

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.01.017

开挖断面曲率半径对高应力下硬脆性围岩板裂化的影响

周 辉, 卢景景, 胡善超, 张传庆, 徐荣超, 孟凡震

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 围岩板裂化是深埋高地应力条件下硬脆性围岩开挖后出现的一种典型破坏形式。影响围岩板裂化形态和形成机制的因素很多, 开挖断面的曲率半径是其中的关键因素之一。为了研究开挖断面曲率半径对深部硬脆性围岩板裂化的影响, 首先总结、分析了锦屏二级水电站深埋隧洞不同开挖断面曲率半径所对应的板裂化形态和特征。在此基础上, 设计了室内物理模型试验, 研究不同孔径的圆形洞室和不同尺寸的直墙拱洞室在平面应变条件下的板裂化破坏形态。研究结果表明, 开挖断面的曲率半径对围岩板裂化的影响机制表现在尺度效应和结构效应两个方面, 影响着板裂化的破坏形态和破裂机制, 当同一洞室断面包含不同曲率半径段时, 板裂化破坏表现出曲率半径影响下的组合破坏特征。最后, 利用数值模拟结果分析和验证了开挖断面曲率半径对围岩板裂化的影响效应。

关 键 词: 硬脆性围岩; 高应力; 板裂化破坏; 曲率半径; 影响机制

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016)01 - 0140 - 07

Influence of curvature radius of tunnels excavation section on slabbing of hard brittle rockmass under high stress

ZHOU Hui, LU Jing-jing, HU Shan-chao, ZHANG Chuan-qing, XU Rong-chao, MENG Fan-zhen

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Generally, slabbing is the typical failure mode when the hard brittle rockmass in deep tunnel is excavated under the condition of high stress. Many factors are contributed to the form and formation mechanism of slabbing, in particular the curvature radius of the excavated section. Therefore, the influence of curvature radius on the hard brittle slabbing is firstly summarized and analyzed the slabbing form and feature corresponding to curvature radius of different sections in deep tunnel of Jinping II hydropower station. Subsequently, the indoor physical model test is designed to investigate the slabbing forms of circular caves with different bore diameters and straight-wall arch caves with different sizes under plane strain condition. The results show that the slabbing mechanisms influenced by the curvature radius can be demonstrated at both scale and structural effects, which jointly affect fracture morphology and fracture mechanism of slabbing. When the sections in the same tunnel consist of different curvature radii, slabbing failure presents combined characteristics of fracture. Finally, the mechanisms of slabbing influenced by curvature radius are analyzed and verified by numerical simulation.

Keywords: hard brittle rockmass; high stress; slabbing failure; curvature radius; influence mechanism

1 引 言

断面几何形状是地下洞室设计的一个重要因

素, 选择合理的断面形状有利于提高洞室结构稳定性和降低围岩损伤程度, 在保证安全的条件下降低工程造价。目前, 国内外水工隧洞常用的断面形式

收稿日期: 2014-04-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No.2014CB046902); 中国科学院科技创新“交叉与合作团队”(人教字〔2012〕119号); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No.KZCX2-EW-QN115); 国家自然科学基金项目 (No.41172288)。

This work was supported by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB046902), CAS Interdisciplinary Innovation Team ((2012)119), the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (KZCX2-EW-QN115) and the National Natural Science Foundation of China (41172288).

第一作者简介: 周辉, 男, 1972年生, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

有圆形、矩形、直墙圆拱形和蛋壳型^[1]。董书明等^[2]采用有限元分析计算的方法研究了这4种断面形式的隧洞围岩应力分布和位移分布情况,表明圆形为稳定性最优断面,但考虑到实际使用空间和效益,认为蛋壳型为最合理断面形式。其他学者的研究^[1,3]也表明,蛋壳型或椭圆形为最优断面形式,但这种断面形式施工上存在困难,因此,实际工程中不乏圆形、直墙圆拱形等断面形式。采用非圆形断面,隧洞断面不同部位对应不同的曲率半径,曲率半径会影响围岩应力场的分布并引起不同的结构效应^[4]。

围岩板裂化是深部高地应力条件下硬脆性岩体开挖后出现的一种典型破坏形式。二滩、小湾、锦屏二级等水电站及一些大埋深煤矿巷道中均出现了板裂化破坏现象^[5-8]。围岩板裂化破坏形态蕴含着丰富的信息,通过解译这些信息可以获得地应力场分布和判断岩爆的发生^[9]。因此,对围岩板裂化形态的研究具有重要意义。Cai^[10]研究表明,板裂化破坏通常表现为洞壁围岩密集分布的洋葱皮状裂纹,裂纹切割围岩形成近似平行于开挖面的岩板,裂纹密度取决于岩体地应力条件、岩体强度以及岩石的非均质性。早期的研究多建立在隧洞边墙的板裂化破坏上,造成了板裂化多发生在隧洞边墙的认识。实际上,围岩板裂化在隧洞整个洞周围岩内都会发生,只是边墙处的板裂化破坏最常见且最形象,如图1所示。实际工程中的围岩板裂化表明,板裂化破坏形态与开挖断面的曲率半径有一定关系。顾金才等^[11]在研究围岩分层断裂现象时,发现洞壁曲面半径大小决定着围岩是否发生分层断裂。Cheon等^[12]在利用水泥砂浆试样制作的带孔洞的模型试样研究多轴应力条件下的洞壁破坏情况时,提到了洞周围岩强度比(洞周最大切向应力与单轴抗压强度之比)与开挖断面曲率半径有关。上述研究结果表明,开挖断面曲率半径影响洞周切向应力的大小,而洞壁曲面引起的结构效应会影响围岩径向位移,造成洞壁围岩不同的破坏机制和破坏形态。

围岩板裂化的发生取决于多种条件,其破坏形态也与多种因素有关。现有研究多集中于围岩板裂化的发生条件上,而对于围岩板裂化破坏形态的研究甚少。通过上述分析可以发现,围岩板裂化破坏形态与开挖断面的曲率半径密切相关。本文以锦屏二级水电站深埋隧洞围岩板裂化破坏情况与开挖断面曲率半径的关系为依据,研究开挖断面曲率半径对围岩板裂化的影响规律。通过物理模型试验,在室内试验条件下系统研究开挖断面曲率半径对围岩板裂化破坏的影响,分析曲率半径对围岩板裂化的

影响机制,最后采用数值模拟结果进行验证。

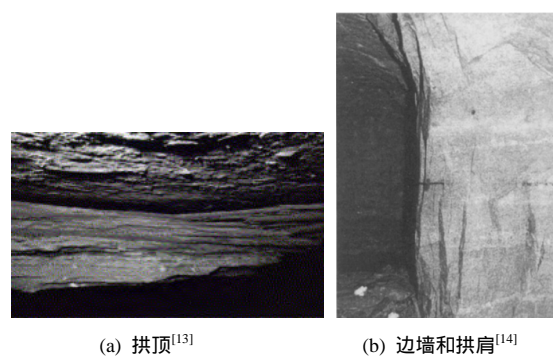


图1 隧洞洞周不同位置处板裂化破坏^[13-14]

Fig.1 Slabbing failure at different positions around the tunnel^[12-13]

2 开挖断面曲率半径对围岩板裂化影响的工程表现

锦屏二级水电站深埋隧洞围岩多为板裂化破坏,作者统计了大量围岩板裂化破坏案例,图2~4列出了几处典型的板裂化破坏照片。



(a) 边墙和拱肩

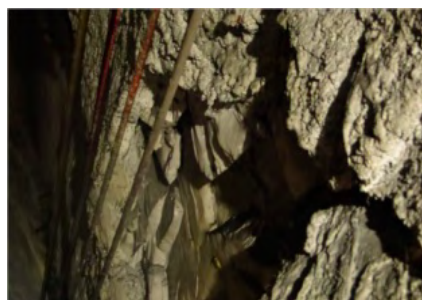


(b) 拱顶和拱肩

图2 2#试验洞支洞板裂化破坏

Fig.2 Slabbing failure of test branch tunnel in tunnel #2

图中所示的隧洞断面形状为直墙拱型(城门洞型),拱肩和拱脚处为曲率半径变化处。边墙曲面近乎平直,其曲率半径近似为无穷大,拱脚处近似直角,其曲率半径近似为无穷小。通过分析大量的围岩板裂化案例可以看出:边墙和拱顶处板裂化破坏面近似平行于开挖面,由出露于洞壁的板裂形态可



(a) 边墙



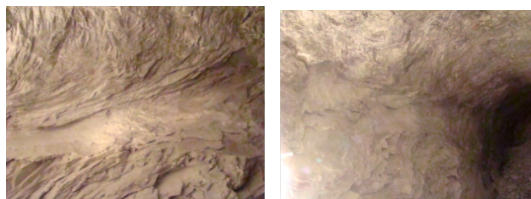
(b) 拱脚

图3 排水洞板裂化破坏

Fig.3 Slabbing failure of the drainage tunnel



(a) 边墙



(b) 拱肩



(c) 另一侧拱肩

图4 3#试验洞 F 支洞板裂化破坏

Fig.4 Slabbing failure of test branch tunnel F in tunnel #3

看出板裂分多层,各板裂面近似平行,板裂形态总体上较为规则;拱肩为拱顶和边墙连接处,其表层板裂面近似平行于该处洞壁的曲面,与边墙和拱顶的表层板裂面具有一定的连通性,如图2及图4(c)所示;但表层以内的板裂形态则发生了变化,见图4(b),该处表层板裂破坏脱落,露出里层板裂,由出露在外的板裂面端部不难推测里层板裂面与原拱肩曲面成一夹角延伸,对比图4(b)和图4(c),更能看出这一特点;拱脚处表层的一层板裂较厚,见图3(b),表层鼓胀脱落后可见内部薄状密布板裂化形态,板裂面与洞壁已成一定夹角。由此可见,开挖断面的曲率半径对板裂化的形态影响甚大。

3 开挖断面曲率半径对围岩板裂化影响的物理模型试验

诚然,板裂化破坏是硬脆性岩体在高地应力场条件下开挖卸荷产生的一种破坏形式,其在工程中的发生条件是高地应力场、非均质硬脆性岩体以及开挖卸荷等,因此,围岩板裂化形态同时受到侧压系数^[15]、开挖过程和方式、卸荷速率、动力扰动^[16]、结构面等的影响。本文的主要目的则是深入研究开挖断面的曲率半径对围岩板裂化的影响,为此,本节设计了室内物理模型试验,研究不同开挖断面的曲率半径洞室在平面应变加载条件下的板裂化破坏情况。

3.1 试验概况

模型试验试样为长方体试样,由水泥和石英砂以1:1配比人工浇筑而成,试样中心为预制模拟洞室。试样浇筑尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,试验试样设计尺寸为150 mm×150 mm×75 mm,由于实际试验试样尺寸由浇筑试样切割和断面磨平而成,故实际尺寸要略小于试样设计尺寸。模拟洞室有两种:圆形洞室和直墙拱顶洞室。圆形洞室直径分别为12、20、31、36 mm;直墙拱顶洞室分别为跨度20 mm、高度30 mm和跨度34 mm、高度46 mm两种。浇筑试样见图5。浇筑试样常规试验应力-应变曲线和力学参数见图6和表1。



(a) 浇筑中的试样

(b) 已浇好的试样

图5 试样浇筑

Fig.5 Concrete specimens

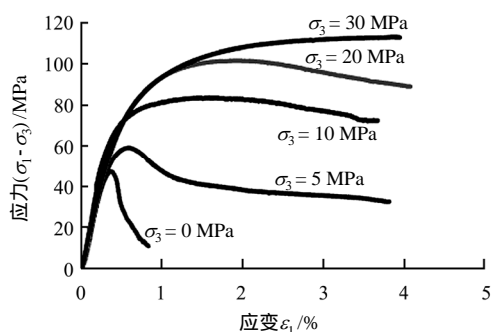


图 6 浇筑试样应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of casting specimens

表 1 试样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of specimens

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	单轴抗压强度 σ_c/MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度 t/MPa
17.3	0.16	47.65	16.24	23.02	2.3

由表 1 可见，试样单轴抗压强度与抗拉强度之比达到 20.72，表明试样为典型的脆性材料。而图 6 所示的应力-应变曲线表明浇筑试样脆延转化明显，与前文所述的锦屏水电站的大理岩特性相似^[17]。综上可知，本次试验所配制的试件具有明显的脆性破坏特征，而硬脆性是围岩形成板裂化破坏的必要条件^[18]。

采用自行研制的组接式真三轴地下洞室模拟试验装置，该装置可约束一侧水平向位移，另一侧水平向采用千斤顶加压。其轴向加压仪器采用中国科学院武汉岩土力学研究所自主研制的 RMT-150C 电液伺服刚性试验机。整体设备见图 7。



图 7 试验设备

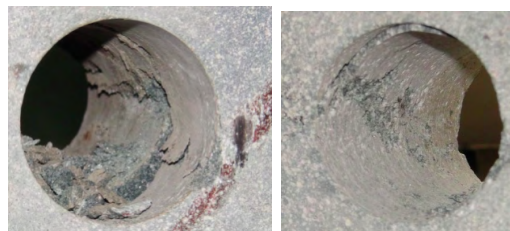
Fig.7 Testing equipment

试验方案为轴向和侧向千斤顶同步等荷加载，当加载到预定值时，继续加轴向荷载直至试样破裂。加载初始，旋紧水平向螺母，约束试样该侧水平位移，保证垂直洞室轴线平面为平面应变状态。试验结果显示，不同孔洞试样的侧向荷载为 8.35 ~ 8.77 MPa，竖向向荷载加载至 45.96 ~ 62.88 MPa 试样破裂，试样均为宏观裂缝贯通导致破坏。

3.2 试验结果分析

(1) 如图 8 所示，不同孔径和孔型洞壁均出现了板裂化破坏形态，由于试验是加载至试样宏观破裂时停止，故洞壁上的板片有的已脱落，在洞壁上形成了 V 型坑。

(2) 随着洞径的增大，板裂化由单层卷曲形态逐渐转为多层板裂片形态，板裂化碎屑尺寸成增大趋势（见图 9），V 型坑深度也有所增大，而试样最终破坏时的竖向向荷载则有所降低。如图 8 和图 9 所示，各孔径和不同孔型的碎屑均表现出中间厚两端薄的楔形体特征，圆形孔洞板裂化碎屑易在中间处断裂，且整片碎屑易于掰断，其颗粒间黏结力减弱。直墙拱式板裂楔形体两端较薄处易于掰断，中间较厚处强度则很高。

(a) B12-1 ($d = 12 \text{ mm}$)(b) B20-2 ($d = 20 \text{ mm}$)(c) B31-2 ($d = 31 \text{ mm}$)(d) A36-1 ($d = 36 \text{ mm}$)

(e) B23-2(宽 20 mm, 高 30 mm) (f) B34-2(宽 34 mm, 高 46 mm)

图 8 不同孔径洞壁破坏形态

Fig.8 Fracture morphology of the tunnel walls with different bore diameters

(3) 由板裂化破坏的碎屑（图 9）和 V 型坑壁上的微观特征可发现，随着曲率半径的增大，板裂化破坏面由剪切滑移为主逐渐转为以拉伸破坏为主，孔径在 20 mm 时，碎屑破坏面上可见有反光点（试样浇筑时使用的细石英砂），且表面干净，无水

泥的摩擦粉末,孔径增大,碎屑破坏面反光点密度也增大。试验中最小洞径为 12 mm,大于 12 mm 的试样洞壁板裂化形态和破裂的力学机制是相似的。

(4)对于直墙拱板裂化破坏面,从图 10(a)所示的箭头方向观察可见点式分布的剪切摩擦粉末痕迹,而垂直于破坏面观察时则可见拉裂断面的反光点。图 10(b)为内层板裂片,端部可见明显的剪切滑移痕迹。

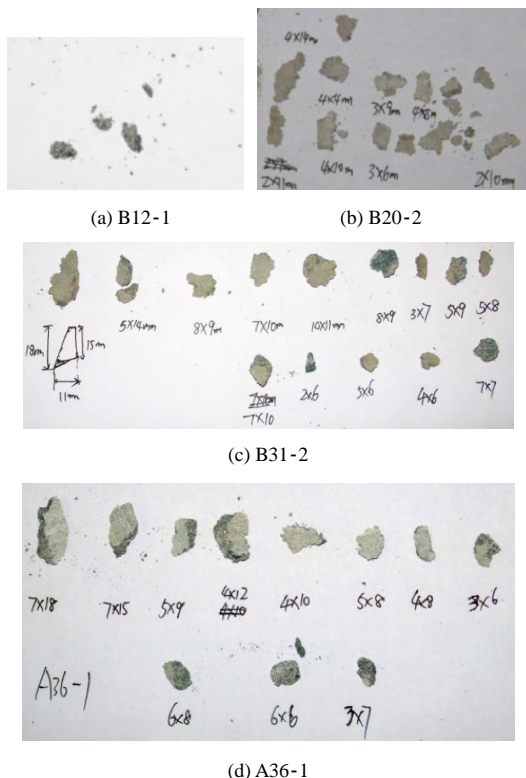


图 9 圆形孔洞洞壁剥落碎屑

Fig.9 Spalling fragments of the circular cave wall

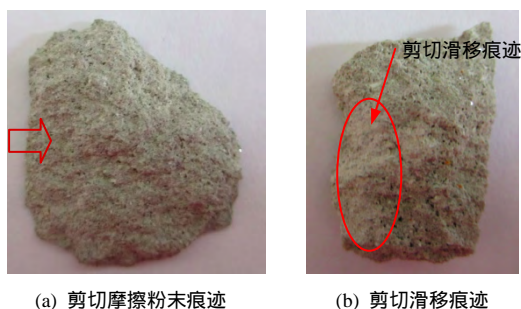


图 10 直墙拱孔洞洞壁剥落碎屑

Fig.10 Spalling fragments of the straight-wall arch cave wall

(5)直墙拱孔洞断面是由不同曲率半径段组成,边墙壁与拱顶及底边连接处为曲率半径转折处。由于试样尺寸较小和采用的加载方式,在曲率半径转折处只有一条以剪切滑移为主的破坏线,并向试样上、下两端延伸,见图 11,并没有出现工程中的一

组以剪切滑移为主的板裂破坏面。



(a) B23-2(宽 20 mm, 高 30 mm) (b) B34-2(宽 34 mm, 高 46 mm)

图 11 拱肩和拱脚处破坏

Fig.11 Fracture of the spandrel and skewback

4 开挖断面曲率半径对围岩板裂化的影响分析

工程和试验中的现象均表明,开挖断面的曲率半径对围岩板裂化形态影响甚大,尤其是洞室同一断面是由不同曲率半径段组合而成,这种影响更为明显。试验结果显示,开挖断面的曲率半径不同,则板裂化机制也不同。随曲率半径的增大,板裂化由剪切滑移为主转变为拉伸破坏为主,板裂化碎片显示出明显的尺度效应。由圆形孔洞周围的应力场解析解可以看出^[19],洞壁应力场与孔径无关,围岩内应力场分布尺度有差异,但分布形式是相似的。综合试验结果和已有研究,作者认为,开挖断面的曲率半径对围岩板裂化的影响机制表现为两个方面,即尺度效应和结构效应。

尺度效应是指随着曲率半径增大(如前文中圆形洞室的半径),洞周围岩扰动应力场和板裂化破坏尺寸相应的增大;结构效应是指由于曲率半径的存在引起的板裂化板片具有一定的曲率,引起了板裂化破坏过程中应力场的改变。两者并不是相互独立的,曲率半径较小时,尺度较小,结构效应不明显;曲率半径增大时,尺度增大,结构效应发挥作用。从宏观上定性来看,尺度效应决定着板裂化的破坏范围;结构效应则在板裂化形成过程中和形成后起关键作用,基本决定了板裂化的最终形态和主要破裂机制,以及影响着板裂化的后续破坏,如完整岩体的板裂化岩爆以及岩爆等级等。

如图 12(a)所示,在本文模型试验加载条件下,洞壁板裂化发生在水平加荷方向—V 型区域内。曲率半径(圆孔半径)较小时,V 型范围很小,切向应力和径向应力集中区域接近孔壁,孔壁围岩发生

切向压缩和径向膨胀。由于曲率的存在，孔壁一定范围内围岩形成一拱形结构。当某处发生屈服，拱形结构有脱离孔壁的趋势时，该拱形结构会产生向围岩内的弯曲变形。随着曲率半径的增大，初始破坏面增多，形成的拱形结构曲率越大，向围岩内的弯曲变形减小，围岩壁径向位移增大，板裂化板片更易脱落。孔壁上围岩达到抗剪强度时破坏，产生裂纹，形成如图 12(b)所示的卷曲形态。卷曲板裂片的中心部分并未脱离孔壁，对该处内部围岩形成一定的支护作用，在此加载条件下达到平衡，围岩不再破坏。由图 12(c)则可见内层未脱落板裂片。

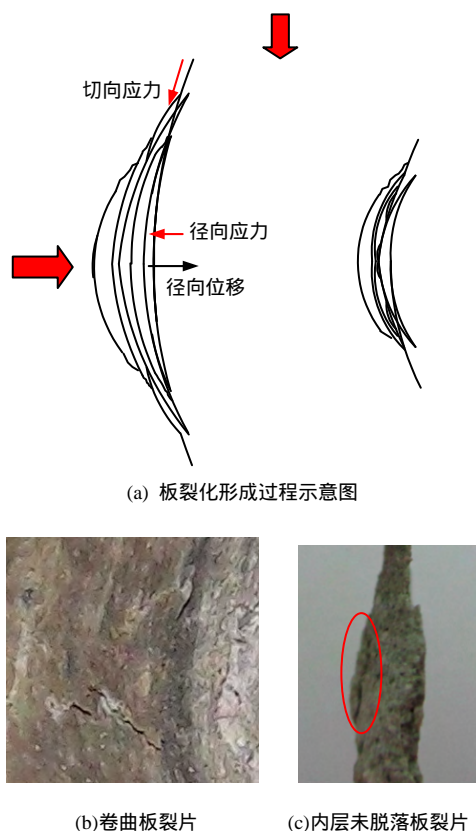


图 12 曲率半径影响机制示意图

Fig.12 Schematic of the affected mechanism by the curvature radius

已剥落的碎屑强度降低，用手可轻易掰断，可见，在板裂面形成之前整个 V 型区域内大部分发生了塑性屈服。

图 13 为直墙拱洞室围岩板裂化破坏的数值模拟计算结果，限于篇幅，板裂化破坏的数值模拟实现将在另文叙述，在此只对计算结果进行分析。图 13 中所示为洞壁周边围岩塑性区的分布与破坏机制，在直墙壁处（无穷大曲率半径）可见明显拉伸破坏板裂化，而在拱顶和拱肩处（曲率半径转折处）则是明显的剪切滑移为主的板裂化破坏，这与前文所述的工程板裂化形态和室内模型试验结果是一致的。

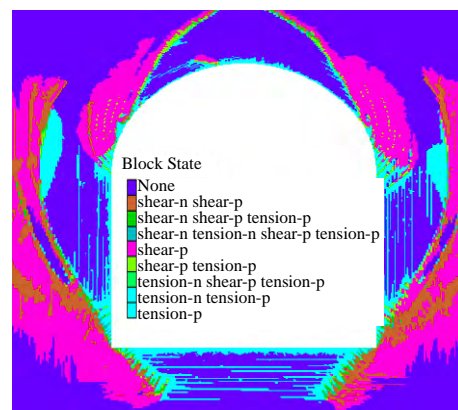


图 13 数值模拟结果

Fig.13 Contour of numerical result

5 结 论

(1) 开挖断面的曲率半径对围岩板裂化的影响机制主要表现在两个方面，即尺度效应和结构效应。两者不是相互独立的，尺度效应决定着结构效应发挥的程度。较小的曲率半径具有小尺度效应，相应的结构效应则不明显；相反的，较大的曲率半径具有大尺度效应，这时结构效应对板裂化形态和破坏机制起主要作用。

(2) 随着曲率半径的增大，板裂化破坏机制则由以剪切滑移为主转变为以拉伸破坏为主。

(3) 同一洞室、不同曲率半径段的板裂化形态明显不同，大曲率半径（边墙）板裂化板面与洞壁近似平行，曲率半径转折处（拱顶和拱脚）板裂化板裂面与洞壁成一定角度，破坏机制如（2）所述。

(4) 需要说明的是，影响板裂化破坏机制和形态的因素有很多，曲率半径只是其中之一，且作者认为，曲率半径的影响只对洞周围岩一定深度内起作用，在围岩深部，岩体处于较高的围压状态，其主要破坏机制为剪切破坏，开挖断面曲率半径的影响会逐渐减弱。

参 考 文 献

- [1] 黄运飞. 关于地下洞室形状的几个问题[J]. 水文地质工程地质, 1989, (6): 49 - 51.
HUANG Yun-fei. Several problems on the shape of underground openings[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1989, (6): 49 - 51.
- [2] 董书明, 辛全才, 卢树盛. 断面形状对隧洞围岩稳定性的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2011, (1): 102 - 104, 107.
DONG Shu-ming, XIN Quan-cai, LU Shu-sheng. The influence of the tunnel cross section shape on stability of surrounding rocks[J]. *China Rural Water and*

- Hydropower**, 2011, (1): 102 - 104, 107.
- [3] 郝付成. 合理开挖地下洞室洞形初探[J]. 市政技术, 2006, 23(6): 390 - 392.
HAO Fu-cheng. Initial inquiry into the cave shape for rational excavation[J]. **Municipal Engineering Technology**, 2006, 23(6): 390 - 392.
- [4] 施高萍, 祝江鸿, 李保海, 等. 矩形巷道孔边应力的弹性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2587 - 2593.
SHI Gao-ping, ZHU Jiang-hong, LI Bao-hai, et al. Elastic analysis of hole-edge stress of rectangular roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2587 - 2593.
- [5] 史红光. 二滩水电站地下厂房围岩稳定性因素评价[J]. 水电站设计, 1999, 15(2): 75 - 78.
SHI Hong-guang. Wall rock stabilization evaluation of underground powerhouse at Ertan Hydropower Station[J]. **Design of Hydroelectric Power Station**, 1999, 15(2): 75 - 78.
- [6] 林锋, 黄润秋, 蔡国军. 小湾水电站低高程坝基开挖卸荷松弛机制试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 606 - 611.
LIN Feng, HUANG Run-qiu, CAI Guo-jun. Experimental study for unloading and relaxation of dam base during excavation at Xiaowan Hydropower Station[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(5): 606 - 611.
- [7] 吴世勇, 龚秋明, 王鸽, 等. 锦屏 级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对 TBM 开挖的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1089 - 1095.
WU Shi-yong, GONG Qiu-ming, WANG Ge, et al. Experimental study of slabbing failure for deep-buried marble at Jinping Hydropower Station and its influence on TBM excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1089 - 1095.
- [8] 杨建辉, 周立峰. 碎裂结构顶板锚杆支护实践[J]. 矿冶, 2004, 13(4): 17 - 19, 23.
YANG Jian-hui, ZHOU Li-feng. The practice of suspension support for friable roof[J]. **Mining and Metallurgy**, 2004, 13(4): 17 - 19, 23.
- [9] 王敏强, 侯发亮. 板状破坏的岩体岩爆判别的一种方法[J]. 岩土力学, 1993, 14(3): 53 - 60.
WANG Min-qiang, HOU Fa-liang. A method to determine rockburst in rockmass with plate-form damage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1993, 14(3): 53 - 60.
- [10] CAI MING. Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries - Insight from numerical modeling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45: 763 - 772.
- [11] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433 - 438.
GU Jin-cai, GU Lei-yu, CHEN An-min, et al. Model test study on mechanism of layered fracture with in surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 433 - 438.
- [12] CHEON D S, JEON S, PARK C, et al. Characterization of brittle failure using physical model experiments under polyaxial stress conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(1): 152 - 160.
- [13] SZWEDZICKI T. Rock mass behaviour prior to failure[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(4): 573 - 584.
- [14] CAI MING, KAISER PETER K, MARTIN C DEREK. A tensile model for the interpretation of microseismic events near underground openings[J]. **Pure and Applied Geophysics**, 1998, 153(1): 67 - 92.
- [15] 王学滨, 伍小林, 潘一山. 圆形巷道围岩层裂或板裂化的等效连续介质模型及侧压系数的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2395 - 2402.
WANG Xue-bin, WU Xiao-lin, PAN Yi-shan. An equivalent continuum model for exfoliation of slabbing phenomenon of surrounding rock of circular tunnel and effects of lateral pressure coefficients[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2395 - 2402.
- [16] 雷光宇, 卢爱红, 茅献彪. 应力波作用下巷道层裂破坏的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1477 - 1480.
LEI Guang-yu, LU Ai-hong, MAO Xian-biao. Numerical simulation on layered crack and failure of roadway under stress wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1477 - 1480.
- [17] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 基于损伤控制方法的大理岩非线性剪胀特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 981 - 987.
WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental study of nonlinear dilatancy characteristics based on the damage-controlled method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 981 - 987.
- [18] 周辉, 徐荣超, 卢景景, 等. 板裂化模型试样失稳破坏及其裂隙扩展特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 1 - 11.
ZHOU Hui, XU Rong-chao, LU Jing-jing, et al. Experimental study of instability destruction and crack propagation characteristics of slab failure model specimen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.2): 1 - 11.
- [19] 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.