

城市基坑富水破碎岩体注浆加固技术研究

Study on Grouting Reinforcement Technology of Water Rich Broken Rock Mass in Urban Foundation Pit

王 姣

(河北医科大学第四医院, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 在城市地下基坑开挖过程中, 由于地下水和工程地质条件的影响, 普通注浆材料对破碎岩体地层的加固效果较差。本次研究利用改性聚氨酯粘合剂对普通快硬性水泥注浆材料进行改良, 室内制备了改性聚氨酯/水泥基新型复合注浆材料, 并对其展开了综合试验研究。研究表明: (1) 掺入改性聚氨酯粘合剂后, 注浆材料的扩散半径和抗压强度会逐渐降低, 但流动性及承载能力依然在良好的范围内; 新型复合注浆材料的初凝时间和终凝时间得到了大幅改善, 不同 MP 材料浓度条件下, 新型盾构注浆浆液初凝时间分别为 21 min、18 min、12 min、10 min 以及 8.5 min, 终凝时间则分别为 117min、91min、66 min、57 min 以及 42 min; (2) 随着 MP 材料浓度的增大, 碎石土注浆结石体试样的渗透性逐渐减小。利用纯水泥注浆材料注浆加固的结石体试样的渗透系数为 $2.01 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 随着 MP 材料浓度的逐渐增大, 结石体的渗透系数分别降低到 $1.79 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.68 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.61 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $1.55 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; (3) 当养护时间较短时, 新型复合注浆材料对碎石体的加固效果不断增强, 结石体的抗压强度和抗折强度也不断提高, 而当养护时间足够长时, 随着 MP 材料浓度的不段增大, 结石体的抗压强度和抗折强度均呈现出先增大后减小的变化趋势。

关键词: 改性聚丙烯粘合剂; 富水; 破碎岩体; 注浆材料; 基坑加固

中图分类号: TU045 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 03-0006-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.006

WANG Jiao

(The Fourth Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang China, 050051)

Abstract: During the excavation of urban underground foundation pit, due to the influence of groundwater and engineering geological conditions, the reinforcement effect of ordinary grouting materials on the broken rock stratum is poor. In this study, modified polyurethane adhesive was used to improve the ordinary quick hardening cement grouting material, and a new type of modified polyurethane/cement-based composite grouting material was prepared indoor, and a comprehensive experimental study was carried out on it. The results show that: (1) after adding modified polyurethane adhesive, the diffusion radius and compressive strength of grouting materials will gradually decrease, but the fluidity and bearing capacity are still in a good range; the initial setting time and final setting time of the new composite grouting material have been greatly improved. Under different MP material concentrations, the initial setting time of the new shield grouting slurry is 21 min, 18 min, 12 min, 10 min and 8.5 min respectively, and the final setting time is 117 min, 91 min, 66 min, 57 min and 42 min respectively; (2) with the increase of MP material concentration, the permeability of gravel soil grouting stone sample decreases gradually. The permeability coefficient of the stone sample reinforced by pure cement grouting material is $2.01 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, with the gradual increase of MP material concentration, the permeability coefficient of stone body decreases to $1.79 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.68 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.61 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.55 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; (3) when the curing time

作者简介: 王姣 (1989—), 女, 本科, 工程师, 主要从事医院基建项目质量、进度管理工作。

收稿日期: 2022-11-01

岩土力学

is short, the strengthening effect of the new composite grouting material on the gravel body is continuously enhanced, and the compressive strength and flexural strength of the stone body are also continuously improved, when the curing time is long enough, the compressive strength and flexural strength of the stone body will increase first and then decrease with the increase of MP material concentration.

Keywords: modified polypropylene adhesive; rich water; broken rock mass; grouting materials; foundation pit reinforcement

0 引言

近年来,随着我国城市化进程的不断加速,城市土地资源日益紧缺,城市对地下空间的开发与利用需求达到了前所未有的高度。在地下空间的开发过程中,也面临着一系列建设难题,其中最为突出的就是不良地质条件的处置^[1-3]。富水破碎岩体是一种常见的不良地质,具有稳定性差、渗透性好、含水率高、强度低的特点,导致地基不均匀沉降、基坑涌水等工程问题。城市地下空间开发如地铁建设等,因考虑到运行期间人群密集、工程失事社会损失巨大,而对地基基础的要求极高^[4-7]。因此,研究富水破碎岩体的加固,避免其带来的事故风险,具有重大实践应用价值。

处置富水破碎岩体常见的措施包括开挖、换填、锚固、注浆等。其中注浆既可提高抗渗性又可增强承载力,对不良地质具有很强的适应性,在地下工程富水破碎岩体处置领域获得广泛应用^[8-10]。富水破碎岩体的注浆难点在于注浆扩散范围难以控制,实践中存在着严重的注浆流失现象,急剧增加工程成本。加之受到地下水和破碎岩体的相互作用,加固效果影响因素复杂多变。注浆材料是保障注浆质量的关键因素,学者们在注浆材料研究上取得了丰硕的研究成果^[11-13]。富水破碎岩体注浆材料方面,传统硅酸盐水泥注浆材料具有价格低廉、工艺简便等优势,但浆液稳定性较差、凝结时间长、富水环境留存率低、结石体强度低,难以满足富水破碎岩体处置要求;水泥-水玻璃注浆材料则因凝结时间过快,导致注浆过程中极易堵管,且不利于浆液在注浆地层中的扩散,存在着可注性低等问题;化学注浆材料可注性较高,但因环境污染、工艺复杂、造价昂贵等不足,实践中的应用受到限制^[14-16]。适应富

水破碎岩体工程特性的注浆材料已成为关键技术制约,研发一种低碳绿色、可注性高、性能优异的注浆材料对治理富水破碎岩体至关重要。

综上所述,目前针对城市基坑富水破碎岩体注浆加固问题仍未找到较好的解决方案。本文利用改性聚氨酯粘合剂对普通快硬性水泥注浆材料进行改良,室内制备了改性聚氨酯/水泥基新型复合注浆材料,并对其展开了综合试验研究。研究成果可为新型胶粘剂再地下空间富水破碎岩体处置中的应用提供一定参考价值。

1 试验

1.1 原材料

本次试验研究制备的新型复合注浆材料的主要原材料为水泥和改性聚氨酯粘合剂,其中,水泥为 R. SAC4.5 级快硬性硫铝酸盐水泥,采购自广东省惠州市某水泥有限公司,初凝时间 25 min,终凝时间 180 min,主要成分如下表 1 所示。改性聚氨酯(MP)材料主要由二苯甲烷二异氰酸酯、环氧丙烷聚醚多元醇、稀释剂丙酮、催化剂三乙醇胺、缓凝剂磷酸、扩链剂 1,4 丁二醇以及乳化剂:吐温-80 制备而成。此外,本次试验所用土样为取自某城市地铁工程施工现场的碎石土,碎石土样整体呈黄褐色,天然密度为 2.65 g/cm³,天然含水率为 4.13%,最大干密度为 1.75 g/cm³。



(a) 改性聚氨酯粘合剂 (b) 新型复合注浆材料

图 1 试验材料制备

Fig. 1 Preparation of test materials

表 1 R. SAC4.5 级快硬性硫铝酸盐水泥主要成分
Table 1 Main composition of R. SAC4.5 fast hardening sulphoaluminate cement

成分	nm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃
含量/%	4.62	10.93	22.87	1.74	44.36	1.25	1.28	11.85

1.2 试验方案

为全方面综合研究新型复合注浆材料的注浆性能, 室内制备了不同改性聚氨酯粘合剂浓度 (0%、5%、10%、15% 及 20%) 的新型复合注浆材料, 并对其展开了室内试验研究。研究主要分为两个部分:

(1) 新型复合注浆材料浆液性能试验研究。针对不同改性聚氨酯材料浓度的新型复合注浆材料展开了浆液性能试验研究, 主要包括流动性试验、凝结时间试验以及浆液固结体 (浆体养护时间分别为 3 d、7 d 和 28 d) 抗压强度。

(2) 注浆结石体力学性质试验研究。将制备得到的新型注浆材料注入碎石土试样中后养护一定时间得到注浆结石体, 并开展室内综合试验研究。首先, 取 10 mL 的新型复合注浆材料注入碎石土试样 (标准试样 $\varphi \times H = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) 中, 分别养护 4 h、8 h 和 12 h, 得到不同新型聚氨酯浓度和养护时间的注浆结石体并展开力学性质试验; 同时, 对养护 12 h 的试样开展渗水性试验。试样组编号及试验设置具体如下表 2 所示。此外, 由于地下隧道开挖常涉及到地下水问题, 因此为研究水环境对注浆材料性能的影响, 本次试验设计了不同养护时间 (4h、8h 和 12h) 下的注浆结石体无侧限抗压强度试验。

表 2 试样组编号及试验设置
Table 2 Sample group number and test setup

分组	MP 浓度/%	水泥掺量/mL	MP 掺量/mL	养护时间	备注
MP-A	0	5	5	4 h、8 h、12 h	对照组
MP-B	5	5	5	4 h、8 h、12 h	试验组
MP-C	10	5	5	4 h、8 h、12 h	试验组
MP-D	15	5	5	4 h、8 h、12 h	试验组
MP-E	20	5	5	4 h、8 h、12 h	试验组

2 试验成果分析

2.1 浆体流动度

良好的流动度确保了浆液良好可泵性, 能够

为注浆现场浆液选型提供可靠参考。新型注浆材料扩散半径变化曲线随改性聚氨酯材料掺量变化趋势如图 2 所示, 由图 2 可知, MP 材料的掺入会引起导致新型复合注浆浆液的流动能力产生了显著的弱化。对于纯水泥注浆浆液 (0%MP) 而言, 其扩散半径可以达到 235 mm, 而随着 MP 材料掺量的逐渐增大, 新型复合注浆材料的扩散半径逐渐减小, 分别减小到 219 mm、206 mm、194 mm 以及 162 mm, 相较于基础盾构注浆浆液分别下降 6.81%、12.34%、17.45% 以及 31.06%。分析认为, 在胶凝材料中掺入一定量的 MP 材料后, 改性聚氨酯粘合剂和水反应生成凝胶状物质, 降低了浆液的流动性, 即使如此, 浆液的流动性依然在良好的范围内。

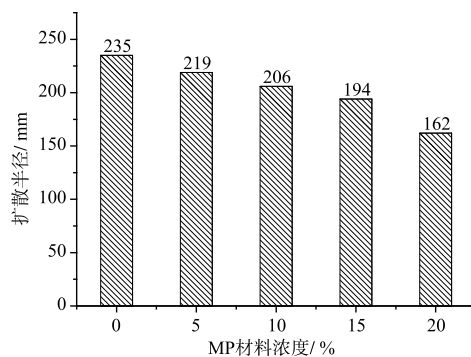


图 2 不同 MP 材料浓度条件下新型注浆浆液扩散半径变化
Fig. 2 Variation of diffusion radius of new grouting grout with different MP concentration

2.2 浆体凝结时间

表 3 展示了新型复合注浆浆液凝结时间随 MP 材料浓度的变化关系, 由表 3 可知, MP 材料的浓度显著的缩短了新型复合注浆浆液的凝结时间, 加快了注浆浆液的凝结速度。对于基础盾构注浆浆液 (0%MP) 而言, 其初凝时间 (t_0) 和终凝时间 (t_s) 分为 21min 和 117 min, 而随着 MP 材料浓度的逐渐增大, 新型复合注浆浆液的凝结时间也逐渐缩短。不同 MP 材料浓度条件下, 新型盾构注浆浆液初凝时间分别缩短至 18 min、12 min、10 min 以及 8.5 min, 终凝时间分别缩短至 91 min、66 min、57 min 以及 42 min。

岩土力学

表 3 不同 MP 浓度条件下新型盾构注浆浆液凝结时间
Table 3 Setting time of new type shield grouting slurry under different MP substitutions

MP 浓度 /%	初凝		终凝	
	初凝时间 /min	初凝时间 缩减率/%	终凝时间 /min	终凝时间 缩减率/%
0	21	0.00%	117	0.00%
5	18	14.29%	91	23.08%
10	12	42.86%	66	44.10%
15	10	51.43%	57	51.28%
20	8.5	60.00%	42	64.10%

2.3 固结体抗压强度

图 3 展示了不同养护龄期和不同改性聚氨酯浓度条件下, 注浆材料固结体抗压强度的变化规律。由图 3 可知, 养护龄期越长, 则注浆材料固结体的抗压强度越大。以 5%MP 组为例, 不同养护龄期下固结体的抗压强度分别为 18.52 MPa、24.15 MPa 以及 26.33 MPa。进一步观察可以得知, 注浆材料固结体的抗压强度与改性聚氨酯浓度之间呈负相关关系。以养护时间均为 28 d 的注浆材料固结体为例, 纯水泥试样的抗压强度能够达到 32.25 MPa, 而随着改性聚氨酯浓度的增大, 试样的抗压强度逐渐降低到 26.33 MPa、21.15 MPa、20.03 MPa 以及 18.62 MPa, 分别较纯水泥试样组下降 18.36%、31.32%、37.89% 及 42.26%。分析认为, 这是由于相较于水泥结石体, 改性聚氨酯的聚合反应产生的凝胶体强度较低。在制备注浆材料的过程中, 改性聚氨酯的聚合反应以及水泥的水化反应是同时发生的, 在此过程中, 改性聚氨酯的聚合反应凝胶体穿插在水泥水化产物中,

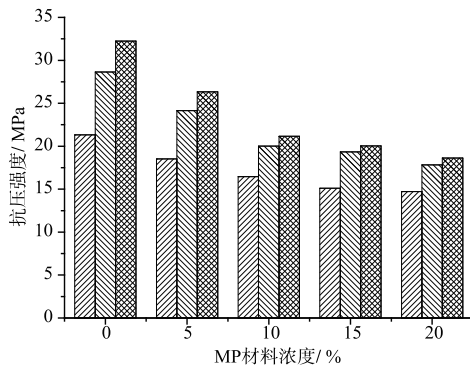


图 3 不同 MP 材料浓度条件下注浆液固结体抗压强度
Fig. 3 Compressive strength of grout consolidation mass under different MP material concentrations

与水泥水化产物形成一个整体。当注浆材料固结体受压时, 凝胶体不能承载较高的压缩应力, 因此, 新型复合注浆材料的抗压强度低于纯水泥浆材的抗压强度。

3 结石体性质

3.1 结石体抗渗性

基于室内渗透试验得到不同 MP 浓度注浆结石体试样的渗水系数变化规律如下表 4 所示, 由表 4 可知, 随着 MP 材料浓度的增大, 碎石土注浆结石体试样的吸水率逐渐减小, 同时其渗透性业逐渐减小。利用纯水泥注浆材料注浆加固的结石体试样的吸水率为 0.023, 渗透系数为 $2.01 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 随着 MP 材料浓度的逐渐增大, 结石体的吸水率分别降低到 0.020、0.019、0.019 和 0.018, 渗透系数则分别降低到 $1.79 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.68 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.61 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $1.55 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。基于上述试验结果可知, 利用改性聚氨酯材料制备的注浆材料具备较好的工程性能, 其能够有效提高注浆结石体的抗渗性能。分析认为, 这是由于凝胶体穿插在水泥水化产物中, 与水泥水化产物形成一个整体, 减小了浆体内的孔隙大小, 注浆材料本身更加紧密; 此外, 由于凝胶体具有黏性, 因此能使注浆结石体内部结构之间黏结更加紧密, 因此, 注浆结石体的抗渗性能得到了大幅度的提升。

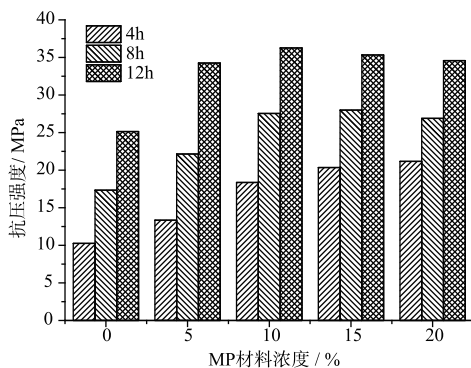
表 4 注浆结石体试样渗水性随 MP 浓度变化关系
Table 4 Relation between water permeability of grouting stone sample and MP concentration

试样编号	MP 浓度 /%	恒压时间 /h	吸水率	渗透系数 / $10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
MP-A5	0	2	0.023	2.01
MP-B5	5	2	0.020	1.79
MP-C5	10	2	0.019	1.68
MP-D5	15	2	0.019	1.61
MP-E5	20	2	0.018	1.55

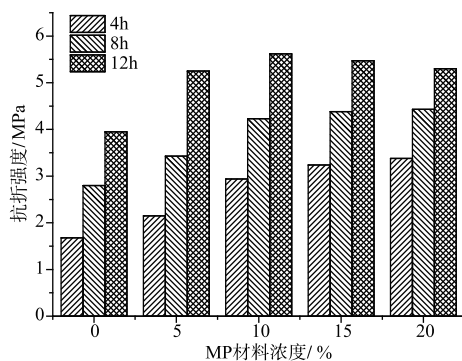
3.2 力学性质

基于室内试验, 得出不同 MP 材料浓度条件下注浆结石体的无侧限抗压强度及抗折强度试验结果如下图 4 所示。由图 4 可知, 养护时间和聚氨酯浆材掺量对于注浆结石体抗压强度和抗折强度的

影响是比较复杂的。当养护时间较短时, 向水泥注浆材料中掺入一定浓度的 MP 材料后, 新型复合注浆材料对碎石体的加固效果不断增强, 结石体的抗压强度和抗折强度也不断提高。而当养护时间足够长时, 随着 MP 材料浓度的不断增大, 结石体的抗压强度和抗折强度均呈现出先增大后减小的变化趋势。分析认为, 随 MP 材料浓度含量的增大, 新型复合注浆材料的凝结时间逐渐变短, 因此, 当养护龄期较短时, 注浆结石体的力学性质得到了有效的加强, 而水泥注浆材料由于硬化较慢, 因此相对强度较低。而当养护时间足够长时, 注浆结石体中的注浆材料完全硬化, 而新型复合注浆材料的浆材固结体的强度明显低于水泥结石体强度 (图 3), 因此, 当养护时间足够长时注浆材料加固结石体的抗压强度会随 MP 材料浓度增大而呈现出逐渐降低的变化趋势, 但强度的降低幅度不大。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

图 4 注浆结石体试样抗压强度及抗折强度的变化规律
Fig. 4 Change rule of compressive strength and flexural strength of grouting stone sample

4 结论

(1) 掺入改性聚氨酯粘合剂后, 注浆材料的扩散半径和抗压强度会逐渐降低, 但流动性及承载能力依然在良好的范围内; 新型复合注浆材料的初凝时间和终凝时间得到了大幅改善, 不同 MP 材料浓度条件下, 新型盾构注浆浆液初凝时间分别为 21 min、18 min、12 min、10 min 以及 8.5 min, 终凝时间则分别为 117 min、91 min、66 min、57 min 以及 42 min;

(2) 随着 MP 材料浓度的增大, 碎石土注浆结石体试样的渗透性逐渐减小。利用纯水泥注浆材料注浆加固的结石体试样的吸水率为 0.023 \ 渗透系数为 $2.01 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 随着 MP 材料浓度的逐渐增大, 结石体的吸水率分别降低到 0.020、0.019、0.019 和 0.018, 渗透系数则分别降低到 $1.79 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.68 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.61 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $1.55 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;

(3) 养护时间和聚氨酯浆材掺量对于注浆结石体抗压强度和抗折强度的影响是比较复杂的。当养护时间较短时, 向水泥注浆材料中掺入一定浓度的 MP 材料后, 新型复合注浆材料对碎石体的加固效果不断增强, 结石体的抗压强度和抗折强度也不断提高。而当养护时间足够长时, 随着 MP 材料浓度的不断增大, 结石体的抗压强度和抗折强度均呈现出先增大后减小的变化趋势。

参 考 文 献

- [1] 吕高, 杨杰, 李宁, 等. 黄土地基不良地质界面瞬态地质雷达波形 FDTD 正演分析 [J]. 西安理工大学学报, 2018, 34 (2): 185-191+204.
- [2] 苗宝栋. 驻信高速公路三合同段不良地质地基处理 [J]. 公路, 2005 (10): 78-81.
- [3] 陈礼明, 吴涛, 卢秀华. 不良地质条件下管道地基的处理 [J]. 中国给水排水, 2004 (4): 87.
- [4] 李廷春, 吕连勋, 段会玲, 等. 深埋隧道穿越富水破碎带围岩突水机理 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2016, 47 (10): 3469-3476.
- [5] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (1): 198-207.

(下转第 57 页)