

水平软硬互层隧道围岩动态模拟方法及施工方法优选

任 松¹, 李 玉¹, 欧阳汛^{1,2}, 陈 钊², 姜德义¹, 陈 结¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 水平软硬互层岩体具有明显的层理效应, 在数值计算时常将其近似为一种横观各向同性体。层理存在对隧道围岩特别是上部围岩稳定性具有重要影响, 使得隧道开挖时拱顶下沉较水平收敛大, 易发生冒顶。为此提出水平互层围岩隧道动态模拟方法, 考虑层理效应下围岩持续变形, 并应用于江习高速四面山砂泥互层 V 级围岩隧道施工, 得到如下结论: 1) 不同方法模拟所得围岩变形结果均符合软硬互层隧道围岩变形特点, 且动态模拟方法能够考虑围岩时效效应, 更接近现场测试结果; 2) 对比不同隧道施工方法, 提出了近水平软硬互层隧道的优选方案建议; 3) 将优选方案进行现场验证, 结果显示隧道实际变形与模拟结果基本吻合。研究成果可在类似隧道施工模拟及工艺优化中推广应用。

关键词: 软硬互层; 接触分析; 动态模拟; 施工工艺优选; 现场验证

中图分类号: TU97

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)03-0317-07

Stability analysis and optimization of construction technology on tunnel excavation with soft-hard interbed rock

REN Song¹, LI YU¹, OUYANG Xun^{1,2}, CHEN Fan², JIANG Deyi¹, CHEN Jie¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 40030, China;

2. Power China Road Bridge Group Co, LTD, Beijing 100048, China)

Abstract: Horizontal interbed of soft and hard surrounding rock has an obvious bedding effect, it was often considered as a transversely isotropic rock mass in numerical calculation. Bedding is important influence to the upper tunnel surrounding rock, especially the stability of surrounding rock. At the same time, Bedding has an important effect on the surrounding rock, especially the stability of the upper tunnel, which lead to a larger vault sink value than level convergence and roof fall easily when the tunnel excavation. Therefore, dynamic simulation method for the horizontal interbed surrounding rock tunnel was put forward, to consider the rock continuous deformation under the effect of bedding, then applied to the construction of Simianshan mountain tunnel surrounded with soft-hard interbed rock at the level of grade V in Jiangxi highway. Get the following conclusion: 1) The displacement results by using different simulation methods were conformed to the characteristics of surrounding rock deformation of soft and hard interbedded rock. And the dynamic simulation method can consider the time-varying effect of surrounding rock, which was closer to the field test results; 2) Compare different tunnel construction methods, the optimal scheme of near horizontal soft - hard interlayer tunnel was proposed; 3) Took the optimal scheme into practice, the simulated values approximately agree with the measured results. Research results can be promoted and it can be a good model for the similar tunnel construction simulation and optimization.

Key words: soft-hard interbed rock; contact analysis; dynamic simulation; construction optimization; field verification

软硬互层岩体是指有一组或多组结构面占绝对优势(如层面、片理面等)的围岩体^[1], 其中软岩强度低, 易于风化和软化而破碎; 硬岩则相对更完整, 强度也明显更高^[2]。近水平软硬互层岩体是典型的复杂岩体之一, 在高速公路、铁路隧道建设施工中经常遇到, 严重影响隧道稳定性。目前

有限元法是提供可靠变形预测的重要工具, 普遍应用于隧道稳定性分析^[3]。现有研究大多将层状岩体视为横观各向同性, 张茹等^[4]将冻土分别视为各向同性材料和横观各向同性材料, 得出横观各向同性线弹性模拟数值较各向同性普遍偏小。宓荣三^[5]将乔庄隧道软弱岩体视为各向同性材料进行数

收稿日期: 2017-05-03

修改稿日期: 2018-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774057); 重庆市研究生科研创新项目资助(CYB15011)

第一作者: 任 松(1975—), 男, 教授, 博导, 主要从事隧道工程稳定性研究。E-mail: Rwx_cqu@cqu.edu.cn

通信作者: 欧阳汛(1994—), 男, 研究生, 主要从事地下工程安全稳定性方面的研究。E-mail: oyx-cqu@cqu.edu.cn

值模拟, 所得结果比实测值略为偏大; 肖小文^[6]等采用横观各向同性模型分析了高地应力区缓倾互层岩体无砟轨道隧道底部隆起的成因, 并提出了具体整治方案; 申灵君等^[7]对软弱地层大断面选用不同工法进行稳定性分析, 并对相应围岩稳定和支护效果优劣进行评价。

以上方法对某些岩性较好的互层岩体可以达到精度要求, 但对一些岩性差的岩体, 模拟结果将有一定差异, 且不适用于层理明显存在的层状沉积岩体^[7-8]。上述模拟方法也未考虑时间效应, 不能考虑隧道施工工序, 只能得到围岩最终变形结果。另外, 对于近水平软硬互层隧道施工方法, 缺乏针对性, 因此, 水平软硬互层隧道模拟方法及其相应施工工艺设计也需进一步改进。本文依托于江习高速四面山隧道, 提出采用水平互层围岩隧道动态模拟方法, 考虑层理影响及围岩持续变形特性, 尝试提供一种一定程度更为精确的软硬互层围岩隧道变形预测思路; 并采用该方法, 预测隧道围岩施工过程中的实时变形情况并验证, 优选出针对性的施工方法。

1 水平互层围岩隧道动态模拟方法

1.1 非线性接触分析模拟方法

将岩土体视为横观各向同性材料时, 整个岩层为一整体, 层间无相互作用力且黏结牢固。软硬互层岩体特点在于层理效应明显, 导致岩体变形和强度具有各向异性, 容易发生分层、滑移、弯折、倾倒溃屈等变形破坏^[9]。因此不能将其视为简单的连续介质, 也不能简单视作横观各向同性体而对整个岩层赋予相同的力学参数。采用非线性接触分析方法, 使用接触对(Targe 以及 Conta)单元模拟层理, 考虑了层理效应的影响, 模拟更接近工程实际情况。

1.2 隧道开挖全过程动态模拟方法

以往的数值模拟方法大都未考虑时间效应, 对于施工工序接替及此过程中的围岩变形特性也未能较好地体现。本次模拟还提出采用一种隧道开挖全过程模拟方法, 该方法的特征在于, 视隧道施工过程中围岩体为一种随时间持续变形的结构体, 模拟不同施工阶段下围岩的动态变化, 进而达到模拟整个隧道开挖过程的目的。

ANSYS 隐式蠕变 11 号方程, 包含了第一阶段蠕变和第二阶段蠕变, 并做了时间强化, 通过砂泥岩蠕变试验发现其较为符合, 能够形象体现监控量测阶段围岩持续变形直至收敛的自稳效应,

且使得围岩模拟材料具备时变效应, 还能够更好地体现施工工序的相互接替。因此采用 CREEP 准则, 将 11 号方程作为砂泥围岩持续变形的本构方程, 方程具体形式如式(1)所示。

$$\epsilon_{cr} = \frac{c_1 \sigma^{c_2} t^{c_3+1} e^{-\frac{c_4}{T}}}{c_3 + 1} + c_5 \sigma^{c_6} t e^{-\frac{c_7}{T}} \quad (1)$$

式中: ϵ_{cr} 为岩石等效蠕变应变, t 为时间, σ 为岩石等效应力, T 为温度, $C_1 \sim C_7$ 为蠕变参数。

该方法优点在于, 通过控制时间, 能够较好地反映隧道开挖各个阶段下围岩随时间持续变形特性, 也能确定初期支护时间, 保证二次衬砌紧跟等各施工工序环节的有效接替, 提高隧道稳定性, 加快施工进度。另外, 该方法可与非线性接触分析方法结合使用, 即得水平互层围岩隧道动态模拟方法, 进而应用于层理效应明显的水平软硬互层围岩隧道施工模拟及优化, 指导类似围岩隧道施工设计, 有良好的推广应用价值。水平互层围岩隧道动态模拟方法技术路线图如图 1 所示, 具体包括如下几个步骤:

(1) 建立隧道开挖模型, 并划分网格; 开始求解时杀死各支护单元以保证在初始地应力计算中隧道周围的地应力与实际情况相符合;

(2) 模拟地应力: 隧道开挖前原岩应力以自重应力为主, 因此模拟初始地应力时设置一个很小的时间(1×10^{-8})来使围岩不发生蠕变, 并施加重力荷载;

(3) 杀死开挖单元、初衬, 设置结束时间为 t_1 , 模拟开挖完成到初衬建立之前阶段, $0-t_1$ 为该阶段所用的时间, 对应于隧道实际建设过程中开挖完成而未建立初期支护的时间;

(4) 激活初衬但不激活二衬, 设置结束时间为 t_2 , 模拟初期支护到二衬支护前阶段, 该阶段所用时间为 $t_1 \sim t_2$, 对应于隧道实际建设过程中初期支护建立后监控量测时间, 并将模拟数据与实际监控量测数据做对比。

2 模拟方法对比及工程应用

2.1 工程概况

四面山隧道属于重庆江津至贵州习水高速公路一大重点工程段, 隧道左右洞长近 5 000 m, 设计时速 80 km/h, 荷载等级为 I 级。隧道为三心圆曲边墙结构, 属中断面特长隧道, 其拱高 7.05 m, 上半圆半径 5.45 m, 净空面积 64.28 m², 周长 31.17 m, 如图 1 所示。

隧道砂泥互层段围岩等级为 V 级, 其岩质多软

弱, 砂岩与泥岩弹性模量比值 5 : 1, 粘聚力比值 4 : 1, 砂、泥岩呈互层状产出. V 级围岩隧道采用导坑法或上下台阶法分部开挖, 二次复合支护.

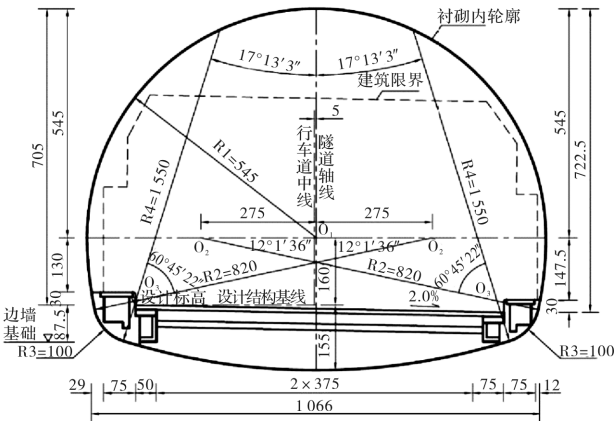


图 1 四面山隧道主洞断面内轮廓图(单位: mm)

Fig. 1 The inner contour of Simianshan tunnel/mm

2.2 平面应变模型建立

砂泥复合岩层软硬不均, 砂岩强度相对要高、脆性好、延展性低, 而泥岩强度更低、延展性及压缩性大^[10]. 结合《四面山隧道施工设计说明》及地勘资料, 由于隧道长度相对其断面尺寸足够大, 因此以平面应变问题处理分析, 根据隧道实际工况, 建立几何模型如图 2 所示. 模拟范围宽 300 m, 高 126 m, 远大于开挖洞径. 岩层自上而下为泥岩(40 m)—砂岩(10 m)—泥岩(9 m)—砂岩(3 m)—泥岩(20 m)—砂岩(44 m). 《四面山隧道施工设计说明》建议 V 级围岩隧道施工采用导坑法或台阶法. 以杆单元 Link1 模拟锚杆材料, 梁单元 Beam3 模拟喷射混凝土材料, 平面单元 Plane42 模拟岩体材料. 接触对中 target169 单元模拟相对更硬的砂岩接触面, conta171 单元模拟相对更软的泥岩接触面, 各岩体材料及支护材料参数见表 1, 层理参数参考文献[11].

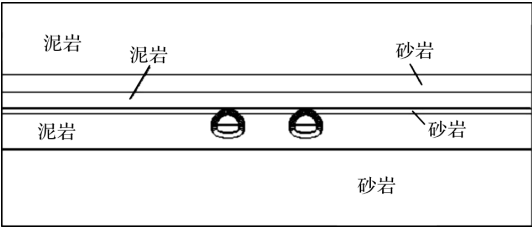


图 2 四面山隧道模型建立

Fig. 2 The build of Simianshan tunnel model

需要说明的是, 建模过程中需保证各岩层间不共线, 以便生成接触对, 对于锚杆穿砂岩层形成锚固段部分, 需设置两次面域来保证其上下层间不共线: 将整个锚固段单独成面一次, 所形成面域赋予实体属性, 穿层锚固段则不具备材料属

性; 针对岩层岩性不同, 需再将穿层锚固段区域进行上下成面, 此时面域需同时具备实体属性及材料属性, 这样能够很好地解决层理非线性分析不收敛问题.

表 1 材料参数

Tab. 1 The mechanical parameters

材料	长度 /m	弹性模 量/GPa	泊松 比	密度/ g · cm ⁻³	粘聚力 /MPa	内摩 擦角/°
砂岩		8.90	0.19	2.50	1.40	34.77
泥岩		1.70	0.29	2.55	0.36	27.35
层理					0.10	35
锚杆	3.00	200	0.30	7.80		
初衬		21	0.20	2.20	2.85	54.8

2.3 模拟方法结果对比分析

采用横观各向同性模型模拟方法时, 岩土体材料采用弹塑性本构模型、DP 准则, 此时隧道开挖与时间无关; 采用水平互层隧道围岩动态模拟方法时, 岩土体材料采用隐式蠕变 11 号本构、CREEP 准则, 此时围岩具有时变效应. 分别采用上述两种方法进行隧道开挖模拟, 得两种方法模拟结果如表 2 所示.

根据相关文献[12], 近水平软硬互层隧道拱顶下沉明显大于水平收敛. 水平互层隧道围岩动态模拟所得拱顶沉降数值 11.33 mm, 水平收敛 6.42 mm; 横观各向同性模型模拟方法所得拱顶沉降数值 10.34 mm, 水平收敛 3.90 mm. 前者拱顶下沉数值较后者增大 9.5%, 水平收敛数值增大 64.6%, 可见, 考虑围岩蠕变时间效应后, 变形更为明显.

表 2 不同模拟方法下隧道围岩稳定性对比

Tab. 2 Stability comparison of surrounding rock under different simulation method

砂泥互层 V 级围岩	水平收敛 /mm	拱顶沉降 /mm
横观各向同性模型模拟方法	3.90	10.34
水平互层隧道动态模拟方法	6.42	11.33

在砂泥互层 V 级围岩施工段左右洞各选 5 个断面进行围岩变形测试, 自测试日起, 记录各断面水平收敛及拱顶下沉直至稳定, 具体结果对比如表 3. 拱顶下沉数值与水平收敛比值位于 1.5~2.0 范围, 测试所得各结果均值与平面应变问题模拟所得变形数值进行对比稍有偏小, 水平互层隧道围岩动态模拟方法模拟结果较好, 符合隧道开挖实际变形特点.

表 3 位移模拟数值与实测值对比

Tab. 3 Displacement simulation value compared with the measured displacement value

测试项目	断面编号										
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	均值
拱顶下沉/mm	9.61	10.17	11.29	10.26	10.31	11.29	10.94	10.73	10.42	9.89	10.49
水平收敛/mm	6.08	5.93	5.71	6.31	5.97	6.22	5.88	6.11	6.23	5.82	6.03
位移比	1.58	1.72	1.98	1.63	1.73	1.82	1.86	1.76	1.67	1.70	1.74

3 四面山隧道施工工艺优选及验证

3.1 施工工艺优选

(1) 实体模型建立

水平软硬互层 V 级围岩岩性软弱, 且层理效应使得水平岩层层间结合力差, 隧道开挖方法不同对围岩变形影响也不相同. 根据实际地层情况, 对四面山砂泥互层 V 级围岩段隧道进行施工方法优选, 建立三维模型如图 3 所示, 所模拟围岩范围宽 300 m, 高 114 m, 模型自上而下为砂岩 31.5 m—泥岩 24.5 m—砂岩 9 m—泥岩 7 m—砂岩 10 m(A5)—泥岩 9 m—砂岩 23 m. 以 Solid187 实体单元模拟岩体及衬砌结构. 采用水平互层围岩隧道动态模拟方法, 考虑隧道围岩持续变形及层理效应, 分别对上下台阶法、全断面法、单侧壁导坑法进行隧道位移场分析, 各施工方法具体工序步骤模拟均按实际施工情况进行.

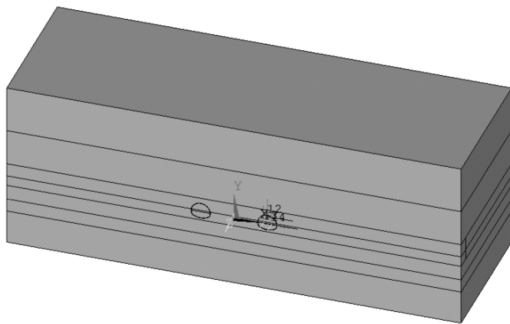


图 3 四面山隧道三维模型

Fig. 3 The 3D model of Simianshan tunnel

(2) 边界条件

根据隧道模型, 针对整个模型长度方向, 约束其左右面的边界节点, 使水平方向(X 方向)位移为零, 对于竖直方向(Y 方向), 限制底部位移为零. 对模型的主视面和后视面(Z 方向)均进行约束. 顶部则不作任何约束, 位移也不受限制, 但施加重力荷载模拟上覆岩层的自重.

(3) 优选结果及分析

基于本文提出的模拟方法, 对四面山 V 级砂

泥互层隧道进行开挖方法优选, 提取前节定义的 $t_1 \sim t_2$ 时间段各方法的围岩变形结果, 如表 4 所示. 全断面法和台阶法所得隧道水平收敛分别为单侧壁导坑法的 1.83 倍和 1.28 倍; 拱顶沉降则分别为单侧壁导坑法的 1.63 倍和 1.21 倍. 可见全断面法施工隧道围岩变形最大; 采用单侧壁导坑法时, 对围岩变形影响最小.

现场监控量测(对应 $t_1 \sim t_2$ 时间段), 是在初期支护完成之后开始, 在二衬支护开始时结束, 该阶段无法测量到隧道开挖的瞬时卸荷变形及初期支护完成之前短暂的持续变形. 为更好地与现场监测数据进行对比, 提取施工过程模拟方法所得该阶段的相关结果. 结合部分文献及隧道相关设计规范^[13-14]: 隧道监控量测时段的变形占总变形(≤ 20 mm)的 70%, 可知全断面法施工围岩变形超出允许值, 初步建议软硬互层隧道施工采用上下台阶法.

表 4 各施工方法下隧道围岩变形

Tab. 4 The deformation of surrounding rock under different construction method

砂泥互层 V 级围岩	水平收敛	拱顶沉降	允许值
上下台阶法	6.12 mm	10.77 mm	
全断面法	8.76 mm	14.52 mm	≤ 14.00 mm
单侧壁导坑法	4.78 mm	8.91 mm	

3.2 优选施工工艺现场验证

根据四面山隧道 V 级砂泥互层段现场台阶法施工情况, 结合原位监测技术, 用以测试隧道变形, 不仅能够验证模拟方法及其结果与实际的相符程度, 清晰描述施工过程对隧道变形的影响, 而且还能验证上下台阶法是否可行.

(1) 现场验证方案

在开挖段左右洞分别选取 3 个断面进行测试, 自开挖之日起直至采取二衬支护, 详细记录各断面变形的收敛情况, 包括量测拱顶下沉、净空水平收敛.

拱顶下沉和水平收敛量测断面的间距为 15 m, 在围岩变化处做了适当加密。均在靠近工作面 0.5 ~ 2 m 位置埋设。初读数均在开挖后 12 h 内读取, 根据施工方法、地质条件, 净空水平收敛测线设为一条水平测线。拱顶下沉量测与净空水平收敛量测在同一量测断面内进行。具体拱顶下沉监测点和水平收敛测点布置如图 4 所示。图中, 数字 1, 2 为水平收敛测点, 3 为拱顶沉降测点。

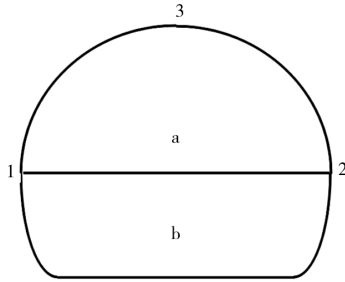


图 4 现场测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of field measurement points

(2) 验证结果及分析

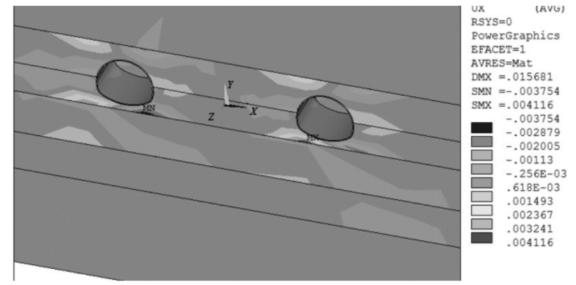
施工过程 ($t_1 \sim t_2$ 时间段) 模拟结果如图 5 所示, 与表 4 现场监控量测结果对比, 对比可知, 相较于水平收敛数值, 拱顶下沉为其 1.5 ~ 2.0 倍。以 1 d 为时间间隔, 将每一施工过程模拟数值与 A1 ~ A6 断面的实测数值绘制成曲线, 如图 6 所示。测试所得各结果及其平均值与实体模型模拟值吻合程度较高。

4 讨论

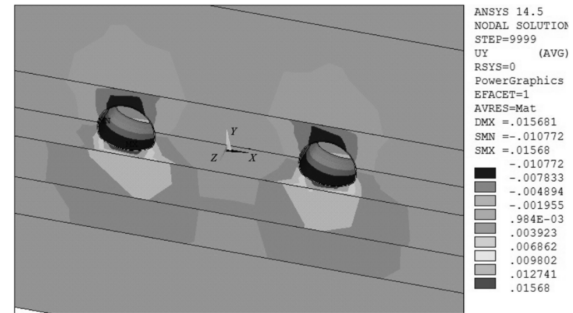
(1) 对四面山砂泥互层 V 级围岩隧道进行数值模拟, 采用二维模型, 基于平面应变问题, 忽略了隧道长度方向的变形, 使其所得水平方向与竖直方向开挖变形结果较三维模型大, 而横观各向同性模拟方法由于忽略了层理作用, 使得其二维模型模拟值比实测值要小; 另外, 里程桩号不同, 模型尺寸改变, 使得隧道上覆岩层荷载发生变化, 也使得二维模拟结果与三维有一定差异。

(2) 数值模拟结果中, 水平位移最大值出现在拱脚处, 竖直位移最大值出现在拱底, 这应该是由于下台阶岩性为泥岩, 较上台阶砂岩层更软弱, 更易破碎, 隧道开挖使得拱底围岩承载能力严重丧失, 所受荷载更大, 也导致底部围岩向开挖空间内变形挤出量更大, 底部隆起量相比拱顶沉降量也更大。

(3) 虽然当软硬互层岩体具有一定倾角时, 在



(a) 水平方向位移变化



(b) 竖直方向位移变化

图 5 隧道上下台阶开挖位移场变化 (单位: m)

Fig. 5 Bench excavation method displacement field changes of the tunnel

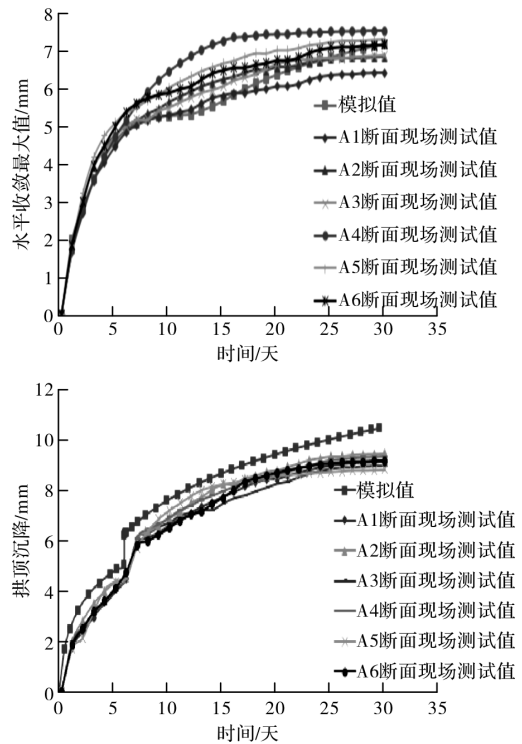


图 6 隧道变形模拟值与各断面现场测试结果对比

Fig. 7 Comparison diagram of the simulation value with field test deformation results of tunnel

隧道施工过程中层理效应将发生变化; 隧道的埋深及施工方法不同也会使得围岩变形特性不同; 台阶长度、日进尺量等改变也都会对隧道稳定性及二衬时间造成一定影响, 此类因素会导致结果

有一定的差异,但分析思路仍然是可用的。

5 结论

(1)提出采用水平互层围岩隧道动态模拟方法,考虑了层理效应及围岩在时间效应下的持续变形特性,更接近工程实际情况,为复杂水平软硬互层围岩隧道稳定性分析提供了新的思路。

(2)优选隧道常用施工模拟方法,结果显示:水平互层围岩隧道动态模拟所得隧道变形结果较采用横观各向同性模型模拟时更大,但两种方法均符合实际软硬互层围岩隧道变形特性,拱顶沉降数值为水平收敛数值的1.5~2.0倍。

(3)通过现场测试,以1d为时间间隔,对比施工过程实际监测值可知,水平互层围岩隧道动态模拟所得施工过程方法的变形模拟结果与实测值更吻合。软硬互层隧道是施工采用上下台阶法可行。

参考文献 References

- [1] 鲁志伟. 层状岩体地下洞室失稳机理及稳定性评价理论研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2007.
LU Zhiwei. Research on destabilization mechanics and stability appraisal theory of bedded rock chamber[D]. Guiyang: Guizhou University, 2007.
- [2] 晏莉, 阳军生, 张学民, 等. 水平互层岩体并行隧道中间岩柱稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2898-2904.
YAN Li, YANG Junsheng, ZHANG Xueming, et al. Stability analysis of middle rock pillar in parallel tunnels in horizontally interbedding rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2898-2904.
- [3] ZHAO C, LAVASAN A A, BARCIAGA T, et al. Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations - The Western Scheldt tunnel case[J]. Computers & Geotechnics, 2015, 69(7): 601-614.
- [4] 张茹, 王正中, 牟声远, 等. 基于横观各向同性冻土的U形渠道冻胀数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(5): 773-783.
ZHANG Ru, WANG Zhengzhong, MOU Shengyuan, et al. Numerical simulation of frost heaving for ucanal based on transverse isotropy[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(5): 773-783.
- [5] 宓荣三. 乔庄隧道穿越软弱围岩施工力学行为分析[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 87-91, 104.
MI Rongsan. Analysis of the construction behavior of the Qiaozhuang tunnel in soft rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(4): 87-91, 104.
- [6] 肖小文, 王立川, 阳军生, 等. 高地应力区缓倾互层岩体无砟轨道隧道底部隆起的成因分析及整治方案[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 78-84.
XIAO Xiaowen, WANG Lichuan, YANG Junsheng, et al. Cause analysis and treatment scheme for bottom heave of ballastless track tunnel in nearly horizontally interbedded rock mass with high geostress[J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 78-84.
- [7] 梁正召, 唐春安, 李厚祥, 等. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 57-62.
LIANG Zhengzhao, TANG Chunan, LI Houxiang, et al. A numerical study on failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 57-62.
- [8] TANG C A, LIU H, LEE P K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part I: effect of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(4): 555-569.
- [9] 黄达. 软硬岩层互层巷道顶板稳定性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
HUANG Da. The stability analyses of the laneway roof in soft and hard interbedded rocks[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [10] 杜文. 双线铁路隧道平缓砂泥岩互层围岩变形机理分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(4): 22-25.
DU Wen. Analysis of the surrounding rock deformation mechanism of a gently inclined sand and mud stone interbed in a double-track railway tunnel[J]. Modern tunnelling technology, 2012, 49(4): 22-25.
- [11] 任松, 欧阳汛, 姜德义, 等. 软硬互层隧道稳定性分析及初期支护优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 17-22.
REN Song, OUYANG Xun, JIANG Deyi, et al. Stability analysis and optimization of primary support on tunnel excavation with soft-hard interbed rock[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 45(7): 17-22.
- [12] 熊亮. 层状围岩隧道稳定性及锚杆支护参数优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
XIONG Liang. Layered rock stability and bolt support parameter optimization of tunnel[D]. Chongqing:

- Chongqing University, 2010.
- [13] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范: JTG D70-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Chongqing Communication Technology Research & Design Institute Co., LTD. Code for design of road tunnel: JTG D70-2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [14] 刘小军, 张永兴. 地形因素及围岩类别对偏压隧道的影响效应分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(2): 205-210.
- LIU Xiaojun, ZHANG Yongxing. Analysis of unsymmetrically loaded tunnel according to topographic factors and classification of the surrounding rocks[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(2): 205-210.
- (编辑 吴海西)
-
- (上接第 316 页)
- [10] 吴涛, 刘全威, 成然, 等. 钢筋套筒灌浆连接性能试验研究及筒壁应力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 68-75.
- WU Tao, LIU Quanwei, CHENG Ran, et al. Experimental study and stress analysis on mechanical performance of grouted sleeve splice[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 68-75.
- [11] TEPFERS R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars[J]. Magazine of Concrete Research, 1979, 31(106): 3-12.
- [12] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- XU Youlin. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [13] 徐有邻, 沈文都. 钢筋外形对粘结性能的影响[J]. 工业建筑, 1987, 17(3): 28-32.
- XU Youlin, SHEN Wendu. Influence of reinforcement shape on bonding properties[J]. Industrial Construction, 1987, 17(3): 28-32.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程: JGJ 355-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Technical specification for grout sleeve splicing of rebars: JGJ 355-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [15] 郑永峰, 郭正兴. 变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 94-102.
- ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed grout-filled pipe splice[J]. Journal of building structures, 2016, 37(3): 94-102.
- (编辑 吴海西)