

深圳断裂带现今构造活动性及其对深圳市输水隧洞工程地壳稳定性影响

谭成轩¹ 王瑞江² 孙叶²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质科学院城市与工程场地稳定性研究中心, 燕郊 056201)

摘要: 从微震活动、断层位移监测、现今地应力测量等方面进行深圳断裂带现今构造活动性分析, 配合构造应力场三维数值模拟, 定量计算了深圳断裂带与输水隧洞交汇部位的现今活动量级范围以及输水隧洞不同地段轴向与最大水平主压应力夹角, 推算出深埋输水隧洞地段现今构造应力状态, 并结合地震活动性及其危险性、岩土体稳定性等研究成果, 运用模糊数学方法, 评价输水隧洞工程地壳稳定性, 为工程设计和施工提供依据。

关键词: 深圳断裂带; 构造活动性; 三维构造应力场; 输水隧洞工程; 地壳稳定性。

中图分类号: P542; P64 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)01-0051-06

作者简介: 谭成轩, 男, 副研究员, 1964年生, 1996年毕业于中国地质科学院研究生部, 获博士学位, 主要从事地质力学研究。

深圳市自1985年以来, 城市高速发展, 人口增长7倍以上, 达350多万, 为了解决城市供水, 实施东水西调输水隧洞工程(东江→深圳市西沥水库, 全长约100 km)。输水隧洞在坪山以西穿过深圳断裂带3条主干断裂, 该段隧洞长约47.7 km, 断面4.2 m×4.2 m, 并且4处属于深埋隧洞(图1)。已有研究成果表明, 深圳断裂带现今具有一定的活动性^[1], 对工程地壳稳定性具有重要影响。因此, 工程设计部门要求在实测地应力和断层位移监测的基础上, 定量分析输水隧洞不同地段现今构造活动性, 评价输水隧洞工程地壳稳定性, 为工程设计和施工提供依据。为此, 下面将在深圳断裂带现今构造活动性分析的基础上, 配合三维构造应力场数值模拟, 定量分析上述有关工程设计所需数据, 并进行输水隧洞工程地壳稳定性评价。

1 深圳断裂带现今构造活动性分析

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^[1,2]。深圳断裂带在研究区内长约50 km, 宽5~8 km, 现今活动相对较弱, 属于相对较稳定地段(图1)^[1,3]。

下面主要从输水管线两侧廊道地区(宽约10 km)内深圳断裂带微震活动性、断层位移监测和现今地应力实测结果, 分析深圳断裂带现今构造活动性, 为三维构造应力场数值模拟提供必要条件。(1)微震活动与深圳断裂带的关系。笔者通过对本区微地震台网的测量与定位, 并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2), 反映该断裂带现今具有一定的活动性。(2)断层位移测量结果分析。在研究区深圳断裂带横岗-罗湖断裂上布设了黄贝岭断层位移测量站, 自1986年7月—1991年7月(其中1987年7月—1988年7月停测)进行了4年观测^[1], 采用断层上盘相对运动的矢量周年轨迹对比法, 进行复核计算分析, 平均趋势位移速率大于0.3 mm/a的量级范围, 上盘相对下盘反扭下降, 反扭速率0.29 mm/a, 下降速率0.26 mm/a。根据国内外断层现今位移活动量级资料^[4-6], 结合工程建设应用进行综合分类, 将现今活动断层分为5个等级, 即高

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. 第三系; 2. 侏罗系; 3. 石炭系; 4. 泥盆系; 5. 震旦系; 6. 花岗岩与混合花岗岩; 7. 地质界线; 8. 主要断裂及其编号(即深圳断裂带): 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; 9. 次级断裂; 10. 压扭性断裂; 11. 实测与推测断裂; 12. 断层位移监测站; 13. 输水管线编号/设计水位高程; 14. 输水明渠或箱涵; 15. 输水隧洞; 16. 深埋输水隧洞; 17. 输水管线备用方案; 18. 输水工程廊道地区; 19. 水位与高程; 20. 山峰与高程

以 NW—NNW 向为主, 量值在 1~3 MPa 之间; 最大水平剪应力多在 1 MPa 以内, 表明深圳断裂带现今构造活动以新华夏系活动方式为主。

2 深圳断裂带现今三维构造应力场有限元数值模拟

在深圳断裂带现今构造活动性分析的基础上, 为有限点实测数据推演到无限连续的三维物理空间场, 获得空间不同地点有关数据, 需进行三维构造应力场模拟实验^[7,8]。

研究区现今三维构造应力场数值模拟, 主要根据 1/5 万廊道地质构造图及其岩石类型和力学性质, 编制实验模型。模型比例尺为 1/5 万。模型形状为长方体, 长宽分别为 40 km(Z 轴, NE56°方向), 23 km(X 轴, NW326°方向), 高 1 530 m 以上, 地形起伏根据 1/5 万地形图编制, 输水管线位于模型中央。模型单元划分为 6 层, 即输水管线以上为第 1 层, 厚度数十至数百 m 不等, 输水管线所在倾斜面为第 2 层, 厚 20 m, 以下再分 4 层(即第 3, 4, 5, 6 层), 每层厚 375 m, 共划分六面体三维等单元 11 832 个, 节点 14 455 个(图 4)。物性参数依据断裂规模、产状、活动

图 2 深圳断裂带的微地震震源深度综合投影剖面

Fig. 2 Projecting section of the focus depth of micro-earthquake within Shenzhen fracture belt

1. 震源; 2. 深圳断裂带

速活动断层(>10 mm/a)、较高速活动断层(10~1 mm/a)、中速活动断层(1.0~0.1 mm/a)、低速活动断层(0.10~0.01 mm/a)、微速活动断层(<0.01 mm/a)。因此, 黄贝岭断层位移现今活动量级应属中速偏弱。它与日本福岛断层、中国北京八宝山断裂的活动量级大致相当。(3)现今构造应力场变化特征分析。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)和龙岗坪地(No. 6)进行了地应力测量^[1]; 1998 年又增加了龙华民乐(No. 2)和坪山松子坑(No. 7)两个测孔(表 1, 图 3)。综合分析实测数据, 研究区最大水平主压应力方向

表 1 深圳市输水工程附近实测地应力

Table 1 Results of geostress measurements near the diversion tunnel engineering

测点	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	
岩石类型	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	
测量方法	压磁电感法	压磁电感法	压磁电感法	水压致裂法	压磁电感法	压磁电感法	压磁电感法	
最大水平主压应力状态	方向 大小/MPa	NW299° 3.96	NW347° 0.93	NE71° 1.85	NW310° 4.71	NW312° 3.28	NW350° 2.58	NW287° 3.71
测量深度/m		7.2	2.4	23.5	89.4	8.7	12.0	6.7
测量高程/m		100	100	50	-10	100	55	75
最大水平主压应力梯度/(MPa·m ⁻¹)		0.55	0.39	0.08	0.05	0.38	0.22	0.55
最大剪切应力 τ _{max} /MPa		0.32	0.53	0.20	0.34	0.94	0.46	0.68



图 3 深圳市东水西调输水工程管线附近地应力测量孔位分布

Fig.3 Locations of geostress measurements near the diversion tunnel in Shenzhen

1.输水工程廊道地区;2.输水管线;3.主要断层;4.次级断层;5.地应力测孔位置及最大主压应力方向

表 2 深圳市输水工程三维数值模拟物性参数

Table 2 Parameters for three-dimensional tectonic stress field simulation around the diversion tunnel

岩石类型	E/GPa	μ	ρ/(g·cm ⁻³)
花岗岩(包括部分混合岩)	57	0.26	2.7
砂岩(J)	60	0.24	2.7
片岩	42	0.28	2.4
第三纪胶结差的砂岩	27	0.30	2.7
煤系	24	0.32	2.3
一级断层片理带	24	0.32	2.4
二级断裂和一级含角砾断层片理带	14	0.34	2.2
一级断裂	7	0.45	2.0



图 4 深圳断裂带现今三维构造应力场数值模拟模型(Y轴方向放大 5 倍)

Fig.4 Three-dimensional model for present tectonic stress field modeling around the diversion tunnel in Shenzhen

性分级,以及岩石类型、力学性质分区,参考本区实测岩石力学性质数据,选取三维模型的物性参数(表 2).NE 向一级主干断裂按实地产状输入模型,NW 向二级断裂按照直立产状输入类型.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:σ_{h,max} = 2.524 2 + 0.303 0 h (σ_{h,max}:最大水平主压应力,MPa;h:深度,m),为 NW326°方向加载;σ_{h,min} = 0.886 6 + 0.017 18 h (σ_{h,min}:最小水平

表 3 深圳断裂带主要断层与输水隧洞交汇部位现今活动速率

Table 3 Present rate of displacement of major faults of Shenzhen fracture belt at the intersections with the tunnel

主干断层与隧洞交汇部位 ¹	水平扭动 ² $v/(mm \cdot a^{-1})$	垂直扭动 ³ $v/(mm \cdot a^{-1})$
①与 ZD12	0.26	0.51
①与 D2	-0.27	0.78
②与 ZD10-3	0.63	0.77
③与 ZD5	-0.26	0.54
④与 ZD10-1	0.35	0.79
④与 ZD6	-0.39 ~ -0.80	-0.12 ~ -0.47
⑤与 ZD9	0.18	0.89

1. 参考图 1; 2. 断层上盘相对下盘水平扭动, 正值为反扭, 负值为顺扭; 3. 断层上盘相对下盘垂直扭动, 正值为下降, 负值为上升。

表 4 隧洞轴向(α)与最大水平主压应力($\sigma_{h, \max}$)方向夹角

Table 4 Angle enclosed between the maximum horizontal principal compressive stress direction and the tunnel axis

输水管线编号	α	$\sigma_{h, \max}$ 方向	夹角	其他因素
ZD1—ZD2	NE38°	NW282°	64°	明渠或箱涵
ZD2—ZD3	NW344°	NW274°	70°	
ZD3—ZD5	NE8°	NE49°	41°	
ZD5—ZD6	NE65°	NW287°	42°	
ZD6—ZD9	NE37°	NW304°	87°	第一段深埋隧洞
ZD9—ZD10	NE53°	NW344°	69°	
ZD10—ZD10-1	NE74°	NE44°	30°	
ZD10-1—ZD10-2	NW282°	NW322°	40°	第二段深埋隧洞
ZD10-2—ZD10-3	NE75°	NW303°	48°	
ZD10-3—ZD10-5	NE50°	NW307°	77°	渡槽
ZD10-5—ZD12	NE65°	NW308°	63°	渡槽
ZD12—ZD14	NW280°	NW279°	1°	渡槽
ZD14—ZD15	NW324°	NE18°	54°	
ZD15—ZD17	NE58°	NE18°	40°	倒虹吸
ZD17—ZD20	NW272°	NW294°	22°	第三段深埋隧洞
ZD20—ZD21	NW310°	NW299°	11°	第四段深埋隧洞
ZD21—ZD27	NW290°	NW296°	6°	渡槽及明渠

主压应力(MPa), 为 NE56°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, 压磁法测量深度大者对应较好, 浅者对应较差, 其原因在于与实测浅孔的深度并不一致.

3 输水隧洞不同地段现今构造活动性分析

通过实测地应力与断层位移数据分析, 配合现

今构造应力场有限元数值模拟计算, 定量计算深圳断裂带与输水隧洞交汇部位的现今活动量级范围、输水隧洞不同地段轴向与最大水平主压应力夹角, 推算四段深埋隧洞现今构造应力状态以及讨论主要断层内部的安全度, 为输水隧洞工程设计和地壳稳定性评价提供定量化数据.

(1) 深圳断裂带与输水隧洞交汇部位的现今活动量级范围. 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. 依据黄贝岭断层位移监测结果, 结合三维构造应力场模拟各节点相对位移大小, 可以分别计算深圳断裂带与输水隧洞交汇部位的现今活动量级范围. 断层倾向位移在 0.12~0.89 mm/a, 断层两盘水平相对扭动在 0.18~0.80 mm/a 量级范围(表 3): 表明研究区输水管线附近主要断裂总体属于中速活动断层.

(2) 输水隧洞不同地段轴向与最大水平主压应力夹角. 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、拐弯的部位局部出现 NE 向或近 SN 向, 输水隧洞不同地段轴向与最大水平主压应力夹角如表 4. 世界各国的地下隧洞工程建设经验一致认为: 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. 经过对隧洞轴向与最大水平主压应力方向之间夹角统计, 表明它们在不同地段的夹角存在着明显的变化, 半数地段二者交角小于 30°, 四分之一地段交角大于 60°, 后者对稳定性具有重大影响. 因此, 在选线阶段, 考虑二者交角大小具有重要意义.

(3) 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, 地面海拔标高 250~300 m, 隧洞埋深 220~250 m, 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, 根据三维模拟实验, 选择输水管线微倾斜面, 作为计算单元面, 可以计算该面上各隧洞部位的三维构造应力状态, 表 5 中给出了 4 处深埋隧洞地段现今三维构造应力状态.

(4) 主要断层内部的安全度^①. 从总体上看, 区内主要断层安全度大多属于安全状态或较安全状态, 个别地点处于剪切应力作用下的不安全状态, 例如部分断裂的端点处; 也有个别地点处于拉张应

①王仁, 孙苟英, 邢全友, 等. 京津唐地区应力场及地震危险区探讨. 北京市地震地质会战第七专题成果: 京津及华北地区现今应力场模拟分析. 1980. 17~36.

表 5 深圳市东水西调输水工程深埋隧洞地段三维构造应力状态

Table 5 Three-dimensional simulated tectonic stress states at four deep buried sectors of the diversion tunnel

	ZD6— ZD9	ZD10—1— ZD10—2	ZD19— ZD20	ZD20— ZD21
隧洞特征				
地面高程/m	300	250	250	270
底板高程/m	48	45	30	29
岩石类型	花岗岩	花岗岩	混合花岗岩 和砂岩	花岗岩
三维构造应力场模拟结果				
σ_{\max} /MPa	5.39	4.20	6.62	5.79
σ_{\max} 倾角	77°	86°	89°	89°
τ_{\max} /MPa	2.05	1.32	2.49	2.02
$E^*/(10^2 \text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	1.52	0.76	2.62	1.96
$\tau_{\text{h,max}}$ /MPa	0.83	0.15	0.38	0.12
$\sigma_{\text{h,max}}$ /MPa	2.37	1.86	2.38	1.98
$\sigma_{\text{h,max}}$ 方向	NW304°	NW322°	NW294°	NW299°
$\sigma_{\text{h,max}}$ 与 α 夹角	87°	40°	22°	11°

表中 E^* 指岩石形状改变比能。

力作用下的不安全状态,特别是部分 NE 向与 NW 向断层的交接部位,设计输水隧洞时,应该尽可能避开。

综上所述,输水管线不同地段现今构造活动性表现为中等速率;断层多属安全状态,仅个别地点处于不安全状态。

4 输水隧洞工程地壳稳定性分析

(1)输水隧洞工程地壳稳定性评价.在深圳断裂带现今构造活动性、三维构造应力场数值模拟以及输水隧洞不同地段现今构造应力状态变化规律等分析的基础上,结合地震危险性、岩土体稳定性、地面稳定性,以及水文地质条件等研究成果,运用模糊数学原理,对深圳市东水西调输水隧洞工程不同地段地壳稳定性进行评价^[9~12].评价结果表明西段(ZD27—ZD19)和北段(ZD5—ZD1)主要属于相对稳定区段和相对较稳定区段;中段(ZD19—ZD10—3)和东段(ZD10—3—ZD5)主要属于相对较不稳定区段,在相对较不稳定区段中出现部分相对不稳定地段.影响稳定状态的主要因素是断层内部构造岩属于不稳定岩体类型;其次为断层内部安全度属于强拉张不安全状态;而断层现今趋势位移速率则居于次要地位.少数地段地面稳定性较差,也影响了地壳稳定程度。

(2)输水管线清风岭设计方案与三洲田备用方案地壳稳定性对比讨论.由于输水管线在 ZD5—ZD8 地段近平行或斜穿炮台山主干断裂,出现不利

的工程地质环境,故水利设计单位提出备用对比方案——三洲田线路方案.设计方案与备用方案地壳稳定性对比讨论如下.(1)三洲田备用方案可以避免不良工程地质地段,但有以下 3 个问题:①绕行加长了输水管线长度;②管线通过海拔 526.8 m 的高山,增加了深埋应力地段的长度(约为 350 m),穿越廊道地区最大剪应力和能量高值区;③管线相距三洲田水库仅 200 m 左右,增加了石灰岩由于渗漏而造成隧洞大量涌水的危险性.(2)输水管线在 ZD5—ZD8 地段近平行或斜穿炮台山主干断裂,穿越薄层状变质片岩,属不良工程地段,但经过工程勘察,在清风岭和炮台山主干断裂之间可以找到宽约 100 m 左右的完整片岩.因此,经过工程合理选线,可在相对不稳定或较不稳定的岩体中选择线路进行隧洞掘进。

5 结论及建议

(1)结论.①深圳断裂带主要断层与输水隧洞交汇部位的现今最大活动速率属于中速活动量级,活动速率小于 1 mm/a,50 a 断层累计位移量小于 20~40 mm.②输水隧洞轴向与最大水平主压应力方向的夹角,有半数地段小于 30°,1/4 地段大于 60°.③输水管线的 4 个深埋隧洞地段,最大水平剪切应力小于 1 MPa,三维最大剪切应力小于 2.5 MPa.隧洞轴向与最大水平主压应力方向交角分别为:87°,40°,22°和 11°.④深圳市东水西调输水工程地壳稳定性评价中,大多数地段属相对稳定、相对较稳定等级,少数地段属于相对较不稳定等级,其中个别地段属于相对不稳定等级,并大多集中在 NE—NEE 向一级主干断裂带和北向西二级断裂交汇部位附近。

(2)建议.①当隧洞穿越主干断裂时,依据断层 50 a 累计位移量小于 40 mm 的量级,对输水管道采取有效防护措施.如在钢筋水泥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孔地应力测量,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.⑤如果采用清风岭设计方案,应在清风岭和炮台山主干断裂之间寻找较为完整的局部片岩

地段作为隧洞掘进线路,宜横穿清风岭或炮台山主干断裂,避免平行主干断裂掘进,可以改善隧洞工程岩体稳定性.而采用三洲田备用方案,应加强隧洞穿越覆盖岩溶地段的工程地质勘察工作,特别是三洲田水库对隧洞可能造成的涌水及其灾害.

参考文献:

- [1] 地质矿产部《深圳市区域稳定性评价》编写组. 深圳市区域稳定性评价[M]. 北京:地质出版社,1991.
- [2] 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.
- [3] 胡海涛,易明初,向祖廷,等. 广东核电站规划选址区域稳定性分析与评价[M]. 北京:档案出版社,1988.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] Ranajit G, Yoshioka S, Oike K. Three-dimensional numerical simulation of the subduction dynamics in the Sunda Arc region, Southeast Asia [J]. Tectonophysics, 1990, 181(1~4): 223~255.
- [9] 孙叶,谭成轩,李开善,等. 区域地壳稳定性定量化评价[M]. 北京:地质出版社,1999.
- [10] 孙叶,谭成轩,杨贵生,等. 中国区域地壳稳定性定量化评价与分区[J]. 地质力学学报,1997,3(3): 42~52.
- [11] Chen Q X, Hu H T, Sun Y, et al. Assessment of regional crustal stability and its application to engineering geology in China [J]. Episodes, 1996, 18(1, 2): 69~72.
- [12] Tan C X, Sun Y, Wang R J, et al. Assessment and zonation of regional crustal stability in and around the dam region of the Three Gorges Project on the Yangtze River [J]. Environmental Geology, 1997, 32(4): 285~295.

PRESENT-DAY STRUCTURAL ACTIVITY OF SHENZHEN FRACTURE ZONE AND ITS EFFECT ON CRUSTAL STABILITY OF WATER DIVERSION TUNNEL IN SHENZHEN

Tan Chengxuan¹ Wang Ruijiang² Sun Ye²

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Urban and Engineering Site Stability Assessment Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Yanjiao 056201, China)

Abstract: This paper presents the analysis of the present-day structural activity of the Shenzhen fracture zone in terms of the micro-seismicity, fault displacement monitoring and present-day crustal stress measurements. A numerical simulation of the present-day three-dimensional tectonic stress field was then used to make a quantitative calculation of the present-day activity magnitude range at the intersection between the Shenzhen fault zone and the water diversion tunnel, and the included angle between the axial orientations in different parts of the water diversion tunnel and the maximum horizontal principal compressive stress, and to infer the present-day structural stress state of the deeply-buried sectors of the water diversion tunnel. The research results both in seismic activities and risks and in rock and soil stability can be used by means of fuzzy mathematics to assess the crustal stability of the water diversion tunnel project, providing a basis for the engineering designing and construction.

Key words: Shenzhen fracture zone; structural activity; three-dimensional structural stress field; water diversion tunnel engineering; crustal stability.