

网络出版时间:2013-03-27 15:50

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130327.1550.024.html>

# 深基坑开挖对邻近通道影响的实测及数值分析

姜兆华<sup>a,b</sup>, 张永兴<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a 土木工程学院, b 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400030)

**[摘要]** **【目的】**研究基坑开挖对邻近通道的影响,为邻近通道基坑开挖工程的设计与施工提供参考。**【方法】**以重庆某周围存在邻近人防洞通道的岩质深基坑工程为例,通过数值模拟和现场观测,研究土岩组合地层基坑与通道变形、通道拱脚推力及围岩破坏模式的关系。**【结果】**邻近通道会改变地表最大沉降点位置,土岩组合地层中地表沉降主要与基坑的水平位移和通道沉降有关。通道与基坑之间围岩间壁厚度较大时,隧洞破坏来自于拱顶;间壁厚度较小时,隧洞破坏来自于侧壁。由于受连续介质及隧道几何形态的影响,围岩会改变位移场传递的方向,通道主要表现为横向变形。**【结论】**邻近通道会增加基坑的水平位移与沉降,通道的破坏方式与间壁岩体厚度有关。

**[关键词]** 邻近通道;深基坑;数值模拟;拉裂破坏;变形监测

**[中图分类号]** TU433

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2013)04-0220-07

## Field measurement and numerical analysis on effects of deep excavation on adjacent channel

JIANG Zhao-hua<sup>a,b</sup>, ZHANG Yong-xing<sup>a,b</sup>

(a College of Civil Engineering, b Key Laboratory of New Technology for Construction of China in Mountainous Area, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** **【Objective】** This study focused on the effects of excavation foundation pit on adjacent channels and aimed to improve the design and construction of the foundation pit. **【Method】** Based on the rock deep excavation adjacent to the channel in Chongqing, the deformation of the channel and deep foundation pit, thrust at springer, and the surrounding rock failure mode were studied by numerical simulation and field measurement in the soil rock layer. **【Result】** The results showed that the adjacent channel changed the position of the biggest settlement point, and the ground surface settlement was related to the horizontal displacement and the settlement of the channel in soil rock layer. When the thickness of the surrounding rock was larger, the tunnel vault may appear tension failure. If the thickness of the surrounding rock was smaller, the lateral wall may appear tension failure. Due to the influence of the continuous media and tunnel geometric shape, the surrounding rock would change the direction of displacement field and cause the lateral deformation. **【Conclusion】** Adjacent channel will increase the horizontal displacement and settlement of the foundation pit, and the failure mode is related to the thickness of the rock mass.

**Key words:** adjacent channel; deep foundation pit; numerical simulation; tension failure; deformation monitoring

近年来,随着地下空间开发利用与发展,越来越多的地下工程正在建造。由于不少基坑工程在开挖

**[收稿日期]** 2012-07-19

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(51027004)

**[作者简介]** 姜兆华(1983—),男,湖北蕲春人,在读博士,主要从事基坑开挖研究。E-mail: jzhyantu@163.com

之前周围就存在地下结构物<sup>[1-3]</sup>,如地铁隧道、人防洞通道、市政管线等,在这种情况下开挖基坑,有必要考虑邻近地下结构物对基坑开挖的影响<sup>[4-6]</sup>。

目前,已有很多学者对该问题进行了研究,并提出了不少有指导意义的理论及一些有价值的经验成果。刘国彬等<sup>[7]</sup>结合上海软土基坑开挖工程,对已运行下卧地铁区间隧道上抬变形进行研究,提出时空效应施工控制方法。闫静雅<sup>[8]</sup>基于上海隧道与基坑距离小于 10 m 的工程实例,总结指出在确定基坑设计方案时,就应考虑整体的分区布局,提出基坑围护形式、加固方案、支撑布局等保护措施。高广运等<sup>[9]</sup>以上海某邻近地铁隧道的基坑工程为背景,运用数值分析软件建立三维数值分析模型,对基坑施工进行全过程动态模拟,提出并采用了坑外二次加固的施工新工艺,即对紧贴基坑地下连续墙的土体进行二次加固及结构逆筑施工,可有效控制相邻隧道变形。王卫东等<sup>[10]</sup>针对距离已运行地铁隧道最小净距仅为 5.45 m 的上海市闸北区大宁商业中心基坑东侧围护体工程,运用修正剑桥模型分析了开挖所引起的环境效应,提出了坑外注浆加固措施。但上述研究主要是针对软土地层基坑变形的预测和分析,而在土岩组合地层中的研究尚比较少。

基于上述原因,本研究依托重庆地区某邻近人防洞通道深基坑工程,对现场和地下隧道结构进行实时监测,通过分析实测数据,全面了解基坑的变形和地下人防洞通道结构受影响的程度,并结合数值模拟,探讨土岩组合地层中基坑及邻近人防洞通道的变形特点及基坑开挖对邻近通道围岩的破坏模式,以期更深入地了解深基坑与已有地下工程的相互作用,为地下空间的开发设计与施工提供依据和参考。

### 1 工程及地质概况

研究对象重庆地区某邻近人防洞通道的基坑工程开挖深度大,周围环境比较复杂,基坑场地开挖后,将形成高约 30 m 的岩质边坡,属于深基坑工程。基坑与邻近地下隧道的位置关系如图 1 所示。其中基坑一侧边坡与邻近的人防洞通道(以下简称通道)相距 7 m,通道宽度为 6 m,高度为 6 m,覆盖层的厚度为 9.6 m。该段设计采用桩锚支护,桩身混凝土强度为 C30,人工挖孔灌注桩施工,桩截面尺寸为 1 500 mm×2 500 mm,平均间距为 4 m,桩长 33 m,分别施加 4 段预应力锚索,锚索长度为 15 m,自由长度为 7 m,锚固长度为 8 m,上面 2 排锚索施

加的预应力为 1 021 kN,下面 2 排锚索施加预应力为 804 kN。

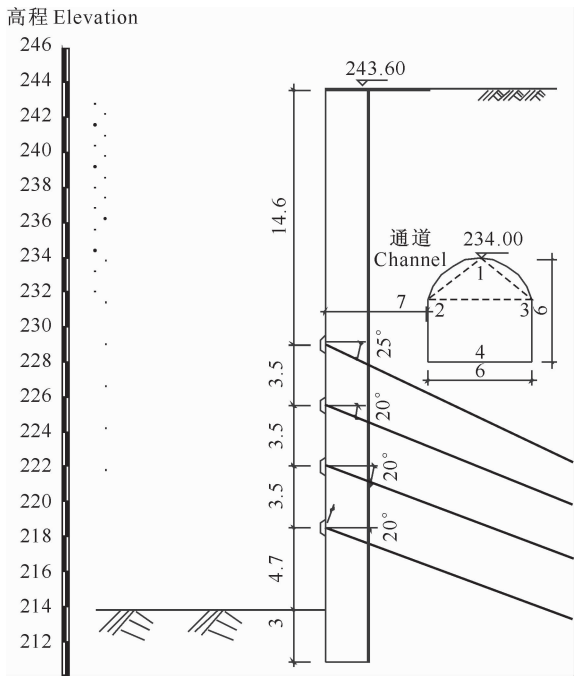


图 1 与人防洞通道邻近的某基坑的支护示意图(单位:m)

Fig.1 Profile of excavation adjacent to anti-aircraft channel (Unit:m)

根据地质钻探和调查,施工区域岩层产状为:倾向 208°,倾角 7°,层面倾角很小,近乎水平。构造节理裂隙有 2 组,其中一组产状为倾向 336°,倾角 79°;另一组产状为倾向 72°,倾角 64°。基坑为切向坡,裂隙倾向与边坡坡向斜交和反向,故该边坡基本不受构造节理裂隙的影响。施工场地内地下水较为贫乏,岩层自上而下分布:第 1 层为人工素填土,厚 4 m;第 2 层为中风化砂岩,较硬岩,厚 18 m;第 3 层为中风化泥岩,较软岩。

### 2 计算模型及监测

为分析基坑开挖对邻近人防洞通道结构的影响,取基坑北侧边坡段的中部建立了数值计算模型,由于岩质基坑变形一般较小,宽度可取两桩之间距离 4 m,开挖的长度为 10 m。模型边界范围原则上要达到基坑开挖结构受力后不再产生变位影响的边界,考虑到围岩力学性质较好,经计算表明,边界宽度大于 1 倍开挖深度就可收敛,收敛边界较小。最终建立计算模型长 80 m,宽 4 m,高 60 m,节点数共计 10 772 个,单元数共计 8 280 个,如图 2 所示。底部施加固定位移约束,两侧边界施加水平位移约束,

距基坑 6~22 m 内,考虑地面荷载 10 kN/m<sup>2</sup>。岩土体采用 Mohr-Coulomb 模型,工程岩体一般有裂隙,故不考虑其抗拉作用,计算力学参数取值如表 1 所示。由于人防洞内锚喷支护及衬砌刚度不大,在计算中可以忽略其结构效应。支护桩采用 beam 单元,计算力学参数如表 2 所示;锚索采用 cable 单元,计算力学参数如表 3 所示,锚索力学模型用弹簧与滑块来描述,主要模拟锚索与岩体之间的黏结性与摩擦力。

结合基坑本身的特点及工程经验,该基坑分析段监测项目有:支护桩顶位移测点 2 个;基坑与通道之间的间壁岩体上拉力监测点 2 个;通道内横向变形监测点 4 个,如图 1 所示。

数值计算首先模拟基坑开挖前地层应力分布情况,然后将基坑开挖简化为如下步骤:第 1 步,施工人工挖孔桩到设计标高;第 2 步,基坑开挖至 13 m;

第 3 步,施加第 1 段锚索;第 4 步,基坑开挖至 22 m;第 5 步,施加第 2 段锚索;第 6 步,基坑开挖至 25 m;第 7 步,施加第 3 段锚索;第 8 步,基坑开挖至 30 m;第 9 步,施加第 4 段锚索。

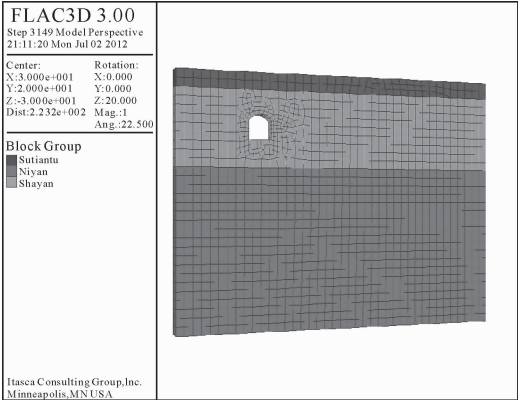


图 2 深基坑工程计算模型

Fig. 2 Calculation model of deep foundation pit

表 1 深基坑工程区域岩土体的计算参数

Table 1 Rock and soil calculation parameters of deep foundation pit

| 岩土类别<br>Geotechnical<br>category | 计算参数 Calculating parameter                                    |                                               |                        |                                          |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
|                                  | 天然重度( $\gamma$ )/(kN·m <sup>-3</sup> )<br>Natural unit weight | 内摩擦角( $\Phi$ )/(°)<br>Internal friction angle | 凝聚力(C)/MPa<br>Cohesion | 变形模量( $E_0$ )/MPa<br>Deformation modulus | 泊松比( $\nu$ )<br>Poisson's ratio |
| 素填土<br>Miscellaneous fill        | 18                                                            | 20                                            | 0.01                   | 8                                        | 0.40                            |
| 中风化砂岩<br>Mud-stone               | 25                                                            | 36                                            | 1.38                   | 3 200                                    | 0.30                            |
| 中风化泥岩<br>Sandstone               | 25                                                            | 30                                            | 0.57                   | 1 500                                    | 0.35                            |

表 2 深基坑工程支护桩的计算参数

Table 2 Calculation parameters of piles of deep foundation pit

| 弹性模量/GPa<br>Elastic modulus | 截面尺寸/(m×m)<br>Area | 梁结构的惯性矩/m <sup>4</sup> The moment of inertia of the beam |                                      |                                        |
|-----------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
|                             |                    | y 轴 $Xc_{iy}$<br>y moment of inertia                     | z 轴 $Xc_{iz}$<br>z moment of inertia | 极惯性矩 $Xc_j$<br>Polar moment of inertia |
| 32.5                        | 2.5×1.5            | 1.95                                                     | 0.70                                 | 2.65                                   |

表 3 深基坑工程锚索的计算参数

Table 3 Calculation parameters of cable of deep foundation pit

| 弹性模量/GPa<br>Elastic modulus | 面积/m <sup>2</sup><br>Area | 黏结力/MN<br>Gr_coh | 摩擦角/(°)<br>Gr_fric | 刚度/Pa<br>Gr_k |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|---------------|
| 200                         | 3.45×10 <sup>-3</sup>     | 0.7              | 25                 | 600           |

3 监测结果及数值分析

3.1 基坑位移分析

从图 3 可以看出,土岩组合地层中基坑变形较小,水平位移先增长后趋于稳定,对比图 3 支护桩顶的水平位移实测值与图 5 的水平位移模型计算值,两者之间比较接近,说明计算模型与计算参数是合理的。

图 4、5 分别是基坑周围有或无人防洞通道时,基坑地表沉降和支护桩的水平位移对比图。由图 4、5 可以看出,有通道时,最大水平位移为 3.78 mm,地表最大沉降值 2.23 mm,地表最大沉降点在离坑边 9 m 处,最大水平位移与最大竖直位移之比为 1.69;无通道时,最大水平位移为 2.62 mm,地表最大沉降值 1.9 mm,地表最大沉降点在离坑边 18.6 m 处,最大水平位移与最大竖直位移之比为

1.37。对比两者数据不难得出,前者位移比后者大,水平位移增大了 44.3%,沉降增大了 17.3%,最大沉降点位置发生了改变,有通道时沉降点位置比无通道时位置靠前,而这个沉降沟位置恰好与通道拱顶位置相对应,说明地表的沉降与通道有密切联系。

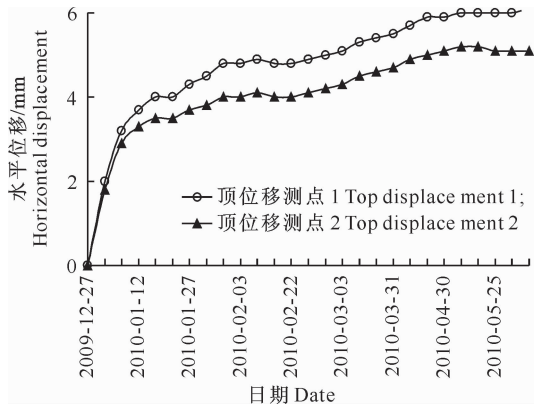


图 3 基坑支护桩顶水平位移实测值

Fig. 3 Monitored horizontal top displacement of pile

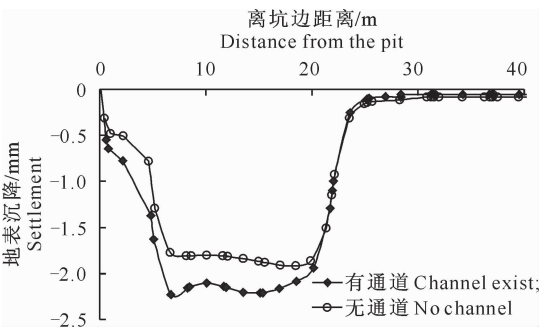


图 4 基坑周边地表沉降模型计算值对比

Fig. 4 Comparison of settlement of surrounding surface

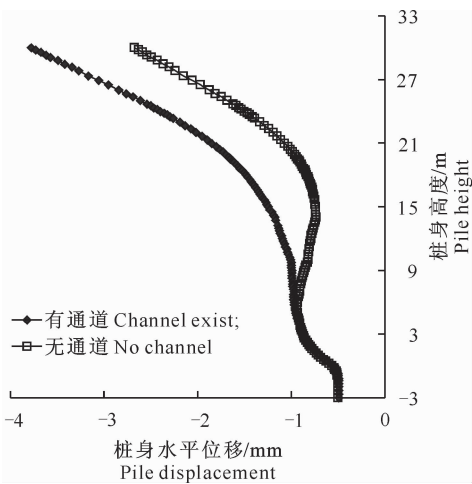


图 5 基坑支护桩水平位移模型计算值对比

Fig. 5 Comparison of horizontal displacement of pile

从力学机制上来看,由于通道的存在,围岩的应

力场发生了改变,主应力场由竖直方向发生了旋转,从而影响基坑支护结构水平变位与周边地表沉降。从基坑地表沉降变形机理来看,一般情况下土质基坑地表沉降的影响因素主要有支护结构水平变位、基坑的回弹与隆起、地下水的固结沉降、施工因素等,一般主要考虑前 3 部分因素。在土岩组合地层中,由于岩体弹性模量较大,回弹较小,且所研究基坑地下水较为贫乏。所以,通常情况下岩质基坑地表沉降主要取决于基坑的水平变位。但由于邻近人防洞通道的存在,基坑开挖后,坑外的岩土体不仅向坑内方向移动,也向人防洞通道方向移动,造成地表土体损失,从而引起地表产生附加沉降,导致有通道时的地表沉降比无通道时大。由此可见,当基坑工程周围存在通道时,通道不仅改变最大沉降点位置,还会加大地表沉降。在这种条件下,地表沉降除与基坑的水平变位有关外,还与通道内部沉降有关。

3.2 通道稳定性分析

基坑开挖会减弱通道拱脚的水平推力,基坑与通道之间的岩体是关键控制区域,由于目前这方面还没有成熟的相关理论指导,故在拱脚处布置的锚杆,设置 2 个钢筋应力传感器,测量锚杆的拉力,由此推测间壁的受力状况,监测结果如图 6 所示。由图 6 可知,锚杆 1 拉力 22.8 kN,另一根拉力为 17.8 kN;按最大轴力 22.8 kN 计算,应变为  $0.458 \times 10^{-3}$ ,远小于砂岩极限应变值,可见岩体之间间壁受力不大。按照目前的设计计算方法,拱脚推力计算值为 215 kN,监测的实际值比现行设计的拱脚推力计算方法<sup>[11]</sup>所得结果小得多。

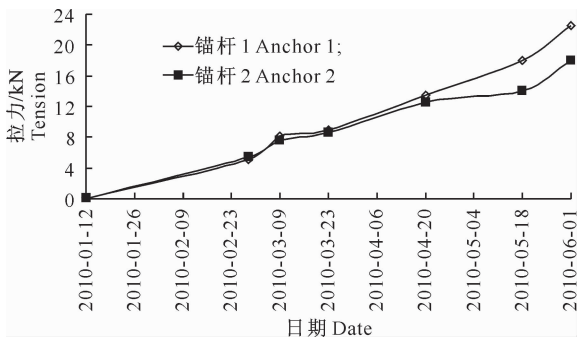


图 6 基坑通道拱脚处的锚杆拉力

Fig. 6 Monitoring anchor tension of channel arch feet

在最初的设计方案中,为了保证通道的拱脚稳定,提出在图 1 的点 2 与点 3 之间设置拉杆,用来保证拱脚的推力;但经讨论后,认为点 2 与点 3 之间的相对位移较小,施加非预应力拉杆作用不大,故取消设置拉杆方案。监测结果表明,拱脚推力较小,笔者

认为其原因一方面是岩体强度较好,另一方面是通道拱效应产生了作用。

由于对边坡中的安全系数,一般只给出单一的整体安全系数,以反映边坡的整体稳定情况,各个单元安全度并不能描述,存在其自身的局限性<sup>[12]</sup>。点安全系数可以描述各个单元的的稳定程度,能够定量地评价单元接近塑性屈服程度,能够描述各点安全度,有一定的优越性<sup>[13-14]</sup>。为此,基于 Mohr-Coulomb 屈服准则,可得点剪切安全系数为:

$$F_s = \frac{c \cos \varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \quad (1)$$

式中: $c$ 、 $\varphi$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为岩土体黏聚力、内摩擦角和最大、最小主应力。

拉伸破坏形式安全系数为:

$$F_s = \frac{-\sigma_t}{\sigma_3} \quad (2)$$

式中: $\sigma_t$  为岩体抗拉强度。

由于工程岩体一般存在裂隙,故不考虑其抗拉作用,若出现拉应力,则认为该单元已破坏。上述剪切与拉伸单元安全系数计算过程可通过 Flac3D 内嵌语言 Fish 编程实现<sup>[15]</sup>。

为便于对比,基坑在未设置支护措施及不考虑坡顶外荷载的情况下,保持其他条件不变,调整基坑与通道之间的间壁厚度,计算所得通道围岩塑性区如图 7 所示,所得剪切安全系数如表 4 所示,表 4 中的点号与图 1 相对应。需要说明的是,Flac3D 区域离散是常应变体单元,故表中各点应力分别为所在单元体形心的应力值。图 7 中所示的红色塑性区域(即图7中浅色区域)为受拉区,也就是拉裂安全系

数为 0。由表 4、图 7 可以看出,岩体间壁厚度为 9 m 时,通道拱顶的上方出现拉伸塑性区,类似于浅埋隧道的拱顶破坏,通道两侧壁单元最大、最小主应力相差不大,单元剪切安全度较大;当岩体间壁厚度为 7 m 时,也表现出类似的拱顶拉裂破坏。随着岩体间壁厚度的减小,拉伸塑性区逐渐向左侧转移,在岩体间壁厚度为 3 m 时,岩体间壁上出现贯通的拉伸塑性区,通道两侧壁单元最大主应力与最小主应力相差较大,表明通道的两侧受力相差较大,剪切安全系数相对较小,拉裂塑性区面积较大,通道的左侧围岩出现拉裂塑性区,易发生开裂失稳,类似于一般深埋隧道的侧壁破坏。

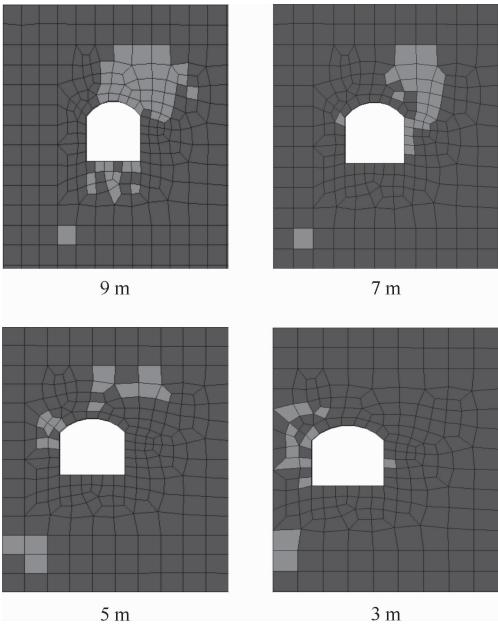


图 7 不同岩体间壁厚度下通道围岩塑性区的变化  
Fig. 7 Plasticity state for different rock wall thicknesses

表 4 不同岩体间壁厚度下各测点的应力与安全系数

Table 4 Point safety factors and stresses for different rock wall thicknesses

| 岩体间壁厚度/m<br>Thickness | 项目<br>Item      | 测点 Point |       |       |      |
|-----------------------|-----------------|----------|-------|-------|------|
|                       |                 | 1        | 2     | 3     | 4    |
| 3                     | $\sigma_1$ /kPa | 48.6     | 1 270 | 1 380 | 28.7 |
|                       | $\sigma_3$ /kPa | 1.92     | 21.3  | 37.3  | 1.87 |
|                       | $F_s$           | 17.2     | 1.23  | 1.19  | 29.5 |
| 5                     | $\sigma_1$ /kPa | 39.1     | 1 210 | 1 110 | 21.8 |
|                       | $\sigma_3$ /kPa | 0.49     | 36.2  | 28.2  | 3.41 |
|                       | $F_s$           | 20.7     | 1.28  | 1.33  | 43.1 |
| 7                     | $\sigma_1$ /kPa | 32.5     | 1 020 | 931   | 16.8 |
|                       | $\sigma_3$ /kPa | 0.57     | 44.8  | 35.7  | 3.43 |
|                       | $F_s$           | 24.9     | 1.43  | 1.5   | 58.8 |
| 9                     | $\sigma_1$ /kPa | 28.4     | 929   | 841   | 9.96 |
|                       | $\sigma_3$ /kPa | 1.53     | 39.9  | 43.8  | 1.26 |
|                       | $F_s$           | 27.9     | 1.53  | 1.63  | 90   |

图 8 显示,通道拱顶在上部岩层荷载的作用下,对拱脚岩体产生向下的压力和水平推力。基坑开挖后,近基坑的通道侧壁的岩体厚度减少,应力释放,水平方向发生卸荷,而工程岩体一般有裂隙存在,在开挖扰动情况下,间壁厚度较大且侧壁围岩稳定时,破坏来自拱顶,类似于浅埋的拱形隧洞;若围岩间壁厚度不大,在拱脚推力与压力作用下,通道侧壁岩体承载力不够,会拉裂屈服贯通,形成危岩体,容易向下坠落,造成人为地质灾害。

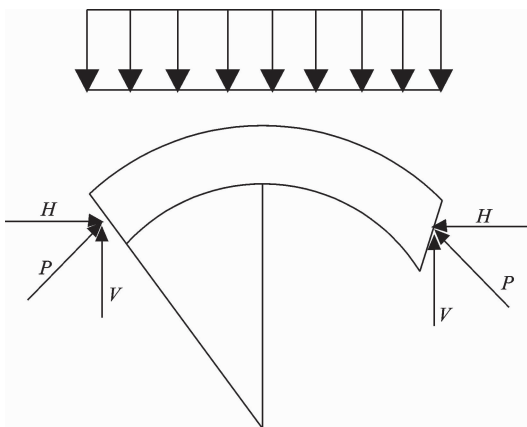


图 8 基坑开挖后通道拱顶受力示意图

Fig. 8 Force of channel vault after excavation

### 3.3 通道变形分析

为观测通道变形,在洞内进行变形监测,测点布置如图 1 所示,量测线段缩短为正值,伸长为负值。由监测结果(图 9)可以看出,通道线段 1-3、1-2 竖直方向缩短,曲线 1 收敛值比曲线 2 要大,其原因是点 1 发生向下位移,点 2 靠近基坑,竖向位移受开挖影响较大,位移表现为上浮;而点 3 受其影响相对较小,位移向下,但下降值较小,故 1-2 与 1-3 之间相对线段均缩短,且 1-2 相对缩短位移更加明显。曲线 3 明显伸长,说明线段 2-3 之间水平距离变大。

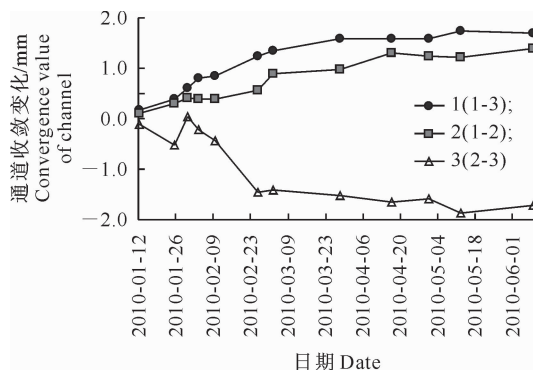


图 9 基坑开挖后通道洞内变形的监测结果

Fig. 9 Deformation monitoring of channel after excavation

基于以上分析可看出,通道的竖直方向缩短,水平方向伸长。根据监测结果,分析主要原因是基坑周围的通道相当于岩体内的一个空洞,由连续介质力学可知,通道会使围岩的应力与位移发生改变,基坑开挖后通道周围岩体会向坑内方向移动,但岩体移动方向发生明显改变,拱顶下沉,拱底回弹上抬,通道的侧壁向坑内水平方向移动,故通道竖向之间缩短,水平方向伸长。由于通道上的偏差应力在这个过程中进一步增大,故竖直方向的改变大于水平方向,通道在几何形态上呈现出横向式变形。

## 4 结 论

1) 邻近通道的存在会增加基坑的水平位移和地表沉降,改变周围地表的最大沉降点位置,其位置与通道拱顶相对应。土岩组合地层中地表沉降主要与基坑的水平位移和通道沉降有关,对地表沉降预测,要综合考虑这 2 个因素。

2) 实测通道拱脚推力较小,在实际工程设计中可结合岩体强度与拱效应进行分析,优化通道间壁的厚度。

3) 通道与基坑之间围岩间壁,开挖后约束应力减小,受拉伸卸荷与岩体裂隙影响,均容易发生受拉破坏,间壁厚度较大时,隧洞破坏来自拱顶;间壁厚度较小时,隧洞破坏来自于侧壁。在设计中要对其应力分布变化进行认真分析,确定间壁的合理厚度。

4) 由于受岩体连续介质及通道自身几何形态的影响,围岩会改变位移场传递的方向,并且竖直方向的改变大于水平方向,通道主要表现为横向变形。

## [参考文献]

[1] 王 璐. 基坑开挖对邻近既有隧道的的影响分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 44-46.  
Wang L. Analysis of effects of excavation on existing adjacent tunnels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 44-46. (in Chinese)

[2] 陈 郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算 [J]. 地下空间与工程学报, 2005(1): 91-94.  
Chen Y, Li Y S. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(1): 91-94. (in Chinese)

[3] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法 [J]. 同济大学学报, 2001(5): 531-535.  
Ji M J, Liu G B. Prediction method of displacement due to excavation [J]. Journal of Tongji University, 2001(5): 531-535. (in Chinese)

[4] Vorster T E B, Klar A, Soga K, et al. Estimating the effects of

tunneling on existing pipelines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 13(11): 1399-1410.

[5] Sharma J S, Hefny A M. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1972(7): 11-23.

[6] Zheng G, Wei S W. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(S2): 69-75.

[7] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 202-207.

Liu G B, Huang Y X, Hou X Y. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 202-207. (in Chinese)

[8] 闫静雅. 邻近运营地铁隧道的深基坑设计施工浅谈 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 234-237.

Yan J Y. Design and construction of deep foundation pits near metro tunnels [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 234-237. (in Chinese)

[9] 高广运, 高 盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453-460.

Gao G Y, Gao M, Yang C B, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 453-460. (in Chinese)

[10] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 251-256.

Wang W D, Wu J B, Weng Q P. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 251-256. (in Chinese)

[11] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范 (JTG D70—2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 86-88.

The Ministry of Communications of the People's Republic of China. Code for design of road tunnel (JTG D70—2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 86-88. (in Chinese)

[12] Hoek E, Bray J. Rock slope engineering [M]. London: Institute of Mineral and Metallurgy, 1981.

[13] 蒋青青. 基于 Hoek-Brown 准则点安全系数的边坡稳定性分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(3): 785-790.

Jiang Q Q. Stability of point safety factor of slope based on Hoek-Brown criterion [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(3): 785-790. (in Chinese)

[14] 沈 可, 张仲卿. 三维抗滑稳定分析中的点安全系数法 [J]. 人民珠江, 2003(2): 21-22.

Shen K, Zhang Z Q. Point safety factor method for 3-dimensional stability analysis [J]. Pearl River, 2003(2): 21-22. (in Chinese)

[15] Itasca Consulting Group. Theory and background [R]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.