

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.02.007

黏土地层矩形顶管触变泥浆配比优选研究

韩 通

(中铁十九局集团轨道交通工程有限公司,北京 101300)

摘要: 为保证触变泥浆在顶管施工中起到良好的润滑减阻和稳定围岩的作用,使顶管施工安全、高效、快速进行,本文对其配比进行研究。以深圳市16号线综合管廊昌盛路段顶管工程为依托,在对膨润土、羧甲基纤维素(CMC)和纯碱为触变泥浆原材料开展正交试验的基础上,构建基于综合平衡法的触变泥浆配比优选方法,并采用摩擦特性试验及数值计算相结合的方式,对最优配比的触变泥浆进行减阻效果研究。结果表明:10%膨润土、0.19% CMC、0.25%纯碱和89.56%水是泥浆原材料的最优配比,该配比下的泥浆流动性和触变性较好,失水量较小,形成的“泥饼”较为致密,减阻性能良好,综合性能最优;根据最优配比得到的触变泥浆对依托工程进行顶管施工减阻,地表沉降值分布在0.03047 mm~1.12800 mm之间;泥浆失水量与膨润土、CMC、纯碱的含量均具有显著相关性,表明三种原材料之间存在复杂的交互作用,共同决定了泥浆失水量这一关键性能指标。该配比应用于深圳市16号线综合管廊昌盛路段顶管工程,验证了本文提出的优选方案。

关键词: 软黏土层;触变泥浆;顶管施工;配比试验;减阻性能

中图分类号: TU990.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0050-09

Optimal Ratio of Convertible Mud of Rectangular Pipe Jacking in Clay Formation

HAN Tong

(China Railway 19th Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: Touch mud plays the role of lubrication, resistance reduction and stabilizing the surrounding rock in the pipe jacking construction, and is an important material to ensure the safety, efficiency and rapid progress of the pipe jacking construction, and the scientific determination of its ratio is the key to ensure its safety and stability. Based on the orthogonal test of bentonite, CMC and soda ash as raw materials, the work constructs the optimization method, adopts the method of friction characteristic test and numerical calculation. The results show that 10% bentonite, 0.19% CMC, 0.25% soda ash and 89.56% water are the optimal ratio of slurry raw materials, The fluidity and touch ability under this ratio are better, with less significant water loss, the "mud cake" formed is relatively dense, good resistance reduction performance, optimum comprehensive performance. According to the optimal ratio of the contact mud to rely on the engineering pipe jacking construction resistance reduction, the surface subsidence values are distributed between the 0.03047 mm~1.12800 mm, construction has little impact on the ground surface to ensure the safety of the construction. the water loss has strong correlation with bentonite, CMC and soda ash. This suggests a complex interaction between the three raw materials, and jointly determines the mud water loss of this key performance index. Applies it to the pipe jacking project of Shenzhen Line 16, and verifies the optimization scheme.

Keywords: soft clay layer; thixotropic slurry; pipe jacking construction; ratio test; drag reduction performance

随着经济社会的快速发展及城市化进程的加速推进,城市地下空间越来越受到重视,越来越多的基础设施建设转入地下,很好地解决了地上空间供需

冲突的问题。考虑城市社会经济的正常运转及地上建构物的安全稳定,对地下空间建设施工方法提出了较高的要求。顶管法因具备安全性能强、造价

收稿日期:2024-12-16

修稿日期:2025-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(42072319);中铁十九局集团有限公司科技研究开发计划项目(23-B10)

作者简介:韩 通(1993—),男,工程师,主要从事地铁项目土建工程施工技术研究工作。E-mail: 294490739@qq.com

成本低、开挖扰动小、能够维护城市景观等优势而逐渐兴起,被广泛的使用于地下通道、地铁通道及综合管廊等地下工程^[1-5]。但是顶管法施工过程中,管片与土体表面在顶进过程中会产生较大的摩擦力,致使地层扰动,从而引起地表沉降,对上层建筑及道路等构筑物造成了很大威胁^[6-9]。因此,如何采取有效方法降低该摩擦力成为了目前顶管法施工最大的难题。近 30 年来,随着化学工业的发展,各种高分子材料开始被引入到顶管减阻泥浆中,如羧甲基纤维素(CMC)、聚丙烯酰胺(PAM)等。这些高分子材料的加入可以改善泥浆的流变性、稳定性和润滑性,使泥浆在不同地层条件下都能更好地发挥减阻作用^[10-11]。针对长距离顶管、复杂地层顶管等特殊工程需求,科研人员通过大量的室内外试验,不断优化泥浆配方。王梓任^[12]依托实际富水砂层圆形顶管工程,以膨润土、CMC、纯碱为触变泥浆原材料,从泥浆性能(含砂率、密度、pH、滤失量、流变参数)方面出发,通过室内正交试验得到了一种泥浆配比;王明胜等^[13]依托郑州市某圆形顶管工程,在触变泥浆原材料基础上添加了 PHP 外加剂,通过控制变量法分析各原材料对泥浆各性能(黏度、失水量、析水率)的影响规律,提出一种泥浆配比;王春婷等^[14]在泥浆中添加聚丙烯酰胺、腐植酸钾和石墨粉等外加剂,通过控制变量法对触变泥浆的性能(黏度、失水量、流变指数)进行了优化,提出了一种泥浆配比。沈磊磊^[15]通过控制变量法测定不同触变泥浆原材料(膨润土、CMC、纯碱、PAM)配比下的泥浆性能参数(漏斗黏度、失水量、析水率),分析了触变泥浆原材料对泥浆各性能的影响规律;诸葛恒源^[16]通过室内试验测定不同泥浆原材料配比下的触变泥浆性能(比重、漏斗黏度、绝对黏度、析水率、滤失量),结合实际工程泥浆性能要求,确定了触变泥浆在顶管工程中各性能数值范围;冯锐等^[17]依托软弱地层圆形顶管工程,提出了一种膨润土触变泥浆及高聚物触变泥浆配比,通过实际的工程案例得出顶进速度会对泥浆套的形成产生影响;吴全科等^[18]通过试验提出了一种适用于广州亚运会圆形顶管工程的触变泥浆配比。

综上所述,目前顶管施工减阻触变泥浆的配比优化,学者们虽做了大量研究,但因地层的不同,优化指标及优化方法的不足,并没有得到较为认可的配比;较多学者^[12-16]仅选取 3~4 个性能指标进行触变泥浆配比优化,指标选取缺乏全面性,且优化试验方法上多选取控制变量法^[13-15],单一因素变化,

忽视了泥浆各原材料间的交互作用,从而使试验结果出现偏差;现有研究成果主要集中在圆形顶管触变泥浆配比的优选,而矩形顶管较圆形顶管与土体接触面更广,顶管施工中产生的摩擦阻力也随着增大。目前,对于矩形顶管施工触变泥浆配比研究较少,鉴于此,本文综合考虑影响触变泥浆配比的性能指标,拟设计不同泥浆配比的正交试验,通过极差分析和方差分析相结合的方式,探究各性能指标与触变泥浆原材料间的影响规律,在此基础上,采用综合平衡法优选触变泥浆配比,并结合深圳市 16 号线综合管廊昌盛路段顶管工程软黏土地层,开展摩阻特性试验,验证泥浆的减阻效果,并通过数值计算模型探讨触变泥浆减阻后的地表沉降规律,以期为类似顶管工程施工及相关研究提供参考。

1 工程概况

深圳 16 号线共建管廊工程项目昌盛路顶管工程区间长 166.3 m,工作井处在现状新一路南侧的端头位置,接收井处在现状龙坪路与站前路交汇口西南方向约 100 m 之处。管节结构的外尺寸为 7.7 m×4.5 m,壁厚均是 0.7 m,单节管节的长度为 1.5 m。结构的覆土深度在 3.3 m~5.4 m 之间,顶管区间主要穿越的是粉质黏土层。

2 触变泥浆配比试验及减阻性能研究

2.1 触变泥浆性能指标

影响触变泥浆性能的指标主要包括失水量和泥饼厚度、析水率、pH 值、黏度和流动度、稠度系数^[10-16]。

(1) 失水量和泥饼厚度。特定体积的触变泥浆在 0.69 MPa 压力下特定时间内滤出的溶液体积为触变泥浆的失水量,泥浆失水后,固相颗粒相互附着形成“泥饼”。顶管施工所需的触变泥浆要求泥浆失水量小于 25 cm³/30 min,泥饼要致密完整^[13]。

(2) 析水率。泥浆静置 24 h 表面析出的水分体积与原泥浆体积之比为触变泥浆的析水率,在实际顶管施工中要求泥浆的析水率为 0^[13]。

(3) pH 值。当 pH 值大于 11 时,泥浆不稳定,会产生分层现象,而过于酸性则会腐蚀管材。通常情况下,要求 pH 值处于 8 至 10 之间^[16]。

(4) 黏度和流动度。黏度是指特定体积的泥浆流经马氏漏斗的小孔所耗费的时间,在顶管施工中,要求泥浆的黏度大于 30 秒,能够良好的评价泥浆的触变性;流动度是指特定体积的泥浆流经流动度

测试仪的时间,能够良好地评价泥浆的流动性能。

(5) 稠度系数。用于表示泥浆的可泵性,反映了泥浆的稀稠程度。

2.2 试验材料及方法

正交试验可进行多因素多水平的研究,具有高效、全面、经济等优点^[19]。因此,本文采取正交试验探究不同泥浆原材料配比下各泥浆性能的变化规律,并结合顶管施工触变泥浆要求,提出最优的触变泥浆原材料间的比重。触变泥浆原材料为膨润土、CMC、纯碱,如图 1 所示。



图 1 膨润土(左)、CMC(中间)和纯碱(右)

本次试验设定 3 个因素(膨润土、CMC、纯碱),每个因素 5 个水平,即进行三因素五水平正交试验,

由 SPSSAU 软件生成三因素五水平正交表如表 1 所示,开展 25 组试验。结合工程经验及前人研究成果^[20-21]确定触变泥浆各原材料占比取值范围。任怡东^[20]在研究膨润土配比时,膨润土取值 4%~14%,CMC 取值 0%~0.22%,纯碱取值 0%~0.3%,且得到膨润土配制比例不应低于 6% 的结论。周载延^[21]在研究 CMC 和纯碱对触变泥浆的影响时,得到 CMC、纯碱配制比例不应低于 0.1% 的结论。因此,膨润土变量(A)五个水平从 6% 开始,依次以 2% 为基准递增;CMC 变量(B)五个水平从 0.1% 开始,依次以 0.03% 为基准递增;纯碱变量(C)五个水平从 0.1% 开始,依次以 0.05% 为基准递增。水的掺量为 $1 - (A + B + C)$ 。

按照表 1 中各组试验原材料配比制备触变泥浆,然后依次借助马氏漏斗测量泥浆黏度,量筒测量泥浆析水率,泥浆失水量测定器测量失水量和泥饼厚度,旋转泥浆黏度测试仪测量泥浆稠度系数,流动度测试仪测量泥浆流动度,石蕊试纸测量泥浆 pH 值。每组试验设置 3 个平行组,求取平均值作为该性能最终结果,试验结果见表 1。

表 1 正交试验设计表及试验结果

试验号	膨润土/%	CMC/%	纯碱/%	黏度/s	析水率/%	失水量/%	泥饼厚度/mm	稠度系数	流动度/s	pH 值
1	6	0.10	0.10	34.62	0.30	16.80	0.99	0.066	5.05	9.7
2	6	0.13	0.20	36.45	0.30	16.20	1.00	0.088	4.70	10.5
3	6	0.16	0.30	37.36	0.20	14.80	0.95	0.124	4.76	10.7
4	6	0.19	0.15	39.08	0.02	15.00	0.90	0.129	4.99	10.8
5	6	0.22	0.25	40.47	0.60	13.80	1.50	0.166	5.42	9.4
6	8	0.10	0.30	41.07	0.80	14.49	0.95	0.291	5.90	10.5
7	8	0.13	0.15	48.30	0.10	14.18	1.00	0.219	5.37	8.9
8	8	0.16	0.25	47.90	0.15	14.40	0.96	0.377	5.42	9.6
9	8	0.19	0.10	66.11	0.24	14.70	0.85	0.371	6.17	8.8
10	8	0.22	0.20	53.73	0.05	13.10	1.85	0.344	5.72	9.6
11	10	0.10	0.25	57.77	0.05	14.60	1.90	0.550	5.33	9.7
12	10	0.13	0.10	61.80	0.03	14.40	2.00	0.263	4.95	9.2
13	10	0.16	0.20	73.50	0.20	13.80	2.15	0.383	5.47	9.3
14	10	0.19	0.30	80.64	0.02	11.20	2.30	1.024	6.90	9.6
15	10	0.22	0.15	140.32	0.05	11.70	2.50	0.649	8.78	9.2
16	12	0.10	0.20	107.61	0.01	13.80	2.30	1.769	7.02	9.7
17	12	0.13	0.30	118.81	0.30	12.00	2.35	1.014	6.93	10.3
18	12	0.16	0.15	204.53	0.32	11.80	2.48	3.903	14.98	10.4
19	12	0.19	0.25	167.19	0.05	10.30	3.00	8.697	11.70	9.8
20	12	0.22	0.10	309.67	0.27	10.90	3.30	1.970	16.84	9.6
21	14	0.10	0.15	395.14	0.60	13.00	2.95	8.532	13.98	8.8
22	14	0.13	0.25	432.39	0.15	11.50	3.00	8.128	24.52	10.2
23	14	0.16	0.10	523.62	0.01	10.84	2.60	5.055	57.32	9.1
24	14	0.19	0.20	762.36	0.05	10.90	3.35	9.517	84.86	9.5
25	14	0.22	0.30	466.45	0.30	9.20	4.00	12.086	53.54	10.7

2.3 正交配比试验结果分析

依据正交试验的结果进行极差与方差分析,分析各因素对泥浆各个性能的贡献效果,然后结合实际施工触变泥浆性能指标要求,确定正交试验的最优组合^[15]。

2.3.1 影响因素对泥浆性能参数贡献效果分析

极差分析是一种统计学中的简单测量数据离散程度的方法,可快速评估数据集的变化幅度。图 2—图 8 分别示出触变泥浆各影响因素对其泥浆各个性能(黏度、析水率、失水量、泥饼厚度、稠度系数、流动度、pH 值)的贡献效果图。

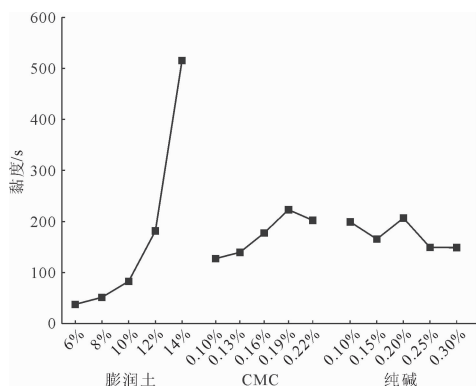


图 2 各影响因素对黏度的贡献效果图

从图 2 中能够看出,对泥浆黏度性能的影响而言,膨润土居首,CMC 次之,纯碱的影响最弱。黏度伴随膨润土含量的增多,整体上呈现出增长的态势,黏度随着 CMC 含量的增加先是上升而后下降,纯碱则相对缺乏规律。鉴于触变泥浆的黏度过大或者过小,注浆的成效均欠佳,故而选取中间值即可。由此可知,膨润土处于第 3 个水平也就是 10% 的时候为最佳,CMC 以第 3 个水平即 0.16% 时为优,纯碱以第 2 个水平也就是 0.15% 时为最合适。因而,确定的最优组合是 A3B3C2。

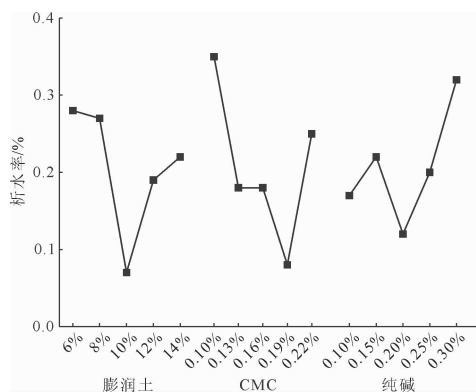


图 3 各影响因素对析水率的贡献效果图

从图 3 中能够看出,CMC 对触变泥浆的析水率影响最为显著,膨润土其次,纯碱的影响相对较小。实际工程中要求触变泥浆的析水率为 0,因此触变泥浆的析水率越小越好,膨润土含量为 10%、CMC 含量为 0.19%、纯碱含量为 0.20% 时泥浆析水率最小,因而,确定的最优组合为 A3B4C3。

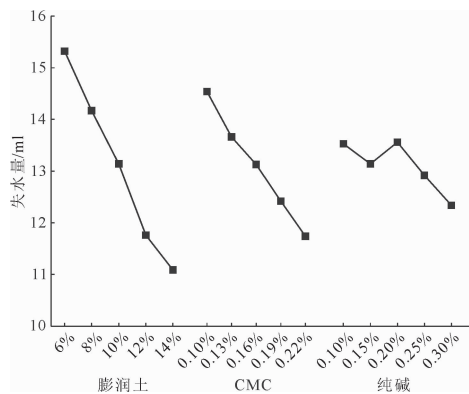


图 4 各影响因素对失水量的贡献效果图

从图 4 中可以看出,在对泥浆失水量的影响程度方面,膨润土的作用最为显著,CMC 次之,纯碱的影响最小,且失水量与膨润土、CMC 含量成反比。

实际顶管施工中要求触变泥浆失水量越小越好。因此,确定的最佳组合为 A5B5C5。

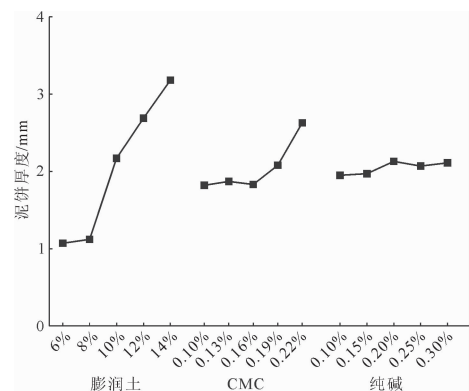


图 5 各影响因素对泥饼厚度的贡献效果图

从图 5 中可以发现,对泥浆泥饼厚度影响最大的是膨润土,CMC 位居其次,纯碱的影响最为微弱。泥饼厚度越厚,表明泥浆的致密性越强。由此,确定的最佳组合为 A5B5C3。

从图 6 中可以发现,对触变泥浆稠度系数影响最大的是膨润土掺量,CMC 与纯碱影响不是很显著。就减阻泥浆的稠度性能而言,稠度适中时,触变泥浆的减阻效果越佳。因此,确定最佳组合为 A3B1C2。

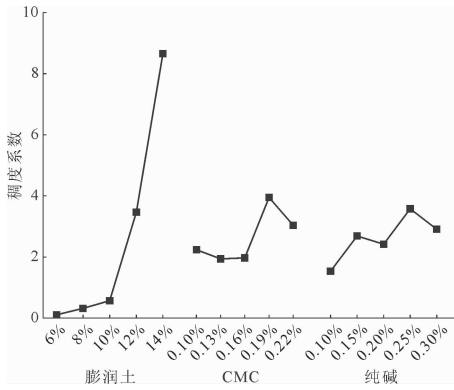


图 6 各影响因素对稠度系数的贡献效果图

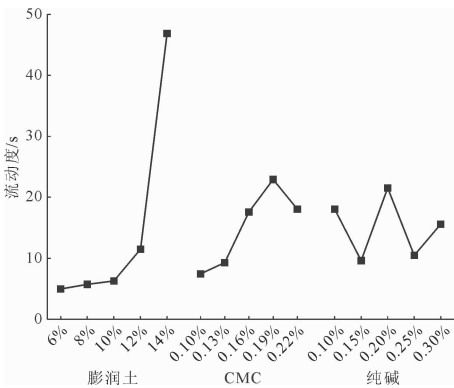


图 7 各影响因素对流动度的贡献效果图

从图 7 中可以看出,对触变泥浆流动度产生最大影响的是膨润土。就减阻泥浆的流动度性能来讲,流动度所用时间越短,减阻泥浆的流动性能便越出色。因而,确定的最佳组合为 A1B1C2。

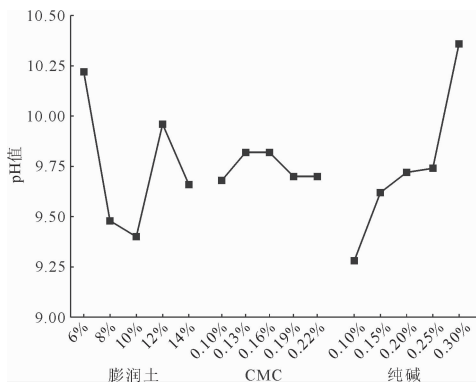


图 8 各影响因素对 pH 值的贡献效果图

从图 8 中可以看出,在对触变泥浆 pH 值的影响方面,纯碱的作用最大,膨润土位居其次,CMC 的影响最为微弱。针对减阻泥浆的 pH 性能来说,pH 值越小,减阻泥浆的表现就越佳。故而,确定的最佳组合为 A3B1C1。

2.3.2 原材料含量对泥浆性能的影响分析

运用方差分析探究触变泥浆原材料的含量和泥浆性能之间有无显著关联,同时借助极差分析,更为深入地分析触变泥浆原材料含量对于泥浆性能的作用影响。方差分析的结果如表 2 所示。

表 2 中 P 值小于 0.05 时,表明该泥浆性能与对应的泥浆原材料主效应存在,即意味着该泥浆性能随着该原材料的改变而改变。由表 2 可知,膨润土含量与泥浆的黏度性能具有显著相关性,结合图 3 可知,触变泥浆的黏性与膨润土含量成正相关;膨润土、CMC 及纯碱均与失水量性能具有显著相关性,结合图 5 可知,触变泥浆的失水量与膨润土、CMC 及纯碱含量成正相关,膨润土含量影响最大,CMC 次之,纯碱最小;膨润土、CMC 含量与泥浆的泥饼厚度性能具有显著相关性,结合图 6 可知,触变泥浆的泥饼厚度与膨润土、CMC 含量成正相关,膨润土含量影响最大,CMC 次之;膨润土含量与泥浆的稠度系数具有显著相关性,结合图 7 可知,触变泥浆的稠度系数与膨润土含量成正相关;膨润土含量与泥浆的流动度具有显著相关性,结合图 8 可知,触变泥浆的流动度与膨润土含量成正相关,即膨润土含量越大,流动度越大,泥浆流动性越差;纯碱含量与泥浆的 pH 值具有显著相关性,结合图 9 可知,触变泥浆的 pH 值与纯碱含量成正相关。

表 2 方差分析结果

性能指标	项	膨润土	CMC	纯碱
黏度	F	34.993	1.449	0.666
	P	0.000	0.278	0.627
析水率	F	0.769	1.124	0.596
	P	0.566	0.390	0.672
失水量	F	54.113	21.277	4.578
	P	0.000	0.000	0.018
泥饼厚度	F	97.365	13.071	0.769
	P	0.000	0.000	0.565
稠度系数	F	20.425	1.144	0.852
	P	0.000	0.382	0.519
流动度	F	10.076	1.316	0.798
	P	0.001	0.319	0.549
pH	F	2.002	0.083	2.611
	P	0.158	0.986	0.049

2.4 触变泥浆性能最优配比分析

由极差分析和方差分析结果可知,对于触变泥浆每个性能指标所对应的最优组合各不相同,无法对三因素、7 种性能指标的重要程度进行排序,为了

得到 7 种性能均较佳的触变泥浆配比,采用综合平衡法进行触变泥浆配比优选。

不同指标所对应的最佳水平组合是不同的,利用综合平衡法进一步分析,以此获取综合的最优配比。综合平衡法的原则有以下四条^[22]。

(1) 基于因素影响主次性的优水平选择。当某一因素对不同指标的影响呈现显著差异,在某一指标中为主要影响因素,而在另一指标中为次要影响因素时,应优先选取该因素作为主要因素时对应的优水平。此选择策略旨在确保对关键指标的优化效果,避免因次要因素的干扰而偏离整体最优解。

(2) 基于影响程度均衡性的优水平选择。若各指标受某因素的影响程度相近,难以明确主次关系,此时可采用“少数服从多数”的原则。即统计该因素在不同指标中所呈现的优水平出现次数,选取出现频次较高的优水平作为最终决策。这一原则基于多数指标的共性需求,在无明显主导因素的情况下,

寻求整体上的最优妥协解。

(3) 基于因素水平差异的成本导向优水平选择。当因素的各水平对指标的影响差异较小时,决策的重点可转向成本效益方面。依据减少资源消耗、节省成本的原则,选取能够在满足基本指标要求的前提下,实现经济效益最大化的水平。此原则在保证产品或服务质量的的同时,注重资源的有效利用和成本控制。

(4) 基于指标重要性分级的优水平选择:若各指标之间存在重要程度的差异,其中某些指标具有更高的战略意义或实际价值,那么在确定因素优水平时,应以满足这些关键指标的需求为首要目标。优先确保关键指标达到最优状态,再考虑其他指标的优化,以实现整体系统的核心价值最大化。

具体平衡过程如下:综合考虑极差分析与方差分析的结果,对泥浆性能与原材料间存在显著特征的各水平进行排序,见表 3。

表 3 各因子水平排序表

性能	膨润土(优→劣)					CMC(优→劣)					纯碱(优→劣)				
黏度	3	2	1	4	5										
析水率	3	4	5	2	1	4	3	2	5	1	3	1	4	2	5
失水量	5	4	3	2	1	5	4	3	2	1	5	4	2	1	3
泥饼厚度	5	4	3	2	1	5	4	2	3	1					
稠度	3	2	1	4	5										
流动度	3	2	1	4	5										
pH											1	2	3	4	5

由表 3 可知,触变泥浆的 6 个性能与膨润土含量具有显著相关性,膨润土水平为 3 时,触变泥浆的 4 个性能达到了最优,且其余 2 个性能也处于中等水平,即最优膨润土含量为 10%;触变泥浆的 3 个性能与 CMC 含量具有显著相关性,CMC 水平为 4 时,3 个性能均较优,即最优 CMC 含量为 0.19%;触变泥浆的 2 个性能与纯碱含量具有显著相关性,水平 3 和水平 5 仅使触变泥浆一个性能达到最优,当纯碱含量水平为 4 时,触变泥浆 2 个性能均处于较优水平,即最优纯碱含量为 0.25%。因此,触变泥浆最优配比为膨润土:CMC:纯碱:水 = 10.00:0.19:0.25:89.56。

由于提出的最优触变泥浆配比并没有在正交试验设计组数中,为了验证各性能指标的优选性,按照触变泥浆最优配比配备泥浆,并依次测定触变泥浆的 7 个性能,试验结果见表 4。

由表 4 可以看出,通过综合平衡法优选的触变

泥浆配比其各项性能均满足工程要求,且泥浆的流动性与触变性较为良好,失水量较少,所形成的“泥饼”更为致密,综合性能达到最优状态。

表 4 优化后的触变泥浆各性能指标数据

黏度/s	析水率/%	失水量/%	泥饼厚度/mm
80.72	0.01	10.3	2.5
稠度系数	流动度/s	pH 值	
1.106	5.8	9.2	

2.5 触变泥浆减阻性能

在得到泥浆最优配比后,进一步展开摩阻特性试验,以便更直观地了解在软黏土层顶管施工时该泥浆的减阻成效。顶管施工过程中,触变泥浆在注浆压力作用下渗透到周围土体中,渗透到一定距离便静止成为浆土固态混合物,如图 9 所示。在长时间的循环注入泥浆后,最先注入的浆体与土体产生挤压,形成密不透的泥浆套,将土体与管片隔开,

所形成的泥浆套起到了润滑减阻和支撑土体的作用^[23]。

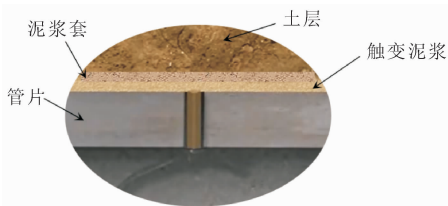


图 9 泥浆的渗透过程

结合顶管施工工艺与触变泥浆减阻机理,采用 ZJ 型应变控制式电动四联剪试验机进行直剪试验,分别测定软黏土层与管片材质 C60 混凝土土块和泥浆套间的摩擦系数,摩阻系数测定模型如图 10 所示。



图 10 摩擦系数测定模型

2.5.1 摩阻直剪试验

首先通过 3D 打印技术改造下部直剪试验盒,下部试样尺寸为 92 mm × 92 mm × 20 mm,上部环刀试样尺寸为 30 cm² × 2 cm。原状土样取自深圳市昌盛路段,混凝土样按照 C60 强度进行制备,制备好后进行装样,盖上顶帽拧紧固定销钉后,杠杆上分级添加竖向荷载。转动百分表上盒并调 0 后,拔除上下盒销钉,按键 F1 设定剪切速率为 0.8 mm/min,按键 F3 开始剪切,观察百分表读数,当百分表指针往回跳动或不变时停止,并记录破坏值。试验结束后卸除竖向荷载,清理环刀并重新取样,开始下一组试验,重复以上步骤依次添加 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 四组试验,每组重复 5 次,取平均值作为最终数据记录。在测定注浆条件下软黏土与管片的摩擦系数时,先将配制好的触变泥浆通过 0.1 MPa 的注浆压力注入到软黏土层进行渗透,形成致密的泥浆套时,开始直剪测定。直剪试验如图 11 所示。

2.5.2 摩阻直剪试验结果分析

通过对比未注浆和注浆后的摩阻系数,可知触变泥浆对减阻的具体贡献程度。

将得到的摩阻直剪试验结果进行拟合处理,得到的直线斜率为混凝土板与土体间的摩擦系数,如图 12 所示。



图 11 直剪试验

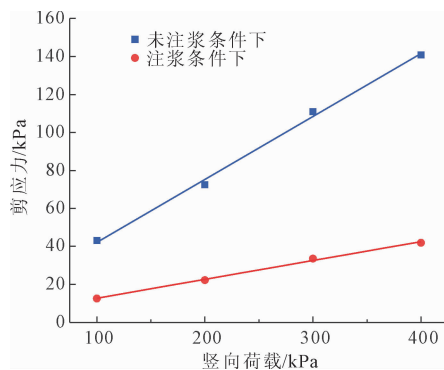


图 12 摩阻直剪试验结果

根据软黏土与 C60 混凝土板的剪应力和竖向荷载关系拟合得到下式,最终得出管土摩擦系数为 0.3416。

$$y = 0.3416x + 7.4 \quad (1)$$

式中: x 为竖向荷载, kPa; y 为剪应力, kPa。

根据泥浆套与 C60 混凝土板的剪应力和竖向荷载拟合得到下式,最终得出管片与泥浆套摩擦系数为 0.1006。

$$y = 0.1006x + 2.1 \quad (2)$$

式中: x 为竖向荷载, kPa; y 为剪应力, kPa。

对比分析可知,考虑注浆作用时,软黏土层与管片之间的摩擦系数降低了 3.4 倍左右,可见减阻泥浆的减阻效果良好。

3 优化后触变泥浆的应用

在前文摩阻特性试验的基础上,依托深圳市 16 号线综合管廊昌盛路段顶管工程,通过建立数值计算模型,分析触变泥浆在实际顶管施工中的减阻效果。

3.1 数值计算模型

本研究借助 ABAQUS 有限元分析软件,针对顶管工程的施工进度进行三维数值模拟。依据弹性力

学和岩石力学相关知识^[24]可知,隧道开挖对围岩应力状态的影响区域为隧道开挖轮廓线外 3 倍隧道宽度,即 X 轴方向取值应取 7 倍的顶管宽度,Y 轴方向距离取埋深与 4 倍的顶管高度之和,根据实际情况确定模型尺寸为 55 m × 30 m × 60 m (X × Y × Z)。模型的网格划分状况与地层分布详情如图 13 所示。

在模拟过程中,土体选用实体单元(C3D8R)进行模拟,为准确反映地层的塑性特性,采用摩尔-库仑本构模型,相关参数如表 5 所示。在边界条件设置方面,对模型四周的法向方向变形予以约束,同时对模型底部在三个方向上的位移进行约束。

管片结构同样采用实体单元(C3D8R)模拟,运用弹性本构模型。其截面外尺寸为 7.7 m × 4.5 m,管片厚度为 0.7 m,总长度 60 m,单节管片长度 1.5 m。此次模拟着重呈现管片顶进 40 节的动态过程,具体参数如表 6 所示。

顶管机亦采用实体单元(C3D8R)模拟,使用弹性本构模型,其截面尺寸为 7.72 m × 4.52 m。为简化模型构建流程,假定顶管机身长度为单节管片长度的 3 倍,即 4.5 m,且摩擦系数取值为 0.1006。

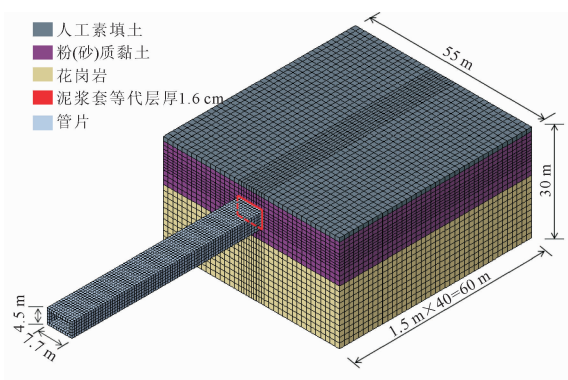


图 13 有限元模型

表 5 岩土参数

地层	密度 / (g · cm ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)	厚度 /m
人工素填土	2.10	5	0.20	25.0	25	1.200
粉(砂)质黏土	2.10	85	0.30	26.8	25	11.800
花岗岩	2.63	80000	0.25	500.0	35	17.000
等代层	2.10	310	0.20	26.8	25	0.016

表 6 管片及顶管机材料参数

材料	密度 / (g · cm ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比
混凝土管片	2.50	36500	0.167
顶管机	7.85	210000	0.200

3.2 结果分析

图 14 为顶管施工结束地层竖向位移云图。通过对图 14 的深入分析可知,地表沉降的最大值出现于管片正上方且靠近始发端的位置,此区域地表沉降最为显著。随着施工向纵深推进,即施工距离不断增加,地表沉降值呈现出逐渐减小的趋势。

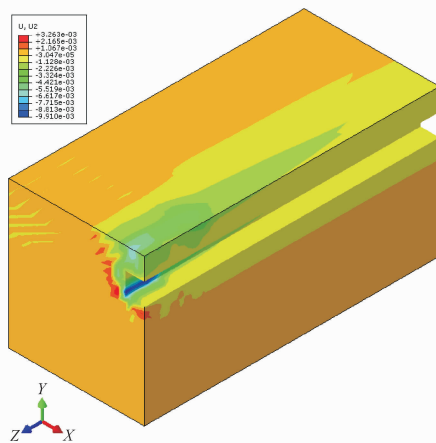


图 14 顶管施工结束地层竖向位移云图

在距离顶管中心两侧各 10 m 的范围内,地表呈现沉降态势,该区域构成了施工的主要影响区域。而当与顶管中心线的距离大于 10 m 时,地表沉降值转为正值,表现为隆起区域,属于施工的次要影响区域。值得注意的是,随着施工距离的持续增加,地表隆起值呈逐渐增大的态势。

此外,从图 14 中能够清晰地观察到,地表沉降值的波动范围介于 0.03047 mm ~ 1.12800 mm 之间。这一结果表明,在考虑注浆作用后,管片与土体之间的摩阻力得到了极大程度的降低,进而有效减少了顶管顶进过程中对周围土体的扰动。最终使得地表变形量维持在较低水平,有力地保障了地表已有构筑物的安全与稳定。

基于前文的分析结论,由于地表沉降最大值出现在顶管顶进路线的正上方。为进一步探究地表沉降随顶进距离的变化规律,本研究沿顶管顶进方向的正上方轴线,每隔 12 m 设置一个监测点,共计选取 6 个监测点。对这 6 个监测点的地表沉降值随顶进距离的变化规律进行深入分析,其结果如图 15 所示。

从图 15 中能够清晰洞察到,在顶管机启动掘进的初始阶段,地表即产生了 12 mm 的沉降现象。这一沉降的产生机理在于顶管机初次切入土体,对土体结构造成了显著破坏,尤其是在洞口区域,大量土体在掘进扰动下发生流动,上覆土体也随之出现较

为明显的滑移。这一现象揭示了实际顶管施工中对进出洞口土体进行加固的必要性。在本次数值计算中,由于未对进口土体采取加固措施,因此引发了地表大幅度沉降。这充分表明,顶管进洞操作对土体的扰动作用极为显著,在保持施工进度恒定的情况下,地表沉降量与始发井的距离呈负相关,即越靠近始发井,地表沉降越大。

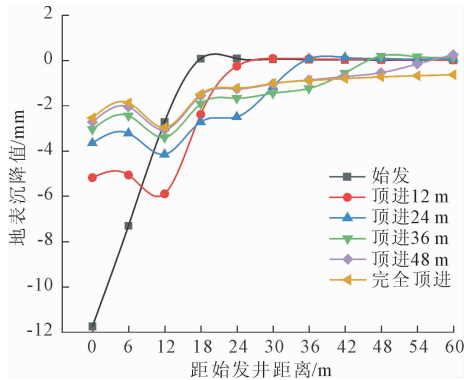


图 15 监测点随顶管顶进距离的变化曲线

在靠近始发井的前 18 m 范围内,地表沉降呈现出较为剧烈的波动。而在超过这一范围后,地表沉降变化渐趋平稳。由此可以推断,地表沉降沿纵向的主要影响区间大致为 18 m。当施工推进至 54 m 时,对比此时地表纵向沉降曲线与施工结束时的曲线,发现二者差异甚微,这意味着此时顶管区间的上覆土体已基本趋于稳定状态,沉降的纵向变化趋势已基本保持一致。

在顶管出洞阶段,尽管对周围土体同样产生了一定程度的扰动,但由于在数值计算过程中,注浆压力被设定为恒定值,且注浆作业及时高效,同时地层土质分布均匀,施工过程匀速稳定,诸多因素综合作用下,使得接收井端的地表沉降值相对较小。此外,还可观察到,每当顶管机通过监测点后,地表沉降均会出现一定程度的回升。

4 结 论

通过进行正交试验,探究了触变泥浆各种性能与原材料间的影响规律;在此基础上,采用综合平衡法对触变泥浆配比进行了优选;结合深圳市 16 号线综合管廊昌盛路段顶管工程软黏土地层,开展摩阻特性试验,验证泥浆的减阻效果,并通过数值计算模型探讨触变泥浆减阻后的地表沉降规律。得到了如下结论:

(1) 触变泥浆原材料含量很大程度上影响着泥浆各种性能。膨润土含量的波动,会明显地引发泥

浆黏度、稠度系数、流动度、失水量、泥饼厚度、析水率的变化;CMC 含量的波动,会引发泥浆析水率、失水量、泥饼厚度的变化;纯碱含量的波动,会引发泥浆 pH 值的变化。

(2) 泥浆失水量与膨润土、CMC、纯碱的含量均具有显著特征,这表明三种原材料之间存在复杂的交互作用,共同决定了泥浆失水量这一关键性能指标。

(3) 触变泥浆材料的最佳配比为膨润土:CMC:纯碱:水 = 10:0.19:0.25:89.56。在此配比之下,泥浆的流动性与触变性较为良好,失水量较少,所形成的“泥饼”更为致密,且与软黏土地层的摩擦系数为 0.1006,减阻性能良好,综合性能达到最优状态。

(4) 应用该触变泥浆进行顶管施工减阻,地表沉降值分布在 0.03047 mm ~ 1.12800 mm 之间,且沉降值随着距始发井距离的增大而减小,对地面扰动较小,确保了地表构筑物不受顶管施工的影响。

参考文献:

- [1] 曹 晔. 泥水平衡机械顶管穿越富水砂层施工控制技术[J]. 安徽建筑,2014,21(2):79-80.
- [2] 童 聪,韩军伟. 浅析长距离顶管过程中触变泥浆技术应用研究[J]. 智能建筑与工程机械,2020,2(7):26-27.
- [3] Zhou Jianqing. Numerical analysis and laboratory test of concrete jacking pipes [D]. Oxford: Doctor Dissertation University of Oxford,1998.
- [4] Mohammad N,Sanjiv G. Technology: pipeline and utility design, construction, and renewal [M]. New York: McGraw Hill Professional Press,2004.
- [5] 马保松,陈责生. 顶管和微型隧道技术的发展历史[J]. 非开挖技术,2003,20(3):26-29.
- [6] 米吉龙. 基于泥浆减阻作用的土岩复合地层顶管施工顶推力研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.
- [7] 汪祥志. 瓜尔胶-硼砂顶管用新型泥浆制备及减阻性能研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2023.
- [8] 徐浩东,余童真,樊 伟,等. 顶管施工过程中浆液扩散对减阻效果影响[J]. 上海交通大学学报,2024,58(7):1067-1074.
- [9] 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.
- [10] 张立新. 大直径超长距离顶管触变泥浆减阻技术的应用[J]. 特种结构,2013,30(2):100-102.
- [11] 李 刚. 超大断面矩形顶管新型泥浆的开发应用[J]. 绿色建筑,2016,13(4):67-71.

(下转第 66 页)

- Texas at Austin, 2006.
- [4] Wang Zhiqiang, Qu Hongya, Li Tiantian, et al. Quasi-static cyclic tests of precast bridge columns with different connection details for high seismic zones[J]. *Engineering Structures*, 2018, 158:13-27.
- [5] 葛继平, 闫兴非, 王志强. 灌浆套筒和预应力筋连接的预制拼装桥墩的抗震性能[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(2):42-52.
- [6] Qu Hongya, Li Tiantian, Wang Zhiqiang, et al. Investigation and verification on seismic behavior of precast concrete frame piers used in real bridge structures: Experimental and numerical study[J]. *Engineering Structures*, 2018, 154:1-9.
- [7] 邱发强, 夏樟华, 朱三凡, 等. 预应力灌浆波纹管预制拼装桥墩抗震性能分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(1):144-153.
- [8] 李悦, 宁哲, 李冲, 等. UHPC 双柱式桥墩抗震性能敏感性分析[J]. *世界桥梁*, 2023, 51(6):76-83.
- [9] 赵卓, 耿佳硕, 王建强. 采用 UHPC 材料连接的装配式桥墩抗震性能研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2021, 42(2):13-18.
- [10] 林上顺, 林永捷, 张建帅, 等. ECC 和预制榫卯混合连接装配式桥墩抗震试验及计算方法[J/OL]. *西南交通大学学报*. [2025-04-14] <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20230928.1030.012>.
- [11] 沈星, 叶爱君, 王晓伟. 双柱墩弹塑性位移能力简化计算方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(4):513-519.
- [12] Priestley M J N, Park R. Strength of ductility of concrete bridge columns under seismic loading[J]. *ACI Structural Journal*, 1987, 84(1):61-76.
- [13] LRFDUS-6 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. Washington, DC: AASHTO, 2012.
- [14] 日本道路协会. 道路桥示方书同解说 V 耐震设计篇[S]. 东京: 日本道路协会, 2002.
- [15] Eurocode8 Design of Structures for Earthquake Resistance: Part 2 Bridges; BS EN 1998-2[S]. London, UK: British Standards Institutions, 2004.
- [16] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [17] 城市桥梁抗震设计规范: CJJ 166—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [18] 预制拼装桥墩技术规程: DG/TJ 08-2160—2015[S]. 上海: 同济大学出版社, 2015.

(上接第 58 页)

- [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, 53.
- [13] 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.
- [14] 王春婷, 隆威. 大口径长距离顶管工程泥浆配方试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(1):106-111.
- [15] 沈磊磊. 管廊顶进施工对地表及构筑物变形的影响及减阻泥浆性能试验[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [16] 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.
- [17] 冯锐, 张鹏, 苏树尧, 等. 大口径长距离钢顶管注浆减阻技术: 以黄浦江上游水源地连通管工程为例[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(4):174-180.
- [18] 吴全科, 伍田生, 林超. 软弱土质中大口径长距离泥水平衡顶管纠偏及减阻施工技术[J]. *工业建筑*, 2012, 42(4):107-112.
- [19] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [20] 任怡东. 砂层顶管摩阻力控制机理研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
- [21] 周载延. 大断面矩形顶管摩阻力计算方法与顶力预测[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [22] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [23] 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.
- [24] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.