

卵石地层土压平衡盾构施工土体改良试验研究

姜厚停, 龚秋明, 杜修力

(北京工业大学城市防灾与减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 卵石地层摩擦性高, 塑流性差, 在土压平衡盾构施工过程中遇到了许多困难, 通过对其进行土体改良改善土层性能成为不可缺少的辅助施工措施。但是, 卵石地层土体改良缺乏系统研究, 添加剂配比多依靠工地摸索或工程经验, 容易造成添加剂使用不合理, 直接影响到盾构施工效率。为此以北京地铁 10 号线 2 期隧道区间卵石地层土压平衡盾构施工为案例, 进行了一系列土体改良室内试验, 研究、评价常用添加剂及改良渣土性能, 得到理想改良渣土的添加剂配比参数为泡沫注入比为 30%, 泥浆注入比为 10%, 最佳坍落度范围为 150~200 mm。利用上述添加剂配比方案进行了盾构掘进试验, 显著提高了盾构施工效率。试验结果可为类似地层盾构施工土体改良提供参考。

关键词: 土压平衡盾构机; 土体改良; 室内试验; 掘进试验; 卵石地层

中图分类号: U455; TU4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)02-0284-09

作者简介: 姜厚停 (1981-), 男, 山东临朐人, 博士研究生, 从事岩土工程、地下工程等领域的研究工作。E-mail: jianghouting@emails.bjut.edu.cn。

Experimental study on soil conditioning in cobble layer by use of earth pressure balanced machine

JIANG Hou-ting, GONG Qiu-ming, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Many difficulties are encountered during EPB tunnelling through the cobble layer because of high soil friction and low flow characteristics. In order to solve these problems, soil conditioning with additives has become an indispensable practice to enhance the properties of the soil and make the soil suit for the machine. However, the researches on soil conditioning are limited to an extent, and the use of conditioning additives is often based on trial and errors at the work site or the workers' experience. The soil conditioning for EPB excavation in the cobble layer of the 2nd-stage project of Beijing Metro No. 10 is studied, a series of laboratory tests are performed to investigate and assess the properties of additives and conditioned soils. The optimum injection ratios of additives (foam injection ratio of 30%, slurry injection ratio of 10%, and the optimum slump value of 150~200 mm), which are obtained by laboratory tests, are applied to the penetration tests. The comparative analysis of excavation parameters before and after penetration tests shows that the optimum injection ratios of additives significantly improve the performance of EPB machine. The results can be used to provide guidelines for the excavation by use of EPB machine under such soil conditions.

Key words: earth pressure balanced machine; soil conditioning; laboratory tests; penetration test; cobble layer

0 引 言

土压平衡盾构机以施工速度快、劳动强度低、对环境影响小、施工经济等优点广泛应用于地铁隧道施工中。其施工过程是: 盾构机在千斤顶的推力下向前推进, 同时旋转的刀盘将土体剥落进土舱, 在搅拌翼的搅拌下使得渣土具有良好的塑流性, 能形成持续稳定的土压力平衡掌子面上的土压力和水压力, 最后通过螺旋排土器将渣土排出实现连续开挖^[1]。由此可见,

开挖土体性能是盾构机顺畅完成开挖土层、维持土舱土压力、排出渣土一系列施工过程的关键因素。理想塑流性状态的土体须具备以下 4 个基本条件^[2-4]: ①良好的流动性能; ②优良的黏稠性能; ③较小的摩擦性; ④较低的渗透性。施工过程中, 向不良土层注入添加剂进行土体改良成为不可缺少的辅助施工措施, 合理

基金项目: 北京市教育委员会科技计划面上项目 (KM200910005010)

收稿日期: 2012-06-08

的土体改良技术不仅可以拓展土压平衡盾构施工的土层范围, 还能显著降低盾构施工的综合成本、减小地表沉降、加快施工速度^[5-6]。

传统上, 土压平衡盾构机主要适用于粉土、淤泥质粉土、黏土等黏稠土层的施工, 这些土层往往可以通过少量或不需土体改良就能满足盾构施工要求^[7-8]。随着土压平衡盾构的大量使用, 越来越频繁地应用于其它地层的隧道施工中, 如砂层、圆砾层、卵石层、漂石层、残积层、风化岩层及松散层与岩层并存的混合地层等。这几类地层土体塑流性能较差, 对于土压平衡盾构施工来说, 简单的土体改良难以达到盾构施工所需的土体性能, 须针对不同地层选择合适的添加剂, 优化添加剂配比方案保证土体改良效果, 提高土压平衡盾构施工水平。

现有的评价土体改良效果的室内试验方法主要是岩土工程和混凝土的试验方法^[9-12], 如坍落度试验、搅拌试验、渗透试验、压缩试验、稠度试验、剪切试验等。其中坍落度试验是常用的试验方法, 通过测量改良土体坍落度评价其流动性, Boone 等^[13]认为适用于土压平衡盾构所需的最佳坍落度值在 80~100 mm 之间; Quebaud 等^[14]和 Pena 等^[15]建议最佳坍落度值为 100~150 mm 之间; Raffaele 等^[16]建议最佳坍落度为 150~200 mm 之间; Jancsecz 等^[17]和 Williamson 等^[18]建议最佳坍落度是 200~250 mm。上述最佳坍落度范围都是由不同土样的坍落度试验得到, 其值分布在 80~250 mm 之间。可见, 满足盾构施工土体的最佳坍落度范围没有达成共识, 具体应用起来尺度不容易掌握, 需要进一步确定最佳坍落度范围。Quebaud 等

^[14]、林建等^[19]和闫鑫等^[20]利用搅拌试验模拟刀盘和搅拌翼板对渣土的搅拌过程, 评价改良土体的搅拌性能和黏附性, 搅拌试验是针对性较强的试验, 但搅拌设备多使用小型砂浆搅拌机, 适用的土层范围小, 数据采集不规范。其他土体改良试验, 如渗透试验、压缩试验、稠度试验、剪切试验, 只适用于少数土层改良土体的性能评价, 实际应用价值不高。

上述试验方法及评价标准是针对特定盾构施工土层而言的, 针对卵石地层的盾构施工经验和土体改良试验非常少, 缺乏系统的土体改良方法及相关的评价标准^[21-23]。本文以地铁 10 号线 2 期某盾构区间卵石地层盾构施工为案例, 进行土体改良室内试验优化添加剂配比方案, 并进行了现场盾构掘进试验, 为盾构施工合理经济使用添加剂提供参考。

1 工程概况及工程地质条件

北京地铁 10 号线 2 期工程某盾构隧道区间全长约 700 m, 隧道埋深在 16.0~24.0 m 之间, 两个车站采用明挖法施工, 左侧车站盾构始发段采用暗挖法, 其余隧道段采用盾构法施工, 盾构开挖区间长度为 383 m。地质剖面图如图 1 所示, 勘察范围内土层自上而下依次主要为杂填土层、粉土, 新近沉积卵石、圆砾层, 卵石层, 漂石层, 黏土质砂岩层, 地层岩性特征如表 1 所示, 隧道穿越的地层主要为卵石层。

使用的土压平衡盾构机由 IHI (石川岛播磨) 设计制造, 具体技术规格及参数如表 2 所示。刀盘形式为辐条式, 刀盘及刀具配制如图 2 所示。

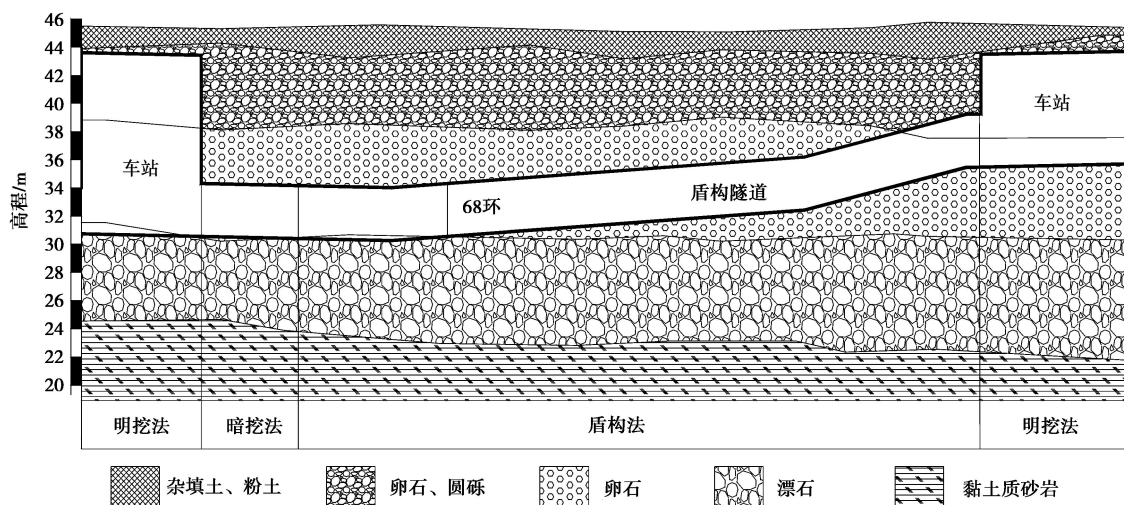


图 1 隧道区间地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of tunnel

表 1 地层岩性特征

Table 1 Soil properties

岩性名称	密实度	湿度	地层描述
杂填土和粉土	松散	稍湿	杂填土含砖渣、灰渣，粉土以砂质粉土、黏质粉土为主，含少量砖渣
卵石、圆砾	中密	湿	亚圆形为主，一般粒径3~5 cm，最大粒径约25 cm，细中砂充填约25~35%，局部夹有漂石，最大粒径约25 cm，漂石含量约5%~10%
卵石	密实	湿	亚圆形，级配连续，磨圆度中等，一般粒径2~20 cm，最大粒径约30 cm，细中砂充填25%~40%；局部夹漂石，一般粒径23~30 cm，含量17.4%~31.0%，其中11.5~17.5 m漂石含量为37.7%~77.8%，最大粒径39 cm
漂石	密实	湿—饱和	亚圆形，级配连续，磨圆度中等，一般粒径4~8 cm，最大粒径约15 cm，细中砂充填约30%，局部夹有漂石，最大粒径大于20 cm，漂石含量约20%以上
黏土质砂岩			泥状、砂状结构，强风化，由砂屑50%~55%和胶结物45%~50%组成

表 2 盾构机主要技术规格及参数

Table 2 Specifications of EPB machine

名称	项目	规格及参数
盾构主机	外径	ϕ 6140 mm
	壳体长度	8780 mm
推进系统	千斤顶	2500 kN×16根
	推进速度	60 mm/min
	总推力	40000 kN
刀盘	刀盘形式	辐条式
	支撑方式	中间支撑
	工作扭矩	5235 kN·m
	刀盘转速	1.6 rpm
螺旋排土器	类型	轴式螺旋排土器
	转速	15.7/10.2rpm
	排土能力	307/199 m ³ /h
	最大排土粒径	ϕ 560×L700 mm

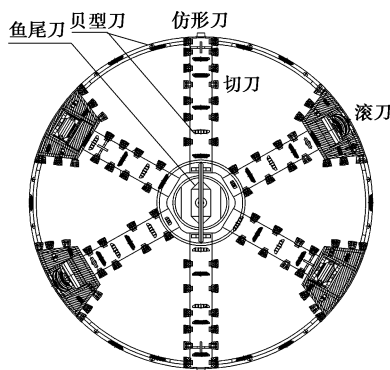


图 2 刀盘及刀具布置图

Fig. 2 Cutterhead of EPB machine

2 土体改良试验流程及评价标准

2.1 土体改良试验流程及仪器

土体改良室内试验流程如图3所示，研究、评价土压平衡盾构常用添加剂及改良渣土性能，优化卵石地层土压平衡盾构施工添加剂配比方案，并进行盾构施工掘进试验验证。

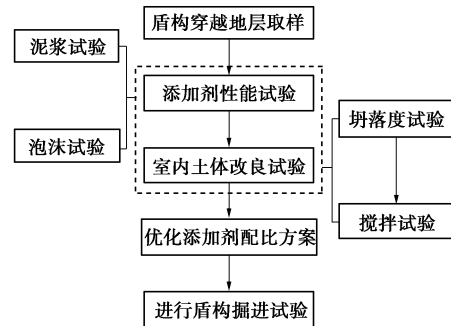


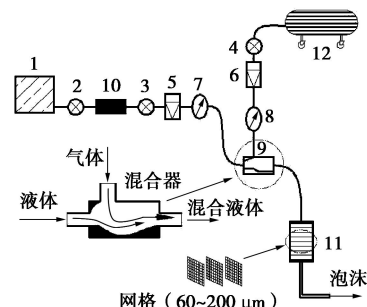
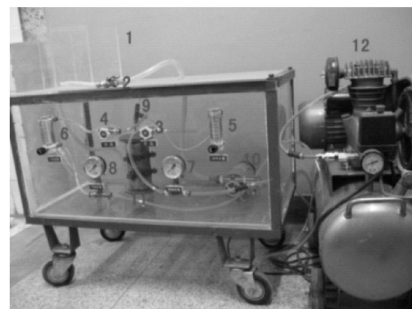
图 3 土体改良试验流程图

Fig. 3 Flow chart of soil conditioning tests

具体步骤如下：

(1) 盾构穿越的地层取样，对土样进行物理力学试验，如测量土样含水率、颗粒级配分布等。

(2) 添加剂性能试验，包括泡沫试验和泥浆试验。添加剂性能试验主要用于评价盾构常用添加剂（泡沫和泥浆）的性能，选择合适的添加剂用于土体改良试验。泡沫试验所用泡沫由自行研制的室内发泡装置^[24]制成（见图4），并通过测量泡沫的半衰期和发泡倍率评价泡沫性能。泥浆配制完毕后静置24 h充分水化后进行泥浆试验，即使用1006型泥浆漏斗黏度计测量泥浆黏度评价泥浆性能。



1-发泡液容器, 2-容器开关, 3-液体开关, 4-气体开关, 5-液体流量计, 6-气体流量计, 7-液体压力计, 8-气体压力计, 9-混合器, 10-增压泵, 11-发泡器, 12-空气压缩机

图 4 室内发泡装置

Fig. 4 Photo and layout of foam generator

(3) 土体改良室内试验, 包括坍落度试验和搅拌试验。坍落度试验利用标准坍落度筒(见图5)评价改良土体的流动性, 初步优化添加剂配比组合; 在满足流动性要求的土样中进行搅拌试验, 搅拌试验所用的仪器为自行研制的搅拌装置^[25](见图6), 此装置可以实时记录搅拌过程中搅拌扭矩随时间的变化规律, 观察搅拌叶片的黏附性能, 进一步优化添加剂优化配比方案。

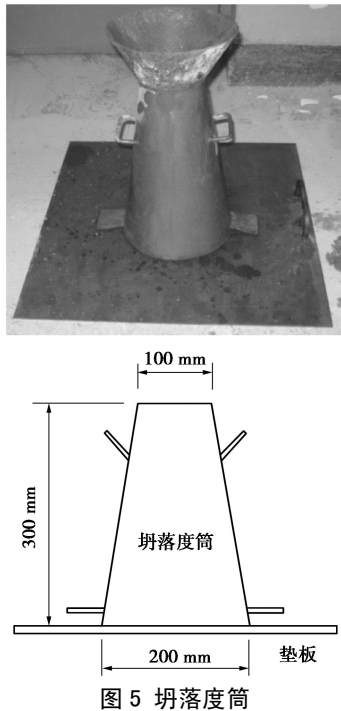


图5 坍落度筒

Fig. 5 Photo and schematic drawing of slump test cone



1-电动机, 2-电流表, 3-电动机变速器, 4-传动轴, 5-搅拌叶片, 6-搅拌桶, 7-底座, 8-升降架, 9-底座轨道, 10-支架

图6 搅拌装置

Fig. 6 Photo and layout of soil mixer

(4) 通过添加剂性能试验和室内土体改良试验选择合适的添加剂和最佳添加剂配比方案, 并应用于取样地层中进行盾构掘进试验进行验证。

2.2 土体改良试验评价标准

(1) 添加剂性能评价标准

泡沫试验通过测量泡沫的半衰期和发泡倍率评价泡沫性能。半衰期是指泡沫破灭到原来重量一半时所用的时间, 是评价泡沫的稳定性的重要指标。发泡倍率是指一定体积的发泡液所发出的气泡体积与发泡液体积的比值, 是发泡液发泡效力的指标。半衰期越长气泡越稳定, 泡沫的半衰期大于 8 min 可满足土压平衡盾构施工的要求; 发泡率越高, 发泡剂利用越充分, 一般来说, 实验室所用泡沫的发泡倍率为 20~40 为宜。

泥浆用于增加土层中细颗粒成分, 提高土层塑性及减小土颗粒间的摩擦力。视开挖土层级配曲线分布决定是否添加泥浆, 即当土层中细颗粒成分(土粒径 < 0.075 mm) 含量低于 30% 时, 需添加泥浆, 反之, 不添加泥浆。泥浆试验通过测量泥浆的漏斗黏度评价泥浆性能, 漏斗黏度为 40~60 s, 适合土压平衡盾构施工。

(2) 土体改良试验评价标准

坍落度试验用于评价土体流动性, 即从坍落度值、坍落后土体形状和析水量来评价土体的流动性, 具体评价标准如下: ①坍落度值为 100~200 mm; ②坍落后土体形状规则, 无明显的倾斜, 轻拍不崩塌; ③土样中无泡沫或水析出, 或少量析出。

搅拌试验评价标准: 改良土体黏附性弱, 即搅拌叶片上依附较少的土体, 搅拌扭矩较小、搅拌扭矩在 200 N·m 以下。

3 土体改良室内试验

3.1 卵石地层取样

为了避免因土样采集产生的误差, 分别在左侧车站和 68 环处(见图 1) 卵石地层中收集土样, 土样的颗粒级配曲线如图 7 所示, 粒径大于 20 mm 的颗粒超过土样总量的 50%, 为卵石。土体改良试验所用的土样主要采集于 68 环处的刀盘检修竖井内, 在刀盘前方 1 m 处左、右两侧分别采集 1 m³ 土样, 测得土样原始含水率为 6.0% 左右。从图 7 中可以看出, 其粒径小于 0.075 mm 的细颗粒含量远小于 30%, 土体改良中需要添加细颗粒成分改善土样的塑性。

3.2 添加剂性能试验

常用的添加剂包括泡沫和泥浆。泡沫因其高效、无污染等的优势得到了广泛的应用, 是盾构施工中最

常用的添加剂；泥浆通常为膨润土泥浆，用于塑性差、摩擦性高及微细颗粒含量少的砂、卵石地层。

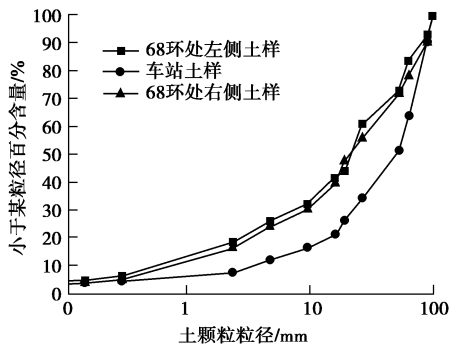


图7 土粒颗粒级配曲线

Fig. 7 Particle size distribution curves

(1) 泡沫性能测试与制备

本试验使用的是 TLH-368 隧道盾构专用液，发泡液质量浓度对泡沫发泡倍率的影响规律如图 8 所示，当其他条件一定时，发泡液质量浓度较低时，发泡倍率随着发泡液质量浓度的增大迅速增大，但当发泡液质量浓度大于 3% 后，发泡倍率维持在 35 左右，仅有轻微变化。从图 9 中可以看出，泡沫的半衰期随着发泡液质量浓度增大迅速增加，当发泡液质量浓度超过 4% 时，泡沫的半衰期有所降低，并维持不变。

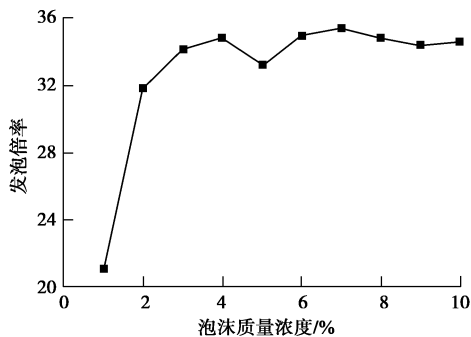


图8 泡沫的发泡倍率试验

Fig. 8 Expansion ratio tests on foam

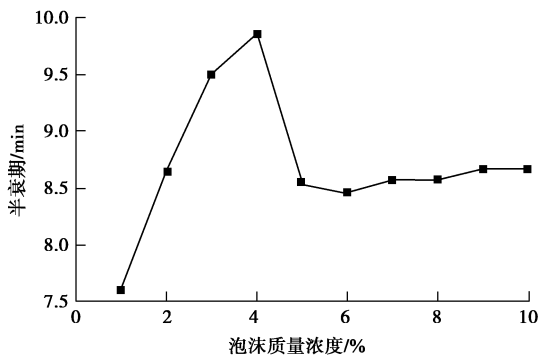


图9 泡沫的半衰期试验

Fig. 9 Half life tests on foam

可见，发泡液的质量浓度并非越大越好，就本泡

沫来说，当发泡液质量浓度为 3%~4% 时，较为理想。本试验所用泡沫的质量浓度为 3%，发泡倍率为 25。

(2) 泥浆性能测试与制备

膨润土是以蒙脱石 (AlO₃·4SiO₂·H₂O) 为主要成分的非金属黏土类矿物，分为钠基和钙基膨润土，为了提高泥浆的性能，本试验使用的是钠基膨润土。

不同质量浓度的膨润土泥浆漏斗黏度试验如图 10 所示，可以看出，泥浆质量浓度在 8%~10% 之间时，泥浆漏斗黏度在 40~60 s 之间，较为适宜。当膨润土泥浆质量浓度大于 11% 时，泥浆的黏度迅速增加，已经不适用于盾构施工。结合现场施工实际情况，本试验使用的膨润土泥浆的质量浓度为 10%。

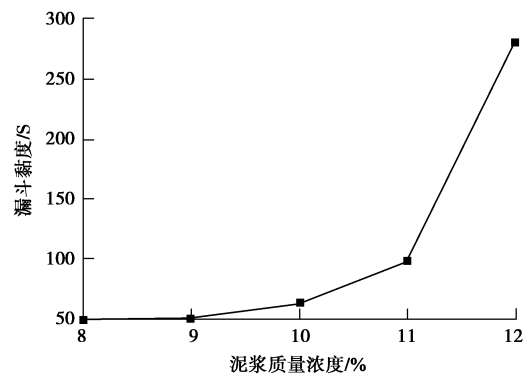


图10 膨润土泥浆试验

Fig. 10 Funnel viscous tests on bentonite slurry

3.3 坍塌度试验

为了满足坍塌度试验土样的要求，去除了土样中大于 40 mm 的颗粒，试验之前将土样风干，每次试验取 9 L 土样，添加水使土样含水率增加到 6%，将土样放入桶壁湿润的水桶中，用薄膜将桶封闭浸润 12 h，然后将土样加入到搅拌机中，边搅拌边加入添加剂(泡沫、泥浆)，搅拌 8min 使得混合土体充分均匀后进行坍塌度试验，每次坍塌度试验做 3 组平行试验，取其平均值作为最终坍塌度值。

在泥浆注入比(泥浆体积与所改良土样体积的比值)为 6%，8%，10%和 12% 的土样中分别加入不同量泡沫进行土体改良，坍塌度试验结果如图 11 所示。当泥浆注入比(泡沫体积与所改良土样体积的比值)为 6% 时，改良土体较干燥，随着泡沫注入比的增加，土体坍塌度增加缓慢，直到泡沫注入比达到 50% 后，改良土体坍塌度达到 100 mm，流动性较好。当泥浆注入比为 12% 时，改良土体稀薄，随着泡沫注入比的增加，坍塌度迅速增加到 200 mm 以上，析水量较大。当泥浆注入比为 8%，10% 时，改良土体塑性较好，泡沫注入比达到 20%~30% 时，改良土体塑性适宜。根据坍塌度试验评价标准，土体流动性较好的土体包含在图 11 中圆圈内。

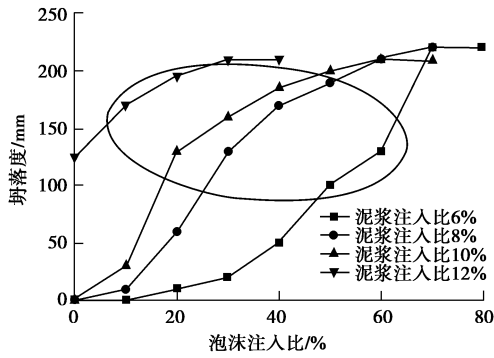


图 11 坍落度试验

Fig. 11 Slump tests on conditioned soils

3.4 搅拌试验

在坍落度试验的基础上进行搅拌试验, 即选择流动性较好的改良土样(图 11 中圆圈内)进行搅拌试验, 改良土体添加剂配比具体参数如表 3 所示。

表 3 搅拌试验土样

Table 3 Parameters of conditioned soils in mixing tests

编号	泥浆注入比 (SIR) /%	泡沫注入比 (FIR) /%
1	6	50
2	6	60
3	8	30
4	8	40
5	10	20
6	10	30
7	10	40
8	12	10
9	12	20
10	12	30

搅拌试验试样制备过程如同坍落度试验, 试验时当搅拌电流稳定后再持续搅拌 2 min 停止试验, 通过计算搅拌电流与空转时电流的差值求得搅拌扭矩, 试验结果如图 12 所示, 当泥浆注入比较小时, 泡沫改良效果不佳, 改良土体干燥, 搅拌扭矩较大; 随着泥浆注入比的增大, 在相同泡沫注入比的情况下, 改良土体搅拌扭矩迅速减小, 但泥浆注入比存在一个极限值, 当泥浆注入比超过这个极限值时, 搅拌扭矩反而增大, 同样泡沫也具有相同的作用效果, 过多的泥浆、泡沫注入比都不利于土体改良。从图 12 中可以看出, 当泥浆注入比、泡沫注入比分别为 10%, 30%左右, 改良土体搅拌扭矩最小, 且与其他改良土体相比, 搅拌扭矩随时间的变化更趋于稳定, 如图 13 所示。可见, 最佳添加剂配比方案是泥浆注入比、泡沫注入比分别为 10%, 30%左右, 改良土体状态如图 14 所示。

本文进行的土体改良试验能快速、有效地评价和研究常用添加剂及改良土体的性能, 对于评价改良土体性能的试验方法来说, 坍落度试验偏重于土体塑性、

流动性能的研究, 搅拌试验直接反映土体的摩擦性能, 为了全面评价盾构施工过程中改良土体的性能, 特别是土体的渗透性及土体传力性能, 还需丰富其试验手段做进一步研究, 如盾构模型试验。

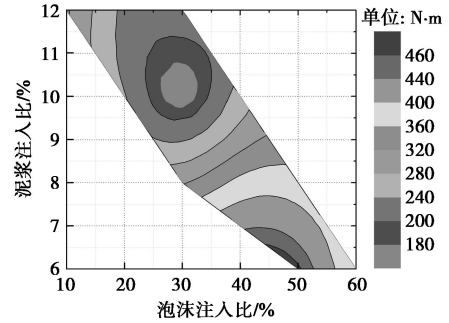


图 12 搅拌试验

Fig. 12 Mixing tests on conditioned soils

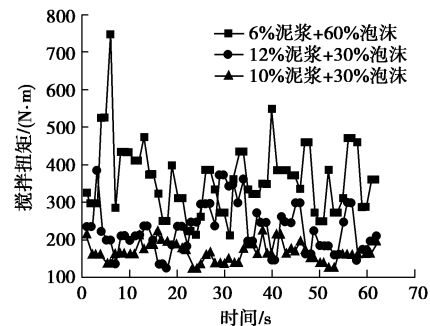


图 13 搅拌扭矩随时间变化曲线

Fig. 13 Variation of mixing torque of different conditioned soils with time



图 14 室内试验理想土体状态

Fig. 14 Ideal state of conditioned soils by laboratory tests

4 盾构掘进试验

如图 15 所示, 将室内试验得到的最佳添加剂配比方案应用到 71~74 环进行掘进试验, 同时对优化后的渣土进行现场坍落度试验, 并统计分析了添加剂配比优化前 61~64 环及掘进试验段 71~74 环的盾构运行参数。

施工运行参数取自盾构机内的数据实时采集系统, 在一环的掘进时间段内自动采集 60 组盾构运行参数, 主要包括土舱中部土压、土舱上部土压、刀盘扭矩、盾构推力、推进速度、泥浆流量、泡沫流量、发

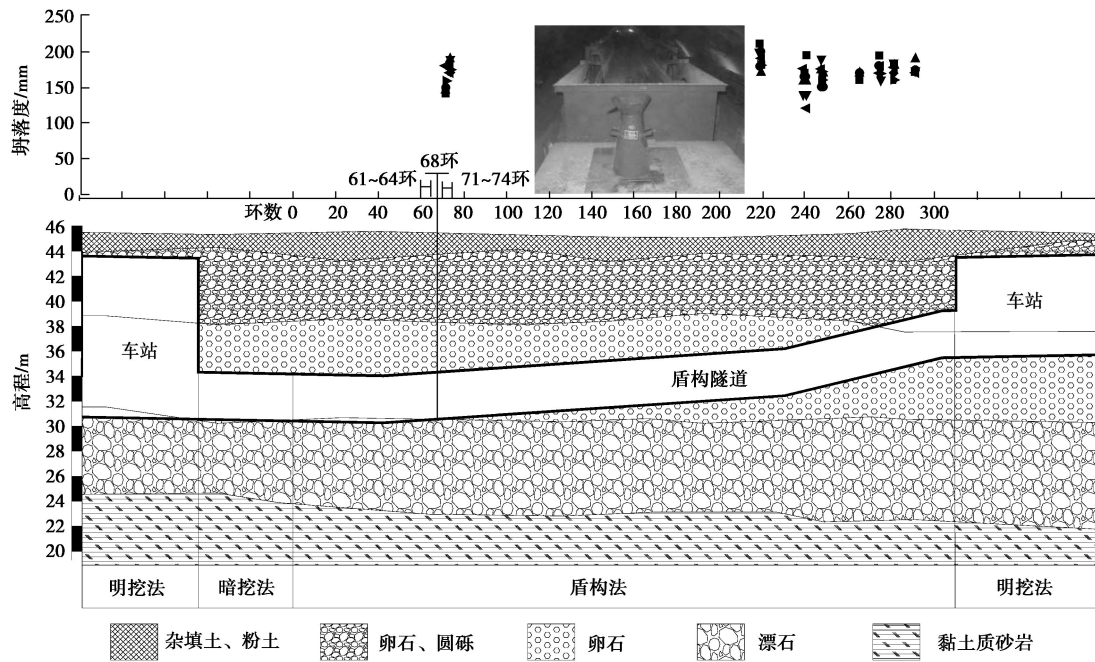


图 15 现场盾构掘进试验

Fig. 15 Penetration tests

泡倍率和螺旋机内土压力。61~64 环施工参数曲线中 (见图 16), 当泥浆流量为 100 mL/min (整环泥浆注入比大约为 17%~18%), 泡沫流量为 250 mL/min (整环泡沫注入比大约为 40%) 时, 刀盘扭矩高达额定扭矩的 90%左右, 严重影响了盾构推进速度, 低于 30 mm/min。71~74 环使用最佳添加剂配比方案, 泥浆注入比增加到 150 mL/min (整环泡沫注入比为 11%)、泡沫注入比增加到 450 mL/min 左右 (整环泡沫注入比为 31%左右), 与 61~64 环施工参数相比, 盾构推进速度增加到 40 mm/min 以上, 刀盘扭矩下降到额定扭矩的 50%左右, 同时减小了盾构总推力, 而且土舱上部、中部土压力稍有增加, 趋于稳定, 有利于维持掌子面土层稳定。对于卵石地层的土压平衡盾构施工中, 过大的泥浆、泡沫注入量不能起到良好的土体改良效果 (与搅拌试验结果相吻合), 反而会使得渣土中的卵石离析、沉积于土舱底部, 增加刀盘扭矩, 影响盾构推进速度。故当泥浆注入比、泡沫注入比分别为 11%, 31%左右时, 显著改善了盾构施工参数, 取得了良好的施工效果, 与土体改良室内试验结果相吻合。

对添加剂改良后的盾构施工进行现场坍塌度试验, 试验土样取自螺旋排土器后面运输渣土的传送带上, 如图 15 所示, 从现场坍塌度试验结果可得, 渣土的坍塌度集中在 150~200 mm 之间, 渣土状态如图 17 所示, 与室内试验的渣土状态类似。可见, 卵石地层土压平衡盾构施工中渣土的最佳坍塌度范围在 150~200 mm 之间。

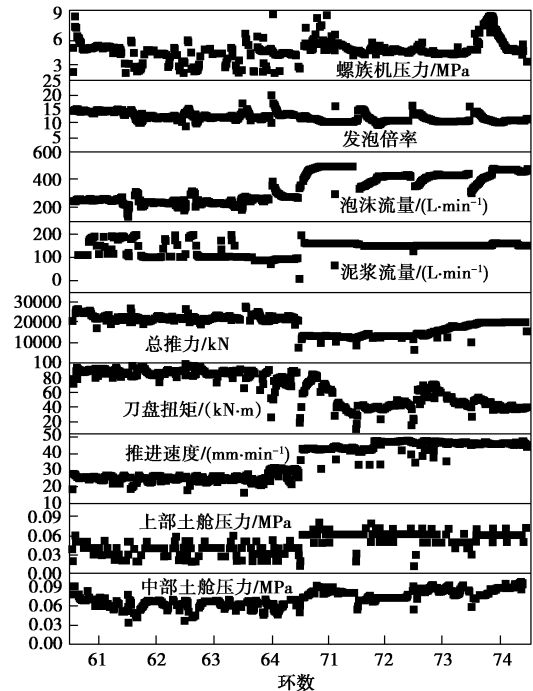


图 16 掘进试验前后施工参数对比分析

Fig. 16 Comparative analysis of excavation parameters before and after penetration tests

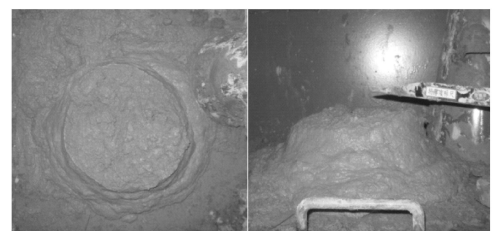


图 17 现场土样状态

Fig. 17 Ideal state of conditioned soils by penetration tests

5 结 语

对于本试验所使用的泡沫和泥浆, 由添加剂试验可得, 当泡沫浓度为 3%~4%时、泥浆质量浓度为 10%左右时, 较为经济适用。

对于本试验卵石土样, 由室内土体改良试验可得, 当泥浆注入比为 10%左右、泡沫注入比为 30%左右时, 土体改良效果良好, 为最佳添加剂配比方案, 此时的坍塌度值范围在 150~200 mm 之间。可以得到, 泥浆具有显著的土体改良作用, 如增强泡沫的功效、增加卵石土样塑性、减小搅拌扭矩, 但是泥浆注入比存在一个极限值, 当泥浆注入比超过极限值反而增加土体的搅拌扭矩, 不利于土体改良。

对取样点所在的卵石地层进行了现场盾构掘进试验, 室内试验得到的最佳添加剂配比显著提高了盾构推进速度, 同时减小了刀盘扭矩、盾构掘进负荷, 增强了掌子面土层稳定, 取得了良好的施工效果。并通过现场坍塌度试验进一步验证了本试验卵石地层渣土的最佳坍塌度范围在 150~200 mm 之间。

参考文献:

- [1] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (ZHANG Feng-xiang, ZHU He-hua, FU De-ming. Shield tunneling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 朱 伟. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (ZHU Wei. Japanese standard for shield tunnelling[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese))
- [3] 张国京, 刘 盈. 土压平衡盾构施工中土的塑流化技术[J]. 市政技术, 2005, 23(5): 293 - 296. (ZHANG Guo-ying, LIU Ying. Soil plasticizing technique for epb shield excavation[J]. Municipal Engineering Technology, 2005, 23(5): 293 - 296. (in Chinese))
- [4] BARTAK J, HRDINA I, ROMANCOV G, et al. Integral studies on mechanical functions of mudding agents and the properties of muddified soils in the EPB shield tunneling technology[C]// Underground Space—the 4th Dimension on Metropolises, Prague, Taylor & Francis Group, London, 2007: 1153 - 1159.
- [5] 龚秋明, 姜厚停, 闫 鑫. 圆砾地层土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 26(增刊 1): 56 - 62. (GONG Qiu-ming, JIANG Hou-ting, YAN Xin. Soil conditioning for earth pressure balanced shields excavation in gravel layer[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 26(S1) : 56 - 62. (in Chinese))
- [6] MILLIGAN G. Lubrication and soil conditioning in tunnelling, pipe jacking, and microtunnelling state of the art review[OL]// London: Geotechnical Consulting Group, www-civil.eng.ox.ac.uk. 2000.
- [7] 龚秋明, 高明忠, 姜厚停. 成都地铁卵石地层盾构施工浅析[J]. 市政技术, 2009, 27(增刊 2): 184 - 186. (GONG Qiu-ming, GAO Ming-zhong, JIANG Hou-ting. Analysis of shield tunnelling in gravel layers during Chengdu subway construction[J]. Municipal Engineering Technology, 2009, 27(S2): 184 - 186. (in Chinese))
- [8] MIGUEL A P D. Foam as a soil conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of conditioned sands[D]. Oxford: University of Oxford, 2007.
- [9] SOTIRIS P. Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications[D]. Oxford: Department of Engineering Science, University of Oxford, 2001.
- [10] NIKOL K. The effects of soil conditioning agents on fine and coarse-grained soils with applications in earth pressure balance machine tunneling[D]. Toronto: Department of Civil Engineering University of Toronto, 2007.
- [11] EFNARC. Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock[OL]. UK: Recommendation of European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures, 2005, www.efnarc.org.
- [12] 姜厚停, 龚秋明, 闫 鑫. 土压平衡盾构施工中泡沫改良圆砾地层试验研究[J]. 现代隧道技术, 2008(增刊): 187 - 190. (JIANG Hou-ting, GONG Qiu-ming, YAN Xin. Use of chemical foam for earth pressure balanced shields excavation in gravel layer[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008(S0): 187 - 190. (in Chinese))
- [13] BOONE S J, ARTIGIANI E, SHIRLAW J N, et al. Use of ground conditioning agents for earth pressure balance machine tunneling[C]// AFTES — Journées Techniques, Chambéry, 2005: 313 - 319.
- [14] QUEBAUD S, SIBAI M, HENRY J P. Use of chemical foam for improvement in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(2): 173 - 180.
- [15] MIGUEL P. Soil conditioning for sand[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2003(7): 40 - 42.
- [16] RAFFAELE V, CKAUDIO O I, DANIELE P. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory

- research[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, **23**(3): 308 - 317.
- [17] JANCSEK S, KRAUSE R, LANGMAACK L. Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: experiences of LRTS Izmir[C]// *Proceedings of International Congress on Challenges for the 21st Century*. Balkema, 1999: 865 - 875.
- [18] WILLIAMSON G E, TRAYLOR M T, HIGUCHI M. Soil conditioning for EPB shield tunneling on the south bay ocean outfall[C]// *Proceedings of RETC Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 1999: 897 - 925.
- [19] 林 键. 土体改良降低土压平衡式盾构刀盘扭矩的机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (LIN Jian. Study on reduction of cutterhead torque in EPB shield with soil conditioning[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [20] 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 layer[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, **6**(3): 449 - 453. (in Chinese))
- [21] 姜厚停, 龚秋明, 周永攀, 等. 北京地铁盾构施工遇到的工程地质问题[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(增刊): 126 - 132. (JIANG Hou-ting, GONG Qiu-ming, ZHOU Yong-pan, et al. Encountered engineering geological problems of shield tunnelling during Beijing subway construction[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(S0): 126 - 132. (in Chinese))
- [22] 丛恩伟. 北京地铁 10 号线砂卵石地层盾构法隧道施工关键技术[J]. *铁道标准设计*, 2008(12): 168 - 171. (CONG En-wei. Key studies for EPB Shield in sandy cobble layer in Beijing Subway Line 10[J]. *Railway Standard Design*, 2008(12): 168 - 171. (in Chinese))
- [23] 宋克志, 汪 波, 孔 恒, 等. 无水砂卵石地层土压平衡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, et al. 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. (in Chinese))
- [24] 龚秋明, 姜厚停, 周永攀. 一种土压平衡盾构施工土体改良试验用泡沫发生装置: 中国, 2011101136997.X[P]. 2011-09-28. (GONG Qiu-ming, JIANG Hou-ting, ZHOU Yong-pan. A foam generator used in soil conditioning test for earth pressure balance (EPB) machine tunneling: China, 2011101136997.X[P]. 2011-09-28. (in Chinese))
- [25] 龚秋明, 姜厚停, 马 超, 等. 一种土压平衡盾构施工土体改良试验的搅拌装置: 中国, 201010228534.1[P]. 2011-02-02. (GONG Qiu-ming, JIANG Hou-ting, MA Chao, et al. A mixer used in soil conditioning test for earth pressure balance (EPB) machine tunneling: China, 201010228534.1[P]. 2011-02-02. (in Chinese))