

DOI: 10.11779/CJGE2020S1040

潮位变化对江底大直径盾构管片受力影响现场测试研究

阳军生¹, 戴 勇¹, 房中玉², 章 怡³, 龚方浩¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211899;

3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 依托杭州望江路泥水盾构隧道工程, 针对钱塘江水位的潮汐变化特征进行了分析, 通过埋设测试元件, 监测了右线 375 环断面处管片衬砌的土压力、孔隙水压力以及管片内力。研究表明, 监测环离开挖面的距离达到 15 环以上地层才能基本稳定。水位与衬砌外水压力呈正相关变化, 对比理论计算值, 潮汐导致的水压力变化经该地层传递到隧道管片后有 45%~77% 的折减。潮位变化对管片结构安全系数的影响甚小。

关键词: 潮汐; 大直径盾构; 管片; 压力; 安全系数

中图分类号: TU459.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0203-05

作者简介: 阳军生(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道相关方面教学与研究。E-mail: jsyang@csu.edu.cn。

Field tests on effects of changes of tidal level on stress of large-diameter shield segments under rivers

YANG Jun-sheng¹, DAI Yong¹, FANG Zhong-yu², ZHANG Yi³, GONG Fang-hao¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. China Railway 14th Bureau Group Shield

Engineering Co., Ltd., Nanjing 211899 China; 3. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Relying on the slurry shield tunnel project of Wangjiang Road in Hangzhou, the tidal change characteristics of the water level of the Qiantang River are analyzed, the earth pressures, pore water pressures and segment internal forces of the segment linings at the section 375 of the right line are monitored by embedding test elements. The studies show that the formation can only be stabilized if the distance from the monitoring ring to the excavation face is more than 18 rings. There is a positive correlation between the water level and the external water pressure of the linings, and the tide-induced change in water pressure is reduced by 45% to 77% after passing through the stratum to the tunnel segment compared with the calculated values. The change of tide level has small effects on the safety factor of the segment structures.

Key words: tide; large-diameter shield; segment; pressure; safety factor

0 引言

大直径泥水平衡盾构水下隧道管片结构受力与上覆土体性质、埋深以及水头高度等因素密切相关。近年来不少长大隧道穿越江河湖海, 周期性涨落潮对水头高度造成直接影响, 掌握潮位变化对水下隧道衬砌的受力影响程度和对于结构安全性评价非常必要。

杭州望江路过江通道盾构段总长约 1837 m, 穿越钱塘江江面宽度约 1300 m, 采用两台泥水平衡盾构机施工^[1]。盾构隧道管片外径 11300 mm, 内径 10300 mm, 厚 500 mm, 环宽 2000 mm; 管片强度等级 C50。江中盾构段里程为 K1+000—K2+830, 线路与钱塘江垂直, 埋深约 12~22 m, 沿线穿越地层特性差异性较大, 其中粉砂与圆砾等粗粒地层所占比例约为 14%, 粉土、黏土等细粒地层占比约为 86%。

目前针对施工期内潮汐对大直径盾构管片结构受力影响的现场测试较为少见。依托望江路过江隧道, 开展大直径盾构衬砌结构受潮汐影响的管片受力实测分析, 对其它穿越钱塘江隧道的设计具有参考价值。

1 钱塘江潮汐水位特征分析

钱塘江属于感潮型河流, 其水位受潮汐影响大。根据闸口站资料, 该段平均高潮位在 4.44~4.45 m, 低潮位 3.75~3.96 m, 平均潮差 0.49~0.69 m, 最大潮差 3.69~4.22 m^[2]。

以 2018 年为例, 潮汐前后(公历 2018-09-15—10-16)的逐时水位变化规律如图 1 所示。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878669)

收稿日期: 2020-06-02

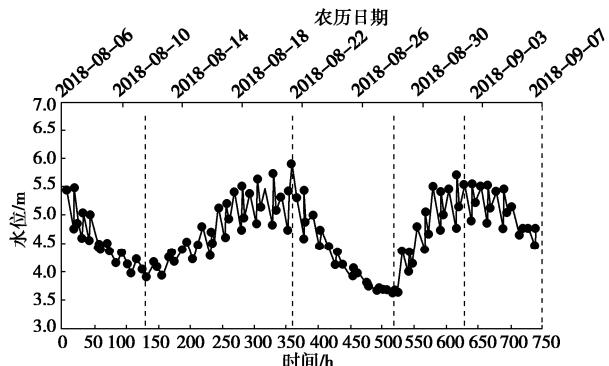


图 1 2018-08-06—2018-09-07 (农历日) 逐时水位图

Fig. 1 Chart of hourly water level for 2018-08-06 to 2018-09-07

(lunar day)

图 1 中最高与最低水位的变化趋势几乎完全一致, 月初大约在 3, 4 号 (以下均为农历日) 达到第一个极大值然后下降; 约 12 号达到极小值, 在 17~20 号上升达到第二个极大值, 到 26 号又下降至水位极小值。两次水位极大值和水位极小值间隔了 15 d 左右出现, 相邻水位极大值与极小值间隔 7~9 d 出现。

根据历年潮汐规律, 设定管片大潮测试期为 2018-09-25—09-30 (农历为 2018-08-01—08-21)。在监测期内对钱塘江日水位变化情况作出记录如下图 2 所示。

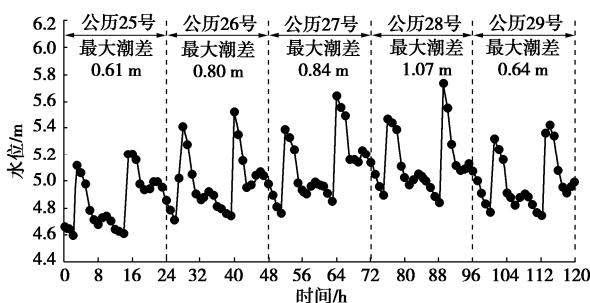


图 2 2018-09-25—2018-09-30 大潮前后逐时水位变化

Fig. 2 Change of hourly water level before and after spring tide from 2018-09-25 to 2018-09-30

潮汐期每日约有 2 次涨潮和落潮, 两次高潮之间相隔大约为 12~13 h, 涨潮时间历时短; 且相邻高潮位与相邻低潮位的水位差约为 1 m。但根据水文资料统计, 2018 年与 2016 年、2017 年相比, 最大潮差相差达 1~1.5 m, 几乎减小至一半。

2 管片受力测试方案

采取埋设测试仪器的方法, 对隧道中管片的内力、衬砌外土压力和孔隙水压力进行监测。监测断面选择应考虑如下因素^[3]:

(1) 断面埋深: 右线约施工至 240 环以后达到埋深最大断面, 且之后断面埋深变化较小, 比较稳定。

(2) 潮汐时间: 大潮测试期为 2018-09-25—09-30, 在此之前管片受力需基本稳定, 判断监测断面处管片应至少在大潮期前半个月安装完毕。

(3) 地层条件: 为避免对测试结果的干扰, 试验应尽量选在地层性质较单一、厚度较均匀的位置。

综上选取右线 375 环管片所在位置作为监测断面, 该断面埋深约 21 m。如下图 3, 该处地层上中部为淤泥质粉质黏土夹粉砂, 隧道下卧层为粉质黏土。该环各管片关键块 (F 块) 的大致处于水平位置。

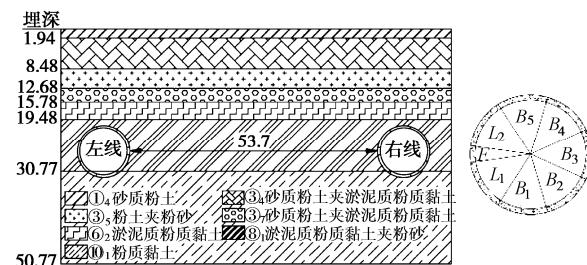


图 3 右线 375 环地质剖面图

Fig. 3 Geological section of ring 375 of right line

测试元件在管片分块中线附近分别进行埋设 (如图 4)。一共布置了 8 个土压力计, 8 个水压力计以及 16 个钢筋应变计。根据水文预报, 闸口站潮汐水位变化于 2018 年 9 月 25 号开始, 因此 375 环管片拼装完成后, 间隔 1 h 读取 1 次数据, 1 d 以后采用 3 h/次频率, 3 d 后采用 4 次/d 读数, 7 d 后采用 3 次/d 读数, 15 d 后采用 2 次/d 读数。大潮期间现场监测频率定为 1 h/次连续测试至 9 月 30 日钱塘江大潮退去。

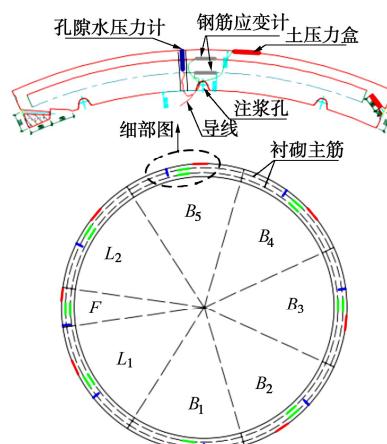


图 4 测试仪器布置图

Fig. 4 Layout of test instrument

3 监测结果及数据分析

375 环试验管片于 2018 年 9 月 7 日进行拼装, 盾构推进 1 环之后开始数据采集。完整监测期为 8 日—29 日; 其中观测潮期为 25 日—29 日 (日潮位变化详见图 2)。监测期间盾构掘进参数基本上保持一致 (见

表 1)。

表 1 监测期间盾构掘进参数表

Table 1 Main parameters of shield tunneling during monitoring

参数	值	参数	值
掘进速度/(mm·min ⁻¹)	16~25	顶推力/MN	56.2~58.6
刀盘转速/(r·min ⁻¹)	0.51~0.56	注浆压/MPa	0.35~0.38
刀盘扭矩/(MN·m)	2.8~3.1	注浆量/m ³	22~25

3.1 管片外力变化及分布规律

土压力盒直接量测的周边围压称为界面压力。作用在管片上的有效土压力等于界面压力减水压力^[4]。

(1) 监测期衬砌外力变化规律

图 5~7 表示外力监测时程曲线, 其中 B_2 处水、土压力元件以及 B_3 处土压力元件已被破坏。

如图 5 所示, 监测期第 1 天可看做刚脱环不久, 正处于同步注浆期, 各测点界面压力在管片脱环后立即陡增, 然后在 4 d 内逐渐回落, 最后趋于稳定。

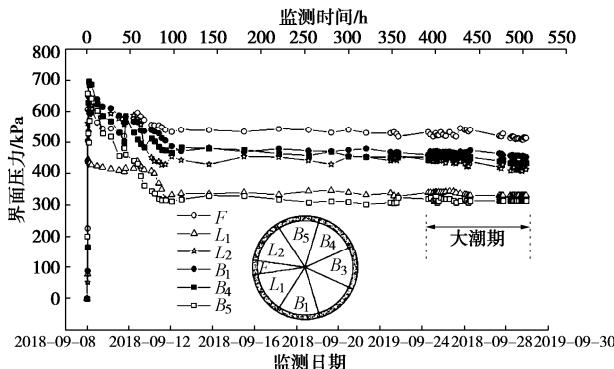


图 5 监测期各测点界面压力变化

Fig. 5 Change of interface pressure during monitoring period

从图 6, 7 可知, 0~4 d 各测点的水、土压力变化较大, 第 4 d 以后变化较小; 对于下部测点 F , L_1 , B_1 , B_3 , 脱环后水压力迅速升高, 然后快速回落后趋于平稳; 对于顶部测点 B_5 , 水压力迅速升高至该点理论静水压力值附近后趋于稳定; 对于上部测点 L_2 , B_4 , 水压力先缓慢上升, 在监测期第 3 d 达到最大值后趋于稳定。因此在富水黏土区, 地层基本稳定的条件是离施工环的距离达 15 环以上; 大潮期间变化并不明显。

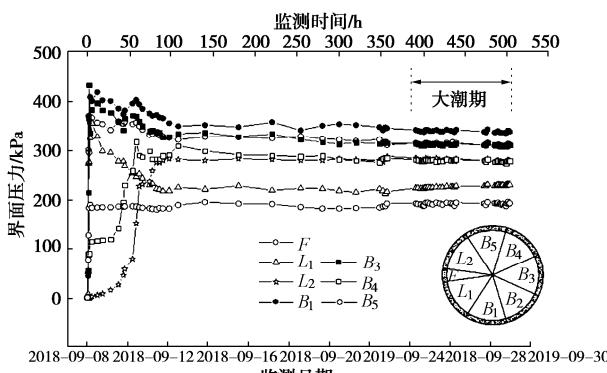


图 6 监测期各测点水压力变化

Fig. 6 Change of water pressure during monitoring period

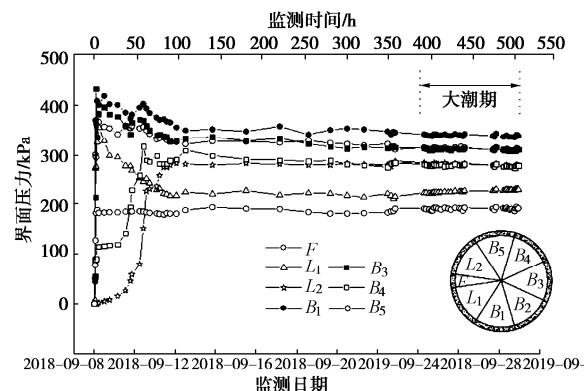


图 7 监测期各测点有效土压力变化

Fig. 7 Change of effective earth pressure during monitoring period

(2) 稳定后衬砌外力分布规律

提取各测点外力值进行全环分布图的绘制, 结果如图 8, 9 所示。由图可知, 全环水压力分布表现为上小下大的形式, 接近对称分布; 与静水压力理论值相比, 实测值大约为理论值的 80%~120% 之间。有效土压力分布呈现下小上大的形式。全环有效土压力大小在 100~210 kPa 之间, 其中最大有效土压力(204 kPa)位于 F 管片测点处。盾构隧道处于黏土地层中, 总土压力分布整体上较为对称、均匀, 黏性土地层中管片衬砌外的总压力荷载主要为水压力, 有效土压力较小, 约为对应位置处水压力的 35%~75%。

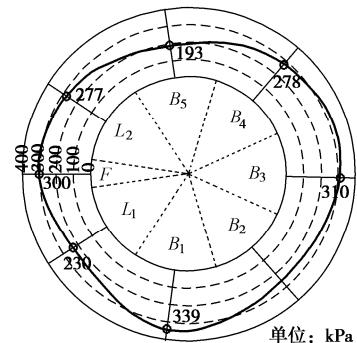


图 8 稳定后全环水压力分布规律

Fig. 8 Distribution rules of water pressure along ring

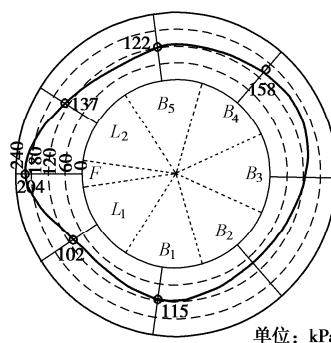


图 9 稳定后全环有效土压力分布规律

Fig. 9 Distribution rules of effective earth pressure along ring

(3) 潮位相关性分析

图 10 为大潮期间 B_1 处水压力随水位变化的时程

曲线, 可知 B_1 水压的变化范围在 10 kPa 之间; 由散点图发现水位与水压力之间呈现出一定的线性关系。对数据进行线性拟合, 图 11 中决定系数越接近 1 表示拟合程度越高; r 绝对值越接近 1 表示变量相关性越强; P 值小于 0.01 即表示方程极显著。因此可判断 B_1 水压力与潮位有较强正相关性, 其中斜率 7.7 表示涨潮时水位每上升 1 m, 水压力增大 7.7 kPa。因此潮位水压力变化传递到管片大概有 23% 损失。

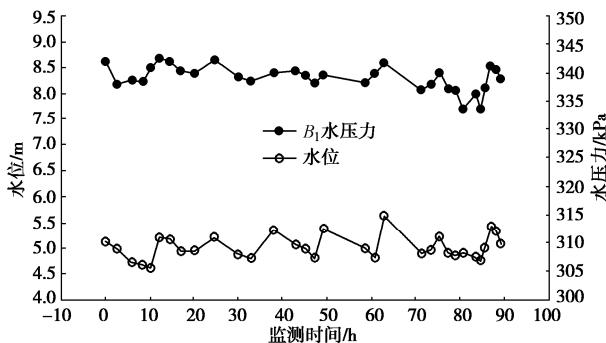


图 10 大潮期间水压力变化曲线

Fig. 10 Curves of water pressure during high tide

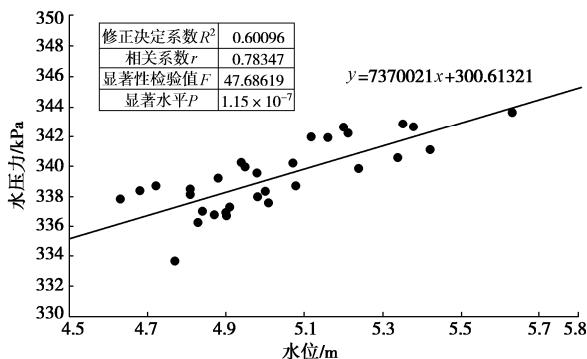


图 11 水压力与水位拟合图

Fig. 11 Fitting diagram of water pressure and water level

其余测点的水压力与水位经分析也具有强相关性, 具体参数见下表 2。其中 B_5 测点处拟合斜率最大, 水力损失最小 (19%); L_1 , L_2 , B_3 和 B_4 测点处水力损失较大, 考虑上述几处位置接近同步注浆孔口, 浆体可能一定程度上减弱了管片与外界的水力联系。

表 2 拟合相关性参数统计表

Table 3 Statistical table of fitting correlation parameters

测点	斜率	相关系数	显著性检验值	显著水平
F	6.82	0.64594	21.47895	6.526×10^{-5}
B_1	7.70	0.78347	47.68619	1.145×10^{-7}
B_3	6.29	0.77141	44.08758	2.368×10^{-7}
B_4	4.48	0.56829	14.31039	6.909×10^{-4}
B_5	8.10	0.85668	82.73673	3.963×10^{-10}
L_1	5.75	0.49406	9.68764	4.051×10^{-3}
L_2	6.54	0.59712	16.6237	3.087×10^{-4}

3.2 管片内力变化及分布规律

(1) 监测期衬砌内力变化规律

全阶段监测期内的各测点内力变化值见图 12, 13, 其中 L_2 元件被破坏无测试数据。

由图 12, 13 分析, 管片刚脱环不久后由于注浆压力、水土压力等对管片的共同作用, 使管片内力在短期内迅速调整变化; 之后由于浆液初凝以及流动导致浆液压力消散, 进而使得管片内力趋于平稳; 2~4 d 是注浆压力缓慢消散阶段; 至第 4 天以后管片内力基本稳定, 地层逐渐沉降固结, 至第 15 天时, 各测点内力基本不变。

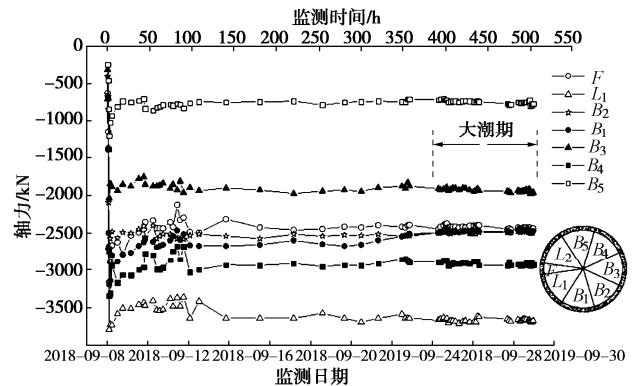


图 12 监测期各测点轴力变化

Fig. 12 Change of axial force during monitoring period

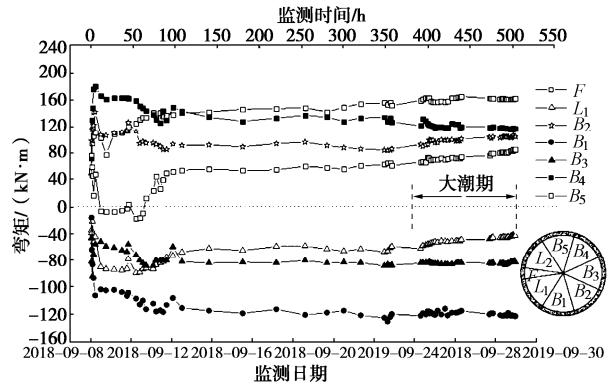


图 13 监测期各测点弯矩变化

Fig. 13 Change of bending moment during monitoring period

(2) 稳定后衬砌内力分布规律

全环内力分布图绘制如图 14, 15。图中管片全环受压, 具体表现在拱顶轴力最小 (780 kN), 拱底左墙脚最大 (3650 kN); 全环管片轴力表现为类矩形分布, 管片下部轴力普遍大于上部, 这可能是由于 B_5 处管片脱环后上部覆土迅速沉降充填了盾尾空隙, L_2 , B_4 附近同步注浆孔口注浆后的浆液在中下部的管片环外周形成了浆液硬化包裹层, 使得浆体将压力分担给测点邻近衬砌结构。弯矩定义为管片内侧受拉为正, 图中所示弯矩分布不对称, 大小在 -170~160 kN 之间, 最大正弯矩 (161 kN·m) 位于左边墙 F 块处, 最大负弯矩 (-159 kN·m) 位于右边墙脚 B_2 块处。

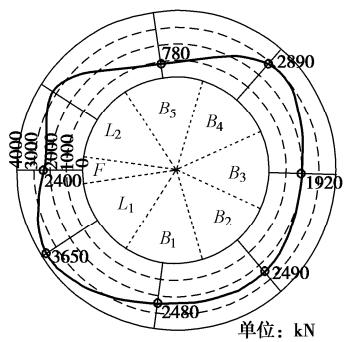


图 14 稳定后全环轴力分布规律

Fig. 14 Distribution laws of axial force along ring

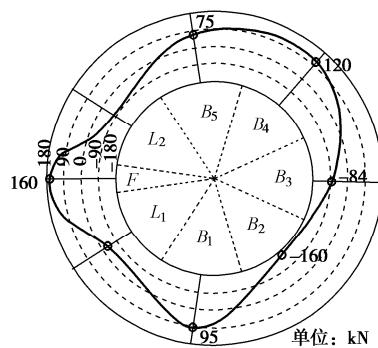


图 15 稳定后全环弯矩分布规律

Fig. 15 Distribution rules of bending moment along ring

3.3 管片结构安全性分析

选取监测期间水位最低(4.63 m)与水位最高(5.7 m)时各测点内力值进行安全系数检算^[5], 计算中按不利情况考虑仅主筋受力, 表 3 输出抗弯安全系数(小于 2.0 认为结构不安全)。说明涨潮会一定程度上削弱衬砌安全系数, 但大潮期间管片衬砌结构始终处于安全状态。

表 3 管片结构安全性检算表

Table 3 Safety check of segment structures

测点	水位最低			水位最高		
	弯矩 / (kN·m)	轴力 / kN	安全系数	弯矩 / (kN·m)	轴力 / kN	安全系数
F	163.2	-2370.6	6.04	161.6	-2453.4	5.89
L ₁	-56.0	-3641.8	4.72	-45.2	-3684.7	4.71
B ₁	102.3	-2468.5	6.34	104.4	-2497.0	6.26
B ₂	-159.0	-2148.6	6.56	-159.0	-2190.1	6.46
B ₃	-83.0	-1891.4	8.21	-83.7	-1966.1	7.93
B ₄	122.8	-2870.3	5.43	119.6	-2931.0	5.35
B ₅	72.4	-713.4	18.21	79.5	-771.8	16.76

4 结 论

依托杭州望江路过江隧道, 在大潮期前后对管片

内、外力进行了监测, 主要得出以下几点结论:

(1) 富水黏土地层下浆液压力难以迅速消散, 本工程监测环离开挖面的距离达到 15 环以上(或脱环 5 d 以上) 地层才能基本稳定。

(2) 黏土地层中总土压力分布较为对称、均匀, 稳定后管片衬砌外的总压力荷载主要为水压力, 有效土压力较小, 其值约为对应位置水压力的 35%~75%。

(3) 水压力与潮位近似呈线性正相关; 潮位的水压力变化传递到隧道 0.45~0.77 的折减, 注浆体可能在一定程度上减弱管片与外界的水力联系。

(4) 大潮期间的潮位变化会一定程度上削减管片结构的安全系数, 但影响甚小, 大潮期间管片衬砌结构始终处于安全状态。

参 考 文 献:

- [1] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 杭州市望江路过江隧道工程施工图变更设计[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2017. (China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Construction Drawing Change Design of Wangjiang Road Tunnel Project in Hangzhou[R]. Wuhan: China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2017. (in Chinese))
- [2] 浙江水文局. 杭州市闸口水文站 2000~2018 年度水文报表[R]. 杭州: 浙江水文局, 2018. (Zhejiang Hydrological Bureau. 2010~2018 Annual Hydrological Report of Hangzhou Zhakou Hydrological Station[R]. Hangzhou: Zhejiang Hydrological Bureau, 2018. (in Chinese))
- [3] 章 怡. 潮汐作用下大直径盾构隧道管片结构内力实测与数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2019. (ZHANG Yi. Analysis of the Internal Forces of Large Diameter Shield Tunnel Segments under Tides based on Field Measurement and Numerical Simulation[D]. Changsha: Central South University, 2019. (in Chinese))
- [4] 李 雪, 周顺华, 王培鑫, 等. 盾构隧道实测土压力分布规律及影响因素研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 453~459. (LI Xue, ZHOU Shun-hua, WANG Pei-xin, et al. Study of distribution law of earth pressure acting on shield tunnel lining based on in-situ data[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 453~459. (in Chinese))
- [5] 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 2017. (Code for Design of Railway Tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)