

文章编号: 1006-6616 (2000) 01-0059-10

# 深圳市东水西调输水隧洞工程构造活动性分析

孙叶<sup>1</sup>, 赵娴<sup>3</sup>, 徐祥银<sup>3</sup>, 刘霆<sup>1</sup>, 谭成轩<sup>2</sup>, 扬耕<sup>4</sup>,  
阎全人<sup>1</sup>, 叶维国<sup>3</sup>, 杨世平<sup>4</sup>, 何广海<sup>4</sup>, 李淑芬<sup>1</sup>, 孙东洵<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院城市与工程场地稳定性研究中心, 河北 燕郊 056201;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 深圳市地质局, 深圳 518029; 4. 深圳市水利规划设计院, 深圳 518000)

**摘要:** 在对深圳断裂带构造活动性演化分析的基础上, 配合现今构造应力场平面和三维数值模拟, 定量计算输水隧洞不同地段轴向与最大水平主压应力方向的夹角、深圳断裂带与隧洞交汇部位的现今活动量级范围以及深埋隧洞地段现今构造应力状态, 为深圳市东水西调输水隧洞工程设计和施工提供依据。

**关键词:** 深圳断裂带; 输水隧洞工程; 构造活动性

**中图分类号:** U452.1<sup>+1</sup>

**文献标识码:** A

深圳市自1985年以来, 城市高速发展, 人口增长七倍以上, 达350多万。为了解决城市供水, 实施东水西调隧洞输水工程(东江→深圳市西沥水库, 全长约100km)。输水隧洞在坪山以西穿过深圳断裂带3条主干活动断裂, 该段隧洞长约47.7km, 断面4.2m×4.2m。为保证工程合理选线、安全施工和正常运行, 需研究深圳断裂带的构造活动性, 为工程设计和施工提供依据, 并对工程设防提出建议。

## 1 深圳断裂带的主要断裂构造

深圳断裂带位于NE向莲花山深断裂带西南展布区, 由3条大致平行的NE向主干断裂组成, 其间褶皱残缺不全, 断裂的动热变质带发育。侵入岩体较多, 年轻的盆地发育, 并被断裂切割, 表明断裂带具有多次活动的特征<sup>[1]</sup>。深圳断裂带在研究区内长约50km, 宽5~8km(图1)<sup>[2,3]</sup>。① 企岭吓—九尾岭断裂组 深圳断裂带的西北支, 主要由企岭吓、九尾岭主干断裂及其旁侧次级金钱凹断裂、望天海螺断裂等组成。总体走向N50°~70°E, 倾向以NW为主, 倾角65°~85°。具显著的碎裂变形特征, 以反扭为主, 前期具压扭性, 后期具张扭性。② 横岗—罗湖断裂组 为深圳断裂带的主体部分, 由横岗断裂、清风岭断裂和炮台山断裂等组成断裂束。动热变质带发育, 并且沿断裂带走向向东北、西南及向两侧动热变质程度依次减弱。前期以韧性变形为主, 后期叠加脆性变形, 以破劈理等变形密集带标示断裂现今位置。③ 石井岭—田螺坑断裂组 深圳断裂带的东南支, 由田螺坑断裂、石井岭—黄竹坑断裂等组成。沿断裂组发育

收稿日期: 1999-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(49802017)和地质力学开放研究实验室项目(dlkf-9803)

作者简介: 孙叶(1933—), 男, 研究员, 兼职教授, 主要从事地质力学与区域地壳稳定性研究。




图 1 深圳市东水西调输水工程廊道地区构造地质略图

Fig. 1 Tectonic geological map in the corridor area of the diversion tunnel in Shenzhen

①企岭吓—九尾岭断裂；②横岗—罗湖断裂；③清风岭断裂；④炮台山断裂；⑤田螺坑断裂；⑥石井岭—黄竹坑断裂

动热变质片岩、千枚岩等。后期叠加滑劈理、构造角砾岩、破碎岩等，也显示出多期变形的特征。

## 2 深圳断裂带构造活动性分析

研究区燕山运动分为早、晚两个阶段，早期阶段新华夏系深圳断裂带以韧性变形和动热变质作用为主；晚期阶段表现为酸性岩浆侵入和脆性破裂。变形方式以压扁作用为主，呈现从韧性到脆性的递进变形过程，其应力应变规律如图2所示。从图2可以看出，横岗—罗湖主干断裂组的最大主压应力方向在  $N20^{\circ}\sim 40^{\circ}W$  之间，结合各处断层走向分析，表明断层以压性为主，兼具扭性。



图2 深圳断裂带燕山期岩石应变和应力状态略图

Fig. 2 Rock stress-strain states of Shenzhen fracture belt in Yanshan period

1. 断裂（粗线为主干断裂，细线为次级断裂）；2. 压扭性断裂；3. 角闪岩相变质岩；4. 绿片岩相变质岩；5. 岩石有限应变测量相对变形强度，拉长者表示相对变形强度增大；6. 据石英组构及方解石 C-T 图推测的最大主应力方向；7~11. 燕山期古差应力值 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 分别为  $>190$ 、 $190\sim 170$ 、 $170\sim 150$ 、 $150\sim 130$ 、 $<130$ （单位：MPa）

根据燕山期岩石在稳态流变过程中形成的变形显微构造，采用方解石双晶页理、石英动态重结晶颗粒和自由位错密度三种统计测量方法估算古差应力值 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sup>[4,5]</sup>。古差应力值在横岗附近最高，其中采用石英自由位错密度测得 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 为 193MPa。沿断层走向往北东或南西方向均逐渐降低，如清风岭和罗湖分别为 139MPa 和 130MPa。据方解石双晶页理和石英动态重结晶颗粒的统计测量计算结果，也以横岗附近最高，往北东或南西方向也逐渐降低。另外，在企岭吓和梅林，采用石英自由位错密度统计测得古差应力值分别为 122MPa 和 132MPa，与横岗—罗湖主干断裂组相比，自深圳断裂带中部往两侧测值也呈降低趋势。

图3 深圳断裂带微地震震源深度  
综合投影剖面图

Fig. 3 Projecting section of the focal  
depth of micro-earthquakes within  
Shenzhen fracture belt

黑圆点为震源, 粗黑线段为深圳断裂带

在深圳断裂带早期塑性变形形成的复杂塑性变形构造带中, 岩石应变测量有如下主要特点: (1) 沿横岗—罗湖断裂组走向, 岩石应变强度在横岗附近应变值最大, 应变轴  $a; c$  达 23.91, 往北东和南西方向渐次降低。往北东方向的清风岭降至 7.92, 往南西方向的黄贝岭降至 2.49, 与动热变质带的变质程度吻合, 与断裂活动的古地应力值呈正相关。(2) 自深圳断裂带的横岗—罗湖主干断裂组往两侧的主干断裂、次级断裂, 应变强度趋势减弱。这也与古地应力场的变化趋势一致, 表明古应变与古地应力的一致性。(3) 深圳断裂带岩石有限应变测量结果所得付林指数及其图解, 经分析, 变形类型属压扁型, 与岩组分析得出的断裂以压性为主的

结论一致。

挽近地质时期, 从地貌景观和第四纪断陷槽地及其沉积物, 断层错动证据与新年龄测定可以确定, 在全新世期间, 甚至在晚更新世期间, 区内断裂活动已明显减弱。这与人工地震浅部探测结果相吻合。下面借助地震活动、断层位移监测、地应力测量等方面的实测结果, 重点分析深圳断裂带在输水管线两侧宽约 10km 的廊道地区的现今活动性。

## 2.1 微地震活动与深圳断裂带的关系

笔者以本区微地震台网的测量与定位作深圳断裂带微地震震源深度横剖面综合投影图。可以看出, 震源分布与深圳断裂带产状一致 (图 3), 反映该断裂带现今具有一定的活动性。

## 2.2 断层位移测量

黄贝岭断层位移测量站布设在横岗—罗湖断裂上。自 1986 年 7 月至 1991 年 7 月 (其中 1987 年 7 月至 1988 年 7 月停测) 进行了四年观测, 采用断层上盘相对运动的矢量周年轨迹对比法进行复核计算, 得到平均趋势位移速率大于  $0.3\text{mm/a}$ 。上盘相对下盘反扭下降, 反扭速率  $-0.29\text{mm/a}$ , 下降速率  $-0.26\text{mm/a}$  (图 4)。依据世界各国有关断层趋势性年位移速率分级及其在工程建筑中的等级分类综合

图4 深圳黄贝岭断层实测趋势位移运动矢量示意图

Fig. 4 Vectograph of measured relative displacement of the Huangbeiling fault in Shenzhen

图中假定断层下盘不动, 上盘作相对运动的位移矢量轨迹图。其中实线为 1986 年 7 月~1987 年 7 月的运动轨迹, A 点为周年“8”字形运动轨迹的交点。虚线为 1990 年 7 月~1991 年 7 月的运动轨迹, B 点为周年“8”字形运动轨迹的交点。图中 1988 年 7 月~1990 年 7 月的运动轨迹线已被删去, A→B 即 5 年 (1986 年 7 月~1991 年 7 月) 的上盘相对位移趋势位移量和运动方向

对比,横岗—罗湖断裂应属中速偏弱  
的活动断层,与日本福岛断层、北京  
八宝山断裂的活动量级大致相  
当<sup>[6~9]</sup>。

1984~1988年开展深圳市区域  
稳定性评价工作时,选择座落在主干  
断层上的民用建筑、厂房、水库大坝  
进行了不定期的位移监测<sup>[2]</sup>。再次证  
实,自1983~1986年大约12~15a  
内,上述各种建筑物均没有因断层活  
动而遭损坏的迹象,可见,本区主要  
断层现今活动速率属中速偏弱的结  
论是正确的。

### 2.3 地应力测量

为了准确测量各测孔的地应力  
值,必须首先保证测值为构造应力。  
地形、人类活动等引起的非构造应力

在地表附近有一定的影响空间,并与构造应力完全保存的范围之间必然存在着一个理想界面,即构造应力面,亦即构造应力全部保存的界面。这个界面随着地形起伏变化,各处埋深、高程也各不相同。例如东水西调工程输水隧洞的四个深埋地段,各处构造应力面的埋深不同,高程也不相同(表4)。因此,测孔应选择地形相对平坦或起伏较小的地点,以便在较浅处即穿过构造应力面测到构造应力,同时也应注意人工采掘面和测孔附近微地貌对测值的影响。

研究区于1985~1986年在石岩水库(No.1)、深圳八卦岭(No.3&No.4)、横岗西坑(No.5)和龙岗(No.6)进行了地应力测量<sup>[2]</sup>;1998年又增加了民乐(No.2)和松子坑(No.7)两个测孔(图5)。综合分析实测数据可以获得以下认识:研究区最大水平主压应力方向以NW~NNW向为主,量值在1MPa~3MPa之间;最大水平剪应力多在1MPa以内。结合前述各种资料分析,表明现今构造活动以新华夏系活动方式为主,并且自燕山运动以来构造应力场具有很好的继承性。

## 3 输水管线所在倾斜面上现今构造应力状态变化规律

东水西调输水管线所在平面自东北往西南倾斜,东西长约47.7km,高程自50m下降至25.6m,为缓倾斜面。在深圳断裂带构造活动性演化分析的基础上,为使有限测点的现今实测地应力与断层位移数据推演到无限连续的三维空间场,获得空间不同地点的有关数据,需配合构造应力场模拟实验,以便探讨输水管线所在倾斜面上现今构造应力状态的变化规律。

### 3.1 现今构造应力场线弹性平面模拟

笔者以输水工程廊道地区为中心选择矩形模型,面积1500km<sup>2</sup>,短边方向为N34°W,长边方向为N56°E,比例尺为1:5万。模型划分三角形单元779个,节点430个,载荷节点71个,约束点11个。模型的物性参数见表1。按照新华夏系应力活动方式加载,按两种实验方案进行模拟:其一,为了较好地观察断层内部的位移与应力状态,在断层内部划分4层三角形单元;其

图5 深圳市东水西调输水工程管线附近地应力  
测量孔位分布略图

Fig. 5 Positions of ground-stress measurements  
near the diversion tunnel in Shenzhen  
1. 输水工程廊道地区; 2. 输水管线; 3. 主干断层;  
4. 次级断层; 5. 地应力测孔位置及最大水平主压应力方向

二,为了观察平面应力状态,在断层内部仅划分一层单元。模拟结果与实测最大主应力方向对应较好,量值变化也大体一致,表明模拟结果具有较高的可信度。

表1 深圳市东水西调输水工程平面数值模拟实验参数

Table 1 Parameters for plane numerical simulation of the diversion tunnel engineering in Shenzhen

岩类	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	备注
花岗岩	57000	0.26	2.70	以花岗岩为主,小部分混合岩
片岩	45000	0.27	2.40	动热变质带中片岩
花岗岩破碎带	40000	0.29	2.30	断层破碎带
千枚岩、片岩、破碎角砾岩	30000	0.30	2.10	断层破碎带

### 3.2 现今构造应力场线弹性三维有限元数值模拟

根据1/5万廊道构造地质图编制实验模型,比例尺为1/5万,长宽分别为40km(N56°E方向)、23km(N34°W方向),高1530m以上,地形起伏依据1/5万地形图编制,输水管线置于模型中央。模型单元划分为6层(即输水管线以上为第一层),厚度数十米至数百米不等;输水管线所在倾斜面为第二层,厚20m;以下再分4层(即第三、四、五、六层),每层厚375m。共划分六面体三维等参元11832个,节点14455个。物性参数主要依据断裂规模、产状、活动性分级以及岩石类型和力学性质分区,并参考本区岩石力学性质实测数据选取(表2)。位移边界条件为模型底部Y方向(直立方向)约束,水平方向自由;西北角底部全约束;东北角底部X方向约束,Z方向自由;模型顶部自由。模型四周的应力边界条件分别为: $S_{H_{\max}}=2.5242+0.3030h$ ( $S_{H_{\max}}/\text{MPa}$ , $h/\text{m}$ ),为N34°W方向加载; $S_{h_{\min}}=0.8866+0.01718h$ ,为N56°E方向加载。这样的边界条件与模型在地壳中所受实际边界条件基本一致。计算结果与水压致裂法深孔地应力测量结果对应最好,与压磁法测量对比,深度大者对应较好,但浅者对应较差,原因在于实测浅孔的深度不一致<sup>[10,11]</sup>。

表2 深圳市东水西调输水工程三维数值模拟实验参数

Table 2 Parameters for Three-dimensional numerical simulation of the diversion tunnel engineering in Shenzhen

岩类	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	备注
花岗岩	57000	0.26	2.7	包括部分混合岩
砂岩(J)	60000	0.24	2.7	
片岩	42000	0.28	2.4	
砂岩(E)	27000	0.30	2.7	第三纪胶结差的砂岩
煤系	24000	0.32	2.3	
断裂构造带1	24000	0.32	2.4	一级断层片理带
断裂构造带2	14000	0.34	2.2	二级断裂和一级含角砾断层片理带
断裂构造带3	7000	0.45	2.0	一级断裂

表3 输水管线轴向与最大水平主压应力方向交角

Table 3 Angle enclosed between the maximum horizontal principal compressive stress direction and the tunnel axis

输水管线编号	隧洞方向	最大水平主压应力方向	隧洞轴向与最大水平主压应力的夹角	其 它
ZD1~ZD2	N38°E	N78°W	64°	其中有明渠或箱涵
ZD2~ZD3	N16°W	N86°W	70°	
ZD3~ZD5	N8°E	N49°E	41°	
ZD5~ZD6	N65°E	N73°W	42°	
ZD6~ZD9	N37°E	N56°W	87°	其中有第一段深埋隧洞
ZD9~ZD10	N53°E	N16°W	69°	
ZD10~ZD10-1	N74°E	N44°E	30°	
ZD10-1~ZD10-2	N78°W	N38°W	40°	其中有第二段深埋隧洞
ZD10-2~ZD10-3	N75°W	N57°W	48°	
ZD10-3~ZD10-5	N50°E	N53°W	77°	其中有渡槽
ZD10-5~ZD12	N65°E	N52°W	63°	其中有渡槽
ZD12~ZD14	N80°W	N81°W	1°	其中有渡槽
ZD14~ZD15	N36°W	N18°E	54°	
ZD15~ZD17	N58°E	N18°E	40°	其中有倒虹吸
ZD17~ZD20	N88°W	N66°W	22°	其中有第三段深埋隧洞
ZD20~ZD21	N50°W	N61°W	11°	其中有第四段深埋隧洞
ZD21~ZD27	N70°W	N64°W	6°	其中有渡槽及明渠

### 3.3 输水管线所在倾斜面上现今构造应力场综合分析

根据各种实测数据及模拟实验结果,重点分析输水管线所在倾斜面上现今应力状态和主要断层位移速率。

#### 3.3.1 现今构造应力状态 输水管

线斜面上的最大水平主压应力方向以NW—NWW向为主,在断裂交接和拐弯部位局部出现NE向或近SN向。世界各国的地下隧洞工程建设经验认为:隧洞轴向与最大水平主压应力轴平行时,隧洞的稳定性最好。本区隧洞轴向与最大水平主压应力方向之间的夹角,经统计,在不同地段存在着明显的变化,半数地段交角小于30°,四分之一地段大于60°,后者对稳定性具有重大影响(表3)。因此,在选线阶段,考虑二者交角大小具有重

图6 根据构造应力面原理推算深埋隧洞地段构造应力状态示意图

Fig. 6 The general sketch showing the tectonic stress states calculated by the theory of tectonic stress plane

A. 山顶最高点 (250m); B. 构造应力面最高点 (110m); C. 往深埋隧洞底板推算起点高程 (92m), 往下推测深度 (47m); D. 各地应力测孔平均取值高程 (75m); E. 输水隧洞底板高程 (45m); F. 海平面高程; G. 实测地应力孔地面高程 (85m); H. 测孔取值高程 (75m)

要意义。

三维应力状态分析表明,最大剪切应力在廊道地区量值变化范围在0.5MPa~4.0MPa之间;形变比能在(20~340) J/m<sup>3</sup>之间。

表4 深圳市东水西调输水工程深埋隧洞地段构造应力状态

Table 4 Tectonic stress states at the deep buried sectors of the diversion tunnel in Shenzhen

深埋隧洞地段	打鼓嶂 第一段	狮子山 第二段	鸡公头 第三段	雅鸡山 第四段	备注
输水管线编号	ZD6~ ZD9	ZD10-1~ ZD10-2	ZD19~ ZD20	ZD20~ ZD21	
地面最高点/m	300	250	250	270	
地应力测孔平均取值高程/m	75	75	75	75	各孔取值深度高程为50~100m, 平均为75m
深埋地段有关指标					
构造应力面埋深/m	180	140	140	156	
构造应力面高程/m	120	110	110	114	按地面最高点与平均地应力取值深度的1/5隆起确定
隧洞底板高程/m	48	45	30	29	
构造应力面与隧洞底板高程差/m	72	65	80	85	
山体岩性	花岗岩	花岗岩	混合岩、砂岩	花岗岩	
平面模拟最大剪切应力值/MPa	0.28	0.28	0.14	0.14	
往隧洞底板推算的深度/m	49	47	57	65	
平面模拟实验结果					
最大水平剪应力梯度值 $G_{\text{rmax}}$	根据研究区水压致裂测量结果计算: $G_{\text{rmax}} = 1.32\text{MPa}/100\text{m}$ , 该值与华南地区平均值相比偏大				
推算深埋隧洞的最大水平剪应力值/MPa	0.93	0.90	0.89	0.99	
最大水平主压应力方向	N67°W	N52°W	N86°W	N63°W	
深埋隧洞轴向	N37°E	N78°W	N88°W	N50°W	
最大水平主压应力与隧洞轴向夹角	76°	26°	2°	13°	
三维模拟实验结果分析					
三维最大剪应力值/MPa	2.05	1.32	2.49	2.02	
最大水平主压应力方向	N56°W	N38°W	N66°W	N61°W	
最大水平主压应力与隧洞轴向夹角	87°	40°	22°	11°	

3.3.2 主要断层与隧洞交汇部位现今位移活动量级范围 国内外有关断层现今位移活动分为5级<sup>[6~9]</sup>,即高速活动断层 (>10mm/a)、较高速活动断层 (10~1mm/a)、中速活动断层 (1~0.1mm/a)、低速活动断层 (0.1~0.01mm/a)、微速活动断层 (<0.01mm/a)。断层两盘相对位移活动,可以分解为水平扭动与上下升降(即倾向位移)两个指标。研究区断层位移年速率的计算以黄贝岭断层位移站为起算点,起算值为断层上盘相对下盘实测年速率:反扭0.29mm/a、下降0.26mm/a。依照这个比例关系,根据平面和三维构造应力场模拟中位移形变



分析,对区内主要断层与隧洞交汇部位现今活动速率进行绝对值量级范围推算。断层倾向位移水平投影在 $0.42\sim 0.60\text{mm/a}$ 和 $0.62\sim 0.80\text{mm/a}$ 两个量级范围,属中等速率量级范围。断层两盘相对扭动量级,也属于中速率量级,即 $0.10\sim 0.80\text{mm/a}$ 。

### 3.4 深埋隧洞地段的现今构造应力状态

东水西调输水隧洞深埋地段共计4段,地面标高 $250\sim 300\text{m}$ ,隧洞埋深 $220\sim 250\text{m}$ 左右,了解深埋地段的三维应力状态,对于隧洞岩体稳定性分析、岩爆预测、工程设计等具有重要意义。在没有深孔实测地应力的前提下,采用下面两种方法推算深埋隧洞现今地应力状态。

**3.4.1 构造应力面推算法** 构造应力面大体随地形起伏变化,即山头周围是临空面,部分构造应力释放,故构造应力面的埋深在山体部位较平坦地区为深。

深圳地区实测压磁应力测孔的高程为 $50\sim 100\text{m}$ ,取 $75\text{m}$ 作为平均高程( $D$ )。现今构造应力场平面模拟实验结果大致代表 $75\text{m}$ 高程附近的平面应力状态。根据地形起伏确定山顶( $A$ )之下构造应力面的最高点( $B$ )。根据 $B$ 、 $D$ 的高程平均值,确定往深埋隧洞底板( $E$ )推算起点高程( $C$ ),再计算往底板推算的深度( $C\rightarrow E=47\text{m}$ ) (图6)。根据1986年深圳市体育馆 $200\text{m}$ 深孔水压致裂法测量的地应力数据,计算最大水平剪应力随深度变化的梯度 $G_{\text{max}}=1.32\text{MPa}/100\text{m}$ 。表4是深埋隧洞构造应力状态的推算结果。

**3.4.2 构造应力场三维模拟实验方法** 笔者选择输水管线所在倾斜面作为计算单元面,作三维构造应力场模拟,因此很容易计算该面上隧洞各部位的三维构造应力状态。表4列出了四处深埋隧洞地段三维最大剪应力值、最大水平主压应力方向及其与隧洞轴向的夹角。

## 4 主要结论与建议

### 4.1 结论

- (1) 输水隧洞轴向与最大水平主压应力方向夹角,半数地段小于 $30^\circ$ , $1/4$ 地段大于 $60^\circ$ 。
- (2) 输水管线附近主要断裂现今最大活动速率属中速活动量级( $<1\text{mm/a}$ ),断层50年累计位移量小于 $20\sim 40\text{mm}$ 。
- (3) 输水管线的4个深埋隧洞地段,三维最大剪切应力小于 $2.5\text{MPa}$ 。隧洞轴向与最大水平主压应力方向交角分别为: $87^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $22^\circ$ 和 $11^\circ$ 。
- (4) 深圳断裂带现今构造活动特征表现为:低剪应力、低应变能量、位移量级中等。

### 4.2 建议

- (1) 当隧洞超越主干断裂时,依据断层50年累计位移量小于 $40\text{mm}$ 的量级,对输水管道采取有效防护措施。如在钢筋混凝土管道外填加一定厚度的半流体层(沥青等),以缓解断层错动对输水管道的直接影响和损伤。
- (2) 输水隧洞应避免NE向和NW向两组断裂交接复合强拉张的不安全部位。
- (3) 经过推算和模拟实验获得4个深埋隧洞地段的有关数据,为了验证其可靠性,建议选其中一段进行深部地应力测量,以确保工程的安全。
- (4) 委托有关部门对断层位移进行长期监测,便于及时采取措施,保证隧洞的安全运作。

## 参 考 文 献

- [1] 广东省地质矿产局. 中华人民共和国广东省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [2] 地质矿产部《深圳市区域稳定性评价》编写组. 深圳市区域地壳稳定性评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [3] 广东省地质矿产局区域地质调查大队. 深圳地质图 (1:5万) 及说明书 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [4] 郑伯让, 金淑燕. 构造岩岩组学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [5] 郑亚东, 常志忠. 岩石有限应变测量及韧性剪切带 [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [6] 中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断裂 [M]. 北京: 地震出版社, 1982.
- [7] 陈庆宣, 王维襄, 孙 叶, 等. 岩石力学与构造应力场分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [8] 孙 叶, 谭成轩. 现今区域构造应力场与地壳运动趋势分析 [J]. 地质力学学报, 1995, 1 (3): 1~12.
- [9] 孙 叶. 断层面上岩石位移和擦痕的几种形式 [A]. 国际交流地质学术论文集1 [C]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [10] 谭成轩, 王连捷, 孙宝珊, 等. 含油气盆地三维构造应力场数值模拟方法 [J]. 地质力学学报, 1997, 3 (1): 71~80.
- [11] Ghose Ranajit, et al. . Three-dimensional numerical simulation of the subduction dynamics in the Sunda Arc region, Southeast Asia [J]. Tectonophysics, 1990, 181 (1~4).

## AN ANALYSIS OF THE ACTIVITY OF THE SHENZHEN FAULT ZONE IN THE TUNNEL ENGINEERING IN SHENZHEN MUNICIPALITY

SUN Ye<sup>1</sup>, ZHAO Xian<sup>3</sup>, XU Xiang-ying<sup>3</sup>, LIU Ting<sup>1</sup>, TAN Cheng-xuan<sup>2</sup>,  
YANG Geng<sup>4</sup>, YAN Quan-ren<sup>1</sup>, YE Wei-guo<sup>3</sup>, YANG Shi-ping<sup>4</sup>,  
HE Guang-hai<sup>4</sup>, LI Shu-fen<sup>1</sup>, SUN Dong-xun<sup>1</sup>

(1. *Urban and Engineering Site Stability Assessment Center, CAGS, Yanjiao, Hebei 056201, China;*

2. *Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China;* 3. *Shenzhen Geological Bureau, Shenzhen 518029, China;*

4. *Shenzhen Planning and Designing Institute of Water Resources, Shenzhen 518000, China)*

**Abstract:** After an analysis of the evolution of the activity of the Shenzhen fault zone numerical simulations of both plane-and 3-D present tectonic stress fields are made to calculate quantitatively the angle enclosed between the maximum horizontal principal compressive stress direction and the tunnel axis at different sections of the Shenzhen water diversion tunnel. The displacements of the faults at the intersections between them and the tunnel and the possible stress states of four deep buried sectors of the tunnel are also obtained by the modeling. The results will provide data for the design of the planned tunnel construction.

**Key words:** Shenzhen fault zone; diversion tunnel engineering; tectonic activity