

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.261



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



南京江底盾构施工废弃砂土在同步注浆中再利用率适用性

刘慧刚¹, 丁建文¹, 吉锋², 高鹏举¹, 廖赵胜¹

(1. 东南大学交通学院, 南京 210096; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029)

摘要: 依托南京长江新济洲供水廊道项目泥水盾构工程, 针对江底粉细砂地层和岩石地层中泥水盾构施工产生的废弃砂土, 研究其在盾构同步注浆材料中再利用率适用性。通过改变砂土地层弃砂的粒径分布, 研究其对砂浆性能的影响; 针对岩石地层产生的废弃砂土, 研究其颗粒形状对砂浆性能的影响, 并对岩层弃砂制备同步砂浆进行配比优化。结果表明: 该工程砂土层弃砂可直接代替原配比中的砂进行再利用, 岩层弃砂通过调整配比亦能满足工程要求; 增大砂层弃砂细度模数和砂粒含量可改善砂浆的流动性, 但砂土黏粒含量过大会使砂浆流动性变差、凝结时间缩短、强度降低; 岩层弃砂颗粒表面越粗糙, 所制备砂浆流动性越差, 凝结时间越短。合适配比下, 盾构施工废弃砂土可应用于同步注浆, 砂浆配比应随废弃砂土粒径分布和颗粒形状的变化做出适当调整。

关键词: 泥水盾构; 废弃砂土; 岩层弃砂; 同步注浆; 资源化利用

中图分类号: TU744 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)06-0134-09

Applicability of recycling of shield waste sand as synchronous grouting during shield construction under the Nanjing Yangtze River

LIU Huigang¹, DING Jianwen¹, JI Feng², GAO Pengju¹, LIAO Zhaosheng¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co., Ltd., Nanjing 210029, P. R. China)

Abstract: Based on the slurry shield engineering of Xinjizhou water supply corridor project in Nanjing Yangtze River, the applicability of reusing waste sand as shield synchronous grouting materials was studied, which was produced by slurry shield construction in silty fine sand layer and rock stratum. Through changing the particle size distribution of abandoned sand in sandy soil layer, its influence on the performance of mortar was examined; furthermore, the influence of the particle shape of rock stratum waste sand on the performance of mortar was investigated, and the proportioning optimizing of synchronous mortar prepared from rock stratum waste sand was discussed. The results indicated that the sand layer waste sand can be used to replace the original sand directly, and the rock stratum waste sand can also satisfy the engineering requirements by adjusting the

收稿日期: 2021-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51978159); 国家科技支撑计划(2015BAB07B06)

作者简介: 刘慧刚(1996-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: lhgseu@163.com。

丁建文(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: jwding@seu.edu.cn。

Received: 2021-09-29

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978159); National Science and Technology Support Program (No. 2015BAB07B06)

Author brief: LIU Huigang (1996-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: lhgseu@163.com.

DING Jianwen (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: jwding@seu.edu.cn.

proportion; the fluidity of mortar improves with the increase of fineness modulus and sand content of sand layer waste sand, but excessive clay content results in decreased fluidity, shorter setting time and lower strength of mortar; the rougher the surface of rock stratum waste sand particles, the worse the fluidity and shorter the setting time. The waste sand of shield construction can be used for synchronous grouting under the appropriate proportioning, but the mortar proportioning should be adjusted appropriately with the change of particle size distribution and particle surface shape of waste sand.

Keywords: slurry shield; waste sand; rock stratum waste sand; synchronous grouting; recycling

近年来,随着生态文明建设的有力推进,施工废弃泥浆渣土无害化处理及资源化利用成为必然趋势^[1-6]。泥水盾构施工废弃泥浆渣土是指盾构刀盘掘削地层产生的渣土与泥浆混合后输送到地面的废弃物,经泥水分离系统处理后分离成泥浆和废弃渣土,其中部分泥浆进入泥浆循环系统再利用,多余泥浆则成为废弃泥浆,而废弃渣土又可根据掘进地层的不同分为废弃黏土和废弃砂土等。

目前,关于废弃砂土在壁后注浆中的再利用已有不少研究。钟小春等^[7]提出将南京长江隧道施工排放的粉细砂用于壁后注浆中,并研究了各种渣土情况下浆液性质的变化。林文书等^[8]、许可^[9]研究了不同颗粒组成、不同塑性指数的盾构泥砂对同步注浆材料工作性能、力学性能及抗水分散性能的影响。Wang^[10]以粉细砂地层的废弃砂土作为盾构同步注浆的砂源,并探讨了不同配比条件下的砂浆性能。陈喜坤等^[11]、张亚洲等^[12]探究了砂的细度模数对同步砂浆基本性能的影响,进而提出了弃砂再利用的方法。Zhou等^[13]、李雪等^[14]探究了废弃砂土作为壁后注浆砂源的可行性,同时研究了优化砂浆性能的方法。Kato等^[15]提出了一种将废弃渣土与水泥混合后用作回填土的方法。Xu等^[16]将盾构开挖出的黏质粉土作为壁后注浆中砂的替代物,提出了黏质粉土的再利用方案,并对砂浆进行了微观分析。郝彤等^[17]分析了地铁盾构渣土掺量及水胶比对砂浆性能的影响,探讨了盾构渣土制备同步注浆材料的可行性。史庆涛等^[18]采用致密堆积设计思想,开展了筛分渣土、黄砂与胶结材的紧密堆积密度试验研究。目前关于废弃砂土在壁后注浆中的研究主要集中在可行性验证、废弃砂土对砂浆性能的影响、砂浆配比优化等方面,关于废弃砂土自然变异性对砂浆性能影响的研究还不足。另外,目前大部分研究都是针对粉细砂地层产生的废弃砂,缺少针对岩石地层所产生废弃砂的相关研究。

笔者依托南京长江新济洲过江供水廊道项目泥水盾构工程,针对该工程粉细砂地层产生的废弃砂土,研究其在同步砂浆中再利用的适用性,同时,考虑粉细砂地层的自然变异性,研究废弃砂土粒径

分布对砂浆性能的影响;针对该工程岩石地层产生的废弃砂土,研究其颗粒形状特性对砂浆性能的影响,并利用多元回归分析和多目标规划进行配比优化,得到满足本工程施工要求的同步砂浆,验证了岩层弃砂制备同步砂浆的可行性。

1 工程背景

1.1 工程概况

南京长江新济洲过江供水廊道项目采用泥水盾构施工,隧道单线单洞总长1 945 m,盾构管片外径6.2 m,埋深约10.77~51.53 m,江面至江底水深约33 m。隧道地质条件复杂,自江宁始发井到新济洲接收井依次穿越444 m软土地层、25 m软硬不均地层、600 m闪长玢岩层、57 m软硬不均地层、819 m砂土地层,如图1所示。该工程盾构机穿越岩石地层和砂土地层时会产生大量的废弃砂土,如将其运用于同步砂浆中,将产生巨大的经济和环保效益。

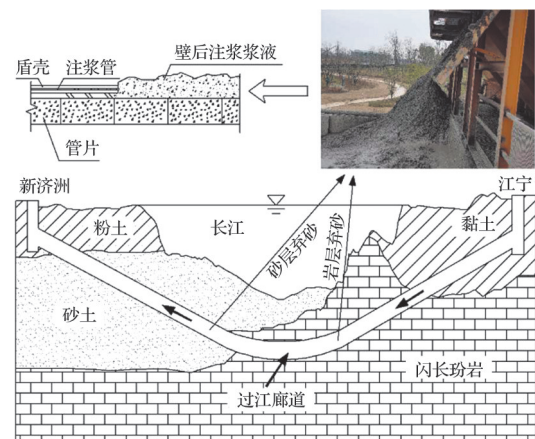


图1 南京长江新济洲供水管线廊道项目

Fig. 1 Xinjizhou water supply corridor project in Nanjing Yangtze River

1.2 浆液性能要求

盾构壁后注浆作为盾构隧道施工中一项关键技术,其主要目的在于及时填充盾尾空隙,控制由地层损失引起的地表沉降^[19-21],这就要求注浆浆液具有良好的输送性能、充填性能和强度性能。结合工程特点并参考相关文献^[21-25],初步确定工程施工

所用同步砂浆的性能指标要求为:流动度为 20~25 cm,稠度为 10~13 cm,凝结时间为 6~9 h,泌水率不大于 5%,体积收缩率不大于 5%,3、7、28 d 抗压强度分别不低于 0.5、1.0、2.5 MPa。

2 试验材料、试样制备及测试方法

2.1 试验材料

壁后同步砂浆采用单液硬性浆,其主要成分为水泥、粉煤灰、膨润土、砂,为保证试验所得结果适用于工程施工,试验所用原材料均取自工程现场。

水泥为散装 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰为句容市东升公司生产的二级粉煤灰;膨润土为江苏润通膨润土科技有限公司生产的钠基膨润土。

工程现场使用的砂,简称现场河砂。现场河砂颗粒均小于 4.75 mm,细度模数为 0.30,砂粒含量为 71.1%,粉粒含量为 22.0%,黏粒含量为 6.9%,不均匀系数为 3.11,曲率系数为 1.87,属于均粒土,级配不良,颗粒分布曲线见图 2。

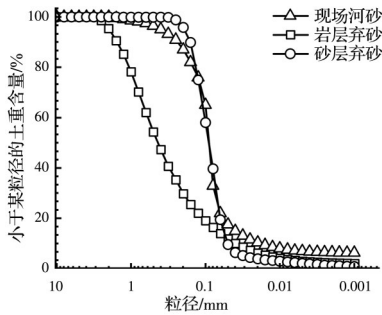


图 2 试验用砂颗粒分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of test sand

粉细砂地层产生的废弃砂土,简称砂层弃砂。砂层弃砂颗粒均小于 4.75 mm,细度模数为 0.13,砂粒含量为 65.4%,粉粒含量为 32.6%,黏粒含量为 2.1%。不均匀系数为 2.01,曲率系数为 0.97,属于均粒土,级配不良,颗粒分布曲线见图 2。

岩石地层产生的废弃砂土,简称岩层弃砂,为盾构在闪长玢岩中掘进时产生的渣土过 4.75 mm 筛后所得。细度模数为 1.94,砂粒含量为 84.1%,粉粒含量为 12.8%,黏粒含量为 3.1%。不均匀系数为 15.33,曲率系数为 1.76,属不均粒土,级配良好,颗粒分布曲线见图 2。

2.2 试样制备及测试方法

砂浆的制备流程:将膨润土与水混合并搅拌均匀,制备出一定膨水比的泥浆;静置 24 h 让其充分膨化;在泥浆中加入水泥、粉煤灰和砂,充分搅拌后即得到试验用砂浆。制备完成后,迅速进行砂浆的流动度和稠度测试,取部分砂浆分别测试泌水率与凝结时间,剩余砂浆用于制作无侧限抗压强度试

块,待养护后测试砂浆的强度及体积收缩率。各项性能指标测试方法如下。

1)稠度、凝结时间和无侧限抗压强度测试参考《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)。

2)流动度测试采用《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)中的截锥圆模测试方法。

3)泌水率测试参考《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)。

4)体积收缩率通过测量 28 d 抗压强度试样的长、宽、高尺寸确定,试样实际体积与试模标准容积的差值与标准容积的比值即为体积收缩率。

3 砂层弃砂再利用研究

依据本工程浆液性能要求,利用现场河砂,通过前期试配得到满足要求的基础配比为粉灰比 1.5、膨水比 0.067、水胶比 0.9、胶砂比 0.75,即试验组 S1。然后用砂层弃砂直接全部代替基础配比中的现场河砂,分析砂层弃砂制备的砂浆性能是否满足工程要求,在此基础上,通过对砂层弃砂筛分得到不同粒径分布的砂样,研究废弃砂土粒径分布对砂浆性能的影响。各试验组试验结果见表 1。

3.1 砂层弃砂适用性分析

表 2 给出了砂层弃砂和现场河砂所制备砂浆的性能测试结果。相比于现场河砂制备的砂浆,砂层弃砂制备的砂浆具有更好的流动性、更短的凝结时间和更高的强度,虽然泌水率和体积收缩率更大,但均在 5% 以下。因此,在工程中可以直接用粉细砂地层的废弃砂土全部代替同步砂浆中的砂,制备出的砂浆能够满足工程要求。

3.2 细度模数对砂浆性能的影响

将砂层弃砂筛分得到细度模数分别为 0.1、0.5、1.0 的砂样,并控制砂样的砂粒含量和黏粒含量不变,砂样颗粒分布曲线如图 3 所示。

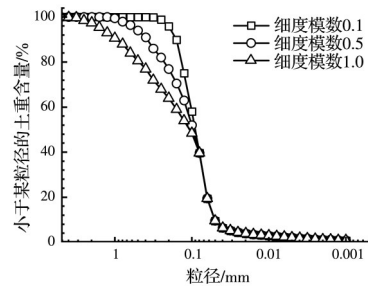


图 3 不同细度模数的砂样颗粒分布曲线

Fig. 3 Particle distribution curves of sand samples with different fineness modulus

图 4 给出了砂浆流动性、凝结时间、泌水率与细度模数之间的关系曲线,从图中可以看出,在砂粒含量和黏粒含量相同的情况下,随着细度模数的增

表 1 砂层弃砂再利用试验结果

Table 1 Test results of reusing sand layer waste sand

试验组	砂样	细度模数	砂粒含量/%	黏粒含量/%	流动度/cm	稠度/cm	凝结时间/h	泌水率/%	体积收缩率/%	无侧限抗压强度/MPa		
										3 d	7 d	28 d
S1	现场河砂	0.3	71.07	7.43	21.5	10.3	8.9	1.71	3.07	0.98	1.59	3.93
S2	砂层弃砂	0.1	65.36	2.07	23.2	11.1	8.7	3.56	3.61	1.28	2.11	4.78
S3	砂样 1	0.5	65.36	2.07	24.3	11.9	9.3	3.38	3.70	1.24	2.18	4.80
S4	砂样 2	1.0	65.36	2.07	26.1	12.8	10.1	2.45	3.96	1.19	2.01	4.58
S5	砂样 3	0.1	45.00	3.29	22.2	10.0	7.6	2.92	4.00	1.28	2.54	4.75
S6	砂样 4	0.1	85.00	0.90	26.4	13.2	11.2	3.40	4.24	1.24	2.33	4.55
S7	砂样 5	0.1	65.36	10.00	19.6	8.8	5.6	1.03	4.22	1.49	2.15	4.70
S8	砂样 6	0.1	65.36	20.00	17.4	6.7	3.0	0.10	2.62	1.33	2.38	3.77

表 2 砂层弃砂与现场河砂制备砂浆性能比较

Table 2 Comparison between the properties of mortar prepared by sand layer waste sand and site river sand

砂样	流动度/cm	稠度/cm	凝结时间/h	泌水率/%	体积收缩率/%	3 d 强度/MPa	7 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa
现场河砂	21.5	10.3	8.9	1.71	3.07	0.98	1.59	3.93
砂层弃砂	23.2	11.1	8.7	3.56	3.61	1.28	2.11	4.78

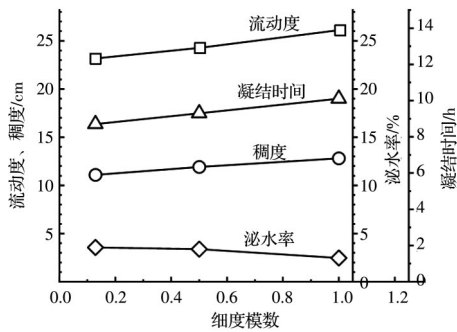


图 4 细度模数对砂浆流动性、凝结时间、泌水率的影响

Fig. 4 Effect of fineness modulus on fluidity, setting time and bleeding rate of mortar

大,砂浆的流动度、稠度和凝结时间均呈线性增大趋势,而泌水率稍有降低。图 5 为细度模数对砂浆无侧限抗压强度的影响,可以看到,砂浆的强度随着细度模数的增大略有降低,但变化幅度较小。

定量来看,随着细度模数从 0.1 增大到 1.0,砂浆的流动度、稠度、凝结时间分别增加了 12.7%、

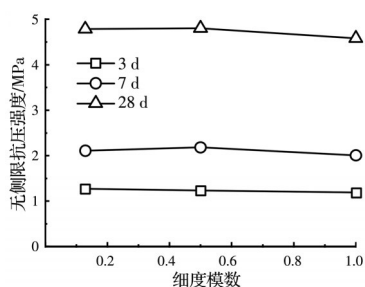


图 5 细度模数对砂浆强度的影响

Fig. 5 Effect of fineness modulus on mortar strength

15.3%、16.1%,而泌水率、3 d 强度、7 d 强度、28 d 强度则分别降低了 31.2%、6.7%、4.6%、4.2%,其中流动性与凝结时间的增加幅度相差不大。

流动性和凝结时间的增加主要与砂浆中颗粒之间的接触面积有关。随着细度模数的增大,砂浆中的粗颗粒增多,等效于将原先砂浆中的部分细颗粒凝聚成粗颗粒,减小了颗粒之间的接触面积,从而一方面降低了颗粒之间的摩擦力,使砂浆流动性增大,另一方面减少了砂浆中水泥水化反应的接触面积,延长了砂浆的凝结时间。

综上所述,细度模数主要影响砂浆的流动性、凝结时间和泌水率,对强度影响不大。在利用粉细砂地层产生的废弃砂土时,如果砂土细度模数过小,可能会出现流动性不足的情况,而细度模数过大则可能出现凝结时间过长的问題。

3.3 砂粒含量对砂浆性能的影响

将砂层弃砂筛分得到砂粒含量分别为 45%、65%、85% 的砂样,并控制砂样的细度模数和粉黏比不变,砂样颗粒分布曲线如图 6 所示。

图 7 为砂浆流动性、凝结时间、泌水率随砂粒含量变化的关系曲线,从图中可以看出,在细度模数和粉黏比相同的情况下,随着砂粒含量的增大,砂浆的流动性、凝结时间和泌水率均呈增大趋势。图 8 给出了不同砂粒含量下的砂浆无侧限抗压强度,随着砂粒含量的增大,砂浆的 3、7、28 d 强度均有所下降,但下降幅度较小。除泌水率外,各项性能的变化趋势都与细度模数引起的变化趋势相似。

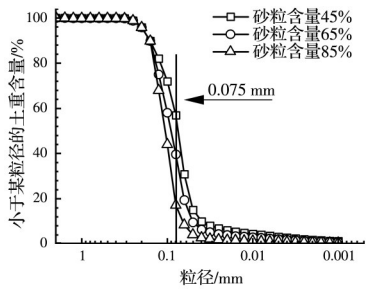


图 6 不同砂粒含量砂样颗粒分布曲线

Fig. 6 Particle distribution curve of sand samples with different sand content

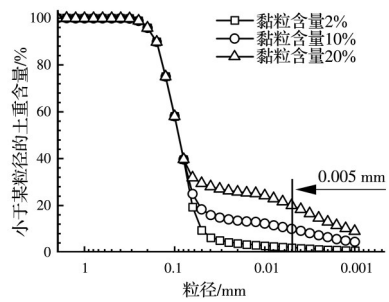


图 9 不同黏粒含量砂样颗粒分布曲线

Fig. 9 Particle distribution curve of sand samples with different clay content

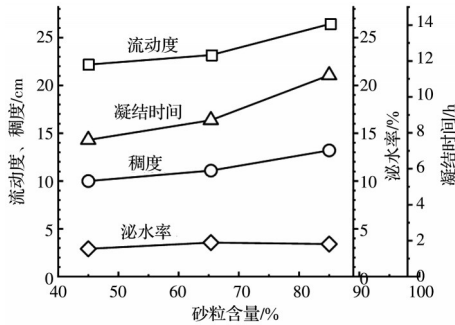


图 7 砂粒含量对砂浆流动性、凝结时间、泌水率的影响

Fig. 7 Effect of sand content on fluidity, setting time and bleeding rate of mortar

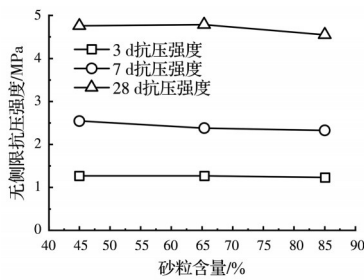


图 8 砂粒含量对砂浆强度的影响

Fig. 8 Effect of sand content on strength of mortar

随着砂粒含量从 45% 增加到 85%，砂浆的流动性、稠度、凝结时间和泌水率分别增加了 19.1%、32.0%、47.4%、16.5%，而 3、7、28 d 强度分别降低了 3.0%、8.4%、4.3%。其中，流动性的增加幅度比凝结时间小，这与细度模数对砂浆性能的影响有所不同，换言之，通过调整砂粒含量，可以使砂浆具有良好流动性的同时获得更短的凝结时间。

3.4 黏粒含量对砂浆性能的影响

控制砂样的细度模数和砂粒含量不变，通过掺入现场废弃黏土中的粉黏粒得到黏粒含量分别为 2%、10%、20% 的砂样，砂样颗粒分布曲线如图 9 所示。

图 10 为砂浆流动性、凝结时间、泌水率随黏粒含量变化的关系曲线，从图中可以看出，在细度模数和砂粒含量相同的情况下，随着废弃砂土黏粒含量的增大，砂浆中被黏粒吸附的水分子增多，自由

流动的水分子减少，使砂浆的流动性、稠度和泌水率显著降低，当黏粒含量超过 10% 后，砂浆的流动性将不满足要求。另外，随着废弃砂土的黏粒含量从 2% 增加到 20%，砂浆的凝结时间从 8.7 h 缩短至 3 h，而本工程中砂浆的凝结时间应控制在 6~9 h 之间，当废弃砂土的黏粒含量大于 10% 时，砂浆的凝结时间将低于 6 h，无法满足工程要求。因此，当废弃砂土黏粒含量较高时，砂浆的流动性将变差，凝结时间过短，需对配比进行调整。

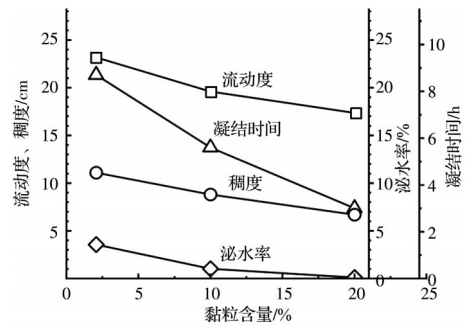


图 10 黏粒含量对砂浆流动性、凝结时间、泌水率的影响

Fig. 10 Effect of clay content on fluidity, setting time and bleeding rate of mortar

图 11 给出了不同黏粒含量下砂浆无侧限抗压强度，随着黏粒含量的增大，砂浆的 3、7 d 强度稍有增大，而 28 d 强度呈下降趋势。随着黏粒含量从 2% 增加到 20%，砂浆的 3、7 d 强度分别增大了 4.6% 和 12.8%，而 28 d 强度则降低了 21.1%。因此，在回收利用废弃砂土时应注意监测废弃砂土的黏粒含量，当黏粒含量过高时，砂浆的强度可能不满足要求。

4 岩层弃砂再利用研究

4.1 岩层弃砂适用性分析

用岩层弃砂代替基础配比中的现场河砂，测试得到砂浆性能如表 3 所示。由表 3 可知，岩层弃砂制备的砂浆在流动性、稠度、泌水率、体积收缩率等

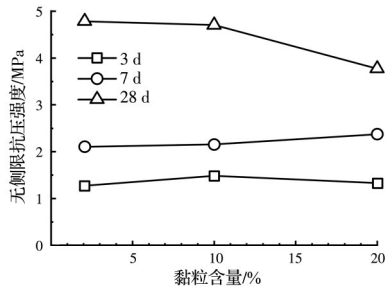


图 11 黏粒含量对砂浆强度的影响

Fig. 11 Effect of clay content on strength of mortar

方面均优于基础配比,3 d 强度及 7 d 强度与基础配

表 3 岩层弃砂与现场河砂制备砂浆性能比较

Table 3 Comparison between the properties of mortar prepared by rock stratum waste sand and site river sand

砂样	流动度/cm	稠度/cm	凝结时间/h	泌水率/%	体积收缩率/%	3 d 强度/MPa	7 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa
现场河砂	21.5	10.3	8.9	1.71	3.07	0.98	1.59	3.93
岩层弃砂	24.6	11.9	4.5	0.74	2.51	1.09	1.79	3.18

4.2 颗粒形状对砂浆性能的影响

考虑到岩层弃砂是由刀盘破岩而成,砂颗粒表面粗糙,与通常的河砂有所区别,因此,开展了砂土颗粒形状对砂浆性能影响的研究。试验方法如下:将磨圆度较好的河砂筛分后代替岩层弃砂中的砂粒部分,而粉粒和黏粒部分则继续使用岩层弃砂,从而得到与岩层弃砂粒径分布一致但颗粒形状不同的砂样,然后利用这两种砂样分别配制砂浆,比较不同砂浆的性能差异。

两种砂样的颗粒形状分别如图 12、图 13 所示,由图可见,岩层弃砂各粒组颗粒表面粗糙,棱角分明,磨圆度较差,形状不规则;而河砂表面光滑、富有光泽,颗粒形状较为圆润,质地均匀透明。

两种砂样所制备砂浆的性能如表 4 所示。从表 4 中可以看出,在砂土颗粒分布曲线完全一致的

比相差不大,28 d 强度比基础配比稍低,但满足工程要求,而凝结时间远远短于基础配比,只有 4.5 h,无法满足工程需求。对比岩层弃砂和现场河砂的粒径分布情况可以发现,岩层弃砂的细度模数更大,砂粒含量更多,黏粒含量更低,因此,岩层弃砂制备的砂浆流动性更好,这与砂土粒径分布对砂浆性能影响的研究结果一致,但凝结时间却大幅缩短,这是因为受砂土颗粒形状的影响,故对砂颗粒表面形状对砂浆性能的影响进行探讨。

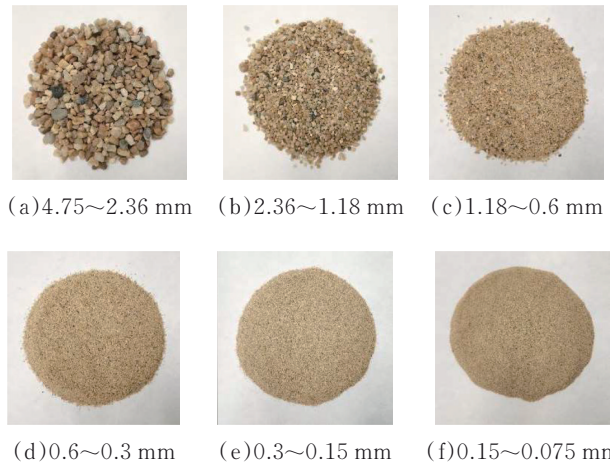


图 13 河砂各粒组照片

Fig. 13 Images of each grain group of river sand

情况下,砂土的颗粒形状也会对砂浆性能产生较大影响,与河砂制备的砂浆相比,岩层弃砂制备的砂浆流动度、稠度、凝结时间、泌水率和体积收缩率更小,强度则相差不大。这是由于砂颗粒表面粗糙,增大了砂浆中颗粒之间的接触面积,使得摩擦力增大、自由流动的水分子减少,从而引起砂浆流动性和泌水率降低,接触面积的增大同时也增大了水泥水化反应的面积,故凝结时间大大缩短。

4.3 配比优化

由于岩层弃砂颗粒表面粗糙,制备的砂浆凝结速度快,不满足工程要求,需要通过调整配比来延长凝结时间,但砂浆凝结时间的延长往往伴随着砂浆流动度和稠度的增大,又由于岩层弃砂细度模数较大,制备的砂浆流动度和稠度本身就很大,若凝

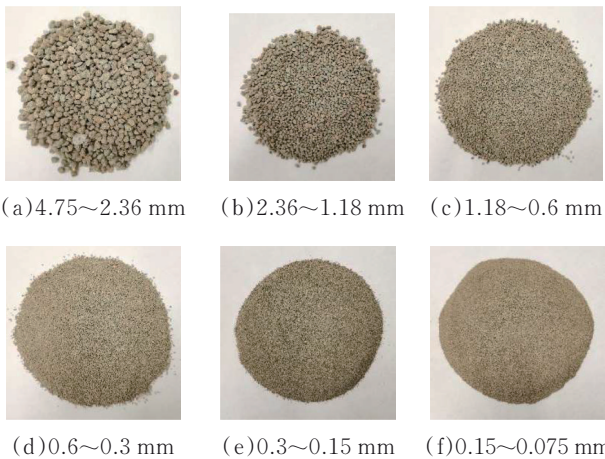


图 12 岩层弃砂各粒组照片

Fig. 12 Images of each grain group of rock stratum waste sand

表 4 岩层弃砂与河砂制备砂浆性能比较

Table 4 Comparison between the properties of mortar prepared by rock stratum waste sand and river sand

砂样	流动度/cm	稠度/cm	凝结时间/h	泌水率/%	体积收缩率/%	3 d强度/MPa	7 d强度/MPa	28 d强度/MPa
岩层弃砂	24.6	11.9	4.5	0.74	2.51	1.09	1.79	3.18
河砂	28.2	13.4	10.7	3.35	3.51	1.13	1.78	3.06

结时间延长,砂浆流动度和稠度很可能超过工程要求,这就给砂浆配比调整造成了困难。因此,设计了以粉灰比、膨水比、水胶比和胶砂比为自变量的

配比优化试验,拟通过多元回归分析和多目标规划得到满足本工程要求的配合比。各试验组因素取值及试验结果如表5所示。

表 5 岩层弃砂再利用配比优化试验组

Table 5 Optimization test group for reuse of rock stratum waste sand

试验组	粉灰比	膨水比	水胶比	胶砂比	流动度/cm	稠度/cm	凝结时间/h	泌水率/%	体积收缩率/%	无侧限抗压强度/MPa		
										3 d	7 d	28 d
Y1	1.50	0.067	0.90	0.75	24.5	11.9	4.5	0.74	2.51	1.09	1.79	3.57
Y2	2.00	0.067	1.00	0.70	24.5	12.2	5.1	0.69	3.70	0.86	1.18	1.99
Y3	2.00	0.050	0.70	0.70	17.6	6.1	1.9	0.15	0.83	1.70	2.75	5.15
Y4	3.00	0.100	0.80	1.00	21.3	10.1	4.8	1.24	1.97	0.70	1.11	2.60
Y5	4.00	0.150	0.90	0.60	16.4	5.6	2.6	0.10	1.70	0.64	0.77	1.44
Y6	1.50	0.200	1.00	0.90	16.2	6.7	4.2	0.20	2.58	0.82	1.55	3.52
Y7	2.50	0.250	1.10	0.50	13.1	3.1	2.4	0.05	2.63	0.71	0.84	1.41
Y8	3.50	0.300	1.20	0.80	11.5	3.3	5.8	0.06	2.77	0.34	0.46	0.74

4.3.1 多元回归分析

根据表5的试验结果,利用SPSS软件进行多元回归分析,回归模型采用二次型多元回归模型,得到粉灰比 x_1 、膨水比 x_2 、水胶比 x_3 、胶砂比 x_4 与流动度 F_L 、稠度 F_C 、凝结时间 F_T 、泌水率 F_B 、体积收缩率 F_S 、3 d强度 F_3 、7 d强度 F_7 、28 d强度 F_{28} 之间的回归方程为

$$F_L = -26.042 - 78.749x_2 + 53.181x_3 + 43.548x_4 - 38.563x_3x_4 \quad (1)$$

$$F_C = -28.829 - 58.76x_2 + 40.382x_3 + 33.165x_4 - 25.83x_3x_4 \quad (2)$$

$$F_T = -8.012 - 1.255x_1 - 16.162x_2 + 8.207x_3 + 7.346x_4 + 1.748x_1x_3 \quad (3)$$

$$F_B = -5.245 + 0.116x_1 + 10.228x_2 + 2.209x_3 + 5.554x_4 - 22.005x_2x_4 \quad (4)$$

$$F_S = -1.737 - 12.262x_2 + 10.002x_3 - 11.215x_4 + 8.221x_4^2 \quad (5)$$

$$F_3 = 9.594 - 0.66x_1 - 13.156x_3 - 0.873x_4 + 0.075x_1^2 + 5.989x_3^2 \quad (6)$$

$$F_7 = 18.044 - 1.849x_1 - 25.758x_3 - 0.682x_4 + 0.246x_1^2 + 12.039x_3^2 \quad (7)$$

$$F_{28} = 30.948 - 3.415x_1 - 43.861x_3 + 0.458x_1^2 + 20.061x_3^2 \quad (8)$$

对上述模型进行拟合度评价及显著性评价,评价结果如表6所示。表中 R 为相关系数; R^2 为决定系数; \bar{R}^2 为校正决定系数。其中,决定系数 R^2 反映了拟合值与真值之间的差异程度,其值越接近于1,表示回归方

程的拟合程度越好。 F 为显著性检验值; P 值反映模型的显著程度,当 $P < 0.05$ 时,表示回归模型显著,当 $P < 0.01$ 时,表示回归模型非常显著。

表 6 模型评价

Table 6 Model evaluation

因变量	R	R^2	\bar{R}^2	F	P
流动度	0.983	0.967	0.923	21.972	0.015
稠度	0.982	0.965	0.918	20.554	0.016
凝结时间	0.996	0.992	0.973	52.401	0.019
泌水率	0.997	0.994	0.978	63.783	0.016
体积收缩率	0.992	0.984	0.962	45.363	0.005
3 d强度	0.996	0.993	0.976	56.751	0.017
7 d强度	0.998	0.996	0.985	91.768	0.011
28 d强度	0.983	0.966	0.921	21.375	0.015

由表6可知,各回归方程的 R^2 均接近于1,说明各回归方程的拟合值与真值之间差异较小,方程能够较好地拟合性能与各因素之间的关系,而各回归方程的 P 值均小于0.05,说明模型具有较高的可信度。

4.3.2 多目标规划与试验验证

以各项性能的回归方程为目标函数,将性能要求上下限设为约束条件,采用Design-Expert. 8.05b软件的Optimization模块进行多目标规划求解,即可获得多组满足要求的配比。择优得到岩层弃砂

制备砂浆的优化配比为:粉灰比1.5,膨水比0.15,水胶比1.15,胶砂比0.9。将该配比代入回归方程中,得到优化配比各项性能的预测值如表7所示。由表7可以看出,各项性能均满足要求。

根据优化配比配制砂浆,并对砂浆性能进行验

证性测试,得到砂浆各项性能实测值如表7所示。由表7可见,经过配比优化后砂浆各项性能均处于要求范围内,说明经过配比调整后,岩层弃砂制备的同步注浆浆液能够满足本工程要求,验证了利用岩层弃砂制备同步砂浆的可行性。

表7 优化配比的试验验证

Table 7 Experimental verification of optimum proportioning

数值	流动度/cm	稠度/cm	凝结/h	泌水率/%	体积收缩率/%	3 d强度/MPa	7 d强度/MPa	28 d强度/MPa
预测值	22.6	11.9	6.7	1.03	4.49	0.78	1.51	2.95
实测值	21.4	11.1	6.9	0.72	3.94	0.77	1.22	2.73
性能要求	20~25	10~13	6~9	≤5.0	≤5.0	≥0.5	≥1.0	≥2.5

5 结论

开展了盾构施工砂土层弃砂和岩层弃砂在同步注浆材料中的再利用研究,得到以下主要结论:

1)粉细砂地层所产生的废弃砂可直接代替原配比中的砂,制备出的砂浆能够满足本工程浆液性能要求。

2)砂层弃砂的粒径分布对砂浆性能影响较大。增大细度模数和砂粒含量可提高砂浆的流动度和稠度,延长砂浆的凝结时间,对砂浆强度的影响则不大;增大黏粒含量可缩短砂浆凝结时间和减小泌水率,但会降低砂浆的流动性和强度。

3)岩石地层所产生的废弃砂土无法直接应用于本工程的同步注浆,但经过配比的优化调整,岩层弃砂也能制备出满足性能要求的砂浆,表明岩层弃砂与砂层弃砂一样具有再利用的价值。

4)岩层弃砂的颗粒形状主要对砂浆的流动性和凝结时间有较大影响,对砂浆强度影响不大。岩层弃砂颗粒表面相对较粗糙,制备出的砂浆流动性更差,凝结时间更短。

5)不同粒径分布和颗粒形状的砂制备得到的砂浆性能差异较大,因此,在对废弃砂土进行再生利用时,应随地层的变化及时检测废弃砂土的粒径分布和颗粒形状,同时对砂浆的配比进行相应调整或者掺入河砂对废弃砂土的级配进行改良。

参考文献

[1] 楼春晖,张忠苗,房凯. 泥浆压滤处理技术理论分析及试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 57-61.
LOU C H, ZHANG Z M, FANG K. Theoretical and experimental analysis on the pressure filtration technology in slurries treatment [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34 (6): 57-61. (in Chinese)

[2] 郭卫社,王百泉,李沿宗,等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40 (8): 1101-1112.

GUO W S, WANG B Q, LI Y Z, et al. Status quo and prospect of harmless disposal and Reclamation of shield muck in China [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(8): 1101-1112. (in Chinese)

[3] HE S Y, LAI J X, WANG L X, et al. A literature review on properties and applications of grouts for shield tunnel [J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117782.

[4] 郭康鹰,高宝玉,岳钦艳. 造纸污泥的资源化综合利用研究现状与展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 118-131.

GUO K Y, GAO B Y, YUE Q Y. Research status and prospect of the comprehensive utilization of paper mill sludge [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4): 118-131. (in Chinese)

[5] 陈蕊,杨凯,肖为,等. 工程渣土的资源化处理处置分析[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 22-26.

CHEN R, YANG K, XIAO W, et al. Analysis on recycling treatment and disposal of engineering slag [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(3): 22-26. (in Chinese)

[6] 徐杨,阎长虹,许宝田,等. 城市河道淤泥资源化利用的烧结制砖试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(Sup1): 125-129, 157.

XU Y, YAN C H, XU B T, et al. Resource utilization of the dredged material of urban river to manufacture sintered brick [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(Sup1): 125-129, 157. (in Chinese)

[7] 钟小春,左佳,刘泉维,等. 地层中粉细砂在盾构壁后注浆中的再利用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(Sup1): 293-296.
ZHONG X C, ZUO J, LIU Q W, et al. Reuse of

- excavated fine sand for back grouting of shield tunnelling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Sup1): 293-296. (in Chinese)
- [8] 林文书, 王红喜, 彭碧辉, 等. 不同地层盾构泥砂对制备同步注浆材料性能影响研究[J]. *隧道建设*, 2013, 33(9): 715-719.
- LIN W S, WANG H X, PENG B H, et al. A study on producing synchronous grouting materials using muck collected in shield tunneling in different strata [J]. *Tunnel Construction*, 2013, 33(9): 715-719. (in Chinese)
- [9] 许可. 盾构泥砂高性能注浆材料的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- XU K. The research and application on high-performance grouting made by shield sediment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [10] WANG T. Experiment of shield synchronized grouting slurry using waste sand in sand layer [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 638/639/640: 1600-1605.
- [11] 陈喜坤, 朱伟, 王睿, 等. 南京纬三路过江通道弃砂在壁后注浆材料中的利用[J]. *隧道建设*, 2015, 35(11): 1176-1181.
- CHEN X K, ZHU W, WANG R, et al. Application of waste sand in backfilling grouting in shielding tunneling: case study on weisanlu river-crossing tunnel in Nanjing [J]. *Tunnel Construction*, 2015, 35(11): 1176-1181. (in Chinese)
- [12] 张亚洲, 夏鹏举, 魏代伟, 等. 南京纬三路过江通道泥水处理及全线路废弃土再利用技术[J]. *隧道建设*, 2015, 35(11): 1229-1233.
- ZHANG Y Z, XIA P J, WEI D W, et al. Slurry treatment and waste muck recycling use in construction of weisanlu Yangtze River crossing tunnel in Nanjing [J]. *Tunnel Construction*, 2015, 35(11): 1229-1233. (in Chinese)
- [13] ZHOU S H, LI X, JI C, et al. Back-fill grout experimental test for discharged soils reuse of the large-diameter size slurry shield tunnel [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(3): 725-733.
- [14] 李雪, 黄琦, 王培鑫, 等. 粉细砂地层泥水盾构渣土回收利用及性能优化[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2): 299-307.
- LI X, HUANG Q, WANG P X, et al. Back-fill grouting and proper performance for discharged soils reuse of the slurry shield tunnel on sand stratum [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(2): 299-307. (in Chinese)
- [15] KATO M, WADA H, INO N, et al. Reuse method for construction surplus soil or earth and sand, involves setting water cement ratio of slurry, and adding viscosity reduction agent to slurry: JP2001354960A [P]. 2001-12-25.
- [16] XU J, XIAO C, WU H N, et al. Reuse of excavated clayey silt in cement - fly ash - bentonite hybrid back-fill grouting during shield tunneling [J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1017.
- [17] 郝彤, 李鑫箫, 冷发光, 等. 郑州市地铁粉质黏土层中盾构渣土制备同步注浆材料特性[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(3): 53-62.
- HAO T, LI X X, LENG F G, et al. Synchronous grouting materials for shield slag in silty clay of Zhengzhou metro [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(3): 53-62. (in Chinese)
- [18] 史庆涛, 武文清, 陆野. 含废弃泥浆和渣土同步砂浆配比优化及性能改善分析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(4): 101-105.
- SHI Q T, WU W Q, LU Y. Mix proportion optimization and performance improvement analysis of synchronous mortar with waste mud and residue [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2020, 42(4): 101-105. (in Chinese)
- [19] MAO J H, YUAN D J, JIN D L, et al. Optimization and application of backfill grouting material for submarine tunnel [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120281.
- [20] WANG S M, HE C, NIE L, et al. Study on the long-term performance of cement-sodium silicate grout and its impact on segment lining structure in synchronous backfill grouting of shield tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 92: 103015.
- [21] 张凤祥. 盾构隧道施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- ZHANG F X. Shield tunnel construction manual [M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [22] 盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程: T/CECS 563—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Technical specification for simultaneous grouting material in shield projects: T/CECS 563—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [23] ZHANG C, YANG J S, FU J Y, et al. Recycling of discharged soil from EPB shield tunnels as a sustainable raw material for synchronous grouting [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 121947.
- [24] CUI Y, TAN Z S. Experimental study of high performance synchronous grouting materials prepared with clay [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2021, 14(6): 1362.
- [25] PANG C R, WEN X. Experiment of slurry shield tunnel recycling waste sand in sand-pebble layer [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 919/920/921: 1104-1109.