

四川松潘某隧道建设对地下水动力环境影响预测模拟

康小兵^{1,2}, 胡卸文¹

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 610031; 2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要: 为充分了解隧道建设对地下水环境的改变, 在准确获取四川省松潘县某隧道围岩地质结构及相关渗透参数基础上, 采用 Visual Modflow 可视化三维软件, 模拟3种方案(天然条件、隧道开挖、隧道运营)下5种不同工况隧道建设对地下水环境的影响。结果表明, 在天然状态下, 隧址区地下水位埋藏浅、变化较小, 地下水环境稳定; 隧道局部开挖条件下, 地下水环境发生明显变化, 在隧道开挖段疏干范围明显增大, 地下分水岭向未开挖段偏移, 而未开挖段地下水环境与天然条件相比变化不明显; 隧道贯通后, 地下水垂直向下流向隧道, 地下水疏干范围逐步扩大; 在加防渗条件下, 地下水不再垂直向下流向隧道, 且地下水环境基本可以恢复到天然状态。综上, 在基岩裂隙山区建设隧道时, 应同步进行防渗施工, 以减小工程建设对地下水环境的干扰, 同时也可以防止隧道涌突水事故的发生。

关键词: 隧道; 地下水环境; 渗流场; 数值模拟

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0113-05

Numerical simulation of impacts of mountain tunnel construction on groundwater environment

KANG Xiaobing^{1,2}, HU Xiewen¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to understand the impacts of mountain tunnel construction on groundwater environment, Visual Modflow, a three dimensional visualization software, was used to simulate the impacts of tunnel construction under five working conditions on groundwater environment with three schemes (natural conditions, tunnel excavation, and tunnel operation) based on the accurate estimation of the geological structure of surrounding rock and the relevant parameters. The results showed that (1) under the natural conditions, groundwater depth is shallow with little variation in the tunnel area, and groundwater environment is stable; (2) under the partial excavation conditions, groundwater environment changes obviously. Drainage area increases significantly in the tunnel excavation area and groundwater divide moves to the tunnel area without excavation, but groundwater environment in the tunnel area without excavation is similar to that under natural conditions; (3) under the complete excavation conditions, groundwater moves downward to the tunnel, and tunnel drainage area continues to expand; and (4) under the anti seepage conditions, groundwater no longer moves downward to the tunnel and groundwater environment can recover to the natural conditions. Therefore, anti seepage construction needs to be performed during the mountain tunnel construction in order to reduce the impacts of engineering construction on groundwater environment and to prevent the water inrush accident in the tunnel.

Key words: tunnel; groundwater environment; seepage field; numerical simulation

隧道工程区的地下水环境与隧道有着复杂的联系, 隧道大量疏干地下水, 会造成隧址区地下水位下降, 水循环平衡遭到破坏, 从而导致地面塌陷、地表水和井泉水流量减小甚至枯竭及水质恶化、地表水大量流失、生态环境恶化等一系列环境水文地质问题^[1-3]。国内外对隧道的研究大多集中

于隧道结构性能和施工安全方面, 也有部分学者对隧道与水环境的相互关系进行了研究, 如蒋忠信^[3]在定量分析隧道工程与水环境相互作用的基础上, 建立了“水环境平衡”的隧道设计理念。随着可持续发展和环境保护理念的不断深入, 有学者从生态保护角度开始研究隧道建设与水环境关系^[4,5]。

收稿日期: 2014-03-11 修回日期: 2014-10-27 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1403.028.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972175); 中央高校基本科研业务费专项基金(SWJTU11ZT14); 成都理工大学青年基金资助项目(2011QJ23)

作者简介: 康小兵(1981-), 男, 江苏丹阳人, 副教授, 博士(后), 主要从事环境水文地质方面的研究。Email: kxb99@163.com

四川省松潘县某公路隧道全长 1 835 m, 最大埋深约 276 m, 隧址区位于岷江以西、牟尼沟以东的山岭地带。隧道洞身主要围岩为三叠系上统西康群侏倭组、新都桥组软-极软千枚岩、炭质板岩, 弱风化变质砂岩、砂质板岩等较硬岩, 岩体整体较破碎。隧址区地下水丰富, 变质砂岩为地下水含水层, 而破碎岩体为地下水的富集和运移又提供了良好空间, 地下水富集程度高, 因此隧道的开挖及运营, 极易引起地下水疏干, 导致地下水位下降, 诱发环境水文地质问题。本文在获取隧道围岩地质结构和岩土体性质资料基础上, 采用 Visual Modflow 可视化三维地下水流动模型软件, 模拟不同开挖条件及防渗条件下地下水渗流场的变化, 研究隧道建设对地下水环境的影响, 进而对隧址区地下水环境恢复提出措施、建议, 以减轻甚至消除环境水文地质问题。

1 地下水渗流模拟基本原理

Visual Modflow 是基于有限差分原理的地下水流动数值模拟的软件, 目前已成为最为普及的地下水运动数值模拟程序, 在工程建设、环境保护、城乡发展规划、水资源利用等许多领域的科研与生产中得到了广泛的应用。实际工作表明, 只要对地质条件做出准确的概化, Modflow 也可用于解决地下水在裂隙介质中流动的问题^[6-7]。

Modflow 的三维地下水流动模型基于常密度地下水三维流动基本方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分别为渗透系数在 x 、 y 、 z 方向的分量 (L/T); h 为水头 (L); W 为单位体积流量 (T^{-1}), 代表流进源或流出汇的水量; S_s 为孔隙介质的贮水率 (L^{-1}); t 为时间。根据相应的边界和初始条件, 用有限差分法进行求解就得到水头的分布值。

2 隧道地质模型建立

地质模型范围包括整个隧道及其影响区域, 模型底板设为水平, 所有分层界限 (地层顶底标高) 均由模拟计算区内钻探、水文地质纵横剖面图数据提取, 并恢复为三维空间数据, 由此建立三维含水系统空间物理模型^[8-10]。模型充分考虑了隧址区复杂的构造及板岩、千枚岩、变质砂岩的间隔出现, 反映真实情况。

模型 X 方向延伸 2 030 m, Y 方向延伸 510 m, 平面上共剖分单元 100×26 个; 垂向上, 隧址区主要地层从老至新为: 第四系全新统冲洪积物、残坡积物; 三叠系上统西康群新都桥组、侏倭组炭质板岩、千枚岩、变质砂岩 (图 1)。隧址区构造发育, 岩层大多为陡倾角形态, 建模时对其做了简单的概化, 仅考虑了较大的断层与褶皱, 但地层分布与实际情况一致。

模型构建时首先将模型分为 7 大层, 计算时再将各层进行细分, 模型最终分为 51 层, 每层 2 600 个单元格, 共剖分了 132 600 个单元格。

隧址区地处松潘县大湾山山区, 气象条件与地表径流对地下水渗流补排关系起到决定性的控制作用, 与此同时这些控制性因素又具有显著的季节性动态变化特征, 即时间上具有明显的阶段性划分。此次计算将数值模拟的时间进行离

散。根据当地降雨量和蒸发量条件, 将一个完整水文周期 (年) 划分为 12 个应力期, 10 个时段。

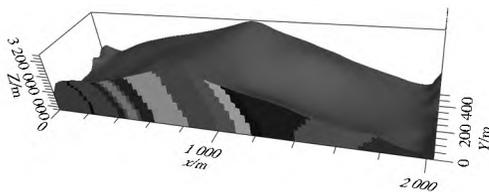


图 1 隧址区三维含水系统空间物理模型

Fig. 1 Three dimensional model of groundwater system in the tunnel area

模型中各岩土体的渗透系数根据钻孔抽水试验获取, 具体取值详见表 1。

表 1 隧址区岩土体模拟计算参数

Tab. 1 Simulation parameters of rock and soil in the tunnel area

地层	K_x $/(m \cdot d^{-1})$	K_y $/(m \cdot d^{-1})$	K_z $/(m \cdot d^{-1})$	有效孔隙度 (%)	给水度 (%)
第四系	1.5	1.5	1.5	15	10.7
变质砂岩	0.83	0.83	1.2	4.97	3.48
砂质板岩	0.6	0.6	0.9	8.17	5.72
千枚岩	0.7	0.7	1.1	5.89	4.12
炭质板岩	0.54	0.54	0.8	8.96	6.27
石英岩	0.8	0.8	1.2	5.23	3.67
断层破碎带	1.5	1.5	1.5	10	7

利用前期勘察和施工获取的泉点、钻孔地下水位及埋深资料进行模型校正。然后利用初步校验后的模型对隧道局部开挖至 K4+ 873 洞段进行渗流场模拟及涌水量预测。涌水量预测结果为 $5\,331.58\,m^3/d$, 而该涌水段施工日志显示, 每天涌水量约 $6\,000\,m^3/d$, 可见模拟结果与监测结果比较接近; 地下水位模拟结果与地下水位观测点 (隧址区出露泉点) 结果也较为接近, 即隧道渗流场模拟预测与实际情况也较吻合。

3 隧道地下水环境变化模拟分析

3.1 模拟计算方案

为充分了解隧道建设对地下水环境的改变, 本次模拟计算主要考虑了 3 种方案共 5 种工况 (表 2)^[11-12]。其中防渗层渗透系数根据混凝土抗渗等级 P8 计算得出, 取 $0.023\,m/d$ 。

表 2 数值模拟计算方案

Tab. 2 Calculation schemes of numerical simulation

计算方案	工况	地下水运动状态	模拟时间	模型运行目的
天然状态	N 天然条件	非稳定流	1 年	天然状态下地下水渗流场特征分析
隧道开挖	0 局部开挖	非稳定流	开挖瞬时	隧道局部开挖条件下地下水渗流场变化及涌水量分析
	0 完全开挖	非稳定流	贯通瞬时	模拟隧道完全开挖 (贯通) 后渗流场
隧道贯通	0 无防渗	非稳定流	1 年	隧道贯通后未加防渗条件下地下水运动状况及地下水流场
	0 加防渗	非稳定流	1 年	隧道贯通后洞壁添加防渗层条件下的地下水运动状况及地下水流场

3.2 模拟结果分析

通过模拟可以得到隧址区在天然状态下、局部开挖条件和隧道贯通条件下各个工况的地下水流场图(图 2- 图 5)。

在天然状态下,隧址区由于岩体破碎,且岩层倾角较大,渗透性好,地表水位埋深浅、变化较小,在山顶 3 150 m 高程

以上出现干单元(地下水水位以上范围),范围小(图 2)。地下水接受大气降雨补给,先由地表入渗往山体内部流动,再往山体两侧流动。总体来看天然状态下隧址区地下水位较高、渗流场稳定。

隧道局部开挖(开挖至 K4+ 873 洞段)条件下,地下水流

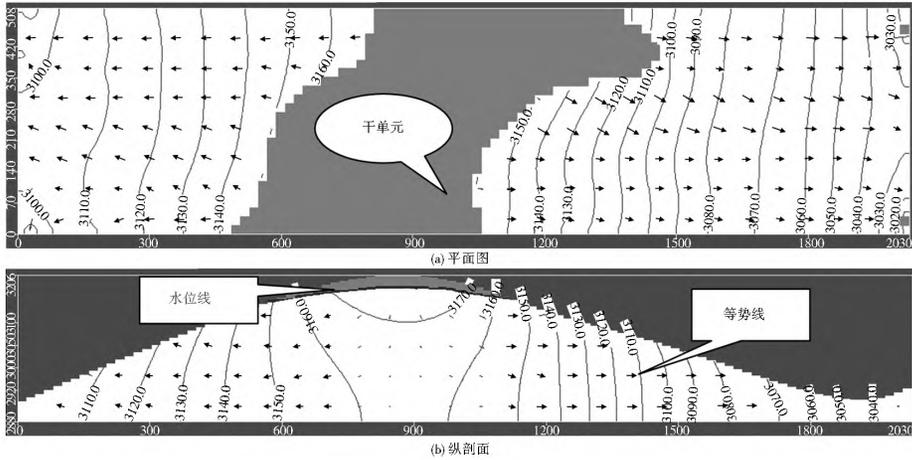


图 2 隧址区天然状态下地下水渗流场模拟结果

Fig. 2 Simulated groundwater seepage field under the natural conditions

场(图 3)与天然状态下(图 2)相比发生明显变化:在隧道进口段(开挖段)疏干范围明显增大,而在出口未开挖段基本无变化;由于隧道开挖形成地下水流动通道,增大了开挖段水力坡度,改变了地下水流动条件,使得地下分水岭向未开挖段偏移;地下水位变化主要发生在开挖段,未开挖段基本无变化;在开挖段,地下水等势线较密集,说明地下水集中向隧道开挖段流出,地下水位降低,而未开挖段与天然条件

相比基本无明显变化。图 3(c)、图 3(d)为隧道局部开挖后 3 个月与 12 个月时的地下水流场图,可以看出,3 个月与开挖后瞬时的地下水流场相比,疏干范围增大(在开挖段变化较明显),地下水位降低幅度增大,地下分水岭进一步向右偏移;而 12 个月与 3 个月的流场相比变化不明显,说明隧道开挖后隧址区地下水流场在 3 个月左右的时间基本重新达到稳定状态。

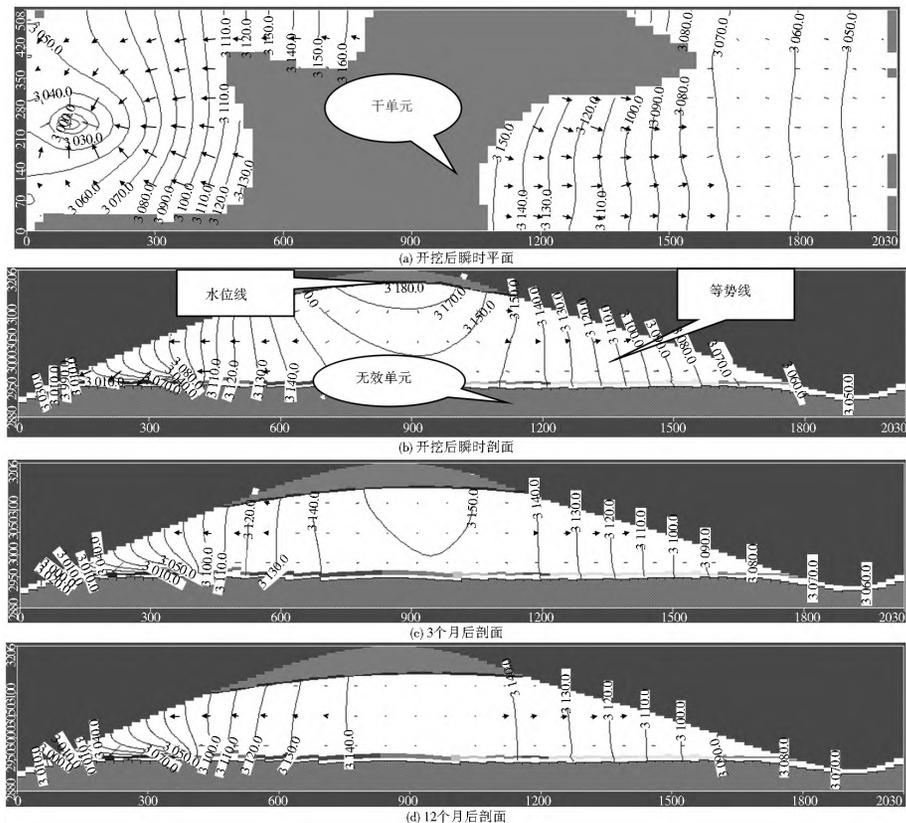


图 3 隧道部分开挖情况下隧址区地下水渗流场模拟结果

Fig. 3 Simulated groundwater seepage field under the part excavation conditions

隧道完全开挖后,瞬时疏干范围明显增大。隧道开挖在山体内部形成一个与外部连通的线状空腔,出现水位临空面,增大了水头差,地下水向下流动趋势加强,基本为垂直向

下流向隧道,在高程 3 100 m 以上大范围内都被疏干(图 4)。所以隧道开挖对地下水的袭夺量较大,隧道涌突水危害性大,特别是在断层破碎带等处应特别注意涌水灾害。

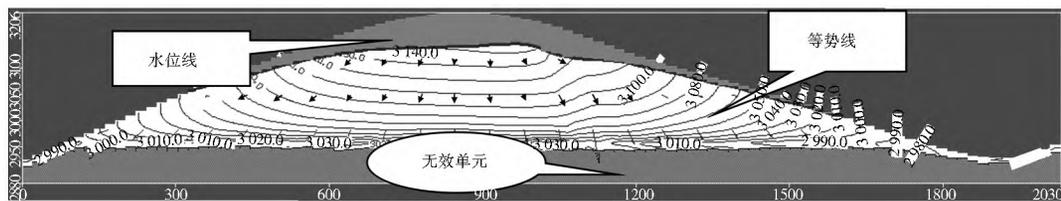


图 4 隧道贯通后瞬时(无防渗)地下水水流剖面

Fig. 4 Simulated groundwater seepage field under the complete excavation conditions (without anti-seepage measures)

隧道贯通 1 年后,在未加防渗的条件下,隧道的疏干范围进一步扩大(图 5(a)),高程 3 050 m 以上范围内地下水基本被疏干;地下水仍垂直向下流向隧道。隧道开挖大大降低了隧址区地下水位,特别是海拔相对较高处的地下水位,除了会在隧道开挖过程中发生涌突水事故,还会对环境及生态造成不利影响。从图 5(b)可以看出,隧道贯通 1 年后地下水也基本处于稳定状态,但与未加防渗相比有明显变化:防渗条件下隧道的疏干范围明显缩小,在高程 3 100 m 以上范

围被疏干,与隧道开挖后瞬时相接近,且地下水不再垂直向下流向隧道,山体中间又恢复了地下分水岭,地下水流动与天然状态类似,只是地下水位稍微有所降低。可见,隧道开挖过程中同步进行防渗施工,则对地下水环境影响较小,而且可以减少隧道涌突水事故。

4 结论

四川省松潘县某公路隧道围岩岩体整体较破碎,隧址区

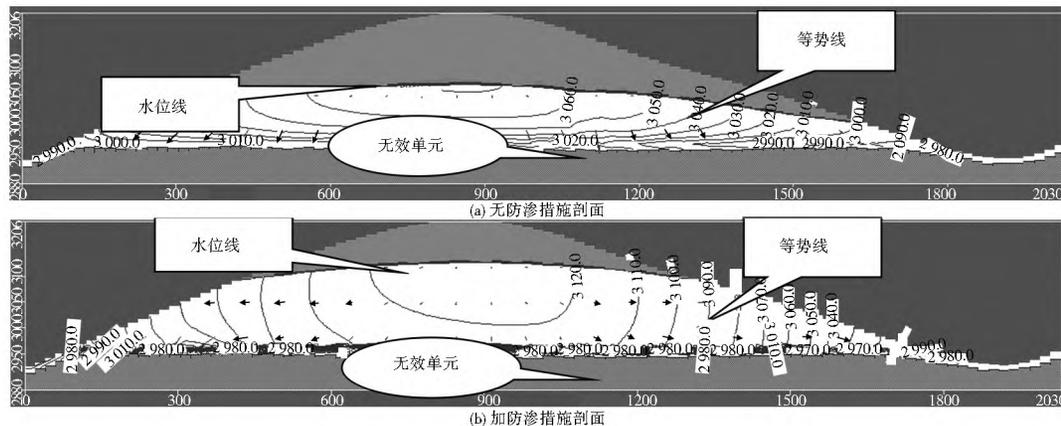


图 5 隧道贯通后 1 年地下水水流

Fig. 5 Simulated groundwater seepage field at 1 year after the complete excavation conditions

地下水丰富,隧道的开挖及运营,极易引起地下水疏干。本文利用 Visual Modflow 数值模型软件,模拟分析了四川省松潘县某公路隧道建设对地下水动力环境的影响,得出了一些有实际意义的结论。结果表明在基岩裂隙山区建设隧道如能在隧道开挖时把防渗措施同步施工,对地下水环境影响较小,同时也可以减少隧道涌突水事故。

参考文献(References):

[1] 王廷亮. 隧道工程地下水处理的环境地质效应[J]. 工程勘察, 2010(12): 42-47. (WANG Tingliang. The geo-environmental effect of the groundwater treatment in tunnel engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(12): 42-47. (in Chinese))

[2] 杜欣, 曾亚武, 岳全贵. 铁路隧道建设与水环境关系分析[J]. 铁道工程学报, 2009(1): 82-85. (DU Xin, ZENG Yawu, YUE Quangu. Analysis of the relation between railway tunnel and groundwater environment[J]. Journal Railway Engineering Society, 2009(1): 82-85. (in Chinese))

[3] 蒋忠信. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 121-127. (JIANG Zhongxin. Interaction between tunnel engineering and water environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 121-127. (in Chinese))

[4] 蒋红梅, 张兰军, 丁浩. 隧道建设对水环境的影响及其对策[J]. 公路交通技术, 2010, 10(5): 144-147. (JIANG Hongmei, ZHANG Lanjun, DING Hao. Impacts of tunnel construction on water environment and countermeasures[J]. Technology of Highway and Transport, 2010, 10(5): 144-147. (in Chinese))

[5] 蒋忠信, 崔鹏. 山区道路工程与环境协调的设计原理[J]. 铁道工程学报, 2006, 2(1): 4-10. (JIANG Zhongxin, CUI Peng. Design principles on the coordinating between road engineering and environment in mountain area[J]. Journal Railway Engineering Society, 2006, 2(1): 4-10. (in Chinese))

[6] 贺炜, 莫凯, 付宏渊. 隧道施工对地下水环境影响的三维数值模拟-以八面山隧道为例[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2011, 12(4): 6-11. (HE Wei, MO Kai, FU Hongyuan. Three dimensional numerical study of impact of tunnel construction on

- the underground water environment a case study of Bamianshan tunnel[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 12(4): 6-11. (in Chinese)
- [7] 郭卫星, 卢国平. Modflow 三维有限差分地下水流动模型[M]. 南京: 南京大学出版社, 1998. (GUO Wei xing, LU Guo ping. Modflow 3d finite difference underground water flow model [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1998. (in Chinese))
- [8] 宋飞. 太峪隧道斜井交叉口挤压变形段涌水处理技术[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 3(6): 155-156. (SONG Fei. Water burst treatment on an extrusion segment of inclined intersection in Taiyu tunnel[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 19(3): 155-156. (in Chinese))
- [9] 李泽龙. 隧道地下水环境保护技术[J]. 四川建筑, 2012, 3(6): 84-86. (LI Ze long. Protection technology of tunnel groundwater environmental[J]. Sichuan Architecture, 2012, 3(6): 84-86. (in Chinese))
- [10] 杜欣莉. 中条山某公路隧道地下水环境问题探讨[J]. 山西建筑, 2011, 4(10): 154-155. (DU Xin li. Explotion in grounawar ter environment of a tunnel in Zhongtiao mountain road[J]. Shanxi Architecture, 2011, 4(10): 154-155. (in Chinese))
- [11] 赖明. 叙岭关隧道建设对地下水环境的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. (LAI Ming. Study of the impaction the grounawater environment during the construction of the Xu linguan tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [12] 周鹏, 运荷. 某公路隧道对地下水环境的影响评价与对策[J]. 山西交通科技, 2012, 8(4): 84-86. (ZHOU Peng, YUN He. The impact assessment and countermeasures of a highway tunnel on groundwater environment[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2012, 8(4): 84-86. (in Chinese))

(上接第 102 页)

- [6] 胡小平, 孙贵尚, 王联军, 等. 三峡水库区地质灾害防治工程环境效益评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 148-150. (HU Xiaoping, SUN Guishang, WANG Lianjun, et al. Environmental benefits assessment of geological disaster prevention project for the Three Gorges Reservoir[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 148-150. (in Chinese))
- [7] 许建聪, 尚岳全, 郑东宁, 等. 不平衡推力法的弹塑性有限元改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4247-4252. (XU Jiancong, SHANG Yuequan, ZHENG Shuning, et al. Elastoplastic finite element improvement of imbalanced thrust force method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4247-4252. (in Chinese))
- [8] 张鲁渝, 郑颖人, 时卫民, 等. 边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 177-182. (ZHANG Luyu, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. On slope stability analysis by imbalance thrust force method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 177-182. (in Chinese))
- [9] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明, 等. 边坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J]. 岩土工程学报, 2004(5): 313-317. (SHI Weimin, ZHENG Yiren, TANG Boming, et al. Accuracy and application range of imbalance thrust force method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(5): 313-317. (in Chinese))
- [10] 何正杰, 朱寿增, 米澄宇, 等. 不平衡推力法在滑坡治理中的应用研究[J]. 成都工业学院学报, 2013(4): 71-73. (HE Zhengjie, ZHU Shouzheng, MI Chengyu, et al. Application of unbalanced thrust transfer coefficient method in landslide[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2013(4): 71-73. (in Chinese))
- [11] 郑颖人, 时卫民, 杨明成, 等. 不平衡推力法与Sarma法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3030-3036. (ZHENG Yiren, SHI Weimin, YANG Mingcheng. Discussion on imbalance thrust force method and Sarma's method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 23(17): 3030-3036. (in Chinese))
- [12] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986: 225-252. (XU Zhiying. Rock Mechanics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1986, 225-252. (in Chinese))
- [13] 文明, 叶洪华. 考虑条间推力倾角变化对不平衡推力法的修正[J]. 路基工程, 2013(4): 107-110. (WEN Ming, YE Honghua. Amendment on unbalanced thrust force method when considering change of interslice thrust force inclination[J]. Subgrade Engineering, 2013(4): 107-110. (in Chinese))
- [14] 陶丽娜, 周小平, 柴贺军, 等. 用于边坡稳定分析的改进通用条分法[J]. 土木建筑与环境工程, 2014(1): 106-113. (TAO Lina, ZHOU Xiaoping, CAI Hejun, et al. Improved general limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2014(1): 106-113. (in Chinese))
- [15] DZ/T 0218-2006, 滑坡防治工程勘查规范[S]. (DZ/T 0218-2006, Specification of Geological Investigation for Landslide Stabilization[S]. (in Chinese))