

The Influence Analysis of Structure Safety by Voids in the Composite Linings of High Speed Railway Tunnels in Southwest China

Huanlong Wang, Li Liu, Mufei Gan

China Railway Eryuan Engineering Group Co., LTD., Chengdu
Email: ppadhere@hotmail.com

Received: Nov. 23rd, 2014; revised: Dec. 24th, 2014; accepted: Jan. 4th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In high speed railway tunnel constructing process of southwest China, due to large size of excavation with good conditions of surrounding rock, the voids between tunnel secondary lining and surrounding rock are relatively common affected by factors such as geology and construction. The voids cause lining crack, impellers and leakage and reduce the durability of structures. The voids are a kind of factor which causes serious damage to the operation safety of high speed railway train. In order to study the influence effects of voids position and area on internal forces and structure security, using typical Karst tunnel section, the paper establishes formation-load model, calculates lining internal force of 10 different voids position and area and thus obtains section safety coefficient K . Through nondestructive testing results of a tunnel, the paper discusses the four main causes of secondary linings voids, that is: excavation, concrete pouring, templates pallet strength and waterproof board installation. The paper analyzes the security influence of voids for secondary linings at last, and provides theoretical basis of voids prevention in high speed railway construction.

Keywords

High Speed Railway, Tunnel, Void, Harm, Safety Influence

西南山区高速铁路隧道衬砌脱空对结构安全的影响分析

王唤龙, 刘黎, 甘目飞

中国中铁二院工程集团有限责任公司，成都
Email: ppadhere@hotmail.com

收稿日期：2014年11月23日；修回日期：2014年12月24日；录用日期：2015年1月4日

摘要

在西南山区高速铁路隧道的建设过程中，由于隧道开挖断面较大，当围岩条件较好时，受地质及施工等因素的影响，隧道二次衬砌与围岩脱空的现象较为普遍。衬砌脱空导致隧道衬砌开裂、掉块、漏水，降低结构耐久性，是一种严重危害高速铁路行车安全的病害。为了研究二衬脱空位置及脱空面积对衬砌结构内力以及结构安全造成的影响，针对西南山区典型的灰岩隧道断面，建立了脱空计算的地层-荷载模型，计算10种不同脱空位置及脱空面积下二衬内力，进而得到截面安全系数 K 。通过某隧道的无损检测结果，讨论了引起二衬脱空的4种主要原因，分别是：开挖、混凝土浇筑、模板台车强度以及防水板安装。结合工程实例，最后分析了脱空对二衬结构安全的影响，为高速铁路隧道脱空防治提供一定的理论基础。

关键词

高速铁路，隧道，脱空，危害，安全影响

1. 概述

随着铁路建设的范围越来越广泛，高速铁路隧道面临的地质、设计、施工及结构安全问题较以往更具有特殊性和典型性。隧道衬砌结构是否可靠，主要由地质条件、设计参数、施工质量以及相应的建设管理等因素控制。由于高速铁路隧道衬砌断面考虑空气动力学原因，隧道断面较大，给隧道施工质量提出了更高的要求。按照隧道新奥法的设计理念，隧道衬砌与围岩紧密贴合，共同受力变形，设计计算中也考虑隧道衬砌背后的围岩可以提供连续的径向弹性抗力。然而，由于施工质量问题，隧道衬砌与背后围岩脱空，未密贴，围岩未提供连续有效的弹性抗力，衬砌结构承载不均匀，产生不均匀地层反力，引起结构局部地方应力集中，严重影响结构安全储备，危害结构安全，实际工程中造成结构开裂、掉块，局部结构防排水措施失效等病害[1]-[5]。本文结合西南山区高速铁路隧道的工程实例，以数值模拟为手段，分析不同脱空部位及脱空范围对结构受力特征的影响，为高速铁路隧道的结构安全提供技术基础及方案处理对策。

2. 脱空的数值模拟

2.1. 数值计算模型建立及参数取值

由于隧道背后脱空现象多发生于岩层条件较好的硬质岩中，以西南山区典型的灰岩隧道为例，隧道典型断面深埋，围岩为 $<17-8>$ 灰岩(D_2q)：浅灰、灰色，中厚层状，岩质硬脆，节理裂隙发育，地下水弱发育。典型断面采用地层结构法进行了III级围岩隧道平面应变分析，III级A型复合式衬砌断面如图1所示。计算模型横向宽度180 m，纵向高度150 m，直角坐标系的坐标原点位于仰拱中心。

假设围岩材料均服从Mohr-Coulomb准则，四面体单元进行离散；隧道二衬采用弹性梁单元模拟，左侧边墙脚处的单元为1#，顺时针编号，二衬共划分了92个单元。

在整体坐标系里，X轴平行于隧道断面且与水平地面平行，Y轴垂直向上，Z轴沿隧道中线，静力分析中X方向约束法向位移，底部边界约束X、Y方向位移，共离散了2740个单元，2850个节点。数

值计算各参数取值见表 1。

2.2. 静力模拟工况

本次模拟共进行了 10 种工况的分析，考虑沿拱圈 0.5 m 范围内混凝土与二衬脱离来进行模拟，共划分了 16 个脱空单元，如图 2 所示。模拟主要分为 4 种类型 10 个小项，分别为：二衬与围岩紧密贴合无脱空、拱顶脱空、拱腰脱空和边墙脱空，具体工况如表 2 所示。

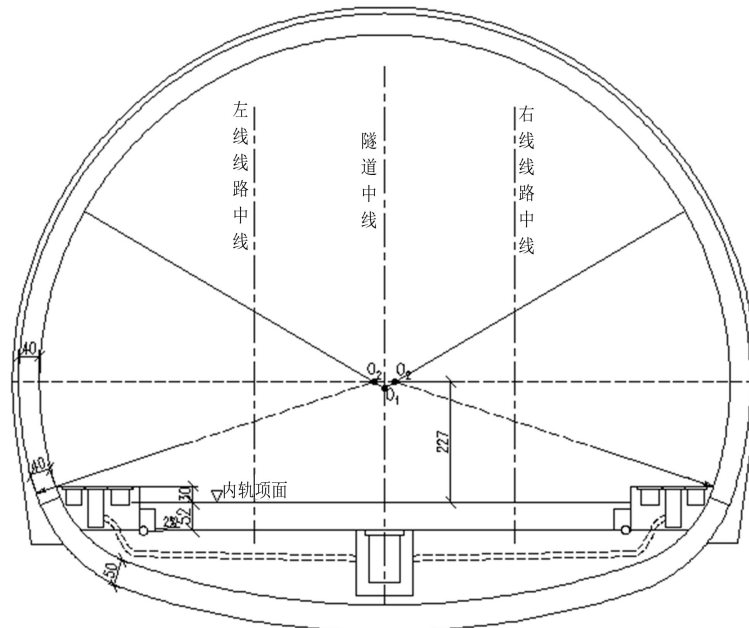


Figure 1. The schematic diagram of Grade III type A composite lining section
图 1. III 级 A 型复合式衬砌断面示意图

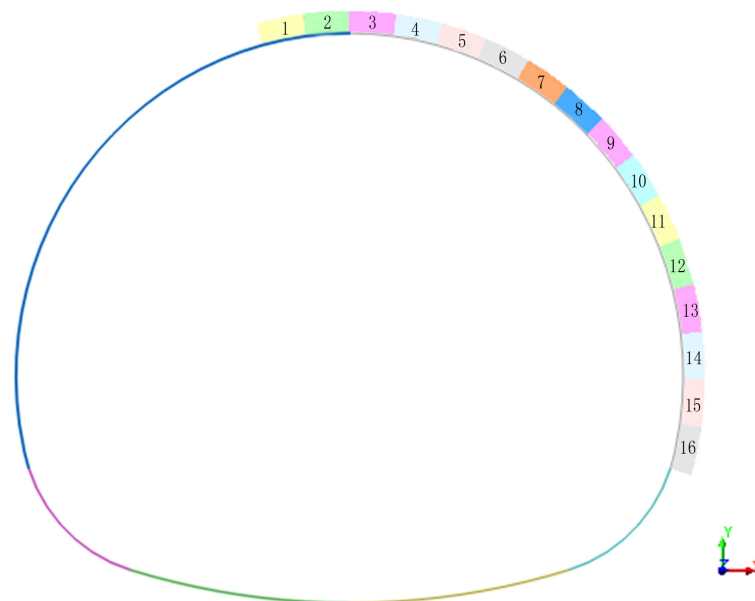


Figure 2. The schematic diagram of 16 void elements by numerical simulation
图 2. 数值模拟 16 个脱空单元示意图

Table 1. Model parameter values
表 1. 模型参数取值

项目名称	E/MPa	μ	天然容重 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	内聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
围岩	3700	0.28	25	1100	44
二衬	30000	0.22	25	—	—

Table 2. Working conditions of numerical simulation
表 2. 数值模拟工况表

项目名称	模拟内容
无脱空	二衬与围岩紧密贴合
拱顶脱空	1 m 单元 1 与二衬分离
	2 m 单元 1、单元 2 与二衬分离
	4 m 单元 1~单元 4 与二衬分离
拱腰脱空	1 m 单元 9 与二衬分离
	2 m 单元 9、单元 10 与二衬分离
	4 m 单元 9~单元 12 与二衬分离
边墙脱空	1 m 单元 13 与二衬分离
	2 m 单元 13、单元 14 与二衬分离
	4 m 单元 13~单元 16 与二衬分离

2.3. 计算结果

根据《铁路隧道设计规范》(TB10003-2005) [6]的衬砌计算方法, 混凝土矩形截面中心及偏心受压构件的抗压强度应按下式计算:

$$KN \leq \varphi a R_a b h \quad (1)$$

式中 R_a ——混凝土或砌体的抗压极限强度;

K ——安全系数;

N ——轴向力;

b ——截面宽度;

h ——截面厚度;

φ ——构件的纵向弯曲系数; 对于隧道衬砌取 $\varphi = 1.0$;

a ——轴向力的偏心影响系数。

从抗裂要求出发, 混凝土矩形截面偏心受压构件的抗拉强度应按下式计算:

$$KN = \varphi \frac{1.75 R_1 b h}{\frac{6e_0}{h} - 1} \quad (2)$$

式中 R_1 ——混凝土的抗拉极限强度;

e_0 ——截面偏心距(m), 对混凝土矩形截面构件, 当 $e_0 \leq 0.20 h$ 时, 抗压强度控制承载能力, 按式(1)计算。

通过数值模拟计算, 得到二衬轴向内力结果, 按下式计算截面安全系数, 评价脱空对二衬的影响。

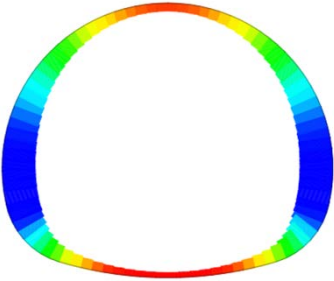
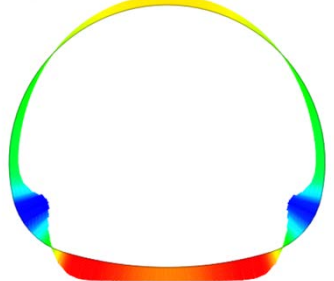
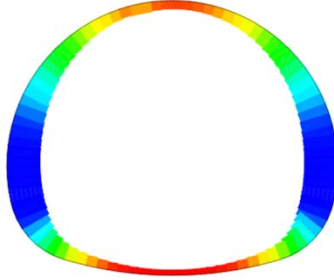
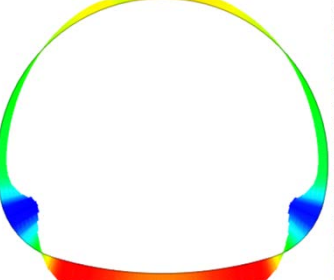
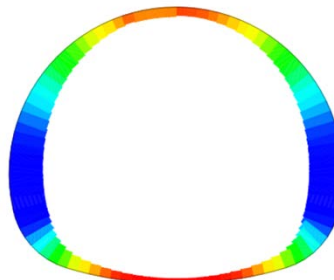
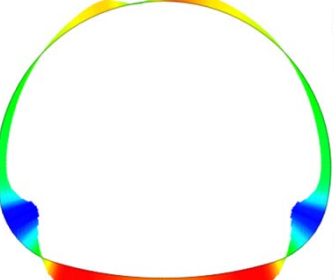
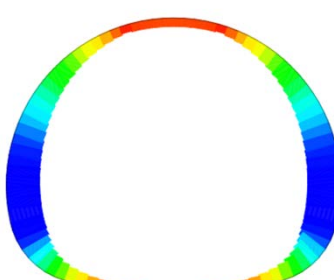
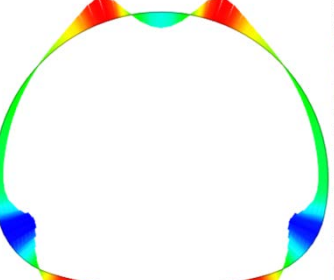
$$K = \frac{\varphi a R_a b h}{N} \quad (\text{抗压控制}) \quad (3)$$

$$K = \frac{\varphi}{N} \cdot \frac{1.75R_1bh}{\frac{6e_0}{h} - 1} \quad (\text{抗拉控制}) \quad (4)$$

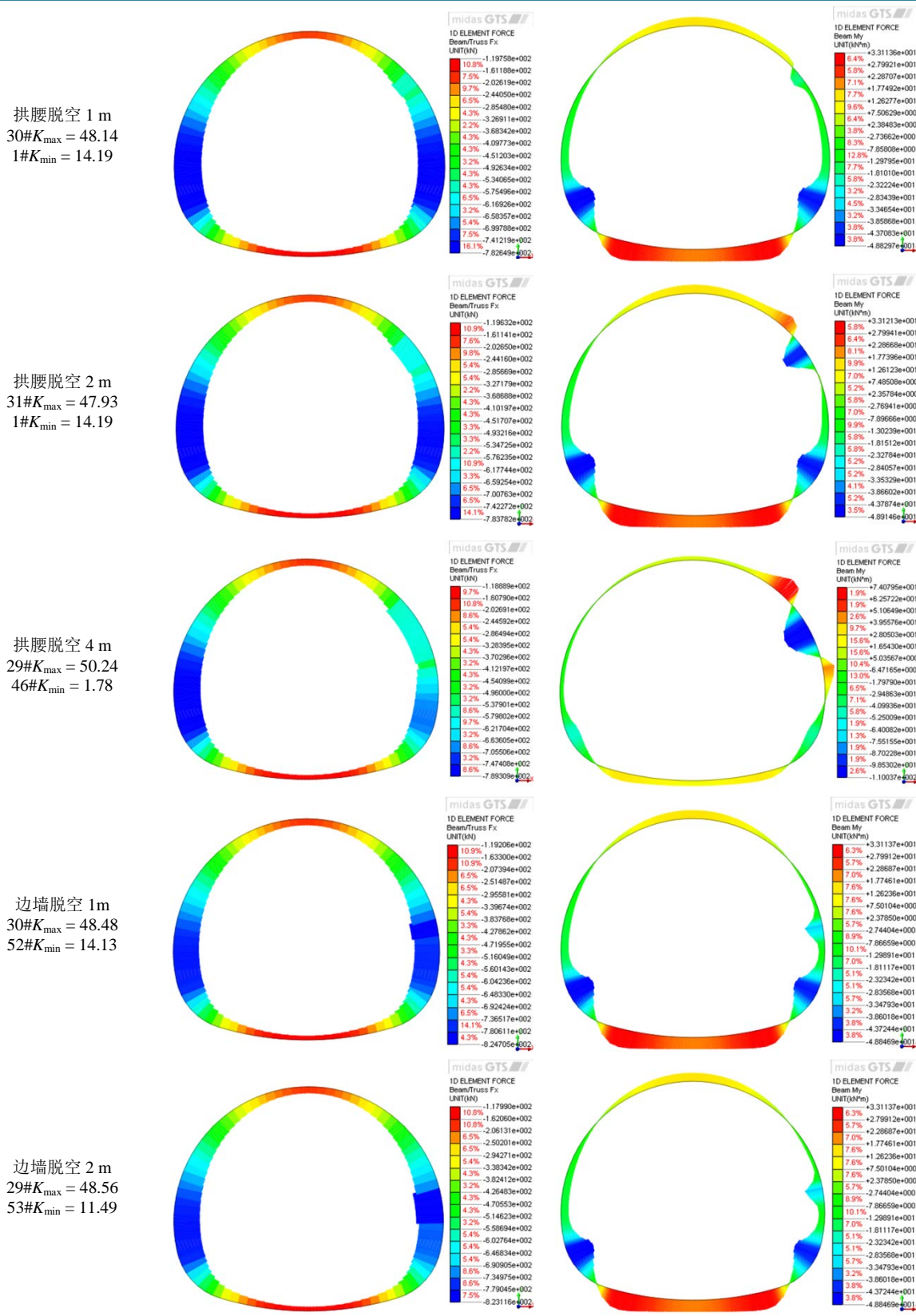
10种数值模拟工况的衬砌轴力及弯矩图如表3所示。不同脱空部位对应的各截面安全系数K分布图如图3~图5所示。

结果显示，在0~4 m范围内，脱空4 m时，对二衬结构内力及截面安全系数K影响最大。

Table 3. Axial force and bending moment of numerical simulation results
表 3. 数值模拟各工况衬砌轴力及弯矩图

模拟工况名称	衬砌轴力图	衬砌弯矩图
无脱空 31# $K_{\max} = 47.75$ 1# $K_{\min} = 14.19$		
拱顶脱空 1 m 25# $K_{\max} = 51.35$ 1# $K_{\min} = 14.20$		
拱顶脱空 2 m 26# $K_{\max} = 53.64$ 1# $K_{\min} = 14.20$		
拱顶脱空 4 m 32# $K_{\max} = 58.60$ 35# $K_{\min} = 6.39$		

续表



续表

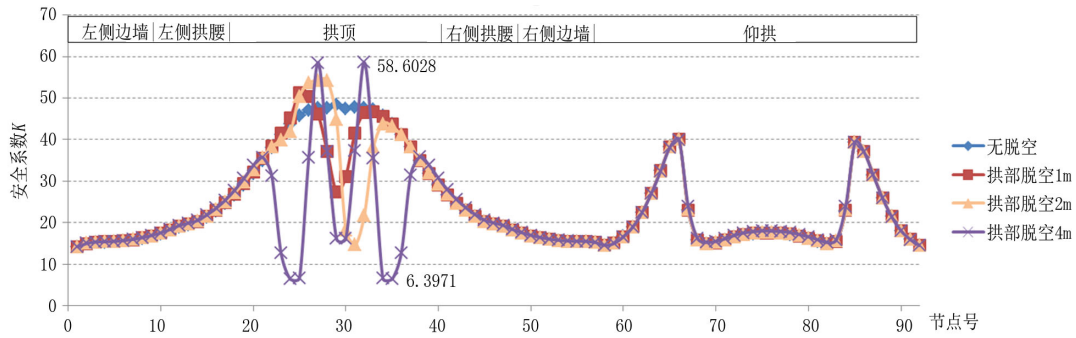
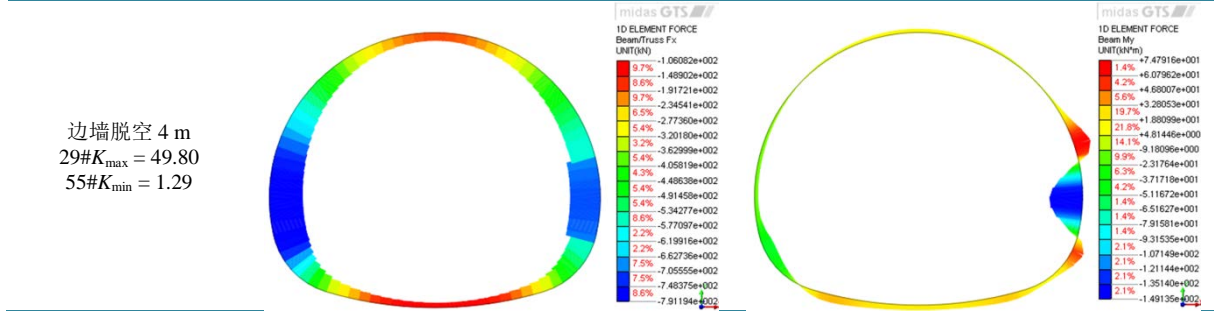


Figure 3. Distribution of safety coefficients K for each section against different arch void widths
图 3. 不同拱部脱空宽度对应的各截面安全系数 K 分布图

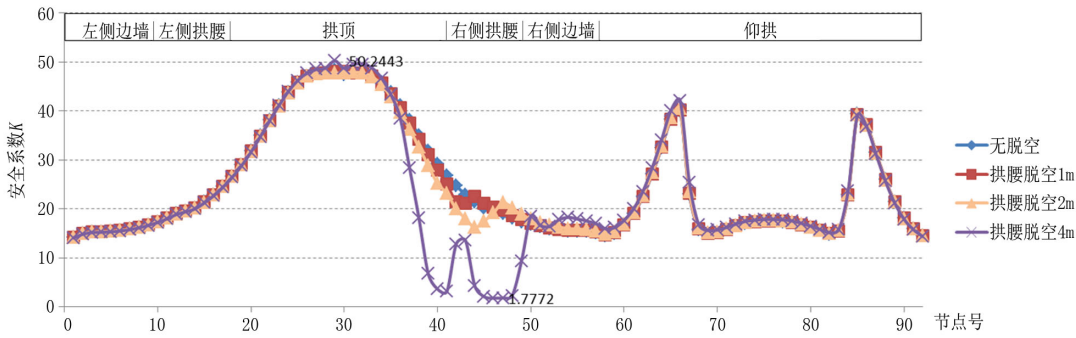


Figure 4. Distribution of safety coefficients K for each section against different hance void widths
图 4. 不同拱腰脱空宽度对应的各截面安全系数 K 分布图

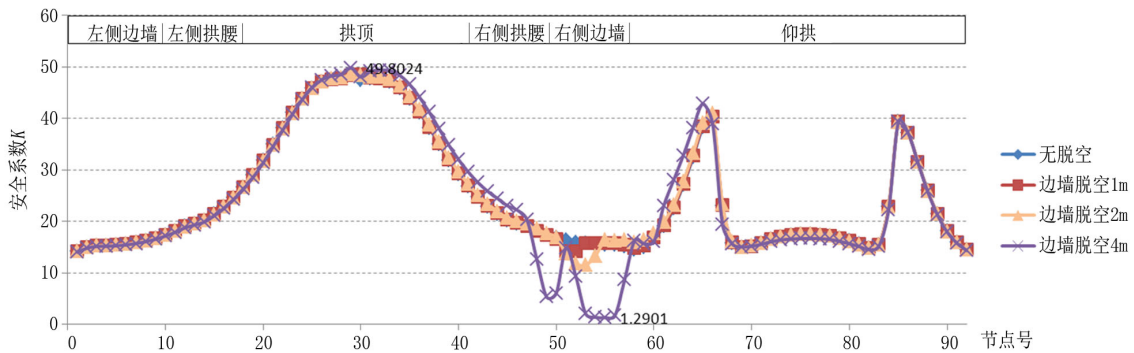


Figure 5. Distribution of safety coefficients K for each section against different side-wall void widths
图 5. 不同边墙脱空宽度对应的各截面安全系数 K 分布图

拱部脱空 4 m 时, 衬砌截面安全系数 K 跳动很明显, 波动大于 10% 的衬砌长度超过 8 m, 24# 和 34# 单元(拱顶衬砌脱空与未脱空衔接处) K 值由 45 左右降低至 6.6, 降幅达 85%, 但衬砌截面具备一定的安全储备, 满足规范要求, 同时部分截面由于内力减小, 安全系数 K 有一定幅度的升高。

拱腰脱空 4 m 时, 脱空处前后约 11 m 范围内的二衬截面安全系数 K 值波动超过 10%, 46# 及 47# 单元(拱脚处) K 值由 19 降低至 1.8, 降幅几近 91%, 影响范围向拱顶及边墙两个方向延伸, 较相同的拱顶脱空宽度影响范围增加。

边墙脱空 4 m 时, 41#~66# 单元约 13 m 范围内二衬截面安全系数 K 值波动超过 10%, 特别是 55# 单元(边墙脱空中部单元) K 值由 15.45 降低至 1.29, 降幅为 91.65%, 但影响范围波及到的拱腰及仰拱部分单元截面 K 值有不同程度的提高。相同的脱空宽度, 边墙脱空引起截面 K 值波动范围最大, 最不利截面安全储备降低最大, 已经不满足设计规范要求, 局部结构被破坏。

3. 脱空的原因

表 4 为西南山区高速铁路某灰岩隧道无损检测结果, 结果显示围岩条件较差时脱空缺陷率较低, 各级围岩拱顶与拱腰脱空缺陷率明显高于边墙脱空缺陷率, 结合现场检测结果及隧道施工质量控制过程, 隧道二衬与围岩脱空的原因主要包括以下 4 个方面: 洞室开挖成型效果、混凝土浇筑、衬砌模板台车强度及防水板安装。

3.1. 开挖成型效果

由表 4 可知, 开挖过程中的二衬脱空主要出现在 II、III 级围岩地段, 脱空缺陷率较 IV、V 级围岩明显偏高, 这段围岩若光爆效果较差, 开挖成型效果不好, 且初支喷射混凝土与设计厚度不符, 表面平整度差, 常常造成二衬混凝土与围岩不密贴, 施工过程中的质量控制是初支表面平整度的决定性因素。

对于 IV、V 级围岩地段, 小间隙脱空因围岩变形逐渐与二衬外缘贴合, 脱空率较低, 但高速铁路隧道断面一般均设置格栅或型钢钢架, 受钢架架设因素影响, 喷射混凝土在钢架间的平整度相对无钢架支护时可以较易控制, 但如果钢架间喷射混凝土不饱满, 或者局部超欠挖使得钢架难以按设计位置安装, 则会造成相邻钢架起伏过大, 进而导致初支不平整度过大。

设置钢架地段初支还存在一个不容忽视的情况, 格栅钢架一般高度 12 cm 或 16 cm, 钢筋间距较密, 密集的钢筋导致喷射混凝土难以按设计要求成型; 另外喷射混凝土难以密贴型钢钢架翼缘板与围岩间较小的缝隙, 也会造成人为脱空, 此类脱空随机性较大, 难以检测及控制。此外, 对于裂隙较发育岩体局部掉块部位, 若锚杆、钢筋网未按设计施作或现场处理不当, 掉块空腔内混凝土未喷射封闭密实, 同样会造成二衬与围岩脱空。

Table 4. Statistics of a tunnel secondary lining voids

表 4. 某隧道二次衬砌背后脱空情况统计

围岩级别	检测长度(米)	缺陷长度(米)					合计	脱空缺陷率
		拱顶	左拱腰	右拱腰	左边墙	右边墙		
II	204	14	10.5	20	7.5	5	57	5.6%
III	2548	242.5	125.5	131	111.5	98.5	709	5.6%
IV	1085	73	32	50.5	19.5	23.5	198.5	3.7%
V	547	24.5	10.5	15.5	3	5.5	59	2.2%
合计	4384	354	178.5	217	141.5	132.5	1023.5	4.7%
	脱空缺陷率	8.1%	4.1%	4.9%	3.2%	3.0%	4.7%	

3.2. 混凝土浇筑

数值模拟结果显示,边墙脱空对二衬的影响最大,是最不利工况,然而在实际施工中,边墙大范围脱空的情况很少见,主要原因在于混凝土在浇筑过程中是一种流动体,受重力影响,大面积浇筑时,边墙的空腔最易充填密实,而拱顶及拱腰处最易出现二衬脱空的情况,主要由以下几方面控制:

(1) 混凝土浇筑过程中未振捣密实,浇筑完成后混凝土受自重影响向边墙处下沉,拱部压力减小,造成拱部纵向脱空。同理,在反坡施工时,与上一个循环已施作完毕的衬砌间也容易出现自重影响下的增压气囊,造成二衬背后环向脱空。

(2) 混凝土浇筑至拱部时,一般临近本循环混凝土浇筑结束,剩余混凝土数量难以精确掌握,容易导致拱顶混凝土灌注量不足;另外灌注过程压力变化,导致拱部局部地区泵送混凝土不到位,二衬脱空。灌注完毕后,衬砌背后二次注浆孔堵塞或衬砌背后注浆施作不到位,也会造成衬砌与围岩的不密贴。

(3) 泵送混凝土仅利用个别窗口浇筑时,易出现混凝土流动距离过长的情况,距灌注窗口较远处,混凝土供应数量不足、输送泵压力不足或运行故障而易造成脱空。此外,当混凝土扩散度不足时,也可能无法扩散填充密实而造成脱空。

3.3. 模板台车强度

衬砌模板台车由于各种原因底部支撑不足,或未支撑牢固,浇筑混凝土时,台车发生整体位移,不但造成二衬背后脱空,而且可能造成二衬侵限等严重质量问题。若衬砌台车模板在混凝土达到拆模条件前或混凝土强度不足以承受其自重前发生下沉、变形则可能导致二衬背后脱空。

混凝土浇筑时,模板台车挡头板封堵不严实,或在压力作用下变形,与临近模板脱开,造成漏浆,导致二衬背后脱空或不密实。此情况多出现于拱顶处。

3.4. 防水板安装

若防水板铺设固定点数量不足,松弛过度,防水板余量过大,浇筑混凝土过程中由于混凝土的流动、振捣及冲击,混凝土对防水板产生挤压及错动作用,使位于下部的防水板卷曲并层叠,形成大量褶皱,造成本循环内的纵向空腔,但此类脱空纵向面积较小,对结构影响也较小。

若防水板铺设松弛度不足或全环铺设松紧不均,浇筑混凝土过程中松弛度的不足量逐步积累,拱顶防水板张紧,局部紧绷的防水板阻隔混凝土与初支的密贴,形成拱顶纵向连续型空腔,直接造成二衬背后脱空。此种情况还易造成拱顶防水板固定点脱离围岩表面甚至防水板的撕裂。

4. 安全影响分析

(1) 数值模拟结果中,脱空宽度为 1.0 m 时,隧道衬砌结构各截面内力变化范围及幅度较小,截面安全系数 K 的分布与无脱空时基本一致;当脱空宽度为 2.0 m 或 4.0 m 时,脱空中部或脱空与未脱空衔接处截面内力变化较为明显,结构局部应力集中,局部截面安全系数 K 值急剧下降,低于《规范》要求,衬砌无法保证铁路安全运营要求。

(2) 隧道衬砌脱空导致围岩对衬砌的弹性作用不连续,围岩对衬砌外缘的约束状态变化,改变了理想状态下衬砌的受力状态。脱空处衬砌结构弯矩出现正负转换,截面安全系数由受压控制转化为混凝土受拉控制,安全储备急剧降低。由于脱空处可能存在内力减小的情况,脱空处向衬砌两侧延伸段落截面安全系数 K 会有所增长,同时也会造成相邻截面安全系数变化过大并突变的情况。

(3) 隧道衬砌背后脱空主要改变了隧道衬砌结构受力和变形状态,隧道衬砌拱顶或拱腰处由于背后脱空引起的衬砌受拉开裂、掉块、漏水等,对衬砌结构的安全性影响极大,同时漏水造成衬砌钢筋锈蚀,

降低结构耐久性,严重影响高速铁路运营安全。此外,二次衬砌拱顶脱空以后,混凝土结构与围岩的协同变形失效,开挖围岩失去结构对其的支护作用,松弛变形增大,进而导致围岩失稳、脱落破坏。衬砌背后脱空后无法保证结构的长期安全运营,因此二次衬砌背后脱空现象是必须加以预防和处理的,而拱部背后脱空的安全隐患更大。

5. 结论

本文基于地层—荷载模型建立了高速铁路隧道二次衬砌背后脱空的数值模拟模型,分析了二衬脱空对衬砌结构安全的影响范围及程度,并结合西南山区高速铁路某灰岩隧道无损检测实例,讨论二衬脱空的主要原因及其对结构安全的影响分析,并得出以下结论:

(1) 隧道二次衬砌背后脱空对隧道结构安全影响极大,且脱空范围越大,影响范围也越大。

(2) 二衬脱空一般由施工引起,主要受洞室开挖成型效果、混凝土浇筑、模板台车稳定性及防水板安装质量等控制。由于混凝土浇筑过程中的流动性原因,二衬背后一般出现在拱顶或拱腰的环向增压气囊脱空;防水板安装质量及混凝土浇筑过程会引起二衬纵向褶皱型脱空。

(3) 隧道结构一般整体稳定性满足要求,但局部脱空引起结构内力变化,截面安全系数降低,结构截面安全储备急剧降低,特别是拱部二衬脱空,不但直接影响结构安全,还可造成结构纵向开裂、掉块等严重危害行车安全的情况。

参考文献 (References)

- [1] 何川,余健 (2006) 高速公路隧道维修与加固. 人民交通出版社,北京.
- [2] 史世雍,梅世龙,杨志刚 (2005) 隧道顶部溶洞对围岩稳定性的影响分析. *地下空间*, **5**, 698-716.
- [3] 彭跃,王桂林,张永兴,等 (2008) 衬砌背后空洞对在役隧道结构安全性影响研究. *地下空间与工程学报*, **6**, 1101-1104.
- [4] 余健,何川,汪波,等 (2008) 衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究. *公路交通科技*, **1**, 104-110.
- [5] 王立川,周东伟,吴剑,等 (2011) 铁路隧道复合衬砌脱空的危害分析与防治. *中国铁道科学*, **5**, 56-63.
- [6] 中华人民共和国铁道部 (2005) TB 10003-2005 铁路隧道设计规范. 中国铁道出版社,北京.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

