

# 连拱隧道围岩变形和破坏形态的 DDA 分析

胡金海<sup>1</sup>, 范东方<sup>2</sup>

(1. 福州机场二期高速公路有限公司, 福建 福州 350002; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:**连拱隧道围岩一般为由节理结构面相互切割的非连续岩体, 利用非连续性分析方法研究这类围岩的变形和破坏形态可以更好地反映工程实际情况。采用非连续变形分析方法 DDA, 对金鸡山连拱隧道围岩的变形和破坏过程进行了模拟, 将整个变形破坏过程划分为 3 个阶段: 中墙上方岩体变形、地表下沉、滑移面产生阶段、隧道左右洞两侧滑移带(或滑移面)的形成阶段以及中墙顶部块体失稳、隧道上方岩体快速塌落阶段。研究了金鸡山隧道浅埋围岩和深埋围岩的变形破坏特征, 其中边墙部位、靠近中墙的内侧拱顶或拱肩部位、外侧拱肩部位会首先受到变形破坏。

**关键词:**连拱隧道; DDA 分析; 围岩变形; 节理; 破坏形态

**中图分类号:** U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2012)04-0072-04

**Analysis on Deformation and Failure Mode Characteristics of Surrounding Rock of Multi-arch Tunnel by DDA Method/HU Jin-hai<sup>1</sup>, FAN Dong-fang<sup>2</sup>** (1. The Second Phase Project of Fuzhou International Airport Highway Corporation, Fuzhou Fujian 350002, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The surrounding rock of multi-arch tunnel is intermittence jointed rock masses in most cases; it's more realistic to analyze the deformation and failure mode characteristics of this kind of rock with discontinuous deformation analysis (DDA) method. The deformation and failure process of surrounding rock of Jinjishan multi-arch tunnel was simulated and the whole failure process was divided into 3 stages: rock deformation, surface subsidence and slip plane appearing above the mid-partition; slip planes (or bands) forming on both sides of tunnel; the rock mass instability above the mid-partition and rapid collapsing of rock mass above the tunnel. The paper studied the deformation and failure characters of shallow and deep surrounding rock in Jinjishan tunnel with the conclusion that the sidewall of the tunnel, the dome or the inside spandrel close to mid-partition and the outside spandrel would be first deformed.

**Key words:** multi-arch tunnel; DDA; surrounding rock deformation; joint; failure mode

## 0 引言

连拱隧道一般属于浅埋中短长度隧道, 隧道埋深一般不超过 60.0 m<sup>[1]</sup>, 此种条件下的隧道岩体在各种复杂的地质作用下, 会产生永久的变形和构造破坏痕迹, 形成如褶皱、断层、节理、层理等结构弱面。这些结构面的存在, 不仅削弱了岩体的力学强度, 而且控制着岩体的变形、破坏机制和力学法则, 了解和掌握连拱隧道在特定节理展布特征下围岩潜在变形、破坏形态对隧道稳定性分析极为重要, 是隧道稳定分析与稳定控制的基础。

对于连拱隧道, 采用连续介质力学分析方法研究隧道围岩变形和破坏形态难以反映节理面的力学特性和其对工程稳定性的影响, 分析结果也常与实际不符。而采用非连续性分析方法则可以更好地反映工程实际情况。隧道工程围岩稳定性非连续性分析方法主要有物理相似模型试验和数值分析方

法。Everling<sup>[2]</sup>利用相似模型试验对有支护结构条件下节理岩体的变形特性进行了探讨和分析; Goodman 等<sup>[3]</sup>利用相似模型试验对节理岩体中隧道的变形特性进行了研究、分析; 刘涛、沈明荣<sup>[4]</sup>按弹性阶段相似原则进行连拱隧道室内模型试验, 模拟连拱隧道的施工工况, 得出施工过程中隧道围岩位移、应力和塑性区分布规律。

物理相似模型试验虽然能对特定条件下节理岩体中隧道围岩的稳定性进行反映, 但无法直观的表现出围岩变形和破坏的完整过程, 而数值分析方法则可以模拟出节理岩体中隧道围岩从开始变形到破坏的整个过程。非连续岩体数值分析方法有两种: 离散单元法 DEM (distinct element method)<sup>[5]</sup> 和非连续变形分析方法 DDA (discontinuous deformation analysis)<sup>[6]</sup>。本文采用非连续变形分析方法 DDA, 对节理岩体中连拱隧道围岩的变形和破坏过程进行了

收稿日期: 2011-08-27

作者简介: 胡金海 (1966-), 男 (汉族), 福建莆田人, 福州机场二期高速公路有限公司董事长, 公路与城市道路专业, 从事工程建设管理工作, 福建省福州市, fz\_hjh@163.com。

模拟,分析总结了围岩变形和破坏形态特征以及首先受到变形破坏的特征部位。

## 1 DDA 基本理论

DDA 以块体内某一点的位移、应变为未知量,每个块体有 6 个自由度,包括 3 个刚体运动项和 3 个应变项,即  $(u_0, v_0, r_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})^T$ , 其中  $u_0, v_0$  分别为块体沿  $x, y$  方向的刚体平动位移;  $r_0$  为绕块体形心  $(x_0, y_0)$  的刚体转动角;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  为点  $(x_0, y_0)$  处的应变状态。整个系统根据最小势能原理进行求解,块体系统的总体方程组为:

$$\overline{KD} = \overline{F} \quad (1)$$

如果该块体系统由  $n$  个块体组成,则有:

$$\overline{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \cdots \\ D_n \end{bmatrix} \quad \overline{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $K_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$  ——  $6 \times 6$  的子矩阵的元素,  $K_{ij}$  与块体  $i$  的材料属性有关,  $K_{ij} (i \neq j)$  与块体  $i$  和  $j$  之间的相互作用情况有关;  $D_i$  —— 块体  $i$  的位移矢量;  $F_i$  —— 作用于块体  $i$  上的荷载矢量。

## 2 计算模型及结果

利用 DDA 程序对金鸡山隧道中节理力学属性较差的不同埋深隧道围岩变形、破坏过程进行数值模拟。

### 2.1 金鸡山隧道概况

金鸡山隧道为双向八车道连拱隧道,设计行车速度为 100 km/h,限界宽度为 17.25 m,净高 5 m。隧道场址区内发育有 2 条断裂构造,隧道洞身围岩受其影响,主要表现为带内围岩较破碎,节理裂隙发育,易形成排水通道,使围岩级别变差。

### 2.2 计算模型

选取金鸡山隧道 K22 + 402 (V 级围岩) 断面和 K22 + 562 (IV 级围岩) 断面为计算断面。其中 K22 + 402 断面主要分布  $70^\circ \angle 59^\circ$ 、 $51^\circ \angle 175^\circ$  两组节理,且左洞埋深 15.0 m,右洞埋深 14.0 m; K22 + 562 断面分布  $67^\circ \angle 58^\circ$ 、 $59^\circ \angle 195^\circ$  两组节理,且左洞埋深 31.0 m,右洞埋深 28.8 m。两个断面计算模

型尺寸(长×高)分别为 80.0 m×44.0 m、80.0 m×59.0 m。围岩参数:重度为 20 kN/m<sup>3</sup>;弹模为 1.5 GPa;泊松比为 0.28;节理面(弱化)参数:内摩擦角为 22°,粘聚力 100 kPa,抗拉强度 50 kPa。计算模型如图 1 所示。

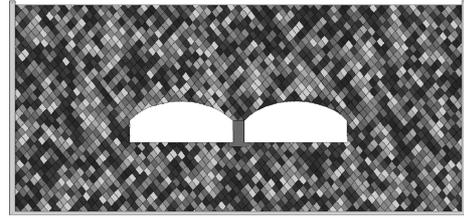


图 1 金鸡山隧道计算模型

### 2.3 计算结果

金鸡山隧道围岩变形和破坏的主要过程如下。

(1) 隧道拱顶围岩最先开始出现明显的向下变形,随即距隧道底部最近的孤立、临空的块体出现剪切滑移。

(2) 随着隧道上部围岩不断变形,隧道边墙壁上临空块体滑落;在左洞和右洞中的顶部围岩出现拉裂破坏,拉裂破坏区域靠近隧道中墙,拉裂破坏形态呈现正“八”字型。其中,埋深为 14.0 m 的断面 K22 + 402 比埋深较大的断面 K22 + 562 明显(图 2a、图 3a),说明随着埋深的增加,在相同节理展布特征下,埋深较大的隧道比埋深较浅的隧道较稳定。

(3) 隧道围岩块体变形、破坏继续发展,埋深为 14.0 m 的 K22 + 402 断面右侧边墙块体以沿结构面向下滑移为主,相邻块体间的位移差值不明显。但在距隧道壁一定距离后,滑移结构面上两相邻块体间位移差值增大,出现了裂隙,此种现象可以看成块体间的碎裂现象;左侧边墙则以沿节理面整体向下滑移为主,滑移块体间仍然紧密接触(图 2b)。

随着埋深的增加,边墙这种变形特征出现了变化,其中,在金鸡山隧道右侧边墙这种向下滑移、碎裂现象在距隧道壁较近的地方(2.0~5.0 m)处已十分严重,而外层围岩此时的变形还比较稳定,尚未破坏;左侧边墙临空块体出现滑落,但滑移层上的块体变形不是很明显(图 3b)。

(4) 随着隧道上方块体的不断脱落,埋深较浅的隧道在左右拱肩(或边墙)处所形成的裂隙不断发展,最终形成了两条滑移带。

滑移带的下边界由边墙上距隧道底最近的结构面控制,上边界一般由拱肩部位的结构面控制;两条滑移带使隧道上方成倒“八”字型下沉(图 2c)。

而埋深较深时,隧道左右两侧滑移性状出现了

变化和转移,在隧道右洞,滑移带不再是沿着滑移面延伸至地表,而是在距隧道壁一定距离的位置转到与左侧相同方向的(第 2 组)节理面,此后沿该节理面延至地表(图 3c)。

(5)当中墙顶部块体失稳后,左右洞拱顶部位的块体开始脱落、下沉。

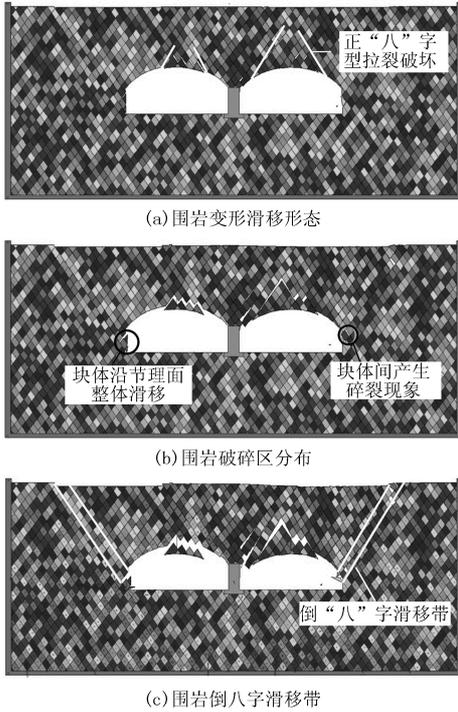


图 2 K22 + 402 断面围岩变形破坏过程

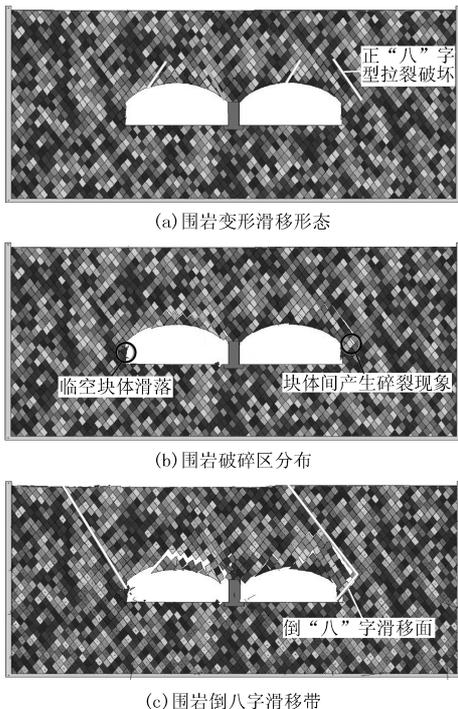


图 3 K22 + 562 断面围岩变形破坏过程

### 3 鸡金山连拱隧道的变形和破坏形态特征

#### 3.1 鸡金山连拱隧道变形、破坏形态特征

通过对鸡金山隧道 K22 + 402 (V 级围岩)断面和 K22 + 562 (IV 级围岩)断面围岩变形破坏过程的分析,可用图 4、图 5 来说明鸡金山连拱隧道围岩变形、破坏的形态特征。

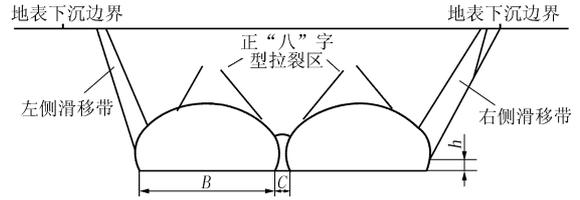


图 4 浅埋隧道围岩破坏区域分布图

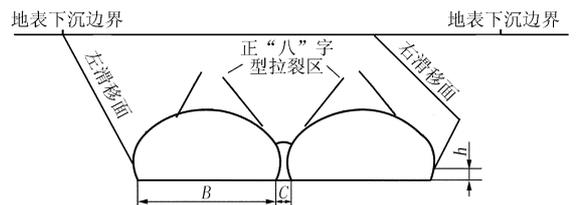


图 5 深埋隧道围岩破坏区域分布图

鸡金山隧道围岩在两组节理控制下,隧道围岩的变形破坏全过程可分为 3 个阶段。

第一阶段:中墙上方岩体变形、地表下沉、滑移面产生阶段,该阶段主要以中墙正上方节理岩体正“八”字型变形、下沉为主。在该阶段中,中墙的宽度、强度对隧道上方岩体变形区域、变形形态具有决定性作用。此外,隧道边墙临空的块体出现脱落。

第二阶段:隧道左右洞两侧滑移带(或滑移面)的形成阶段。在超浅埋段(K22 + 402 断面)左右洞两侧滑移面分别为两组不同节理面,从破坏形态上呈现为倒“八”字型(如图 4);而埋深较深段(K22 + 562 断面)左右洞滑移面从总体上看为由同一组(节理间距最小的一组)的两个节理面,即两个滑移面的主体相互平行(如图 5)。

第三阶段:中墙顶部块体失稳、隧道上方岩体快速塌落阶段。随着隧道两侧滑移带的生成,隧道上方岩体不断下沉,在中墙顶部块体失稳后,隧道顶部围岩开始大面积塌落。

#### 3.2 鸡金山连拱隧道变形显著特征部位

鸡金山连拱隧道围岩变形破坏的 3 个阶段中,围岩首先变形破坏的部位受节理展布特征影响和自身结构特征的影响,就整个破坏过程而言,首先受到变形破坏的特征部位有:

(1)边墙部位。受节理面切割影响,边墙部位易形成沿节理面向临空面滑移的块体(节理面与隧

道外径方向夹角 $<90^\circ$ ),这些块体在变形破坏过程中容易较早出现滑移破坏。

(2)靠近中墙的内侧拱顶或拱肩部位。此处部位围岩受上覆围岩重力影响较为严重,而隧道中墙由于有限厚度的制约又难以提供足够支撑力,所以此处围岩较早的产生变形破坏(即为正“八”字型变形破坏区域)。

(3)外侧拱肩部位。该部位围岩处于隧道上覆围岩松散塌落的边界处,受到节理面切割影响和重力影响,此处围岩也会较早发生变形、破坏。

#### 4 结论

利用非连续性变形分析方法(DDA)对鸡金山隧道围岩的变形和破坏过程进行了模拟,对隧道围岩的变形和破坏形态特征进行了研究,得出了如下结论。

(1)鸡金山连拱隧道围岩在两组节理的作用下,变形和破坏过程可以分为3个阶段。第一阶段:中墙上方岩体变形、地表下沉、滑移面产生阶段;第二阶段:隧道左右洞两侧滑移带(或滑移面)的形成阶段;第三阶段:中墙顶部块体失稳、隧道上方岩体快速塌落阶段。

(2)第一阶段以中墙正上方节理岩体正“八”字

型变形、下沉为主;第二阶段中超浅埋围岩左右洞两侧滑移面分别为两组不同节理面,而埋深较深段左右洞滑移面从总体上看为由同一组(节理间距最小的一组)的两个节理面,即两个滑移面的主体相互平行。

(3)在围岩的整个破坏过程中,首先受到变形破坏的特征部位为:边墙部位、靠近中墙的内侧拱顶或拱肩部位、外侧拱肩部位。

#### 参考文献:

- [1] 刘洪州,黄伦海.连拱隧道设计施工技术研究现状[J].西部探矿工程,2001,(1):54-55.
- [2] Everling G. Model study of rock-joint deformation[J]. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 1964, (1):319-326.
- [3] Goodman R. E., Heuze H. E., Bureau G. J. On modeling techniques for the study of tunnels in jointed rock[C]. Fourteenth Symposium on Rock Mechanics; 1972. 441-479.
- [4] 刘涛,沈明荣,陶履彬.连拱隧道动态施工模型试验与三维数值仿真模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1802-1808.
- [5] Cundall, P. A. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock system[C]. Symposium of International Society of Rock Mechanics. Nancy, France; 1971. 11-18.
- [6] Shi, G-H. Discontinuous deformation analysis—a new model for the statics and dynamics of block systems[D]. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley; 1988.

## 全国页岩气资源调查评价与勘查示范总体方案通过专家论证

中国地质调查局网站消息(2012-04-01) 2012年3月30日,国土资源部地质勘查司组织专家在北京对《全国页岩气资源调查评价与勘查示范总体方案(2012~2020年)》(以下简称“总体方案”)进行了论证。国土资源部总工程师钟自然出席会议并介绍总体方案的编制背景。中国地质调查局党组成员、副局长李金发出席会议。财政部、发改委、科技部、能源局等部委有关同志应邀莅临论证会。

会上,中国地质调查局油气调查中心筹备组翟刚毅代表方案编写组详细汇报了总体方案的各项具体内容。由康玉柱、翟光明、何继善、马宗晋、殷鸿福、刘宝珺、贾承造等7位院士,国务院参事张洪涛,以及来自中石油、中石化、中海油、院校、地调局等单位的十余位资深地质专家组成的专家组认为,该总体方案体现了战略性、前瞻性和公益性,编制及时、意义重大,是贯彻落实中央精神和《找矿突破战略行动纲要》的重要举措。总体方案目标任务具体,部署思路明确,任务

和工作量安排合理,可操作性强,专家一致同意通过该总体方案论证。

全国页岩气资源调查评价与勘查示范总体方案的编制,是国土资源部贯彻落实中央精神,以及《找矿突破战略行动纲要》和《页岩气发展规划(2011~2015)》、为加快推进我国页岩气勘探开发而开展的一项重点工作。在国土资源部地质勘查司的统筹部署下,由中国地质调查局牵头组织其直属单位、国土资源部油气中心、相关油田公司和院校等单位编制完成。总体方案包括全国页岩气资源潜力评价、重点远景区页岩气资源调查评价、有利目标区页岩气资源调查评价、勘查示范、基础理论与勘查技术研究、管理支撑等六项任务。

国土资源部规划司、财务司、勘查司、开发司、储量司、环境司、科技司、中国地质调查局、国土资源部油气中心、信息中心和经研院等单位相关人员,以及总体方案编写组主要成员等60余名代表参加了论证会。