

文章编号:0559-9350(2020)12-1495-07

## 大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统研制与应用

凌永玉, 刘立鹏, 汪小刚, 傅睿智, 孙兴松

(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)

**摘要:** 根据水工隧洞衬砌受力特点, 研制出一种新型的大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统。该系统主要由压力筒体、加载系统、测量系统、封水结构组成, 其中压力筒体由厚22 mm的Q245R钢板制作, 尺寸为 $\varnothing 3000 \text{ mm} \times L4000 \text{ mm}$ , 外水压力试验时采用橡胶囊柔性加载方式或衬砌与压力筒体间高压水体直接加载方式, 内水压力试验时在隧洞内腔直接采用高压水体加载, 动力源由自主设计的伺服控制高压水泵与稳压筒体组成, 测量系统由常规检测仪器组合实现, 封水结构则由端头涂刷防水胶与双圈橡胶条实施。该模型试验系统在高外水压力、高内水压力作用下的水工隧洞衬砌试验结果表明, 所研制的试验系统能满足水工隧洞多种不同边界模型试验要求。

**关键词:** 水工隧洞衬砌; 物理模型试验系统; 高外水压力; 高内水压力

**中图分类号:** TV32

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slx.20200653

## 1 研究背景

水工隧洞是大型水利水电工程的重要组成部分, 其安全性关系整个工程的成败。衬砌作为水工隧洞的最终支护方式, 考虑主要赋存环境的结构型式选择、针对多变荷载因素的参数设计合理性等对于衬砌稳定安全尤为重要。此外, 开挖建设过程中岩体荷载变化、充水期隧洞内水作用、长期运行时围岩蠕变荷载、外水压力以及岩体地温与隧洞过水温度荷载等, 均对衬砌的稳定安全产生一定的影响。对于这些复杂的问题, 一方面要借助理论分析<sup>[1-2]</sup>、计算机模拟仿真进行研究<sup>[3-4]</sup>; 另一方面, 则需要借助大型物理模型试验的手段来解决<sup>[5]</sup>。目前, 国内外已经建造并开展试验的隧洞(道)物理模型试验系统多集中于研究分析地下洞室开挖过程中灾害模拟、围岩稳定、支护安全以及围岩与支护协同作用的影响等方面。苏海健<sup>[6]</sup>、李浪等<sup>[7]</sup>、张庆松等<sup>[8]</sup>和李术才等<sup>[9]</sup>研制了深长隧道突水突泥灾害演化模型试验系统, 研究隧洞建造过程中突水突泥灾害; 陈陆望<sup>[10]</sup>、张强勇等<sup>[11]</sup>、姜耀东等<sup>[12]</sup>和杨立云等<sup>[13]</sup>研制了深部巷道建设模型试验系统, 研究深埋地下隧洞建设期围岩稳定性; 朱合华等<sup>[14]</sup>和齐春等<sup>[15]</sup>等研制了盾构开挖模型试验系统, 研究盾构开挖泥膜形成及土压平衡过程等, 此外还有为了其他研究目的所设计研制的物理模型试验系统<sup>[16-18]</sup>。

与常规地下隧洞(道)工程相比, 水工隧洞特别是有压隧洞在充水期及运行期将承受高压内水作用或高压外水作用, 对衬砌的整体稳定与安全形成显著影响。现有的水工隧洞物理模型多集中于考虑施工期围岩稳定及支护结构安全方面, 对于运行期衬砌安全的模型试验也多为研究复合衬砌对于外水压力的影响上<sup>[19-21]</sup>, 且受限于模型的尺寸, 采用大比尺试验时相似材料的选择异常困难, 同时还对结果的影响很大。设计并研制相关物理模型试验系统, 对水工有压隧洞承受高内、外水作用下衬

收稿日期: 2020-08-18; 网络首发日期: 2020-11-23

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201119.1605.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401804); 中国水科院基本科研业务费专项项目(GE0145B452016, GE0145B822017); 国家自然科学基金面上项目(51879284)

作者简介: 凌永玉(1966-), 高级工程师, 主要从事水利水电工程防灾减灾研究。E-mail: lingyy@iwhr.com

通讯作者: 刘立鹏(1983-), 高级工程师, 主要从事地下洞室及结构工程稳定性研究。E-mail: liulip@iwhr.com

砌受力变化, 以及承压过程中围岩与衬砌联合受力变化、内水外渗时衬砌与围岩接触关系演变等研究有迫切需求, 上述变化的影响对于有压隧洞衬砌与稳定安全尤为重要, 是衬砌类型选择、参数设计与优化中必须考虑的关键问题。

基于此, 本文考虑水工隧洞衬砌受力特点, 设计开发了一种新的大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统, 可进行高内水荷载、高外水荷载的大尺寸水工衬砌试验, 降低按相似原则选择模型试验材料对试验结果的影响, 同时还可以进一步研究围岩与衬砌联合承载及衬砌内外温度变化等因素对衬砌结构安全的影响。

## 2 大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统研制及试验流程

**2.1 设计目的** 水工有压隧洞与常规交通隧道、采矿隧洞等不同, 其运载主体为水体。在充水期及运行期, 根据过水需求、水头变化等, 通常衬砌上会具有一定的内水压力作用, 同时在放空检修期又由于岩体中地下水作用而需要承受较高的外水作用。在这一过程中, 围岩与衬砌间的接触关系及联合承载作用会发生变化, 进而影响衬砌受力变形及安全。基于此, 所设计的大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统主要可用于研究在不同比尺下水工隧洞在变化的内外水作用时衬砌受力变形及安全, 同时可进一步研究围岩与衬砌联合承载及衬砌内外温度变化等因素对衬砌结构安全的影响。

**2.2 主要结构及组成** 大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统主要由压力筒体、加载系统、测量系统、封水结构组成。压力筒体由厚 22 mm 的 Q245R 钢板制作, 尺寸为  $\text{Ø}3000 \text{ mm} \times \text{L}4000 \text{ mm}$ , 用以提供衬砌反向荷载(图 1), 最大可承受内、外压荷载为 1.2 MPa。压力筒体两端为厚 65 mm 的 Q245R 钢板制作的法兰盘, 主要是用于封堵衬砌内外水体, 防止隧洞内、外水体发生连通。

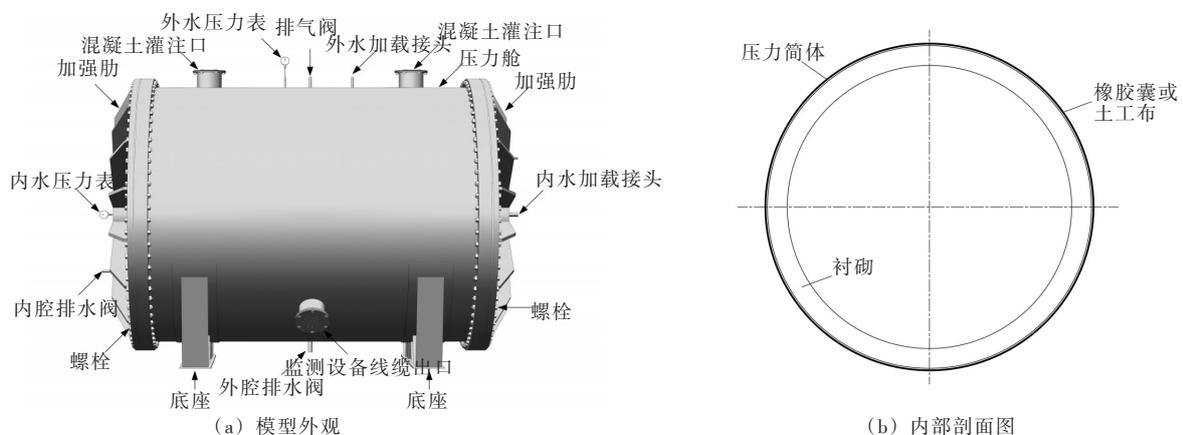


图 1 水工隧洞衬砌物理模型试验系统中的压力筒体

为便于混凝土衬砌浇筑、衬砌外水压力测量、内水加载、外水加载、监测设备线缆进出以及试验后排水等, 压力筒体上布置有 2 个混凝土灌注口( $\text{Ø}300 \text{ mm}$ )、内水压力表、外水压力表、内水加载接头、外水加载接头等(图 1)。

**2.3 加载系统** 目前隧洞(道)工程物理模型中主要有刚性加载(位移加载)和柔性加载(应力加载)两种边界条件实现方式, 加载动力来源则主要有: 重力加载、电机加载、液压加载、气压加载和复合加载等<sup>[22]</sup>。考虑水工隧洞主要受力情况及试验需求, 大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统采用应力加载边界条件实现方式, 根据试验时衬砌与压力筒体间水体的封堵需求, 外水压力试验时可选择衬砌外橡胶囊柔性加载方式或衬砌与压力筒体间高压水体直接加载方式(衬砌与筒体间铺设土工布作为水体通道), 内水压力试验时直接采用隧洞内腔高压水体直接加载方式。动力来源则由自主设计的伺服控制高压水泵与稳压筒体实现(图 2)。

单个加压橡胶囊尺寸为  $100 \text{ cm} \times 92 \text{ cm}$ , 主体橡胶材料性能参数如表 1 所示。



(a) 加压水泵系统



(b) 伺服控制系统

图2 水工隧洞衬砌物理模型试验系统中的水压力加载系统

表1 加载腔主体橡胶材料主要性能参数

性能指标	邵氏硬度	拉伸强度/MPa	拉断伸长率/%	磨损/mm <sup>3</sup>
具体参数	55	24.9	660	98

**2.4 测量系统** 物理模型试验中根据试验目的，一般分为应力与应变测量、位移与变形量测以及渗压量测等。所设计的水工隧洞衬砌物理模型不进行地下洞室开挖围岩位移与屈服模拟，故而整个量测系统主要为衬砌应力与应变测量以及衬砌内外作用水压力测量。由于物理模型试验系统尺寸较大的优势，可采用常规的监测仪器，如钢筋计、应变计、压力盒等，同时考虑该物理模型系统主要为内、外水作用下的衬砌安全与稳定试验，所涉及的测量系统需具有一定耐渗能力。

**2.5 封水结构** 由于水工隧洞与交通隧洞、采矿巷道等不同，充水试验过程中防止衬砌内外水通过衬砌两端发生内外水体连通、高外水压力作用下衬砌稳定安全试验中防止高外水通过衬砌两端外渗等是整个模型试验关键，所设计的大尺寸水工隧洞衬砌模型试验系统为防止上述问题，主要采用两种方式进行封水设计(图3)。



(a) 混凝土衬砌端面防水胶



(b) 法兰盘上安装的橡胶条

图3 水工隧洞衬砌物理模型试验系统中的封水结构

具体通过以下措施防止衬砌外水体与隧洞内水体连通以及衬砌外水体沿衬砌两端发生外渗：(1)在浇筑好的混凝土衬砌两个端头涂刷防水胶堵水(图3(a))；(2)法兰盘与压力舱体间设置双圈橡胶条，内圈与所浇筑的混凝土衬砌端头接触，外圈与压力舱体及混凝土衬砌端头接触(图3(b))。通过法兰盘与压力筒体间所设置的72个 $\phi 12$  mm 高强螺栓的挤压力作用进行压实防渗。

**2.6 主要试验流程** ①根据拟进行的衬砌试验尺寸、内外水压力大小、配筋等情况，为保证模型试验结果能够准确反映原型结构的应力与变形，确定合适的模型比尺；②按相似原则选择模型试验材料，确定衬砌、钢筋等参数；③选择外水加载方式，如采用橡胶囊加载方式或考虑为围岩变形下衬

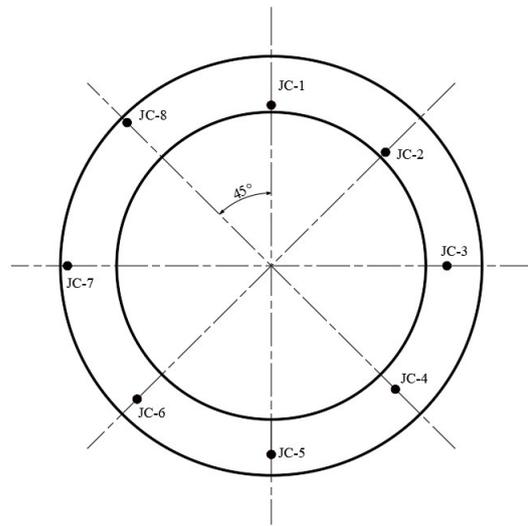
砌受力变化试验,在衬砌浇筑前于压力筒体内壁安装橡胶囊,如采用衬砌与压力筒体之间直接加载方式,则在压力筒体内壁铺设土工布;④采用支架方式安装应变计、压力盒等检测仪器,并浇筑衬砌混凝土;⑤引出检测仪器缆线,并安装读数设备;⑥混凝土衬砌龄期达到后做好堵水,并封装两侧法兰盘;⑦根据制定试验加载方案进行试验,并记录相应检测数据。

### 3 水工隧洞衬砌高外、内水压力作用模型试验

**3.1 高外水压力作用下水工隧洞衬砌试验** 衬砌遭遇过高地下水压力作用时,如衬砌设计参数及防排水不当,势必会影响衬砌结构安全,在不同外水压力作用下的衬砌结构安全历来是设计人员关注的重点。此处,利用所设计的大尺寸水工隧洞衬砌模型试验系统对不同外水压力作用下衬砌径向应力及环向应力大小变化进行模型试验研究,其中素混凝土衬砌外径 2.998 m,厚 0.4 m,标号为 C20( $E=29.7$  GPa,  $\nu=0.21$ ),采用衬砌与压力筒体间高压水体直接加载方式加载,外水压力大小为 0.1 ~ 1.0 MPa,等间隔 0.1 MPa 加载,不同压力下稳压时间为 30 min。在轴线 1.5 m 处布置一个监测断面,用于监测试验过程中混凝土衬砌径向及环向应变变化,所安装的应变计位置如图 4 所示。

不同外水压力作用下,衬砌环向及径向应力大小变化如图 5 所示。由图 5 可知,混凝土衬砌承受外水压力作用时,衬砌环向与径向始终保持为受压状态。随着衬砌外水压力的逐级增加,衬砌不同位置的环向应力及径向应力相应增加,1.0 MPa 外水压力作用下衬砌环向压应力达 -3.894 MPa,径向压应力达 -0.872 MPa;同时,由图 5 可知各级压力下稳压过程中监测仪器测值较为平稳,为论证大尺寸水工隧洞衬砌模型试验系统在加载过程中的稳定性以及试验结果是否合理,将 0.5、1.0 MPa 外水压力作用下的试验值与厚壁圆筒承受外压作用下的 Lamé 解值<sup>[23]</sup>进行对比,具体如表 2 所示。

由表 2 可知,在衬砌外作用不同外水压力时,衬砌的径向应力与环向应力试验测值均值与理论计



传感器编号	距内壁距离/cm	测值
JC-1	5	环向应变
JC-2	5	径向应变
JC-3	15	环向应变
JC-4	15	径向应变
JC-5	25	环向应变
JC-6	25	径向应变
JC-7	35	环向应变
JC-8	35	径向应变

图 4 衬砌中应变计空间排布

表 2 不同外水压力作用下衬砌应力测值均值及标准差

序号	外水压力 /MPa	距内壁距离 /cm	理论计算值/MPa		环向应力		径向应力	
			环向应力/MPa	径向应力/MPa	测值均值/MPa	标准差	测值均值/MPa	标准差
1	0.5	5.0	-2.071	-0.092	-1.958	0.011	-0.085	0.008
		15.0	-1.919	-0.244	-1.850	0.008	-0.228	0.005
		25.0	-1.800	-0.364	-1.718	0.012	-0.348	0.009
		35.0	-1.704	-0.459	-1.619	0.010	-0.436	0.010
2	1.0	5.0	-4.143	-0.184	-3.894	0.015	-0.174	0.008
		15.0	-3.839	-0.488	-3.703	0.014	-0.459	0.011
		25.0	-3.600	-0.727	-3.438	0.009	-0.698	0.007
		35.0	-3.409	-0.918	-3.238	0.012	-0.872	0.009

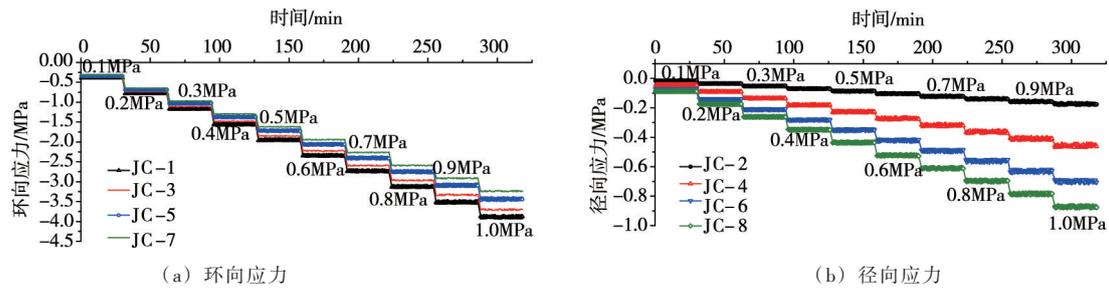


图5 不同外水压力作用下衬砌径向及环向应力

算值较为接近，在各级压力下环向应力及径向应力测值波动较小，监测仪器所得测值标准差较小，说明大尺寸水工隧洞衬砌模型试验系统的加载稳压系统能够提供较为稳定的水体压力，监测单元性能可靠，试验结果合理，能够满足大尺寸水工隧洞衬砌模型试验的需要。

**3.2 高内水压力作用下水工隧洞衬砌试验** 在高内水作用下混凝土衬砌一般均会开裂，《水工隧洞设计规范》(SL279-2016)<sup>[24]</sup>中对于有压隧洞衬砌裂缝宽度进行了限制，即限裂式设计。对于实际工程则需了解所设计的衬砌是否满足规范要求，掌握不同内水压力作用下衬砌开裂的可能性及开裂水头量值。此处，利用所设计的衬砌模型试验系统对不同内水压力作用下衬砌径向应力及环向应力变化进行模型试验研究，其中混凝土标号、衬砌厚度、内水压力大小设置、加载方案以及监测方案均与高外水压力作用下水工隧洞衬砌试验一致。不同内水压力作用下衬砌环向及径向应力变化如图6所示。

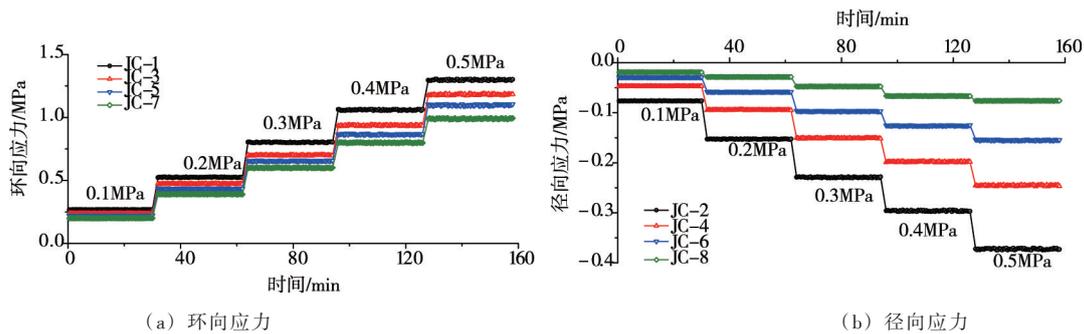


图6 不同内水压力作用下衬砌径向及环向应力

由图6可知，水工隧洞承受内水压力作用时，衬砌环向始终保持为受拉状态，且随着隧洞内水体压力的逐级增加，衬砌环向及径向应力逐渐增加。内水压力为0.5 MPa时，衬砌环向拉应力达1.298 MPa，径向压应力为-0.372 MPa。试验过程中，当隧洞内水体压力达到0.55 MPa时，压力筒体上安装的压力表出现读数并快速增加至与隧洞内水体压力一致，表明衬砌开裂(图7)，衬砌内水体由裂缝外渗至衬砌外，即在试验参数下，衬砌的启裂水头为55 m。

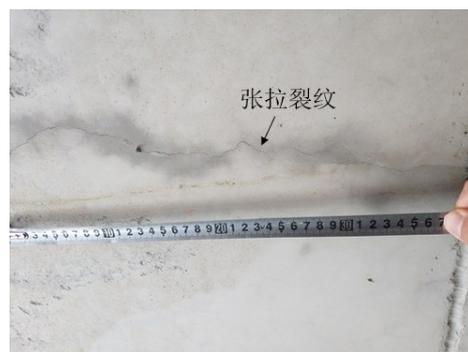


图7 高压内水试验时衬砌所产生裂纹

衬砌内水压力为0.3、0.5 MPa时，衬砌环向应力与径向应力测值均值、标准差如表3所示。由表3可知，在水工隧洞内作用不同的内水压力时，衬砌径向应力与环向应力试验测值均值标准差均较小，说明所研制的模型试验系统能够有效的进行高内水作用下的衬砌试验，满足水工隧洞衬砌试验需要。

表3 不同内水压力作用下衬砌应力测值均值及标准差

序号	外水压力/MPa	距内壁距离/cm	环向应力		径向应力	
			测值均值/MPa	标准差	测值均值/MPa	标准差
1	0.3	5.0	0.802	0.009	-0.229	0.002
		15.0	0.699	0.003	-0.151	0.002
		25.0	0.656	0.003	-0.096	0.002
		35.0	0.598	0.002	-0.048	0.001
2	0.5	5.0	1.298	0.005	-0.372	0.003
		15.0	1.181	0.005	-0.245	0.003
		25.0	1.099	0.005	-0.154	0.003
		35.0	0.990	0.003	-0.076	0.002

#### 4 结论

(1)所研究开发的大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统,长4.0 m、直径3.0 m,水体最大压力为1.2 MPa。该系统能够较好地模拟水工隧洞衬砌承受内水压力和外水压力作用过程,试验加载系统性能稳定,测量系统可满足试验需要,封水结构能有效阻止衬砌内、外水体发生连通对试验结果产生的影响,可用于研究水工隧洞在运行期及放空检修期不同工况下的衬砌受力变形及安全。(2)水工隧洞衬砌承受外水压力作用时,与厚壁圆筒Lamé解较为一致,衬砌环向与径向始终保持为受压状态,且随着外水压力增加,衬砌不同位置的环向压应力及径向压应力相应增加,在试验中1 MPa外水压力作用下,衬砌环向应力可达到-3.894 MPa。(3)水工隧洞衬砌承受内水压力作用时,衬砌环向始终为受拉状态,且随着隧洞内水体压力的增加,衬砌环向应力逐渐增加,在试验中内水压力为0.5 MPa时衬砌环向应力达1.298 MPa,内水水头达到55 m时,混凝土衬砌开裂,发生内水外渗现象。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] 潘家铮,唐家骥,张有天,等.隧洞水荷载静力计算[J].水利学报,1981(5):75-81.
- [ 2 ] 张有天.论有压水工隧洞最小覆盖厚度[J].水利学报,2002(9):1-5.
- [ 3 ] 苏凯,张伟,伍鹤皋,等.考虑摩擦接触特性的钢衬钢筋混凝土管道承载机理研究[J].水利学报,2016,47(8):1070-1078.
- [ 4 ] 周利,苏凯,周亚峰,等.高压水工隧洞透水衬砌渗流-应力-损伤耦合分析方法研究[J].水利学报,2018,49(3):313-322.
- [ 5 ] 张强勇,李术才,焦玉勇.岩体数值分析方法与地质力学模型试验原理及工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [ 6 ] 苏海健.深埋节理岩体渗流演化机理及工程应用[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [ 7 ] 李浪,戎晓力,王明洋,等.深长隧道突水地质灾害三维模型试验系统研制及其应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):491-497.
- [ 8 ] 张庆松,王德明,李术才,等.断层破碎带隧道突水突泥模型试验系统研制与应用[J].岩土工程学报,2017,39(3):417-426.
- [ 9 ] 李术才,宋曙光,李利平,等.海底隧道流固耦合模型试验系统的研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):883-890.
- [ 10 ] 陈陆望.物理模型试验技术研究及其在岩土工程中的应用[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2006.
- [ 11 ] 张强勇,陈旭光,林波,等.高地应力真三维加载模型试验系统的研制及其应用[J].岩土工程学报,2010,32(10):1588-1593.

- [ 12 ] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型试验台的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3727-3731.
- [ 13 ] 杨立云, 杨仁树, 马佳辉, 等. 大型深部矿井建设模型试验系统研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1424-1431.
- [ 14 ] 朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等. 土压平衡盾构法施工参数的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 553-557.
- [ 15 ] 齐春, 何川, 封坤, 等. 泥水平衡式盾构模拟试验系统的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1999-2008.
- [ 16 ] 李元海, 林志斌. 透明岩体相似物理模拟试验新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2030-2039.
- [ 17 ] STANDING J R, LAU C. Small-scale model for investing tunnel lining deformations[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 68: 130-141.
- [ 18 ] ANIRBAN D, ALBERTON M, THOMAS F Z. Numerical and physical modeling of geofam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(1): 1-12.
- [ 19 ] 王克忠, 李仲奎. 深埋长大引水隧洞三维物理模型渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 25-731.
- [ 20 ] 陈林杰, 蒋树屏, 丁浩. 公路隧道外水压力折减规律研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 383-386.
- [ 21 ] 傅睿智, 郭凯, 黄鹤程, 等. 复合衬砌外水压力模型试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 192-197.
- [ 22 ] 李元海, 杜建明, 刘毅. 隧道工程物理模拟试验技术现状与趋势分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(1): 10-21.
- [ 23 ] SULEM J, PANET M, GUENOT A. An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1987, 24(3): 155-164.
- [ 24 ] SL279-2016 水工隧洞设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

## Development and application of physical model test system for large-scale hydraulic tunnel lining

LING Yongyu, LIU Lipeng, WANG Xiaogang, FU Ruizhi, SUN Xingsong

*(China State key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

**Abstract:** According to the characteristics of hydraulic tunnel lining, a new type of large-size hydraulic tunnel lining model test system was developed. The system is mainly composed of pressure cylinder, loading system, measuring system, and water sealing structure. The pressure cylinder is made of 22 mm thick Q245R steel plate, with a diameter of 3000 mm and a length of 4000 mm. In the external water pressure test, the rubber bladder flexible loading method or the direct loading method of high-pressure water between the lining and the pressure cylinder is used, and the high-pressure water is directly loaded in the tunnel cavity during the internal water pressure test. The power source is a self-designed private server controlled high-pressure water pump and a pressure-stabilizing cylinder. The measurement system is realized by a combination of conventional testing instruments. The water-sealing structure is realized by painting the end with waterproof glue and double-ring rubber strips. The test results of the hydraulic tunnel lining with two different boundary conditions under the action of high external water pressure and high internal water pressure indicates that it can meet the requirements of a variety of different boundary model tests of hydraulic tunnels.

**Keywords:** hydraulic tunnel lining; physical model test system; high external water pressure; high internal water pressure

(责任编辑: 韩 昆)