

刘邦,朱哲明,周磊,等. 贯穿隧道的节理对隧道稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1296-1304. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1128

LIU Bang, ZHU Zheming, ZHOU Lei, et al. Effect of the joints crossing the tunnel on tunnel stability[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1296-1304. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1128

贯穿隧道的节理对隧道稳定性的影响

刘 邦^{1,2,3}, 朱哲明^{1,2}, 周 磊^{1,2}, 李 盟^{1,2}, 刘瑞峰^{1,2}

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 宜宾学院 经济与管理学院, 四川 宜宾 644000)

摘 要:隧道常贯穿节理和断层,在隧道使用过程中,这两个方面对隧道的稳定性有很大影响。将节理及断层近似为穿越隧道的裂纹,通过模型试验和数值模拟相结合方法研究其在双轴压力作用下的损伤破坏规律。试验采用砂岩制作隧道模型,模拟采用 Abaqus 软件进行。使用 Abaqus 模拟计算出隧道围岩的应力分布以及裂纹尖端的应力强度因子,与实验结果比较吻合。结果表明:① 穿越隧道不同倾角的裂纹对隧道的整体稳定性及强度的影响不同,在裂纹尖端产生的应力集中也不同,当贯穿裂纹倾角 $\theta = 40^\circ$ 时,裂纹对其整体稳定性及强度的影响最大,裂纹两端的应力集中现象最为明显, K_{II} 值最大,隧道剪切破坏较为严重,破坏应力峰值仅为无裂纹模型的 41.77%; ② 当贯穿裂纹位于 $\theta = 0^\circ$ 位置时, K_{II} 值很小且接近于 0,在竖直压力下裂纹闭合,裂纹尖端的应力集中不明显,裂纹比较稳定,隧道的破坏应力最大,为无裂纹隧道模型的 91.23%,即此位置是隧道稳定性最强位置; ③ 隧道在竖直应力和侧向压力下,隧道的破坏主要表现为拱肩、边墙、裂纹尖端、拱脚的压剪破坏和拱底、拱顶的拉伸破坏。

关键词:贯穿节理;隧道;数值模拟;应力强度因子;稳定性

中图分类号:TD32 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)05-1296-09

Effect of the joints crossing the tunnel on tunnel stability

LIU Bang^{1,2,3}, ZHU Zheming^{1,2}, ZHOU Lei^{1,2}, LI Meng^{1,2}, LIU Ruifeng^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. School of Economics and Management, Yibin University, Yibin 644000, China)

Abstract: The tunnels often cross joints and faults, which have great influence on tunnel stability during their use. In this paper, these joints and faults were approximated as the cracks through the tunnel. In order to study the influence of the cracks crossing the tunnel on tunnel stability under biaxial pressure, some model tests and numerical simulation were implemented. In the experiment study, Longchang sandstone was used to build tunnel models which were a square plate containing a small "tunnel" and an inclined fault, and in the simulation, Abaqus software was used. Using Abaqus software, the stresses at the points around the tunnel and the stress intensity factor of crack tips were calculated which agreed well with the experimental results. The results show that: ① Different angle cracks would have different influence on the stability and strength of tunnel, and produced different stress concentration at the crack tips. When θ is around 40 degrees, the influence of crack on the overall stability and strength of tunnel is maximum, the stress concentration at crack tips is most obvious, K_{II} value is maximum, its shear failure is more serious, and the peak of failure

收稿日期:2017-08-18 修回日期:2017-11-14 责任编辑:常明然

基金项目:国家自然科学基金项目(11672194;11702181);四川省安全监管局安全生产科技项目(aj20170515161307)

作者简介:刘 邦(1977—),男,河南鹿邑县人,博士研究生。E-mail:625490193@qq.com

通讯作者:朱哲明(1965—),男,辽宁葫芦岛人,教授,博士生导师。E-mail:zhemingzhu@hotmail.com

stress is only 41.77% of that of tunnels without cracks. ② When θ is around 0 degrees, KII value is close to zero, under vertical pressure the cracks close, the stress concentration of crack tips are not obvious, the cracks are more steady, the failure stress of tunnel is maximum which is 91.23% of that of tunnels without cracks, and this position is the strongest for the tunnel stability. ③ Under the influence of vertical stress and confining pressure, the tunnel failure is mainly the pressure-shear failure of the spandrels, side walls, crack tips, and skewbacks, and the tensile failure of arch bottom, vault.

Key words: crossing joints; tunnel; numerical simulation; stress intensity factor; stability

岩石中存在着各种尺度的节理或断层,可能会与隧道交叉;另外在隧道工程开挖施工时,爆炸产生的应力波常常会使隧道周边产生贯穿隧道的不同倾角的断层。在隧道支护以后,这些节理或断层的存在导致隧道的强度、整体稳定性、使用寿命在一定程度上受到影响。隧道在开挖过程中,由于围岩重力和构造应力的影响,贯穿节理或断层会沿不同方向扩展,会影响隧道的维护方法选择;当贯穿节理或断层位置和长短不同时,对类似隧道强度、稳定性、支护方法、维护方法、设计依据也不同。因此,研究隧道在支护以后贯穿隧道节理以及长度和位置在垂直压力和侧压力下对隧道强度、破坏模式、稳定性的影响,对类似隧道的维护、设计、节理或断层的止裂方法的选择具有一定的工程实际意义。

许多专家、学者研究了围岩中的断层或节理对隧道强度、稳定性的影响程度。BRUNEAU 等^[1]、SUORINEN 等^[2]经过模拟和实验分析指出,围岩中的断层分布对于隧道整体稳定性具有不同程度影响,围岩中断层的方向和位置分布对隧道的破坏具有很大关系。CHARPENTIER 等^[3]经分析认为,工程地下开挖可以使应力出现重分布,同时可以导致围岩中裂纹的出现,利用模拟实验开挖隧道内页岩近场微裂纹的出现,分析了开挖过程中构造破裂作用和卸荷作用的不同点,指出岩石的破坏在很大程度上是由于岩体的各向异性、节理和构造应力方向、泥岩的孔隙度。BRADY 和 BROWN^[4]研究认为,任何大的构造运动均能导致很高的水平应力,因为地下岩体构造具有错综复杂的特点,像断层和褶皱等等,在很大程度上影响隧道围岩的强度以及整体稳定性。刘学增等^[5]分析认为,当裂缝深度不变情况下,对隧道影响程度最大的位置是其在拱顶时;对隧道的整体稳定性影响较小的位置是其在拱腰、边墙、拱脚。李元鑫等^[6]经实验认为,处于拱肩的裂纹对隧道的强度以及稳定性存在较大的影响,应力集中较大的区域出现在裂纹尖端、直墙;裂纹倾角不同时,试件的强度也不同。周应麟等^[7]、贾蓬等^[8]、任德惠等^[9]、胡厚田等^[10]研究了层状节理岩层倾角对围岩稳定性的影响,得出围岩的破

坏是由层间岩层开始并逐步扩展。黄成盖等^[11]、李治国等^[12]研究指出裂缝深度和位置对于隧道强度的影响规律,还研究了裂纹对隧道衬砌的影响规律,指出开裂的隧道从力学上讲为不连续体,在变形不大的情况下,其有可能从开裂部位发生突然破坏,危及行车安全。朱哲明等^[13-17]借助复变函数得出边界配位计算方法,并计算出各种边界条件下裂纹尖端应力强度因子,同时得出压缩载荷下共线裂纹的断裂准则。郑颖人等^[18-19]利用有限元强度折减法分析了层状围岩隧道的破坏状态,并指出节理倾角对破裂面位置影响较大,当节理倾角为 90° 时,隧道在洞顶正中形成了贯通的塑性破裂面。王吉亮等^[20]、郑颖人等^[21]研究认为,节理岩体对隧道安全系数的影响比匀质隧道要大,节理倾角对安全系数影响最小,安全系数随节理间距减小、强度降低而有所减小。朱劲等^[22]指出,在红层地层中节理倾角对围岩应力和变形存在一定程度的影响;围岩变形与水平方向应力的最大值发生在节理倾角与偏压坡面垂直的位置;围岩垂直方向应力最大值发生在节理倾角与偏压坡面平行的位置。范君黎等^[23]通过实验指出,隧道高宽比 K 对隧道围岩整体稳定性和损伤破坏存在规律性。当试件无裂纹时,试件抗压强度最小值在 K 等于 1.0 时,最大值在 K 等于 1.5 时;当试件有裂纹时,试件抗压强度最小值在 K 等于 0.7 时,最大值在 K 等于 1.7 时。

本文采用 Abaqus 软件以及相应的隧道模型试验,研究隧道在支护以后贯穿隧道的节理以及其长度和位置对隧道的稳定性的影响。隧道模型材料来自工厂加工,裂纹采用人工加工。利用软件分析与试验对比深入研究贯穿隧道的节理对隧道稳定性和强度的影响规律,对类似实际隧道工程的设计、施工、支护、维护、节理或断层的止裂方法的选择具有一定的借鉴意义。

1 隧道试件简介

本文所研究的贯穿裂纹,是指一条裂纹穿过隧道并被隧道隔开,而后变成共线裂纹。这条共线裂纹通过隧道圆拱的圆心,圆心位于 AB 的中点,与水平方

向夹角 θ 从 0° 到 90° 不等,其增量为 10° ,共计 10 条裂纹,如图 1 所示。隧道模型试件尺寸设为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,与实际单向隧道的尺寸比例关系大概是 $1:30$,为了尽可能避免边界条件的影响,裂纹两尖端 AB 总长设为 120 mm ,隧道断面按直墙拱形隧道适当比例进行缩小,其断面尺寸取如图 2 所示,隧道高度为 60 mm ,宽度为 40 mm ,圆拱半径为 20 mm 。隧道两侧裂纹尺寸见表 1。

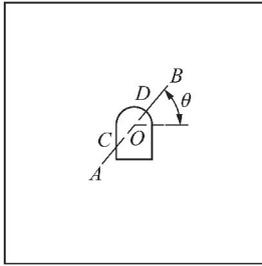


图 1 不同倾角裂纹隧道模型

Fig. 1 Different angle cracks tunnel model

表 1 隧道两侧裂纹尺寸

Table 1 Crack size on both sides of tunnel

裂纹倾角/ $^\circ$		0	10	20	30	40
裂纹长度/mm	AC	40.00	39.69	38.72	36.91	33.89
	BD	40	40	40	40	40
裂纹倾角/ $^\circ$		50	60	70	80	90
裂纹长度/mm	AC	28.89	19.44	17.43	19.38	20.00
	BD	40	40	40	40	40

为了更加接近实际工程情况,在试件上下表面以及侧面用钢板夹住,用液压千斤顶施加侧压 σ_2 ,为了减小摩擦对实验结果的影响,在试件上下左右 4 面涂上润滑油,用压力机施加竖直压力 σ_1 ,如图 2 所示,围压 σ_2 和竖直压力 σ_1 的关系:

$$\sigma_2 = \nu \sigma_1$$

式中, ν 为泊松比; σ_1 设为隧道的破坏应力。

2 数值模拟研究

为了预测实验过程中试件的变形破坏规律及可

表 2 数值模拟参数

Table 2 Numerical simulation parameters

弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	均质度系数 m	竖直应力 σ_1/MPa	围压 σ_2/MPa
29.5×10^6	0.25	2 320	1.5	15	5.0	10	2.5

2.1.2 数值模拟结果分析

此次试验有 11 组数据(其中一组为无裂纹隧道模型),Abaqus 数值模拟做破坏结果如图 3 所示。

图 3 为贯穿裂纹以及无裂纹隧道模型 Tresca 应

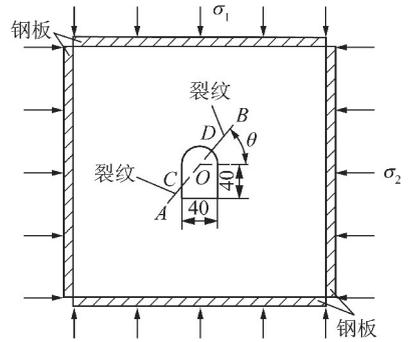


图 2 隧道模型

Fig. 2 Tunnel model

能出现的问题,在进行实验前,有必要首先进行相应的数值模拟研究。

2.1 Abaqus 数值模拟分析

为了更加清晰的分析隧道围岩中不同位置贯穿裂纹对隧道围岩稳定性和强度的影响规律,本文采用了 Abaqus 中 Contour integral 方法计算模拟出隧道模型的 Tresca 应力云图。

2.1.1 混凝土损伤塑性模型简介

本次数值模拟采用混凝土损伤塑性模型,把它看作塑性的连续介质损伤模型。Abaqus 软件中的混凝土损伤塑性模型采用各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩塑性的模式表示混凝土的弹塑性行为。采用 Abaqus 中 Tresca 应力云图模拟隧道围岩脆性材料的破坏规律以及应力分布情况,并计算出两个裂纹尖端的应力强度因子。分析时竖直应力设为 10 MPa ,侧向应力设为 2.5 MPa 。

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 软件模拟计算出二维 Tresca 应力模型,裂纹尖端设置为 CPS4 三角形单元,将其他区域设置为 CPS8 四边形单元,计算参数见表 2。

力云图,从图 3 可以看出,当贯穿裂纹倾角 θ 从 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时裂纹尖端都具有较大的应力集中并且范围增大,当 θ 为 40° 时裂纹尖端具有最大的应力集中,当贯穿裂纹倾角 θ 从 $50^\circ \sim 90^\circ$ 时裂纹尖端应力集中程

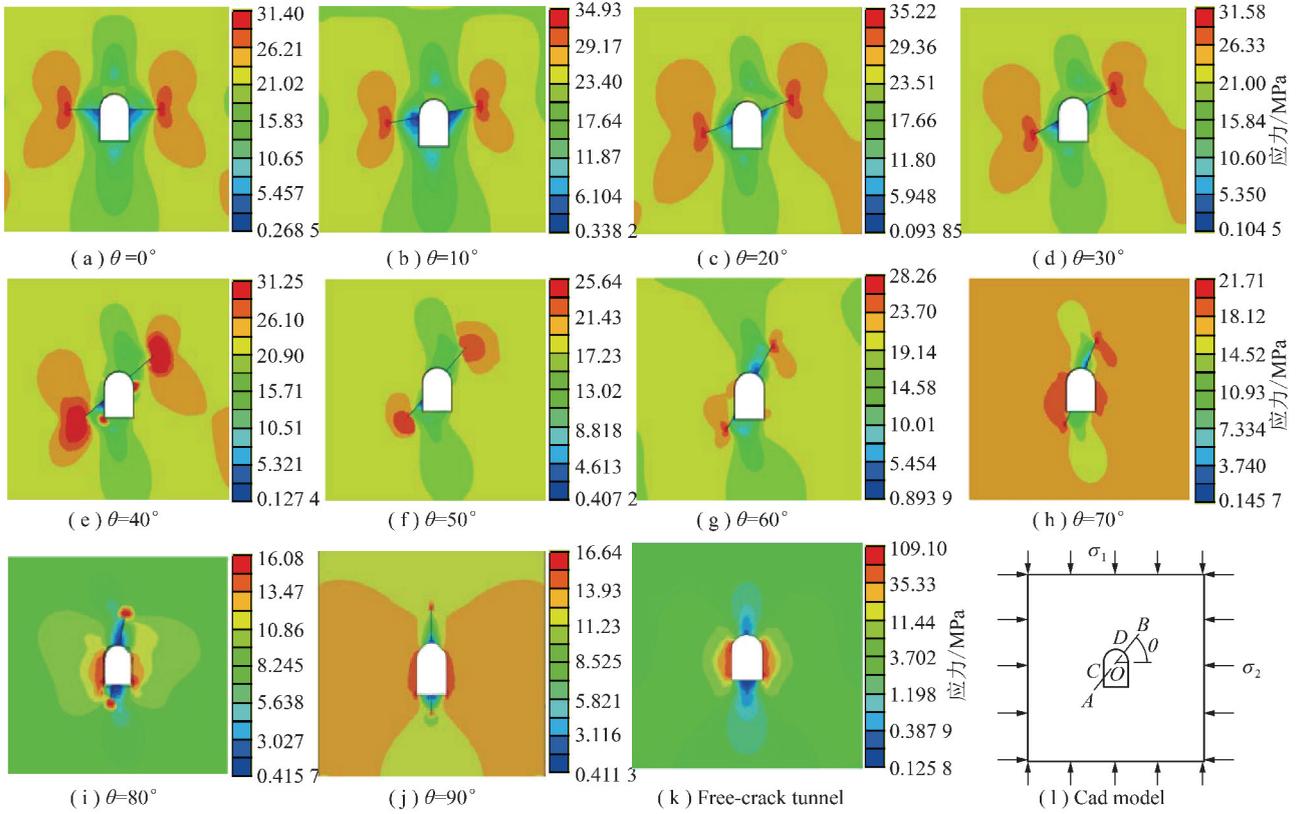


图3 贯穿裂纹隧道模型 Abaqus 模拟结果

Fig. 3 Abaqus simulation of the crossing cracks tunnel model

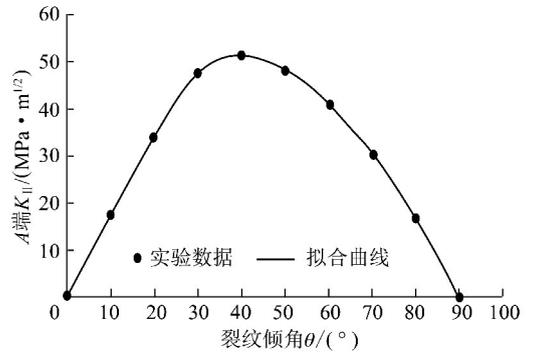
度逐渐减小,当 θ 为 90° 时裂纹尖端应力集中程度最小;贯穿裂纹倾角 θ 从 $10^\circ \sim 90^\circ$ 变化过程中,裂纹尖端 B 的应力集中程度比 A 端大;贯穿裂纹倾角 θ 从 $0^\circ \sim 30^\circ$ 变化过程中隧道直墙有不太大的应力集中, θ 从 $40^\circ \sim 90^\circ$ 变化过程中隧道直墙开始出现较大的应力集中。对于无裂纹隧道来说,其拱肩、直墙、拱脚出现较大的应力集中。

2.1.3 应力强度因子结果分析

利用 Abaqus 计算结果,分别计算出贯穿裂纹尖端 A, B 的10组应力强度因子 K_{II} 的值,如图4,5所示。

从图4看到,贯穿裂纹倾角变化时, A 端应力强度因子 K_{II} 对隧道具有不同程度的影响。随着贯穿裂纹倾角 θ 的变化,裂纹尖端 A 应力强度因子 K_{II} 变化较大,在 θ 从 0° 到 40° 变化过程中 K_{II} 逐渐增大,在 θ 从 40° 到 90° 变化过程中 K_{II} 逐渐减小,在整个变化过程中 θ 为 40° 时 K_{II} 值最大,其值为 $51.22 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,此时裂纹尖端 A 具有较大的应力集中;由于侧压力的存在,当 θ 为 0° 和 90° 时裂纹尖端闭合,应力集中不明显,应力强度因子很小,分别为 0.4937 和 $0.0160 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

从图5可知,贯穿裂纹倾角对裂纹尖端 B 应力强度因子 K_{II} 的影响与裂纹尖端 A 相似,在整个变化

图4 裂纹尖端 A 应力强度因子 $K_{II}-\theta$ 曲线Fig. 4 Curve of crack A stress intensity factor K_{II} versus the inclined angle θ

过程中 θ 为 40° 和 50° 时 K_{II} 值接近且都较大,其值分别为 51.91 和 $52.12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,此时裂纹尖端 B 具有较大的应力集中;由于侧压力的存在,当 θ 为 0° 和 90° 时裂纹尖端闭合,应力集中不明显,应力强度因子很小,分别为 0.5005 和 $0.0042 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

结果表明:贯穿裂纹倾角对裂纹尖端 A, B 的应力强度因子 K_{II} 影响较大,且具有相似的影响,都是在 θ 为 40° 左右时 K_{II} 值最大。

3 模型试验

本文采用自贡砂岩作为试验材料,在石材加工厂

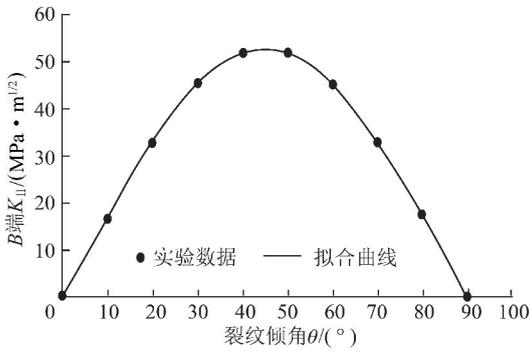


图 5 裂纹尖端 B 端应力强度因子 $K_{II}-\theta$ 曲线

Fig. 5 Curve of crack B stress intensity factor K_{II} versus the inclined angle

用自动化水刀制作隧道模型并人工进行打磨。为了避免贯穿裂纹尖端初始损伤,裂纹先用铅笔描好位置和尺寸大小,再用 0.5 mm 厚钢锯条人工切割到相应的尺寸。

3.1 试件模型尺寸与加工

试验模型尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm,隧道高度为 60 mm,宽度为 40 mm,圆拱半径为 20 mm,与 Abaqus 模拟尺寸相同。贯穿裂纹厚度 0.5mm,贯穿于整个模型厚度,为了减小摩擦对实验结果的影响,

首先用打磨机对隧道模型的上下左右 4 个面进行打磨处理,同时实验前在这 4 个面涂抹润滑油。贯穿裂纹与水平轴夹角从 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,间隔 10° ,共 10 组贯穿裂纹隧道模型,此外我们还加工了无裂纹的隧道模型。物理性质参数见表 2。

3.2 模型试验过程与结果分析

此次试验所用压力机为电液伺服压力试验机,微机控制(500T),给试验模型施加垂直压力,即主应力 σ_1 ,加载速率为 5 kN/s,侧压 σ_2 由带压力表的液压千斤顶施加(图 6)。贯穿裂纹隧道模型在不同倾角下的破坏模式(图 7)。并根据破坏强度画出贯穿裂纹隧道模型强度曲线(图 8)。



图 6 压力机及加载方式(500T)

Fig. 6 Presses and loading model(500T)

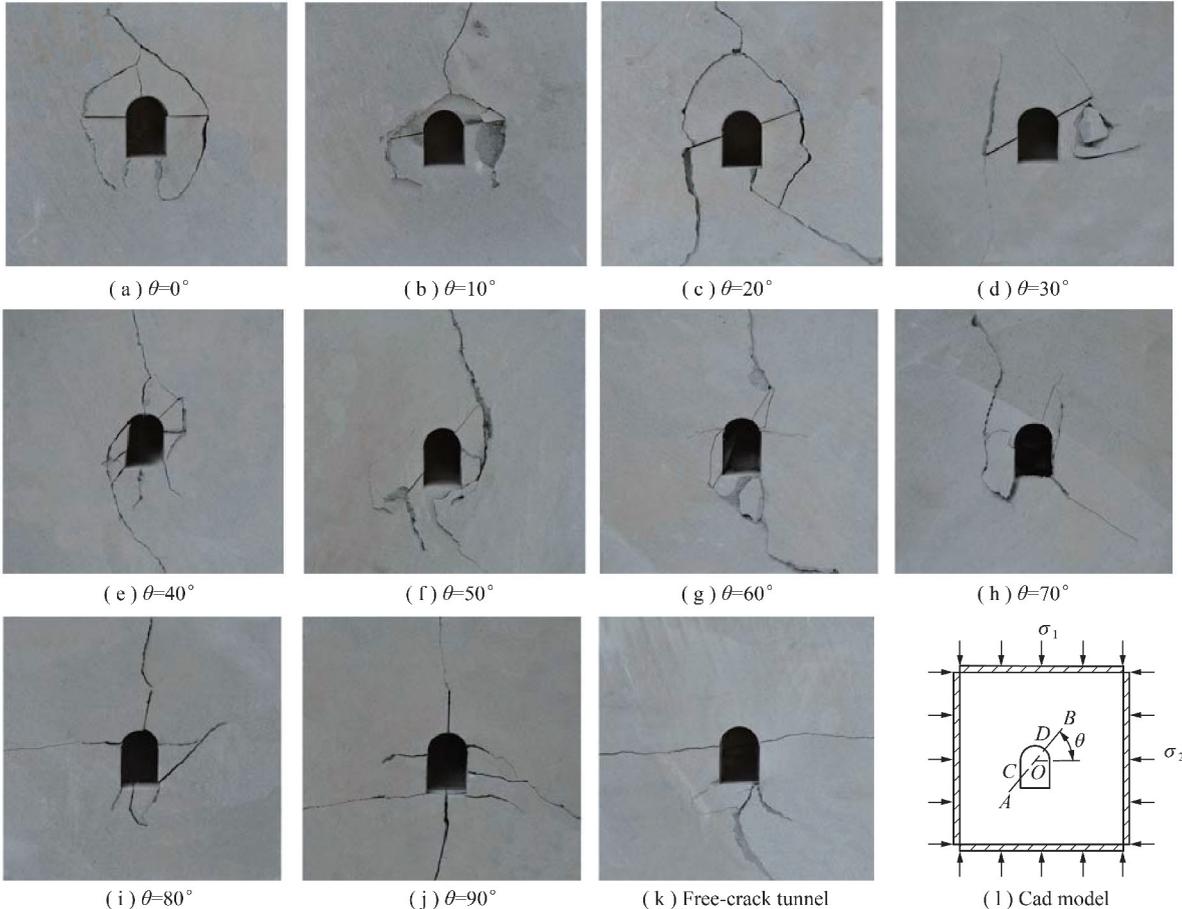
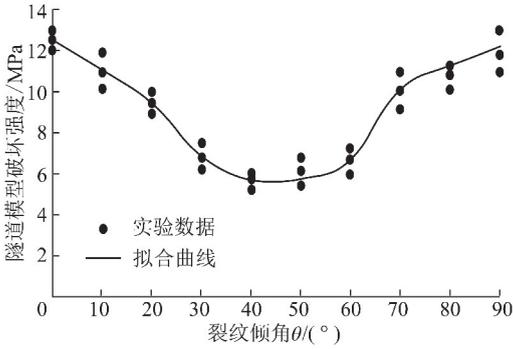


图 7 隧道模型破坏结果

Fig. 7 Failure results of the tunnel models

图8 隧道模型抗压强度与裂纹倾角 θ 关系的实验结果Fig. 8 Relationship between failure stress of test models and inclined crack angle θ

为了保持试验机的平衡,把隧道实验模型放入试验机中间加载,施加 σ_1 同时加载围压 σ_2 ,然后再缓慢加载 σ_1 ,直至试验试件破坏。试验中,电脑能够记下试件的实验时间、应力大小、位移大小等曲线,按照电脑记下的曲线得到不同的试验结果。试验结束以后,从电脑中获得试验的峰值破坏应力、主应力-时间曲线、位移-时间曲线等数据。

从图7隧道模型破坏结果可知,由于压剪作用,贯穿裂纹倾角 θ 从 $0^\circ \sim 60^\circ$ 两个裂纹尖端呈现翼型开裂并分别向上向下往边界延伸,呈现压剪破坏;当 θ 从 $70^\circ \sim 90^\circ$ 裂纹尖端呈现单向扩展,并接近竖直应力方向开裂,呈现拉伸破坏。贯穿裂纹倾角 θ 从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化过程中,部分隧道出现拱顶、拱底的拉伸破坏以及拱肩、直墙、拱脚的压剪破坏。对于无裂纹隧道模型,出现拱肩、拱底的拉伸破坏以及拱脚的压剪破坏。左侧裂纹在倾角从 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时裂纹长度逐渐减小,都出现了翼型裂纹;倾角从 $70^\circ \sim 90^\circ$ 裂纹长度逐渐增大,出现单一扩展裂纹。右侧裂纹随着倾角的增大,具有相似的规律。

从图7以及计算可知,当侧压力系数 λ 小于0.5时,裂纹尖端的翼型扩展方向向竖直应力方向逐渐靠近但尚有一定角度;当侧压力系数 λ 在0.5~1.5之间时,裂纹尖端的翼型扩展方向逼近竖直方向。当侧压力系数 λ 小于0.6时,隧道的破坏主要集中在裂纹尖端、拱顶的破坏;当侧压力系数 λ 在0.6~1.5时,隧道的破坏主要集中在裂纹尖端、拱肩、拱脚、直墙的破坏。

从图8可以看出,贯穿裂纹倾角 θ 在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时带裂纹隧道模型的抗压强度逐渐降低; $40^\circ \sim 90^\circ$ 时其抗压强度逐渐增大;在 θ 为 40° 时,抗压强度最低,其值为5.76 MPa;当贯穿裂纹水平、竖直时,其破坏应力很大,平均值分别为12.58, 11.34 MPa,与无裂纹隧道模型破坏应力均值13.79 MPa接近,从而说明贯

穿裂纹 θ 为 0° 和 90° 时,由于侧压力的存在,致使裂纹的起裂和开展受到一定的限制,贯穿裂纹的存在对隧道整体的强度和稳定性的影响不大。

3.3 破坏强度理论值与试验结果的对比分析

根据 Hoek-Brown 强度准则:

$$\sigma = \sigma_2 + \sigma_c \sqrt{\frac{m\sigma_2}{\sigma_c} + 1}$$

其中, σ 为破坏应力; σ_2 为围压; m 为材料的参数;这里取 m 为8; σ_c 为砂岩单轴抗压强度,根据文献查询和实验,这里取 σ_c 为17 MPa。根据围压计算出破坏强度理论值,画出曲线并与实验值对比分析,如图9所示。

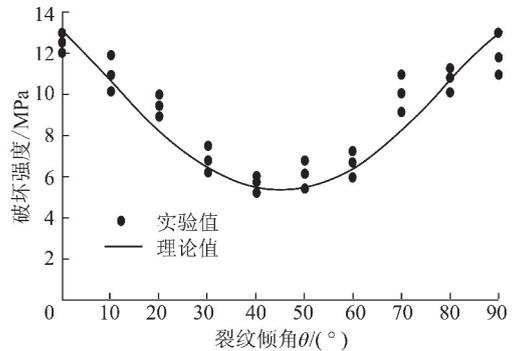


图9 破坏强度理论值曲线与实验值

Fig. 9 Theoretical value and experimental value of failure strength

从图9可知,破坏强度理论值在 θ 从 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时逐渐减小, $40^\circ \sim 90^\circ$ 逐渐增大, 40° 时破坏强度理论值最小,其值为5.76 MPa, 0° 和 90° 时破坏强度理论值最大,其值为12 MPa左右,这与实验模型的实验破坏强度曲线较为吻合。与实验模型的破坏强度相比,强度和稳定性最弱位置较为吻合,都是在 θ 为 40° 时;强度和稳定性最强位置也基本吻合,均为 θ 为 0° 和 90° 时。破坏强度理论值较实验值局部存在偏差,原因在于实验时存在边界条件以及材料不均匀性等影响,具体影响因素还有待进一步研究。

从理论计算和实验结果可知,破坏强度理论值与实验值变化趋势大致相似,强度和稳定性的最弱、最强位置较为吻合,局部略有差别。

4 模型试验结果与数值模拟结果对比分析

为了进一步研究带贯穿裂隙隧道的强度、破坏规律及其实验的真实性,采用 Abaqus 软件进行了数值模拟,并与实验结果的比对分析。本文采用了 Abaqus 软件中 Contour integral 方法计算模拟出隧道模型的 Tresca 应力云图,最后与隧道模型的试验结果进行对比分析,如图10所示,得出贯穿隧道裂纹

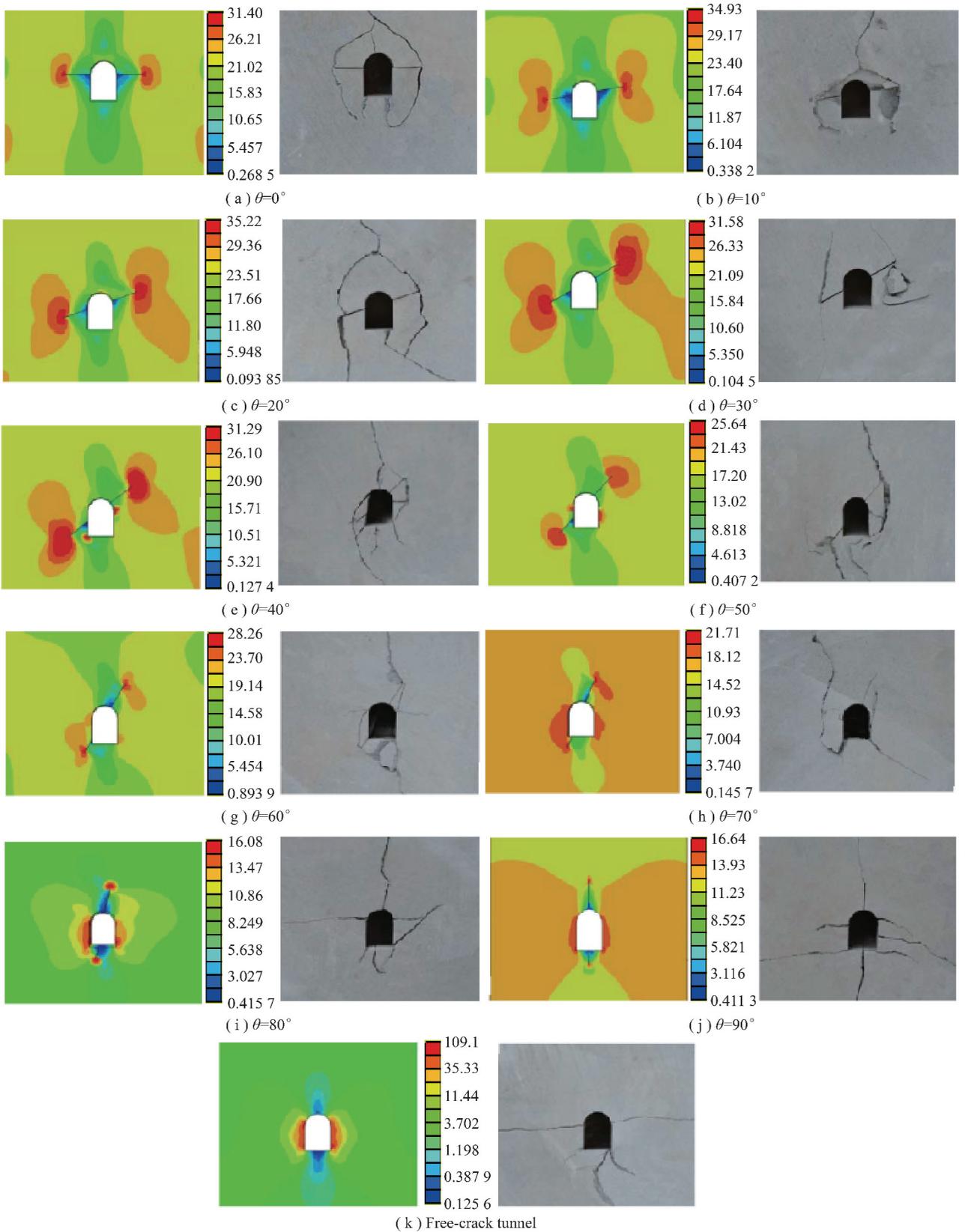


图 10 隧道应力云图、破坏模式(应力:MPa)

Fig. 10 Stress nephogram and failure mode of the tunnels(Stress:MPa)

在不同位置处对隧道模型的破坏形式的影响。图 10(a) ~ (j) 为倾角 θ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时隧道模型的 Tresca

应力云图、试件破坏模式。

从试件试验结果来看,当贯穿裂纹倾角 θ 在

0°~60°变化时,隧道模型的破坏主要集中于裂纹的两个尖端翼形起裂、扩展直至贯穿围岩,有部分没有贯穿,隧道模型的破坏还体现在部分拱顶、拱底处的拉伸破坏、部分拱脚、直墙和拱肩的压剪破坏;当裂纹倾角 θ 在70°~90°变化时,表现为裂纹尖端的单向扩展,拱底、拱顶的拉伸破坏比较严重,边墙处、拱肩处、拱脚处的压剪破坏比较严重;裂纹倾角 θ 为40°时,模型破坏最为严重,表现为裂纹尖端的翼形起裂和破坏、拱肩和拱脚的压剪破坏以及拱底的拉伸破坏。当贯穿裂纹倾角 θ 在0°~40°变化时,随着裂纹倾角的增大,隧道破坏强度从12.58 MPa降低到5.76 MPa,当贯穿裂纹倾角 θ 在40°~90°变化时,随着裂纹倾角的增大,隧道破坏强度从5.76 MPa增加到11.34 MPa;在 θ 为40°时,隧道的破坏强度最低,仅为无裂纹隧道模型强度13.79 MPa的41.79%,此位置为贯穿裂纹实验模型强度和稳定性最弱位置;在 θ 为0°和90°时,其强度分别为无裂纹隧道模型强度91.23%和82.23%,说明贯穿裂纹水平时,此位置为贯穿裂纹实验模型强度和稳定性最强位置。当贯穿裂纹倾角 θ 从0°~40°变化时,裂纹AC长度逐渐减小,实验模型强度也逐渐减小;当贯穿裂纹倾角 θ 在40°~70°变化时,裂纹AC长度逐渐减小,实验模型强度逐渐增加;当贯穿裂纹倾角 θ 在70°~90°变化时,裂纹AC长度逐渐增加,实验模型强度也逐渐增加。具体是AC长度、裂纹倾角还是二者共同对试验模型强度有影响,需要进一步研究。由以上分析可知,模型试验结果与Abaqus模拟结果较为吻合,由于实验时边界条件以及材料的不均匀性等影响,实验结果与数值模拟存在部分差异。

从Tresca应力云图可以看出,当裂纹倾角 θ 在0°~40°变化时,裂纹尖端应力集中程度及范围逐渐增大,剪切应力较大的区域为裂纹的两个尖端、拱肩、直墙、拱脚、拱底、拱顶。当裂纹倾角 θ 在40°~90°变化时,裂纹尖端集中及范围逐渐减小,剪切应力较大的区域为裂纹的两个尖端、拱肩、直墙、拱脚、拱底、拱顶。裂纹倾角 θ 为40°时,隧道表现为裂纹尖端应力集中程度最大且范围较大以及拱肩、拱脚较大的应力集中。Abaqus数值模拟与实验结果较为吻合,由于实验时边界条件以及材料的不均匀性等影响,在角度较小时存在部分差异。同时裂纹倾角 θ 为90°时由于在侧压力作用下裂纹闭合,裂纹的两个尖端应力集中不明显,与实验结果也存在部分差异。

图10(k)为无裂纹隧道模型的Tresca应力云图、试件破坏模式。从Tresca应力云图可以看出,剪切应力较大的区域为拱肩、直墙、拱脚、拱底。从实验结

果可知,模型的破坏主要表现为拱肩、拱脚、拱底的破坏。隧道模型的Tresca应力云图与实验结果吻合也较好。由于实验时边界条件以及材料不均匀性等影响,实验结果与Abaqus模拟结果存在个别差异。

5 结 论

(1)围岩中存在贯穿裂纹的隧道模型与无裂纹的隧道模型相比,其稳定性和强度有不同程度的降低, θ 在20°~60°时强度降低明显, θ 在0°~10°、70°~90°时强度降低不明显。

(2)当贯穿裂纹位于 $\theta=40^\circ$ 位置时,隧道模型的破坏应力峰值最小,仅为无裂纹隧道模型的41.77%,即此位置是隧道稳定性最弱位置。

(3)当贯穿裂纹位于 $\theta=0^\circ$ 位置时,其破坏应力最大,为无裂纹隧道模型的91.23%,即此位置是稳定性最强位置。

(4)贯穿裂纹倾角 θ 在0°~40°,40°~90°增大过程中,裂纹尖端A、B的应力强度因子具有相似的变化趋势,局部略有区别。

(5)当贯穿裂纹倾角 θ 不同时,裂纹尖端A、B的应力强度因子 K_{II} 在 θ 为40°时最大,存在明显的应力集中,此时尖端A、B破坏相对严重,隧道模型的破坏强度最低。

(6)从计算可知,破坏强度方面,理论值与实验值变化趋势大致相似,由于实际情况下边界条件的影响,部分位置实验值与理论值存在较小偏差;强度和稳定性的最弱、最强位置较为吻合。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] CHARPENTIER D, TESSIER D, CATHELINÉAU M. Shale microstructure evolution due to tunnel excavation after 100 years and impact of tectonic paleo-fracturing. Case of Tournemire, France[J]. Engineering Geology, 2003, 70(1/2): 55–69.
- [4] BRADY B H G, BROWN E T. Rock Mechanics for underground mining[M]. George Allen and Unwin, 1985.
- [5] 刘学增, 张鹏, 周敏. 纵向裂缝对隧道衬砌承载力的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 31(10): 2096–2101.
LIU Xuezheng, ZHANG Peng, ZHOU Min. Analysis of effect of longitudinal cracks on bearing capacity of tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 31(10): 2096–2101.

- [6] 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(S1):189-194.
LI Yuanxin,ZHU Zheming,LIU Kai, et al. Study of effect of cracks orientation on tunnel stability[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(S1):189-194.
- [7] 周应麟,邱喜华. 层状岩层围岩隧道稳定性的探讨[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(2):345-348.
ZHOU Yinglin,QIU Xihua. Study on stability of stratified rock tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006,2(2):345-348.
- [8] 贾蓬,唐春安,杨天鸿,等. 具有不同倾角层状结构面岩体中隧道稳定性数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2006,27(11):1275-1278.
JIA Peng,TANG Chun'an,YANG Tianhong, et al. Numerical stability analysis of surrounding rock mass layered by structural planes with different obliquities [J]. Journal of Northeastern University,2006,27(11):1275-1278.
- [9] 任德惠,张平. 不同倾角结构面对巷道稳定性的影响[J]. 煤炭学报,1988,13(3):13-19.
REN Dehui,ZHANG Ping. Study on effect of structure plane with varying inclinations on stability of roadway with a 3D model [J]. Journal of China Coal Society,1988,13(3):13-19.
- [10] 胡厚田,孔建,李晓民. 宝天线 105 隧道裂纹变形的研究[J]. 西南交通大学学报,1999,34(1):6-10.
HU Houtian,KONG Jian,LI Xiaomin. Study on the crack deformation of tunnel 105 on Baoji-Tianshui Railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,1999,34(1):6-10.
- [11] 黄成盖,叶佰建. 隧道二衬混凝土的施工及其裂缝预防措施[J]. 山西建筑,2009,35(13):301-302.
HUANG Chenggai, YE Baijian. Construction and crack prevention measures of the tunnel 2nd liner building concrete [J]. Shanxi Architecture,2009,35(13):301-302.
- [12] 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(1):29-34,43.
LI Zhiguo,ZHANG Yujun. Stability analysis for tunnels with cracked linings and the techniques for repairing the cracked linings [J]. Modern Tunnelling Technology,2004(1):29-34,43.
- [13] ZHU Z M,WANG L G,MOHANTY B, et al. Stress intensity factor for a cracked specimen under compression [J]. Engineering Fracture Mechanics,2006,73(4):482-489.
- [14] ZHU Z M. New biaxial failure criterion for brittle materials in compression [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1999,125(11):1251-1258.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 郑颖人,王永甫,王成,等. 节理岩体隧道的稳定分析与破坏规律探讨-隧道稳定性分析讲座之一[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(4):649-656.
ZHENG Yingren,WANG Yongfu,WANG Cheng, et al. Stability analysis and exploration of failure law of jointed rock tunnel-seminor on tunnel stability analysis [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering Aug,2011,7(4):649-656.
- [19] 张黎明,郑颖人,王在泉,等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学,2007,28(1):99-103,108.
ZHANG Liming,ZHENG Yingren,WANG Zaiquan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(1):99-103,108.
- [20] 王吉亮,陈剑平,苏生瑞,等. 节理岩体隧道塌方机理离散元研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(3):316-319.
WANG Jiliang, CHEN Jianping, SU Shengrui, et al. Study of collapse mechanism of tunnels in jointed rock mass by distinct element method [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2008,37(3):316-319.
- [21] 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(S2):1522-1532.
ZHENG Yingren. Failure mechanism and design and calculation method for the tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2010,6(S2):1522-1532.
- [22] 朱劲,徐幼建,许瑞宁. 不同节理倾角对红层地区偏压隧道围岩稳定性的影响[J]. 四川建筑,2015,35(2):91-93.
ZHU Jin,XU Youjian,XU Ruining. The influence of different joint angles on the stability of surrounding rock in the red beds area [J]. Sichuan Architecture,2015,35(2):91-93.
- [23] 范君黎,朱哲明,等. 高宽比对隧道围岩稳定性的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版),2015,47(S1):76-83.
FAN Junli,ZHU Zheming, et al. Effect of the ratio of depth to width on tunnel stability [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2015,47(S1):76-83.