

衬砌背后脱空对隧道结构影响三维数值分析

张运良¹, 聂子云¹, 李凤翔²

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

摘 要: 衬砌背后脱空是很普遍的公路隧道病害现象之一, 对衬砌结构危害较大. 以往通过平面分析认为脱空过大可能导致衬砌外侧沿环向出现较大拉应力, 产生纵向裂缝; 通过建立三维有限元模型对比发现, 局部空洞会导致脱空衬砌外侧出现较大纵向拉应力, 可能引起环向裂缝, 而几乎不产生环向拉应力. 根据三维数值分析得出不同空洞位置、不同围岩级别下空洞对衬砌结构影响.

关键词: 公路隧道; 衬砌; 脱空; 平面分析; 三维; 数值分析

中图分类号: U451.5 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.02.024

0 引言

近20年, 伴随着我国公路建设的蓬勃发展, 公路隧道的数量和里程也迅速增加, 已相继建成5 000多座公路隧道. 由于我国地域辽阔, 工程地质条件复杂, 施工技术不够发达及组织管理能力不足等方面原因, 早期修建的隧道大多数已暴露出或多或少的病害问题, 如出现渗漏水、衬砌开裂、衬砌变形、衬砌脱空等现象. 相信随着时间的推移, 我国公路隧道将逐渐从建设高峰期向养护维修高峰期过度, 因此公路隧道病害机理和病害处治方法已是势在必行的研究课题. 衬砌背后脱空是隧道病害中很普遍的现象, 产生背后空洞的原因有很多, 如超挖回填不密实, 塌方处理不彻底, 模架沉降, 混凝土收缩, 水土流失, 地质运动等. 背后空洞的存在使脱空区衬砌失去围岩抵抗力导致衬砌受力不均, 还可能导致附近围岩容易松动产生松弛土压, 甚至掉落冲击衬砌, 单侧拱腰或边墙出现大范围空洞还可能导致衬砌受偏压作用. 可见空洞直接影响衬砌结构的受力状态, 从而影响其承载力及安全性, 应引起足够的重视.

1 平面分析法

1.1 力学解析法

为简便直观地计算分析拱顶空洞对拱顶衬砌受力状态的影响, 建立衬砌结构力学模型, 如图1所示.

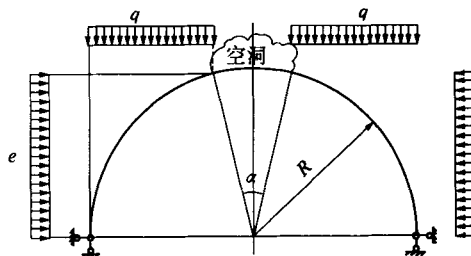


图1 力学模型

Fig.1 The mechanical model

该结构模型为超静定结构, 取左边一半进行计算, 拱部截面弯矩 M 是反应拱顶受力状态的重要指标, 通过结构力学方法进行求解; q 为垂直围岩压力; e 为围岩侧压力; α 为脱空范围. 根据力法得

$$M = \left[\frac{2}{3\pi} (1 - \sin \frac{\alpha}{2})^3 + \frac{\pi - 4}{2\pi} (1 - \sin \frac{\alpha}{2})^2 \right] q R^2 + \left[\frac{\pi - 4}{2\pi} \cos^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{2 - \pi - \alpha}{\pi} \right) \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{4}{3\pi} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{4}{3\pi} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{4}{3\pi} \right] e R^2 \quad (1)$$

隧道半径取为5.7 m, q 和 e 按《公路隧道设计规范》计算, 根据式(1)可以计算V、IV及III级围岩下拱顶不同范围脱空对拱顶弯矩的影响, 如表1.

从表1可以看出, 围岩越差, 拱顶截面弯矩越大; 拱顶处密实即 $\alpha = 0^\circ$ 时, 拱顶截面弯矩为负, 且值相对较小, 说明拱部受力状态相对较好; 随着

收稿日期: 2012-11-10; 修订日期: 2012-12-26

作者简介: 张运良(1963-), 男, 湖南湘潭人, 中南大学副教授, 主要从事隧道工程与岩土工程方面科学教研工作, E-mail: zhangyunliang88@126.com.

表 1 拱顶截面弯矩计算值
Tab.1 Bending moment of crown

围岩 级别	荷载/(kN·m ⁻¹)		拱顶截面弯矩 M/(kN·m)		
	q	e	α=0°	α=15°	α=30°
Ⅲ	82.1	12.3	-170.9	-2.6	116.7
Ⅳ	164.2	49.2	-281.6	182.0	539.6
V	328.4	164.2	-402.1	863.9	1 837.5

注:正弯矩表示衬砌外侧受拉。

空洞范围扩大,拱顶截面出现正弯矩,且值很大,说明拱顶衬砌外侧处于非常不利的受拉状态。

1.2 二维有限元分析

解析力学法虽然直观易懂,但其未考虑围岩对衬砌结构的约束作用,且将拱圈简化为半圆形。为反映空洞与脱空区衬砌协调变形作用,建立 V 级围岩二维有限元模型,如图 2。衬砌厚度取为 45 cm,衬砌内轮廓断面及材料参数均是根据《公路隧道设计规范》中建议值选取,采用 MC 本构模型,材料参数见表 2。

对于空洞的模拟可以通过挖除空洞处土体实现,如图 2 所示。考虑到按规定施作衬砌时不允许残留空洞,空洞的出现也可能是后期形成的,而且往往回填不密实也会起到和空洞同样的脱空效果,而总的土体体积并不一定减少,故衬砌背后脱空不能简单地通过移除土体来模拟。笔者通过解除脱空区衬砌和围岩的接触属性来实现脱空区的存在。

实际上,开挖释放的荷载不可能全由衬砌承担,为使空洞效应最大化呈现,本研究假设衬砌承担 100% 的开挖释放荷载。

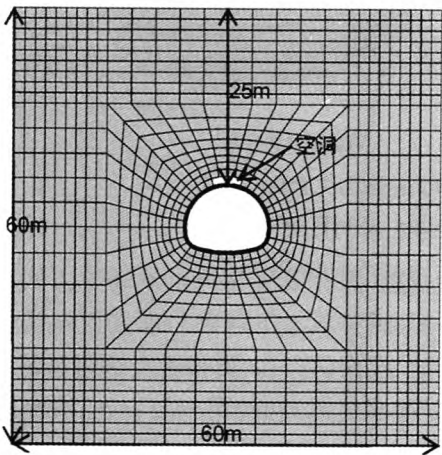
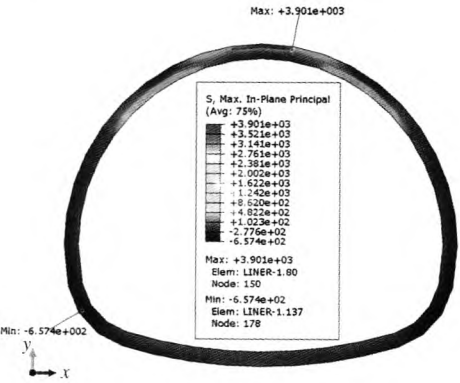


图 2 V 级围岩二维有限元计算模型
Fig.2 2D finite element model of
V class surrounding rock

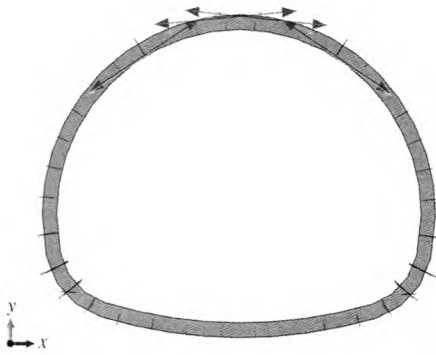
表 2 有限元模型基本材料参数
Tab.2 Parameters used for FEM simulation

材料类型	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /kPa
V 级围岩	2.0	1	0.35	0.08
Ⅲ级围岩	2.3	6	0.30	0.80
C25 衬砌	2.5	28	0.20	—

图 3 为拱顶 6 m 的范围脱空状态下衬砌主拉应力云图。根据计算,密实状态下衬砌主要受压应力,几乎不存在拉应力,最大压应力为 9.14 MPa,位于墙角处,可见衬砌处于良好的受力状态。图 3 显示,当拱顶出现 6 m 脱空范围时,将导致拱顶外侧及脱空区边缘处衬砌内侧切向均出现很大拉应力,最大主拉应力为 3.90 MPa,显然在不考虑钢筋的情况下,衬砌已拉裂破坏。



(a) 主拉应力云图



(b) 主拉应力矢量图

图 3 拱顶 6 m 范围脱空状态下衬砌
主拉应力云图及主拉应力矢量图
Fig.3 Principal stress contour and Principle stress
vector of lining with 6 m width void behind crown

2 三维数值分析

平面分析方法^[1-9]有力地验证了衬砌脱空对隧道工程危害的严重性,不过平面分析中将空洞沿隧道视为沿纵向无限延伸,而根据笔者多年隧

道检测经验,实际上空洞纵向长度是有限的,平面分析不能全面模拟空洞作用,故分析空洞对衬砌影响时应充分考虑空洞的三维效应.建立三维有限元模型,三维模型横断面尺寸同二维分析,纵向长度取 20 m,脱空区如图 4,本构模型及材料参数均与二维相同.

初始应力场对岩土工程影响很显著,区域不同,地应力的分布规律也不同,下面通过设置侧压力系数为 0.5 和 2,分别模拟水平应力场和竖直应力场下拱顶脱空数值分析模型.脱空主要影响衬砌的主拉应力,得到两种主应力场下 V 级衬砌主拉应力计算结果如图 5、图 6 所示.

从图 5 中可以看出,拱顶脱空对衬砌应力影



图 4 拱顶脱空示意图
Fig. 4 Schematic diagram of void behind crown

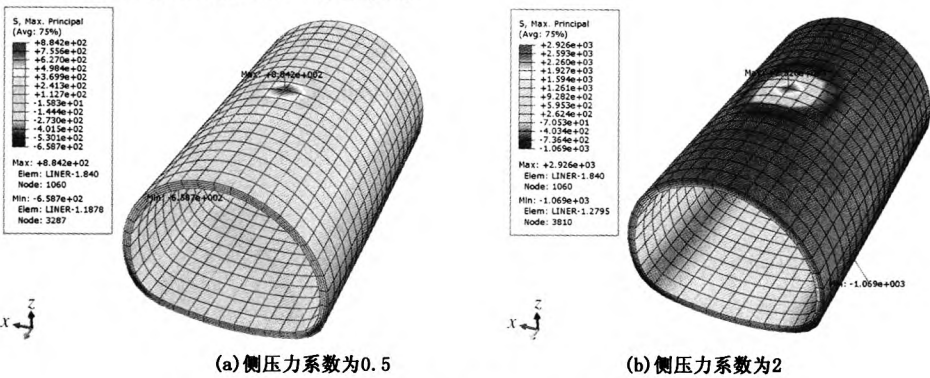


图 5 V 级围岩拱顶脱空状态下衬砌主应力分布图
Fig. 5 Principal stress contour of lining with void behind crown

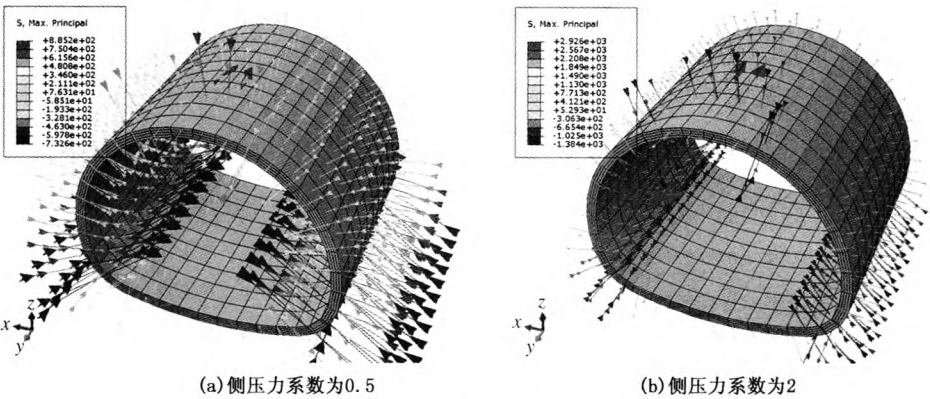


图 6 V 级围岩拱顶脱空状态下衬砌最大主应力矢量图
Fig. 6 Maximum principle stress vector with void behind crown

响主要集中在脱空区附近,而对其他区域的衬砌应力影响不大;脱空使衬砌产生较大拉应力,竖直和水平应力场下分别达到 0.88 MPa 和 2.93 MPa.对比图 3 和图 6,可以发现二维和三维分析结果差别比较大:平面分析中脱空区衬砌出现很大环向拉应力,导致纵向裂缝;三维分析中脱空区衬砌出现很大纵向拉应力,导致环向裂缝.造成这种巨大差异的原因在于:围岩产生主动压力使衬

砌结构变形,同时围岩又产生被动抗力约束衬砌结构变形,理想状态下衬砌与围岩应该是协调受力变形的.空洞的存在,使得脱空区衬砌理应受到的压力(或者抗力)和约束不复存在,脱空区衬砌相当于一块受到反向压力作用的曲板.在平面分析中,这块板可以视作环向两边受到约束而纵向两边未受到约束的单向板,显然这样会导致产生纵向裂缝;而三维分析考虑了实际情况,即曲板的

四周均受到了约束,从计算结果看纵向两边的约束作用明显大于环向两边的约束作用,从而导致板主要为纵向受力,从而导致环向裂缝。

为进一步研究不同空洞位置、围岩级别下衬

砌的脱空效应,分别建立了相关计算模型,其中Ⅲ级围岩衬砌内轮廓同V级围岩衬砌,厚度取为35 cm,不带仰拱。各工况计算结果见表3。

表3 各种脱空工况下衬砌主应力计算结果

Tab.3 Calculated results of principle stress under different working modes

围岩级别	空洞位置	侧压力系数为0.5		侧压力系数为2	
		σ_1/MPa	σ_3/MPa	σ_1/MPa	σ_3/MPa
V级	密实	-0.000 4(仰拱内侧)	-8.872(墙角内侧)	-0.000 3(仰拱内侧)	-14.380(墙角内侧)
	拱顶	0.884(拱顶外侧)	-8.887(墙角内侧)	2.926(拱顶外侧)	-14.440(墙角内侧)
	拱腰	1.56(拱腰外侧)	-8.892(墙角内侧)	2.663(拱腰外侧)	-14.500(墙角内侧)
	边墙	2.051(边墙外侧)	-8.917(墙角内侧)	2.202(边墙外侧)	-14.450(墙角内侧)
Ⅲ级	密实	0.109(拱腰外侧)	-3.614(墙角外侧)	0.497(墙角内侧)	-5.265(拱顶内侧)
	拱顶	0.203(拱顶外侧)	-3.627(墙角外侧)	0.816(拱顶外侧)	-5.678(拱顶内侧)
	拱腰	0.601(拱腰外侧)	-3.617(墙角外侧)	0.916(拱腰外侧)	-5.270(拱顶内侧)
	边墙	0.495(边墙外侧)	-3.734(墙角外侧)	0.799(墙角内侧)	-5.624(拱顶内侧)

注:正为受拉,负为受压。

从表3可以看出:①各种工况下,空洞均会导致衬砌产生不利的拉应力,拉应力一般集中在脱空区衬砌外侧,方向为沿隧道纵向;②水平应力场下衬砌应力值比竖直应力场下大很多;③在V级围岩,竖直应力为主的地应力场下,边墙空洞产生的拉应力最大,拱腰其次,拱顶最小,水平应力为主的地应力场下,各位置空洞产生拉应力均很大,拱顶最大,拱腰其次,边墙最小。在Ⅲ级围岩中,衬砌缺少仰拱支撑作用,拱腰处空洞拉应力最大。

3 结论

通过对比平面分析和三维数值分析,并对比三维分析中不同应力场、不同空洞位置、不同围岩级别下的空洞效应。

(1)平面分析不能合理地反映出局部范围空洞作用下衬砌的纵向受力状态,对于此类局部范围空洞进行数值分析时应考虑采用三维模型。

(2)不管何种应力场下、空洞位于何处、围岩好坏,空洞都会对衬砌的受力状态产生不良影响,均会导致较大拉应力,故施工过程当中应尽量避免人为衬砌背后脱空,已有空洞应回填筑实。

(3)竖直应力场下,边墙空洞的危害最大,拱腰其次,拱顶最小;水平应力场下,拱顶空洞危害最大,拱腰次之,边墙最小。

(4)空洞会使脱空区衬砌外侧受到较大的纵向拉应力,其存在对衬砌产生环向裂缝是有所贡献的。

笔者探讨空洞对衬砌的不良影响主要基于数

值分析方法,所有结论均为理论性的,还需得到物理实验及工程实际的进一步验证。

参考文献:

- [1] 李明,陈洪凯,熊峰伟.隧道衬砌背后空洞健康判据试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(3):398-402.
- [2] 崔文艳,宋建,刘宇,等.不同位置空洞对隧道衬砌的力学行为分析[J].水利与建筑工程学报,2011,9(5):70-73.
- [3] 王立川,周东伟,吴剑,等.铁路隧道复合衬砌脱空的危害分析与防治[J].中国铁道科学,2011,32(5):56-63.
- [4] 周一勤,金云雷.公路隧道二次衬砌顶部脱空的分析 and 处理[J].华东公路,1999(2):39-43.
- [5] 王春景,雷明锋,彭丽敏.病害隧道结构安全性评价模型与方法[J].铁道科学与工程学报,2011,8(3):73-77.
- [6] 朱春生,杨晓华,来弘鹏,等.公路隧道衬砌后空洞对结构安全的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(5):63-68.
- [7] 彭跃,王桂林,张永兴,等.衬砌背后空洞对在役隧道结构安全性影响研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(6):1101-1104.
- [8] 余健,何川,汪波,等.衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究[J].公路交通科技,2008,25(1):105-110.
- [9] MEGUID M A, DANG H K. The effect of erosion voids on existing tunnel linings [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 23(3): 278-286.

Three-dimensional Numerical Analysis of the Effect of Voids on Existing Road Tunnel Linings

ZHANG Yun-liang¹, NIE Zi-yun¹, LI Feng-xiang²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410004, China; 2. China Railway Engineering Design and Consultant Group, Beijing 100055, China)

Abstract: Voids behind linings, which are a common form of road tunnel disease, have great danger to the stability of tunnel linings. The previous researches concentrated on plane analysis, researchers considered that larger voids would lead to loop tensile stress at the out edge of the lining which might cause longitudinal crack; However, through establishing three-dimensional finite element model compared with plane analysis, the article puts forward that voids will lead to longitudinal tensile stress but loop tensile stress at the out edge of the lining, which possible cause annular cracking. And based on three-dimensional numerical analysis, obtaining the effect of void behind linings under different surrounding rock and different void locations.

Key words: road tunnel; linings; voids; plane analysis; three-dimensional; numerical analysis

(上接第 48 页)

Research on Water Stability of Miber I Mineral Composite Fiber Asphalt Mixture

CHEN Shuan-fa^{1,2}, HUANG Zhen¹, XIONG Rui¹, GUAN Bo-wen¹, MA Li-li², SHENG Yan-ping²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To explore the water stability of Miber I mineral composite fiber asphalt mixture, based on the freeze-thaw splitting test and the immersion marshall test, the influencing factors on water stability of both AC-13 and SMA-13 Miber I mineral composite fiber asphalt mixture are discussed. The grey correlation entropy method is utilized to analyze different factors such as fiber content, the percentage of 4.75 mm sized aggregate passing through the mesh, asphalt penetration, optimal asphalt content, percent voids filled with asphalt and percent air voids in asphalt mixtures, when TSR and MS_0 are set as the reference sequences. The results indicate that fiber content has the greatest effect on water stability of fiber asphalt mixtures. Miber I mineral composite fiber can improve water stability of asphalt mixture effectively.

Key words: road engineering; asphalt mixture; Miber I mineral composite fiber; water stability; grey correlation entropy