

双洞交叉段三维有限元稳定性分析

冯旭¹, 张升堂²

(1 杨凌职业技术学院 水利工程系, 陕西 杨凌 712100; 2 山东科技大学 地球信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

【摘要】 【目的】针对某水电站工程排沙洞与施工支洞双洞交叉、交叉段结构复杂、洞室跨度大、且拱顶有软弱夹层、利用常规方法无法对其稳定性进行准确分析的现状, 寻求一种更准确的分析方法, 以指导工程施工。【方法】利用三维有限元方法对施工过程进行跟踪分析, 对比不同开挖方案下交叉段围岩的稳定性, 并对施工期支护进行了方案设计。【结果】经过对不同施工方案的三维有限元稳定性分析, 确定了在排沙洞开挖到施工支洞时, 先以短进尺方式开挖施工支洞, 并浇筑 0.8 m 厚混凝土衬砌, 以限制软弱夹层变形, 减小塑性区和交叉处拱顶拉应力的施工方案。【结论】三维有限元方法在双洞交叉段, 能监控确认支护的效果、施工方法是否妥善等, 从而及时调整施工方法和修正技术参数, 使施工方法和技术更为合理、经济。

【关键词】 地下隧洞; 双洞交叉开挖; 围岩稳定性; 三维有限元

【中图分类号】 U455.4

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)04-0199-07

3D finite element analysis and design of the intersection part of two tunnels

FENG Xu¹, ZHANG Sheng-tang²

(1 Department of Hydraulic Engineering, Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 College of Geo-Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: 【Objective】 Due to complex structure of the intesecting pant, carge span of the tunnel and a soft stratum across the top of the intersecting trnnel, the stability of the surrounding rock can't be analysed accurately by the conventional method. It is necessary to find out a more accurate method to guide construction. So the research is presented. 【Method】 The 3D FEM which tracks construction process is taken to study the stresses and deformations distribution and the stability of the surrounding rocks affected by different excavating projects. And the support measures were planned. 【Result】 A construction project is made certain after accurately analysing the stability of surrounding rock under the condition of different excavating projects by the 3D FEM. The project instructs excavating the adit firstly at the intersection part by the method of short-range, and casting concrete 0.8 m as lining in order to prevent the deformations of the soft stratum and decrease the tension and plastic zone on the top of the intersection part arch. 【Conclusion】 The results indicate that the 3D FEM can inspect the effect of support and show whether the construction project is proper or not. This makes the modulating of the project in time and modifying the technical parameters coefficients possible and the construction method and technology reason able and economical.

Key words: underground tunnels; excavating the intersection part; the stability of surrounding rocks;

* [收稿日期] 2007-04-06
[基金项目] 陕西省水利科技计划项目(2003SK-12)
[作者简介] 冯旭(1969—), 男, 陕西丹凤人, 讲师, 主要从事水工建筑设计和工程施工技术研究。

3D FEM

地下工程中双隧洞交叉段结构复杂,洞室跨度大,三维作用明显,用常规方法无法对其稳定性进行准确分析。虽然文献[1-3]就软弱夹层对单洞围岩稳定性的影响建立了层状岩体的本构关系和计算模型;文献[4-6]对叉洞的稳定性进行了研究分析,提出了相应的施工、支护设计方案,但由于不同工程的地质状况及在交叉段的布置、建筑目的要求上有较大差异,因此,应对具体工程有针对性地进行分析和研究。本研究针对某水电站工程排沙洞(兼作交通洞)与施工支洞交叉段稳定性和支护设计进行了三维有限元分析,跟踪模拟了施工过程,分析了围岩的应力和变形,并对不同开挖和支护方案进行了比较,

探讨了检查段不同施工方式下的稳定性,以期为类似工程提供参考。

1 工程概况及开挖方案

1.1 工程概况

该工程岩性为紫红色砾岩夹条带状中细砂岩,岩层呈层状分布,与水平夹角 15°,上覆岩体厚度 70 m,软弱夹层发育。交叉段由施工支洞和排沙洞组成,洞径均为 11.2 m,在洞顶上方 10 m 处有一厚 2~5 cm 的软弱夹层。交叉段布置见图 1(a)所示,地质分布见图 1(b)所示。

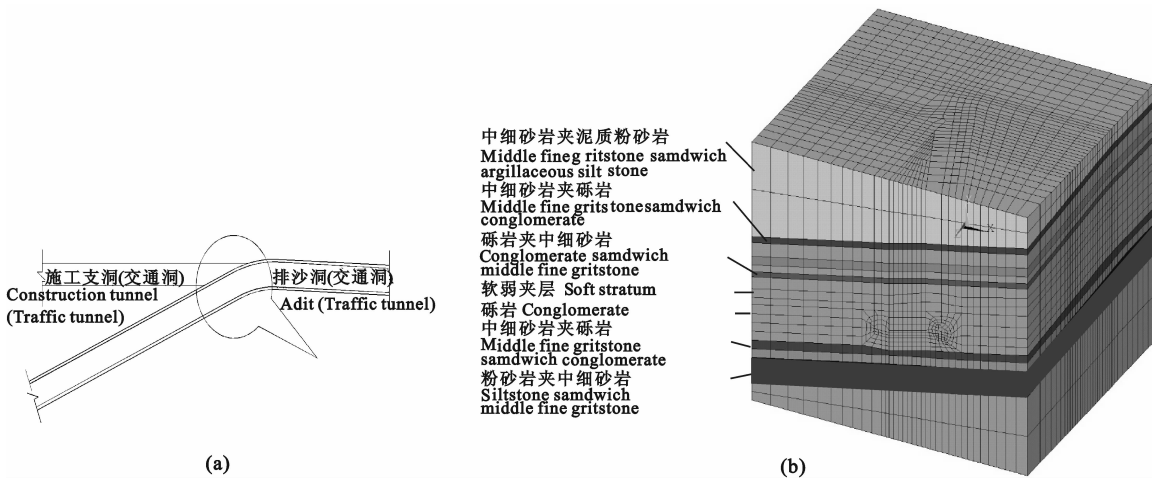


图 1 有限元三维网格图
(a). 隧洞布置示意图;(b). 地质剖面及有限元三维网格图
Fig. 1 3D finite element grid cells
(a). Tunnel layout sketch;(b). Geological profile and 3D finite element grid cells

1.2 开挖方案

开挖方案 I:排沙洞先由下游向上游全断面开挖,距掌子面 2.0 倍洞径时进行喷锚支护,喷层为厚 10 cm 标号 C20 混凝土,锚杆为直径 $\Phi 28$,间距 2 m $\times$ 2 m,长度 $L=4$ m/7 m 的钢筋。排沙洞开挖完毕后,全断面一次开挖施工支洞,距掌子面 1.5 倍洞径时进行喷锚支护(仅限交叉处),喷层为厚 10 cm 标号 C20 混凝土,锚杆为直径 $\Phi 28$,间距 2 m $\times$ 2 m,长度 $L=3.5$ m/7 m 的钢筋。

开挖方案 II:排沙洞由下游向上游全断面开挖,支护同上,开挖到施工支洞位置时,先全断面一次开挖施工支洞,支护同上,施工支洞开挖完毕后再继续全断面开挖排沙洞。

2 数值分析模型

采用六面体 20 节点高精度实体单元模拟围岩,围岩的本构关系采用 Drucker-Prager 准则,如图 1(b)所示。按弹性考虑,采用四边形 8 节点高精度壳单元模拟喷层,如图 2。用很薄的一层实体单元同时赋予一相关参数来模拟软弱夹层,开挖单元如图 3 所示。采用等效的方法模拟锚杆,即提高锚杆加固区的单元强度参数 c ,以模拟锚杆的加固作用,通常按提高 20%~30%^[7-8]考虑,本工程按提高 20%进行计算,图 4 即是采用等效方法模拟的锚杆加固区域。初始应力场按自重应力考虑。围岩的物理力学参数见表 1。

采用 ANSYS 大型有限元分析系统,用生死单

元技术模拟开挖,在交叉段前后及交叉段严格按 3 m 每进尺进行开挖模拟,模拟排沙洞和施工支洞开挖的支护时机是距掌子面 18~21 m 时进行喷锚支

护,交叉段的支护时机是距施工支洞掌子面 12 m 时进行喷锚支护,即在距掌子面 2 倍洞径时提高强度参数 c ,并将壳单元激活以模拟喷层。

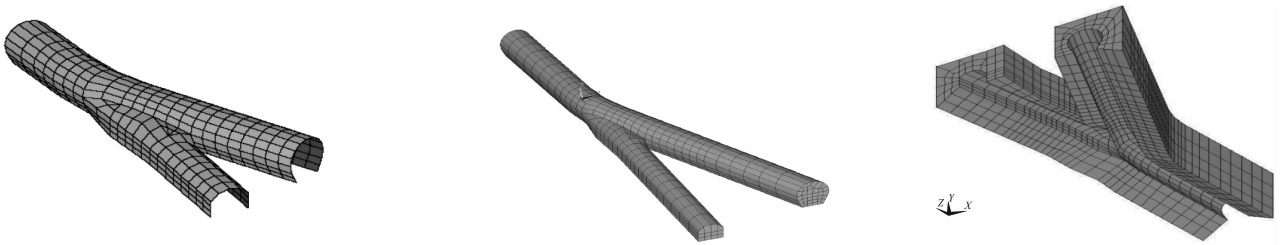


图 2 模拟喷层的壳单元
Fig. 2 The elements for excavated

图 3 实体开挖单元
Fig. 3 The shell element for entity shotconcrete

图 4 等效模拟锚杆加固的区域
Fig. 4 The equivalent strengthened region for simulating bolts

表 1 围岩的物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

序号 Serial number	岩性 Lithologic characters	围岩类别 Surrounding rock types	变形模量 (E)/GPa Deformation modulus	泊松比(μ) Poisson's ratio	凝聚力 (C)/MPa Cohesion	摩擦角 (Φ)/° Friction angle	重度(γ)/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) Unit weight
1	砾岩 Conglomerate	Ⅲ	5.0	0.30	0.5	35.0	25.0
2	砾岩夹中细砂岩 Conglomerate sandwich middle fine gritstone	Ⅲ	5.5	0.30	0.5	36.0	25.0
3	粉砂岩夹中细砂岩 Siltstone sandwich middle fine gritstone	Ⅲ	6.5	0.25	0.7	39.0	25.0
4	中细砂岩夹砾岩 Middle fine gritstone sandwich conglomerate	Ⅲ	6.0	0.28	0.6	38.0	25.0
5	中细砂岩夹泥质粉砂岩 Middle fine gritstone sandwich argillaceous sandstone	Ⅲ	4.5	0.32	0.5	34.0	25.0
6	软弱夹层 Soft stratum	Ⅲ	4.3	0.31	0.1	10.0	25.0

3 结果与分析

3.1 围岩应力

从图 5~7 可以看出,交叉段开挖完后在底角部位略有应力集中现象,在整个排沙洞的左拱肩上方和施工支洞拱顶上方,部位大主应力 σ_1 有拉应力产

生,方案 I 最大拉应力约为 0.3 MPa,且分布范围较大;而方案 II 中的最大拉应力不超过 0.1 MPa,且分布范围远小于方案 I [9]。除此之外,其他部位围岩为受压状态,在原马蹄形开挖轮廓的右边墙部位和施工支洞的底角压应力最大,最大压应力值为 5.5 MPa。

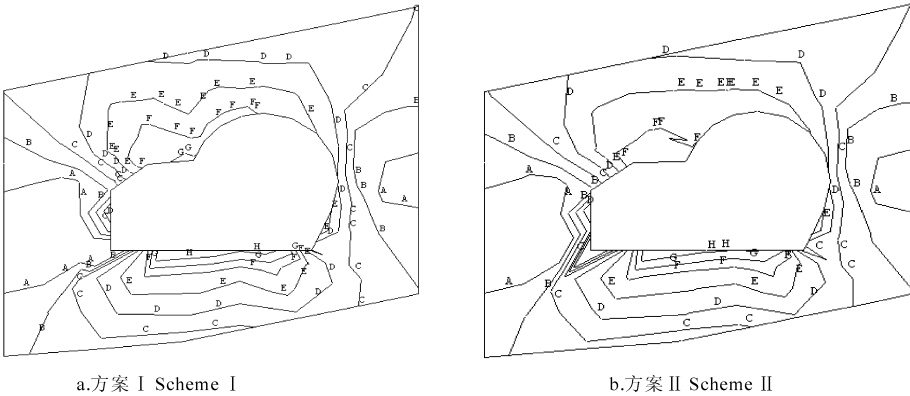


图 5 不同开挖方案时最大跨度剖面中大主应力 σ_1 等值线图(拉力为正,压力为负)
A. -1 000 kPa; B. -785.741 kPa; C. -571.429 kPa; D. -357.143 kPa; E. -142.857 kPa; F. 71.429 kPa; G. 285.741 kPa; H. 500 kPa

Fig. 5 Max principal stress of the section with the max span (tension positive and pressure negative)

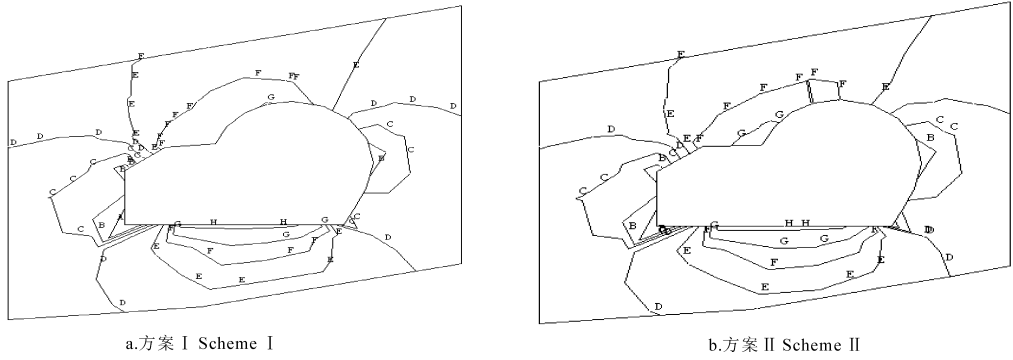


图 6 不同开挖方案时最大跨度剖面中主应力 σ_2 等值线图(拉力为正,压力为负)

A. -1 900 kPa; B. -1 600 kPa; C. -1 300 kPa; D. -1 000 kPa; E. -700 kPa; F. -400 kPa; G. -100 kPa; H. -200 kPa

Fig. 6 The middle principal stress of the section with the max span (tension positive and pressure negative)

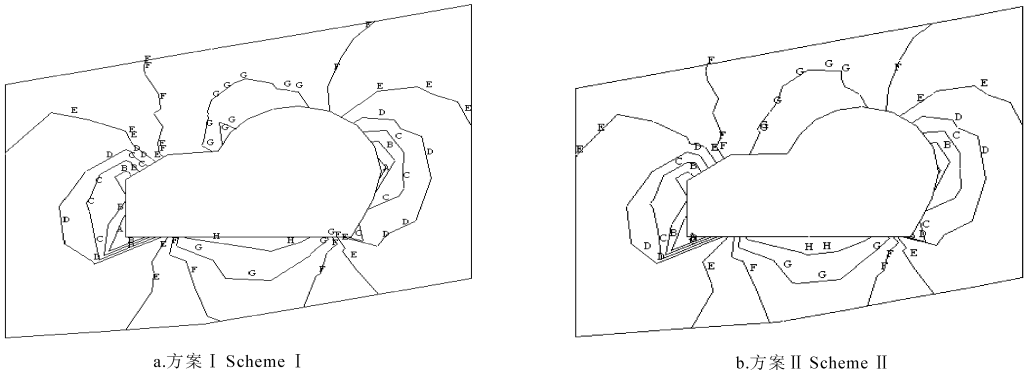


图 7 不同开挖方案时最大跨度剖面中小主应力 σ_3 等值线图(拉力为正,压力为负)

A. -5 500 kPa; B. -4 743 kPa; C. -3 986 kPa; D. -3 229 kPa; E. -2 471 kPa; F. -1 714 kPa; G. -957.143 kPa; H. -200 kPa

Fig. 7 The minimum principal stress of the section with the max span (tension positive and pressure negative)

对于排沙洞而言,E点处于排沙洞的边墙,对于施工洞则处于拱顶。在方案I中,当施工支洞开挖穿过掌子面时,洞壁围岩的应力又有较大调整,洞室跨度增大,应力调整幅度增大,E点的应力调整幅度较大,该处洞壁围岩最大拉应力为0.5 MPa;由掌子面再向前推进,主应力曲线趋于平缓,如图8(a)所示。

在方案II中,当施工支洞开挖穿过掌子面时,应力迅速调整,有不到0.1 MPa的拉应力产生,当排沙洞的开挖穿过掌子面时,应力也有较大调整,该处洞壁围岩拉应力增加至0.25 MPa(图8(b))。两方案比较,方案II的最大拉应力较小^[10]。从围岩应力分析来看,方案II较优。

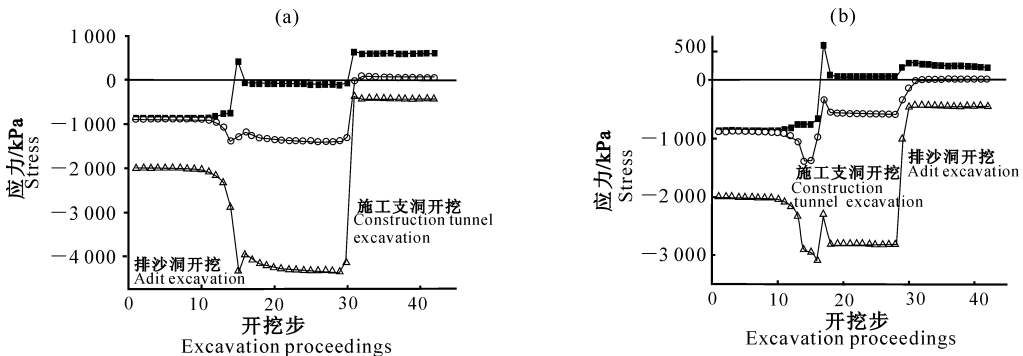


图 8 不同开挖方案时交叉段相交线上关键点 E 处的主应力随开挖步的变化曲线

a. 方案 I; b. 方案 II; —■—. 大主应力 σ_1 ; -○-. 中主应力 σ_2 ; -△-. 小主应力 σ_3

Fig. 8 The principal stress of key point E varied with the excavation proceedings

a. Scheme I; b. Scheme II; —■—. Great principal stress σ_1 ; -○-. Moderate principal stress σ_2 ; -△-. Little principal stress σ_3

3.2 围岩塑性区

图 9 是两个开挖方案跨度最大值剖面的塑性区图,塑性区分布在隧洞两侧 1.5~2 m 内,在施工支

洞的顶部分布有 3~4 m 的塑性区。对比图 9(a)和 9(b)可以看出,先开挖施工支洞,拱顶塑性区相对减小^[11]。可见方案 II 较好。

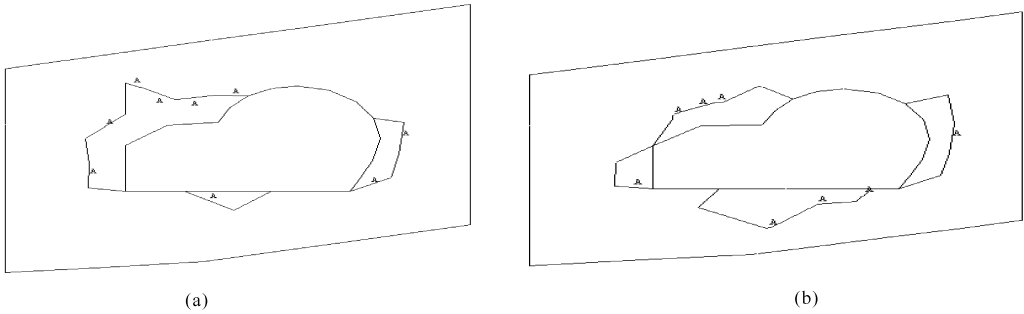


图 9 不同开挖方案时最大跨度剖面的塑性区示意图
(a). 方案 I ;(b). 方案 II
Fig. 9 Plastic region of the section with the max span
(a). Scheme I ;(b). Scheme II

3.3 围岩变形

为了跟踪观测围岩变形,如图 10 对交叉段围岩标定了 9 个观测点。9 个关键点均位于交叉段的拱顶。其中,A、B、C 3 点位于排沙洞的拱顶,D、E、F 3 点位于施工支洞与排沙洞的交线上,G、H、I 3 点位于施工支洞拱顶^[12]。图 11 是排沙洞与施工支洞交叉段拱顶各关键点随开挖步 Y 方向(竖直方向)的变形值,从图 11 可以看出,方案 I 施工支洞在开挖时,Y 方向位移变化较大,而且基本属于突变,对施工极为不利;方案 II 排沙洞在开挖时,Y 方向位移变化比较均匀,后期基本属于施工支洞开挖时位移的微量延续,这种位移在施工中容易控制。通过对变形曲线的比较可以看出,方案 II 中除 E 点较方案 I

略大外,其余各点的变形均较方案 I 小。因此,还是方案 II 较优。

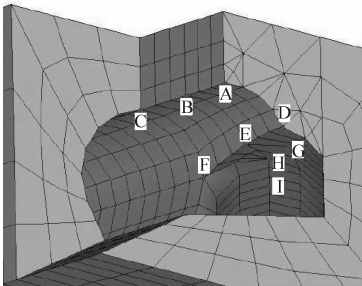


图 10 交叉段拱顶部位关键点示意图
Fig. 10 View of key points on the vault of intersecting part

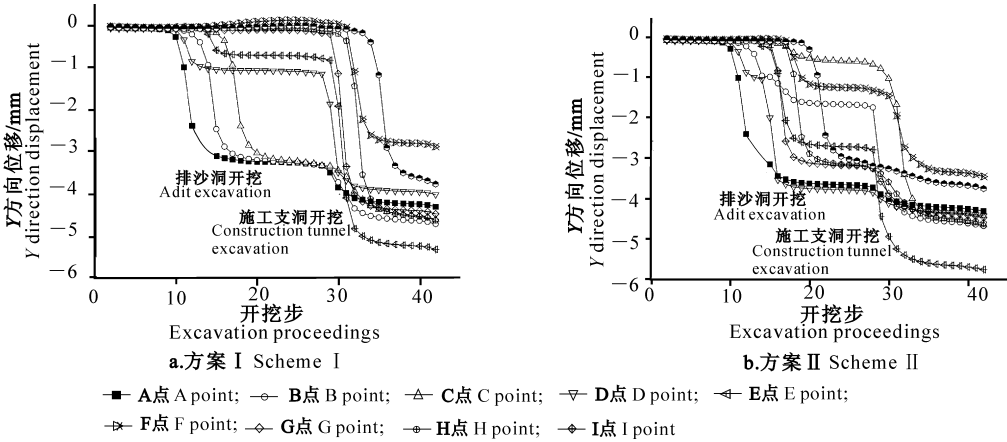


图 11 交叉段拱顶各关键点随开挖步的 Y 方向(竖直方向)变形曲线
Fig. 11 Deformation curves of the key points varied with the excavation proceedings

3.4 喷层应力

交叉段排沙洞的拱顶至左边墙喷层的大主应力

可近似看成喷层的截面应力^[13]。从图 12(a)可以看出,方案 I 施工支洞开挖完后,该部位的喷层受拉,

经计算,随洞室跨度的增加,该处的喷层拉应力从 1 MPa 增加到 3.5 MPa,但随着施工支洞和排沙洞的分开及施工支洞和排沙洞之间岩柱的出现,该部位的喷层拉应力又从 3.5 MPa 降至 1 MPa,两条隧洞分开变成单洞开挖后,在排沙洞拱顶和施工支洞拱

顶的局部喷层有少许不超过 0.5 MPa 的拉应力。施工支洞的开挖对排沙洞的左侧影响较大,在交叉段洞室的跨度增加,喷层的拉应力大,并且洞室顶部围岩处于受拉状态。

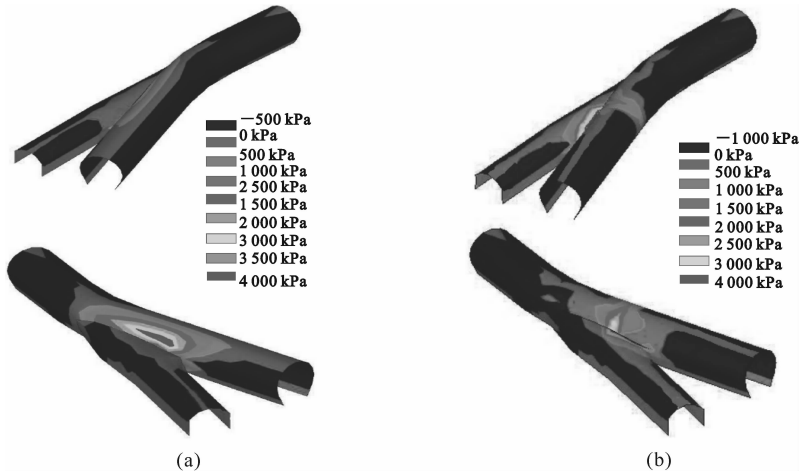


图 12 喷层壳单元大主应力 σ_1 云图

a. 方案 I; b. 方案 II

Fig. 12 Max principal stress of shell element

a. Scheme I; b. Scheme II

从图 12(b)可以看出,方案 II 开挖完成后,施工支洞顶拱沿交线喷层出现了拉应力,且该部位的喷层拉应力最大。经计算,随洞室跨度的增加,该处的喷层拉应力从 0.5 MPa 增加到 3.0 MPa,但随着施工支洞和排沙洞的分开及施工支洞和排沙洞之间岩柱的出现,该部位的喷层拉应力又从 3.0 MPa 降至 0.5 MPa。

两方案相比,方案 II 喷层受拉的分布范围发生变化,但其范围和量值均减小,在排沙洞顶拱向靠近交叉线一侧,喷层的受拉范围较开挖方案 I 减小了近一半,在交叉段排沙洞右拱肩喷层出现拉应力,但最大拉应力不超过 1.5 MPa。因此,方案 II 相对较优。

4 支护设计

综上所述,开挖方案 II 优于开挖方案 I,排沙洞和施工支洞交叉处的开挖,应先开挖施工支洞再开挖排沙洞。但从上面的分析结果可以看出,由于围岩近水平层状分布,且距排沙洞洞顶 10 m 有一软弱夹层,本身跨度增加对近水平层状分布岩体的稳定极为不利。排沙洞开挖完成后再开挖施工支洞,开挖的洞室形状所形成的空间走向与软弱夹层平行,对层状分布岩体的稳定不利,在排沙洞快要开挖到施工支洞时,先开挖施工支洞,以短进尺方式开挖施

工支洞,洞口形成喷锚支护后浇筑 0.8 m 厚混凝土衬砌,待达到一定强度后,再向前开挖,进尺后再浇筑 0.8 m 厚混凝土衬砌,直到施工支洞锁口段 1.5 倍施工支洞洞径的长度都有混凝土衬砌后,再以正常方式开挖,这样可限制因施工支洞开挖引起的软弱夹层张开变形,同时可减小交叉处洞室拱顶的拉应力和塑性区。排沙洞喷层截面拉压应力均超过了喷射混凝土的设计值,在交叉段洞室拱顶改喷射聚丙烯混凝土并挂网,有助于荷载向深部围岩传递。

5 结 论

(1)在本研究涉及的施工条件下,对比了两种不同的开挖方案,结果表明,拱顶的围岩变形相近,但按开挖方案 II 施工时,拱顶围岩的拉应力、围岩塑性区和喷层的应力均较开挖方案 I 小,可见开挖方案 II 优于开挖方案 I。

(2)由于洞体交叉处施工时围岩将受到多次扰动,洞体交叉部位受力结构复杂,施工支洞锁口段的混凝土衬砌,可有效减少交叉段洞室拱顶的变形和拱顶围岩的拉应力,所设计的施工期支护方案合理可行,可满足施工期稳定性的要求。

(3)施工过程 and 支护手段对交叉洞室开挖的稳定性影响很大,尤其在有软弱夹层存在的条件下影响更大。在施工过程中,要借助现场量测以及时反

馈指导设计和施工,要根据地质及施工中的监控量测情况确认支护的效果、施工方法是否妥善等,从而视具体情况及时调整施工方法,并对支护参数进行合理修正,以获得更为合理、经济的支护效果。

[参考文献]

[1] 张天军,李云鹏. 顺层围岩地下洞室的粘弹性稳定[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(4):55-58.
Zhang T J, Li Y P. Viscoelastic stability of cavity bedding wall rock [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 55-58. (in Chinese)

[2] 王祥秋,杨林德,高文华. 含软弱夹层层状围岩地下洞室平面非线性有限元分析 [J]. 岩土工程学报,2002,24(6):729-732.
Wang X Q, Yang L D, Gao W H. 2-D nonlinear FEM analysis for underground openings located in the layered rock mass with softening joints [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 729-732. (in Chinese)

[3] 李树森,符文熹,聂德新. 洞室顶部软弱夹层和层状岩体的稳定性分析 [J]. 山地学报,2000,18(2):156-160.
Li S S, Fu W X, Nie D X. The stability analysis on weak intercalation and stratified rock mass near the top of underground cavity [J]. Journal of Mountain Research, 2000, 18(2): 156-160. (in Chinese)

[4] 盛超,姜立刚,迟晓明. 白山抽水蓄能泵站进厂交通洞交叉段施工 [J]. 东北水利水电,2003,21(9):29-30.
Sheng C, Jiang L G, Chi X M. Construction of access tunnel crossing reach in Baishan pumped storage pumping station [J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 2003, 21(9): 29-30. (in Chinese)

[5] 杨林德,邓涛,陈海军. 龙滩水电站地下厂房主支洞交叉处稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报,2005,1(5):679-684.
Yang L D, Deng T, Chen H J. Stability of rockmass between main tunnel and sub-tunnels of underground power houses at Longtan Hydro-power station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 679-684. (in Chinese)

[6] 马栋,黄立新. 铁路长大隧道斜井与正洞交叉段软弱层状围岩开挖支护施工方法浅析 [J]. 现代隧道技术,1999,3(5):23-27.
Ma D, Hang L X. An elementary introduction to soft layered surrounding rock support at the intersection of inclined shaft and main tunnel in Large Railway Tunnel [J]. Modern Tunnel-

ling Technology, 1999, 3(5): 23-27. (in Chinese)

[7] 陈卫忠,朱维申,李术才. 水布垭大型地下厂房施工顺序和锚固参数优化分析研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1623-1628.
Chen W Z, Zhu W S, Li S C. Optimization of the construction sequence and anchoring parameters in the large underground cavern excavation of Shuibuya Project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1623-1628. (in Chinese)

[8] 张西前,万良勇,李宁. 双洞交叉的施工稳定性分析及支护设计 [J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(11):1627-1632.
Zhang X Q, Wan L Y, Li N. Stability analysis and design considerations for the Intersection opening of two tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1627-1632. (in Chinese)

[9] 张志强,李宁,徐彬. 大规模引水隧洞群施工方案三维有限元分析 [J]. 水力发电学报,2004,23(6):83-87.
Zhang Z Q, Li N, Xu B. 3-D FEM analysis for excavation sequence of large scale power tunnels [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(6): 83-87. (in Chinese)

[10] 肖明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析 [J]. 岩土工程学报,2000,22(4):421-425.
Xiao M. Three-dimensional numerical model of construction process for underground opening [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 421-425. (in Chinese)

[11] 杨明举,常晓东. 超大型地下洞室群施工开挖程序及围岩稳定性分析 [J]. 西南交通大学学报:自然科学版,2000,35(1):32-35.
Yang M J, Chang S D. The excavation procedure of super-large underground chambers and the surrounding rock stability [J]. Journal of Southwest Jiaotong University: Natural Science Edition, 2000, 35(1): 32-35. (in Chinese)

[12] 金丰年,钱七虎. 隧洞开挖的三维有限元计算 [J]. 岩石力学与工程学报,1996,15(3):193-199.
Jin F N, Qian Q H. Simulation of three dimensional tunnel excavations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 193-199. (in Chinese)

[13] 杨典森,陈卫忠,杨为民. 龙滩地下洞室群围岩稳定性分析 [J]. 岩土力学,2004,25(3):391-395.
Yang D S, Chen W Z, Yang W M. Stability analysis of surrounding rock mass of Longtan underground caverns [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 391-395. (in Chinese)