

橡胶土减载深覆土明洞受力特性研究

黄继新

(兰州城市建设设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 随着国家“西部大开发”、“一带一路”等发展战略的深入实施,我国西部地区交通基础设施建设迅速发展,城市中增加了许多深覆土基础设施,深覆土明洞因隧道顶部覆土厚度过大,容易出现结构开裂、衬砌掉块等影响隧道安全运营的问题,因此,采取有效减载措施,减小深覆土明洞工程中隧道结构周围土压力,对于确保隧道结构的安全稳定十分重要。结合九安隧道大厚度回填明洞工程,利用有限差分程序FLAC3D建立了三维数值仿真模型,研究了无减载和橡胶土减载两种工况下回填土中土压力以及隧道结构内力变化,在隧道顶部铺设橡胶土,可有效减小衬砌结构内力,有利于隧道明洞衬砌结构安全,同时也为废旧橡胶固废利用提供了一种途径。

关键词: 九安隧道;深覆土明洞;橡胶土;数值分析;结构内力;固废利用

中图分类号: TU435

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0442-05

Research on Stress Characteristics of Deep Covered Open Tunnels with Rubber Soil Load Reduction

HUANG Jixin

(Lanzhou Urban Construction Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the in-depth implementation of national development strategies such as the "Great Western Development" and the "Belt and Road", the transportation infrastructure construction in western China has developed rapidly, and many deep-covered soil infrastructures have been added in cities. Deep-covered soil open tunnels are prone to structural cracking, lining falling blocks and other problems affecting the safe operation of tunnels due to the excessive thickness of soil cover at the top of tunnels. Therefore, it is very important to take the effective load reduction measures and reduce the soil pressure around the tunnel structure to ensure the safety and stability of the tunnel structure in the deep covered open tunnel projects. Combined with the large-thickness backfill open tunnel project of Jiuan Tunnel, a three-dimensional numerical simulation model is established by using the finite difference program FLAC3D to study the changes of soil pressure and tunnel structural internal force in the backfill soil under two construction conditions of no load reduction and rubber soil load reduction. Laying the rubber soil on the top of the tunnel can effectively reduce the internal force of the lining structure, which is conducive to the safety of the open tunnel lining structure. At the same time, a way for the utilization of waste rubber solid waste is provided.

Keywords: Jiuan Tunnel; deep covered open tunnel; rubber soil; numerical analysis; internal force of structure; solid waste utilization

0 引言

随着国家“西部大开发”、“一带一路”等发展战略的深入实施,我国西北地区交通基础设施建设经历了一波快速发展期。西北黄土高原地区山大沟深,沟壑纵横,地形支离破碎,能够用于基础设施建设的土体资源严重不足,为增加可用于城市建设的土地资源,缓解城市用地紧张的局面,削山填沟造地

已成为解决这一问题的有效途径。而削山填沟造地在有效改善城市用地紧张这一问题的同时,也使城市中增加了许多深覆土基础设施,其中之一就是隧道深覆土明洞。深覆土明洞因隧道顶部覆土厚度过大,容易出现结构开裂、衬砌掉块等影响隧道安全运营的问题,因此,采取有效的减载措施,减小深覆土明洞工程中隧道结构周围土压力,对于确保隧道结构的安全稳定十分重要。

关于深覆土结构减载,已有许多学者进行了研究。宋丁豹等^[1]通过模型试验研究了高填方减载式刚性涵洞的减载效果,建立了减载式刚性涵洞顶垂

收稿日期: 2025-04-23

作者简介: 黄继新(1984—),男,工学学士,高级工程师,从事市政道路、隧道工程设计工作。

直土压力计算理论,并推导出了相应的计算公式;张业勤等人^[2]在考虑涵洞侧墙摩擦阻力对高填方结构受力影响的基础上,提出了涵洞-土体作用机制模型,并推导了计算公式。马强等^[3]利用数值模拟方式对高填方减载涵洞的加筋减载机理进行了研究,对不同格栅层数、减载孔宽度、侧壁角度以及减载孔填料性质的减载效果进行了研究。杨锡武等^[4]针对高填方涵洞减载,提出了加筋桥减概念,并通过模型试验验证了高填方涵洞工程中使用加筋减载桥进行减载的有效性。赵鹏等^[5]基于现场试验和室内相似模型试验,研究了明洞顶土压力变化规律以及使用土拱格栅进行减载时的减载效率。李盛等^[6-9]通过理论分析、数值模拟和相似模型试验,对高填方明洞的土压力计算方法、减载机理、不同减载措施的减载效果以及土拱效用进行了研究。李朝晖^[10]将废弃轮胎颗粒与黄土混合物作为减载材料应用于高填方路堤工程,研究了废弃轮胎颗粒与黄土混合物作为高弹性轻质骨料混合物进行减载时所产生的减载效果。

上述研究现状表明,前人的研究主要集中于高填方涵洞、高填方明洞以及高填方路堤的减载方式和减载机理,但是对于使用废弃轮胎橡胶颗粒与黄土混合物(以下简称橡胶土)作为减载材料应用于深覆土明洞中的研究却鲜有耳闻。因此,本文依托实际工程,通过有限差分程序FALC3D建立深覆土明洞数值分析模型,研究无减载情况和使用橡胶土减载情况下隧道结构周围土压力分布规律,并基于此进一步研究隧道衬砌结构内力分布状态,以期探明深覆土明洞工程使用橡胶土减载后所产生的减载效果及其减载机理,为类似工程设计施工提供参考价值,也为废旧橡胶固废利用提供了一种途径。

1 工程概况

九安隧道是兰州市北环路重要节点工程,隧道单洞开挖跨度达16.00 m,为大跨度隧道。隧道右线YK2+655~YK2+940段(长度为285 m)地形呈沟谷状,设计以明洞形式通过该区段,明洞填土厚度为2.0~14.0 m。本文依托九安隧道明挖段工程,通过有限差分程序FLAC3D建立三维数值分析模型,研究不采取减载措施和使用橡胶土减载措施两种工况下回填土土压力分布以及明洞结构内力,以期对深覆土明洞设计和施工提供参考。

2 数值分析模型

2.1 数值模型建立

图1是基于现场实际情况所建深覆土明洞数值分析模型图,模型为80 m(长)×50 m(宽)×53.5 m(高),模型地基厚30 m,沟槽宽18 m,高23.5 m,隧道结构高度和宽度分别为9.5 m和16 m,隧道顶部以上填土分7层回填,每层填土厚2 m,共计14 m,隧道顶部铺设一层与隧道等宽的橡胶土,其厚度等于两层填土高度,即4 m。模型建立完成后,为模型设置数值分析计算所需边界条件,模型底部全约束,四周约束法向位移,顶部不设置约束。

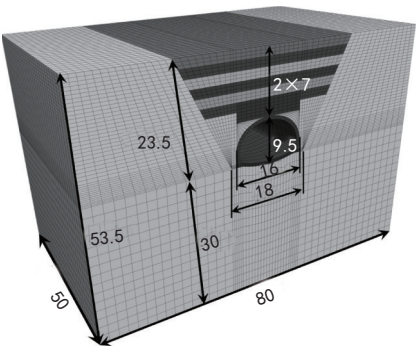


图1 深覆土明洞数值模型图(单位:m)

2.2 工况设置及材料参数选取

为验证隧道顶部铺设橡胶土能起到良好的减载作用,本文设置隧道顶部不铺设橡胶土减载(S1)和隧道顶部铺设橡胶土减载(S2)两种工况,对其计算结果进行对比分析。数值计算过程中,填土和橡胶土采用摩尔-库伦本构模型,边坡、地基和衬砌结构采用线弹性本构模型。模型最小网格尺寸为0.5 m×0.5 m,最大网格尺寸为2 m×2 m,单元类型采用实体单元,计算精度采用平均收敛率小于10⁻⁵。由于依托项目未对橡胶土进行模型参数实验,而李朝晖^[10]所做研究中的填土与本工程填土土层及工况类似,具有较高的参考性,因此,本次研究填土及橡胶土计算模型参数参考其研究中的各材料参数,详见表1。

表1 计算模型参数

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	粘聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	密度/ (kg·m ⁻³)
填土	15	0.30	0.045	35.0	1 950.00
橡胶土	2.55	0.35	0.03	36.0	1 665.00
边坡	50	0.25	—	—	2 000.00
地基	210	0.32	—	—	2 200.00
衬砌	3×104	0.20	—	—	2 400.00

2.3 监测点布置

数值计算过程中,为研究隧道顶部竖向土压力

以及隧道侧面水平土压力变化趋势,在隧道顶部及隧道侧面布设一系列监测点用于监测计算过程中隧道周围土压力变化,监测点布置如图2所示。图2中,隧道左侧一系列测点用于监测隧道侧面水平土压力变化趋势,隧道顶部沿水平方向布设的一系列测点用于监测隧道顶部竖向土压力在隧道洞宽范围内的分布规律,隧道顶沿竖向布置的一系列监测点用于监测竖向土压力随覆土深度的变化规律。

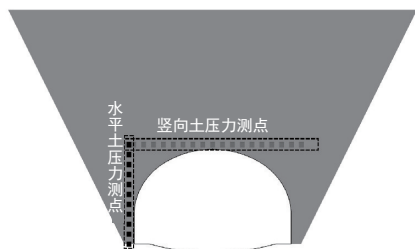


图2 测点布置图

3 结果分析

3.1 土压力分析

3.1.1 竖向土压力分析

图3是无减载和橡胶土减载情况下填土中竖向土压力云图。由图可知,无减载情况下,隧道顶部明显出现土压力集中现象,土压力集中范围主要出现在隧道顶部范围,这对于隧道结构受力将产生不利影响,在隧道顶部铺设橡胶土进行减载后,隧道顶部土压力集中现象消除,且拱顶位置处竖向土压力明显减小,而隧道左右两侧拱肩上方土体中在一定范围内出现了土压力集中现象,这主要是因为隧道顶部铺设橡胶土后填土中产生了土拱效应,将隧道顶部竖向土压力转移到了左右两侧拱肩上方土体中,有效改善了隧道周围土压力环境,这对于确保隧道结构的安全稳定具有十分重要的意义。

为进一步研究有无橡胶土减载情况下隧道顶部竖向土压力变化规律,提取了隧道顶部沿水平向以及竖向布设监测点位置处的竖向土压力,其分布规律如图4所示。图4(a)是隧道顶沿水平向布设测点处竖向应力分布,由图可知,无减载情况下,隧道顶部竖向土压力较大,为277.69 kPa,随着距隧道中心距离的逐渐增加,竖向土压力先略微增加后逐渐减小,出现这种现象,这主要是因为无减载情况下,隧道宽度范围外土体产生的沉降值大于隧道宽度范围内土体,致使隧道顶部和左右两侧拱肩处出现了土压力集中现象,橡胶土减载情况下,隧道顶部竖向土压力为230.34 kPa,但相比无减载情况下减小了

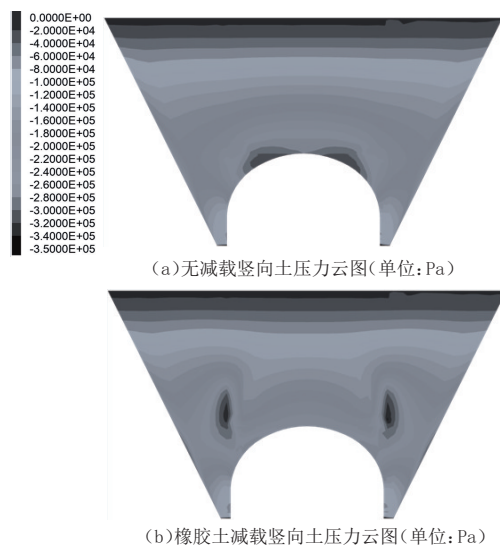


图3 回填土竖向土压力分布

17.05%,随着距隧道中心距离的增加,竖向土压力呈现先逐渐减小后迅速增加,这主要是因为使用橡胶土减载后在回填土体中出现了土拱效应,有效减小了隧道顶部及左右拱肩处的竖向土压力,而距离隧道中心较远位置的土体受力较为集中,所以出现了土压力迅速增加现象,图4(b)是隧道顶竖向测点处竖向土压力变化,由图可知,在距隧道顶部12~14 m范围内有无减载情况下竖向土压力变化趋势基本一致,在距隧道顶0~12 m范围内,橡胶土减载情况下竖向土压力增加速度明显弱于无减载情况下,这再一次说明隧道顶部铺设橡胶土减载后在土体中出现了土拱效应,有效减小了隧道顶部的竖向土压力。

3.1.2 水平土压力分析

图5是无减载和橡胶土减载情况下填土中水平土压力分布云图。由图可知,无减载工况下,隧道左右两侧拱肩附近以及左右两侧边墙顶部出现了水平土压力集中现象,但土压力数值较小。橡胶土减载工况下,隧道左右两侧拱肩与边坡间的土体中出现了明显的土压力集中现象,出现这种现象,主要是因为隧道顶部铺设橡胶土减载后,土体中产生了土拱效应,将隧道顶部土体的土压力转移到了隧道左右两侧拱肩与边坡间的土体中,左右两侧拱肩与边坡间的土体受拱肩与边坡支撑作用,承受了较大水平土压力所致。

为进一步明确有无减载情况下,隧道侧面水平土压力分布规律,提取了隧道侧面布设测点中的水平土压力,其分布规律如图6所示。由图6可知,无减载情况下,隧道侧面水平土压力大体随着距沟槽底部距离的增加先增后减,在距离沟槽底部4 m位

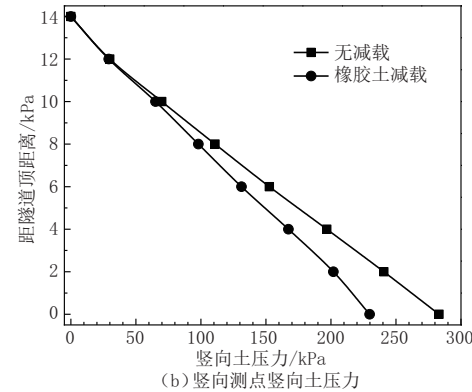
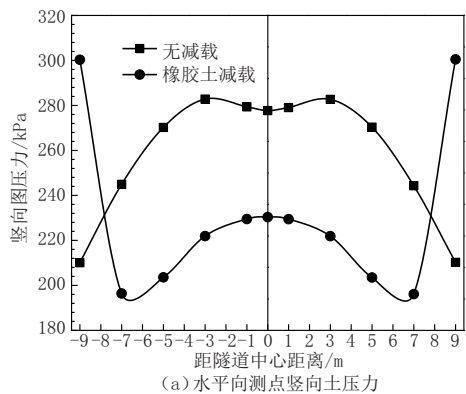


图 4 隧道顶竖向土压力分布

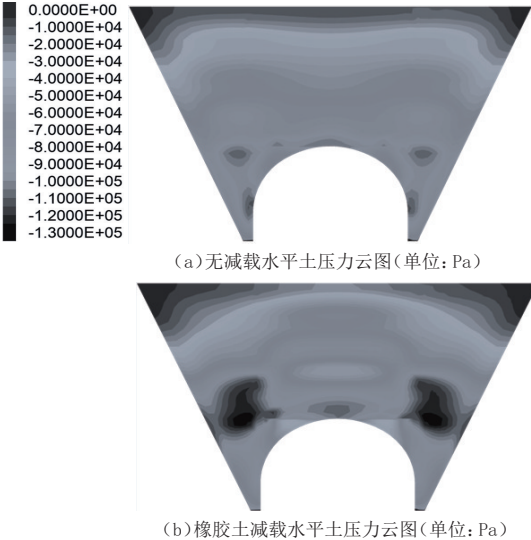


图 5 回填土竖向土压力分布

置处出现了最大水平土压力,为 112.95 kPa,橡胶土减载情况下,隧道侧面水平土压力随着距沟槽底部距离的增加先增加后减小再增加,在距沟槽底部 0~8 m 范围内水平土压力值均小于无减载情况下水平土压力值,仅在距沟槽底部 8~10 m 位置处水平土压力值大于无减载情况下水平土压力值,出现这种现象,主要是由于在隧道顶部铺设橡胶土进行减载后,回填土体中产生了土拱效应,而距离沟槽底部 8 m 且靠近隧道左右两侧拱肩和边坡处的土体出现了土压力集中现象所致。

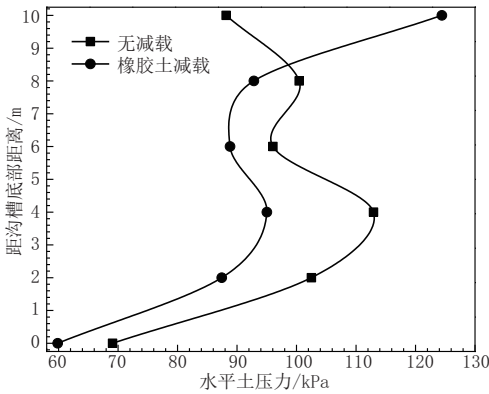


图 6 隧道侧面水平土压力分布

3.2 衬砌结构内力分析

图 7 是无减载和橡胶土减载情况下衬砌结构各位置处的弯矩和轴力分布。从图 7(a)中可以发现,在无减载情况下,衬砌结构拱顶和边墙顶部的弯矩值较大,分别为 2 041.46 kN·m 和 -2 336.41 kN·m(正弯矩和负弯矩分别表示衬砌结构内侧和外侧受拉),相较于无减载情况,橡胶土减载情况下隧道拱部和边墙位置处弯矩均有所减小,其中拱顶和边墙顶部的弯矩分别减小了 495.73 kN·m 和 546.09 kN·m,弯矩减少较多。值得注意的是,无减载情况下边墙底部内侧受拉,橡胶土减载情况下边墙底部变为外侧受拉。从图 7(b)可以发现,无减载情况下边墙顶部和边墙底部的轴力值较大,分别为 -2 998.75 kN 和 -2 760.82 kN,相较于无减载情况,橡胶土减载情况下边墙顶部和底部的轴力分别减小了 509.63 kN 和 203.51 kN,边墙顶部轴力减少较多(正轴力和负轴力分别表示衬砌结构受拉和受压)。由上述分析可以发现,无减载情况下衬砌结构边墙顶部弯矩和轴力均较大,这主要是因为边墙顶部作为衬砌结构拱部与边墙的交界位置,其几何形状的突变致使此位置出现了应力集中现象。而在隧道顶部铺设橡胶土减载后,在回填土中产生了土拱效应,起到了一定的减载作用,故而有效减小了衬砌结构内力,特别是有效减小了容易出现损伤的边墙顶部的结构内力,这对于确保衬砌结构安全是十分重要的。此外,从图 7(b)中还可以发现,无减载与橡胶土减载情况下衬砌结构仰拱始终处于受拉状态,究其原因,主要是因为衬砌结构所受覆土荷载较大,仰拱在覆土荷载作用下有向隧道内侧变形的趋势,但由于衬砌结构自身刚度较大不易产生变形,故而仰拱始终处于受拉状态。

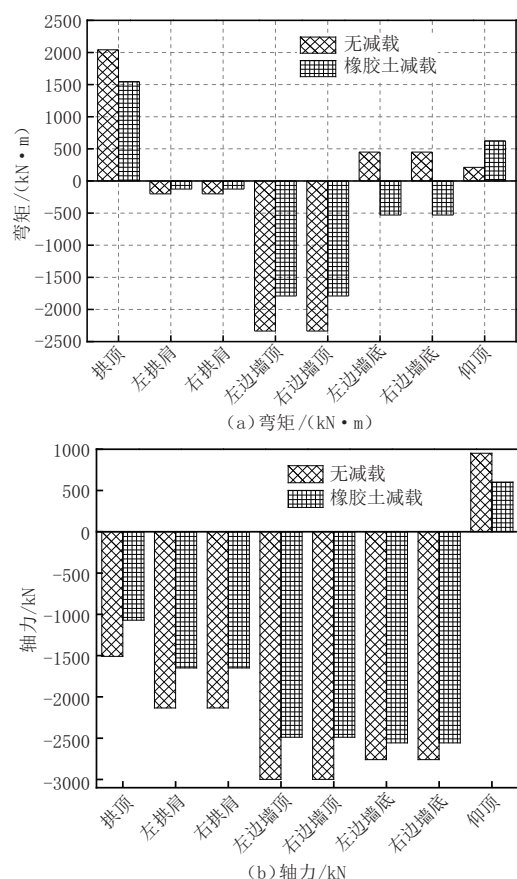


图7 衬砌结构内力分布

3 结 语

针对九安隧道深覆土明洞工程特点,使用有限差分程序FLAC3D建立数值分析模型,对无减载以及橡胶土减载两种情况下隧道结构周围土压力分布以及隧道结构内力进行分析,得出结论如下。

(1)无减载情况下隧道拱顶附近出现竖向土压力集中现象,拱顶竖向土压力值为277.69 kPa;在隧道顶部铺设橡胶土进行减载后,隧道顶部竖向土压力减小至230.34 kPa,相比无减载情况减小约17.05%,说明隧道顶部铺设橡胶土减载后在回填土体中出现了土拱效应,有效减小了隧道顶部的竖向土压力。

(2)无减载情况下隧道顶部两侧产生了水平土压力集中现象,隧道顶部两侧最大水平土压力值为112.95 kPa,橡胶土减载情况下隧道顶部两侧水平土压力值为92.48 kPa,相比于无减载情况隧道顶部两侧水平土压力减小了约18.12%,说明隧道顶部铺设

橡胶土进行减载后,回填土体中产生了土拱效应,将部分土压力分散到隧道两侧拱肩和边坡处。

(3)无减载情况下,衬砌结构拱顶和边墙顶部弯矩值较大,分别为2 041.46 kN·m和-2 336.41 kN·m,边墙顶部和边墙底部轴力值较大,分别为-2 998.75 kN和-2 760.82 kN。相较于无减载情况,橡胶土减载情况下拱顶和边墙顶部的弯矩分别减小了495.73 kN·m和546.09 kN·m,边墙顶部和边墙底部轴力分别减小了509.63 kN和203.51 kN。说明在隧道顶部铺设橡胶土减载后,在回填土中产生了土拱效应,起到了一定的减载作用,故而有效减小了衬砌结构内力,特别是有效减小了容易出现损伤的边墙顶部的结构内力,有利于确保衬砌结构安全。

(4)在深覆土隧道明洞顶部铺设橡胶土,为废旧橡胶固废利用提供了一种途径。

(5)基于九安隧道衬砌结构模型、填土厚度、土层特性及开挖回填坡率等因素进行研究,提供了一种研究思路,对于其他结构地区、地层、埋深、尺寸的隧道的适用性,还有待根据实际情况进一步研究确定。

参考文献:

- [1] 宋丁豹,蒲诃夫,陈保国,等.高填方减载式刚性涵洞受力特性模型试验研究[J].岩土力学,2020,41(3):823-830.
- [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.
- [3] 马强,肖衡林,李丽华.高填方涵洞加筋减载的数值模拟[J].长江科学院院报,2017,34(2):35-40.
- [4] 杨锡武,张永兴.山区公路高填方涵洞减载方法及试验研究[J].土木工程学报,2005(7):116-121.
- [5] 赵鹏,王起才,李盛.明洞顶垂直土压力性状及土工格栅减载方案研究[J].兰州交通大学学报,2013,32(4):79-84.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李盛,王起才,马莉,等.高填土明洞土压力减载计算[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(11):58-63.
- [9] 马莉,李盛,王起才,等.沟槽式高填黄土明洞卸载模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(5):1065-1071.
- [10] 李朝晖.废轮胎颗粒与黄土混合物岩土工程特性研究[D].兰州:兰州大学,2011.