

浅埋暗挖全断面砂层隧道超前注浆加固技术研究

何秋敏¹ 周冬辉² 魏 琪²

(1. 西安有恒房地产开发有限公司, 710016, 西安; 2. 西安市轨道交通集团有限公司, 710018, 西安//第一作者, 工程师)

摘 要 针对浅埋全断面砂层隧道开挖过程中遇到的拱顶塌方、地表沉陷等问题, 以西安某地铁隧道工程为例, 进行超前注浆加固技术研究。通过室内试验, 对注浆浆液配比进行研究。研究表明, 当水、磷酸、水玻璃的体积比为 13.00:1.00:3.30 时, 浆液胶凝时间短、渗透效果好, 且加固砂体后的无侧限抗压强度和直接剪切强度均达到工程应用标准。采用 FLAC3D 模拟软件, 对注浆加固后隧道围岩及地表的破坏形态及机理进行了研究。研究表明: 注浆加固后, 地表沉降最大值为 1.2 mm, 比未注浆工况减小了 80.0%~95.0%; 隧道拱顶沉降为 6.0 mm, 比未注浆工况减小了 49.6%; 注浆加固可有效抑制隧道拱部围岩塑性区的形成和发展, 大幅减小拱顶沉降达到稳定状态的开挖距离。研究成果已成功应用于该地铁隧道工程, 且未发生显著砂层滑塌现象, 土体稳定性良好, 地层成拱效果较好。

关键词 地铁; 隧道; 浅埋暗挖; 全断面砂层; 注浆加固

中图分类号 U455.4; U472.6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.033

Study on the Pre-grouting Reinforcement Technology of Shallow-buried Underground-excavated Full-section Sand Tunnel

HE Qiumin, ZHOU Donghui, WEI Qi

Abstract Aiming at the problems of vault collapse and surface subsidence during the excavation of shallow-buried full-section sand tunnel, taking certain metro tunnel project in Xi'an as an example, the pre-grouting reinforcement technology is studied. Through laboratory tests, the grouting slurry ratio is studied. Results show that when the volume ratio of water, phosphoric acid, water glass is 13.00:1.00:3.30, the slurry has short cementing time and good permeability, and the unconfined compressive strength and direct shear strength after sand reinforcement meet the engineering application standards. The failure mode and mechanism of surrounding rock and surface of tunnel after grouting reinforcement is studied by FLAC3D simulation software. Results show that the maximum ground settlement is 1.2 mm after grouting reinforcement, which is 80.0%~95.0% less than that without grouting. The settlement of tunnel vault is 6.0 mm, which is 49.6% less than

that without grouting. Grouting reinforcement can effectively inhibit the formation and development of plastic zone of tunnel arch surrounding rock, and greatly reduce the excavation distance of vault settlement reaching a stable state. The research results have been successfully applied to metro tunnel project, and there is no obvious collapse of the indigenous sand layer. The soil stability is good, and the formation arching effect is good.

Key words metro; tunnel; shallow-buried tunneling; full-section sand layer; grouting reinforcement

First-author's address Xi'an Youheng Real Estate Development Co., Ltd., 710016, Xi'an, China

浅埋暗挖法施工工艺较为简单, 且可根据监控量测信息及时修正施工工艺。相较于明挖法和盾构法, 浅埋暗挖法具有适应范围广、对周围环境影响小、断面变化灵活等优势, 是城市地下工程施工的主要方法之一^[1]。对于浅埋暗挖砂层隧道, 由于砂层的胶结强度低和自稳能力差等特性, 极易引发隧道塌方与地表塌陷等灾害事故, 继而引起交通中断、管线断裂和房屋破坏等后续环境灾害^[2-3]。注浆作为一种能够有效提升围岩承载能力的措施, 广泛应用于隧道穿越砂层过程。对于城市浅埋砂层隧道, 由于浆液在砂层中的扩散能力差, 导致注浆加固范围难以控制, 且注浆易引起地表隆起和管线变形, 需对注浆材料的渗透扩散和加固能力提出更高要求^[4-5]。

诸多学者在砂层注浆加固方面进行了大量研究。文献[6]通过数值模拟对地铁隧道在软弱砂层中穿越建筑物的注浆加固技术和控制效果进行了分析。文献[7]利用多场耦合软件建立隧道开挖-注浆耦合分析模型, 对隧道开挖过程中注浆的浆扩散时空变化规律进行了研究。文献[8]通过室内试验对磷酸-水玻璃注浆材料的凝胶时间、凝胶形态和砂土固结体强度的影响因素进行了研究。

尽管超前注浆加固技术已大量应用于实际工

程,但由于注浆的隐蔽性、随机性和复杂性,使其存在“难选材、难控制、难评价”等问题。本文通过室内试验分析了浆液配比,通过数值模拟和现场试验研究了注浆加固效果。本文研究可为类似工程提供一定的借鉴和参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

西安某地铁停车场出入线区间为双线、单洞单线设计,隧道右线长为 423.07 m,左线长为 416.13 m,左、右线间距为 12.00 m。隧道埋深变化较小,在 15.16~19.55 m 之间浮动。隧道断面尺寸为 6 500 mm×6 950 mm,初期支护厚为 250 mm,二次衬砌厚为 350 mm,采用“上下台阶法+临时仰拱”施工。

1.2 工程地质及水文地质

该隧道地貌单元属渭河二级阶地,地表以下 65 m 范围内的地层主要由新黄土、古土壤、粉质黏土、细砂、中砂、粗砂组成,隧道主要位于细砂和中砂层,地质断面图如图 1 所示。

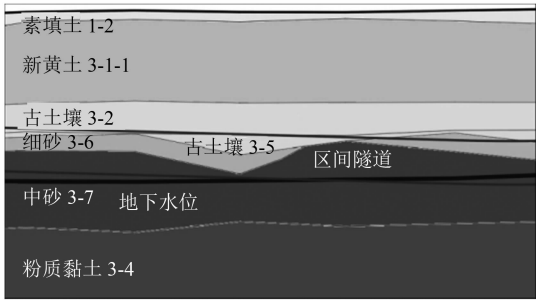


图 1 地质断面图

Fig. 1 Geological section diagram

地下水埋深为 23.1~25.0 m,位于隧道拱底附近,属第四系松散层孔隙潜水,主要赋存于中砂、粉细砂及粉质黏土层中,富水性好。

2 室内配比试验

2.1 胶凝试验

在酸性条件下,水玻璃溶液中的 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 、 H_3SiO_4^- 与 H^+ 发生反应生成双硅酸,并在聚合作用下形成硅溶胶。随着反应时间的继续,硅溶胶中的 SiO_2 颗粒通过吸附电荷达到平衡状态,从而形成凝胶。由于表面电荷随着浆液 pH 值的变化而改变,浆液胶凝时间也随着 pH 值的变化而变化。酸性水玻璃具有良好的渗透性,且其固结体具有良好的防渗性能,因此通过分析不同酸性条件下的浆液胶凝

时间能够确定适用于砂层的浆液配比。根据工程经验及前人研究成果,共设置 13 组配比进行胶凝试验,不同配比下浆液的胶凝时间及其效果评价如表 1 所示。当水、磷酸、水玻璃的体积比为 13.00:1.00:3.30 时,不同时刻的凝结状态如图 2 所示。

表 1 胶凝时间及其效果评价

Tab. 1 Cementing time and effect evaluation

水、磷酸、 水玻璃的体积比	胶凝时间	效果评价
10.00:1.00:3.50	瞬间	溶液混合瞬间凝固,无法在工程中应用
11.00:1.00:3.50	约 5 s	溶液混合倒出过程中有大块凝胶出现,导致在砂土中无法充分渗透,工程中难以应用
11.00:1.00:3.25	约 1 min	溶液混合倒出过程中有大块凝胶出现,导致在砂土中无法充分渗透,工程中难以应用
11.00:1.00:3.30	约 2 min	溶液混合倒出过程中有大块凝胶出现,导致在砂土中无法充分渗透,工程中难以应用
12.00:1.00:3.25	约 130 min	胶凝时间适中,溶液可以充分渗透至砂土中,适合在实际工程中应用
12.00:1.00:3.35	约 120 min	胶凝时间适中,溶液可以充分渗透至砂土中,适合在实际工程中应用
12.00:1.00:3.50	约 10 s	溶液混合倒出过程中有大块凝胶出现,导致在砂土中无法充分渗透,工程中难以应用
13.00:1.00:3.00	约 360 min	胶凝时间太长,在实际工程中不建议使用
13.00:1.00:3.25	约 240 min	胶凝时间较长,在实际工程中不建议使用
13.00:1.00:3.30	约 150 min	胶凝时间适中,溶液可以充分渗透至砂土中,适合在实际工程中应用
13.00:1.00:3.40	约 60 min	溶液混合倒出过程中有较多“果冻”状凝胶出现,导致在砂土中无法充分渗透,工程中难以应用
13.00:1.00:3.50	约 14 min	溶液混合倒出过程中有大量“果冻”状凝胶出现,导致在砂土中无法充分渗透,工程中难以应用
13.00:1.00:4.00	约 30 s	溶液混合倒出过程中有大块凝胶出现,导致在砂土中无法充分渗透,工程中难以应用

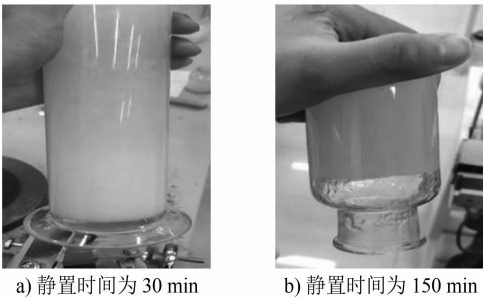


图 2 不同静置时间下的浆液胶凝状态

Fig. 2 Cementing state of slurry at different standing time

凝胶时间是注浆材料的重要性质之一,其决定着浆液在土层中的扩散距离。当工程的注浆范围较大、且需要浆液有较大的扩散半径时,浆液的凝胶时间应足够长,以保证浆液可以充分扩散至全部注浆范围;若注浆范围内有地下水流动,为了防止地下水把浆液带走或出于堵水的目的,则要求浆液的凝胶时间应尽可能短,甚至瞬凝。由于所依托工程不受地下水影响,且受工期限限制,所以胶凝时间不宜过长。根据胶凝试验结果可知,当水、磷酸、水玻璃体积比分别为 12.00:1.00:3.25、12.00:1.00:3.35 和 13.00:1.00:3.30 时,浆液可充分渗透至砂土中,工程应用效果较好。

2.2 无侧限抗压强度试验

根据胶凝试验结果,选择水、磷酸、水玻璃体积比为 13:1:3.30 和 12:1:3.35 时的改性水玻璃溶液加固砂土,进行无侧限抗压强度试验。砂土在实验室进行振捣制样,制备试样干密度为 1.50 g/cm^3 ,现场取样的天然含水量为 15%,圆柱体试样高为 80 mm,直径为 39 mm,试样制备完成后静置 12 h,以保证充分凝结。试样制备及试验过程如图 3 所示。

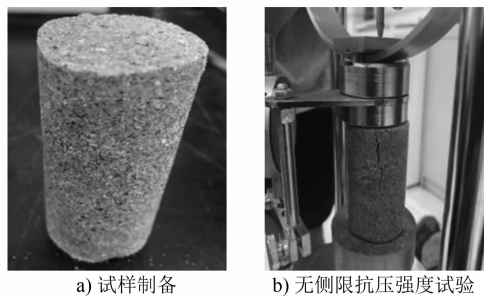


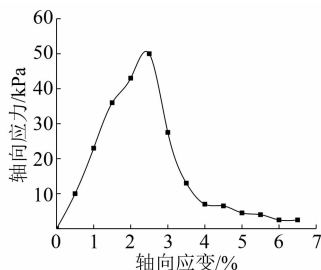
图 3 试样制备及试验过程

Fig. 3 Sample preparation and test process

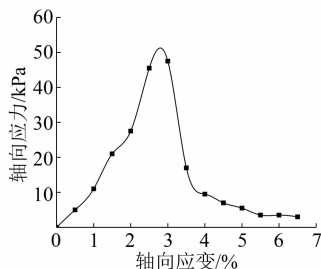
不同浆液配比下,无侧限抗压强度试验的应力应变曲线如图 4 所示。通过试验结果可知:当水、磷酸、水玻璃体积比为 13.00:1.00:3.30 和 12.00:1.00:3.35 时,抗压强度均接近 50 kPa;4 h 后,抗压强度均衰减至 10 kPa 以下。与水、磷酸、水玻璃的体积比为 12.00:1.00:3.35 相比,当体积比为 13.00:1.00:3.30 时,抗压强度在短时间内上升得更快,表明其在短时间内的加固效果更优,实际工程应用效果更好。

2.3 直剪试验

以原状土的干密度和含水量制备素砂土进行直剪试验,获得的抗剪强度包线如图 5 所示。由图 5 可知,素砂土的黏聚力 $C=0.37 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=16.8^\circ$ 。



a) 水、磷酸、水玻璃体积比为 13.00:1.00:3.30



b) 水、磷酸、水玻璃体积比为 12.00:1.00:3.35

图 4 不同浆液配比下的无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strength at different slurry ratios

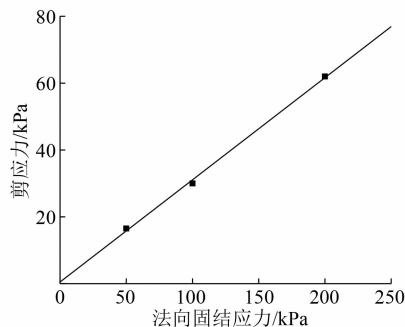


图 5 素砂土抗剪强度包线

Fig. 5 Shear strength envelope of plain sand

保持干密度和含水量与原状土一致,以水、磷酸、水玻璃体积比分别为 12.00:1.00:3.35 和 13.00:1.00:3.30 的改性水玻璃溶液加固砂土进行直剪试验。砂土在实验室进行振捣制样,试样制备完成后分别静置 12 h 和 18 h,以保证其底部充分凝结。当法向固结应力分别为 50 kPa、100 kPa 和 200 kPa 时,不同体积比及静置时间下固砂体的抗剪强度包线,如图 6 所示。

不同浆液配比下,砂土的抗剪强度指标如表 2 所示。由表 2 可知,在砂土中添加改性水玻璃溶液可有效提高其黏聚力,而内摩擦角则稍有降低。随着静置时间的增长,体积比为 13.00:1.00:3.30 的固砂体黏聚力基本保持不变,其内摩擦角则增大接近至素砂土的内摩擦角值;随着静置时间的增长,体积比为 12.00:1.00:3.35 的固砂体黏聚力和内摩擦

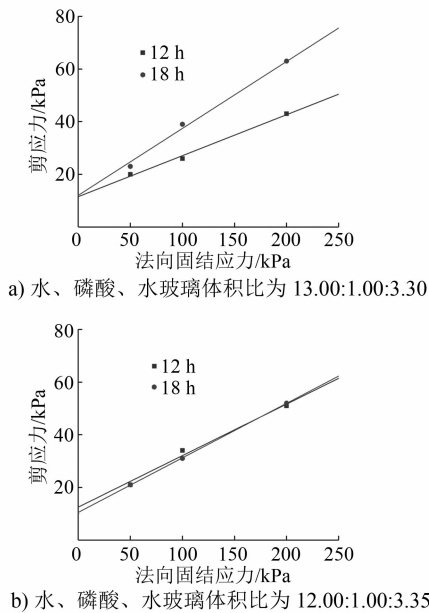


图 6 不同体积比及静置时间下的固砂体抗剪强度包线
Fig. 6 Shear strength envelope of solid sand body with different proportions and standing time

表 2 不同浆液体积比下的砂土抗剪强度指标
Tab. 2 Indexes of sand shear strength with different grout ratios

水、磷酸、水玻璃体积比	静置时间/h	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
13.00:1.00:3.30	12	11.10	8.9
	18	11.20	14.8
12.00:1.00:3.35	12	13.70	11.1
	18	10.50	11.3
素砂土		0.37	16.8

角均无显著变化。因此,当体积比为 13.00 : 1.00 : 3.30 时,固砂体的抗剪性能更强,浆液对砂土的加固效果更优。

2.4 注浆配合比

结合实际工程需要,对不同体积比下浆液的胶凝时间及固砂体的无侧限抗压强度和直剪强度试验结果进行综合分析,确定水、磷酸、水玻璃最佳注浆配合体积比为 13.00 : 1.00 : 3.30。

3 隧道开挖数值模拟

3.1 数值计算模型

采用 FLAC3D 有限差分软件模拟隧道开挖过程,如图 7 所示。建立三维数值计算模型,模型尺寸为 80 m×50 m×50 m,隧道左、右两侧距边界为 36.5 m,约为隧道洞径的 5 倍,隧道底部距底部边界为 26.0 m,约为隧道洞径的 4 倍。隧道埋深为 17.0 m,模型上部边界取自地表。模型在自重应力场下进行计算,

边界条件定为模型底面固定,四周表面约束其法向位移,上表面取至地表,为自由表面,开挖步距为 0.5 m。

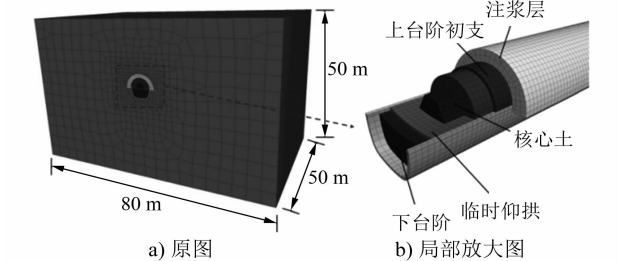


图 7 数值计算模型
Fig. 7 Numerical calculation model

3.2 物理力学参数

围岩采用摩尔库伦准则进行模拟,围岩物理力学参数参考室内试验数据和地质勘探资料,如表 3 所示,其中注浆加固作用等效为加固区。衬砌采用弹性模型,初支等效折算为实体单元,支护力学参数如表 4 所示。

表 3 围岩物理力学参数表
Tab. 3 Surrounding rock physical and mechanical parameters

围岩	泊松比	密度/(g/cm ³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
素填土	0.33	1.60	10.0	10
新黄土	0.30	1.58	20.5	24
古土壤	0.30	1.82	21.5	26
细砂	0.43	1.93	29.0	0
中砂	0.41	1.95	31.0	0
粉质黏土	0.31	1.96	21.5	27
注浆后砂层	0.30	1.98	14.8	11

表 4 数值模型支护力学参数表
Tab. 4 Numerical model supporting structure mechanical parameters

支护类型	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
临时仰拱	22.0	20	0.2
C25 喷层+网喷	25.5	27	0.2

3.3 数值计算结果分析

3.3.1 地层沉降分析

注浆处理和未注浆处理条件下的隧道地层沉降云图如图 8 所示。由图 8 可知,对砂层进行注浆处理可以有效控制地层和地表的沉降。未注浆时,工后地表最大沉降量为 23.0 mm;超前注浆处理后,工后地表最大沉降量为 1.2 mm,大幅度减小了地表沉降。因此,注浆处理可以有效改善隧道围岩条件。由室内试验结果可知,注浆对砂层的加固作用主要是大幅增强砂体黏聚力。注浆加固条件下其

他地层沉降也有所减小,新黄土和古土壤地层沉降量分别从 26.0 mm 和 60.0 mm 减小至 2.0 mm 和 11.0 mm。从拱顶至地表,注浆处理可使地层沉降减小约 80.0%~95.0%,地层沉降控制效果显著。由于隧道上方分布有污水、燃气、给水和热力等多条管线,超前注浆加固可通过减小地层沉降有效控制管线沉降,从而确保施工安全。

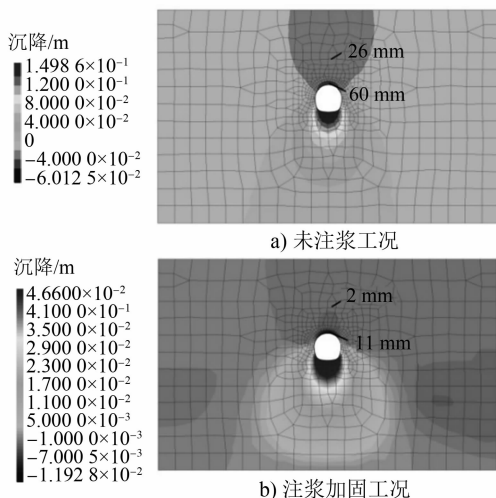


图8 地层沉降云图软件截图

Fig. 8 Screenshot of formation subsidence nephogram in software

3.3.2 拱顶沉降分析

超前注浆加固可大幅减小隧道拱部变形量,有效控制拱顶沉降。未经过注浆处理的隧道拱顶沉降为 11.9 mm;注浆加固后的隧道拱顶沉降为 6.0 mm,比未注浆工况减小了 49.6%,与地层沉降分析结果相符。提取隧道中间断面拱顶沉降曲线如图 9 所示。由图 9 可知,经过注浆处理后,拱顶沉降达到稳定状态的开挖距离大幅减小。未注浆时,隧道开挖至中间断面后 30 m 才逐渐达到稳定;经过注浆处理后,隧道开挖至中间断面后 20 m,拱顶沉降值基本不发生变化,说明围岩变形已达到稳定。

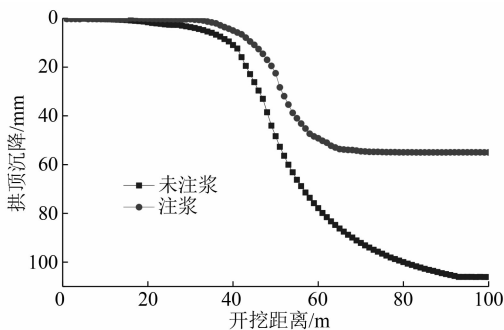


图9 中间断面拱顶沉降曲线

Fig. 9 Settlement curve of middle section vault

3.3.3 塑性区分布

注浆能有效抑制地层沉降变形,并减小塑性区分布,注浆处理和未注浆处理工况下的塑性区云图如图 10 所示。由图 10 可知,注浆加固主要抑制隧道拱部围岩塑性区的发展,其余未加固地层的塑性区分布变化不大。未注浆时,隧道拱部塑性区的分布呈猫耳朵形,由于砂层黏聚力较小,拱部围岩主要为剪切破坏。注浆加固后,地层黏聚力有所增加,抑制了拱部特别是拱顶部分塑性区的形成。

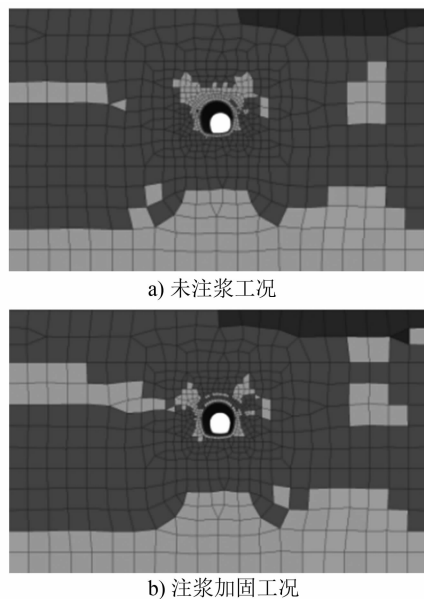


图10 围岩塑性区分布

Fig. 10 Distribution of surrounding rock plastic zone

4 现场注浆试验

4.1 注浆方案

试验断面位于细砂层,为保证隧道开挖的稳定性,采用上台阶全断面注浆方案。在拱顶约 120°范围内,打设 $\phi 42$ mm 超前小导管,长度为 1.8 m,环向间距为 30 cm。掌子面小导管长度与拱顶保持一致,环向间距由拱顶向内逐渐增大,为 0.5~1.0 m。小导管浆液溢出孔采用梅花形布置,间距为 15~25 cm。

4.2 开挖稳定性分析

隧道注浆断面开挖长约 4.7 m,高约 1.6 m,开挖进深约 1.2 m,如图 11 所示。由图 11 可知,拱顶上方及拱肩位置处的砂层土体保持稳定,未发生显著砂层滑塌现象,表明注浆后的砂层土体稳定性良好,地层成拱效果较好。在开挖断面拱顶上部 50 cm 处设置地层沉降监测点,未经注浆处理开挖时,

拱顶及拱腰处砂体滑落严重,地层沉降为 31.5 mm;注浆处理后,开挖的地层沉降为 5.9 mm,地层沉降减小了 81.3%,与数值模拟结果基本吻合。开挖过程中,可见扩散范围内浆液与砂体黏结形成固砂块体,最大固砂块体的长和宽约为 37 cm,如图 12 所示。由图 12 可知,该浆液对比对砂层渗透效果较好,能够有效黏结砂土并达到加固效果。

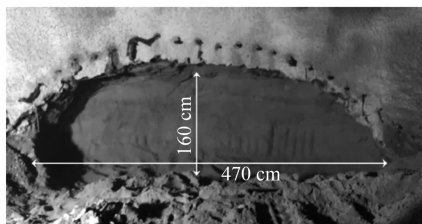


图 11 试验断面开挖状态

Fig. 11 Excavation status of test section



图 12 注浆后砂体黏结效果

Fig. 12 Bonding effect of sand body after grouting

5 结语

为解决浅埋暗挖全断面砂层隧道施工过程中的砂土滑塌问题,本文通过室内试验确定了改性水玻璃浆液配比,并通过数值模拟和现场试验研究了注浆加固效果,所获得的主要结论如下:

1) 水、磷酸、水玻璃的体积比为 13.00:1.00:3.30 的浆液,胶凝时间适中,在砂土中的渗透能力较好。与砂土形成固结体后,在短时间内能够显著提高其抗压强度和抗剪强度,推荐以此配比进行砂层隧道注浆加固。

2) 注浆加固能够有效控制隧道开挖引起的地层沉降和拱顶沉降,抑制拱部围岩破坏并提高围岩成拱能力。对于城市浅埋暗挖隧道,超前注浆加固可降低开挖对围岩及管线的影响,确保施工安全。

3) 注浆后开挖揭露的掌子面特征表明,该配比浆液在砂层中的扩散效果较好,砂层土体稳定性和地层成拱效果良好,能够达到预期加固效果,可为浅埋暗挖全断面砂层隧道工程提供参考。

参考文献

- [1] 王梦恕. 隧道工程浅埋暗挖法施工要点[J]. 隧道建设, 2006(5):1.
WANG Mengshu. Outline of tunnel construction by means of method of undercutting with shallow overburden[J]. Tunnel Construction, 2006(5):1.
- [2] 张成平, 张顶立, 王梦恕. 浅埋暗挖隧道施工引起的地表塌陷分析及其控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(增刊2):3601.
ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WANG Mengshu. Analysis of ground subsidence induced by shallow-buried tunnel construction and its control techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S2):3601.
- [3] 张庆松, 张连震, 李鹏, 等. 地下工程富水软弱地层注浆加固理论研究新进展[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019(1):47.
ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LI Peng, et al. New progress in grouting reinforcement theory of water-rich soft stratum in underground engineering[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019(1):47.
- [4] 沙飞, 李术才, 刘人太, 等. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019(7):1420.
SHA Fei, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Performance and engineering application of effective microfine cement-based grout (EMCG) for water-rich sand strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019(7):1420.
- [5] 卓越, 李治国, 高广义. 隧道注浆技术的发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021(11):1953.
ZHUO Yue, LI Zhiguo, GAO Guangyi. Development status and prospect of tunnel grouting technology[J]. Tunnel Construction, 2021(11):1953.
- [6] 许军, 张开顺. 软弱砂层下的地铁隧道穿越建筑物的加固技术及注浆控制效果分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017(5):122.
XU Jun, ZHANG Kaishun. Reinforcement technology and grouting control for metro tunnel crossing buildings under soft sand layer[J]. Urban Mass Transit, 2017(5):122.
- [7] 黄文华, 张云. 基于浆液扩散的软弱围岩隧道注浆加固效果研究[J]. 公路, 2021(8):355.
HUANG Wenhua, ZHANG Yun. Research on the effect of grouting reinforcement for weak surrounding rock tunnel based on grout diffusion[J]. Highway, 2021(8):355.
- [8] 李夏, 徐军哲, 刘人太, 等. 新型酸性水玻璃注浆材料的研究与应用[J]. 隧道建设, 2017(10):1296.
LI Xia, XU Junzhe, LIU Rentai, et al. Study and application of a new acid water glass grouting material[J]. Tunnel Construction, 2017(10):1296.

(收稿日期:2022-04-20)