

• 土木工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202301041



本刊网刊

## 深覆土梯形拱明洞静力特性及卸荷效果

马莉<sup>1</sup>, 禄云华<sup>1</sup>, 王起才<sup>1\*</sup>, 马晓波<sup>2</sup>, 李盛<sup>1</sup>, 张克勋<sup>2</sup>

(1.兰州交通大学土木工程学院, 甘肃兰州 730070; 2.中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西西安 710043)

**摘要:**为研究深覆土条件下梯形拱结构-填土相互作用对周围土压力的影响机制和卸荷机理,明确梯形拱明洞相较于传统矩形明洞的优势,采用室内模型试验和数值模拟相结合的方法,对深覆土梯形拱明洞静力特性及卸荷效果进行分析。结果表明:无减载时,梯形拱明洞两侧回填土沉降大于上方回填土沉降,两侧回填土土压力向明洞上方转移,土压力随着填土高度的增大而增大,基本呈线性变化趋势;减载时,明洞上方回填土沉降大于两侧回填土沉降,回填土内部产生土拱效应,明洞上方回填土土压力向两侧转移,铺设减载层不会改变深覆土明洞结构受力分布,但会极大地减小其内力及变形,并提高结构安全系数;减载后,梯形拱明洞的最大轴力、最大正弯矩和最大负弯矩分别减少17.5%、34.1%、29.9%,最大变形减小32.9%。矩形和梯形两种截面形式下明洞的最大轴力均出现在中隔墙底部,最大正弯矩、最小安全系数和最大变形均出现在顶板中央位置;铺设减载层后两种截面形式拱明洞最小安全系数分别增大42.6%和100.0%,梯形拱明洞安全系数提高的比例更大,效果更显著。该研究可为深覆土梯形拱明洞结构的设计和施工提供理论指导和技术支持。

**关键词:**深覆土;梯形拱明洞;静力特性;卸荷效果

**中图分类号:** U451.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2024)04-0120-10

随着城市化进程的发展,中国进入城市轨道交通建设的高峰,为保持原有建筑安全稳定,通常会将地铁工程向地面更深处修建,导致车站主体的一部分会出现覆土深度较大的情形。目前,深覆土明洞主体结构截面多为矩形,适用于跨度较小、覆土较浅的节段;而对于跨度较大、覆土较深的地段,结构周围土压力大,梯形拱具有较好的适应能力。

明洞结构上方填土是短期内人为压实回填,需要适应和满足高回填土体及相关材料产生的土压力。因此,诸多学者侧重于改变高填明洞的几何形式、断面形式及地基基础的处理方式来适应高填土产生的各向土压力。丁浩<sup>[1]</sup>、白祖应<sup>[2]</sup>和刘学魁<sup>[3]</sup>等考虑到高填明洞受力性能的复杂性,通过数值分析验证基础、衬砌及回填土在施工方式变化时的受力和变形。许兴伍<sup>[4]</sup>、董聪慧<sup>[5]</sup>和李盛<sup>[6]</sup>等发现在传统的理论下,高填明洞具有某一极限回填高度,一旦超出其结构

承载力就难以满足实际要求,且明洞结构不具备形成主动土压力的变形条件。黎康<sup>[7]</sup>、匡亮<sup>[8]</sup>和马莉<sup>[9]</sup>等开展了在大体积隧道混凝土坝基上修建明洞的施工及内力分析,发现高填明洞结构在内层衬砌结构施工时对于结构的影响较大,应根据不同明洞的施工特点综合考虑其力学性能的变化。卓彬<sup>[10-11]</sup>、Zhuo<sup>[12]</sup>等研究了深覆土明洞的破坏机理,发现随着覆土深度与洞高比的增大,明洞承载能力明显表现出3个层次;在其临界点,拱顶、拱肩、拱腰、边墙截面内力和位移随覆土深度增加会发生突增现象,并给出在洞顶布设EPS板的建议。李盛<sup>[13-15]</sup>、Li<sup>[16]</sup>等基于柔性材料的减载原理,结合高填明洞在不同减载措施(EPS板、混凝土柱和土工格栅等)下结构的受力性能,多次通过室内模型和数值分析等方法,研究高填减载明洞土压力变化及土拱形态演化,构建基础-结构-减载的明洞卸荷模型,完善减载前后明洞土压力

收稿日期:2023-12-19 修回日期:2024-01-23 网络出版日期:2024-04-10

基金项目:甘肃省基础研究创新群体项目(21JR7RA347);甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA338);国家自然科学基金项目(51868041)

作者简介:马莉(1982—),女,讲师。研究方向:岩土与地下工程。E-mail: 451906654@qq.com

\*通信作者:王起才,教授, E-mail: 3158662079@qq.com

的计算理论。然而,高填方填筑材料及减载材料的使用对高填方构筑物的力学行为有着极大的影响,如何有效地减小高填方土体对高填方构筑物结构的压力显得尤为重要<sup>[17-19]</sup>。Popov<sup>[20]</sup>、Nguyen<sup>[21]</sup>和Li<sup>[22]</sup>等探索发现,对于高填方结构,在结构顶部布设较轻且易压缩的柔性材料可以有效地减小高填方结构上方的土压力荷载,并基于此提出针对高填方结构的ITI卸载法。Di<sup>[23]</sup>、Li<sup>[24]</sup>等对于柔性材料-土-结构进行研究,得到在结构顶部设置柔性减载材料的最优减载方案的最优布设范围。Zheng<sup>[25]</sup>、Tang<sup>[26]</sup>等对填方涵洞顶部铺设干草前后涵洞顶的土压力进行对比分析,发现干草的存在可以较为明显地减小结构所受的土压力,起到减载的效果。Sun<sup>[27]</sup>、El-Sawy<sup>[28]</sup>等研究了聚苯乙烯泡沫作为减载材料的效果,并以现场实际工程为索引,对其进行长期监测,发现高填管涵顶部的土压力变为原来的0.6倍左右。蒋承轩<sup>[29]</sup>、高琦<sup>[30]</sup>等采用稻草和聚苯乙烯塑料泡沫珠粒对不同宽度的排洪管涵上部进行卸载,研究其减载的效果,发现两种材料均比无减载措施好,且后者的减载效果比前者较为理想。

综上所述,目前研究主要聚焦于常规明洞结构形式及减载机制,针对深覆土梯形拱顶板的相关报道较少。梯形拱作为大跨度深覆土明洞的一种新型结构,在深覆土条件下,土压力是影响整个明洞结构受力安全的重要因素。此外,采用废旧轮胎橡胶颗粒减载材料,使深覆土-梯形拱-橡胶颗粒减载层相互作用下的土压力传递机理、明洞结构受力和变形研究十分复杂。因此,本文针对深覆土条件,研究梯形拱结构-填土相互作用对周围土压力的影响机制,以为该类结构的设计施工提供切实可行的思路。

## 1 深覆土明洞模型试验

### 1.1 工程概况

深覆土梯形拱明洞地铁车站工程位于甘肃兰州,属秦王川盆地,为断陷盆地,四周为黄土梁峁残丘,盆地内部开阔平坦。工程为地下车站,线路附近村庄密集,交通便利。工点处地层主要为第4系全新统人工填土、细砂、砾砂和细圆砾土,下伏上第3系中新统泥岩、砂岩。

深覆土明洞顶板采用梯形拱,为双向车道。开挖形式为3级放坡开挖,该工程横截面宽度较大、上覆土自重较大,对梯形拱明洞上方及两侧边墙、中隔墙产生较大的压力,对明洞结构的安全性产生影响。

### 1.2 模型相似理论及相似关系

定义模型试验时,填土容重为 $\gamma_m$ ,填土高度为 $h_m$ ,试验模型长度为 $L_m$ ,弹性模量为 $E_m$ ;现场原型填土容

重为 $\gamma_p$ (模型试验填土均取自工程现场),填土高度为 $h_p$ ,原结构模型长度为 $L_p$ ,弹性模量为 $E_p$ 。模型相似关系如表1所示。

表1 模型相似关系

Tab. 1 Model similarity relationship			
材料	物理量	相似关系	相似比
填土	高度 $h$	$C_h=h_m/h_p$	1:30.0
	容重 $\gamma$	$C_\gamma=\gamma_m/\gamma_p$	1:1.0
	应力 $\sigma_s$	$C_{\sigma_s}=C_\gamma \times C_h$	1:30.0
有机玻璃模型	长度 $L$	$C_L=L_m/L_p$	1:30.0
	弹性模量 $E$	$C_E=E_m/E_p$	1:10.5
	应力 $\sigma_m$	$C_\sigma=C_E$	1:10.5
	位移	$C_d=C_L$	1:30.0

由于试验采用有机玻璃模拟明洞结构,其弹性模量与原型明洞有差异,因此,将明洞模型视为薄板结构,利用弹性力学中薄板弹性曲面微分方程推导明洞模型的厚度,从而确定最终模型厚度为10.7 cm。

### 1.3 材料制备及试验方案

#### 1.3.1 材料制备

依据相似材料力学指标,制作材料采用透明有机玻璃,按1:30.0的几何相似比制作尺寸为1.05 m×1.00 m×0.52 m的梯形拱明洞试验模型,如图1所示。



图1 梯形拱明洞试验模型

Fig. 1 Test model of trapezoidal arch cut and cover tunnel

橡胶颗粒混合土力学特性试验如图2所示。橡胶颗粒混合土掺量为30%(通过室内土工试验确定其最优掺量),最大干密度为1.75 g/cm<sup>3</sup>,压实度为90%,含水率为9.3%。废旧轮胎颗粒粒径1~3 mm([1, 2] mm粒径的占65%,(2, 3] mm粒径的占35%),平均比重为1.17,浸泡24 h后吸水率为1.07%~1.08%。人工填土选用10.6%的最优含水率、95%的压实度。

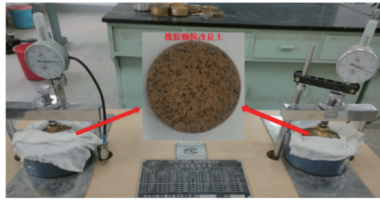
#### 1.3.2 试验方案

模型试验设计4种方案如表2所示,比较明洞截面形式对土压力传递及结构受力的影响。试验模型尺寸以工况TXG1为例,示意图如图3所示。工况JXG1和TXG1从拱顶开始布置橡胶颗粒混合土减载材料,减载区域长1.05 m,宽1.00 m,高0.17 m,工况JXG2和TXG2未布置减载材料。为得到深覆土压力随着填土

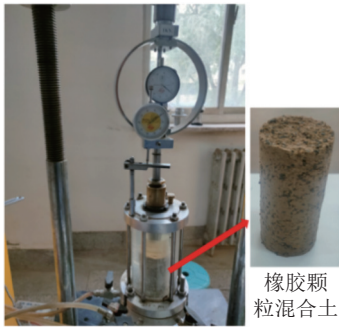
高度的变化规律及填土高度对明洞结构内力和位移的影响,在明洞左侧墙及梯形拱顶板处布置土压力盒和应力应变计,在顶板跨中位置布置电阻式应变位移传感器。



(a) 橡胶颗粒混合土制备



(b) 混合土压缩特性试验



(c) 混合土剪切特性试验

图 2 橡胶颗粒混合土力学特性试验

Fig. 2 Test on mechanical properties of rubber particle mixed soil

表 2 模型试验方案

Tab. 2 Model test schemes

工况编号	方案
JXG1	矩形,有橡胶颗粒混合土减载材料
JXG2	矩形,无橡胶颗粒混合土减载材料
TXG1	梯形拱,有橡胶颗粒混合土减载材料
TXG2	梯形拱,无橡胶颗粒混合土减载材料

模型试验如图4所示。由图3、4可知,测点布置及材料制备完成后,进行统一压实系数分层填筑,黄土填筑高度为0.20 m,顶层填筑高度为0.28 m。试验过程中,为保证达到黄土压实度的要求,采用体积法计算每层填土所需人工填土量,按每层0.20 m的分层高度均匀铺设并进行夯实。

每层填土夯实完成后,利用水准尺进行填土面水平检查。随后,进行土压力和应变读数,得到不同回填高度下的土压力值与应力值,待读数稳定后,进

行下一层填土。

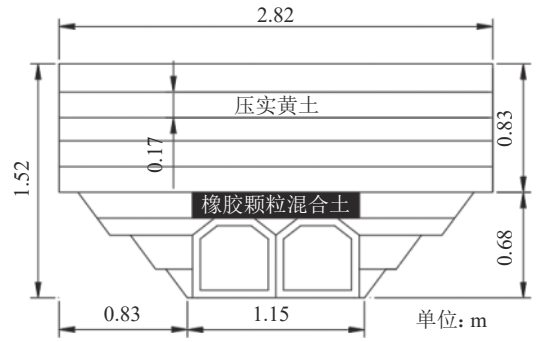


图 3 工况TXG1示意图

Fig. 3 Diagrammatic drawing of case TXG1

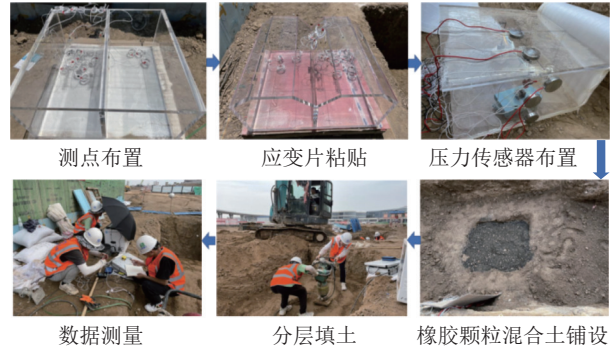


图 4 模型试验

Fig. 4 Model test

1.4 试验结果分析

填土完成后拱顶不同位置土压力如图5所示。由图5可知,JXG2和TXG2的拱顶压力值分别呈倒“V”形和“M”形,JXG1和TXG1拱顶土压力值呈“W”形变化,这表明拱顶铺设橡胶颗粒混合土减载后,拱顶土压力分布规律发生改变,跨中位置和中心位置土压力呈现减小趋势,而两侧边墙处的土压力呈现增大的趋势,即拱顶土压力向两侧转移。

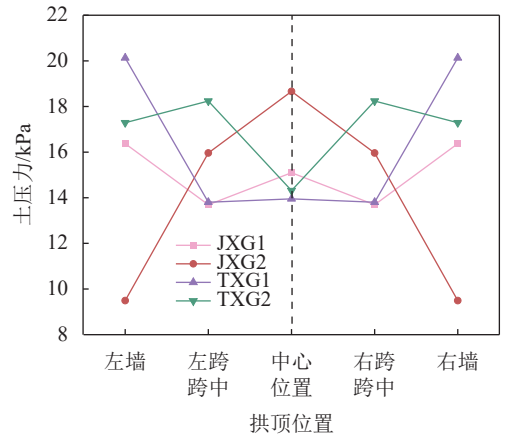


图 5 填土完成后拱顶不同位置土压力

Fig. 5 Earth pressure at different locations in the vault after filled

拱顶跨中位置土压力变化如图6所示。由图6可知:JXG2和TXG2(无减载)两种情况下,随着填土高

度逐渐增大,拱顶跨中位置土压力基本呈现线性变化的趋势,与理论土压力值基本吻合;JXG1和TXG1(橡胶颗粒减载)两种情况下,随着填土高度的变化,土压力呈非线性变化;当填土高度达到1 m(实际填土高度30 m)时,JXG1和TXG1相较于JXG2和TXG2的土压力值分别减小了19.3%和24.4%,说明橡胶颗粒减载层的设置一定程度地减小了明洞上方土压力,这是因为铺设橡胶颗粒后,明洞上方的土柱沉降发生变化,形成土拱效应,土压力由明洞拱顶中心位置向两侧边墙转移。因此,铺设橡胶颗粒混凝土等减载材料可以极大地缓解明洞所受的上部土压力,保证结构的安全稳定。

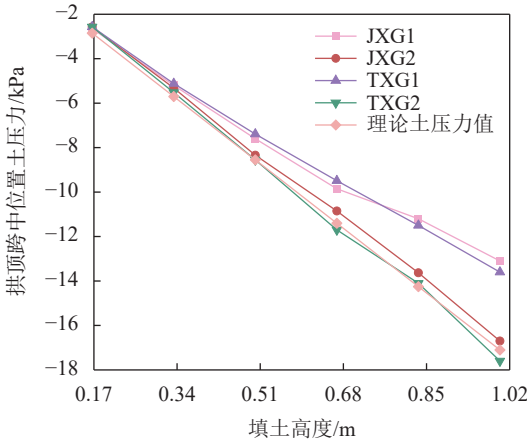


图6 拱顶跨中位置土压力随填土高度的变化

Fig. 6 Variation of earth pressure at the mid-span of vault with height of backfill

拱顶中心位置土压力随填土高度的变化如图7所示。由图7可知:随着填土高度的增加,拱顶中心位置的土压力基本呈线性变化趋势;由于填土过程中夯实过度,JXG1、TXG1和TXG2土压力值基本都小于理论土压力值,JXG2土压力大于理论土压力值。当填土完成时,JXG1相较于JXG2的土压力值减小了14.5%,TXG1相较于TXG2的土压力值减小了5.2%。对比可得:跨中位置的减载效果较为显著,这表明拱顶中心位置土柱内外沉降值较小,土拱效应不显著,减载效果有一定的降低。

同时,拱顶中心位置矩形与梯形拱土压力值存在差异。对比各工况填土完成时土压力值可得:TXG1相较于JXG1的土压力值减小8.9%,TXG2相较于JXG2的土压力值减小17.8%,充分证明梯形拱斜顶板本身可将土压力由中心向两边转移,其截面设计相较于矩形顶板具有一定的卸荷效果。

拱顶中心位置竖向位移如图8所示。由图8可知,拱顶跨中位置竖向位移随着填土高度的增大而增大,且呈线性特征。JXG1和TXG1(有减载时)的竖向位移相较于JXG2和TXG2(无减载时)减小较为显著,

当填土高度为1 m时,分别减小了16.4%和17.4%。同时,采用梯形拱时竖向位移明显小于矩形,再次验证了梯形拱本身具有一定的减载效果。

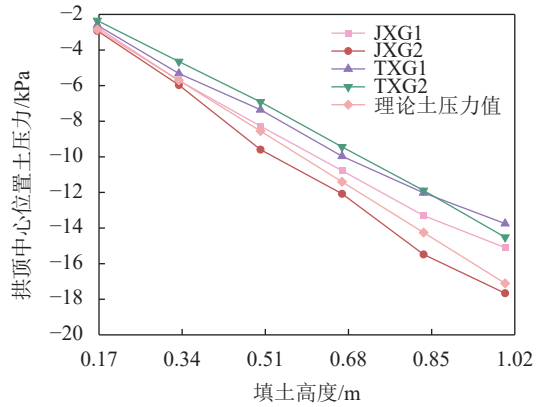


图7 拱顶中心位置土压力随填土高度的变化

Fig. 7 Variation of earth pressure at the center of vault with height of backfill

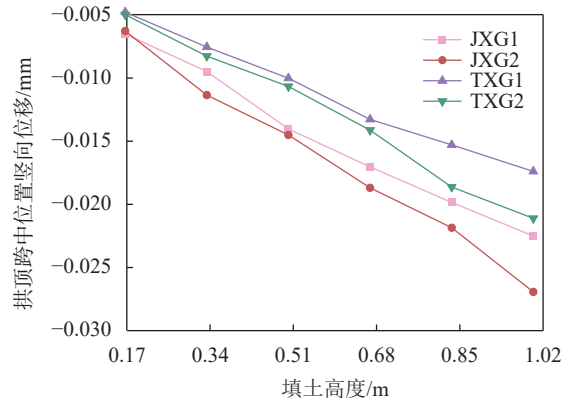


图8 拱顶中心位置竖向位移随填土高度的变化

Fig. 8 Vertical displacement at the center of the vault with height of backfill

## 2 数值模型与结果验证

### 2.1 数值模型

#### 2.1.1 模型建立

分别用有限差分软件FLAC3D和离散元软件PFC2D建立深覆土明洞模型。其中,使用离散元主要是为了描述回填土颗粒间的细观接触,以便更好地观测明洞周围回填土接触力链的分布规律。模拟工况如表3所示。

表3 模拟工况

Tab. 3 Simulated working conditions

工况编号	截面形式	减载
T1	梯形拱	否
T2	梯形拱	是
J1	矩形	否
J2	矩形	是

有限差分模型包括回填土、明洞结构、地基、边

坡和减载层(所用材料为橡胶颗粒混合土)5部分。以工况T2为例,运用FLAC3D建立的数值分析模型如图9所示。图9(a)中:模型总宽度为180.0 m,总高度为95.5 m,地基厚度为50.0 m,明洞结构宽度为32.5 m,高度为15.5 m,厚度为1.5 m;回填土总厚度为30.0 m,每层5.0 m,分6层填入;橡胶颗粒混合土减载层厚度为4.0 m,与明洞结构同宽;边坡为3级边坡,高度分别为5.6、6.6和8.3 m,边坡角度为53°。对地基、边坡和明洞结构赋予线弹性(Elastic)本构模型,对回填土和橡胶颗粒赋予摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)本构模型。各部分材料参数均为工程现场实测值,有限差分模型参数如表4所示。

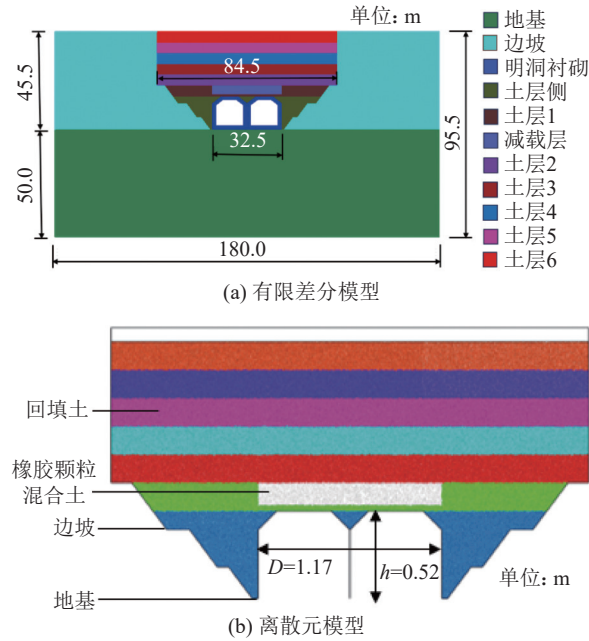


图9 数值分析模型

Fig. 9 Numerical analysis model

表4 有限差分模型参数

Tab. 4 Parameters of finite difference model

材料类型	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa
地基	2 700	21 700.00	0.11		
边坡	2 200	4 190.00	0.27		
回填土	1 710	31.60	0.30	30.24	58.10
衬砌	2 500	30 000.00	0.20		
橡胶颗粒混合土	1 565	2.55	0.35	64.30	35.44

离散元软件PFC2D建立的深覆土-梯形拱(工况T2)明洞缩尺数值模型如图9(b)所示:缩尺比例1:30,模型总高 $H=1.50$  m,明洞高度 $h=0.52$  m,总跨径 $D=1.17$  m,明洞两侧各宽0.03 m;边坡为3级坡,坡角 $\beta=53^\circ$ ,边坡高度分别为0.19、0.22、0.28 m。模型中,边坡、明洞结构、地基均采用墙单元模拟,填土采用圆盘颗粒模拟,回填土压实度为90%。建立模型时,采

用改进的分层压实法(IMCM)将填土分7层填筑。为保证顶层填土被压实,顶部预留0.07 m的空白区域。

与有限元软件能够直接识别控制材料力学特性的宏观参数不同,PFC2D是通过参数标定得到与宏观参数对应的微观参数并进行模拟分析。

## 2.1.2 测点布置

明洞监测点布置如图10所示。图10(a)中:竖直线方向布设3个监测截面,分别位于明洞拱顶中心截面(1-1截面)和拱顶左右跨中截面(2-2和4-4截面)处,各监测截面监测点之间的距离为0.5 m;水平方向布设一个监测截面(3-3截面),位于明洞上方0.5 m处。

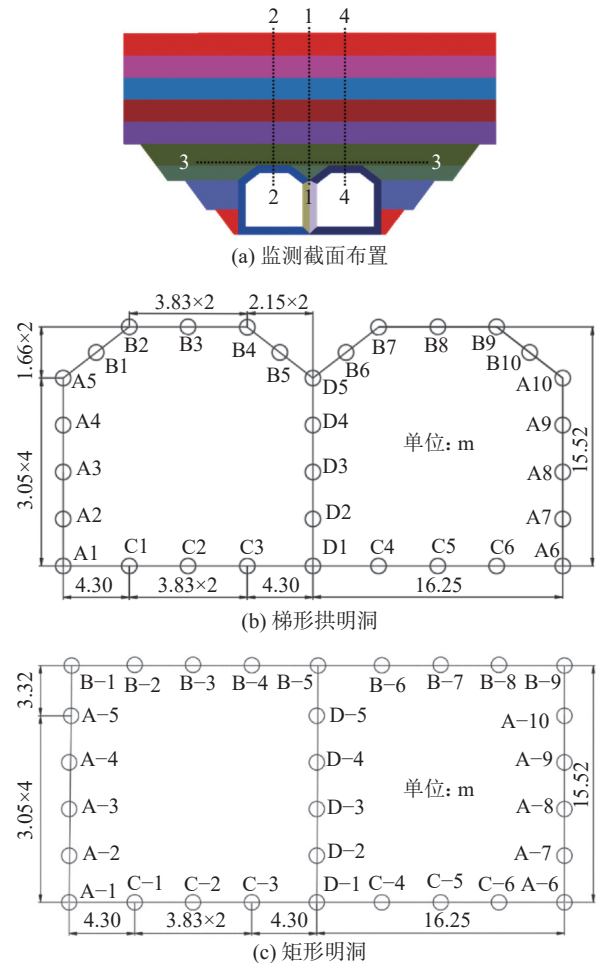


图10 明洞监测点布置

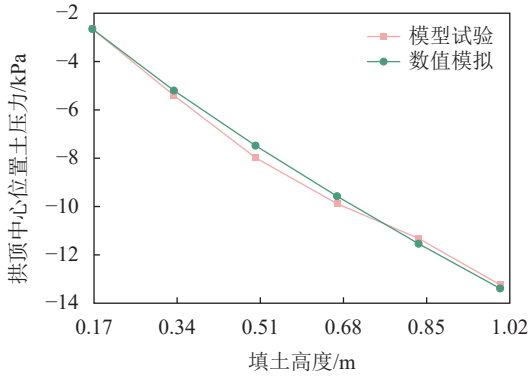
Fig. 10 Monitoring points arrangement of cut and cover tunnel

梯形拱明洞共布置测点31个,矩形明洞共布置测点30个,如图10(b)所示,用于提取明洞结构的内力和变形,分析明洞结构的安全性。

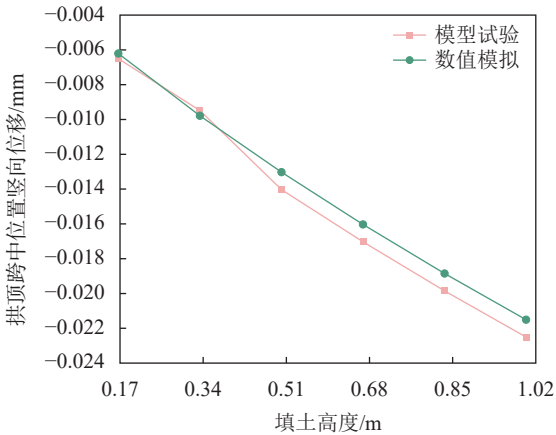
## 2.2 数值结果对比验证

模型试验与数值分析验证结果如图11所示。由图11可知,模型试验和数值模拟结果基本吻合,土压力和竖向位移最大误差分别为6.3%和7.1%。因此,模

型试验可以较好地模拟不同填土高度下明洞拱顶中心土压力及明洞竖向位移的变化规律。



(a) 土压力



(b) 竖向位移

图 11 模型试验与数值分析验证

Fig. 11 Verification of model test and numerical analysis

### 3 深覆土明洞静力性能及卸荷效果分析

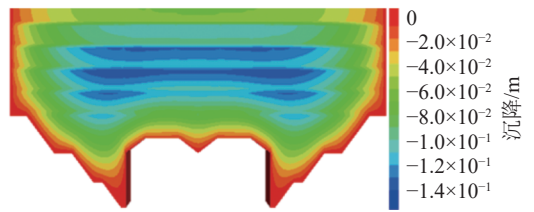
#### 3.1 深覆土明洞静力性能分析

##### 3.1.1 回填土沉降

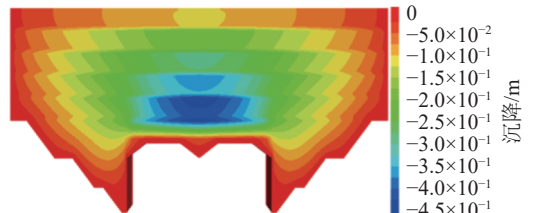
回填土沉降如图12所示。由图12(a)可知,未铺设减载层时,明洞上方回填土沉降小于两侧回填土,这是由于明洞顶部比两侧边坡高,回填土厚度小,两侧回填土沉降大于明洞上方回填土沉降。梯形拱直顶板和斜顶板上方回填土沉降存在差异,这是由于梯形拱直顶板上方回填土沉降只受两侧回填土影响,而斜顶板上方回填土沉降不仅受两侧回填土影响,还受明洞结构影响。

由图12(b)可知:减载后,随着填土深度增大,回填土沉降随之增加,明洞上方区域回填土沉降明显大于两侧回填土沉降,这是由于明洞上方铺设了橡胶颗粒混合土减载层,而橡胶颗粒的弹性模量远小于回填土。明洞中心位置的沉降最大,向两侧逐步减小。明洞上方回填土在距明洞顶部5 m范围内,其回填土沉降几乎完全相同,与工况T1对比可知,铺设减

载层后,极大地削弱了截面形式的影响。



(a) T1 工况



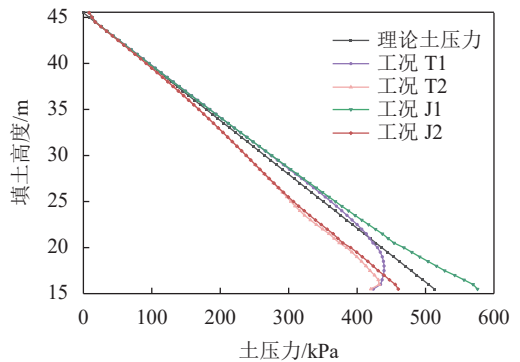
(b) T2 工况

图 12 回填土沉降云图

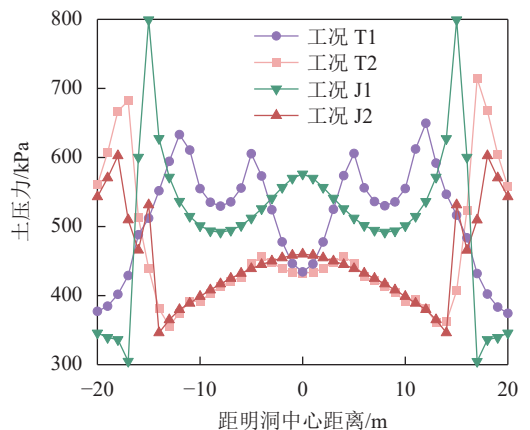
Fig. 12 Settlement nephograms of backfill soil

##### 3.1.2 竖向土压力

明洞不同位置土压力如图13所示。由图13可知:未铺设减载层时,1-1截面的土压力在填土深度较小时与理论土压力数值接近,随着填土深度增大,工况T1和J1开始逐渐大于理论土压力数值,但梯形拱随



(a) 1-1 截面



(b) 3-3 截面

图 13 明洞不同位置土压力

Fig. 13 Earth pressure at different locations of cut and cover tunnel

后剧烈减小,且3-3截面的拱顶中心处土压力与铺设减载层时接近,与矩形相比,其本身具有一定的卸荷效果;铺设减载层时,梯形拱和矩形明洞两侧回填土土压力大于明洞上方回填土土压力,梯形拱和矩形明洞两侧边墙处土体的土压力数值相等。

结合土体沉降云图(图12)发现:明洞上方土柱沉降小于两侧土柱沉降,回填土内产生沉降差,导致明洞两侧土压力向明洞上方回填土转移;梯形拱直顶板和梯形拱斜顶板交界处出现应力集中,向交界点两侧扩散,由于明洞两侧回填土土压力向上方转移,而外侧交界处更接近明洞两侧回填土,明洞两侧土压力向上方回填土转移量随着距离增大而减少,因此,梯形拱直顶板与梯形拱斜顶板外侧交界处应力比内侧交界处更大,其截面设计较矩形更加合理。

### 3.1.3 填土颗粒间细观接触

土体颗粒接触力链的分布实质是土体中荷载传递特征的体现,工况T1土体颗粒接触力链如图14所示。图14中,黑线和红线分别表示压力和拉力,线的粗细代表接触力链的大小,线条组成的网络结构形式代表力的分布和荷载的传递方向。出现拉力是因为填土本身具有黏性,颗粒间存在黏聚力。由图14可知:明洞顶部和边坡平台处接触力链较为密集,明洞两侧则较为稀疏;明洞上方范围内,中隔墙上方回填土接触力链最稀疏,与FLAC3D模拟结果相互吻合。



图 14 工况T1土体颗粒接触力链

Fig. 14 Soil particle contact force chain for Case T1

## 3.2 深覆土明洞橡胶颗粒卸荷效果评价

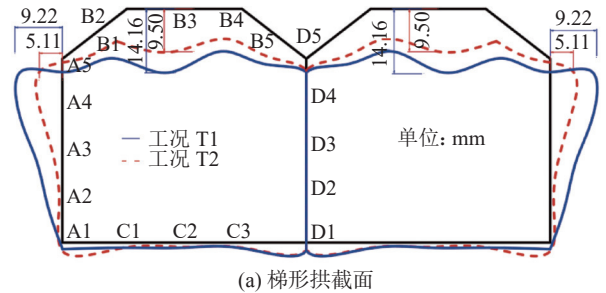
### 3.2.1 结构内力

矩形和梯形拱明洞的最大轴力均出现在中隔墙底部,最大正弯矩、最小安全系数和明洞最大变形均出现在顶板中央位置,而梯形拱最大负弯矩出现在直顶板与靠近中隔墙的斜顶板交界面处。铺设减载层不会改变深覆土明洞结构受力分布,但会极大地减小明洞所受弯矩、轴力及变形,并提高结构安全系数;铺设减载层后,梯形拱明洞的最大轴力、最大正弯矩和最大负弯矩分别减少17.5%、34.1%、29.9%;矩形明洞最大轴力、最大正弯矩和最大负弯矩分别减小4.5%、37.2%、50.2%。这充分说明在深覆土明洞上方铺设高压缩性材料可以有效增大结构上方土柱和

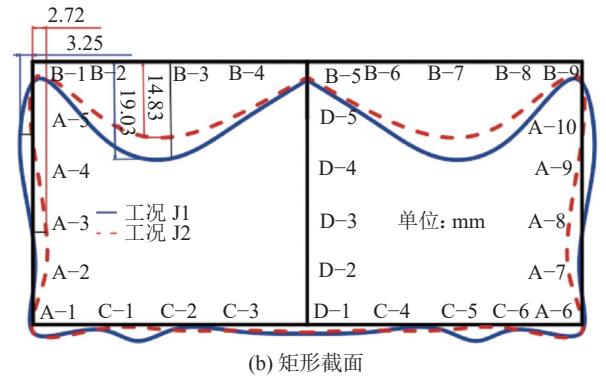
两侧土柱的沉降差,使回填土内部产生土拱效应,减小结构受力。这种减载方式一般只改变明洞结构受力大小,不改变其受力分布规律,而深覆土明洞截面形式的改变,会导致明洞结构受力分布规律发生改变,也会引起周围土压力发生变化。因此,明洞截面形式对其力学性能亦存在较大影响。

### 3.2.2 明洞结构变形

明洞结构变形放大300倍,如图15所示。由图15可知:中隔墙和底板变形较小,顶板变形最大;铺设减载层会改变明洞结构变形量,但不会改变其变形分布规律,工况T1、T2、J1、J2的最大变形分别为14.16、9.50、19.03和14.83 mm,变形最大位置均为拱顶中心位置,铺设减载层可使梯形拱和矩形明洞最大变形分别减小32.9%和22.1%。减载前后梯形拱明洞的变形均小于矩形明洞,且铺设减载层后梯形拱明洞变形减小比例更大,效果更显著。



(a) 梯形拱截面



(b) 矩形截面

图 15 明洞结构变形

Fig. 15 Deformation of cut and cover tunnel

### 3.2.3 安全系数

根据《铁路隧道设计规范》(TB10003—2016)<sup>[31]</sup>,计算明洞结构安全系数,梯形拱明洞结构安全系数由小到大分别为直顶板、中隔墙、边墙、斜顶板、底板,矩形拱明洞结构安全系数由小到大分别为顶板、中隔墙、边墙和底板。铺设减载层会改变安全系数,但其分布规律未发生变化,两种截面形式下最大和最小安全系数分别位于单侧洞室顶板中心位置和底板中心位置。铺设减载层使矩形和梯形拱明洞最小安全系数分别增大42.6%和100.0%;与梯形拱明洞相比,

矩形明洞底板、边墙的安全系数较大,但顶板的安全系数较小,尤其是顶板中央位置,其安全系数不满足规范要求;与铺设减载层之前对比,梯形拱明洞安全系数提高的比例更大,效果更显著。

## 4 结 论

本文基于离散元和有限差分两种数值模拟方法,结合室内模型试验分析了橡胶颗粒和梯形拱的卸荷效果,并对比有无减载层时明洞截面形式对明洞结构力学性能的影响,结论如下:

1) 无减载时,梯形拱明洞两侧回填土沉降大于明洞上方回填土沉降,明洞两侧回填土土压力向明洞上方转移;减载时,明洞上方回填土沉降大于两侧回填土沉降,回填土内部产生土拱效应,明洞上方回填土土压力向两侧转移,截面形式对明洞上方回填土沉降和分布影响较小。

2) 无减载时,梯形拱明洞两侧洞室上方回填土土压力随填土高度增大而增大;使用减载材料后,随着填土高度增大,土压力先增大后减小。这是因为减载材料增大了拱顶土的沉降,土柱内外产生沉降差,从而形成土拱效应,使拱顶土压力向两侧转移。

3) 梯形拱明洞和矩形明洞的最大轴力均出现在中隔墙底部,最大正弯矩、最小安全系数和最大变形均出现在顶板中央位置;梯形拱明洞最大负弯矩出现在直顶板与靠近中隔墙的斜顶板交界面处,铺设减载层不会改变明洞结构受力分布,但会极大地减小明洞所受弯矩、轴力及变形,并提高结构安全系数。

4) 深覆土梯形拱明洞减载后,明洞结构最大轴力、最大正弯矩、最大负弯矩和最大变形分别减小4.5%、37.2%、50.2%、35.9%,均优于矩形明洞;同时,安全系数提高100.0%,铺设减载层后梯形拱明洞安全系数提高的比例更大,效果更显著。

不足之处在于本文只通过试验和数值分析研究了静力作用下深覆土梯形拱明洞内力及变形发展规律,但对于动力作用特别是地震作用尚未考虑,这也是之后重点研究的方向。

### 参考文献:

[1] Ding Hao, Gong Lun, Liao Longtao, et al. Investigating the causes of deep overburden open-cut tunnel lining crack damage in high fill areas[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(Supp1): 405–412. [丁浩, 龚伦, 廖龙涛, 等. 高填方深覆土明洞衬砌裂损原因探究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(增刊1): 405–412.]

[2] Bai Zuying, Huang Xuanbo, Ding Wenqi, et al. Analysis on monitoring data and numerical simulation of corrugated steel fabricated multi-arch open-cut highway tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(Supp1): 635–642. [白祖

应, 黄煊博, 丁文其, 等. 波纹钢连拱明洞公路隧道监测数据分析与数值模拟研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(增刊1): 635–642.]

- [3] Liu Xuekui, Li Sheng, Wang Changdan. Study on the timeliness of soil arch and structural response of the unloading high-filled cut-and-cover tunnels based on finite difference method[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023, 40(6): 1364–1373. [刘学魁, 李盛, 王长丹. 基于有限差分的高填减载明洞土拱形态与结构响应的时效性研究[J]. *应用力学学报*, 2023, 40(6): 1364–1373.]
- [4] Xu Xingwu. A Study on optimization of load pattern of open-cut tunnel with ultra-high backfill[J]. *High Speed Railway Technology*, 2023, 14(2): 19–23. [许兴伍. 超高回填明洞荷载模式优化研究[J]. *高速铁路技术*, 2023, 14(2): 19–23.]
- [5] Dong Conghui, Yan Changhong, Lou Zhihui, et al. Stability of a gentle backfill slope in the open tunnel section of an intercity railway under construction[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 835–844. [董聪慧, 阎长虹, 娄志会, 等. 某在建城际铁路明洞段地基回填土缓坡稳定性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(4): 835–844.]
- [6] Li Sheng, Zhuo Bin, He Chuan, et al. Analysis on influence of load reduction of EPS board on internal force and thickness of lining structure of high fill loess open cut tunnel in wide and flat area[J]. *China Railway Science*, 2019, 40(1): 17–23. [李盛, 卓彬, 何川, 等. EPS板减载对宽坦式高填黄土明洞衬砌结构内力和厚度的影响分析[J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(1): 17–23.]
- [7] Li Kang. Study on mechanical characteristics of open cut tunnel structure with high fill and deep foundation in Chongqing–Lichuan railway[J]. *High Speed Railway Technology*, 2020, 11(3): 79–84. [黎康. 渝利铁路高填方深基础明洞结构力学特性研究[J]. *高速铁路技术*, 2020, 11(3): 79–84.]
- [8] Kuang Liang, Chen Chikun, Tan Yongjie, et al. Design of extra-high filling urban railway open cut tunnel in valley mountain area[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2013, 30(12): 51–56. [匡亮, 陈赤坤, 谭永杰, 等. 沟谷山区城市超厚填土铁路明洞设计[J]. *铁道工程学报*, 2013, 30(12): 51–56.]
- [9] Ma Li, Liu Yapeng, Li Sheng, et al. Study on the influence of parallel fold structure on deformation of tunnel surrounding rocks[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(3): 75–84. [马莉, 刘亚朋, 李盛, 等. 不同减载措施下高填黄土拱形明洞结构受力研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(3): 75–84.]
- [10] Zhuo Bin, Wang Feiyang, Fang Yong, et al. Model test research on progressive failure mechanism of high-filled cut-and-cover tunnel and its load reduction structure[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2022, 53(2): 610–619. [卓彬, 王飞阳, 方勇, 等. 深覆土明洞及其减载结构渐进性破坏机理模型试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 610–619.]
- [11] Zhuo Bin. Research on structural optimization and section

- design of lining structure of trench type high fill loess open cut tunnel under load reduction[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. [卓彬. 沟槽式高填黄土减载明洞结构优化及其截面设计研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.]
- [12] Zhuo Bin, Zhu Muyuan, Fang Yong, et al. Numerical and experimental analyses for rubber-sand particle mixtures applied in high-filled cut-and-cover tunnels[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 306: 124874.
- [13] Li Sheng, Ma Li, Wang Qicai, et al. Model tests and numerical simulations of earth pressure for unloading structures of high fill open cut tunnel[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 636–642. [李盛, 马莉, 王起才, 等. 高填黄土明洞卸载结构土压力模型试验和数值模拟分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 636–642.]
- [14] Li Sheng, Li Shanzhen, Wang Qicai, et al. Unloading model test and numerical simulation analysis on high fill loess open cut tunnel with EPS[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Supp1): 3394–3401. [李盛, 李善珍, 王起才, 等. EPS板卸载的高填黄土明洞模型试验和数值模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊1): 3394–3401.]
- [15] Li Sheng, Zhuo Bin, Wang Qicai, et al. Load reduction calculation and soil arch effect analysis for high fill open cut tunnel in loess area under joint action of EPS and geogrid[J]. *China Railway Science*, 2018, 39(1): 16–22. [李盛, 卓彬, 王起才, 等. 高填方黄土明洞顶EPS板和土工格栅共同减载计算及土拱效应分析[J]. *中国铁道科学*, 2018, 39(1): 16–22.]
- [16] Li Sheng, You Zhugang, Ho I H, et al. Evolution of soil arching subjected to dynamic loads[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(9): 04022144.
- [17] Li Ming, Yan Songhong, Li Sheng, et al. Study on structural mechanical behavior of secondary backfill of high filled open cut tunnel with foamed lightweight soil[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(2): 135–142. [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.]
- [18] Yao Yuxiang, Li Sheng, Ma Li, et al. DEM analysis on soil arching effect of unloading structure of high-filled open cut tunnels[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(3): 84–93. [姚玉相, 李盛, 马莉, 等. 高填黄土明洞卸载结构土拱效应离散元分析[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(3): 84–93.]
- [19] Ma Li, Wang Qicai, Li Sheng, et al. Analysis of mechanical properties and influencing factors of high-filled cut-and-cover tunnel in trench[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(6): 133–141. [马莉, 王起才, 李盛, 等. 沟槽式高填拱形明洞力学特性及其影响因素分析[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(6): 133–141.]
- [20] Popov S N. Determination of the complete stress tensor by the load-relief method in a transversally isotropic rock mass[J]. *Soviet Mining*, 1975, 11(6): 722–730.
- [21] Nguyen D D, Park D, Shamsheer S, et al. Seismic vulnerability assessment of rectangular cut-and-cover subway tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 86: 247–261.
- [22] Li Sheng, Ho I H, Ma Li, et al. Load reduction on high-filled cut-and-cover tunnel using discrete element method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 114: 103149.
- [23] Di Honggui, Zhou Shunhua, Yao Xiping, et al. In situ grouting tests for differential settlement treatment of a cut-and-cover metro tunnel in soft soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(8): 6415–6427.
- [24] Li Sheng, Jianie Yuchi, Ho I H, et al. Evolution of load reduction for high-filled cut-and-cover tunnels subjected to soil creep[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(9): 04021172.
- [25] Zheng Jinlei, He Shaohui, Li Yiming, et al. Longitudinal deformation of deep shield tunnels caused by upper load reduction[J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3629.
- [26] Tang Hua, Jiang Chengye, Deng Qin, et al. Calculation of pressure on the shallow-buried double-arch tunnel without middle drift[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(11): 4805–4814.
- [27] Sun Liecheng, Hopkins T, Beckham T. Stress reduction by ultra-lightweight geofoam for high fill culvert: Numerical analysis[C]// *Proceedings of the Geotechnical Applications for Transportation Infrastructure*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2005: 146–154.
- [28] El-Sawy K M. Three-dimensional modeling of soil-steel culverts under the effect of truckloads[J]. *Thin-Walled Structures*, 2003, 41(8): 747–768.
- [29] Jiang Chengxuan, Chen Baoguo, Mao Xinying, et al. Stress characteristics of high fill load-shedding culvert on flexible foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(1): 275–280. [蒋承轩, 陈保国, 毛新颖, 等. 柔性地基上高填方减载式涵洞受力特性[J]. *岩土力学*, 2019, 40(1): 275–280.]
- [30] Gao Qi, Chen Baoguo, Wu Sen, et al. Long-term stress characteristics and load reduction effect of high-fill box culverts with EPS slabs[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(7): 2151–2160. [高琦, 陈保国, 吴森, 等. 可发性聚苯乙烯板减载条件下高填方箱涵长期受力特征与减载效果[J]. *岩土力学*, 2023, 44(7): 2151–2160.]
- [31] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.

## Static Characteristics and Unloading Effect of Deep Overburden Soil Ladder Arch Tunnel

MA Li<sup>1</sup>, LU Yunhua<sup>1</sup>, WANG Qicai<sup>1\*</sup>, MA Xiaobo<sup>2</sup>, LI Sheng<sup>1</sup>, ZHANG Kexun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Eng., Lanzhou Jiaotong Univ., Lanzhou 730070, China; 2. China Railway First Survey and Design Inst. Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

### Abstract:

**Objective** This study analyzes the static characteristics of trapezoidal arch openings and the unloading effect in deep overburden conditions to in-

investigate the influence of the trapezoidal arch structure-fill interaction on surrounding soil pressure and unloading mechanisms. Additionally, it aims to clarify the advantages of trapezoidal arches over traditional rectangular arches.

**Methods** This analysis combines indoor modeling tests and numerical simulations. In the experimental phase, organic glass plates serve as the test material. A numerical model and the specific thickness of the test material are deduced. Additionally, the preparation of a rubber granular soil mixture and its related compression and shear characteristic tests are conducted. In the numerical simulation phase, following verification with the indoor model test, the finite difference software FLAC3D and the discrete element software PFC2D are employed to establish the subway station model. Discrete elements primarily describe the fine contact between backfill particles, facilitating a better observation of the distribution of the contact force chain of the backfill around the openings. The static analysis of the deep overburden trapezoidal arch openings and their load unloading is also evaluated.

**Results and Discussions** The study attributes the observed decrease in soil pressure to the gradual reduction of load shedding. The load reduction material enhanced the soil settlement at the top of the arch, creating a settlement difference within the soil column and forming a soil arch effect. This effect caused the soil pressure at the top of the arch to transfer to the sides, with the cross-section type exerting minimal influence on the settlement and distribution of the backfill above the opening. Before load reduction, the maximum axial force, the maximum positive bending moment, the minimum safety coefficient, and the maximum deformation of the lining in the trapezoidal arch roof slab opening all occurred at the central position of the roof slab. The maximum negative bending moment was observed at the interface between the straight roof slab of the trapezoidal arch and the sloping roof slab near the diaphragm wall. The maximum axial force, the maximum positive bending moment, and the maximum negative bending moment in the opening with trapezoidal arches were reduced by 17.5%, 34.1%, and 29.9%, respectively. The maximum deformations under working conditions T1, T2, J1, and J2 were 14.16, 9.50, 19.03, and 14.83 mm, respectively. Introducing a load-shedding layer did not alter the distribution of structural forces in deep overburden openings, but it significantly reduced the internal forces and deformation of metro stations, thereby enhancing the structural safety coefficient. The safety coefficients for various working conditions have been calculated according to the "Railway Tunnel Design Code". The structural safety coefficients for trapezoidal arch caverns are in the following order: trapezoidal arch straight top plate < diaphragm wall < side wall < trapezoidal arch sloped top plate < bottom plate. For rectangular arch caverns, the order is rectangular arch top plate < diaphragm wall < side wall < bottom plate. The maximum and minimum safety factors for these two types of sections are found at the center of the top slab and the bottom slab of the unilateral cavern, respectively. Installing a load-shedding layer can increase the minimum safety coefficient of the trapezoidal arch and rectangular arch open caverns by 100.0% and 42.6%, respectively. Compared to trapezoidal arch roof subway stations, rectangular arch roof stations exhibit higher safety coefficients for the bottom plate and side wall but lower coefficients for the top plate, particularly at the center, which does not meet the specification requirements. The safety coefficients for trapezoidal arch roof subway stations increase significantly after installing a load-shedding layer, yielding a more pronounced effect. This study's limitation lies in its sole focus on testing and numerical analysis to examine the internal force and deformation development in deep cover trapezoidal arch open holes under static force. However, it does not consider the substantial disturbances to the structure caused by backfill compaction during the open hole's construction. Moreover, the study ignores the dynamic influences, especially seismic activities, and the development of solidification and settlement over time following the soil fill completion. These factors significantly affect the fill's stress distribution and the structural force, posing a considerable impact on structural stability. Therefore, the dynamic effects, notably seismic actions, and the time-dependent consolidation and settlement after the completion require further investigation due to their substantial influence on the stress distribution of the fill and the structural stress, making them highly significant for research.

**Conclusions** The results showed that in the absence of load shedding, the backfill settlement on both sides of the trapezoidal arch subway station exceeded the backfill settlement above the subway station, with the soil pressure on both sides of the subway station transferring to the top of the subway station. Furthermore, the soil pressure increased with the filling height, displaying a generally linear trend. During load shedding, the backfill settlement above the subway station was greater than on its sides, and the soil pressure gradually decreased with the increase of filling height.

**Key words:** deep overburden soil; ladder arch open-cut tunnel; static characteristics; unloading effect

(编辑 周璇)

引用格式: Ma Li, Lu Yunhua, Wang Qicai, et al. Static characteristics and unloading effect of deep overburden soil ladder arch tunnel[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(4): 120-129. [马莉, 禄云华, 王起才, 等. 深覆土梯形拱明洞静力特性及卸荷效果[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(4): 120-129.]