

运营期隧道衬砌非对称式破坏成因分析及数值模拟研究

杨腾添^{1,2,3}

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司 天津 300300; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院 陕西 西安 710055)

摘要: 宜万铁路广成山隧道 K180+261~K180+306 段边墙衬砌处发生纵向开裂、剥离、翘壳等灾害,隧道衬砌形成了典型的非对称式破坏模式。基于现场系统性的衬砌厚度、衬砌强度及衬砌侵限检测,并结合理论及数值模型分析了衬砌破坏模式及其孕育机制。研究表明,隧道右边墙衬砌厚度不足、病害段衬砌强度偏低以及既有溶洞共同作用导致了病害的发生。临近既有溶洞侧与远离溶洞侧的围岩应力存在明显差异,靠近围岩溶洞侧出现明显的围岩应力集中现象,进而加剧了衬砌的变形破裂。相比二衬厚度不足,既有溶洞是影响隧道应力分布及衬砌剥落的主要因素。研究为类似隧道病害的整治提供理论依据。

关键词: 运营隧道;非对称破坏;衬砌剥落;溶洞;数值模拟

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0525-09

Cause analysis and numerical simulation of asymmetric damage of operating tunnel lining

YANG Tengtian^{1,2,3}

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co. Ltd., Tianjin 300300, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China;
3. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Disasters such as longitudinal cracking, lining peeling, and shell warping occurred at the side wall lining of K180+261~K180+306 section of Guangchengshan tunnel on Yiwan railway. The tunnel lining formed a typical asymmetric failure mode. Based on the on-site systematic detection of lining thickness, lining strength and lining invasion limit, the lining failure mode and its incubation mechanism are analyzed with theoretical and numerical models. Results of the study show that the insufficient thickness of lining on the right side of the tunnel, low strength of lining at the diseased section, and adjacent existing Karst cave all contribute to the disease occurrence. There are obvious differences between the stress of surrounding rock near the existing Karst cave and away from the cave, and the stress concentration of surrounding rock near the Karst cave appears obviously, which intensifies the deformation and rupture of the lining. Compared with the insufficient thickness of the secondary lining, the existing cave is the main factor affecting the stress distribution of the tunnel and the lining peeling. Research results can provide a theoretical basis for the treatment of similar tunnel diseases.

Key words: operating tunnel; asymmetric damage; lining peeling; Karst cave; numerical simulation

我国交通网逐渐形成了“八纵八横”的规划布局,加快了中西部公路、铁路建设实施^[1-3]。由于西南地区多以高山、丘陵地形为主,导致岩土工程的建设极有可能遇到大埋深隧道^[4],工程围岩体多呈现“复杂多变、强度低、自承能力差、富水性强”等软弱特征^[4-7],进而增加隧道坍塌、冒顶及衬砌变形等工程风险。因此,通过工程现场监测及

理论分析不同隧道病害模式及其孕育机制具有的工程应用价值。

众多学者围绕既有线隧道病害探测技术研发、病害风险评估、病害整治设计优化及配套整治设备改进等^[7-11]开展了大量工作。程建铝等^[12]开展了喀斯特地区铁路隧道工程地质灾害研究初探;王魁东^[13]分析了地震作用后隧道衬砌的开裂原因及

处理方案,提出了通过静态爆破拆除二衬及花管注浆的施工工艺;王明阳^[14]提出了自动低压灌浆技术;周文^[15]对于安徽208省道大力寺隧道施工方案进行了优化。另外,臧守杰^[16]针对宜万铁路广成山隧道软弱围岩挤压变形进行了分析,提出采用支护技术、开挖顺序和相应的监测手段可保证洞室的稳定。以上研究对不同地质环境下的隧道围岩及支护结构变形、岩溶灾害进行了详实研究,并提出了可供隧道围岩灾害分析、评估的相关理论。随着交通强国战略的不断深入实施,西南地区大埋深、特长隧道建设过程中以及建成隧道运营过程中围岩变形、衬砌结构开裂、二衬剥落等灾害时常出现,这对隧道的安全运营应带来了潜在危害,因此,有必要对于不同的隧道病害模式、成因及其孕育机制进行不断关注和深入研究。

宜万铁路作为“八纵八横”铁路网主骨架之一,是贯通中国东、中、西部的重要交通纽带。经过多年运营,宜万铁路广成山隧道 K180+261~K180+306 段边墙出现了显著的纵向开裂、剥离、翘壳等灾害,出现典型的非对称式破坏模式。本文对广成山隧道病害段进行了系统性的衬砌厚度、衬砌强度及衬砌侵限检测,结合理论及数值模型分析了衬砌破坏模式及其孕育机制,期望为类似隧道病害的整治提供理论依据。

1 工程概况

1.1 工程背景

宜万铁路(湖北宜昌—重庆万州)全长近 380 km,属于国家Ⅰ级电气化铁路,是中国“四纵四横”快速客运线路通道的重要组成部分。由于该线路经过区域多为岩体构造侵蚀严重、岩溶发育显著的丘陵地区,导致围岩体出现崩塌、滑坡及突水等地质灾害^[2,11-12]。广成山隧道全长 5.35 km,其进口里程为 DK406+988,出口里程为 DK412+341,斜井位于 DK408+400 处。广成山隧道的位置分布,如图 1 所示。

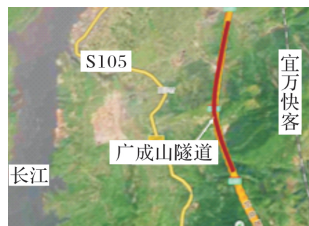


图1 广成山隧道的位置分布

Fig. 1 Location distribution of Guangchengshan tunnel

该隧道为单线隧道,建设于 2004 年 6 月,竣工于 2010 年 6 月,列车设计时速为 120 km/h。2018 年 4 月发现,隧道洞身 DK410+346~DK410+371 段(1 970~1 995 m)右侧边墙纵向开裂、剥离、翘壳。裂纹长度为 25 m,最宽处为 3 mm;边墙剥离面长度为 12 m,宽度为 2.5 m;翘壳面长度为 2 m,宽度为 1.8 m。经后续观测,边墙裂纹有发展趋势。隧道二衬裂缝变化监测,如图 2 所示。



图2 广成山隧道病害情况

Fig. 2 Disease of Guanghengshan tunnel

1.2 工程地质及水文特点

隧址处于构造剥蚀中低山区,地形起伏较大,广成山最大标高为 1 002 m。隧道区域位于方斗山背斜中段,沿线岩层多为软弱围岩体并分布有 F_4 、 F_5 、 F_6 三处断层,地层为三叠系中上统^[16]。隧道进口端的山体相对平缓,而出口端比较陡峭。洞身 DK410+346~DK410+371 段主要穿越钙质页岩地层,局部呈互层状、薄~中厚层状。岩层产状较稳定,受区域构造影响,岩层节理较发育,岩体较破碎。在地下水作用下易形成填充式溶腔。

隧道进口端因断层岩体发育导致岩体破裂、剥落,部分地段右侧边拱存在顺层软弱面,易出现滑塌灾害。由于隧道埋深较大、软弱软岩,受挤压作用易产生较大侧向变形,对列车安全运营具有潜在危害。隧道属于亚热带季风区、湿润多雨,年平均气温为 13~20℃,年降水量为 1 500~2 000 mm。勘察表明,隧道沿线地下水丰沛,主要以基岩裂隙水为主,出水量较大。施工中发现,在断层、破碎位置出现明显的裂隙水富集。

1.3 隧道结构设计

DK410+346~DK410+371 段位于Ⅳ级围岩,处于钙质页岩地段。衬砌采用复合式衬砌,设计初期支护采用 200 mm 厚的 C20 喷射混凝土,设格栅钢架,间距 0.80 m/榀。二次衬砌采用 300 mm 厚的 C25 混凝土。

隧道洞内采用双侧排水沟排水,对于隧道穿越断层破碎带,通过注浆加固圈限制排水量。初期支护与二次衬砌之间地段拱墙铺设复合防水板。施工缝地段设置橡胶止水带,在二次衬砌背后环

向采用直径50透水管盲沟,洞内纵向侧沟泄水孔标高处,设直径80的透水管盲沟。

衬砌支护参数:①初期支护,隧道拱墙、仰拱的喷射混凝土厚度均为200 mm;拱墙处设置的锚杆长度为2 500 mm,间距为环×纵=1 200 mm×1 000 mm;拱墙位置铺设了钢筋网。②二次衬砌,拱墙及仰拱、底板的衬砌厚度均为300 mm。

2 检测结果及分析

根据隧道病害特点,分别对隧道衬砌厚度、衬砌强度及衬砌背后空洞等参数进行采集检测。广成山隧道病害检测方案,如图3所示。

衬砌厚度检测时,检测断面间距为5 m,在每个断面中选取隧道左、右拱腰及左、右边墙四个代表位置设置检测点。衬砌强度检测时,检测断面间距为15 m,在每个断面中选取隧道拱顶及左、右拱腰三个代表位置的混凝土进行检测,每个检测位置钻取三个检测试件。

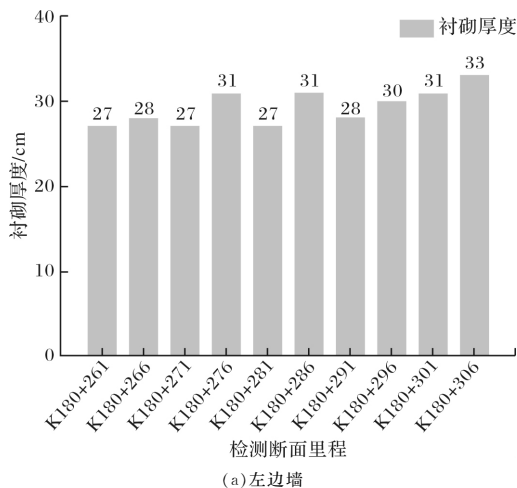


图3 广成山隧道病害检测内容

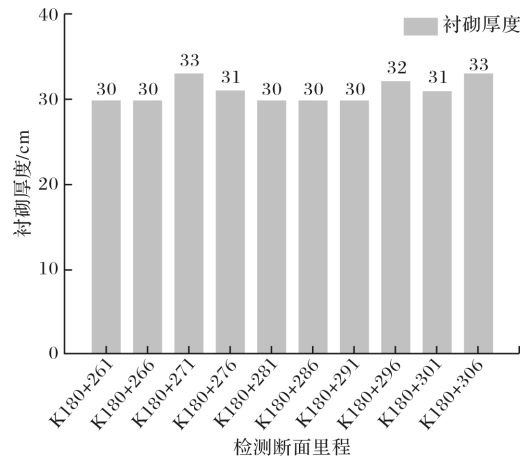
Fig. 3 Testing contents of Guangchengshan tunnel

2.1 二衬厚度检测特征

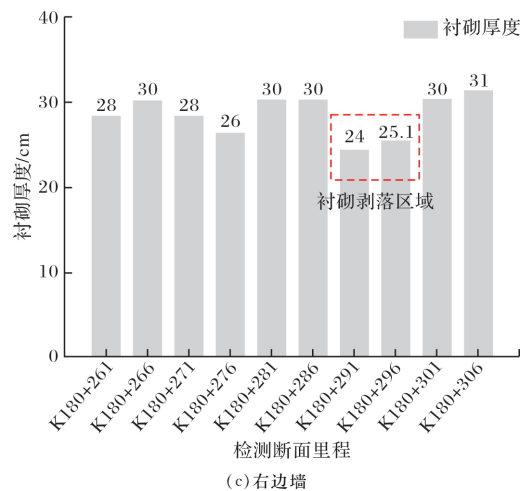
图4为隧道K180+261~K180+306段左、右边墙及左、右拱腰处衬砌厚度的检测结果。由图4可知,隧道各断面左拱腰处的二衬厚度为30~33 cm,平均厚度为31 cm,近似为二衬设计厚度(30 cm)。这表明左拱腰处的二衬厚度满足隧道安全运营要求。



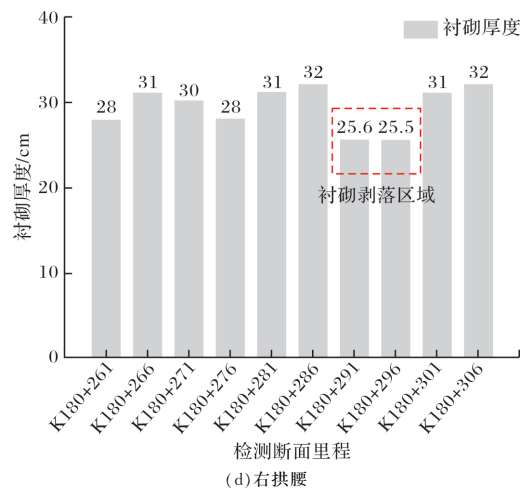
(a) 左边墙



(b) 左拱腰



(c) 右边墙



(d) 右拱腰

图4 左、右边墙及左、右拱腰的衬砌厚度

Fig. 4 Lining thickness of left and right walls and left and right arches of tunnel

相比隧道左拱腰的二衬厚度,左、右边墙及右拱腰处的二衬厚度具有显著变化,相对设计厚度具有一定的浮动幅度。左边墙、右边墙及右拱腰处的二衬厚度分别为27~33 cm、24~31 cm和25.50~32 cm,平均厚度分别为29.3 cm、26.81 cm和29.41 cm,厚度方差分别为4.19、2.23和9.73。可见二衬厚度平均值均小于设计厚

度,这对衬砌承载能力及安全运营具有潜在危害。

隧道右边墙及右拱腰的二衬局部位置出现了明显的剥落区域,如图5所示。由图5可知,①右边墙 K180+291、K180+296 两个断面处,二衬厚度分别为 24 cm 和 25.10 cm,相比设计厚度分别降低了 20.00%和 16.30%;②右拱腰 K180+291、K180+296 两个断面处,二衬厚度分别为 25.60 cm 和 25.50 cm,相比设计厚度分别降低了 14.67%和 15.00%;③由于隧道二衬施作于 10 年前,二衬浇筑仍采用传统的单窗布料模式,工序繁琐,施工人员常常会为节省时间选择跳窗施工,引起衬砌厚度不均。

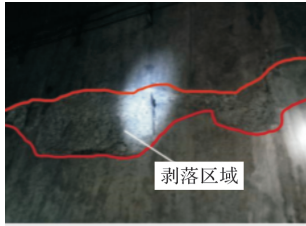


图5 隧道衬砌剥落

Fig. 5 Spalling disaster of tunnel lining

2.2 二衬强度检测特征

图6为隧道 K180+261~K180+306 段左、右拱腰及拱顶处的二衬强度的检测结果。检测数据表明,左、右拱腰检测点处的衬砌强度比较接近于二衬的设计强度(25 MPa),分别为 22.90~25.10 MPa 和 21.90~23.80 MPa,强度方差分别为 0.63 和 0.51。其中,左拱腰的二衬强度最大值为 25.10 MPa,高出设计强度的 0.40%;右拱腰的二衬强度的最小值为 21.90 MPa,相比设计强度降低了 12.40%。可见,左拱腰的二衬强度相对优于右拱腰。

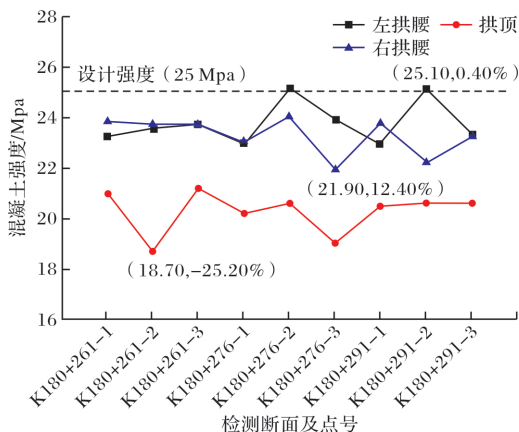


图6 不同检测断面处二衬强度的变化趋势

Fig. 6 Change trend of secondary lining strength at different test sections

相比左、右拱腰,拱顶位置的二衬强度相对不足,强度值为 18.70~21.2 MPa,平均强度为 20.27 MPa。K180+261-2 断面和 K180+261-3 断面处的二衬强度分别达到最小值 18.70 MPa 和

最大值 21.2 MPa,仅为设计强度的 62.33%和 70.67%。可见,K180+291-1~K180+291-3 范围内拱顶二衬的混凝土力学性能显著不足,这提高了衬砌发生破坏的可能性。

2.3 衬砌侵限检测特征

隧道衬砌侵限检测表明,隧道右边墙中部发生明显的鼓出变形和开裂,混凝土喷层剥落,形成了典型的“葱剥皮”现象,这与小湾水电站坝基岩体的剥落特征相似。刘建友等^[11]分析认为,岩体存在局部地质构造并引起隧道围岩产生非对称的应力集中时,易导致隧道衬砌产生变形、开裂,经过缓慢的变形累积引起表层混凝土鼓起、剥落,破坏模式,如图7所示。

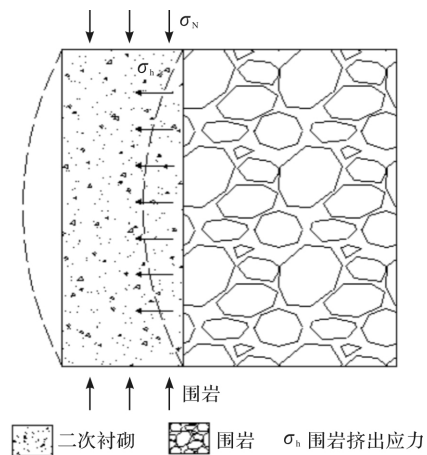


图7 二衬破坏模式

Fig. 7 Failure mode of secondary lining

另外,左、右边墙的破坏程度表现出明显的非对称性,其他位置墙体平整但裂隙呈零星发育。结合混凝土厚度和强度分布特征发现,病害段在左、右拱腰及边墙位置的衬砌厚度与混凝土强度并未出现明显的不对称分布。

对隧道病害段打设临时加固锚杆时发现,在向隧道右侧围岩钻孔时,数根锚杆钻至 3.70~4.2 m 时,钻进反力突然消失并有伴随有大量的泥浆涌出,且钻至 5 m 深度,钻杆反力并未恢复,如图8所示,可以判断隧道右侧岩体存在填充式溶洞。因此,溶洞对围岩结构应力分布及稳定性的影响有必要进一步分析。



图8 锚杆孔泥浆涌出现象

Fig. 8 Mud gush phenomenon in anchor hole

3 溶洞对隧道围岩应力分布影响

为进一步探明广成山隧道产生的衬砌单边非对称式剥落破坏的孕育机理,需深入探究既有填充式溶腔对隧道围岩应力分布特征的影响规律.将溶洞—隧道所处的围岩范围转换为平面应变情况下的弹性半空间,将隧道、溶洞近似为圆形;由于隧道埋深超过铁路隧道中深浅埋隧道判据(2.5 hq),从而不考虑地表影响.考虑溶洞先于隧道形成,先建立仅存在溶洞的条件下,溶洞在隧道区域围岩产生的多余面力,再利用复变函数中的柯西积分法结合 Schwarz 交替法求解出弹性半空间内圆形溶洞及圆形隧道周边任意一点处的应力值和位移值解析解的具体显式表达式.

基于此,本节建立了临近既有溶洞隧道模型,如图9所示.其中,隧道直径为 $2R$,溶洞直径为 $2r$, d 为隧道与溶洞内侧边界间距,隧道支护反力为 T , P_v 为岩体自重, P_h 为地应力. $x_R O y_R$ 、 $x_r O y_r$ 分别为以隧道中心和溶洞中心建立的坐标系.

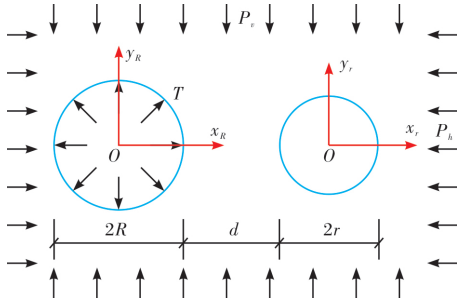


图9 临近既有溶洞与隧道模型

Fig. 9 Model of adjacent existing cave and tunnel

令 z_r 、 z_R 分别为 $x_r O y_r$ 坐标系和 $x_R O y_R$ 坐标系的法向量,则有

$$z_r = z_R - D \quad (1)$$

其中, $D=r+R+d$.

采用 Schwarz 交替法^[17-18]对复平面多连通域问题求解,令 $\varphi_r(z_r)$ 、 $\Psi_r(z_r)$ 为 $x_r O y_r$ 坐标系的复应力函数; $\varphi_R(z_R)$ 、 $\Psi_R(z_R)$ 为 $x_R O y_R$ 坐标系的复应力函数,则

$$\begin{cases} \varphi_r(z_r) = \varphi_R(z_r + D) \\ \Psi_r(z_r) = \Psi_R(z_r + D) - \bar{D} \varphi'_R(z_r + D) \end{cases} \quad (2)$$

以柯西积分法,求出 P_v 和 P_h 共同作用下仅有溶洞条件下的复变函数 $\varphi_r^{(1)}(z_r)$ 和 $\Psi_r^{(1)}(z_r)$.

$$\varphi_r^{(1)}(z_r) = \frac{P_A}{2} z_r - \frac{P_s r^2}{z_r} \quad (3)$$

$$\Psi_r^{(1)}(z_r) = P_s z_r - \frac{P_A r}{z_r} - \frac{P_s r^4}{z_r^3} \quad (4)$$

其中, $P_A = \frac{P_v + P_h}{2}$, $P_s = \frac{P_v - P_h}{2}$.

将 $\varphi_r^{(1)}(z_r)$ 和 $\Psi_r^{(1)}(z_r)$ 由 $x_r O y_r$ 坐标系迁移至

$x_R O y_R$ 坐标系,形成 $\varphi_{(1)}^{(1)}(z_R)$ 和 $\Psi_{(1)}^{(1)}(z_R)$,则有

$$\varphi_{(1)}^{(1)}(z_R) = \frac{P_A}{2} (z_R - D) - \frac{P_s r^2}{z_R - D} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{(1)}^{(1)}(z_R) = & P_s (z_R - D) - \frac{P_A r^2}{z_R - D} - \frac{P_s r^4}{(z_R - D)^3} - \\ & \bar{D} \left[\frac{P_A}{2} + \frac{P_s r^2}{(z_R - D)^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

仅存在溶洞的条件下,溶洞在隧道区域围岩产生的多余面力 $f_{(1)}^{(1)}(n_R)$:

$$f_{(1)}^{(1)}(n_R) = \varphi_{(1)}^{(1)} + n_R \overline{\varphi_{(1)}^{(1)}(n_R)} + \overline{\Psi_{(1)}^{(1)}(n_R)} \quad (7)$$

其中, $\overline{\varphi_{(1)}^{(1)}(n_R)}$ 、 $\overline{\Psi_{(1)}^{(1)}(n_R)}$ 分别为 $\varphi_{(1)}^{(1)}(n_R)$ 和 $\Psi_{(1)}^{(1)}(n_R)$ 的一阶导数的共轭复数.

法向支撑力(支护反力) T 的复应力函数 $f(n_R)$ 表示为:

$$f(n_R) = -T n_R \quad (8)$$

仅考虑隧道开挖产生的围岩应力 P 变化的条件下,存在以下边界条件:

$$f_{(1)}^{(1)}(n_R) + P = -T n_R \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P = & -T n_R - P_s (n_R - D) + \frac{P_A r^2}{n_R - D} + \frac{P_s r^4}{(n_R - D)^3} + \\ & \bar{D} \left[\frac{P_A}{2} + \frac{P_s r^2}{(n_R - D)^2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

同理,可得出 P 作用下隧道周边围岩区域的复函数 $\varphi_{(1)}^{(2)}(n_R)$ 和 $\Psi_{(1)}^{(2)}(n_R)$ 在 $x_r O y_r$ 坐标系的形式 $\varphi_r^{(2)}(n_r)$ 和 $\Psi_r^{(2)}(n_r)$.

同时,考虑溶洞与隧道共存条件下的复应力函数为

$$\begin{aligned} \varphi_r(z_r) = & \varphi_r^{(1)}(n_r) + \varphi_r^{(2)}(n_r) = \frac{P_A}{2} z_r - \frac{P_s r^2}{z_r} - \\ & \frac{P_s r^2}{(\bar{D})^2} \left[\frac{(\frac{R^2}{D})^3}{(z_r + D - \frac{R^2}{D})^2} + \frac{3(\frac{R^2}{D})^2}{z_r + D - \frac{R^2}{D}} \right] + \frac{P_A r^2}{z_r + D} - \\ & \frac{P_s R^2}{z_r + D} + \frac{P_s r^4}{(\frac{R^2}{z_r - D} - \bar{D})^3} - \frac{P_s D r^2}{(\frac{R^2}{z_r - D} - \bar{D})^2} + \frac{P_A r^2}{\bar{D}} + \\ & \frac{P_s r^4}{(\bar{D})^3} - \frac{P_s D r^2}{(\bar{D})^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Psi_r(z_r) = & \Psi_r^{(1)}(n_r) + \Psi_r^{(2)}(n_r) = P_s z_r - \frac{P_A r}{z_r} - \\ & \frac{P_s r^4}{z_r^3} - \frac{T R^2}{z_r + D} - \frac{P_A R^2}{z_r + D} - \frac{P_s R^2 r^2}{(z_r + D) D^2} + \frac{P_s r^2}{z_r + D} - \\ & \frac{P_s r^2}{\bar{D}} + \frac{P_s r R}{\bar{D}} - \frac{\rho^2 R^2}{z_r + D} \varphi_{(1)}^{(2)}(z_R) + \bar{D} \varphi_{(1)}^{(2)}(z_r) \end{aligned} \quad (12)$$

临近既有溶洞隧道周边围岩内任意位置的应力分量:

$$\begin{cases} \sigma_x + \sigma_y = 4R_e [\varphi'_r(z_r)] \\ \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = 2[\bar{z} \varphi''_r(z_r) + \Psi'_r(z_r)] \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\varphi'_r(z_r)$ 、 $\Psi'_r(z_1)$ 和 $\varphi''_r(z_1)$ 分别为 $x_R O y_R$ 坐标系下复应力函数的一阶导数和二阶导数, R_e 为 $\varphi'_r(z_1)$ 的实部。

结合上述分析,在 $x_R O y_R$ 坐标系下,与 $x \leq -R$ (x 为 z_R 的横坐标)范围内的围岩应力相比, $R \leq x \leq R+d$ 范围内的 $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ 取值较大,即,临近既有溶洞侧与远离溶洞侧的围岩应力存在明显差异,且在靠近围岩溶洞侧存在明显的围岩应力集中。这一结论与既有研究文献成果^[19-20]具有一致性,溶洞对围岩应力场分布影响如图 10 所示。因此,既有溶洞的存在为隧道产生非对称性破坏提供了可能。

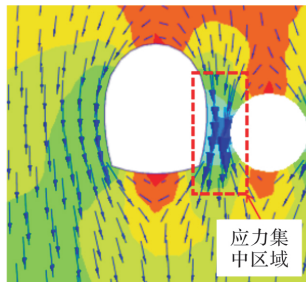


图 10 溶洞对围岩应力场分布影响^[19-20]

Fig. 10 Influence of karst cave on stress field of surrounding rock of tunnel^[19-20]

4 隧道开挖模拟及分析

为探明有无溶洞及二衬厚度两主要病害因素对广成山隧道衬砌结构的影响,基于 MIDAS/GTS 有限元分析软件分别建立了不同工况下的数值模型,用于分析隧道围岩应力与衬砌内力的分布情况。

4.1 模型建立及参数选取

数值模拟采用 MIDAS/GTS 数值软件构建,模型利用板单元模拟围岩体,杆单元模拟初支和二次衬砌结构,模型破坏准则为 Mohr-Coulomb 准则。既有工程经验表明,开挖作用一般对隧道 3~5 倍洞径范围内的围岩体的沉降、变形具有显著影响^[2,4]。另外,为降低数值模型的边界约束对岩体计算的影响,隧道中线到模型左右边界的距离为 4~5 倍洞径,隧底到模型下边界距离为隧高的 3~4 倍,隧道上覆岩体仅考虑岩体自重应力场作用,侧向仅考虑地应力作用。

基于此,本模型的水平方向和竖直方向尺寸分别取 77 m 和 75 m。由于既有条件限制,未能查明实际填充式溶腔的尺寸和规模大小。采用直径为 5 m 的圆形空腔模拟溶腔对隧道的影响。模型侧边界和底面设置水平约束,底面设置竖直及水平方向约束。有限元分析模型及模型边界条件,如图 11 所示。具体模型材料参数,见表 1。

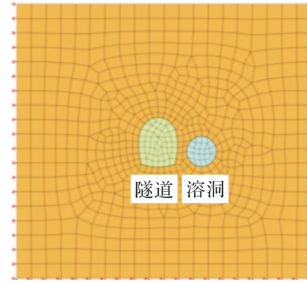


图 11 隧道断面及数值模型

Fig. 11 Tunnel section and numerical model

在不考虑衬砌混凝土刚度随强度发生变化的前提下,混凝土强度不足并不会直接引起衬砌结构受力的变化,只会导致衬砌更容易发生破坏。因此,本模型考虑了不同衬砌厚度和溶洞影响下的 4 种工况,分别为:①工况 1,无既有溶洞影响,隧道二衬厚度为 30 cm(设计厚度);②工况 2,存在既有溶洞,隧道二衬厚度为 30 cm;③工况 3,无既有溶洞影响,隧道二衬厚度为 24 cm(检测最小厚度);④工况 4,存在既有溶洞影响,隧道二衬厚度为 24 cm。

表 1 模型材料参数^[21]

Tab. 1 Material parameters of tunnel model^[21]

材料	弹性模量/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/°	泊松比	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
砂质页岩	1.52	6.86	35	0.45	21.5
初期支护	27	—	—	0.16	24
二次衬砌	29	—	—	0.16	24

4.2 数值模拟结果与分析

4.2.1 隧道围岩变形特性

图 11 为 4 种工况下隧道围岩水平方向变形分布云图, S 表示水平变形值, mm。由图 12 可知,无溶洞条件下隧道围岩变形表现出了良好的对称性,而溶洞存在时对隧道围岩变形具有显著影响,围岩水平变形具有非对称特征。

对比工况 1 和 3 发现,隧道二衬厚度为设计值 30 cm 时,隧道边墙的水平收敛变形为 1.60 mm;隧道二衬厚度为 24 cm 时,即隧道衬砌厚度不足时,隧道边墙的水平收敛变形为 2.00 mm;相比工况 1,工况 3 的二衬厚度降低了 26.67%,而其水平收敛变形增加了 25.00%。由此可见,无溶洞条件下隧道边墙处的水平收敛变形并未因为衬砌变薄发生较显著变化。

由工况 2 和 4 变形分布云图可知,隧道右侧存在溶洞时,隧道围岩体的水平变形表现出非对称分布特征,隧道右侧围岩表现出应力集中现象,这与图 9 分析结果一致。由于受到溶洞位置影响,隧道右侧边墙的水平收敛变形值明显大于左侧边墙,但其收敛值大小与并未因二衬厚度的降低表现出显著的变化,这与前文分析一致。分析数据

表明,当隧道二衬厚度为30 cm时,左侧边墙的水平变形为0.01~1.40 mm,右侧边墙变形相对比较明显其水平变形为3.50~4.70 mm.工况4与2的水平变形特征具有相似之处,工况4左侧边墙与右侧边墙的水平变形分别为0.10~1.40 mm和3.60~4.80 mm,相比工况2的水平变形有所提高,但提高幅度不显著(2.13%~2.86%).

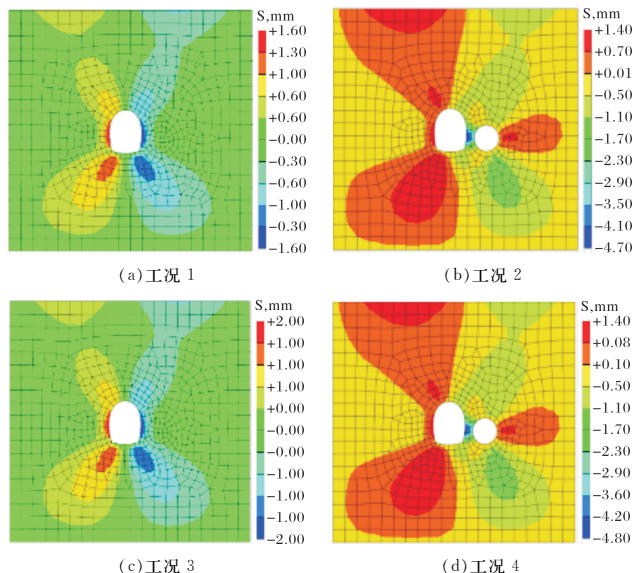


图12 隧道围岩水平方向变形分布云图

Fig. 12 Deformation distribution of surrounding rock in horizontal direction

4.2.2 隧道二衬受力特性

图13为4种工况下隧道二衬轴力分布云图, N 表示二衬轴力,kN.无溶洞条件下隧道边墙处二衬受到的轴力呈对称分布,拱顶位置轴力偏小,距离隧底越近的位置轴力值越大.隧道二衬厚度的降低,二衬所受轴力呈增加趋势.当溶洞存在时,隧道二衬所受轴力显著增加,且靠近溶洞侧的轴力值显著大于隧道左侧边墙的轴力值,此时隧道二衬轴力具有非对称分布特征.

由图13发现,①拱腰与边墙连接处轴向应力的增加较为显著;二衬厚度为30 cm时,二衬轴力由40.10 kN增长至50.00 kN,增加了24.68%;由于剥落原因,隧道二衬厚度降低到24 cm时的轴力则由40.76 kN增加到52.89 kN,提高了29.76%,增加幅度明显大于前者.②对比工况1与2、工况3与4发现,既有溶洞导致二衬最大轴力分别增加了30.99%和31.86%,相比①中的轴力增加幅度显著提高.可见,既有溶洞为影响衬砌轴力变化的主要因素,而衬砌厚度不足为次要因素.③对比工况2和4发现,既有溶洞对衬砌轴力的影响主要集中于右边墙和右拱腰,轴力范围分别为48.87~61.12 kN和51.04~63.98 kN.综上可知,既有溶洞是引起隧

道边墙二衬轴力增大的关键性因素.

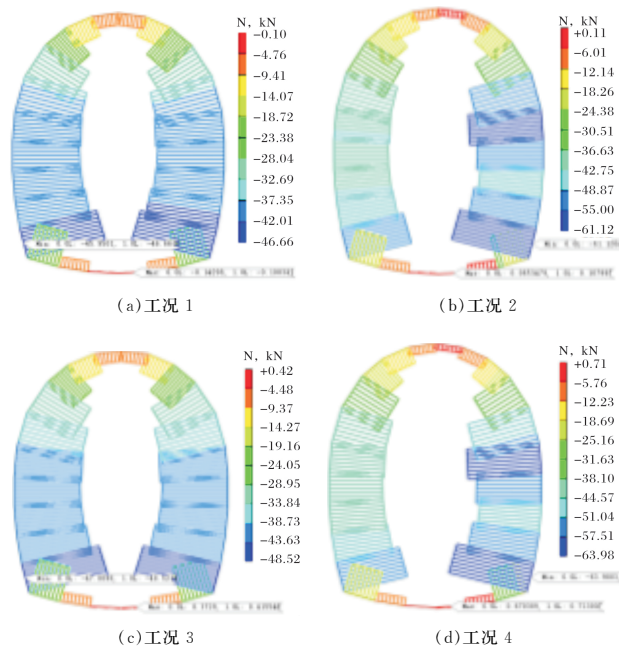


图13 隧道二衬轴力分布云图

Fig. 13 Distribution of axial stress of secondary lining

图14为隧道二衬弯矩分布云图.由图14可以看出,在无溶洞条件下最大弯矩主要集中隧道拱脚,而两侧边墙弯矩值控制在非常小的范围内.隧道边墙处弯矩值的增加最为显著,最大弯矩值由0.04 kN×m增长至0.25 kN×m.与溶洞的影响程度相比,衬砌厚度不足所引起的二衬弯矩分布变化比较微小,工况4中边墙二衬处的最大弯矩值相比工况2仅减少了8%.

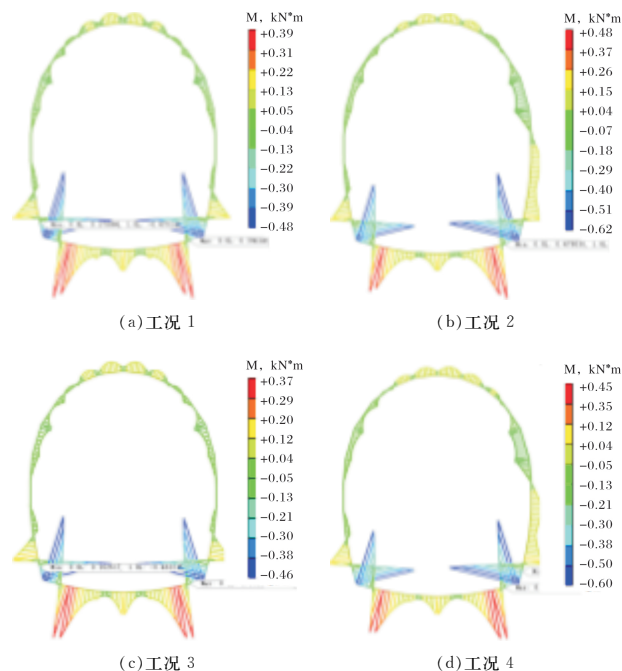


图14 隧道二衬弯矩分布云图

Fig. 14 Distribution of bending moment of secondary lining

综合上述分析可知,隧道临近既有溶洞、衬

砌厚度不足导致靠近溶洞侧衬砌受力大于设计状态,靠近溶洞侧隧道衬砌受力大于远离溶洞侧,随着隧道的通车运营,在车辆震动以及裂隙水对隧道混凝土结构的长期腐蚀作用下,靠近溶洞侧隧道衬砌优先进入破坏阶段,导致隧道发生非对称式破坏。既有溶洞的影响下,隧道两侧的围岩应力出现分布不均,靠近围岩溶洞侧出现明显的围岩应力集中现象,靠近围岩溶洞侧的围压压力高于无溶洞条件下隧道拱腰处的围岩压力,因此加剧了衬砌变形破裂。

5 结论

宜万铁路广成山隧道经过多年运营,隧道K180+261~K180+306段边墙发生纵向开裂、剥离、翘壳等灾害,隧道衬砌形成了典型的非对称式破坏模式。为探究形成该破坏模式的孕育机制,并以期为类似病害的整治提供理论依据,本文基于广成山隧道病害检测结果,对该隧道的病害成因进行分析,得出结论如下:

(1)隧道右边墙衬砌厚度不足、病害段衬砌强度偏低以及临近既有溶洞共同导致病害的发生。溶洞引起的隧道围岩非对称的应力集中是导致右边墙二衬剥落破坏的主因。衬砌厚度和强度不足也导致二衬混凝土更容易发生破坏。

(2)理论分析表明临近既有溶洞侧与远离溶洞侧的围岩应力存在明显差异,且在靠近围岩溶洞侧存在明显的围岩应力集中现象,加剧了衬砌的变形破裂。

(3)隧道数值模型表明临近既有溶洞、隧道衬砌厚度不足均会引起边墙的变形增加、二衬内力增大。相比二衬厚度不足,既有溶洞对隧道应力,分布的影响更为显著,也是导致衬砌发剥落的主要因素。

参考文献 References

- [1] SONG Z P, CHENG Y, TIAN X X, et al. Mechanical properties of limestone from Maixi tunnel under hydro-mechanical coupling [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(5): 402-413.
- [2] 牛泽林, 刘朝鹏, 郑蕾, 等. 大断面公路板岩隧道开挖与支护数值模拟研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(3): 376-383, 403.
NIU Zelin, LIU Chaopeng, ZHENG Lei, et al. Numerical simulation study on excavation and support of slab tunnel in large section highway [J]. *Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2020, 52(3): 376-383, 403.
- [3] GUO J. Analysis on construction safety of optimized double side drift method [J]. *Tunnel Construction*, 2014, 34(6): 525-533.
- [4] 郑余朝, 仲恒, 熊骏, 等. 铁路隧道隧底质量缺陷整治技术研究[J]. *铁道工程学报*, 2018, 35(3): 69-73.
ZHENG Yuchao, ZHONG Heng, XIONG Jun, et al. Research on the remediation technology of the defects of railway tunnel bottom [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2018, 35(3): 69-73.
- [5] 曾晓东. 运营隧道衬砌裂缝及渗漏水病害整治技术研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(3): 201-205, 252.
ZENG Xiaodong. Treatment of tunnel lining cracks and water leakage in operation tunnels [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(3): 201-205, 252.
- [6] 庄乾涛. 复杂地质环境营业线隧道渗漏水原因分析与治理技术研究[J]. *铁道建筑技术*, 2017(9): 81-83.
ZHUANG Qiantao. Research on the cause analysis of operating line tunnel seepage in complex geological environment and its control technology [J]. *Railway Construction Technology*, 2017(9): 81-83.
- [7] 王悦. 呼和浩特铁路局既有线路基冻害成因分析及整治措施[J]. *中国铁路*, 2017(11): 62-65.
WANG Yue. Cause analysis and renovation methods for frost heaving of subgrade on existing lines of Hohhot railway administration [J]. *Railway Chinese Railways*, 2017(11): 62-65.
- [8] 咎月稳, 李桂明. 既有线电气化铁路隧道病害全断面车载检测技术[J]. *中国铁路*, 2013(6): 64-66.
ZAN Yuewen, LI Guiming. Onboard detection technology of tunnel disease in existing electrified [J]. *Railway Chinese Railways*, 2013(6): 64-66.
- [9] 罗建春, 高菊如. 既有铁路隧道病害分级方法与评价体系研究[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(6): 12-17, 24.
LUO Jianchun, GAO Juru. A defect classification and evaluation system for existing railway tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(6): 12-17, 24.
- [10] 高菊茹, 贵逢涛, 袁玮, 等. 既有铁路隧道病害整治技术与设备发展现状[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(1): 7-16.
GAO Juru, GUI Fengtao, YUAN Wei, et al. State of the art of techniques and equipment for defect remediation in existing railway tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(1): 7-16.
- [11] 刘建友, 伍法权, 赵振华, 等. 锦屏一级水电站地下厂房下游拱腰喷层裂缝成因分析[J]. *岩石力学与工程学*

- 报,2010,29(S2):3777-3784.
- LIU Jianyou, WU Faquan, ZHAO Zhenhua, et al. Cause analysis of cracks of shotcrete layer around the downstream hance in underground powerhouse of Jinping I hydroelectric power station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 3777-3784.
- [12] 程建铝,宋战平.喀斯特地区铁路隧道工程地质灾害研究初探—以宜(昌)万(州)铁路金子山岩溶隧道为例[J].水利与建筑工程学报,2006,4(3):18-21.
- CHENG Jianlü, SONG Zhanping. Research on geologic disaster of railway tunnel in karst zone—taking Jinzishan karst tunnel of yichang-wanzhou railway for example [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4(3): 18-21.
- [13] 王魁东.单线铁路隧道衬砌开裂原因分析及相应的处理措施[J].铁道建筑技术,2015(6):53-56.
- WANG Kuidong. Analysis of single track railway tunnel lining cracking reasons and its corresponding treatment measures [J]. Railway Construction Technology, 2015(6): 53-56.
- [14] 王明阳.某铁路隧道衬砌裂缝成因分析与整治[J].隧道建设,2006,26(4):52-53.
- WANG Mingyang. Cause analysis on and repairing of lining cracks of a railway tunnel [J]. Tunnel Construction, 2006, 26(4): 52-53.
- [15] 周文.下穿既有运营公路大断面浅埋隧道方案优选及监测分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(4):520-527.
- ZHOU Wen. Scheme optimal and monitoring analysis of large section shallow buried tunnel on existing highway [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(4): 520-527.
- [16] 臧守杰.广成山隧道挤压大变形围岩的施工技术探讨[J].水利与建筑工程学报,2007,5(2):35-38.
- ZANG Shoujie. Study on construction control technique of big extrusion deformation rock mass in guangchengshan tunnel [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, 5 (2): 35-38.
- [17] 陈福全,苏锋,施有志.椭圆形溶洞对邻近深埋圆形隧道的影响分析[J].计算力学学报,2014,31(1):54-60.
- CHEN Fuquan, SU Feng, SHI Youzhi. Analysis solution for tunnels due to the influence of adjacent ellipse karst cave [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(1): 54-60.
- [18] 易菁,张欣艳.多溶洞隧道围岩应力解析解研究[J].公路工程,2014,39(4):268-271.
- YI Jing, ZHANG Xinyan. Analytical solutions of surrounding stress fields in multi caves tunnel [J]. Highway Engineering, 2014, 39(4): 268-271.
- [19] 宋战平,杨腾添,张丹锋,等.溶洞对隧道(洞)稳定性影响的数值试验及现场监测分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(4):484-491.
- SONG Zhanping, YANG Tengtian, ZHANG Danfeng, et al. Experiments and field monitoring and analysis about the impact of existing cave on the stability of the tunnel [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 484-491.
- [20] 宋战平.隐伏溶洞对隧道围岩-支护结构稳定性的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1296-1296.
- SONG Zhanping. Research on the influence of concealed karst caverns upon the stability of tunnels and its support structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1296-1296.
- [21] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.

(编辑 桂智刚)