

• 土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202201182



本刊网刊

护盾式TBM隧道管片壁后豆砾石分布规律

吴圣智^{1,2}, 赵洪海^{1,2}, 谢宏强^{1,2}, 董宇苍^{3*}, 方霖⁴, 王明年⁵, 刘越^{1,2}

(1.山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2.山东建筑大学 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101;

3.河北地质大学 城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031; 4.四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

5.西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 作为管片与围岩间的连接层, TBM隧道中的豆砾石对管片受力具有重要意义。受施工技术、地质条件等影响, 豆砾石填充不密实、分布不均匀的现象时常发生, 导致管片出现错台、开裂、渗漏水等灾害, 故探明豆砾石分布特征是分析管片受力的基础。对此, 依托青岛地铁TBM隧道项目, 采用地质雷达对管片壁后豆砾石分布特征进行现场测试, 并进行单环管片豆砾石吹填数值模拟, 分析了隧道直行段、转弯段豆砾石在管片壁后的迁移过程, 讨论了地质条件、吹填压力、塌方等因素对吹填质量的影响规律。结果表明: 在TBM隧道施工中, 拱顶、隧底及转弯段外侧下部为豆砾石空洞多发部位, 拱顶与隧底空洞长度大于1 m, 主要表现为层间脱空, 转弯段外侧下部豆砾石空洞规模较小且不密实; 地质条件越差, 豆砾石出现空洞的概率及规模越大, 强风化地层表现最为明显; 塌方通过阻碍豆砾石迁移路径、增加碰撞耗能影响豆砾石吹填质量, 但影响范围仅在塌方处; 提升豆砾石吹填压力可以改善拱顶和隧底豆砾石填充状态, 地质条件越好, 改善程度越明显, 强风化地层豆砾石吹填质量改善不明显; 管片壁后豆砾石空洞按照形成原因分为3类: 碰撞耗能、塌方掉块和转弯段间隙变小, 并给出了3类空洞的多发部位、特征及施工控制建议。

关键词: 隧道工程; 全断面隧道掘进机; 管片; 豆砾石; 分布特征

中图分类号: TU741

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)04-0150-11

全断面隧道掘进机(简称TBM)施工速度快、可靠性高, 被广泛应用于交通隧道、煤矿工程、引水工程等各类地下工程中^[1-3]。当TBM隧道采用管片作为支护结构时, 管片与围岩间存在5~20 cm的间隙, 通常采用豆砾石(或碎石)填充后注浆, 形成围岩-豆砾石注浆层-管片这一稳定的受力体系^[4-9]。豆砾石注浆前, 力学参数差, 松散易变性, 对管片的约束有限。同时, 管片壁后间隙为封闭空间, 受施工技术、地质条件等影响, 时常出现豆砾石填充不密实、分布不均匀的现象。大量工程经验表明^[10-11], 豆砾石填充不密实、分布不均匀时, 管片极易出现应力集中, 导致隧道出现大规模的错台、开裂、渗漏水等灾害。因此, 探明豆砾石在管片壁后的分布特征是开展管片受力研究的前提。

针对管片壁后豆砾石的分布特征, 国内外学者开展了大量研究。于舒雅^[12]将管片壁后的间隙视为均匀分布, 选取侧墙一小部位开展了豆砾石吹填数值模拟, 得出了管片壁后豆砾石的孔隙率范围。梁国辉^[13]依托兰州水源地项目得出豆砾石纵向分布具有阶梯性, 指出施工中应注重顶部豆砾石吹填。Hen-zinger等^[14]总结典型工程得出豆砾石纵向分布存在一个倾斜面, 该倾斜面与水平面的夹角与豆砾石的休止角接近。蕙振东等^[15]利用PFC开展了单环管片少量豆砾石吹填模拟, 发现豆砾石自由落体明显, 应首先吹填拱顶孔洞。张少轩^[16]依托兰州水源地工程, 通过现场取芯得出隧道豆砾石灌浆体存在一定的质量缺陷, 对管片受力具有重要影响。罗志鑫^[17]通过管片壁后回填注浆层钻芯取样发现围岩质量不同, 芯

收稿日期:2022-11-01 修回日期:2023-02-08 网络出版日期:2023-02-28

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020QE265); 国家自然科学基金项目(42172310)

作者简介:吴圣智(1987—), 男, 讲师, 博士。研究方向:隧道与地下工程。E-mail: wushengzhi19@sdjzu.edu.cn

*通信作者:董宇苍, 讲师, E-mail: Yucang_Dong@163.com

样形态存在差异,围岩质量对管片壁后豆砾石注浆施工具有重要影响。苏华友等^[18]阐述了TBM隧道质量控制问题,提出可通过钻孔取芯和灌水试验检验豆砾石注浆层质量。胡明明等^[19]分析了豆砾石注浆层应力与波速的对应关系,尝试通过声波检验豆砾石注浆层的质量。胡超等^[20]利用PFC对豆砾石吹填质量进行了分析,探明豆砾石在管片壁后存在分层现象,并提出阶梯吹填法。

综上所述,TBM施工过程中管片壁后豆砾石易出现填充不密实的情况,并对管片受力产生重要影响,但未能揭示其形成机制,也未给出管片豆砾石的分布模式,这就造成管片受力分析与实际存在较大差别。对此,依托青岛地铁2号线双护盾TBM隧道,采用数值模拟及现场实测的方式,分析了管片壁后豆砾石的分布特征。研究成果有望为管片受力分析及豆砾石吹填施工提供支撑。

1 工程概况

1.1 工程位置

青岛地铁2号线海安路—高雄路段、泰山路—芝泉路段采用了双护盾TBM(DS-TBM)进行施工,如

表1 双护盾TBM主要参数

Tab. 1 Main parameters of DS-TBM

开挖直径/mm	前护盾			伸缩盾			支撑盾			尾盾		
	长度/mm	外径/mm	厚度/mm	长度/mm	外径/mm	厚度/mm	长度/mm	外径/mm	厚度/mm	长度/mm	外径/mm	厚度/mm
6300或6400	1463	6240	40	2910	6240	35	3240	6150	35	3190	6150	30

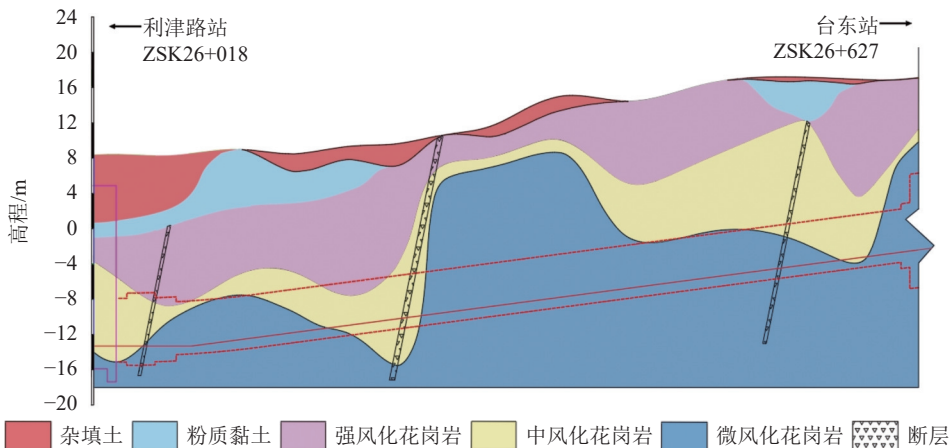


图2 隧道穿越地层地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of the tunnel crossing the stratum

1.2 豆砾石吹填施工

双护盾TBM整体呈倒梯形设计,管片脱离盾尾后,与围岩存在一定的间隙,一般采用豆砾石回填。豆砾石填充后,围岩、豆砾石、管片形成临时受力体系,该受力体系将持续15~20环,直至豆砾石注浆;

图1所示。双护盾TBM主机由刀盘、前盾、伸缩盾、支撑盾、后护盾等部分组成。结构设计中,为避免围岩径向收缩引起卡机灾害,双护盾TBM整体呈倒梯形设计,各部分结构外径逐步减小,具体参数如表1所示。TBM主机与整机长度分别为12 m和135 m,TBM隧道直行段开挖直径为6.3 m,转弯段(转弯半径小于600 m)的开挖直径为6.4 m。

隧道采用C50钢筋混凝土管片作为支护结构,每环管片由3块标准块、2块邻接块和1块封顶块组成,管片外径为6 m,厚度为30 cm。管片采用M27螺栓连接,块间设置两组螺栓,环间设置10组螺栓,等角度布置。隧道穿越地层以中风化和微风化花岗岩为主,部分区段存在强风化花岗岩,如图2所示。



图1 青岛地铁2号线双护盾TBM隧道

Fig. 1 DS-TBM tunnel in Qingdao metro line 2

注浆后会形成豆砾石与围岩、管片这一稳定的支护体系,如图3所示。豆砾石为形态圆滑、粒径均匀的小砾石,密度为1800~1900 kg/m³之间,粒径分布如图4所示。

利用气泵经管片上的注浆吹填孔将豆砾石填充

至管片壁后间隙。每环管片设置6个吹填孔，位于每块管片的中心位置，吹填孔直径为10 cm，如图5所示。

豆砾石吹填压力控制在0.3~0.6 MPa，吹填控制遵循“量控为主，压控为辅”的原则^[21]。

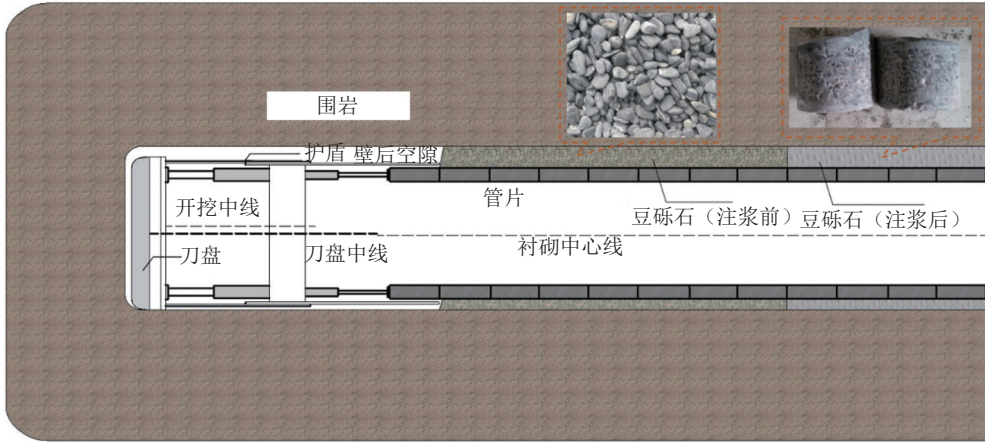


图 3 围岩-豆砾石-管片空间关系

Fig. 3 Spatial relationship between surrounding rock, pea gravel and segment

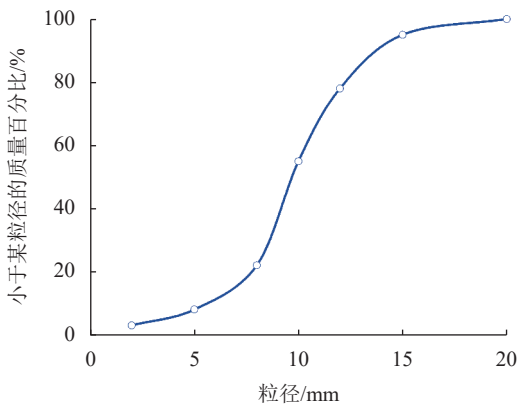


图 4 豆砾石粒径分布

Fig. 4 Grading of pea gravel

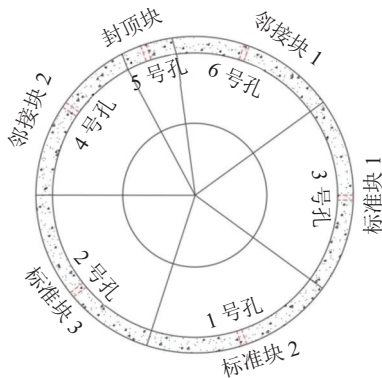


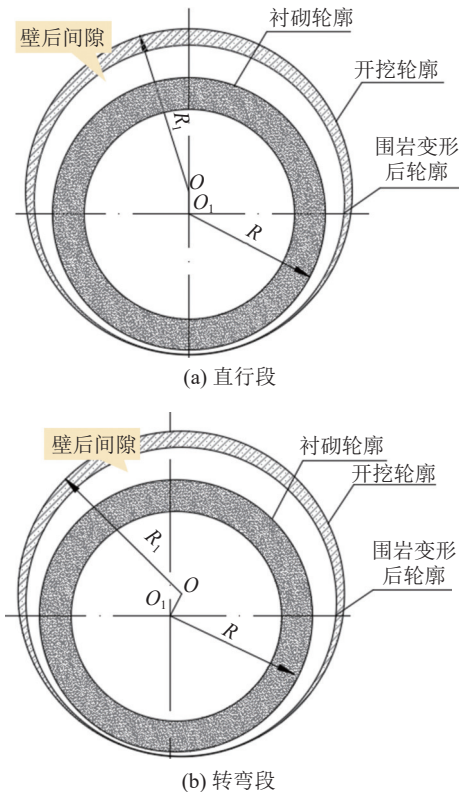
图 5 吹填孔位置

Fig. 5 Location of fill holes

1.3 管片壁后间隙分布

受隧道线型、围岩变形等影响，管片与围岩之间的间隙分布不均匀，且底部间隙厚度往往小于顶部间隙厚度。受千斤顶推力影响，转弯段管片向隧道外侧出现了一定的偏离，两侧间隙厚度存在一定差异，表现出内大外小的特征。因此，管片壁后间隙实际存

在两种主要模式：一是线路直行区段管片与隧道开挖轮廓内外大致对称，管片与围岩间的间隙近似呈“上大下小、内外对称”的分布模式，如图6(a)所示；二是线路转弯段管片受掘进姿态及千斤顶推力影响，产生一定的水平偏移，管片壁后间隙呈“上大下小，内大外小”的非对称分布模式，如图6(b)所示。



注： R 为管片外半径； R_1 为开挖轮廓线半径； O 为开挖轮廓圆心； O_1 为管片圆心。

图 6 管片壁后间隙分布模式

Fig. 6 Shape of gap between segment ring and surrounding rock

2 管片壁后豆砾石分布现场实测

豆砾石吹填完成后,通过地质雷达沿管片环向对管片壁后豆砾石分布状态进行扫描,结果如图7所示。



图7 管片壁后豆砾石分布地质雷达测试

Fig. 7 GPR test on distribution of pea gravel behind segment ring

受施工、地质等多种因素的影响,管片壁后豆砾石存在一定空洞,通过地质雷达获取管片壁后各部位出现空洞的概率,结果如图8所示(编号1~12为位置示意)。

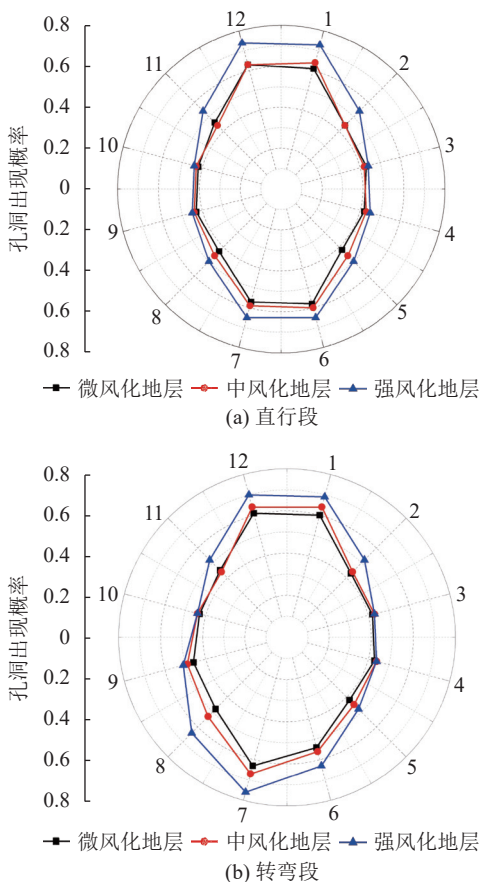


图8 管片壁后各部位空洞出现概率

Fig. 8 Cavity occurrence probability in various parts behind the segments

由图8可以得出以下结论:

1)隧道直行段豆砾石填充后拱顶和隧底出现空洞的概率最大,为0.2~0.3;边墙部位几乎不会出现空洞。

文献[16]通过现场取芯观测了管片壁后豆砾石的分布,发现拱顶与隧底豆砾石填充明显少于其他部位,与本次测试结果接近。

2)相比直行段,隧道转弯段除拱顶和隧底外,外侧(间隙窄侧)下部空洞出现的概率比较大,为0.10~0.25。

3)地质条件越差,管片壁后豆砾石出现空洞的概率越大;强风化地层空洞出现概率最大。

地质条件对隧道顶部、底部及转弯段外侧下部的豆砾石空洞出现概率影响较大,对隧道两侧影响较小。

4)强风化地层直行段拱顶与隧底空洞出现的概率分别为微风化地层空洞出现概率的1.52、1.43倍,为中风化地层空洞出现概率的1.42、1.28倍。隧道顶部豆砾石空洞出现概率受地层条件影响明显较其他位置大。

这表明地质条件降低,地层稳定性变差,拱顶越容易出现掉块堵孔现象,豆砾石空洞出现概率明显增加。

5)强风化地层转弯段豆砾石空洞出现概率较微风化、中风化地层增加明显,其中,外侧下部增加最大,分别为微风化和中风化地层空洞出现概率的2.41、1.59倍。由于该部位间隙狭窄,一旦出现掉块情况,极易阻碍豆砾石吹填路径,引起该处豆砾石填充不密实。

拱顶、隧底及转弯段外侧下部(间隙窄侧)为豆砾石空洞的多发部位,但不同部位空洞出现的规模也不相同。3个部位空洞环向长度分布占比分别如图9所示。

由图9可知:拱顶与隧底处空洞的环向长度相对较大,多数大于1 m,以层间脱空为主;隧道转弯段外侧下部空洞环向长度相对较小,多数小于1 m,主要表现为不密实;地质条件越差,围岩塌方掉块阻塞豆砾石吹填路径的概率越大,空洞环向长度也越大。

以上说明拱顶豆砾石空洞长度受地质条件影响明显大于隧底和转弯段外侧下部,拱顶处掉块阻塞吹填路径后,豆砾石难以填充,同时也难以受临近管片豆砾石吹填补偿,造成空洞环向长度明显增加;隧道下部塌方掉块虽阻塞了豆砾石吹填路径,但临近管片豆砾石吹填后会得到一定的补充,豆砾石空洞长度降低。

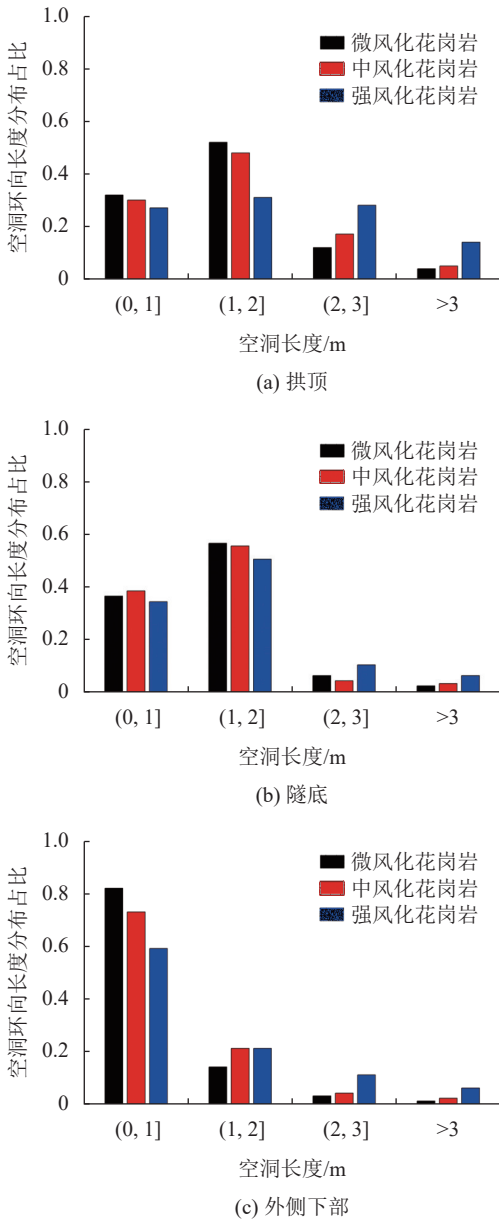


图 9 空洞长度分布
Fig. 9 Cavity length distribution

3 管片壁后豆砾石吹填数值模拟

3.1 豆砾石细观参数数值标定

通过豆砾石三轴试验与数值三轴试验对比反演的方式确定豆砾石数值^[22]。利用大型三轴剪切试验仪开展豆砾石剪切试验,试样尺寸为300 mm×600 mm,围压分别为50、100和200 kPa。

同时,建立1:1的三轴剪切数值试验模型,颗粒采用ball单元模拟,颗粒与颗粒采用线弹性接触模型。数值计算与试验结果对比如图10所示,根据对比确定豆砾石吹填模拟时采用的豆砾石颗粒细观参数见表2。

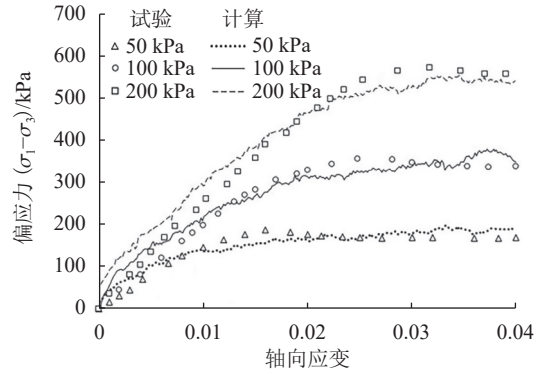


图 10 试验与计算结果对比

Fig. 10 Comparison of test and calculation results

表 2 豆砾石细观参数

Tab. 2 Microscopic parameters of pea gravel

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	1 850
法向刚度/Pa	6×10 ⁷
切向刚度/Pa	4×10 ⁷
摩擦系数	0.8
阻尼比	0.65

3.2 豆砾石吹填数值模型

由于管片壁后豆砾石颗粒体积远小于间隙体积,而管片壁后颗粒达百万计,因此将其简化为圆形颗粒,采用ball模拟,模拟中ball单元粒径分布如图4所示,计算参数见表2。

洞壁及管片外侧采用wall模拟,管片壁后间隙形态分为直行段和转弯段两类,各部位间隙厚度依据现场量测确定;洞壁节理及围岩质量通过刚度、摩擦系数、阻尼比反映;颗粒与颗粒、颗粒与墙之间接触采用线性模型,所需的计算参数包含刚度、接触的摩擦系数和阻尼比。

在豆砾石参数标定的基础上,进一步开展豆砾石在管片及围岩上的滑动、碰撞试验与反演,即可获得围岩、管片计算参数,见表3^[23]。

表 3 计算参数^[23]

Tab. 3 Calculation parameters^[23]

材料	刚度/Pa	摩擦系数	阻尼比
管片	5×10 ⁹	0.70	0.50
强风化花岗岩	1×10 ⁸	0.90	0.70
中风化花岗岩	8×10 ⁸	0.85	0.60
微风化花岗岩	2×10 ⁹	0.75	0.55

豆砾石自下而上对称吹填。模拟时,豆砾石在吹填管内生成,在吹填压力的作用下进入管片壁后间隙,如图11所示。

模拟时,考虑了地质条件、吹填压力、塌方掉块的影响,计算工况见表4。

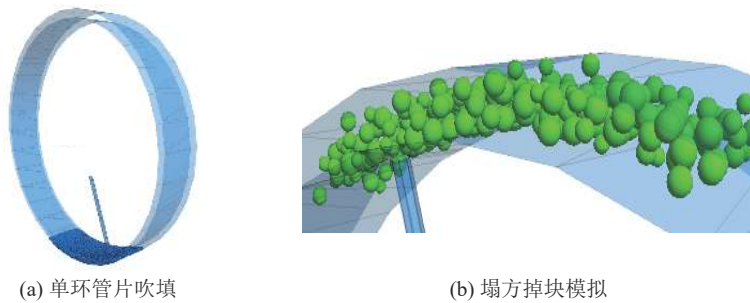


图 11 数值模型

Fig. 11 Numerical model
表 4 计算工况

Tab. 4 Calculation conditions

计算工况	区段	地层	间隙厚度/cm	偏移/cm	塌方掉块范围	吹填压力/MPa
1		微风化花岗岩	顶部20,底部10			0.3
2		中风化花岗岩	顶部18,底部10			0.3
3		强风化花岗岩	顶部15,底部10			0.3
4					拱顶30°	0.3
5	直行段	强风化花岗岩	顶部15,底部10		拱顶60°	0.3
6					拱顶120°	0.3
7		微风化花岗岩	顶部20,底部10			0.4
8		中风化花岗岩	顶部18,底部10			0.4
9		强风化花岗岩	顶部15,底部10			0.4
10		微风化花岗岩	顶部30,底部10	5(水平)		0.3
11	转弯段	中风化花岗岩	顶部24,底部10	5(水平)		0.3
12		强风化花岗岩	顶部22,底部10	5(水平)		0.3

3.3 直行段吹填计算结果

3.3.1 吹填过程中豆砾石分布模式

以工况1为例,分析隧道直行段豆砾石在管片壁后的分布特征,各吹填孔完成吹填后的计算结果如图12所示。

由图12可知:

1)豆砾石进入管片壁后间隙后具备一定的吹填速度,部分颗粒克服重力上升,部分颗粒下落堆积。其中,上升的颗粒会与围岩、管片及颗粒碰撞导致能量消耗,运动速度不断降低,最终下落堆积。豆砾石的运动轨迹导致位于吹填孔下方的区域可以被填充,吹填孔上方区域仅少部分被填充。

2)1号吹填孔吹填完成后,隧底颗粒堆积后会形成一定的倾斜面(与Henzinger等^[14]研究成果相似,其认为该倾斜面倾斜角与豆砾石的休止角有关),如图13所示。由2号吹填孔吹入的颗粒填充该倾斜面上部空间时,会增加颗粒与豆砾石碰撞,此时,颗粒动能消耗增加,隧底无法有效填充。位于隧道两侧的3、4号吹填孔对孔口以下间隙能够有效填充。5、6号吹填孔在填充拱顶时颗粒需克服重力上升;在上升过程

中,除重力导致能量消耗外,颗粒碰撞次数及能量消耗也相应增加,导致拱顶间隙难以填充。

3)豆砾石吹填完成后,拱顶和隧底30°范围内存在不密实的情况,其他部位密实性良好。现场地质雷达测试结果显示,直行段拱顶与隧底容易出现空洞,与数值模拟结果一致。

豆砾石吹填完成后,通过测量圆提取直行段管片壁后豆砾石填充比(豆砾石体积与环向间隙体积之比),该比值能够反映管片壁后各部位豆砾石的填充密实情况,如图14所示。

由图14可以看出:拱顶和隧底的豆砾石填充情况最差,拱顶填充比为0.60~0.70,隧底填充比为0.70~0.80,其他部位密实性良好,填充比均超过0.90。这表明拱顶和隧底难以有效填充。随着地质条件下降,拱顶和隧底部位填充比出现了一定的降低,与微风化地层相比,强风化地层两部位颗粒填充比降低了约0.10,中风化地层填充比降低了约0.05,其他部位颗粒填充比几乎无变化。可见,随着地质条件变差,颗粒与围岩摩擦系数、阻尼均增大,颗粒填充过程中动能损耗增加,拱顶与隧底更加难以填充密实。

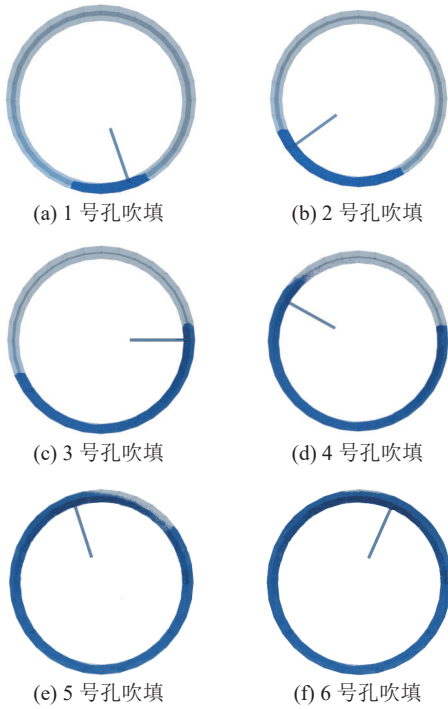


图 12 直行段管片壁后豆砾石分布

Fig. 12 Distribution of pea gravel behind segment ring of line straight section



图 13 堆积体倾斜分布

Fig. 13 Inclined distribution of particles

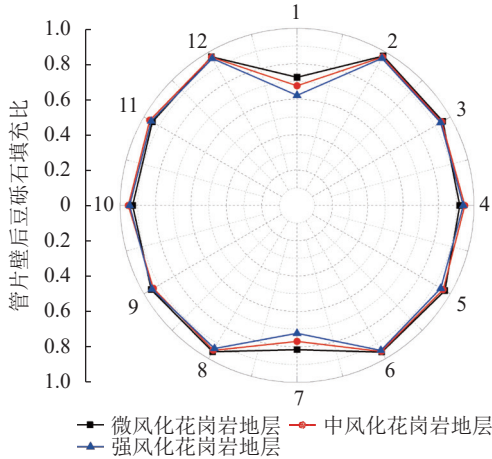


图 14 直行段管片壁厚豆砾石填充比分布

Fig. 14 Distribution of the filling ratios of pea gravel in the wall thickness of the segment in the straight section

3.3.2 吹填压力对分布模式影响

吹填压力决定了豆砾石颗粒的初始动能,对颗粒分布具有重要影响,不同吹填压力下管片壁后颗粒填充比分布规律如图15所示。由图15可知:吹填压力由0.3提至0.4 MPa后,拱顶和隧底部位颗粒的填充比出现一定的上升,其他部位上升不明显;地质条件越好,拱顶和隧底部位颗粒填充比上升越大,微风化地层

两部位填充比上升约0.10,中风化地层上升约0.06,强风化地层上升了约0.04。可见,提升吹填压力对微风化、中风化地层豆砾石吹填具有一定的积极作用,对强风化影响较小,对于微风化、中风化地层可适当提升豆砾石吹填压力以保障豆砾石填充质量。

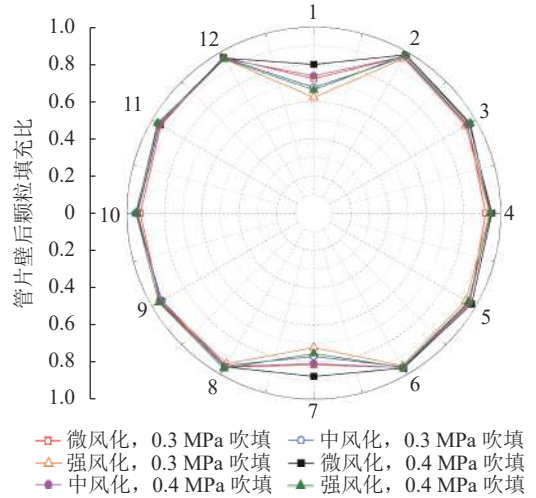


图 15 吹填压力对填充比影响

Fig. 15 Effect of hydraulic filling pressure on porosity

3.3.3 塌方掉块对分布模式的影响

地质条件较差的地层,拱顶易出现塌方掉块,易阻碍豆砾石的吹填路径,如图16所示。

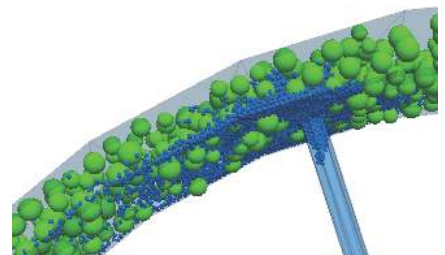
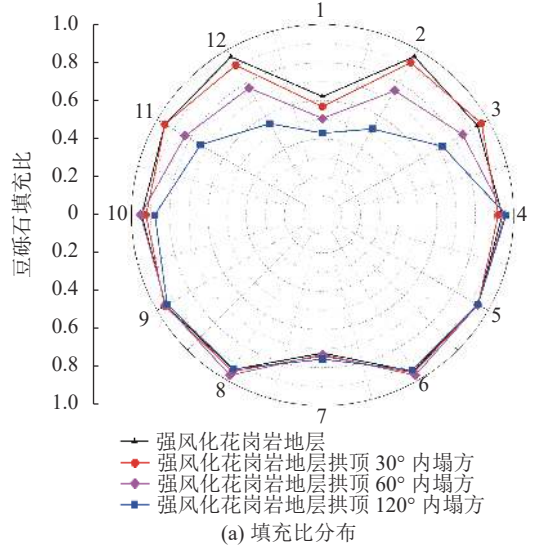


图 16 塌方掉块对豆砾石吹填影响

Fig. 16 Influence of landslide drop on pea gravel filling

由图16可以看出,拱顶发生塌方掉块后,塌方掉块位置处颗粒填充比明显降低,随着塌方掉块范围的增加,豆砾石填充比进一步降低。塌方掉块对豆砾石填充的影响主要表现在:塌方掉块阻碍了豆砾石的迁移路径,加速了豆砾石的碰撞消能,以上两者造成塌方掉块处形成较大的空洞。塌方掉块对豆砾石填充比的影响主要体现在塌方掉块位置处,而非塌方掉块位置豆砾石填充比变化不大,可见局部塌方掉块对豆砾石的分布影响有限。

3.4 转弯段吹填计算结果

微风化花岗岩地层转弯段管片壁后豆砾石分布如图17所示。可知:转弯段地层颗粒分布与直行段大体相同,均为拱顶与隧底易出现空洞;隧道外侧由于间隙厚度较薄,与隧道内侧颗粒分布存在一定差异。



图 17 微风化花岗岩地层转弯段管片壁后豆砾石分布
Fig. 17 Distribution of pea gravel behind the segments in the turning section of slightly weathered granite strata

不同地质条件下各部位豆砾石填充比分布见图18。

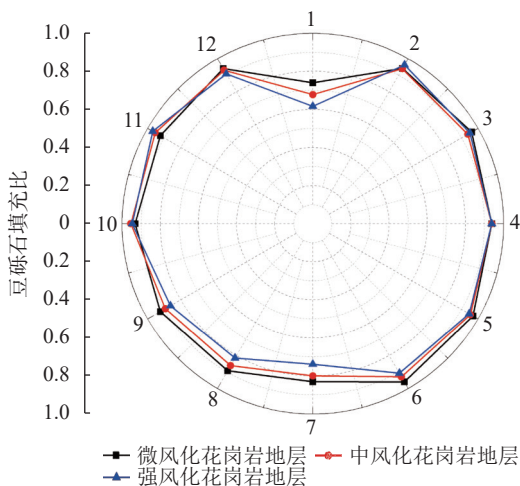


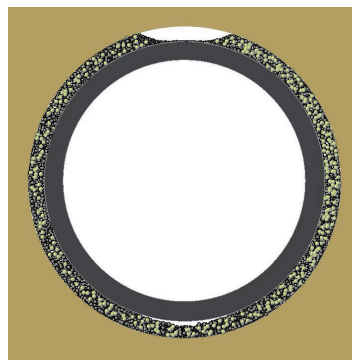
图 18 转弯段豆砾石填充比分布
Fig. 18 Porosity distribution of pea gravel in line turning section

由图18可知:转弯段颗粒填充比分布与直行段接近;拱顶部位颗粒填充比最小,为0.60~0.75,隧底部位其次,为0.70~0.80。与直行段不同的是:转弯段

外侧墙角部位由于间隙厚度最薄,该部位填充比相对较小,为0.80~0.90,且随地质条件变差,填充比降低;转弯段其他部位颗粒填充比差距不大,多在0.9以上,填充质量良好。可见,转弯段拱顶、隧底、外侧墙角部位难以填充密实,与地质雷达空洞常发部位测试结果一致。

4 豆砾石空洞模式及工程建议

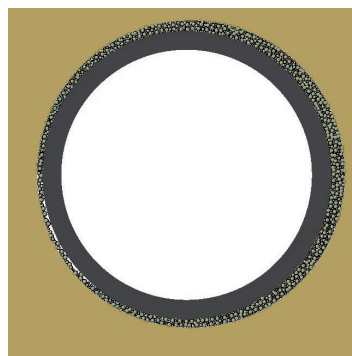
结合现场实测与数值模拟,可以将TBM施工过程中管片壁后豆砾石空洞分为碰撞耗能引起的空洞、塌方掉块引起的空洞、转弯段间隙变小引起的空洞,如图19所示;同时,根据空洞形成原因,进一步总结出了常见部位,并给出了控制建议,见表5。



(a) 碰撞耗能引起的空洞



(b) 塌方掉块造成的空洞



(c) 间隙变小引起的空洞

图 19 管片壁后豆砾石空洞典型分布模式
Fig. 19 Typical distribution patterns of pea gravel cavity behind segment wall

表 5 豆砾石空洞形成原因及控制建议

Tab. 5 Reasons for the formation of pea gravel voids and its control suggestions

类型	形成原因	常出现部位	特征	控制建议
1	隧道上方围岩塌方掉块阻碍了豆砾石的吹填路径	强风化地层隧道拱部	空洞范围受塌方掉块程度影响明显, 空洞长度多大于 2 m	根据吹填体积判别塌方掉块规模, 及时进行豆砾石注浆
2	豆砾石碰撞耗能过大, 吹填压力难以克服重力	拱顶和隧底	层间脱空, 空洞环向长度较长, 多大于 1 m	中风化、微风化地层高压吹填; 强风地层增设拱顶和隧底两处吹填孔
3	转弯段间隙变小	转弯段外侧墙角处	出现部位明确, 豆砾石交界面不连续, 表现为较多的小空洞, 空洞环向长度多小于 1 m	高压吹填, 特别是相邻环补充吹填

5 结 论

TBM隧道管片壁后豆砾石填充不密实、分布不均匀的现象时常发生, 导致管片出现大规模的错台、开裂、渗漏水等灾害。管片壁后豆砾石分布特征是分析管片受力研究的基础。依托青岛地铁, 采用数值模拟、现场实测等方法分析了管片壁后豆砾石分布特征, 得出以下结论:

1) 数值模拟及现场实测均显示, 在TBM隧道施工过程中, 隧道拱顶、隧底及转弯段外侧下部(间隙窄侧)为空洞多发位置。拱顶与隧底空洞环向长度多大于 1 m, 表现为层间脱空; 转弯段外侧下部空洞环向长度多小于 1 m, 表现为填充不密实。

2) 地质条件越差, 豆砾石颗粒与围岩的碰撞消能增加, 管片壁后豆砾石出现空洞的概率及空洞规模均会增大, 尤其是强风化地层管片壁后空洞规模及概率增加更为明显。

3) 塌方掉块阻碍了颗粒的迁移路径, 增加了豆砾石颗粒的碰撞消能, 造成塌方掉块范围内豆砾石填充不密实; 塌方掉块对颗粒填充比的影响主要体现在塌方掉块位置处, 对其他部位影响有限。

4) 提升吹填压力可以改善拱顶和隧底豆砾石填充状态, 但对其他部位改善不明显。地质条件越好, 提升吹填压力对豆砾石吹填的改善程度越明显。

5) 管片壁后豆砾石空洞按照形成原因可分为 3 类: 碰撞耗能引起的空洞、塌方掉块引起的空洞、转弯段间隙变小引起的空洞, 并给出了 3 类空洞的多发部位、特征及施工控制建议。

参考文献:

- [1] Zhong Zuliang, Li Chao, Liu Xinrong, et al. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of mechanized twin tunnels in soil-rock mass mixed ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 110: 103746.
- [2] Liu Quansheng, Huang Xing, Gong Qiuming, et al. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57: 33–46.
- [3] Huang Xing, Liu Quansheng, Shi Kai, et al. Application and prospect of hard rock tbn for deep roadway construction in coal mines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 73: 105–126.
- [4] Li Chaoyi, Hou Shaokang, Liu Yaoru, et al. Analysis on the crown convergence deformation of surrounding rock for double-shield TBM tunnel based on advance borehole monitoring and inversion analysis[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 103: 103513.
- [5] Hu Xiongyu, Fang Yong, Walton G, et al. Analysis of the behaviour of a novel support system in an anisotropically jointed rock mass[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 113–134.
- [6] Wu Shengzhi, Wang Mingnian, Yu Li, et al. Model test study on stress characteristics of backfill to segment in TBM tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 3976–3982. [吴圣智, 王明年, 于丽, 等. TBM隧道回填层-管片受力特征模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 3976–3982.]
- [7] Wu Shengzhi, Jiang Zhiyi, Wang Mingnian, et al. Design method for shield TBM tunnels considering backfill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 857–863. [吴圣智, 姜志毅, 王明年, 等. 考虑回填层的护盾式TBM隧道结构设计方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(5): 857–863.]
- [8] Hu Xiongyu, Yan Qixiang, He Chuan, et al. A support structure of segment lining combined with compressible crushed stone and its applications in inclined shaft[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(3): 579–591. [胡雄玉, 晏启祥, 何川, 等. 管片衬砌配合碎石可压缩层的斜井支护结构型式及其应用[J]. *岩土力学与工程学报*, 2016, 35(3): 579–591.]
- [9] Liu Yaoru, Hou Shaokang, Li Chaoyi, et al. Study on support time in double-shield TBM tunnel based on self-compacting concrete backfilling material[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 96: 103212.
- [10] Chen Weitao, Li Shu, Zhang Zihan. Analysis of segment

- cracking during construction of double shield TBM tunnel[J]. *Tunnel Construction*,2020,40(Supp2):50–57.[陈炜韬,李姝,张子晗.双护盾TBM隧道施工期管片开裂分析[J].*隧道建设(中英文)*,2020,40(增刊2):50–57.]
- [11] Jiang Zhiyi. Study on the design method of double-shielded TBM segment structure in the squeezing ground under high in-situ stress[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.[姜志毅.高地应力挤压性地层双护盾TBM管片结构设计方法研究[D].成都:西南交通大学,2017.]
- [12] Yu Shuya. Quantitative analysis of the morphological characteristics of pea-gravel and its simulation test of backfill grouting[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.[于舒雅.豆砾石形态特征量化分析与回填灌浆模拟试验研究[D].成都:成都理工大学,2018.]
- [13] Liang Guohui. Study on construction technology of TBM bean gravel backfill grouting in Lanzhou water source project[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.[梁国辉.兰州水源地项目TBM豆砾石回填灌浆施工技术研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.]
- [14] Hinzinger M R, Radončić N, Moritz B A, et al. Backfill of segmental lining—State of the art, redistribution behaviour of pea gravel, possible improvements/Tübbingbettung—Stand der Technik, Umlagerungsverhalten von Perlkies, Verbesserungspotenzial[J]. *Geomechanics and Tunneling*, 2016, 9(3): 188–199.
- [15] Xi Zhendong, Sun Heming, Li Jiakun, et al. Research and practice of gravel filling and grouting technology of rail transit single shield TBM[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2017, 36(9): 22–27.[蒯振东,孙鹤明,李佳坤,等.轨道交通单护盾TBM碎石吹填灌浆工艺研究与实践[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2017,36(9):22–27.]
- [16] Zhang Shaoxuan. Study on the effect of defects of pea gravel backfill grouting body on the engineering effect of segment lining structure[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.[张少轩.豆砾石回填灌浆体缺陷对管片衬砌结构工程效应的影响研究——以兰州水源地建设工程为例[D].成都:成都理工大学,2019.]
- [17] Luo Zhixin. Exploration of a project on TBM pea gravel backfill grouting test standards[J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2014, 34(4): 24–26.[罗志鑫.某工程对TBM豆砾石回填灌浆检验标准的探索[J].*水利建设与管理*,2014,34(4):24–26.]
- [18] Su Huayou, Wang Jialin. Quality control and management of tbm construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(11): 1930–1934.[苏华友,汪家林.TBM施工中的质量控制与管理[J].*岩石力学与工程学报*,2004,23(11):1930–1934.]
- [19] Hu Mingming, Gao Yang, Chen Jiaqi, et al. Study on real time synchronized correlation between wave velocity and stress of pea-gravel backfills[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2020, 57(3): 135–140.[胡明明,高阳,陈家骐,等.豆砾石充填体波速与应力实时同向相关性研究[J].*现代隧道技术*,2020,57(3):135–140.]
- [20] Hu Chao, Huang Qiuxiang, Wang Xueming. Simulation study on pea gravel filling process of shield TBM construction tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(3): 964–972.[胡超,黄秋香,汪雪英.护盾式TBM施工隧洞豆砾石吹填过程模拟研究[J].*地下空间与工程学报*,2022,18(3):964–972.]
- [21] Wu Shengzhi, Li Jian, Wang Mingnian, et al. Field test on stress and deformation of shield TBM tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12): 2500–2509.[吴圣智,李建,王明年,等.护盾式TBM施工中隧道受力与变形现场试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(12):2500–2509.]
- [22] Fang Wei, Zhou Zhigang. Sand-fall molding process and influencing factors of model porosity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(11): 2086–2093.[方薇,周志刚.落砂成型过程及模型孔隙率影响因素研究[J].*岩土工程学报*,2019,41(11):2086–2093.]
- [23] Hu Xiongyu. Research on the interaction between shield liner and surrounding rock under deep buried condition[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.[胡雄玉.大埋深条件下盾构隧道衬砌与围岩相互作用关系研究[D].成都:西南交通大学,2018.]

Distribution Characteristics of Pea Gravel Behind Segment in Shield Tunnel Boring Machine Tunnels

WU Shengzhi^{1,2}, ZHAO Honghai^{1,2}, XIE Hongqiang^{1,2}, DONG Yucang^{3*}, FANG Lin⁴, WANG Mingnian⁵, LIU Yue^{1,2}

(1.School of Civil Eng., Shandong Jianzhu Univ., Ji'nan 250101, China;

2.Key Lab. of Building Structural Retrofitting and Underground Space Eng. (Shandong Jianzhu Univ.), Ministry of Education, Ji'nan 250101, China;

3.School of Urban Geology and Eng., Hebei GEO Univ., Shijiazhuang 050031, China;

4.Sichuan Communication Surveying & Design Inst. Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

5.School of Civil Eng., Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China)

Abstract: Pea gravel plays a crucial role in segment stability as the connecting layer between the segment and the surrounding rock in TBM tun-

nels. Due to the influence of construction technology and geological conditions, the phenomena of dense filling and uneven distribution of pea gravel often occur, leading to various disasters such as dislocation, cracking, and water leakage. The distribution characteristics of pea gravel behind the segment ring form the basis for analyzing segment stress. Within the context of the Qingdao metro TBM tunnel project, geological radar is employed to examine the distribution characteristics of pea gravel behind the segment wall. Subsequently, a numerical simulation of single-ring pea gravel filling is conducted. This study analyzes the migration process of pea gravel behind the segment wall in both straight and curved sections of the tunnel and discusses the impact of geological conditions, filling pressure, collapses, and other factors on the quality of the filling. The results indicated that during TBM tunnel construction, the arch crown, tunnel bottom, and lower part of the outer side of the line's turning section are the areas most prone to pea gravel empty tunnels. Moreover, the pea gravel empty of the arch crown and tunnel bottom exceeds 1 m, while those at the lower part of the outer side of the turning section are smaller and less dense. Poorer geological conditions increase the probability and scale of voids in the pea gravel behind the segment, with strongly weathered strata showing the most significant effects. Collapses impact pea gravel reclamation by obstructing migration paths and increasing energy demands, although their impact is limited to the collapse site. Enhancing the hydraulic fill pressure of the pea gravel can improve the fill quality at the vault and tunnel bottom; the improvement is more pronounced under better geological conditions, though it does not significantly enhance the filling quality in strongly weathered strata. Based on the causes of formation, the pea gravel cavities behind the segment ring are categorized into three types: collision energy dissipation, collapse block, and smaller clearance in the turning section. Additionally, the study presents the frequent parts, characteristics, and construction recommendations related to these activities.

Key words: tunnel engineering; tunnel boring machine; segment ring; pea gravel; distribution characteristics

(编辑 李轶楠)

引用格式: Wu Shengzhi,Zhao Honghai,Xie Hongqiang,et al.Distribution characteristics of pea gravel behind segment in shield tunnel boring machine tunnels[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(4):150–160.[吴圣智,赵洪海,谢宏强,等.护盾式TBM隧道管片壁后豆砾石分布规律[J].工程科学与技术,2024,56(4):150–160.]