

文章编号:1005-0523(2015)06-0044-10

砂卵石地层的土压平衡盾构施工土体改良试验研究

钟毅¹, 杨龙才¹, 房师涛², 张润来¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中水电成都建设投资有限公司, 四川 成都 610000)

摘要:砂卵石地层土压平衡盾构掘削形成的渣土无法达到较为理想的塑性膏体状态, 往往因渣土内摩擦角大而导致盾构机械过度磨损, 因渣土流塑性差而导致扭矩过大、掘进效率剧降、进出土失控, 甚至沉降超限、引发塌方事故。土体改良是改善渣土特性的有效方法, 但砂卵石地层土体改良配比、参数用量, 尚处于工程经验和现场施工试错法阶段, 具有一定的不合理性和盲目性。基于此, 依托成都某典型砂卵石地层工点, 使用膨润土基泥浆和泡沫对土体进行改良, 并对改良剂的性能和改良效果进行评价和分析。研究得出了土体改良后塑流性良好的添加剂配比和注入量, 并对几种改良方案的进行分析对比, 得到最优改良方案。

关键词:土压平衡盾构; 土体改良; 添加剂; 砂卵石地层

中图分类号:U455

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.06.008

近些年在不同地质条件下的城市地铁隧道建设中, 土压平衡盾构被成功的采用, 目前它被认为是最常用的机械化盾构技术。一方面, EPB 数量的增加得益于机电技术的改性; 另一方面在于更加高效的使用添加剂进行土体改良。

土体改良是通过往掌子面或者土仓中注入泡沫、高分子聚合物、膨润土泥浆等添加剂, 改良土体的目的主要有以下几点: ① 达到一种理想塑流性状态—即能够形成土水压力, 又能从螺旋输送机顺利排出; ② 减小地层的渗透系数—阻止掌子面水渗漏, 减小地层损失; ③ 较小的土体摩擦性—减小刀盘磨损, 减小刀盘和螺旋输送机扭矩; ④ 避免土体粘度过大黏附结块^[1]。

由于使用添加剂对土体进行改良的时间不长, 相关室内试验和研究比较少, 添加剂的配比和用量基本依靠工地现场摸索和工程经验, 具有一定的不合理性和盲目性。而且地层条件的不同, 添加剂种类的选取和添加剂的最优配比方案也不尽相同。魏康林^[2]介绍了盾构施工中常用的几种添加剂, 并分析了泡沫和膨润土改良土体的微观机理, 为添加剂使用提供理论依据; 姜厚停等^[3]研究了泡沫和膨润土泥浆对卵石地层渣土改良效果, 得到了添加剂最佳配比, 并得出土体的最佳坍塌度范围在 150~200 mm 之间; Jancsecz 等^[4]和 Williamson 等^[5]研究了泡沫对砂土的改良效果, 建议合理坍塌度范围为 200~250 mm; 马连丛等^[6]研究了泡沫对富水砂卵石地层渣土的改良效果, 得到了适应该地层的合理配比。但目前对于不同改良剂的改良效果和影响规律方面的研究, 还存在一定程度的不足。

为此, 本文依托成都某典型砂卵石地层工点, 针对砂卵石地层摩擦角大, 黏聚力小, 塑流性差的特殊性, 设计了一系列室内试验, 使用搅拌试验、坍塌度试验和粘度试验得到的指标对膨润土基泥浆和泡沫改良土体效果进行评价, 分析每种方案的优缺点, 优化添加剂配比方案。

收稿日期: 2015-09-03

作者简介: 钟毅 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通与铁道工程。

通讯作者: 杨龙才 (1971—), 男, 副研究员, 博士生导师, 主要从事高速铁路路基变形控制理论与技术、城市轨道交通土工结构的设计理论与施工技术等方面的研究工作。

1 土体改良试验方案

1.1 典型砂卵石地层特性

现场地层的土体颗粒直径较大, 超过30 mm 的颗粒占 50%, 为满足坍落度试验土样的颗粒粒径要求, 剔除粒径超过 30 mm 的颗粒后的级配曲线如图 1 所示。

试验砂卵石土按照级配曲线由卵石和砂配制得到, 试验每次取土样体积为 9 L, 土样含水率取 3%。

1.2 试验方案

1.2.1 试验内容

试验方案分别考虑膨润土基泥浆和泡沫对土体改良效果的影响, 对于膨润土基泥浆改良方案, 试验旨在膨润土少用量、低浓度的情况下, 添加适量的高分子聚合物来增加泥浆粘度和减小失水量, 提高泥浆性能, 从而满足盾构施工要求。膨润土泥浆分别添加两种常用的高分子聚合物聚丙烯酰胺(PAM)和羧甲基纤维素(CMC), 单独使用膨润土泥浆作为对照试验, 故共有 4 种方案:

- 方案一: 膨润土基泥浆;
- 方案二: 膨润土基泥浆+聚丙烯酰胺(PAM);
- 方案三: 膨润土基泥浆+羧甲基纤维素(CMC);
- 方案四: 泡沫

各试验方案具体进行的试验项目和内容见表 1。

表 1 试验内容
Tab.1 Testing contents

试验方案	试验项目	目的	评价指标	试验设备
膨润土基泥浆	搅拌试验	反应搅拌难易程度、内摩擦角和粘聚力大小	搅拌电流(A)	转速为 42 rpm 的 30 L 搅拌机, 数字电流计
膨润土基泥浆+PAM	坍落度试验	反映土的和易性、塑流性状态	坍落度(mm)	坍落度筒
膨润土基泥浆+CMC	观察	是否离析、析浆、失水或泡沫析出		
泡沫				
膨润土基泥浆	粘度试验	对泥浆性能进行评价	表观粘度和塑性粘度(MPa·s)	ZNN-D6 型六速旋转粘度计
膨润土基泥浆+PAM				
膨润土基泥浆+CMC				

1.2.2 具体实施方法

试验所使用膨润土选用钠基膨润土。泡沫改良试验所用泡沫由实验室自制泡沫发生装置制得, 泡沫剂为盾构专用发泡剂。评价泡沫的性能主要是发泡倍率和半衰期, 当发泡质量浓度为 3%~4%时, 较为理想^[7]。试验选用发泡剂质量浓度为 3%, 测得发泡倍率为 18, 半衰期 8 min, 满足土压平衡盾构施工的要求。

4 种试验方案具体试验方法如下所示。

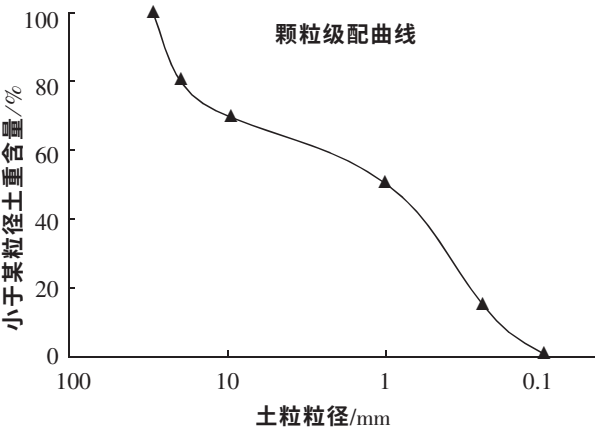


图 1 试验砂卵石土颗粒级配曲线
Fig.1 Test sand-pebble soil grading curve

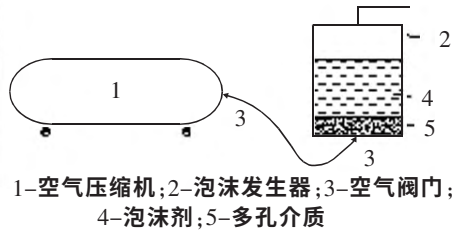
方案一:泥浆浓度分别取 10%、11%、12.5%、14.3%、16.7%、20%(即土水质量比分别为 1:10、1:9、1:8、1:7、1:6、1:5),注入率分别取 15%、20%、25%(即分别为 1.35L、1.8L、2.25L),进行全面试验,共 18 组试验。

方案二:实验室配得 PAM 浓度为 1‰的溶液,PAM 溶液添加量取 0.2、0.3、0.4、0.5 L,膨润土溶液注入量取 20%,即 1.8 L,浓度取 10%、11%、12.5%、14.3%,配得泥浆体系进行全面试验,共 16 组试验。

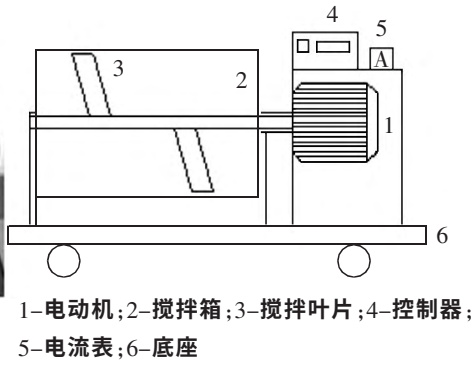
方案三:分别取 CMC 0.1、0.2、0.3、0.4g,膨润土溶液注入量取 20%,即 1.8 L,浓度取 10%、11%、12.5%,配得泥浆体系进行全面试验,共 12 组试验。

方案四:土体含水率分别选取 3%、5%、7.5%和 10%,泡沫注入比从 10%开始,每次增加 5%,直至得到较好改良效果为止。

试验所使用设备和仪器如图 2 所示。



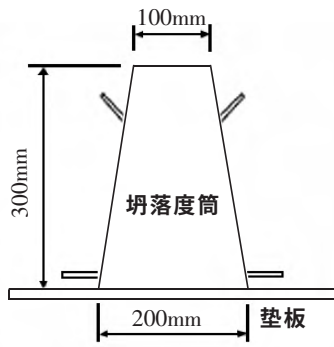
(a) 实验室泡沫发生装置



(b) 搅拌装置



(c) 坍落度筒



(d) ZNN-D6 型六速旋转粘度计

图 2 试验设备和仪器

Fig.2 Test equipment and instruments

1.2.3 土体改良试验评价标准

坍落度试验用于评价土体塑性流动性,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:① 坍落度值范围为 150~250 mm;② 坍落后土体形状呈圆锥状,扩展状基本呈圆形;③ 土

样中无明显泥浆或泡沫析出。

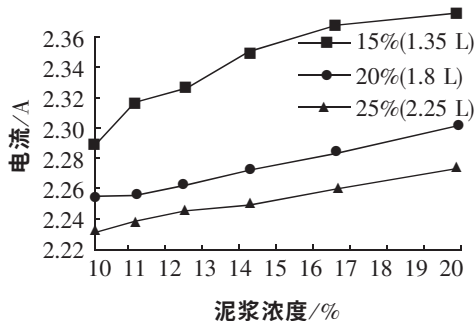
搅拌试验评价标准:改良土体黏附性弱,即搅拌叶片上依附较少的土体,搅拌电流较小。

2 土体改良试验结果分析

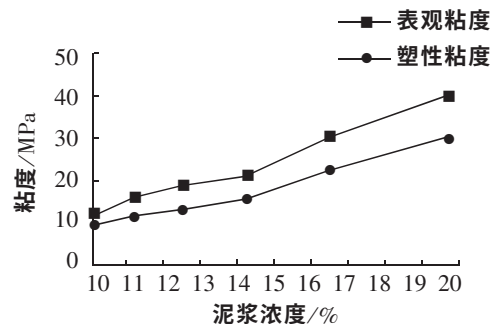
2.1 膨润土基泥浆改良试验结果

为了对泥浆性能进行初步评价,测得不同泥浆浓度的粘度值如图3(a)所示,由图中可以看出,泥浆的表观粘度和塑性粘度均随着的泥浆浓度的增大而增大。泥浆浓度在超过14.3%后,泥浆的表观粘度开始迅速增长,若泥浆黏度太大,现场泵送困难,不合适盾构施工。认为泥浆黏度在12.5~22.5 MPa之间,即泥浆浓度在10%~14.3%之间较为合适。并且塑性粘度反映着泥浆改良土体保水性,低浓度保水性不好,高浓度保水性较好^[8],故当泥浆浓度较低时,泥浆中粘土颗粒含量较少,保水性不好,改良土体时,会出现析浆的情况。

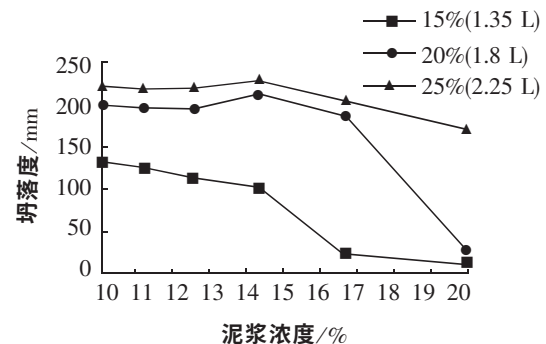
图3(b)和(c)给出了不同注入率下,电流和坍落度与泥浆浓度的关系,一方面可以看出,搅拌电流随着泥浆浓度的增加而变大的趋势,随着注入量的增加而减小的趋势。注入率为15%时,搅拌电流远远大于注入率为20%和25%的电流,而注入率20%和25%两者的电流值相差不大。另一方面,当注入率为20%和25%时,两者在低泥浆浓度时坍落度值相差不大,在高泥浆浓度时差别明显,坍落度随着泥浆浓度呈先缓慢增大后迅速减小的趋势,在泥浆浓度为14.3%达到最大。注入率15%时,改良效果不好,坍落度值达不到要求。



(b) 膨润土泥浆浓度与搅拌电流关系图



(a) 膨润土泥浆粘度指标



(c) 膨润土泥浆浓度与坍落度关系图

图3 各试验指标和参数关系图(膨润土基泥浆)

Fig.3 Test indexes and parameters diagram(bentonite slurry)

为了能直观的反应土体改良效果的塑流性状态,给出改良效果的3种状态a、b、c,如图4所示,图5列出了各试验组合改良后的塑流性状态。分析可知,在泥浆高浓度且低注入量的条件下,土体粘性较大,太干且不易流动,改良效果不好;泥浆在低浓度且高注入量的条件下,土体保水性太差,容易析浆,改良效果不好;在泥浆浓度和注入量合适时,即图中平行四边形范围内,改良效果比较理想,能够达到较好的塑流性状态。

综上所述,虽然泥浆浓度为14.3%坍落度值达到最大,但与浓度为12.5%时的值相差不大,改良效果都比较理性,本着低消耗的原则,泥浆浓度为12.5%(土水质量比1:8),泥浆注入量取20%,为单独添加膨润土泥浆改良的合理配比。

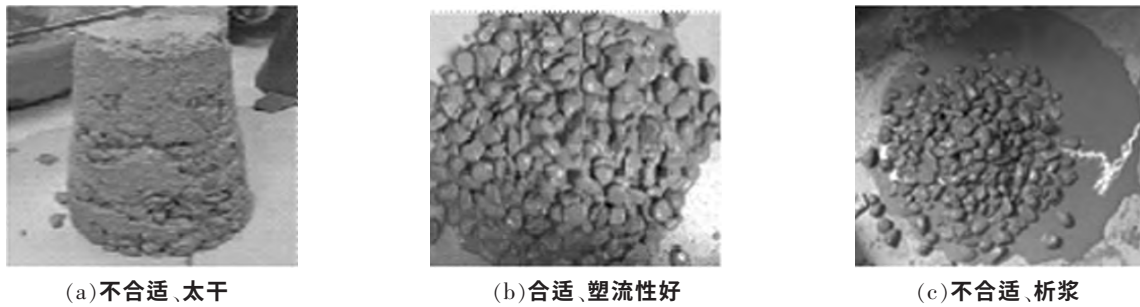


图 4 膨润土泥浆改良三种塑性状态

Fig.4 Three plastic flow states of bentonite slurry conditioning

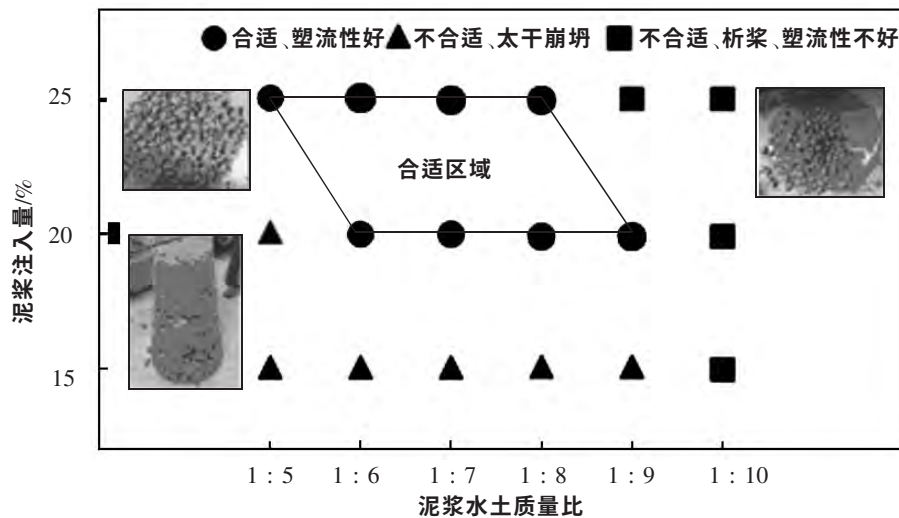


图 5 膨润土泥浆改良效果

Fig.5 Bentonite slurry conditioning results

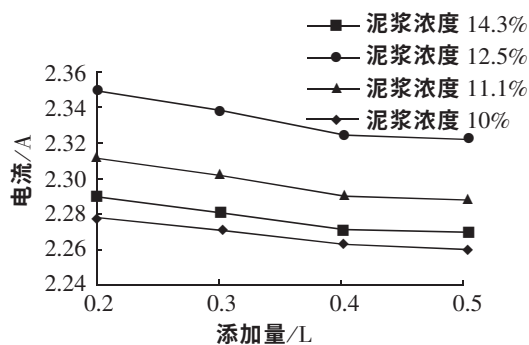
2.2 膨润土基泥浆+PAM 改良试验结果

试验得到指标和参数之间的关系在图 6 中给出,由图 6(a)和(b)可以看出,同一泥浆浓度,搅拌电流随着 PAM 溶液的添加量的增加呈减小的趋势,当添加量达到 0.5 L 时,电流基本不变,出现电流减小的原因是溶液中的水分对泥浆有一定的稀释作用;同一 PAM 溶液添加量,搅拌电流随着泥浆浓度的变大呈先减小后增大的趋势,且在泥浆浓度为 12.5% 时,达到最小。由图 6(c)和(d)可知,同一泥浆浓度,坍落度随着 PAM 溶液添加量的增加呈先增大后减小的趋势,且在添加量为 0.4 L 时最大;同一 PAM 溶液添加量,坍落度随着泥浆浓度的增加而变小。以上分析说明,PAM 的添加量存在一个限值,若超过此限值改良效果反而不好。

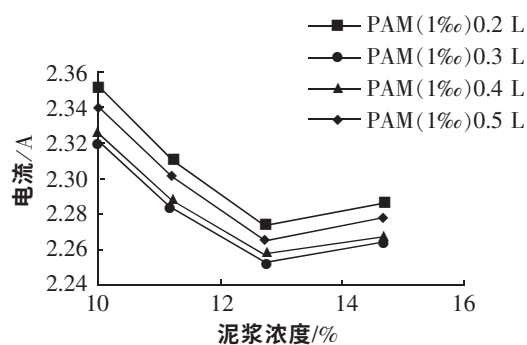
由于泥浆浓度为 11.1% 和 10% 时,泥浆的保水性较差,测得加入 PAM 溶液后的泥浆体系的粘度值,在图 6(e)和(f)给出,可看出泥浆体系的表现粘度呈先减小后增大的趋势;塑性粘度先基本不变,在添加量达到 0.4 L 时,有所变大,泥浆保水性有所提高。

本改良试验的目的是在泥浆低浓度时,加入添加剂提高泥浆的保水性,达到理想的改良效果,图 7 中给出了泥浆浓度为 10% 时,加入 PAM 改良前后效果对比图:图 6(a),泥浆浓度 10%,注入率 20% (1.8 L);图 6(b),泥浆浓度 10%,注入率 20% (1.8 L),PAM (1‰) 添加量 0.4 L。故在泥浆低浓度时,加入 PAM 改良效果比较明显,能使改良土体达到比较理性的塑性状态。

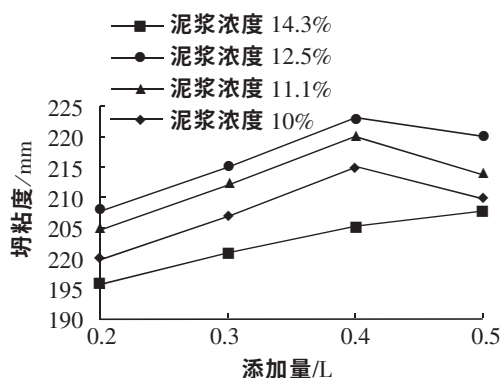
综上所述,在泥浆浓度为 10%,注入率为 20% (即 1.8 L) 时,PAM 溶液 (1‰) 添加比为 22% (相对于泥浆体积,即 0.4 L) 为使用 PAM 进行改良的合理配比。



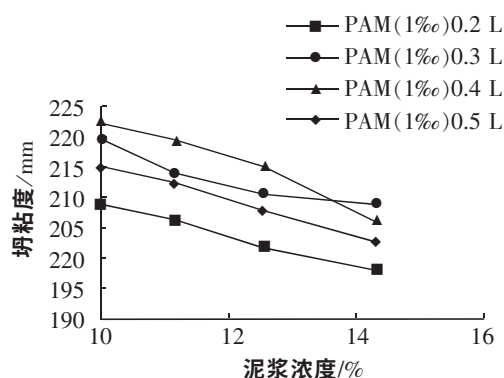
(a) PAM 溶液(1‰)添加量与搅拌电流的关系图



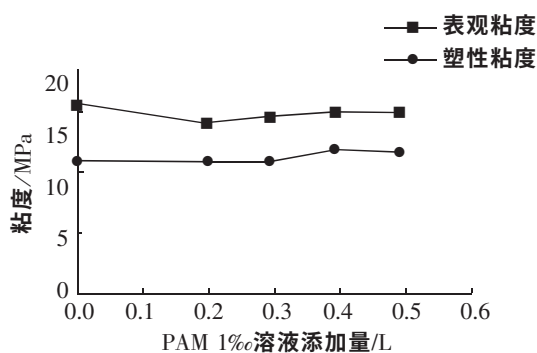
(b) 膨润土泥浆浓度与搅拌电流的关系图



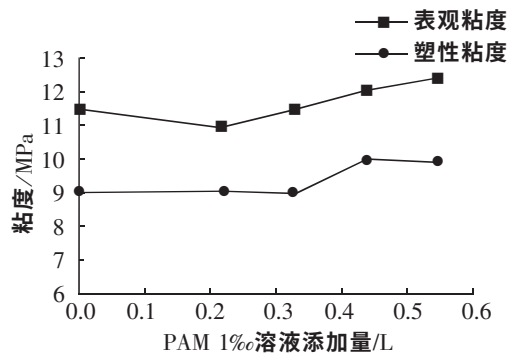
(c) PAM 溶液(1‰)添加量与坍落度的关系图



(d) 膨润土泥浆浓度与坍落度的关系图



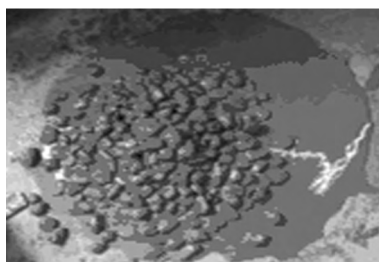
(e) 泥浆浓度 11.1%, 泥浆体系粘度值



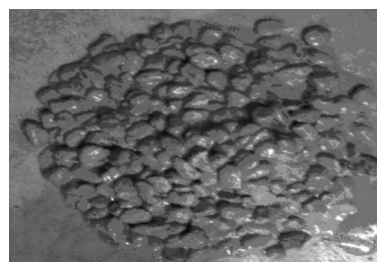
(f) 泥浆浓度 10%, 泥浆体系粘度值

图6 各试验指标和参数关系图(膨润土基泥浆+PAM)

Fig.6 Test indexes and parameters diagram(bentonite slurry+PAM)



(a) 改良前



(b) PAM(1‰), 0.4 L

图7 添加 PAM 溶液改良前后对比图

Fig.7 Contrast figure of PAM solution before and after conditioning

2.3 膨润土基泥浆+CMC 改良试验结果

试验得到指标和参数之间的关系如图 8 所示,分析图 8(a)和(b)可知,同一泥浆浓度,搅拌电流随着 CMC 添加量的增加而增加;同一 CMC 添加量,搅拌电流随着泥浆浓度的增加呈先缓慢增加后迅速增大的趋势,且泥浆低浓度时,搅拌电流值相差不大。分析图 8(c)和(d)可知,在泥浆高浓度时,坍落度随着 CMC 添加量呈递减的趋势,在低浓度时,坍落度呈现增大后减小的趋势;同一 CMC 添加量,坍落度随着泥浆浓度的增加呈递减的趋势。以上分析说明 CMC 在泥浆浓度较高时,对土体的粘度和摩擦系数影响较敏感,同样 CMC 的添加量也存在一个限值,若超过此限值改良效果反而不好。

同样在泥浆浓度为 11.1%和 10%时,测得加入 CMC 溶液后的泥浆体系的粘度值,见图 8(e)和(f),分析可知泥浆体系的表观粘度和塑性粘度呈先基本不变,在添加量达到一定量时,有所变大的趋势,泥浆保水性有所提高。

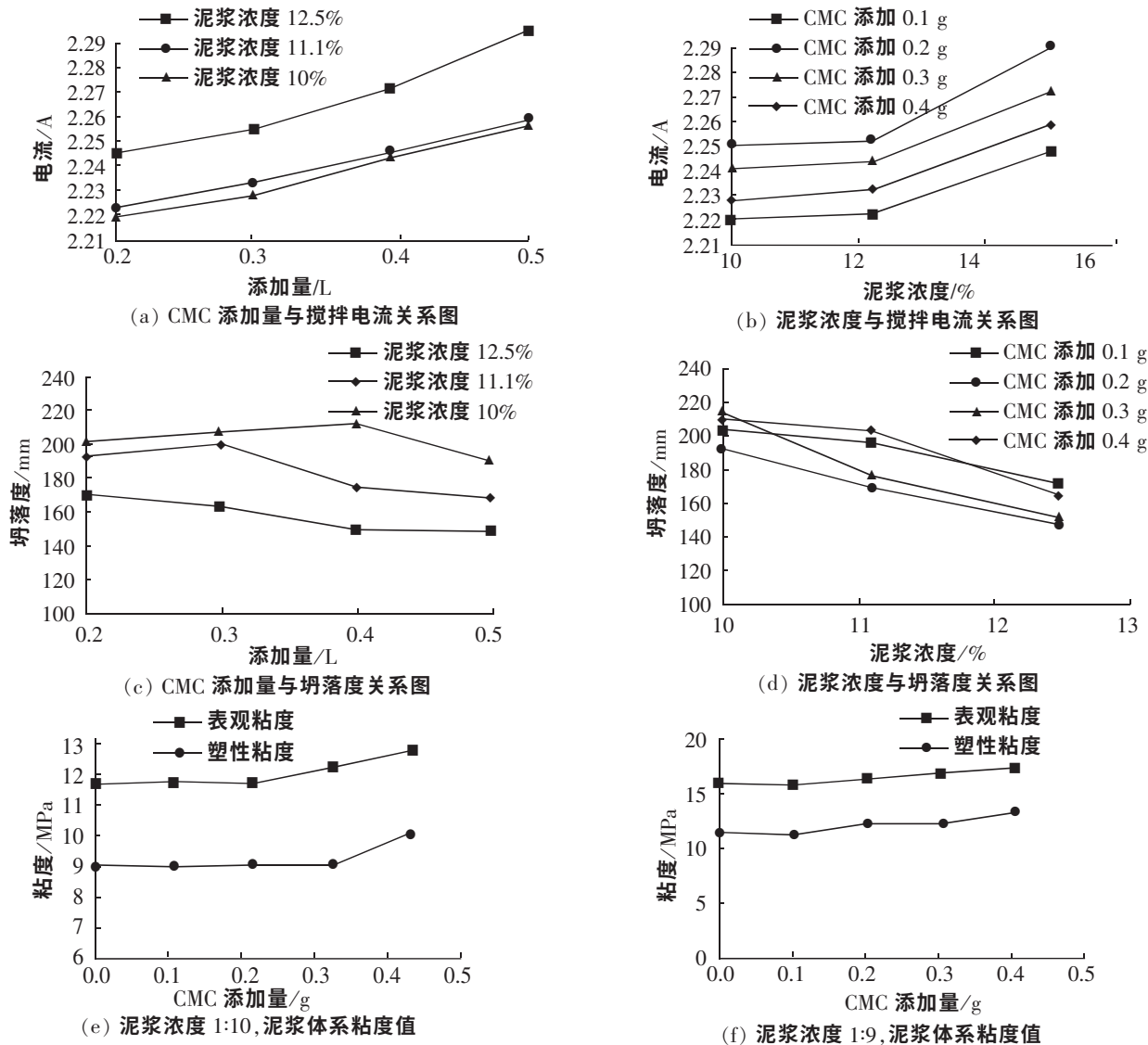


图 8 各试验指标和参数关系图(膨润土基泥浆+CMC)

Fig.8 Test indexes and parameters diagram(bentonite slurry+CMC)

图 9 给出了,泥浆低浓度为 10%,加入 CMC 改良前后效果对比图:图 9(a),泥浆浓度 10%,注入率 20% (1.8 L);图 9(b),泥浆浓度 10%,注入率 20%(1.8 L),CMC 添加量 0.3 g。故在泥浆低浓度时,加入 CMC 改良效果比较明显,能到使改良土体达到比较理性的塑流性状态。

综上所述,在泥浆浓度为 10%,注入率为 20%(即 1.8 L)时,CMC 添加量为 0.3 g,为使用 CMC 进行改良的合理配比。

2.4 泡沫剂改良试验结果

试验得到的试验指标如图10所示,含水率10%时,土体严重失水,泡沫改良效果不明显,图中未给出。

分析可知,同一含水率,搅拌电流随着FIR(泡沫注入比)的增大呈先迅速递减后减缓的趋势,坍塌度随着FIR的增加呈先迅速增加后减缓的趋势。这说明使用泡沫进行改良可以明显的降低土体的摩擦系数,但当FIR超过某一限值后,摩擦系数改在变小。

图11列出了泡沫改良土体的几种塑流性状态,图12给出了各试验组合改良效果。分析可知,当泡沫注入量不够时,土体太干、易崩塌;当泡沫注入过多时,造成泡沫析出,塑流性不好;随着土体含水率的变大,泡沫的最佳注入比变小,即泡沫利用率有所提高;当土体含水率超过一定值后,土中水分含量太多,泡沫改良土体效果不明显。在不同土体含水率下,泡沫注入比合适时,如图中四边形包含范围所示,改良效果比较理想,能够达到较好的塑流性状态。

综上所述,使用泡沫对土体进行改良,土体含水率的影响较大,当含水率3%时,最佳FIR为30%~40%;当含水率5%时,为25%~30%;当含水率7.5%时,为15%~20%。

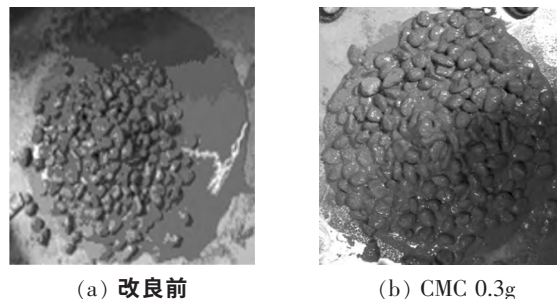


图9 添加CMC改良前后对比图
Fig.9 Addition CMC conditioning contrast figure

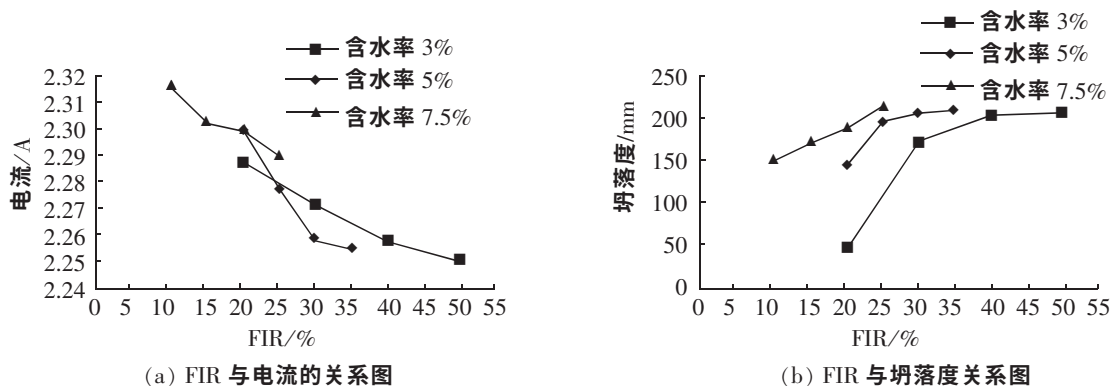


图10 各试验指标和参数关系图(泡沫)
Fig.10 Test indexes and parameters diagram(foam)

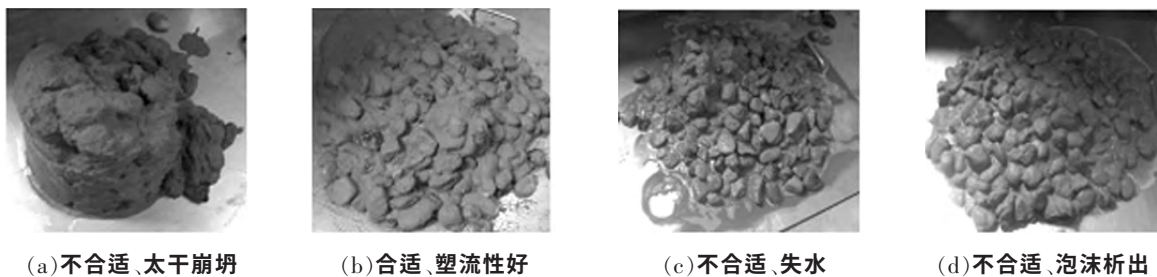


图11 泡沫改良四种塑流性状态
Fig.11 Four plastic flow states of foam conditioning

3 不同改良剂改良效果

通过对 4 种试验方案分析比较可知,单独使用膨润土泥浆改良时,泥浆浓度为 12.5%,注入量 20%,为合理配比,但是泥浆浓度较大,对应的泥浆粘度较大,一方面会造成泵送剂输送困难,工作量较大,另一方面,土体粘性较大,不利于螺旋输送机正常出土。故单独使用膨润土泥浆改良土体不合适盾构施工。

在膨润土泥浆低浓度时,添加一定的高分子聚合物可以改善土体的保水性和粘度。添加 PAM 方案的合理配比为:泥浆浓度 10%(注入率 20%,即 1.8 L)、PAM 溶液(1‰)添加量 0.4 L;添加 CMC 方案的合理配比为:泥浆浓度 10%(注入率 20%,即 1.8 L)、CMC 添加量 0.3 g。

这两种方案改良土体,土体渗透性明显减小,保水性得到明显改善,具有较好塑流性状态,但是对于土体的摩擦系数和粘聚力有一定程度的提高。通过换算得到两种添加剂合理配比在泥浆体系中的质量体积比分别为,PAM 为 0.18 g·L,CMC 为 0.17 g·L,两种添加剂消耗量相差不大;此外,PAM 的市场价格相对来说比 CMC 的市场价格便宜,故经济成本上使用 CMC 较好。综上所述,考虑改良效果和经济成本,使用高分子聚合物添加剂时,往低浓度膨润土泥浆中添加 CMC 组成泥浆体系对土体进行改良为最优方案。

在使用泡沫对土体进行改良时,土体的摩擦系数明显减小,保水性有一定的改善,但是当土体含水率较大时,泡沫有注不进情况,并且泡沫的最佳注入比同土体含水率有很大关系,土体越干,最佳泡沫注入比越大。

综上所述,分别使用膨润土基泥浆和泡沫改良土体各有利弊,若能针对某一特定土层,找到两者合理配比,对实际盾构施工有一定指导意义。

4 结论

对于本试验所使用砂卵石土样,作者进行了大量室内试验,通过对不同添加剂对土体改良效果进行分析对比,得到以下几点结论:

- 1) 使用膨润土基泥浆不添加高分子聚合物时,泥浆浓度较低时,土体保水性太差,当加入一定量的高分子聚合物时,土体保水性得到明显改善。
- 2) 使用高分子聚合物添加剂时,往低浓度膨润土泥浆中添加 CMC 组成泥浆体系对土体进行改良,改良土体塑流性较好,且经济成本较低。
- 3) 对土体进行改良,不管是膨润土还是高分子聚合物的添加量均存在一个限值,是把双刃剑,一旦超过这个限值反而增大土体摩擦角和粘聚力,不利于土体改良。
- 4) 使用泡沫改良土体时,土体的摩擦系数明显减小,保水性有一定的改善,泡沫的最佳注入比对土体的含水率比较敏感,随着含水率的增加,泡沫最佳注入比明显减小。但当含水率超过一定限值时,泡沫并不能对土体改良有明显的效果,有注不进的现象出现。

由于本文是分别考虑了膨润土基泥浆和泡沫对土体改良效果的影响,两者对土体的改良效果各有利弊,并没有把两者一起考虑,这也与现场盾构施工实际情况有些不符。针对这一局限性,本文作者将进行进一步的试验与研究。

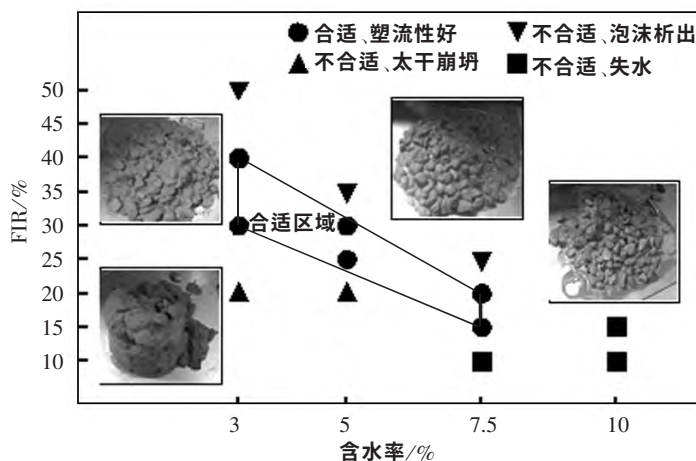


图 12 泡沫改良土体效果
Fig.12 Foam conditioning results

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(1): 73–77.
- [3] 姜厚停, 龚秋明, 杜修力. 卵石地层土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013(2): 284–292.
- [4] JANCSECZ 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.
- [5] 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.
- [6] 马连丛. 富水砂卵石地层盾构施工渣土改良研究[J]. 隧道建设, 2010(4): 411–415.
- [7] 姜厚停, 闫鑫, 龚秋明. 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(S1): 187–190.
- [8] 汪国锋. 北京砂卵石地层土压平衡盾构土体改良技术试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011: 63–65, 98–99.

Research on Soil Conditioning of Sand-pebble Layer in EPB Tunneling

Zhong Yi¹, Yang Longcai¹, Fang Shitao², Zhang Runlai¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Sinohydro Chengdu Construction Investment Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Many difficulties exist during EPB through the sand-pebble layer because of high soil friction, low flow and poor plastic flow characteristics, namely, the mechanical torque of the cutting head and screw conveyor is large, extraction soil of the screw conveyor is not smooth and tunnel face earth press is difficult to form. At present effective solution mainly focuses on adoption of additives such as bentonite slurry and foam to improve the plastic flow of the excavation soil. But the conditioning design is often based on the workers' experience or according to trial-and-error procedure at the work site, which has a certain irrationality and blindness. For this purpose, a series of laboratory tests were performed to evaluate and analyze the properties of additives and conditioned soils. Tests obtained the laboratory optimum ratio of additives and injection rate of bentonite slurry and foam. Through the comparative analysis of several conditioning solutions, the optimal solution was proposed.

Key words: earth pressure balance shields; soil conditioning; additive agent; sand-pebble layer

(责任编辑 王建华)