

隧道围岩动态损伤劣化的累进性破坏数值模拟

王嵩¹, 左双英^{2*}, 季永新³

(1.贵州省地矿局第二工程勘察院, 贵州 遵义 563099; 2.贵州大学 资源与环境工程学院;
3.贵州中建建筑科研设计院有限公司)

摘要: 隧道开挖卸荷, 围岩产生弹性—塑性—松动变形, 实际上是一个累进性损伤过程。基于连续损伤力学理论, 通过室内岩石单轴压缩试验及声发射技术, 研究岩石受荷作用下的损伤演化特性。结合 Weibull 统计分布规律, 得到了损伤变量与岩石累积应变的数学关系, 推导了损伤后力学参数劣化修正表达式。基于 FLAC^{3D} 软件的二次开发应用, 建立三维数值分析模型, 对隧道的开挖过程分别进行常规数值模拟和动态损伤数值模拟, 从应力、位移、塑性破坏区分布特点以及损伤特性等方面进行对比分析。结果表明: 考虑动态损伤计算的拱顶沉降和洞周收敛位移与隧道开挖现场监测值更接近, 能更好地反映隧道开挖围岩变形破坏的过程与范围。

关键词: 隧道; 损伤演化; 参数劣化; 数值模拟

数值模拟作为一种重要的岩土工程研究手段, 常用于隧道及各种地下洞室围岩的稳定性分析中。大量的工程实例都表明: 隧道开挖卸荷使得围岩的力学参数发生劣化。对于常规的数值模拟, 计算过程中力学参数保持不变, 这与工程事实不符。不同的力学参数会造成不同的计算结果, 不当的力学参数还会对工程实践起误导作用。因此如何反映力学参数在施工过程中的变化是数值模拟结果合理与否的关键所在。

工程实践表明: 隧道开挖围岩的破坏历经弹性—塑性—松动变形, 是一个累进性发展的过程。破坏首先发生在应力集中程度高且结构强度又相对较低的部位, 随后产生变形、松动、掉块等现象, 二次应力场进一步调整, 应力集中向其他位置转移, 进而引起一些次薄弱部位的破坏, 此过程即为累进性变形破坏过程, 也是受损围岩的物理力学参数逐渐劣化的过程。

为更好地模拟隧道开挖过程, 该文从连续介质损伤力学的角度出发, 借助声发射技术, 进行室内岩石压缩试验, 拟合出岩石损伤变量与累积应变的数学关系, 并建立损伤变量与弹性模量、黏聚力、内摩擦角之间的损伤修正关系。借助 FLAC^{3D} 数值模拟软件的二次开

发功能, 编写出基于力学参数劣化修正的动态损伤数值模拟计算程序, 模拟隧道开挖后围岩损伤特性及累进性破坏的过程。

1 岩石单轴压缩损伤试验

1.1 单轴压缩试验

1.1.1 试验准备

试验采用的试件是三叠系大冶组灰岩, 从野外取样后, 在试验室内将岩石加工成标准圆柱形岩样, 其直径为 5 cm, 高度为 10 cm, 每组 6 个试样。横、竖两方向的电阻应变片通过长导线分别连入应变仪的两个工作通道, 取 6 个声发射探头, 分别安装于岩样的上下两端, 用高真空硅脂与岩样进行接触耦合, 并用橡皮圈固定在岩样上。

采用 WAW-1000 kN 型微电液伺服万能试验机进行岩石单轴压缩试验, 按轴向位移控制加载, 以 0.002 mm/s 的恒定加载速率对岩样持续加载直至破坏。当岩石压力机开始工作时, 同时开始声发射数据采集和应变数据采集工作, 以保证采集的试验数据处

收稿日期: 2019-01-19(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51469007); 贵州省山地地质灾害防治工程技术研究中心(编号: 黔科合平台人才[2017]5402 号); 贵州省科学技术厅社会发展科技攻关项目(编号: 黔科合 SY 字[2015]3055); 中国建筑第四工程局有限公司科技研发课题(编号: CSCEC4B-2015-KT-03)

作者简介: 王嵩, 男, 硕士, 工程师, Email: gzws@ qq.com

* 通信作者: 左双英, 女, 博士, 教授, E-mail: shyzuo@163.com

于同一时间轴。

1.1.2 试验结果分析

根据单轴压缩试验所得到的应力—应变关系曲线,选取有代表性的试件 1、4 的声发射特征参数进行分析。图 1 为两个岩石试件累计振铃计数与同时刻相应的应力水平对应关系。

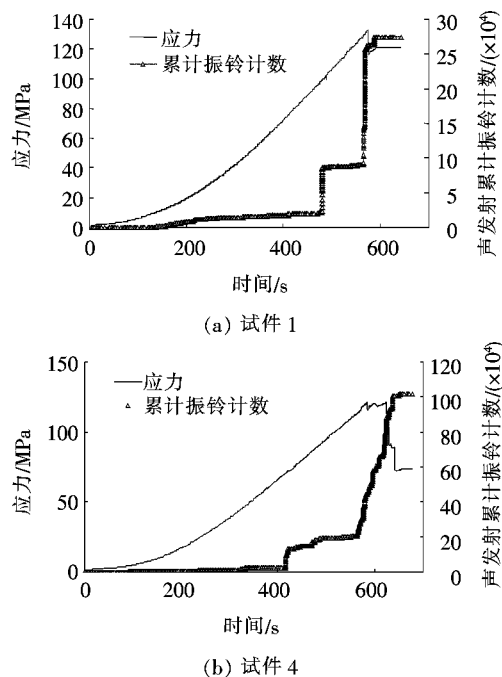


图 1 单轴压缩声发射累积振铃计数、应力与时间关系曲线

由图 1 可得:在压密阶段,岩石内部初始裂纹在轴向压力的作用下开始缓慢闭合,声发射活动并不明显,趋于平静。在弹性阶段,声发射活动总体来说依然不活跃,偶有一些波动。如试件 1 在 470 s 时,试件 4 在 420 s 时,声发射振铃计数出现短暂的高值,且对应时刻应力值也出现了细微的波动。这是由于岩石试样并非理想均质材料,随着荷载的增加,局部岩石单元体到达极限应力状态而产生微裂隙。但随着荷载的继续增加,声发射活动随着应变的缓慢增加又趋于平静(试件 1 在 470~590 s 之间,试件 4 在 420~580 s 之间)。当岩样进入塑性阶段和紧随其后的破坏阶段时,微裂纹发生聚合、贯通,并逐渐形成宏观裂纹,岩石内部能量快速释放,产生大量弹性波。声发射事件再一次活跃起来,振铃计数迅速增加,直到达到应力峰值。到破坏阶段,压力机停止工作,应力明显松弛,累积振铃计数相应地不再增加。由图 1 可见,声发射事件的累积振铃计数与岩样的轴向应力水平具有很好的对应关系,反映了岩石在加载时逐渐受损破坏的过程。

1.2 损伤演化方程

通过累积振铃计数换算得到岩石受压微裂纹产生过程中的损伤变量 D ,表达式为:

$$D = \left(1 - \frac{\sigma_p}{E\epsilon_p}\right) \frac{N_d}{N} \quad (1)$$

式中: σ_p 、 ϵ_p 为试验结束时的应力、应变值; E 为未损伤弹性模量; N_d 、 N 为损伤量为 D 及完全破坏时的累积振铃数。

利用声发射振铃计数计算出损伤变量,在同一时间轴下将损伤变量和累积应变进行整合,得出试件 1 和试件 4 的损伤变量 D 随轴向应变 ϵ 的演化关系曲线,如图 2 所示。

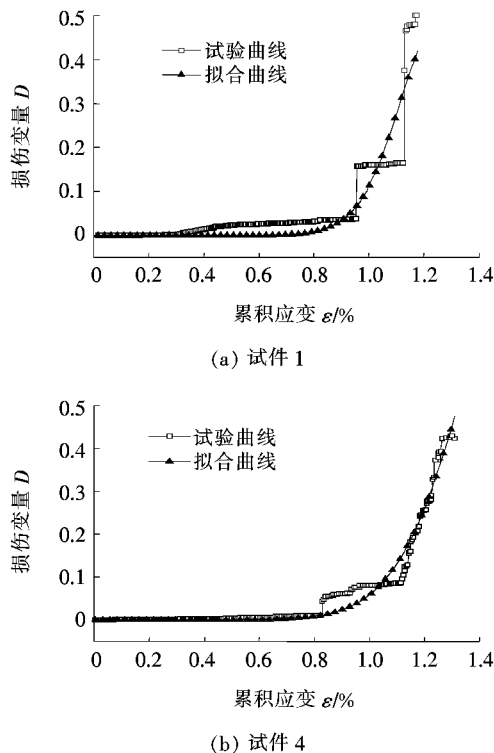


图 2 岩石损伤演化拟合曲线

已有研究表明:岩石损伤规律与 Weibull 统计分布比较相符,演化方程为:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (2)$$

式中: m 、 α 为 Weibull 分布的两个特征参数, m 为岩石均质程度, α 为微元极限应变的总体平均值。

利用式(2)对损伤变量和累积应变试验数据进行拟合(图 2),参数 m 、 α 的拟合值如表 1 所示,取 1、2、4、5 共 4 个试件试验结果进行计算,平均拟合优度达到 0.921,可得损伤演化方程:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{0.014}\right)^{11.32}\right] \quad (3)$$

表 1 Weibull 参数拟合值

试件编号	m 值	α 值	拟合优度
AE1-1	12.07	0.011	0.847
AE1-2	11.35	0.015	0.891
AE1-4	8.76	0.014	0.965
AE1-5	13.14	0.017	0.946
平均值	11.32	0.014	0.921

2 力学参数的损伤劣化

Kachanov 对损伤变量 D 的定义为:

$$D = 1 - \frac{\tilde{A}}{A} \quad (4)$$

根据 Lemaitre 应变等效假说:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\tilde{E}} = \frac{\sigma'}{E} \quad (5)$$

式中: $\sigma = F/A$ 为横截面上的名义应力; $\sigma' = F/\tilde{A}$ 为有效截面上的应力,即有效应力; E 为无损材料的弹性模量; \tilde{E} 为受损材料的弹性模量。

联立式(4)、(5),弹性模量与损伤的关系为:

$$\tilde{E} = E(1 - D) \quad (6)$$

同理,利用 Lemaitre 应变等效假说思想以及 Mohr-Coulomb 强度理论可得:

$$\tau' = c + \sigma' \tan \varphi \quad (7)$$

$$\tau = \tilde{c} + \sigma \tan \tilde{\varphi} \quad (8)$$

式中: τ' 、 σ' 为有效剪应力和有效正应力; τ 、 σ 为名义剪应力和名义正应力; c 、 φ 为无损材料的黏聚力和内摩擦角; \tilde{c} 、 $\tilde{\varphi}$ 为受损材料的黏聚力和内摩擦角。

有效剪应力、正应力与名义剪应力、正应力满足如下关系:

$$\tau' = \frac{\tau}{1 - D} \quad (9)$$

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(7),可得:

$$\frac{\tau}{1 - D} = c + \frac{\sigma}{1 - D} \tan \varphi \quad (11)$$

又根据 Mohr-Coulomb 强度理论的单轴抗压强度计算公式:

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

同理可得:

$$\sigma_c' = \frac{\sigma_c}{1 - D} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (13)$$

$$\sigma_c = \frac{2\tilde{c} \cos \tilde{\varphi}}{1 - \sin \tilde{\varphi}} \quad (14)$$

式中: σ_c' 为有效单轴抗压强度; σ_c 为名义单轴抗压强度。

联立式(8)、(11)、(13)和(14)可得岩石抗剪强度参数黏聚力和内摩擦角与损伤变量的关系式:

$$\begin{cases} \tilde{c} = c(1 - D) \\ \tilde{\varphi} = \varphi \end{cases} \quad (15)$$

3 计算实例

该文以贵州省赤水至望谟高速公路的某分离式隧道为例,通过 FLAC^{3D} 内嵌的 fish 语言编程,在每个循环计算步骤中进行单元累积应变的提取,根据式(3)计算出同时刻单元的损伤变量,然后根据式(6)、(15)对各单元的力学参数进行损伤修正。初始力学参数如表 2 所示,对模型分别进行常规和动态损伤数值模拟。

表 2 岩体物理力学参数初始值

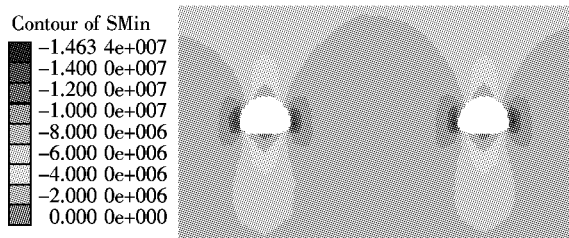
围岩	重度/ (kN · m ⁻³)	弹性模 量/GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	泊松比
中风化 灰岩	26	6.5	1.0	42	0.25
微风化 灰岩	27	7.0	1.4	42	0.25

3.1 应力分析

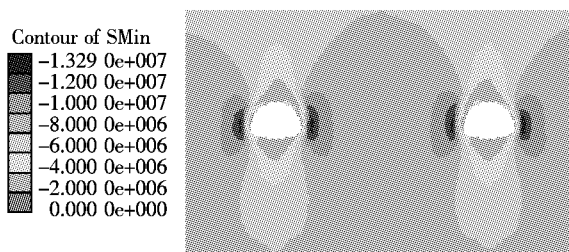
图 3(a)和(b)为两种模拟结果的第一主应力分布图。由图 3 可见:两种模拟的应力分布规律相似,隧道开挖引起初始地应力的释放,应力重分布,出现了应力集中,应力集中部位基本相同。其中第一主应力都以压应力为主,特别是隧道两侧壁处,压应力集中,出现最大值。不同处在于动态损伤模拟的应力集中范围较常规模拟的范围更大一些。而其中常规模拟的第一主应力的最大值约为 14.6 MPa,动态损伤模拟的最大值约为 13.3 MPa,较常规模拟的数值减小了一些。

图 4 为两种模拟结果的剪应力分布图。剪应力分布最大值出现在隧道 45°交叉共轭线上,分别位于两侧拱座、侧墙与底板交角处,说明此处是产生剪切破坏的薄弱环节,考虑动态损伤效应的剪应力集中范围比常规计算大,但量值相对小一些。

从弹塑性力学的角度分析,动态损伤模拟中隧道围岩随应变的逐渐增加而发生损伤破坏,使得初始地应力得到了更多的释放,应力的释放又使得应力集中位置沿隧道围岩的法向方向向外偏移,应力集中的范围扩大,更符合实际施工情况。

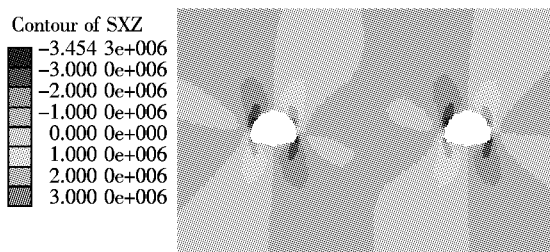


(a) 常规数值模拟

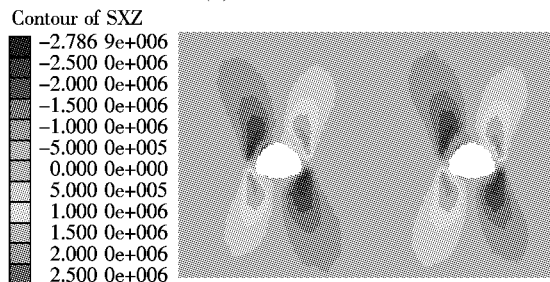


(b) 动态损伤数值模拟

图 3 第一主应力分布图(单位:Pa)



(a) 常规数值模拟



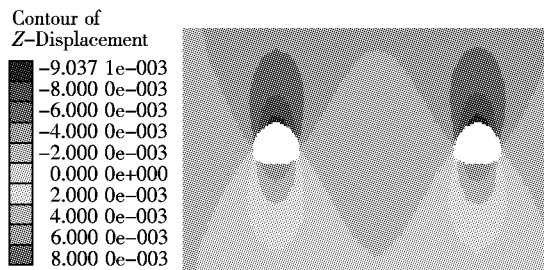
(b) 动态损伤数值模拟

图 4 剪应力分布图(单位:Pa)

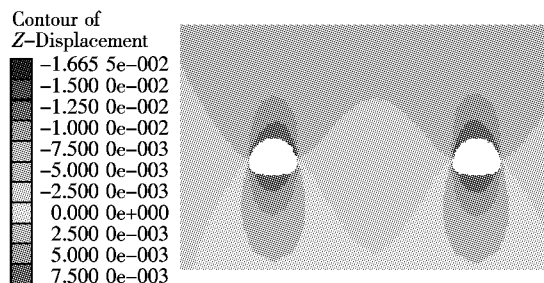
3.2 位移分布

图 5 为两种模拟结果的竖向位移分布图。从图 5 可知:两种计算模式模拟的竖向位移分布规律大致相同,都表现为底板鼓胀,顶板下沉。区别在于动态损伤模拟的位移量更大,最大位移约为 1.7 cm,位于左右

隧道相邻侧壁的上部 45°处,反映了左右隧道开挖的相互影响作用。而常规模拟最大值约为 0.9 cm,位于隧道拱顶处。对于底板的鼓胀位移,常规模拟值略大于动态损伤模拟,这是因为不考虑损伤效应的弹性参数较大,底板的回弹变形更明显。



(a) 常规数值模拟



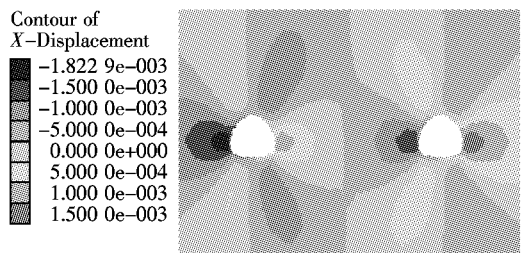
(b) 动态损伤数值模拟

图 5 竖向位移分布图(单位:m)

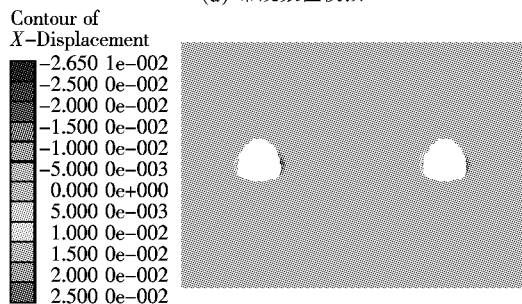
图 6 为水平方向位移分布图,两种模拟的水平位移呈相反分布规律。常规模拟表现为隧道两壁沿径向向外运动,这是由于初始应力场中垂直应力大于水平应力,隧道开挖后垂直方向的围岩回弹变形大于水平方向,使得隧道垂直方向上各点向内变形增大,但对于水平方向,由于成拱效应,使得隧道两壁各点发生了向外的运动。而动态损伤模拟表现为两壁沿径向方向向内运动,且位移量大,最大值约为 2.7 cm,但向内运动的范围距隧道侧壁仅 1.5 m 左右。从损伤角度分析,隧道两壁受压破坏,力学参数降低,使得成拱效应的“拱”范围向外偏移,隧道两壁受损破坏部分未受到拱效应向外挤压的作用,从而向内挤进。

3.3 破坏区分布

图 7 为模型中提取的塑性破坏单元体,可以非常直观地看出两种模拟结果的塑性破坏单元体分布规律大致相同,以隧道中心为起点,呈“X”状放射分布,其破坏方式以塑性剪切破坏为主。不同的是动态损伤数值模拟的塑性破坏单元体分布区域更广,特别是隧道侧壁的破坏区深度较常规数值模拟增加了 1 倍多。其中常规模拟的塑性破坏单元体体积为 46 985 m³,而动态损伤模拟为 83 341 m³,两者比值约为 1:2。

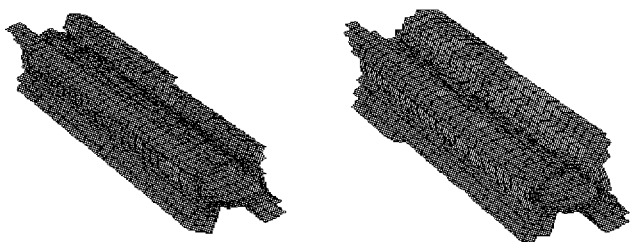


(a) 常规数值模拟



(b) 动态损伤数值模拟

图 6 水平向位移分布图(单位:m)



(a) 常规数值模拟

(b) 动态损伤数值模拟

图 7 隧道左线破坏区体积

3.4 损伤特性分析

图 8 为损伤变量大于 0.1 的单元体分布图,损伤区域基本分布在隧道开挖面附近,大部分位于隧道两侧壁,其厚度为 0.5~2.2 m。最大损伤变量为 0.9,其值以隧道为中心,向外逐渐减小。

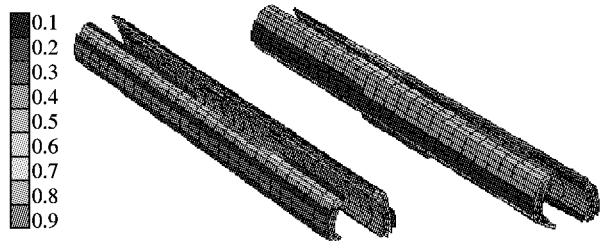
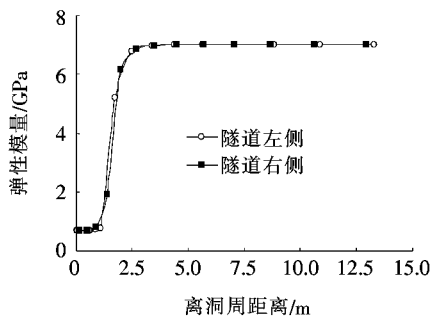


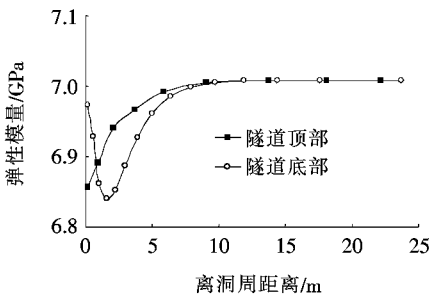
图 8 损伤变量大于 0.1 的单元体

图 9 为弹性模量与围岩深度关系曲线。由图 9 可知:隧道左、右侧的弹性模量变化情况相似,距隧道洞壁越近,弹性模量劣化越严重,损伤深度约为 3.0 m,劣化程度较严重,随深度的增加弹性模量呈现出指数型增加

的关系。顶部损伤深度约为 8 m,劣化程度较低,随深度的增加弹性模量逐渐增加。隧道底部劣化最严重的区域为距底板 2.0 m 处,总的劣化程度较低,随深度的增加弹性模量呈现出先减小后增加的变化关系。



(a) 隧道左、右侧



(b) 隧道顶、底部

图 9 弹性模量与围岩深度关系曲线

3.5 数值模拟与监测数据对比分析

图 10、11 为隧道右线的 YK49+205、YK49+260、YK49+300、YK49+343 和 YK49+360 共 5 处拱顶沉降和周边收敛模拟值与监测值的对比。监测位移在模拟位移上下起伏,其平均值与监测数据非常接近。

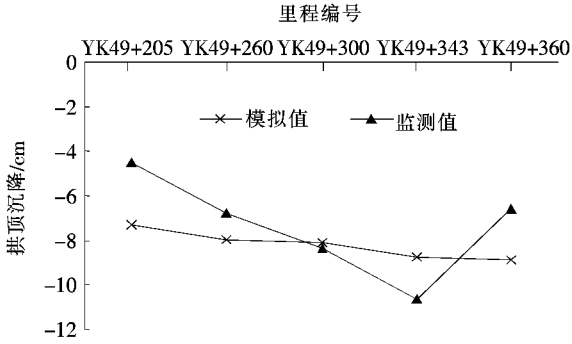


图 10 隧道右线拱顶累计下沉纵向曲线图

4 结论

(1) 通过岩石单轴压缩试验及声发射事件监测,结合 Weibull 分布函数,拟合出损伤变量和岩石累积

运营线路下换乘节点施工变形分析与现场监测

唐勇¹, 刘锐², 洪源¹, 张健¹, 黄靓钰³, 阳军生³

(1.中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004; 2.深圳地铁建设集团有限公司; 3.中南大学 土木工程学院)

摘要: 换乘节点施工对既有线路的运营可能造成较大影响,但是这方面的研究较少。该文以深圳地铁石厦站的换乘节点工程为研究背景,分析了施工过程中可能出现的风险,并提出了应对的施工方,采用有限元软件 Abaqus 并结合自动化监测的数据进行分析和计算。结果表明:换乘节点施工对负二层中板的影响较大,对顶板和负一层中板的影响较小,所以应重点监测负二层中板的位移变化;采用在开挖前进行注浆封闭止水,洞内开挖时进行补注浆,分层分块开挖,以及小导洞注浆+台阶法+临时仰拱的整套施工方法可行,保证了既有结构的安全运营。

关键词: 换乘节点; 施工工序; 数值分析; 自动化监测

换乘节点的施工对既有车站的正常运营可能产生较大的影响,为了保证既有地铁的正常运营,开展施工对既有地铁影响的研究显得十分必要。由于缺少对既有结构的位移和内力测试,分析施工过程中的连续墙和结构板的内力和位移变化有一定难度。因此对换乘节点的施工过程进行数值模拟和自动化监测是十分重

要的,对换乘节点的设计和施工也有重要意义。

一些学者通过数值计算和现场监测对新建隧道下穿既有车站进行了研究,王春希采用 FLAC^{3D} 软件对不同施工方法和加固范围进行了计算,得到合理的加固范围;Liao 等对上海地铁 6 号线穿越既有车站进行分析和研究;黄合理提出采用数值模拟和经验分析法

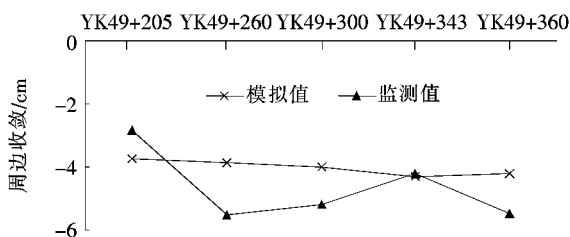


图 11 隧道右线累计周边收敛纵向曲线图

应变之间的数学关系式。

(2) 根据 Lemaitre 的应变等效假说的思想,推导了主要岩石力学参数劣化与损伤变量间的关系,弹性模量 E 和黏聚力 c 与损伤变量间呈线性关系,而内摩擦角 φ 的大小基本不受损伤影响。

(3) 为验证动态损伤数值模拟的合理性,分别进行了隧道开挖过程的常规数值模拟和动态损伤数值模拟,并对应力分布、位移分布、塑性破坏区进行了对比分析。将模拟值与监测值进行对比,发现动态损伤模拟更能体现隧道开挖过程中围岩累进性破坏的过程。

(4) 通过对动态损伤模拟分析,模型在计算过程中,隧道围岩的力学参数是随着计算时步逐渐劣化的,且越靠近隧道洞壁处的围岩,劣化程度越高。这与大量的研究结果是一致的,说明动态损伤模拟更为客观地体现了隧道开挖过程。

参考文献:

- [1] 王喷,赵明阶,蒋树屏,等.隧道开挖中围岩损伤演化分析及力学参数预测[J].岩土力学,2009(增刊1).
- [2] 张倬元.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,2009.
- [3] 江权,冯夏庭,陈国庆.考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008(1).
- [4] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009(增刊1).
- [5] 唐春安.岩石破裂过程中的灾变[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [6] Lemaitre J. How to Use Damage Mechanics[J].Nuclear Engineering and Design, 1984: 233-245.

收稿日期:2019-04-10

基金项目:中国水利水电第八工程局有限公司课题(编号:SZDT-5122-2018-L01)

作者简介:唐勇,男,高级工程师,E-mail: 18945087415@163.com