

水工压力隧洞衬砌顶部脱空区对衬砌内力影响分析

石钰锋^{1,2},傅琼华¹,高江林¹,张晗秋²

(1. 江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029;2. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对水工隧洞衬砌顶部可能出现脱空的现象,在对其原因初步探析基础上,应用 ABAQUS 建立拱部衬砌存在脱空的隧洞模型,计算分析不同内水压力下,脱空区大小对衬砌内力的影响,并对其安全性进行评价。计算表明:(1)拱部衬砌背后脱空对其受力影响显著,无内水压力时,应力较之无脱空工况可增长数倍,内水压力为 0.5 MPa 时,弯矩较之无脱空工况增长 5.5 倍,与之对应,衬砌拱部安全系数降低显著;(2)衬砌拱顶安全系数随空洞及内水压力增大而减小,脱空区增大对应安全系数减幅较小,而内水压力增大对应安全系数减幅较大,衬砌安全对水压变化敏感。

关键词:有压隧洞;内水压力;空洞;数值分析

中图分类号:TV554.14

文献标识码:A

文章编号:1004-4701(2016)03-0157-05

0 引言

隧洞因地质、施工条件复杂易出现诸如混凝土不密实^[1]、衬砌背后空洞^[2-4]、衬砌贯穿裂缝及顶拱厚度不足^[5]等缺陷,隧洞承载性能及耐久性将受到不同程度影响,故对其进行研究显得尤为重要。汤雷等^[5]依托具体工程,在对其检测基础上进行深入分析,认为衬砌裂缝和顶拱厚度不足对衬砌安全性有明显影响且在修补加固后可恢复衬砌整体力学特性;刘伟明等^[6]利用有限差分软件分析高水压作用下泄洪洞与发电支洞交叉口位置管壁及围岩的应力、位移场及其变化规律,得出衬砌管壁在 0.78 MPa 内水压力作用下,管壁局部产生较大拉应力,将导致混凝土开裂;蔡晓鸿等^[7]根据水工隧洞结构与荷载特点,探讨了解决施工缺陷的计算模型与计算方法,强调水工隧洞回填灌浆和高压隧洞固结灌浆是保证衬砌和围岩联合承载的有效措施。其中针对缺陷对衬砌影响的研究相对较多,而对隧洞在内水压力变化情况下,缺陷对衬砌影响的研究较少。本文针对隧洞衬砌背后存在脱空的情况,拟对其进行初步分析,建立拱部衬砌背后存在空洞的计算模型,模拟不同大小的脱空区在内水压力 0 MPa ~ 0.5 MPa 情况下对衬砌受力的影响,并对衬砌安全性进行评价,以期揭示

其对隧洞结构影响规律。

1 空洞原因分析

现有隧洞产生脱空的原因大致可分为两类:(1)施工中由于超挖未按规范进行回填、拱顶灌注混凝土不饱满或振捣不足、泵送混凝土时压力损失、防水板松弛度控制不当等易导致拱顶甚至拱肩出现脱空^[4];(2)水工隧洞在运营阶段由于衬砌内外水头差而产生渗流,可能带走衬砌背后围岩中细颗粒,如此反复淘蚀,易在其背后形成脱空。鉴于此,隧洞背后脱空是一种较为常见的缺陷,其对水工隧洞的正常使用势必产生一定的不利影响,尤其是有压隧洞,下文通过数值模拟手段研究脱空对有压隧洞衬砌的影响规律。

2 数值模拟

2.1 简化模型

为分析空洞对水工隧洞衬砌的受力及安全性影响,假定如下案例:隧洞埋深 50.00 m,围岩等级为Ⅲ级,衬砌为厚 0.50 m 的 C25 混凝土,满足《水工隧洞设计规范》(DL/T595-2004)^[8]最小覆盖层厚度要求。内水压力 p 取值范围为 0 ~ 0.5 MPa,暂不考虑外水压力。

收稿日期:2016-05-16

项目来源:江西省博士后科研项目一等资助(编号:2015KY07);江西省青年科学基金项目(编号:20161BAB2016139);江西省自然科学基金项目(编号:20161BAB206159)。

作者简介:石钰锋(1985-),男,博士,讲师。

实际工程中衬砌背后脱空多位于拱部,故本文仅对此情况进行探讨。根据弹塑性力学原理,当计算边界超过隧洞直径3倍时,边界影响可忽略不计,模型上部边界取至地表,其他方向边界均取为距隧洞边缘20.00 m,详见图1所示二维计算模型。

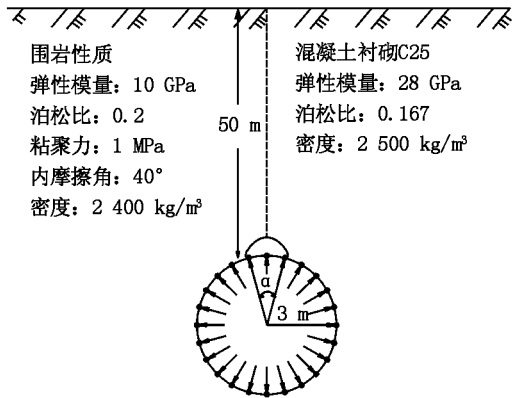


图1 拱部存在空洞的有压隧洞计算模型

2.2 工况拟定

本文讨论内水压力分别为0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa时,不同脱空大小(选用脱空区对应的圆心角 α 为指标)对衬砌内力及安全性的影响。拟定如表1所示计算工况。模型中围岩采用平面四边形实体等参单元,判定准则采用Mohr-Coulomb屈服准则,混凝土衬砌采用梁单元模拟,衬砌与围岩间接触为绑定约束。边界条件为:计算域左、右边界X方向位移固定,下边界Y方向位移固定。

表1 工况列表

工况	工况一	工况二	工况三
角度	无脱空	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$

注:此处圆心角 α 为脱空圆弧对应角度,脱空深度假定为40 cm^[9],见图1所示。

2.3 计算步骤

模拟计算分3步:(1)在隧洞开挖前,围岩在重力和历次地质构造作用下,形成初始地应力场;(2)在(1)步基础上,模拟隧洞开挖,在此拱部由于超挖而形成脱空;而后施作衬砌,计算衬砌和围岩的应力场和变形场;(3)施加内水压力,计算平衡。

3 计算结果分析

3.1 衬砌受力

图2、3为内水压力为0时,不同工况下衬砌轴力及弯矩图。此处轴力和弯矩符号规定为拉正压负。3种工况下,衬砌最大轴力均位于拱腰,其值分别为4.98 kN、4.74 kN、4.92 kN;而拱部衬砌轴力分别为0.68 kN、1.36 kN、3.88 kN,即工况三拱部衬砌轴力为工况一的5.7倍,可知脱空对衬砌最大轴力影响较小,但对该部位衬砌轴力影响显著。同时,3种工况下衬砌最大弯矩均位于拱部,其值分别为0.13 kN·m、0.25 kN·m、1.50 kN·m,即工况三拱部衬砌弯矩为工况一的10倍;同时衬砌其他部位弯矩变化较小,可知脱空对衬砌弯矩影响明显且影响范围主要为拱部脱空部位。由此可以

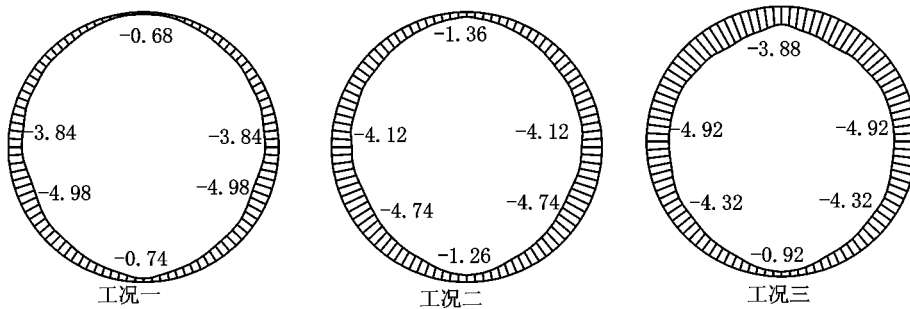


图2 衬砌轴力分布(单位:kN)($p=0$ MPa)

说明脱空对该部位衬砌受力影响显著,与衬砌轴力相比弯矩对脱空区大小更为敏感。

对上述3种情况在充水状态下进行衬砌内力计算,结果显示不同内水压力下衬砌内力变化规律基本类似,

以内压0.5 MPa下衬砌受力为代表进行规律分析(图4、5)。可知,衬砌在均匀内压作用下,由受压变为受拉(注:衬砌受力情况受到脱空范围以及衬砌与围岩的刚度比影响,由于手段有限,暂做此简化)。工况一,最大

轴力位于拱腰,其值为 545 kN;工况二、三最大轴力均位于拱顶,其值分别为 605 kN、705 kN,与工况一相比均有所增长,增幅分别为 11%、29.4%。而衬砌最大弯矩则受脱空区影响自 1.46 kN·m 增至 8.29 kN·m,位置则自拱腰上移至拱顶,同时脱空部位变化显著。此时,衬砌内力较接近于混凝土极限抗拉强度,即将出现

裂缝。由图 6 可知,工况二拱顶弯矩为工况一拱顶弯矩的 2.3 倍,而工况三则增长为 5.5 倍,可见脱空区增大将导致拱顶弯矩呈倍数增长。内水压力存在时,衬砌应力在脱空部位变化明显,弯矩显著增长,且易导致衬砌率先开裂、降低使用寿命,与刘伟明^[6]等研究结果相近。

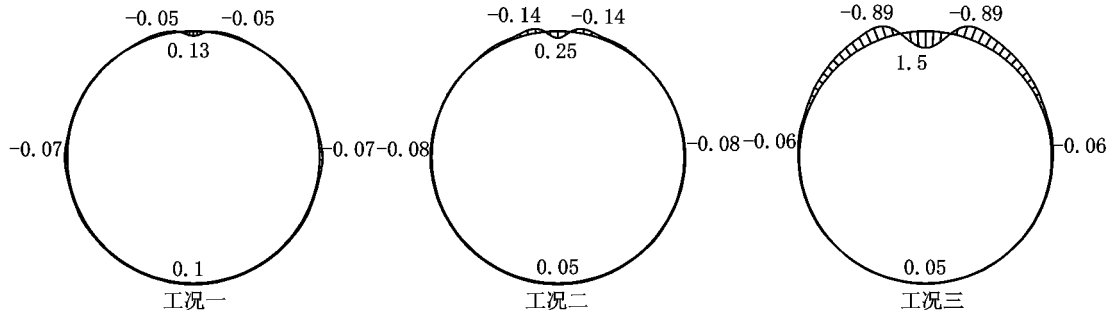


图 3 衬砌弯矩分布(单位:kN·m) (p=0 MPa)

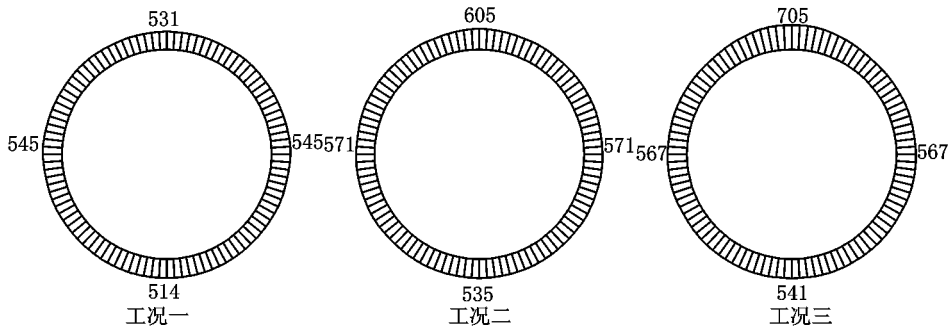


图 4 衬砌轴力分布(单位:kN) (p=0.5 MPa)

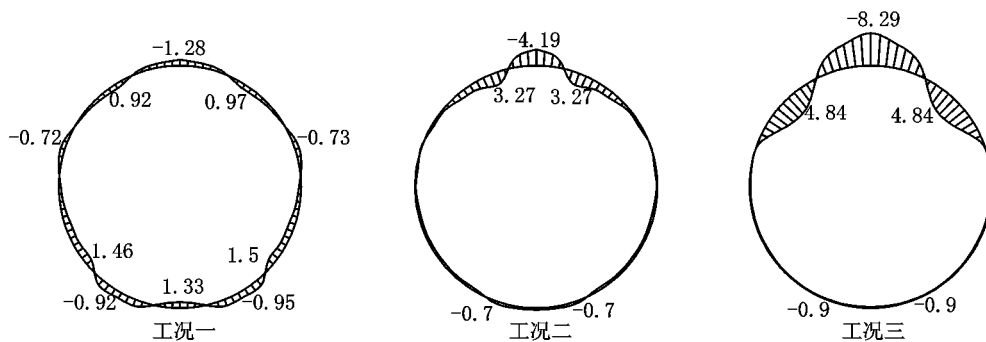


图 5 衬砌弯矩分布(单位:kN·m) (p=0.5 MPa)

3.2 衬砌安全性

为评价脱空区对衬砌安全性影响,此处采用容许应力法确定其安全系数,即 $\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \frac{f}{K}$,式中: σ_{\max} 为构件截面的最大计算应力; $[\sigma]$ 为材料的容许应力; f 为材料的标准强度; K 为安全系数。

图 7 为 3 种工况下衬砌最小安全系数随内水压力

变化曲线。可知,相同内水压力作用下,衬砌安全系数随脱空增大而减小,最大减幅达 13.8%;同一工况下,衬砌安全系数随内水压力增大而减小,其中内水压力由 0.1 MPa 增至 0.2 MPa 时,最大减幅达 50%。可见脱空对衬砌安全影响较大,建议对脱空部位进行回填注浆,使衬砌、注浆体、围岩充分密贴可确保衬砌受力均匀;内

水压力对衬砌安全影响显著,应确保内水压力在设计范围之内。若采用限裂设计,内水压力可放宽要求,具体大小还需进一步研究。需要说明的是,图中安全系数是

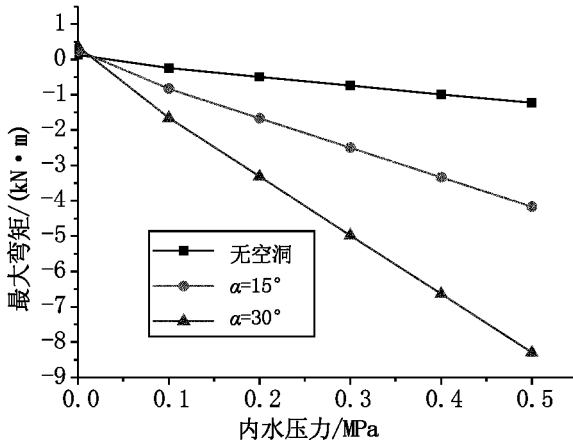


图6 拱顶弯矩随内水压力变化线

以衬砌混凝土限裂为标准计算得到,放空状态下衬砌轴力较小,其安全系数很大,故仅对充水状态下衬砌安全系数进行计算。

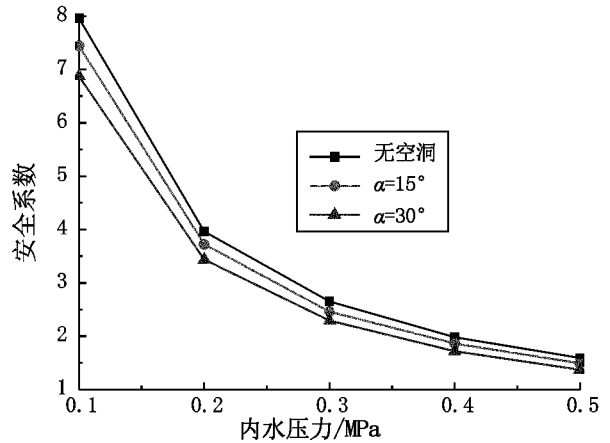


图7 安全系数随内水压力变化曲线

4 极限内水压力的探讨

混凝土的极限拉应变一般不超过 1.7×10^{-4} ,即衬砌的极限应变不能超过 1.7×10^{-4} 。由于开挖不规则,衬砌受力不均,以及温度、干缩、围岩蠕变等因素,衬砌允许的环向应变远小于 1.7×10^{-4} ,取允许拉应变为 5×10^{-5} [10]。本文衬砌采用梁单元模拟,可直接获取衬砌的最大拉应变。3种工况下最大拉应变依次为 3.96×10^{-5} 、 4.72×10^{-5} 和 4.99×10^{-5} ,均小于 5×10^{-5} ,故衬砌仍未开裂。经过后续计算结果表明,当 α 、 p 分别为 0° 、 0.62 MPa 、 15° 、 0.54 MPa 和 30° 、 0.52 MPa 时,衬砌最大拉应变均大于 5×10^{-5} ,即衬砌出现裂缝。当然,此计算结果是基于内水压力为面力,不考虑外水压力及内水外渗的假定下得出的,脱空对衬砌及围岩的真实影响有待于考虑衬砌裂缝及流固耦合的精细化模型的进一步研究。

5 结语与展望

(1)拱部衬砌背后脱空对其受力影响显著,无内水压力时,应力较之无脱空工况可增长数倍,内水压力为 0.5 MPa 时,弯矩较之无脱空工况增长 5.5 倍,与之对应,衬砌拱部安全系数降低显著。

(2)衬砌拱顶安全系数随脱空及内水压力增大而

减小,脱空增大对应安全系数减小幅度较小,而内水压力增大对应安全系数降幅较大,在拱部存在脱空时,衬砌安全对水压变化敏感。

(3)在该拟定工况下,以混凝土衬砌限裂为标准,拱部脱空所对应圆心角依次为 0° 、 15° 、 30° ,内水压力为 0.62 MPa 、 0.54 MPa 、 0.52 MPa 时,衬砌即产生裂缝。

上述观点均基于内水压力为面力,且不考虑衬砌开裂及外水压力的假定下得到的,脱空对衬砌及围岩的真实影响有待于考虑衬砌裂缝及流固耦合的精细化模型的进一步研究,本文权当对此问题的初步探讨。而后还应在明晰脱空特征的基础上,结合工程实际建立三维有限元模型对脱空下衬砌的影响分析,以便指导实际工程。

参考文献:

- [1] 张小明. 水工隧洞衬砌结构的缺陷检测及稳定性分析[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [2] 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.
- [3] 刘海京,夏才初,蔡永昌. 存在衬砌背后空洞的隧道计算模型研究及应用[J]. 公路隧道,2007,(4):41~45.
- [4] 杨吴礼,闵博,张素磊,等. 公路隧道衬砌背后空洞成因及规律研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014,(2):153~154.
- [5] 汤雷,傅翔. 水工隧洞施工缺陷对衬砌承载性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(2):74~79.
- [6] 刘伟明,王克忠,程青云. 水工压力隧洞内衬及围岩应力与变形数值计算[J]. 人民黄河,2012,34(7):103~105.

- [7] 蔡晓鸿,李清华,蔡勇斌,等. 水工隧洞结构设计若干关键问题剖析[J]. 江西水利科技,2010,36(4):262~266.
- [8] DL/T595~2004,水工隧洞设计规范[S].
- [9] 王高,黄宏伟,周应新. 空洞深度对隧道衬砌的影响研究[J]. 公路,2014,(6):333~336.
- [10] 侯静,胡敏云. 水工高压隧洞结构设计中若干问题的讨论[J]. 水利学报,2001,7:36~40.

编辑:张绍付

The influence analysis of void on the top lining of the pressure hydraulic tunnel to the lining stress

SHI Yufeng^{1,2}, FU Qionghua¹, GAO Jianglin¹, ZHANG Hanqiu²

(1. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: For the voids emerged behind the lining to the handful of pressure hydraulic tunnel, established a model by ABAQUS contains a void at top lining based on the exploration of the cause of cavity. In this paper, the internal force and displacement of lining was analyzed with varying the scope of the void at different internal hydraulic pressure, and evaluated the safety of lining under this condition. The computation shows that: (1) cavity behind the lining has a significant impact on the internal force of lining. When the internal hydraulic pressure was not existed, compared with none cavity condition, the axial force of lining may be changed several times. And with this condition, the bending moment of lining increases 5.5 times when the internal hydraulic pressure was 0.5MPa. At the same time, the safety factor of top lining decreased significantly. (2) The safety factor of top lining decreased with the cavity scope and internal hydraulic pressure increased. The reducing amplitude of safety factor was small when cavity scope increased, but it was big when internal hydraulic pressure increased. The safety of lining was sensitive to internal hydraulic pressure changed when top cavity existed.

Key words: Pressure hydraulic tunnel; Internal hydraulic pressure; Void; Numerical analysis

翻译:石钰锋

声 明

应作者要求,《江西水利科技》2016年第2期刊登的《鄱阳湖枯水期水体主要污染物时空分布差异(性)研究》一文项目来源为国家自然科学基金(编号41561002),作者为黄小兰,郭秋平,张婷,张建;特此声明!

《江西水利科技》编辑部

2016年6月22日