

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.08

高水压下衬砌背后空洞对结构受力的影响

徐 晨, 邓如勇, 崔 戈, 方 勇

(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 岩溶区隧道衬砌背后空洞与高透水压力的共同作用, 改变了衬砌的受力状态, 导致结构原本良好的受力状况恶化, 进而可能造成衬砌的开裂破损。采用 FLAC^{3D} 软件研究不同空洞位置对应力场分布、渗流场分布、二次衬砌内力的影响以及在高透水压力下拱顶空洞大小对二衬内力的影响规律。结果表明: 竖直应力场为主应力场时空洞周边会出现应力增大区和应力减小区; 空洞会使 3 倍空洞直径范围内外水压力明显折减; 无外水压力时空洞对二次衬砌弯矩的影响远大于轴力; 无论空洞存在与否, 存在何位置, 各测点内力均随水头高度的升高呈现线性变化, 拱底与拱脚内力大小及变化速率都远大于其他测点, 且空洞不同位置下内力随水压的变化速率有很大区别; 边墙空洞使衬砌结构处于偏压状态, 且随水头高度的升高偏压效应更加明显; 拱部弯矩随拱顶空洞大小线性特征明显。

关键词: 背后空洞; 外水压; 隧道衬砌; 内力特性; 数值模拟

中图分类号: U456.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0044-08

Influence of voids behind lining on mechanical behavior of the tunnel lining structure under a high water pressure

XU Chen, DENG Ruyong, CUI Ge, FANG Yong

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Under the interaction of voids behind the tunnel lining and the high permeable water pressure, the state of the tunnel lining forces in Karst areas is usually changed, which may lead to a bad tunnel lining forces state, and even cause cracking damage. This study was carried out relying on the FLAC^{3D}, which examines the effect of voids position on the stress field, seepage field and the mechanical behavior of the tunnel lining, and the influence law of internal force with a high permeable external water pressure when the voids is behind arch with different sizes. The results show that when the vertical stress field is the principal stress field, decrease and increase stress fields will appear in the surrounding void. The void can make the external water pressure obvious reduction within the range of three times the hole diameter distance. The influence of voids on bending moment of the secondary lining is greater than the axial force when there is no water pressure. No matter the void exists or not and no matter where the void exists, the internal force of lining is increased linearly. With the increasing water pressure, both the value and change rate of the internal force in the arch spring and invert are larger than those of other measuring points, and the change rate is different with voids in different positions. The void behind the side wall will make the lining structure under the bias state, and the higher the waterhead, the more obvious the bias effect. The bending moment increases linearly with the increasing arch hole size.

收稿日期: 2015-08-17; 修订日期: 2015-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51278422); 国家科技支撑计划课题资助(2012BAG05B03); 四川省青年科技基金项目资助(2012JQ0021)

第一作者: 徐晨(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事隧道施工力学行为等研究。E-mail: 1107176374@qq.com

Keywords: voids behind tunnel; water pressure; tunnel lining; mechanical behavior; numerical simulation

衬砌背后空洞主要包括由于超挖回填不实引起的初支背后空洞和模筑混凝土脱空引起的二衬背后空洞,是隧道工程中的主要病害之一。据统计隧道衬砌背后存在松散区和空洞比例高达 10% ~ 15%,且衬砌背后空洞呈现的比例、径向尺寸、标准差和变异性存在拱顶→拱腰→拱脚逐渐降低的规律^[1]。

隧道一个重要力学特征就是荷载-结构-材料的三位一体^[2]，“支护-围岩”的接触状态将决定两者能否共同发挥作用,特别是矿山法修建的隧道,一旦支护结构与围岩出现脱空现象,围岩无法提供充分的地层反力,影响了围岩的三次应力状态,会导致衬砌结构受力不均匀,应力集中现象明显,并且容易产生渗漏水、冻胀等次生灾害,危害结构安全^[3]。

岩溶区隧道的典型特征是隧道将受到应力场和渗流场的共同作用,隧道开挖导致两者之间相对静止的动态平衡遭到破坏,进而裂隙岩体中应力场与渗流场的耦合作用将极大地改变岩体中原始存在的应力状态^[4-5]。衬砌背后空洞与高透水压力的共同作用,使衬砌结构的受力状态更为复杂,进而可能造成衬砌的开裂破坏。

目前许多专家学者对衬砌背后空洞及岩溶地层渗流场分布展开了大量研究,张顶立等^[1]通过对 100 余座铁路运营隧道衬砌无损检测及统计分析,得出了单层衬砌与复合式衬砌背后接触状态及其分布规律。曲荣怀^[6]、张成平等^[7]通过数值模拟及室内模型试验等手段研究了单空洞与不同空洞组合作用下衬砌结构的破坏演化规律。许多学者还针对岩溶地层衬砌背后外水压力分布、高水压隧道渗流场变化规律及渗流渐进破坏机理展开了有益研究^[4,8-10]。现以重庆双碑隧道为依托,展开高水压下衬砌背后空洞对结构受力的影响研究,以期为隧道衬砌背后存在空洞时结构的安全评估与灾害治理提供参考。

1 依托工程概况

双碑隧道位于重庆市沙坪坝区,穿越中梁山连接主城区与大学城。双碑隧道为双向 6 车道,跨度为 15.48 m,高 11.45 m,双碑隧道沿线穿越的地层为三叠系下统雷口坡组 (T_2l) 和嘉陵江组 (T_1j),岩性以泥质岩、灰岩和砂岩为主,隧道穿越地层围岩条件复杂,涵盖Ⅲ~Ⅴ级围岩,地质剖面图如图 1 所示。隧址区域地下水分布广泛,泉眼密布,节理、岩溶漏斗发育,且

分布不均,地表连通性较好,隧道预计平时涌水量 10 592 m³/d,雨季涌水量 26 480 m³/d。静水压力 1.80 ~ 2.00 MPa,隧道施工遇高压涌水、突泥风险性较高,运营期间承受较大静水压力,属于静水压力较大的隧道。

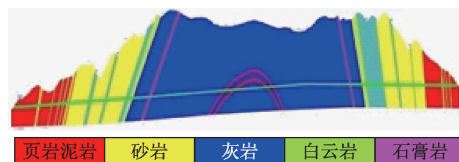


图 1 重庆双碑隧道地层剖面图

Fig. 1 Geological section map of the Shuangbei tunnel of Chongqing

2 研究方法

2.1 研究方案

衬砌背后空洞类型多种多样,如岩溶空洞、超挖回填不实、支护脱空引起的空洞,这些空洞形状各异,对隧道结构的影响本质都是衬砌与围岩产生了脱离区,隧道断面设计图及典型空洞如图 2 所示。

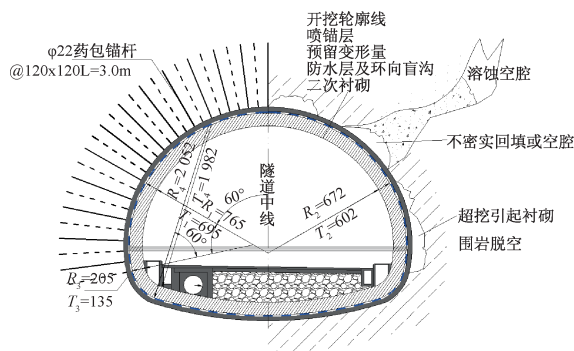


图 2 双碑隧道断面设计图与典型空洞图示

Fig. 2 Profile of the Shuangbei tunnel and typical voids distribution

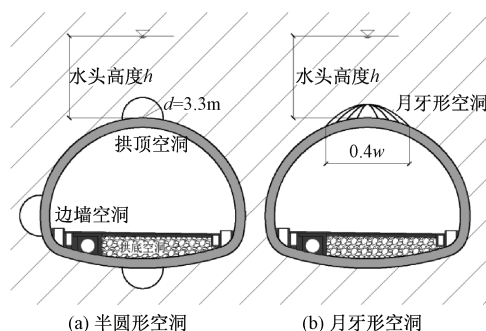


图 3 模拟空洞方案

Fig. 3 Voids distribution

基于拱形空洞围岩自承稳定性较好,选取半圆形空洞为研究对象,分别考虑无空洞、拱顶空洞、边墙空洞、拱底空洞4种情况,空洞直径为3.3 m(0.2W,W为隧道开挖宽度),按照0,10,20,30 m共4种水头高度、总计16种工况进行模拟分析(图3a);超挖回填不实引起拱顶空洞最为常见,所以研究拱顶空洞规模对衬砌结构受力的影响也十分必要。假定空洞形状为月牙形,空洞中心高度取1 m,跨度取0.1W,0.2W,0.3W,0.4W,对30 m水头高度时结构受力特性进行研究(图3b)。

2.2 模型建立

2.2.1 模型尺寸

采用FLAC^{3D}计算模型中,根据圣维南定律,模型宽度取135 m,隧道埋深100 m,模型底部边界与隧道拱底的距离为40 m。

2.2.2 模型参数

根据双碑隧道地质勘查资料,基本物理力学参数见表1。由于本文旨在研究隧道排水系统失效条件下,二次衬砌结构在水压力作用下的受力特性,因此未对排水系统进行模拟,有限元模型见图4。

2.2.3 边界条件

模型顶部为自由边界,其余施加径向约束;左右以及底部边界采用FLAC^{3D}默认的不透水边界条件;岩溶空洞边界采用自由透水边界;隧道开挖后,隧道开挖部分的边界采用自由透水边界;水面以上岩体固定孔隙水压力为零。

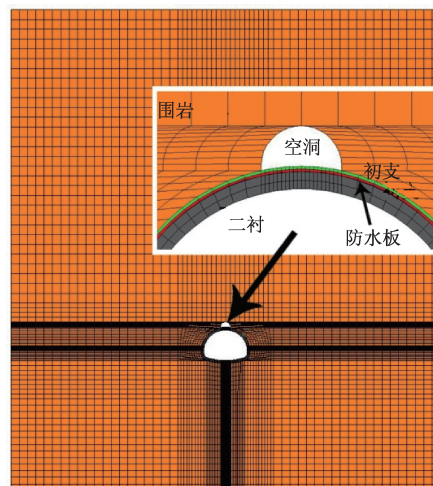


图4 有限元模型

Fig. 4 Numerical analysis of the tunnel

表1 隧道基本物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the tunnel

名称	厚度/cm	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	内聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	抗拉强度 / MPa	渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	孔隙率 n
围岩(IV)		21	3	0.32	2	38	2.5	$2(10^{-3})$	0.1
喷射砼(C25)	28	22	23	0.2	2.5	45	1.3	$1(10^{-6})$	0.05
二衬(C30)	70	25	31	0.18	3.2	50	2.2	$1(10^{-7})$	0.03
防水层(EVA)	0.6	9.6						$4(10^{-9})$	0.005

2.2.4 监测项目

数值模拟采用上下台阶法开挖,分别对12个测点的外水压力以及内力(轴力、弯矩)进行量测,监控点的布置如图5所示。

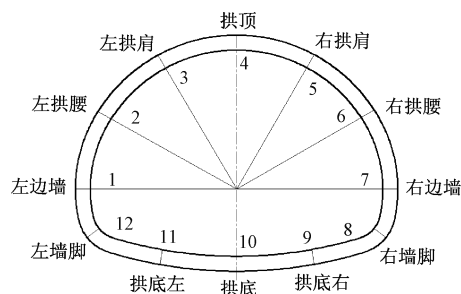


图5 水压力和结构内力监控点

Fig. 5 Layout of water pressure and internal force monitoring points

3 结果分析

3.1 空洞存在对围岩应力分布的影响

无水压作用下,空洞存在明显改变了围岩应力场的分布,最大主应力场分布如图6所示,竖向应力和水平应力分布如图7所示。

在自重应力场为主应力场的情况下,隧道开挖、支护引起围岩应力的三次应力状态,最大主应力场大致呈上下小、左右两侧大的特点(图6a);拱顶空洞改变了上覆荷载的传递路径,上覆围岩应力释放,空洞上方围岩竖向应力减小,水平应力增大,最大主应力增大,荷载向两侧传递,边墙区域应力增大。拱顶空洞对仰拱区域的应力场影响较小(图6b、图7c,d);边墙空洞的存在减弱了空洞区域围岩对衬砌变形的约束,改变

了水平应力场的分布,造成空洞区衬砌逐渐向外变形,同侧边墙处围岩最大主应力相对无空洞时增加了近 30%,而对侧增加了近 40%,空洞上下围岩最大主应力均有一定幅度的减小,同时围岩应力场分布呈非对

称性,衬砌结构处于偏压荷载作用(图 6c、图 7e,f);拱底空洞主要影响范围在仰拱区域,空洞拱效应产生切向压紧效应,下方围岩最大主应力增大。拱底空洞基本不会改变拱部围岩应力场分布(图 6d、图 7g,h)。

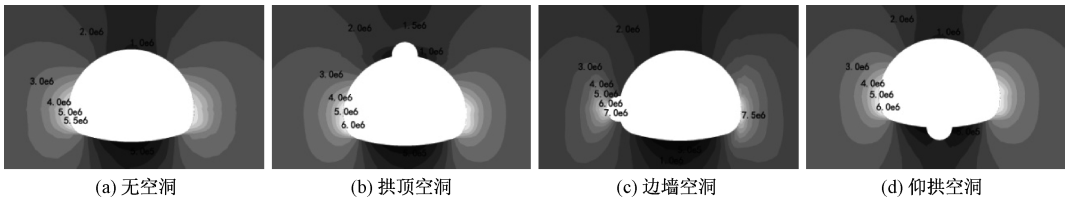


图 6 不同空洞位置围岩最大主应力场等值线图
Fig. 6 Contour map of the maximum principal stress field of the surrounding rock

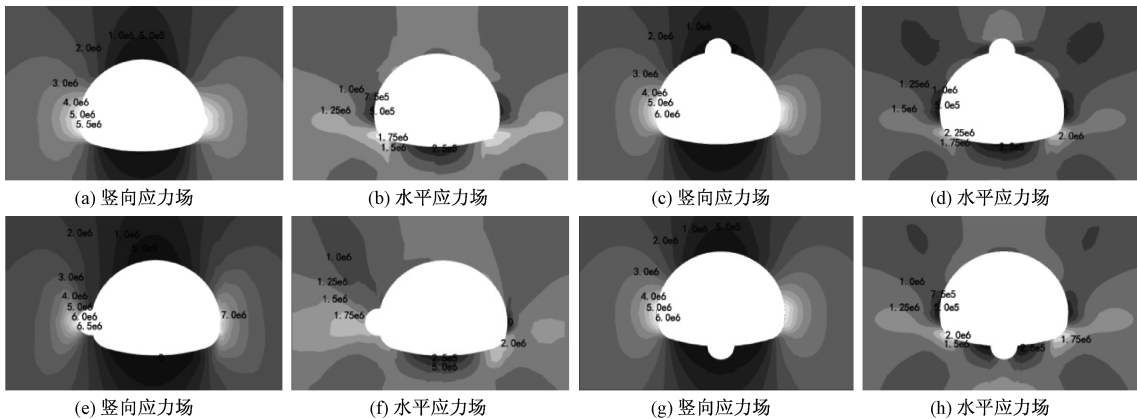


图 7 不同位置空洞围岩竖向应力与水平应力场等值线图
Fig. 7 Contour map of the vertical stress and horizontal stress field of the surrounding rock

3.2 空洞存在对水压的折减作用

破碎充水型岩体隧道如果采用全封堵的防水结构,由于渗流作用,作用在二次衬砌的外水压力有一定的折减,折减系数一般在 0.8~0.9 之间。而背后空洞的存在,改变了水的渗流途径,使得空洞附近二衬外水压力显著降低,其影响半径约为 3 倍的空洞直径。不同位置空洞对水压的折减如图 8 所示。

隧道开挖后衬砌作为不透水结构改变了地下水的排泄途径,围岩内渗流场也相应发生了较大的变化,拱顶的水压折减要大于拱底;当拱顶存在空洞时,二次衬砌各测点的折减系数以隧道中线呈“V”型分布,即拱顶水压折减明显,折减系数 0.35,空洞周边拱肩、拱腰水压折减也较为明显;当仰拱底部出现空洞时,相对于无空洞各位置测点水压皆有折减明显,尤其是仰拱区域折减系数均小于 0.5;而空洞存在于边墙时,水压折减效应具有明显的非对称性,即对空洞一侧水压折减明显,尤其是边墙附近,折减系数达到 0.22,而另外一侧影响不大,此时衬砌结构承受外水压力的偏压作用。

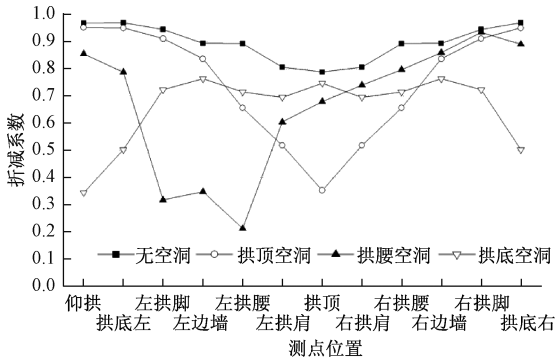


图 8 空洞对水压的折减效应
Fig. 8 Voids reduction effect on water pressure

3.3 空洞位置对二衬受力的影响

3.3.1 无水压下空洞存在对衬砌受力的影响

如图 9 所示,隧道开挖后部分应力释放,且施做初支能较大程度地改善围岩的自承能力,使二次衬砌所受的接触压力较小。空洞存在不会改变衬砌轴力的分布形态,各位置轴力变化皆小于 10%;而对弯矩影响较大。首先无空洞时拱顶承受较大内弯矩,拱腰边墙

承受外弯矩,是典型的大断面隧道(矢跨比较小)的受力特征,竖向荷载作用下衬砌向两侧变形,两侧围岩提供弹性抗力。

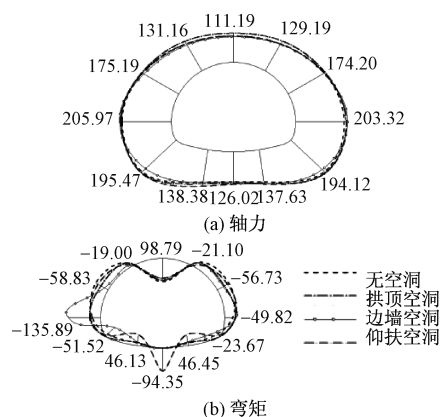


图9 无水压下不同空洞位置衬砌内力分布

Fig. 9 Internal force of the tunnel lining with different void positions

当拱顶存在空洞时,拱顶围岩应力释放,竖向荷载减小,所以内弯矩减小,同时拱腰、边墙位置由于拱顶处松散围岩的挤压荷载增大,能够产生较大的弹性抗力,限制拱腰、边墙向隧道外变形的趋势,故弯矩减小;边墙存在空洞时,结构弯矩非对称性

明显,且空洞存在一侧,弯矩形态特征发生突变,边墙外弯矩由 $34.97 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 增大至 $135.89 \text{ kN} \cdot \text{m}$,扩大了 3.88 倍,而与空洞相邻的测点拱腰外弯矩由 $58.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 减小至 $17.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$,减小了 70%,拱脚位置内弯矩由 $12.61 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 扩大至 $51.52 \text{ kN} \cdot \text{m}$,增大了 4 倍;边墙空洞对另外一侧弯矩影响较小;拱底空洞的存在主要影响仰拱的内力分布,与边墙空洞类似,空洞的存在使空洞区域衬砌失去围岩抗力,而发生向外变形,同时强迫空洞相邻区域逆向变形。

衬砌背后空洞的存在,一方面使空洞区域围岩抗力缺失或者减小,径向荷载减小,衬砌结构会有向外侧变形的趋势,而另一方面,由于空洞区域结构变形而形成空洞周围围岩反作用力增大,衬砌结构有向内变形的趋势。

3.3.2 外水压下空洞存在对衬砌受力的影响

如果二次衬砌只作为支护结构的安全储备,则二衬只承担部分围岩压力,但必须承担全部的外水压力。在高水压地层,空洞对衬砌结构受力产生影响,主要是由于改变了外水压的分布。

为研究高透水压力下不同空洞位置对衬砌结构受力的影响,在 0, 10, 20, 30 m 水头作用下的二次衬砌内力如图 10 所示,图中数值为 30 m 水头内力值。

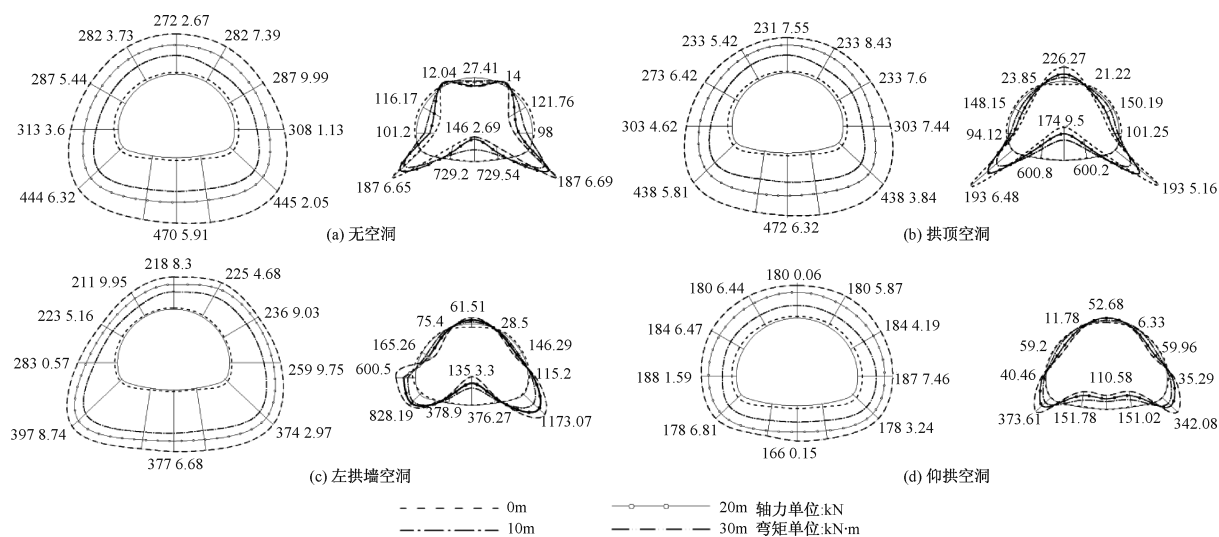


图10 外水压作用下不同空洞位置衬砌内力分布

Fig. 10 Internal force of the tunnel lining with different void positions under the water pressure

30 m 水头作用下,无空洞时,轴力分布由拱顶到拱底逐渐增大,最大最小轴力比为 1.74;空洞在拱顶,上半断面测点轴力有了不同程度的减小,且减小幅度拱顶 > 拱肩 > 拱腰 > 边墙,而对仰拱测点无影响,是由于拱顶空洞对水压的折减效果所致,最大轴力位于拱

底,最小轴力位于拱顶,最大最小轴力比为 2.04;当边墙出现空洞,衬砌偏压明显,空洞侧轴力小于另外一侧,最大轴力位于左拱脚,最小轴力位于左拱肩,最大最小轴力比为 1.88;拱底存在空洞,对于高水压隧道结构而言,有一定的泄水作用,水压均有所折减,所以

轴力较小,且分布形态呈现边墙大,拱部次之、仰拱最小的特点,最大最小轴力比为 1.13,轴力分布较为均匀。

而高水头作用下,弯矩的形态特征明显区别于无水压状态,拱顶、拱底、拱腰、边墙承受内弯矩,拱肩、拱脚承受外弯矩,且拱底、拱脚所受弯矩较大,为衬砌结构的最危险截面;当拱顶出现空洞时,拱顶内弯矩变成外弯矩,仰拱区域内弯矩变大;左边墙出现空洞时,左右拱脚外弯矩范围同时增大,且左边墙由内侧受拉变为外侧受拉,且变化幅度较大,由于结构左右两侧不均匀受力,结构处于明显的偏压状态;仰拱存在空洞时,仰拱内侧受拉区域范围扩大,且拱底弯矩小于仰拱两侧弯矩。

30 m 水头作用下,左半断面测点偏心距如表 2 所示,拱顶出现空洞会使各点的偏心距均有所增大,边墙空洞使同侧拱脚偏心距减小,而其他位置偏心距均增大,拱底空洞由于改变了围岩内渗流场,起到了泄水作用,水压分布也较为均匀,外水压的环箍作用使偏心距较小。

表 2 30 m 水头作用下左半断面测点偏心距

Table 2 Structure eccentricity of the tunnel lining under the water pressure of 30 m

项目	拱底	左拱脚	左边墙	左拱腰	拱顶
无空洞	0.31	0.42	0.01	0.04	0.01
拱顶空洞	0.38	0.44	0.02	0.05	0.10
边墙空洞	0.36	0.21	0.26	0.07	0.03
仰拱空洞	0.07	0.19	0.02	0.03	0.03

3.3.3 不同空洞位置随水压升高内力变化

不同空洞位置下二次衬砌轴力随水头高度变化曲线如图 11 所示。轴力随水头高度增加线性增大,且拱脚、拱底轴力数值及线性增大速率均远大于其他测点,其他测点的离散性也相对较小;当边墙出现空洞时,轴力分布及变化规律呈现非对称性,空洞侧拱脚、边墙轴力大于对侧;以轴力随水头高度变化的平均速率进行分析,无空洞时最大,其次是拱顶、边墙,拱底速率最小,且空洞位于拱底时,轴力受水压力的影响最小,各测点轴力随水压力增大的变化速度基本一致,轴力的差异最小。

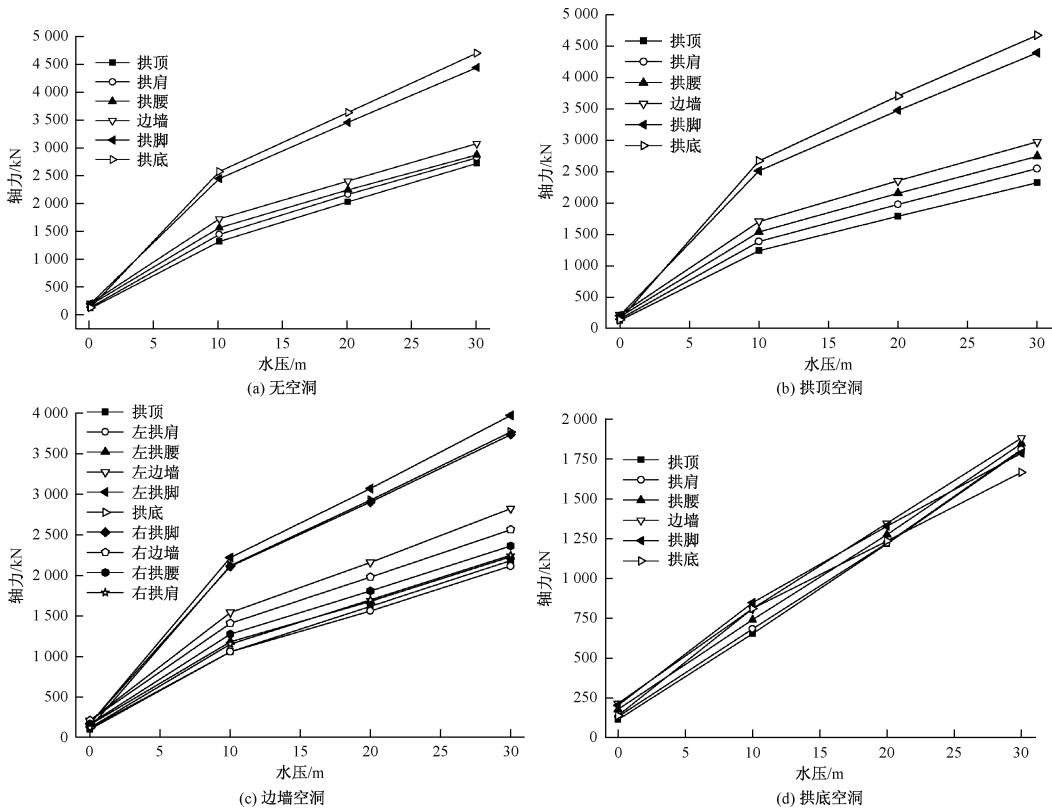


图 11 轴力与水压力关系曲线

Fig. 11 Relationship between the axial force and water pressure

空洞出现在不同位置二次衬砌弯矩随水头高度变化如图 12 所示。无论空洞存在与否,存在何位置,各

测点弯矩均随水头高度的升高呈现线性变化,拱底与拱脚测点弯矩大小及变化速率都远大于其他测点;当

拱顶出现空洞时,水压升高,拱顶位置弯矩线性增大显著,其他位置与无空洞时差异不大;边墙出现空洞时,弯矩随水压变化呈现非对称性,空洞一侧拱脚弯矩大小和线性速度均小于对侧,而同侧边墙弯矩随水头高度增大速度则明显高于对侧边墙;拱底空洞对水压折减效应明显,所以各测点弯矩数值较小,且拱底弯矩线

性增大速度相对较小,同时各测点弯矩数值的离散性最小;以弯矩随水头高度变化的平均速率进行分析,拱顶最大,其次是无空洞、边墙空洞,拱底空洞各测点的弯矩随水压变化的影响最小,各测点弯矩的差异也最小。

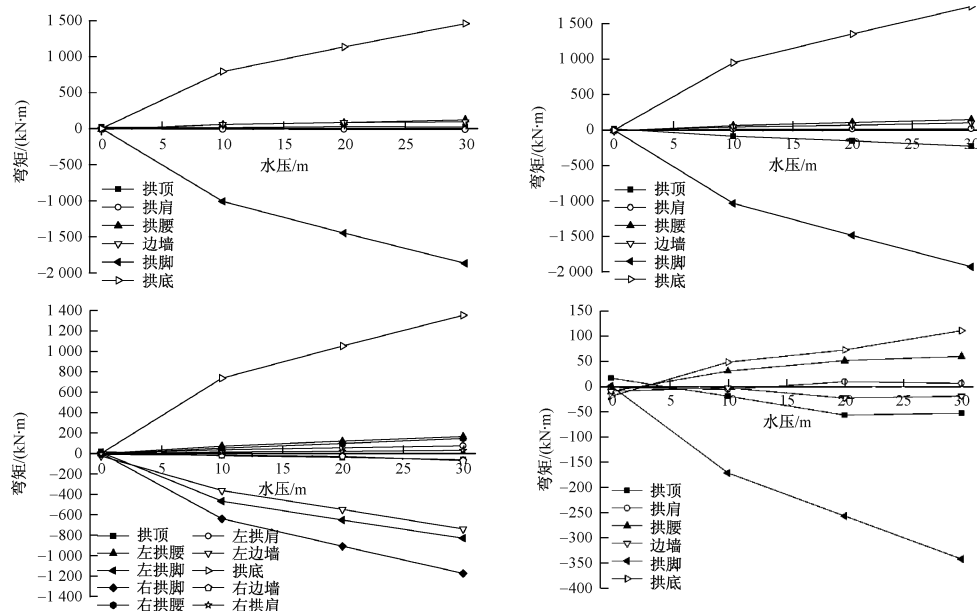


图 12 弯矩与水压力关系图

Fig. 12 Relationship between the bending moment and water pressure

空洞的存在不会改变二次衬砌内力随水头高度增大呈线性变化的趋势,且拱脚及拱底位置始终为受力最不利位置;边墙空洞使衬砌结构处于偏压状态,且随水头高度的升高偏压效应更加明显。

3.4 拱顶空洞大小对二衬受力的影响

由于衬砌内力的对称分布,所以只取左侧测点分析,轴力、弯矩随空洞大小变化如图 13 所示。

拱顶空洞的存在均使各测点轴力有不同程度的增大,当空洞大小为 $0.1W$ 时,从拱顶至拱底轴力增长 10.0% 至 23.9% 不等,且拱顶→拱底增大幅度逐渐增大;不过空洞范围增大,各测点轴力逐渐减小,但减小幅度较小,从 $0.1W$ 至 $0.4W$ 减小范围在 2.1% 至 6.3% 不等,空洞大小对结构轴力影响较小。

拱顶空洞的存在同样使各测点弯矩有较大幅度增大,且分布形态也有所改变,拱顶、边墙由内弯矩变为外弯矩,拱肩由外弯矩变为内弯矩,原因是空洞存在改变了衬砌结构的变形特征,而数值上拱顶位置变化最为明显,增加了近 9 倍,拱底弯矩变化最小,增加了 61.4% ;随着拱顶空洞范围的增大,拱部测点(拱顶、

拱肩、拱腰、边墙)弯矩呈增大趋势,尤其是拱顶与拱肩位置,线性特征明显。而对仰拱(拱脚、拱底)影响较小,变化幅度在 4.6% ~ 7.3% 之间。

4 结论

(1)在自重应力场为主应力场的情况下,空洞改变了上覆荷载的传递路径,改变了隧道-围岩的三次应力状态;空洞的存在会在空洞周围形成了应力减小区和应力增大区;边墙空洞围岩应力场分布呈非对称性,衬砌结构处于偏压荷载作用。

(2)背后空洞的存在,改变了水的渗流途径,使得空洞附近二次衬砌外水压力显著降低,其影响半径约为 3 倍的空洞直径,而空洞存在于边墙时,水压折减效应具有明显的非对称性,衬砌结构承受外水压力的偏压作用,且随水头高度的增加偏压效应更加明显。

(3)无水压时空洞存在对二次衬砌轴力的影响较小,对弯矩影响较大;一方面空洞区域围岩抗力缺失或减小,衬砌结构会有向外侧变形的趋势,另一方面,由于空洞区域结构变形而形成空洞周围围岩作用应力

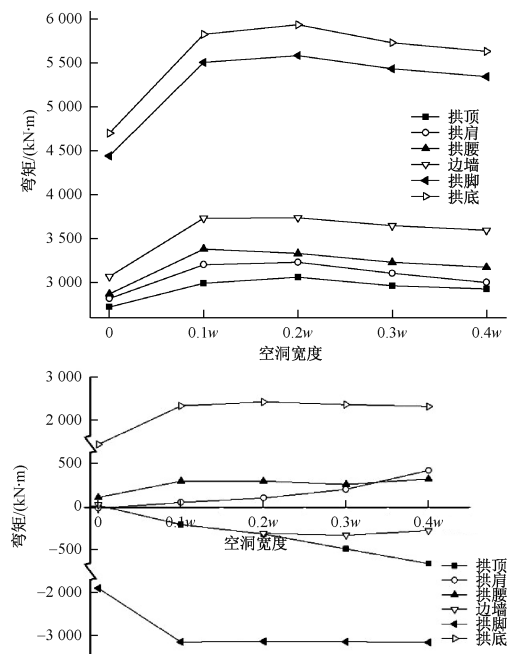


图13 内力与拱顶空洞大小关系曲线

Fig. 13 Relationship between the internal force and vault voids size

增大,衬砌结构有向内变形的趋势。

(4)无论空洞存在与否,存在位置如何,各测点弯矩均随水头高度的升高呈现线性变化,拱底与拱脚测点弯矩大小及变化速率都远大于其他测点;空洞存在改变了内力随水头高度的变化速度,对弯矩变化的影响为拱顶空洞>无空洞>边墙空洞>拱底空洞,空洞位置对轴力的影响为无空洞>拱顶>边墙>拱底。

(5)随着拱顶空洞范围的增大,结构轴力影响较小,而拱部测点(拱顶、拱肩、拱腰、边墙)弯矩呈增大趋势,尤其是拱顶与拱肩位置,线性特征明显,而对仰拱(拱脚、拱底)影响较小。

参考文献:

- [1] 张顶立,张素磊,房倩,等. 铁路运营隧道衬砌背后接触状态及其分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(2):217-224. [ZHANG D L, ZHANG S L, FANG Q, et al. Study of contact state behind tunnel lining in process of railway operation and its analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(2):217-224. (in Chinese)]
- [2] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京:人民交通出版社,2003. [GUAN B S. Main Points for Design of tunneling engineering [J]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)]
- [3] WANG Jifei, HUANG Hongwei, XIE Xiongyao, et

al. Void-induced liner deformation and stress redistribution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014,40(12):263-276.

- [4] 张明德. 岩溶隧道围岩渗流场分布和衬砌水压力特征研究[D]. 北京:北京交通大学,2008. [ZHANG M D. Study on the characteristics of seepage field and water pressure on tunnel lining in Karst ground [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)]
- [5] 付金伟,朱维申,张敦福,等. 渗流影响下岩石损伤和渐进破裂演化过程的数值试验研究[J]. 水文地质工程地质,2015,42(1):53-59. [FU J W, ZHU W S, ZHANG D F, et al. Numerical study of the damage and progressive failure process of rocks under the effect of seepage[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015,42(1):53-59. (in Chinese)]
- [6] 曲荣怀. 衬砌背后空洞对隧道围岩压力分布规律的影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2014. [QU R H. Study on the influence laws of voids behind lining on the distribution of tunnel surrounding rock pressure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)]
- [7] 张成平,冯岗,张旭,等. 衬砌背后双空洞影响下隧道结构的安全状态分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(3):487-493. [ZHANG C P, FENG G, ZHANG X, et al. The effect of double voids behind the lining on safety state of tunnel structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(3):487-493. (in Chinese)]
- [8] 高新强. 高水压山岭隧道衬砌水压力分布规律研究[D]. 成都:西南交通大学,2005. [GAO X Q. Study on the distribution rule of water pressure upon lining in subject to high hydraulic pressure mountain tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese)]
- [9] 罗明明,肖天昀,陈植华,等. 香溪河岩溶流域几种岩溶水系统的地质结构特征[J]. 水文地质工程地质,2014,41(6):13-19. [LUO M M, XIAO T Y, CHEN Z H, et al. Geological structure characteristics of several karst water systems in the Xiangxi River Karst Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014,41(6):13-19. (in Chinese)]
- [10] 魏加华,郭亚娇,王荣,等. 复杂岩溶介质地下水模拟研究进展[J]. 水文地质工程地质,2015,42(3):27-34. [WEI J H, GUO Y J, WANG R, et al. Recent advances in simulation approaches of the complex karst medium [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015,42(3):27-34. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞