

断层位置及强度对地下洞室围岩稳定性影响

黄 达¹, 黄润秋², 张永兴¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘 要: 岩体工程的稳定性主要受岩体结构控制, 而断层是岩体工程中最常见的一类规模较大的地质不连续面。断层的力学性质及其与洞室的相对位置关系决定了围岩的稳定状态, 通过数值计算及三峡工程地下厂房变形监测分析表明: 断层的存在严重恶化了围岩的应力及变形分布, 不同断层位置、不同自然应力场条件下围岩的应力及变形特征存在着明显的差异; 断层摩擦强度对断层位于顶拱部位时的围岩变形影响较大, 而粘聚力对断层位于边墙部位时影响较大, 而且这种影响规律随侧压系数的增大而增大。

关键词: 地下洞室; 断层位置; 断层强度; 变形; 应力分布

中图分类号: TU451.1 文献标识码: A

文章编号: 1674-4764(2009)02-0068-06

Analysis on Influence of Fault Location and Strength on Deformation and Stress Distribution of Surrounding Rocks of Large Underground Openings

HUANG Da¹, HUNAG Run-qiu², ZHANG Yong-xing¹

(1. College of Civil Engineering; Chongqing University; Chongqing 400045, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China)

Abstract: The stability of rock mass project is mainly controlled by the rock mass structure, and faults are the large geological discontinuity plane commonly encountered in rock mass engineering. The stability of surrounding rocks is restricted by mechanical property and location to underground cavern of faults, the detailed studies carried out by analysis of numerical calculation and construction monitoring datum of underground powerhouse of Three Gorges Project show: the distribution of stress and deformation of surrounding rock masses containing a fault are badly deteriorated, the distribution of stress and deformation are obviously different under different natural stress field and position of fault; The influence of friction strength of fault on deformation of surrounding rocks is more obvious when a fault is located near the crown, but the cohesion is more when wall nearby, and the influence is more distinct with side pressure coefficient increases.

Key words: underground openings; fault location; fault strength; deformation; stress distribution

1959年法国的马尔帕赛(Malpasset)和1963年意大利的瓦伊昂(Vajont)水坝的失事,使工程地质

和岩石力学界受到极大震动,人们开始认识到坝基岩体的稳定性与结构物的强度同等重要,系统研究

收稿日期: 2008-09-18

基金项目: 教育部博士点新教师基金资助项目(200806111012); 中国博士后科学基金资助项目(20080440703); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(GZ2007-13)

作者简介: 黄达(1976-), 男, 重庆大学在读博士后, 主要从事岩土体稳定性评价及其灾害防治等方面研究, (E-mail) hdcqy@yahoo.com.cn 或 hdcqy@126.com。

岩体的力学特性由此引起人们的关注。“岩体结构”是谷德振、孙玉科等于20世纪60年代提出,并系统地建立了岩体结构力学的基础理论^[1-3]。黄润秋等^[4-5]结合大型工程实例对岩体结构进行了较为精细的研究。位于岩石强度较高的硬岩中的大型岩体工程开挖稳定性受岩体结构控制更加明显,特别是断层的影响。

断层对工程岩体稳定的控制作用主要表现为三方面:区域稳定性控制及其活动状态评价^[6-7],如诱发地震;与其它结构面组合切割构成岩石块体^[8-9],造成局部坍塌或塌方;岩体大范围失稳的控制边界^[10-11],如构成边坡滑动面和洞室整体稳定的控制面。

该文通过FLAC^[12]数值模拟及三峡地下厂房施工监测资料分析,对断层的分布位置、抗剪强度及地应力场对围岩变形及应力分布的影响规律进行了较详细的定量分析。而现今的一些研究主要是一些粗略的定性或半定量描述,如:文献^[13]应用有限元法初步探讨了断层分布部位(拱顶、拱肩、边墙)对地下洞室围岩稳定性以及喷锚支护结构受力性状的影响;文献^[14]运用离散元法较详细分析了断层倾角、侧压系数对围岩塑性区及变形特征的影响。

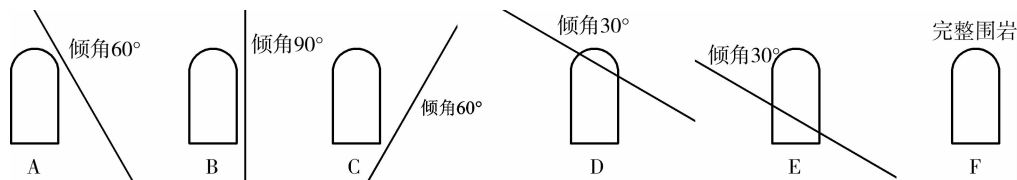


图1 数值计算几何模型示意图

采用理想弹塑性本构模型, Mohr-Coulomb 准则。在模型左侧施加水平应力,其大小为侧压系数与重力应力的乘积,顶部施加覆岩体的重力,其它边界采用法向位移约束。

表1 岩体的物理力学参数

岩体类型	密度 /(kg·m ⁻³)	变形模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	凝聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	泊松比
岩体	2 600	30	2.5	1.8	58	0.2
断层	2 300	0.1	0	变量	变量	0.4

1.2 断层位置对围岩应力及变形的影响

1.2.1 围岩应力场集中及卸荷松弛特征 将洞室开挖后最大主应力的最大值与围岩单轴屈服强度的比值定义为最大应力集中系数:

$$N = \frac{\sigma_{1\max}}{\sigma_{cm}}, \sigma_{cm} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1)$$

式中, N 为最大应力集中系数, $\sigma_{1\max}$ 为计算的最大主应力最大值, σ_{cm} 为岩体单轴抗压强度。

1 断层位置及强度对围岩变形及应力分布影响规律数值模拟分析

1.1 计算方案概化

断层与洞室相对位置关系类型很多,很难全面考虑,本文假设中陡倾角断层与洞室不相交,而缓倾角断层与洞室相交,分别考虑了倾角 30°、60°、90° 的断层在洞室不同部位出现的工况,具有一定的代表性。按上述思路,建立如图1所示的6种计算模型,分别编号 A-F。假设断层走向与洞室轴线平行(平面应变问题),断层宽 1 m,与洞室不相交断层距开挖边界最小距离 5 m,洞室高 60 m,宽 30 m。

岩体物理力学参数根据长委三峡勘测院的室内和现场岩体力学试验,结合厂房区的结构面工程地质特性综合取值如表1所示。其中断层抗剪强度为变量,粘聚力 c 和摩擦角 φ 均分为5个等级: c , 0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa; φ , 15°、20°、25°、30°、35°(分析断层分布位置影响时: $c=0.4$ MPa, $\varphi=25^\circ$)。假设地下厂房顶拱中心埋深为 200 m,侧压系数 k (水平应力与垂直应力之比)设计2个水平应力等级: $k=0.6, k=3$ 。

由表2可知: $k=0.6$ 时,含断层模型应力集中系数大约为 1.4~2.5,除断层从边墙通过的模型 E 外,其它模型的最大应力集中系数均较模型 F 大,从大到小依次为: C→B→D→A→F→E; $k=3$ 时,含断层模型的最大应力集中系数普遍较模型 F 小,只有断层位于右拱肩部位的模型 A 应力集中系数较模型 F 大些,从大到小依次为: A→F→E→D→C→B。

表2 最大应力集中系数

模型编号	A	B	C	D	E	F
$k=0.6$	1.82	2.25	2.45	2.10	1.42	1.59
$k=3.0$	6.48	4.86	5.09	5.28	5.31	5.70

表3 应力松弛区面积/m²

模型编号	A	B	C	D	E	F
$k=0.6$	1 753	1 213	1 784	2 012	1 628	1 037
$k=3.0$	5 762	4 752	6 877	4 432	6 354	3 320

将相对于围岩深部,最小主应力卸荷较为明显区域的面积定义为应力松弛区面积。由表 3 可知:含断层模型的最小主应力松弛区面积较模型 F 要大得多,大约为 1.2~2 倍。 $k = 0.6$ 时,含断层模型松弛区面积约在 $1\,213\text{ m}^2 \sim 2\,012\text{ m}^2$ 之间,从大到小依次为:D→C→A→E→B→F; $k = 3$ 时,含断层模型松弛区面积在 $4\,432\text{ m}^2 \sim 6\,877\text{ m}^2$,从大到小依次为:C→E→A→B→D→F。

围岩最大应力集中系数及应力松弛区面积随断层分布部位而变化,同时也随侧压系数而变化。

1.2.2 围岩变形特征 图 2 为各模型的位移矢量图。变形主要集中在断层与洞室表面之间的断

层影响区内,如果断层相对于开挖面倾向开挖区时,变形主要集中在断层上盘,如果断层相对于开挖面倾向围岩内部时,变形主要集中在断层下盘,当断层与洞室相交时,相交处位移最大。离洞室周边较远的岩体沿断层面主要以向开挖区滑移变形为主且变形较小,而开挖面附近的断层影响区则是以向开挖区卸荷回弹变形为主且变形较大,具体来说顶拱是径向变形,而边墙以水平变形为主,当断层相对于边墙反倾时,变形方向稍微向下偏转,当断层相对边墙倾向开挖区时,变形方向基本水平。侧压系数对变形方向和大小均有较大影响,当 $k = 3$ 时,由于水平挤压增大,变形逐渐向上偏转,变形量也明显增大。

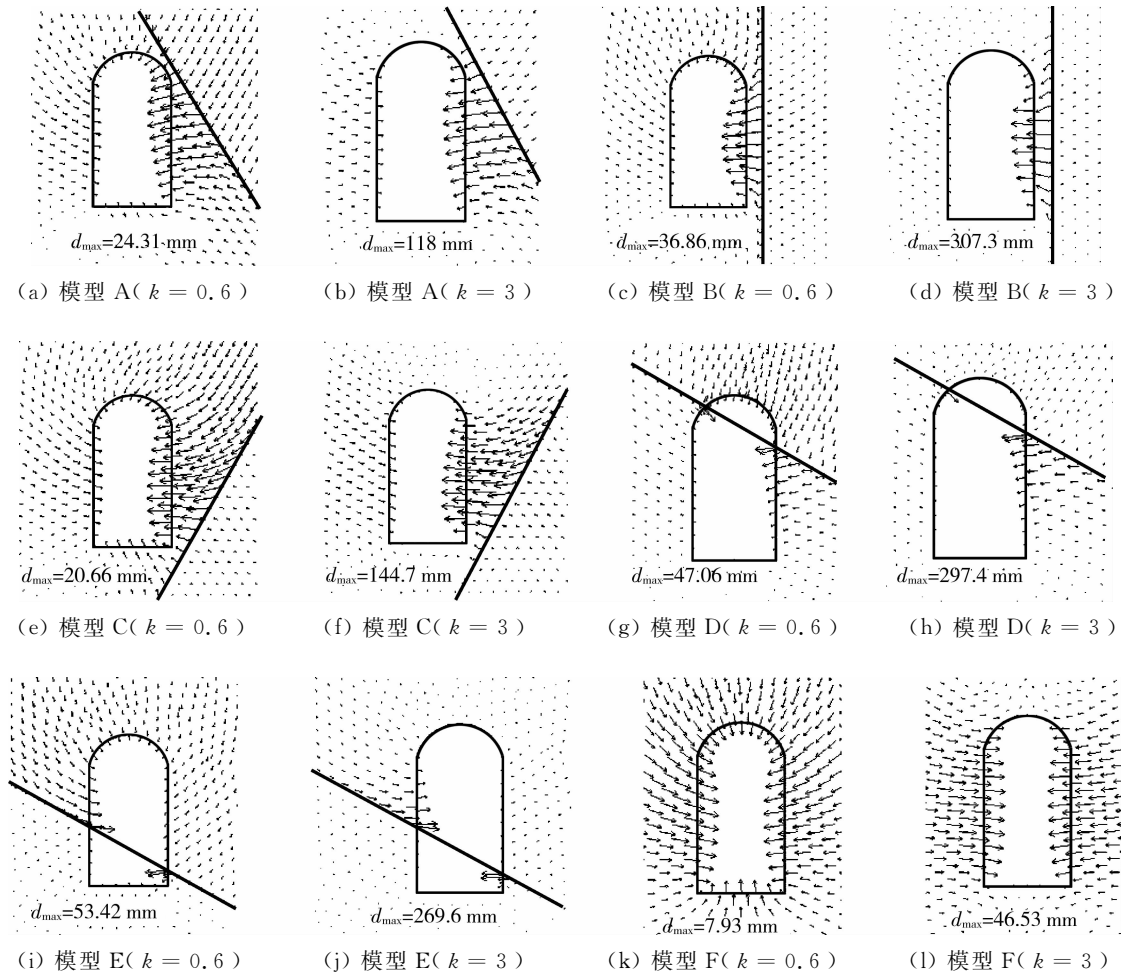


图 2 各模型位移矢量图

断层将一个整体围岩的连续位移场改变为非连续围岩位移场。由图 2 位移矢量图可发现,完整岩体模型 F 围岩位移从开挖面向围岩内部逐步减小,到一定深度处围岩位移为零,而围岩内含断层时,变形在断层影响区显著增大,而其它部位变形相对很小,这种变形集中现象在断层位于边墙内且倾角

为 90° 的模型 B 中最为明显,特别是 $k = 3$ 时。

图 2 中标出了围岩最大变形量,可以发现,含断层模型较模型 F 的最大变形量大约要大 2.5~7 倍,断层对围岩最大变形量影响较大的是模型 B、D 及 E,从大到小依次为: $k = 0.6$ 时, E→D→B→A→C→F; $k = 3$ 时, B→D→E→C→A→F。当断层与洞

室不相交时,围岩也会出现大的变形,特别是模型 B, $k = 3$ 时甚至较断层与洞室相交时更大。

表 4 为洞周开挖面(表中各部位中部)围岩变形计算结果,由表可知:洞壁位移因断层分布部位不同存在较大差异,一般断层分布在哪一部位,哪一部位的位移量将增大,相对于模型 F 增大约 2~7 倍,增加量与断层分布及监测点部位有关,当断层与洞室相交及断层位于边墙内时增加倍数较大;围岩变形主要集中在断层影响区,而远离断层影响区的变形量相对很小,相对于完整岩体模型 F,某些部位变形甚至可能减小,如模型 B 的左边墙中部位移约 0.9 倍,模型 C 的左边墙中部位移约 0.8 倍;围岩最大变形并非断层与围岩相交时就一定会比断层与洞室不相交时大(如模型 B),因此,在实际工程中应该对那些与洞室并不相交的断层加以重视。

表 4 洞周关键点位移计算结果/mm

模型编号	A	B	C	D	E	F	
$k = 0.6$	顶拱	6.01	7.48	5.54	14.48	11.11	4.82
	左边墙	6.83	7.10	6.39	7.72	51.59	7.77
	底板	4.91	6.03	6.76	4.33	6.35	5.05
	右边墙	21.43	36.02	19.91	20.01	11.26	7.77
$k = 3.0$	顶拱	3.16	10.98	6.46	23.12	9.94	3.50
	左边墙	31.68	41.03	38.37	37.42	265.32	46.45
	底板	2.83	6.39	5.33	3.75	4.64	2.64
	右边墙	110.20	302.90	144.10	122.9	35.33	46.45

1.3 断层抗剪强度对围岩变形影响

围岩变形是围岩稳定性分析最为重要且最为直接的指标,断层抗剪强度参数直接影响围岩变形。从前面的分析中可以发现围岩最大变形一般位于围岩的最为薄弱部位(断层影响最为强烈的部位),因此,当断层与洞室不相交时,分析其最大位移量作为特征位移;断层与洞室相交时,分析断层与洞壁相交处的位移作为特征位移。

图 4 为各模型的特征位移随断层摩擦角的变化曲线,图中曲线系列标志 A. max 表示模型 A 的最大位移、D 交顶表示模型 D 断层与顶拱开挖面相交处位移。断层摩擦强度对断层与顶拱相交的顶拱部分围岩的变形影响最为强烈,而且侧压系数越大越显著,这是因为顶拱围岩由于二次切向应力场的挤压作用,使得断层的摩擦强度发挥得更为充分,随侧压系数的增大,这种挤压力也会变得越大;而当断层与边墙相交时,断层摩擦强度增大,对围岩变形的约束就相对较小,这是因为围岩开挖卸荷致使边墙岩体向开挖区发生了较大的水平变形,使得断层面的法向应力减小,断层的摩擦强度不能充分发挥;如果断层与洞室不相交,断层摩擦强度对断层倾向开挖区的围岩变形影响相对较大,对边墙内含有直立断层的模型 B 变形影响最小,因为垂直断层几乎不可能产生沿断层的摩擦滑动。

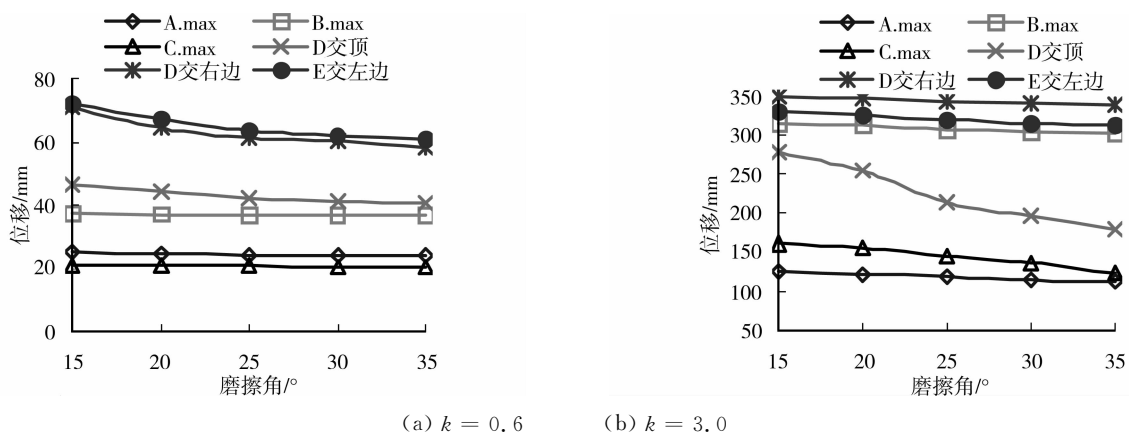


图 4 围岩特征位移随断层摩擦角的变化特征

图 5 为各模型的特征位移随断层粘聚力的变化曲线。断层粘聚力的变化对断层位于拱肩及底部拐角处的模型 A、C 围岩的最大变形和模型 D 中断层与顶拱开挖面相交处影响较小;而对断层位于边墙

附近或与边墙相交的模型变形影响较大,且随侧压系数的增大而加剧。就断层分布部位来说,断层粘聚力对围岩变形的影响正好跟摩擦强度的影响相反,这是由围岩变形及应力场重分布特征决定的。

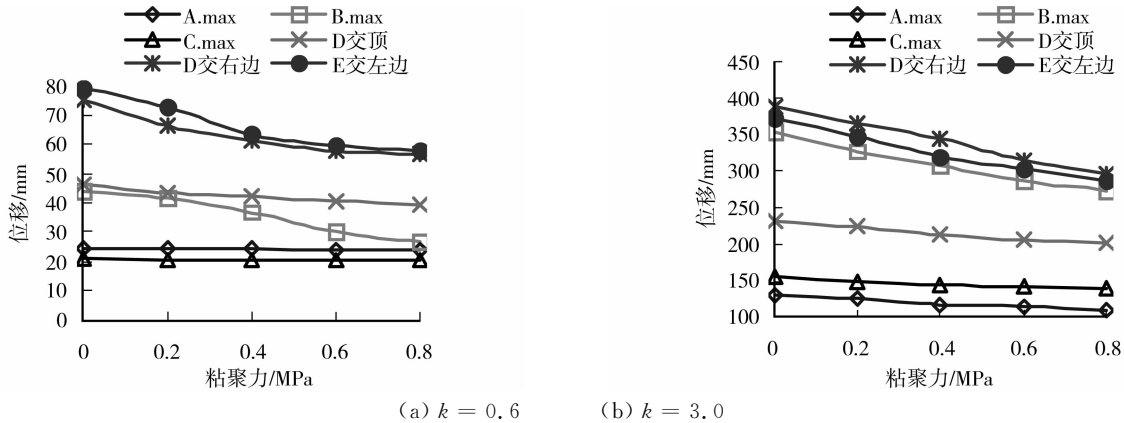


图 5 围岩特征位移随断层粘聚力的变化特征

2 工程实例监测分析

2.1 工程概况及工程地质条件

三峡工程地下电站共安装 6 台 700 MW 水轮发电机组。主厂房断面为直墙拱型,最大高度 87.3 m,跨度 32.60 m,轴线方位 43.5° ,埋深较浅,约 60~80 m,前震旦系闪云斜长花岗岩和闪长岩包裹体混合岩体,微新岩体,以 II 类围岩为主。

断层按走向主要分为 NNW、NE~NEE、NW 及 NNE 四组,以陡倾角为主。NNW 向 F20、F22、F24、f32 等断层为挤压型,有一定延伸规模,但无典型断层破碎带,表现为具有一定宽度的、呈镶嵌或次块状结构的挤压破裂岩带,这类结构面工程地质性状较好,而且与厂房轴线交角较大,倾角较陡,对主厂房的整体稳定性影响较小。NE 向 f10 以及 NEE 向 F84、f143 不仅在规模上具有一定的延伸长度,而且具有一定厚度的断层破碎带,破碎带物质多由性状相对较差的各类构造岩组成,以中缓倾角为主且与主厂房轴线呈较小角度相交,这类结构面的工程地质意义尤为突出,对地下厂房稳定性起关键性控制作用。其中 F84、f10 为典型的断层,具有较为完整的构造岩序列,上下盘(或某一盘)由压碎岩块构成的影响带(具有镶嵌状结构或次块状结构),由构造角砾、碎裂物(局部含断层泥)组成的破碎带,破碎带宽度 0.5~5.0 m,其工程地质物质组分多为含屑砾型或岩屑砾型,局部为夹泥型。

自然地应力场在水平方向受构造应力影响明显,厂房洞顶~拱座高程内,最大水平主应力与厂房中心线成 78.5° 夹角,约 11.2~12.25 MPa,最小水平主应力约 7~9.05 MPa,侧压系数约 2.2~3.5。

2.2 变形监测成果分析

主厂房自 2005 年 3 月开始开挖,2008 年完成整个地下电站的土建工程。由于机窝部分为分机组的局部开挖,因此该文仅分析机窝上方开挖过程中的变形监测成果(至 2007 年 8 月初)。

选择研究区最为关键的两条断层 F84 和 f10 所

通过的 1# 和 4# 机组断面,分析受断层影响较为明显的围岩薄弱部位的 M09DC01 和 M11DC04 两多点位移计变形监测成果,其布置剖面如图 6 所示。

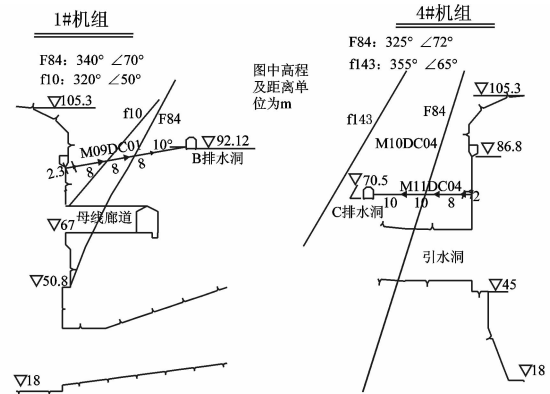


图 6 1# 和 4# 机组部分多点位移计布置剖面图

两多点位移计监测曲线^[15]如图 7 所示,从图中可以看出:

1) 多点位移计的较浅部位锚点 1 和锚点 2 的位移大小差别较大,这种较强的卸荷差异回弹变形容易在边墙围岩中形成拉应力。

2) M09DC01 的锚点 1 和锚点 2 位移比较大,而锚点 4 位移非常小,从多点位移布置剖面图上可以发现,锚点 1 和锚点 2 位于 f10 和 F84 的上盘,即位于断层与开挖面之间围岩内,开挖条件下这部分岩体会产生较大的卸荷变形,变形包括断层面的卸荷张开变形和岩体的卸荷回弹变形。

3) M11DC04 锚点 1 和锚点 2 均位于相对上游边墙反倾的断层 F84 与开挖面之间的岩体内,其受断层控制的锚点 1 和 2 位移同样比较大,开挖位移级跳和大小均较 M09DC01 相应监测点稍大,而位于断层面以内的锚点 3 位移很小。

4) 施工监测表明断层位置对围岩变形的影响规律和高侧压系数条件下高边墙地下洞室边墙部位存在较大的水平方向卸荷变形的结论与数值分析结果基本一致。

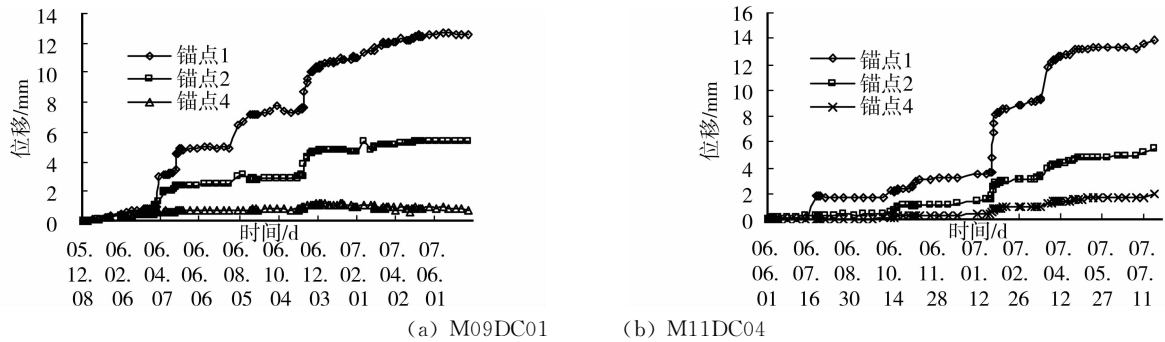


图7 围岩变形监测曲线

3 结 论

1) 围岩内含断层时, 围岩应力分布严重恶化。当断层出现在顶拱、拱肩或底板拐角附近时, 最大主应力更加集中; 断层附近松弛范围明显增大, 当 $k = 3$ 时, 模型 C 甚至较无断层模型大 2 倍以上。

2) 围岩变形主要集中在断层与开挖面间的岩体; 并非断层与洞室相交时其变形就会较大, 当侧压系数较高时, 围岩内含有走向平行于洞室轴线的直立断层时甚至会产生更大的变形; 断层的存在, 并不会使围岩所有部位变形都变大, 而在远离断层影响区的某些部位会有所减小。

3) 就断层分布部位来说, 断层粘聚力对围岩变形的影响正好跟其摩擦强度的影响相反: 当断层位于顶拱部位时, 摩擦强度影响较大; 而当断层位于边墙部位时, 粘聚力影响较大。而且这种影响规律随侧压系数的增大而增大。

参考文献:

- [1] 谷德振. 地质构造与工程建设 [J]. 科学通报, 1963 (10): 22-26.
GU DE-ZHEN. Tectonics & engineering construction [J]. Chinese Science Bulletin, 1963(10): 22-26.
- [2] 孙玉科, 岩体结构力学—岩体工程地质力学的新发展 [J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 292-294.
SUN YU-KE. Rockmass structural mechanism- a new advance in rock engineering- geological mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(4): 292-294.
- [3] 孙广忠. 论“岩体结构控制论” [J]. 工程地质学报, 1993, 创刊号: 14-18.
SUN GUANG-ZHONG. On the theory of structure-controlled rockmass [J]. Journal of Engineering Geology, 1993, First Issue: 14-18.
- [4] 黄润秋, 许模, 陈剑平, 等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 黄达, 黄润秋, 陈强, 等. 基体裂隙实测全迹长分布规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4): 10-12.
HUANG DA, HUANG RUN-QIU, CHEN QIANG, et al. Study on distribution laws of observation full-trace length of basal joints [J]. Hydrogeology &

Engineering Geology, 2005, 32(4): 10-12.

- [6] K. MATSUKI, S NAKAMA, T SATO. Estimation of regional stress by FEM for a heterogeneous rock mass with a large fault [J]. Int J. Rock Mech Min Sci, 2009, 46(1):31-50.
- [7] JÜRGEN E STREIT, RICHARD R HILLIS. Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO₂ in porous rock [J]. Energy, 2004, 29(9/10):1445-1456.
- [8] FULVIO TONON, POOYAN ASADOLLAHI. Validation of general single rock block stability analysis (BS3D) for wedge failure [J]. Int J. Rock Mech Min Sci, 2008, 45(4):627-637.
- [9] D GALIC, S D GLASER, R E GOODMAN. Calculating the shear strength of a sliding asymmetric block under varying degrees of lateral constraint [J]. Int J. Rock Mech Min Sci, 2008, 45(8):1287-1305.
- [10] LIN JEEN-SHANG, KU CHENG-YU. Two-scale modeling of jointed rock masses [J]. Int J. Rock Mech Min Sci, 2006, 43(3):426-436.
- [11] VICKI MOON, TRISHA ROY. Geological controls on rock mass classification of coal from Huntly East Mine, New Zealand [J]. Engineering Geology, 2004, 75(2): 201-213.
- [12] ITASCA. FLAC^{3D} Version 2.1. User's Manual [M]. Minneapolis: ICG, 2002.
- [13] Y H HAO, R AZZAM. The plastic zones and displacements around underground openings in rock masses containing a Fault [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, (20): 49-61.
- [14] 张志强, 李宁, SWOBODA G. 软弱夹层分布部位地洞室稳定性影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3252-3257.
ZHANG ZHI-QIANG, LI NING, SWOBODA G. Influence of weak interbed distribution on stability of underground openings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3252-3257.
- [15] 长江水利委员会长江科学院工程安全与病害防治研究所. 长江三峡工程右岸地下电站安全监测月报 [R]. 武汉, 2005-2007.

(编辑 王秀玲)