

DOI: 10.11779/CJGE202005010

# 盾构隧道二次衬砌合理施作时机模型试验研究

王士民<sup>1</sup>, 陈兵<sup>1</sup>, 王先明<sup>1</sup>, 鲁茜茜<sup>1</sup>, 阮雷<sup>2</sup>, 蹇蕴奇<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 中建丝路建设投资有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 近年来, 盾构隧道双层衬砌作为一种新的形式开始得到应用推广, 但由于相关研究较少, 导致盾构隧道双层衬砌结构体系关键参数尚不明确, 其中二次衬砌合理施作时机便是其中之一。以狮子洋隧道工程为依托, 采用相似模型试验对二次衬砌合理施作时机展开研究, 研究表明: 二次衬砌在盾构隧道双层衬砌中仅作为辅助承载结构, 施作时机为57%~83%, 结构径向收敛值和椭圆度随加载步变化最为缓慢, 结构累计声发射数AE呈渐进性增长; 施作过早或过晚, 二次衬砌均不能有效抑制管片衬砌变形, 且结构累计声发射数AE均呈阶梯型增长; 随着二次衬砌施作时机推迟, 二次衬砌与管片衬砌最大内力量值之比及结构开始出现宏观损伤破坏荷载级别均呈先增大后减小的变化规律。因此, 在综合考虑双层衬砌结构加载过程中的变形历程及损伤特性, 认为二次衬砌合理施作时机为57%~83%。

**关键词:** 盾构隧道; 管片衬砌; 二次衬砌; 施作时机; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)05-0882-10

**作者简介:** 王士民(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下结构安全性及耐久性的研究。E-mail: wangshimin@swjtu.edu.cn。

## Model tests on reasonable construction time of secondary lining of shield tunnel

WANG Shi-min<sup>1</sup>, CHEN Bing<sup>1</sup>, WANG Xian-ming<sup>1</sup>, LU Xi-xi<sup>1</sup>, RUAN Lei<sup>2</sup>, JIAN Yun-qi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Construction Silk Road Construction Investment Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Recently, the double-layer lining of shield tunnels has begun to be applied as a new form. However, due to the lack of the related researches, the key parameters of the double-layer lining structure system of shield tunnels are still unclear. The construction time of the second lining is one of them. Based on the Shiziyang Tunnel Project, a similar model test is used to study the reasonable construction time of the secondary lining. The results show that the secondary lining is only used as the auxiliary bearing structure in the double-layer lining of the shield tunnel. When the construction time is 57%~83%, the radial convergence and ellipticity of the structure change most slowly with the loading step, and the cumulative AE number of the structure increases progressively. If it is constructed too early or too late, the secondary lining can not effectively inhibit the deformation of the segment lining, and the cumulative AE number of the structure increases stepwisely. With the delay of the construction time of the secondary lining, the ratio of the maximum internal strength of the secondary lining to that of the segment lining and the load level of the macroscopic damage at the beginning of the structure both increase first and then decrease. Therefore, considering the deformation history and damage characteristics of the double-layer lining structure during the loading process, the reasonable construction time of the secondary lining is 57%~83%.

**Key words:** shield tunnel; segment lining; secondary lining; construction time; model test

## 0 引言

近年来, 盾构法在越江隧道和城市地铁的建设中得到了广泛应用。在盾构隧道修建过程中, 主要采用单层管片衬砌的结构形式, 然而在制造、施工以及运营阶段, 单层管片衬砌暴露出的安全性问题较为突出, 诸如管片的开裂、错台、混凝土碳化、钢筋锈蚀, 甚至造成结构整体的失稳破坏<sup>[1]</sup>, 这些问题不仅对盾

构隧道运营安全产生较大隐患, 而且增加了隧道结构的维修加固难度, 提高维护费用<sup>[2]</sup>。在对运营期间北京地铁调研发现, 部分区间隧道由于管片衬砌变形, 引起盾构断面椭圆化, 产生管片压溃与错台以及盾

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578461)

收稿日期: 2019-05-24

隧道渗漏水等耐久性问题<sup>[3]</sup>。在水下盾构隧道日趋深化、超长化以及大断面化, 衬砌结构满足更为严格的安全性及耐久性要求是必然的, 基于此在盾构隧道建设过程中可采用双层衬砌结构形式。

既有研究对盾构隧道双层衬砌的研究较少, 其中, 文献[4, 5]较早地对盾构隧道双层衬砌的结构形式进行一定的研究, 并提出了复合、叠合两种双层衬砌结构形式, 此外针对盾构隧道双层衬砌的研究也多集中在双层衬砌计算模型和双层衬砌结构的力学特性方面。在计算模型方面, Fujimori 等<sup>[6]</sup>根据梁-弹簧模型提出了采用弹簧单元模拟结合面间的剪切和压缩效应; 张厚美等<sup>[7]</sup>以南水北调穿黄隧洞工程为依托, 根据结合面型式的差异, 建立了 3 种双层衬砌相互作用计算模型; 崛地紀行<sup>[8]</sup>在考虑了环间压缩刚度和剪切刚度的作用下, 利用弹簧来模拟双层衬砌环间接头, 对二次衬砌的轴向刚度进行了研究; 王士民等<sup>[9]</sup>建立了三维实体非连续接触模型研究了管片内置钢筋对结构力学性能的影响; 在研究双层衬砌结构的力学特性方面, 何川等<sup>[10]</sup>基于纵向刚度等效模型, 利用模型试验和数值计算相结合的方法对双层衬砌结构纵向力学特性进行了研究; Feng 等<sup>[11]</sup>通过模型试验和现场测试探究了水下盾构隧道单层衬砌和双层衬砌结构的力学性能差异; 村上博智等<sup>[12]</sup>和 Nasri 等<sup>[13]</sup>分别对盾构隧道双层衬砌进行了多环和整环模型试验, 认为二次衬砌的施作提高了结构整体的承载性能; Murakami 等<sup>[14]</sup>针对盾构隧道双层衬砌进行试验, 研究了二次衬砌对管片结构承载力的增强效应; Takamatsu 等<sup>[15]</sup>采用试验和理论分析对盾构隧道双层衬砌的纵向力学效应进行了研究。从上述文献可知, 目前在管片衬砌与二次衬砌共同承载过程中的接触模式、接触面压力以及荷载传递机制等方面的研究尚不充分; 而二次衬砌关键设计参数以及最佳施作时机的确定原则等也尚未形成较为明确的结论。

然而截至目前, 针对二次衬砌不同施作时机对双层衬砌结构力学特性影响的研究尚少, 且研究对象多为山岭隧道<sup>[16-18]</sup>。由于盾构隧道与山岭隧道所处地层条件, 承载主体和结构内部之间的相互作用机理均有所差异。因此, 本文依托广深港狮子洋隧道工程, 采用相似模型试验, 对二次衬砌不同施作时机下双层衬砌结构整体力学特性进行分析研究, 为盾构隧道施工过程中二次衬砌结构施作时机的选择提供理论依据。

## 1 相似模型试验

### 1.1 依托工程概况

试验依托国内首座水下铁路盾构隧道——狮子

洋隧道, 隧道长度为 10.8 km, 隧道进出口段主要穿越粉细砂层、粗砾砂层, 如图 1 所示。隧道主体结构采用单层装配式钢筋混凝土平板型管片衬砌, 隧道内、外直径分别为 9.8, 10.8 m, 管片厚度为 0.5 m, 幅宽为 2.0 m, 管片衬砌分块形式为“5+2+1”, 如图 2 所示。在软硬不均地层的隧道进出口段采用双层衬砌结构, 二次衬砌为 30 cm 厚的 C30 素混凝土。

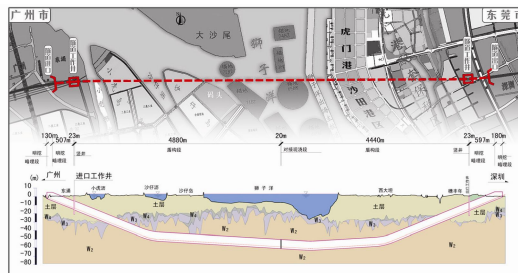


图 1 狮子洋隧道越江段纵断面地质图

Fig. 1 Geological map of cross section of Shiziyang Tunnel

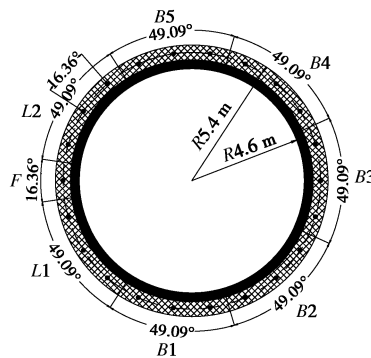


图 2 狮子洋隧道双层衬砌分块图

Fig. 2 Structure of segment lining of Shiziyang Tunnel

### 1.2 相似关系

以几何相似比  $C_l=20$  及重度相似比  $C_\gamma=1$  为基础相似比, 根据相似理论原理推出各物理力学参数原型值与模型值的相似比, 如表 1 所示。

表 1 相似关系表

Table 1 Similar relationship of model tests

物理量	符号	单位	相似比
内摩擦角	$\varphi$	°	$C_\varphi = 1$
应变	$\varepsilon$	—	$C_\varepsilon = 1$
泊松比	$\nu$	—	$C_\nu = 1$
黏聚力	$c$	Pa	$C_c = 20$
强度	$R$	Pa	$C_R = 20$
应力	$\sigma$	Pa	$C_\sigma = 20$
弹性模量	$E$	Pa	$C_E = 20$

### 1.3 相似模型土体配制

以狮子洋隧道进出口段主要穿越的粉细砂层、粗砾砂层等为原型土体, 根据相似关系配制模型土体。在配制模型土时, 以重度、黏聚力、内摩擦角以及弹

性模量作为控制指标，以河砂为主材，粉煤灰、石英砂、机油、重晶石粉以及松香为辅助材料。通过土体直剪试验对不同配比的模型土体进行筛选，最终确定模型土体的各材料比例为河砂：粉煤灰：石英砂：机油：重晶石粉：松香 = 1：1：0.055：0.045：0.01：0.001，其物理力学参数如表 2 所示。

表 2 土体材料物理力学参数对照表

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil materials

名称	$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{°})$
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
对应原型值	20.0	20.0	0	28.0

1.4 相似模型尺寸及相似材料配制

依托工程管片结构和二次衬砌混凝土强度等级分别为 C50 和 C30，两者物理力学参数均根据《混凝土结构设计规范》取值，详见表 3。在模型试验中，管片衬砌和二次衬砌是以石膏为基材，同时掺加一定比例硅藻土进行试制，并以单轴抗压强度试验数据进行评估，最终确定水：石膏：硅藻土 = 1：1.38：0.1 作为管片衬砌结构模型材料，水：石膏：硅藻土 = 1：1.26：0.1 作为二次衬砌模型材料。通过拉压刚度 EA 等效的方法，在每环模型管片内外侧分别对称配置 10 根  $\phi 1.2 \text{ mm}$  的铁丝用来模拟管片衬砌环向主筋。衬砌结构相似材料物理力学参数如表 3 所示。

表 3 双层衬砌结构物理力学参数表

Table 3 Physical and mechanical parameters of double-layer lining structure

衬砌结构	物理力学参数	原型值	模型值	对应原型值
管片	弹性模量/GPa	34.5	1.72	34.4
	单轴抗压强度标准值/MPa	32.4	1.60	32.0
二次衬砌	弹性模量/GPa	28.0	1.43	28.6
	单轴抗压强度标准值/MPa	16.7	0.84	16.8
环向主筋	等效拉压刚度/ $(10^5\text{N})$	$2.4\times 10^4$	1.80	$2.82\times 10^4$

1.5 管片接头的模拟

管片环向接头采用内外分区割槽方式进行模拟<sup>[19]</sup>，如图 3 所示。等效割槽深度根据抗弯刚度等效原理通过计算予以确定，管片正负弯曲刚度及对应槽缝深度如表 4 所示。

对于平面应变问题而言，认为管片纵向接头的抗剪刚度（径向和切向）近似为无穷大<sup>[20]</sup>，因此，模型试验中，采用直径为 4 mm、长度为 40 mm 的钢棒对管片环间纵向进行连接，安装过程如图 4 所示。

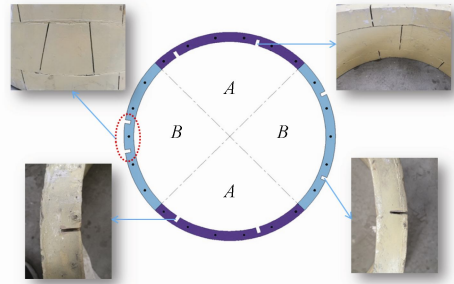


图 3 管片衬砌相似模型接头处理方式

Fig. 3 Joint treatment of segment lining similar model

表 4 管片接头对应弯曲刚度和槽缝深度

Table 4 Bending stiffnesses and slot depths of segment joints

序号	割槽位置	弯曲刚度 $/ (10^8 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	模型槽缝深度 /mm
1	A 区域	2.57 (正弯曲)	14.0
2	B 区域	1.60 (负弯曲)	15.5

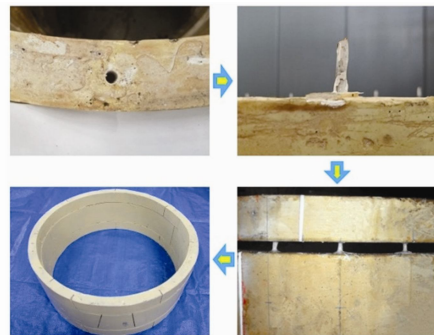


图 4 管片纵向接头安装过程效果图

Fig. 4 Diagram of installation process of longitudinal segment joints

1.6 双层衬砌接触面模拟

依托工程在管片和二次衬砌之间布设有防水层结构，因此，本次试验设定管片与二次衬砌为复合衬砌结构体系，如图 5 所示。模型试验中，具体操作过程：当管片衬砌结构加载至规定设计荷载时，保持荷载不变，在管片内侧敷设塑料薄膜，用于模拟工程实际中的防水层结构，然后通过现浇的形式施作二次衬砌，待二次衬砌养护达到设计强度后再继续加载。

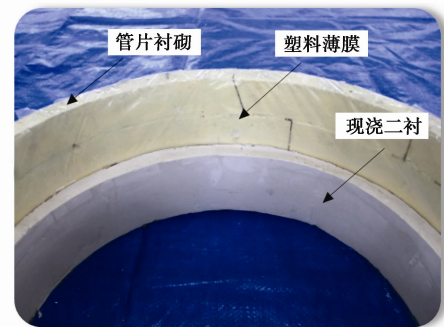


图 5 模型试验复合式双层衬砌结构

Fig. 5 Composite double-layer lining structure for model tests

### 1.7 试验加载与测试

本次试验采用了“隧道衬砌-水压-地层复合模型试验系统”,如图 6 所示。试验过程中采用水土分算模式,分别对水压、土压进行施加,其中将水压分解为均匀水压和非均匀水压两部分分别予以施加<sup>[21]</sup>。根据工程实际情况,盾构隧道双层衬砌结构常时设计荷载取为 50 m 水头和 30 m 土柱高度。

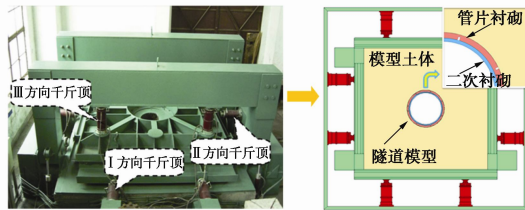


图 6 模型试验加载图

Fig. 6 Loading system of model tests

试验过程中,首先施加 III 方向竖向荷载,保证结构处于平面应变状态,然后施加均匀水压和非均匀水压至其工作状态;随后以分级加载方式同时施加 I, II 两个水平方向土压力至其工作状态,加载过程中两水平方向所加荷载值保持一定的比例即侧压力系数,最后继续分级施加土压力模拟超载及结构不同程度劣化,具体加载方案如表 5 所示。

表 5 试验加载工况表

Table 5 Loading schemes of model tests

加载步	III方向 千斤顶 压力 /MPa	I 方向荷载				隧道等 效上覆 土层/m
		千斤顶 油压 /MPa	模型拱 顶地层 压力/kPa	原型拱 顶地层 压力/kPa		
0	0	0.0	0.00	0.00	0	
1	18	0.6	1.44	28.80	3	
2	18	1.0	5.52	110.40	11	
3	18	1.4	8.67	173.40	17	
4	18	1.8	11.86	237.20	25	
5	18	2.2	14.46	289.20	30	
6	18	2.6	18.70	374.00	37	
7	18	3.0	21.79	435.80	43	
8	18	3.4	24.95	499.00	50	
9	18	3.8	29.29	585.80	60	
10	18	4.2	33.96	679.20	70	
11	18	4.6	41.88	837.60	85	
12	18	5.0	47.31	946.20	95	
13	18	5.4	52.83	1056.60	105	
14	18	5.8	57.34	1146.80	115	
15	18	6.2	61.33	1226.60	125	
16	18	6.6	65.37	1307.40	135	

试验中以中间环为目标环,采集管片衬砌及二次衬砌结构位移、层间内力、应变及声发射信息用于研究不同二次衬砌施作时机下双层衬砌结构力学特性。其中位移计从拱顶位置开始,间隔 45° 布置于模型环一侧至拱底位置结束,并于模型环另一侧拱腰位置增设一处,共计 6 处;土压力盒从拱顶开始,间隔 45° 布设在管片与外侧土体、管片和二次衬砌之间,共计

16 处;管片衬砌结构上的应变片在管片内、外侧相同位置同时布置,沿管片环向以 15° 为间隔,共计 24 处;二次衬砌结构应变片沿环向以 30° 为间隔等角度布置,共计 12 个测点;声发射探头布置在拱顶、拱底、左右拱腰,共计 4 处。

### 1.8 试验分组

盾构隧道开挖瞬间其上部土体压力主要由盾壳承担,随着盾构掘进,管片衬砌逐渐脱出盾尾,此时部分地层压力转移至管片衬砌结构上,但由于隧道结构所处地形地貌以及地质水文条件的差异,隧道开挖后土体压力转移的过程有差异,并且在盾构隧道投入使用后,地表挖填方、地下水位涨落、列车振动等外部荷载改变也会导致管片承受荷载量值的变化。基于上述考虑,将管片承受荷载量值占常时设计荷载比例分别为 37%, 57%, 83%, 100% 作为研究二次衬砌合理施作时机的 4 种工况。

此外,考虑到盾构隧道管片衬砌结构在长期运营过程中会出现损伤及劣化,导致其承载性能退化,本次试验采用超载手段对结构劣化进行模拟,增设管片承受荷载量值占常时设计荷载比例为 120%, 200% 两种工况。具体试验分组见表 6。

表 6 试验分组

Table 6 Test grouping

试验组号	管片拼装方式	侧压力系数	目标环封顶块位置	对应加载步	二次衬砌施作时机/%
1				2	37
2	相对中间目			3	57
3	标环管片旋	0.4	左拱腰	4	83
4	转 49.08°			5	100
5	布置			6	120
6				9	200

## 2 试验结果分析

### 2.1 双层衬砌结构变形特性分析

将不同施作时机下双层衬砌结构关键点位移换算成径向收敛值,以沿圆心径向向内收敛方向作为正方向,图 7 为各加载步下结构径向收敛值随加载步变化曲线。

由图 7 可知,各组衬砌结构横向、竖向收敛值均随荷载增加均呈逐渐增大趋势,但同一荷载级别下结构径向收敛量值有所差异。在常时设计荷载内(第 5 加载步),结构径向收敛值变化缓慢,且量值无明显差异,在此之后竖向收敛变形加速增加,且逐渐大于横向变形收敛值,同时各施作时机下结构径向收敛量值差异逐渐显著。在变形量值方面,施作时机为 57%,

83%整体偏小,其次是施作时机为37%,100%,原因在于较早施作二次衬砌(施作时机为37%),管片未能充分发挥承载能力,使得二次衬砌承受荷载相对较大,在外荷载作用下二次衬砌产生变形,对管片变形抑制效果逐渐减弱,结构变形相对较大;二次衬砌施作过晚时(施作时机大于100%),管片衬砌单独承受荷载量值增大,时间延长,施作二次衬砌时管片已产生较大变形甚至已损坏,施作二次衬砌后结构内部应力重分布,二次衬砌承受较大荷载,随着荷载增加产生大变形,进而对抑制管片变形效果不佳导致结构变形相对较大;而在施作时机为57%~83%,管片在单独承载情况下已产生一定变形,此时施作二次衬砌,形变后的管片和二次衬砌所承受荷载均与自身刚度相匹配,两者变形协调性能相对较好,二次衬砌能够在一定程度上抑制管片变形,减缓了第9—第13加载步荷载作用下结构径向收敛变形的发展。由于椭圆度能更好地描述双层衬砌结构整体变形特性,计算各组试验不同加载步下的椭圆度,如图8所示。

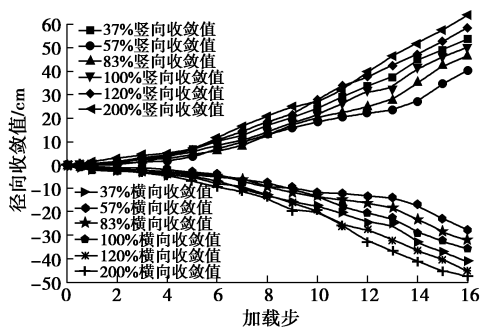


图7 各组试验结构径向收敛值随加载变化曲线

Fig. 7 Variation of radial convergence of structure with load

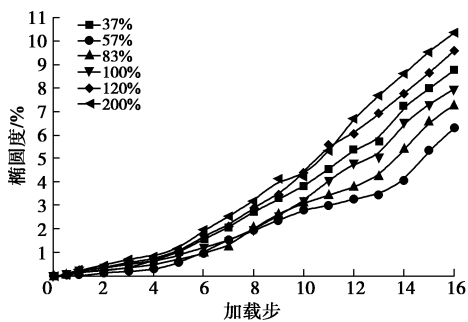


图8 各组试验结构椭圆度随加载变化曲线

Fig. 8 Variation of ellipticity of structure with load

由图8可知,随着荷载增加,结构整体椭圆度呈逐渐增加趋势,根据不同二衬施作时机下结构椭圆度随加载步变化速率的快慢,可将结构变形分为弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和结构失稳阶段3个阶段。在常时设计荷载内结构椭圆度变化均匀且量值较小,为结构弹性变形阶段;而在不同施作时机下,结构弹塑性区段有所差异,施作时机为57%,83%结构弹塑

性阶段在第5—第13加载步,结构椭圆度随加载步加速增加,在加载后期有收敛趋势,表明此收敛阶段管片和二次衬砌变形协调性能相对较好;而其他施作时机结构弹塑性阶段在第5—第10加载步,在此之后,结构椭圆度随加载步变化速度进一步加快,表现为不收敛状态,处于结构失稳阶段,表明合理二次衬砌施作时机可延长结构弹塑性变形阶段,有利于提高结构整体承载性能。

### 2.2 双层衬砌结构层间相互作用特性分析

与单层管片衬砌相比,双层衬砌在承载过程中,管片不仅要承担结构外侧土体压力,还需要承受二次衬砌与管片衬砌间的接触面压力,形成与单层管片衬砌截然不同的支护体系。因此,探明不同施作时机下管片与二次衬砌接触面间接触面压力随外荷载变化规律,对研究盾构二次衬砌合理施作时机有重要意义。图9为不同施作时机下管片与二次衬砌接触面压力平均值随加载步变化曲线。

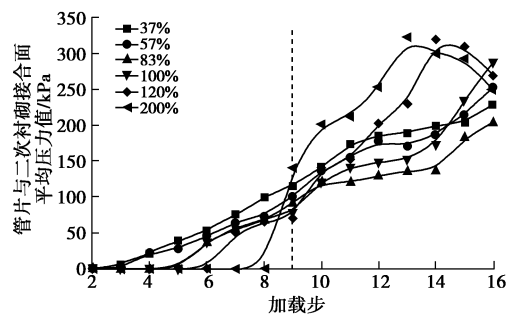


图9 接触面压力平均值随荷载变化曲线

Fig. 9 Variation of average pressure of contact surface with load

由图9可知,各施作时机下二次衬砌与管片衬砌层间接触面压力平均值随加载步增加表现为逐渐增大的趋势,在0—第9加载步内,相同加载步条件下,接触面压力平均值随施作时机推迟呈逐渐减小趋势,这是由于该加载区段内随着施作时机推迟,管片与二次衬砌在外荷载作用下的变形较为协调,二次衬砌与管片间能够更好的贴合,使得压力测试元件附近有效贴合区域面积逐渐增加,从而在各关键点所测得的量值逐渐减小;在第9加载步以后,结构在加载过程中产生的裂缝引起结构荷载重分布,使得接触面压力平均值随加载步表现为两种不同趋势:当施作时机为37%~100%时,随着荷载增加,接触面压力呈逐渐增大趋势,在第14加载步之后,接触面压力增加速度进一步加大,表明管片与二次衬砌接触面面积加速减小,两者之间的变形协调性能逐渐减弱;施作时机大于100%,在加载至第9—第13加载步时,二次衬砌与管片衬砌之间的接触面压力平均值增加速度较37%~100%施作时机大,此后接触面压力平均值呈减小趋

势, 原因在于二次衬砌施作过晚, 已产生大变形的管片衬砌与二次衬砌两者变形协调性能弱, 二次衬砌为了抑制大变形管片继续变形, 将增加与大变形管片衬砌的接触面积, 承受较大荷载, 进而表现为压力盒所测压力偏小。为进一步探明承载过程中二次衬砌发挥的作用, 现以管片所受外部荷载平均值为比较基准, 将二次衬砌所受层间接触面压力平均值进行无量纲化处理, 图 10 为管片衬砌与二次衬砌接触面压力平均值占地层土压力分担比例图。

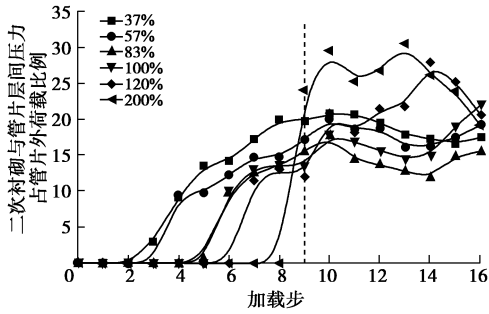


图 10 接触面压力占地层土压力平均分担比例

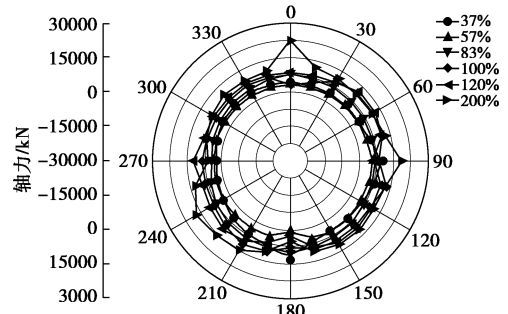
Fig. 10 Ratios of pressure of contact surface to earth pressure of strata

由图 10 可知, 各工况下接触面压力平均占比随加载步基本呈现先增大后减小的趋势。加载步等级较小时, 随着外荷载的增加, 二次衬砌在结构体系中承担外荷载的比例逐渐增大, 承载作用逐渐增强, 待二次衬砌发生宏观裂缝前达到峰值。对比各工况下分担比例曲线可知, 在第 9 加载步内, 相同加载条件下, 随着二次衬砌施作时机的推迟, 相同加载步下接触面压力平均占比基本呈递减趋势; 在第 10—第 16 加载步内, 常时设计荷载内施作二次衬砌, 二次衬砌所受层间压力平均值占比均小于超载情况, 这是因为超载情况下二次衬砌施作时管片已产生大变形, 随着荷载增加, 管片承载能力逐渐削弱, 二次衬砌承受荷载加大, 导致二次衬砌所受层间压力平均值占比较大, 但整个加载过程中二次衬砌所承受层间接触面压力占比均小于 50%, 表明盾构双层衬砌承载过程中, 二次衬砌仅作为辅助承载结构。

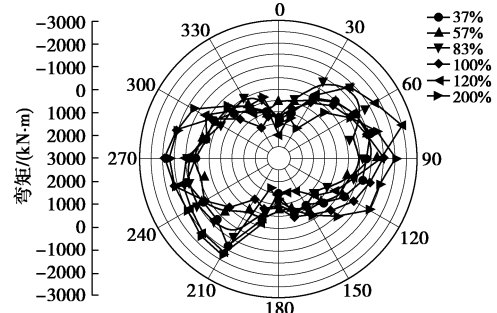
2.3 双层衬砌结构内力分布特性分析

为了进一步探明双层衬砌结构之间的受力特性, 通过对试验过程中管片衬砌与二次衬砌结构内外侧应变信息进行采集, 利用材料本构关系计算原型衬砌结构内力量值, 规定结构轴力受压为正, 弯矩则是外表面受压、内表面受拉为正值, 反之为负值。由于第 6 组试验显示, 单层管片衬砌结构加载至第 8 加载步时, 拱顶、拱底已出现宏观裂纹, 现对第 8 加载步不同二次衬砌施作时机下双层衬砌结构内力分布进行研究

(施作时机为 200%在该加载步下还未进行二次衬砌施作)。图 11 为管片衬砌轴力、弯矩分布图。



(a) 管片环向轴力图



(b) 管片环向弯矩图

图 11 第 8 加载步管片衬砌环向内力分布

Fig. 11 Distribution of axial force and bending moment of lining ring at 8th loading step

由图 11 可知, 管片衬砌轴力表现出全环受压的特点; 弯矩分布呈“扁鸭蛋”状, 表现出拱顶、拱底内侧受拉, 左右拱腰外侧受拉的特点, 内外侧反弯点位置主要分布于拱顶、拱底关键点 30° ~45° 范围内, 但各曲线之间存在一定差异, 表明二次衬砌施作时机并没有改变管片衬砌轴力与弯矩的分布规律, 但对其内力分布均匀程度及量值均存在一定影响。在均匀程度方面, 施作时机为 57%时, 管片轴力及弯矩相对其他试验组分布均匀, 其次是施作时机为 83%, 施作时机过早 (37%) 或过晚 (120%, 200%), 管片衬砌结构易在右拱腰及拱底产生应力集中, 导致管片衬砌结构内力分布不均匀, 降低整体承载性能。图 12 为第 8 加载步不同二次衬砌施作时机下二次衬砌轴力、弯矩分布图。

与图 11 管片衬砌内力分布对比可知, 同一加载步不同二次衬砌施作时机下, 二次衬砌环向内力分布更为不均, 原因在于二次衬砌的内力源于管片衬砌和二次衬砌之间的接触面压力, 两者刚度均较大, 在加载过程中变形协调性能难以保证, 从而导致二次衬砌内力突变情况更为显著。为了进一步探究二次衬砌施作时机对双层衬砌承载特性的影响, 将第 8 加载步不同二次衬砌施作时机下双层衬砌最大内力量值汇总于表 7。

表7 第8加载步双层衬砌最大内力量值

Table 7 Values of maximum internal force of double-layer lining at 8th loading step

试验 分组	二次衬砌施 作时机/%	二次衬砌最大内力			管片衬砌最大内力			二衬最大内力/ 管片最大内力		
		轴力 /kN	正弯矩 /(kN·m)	负弯矩 /(kN·m)	轴力 /kN	正弯矩 /(kN·m)	负弯矩 /(kN·m)	轴力 /kN	正弯矩 /(kN·m)	负弯矩 /(kN·m)
1	37	8359.4	418.0	252.6	13165.9	1406.1	1456.4	0.64	0.29	0.18
2	57	8498.9	907.3	1132.5	6385.1	1236.1	990.3	1.33	0.92	0.92
3	83	8096.0	585.3	303.0	10398.9	1347.1	1286.9	0.78	0.45	0.22
4	100	3770.3	332.4	249.7	13540.4	1951.7	1463.8	0.28	0.23	0.13
5	130	4112.4	546.2	591.7	12910.3	2538.0	2001.6	0.32	0.27	0.23

表8 双层衬砌结构内部损伤及宏观破坏荷载级别

Table 8 Levels of internal and macroscopic damage loads of double-layer lining structure

试验 组号	二次衬砌施 作时机/%	二次衬砌施作 荷载级别	结构内部损伤 出现荷载级别	结构宏观破坏 出现荷载级别	主裂缝 位置	主裂缝 方向
1	37	2	5	9 (二次衬砌)	拱顶	纵向、斜向
2	57	3	7	12 (二次衬砌)	拱顶、拱底	纵向
3	83	4	10	10 (二次衬砌)	拱底、左拱肩	拱底纵向、拱肩斜向
4	100	5	10	10 (二次衬砌)	拱顶	纵向
5	120	6	9	9 (二次衬砌)	拱底	纵向
6	200	9	8	8 (管片)	拱顶、拱底	纵向

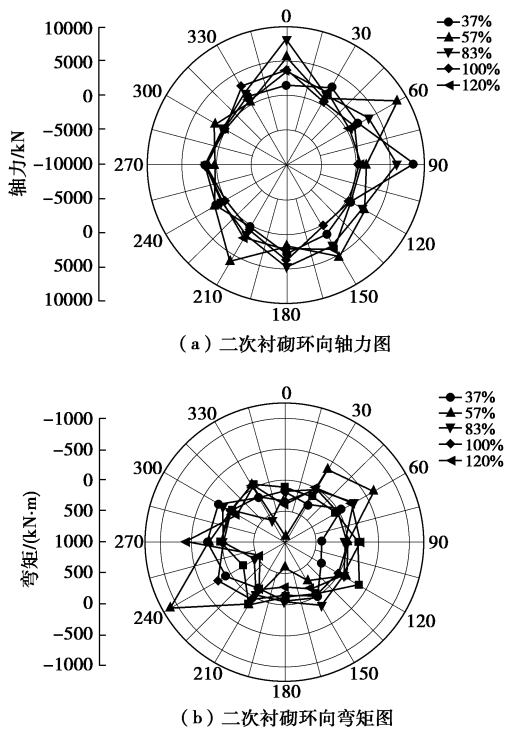


图12 第8加载步二次衬砌环向内力分布

Fig. 12 Distribution of internal forces of the secondary lining ring at 8th loading step

由表8可知，同一加载步不同二次衬砌施作时机下双层衬砌内力量值大小有所差异，但在常时设计荷载内施作二次衬砌，随着二次衬砌施作的推迟，二次衬砌内力量值基本呈现先增大后减小的趋势，当二次

衬砌施作时超出100%，二次衬砌内力量值相比二次衬砌施作时机为100%有所增加，管片衬砌内力变化与之相反，引入二次衬砌内力与管片衬砌内力比值作为不同二次衬砌施作时机下双层衬砌承载性能评价指标，该比值越接近于1，表明二次衬砌在承载过程中发挥的作用越显著，二次衬砌与管片衬砌变形协调性能更为合适，反之则越差。试验具体计算结果如表8所示，分析可知二次衬砌施作时机为57%，83%时，二次衬砌内力更加接近管片衬砌内力量值，能充分发挥管片和二衬承载性能，更加有利于提高双层衬砌整体承载性能。

2.4 双层衬砌损伤破坏声发射信息及承载性能分析

随着加载的进行衬砌环于结构内部产生微观裂纹，在裂纹产生及扩展过程中应变能以弹性波形式释放引起声发射现象，利用传感器能够接收到声发射信号中的能量信息借此分析结构内部损伤情况。图13是不同二次衬砌施作时机下结构声发射信息。

由图13可知，结构累计声发射事件数（累计AE数）随着加载进行呈增大趋势，但不同二次衬砌施作时机结构累计AE数增长形式及量值有所差异：二次衬砌施作过早（37%），结构累计AE数呈阶梯性增长，结构于第5加载步出现了显著声发射事件率（AE率）和累计AE数突变，表明结构出现显著内部损伤，原因在于二次衬砌施作较早时，二次衬砌以刚性支护形式作用于双层衬砌结构，承担较大荷载，由于所受荷

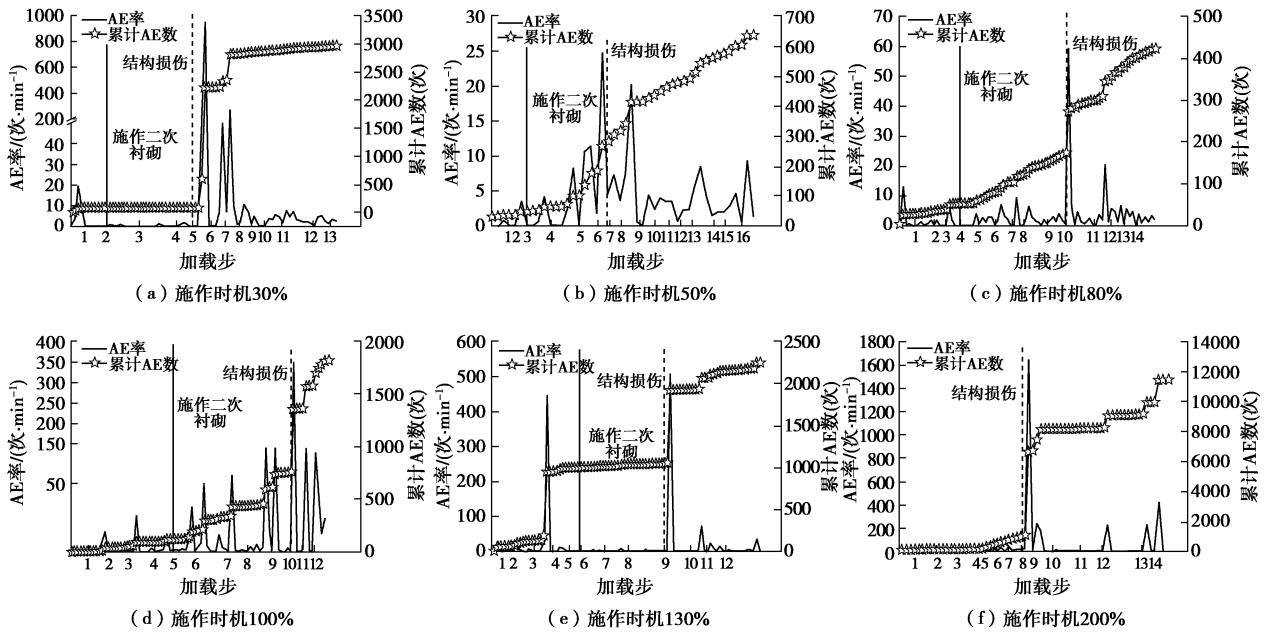


图 13 声发射事件数随加载步变化曲线

Fig. 13 Variation of number of acoustic emission events with loading step

载和承载能力不协调, 导致二次衬砌内部产生损伤破坏引起双层衬砌结构累计 AE 数和 AE 率突变; 二次衬砌施作时机为 57%~83%, 双层衬砌结构累计 AE 数呈渐进性增长, 增长趋势相对均匀, 双层衬砌结构分别于第 7 步、第 10 加载步出现显著 AE 率突变, 但突变量值较小; 施作时机 100% 时的结构声发射信息变化规律与施作时机为 57%~83% 相似, 但在量值上有所增大, 结构 AE 率和累计 AE 数于第 10 加载步发生突变; 二次衬砌施作过晚 (120%, 200%), 结构累计 AE 数呈阶梯性增长, 结构 AE 率和累计 AE 数分别于第 9 步、第 8 加载步出现突变且量值较其他施作时机大, 声发射信息变化相比施作时机为 57%~100% 更为显著, 结构内部损伤更为严重。

试验过程中将结构出现宏观裂缝的荷载级别定义为结构宏观破坏荷载级别。其中第 1 组—第 5 组二次衬砌较管片衬砌先出现宏观裂缝, 第 6 组则为管片衬砌较二次衬砌先出现宏观裂缝。图 14 为施作时机为 57% 时, 结构宏观破坏示意图。

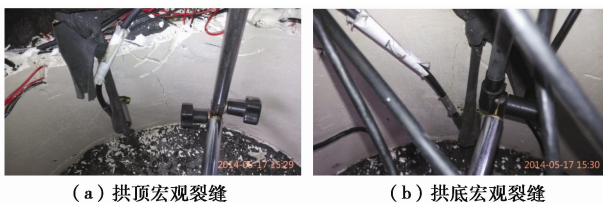


图 14 第 2 组试验宏观破坏示意图

Fig. 14 Macroscopic failure of test group No. 2

结合双层衬砌结构内部损伤和试验过程中结构宏

观破坏对应荷载级别, 对不同施作时机下双层衬砌结构整体承载性能进行评价。表 8 对双层衬砌结构内部损伤及宏观破坏荷载级别进行统计。

由表 8 可知, 双层衬砌开始发生宏观破坏主裂缝的位置多集中于拱顶和拱底, 拱顶与拱底部位破坏形式多为拉伸破坏, 其裂缝破坏形式如图 14 所示。二次衬砌施作时机为 57% 时, 结构出现宏观破坏荷载级别最大, 表明该组试验管片和二次衬砌变形协调性能良好, 双层衬砌联合承载能力要优于其他组, 其次是施作时机为 83%, 100%, 但施作时机为 57% 时, 结构开始出现内部损伤荷载级别相对施作时机为 83% 和 100% 低, 表明较早施作二次衬砌可加速结构损伤阶段的出现, 但在合理施作时机内对结构承载性能影响较小。相比施作时机为 37%~100%, 超载情况下结构内部损伤及宏观破坏荷载级别无差别, 原因在于管片刚度较二次衬砌刚度大, 在单独承载过程中不易出现内部损伤, 进而延缓超载情况下损伤阶段的出现, 但在提高结构承载性能, 延缓结构宏观破坏方面作用不够显著。

### 3 结 论

依托广深港狮子洋盾构隧道工程, 采用相似模型试验的研究方法, 对二次衬砌合理施作时机展开研究, 得出以下 4 点结论。

(1) 通过对不同施作时机下结构径向收敛变形及椭圆度分析, 可将结构变形划分为弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和失稳阶段, 且施作时机为 57%~



83%，二次衬砌能有效抑制管片变形，减小结构径向变形量值，延长结构弹塑性变形阶段，有利于提高结构整体承载性能。

(2) 通过对管片与二次衬砌层间接触面压力和内力分析，二次衬砌在盾构隧道双层衬砌中仅作为辅助承载结构，随着二次衬砌施作时机推迟，二次衬砌与管片衬砌最大内力量值之比呈先增大后减小的变化趋势，二次衬砌施作时机为 57%，83%时，二次衬砌内力量值更加接近管片衬砌量值，能充分发挥各自承载性能，有利于提高整体承载性能。

(3) 通过对双层衬砌结构声发射信息分析，二次衬砌施作时机的推迟，可延缓结构损伤阶段的出现，但不能延缓结构宏观破坏的出现，同时施作时机为 57%~100%时，结构累计 AE 数呈渐进性增大趋势，且整体量值相对其它施作时机小，管片和二次衬砌的变形协调能良好，有利于结构整体受力性能提高。

(4) 综合分析管片衬砌结构的位移、层间接触面压力、内力及声发射信息，当二次衬砌施作时机为 57%~83%时，双层衬砌结构能够最大限度地发挥其综合承载性能，认为是合理的二次衬砌施作时机。

#### 参考文献：

- [1] YAN Qi-xiang, YAO Chao-fan, YANG Wen-bo, 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.
- [2] 王士民, 于清洋, 彭 博. 水下盾构隧道管片衬砌结构渐进性破坏机理模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, **49**(4): 111 - 120. (WANG Shi-min, YU Qing-yang, PENG Bo. Model test study on progressive failure mechanism of submarine shield tunnel segment lining structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, **49**(4): 111 - 120. (in Chinese))
- [3] 董 飞, 房 倩, 张顶立. 北京地铁运营隧道病害状态分析[J]. *土木工程学报*, 2017, **50**(6): 104 - 113. (DONG Fei, FANG Qian, ZHANG Ding-li, et al. Analysis of disease status of Beijing subway tunnels[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, **50**(6): 104 - 113. (in Chinese))
- [4] 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]. *土木学会论文集*, 1987(388): 85 - 93. (HIROTOMO Murakami, ATSUSHI Koizumi. On the movement of shielded cement ring that was reinforced by the secondary lining[J]. *Proceedings of JSCE*, 1987(388): 85 - 93. (in Japanese))
- [5] 村上博智, 小泉淳. 二次覆工された千鳥組セグメント リングの挙動について[J]. *土木学会论文集*, 1991(430): 135 - 142. (HIROTOMO Murakami, ATSUSHI Koizumi. On the behavior of the secondary lined staggered segment ring[J]. *Proceedings of JSCE*, 1991(430): 135 - 142. (in Japanese))
- [6] FUJIMORI S, KHANGAI T, KOYAMA Y. Experimental study on mechanical behavior of tunnel lining consists of segments and secondary lining. Part 2: analysis model[C]// *Proceedings of Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, 1983, Tokyo: 173 - 174. (In Japanese)
- [7] 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, LU Guo-liang. Study on mechanical model of double-layer lining of shield tunnel[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, **32**(4): 28 - 33. (in Chinese))
- [8] 堀地紀行. トンネル軸方向の剛性を考慮したセグメント リングの解析法[J]. *トンネルと地下*, 1989(20): 287 - 292. (RAKUJIKO. Analytical method of segment ring considering the eccentricity of tunnel axis[J]. *Tunnel and Underground*, 1989(20): 287 - 292. (in Japanese))
- [9] 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 Shi-min, YU Qing-yang, PENG Bo, et al. Study on three-dimensional solid discontinuous contact model of double-layer lining of shield tunnel based on plastic damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(2): 303 - 311. (in Chinese))
- [10] 何 川, 张建刚, 杨 征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, **41**(12): 85 - 90. (HE Chuan, ZHANG Jian-gang, YANG Zheng. Model test study on mechanical characteristics of segment lining structure of Wuhan Yangtze River Tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, **41**(12): 85 - 90. (in Chinese))
- [11] FENG Kun, HE Chuan, FANG Yong, et al. Study on the mechanical behavior of lining structure for underwater shield tunnel of high-speed railway[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2013, **16**(8): 1381 - 1399.
- [12] 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]. *土木学会论文集*, 1987(388): 85 - 93. (HIROTOMO Murakami, KOIZUMI. On the movement of shieldment ring that was reinforced by the secondary lining[J]. *Proceedings of JSCE*, 1987(388): 85 - 93. (in Japanese))

- [13] NASRI A Wunfah, MICHAEL P Della Posta. Full scale testing of tunnel liner[C]// Towards New Worlds in Tunnelling. 1992: 315 - 320.
- [14] MURAKAMI H, KOIZUMI A. Behavior of shield segment ring reinforced by secondary lining[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **388**: 85 - 94. (in Japanese)
- [15] TAKAMATSU N, MURAKAMI H, KOIZUMI A. A study on the bending behavior in the longitudinal direction of shield tunnels with secondary linings[C]// Proceedings of the International Congress on Towards New World in Tunnellings, 1992, Acapulco: 277 - 285.
- [16] PAN Y W, DONG J J. Time-dependent tunnel convergence: I formulation of the model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, **28**(6): 469 - 475.
- [17] 刘志春, 李文江, 朱永全. 软岩大变形隧道二次衬砌施作时机探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 580 - 588. (LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, ZHU Yong-quan, et al. Discussion on the timing of secondary lining construction in soft rock large deformation tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 580 - 588. (in Chinese))
- [18] 许建聪, 周泉吉. 软弱破碎围岩隧道二次衬砌施作的合理时机判别研究[J]. 系统仿真技术, 2014, **10**(3): 197 - 202, 238. (XU Jian-cong, ZHOU Quan-ji. Study on reasonable timing discrimination of secondary lining of soft and broken surrounding rock tunnel[J]. System Simulation Technology, 2014, **10**(3): 197 - 202, 238. (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 Guo-wen, WANG Shi-min, DAI Guang-hui, et al. Research on the circumferential simulation method of shield tunnel joint based on internal and external divisional slotting method[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, **38**(4): 90 - 97. (in Chinese))
- [20] 鉄道総合技術研究所. 鉄道構造物等設計標準・同解説(シルードトンネル)[M]. 东京: 丸善株式会社, 1997. (Railway Comprehensive Technology Research Institute. Standard and explanation for railway structures design (shield tunnel)[M]. Tokyo: The Maruzen Corporation, 1997. (in Japanese))
- [21] 王士民, 姚佳兵, 何祥凡, 等. 水压对盾构管片衬砌力学特征与破坏形态的影响模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, **51**(4): 111 - 120. (WANG Shi-min, YAO Jia-bing, HE Xiang-fan, et al. Model test study on the influence of water pressure on mechanical characteristics and failure modes of shield lining[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, **51**(4): 111 - 120. (in Chinese))

## 标准摘录：标点符号用法（GB/T 15834—2011） 括号的定义与用法（一）

### 1 定义

标号的一种，标示语段中的注释内容、补充说明或其他特定意义的语句。

### 2 形式

括号的主要形式是圆括号“()”，其他形式还有方括号“[]”、六角括号“{}”和方头括号“【】”等。

### 3 基本用法

#### 3.1 下列各种情况，均用圆括号：

a) 标示注释内容或补充说明。

示例 1：我校拥有特级教师（含已退体的）17 人。

示例 2：我们不但善于破坏一个旧世界，我们还将善于建设一个新世界！（热烈鼓掌）

b) 标示订正或补加的文字。

示例 3：信纸上用稚嫩的字体写着“阿夷（姨），你好！”。

示例 4：该建筑公司负责的建设工程全部达到优良工程（的标准）。

c) 标示序次语。

示例 5：语言有三个要素：（1）声音；（2）结构；（3）意义。

示例 6：思想有三个条件：（一）事理；（二）心理；（三）伦理。