

DOI: 10.11779/CJGE2015S1015

# 特大断面隧道分步施工动态压力拱分析研究

郑康成<sup>1, 2</sup>, 丁文其<sup>1, 2</sup>, 金威<sup>1, 2</sup>, 罗云<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 深圳市交通公用设施建设中心, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 特大断面隧道的建设越来越多, 传统规范荷载计算方法未考虑特大断面隧道施工的实际情况, 计算结果偏大。在确定隧道压力拱判别方法的基础上, 采用大型二维模型试验探究开挖过程中特大断面隧道压力拱的动态发展。从开挖洞周应力随开挖步变化的情况可以看出, 大断面隧道压力拱是随着开挖步分区域、分阶段形成的, 并采用数值分析对试验中的规律进行验证总结。为得到支护对压力拱发展的限制作用, 采用二维精细化数值模型, 模拟施工工况, 探究支护对限制压力拱扩展的作用, 得到大断面隧道复杂施工过程中压力拱的动态变化、压力拱高度折减系数, 用于指导设计计算。

**关键词:** 特大断面隧道; 动态压力拱; 模型试验; 数值分析; 支护作用

中图分类号: U459.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S1-0072-06

作者简介: 郑康成(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事隧道及地下建筑方向研究。E-mail: zhengkangcheng92@126.com。

## Experimental and numerical study on staged construction pressure arch of super large section tunnel

ZHENG Kang-cheng<sup>1, 2</sup>, DING Wen-qi<sup>1, 2</sup>, JIN Wei<sup>1, 2</sup>, LUO Yun<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shenzhen Public Traffic Facilities Construction Center, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** There are more and more super large section tunnels. However, the calculated results by the traditional load calculation method are much larger than the real ones without considering the actual construction steps and support. Based on the method for discriminating the tunnel pressure arch, the dynamic development of pressure arch during the process of construction is studied by utilizing the large-scale two-dimensional model tests. It can be seen from the stress change around the hole that the pressure arch of large section tunnel forms in different regions by stages, along with the excavation steps. Then numerical analysis is conducted to verify and summarize the law found in the model tests. To study the restriction effect on pressure arch of support, a fine numerical model is established to simulate the construction conditions. The restriction effect on pressure arch of support is analyzed. Finally, the dynamic change of pressure arch and the reduction coefficient of arch height, which can be adopted to guide the design and calculation, are obtained.

**Key words:** super large section tunnel; dynamic pressure arch; model test; numerical analysis; support action

## 0 引言

现代公路隧道规划车道数越来越多, 例如深圳某在建的分岔隧道, 分岔大断面段跨度达到 25 m。对于地质条件较差、跨度很大的隧道开挖, 需要采用 CRD 或双侧壁导洞开挖的方式。传统规范中的荷载计算方法是以全断面、台阶法开挖为基础, 其统计样本 91.6% 都在 5~10 m 宽度的马蹄形隧道内取得, 显然已经不适用当今特大跨隧道的建设, 事实上, 在国内的一些特大断面隧道的荷载计算中已经对规范计算得到的荷载结果进行折减。

同济大学曲海锋<sup>[1]</sup>在丁文其等<sup>[2]</sup>连拱隧道双塌落拱假定的基础上, 提出了扁平大断面隧道荷载的过程设计方法, 但其更多的是对荷载计算模型在几何上的简化, 缺乏有效的实验验证, 数值分析中亦未考虑支护的影响, 未能从荷载产生的机理上阐述扁平大断面隧道的过程设计方法。

荷载的产生与压力拱息息相关, 要研究分步开挖

基金项目: 国家“863”计划项目(2012AA112502); 国家“973”计划项目(2014CB046905)

收稿日期: 2015-03-26

下隧道荷载的过程设计方法, 就不得不先研究隧道压力拱随开挖进行时的动态分布, 对隧道开挖过程中压力拱形成、发展机理进行研究。如果能够在开挖过程中采取有效的临时支护, 便可以降低荷载, 因此荷载设计时如何考虑支护的有益作用成为关键。本文从压力拱产生的机理着手, 利用大型二维模型试验结果, 得到分步开挖时压力拱的发展规律, 并进一步考虑支护对压力拱发展的限制作用, 得到压力拱在支护下的发展情况, 为进一步改进大断面隧道过程设计方法奠定基础。

## 1 压力拱内外边界判别方法

压力拱本质上是围岩中应力的自调整, 硐室开挖后, 围岩内产生类似拱结构的切向压紧作用, 荷载传递方向发生偏离, 对于侧压力系数小于 1.0 的围岩来说, 围岩中的最大压应力由原来的竖直方向向拱脚偏离, 将上部围岩压力传至“拱脚”及“拱座”等稳定岩体。压力拱下部区域岩体因未能参与成拱, 其围岩压力传至衬砌, 形成衬砌荷载<sup>[3]</sup>。

隧道开挖后拱顶应力变化示意图如图 1 所示, 有限元分析中, 某隧道毛洞开挖后围岩最大压应力矢量图如图 2 所示, 矢量图中, 矢量流线的方向表示最大压应力方向, 长度表示最大压应力大小。流线越长越密表示压应力越大<sup>[4]</sup>。从图 1 和图 2 中可以看出, 硐室开挖后, 最大压应力在拱顶区域发生偏转, 压力拱内的围岩一部分垂直应力转化为水平应力, 这种转化使拱体内部垂直应力减小而水平应力增加, 根据这一现象可初步判断压力拱的内外边界。

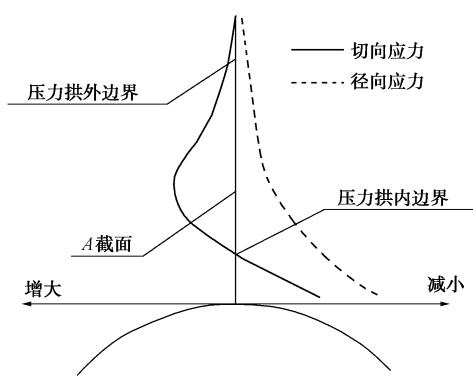


图 1 隧道开挖后拱顶应力变化

Fig. 1 Change of stress in vault area after excavation

对于拱顶正上方区域压力拱的外边界, 隧道开挖形状对称, 隧道的拱顶截面(图 1 中的 A 截面)内剪应力为零, 为主应力面, 最大压应力为水平向或垂直向。从图 2 中可以看出, 当高度超过一定区域后(图 2 中 M 点), 拱顶最大压应力由水平转为垂直方向,

表明岩体在该区域外不再受到拱效应的水平挤压, 称该点为应力偏转点。压力拱的分布与围岩中最大压应力矢量分布基本一致, 以拱顶最大压应力方向偏转点作为拱顶压力拱的外边界的基点, 沿最大压应力矢量流线方向作出压力拱外边界线, 如图 2 所示。

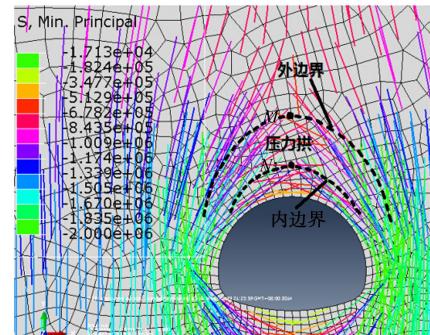


图 2 隧道开挖后最大压应力矢量图

Fig. 2 Vectors of maximum compressive stress after excavation

关于拱顶区域压力拱的内边界, 在靠近拱顶区域, 最大压应力转为水平方向, 此处的水平应力较围岩初始水平应力减小, 并未产生拱效应。应力发生偏转是因为拱顶处垂直应力减小至几乎为 0, 所以尽管该处最大主应力发生偏转, 但不属于压力拱区域, 而属于围岩松动区域<sup>[5]</sup>。以开挖前后拱顶正上方水平应力增与减的转换点作为拱顶压力拱的内边界(图 2 中 N 点), 内边界上部岩体水平方向因为开挖受到挤压, 属于拱体; 下部岩体因为开挖而产生应力释放, 属于松动区。同样地, 以拱顶水平应力增减点为基点, 沿最大压应力矢量流线方向作出压力拱内边界线。如图 2 所示。

因为需要研究开挖过程中压力拱的动态变化, 而所有开挖面并非都是对称的。对于非对称的开挖面, 拱顶最大主应力方向不再是竖直和水平向, 而是有一定的倾斜。此时以压应力偏转最大处作为最大主应力方向等效偏转点, 即压力拱的外边界, 如图 3 的 A 点和图 4 的 B, C 点。

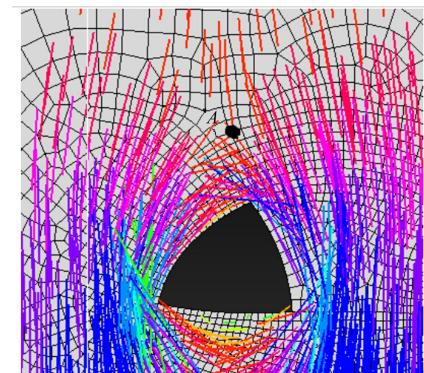


图 3 第一步开挖完成后最大压应力矢量流线图

Fig. 3 Vectors of maximum compressive stress after first excavation step

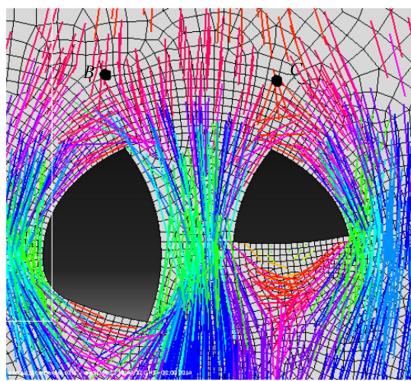


图 4 第三步开挖完成后最大压应力矢量流线图

Fig. 4 Vectors of maximum compressive stress after third excavation step

## 2 模型试验分析压力拱发展规律

### 2.1 压力拱发展规律的模型试验探究

利用大型二维模型试验探究大断面隧道开挖过程中的隧道围岩应力变化,进而探究压力拱的发展规律<sup>[6]</sup>。模型试验台架尺寸为  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ , 模拟开挖的隧道尺寸为跨径  $24.3\text{ m}$ , 高  $15.2\text{ m}$ , 埋深  $40.45\text{ m}$ , 相似比为  $1:50$ 。模拟IV级围岩,  $E=3.65\text{ GPa}$ ,  $\nu=0.3$ ,  $\varphi=33^\circ$ ,  $c=0.45\text{ MPa}$ 。模拟IV级围岩, 开挖步骤如图5所示, 试验台架如图6所示。

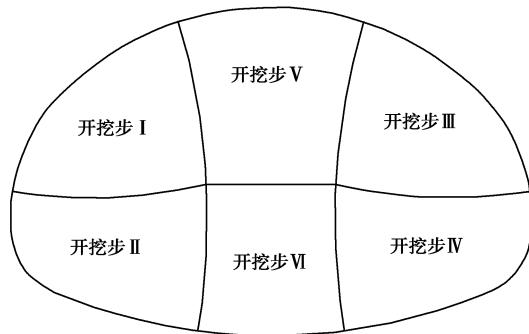


图 5 隧道开挖步

Fig. 5 Excavation steps

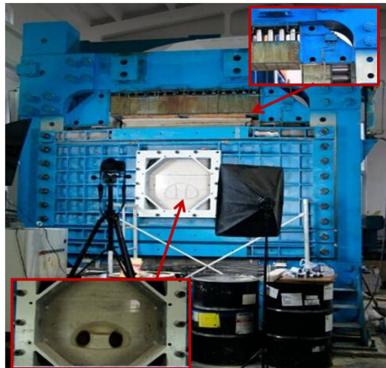


图 6 模型试验装置

Fig. 6 Model test equipment

试验时拱顶径向应力历时曲线如图7所示, 从图中可以看出, 径向应力随开挖步的进行不断发展, 并且不同开挖步下, 应力改变的程度亦不同。在初始的开挖步中, 因为两侧导洞各自成拱, 并且互相影响, 将拱顶部分岩体作为“拱座”, 因此使拱顶竖向应力增加, 第V步开挖后, 坚向应力减小, 因未有支护的支撑, 压力拱区域扩展明显(见图5)。根据各个测线的径向切向应力试验数据, 整理出第II、IV、VI开挖步完成后, 各测线传感器径向及切向应力变化情况。如图9~11所示。

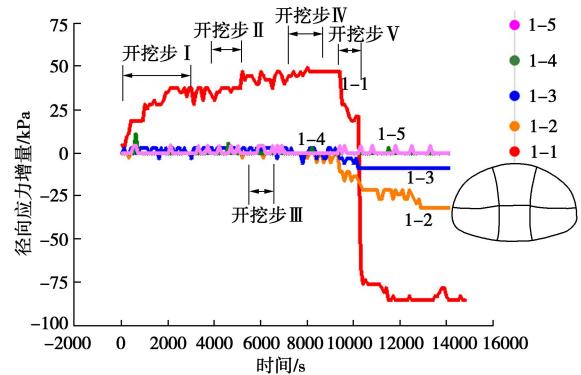


图 7 型试验拱顶径向应力历时曲线

Fig. 7 Time-history curves of radial stress of vault in model tests

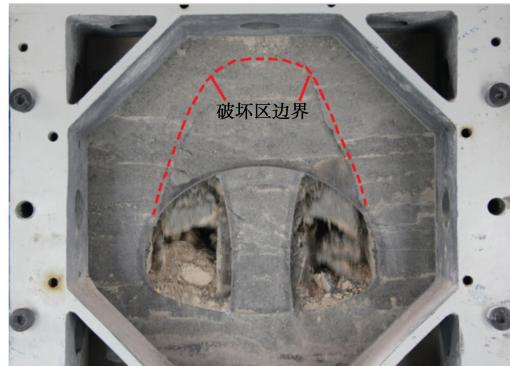


图 8 第 V 步开挖时发生整体塌方破坏

Fig. 8 Collapse damage after completion fifth step

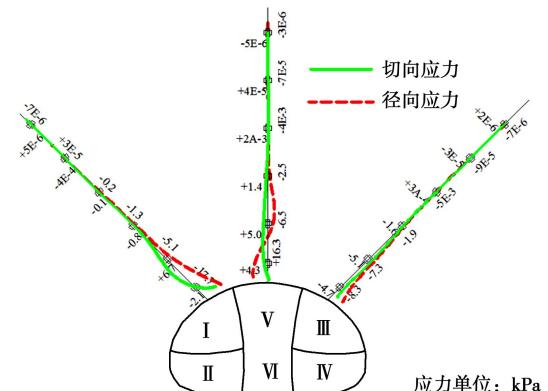


图 9 第 II 步开挖完成后洞周应力变化

Fig. 9 Change of stress of surrounding rock after second excavation step

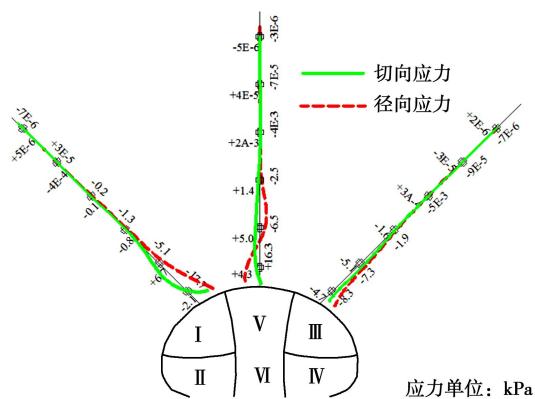


图 10 第IV步开挖完成后洞周应力变化

Fig. 10 Change of stress of surrounding rock after forth excavation step

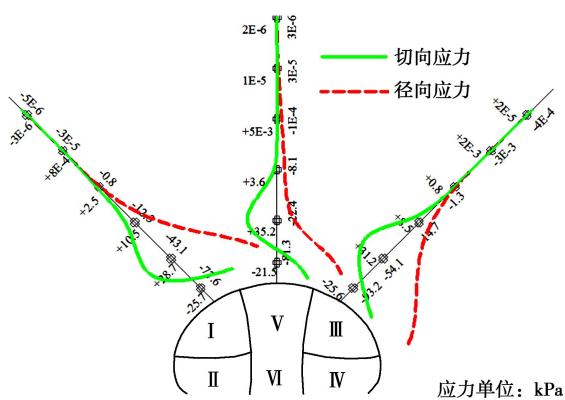


图 11 第VI步开挖完成后洞周应力变化

Fig. 11 Change of stress of surrounding rock after sixth excavation step

从试验结果中可以看出, 开挖对洞周应力影响是分区域、分阶段扩展的, 扩展程度在不同开挖步后不尽相同。压力拱逐步形成, 并且高度不断扩大(见图12)。压力拱的形成与隧道所受的荷载息息相关, 认识并利用该规律, 对隧道压力拱的形成过程进行探究, 改进隧道的过程荷载设计方法, 使该设计方法更贴合围岩压力拱实际的发展过程。

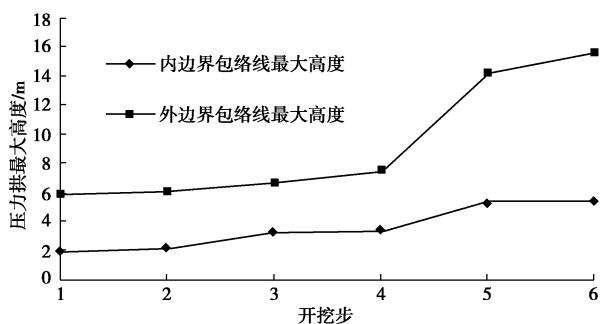


图 12 毛洞开挖压力拱高度动态发展情况

Fig. 12 Dynamic development of pressure arch without support

## 2.2 隧道毛洞开挖的数值分析

建立毛洞二维数值模型, 地质条件、围岩参数、

隧道尺寸以及开挖顺序均与模型试验相同。利用前文提出的压力拱区域判别方法, 得到压力拱的动态发展过程, 第II、IV、VI步毛洞开挖结果如图13中(a)、(c)、(e)所示。统计得到每步开挖后隧道压力拱包络线高度如图13所示。

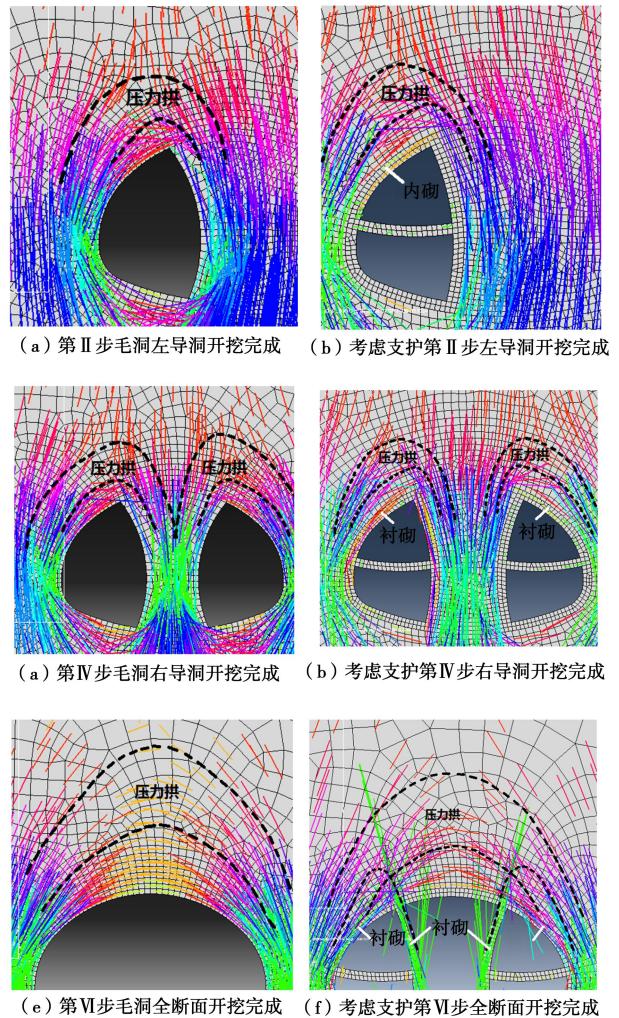


图 13 开挖过程中压力拱的动态变化图

Fig. 13 Dynamic change of pressure arch during excavation

从图13中可以看出, 左导洞开挖完成后, 因开挖跨度较小, 高跨比较大, 压力拱高度很低; 第III步右导洞开挖完成后, 因未采取有效支护, 两洞各自的压力拱很容易发展联结在一起, 此时压力拱高度第一次显著扩大; 第V步拱顶处岩体开挖后, 因在隧道中部缺乏必要的支撑, 两导洞各自的压力拱完全汇合到一起, 并且随着拱顶处岩体的松动不断上移, 压力拱高度第二次显著增大。

数值分析很好地验证了模型试验的规律, 压力拱在第III、V步有两次较大的扩展, 为了限制压力拱在隧道开挖过程中的扩展, 使其在较低的高度上成拱, 必须考虑支护对各导洞的支护作用。在数值分析中加入支护, 得到支护对于压力拱发展的限制效果。

### 3 支护对压力拱发展限制的数值分析

从上述试验与数值分析中,可以看出,特大断面隧道的压力拱是随着开挖步的进行逐渐发展的,因为试验手段的限制,前期试验中暂时没有考虑支护措施。于是在数值分析中考虑支护的作用,如果隧道的临时支护能够有效地限制压力拱的发展,便能够有效降低作用在衬砌上的荷载,改进隧道设计。

建立考虑支护与开挖释放系数的二维精细化数值模型。采用莫尔库伦屈服条件,围岩条件、开挖顺序与试验一致,支护衬砌厚0.85 m,锚杆注浆圈范围为开挖面外3.5 m,根据朱维申等<sup>[7]</sup>的试验结果中以及工程经验,采用对岩体 $c$ , $\tan\varphi$ 值提高30%模拟注浆效果,每步开挖荷载释放系数为0.5,增加第VII步为拆除临时支护施工步。

选取第II、IV、VI步开挖完成后的结果与毛洞开挖结果进行对比,采用前文提出的方法,作出每步开挖后的压力拱线,如图13所示。每一步开挖后压力拱内外边界包络线最大高度如图14所示。

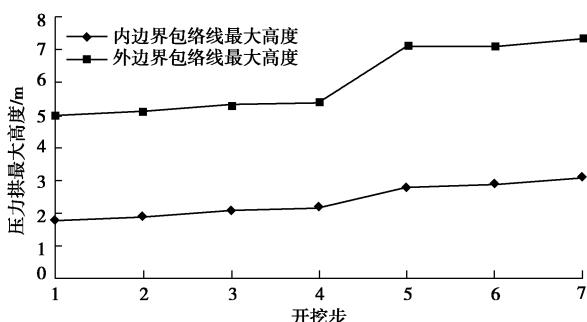


图14 支护后压力拱高度动态发展情况

Fig. 14 Dynamic development of pressure arch with support

从计算结果中可以看出,第II步左导洞开挖完成后,支护对压力拱发展的限制作用并不明显,但第IV步双导洞开挖完成后,因为临时支护的存在,中间岩体得以维持稳定,可以作为两导洞压力拱的“拱座”,使两导洞的压力拱各自独立,不致联结扩展在一起。而毛洞中,中部岩体因开挖松散,使两导洞压力拱扩展,并有部分区域重合。

第VI步全部开挖但临时支护拆除前,从图中可以看出,临时支护充当了“拱座”的作用,很大程度上抵消了中部围岩开挖的影响,使三部分开挖各自产生的压力拱保持一定的独立性,避免了三部分分步压力拱的联合,有效降低了压力拱的高度。因此,在拆除临时支护前,使衬砌及时封闭成环,便能很好地限制压力拱的发展,使隧道压力拱的内外边界降低,从而减小作用在衬砌上的松动荷载以及降低隧道围岩的成拱高度,更易成拱。

将图12与图14相减,得到每步开挖后支护对压力拱高度限制作用如图15所示。

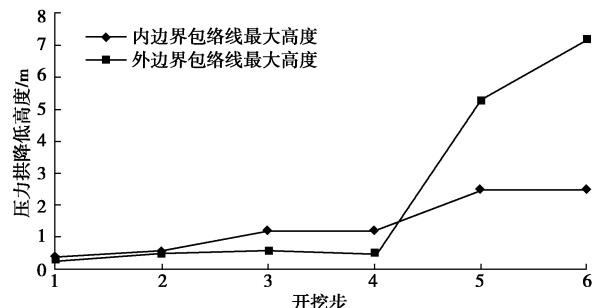


图15 支护后每步开挖后压力拱降低高度

Fig. 15 Reduced height of pressure arch in every step

从图14中可以看出,对于压力拱内边界,支护对于第III步和第V步开挖后内边界高度的限制作用明显,而对于外边界的限制则只在第V步中体现的较为明显。因此施工中在第III步和第V步开挖前,应尽量确保临时支护形成强度,达到预期支护效果,从而对隧道压力拱的扩展进行限制,降低围岩松动区高度。

将支护后最终的压力拱高度除以未考虑支护得到的压力拱高度,可以算得,该大断面隧道,支护作用对压力拱内边界折减系数为0.54,对压力拱外边界的折减系数为0.50。可以据此对隧道的荷载设计采用过程荷载设计方法,有效提高工程的经济性。

### 4 结论与建议

本文通过特大断面隧道的模型试验与数值分析,对其压力拱的产生、发展进行研究,主要得出以下结论:

(1) 大断面隧道的压力拱随开挖步进行有着明显的发展、扩大规律,对其进行荷载设计时,有必要考虑开挖过程对荷载大小的影响,并应该利用压力拱的发展规律,对其进行限制,尽可能的降低成拱高度。

(2) 支护措施对压力拱发展的限制作用明显。有效的支护使各导洞各自的压力拱保持了一定的独立性,避免其互相联结,发展。从而使整个压力拱的包络线高度较低。对软弱地层双导洞开挖大断面隧道,及时做好两侧导洞的支护可较大地限制后续开挖时压力拱高度的扩大,对改进设计有重要参考价值。

(3) 从本文的研究结果可以看出,支护措施对压力拱发展的影响较大,过程荷载设计方法中应考虑支护的影响,对不同支护方式采用不同的设计方法。利用不同支护,对隧道压力拱的发展进行限制,服务于隧道荷载的过程设计方法,可根据本文得到的规律对荷载的过程设计方法作进一步的改进。

**参考文献:**

- [1] 曲海锋. 扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (QU Hai-feng. Study on load mode of road tunnel with extra-large cross-section and low flat-ratio and Its application[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [2] 丁文其, 王晓形, 朱合华, 等. 连拱隧道设计荷载的确定方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 78 - 82. (DING Wen-qi, WANG Xiao-xing, ZHU He-hua, et al. Defining method for designing load of multi-arch tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 78 - 82. (in Chinese))
- [3] 李俊鹏. 开挖过程中隧道围岩应力释放规律及软岩支护时机研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (LI Jun-peng. Rules of stress release in tunnel during excavation and the opportunity of support in soft rock[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [4] 李 奎. 水平层状隧道围岩压力拱理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005. (LI Kui. Pressure arch theory study of horizontal bedded tunnel surrounding rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [5] 梁晓丹, 刘 刚, 赵 坚. 地下工程压力拱拱体的确定与成拱分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 314 - 317. (LIANG Xiao-dan, LIU Gang, ZHAO Jian. Definition and analysis of arching action in underground rock engineering[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(3): 314 - 317. (in Chinese))
- [6] 黄伦海, 刘 伟, 刘新荣. 单洞四车道公路隧道开挖的模型试验[J]. 地下空间, 2004, 24(4): 465 - 474. (HUANG Lun-hai, LIU Wei, LIU Xin-rong. Model test on single four-lane highway tunnel excavation[J]. Underground Space, 2004, 24(4): 465 - 474. (in Chinese))
- [7] 朱维申, 张玉军, 任伟中, 等. 系统锚杆对三峡船闸高边坡岩体加固作用的块体相似模型试验研究[J]. 岩土力学, 1996, 17(2): 1 - 6. (ZHU Wei-shen, ZHANG Yu-jun, REN Wei-zhong, et al. Similar model block tests for reinforcing effects of systematic bolts on rock mass of high slope of three gorges flight lock[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(2): 1 - 6. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)