



# 船闸混凝土结构裂缝防治综合技术

孔繁龙

(扬州市航道管理处, 江苏 扬州 225003)

**摘要:** 通过对新建、在建船闸混凝土结构裂缝的调查, 对裂缝原因进行分析, 并结合施桥三线船闸工程实践, 提出船闸混凝土结构裂缝防治综合技术: 如基于仿真分析的减缩抗裂混凝土配合比优化设计技术; 运用衬垫模板结合脱水施工工艺, 提高表面抗裂性能; 聚苯板外保温技术; 优化结构设计、改善边界约束条件等。综合运用进行裂缝防治, 供科研、设计、监理及施工人员参考。

**关键词:** 船闸工程; 大体积混凝土; 结构裂缝; 防治技术

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0158-06

## Integrated technology of prevention and control of cracks on shiplock's concrete structure

KONG Fan-long

(Yangzhou Waterway Management Department, Yangzhou 225003, China)

**Abstract:** Based on the investigation of the crack on lock's concrete structure built and under construction, this paper analyzes the cause of the crack combining the engineering practice of Shiqiao third line ship lock. It puts forward a more comprehensive technology on prevention and control of the concrete crack, such as the optimization of concrete mix ratio based on the simulation analysis of anti-shrinkage and crack resistance of concrete; use of the liner templates in dehydration construction technology to improve the surface's crack resistance; polystyrene external thermal insulation technology; optimization of structural design, as well as improvement of boundary constraint conditions. The integrated application of crack prevention and control may serve as reference for the scientific research, design, supervision and construction.

**Key words:** lock engineering; mass concrete; structure crack; prevention and control technology

船闸工程混凝土结构, 如船闸廊道和闸室等, 在施工过程中易出现裂缝<sup>[1-2]</sup>, 这些裂缝会降低结构的耐久性, 影响结构的正常使用。在国内兴建的船闸中, 虽然已从设计和施工中采取了不少防护措施, 但收效甚微, 多数船闸的闸首和闸室产生了不同程度的裂缝, 还存在相当数量的贯穿裂缝。通过对江苏新建几座船闸的裂缝调查得知, 裂缝大多分布在以下部位: 1) 廊道内外侧转弯段, 阀门井与廊道连接处等; 2) 大面积闸室墙身及倒角(图1); 3) 钢筋混凝土结构开有孔洞处; 4) 大体积混凝土底板顶、侧表面等。

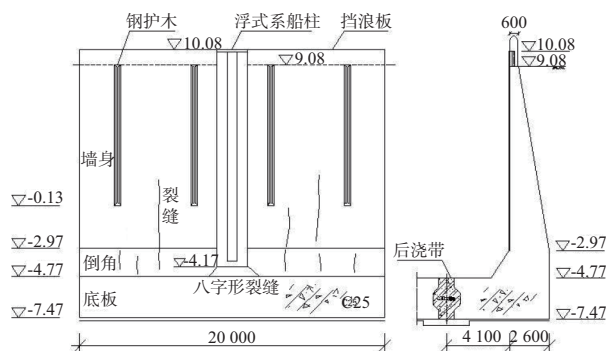


图1 船闸闸室裂缝

京杭运河船闸扩容工程施桥三线船闸在裂缝防治方面取得显著成效, 在2010年交通运输

收稿日期: 2012-07-27

作者简介: 孔繁龙(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事水运、公路、桥梁建设管理及施工技术研究。

部全国水运项目质量安全综合督查中，质量总分第一，“质量安全管理达到全国内河水运项目的最好水平”。施桥三线船闸位于一线船闸西侧，船闸按Ⅱ级船闸标准建设。船闸规模为 $23\text{m} \times 260\text{m} \times 5\text{m}$ （口门宽 $\times$ 闸室长 $\times$ 门槛水深）。船闸上下闸首采用钢筋混凝土整体坞式结构，输水系统采用环形短廊道集中输水结合三角门门缝输水的形式。闸室采用钢筋混凝土坞式结构。

本文结合施桥三线船闸的工程实践，阐述船闸混凝土结构裂缝的防治技术。

## 1 混凝土裂缝产生的原因

### 1.1 混凝土温度变化

混凝土硬化期间水泥放出大量的水化热，内部温度不断上升，在表面引起拉应力；后期在降温过程中，由于受到基础或既有混凝土的约束，又会在混凝土内部出现拉应力；气温的降低也会在混凝土表面引起很大的拉应力，当这些拉应力超出混凝土的抗裂能力时，即会出现裂缝。

### 1.2 混凝土湿度的变化

混凝土的内部湿度变化很小或变化较慢，但表面湿度变化较大或发生剧烈变化，如养护不周、时干时湿，表面干缩形变受到内部混凝土的约束，也往往导致裂缝。

### 1.3 混凝土的特性

混凝土是一种脆性材料，除抗拉强度外，承受拉应变的能力同样很差，很小的强迫受拉变形即可能造成其断裂。混凝土抗拉强度是抗压强度的 $1/10$ 左右，短期加荷时的极限拉伸应变只有 $(0.6 \sim 1.0) \times 10^{-4}$ ，长期加荷时的极限拉伸应变也只有 $(1.2 \sim 2.0) \times 10^{-4}$ 。

### 1.4 结构设计不合理

结构体型设计（如大体量结构之间的瓶颈部位等）或者构造做法失当（如廊道凹槽、内角曲率半径过小而引起应力集中等）都可能使结构刚度突变、体型失调或应力集中，从而引起裂缝；基础不均匀沉降。

### 1.5 施工引起的裂缝

混凝土原材料品质及配比、施工中的不均

匀、养护不当以及施工期施工荷载偶然作用后产生的残余裂缝。如原材料不合格（如碱骨料反应、集料含泥量超标）、不均匀，水灰比不稳定、运输和浇筑过程中的离析现象及施工缺陷等，在同一构件混凝土中其抗拉强度又是不均匀的，存在着许多抗拉能力低、易于出现裂缝的薄弱部位及模板变形等。

## 1.6 组合作用

混凝土产生的原因复杂，往往表现为2种或以上原因的组合作用。如温度与湿度的综合作用。如果混凝土表层气温过高或者养护不当，表层水分蒸发量超过一定程度，则由于毛细管的收缩作用，会在混凝土表层产生塑性收缩，进而产生裂缝。

## 2 裂缝防治技术

### 2.1 采用基于仿真分析的减缩抗裂混凝土配合比优化设计技术

“抗”“放”结合是裂缝控制原则。通过优化混凝土配比，提高混凝土本身的抗拉强度或极限拉伸来获得一定的抗裂效果，这是“抗”的裂缝控制原则<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.1 抗收缩开裂混凝土配合比优化设计方法<sup>[4]</sup>

在传统配合比设计基础上，以强度、施工性能、耐久性<sup>[5-6]</sup>和抗裂性能控制为混凝土整体优化设计目标。最主要的是减缩抗裂混凝土配合比优化设计，以最佳水灰比（水胶比）、矿物掺合料最佳掺量区间、临界骨料体积含量为关键控制参数，在达到关键参数的同时，满足混凝土强度和施工性能的要求，实现混凝土的整体优化。

最佳水灰比（水胶比）、矿物掺合料最佳掺量是混凝土强度设计时的约束条件。实际上，获得相同强度等级的混凝土可以有多种配比方案。对于常用强度等级混凝土（如C20~C40），在满足混凝土强度要求的多种可选配合比方案中，总能存在一个或者多个满足最佳水灰比（水胶比）和矿物掺和料最佳配合比控制区间要求的配合比，可以满足整体优化条件。

胶凝材料单独采用硅酸盐水泥时，最佳水灰比区间宜为 $0.50 \sim 0.60$ ；单独采用粉煤灰等量代

替部分水泥时,考虑到水化相微观孔隙结构的变化,依据混凝土的设计强度要求和所用水泥的强度等级,建议最佳水胶比区间控制在0.40~0.50范围内;采用粉煤灰、矿粉复掺方案时,最佳水胶比区间宜控制在0.45~0.55。

临界骨料体积含量是混凝土坍落度设计时的约束条件。胶结料浆体组成确定时,坍落度设计目标就决定了胶结浆体对骨料孔隙的填充系数和砂浆对粗骨料空隙的填充系数,因此,填充系数和粗骨料的堆积空隙率决定了混凝土最终能够达到的骨料体积含量。填充系数确定,坍落度满足设计要求,但无法达到临界骨料体积含量的约束条件要求时,可对骨料进行优选和组合,调节粗细骨料的堆积空隙率,通过骨料级配优化设计,在坍落度满足设计要求的同时,满足临界骨料体积分含量的限制要求,实现整体优化。

混凝土骨料体积分含量增大,总有利于减少混凝土的收缩,但由于稀释效应、湿扩散行程曲折效应和界面过渡区效应3方面的共同影响,追求过高的骨料体积分含量没有必要,也不现实。一方面,达到过高的骨料体积分含量需要级配好、空隙率低的优质砂石原料,不利于资源的有效利用,并增加了混凝土配合比设计的复杂性;另一方面,骨料体积分含量增大到一定程度时,骨料-水泥石界面过渡区的大量存在,加快水泥石干燥失水速度,将部分抵消因体积分含量增加而获得的减缩效果。

混凝土体积分含量自66%增大到70%时,混凝土的干燥收缩显著减小。高于68%时,混凝土的干燥收缩已显著降低,进一步增大骨料体积分含量,减缩幅度将明显减小,因此,混凝土配比设计时,以68%作为临界骨料体积分含量,可获得良好的收缩控制效果,并降低了配制难度。

考虑到不同胶凝材料的密度差别以及骨料体积分含量的限制条件,混凝土配合比设计应采用绝对体积法确定各种材料用量。具体步骤如下:

1) 依据工程特点以及施工方法确定混凝土的性能要求,并提出混凝土的设计指标:设计强度指标、耐久性限制指标、坍落度指标、减缩抗裂性能设计的定量控制参数指标。

2) 按照抗裂混凝土组成材料的选用原则初步确定胶凝材料的种类和组成。

3) 进行胶结浆体的组成优化设计。选取不同的胶凝材料组成方案,计算达到配制强度要求所需的水灰比(水胶比),从中选取满足耐久性指标、配比参数优化控制指标达到的胶结浆体组成,作为组成优化设计的胶结浆体。胶凝材料组成方案的改变可通过改变水泥强度等级、矿物掺和料种类和掺量实现。

4) 进行骨料组成优化设计。依据临界骨料体积分含量要求设定胶结浆体体积,初步选择一种细骨料,测定其空隙率。设定胶结浆体对细骨料的填充系数、砂浆对粗骨料的填充系数,计算满足临界骨料体积分含量要求时,粗骨料所需达到的最低空隙率。选取不同的粗骨料,对粗骨料级配进行优化设计,获得满足要求的粗骨料组成。由于原料来源限制,当粗骨料级配优化设计存在困难时,可选用级配好、空隙率低的优质细骨料,再次进行骨料优化。

5) 采用体积法计算各种材料的用量,获得初步计算配合比。

6) 试配、调整,再次验证是否满足配比参数优化设计指标,获得基准配合比。

7) 试配、调整,再次验证是否满足配比参数优化设计指标,获得试验室配合比。

8) 考虑砂石的含水量,确定最终施工配合比。

## 2.1.2 基于温度场和应力场仿真分析的船闸混凝土配合比优化设计<sup>[7]</sup>

### 2.1.2.1 建立计算模型

#### 1) 廊道。

廊道的有限元计算模型见图2a)。建模时以廊道进水口中心为坐标原点,船闸轴线方向为 $X$ 方向;铅直方向为 $Y$ 方向;船闸宽度方向为 $Z$ 方向。

计算模型中廊道取一个结构段长度,底板根据对称性取1/4进行计算,地基的计算范围为 $50\text{ m} \times 60\text{ m} \times 7\text{ m}$ ( $X \times Z \times Y$ 方向),整个结构热分析采用90单元,结构分析采用95单元。

#### 2) 闸室。

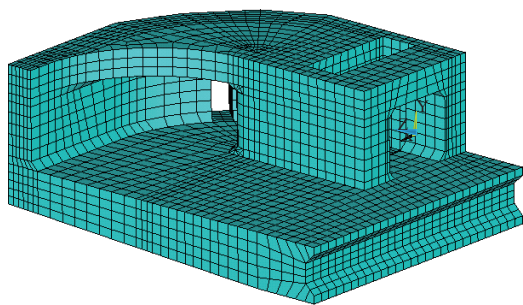
闸室的有限元计算模型见图2b)。建模时以



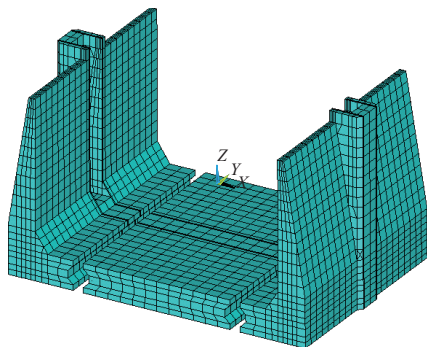
闸室宽度方向为 $X$ 方向, 轴线方向为 $Y$ 方向, 铅直方向为 $Z$ 方向。

计算模型中廊道取一个结构段长度(以第2节为计算对象), 地基的计算范围为 $60\text{ m} \times 40\text{ m} \times 7\text{ m}$ ( $X \times Z \times Y$ 方向), 整个结构热分析采用90单元, 结构分析采用95单元。

闸首和闸室混凝土强度等级为C25, 混凝土配合比优化设计中, 粉煤灰掺量分别为胶凝材料总量的8%, 15%, 25%。



a) 廊道



b) 闸室

图2 有限元计算模型

#### 2.1.2.2 通过不同配比, 计算温度和应力特征值, 进行比较

采用ANSYS分析软件对廊道和闸室不同混凝土配合比进行仿真分析, 通过比较廊道和闸室混凝土温度场、温度应力分布及其随时间变化的规律, 提出较优的混凝土配合比。

#### 2.1.2.3 结果

1) 采用优化配比混凝土的廊道和闸室最高温度、最高温升和内表温差皆小于初步设计材料的相应温度特征值, 温度特征值发生龄期基本相同。就有利于混凝土抗裂而言, 粉煤灰25%掺量的配合比组最优。

2) 就最大应力与相应龄期轴心抗拉强度的比值而言, 粉煤灰掺量较多的配合比粉煤灰15%掺量组、粉煤灰25%掺量组的计算结果优于粉煤灰8%掺量组, 以粉煤灰25%掺量组的计算结果最优, 以上所有材料应力特征值发生龄期基本相同。

#### 2.1.3 采用混凝土抗裂试验对配比设计进行评价、进一步优选

工程中通常采用环约束试验方法对水泥及水泥基胶凝材料进行抗裂试验, 运用平板法对不同配比的混凝土进行抗裂试验<sup>[8]</sup>对比、评价, 进一步优选。

#### 2.2 运用衬垫模板结合脱水施工工艺, 提高表面抗裂性能<sup>[9]</sup>

透水模板衬垫由耐碱性能优良的高分子聚合物纺织纤维材料和高分子聚合物排水网格复合而成; 分子聚合物纺织纤维材料均匀、密布、穿刺略大于水分子直径的微孔, 使混凝土中多余的水分在真空作用下能轻易透过微孔进入排水网格, 继而排出混凝土模板。使用透水模板衬垫, 可以使混凝土均匀脱水, 混凝土均匀致密, 有效地改善混凝土表面光洁度。

##### 2.2.1 混凝土脱水工艺试验

将透水模板衬垫垫于带孔的混凝土试模底部, 利用混凝土自重和振动压力可试验对比透水模板衬垫效果; 在混凝土振动密实后, 采用混凝土真空吸水机对试件进行真空脱水5 min, 脱水真空度维持在0.06~0.08 MPa, 再混凝土振动密实, 最后再次真空脱水5 min。

##### 2.2.2 工艺试验结论

1) 采用透水模板衬垫结合真空脱水技术, 在不改变混凝土配合比的前提下, 可有效降低混凝土表层水胶比, 减少混凝土表面气泡和孔隙, 提高混凝土密实性, 大大改善混凝土外观质量。通过真空脱水, 混凝土致密且干硬, 避免了混凝土塑性裂纹。

2) 采用透水模板衬垫结合真空脱水技术, 不仅提高混凝土表层强度, 而且提高了混凝土抗冲磨性能和混凝土抗渗性能。

施桥三线船闸在闸墙倒角部位混凝土浇筑

过程中,成功运用透水模板衬垫结合真空脱水工艺,取得了令人满意的效果。

### 2.3 掌握大体积混凝土的特性,抓住温控与养护两个关键环节

大体积混凝土在硬化过程中,由于水化热温度上升,体积发生变化,在混凝土体积发生变化的过程中发生约束的时候,就会产生温度应力,如图3所示。

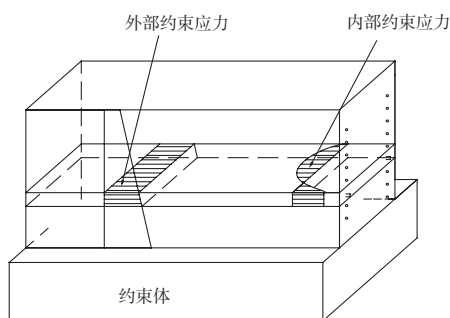


图3 水化热产生的温度应力模型

一般认为,温度应力有两种:内部约束应力和外部约束应力。内部约束应力由混凝土断面内产生温差而造成。由于内部约束应力的作用,在混凝土表面产生不规则的裂缝。外部约束应力是混凝土发生体积变化时,混凝土外部受到约束而产生的应力。在这种应力作用下的混凝土产生的裂缝,多发生在与约束面成直角方向,贯通整个混凝土断面<sup>[10]</sup>。

在混凝土内部不同部位埋设铜热电阻平均温度传感器或测温孔,用混凝土测定记录仪进行施工全过程的跟踪监测就可以在大体积混凝土的凝结硬化过程中随时了解混凝土内部的温度情况,及时摸清大体积混凝土不同深度温度场升降的变化规律,有的放矢地采取相应的技术措施,确保混凝土不产生过大的温度应力,避免温度裂缝的发生。

各项温控措施是相互联系、相互制约、互相补充的,而每项措施也各有利弊。在具体工程的设计和施工中根据温度应力计算和技术经济条件分析,结合实际情况和需要全面考虑,合理采取相应的措施。

在大体积混凝土施工中应增加温度观测与养护记录等施工记录,加强混凝土温控与养护管理。

笔者在对省内新建、在建船闸混凝土结构裂缝的调查中发现,闸墙混凝土竖向裂缝大多发生在建成后第一次冬季大幅降温(幅度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)后3~5 d内出现。为此,在闸墙混凝土浇筑后,运用聚苯板外保温技术<sup>[11]</sup>,在闸墙内外侧、倒角以上 $0.4H$ ( $H$ 为闸墙高度)范围<sup>[12]</sup>内覆盖聚苯板外保温材料,厚度一般为 $5\text{ cm}$ ,对闸墙大体积混凝土进行外保温防裂<sup>[11]</sup>。

### 2.4 优化结构设计、改善边界约束条件

#### 2.4.1 优选结构形式

大体积混凝土结构的类型对混凝土温度应力和裂缝有相当大的影响。特别是在寒冷地区,尽量避免选用对温度应力敏感的薄壁结构或暴露面积大、孔洞多而不太规整的结构形式。

#### 2.4.2 合理分缝分块

浇筑块越长,温度应力越大,暴露时间也可能越长,遇到的基础起伏和应力集中以及出现冷缝的机会也越多。因此将大体积混凝土分成较小的块体可以有效地避免这些问题。

#### 2.4.3 合理配筋及避免应力集中

配置钢筋虽然对贯穿裂缝作用不太明显,但在构造方面进行合理配筋可提高面层抗表面降温的影响和干缩,防止表面裂缝的产生;另外,在结构的孔洞周围、变断面转角等部位,由于温度变化和混凝土收缩会产生应力集中而导致混凝土裂缝,因此在这些地方还应增设一定量的抗裂钢筋。

#### 2.4.4 设置滑动层

混凝土由于边界存在约束才会产生温度应力,如果在与外约束的接触面上全部设置滑动层,则结构的计算长度可折减约一半。为此,若遇到约束强的岩石类地基、较厚的混凝土垫层时,可在接触面上设置滑动层,对减小温度应力将起到显著作用。滑动层的做法有:涂刷两道热沥青加铺一层沥青油毡,或铺设 $10\sim 20\text{ mm}$ 厚的沥青砂,或铺设 $50\text{ mm}$ 厚的砂或石屑层(或涂两层海藻酸钠)等。

#### 2.4.5 设置缓冲层

在高低底板交接处、底板地梁处等,用 $30\sim 50\text{ mm}$ 厚的聚苯乙烯泡沫塑料作垂直隔离,以缓冲基础收缩时的侧向压力。

#### 2.4.6 设置应力缓和沟

这是日本清水建筑工程公司研究成功的一种防止大体积混凝土开裂的新方法,即在混凝土结构的表面,每隔一定距离(结构厚度的1/5)设置一条沟<sup>[3]</sup>。设置应力缓和沟后,可将结构表面的拉应力减少20%~50%,能有效地防止表面裂缝。

#### 2.5 优化细节设计处理、加强结构抗裂的构造措施

设计对结构采取的防止裂缝的措施是控制裂缝出现和扩展的根本保证。

在一般常温 and 允许应力状态下,钢的性能是比较稳定的,其与混凝土的热膨胀系数相差不大,因而在温度变化时,钢与混凝土之间的内应力很小,而钢的弹性模量比混凝土的弹性模量大6~16倍。当混凝土的强度达到极限强度、变形达到极限拉伸值时,应力开始转移到钢筋上,从而可以避免裂缝的开展。

1) 设计在选择结构体系和计算时,应充分考虑温度和混凝土收缩的影响,确定合理的结构布置、合理的配筋率和构造处理。如合理划分温度区段,合理设置后浇带;适当增加水平钢筋的配筋率,配置直径较小、间距较密的水平钢筋,将水平钢筋置于竖向钢筋之外等都是在工程实践中得到证明的行之有效的裂缝控制措施。

工程实践证明,当混凝土墙体厚度为600 mm左右时,采取增加配置构造钢筋的方法,可使构造筋起到温度筋的作用,能有效地提高混凝土的抗裂性能。配置的构造钢筋应尽可能采用小直径、小间距,例如配置直径6~14 mm、间距控制在100~150 mm按全截面对称配筋是最合理的,这样可大大提高抵抗贯穿性开裂的能力。若进行全截面对称配筋,配筋率应控制在0.3%~0.5%<sup>[13]</sup>。

2) 在结构的孔洞周围、变断面转角部位、转角处等,由于温度变化和混凝土收缩,会产生应力集中而导致混凝土裂缝。为此,可在孔洞四周增配斜向钢筋、钢筋网片。在变断面处避免断面突变,可作局部处理使断面逐渐过渡,同时增配一定量的抗裂钢筋,这对防裂缝产生是有很大的作用的。对于大体积混凝土,构造筋对控制贯穿性

裂缝作用不太明显,但沿混凝土表面配置钢筋,可提高面层抗表面降温的影响和干缩。

对于容易引起裂缝的部位,做加筋肋,配置构造钢筋,对结构预留孔洞顶部(如透水孔及排气孔处)设置暗梁<sup>[3]</sup>(在等截面梁、板边沿区,增加构造配筋,形成暗梁)等,均可起到良好的‘模箍作用’从而提高结构的抗裂能力和控制裂缝的扩展。

3) 根据闸室墙裂缝的分布规律,宜在墙中部1/3墙高的范围,增加细而密的水平构造钢筋,以控制竖向裂缝和45 °方向裂缝;在结构的开口部位、截面尺寸变化部位应适当增加附加钢筋。这些措施都能有效地约束和分散温度收缩裂缝的出现和开展,优化相关的结构构造措施。

4) 在施桥三线船闸上、下闸首廊道内壁、转弯段凹曲面段和廊道支撑墩断面变化较大处增设D6定型冷轧带肋钢筋网片,紧贴水平构造钢筋外侧绑扎。

5) 对廊道内侧设置应力沟,由于裂缝走向的随机性,根据同类型船闸廊道两侧施工期出现基本相同裂缝位置的情况,设置应力沟(宽度为50 mm,深度至钢筋位置)。

6) 闸室浮式系船柱底部▽-4.17~▽-4.77 m预留二期浇筑,有效消除闸室墙倒角八字形裂缝;在浮式系船柱一期混凝土临土面增设0.8 m后浇带,改善闸墙约束条件。

### 3 结论

船闸混凝土结构裂缝防治是复杂的系统工程,涉及设计以及施工的各环节,需综合防治。施桥三线船闸综合采用抗裂混凝土配合比设计、优化构造措施(如设置暗梁、增设廊道防裂钢筋网片等)、在廊道设置应力缓和沟等一系列“抗”、“放”结合的措施,闸室墙墙身未发现一条可见裂缝,廊道亦仅在内壁、转弯段凹曲面段存在2条长度不足1 m,最大缝宽0.3 mm,深度小于3.5 cm的竖向可见裂缝。本文结合船闸工程实践提出的船闸混凝土结构裂缝的防治综合技术,已取得令人满意的显著成效。

(下转第194页)