

# 深埋隧洞 TBM 开挖损伤区形成与演化过程的数字 钻孔摄像观测与分析

李邵军<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 张春生<sup>2</sup>, 李占海<sup>3</sup>, 周 辉<sup>1</sup>, 侯 靖<sup>2</sup>, 褚卫江<sup>2</sup>

(1. 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实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 以锦屏 II 级水电站 3<sup>#</sup>引水隧洞为研究对象, 通过事先开挖的平行于引水隧洞的 2-1<sup>#</sup>试验支洞, 利用数字钻孔摄像技术, 对 TBM 掘进过程中围岩的开挖损伤区进行原位测试。基于对一系列不同时间段的 360° 钻孔全景数字图像的综合分析, 给出岩体的结构特性, 得到隧洞开挖全过程中围岩裂隙的产生、发展和闭合的演化过程, 分析该施工条件下的开挖损伤区范围、裂隙演化与 TBM 施工的关系, 并探讨开挖损伤区的形成和演化机制。研究成果为现场支护设计、支护时机、围岩变形特性和地质资料分析提供直接依据。

**关键词:** 隧道工程; 深埋隧洞; 开挖损伤区; 数字全景钻孔摄像机

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2010)06-1106-07

## TESTING ON FORMATION AND EVOLUTION OF TBM EXCAVATION DAMAGED ZONE IN DEEP-BURIED TUNNEL BASED ON DIGITAL PANORAMIC BOREHOLE CAMERA TECHNIQUE

LI Shaojun<sup>1</sup>, FENG Xiating<sup>1</sup>, ZHANG Chunsheng<sup>2</sup>, LI Zhanhai<sup>3</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>,  
HOU Jing<sup>2</sup>, CHU Weijiang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. East China Investigation and Design Institution Under CHECC, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

**Abstract:** It presents the in-situ test on excavation damaged zone(EDZ) evolution of TBM tunnel No.3 in Jinping II hydropower station using digital panoramic borehole camera. Firstly, through the pre-excavated diversion tunnel No.2-1, several boreholes vertical to sidewall of TBM tunnel No.3 are drilled for digital camera, and a series of digital images of borehole wall are obtained during the whole TBM driven time. Afterwards, the images will be digitally processed; geological structural surface and fractures of surrounding rock mass are also analyzed, which makes it possible for the whole procedure of cracks formation, development and close to be obtained. Finally, the depth of damage zone is recognized; the relationship between fractures evolution and TBM construction progress is given; and the mechanism of EDZ evolution is discussed as well. It will not only provide the direct data for geological exploration but also contribute greatly to support design and analysis of deformation behaviors of deep-buried tunnels.

**Key words:** tunnelling engineering; deep-buried tunnel; excavation damaged zone(EDZ); digital panoramic borehole camera

**收稿日期:** 2010-02-11; **修回日期:** 2010-03-25

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732006); 国家科技支撑计划课题(2008BAB29B01); 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划

**作者简介:** 李邵军(1974-), 男, 2005 年于中国科学院武汉岩土力学研究所获岩土工程专业博士学位, 现任副研究员、硕士生导师, 主要从事岩土工程安全性评估与监控等方面的教学与研究工作。E-mail: sjli@whrsm.ac.cn

## 1 引言

锦屏 II 级水电站利用雅砻江锦屏 150 km 长大河弯的天然落差, 裁弯取直凿洞引水, 属雅砻江梯级开发中的骨干水电站。该水电站共有 7 条隧洞, 其中 2 条辅助洞, 1 条排水洞, 4 条引水隧洞。洞线平均长度约 16.7 km, 开挖洞径 8~13 m。上覆岩体一般埋深 1 500~2 000 m, 最大埋深约为 2 525 m, 具有埋深大、洞线长、洞径大的特点, 是迄今为止世界埋深最大的超长水工隧洞工程之一<sup>[1]</sup>。

由于锦屏 II 级隧洞的埋深和自重应力大, 再加上构造作用, 高地应力的作用非常强烈。该条件下岩体力学行为和开挖后围岩的损伤变形特性与低应力下的情况具有很大的差别, 围岩开挖损伤区是现场设计施工和高应力下岩体力学行为研究关注的焦点, 国内外在机制、试验、数值模拟方面均取得了一些重要的研究成果。S. Kwon 等<sup>[2]</sup>针对韩国一个 500 m 深的地下隧道, 通过现场钻孔地质雷达测试和数值分析的方法, 研究了钻爆法施工隧洞开挖损伤区弹性模量的变化和 EDZ 的范围; J. B. MARTIN 等<sup>[3, 4]</sup>结合加拿大一个埋深 443 m 的地下洞室, 开展了压水试验和声波测试, 评估了开挖损伤区的范围, 认为温度和掩饰渗透性是影响开挖损伤区的重要因素; M. Cai 等<sup>[5]</sup>基于声发射和位置测试, 通过理论分析和数值模拟, 研究了 2 070 m 埋深的地下洞室中应力重分布特征与 EDZ 大小的关系; 严鹏等<sup>[6]</sup>结合锦屏深埋隧洞的声波测试数据, 通过数值分析手段研究了动态卸荷条件下深埋隧洞围岩的损伤特性; 吉小明<sup>[7]</sup>基于声波和钻孔弹性模量测试资料, 利用数值法研究了埋深 80 m 隧道开挖后的变形和渗流场变化规律; 潘鹏志等<sup>[8~10]</sup>等针对岩体开挖损伤的多场耦合过程进行了室内试验和数值模拟。

可见, 国内外针对隧洞开挖损伤区研究, 一方面, 理论分析和数值模拟等工作均是基于声波、钻孔弹性模量和地质雷达等测试资料<sup>[11~12]</sup>, 间接获得和评估开挖损伤区的范围, 另一方面, 研究对象主要是针对低埋深的情况, 大于 2 000 m 的深埋隧洞方面的研究甚少。因此, 目前尚缺乏相应的成熟理论和试验依据, 这种背景下的现场设计和施工, 通常首先是按照常规应力条件下对岩体力学行为和开挖损伤区的相关认识进行, 从而在支护参数选取和

岩爆估计等方面往往遇到很多问题。

20 世纪 80 年代末发展起来的数字全景钻孔摄像技术, 实现了对钻孔空间信息的获取、量测、存储、分析、管理、平面和三维显示, 为地质勘探、工程安全监测及工程质量检测提供了新的手段<sup>[13, 14]</sup>。当前, 国内外对于数字钻孔摄像技术的研究和应用, 主要集中在地质勘探和工程地质检测领域<sup>[15~17]</sup>, 对隧洞开挖损伤区形成和演化全过程进行测试分析的文献却鲜有报道。本文针对深埋隧洞开挖损伤区这一核心内容, 采用数字全景钻孔摄像技术, 利用隧洞开挖超前地质钻孔, 对 3<sup>#</sup>引水 TBM 掘进隧洞进行了现场原位测试, 直接观察深埋隧洞开挖损伤区形成与演化过程中裂纹萌生、扩展、搭接全过程以及裂纹的张开或闭合等特征。分析了开挖损伤区的范围、裂隙的形成、发展与闭合的全过程演化特性及其与施工进度之间的关系。

## 2 测试方案与钻孔布置

### 2.1 测试设备

本次测试采用中科院武汉岩土力学研究所研制的数字钻孔摄像仪(DPBGs)<sup>[13, 14]</sup>, 其硬件部分由绞车、全景探头、控制箱、仪器箱、摄像机、台式计算机(含视频采集卡、1394 卡)等部分组成, 可以获得钻孔全长孔壁 360°的全景图像, 其环向最高精度可达 0.1~0.2 mm。另开发了完善的用以计算分析的数字图像分析系统, 具备对地质结构和裂隙特征的测量、计算和分析功能。目前已在矿山、水利水电工程、公路和铁路等领域得到了较为广泛的应用。

### 2.2 测试方案及钻孔布置

根据现场设计施工方案, 锦屏 II 级 4 条引水隧洞平行布置, 其中 1<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>引水隧洞采用 TBM 掘进, 而 2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>引水隧洞则是钻爆法施工。本文研究对象主要针对 3<sup>#</sup>引水隧洞, 获取 TBM 掘进过程中开挖损伤区的演化特性。由于各引水隧洞间距为 60 m, 为提高测试精度和仪器埋设的可操作性, 在 2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>引水隧洞间开挖了一个科研试验支洞 2-1<sup>#</sup>, 然后在该试验支洞向 3<sup>#</sup>引水隧洞拱肩位置实施取芯钻探, 测试钻孔、试验支洞和引水隧洞的布置关系如图 1 所示。

试验洞的基本情况为: (1) 3<sup>#</sup>引水隧洞: 圆形截面,  $D = 12.4$  m, 轴线方向 N58°W; (2) 2-1<sup>#</sup>试验支洞: 拱形截面, 5 m×5 m, 轴线与 3<sup>#</sup>引水隧洞平行。

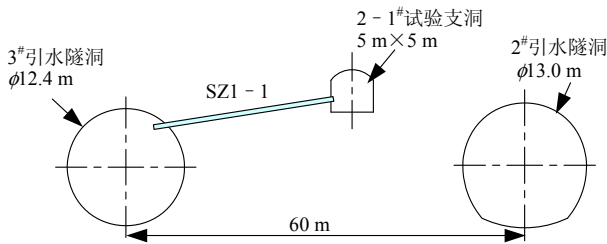


图1 开挖损伤区测试钻孔与隧洞间的剖面布置示意图  
Fig.1 Sketch map of layout profile of testing boreholes and around excavating tunnels

钻探完成后的测试钻孔 SZ1 - 1 的属性如下:

- (1) 所在桩号: 引(2)13+439.50。
- (2) 钻孔孔径: 91 mm; 长度: 33.8 m。
- (3) 钻孔轴线方位: S32°W。
- (4) 钻孔倾角: -2°(下倾)。
- (5) 钻孔离试验支洞 2 - 1#底板高度: 2.0 m。
- (6) 测试段埋深: 1 900 m。

### 3 测试结果及分析

当 3#引水隧洞 TBM 掘进过程中, 以掌子面距离测试钻孔 SZ1 - 1 所在断面前后 200 m 为重点测试区域, 在引水隧洞科研试验支洞 2 - 1#内对 SZ1 - 1 钻孔进行了一系列的数字摄像测试, 对测试结果进行了综合的计算和分析。

#### 3.1 岩体结构特征

测试钻孔 SZ1 - 1 岩性全长为 T<sub>2</sub>y<sup>5</sup> 灰白色厚层块状大理岩, 孔内有混浊的地下水流出, 水质呈土黄色。测试钻孔 SZ1 - 1 典型岩体结构如图 2 所示。

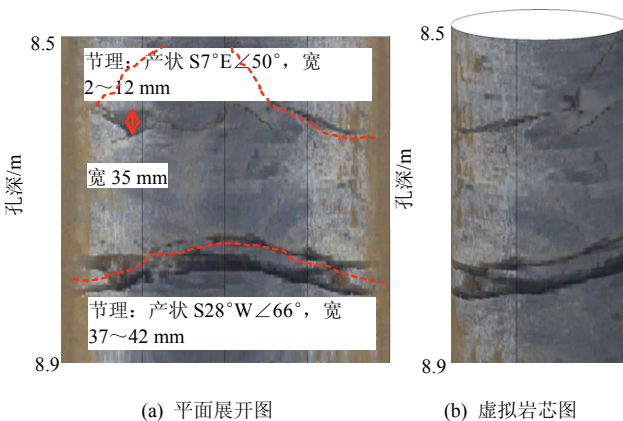
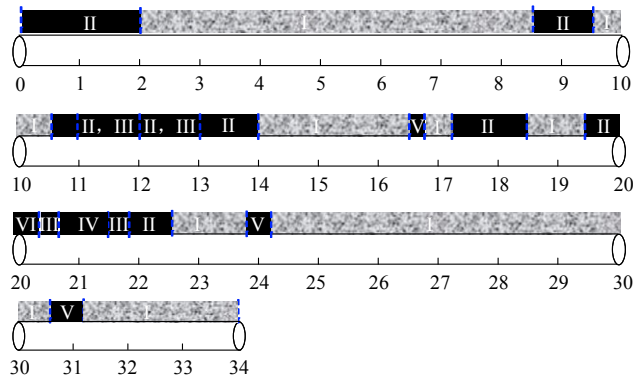


图2 测试钻孔 SZ1 - 1 典型岩体结构

Fig.2 Typical geological joints of testing borehole SZ1 - 1

通过对该测试钻孔全长数字摄像结果的计算和统计分析, 得到图 3 所示的地质概化图, 并得到了每条结构面和节理裂隙的产状。综合看来, 该钻孔反映出该区岩体完整性较差, 统计完整岩体共 20.5 m, 占钻孔全长的 60%, 孔内发育有大量的节理、裂隙、溶蚀裂隙和破碎带。



I—岩体完整; IV—节理密集带; II—节理; V—溶蚀裂隙; III—破碎带发育; VI—溶腔

图3 测试钻孔 SZ1 - 1 全长地质概化图

Fig.3 Generalized geological outline of testing borehole SZ1 - 1

#### 3.2 TBM 掘进过程中开挖损伤区演化特征

根据对该钻孔不同时间段的数字摄像结果分析, 在 3#引水隧洞 TBM 掘进过程中开挖损伤区有如下几方面的演化特征:

- (1) 由于受扰动和岩体应力调整的影响, SZ1 - 1 钻孔壁出现了众多剥落掉块区, 最大剥落区宽 7 mm, 长 39 mm, 如图 4, 5 所示。

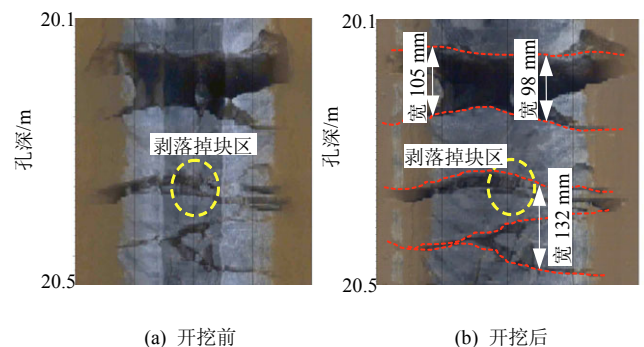


图4 测试钻孔 SZ1 - 1 剥落掉块

Fig.4 Spalling in testing borehole SZ1 - 1

- (2) TBM 掘进过程中, 开挖损伤区产生了一系列细小裂隙, 裂隙宽 2~8 mm。主要裂隙在钻孔长度方向分布为: 29.5~30.0, 31.1~31.5 和 31.8~32.3 m(32.3 m 前部在 3#引水隧洞边墙掘进后被开挖

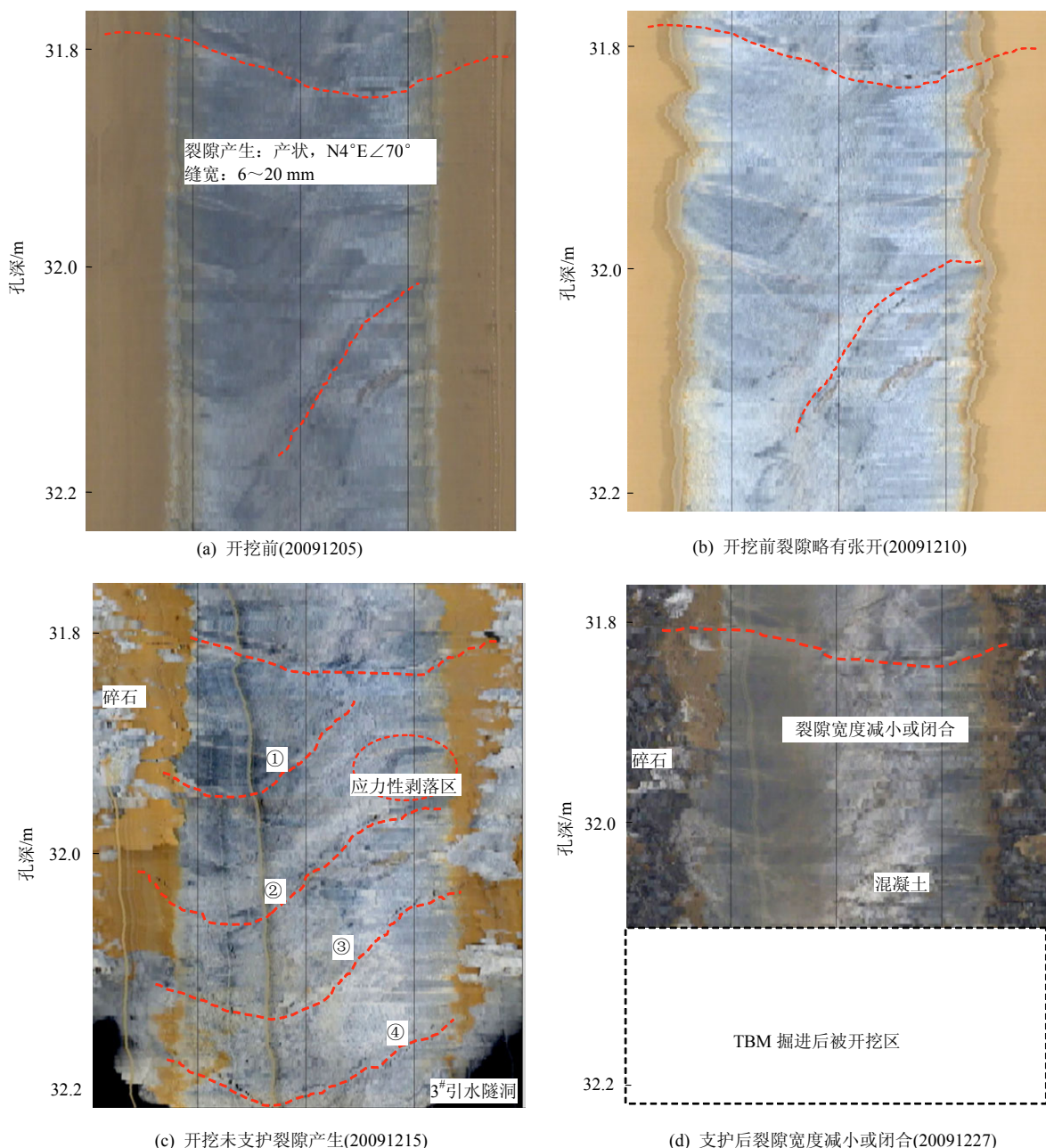


图 5 TBM 掘进过程中开挖损伤区裂隙演化数字钻孔摄像  
 Fig.5 Digital borehole camera of cracks in excavation damaged zone during TBM construction

掉), 新生裂隙的产状统计如下:

I 区: 29.5~30.0 m(距隧洞边墙 2.2~2.7 m), 其裂隙产状为: N27°W, ∠53°, 隙宽 1~3 mm。

II 区: 31.1~31.5m(距隧洞边墙 0.7~1.1 m), 其裂隙产状为: N78°E, ∠52°, 隙宽 1.3~2.6 mm。

III 区: 31.8~32.3 m(距隧洞边墙 -0.1~0.4 m), 其新生裂隙产状如表 1 所示。

在掌子面推进接近测试断面时, 通过数字钻孔摄像获得了不同 TBM 掘进时段的裂隙变化特征, 典型结果如图 5 所示。

(3) 受隧洞边墙施工支护的影响, 新生裂隙在

表 1 SZ1 - 1 钻孔损伤区裂隙统计表

Table 1 Statistics of cracks in borehole SZ1 - 1

裂隙 编号	产状		最大裂隙宽度 /mm	裂隙走向与隧洞 轴线夹角/(°)
	倾向	倾角/(°)		
①	N84°E	65	7.2	52
②	N85°E	77	3.5	53
③	N76°E	51	2.6	44
④	N43°E	44	3.2	11

TBM 掘进完成后发生了裂隙宽度减小甚至逐渐闭合的现象, 如图 5(d)所示。

(4) 根据对数字钻孔摄像分辨的裂隙变化结果分析, 在 3<sup>#</sup>引水隧洞该洞段所处地质条件下, TBM 掘进对围岩的损伤区范围距离隧洞边墙为 -1.3 ~ +2.7 m。

### 3.3 开挖损伤区演化与施工开挖的关系

根据 TBM 掘进过程中一系列数字钻孔摄像分析, 在裂隙演化随施工进度时间变化关系方面, 开挖损伤区先后出现了裂隙产生、隙宽增大和减小及闭合的特征。在裂隙演化与 TBM 掘进掌子面的空间关系方面, 为进一步直观分析它们之间的关系, 以裂隙最大宽度为纵坐标、裂隙所在钻孔深度为横坐标(2-1<sup>#</sup>试验支洞口为 0), 绘制了不同时间段的裂隙宽度变化图, 如图 6 所示。可见裂隙变化主要在 2009 年 12 月 15 日前后, 分布在钻孔长度方向 29.4~33.6 m 孔段, 距离 3<sup>#</sup>引水隧洞边墙 -1.3 ~ +2.7 m, 而新生裂隙主要产生在 29.4~32.2 m 区域(距离 3<sup>#</sup>引水隧洞边墙 0.1~2.7 m), 如图 6 所示的裂隙密集区。由于受到数字钻孔摄像的测试精度的限制, 开挖损伤区的某些微裂隙可能无法识别, 因而实际的开挖损伤区可能要大于这一范围。

而对于如图 6 所示的数字钻孔摄像的测试时间, 钻孔所在断面与 TBM 施工掌子面的距离关系如下: 2009 年 12 月 5 日: -35 m; 2009 年 12 月 10 日: -13 m; 2009 年 12 月 15 日: +50 m; 2009 年 12 月 27 日: 隧道处于支护状态。而在 2009 年 12 月 12 日 07: 00, TBM 正好掘进到监测钻孔所在断

面。

根据上述测试成果综合分析可见, 开挖损伤区与 TBM 掘进的关系可描述如下:

(1) TBM 掘进过程中, 至少影响其离掌子面前方 13.0 m 距离处的岩体, 如图 6 所示的“TBM 施工后挖除区”裂隙宽度发生了明显的变化。而在数字钻孔摄像测试图像上(见图 7), 可以很清楚地看出 33.3 m 附近的裂隙发生了明显的剪切变形。33.32 m 处的裂隙宽度从 9.0 mm 减小为 8.0 mm, 而 33.35 m 处的裂隙宽度从 4.5 mm 增大到 8.1 mm。

(2) TBM 掌子面经过钻孔所在断面后 0~50 m, 是开挖损伤区裂隙密集产生的时段。

(3) 当 TBM 隧洞支护 15 d 后, 边墙变形相应地得到较好控制, 但开挖损伤区后部围岩继续向边墙方向变形, 这种差异变形使得新生的裂隙在 TBM 掘进完成后发生了逐渐闭合的现象。如图 8 所示, 2009 年 12 月 27 日多处裂隙最大裂隙宽度小于 2009 年 12 月 15 日的裂隙宽度, 如 31.9 m 处的裂隙, 由原来 7.2 mm 减小到 5.3 mm。

### 3.4 开挖损伤区形成与演化的机制分析

TBM 施工的破岩过程包括盘刀侵入岩体和两刀盘之间岩石碎片形成 2 个阶段<sup>[6]</sup>, 较之钻爆法施工, TBM 掘进对围岩的影响相对较小。根据对 TBM 施工过程中连续数字钻孔摄像观测, 基于本文的试验结果分析, 深埋隧道 TBM 施工开挖损伤区演化可以概括为 3 个阶段:

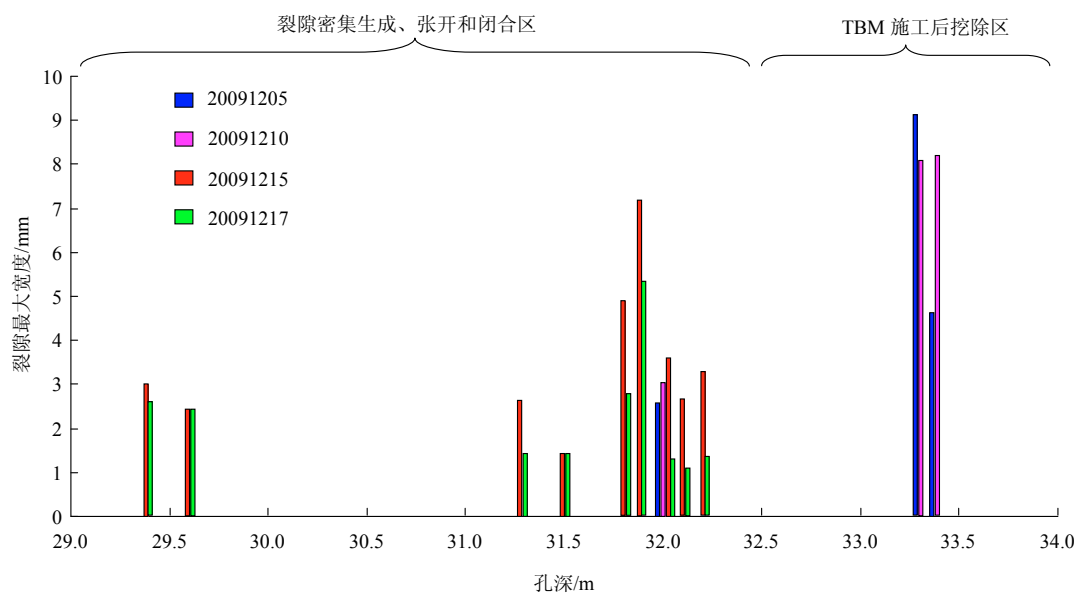


图 6 测试钻孔 SZ1 - 1 不同时间段不同孔深裂隙最大宽度的变化

Fig.6 Cracks' width of different positions of borehole SZ1 - 1 changes with the TBM construction progress

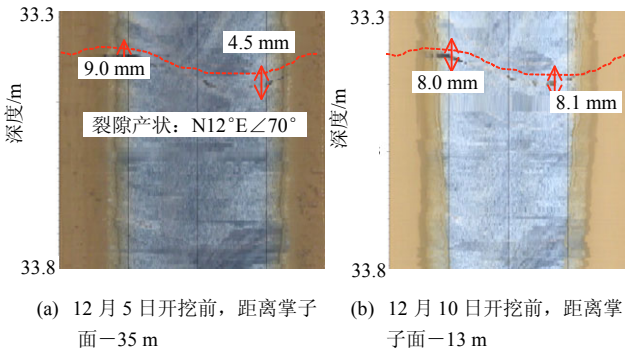


图 7 TBM 掘进掌子面前方开挖损伤区裂隙演化特征

Fig.7 Evolution character ahead of EDZ working face during TBM construction

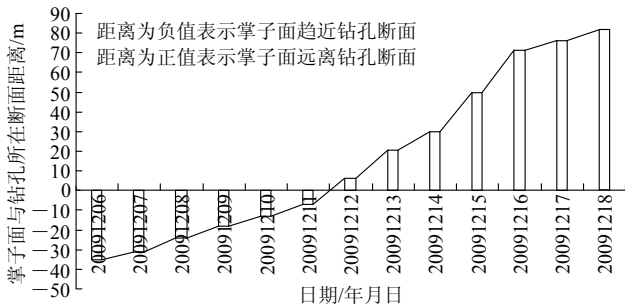


图 8 测试断面与 TBM 掘进掌子面的关系

Fig.8 Relationship between testing section and TBM face

(1) TBM 破岩过程中的岩体开裂和原有裂隙变化。由于施工开挖扰动, 使得岩体内的应力重分布, 临近开挖面的岩体整体或者局部损伤产生裂隙, 并向纵深发展, 形成开挖损伤区, 如本文测试得到的 TBM 掘进掌子面前方 13.0 m 处的岩体裂隙发生了变化。

(2) 围岩瞬态卸荷 EDZ 的形成和发展。脆性硬岩在高应力条件下, 由于岩体应力突然卸载, 原来储存的能量迅速释放, 这种动力扩张使得开挖损伤区裂纹的产生并发展。

(3) 围岩支护后 EDZ 的控制与岩体蠕变。在这一阶段, TBM 掘进后迅速对围岩进行了喷锚支护, 隧洞边墙的变形得到了初步的控制。但开挖损伤区内的应力仍在进行调整, 岩体继续发生蠕变变形, 使得高应力下的岩体继续发生张拉和剪切作用, 然而, 边墙围岩的支护使得开挖损伤区内的裂隙发生了宽度减小甚至逐渐闭合的现象。

### 4 结论

通过对深埋隧洞 TBM 掘进不同时段数字钻孔

摄像的综合分析, 可以得出以下几方面的结论:

(1) 数字钻孔摄像为深埋隧洞开挖损伤区测试提供了可靠的方法, 它不仅可以获得精细的地质结构, 还可以得到开挖损伤区裂隙的演化特征, 为岩体结构探测、围岩力学特性和支护设计研究提供了直接依据。

(2) 本文测试钻孔 SZ1-1 所在位置岩体完整性较差, 完整岩体占钻孔总长的 60%, 孔内发育大量的张性节理、溶蚀裂隙和破碎带。

(3) 从数字钻孔摄像可以分辨得到的裂隙变化情况, TBM 掘进对该断面尺寸下(12.4 m)的深埋隧洞洞壁围岩的损伤范围为 0.0~2.7 m, 而实际开挖损伤区应该大于该范围, 因为数字钻孔摄像可能对开挖损伤区的某些微裂隙可能无法识别。受施工扰动和岩体应力调整的影响, SZ1-1 钻孔壁还出现了众多剥落掉块区。

(4) TBM 掘进过程中, 开挖损伤区内产生了大量的细小裂隙, 裂隙走向与隧洞轴线成 10°~50° 的夹角, 裂隙宽度为 2~8 mm。裂隙在施工开挖、支护过程中发生了张开、发展和闭合的演化特征。

(5) 在开挖损伤区和 TBM 施工关系方面, TBM 掘进至少影响其离掌子面前方 13.0 m 距离处的岩体, 掌子面经过钻孔所在断面后 0~50 m 范围内是裂隙密集产生的时段, 且隧洞支护后 15 d 内, 开挖损伤区深部岩体仍继续向边墙方向位移, 而后变形逐步收敛。

(6) 本文的研究成果是在锦屏引水隧洞大理岩 T<sub>2</sub>y<sup>5</sup>, 1 900 m 埋深、TBM 掘进、12.4 m 洞径条件下获得的, 对于不同岩性、隧洞埋深、开挖方式和洞径等条件, 其相应的测试结果应该会有所不同。后续的研究工作将针对不同条件下的开挖损伤区演化特性进行测试和分析, 并建立考虑综合因素影响的开挖损伤模型, 为深埋条件下的岩体力学特性和隧洞设计提供支持。

**致谢** 本文的研究工作得到了二滩水电开发责任公司的大力支持, 徐劲松、胡斌、揭秉辉等为现场测试工作的顺利开展提供了帮助, 研究工作也得到了中国水电顾问集团华东勘测设计研究院周春宏、吴旭敏、章奇锋的指导和帮助, 中国科学院武汉岩土力学研究所王川婴博士在钻孔摄像技术方面进行了指导, 此外, 3<sup>#</sup>引水隧洞 2-1<sup>#</sup>试验支洞的施工单位也给予了通力配合, 特此表示衷心的感谢!

**参考文献(References):**

- [1] 吴世勇, 王 鹤, 徐劲松, 等. 锦屏二级水电站TBM选型及施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 000 - 2 009. (WU Shiyong, WANG Ge, XU Jinsong, et al. Research on TBM type-selection and key construction technology for Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 000 - 2 009.(in Chinese))
- [2] KWON S, LEE C S, CHO S J, et al. An investigation of the excavation damaged zone at the Kaeri underground research tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(1): 1 - 13.
- [3] 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): 1 413 - 1 426.
- [4] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1 251 - 1 275.
- [5] 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.
- [6] 严 鹏, 卢文波, 陈 明, 等. TBM和钻爆开挖条件下隧洞围岩损伤特性研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 121 - 128. (YAN Peng, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Study of the damage characteristics of surrounding rocks for tunnels constructed using TBM and drill-and-blast[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(11): 121 - 128.(in Chinese))
- [7] 吉小明. 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1 697 - 1 702. (JI Xiaoming. Study of mechanical and hydraulic behaviors of tunnel surrounding rock masses in excavation-disturbed zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 697 - 1 702.(in Chinese))
- [8] 潘鹏志, 冯夏庭, 周 辉. 开挖损伤区近场模型THM 耦合过程的BMT模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2 532 - 2 540. (PAN Pengzhi, FENG Xiating, ZHOU Hui. BMT simulation of coupled THM processes by near field model in excavation damage zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2 532 - 2 540.(in Chinese))
- [9] PAN P Z, FENG X T, HUDSON J A. Study of failure and scale effects in rocks under uniaxial compression using 3D cellular automata[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 674 - 685.
- [10] 向天兵, 冯夏庭, 陈炳瑞. 三向应力状态下单结构面岩石试样破坏机制与真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2 908 - 2 916. (XIANG Tianbing, FENG Xiating, CHEN Bingrui. Rock failure mechanism and true triaxial experimental study of specimens with single structural plane under three-dimensional stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2 908 - 2 916.(in Chinese))
- [11] FALLS S D, YOUNG R P. Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterize the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock[J]. Tectonophysics, 1998, 289(1 - 3): 1 - 15.
- [12] SATO T, KIKUCHI T, SUGIHARA K. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tone mine, central Japan[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1/2): 97 - 108.
- [13] 王川婴, 葛修润. 数字式全景钻孔摄像技术与数字钻孔[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 254 - 261. (WANG Chuanying, GE Xiurun. Digital panoramic borehole camera technique and digital borehole[J]. Underground Space, 2001, 21(4): 254 - 261.(in Chinese))
- [14] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 398 - 403. (WANG Chuanying, GE Xiurun, BAI Shiwei. Study of the digital panoramic borehole camera system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 398 - 403.(in Chinese))
- [15] 柴满洲, 向绪金, 张庆生, 等. 井下电视测井系统在套管检测中的应用[J]. 测井技术, 2002, 26(3): 242 - 246. (CHAI Manzhou, XIANG Xujin, ZHANG Qingsheng, et al. Applications of down hole video logging tool in casing inspections[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(3): 242 - 246.(in Chinese))
- [16] 何 迈. 全景水下电视在长江堤防隐蔽工程中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增1): 162 - 164. (HE Mai. Application of panoramic underwater television system to Yangtze River embankment concealed engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.1): 162 - 164.(in Chinese))
- [17] 张 筠, 徐炳高. 成像测井在川西碎屑岩解释中的应用[J]. 测井技术, 2005, 29(2): 129 - 132. (ZHANG Jun, XU Binggao. Application of imaging logging interpretation to West Sichuan detrital rock[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(2): 129 - 132.(in Chinese))