

DOI: 10.11779/CJGE201705003

软土盾构法隧道纵向应力松弛规律的实测分析

廖少明^{1, 2}, 门燕青^{*1}, 肖明清³, 张迪³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 为研究软土盾构法隧道的纵向应力松弛特性, 对钱江隧道典型断面的管片体、衬砌环面的纵向应力松弛特性和环间纵向连接螺栓轴力的时变特性进行了长达两年的现场实测。结果表明, 软土盾构法隧道管片体的纵向应力松弛将经历周期性剧烈波动、动态稳定、逐渐衰减、趋于稳定四个阶段的演变, 其纵向应力平均值由 3 MPa 逐渐松弛为 1.2 MPa, 在达到稳定前至少需要 1 a 时间; 与此同时, 衬砌环缝面上的接触应力松弛也经历上述 4 个阶段的演变, 其接触应力平均值由 2 MPa 逐渐松弛为 1 MPa, 在达到稳定前至少需要 18 个月; 隧道环间连接螺栓轴力先减小、然后暂时稳定、最后增大, 且在经历了 2 a 的显著波动后仍未稳定表明隧道纵向应力松弛导致接触状态仍处于复杂的演变过程之中, 其最终稳定需要更长时间。软土盾构法隧道的纵向应力松弛是衬砌环间接触调整、土体-隧道结构接触调整和螺栓体松弛三大要素的时变性及其共同作用的结果, 可导致隧道环面接缝刚度降低、环间抗剪承载力下降、环间接缝的防水密封性能弱化等, 应引起工程界重视。

关键词: 盾构法隧道; 纵向应力松弛; 松弛机理及效应; 现场实测

中图分类号: TU457; U456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)05-0795-09

作者简介: 廖少明 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道、基坑等地下工程设计与施工控制关键技术方面的教学和科研。E-mail: liaosm@126.com。

Field tests on longitudinal stress relaxation along shield tunnel in soft ground

LIAO Shao-ming^{1, 2}, MEN Yan-qing¹, XIAO Ming-qing³, ZHANG Di³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to study the longitudinal stress relaxation properties along shield tunnels in soft ground, two years of field tests in Qianjiang Tunnel are carried out using monitoring cells to obtain the relaxation characteristics of tunnel segments and the contact surface between adjacent lining rings, and to obtain the time-dependent response of longitudinal bolts connected adjacent rings. The results show that the longitudinal stress evolution process inside the segments in soft ground experiences four stages: drastic fluctuation, dynamic stabilization, gradual attenuation and final stabilization. The longitudinal stress relaxation inside the segments lasts for at least 1 year, and causes stress reduction from 3 to 1.2 MPa gradually. Similarly, the development of longitudinal stress between adjacent lining rings experiences four periods as well. After 18 months of longitudinal stress relaxation, the stress value on the interface between adjacent rings decreases from 2 to 1 MPa. The axial forces of bolts decrease first, then temporarily stabilize, and finally increase, and the axial forces of longitudinal bolts are still not stable after two years of dynamic adjustment. Therefore, the origination of longitudinal stress relaxation along the shield tunnel in soft ground is the time-dependent response of contact adjusting between adjacent rings, interaction of lining and soils, and axial forces relaxation of bolts, and coupled-interaction with each other. The stress relaxation along shield tunnel will easily lead to stiffness degradation, shear resistance reduction, and leakage water, etc. The above characteristics should be considered carefully in the future.

Key words: shield tunneling; longitudinal stress relaxation; effect and mechanism of stress relaxation; field test

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2015CB057806); 国家自然科学基金项目 (51378389); 山东省自然科学基金项目 (ZR2016EEQ13, ZR2014EEQ28)

收稿日期: 2016-02-03

***通讯作者** (E-mail: menyanqing@126.com)

0 引 言

软土盾构法隧道在施工过程中受到盾构千斤顶推

力作用向前延伸,使得隧道在全长范围及相当长时间内存在明显的纵向预压应力,这种纵向应力对衬砌环间渗漏水防治和纵向变形控制等至关重要^[1-2]。但是,工程实践中软土盾构隧道经常发生纵向沉降过大、环缝渗漏水、甚至环间连接螺栓剪断等破坏现象^[3],这表明盾构隧道的纵向应力在工后的相当长时间内一直处于动态调整中,甚至出现了纵向应力较大程度衰减的情况。

若将隧道和地层看作整体,软土盾构法隧道纵向应力的衰减具有时变特征且是在两端位移约束的条件下发生的,故属于应力松弛的研究范畴。当前对盾构隧道纵向问题的研究主要针对纵向沉降,采用理论分析、室内试验、沉降监测等方法分析纵向沉降模式、机理及沉降效应。廖少明等^[4-6]系统总结了盾构隧道沉降预测的理论与经验方法,首次提出了隧道纵向剪切荷载及其传递的基本概念,分析了隧道纵向剪切传递机理。王如路等^[7]指出软土地区盾构隧道纵向变形以错台变形为主。Arnau 等^[8]考虑地层-结构相互作用,计入混凝土徐变和收缩的影响,提出了隧道结构纵向应力的计算模型。Talmon 等^[9]考虑注浆、千斤顶推力等的影响,分析了隧道衬砌沿纵向的弯矩和剪力的变化规律。Huang 等^[10]基于室内试验数据,提出了考虑地层参数变异的纵向变形简化计算方法。Shen 等^[11-12]考虑环间剪切错台,提出了符合隧道实际变形模式的纵向结构计算模型。叶飞等^[13]对通缝、错缝及匀质圆筒模型进行了纵向模型试验研究,得出了纵向变形规律及其抗弯刚度有效率。

然而,上述研究极少注意到软土盾构法隧道的纵向应力松弛及其效应可能导致的问题。鉴于此,本文依托钱江隧道工程实践,对典型断面隧道结构管片体和衬砌环面的纵向应力松弛特性、环间纵向连接螺栓轴力的时变特性进行了长达两年的现场实测,分析得到了软土盾构隧道纵向应力松弛的演变规律。以期软土盾构法隧道的纵向设计、环间渗漏水防治和纵向变形控制提供科学依据。

1 工程背景

钱江隧道采用外径 15.43 m 的超大直径泥水平衡式盾构法施工,是当前世界上已建成通车的最大直径的软土盾构法隧道工程之一^[14]。盾构段隧道采用圆形断面、单层衬砌的结构形式,衬砌环外径 15.00 m,内径 13.70 m,管片厚度 0.65 m,环宽度 2.0 m,采用“9+1”(B1~B7、L1、L2、K)通用楔形环方式,环间错缝拼装,环、块间采用斜螺栓连接。管片混凝土强度等级 C60。隧道结构及内部布置如图 1 所示。

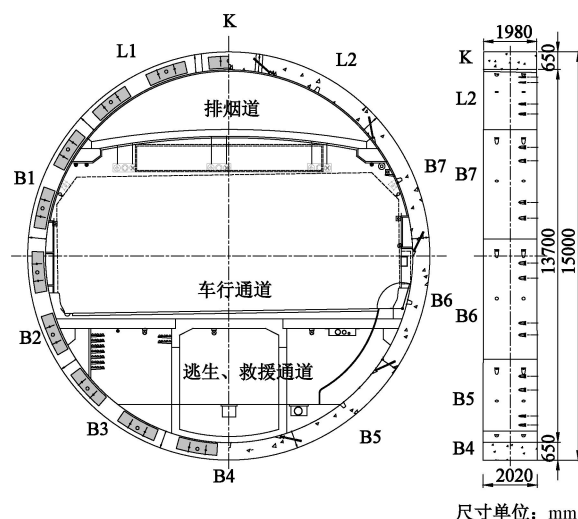


图 1 钱江隧道结构及内部布置图

Fig. 1 Structures and internal layout of Qianjiang Tunnel

盾构段隧道穿越土层主要为透水性强的粉砂层和强度低、含水率高、灵敏度高的淤泥质黏土层。其中,江中以北约 2.5 km 以淤泥质黏土和粉质黏土为主,江中以南约 1.95 km 以淤泥质黏土、粉土和粉砂层为主。此外,隧址位于钱塘江赶潮河段,以非正规浅海半日潮为主的潮汐现象明显、潮差较大。

2 现场实测方案

钱江隧道现场实测试验环埋设在东线隧道 618~620 环,该位置为江中深埋段,上覆土层厚度 20.5 m,平均水位高度 2.1 m,隧道坡度-3‰。根据该区域内的 JZ-III07-51 钻孔资料,在勘探深度范围内,自上而下的土层分别为砂质粉土、粉砂、淤泥质粉质黏土和粉质黏土,试验环埋设位置处的土层分布及其物理力学指标如图 2 所示。

现场试验环中的钢筋计、应变计和柔性土压力计等大量监测元件是在管片浇筑期间埋设的。其中,与盾构隧道的纵向受力变形特性相关的监测元件分别埋设在 618 环试验环管片内部、618 环与 619 环环间接触面的顶部、两侧腰部和底部。根据监测元件的类型与功能可分为 3 类,即,①钢筋计,分布在试验环管片钢筋笼的环向中部,密贴管片内、外弧面焊接,用于量测隧道结构纵向应力的变化;②应变计,分布在试验环管片千斤顶作用面,密贴管片内、外弧面绑扎,用于量测衬砌环面纵向应力的变化;③纵向测力螺栓(无需提前埋设),代替了 618 环与 619 环的纵向连接螺栓,用于量测衬砌环间纵向连接螺栓的轴力变化。上述监测元件的埋设位置及类型如图 3 所示^[15]。

本现场实测自试验环管片拼装开始直到拼装后两年时间。其中,在管片拼装阶段,每块管片拼装后均

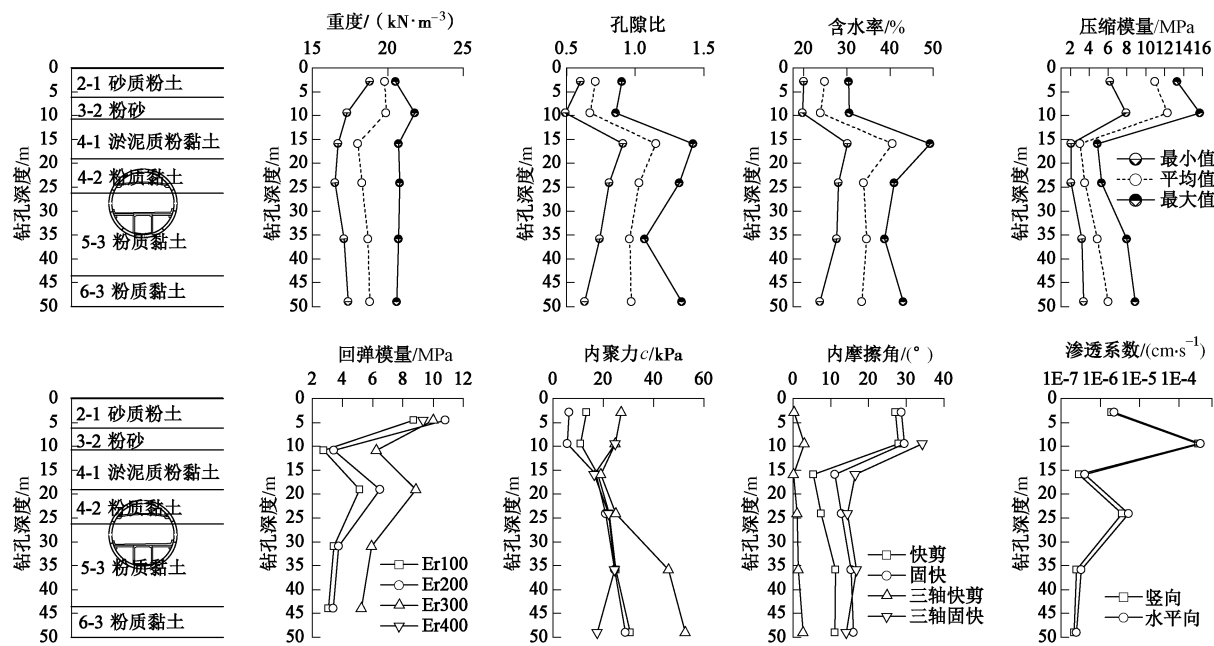


图 2 土体分层及岩土参数变化曲线

Fig. 2 Soil profiles and variation of geotechnical parameters

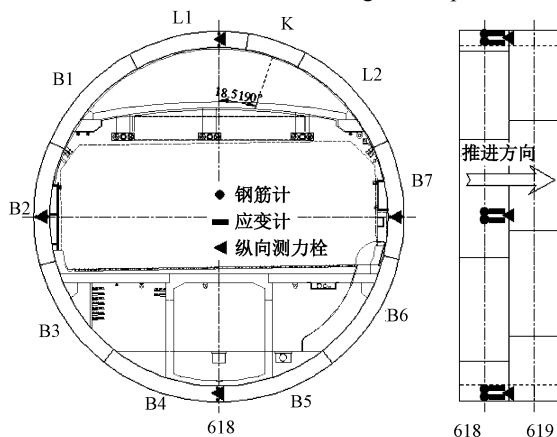


图 3 纵向测试元件布置图

Fig. 3 Location of measuring cells

对已拼装的所有测试环管片进行 1 次人工采集数据; 待拼装成环后改用 DT80G 智能数据采集模块进行自动采集, 采集频率 5 min/次。本试验持续时间约 24 个月 (2012 年 6 月 6 日—2014 年 6 月 1 日), 期间采集到约 20 万组数据。

3 主要工序及关键参数

考虑钱江隧道的施工全过程, 影响隧道结构的受力变形特性的主要工序包括 (按照施工顺序): 管片拼装与盾构推进 (期间发生同步注浆、衬砌环脱出盾尾)、口型构件安装、衬砌环脱出盾构后配套车架、隧道内部施工 (包括逃生救援通道底板浇筑、车道板浇筑、烟道板安装、防撞墙浇筑、临时堆载等), 上述工序持续总时间约 3 个月。在此期间, 隧道结构的受力变形特性将同时受到注浆浆液硬化、土体固结、砼收缩徐变等岩土体力学特性变化以及钱江潮汐等的影响。

值得注意的是, 盾构施工控制直接决定盾构隧道结构的纵向应力的初始状态。试验环附近区域在盾构推进时的关键施工参数汇总如图 4 所示。可见, 试验环拼装前后盾构推力基本维持在 80~100 MN 之间 (腰部推力略大于底部、顶部推力), 推进速度介于 35~40 mm/min 之间, 刀盘扭矩处于 3~5 MN·m 之间, 且上述施工参数变化较为均匀, 不存在突变情况。

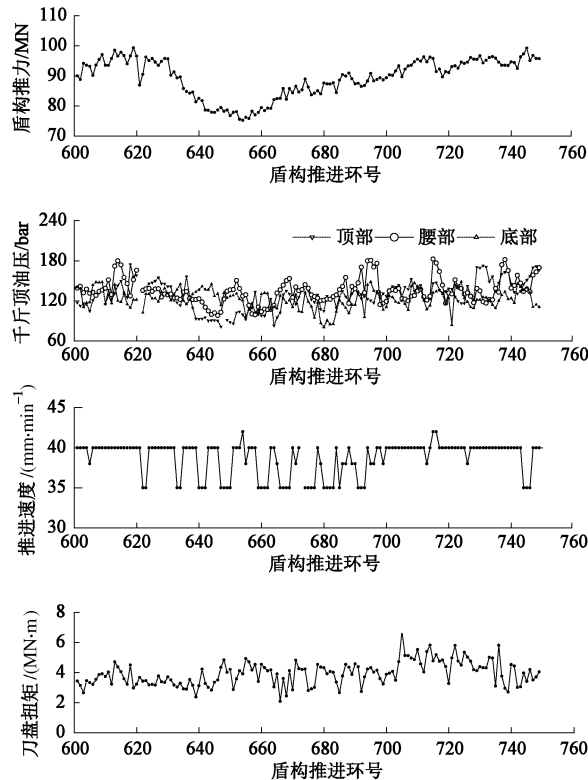


图 4 盾构推进关键施工参数

Fig. 4 Key construction parameters during shield advancing

4 实测结果分析

4.1 隧道管片体纵向应力松弛实测分析

图 5 为隧道管片体纵向应力变化曲线（以受压为正），是在不同位置的各个测点的纵向应力求取平均值后综合表征的隧道结构本体的纵向应力松弛的演变规律，反映了隧道结构本体沿纵向的压紧与放松。由图可见，软土盾构隧道管片体纵向应力的演变经历 4 个阶段，即，盾构远离期间周期性剧烈波动→隧道内部施工期间动态稳定→隧道内部施工后逐渐衰减→最终趋于相对稳定，前 3 个阶段总持续时间至少 1 a。

软土盾构隧道管片体的纵向应力松弛经历 4 个阶段的演变与隧道施工工序及岩土体力学特性变化等因素相关。首先，在试验环管片拼装后的 7 d 内（如图中 2012 年 6 月 6 日—2012 年 6 月 12 日数据变化），管片体的纵向应力发生周期性的剧烈波动，应力平均值介于 0~4 MPa 之间。该波动是由于试验环在后续环管片拼装及盾构推进的交替轮换下，受到盾构千斤顶往复加卸载作用导致隧道结构本体沿纵向不断的压紧与放松引起的。随着盾构远离 50 环以上，隧道-土

体间的剪切效应逐渐增强，因盾构千斤顶往复推进引起的管片体的纵向应力波动逐渐衰减直至消失。然后，盾构隧道管片体的纵向应力将经历长约 1~2 个月的暂时动态平衡（如图中 2012 年 6 月 26 日—2012 年 7 月 2 日数据变化）。在该阶段，发生疏散救援通道底板浇筑、车道板浇筑等隧道内部施工，并伴随着隧道内临时堆载，以及同步注浆浆液逐渐硬化等岩土体力学参数变化，上述综合作用导致纵向应力增加与降低相抵消，管片体的纵向应力处于暂时动态稳定状态，纵向应力维持在 3 MPa 左右。此后，随着隧道内部施工加载、堆载等影响因素逐渐减少，土体固结、混凝土收缩徐变甚至螺栓松弛等因素导致管片体的纵向应力松弛现象逐渐凸显（如图中 2012 年 9 月 16 日—2012 年 9 月 22 日数据变化），在长达半年以上的时间内，纵向应力持续衰减（图中若干小的应力峰值为钱江潮汐日变化影响结果）。最后，随钱塘江水位而变化的年度纵向应力峰值明显小于应力松弛发生前的纵向应力值，即，软土盾构隧道管片体的纵向应力经历了上述几个阶段的变化后基本趋于稳定。上述变化过程中，隧道管片体在不同位置的纵向应力松弛的测试结果汇总见图 6 和表 1。

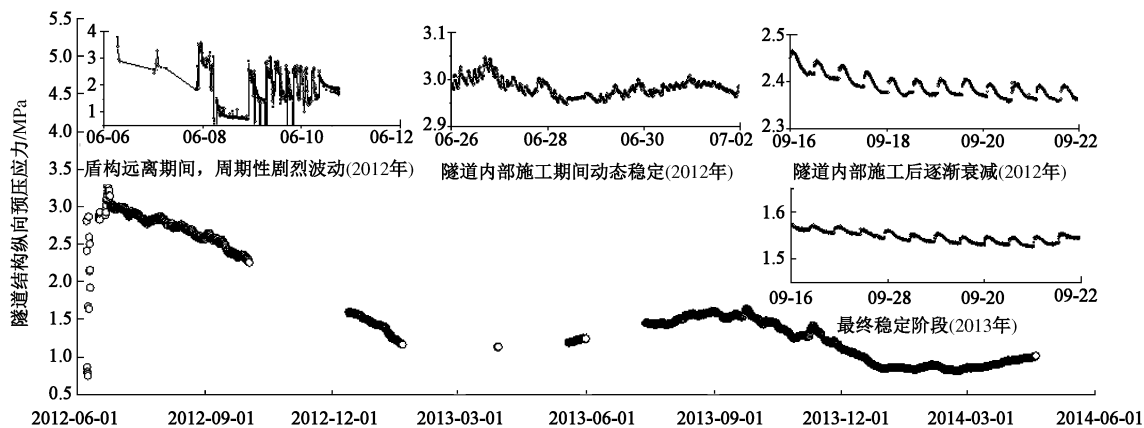


图 5 隧道管片体纵向应力变化曲线

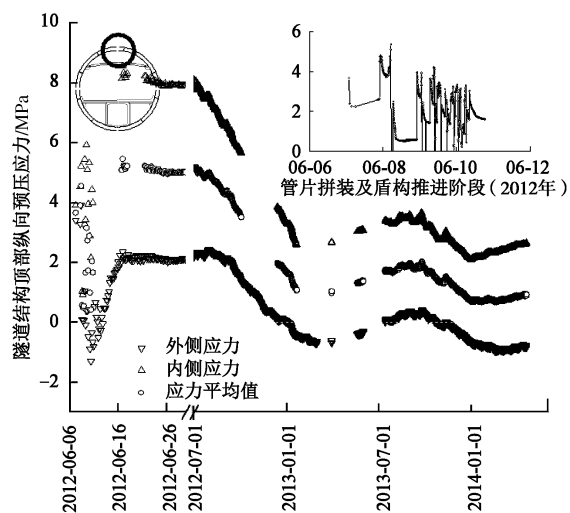
Fig. 5 Longitudinal stress curves of segment lining

表 1 隧道管片体不同位置应力松弛测试结果

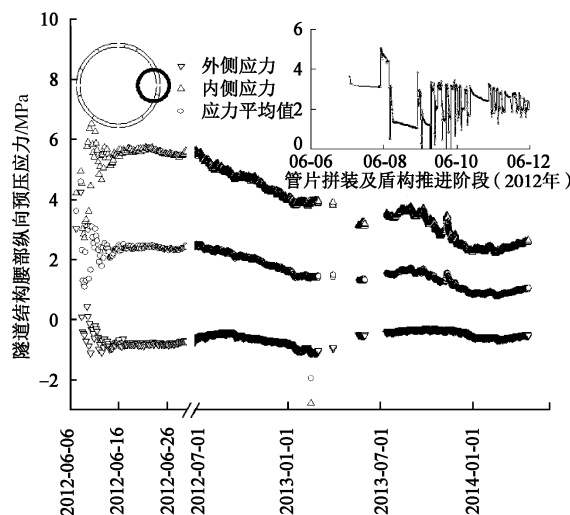
Table 1 Test results of stress relaxation at different locations of segment lining

测点位置		初始应力 σ_0 /MPa	剩余应力 σ_s /MPa	应力松弛量 ^[16] σ' /MPa	应力松弛度 ^[16] λ /%	松弛达到稳定 阶段所需时间/月	备注
顶部	外侧	2.08	-0.66	2.74	132	8	明显松弛
	内侧	7.93	2.67	5.26	66	9	明显松弛
	平均值	5.00	1.04	3.96	79	9	明显松弛
腰部	外侧	-0.84	-0.83	—	—	—	无明显松弛
	内侧	5.53	3.93	1.60	29	13	明显松弛
	平均值	2.40	1.46	0.94	39	13	明显松弛
底部	外侧	0.52	-1.14	1.66	319	8	隧底管片局部弯曲造成 内侧应力增大，与应力 松弛共同作用导致底部 松弛量小
	内侧	1.36	2.90	-1.54	-113	5	
	平均值	0.95	0.92	0.03	3	8	

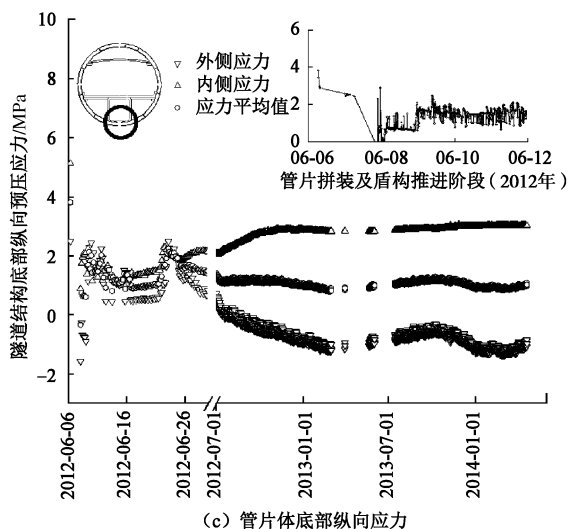
注： $\sigma' = \sigma_0 - \sigma_s$ ， $\lambda = \sigma' / \sigma_0$ 。



(a) 管片顶部纵向应力



(b) 管片腰部纵向应力



(c) 管片底部纵向应力

图6 隧道管片体不同位置纵向应力变化

Fig. 6 Longitudinal stress curves at different locations of segment lining

软土盾构隧道纵向应力松弛的演变过程也体现在

横断面上纵向应力的分布形态的演进过程中(如图7)。由图7可见,管片体纵向应力在横断面上的最值依次出现在腰部、顶部、底部,该过程中,管片体的腰部和底部的纵向应力持续降低,而顶部的纵向应力在脱出盾尾和盾构远离期间先明显增大,随后将持续降低。即,管片体纵向应力松弛过程中横断面上的纵向应力在同一时刻分布形状依次为:正立、倒立的梯形分布(盾构远离期间周期性剧烈波动阶段)→两个倒立梯形分布(隧道内部施工期间动态稳定阶段)→近似一个倒立梯形分布(隧道内部施工后逐渐衰减阶段)→近似一个正立梯形分布(稳定阶段)。

综上所述,软土盾构法隧道管片体纵向应力松弛的演变过程可概况为:自管片拼装后历时1 a时间,管片体的纵向应力经历了周期性剧烈波动、动态稳定、逐渐衰减、最终趋于基本稳定4个阶段的调整,管片应力松弛度最终达到3%~80%,纵向应力平均值由3 MPa逐渐松弛为1.2 MPa,松弛度平均约60%。

4.2 隧道环面纵向接触应力松弛实测分析

图8为隧道环面不同位置的纵向接触应力变化曲线(以受压为正),反映的是衬砌环之间的接触关系(张开、闭合)的调整过程。综合不同位置的纵向应力的变化曲线可见,隧道环面纵向接触应力松弛同样经历了4个阶段的演变,依次为盾构远离期间动态调整→隧道内部施工期间暂时平衡→隧道内部施工后逐渐衰减→最终趋于相对稳定。由于衬砌环面在腰部的纵向接触应力经历了长达18个月(2012年6月—2013年12月)的动态调整后逐渐稳定。因此,软土盾构隧道环面的纵向接触应力松弛现象的持续时间比隧道管片体的应力松弛时间更长。

由于隧道环面纵向接触应力的初始值除受盾构施工控制的直接影响外,还受到管片拼装误差、施工操作等人为不确定性因素的影响^[14, 17],该阶段将累计更多的变形能。因此,在试验环管片拼装后7 d内,随着后续环盾构推进,管片块、衬砌环之间的相对位置剧烈调整、修正,因拼装误差累计的多余变形能将快速消散^[18]。在该过程中,隧道环面的纵向接触应力发生明显变化,如,环面的顶部纵向应力递进式增长、腰部纵向应力振荡式居中、底部纵向应力先降低后增长。然后,当试验环脱出盾构后配套车架后的7~30 d内(盾构远离50环以上,2012年6月16日后),由于同步注浆浆液尚未完全硬化等影响,环面纵向接触应力处于暂时平衡状态。在该阶段,隧道环面纵向接触应力平均值约为2 MPa,但不同位置的接触关系仍处于动态微调中,且持续时间不一致(隧道环面的顶部的暂时平衡状态持续时间长,腰部次之,底部短)。

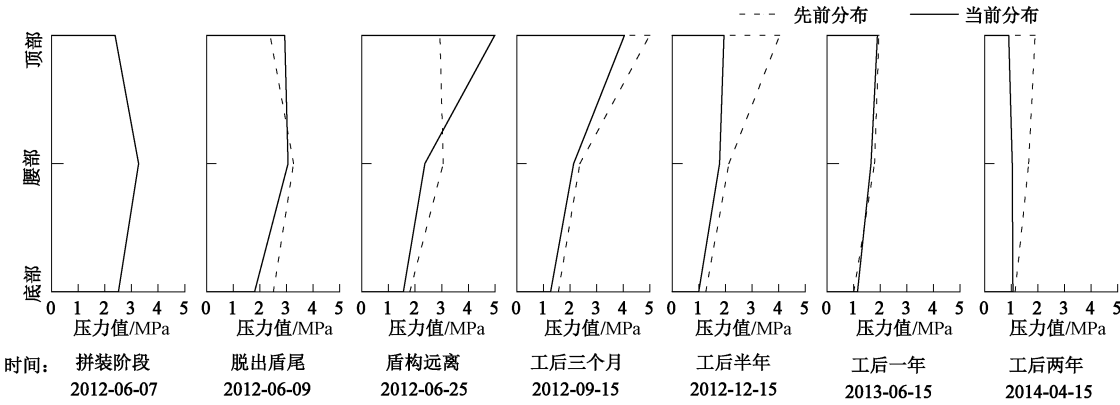


图 7 隧道管片体纵向应力在不同阶段分布规律

Fig. 7 Longitudinal stress distribution patterns of segment lining in different periods

此后，隧道环面的纵向接触应力进入逐渐衰减阶段，在随后的 5~18 个月的时间内，环面的顶部的纵向接触应力松弛度达到 9%、腰部 81%（底部未知），环面纵向接触应力的最终状态汇总见表 2。最后，经历了上述 3 个阶段的变化后，隧道环面的纵向接触应力由先前的 2 MPa 逐渐衰减为 1 MPa，纵向应力松弛现象基本消失。

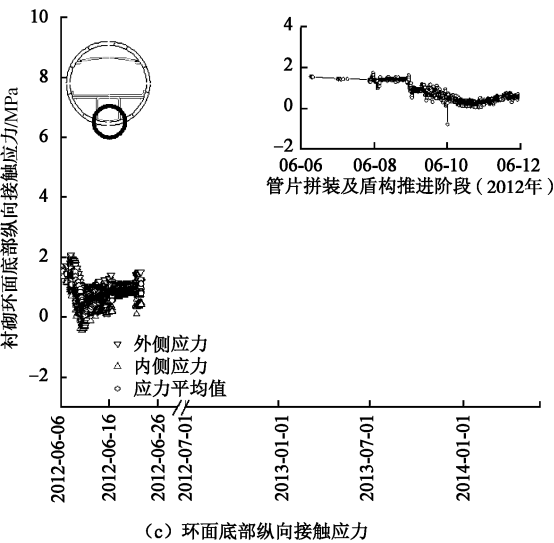


图 8 隧道环面不同位置纵向接触应力变化

Fig. 8 Longitudinal stress curves at different locations between lining rings

图 9 为隧道环面纵向接触应力在不同阶段的分布规律。可见，环面纵向接触应力在横断面上的最值同样依次出现在腰部、顶部、底部，且腰部的纵向接触应力持续降低（底部应力分布在 2012 年 6 月 25 日后未知）。然而，在管片拼装后的半年内，隧道环面纵向接触应力的最大值较多出现在环面腰部，出现在环面顶部的持续时间较短。隧道环面纵向接触应力松弛过程中横断面上的纵向应力分布不均，在同一时刻的分布形态依次为：正立、倒立的梯形分布（盾构远离期间动态调整、隧道内部施工期间暂时平衡）→ 近似一个倒立梯形分布（隧道内部施工后逐渐衰减）→ 近似一个正立梯形分布（稳定阶段）。

综上所述，隧道环面纵向接触应力松弛演变过程可概况为：自管片拼装后历时 18 个月，隧道环面的纵向接触应力经历了盾构远离期间动态调整、隧道内部施工期间暂时平衡、隧道内部施工后逐渐衰减、最终趋于稳定阶段 4 个阶段的调整，接触应力平均值由先前的 2 MPa 逐渐松弛为 1 MPa，应力松弛度平均约 50%。

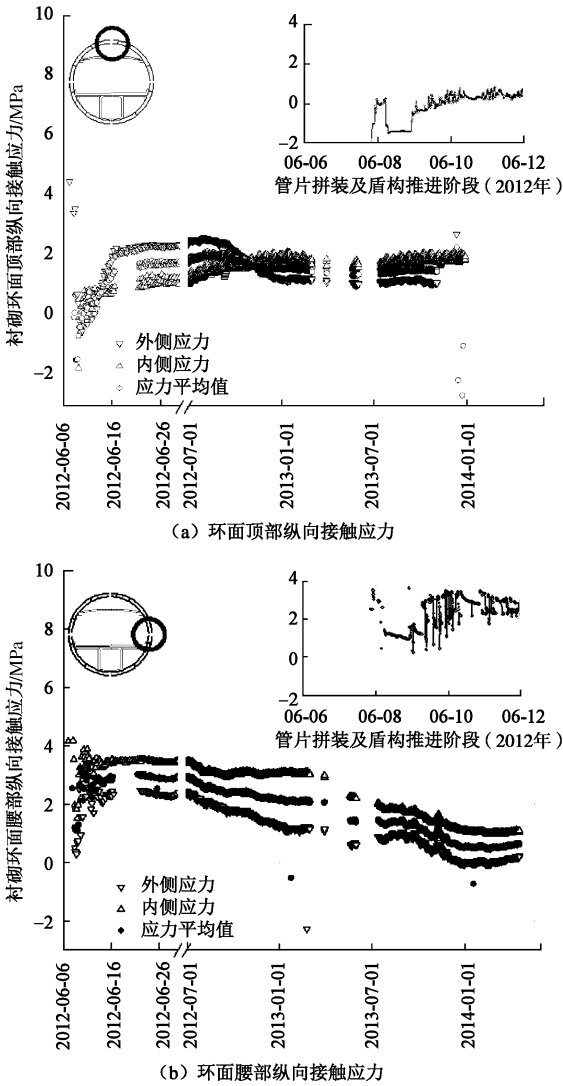
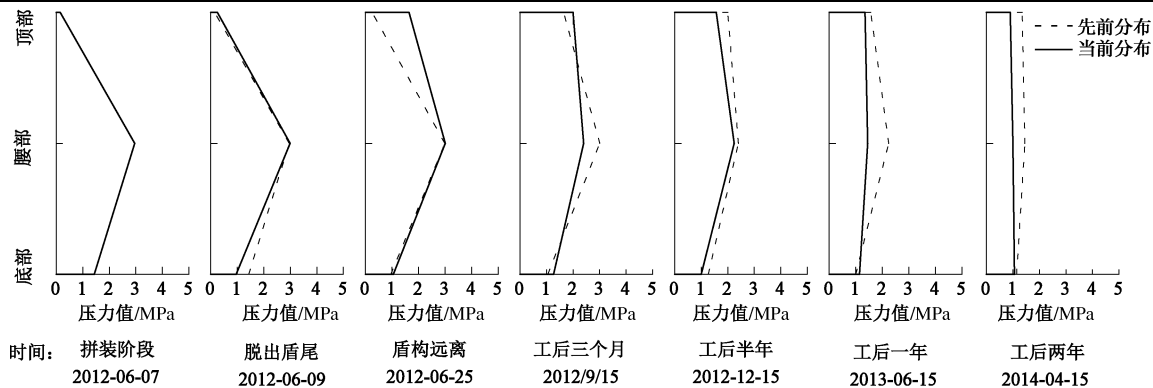


表 2 隧道环面不同位置应力松弛测试结果

Table 2 Test results of stress relaxation at different locations between lining rings							
测点位置	初始应力 σ_0 /MPa	剩余应力 σ_s /MPa	应力松弛量 ^[16] $\sigma' = \sigma_0 - \sigma_s$ /MPa	应力松弛度 ^[16] $\lambda = \sigma' / \sigma_0$ /%	松弛达到稳定 阶段所需时间/月	备注	
顶部	外侧	2.50	1.22	1.28	51	5	明显松弛
	内侧	1.22	1.93	-0.71	-58	7	接触调整使应力增长
	平均值	1.73	1.58	0.15	9	7	明显松弛
腰部	外侧	2.31	0.03	2.28	99	18	明显松弛
	内侧	3.45	1.12	2.33	68	18	明显松弛
	平均值	2.89	0.54	2.35	81	18	明显松弛
底部	外侧	1.14	—	—	—	—	元件失效
	内侧	0.84	—	—	—	—	元件失效
	平均值	0.99	—	—	—	—	元件失效



注：2012年6月25日后底部压力缺失，图中取为隧道结构底部压力值

图 9 衬砌环面纵向应力在不同阶段分布规律

Fig. 9 Longitudinal stress distribution patterns between lining rings in different periods

4.3 隧道环间纵向连接螺栓轴力实测分析

图 10 为衬砌环间纵向连接螺栓轴力的实测曲线（以受拉为正），螺栓应力的波动性增长趋势验证了纵向应力松弛导致衬砌环面张开、错台等接触状态关系的调整，反映了软土盾构隧道纵向应力松弛的内在发生机制。

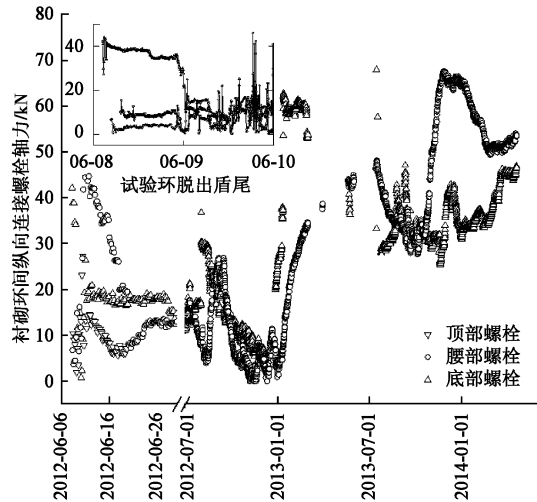


图 10 衬砌环间不同位置纵向连接螺栓轴力变化

Fig. 10 Axial forces of longitudinal bolts at different locations between lining rings

由图可见，衬砌环间纵向连接螺栓轴力的演变过

程较隧道结构本体、隧道环面接触的纵向应力演变更为复杂，呈现：减小→暂时稳定→增大的变化规律，波动性强烈，且经历了 2 a 的动态演变后仍未稳定。首先，在试验环管片拼装后的两周内，随着盾构远离，不同位置的纵向连接螺栓均出现轴力减小的现象（试验环脱出盾尾瞬间除外）。尤其是，在临近的后续环盾构推进过程中，底部的纵向连接螺栓的轴力减小极为明显（如图中 2012 年 6 月 8 日—2012 年 6 月 9 日数据变化）。该过程表明，盾构千斤顶的往复加卸载导致衬砌环接触面闭合、张开，初始拼装误差逐渐消除，使得纵向连接螺栓轴力降低。然后，在隧道内部施工的初始阶段，环间纵向连接螺栓的轴力经历了持续时间约为两周的暂时稳定阶段。随后，受到车道板浇筑等因素的影响，纵向连接螺栓的轴力将进一步降低（2012 年 8 月出现的应力增长峰值为螺栓二次复紧的影响），在将近半年的时间内呈现出隧道管片体纵向应力、隧道环面纵向接触应力和隧道纵向连接螺栓轴力共同降低的现象。表明，在该阶段的纵向应力松弛中，衬砌环面间的接触关系尚未调整到足以影响连接螺栓轴力变化的临界状态。此后，与管片体、隧道环面的纵向应力的进一步演变规律相反，环间纵向连接螺栓轴力将明显增大（2013 年 1 月后），并具有极大的波动

性,与隧道管片体、衬砌环面的纵向应力松弛规律在同一时刻的协调性较差。考虑衬砌环接触面的张开和错台发展均能够导致纵向连接螺栓轴力增大的客观事实,可以推测,软土盾构法隧道纵向应力松弛将导致隧道环间部分区域甚至整个环面的接触关系恶化,环间张开和错台同时存在、发展。

5 对应力松弛机理及其效应的讨论

(1)软土盾构法隧道纵向应力松弛的产生与盾构施工控制、岩土体力学性质的时变性、隧道内部施工以及管片块、衬砌环相对位置的动态调整等多种因素相关,可概况为衬砌环接触调整、土体-隧道结构接触调整和螺栓体松弛三大要素的时变性及其共同作用的结果。根据接触面位置,纵向应力松弛可分为“主动松弛”和“被动松弛”两部分。“主动松弛”发生在盾构隧道衬砌环间的接触面,是衬砌环间的接触关系(包含螺栓应力松弛)随时间变化发生调整的结果。“被动松弛”发生在隧道结构-土体接触面,是隧道与土体外部接触条件或变形协调关系随时间变化发生调整的结果。

需要指出的是,盾构隧道纵向沉降变形将导致横断面上的纵向应力一侧减小、另一侧增大,但纵向应力平均值基本维持在沉降前的水平。现场实测表明,隧道纵向应力降低明显,范围大,而纵向应力增长范围小、幅值小。该特征表明,盾构隧道纵向应力的实际状态为隧道沉降引起的应力调整和纵向松弛引起的应力调整耦合作用的结果,如图 11 所示。

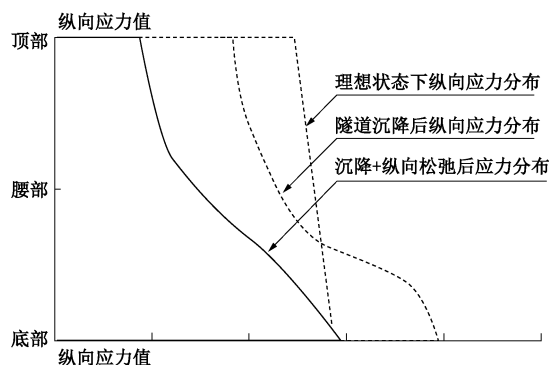


图 11 环面纵向应力分布特征

Fig. 11 Distribution characteristics of longitudinal stress

(2) 软土盾构隧道环缝防水及纵向剪切传递^[6]能力均受隧道环缝间的法向接触应力(即纵向应力)的控制,因此纵向应力松弛可产生如下效应:隧道环面接缝刚度降低、环间抗剪承载力下降、环间接触密封性能弱化等。若在工程中不引起重视,盾构隧道纵向应力松弛将导致衬砌环间张开、错台等的持续恶化,并最终造成衬砌环面渗漏水、纵向螺栓拉断或剪断、管片局部破损等病害,如图 12 所示。

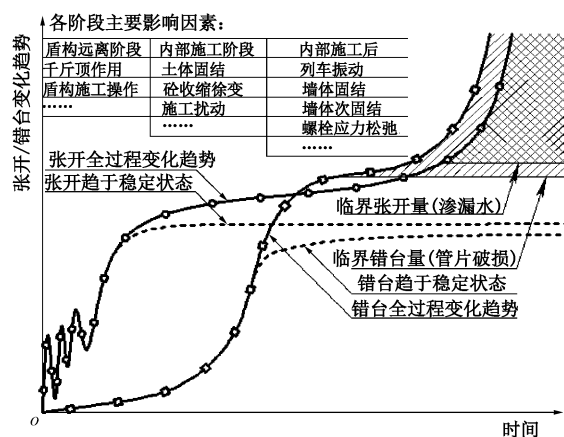


图 12 环面接触关系变化曲线

Fig. 12 Variation of circumferential joint contact

6 结 论

本文结合钱江隧道工程实例,从隧道管片拼装开始对软土盾构法隧道的纵向应力的变化进行了长达两年的现场实测,详细分析了隧道结构本体、衬砌环面的纵向应力松弛特性以及环间纵向连接螺栓轴力的时变特性,并对应力松弛发生机理及其效应进行了讨论,得到以下 5 点结论。

(1)软土盾构隧道管片体的纵向应力松弛将经历周期性剧烈波动、动态稳定、逐渐衰减、趋于稳定四个阶段的演变,管片应力松弛度最终达到 3%~80%,纵向应力平均值由 3 MPa 逐渐松弛为 1.2 MPa,应力松弛度平均约为 60%,达到稳定前至少需要 1 a 时间。

(2)软土盾构隧道衬砌环面的纵向接触应力松弛将经历动态调整、暂时平衡、逐渐衰减、趋于稳定 4 个阶段的演变,应力松弛幅度相对隧道结构本体较小但持续时间更长,接触应力平均值由 2 MPa 逐渐松弛为 1 MPa,接触应力松弛度平均约 50%,达到稳定至少需要 18 个月。

(3)隧道环间纵向连接螺栓轴力先减小、然后暂时稳定、最后增大,且经历了 2 a 的动态演变后仍未稳定。同时,环缝间纵向连接螺栓轴力的不稳定性增加了隧道纵向受力性能长期演化的不确定性。

(4)在隧道纵向应力松弛过程中,断面内纵向应力的分布形态呈现出规律性的演进过程,依次为正立、倒立的梯形分布→两个倒立梯形分布→近似一个倒立梯形分布→近似一个正立梯形分布。

(5)软土盾构隧道的纵向应力松弛是衬砌环接触调整、土体-隧道结构接触调整和螺栓体松弛三大要素的时变性及其共同作用的结果,可导致隧道环面接缝刚度降低、环间抗剪承载力下降、环间接缝的防水密封性能弱化等,应引起工程界重视。

参考文献:

- [1] SUGIMOTO M, SRAMOON A. Theoretical model of shield behavior during excavation: I theory[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(2): 138 - 155.
- [2] BLOM C B M, VAN DER HORST E J, JOVANOVIĆ P S. Three-dimensional structural analyses of the shield-driven “green heart” tunnel of the high-speed line south[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, **14**(2): 217 - 224.
- [3] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**: 454 - 465.
- [4] 廖少明, 白廷辉, 彭芳乐, 等. 盾构隧道纵向沉降模式及其结构响应[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(4): 566 - 570. (LIAO Shao-ming, BAI Ting-hui, PENG Fang-le, et al. Longitudinal settlement forms and structural response of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(4): 566 - 570. (in Chinese))
- [5] 廖少明. 圆形隧道纵向剪切传递效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002. (LIAO Shao-ming. Research on the effect of longitudinal shear transfer on circular tunnel lining[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))
- [6] LIAO S M, PENG F L, SHEN S L. Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**: 421 - 430.
- [7] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J]. 地下工程与隧道, 2009(1): 1 - 6. (WANG Ru-lu. Factors influencing deformation of Shanghai soft soil metro tunnel and deformation analysis[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [8] ARNAU O, MOLINS C, BLOM C B M, et al. Longitudinal time-dependent response of segmental tunnel linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, **28**: 98 - 108.
- [9] TALMON A M, BEZUIJEN A. Calculation of longitudinal bending moment and shear force for Shanghai Yangtze River Tunnel: Application of lessons from Dutch research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **35**: 161 - 171.
- [10] HUANG H W, GONG W P, KHOSHNEVISAN S, et al. Simplified procedure for finite element analysis of the longitudinal performance of shield tunnels considering spatial soil variability in longitudinal direction[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **64**: 132 - 145.
- [11] SHEN S L, WU H N, CUI Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **40**(12): 309 - 323.
- [12] WU H N, SHEN S L, LIAO S M, et al. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **50**: 317 - 323.
- [13] 叶飞, 杨鹏博, 毛家骅, 等. 基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 83 - 90. (YE Fei, YANG Peng-bo, MAO Jia-hua, et al. Longitudinal rigidity of shield tunnels based on model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 83 - 90. (in Chinese))
- [14] 廖少明, 门燕青, 张迪, 等. 钱江隧道管片拼装过程中的力学行为实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 156 - 164. (LIAO Shao-ming, MEN Yan-qing, ZHANG Di, et al. Field tests on mechanical behaviors during assembly of segmental linings of Qianjiang tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 156 - 164. (in Chinese))
- [15] 门燕青, 廖少明, 苑宝华. 超大直径盾构隧道纵向应力变化规律实测分析[C]// 第八届中国盾构隧道技术交流会论文集. 南京, 2015: 189 - 193. (MEN Yan-qing, LIAO Shao-ming, YUAN Bao-hua. Testing analysis of longitudinal stress along super large diameter shield tunnel[C]// The 8th China-Japan Conference on Shield Tunneling. Nanjing, 2015: 189 - 193. (in Chinese))
- [16] 于怀昌, 赵阳, 刘汉东, 等. 三轴应力作用下水对岩石应力松弛特性影响作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(2): 313 - 322. (YU Huai-chang, ZHAO Yang, LIU Han-dong, et al. Experimental study of influence of water on stress relaxation of rock under triaxial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(2): 313 - 322. (in Chinese))
- [17] 廖少明, 徐进, 焦齐柱. 盾构法隧道管片拼装过程中的衬砌内力解析[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(3): 127 - 135. (LIAO Shao-ming, XU Jin, JIAO Qi-zhu. Mechanical behaviors of tunnel lining during segment assembly[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(3): 127 - 135. (in Chinese))
- [18] 徐进. 盾构隧道管片拼装力学机理分析[D]. 上海: 同济大学, 2013. (XU Jin. Mechanical behaviors of tunnel lining induced by segments assembly[D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))