

# 公路隧道浅埋暗挖段施工方法的数值分析

张军, 廖鑫捷

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对张桑(张家界—桑植)高速公路麻栗垭隧道左线 ZK34+910 变形剧烈段, 利用有限元数值软件 MIDAS—GTS NX 建立二维数值模型, 分别采用上下台阶法、三台阶法、三台阶预留核心土法模拟公路隧道浅埋暗挖段的开挖过程, 分析公路隧道浅埋段埋深 10 m 处围岩衬砌的应力变化、位移及塑性区分布, 确定三台阶预留核心土法为该工程较合理的开挖方式。

**关键词:** 隧道; 浅埋暗挖; 施工方法; 数值模拟

**中图分类号:** U455.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2019)02-0140-04

浅埋隧道的地质条件较差, 围岩结构松散且易受地下水影响, 周边围岩无法有效地形成天然压力拱, 隧道洞室整体变形不易控制。隧道洞室开挖后, 围岩压力重新分布, 地下水路径也发生变化, 周围地质环境的改变极易对洞室的稳定性产生威胁。浅埋暗挖法是针对浅埋隧道地质条件差、覆土层薄、承载力小、容易坍塌等特点提出的通过围岩预加固并及时支护控制地面沉降, 保证施工安全的施工方法。判断围岩稳定性的方法有模型实验、原位实验、工程类比、数值分析等, 其中数值分析法最适合分析隧道施工。刘长祥等采用 PLAXIS 有限元软件模拟了杭新景(杭州—新安江—景德镇)高速公路山岭隧道围岩的变形过程; 蒋树屏等对扁平状公路隧道在不同方法施工下的力学响应进行数值模拟, 分析了围岩和支护结构的地应力场、位移场, 确定了适合于大断面公路隧道施工的方法; 段慧玲等利用有限元软件 ADINA 进行数值模拟, 得出了不同开挖方案下隧道围岩代表性点的应力、初期支护代表性点的应力及隧道洞周总位移; 邹成路等采用 FLAC<sup>3D</sup> 对软弱破碎围岩隧道台阶法开挖时上台阶开挖高度进行了优化。该文以湖南张桑(张家界—桑植)高速公路麻栗垭隧道为依托, 通过二维数值模拟, 分析采用上下台阶法、三台阶法、三台阶预留核心土法开挖时隧道浅埋段埋深 10 m 处围岩衬砌的应力变化、位移及塑性区分布, 确定合理的开挖方式, 为类似公路隧道浅埋段工程设计和施工提供参考。

## 1 工程概况

麻栗垭隧道左洞桑植端 ZK34+875—ZK35+900 为明洞段, ZK35+900—930 为浅埋暗挖段, 最

大埋深为 25 m, 最小埋深仅 6 m。桑植端洞门附近位于水田中, 地势较平坦, 仰坡自然坡度为 10°~15°。洞门附近约 100 m 处烟冲沟分布, 且设计高程较低, 洞口覆盖层厚度小, 局部可见强风化基岩出露, 岩体破碎, 边坡开挖后表层极易发生开裂、崩塌、掉块。左洞张家界段隧道轴线与等高线大致正交, 仰坡自然坡度约 30°, 洞口附近覆盖层厚度小, 边坡开挖后表层极易发生开裂、崩塌、掉块。

## 2 基于 MIDAS—GTS NX 的数值模拟

### 2.1 有限元模型建立

麻栗垭隧道桑植端采用新奥法施工原理进行洞身结构设计, 结合现场实际施工地质条件, 合理选用洞身衬砌支护参数, 浅埋暗挖段采用三台阶预留核心土法进行开挖, 并采用小导管注浆法加固土体, 锚杆、工字形钢拱架和喷射砼联合支护。利用 MIDAS—GTS NX 软件建立浅埋段二维模型, 对隧道施工开挖阶段进行模拟。该隧道出洞处属于浅埋暗挖段, 围岩自身承载能力较差, 层间结合力差, 且有淤泥填充, 采用三台阶预留核心土法进行开挖。洞身周边围岩主要为中风化砂质页岩和强风化砂质页岩, 出洞段地势较平坦, 不存在偏压现象。主动内轮廓按设计规范推荐的三心圆曲边墙结构形式, 根据圣维南原理, 隧道洞室开挖后的应力和应变仅在洞室周围 3~5 倍开挖宽度范围内存在影响, 故数值模型宽度左右各取 3D(约 30 m), 竖直方向向下取 30 m, 向上取至地面。数值模型见图 1。

### 2.2 模型参数选择

根据隧道地质勘察报告及《公路隧道设计规范》选取围岩物理力学参数。在隧道洞室开挖过程中,

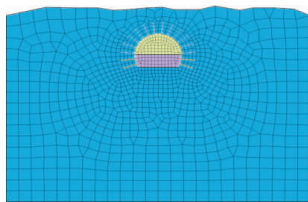


图 1 ZK34+910 断面网格图(上下台阶法)

围岩开挖后即进行初期支护,先架设钢拱架和钢筋网片,然后施作中空注浆锚杆,最后采用喷射砼进行封闭。上述施工过程产生的刚度矩阵对于总刚度矩阵的影响较小,数值模拟中不需要进行分布建模,初期衬砌可根据等效原则进行换算:

$$E_o \times A = E_c \times A_c + E_s \times A_s \quad (1)$$

式中: $E_o$ 为等效初期支护的弹性模量; $A$ 为初期支护的面积; $E_c$ 、 $E_s$ 分别为砼和钢筋的弹性模量; $A_c$ 、 $A_s$ 分别为砼和钢筋的面积。

模型选取的材料参数见表 1。

表 1 有限元模型的材料参数

材料	单元类型	模型类型	弹性模量/GPa	泊松比	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
初期支护	梁	弹性	21	0.2	22
锚杆	桁架	弹性	200	0.3	60
注浆小导管	梁	弹性	21	0.2	22

### 3 数值模拟计算结果与分析

#### 3.1 围岩位移

图 2~4 为采用不同施工方法开挖时隧道洞室围岩位移—工序曲线。

由图 2~4 可知:1) 采用上下台阶法、三台阶法和三台阶预留核心土法开挖洞室后,最大拱顶沉降分别为 12.66、12.50、12.46 mm,最大周边收敛分别为 11.33、11.27、11.22 mm,洞室沉降均超过设计要求的预警值,与现场实际施工情况相符。2) 埋深为

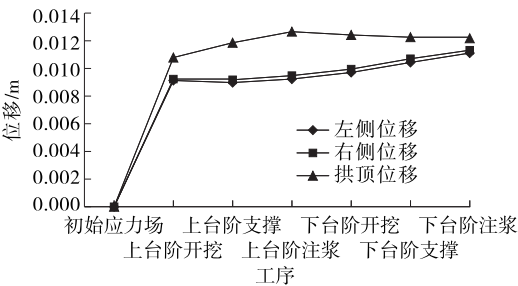


图 2 上下台阶法开挖时埋深 10 m 处围岩的位移—工序曲线

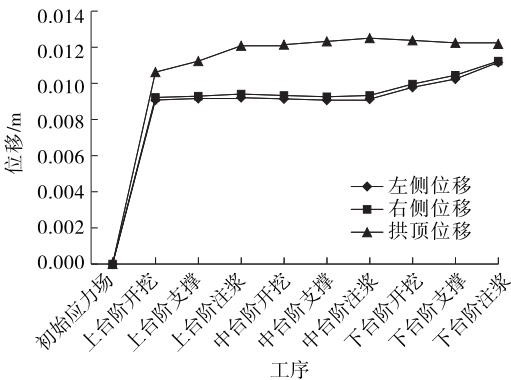


图 3 三台阶法开挖时埋深 10 m 处围岩的位移—工序曲线

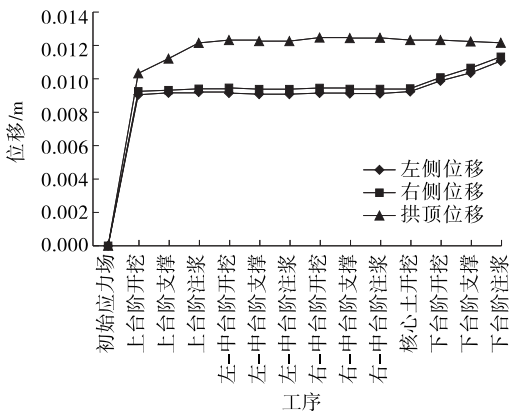


图 4 三台阶预留核心土法开挖时埋深 10 m 处围岩的位移—工序曲线

10 m 的情况下,上下台阶法、三台阶法和三台阶预留核心土法开挖引起的围岩变形相差不大,但采用上下台阶法开挖时变形—工序曲线变形突兀,表明围岩变形存在骤变现象;而三台阶法和三台阶预留核心土法的变形—工序曲线变形平缓,围岩变形不存在骤变现象,更符合安全施工的要求。3) 3 种开挖方式下,左右边墙的周边收敛变形趋势大体相似,这是由于隧道地质情况并不存在偏压现象,左右边墙衬砌结构的变形情况大体对称。

综上,隧道开挖后,洞室拱顶沉降和周边收敛均超过预警值,左右边墙的周边收敛变形趋势相似,符合地质条件不存在偏压现象的设定;采用 3 种施工方法开挖洞室,埋深 10 m 处围岩的位移相差不大。

#### 3.2 围岩最大主应力

采用不同施工方法开挖时隧道围岩最大主应力见图 5~7,以拉应力为+、压应力为一。

由图 5~7 可知:1) 采用上下台阶法进行洞室开挖时,拱顶处最大主应力为 -75.99 kPa,左、右拱肩处最大主应力分别为 -82.45 和 -82.51 kPa,左、

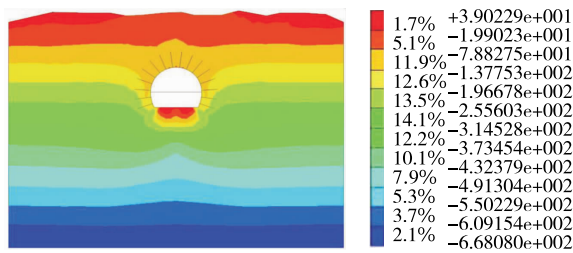


图5 上下台阶法开挖时围岩最大主应力  
等值线分布(单位:Pa)

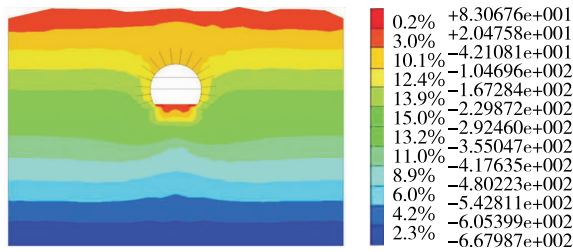


图6 三台阶法开挖时围岩最大主应力  
等值线分布(单位:Pa)

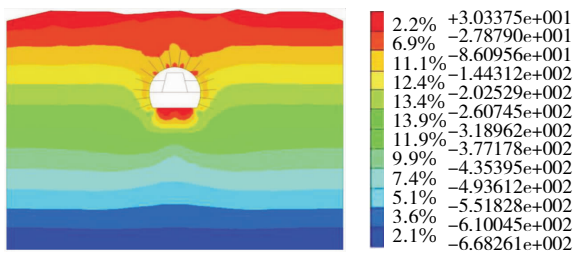


图7 三台阶预留核心土法开挖时围岩最大主应力  
等值线分布(单位:Pa)

右拱腰处最大主应力分别为 $-183.80$ 和 $-184.51$  kPa,围岩最大主应力值左右侧相差不大,表明围岩不存在偏压现象;在上下台阶衬砌结构连接处出现应力集中现象,且最大主应力以受压为主,若下台阶衬砌支护不及时,极易出现剪切破坏,衬砌结构产生环形裂缝,与现场实际施工情况类似。2)采用三台阶法开挖时,拱顶处最大主应力为 $-80.82$  kPa,左、右拱肩处最大主应力分别为 $-87.91$ 和 $-87.76$  kPa,左、右拱腰处最大主应力分别为 $-175.51$ 和 $-175.62$  kPa,与上下台阶法相比,由于三台阶法开挖步骤的细分及围岩开挖程度的减小,围岩最大主应力减小;左、右拱脚处最大主应力分别为 $-118.60$ 和 $-107.67$  kPa,且出现拉压应力转换现象,该部位易产生剪切破坏。3)采用三台阶预留核心土法开挖时,拱顶处最大主应力为 $-81.02$  kPa,左、右拱肩处最大主应力分别为 $-89.51$ 和 $-87.31$  kPa,上台阶开挖后,最大主应力主要表现为压应力;左、右拱

腰处最大主应力分别为 $-172.38$ 和 $-172.02$  kPa,对比3种开挖方法,围岩最大主应力与开挖步骤的细化程度成反比,开挖步骤划分越细,各阶段围岩的最大主应力越小,从而避免围岩出现压力集中现象,对衬砌结构的完整性起到保护作用;左、右拱脚处最大主应力分别为 $-145.16$ 和 $-151.67$  kPa,仰拱及拱脚处均出现拉压交替现象,易产生剪切破坏。

综上,采用上下台阶法,围岩应力集中现象明显,极易造成初期支护开裂、崩解,严重影响施工安全;采用三台阶法和三台阶预留核心土法,应力集中现象出现在拱脚处,说明应力释放主要集中在下台阶开挖后,且各阶段围岩最大主应力大小与施工步骤的细分程度成反比。在埋深 $10\text{ m}$ 的情况下,采用不同开挖方法洞室围岩的最大应力相差不大。

### 3.3 衬砌结构应力

采用不同施工方法开挖时隧道衬砌结构轴应力分布见图8~10。

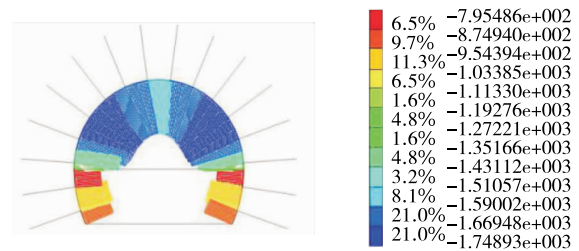


图8 上下台阶法开挖时衬砌结构轴应力  
等值线分布(单位:Pa)

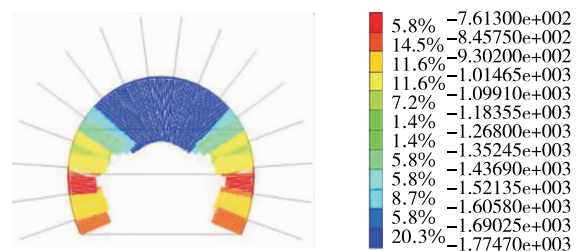


图9 三台阶法开挖时衬砌结构轴应力  
等值线分布(单位:Pa)

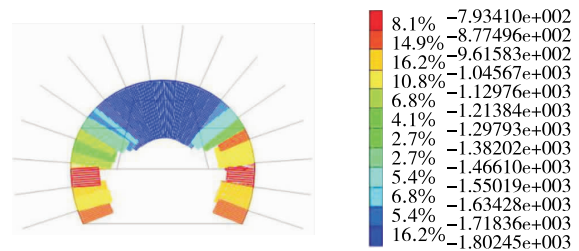


图10 三台阶预留核心土法开挖时衬砌结构轴应力  
等值线分布(单位:Pa)

由图 8~10 可知:1) 不同施工方法下衬砌结构轴应力均左右大致对称且均为压应力,表明衬砌结构不存在偏压现象。2) 采用上下台阶法、三台阶法、三台阶预留核心土法开挖洞室后,衬砌结构的最大轴应力分别为 $-1\,748.93$ 、 $-1\,774.7$ 、 $-1\,802.45$  kPa,其中上下台阶法时衬砌结构最大轴应力出现在拱肩两侧,而三台阶法和三台阶预留核心土法时出现在拱顶处。采用上下台阶法施工时,上下台阶交界处的轴应力突变明显,由 $-1\,431.12$  kPa 降至 $-795.49$  kPa,说明施工中上下台阶连接处的衬砌结构受力较大,存在一定安全风险。3) 开挖步骤的细分,有助于衬砌轴应力的合理分布,使衬砌拱脚处轴力较大程度减小。如采用三台阶法开挖洞室后,衬砌轴应力变化较平缓,中台阶和上台阶交界处的最大衬砌轴应力从 $-1\,213.84$  kPa 变为 $-961.59$  kPa,中台阶和下台阶交界处的最大衬砌轴应力从 $-1\,129.76$  kPa 变为 $-877.50$  kPa。

综上,衬砌结构轴应力呈左右对称分布,与工程地质不存在偏压现象相符;相对于上下台阶法,采用三台阶法开挖时衬砌轴应力增大,与隧道埋深增加而造成围岩压应力变大有关;3 种施工方法下台阶连接处的轴应力均出现突变,但突变程度不同,施工步骤划分越细,台阶连接处的轴应力突变越小。

### 3.4 围岩塑性区

采用不同施工方法开挖时隧道围岩塑性区分布见图 11~13。

洞室开挖完成后,周边围岩的受力状态从弹性阶段进入塑性阶段,塑性区面积大小反映洞室周围岩体的破坏程度。由图 11~13 可知:1) 3 种施工方法下围岩塑性区面积大致相同;洞室周边围岩塑性区主要分布在隧道拱腰至拱脚部位,衬砌结构连接



图 11 上下台阶法开挖时埋深 10 m 处围岩塑性区分布

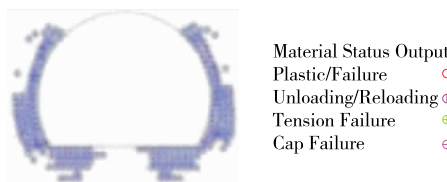


图 12 三台阶法开挖时 10 m 处围岩塑性区分布

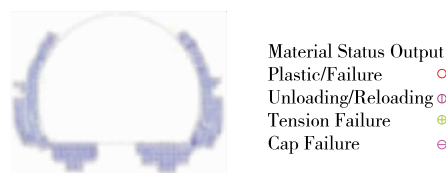


图 13 三台阶预留核心土法开挖时埋深 10 m 处围岩塑性区分布

处为受力集中位置,施工中应加大该位置的支护强度,使之能有效约束围岩变形。2) 采用 3 种施工方法开挖后,由于施工步骤的细分,围岩受到明显的多次扰动和卸载作用,拱腰至拱脚处围岩未能及时受到衬砌结构的反力作用,导致台阶连接处、左右拱脚处围岩呈塑性状态,处于不稳定状态。3) 采用三台阶预留核心土法开挖后,围岩塑性区分布区域较协调,没有出现塑性区分布混乱现象。这是由于开挖步骤的细化使围岩的塑性变形更平缓,同时有利于衬砌结构有效发挥约束作用。

## 4 结论

(1) 山岭隧道浅埋暗挖段围岩自稳能力差,结构较松散,采用上下台阶法开挖时,由于埋深过浅,采用施工步骤细分程度较高的施工方法会导致隧道拱顶出现掉块、垮塌现象,而较少的开挖步骤不仅能减少对隧道围岩的扰动,还可快速完成支护结构,最大限度控制围岩变形,保证隧道洞室的施工安全。

(2) 采用台阶法进行洞室开挖,衬砌结构连接处为薄弱部位,该部位衬砌轴应力变化大,塑性区集中,支护完成后易出现拱顶沉降较大的情况,洞室围岩变形程度也会增大,该部位应加大支护强度。

(3) 在隧道埋深 10 m 的情况下,采用三台阶预留核心土法能合理分配隧道衬砌结构应力,使洞室围岩压力释放处于可控范围,有效控制洞室周边围岩变形,最大程度保证施工安全,为浅埋隧道合理的开挖方法。

### 参考文献:

- [1] 王剑.软弱围岩隧道偏压特性及施工控制技术研究[D].长沙:中南大学,2011.
- [2] 桂铭.浅埋软弱围岩小净距隧道施工技术与受力特征研究[D].长沙:中南大学,2008.
- [3] 韩日美.浅埋土质隧道特性分析及关键技术研究[D].西安:长安大学,2010.

(下转第 148 页)



$$b'_s = \left| \frac{b_s}{\sum_{s=1}^n b_s} \right| \quad (s=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

$$A = b'_s \cdot v'_k \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

#### 4 结语

该文在分析高速公路路线影响因素的基础上,建立以技术、经济和社会环境为指标的评价模型。采用层次分析法确定子目标层权重时,主要站在投资者的角度,把经济指标作为决策因素。最后通过二级模糊综合评价,分别对子目标层与因素层进行评判,采用百分制进行打分,得分最多的方案为最优路线方案。

#### 参考文献:

- [1] 徐龙.高速公路路线设计基本思路及选线方法研究[J].新疆交通运输科技,2017(5).
- [2] 郭伟.山岭区高速公路路线方案布置及比选论证[J].公路与汽运,2014(4).
- [3] 陈远祥,刘方强.高速公路路线方案优选模型及其应用[J].公路工程,2004,29(1).
- [4] 刘志军,肖盛燮.公路选线设计方案多目标决策模糊优选模型[J].重庆交通学院学报,2003,22(2).
- [5] 孙才志,林学钰.基于层次分析的模糊一致性判断矩阵及其应用[J].模糊系统与数学,2002,16(3).
- [6] 张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学,2000,14(2).
- [7] 刘洁,杨凯.层次分析法在京秦高速公路选线中的应用[J].公路交通科技:应用技术版,2016(6).
- [8] 潘晓宇.基于模糊综合评价法的高速公路PPP项目承包商风险分析[J].公路与汽运,2017(3).
- [9] 陈鸿山.基于模糊评估的红色旅游公路路线方案选择[J].建材与装饰,2018(36).
- [10] 刘雄伟.基于模糊多层次综合评价的高速公路交通量预测评价方法研究[J].山西交通科技,2016(1).
- [11] 高贺,苑少伟,慈玉生.高速公路投资绩效评价指标体系[J].中外公路,2014,34(6).
- [12] 陈亮.安徽高速公路建设工程绩效评价研究[J].价值工程,2017(35).
- [13] 刘颖.影响高速公路选线设计的因素分析[J].科技创新与应用,2016(24).
- [14] 杨春,叶景才.基于模糊层次分析法的材料力学评价模型[J].四川师范大学学报:自然科学版,2013,36(5).
- [15] 徐伟,宋亚丽.基于模糊层次分析法的光伏建筑综合效益评价[J].太阳能学报,2018,39(2).
- [16] 张嘉敏,韩宝明.智能运输系统社会经济影响综合评价研究[A].经济全球化与系统工程:中国系统工程学会第16届学术年会论文集[C].2010.
- [17] 刘长祥,吕常新.三车道大断面高速公路隧道稳定性数值模拟[J].地下空间与工程学报,2007,3(4).
- [18] 蒋树屏,胡学兵.云南扁平状大断面公路隧道施工力学响应数值模拟[J].岩土工程学报,2004,26(2).
- [19] 鄢建华.高地应力围岩挤压性大变形分析及数值模拟[D].南京:南京水利科学研究所,2004.
- [20] 段慧玲,张林.大跨度公路隧道合理开挖方法对比研究[J].土木工程学报,2009,42(9).
- [21] 邹成路,申玉生.软弱破碎围岩大断面隧道台阶法施工几何参数优化分析[J].公路工程,2013,38(2).
- [22] 童建军,王明年.公路隧道围岩亚级开挖及支护设计参数研究[J].岩土力学,2011,32(1).
- [23] 王志达,龚晓南,蔡智军.浅埋暗挖隧道开挖进尺的计算方法探讨[A].第九届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C].2007.
- [24] 牛永宏,唐德密.基于数值模拟的浅埋暗挖隧道施工工法分析[J].施工技术,2017(增刊2).
- [25] Yang Xiao-Li, Huang Fu. Influences of material dilatancy and pore water pressure on stability factor of shallow tunnels[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19, (3).
- [26] 董自超.浅埋大断面隧道围岩压力特征与变形性状数值计算[D].长沙:中南大学,2008.
- [27] 李达铭.岩土力学数值分析方法研究[J].地球,2016(6).
- [28] 秦忠诚.3D-FSM-DDM间接边界元数值系统及其在矿山工程中的应用研究[D].济南:山东科技大学,2007.
- [29] Gunter Swoboda, Ahmed Moussa. Numerical modeling of shotcrete and concrete tunnel linings[A]. Tunneling and Ground Conditions[C]. 1994.

收稿日期:2018-08-27

(上接第143页)

- [4] 李永鑫.浅埋隧道围岩压力的上限分析与围岩稳定性研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [5] 张鹏.火郎峪隧道浅埋偏压段施工监控量测与分析[D].西安:长安大学,2011.
- [6] Yang Xiao-Li, Huang Fu. Influences of material dilatancy and pore water pressure on stability factor of shallow tunnels[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19, (3).
- [7] 董自超.浅埋大断面隧道围岩压力特征与变形性状数值计算[D].长沙:中南大学,2008.
- [8] 李达铭.岩土力学数值分析方法研究[J].地球,2016(6).
- [9] 秦忠诚.3D-FSM-DDM间接边界元数值系统及其在矿山工程中的应用研究[D].济南:山东科技大学,2007.
- [10] Gunter Swoboda, Ahmed Moussa. Numerical modeling of shotcrete and concrete tunnel linings[A]. Tunneling and Ground Conditions[C]. 1994.

收稿日期:2018-03-08