

# 海底风化槽地铁盾构隧道结构受力监测与计算

张 强<sup>1,2</sup> 王九利<sup>3</sup>

(1. 北京安捷工程咨询有限公司, 100037, 北京; 2. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程实验室, 100037, 北京;  
3. 青岛地铁集团有限公司, 266100, 青岛)

**摘 要** [目的]为探明海底风化槽盾构隧道结构荷载分布特征,特开展隧道管片结构内力响应规律研究。[方法]依托某跨海地铁盾构隧道项目,针对其海底风化槽段,实施了管片水土荷载及结构内力的系统性监测。通过数据分析,揭示了该区域隧道结构荷载与内力的分布特征,并进一步验算了潮汐荷载作用下管片的疲劳特性。[结果及结论]① 监测结果显示,水土压力与钢筋内力经历了初期的显著波动后趋于稳定。稳定阶段的水土压力维持在 0.1~0.4 MPa 范围内。内侧钢筋应力范围为 -2.19~-38.60 MPa,外侧的则为 -6.95~-34.59 MPa。对比钢筋应力的计算值与实测值,二者比值为 0.6~1.8,显示出良好的一致性。② 管片所受水土荷载随潮汐水位的周期性变化(周期为 12 h)而呈现相应的波动。管片接缝处的最大主应力水平为 -2.45~-2.60 MPa,应力幅值在 0.31~0.34 MPa 之间,应力比则介于 0.87~0.96 之间。③ 在不同潮汐荷载幅值条件下,管片的应力水平保持相对稳定,而应力幅值则随潮汐荷载幅值的增加而线性增长,同时应力比呈线性下降趋势。当潮汐荷载幅值达到实测值的 5 倍时,管片的主应力幅值增大至 1.70 MPa,应力比降至 0.84,此时混凝土主应力的最大值范围为 -1.6~-3.6 MPa。

**关键词** 地铁盾构隧道; 结构受力; 海底风化槽; 现场监测  
**中图分类号** U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.021

## Structural Force Monitoring and Calculation of the Metro Shield Tunnel in Subsea Weathered Slot

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Jiuli<sup>3</sup>

(1. Beijing AGILETECH Engineering Consultants Co., Ltd., 100037, Beijing, China; 2 National Engineering Lab for Green & Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, 100037, Beijing, China; 3 Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266100, Qingdao, China)

**Abstract** [Objective] In order to explore the load distribution characteristics of shield tunnel structures in subsea weathered slot, a study on the internal force response law of the segment structures is carried out. [Method] Relying on a cross-sea metro shield tunnel project, systematic monitoring of wa-

ter-soil loads and structural internal forces of the segments is carried out for the subsea weathered slot section. Through data analysis, the distribution characteristics of the tunnel structural loads and internal forces in this area are revealed. The fatigue characteristics of the segments under tidal load are further verified. [Result & Conclusion] ① The monitoring results show that the soil and water pressures and the internal forces of the reinforcement tend to stabilize after significant fluctuations in the initial stage. In the stable stage, water-soil pressure is maintained within the range of 0.1~0.4 MPa, the stress range of the inside reinforcement is -2.19~-38.60 MPa, and that of the outside reinforcement is -6.95~-34.59 MPa. The ratio between the calculated and measured values of the reinforcement stress is 0.6~1.8, which shows a good consistency. ② The water-soil loads on the segments show corresponding fluctuations with the periodic changes of the tidal water level (period of 12 h). The maximum main stress level at the segment joint is -2.45~-2.60 MPa, the stress amplitude is between 0.31~0.34 MPa, and the stress ratio is between 0.87~0.96. ③ Under different tidal load amplitude conditions, the segment stress level remains relatively stable, while the stress amplitude increases linearly with the increase of tidal load amplitude, and the stress ratio shows a linear downward trend. When the tidal load amplitude reaches 5 times of the actual measured value, the main stress amplitude of the segment increases to 1.70 MPa, and the stress ratio decreases to 0.84, at this time the maximum value of the concrete main stress ranges from -1.6 to -3.6 MPa.

**Key words** metro shield tunnel; structural stress; subsea weathered slot; field monitoring

## 0 引言

海底风化槽区域的围岩具有软弱破碎的特性,且围岩压力及水力联系复杂多变,这极大地增加了隧道施工的难度。隧道建成后,长期受到地下水侵蚀和潮汐荷载等多种因素的影响,其长期运营安全

面临严重威胁<sup>[1]</sup>。在海底隧道结构荷载分析领域,已有诸多学者进行了深入研究。例如,陈卫忠等人研究了风化槽段隧道采用 CRD(交叉中隔壁)法施工过程中衬砌结构的变形应力分布规律<sup>[2]</sup>;姜燕等通过修正惯用法及梁-弹簧法计算了湛江湾跨海盾构隧道在最大覆土断面与最大水深断面下管片的受力情况,发现梁-弹簧法的计算结果更接近实测值<sup>[3]</sup>;周济民等则利用三维壳-弹簧模型分析了狮子洋水下盾构隧道大断面宽幅管片结构的内力<sup>[4]</sup>;于洪丹等在考虑潮汐荷载循环变化的基础上,研究了衬砌结构的疲劳损伤过程,并分析了应力渗流耦合作用下潮汐荷载对隧道稳定性的影响<sup>[5]</sup>。

然而,综观现有研究,针对跨海地铁盾构隧道结构受力监测分析方面尚显不足,特别是在其独特的荷载环境和结构内力分布监测分析方面,具有显著的代表性和研究价值。潮汐变化会导致隧道水

土压力荷载的周期性波动,这种长期循环交替的荷载变化会使隧道结构应力产生往复变化,进而可能引发结构的疲劳失效。因此,潮汐交变荷载循环作用下隧道结构的长期稳定性问题亟待深入探讨。

本文以某跨海地铁区间海底风化槽段盾构隧道为具体研究对象,综合运用现场监测和数值分析等方法,深入分析了隧道结构的响应特征,旨在为类似工程的研究提供参考和借鉴。

## 1 工程概况

海底风化槽段区间隧道穿越全/强风化变质砂岩,上覆地层为淤泥、淤泥质黏土,下卧地层为强风化变质砂岩。海底风化槽段地质剖面如图 1 所示。区域海洋潮汐属正规半日潮流,历史最低潮水位高程为  $-3.08\text{ m}$ ,最高潮水位高程为  $3.58\text{ m}$ 。

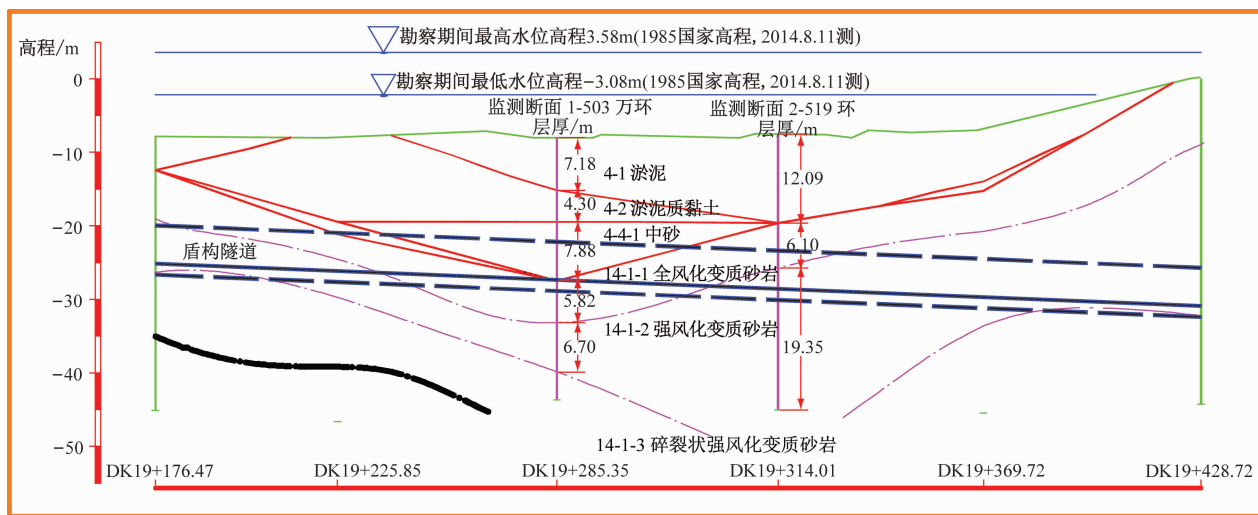


图 1 海底风化槽段地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of the subsea weathered slot

区间隧道采用盾构法施工,管片外径为  $6.7\text{ m}$ ,内径为  $6.0\text{ m}$ ,厚度为  $0.35\text{ m}$ ,环宽为  $1.5\text{ m}$ 。设计为 C55 钢筋混凝土管片,主筋为 HRB400 级钢筋。管片采用机械性能 8.8 级 M30 弯螺栓连接,环缝设置分布式凹凸榫。采用  $1(\text{K 管片}) + 2(\text{B}_1、\text{B}_2 \text{ 管片}) + 3(\text{A}_1、\text{A}_2、\text{A}_3 \text{ 管片})$  分块型式,错缝拼装。

海底风化槽段布设 2 个监测断面。管片预制阶段预埋监测传感器,对管片外部水土压力、钢筋应力进行动态监测。海底风化槽段监测断面测点布置见图 2。

从监测管片环拼装开始进行了为期 500 多天的长期人工监测,监测频率约 1 月/次,期间采用自动

化采集仪对 503 环部分测点进行了 18 d 的连续采集,采集频率为  $30\text{ min/次}$ 。

## 2 监测数据分析

### 2.1 水土压力

图 3 为海底风化槽段水土压力监测的时程曲线。从图 3 中可以看出:管片拼装完成后的  $0 \sim 165\text{ d}$  内,水土压力波动较为剧烈,荷载变化频繁,其中拱顶测点对荷载变化最为敏感,最大波动幅度达到了  $0.3\text{ MPa}$ 。随后,水土压力逐渐趋于稳定,表现为小幅波动,最大波动幅度减小至  $0.03\text{ MPa}$ 。在稳定状态下,对于 503 环,水土压力分布范围在  $0.12 \sim$

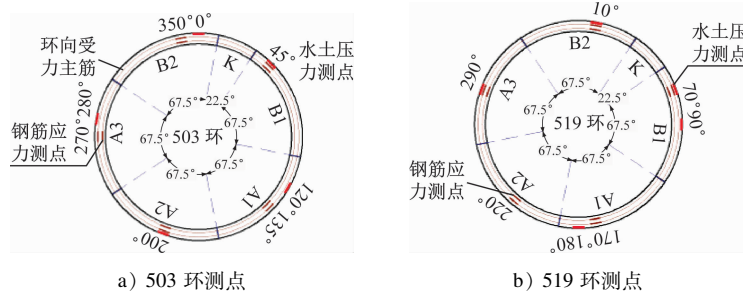


图 2 海底风化槽段监测断面测点布置

Fig. 2 Measuring points arrangement of the subsea weathered slot monitoring section

0.30 MPa 之间,各部位的水土压力大小依次为左边墙 > 拱顶 > 右边墙 > 拱底;而对于 519 环,虽然水土压力分布范围略有不同(0.27 ~ 0.40 MPa),但需要注意的是,不同环之间的水土压力分布规律可能受到多种因素的影响,因此在实际应用中需要结合具体情况进行分析。

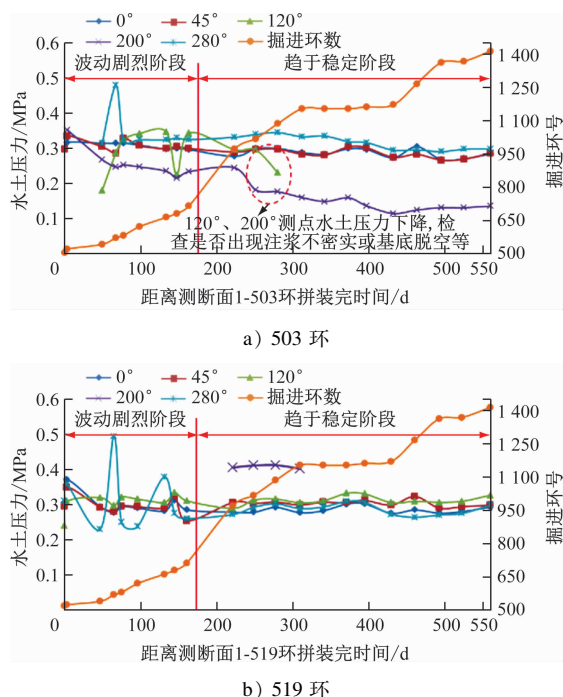


图 3 海底风化槽段水土压力监测时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of water-soil pressure monitoring in the the subsea weathered slot section

## 2.2 钢筋应力

图 4 为 503 环钢筋应力监测时程曲线,图 5 为 519 环钢筋应力监测时程曲线。与水土压力分布规律一致,钢筋应力变化分波动剧烈和趋于稳定两阶段。管片安装后,除局部测点钢筋应力出现短期受拉外,其余测点很快趋于稳定,整体受压。由图 4 和图 5 可知:503 环管片拼装完 67 d 和 147 d 时(对应

519 环的 65 d 和 145 d),盾构机推至 680 环,局部测点钢筋应力出现拉应力峰值,最大拉应力为 150 MPa;503 环管片拼装完 163 d 后(对应 519 环的 161 d),盾构机推至 713 环,钢筋应力趋于稳定。此时 503 环内侧钢筋应力为 -2.19 ~ -27.39 MPa,外侧钢筋应力为 -12.59 ~ -34.59 MPa;519 环内侧钢筋应力为 -18.29 ~ -38.60 MPa,外侧钢筋应力为 -6.95 ~ -28.09 MPa。

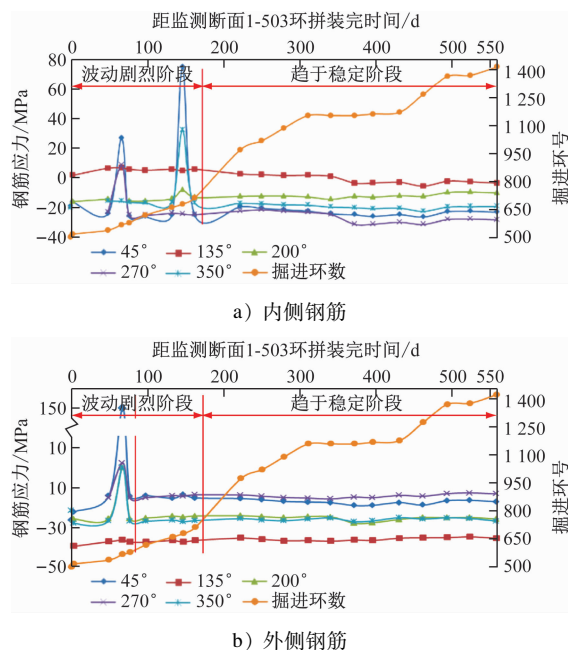


图 4 503 环钢筋应力监测时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of 503 loop reinforcement stress monitoring

## 3 结构力学计算

建立管片结构三维精细化计算模型,采用荷载-结构法,将监测水土压力作为外荷载施加于管片结构,荷载分两步施加,第一步施加图 3 稳定后荷载,分析结构内力分布特征,与监测钢筋内力对比,验



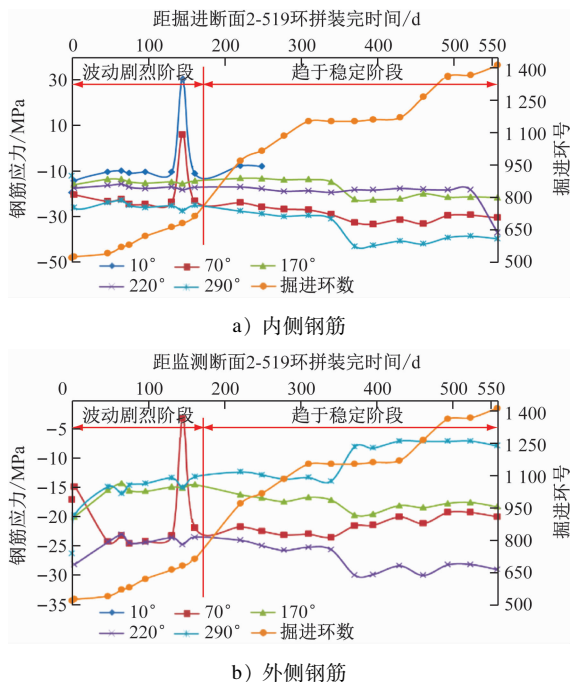


图5 519环钢筋应力监测时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of 519 loop reinforcement stress monitoring

证计算模型合理性;第二步为施加潮汐荷载,分析潮汐荷载对结构内力影响,进行结构疲劳验算。

### 3.1 计算模型

如图6所示,管片采用实体单元,钢筋、螺栓采用梁单元,弯螺栓采用等效刚度法对直梁螺栓单元折减<sup>[6]</sup>,钢筋、螺栓杆单元设置嵌入管片。管片分块、环之间由纵向螺栓连接,切向设置摩擦接触,摩擦因数取0.3,法向为硬接触<sup>[6]</sup>。管片与地层之间设置地层仅受压弹簧,设置剪切弹簧以约束整环旋转,两端设置轴向位移约束。

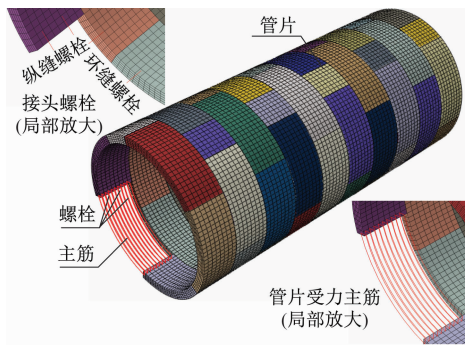


图6 管片结构受力计算模型

Fig. 6 Segment structure force calculation model

### 3.2 参数选取

管片采用混凝土损伤塑性模型,根据 GB

50010—2010《混凝土结构设计规范》混凝土本构模型进行参数标定,螺栓、钢筋采用理想弹塑性模型。材料力学参数如表1所示。

表1 材料力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of the material

材料	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa
C55 混凝土	2 500	35.5	0.2	
8.8 级螺栓	7 800	206.0	0.3	640
HRB 400 钢筋	7 800	200.0	0.3	400

注:螺栓弹性模量为折减后数值,简化后直螺栓长度与弯螺栓比值  
为0.85:1,直螺栓弹性模量折减15%。

### 3.3 稳态荷载下结构受力分析

图7为钢筋最大主应力图。由图7可知:管片钢筋以受压为主,内侧压应力大于外侧,管片压应力22.3~25.8 MPa;管片挤压下接缝处出现应力集中,钢筋压应力为11.9~13.4 MPa。

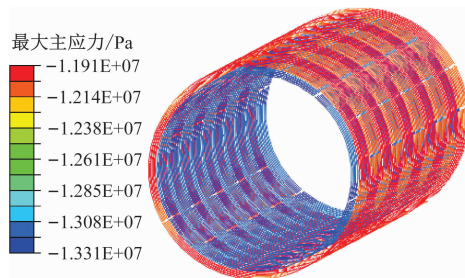


图7 钢筋最大主应力

Fig. 7 Maximum main stress of reinforcement

图8为钢筋应力计算值与监测值对比。由图8可知:将钢筋应力实测值与计算结果对比,相对于实测值,计算值离散度小;第503环钢筋应力计算值与监测值比值为0.6~1.8,第519环钢筋应力计算值与监测值比值为0.6~1.0;除个别测点偏差较大外,总体上,计算值和监测值吻合较好,这一定程度上验证了计算模型的合理性。

### 3.4 潮汐荷载下结构疲劳验算

#### 3.4.1 管片水土压力自动化监测分析

图9为第503环水土压力自动化监测时程曲线。由图9可知:水土压力自动化监测数据均较好地反映了正规半日潮汐荷载对管片水土压力的影响规律;潮汐作用下荷载呈周期波动,1 d内呈2个周期波动,每个周期为12 h,波谷分别对应的时间为00:00、12:00,波峰分别对应的时间为06:00、18:00;荷载水平为0.28 MPa,最大幅值约0.02 MPa。

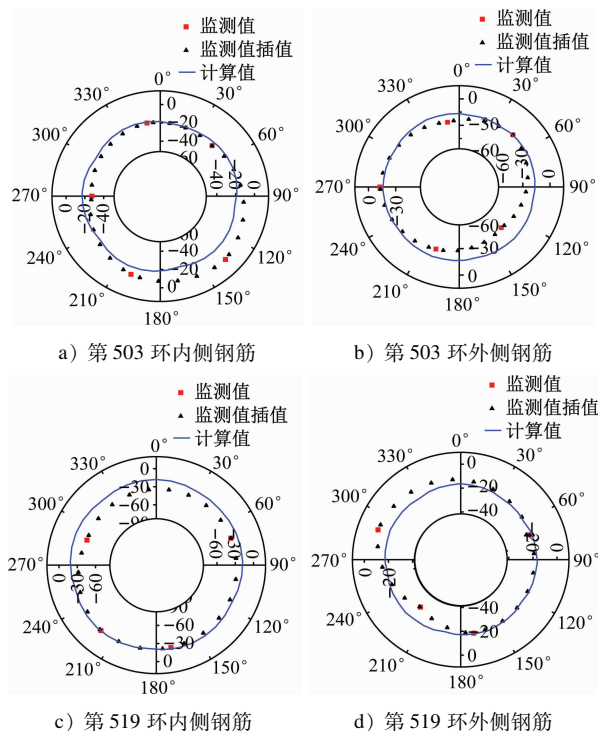


图 8 钢筋应力计算值与监测值对比

Fig. 8 Comparison between calculated and monitored values of reinforcement stress

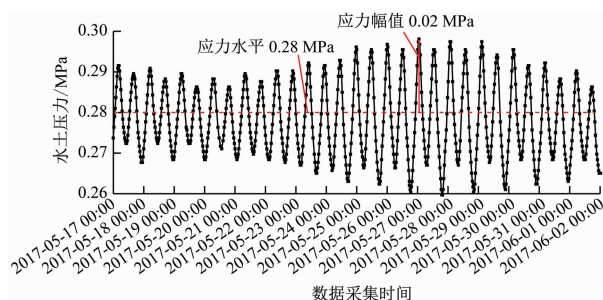


图 9 503 环水土压力自动化监测时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of 503 loop water-soil pressure automatic monitoring

### 3.4.2 结构受力分析

结合自动化采集数据,计算时将拱顶测点水土压力自动化监测数据施加于管片外壁,此时最大应力幅值为 0.02 MPa,对应潮汐水位高差为 4 m。

潮汐荷载下接缝处管片最大主应力响应规律如图 10 所示。管片最大主应力呈周期波动,波动周期与荷载一致,管片最大主应力水平为  $-2.45 \sim -2.60$  MPa,拱顶接缝 B2-K 处管片主应力水平最大为  $-2.45$  MPa,其余接缝处管片最大主应力水平接近为  $-2.50 \sim -2.60$  MPa,各接缝处管片应力幅值一致为 0.31 ~ 0.34 MPa,应力比为 0.87 ~ 0.96。

由图 11、图 12 可知,不同潮汐荷载幅值下管片

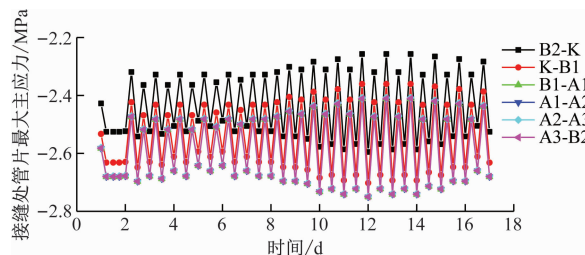


图 10 接缝处管片最大主应力时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of maximum principal stress of the segment at vault joint

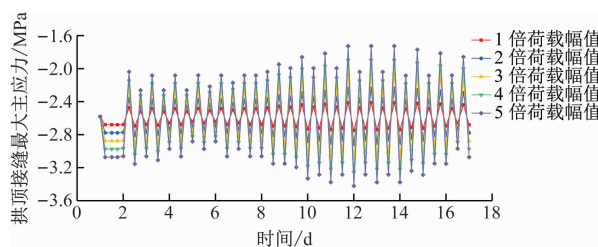


图 11 不同潮汐荷载幅值下拱顶接缝 B2-K 处管片最大主应力时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of the maximum principal stress of the segment at vault joint B2-K under different tidal load amplitudes

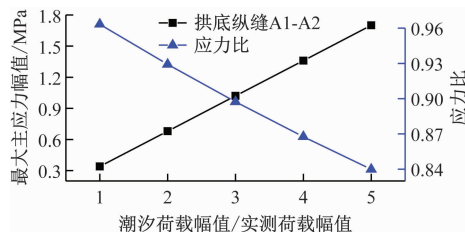


图 12 潮汐荷载幅值与管片应力幅值关系曲线

Fig. 12 Relationship curves between tidal load amplitude and segment stress amplitude

应力水平恒定,为 2.59 ~ 2.61 MPa;管片应力幅值随潮汐荷载幅值呈线性增加,应力比呈线性下降;当潮汐荷载幅值为 5 倍的实测荷载幅值时,对应高、低潮位差为 20 m,管片主应力幅值为 1.70 MPa,应力比为 0.84。根据《规范》,当应力比  $\geq 0.5$  时,混凝土受压疲劳强度修正系数为 1, C55 混凝土受压疲劳强度为 25.3 MPa,远大于高低潮位差为 20 m 时混凝土主应力值(据属地海洋观测资料,近 50 年最高潮位 7.10 m,最低潮位  $-0.05$  m,潮差 7.15 m)。

## 4 结语

本文采用现场监测、数值模拟等,研究了海底风化槽段荷载及结构受力变形分布特征,验算了潮汐荷载下管片疲劳损伤,结论如下:

1) 管片水土压力、钢筋应力监测值变化分初期波动剧烈阶段、后期趋于稳定阶段。稳定后水土压力分布范围为  $0.1 \sim 0.4$  MPa; 钢筋整体受压, 内侧钢筋应力为  $-2.19 \sim -38.60$  MPa, 外侧钢筋应力为  $-6.95 \sim -34.59$  MPa。随潮汐水位变化, 管片水土荷载呈周期波动, 波动周期为 12 h。

2) 已探明荷载模式下, 管片整体向内收敛, 径向位移为  $0.20 \sim 0.25$  mm, 管片、钢筋以受压为主, 管片接缝处出现应力集中, 钢筋应力计算值为  $-15 \sim -21$  MPa, 钢筋应力计算值和实测值比值为  $0.6 \sim 1.8$ 。

3) 实测潮汐荷载下管片最大主应力呈与荷载一致的周期波动, 接缝处管片最大主应力水平为  $-2.45 \sim -2.60$  MPa, 应力幅值为  $0.31 \sim 0.34$  MPa, 应力比为  $0.87 \sim 0.96$ ; 不同潮汐荷载幅值下管片应力水平恒定, 应力幅值随潮汐荷载幅值呈线性增加, 应力比呈线性下降; 当潮汐荷载幅值为 5 倍实测值时, 对应高、低潮位差为 20 m, 管片主应力幅值为 1.70 MPa, 应力比为 0.84, C55 混凝土受压疲劳强度 25.3 MPa 远大于混凝土主应力最大值。

## 参考文献

- [1] 肖明清. 我国水下盾构隧道代表性工程与发展趋势 (英文) [J]. 隧道建设 (中英文), 2018, 38(3): 360.  
XIAO Mingqing. Representative projects and development trend of underwater shield tunnel in China [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(3): 360.
- [2] 陈卫忠, 于洪丹, 郭小红, 等. 厦门海底隧道海域风化槽段围岩稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 873.  
CHEN Weizhong, YU Hongdan, GUO Xiaohong, et al. Study on stabilities of surrounding rocks through weathered slot in Xiamen subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 873.
- [3] 姜燕, 杨光华, 陈富强, 等. 湛江湾高水头跨海盾构隧道管片结构典型断面受力计算与监测反馈分析 [J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 275.  
JIANG Yan, YANG Guanghua, CHEN Fuqiang, et al. Force determination and monitoring feedback analysis of typical sections of lining structure of cross-sea shield tunnel under high head in Zhanjiang Bay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 275.
- [4] 周济民, 何川, 肖明清, 等. 狮子洋水下盾构隧道衬砌结构受力的现场测试与计算分析 [J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 115.  
ZHOU Jimin, HE Chuan, XIAO Mingqing, et al. Field test and numerical simulation of mechanics of segment lining of Shiziyang underwater shield tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 115.
- [5] 于洪丹, 陈卫忠, 郭小红, 等. 潮汐对跨海峡隧道衬砌稳定性影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增刊 1): 2905.  
YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Research on effect of tide on stabilities of channel tunnel lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S1): 2905.
- [6] 刘学增, 蔡光远, 杨帆, 等. 破碎围岩错缝拼装盾构隧道结构承载性能与变形控制指标 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (8): 57.  
LIU Xuezheng, CAI Guangyuan, YANG Fan, et al. Structural bearing behavior and deformation controlling indicators for staggered jointed shield tunnel lining in fractured surrounding rock [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (8): 57.

· 收稿日期: 2022-06-15 修回日期: 2022-10-08 出版日期: 2024-10-10

Received: 2022-06-15 Revised: 2022-10-08 Published: 2024-10-10

· 通信作者: 张强, 工程师, 1039714664@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题, 以及新技术、新成果, 邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述, 是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

