

DOI: 10.11779/CJGE20230909

地层侧压力系数对盾构隧道双层衬砌结构力学特性影响 模型试验研究

马晓斌, 王士民*, 刘 畅, 钟美昀

(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 当今盾构隧道的建设规模愈发庞大, 洞身穿越的地层复杂多变, 单层管片衬砌结构往往难以满足隧道安全性和耐久性要求, 由此双层衬砌结构得到了更加广泛的关注。为探究不同地层中盾构隧道双层衬砌结构的适用性, 依托广深客运专线狮子洋盾构隧道工程, 通过相似模型试验, 以侧压力系数(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)为指标对比分析了不同地层条件下双层衬砌结构力学特性的变化规律。试验结果表明: 地层侧压力系数增大, 双层衬砌整体更加趋于静水压力场状态, 管片衬砌与二次衬砌极限轴力值增大, 弹塑性临界点与内力突变点滞后。当侧压力系数从0.5增至0.8时, 双层衬砌的极限承载能力提升了66.39%, 最大径向位移从15.17 mm减小为9.45 mm, 管片衬砌侧向位移受限, 二次衬砌辅助管片衬砌承载能力提升。高地层侧压力条件下管片衬砌裂纹发育程度下降, 局部掉块现象减少, 双层衬砌整体结构的可靠性提升。

关键词: 盾构隧道; 双层衬砌; 模型试验; 侧压力系数; 力学特性

中图分类号: U25 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)04-0725-11

作者简介: 马晓斌(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事盾构隧道施工及衬砌结构方面的研究工作。E-mail: Maxiaobin@my.swjtu.edu.cn。

Experimental study on influence of lateral pressure coefficient of soil strata on mechanical properties of double-layer lining structure in shield tunnels

MA Xiaobin, WANG Shimin, LIU Chang, ZHONG Meiyun

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu
610031, China)

Abstract: Nowadays, the construction scale of shield tunnels is getting larger and larger, and the strata crossed by the tunnels are complicated and changeable, so it is often difficult to meet the requirements of tunnel safety and durability by using the single-layer tube lining structure, and thus the double-layer lining structure has been more widely concerned. In order to explore the applicability of the double-layer lining structure of shield tunnels in different strata, relying on the Shiziyang Tunnel Project on the Guangzhou-Shenzhen High-speed Railway, the change rules of the mechanical properties of the double-layer lining structure under different strata conditions are comparatively analyzed with the lateral pressure coefficient (0.5, 0.6, 0.7, 0.8) as an index through the similar model tests. The test results show that the lateral pressure coefficient of the strata increases, the double-layer lining as a whole tends to be more hydrostatic pressure field state, the limit axial forces of the segmental lining and secondary lining increase, and the critical point of elasticity and plasticity and the mutation point of internal force delay. When the lateral pressure coefficient increases from 0.5 to 0.8, the ultimate bearing capacity of the double-layer lining increases by 66.39%, the maximum radial displacement decreases from 15.17 to 9.45 mm, the lateral displacement of the segmental lining is limited, and the secondary lining contribute to the improvement of the bearing capacity of segmental lining. The degree of crack development of segmental lining under high lateral pressure of strata decreases, the phenomenon of localized falling block is reduced, and the reliability of the overall structure of the double-layer lining is improved.

Key words: shield tunnel; double-layer lining; model test; lateral pressure coefficient; mechanical property

0 引言

近年来, 盾构法在城市地下工程修建中得到了广

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178398, 51991394)

收稿日期: 2023-09-18

*通信作者 (E-mail: wangshimin@swjtu.edu.cn)

泛应用,而随着城市地下空间的开发及交通需求的增长,盾构隧道的建设趋于大断面化和大埋深,所穿越地层的地质条件愈加复杂,施工中常面临地层软弱、高外水压等一系列问题。传统的单层管片衬砌结构难以满足盾构隧道安全性和耐久性的要求,为此国内武汉地铁8号线越江隧道、狮子洋水下隧道等盾构隧道工程开始采用双层衬砌作为支护结构。相比于单层管片衬砌,双层衬砌结构在补强、防水和防侵蚀等方面具有更多优势,在盾构隧道建设中的应用越来越广泛^[1]。

目前,国内外已有许多学者采用理论分析、数值模拟、模型试验以及现场监测的方法对盾构隧道双层衬砌结构进行了研究。早期,村上博智等^[2]开展了双层衬砌模型试验并提出了复合、叠合两种衬砌结构形式及特点。张厚美等^[3]依托穿黄隧洞工程提出了双层衬砌叠加受力模型,得到了双层衬砌联合承载的内力分布曲线。王士民等^[4]建立了基于塑性损伤的双层衬砌三维实体非连续接触模型,真实模拟了盾构隧道管片衬砌与二次衬砌接合面的接触情况。刘洋等^[5]、高鑫等^[6]通过数值模拟的方式,对双层衬砌结构横向力学特性、非协调变形、应力集中等力学行为进行了分析。

封坤^[7]、于清洋^[8]完善了盾构隧道模型试验加载装置,实现了不均匀水土荷载的模拟施加,为双层衬砌相似模型试验打下了基础。何川等^[9]依托狮子洋水下盾构隧道工程,开展双层衬砌纵向力学性能模型试验,研究了在软硬交替地层下双层衬砌隧道纵向内力与变形的变化规律。王士民等^[10]开展了二次衬砌合理施作时机模型试验,对管片衬砌与二次衬砌的主从关系进行研究,认为二次衬砌在盾构隧道双层衬砌中仅作为辅助承载结构,应在管片衬砌承受部分设计荷载之后施作。郭文琦等^[11]通过设计模型试验,探究了二次衬砌厚度对双层衬砌纵向力学性能的影响,综合考虑得到了大断面水下盾构隧道二次衬砌合理厚度的合理取值范围。

由于上述双层衬砌结构的研究重点多集中在内外衬砌结构体系分析方面,实际工程中隧道洞身所穿越的地层条件复杂多变,而针对不同地层条件下双层衬砌结构力学特性变化的研究国内还鲜有报道。郭瑞等^[12]认为地层侧压力系数的变化对隧道整体稳定有较大影响,且提出了一种基于极限位移与隧道直径变化率的衬砌结构失稳判据。但是目前,部分考虑侧向土压力对盾构隧道影响的研究^[13-15]主要集中在管片衬砌结构,对于二次衬砌施作之后到破坏阶段的双层衬砌整体力学特性无详细讨论。以侧压力系数为指标,为进

一步探明侧压力系数对盾构隧道双层衬砌结构力学特性的影响,确保结构满足安全运行要求。本文依托广深客运专线狮子洋盾构隧道工程,通过相似模型试验,针对不同侧压力系数下盾构隧道双层衬砌结构的力学特性进行了相关研究,揭示了侧压力系数对双层衬砌结构力学特性及破坏形态的影响规律,同时也对管片衬砌单独承载与双层衬砌联合承载性能差异进行了分析讨论。

1 相似模型试验

1.1 依托工程概况

试验依托狮子洋水下铁路大直径盾构隧道工程,盾构段隧道长 10.8 km,在处于软弱地层及软硬不均地层的进出洞口段采用双层衬砌结构。如图 1 所示,其中管片衬砌采用“5+2+1”分块形式,外直径 10.8 m,内直径 9.8 m,管片厚度 50 cm,幅宽 2 m,混凝土强度等级为 C50;二次衬砌环外直径为 9.8 m,内直径 9.2 m,厚度为 30 cm,采用 C30 素混凝土。

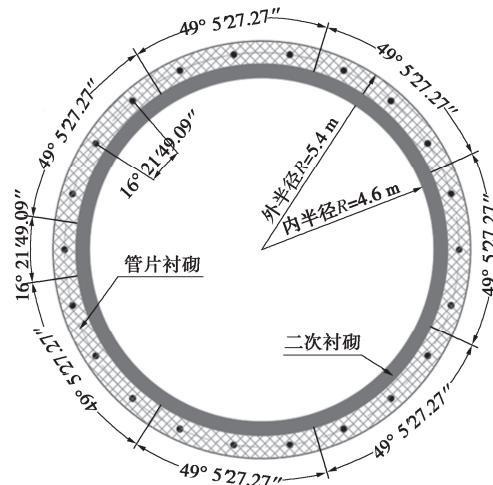


图 1 狮子洋盾构隧道双层衬砌分块示意

Fig. 1 Schematic diagram of double-layer lining of Shiziyang tunnel

1.2 相似试验设计

相似试验按照“地层-结构模式”设计模拟。如图 2 所示,试验采用“盾构隧道-地层复合体模拟试验系统”作为加载装置,中央装载隧道模型并装填模型土^[16]。在平行于隧道横断面方向,该装置通过控制地层内部应力场调整地层侧压力系数,其中 I 方向布置 4 台千斤顶施加竖向土压力,II 方向布置 4 台千斤顶施加侧向土压力;垂直隧道横断面方向通过控制千斤顶施加纵向约束力保证双层衬砌在试验加载过程中保持平面应变状态,其量值大于 I, II 方向荷载值。

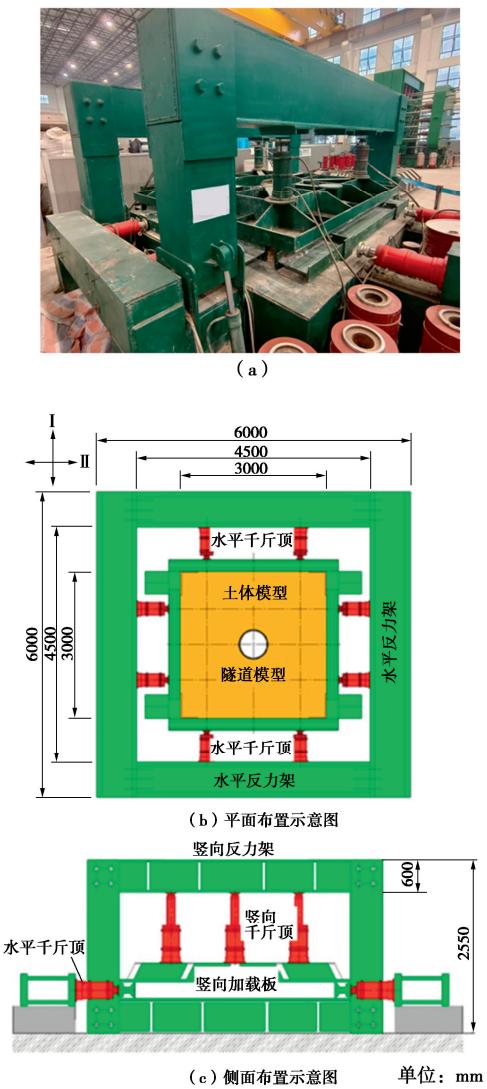


图2 模型试验加载装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of loading devices for model tests

1.3 材料模型相似设计

参考模型试验相似理论及方法, 根据相似理论, 在本研究中采用几何相似比 $C_L=20$ 作为整个相似模型试验的基础相似比, 表1为其余各物理参数的原型与模型值之比^[17]。

表1 相似关系表

Table 1 Ratios of similarities

物理量	符号	相似比	单位
强度	R	$C_R=20$	Pa
弹性模量	E	$C_E=20$	Pa
应力	σ	$C_\sigma=20$	Pa
黏聚力	c	$C_c=20$	Pa
内摩擦角	φ	$C_\varphi=1$	(°)

根据相似关系, 按照一定的比例将河砂、粉煤灰、石英砂、机油、重晶石粉及松香均匀混合模拟实际工程中狮子洋隧道洞身穿越段地层的土体^[18], 模型土与

原型土的物理力学参数如表2所示。

表2 土体材料物理力学参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil materials

名称	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	E/MPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
原型值	18.7~20.3	15.0~25.0	0	20.0~32.0
模型值	20.0	1.0	0	28.0

管片衬砌与二次衬砌均由可塑性较强的雕塑石膏按照不同的水灰比调制而成, 双层衬砌模型尺寸按照相似比关系确定, 如图3所示。同时为保证管片衬砌的等效抗弯刚度, 选择在管片衬砌中内嵌钢丝网模拟衬砌的环向主筋。

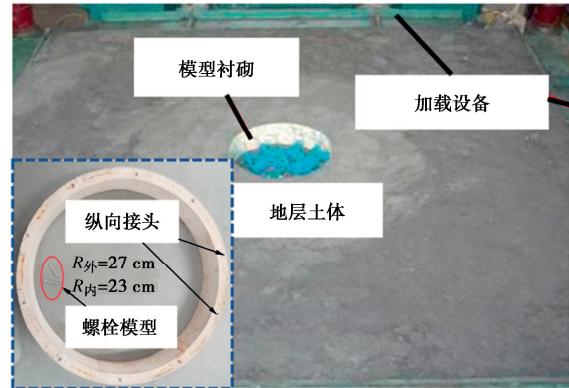


图3 模型结构及加载示意

Fig. 3 Schematic diagram of model structure and loading

如图4所示, 根据盾构隧道管片衬砌不同位置的弯矩典型分布规律和环向接头的拉压特性, 采用内外分区割槽的方式模拟管片衬砌环向接缝, 弱化管片衬砌在环向接头处的等效刚度, 从而更好地模拟实际工程中接头位置的强度削弱^[19], 其中正弯矩区深1.5 cm, 负弯矩区深1.6 cm。此外, 为约束管片衬砌环间错动, 精确表征双层衬砌结构横向力学特性, 通过细钢棒模拟管片衬砌纵向接头螺栓。

1.4 双层衬砌接合面模拟

在模型制作过程中, 叠合结构由于在管片衬砌内表面接头位置预制凹槽, 使得二次衬砌与管片衬砌在该位置互相咬合, 进而改变结构的弯曲刚度, 复合结构则无此影响。此外, 试验中为了减少切向剪力的干扰, 使结构仅传递管片衬砌与二次衬砌间的法向压力, 在模型管片衬砌施作完成之后, 选择复合的方式施作二次衬砌^[20]。如图5所示, 具体为管片衬砌结构加载至设计值时, 在管片衬砌与二次衬砌之间放置一层塑料薄膜, 用以模拟工程实际中的防水层, 然后通过现浇的方式施作预制好的二次衬砌, 实现二者的复合。

1.5 试验加载与测量

为了获得不同侧向土压下双层衬砌结构的各项试验数据, 以中间整环管片及对应的二次衬砌作为主要

量测对象,在二次衬砌浇筑前,将电阻应变片每隔 15° 粘贴在拼装好的管片环及预制石膏二次衬砌的内外侧,合计 4 环共 96 个测点,利用测得的应变数据计算管片衬砌与二次衬砌的弯矩和轴力^[21]。除此之外,在内侧相同方位布设 6 个电阻式位移计,记录双层衬砌横向位移;在双层衬砌内侧拱顶、拱底及左右拱腰处安装声发射探头记录声发射信息。3 种不同测量元件的排布方式如图 6 所示。

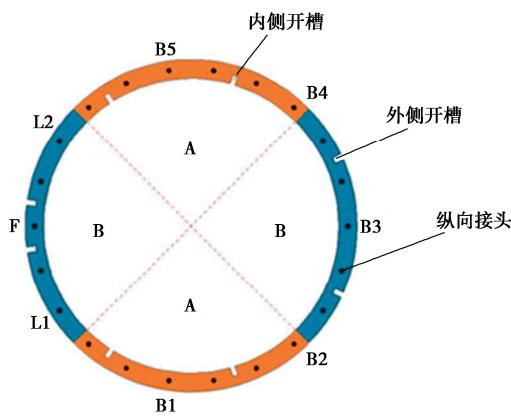


图 4 盾构隧道管片衬砌接头处理示意

Fig. 4 Treatment of segmental sheet lining joint of shield tunnel

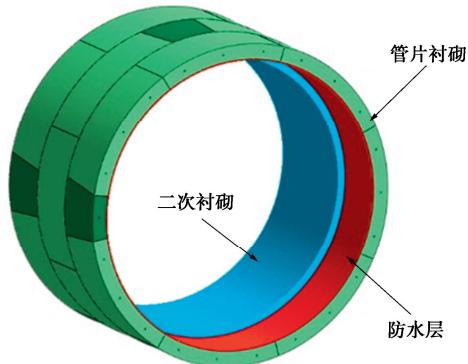


图 5 接合面为复合类型的双层衬砌结构示意

Fig. 5 Schematic diagram of double-lining structure with composite type at joint surface

1.6 试验分组

试验采用分级加载方式,在垂直于管片横断面方向先控制竖向千斤顶将模型纵向约束力设为 18 MPa,然后同时施加竖向(I方向)与横向(II方向)土压力,最后通过环箍钢丝绳施加管片衬砌外侧的水压力。竖向土压加至工程实际埋深的设计荷载值(第 8 荷载步)后,在稳载状态下施作二次衬砌并继续加载直至双层衬砌结构整体损伤破坏(第 24 荷载步),加载工况如表 3 所示。其中,每一个荷载步 I 方向土压力按照千斤顶油压刻度 0.4 MPa 逐级加载, II 方向土压力值通过相应的侧压力系数计算得出。

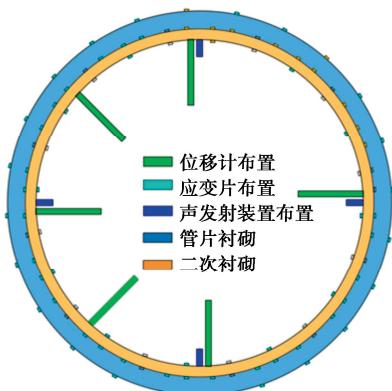


图 6 测试元件排布方式示意

Fig. 6 Schematic diagram of arrangement of test components

表 3 试验加载参数表

Table 3 Loading parameters for tests

加载步	千斤顶油压 /MPa	模型拱顶地层压力/kPa	模拟等效覆盖土厚度/m
0	0.0	0.00	0
1	0.6	1.44	3
2	1.0	5.52	11
3	1.4	8.67	17
4	1.8	11.86	25
5	2.2	14.46	30
6	2.6	18.70	37
7	3.0	21.79	43
8	3.4	24.95	50
9	3.8	29.29	60
10	4.2	33.96	70
11	4.6	41.88	85
12	5.0	47.31	95
13	5.4	52.83	105
14	5.8	57.34	115
15	6.2	61.33	125
16	6.6	65.37	135
17	7.0	70.04	145
18	7.4	75.96	155
19	7.8	81.39	165
20	8.2	86.91	175
21	8.6	91.42	185
22	9.0	95.41	195
23	9.4	99.45	205
24	9.8	103.58	215

大型跨江、海盾构隧道通常会穿越多种地层, 地质条件复杂多变, 地层性质呈现很大的不均匀性, 广深客运专线狮子洋盾构隧道洞身主要穿越地层有淤泥质土层、砂层、岩石强风化带、黏性土层, 根据相关地勘资料, 本次试验主要探究侧压力系数分别为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 的情况下, 双层衬砌结构的力学特性变化规律以及对高侧压力地层的适应性, 试验工况见表 4。

表 4 试验工况表

Table 4 Test conditions

试验组号	侧压力系数	二衬厚度/cm	水头高度/m
1	0.5		
2	0.6	30	30
3	0.7		
4	0.8		

2 双层衬砌结构受力及变形特性

2.1 双层衬砌结构受力特性

(1) 管片衬砌受力特性分析

图7为不同侧压力系数条件下管片衬砌轴力弯矩变化曲线, 其中红色虚线为管片衬砌弹塑性分界点(结构内力与声发射事件率突变), 粉色虚线为管片衬砌失稳破坏临界点(结构轴力突变)。试验加载过程中, 二次衬砌在管片衬砌承受100%设计荷载值即第8荷载步时施作^[22]。

根据图7可知, 随着侧压力系数的增大, 管片衬砌的弹塑性分界点和失稳破坏临界点逐渐后移。当侧压力系数为0.5时, 管片衬砌内力呈线性变化, 在前6级荷载下处于弹性变形阶段, 二次衬砌施作前管片衬砌已进入塑性变形阶段, 当荷载等级达到14级时, 拱底的轴力急剧增加, 表现出失稳破坏; 而当侧压力系数增至0.8时, 管片衬砌的弹性变形阶段延伸到12级荷载, 并且拱顶的弯矩在第20级荷载时才表现出突增, 发生失稳破坏, 其中管片衬砌的失稳荷载在侧压

力系数由0.7增至0.8时变化最大, 为4个荷载步。

在试验加载过程中, 盾构隧道管片衬砌所承受的弯矩在拱底和拱顶表现为内侧受拉, 而在左右拱腰则为外侧受拉。轴力以全环受压的形式存在。随着侧压力系数的增大, 围岩土体对管片衬砌变形的约束作用增强, 导致管片衬砌的弹塑性临界荷载及失稳破坏的临界荷载增大。管片衬砌的失稳位置主要集中在拱底处, 拱腰在低侧压力系数条件下更易发生失稳破坏。

(2) 二次衬砌受力特性分析

为纵向探究不同侧压力系数下二次衬砌结构力学特性及横向对比二次衬砌与管片衬砌力学特性差异。提取加载试验的应变数据, 计算相应内力, 绘制出二次衬砌弯矩和轴力随加载步变化曲线, 如图8所示, 虚线为二次衬砌失稳破坏临界点。

从图8中可以看出, 二次衬砌在施作完成后即开始承受一定的弯矩和轴力, 在其施作过程中石膏的水化作用导致二次衬砌内部出现初始应力。当侧压力系数为0.5时, 根据弯矩和轴力变化, 加载至第14级荷载, 二次衬砌的右拱腰和拱顶位置轴力突变, 发生失

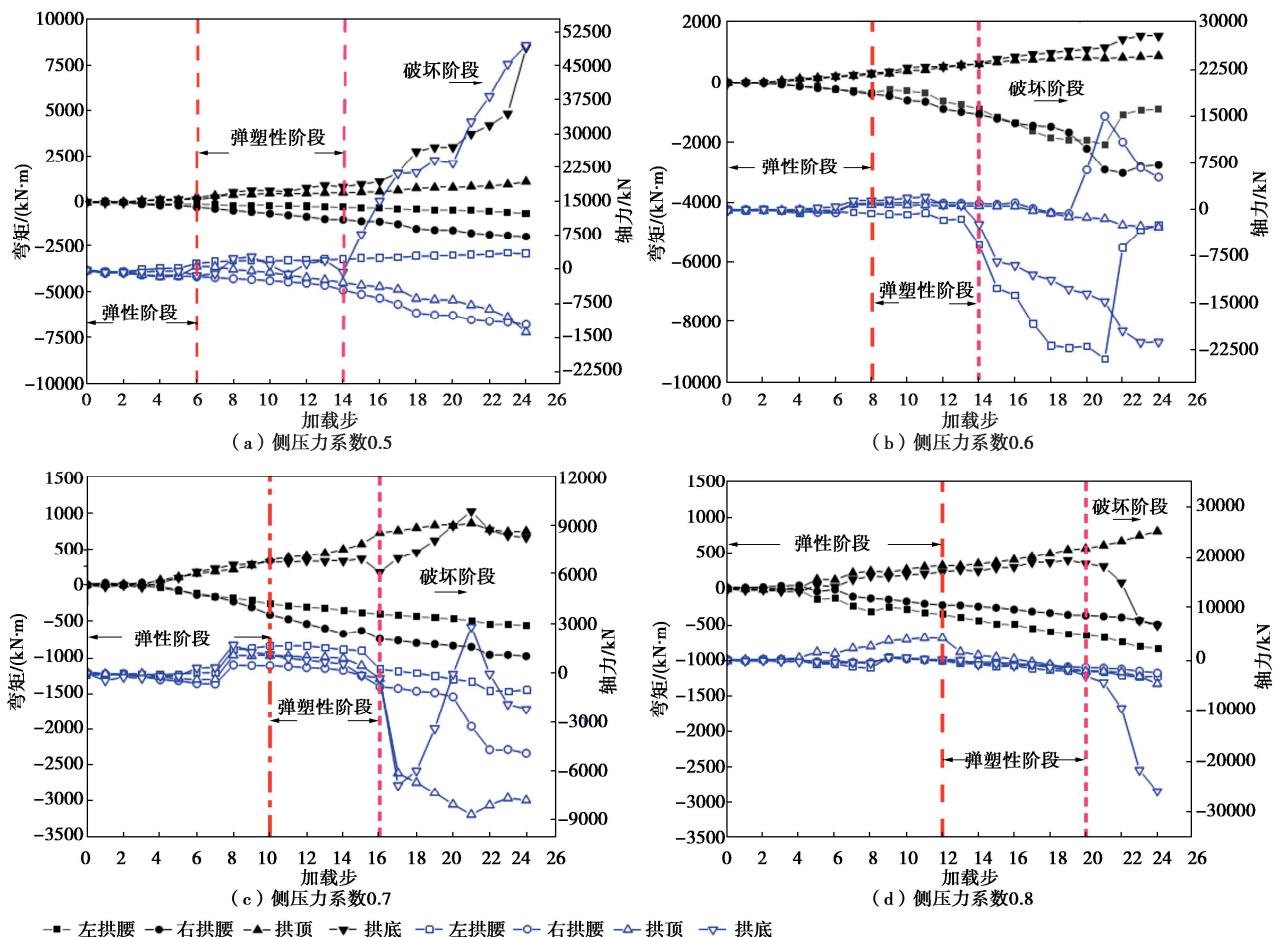


图7 不同侧压力系数条件下管片衬砌内力随加载变化曲线

Fig. 7 Variation curves of internal force of segmental lining with loading under different lateral pressure coefficients

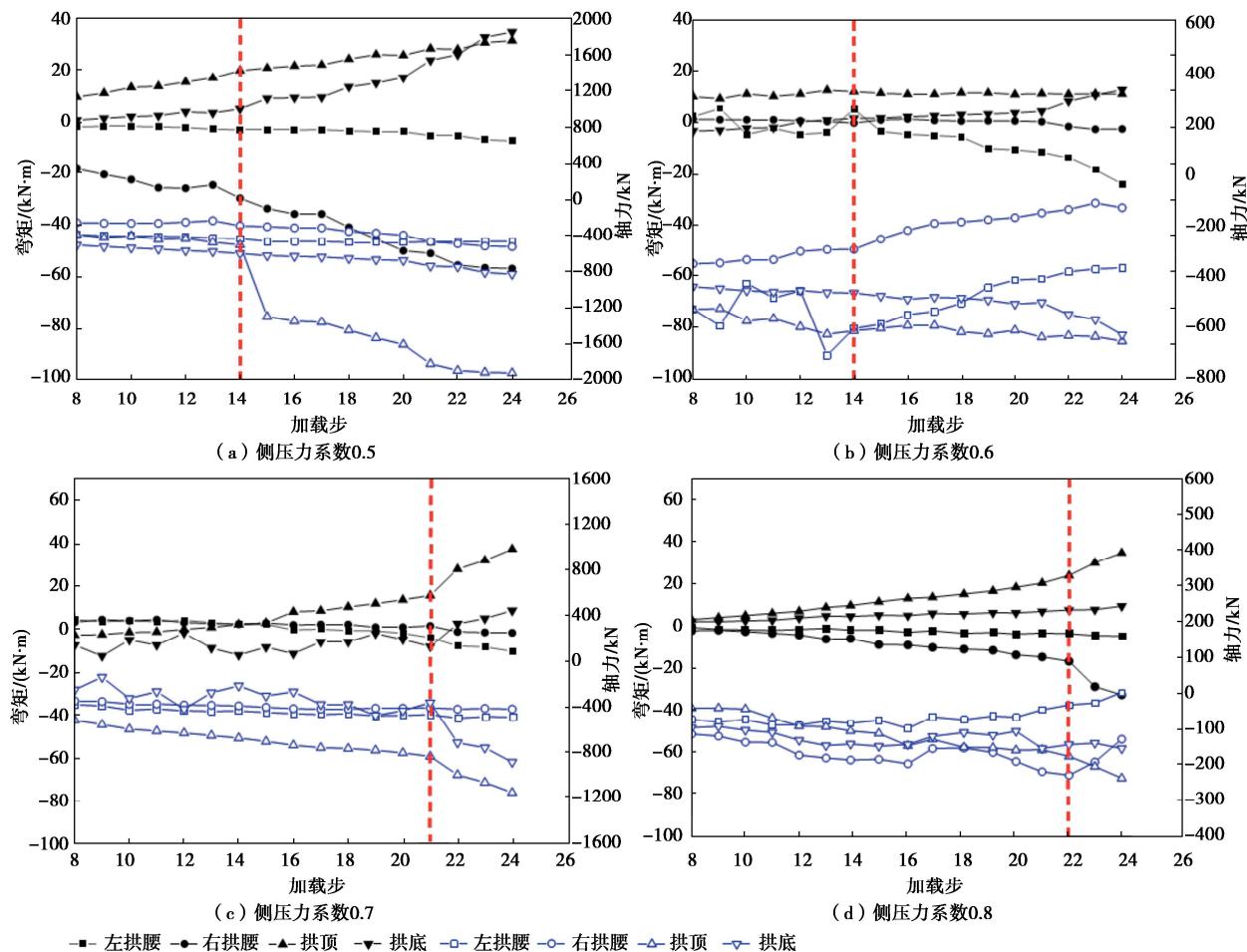


图 8 不同侧压力系数条件下二次衬砌内力随加载变化图

Fig. 8 Variation of internal force of secondary lining with loading under different lateral pressure coefficients

稳破坏;当侧压力系数增至 0.8 时,加载至 22 级荷载,二次衬砌左、右拱腰和拱底位置发生失稳破坏,侧压力系数从 0.6 增至 0.7 时,二次衬砌失稳荷载变化最大,为 7 个荷载步。

二次衬砌与管片衬砌所受的弯矩和轴力表现相似,但所承担的荷载水平更低。随着侧压力系数的增大,二次衬砌失稳破坏临界荷载值也增加,较高的侧压力系数使得二次衬砌失稳破坏位置主要集中在拱顶和拱底。相对于管片衬砌而言,二次衬砌的失稳破坏发生时间较晚。因此,二次衬砌能够有效协助管片衬砌承担外部荷载。增大侧压力系数有助于提高二次衬砌的承载能力,确保盾构隧道双层衬砌结构的安全性。

2.2 双层衬砌位移特性分析

图 9 为不同侧压力系数对应的双层衬砌位移变化曲线(位移数据以径向向外为正)。从图 9 中可以看出,在外部荷载的作用下,隧道拱顶发生沉降变形,拱底隆起,左右拱腰变形径向向外,衬砌整体椭变呈“横鸭蛋”状,最大位移出现在双层衬砌拱底处,最大位移随荷载步增加而不断增大。二次衬砌施作后,双层

衬砌变形速率减缓,衬砌整体刚度加强。随侧压力系数的增大,双层衬砌变形由拱腰外凸向拱顶和拱底外凸趋近,最后变形趋于均匀,结构椭圆度下降。为进一步分析侧压力系数变化带来的影响,提取了衬砌二次失稳时对应的位移数据进行分析,如表 5 所示。

表 5 双层衬砌失稳变形统计

Table 5 Instability deformation statistics of double-layer lining

侧压力系数	失稳荷载等级	失稳位置	失稳变形/mm
0.5	14	拱底	15.17
0.6	14	拱底	10.68
0.7	21	拱底	10.59
0.8	22	拱底	9.45

随着侧压力系数的变化,双层衬砌失稳破坏时的变形结果有所差异。由表 5 中数据可得,侧压力系数从 0.5 增大至 0.8,双层衬砌失稳荷载等级增大,双层衬砌承载能力增强。双层衬砌失稳临界变形值由 15.17 mm 降至 9.45 mm 减小了 37.71%,其中最大降幅为 29.60%,在侧压力系数为 0.5~0.6 时取得,可以认为地层侧压力的增大限制了双层衬砌的横向变形。

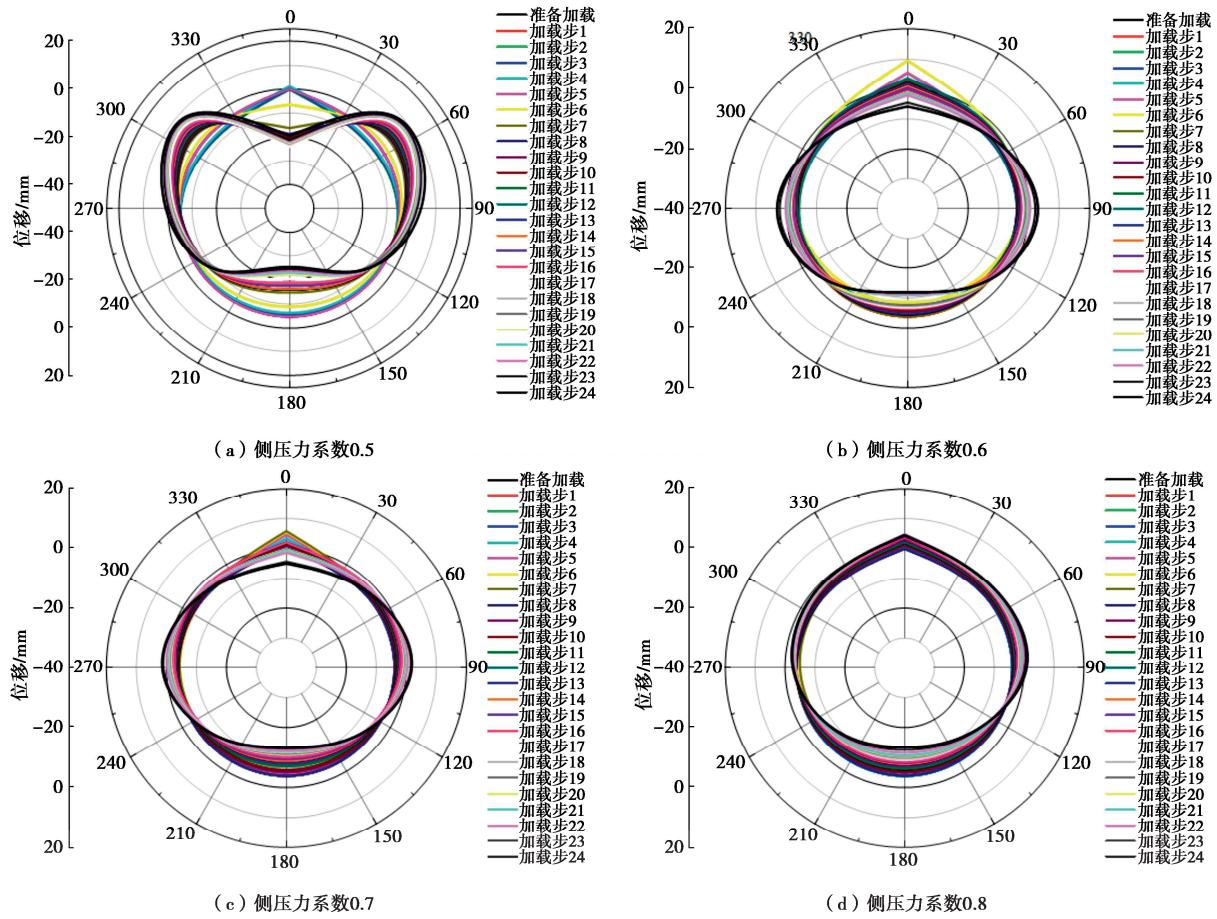


图9 不同侧压力系数条件下衬砌变形随加载变化图

Fig. 9 Variation of lining deformation with loading under different lateral pressure coefficients

2.3 受力变形讨论及分析

为探明双层衬砌中二次衬砌与管片衬砌的相互作用关系, 进一步分析地层侧压力系数对双层衬砌结构受力及变形特性的影响, 需对双层衬砌内力与变形结果进行联合分析。基于此, 将试验中二次衬砌失稳破坏时双层衬砌的关键数据汇总于表6。

表6 双层衬砌结构试验结果汇总

Table 6 Summary of test results for double-layer structures

二次衬砌失效时衬砌结构试验数据	侧压力系数			
	0.5	0.6	0.7	0.8
竖向外荷载/kPa	57.34	57.34	91.42	95.41
最大径向位移/mm	15.17	10.68	10.59	9.45
最大弯矩值/(kN·m)	954.26	885.52	845.73	750.54
最大轴力值/kN	4322.43	5699.15	8030.46	9421.30
最大偏心距/mm	220.77	155.54	105.32	79.66
二次衬砌轴力分配比例/%	24.5	26.4	19.9	32.7

由表6中各项数据可以看出, 失稳破坏阶段双层衬砌整体的内力与变形量值均处于较高水平, 二次衬砌轴力占比低于40%, 说明在二次衬砌的辅助下, 管片衬砌的承载能力得到了强化, 管片衬砌为主要承载结构。

地层侧压力系数增加使得双层衬砌能够承受更大的外部荷载。侧压力系数从0.5增长至0.8, 二次衬砌失效时的竖向外荷载增加了66.39%, 管片衬砌所承受的最大轴力增加117.96%, 最大弯矩减小21.35%。此时双层衬砌的最大径向位移反而从15.17 mm减小至9.45 mm, 最大偏心距从220.77 mm减小至79.66 mm, 表明结构的失稳变形减小、受力状态有利, 结构可靠性增加。其中, 地层侧压力系数由0.6变为0.7时变化最为明显, 双层衬砌结构承载能力提高了59.43%, 侧压力系数为0.6时, 双层衬砌结构所能承受的最大竖向外荷载虽然没有改变, 但最大径向位移与最大偏心距均大幅减小, 很好地改善了双层衬砌结构的受力状态与变形。

试验过程中, 存在管片衬砌结构内力突变先于二次衬砌的现象, 究其原因, 是二者的刚度存在差异, 两者共同承载的过程中, 刚度较低的管片衬砌通过变形将部分外部荷载传递给二次衬砌(管片衬砌与二次衬砌的相互作用), 完成了其自身的内力调整; 二次衬砌则由于刚度较大, 通过变形进行内力调整的能力相对较弱, 在其荷载持续增加的情况下, 内力随之增加, 达到其承载极限时会出现损伤及局部破坏, 进而释放

变形, 导致其内力突变。两者发生内力的突变的本质不同, 管片衬砌结构的内力突变通过与二次衬砌接触传递荷载实现, 二次衬砌结构的内力突变则通过结构损伤破坏实现。

3 双层衬砌损伤及破坏特性

3.1 双层衬砌声发射特征分析

试验全过程利用声发射仪器监测不同地层侧压力系数下随加载步变化的声发射事件率及累计声发射事件数, 从能量角度揭示双层衬砌的损伤过程以及地层侧压力系数改变带来的影响。如图 10, 为侧压力系数 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 时声发射事件率及累计声发射事件数随加载步变化曲线。

由图 10 可知, 侧压力系数为 0.5 时, 管片衬砌在第 6~7 级荷载下从弹性阶段过渡到了弹塑性阶段, 施作二次衬砌后声发射信号趋于平稳, 直到施加第 14 级荷载后, 双层衬砌整体失稳破坏, 此时累计声发射事件数达 836 次。随着侧压力系数的增大, 管片衬砌单独承载情况下进入弹塑性阶段需要的荷载值不断增

大, 同时双层衬砌失稳破坏的临界荷载也逐渐增大。当侧压力系数增至 0.8 时, 整体失稳破坏累计声发射事件数达到 1236 次, 增加了 47.8%, 认为破坏前双层衬砌整体吸收了更多能量而产生了更多裂纹, 二次衬砌的施作抑制了管片衬砌进入塑性阶段的进程, 双层衬砌结构承载能力得到提升。

3.2 双层衬砌破坏形态分析

为研究不同地层侧压力系数下双层衬砌结构破坏形态的变化规律, 在加载试验结束之后对辅助承载的二次衬砌进行清理, 观察作为主要承载结构的管片衬砌的宏观破坏裂纹, 结合加载全过程声发射信息最终绘制出管片衬砌破坏形态素描图。如图 11 所示, 素描图以拱底为起点沿顺时针绘制, 数字表示破坏区域编号, 红色实线代表管片衬砌外侧破坏裂纹, 绿色虚线代表内侧破坏裂纹。

由图 11 可知, 在侧压力系数为 0.5 的条件下, 管片衬砌破坏裂纹早期主要出现在拱顶位置, 后向拱腰位置延伸, 裂纹具体表现为拉伸破坏和剪切破坏以及局部掉块现象。随着地层侧压力系数的增长, 二次衬

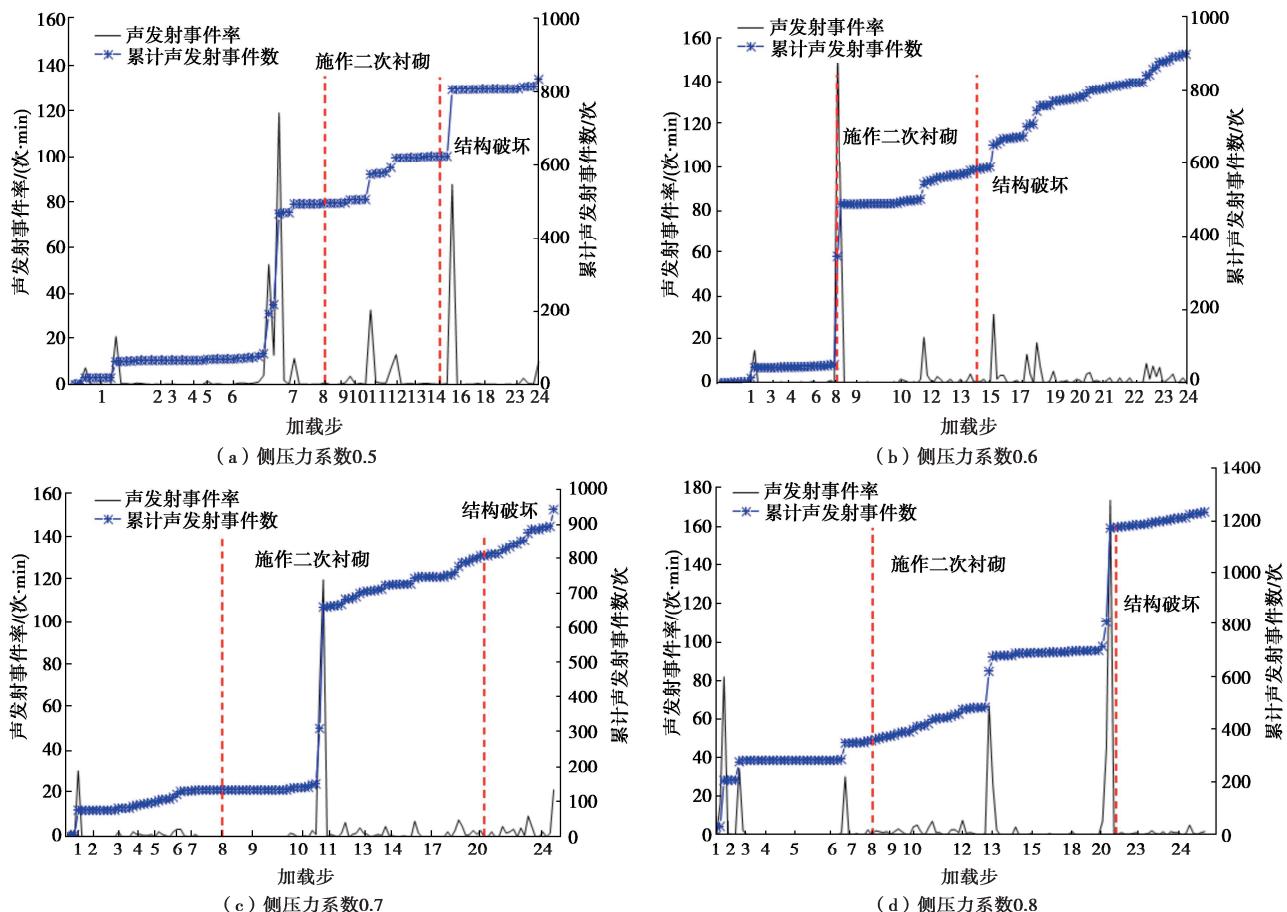


图 10 不同侧压力系数下加载全过程声发射信息

Fig. 10 Acoustic emission information of whole loading process with different lateral pressure coefficients

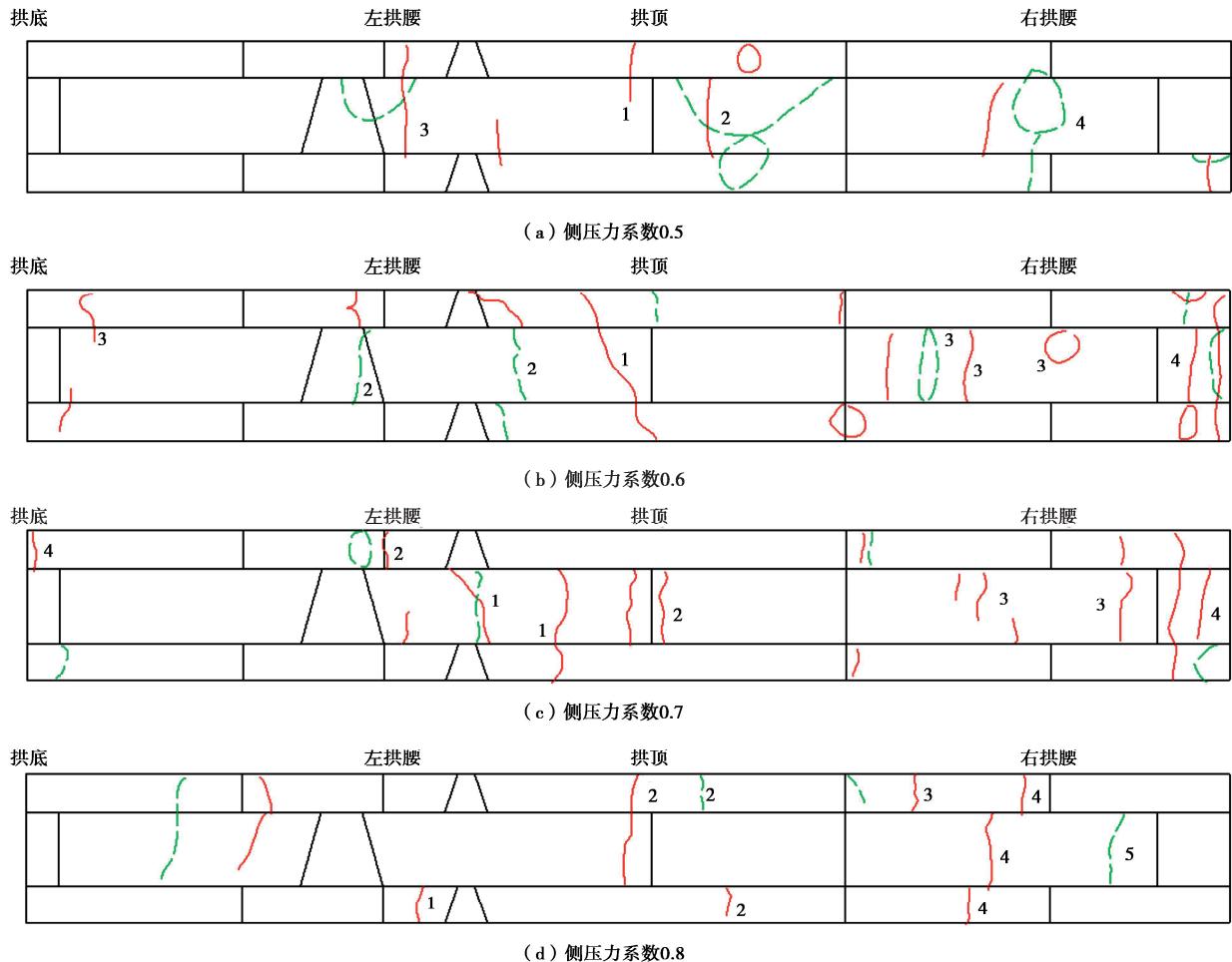


图 11 管片衬砌破坏形态素描

Fig. 11 Sketch of damage pattern of segmental lining

砌破坏裂纹数量少量增长, 裂纹整体发育程度下降, 局部掉块现象减少, 剪切与拉伸破坏产生的裂纹由左右拱腰向拱顶转移。在侧压力系数为 0.8 条件下, 管片衬砌局部掉块现象消失, 仅在左右拱腰处有少数剪切破坏及拉伸破坏裂纹出现。可见地层侧压力系数的增加, 延缓了管片衬砌局部裂纹的产生, 提高了双层衬砌的承载能力以及结构的整体安全性。

4 结 论

依托狮子洋水下铁路盾构隧道工程, 通过模型试验对不同地层侧压力系数下的双层衬砌力学特性进行分析, 得到 3 点结论。

(1) 在竖向土荷载恒定的情况下, 地层侧压力系数增加对双层衬砌结构的极限承载能力有显著的提升效果。高地层侧压力下, 双层衬砌的极限轴力值增大, 弹塑性临界点与内力突变点滞后, 二次衬砌补强了管片衬砌的承载性能, 双层衬砌整体更加趋于静水压力场状态。

(2) 内外衬砌联合承载的条件下, 二次衬砌与地层的侧向压力共同抑制了管片衬砌的侧向变形, 使得

管片衬砌具备更高的抗变形能力。地层侧压力系数增大使得双层衬砌最大失稳位移减小, 结构横椭变现象减弱, 提高了衬砌整体结构的可靠性。

(3) 声发射率和声发射事件数的突变时机与的双层衬砌结构的破坏时机相对应。在高侧向土压力条件下, 二次衬砌能够更好地协助管片衬砌承担外部荷载, 延缓结构声发射率和声发射事件数的突变, 减少管片衬砌大裂纹与局部掉块的产生。

参考文献:

- [1] 何川, 封坤. 大型水下盾构隧道结构研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 1-11. (HE Chuan, FENG Kun. Review and prospect of structure research of underwater shield tunnel with large cross-section[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 1-11. (in Chinese))
- [2] 村上博智, 小泉淳. 二次覆工で補強されたシールド グメントリングの挙動について[J]. 土木学会論文集, 1987(388): 85-93. (MURAKAMI H, KOIZUMI J. Behavior of shield tunnel segment rings reinforced by secondary lining

- work[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 1987(388): 85-93. (in Japanese))
- [3] 张厚美, 过 迟, 吕国梁. 盾构压力隧道双层衬砌的力学模型研究[J]. 水利学报, 2001, 32(4): 28-33. (ZHANG Houmei, GUO Chi, LÜ Guoliang. Mechanical model for shield pressure tunnel with secondary linings[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(4): 28-33. (in Chinese))
- [4] 王士民, 于清洋, 彭 博, 等. 基于塑性损伤的盾构隧道双层衬砌三维实体非连续接触模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 303-311. (WANG Shimin, YU Qingyang, PENG Bo, et al. Three-dimensional discontinuous contact model for shield tunnels with double-layer lining based on plastic-damage model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 303-311. (in Chinese))
- [5] 刘 洋, 龚振华, 梁敏飞, 等. 考虑变荷载影响的水下盾构隧道双层衬砌力学特性分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(7): 101-107. (LIU Yang, GONG Zhenhua, LIANG Minfei, et al. Analysis of mechanical characteristics of shield tunnel with double-layer lining considering variable loads[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(7): 101-107. (in Chinese))
- [6] 高 鑫, 王文娟. 远场静水压力作用下深埋隧道双层叠合衬砌合理组合形式及力学变形特性研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 93-102. (GAO Xin, WANG Wenjuan. Research on reasonable combination forms and mechanical deformation characteristics of double-layer superimposed lining in deep-buried tunnels under the action of far-field hydrostatic pressure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(2): 93-102. (in Chinese))
- [7] 封 坤. 大断面水下盾构隧道管片衬砌结构的力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (FENG Kun. Research on Mechanical Behavior of Segmental Lining Structure for Underwater Shield Tunnel with Large Cross-Section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [8] 于清洋. 盾构隧道双层衬砌结构横向相互作用机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (YU Qingyang. Research on the Transverse Interaction Mechanism of the Double-Layer Lining Structure for Shield Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [9] 何 川, 郭 瑞, 肖明清, 等. 铁路盾构隧道单、双层衬砌纵向力学性能的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 40-46. (HE Chuan, GUO Rui, XIAO Mingqing, et al. Model test on longitudinal mechanical properties of single-and double-layered linings for railway shield tunnel[J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 40-46. (in Chinese))
- [10] 王士民, 陈 兵, 王先明, 等. 盾构隧道二次衬砌合理施作时机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 882-891. (WANG Shimin, CHEN Bing, WANG Xianming, et al. Model tests on reasonable construction time of secondary lining of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 882-891. (in Chinese))
- [11] 郭文琦, 陈 健, 王士民, 等. 二衬厚度对盾构隧道双层衬砌纵向力学性能的影响[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(2): 142-148. (GUO Wenqi, CHEN Jian, WANG Shimin, et al. The influence of the thickness of secondary lining on the longitudinal mechanical properties of shield tunnel with double-layer lining[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(2): 142-148. (in Chinese))
- [12] 郭 瑞, 何 川. 盾构隧道管片衬砌结构稳定性研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(6): 74-81. (GUO Rui, HE Chuan. Study on stability of segment lining structure for shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(6): 74-81. (in Chinese))
- [13] 郭 瑞, 何 川, 封 坤, 等. 弱抗力地层盾构隧道失稳破坏的模型试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(3): 72-78. (GUO Rui, HE Chuan, FENG Kun, et al. Model test study on instability failure of shield tunnel under weak resistance strata[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(3): 72-78. (in Chinese))
- [14] 梁英俊. 土层侧压力系数试验测定及其对盾构管片内力的影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. (LIANG Yingjun. The Research on the Coefficient of Lateral Earth Pressure and Its Influence on the Internal Force of Shield Segments[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [15] 王士民, 申兴柱, 彭 博, 等. 侧压力系数对盾构隧道管片衬砌受力及破坏形态的影响研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 102-109. (WANG Shimin, SHEN Xingzhu, PENG Bo, et al. Analysis of effect of lateral strata pressure coefficient on mechanical characteristics and failure modes of segment lining of shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(7): 102-109. (in Chinese))
- [16] 郭 瑞. 盾构隧道管片衬砌结构稳定性问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (GUO Rui. Research on Stability of Segmental Lining Structure of Shield Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [17] 王士民, 申兴柱, 何祥凡, 等. 不同拼装方式下盾构隧道管片衬砌受力与破坏模式模型试验研究[J]. 土木工程学报,

- 2017, **50**(6): 114-124. (WANG Shimin, SHEN Xingzhu, HE Xiangfan, et al. A model test for the mechanical property and failure mode of lining segments with different assembly types of shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(6): 114-124. (in Chinese))
- [18] 姚佳兵. 盾构隧道双层衬砌横向力学特性影响因素及影响规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (YAO Jiabing. Study on Influencing Factors and Influence Law of Lateral Mechanical Characteristic of Double Lining of Shield Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [19] 徐国文, 王士民, 代光辉, 等. 基于内外分区割槽方式的盾构隧道接头环向模拟方法研究[J]. 铁道学报, 2016, **38**(4): 90-97. (XU Guowen, WANG Shimin, DAI Guanghui, et al. Research on radial joint simulation method for shield tunnel based on inner and peripheral zoning slotting[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, **38**(4): 90-97. (in Chinese))
- [20] WANG S M, RUAN L, SHEN X Z, et al. Investigation of the mechanical properties of double lining structure of shield tunnel with different joint surface[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **90**: 404-419.
- [21] 何川, 张建刚, 苏宗贤. 大断面水下盾构隧道结构力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (HE Chuan, ZHANG Jiangang, SU Zongxian. Structural Mechanical Characteristics of Large-Section Underwater Shield Tunnels [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [22] WANG S M, JIAN Y Q, LU X X, et al. Study on load distribution characteristics of secondary lining of shield under different construction time[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2019, **89**: 25-37.