

DOI: 10.11779/CJGE202012012

叠合式衬砌结构抗外载特性足尺试验与数值研究

李代茂¹, 严振瑞², 唐欣薇^{3*}, 莫键豪³, 黄鸿浩³, 刘庭金³

(1. 广东粤海珠三角供水有限公司, 广东 广州 511458; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635;
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 设计了一种探究“管片-自密实混凝土 (SCC) -钢管”叠合式衬砌结构横向力学行为与变形特性的大型足尺试验方法, 初步揭示了叠合式衬砌结构在非均匀外载下的变形及力学响应规律; 结合三维精细化有限元模型, 探讨了栓钉布设、衬砌类型、侧压力系数等因素对结构承载机理的影响。结果表明: 在非均匀外载作用下叠合式衬砌的环向应力相比分离式衬砌较小, 变形呈现“横椭圆”模式, 且随荷载非均匀性增加, 其变形规律越显著; 栓钉布设有效地增强了钢管-SCC 的界面性能, 但对结构环向应力影响甚微。

关键词: 输水隧洞; 叠合式衬砌; 足尺模型试验; 横向性能; 数值模拟

中图分类号: TV312 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)12-2257-07

作者简介: 李代茂(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事大型输水工程建设与管理方面的研究工作。E-mail: 123869845@qq.com。

Full-scale model tests and numerical investigations on bearing characteristics of superimposed lining structures under external loads

LI Dai-mao¹, YAN Zhen-rui², TANG Xin-wei³, MO Jian-hao³, HUANG Hong-hao³, LIU Ting-jin³

(1. Guangdong Yuehai Pearl River Delta Water Supply Co., Ltd., Guangzhou 511458, China; 2. Guangdong Hydropower Planning and Design Institute, Guangzhou 510635, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A full-scale mode test is proposed to study the transverse mechanical behaviors and deformation characteristics of segment-self compacted concrete (SCC)-steel superimposed linings. The deformation and mechanical response laws of composite lining structures under non-uniform external loads are revealed. Based on the 3D refined finite element model, the influences of studs, lining types and lateral pressure coefficient on the bearing capacity of the structures are discussed. The results show that the circumferential stress of the superimposed linings is lower than that of the separated ones under the action of non-uniform external loads, and the superimposed lining structures present a ‘transverse ellipse’ deformation, and the deformation laws are more clear with the increase of load amplitude and non-uniformity. The studs can effectively enhance the interface performance of steel-SCC, but they have few effects on the circumferential stress of the structures.

Key words: water-conveying tunnel; superimposed lining; full-scale model test; transverse performance; numerical simulation

0 引言

珠江三角洲水资源配置工程是一项提升粤港澳大湾区水安全保障的战略性工程, 采用深埋高压输水盾构隧洞衬砌结构设计, 穿越珠三角主要城市群, 地质条件复杂, 外界环境敏感。输水隧洞将承受最大高达 1.5 MPa 内水压力的作用, 衬砌结构设计难度大。为此, 设计人员提出一种“管片-自密实混凝土 (SCC) -钢管”三层叠合式衬砌结构, 以满足工程要求^[1,2]。

20 世纪 90 年代, 随着盾构工法在国内大型输水隧洞工程中的应用与推广, 已发展单层管片、钢筋混凝土内衬、预应力混凝土内衬、钢管内衬等主要结构

型式, 并成功应用于工程实践, 如上海青草沙供水工程、北京团结湖-第九水厂输水工程、南水北调穿黄隧洞工程、广州西江引水工程等^[3-4]。针对盾构输水隧洞设计特点, 人们已开展大量的试验和数值研究, 并提出各种理论模型^[5-8]。

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2019B111108001); 珠江三角洲水资源配置工程课题研究 (WW2018225); 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开放基金项目 (IWRH-SKL-KF201818)

收稿日期: 2020-03-01

*通信作者 (E-mail: cttangxw@scut.edu.cn)

然而,现有研究仍缺乏针对3层钢管内衬叠合式衬砌结构的成果,工程界对其复杂的传力机理缺乏充分的认识,制约该结构的推广与应用,亟待开展专门研究论证其工程适用性。

因此,本文依托于在建的珠江三角洲水资源配置工程,提出了一种考虑错缝拼装盾构隧洞叠合式衬砌结构的模型试验方案,采用分布式光纤的多层监测系统,针对“外衬管片-中衬自密实混凝土-内衬钢管”的复杂衬砌结构在考虑外水、外土压力下的力学行为与变形特性开展足尺模型试验,结合数值仿真计算,揭示叠合式衬砌结构在外部水土荷载下的承载机理,为优化结构设计提供参考。

1 钢管内衬结构设计

采用钢管内衬的衬砌结构防水性能好,一般适用于内外压力差较大的输水工程。根据钢管与管片之间的关系,可分为分离式和叠合式结构,见图1。分离式结构在钢管和管片之间设置隔离层,并在隔离层设置排水,避免渗压对内、外衬的影响,使内外衬分别受力,如,广州西江引水工程设计内水压力为0.9 MPa,采用盾构管片单独承担外水土荷载,内衬钢管单独承担内水压力,管片和钢管间填充自密实混凝土,在管片内侧设置排水垫层,管片和内衬未联合作用承担荷载^[9]。上述结构受力明确,安全度较大,对地质条件无过高要求,但设计偏保守,未能充分发挥材料特性,在长距离输水隧洞工程中,造成巨大的资源浪费!叠合式结构在管片和钢管之间采取连接件等有效措施紧密结合,实现联合受力共同承载。该结构需确保各层衬砌紧密结合,对不同材料界面黏结性能、地质条件具有一定的要求。围岩及管片衬砌分担内衬的承载,相对于分离式结构,可充分发挥材料性能,优化结构设计。然而,现阶段未见该结构的应用报导,其力学行为特征、承载机理、隧洞安全性和工作性能等亟待开展研究,尚需要通过一系列现场原型试验进行验证。因而,本文以叠合式钢内衬结构为研究对象,围绕该结构在外部水土压力作用下的承载机理开展足尺试验与数值研究。

2 足尺模型试验

2.1 模型制作

依据工程要求,确定叠合式衬砌结构试件几何尺寸、细部构造和材料要求。为体现错缝拼装的环间三维耦合效应^[10],外衬采用三环预制钢筋混凝土盾构管片(外径为6 m、内径为5.4 m、厚度为0.3 m、幅宽为1.5 m)。其中,将中间环视为观测对象,上、下环

为纵向边界。每环管片由1块封顶块(F)、3块标准块(B1, B2, B3)和2块邻接块(L1, L2)组成。

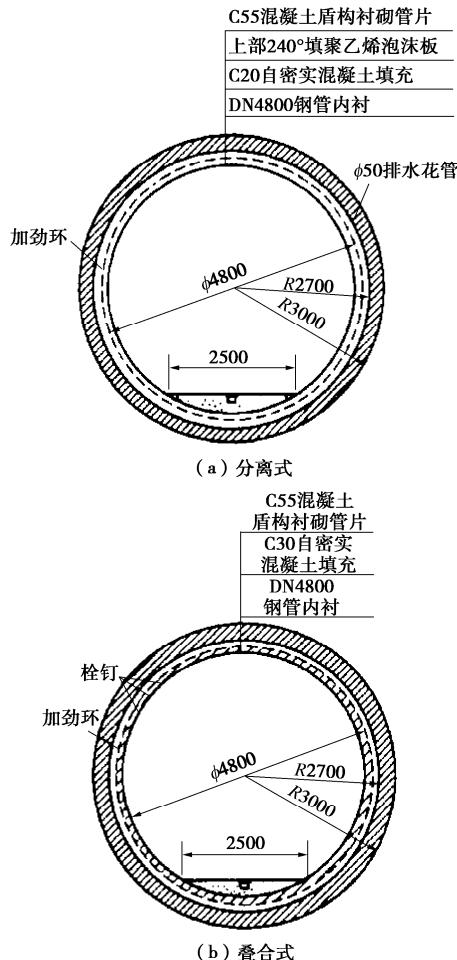


图1 钢管内衬结构示意图^[2]

Fig. 1 Diagram of steel lining structure^[2]

内衬钢管材质为Q345C,高度为4.5 m,内径为4.8 m,壁厚为14 mm。外壁按全周360°布置环状加劲肋(壁厚为20 mm、环高为120 mm、间距为2 m)。为考察栓钉对结构传力机理的影响,钢管右半区域设置栓钉,环向间距为350 mm、纵向间距为400 mm,呈梅花型布置。钢管和管片之间浇筑C30自密实混凝土。

2.2 加载系统与方案

本次试验旨在研究叠合式衬砌结构在弹性工作状态下外部水土压力作用对结构变形传力机理的影响。如图2所示,沿圆周方向均匀布置12个加载端,每个加载端沿高度方向均匀布置2台全伺服液压千斤顶作动器,承担1.5环管片的等效作用力(图3)。其中,每台作动器油缸行程为±20 cm,最大推进力为200 t,按照4个荷载组进行加载控制。

根据现场地质勘察与设计资料,本次试验按隧洞顶埋深确定设计荷载,竖向顶推力 P_1 最大值设为800 kN。本试验采用侧压力系数($\lambda = P_4 / P_1$)反映地层条件,取 $\lambda = 0.57$ 。按荷载控制分级进行加卸载,经历空

载(I)、加载(II)和卸载(III)3个阶段, 变载速率为0.3 kN/s, 稳压40 min完成各项监测数据的采集作业。I阶段均匀施加10 kN推进力, 并对加载结构体系进行对中定位; II阶段以25%峰值荷载梯度进行加载; III阶段以50%峰值荷载梯度进行卸载。其中, P_1 为加载控制值, P_4 由侧压力系数确定, 其他加载点由 P_1 、 P_4 按角度插值确定。



图2 足尺模型试验

Fig. 2 Full-scale model test

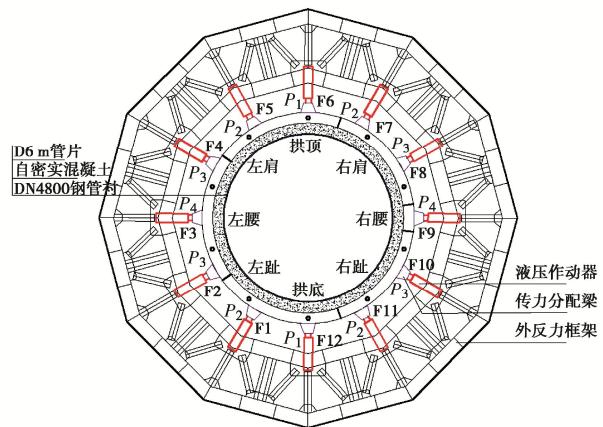


图3 加载系统平面示意图

Fig. 3 Diagram of loading system

2.3 测量系统

本文在应用传统测量手段的基础上, 充分结合现代光纤传感技术, 制定如图4所示的测量系统, 具体方案如表1所列, 主要采集界面相对位移、衬砌结构变形与应力响应等方面的数据。

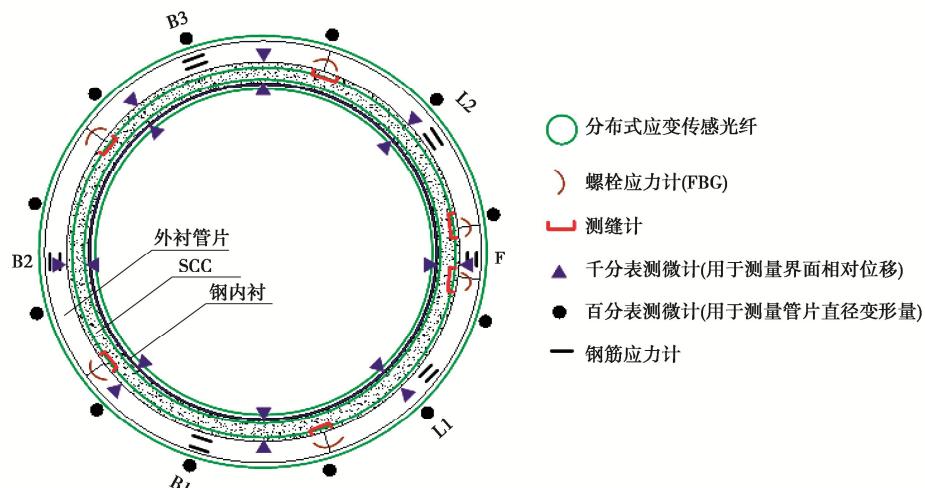


图4 测量系统示意图

Fig. 4 Diagram of measurement system

表1 测量方案

Table 1 Measurement schemes

传感器类型	测量精度	布置位置	测量内容	元件数量
钢筋计 (振弦式)	0.01 MPa	管片跨中截面(中环)	钢筋 应力	内侧6支\外侧6支
传统类 数显百分表(机械式)	0.01 mm	管片外弧面(中环)	全周径向变形	12支
测缝计(振弦式)	0.001 mm	管片内弧面接头(中环)	纵缝张开量	12支
数显千分表(机械式)	0.001 mm	顶环管片端面	界面相对位移	16支(双向)
光纤光栅裸栅应变计	1 $\mu\epsilon$	管片下层连接螺栓	轴向应变	中环6支\顶环6支
光纤类 分布式应变传感光缆	2 $\mu\epsilon$	SCC(中环管片)	SCC裂缝扩展	外侧1道\内侧1道
分布式应变传感光缆	2 $\mu\epsilon$	钢管(中环管片)	全周环向应变	幅宽中央1道\环缝接头1道

3 三维精细化数值仿真模型

受限于足尺模型的复杂性和试验操作的局限性, 试验将产生各种误差, 如加载不均匀、人工测量操作等。因而, 本文针对“管片-自密实混凝土-钢管”叠合式衬砌结构, 建立三维精细化有限元模型, 借助数值仿真手段开展衬砌结构承载机理研究。

3.1 有限元网格

根据工程拟采用的叠合式衬砌盾构管片、钢管内衬、连接螺栓、加劲肋等构件型式与几何尺寸, 建立三维有限元模型, 考虑管片螺栓手孔、纵缝间隙等细部构造, 如图 5 所示, 三维有限元模型包含 465375 个单元和 165796 个节点。

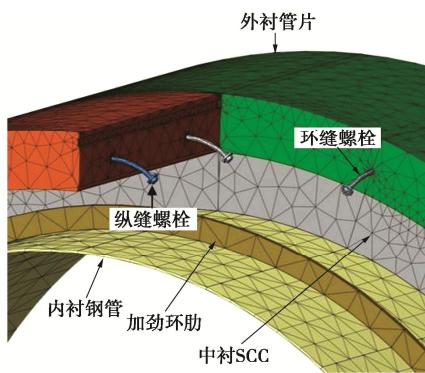


图 5 细部有限元网格

Fig. 5 Details for finite element meshes

3.2 计算参数

外衬管片采用 C55 混凝土, 环向受力主筋为 HRB400, 连接螺栓型号为 A4-70; 中衬采用 C30 自密实混凝土; 内衬钢管和加劲肋采用 Q345C 钢。其中, 混凝土材料采用非线性损伤模型, 钢材采用 Von Mises 模型, 主要力学参数见表 2。

表 2 材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of materials

材料	抗拉/压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	极限强度 /MPa	屈服强度/MPa
混凝土	2.74/35.5	35.5	—	—
SCC	2.01/20.1	30.0	—	—
螺栓	—	206	700	450
钢筋	—	200	540	400
钢材	—	206	470	345

3.3 界面定义

数值模型包含两个界面: “管片-SCC” 和 “SCC-钢管”。前者采用光面黏结, 可设置为库伦摩擦接触对^[11], 后者则采用零厚度八节点黏结单元进行定义, 基于离散式裂纹脆性本构模型表征非线性界面行为。

通过开展多组“含/无栓钉-加劲肋-自密实混凝土”组合梁试验, 如图 6, 确定钢管-SCC 界面的力学

参数, 如表 3 所列。试验细节及参数率定过程详见文献[12]。



图 6 钢-SCC 组合梁试验

Fig. 6 Tests on steel-SCC composite beam

表 3 界面力学参数

Table 3 Mechanical parameters of interface

连接类型	$k_t/(N \cdot m^{-3})$	$k_n/(N \cdot m^{-3})$	$f_{ct}/(N \cdot m^{-2})$
无栓钉	3.0×10^7	1.0×10^{11}	4.0×10^6
含栓钉	8.0×10^8	1.0×10^{11}	2.5×10^7

注: k_t 、 k_n 、 f_{ct} 为切向刚度模量、法向刚度模量和抗拉强度。

3.4 约束条件与加载方式

为确保计算的收敛性, 对有限元模型采用图 7 所示的位移约束方式, 即, 在左、右腰处约束 Y, Z 向位移, 在拱顶、底处约束 X, Y 向位移, 前后环端面约束 Y 向位移。

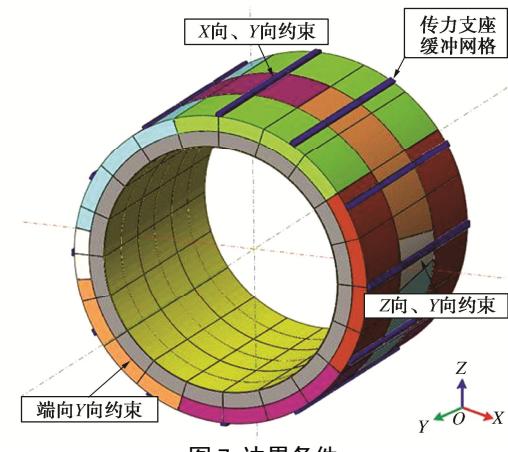


图 7 边界条件

Fig. 7 Boundary conditions

按 2.2 节荷载施加位置和方式逐级施加荷载, 对足尺模型外载试验全过程进行数值仿真模拟。基于 Newton-Raphson 迭代方法, 采用能量准则判定收敛 (收敛精度取 1%)。

4 承载机理分析

为了探究叠合式衬砌结构在外部水土荷载作用下的承载机理, 本文结合足尺模型试验, 基于上述三维

精细化数值仿真模型, 针对栓钉布置、叠合式和分离式衬砌、侧压力系数对结构环向应力的影响展开讨论。其中, 拉应力计为“+”, 压应力计为“-”。

4.1 栓钉布置

限于试验条件, 叠合式衬砌结构足尺试验采用钢管右半区域设置栓钉、左半区未设置栓钉的方式考察栓钉对结构传力机理的影响; 而数值模拟则根据工程实际情况分别建立钢管全周有、无栓钉两种模型。

试验表明, 管片-SCC、SCC-钢管界面大部分区域均呈现挤压状态, 前者在拱顶、左趾尤为明显, 后者则在在拱顶、右趾更为明显; 界面剥离均主要发生在结构右半区域, 尤其是结构右腰部位。随着外载逐级增大, 剥离量稍有增长, 但变化不明显, 见图 8。当 P_1 达 800 kN 时, 管片-SCC 界面在右腰 90° 出现最大剥离量 (+0.102 mm), 在左趾 225° 出现最大挤压量 (-0.104 mm); SCC-钢管界面在右腰 90° 出现最大剥离量 (+0.06 mm), 在右趾 135° 出现最大挤压量 (-0.145 mm)。界面剥离量均未超过容许裂缝宽度 (0.2 mm)。

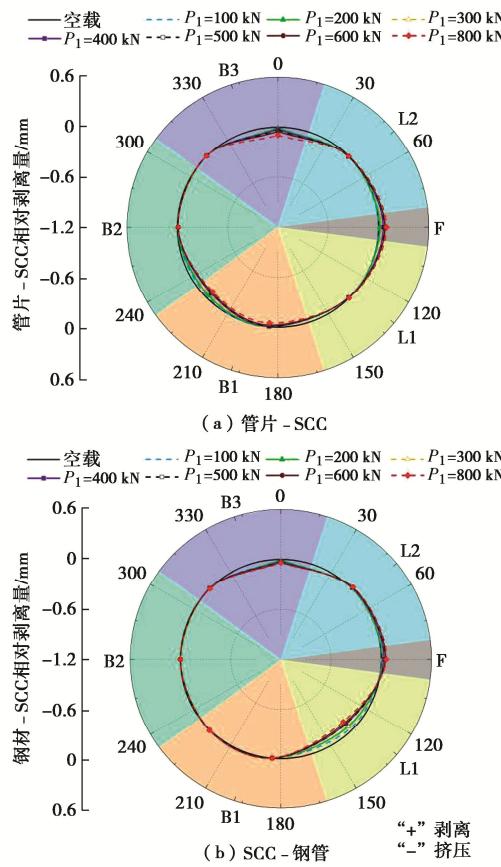


图 8 不同外载作用下衬砌界面相对剥离量

Fig. 8 Peeling of lining interface under different loads

右腰部处的管片-SCC 比 SCC-钢管界面剥离量提高了约 70%。可见, 钢管外壁右半侧设置的栓钉构造加强了钢管与 SCC 的连接作用, 削弱了管片与 SCC 的结合性与联合承载能力, 导致了右半侧的管片-SCC 界面剥离量增大, 而结构左半侧剥离情况较

为缓和。因此, 设置栓钉使结构体系在右半侧易发生界面剥离, 当外部荷载发生突变时, 结构右半侧尤其是管片-SCC 界面将为外水内渗的薄弱区域。

图 9 的试验结果显示, 衬砌承载符合横椭圆变形的力学特征, 结构处于弹性阶段。管片外侧最大环向压应力为 -16.02 MPa, 最大环向拉应力为 0.60 MPa; SCC 外侧最大环向压应力为 -1.74 MPa, 最大环向拉应力为 0.09 MPa; 钢衬内侧全周受压, 最大环向压应力为 -19.36 MPa。

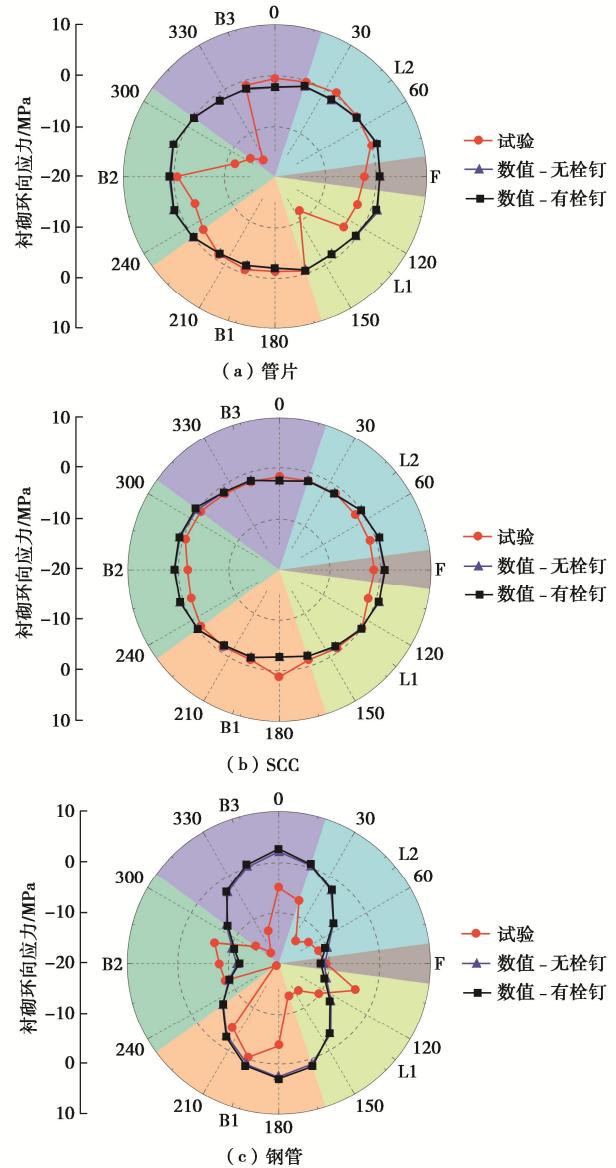


图 9 叠合式衬砌环向应力雷达图 ($\lambda=0.57$)

Fig. 9 Circumferential stresses of superimposed lining structures ($\lambda=0.57$)

数值仿真呈现与试验相似的承载特征, 但受栓钉布置方式影响, 数值仿真的应力分布更加均匀, 当考虑栓钉布置时, 钢管与 SCC 环向应力略大, 对管片应力影响并不显著。管片外侧最大环向压应力为 -2.27 MPa, 最大环向拉应力为 1.31 MPa; SCC 外侧最大环向压应力为 -2.64 MPa, 最大环向拉应力为 0.84 MPa;

钢衬内侧最大环向压应力为-11.7 MPa, 最大环向拉应力为 2.68 MPa。

4.2 衬砌结构

本文针对分离式和叠合式衬砌结构开展数值仿真分析以揭示不同衬砌类型对结构承载性能的影响, 其中, 两种结构型式均未考虑栓钉布置。

由图 10 可知, 两种衬砌类型在外载作用下, 结构承载分布规律大致相同。分离式衬砌管片最大环向压应力为-2.38 MPa, 最大环向拉应力为 1.56 MPa; 叠合式衬砌管片最大环向压应力为-2.27 MPa, 最大环向拉应力为 1.31 MPa。

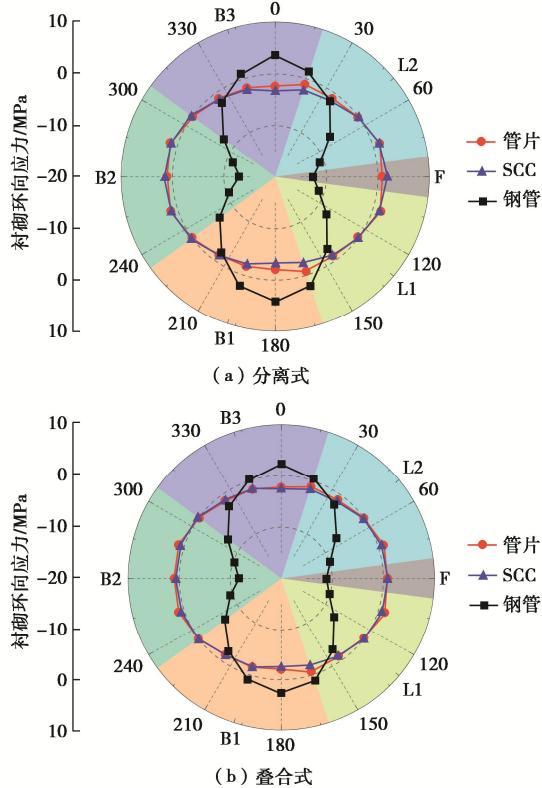


图 10 无栓钉衬砌环向应力雷达图 ($\lambda=0.57$)

Fig. 10 Circumferential stresses of linings without studs ($\lambda=0.57$)

分离式衬砌 SCC 和钢管环向应力均大于叠合式衬砌。前者 SCC 最大环向压应力为-3.39 MPa, 最大环向拉应力为 1.77 MPa; 钢管最大环向压应力为-12.98 MPa, 最大环向拉应力为 4.12 MPa。后者 SCC 最大环向压应力为-2.64 MPa, 最大环向拉应力为 0.84 MPa; 钢管最大环向压应力为-11.74 MPa, 最大环向拉应力为 2.68 MPa。

可见, 对于分离式衬砌, 管片内侧设置的垫层使管片与 SCC-钢管无法协调变形, 削弱了其间的剪力传递; 对于叠合式衬砌, 管片与 SCC-钢管作为一个整体共同承担荷载, 其间不仅能够传递压力, 并且能够传递拉力和剪力。因而, 在相同外部水土荷载作用下, 叠合式衬砌结构的环向应力相比分离式衬砌结构较小。

4.3 侧压力系数

地层侧压力系数对衬砌内力分布、变形特征、结构安全等具有较大影响, 本文以未考虑栓钉布置的叠合式衬砌结构为例, 根据工程地质条件, 选取 3 个典型的侧压力系数 (λ 为 0.43, 0.57, 0.71), 初步探讨不同地层条件对衬砌结构承载特性的影响, 如图 10 (b)、图 11 和表 4。

可见, 叠合式衬砌结构在非均匀外载作用下, 呈现“横鸭蛋”的变形模式, 外载非均匀程度越大 (λ 为 0.43), 衬砌收缩或扩展过程越激烈, 腰部界面位置越易发生剥离。随着侧压力系数的提高, 外部荷载越趋均匀化, 衬砌结构逐渐呈现“整体向内压缩”的变形模式 ($\lambda=0.71$), 结构受压状态进一步加强。

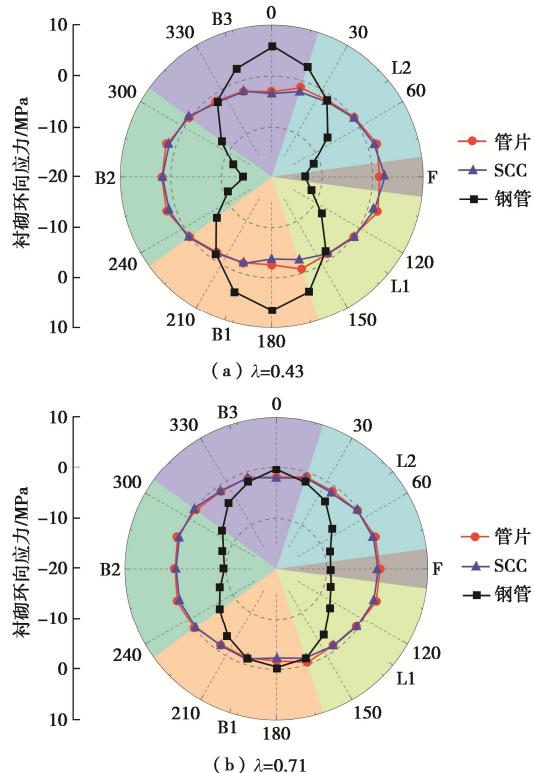


图 11 叠合式衬砌环向应力雷达图 (无栓钉)

Fig. 11 Circumferential stresses of superimposed lining structures (without studs)

表 4 衬砌最大环向应力

Table 4 Maximum circumferential stresses of linings (MPa)

衬砌	管片		SCC		钢管	
	环向应力	拉应力	压应力	拉应力	压应力	拉应力
$\lambda=0.43$	1.99	-2.98	2.46	-3.69	6.59	-14.21
$\lambda=0.57$	1.31	-2.27	0.84	-2.64	2.69	-11.74
$\lambda=0.71$	0.71	-1.85	0.27	-2.10	—	-9.68

5 结 论

本文针对叠合式衬砌结构开展了抗外载足尺模型试验与数值仿真研究, 详细探讨了衬砌结构在外部水土荷载作用下的变形特征与承载机理, 得到以下初步

结论:

(1) 布置栓钉对叠合式衬砌环向应力无明显影响, 但强化了SCC-钢管界面力学性能, 增大管片-SCC界面剥离量, 使其成为外水内渗的薄弱区域; 加之栓钉焊接工艺的复杂性, 建议钢管不布置栓钉。

(2) 分离式和叠合式衬砌结构在相同外部水土压力下表现出相似的承载分布规律, 因前者管片与SCC-钢管无法协调变形、未能有效传递剪切作用, 使其环向应力相对后者较大。

(3) 在非均匀外载作用下, 叠合式衬砌结构呈现“横椭圆”变形模式, 腰部界面易发生剥离。随着荷载趋向均匀, 衬砌逐渐呈现“整体向内压缩”变形模式, 有利于衬砌承载。

鉴于研究对象的复杂性和特殊性, 本文仅针对叠合式衬砌结构在外载作用下弹性阶段的承载性能进行了初步研究, 下阶段有必要针对衬砌-岩联合承载、薄壁钢管屈曲稳定等问题开展深入研究。

致谢: 感谢中国建筑股份有限公司技术中心马程昊博士、北方工业大学何世钦博士课题组的支持, 感谢清华大学张楚汉院士和安雪晖教授、重庆交通大学李鹏飞博士、华南理工大学陈高敬同学的帮助与讨论。

参考文献:

- [1] 广东省水利电力勘测设计研究院. 珠江三角洲水资源配置工程初步设计报告[R]. 广州: 广东省水利电力勘测设计研究院, 2018. (Guangdong Hydropower Planning and Design Institute. Preliminary Design Report of Water Resources Allocation Project in the Pearl River Delta[R]. Guangzhou: Guangdong Hydropower Planning and Design Institute, 2018. (in Chinese))
- [2] 严振瑞, 秦晓川, 张武, 等. 珠江三角洲水资源配置工程输水盾构隧洞形式优化设计研究[M]// 水工隧洞技术应用与发展. 北京: 中国水利水电出版社, 2018. (YAN Zhen-rui, QIN Xiao-chuan, ZHANG Wu, et al. Study on the optimization design of shield tunnel for water resources allocation project in the Pearl River Delta[M]// Application and Development of Hydraulic Tunnel Technology. Beijing: China Water Power Press, 2018. (in Chinese))
- [3] 杨光华, 李志云, 徐传堡, 等. 盾构隧洞复合衬砌的荷载结构共同作用模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 20-30. (YANG Guang-hua, LI Zhi-yun, XU Chuan-bao, et al. Modeling load-structure interaction in shield tunnel composite lining[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10): 20-30. (in Chinese))
- [4] YANG F, CAO S R, QIN G. Mechanical behavior of two kinds of prestressed composite linings: A case study of the Yellow River Crossing Tunnel in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79: 96-109.
- [5] 张常光, 胡云世, 赵均海, 等. 深埋圆形水工隧洞弹塑性应力和位移统一解[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1738-1745. (ZHANG Chang-guang, HU Yun-shi, ZHAO Jun-hai, et al. Elastic-plastic unified solutions for stresses and displacements of a deep buried circular hydraulic tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1738-1745. (in Chinese))
- [6] FENG K, HE C, QIU Y, et al. Full-scale tests on bending behavior of segmental joints for large underwater shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 75: 100-116.
- [7] 章青, 卓家寿. 盾构式输水隧洞的计算模型及其工程应用[J]. 水利学报, 1999(2): 19-22. (ZHANG Qing, ZHUO Jia-shou. A computational model of shield tunnel for water conveyance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(2): 19-22. (in Chinese))
- [8] YAN Q X, YAO C F, YANG W, et al. An improved numerical model of shield tunnel with double lining and its applications[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015: 1-15.
- [9] 王志国, 顾小兵, 程子悦, 等. 西江引水工程盾构输水隧洞设计[J]. 水利水电工程设计, 2016(1): 1-3. (WANG Zhi-guo, GU Xiao-bin, CHENG Zi-yue, et al. Design of shield water conveyance tunnel in Xijiang Water Diversion Project[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2016(1): 1-3. (in Chinese))
- [10] ARNAU O, MOLINS C. Three dimensional structural response of segmental tunnel linings[J]. Engineering Structures, 2012, 44(6): 210-221.
- [11] 张厚美, 过迟, 吕国梁. 盾构压力隧洞双层衬砌的力学模型研究[J]. 水利学报, 2001, 32(4): 28-33. (ZHANG Hou-mei, GUO Chi, LÜ Guo-liang. Mechanical model for shield pressure tunnel with secondary linings[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(4): 28-33. (in Chinese))
- [12] 黄鸿浩.“管片-SCC-钢衬”叠合式衬砌体系足尺结构试验设计与抗外载特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. (HUANG Hong-hao. Full-scale Experimental Investigation on Bearing Characteristic of Segment-SCC-Steel Superimposed Lining Structure Subjected to External Pressure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese))