

高含水率盾构废弃泥浆固化及强度特性研究

孟凡伦

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 211800, 南京//工程师)

摘要 泥水盾构隧道施工会产生大量废弃泥浆,易引起环境污染等问题。为了提高废弃泥浆的力学性能,以济南某隧道泥水盾构施工过程产生的废弃泥浆为研究对象,研制了一种新型固化剂,以解决废弃泥浆再利用问题。在室内制作水泥固化土及新型固化土试样进行强度特性测试,并用扫描电镜对试样的微观结构和孔隙特征进行了研究。研究结果表明:当水泥掺量为15%时,新型固化土7 d抗压强度约为水泥固化土的3.5倍;外掺剂的最佳掺入比为水泥掺量的12%,可提高固化土的早期抗压强度及抗剪强度;新型固化土中生成了水化硅酸钙、水化铝酸钙等水化产物,形成了较好的骨架结构;废弃泥浆属于黏塑性宾汉流体,固化过程中发生了聚并和固化等复杂作用,逐渐向弹塑性流体过渡。

关键词 盾构隧道;废弃泥浆;固化剂;强度特性;微观机理

中图分类号 U455

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.029

Research on Solidification and Strength Characteristics of Shield Waste Mud with High Moisture Content

MENG Fanlun

Abstract A large amount of waste mud are produced in the slurry shield tunnels construction, easily causing problems such as environmental pollution. To improve the mechanical properties of the waste mud, taking the waste mud produced in the slurry shield construction of a tunnel in Jinan as research object, a new type of curing agent is developed to resolve the waste mud recycle issue. Strength characteristics test is carried out on indoor-produced samples of cement solidified soil and new type solidified soil, and the microstructure and pore characteristics of the samples are studied by SEM (scanning electron microscope). The results show that: when the cement content is 15%, the 7 d compressive strength of new type solidified soil is about 3.5 times that of cement solidified soil; the best ratio of the external admixture is 12% of the cement content, so that the early-stage compressive strength and the shear strength of the solidified soil will be improved. Hydration products are formed in the new type solidified soil, such as calcium silicate hydrate and calcium aluminate hydrate, which

forms a relatively good skeleton structure. The waste mud is a Bingham viscoplastic fluid with complex effects such as coalescence and solidification occurring during the solidification process, and gradually transforms to elastoplastic fluid.

Key words shield tunnel; waste mud; curing agent; strength characteristics; micro mechanism

Author's address China Railway 14th Bureau Group Large Shield Engineering Co., Ltd., 211800, Nanjing, China

近年来,我国各大城市大量修建水下隧道工程,泥水平衡盾构因高效、安全而成为水下隧道施工的首选^[1-2]。泥水平衡盾构施工时会产生高比重、高黏度的废弃泥浆,其中含有碳酸钠、膨润土等辅助造浆添加剂以及其他化学物质,如果处置不当,易产生环境污染等危害^[3]。

我国对工程废弃泥浆的处理方法由最原始的直接晾晒法逐步发展为较先进的机械处理法、絮凝沉淀法以及化学固化法^[4]。目前,工程废弃泥浆常用化学固化法,即加入特定的固化剂与泥浆中的水发生水化反应,进而降低泥浆的含水率,此外水化反应生成的产物还可以提高固化土的强度,有利于废弃泥浆的资源化再利用。

目前国内外学者对废弃泥浆固化剂已开展了不少研究。文献[5]针对高含水率废弃泥浆开展真空预压模型试验,研究了不同无机药剂对真空预压效果的影响。文献[6]将钢渣、水泥以及偏高岭土作为复合固化剂来固化连云港海洋软土,研究了含水率、塑性指数、龄期对固化土强度的影响。文献[7]采用水玻璃和石灰对硫酸盐盐渍土进行了固化,研究了不同含盐量条件下的抗压强度变化规律。文献[8]采用剑麻纤维对黏土进行加固,分析了纤维含量、干密度对黏土特性的影响。文献[9]研究了水泥掺入花岗岩残积土后土样的微观结构、渗透性和强度特性。文献[10]研究了纤维和石灰对黑棉土的影响,试验结果表明土体最佳含水率和

膨胀性降低,强度和干密度提高。文献[11]分析了偏高岭土地聚物对粉质黏土力学性质的影响,并从微观角度探讨土体强度提高的机理。综上可知,目前固化剂的研究主要针对钻井泥浆、淤泥等软弱土,对泥水盾构废弃泥浆的研究相对较少,且不完全适用。

本文以济南市济泺路某隧道工程为依托,通过不同掺加剂、掺入比、龄期的泥浆固化试验,测定无侧限抗压强度指标从而确定最优固化剂种类和掺入比,并对新研制的固化剂在抗压强度和抗剪强度方面的有效性进行了评估。此外,还对掺加剂掺量与各种力学性能的相关性进行了分析,并对扫描电镜观察结果进行了分析和讨论。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

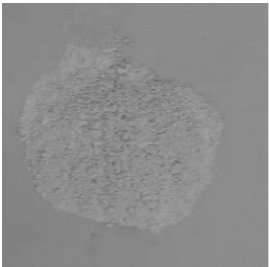
1.1.1 泥浆材料

试验采用的泥浆取自济南市济泺路某隧道工程施工现场沉淀池底部。济南济泺路某隧道盾构段长2 519 m,开挖直径15.74 m,隧道主要穿越可塑~硬塑粉质黏土层、多夹砂层及钙质结核层,地层中砂粒含量仅有14.83%,黏粉粒含量高达85.17%,且地层中存在的钙质结核颗粒较大。常规泥水分离技术无法分离粒径小于10 μm的黏土颗粒,脱水效率差,从而产生大量废弃泥浆。

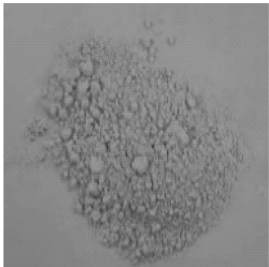
该工程废弃泥浆的基本性质如表1所示。颗粒大小主要集中于1 μm至100 μm之间,泥浆颗粒由黏粒、粉粒、细砂组成,颗粒级配曲线见图1。

表1 盾构废弃泥浆基本性质

Tab.1 Basic properties of shield waste mud				
天然含水率/%	密度/(g/cm ³)	漏斗黏度/s	黏粒含量/%	pH
102.6	1.2	24	37	7



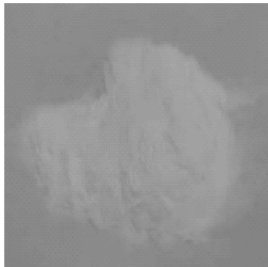
a) 生石膏



b) 生石灰



c) 硅粉



d) 吸水树脂

图2 试验所用外掺剂

Fig.2 Admixture used in the test

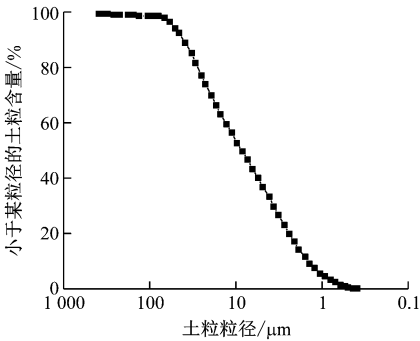


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Particle grading curve

1.1.2 固化剂材料

试验选择P.O 42.5级水泥固化剂及研制的新型固化剂进行对比分析,水泥成分如表2所示。研制的新型固化剂是在P.O 42.5水泥基础上,掺加生石膏、生石灰、硅粉、吸水树脂,如图2所示。生石膏是硫酸钙(CaSO₄)的二水合物,与废弃泥浆反应生成具有微膨胀特性的3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O^[12]。生石灰主要成分为氧化钙,泥浆中土颗粒表面的活性物质可以与氢氧化钙反应,生成Ca₅Si₆O₁₆(OH)·4H₂O和mCaO·nAl₂O₃,从而增强固化土的强度^[13]。硅粉颗粒粒径相对较小,表面较为光滑,可以填补土颗粒之间的孔隙,改善固化土的微结构;同时,由于硅粉具有较高的火山灰活性,因此将其加入泥浆中可以促进水化反应,提高固化土结构密度和强度^[14]。吸水树脂加入废弃泥浆后,可以促进水化反应的进行,从而增强固化土强度^[15]。

表2 水泥主要化学成分

Tab.2 Main chemical composition of cement							
化学成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
含量/%	21.95	57.83	5.41	4.29	2.37	0.12	0.59

1.2 试样制备

为配制质量为 m 的盾构废弃泥浆,需加入现场取得的质量为 m_1 的泥浆样本,并加入质量为 m_2 的水, m_1 及 m_2 的计算式为:

$$m_1 = \frac{m(1 + \omega_1)}{1 + \omega}$$
(1)

$$m_2 = \frac{m(\omega - \omega_1)}{1 + \omega}$$
(2)

式中:

- ω ——新鲜废弃泥浆含水率;
- ω_1 ——取样点废弃泥浆土含水率。

首先按设计比例称量泥浆的质量及水的质量,将两者混合,使用搅拌机搅拌至均匀,制成现场泥水盾构废弃泥浆。根据固化剂试验方案量取各组固化剂成分的质量,并放入烧杯中均匀搅拌,形成每组的固化剂。按照试验设定的水灰比,将固化剂、废弃泥浆进行充分混合,持续搅拌 10 min,待搅拌完成后便可以将得到的固化土制作成固化土样本。然后将其填入模具,向其中分层添加充分搅拌后的固化土,通过锤击敲打的方法,使固化土具有一定的密实度。后续加土时要对前一层土的表面进行刨毛处理,当全部土体处理完毕后,需要使试样保持水平,并进行养护。

1.3 试验方法

1.3.1 无侧限抗压强度试验

按表 3、表 4 所示测试方案,分别进行水泥型固化土和新型固化土无侧限抗压强度试验。

表 3 水泥固化土抗压强度试验方案

Tab.3 Test scheme of cement solidified soil compressive strength

试验编号	影响因素	因素水平
A1	水泥掺量	10%、12%、15%、18%、20%
A2	龄期	3 d、7 d、14 d、28 d、60 d

注:基准配比为水泥掺量 15%、含水率 100%,龄期 7 d。

表 4 新型固化土抗压强度试验方案

Tab.4 Test scheme of new type solidified soil compressive strength

试验编号	影响因素	因素水平
B1	水泥掺量	10%、12%、15%、18%、20%
B2	外掺剂掺量	7%、10%、12%、15%、18%
B3	龄期	3 d、7 d、14 d、28 d、60 d

注:基准配比为水泥掺量 15%、外掺剂掺量 12%、含水率 100%,龄期 7 d。

1.3.2 抗剪强度试验

分别设置水泥型固化土抗剪强度试验和新型固化土抗剪强度试验,进行外掺剂对固化土抗剪强度影响分析。水泥型固化土中水泥掺量为 15%,新型固化土中外掺剂掺量为 12%,泥浆基准含水率为 100%,养护时间为 7 d,分别垂向施加 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 四级荷载。

1.3.3 扫描电镜试验

在完成无侧限抗压试验后,选取固化土试样的正中区域,先将土样进行烘干处理,再将试样进行切样处理,试块厚度不超过 3 mm,且其中一面为新鲜断面。电镜扫描倍数分别设置为放大 500、2 500、5 000 倍等,观测土体颗粒、孔隙等微观结构。

2 结果与讨论

2.1 强度特性分析

2.1.1 抗压强度特性

2.1.1.1 水泥掺量影响

图 3 为固化土强度随水泥掺量的变化规律。随着水泥掺量从 10% 增加至 20%,水泥固化土和新型固化土的强度均以幂函数形式增长,新型固化土的强度增长速度远高于传统水泥固化土。

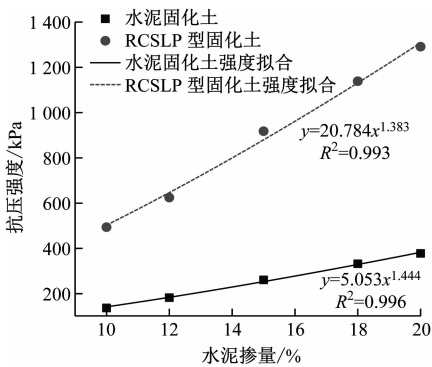


图 3 固化土强度随水泥掺量变化

Fig.3 Diagram of solidified soil strength changing with cement content

水泥固化土强度 R_1 、新型固化土强度 R_2 (R_1 和 R_2 单位为 kPa) 与水泥掺量 $\omega_{\text{水泥}}$ 的关系为:

$$R_1 = 5.053(\omega_{\text{水泥}})^{1.444}$$
(3)

$$R_2 = 20.784(\omega_{\text{水泥}})^{1.383}$$
(4)

当水泥掺量从 10% 增加至 20%,新型固化土抗压强度从原来的水泥固化土抗压强度的 3.64 倍减少至 3.42 倍。当水泥掺量为 15% 时,新型固化土抗压强度约为水泥固化土抗压强度的 3.50 倍。由

此可见,研制的新型固化剂对盾构废弃泥浆固化土强度具有显著增强作用。

为了更加清晰地表明不同因素掺量对固化土强度的影响水平,评估水泥在固化土强度增长过程中发挥的重要作用,本次研究引入强度比的概念。强度比为参加固化土后的抗压强度与该因素最低水平抗压强度的比值。图4为固化土抗压强度比随水泥掺量的变化规律。

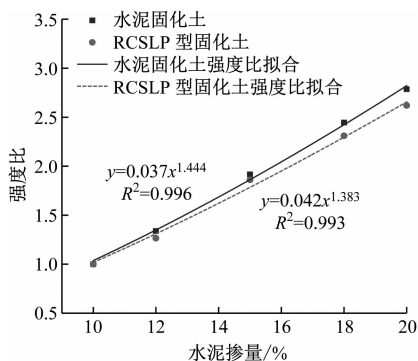


图4 固化土抗压强度比随水泥掺量变化

Fig. 4 Diagram of solidified soil compressive strength ratio changing with cement content

随着水泥掺量的增加,水泥固化土和新型固化土的强度比均增长。这说明外掺剂的加入改变了固化土早期强度从而使得固化土整体强度得到提升。当外掺剂加入后,水泥掺量为10%时,新型固化土7 d抗压强度已达到492 kPa。

2.1.1.2 外掺剂掺量

固化土强度随外掺剂掺量变化规律如图5所示。随着外掺剂掺量的增加,新型固化土的抗压强度 R_3 (单位为kPa)与外掺剂掺量 $\omega_{\text{外掺剂}}$ 的拟合关系式为:

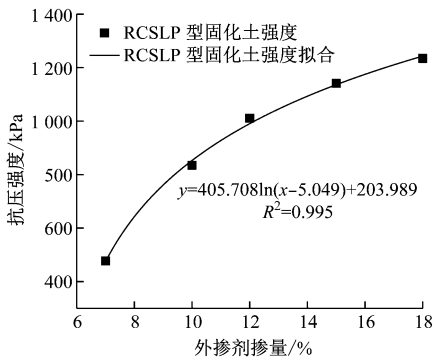


图5 固化土强度随外掺剂掺量变化

Fig. 5 Diagram of solidified soil strength changing with admixture content

$$R_3 = 405.708 \ln(\omega_{\text{外掺剂}} - 5.049) + 203.989$$

(5)

当外掺剂掺量从7%增加到18%,新型固化土的抗压强度从477 kPa提高至1 234 kPa,抗压强度增长2.58倍。当外掺剂为12%时,抗压强度达到1 000 kPa左右,其强度已满足实际需求;当继续增加外掺剂掺量时,抗压强度增幅较小。因此,从经济性考虑,外掺剂的最佳掺入比为水泥掺量的12%。

2.1.1.3 养护时间影响

图6为固化土抗压强度随龄期的变化规律。水泥固化土抗压强度 R_4 、新型固化土抗压强度 R_5 (R_4 和 R_5 的单位为kPa)与龄期 T (单位为d)的拟合关系式为:

$$R_4 = 32.311 \ln(T - 1.496) + 213.607 \quad (6)$$

$$R_5 = 136.162 \ln(T + 0.355) + 658.328 \quad (7)$$

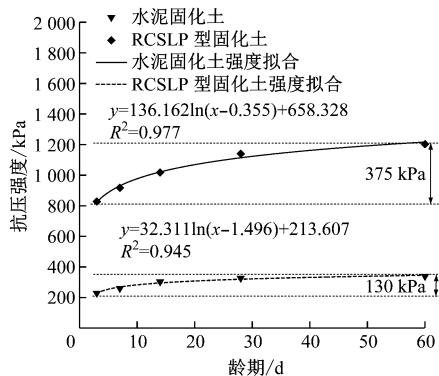


图6 固化土强度随龄期变化

Fig. 6 Diagram of solidified soil strength changing with curing time

当养护天数从3 d增加至60 d时,水泥固化土的抗压强度从228 kPa增长至358 kPa,而对于加入外掺剂的新型固化土来说,其抗压强度从828 kPa增长至1 203 kPa,说明外掺剂对于固化土的早期强度影响较大。

图7为固化土的抗压强度比随养护时间变化规律。新型固化土的抗压强度比低于水泥固化土的抗压强度比,表明外掺剂主要增强固化土的早期强度,进而提升其整体强度。

2.1.2 抗剪强度特性

图8为水泥固化土和新型固化土在基准条件下的抗剪强度,可得水泥固化土和新型固化土的抗剪强度分别为:

$$\tau_1 = 0.368 \sigma + 67.367 \quad (8)$$

$$\tau_2 = 0.394 \sigma + 78.833 \quad (9)$$

式中:

τ_1 ——水泥固化抗剪强度, kPa;

τ_2 ——新型固化抗剪强度, kPa;

σ ——垂直压力, kPa。

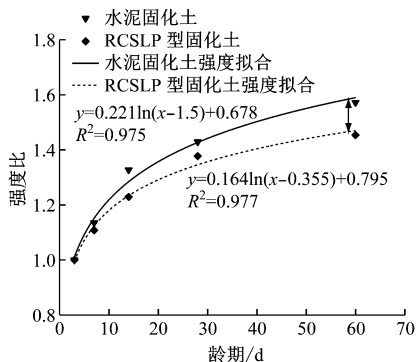


图7 固化土强度比随龄期变化

Fig. 7 Diagram of solidified soil strength ratio changing with curing time

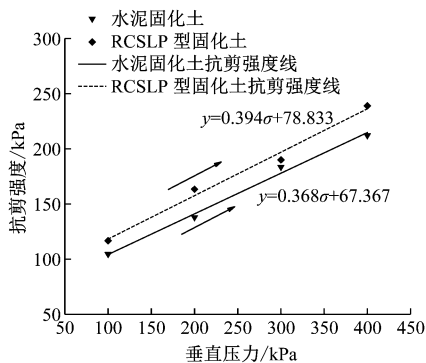


图8 固化土抗剪强度

Fig. 8 Shear strength of solidified soil

水泥固化土的黏聚力为 67.367 kPa,内摩擦角为 20.2° ;而加外掺剂的新型固化土的黏聚力为 78.833 kPa,内摩擦角为 21.5° 。这主要是因为外掺剂中的成分会促进凝胶物质生成,进而增强了固化土的胶结作用,但外掺剂对抗剪强度的促进作用较弱。

2.2 微观结构评价分析

图9、图10及图11分别为盾构废弃泥浆、传统水泥固化土和新型固化土的扫描电镜照片,观察它们在微观结构上的差异,选择原状土、水泥固化土及新型固化土在500、2500、5000倍下的微观结构进行分析。

2.2.1 表面形状特征

如图9所示,原状废弃泥浆主要由黏土颗粒和黏土絮凝体组成,在不同倍数下的扫描电镜图片里

土颗粒的骨架结构表面均较为光滑,因此盾构废弃泥浆在宏观上泥质较为细腻。同时由于黏土颗粒含量高,在长期浸水环境下,黏粒周围将吸附大量自由水,使土体强度快速降低,也是盾构废弃泥浆脱水难的主要原因。盾构废弃泥浆土中相邻土颗粒或土颗粒与矿物之间存在明显的孔隙,孔隙直径约 $5 \sim 10 \mu\text{m}$,形状大小各不相同,孔隙分布没有规律。因此,盾构废弃泥浆在天然干燥后表现强度较低。

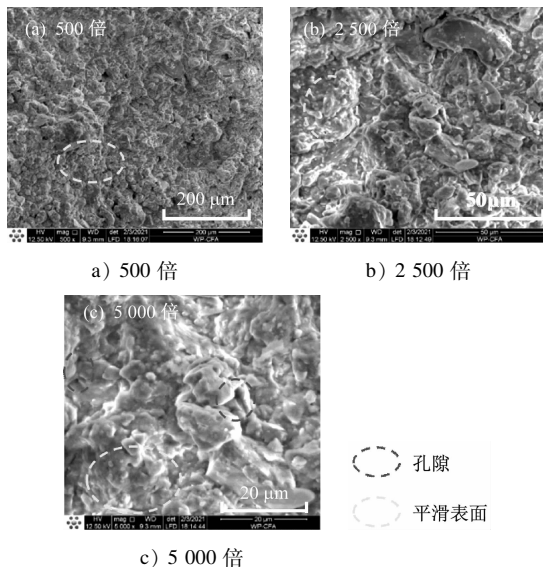


图9 盾构废弃泥浆扫描电镜图

Fig. 9 SEM of shield structure waste mud

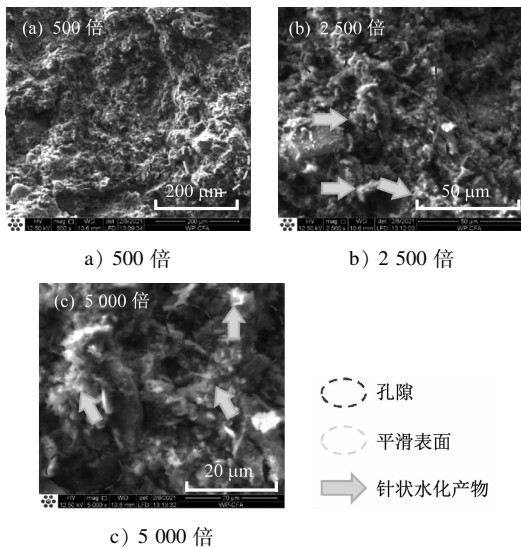


图10 水泥加固土扫描电镜图

Fig. 10 SEM of cement solidified soil

由图10可知,使用水泥作为单一固化剂处理后,废弃泥浆固化土的空间结构得到了改善。固化

土的孔隙比原状土少,同时部分孔隙被水化产物填充。加入水泥后土颗粒形态得到改善,随之生成部分针状水化产物,但无法填补较大的孔隙,只在较小孔隙中发育。因此,盾构废弃泥浆加入单一水泥固化剂后表现强度仍然较低。

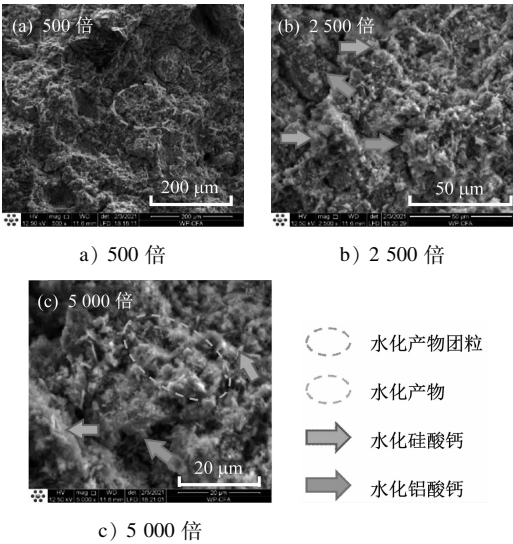


图 11 新型固化土扫描电镜图

Fig. 11 SEM of new type solidified soil

由图 11 可知,加入新型固化剂后盾构废弃泥浆发生了强烈的水化反应,原泥浆中的土颗粒被生成的水化产物包裹成团粒形状。由于水化反应,土颗粒表面由光滑变得较为粗糙,有新物质产生,其中以棉团状存在的针片状物质为水化铝酸钙,以絮状存在的物质为水化硅酸钙,它们改变了土颗粒间的空间结构,提高了骨架稳定性。

石灰与水生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 再与活性物质反应生成水化硅酸钙 $\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和水化铝酸钙 $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$; 同时生石膏可与水化铝酸钙生成钙矾石, 而且外掺剂中的硅粉也可促进水泥水化反应, 这些反应提高了新型固化土的强度。因此, 固化土经新型固化剂处理后水化产物生成量增加。

2.2.2 孔隙特征

对水泥固化土和新型固化土在 2 500 倍下的扫描电镜图片进行图像二值化处理,提取相应的孔隙数据进行分析,如图 12 所示。

文献[16]的孔隙分类方法,对固化土面孔率和孔隙丰度进行统计,分别如图 13、图 14 所示。由图 13 可知,水泥固化土中孔隙主要为大孔隙,其孔隙占比高达 87.05%,其余三种类型孔隙均占比较少。而新型固化土中孔隙主要为中孔隙,其占比为

40.45%,大孔隙占比为 37.53%。与传统水泥固化土相比,新型固化土中大孔隙占比显著下降,主要因为加入外掺剂后极大促进了水泥的水化反应,产生较多的水化产物和凝胶物质,充填了孔隙,这与扫描电镜现象一致。

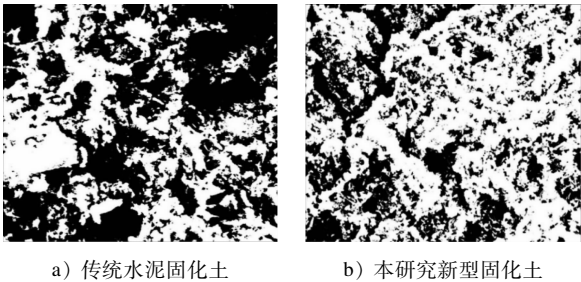


图 12 扫描电镜图二值化处理

Fig. 12 Binarization of SEM image

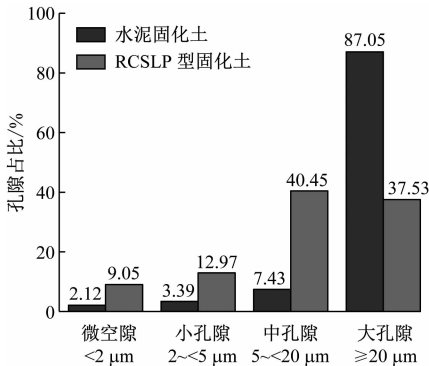


图 13 固化土面孔率

Fig. 13 Porosity of solidified soil

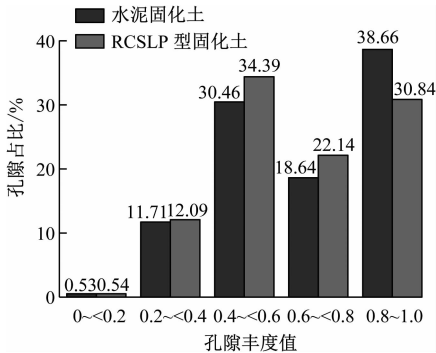


图 14 固化土孔隙丰度

Fig. 14 Pore fullness ratio of solidified soil

由图 14 可得,水泥固化土孔隙丰度占比大多分布在 0.8 ~ 1.0 和 0.4 ~ 0.6 区间,0.6 ~ 0.8 和 0.2 ~ 0.4 区间较少,0 ~ 0.2 区间最少。其中,水泥固化土近椭圆形孔隙占比为 60.81%、近圆形孔隙占比为 38.66%。而新型固化土孔隙丰度占比大多分布在 0.4 ~ 0.6 和 0.8 ~ 1.0 区间,其中,近椭圆形孔隙

占比为 68.62%、近圆形孔隙占比 30.84%。

数据分析表明,外掺剂加入后,试样近圆形占比下降 7.82%,而近椭圆形占比上升 7.81%,这说明土体孔隙虽然还是以近椭圆形为主,但部分孔隙呈现从近圆形向近椭圆形的发展趋势。

3 泥浆流体性质分析

废弃泥浆固化过程分为颗粒聚并-固化和固结两个阶段。其固化土物理化学反应如图 15 所示。废弃泥浆加入掺加剂后短时间内固化效果有限,泥浆仍为黏塑性流体,颗粒聚并与固化作用同时存在。随时间推移水化作用逐渐明显, CaSiO_3 和 $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ 越来越多,新型固化土含水率逐渐降低,直到固化土转化为弹塑性状态。

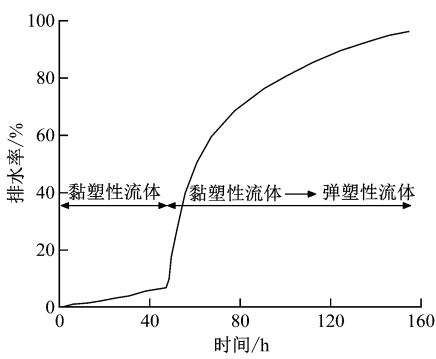


图 15 固化土物理化学状态反应图

Fig. 15 Reaction diagram of physical and chemical states of solidified soil

流体主要分类如图 16 所示。理想宾汉流体在低剪切速率下为直线,但泥浆在低剪切速率下呈曲线,所以泥浆是宾汉流体,但不是理想宾汉流体。其剪切应力与剪切速率之间的关系如式(10)所示:

$$\tau = \eta_p \frac{du}{dy} + \tau_s \tag{10}$$

式中:

η_p ——塑性黏度;

τ ——剪切应力,MPa;

τ_s ——极限静切应力,MPa;

u ——剪切速度,m/s;

y ——圆流道半径,m。

对于泥浆,流变参数 τ_s 、 η_p 同含水率和颗粒成分有关。

当外掺剂加入废弃泥浆后,主要发生聚并和固化作用。随着反应的继续进行,新型固化土含水率逐渐降低,密度和极限静切应力持续增加,流变特

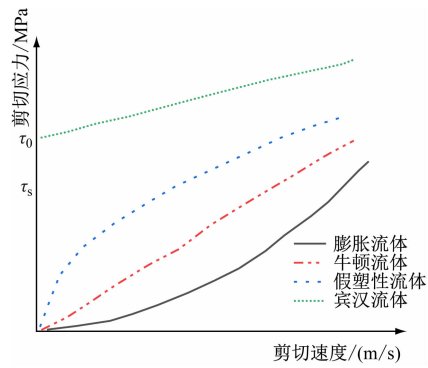


图 16 流体流动曲线

Fig. 16 Diagram of fluid flow curves

性由黏塑性流体状态逐渐向弹塑性状态过渡,整个流变状态主要从局部向整体扩散,此时应对新型固化土采用弹塑性固结理论分析。

4 结论

本文选取济南市济泺路某隧道工程的盾构隧道废弃泥浆为研究对象,以资源化利用为目标,对泥浆进行力学特性分析,得到以下结论:

1) 随着水泥量增加,新型固化土抗压强度的增长速度高于水泥固化土。当水泥掺量为 15% 时,新型固化土 7 d 抗压强度约为水泥固化土的 3.5 倍。

2) 外掺剂的最佳掺入比为水泥掺量的 12%,主要提高了固化土的早期抗压强度。同时外掺剂也可提高固化土的抗剪强度,但提高的幅度相比于抗压强度而言较小。

3) 从微观角度上看,新型固化土中生成了水化 CaSiO_3 、 $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ 等水化产物和凝胶物质,填充了土颗粒间的部分孔隙,降低了土中的孔隙含量,使固化后土体孔隙分布更加均匀,形成了较好的骨架结构。

4) 废弃泥浆属于黏塑性宾汉流体,固化过程中发生了聚并作用和固化作用等复杂作用,逐渐向弹塑性流体过渡。

参考文献

[1] 洪开荣,冯欢欢. 近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考 (2019—2020 年) [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (8):1259.
HONG Kairong, FENG Huanhuan. Development and thinking of tunnels and underground engineering in China in recent 2 years (from 2019 to 2020) [J]. Tunnel Construction, 2021, 41 (8):1259.
[2] 肖明清. 我国水下盾构隧道代表性工程与发展趋势 [J]. 隧道

- 建设(中英文),2018,38(3):360.
- XIAO Mingqing. Representative projects and development trend of underwater shield tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(3): 360.
- [3] 房凯,张忠苗,刘兴旺,等. 工程废弃泥浆污染及其防治措施研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(增刊2):238.
- FANG Kai, ZHANG Zhongmiao, LIU Xingwang, et al. Pollution of construction waste slurry and prevention measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 238.
- [4] 朱伟,闵凡路,吕一彦,等. “泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学,2013, 34(11): 3041.
- ZHU Wei, MIN Fanlu, LYU Yiyan, et al. Subject of 'mud science and application technology' and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3041.
- [5] 武亚军,顾赛师,骆嘉成,等. 无机药剂对工程废浆药剂真空预压的影响[J]. 中国公路学报,2018,31(9):34.
- WU Yajun, GU Saishuai, LUO Jiacheng, et al. Effect of inorganic chemicals on vacuum preloading with flocculation of construction waste slurry[J]. China Journal Highway and Transport, 2018,31(9):34.
- [6] LIU L, ZHOU A, DENG Y, et al. Strength performance of cement/slag-based stabilized soft clays[J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 909.
- [7] LYU Q, JIANG L, MA B, et al. A study on the effect of the salt content on the solidification of sulfate saline soil solidified with an alkali-activated geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 68.
- [8] 李贺勇,张洪东,李海峰,等. 剑麻加筋黏土的强度试验研究[J]. 矿产与地质,2021, 35(5): 1005.
- LI Heyong, ZHANG Hongdong, LI Haifeng, et al. Experimental study on strength of sisal reinforced clay[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(5): 1005.
- [9] ZHAO Y, CHEN X, WEN T, et al. Experimental investigations of hydraulic and mechanical properties of granite residual soil improved with cement addition[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318:126016.
- [10] THARANI K, SELVAN G P, SENBAGAM T, et al. An experimental investigation of soil stabilization using hybrid fibre and lime[J]. Materials Today: Proceedings, 2021(3):380.
- [11] LUO Y, MENG J, WANG D, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer stabilized silty clay[J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 125662.
- [12] 金靖,李俊虎,李雪刚. 生石膏加固软土的试验研究[J]. 建筑技术,2014,45(4):349.
- JIN Jing, LI Junhu, LI Xuegang. Test research on gypsum reinforced soft soil[J]. Architecture Technology, 2014,45(4):349.
- [13] 原奇,申向东,薛慧君,等. 水泥-生石灰对铬污染土固化效果及微观孔隙特征的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(6):1141.
- YUAN Qi, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Study on curing effect and micropore characteristics of chromium-polluted soil under the coupling effect of cement and quicklime[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018,37(6):1141.
- [14] 常锋. 混凝土中硅粉的作用机理[J]. 中国新技术新产品, 2019(13): 37.
- CHANG Feng. Action mechanism of silica powder in concrete[J]. New Technology & New Products of China, 2019(13): 37.
- [15] 余云祥,张义,夏世斌. 高吸水性树脂研究进展[J]. 化工新型材料,2014, 42(1): 10.
- YU Yunxiang, ZHANG Yi, XIA Shibin. Research advance of high water-absorptive resin[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(1): 10.
- [16] 高国瑞. 近代土质学[M]. 北京: 科学出版社,2012: 131-133.
- GAO Guorui. Neoteric soil geotechnolgy[M]. Beijing: Science Press, 2012: 131-133.
- [17] 黄新,宁建国,许晟,等. 固化土孔隙液 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度对强度的影响[J]. 工业建筑,2006,36(7): 19.
- HUANG Xin, NING Jianguo, XU Sheng, et al. Influence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentration in the pore solution on strength increasing of the stabilized soil[J]. Industrial Construction, 2006, 36(7): 19.
- [18] 宁建国,黄新,许晟. 土样 pH 值对固化土抗压强度增长的影响研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(1): 98.
- NING Jianguo, HUANG Xin, XU Sheng. Effect of pH value of soil on strength increasing of the stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(1): 98.

(收稿日期:2022-05-07)

(上接第151页)

- [5] 尹力明,赵华,刘俊艳. 中低速磁浮列车动力学特性测试方法初探[J]. 上海电气技术,2011, 4(1): 1.
- YIN Liming, ZHAO Hua, LIU Junyan. Preliminary method of dynamics detecting in M & L speed maglev train[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2011, 4(1): 1.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中低速磁浮交通轨排通用技术条件: CJ/T 413—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for low and medium speed maglev train transport rail row: CJ/T 413—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [7] 周晓璐. 中低速磁悬浮轨排结构力学性能分析与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- ZHOU Xiaolu. Mechanical analysis and test research of low speed maglev rail structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [8] 朱晓嘉,赵春发,庞玲,等. 低速磁浮交通轨道结构强度计算与分析[J]. 铁道标准设计,2012, 56(10): 4.
- ZHU Xiaojia, ZHAO Chunfa, PANG Ling, et al. Strength calculation and analysis on track structure for low-speed maglev transit[J]. Railway Standard Design, 2012, 56(10): 4.

(收稿日期:2021-09-18)