

DOI: 10.11779/CJGE201607009

隧道周边不同位置径向裂纹对隧道围岩稳定性影响规律的研究

周 磊, 朱哲明*, 刘 邦

(四川大学建筑与环境学院能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 在爆炸载荷作用下, 隧道周边会产生大量的径向裂隙, 研究在双轴压缩荷载作用下不同位置处径向单裂纹直墙拱形隧道的破坏规律, 分两种情况进行研究, 一种是裂纹在隧道拱肩或拱顶部位, 以拱顶半圆圆心为基点的径向裂纹; 另一种是裂纹在隧道底板或边墙部位, 其裂纹面与隧道底板、边墙成 135° 夹角。采用模型试验和数值模拟方法进行研究, 模型试验采用水泥砂浆制作隧道模型, 数值模拟计算隧道模型裂纹尖端应力强度因子和应力云图, 模拟结果与试验结果对比较吻合。结果表明: ①裂隙会降低隧道整体的稳定性以及抗压强度; ②当裂纹在隧道拱肩或拱顶部位时, 裂纹倾角 $\theta=45^\circ$ 时, 隧道的稳定性最差, 最容易破坏; ③当裂纹在隧道底板与边墙交界处时, 隧道最容易破坏, 整体稳定性最差。

关键词: 隧道; 应力强度因子; 数值模拟; 径向裂纹

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)07-1230-08

作者简介: 周 磊(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石断裂力学的研究。E-mail: zhoulitkx@126.com。

Influence of radial cracks on stability of surrounding rocks at different locations around tunnel

ZHOU Lei, ZHU Zhe-ming, LIU Bang

(Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Disaster Mechanics, School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to investigate the failure laws of straight wall tunnel with a single radial crack under biaxial compression load, two cases are studied. One is the crack located in the arch shoulder to the vault with the vault semicircle center as the basis of radial crack. The other is the crack located in the tunnel bottom or arch wall, and the angle between the crack surface and the tunnel wall is fixed at 135° . In the experiment, using model tests and numerical simulations, the test samples of cement mortar are investigated. The stress intensity factor and the stress chart of the crack tip are numerically calculated, and the simulated results are in good agreement with the experimental ones. The results show that: (1) The crack reduces the stability of the tunnel and the compressive strength. (2) When the radial crack is located on the arch shoulder or the vault with angle of 45° , the stability of the tunnel is the worst, and it is most easily damaged. (3) When the crack is located at the junction between the arch bottom and the arch wall, the tunnel is the most vulnerable, and the overall stability is the worst.

Key words: tunnel; stress intensity factor; numerical simulation; radial crack

0 引言

隧道爆破掘进过程中, 在爆炸载荷作用下隧道周边往往会产生大量的径向裂隙, 这些径向裂隙的存在会严重影响隧道围岩的稳定性和隧道工程的使用寿命。在隧道使用过程中会受到自重应力场和构造应力场作用, 此时裂隙会沿各个不同方向不断扩展; 而隧道周边不同位置处的裂隙, 对隧道围岩的破坏形式及规律的影响也有所不同, 因此研究在双轴压缩荷载作用下隧道周边不同位置处裂纹对隧道围岩破坏规律的

影响, 对隧道的设计以及初期支护等具有较大的实际意义。

对于隧道围岩的稳定性以及破坏规律, 国内外众多专家及学者做了很多研究。Suorineni 等^[1]和 Bruneau 等^[2]指出断层节理面对隧道稳定性有很大影响, 许多

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074109); 四川省科技计划项目(2014JY0002); 油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助项目(PLN1505)

收稿日期: 2015-06-28

*通讯作者

地下结构的失稳破坏都与岩体周围的断层分布有关。Jia 等^[3]研究了当软弱结构面倾角 θ 为 45° 或者 135° 时, 围岩破坏的主要部位从拱肩部位开始, 并且沿垂直结构面向上扩展。在一定条件下, 具有水平层状结构面的时候, 隧道侧墙、底板所受的应力较大。康勇等^[4]通过数值模拟试验研究认为隧道围岩开裂是从拱顶开始, 然后左右拱肩裂纹出现及扩展, 最后拱肩深部裂纹破坏。李占海等^[5]认为隧道围岩的初始损伤与最后失稳破坏所能够承受的载荷大小与侧压力系数 λ 相关。当 λ 较小时, 初始的损伤位置为隧道墙脚、拱肩以及拱顶; 当 λ 较大时, 初始损伤主要在隧道拱顶部位, 以拱顶的拉伸形式破坏。Wang 等^[6]采用光弹性试验对隧道围岩中裂纹尖端的应力强度因子进行了研究, 试验结果表明, 在围岩压力一定时, 裂纹倾角为 45° 或 135° 情况下, 为最不利裂纹且裂纹尖端应力强度因子最大。李永乾等^[7]研究了不同主应力方向作用下, 隧道的破坏大多首先从隧道的拱肩处开始, 然后沿主应力方向发展, 拱顶和边墙也会出现裂纹, 且裂纹扩展方向存在离散性。李治国等^[8]研究了纵向裂纹对隧道衬砌承载力的影响, 总结了裂纹的位置以及深度和隧道围岩抗力对隧道衬砌结构安全系数的影响。Zhu 等^[9]认为直拱形隧道拱肩处裂纹会降低隧道的整体稳定性及强度。当在拱肩处裂纹与隧道边墙形成 θ 为 135° 时, 隧道的整体稳定性及强度降低最快。Chu 等^[10]基于虚拟应力法计算了多层双向圆形隧道的破坏形式, 研究了圆形隧道围岩的破坏的主要因素。Zhou 等^[11]研究了圆形隧道在不同侧压力作用下的破坏形式, 隧道围岩周围发生岩爆的位置随侧压力变化而变化。郑颖人^[12]采用模型试验与数值极限分析方法得出浅埋拱形隧洞的破坏来自拱顶, 深埋拱形隧洞的破坏来自侧壁。彭建兵等^[13]对马蹄形隧道 40° 斜穿地裂缝进行了研究, 认为整体式马蹄形隧道衬砌结构 40° 斜穿地裂缝时, 破坏模式为扭转、弯曲剪切破坏, 破坏形式不对称。于海龙等^[14]对大断面公路隧道的断面形式进行研究后指出 3 心圆拱断面形式的圆拱部分会承受较大的压应力, 隧道墙脚处局部应力集中较大, 若在墙脚处加设仰拱, 可使隧道结构承载能力提高 10% 左右。这些研究很大程度上推动了人们对隧道破坏机制的认识, 促进了国内国际隧道工程建设的发展。但是, 隧道所处的地质条件非常复杂, 地质状况千变万化, 本文选择了裂纹位置对隧道围岩稳定性的影响规律进行研究。

在数值模拟方面, Zhu 等^[15-20], Zheng 等^[21]采用复变函数求解裂纹尖端的应力强度因子, 给出了不同条件下裂纹尖端应力强度因子的边界配位计算法则, 提出了单轴荷载作用下裂纹材料的破坏准则, 在裂纹存

在的情况下可以简化为最大剪应力准则。Huang 等^[22]通过模型试验与有限元模拟分析研究了软弱夹层对隧道稳定性的影响, 软弱夹层的位置、倾角、距离是隧道物理失稳的重要因素。钱莹等^[23]采用流行元法模拟了圆形隧道和直墙拱形隧道不同的水平压力下的裂纹扩展效果, 裂纹的破坏形式与侧压系数和隧道的几何形状有很大关系。方秦等^[24]认为混凝土损伤塑性模型对混凝土材料双轴应力状态能较为准确的模拟, 能较好的反映双轴应力状态的材料破坏的应力包络图。李元鑫等^[25]采用混凝土损伤塑性模型模拟直墙拱形隧道拱肩不同裂纹倾角破坏时的应力云图和裂纹尖端应力强度因子。

近年来, 国内外学者对于隧道周边及内部裂纹的研究已经很多, 但很少有人系统的研究过隧道周边底板、墙脚等位置处的裂纹对隧道围岩稳定性的影响。隧道周边裂纹位置不仅影响着围岩稳定性及破坏模式, 而且直接影响隧道工程的安全性、耐久性。因此本文采用试验研究和数值模拟研究相互论证不同位置处裂纹对隧道围岩稳定性的影响。试验以水泥砂浆为模型材料, 采用无裂纹直墙拱形隧道作为标准试验模型, 与有裂纹的隧道模型的应力峰值作分析对比。为进一步验证隧道模型试验结果的准确性, 采用 ABAQUS 软件中的混凝土损伤塑性模型进行数值模拟, 两者相互对比分析, 得出一些较有意义的结论, 为以后的隧道设计、施工、初期养护等提供一定的依据。

1 试验设计及结果

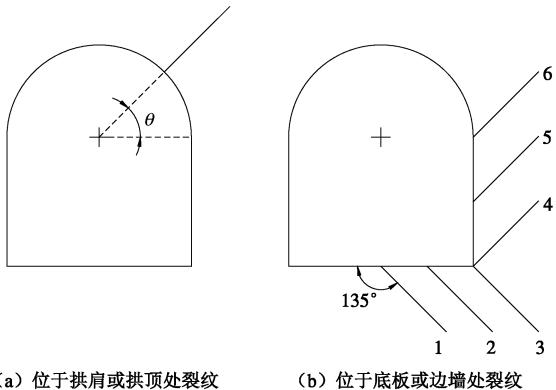
本文采用直墙拱形隧道作为研究对象, 裂纹分别位于隧道的拱肩、拱顶和底板、墙脚、边墙两大部位。当裂纹在拱肩或拱顶部位时, 取裂纹倾角 $\theta=0^\circ \sim 90^\circ$ 以每 15° 为梯度均匀变化, 以拱顶半圆圆心为基点取逆时针方向转动形成单裂纹隧道模型, 如图 1(a) 所示。

由于国内外众多学者已经提出当裂纹位于隧道边墙部位时, 裂纹倾角为 135° 或者 45° 时, 隧道围岩的稳定性和抗压强度最低^[3, 6, 9]。因此本文研究位于隧道墙脚、边墙位置的裂纹与隧道边墙成 135° 夹角, 裂纹从隧道底板水平位置以逆时针方向转至垂直方向的边墙、拱肩位置, 如图 1(b) 所示, 隧道内部都采用单一径向裂纹进行研究, 隧道内共线多裂纹以及交叉多裂纹等情况以后将做进一步研究。

1.1 试验模型制作

本文试验模型采用水泥砂浆作为模型材料, 将隧道模型理想化为连续介质模型, 并根据隧道围岩的力学性质调节水泥砂浆的水灰比, 使得模型材料力学特

性与围岩结构特性相似。裂纹在隧道拱肩、拱顶部位，以每 15° 为增量逆时针方向进行裂纹设置，从 0° ， 15° ， 30° ， 45° ， 60° ， 75° ， 90° 设置 7 组试验；裂纹在隧道底板或边墙位置，与隧道周边成 135° 夹角，从隧道底板水平方向以逆时针方向转至垂直方向的边墙、拱肩位置进行裂纹设置，共 6 组试验，如图 2 所示。



(a) 位于拱肩或拱顶处裂纹

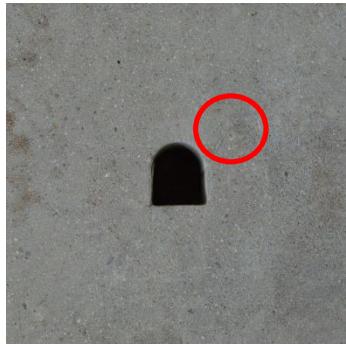
(b) 位于底板或边墙处裂纹

图 1 含单一裂纹的隧道模型

Fig. 1 Model for tunnel with a single crack



(a) 位于拱顶处裂纹模型



(b) 倾斜裂纹模型

图 2 隧道试件

Fig. 2 Tunnel specimens

试验模型分为 14 组（7 组裂纹位于隧道拱肩或拱顶位置隧道模型，6 组裂纹位于隧道底板或边墙位置隧道模型，1 组无裂纹隧道模型），每组浇筑 3 个试验模型。通过多次试验的调配，确定水泥砂浆材料比例

水泥：砂：石膏：水为 $1:2.5:0.6:0.45$ ，模型参数与实际工程隧道围岩参数相似，隧道模型参数：弹性模量 $E=3.00 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.22$ ，密度 $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ ，黏聚力 $c=1.5 \text{ MPa}$ ，内摩擦角 $\phi=15^\circ$ 。

试验模型尺寸为 $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，隧道断面按直墙拱形隧道实际比例进行缩小设置，高度为 60 mm ，宽度为 50 mm ，圆拱半径为 25 mm 。试验隧道模型采用 0.25 mm 厚的薄塑料片作为预制裂纹贯穿于整个模型厚度。浇筑前，将长 50 mm 的薄塑料片折成直角粘接固定在模具底板上，薄塑料片与隧道拱肩、拱顶部位形成不同的夹角 θ ，或与隧道底板、墙脚、边墙成 135° 夹角。然后将按比例调配好的水泥砂浆倒入固定好的模具中， 1 d 之后拆掉模具，将隧道模型取出放入水箱中恒温养护 30 d ，达到试验要求强度条件。最后取出薄塑料片，在隧道中形成长 50 mm 、厚 0.25 mm 的贯穿裂纹。

1.2 试验试件加载

实际工程中隧道围岩不仅受到垂直应力的作用，更有水平应力（侧压力）的作用，侧压力对隧道围岩的稳定性也有一定的影响。试验加载设备采用电液伺服压力机（500T）对隧道模型施加轴向竖直压力，加载速率选择 10 kN/s ；采用液压千斤顶施加侧压力，固定值为 2.5 MPa ，加载隧道模型方式如图 3 所示。

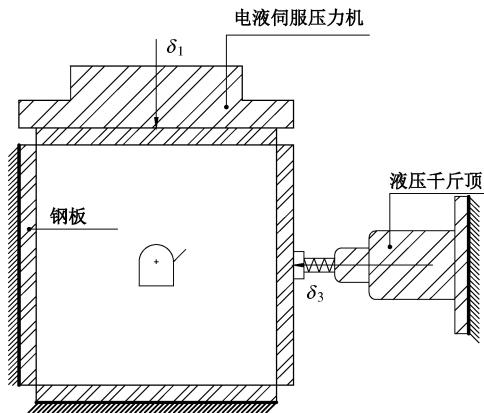


图 3 试验设备及加载方式

Fig. 3 Test equipment and loading mode

加载前，为了减少端部效应对隧道模型加载表面的影响，采用多功能角磨机对加载表面进行打磨处理，使其表面足够光滑；然后在模型表面涂上一层植物油，减少其与加载压头及夹具之间的摩擦，防止受压不均匀导致隧道模型局部受压破坏。该处理能够较好的保证加载的均匀性，减小试验误差。然后将隧道模型放在压力机中间进行加载，整个过程中采用分级加载方式进行加载。在试验的加载全过程中，电脑会自动记录下隧道模型受到的应力 - 位移，应力 - 时间等各种曲线，根据应力 - 位移曲线得出试验数据。

1.3 试验结果

根据裂纹位于直墙拱形隧道周边的不同位置, 得出两组试验数据: ①裂纹位于隧道拱肩或拱顶位置, 如图 4 所示; ②裂纹位于隧道底板或边墙位置, 如图 5 所示, 将每组 3 个模型试验得出的应力峰值求其平均值。

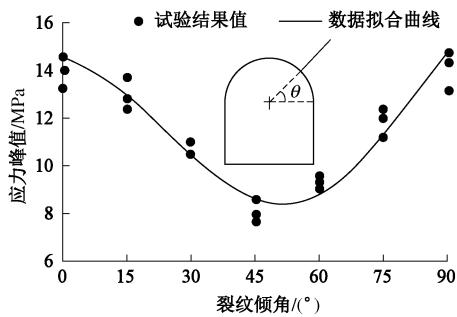


图 4 隧道模型破坏时的压缩载荷与裂纹倾角的关系

Fig. 4 Relationship between compressive load and angle of crack in tunnel model

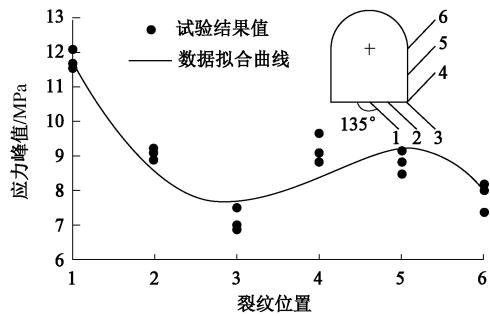


图 5 隧道模型破坏时的压缩载荷与裂纹位置的关系

Fig. 5 Relationship between compressive load and crack location in tunnel model

试验发现, 无裂纹隧道标准模型的破坏应力峰值为 16.07 MPa。对于有裂纹的隧道模型, 当裂纹在隧道拱肩或拱顶位置时, 不同裂纹倾角 θ 对隧道的破坏应力峰值有很大影响。当 θ 为 0° 时, 隧道模型的破坏应力峰值为 13.56 MPa; 当 θ 从 0° 到 45° 变化过程中, 破坏应力峰值呈递减趋势; 当 θ 为 45° 时, 达到最小值, 其破坏应力峰值仅为 8.03 MPa; 当 θ 从 45° 到 90° 变化过程中, 隧道模型的应力峰值递增; 当 θ 为 90° 时, 模型的破坏应力峰值达到 13.97 MPa, 为裂纹位于隧道拱肩或拱顶部位模型的最大值。

当裂纹位于隧道底板、边墙位置, 裂纹在 1 位置处时, 破坏应力峰值为 11.75 MPa, 为峰值的最大值; 当裂纹从 1 位置处到 3 位置处的变化过程中, 破坏应力峰值呈现递减的趋势; 当裂纹在 3 位置处时, 隧道模型的破坏应力峰值为 7.13 MPa, 其峰值为裂纹位于隧道底板或边墙部位的隧道模型的最小值; 当裂纹从

3 位置处到 6 位置处的变化过程中, 破坏应力峰值先增大后减小; 当裂纹在 6 位置处时, 应力峰值为 7.74 MPa。有裂纹的隧道模型的破坏应力峰值相对于无裂纹标准隧道模型的破坏应力峰值 16.07 MPa 都有所降低。

由图 4, 5 可以得出如下结论: ①有裂纹的隧道模型的稳定性相对于无裂纹隧道模型的稳定性有所降低。②当裂纹位于隧道拱肩或拱顶位置时, 裂纹倾角 θ 为 45° 时, 隧道的破坏应力峰值最低, 也即为裂纹位于隧道拱肩或拱顶位置的隧道模型最弱位置。③当裂纹位于隧道底板或边墙位置时, 裂纹在 3 位置处, 隧道的破坏应力峰值最小。④裂纹在隧道 3 位置处的应力峰值相对于裂纹倾角 θ 为 45° 的应力峰值更小, 即裂纹在墙脚的 3 位置处为隧道周边裂纹破坏的最弱位置。

2 数值模拟与试验结果分析对比

本文采用混凝土塑性损伤模型模拟隧道的破坏规律, 在塑性损伤模型基础上简化为连续介质模型, 利用各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩模型来模拟混凝土材料的弹塑性行为。采用 Abaqus 软件云图积分模块模拟隧道模型岩体脆性材料的破坏, 计算出裂纹尖端应力强度因子和应力云图。

为了进一步考虑裂纹尖端的奇异性, 在 Abaqus 软件的 Interaction 模块中进行设置。将裂纹视为理想尖锐裂纹, 对裂纹尖端的网格划分实行进一步细化, 防止裂纹尖端应力场的奇异性对裂纹尖端应力强度因子计算精度产生误差。本文采用精度较高的 J 积分方法求解应力强度因子, 一般有限元单元法在求解裂纹应力强度因子时, 需要将裂纹面设置成单元的边界, 裂纹尖端设置成一个单元的节点。利用 Abaqus 软件计算隧道模型的二维模型, 将裂纹尖端设置成 6 节点的三角形 CPS6 单元, 余下其他区域使用 CPS8 四边形单元, 计算参数与隧道模型参数相同, 弹性模量 $E=3.00 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.22$, 密度 $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$, 黏聚力 $c=1.5 \text{ MPa}$, 内摩擦角 $\varphi=15^\circ$ 。

加载边界条件设置下边界限为无竖直方向位移, 模拟过程中加载的竖向应力设置为 10 MPa, 侧压力为 2.5 MPa, 加载条件与试验条件相似, 得出裂纹在隧道拱肩或拱顶部位和底板或边墙部位两组裂纹尖端应力强度因子 K_{II} 值 (II 型裂纹) 以及 Tresca 应力云图。

2.1 裂纹位于隧道拱肩或拱顶部位的试验结果与数值模拟结果对比

当裂纹位于拱肩或拱顶位置时, 由 Abaqus 软件模拟得出的 $K_{II}-\theta$ 曲线如图 6 所示。可以看出, 裂纹

位置倾角 θ 对裂纹尖端应力强度因子 K_{II} 值影响比较明显。当 θ 从 0° 增大至 45° 时, K_{II} 逐渐增大; 当 θ 为 45° 时, K_{II} 值最大, 为 $56.87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 裂纹尖端应力强度因子最大, 应力集中最明显, 破坏应力峰值最低, 与试验结果比较吻合; 当 θ 从 45° 增大至 90° 时, K_{II} 逐渐降低至 $0.01 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; 当 θ 为 0° 和 90° 时, 由于裂纹受到竖向应力与侧压力的作用, 裂纹尖端闭合, 应力不集中, 因此裂纹尖端应力强度因子 K_{II} 较小, 分别为 $1.37 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 和 $0.01 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

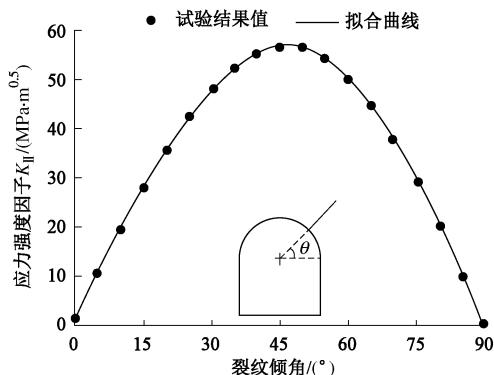
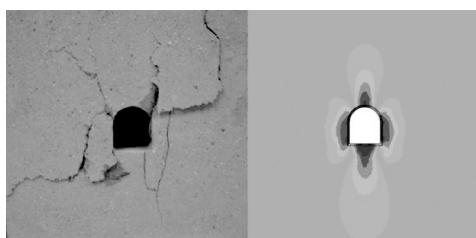


图 6 数值模拟的 K_{II} - θ 曲线

Fig. 6 Numerical results of K_{II} - θ curve

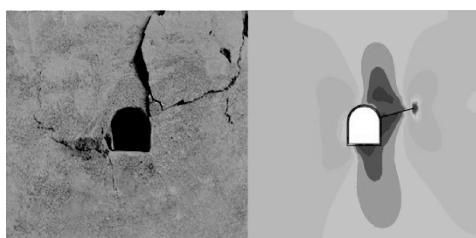
由 Abaqus 软件模拟裂纹位于隧道拱肩或拱顶位置的 7 组试验模型, 得出不同裂纹倾角 θ 下的应力云图如图 7 所示。



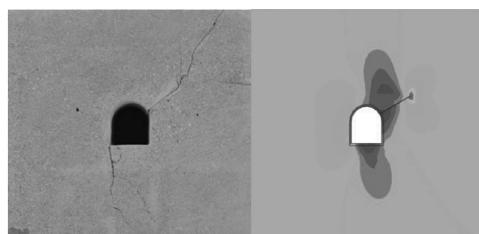
(a) 无裂纹的隧道模型



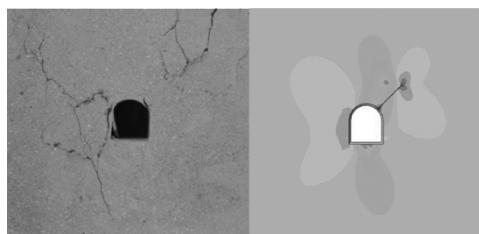
(b) 裂纹倾角 $\theta=0^\circ$ 的隧道模型



(c) 裂纹倾角 $\theta=15^\circ$ 的隧道模型



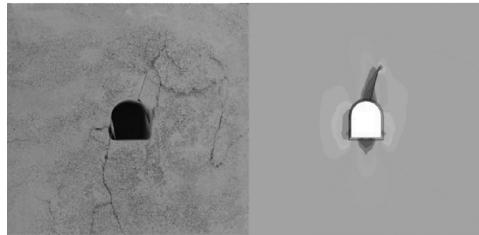
(d) 裂纹倾角 $\theta=30^\circ$ 的隧道模型



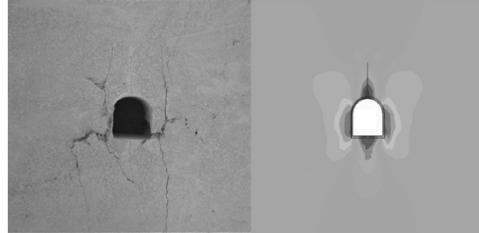
(e) 裂纹倾角 $\theta=45^\circ$ 的隧道模型



(f) 裂纹倾角 $\theta=60^\circ$ 的隧道模型



(g) 裂纹倾角 $\theta=75^\circ$ 的隧道模型



(h) 裂纹倾角 $\theta=90^\circ$ 的隧道模型

图 7 不同倾角裂纹的隧道模型破坏状态及计算的应力云图

Fig. 7 Failure states and stress cloud images of cracks with different inclinations

图 7 (a) 为无裂纹隧道标准模型在竖向压缩荷载作用下的试验照片和数值模拟下的应力云图, 从右侧应力云图可以看出隧道左右两侧墙脚、边墙、拱肩区域应力较大, 且较对称。隧道模型的破坏主要是左右两侧的拱肩、边墙、墙脚的破坏, 试验照片与应力云图比较吻合。

图 7 (b) ~ (h) 分别是裂纹倾角 θ 为 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° 时隧道模型的试验照片和应力云图。从图 7 (e) 右侧的应力云图可以看出,

当裂纹倾角 θ 为45°时, 隧道裂纹尖端和左侧墙脚、边墙、拱肩部位应力较大, 且相比于其他裂纹倾角时的应力集中的区域较大。当裂纹倾角 θ 为0°, 15°, 30°时, 隧道裂纹尖端和左侧墙脚、边墙、拱肩等部位都有较为明显的应力集中区域, 墙脚部位的应力集中现象较为严重。当裂纹倾角 θ 为60°, 75°, 90°时, 裂纹尖端和隧道左侧的墙脚、边墙、拱肩部位出现不同程度的应力集中现象, 右侧的墙脚、边墙、拱肩也逐渐出现应力集中现象; 当倾角 θ 为90°时, 隧道的右侧墙脚、边墙、拱肩区域应力集中较大, 且与隧道模型的左侧区域较对称。

从图7(b)~(h)隧道模型的试验照片可以看出, 裂纹尖端都有一定的扩展, 隧道左侧墙脚部位都有不同程度的破坏, 表明裂纹尖端和墙脚部位为隧道模型的薄弱部位; 当裂纹倾角 θ 从0°~45°的变化过程中, 隧道模型的破坏主要是左侧的墙脚、边墙、拱肩破坏和裂纹尖端的扩展, 右侧区域破坏较小; 当裂纹倾角从45°~90°的变化过程中, 隧道模型的破坏主要是裂纹尖端的扩展和左侧墙脚、边墙、拱肩破坏, 其次右侧墙脚、边墙、拱肩的破坏情况也较严重。通过试验照片与应力云图对比分析可知, 隧道模型的破坏情况与应力云图比较吻合, 但图7(d)、(f)中, 隧道模型左侧拱肩的破坏情况与应力云图有一点不相吻合。

根据试验照片裂纹尖端的扩展效果可以得知, 当裂纹倾角 θ 从0°~90°的变化过程中, 裂纹扩展方向大致都沿竖直向上偏左扩展, 扩展的距离和路径具有一定的离散性和随机性。裂尖扩展效果与裂纹倾角有很大关系, 当裂纹倾角为0°和90°时, 裂纹尖端扩展距离很小或者几乎不扩张。结果表明, 隧道拱肩部位边裂纹扩展是裂纹的翼形起裂, 且扩展的距离、路径与隧道拱肩处裂纹倾角 θ 有很大关系。

2.2 裂纹位于隧道底板或边墙部位的试验结果与数值分析结果对比

当裂纹位于隧道底板或边墙位置时, 由Abaqus软件模拟计算得出的隧道裂纹尖端应力强度因子 K_{II} 的走势如图8所示。计算结果表明, 当隧道周边裂纹倾角 θ 为135°, 裂纹在隧道周边不同位置处时, 裂纹尖端应力强度因子有很大差别。

当裂纹在隧道底板位置1处时, K_{II} 值最小, 为39.52 MPa \sqrt{m} ; 当裂纹从位置1处到位置3处的变化过程中, K_{II} 逐渐增大; 当在隧道底板位置3处时, K_{II} 达到最大值, 为63.66 MPa \sqrt{m} , 应力集中现象最明显, 隧道破坏的应力峰值最低, 与隧道模型压缩结果一致; 当裂纹从位置3处到位置6处的变化过程中, K_{II} 值先减小后增大; 当裂纹位于边墙位置6处, K_{II} 值也较大,

为58.65 MPa \sqrt{m} , 表明位置6处裂纹尖端应力集中也比较严重, 隧道的稳定性较差。从上述结果可知: 裂尖应力强度因子 K_{II} 值越大, 应力集中越明显, 隧道模型的破坏应力峰值越低, 数值模拟计算结果与试验模型结果较为一致。

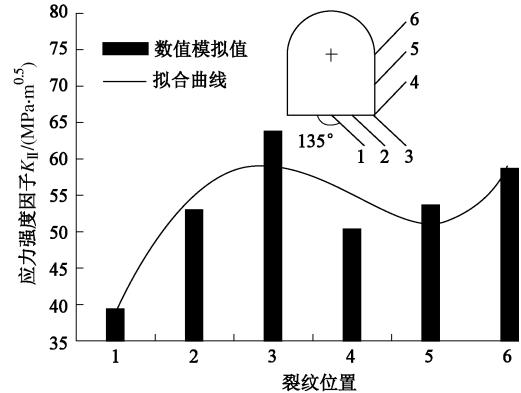


图8 数值模拟的 K_{II} -裂纹位置曲线

Fig. 8 Numerical results of K_{II} -crack position curve

当裂纹在隧道底板、边墙的6个位置处时, 通过数值模拟的应力云图和模型破坏结果对比分析如图9。

图9(a)~(f)为裂纹处于1到6位置处时隧道模型的试验照片和数值模拟下的应力云图。从图9(c)左侧的应力云图可以看出, 当裂纹在3位置处时, 隧道裂纹尖端应力较大, 左侧墙脚、边墙、拱肩区域也比较大, 且应力集中区域相对于其他裂纹位置处时的应力集中区域较大。当裂纹位于1, 2位置处时, 隧道模型应力较大的区域主要在裂纹尖端以及隧道左侧的墙脚、边墙、拱肩部位, 右侧拱肩部位也有一定程度的应力集中现象。当裂纹位于4, 5, 6位置处时, 隧道模型应力集中区域主要在裂纹尖端区域和左侧墙脚、边墙、拱肩区域, 隧道模型的右侧区域应力较小。从试验照片来看, 当裂纹在1, 2位置处时, 隧道模型主要破坏是左侧的墙脚、边墙、拱肩的破坏和裂纹尖端的扩展, 右侧的拱肩、边墙、墙脚也有一定程度的破坏。当裂纹在3, 4, 5, 6位置处时, 隧道模型主要破坏是左侧的墙脚、边墙、拱肩的破坏和裂纹尖端的扩展, 隧道右侧的破坏较小。通过试验照片与Tresca应力云图分析对比, 隧道模型的破坏情况与云图比较吻合, 但裂纹位于6位置处的隧道模型的左侧拱肩破坏情况与应力云图不相一致。

根据试验照片裂纹的扩展情况可知, 裂纹在隧道的1, 2, 3位置处时, 裂纹扩展方向沿竖直偏左向下扩展, 且扩展的距离具有较大的离散性。裂纹在隧道的4, 5, 6位置处时, 裂纹的扩展方向沿裂纹尖端竖向偏左向上扩展, 扩展路径和距离也具有较大的离散性。从裂纹扩展效果和隧道破坏形式可知, 隧道边裂

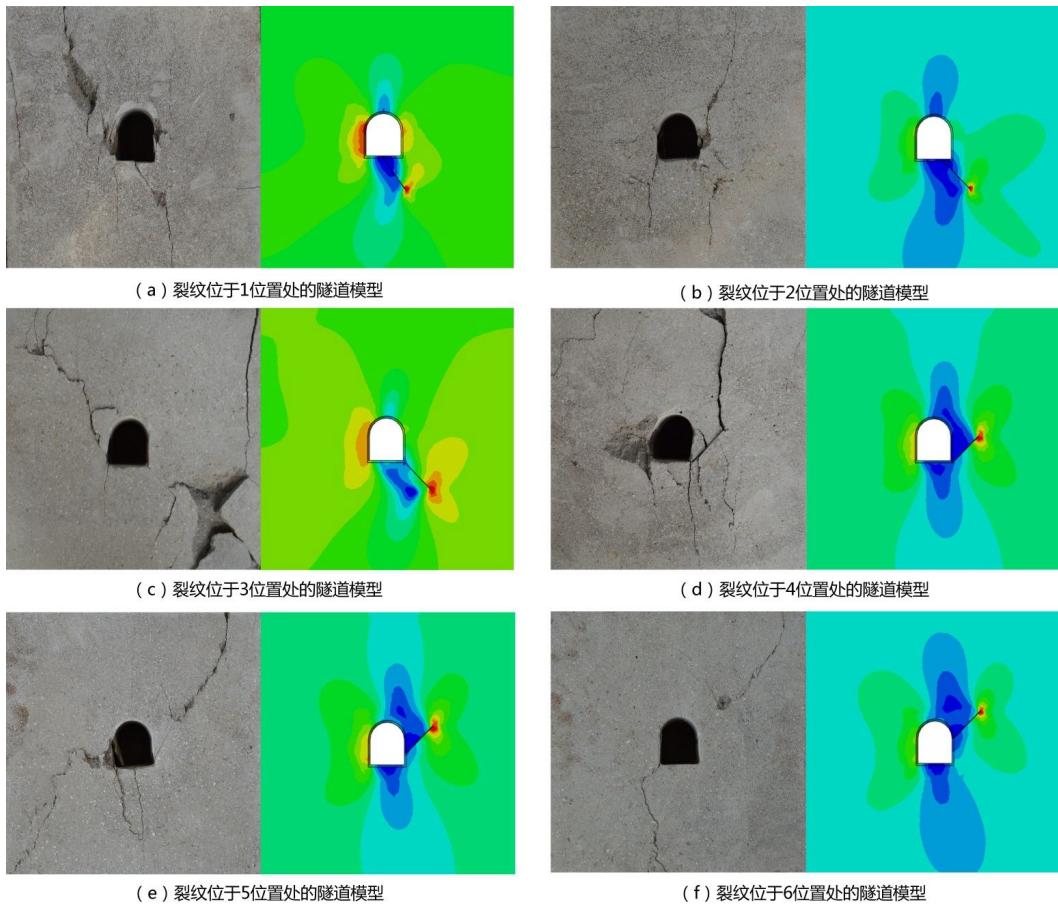


图 9 裂纹位于 1~6 位置时的隧道破坏状态及计算的应力云图

Fig. 9 Failure states and stress cloud images of tunnel with crack positions No. 1~6

纹的起裂基本都是一端的翼形起裂，裂纹尖端的扩展具有较大的离散性和随机性，但扩展方向能够根据裂纹倾斜方向较好的做出判断。裂尖扩展和墙脚的破坏为所有隧道模型的共同特征，表明裂尖和墙脚部位的确为隧道的薄弱部位。

3 结 论

(1) 裂纹会降低直墙拱形隧道整体的稳定性和强度。

(2) 无论直墙拱形隧道有无裂纹，隧道墙脚部位都可能遭到破坏，即墙脚部位为隧道的薄弱部位。

(3) 当裂纹位于隧道拱肩或拱顶部位，裂纹处于拱肩倾角 θ 为45°位置时，隧道模型的强度最低，且相对于无裂纹隧道模型破坏应力峰值降低了50.03%。

(4) 当裂纹位于隧道底板与边墙交界的墙脚位置处时，隧道模型稳定性最差，且相对于无裂纹隧道模型破坏应力峰值降低了55.63%。

(5) 裂纹位于隧道底板与边墙交界的墙脚位置处时的隧道模型相对于拱肩部位裂纹倾角 θ 为45°时的隧道模型的强度更低，即隧道墙脚位置处裂纹为隧道周边径向裂纹的最弱位置。

参 考 文 献：

- [1] SUORINENI F, TANNANT D, KAISER P. Determination of fault-related sloughage in open stopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(7): 891 - 906.
- [2] BRUNEAU G, TYLER D, HADJIGEORGIOU J, et al. Influence of faulting on a mine shaft—a case study: part I—Background and instrumentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 95 - 111.
- [3] JIA P, TANG C. Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(5): 500 - 507.
- [4] 康 勇, 李晓红, 杨春和. 深埋隧道围岩损伤破坏模式的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(增刊 1): 3578 - 3583. (KANG Yong, LI Xiaogong, YANG Chun-he. Numerical tests of damage failure mode of surrounding rock damage in deep tunnels[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S1): 3578 - 3583. (in Chinese))
- [5] 李占海, 朱万成, 冯夏庭, 等. 侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 441 - 448, 468. (LI Zhan-hai, ZHU Wan-cheng, FENG Xia-ting, et

- al. Effect of lateral pressure coefficients on damage and failure process of horseshoe-shaped tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 441 – 448, 468. (in Chinese))
- [6] WANG M, ZHU Z M, LIU J. The photoelastic analysis of stress intensity factor for cracks around a tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, **147**: 197 – 200.
- [7] 李永乾, 朱哲明, 胡 荣. 主应力方向对隧道稳定性影响规律的研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, **44**(增刊1): 93 – 98. (LI Yong-qian, ZHU Zhe-ming, HU Rong. Study on the effect of principal stress orientation on tunnel stability[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, **44**(S1): 93 – 98. (in Chinese))
- [8] 李治国, 张玉军. 衬砌开裂隧道的稳定性分析及治理技术[J]. 现代隧道技术, 2004, **41**(1): 26 – 34, 43. (LI Zhi-guo, ZHANG Yu-jun. Stability analysis for tunnels with cracked linings and the techniques for repairing the cracked linings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, **41**(1): 29 – 34, 43. (in Chinese))
- [9] ZHU Z M, LI Y X, XIE J, et al. The effect of principal stress orientation on tunnel stability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **49**: 279 – 286.
- [10] CHU B L, HSU S C, CHANG Y L, et al. Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, **22**(3): 351 – 362.
- [11] ZHOU X P, QIAN Q, YANG H. Rock burst of deep circular tunnels surrounded by weakened rock mass with cracks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2011, **56**(2): 79 – 88.
- [12] 郑颖人. 隧洞破坏机理及设计计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(增刊2): 1522 – 1532. (ZHENG Ying-ren. Failure mechanism and design and calculation method for the tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(S2): 1522 – 1532. (in Chinese))
- [13] 彭建兵, 胡志平, 门玉明, 等. 马蹄形隧道 40° 斜穿地裂缝的变形破坏机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2009, **28**(11): 2259 – 2265. (PENG Jian-bing, HU Zhi-ping, MEN Yu-ming, et al. Experimental study on the deformation and failure mechanism of the 40° inclined crack in the horseshoe tunnel of the horseshoe tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(11): 2259 – 2265. (in Chinese))
- [14] 于海龙, 王瑞峰. 大断面公路隧道的断面形式研究[J]. 四川建筑, 2006, **26**(3): 65 – 67. (YU Hai-long, WANG Rui-feng. Research on the section form of large section highway tunnel[J]. Sichuan Building, 2006, **26**(3): 65 – 67. (in Chinese))
- [15] ZHU Z M. New biaxial failure criterion for brittle materials in compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1999, **125**(11): 1251 – 1258.
- [16] ZHU Z M, WANG L, MOHANTY B, et al. Stress intensity factor for a cracked specimen under compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, **73**(4): 482 – 489.
- [17] ZHU Z M, XIE H P, MOHANTY B. Numerical investigation investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(2): 111 – 121.
- [18] ZHU Z M. An alternative form of propagation criterion for two collinear cracks under compression[J]. Mathematics and Mechanics of Solids, 2009, **14**(8): 727 – 746.
- [19] ZHU Z M. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, **46**(6): 1088 – 1096.
- [20] ZHU Z M. Evaluation of the range of horizontal stresses in the earth's upper crust by using a collinear crack model[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, **88**(1): 114 – 121.
- [21] ZHENG T, ZHU Z M, WANG B, et al. Stress intensity factor for an infinite plane containing three collinear cracks under compression[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2014, **94**(10): 853 – 861.
- [22] HUANG F, ZHU H, XU Q, et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel-scaled model tests and numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **35**: 207 – 218.
- [23] 钱 莹, 杨 军. 不同侧压下两种断面形式隧道裂纹演化的流形元法模拟[J]. 煤矿安全, 2008, **39**(3): 22 – 25. (QIAN Ying, YANG Jun. Evolution of two type of cross section of the tunnel crack under different confining pressures on the manifold method simulation[J]. Safety in Coal Mines, 2008, **39**(5): 22 – 25. (in Chinese))
- [24] 方 秦, 还 毅, 张亚栋, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型的静力性能分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, **8**(3): 254 – 260. (FANG Qin, HUAN Yi, ZHANG Ya-dong, et al. Investigation into static properties of damaged plasticity model for concrete in ABAQUS[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, **8**(3): 254 – 260. (in Chinese))
- [25] 李元鑫, 朱哲明, 刘 凯, 等. 裂纹方向对隧道稳定性影响规律的研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊1): 189 – 194. (LI Yuan-xin, ZHU Zhe-ming, LIU Kai, et al. Study of effect of cracking orientation on tunnel stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S1): 189 – 194. (in Chinese))