图3 CMC含量对泥浆指标影响

Fig. 3 Influence of CMC content on mud index

变化趋势，在纯碱含量为0.4%附近时，泥浆的失水量达到最小，但总体变化较为平稳。这是因为纯碱加入减阻泥浆中可与泥浆中的部分钙离子发生交换，增大了泥浆的水化能力，从而降低泥浆的失水量，但加入过多的纯碱后，会有多余的纯碱溶解在泥浆中，这反而会增大其失水量，由此影响泥浆的性能。随着纯碱含量的增大，泥浆漏斗黏度会呈现出先增大后减小的变化趋势，在泥浆中纯碱含量达到0.3%附近时，泥浆的黏度变到最大，其值为42.24 s，达到最大。随着纯碱含量的增大，泥浆的析水率会不断降低，在其含量达到0.3%附近时，析水率变为0。因此根据管幕箱涵施工对减阻泥浆性能的要求，减阻泥浆中纯碱含量为0.3%时是合适的。

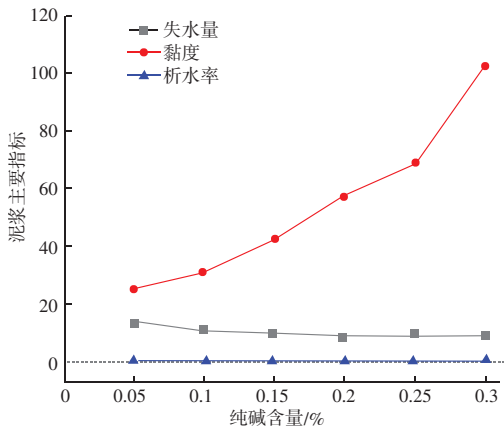


图4 纯碱含量对泥浆指标影响

Fig. 4 Influence of soda content on mud index

通过室内正交试验得到满足膨胀土地层管幕箱涵顶进所要求的减阻泥浆配合比为膨润土:CMC:纯碱为8%:0.1%:0.3%。

岩土力学

4 结论

本研究旨在应对膨胀土地区大断面管幕箱涵顶进施工中的阻力控制问题,探索最佳减阻泥浆配比。采用正交试验法,选择膨润土、CMC 和纯碱为主要原料,通过改变其比例,分析各成分对泥浆减阻性能的影响。试验重点测试泥浆的漏斗粘度、析水率和失水量,以评价泥浆在润滑、失水控制和支撑地层方面的综合表现。结果表明,膨润土、CMC 和纯碱含量的合理配比可在控制失水的同时提升泥浆的润滑性和稳定性。本研究为膨胀土地区的类似工程提供了优化的泥浆配方和减阻措施,提升了顶进施工的效率与安全性。

参 考 文 献

- [1] 魏纲,徐日庆,邵剑明,等. 顶管施工中注浆减摩作用机理的研究 [J]. 岩土力学, 2004 (6): 930-934.
- [2] 井浩. 大断面箱涵泥浆套形成机理及作用效果研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [3] 喻军,李元海. 顶管泥浆套的物理性质对顶推力的影响 [J]. 土木工程学报, 2015, 48 (增刊2): 327-331.
- [4] 王明胜,刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53 (6): 182-189.
- [5] 袁为岭,荣亮,杨红军. 原材料含量对顶管施工触变泥浆性能的影响 [J]. 隧道建设, 2016, 36 (6): 683-687.
- [6] 诸葛恒源. 复杂环境下大口径顶管施工对周围环境的影响研究 [D]. 杭州: 浙江科技学院, 2018.
- [7] 张雪,万中正,王传银,等. 无水砂层中矩形顶管施工用触变泥浆配比优化及减阻性能试验 [J]. 工程地质学报, 2021, 29 (5): 1611-1620.
- [8] 高增奎,张睿钦,王先甲,等. 膨润土种类及黄原胶含量对减阻泥浆性能的影响 [J]. 土木工程与管理学报, 2024, 41 (1): 19-24.
- [9] 汪雨珍,刘念武,梁锦涛,等. 触变泥浆组成对减阻性能影响的室内测定试验 [J]. 科技通报, 2024, 40 (10): 36-39.
- [10] 刘常利,张占胜,张浩,等. 超大断面矩形顶管隧道触变泥浆减阻控制技术 [J]. 建筑机械化, 2022, 43 (5): 43-47.
- [11] 胡凯,李文,李胜,等. 不同外加剂对顶管施工用减阻泥浆的性能影响 [J]. 建筑施工, 2022, 44 (4): 842-846.
- [12] 王梓任,夏意峻,姚永宽,等. 富水砂层长距离顶管减阻泥浆性能研究 [J]. 辽宁工业大学学报 (自然科学版), 2024, 44 (1): 44-47.
- [13] 郑茜,邢晓东,孙春辉,等. 膨润土触变泥浆辅助大口径顶管一次顶进施工的配比分析 [J]. 混凝土世界, 2022, (9): 70-74.
- [14] 刘慧明. 大断面矩形顶管减阻泥浆配制与注入技术 [J]. 山西建筑, 2020, 46 (21): 64-65.
- [15] 缪高远,霍振峰,池俊杰. 顶管泥浆触变特性及泥浆套成型机理研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024 (13): 143-145.

E - mail : fmhzhly@163.com