

文章编号:1672-3031(2021)01-0074-07

双层复合衬砌隧洞运行安全预警监控指标研究

刘毅^{1, 2, 3}, 李海枫^{2, 3}, 商峰^{1, 2, 3}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院 水利部水工程建设与安全重点实验室, 北京 100038;

3. 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038)

摘要: 双层复合衬砌结构是一种新型隧洞衬砌结构型式, 其外衬承受外部水土压力, 内衬承受内水压力, 体现了“结构联合、功能独立”的新型输水隧洞设计理念, 目前该衬砌型式已成功应用到我国北方某输水工程中, 如何确定双层复合衬砌隧洞安全预警监控指标是工程运行管理的重点和难点。本文基于以往研究成果, 提出了工程结构监控指标及监控阈值确定的统一技术路径; 根据双层复合衬砌结构受力特点, 开展可能破坏模式分析; 基于破坏模式与监测量的敏感性分析, 提出层间渗压作为双层复合衬砌隧洞结构核心监控指标, 内衬处的钢筋计测值以及外衬处的测缝计测值作为辅助监控指标, 为双层复合衬砌隧洞安全运行提供借鉴和参考。

关键词: 双层复合衬砌结构; 安全预警; 监控指标; 破坏模式

中图分类号: TV431

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200121

1 研究背景

输水隧洞监测信息可为工程安全分析评估提供科学依据, 目前输水隧洞安全监控大多借鉴坝工领域工程安全监测的相关经验, 输水隧洞安全监控有关的研究相对滞后^[1]。何勇军等^[2]在输水隧洞监测方法、工程运行安全影响因素的基础上, 基于统计学原理提出了输水隧洞动态监控指标的拟定方法; 符志远等^[3]基于穿黄隧洞受力特点, 提出了隧洞运行若干风险因子, 并未给出明确的监控指标; 靳玮涛、胡长华等^[4-5]给出了穿黄隧洞安全运行的若干警戒值, 包括渗压值、渗漏量及测缝值等, 但是这些指标未能体现“分级监控、逐级预警”的现代监控理念。

穿黄隧洞是南水北调中线工程与黄河的交叉建筑物, 是中线工程上建设规模最大、技术最复杂的工程之一, 也是保障中线工程稳定输水的关键节点^[6]。穿黄隧洞采用双层复合衬砌结构型式^[7], 这种新型结构型式体现了“结构联合、功能独立”的新型输水隧洞设计理念, 解决了穿越黄河多相复杂软土地层高压输水隧洞结构受力和高压内水外渗导致围土失稳破坏难题, 较好地适应河床游荡作用引起的纵向动态大变形^[8]。这种位于软基上的新型水工隧洞结构型式, 在我国水利行业尚属首次, 如何通过监测信息准确把控隧洞运行安全是一个值得研究的问题。

鉴于此, 本文提出了调水工程监控指标及监控阈值确定的统一技术路径, 以穿黄隧洞为具体案例研究提出了其监控预警指标体系, 可为穿黄隧洞安全运行提供借鉴和参考。

2 安全监控指标确定方法

2.1 安全监控指标确定原则 工程安全监控指标是对工程结构的荷载或效应量所规定的安全界限

收稿日期: 2020-07-07; 网络首发时间: 2021-01-22

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210121.1657.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406700); 国家自然科学基金项目(51779277); 中国水科院科研专项(SS0145B612017, SS0145B392016); 流域水循环模拟与调控重点实验室资助项目(SKL2020ZY10)

作者简介: 刘毅(1979-), 正高级工程师, 主要从事水工结构研究。Email: liuyi@iwhr.com

值。这种指标用以衡量工程结构的运用是否正常、安全，当实测值在指标规定范围以内或数值以下时，一般可认为工程结构是安全或正常的，否则认为工程结构可能是不安全的或不正常的。安全监控指标应对结构运行过程中出现异常情况有较为敏感的响应或与工程结构安全状态具有紧密联系的特征。在实际工程中，安全监测项目和测点数量通常都很多，为了及时有效地进行安全监控，应选择一部分有控制作用的项目和有代表性的测点建立监控指标。

在确定监控指标之后，为便于实际操作，通常需要对监控指标进行分级处理，目的就是为了全面监控结构运行期的工作性态。在进行监控指标分级时需处理好两个问题，一是监控指标需划分为多少个等级，二是每个等级监控指标对应着什么样的工作状态或安全状态。通常，监控指标分级按照“概念清晰，层次分明，标准一致，工程实用”的原则进行分级。分级过少，监控指标对结构工作性态识别度不高；分级过多，虽然可以全面把控结构工作性态但不便于实际操作。在确定监控指标的分级标准之后，需要给出相应的监测阈值，用于判断工程所处的安全状态，根据具体情况确定出需要采取的处理措施。监控阈值一般有单指标预警阈值和多指标预警阈值，如单指标预警阈值可采用变形监控，多指标预警阈值可综合变形、应力、渗压等因素。阈值取值有固定阈值、波动阈值，各监控指标预警阈值的确定方法不同。工程中常用于确定阈值的方法有：置信区间法、典型效应量小概率法、结构分析法、极限状态法等。

2.2 安全监控指标确定技术途径 根据监控指标确定原则，本文团队提出了工程结构安全监控指标及阈值确定的统一技术路径^[9]，详见图1，具体步骤如下：(1)通过调研梳理破坏模式及破坏路径；(2)开展现有监测量综合分析，包括监测对象、部位及项目，确定监测物理量；(3)基于监测物理量与破坏模式的敏感程度，进而确定监控指标；(4)开展典型建筑物工作性态与易损性分析，基于工程运行特点和破坏机理提出监测效应量监控指标等级的划分方法，即监控指标分级问题；(5)基于监控指标分级标准，采用统计理论、结构分析方法等多种方法，确定监控指标分级控制阈值，即监控阈值。

其中，破坏模式及路径识别、现有监测量分析是基础；安全监控指标拟定、典型建筑物性态与易损性分析是基础；安全监控指标分级是关键；监控阈值确定是核心。

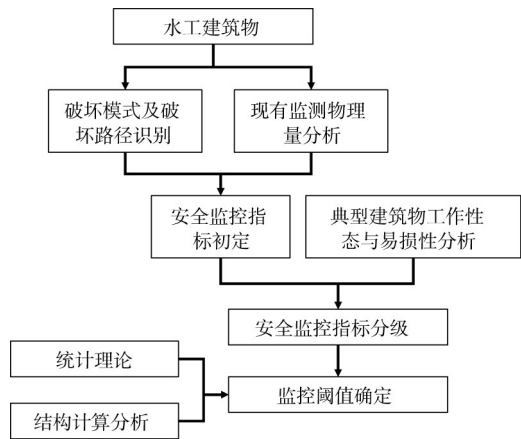


图1 工程结构监控指标及阈值确定统一技术路径示意图

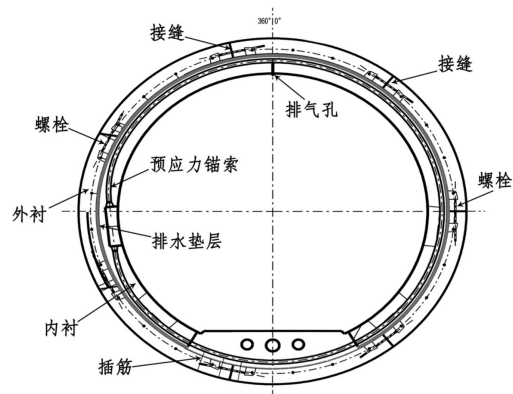


图2 双层衬砌结构断面示意图

3 穿黄隧洞受力及破坏机理分析

3.1 穿黄隧洞受力特点分析 穿黄隧洞地处黄河典型游荡性河段，该河段所处围土为饱和砂土地层，地质条件复杂，内水压达0.51 MPa。针对上述环境特点，穿黄隧洞采用盾构隧洞预应力复合衬砌结构，示意图如图2所示。外衬为盾构施工过程中形成的管片环，内衬为现浇预应力钢筋混凝土结构，车道平台上方的内、外衬之间由7 mm的弹性排水垫层分隔，内、外衬于车道平台下方有插筋相连且整体浇筑(60°范围内)，内、外衬砌按单独受力考虑。在盾构施工过程中，外衬由管片(宽1.6 m，

厚 0.4 m)通过螺栓拼装成整体,管片之间(简称纵缝)以及环与环之间(简称环缝)均设有软垫层,通过螺栓连接;内衬为 C40 预应力钢筋混凝土结构,内径 7.0 m,厚度 45 cm,标准分段长度 9.6 m,每段环缝长 23.4 m(算至止水铜片中心)。

穿黄隧洞双层复合衬砌结构安全等级按 1 级建筑物考虑;设计时严格限制外衬结构变形和接缝张开量,以满足正常使用与防水要求,其控制指标为:衬砌圆环直径变形不大于 $6‰D$ (D 为隧洞直径),管片接缝张开不大于 6 mm。另外,对于普通钢筋混凝土结构,应满足承载要求和限裂要求;对于预应力钢筋混凝土结构,要求在基本荷载组合下,满足全截面受压要求;在特殊荷载组合下,允许出现拉应力,但应满足抗裂要求。

这种双层复合衬砌结构型式是在外衬和内衬之间增设弹性垫层,使两层衬砌完全分开受力,外衬承担外部水、土荷载,内衬承担内部水压力,内外分开,受力明确,剪力和变形在两层衬砌间不相传递,内衬不得产生渗水裂缝,弹性垫层既要隔离两层衬砌又要方便施工。这种体现了“结构联合、功能独立”的新型输水隧洞设计理念,解决了穿越黄河多相复杂软土地层高压输水隧洞结构受力和高压内水外渗导致围土失稳破坏难题,较好地适应河床游荡作用引起的纵向动态大变形。

3.2 穿黄隧洞可能破坏路径分析 穿黄隧洞外衬为盾构施工的分块拼装结构,管片接缝众多,而内衬又承受高内水压力;如发生内水外渗,渗漏量超出层间排水能力或局部排水失效,垫层处会产生较大水压力,该水压力对内衬受力有利但对外衬受力极为不利,将使外衬受拉,外衬环向和径向接缝会产生张拉变形,若接缝完全张开并超过变形限值,PE 膜会失去隔水功能,可能会导致洞外砂土渗透破坏,危及隧洞安全。为此,本文建立穿黄隧洞有限元计算模型进行破坏模式及破坏路径研究,具体模型见图 3。计算选取正常运行工况,并在此基础上特别考虑发生内水外渗时产生不同层间渗压的影响,即垫层处考虑不同渗压水位。计算参数取值见表 1。

表 1 计算参数

部位	自重/(kN/m ³)	弹性模量/变形模量/MPa	泊松比	备注
外围土体	20	40	0.45	按线弹性考虑
内衬	25	325000	0.167	C40 混凝土
外衬	25	345000	0.167	C50 混凝土
垫层	10	1.5	0.3	厚度 7mm

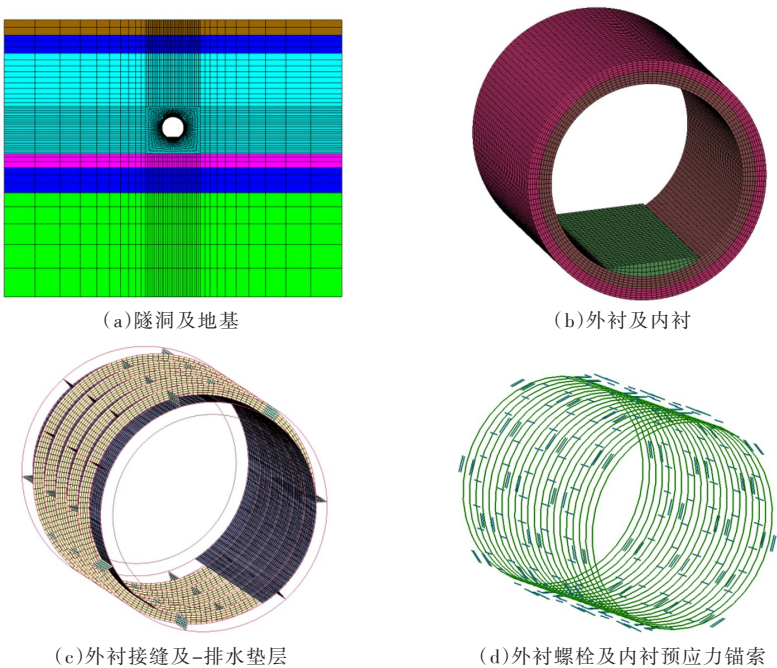


图 3 穿黄隧洞有限元计算模型

垫层内不同水位下外衬环向应力分布、外衬管片接缝开合状态及接缝开度过程线见图4—图6。

当隧洞出现内水外渗时，垫层处将产生水压力，该水压力对内衬受力有利而对外衬不利。由内衬环向应力分布云图可知，随着垫层内水位不断增加，内衬环向应力始终为压应力，并且随着垫层水位增加而不断增大；而外衬环向应力则由受压转向受拉，并且环向拉应力逐渐增大。结合不同水位下外衬接缝开合状态分布图可知，当垫层内无渗水时，外衬内外壁环向基本处于受压状态，环向与径向接缝处于接触状态；当垫层内出现水位为70 m左右的渗水时，管片内壁处部分接缝出现张开，虽然接缝能够释放部分环向应力，但受到螺栓锚固影响，管片内壁处部分区域的环向拉应力仍超过1 MPa，此时外壁环向仍处于受压状态；随着垫层内水位逐渐增大，管片接缝逐渐张开，受螺栓锚固影响，管片内壁环向拉应力逐渐增大；当垫层内水位达到80 m时，除外衬底部即内衬行车道以下区域的管片接缝未张开外，管片径向接缝大部分张开并贯通，环向接缝大部分已经张开但未贯通，此时内壁大部分区域环向应力已超过2 MPa，外壁环向也出现拉应力；当垫层内水位达到90 m时，管片环向接缝已基本贯通，内壁环向应力已达到3 MPa；当垫层内水位达到100 m时，除外衬底部即内衬行车道以下区域的管片接缝未张开外，管片所有接缝均张开并贯通，管片径向接缝开度达

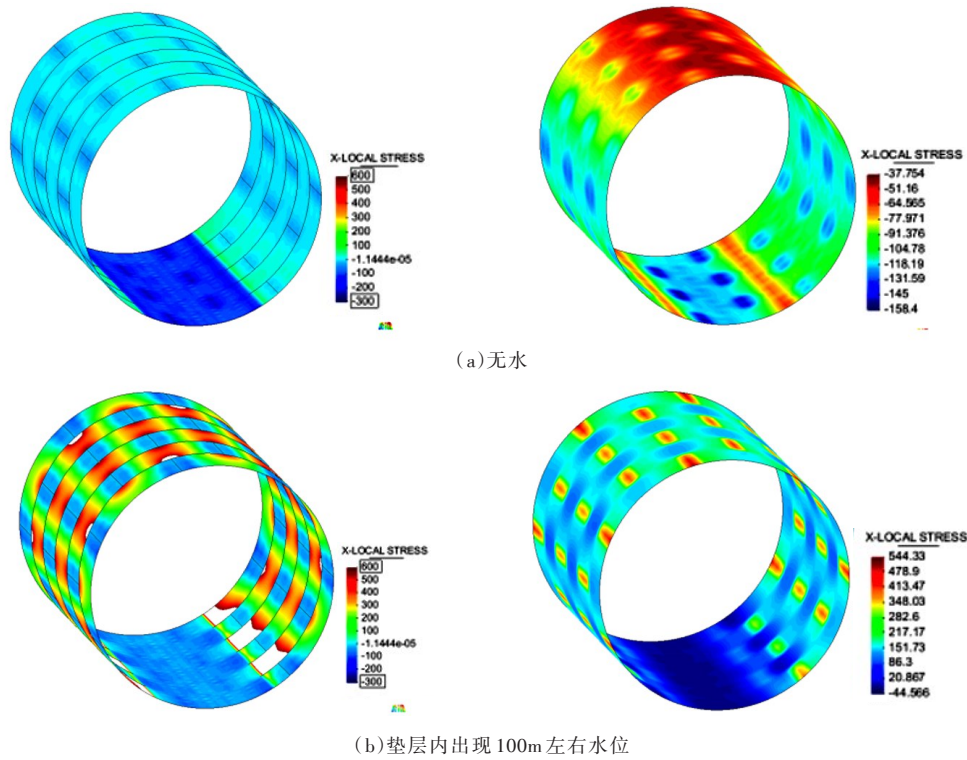


图4 垫层内不同水位下外衬内壁与外壁环向应力分布云图(左边为内壁,右边为外壁;单位:0.01MPa)

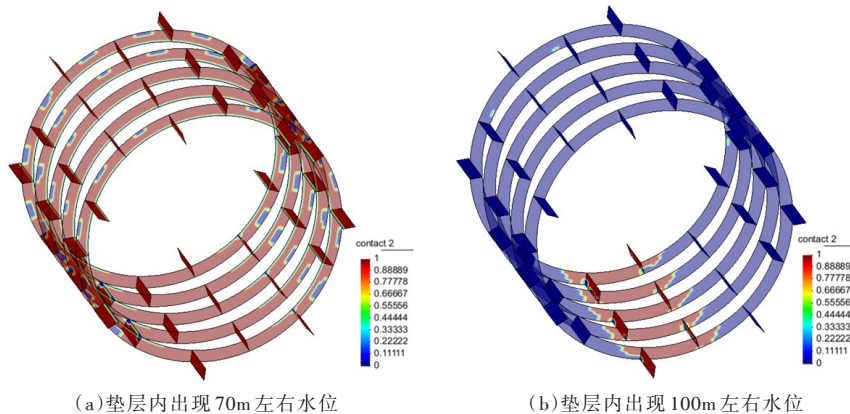


图5 垫层内不同水位下外衬接缝开合状态分布云图(0: 张开; 1: 接触)

到6 mm。

综合以上分析，穿黄隧洞这种双层复合衬砌结构发生破坏的可能路径如下：内衬接缝止水破坏导致洞内高压水外渗→垫层内水位达到100 m→外衬接缝全部张开且宽度超出限值，导致洞外砂土渗透破坏→隧洞局部破坏失稳。

4 穿黄隧洞监测物理量分析

4.1 监测项目、布置及频次 根据《南水北调东中线一期工程运行安全监测技术要求 NSBD21-2015》规定，穿黄隧洞主要监测项目包括隧洞渗水压力监测(渗压计)、隧洞接缝变形监测(测缝计)、混凝土应力应变监测(钢筋计、应变计)、裂缝监测(测缝计)、渗漏监测等。其中，典型监测断面仪器布置见图7。

在通水运行初期各监测物理量监测频次分别为：渗压计2次/d、隧洞渗漏量2次/d、测缝计1次/2d、钢筋计应变计锚索测力计1次/d。目前监测频次为：渗压计1次/d、隧洞渗漏量1次/d、其余仪器1次/7d。

4.2 监测物理量分析 根据穿黄隧洞双层复合衬砌结构受力特点及破坏模式分析可知，要确保穿黄隧洞运行安全，关键要防止洞内高压水从内衬向层间渗水，层间排水不及时，导致层间产生渗压作用在外衬上，进而诱发洞外围土渗透破坏。因此，渗压监测至关重要，这里选取某典型监测断面外衬管片处2支渗压计进行重点分析。

渗压计测值特征值统计见表2，删除个别粗差后，测值过程线见图8。在分析时段2012年11月30日—2020年11月6日期间，渗透压力最大值为147.22 kPa，测点为P01MSX，发生在2017年6月5日，变幅介于94.50 kPa ~ 147.22 kPa。从测值过程线来看，渗压计自2015年后，呈年周期性波动变化。

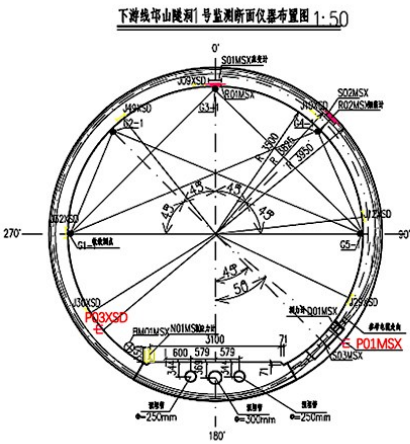


图7 典型监测断面仪器布置图

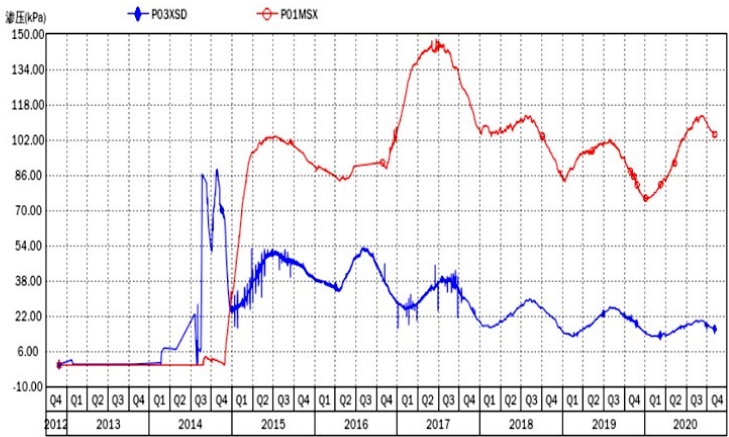


图8 典型渗压计测值过程线

表2 渗压计测值特征值统计表 (单位: kPa)

物理量	测点编号	分析时段	最小值	最小值日期	最大值	最大值日期	变幅
渗压	P01MSX	20121130—20201106	0	20121130	147.22	20170605	147.22
渗压	P03XSD	20121130—20201106	0	20121130	94.50	20140910	94.50

5 穿黄隧洞预警监控指标研究

5.1 监控指标拟定 本节基于3.2节穿黄隧洞破坏路径分析成果，采用数学模型法中的确定性模型来建立穿黄隧洞运行期监控指标。基于穿黄隧洞双层复合衬砌结构破坏模式与监测物理量的敏感程度可知，钢筋计测值、应变计测值、渗压计测值及测缝计测值均可作为穿黄隧洞复合衬砌结构的监控指标；但是钢筋计测值、应变计测值及测缝计测值均是局部监测量，而渗压计测值则可较全面反映层间渗压变化情况。因此，选择渗压计测值是核心监控指标，钢筋计测值和测缝计测值是辅助监控指标。

5.2 监控指标分级 基于上述破坏阶段，按照“概念清晰，层次分明，标准一致，工程实用”的原则^[10]可将穿黄隧洞衬砌结构监控状态分为三级，即一级状态需要引起关注，二级状态需要进行干预处理，三级状态则是比较紧急的状况。具体分级如下：一级监控，对应内衬或外衬出现渗漏通道导致层间存在一定渗水量，局部产生层间渗压的工作状态，可选择渗压计测值和钢筋计测值作为监控指标；二级监控，对应外衬管片接缝全部张开并贯通的工作状态，可选择渗压计测值作为监控指标；三级监控，对于外衬破坏、层间水位达到100 m工作状态，可选择渗压计测值和测缝计测值作为监控指标。

5.3 监控预警指标 综合以上监控指标以及监控分级，可建立穿黄隧洞双层复合衬砌结构的主从协作、多重配合的三级监控预警指标体系，具体见表3。

表3 穿黄隧洞双层复合衬砌结构监控预警指标

监控预警分级	核心监控指标		辅助监控指标	
	监测物理量	监测阈值	监测物理量	监测阈值
一级监控预警	层间渗压计测值	层间渗压测值水位达到80m	外衬钢筋计测值	钢筋应力约为20~30MPa
二级监控预警		层间渗压测值水位达到90m		
三级监控预警		层间渗压测值水位达到100m	外衬处测缝计测值	管片接缝张开不大于6mm

对于钢筋计测值而言，当钢筋周边混凝土出现裂缝时，考虑到混凝土极限拉应变一般为 $0.1\times10^{-3}\sim0.15\times10^{-3}$ ，根据《水工混凝土结构设计规范》(SL191-2008)，常用HPB235普通钢筋的弹性模量一般为 2.1×10^5 MPa，HRB400、HRB335和RRB400钢筋的弹性模量一般为 2.0×10^5 MPa，则由此可以大致推算钢筋应力约为20 MPa~30MPa，因此选择该值作为一级监控预警状态下钢筋计的监测阈值。

对于测缝计而言，设计严格限制外衬结构变形和接缝张开量，以满足正常使用与防水要求，其控制指标为：衬砌圆环直径变形不大于 $6\% D$ (D 为隧洞直径)，管片接缝张开不大于6 mm。由图6可知，当层间渗压测值水位达到100 m时，外衬管片接缝张开度将大于6 mm。因此选择该值作为三级监控预警状态下测缝计的监测阈值。

6 结论

通过以上研究，可得出以下结论：

(1)提出了工程结构安全监控指标及阈值确定的统一技术路径，即先开展建筑物破坏模式与破坏路径识别，结合现有监测物理量分析，进行安全监控指标初选，然后开展典型建筑物性态与易损性分析，进行安全监控指标的分级，最后采用统计理论与结构分析方法确定相应的监控阈值。其中，破坏模式及路径识别、现有监测量分析是基础；安全监控指标拟定、典型建筑物性态与易损性分析是基础；安全监控指标分级是关键；监控阈值确定是核心。

(2)基于穿黄隧洞双层复合衬砌结构受力特点，提出了双层复合衬砌结构可能破坏路径，即内衬接缝止水破坏导致洞内高压水外渗→垫层内水位达到100 m→外衬接缝全部张开且超出设计限值，导致洞外砂土渗透破坏→隧洞局部破坏。

(3)基于破坏路径与监测量之间的敏感性关系可知,钢筋计、应变计、渗压计及测缝计测值均可作为穿黄隧洞复合衬砌结构的监控指标,其中钢筋计测值、应变计测值及测缝计测值均是局部监测量,而渗压计测值则可较全面反映层间渗压变化情况;综合分析来看,层间渗压作为穿黄隧洞双层复合衬砌结构核心监控指标,外衬处钢筋计测值及外衬处测缝计测值作为辅助监控指标。本文建立的监控指标阈值可为工程运行提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 何勇军,范光亚,徐海峰,等.输水隧洞安全监控与预警技术研究进展[J].东北水利水电,2014,32(10):48-50.
- [2] 杨阳,何勇军,徐海峰,等.输水隧洞动态监控指标拟定方法[J].水利水电科技进展,2018,38(5):81-85.
- [3] 符志远,张传健.穿黄隧洞运行安全与检修条件评估[J].人民长江,2011,42(8):111-118.
- [4] 靳玮涛,赵刚毅.南水北调中线全线通水穿黄隧洞安全监测成果分析[J].西北水电,2016(2):73-79.
- [5] 胡长华,郝长江.南水北调中线穿黄工程安全监测设计[J].人民长江,2009,40(23):73-74.
- [6] 张传健,吕国梁,廖仁强.南水北调中线穿黄隧洞结构设计研究[J].人民长江,2009,40(23):85-87.
- [7] 钮新强,符志远,张传健.穿黄盾构隧洞新型复合衬砌结构特性研究[J].人民长江,2011,42(8):8-13.
- [8] 王慧,韦凤年.南水北调关键技术突破对推动我国水利技术进步具有重要意义——访中国工程院院士钮新强[J].中国水利,2019(23):29-32.
- [9] 杨天凯.调水工程安全运行若干关键问题研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2020.
- [10] 范哲,黎利兵,商玉洁.南水北调中线工程安全监测预警机制研究[J].水利水电快报,2019,40(4):57-60.

Research on operation safety warning and monitoring index of double layer composite lining tunnel

LIU Yi^{1, 2, 3}, LI Haifeng^{2, 3}, SHAGN Feng^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Key Laboratory of Construction and Safety of Hydraulic Engineering of Ministry of Water Resources,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Department of Structure and materials, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Double composite lining structure is a new type of tunnel lining structure, its outer lining under external water and soil pressure, lining under the internal pressure, embodies the "joint structure, functional independence" a new type of water conveyance tunnel design concept, now the lining pattern has been successfully applied to a water project in the north of China. How do you determine the double-layer composite lining of tunnel safety early warning monitoring index is the emphasis and difficulty in operation and management project. Based on the previous engineering research results, this paper proposes a unified technical path to determine the monitoring index and monitoring threshold of engineering structure. According to the technical path and the characteristics of the double-layer composite lining structure, the failure mode analysis of the tunnel is carried out. Based on the sensitivity analysis of failure mode and monitoring quantity, the interlayer seepage pressure is proposed as the core monitoring index of the double-layer composite lining structure. The measured values of steel bar meter in internal lining and seam measurement meter in external lining can be used as auxiliary monitoring indexes, which provides reference for the safe operation of double layer composite lining tunnel.

Keywords: double layer composite lining tunnel; safety warning; monitoring index; failure mode

(责任编辑: 祁 伟)