

DOI: 10.11779/CJGE20230380

含水率影响下黄土盾构隧道壁后注浆浆液扩散特性 试验研究

叶 飞, 李思翰, 夏天晗, 张才飞, 韩兴博*

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了揭示黄土盾构隧道壁后注浆浆液在地层中的扩散形式和规律, 考虑盾构隧道盾尾间隙特征, 建立含水率、渗流压力、土压力可实时监测以及扩散过程可视的模型试验系统。考虑黄土不同含水率, 通过试验研究浆液扩散形式以及注浆过程中的含水率、渗流压力和土压力变化规律。研究结果表明: 在相同干密度下, 不同含水率对壁后注浆浆液扩散形式影响显著; 含水率为 10% 时, 浆液未发生明显扩散, 浆-土形成了明显的分界面, 仅分界面处的含水率发生显著变化, 各分层土体土压力较大; 含水率为 20% 和 30% 时, 浆液扩散范围增大, 各分层土体含水率均有变化, 土压力和渗流压力出现了阶跃曲线, 土体中形成了明显的浆脉。黄土盾构隧道壁后注浆中浆液的扩散形式主要为压密扩散、压滤扩散和劈裂扩散。

关键词: 黄土盾构隧道; 壁后注浆; 模型试验; 浆液扩散形式

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2051-09

作者简介: 叶 飞 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事隧道及地下工程方面的研究与教学工作。E-mail: xianyefei@126.com。

Experimental study on diffusion characteristics of backfill grouting in shield tunnels of loess under effects of moisture content

YE Fei, LI Sihan, XIA Tianhan, ZHANG Caifei, HAN Xingbo

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To reveal the diffusion form and law of backfill grouting in shield tunnels of loess, considering the characteristics of shield tail, a model test system with real-time monitoring for moisture content, seepage pressure and soil pressure and visualization of diffusion process is established. Considering the different moisture contents of loess, the grout diffusion form and the variation law of moisture content, seepage pressure and soil pressure during grouting process are studied through the model tests. The results show that under the same dry density, different moisture contents have a significant effects on the diffusion form of backfill grouting. When the moisture content is 10%, the grout does not diffuse obviously, and an obvious interface is formed between the grout and soil. Only the moisture content at the interface changes significantly, and the soil pressure of each layer is large. When the moisture content is 20% and 30%, the grout diffusion range increases, the moisture content of each layer of soil changes, the soil pressure and seepage pressure show step curves, and obvious grout veins are formed in the soil. The grout diffusion forms in shield tunnels of loess are mainly compaction diffusion, pressure filtration diffusion and splitting diffusion.

Key words: shield tunnel of loess; backfill grouting; model test; grout diffusion form

0 引 言

城市轨道交通因其绿色安全、快捷、承载量大等优势, 得到了大力发展, 推进了城市的繁荣兴盛。截至 2024 年 7 月, 中国 (不含港澳台) 共有 54 个城市开通了运营轨道交通线路, 总运营里程达到 10339.4 km, 运营线路 311 条^[1]。

盾构法因其扰动小、施工快以及高度机械化等优势成为了城市地下轨道交通建设的主要手段。刀盘切削、掌子面稳定、盾构推进、管片拼装和壁后注浆是

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878060, 52108360); 中国博士后科学基金项目 (2020M683398)

收稿日期: 2023-05-04

*通信作者 (E-mail: xingbo.han@chd.edu.cn)

盾构法的重要构成部分^[2]，其中，壁后注浆工艺是指通过浆液来填充管片与围岩之间的间隙(即盾尾间隙)的方法与过程。盾构隧道壁后注浆的主要作用为充填地层以防止地层变形、管片-浆液-围岩形成整体共同受力、约束管片以减缓上浮与下沉等^[3]。浆液的扩散模式主要分为基于力学平衡原理的充填扩散^[4]、基于毛细管组理论的渗透扩散^[5-6]、基于扩孔理论的压密扩散以及基于岩土强度准则的劈裂扩散，受地层、浆液特性、注浆参数等多因素的影响，各扩散模式之间相互转化、相互掺杂，无明显分界^[7]。

黄土由于其风力搬运沉积的形成特性，具有结构性，黄土结构性由其颗粒排列和胶结能力组成，而黄土颗粒间的胶结效果对水极为敏感，在含水率及外力变化时，结构性会发生显著变化^[8-9]。目前针对黄土注浆的研究多应用于地基加固、超前加固方面^[10]，其扩散模式分类与盾构隧道壁后注浆的扩散模式分类是一致的。浆液在管片壁后的扩散模式受黄土物理力学特性的影响，只有掌握了浆液的扩散特性，才能进一步得到浆液在管片壁后的压力分布以及对地层的加固效果。由于盾构隧道壁后注浆属于隐蔽工程，浆液的扩散过程无法通过肉眼直接观察，目前关于盾构隧道壁后注浆浆液扩散研究多以理论计算和数值模拟^[11]为主，但由于过多的计算假定，很难得到准确的结果。室内模型试验具有一定的针对性和真实性，受到众多学者的应用与研究。

目前，缺少对黄土盾构隧道壁后注浆浆液扩散特性方面的研究，导致缺少对黄土盾构隧道工程中壁后注浆工艺的设计及施工指导。本文依托西安地铁 8 号线 D8KC-1 标段盾构区间，通过设计壁后注浆局部模型，进行模型试验，选定不同黄土含水率界限，对土体含水率变化、渗流压力变化及土压力变化进行监测，分析浆液在不同含水率黄土中的扩散规律，以期更为清晰地了解黄土盾构隧道中浆液的扩散模式，为工程实践提供科学指引。

1 盾构隧道壁后注浆现有室内试验

若要研究清楚盾构隧道壁后注浆的浆液扩散特性，首先需对其扩散过程与注浆效果进行观测，只有通过宏观观察才能得到直观的感受与数据，然而，因盾构隧道壁后注浆属于隐蔽工程，此过程是在成环管片的背后进行，只有在盾构隧道负环管片处进行的原位试验可以较好地展现扩散过程，但其他区域浆液扩散过程和注浆效果均难以观测，且负环管片处的原位试验又存在无法模拟真实地层的问题^[12-13]，因此具有

强针对性及高灵活性的室内模型试验就被众多学者用于盾构隧道壁后注浆施工过程的研究。

根据研究的范围与角度的不同，依照模型试验的基本组件进行分类，主要包括整体模型试验与局部模型试验。整体模型试验通过对整个注浆段全断面的模拟，可以较好地展现管片受力情况、浆液扩散特性以及注浆效果等；而局部模型试验通过对部分维度浆液的扩散进行研究，再选取特征点使用部分管片、土体、浆液进行注入试验。整体而言，两种室内模型试验均能较好地反应盾构隧道施工中壁后注浆浆液扩散的情况，一定程度上，为理论研究的科学推进提供了宏观认知，为工程施工的高质量完成提供了科学指导。盾构隧道壁后注浆室内试验主要内容见表 1。

Table 1 Existing indoor test methods for backfill grouting			
试验类型	模型构造	试验目的	特色手段
整体模型	盾构推进模拟系统、注浆系统、激发及数据采集分析系统 ^[14]	隧道埋深、注浆压力、土层性质影响下浆液扩散形态	采用了透明土技术直观展示浆液扩散形态
	模型箱、推进系统、注浆系统、数据采集系统、数据处理系统 ^[15]	分析同步注浆对管片压力和地层变形的影响	大比例尺开展整体试验
局部模型	注浆设备、模型管道 ^[16]	研究浆液扩散范围与注浆参数及浆液水灰比之间的联系	分段拼接式构造
	渗透注浆管、手动注浆泵、注浆记录仪、双液混合器 ^[17]	探析注浆压力与地层渗透率及注浆速率之间的变化规律	考虑了双液浆的黏度时变性的
	渗透注浆装置、恒压注浆系统、数据采集系统 ^[18]	通过一维注入试验研究地下适配浆液的选取	考虑了盾尾脱空过程的模拟，提出了适配性方法
	试验模型箱、注浆系统、浆液配制系统、测试及数据处理系统 ^[19]	不同级配砂样地层下牛顿流体、宾汉姆流体、幂律流体的浆液扩散过程	考虑了砂样分体、维数等多因素综合影响

2 试验系统及试验方案设计

2.1 试验系统

因不同盾构隧道中地层参数、施工参数和浆液参数有所差别，浆液的扩散形式及效果也有所不同。前阶段已对考虑盾尾脱空过程的试验装置进行了设计^[18]，本系统对装置设置、安装以及监测元件进行了优化，本可视化浆液扩散模型试验系统由注入套件、模型套件、调压套件以及数据采集套件组成，如图 1 所

示。

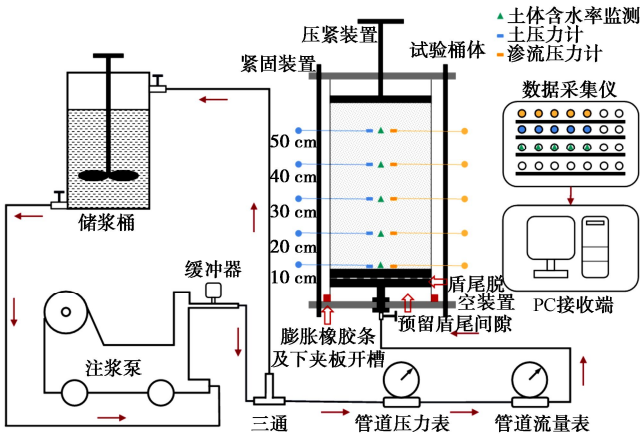


图 1 可视化浆液扩散模型试验系统

Fig. 1 Visual grout diffusion model test system

其中，注入套件由储浆桶、注浆泵及缓冲器组成，浆液注入试验土体前会先流经缓冲器，能有效降低泵出浆液压力的波动性；模型套件由有机玻璃管、框架结构及其余配套设施组成，有机玻璃管高 70 cm，内径 30 cm，厚度 1 cm，配套防水接头和止水橡胶塞以保证密封性；调压套件由三通接口、管道压力表及管道流量表组成，管道压力表量程为 0~1 MPa，测量精度为 1 kPa，管道流量表测量量程为 0~20 L/min；数据采集套件由土压力计、渗流压力计以及土体含水率监测元件组成。仪器细节见图 2。

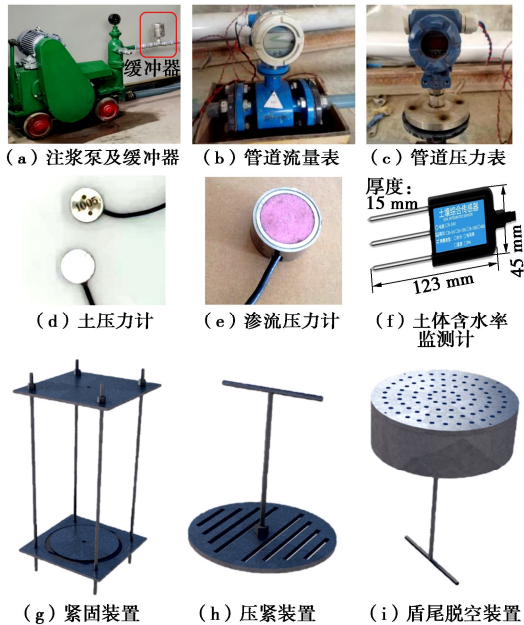


图 2 仪器细节

Fig. 2 Instrument details

2.2 试验参数确定

(1) 土体含水率区间

本文依托工程西安地铁 8 号线贞观路站—市图书馆站盾构区间，隧道拱顶埋深为 10.3~18.4 m，上覆

地层主要为 Q₃ 新黄土地层和 Q₄ 素填土地层，隧道主要穿越 Q₃ 新黄土地层，隧道位于地下水位线以上。试验用土选用盾构基坑土体，土体采样时未经过加固处理等人工扰动，选用的水上新黄土的基本参数见表 2。

为探究注浆过程中的土压力、渗流压力和含水率变化，需要埋设监测元件，因此，工程原状土经烘干后采用重塑土体的方法进行含水率调配，采用烘干法测定其含水率。试验土体含水率以一般工程常见含水率为区间，下限设为自然环境风干下含水率，上限设为土体饱和含水率。测定用自然风干土采用晾晒法进行制备，经测定其含水率为 9.6%，过程如图 3，测定用饱和重塑土采用毛细管饱和法制备，操作方法依据《土工试验规程》，采用重叠式饱和器，将装设好的饱和器置入水箱，静置 3 d 后测定其饱和含水率为 30.3%，过程如图 4 所示。综上所述，试验初步选取 3 组含水率，分别为 10%，20%，30%，对不同含水率黄土中的浆液扩散特性进行定性研究。

表 2 试验用土参数

Table 2 Parameters of test soil

含水率/ %	相对质 量密度	重度/ (kN·m ⁻³)	干重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙比	饱和度/ %
20.70	2.70	15.80	13.10	1.04	53.90



图 3 自然风干土体制备

Fig. 3 Preparation of natural air-dried soil



图 4 饱和土体制备

Fig. 4 Preparation of saturated soil

(2) 浆液配合比

浆液的流变性影响其可注入性，依据实际工程砂浆配合比检验报告进行浆液调配，浆液为宾汉姆流体，基本参数如表 3 所示。同时为较直观地展现浆液扩散

形态,按照各组水泥用量的 5%加入显色剂氧化铁蓝,氧化铁蓝的掺量代替部分砂用量。

表 3 浆液各组分质量比

Table 3 Mass ratios of grout components					
工况	水泥	砂	膨润土	粉煤灰	水
水泥砂浆	1.00	1.67	0.32	1.00	1.97

试验使用的水泥选自陕西省咸阳市某水泥厂海螺牌普通硅酸盐水泥 P.O 42.5 级水泥,技术指标如表 4 所示。参考现场施工,选用钠基膨润土以及常规粉煤灰用于壁后注浆浆液的拌制。试验所用砂采用振筛机选取粒径小于 0.5 mm 的砂粒。实验室温度控制在 20±2℃,湿度大于 50%。

表 4 P.O 42.5 级水泥技术指标

Table 4 Technical indexes of P.O 42.5 grade cement						
安定性	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
合格	198	240	5.6	7.5	26.4	45.2

2.3 土料制备

因模型试验条件和监测元件埋设等原因,土体采用重塑黄土,干密度为 1.50 g/cm³。将工程现场原状土运回至试验室后,使用恒温干燥箱对土体进行烘干,然后将初步烘干的土体进行碾碎,再根据试验所需土体质量和目标含水率 10%,20%,30%,计算所需加入水的质量,采用喷雾法进行增湿,最后将试验用土置于闷土箱中静止 48 h,以实现水分均匀化。

为保证制备土体含水率满足误差要求,对制备土体进行含水率的复核。

2.4 试验流程

黄土地层盾构隧道壁后注浆室内模型试验流程如下:①黏贴膨胀橡胶环于下夹板开槽处和盾尾脱空装置外表面,安装有机玻璃管防水接头和止水橡胶塞,依次组装框架和有机玻璃管;②确定本次盾尾模拟量为 10 cm,使用下螺杆支撑起盾尾脱空装置后,分层每 10 cm 填入定量试验用土,采用相同的击实力度和击实次数,使土体体积满足密度要求,保证土体相同的压实度;③填土至检测元件埋设处时,连接土压力计、渗压计并拧紧防水接头,填土完成后,旋紧上压板并拧紧紧固螺杆上、下螺母,插入含水率监测元件;④根据预先设定好的浆液配比将多种材料进行拌合;⑤正式试验之前,先进行通水试验,确保注浆管道连接处的密封性,同时为了保证注浆起始压力和浆液流速,应先开启注浆泵并关闭注浆口处阀门,存贮浆液压力不低于 0.2 MPa,随后关闭注浆泵;⑥试验人员确保在 5~10 s 内完成盾尾脱空装置的下拉工作,脱空的盾尾间隙厚度为 10 cm,打开所有监测元件,启动注浆泵,实际盾构隧道同步注浆中注浆压力一般在 0.2~0.4 MPa,此处采用 0.4 MPa 的注浆压力;⑦注

浆结束后,及时关闭模型体下部阀门,避免浆液回流,浆液凝结后,拆除试验装置,对土体进行挖掘,探明土体内部浆液的扩散情况。

注浆停止时间采用双因素控制,一是在 0.4 MPa 压力下,流量表数值不增长保持 2 min,表明浆液不再可注入土体;二是在 0.4 MPa 压力下,浆液已通过模型体上方引流孔,表明浆液已形成通道贯穿模型体。

3 试验结果与分析

3.1 浆液扩散形式分析

(1) 浆液注入量及最远扩散距离

试验共开展了 3 组工况,过程中通过流量表记录浆液的注入量,注浆结束 24 h 浆液初凝后,通过观察浆-土结合面和浆脉来判定其扩散距离,各工况浆液注入量和最远扩散距离如表 5 所示。其中,浆液注入量为浆液注入模型筒的总量,浆液注入土体量为总量减去充填盾尾间隙体积量,浆液土中扩散距离指扩散最远距离减去盾尾间隙高度(10 cm)。

表 5 各工况浆液注入量和最远扩散距离

Table 5 Grout injection amounts and farthest diffusion distances under various working conditions						
组别	浆液	土体含水率/%	浆液注入量/L	浆液注入土体量/L	扩散最远距离/cm	浆液土中扩散距离/cm
1	水泥砂浆	10	7.1	0.035	12.5	2.5
2		20	10.8	3.735	58	48
3		30	11.3	4.235	60	50

根据表 5,对浆液注入量进行分析可以发现,注入水泥砂浆时,土体含水率为 10%的浆液注入量小于土体含水率为 20%和 30%时,20%与 30%土体含水率时浆液注入量差距不大。同时计算得盾尾间隙体积为 7.065 L($\pi \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 10\text{ cm}$),第 1 组浆液进入土体的体积为 0.035 L,相较整体填土量,可以初步断定浆液并未渗入土体。

浆液扩散距离起算位置为盾尾脱空装置上表面,上方包括 10 cm 盾尾间隙与 50 cm 土体,浆液土中扩散距离起算位置为土体下表面,对浆液土中扩散距离进行分析,不难发现土体含水率为 20%及 30%时,浆液几乎贯通了模型体内土体,10%含水率时浆液几乎未发生扩散。

(2) 表面浆液扩散情况

注浆完成后,各组表面浆液扩散情况如图 5 所示。

根据试验表面浆液扩散情况,可以发现土体含水率为 10%时,浆-土形成了明显的分界面,同时在分界面发生了水分迁移的情况,在土体含水率为 20%和 30%时,可以发现浆液扩散形成了较为明显的浆脉,

且扩散距离较远。

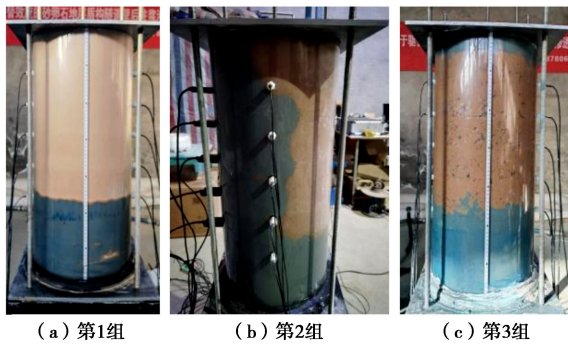


图 5 有机玻璃管表面浆液扩散情况

Fig. 5 Grout diffusion on surface of organic glass tube

(3) 横断面浆液扩散情况

48 h 后挖掘其横断面情况如图 6 所示。根据浆液扩散横断面情况, 可以发现土体含水率为 10% 时, 断面会形成“浆盘”, 土体含水率为 20% 和 30% 时, 可以发现浆液在土体中形成了较为明显的浆脉, 这对浆液扩散距离形成了印证, 浆脉的形成成为浆液更远的扩散距离提供了空间。

现行浆液扩散模型被总结为充填扩散、渗透扩散、压密扩散以及劈裂扩散, 各扩散形式均有其明显表征。综合表面和横断面浆液扩散基本情况, 以及水分迁移现象, 发现在注浆过程中, 土体首先被压密, 其后伴随着浆液水分的向上迁移, 且浆液水分迁移距离大于土体被压密距离。可以提出合理猜想, 浆液在 10% 含水率时主要发生的扩散形式为压滤扩散, 即当浆液中颗粒粒径超过地层孔隙直径 $1/3$ 时, 浆液中颗粒无法进入地层, 仅浆液中的自由水在注浆压力作用下渗透进入地层, 此扩散形式称为压滤扩散; 浆液在 20% 和 30% 含水率时, 产生了明显浆脉, 可以考虑为发生了劈裂扩散^[20], 但上述的初步认知仍需试验中监测元件所反馈的数据作进一步验证。

3.2 土体含水率分析

试验时在模型体每间隔 10 cm 分层设置土体含水

率监测元件, 共埋设了 5 组, 起始埋设位置为土体下表面, 距盾尾脱空装置 10 cm 处, 各工况下含水率变化曲线见图 7。

通过各试验组土体注浆前后含水率分层变化可知, 第 1 组中 20, 30, 40, 50 cm 处土体含水率未发生变化, 而第 2, 3 组中各层含水率在注浆后均有了明显的增大, 这表明第 1 组中浆液注入距离较短, 这与浆液扩散情况直观分析中浆液最远扩散距离 12.5 cm 是一致的。而第 2, 3 组中, 浆液贯穿了模型体。从具体数值来看, 各组中浆液注入断面的含水率均产生了变化, 其含水率变化范围在 17%~70%, 其中绝大多数断面含水率已经超过了其饱和含水率, 在分层挖除中土体也确有流塑状态, 第 2, 3 组中, 随着断面高度的增加, 含水率的增加变少, 这与压力和浆液通过量减小是有关的。

对 12 h 后各分层土体含水率进行分析可知, 其数值较注浆刚结束时均有减小, 意味着随着注浆结束后的时间推移, 模型体中的水是趋向均匀的, 但按含水率减小速率来推断, 其所需时间较长。

3.3 渗流压力分析

针对注浆过程中的渗流压力进行分析, 由于水泥砂浆的黏稠度较高, 发现渗流压力在注浆开始后出现突增, 而在停止注浆后, 有一定程度的保持。当土体含水率为 10% 时, 渗流压力的峰值最大值出现于 10 cm 处, 为 92.31 kPa, 峰值最小值出现于 50 cm 处, 为 10.37 kPa。这意味着浆液或浆液中的水已扩散至 10 cm 处, 这与直观观察出的浆液扩散与浆液中水扩散的距离是较为一致的。

当土体含水率为 20% 和 30% 时, 注浆过程中的渗流压力出现明显的阶跃曲线。土体含水率为 20% 时, 渗流压力的峰值最大值出现于 10 cm 处, 为 145.77 kPa, 峰值最小值出现于 30 cm 处, 为 14.44 kPa。土体含水率为 30% 时, 渗流压力的峰值最大值出现在 20

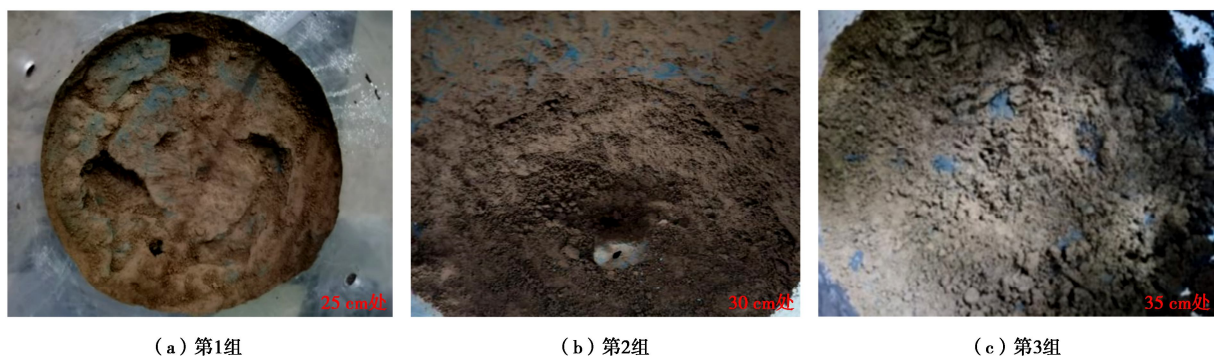


图 6 横断面浆液扩散情况

Fig. 6 Grout diffusion of cross section

cm 处, 为 146.3 kPa, 峰值最小值出现 10 cm 处, 为 11.15 kPa。与 10%含水率相比, 当土体含水率为 20%和 30%时, 渗流压力出现了明显的阶跃曲线。这是由于浆液扩散产生了劈裂通道, 浆液涌入劈裂通道后, 导致原有的渗流压力急剧减小, 浆液充满通道后, 又沿原有路径渗流, 渗流压力重新升高。各分层渗流压力变化见图 8。

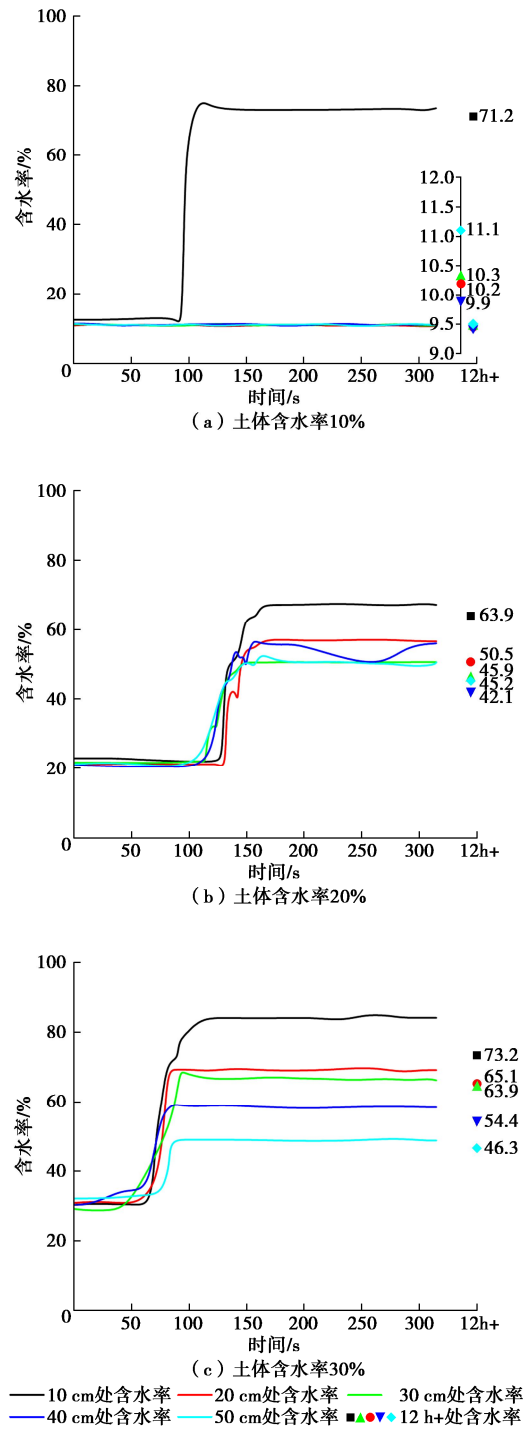


图 7 各工况土体含水率变化及 12 h+含水率

Fig. 7 Change of moisture content of soil and 12h + moisture contents under various working conditions

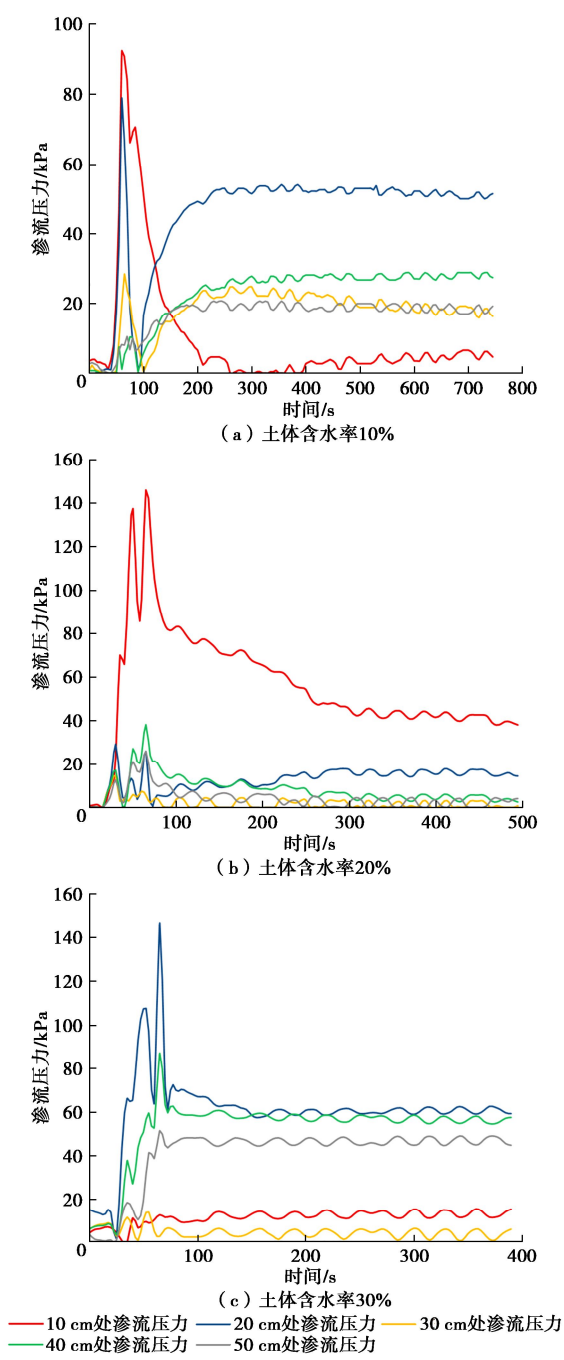


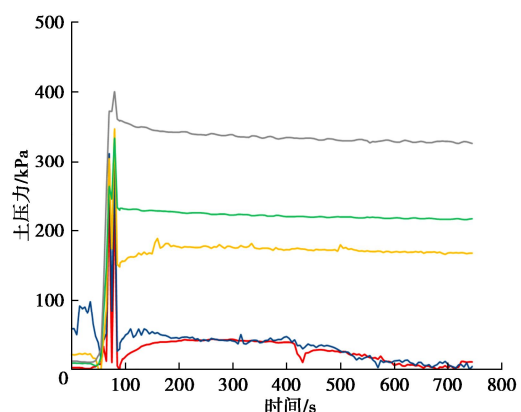
图 8 各工况渗流压力变化

Fig. 8 Change of seepage pressure under various working conditions

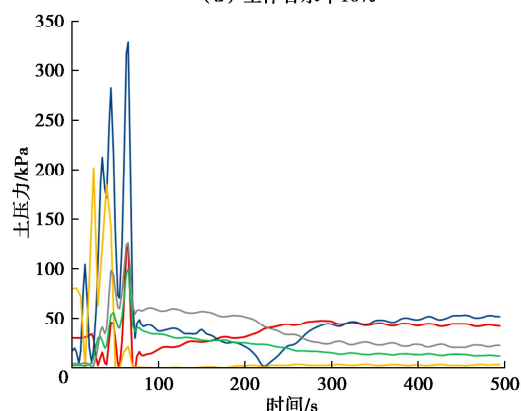
3.4 土压力分析

分析注浆过程中各试验组土压力的变化, 见图 9。发现土体含水率为 10%时, 土压力形成了消散-保持曲线, 说明注入水泥砂浆后, 浆液压力消散过程较慢。土压力的峰值最大值出现在 50 cm 处, 为 400.37 kPa, 峰值最小值出现在 10 cm 处, 为 251.85 kPa。土压力的整体增大主要由浆液抬升力所引起, 50 cm 处土压力最大的原因主要是上方边界的存在抑制了土体抬升的空间。

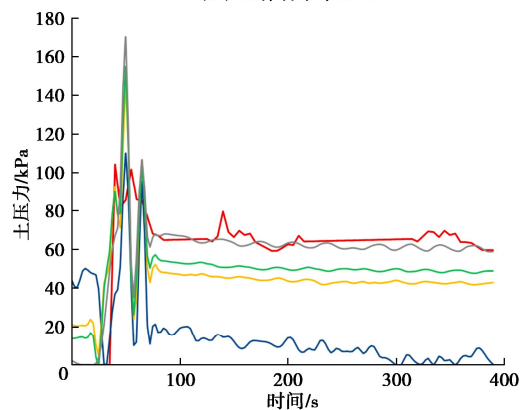
当土体含水率为 20% 时, 土压力形成了较为明显的阶跃曲线, 这与劈裂扩散时的土压力变化趋势是一致的。浆液在注入土体后, 土体应力不断增加至起劈压力, 开始产生劈裂, 劈裂通道产生后, 土体应力急剧减小, 浆液充填满通道后, 土体应力继续增加, 直至新的劈裂通道产生, 注浆结束后土压以较快速度进行了消散。土体含水率为 30% 时, 土压力同样形成明显的阶跃曲线, 与第 2 组试验分析一致。土压力整体较第 1 组中的土压力小, 同样说明当土体发生劈裂后, 浆液得以继续扩散, 浆液压力未转化为对土体的抬升力。



(a) 土体含水率 10%



(b) 土体含水率 20%



(c) 土体含水率 30%

— 10 cm 处土压力 — 20 cm 处土压力 — 30 cm 处土压力
— 40 cm 处土压力 — 50 cm 处土压力

图 9 各工况土压力变化

Fig. 9 Change of soil pressure under various working conditions

4 讨 论

盾构隧道壁后注浆的主要作用有充填盾尾间隙、加固地层和稳固管片等, 由于土体自重应力的存在导致地层中的垂直主应力大于水平主应力, 地层中土体应力的分布不均, 这就带来了宏观上浆液流体和土体之间复杂的力学作用。对于渗透系数较低的黄土地层, 浆液的扩散形式主要表现为压滤扩散和劈裂扩散, 总体来说, 当黄土含水率为 10% 时, 浆液几乎未发生扩散, 浆液注入量极低; 当黄土含水率为 20%~30% 时, 土体发生了劈裂。这两种浆液扩散形式均对盾构隧道结构及地层产生影响, 前者由于浆液注入量低, 盾尾间隙内存在较大的浆液压力可能导致隧道变形甚至管片破损; 后者由于土体劈裂, 虽然使得浆液的加固范围变大, 但存在浆液泄露的风险。

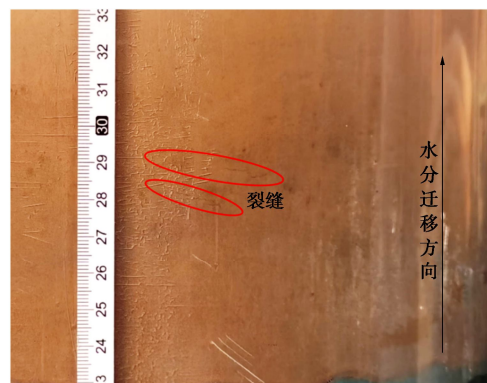


图 10 注浆后产生的土体裂缝

Fig. 10 Soil cracks generated after grouting

由于黄土独特的水敏性, 浆液中的水会对地层产生较大影响, 尤其当黄土含水率较低时, 黄土则具有很高的吸水势^[21-22], 加之土颗粒之间可溶盐的作用, 使得在水泥砂浆的扩散中, 压滤和毛细管影响下, 浆液中水分向上迁移, 使得土体中产生了微小的裂缝, 如图 10 所示。微小的裂缝在车辆和施工荷载扰动下发生扩展, 则可能导致隧道的围岩压力突增, 从形变压力转变为松散压力。实际工程中, 可考虑将微膨胀浆液应用至黄土地层盾构隧道壁后注浆工艺之中^[23], 以抑制裂缝的扩展。

5 结 论

(1) 在已有试验系统的基础上增加了含水率监测元件, 并优化了套件间连接手段, 设计了包含注入套件、模型套件、调压套件以及数据采集套件的可视化浆液扩散模型试验系统, 该系统可模拟不同地层情况、不同浆液配比、不同注浆参数影响下盾构隧道壁后注浆浆液扩散形式。

(2) 黄土含水率在 10% 时, 浆液几乎未发生扩散, 各层土压力较大, 浆-土形成了明显的分界面, 同时在分界面发生了水分迁移的情况, 在注入水泥砂浆时, 随着时间的推移, 浆液发生初凝后, 会在浆-土交界处形成“浆盘”。

(3) 黄土含水率在 20%, 30% 时, 浆液扩散距离较大, 各分层含水率显著变化, 土压、渗压随着注浆过程出现了阶跃变化, 浆液在土体中形成了较为明显的浆脉。

(4) 综合分析各试验组浆液扩散基本情况、含水率变化曲线、渗压及土压曲线, 得出黄土地层在低含水率下浆液以压滤扩散为主, 高含水率下以劈裂扩散为主, 两者同时伴随着压密扩散, 扩散形式转化的含水率界限在 10%~20%。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2024 年 7 月城市轨道交通运营数据速报[EB/OL]. 2024.08.06. <https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/yunlifexi/> (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Urban rail transit operation data report in July[EB/OL]. 2024.08.06. <https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/yunlifexi/> (in Chinese))
- [2] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, **50**(1): 97-109. (HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, **50**(1): 97-109. (in Chinese))
- [3] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (ZHANG Fengxiang, ZHU Hehua, FU Deming. Shield Tunnelling Method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 苟长飞, 叶飞, 张金龙, 等. 盾构隧道同步注浆充填压力环向分布模型[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 590-598. (GOU Changfei, YE Fei, ZHANG Jinlong, et al. Ring distribution model of filling pressure for shield tunnels under synchronous grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 590-598. (in Chinese))
- [5] ZHANG J, LU S D, FENG T G, et al. Research on reuse of silty fine sand in backfill grouting material and optimization of backfill grouting material proportions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **130**: 104751.
- [6] 毛家骅. 基于渗滤效应的盾构隧道壁后注浆浆液扩散机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. (MAO Jiahua. Study on the Grouts Diffusion Mechanism of Shield Tunnel Back-Filled Grouts Based on Filtration[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese))
- [7] 叶飞, 王斌, 韩鑫, 等. 盾构隧道壁后注浆试验与浆液扩散机理研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, **33**(12): 92-104. (YE Fei, WANG Bin, HAN Xin, et al. Review of shield tunnel backfill grouting tests and its diffusion mechanism[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(12): 92-104. (in Chinese))
- [8] SHIRLAW N, RICHARDS D, RAMOND P, et al. Recent experience in automatic tail void grouting with soft ground tunnel boring machines[C]// Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, Singapore, 2004: 22-27.
- [9] LAMBE T W. The structure of compacted clays[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1958, **84**(2): 1-34.
- [10] SEED H B, CHAN C K. Structure and strength characteristics of compacted clays[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1959, **85**(5): 87-128.
- [11] 李培楠, 石来, 李晓军, 等. 盾构隧道同步注浆纵环向整体扩散理论模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, **48**(5): 629-637. (LI Peinan, SHI Lai, LI Xiaojun, et al. Theoretical model of synchronous grouting longitudinal-circumferential integrated diffusion of shield tunnels[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, **48**(5): 629-637. (in Chinese))
- [12] 舒计城. 超大直径盾构双液注浆试验及应用效果[J]. 铁道建筑, 2022, **62**(5): 117-122. (SHU Jicheng. Experiment and application effect of double-liquid grouting in large-diameter shield tunnel[J]. Railway Engineering, 2022, **62**(5): 117-122. (in Chinese))
- [13] 陈鹏, 王先明, 刘四进, 等. 超大直径盾构隧道同步双液注浆原位试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, **43**(1): 64-74. (CHEN Peng, WANG Xianming, LIU Sijin, et al. In-situ experiment on synchronous double-component grouting in super-large-diameter shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023, **43**(1): 64-74. (in Chinese))
- [14] 倪小东, 寇恒琦, 刘雨琨, 等. 基于透明土技术的盾构壁后注浆效果试验研究[J]. 长江科学院院报, 2023, **40**(10): 80-87. (NI Xiaodong, KOU Hengqi, LIU Yukun, et al. Experimental study on slurry diffusion and effect evaluation of shield tunnel backfill grouting based on transparent soil technique[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, **40**(10): 80-87. (in Chinese))

- [15] 金 威, 丁文其, 徐前卫, 等. 软弱围岩特大跨度隧道模型试验技术及应用[J]. 现代隧道技术, 2014, **51**(5): 99-107. (JIN Wei, DING Wenqi, XU Qianwei, et al. Model-testing technology for an extra-large span tunnel in soft rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, **51**(5): 99-107. (in Chinese))
- [16] 张 玉. 水泥基注浆材料浆液扩散规律和预测控制试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (ZHANG Yu. Experimental Research on Law and Prediction Control of Slurry Diffusion Using Cement-Based Grouting Material[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [17] 张连震. 地铁穿越砂层注浆扩散与加固机理及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2017. (ZHANG Lianzhen. Study on Penetration and Reinforcement Mechanism of Grouting in Sand Layer Disclosed by Subway Tunnel and its Application[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017. (in Chinese))
- [18] 叶 飞, 夏天晗, 应凯臣, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液与地层适配性优选方法[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(12): 2225-2233. (YE Fei, XIA Tianhan, YING Kaichen, et al. Optimization method for backfill grouting of shield tunnel based on stratum suitability characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(12): 2225-2233. (in Chinese))
- [19] 蔡德国, 叶 飞, 曹 凯, 等. 砂性地层盾构隧道壁后注浆浆液扩散室内试验[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(10): 274-283. (CAI Deguo, YE Fei, CAO Kai, et al. Test of grout diffusion of shield tunnel backfill grouting in sandy strata[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(10): 274-283. (in Chinese))
- [20] 叶 飞, 李思翰, 夏天晗, 等. 低渗地层盾构隧道壁后注浆压密-劈裂扩散模型研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(10): 2014-2022. (YE Fei, LI Sihan, XIA Tianhan, et al. Study on pressure-fracture diffusion model of shield tunnel backfill grouting in low permeability strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(10): 2014-2022. (in Chinese))
- [21] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 3-13. (XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 3-13. (in Chinese))
- [22] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(7): 1297-1312. (XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(7): 1297-1312. (in Chinese))
- [23] 李晓龙, 陈 灿, 贾赫扬, 等. 考虑化学反应的聚氨酯高聚物浆液膨胀机理试验与数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, **20**(11): 4163-4173. (LI Xiaolong, CHEN Can, JIA Heyang, et al. Expansion mechanism of polymer considering chemical reactions: experiment and numerical simulation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, **20**(11): 4163-4173. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊为全国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊和中国科技核心期刊。本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”“Scopus 数据库”等国际数据库收录。本刊官网(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章, “中

国知网”“万方网”“维普网”全文收录本刊。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 222 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000-4548, 国内统一刊号 CN 32-1124/TU, 国内发行代号 28-62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)