

DOI: 10.11779/CJGE2016S2011

高应力区大尺度隧洞开挖损伤区范围预测研究

周 栋^{1, 2}, 赵志宏^{*2}, 赵佳鹏²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 通过理论公式和数值模拟方法进行了高应力区大尺度隧洞开挖损伤区范围预测研究。当圆形隧洞开挖后, 根据工程经验得到的破坏准则, 结合隧洞周围的应力经典求解结果, 可以推导出损伤区范围的理论公式, 并且水平方向与竖直方向的范围能够直接得到, 可以作为估测开挖损失区的实用方法。当把破坏准则与有限元方法结合, 能够得到更为精确的损伤区分布, 改变隧洞的形状与尺寸, 得到主要结论如下: 当初始水平应力小于竖直应力时, 圆形隧洞的直径增大后, 水平方向的开挖损伤区范围比竖直方向更大; 隧道形状对开挖损伤区分布范围和特性有着显著影响, 在相同地应力和围岩条件下, 开挖相同面积的圆形和矩形隧洞, 圆形隧洞的损伤区范围比矩形隧洞更小; ③当矩形隧洞的宽高比增大后, 开挖区附近出现拉应力, 水平方向的损伤区范围最大。

关键词: 深部隧洞; 高地应力; 大尺度; 开挖损伤区

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0067-06

作者简介: 周 栋(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: zhou Dongibk@163.com。

Prediction of excavation damage zone of a deep tunnel with large size subjected to high in-situ stress

ZHOU Dong^{1, 2}, ZHAO Zhi-hong², ZHAO Jia-peng²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The analytical and numeral methods are used to predict the excavation damage zone of a deep tunnel with large size subjected to high in-situ stresses. Based on an empirical damage criterion and the classical solutions of stress distributions around a circular tunnel, the range of excavation damage zone in the horizontal and vertical directions can be analytically determined, which can serve as a first-order approximation to estimate the range of excavation damage zone. By integrating the empirical damage criterion with the finite element models, more accurate range of excavation damage zone can be determined. The results show that the excavation damage zone is dependent on the tunnel shapes and sizes: (1) When the diameter of circular tunnel increases, the range of EDZ is larger in the horizontal level than that in the vertical level; (2) The circular tunnel is more economical and reasonable than the other one in the same area; (3) When the width/height of rectangle tunnel increases, there is tensile stress generated in the vicinity of excavation, and the range of EDZ is also larger in the horizontal level.

Key words: deep tunnel; high in-situ stress; large size; excavation damage zone

0 引 言

锦屏地下实验室二期埋深约2500 m, 是目前世界上埋深最大的地下实验室之一, 围岩承受的最大应力超过70 MPa^[1], 岩石自身强度(单轴抗压强度约为135 MPa^[2])与高地应力的矛盾性为该工程面临的关键工程问题之一。由于隧洞开挖产生的临空面, 其附近岩体中通常会发生应力的重分布, 导致围岩体的节理裂隙、渗透系数、波速会发生变化, 发生这种变化的区域称为隧洞开挖损伤区^[3]。围岩开挖损伤区分布范围, 损伤区内围岩力学性质演化是深部岩体工程开挖支护设计、安全性评价的重要依据和指标。Martino和

Chandler^[4]依托加拿大的URL (Underground Research Laboratory)实验室分析了地下隧洞开挖损伤区分布范围的影响因素及控制方法。Castro等^[5]采用偏应力方法研究了加拿大SNO地下实验室隧洞开挖损伤区分布范围。Andersson和Martin^[6]在瑞典的Äspö地下实验室研究了温度-应力耦合作用下的围岩开挖损伤区范围。Cai和Kaiser^[7]根据裂纹数目判断围岩的损伤程度。戴

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509138); 清华大学自主科研项目(20151080432)

收稿日期: 2016-05-19

*通讯作者(E-mail: zhzhao@tsinghua.edu.cn)

峰等^[3]采用规二维监测与三维微震监测方法,对猴子岩电站地下厂房围岩损伤区的分布范围与特征进行了研究。朱泽奇等^[8]针对大岗山水电站地下厂房洞室进行了施工阶段的岩体力学性质测试、变形监测,得出了地下洞室开挖损伤区的分布范围。严鹏等^[9]基于原位监测试验比较了钻爆法和TBM两种开挖方法对锦屏水电站深埋隧洞围岩损伤区的影响。刘宁等^[11]采用声波监测、钻孔电视等手段对锦屏二级水电站引水隧洞开挖后的损伤区分布特征进行了研究。肖明等^[10]通过三维数值模拟分析围岩在开挖爆破作用下的损伤演化过程,得到洞室围岩的损伤系数分布。陈明等^[11]通过数值模拟开挖荷载的瞬态卸荷作用过程,比较不同应力水平下,开挖卸荷对岩体损伤区范围的影响。

综上所述,前人的研究多针对具体工程研究开挖损伤区的分布特征,尚未系统研究隧洞形状和尺寸对围岩开挖损伤区的影响,而且开挖损伤区的预测判别主要依据现场监测数据,相应的理论预测模型还不成熟。本文结合解析模型与数值方法,提出了一种能够快速预测围岩损伤区分布范围的经验方法,并分析了隧洞形状及尺寸对开挖损伤区范围的影响规律。

1 岩体开挖损伤区范围预测理论

1.1 岩体开挖损伤区判别标准

Cai 等^[12]根据隧洞开挖后围岩的应力重分布情况定义了如下的岩体损伤准则:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A\sigma_u, \quad (1)$$

式中 σ_1 , σ_3 分别为最大、最小主应力; σ_u 为岩体的单轴抗压强度; A 为岩石的相关系数。对于完整岩体, A 介于 0.4~0.5 对应岩体的损伤区; 对于重度节理岩体, A 介于 0.5~0.6 对应岩体的损伤区。如果隧洞中产生了拉应力, 还应满足拉应力强度准则。本文的研究对象为完整岩体, 结合前人积累的经验^[11], 选用 $A=0.5$ 时作为损伤区的判断标准。

1.2 岩体开挖损伤区解析模型

隧洞断面为圆形, 假设在无限长的隧洞长度里, 围岩的性质一致, 于是可以采用平面应变问题的方法, 取隧洞任一截面作为其代表研究。深部圆形隧洞的水平荷载对称于竖轴, 竖向荷载对称于横轴, 竖向荷载为 p_0 , 横向荷载为 λp_0 , λ 为侧压系数, 得到圆形隧洞围岩中的应力分布解析式为^[13]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(1+\lambda)p_0 \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(1-\lambda)p_0 \left(1 - 4\frac{R_0^2}{r^2} + 3\frac{R_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(1+\lambda)p_0 \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(1-\lambda)p_0 \left(1 + 3\frac{R_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2}(1-\lambda)p_0 \left(1 + 2\frac{R_0^2}{r^2} - 3\frac{R_0^4}{r^4}\right) \sin 2\theta. \end{aligned} \right\}$$

(2)

通过直角坐标系与极坐标系的转换关系式(3)^[15]和平面应变状态下最大、最小主应力的表达式(4), 可推出圆形隧洞围岩中最大主应力、最小主应力之差在极坐标系中的表达式(5)。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta - \tau_{r\theta} \sin 2\theta, \\ \sigma_y &= \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta + \tau_{r\theta} \sin 2\theta, \\ \tau_{xy} &= \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \sin 2\theta + \tau_{r\theta} \sin 2\theta; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}; \quad (4)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} = 0.5\sigma_u. \quad (5)$$

将式(2)带入式(5)可以求出只含有 r 和 θ 的方程, 但无法直接给出 r 的表达式。利用数值方法, 给定一个 θ 值, 便可快捷得出损伤区的范围 r 。当考虑水平方向与竖直方向两种特殊情况时, 可直接求出损伤半径的表达式。由于对称结构, 只需计算 0° 与 90° 的表达式:

$$r = \left[C + \left((C)^2 + \frac{B-1}{3R_0^4} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\theta=0^\circ), \quad (6)$$

$$r = \left[D + \left((D)^2 - \frac{B+1}{3R_0^4} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\theta=90^\circ), \quad (7)$$

式中, $B = \frac{\sigma_u}{2p_0(1-\lambda)}$, $C = \frac{1-3\lambda}{6R_0^2(1-\lambda)}$, $D = \frac{3-\lambda}{6R_0^2(1-\lambda)}$ 。

只需获得深埋隧洞的围岩应力与单轴抗压强度, 便可以根据式(6)和(7)计算出岩石的开挖损伤范围。

2 岩体开挖损伤数值模拟

2.1 岩体开挖损伤区数值模拟

理论公式虽然能够快速地预测出岩石的损伤区范围, 但对于 0° 到 90° 之间的任意角不方便应用。为了更全面地计算围岩开挖损伤区分布范围, 以下采用有限元软件 ABAQUS 建立隧洞模型与实际的损伤区监测数值进行比较。岩石参数选用室内试验获得的锦屏 II 类围岩参数 (见表 1^[16]), 本构关系采用 Mohr-Coulomb 准则, 围岩的地应力条件竖直方向应力 $\sigma_z = 66.16$ MPa、水平应力分别为 $\sigma_{xx} = 48.98$ MPa, $\sigma_{yy} = 55.67$ MPa^[16]。本次模拟考虑最不利的情况, 即选用应力差最大的两组数值进行分析。

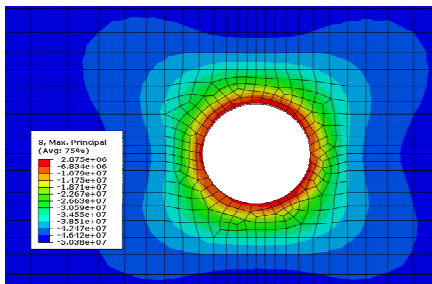
在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的二维矩形模型区域开挖直径为 12 m 的圆形隧洞, 模型左右两侧固定水平位移, 底端固定水平和垂直位移, 顶部施加已经探测出的围

岩应力; 网格对计算结果有较大的影响, 为了更好地研究开挖硐室附近区域的应力变化, 对开挖硐室的附近区域进行网格密化处理; 在进行开挖前进行地应力平衡分析, 得到围岩初始地应力场, 经计算得到隧洞开挖后的最大主应力与最小主应力分布云图如图 1 所示。

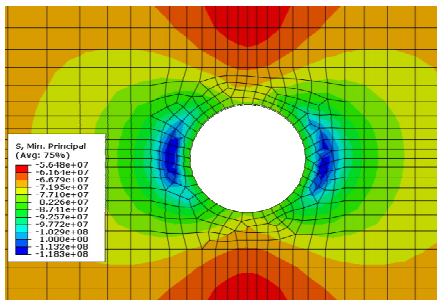
表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

围岩状态	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	弹性模量 /GPa
峰值状态	0.22	23.9	22.7	25.3
残余状态	—	5.0	42.0	2.1



(a) 最大主应力



(b) 最小主应力

图 1 隧洞围岩应力分布情况

Fig. 1 Stress distribution in surrounding rocks of tunnel

从图 1 可知最大主应力与最小主应力的分布情况, 最大主应力分布较为均匀, 最小主应力在水平方向的数值较大。在圆形隧洞的周围布置 8 个监控点, 如图 2 所示; 结合公式 (1), 根据 8 个方向监测点的最大主应力与最小主应力差值 (分别取距离开挖区 1, 2, 3, 4, 5 m 处的应力值) 判断损伤区范围。

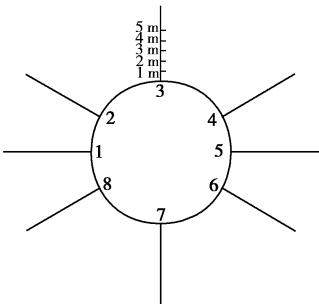


图 2 开挖区监测点布置

Fig. 2 Distribution of stress monitoring points

采用室内实验结果, 取单轴抗压强度为 135 MPa^[2], 对提取应力代入公式 (1) 计算, 得到开挖损伤区分布如图 3 所示 (单位为 m)。

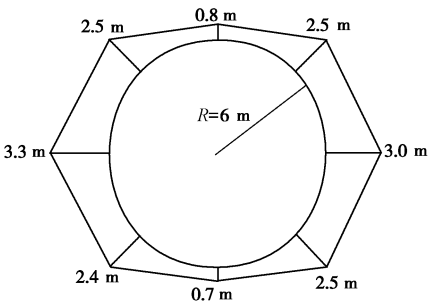


图 3 直径为 12 m 时开挖损伤区分布图

Fig. 3 Excavation damage zone in tunnel with diameter of 12 m

从图 3 可以看出: 对孔#1 的损伤范围为 3.3 m, 孔#3 的损伤范围为 3 m; 对于孔#2 (与水平方向夹角为 30 $^{\circ}$) 的损伤范围为 2.5 m; 孔#4 和孔#6 的损伤范围也为 2.5 m; 孔#8 的损伤范围为 2.4 m; 孔#3 的损伤为 0.8 m, 孔#7 的损伤为 0.7 m。当距离继续增加, 围岩受开挖的影响越小, 围岩均处于安全状态。从图 3 还可以看出, 在开挖隧洞的水平两端, 岩石的损伤范围最大, 数值为 3.3 m, 而上下端所受的影响较小, 最小的损伤范围为 0.7 m。从分析结果可知, 在应力水平最大方向 (竖直方向) 围岩洞室的损伤区范围最小, 在水平方向其损伤区范围最大, 倾斜方向的损伤区范围位于二者之间。这与张传庆^[17]在锦屏地下洞室的监测数据较一致, 即在地应力水平最大的方向, 围岩洞室的损伤区范围最小, 与最大应力垂直的方向, 损伤区范围最大。

2.2 隧洞直径对开挖损伤区的影响

为预测锦屏隧洞在 2500 m 埋深处, 隧洞的直径变化与开挖损伤区的关系, 分开挖直径为 8, 10, 16, 20 m 的圆形隧洞, 根据式 (1) 得到损伤区的范围分布; 模拟采用的地质条件与直径为 12 m 的隧洞时相同。

从图 4 可知, 当隧洞直径为 8 m 时, 孔#1 与#5 损伤范围为 2.2 m; 倾斜方向孔#2 与#4 的损伤范围为 1.6 m; 孔#6 与#8 的损伤范围为 1.5 m; 孔#3 损伤范围为 0.5 m; 孔#7 损伤范围为 0.4 m。当隧洞直径为 10 m 时, 水平方向损伤范围增加为 2.8 m, 倾斜方向为 1.8 m, 竖直方向为 0.7 m。当隧洞直径为 12 m 时, 如上节所述。当隧洞直径为 16 m 时, 水平方向损伤范围增加为 4.9 m, 倾斜方向为 3.2 m, 竖直方向为 0.9 m。隧洞直径 20 m 时, 水平方向损伤范围增加为 6 m, 倾斜方向为 3.4 m, 竖直方向为 0.9 m。随着开挖隧洞直径的增大, 监测点的损伤区范围逐渐变大, 孔#1 与#5 的损伤变化最为明显; 倾斜孔#2、#4、#6、#8 的变化次

之, 孔#3、#7 的损伤范围变化很小。当隧洞直径从 8 m 增加到 12 m 时, 水平方向的损伤范围按同样的比例增加, 当直径为 16, 20 m 时, 水平方向的损伤区范围比直径增加的比例大, 这说明隧洞直径为 16 m 后, 损伤区的范围增加得更快。同时从图 5 中可以看出水平方向的损伤区深度受隧洞直径影响更为明显, 其原因可能是水平应力较大。

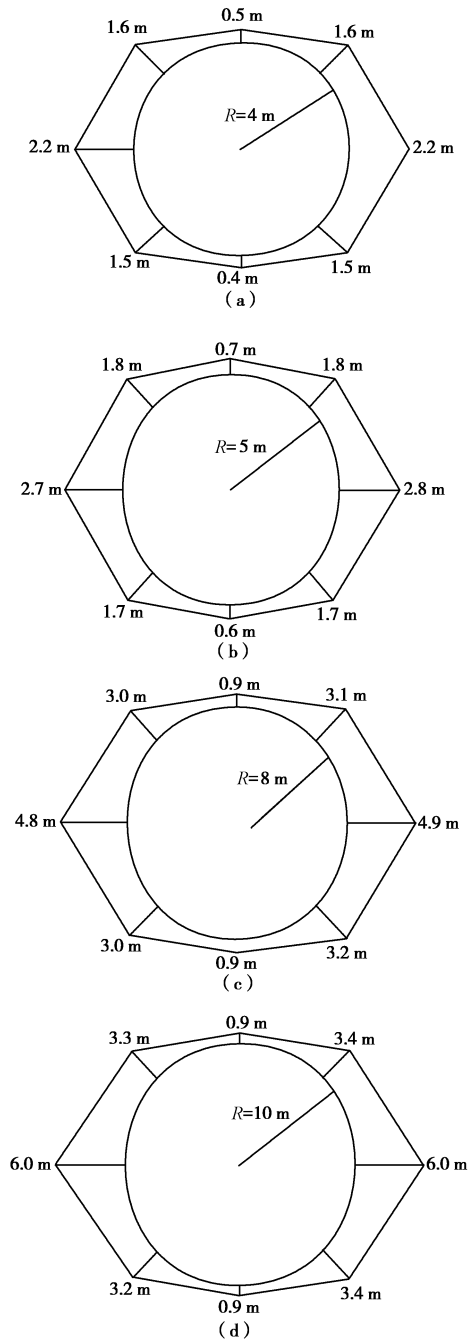


图 4 不同隧洞直径时损伤区范围变化

Fig. 4 Variation of excavation damage zone in circular tunnel with different sizes

2.3 隧洞形状对开挖损伤区的影响

为了比较开挖形状对开挖损伤区的影响, 在 2500 m 埋深处开挖宽度为 10 m、高度为 10 m 的隧洞, 模

型的地应力条件与边界条件与圆形隧洞时一致。图 6 给出模拟结果的最大主应力与最小主应力分布云图。从最大主应力中可以看出在开挖隧洞的附近区域出现拉应力, 但在圆形隧洞的开挖区周围只有压应力, 而岩石能够承担较大的压应力, 当有拉应力时岩石较容易发生破坏。圆形隧洞的水平两端最小主应力数值大, 矩形隧洞的四个角最小主应力数值大。

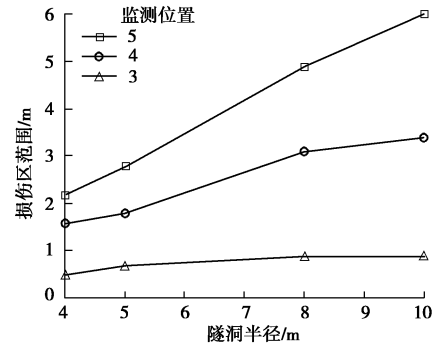
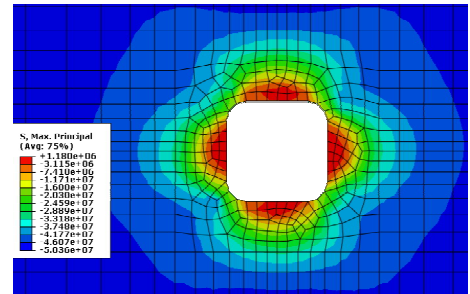
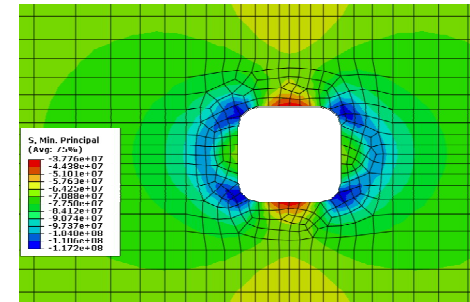


图 5 隧洞直径变化对围岩不同位置开挖损伤区的影响

Fig. 5 Effects of tunnel diameter on excavation damage zone of surrounding rock at different positions



(a) 最大主应力



(b) 最小主应力

图 6 开挖损伤区的应力分布情况

Fig. 6 Stress distribution of excavation damage zone

从图 4 (b) 与图 7 的损伤分布图可以看出: 对于孔#1 与#5, 圆形隧洞的损伤范围为 2.8 m, 而矩形隧洞对应的损伤区为 4.1 m; 对于孔#2、#4、#6、#8, 两种形状的损伤区接近 (大小为 1.8 m); 对于孔#7, 圆形隧洞的损伤范围为 0.6 m, 矩形隧洞的损伤范围为 0.4 m。在水平方向, 矩形隧洞的损伤范围接近圆形的两倍, 其他方向两种形状的损伤范围接近。由此可知形状对于损伤区的影响较为显著, 考虑到经济性与安全

性, 同样开挖面积时, 圆形隧洞比矩形更有优势。

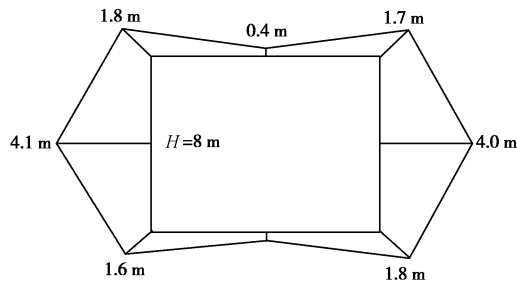


图 7 宽高比为 0.8 时开挖损伤区的分布

Fig. 7 Distribution of excavation damage zone in a tunnel with width/height of 0.8

2.4 隧洞宽高比对开挖损伤区的影响

为了比较宽高比对开挖损伤区的影响, 在 2500 m 埋深处开挖矩形隧洞, 其宽度为 10 m, 高度分别为 4, 10, 12, 16 m, 模拟条件类似, 经过计算得到的损伤区分布如图 8 所示。

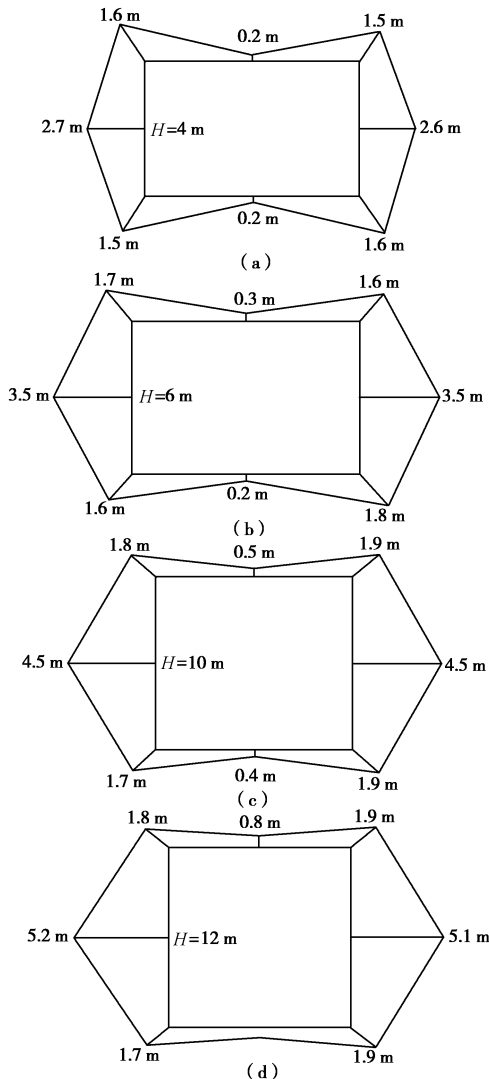


图 8 不同宽高比时应力损伤区分布

Fig. 8 Variation of excavation damage zone in tunnels with different ratios of width/height

当宽高比为 0.4 时: 水平方向#1 孔损伤区为 2.7 m, #5 孔为 2.6 m, 倾斜方向#2、#6 孔的损伤区为 1.6 m, #4、#8 孔为 1.5 m; 竖直方向有拉应力出现, 不仅要考虑损伤系数, 还需要考虑岩石的抗拉强度值, 本文以岩石单轴抗压强度的 1/10 作为岩石的抗拉强度值, 竖直方向#3、#7 孔损伤范围为 0.2 m。当宽高比为 0.6 时, 水平方向的损伤区为 3.5 m, 倾斜方向的损伤区为 1.7 m, 竖直方向的损伤区为 0.3 m; 当宽高比为 0.8 时, 上文已经讨论过。当宽高比为 1 时, 水平方向的损伤区为 4.5 m, 倾斜方向的损伤区为 1.8 m, 竖直方向的损伤区为 0.5 m。当宽高比为 1.2 时, 水平方向的损伤区为 5.2 m, 倾斜方向的损伤区为 1.9 m, 竖直方向的损伤区为 0.8 m。随着宽高比的增加, 监测点的损伤区范围逐渐变大, 与圆形隧洞类似的是孔#1 与#5 的损伤变化最为明显, 孔#2、#4、#6、#8 的变化次之, 孔#3 与#7 的损伤区域变化很小。同理, 水平方向损伤区范围较大可能与水平方向的应力较大有关。

3 结论与建议

本文进行锦屏深部隧洞开挖的理论分析与数值模拟研究, 通过改变开挖隧洞的尺寸、形状、宽高比, 分析开挖损伤区的变化, 得到如下主要结论。

(1) 得到预测损伤区分布范围的经验公式, 水平方向与竖直方向的开挖损伤范围可由解析解计算, 其余角度可以用数值方法求解。

(2) 在侧压系数小于 1 的岩体中开挖圆形隧洞, 随隧洞直径的增加, 隧洞水平两端的损伤变化最为明显, 与水平方向 30° 夹角区域的损伤变化次之, 竖直方向的损伤很小; 当开挖直径较大时, 隧洞水平两端的损伤区范围很大, 会严重影响岩体工程的安全性。

(3) 在相同地应力和围岩条件下, 开挖相同面积的圆形和矩形隧洞, 圆形隧洞开挖产生的损伤区范围比矩形隧洞更小, 应力集中程度更低, 同时圆形隧洞的周围没有拉应力出现, 在进行工程设计时, 优先考虑圆形隧洞的样式。

(4) 矩形隧洞开挖后, 当距离开挖区稍远 (大于 3 m) 时, 损伤区域只出现在矩形隧洞的水平两端。

考虑到过大的开挖尺寸对地下洞室的安全性影响较大, 应对开挖区进行衬砌与锚杆加固处理, 在今后的研究中建议考虑加固方法对开挖损伤区的影响。

参考文献:

- [1] 刘 宁, 张春生, 褚卫江, 等. 锦屏二级水电站深埋隧洞开挖损伤区特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2235 - 2241. (LIU Ning, ZHANG Chun-sheng, ZHU

- Wei-jiang, et al. Excavation damaged zone characteristics in deep tunnel of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(11): 2235 – 2241. (in Chinese))
- [2] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(10): 1999 – 2009. (ZHANG Chun sheng, CHEN Xiang-rong, HOU Jing, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(10): 1999 – 2009. (in Chinese))
- [3] 戴峰, 李彪, 徐奴文, 等. 猴子岩水电站深埋地下厂房开挖损伤区特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(4): 735 – 746. (DAI Feng, LI Biao, XU Nu-wen, et al. Characteristics of damaged zone due to excavation in deep underground powerhouse at Houziyan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(4): 735 – 746. (in Chinese))
- [4] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(8): 1413 – 1426.
- [5] CASTRO L A M, MCCREATH D R, OLIVER P. Rockmass damage initiation around the sudbury neutrino observatory cavern[C]// North American Rock Mechanics Symposium, 1996.
- [6] ANDERSSON J C, MARTIN C D. The Äspö pillar stability experiment: Part I experiment design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, **46**(5): 865 – 878.
- [7] CAI M, KAISER P K. Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**(4): 301 – 310.
- [8] 朱泽奇, 盛谦, 张勇慧, 等. 大岗山水电站地下厂房洞室群围岩开挖损伤区研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(4): 734 – 739. (ZHU Ze-qi, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Research on excavation damage zone of underground powerhouse of Dagangshan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(4): 734 – 739. (in Chinese))
- [9] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 深部岩体开挖方式对损伤区影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(6): 1097 – 1106. (YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. In-situ test research on influence of excavation on induced damage zone in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(6): 1097 – 1106. (in Chinese))
- [10] 肖明, 张雨霆, 陈俊涛, 等. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析计算[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2613 – 2618. (XIAO Ming, ZHANG Yu-ting, CHEN Jun-tao, et al. Numerical analysis of excavation damaged zone of underground caverns induced by excavation blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2613 – 2618. (in Chinese))
- [11] 陈明, 胡英国, 卢文波, 等. 深埋隧洞爆破开挖扰动损伤效应的数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1531 – 1537. (CHEN Ming, HU Ying-guo, LU Wen-bo, et al. Numerical simulation of blasting excavation induced damage to deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1531 – 1537. (in Chinese))
- [12] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(5): 833 – 847.
- [13] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [14] 周松鹤. 工程力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. (ZHOU Song-he. Engineering mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (XU Zhi-lun. A concise course of elastic mechanics[M]. Beijing: High Education Press, 2002. (in Chinese))
- [16] 张凯. 脆性岩石力学模型与流固耦合机理研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2010. (ZHANG Kai. Study on mechanical model and fluid-solid coupling mechanism for brittle rocks[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese))
- [17] ZHANG C, FENG X, ZHOU H. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **52**(3): 139 – 162.

(责任编辑 明经平)