

大跨径尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析

林 鹏¹, 周雅能¹, 朱晓旭¹, 王仁坤², 赵文光²

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水电工程顾问集团公司 成都勘测设计院, 四川 成都 610072)

摘要: 针对目前国内外水利工程中大跨径地下尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析现状, 对其存在的主要问题进行讨论。总结大跨径尾水岔洞开挖与衬砌稳定的分析方法, 包括数值模型建立原则、分析内容、流程、评价指标等。应用此分析方法, 对溪洛渡水电站尾水岔洞开挖与衬砌稳定开展研究, 包括大跨径尾水岔洞开挖过程中变形、应力及屈服区分布特点, 以及不同应力释放荷载条件下的喷锚支护效果; 针对运行和检修工况, 分析岔洞围岩、衬砌结构的变形及应力分布情况, 变形计算结果与监测结果一致。通过实际工程分析与应用, 表明所建议的大跨径地下尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析方法可用于指导同类岩土结构工程设计。

关键词: 隧道工程; 大跨径地下尾水岔洞; 数值模拟; 衬砌稳定

中图分类号: U 45; O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增1 - 3177 - 07

STABILITY ANALYSIS OF EXCAVATION AND LINING STRUCTURE OF LARGE-SPAN TAILRACE BIFURCATION TUNNEL

LIN Peng¹, ZHOU Yaneng¹, ZHU Xiaoxu¹, WANG Renkun², ZHAO Wenguang²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. HydroChina Chengdu Corporation, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: The current research situation and commonly used method of stability for excavation and lining of large-span tailrace bifurcation tunnel at home and abroad are reviewed. Based on summary studies, an evaluation method to analyze the stability of excavation and lining structure is proposed. It involves the basic principles of numerical method, analytical contents, flow charts and evaluation index. By employing this evaluation method, the tailrace bifurcation tunnel of Xiluodu hydropower station is analyzed, including the distribution characters of deformation, stress and yield zone in the surrounding excavated rock mass and the reinforcing effect under different stress releasing conditions. The deformation and stress state in surrounding rock mass and lining structure also are investigated under operation and maintenance loading conditions. The numerical results and monitoring results are consistent. Based on the numerical results of practical projects, it shows that the proposed evaluation method related to tailrace bifurcation tunnels can be applied to the design and construction of the similar projects.

Key words: tunnelling engineering; large-span tailrace bifurcation tunnel; numerical simulation; lining stability

1 引 言

当前, 为开发可持续利用清洁能源, 一大批位于西南高山峡谷中的巨型电站, 如小湾、溪洛渡、

锦屏一级、和拉西瓦等水电站相继修建。由于地形条件限制或为减少开挖量、降低工程造价等原因, 这些工程地下电站的尾水洞常常采取多台机组的尾水支洞通常共用一条尾水主洞的结构布置形式, 如官地水电站采用四机两管的布置形式, 溪洛渡水电

收稿日期: 2009 - 12 - 29; **修回日期:** 2010 - 05 - 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772095); “十一五”国家科技支撑计划项目(042601001)

作者简介: 林 鹏(1972 -), 男, 博士, 1995年毕业于东北大学采矿专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程、水工结构及地下工程等方面的教学与研究。E-mail: celinpe@tsinghua.edu.cn

站左右岸均采用九机三管的布置形式^[1~3]。在尾水支洞和主洞结合交叉处常常形成复杂的大跨径非规则三维空间结构,即尾水岔洞(一般最大跨径大于30 m),此部位在开挖施工期、运行期及检修期的稳定问题是工程设计中重点关注对象。

对于大跨径尾水岔洞开挖与衬砌稳定问题,除了具有一般地下结构的主要特点外,还具有一些独特的特点:

(1) 因岔洞交汇处形状非规则,开挖和衬砌支护过程中岩体及衬砌受力,甚至破坏机制复杂。

(2) 开挖后的应力重分布差,大跨径岔洞的扁平形状的拱形结构,使围岩自身形成稳定的承载拱的能力减弱,支护结构承担大部分的荷载,特别在埋深小的时候,更容易产生较大的松弛压力。

(3) 底脚处的应力集中往往过大,对地基的承载力要求高。因此,开展大跨径地下尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析研究具有重要科学和工程意义。

目前国内外针对岔洞结构开挖与稳定分析的方法主要有解析法^[4]、数值计算方法^[5~14]和模型试验法^[15]等。应用解析法时,一般将岔洞的空间结构按平面问题考虑,且较少考虑初始地应力和开挖、喷锚支护形成的二次地应力的影响,特别是对于大跨径的岔洞接头部位,由于结构受力大,受力性质复杂,解析法很难真实反映岔洞结构的空间受力特征,因此,解析法计算结果通常只是作为初步设计分析的参考。数值计算方法,它突破了解析法的局限性,能较客观的反映岔洞结构的物理力学性质。如, H. Stille 等^[5, 6]对大跨径隧道、岔洞开展的围岩应力有限元分析;郭海庆等^[13, 14]对地下混凝土岔管三维有限元分析。这些分析研究利用各种复杂的材料本构关系、精细模拟复杂地质条件下,三维岔洞开挖、支护、衬砌充水及隧洞放水检修等不同荷载工况,这些都是其他方法难于做到的。模型试验法^[15],即选择有代表性的地段进行仿真材料试验,是研究地下高压水工隧洞应力状态较有效的方法,但是由于模型试验成本高,周期长,除非重大、复杂的地下工程需要试验同计算分析互相验证,一般现在很少采用三维模型试验分析岔洞结构的稳定。

从以上国内外研究现状可知:

(1) 大部分研究集中在地表的沉降控制或者结构的稳定分析。对岔洞开挖和永久衬砌后围岩、衬

砌结构的全过程稳定分析还较少。

(2) 目前对尾水岔洞开挖与衬砌稳定的分析评价中,对大跨径岔洞结构的空效应分析一般采用简化处理,在衬砌配筋计算中通常采用结构计算的方法,计算分析结果往往不能真实反应岔洞衬砌内应力非线性分布特点。

(3) 目前还没有针对大跨径地下尾水岔洞开挖和运行、检修期岔洞及衬砌的稳定的阶段特点,提出一套系统的评价分析方法。

本文主要建议了大跨径地下尾水岔洞开挖与衬砌稳定全过程分析评价方法,包括数值模型建立原则、分析内容、分析流程和评价指标等,并将此评价体系应用到溪洛渡水电站的尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析中。

2 分析方法、内容和流程

2.1 计算模型的建立方法

尾水岔洞是一个复杂的空间结构,其数值分析一般应采用三维模型,为保证精度,通常采用六面体单元,对重点研究的洞室周围应精细模拟,而对远离岔洞的近地面区域,网格可适当稀疏以减少计算时间。根据数值计算原理^[8, 10]和工程具体情况,可按以下方法进行三维建模分析:

(1) 模拟范围:岔洞两侧至少超过洞室3倍洞径距离,顶部取到地面,底部取到尾水洞底板以下至少3倍洞径。

(2) 本构关系:岩体本构采用弹塑性模型、D-P屈服准则,混凝土衬砌单元采用线弹性模型。喷混凝土采用SHELL单元,锚杆采用CABLE单元。

(3) 力学边界:模型的左右边界分别施加水平位移约束,底部施加竖向位移约束,顶面自由,模型边界在计算前后保持不变。计算荷载为结构自重,反演的地应力以及对内内外水,灌浆压力的工况组合。

(4) 材料参数:变形模量 E ,泊松比 μ ,岩石抗剪强度 φ' , c' 等材料力学参数主要根据工程地质勘察综合求得。在数值计算中可根据不同软件要求转换为相应的计算参数,比如剪切模量 G ,体积模量 K ,内摩擦角 φ 等。

(5) 工况组合:根据施工、运行,检修等不同时期,作用在尾水洞围岩和衬砌上的荷载不同,计

算工况应按如下工况进行分类计算: ① 无支护开挖; ② 有支护开挖; ③ 施工期衬砌应力计算; ④ 运行期衬砌应力计算; ⑤ 检修期衬砌应力计算。

2.2 分析内容

尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析时, 主要目的和任务是了解尾水岔洞在施工期、运行期和检修期工况下的围岩的应力、位移、变形、塑性区和支护结构的内力、变形等分布情况。通过计算比较, 提出推荐的支护型式(包括临时支护和永久支护)、尺寸以及相应的控制性工况。具体分析内容如下:

(1) 岔洞开挖应力变形分析

分析大跨径尾水岔洞开挖后整体围岩稳定情况, 一般先给出围岩拱顶的三维应力、位移、塑性区图, 然后选取有代表性的断面(如有断层通过或最大跨径附近)。分析这些断面内围岩的应力, 位移和塑性区变化。

(2) 岔洞开挖喷锚支护分析

由于岔洞开挖破坏了山体原有的平衡状态, 在岔洞围岩表面及其附近引起应力重分布, 产生变形甚至坍塌破坏, 故常需临时支护和永久衬砌。因此常需要分析影响锚杆锚固力的因素, 包括锚杆的材料、锚固剂的材料、锚杆结构、锚固方式、锚杆支护时间及岩体性质和锚固参数等。锚固效果可以从以下几个方面展开: 围岩位移变化、围岩应力变化、围岩塑性区大小和锚杆单元的应力大小以及长期锚固段围岩变形分析。

(3) 衬砌稳定分析

岔洞衬砌可承受山岩压力、内外水荷载, 保持围岩的稳定和改善水流条件, 二次支护形式一般采用钢筋混凝土衬砌。在衬砌分析中一般认为衬砌与围岩都是相对透水体, 由于灌浆, 认为两者紧密黏接, 内外水压力形成一定的边界条件下的渗流场, 其作用是体积力, 但将水压力视为边界力的方法比较简单, 因此得到了广泛的应用。

内水压力是水工隧洞的重要荷载, 常对有压隧洞的衬砌起控制作用。有压隧洞过水时, 沿程压坡线随流程变化, 各段面的内水压力值由测压管水头线即压坡线在该处的高度确定^[4]。外水压力的大小与隧洞沿线地下水活动的规律有关。通常将外水压力视为作用在隧洞衬砌外壁的边界力。分析确定可能的地下水位线, 然后将地下水位线至衬砌外壁之

间的水柱高乘一折减系数 β 后可视为作用在衬砌上的外水压力, 其中 β 是一个综合指标, 考虑了围岩渗流特性和摩阻损失。外水压力有抵消内水压力的作用, 但在工程设计中, 为安全计, 当与内水压力组合时, 取 $\beta=0$, 即不考虑外水压力, 当隧洞检修时, 取偏大值, 一般取 $\beta=0.6$ 或 0.8 。

对衬砌稳定分析主要包括运行期内外水压力下衬砌与围岩的稳定状态, 以及提出相应的衬砌配筋参数。

2.3 分析流程

综上, 对大跨径地下尾水岔洞开挖与衬砌整体稳定的分析方法、内容以及各分析流程之间的关系与特点, 本文建议按照图1所示的流程开展分析。

从图1可知, 大跨径岔洞开挖与衬砌稳定分析主要包括: (1) 数值模型, 包括数值模型建立方法, 材料参数以及计算工况的选取等。(2) 开挖与衬砌稳定分析内容, 如岔洞开挖后围岩稳定分析, 喷锚支护分析以及衬砌稳定分析。其中衬砌稳定分析包括提出控制工况的三维衬砌非线性配筋参数。

3 工程分析应用

3.1 工程介绍

溪洛渡水电站左岸尾水岔洞深埋段上覆岩体厚500 m左右, 水平埋深500~700 m。尾水岔洞地层岩质坚硬, 岩体新鲜, 嵌合紧密, 多呈块状结构, 部分次块状结构, 围岩类别以II类为主, 有较好的围岩稳定条件。尾水岔洞进口段顶拱岩性为P2 β 5层上部的角砾集块熔岩和P2 β 6层下部斑状玄武岩, 岩体新鲜, 层内错动带及裂隙较发育, 间距较小, 部分地段呈网状分布, 岩体完整性较差, 对顶拱围岩稳定不利。边墙岩性大部分为P2 β 5层的致密状玄武岩, 下部为P2 β 4层角砾集块熔岩, 岩流层产状为N25°~35°E/SE \angle 7°~15°。C5层间错动带分布较连续, 加之层内错动带较发育, 由于产状比较平缓, 且埋深较浅, 可能会产生塌顶和局部的楔形、三角形等块体失稳问题, 岩体完整性较差。

本文研究主要以左岸2#尾水岔洞为分析对象, 对2#尾水岔洞围岩稳定及衬砌结构进行数值分析。采用FLAC^{3D}程序作为数值模型建立与计算的工具^[8]。

3.2 计算模型

计算坐标系如下： X 轴：沿尾水岔洞方向； Y 轴：沿尾水洞直线段方向； Z 轴：铅直向上。模拟的范围为：顺尾水流向 400 m，顺尾水调压室横轴

方向 350 m，计算模型的顶部取到地面，上覆岩

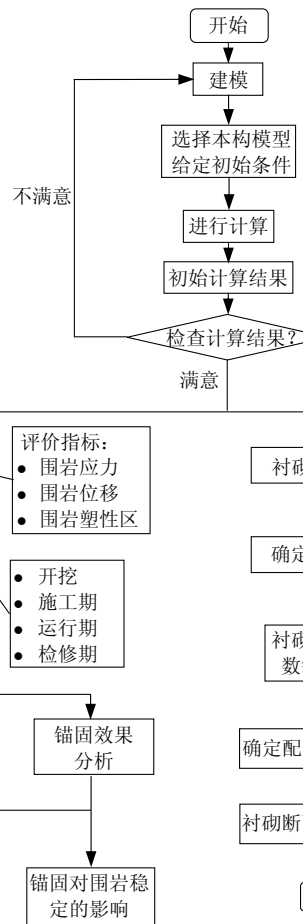


图 1 分析流程示意图

Fig.1 Scheme of flow chart of analysis

层厚度约为 500 m，底部取到尾水洞底板以下 75 m 高程。

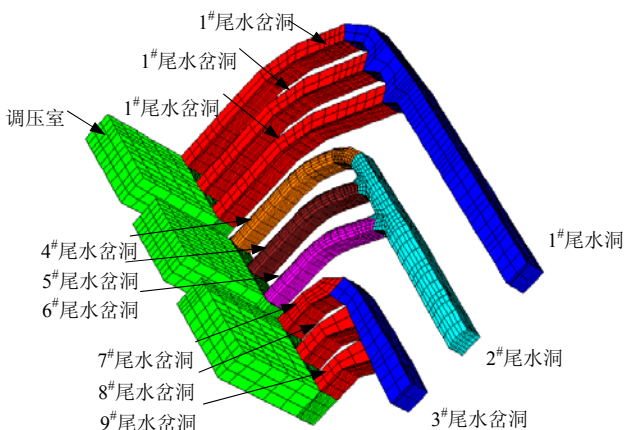
整个模型全部采用六面体八节点单元，共有单元 66 850 个以及节点 71 722 个。尾水洞模拟开挖顺序为(见图2)：(1) 1#和3#尾水管直线段；(2) 1#和

图 2 开挖模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of excavation model

3#尾水拐弯段；(3) 尾水调压室；(4) 2#尾水直线段；(5) 2#尾水 6#岔洞；(6) 2#尾水 5#岔洞；(7) 2#尾水 4#岔洞。

尾水洞的锚杆分布数值模型见图 3(图中数字为锚杆序号)；锚杆单元参数如表 1 所示。锚杆单元为 6 504 个。本次计算各类材料物理力学参数如表 2 所示。



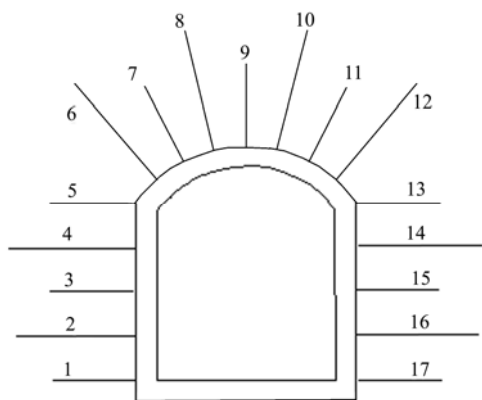


图 3 尾水洞的锚杆分布数值模型

Fig.3 Numerical model of cable distributed around tunnel

表 1 锚杆单元特征参数

Table 1 Characteristic parameters of cable

锚杆长度 /m	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	横截面积 /mm ²
6	310	2.00×10 ⁵	615.44

表 2 溪洛渡水电站尾水岔洞物理力学计算参数表

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock mass and concretes of Xiluodu tailrace bifurcation tunnel

材料	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	变形模量 /GPa	泊松比	抗剪强度/MPa	
				f'	c'
C20 混凝土		25.5	0.20		
II 类岩体	2.8	16.0	0.20	1.35	2.5
III 类岩体	2.6	11.0	0.25	1.22	2.2
层间错动带 C5	2.8	0.9	0.40	0.44	0.1
层间错动带 C3	2.8	0.9	0.40	0.44	0.1

限于篇幅, 本文仅对下列6种主要工况进行分析:

(1) 工况1: 工况1a: 构造应力作用下支护开挖(洞顶参数取II类岩); 工况1b: 构造应力作用下支护开挖(洞顶参数取III类岩)。

- (2) 工况2: 构造应力作用下灌浆期衬砌计算。
- (3) 工况3: 构造应力作用下运行期衬砌计算。
- (4) 工况4: 构造应力作用下检修期衬砌计算。
- (5) 工况5: 构造应力作用下检修期衬砌计算。
- (6) 工况6: 构造应力作用下检修期衬砌计算。

在工况2~6中洞顶参数取III类岩, 工况4~6中外水压力折减系数分别取0.6, 0.8和0.96。

3.3 结果分析

(1) 岔洞开挖围岩稳定分析

如图 4 所示, 溪洛渡水电站尾水洞取 4 个断面:

I - I, II - II, III - III, IV - IV, 图 4 中箭头表示断面方向, 顺着箭头方向的左边计为断面左侧。由计算可知在构造应力场作用下, 岔洞附近主要变形还是顶拱沉降, 但与自重应力场相比, 有了一定降低, 这说明构造应力有利于洞顶“拱”结构的形成, 对顶拱变形是有利的。在工况 1a 作用下, 围岩稳定, 拱顶变形较小。由于构造应力的作用, 与自重应力场相比, 两帮的水平位移都有了较大的提高, 在边墙附近, 由于断层的存在, Y 方向变形较大; 在工况 1b 作用下, 拱顶最大变形为 47.6 mm。因此针对 III1 类岩在开挖后建议即时采取支护锚固措施。从主应力大小来看, 应力集中主要发生在边墙与顶拱

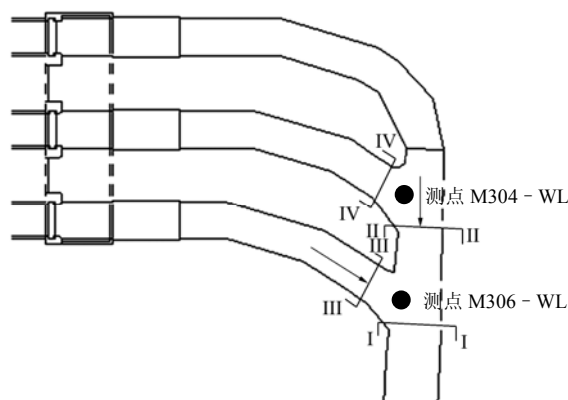


图 4 尾水洞的平面布置及主要断面示意图

Fig.4 Sketch of layouts and major sections of tailrace bifurcation tunnels

相交的地方(即 C5 断层处); 最大拉应力发生在岔洞的顶拱附近, 大约为 1 MPa。图 5 显示了岔洞顶部的拉应力分布状态。

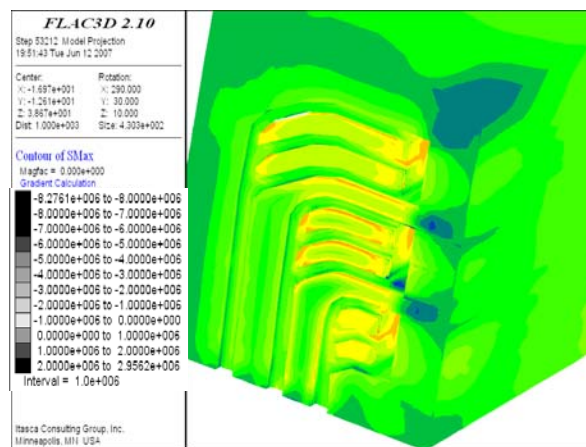


图 5 岔洞顶部应力分布图(单位: Pa)

Fig.5 Stress distribution in top of tailrace bifurcation tunnel (unit: Pa)

(2) 岔洞开挖喷锚支护分析

通过计算分析(见表 3, 4), 可知大跨径岔洞开挖后喷锚支护具有以下特点:

① 锚喷支护对于降低位移量, 减缓围岩应力集中程度, 以及减少塑性区有明显效果。如表 4 列出了溪洛渡尾水岔洞在加锚前后应力, 位移和塑性区的改变情况。

② 岩体性质对锚固效果有较大的影响: 围岩比较软弱时, 锚杆能承担较大的力, 锚固效果比较明显; 围岩比较坚硬时, 围岩承载能力较强, 锚固效果不明显。计算显示在岔洞处不同围岩内锚杆轴力特征分布情况。当岔洞周围为 II 类岩时, 锚杆平均

表 3 尾水岔洞围岩开挖与衬砌稳定特征指标比较

Table 3 Comparison main mechanics value of surrounding rock mass and lining structure under different conditions

计算工况描述	衬砌					围岩(III类岩)					
	截面	最大拉应力 /MPa	最大拉应力所在区域	内表面拉应力 /MPa	最大位移 /mm	顶拱最大拉应力 /MPa	顶拱最大沉降/mm	所选截面锚杆最大轴力 /kN	锚杆最大轴力所在区域	塑性区体积 /(10^4 m^3)	塑性区范围
开挖期 (工况 1b)						1.9	47.6	314	III - III 断面左侧拱顶	2.8	岔角处塑性区范围最大, 基本贯穿
运行期(81 m 水头, 工况 3)	I - I	1.72	右底板								
	II - II	1.22	左拱脚	1.5	0.9	1.4	-1.9	313	III - III 断面左侧拱顶	0.1	由于内水压力部分抵消了围岩释放荷载, 基本上无塑性区
	III - III	1.39	右拱脚								
检修期(按折减系数 0.8, 35 m 水头计算, 工况 5)	IV - IV	1.13	左拱脚								
	I - I	0.98	右边墙								
	II - II	1.00	右边墙	1.9	1.2	2.4	1.5	331	III - III 断面左侧拱顶	2.1	III - III 左侧之外和 IV - IV 左侧之外边墙上部塑性区贯穿
	III - III	1.14	左边墙								
	IV - IV	1.76	左边墙								

表 4 锚固效果比较

Table 4 Effects of anchorage of surrounding rock mass

支护情况	顶拱最大沉降		顶拱最大主应力		顶拱最小主应力		塑性区体积	
	数值/mm	支护后减少百分比/%	数值 /MPa	支护后减少百分比/%	数值/MPa	支护后减少百分比/%	数值/(10^4 m^3)	支护后减少百分比/%
无支护(II类围岩)	39.3		1.97		-42.4		2.96	
支护(II类围岩)	39.2	0.25	1.74	11.68	-42.3	0.24	2.57	13.18

轴力只有 42 kN, 锚杆有较大的安全余度, 说明围岩是稳定的。当岔洞周围为 IV 类岩时, 锚杆平均轴力为 675 kN, 超过所选锚杆的极限拉力 190 kN, 说明此时的支护是不足的。

③ 衬砌稳定分析

表 5 列出了不同工况下(回填灌浆、运行期、封堵期外水折减系数 0.6、封堵期外水折减系数 0.8、封堵期外水折减系数 0.96)衬砌最危险断面及其拉应力大小和分布情况。可以看出: 最大拉应力为 0.81~1.76 MPa, 且最大拉应力都发生在断面 II - II 或 IV - IV 上, 即 2#尾水洞 5#岔洞拐弯处。在回填

Table 5 Unstability section and stress distribution of lining under different loading conditions

不同工况	折减系数	工况	最危险断面	最大拉应力 /MPa	最大拉应力所在区域
回填灌浆期	1.0	2	IV - IV	0.81	边墙上上部靠 C5 破碎带处
运行期	1.0	3	I - I	1.72	边墙与顶拱、底板拐角处
检修期	0.6	4	II - II	1.74	边墙上上部靠 C5 破碎带处
	0.8	5	II - II	1.76	边墙上上部靠 C5 破碎带处

灌浆、隧洞检修工况下衬砌最大拉应力出现在边墙上上部靠近 C5 破碎带区域; 在运行期工况下, 衬砌最大拉应力区域出现在边墙与顶拱、底板的 4 个拐角处。

表 5 不同工况下衬砌最危险断面及其应力分布

根据表 5 计算结果, 基于水工混凝土结构设计规范, 按非线性配筋设计方法^[4, 16], 可计算出衬砌的钢筋用量。计算结果^[3]显示, 按 $\phi 28$ mm 钢筋配筋, 运行期配筋率最大为 0.57%。

目前, 针对溪洛渡水电站尾水岔洞处变形已经有近 2 a 的监测数据。图 6 列出了左岸尾水管 W2L1

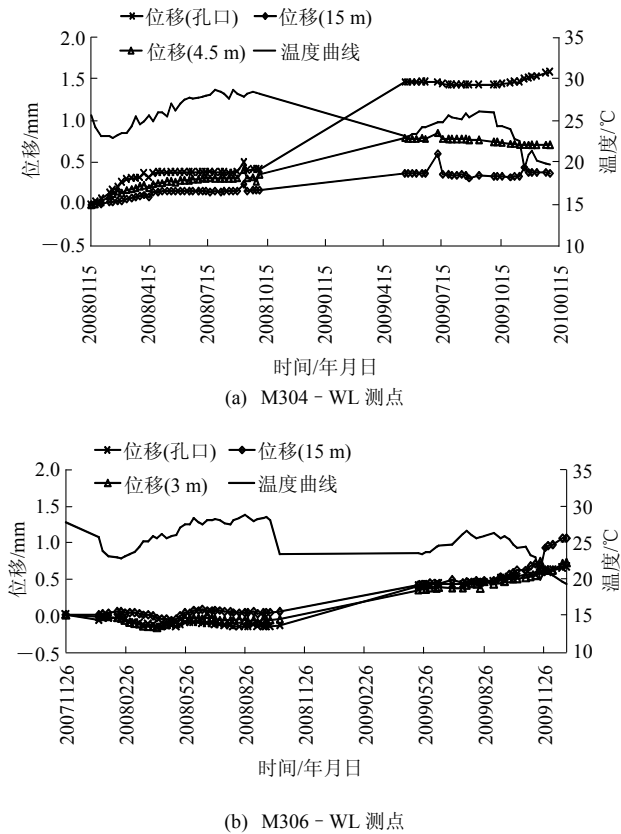


图 6 左岸尾水管 W2L1 断面拱顶变形监测过程曲线
Fig.6 Deformation monitoring curve of cross-section W2L1 of tailrace bifurcation tunnel in left bank

断面 M304 - WL 测点和 M306 - WL 测点(测点位置见图 4)拱顶变形监测过程线, 从监测数据可知目前岔洞变形小于 1.5 mm。与计算结果基本吻合, 见表 3 以及 2007 年的计算成果^[3]。说明本文的建议评价方法和计算成果可以指导同类工程施工。

4 结 论

本文针对目前国内外水利工程中大跨径地下尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析现状, 存在的主要问题进行了详细讨论, 主要结论如下:

(1) 在常用分析方法的基础上, 建议了大跨径尾水岔洞开挖与衬砌稳定的分析评价方法, 包括数值模型建立原则、分析内容, 流程, 评价指标等。

(2) 应用此评价方法对溪洛渡水电站尾水岔洞开挖与衬砌稳定进行研究。岔洞拱顶的变形监测结果与计算分析基本吻合。

本文建议的大跨径地下尾水岔洞开挖与衬砌稳定分析方法可用于指导工程设计, 也可供其他同类岩土工程设计参考。

致谢 参加本课题研究的还有中国水电工程顾问集团公司成都勘测设计院枢纽室的夏 勇、杨怀德、刘跃、周跃年等高级工程师, 在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 李 旻, 伍鹤皋. 埋藏式钢岔管与围岩联合承载有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(1): 24 - 26.(LI Min, WU Hegao. Finite element analysis of interaction between underground steel bifurcation and surrounding rock[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004, 37(1): 24 - 26.(in Chinese))
- [2] 林 鹏, 周雅能, 李子昌, 等. 官地地下尾水岔洞开挖与衬砌稳定研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 283 - 289.(LIN Peng, ZHOU Yaneng, LI Zichang, et al. Stability study on excavation and lining structure of tailrace bifurcation tunnel of Guandi Project[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(2): 283 - 289.(in Chinese))
- [3] 林 鹏. 溪洛渡工程尾水岔洞开挖与衬砌三维有限元计算分析[R]. 北京: 清华大学, 2007.(LIN Peng. 3D finite element analysis of excavation and lining structure of tailrace bifurcation tunnel of Xiluodu project[R]. Beijing: Tsinghua University, 2007.(in Chinese))
- [4] 李珍照. 中国水利百科全书水工建筑物分册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(LI Zhenzhao. Encyclopedia of China water conservancy: hydraulic structures volumes[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))
- [5] STILLE H, PALMSTRO A. Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1): 46 - 64.
- [6] 司铁汉, 黄生文. 大跨径隧道围岩应力有限元分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005, 2(4): 7 - 11.(SI Tiehan, HUANG Shengwen. Finite element analyses of surrounding rock stress in large-span tunnel[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2005, 2(4): 7 - 11.(in Chinese))
- [7] 习 剑, 李艳茹, 刘新宇. 大跨度岩石坑道T形接头衬砌受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 2 194 - 2 196.(XI Jian, LI Yanru, LIU Xinyu. Stress analysis of T-shaped connection of rock tunnel structure with long span[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 2 194 - 2 196.(in Chinese))
- [8] Itasca Consulting Group Inc.. FLAC^{3D} Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions(Version 2.0)[R]. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group Inc., 1992.
- [9] 姚长春, 于海龙, 张 洋. 基于FLAC^{3D}软件求解衬砌强度安全系数的方法[J]. 四川建筑, 2007, 27(2): 115 - 116.(YAO Changchun, YU Hailong, ZHANG Yang. Method to compute strength safety coefficient of lining based on FLAC^{3D}[J]. Sichuan Architecture, 2007, 27(2): 115 - 116.(in Chinese))
- [10] 周维垣, 杨 强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.(ZHOU Weiyuan, YANG Qiang. Numerical computational methods for rock mechanics[M]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2005.(in Chinese))
- [11] 孙 均, 汪炳鉴. 地下结构有限元解析[M]. 上海: 同济大学出版

- 社, 1986.(SUN Jun, WANG Bingjian. FEM of underground structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1986.(in Chinese))
- [12] BROX D, HAGEDORN H. Extreme deformation and damage during the construction of large tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(1): 23 - 28.
- [13] 郭海庆, 邓昌铁, 周澄. 地下岔洞开挖的三维弹塑性有限元分析[J]. 水电能源科学, 2000, 18(4): 25 - 27.(GUO Haiqing, DENG Changtie, ZHOU Cheng. Study of the excavation of underground bifurcated tunnels by 3D elastoplastic FEM[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000, 18(4): 25 - 27.(in Chinese))
- [14] 王怀良, 伍鹤皋, 余成学. 尾水岔洞三维有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(3): 8 - 13.(WANG Huailiang, WU Hegao, SHE Chengxue. 3D finite element analysis of tailrace bifurcated tunnels[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004, 37(3): 8 - 13.(in Chinese))
- [15] 周维垣, 林鹏, 杨若琼, 等. 高拱坝地质力学模型试验方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.(ZHOU Weiyuan, LIN Peng, YANG Ruoqiong, et al. Method and application of geo-mechanical model test on high arch dam[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.(in Chinese))
- [16] 林鹏, 周雅能, 李子昌, 等. 大跨径非规则地下结构衬砌非线性配筋分析[C]// 第四届深部岩体力学与工程灾害控制学术研讨会学术会议论文集. 北京: 中国矿业大学出版社, 2009: 405 - 410. (LIN Peng, ZHOU Yaneng, LI Zichang, et al. Nonlinear reinforcement analysis of large-span and irregular underground lining structure[C]// The Fourth Deep Rock Mechanics and Engineering Disaster Control Conference. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2009: 405 - 410.(in Chinese))