

文章编号: 1000-7598(2010)04-1314-06

油气管道穿越黄土冲沟的管线设计参数研究

唐明明¹, 王芝银¹, 马兰平², 曾志华², 张之沛³

(1. 中国石油大学 城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000;
3. 西安科技大学 地质与环境工程系, 西安 710054)

摘要:长输油气管道经过黄土冲沟边坡时常常采用斜井穿越的方式, 采用数值强度折减法与实际地形建模结合的方法, 以陕西千阳黄土冲沟边坡为例, 通过对黄土力学参数的不断折减, 以收敛性准则作为边坡是否产生滑动的破坏判据, 根据边坡滑动时的位移等值线图确定了边坡潜在滑动面的形状及位置, 确定了管线穿越斜井的初始安全设计参数; 基于初步设计参数研究了管线斜井开挖过程中井周土体的位移变化规律, 并对斜井开挖后黄土冲沟边坡的稳定性安全系数进行了进一步分析计算。分析结果表明, 所给出的管线穿越斜井设计参数的确定方法, 能在设计阶段有效避开冲沟边坡潜在滑动区, 基于这种设计参数使得管道斜井施工对边坡稳定性影响很小, 边坡安全系数由 1.162 变为 1.156, 变化不大。根据计算结果, 对斜井支护区域也提出了合理的建议。

关键词:实际地形建模; 数值强度折减法; 斜井穿越; 管线设计; 稳定性

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

Study of design parameters of oil-gas pipeline traversing loess gully

TANG Ming-ming¹, WANG Zhi-yin¹, MA Lan-ping², ZENG Zhi-hua², ZHANG Zhi-pei³

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China;

3. Department of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to set the pipeline out of the hazard zone, the numerical strength reduction method and actual landform simulating method are used to evaluate the position and shape of the landslide of Qianyang loess gully. In the process of simulation, convergence is chosen as the failure criteria. By reducing the strength parameters step by step, the surface of the landslide is decided according to the displacement isoline when the landslide happens. After the parameters of the pipeline traversing the loess gully is designed, the distribution of displacement in the loess around the well while excavation and the stability of the slope after excavation are studied. The results indicate that the method given in for designing the parameters of the pipeline traversing the loess gully can set the pipeline out of the hazard zone effectively; and the construction of the pipeline will affect the safety of the slope little. The change of the safety parameters after exaction is not obvious, which is from 1.162 to 1.156. At last, some reasonable advices for support are given based on the numerical simulation.

Key words: actual landform simulation; strength reduction method; oblique well crossing method; pipeline design; stability

1 引言

我国西气东输 1 线工程、2 线工程及一些成品油管道工程是我国重要的油气长输管道工程。油气长输管道在经过西北、晋西等地区的黄土冲沟边坡时, 由于施工安装作业场地狭小, 无法采用跨越方式通过黄土冲沟边坡, 并且考虑到采用大开挖法施工, 不仅对环境、植被破坏大, 土方量大, 而且冲沟两侧地势陡峭, 地貌恢复和水土保持困难, 故

常常采取斜井开挖法开挖管沟和溜管穿越法安装管道相结合的斜井穿越法。有关岩土工程勘探资料表明, 黄土地区除表层风化形成的砂土较松软外, 底层比较坚硬。因此, 在采取一定的安全防护措施后, 利用斜井穿越法施工技术, 可解决传统大开挖法存在的许多问题, 具有明显的安全和环保优势, 是大中型冲沟、台地、黄土坡地区管道施工的有效方法^[5]。尽管如此, 斜井开挖和管道施工仍不可避免地会对黄土边坡产生工程扰动, 扰动后黄土冲沟边

收稿日期: 2008-11-27

第一作者简介: 唐明明, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学及工程应用方面的研究。E-mail: tmam_sugar@126.com

坡是否稳定、油气输送管道能否长期安全运营，仍是当前众多大型油气管线穿越工程在斜井设计阶段需要解决的重要问题^[2,4]。实际上，寻找出冲沟边坡潜在滑动面的形状及位置，使管线避开滑动区，获取斜井合理的设计参数将是解决这些问题的基本方法之一。本文运用 FLAC^{3D} 数值模拟软件，将强度折减法与实际地形建模结合起来，以千阳黄土冲沟边坡为例，通过对黄土力学参数的不断折减，根据边坡滑动时的位移等值线图确定了边坡潜在滑动面的形状及位置，确定了管线斜井穿越的初始安全设计参数；继而基于初步设计参数研究了管线斜井开挖过程中井周土体的位移变化规律，并对斜井开挖后黄土冲沟边坡的稳定性安全系数进行了进一步分析计算。所取得的研究成果对类似工程设计与研究有一定的借鉴价值。

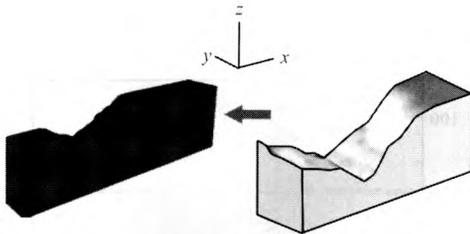


图 1 根据实际地质情况建立的模型
Fig.1 The model established according to the actual geological conditions

2 斜井设计参数初步确定

以千阳黄土冲沟边坡为例，研究确定穿越斜井的初步设计参数。千阳黄土冲沟边坡位于陕西省千阳县城北，场地附近属于贺兰、六盘地槽褶皱带。主要构造形迹以北西向断裂构造为主，次生构造为北北东、北东与北西西向断裂构造。区域出露地层为马兰黄土及离石黄土，冲沟附近为平原地貌与沟谷貌，沟壁及沟底植被较茂盛。根据实际地形等高线图建立实际地形模型，建立的模型与根据等高线利用 surfer 软件画出的地形图比较如图 1 所示。为尽量减小数值模拟时的边界效应，计算模型右侧边坡坡顶距离边界 200 m，左侧边坡坡顶距离边界 150 m，模型总长度为 670 m，宽度为 130 m，底面边界距离冲沟最低点长度为 105 m，左坡坡高 49 m，右坡坡高 91 m。根据现场钻探资料，将土体自上而下分为马兰黄土、离石黄土、卵石层 3 层，具体划分如图 2 所示。模型底面边界为固定边界，四周边界施加法向位移约束。

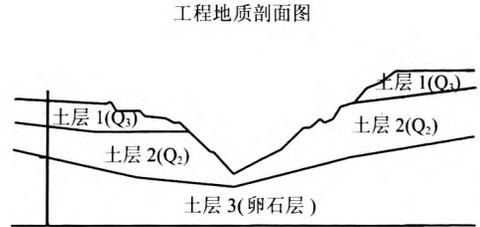


图 2 工程地质剖面图
Fig.2 Engineering geology profile

2.1 确定自重条件下边坡潜在滑动面

通过采用强度折减法对强度指标的不断折减得到极限状态下的边坡失效形式，确定出边坡的潜在滑动面及安全系数。安全系数定义为把强度指标减小到边坡临界破坏时的强度指标所对应的折减系数，即坡体在任意滑面上的抗滑力与下滑力比值的最小值。强度指标如下式进行折减^[6,9]：

$$\phi_i = \arctan(\tan \phi / k_i) \quad (1)$$

$$c_i = c / k_i \quad (2)$$

各土层计算采用理想弹塑性本构模型，卵石层采用理想弹性本构模型。各层力学参数如表 1 所示。通过不断地调整土体的强度指标 c ， $\tan \phi$ ，对土坡进行数值计算，直至其达到临界破坏，此时得到的折减系数即为安全系数。当土坡达到临界破坏后，滑动区域土体位移持续增加，其位移值远大于未滑动区域土体的位移值，因此，通过位移云图可以清楚地看到滑动区域的位置及潜在的滑动面形状。

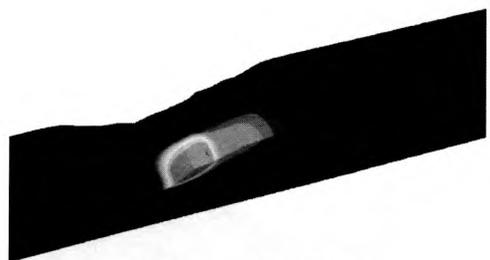


图 3 潜在滑动面图
Fig.3 The potential sliding surface

表 1 各土层弹塑性力学参数
Table 1 The elastoplastic mechanical parameters of soil layers

土层	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /kPa	重度 /(kN/m^3)	
高坡	Q ₃	11.59	0.343	29.17	25.22	20.11	15.72
	Q ₂	26.35	0.348	68.33	23.10	35.68	19.17
低坡	Q ₃	11.74	0.318	31.17	24.08	20.11	16.24
	Q ₂	31.68	0.441	95.67	20.00	35.68	19.00
卵石层	1238	0.300					25.78

对边坡进行强度折减计算,采用收敛性准则作为破坏判据^[7-8]。计算得到土坡安全系数为1.162,安全系数较小,在强降雨及连续长时间降雨的情况下,边坡存在产生滑坡的可能性。潜在破坏面及滑动区域如图3、4所示。根据计算结果可得到以下认识:

(1) 传统的极限平衡法需要假定滑面的形状或者通过运用各种优化方法对其在一定范围内进行搜索,使得安全系数最小。然而对于实际地形复杂的边坡问题,传统的极限平衡法的作用显然有限;数值强度折减法不需要对实际地形进行简化处理,也不需要假定滑面的位置及形状。通过对强度参数的不断折减,到临界状态时,对该状态的应力、应变或位移分析得出的等值线图上可明显观察到滑面的形状及位置,并得到边坡的安全系数。

(2) 实际边坡的地质情况复杂多样,有可能存在多个潜在滑动面,如图4所示,右侧边坡坡面的倾斜程度不同,坡体下部倾斜程度较大,上部倾斜程度较小,将可能产生滑动的区域分别定义为区域1和区域2,当土体强度参数减小到一定程度后,区域1土体由于其坡面的角度较大,故首先产生滑动,此部分土体滑动将造成区域2土体抗滑阻力减小,使得区域2部分土体的下滑力大于抗滑力,并最终造成两个区域内的土体产生滑坡。

(3) 实际坡面的倾斜程度沿边坡走向也不相同,因此,坡度大的一侧更容易因强度的减小引起滑动。其潜在滑动面与传统极限平衡法所得到的贯穿整个坡体宽度的滑动面很不相同,为增大斜井角度,减少斜井开挖时的出土量,管道斜井位置设计应尽量在宽度方向上避开最可能产生滑动的区域。



图4 潜在滑动区域

Fig.4 The potential sliding region

2.2 确定斜井初始安全设计参数

由于左侧边坡坡高较低,边坡角度较小,经计算其安全系数为1.344,产生滑坡的可能性较小。本文以右侧边坡的斜井位置作为设计重点。

根据计算得到的滑动面形状及位置,设计斜井应尽量避免最可能产生滑坡的区域,同时受到地形及施工条件的限制,最终确定管道斜井位置如图5、

6所示,模型剖面简图如图7所示,其中左侧斜井角度为 30° ,全长为102.8 m,覆土最大埋深为17m,斜井入口距离边坡坡肩的长度为13 m;右侧斜井角度为 20° ,全长为268.1 m,覆土最大埋深约为47 m,斜井入口距离边坡坡肩的长度为80 m。由于右侧管线线路较长,考虑到施工过程中开挖出土方便以及通风等安全因素,在右侧管线中部开挖水平巷道,斜井截面为直墙拱形,高度为1.8 m,跨度为1.5 m。水平巷道截面为矩形,高度及跨度均为1.5 m,施工完毕后,对水平巷道进行回填处理。

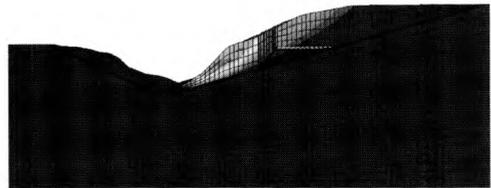


图5 潜在滑动区与管线位置示意图

Fig.5 The potential sliding region and location of pipeline

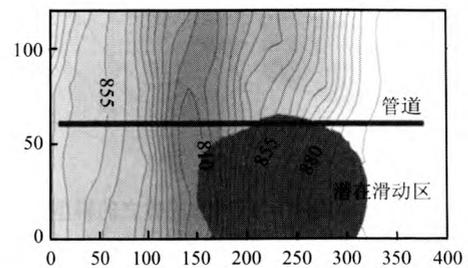


图6 管线设计空间位置示意图

Fig.6 The designed space location of the pipeline

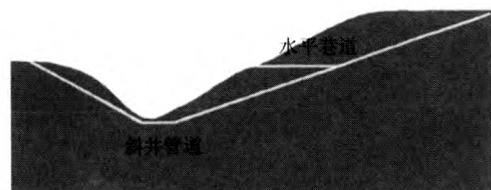


图7 管线设计位置剖面图

Fig.7 Profile of designed location of pipeline

3 管线工程施工对边坡稳定性的影响

3.1 斜井开挖过程中井周土体的稳定性分析

黄土在沉积结构上是一种疏松的、具高孔隙的、欠压密的、相对稳定的一种特殊土^[3],管道斜井开挖可能会导致斜井周围土体的松动及塌落。为了解施工过程的安全性,检验斜井初始设计参数的合理性,对斜井开挖过程进行数值模拟。

斜井开挖模拟计算采用非线性弹性本构模型(Duncan-Chang),与模型相关的力学参数计算如

下^[1]。

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

$$v_t = \frac{G - F \log(\sigma_3/P_a)}{(1 - D\varepsilon_1)^2} \quad (4)$$

式中： E_t 为弹性模量； v_t 为泊松比； c 为黏聚力； φ 为内摩擦角； P_a 为大气压； G 、 F 、 D 、 K 、 n 为试验

常数； R_f 为破坏比，可以利用常规三轴剪切试验求得这些参数。

对于卸载及重复加载的情况，弹性模量按式(5)计算

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (5)$$

K_{ur} 的值也应通过试验测定。根据试验测得各参数如表2所示。

表 2 非线性弹性模型参数取值
Table 2 Parameters of nonlinear elastic model

土层		参数								
		R_f	G	F	D	K	n	C/kPa	$\varphi/(^\circ)$	K_{ur}
高坡	Q ₃	0.508 5	5.593	0.083	0.070	44.416	0.479 33	29.166 6	25.22	92.679
	Q ₂	0.773 3	4.060	0.139	0.089	66.666	0.784 00	68.333 3	23.10	152.330
低坡	Q ₃	0.536	6.010	0.104	0.086	43.833	0.544 33	31.166 6	24.08	131.470
	Q ₂	0.734 3	5.880	0.176	0.095	71.166	0.700 67	95.666 6	20.00	201.330

斜井开挖模拟计算前，按自重形成初始应力场，并清除由自重引起的土体位移场及变形场。斜井开挖按每步进尺 2 m 进行，计算结果如图 8~11 所示，由图可知，除右侧斜井与水平巷道的交接处外，斜井开挖仅对斜井周围 3~5 m 范围内的土体产生较大的影响，超出此范围后，土体因斜井开挖引起的位移值较小。说明斜井周围土体稳定性较好，土体松动范围较小。左侧边坡斜井开挖后井周土体位移在 3 cm 之内，最大位移出现在中部位置，右侧边坡斜井开挖后最大

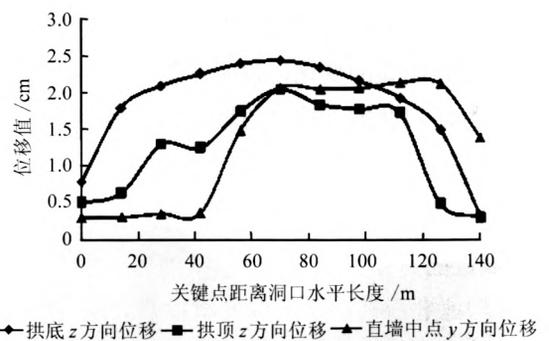


图 10 管线开挖后左坡关键点位移
Fig.10 Displacements of key points at the left slope after pipeline excavation

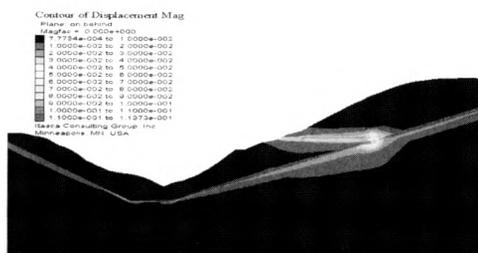


图 8 模型剖面位移云图 (侧视图)
Fig.8 Profile of contours of displacements (side view)

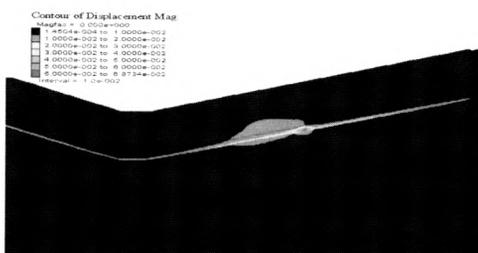


图 9 模型剖面位移云图 (俯视图)
Fig.9 Profile of contours of displacements (vertical view)

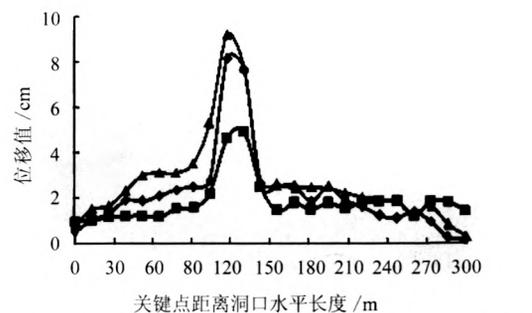


图 11 管线开挖后右坡关键点位移
Fig.11 Displacements of key points at right slope after pipeline excavation

位移出现在斜井与水平巷道交接位置处，可达到 10 cm，水平巷道开挖后周围土体的位移值较大，最大值可达到 8 cm。

根据计算结果,按斜井初始设计参数进行斜井开挖施工过程的模拟分析,斜井周围土体稳定性较好,土体松动范围较小,但在右侧斜井与水平巷道交接处以及水平巷道部分,斜井开挖对周围土体影响较大,斜井周围土体位移值较高,因此,需加强斜井中部及斜井与水平巷道交接处,以及水平巷道的支护,防止在施工过程中产生局部土质松动继而塌落等现象,就能保证施工过程的安全。

3.2 斜井开挖后边坡的稳定性分析

管道斜井开挖对边坡产生扰动,可能会影响坡体的长期稳定性,斜井开挖完成后,同样采用强度折减法对整体的稳定进行研究。

由于开挖斜井断面尺寸较小,管道埋设较深,且在管道安装完毕后对斜井进行回填处理,因此,管道斜井的开挖对边坡下滑力及抗滑力的数值未产生太大的影响。计算结果表明,管道开挖后边坡的安全系数为 1.156,有略微降低,潜在滑动面形式及位置也并无明显的变化,说明在斜井初始设计参数条件下管道斜井的开挖对边坡的长期稳定性影响不大。



图 12 管线开挖后潜在滑动面示意图(侧视图)
Fig.12 The potential sliding surface after pipeline excavation (side view)

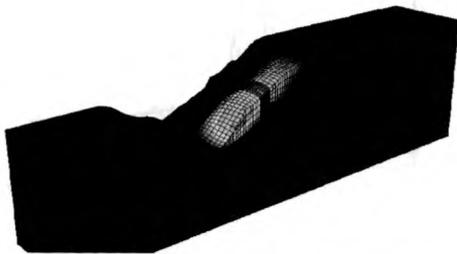


图 13 管道开挖后潜在滑动面与管线位置示意图(俯视图)
Fig.13 The potential sliding surface after pipeline excavation (vertical view)

4 结论与建议

研究分析结果表明,实际边坡地形复杂多样,坡面各处倾斜程度相异,有的情况下不止存在一个危险滑动面,根据实际地形三维建模结合强度折减

法进行边坡稳定性分析,不需要对实际地形进行简化处理,也不需要假设滑面的位置及形状。通过对强度参数的不断折减,到临界状态时,对该状态的应力-应变或位移分析可得到准确的潜在滑动面形状及位置,并由此设计管道的安全位置。此种管线斜井穿越的参数设计方法,能在设计阶段有效避开冲沟边坡潜在滑动区,斜井开挖过程中,斜井周围土体稳定性较好,需加强斜井中部及斜井与水平巷道交接处的支护,以及水平巷道的支护,防止在施工过程中产生土质松动继而塌落等现象,保证施工过程的安全。由于开挖斜井断面尺寸较小,管道埋设较深,斜井开挖后对边坡长期稳定性没有太大的影响。

工程经验表明,多数滑坡是由于水的作用造成的,特别是黄土冲沟边坡工程。因此,在斜井开挖施工过程中,应在洞口作业坑外搭设遮雨棚;施工完毕后应在斜坡体表面适当位置修建排水沟或排水渠,整平斜坡面上的坑洼不平处,避免降雨水在坡面上聚集和入渗。与此同时,应在边坡坡脚处设置挡土墙,以提高坡体的抗滑力,降低产生滑坡的可能性。考虑降雨等水的作用的研究将在今后进一步开展研究。

参 考 文 献

- [1] 郑颖人,沈珠江,龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 王毓民. 西气东输管道工程相关的黄土滑坡[J]. 天然气与石油, 2005, 23(4): 8-11.
- [3] 胡再强,沈珠江,谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 565-569.
HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Constitutive model of structural loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(4): 565-569.
- [4] 王芝银,李云鹏. 西部岩土工程与岩土力学问题[J]. 西安大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 11-14.
WANG zhi-yin, LI Yun-peng. Geotechnical engineering and geomechanics in Chinese western zone[J]. *Journal of Xi'an Highway University*, 2003, 23(1): 11-14.
- [5] 梁国俭. 黄土塬地区管道施工方法—斜井穿越法[J]. 石油工程建设, 2007, 33(3): 23-26.

上接第 1318 页

- [6] 郑颖人, 张玉芳, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在元磨高速公路高边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3812—3817.
ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang, ZHAO Shang-yi, et al. Application of strength reduction FEM to Yuanjiang-Mohei expressway cut slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(21): 3812—3817.
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332—336.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 332—336.
- [8] 徐卫亚, 肖武. 基于强度折减和重度增加的边坡破坏判据研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 505—511.
XU Wei-ya, XIAO Wu. Study on slope failure criterion based on strength reduction and gravity increase method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 505—511.
- [9] 李新平, 郭运华, 彭元平, 等. 基于 FLAC^{3D} 的改进边坡极限状态确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(supp.2): 5287—5291.
LI Xin-ping, GUO Yun-hua, PENG Yuan-ping, et al. Improved method to determine the critical state of slopes based on FLAC^{3D} method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(supp.2): 5287—5291.