

DOI: 10.11779/CJGE2014S2080

湛江湾厚砂层深挖竖井结构施工监测分析

廖文来^{1,2}, 张君禄^{1,2}, 陈晓文^{1,2}, 段峰虎^{1,2}, 黎 兴³

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610;

3. 湛江市鉴江供水枢纽工程建设管理处, 广东 湛江 524000)

摘要: 为掌握施工期竖井支护结构的内力发展及分布情况, 指导竖井土方开挖及衬护施工。在竖井支护结构不同高程和不同方向的受力主筋上安装钢筋计量测钢筋应力, 从而监控施工期支护结构内力的变化。监测成果表明, 施工期竖井支护结构主要表现为受压状态, 同高程水平环向结构应力大于竖向, 地下连续墙中部结构应力大于下部, 内衬墙下部水平环向结构应力大于中部; 逆作法按6 m一段土方开挖和支护衬砌, 施工至第五、六层时结构受力最大, 计算分析结构受力安全系数在允许范围内。监测成果为竖井的开挖衬护施工提供指导, 亦可为其它类似竖井工程的监测、设计和施工提供参考。

关键词: 湛江湾; 厚砂层; 深挖竖井; 施工监测

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0460-05

作者简介: 廖文来(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程安全监测与评价、质量检测等工作。E-mail: gdskyliao@126.com。

Monitoring analysis of structural construction of deep thick sand shaft in Zhanjiang Bay

LIAO Wen-lai^{1,2}, ZHANG Jun-lu^{1,2}, CHEN Xiao-wen^{1,2}, DUAN Feng-hu^{1,2}, LI Xing³

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. Geotechnical Engineering

Technology Research Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China; 3. The Construction Management Department of Jain River Water Supply Project of Zhanjiang City, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: To master the development and distribution of internal forces in the shaft structure to guide earth excavation and lining construction, dynamometers are installed on the reinforcement at different elevations in different directions in the shaft structure to measure the force so as to monitor changes of the internal forces in the shaft structure during the construction period. The monitoring results show that the shaft structure is mainly in a compressed state during the construction period. The circumferential pressure of the shaft structure is greater than the vertical one at the same elevation. The structural stress in the center of diaphragm wall structure is greater than that in the substructure, and the circumferential pressure in the substructure of the lining wall is greater than that in the center. The earth excavation and lining construction is performed according to the section of six meters in length. The structural force is the maximum when constructed to the fifth and sixth floor. The calculated results show that the safety factor of structure is within the allowable range. The monitoring results provide guidance for the earth excavation and lining construction, and they also provide a reference for the monitoring, design and construction of other similar shafts.

Key words: Zhanjiang Bay; thick sand bed; deep shaft; construction monitoring

1 工程概况

湛江湾跨海盾构隧道是鉴江—东海岛输水工程的控制性项目, 主要由始发井、跨海隧道、接收井三部分组成。始发井和接收井均采用地下连续墙+内衬混凝土组合的围护结构, 高压旋喷加固竖井下方土体和隧道洞口土体。始发井开挖深度28.5 m, 地下连续墙深34.5 m; 接收井开挖深度34.64 m, 地下连续墙

深57.0 m。为掌握施工期竖井支护结构的内力发展及分布情况, 指导竖井土方开挖及衬护施工, 以接收井为例, 在竖井支护结构不同高程和不同方向的受力主筋上安装钢筋计量测钢筋应力, 从而监控施工期支护结构内力的变化。

表 1 接收井地层主要物理力学指标
Table 1 Main physico-mechanical indices of receiving shaft

层号	岩土名称	状态	饱和重度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	强度参数		压缩系数 a_{vI}/MPa	压缩模量 E_s/MPa	标贯击数 $N_{63.5}$ 击	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
				c_{cq} /kPa	φ_{cq} (°)				
③-2	淤质细砂、 淤质中细砂	稍密状	19.7	20	27.2	0.208	13.04	9~18	4.03×10^{-4}
⑤	中粗砂、粗砂、砾砂	稍密—中密	22.1	28	33.5	0.096	14.47	13~23	4.93×10^{-4}

接收井外壁支护结构为 C25 混凝土地下连续墙, 内径 19 m, 厚 1.0 m, 墙深 57.0 m, 分 11 槽段浇筑, 2011 年 11 月开工, 至 2012 年 1 月浇筑完成; 内壁支护结构为现浇 C30 混凝土整体衬砌内衬墙, 深 34.64 m, 自上而下 $\nabla 7.00 \sim \nabla -5.00$ m 衬砌厚 1.0 m, $\nabla -5.00 \sim \nabla -12.14$ m 厚 1.2 m, $\nabla -12.14 \sim \nabla -25.64$ m, 厚 1.5 m, 衬后最小内径 16.0 m, 底板厚 2 m。

内衬墙采用逆作法施工, 设计 3 m 一层, 而实际施工按 6 m 一层开挖和衬护。土方开挖及衬砌 2012 年 2 月开工, 2012 年 8 月 15 日开挖到底, 8 月 16 日开始浇筑底板, 8 月 20 日开始浇筑 $\nabla -18.14 \sim \nabla -25.64$ m 段内衬墙, 11 月 8 日盾构破洞门, 12 月 14 日盾构机出洞, 2013 年 5 月 10 日开始加高接收井至 $\nabla 7.00$ m 高程。接收井围护结构见图 1。接收井土方开挖和内衬墙施工过程见图 2。

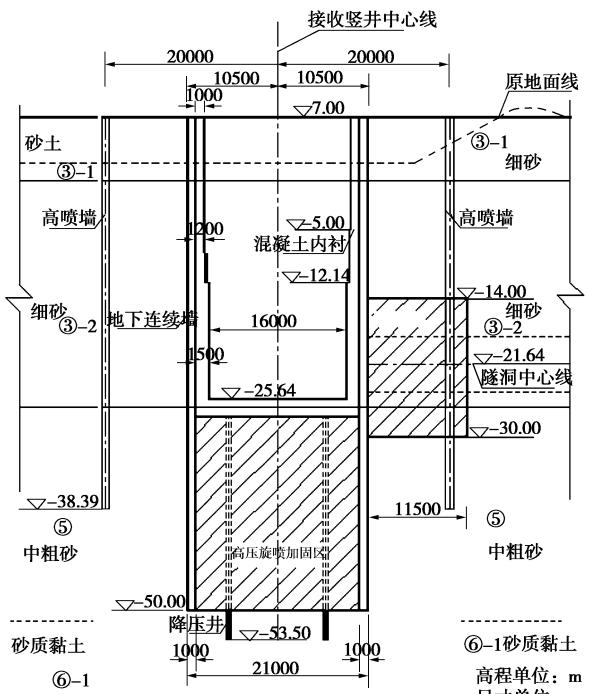


图 1 接收井结构剖面

Fig. 1 Sectional structure of receiving shaft

2 工程地质

湛江湾宽约 2.5~4 km, 海水最大深度 38 m 左右, 海底高程 2~36 m, 接收井所处南三岛陆地沙滩地面高程一般 2~5 m, 坡度 <5°, 地形平缓。

区域地层岩性主要为深厚第四系地层。工程区出

露的第四系地层主要有: 中全新统海风混积③-1 层、中全新统海相沉积③-2 层、中更新统北海组⑤和下更新统湛江组⑥层等。盾构隧道接收井地层主要为③-2 (淤质细砂、淤质中细砂, 层厚 21.3~24.5 m, 埋深 3.0~3.7 m)、⑤层 (中粗砂、粗砂、砾砂, 层厚 20.7~21.5 m, 埋深 25.0~27.5 m)。该两土层的主要物理力学参数^[1]见表 1。

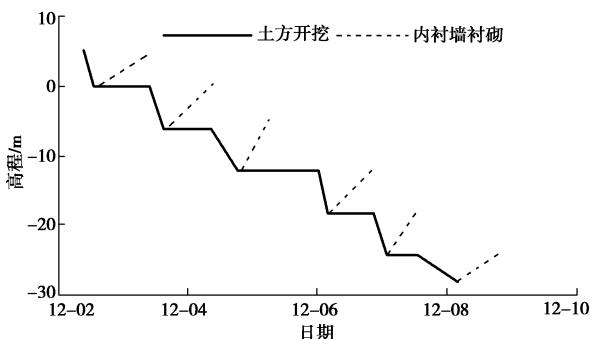


图 2 坚井土方开挖和内衬墙衬砌施工过程

Fig. 2 Earth excavation and lining construction process of shaft

3 钢筋应力监测布置

选地下连续墙#2 槽段中部及相对应的内衬墙作为一个监测断面, 在不同高程水平环向及竖直向, 分别在连续墙和内衬墙内侧主筋上安装 4 支, 共 8 支钢筋计监测支护混凝土结构中的钢筋应力。以量测钢筋应力随竖井开挖衬砌施工的变化, 推算支护结构的内力, 了解结构内部应力分布情况, 以指导施工和反馈设计。竖井钢筋计安装情况见表 2, 测点平面布置见图 3。

表 2 竖井钢筋计安装情况

Table 2 Installation of reinforcement meters in shaft

仪器 编号	安装日期	安装位置	安装 方向
R1-1	2011-12-28	地下连续墙#2 槽段-24.5 m 高程内侧主筋上	水平环向
R1-2	2011-12-28	内衬墙-15 m 高程内侧主筋上, R3-1 与 R1-1 相对应, R3-2 与 R1-2 相对应	竖直
R2-1	2011-12-28	地下连续墙#2 槽段-15 m 高程内侧主筋上	水平环向
R2-2	2011-12-28	内衬墙-23.5 m 高程内侧主筋上, R4-1 与 R2-1 相对应, R4-2 与 R2-2 相对应	竖直
R3-1	2012-06-10	内衬墙-15 m 高程内侧主筋上, R3-1 与 R1-1 相对应, R3-2 与 R1-2 相对应	水平环向
R3-2	2012-06-10	内衬墙-23.5 m 高程内侧主筋上, R4-1 与 R2-1 相对应, R4-2 与 R2-2 相对应	竖直
R4-1	2012-07-09	内衬墙-23.5 m 高程内侧主筋上, R4-1 与 R2-1 相对应, R4-2 与 R2-2 相对应	水平环向
R4-2	2012-07-09	内衬墙-23.5 m 高程内侧主筋上, R4-1 与 R2-1 相对应, R4-2 与 R2-2 相对应	竖直

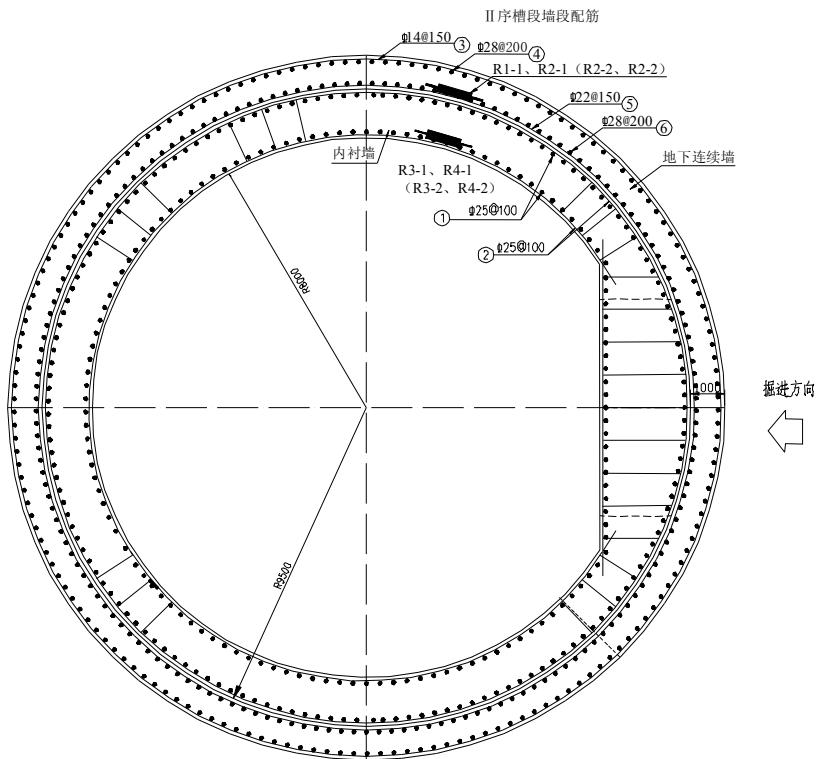


图 3 竖井钢筋计平面布置示意图

Fig. 3 Layout of reinforcement meters in shaft

4 监测分析

4.1 应力变化及分布分析

竖井地下连续墙 4 支钢筋计施工期的应力变化过程见图 4 (拉应力为正, 压应力为负, 下同), 内衬墙 4 支钢筋计施工期的应力变化过程见图 5。各钢筋计应力值最大变化速率见表 3。

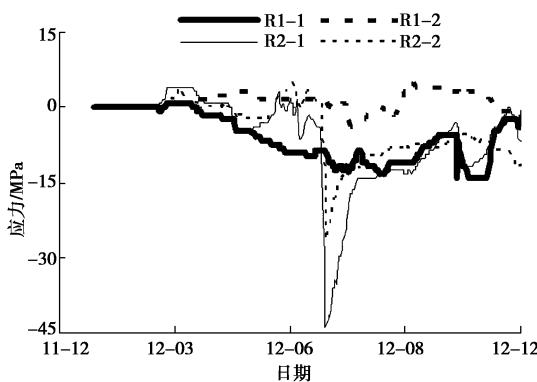


图 4 竖井地下连续墙各测点钢筋应力变化过程

Fig. 4 Variation process of reinforced stress at each measuring point of diaphragm wall

监测成果表明: ①连续墙和内衬墙结构底部竖向钢筋计 (R1-2 和 R4-2) 应力值呈较小的应力值, 其余测点的钢筋计处于受压状态。②同高程水平环向钢筋

计压应力值较同期竖直向钢筋计压应力值大, 地下连续墙-15 m 高程的两支钢筋计 (R2-1 和 R2-2) 应力变幅较-24.5 m 高程的两支钢筋计应力变幅值大。③2012 年 6 月底, 在浇筑完-12.14~ -18.14 m 段内衬墙混凝土时, 连续墙处于-15m 高程两支钢筋计 (R2-1 和 R2-2) 及内衬墙 R3-1 水平环向钢筋计压应力剧增, R2-1 和 R3-1 最大变化速率为-14.24 MPa/d 和-27.66 MPa/d, 压应力值分别达到-43.98 MPa 和-32.27 MPa, 内衬墙早于连续墙承受应力增量, 但连续墙承担应力大。④2012 年 7 月, 在浇筑完-18.14~ -24.14 m 段内衬墙混凝土时, 处于-23.5 m 高程的 R4-1 水平环向钢筋计压应力剧增, 其最大变化速率为-9.06 MPa/天, 压应力值达到-61.95 MPa。⑤连续墙和内衬墙的最大压应力分别为 R2-1 和 R4-1 两支水平环向钢筋计测得, 最大压应力值分别为-43.98 MPa 和-61.95 MPa, 相应的混凝土最大压应力值分别达到-6.16 MPa 和-9.29 MPa。

竖井结构钢筋应力分布分析: ①同高程时, 内衬墙水平环向钢筋承受的压应力值大于连续墙水平环向钢筋承受的压应力值; 内衬墙竖直向钢筋承受的压应力值大于连续墙竖直向钢筋承受的压应力值。②连续墙竖井中部钢筋应力值均大于竖井底部钢筋应力。③内衬墙: 靠井底内侧水平环向钢筋 (R4-1) 承受的压应力大于井中部内侧水平环向钢筋承受的压应力。靠

井底内侧竖直向钢筋 (R4-2) 承受的压应力小于井中部内侧竖直向钢筋 (R3-2) 承受的压应力。

表 3 竖井各钢筋计应力值最大变化速率

Table 3 Maximum change rate of stress at each reinforcement metre in shaft

最大变化			最大变化		
测点	速率 /(MPa·d ⁻¹)	发生日期	测点	速率 /(MPa·d ⁻¹)	发生日期
R1-1	-8.67	2012-10-12	R3-1	-27.66	2012-06-27
R1-2	-3.83	2012-12-13	R3-2	-3.28	2012-07-05
R2-1	-14.24	2012-06-29	R4-1	-9.06	2012-07-18
R2-2	-12.05	2012-06-29	R4-2	-2.34	2012-07-16

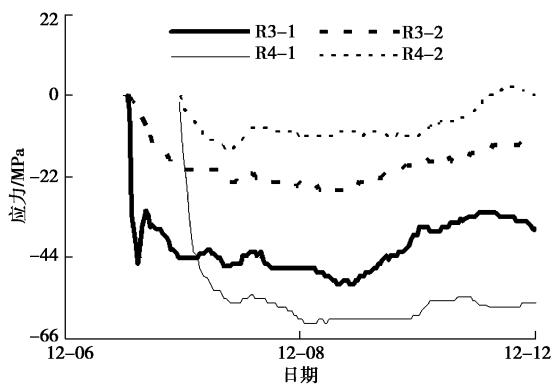


图 5 竖井内衬墙各测点钢筋应力变化过程

Fig.5 Variation process of reinforced stress at each measuring point of lining wall

4.2 施工影响分析

竖井地下连续墙 4 支钢筋计在各施工阶段的应力均值见图 6, 内衬墙 4 支钢筋计在各施工阶段的应力均值见图 7。

结果表明: ①竖井从上往下开挖衬砌, 地下连续墙内除 R1-2 外的其它 3 支钢筋计压应力值逐渐增大, 当开挖到第五层时增大明显; ②当开挖衬砌至第五层 ($\nabla-18.14 \sim \nabla-24.14$ m) 和第六层 ($\nabla-24.14 \sim \nabla-28$ m)

m) 时, 连续墙压应力值基本达到最大, 处于最危险工况。③内衬墙各钢筋计在各施工阶段均呈受压状态; ④除 R4-1 钢筋计在施工完成后压应力达到最大值外, 当开挖衬砌至第六层 ($\nabla-24.14 \sim \nabla-28$ m) 时, 其它 3 支钢筋计压应力值达到最大, 反映在开挖衬砌第六层时, 内衬墙受力最大。

根据施工影响分析情况, 绘制在竖井开挖衬砌第五层 ($\nabla-18.14 \sim \nabla-24.14$ m)、第六层 ($\nabla-24.14 \sim \nabla-28$ m) 和施工完成后地下连续墙及内衬墙中各测点极值应力分布图, 见图 8~10, 从图中可知: ①应力最大的为水平环向的 R2-1、R3-1 和 R4-1 三支钢筋计, 且均呈受压状态。②R2-1 钢筋计最大压应力值为 -43.98 MPa, 发生在竖井第五层 ($\nabla-18.14 \sim \nabla-24.14$ m) 施工时; ③R3-1 和 R4-1 钢筋计最大压应力均发生在竖井施工完成后, 应力值分别为 -51.51 MPa 和 -61.95 MPa。

5 安全度分析

根据《压力容器 第三部分: 设计》^[2], 竖井连续墙和内衬墙结构均可视为薄壁筒进行结构分析, 认为应力沿壁厚均匀分布。在施工期间, 竖井连续墙和内衬墙受力除受温度影响和局部受施工机械影响外, 主要受井外水土压力的作用, 在同一高程的环截面可认为是仅受外压均布荷载的作用。监测成果表明地下连续墙和内衬墙都是水平环向结构应力值大于竖向的结构应力值, 因此选取结构水平环向最大钢筋应力值 σ_s , 根据变形协调原理^[3]算得混凝土应力值 σ_c , 从而计算单宽截面结构内力的安全系数来复核结构安全度。计算成果见表 4。

从表 4 可知: ①竖井开挖衬砌期间, 地下连续墙在 -15 m 和 -24.5 m 高程结构环向受力安全系数分别为 1.72 和 5.67, 内衬墙在 -15 m 和 -23.5 m 高程结构环向受力安全系数分别为 1.84 和 1.51。②施工完成后,

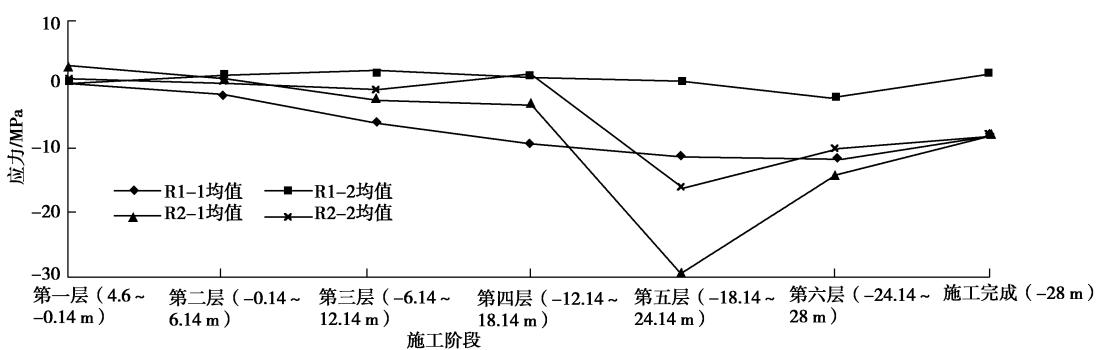


图 6 竖井地下连续墙各钢筋计各施工阶段应力均值图

Fig. 6 Average stress at each reinforcement metre at all stages of construction of diaphragm wall

表 4 坚井结构环向受力安全度计算成果

Table 4 Calculated results of circumferential pressure safety of shaft structure

项目	开挖衬砌期(2012-02-17~2012-08-25)				施工完成后(2012-08-26~2013-05-14)			
	连续墙结构		内衬墙结构		连续墙结构		内衬墙结构	
高程/m	-15	-15	-15	-23.5	-15	-24.5	-15	-23.5
安全系数 f	1.72	1.84	1.84	1.51	5.72	5.38	1.68	1.40
发生日期	2012-06-29	2012-08-20	2012-08-20	2012-08-25	2012-06-29	2012-10-12	2012-09-15	2012-09-04

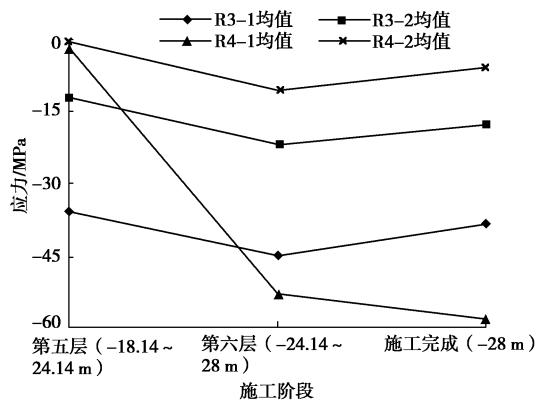


图 7 坚井内衬墙各钢筋计各施工阶段应力均值图

Fig. 7 Average stress at each reinforcement metre at all stages of construction of lining wall

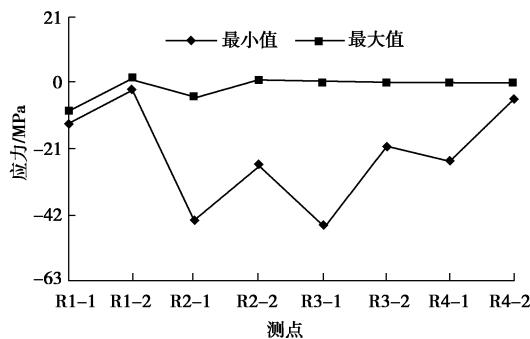


图 8 坚井各测点在开挖衬砌第五层时的极值应力分布

Fig. 8 Extreme stress distribution at each reinforcement metre of fifth layer of earth excavation and lining construction of shaft

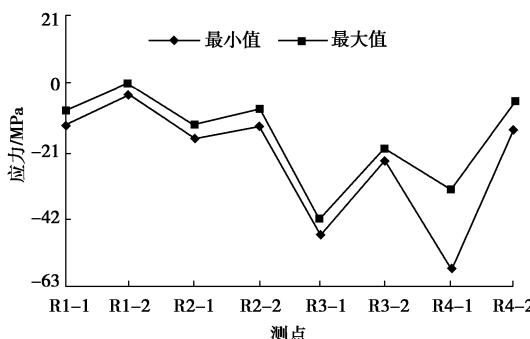


图 9 坚井各测点在开挖衬砌第六层时的极值应力分布

Fig. 9 Extreme stress distribution at each reinforcement metre of sixth layer of earth excavation and lining construction of shaft

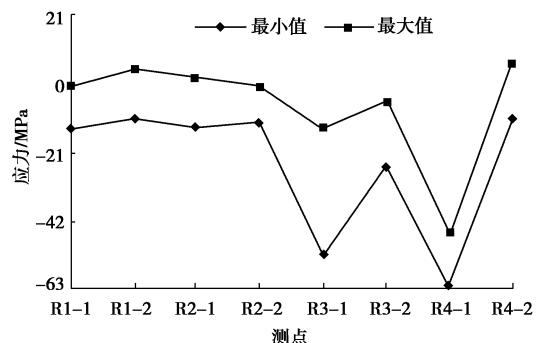


图 10 坚井各测点在开挖衬砌完成后的极值应力分布图

Fig. 10 Extreme stress distribution at each reinforcement metre after construction of shaft

地下连续墙-15 m 和-24.5 m 高程结构环向受力安全系数分别为 5.72 和 5.38，内衬墙-15 m 和-23.5 m 高程结构环向受力安全系数分别为 1.68 和 1.40。③坚井支护结构在开挖衬砌施工期和施工完成后的结构安全系数均大于规范 SL191—2008 对 1 级钢筋混凝土结构 1.35 的安全系数要求。

6 结 论

(1) 坚井地下连续墙和内衬墙施工期钢筋及混凝土应力值均在规范规定的容许应力值范围内，地下连续墙和内衬墙在施工期间及施工完成后实际安全度满足规范要求，坚井可按 6 m 一段开挖衬砌施工，3 m 一段的施工设计偏于保守。

(2) 地下连续墙及内衬墙墙体施工期表现为受压状态。地下连续墙及内衬墙同高程水平环向钢筋计均比竖直向钢筋计压应力大。地下连续墙中部墙体施工期水平环向和竖直向压应力均比井底部墙体压应力大。内衬墙墙体水平环向压应力表现为下部比上部大，竖直向压应力表现为下部比上部小。

(3) 施工期环向钢筋应力较竖向钢筋应力发展快，内衬墙钢筋应力变化速率最大值的发生早于连续墙，内衬墙早于连续墙承受应力增量，但连续墙早期承担应力大。同高程时内衬墙水平环向钢筋承受的压应力值大于连续墙水平环向钢筋承受的压应力值，后期以内衬墙承受荷载为主。

(4) 当开挖衬砌至第五、第六层时, 钢筋计压应力值基本达到最大, 反映在开挖衬砌第五、第六层时, 处于最危险工况。连续墙竖井中部钢筋应力值均大于竖井底部钢筋应力, 连续墙最危险截面在中部。

参考文献:

- [1] 严振瑞, 赖瑞山, 秦晓川, 等. 湛江市鉴江供水枢纽工程湛江湾跨海盾构隧道方案设计专题报告[R]. 广州: 广东省水利电力勘测设计研究院, 2011. (YAN Zhen-rui, LAI Rui-shan, QIN Xiao-chuan, et al. Special report for the design of Zhanjiang bay sea-crossing shield tunnel of water supply hub project of Jianjiang river[R]. Guangzhou: Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, 2011. (in Chinese))
- [2] GB150.3—2011 《压力容器 第三部分: 设计》[S]. 2011. (GB150.3—2011 Pressure vessels-part 3: Design[S]. 2011. (in Chinese))
- [3] SL191—2008 水工钢筋混凝土结构设计规范[S]. 2008. (SL191 — 2008 Design code for hydraulic concrete structures[S]. 2008. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)