

盾构隧道破损管片修复竖井回填过程中的荷载分布规律^{*}

陈 东¹ 连逢逾¹ 贾培文² 任天烁³

(1. 成都轨道建设管理有限公司, 610041, 成都; 2. 中国交通建设股份有限公司轨道交通分公司, 102209, 北京;
3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 610059, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的:在地铁隧道管片修复过程中,一般通过明挖工作竖井到达隧道破损衬砌管片表面,进而修复隧道结构。但在回填工作竖井时,其内部回填材料作用于盾构隧道拱部的荷载分布规律尚不明确,因此需对隧道破损采样修复竖井的回填材料及竖井回填过程中的荷载分布规律进行研究。方法:建立盾构隧道修复竖井回填有限元模型;选取砂土、轻质混凝土、卵石土这 3 种回填材料,分析修复竖井回填荷载传递规律和荷载分布特征。结果及结论:当修复竖井回填材料为轻质混凝土时,竖井底部应力最小;当轻质混凝土回填高度达到 17.4 m 时,竖井底部应力为 55.58 kPa;竖井回填过程中对隧道拱顶造成的荷载形式为均布荷载;随着竖井累计回填高度的增加,盾构隧道拱部荷载呈指数函数增加;当竖井回填高度大于 6.0 m 后,隧道拱部荷载增长减缓并逐渐趋于稳定。

关键词 盾构隧道;管片修复;竖井回填

中图分类号 U455.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.022

Law of Load Distribution in Shield Tunnel Damaged Segment Repair and Vertical Shaft Backfilling Process

CHEN Dong, LIAN Fengyu, JIA Peiwen, REN Tianshuo

Abstract Objective: During the repair process of metro tunnel segments, the damaged lining segments are typically repaired by workers accessing the surface through an open excavation vertical work shaft and subsequently restoring the tunnel structure. However, when backfilling the shaft the law of load distribution on shield tunnel arch exerted by internal backfilling materials remains unclear. Therefore, it is necessary to study the backfilling materials sampled from tunnel damages for vertical shaft repair, as well as the load distribution law throughout vertical shaft backfilling process. Method: A finite ele-

ment model of the shield tunnel vertical shaft repair and backfilling is established. Three types of backfilling materials: sand, lightweight concrete, and gravel soil, are selected for analyzing of the load transfer and distribution law during vertical shaft repair and backfilling. Result & Conclusion: When lightweight concrete is used as the vertical shaft backfilling material, the stress at shaft bottom is minimized. When its backfilling height reaches 17.4 m, the stress on shaft bottom is 55.58 kPa. The load exerted on tunnel arch crown throughout vertical shaft backfilling process is uniformly distributed. As the cumulative backfilling height in the vertical shaft increases, the load on shield tunnel arch crown increases exponentially. When the backfilling height in the vertical shaft exceeds 6.0 m, the growth of load on tunnel arch crown slows down and gradually becomes stable.

Key words shield tunnel; segment repair; vertical shaft backfilling

First-author's address Chengdu Railway Construction Management Co., Ltd., 610041, Chengdu, China

在地铁隧道管片修复过程中,一般通过明挖工作竖井到达隧道破损衬砌管片表面,在探明衬砌管片破损范围及受损程度后,将已经严重受损的衬砌管片凿除,修复隧道结构恢复至安全服役状态。然而,当工作竖井进行回填时,工作竖井内部回填材料作用于盾构隧道拱部的荷载分布规律尚不明确。文献[1]结合上海某盾构隧道涌水涌沙事故,研究了采用冻结法修复隧道过程中,各施工阶段的管片稳定性。文献[2]研究了隧道上部回填过程中既有隧道的位移、内力及围岩压力,获得了隧道的受力变化规律,并分析了隧道受力与承载拱效应之间的关系。文献[3]计算分析了明洞衬砌管片开裂修复

^{*} SKLGP 国家重点实验室自主课题(SKLGP2021Z007)

后,管片上方累计回填土石厚度与衬砌管片最小安全系数之间的关系。文献[4]研究了泡沫轻质混凝土回填施工技术的实施要点,分析了泡沫轻质混凝土强度及其对基底的竖向荷载分布规律。以上文献对于隧道破损采样竖井修复方式及竖井回填过程中的荷载分布规律研究较少。

鉴于此,本文依托成都地铁某盾构隧道区间管片顶拱穿孔实际案例,研究隧道管片修复完成后,破损管片修复竖井(以下简称“竖井”)在回填过程中的荷载传递及分布规律,并针对不同竖井回填材料的荷载分布规律进行对比分析,确定最优回填材料。本文研究可为类似工程设计和施工提供理论基础。

1 工程概况

1.1 工程概述

成都某地铁运营区间的盾构隧道由于地面施工降水井,误将隧道管片顶部钻穿而破损,导致隧道拱顶破损处涌水,运行列车降速,管片破损位置涌水情况如图1所示。为确保地面和盾构隧道的安全性,现场立即采取了引流封堵等临时措施,使隧道不再渗漏。

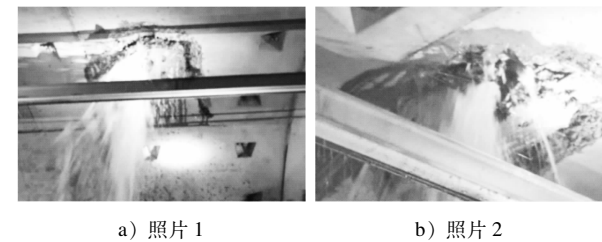


图1 管片破损位置涌水情况

Fig. 1 Water inrush at the segment damaged position

1.2 工程地质

本区间工程场地范围地势起伏平缓,地貌单元为岷江水系Ⅰ级阶地,上覆地层依次为杂填土、松散卵石、中砂层、稍密卵石、中砂层、中密卵石,下伏基岩为泥岩,属易风化岩,破损管片位置距离地面约17.3 m,位于中风化泥岩中,距离泥岩上层面约6.1 m。地下水位埋深为4.1~6.1 m,水量较丰富。

1.3 竖井修复方案及回填材料选择

经工程技术人员对破损管片进行检测和评估,采用洞外竖井修复方案对出现破损的管片进行永久修复。在管片破损处正上方施工内径为2.1 m的人工挖孔竖井,开挖深度至管片外轮廓面,竖井段

深约17.4 m,竖井每竖向掘进1 m便施作现浇混凝土护壁,护壁厚度为150 mm,混凝土强度等级为C30。

在盾构隧道管片修复后,开始竖井回填施工,竖井回填过程即为盾构管片顶部荷载的增长过程,竖井回填材料的选择对荷载影响较大。对比分析了砂土、轻质混凝土、卵石土这3种回填材料,分析其竖井回填荷载传递规律、荷载分布特征等,选择最优回填材料。

2 盾构隧道竖井修复回填有限元模型

2.1 建立计算模型

采用二维有限元计算模型分析竖井回填过程中的荷载分布规律,考虑盾构隧道及竖井开挖对地应力场的影响及计算边界效应,模型顶部至隧道上边界为17.4 m,模型底部和模型两侧边界至隧道边界为4倍洞径,即24.0 m,模型尺寸为54 m×47 m。模型上边界无约束,底部边界为固定约束,两侧边界均为法向约束。土体本构采用摩尔-库伦模型模拟,竖井护壁及盾构管片本构采用混凝土弹性模型模拟,竖井及土体采用二维面单元模拟,盾构管片采用梁单元模拟。竖井修复盾构隧道有限元计算模型如图2所示。围岩、盾构隧道及竖井的主要物理学参数如表1所示。

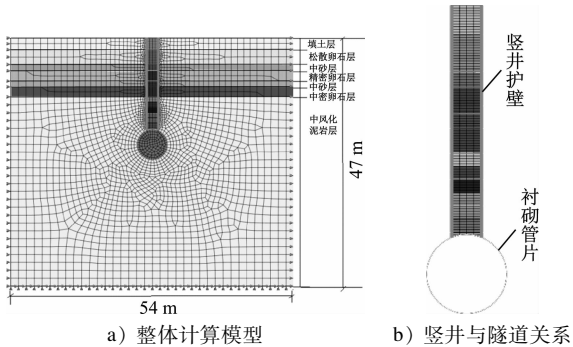


图2 盾构隧道竖井修复有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model of shield tunnel vertical shaft repair

2.2 竖井回填工序

在竖井回填过程中,具体的施工工序为:①盾构隧道管片拱顶至中风化泥岩层面范围,每次回填厚度为1.2 m;②中密卵石层,每次回填厚度为1.9 m;③中砂层,每次回填厚度为1.1 m;④稍密卵石层,每次回填厚度为2.0 m;⑤松散卵石层,每次回填厚度为1.2 m;⑥杂填土至地面,每次回填厚度为2.8 m。

表 1 围岩、盾构隧道及竖井的主要物理学参数
Tab.1 Main physical parameters of surrounding rocks, shield tunnel and vertical shaft

名称	弹性模量/ MPa	重度/ (kN/m³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	泊松比
杂填土	6.1	18.0	10	8	0.30
松散卵石土	22.0	20.0	32	2	0.33
稍密卵石土	30.0	21.0	35	5	0.30
中砂层	12.0	19.5	38	2	0.30
中密卵石土	35.0	22.0	40	5	0.25
竖井护壁	31 500.0	25.0	—	—	0.20
衬砌管片	34 500.0	25.0	—	—	0.20

2.3 界面单元及参数设置

竖井混凝土护壁与竖井内部回填材料之间设置界面接触单元。接触单元类型为 interface 面接触,竖井护壁 C35 混凝土与回填材料的虚拟厚度系数(虚拟厚度系数表示岩土与结构构件之间的强度差,两者强度差越大,其值越小)分别为 0.100(轻质混凝土)、0.080(卵石土)、0.065(砂土),强度折减系数分别为 1.0(轻质混凝土)、0.9(卵石土)、0.9(砂土)。

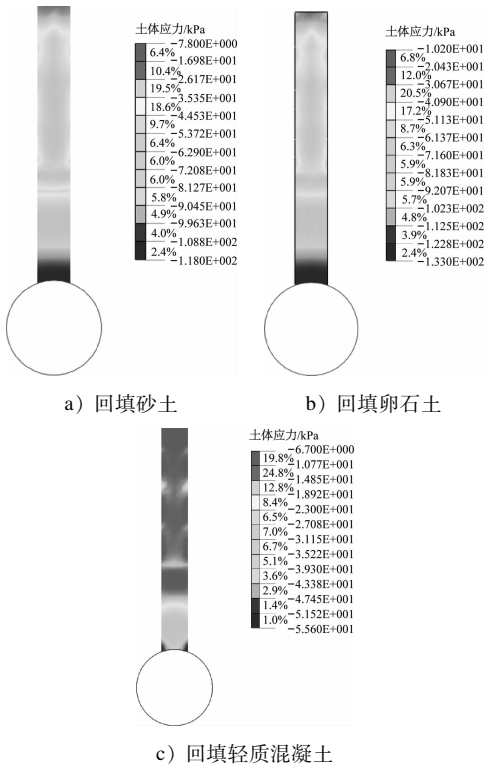
3 竖井回填过程荷载分布规律分析

3.1 竖井内部应力分布情况

回填竖井完成后,不同回填材料(砂土、卵石土、轻质混凝土)的竖井内部土体应力云图如图 3 所示。沿竖井中轴线选取节点,绘制不同回填材料条件下,土体应力沿竖井深度的分布曲线,如图 4 所示。

由图 3 可知:不同回填材料条件下,竖井内部的土体应力均为压应力;竖井底部的土体应力最大且分布较均匀;回填材料为轻质混凝土时,竖井底部的土体应力最小。

由图 4 可知:随着竖井深度的增加,竖井回填材料内部的土体应力呈非线性增大,竖井浅层范围内的土体应力呈线性增大分布且斜率较大,竖井深层范围内的土体应力增加缓慢;回填材料为砂土时,竖井底部的土体应力为 117.84 kPa;回填材料为卵石土时,竖井底部的土体应力为 132.81 kPa;回填材料为轻质混凝土时,竖井底部的土体应力为 55.58 kPa,显著小于回填材料为砂土和卵石土的土体应力。因此,竖井回填时选择轻质混凝土作为回填材料可以有效减少竖井内部的整体荷载,进而减小竖井下方衬砌管片结构的荷载。



注:应力负值代表压应力。

图 3 不同回填材料的竖井内部应力云图
Fig.3 Nephogram of vertical shaft internal stress of different backfilling materials

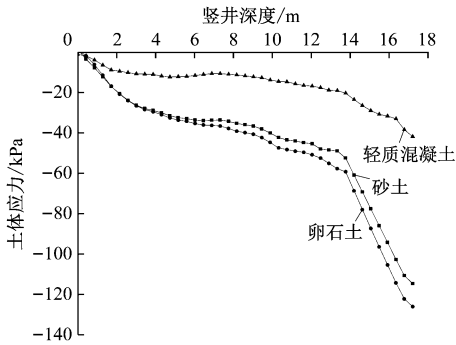


图 4 不同回填材料条件下土体应力沿竖井深度的分布曲线
Fig.4 Distribution curve of soil mass stress along vertical shaft depth with different backfilling materials

3.2 隧道拱顶荷载变化规律

为了分析隧道拱顶,即竖井底部荷载的分布特征,建立竖井底部与盾构衬砌管片顶部接触面单元模型,如图 5 所示。提取盾构管片顶部界面接触面荷载,绘制拱顶压力随竖井回填高度的变化曲线,如图 6 所示。

由图 6 可知:盾构管片顶部荷载随着竖井回填高度的增加而有所增大;当回填高度小于 4.0 m 时,

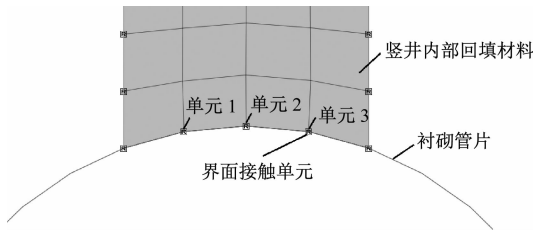


图5 竖井底部与衬砌管片的接触面模型示意图
Fig.5 Diagram of vertical shaft bottom and lining segment contact surface model

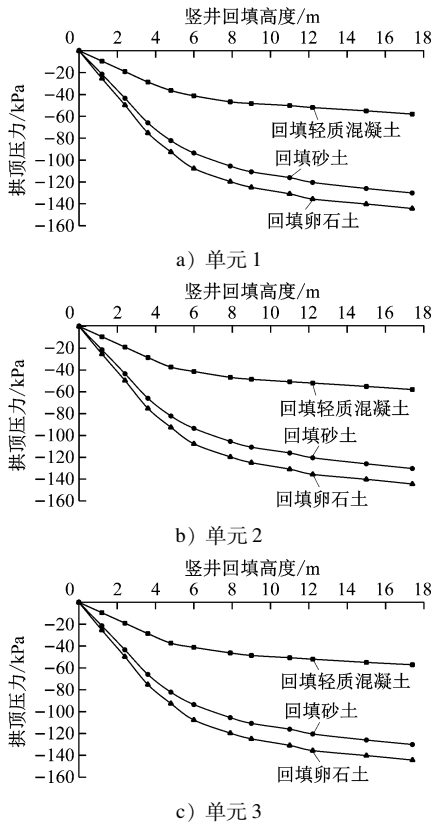


图6 隧道拱顶压力随竖井回填高度变化曲线
Fig. 6 Curve of tunnel arch crown pressure changing with vertical shaft backfilling height

拱顶压力呈线性增加;当回填高度达到 6.0 ~ 10.0 m 时,拱顶压力的增加变缓;当回填高度达到 10.0 m 以上时,拱顶压力趋于较稳定的状态,并有逐渐收敛的趋势。此外,当回填材料为轻质混凝土时,其隧道拱顶压力显著小于回填材料为砂土和卵石土时的拱顶压力,这主要是由于轻质混凝土的重度较小,而砂土与卵石土的重度相近导致的。

当竖井回填高度为 2.4 m、9.0 m 和 17.4 m 时,3 种回填材料各单元的拱顶压力如表 2 所示。由表 2 可知,当竖井内的回填材料相同、回填高度相同的情况下,拱顶各单元的压力几乎一致。由此可知,

由竖井回填引起的隧道拱顶荷载分布模式为均布荷载。

当竖井回填材料为轻质混凝土、砂土和卵石土情况下,建立隧道拱顶压力 P 与竖井回填高度 h 的关系式:

$$P = \gamma(6.85 - 7.03e^{-h/5.1}) \quad (1)$$

式中:

γ ——回填材料重度,单位 kN/m^3 。

由式(1)可知,拱顶压力随着竖井回填高度的增加而缓慢增大,当回填达到一定高度值时,隧道拱顶压力趋于稳定。

表 2 不同竖井回填高度下 3 种回填材料各单元的拱顶压力
Tab.2 Arch crown pressure of each unit with the three backfilling materials under different shaft backfilling height conditions

回填高度/m	回填材料	拱顶压力/kPa		
		单元 1	单元 2	单元 3
2.4	轻质混凝土	18.90	19.00	19.10
	砂土	43.40	43.40	43.40
	卵石土	49.70	49.70	49.60
9.0	轻质混凝土	48.20	48.50	48.60
	砂土	94.70	94.20	94.90
	卵石土	123.00	124.00	124.00
17.4	轻质混凝土	57.95	57.95	57.95
	砂土	130.30	130.30	130.30
	卵石土	144.10	144.50	143.50

3.3 隧道拱顶压力与材料自重对比分析

为进一步研究竖井回填过程中,隧道拱顶压力与竖井回填高度之间的关系,分别绘制采用不同竖井回填材料时,不同竖井回填高度下的拱顶压力和材料自重压力 γh 曲线对比图,如图 7 所示。由图 7 可知:当竖井回填高度小于 6.0 m 时,隧道拱顶压力与材料自重压力较为接近;当竖井回填高度大于 6.0 m 时,隧道拱顶压力逐渐偏离材料自重压力曲线且缓慢增加,并逐渐趋于稳定;当回填材料为轻质混凝土时,回填完成后的隧道拱顶压力为 57.9 kPa,而材料自重压力为 147.9 kPa,比拱顶实际压力大了 155.2%;当回填材料为砂土时,回填完成后的隧道拱顶压力为 130.3 kPa,而材料自重压力为 339.3 kPa,比拱顶实际压力大了 160.3%;当回填材料为卵石土时,回填完成后的隧道拱顶压力为 144.5 kPa,而材料自重压力为 382.8 kPa,比拱顶实

际压力大了 164.8%。

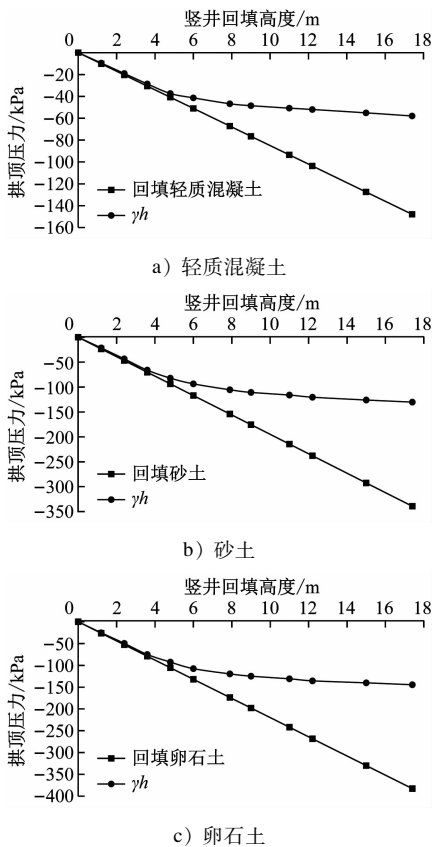


图7 隧道回填拱顶压力与材料自重压力对比图

Fig. 7 Comparison diagram of tunnel backfilling arch crown pressure and material self-weight pressure

由此可知,隧道拱顶荷载并非随着竖井回填高度的增加而线性增大,其约为回填材料自重的 0.4 倍,这是由于“谷仓效应”作用导致的。当竖井中回填材料的高度远大于竖井直径时,竖井底部压力不再随着回填高度的增加而线性增大,这是由于混凝土竖井侧壁与回填材料接触面摩擦力导致的。

4 结语

本文依托成都地铁某盾构隧道区间管片顶拱穿孔实际案例,研究隧道管片修复完成后,竖井在回填过程中的荷载传递及分布规律,主要获得以下结论:

1) 在竖井回填过程中,竖井回填材料内部的土压力均为压应力,竖井底部应力最大且均匀分布。采用轻质混凝土回填时,其竖井底部应力比砂土和卵石土回填的应力有所减小,因此可选择轻质混凝土作为竖井回填材料。

2) 竖井回填过程中盾构隧道拱顶荷载分布模式为均布荷载,由于“谷仓效应”作用,隧道拱顶回填荷载并非随着回填高度的增加而线性增大,隧道拱顶荷载约为回填材料自重的 0.4 倍。

3) 建立了竖井回填高度与隧道拱顶压力之间的关系式,随着竖井回填高度的增加呈指数关系增大。当竖井回填高度小于 6.0 m 时,隧道拱顶压力与材料自重压力曲线较接近。当竖井回填高度大于 6.0 m 时,隧道拱顶压力增长缓慢,并逐渐趋于稳定。

参考文献

- [1] 李柱和. 临江地铁冻结工程事故机理及修复技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
LI Zhuhe. Research on the mechanics about accident of subway engineering with refrigeration construction technology and its repairing technology [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [2] 马相峰, 龚伦, 张致心, 等. 开挖与回填过程中隧道受力和承载拱效应研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊2): 185.
MA Xiangfeng, GONG Lun, ZHANG Zhixin, et al. Study on tunnel stress and load-bearing arch effect during excavation and filling [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 185.
- [3] 余大龙, 舒东利, 廖余, 等. 填方高度对明洞衬砌运营安全的影响研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(10): 50.
YU Dalong, SHU Dongli, LIAO Yu, et al. Research on the influence of fill height on the operation safety of open-cut tunnel lining [J]. Construction Technology, 2022, 51(10): 50.
- [4] 毛庭. 泡沫混凝土回填施工技术实施要点探析[J]. 科技创新与应用, 2020(30): 151.
MAO Ting. Analysis on the implementation points of foam concrete backfill construction technology [J]. Technology Innovation and Application, 2020(30): 151.

(收稿日期:2022-08-11)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998.tongji.edu.cn