

双侧卸载工况下盾构隧道错缝拼装结构变形特征

刘学增¹, 赖浩然², 桑运龙^{1,3}, 张 强^{3,4}, 张竹清⁵, 刘金栋⁶

(1. 同济大学 土木信息技术教育部工程研究中心, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 上海同岩土木工程科技股份有限公司, 上海 200092; 4. 上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心,
上海 200092; 5. 厦门轨道交通集团有限公司, 福建 厦门 361008; 6. 青岛银盛泰集团有限公司, 山东 济南 266000)

摘要: 依托厦门地铁 2 号线区间隧道, 采用相似模型试验和有限元数值模拟分析了隧道双侧卸载工况下结构的受力变形特征、破坏形式及损伤过程, 得到盾构隧道管片错缝拼装结构在双侧卸载工况下的变形控制指标。结果表明, 管片混凝土裂缝宽度达到设计允许值 0.15 mm 时的收敛变形值为 $3.29\% D$ (D 为隧道直径); 螺栓屈服时收敛变形值为 $10.67\% D$, 结构破坏形式表现为由管片开裂、螺栓屈服直到变形过大并垮塌。

关键词: 盾构隧道; 卸载工况; 相似模型试验; 数值分析; 变形特征

中图分类号: U451

文献标志码: A

Deformation Characteristics of Shield Tunnel with Staggered Joints Under Bilateral Unloading Condition

LIU Xuezheng¹, LAI Haoran², SANG Yunlong^{1,3}, ZHANG Qiang^{3,4}, ZHANG Zhuqing⁵, LIU Jindong⁶

(1. Civil Engineering Information Technology Research Center of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Tongyan Civil Engineering Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Engineering Research Center of Underground Infrastructure Detection and Maintenance Equipment, Shanghai 200092, China; 5. Xiamen Rail Transit Group Limited Corporation, Xiamen 361008, China; 6. Qingdao Yinshengtai Group Co., Ltd., Ji'nan 266000, China)

Abstract: Based on the engineering background of the Xiamen Metro Line 2 tunnel, the similar model test and the finite element numerical simulation were used. Aiming at the shield tunnel's unloading conditions on both sides, the

transverse deformation characteristics, failure modes and segment damage process of tunnel were analyzed, and the stress mechanism and the key performance points of shield tunnel under unloading condition were obtained. The results show that: the convergent deformation value of segment concrete crack width 0.15 mm of design allowable value is $3.29\% D$ (D is the diameter of the tunnel); the vertical section of bolt failing to yield is $10.67\% D$, the structural failure form is caused by segment cracking, bolt yielding to excessive deformation and collapse.

Key words: shield tunnel; unloading condition; similar model test; numerical analysis; deformation characteristics

随着城市铁路网的不断发展, 地铁隧道保护区基坑施工也逐渐增多, 基坑施工对周边地层的应力释放作用, 不可避免地会对地铁隧道造成一定的影响, 严重时造成地铁隧道结构损伤^[1-3]。

目前, 针对盾构隧道结构力学性能已开展了较多研究^[4-8], 但针对卸载工况下盾构隧道结构受力变形特征的研究尚少。柳献等^[9]针对卸载工况下盾构隧道结构承载能力进行了足尺试验, 记录了试验现象及相关破坏形式, 并得到了盾构隧道在卸载工况下的受力变形机理及关键性能点, 但由于足尺试验规模大、周期长, 地层难以模拟, 因此没有考虑地层与结构之间的相互作用。徐秀峰等^[10]针对上海地铁 16 号线外径为 11.6 m 的大直径盾构隧道, 建立包含内部结构的错缝拼装隧道三维模型, 对隧道两侧土体对称开挖卸载工况下管片环的直径变形量、接缝张开量、中隔壁应力及石岩棉压缩量与土体开挖

收稿日期: 2018-05-16

基金项目: 厦门市科技计划重大项目(3502Z20151006); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2015CB057806); 国家电网公司科技项目(SHJJGC160053); 深圳市交通公用设施建设中心交通建设工程课题(20160318003B、20160318002B); 上海人才发展基金(2017055)

第一作者: 刘学增(1971—), 男, 教授级高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为隧道病害检测与结构健康监测。

E-mail: xuezhengL@263.net

通信作者: 桑运龙(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为隧道及地下建筑工程。E-mail: hiker_1@163.com

深度的关系进行了分析,主要以变形预测为主,缺乏对管片结构承载性能演化规律的研究。

基于几何相似比 1:5 的室内模型试验以及三维有限元数值建模分析,研究淤泥地层双侧卸载工况下盾构隧道错缝拼装结构受力变形特征、损伤过程以及破坏模式,寻求隧道管片应力与变形、构件承载力与变形之间的对应规律,并提出双侧卸载工况下的隧道变形控制指标,为今后盾构隧道保护区内基坑施工变形控制提供依据。

1 相似模型试验方案及试验结果

1.1 依托工程概况

模型试验以厦门地铁 2 号线厦门岛至海沧段为背景,选取地铁隧道所穿越的陆域段淤泥质地层作为模型试验条件,地质横断面如图 1 所示。每环管片由 1 个封顶块(K)、2 个邻接块(B1、B2)和 3 个标准块(A1、A2、A3)组成,按 45° 错缝拼装。混凝土强度等级为 C55,管片环间由 16 个环缝连接螺栓(M30)连接,管片间由 12 个纵缝连接螺栓(M30)连接。隧道外径为 6 700 mm,内径为 6 000 mm,环宽为 1 500 mm,管片厚度为 350 mm,分块如图 2 所示。

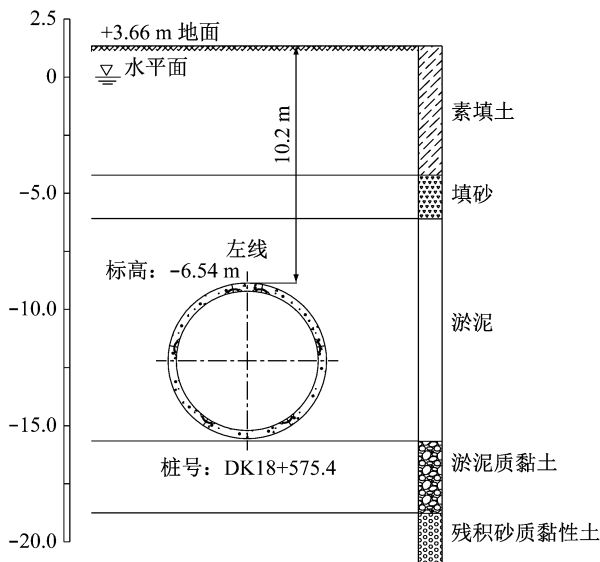


图 1 厦门地铁 2 号线陆域段工程横断面

Fig.1 Transverse section of continental section of Xiamen Metro Line 2

1.2 相似材料及相似模型

取几何相似比 $C_L=5$ 、容重相似比 $C_\gamma=1$ 作为基础相似比,根据相似理论,其他物理力学参数相似比如表 1 所示。

管片由水、中砂和水泥按 1.0:6.0:1.5 的质量比

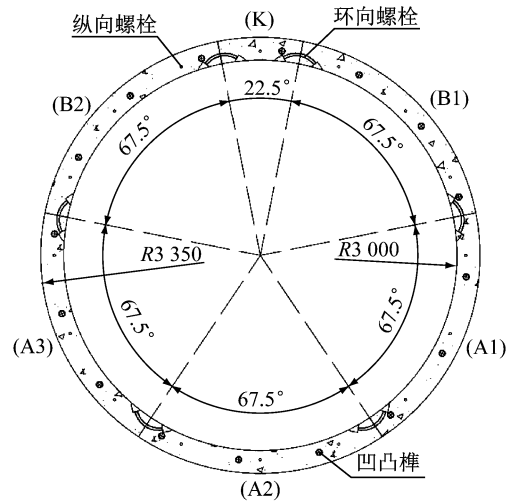


图 2 厦门地铁 2 号线管片衬砌分块图

Fig.2 Segment block diagram of Xiamen Metro Line 2

表 1 各物理量相似常数

Tab.1 Similarity constants of each physical quantity

物理量	相似常数
几何尺寸/m	5
位移/m	5
弹性模量/(N·m ⁻²)	5
应力/(N·m ⁻²)	5
弹性抗力系数/(N·m ⁻³)	1
应变	1
泊松比	1
均布荷载/(N·m ⁻²)	5
轴力/N	125
弯矩/(N·m)	625

配置而成,并通过模具浇筑成型,如图 3 所示。管片钢筋采用直径为 2 mm、网格大小为 40 mm×15 mm 的镀锌铁丝网模拟。试验中不考虑管片手孔构造,螺栓采用 M6 AZ91d 镁合金模拟。每环管片外侧等距布设 36 个径向弹簧模拟地层。管片采用 ABA 型错缝拼装模式,相邻环错动角度为 45°。

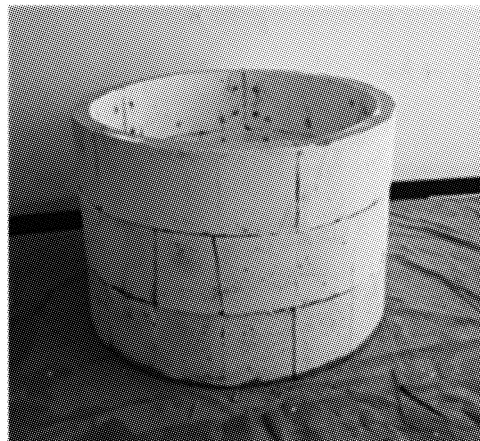


图 3 拼装后的盾构隧道试验模型

Fig.3 Experimental model of assembled shield tunnel

1.3 试验设备及测试手段

1.3.1 试验装置

试验采用三环拼装结构,如图 4 所示.卧式加载,可实现 12 个方向荷载的独立施加,每个方向千斤顶均采用“一拖三”的形式,保持压力一致.通过地层弹簧及荷载分配梁(曲板)以均布荷载的形式施加于管片模型结构.

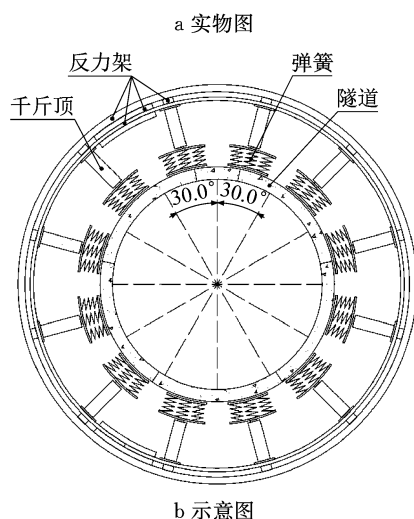
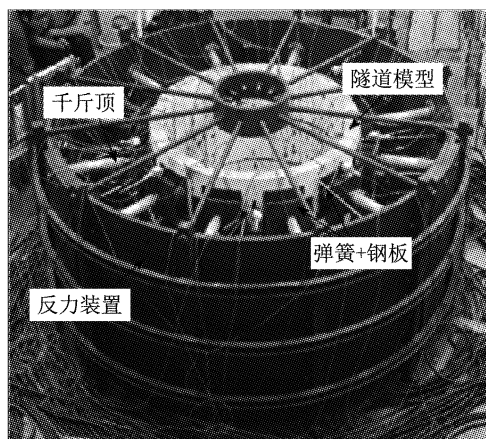


图 4 模型试验加载装置

Fig.4 Physical diagram of model test loading device

1.3.2 荷载施加过程

依据埋深及地下水位信息,采用水土合算法按照全覆土柱理论计算原型和模型隧道的外部水土压力,地层参数如表 2 所示,水土压力如表 3 所示.

表 2 地层参数

Tab.2 Geological parameter

岩土名称	地层厚度/ m	重力密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	基床系数/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	侧压力 系数
素填土	5.56	18.7	10	0.43
填砂	1.88	22.0	20	0.43
淤泥	9.57	16.2	5	0.72

试验加载方式为静力全周加载^[11],通过 12 个方向的弹簧-弧形钢板装置来模拟均布荷载.均布荷载

表 3 水土压力

Tab.3 Water and soil pressure

项目	顶部荷载 q_1 设计值/kPa	侧向荷载 q_2 设计值/kPa
原型	190.0	136.8
模型	38.0	27.4

分成 3 组,分别为 q_1 、 q_2 与 q_3 ,加载时完全同步,如图 5 所示.卸载工况按以下 2 个阶段进行:

模拟实际埋深的加载阶段:由零应力初始状态,分 5 步对称加载至实际埋深,每步荷载增量 $\Delta q_1 = 7.20 \text{ kPa}$, $\Delta q_2 = 5.48 \text{ kPa}$, $\Delta q_3 = 5.52 \text{ kPa}$.

模拟基坑开挖的卸载阶段:保持 q_1 不变,由实际埋深状态分步对称卸载,调节 q_2 和 q_3 ,每步卸载增量 $\Delta q_2 = -3.91 \text{ kPa}$, $\Delta q_3 = -1.96 \text{ kPa}$,直至 $q_2 = 0 \text{ kPa}$ 或结构破坏.

试验中由于设置了模拟土体弹性抗力的弹簧,因此侧向荷载 $q_2 = (q'_2 - \Delta k)/2$,其中 q'_2 为侧向荷载实测值, Δ 为弹簧压缩量, k 为弹簧刚度.

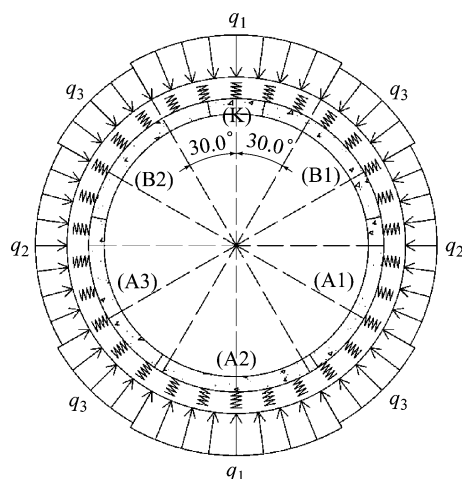


图 5 环向荷载分组示意图

Fig.5 Grouped schematic diagram of cyclic loading

1.3.3 量测方案

试验过程中,为了能有效揭示盾构隧道管片衬砌结构渐进性破坏规律,测试管片应变和位移.各物理量测点布置如图 6 所示.

1.4 试验结果分析

1.4.1 管片变形及破坏过程

图 7 反映了侧向荷载与结构变形(中环管片)的对应关系.总体上,结构变形表现为“横鸭蛋”,即横向扩张、竖向收敛.加载阶段,变形近似线性增加,并且竖向收敛值大于横向扩张值.实际埋深条件下,中环管片竖向收敛 7.60 mm,横向扩张 4.20 mm,拱底内侧、拱顶内侧和拱腰外侧出现微裂缝,裂缝未张开,其他部位未见裂损现象.

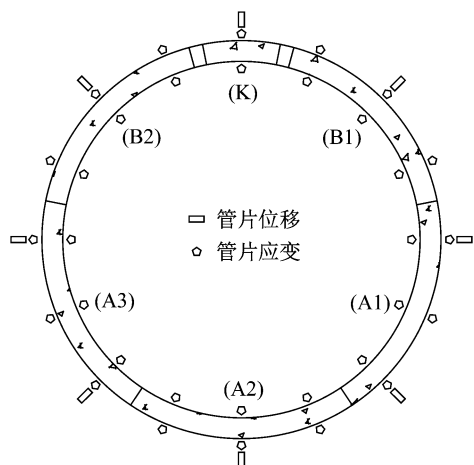


图 6 中环管片测点布置示意图

Fig.6 Layout of measuring points in middle ring segment

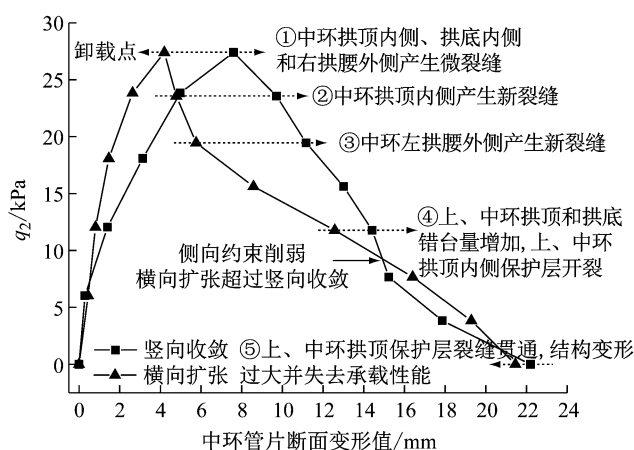


图 7 中环管片断面收敛与侧向荷载关系(试验)

Fig.7 Relation between section convergence and lateral load of middle ring segment(test)

开始卸载后,由于水平约束的减小,横向扩张量非线性增加,快速向竖向收敛值逼近,如图 7 所示。卸荷比超过 72%后,横向扩张与竖向收敛接近同步发展;侧向荷载降低为零时,中环管片竖向收敛 22.20 mm,横向扩张 21.46 mm。随着变形的快速发展,拱底内侧、拱腰外侧、拱顶内侧相继出现新的裂缝,拱顶、拱底最为密集;横向扩张与竖向收敛一致时,上环与中环出现明显的错台,导致上环拱部保护层开裂,并沿环向迅速贯通。中环管片裂缝展布如图 8 所示,隧道最终破坏形态如图 9 所示。

	拱底	左拱腰	拱顶	右拱腰	拱底
中环内侧	A2	A3	B2	B1	A1
中环外侧	A2	A3	B2	K	B1

图 8 中环管片裂缝展布

Fig.8 Distribution of cracks in middle ring segment

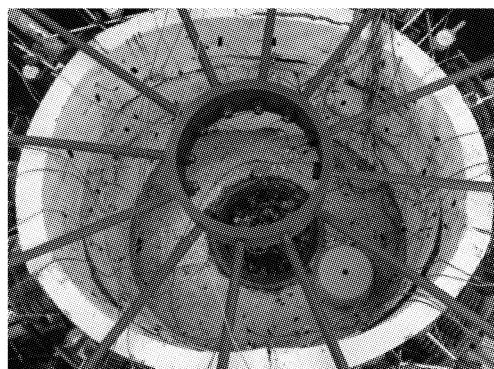


图 9 隧道最终破坏形态

Fig.9 Final failure mode of tunnel

卸载工况下管片结构破坏过程分为以下几个阶段:①设计荷载作用下管片受力状态→②中环拱底内侧开裂→③中环左拱腰外侧开裂→④上、中环拱顶错台加深,螺栓变形增加→⑤上环拱顶保护层裂缝贯通,结构变形过大并失去承载性能。破坏过程与中环管片断面收敛关系如表 4 所示。

表 4 破坏过程与中环管片断面收敛关系

Tab.4 Relation between failure process and cross section convergence of middle ring segment

损伤阶段	侧向卸载比例/%	模型变形值/mm		原型收敛值/mm	
		竖向收敛	横向扩张	竖向	横向
①	0	7.60	-4.20	38.00	-21.00
②	14	9.71	-4.79	48.55	-23.95
③	29	11.17	-5.76	55.85	-28.80
④	57	14.41	-12.57	72.05	-62.85
⑤	100	22.20	-21.46	111.00	-107.30

1.4.2 管片应力

按应力-应变关系,通过公式 $\sigma_m = \epsilon E_m$ (σ_m 为混凝土应力, ϵ 为混凝土应变, E_m 为混凝土弹性模量)将隧道模型混凝土应变值转换为应力,中环管片混凝土拉应力随侧向荷载变化如图 10 所示。

由图 10 可知,在设计荷载条件下,中环管片拱顶内侧、拱底内侧和拱腰外侧的混凝土应力较小,约为 0.5 MPa,超过其抗拉强度,与微裂缝产生现象相符。随着侧向荷载的不断减小,中环拱底内侧应力增长较为迅速,为管片受拉最不利位置,混凝土拉应力为 0.89 MPa 时产生一批新裂缝。两侧卸载作用下,中环左、右拱腰外侧混凝土拉应力增长趋势基本一致,侧向卸载 29%时,左拱腰外侧产生一批新裂缝,混凝土拉应力为 0.86 MPa。管片变形所产生的内力除了自身承受之外,还通过接头向两侧传递,由于顶部封顶块接缝距拱顶较近,有利于释放管片自身内力,拱顶内侧混凝土拉应力相较于拱顶增长较为缓慢。

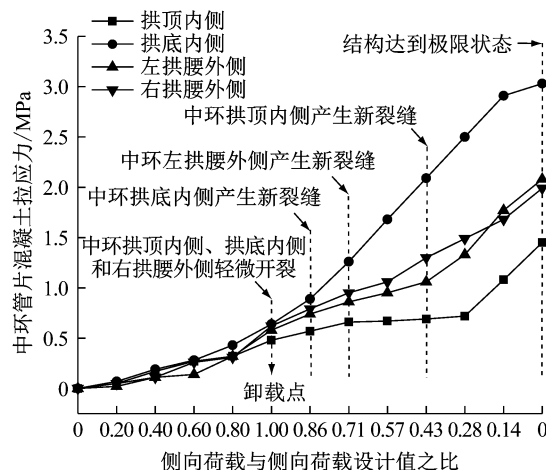


图 10 中环管片混凝土拉应力随侧向荷载变化

Fig. 10 Variation of concrete tensile stress of middle ring segment with lateral load

2 数值模拟方案及计算结果

2.1 三维有限元模型与参数选取

以模型试验为对象,建立基于荷载-结构法的三维有限元计算模型,分析管片应力、螺栓应力、接缝张开等随卸荷的发展过程,从细观角度揭示淤泥层错缝 45°角拼装的盾构隧道在双侧卸载条件下隧道结构的承载性能演化规律。

采用六面体实体单元模拟衬砌,采用杆单元模拟钢筋与接头螺栓,如图 11 所示。管片衬砌采用混凝土损伤塑性模型,允许结构产生裂缝,最大裂缝允许值为 0.15 mm,混凝土裂缝宽度按照《混凝土结构设计规范》^[12] 提供的公式对裂缝宽度进行验算。螺栓与钢筋采用理想弹塑性模型模拟,当应力达到屈服强度后钢筋、螺栓的承载性能不再增长。混凝土、钢筋及螺栓的物理力学参数如表 5 和表 6 所示。

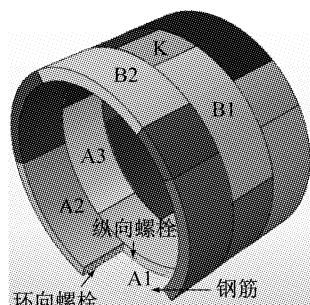


图 11 隧道模型

Fig. 11 Tunnel model

管片之间设置摩擦接触,并通过螺栓连接。管片结构与地层的相关作用通过设置地层弹簧模拟,同

表 5 混凝土材料参数

Tab. 5 Material parameters of concrete

材料参数	参数值
混凝土强度等级	C55
弹性模量/GPa	35.5
泊松比	0.2
密度/(kg·m ⁻³)	2 500
膨胀角/(°)	30
偏心率	0.667
轴心抗压强度/MPa	35.5
轴心抗拉强度/MPa	2.74

表 6 螺栓和钢筋材料参数

Tab. 6 Material parameters of bolts and steels

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa
螺栓	7 800	200	0.3	640
钢筋	7 800	210	0.3	400

时设置剪切弹簧以约束整环的旋转运动。荷载条件、加载方式和卸荷方式均与模型试验保持一致,考虑重力方向与隧道纵向平行,底面设置约束,顶面为自由端。

2.2 计算结果分析

图 12 反映了侧向荷载与结构变形(中环管片)的对应关系,结构总体呈现“横鸭蛋”变形模式。由初始状态加载至实际埋深的过程中,管片变形表现为线性增加。实际埋深下,产生的竖向收敛为 5.41 mm,横向扩张为 5.01 mm,左拱腰接缝张开 0.12 mm。管片拱底内侧混凝土拉应力最大,为 2.213 MPa,拱顶螺栓应力最大,为 37.1 MPa,钢筋拉应力最大位置在拱底内侧,为 10.5 MPa。设计荷载作用下结构内力如图 13 所示。

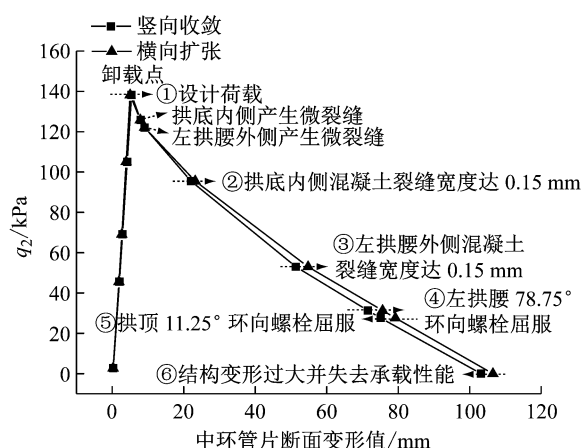


图 12 中环管片断面收敛与侧向荷载关系(数值计算)

Fig. 12 Relation between cross section convergence and lateral load of middle ring segment (numerical calculation)

开始卸载后,由于淤泥地层地基抗力小、侧压力系数较大,侧向约束逐渐削弱,拱底内侧和左拱腰外

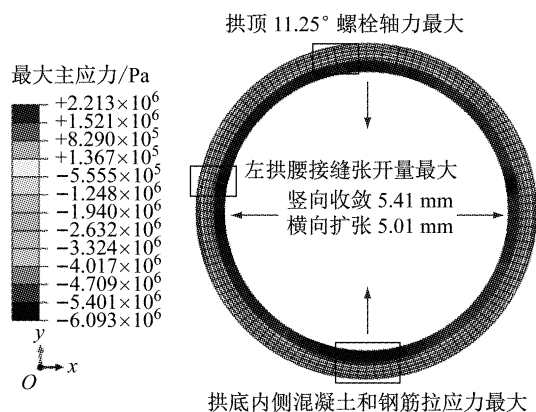


图 13 设计荷载作用下中环管片混凝土最大主应力云图

Fig. 13 Maximum principal stress nephogram of concrete under design load

侧混凝土拉应力相继达到抗拉强度 2.74 MPa, 并产生微裂缝. 计算中以钢筋拉应力验算裂缝宽度, 侧向卸载 31% 时, 拱底内侧钢筋应力达 136 MPa, 混凝土裂缝宽度首先达设计允许最大值 0.15 mm, 随后在侧向卸载 62% 时, 左拱腰外侧混凝土裂缝宽度达 0.15 mm. 由于三环错缝拼装隧道纵向的不对称性, 因此左侧接缝张开量大于右侧, 侧向卸载 77% 时, 左拱腰 78.75° 接缝向外张开 5.34 mm, 环向螺栓首先屈服. 拱底 A2 块收敛大于顶部, 并且两侧接缝处于压紧状态, 使得底部刚度较弱, 钢筋最不利位置位于拱底内侧. 侧向卸载 100% 时, 产生的竖向收敛为 103.17 mm, 横向扩张为 106.50 mm, 11.25° 接缝张开 5.79 mm, 78.75° 接缝张开 8.56 mm, 拱底内侧钢筋应力为 346 MPa. 卸载工况下管片达到极限承载状态时变形及混凝土最大主应力如图 14 所示.

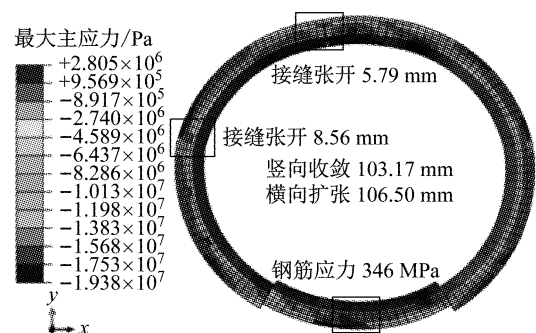


图 14 双侧卸载工况下中环管片达到极限承载状态时混凝土最大主应力云图

Fig. 14 Maximum principal stress nephogram of concrete under bilateral unloading when reaching ultimate bearing state

淤泥地层双侧卸载作用下管片损伤过程为: ①实际埋深下管片变形受力状态→⑥拱底内侧裂缝宽

度达到设计允许值 0.15 mm→③左拱腰外侧裂缝宽度达到设计允许值 0.15 mm→④左拱腰 78.75° 环向螺栓屈服→⑤拱顶 11.25° 环向螺栓屈服→⑥结构变形过大并失去承载性能. 管片卸载损伤过程承载临界状态对应断面变形如表 7 所示, 承载状态与竖向断面变形关系如图 15 所示.

表 7 双侧卸载工况下达到不同承载临界状态的管片变形

Tab.7 Segment deformation at different bearing critical states under bilateral unloading

承载状态	q_2 卸载比例/%	竖向收敛/mm	横向扩张/mm	最大接缝张开及位置/mm
①	0	5.41	5.01	0.12(左拱腰)
②	31	22.02	23.22	1.19(左拱腰)
③	62	51.39	54.77	3.67(左拱腰)
④	77	71.52	75.62	5.34(左拱腰)
⑤	80	75.11	79.22	5.70(左拱腰)
⑥	100	103.17	106.50	8.56(左拱腰)

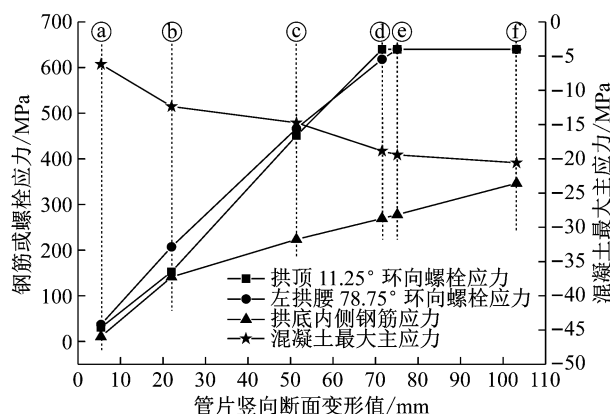


图 15 承载状态发展与竖向断面变形关系

Fig. 15 Relation between bearing state development and vertical section deformation

3 卸载工况下结构损伤规律分析

为了研究卸载工况下淤泥地层盾构隧道结构变形与受力的对应关系, 结合数值计算与模型试验的结果, 用中环管片竖向收敛与管片隧道直径的比值 ($\Delta D/D$) 来表示隧道关键节点的中环竖向断面收敛率. 卸载工况下隧道断面收敛率随侧向荷载变化如图 16 所示(损伤过程编号与第 1.4.1 节和第 2.2 节相同), 图中无下划线文字描述代表模型试验, 有下划线文字描述代表数值计算.

由图 16 对比分析可知, 2 种研究手段存在一定差异, 主要表现在: 模型试验前期变形较大, 这是由于存在拼装误差, 因此在前期加卸载阶段接缝逐渐闭合、管片压紧, 而且由于对接头处的传力橡胶进行

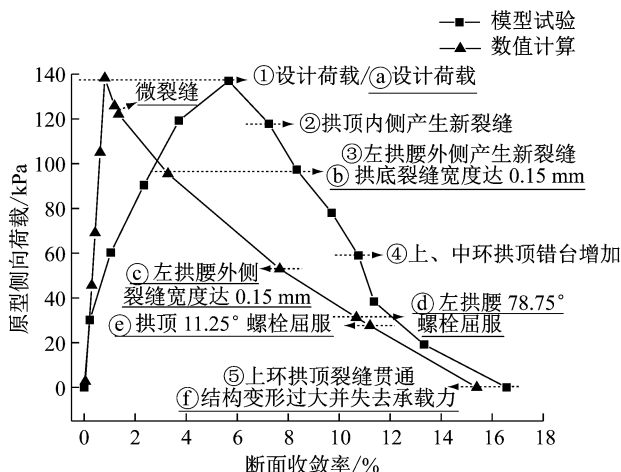


图 16 竖向收敛率随侧向荷载变化

Fig. 16 Variation of vertical convergence rate with lateral load

简化,因此管片整体性较差,并且块与块之间约束力较弱,使得前中期结构变形偏大;模型试验中管片开裂较早,这是由于采用的混凝土相似材料为砂浆,因此抗拉性能较弱,易在较低应力状态下开裂。

上述差异主要限于试验条件,但仍有较为一致的现象,主要为:管片混凝土损伤的主要部位为拱顶内侧和左拱腰外侧;管片破坏的最终形式为结构变形过大,并且两者变形结果接近。这些相同点在一定程度上验证了数值计算结果的合理性,考虑数值计算更为严谨,数据分析精细化程度更高,以计算结果为主要依据分析结构破损过程,提炼变形控制标准,更加有利于运营安全。

综上所述,以数值计算结果为依据,得出不同侧向荷载与顶、底荷载比值(q_2/q_1)下结构的变形和破损过程,主要为以下 4 个阶段:

(1)弹性阶段($q_2/q_1=0.72$),即初始状态至实际埋深阶段。管片呈“横鸭蛋”变形模式,变形呈线性增加,结构无裂损发生。在实际埋深条件下,接缝张开最大位置为左拱腰,拱底内侧为混凝土和钢筋受拉最不利位置。

(2)裂缝产生及发展阶段($q_2/q_1=0.72\sim0.50$),即实际埋深至混凝土裂缝宽度达设计允许值 0.15 mm 阶段。中环管片在拱底内侧和左拱腰外侧混凝土抗拉强度先后达 2.74 MPa 并产生微裂缝。随着侧向卸载的增加,拱底内侧和左拱腰外侧钢筋拉应力相继达 136 MPa,裂缝宽度增加至设计允许值 0.15 mm。

(3)错台发展和接缝张开阶段($q_2/q_1=0.50\sim0.17$),即裂缝宽度达设计允许最大值至螺栓屈服阶

段。裂缝的发展直接削弱了管片整体刚度,变形加剧,接缝张开量增大。当左拱腰 78.75°接缝张开 5.34 mm 时,该位置环向螺栓首先屈服,随后拱顶 11.25°环向螺栓在接缝张开 3.50 mm 时屈服。

(4)破坏阶段($q_2/q_1=0.17\sim0$),即螺栓屈服至变形过大并失去承载性能阶段。螺栓屈服后,管片承载力和整体刚度显著降低,当侧向卸载 100%时,结构变形过大并失去承载性能。

从盾构隧道运维的角度出发,根据卸载工况下管片损伤演变过程,提出基坑开挖施工时的变形控制指标建议值,如表 8 所示。

表 8 管片结构损伤节点与断面收敛关系

Tab. 8 Relation between damage nodes and section convergence of segment structure

损伤节点	竖向收敛/mm	$\frac{\Delta D}{D}/\%$
拱底内侧裂缝达 0.15 mm	22.02	3.29
左拱腰外侧裂缝达 0.15 mm	51.39	7.67
左拱腰 78.75°环向螺栓屈服	71.52	10.67
拱顶 11.25°环向螺栓屈服	75.11	11.21

4 结论

(1)淤泥地层地铁盾构隧道在 1.5D 埋深条件下,侧向压力与顶部荷载比值为 0.72~0.50 时,管片结构处于裂缝产生及发展阶段,断面收敛增长速率及构件承载性能降低程度对双侧卸载的敏感度低;侧向压力与顶部荷载比值从 0.50 减小至 0 的过程中,管片承载状态从错台发展和接缝张开阶段发展至破坏阶段,断面收敛增长速率及构件承载性能降低程度对双侧卸载的敏感度高。因此,软土地层条件下,在邻近地铁双侧基坑开挖工程中,从管片变形控制及构件承载性能角度考虑,建议将施工中的隧道双侧荷载控制在 0.5 倍顶、底荷载以上,以保证隧道的安全运营。

(2)淤泥地层错缝拼装盾构隧道在双侧卸载工况下,管片拱底内侧混凝土裂缝宽度达到设计允许值 0.15 mm 的收敛变形值为 3.29%D;管片左拱腰外侧混凝土裂缝宽度达到设计允许值 0.15 mm 的收敛变形值为 7.67%D;管片左拱腰 78.75°环向螺栓屈服时收敛变形值为 10.67%D;管片拱顶 11.25°环向螺栓屈服时收敛变形值为 11.21%D。结构破坏形式表现为:拱底内侧裂缝宽度达到设计允许值 0.15 mm→左拱腰外侧裂缝宽度达到设计允许值 0.15 mm→左拱腰 78.75°环向螺栓屈服→拱顶 11.25°环向螺栓屈服→变形过大并垮塌。

参考文献:

- [1] 邹伟彪,张冬梅,蔡雄威. 基坑开挖对临近地铁变形的实时监测与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增2):1729.
ZOU Weibiao, ZHANG Dongmei, CAI Xiongwei. Numerical simulation and real time monitoring of foundation pit excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S2):1729.
- [2] 王罡. 基坑开挖施工对邻近运营地铁隧道变形影响分析[J]. 施工技术, 2016, 45(20):86.
WANG Gang. Influence analysis of deep foundation excavation construction on deformation of adjacent subway tunnel [J]. Construction Technology, 2016, 45(20):86.
- [3] 王如路. 上海轨道交通隧道结构安全性分析[J]. 地下工程与隧道, 2011(4):37.
WANG Rulu. Structural safety analysis of Shanghai rail transit tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2011(4):37.
- [4] 封坤,何川,苏宗贤. 南京长江隧道管片衬砌结构原型加载试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1):135.
FENG Kun, HE Chuan, SU Zongxian. Prototype loading test on segmental lining structure of Nanjing Yangtze River Tunnel [J]. China Journal Highway and Transport, 2013, 26(1):135.
- [5] 柳献,张浩立,鲁亮,等. 超载工况下盾构隧道结构承载力的试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2013(4):10.
LIU Xian, ZHANG Haoli, LU Liang, et al. Experimental study on load bearing capacity of shield tunnel structure under overload condition [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2013(4):10.
- [6] 柳献,黄晓冬. 通缝拼装盾构隧道衬砌结构抗倒塌性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2):3703.
LIU Xian, HUANG Xiaodong. Experimental study of collapse capacity of straight joint segment tunnel lining structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2):3703.
- [7] 袁勇,毕湘利,柳献,等. 装配式圆形管片环结构变形特性试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015(7):24.
YUAN Yong, BI Xiangli, LIU Xian, et al. Experiment of deforming characteristics of the assembled circular lining structure [J]. Urban Mass Transit, 2015(7):24.
- [8] 方勇,汪辉武,郭建宁,等. 下穿黄河盾构隧道管片衬砌结构受力特征模型试验[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2017, 44(5):133.
FANG Yong, WANG Huiwu, GUO Jianning, et al. Model test study on the mechanical characteristics of segment linings for the shield tunnel under crossing the Yellow River [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2017, 44(5):133.
- [9] 柳献,张浩立,鲁亮,等. 卸载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 城市轨道交通, 2015(5):38.
LIU Xian, ZHANG Haoli, LU Liang, et al. Experiment of the bearing capacity of shield tunnel in unloading conditions [J]. China Metros, 2015(5):38.
- [10] 徐秀峰,黄爱军. 地面卸载作用下软土大直径轨道交通盾构隧道结构的变形预测[J]. 中国市政工程, 2016(5):62.
XU Xiufeng, HUANG Aijun. Deformation prediction of rail transit shield tunnel structure with large-diameter under ground loading in soft soil [J]. China Municipal Engineering, 2016(5):62.
- [11] 鲁亮,何燕清,毕湘利,等. 盾构隧道衬砌足尺整环结构试验方法研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(1):155.
LU Liang, HE Yanqing, BI Xiangli, et al. Research on the experimental methods of whole-scale whole-ring shield-driven tunnel lining [J]. Structure Engineers, 2016, 32(1):155.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Building and Architecture Press, 2010.