

DOI: 10.11779/CJGE201410019

主应力方向对围岩稳定性的影响

李元鑫, 朱哲明*, 范君黎

(四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: 采用模型试验和数值模拟方法研究了在不同方向的主应力作用下, 直墙拱形隧道的围岩损伤破坏规律, 考虑了隧道内含有裂纹和不含裂纹两种情况, 利用水泥砂浆制作了直墙拱形隧道模型, 并利用有机玻璃光弹试验对无裂纹隧道的试验结果加以验证; 数值模拟采用混凝土损伤塑性模型, 计算出隧道周边各点的应力, 而对于含有裂纹的隧道计算了裂纹尖端的无量纲应力强度因子 Y_I 和 Y_{II} , 与模型试验结果吻合较好。结果表明: 对于无裂纹的隧道, 当主应力方向与隧道垂直边墙的夹角 $\theta = 45^\circ$ 左右时, 隧道的抗压强度最低; 对于带裂纹的隧道, 当裂纹与垂直边墙的夹角 $\beta = 130^\circ$ 时, 裂纹尖端无量纲应力强度因子 Y_{II} 最大, 其隧道强度最低; 对于含有裂纹且 $\beta_0 = 130^\circ$ 的直墙拱形隧道, 当主应力方向与隧道垂直边墙的夹角 θ 较小时或在 70° 左右时, 隧道的抗压强度最低。

关键词: 主应力方向; 隧道; 数值模拟; 应力强度因子

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)10-1908-07

作者简介: 李元鑫(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: yuanxinli328@gmail.com。

Effect of principal stress orientation on stability of surrounding rock of tunnels

LI Yuan-xin, ZHU Zhe-ming, FAN Jun-li

(School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to investigate the effect of principal stress orientation on the stability of the surrounding rock of tunnels, experimental and numerical studies are performed. Cement mortar models are applied, and two cases for the tunnel with and without cracks are considered. Photoelastic experiments are conducted to confirm the results of the cement mortar model tests. In the numerical simulation, the plastic damage of concrete damaged plasticity is adopted. The stresses at the points around the tunnel and the stress intensity factor of crack tips are calculated, and the results are in good agreement with the experimental ones. The results show that for the tunnel without cracks, when the angel of principal stress orientation and tunnel wall $\theta = 45^\circ$, the compressive strength is the lowest; for the tunnel with a crack, when the angel of crack direction and tunnel wall $\beta = 130^\circ$, the stress intensity factor of crack tips is the largest, and the compressive strength is the lowest, and for the tunnel with $\beta = 130^\circ$, when θ was small or $\theta = 70^\circ$, the lowest compressive strength occurs.

Key words: principal stress orientation; tunnel; numerical simulation; stress intensity factor

0 引言

隧道所承受的地应力主要来自两个方面: 上覆岩体的重量和区域构造运动作用。Brady 等^[1]指出, 一次大的构造运动都会产生大的水平应力及破坏。由于复杂的地下岩体构造, 如倾斜、褶皱和断层等, 岩体中的主应力往往不是垂直或水平的, 而是有一定的倾斜角度。围岩的破坏模式也将随主应力方向的变化而变化。如能通过理论研究并结合试验研究找到其主应力方向与围岩破坏方式的之间的联系, 就能根据隧道围岩的应力状态对隧道的稳定性及岩爆发生的可能性做出准确的预测及预报, 因此该项目研究具有重要意义。

关于隧道损伤破坏及围岩稳定性问题, 国内外有

众多学者进行了研究。赵景彭^[2]指出节理面是隧道失稳破坏的关键所在。结构面的方位、密度、组合关系及力学特性对岩体变形和破坏规律的影响远较岩石性质的影响更为重要, 许多学者^[3-6]指出节理的存在改变了岩体中应力波的传播模式, 层状结构面倾角大小对围岩的破坏失稳模式有显著的影响。Charpentier 等^[7]认为, 地下工程开挖的力学机制在于初始应力的重分

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2010CB732005); 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 (PLN1202)

收稿日期: 2013-12-31

*通讯作者

布, 开挖可以诱发裂隙, 通过开展开挖隧道内页岩近场微裂纹形成试验, 对比研究了开挖卸荷作用与构造破裂作用的差别, 还认为泥岩的孔隙度、节理、构造应力方向、岩体的各向异性对岩石的破坏起到非常重大的影响。李占海等^[8]就侧压力系数 λ 对马蹄形隧道的损伤破坏进行了数值研究, 认为损伤机制与 λ 密切相关, 当 λ 较小时, 在空间上初始损伤分布具有较大的离散性, 以拱脚、拱肩和拱顶位置为主; 当 λ 较大时, 初始损伤以拱顶位置的拉伸损伤为主; 拱顶垂直方向的位移随 λ 的增大而减小, 且随埋深的增加而增大。李永乾等^[9]研究主应力方向对隧道稳定性的影响, 得出在主应力与隧道横断面水平轴夹角在 $55^\circ \sim 75^\circ$ 时, 隧道的强度较高, 其稳定性较好; 而当主应力与其水平轴夹角在 $40^\circ \sim 45^\circ$ 或 90° 时, 隧道破坏时的主应力均较低。郑颖人等^[10-11]也研究了隧洞的破坏机理; 晏启祥等^[12]将断裂理论应用到含裂纹的盾构隧道中, 尝试利用断裂力学理论对含纵向裂纹的盾构隧道进行安全性分析, 从而对盾构隧道的安全性进行评估。一些学者^[13-15]研究了裂纹对隧道衬砌的影响, 指出裂缝的深度和位置对隧道的稳定性的影响规律。这些研究很大程度上推动了人们对隧道破坏机理的认识, 促进了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, 因此, 本文选择了主应力方向对隧道稳定性的影响规律进行了研究, 所研究的隧道为含有裂纹与不含有裂纹两种。在隧道爆破掘进过程中, 爆炸应力波往往会使隧道周边产生大量的径向裂隙, 裂隙的存在会降低隧道的稳定性。

在数值模拟方面, 很多专家和学者探索出了一些方法, 朱哲明等^[16-20]利用复变函数给出了各种边界条件下裂纹尖端应力强度因子的边界配位计算方法, 并提出了压缩载荷下共线裂纹的断裂准则。阮滨等^[21]利用扩展有限元法模拟了均质土坝坝顶裂纹的初始扩展, 裂纹的扩展规律符合实际土坝坝顶的开裂情况。

郑颖人等^[22-24]运用有限元强度折减法分析节理岩体隧道的破坏状态及其安全系数。王永甫等^[25]通过引入 PLAXIS 程序提供的界面单元模拟节理面, 对不同节理倾角时隧道的洞周变形、衬砌受力及稳定性进行了系统研究。

为了研究主应力对隧道稳定性的影响规律, 本文进行了试验研究和数值模拟研究, 试验以水泥砂浆为主要模型材料。为了进一步研究隧道变形破坏规律, 应用 Abaqus 软件中的混凝土损伤塑性模型做数值模拟计算, 并和试验结果进行比较, 得出一些有意义的结论, 为今后的隧道设计、施工提供一定的参考。

1 试验模型及材料

主应力的方向对围岩的稳定性有很大的影响, 为此我们首先研究了在不同方向的主应力作用下, 无宏观裂纹试件的整体抗压强度的变化规律, 如图 1 (a) 所示; 其次由于在爆破开挖过程中, 爆炸应力波在隧道周边容易诱发径向裂隙, 对隧道的稳定性影响很大, 因此我们选择了在隧道内拱肩处带有不同倾角 β 的单一裂隙的试件进行压缩试验, 如图 1 (b) 所示, 进而找到试件抗压强度与裂纹倾角间的关系, 并确定最不利裂纹倾角 β_0 ; 最后试验研究了在不同方向的主应力作用下, 含有单一最不利倾角 β_0 的裂纹隧道试件的整体抗压强度的变化规律, 如图 1 (c) 所示。

考虑到侧压力对隧道的影响, 在隧道模型的两侧用钢板夹住, 限制模型的侧向变形, 如图 1 所示, 相当于对模型施加了侧压力 σ_2 , 按照弹性力学理论, 其与主应力 σ_1 的关系为

$$\sigma_2 = \nu \sigma_1 \quad (1)$$

式中, ν 是泊松比, 实际上也就是无侧向应变条件下的侧压力系数 λ 。另外选择最大载荷做为临界载荷 σ_1 。

主应力方向和大小都会对隧道围岩的破坏产生重要的影响, 本文的试验方法是将侧向固定, 这样两个

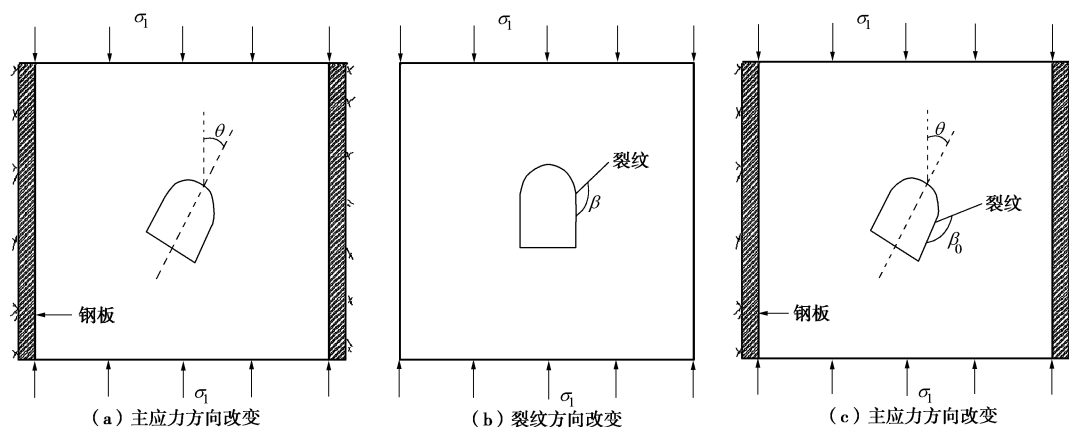


图 1 不同倾角的隧道与含有单一裂纹的隧道的 3 种试验模型

Fig. 1 Three test models for tunnels

试验以直墙拱形隧道为研究对象，将隧道简化为连续均匀介质模型。采用水泥砂浆作为试验材料，经多次试配，试验最终确定水灰比为水泥：砂：石膏：水为 1：2.6：0.52：0.3。模型试样尺寸为 350 mm×350 mm×100 mm，隧道高 60 mm，宽 50 mm，隧道拱为半径 25 mm 的半圆，模型材料的参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters				
弹性模量	泊松比	密度	黏聚力	内摩擦角
E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$
2.7	0.2	2375	1.2	15

2 主应力方向对无裂纹隧道试件整体强度的影响

试验共制作了 7 组不同角度的隧道模型，每一组有 3 个试件，隧道倾斜角度 θ 为主应力与隧道的夹角，如图 1 所示，在本试验中 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 。试验使用的是微机控制电液伺服压力试验机（200T），可对试验模型施加竖直方向荷载，如图 2 所示。将试验模型放在设备正中间后进行加载。在试验全过程中，电脑会记录整个模型的加载时间、位移、应力及应变，试验结束后还会自动生成应力应变曲线。

图 3 为各个试件破坏之后的照片，从图 3 可以看出，在不同方向的主应力作用下，即隧道倾斜角 θ 从 $0^{\circ}\sim90^{\circ}$ 度之间变化时，试件的破坏形式有所不同。当 $\theta=0^{\circ}$ 和 $\theta=15^{\circ}$ 时，模型破坏主要集中在隧道侧壁；当 $\theta=30^{\circ}$ ， $\theta=45^{\circ}$ 和 $\theta=60^{\circ}$ 时，破坏主要集

中在隧道拱肩、底角处；当 $\theta=75^{\circ}$ 和 $\theta=90^{\circ}$ 时，破坏的部位集中在隧道底边和拱顶。

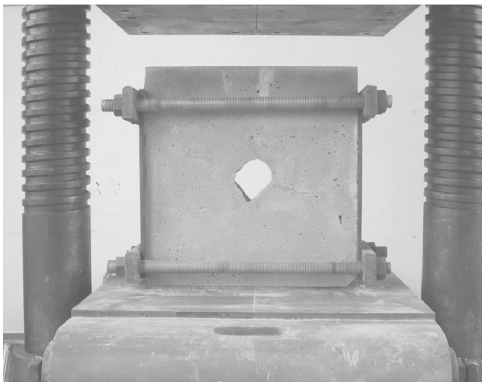


图 2 不同倾角无裂纹隧道的试验模型及加载设备
Fig. 2 Experimental model for a tunnel without cracks and loading devices

为了验证上述试验结果的准确性和普适性，本文做了光弹试验，得出了模型的条纹图，如图 4 所示。从图中可以看出，当 $\theta=0^{\circ}$ 和 $\theta=15^{\circ}$ 时，模型中应力集中现象主要集中在侧壁；当 $\theta=30^{\circ}$ ， $\theta=45^{\circ}$ 和 $\theta=60^{\circ}$ 时，应力集中主要在拱肩、底角处；当 $\theta=75^{\circ}$ 和 $\theta=90^{\circ}$ 时，应力集中发生在底边和拱顶。这与水泥砂浆材料的压缩试验结果完全吻合，这说明上述试验的结果是准确的，得出的结论是有意义的。

图 5 给出了当隧道倾角 $\theta=0^{\circ}$ 和 $\theta=30^{\circ}$ 时的应力-应变曲线，可以看出它们与一般岩土试件的压缩试验的应力-应变曲线相似，其试件的抗压强度与隧道倾角 θ 的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出，随着

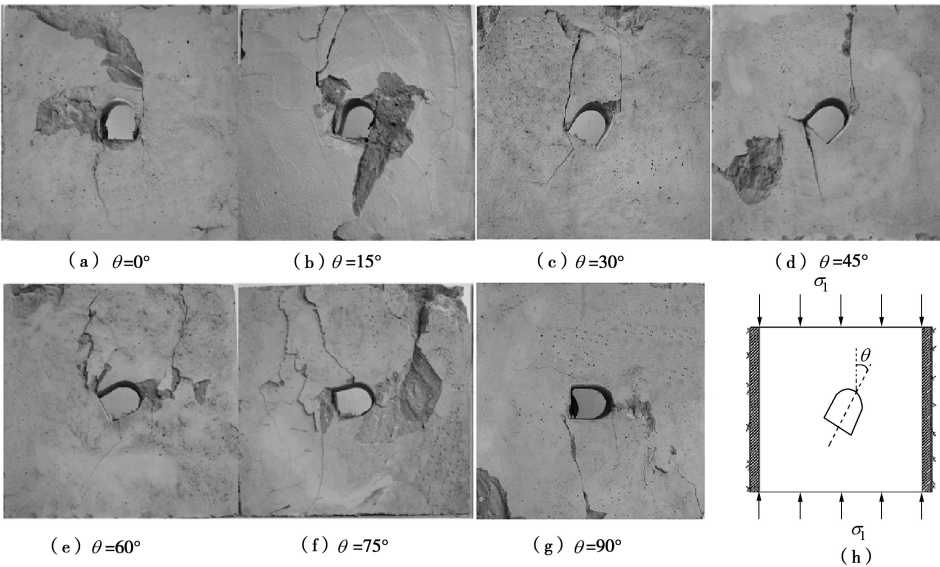


图 3 无裂纹隧道模型破坏模式
Fig. 3 Failure patterns of a tunnel without crack

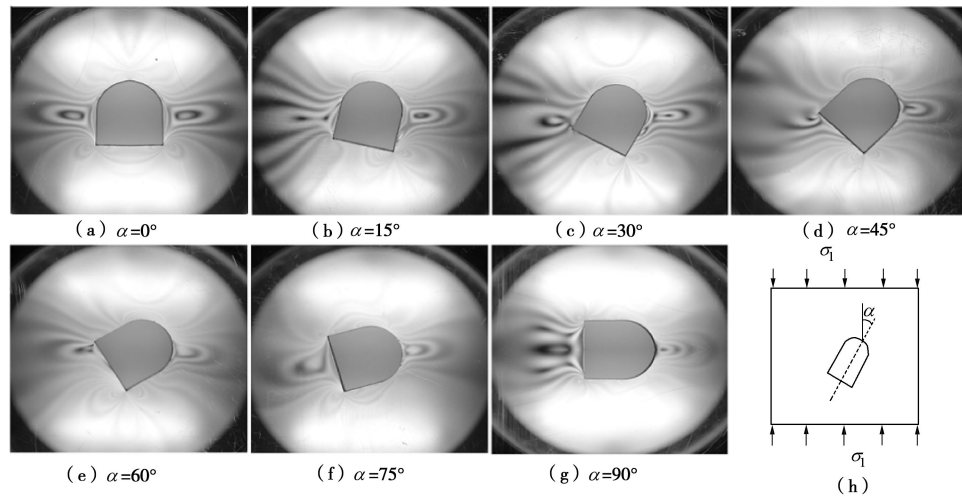


图 4 不同倾角无裂纹隧道模型光弹试验

Fig. 4 Photoelastic experiments on a tunnel without crack

夹角 θ 的变化, 试件的抗压强度也明显变化。当 $\theta = 30^\circ$ 时, 试件抗压强度最大, 平均为 28.5 MPa; 当 $\theta = 45^\circ$ 时抗压强度最小, 平均为 19.5 MPa。

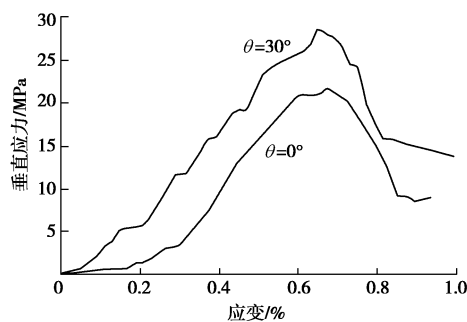
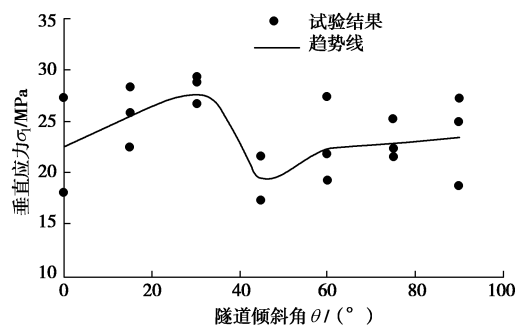
图 5 隧道倾角 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 30^\circ$ 的应力 - 应变曲线Fig. 5 Curves of stress-strain as $\theta = 0^\circ$ and $\theta = 30^\circ$ 图 6 不同 θ 角度试件的抗压强度

Fig. 6 Curve of critical stress and inclination angle of tunnel

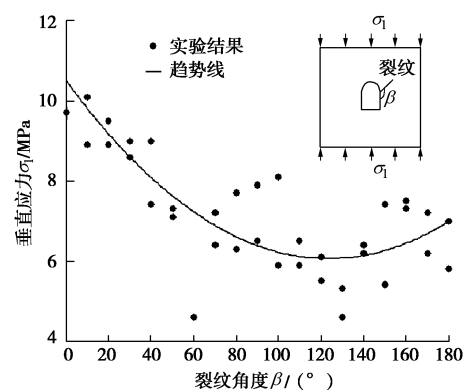
3 裂纹倾角对隧道试件整体强度的影响

在隧道爆破掘进过程中, 爆炸应力波往往会使隧道周边产生大量的径向裂隙^[26-28]。为了寻找隧道拱肩处的裂纹与垂直边墙的夹角 β 与隧道的强度和整体稳定性的关系, 采用图 1 (b) 所示的试件进行了试验研究。

采用同样配合比的水泥砂浆作为试验材料, 在隧道拱肩预制贯通裂纹, 裂纹与隧道垂直边墙的夹角 β

从 $10^\circ \sim 180^\circ$ 不等, 以 10° 为间隔。试验共制作了 19 组隧道模型(其中一组试件没有裂纹, 标记为 0°), 同一角度的模型每组有 3 块。为了在隧道模型中形成贯穿裂纹, 在浇筑水泥砂浆之前, 将薄塑料片在拱肩处进行粘接固定, 薄塑料片厚为 0.5 mm。固定好塑料片与隧道垂直边墙的夹角 β , 浇筑拌合好的水泥砂浆, 养护 30 d 之后, 将薄塑料片抽出, 在隧道中便形成长 50 mm 厚 0.5 mm 的贯穿裂纹。

采用与前文所述同样的设备进行单轴压缩试验, 其试件的抗压强度与其裂纹倾角 β 的关系如图 7 所示。从图 7 可以看出, 随着隧道拱肩处的贯穿裂纹与垂直边墙的夹角 β 的变化, 试件抗压强度发生了明显的变化。当 β 为 0° 时, 即无裂纹试件, 其抗压强度最大; 当 β 从 $0^\circ \sim 130^\circ$ 变化的过程中, 抗压强度呈现递减的趋势, 当 β 为 130° 时降为最小值, 由此可以得出: ①对于拱肩处有裂纹的隧道模型, 其稳定性比无裂纹模型的稳定性差, 强度低; ②当裂纹与侧壁的夹角 β 为 130° 时, 隧道模型的稳定性最差, 其抗压强度最低, 而后随着角 β 的增加有所增长。

图 7 不同 β 角度试件的单轴抗压强度测试结果Fig. 7 Test results of curve of compressive strength and crack inclination angle β

为了进一步研究拱肩处裂纹的方向对隧道稳定性的影响,利用 ABAQUS 软件进行了相应的数值模拟研究。基于图 1 (b) 所示的试件,建立了相应的数值计算模型。采用 J 积分法计算应力强度因子,常规有限元法在处理裂纹问题时,须将裂纹面设置为单元的边界,裂尖设为单元的一个结点,围绕着裂尖尖端设置了六节点的三角形单元 CPS6,其它的区域全部采用 CPS8 四边形单元。用 Abaqus 软件对试件模型进行计算,得出了在不同倾角 β 下各裂纹尖端的无量纲应力强度因子 Y_I (I 型裂纹) 和 Y_{II} (II 型裂纹) 值,如图 8 所示。

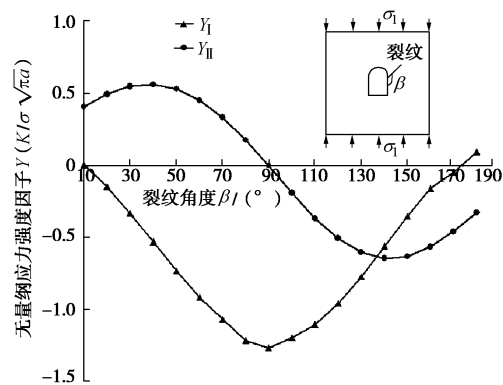


图 8 基于图 1 (b) 试件模拟的无量纲应力强度因子 Y_I 和 Y_{II} 的有限元计算结果

Fig. 8 Calculated results of the curve of dimensionless SIF Y_I and Y_{II} and crack inclination angle β

从图 8 可以看出 Y_I 基本为负值,这是由于在压缩载荷下裂纹闭合,在裂纹尖端不会造成应力集中,但是负的 Y_I 也会在裂纹尖端处产生压应力,进而影响裂纹尖端的应力场,所以负的 Y_I 也会对裂纹的扩展有一些的影响,但具体的影响程度,目前还没有定论,这有待于进一步研究。随着裂纹倾角 β 的变化,裂纹尖端无量纲应力强度因子 Y_{II} 发生了很大的变化,当 β 在 135° 左右时,其无量纲应力强度因子 Y_{II} 最大,这与图 7 中的试验结果,即当 $\beta = 130^\circ$ 时的模型抗压强度最低基本相同。

4 主应力方向对带裂纹隧道的整体抗压强度的影响

通过试验得知,当裂纹与隧道夹角 β 为 130° 时,隧道的抗压强度最低,整体稳定性最差,因此在本试验中确定裂纹与隧道夹角 β 全部为 130° ,试件如图 1 (c) 所示。试验与前面试验一样,唯一的区别是,模型试件的拱肩处有一预制裂纹,而且裂纹与隧道垂直边墙之间的夹角为 $\beta_0 = 130^\circ$ 。试验得到的试件抗压强度与主应力方向和隧道夹角 θ 的关系如图 9 所示。

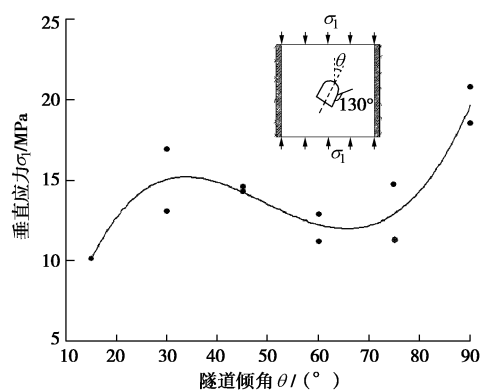


图 9 不同倾角 θ 下带裂纹隧道试件的抗压强度测试结果

Fig. 9 Curve of compressive strength and inclination angle θ for tunnel with a crack

从图 9 可以看出,随着夹角 θ 的变化,试件的抗压强度也明显不同,当主应力方向与隧道夹角 θ 为 15° 和 70° 左右时,试块的抗压强度较小;当 θ 为 90° 时,试块的抗压强度较大。

用 Abaqus 软件对 7 组带裂纹的模型进行计算,得出了不同 θ 角度下裂纹尖端的无量纲应力强度因子 Y_I 和 Y_{II} 值,其结果如图 10 所示。

从图中可以看出,随着裂纹倾角 θ 的变化,裂纹尖端应力强度因子发生了很大的变化,其 I 型裂纹的应力强度因子总是负值,而 II 型的应力强度因子在 $\theta \leq 38.54^\circ$ 时为负的,在 θ 为 0° 时,其值的绝对值最大;而当 $\theta \geq 38.54^\circ$ 时,随着 θ 的增加而增大,在 75° 左右时为最大值,其相应的抗压强度应最低,这图 9 中的试验结果一致。

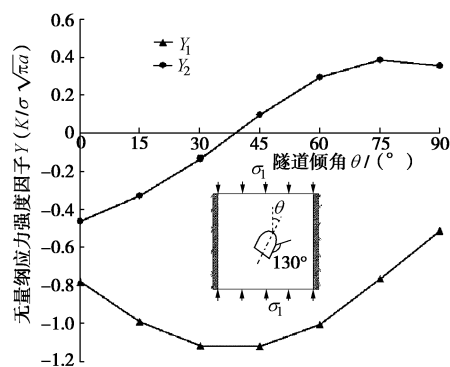


图 10 不同倾角 θ 下无量纲应力强度因子的有限元计算结果

Fig. 10 Calculated results of curve of dimensionless SIF and tunnel inclination angle θ

5 结 论

主应力的方向对围岩的稳定性有很大的影响,本文采用试验研究和数值模拟相结合的方法对如下问题进行了研究:①在不同方向主应力作用下,无宏观裂

纹隧道试件的整体抗压强度的变化规律; ②其次由于在爆破开挖过程中, 爆炸应力波在隧道周边容易诱发径向裂隙, 对隧道的稳定性影响很大, 因此我们选择了在隧道内拱肩处带有单一裂纹的试件进行压缩试验, 研究其裂纹倾角对试件抗压强度的影响, 进而找到试件抗压强度与裂纹倾角间的关系, 并确定最不利裂纹倾角 β 值; ③最后试验研究了不同方向主应力作用下, 含有单一最不利倾角 β_0 的裂纹隧道试件的整体抗压强度的变化规律。依据试验及数值模拟结果, 得出以下结论:

(1) 无裂纹的隧道模型, 主应力方向与隧道的夹角 $\theta = 30^\circ$ 左右时, 抗压强度最大; 当 $\theta = 45^\circ$ 左右时, 抗压强度最小。

(2) 拱肩处的裂纹会降低直墙拱形隧道的整体稳定性及强度, 且随着 β 角度的不同, 强度降低的程度不同。当 $\beta = 130^\circ$ 时, 裂纹尖端应力强度因子较大, 应力集中现象较明显, 其隧道模型的整体抗压强度较低。

(3) 带最不利裂纹($\beta_0 = 130^\circ$)的隧道模型, 主应力方向与隧道夹角 θ 较小时或在 70° 左右时, 抗压强度较低。

参考文献:

- [1] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. Oxford: George Allen and Unwin Ltd, 1985.
- [2] 赵景彭. 节理倾角对层状岩体大断面隧道稳定性研究[J]. 铁道建筑, 2011, **41**(9): 58 - 61. (ZHAO Jing-peng. Studies on stability of large cross section tunnels with joints[J]. Railway Engineering, 2011, **41**(9): 58 - 61. (in Chinese))
- [3] 廖志毅, 梁正召, 杨岳峰, 等. 刀具动态作用下节理岩体破坏过程的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1147 - 1155. (LIAO Zhi-yi, LIANG Zheng-zhao, YANG Yue-feng, et al. Numerical simulation of fragmentation process of jointed rock mass induced by a drill bit under dynamic loading[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2013, **35**(6): 1147 - 1155. (in Chinese))
- [4] 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): 345 - 348. (ZHOU Ying-lin, QIU Xi-hua. Study on stability of stratified rock tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006(2): 345 - 348. (in Chinese))
- [5] 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 Tian-hong, et al. Numerical stability analysis of surrounding rock mass layered by structural planes with different obliquities[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2006, **27**(11): 1275 - 1278. (in Chinese))
- [6] 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 De-hui, 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. (in Chinese))
- [7] CHARPENTIER D, TESSIER D, CATHELINEAU 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.
- [8] 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))
- [9] 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))
- [10] 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 Ji-liang, CHEN Jian-ping, SU Sheng-rui, 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. (in Chinese))
- [11] 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**(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**(2): 1522 - 1532. (in Chinese))
- [12] 晏启祥, 程 曦, 杨 征. 断裂理论在含裂纹盾构隧道安全性评价中的应用[J]. 铁道标准设计, 2010, **53**(6): 94 - 96. (YAN Qi-xiang, CHENG Xi, YANG Zheng. The application of the fracture theory in tunnel safety evaluation[J]. Railway Standard Design, 2010, **53**(6): 94 - 96. (in Chinese))
- [13] 黄成盖, 叶佰建. 隧道二衬混凝土的施工及其裂缝预防措施

- 施[J]. 山西建筑, 2009, **35**(13): 301 - 302. (HUANG Cheng-gai, YE Bai-jian. Construction and crack prevention measures of the tunnel 2nd liner building concrete[J]. Shanxi Architecture, 2009, **35**(13): 301 - 302. (in Chinese))
- [14] 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 Xue-zeng, 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. (in Chinese))
- [15] 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): 29 - 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))
- [16] 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.
- [17] ZHU Z M. New biaxial failure criterion for brittle materials in compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1999, **125**(11): 1251 - 1258.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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**: 9.
- [21] 阮 滨, 陈国兴, 王志华. 基于扩展有限元法的均质土坝裂纹模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 49 - 54. (RUAN Bin, CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua. Numerical simulation of cracks of homogeneous earth dams using an extended finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 49 - 54. (in Chinese))
- [22] 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 Ying-ren, WANG Yong-fu, WANG Cheng, et al. Stability analysis and exploration of failure law of jointed rock tunnel—seminar on tunnel stability analysis[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(4): 649 - 656. (in Chinese))
- [23] 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(1): 99 - 103, 108. (ZHANG Li-ming, ZHENG Ying-ren, WANG Zai-quan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(1): 99 - 103, 108. (in Chinese))
- [24] 贾 蓬, 唐春安, 杨天鸿, 等. 强度折减法在岩石隧道稳定性研究中的应用[J]. 力学与实践, 2007, **29**(3): 50 - 55. (JIA Peng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Application of strength reduction method on the stability study of rock tunnel[J]. Mechanics in Engineering, 2007, **29**(3): 50 - 55. (in Chinese))
- [25] 王永甫, 唐晓松, 郑颖人, 等. 岩体节理对隧道开挖稳定性影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 207 - 211. (WANG Yong-fu, TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, et al. Numerical analysis of influence of rock mass joints on stability of tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 207 - 211. (in Chinese))
- [26] ZHU Z M, MOHANTY B, XIE H P. Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(3): 412 - 424.
- [27] ZHU Z M, XIE H P, MOHANTY B. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(2): 111 - 121.
- [28] ZHU Z M. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2009, **46**(6): 1088 - 1096.