

Research on Internal Force Change of Inverted Arch at Floor Heave of Tunnel Pavement

Kai Liu, Zhirong He

CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan Hubei
Email: 984633345@qq.com

Received: Jun. 1st, 2019; accepted: Jun. 19th, 2019; published: Jun. 26th, 2019

Abstract

Based on the cracking disease of a highway tunnel pavement floor heave, the causes of cracking of tunnel floor heave are determined by the results of field test. The internal force of tunnel inverted arch at the diseased site is simulated by finite element software, and the internal force of diseased inverted arch is compared with that of normal inverted arch. The causes of the diseased inverted arch are further verified, so as to provide accurate data reference for later reinforcement treatment.

Keywords

Highway Tunnel, Floor Heave, Inverted Bearing Capacity, Numerical Simulation

基于隧道路面底鼓处仰拱内力变化的研究

刘 凯, 何治荣

中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉
Email: 984633345@qq.com

收稿日期: 2019年6月1日; 录用日期: 2019年6月19日; 发布日期: 2019年6月26日

摘 要

依托某高速公路隧道路面底鼓开裂病害, 通过现场试验检测结果来判定隧道底鼓开裂的原因, 采用有限元软件模拟病害处隧道仰拱内力, 并将病害仰拱与正常仰拱内力进行对比分析, 进一步验证病害产生原因, 从而为后期加固处治提供准确的数据参考, 使加固设计更具针对性。

关键词

高速公路隧道, 路面底鼓, 仰拱承载力, 数值模拟

Copyright © 2019 by author(s) 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

1. 引言

据统计我国约 30% 的公路隧道处于病害发育状态, 其中隧道路面底鼓病害对结构安全影响较大, 底鼓表现为路面隆起、开裂及错台。汪洋[1]通过理论计算出隧道底鼓表达式, 并与现场监控量测数据对比, 分析了隧道底鼓机制; 周森[2]通过对某高速公路隧道底鼓病害的处治分析, 提出随着外部环境的变化, 隧道所受荷载与围岩塑性圈半径扩大呈正比; 宋克志[3]等运用有限元理论计算分析了二衬结构受力与围岩弹性抗力的关系; 赵建邦[4]通过对白家山 1 号隧道仰拱开裂的治理, 运用型钢网格混凝土加固方法获得了较好的处治效果; 李永永[5]结合隧址区地质水文情况, 分析了隧道路面开裂的原因; 时亚昕[6]通过现场试验研究并用有限元计算方法对试验结果进行分析验证, 取得较好结果; 陈柚州[7]总结了隧道路面病害检测方法, 综合分析病害成因; 杨俊泉[8]通过二维隧道衬砌模型计算分析了衬砌的受力特性; S. B. Tang [9]通过研究数值模型中参数对底鼓特性的影响, 详细讨论了高湿条件下隧道的时变变形和破坏过程。

2. 隧道概况

某高速公路隧道是一座上下行分离式隧道, 左幅长 3315 m, 右幅长 3260 m。隧址位于构造侵蚀中低山区, 跨越山体呈连绵起伏, 呈鸡爪状地形, 相对高差约 160 m。

病害处围岩等级为 V 级, 顶埋深 50~100 m, 隧道围岩主要为泥灰岩夹灰岩, $R_c = 16.1$ MPa, 为较软岩, 处在小向斜核部, 岩体挤压变形强烈, 岩体较破碎, $K_v = 0.58$, 地下水不发育, 一般呈点滴状出水。本隧道衬砌采用复合式衬砌, 二次衬砌为 C25 模筑混凝土, 厚 45 cm。

3. 隧道底鼓现状及发展情况

3.1. 病害现象描述

根据高速公路定期检测报告及现场钻孔取芯试验, 隧道病害处路面起拱长度达到 30 m, 周围伴随纵向裂缝, 两行车道路面板错台高差达到 5 cm; 从取芯试样看, 隧底仰拱回填材料软化失效, 仰拱存在破损。

3.2. 病害成因分析

通过对隧底起拱现象及试验数据分析, 底鼓地段围岩为泥灰岩夹灰岩, 围岩性能较差, 隧道塑性区范围很大, 并向深部围岩传递; 另外在爆破开挖后围岩扰动强烈, 在垂直荷载及水平荷载作用下, 根据衬砌结构的压模效应和远场应力作用, 仰拱处软弱岩体向隧道内挤压, 形成不同程度的路面隆起, 导致开裂错台。

同时该地层处于小向斜核部, 构造应力影响带内的深埋隧道水平地应力常高于垂直地应力, 隧道开挖后, 初始地应力部分释放, 围岩应力重分布, 该过程比较缓慢, 宏观表现为路面结构薄弱处隆起, 出现裂缝错台现象, 并且随着围岩应力逐渐释放底鼓开裂更加严重; 通过现场对病害的监控量测也验证了

这一结论, 病害从被发现隆起量仅 2 cm, 经过一年后, 隆起量达到 20 cm, 并且两行车道路面板错台高差也逐步增加。

4. 仰拱内力变化计算分析

4.1. 建立模型

根据现场试验检测数据及建设期隧道设计资料, 采用有限元软件 ANSYS 建立数值模型, 对隧道底鼓病害进行受力分析。关于隧道围岩压力、荷载结构计算方法以及强度和刚度安全性验算均参照建设期勘察设计资料。模型选取隧道二维衬砌, 病害处隧道属于深埋洞室, 但是由于该处围岩较破碎松散, 故采用荷载结构法进行计算, 其计算原理如下:

取衬砌结构结点的位移为基本未知量。由最小势能原理或变分原理可得系统整体求解时的平衡方程为:

$$[K] * \{\delta\} = \{P\} \quad (1)$$

式中: $[K]$ ——衬砌结构的整体刚度矩阵, 为 $m \times m$ 阶方阵, m 为体系接点自由度的总个数;

$\{\delta\}$ ——由衬砌结构结点位移组成的列向量, 即 $\{\delta\} = \{\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_m\}^T$;

$\{P\}$ ——由衬砌结构结点荷载组成的列向量, 即 $\{P\} = \{P_1 \ P_2 \ \dots \ P_m\}^T$ 。

隧道承重结构轴线的形状为弧形时, 需用折线单元模拟曲线。划分单元时, 只需确定杆件单元的长度。杆件厚度 d 即为承重结构的厚度, 杆件宽度取为 1 m。

相应的杆件横截面积为 $A = d \times 1 (\text{m}^2)$, 抗弯惯性矩为 $I = \frac{1}{12} \times 1 \times d^3 (\text{m}^4)$, 弹性模量 E (kN/m^2) 取为混凝土的弹性模量。

地层弹性抗力由下式给出:

$$F_n = K_n * U_n \quad (2)$$

$$F_s = K_s * U_s \quad (3)$$

其中,

$$K_n = \begin{cases} K_n^+ & U_n \geq 0 \\ K_n^- & U_n < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K_s = \begin{cases} K_s^+ & U_s \geq 0 \\ K_s^- & U_s < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_n 、 F_s 分别为法向和切向弹性抗力, K_n 、 K_s 为相应的围岩弹性抗力系数, 且 K_n 、 K_s 分别为压缩区和拉伸区的抗力系数, 通常令 $K_n = K_s = 0$ 。

4.2. 计算参数的选取

复合式衬砌初期支护与二次衬砌承载比例依据《公路隧道设计细则》规定取值, 两车道隧道围岩级别为 V 级, 计算中二次衬砌承载比按 70% 选取, 计算参数见表 1, 表 2。

Table 1. Calculation parameters of lining

表 1. 衬砌计算参数

结构类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/\text{KN/m}^3$	抗压极限强度 R_c/MPa	极限弯曲抗压强度 R_m/MPa	抗拉极限强度 R_t/MPa
C25 混凝土	29.5	0.2	25	19.0	23.8	2.0

Table 2. Calculating parameters of wall rock in diseased section
表 2. 病害段围岩计算参数

围岩级别	重度 γ (KN/m ³)	弹性抗力系数 K (MPa/m)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	计算内摩擦角 φ (°)
V	19.1	150	0.5	0.43	45

隧道模型建立后, 分别施加水平力梯形分布荷载、垂直荷载及地基弹簧, 并且对荷载进行组合, 计算模型如图 1, 由于隧道底鼓病害, 根据规范要求将隧道原衬砌承载力折算系数调整为 0.1。

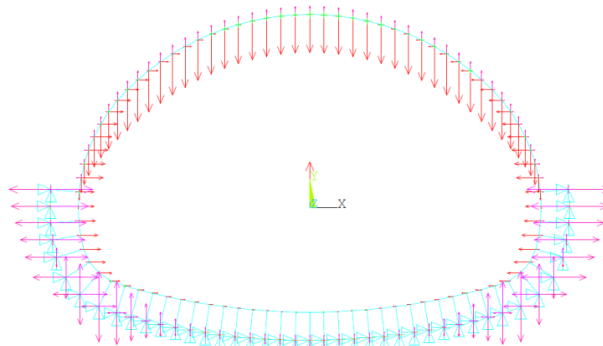


Figure 1. Calculation model view of tunnel floor heave
图 1. 隧道底鼓计算模型图

4.3. 计算结果分析

组合荷载下隧道衬砌底部弯矩在两侧达到最大, 最大绝对值弯矩为 210.67 kN·m, 内侧受拉, 表明仰拱两侧内表面受拉较大, 较容易出现开裂病害, 弯矩图如图 2。

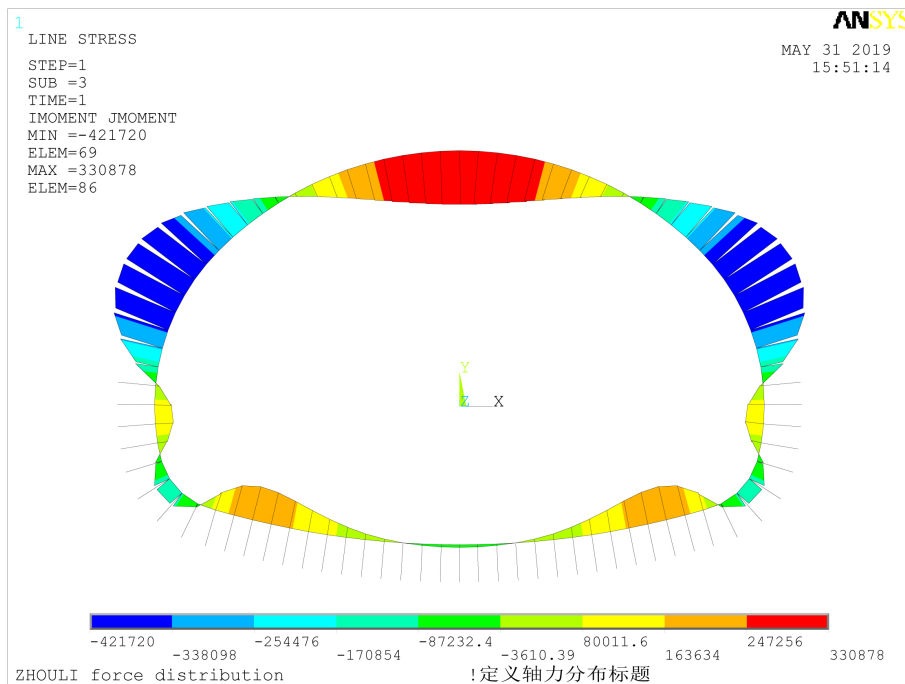


Figure 2. Moment view of tunnel floor heave
图 2. 隧道底鼓模型弯矩图

组合荷载下隧道衬砌底部剪力在两侧达到最大, 最大绝对值剪力为 261.2 kN, 隧道底部受剪力影响较小, 剪力图如图 3。

组合荷载下隧道衬砌底部轴力在两侧达到最大, 最大绝对值轴力为 1380 kN, 隧道底部全部受压, 压力值较正常仰拱段增加幅度大, 说明隧道底部压力对存在病害的仰拱较敏感, 轴力图如图 4。

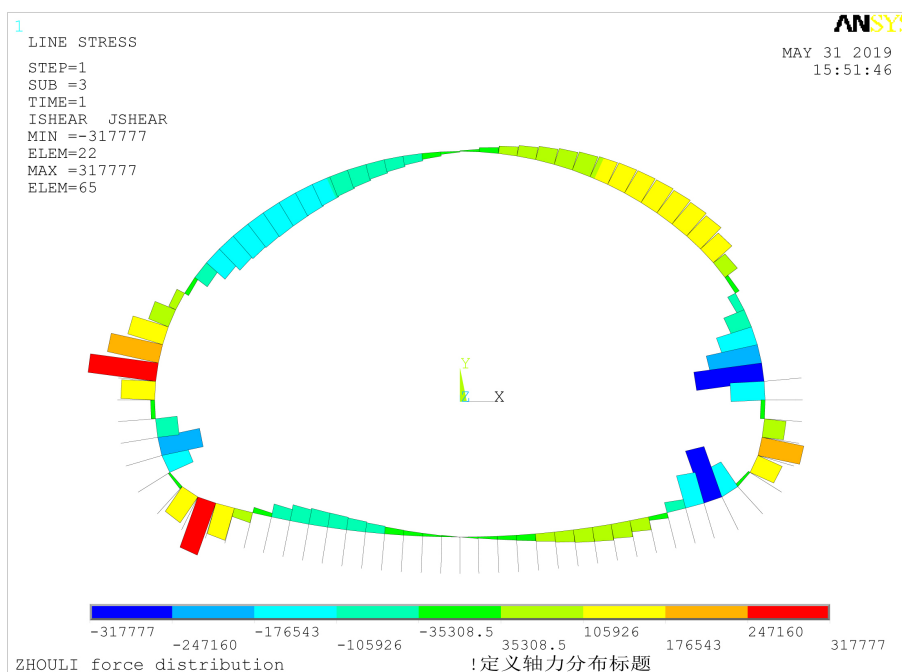


Figure 3. Shear view of tunnel floor heave

图 3. 隧道底鼓模型剪力图

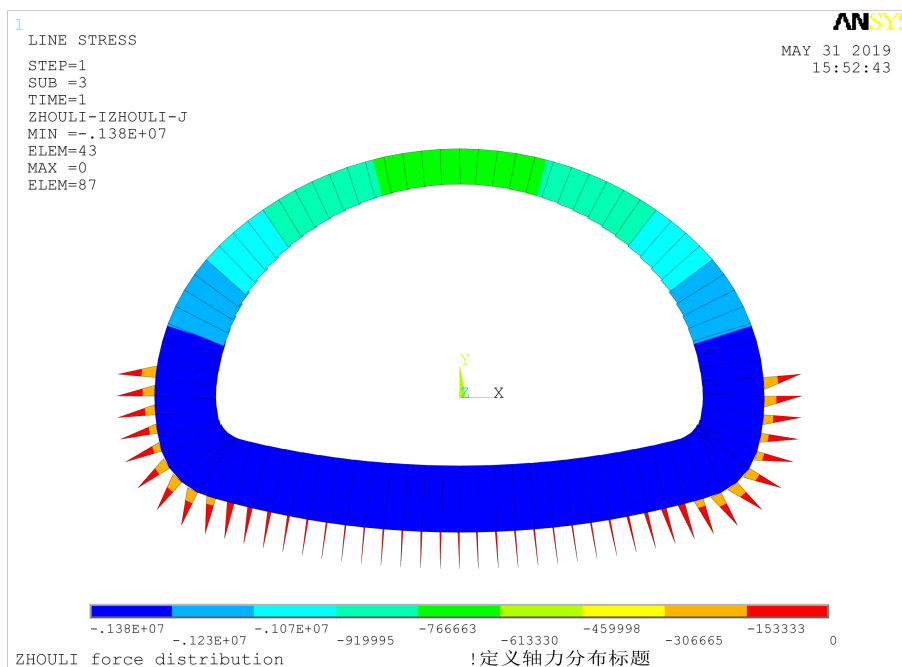


Figure 4. Axial view of tunnel floor heave

图 4. 隧道底鼓模型轴力图

5. 结论

根据数值模拟计算出的内力值及内力分布情况, 结合现场检测结果及钻孔取芯试验数据, 可得出以下结论:

1) 隧道底部衬砌主要受弯压作用较明显, 并且受力最大部位均在底部两侧, 底鼓发生处位于隧道路面两侧也反映了这一结论;

2) 相比正常仰拱, 带病害工作的仰拱对压力很敏感, 底鼓发生处仰拱存在质量缺陷, 导致缺陷附近现象明显。

综上所述, 数值模拟病害处隧道仰拱内力变化, 模拟结果与现场检测数据反映的病害较一致, 说明数值计算方法适用该处, 后面将进行更多隧道病害的模拟计算, 确定该数值计算方法的适用性。

参考文献

- [1] 汪洋, 唐雄俊, 谭显坤, 等. 云岭隧道底鼓机理分析[J]. 岩石力学, 2010, 31(8): 2530-2534.
- [2] 周森. 高速公路隧道仰拱底鼓破坏机理分析及处治措施[J]. 交通科技, 2013(5): 97-99+108.
- [3] 宋克志, 王梦恕. 围岩弹性抗力对隧道结构受力的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 79-82.
- [4] 赵建邦. 某高速公路隧道仰拱开裂处治设计方案研究[J]. 公路, 2014, 59(5): 147-149.
- [5] 李永永, 薛勇杰. 隧道路面病害成因分析与处治措施研究[J]. 山西交通科技, 2017(6): 77-79.
- [6] 时亚昕, 王明年. 隧道仰拱组合结构的现场试验研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(1): 70-74.
- [7] 陈柚州, 曾知法. 浅谈运营高速公路隧道路面病害检测方法——以奉云高速分界梁隧道左洞路面病害检测为例[J]. 建材与装饰, 2017(8): 226-227.
- [8] 杨俊泉. 隧道二维衬砌结构受力特征的数值模拟分析[J]. 内蒙古公路与运输, 2012(3): 14-15.
- [9] Tang, S.B. and Tang, C.A. (2012) Numerical Studies on Tunnel Floor Heave in Swelling Ground under Humid Conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **55**, 139-150.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.007>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org