

隧道开挖方式对建筑物桩基影响的数值模拟分析*

芮勇勤^{1,2} 岳中琦² 唐春安^{3,4} 杨天鸿³ 陆培炎⁵

(¹长沙交通学院道路与交通工程系 长沙 410076) (²香港大学土木工程系 香港) (³东北大学岩石破裂与失稳研究中心 沈阳 110006)
(⁴中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 北京 100080) (⁵广东陆仕岩土工程有限公司 广州 510660)

摘要 运用岩石破裂与失稳过程分析 RFPA^{2D} 系统以及 FLAC^{2D} 程序对广州地铁二号线隧道通过电化教育学院录音楼引起建筑物桩基的变形与力学特性进行研究。RFPA^{2D} 系统视材料为非均匀损伤材料, 考虑修正后的 Mohr-Coulomb 准则(包含拉伸截断)作为单元破坏的强度判据, 研究不同隧道开挖方式对建筑物桩基和地面移动的影响。分析表明, RFPA^{2D} 系统是研究地表移动和破坏机理的适用工具。

关键词 隧道工程, RFPA^{2D} 系统, FLAC^{2D} 程序, 建筑物桩基, 开挖方式

分类号 TU 457 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2003)05-0735-07

NUMERICAL SIMULATION ANALYSIS ON INFLUENCE OF TUNNEL EXCAVATION TYPES ON PILE FOUNDATION OF BUILDING

Rui Yongqin^{1,2}, Yue Z Q², Tang Chunan^{3,4}, Yang Tianhong³, Lu Peiyan⁵

(¹Highways and Communications Eng. Dept., Changsha Comm. Univ., Changsha 410076 China)

(²Civil Eng. Dept., The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

(³CRISR, School of Resources and Civil Eng., Northeastern University, Shenyang 110006 China)

(⁴LNM, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080 China)

(⁵Guangdong Lu's Rock and Civill Eng. Llimit. Co., Guangzhou 510660 China)

Abstract With a newly developed numerical code, Rock Failure Process Analysis (RFPA^{2D}), as well as numerical code FLAC^{2D}, some numerical simulations of deformation and mechanical behaviors are made for a two-dimensional tunneling in the No.2 line tunnel of Guangzhou highway. By using the RFPA^{2D} code, the model materials are considered as brittle and heterogeneous. The modified models of Mohr-Coulomb and tension cut-off are taken as the element failure criterion. Pile-base deformation and ground movement are inevitably caused by tunnelling construction in soil and rock ground. In urban areas, the potential effects on building are of great importance in the construction of tunnels by means of different excavating types. It is shown that the RFPA^{2D} code is very promising to be used as a tool to study the ground movement and its failure mechanism.

Key words tunneling engineering, RFPA^{2D} code, FLAC^{2D} code, pile-base of building, excavating types

1 引言

广州地铁二号线晓港站至江南西站区间隧道通过电化教育学院录音楼(编号 037), 隧道开挖过

程引起 037 号楼桩基的变形大小和是否需要桩基进行托换处理, 这对设计和施工部门提供合理的桩基处理方案至关重要。

本文主要运用岩石破裂过程分析的 RFPA^{2D} 系统^[1, 2], 以及国际上通用的 FLAC^{2D} 程序^[3], 对上述

2001年7月5日收到初稿, 2001年12月11日收到修改稿。

* 中国博士后科学基金项目、国家自然科学基金(49974009)资助项目和国家重点基础研究发展规划 973 资助项目(95-13-07-01)。

作者 芮勇勤 简介: 男, 40 岁, 博士, 2000 年于东北大学工程力学与采矿工程博士后出站, 现任教授, 主要从事工程力学与数值模拟方面的教学和科研工作。

问题进行初步探索。RFPA^{2D} 最大特点是可以在模型中考虑实际材料的非均匀特性, 其中包括几个方面的功能: 应力分析、变形分析、声发射、结构破坏和渗流耦合分析等^[4~12]。本文依据设计部门提供的资料, 数值模拟分析隧道通过 037 号楼桩基础过程中洞室围岩的受力及变形情况, 重点围绕楼桩基础, 考察其变形和应力分布, 定量分析隧道对桩基础扰动的影响程度, 即开挖方式对建筑物桩基及其力学行为的影响, 确定经济合理的基础保护方案, 为隧道顺利施工以及确保该楼桩基础安全提供依据。

RFPA^{2D} 系统的应力分析采用有限元法进行, 破坏分析则是根据修正后的 Mohr-Coulomb 破坏准则来检查材料中是否有单元破坏。对破坏单元则采用刚度特性退化(处理分离)和刚度重建(处理接触)的办法进行^[1], 正如文[13]所指出的, 渐近破坏模型计算结果的好坏主要取决于破坏准则以及刚度矩阵退化规律选择是否适当。到目前为止, 对于如何选择破坏准则, 还没有一个统一的认识^[14~23]。考虑到脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度, 因此本文采用了修正后的 Mohr-Coulomb 准则(包含拉伸截断)作为单元破坏的强度判据。这样, 即可以利用数值计算方法, 对隧道开挖方式引起建筑物桩基影响的复杂问题进行研究^[24~31]。

2 工程概况

2.1 隧道结构及地层分布

研究区段内隧道洞室宽 6.40 m, 拱高 6.70 m, 平均埋深为 17.8 m, 其纵向坡度为 29%, 围岩为全风化-微风化泥质粉砂岩、砂砾岩。图 1 所示的是典型 037 号楼断面 9 的工程地质模型及地下隧道与桩基础位置。地层由上至下分布顺次为杂填土(1)、粉质粘土(5-1)、全风化砂岩(6)、强风化砂岩(7)、中风化砂岩(8)、微风化砂岩(9), 地层近水平层状分布。

2.2 楼房结构及桩基础

该楼房设计为 9 层, 实际已施工 5 层, 为钢筋混凝土框架结构。桩基为沉管灌注桩, 承台底面低于地面 2.3~3.2 m, 桩长 9 m, 桩底距隧道洞顶 5.4~7.0 m。基础有 34 个承台, 276 根桩, 隧道开挖范围内的桩数量多达 80~120 根。原设计方案为增设筏形基础, 施工工期 130 d。

2.3 隧道开挖及支护方式

该区间隧道按设计采用矿山法施工^[25~27], 单线断面采用正台阶开挖, 初步支护和衬砌采用 C20 混

凝土, 厚 300 mm, 二次衬砌采用 C25 防水钢筋混凝土整体浇筑, 厚 300 mm, 隧道开挖支护步骤简略如下(见图 2):

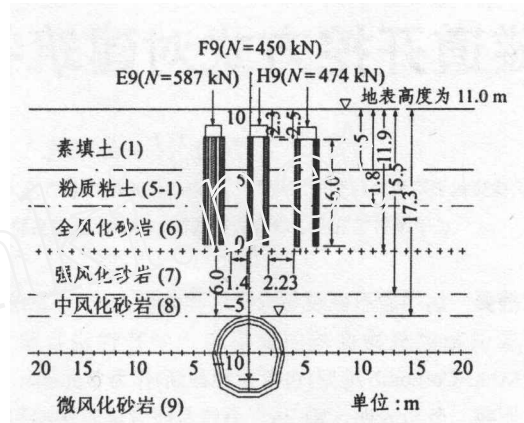


图 1 隧道与桩基础位置图

Fig.1 Relationship of tunnel and pile-foundation position

- (1) 开挖隧道上部土方, 即 1+3, 施工初步支护;
- (2) 开挖隧道下部土方, 即 2+4, 施工初步支护;
- (3) 施工二次衬砌, 厚 300 mm。

作为矿山法的对比方案, 也选择其他施工步骤进行计算, 以资比较。

2.4 桩基及隧道结构三维模型的建立

使用 Auto CAD 绘制出整个隧道范围内的地层结构三维透视图(见图 3, 只画出受隧道影响的桩), 图中清晰示出隧道与桩基础以及所处地层的空间位置关系。三维地质结构模型的建立为桩基应力-应变模拟计算提供了依据。

3 计算方法和模型

3.1 RFPA^{2D} 计算方法

RFPA^{2D} 系统是一个岩石渐进破裂直至宏观破坏过程的分析程序, 通过考虑细观单元力学参数(弹性模量、强度等)的非均匀性, 模拟岩石宏观变形、破坏的非线性行为; 通过考虑材料破坏后单元的参数弱化(包括刚度退化), 模拟材料破坏的非连续和不可逆行为, 研究岩石非均匀性的影响, 设定岩石的力学性质(单元的弹性及强度性质)服从韦布尔分布 $\varphi_c(m, \mu)$, 其中, 参数 m 为形状参数, 反映岩石材料力学性质的均质程度, m 越大, 表明岩石的性质越均匀; μ 为反映岩石材料平均性质的参数。本模型中, 拉压强度比 1/10。采用修正的 Mohr-Coulomb 判据作为单元破坏的准则, 由此得到的模

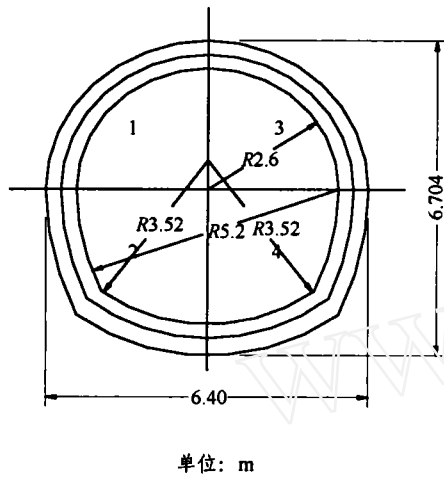


图 2 隧道开挖断面

Fig.2 Tunnelling excavation section

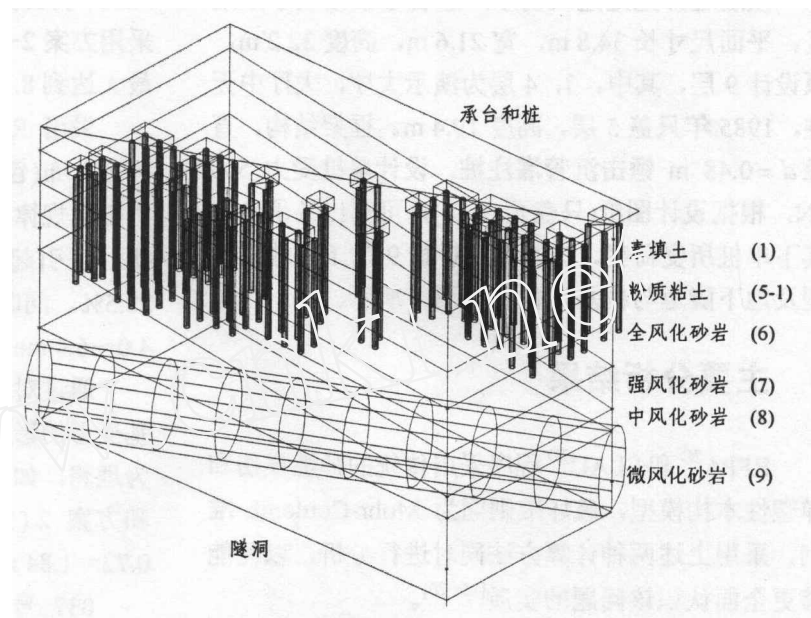


图 3 桩基础三维透视图

Fig.3 Perspective drawing of three dimensional pile-foundation

型材料可以模拟脆-塑性岩石的材料性质^[1, 3, 13]。

3.2 FLAC2D 计算软件运用

FLAC^{2D} 程序是国内外岩土工程界广泛应用的计算软件, 本文将其作为辅助手段进行桩基结构的应力应变分析, 以检验 RFPA^{2D} 程序的工程应用可靠性。

确定的总体计算内容为: 采用 RFPA^{2D} 和 FLAC^{2D} 程序进行桩基应力应变有限元分析计算; 采用 FLAC^{2D} 程序计算不同开挖顺序工况时的桩基变形值, 对比不同开挖方案引起的变形差异; 在验证了 RFPA^{2D} 程序的可靠性之后, 最终采用 RFPA^{2D} 计算二维断面桩基变形(包括隧道每一开挖步的变形量), 确定经济合理的基础保护方案。

3.3 计算方案

隧道沿楼房两个对角线斜穿整个基础, 沿途通过 18 个承台(见图 3, 图中画出全部桩基, 其中, 连线的桩为受隧道影响的桩, 共 105 根, 计算时考虑其荷载)。取垂直于隧道的横剖面作为研究对象, 按照平面应变问题考虑。计算取 60 m×40 m 的分析区域, 上部取到地表; 左右两侧的水平位移取零, 垂直方向可自由滑动; 底部水平和垂直位移取零。岩土体除了承受自重外, 在桩顶还承受上层建筑的自重荷载, 不考虑其他荷载。由于每个承台的桩数不同, 根据每排承台确定了 7 个二维计算断面。计算模型的范围为以隧道断面为中心, 长 60 m, 高 40 m, 隧道及支护结构按实际尺寸确定。为了区分

不同开挖方式下的桩基变形状况, 以 9 号断面为例确定如下几种施工开挖计算方案:

方案 1: 开挖隧道上部土方, 施工初步支护; 开挖隧道下部土方, 施工初步支护, 施工二次衬砌, 即(1+3)→(2+4)。

方案 2: 开挖隧道左上部土方, 施工初步支护, 接续的施工顺序为右上→左下→右下, 施工二次衬砌, 即 1→3→2→4。

方案 3: 开挖隧道左上部土方, 施工初步支护, 接续的施工顺序为左下→右上→右下, 施工二次衬砌, 即 1→2→3→4。

3.4 计算参数与桩基荷载计算

各层岩土和支护结构的物理力学参数如表 1 所列。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials

岩层	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/ (^{\circ})$	自重 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
杂填土(1)	10	0.30	10	18	20
粉质粘土(5)	25	0.30	25	22	20
全风化泥质砂岩(6)	80	0.25	50	28	21
强风化泥质砂岩(7)	150	0.20	100	28	23
中风化泥质砂岩(8)	500	0.20	250	30	23
微风化泥质砂岩(9)	3 000	0.20	500	30	23
承台和桩	20 000	0.15	5 206	34	25
衬砌混凝土	20 000	0.15	5 206	34	25

该隧道开挖处建筑物系广东省电教馆演示厅地区，平面尺寸长 34.8 m，宽 21.6 m，高度 32.2 m，原设计 9 层，其中，3，4 层为演示大厅，大厅中无柱，1985 年只盖 5 层，高度 19.4 m。框架结构，直径 $d=0.48$ m 锤击沉管灌注桩，设计单桩受力 500 kN，根据设计图纸(只盖至 5 层)，可算出各承台及其下单桩所受荷载，037 号楼断面 9 的工程地质模型及地下隧道与桩基础位置如图 1 所示。

4 主要分析结果

RFPA^{2D} 和 FLAC^{2D} 程序采用传统的弹性损伤和弹塑性本构模型，破坏准则同为 Mohr-Coulomb 准则，采用上述两种计算方法同时进行分析，以便能够更全面认识该问题的实质^[15~20]。

RFPA^{2D} 和 FLAC^{2D} 程序计算结果如图 4，5 所示。这里以方案 3 为基础进行分析，开挖顺序为首先开挖隧道左上部土方，进行施工初步支护，接续的施工顺序为左下→右上→右下，施工二次衬砌，即 1→2→3→4(如图 2)。

RFPA^{2D} 计算的每开挖步引起的下沉量分别为 3.23，3.58，5.20，5.26 mm，FLAC^{2D} 计算的每开挖步引起的下沉量分别为 1.94，3.11，5.87，6.35 mm。两种分析方法累积引起的相对误差为 1.09 mm，表明分析结果接近。RFPA^{2D} 计算结果比 FLAC^{2D} 计算结果略小，原因是 RFPA^{2D} 计算的洞壁材料损伤破裂后部分仍有残余支撑强度，以及考虑了材料的非均匀性。

RFPA^{2D} 计算的每步桩身应力分布变化规律为：从顶到底逐渐增大，桩顶垂向应力从 0.572 MPa 增大到 0.645 MPa，桩身下部垂向应力受开挖影响，最大压应力点从 0.645 MPa 减小到 0.545 MPa；FLAC^{2D} 程序计算的桩身垂向应力变化为 0.631~0.659 MPa，计算结果接近。

5 不同开挖方式对建筑物桩基变形的影响

开挖方法以及开挖与支护的顺序都对隧道围岩、地表土体及桩基的变形及应力状态产生不同影响。采用 FLAC^{2D} 程序计算不同开挖顺序工况的桩基下沉值变化，不同开挖顺序计算结果列于表 2。3 种开挖方案引起的最终位移分别为 8.19，7.07，6.35

mm。可见方案 3 变形量最小，开挖形式最好。如果采用方案 2→1 顺序开挖，位移将增大 12%~29%，最大达到 8.19 mm。

采用 RFPA^{2D} 计算隧道开挖引起的桩基变形和应力分布(包括隧道每一开挖步的变化量)和桩身应力变化规律。结果表明，开挖对桩底应力有一定的扰动，引起垂向应力下降，下降的幅度最大可达 28.5%。同时，地表位移逐步增加，最大位移量为 4.0~6.4 mm。

通过对比不同隧道开挖顺序，在开挖方式对桩基变形的影响中，分析认为采用方案 3 开挖方式最为理想，如果采用方案 1(正台阶分上下 2 步开挖)和方案 2(分上下 4 步开挖)，地表位移量将增大 0.72~1.84 mm。

037 号楼能够承受的允许沉降差，该楼承台柱的间距 $L=3.6\sim 5.8$ m。地基规范规定，相邻基础沉降差允许值为 0.002L，即相邻承台的沉降差为 7~11mm。按上述情况分析，地表最终沉降量为 6.35 mm(方案 3)，故计算沉降差小于沉降差允许值，因此 037 号楼不需采用筏板加固。

表 2 3 种开挖方案桩基变形

Table 2 Displacements of pile bases in three excavation types mm

开挖方式	开挖步数			
	1	2	3	4
方案 1		3.58		8.19
方案 2	1.94	4.12	6.35	7.07
方案 3	1.94	4.10	5.87	6.35
(方案 1-方案 3)/方案 3 (%)		-12.70		29.00
(方案 2-方案 3)/方案 3 (%)	0.00	0.50	8.20	11.30

可见，RFPA^{2D} 和 FLAC^{2D} 计算结果接近，特别是对于新近开发的 RFPA^{2D} 程序进行工程问题计算分析，其结果令人满意。

6 结 论

开挖方式对桩基变形的影响分析中，采用方案 3 开挖方式最为理想。建议放弃原设计增设筏板基础的处理方案，而在隧道开挖方式和支护方法上采取合理有效的措施，最大限度地减小开挖对地层的扰动。具体措施包括：衬砌支护采用锚、网、喷、钢架等联合支护；爆破施工应采用减小振动的新技

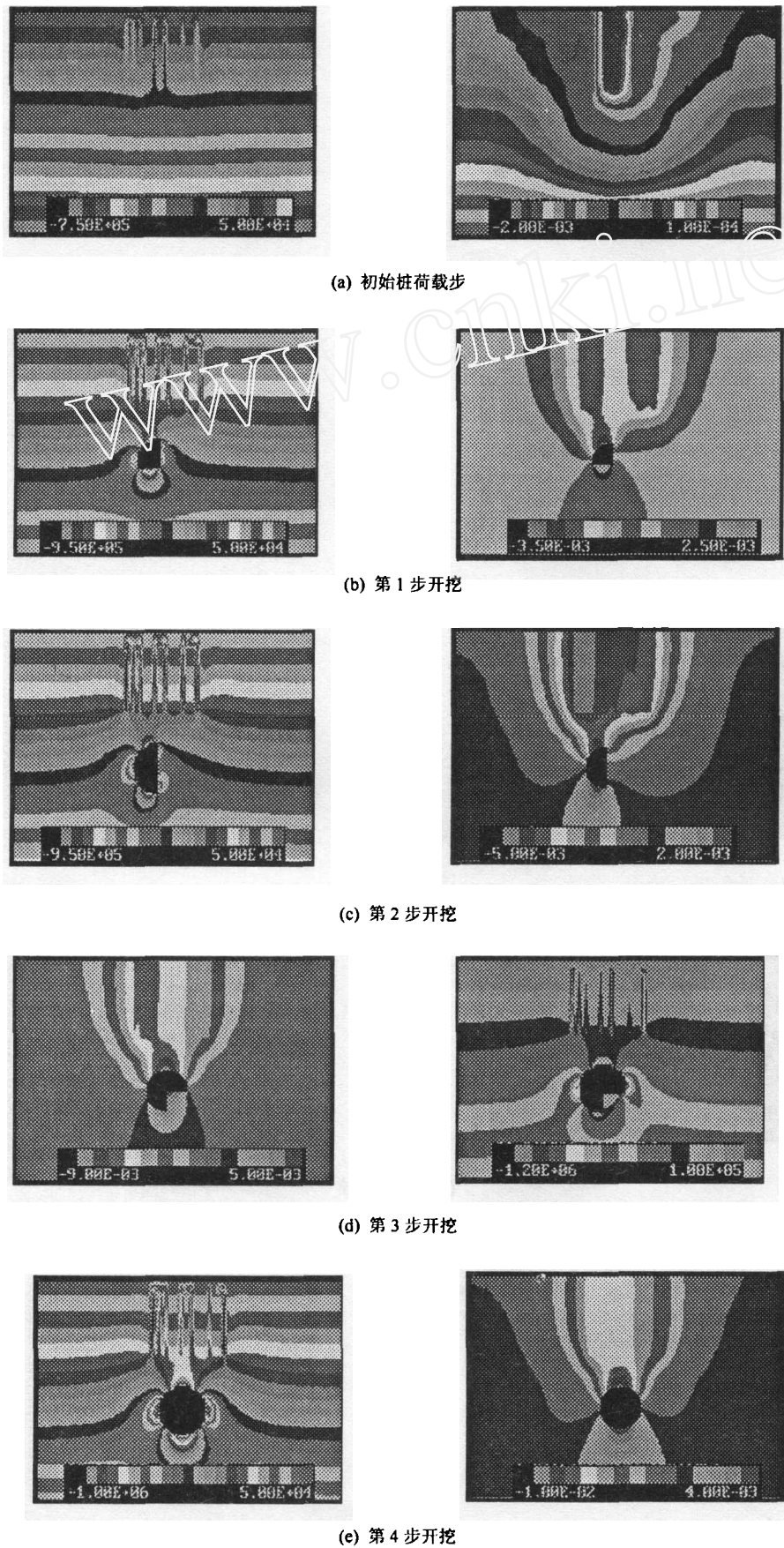


图 4 FLAC^{2D} 程序计算结果
Fig.4 Calculating results with FLAC^{2D} code

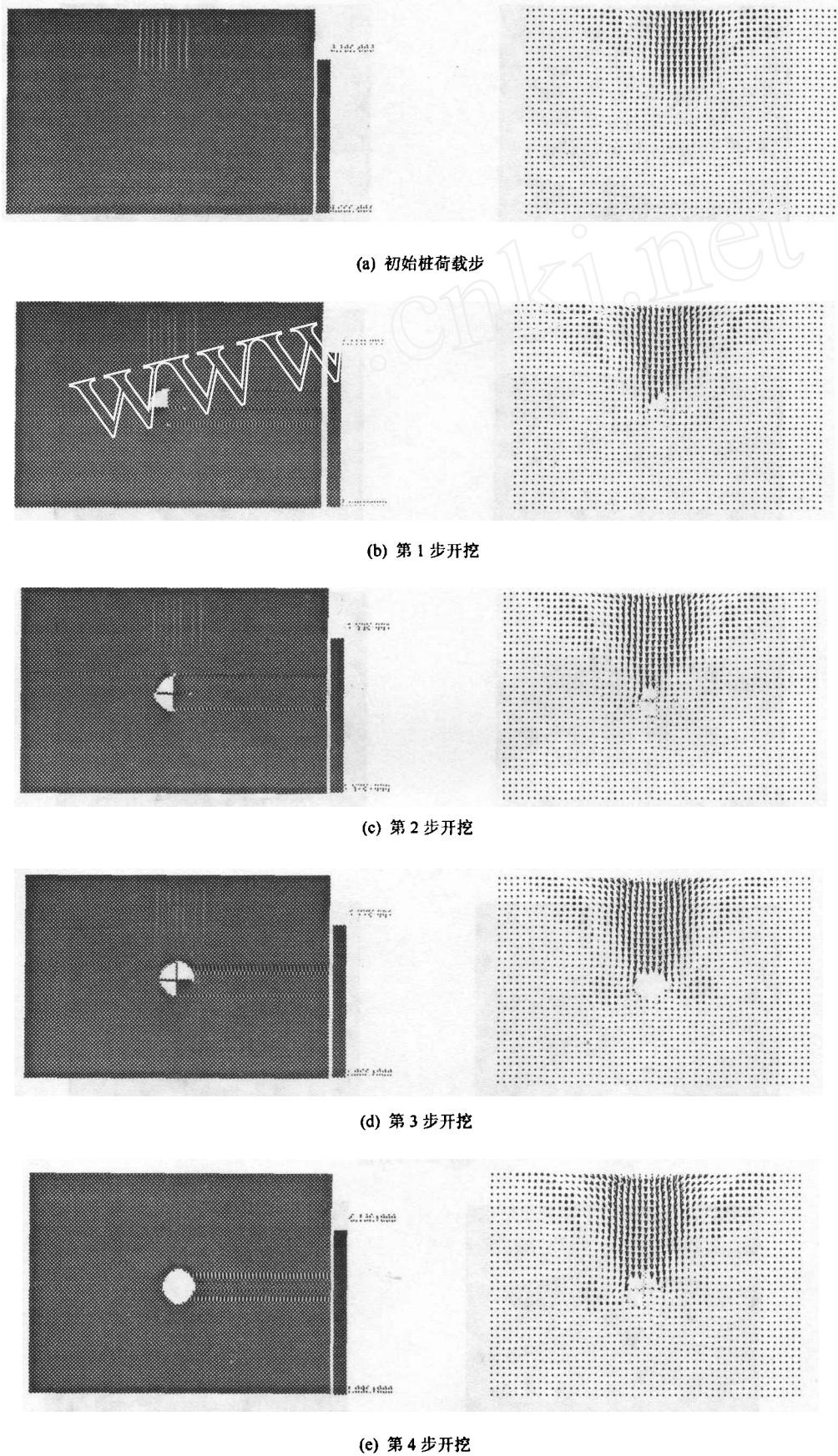


图 5 RFP2D 程序计算结果
Fig.5 Calculating results with RFP2D code

术。开挖顺序上,沿隧道纵向每步接续开挖,保证隧道沿程开挖空间差较小,这样可使不同断面之间的承台沉降差最小。

同时,采取信息化施工,即在隧道纵向和横向的基础周围布设地表下沉观测点,边施工边监测。这样不但可以验证上述分析结果,而且确保隧道开挖过程中上部建筑物及桩基础的安全。

参考文献

- 唐春安. 岩石破裂过程声发射的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 368~378
- 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D}[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507~508
- 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法同拉格朗日元法及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土力学, 1995, 6(2): 12~19
- Tang C A, Kaiser P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release in unstable failure of brittle rock: part I. fundamentals[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1998, 35(1): 113~21
- 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 468~471
- 傅宇方, 黄明利, 任凤玉等. 不同围压条件下孔壁周边裂纹演化的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 577~583
- 刘红元, 唐春安, 芮勇勤. 多煤层开采时岩层垮落过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 190~196
- 黄凯珠, 林鹏, 唐春安等. 双轴加载下断续预制裂纹贯通机制的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 808~816
- 黄明利, 唐春安. 非均匀因素对 I 型裂纹扩展、相互作用影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1111~1114
- 唐春安, 刘红元. 石门揭煤突出过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1467~1472
- 杨天鸿, 梁正召, 刘红元等. 地铁开挖引起地表沉降过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1620~1626
- 张晓春, 缪协兴. 层状岩体中洞室围岩层裂及破坏的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1645~1650
- 崔维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟[J]. 复合材料学报, 1996, 13(4): 102~111
- Maji A K, Sahu R. Acoustic emissions from reinforced concrete[J]. Experimental Mechanics, 1994, 34(3): 379~388
- Bafnt Z P, Pfeiffer P A. Determination of fracture energy from size effect and brittleness number[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(2): 463~480
- Blair S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: part I. a non-linear rule-based model[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1998, 35(4): 837~848
- Cundall P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model: part I: a scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1998, 25(1): 10~16
- Hart R, Cundall P A, Lemos J. Formulation of a three-dimensional distinct element model: part II: mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1998, 25(1): 11~25
- Suaris W, Van Mier J G M. Acoustic emission source characterization in concrete under biaxial loading[J]. Materials and Structures, 1995, 28(1): 87~95
- Desrues J, Chambon R, Mokni M, et al. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography[J]. Geotechnique, 1996, 46(3): 529~546
- Desrues J. Experimental strain localization in plane strain tests on sands and weak rocks in Tanimura[A]. In: Proc. of Dynamic Plasticity and Structural Behaviors Plasticity95[C]. Osaka: A. A. Balkema, 1995, 415~418
- Al Abram I, Mathieu P, Kaster R. Mesure de déplacement par imagerie numérique dans un modèle réduit simulant le creusement du tunnel[A]. Proc. of Colloque photomécanique 98[C]. Marne la Vallée: A. A. Balkema, 1998, 56~72
- Li Shiping, Wu Daxin. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of yinzhuang sandstone[J]. Int. J. Rock Mech. Min. and Sci., 1997, 34(3/4): 435~441
- 徐华荣, 朱冠美. 混凝土裂纹失稳扩展临界点的确定[J]. 水利学报, 1982, (6): 47~50
- 万松林. 高等级公路隧道修建新技术[J]. 公路隧道, 1997, (2): 5~8
- 孙钧. 岩石力学参数弹塑性反演问题的优化问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 221~229
- 蒋树屏. 扩张卡尔曼滤波器有限元耦合算法及其在隧道工程应用[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 11~19
- Ohtsu M, Kaminaga Y, Munwam M C. Experimental and numerical crack analysis of mixed-mode failure in concrete by acoustic emission and boundary element method[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(1): 57~64
- Landis E N. Micro-macro fracture relationship and acoustic emission in concrete[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(1/2): 65~72
- Hsu N N, Simmons J A, Hardy S C. An approach to acoustic emission signal analysis[J]. Material Evaluation 1977, 35(1): 100~106
- Ouyang C S, Eric L, Surendra P S. Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission[J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 1991, 117(11): 2681~2698