

钢筋混凝土岔管结构优化

程 丹, 苏 凯, 石怡安

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:针对钢筋混凝土岔管锐角区围岩稳定性和衬砌结构受力情况复杂的问题,结合某抽水蓄能电站工程实例,建立了引水钢筋混凝土岔管三维数值模型,并对岔管锐角区进行修圆处理。采用有限单元法,对比分析了不同修圆半径下的围岩稳定性及衬砌结构的应力和变形。计算结果表明:与修圆前相比,施工期塑性区范围增加,围岩的塑性区集中程度减缓,但岔管分岔处跨度增大,围岩变形略有增加;运行期岔管的应力集中程度减缓,钢筋应力集中程度也有所减小,应力分布更加均匀;检修期岔管衬砌主要承受压应力,适当的修圆处理减缓了局部压应力集中程度,对变形影响不大;在外围围岩稳定的基础上尽量减少开挖,选择适当的修圆半径,有利于围岩的稳定和衬砌结构的受力。

关键词:钢筋混凝土岔管;围岩稳定;衬砌结构;结构优化;有限单元法

中图分类号:TV554⁺.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)01-0089-06

Structure optimization on reinforced concrete bifurcation//CHENG Dan, SU Kai, SHI Yian (*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: Surrounding rock stability and lining structure stress in acute angle region of reinforced concrete bifurcation is complex. Based on the practice of a certain pumped-storage power station, three-dimensional numerical model of the diversion bifurcation is proposed and the acute angle of bifurcation is optimized. By using finite element method (FEM) comparative analysis of stress and deformation of lining structure as well as the surrounding rock stability before and after optimization of different round radius have been performed. Numerical results show that after optimization, the range of plastic zone increases during construction period and the plastic concentration of surrounding rock slows down while the deformation of surrounding rock increases slightly because span at bifurcation point increases. The stress concentration of bifurcation and rebar reduce during operation period, thus the stress distributes more uniform. The bifurcation lining mainly endures compressive stress during overhaul period and the degree of local compressive stress concentration reduces with proper optimization, which has little effect on deformation. Thus, if surrounding rock is stable, one should reduce excavation and choose proper round radius, which is conducive to surrounding rock stability and lining structure stress.

Key words: reinforced concrete bifurcation; surrounding rock stability; lining structure; structure optimization; finite element method (FEM)

随着高水头电站以及抽水蓄能电站的大量兴建,为降低工程造价,减小土石方的开挖,常采用联合供水和分组供水的方案,这样就需要采用洞径较大的发电引水隧洞和分岔管。由于岔管位于压力管道的末端并靠近厂房,内水压力较大,传统的钢板衬砌结构在施工中存在洞内运输、拼接、焊接等方面难题,且用钢量较大,为降低工程造价及施工难度,实际工程中产生了钢筋混凝土衬砌结构这一需求。钢筋混凝土岔管的体型、荷载、边界以及围岩联合承载的机理极其复杂,传统的结构力学法因其计算条件

和计算方法不完善,无法准确描述结构的变形和受力特征^[1-2]。文献[1-9]采用有限单元数值计算法对钢筋混凝土岔管围岩稳定及岔管结构进行分析,指出围岩开挖后塑性区主要位于主洞、岔洞交叉处,由于隧洞体型连续性遭到破坏,塑性区开展深度较大^[9],是施工中洞室成形难度较大的部位,除了对这些部位及时喷锚支护外,同时建议对岔管处尖角以及主管与支管转折处进行修圆处理^[3,8]。肖明等^[10-11]对钢筋混凝土岔管进行了优化分析,指出岔角结构修圆处理对岔角处的应力集中有较大影响,

基金项目:国家自然科学基金(51179140)

作者简介:程丹(1989—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事水电站压力管道和地下工程研究。E-mail:chengdan@whu.edu.cn

通信作者:苏凯(1977—),男(回族),河南淮阳人,副教授,主要从事水电站压力管道和地下工程研究。E-mail:suker8044@163.com

能有效地缓解应力集中现象,但以上研究均未对修圆处理前后的围岩稳定性和衬砌结构安全进行系统的对比分析。本文应用 Ansys 前处理模块,建立了钢筋混凝土岔管数值模型,并对钢筋混凝土岔管衬砌锐角区进行修圆处理,采用有限单元法开展了围岩稳定性及衬砌结构应力变形的计算分析,系统地分析了锐角区不同半径修圆处理对围岩稳定及岔管衬砌结构受力的影响。

1 工程概况

某抽水蓄能电站装机容量 2 400 MW,安装 6 台单机容量为 400 MW 的水泵水轮机组,引水系统采用一洞三机供水方式,主管直径 5.5 m,支管直径 3.0 m。引水岔管段围岩大部分为Ⅱ类,局部为Ⅲ类。钢筋混凝土岔管设计采用主、支管圆弧的最低点置于同一水平面上,岔管段衬砌厚度为 1 m,主管与支管段衬砌混凝土厚度为 0.6 m,外表面锐角修圆半径分别采用 1 m 和 2 m 两种情况(外表面锐角修圆半径是指岔管锐角区衬砌外表面腰部圆弧半径),分别对应修圆 1 和修圆 2,引水岔管结构图见图 1。

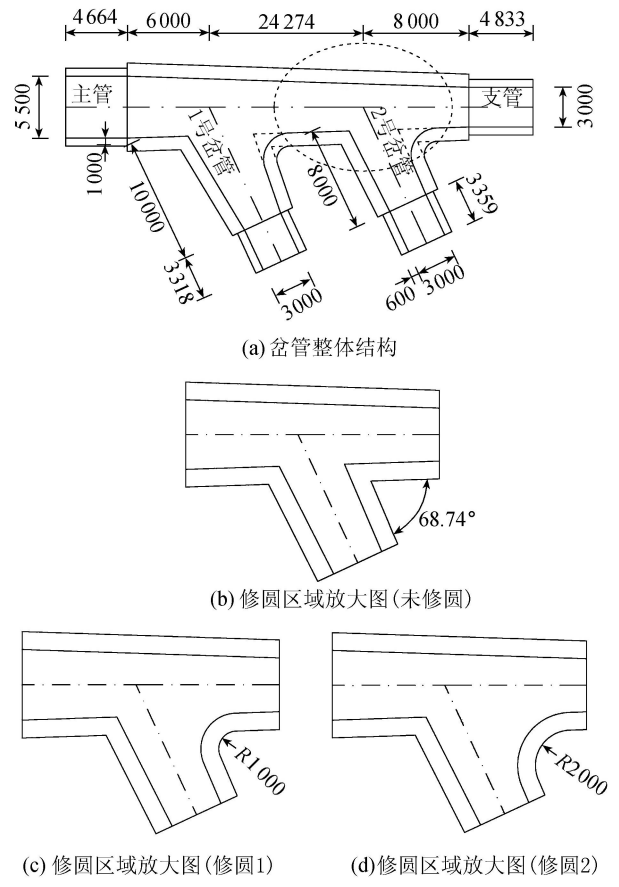


图 1 岔管结构示意图(单位:mm)

根据岔管结构尺寸建立了三维有限元模型,模型的顶部、底部及两侧围岩均取 5 倍以上的引水主管直径,整体模型计算范围和修圆后的引水岔管衬

砌网格及局部放大图见图 2。引水岔管处完整围岩力学参数按Ⅱ₂类围岩选用,各材料参数见表 1 和表 2。采用笛卡儿直角坐标系,其整体坐标系的 x 轴与主管管道的轴线一致,以指向下游为正;铅直方向为 z 轴,以向上为正, y 轴以右手法则确定。引水岔管坐标原点位于 1 号岔管分岔点上游 6 m 管道中心处。模型左右两侧、上下游侧和底部施加法向位移约束,顶部为自由面。岔管结构上的荷载包括衬砌自重、内水压力、外水压力。

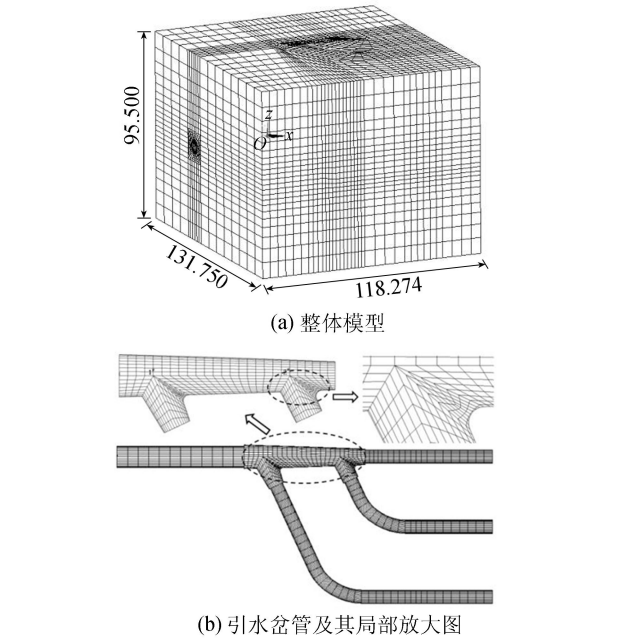


图 2 引水岔管网格(单位:m)

表 1 岩体材料物理力学参数

围岩类别	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	变形模量/ GPa	泊松比	摩擦 因数	黏聚力/ MPa
Ⅱ ₂	2.65	15~22	10~15	0.23	1.1	1.2
Ⅲ ₁	2.68	15~18	8~10	0.25	1.0	1.0

表 2 衬砌材料力学参数

材 料	等级	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松比	抗压强度 设计值/ MPa	抗拉强度 设计值/ MPa
喷层混凝土	C20	2 200	21	0.167	9.6	1.10
岔管混凝土	C25	2 400	28	0.167	11.9	1.27
钢 筋	Ⅱ级	7 850	200	0.3	300	300

非线性分析中,岩体材料采用理想弹塑性本构关系和 Drucker-Prager 屈服准则^[12];岔管衬砌混凝土采用多线性弹性本构关系,并取组合破坏准则作为开裂准则;钢筋采用分布钢筋模式。在混凝土开裂前其应力应变关系采用多线性弹性关系,通过破坏准则(采用组合破坏准则,三向受拉应力状态时取最大主应力准则,三向受压应力状态取 William-Warnke 五参数准则^[13],其他应力状态取两准则的过渡形式)来判断是否达到破坏曲面,当达到破坏曲面时,按拉压不同破坏形式相应改变应力应变关

系;受拉开裂后,混凝土应力应变矩阵沿着破坏面和垂直于破坏面的方向建立,并设置相应参数反映混凝土开裂后的应力应变关系。材料在受压破坏后所有方向发生应变软化,单元完全丧失承载力。

2 施工期围岩稳定性分析

岩体铅直方向的应力符合自重应力场规律,水平向应力侧压力系数为 1.2 ~ 1.3,施工开挖均按一次性开挖考虑。

a. 施工开挖期间围岩第三主应力 σ_3 等值线见图 3。从图 3 可以看出,1 号和 2 号岔管段围岩的应力均为压应力,最小压应力出现在 1 号岔管分岔处围岩的顶部和底部,最大压应力均出现在靠近主管与岔管以及岔管与支管的交界处开挖面的顶部和底部。施工期岔管段开挖围岩应力与铅直方向的位移见表 3,由表 3 可以看出,3 种方案的围岩应力数值比较接近。

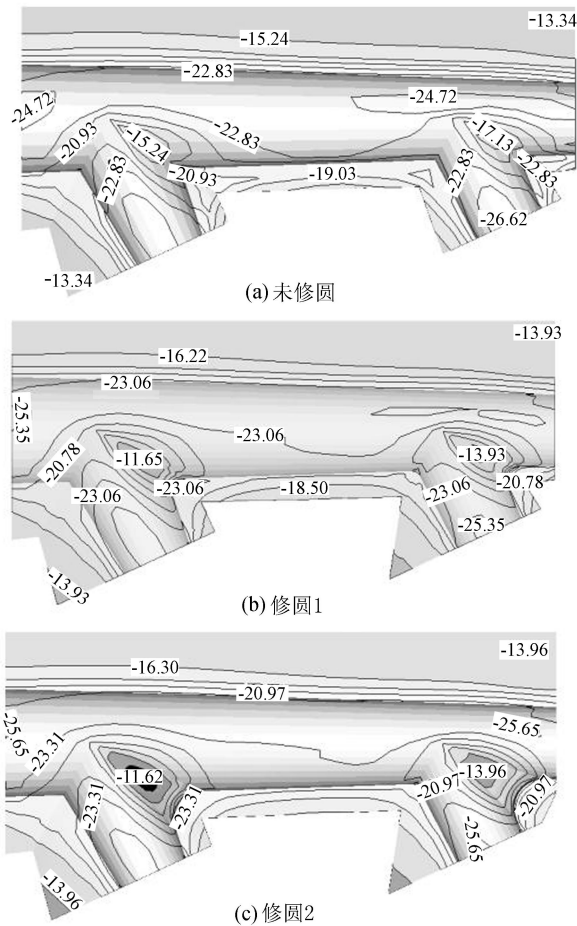


图 3 施工开挖期围岩 σ_3 等值线(单位:MPa)

b. 围岩开挖后形成临空面,洞周岩体向洞内变形,其中铅直方向的位移最为明显,最大位移出现在岔管底部。修圆后的岔管段围岩铅直方向位移有所增大,且随着修圆半径的增大,岔管段围岩铅直向位移逐渐增大,如1号岔管处围岩的位移由5.55mm

表 3 施工期岔管段开挖围岩应力与位移分析

部位	体型	第一主应力 σ_1 /MPa		第三主应力 σ_3 /MPa		铅直向位移 u_z /mm	
		最小值	最大值	最小值	最大值	顶部	底部
1 号岔管围岩	未修圆	-11.34	-1.62	-26.75	-13.16	-4.92	5.55
	修圆 1	-11.20	-0.90	-27.51	-11.62	-6.05	6.74
	修圆 2	-11.22	-0.77	-27.56	-10.55	-7.11	7.38
2 号岔管围岩	未修圆	-11.61	-1.67	-26.89	-13.44	-4.02	3.91
	修圆 1	-11.50	-1.18	-28.03	-13.07	-4.46	5.02
	修圆 2	-11.52	-1.06	-27.99	-12.90	-4.65	5.83

增加到 7.38 mm,增大了 33.0%。

c. 围岩开挖后,围岩的塑性区集中在岔档和 1 号岔管洞室顶部、底部,深度在 1.0 ~ 1.5 m 之间,见图 4。锐角区修圆后,围岩的塑性集中程度减缓。由于分岔处跨度(最大开挖横断面的宽度)加大,围岩塑性区范围增加,且随着修圆半径的增大,塑性区范围增大,如图 5 所示(图中横坐标为底数取 10 的对数坐标)。

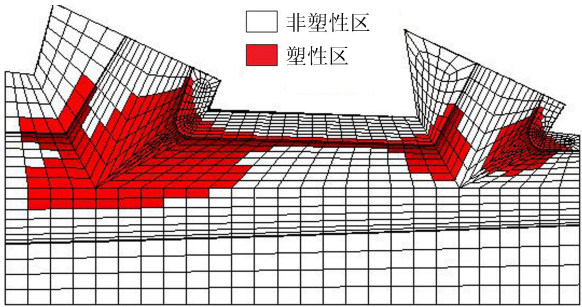


图 4 岔管段围岩塑性区分布

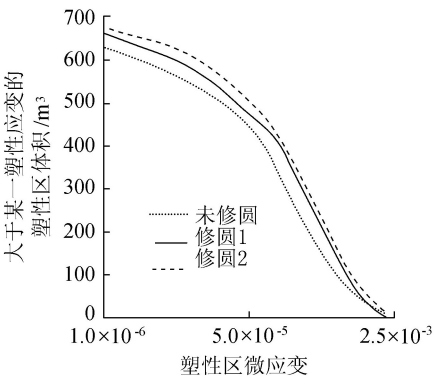


图 5 不同修圆条件下施工开挖期间塑性区范围

3 运行期衬砌结构分析

3.1 运行期衬砌结构线性分析

运行期内水压力为 3.85 MPa,在内水压力作用下,岔管衬砌主要承受拉应力,岔档出现了明显的应力集中现象。由于运行期 2 号岔管衬砌拉应力较 1 号岔管小,受力规律与 1 号岔管相同,表 4 仅给出了 1 号岔管衬砌应力与位移。由表 4 可知,修圆后岔管衬砌结构最大拉应力减小,岔档和岔顶应力变化趋向平缓,应力集中程度有所缓解。相对修圆 1,

修圆2 修圆半径增大,岔管应力集中程度恶化,故需要选择适当的修圆半径。衬砌主要向洞外变形,最大值均出现在岔管分岔处的正上方顶板处,整体合位移动不大,衬砌合位移动最大值随着修圆半径的增大而增大。

表 4 运行期 1 号岔管衬砌结构应力与位移分析

体型	最大拉应力/MPa	岔档内外表面应力差/MPa	岔顶内外表面应力差/MPa	合位移/mm
未修圆	15.57	9.29	3.30	0.13~0.90
修圆1	14.52	6.59	2.48	0.10~1.00
修圆2	15.21	8.81	2.64	0.06~1.08

3.2 运行期衬砌结构非线性分析

衬砌混凝土材料为非线性材料,衬砌主管、支管和岔管环向钢筋采用双层 $\phi 32\text{ mm}@200\text{ mm}$,轴向钢筋采用双层 $\phi 25\text{ mm}@250\text{ mm}$,计算时采用线性加载方式,各内水压力作用下的内外层环向钢筋最大值见图 6。可以看出钢筋应力随着内水压力的增加而增大,但钢筋应力的增大与水头的增加不成比例。

对于未修圆体型,当衬砌所受内水水头为 33 m 时,内外层环向钢筋应力均较小,衬砌未开裂;内水水头增加到 55 m 时,环向钢筋应力最大值为

10.17MPa,但此时 2 号岔管衬砌内表面锐角区已开裂,随着水头的增加,1 号岔管衬砌锐角区开裂,开裂范围向衬砌腰部和外表面延伸;当内水水头达到 165 m 时,衬砌内层单元除分岔处顶部和底部未开裂,其他绝大部分已开裂,外层单元仅腰部开裂,其中 1 号岔管与主管交界处 3 m 内衬砌均开裂,开裂深度为 0.8~1.0 m,2 号岔管腰部开裂深度为 0.4~0.6 m。随着水头的继续增加,开裂范围进一步扩展,当水头达到 385 m 时,仅岔管顶部和底部未开裂,其他已基本全裂。修圆后的开裂规律与未修圆时类似,而对于修圆 1 和修圆 2 体型,当水头为 55 m 时,两岔管衬砌内层单元锐角修圆区均开裂,水头增加到 385 m 时,未开裂部位集中在分岔处顶部和底部,开裂范围与未修圆时相差不大,如图 7 所示。

对于修圆 1 体型,总体上 1 号岔管和 2 号岔管内层环向钢筋应力较未修圆时减小,1 号岔管外层钢筋应力增大,2 号岔管外层钢筋应力变化幅度很小,衬砌钢筋应力分布更加均匀。比较修圆 2 和修圆 1 两种修圆体型的钢筋应力值,可以发现前者的内层钢筋应力大于后者,而前者的外层钢筋应力小

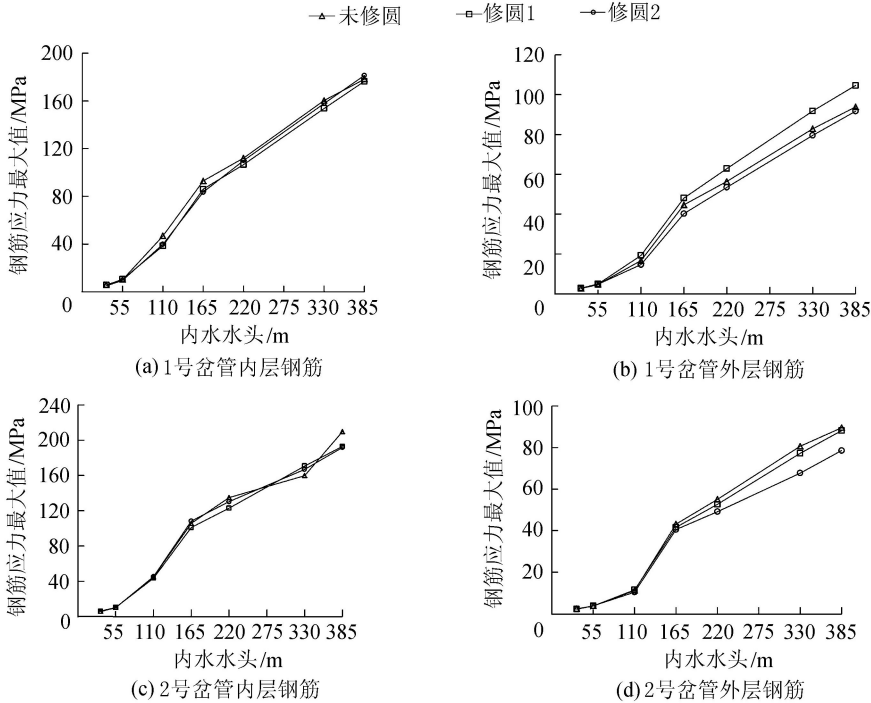


图 6 运行期 1 号、2 号岔管环向钢筋应力分析

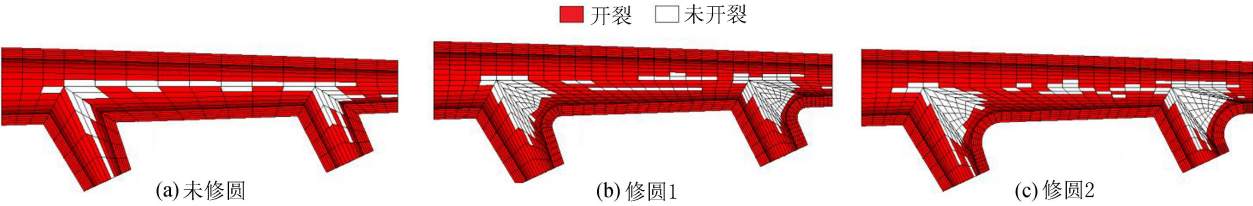


图 7 运行期岔管衬砌开裂情况(水头 385 m)

于后者,且前者钢筋均匀性较后者差。修圆后钢筋整体应力有所减小,应力分布更加均匀,对衬砌受力是有利的,但修圆半径并非越大越好。

4 检修期衬砌结构线性分析

检修期外水压力为 1.11 MPa,作用在衬砌的外表面,岔管衬砌主要承受压应力,局部出现拉应力。未修圆时,拉应力集中在 1 号岔管岔挡外表面和岔管衬砌顶部;修圆后拉应力数值和集中范围略有增大,主要集中在岔管顶部,如图 8 和图 9 所示。

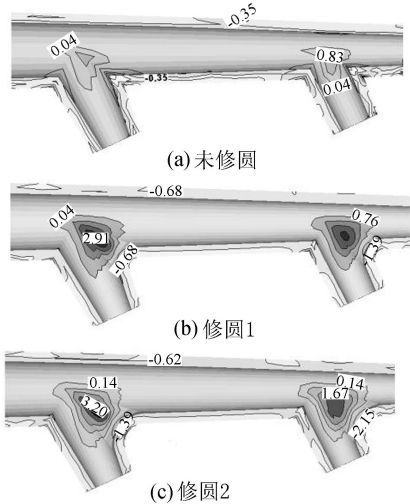


图 8 检修期岔管衬砌 σ_1 等值线 (单位:MPa)

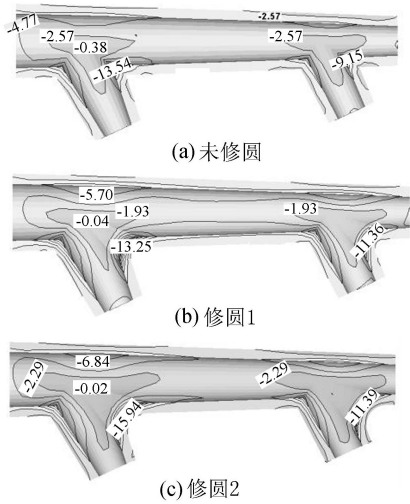


图 9 检修期岔管衬砌 σ_3 等值线 (单位:MPa)

由于检修期 2 号岔管衬砌压应力较 1 号岔管小,受力规律与 1 号岔管相同,表 5 仅给出了 1 号岔管衬砌应力与位移。由表 5 可知:修圆 1 相对未修圆体型,1 号岔管岔挡,岔顶内外表面应力差减小,应力集中程度也减小,而修圆 2 相对未修圆体型,1 号岔挡,岔顶内外层应力差反而增大,即修圆半径过大,应力集中并未得到缓解。衬砌主要向洞内变形,修圆后合位移增大,且随着修圆半径的增大,合位移增大。

表 5 检修期 1 号岔管衬砌应力与位移分析

体型	最大拉应力/MPa	岔挡内外表面应力差/MPa	岔顶内外表面应力差/MPa	合位移/mm
未修圆	-15.37	-13.38	3.35	0.03 ~ 1.31
修圆 1	-14.98	-13.10	3.30	0.00 ~ 1.77
修圆 2	-15.94	-14.06	3.57	0.04 ~ 2.05

5 结 语

由于岔管锐角区存在不连续面,因而围岩稳定性与衬砌结构受力情况复杂。从水流条件看,未进行修圆处理时,锐角区岔挡衬砌可起到类似导流板的作用,对水流条件是有利的;对锐角区进行修圆处理后,对岔挡处的水流条件是不利的,但对改善衬砌受力是有利的。本文对岔管锐角区进行了不同程度的修圆,并从结构受力方面进行了施工、运行、检修期的对比分析,根据计算分析结果可以得出:①施工开挖期,岔挡处应力集中较为明显,塑性区集中在岔挡和岔管分岔处的顶部、底部。修圆后,塑性集中程度降低,由于岔角处跨度加大,开挖对围岩扰动增大,围岩塑性区范围增加,变形略有增大。②运行期衬砌主要承受拉应力,适当的修圆处理可使衬砌应力分布更加均匀,衬砌开裂区范围减小,钢筋应力有所降低,对衬砌受力是有利的。但衬砌合位移随着修圆半径的增大而增大,认为缓变的岔角结构更合理,更有利于衬砌结构的安全。③检修期间衬砌主要承受压应力,岔挡和岔管顶部出现了局部拉应力集中。适当的修圆处理后,拉应力集中范围和数值有所增大,但岔挡压应力集中现象有所改善,对整体的变形影响相对较小。因而在岔挡外围围岩稳定的情况下尽量减少开挖,选择适当的修圆半径,有利于围岩的稳定性和衬砌结构的受力。

参考文献:

[1] 黄丽伟,邓柏旺,梁幼. 地下钢筋混凝土岔管三维有限元分析[J]. 华北水利水电学院学报,2007,28(2):40-42. (HUANG Liwei, DENG Bowang, LIANG You. 3D finite element analysis of underground reinforced concrete bifurcation [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(2): 40-42. (in Chinese))

[2] 韩前龙. 大型地下钢筋混凝土岔管结构研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.

[3] 韩前龙,伍鹤皋,苏凯,等. 地下钢筋混凝土岔管应力分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(3):31-35. (HAN Qianlong, WU Hegao, SU Kai, et al. Stress analysis of underground reinforced concrete bifurcation [J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2005, 38(3): 31-35. (in Chinese))

- [4] 苏凯,伍鹤皋,李青麒.抽水蓄能电站钢筋混凝土岔管有限元分析[J].水电能源科学,2005,23(5):51-54. (SU Kai, WU Hegao, LI Qingqi. Finite element method analysis of reinforced concrete manifold of pumped storage power station [J]. Water Resources and Power, 2005, 23 (5):51-54. (in Chinese))
- [5] 邓柏旺.地下钢筋混凝土高压岔管围岩稳定与衬砌结构分析[D].南京:河海大学,2007.
- [6] 苏凯,伍鹤皋,英鹏涛,等.断裂影响下的高压钢筋混凝土岔管结构[J].水利水电技术,2008,39(4):41-45. (SU Kai, WU Hegao, YING Pengtao, et al. Study on high-pressure reinforced concrete manifold structure under impact of fault [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2008, 39(4):41-45. (in Chinese))
- [7] 任旭华,徐海奔,束加庆.地下水工隧洞围岩及钢筋混凝土岔管结构数值分析[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(4):8-13. (REN Xuhua, XU Haiben, SHU Jiaqing. Numerical analysis on surrounding rock and reinforced concrete bifurcation structure of undergrounding tunnels [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(4):8-13. (in Chinese))
- [8] 王明.地下钢筋混凝土岔管三维有限元分析研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [9] 张继勋,任旭华.地下钢筋混凝土岔管围岩稳定及结构数值分析[J].三峡大学学报:自然科学版,2011,33(5):2-6. (ZHANG Jixun, REN Xuhua. Numerical analysis of surrounding rock stability and lining structure of underground reinforced concrete bifurcation [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science, 2011, 33(5):2-6. (in Chinese))
- [10] 肖明.大型地下钢筋混凝土岔管结构优化分析[J].水利学报,2001,32(12):8-13. (XIAO Ming. Optimization analysis of large-scale underground reinforced concrete branching conduit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(12):8-13. (in Chinese))
- [11] 龚玉锋,丁旭柳.地下钢筋混凝土岔管结构优化分析[J].水电站设计,2002,18(1):26-30. (GONG Yufeng, DING Xuli. Structure optimization analysis on underground reinforced concrete branch pipe [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2002, 18(1):26-30. (in Chinese))
- [12] 徐干成,郑颖人.岩石工程中屈服准则应用的研究[J].岩土工程学报,1990,12(2):93-99. (XU Gancheng, ZHANG Yinren. Study on application of yield criterions in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2):93-99. (in Chinese))
- [13] 董哲仁.钢筋混凝土非线性有限元法原理与应用[M].北京:中国铁道出版社,1993. (收稿日期:2013-11-11 编辑:骆超)

(上接第88页)

- [5] 刘攀,郭生练,郭富强,等.清江梯级水库群联合优化调度图研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(7):63-66. (LIU Pan, GUO Shenglian, GUO Fuqiang, et al. Derivation of the optimal operating curve rules for Qingjiang cascade reservoirs [J]. Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(7):63-66. (in Chinese))
- [6] 李玮,郭生练,朱凤霞,等.清江梯级水电站联合调度图的研究与应用[J].水力发电学报,2008,27(5):10-15. (LI Wei, GUO Shenglian, ZHU Fengxia, et al. Combined reservoirs operation of Qingjiang cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5):10-15. (in Chinese))
- [7] 刘心愿,郭生练,刘攀,等.基于总出力调度图与出力分配模型的梯级水电站优化调度规则研究[J].水力发电学报,2009,28(3):26-31. (LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Study on the optimal operating rules for cascade hydropower stations based on output allocation model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(3):26-31. (in Chinese))
- [8] 梁忠民,钟平安.水文水利计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2008:307-310.
- [9] HOWSON H R, SANCHO N G F. A new algorithm for the solution of multi-state dynamic programming problems [J]. Mathematical Programming, 1975, 8:104-116.
- [10] ANDRE T. Optimal short-term hydro scheduling from the principle of progressive optimality [J]. Water Resources Research, 1981, 17(3):81-86.
- [11] 程春田,杨凤英,武新宇,等.基于模拟逐次逼近算法的梯级水电站群优化调度图研究[J].水力发电学报,2010,29(6):71-77. (CHENG Chuntian, YANG Fengying, WU Xinyu, et al. Link the simulation with dynamic programming successive approximations to the study on optimal operation chart of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6):71-77. (in Chinese)) (收稿日期:2014-03-03 编辑:骆超)

