

外加剂对注浆材料即时和延时性能的研究

吴熙^{1,2*}, 任梦博¹, 刘映晶³, 魏新江¹, 丁玉琴¹

(1. 浙大城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 城市基础设施智能化浙江省工程研究中心, 浙江 杭州 310015;
3. 中天建设集团有限公司, 浙江 杭州 310009)

摘要: 为了优化软弱土地层注浆材料性能, 本文设置 13 组浆液基准配合比, 根据试验结果和工程经验确定浆液的基准配合比; 通过研究外加剂对浆液即时、延时性能的影响规律, 得出浆液配合比, 并得到浆液延迟注浆优化方案。结果表明: 减水剂和缓凝剂均能延缓浆液的即时凝结速度以及流动度损失速度, 其中缓凝剂增大浆液初凝时间的效果更为显著, 随延迟时间增长, 浆液的流动度和初凝时间持续下降, 终凝时间增长。为合理控制浆液的流动性和凝结时间, 建议浆液的减水剂掺量尽量在水泥掺量的 4.2% 以下, 缓凝剂掺量在 0.08%~0.10% 区间内。同时在延迟注浆不超过 4 h 的情况下, 可以通过再次添加减水剂的方法恢复浆液性能。

关键词: 注浆材料; 配比优化; 即时性能; 延时性能; 外加剂; 软弱土层

中图分类号: TU53

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)04-0295-08

Study on immediate and delayed properties of grouting materials with admixtures

WU Xi^{1,2*}, REN Meng-bo¹, LIU Ying-jing³, WEI Xin-jiang¹, DING Yu-qin¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Engineering Research Center of Intelligent Urban Infrastructure, Hangzhou 310015, Zhejiang, China;

3. Zhongtian Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310009, Zhejiang, China)

Abstract: In order to optimize the performance of grouting materials in soft soil layer, 13 groups of benchmark mix proportion of slurry were set in this paper. And the benchmark mix proportion of slurry is determined according to the experimental results and engineering experience. By studying the influence laws of admixtures on the immediate and delayed properties of slurry, the slurry mix proportion and the optimal scheme of delayed grouting of slurry are obtained. The results show that both water reducing agent and retarder can delay the immediate setting speed and fluidity loss speed of slurry. And the effect of retarder on increasing the initial setting time of slurry is more significant. With the increase of delay time, the fluidity and initial setting time of slurry continued to decline, and the final setting time increased. In order to reasonably control the fluidity and setting time of the slurry, it is suggested that the dosage of water reducing agent of the slurry should be less than 4.2% of the cement dosage and the dosage of coagulant should be within the range of 0.08%-0.10%. At the same time, if the delayed grouting does not exceed 4 hours, the performance of the slurry can be restored by adding water reducing agent again.

Key words: grouting material; ratio optimization; immediate performance; delayed performance; admixture; soft soil

0 引言

盾构开挖地铁隧道已成为目前城市地铁修建

的首选方法, 在盾构开挖隧道的过程中, 必须辅助同步注浆来填充隧道管片与开挖界面之间的环状空隙。同步注浆是隧道施工的重要工序, 有

收稿日期: 2022-01-18

基金项目: 浙江省自然科学基金探索项目 (LY20E080006)。

作者简介: 吴熙 (1985—), 女, 博士, 副教授, 主要从事新型水泥基材料和结构的耐久性研究。E-mail: wuxi@zucc.edu.cn。

利于均匀管片受力、防止管片上浮、控制地面沉降,故必须加强同步注浆的效果^[1-2]。注浆效果除了与注浆设备有关,还受注浆材料与注浆填充土层影响。

众多学者开展注浆材料性能研究,并提供了相关理论基础。周麟等^[3]通过正交设计基础材料配比,探讨分析了水泥、粉煤灰等对浆液流动性、稠度、强度等的影响规律,提供了同步浆液优化的方向。MAO等^[4]利用正交试验进行了粉灰比等对浆液性能的影响研究,为水下隧道注浆提供了水泥砂浆配合比。SHA等^[5]研究了高效减水剂与粉煤灰等材料的协同机理,讨论了浆液中减水剂的合适掺加量。AZADI等^[6]研究了三乙醇胺、膨润土等外加剂对浆液泌水率、凝结时间等性能的影响规律,确定了每种成分的最佳用量。赵青等^[7]研究了羟丙基甲基纤维素对浆液流动度、凝结时间等的影响规律,提高了水泥基浆液的抗水分散性能。仇佳琳等^[8]研究了减水剂复配方案对水泥浆液流动度、凝结时间等性能的影响,发现复配方案均能延长浆液的凝结时间,增大其流动度。唐超等^[9]研究发现减水剂的减水和分散作用会使浆液的凝结时间小幅增加,黏度和结石率下降,减水剂能够改善浆液的流动特性。

上述试验仅研究了浆液基准配比参数和外加剂对浆液即时性能的影响,没有考虑特定地层以及延迟注浆对注浆浆液的影响。故本文将调配适用于软土地区的浆液配比,研究减水剂和缓凝剂对浆液即时性能和延时性能的影响规律,提出注浆延迟一定时间后浆液恢复性能的方案,并得到适用于软土地区的浆液配比,为工程注浆提供即时和延时性能的优化方案,为软土地区注浆工程提供参考。

1 试验设计

1.1 试验材料与方法

试验用注浆材料采用水泥、砂、膨润土、粉煤灰和水,其中水泥采用河北产的P.O.42.5的普通硅酸盐水泥,粉煤灰采用济南黄台电厂的F级粉煤灰,细砂采用了最大粒径为6 mm的细砂,其细度模数为1.51,膨润土采用浙江湖州安吉益国厂家生产的纳基膨润土。缓凝剂使用羟基乙叉二膦酸(HP),

减水剂使用醛酮缩合物(AKC)。

1.2 基准试验组

郝向光等^[10]、钟小春等^[11]、李发勇^[12]采用的软土地区浆液水胶比均在1.0左右,符合周麟等的正交实验结果^[3],故本试验组固定水胶比1.0,采用的配合比如表1所示,表中采用的是各材料的相对质量比。

表1 浆液试验组配比
Table 1 Slurry ratio

序号	水泥	粉煤灰	砂	水	膨润土
1	1.0	6.7	16.4	7.7	1.24
2	1.0	6.7	17.4	7.7	1.24
3	1.0	7.2	17.4	7.7	1.24
4	1.0	6.7	17.4	7.7	1.60
5	1.0	7.2	17.4	7.7	1.60
6	1.0	6.0	17.4	7.7	1.24
7	1.0	6.0	17.4	7.7	1.60
8	1.0	6.7	17.4	7.7	2.00
9	1.0	6.7	17.6	7.7	1.60
10	1.1	7.4	17.4	7.7	1.60
11	1.0	7.0	17.4	7.7	1.40
12	1.0	7.0	17.4	7.7	1.60
13	1.0	6.7	17.4	8.0	1.60

1.3 基准配合比确定

软土地区注浆要求浆液注入土层后要有一定的早期强度,便于及时支撑周围土体,控制周围土体的位移,同时为保证注浆的流畅性,浆液的流动度和稠度也要控制在一定范围内。根据现有的注浆工程实践经验,软土地区要求浆液的流动度要在25~40 cm以内,稠度在12~13 cm区间范围内,浆液的早期抗压强度大于0.5 MPa,28 d抗压强度大于1.0 MPa,初凝时间控制在4 h,终凝时间控制在10 h,泌水率也应不大于3%^[13-15]。

根据以上软土地区注浆浆液要求,对上述实验结果进行对比,如表2所示,发现浆液的初凝时间基本维持在1~2.5 h左右,不满足注浆要求,需要加入缓凝剂来调节。根据浆液流动性能要求,综合考虑浆液泌水率、早期强度等要求,首选第8组作为基准配合比,水泥:粉煤灰:砂:水:膨润土=1.0:6.7:17.4:7.7:2.0。

表 2 浆液试验组性能值
Table 2 Slurry properties of test groups

序号	流动度/cm	稠度/cm	重度/(kg/m ³)	泌水率/%	3 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa	初凝时间/h	终凝时间/h
1	46	13.20	1 900	2.37	0.48	0.89	2.20	10.50
2	42	13.40	1 905	2.13	0.56	1.34	2.20	10.50
3	34	12.80	1 935	1.70	0.65	1.56	2.50	10.75
4	37	13.30	1 935	1.67	0.61	1.20	1.67	10.00
5	38	13.40	1 915	1.77	0.69	1.30	1.83	9.50
6	48	14.00	1 910	1.71	0.38	0.90	1.98	9.45
7	32	13.00	1 905	1.39	0.58	1.10	2.07	9.00
8	30	12.95	1 922	0.67	0.74	1.50	2.00	11.00
9	33	13.20	1 918	0.79	0.62	1.40	1.83	10.00
10	41	13.15	1 925	0.94	0.72	1.30	1.33	10.25
11	32	13.10	1 930	1.80	0.61	1.50	1.17	10.00
12	27	13.00	1 915	1.36	0.54	1.50	1.33	10.25
13	31	12.75	1 910	1.47	0.51	1.50	1.50	11.00

2 浆液配合比优化

2.1 外加剂试验

根据上节的基准配合比研究,发现在无外加剂的情况下,基准配合比在满足流动性、强度等条件下,无法满足浆液的初凝时间要求,需要加入外加剂来调配。本节将以缓凝剂和减水剂对浆液性能的影响研究为基础,以浆液的流动性和凝结时间作为首要协调对象,试验分析外加剂对两者的影响规律,优化浆液性能。试验配比如表 3 所示。

表 3 外加剂试验组
Table 3 Admixture amount %

序号	缓凝剂 掺量	减水剂 掺量	序号	缓凝剂 掺量	减水剂 掺量
A-0	0.00	0	B-1	0	1.8
A-1	0.08	0	B-2	0	2.4
A-2	0.10	0	B-3	0	3.0
A-3	0.12	0	B-4	0	3.6
A-4	0.14	0	B-5	0	4.2
A-5	0.16	0	B-6	0	4.8

注: 计量方式为外加剂占水泥质量的百分比。

2.2 结果分析

根据以上实验结果,本文整理了两种外加剂对浆液性能的影响。图 1 为缓凝剂对浆液 3 h 内流动度经时损失的影响关系曲线,对比 A-0 与 A-1 等

曲线图,加入缓凝剂的浆液 3 h 内任意时刻的流动度均大于未掺加缓凝剂的浆液流动度,且 A-1、A-2、A-3、A-4、A-5 组在 3 h 的流动度比 A0 组分别提高了 16.7%、22.2%、27.8%、27.8%、27.8%,对比发现,缓凝剂掺量越高,浆液的流动度损失曲线越平缓,表明随缓凝剂掺量的增大,浆液的流动度损失越慢,但所有曲线的起点基本一致,说明缓凝剂只能一定程度上延缓浆液对流动度损失,不能提高浆液的初始流动度。

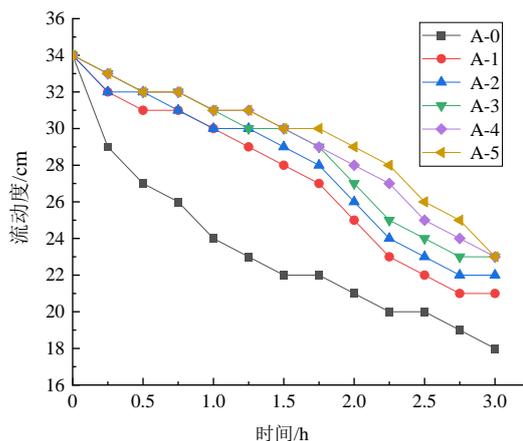


图 1 缓凝剂对浆液流动度经时损失的影响

Fig. 1 Effect of retarder on the loss of slurry fluidity with time

在不同掺量缓凝剂的作用下,浆液在不同时刻测得的凝结阻力和凝结时间分别如图 2 和图 3 所示。图 2 显示,缓凝剂的掺加能够显著减小曲线的斜率,且随着其掺量的增大,曲线上扬的斜率越小,即缓凝剂能够延缓浆液凝结的速度,其掺量越大,

要达到同样硬度需要更多的时间。A-4 和 A-5 组测量力达到 15 N 时需要的时间已超过 15 h。

从图 3 可以看出：缓凝剂掺量小于 0.08% 时，浆液的终凝时间、初终凝时间差增长小于 0.5 h，此时浆液的凝结过程并没有明显的延缓。为了保证浆液的初凝时间和终凝时间分别保持在 3~4 h 和 10 h 左右，建议缓凝剂掺量控制在 0.08%~0.10% 区间内。缓凝剂延缓浆液凝结速度的机理为：缓凝剂与水泥净浆中的 Ca^{2+} 结合形成微溶性的 $Ca_{3.5}(C_3H_7O_{13}NP_3)$ 螯合物，并包裹在未水化的水泥颗粒表面，阻止水泥与水的接触，从而延缓水泥进一步水化，所以当缓凝剂掺量过小，后续生成物不能较好包裹水泥颗粒，故此时缓凝剂延缓作用不明显^[16]。

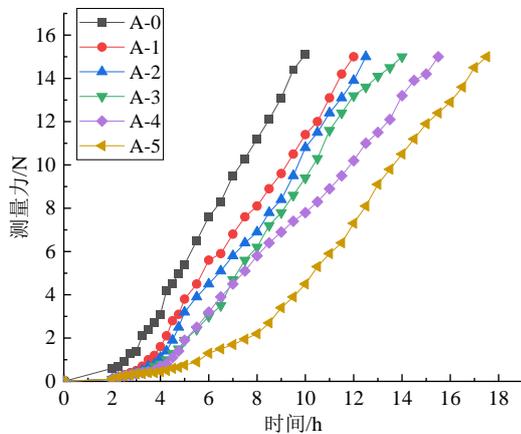


图 2 不同缓凝剂掺量下的浆液测量力

Fig. 2 Measured slurry force with different retarder contents

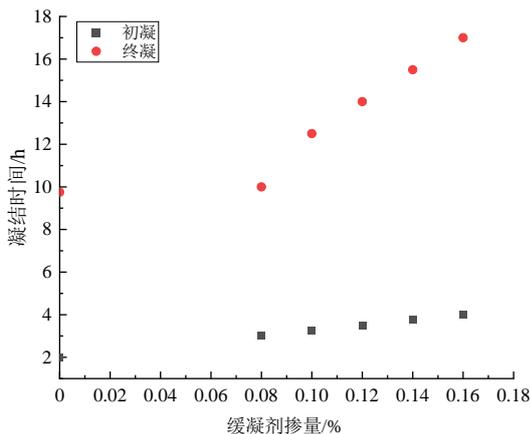


图 3 不同缓凝剂掺量下的浆液凝结时间

Fig. 3 Slurry setting time under different retarder dosages

图 4 为浆液的流动度与减水剂掺量的变化关系。图中显示，减水剂掺量增大可明显增大浆液的流动度，当减水剂掺量超过水泥质量的 4.2% 时，浆液的流动度增大速度明显提升，此时减水剂掺量每增加 0.1%，流动度约增加 1 cm。为控制浆液的流

动度，建议浆液的减水剂掺量尽量在水泥掺量的 4.2% 以下。根据静电斥力理论，由于减水剂表面活性作用，吸附于胶凝材料颗粒表面的憎水基端，可以使颗粒表面带相同的电荷，加大了彼此间的静电斥力，导致颗粒相互分散，释放出更多的游离水，继而增大浆液的流动性^[17]。

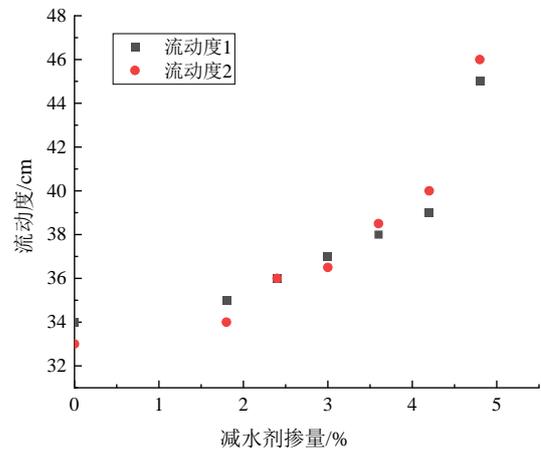


图 4 减水剂掺量与浆液流动度关系

Fig. 4 Relationship between the dosage of superplasticizer and the fluidity of slurry

图 5 为浆液 3 h 内的流动度变化与减水剂掺量的变化关系。图中显示，减水剂的掺加能够增大浆液 3 h 内的流动度，但是浆液的减水剂掺量在 2.4%~4.2% 区间内时，1.75 h 内的流动度相差不大，3 h 的流动度与无掺加减水剂相差在 3 cm 以内，故当减水剂掺量小于 4.2% 时，对浆液 3 h 后的流动度提高作用区别不明显。

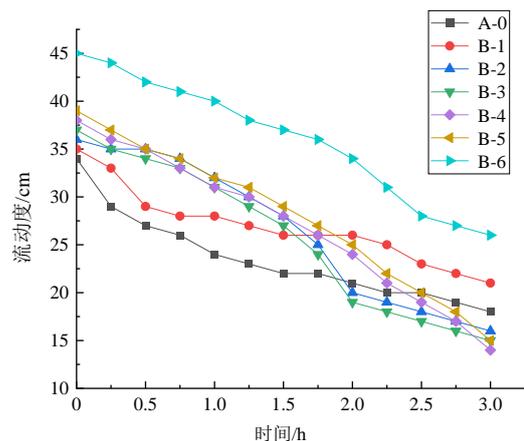


图 5 不同减水剂掺量下的浆液流动度经时损失

Fig. 5 Loss of slurry fluidity with time under different dosages of superplasticizer

浆液凝结时间测量装置测得的凝结阻力如图 6 所示，图中显示，减水剂的掺加能够明显延缓浆液的爬升速率，延缓效果随着减水剂掺量的增大而增

强, 说明减水剂能够降低浆液的硬化速度, 当减水剂掺量超过 4.2% 时, 对浆液的终凝延缓显著, 超过 13 h。

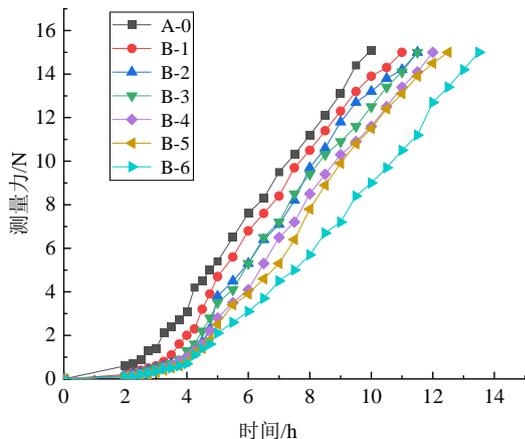


图6 不同减水剂掺量下的浆液凝结速度测量值

Fig. 6 Measured values of slurry coagulation speed under different dosages of superplasticizer

浆液的初凝、终凝时间与减水剂掺量关系如图7所示, 图中显示, 随着减水剂掺量的增加, 浆液的初凝和终凝时间均逐渐增大, 当减水剂掺量超过水泥质量的 4.2% 时, 浆液的初凝时间增大幅度接近 75%, 终凝时间约增大了 38%。说明减水剂能够延缓浆液的水化反应速度和凝结过程, 但为保证浆液的终凝时间, 建议浆液的减水剂掺量不宜超过水泥质量的 4.2%。

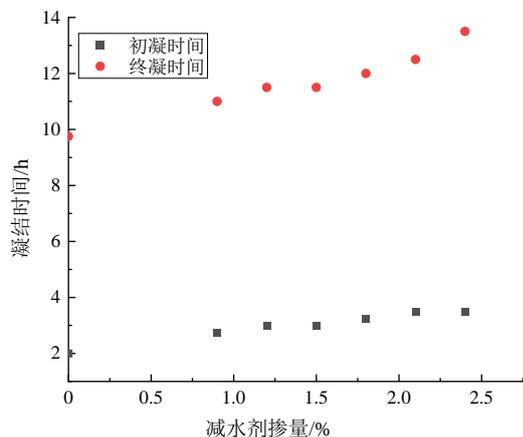


图7 不同减水剂掺量下的浆液凝结速度测量值

Fig. 7 Measured values of slurry coagulation speed under different dosages of superplasticizer

2.3 外加剂优化

实验证明两种外加剂均能延缓浆液的凝结速度, 但是相对而言, 掺加水泥质量 0.12% 的缓凝剂能对浆液的初凝时间有较好的增大作用, 也可减小浆液的流动度损失速度, 但其 3 h 内的流动度小于减水剂作用下的浆液流动度。建议使用缓凝剂调配浆液的初凝时间, 再用减水剂提高浆液的流动

性能。

综合上述基准配比和浆液外加剂对其性能影响规律, 调配减水剂和缓凝剂共同提高浆液的性能, 发现加入水泥质量 0.12% 的缓凝剂和 3.6% 的减水剂能够达到上述要求的性能值, 其初凝时间接近 4 h, 终凝时间约为 14 h, 3 d 抗压强度达到 0.56 MPa, 3 h 内的浆液流动度和稠度如图 8 所示, 浆液历经 3 h 后的流动度为 20 cm, 稠度 8.3 cm, 仍具有流动性。

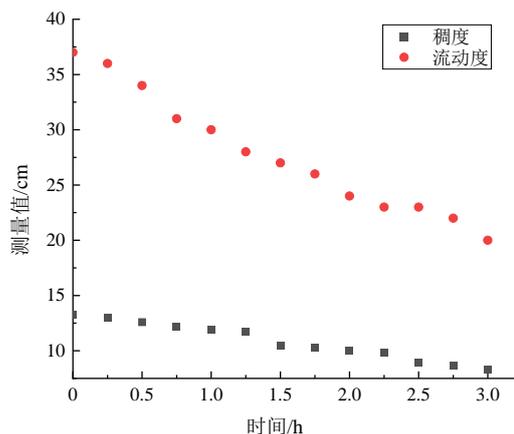


图8 浆液 3 h 内的稠度和流动度测量值

Fig. 8 Consistency and fluidity measurements within 3 h of the slurry

3 配比优化

现实注浆工程中, 注浆浆液将在预制后进行注浆, 但在此过程中, 常存在注浆设备发生故障等不可控因素, 导致注浆延迟, 进而使浆液流动性大大降低, 不再符合注浆要求, 堵塞注浆管道。本文为试验模拟、研究工程中注浆延迟对浆液性能的影响, 并在此技术上提出恢复浆液性能的方法。

在以上优化配合比的基础上, 实验室模拟注浆延迟 0、2、3、4、5 h, 在延迟注浆的过程中, 模仿浆液在罐车或者搅拌箱中持续搅拌, 研究持续搅拌时间对浆液性能的影响。

图 9 表示浆液的 3 h 内流动度与搅拌时长的关系, 如图所示, 当持续搅拌时间超过 4 h 时, 浆液的流动度下降 11 cm, 下降了 34.8%, 搅拌时长超过 4 h 后浆液的 3 h 流动度低于 15 cm, 基本不具有流动性能, 故建议浆液的持续搅拌时间不宜超过 4 h。

浆液的初凝时间、终凝时间与搅拌时间的关系, 如图 10 所示。从图中可以看出, 浆液的搅拌时间增长时, 浆液的初凝时间略微下降, 但浆液的终凝时间增长, 持续搅拌 4 h 后浆液的终凝时间接近 20 h, 初凝时间为 3 h。这是因为搅拌时间的增长, 水化反应持续进行, 使得再次测量浆液的初凝时间

低于搅拌前原始值，持续的搅拌破坏了浆液分子间的黏聚力，改变浆液的细微结构，使得浆液的终凝时间增大。

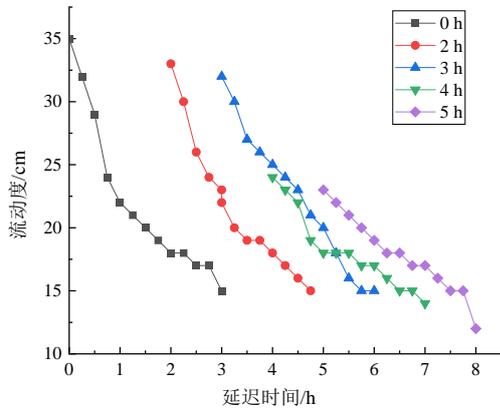


图9 不同搅拌时长下的浆液3 h内的流动度

Fig. 9 Fluidity of the slurry within 3 h under different mixing times

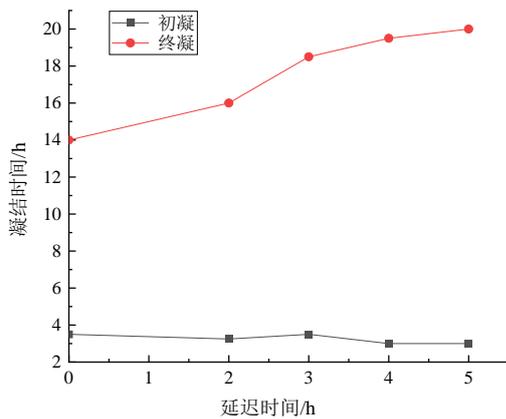


图10 浆液的凝结时间与搅拌时间关系

Fig. 10 Relationship between the setting time of the slurry and the mixing time

通过研究不同搅拌时长情况下浆液的流动度和凝结时间，发现随着持续搅拌时间的增长，浆液的流动度和初凝时间持续下降，终凝时间增长。为了恢复不同延迟时间下浆液的性能，主要以增大浆液流动性为主，以浆液达到等量流动度为准，探讨减水剂掺量对浆液延时性能的影响。如图11所示，浆液二次掺加减水剂与延迟时间的关系。随着浆液延迟时间的增长，为补偿浆液的流动性，所需掺加的减水剂掺量也不断增加。

图12为浆液二次掺加减水剂后浆液的流动性损失曲线。图中显示，二次掺加减水剂虽然能补偿浆液的流动度，但并不能降低浆液的流动性损失速度。现场注浆出现延迟的情况造成流动性严重下降，在不超过4 h的情况下，可以通过再次掺加一定减水剂的方法恢复浆液的流动性，避免注浆效果

严重下降或者浆液损耗严重的情况。

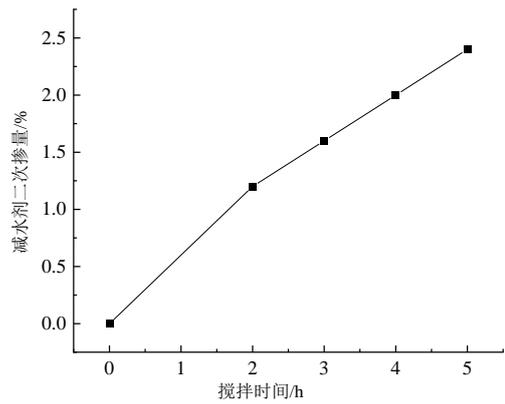


图11 减水剂二次掺加量与搅拌时间关系

Fig. 11 Relationship between the secondary addition amount of the water reducing agent and the mixing time

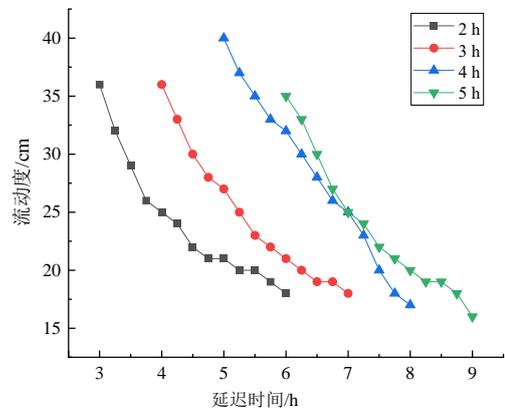


图12 浆液的3 h流动度与搅拌时间关系

Fig. 12 Relationship between the 3 h fluidity of the slurry and the mixing time

图13为不同搅拌时长的浆液二次掺加减水剂后初凝和终凝时间。从图中可以看出，二次掺加减水剂后浆液的初凝与终凝时间继续增长。在延迟时间达到5 h后，加入24%的减水剂，初凝时间达到5 h，终凝时间接近20 h。

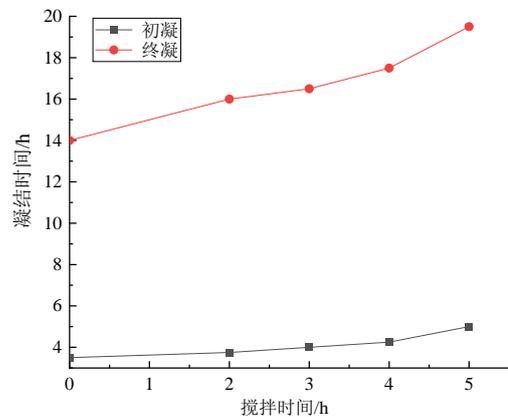


图13 浆液的凝结时间与搅拌时间关系

Fig. 13 Relationship between the setting time of the slurry and the mixing time

4 结 论

以上对软弱土地层同步注浆材料配比优化进行了试验研究,得到了基准配合比以及外加剂对浆液即时和延时性能的影响规律。试验得出结论如下:

(1) 减水剂和缓凝剂掺量均能延缓浆液 3 h 内的流动度损失速度,但缓凝剂不能提高浆液的初始流动度。为保证浆液的初凝时间在 4 h 左右,建议缓凝剂掺量控制在水泥掺量的 0.08%~0.10% 区间内。

(2) 随着减水剂掺量的增大,浆液的流动度、初、终凝时间逐渐增大。当减水剂掺量超过水泥质量的 4.2% 时,浆液的流动度增大速度明显提升,初、终凝时间增大幅度分别接近 75% 和 38%。为控制浆液的流动度和终凝时间,建议浆液的减水剂掺量尽量在水泥掺量的 4.2% 以下。

(3) 软土地区注浆配比为水泥:粉煤灰:砂:水:膨润土=1.0:6.7:17.4:7.7:2.0,且加入水泥质量 0.12% 的缓凝剂和 3.6% 的减水剂能够满足软弱土地层的注浆要求。

(4) 随着延迟注浆时间的增长,浆液的流动度和初凝时间持续下降,终凝时间增长。在延迟注浆不超过 4 h 的情况下,可以通过再次掺加一定减水剂的方法恢复浆液的流动性,但并不能降低浆液的流动性损失速度。

参考文献

- [1] BEZUIJEN A, TALMON A M, KAALBERG F J, et al. Field measurements of grout pressures during tunnelling of the sophia rail tunnel[J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(1): 39-48.
- [2] 肖立, 张庆贺, 赵天石, 等. 泥水盾构同步注浆材料试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(1): 59-64.
XIAO Li, ZHANG Qing-he, ZHAO Tian-shi, et al. Study on mortar material of tail void grouting in slurry shield tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(1): 59-64.
- [3] 周麟, 毛文, 施墨华. 盾构隧道同步注浆浆液配合比优化设计[J]. *武汉工程大学学报*, 2013, 35(9): 29-33.
ZHOU Lin, MAO Wen, SHI Mo-hua. Optimized design of grout mix proportion for synchronous grouting in shield tunneling[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2013, 35(9): 29-33.
- [4] 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(30): 120281.
- [5] SHA F, LI S, LIU R, et al. Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 282-291.
- [6] AZADI M R, TAGHICHIAN A, TAHERI A. Optimization of cement-based grouts using chemical additives[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(4): 623-637.
- [7] 赵青, 张艺霞, 赵军, 等. 速凝抗水分散型水泥基注浆材料的制备及性能研究[J]. *功能材料*, 2020, 51(6): 6114-6119.
ZHAO Qing, ZHANG Yi-xia, ZHAO Jun, et al. Study on the preparation and performance of cement-based grouting material with quick setting and water resistance[J]. *Journal of Functional Materials*, 2020, 51(6): 6114-6119.
- [8] 仇佳琳, 郭伟, 吴庆, 等. 缓凝剂与高效减水剂复配对硫铝酸盐水泥性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(6): 64-68.
QIU Jia-lin, GUO Wei, WU Qing, et al. Effects of retarders and superplasticizers on the performance of sulphoaluminate cement[J]. *New Building Materials*, 2021, 48(6): 64-68.
- [9] 唐超, 刘慧妮, 张帅, 等. 纳米材料改性水泥浆液凝结与流动特性试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(6): 72-76.
TANG Chao, LIU Hui-ni, ZHANG Shuai, et al. Experimental study on the coagulation and flow characteristics of nano material modified cement slurry[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(6): 72-76.
- [10] 郟向光, 王涛, 乔国刚, 等. 盾构同步注浆类型选择及地层适应性研究[J]. *市政技术*, 2014, 32(2): 77-80.
QIE Xiang-guang, WANG Tao, QIAO Guo-gang, et al. Study on selection and strata adaptability of synchronous grouting of shield tunneling[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2014, 32(2): 77-80.
- [11] 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(增刊 1): 293-296.

- ZHONG Xiao-chun, ZUO Jia, LIU Quan-wei, et al. Reuse of excavated fine sand for back grouting of shield tunnelling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(S1): 293–296.
- [12] 李发勇. 盾构掘进切削灌注桩桩基群施工关键技术——以宁波地铁3号线钱仇区间为例[J]. *隧道建设*, 2020, 40(4): 569–574.
- LI Fa-yong. Key construction technology of shield cutting pile foundation group of cast-in-place piles: a case study on Qianhubeilu station-Qiubi station section of Ningbo metro line No.3[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(4): 569–574.
- [13] 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 Tong, LI Xin-xiao, LENG Fa-guang, 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.
- [14] 单洪萍. 高抗水分散性同步注浆浆液在南京地铁10号线过江隧道中的应用研究[J]. *工程技术研究*, 2019, 4(1): 102–103.
- SHAN Hong-ping. Study on application of high water resistant and dispersive synchronous grouting slurry in Nanjing metro line 10 river crossing tunnel[J]. *Engineering Equipment and Materials*, 2019, 4(1): 102–103.
- [15] ZHANG G, LIU J, LI Y, et al. A pasty clay-cement grouting material for soft and loose ground under groundwater conditions[J]. *Advances in Cement Research*, 2017, 29(2): 54–62.
- [16] 王方刚, 梁权刚, 陆加越, 等. 不同缓凝剂对水泥超长缓凝作用与水化特性的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(7): 2065–2072.
- WANG Fang-gang, LIANG Quan-gang, LU Jia-yue, et al. Effect of different retarders on the super retarding action and hydration characteristics of cement[J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(7): 2065–2072.
- [17] 曹辉林. 减水剂类型对地聚物注浆材料的性能影响及机理研究[J]. *金属矿山*, 2022(2): 1–7.
- CAO Hui-lin. Research on the effect of water superplasticizer type on the properties of geopolymer grouting material and mechanism[J]. *Metal Mine*, 2022(2): 1–7.