

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.02.038

# 浅埋明挖小间距隧道回填施工方案及力学性能研究

王承阳<sup>1</sup>, 江敏华<sup>2</sup>, 刘建松<sup>1</sup>, 余廷舜<sup>2</sup>

(1. 中铁二十四局集团西南建设有限公司, 四川 成都 610000; 2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆市 400074)

**摘要:** 为研究浅埋明挖小间距隧道回填施工方案以及回填过程中对衬砌结构变形和应力的影响, 依托重庆市渝北区金洲大道与星光大道延伸段节点改造工程, 采用有限元分析方法对比土石混合料、泡沫轻质土两种材料回填方案, 并结合现场监测数据对衬砌结构变形、应力进行分析。结果表明: 与土石混合料回填相比, 采用泡沫轻质土回填的结构变形、应力均满足承载力要求; 顶板、墙角、底板位移分别减少约 24%、29%、11% 且未超出位移容许值, 拉应力分别减少约 41%、39%、27%; 当衬砌结构回填深度为 0、2、4、6 m 时, 结构各部位拉应力变化趋势较缓, 且变形、应力基本呈对称分布, 可以有效避免结构拉剪破坏。综合考虑施工便利性、结构安全性、回填土压实度, 对该隧道回填采用特殊部位以泡沫轻质土分层回填, 两侧及顶部以土石混合料分层回填的回填方案; 现场以此方案进行回填施工后, 结构位移、应力均未超过容许值, 因土拱效应, 现场实测值小于模拟值。

**关键词:** 明挖小间距隧道; 泡沫轻质土; 数值分析; 现场实测

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)02-0166-07

## 0 引言

为适应城市发展和交通量的需求, 城市地下道路建设已成为扩展城市交通的主流。采用地下道路建设的方式可以有效减缓城市土地资源的压力, 提高用地的灵活性。

国内外对于地下分流小间距明挖隧道的回填研究以回填材料、回填方式、减载措施对结构受力特性、周边土压力和回填沉降规律的影响为主。徐慧芬等<sup>[1]</sup>采用 FC-W12-C7.5 泡沫混凝土作为回填材料; 李明等<sup>[2]</sup>采用泡沫轻质土作为高填明洞换填材料, 均起到了减少结构位移和周围土压力的明显效果。Zhuo 等<sup>[3]</sup>采用橡胶砂颗粒混合物(LFM)作为切割和覆盖隧道回填材料, 有效地消除了 CCT 顶部应力集中; 黎鸣<sup>[4]</sup>采用泡沫混凝土对桥头台背进行换填处理, 有效减小了桥头桩基的水平位移和竖向位移, 且该位移随着换填高度的增加而减小; Qiu 等<sup>[5]</sup>对软土区挡土墙后的路基进行换填处理, 有效减小了挡土墙和路基沉降的推力; Chen 等<sup>[6]</sup>采用含粉煤灰的泡沫混凝土对城市地下空间进行回填, 结果表明粉煤灰泡沫混凝土对原始结构产生的最大拉应力为 75.68 kPa, 可以忽略不计。

泡沫混凝土作为一种新型建筑材料, 具有质量

轻、流动性好、稳定性好、抗压强度和自立性良好、施工方便等优点, 被广泛用于软土地基置换、小间距隧道换填、隧道空洞填充等。Wang 等<sup>[7]</sup>将泡沫混凝土应用于高埋管道回填, 分析得出泡沫混凝土不仅可以提高地下结构的承载能力, 还可以提高管道防爆性能。马永政等<sup>[8]</sup>采用 1:1 横截面模型试验, 结合现场试验验证了泡沫混凝土填充程度、表观完整性和现场混合施工的有效性。

前述研究均未见泡沫轻质土在浅埋明挖小间距隧道回填实例。本文以重庆市渝北区金洲大道和星光大道延伸段节点改造工程为研究背景, 采用泡沫轻质土作为特殊部位回填材料, 通过数值模拟分析土石混合料和泡沫轻质土两种回填方案的优劣, 并与现场实测结果进行对比, 根据泡沫轻质土回填对结构变形、受力的影响来验证该回填方案的合理性。

## 1 工程概况

金洲大道和星光大道延伸段节点改造工程地下建立全互通式立交, 地面铺设路面, 全断面采用全明挖的开挖方式, 整体结构共包含 2 条主线和 9 条匝道; 匝道总长 4 157.178 m, 其中 J、K 匝道间距 2.3 m, 为小间距隧道, 结构跨度 8.85 m, 高 7.2 m, 明洞衬砌厚度 0.7 m, 采用 C40 混凝土。工地场地在勘察范围内土层由素填土、中风化泥岩和中风化砂岩组成。浅埋明挖小间距隧道示意图见图 1。

明挖隧道基坑平均开挖宽度达 40 m, 平均开挖

收稿日期: 2023-03-05

作者简介: 王承阳(1995—), 男, 学士, 工程师, 从事隧道施工管理工作。

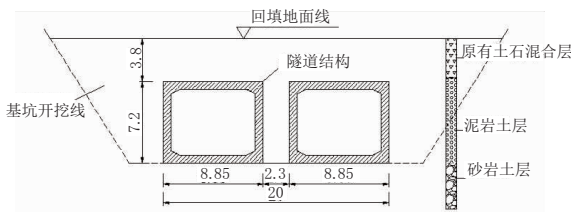


图1 浅埋明挖小间距隧道示意图(单位:m)

深度达 11 m。由于上覆公路,为满足公路地基承载力要求,秉承经济节约的理念,采用土石混合料分层压实回填。因为两隧道间距过小,若用土石混合料回填,不易压实,土石混合料会因自重、汽车荷载等因素发生不均匀沉降而造成公路塌陷和衬砌结构剪切破坏,因此需对小间距隧道的特殊部位进行换填。由于泡沫轻质土良好的流动性、固化后具有一定抗压强度和自立性、稳定、施工方便<sup>[4,9]</sup>,若用其对小间距隧道的特殊部位进行换填,则既可以满足压实度,又可以减少机器反复碾压对结构造成的扰动,避免顶部回填时,因隧道特殊部位回填土塌落而导致的围岩空洞,从而造成结构受力不均匀、结构不稳定、破坏等潜在危害。

浅埋小间距明挖隧道特殊部位回填示意图见图 2。由图 2 可见:泡沫轻质土回填在两隧道之间,回填宽度为  $B$ ,回填高度至隧道顶板;其余部位均采用对称施工方法进行土石混合料分层回填。

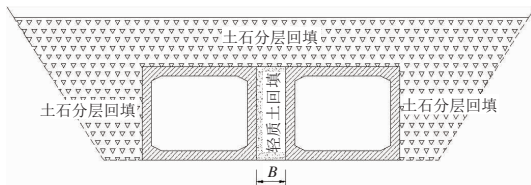


图2 回填示意图

## 2 小间距明洞-填土-地基相互作用机理

### 2.1 相互作用机理分析

明挖隧道修筑于地基基础上,其本身既作为基础荷载,同时又承受来自于回填土的压力荷载和填土与结构沉降差引起的附加剪应力<sup>[10]</sup>。根据明挖隧道回填施工对结构竖向变形的影响分析,结合明洞结构受力变形特点,深入分析小间距明洞-填土-地基相互作用机理。

明洞-填土-地基共同工作示意图见图 3。

图 3 中: $M_{11}$ 、 $M_{12}$ 、 $M_{13}$ 、 $M_{14}$  分别表示明洞拱顶上方填土质量; $M_{21}$ 、 $M_{24}$  分别表示两侧填土质量; $M_{22}$ 、 $M_{23}$  表示明洞结构质量; $M_{31}$ 、 $M_{32}$ 、 $M_{33}$ 、 $M_{34}$  分别表示明洞洞室及地基质量; $T_1$ 、 $T_3$  代表明洞两侧附加剪应力, $T_2$  表示明洞间产生的剪应力。根据图 3 可得,由

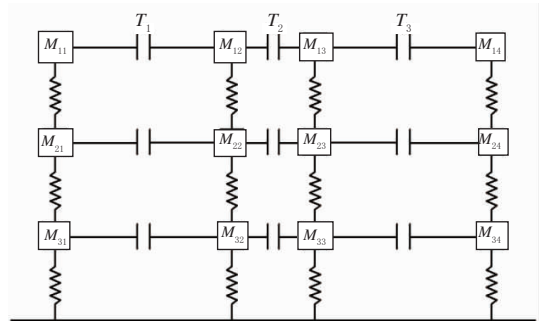


图3 明洞-填土-地基作用示意图

于明洞结构本身刚度远大于填土地基刚度,在回填土固结沉降过程中,两侧及明洞间填土沉降大于明洞沉降,从而导致明洞拱顶除拱顶上方填土荷载之外还承受来自沉降差产生的附加剪应力,于是可得作用于拱顶土压力  $p$  为:

$$p = (M_{12} + M_{13})g + T_1 + T_2 + T_3 \quad (1)$$

由此可见,作用于拱顶的土压力远大于由拱顶上方填土产生的土压力。

### 2.2 小间距隧道结构变形机理分析

明挖隧道结构由于回填施工工序、填土荷载等因素,会造成结构偏移、整体竖向弯曲或局部变形。根据回填施工对结构主体弯曲变形的影响分析,结合明挖隧道结构变形特点,将明洞结构作为一个整体,视为 Winkler 地基梁,满足伯努利梁假定条件,得到隧道结构竖向弯曲方程<sup>[10-11]</sup>为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = q \quad (2)$$

式中: $EI$  为隧道结构刚度; $k$  为弹性地基系数; $q$  为隧道上覆填土荷载; $y$  为结构竖向位移。

隧道结构沉降差引起的纵向剪应力所呈现的不均匀性,不仅会影响结构-填土-地基协调变形,还会使结构横截面产生剪切变形与横向弯曲。经过有限元差分,可以推导出结构纵向弯矩和剪应力公式:

$$-EI \frac{d^2 y_i}{dx^2} = M_i \quad (3)$$

$$-EI \frac{d^3 y_i}{dx^3} = Q_i \quad (4)$$

式中: $M_i$  为结构纵向弯矩; $Q_i$  为结构纵向剪应力; $y_i$  为结构竖向位移。

## 3 浅埋小间距明挖隧道回填数值模拟

### 3.1 模型建立及参数选取

考虑隧道埋深较浅且两隧道中间部位间距过小,若采用松散回填材料回填,不易压实,因此从工程的经济性角度出发,仅在左右隧道中间回填泡沫

轻质土,其余部位均采用土石混合料分层回填,且两侧基坑按照对称施工方法施工。根据工程施工的实际情况,采用有限元软件 Abaqus 建立三维数值模型进行回填数值模拟分析。施工现场隧道结构以 15~20 m 为一个标段,且由于边界条件对模型的计算精度影响较大,因此模型计算宽度取 3~4 倍开挖宽度,地基以下深度取不小于 5 倍洞径,模型尺寸为 20 m (长)×120 m (宽)×60 m (高)。模型采用以六面体为主的实体单元,建立模型并划分网格后共有单元 68 920,节点 82 656。模型边界条件为底部增加竖向、横向和纵向约束,左右边界增加水平方向约束,前后边界增加轴向约束,模型顶部为自由面。有限元网格划分见图 4。

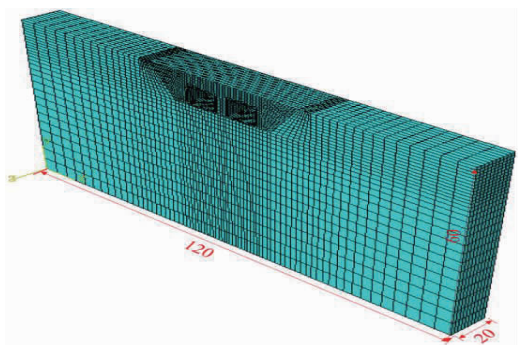


图 4 有限元网格划分(单位:m)

隧道衬砌结构采用线弹性模型,周围土体和回填土体均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。基坑开挖和回填过程分别采用杀死和激活土体单元来实现。泡沫轻质土、土石混合回填土相关物理力学参数参照文献[2,11];结合工程实际,岩土体基本物理力学参数参照地勘资料,弹性模量和泊松比参照文献[12],并结合本工程区域采取经验数值。基本材料计算参数(重度  $\gamma$ 、弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ 、黏聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$ )见表 1。

表 1 基本材料计算参数

材料	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / \text{MPa}$	$\mu$	$C / \text{kPa}$	$\varphi / (^\circ)$
中风化泥岩	24	750	0.15	276	33
中风化砂岩	25.1	3 760	0.20	1 094	37
土石混合回填土	20	90	0.40	14.5	20
C40 混凝土	24	36 500	0.20		
泡沫轻质土	8	200	0.25		

### 3.2 施工步骤及计算工况模拟

为准确模拟回填对隧道结构的影响,结合现场回填施工方案,回填模型的建立与现场实际回填工序一致,具体将施工过程分成 5 个施工工序进行模拟:

工序 1(进行基坑开挖)→工序 2(左右隧道结构

主体对称施工)→工序 3(隧道中间采取不同材料分层回填)→工序 4(隧道两侧采取土石混合料分层回填)→工序 5(隧道顶部进行土石混合料分层回填)。采用两侧对称回填施工方法,并进行分层回填,每层回填 1 m。计算工况考虑两隧道中间区域分别采用土石混合料和泡沫轻质土进行回填。回填施工步骤示意图和计算工况见图 5、表 2。

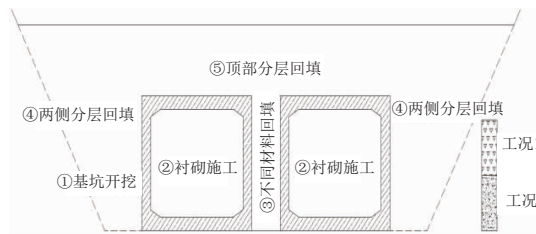


图 5 回填施工步骤示意图

表 2 计算工况

回填位置	工况 1	工况 2
两隧道之间	土石混合料回填	泡沫轻质土回填

## 4 回填施工力学行为

### 4.1 衬砌竖向位移

隧道回填施工结束后,各工况下衬砌结构竖向位移云图见图 6。

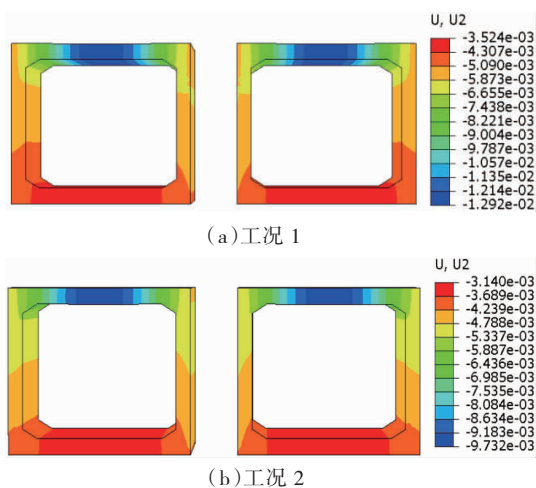


图 6 各工况下衬砌结构竖向位移云图(单位:m)

由图 6 可知,两种回填材料最大竖向位移均出现在顶板跨中,最小位移位于底板;整体竖向位移值:顶板位移>墙角位移>底板位移。采用土石混合料回填时,左右隧道衬砌结构侧墙发生不对称变形,且右侧侧墙变形大于左侧侧墙,但由于采用对称施工,两隧洞整体变形呈对称分布;采用泡沫轻质土回填时,左右隧道衬砌结构侧墙变形与整体变形分布规律基本一致,呈对称分布。

回填结束后,工况 1、2 的顶板、墙角和底板的最

大竖向位移见表3。

表3 工况1、2衬砌结构最大竖向位移

结构位置	工况1位移/mm	工况2位移/mm	倍数
顶板跨中	12.9	9.7	0.75
右墙角	6.2	4.4	0.71
底板跨中	3.5	3.1	0.89

由表3可见,采取泡沫轻质土回填后,结构竖向位移比工况1小,其中顶板最大位移为9.7mm,位于跨中;两种工况下,墙角最大位移为6.2mm,位于右墙角,底板最大位移为3.5mm,位于跨中;泡沫轻质土对衬砌结构位移影响效果显著性为右墙角>顶板跨中>底板跨中。由此可见,采用泡沫轻质土回填可以有效减小结构变形,控制结构的不对称变形,其中对顶板和墙角的影响最大。

由于左右隧道衬砌结构竖向位移基本呈对称分布,因此只提取左隧道在不同回填工况下衬砌结构的竖向位移,分析随着回填深度的增加,隧道结构竖向位移变化趋势。不同回填工况与回填深度下衬砌竖向位移见图7。

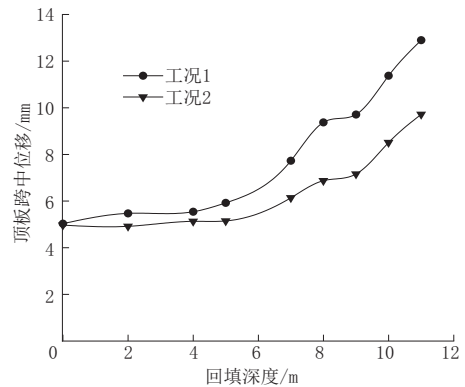
按照《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)并结合当地工程经验,明挖隧道结构容许位移值如表4所示。

结合图7与表4可以发现,衬砌结构整体位移随着回填深度的增加而增大,工况2的位移增长趋势比工况1小;采用土石混合料回填时,衬砌结构顶板位移在回填至8m后超过结构位移容许沉降值。

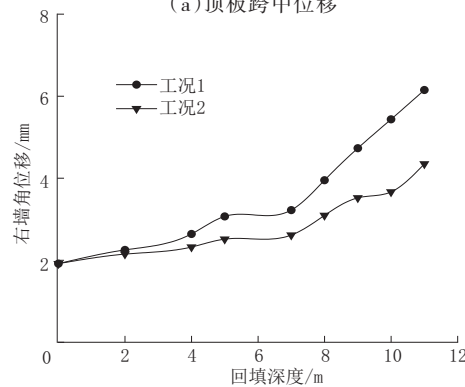
不同工况下衬砌结构位移空间分布如图8所示。

2种工况的衬砌位移整体分布趋势一致,整体位移数值为:顶板>侧墙上边角>侧墙1/2处>侧墙下边角>底板,最大位移位于顶板跨中,最小位移位于底板跨中。

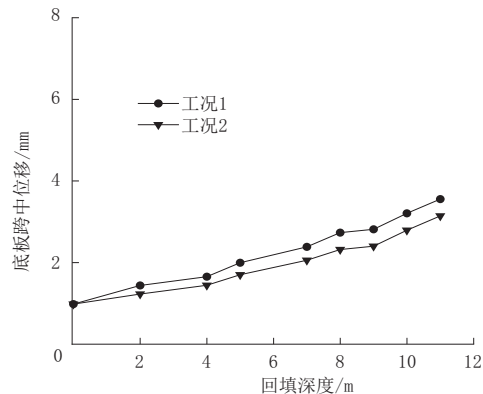
由图8可知,工况1左侧墙的位移大于右侧墙,工况2衬砌结构侧墙位移基本呈对称分布,且整体位移均小于工况1。这是由于两隧道间距过小,隧道中间回填量小于两侧回填量,当采用工况1土石混合料回填时,回填土对侧墙的土压力过小,随着顶部荷载增加,侧墙会产生不对称变形;而在隧道中间采取工况2泡沫轻质土回填时,因泡沫轻质土固化后会产生一定的强度来抵消一部分衬砌结构变形,所以采用泡沫轻质土回填,可以较好地控制结构回填过程中的不对称变形。



(a)顶板跨中位移



(b)右墙角位移



(c)底板跨中位移

图7 不同回填工况和回填深度下衬砌竖向位移

表4 隧道结构位移容许值 单位:mm

重要等级	容许沉降	容许上浮	容许水平位移
I	10	5	3~5

### 4.2 衬砌拉应力分析

不同工况下衬砌拉应力见图9。

衬砌各部位拉应力均小于C40混凝土的极限抗拉强度(2.7MPa)。结构拉应力整体随回填高度的增加呈增大趋势,回填从基坑底至顶板时,随着回填深度的增加,结构整体拉应力整体增长趋于平缓,这是因为结构在自重作用下,随着顶板向下位移、侧墙向外位移、底板向上位移,使结构产生了一部分应力,当两侧开始回填时,由于两侧土压力作用,减小了结

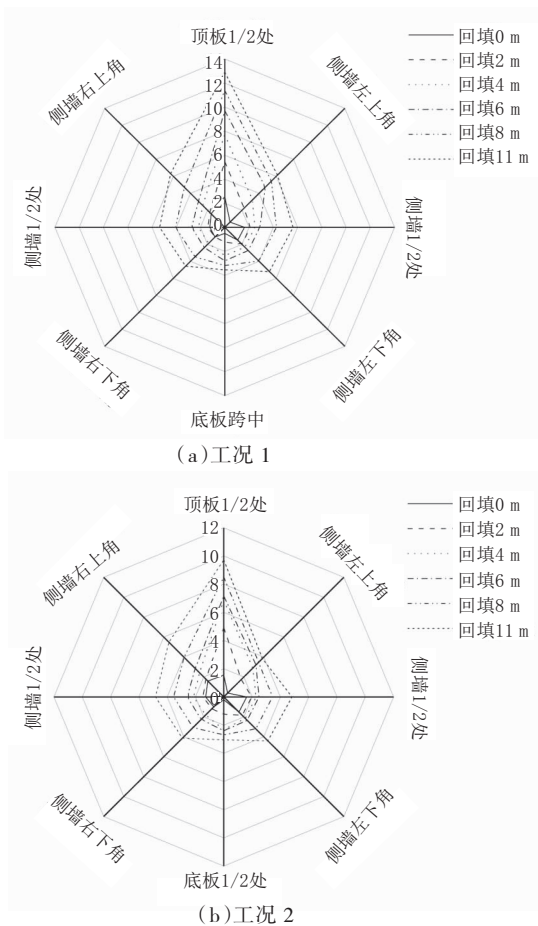
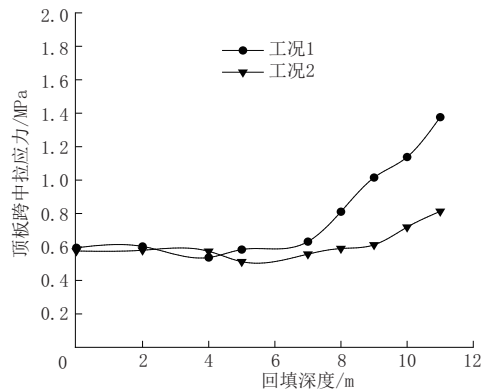


图8 不同回填工况下衬砌结构位移空间分布(单位:mm) 构弹性变形,使得应力增长缓慢。

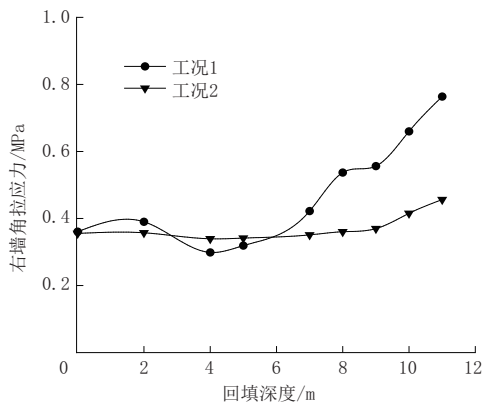
由图9(a)、(b)可以发现:当回填结束时,工况1顶板拉应力达到1.38 MPa,墙角拉应力达到0.76 MPa;工况2顶板拉应力为0.81 MPa,墙角拉应力为0.46 MPa;与工况1相比,工况2的顶板拉应力减小约41%,墙角拉应力减小约39%,说明采用泡沫轻质土回填,可以有效减小衬砌结构拉应力。由图9(c)可以发现,采用泡沫轻质土回填时,底板的拉应力出现先增长后减小再增长的规律,在回填至4 m时,拉应力达到最小值,回填结束后达到最大值。

绘制2种工况下衬砌结构的拉应力空间分布图,如图10所示。

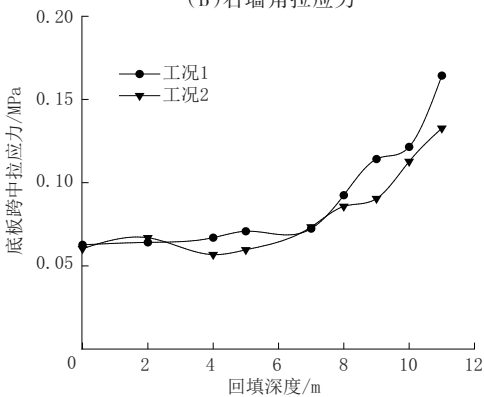
由图10可知:整体应力基本呈对称分布,结构各部位应力数值为:顶板>侧墙上边角>侧墙1/2处>侧墙下边角>底板,最大拉应力位于顶板跨中;从2种工况应力包络图关系来看,采用泡沫轻质土回填,衬砌结构整体拉应力数值小于土石混合料回填;侧墙下边角,回填到2 m时达到拉应力最小值,回填结束后达到最大拉应力。通过比较可见,当回填至2、4、6 m时,工况1、2侧墙各部位以及底板拉应力变化较小,当顶部回填时,工况2较工况1侧墙上



(a)顶板跨中拉应力



(b)右墙角拉应力



(c)底板跨中拉应力

图9 不同回填工况和回填深度下的衬砌拉应力 边角拉应力变化幅度增大,回填至8 m时,应力增长幅度最大;采用泡沫轻质土回填,隧道左侧墙拉应力数值小于右侧墙,且增长趋势缓慢,回填深度为0、2、4、6 m时,左右侧墙拉应力差别不大,回填深度达8、11 m时,侧墙左上角拉应力明显小于右上角。

## 5 现场实测

### 5.1 现场施工工序及测点布置

根据以上研究结论,现场实际以基坑底为0 m,回填深度为11 m,顶部回填深度为3.8 m,基坑开挖及回填按照分层对称施工的方法,施工工序流程为:工序1(基坑下挖至11 m)→工序2(左右隧道主体浇筑)→工序3(两隧道间进行泡沫轻质土分层浇筑

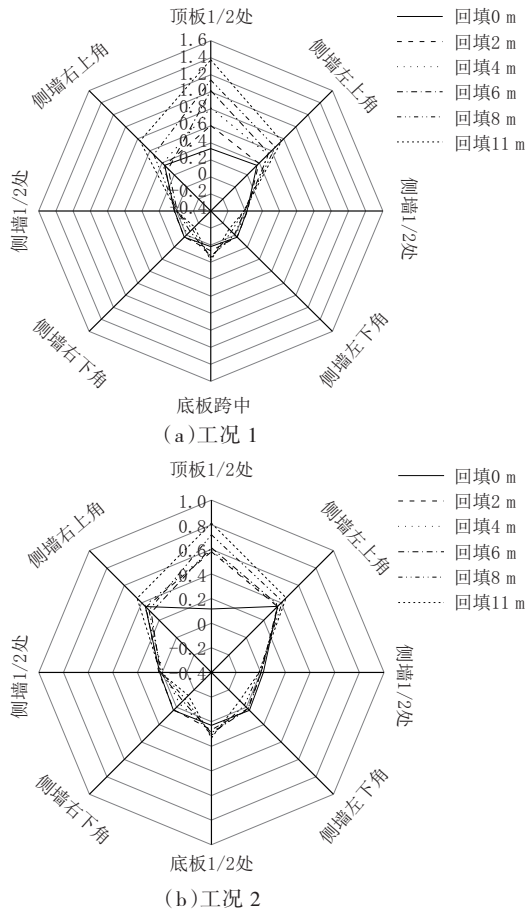


图 10 不同回填工况下衬砌应力空间分布(单位:MPa)并回填至顶板)→工序 4(两侧土石混合料对称分层回填施工)→工序 5(顶部土石混合料分层回填)。施工工序图见图 11,测点布置图见图 12。

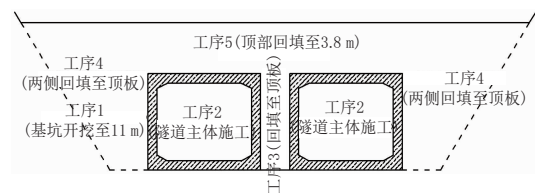


图 11 施工工序图

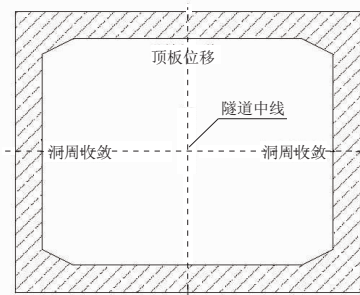


图 12 测点布置图

顶板位移和洞周收敛监测采用反光片的变化来获取结构位移,在洞内顶板及右边侧墙贴反光片作为顶板位移和侧墙收敛的参考点。

5.2 监测结果分析

洞内顶板位移和洞周收敛值见图 13。

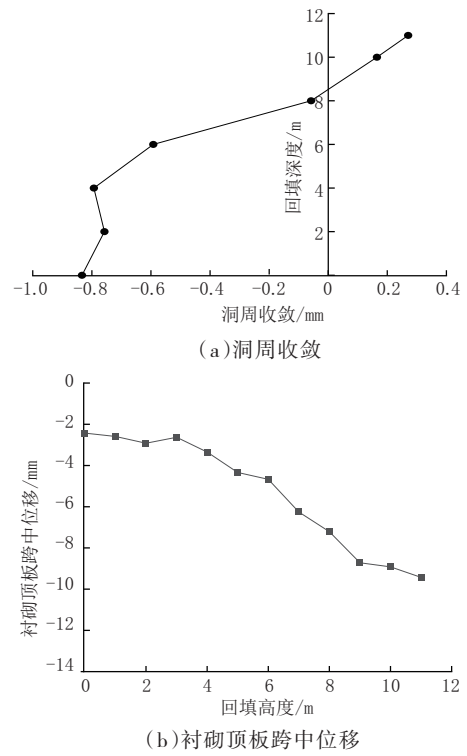


图 13 衬砌顶板位移和洞周收敛

由图 13 可知,衬砌结构在自重作用下顶板产生向下位移,侧墙产生向外位移;结构施工结束后顶板向下最大位移 2.2 mm,侧墙向外最大位移 0.8 mm;随着两侧土石混合料回填,顶板向下位移趋势变缓,侧墙开始由向外位移转变为向内位移,回填结束后顶板位移最终达到 9.4 mm,侧墙向内位移最终达到 0.27 mm。可以看出顶板压缩变形远大于结构弹性变形,侧墙弹性变形接近压缩变形,这是因为两侧回填范围较小,传递给侧墙的土压力较少。

根据实测结果可得,顶板最终位移和洞周收敛均比计算数值小。这是由于在两侧回填土不断压实过程中,隧道两侧在承受侧向土压力的同时还承受着由器械施加的水平压力,导致两隧道间轻质土向上拱起。明挖隧道回填结束后,回填土长期固结压实会形成一定土拱效应,而数值模拟不能模拟真实的土拱效应,导致实测值与计算值存在一定的差别<sup>[2]</sup>,由于形成的土拱承担了一部分荷载,导致结构实测值较计算值小。

考虑到该隧道的重要性和顶部长长期承受车辆荷载的情况,其重要等级为 I 级,由以上图表和分析结果得到实测值和计算值均未超过容许值,说明采用泡沫轻质土回填的方案可行,可以满足结构的承载安全。

6 结语

(1)利用泡沫轻质土回填小间距隧道特殊部位,

其结构位移、应力均满足要求。

(2)与土石混合料回填方案对比后发现,采用泡沫轻质土对明挖小间距隧道特殊部位进行回填,其衬砌结构最大位移可分别减小约24%、29%、11%;最大应力可分别减小约41%、39%、27%,其中对衬砌结构顶板和墙角的竖向位移、应力作用效果最显著。

(3)采用土石混合料回填时,回填深度至8 m后结构顶板位移才超出容许值。从施工便利性、结构安全性和回填压实度考虑,采用泡沫轻质土对小间距隧道特殊部位进行回填更优。

(4)采用泡沫轻质土回填,结构侧墙位移呈对称分布,可以有效避免结构产生不对称变形和应力,造成结构拉剪破坏。

(5)从模拟结果和实测位移值对比发现,结构施工结束后,产生顶板向下、侧墙向洞周外位移,最终回填后,侧墙转向洞周内位移,由于土拱效应导致实测结果小于计算结果。

参考文献:

[1] 徐慧芬,曾琛超.海底隧道洞口长距离明挖段拱脚回填材料优化设计与施工[J].公路,2021,66(4):376-379.  
 [2] 李明,严松宏,李盛,等.采用泡沫轻质土对高填明洞二次回填的结构受力特性研究[J].铁道学报,2022,44(2):135-142.  
 [3] ZHUO Bin,ZHU Muyuan,FANG Yong,et al.Numerical and experi-

mental analyses for rubber-sand particle mixtures applied in high-filled cut-and-cover tunnels[J].Construction and Building Materials,2021,306:124874.  
 [4] 黎鸣.泡沫轻质土路堤扶壁式挡土墙受力及变形特性研究[D].西安:长安大学,2018.  
 [5] QIU Youqiang, LIU yang, ZHANG liujun,et al. Influence of lightweight foamed concrete as backfill material on stress and deformation of buttressed earth-retaining wall[J]. Geofluids, 2021, Article ID 7610933: 14.  
 [6] CHEN Yonggui,GUAN Leilei,ZHU Shenyi,et al. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling [J]. Construction and Building Materials,2020,273:121685.  
 [7] WANG Guangyuan, DENG Zhengdong, XU Haoli, et al. Application of foamed concrete backfill in improving antiexplosion performance of buried pipelines [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(4): 04021052.  
 [8] 马永政,温小栋,冯蕾,等.早期人防隧洞工程泡沫混凝土现浇回填施工应用研究[J].土工基础,2021,35(5):553-556.  
 [9] 孙思博.泡沫轻质土在高填涵洞中应用的实验与数值模拟研究[D].长春:吉林大学,2017.  
 [10] 唐彬彬.高填方明挖隧道土压力计算理论及加筋减载研究[D].兰州:兰州交通大学,2013.  
 [11] 兰庆男,彭鹏,李长俊,等.穿越软硬突变地层隧道纵向不均匀沉降分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):1044-1050.  
 [12] 张祖迪,王玉锁,姚庆晨,等.复杂明挖并行隧道群施工沉降控制技术研究[J].现代隧道技术,2021,58(增刊1):319-325.

\*\*\*\*\*  
 (上接第165页)

的主要影响区,大于临近距离10 m左右为次要影响区,设定约1.6倍隧道外径为盾构掘进过程中的主要影响区。

参考文献:

[1] 魏纲,洪子涵,孙樵.类矩形盾构施工对邻近建筑影响的有限元模拟分析[J].市政技术,2019,37(2): 127-130.  
 [2] 奎耀.盾构开挖对既有建筑基础的影响研究[D].济南:山东建筑大学,2020.  
 [3] 杨记芳.大直径盾构隧道施工对高层建筑及桩基影响数值分析[J].太原理工大学学报,2017,48(5): 772-777.  
 [4] 王红丽,刘良旭.盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响探析[J].公路工程,2017,42(4): 347-354.  
 [5] 周金文.盾构下穿复合地基高层建筑相互安全影响[J].建筑安全,2021,36(4): 23-25.

[6] 刘少楠.郑州地铁5号线盾构施工对地表民用建筑沉降影响研究[D].郑州:河南工业大学,2016.  
 [7] 蒋颖,刘华,何振华.地铁盾构近距离下穿既有建筑结构影响分析[J].土工基础,2018,32(2): 151-153,177.  
 [8] 张杨,林本海,牛九格.地铁盾构隧道施工对既有老式建筑的影响分析[J].广东土木与建筑,2015,22(4): 56-59.  
 [9] 杨绍阁,张彪,赵玉靓,等.盾构掘进穿越民用建筑的沉降影响研究[J].市政技术,2017,35(2): 97-100,138.  
 [10] 穆岩松,戴亦军,邱琼,等.盾构隧道侧穿保护建筑的影响分析[J].施工技术,2018,47(S1): 547-551.  
 [11] 徐万春,罗浩,刘晓阳.盾构隧道下穿对砖混建筑的受力影响与控制方法研究[J].路基工程,2020(2): 180-184.  
 [12] 夏志强,董少博,董克胜,等.双线地铁隧道盾构施工对地层与建筑结构影响研究[J].现代城市轨道交通,2021(4): 49-55.