



港珠澳大桥超大断面隧道混凝土裂缝控制技术

刘可心^{1,2}, 吴柯^{1,2}, 刘豪雨^{1,2}

(1. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430040)

摘要: 港珠澳大桥岛隧工程超大断面隧道混凝土包括预制沉管混凝土和人工岛现浇隧道混凝土, 具有强度高、结构尺寸大、服役环境恶劣、控裂要求高且难度大等特点。其中预制沉管采用工厂法预制, 全断面浇筑, 采取片冰和制冷水拌合混凝土、喷雾养护等温控措施; 人工岛隧道混凝土现场浇筑, 采取合理分段分层、冷却水管、补偿收缩混凝土等温控措施。从施工现场情况来看, 均未出现有害温度裂缝, 温控效果良好, 达到了预期的温控目标。

关键词: 超大断面; 预制沉管; 现浇结构; 人工岛; 温度裂缝; 控制技术; 补偿收缩

中图分类号: TU 528

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2015)08-0139-05

Crack control technology for concrete of super-large section tube of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge

LIU Ke-xin^{1,2}, WU Ke^{1,2}, LIU Hao-yu^{1,2}

(1. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. Hubei Key Lab of Advanced Materials and Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures, Wuhan 430040, China)

Abstract: As the high concrete strength, large size and severe service environment for super-large section tunnel which includes the precast immersed tube and the cast-in-situ tunnel in the artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge, crack control of concrete is difficult. Harmful cracks can be controlled effectively by a series of treatment measures during the construction period such as precasting in the factory, one-piece casting, controlling concrete raw material temperature, mixing concrete with ice shavings and cooling water, setting up automatic curing system for the precast immersed tube and reasonable layered and segmented, water pipe cooling, compensating contraction concrete for the cast-in-situ tunnel. Moreover, the harmful crack does not appear in both the precast immersed tube and the cast-in-situ tunnel appear and the prospective objective of temperature control is achieved.

Keywords: super-large section; precast immersed tube; cast-in-situ tunnel; artificial island; thermal crack; control technology; compensating contraction

港珠澳大桥是当今世界上规模最大、标准最高、技术最复杂的桥-岛-隧一体化的集群工程, 全长 35.6 km。其主体岛隧工程共分为东西人工岛岛体及岛上建筑、东西人工岛非通航孔桥、海中预制沉管隧道、岛上现浇隧道等部分。隧道沉管段长约 5.664 km, 东西人工岛隧道大约为 625 m, 岛上的暗埋段长约 163 m, 敞开段长约 398 m, 隧道总长约 6.75 km。隧道混凝土强度等级为 C45,

结构复杂, 浇筑方量大, 属于超大断面隧道混凝土结构。为确保港珠澳大桥主体工程的使用寿命, 必须采用有效温控措施控制超大断面混凝土裂缝的产生^[1-2]。

港珠澳大桥沉管隧道和人工岛暗埋段隧道具有如下共同特点^[3]: 1) 混凝土设计强度高。混凝土强度等级为 C45, 混凝土胶凝材料用量较多, 水化温升高, 混凝土开裂风险大。2) 结构复杂, 尺

收稿日期: 2015-05-28

作者简介: 刘可心 (1982—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计工作。

寸庞大。采用双孔单廊道结构设计，其中大体积混凝土控裂难度高。3) 混凝土方量大。沉管单次浇筑方量为 3 420 m³，暗埋段、敞开段混凝土单次浇筑方量也在 1 000 m³。4) 结构壁厚。沉管侧壁以及人工岛暗埋段、敞开段侧壁壁厚均大于 1 m，为大体积混凝土结构，内部热量难以散发，内部温度较高，内外温差较大，混凝土内表温差较大。5) 孤岛施工，施工条件限制。沉管预制厂位于桂山岛，岛上隧道分别在东西人工岛现场浇筑，施工浇筑场地有限，水电资源缺乏，施工控制难度大。

1 裂缝控制整体思路

1.1 沉管预制控制思路

沉管隧道采用工厂化预制。为减小外部约束，提高结果的整体性，采用全断面浇筑，内部不埋设冷却水管。在优选原材料、优化配合比设计基础上，采用降低原材料温度，并结合冷却水 + 碎冰的方式控制沉管混凝土的浇筑温度；利用工厂化预制厂房相对封闭的环境，开发自动养护系统，根据监控结果调节养护的湿度和温度，确保构件能得到充分养护，降低开裂的风险^[5]。

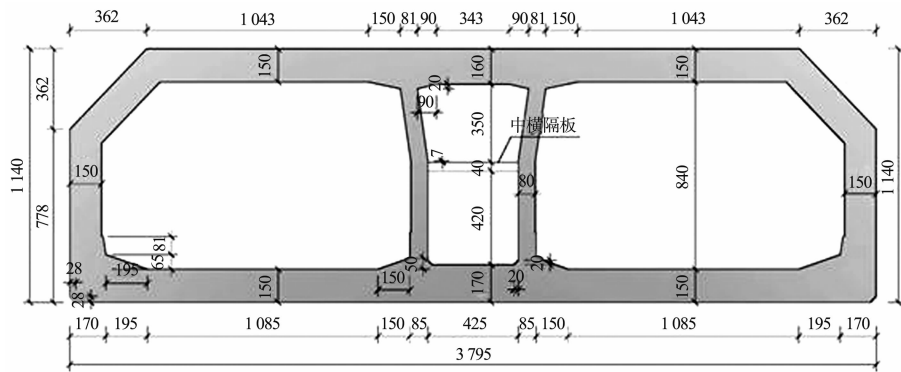


图 1 预制沉管横截面 (单位: cm)

1.2 岛上隧道控制思路

人工岛隧道采用现场浇筑。由于岛上水电资源均较为匮乏，施工作业空间十分有限。受现场浇筑供应、模板等条件的限制，一次浇筑成型难以实现，根据构件结构设计合理的分层。人工岛暗埋段分为 3 次浇筑施工，即第 1 次浇筑底板整体和部分高度侧墙，第 2 次浇筑中隔墙和两道侧

墙，第 3 次浇筑剩余顶板部分。通过合理的分层，选择合适的分层面，避开关键截面，能有效减小约束，同时缩短浇筑间隔时间，减少上下层收缩差，降低收缩应力。同时在采用骨料遮阳、碎冰拌合等措施的基础上，采用布置加密冷却水管、使用补偿收缩混凝土等方式，降低混凝土内部温度，减小上下层的收缩差，从而控制构件裂缝的产生。

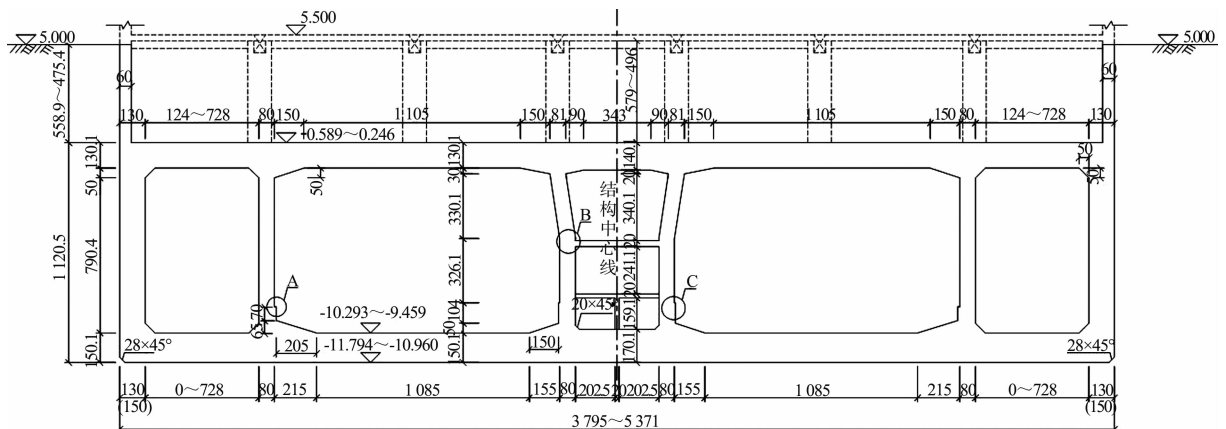


图 2 暗埋段隧道横截面 (高程: m, 尺寸: cm)

2 混凝土配制

港珠澳大桥岛隧工程的结构特点决定了沉管和岛上隧道都是一个超大断面、钢筋密集的复杂箱型结构。要求混凝土具有良好的工作性、高抗裂、低渗透和耐久性。

2.1 原材料

1) 水泥: 采用华润平南 P II 42.5 硅酸盐水泥; 2) 粉煤灰: 采用谏壁 I 级和 II 级粉煤灰; 3) 矿粉: 采用首钢盾石牌 S95 级矿粉; 4) 碎石: 5 ~ 20 mm (5 ~ 10 mm 碎石与 10 ~ 20 mm 碎石的质量比为 3:7) 连续级配花岗岩碎石; 5) 河砂: 采用西江上游 (梧州段) II 级配区要求的中粗砂 (细度模数 2.5 ~ 3.0); 6) 外加剂: 采用江苏博特聚羧酸盐高性能减水剂 (减水率不低于 25%)。

2.2 混凝土配合比设计

依据预制沉管混凝土的配制要求, 在兼顾混凝土工作性、耐久性等性能的基础上配制低热、低收缩的海工高性能混凝土^[6]。采用水泥-粉煤灰-矿粉三元胶凝材料体系, 通过大掺量粉煤灰、矿粉, 在改善混凝土工作性的同时, 降低混凝土的温升。通过综合性能对比, 结合混凝土温度应力测试试验、现场小尺寸模型试验以及足尺模型试验, 优选出满足力学性能、耐久性要求, 并具有良好抗裂性能以及外观的沉管施工用混凝土^[7]。人工岛暗埋段、敞开段配合比在沉管混凝土基础上进行。在此基础上优化混凝土胶凝材料用量、复掺比例、水胶比、砂率等。

表 1 混凝土配合比

部位	水泥	粉煤灰	矿粉	碎石(大)	碎石(小)	砂	水	减水剂
沉管	189	105	126	733	314	775	147	4.20
暗埋段	189	105	126	812	270	752	143	3.36

同时还进行了补偿收缩混凝土试验, 即选择合适的膨胀种类和掺量, 使混凝土内膨胀适当补偿混凝土自身收缩和化学收缩, 减少收缩差。由混凝土的长期收缩测试结果可知, 室内自然条件下暗埋段隧道混凝土 68 d 的收缩率为 279×10^{-6} , 采取有效的养护措施收缩大幅度率降低, 为 152×10^{-6} , 掺加膨胀剂的隧道混凝土自然条件和洒水养护收缩率分别降低为 195×10^{-6} 和 73×10^{-6} 。综合分析, 合理地养护和掺加膨胀剂均可大幅度降低混凝土的收缩率, 进而降低暗埋段隧道混凝土开裂的风险和裂缝程度。

3 温控措施

3.1 原材料温度控制

3.1.1 粉料温度控制

沉管混凝土以及岛上隧道混凝土粉料温度控制措施基本相同, 主要包括以下几点: 1) 严格按照合同要求控制粉料的出厂温度, 进场粉料需在实验室进行检测符合要求后才能上料; 2) 搅拌站罐体及中间仓刷白处理, 并在罐体周围设喷水系统。

3.1.2 骨料温度控制

沉管混凝土以及岛上隧道混凝土都设置了砂石料料棚, 防止阳光直晒。使用遮阳棚能保证骨料温度低于环境温度 $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。沉管预制厂还在料棚顶设喷水雾系统, 降低料棚内环境温度。同时搅拌站砂石上料皮带封闭通冷风降温。见图 3。



图 3 上料机皮带通冷风

3.2 混凝土浇筑温度控制

降低混凝土的浇筑温度对控制混凝土裂缝非常重要。相同混凝土, 浇筑温度高的温升值要比浇筑温度低的大许多。桂山岛浇筑温度控制主要以原材料温度控制为重点, 以片冰和制冷水拌和

混凝土为保证。人工岛现浇隧道则主要依靠安装冷却水管措施。

3.2.1 制冷水拌和

低温冷水拌和降温是最为经济、便捷和节能的降温方法^[8]。桂山沉管预制场采用的是冷水机制冷，制冷水能力为 10 t/h，24 h 能够生产 240 t 冷水，同时还配备冷水池 2 个，尺寸为 7 m × 3.5 m × 2.5 m，能够储存冷水 60 t/个，共 120 t。

3.2.2 片冰拌和

以冰代水，利用冰融化为水的相变潜热降温，是目前混凝土预冷工程的有效措施，在许多工程中都得到了应用^[8]。1 kg 片冰融化为水，大约需要吸收 335 kJ 热量，考虑到搅拌过程中的冷量损失，根据工程经验，每加入 10 kg 的冰至少可使 1 m³新拌混凝土降低 1 ℃，通常高温季节可考虑加冰量 30 ~ 60 kg/m³。桂山沉管预制场冰机制冰能力为 3 t/h，配备冰库扒冰系统和空调系统。

3.2.3 碎冰拌和

东西人工岛采用碎冰拌和混凝土。采购成品块冰，使用碎冰机进行破碎后，通过皮带机和砂石一起进入搅拌机。碎冰投放量为 30 kg/m³，单个拌和楼用冰量约为 600 kg/h。不锈钢碎冰机具体性能为：长 × 宽 × 高 = 950 mm × 500 mm × 1 150 mm，机电配制 380 V/4 kW，碎冰质量 25 kg，产量 3 ~ 5 t/h。

3.3 冷却水管布置

为减小外部约束、提高结构的整体性，沉管混凝土采用全断面浇筑，内部不埋设冷却水管。

岛上隧道底板、侧墙均布设冷却水管，水管水平间距为 80 cm，垂直管间距为 80 cm，单套水管长度不大于 200 m。同时为了减少墙体上下层混凝土由于混凝土浇筑龄期差引起混凝土裂缝，经过计算，在外墙下部靠近施工缝部位 3 m 范围内加密布置 30 cm 间距的冷却水管来减小混凝土因降温引起的收缩，从而达到防裂的效果。

3.4 混凝土养护

沉管混凝土利用工厂化预制厂房相对封闭的环境，开发自动养护系统，混凝土浇筑完毕后，对混凝土进行覆盖土工布洒水保温保湿。对拆模

后的管节使用养护棚进行养护。图 4 为养护系统，图 5 为养护工艺。

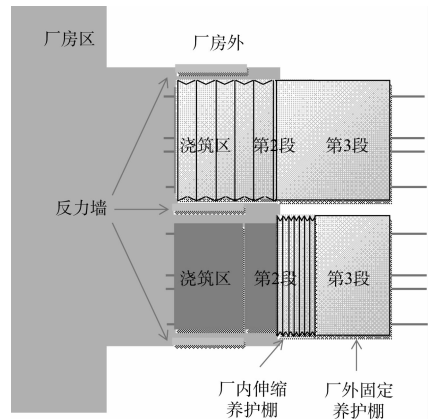


图 4 养护系统

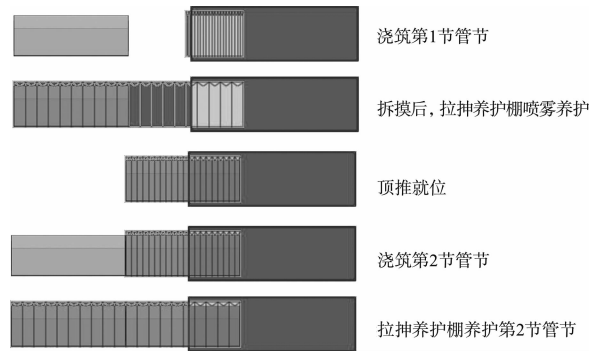


图 5 养护工艺

经过现场认证，喷雾后湿度基本达到 90% 以上，满足预制沉管养护要求。

岛上隧道混凝土主要采取带模养护，延长拆模时间。拆模后，包裹土工布进行保湿养护的方式进行养护。

4 温控效果

沉管预制严格按温控措施的要求进行，温控措施实施情况较好。监测混凝土浇筑温度、最高温度、内表温差等都得到了较好的控制，从现场观测结果来看，目前还未发现有有害裂缝。人工岛现浇隧道结构由于现场施工条件限制，先期出现墙体开裂问题，后期通过综合采用加密冷却水管、补偿收缩混凝土措施，开裂问题也得到了有效控制。

5 结论

港珠澳大桥超大断面混凝土强度高、结构尺寸大, 工程区域气候炎热、腐蚀环境恶劣, 控裂要求高、难度大。根据现场条件和施工工况, 设计合适的养护措施, 现场结果表明, 港珠澳大桥岛隧工程超大断面隧道混凝土未出现有害裂缝, 控裂效果良好。施工经验如下: 1) 优选原材料、优化配合比是混凝土温控的基础, 通过大掺量矿粉和粉煤灰, 降低水泥用量, 降低收缩和水化热, 降低混凝土开裂的风险。2) 预制构件, 宜采用全断面浇筑, 能有效保证混凝土的整体性, 减小混凝土内部约束。3) 现浇构件, 需要对分层面进行合理的划分, 避开关键截面, 减小混凝土底部约束, 同时应尽量缩短上下层混凝土浇筑间隔时间, 控制上下层混凝土收缩差。4) 港珠澳大桥岛隧工程超大断面隧道混凝土结构裂缝控制, 针对预制沉管、岛上现浇隧道等分别设计合理的温控措施, 有效控制混凝土有害裂缝的产生, 对类似工程具有参考意义。

(上接第 138 页)

胸墙混凝土施工养护包括: 顶面混凝土浇筑结束后进行二次振捣、两次抹面, 消除表面混凝土在初凝前产生的细微塑性收缩裂缝; 待表面稍微硬化后进行不间断喷雾养护, 避免高温下混凝土表面水分蒸发过快; 初凝后, 用淋透的土工布外加塑料薄膜及黑色编织布包裹, 形成 3 层保护, 达到保湿、保温的效果。并且水管通入塑料薄膜, 定期向土工布补充水分, 确保混凝土始终处在湿润的养护条件下, 养护龄期不低于 7 d。

通过 3 层覆盖和保持润湿的养护方案, 既克服了高温低湿对混凝土成熟期发展的不利影响; 又平稳地进行热量交换, 保持混凝土表面温度恒定, 降低混凝土内部温升, 减小了内外温差, 避免温度裂缝的产生。

4 结语

在 Ras Al Khair 港码头 5[#]、6[#]泊位胸墙大体积

参考文献:

- [1] 孟凡超, 刘晓东, 徐国平. 港珠澳大桥主体工程总体设计[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(上册). 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] 刘晓东. 港珠澳大桥总体设计与技术挑战[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [3] 李英, 陈越. 港珠澳大桥岛隧工程的意义及技术难点[J]. 工程力学, 2011, 28(S2): 67-77.
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [5] 李进辉, 李阳, 刘可心. 超大断面预制沉管混凝土控裂技术[J]. 混凝土, 2014(4): 146-151.
- [6] 李超, 王胜年, 王迎飞. 港珠澳大桥全断面浇筑沉管裂缝控制技术[J]. 施工技术, 2012, 41(22): 146-151.
- [7] 覃维祖. 混凝土的收缩、开裂及其评价与防治[J]. 混凝土, 2001(7): 3-7.
- [8] 翁定伯. 大体积混凝土预冷技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

(本文编辑 武亚庆)

混凝土施工中, 通过采取优化混凝土配比设计、严控原材料质量、优化混凝土浇筑工艺、精细混凝土养护等措施, 顺利地完成了现场施工并保证了质量, 未出现温度裂缝, 为后期同类型复杂环境下混凝土施工提供了经验。

参考文献:

- [1] ACI 305R-99 Hot Weather Concreting[S].
- [2] 刘松, 屠柳青, 裴炳志, 等. 荆岳长江公路大桥南塔承台大体积混凝土温度裂缝控制[J]. 施工技术, 2008, 37(12): 49-51.
- [3] 刘松, 屠柳青, 裴炳志, 等. 大掺量粉煤灰混凝土在荆岳长江公路大桥承台中的应用[J]. 粉煤灰综合利用, 2009(1): 41-43.
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

(本文编辑 武亚庆)