DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260568

机车荷载下暗挖隧道及栈桥结构安全风险分析

张　琪
(武汉誉城千里建工有限公司,湖北 武汉 430050)

摘　要: 为研究机车运行对暗挖隧道结构及栈桥造成的不利影响,以某双拱暗挖隧道工程为背景,采用三维有限元数值模拟方法开展系统分析,重点讨论了机车荷载对隧道初支、中隔墙和栈桥安全性的影响,探究了暗挖隧道在机车荷载作用下其结构不同位置的动态受力变形规律。研究结果表明:暗挖隧道初支、中隔墙和栈桥的变形随机车运行发生明显变化,但初支的受力状态几乎保持不变。中隔墙受压极值增大约57%,栈桥应力值增大超过170 MPa,中隔墙和栈桥的受力均显著增大,但都处于弹性阶段。机车通过后隧道结构和栈桥的受力均会恢复至正常状态,机车运行仅暂时改变隧道及栈桥的受力变形模式,并不会造成安全隐患。

关键词: 暗挖隧道;仰拱栈桥;机车荷载;数值分析
中图分类号: U458.1;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0225-06

Safety Risk Analysis of Mined Tunnel and Ramp Structures Under Train Loads

ZHANG Qi
(Wuhan Yucheng Qianli Construction Engineering Co., Ltd, Hubei Province, Wuhan City 430050, China)

Abstract: In order to study the adverse effects of train operation on the underground tunnel structure and trestle, under the background of a double-arch underground tunnel project, a three-dimensional finite element numerical simulation method is used to conduct a systematic analysis. The focus is on the discussion of the influence of train load on the safety of the initial support, middle partition wall, and trestle of the tunnel. The dynamic force deformation laws of the structure of underground tunnels at different positions under the action of train loads are explored. The research results indicate that the deformation of the initial support, middle partition wall, and trestle of the underground tunnel undergoes significant changes with the train operation, but the force state of the initial support remains almost unchanged. The extreme pressure value of the middle partition wall is increased by approximately 57%, and the stress value of the trestle bridge is increased by more than 170 MPa. The forces on both the middle partition wall and the trestle significantly increase, but both are all in the elastic stage. After the train passes through, the force on the tunnel structure and the trestle will return to normal. The train operation only temporarily changes the force deformation mode of the tunnel and trestle, and will not cause any safety hazards.

Keywords: underground tunnel; invert trestle; train operation; numerical analysis

0　引　言

我国交通建设领域在发展过程中实现了飞速的技术提升,逐渐从传统的人工施工模式升级为全机械化建设模式[1]。其中,仰拱栈桥是隧道建设机械化转变进程中的关键环节[2],相关先进工艺层出不穷,如可横移前引桥的自行式仰拱栈桥和液压移动仰拱栈桥等[3-5]。

面对不同隧道工程的施工进度要求,众多学者针对仰拱栈桥的施工技术开展了大量研究。王子君[6]以实际隧道工程为依托,结合仰拱栈桥工程案例,对其结构设计、受力规律及施工方案进行了深入研究。李闯[7]在研究中指出,24 m规格仰拱栈桥的现场施工工效仍有较大提升空间。通过理论计算与方案论证,其研发设计出一款可自行走行、有效跨度36 m的大跨度仰拱栈桥,能够实现单段仰拱衬砌、仰拱钢筋绑扎与仰拱初期支护同步作业,显著提升了隧道工程整体施工效率,加快了施工进度。胡运春[8]针对大断面隧道施工中仰拱工序拖慢整体工期的难题,引入自行式双线栈桥仰拱施工技术,从工艺层面突破了施工进度受限的关键痛点。苏辉[9]介绍了长仰拱栈桥在黄土隧道施工中的应用,利用栈桥搭设仰拱模板,减少工序时间,获得了显著的经济效益。另一方面,一些多功能型仰拱栈桥也得到了应用,如带救援通道的仰拱栈桥[10]和重载铁路仰拱栈

收稿日期:2026-05-21
作者简介:张琪(1994—),女,硕士,工程师,从事市政工程项目管理工作。

桥[11]等。总体来看,为满足多工序同步施工和车辆通行等要求,具备履带和自行功能的仰拱栈桥已成为主流趋势[12-14]。得益于大量有关仰拱栈桥施工工艺与优化制造的既有研究,基于需求的仰拱栈桥设计得到了飞速发展[15]。此外,仰拱栈桥的刚度、强度和承载性能也受到了一定的关注。胡志荣[16]等研究了考虑共振作用的栈桥安全性能,并提出应在施工过程中控制车辆的运行速度。Yin[17]等基于强迫激振条件下的栈桥响应特征推导了栈桥顶板的动力学函数,为研究其在动力作用下的受力变形规律提供了理论支持。Wang[18]等通过试验方法探究了栈桥在上覆荷载作用下的平衡性能。考虑到栈桥对隧道整体建设质量和人员安全具有重要影响,应针对其在不同荷载作用条件下的可靠性予以足够重视。

本文以某双拱暗挖隧道工程为背景,针对仰拱栈桥在机车运行荷载下的结构安全状态,采用三维数值模拟开展暗挖隧道与栈桥结构的受力变形分析,研究成果可为类似工程提供参考。

1　工程概况

1.1　暗挖隧道及栈桥

某双洞连拱隧道跨度约 12 m,采用暗挖台阶法施工,隧道以中隔墙为界分为左洞和右洞。暗挖隧道初支施工完成后,进一步开展仰拱、二衬和栈桥施工。隧道初支采用钢筋模板浇筑混凝土,厚度为 30 cm。栈桥采用钢架焊接支撑、顶部搭设钢板,并在钢板上铺设铁轨,栈桥顶板宽 3 m,高 1.2 m。

由于施工进度延后,暗挖隧道在铁轨铺设开始前无法全部完成二次衬砌施工,预计剩余 50 m 二次衬砌未能结束施工。为保证铺轨通道畅通且不影响后续轨道车辆运行,上述 50 m 隧道范围内将直接在初支基础上进行栈桥施工并铺设铁轨。铁轨搭设完成后,其上可行驶机车和平板车,总长约 30 m。

1.2　地质条件

暗挖隧道上部处于强风化砂岩中,下部处于中风化砂岩地层中。地表附近存在厚度较均匀的填土层,向下依次为卵石土地层和黄土地层。地勘结果显示出入场线暗挖隧道周边地层地下水赋存量较小。土体物理力学参数如表 1 所示。

2　数值模型

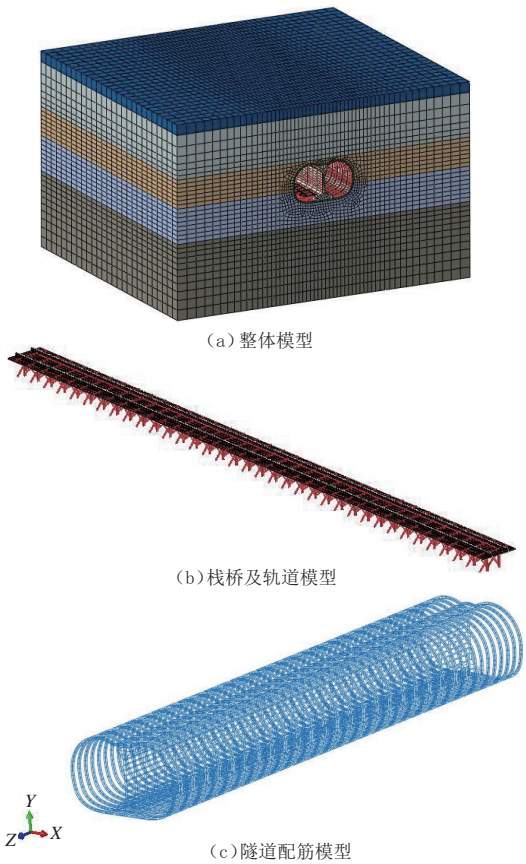
2.1　模型及网格

建立包含土层、双洞连拱隧道及栈桥在内的三维数值模型。土体、隧道和轨道均采用 C3D8 实体模型,栈桥顶板采用 S4 壳单元模拟,其余支撑框架和隧道配筋采用 B31 梁单元模拟,整体模型共包含 29 642 个单元。

表 1　暗挖隧道周围土层物理力学参数表

地层	γ/(kN·m^{-3})	E_S/MPa	c_u/kPa	φ/(°)
填土	17.8	5.2	0	15
卵石	23.5	54	0	33
黄土	17.2	5.5	7	12
砂岩	22.7	36	5	23
砂岩	24.1	57	5	25

三维数值模型如图 1 所示。为保证模型重点关注区域计算结果的精确性,对隧道周围土层网格进行了加密。模型固定四个侧面和底面位置的位移约束,上表面为自由面。此外,隧道与周围土体间采用接触关系,配筋与隧道衬砌为“嵌入”关系,栈桥不同构件间为绑定关系以模拟实际焊接效果。



(a)整体模型　(b)栈桥及轨道模型　(c)隧道配筋模型

图 1　三维数值模型

2.2　材料参数

各土层采用摩尔-库仑本构,具体参数如表 1 所示。暗挖隧道初支和中隔墙采用线弹性本构模型。根据工程实际情况,初支采用 C25 强度混凝土,中隔墙采用 C45 强度混凝土。初支和中隔墙配筋采用 Q235 钢,对应的材料属性采用双折线理想弹塑性本

构模型。轨道为国产轻轨材质,与栈桥顶板和支撑框架材料一致,均为 Q235 钢材。不同材料的具体参数如表 2 所示。

表 2　模型材料参数表

结构	γ/(kN·m^{-3})	E/GPa	泊松比
暗挖隧道初支	22	23.5	0.2
暗挖隧道中隔墙	22	30.5	0.2
初支配筋	78	210	0.25
中隔墙配筋	78	210	0.25
轻质钢轨道	78	210	0.25
栈桥支撑框架	78	210	0.25

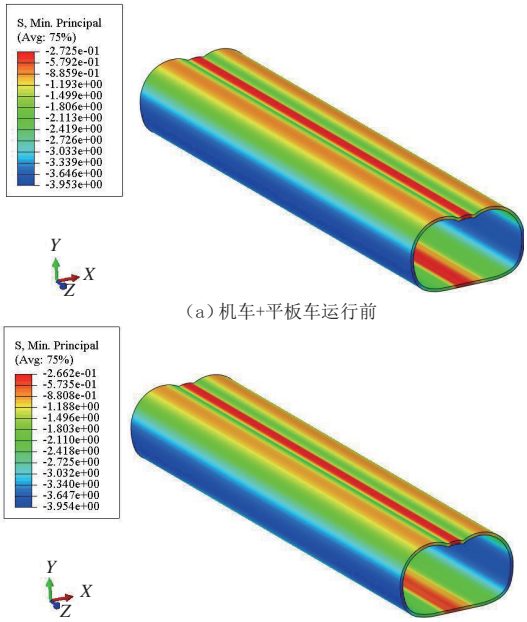
3　结果分析

为明确二衬及仰拱均未施作工况下,机车通行对暗挖隧道初支、中隔墙结构的安全影响,本文分别对暗挖隧道初支、中隔墙及栈桥的受力与变形规律开展计算分析。

3.1　机车运行对初支受力变形影响分析

暗挖隧道初支受力计算结果如图 2 所示,图 2(a)为机车和平板车未运行时对应的初支受压应力分布情况,而图 2(b)为机车和平板车全部运行至轨道上时对应的初支受压应力分布情况。根据实际工程车辆运送需求,机车自重 23 t,平板车自重 13 t 且需要运送约 10 t 的货物。通过对比图 2(a)、(b)可知,机车与平板车未运行前,暗挖隧道初支最大受压为 3.953 MPa,机车与平板车运行后对应的最大受压值变为 3.954 MPa。此外,机车与平板车运行前后暗挖隧道初支压应力的分布特征也基本保持不变,最大压应力出现在双洞隧道拱腰位置。上述结果表明,虽二衬及仰拱无法在栈桥与机车运输作业开展前完成施工,但机车和平板车运行荷载对隧道初支结构受力基本无不利影响。

另一方面,暗挖隧道初支在机车与平板车运行前后对应的竖向变形计算结果如图 3 所示。由图 3 可知,机车与平板车未运行前暗挖隧道的最大向下竖向变形值为 0.917 mm,最大向上竖向变形值为 0.631 mm。最大向上、向下竖向变形值分别出现在暗挖隧道初支的双洞拱顶及拱底位置。相比之下,机车与平板车运行后暗挖隧道初支的竖向变形分布情况出现较大变化,由于机车与平板车仅在左侧隧道中运行,机车和平板车的全部重量都作用于左洞隧道初支上。由图可知,左洞隧道最大向下竖向变形值增长至 6.943 mm,而右洞初支最大向下竖向变形仅为 4 mm 左右。此外,左洞和右洞最大向下竖

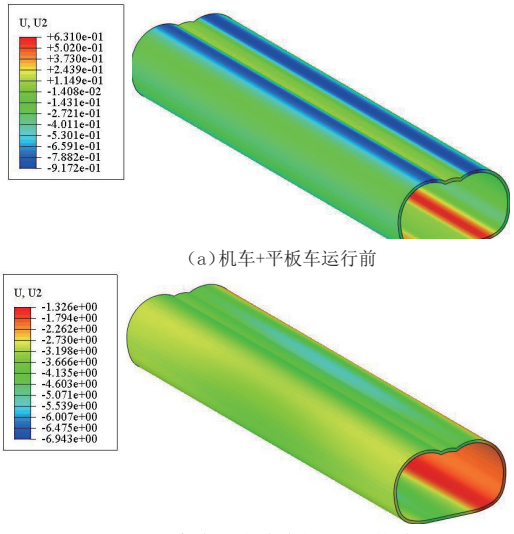


(a)机车+平板车运行前

(b)机车+平板车全部运行至轨道后

图 2　暗挖隧道初支受力计算结果

向变形值的位置也同机车与平板车运行前存在显著区别,分别位于拱腰和拱顶位置。综合来看,机车和平板车运行后暗挖隧道初支左洞的向下位移大于右洞。但由于暗挖隧道初支整体均向下移动,且左洞与右洞的位移差较小,因此上述变形差异并未对暗挖隧道的初支受力造成明显影响。



(a)机车+平板车运行前

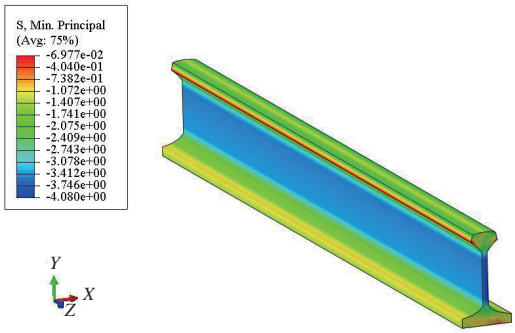
(b)机车+平板车全部运行至轨道后

图 3　暗挖隧道初支变形计算结果

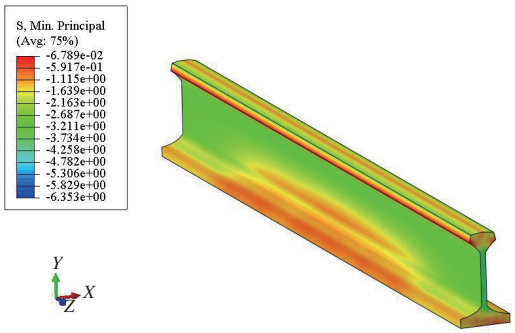
3.2　机车运行对中隔墙受力变形影响分析

机车与平板车运行前后暗挖隧道中隔墙受力计算结果分别如图 4(a)、(b)所示。由图可知,机车与平板车运行前中隔墙受力基本呈对称分布。最大压应力为 4.08 MPa,位于中隔墙中部位置。当机车和平板车全部运行至轨道中部处时,中隔墙受力出现明显变化。左洞一侧底部位置受压减小,中隔墙右

侧中间部分受压增大,最大压应力增长至6.353 MPa,增长幅度约为57%。由此可见,机车运行荷载对于中隔墙的影响要高于对暗挖隧道初支的影响。然而,值得注意的是,尽管机车与平板车运行过程中暗挖隧道中隔墙受力状态出现变化,但变化范围均处于弹性阶段内,远小于其承载能力。因此,机车与平板车运行总体上并不会导致暗挖隧道中隔墙产生损坏风险,当机车与平板车通过后,中隔墙受力情况基本恢复至机车与平板车通过之前的状态。



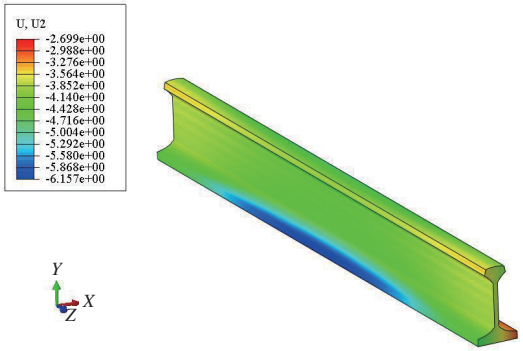
(a)机车+平板车运行前



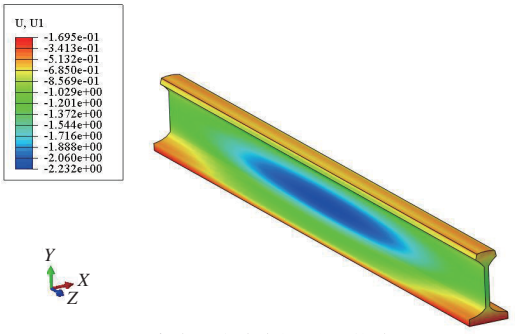
(b)机车+平板车全部运行至轨道后

图4　暗挖隧道中隔墙受力计算结果

暗挖隧道中隔墙在机车和平板车运行至中部位置后对应的竖向及水平变形计算结果如图5所示。由图可知,随着机车和平板车位置的改变,暗挖隧道中隔墙水平和竖向变形均随之产生变化。对于水平变形而言,由于机车和平板车在左洞栈桥上的运行,其重力导致中隔墙出现倾向于左洞方向的水平变形。特别是中隔墙中部墙板,向左洞产生最大水平变形达到2.232 mm,而最小变形仅为0.196 mm。对于竖向变形而言,机车与平板车的重力作用引起其附近的中隔墙底座出现向下变形,最大值为6.157 mm。相对地,右洞侧中隔墙底座竖向变形较小,约为2.699 mm,左右两侧竖向位移存在约3.5 mm的差值。此外,考虑到上述变形并未导致中隔墙材料进入塑性变形阶段,当机车与平板车运行通过后,其变形将恢复至左洞和右洞两侧对称状态。上述结果表明机车与平板车运行条件下暗挖隧道中隔墙是安全的。



(a)机车+平板车运行前



(b)机车+平板车全部运行至轨道后

图5　暗挖隧道中隔墙变形计算结果

3.3　隧道结构受力变形动态分析

图6所示为机车荷载作用下隧道结构受力计算模型。机车与平板车全部重量通过12个车轮作用于轨道,并沿隧道轴线方向保持运动状态。机车荷载通过轨道传递至栈桥,最终对整体隧道结构造成影响。为探究机车荷载在运行全程中对隧道受力变形造成的不利影响,进一步分析隧道结构不同位置的动态受力变形结果。

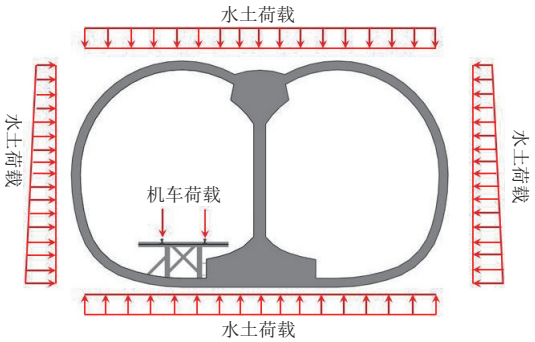


图6　机车荷载作用下隧道结构受力计算模型

选取数值模型中截面位置的隧道结构作为研究对象,相应的动态受力结果如图7所示。由图可知,随着机车与平板车在轨道上逐渐移动,隧道不同位置的受力状态表现出不同的变化趋势。其中,初支拱顶和拱底位置的受力基本保持不变。对于拱腰位置,当机车与平板车靠近监测断面时,其受力有所降低,但随着机车与平板车逐渐远离会恢复至原有水平。相对地,中隔墙在机车与平板车靠近时受力明

显增大,幅度超过50%。此外,机车荷载对中隔墙受力的影响范围也更大,但并未导致混凝土发生塑性破坏,在车辆通过后中隔墙受力同样恢复至正常状态。

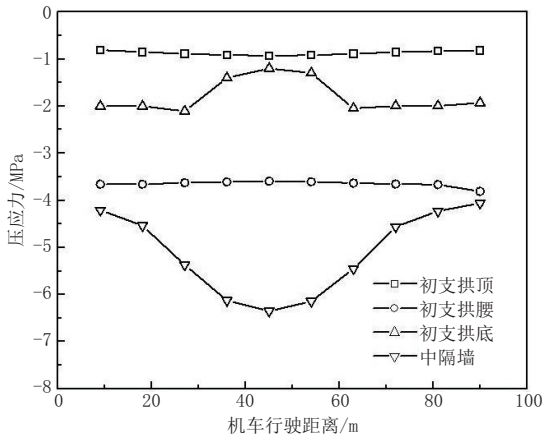


图7　隧道结构不同位置动态受力结果

图8所示为机车与平板车运行过程中隧道结构不同位置动态变形结果。由图可知,动态变形情况与动态受力情况存在一定差异,隧道结构各处关键位置的变形均出现显著变化。其中,初支拱腰位置向隧道内变形,而中隔墙则向栈桥方向变形,隧道结构在水平方向整体上呈现出收窄的趋势。另一方面,隧道拱顶竖向变形增大,表现出一定的下沉倾向。值得注意的是,拱底在机车荷载作用下出现了一定程度的抬升。这种现象可能是由于栈桥通过两根支腿架设在仰拱上,机车荷载最终沿支腿位置将作用力传递给隧道衬砌,而位于两条支腿中间位置的拱底由此出现小幅抬升。总体来看,车辆完全通过后,隧道结构在机车荷载作用下出现的附加变形都会恢复。结合动态受力结果可知,机车荷载对隧道结构的确造成了不利影响,但在机车与平板车通过后也会自行恢复。因此,可以认为机车与平板车运行并未对隧道结构造成安全隐患。

3.4　机车运行对栈桥受力变形影响分析

图9所示为栈桥和钢轨在机车与平板车运行前后的受力计算结果。机车与平板车运行前,栈桥和钢轨仅受自身重力作用。因此,不难发现,钢轨受力很小,而栈桥支撑结构由于受到钢轨和栈桥顶板的重力作用,其应力值约为13.32 MPa。当机车和平板车全部运行至栈桥桥面后,钢轨在车轮接触位置产生应力集中,该处应力超过85 MPa,钢轨其余部位均处于零受力状态。栈桥撑架为主要受力构件,其右侧支腿处应力最大值超过170 MPa,约为钢轨最大应力的2倍。上述结果表明,机车运行条件下栈桥和钢轨的受力值均小于钢材屈服强度,处于安全状态。

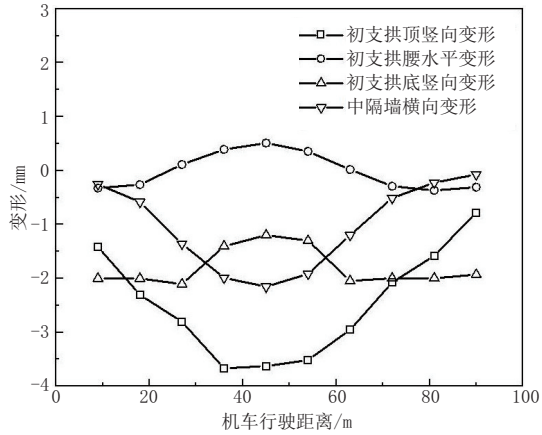


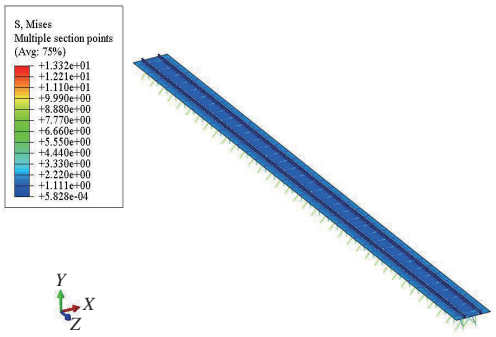
图8　隧道结构不同位置动态变形结果

栈桥和钢轨在机车和平板车运行至中部位置后对应的竖向及水平变形计算结果如图10所示。由图10(a)可知,机车和平板车运行会导致栈桥向下竖向变形增大。当机车与平板车运行至某一段钢轨后,其附近位置钢轨竖向最大位移约为8.4 mm,而机车与平板车未通过范围钢轨的最大竖向变形值仅为2.828 mm。由此可见,机车和平板车自身载重造成钢轨出现约为5.6 mm的竖向变形差。此外,栈桥顶板在机车与平板车运行范围内局部出现较大变形,约为12.38 mm,较钢轨变形值偏大50%。该变形由机车与平板车运行产生的动力荷载向栈桥顶板传递所致,属于瞬时弹性变形,机车与平板车驶离后即可恢复。由图10(b)可知,机车和平板车在栈桥上运行时导致的水平变形非常有限,且基本全部集中于两道钢轨之上,最大水平变形仅为1.387 mm。综上,机车运行荷载导致的栈桥和钢轨变形较小,栈桥和钢轨均处于安全状态。

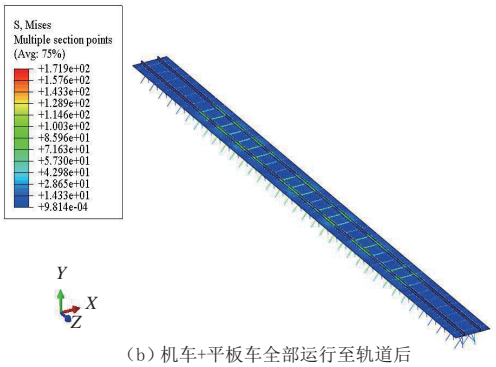
4　结　论

为探究暗挖隧道在机车与平板车运行状态下的安全状态,本文借助三维有限元数值分析方法开展了暗挖隧道初支、中隔墙与栈桥的受力变形分析,并针对上述结构的安全状态进行了评估,主要结论如下。

(1)机车与平板车运行过程中,暗挖隧道初支变形分布出现明显变化,在隧道整体结构出现向下位移的基础上,左洞和右洞的竖向变形也由初始的对称分布变为非对称分布。但上述变形并未改变暗挖隧道初支的受力状态,初支压应力分布情况几乎保持不变。

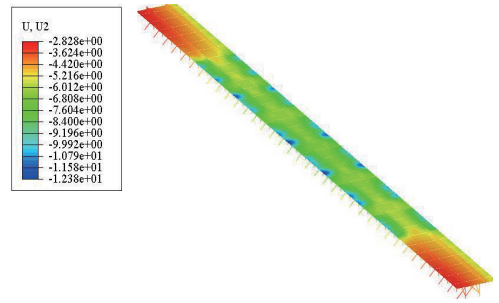


（a）机车+平板车运行前

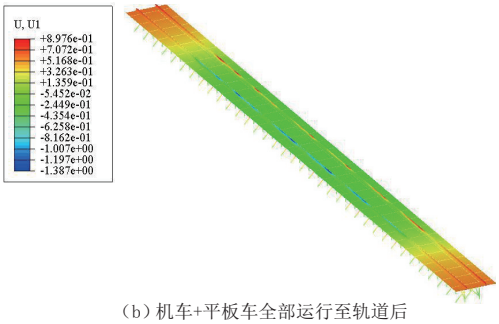


（b）机车+平板车全部运行至轨道后

图 9　栈桥和轨道受力计算结果



（a）机车+平板车运行前



（b）机车+平板车全部运行至轨道后

图 10　栈桥和轨道变形计算结果

（2）暗挖隧道中隔墙受压极值在机车与平板车运行后提高了约 57%。此外，机车与平板车运行将导致暗挖隧道中隔墙中部墙板出现向栈桥方向的位移，中隔墙靠左洞侧与靠右洞侧底座存在明显竖向变形差值，该差值在机车与平板车驶离后可自行消散。

（3）暗挖隧道初支、中隔墙和左洞栈桥在机车与平板车运行荷载作用下变形和受力状态出现不同程度的改变，但均处于弹性阶段内，未导致隧道结构发生塑性变形或损伤。因此，机车与平板车运行条件下暗挖隧道初支、中隔墙和栈桥均处于安全状态。

参考文献：

[1] 吴梦军，吴庆良．山岭公路隧道机械化施工现状与展望[J]. 重庆交通大学学报（自然科学版），2020，39（3）：14-21.

[2] Xie W X, Zhao T S, Wang H W, et al. Construction techniques used to automatically pass standard box girders through special passenger-line tunnels[J]. Journal of construction engineering and management, 2017, 143(5): 5016027.1.

[3] 林立文．液压移动仰拱栈桥施工技术研究[J]. 公路，2020，65（8）：424-427.

[4] 程波．可横移前引桥的自行式仰拱栈在高寒地区隧道施工中的应用[J]. 建设机械技术与管理，2020，33（4）：73-75.

[5] 胡志远．液压移动式仰拱栈桥在公路隧道施工中的应用[J]. 四川水泥，2025（5）：212-214；217.

[6] 王子君．某隧道工程施工中仰拱栈桥的设计[J]. 设计计算，2026（2）：222-226.

[7] 李闯．隧道仰拱施工工艺研究及大跨度仰拱栈桥研制[J]. 工程机械，2024，55（2）：155-158.

[8] 胡运春，廖建东．长大隧道自行式双线仰拱栈桥快速施工技术应用[J]. 科技与创新，2023（19）：75-79.

[9] 苏辉．长仰拱栈桥在黄土隧道施工中的应用[J]. 隧道建设（中英文），2017，37（增刊 2）：192-197.

[10] 王亚波．隧道施工中自带救援逃生通道仰拱栈桥的研制与应用[J]. 中国标准化，2019（2）：28-29.

[11] 张献伟，洪开荣，陈鸿，等．重载铁路隧道仰拱施工关键技术应用—以中条山隧道为例[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18（1）：184-191.

[12] 薛江松，李金鹏．高速铁路隧道仰拱全工序履带式栈桥设计与应用[J]. 隧道建设（中英文），2018，38（8）：1397-1404.

[13] 田晓峰．长大隧道自行式移动仰拱栈桥研制及施工技术[J]. 施工技术，2017，46（15）：120-123.

[14] 汪平．高铁隧道新型自行式仰拱栈桥施工技术[J]. 山东交通学院学报，2022，30（1）：59-66.

[15] 朱望瑜．太中银铁路土石分界地层隧道施工工艺参数选择和优化[J]. 现代隧道技术，2010，47（5）：90-97.

[16] 胡志荣，刘放．隧道衬砌栈桥模型重构及车-栈桥系统共振分析[J]. 制造业自动化，2020，42（4）：143-146.

[17] Yin H B, Sun L Z, Li X, et al. Numerical simulations for aerodynamic derivatives of trestle bridge deck[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2009, 23: 46-54.

[18] Wang S L, Liang S G, Zou L H, et al. Research on the Wind Tunnel Force Balance Tests of Long-Span Closed Coal Trestle[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 477: 797-802.