

土压平衡盾构施工穿越砂层渣土改良试验研究

胡长明¹, 崔耀², 王雪艳¹, 贡少瑞¹, 张文萃¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 郑州大学综合设计研究院有限公司, 河南 郑州 450002)

摘 要:针对地铁隧道采用土压平衡盾构施工穿越砂层时表现出的非适应性开展了渣土改良及现场试验研究, 通过对比渣土经不同配比膨润土泥浆改良前后的抗剪强度、渗透性及塌落度, 得到了合理的膨润土浓度及泥浆掺入比。研究表明: 当砂层采用浓度为 1:10 膨润土泥浆改良后, 渣土的塑性及流动性得到有效提高, 抗剪强度及渗透性大幅降低; 控制泥浆体积掺入比为 1:5 进行掘进施工时, 盾构机刀盘内外温度及磨损程度明显降低、排土顺畅且推进速度提高。研究成果对于解决土压平衡盾构穿越砂层时土压难以平衡、排土不正常、刀盘扭矩过大及磨损过快等问题具有参考价值。

关键词:土压平衡盾构; 非适应性; 渣土改良; 掺入比; 刀盘温度

中图分类号: U 455.43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)06-0761-06

土压平衡盾构主要适用于粘性土地层开挖, 在穿越砂土地层时, 由于砂层渣土流塑性差, 摩擦系数大, 强度高, 盾构机推力大大增加, 出土不易, 刀盘扭矩、螺旋输送机扭矩增大, 降低掘进速度甚至无法推进。同时在砂层中, 盾构机刀盘升温快, 刀盘及螺旋磨损较大, 这些问题导致土压平衡盾构在砂层中掘进困难。

针对以上问题国内外应用较多的是掺入改良剂, 改善砂层特性。朱伟^[1]等对盾构用气泡的性能及对开挖土体改良效果影响进行研究, 得出了气泡改良开挖土体的主要影响因素; 宋克志^[2]等对泡沫技术进行了试验研究, 并进行了现场应用, 与单独加泥的效果进行了比较, 并分析了泡沫的作用机理; 闫鑫^[3]等通过自制的试验室发泡装置生产泡沫, 并通过一系列试验研究泡沫对砂土的改良效果, 得到适合土压平衡盾构施工的优化泡沫掺入比。然而, 采用发泡剂作为改良剂虽然效果较为理想, 但容易造成污染, 高效无污染发泡剂又不能节约成本。同时对于细粒含量少的土体, 透水性高的土体发泡剂改良效果并不理想。膨润土泥浆作为另外一种常用的改良剂能够较好的节约成本, 但又没有合理的掺入比规定。

本文针对土压平衡盾构穿越砂性土层时遇到的技术难题, 采用膨润土作为改良剂, 进行室内渣土改良试验, 得出土压平衡盾构施工中最优膨润土膨化浓度及合理的膨润土泥浆掺入比, 并进行现场试验, 得出了膨润土泥浆对开挖砂层土体改良效果影响, 能够为其他类似地层盾构施工渣土改良提供一种参考。

1 渣土改良试验方案

1.1 工程概况

选取西安地铁二号线某区间作为试验段。试验段区间线路穿越砂层分层较为明显, 隧道顶部分布有

平均厚度(m)	地层柱状	岩土名称
1.50		杂填土
6.34		黄土状土
2.14		粉质粘土
4.5		细砂
2.46		中细砂
3.54		中粗砂
0.80		砾砂

图1 试验段区间穿越地层柱状图

Fig.1 Column of the strata run through with the test section

收稿日期: 2012-12-31 修改稿日期: 2013-11-25

基金项目: 陕西省科技攻关计划项目(2011k10-20); 包头市科技计划项目(2011x1006; 2012 x1002)

作者简介: 胡长明(1963-), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事土木工程施工与管理研究。

不连续的细砂,厚度为 0~0.2 m,隧道洞身为中细砂,厚度为 3~4.5 m,隧道底部及下部为中粗砂和砾砂,厚度分别为 0.5~1.5 m,0.2~0.8 m,砂层中均含有少量黄土,试验段区间穿越地层柱状图如图 1 所示,试验段区间土层主要物理力学性质指标如表 1 所示.

表 1 试验段区间土层主要物理力学性质指标

Tab. 1 The main physical and mechanical parameters diagram of soil in the test section

岩土层名称	含水量 $w/\%$	干密度 $\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	孔隙率 $n/\%$	土粒比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
杂填土	—	1.75	—	60	—	—	—	—	5	10
素填土	20.5	1.59	0.765	80	40	2.71	29.3	17.9	20	15
黄土状土	20.5	1.65	0.660	87	40	2.72	29.0	17.7	35	22
粉质粘土	24.9	1.61	0.700	96	41	2.72	31.5	18.9	32	17
粉细砂	18.6	1.63	0.660	77	39	2.70	—	—	0	30
中砂	16.0	1.59	0.648	75	40	2.68	—	—	0	32
粗砂	17.0	1.64	0.622	83	38	2.67	—	—	0	34

表 2 重塑渣土的基本物理性质指标

Tab. 2 Basic physical properties of sand

重塑土	平均粒径 D_{50}/mm	不均匀系数 C_u	含水量 $w/\%$	孔隙比 e	土的颗粒比重 $G_s/g \cdot cm^{-3}$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
中细砂	0.33	2.47	35.35	0.87	2.65	0.7	39
中粗砂	0.58	5.29	33.21	0.92	2.68	0.9	43
砾砂	0.91	9.33	28.78	0.96	2.74	0.03	45

1.2 试验工况设计

从施工现场取土,运至实验室,按照施工现场砂土级配曲线,控制含水量,密度等指标,配制足量的中细砂,中粗砂及砾砂重塑土,各类重塑土的基本物理性质指标见表 2. 根据本试验的目的及要求,试验内容如下:

(1)膨润土泥浆优化试验:采用正交试验的方法,得出针对砂土合适的膨润土最优配比. 按照水与膨润土的质量比为 6:1、8:1、10:1、12:1、14:1,配制膨润土泥浆,测试泥浆的粘度及比重,得出膨润土膨化效果最优时的泥浆浓度及泥浆膨化时间.

(2)渗透试验,直剪试验,塌落度试验:将重塑土饱和后测定抗剪强度指标,然后以最优浓度配制的膨润土泥浆与砂土体积比为 1:10、1.5:10、2:10、2.5:10、3:10 的比例,加入砂土中,测定改良后三类砂土的渗透系数 K_v 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 塌落度,分别给出适合中细砂、中粗砂及砾砂的膨润土泥浆与砂土体积比.

(3)现场试验:在试验段现场掘进施工时,注入膨润土泥浆,对比改良前后,推进速度,刀盘温度与出土效果,分析渣土改良效果.

2 试验结果与分析

2.1 膨润土泥浆膨化效果

如图 2~3 所示,相同浓度时,在比重与粘度上钠基膨润土优于钙基膨润土,钠基膨润土更有利于渣土改良. 当钠基膨润土添加比例大于或等于 1:10 时,其泥浆粘度随搅拌时间增长而稍加增长,膨润土添加比例的越大而粘度增长幅度越大. 当膨润土添加比例小于 1:10 时,粘度随搅拌时间增长不明显;考虑选取钠基膨润土泥浆浓度为 1:10 进行试验,若 1:10 浓度能满足要求,则大于此浓度的钠基膨润土泥浆均能满足要求. 膨润土泥浆在膨化 18~24 h 后达到泥浆粘度峰值,选定泥浆膨化时间为 18 h.

2.2 砂土的渗透性

渗透试验结果见表 3 所示,分析可知,各类重塑砂土均具有较强的渗透性,渗透系数达到了 10^{-2} cm/s 数量级,极易引起掌子面前方土体的排水固结,盾构机排土不畅,砂土向密封舱底部沉积,工作面

土压难以平衡,掘进困难.

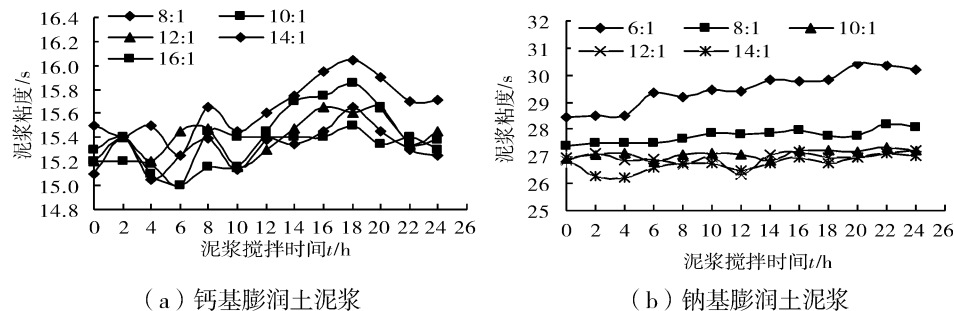


图2 不同浓度膨润土泥浆粘度随时间变化关系曲线

Fig. 2 Time course of viscosity of different concentrations of bentonite slurry

膨润土泥浆改良后的土体抗渗性能明显提高,改良后中细砂、中粗砂渗透系数达到了 10^{-5} cm/s 数量级,改良砾砂渗透系数达到了 10^{-4} cm/s,但均不满足盾构机压力舱内土体的渗透系数要小于 1×10^{-5} cm/s 的要求^[6].当膨润土泥浆与砂土体积比大于等于 2:10 时,继续增大泥浆掺入比,改良后渣土抗渗性的提高效果增加不明显.因此,选用膨润土泥浆与砂土的体积比为 2:10 较为合适.

2.3 砂土的抗剪强度

抗剪强度指标关系曲线如图 4、5 所示.中细砂、中粗砂、砾砂的内摩擦角均较大,抗剪强度较高,在 200 kPa 的垂直压力下的直剪强度分别达到了 143.44 kPa、197.23 kPa、200.49 kPa,使掘进过程中刀盘扭矩较大,刀盘温度较高,磨损加剧.采用不同比例的膨润土泥浆改良后,改良土体的内摩擦角均有不同程度降低,而黏聚力得到一定的提高,按膨润土泥浆与砂土的掺入比为 2:10 时能使重塑土体的内摩擦角降低最大约为 12.8%;掺入比为 2.5:10 时与掺入比为 2:10 时的重塑砂土抗剪强度相当,选取掺入比为 2:10 进行渣土改良较为合理.

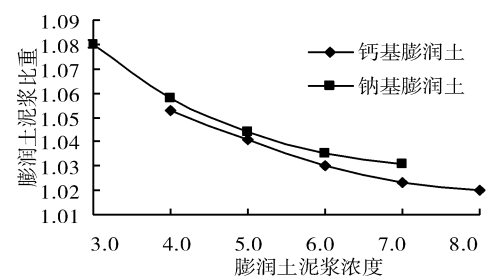


图3 膨润土泥浆比重与浓度关系曲线

Fig. 3 Relationship curve of bentonite slurry proportion with concentration

表3 不同掺入比 λ 改良渣土的渗透系数

Tab. 3 Permeability of sand improved by bentonite slurry with different cement ratio

λ	渗透系数/cm \cdot s $^{-1}$			λ	渗透系数/cm \cdot s $^{-1}$		
	中细砂	中粗砂	砾砂		中细砂	中粗砂	砾砂
0	2.32×10^{-2}	3.65×10^{-2}	5.79×10^{-2}	2:10	2.49×10^{-5}	3.11×10^{-5}	4.74×10^{-4}
1:10	4.96×10^{-5}	5.31×10^{-5}	8.74×10^{-4}	2.5:10	2.33×10^{-5}	2.97×10^{-5}	4.43×10^{-4}
1.5:10	3.03×10^{-5}	3.75×10^{-5}	6.22×10^{-4}	3:10	2.17×10^{-5}	2.95×10^{-5}	4.45×10^{-4}

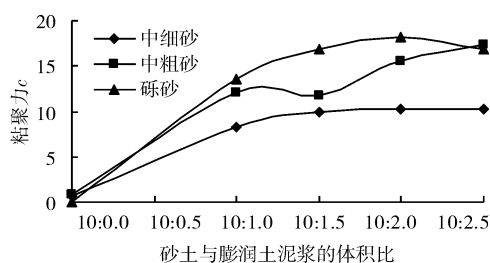


图4 改良砂土黏聚力随泥浆掺入比的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of improved sand cohesion with different bentonite slurry cement ratio

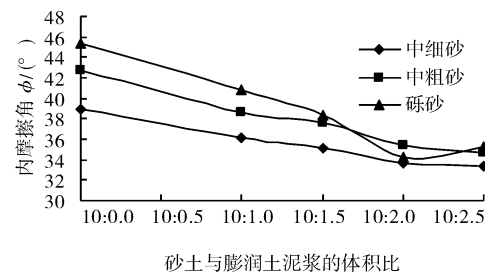


图5 改良砂土内摩擦角随泥浆掺入比的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of improved sand friction angle with different bentonite slurry cement ratio

2.4 砂土的塌落度

和易性是盾构施工中衡量渣土改良效果的一个重要指标,和易性差,会导致大颗粒砾石滞留土舱底部或向盾构机四周移动,使得盾构机位置和姿态控制变得困难,严重时则无法推进。

对三类重塑砂土按照不同掺入比改良后砂土分别进行塌落度试验。从表 4 中可知,改良前,三类重塑砂土基本没有塌落度,土体流塑性差;改良后,塌落度随掺入比的增加逐渐增大,且用膨润土泥浆对中细砂与中粗砂改良效果要明显好于砾砂,当膨润土泥浆与砂土的掺入比为 2:10 时,改良中细砂与改良中粗砂的塌落度分别达到了 140 mm、120 mm,而改良砾砂的塌落度只有 65 mm,没有达到盾构施工渣土最优塌落度 100~150 mm 的要求;当膨掺入比达到 3:10 时,改良中细砂与改良中粗砂的塌落度分别达到了 232 mm、165 mm,而改良砾砂的塌落度达到 110 mm,虽满足砾砂理想塌落度的要求,但泥浆使用量过大,未能满足经济上的要求,需结合工程寻找更适合砾砂的渣土改良剂。

2.5 现场改良效果分析

(1)降低刀盘内外周温度。盾构机刀盘正常的工作温度是 30~40℃,可掘进但需注意的温度是 40~50℃,当温度超过 60℃就需要停机,使刀盘温度降低至 50℃以内,超过 70℃以上刀盘密封会发生物理变形,甚至报警、停机。由于砂层内摩擦角大、流塑性差,造成刀盘在切削穿越砂层时内外周温度上升很快,并超出刀盘的正常工作温度。

试验段需穿越西安市北三环辅道,该道路下方砂层在运输车辆动荷载的作用下相对密实。盾构穿越该道路下方时,基本在 30 min 内即 400 mm 行程内,盾构机刀盘内周温度可上升至 60℃,土温可达到 42℃。在向刀盘前方注入膨润土后,效果十分明显,刀盘密封温度从渣土改良前的 46~48℃下降到改良后的 32~35℃。图 6 为渣土改良对刀盘温度的影响曲线。

根据影响曲线,在 40~90 环这个区间盾构机刀盘密封平均温度基本在 50℃上下徘徊;90~140 环后,增加膨润土的使用量后将加泥管路改至刀盘前方后,温度降低至 40~50℃;在 140 环后,即穿越绕城高速后,刀盘密封温度降低至 30~40℃,后期基本稳定在 30℃上下。在密实砂层中掘进时,盾构机刀盘温度会急剧上升,但通过渣土改良可以将刀盘温度降低至可接受的范围内。在普通砂层中掘进时,通过渣土改良可以保证盾构的正常施工。

(2)增加砂性土的塑性、流动性。增加砂性土的塑性、流动性是为了满足螺旋机和皮带机排土的目的。渣土过干会增加螺旋机油压,使渣土不能顺利排出,甚至卡死螺旋;渣土过稀时,造成渣土从皮带与皮带架之间的间隙处流出,污染双轨梁下的管片和成型隧道。

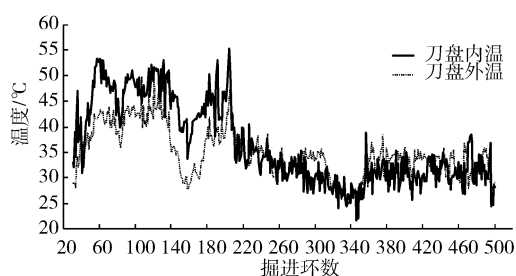


图 6 渣土改良对刀盘温度的影响

Fig. 6 Influence of soil improvement upon cutterhead temperature

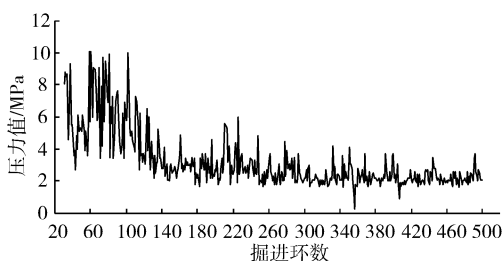


图 7 渣土改良对螺旋机回转压力的影响

Fig. 7 Influence of soil improvement upon screw conveyor turning pressure

表 4 不同掺入比 λ 改良渣土的塌落度

Tab. 4 Slump of sand improved by bentonite slurry with different cement ratio

λ	塌落度/cm		
	中细砂	中粗砂	砾砂
0	1	0.5	0
1:10	6.5	5	3.5
1.5:10	9.5	7.5	4.5
2:10	14	12	6.5
2.5:10	18	13	9
3:10	23.3	16.5	11

图7中,在渣土改良初期的40~120环,螺旋机回转压力基本处于6 MPa左右,波动大.随着渣土改良的进行,在160环以后,螺旋机的回转压力基本处于3 MPa左右.图表中在200~240环、360环附近出现的较高值属于特殊情况,由于200~240环、360环是盾构掘进加固区,渣土中含有较多的旋喷桩加固体造成的;380~410环出现的较高值是因为加泥泵出现故障,不能正常加泥造成的.整个掘进过程中出土较为顺畅.总体来讲,通过膨润土渣土改良方案,是可以改良砂性土的塑性和流动性,具体表现在降低螺旋机回转压力及出渣顺利程度上.

3 结 论

通过试验与分析,可以得出以下结论:

(1)相同膨化条件的钠基膨润土在比重与粘度上优于钙基膨润土,在施工过程中宜选择钠基膨润土作为渣土的改良剂.当钠基膨润土添加比例等于1:10时,能够满足施工要求,建议在配制泥浆改良类似土体时优先选用该配比,最优的膨化时间18~24 h.

(2)用膨润土泥浆改良中细砂、中粗砂效果较好.改良后土体的内摩擦角降低,粘聚力增加,和易性与流动性得到了较大的提高,渗透性也基本满足要求,有利于开挖工作面保持平衡,有效降低刀盘工作温度,减少刀盘磨损,降低螺旋机回转压力,保证出土顺利.根据实验结果,建议现场施工优先采用膨润土泥浆与砂土的掺入比为2:10.

(3)用膨润土泥浆改良砾砂并不能起到很好的效果,改良后土体的和易性有一定的提高,但仍不满足最优塌落度与抗渗性工程施工要求.

参考文献 References

- [1] 朱 伟,郭 涛,魏康林.盾构用气泡的性能及对开挖土体改良效果影响[J].地下空间与工程学报,2006,2(4):571-577.
ZHU Wei, GUO Tao, WEI Kang-lin. The performance of foams in shield tunneling method and its effect on the soil conditioning[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4):571-577.
- [2] 宋克志,汪 波,孔 恒.无水砂卵石地层土压盾构施工泡沫技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(13):2327-2332.
SONG Ke-zhi, WANG Bo, KONG Heng. Study on foam technology during shield excavation in sandy cobble bed without water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13):2327-2332.
- [3] 闫 鑫,龚秋明,姜厚停.土压平衡盾构施工中泡沫改良砂土的试验研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(3):449-453.
YAN Xin, GONG Qiu-ming, JIANG Hou-ting. Soil conditioning for earth-pressure balanced shields excavation in sand layers[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3):449-453.
- [4] 张 敏.扩展土压平衡盾构在含水地层中的适应性[J].隧道建设,2003,23(5):4-6.
ZHANG Min. Extend the adaptability of EPB shields in watery stratum[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(5):4-6.
- [5] 张旭东.土压平衡盾构穿越富水砂层施工技术探讨[J].岩土工程学报,2009,31(9):1445-1449.
ZHANG Xu-dong. Construction technology of earth pressure balance shield in watery sandy stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9):1445-1449.
- [6] 代仁平,宫全美.土压平衡盾构砂卵石处理模式及应用分析[J].土木工程学报,2010,43(S2):292-298.
DAI Ren-ping, GONG Quan-mei. Processing model and application of sand and gravel of earth pressure balance shield[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2):292-298.
- [7] 魏康林.土压平衡盾构施工中泡沫和膨润土改良土体的微观机理分析[J].现代隧道技术,2007,44(1):73-77.
WEI Kang-lin. Micro-mechanism analysis for the soil improvement by foam and bentonite in EPB shield tunneling[J]. Modern Tunneling Technology, 2007, 44(1):73-77.
- [8] 朱 伟,陈仁俊.盾构隧道基本原理及在我国的使用情况[J].岩土工程界,2001,4(11):19-21,65-66.
ZHU Wei, CHEN Ren-jun. The basic principles of Shield Tunnel and use in China[J]. Geotechnical Engineering

- World, 2001, 4(11):19-21, 65-66.
- [9] FENG Qiu-ling. Soil conditioning for modern EPB drives[J]. Tunnels and Tunneling International, 2004, 36(12): 18-20.
- [10] 张明晶. 土压平衡式盾构施工中闭塞问题的发生机理及其防治措施研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
ZHANG Ming-jing. Study on the mechanism and curing method of blocking in EPBS[D]. Nanjing: Hohai University, 2004.
- [11] HOULSBY Guy, MARRIT Robert. Easing the way soil conditioning[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2003, 35(6):48-50.
- [12] 汪国锋. 北京地铁十号线土压平衡盾构土体改良技术应用研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4):77-82.
WANG Guo-feng. Soil Improvement technologies and implementation for EPB shield in Beijing subway line 10[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(4):77-82.
- [13] 唐益群, 宋永辉, 周念清, 等. 土压平衡盾构在砂性土中施工问题的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1):52-56.
TANG Yi-qun, SONG Yong-hui, ZHOU Nian-qing, et al. Exeperimental research on troubles of EPB shield construction in sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1):52-56.

Soil improvement for earth pressure balance shields construction in full section sand layer

HU Chang-ming¹, CUI Yao², WANG Xue-yan¹, GONG Shao-rui¹, ZHANG Wen-cui¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Corporation of Zhengzhou University multi-functional design and research academy, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Soil improvement and field research are made for the unadaptability in earth pressure balance shield in the sand layer. Comparing shearing strength, slump and permeability of soil before and after the improvement, suitable bentonite slurry concentration and cement ratio are obtained. The study shows that plastic flow of soil is improved and shearing strength and permeability decreased greatly with bentonite slurry concentration of 1:10. Temperature and wear degree of shield cutterhead are reduced significantly, soil output is smooth and shield excavation efficiency increased with slurry cement ratio of 1:5. The research has certain reference significance for solving problems of shielded work-face unbalance, abnormal soil output, high torque and excessive wear of shield cutterhead in earth pressure balance shield in sand layer.

Key words: earth pressure balance shield; unadaptability; soil improvement; cement ratio; cutterhead temperature