

DOI: 10.11779/CJGE20240516

不同卸荷措施下深覆土特大跨度明洞受力特性研究及衬砌结构变形预测

黄继新¹, 尤著刚^{*2}, 姜 浩², 马永浪³, 雷 浩⁴

(1. 兰州城市建设设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050; 2. 西南交通大学极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 四川 成都 610031;
3. 中铁成都轨道交通健康管理技术有限公司, 四川 成都 610031; 4. 北方民族大学, 宁夏 银川 750000)

摘要: 为探明可有效降低深覆土特大跨度明洞结构内力和变形的卸荷方式, 通过开展模型试验研究了 EPS 板和混凝土柱单独或组合使用时产生的卸荷效果, 分析土压力、衬砌结构内力和位移后探明了卸荷机理, 使用破损能阶段法评估了衬砌结构的安全性, 基于多元线性回归原理求得了衬砌结构薄弱部位(拱顶和拱腰)位移预测方程。研究结果表明: 无卸荷措施时明洞顶部会出现土压力集中现象, 明洞顶部和两侧铺设 EPS 板与混凝土柱相结合的卸荷方式可最大限度的减小明洞周围土压力, 平均竖向和水平土压力可分别减小 40.01%, 79.34%。然而, 此种卸荷措施会大幅减小水平土压力, 削弱土体对衬砌结构的约束作用, 导致衬砌结构内力和位移不能降至最小。仅在明洞顶铺设 EPS 板, 可在减小竖向土压力增幅的同时增大水平土压力增幅, 加强土体对衬砌结构的约束作用, 达到最优卸荷效果。填土完成后, 无卸荷措施时明洞顶位移为 29.15 mm, 拱顶和拱腰的弯矩分别为 4111.88 kN·m, -3988.51 kN·m, 在明洞顶铺设 EPS 板后, 明洞顶位移减小了 50.15%, 拱顶和拱腰的弯矩分别减小了 77.48%, 75.71%, 且相较于其他卸荷措施, 该措施可更有效提升结构安全性。以土压力为变量, 基于多元线性回归原理, 所得位移预测方程求得的位移预测值与实际值间最大和最小误差分别为 7.30%, 0.28%, 位移预测方程可有效应用于深覆土特大跨度明洞工程卸荷措施研究及卸荷参数优化。

关键词: 深覆土; 特大断面; 卸荷措施; 卸荷机理; 破损阶段法; 多元线性回归

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)09-1845-11

作者简介: 黄继新(1984—), 男, 2010 年毕业于长安大学道路桥梁与渡河工程(岩土与隧道工程)专业, 高级工程师, 主要从事市政道路、隧道工程方面的设计与研究工作。E-mail: 568580515@qq.com。

Study on mechanical characteristics of deep soil-covered super-span open cut tunnel under different unloading measures and deformation prediction of lining structure

HUANG Jixin¹, YOU Zhugang², JIANG Hao², MA Yonglang³, LEI Hao⁴

(1. Lanzhou Urban Construction Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunneling, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. China Railway Chengdu Rail Transit Health Management Technology Co., Ltd., Chengdu 610031 China; 4. North Minzu University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: In order to find out the unloading method that can effectively reduce the internal force and deformation of the super-span cut-and-cover tunnel in deep overburden, the unloading effect of EPS slab and concrete column used alone or in combination is studied through model test, the unloading mechanism is found out after analyzing the soil pressure, internal force and displacement of the lining structure, and the safety of the lining structure is evaluated by using the damage stage method. Based on the principle of multiple linear regression, the displacement prediction equation of the weak parts (vault and haunch) of the lining structure is obtained. The results show that the earth pressure will be concentrated on the top of the cut-and-cover tunnel without unloading measures, and the combination of cut- and-cover tunnel with concrete columns can reduce the earth pressure around the cut-and-cover tunnel to the maximum extent, and the average vertical and horizontal earth

基金项目: 2021 年度甘肃省优秀研究生“创新之星”项目 (2021CXZX-637) This study was supported by the “Innovation Star” Program for Outstanding Graduate Students of Gansu Province in 2021 (Grant No. 2021CXZX-637).

收稿日期(Received): 2024-05-29 修回日期(Revised): 2024-09-22 接受日期(Accepted): 2024-10-12 网络出版日期(Online): 2024-10-13

*通信作者 (E-mail: zhugangyou1230@163.com)

pressures can be reduced by 40. 01% and 79. 34%, respectively. However, this kind of unloading measure will greatly reduce the horizontal earth pressure and weaken the constraint effect of the soil on the lining structure, resulting in the internal force and displacement of the lining structure can not be reduced to the minimum. When the EPS is only laid on the top of the cut-and-cover tunnel, the horizontal earth pressure can be increased while the vertical earth pressure is reduced, and the constraint effect of the soil on the lining structure is strengthened to achieve the optimal unloading effect. After the completion of filling, without unloading measures, the displacement of the top of the cut-and-cover tunnel is 29. 15 mm, and the bending moments of the crown and haunch are 4111. 88 kN · m and 3988. 51 kN · m, respectively. After laying EPS board on the top of the cut-and-cover tunnel, the displacement of the top of the cut-and-cover tunnel is reduced by 50. 15%, and the bending moments of the crown and haunch are reduced by 77. 48% and 75. 71%, respectively. And compare with other unloading measure, that measure can effectively improve the structural safety. Taking the earth pressure as the variable, based on the principle of multiple linear regression, the maximum and minimum errors between the predicted value and the actual value of the displacement are 7. 30% and 0. 28%, respectively. The displacement prediction equation can be effectively applied to the study of unloading measures and the optimization of unloading parameters of super-span cut-and-cover tunnel in deep overburden soil.

Key words: deep overburden; extra-large section; unloading measures; unloading mechanism; damage stage method; multiple linear regression

0 引言

在中国“交通强国”和“西部大开发”等一系列发展战略深入实施过程中，中国西北黄土高原地区大批新型地下结构如雨后春笋般出现，深覆土特大跨度明洞就是综合考虑城市基础设施功能、黄土高原地区沟壑纵横、地形破碎和沟谷众多等地形特征后，开始普遍应用的一种新型地下结构。不同于一般埋地结构，此类工程中衬砌结构自身特大跨度以及结构上方过大填土荷载，会给施工期和服役期内衬砌结构的安全稳定造成严重影响。图 1 是某深覆土特大跨度明洞衬砌结构产生的病害，包括拱顶衬砌开裂、掉块，边墙纵向和环向裂缝等。

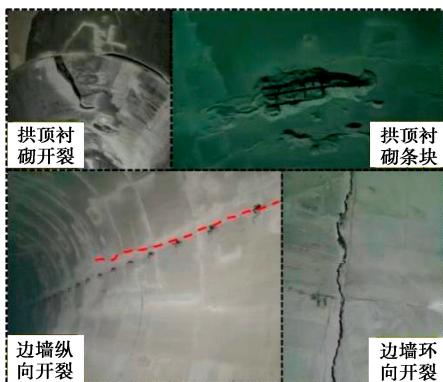


图 1 衬砌结构病害

Fig. 1 Diseases of lining structure

目前关于深覆土特大跨度明洞的研究较少，相关研究主要集中于深覆土埋地结构方面。Yao 等^[1]基于离散元程序 PFC2D，研究了高填方矩形涵洞工程中，卸荷材料不同参数对明洞周围土体变形和衬砌结构变

形的影响，并基于此探明了最优卸荷参数。张业勤等^[2]在现有理论方法基础上提出了一种考虑涵-土作用机制的模型，并由此推导得出了涵洞侧墙摩擦力和基底压力计算公式。李盛等^[3-4]结合理论分析、数值模拟以及室内模型试验等多种研究方式，分析了不同卸荷措施下高填方明洞工程中衬砌结构周围土压力特性以及回填土中土拱效应，从土压力和土拱效应的角度提出了合理的卸荷措施。Zhuo 等^[5-6]通过室内模型试验和离散元数值模拟等方式，研究了无卸荷措施下衬砌结构裂缝、位移以及结构内力变化规律。Zhang 等^[7]结合室内模型试验和离散元数值模拟，研究了填土高度、边坡角度和隧道跨度对明洞周围土压力的影响规律。尤著刚等^[8-9]研究了地震作用下高填方明洞工程中明洞周围的土压力变化规律以及回填土中的土拱形态变化。Li 等^[10-11]通过使用有限差分程序和离散元程序研究了高填方明洞工程中的土压力、卸荷措施以及土拱效应。徐滔源等^[12]通过室内试验和数值模拟相结合的方式，研究了高填方双层衬砌明洞工程中衬砌周围的土压力和结构内力，分析了明洞上方和两侧填土的沉降规律以及沉降差异。Flamarz 等^[13]使用大型有限元软件 ABAQUS 研究了废弃轮胎衍生材料和土工格栅相组合的卸荷方式所产生的卸荷效果。高琦等^[14]使用可发性聚苯乙烯板（EPS 板）作为卸荷材料，通过开展室内模型试验，研究了高填方箱型涵洞周围土压力长期变化规律，并基于此得出了涵顶长期土压力计算方法。

上述学者针对高填方埋地结构，从结构周围土压力、卸荷措施以及回填土中土拱效等方面开展了大量

研究, 这些研究均从减小结构周围土压力的角度, 评估了不同卸荷措施的卸荷效果, 提出了合理卸荷措施。事实上, 埋地结构周围土压力在赋予结构荷载的同时也约束结构变形, 仅从减小结构周围土压力方面评估卸荷措施, 难以探明减小衬砌结构内力的卸荷措施。

为此, 本研究通过开展室内模型试验, 从结构周围土压力的角度研究不同卸荷措施的卸荷效果, 在此基础上分析不同卸荷措施下衬砌结构的变形特征和结构内力, 基于此探明不同卸荷措施的卸荷机理。使用破损阶段法对不同卸荷措施下衬砌结构的安全性进行评估, 基于多元线性回归原理求解衬砌结构薄弱部位位移预测方程, 以期为类似工程的设计和建设提供参考和依据。

1 工程背景

某隧道位于甘肃省兰州市境内, 其工程地质纵剖面如图 2 (a) 所示。隧道最大埋深为 227.0 m, 埋深较大区段隧道穿越地层主要为全风化-中风化片麻岩层, 埋深较浅区段隧道穿越地层主要为全风化片麻岩以及部分杂填土层。埋深较小区段围岩岩性较差, 隧道修建时采用明挖法通过该区段。明挖段隧道最大埋深为 30.0 m, 如图 2 (b) 所示。采用能够承受较大垂直压力和具有良好抗滑性能的拱形截面, 衬砌结构宽度和高度分别为 16.0, 9.53 m, 厚度为 1.0 m, 明洞截面形式及尺寸如图 2 (c) 所示。

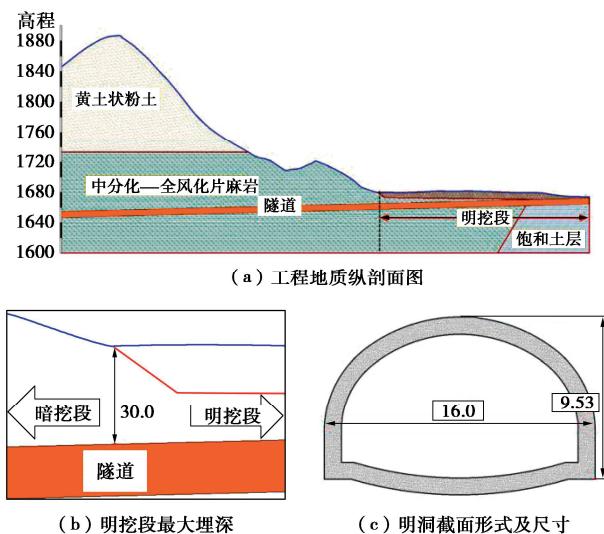


图 2 隧道工程概况

Fig. 2 Overview of tunnel project

2 模型试验

2.1 模型相似比

模型系统和原型系统满足相似第一定理和相似第二定理时, 原型系统的物理量可以由模型系统乘以固定的无量纲常数得到^[15-16]。本研究考虑试验设备以及试验可操作性后, 确定原型 (p) 与模型 (m) 几何相似比 $C(L) = L(p)/L(m) = 30$, 重度相似比 $C(\gamma) = \gamma(p)/\gamma(m) = 1$, 以 $C(L)$ 和 $C(\gamma)$ 为基本物理量, 通过相似关系推导出其余物理量相似比如表 1 所示。

表 1 各物理量相似比

Table 1 Similarity ratio of each physical quantity

物理量	相似比	物理量	相似比
泊松比 $C(\mu)$	1	应力 $C(\sigma)$	30
应变 $C(\epsilon)$	1	黏聚力 $C(c)$	30
内摩擦角 $C(\phi)$	1	轴力 $C(N)$	27000
弹性模量 $C(E)$	30	弯矩 $C(M)$	81000

2.2 试验装置

本研究使用的模型试验装置如图 3 所示。模型箱长×宽×高为 2.10 m×0.80 m×1.35 m, 其框架由等边角钢焊接而成, 为便于观察试验过程中填土沉降变化, 四周采用透明有机玻璃。模型箱左右两侧设有混凝土边坡, 两边坡形成的沟槽底部铺设砂垫层用于增加衬砌结构与地基间摩擦力, 两边坡底部设有可拆卸的混凝土柱, 可用于模拟不同卸荷工况。

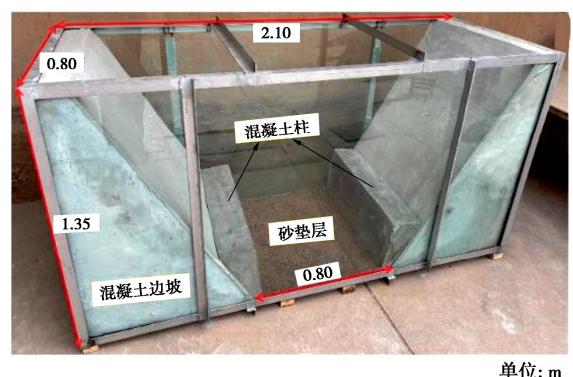


图 3 试验装置

Fig. 3 Test device

2.3 试验方案及材料

(1) 试验方案

为探明特大跨度高填方明洞工程中不同卸荷措施的卸荷效果, 本研究设计的 4 种试验工况如图 4 所示。工况 1 无任何卸荷措施, 工况 2 在明洞顶水平铺设了与衬砌结构等宽、厚度为 0.065 m 的 EPS 板, 工况 3 在工况 2 的基础上在两侧边坡底部增加了混凝土柱, 工况 4 在工况 3 的基础上, 在混凝土柱与衬砌结构间增加了竖向铺设、厚度为 0.05 m 的 EPS 板。以工况 4 为例, 模型试验详细尺寸如图 4 (d) 所示。

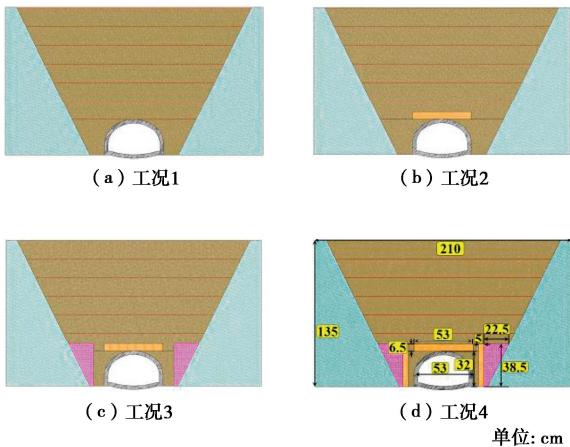


图 4 试验工况设计

Fig. 4 Test condition design

试验过程中,明洞上方土体采用分层(分为6层)回填并辅以人工夯实的方式进行填筑夯实。以工况4为例,试验过程及土体最终回填后效果如图5所示。

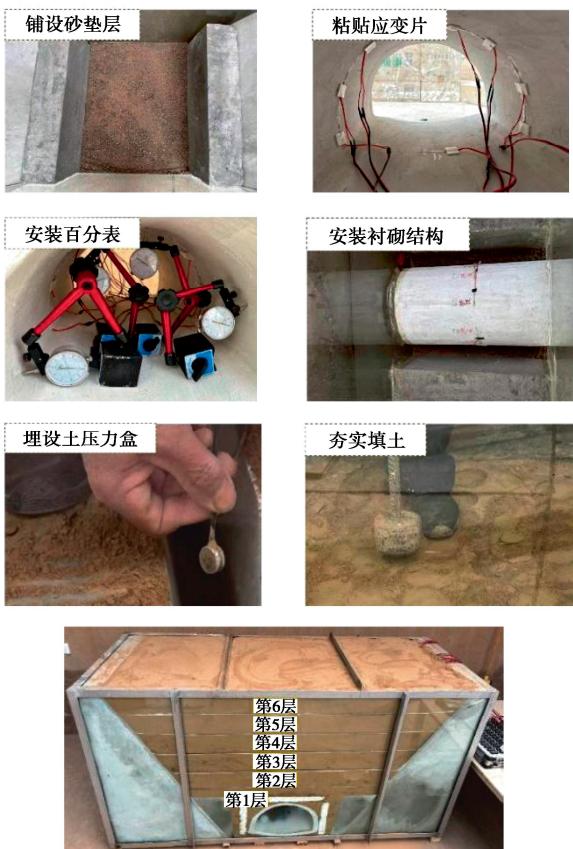


图 5 工况 4 试验过程及最终填土完成后效果

Fig. 5 Test process of working condition 4 and effect after completion of final filling

(2) 试验材料

试验过程中涉及的材料主要有边坡、混凝土柱、衬砌结构和卸荷材料。实际工程中边坡和地基经过处理后在填土荷载作用下产生的变形很小,因此本试验采用由混凝土浇筑而成的混凝土边坡进行模拟,卸荷材料选用密度为 20 kg/m^3 的EPS板,衬砌结构由石膏、

硅藻土和水按照一定的比例浇筑而成,参考文献[5]的研究成果,确定 $P_{\text{石膏}} : P_{\text{硅藻土}} : P_{\text{水}} = 1.0 : 0.08 : 0.77$ 。衬砌结构浇筑过程以及最终形态如图6所示。

试验所用回填土与现场实际工程相一致,土体最优含水率为15%,压实度为0.9,最大干密度为 1850 kg/m^3 。



(a) 浇筑过程 (b) 最终形态

图 6 衬砌结构浇筑过程及最终形态

Fig. 6 Pouring process and final form of lining structure

2.4 测点布设

图7是试验过程中监测元器件布设示意图。回填土中T截面和L截面的土压力盒,分别用于监测不同填土高度下明洞顶部的竖向土压力和明洞侧面的水平土压力,T截面中在明洞宽度范围内布设9个土压力盒,相邻土压力盒间距为0.067 m,L截面中在明洞高度范围内布设9个土压力盒,相邻土压力盒间距为0.033 m,V截面中编号为V1~V7的土压力盒用于监测回填土中不同位置的竖向土压力,V1~V7土压力盒的间距为0.167 m。衬砌结构拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和仰拱位置的内外粘贴了应变片,用于监测填土过程中衬砌结构的内力变化。此外,在衬砌结构的拱顶、拱肩、拱腰和拱脚位置分别布设了杠杆百分表,用于监测填土过程中衬砌结构各关键位置的位移变化。为了反映现场实际工程受力特性和变形特征,本文利用相似定理将模型试验结果换算为原型结果,后续分析结果均为换算后结果。

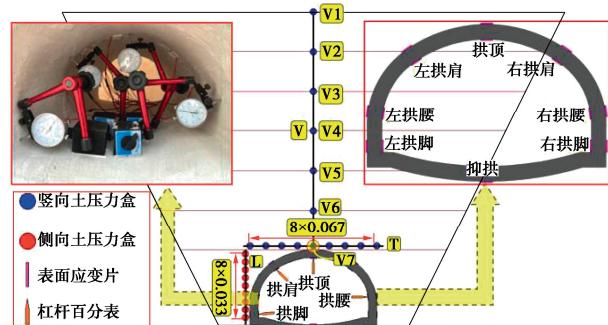


图 7 监测元器件布设示意图

Fig. 7 Layout diagram of monitoring components

3 试验结果分析

3.1 土压力

(1) 坚向土压力

图 8 为填土完成后明洞顶 V 截面中不同位置的坚向土压力。从图中可以看出, 在距离填土表面 $0\sim 10\text{ m}$ 范围内(即 $h \leq 10\text{ m}$), 各工况坚向土压力随着距离填土表面距离的增加基本呈线性增加, 大致等于同高度土柱的坚向土压力(γh)。在距离填土表面 $10\sim 30\text{ m}$ 范围内(即 $10\text{ m} \leq h \leq 30\text{ m}$), 随着距离填土表面距离的增加, 工况 1 坚向土压力快速增加且逐步大于土柱压力(γh), 其他 3 种工况坚向土压力开始逐步小于土柱压力(γh), 且距填土表面距离越大, 与土柱压力(γh)的差值越大。这说明工况 2、工况 3 和工况 4 采取的卸荷措施发挥了卸荷效果, 有效减小了明洞顶部的坚向土压力。

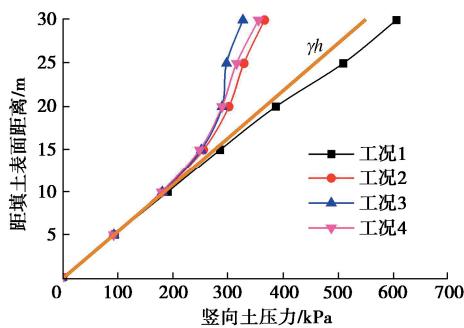


图 8 填土中 V 截面坚向土压力

Fig. 8 Vertical earth pressure of V section in fill

图 9 是填土完成后明洞顶 T 截面中坚向土压力分布规律。从图中可以看出, 工况 1 中坚向土压力呈中间大两边小的倒“U”形分布, 明洞顶部出现了明显的土压力集中现象, 这对于衬砌结构极为不利。工况 2、3 和工况 4 采取的卸荷措施利用填土自身的抗剪能力在回填土中产生了土拱效应, 使 T 截面中坚向土压力呈中间小两边大的“U”形分布, 有效消除了明洞顶的坚向土压力集中现象, 改善了衬砌结构受力特性。

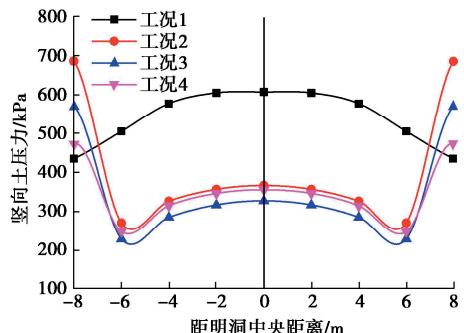


图 9 T 截面坚向土压力

Fig. 9 Vertical earth pressure of section T

使用等效面积法求得工况 1~4 中 T 截面的平均坚向土压力分别为 $551.76, 370.33, 320.06, 331.02\text{ kPa}$,

相较于工况 1, 工况 2~4 的平均坚向土压力分别减小了 $32.88\%, 41.99\%, 40.01\%$, 3 种工况均起到了良好的卸荷效果, 且就减小明洞顶坚向土压力而言, 工况 3 的卸荷效果最优, 工况 4 与工况 3 卸荷效果近乎相同。

(2) 水平土压力

图 10 是填土完成后回填土中 L 截面的水平土压力分布。从图 10 中可以看出, 各工况水平土压力基本随着距地基距离的增加而增加, 工况 1 和工况 2 的水平土压力差异较小, 这说明工况 2 采取的卸荷措施并未减小明洞侧面的水平土压力, 工况 3 和工况 4 采取的卸荷措施均不同程度的减小了明洞侧面的水平土压力, 且工况 4 的卸荷效果更为明显。使用等效面积法求得工况 1~4 中 L 截面的平均水平土压力分别为 $171.17, 171.01, 92.93, 35.37\text{ kPa}$, 相较于工况 1~4 的平均坚向土压力分别减小了 $0.10\%, 43.96\%, 79.34\%$ 。在明洞顶部和两侧铺设 EPS 板并在两侧边坡处设置混凝土柱的减载方式, 利用铺设 EPS 促使回填土中产生了土拱, 将明洞顶部的土压力转移到了明洞左右两侧由边坡和混凝土柱承担, 明洞周围的土压力大幅减小, 同时, 明洞左右两侧铺设的 EPS 板进一步减少了明洞周围的填土量, 进一步减小了明洞周围的土压力。因此, 就减小明洞侧面水平土压力而言, 工况 4 的卸荷效果最优。

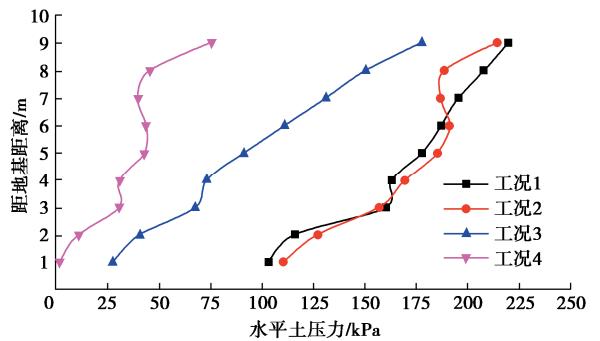


图 10 L 截面水平土压力

Fig. 10 Horizontal earth pressure of section L

3.2 衬砌结构位移

图 11 为填土过程中各工况衬砌结构关键位置位移变化规律。从图中可以看出, 各工况衬砌结构关键位置位移均随着填土高度的增加而增加。对衬砌结构拱顶位移而言, 填土高度小于 15 m 时, 各工况位移大小关系为工况 2>工况 3>工况 1>工况 4, 填土高度大于 15 m 后, 工况 1 位移迅速增加并超过其他 3 种工况, 填土高度大于 20 m 后, 工况 4 拱顶位移逐步大于工况 2 和工况 3。各工况拱顶位移随填土高度增加出现上述变化规律, 是因为填土高度较小时, 明洞顶部坚向土压力小于明洞侧面水平土压力, 水平土压力可有效约束由拱顶坚向土压力产生的竖向位移, 且

水平土压力越大约束作用越明显。随着填土高度的增加, 明洞顶部竖向土压力逐步大于明洞侧面水平土压力且填土高度越大二者差值越大, 水平土压力对拱顶竖向位移的约束作用逐步减弱, 因此当填土高度超过某一数值后, 拱顶位移会随着填土高度的增加迅速增大。填土完成后, 拱顶位置工况 2 位移最小, 为 14.53 mm, 相较于工况 1 的 29.15 mm, 减小了 50.15%。

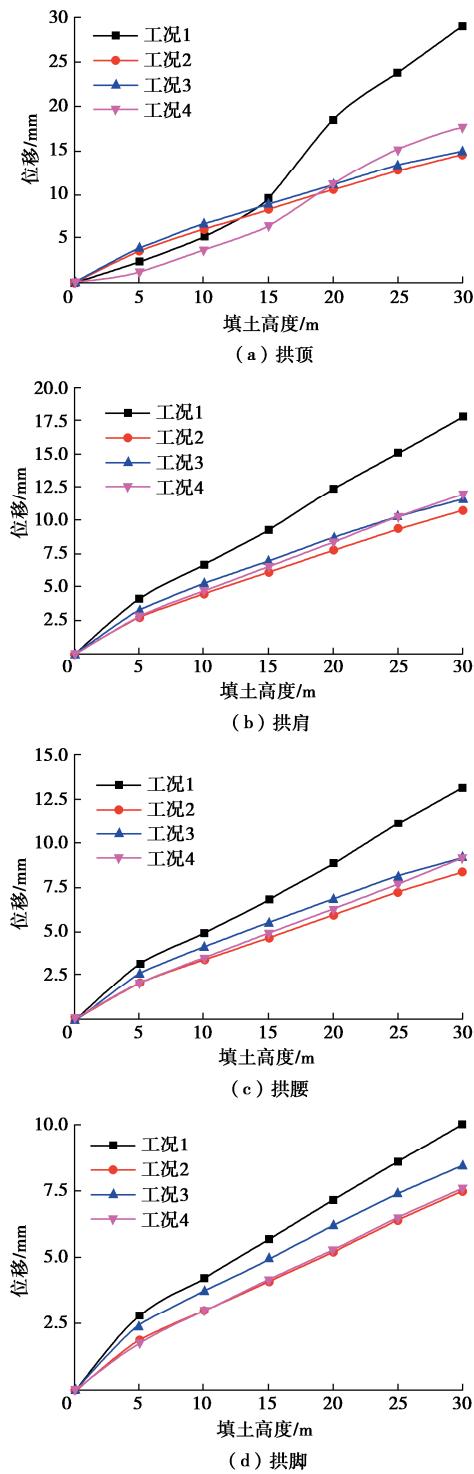


图 11 衬砌结构关键位置位移

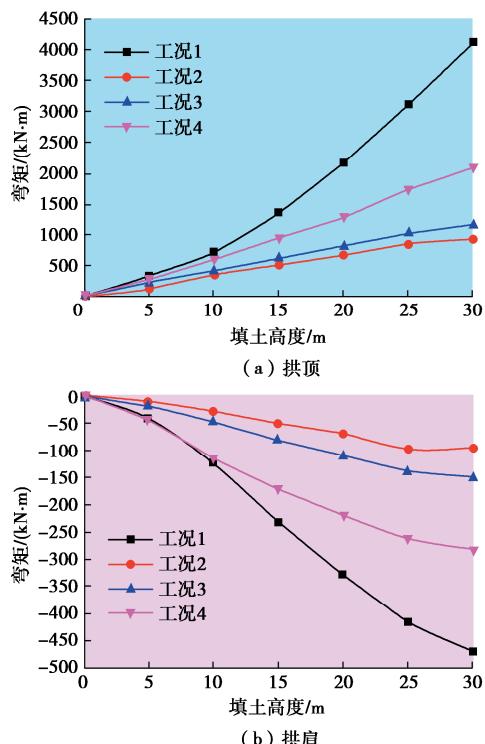
Fig. 11 Displacement of key positions of lining structure

对于衬砌结构拱肩、拱腰和拱脚位置位移, 由于工况 2~4 均采取了卸荷措施, 这些位置的位移相较于工况 1 均有所减小且工况 2 减小最多, 填土完成时工况 2 衬砌结构拱肩、拱腰和拱脚位置的位移分别为 10.76, 8.39, 7.47 mm, 相较于工况 1 的 13.15, 17.81, 9.99 mm, 分别减小了 18.17%, 52.89%, 25.23%。这是由于工况 2 采取的卸荷措施可以利用回填土中的土拱效应将明洞顶部的土压力转移到明洞两侧, 明洞顶部竖向土压力随着填土高度增加而增加的同时侧面的水平土压力也在同步增加, 衬砌结构所受约束作用也逐步增强, 因此衬砌结构产生的变形相对较小。这表明工况 2 采取的卸荷措施可最大程度的减小衬砌结构拱顶和拱腰位置的位移。

3.3 衬砌结构内力

(1) 弯矩

图 12 为各工况下衬砌结构各关键位置弯矩随填土高度变化规律。从图中可以看出, 各工况下衬砌结构各关键位置弯矩均随着填土高度的增加而增加, 各工况下衬砌结构拱顶和拱腰位置的弯矩较大, 拱顶和拱腰位置处工况 1 弯矩最大, 工况 2 弯矩最小, 工况 3 和工况 4 弯矩介于二者之间。填土完成后, 工况 1 拱顶和拱腰位置弯矩分别为 4111.88, -3988.51 kN·m (弯矩以衬砌结构内侧受拉为正, 外侧受拉为负), 工况 2 拱顶和拱腰位置弯矩分别为 925.82, -968.72 kN·m, 相较于工况 1 分别减小了 77.48%, 75.71%。



(a) 拱顶

(b) 拱肩

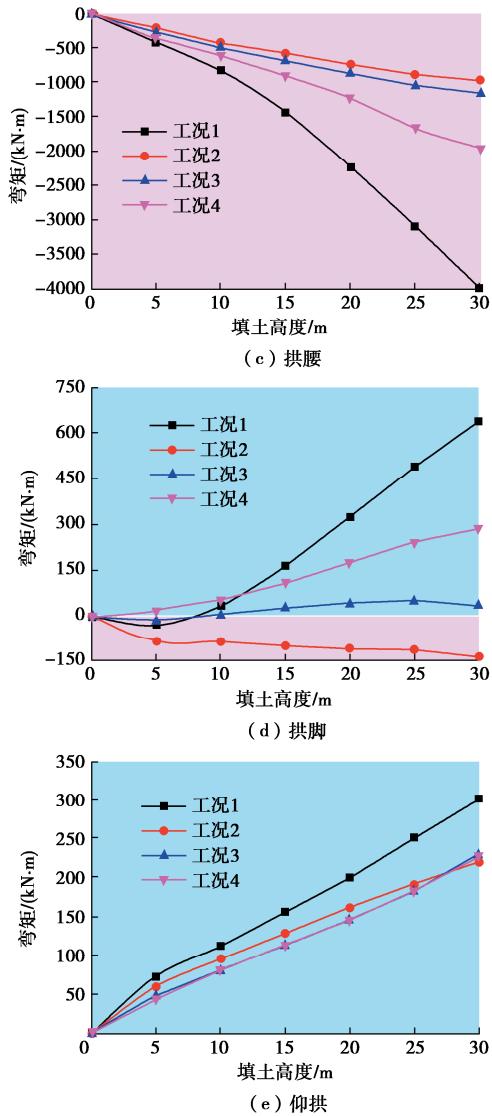


图 12 衬砌结构关键位置弯矩

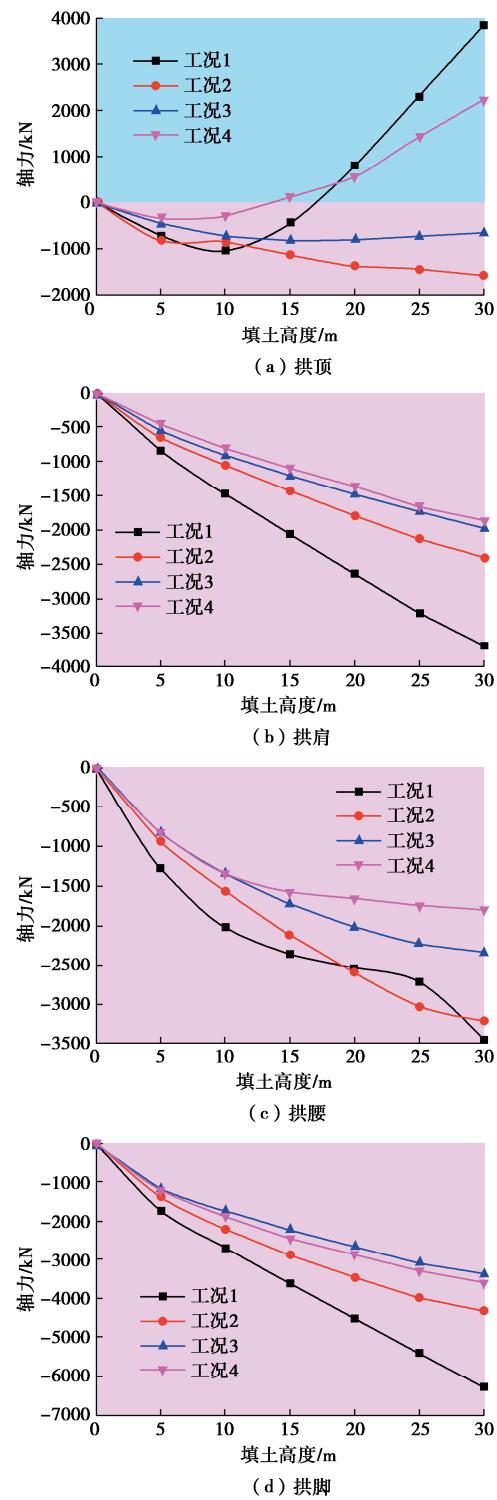
Fig. 12 Bending moment at key position of lining structure

对于特大跨度明洞衬砌结构, 拱顶位置位于结构跨中, 拱腰位置结构形状发生突变, 因此拱顶和拱腰位置均为衬砌结构的薄弱部位, 工况 1 中拱顶和拱腰位置承受了较大弯矩, 这对衬砌结构受力十分不利, 而工况 2 采取的卸荷措施大幅度减小了拱顶和拱腰位置的弯矩, 有效改善了衬砌结构受力, 这对于确保衬砌结构稳定具有十分重要的作用。

(2) 轴力

图 13 为各工况下衬砌结构各关键位置轴力随填土高度变化规律。从图 13 中可以看出, 衬砌结构拱顶位置各工况轴力变化规律存在差异, 对工况 1 而言, 填土高度小于 10 m 时, 轴力为压力且随着填土高度的增加而增加, 填土高度大于 10 m 后, 压力逐渐减小并随着填土高度的进一步增加轴力由压力转变为拉力, 且拉力随着填土高度的增加迅速增加, 工况 4 的轴力也出现了与工况 1 类似的变化规律, 出现这种现象主要是因为随着填土高度的增加明洞顶竖向土压力

与侧面水平土压力大小关系发生了改变, 这与 3.2 节中衬砌结构拱顶位移变化规律原因相同, 此处不再赘述。填土过程中工况 2 和工况 3 轴力均为压力, 工况 3 轴力随着填土高度的增加先逐渐增加而后缓慢减小, 工况 2 轴力随着填土高度的增加始终逐渐增加。填土完成后工况 1 和工况 4 所受拉力为 3839.56, 2241.14 kN, 工况 2 和工况 3 所受压力为 -1567.53, -664.77 kN, 工况 2 和工况 3 采取的卸荷措施有利于发挥衬砌结构的抗压能力而避免其出现拉裂破坏。



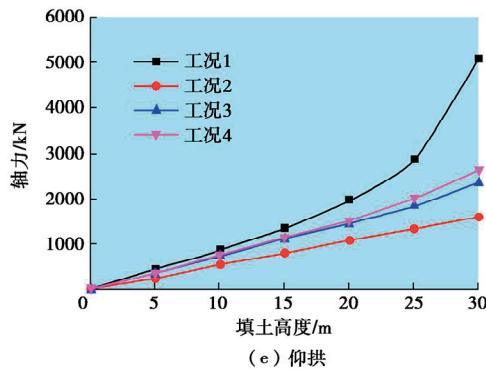


图 13 衬砌结构关键位置轴力

Fig. 13 Axial force at key position of lining structure

填土过程中衬砌结构拱肩、拱腰和拱脚位置始终受压(轴力以拉为正压为负), 轴力均随着填土高度的增加而增加, 各工况轴力大小关系为工况 1 最大, 工况 2 次之, 工况 3 和工况 4 更小但二者较为接近。仰拱位置始终受拉, 各工况轴力随着填土高度的增加而增加, 轴力大小关系为工况 1>工况 4>工况 3>工况 2。

3.4 衬砌结构安全系数

本文钢筋混凝土衬砌结构安全系数计算采用破损阶段法, 根据受压区高度 x 与界限受压区高度 x_b 的大小关系, 将计算截面分为大偏心受压和小偏心受压^[17-19], 图 14 为钢筋混凝土衬砌结构安全系数计算简图, 图中各字母含义如表 2 所示。

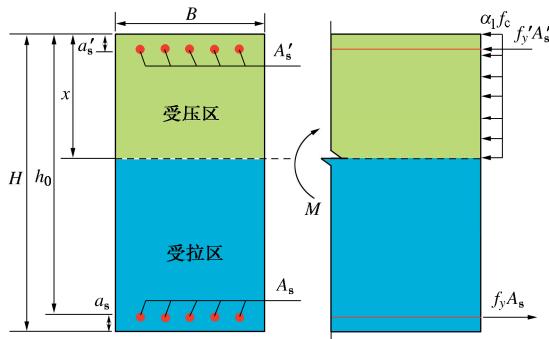


图 14 安全系数计算简图

Fig. 14 Safety factor calculation diagram

表 2 安全系数计算简图字母含义

Table 2 Letter meaning of safety factor calculation diagram

字母	含义
a'_s / a_s	受压(拉)区边缘至受压(拉)钢筋合力作用点距离
x	受压区高度, $x=\varepsilon h_0$, ε 为相对受压区高度
h_0	截面有效高度, $h_0=H-a_s$
H/B	截面高度/高度
α_1	受压区混凝土应力等效系数
A_s / A'_s	受拉/压钢筋横截面积
f_y / f'_y	钢筋抗拉/压计算强度
M	弯矩
f_c	混凝土轴心抗压强度

根据偏压类型不同, 安全系数计算方法如下:

(1) 受压区高度 x 大于界限受压区高度 x_b ($x \geq x_b$), 截面为小偏心受压, 此时取 $x=x_b$ ($x_b=\xi_b \times h_0$, ξ_b 为相对界限受压区高度, 本文 ξ_b 取 0.518), 安全系数如下所示:

$$K = (f_y' A'_s (h_0 - a'_s) + \alpha_s \alpha_1 f_c b h_0^2) / M , \quad (1)$$

$$\alpha_s = \xi (1 - 0.5 \xi) . \quad (2)$$

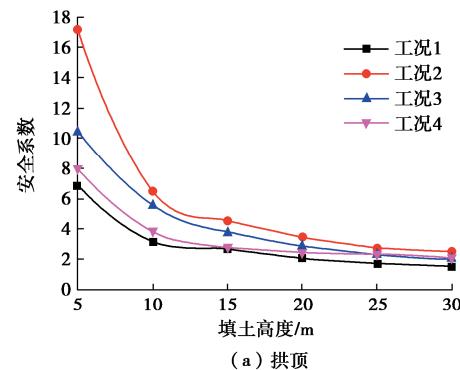
式中: K 为安全系数; α_s 为截面抵抗矩系数。

(2) 受压区高度 x 小于界限受压区高度 x_b ($x < x_b$), 截面为大偏心受压, 此时若 $x > 2 a'_s$, 安全系数如式(3), 若 $x \leq 2 a'_s$, 取 $x=2 a'_s$, 安全系数如式(4)所示:

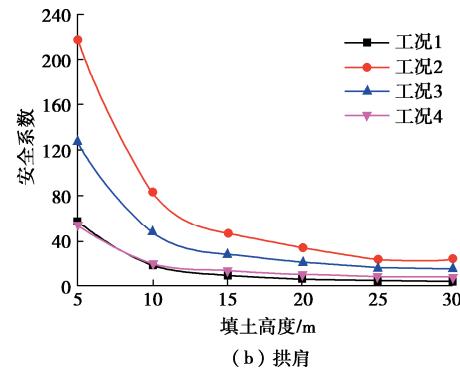
$$K = (f_y' A'_s (h_0 - a'_s) + \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2)) / M , \quad (3)$$

$$K = (f_y A_s (h_0 - a'_s)) / M . \quad (4)$$

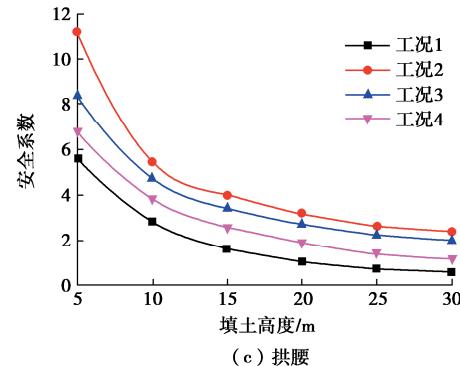
根据上述方式计算所得填土过程中各工况衬砌结构关键位置安全系数变化规律如图 15 所示。从图 15 中可以看出, 各工况衬砌结构关键位置安全系数随着填土高度的增加, 先迅速减小后缓慢减小, 在整个填



(a) 拱顶



(b) 拱肩



(c) 拱腰

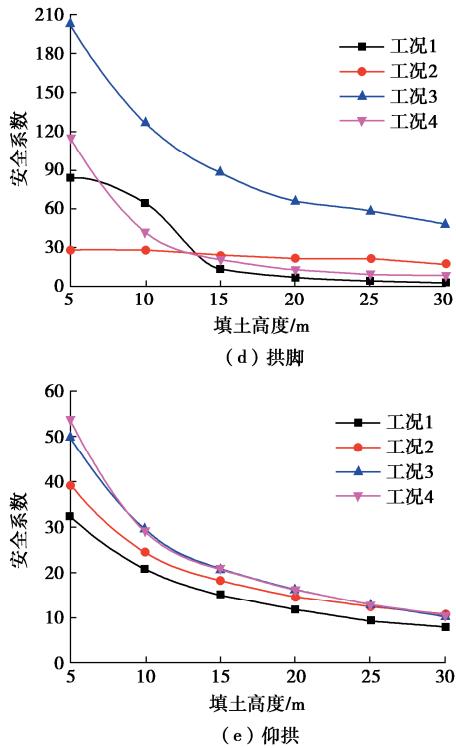


图 15 衬砌结构关键位置安全系数

Fig. 15 Safety factor of key position of lining structures

土过程中衬砌结构拱顶、拱肩和拱腰位置处工况 2 的安全系数始终大于其他 3 种工况, 这说明工况 2 采取的卸荷措施可有效确保衬砌结构薄弱部位(拱顶和拱腰)的安全性, 这对于改善衬砌结构受力, 确保结构安全是十分有利的。

3.5 衬砌结构位移预测

3.2 节和 3.3 节分析结果表明, 填土荷载作用下, 衬砌结构变形及其内力与周围竖向土压力和水平土压力数值大小存在关联。图 16 是衬砌结构周围土压力与结构位移关联示意图。为了探明填土荷载作用下衬砌结构薄弱部位位移(拱顶位移 D_v 和拱腰位移 D_l)与平均竖向土压力 Q_v 和平均水平土压力 Q_l 之间的联系, 本文提取了工况 1~工况 4 的土压力和位移数据(见表 3), 并基于多元线性回归原理求得了利用衬砌结构周围土压力 Q_v 和 Q_l 计算拱顶竖向位移 D_v 的式(5)以及拱腰水平位移 Q_l 的式(6)。

$$D_v = 0.078449Q_v - 0.04599Q_l - 6.34507 \quad (5)$$

$$D_l = 0.023478Q_v - 0.01253Q_l + 2.24389 \quad (6)$$

利用式(5)、(6)所得衬砌结构拱顶和拱腰位置位移预测值及其误差如表 4 所示, 从表 4 可以看出, 拱顶和拱腰位置的实际值与预测值基本相同, 二者间最大误差为 7.30%, 最小误差仅为 0.28%, 这表明利用式(5)、(6)可基本准确预测不同土压力作用下衬砌结构薄弱部位的位移值。就衬砌结构而言, 其变形

特征与结构内力特性息息相关, 式(5)、(6)明确了衬砌结构变形与周围土压力的内在关系, 这对于特大跨度高填方明洞工程中合理卸荷措施的研究以及卸荷参数的优化具有十分重要的意义。

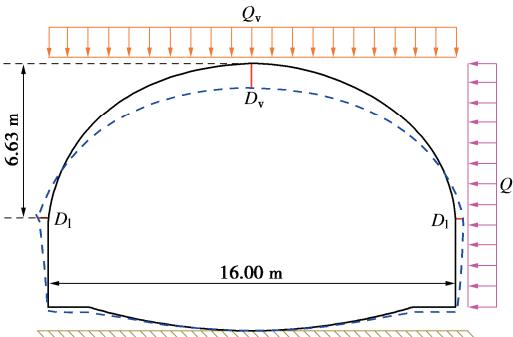


图 16 衬砌结构周围荷载及变形示意图

Fig. 16 Diagram of load and deformation around lining structure

表 3 不同工况下平均土压力和衬砌结构变形

Table 3 Average earth pressure and deformation of lining structure under different working conditions

平均土压力/变形	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
Q_v/kPa	551.76	370.33	320.06	331.02
Q_l/kPa	171.17	171.01	95.93	35.37
D_v/mm	29.15	14.53	14.87	17.71
D_l/mm	13.16	8.39	9.23	9.20

表 4 衬砌结构位移预测及误差

Table 4 Displacement prediction and error of lining structure

实际	拱顶位移/mm			拱腰位移/mm		
	预测	误差	实际	预测	误差	实际
29.15	29.07	0.26%	13.16	13.05	0.84%	
14.53	14.84	2.13%	8.39	8.80	4.89%	
14.87	14.35	3.49%	9.23	8.56	7.26%	
17.71	18.00	1.65%	9.20	9.57	4.02%	

4 结论

本文以深覆土特大跨度明洞工程为依托背景, 通过开展室内模型试验, 研究了不同卸荷措施下土压力、衬砌结构变形以及内力, 使用破损阶段法评估了不同卸荷措施下衬砌结构的安全性, 基于多元线性回归原理求得了衬砌结构薄弱部位位移与土压力的关系, 主要得到以下 5 点结论。

(1)无卸荷措施时明洞顶部会出现明显的土压力集中现象, EPS 板和混凝土柱等卸荷措施单独或组合使用, 均可不同程度减小明洞周围土压力, 消除拱顶土压力集中现象。明洞顶部和两侧铺设 EPS 板与两侧边坡设置混凝土柱的组合卸荷方式能最大限度减小明洞周围土压力, 平均竖向和水平土压力分别可减小

40.01%, 79.34%。

(2) 明洞侧面水平土压力可有效约束结构变形, 明洞顶铺设 EPS 板可在回填土中激发土拱, 将明洞顶的土压力转移到明洞两侧, 减小竖向土压力增幅的同时增大水平土压力增幅, 对衬砌结构变形起到有效约束作用。填土完成后, 无卸荷措施时明洞拱顶位移为 29.15 mm, 明洞顶铺设 EPS 板后拱顶位移减小了 50.15%。使用 EPS 板和混凝土柱组合的卸荷方式, 在减小明洞顶竖向土压力增幅的同时也减小了明洞侧面水平土压力增幅, 衬砌结构变形反而因所受约束作用不足而增大。

(3) 拱顶和拱腰是衬砌结构薄弱部位, 无卸荷措施时, 填土荷载作用下拱顶和拱腰位置弯矩为 4111.88, -3988.51 kN·m, 在明洞顶铺设 EPS 板后, 拱顶和拱腰位置的弯矩分别为 925.82, -968.72 kN·m, 分别减小了 77.48%, 75.71%。使用 EPS 板和混凝土柱组合的卸荷方式亦可有效减小拱顶和拱腰弯矩, 但减小幅度不及仅在明洞顶铺设 EPS 板。

(4) 填土荷载作用下衬砌结构各关键位置安全系数均随着填土高度的增加先迅速减小后缓慢减小, 在明洞顶铺设 EPS 板可有效提升衬砌结构薄弱部位安全系数, 该卸荷方式可有效改善衬砌结构受力。

(5) 衬砌结构薄弱部位位移预测方程所得位移预测值与实际值最大误差为 7.30%, 最小误差仅为 0.28%, 位移预测方程可有效应用于深覆土特大跨度明洞工程中卸荷措施研究及卸荷参数优化。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 黄继新、尤著刚参与模型试验方案设计; 黄继新、尤著刚、姜浩、马永浪参与模型试验实施和监测数据分析处理; 黄继新、尤著刚、雷浩参与论文写作和修改, 所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。HUANG Jixin and YOU Zhugang contributed to the design of the model test scheme. HUANG Jixin, YOU Zhugang, JIANG Hao and MA Yonglang participated in the implementation of the model tests and the analysis of monitoring data. HUANG Jixin, YOU Zhugang, and LEI Hao were involved in the writing and revision of the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献:

[1] YAO Y X, FANG Y, LI S, et al. Analysis of mechanical behavior of lining structure of high-filled cut-and-cover

tunnel based on DEM[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(10): 12729-12743.

- [2] 张业勤, 陈保国, 孟庆达, 等. 减载条件下高填方涵洞受力机制及基底压力[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4813-4818, 4847. (ZHANG Yeqin, CHEN Baoguo, MENG Qingda, et al. Stress mechanism and foundation contact pressure of high fill culvert under load reduction condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4813-4818, 4847. (in Chinese))
- [3] 李 盛, 刘亚朋, 何川, 等. 沟槽式高填黄土明洞洞顶垂直土压力统一计算方法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(5): 1-7. (LI Sheng, LIU Yapeng, HE Chuan, et al. A unified calculation method for vertical earth pressure on top of high fill loess open cut tunnel with groove type[J]. China Railway Science, 2018, 39(5): 1-7. (in Chinese))
- [4] 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. (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. (in Chinese))
- [5] ZHUO B, WANG F Y, FANG Y, et al. Analysis of cracking development and mechanical characteristics of high-filled cut-and-cover tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(8): 2519-2532.
- [6] ZHUO B, ZHU M Y, FANG Y, 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.
- [7] ZHANG Z Q, YANG H Y, QIN Y W, et al. Vertical earth pressure for a high-filled cut-and-cover tunnel: site measurements and DEM simulations[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(12): 04023235.
- [8] 尤著刚, 李 盛, 何 川, 等. 地震作用下高填减载明洞土压力研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(6): 1343-1350. (YOU Zhugang, LI Sheng, HE Chuan, et al. Earth pressure characteristics of high-filled cut-and-cover tunnels under earthquake action[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(6): 1343-1350. (in Chinese))
- [9] 尤著刚, 李 盛, 何 川, 等. 地震作用下高填减载明洞拱形态及衬砌结构动力响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(5): 186-195. (YOU Zhugang, LI Sheng, HE Chuan, et al. Study on soil arch and dynamic response of lining structure of unloading high-filled cut-and-cover tunnels under

- earthquake action[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, **42**(5): 186-195. (in Chinese))
- [10] LI S, HO I H, MA L, et al. Load reduction on high-filled cut-and-cover tunnel using discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **114**: 103149.
- [11] LI S, JIANIE Y C, 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.
- [12] 徐添源, 王明年, 于丽. 高填方双层衬砌式明洞土压力和结构内力特性研究[J]. 铁道学报, 2019, **41**(2): 146-153. (XU Tianyuan, WANG Mingnian, YU Li. Research on earth pressure and structural internal force of a high-fill open cut tunnel consisting of bi-layer linings[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, **41**(2): 146-153. (in Chinese))
- [13] FLAMARZ S A, HAJIAZIZI M. Coupled effect of tire-derived aggregate and geogrid on lateral earth pressure on high-filled cut-and-cover tunnels[J]. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 2023, **57**(1): 73-87.
- [14] 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, 2169. (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, 2169. (in Chinese))
- [15] 何川, 李玉文, 姚勇, 等. 公路小净距隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (HE Chuan, LI Yuwen, YAO Yong, et al. Highway Small Clear Distance Tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [16] FANG Y, GUO J N, GRASMICK J, et al. The effect of external water pressure on the liner behavior of large cross-section tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **60**: 80-95.
- [17] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [18] 公路隧道设计规范: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019. (Code for Design of Highway Tunnels: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communication Press, Co Ltd, 2019. (in Chinese))
- [19] 沈蒲生. 混凝土结构设计原理[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2007. (SHEN Pusheng. Design Principle of Concrete Structure[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese))