



某码头胸墙混凝土裂缝控制技术

邓春林, 熊建波, 刘行, 潘德强

(中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通运输行业重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 根据国内某突堤式沉箱结构胸墙裂缝的统计情况, 利用解析法分析了分层浇筑工况下混凝土内部的拉应力、裂缝宽度等参数, 计算结果与现场观测结果较吻合。根据混凝土温度收缩应力的计算, 全断面浇筑时温度收缩应力大于分层浇筑。采取缩短分层浇筑时间间隔、或把分层浇筑改成全断面浇筑、降低基础阻尼系数、合理选择分段长度等措施, 可以较好控制混凝土的温度收缩裂缝。

关键词: 分层浇筑; 全断面浇筑; 约束应力; 收缩

中图分类号: TU 528.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0159-04

Concrete crack controlling technology for wharf's breast wall

DENG Chun-lin, XIONG Jian-bo, LIU Hang, PAN De-qiang

(Key Laboratory of Communication Industries for Durability Technology of Hydraulic Structures, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The tensile stress, crack width and other parameters are analyzed using the analytical method, and the calculation results agree well with those from the field observations. According to the calculation of concrete temperature shrinkage stress, the full-section pouring temperature shrinkage stress is larger than that of the layered pouring. Taking measures including shortening the time interval of pouring between two layers, changing the layered pouring into full-section pouring, lowering the foundation's damping coefficient, choosing a reasonable segment length, ect., we can control concrete's temperature shrinkage cracks effectively.

Key words: layered pouring; full-section pouring; restraint stress; shrinkage

1 工程概况

国内某码头为突堤式沉箱结构, 码头上部为现浇混凝土胸墙, 码头面高程为 6.0 m, 胸墙高度 4.8 m, 宽度约 17 m, 底部嵌入沉箱内 0.3 m。胸墙标准段分段长度为 12.5 m, 胸墙内设 3 个管廊。管廊高 3.0 m, 宽约 2.2 m。胸墙混凝土强度等级: 2.5 m 高程以下的部分为 C35, 其余部分为 C40。胸墙仅配有少量的构造筋, 为简化计算, 本文把胸墙当作素混凝土处理, 典型的结构断面见图 1。

由于胸墙高度较大, 为了更好地控制管廊的位置、线条和高程, 胸墙混凝土最初分 3 层浇筑, 第 1 层从 1.2 m 处浇筑至 2.5 m 处, 第 2 层由 2.5 m

浇筑至 5.5 m, 顶层的 0.5 m 作为第 3 层浇筑。第 1 层胸墙整体 1 次浇筑, 第 2 层分 4 块进行浇筑, 中间两块分别是 1.4 m 宽隔墙和 3.8 m 宽隔墙, 第 3 层胸墙面层整体一次性浇筑, 胸墙断面分层及分块见图 1。

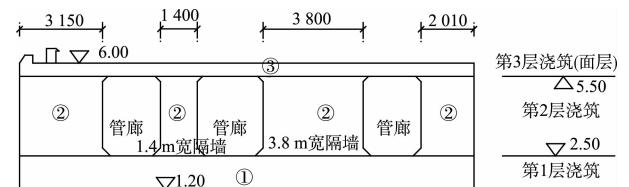


图 1 胸墙断面和分层分块浇筑

后期在分析裂缝原因的基础上, 采取了全断面浇筑方式, 即第 1 层和第 2 层混凝土 1 次性浇筑。

收稿日期: 2013-11-12

作者简介: 邓春林 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事建筑材料耐久性及混凝土裂缝研究。

2 混凝土裂缝特征

前58段胸墙采用图1所示的分层浇筑方式施工。第1层胸墙浇筑后，局部顶面有龟裂及干缩裂缝，直立面上无肉眼可见裂缝出现，立面表观质量较好，平整度、光泽度较高。第2层胸墙在第1层胸墙混凝土浇筑80~90d后进行，第2层胸墙混凝土浇筑后，每段胸墙直立面上出现2~4条裂缝，裂缝首次出现的时间一般是10~20d，并随着时间的推移不断扩展。裂缝主要为竖直向，分布在隔墙的中部与端部。图2为5段隔墙裂缝随时间的扩展情况，每段隔墙给出了3个时间点的裂缝情况，每个时间点统计了隔墙两个侧面的裂缝。从图2可以看出，隔墙两个侧面的裂缝基本呈对称分布，由底部向上逐渐扩展。

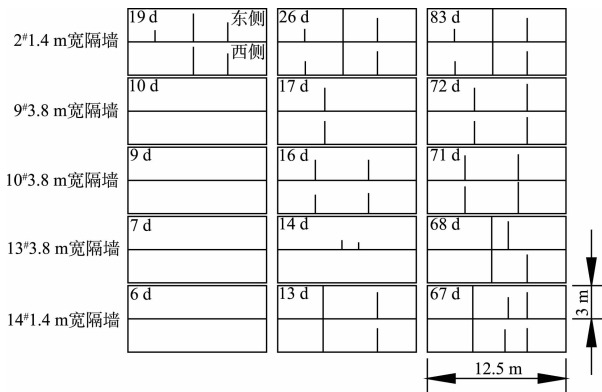


图2 典型构件裂缝的产生和扩展情况

在后续60段胸墙浇筑时，通过改装模板，将原有的分层施工工艺改为整体浇筑工艺。从后期对胸墙观察的结果，裂缝已得到很好的控制，仅个别段胸墙出现了裂缝，裂缝宽度细微，很好地控制了胸墙混凝土的裂缝。

3 裂缝解析法分析

3.1 裂缝原因分析

以图1中第2层混凝土3.8m宽的隔墙为例，隔墙长度为码头分段长度12.5m，高度为3.0m，第2层混凝土浇筑时，第1层混凝土已浇筑80~90d，第1层混凝土基本已完成干燥收缩。隔墙混凝土降温收缩和干燥收缩受到第1层混凝土的约

束。根据王铁梦的解析法理论^[1]，隔墙长度方向的中部截面受到的水平应力为：

$$\sigma = -E\alpha T \cdot \left[1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{C_x}{HE}} \cdot \frac{L}{2}\right)} \right] \cdot H(t, \tau) \quad (1)$$

式中： σ 为中部截面混凝土承受的拉应力（MPa）； E 为混凝土弹性模量（MPa），按28d龄期的参考值，取 35×10^3 MPa； α 为混凝土热膨胀系数； C_x 为基础水平阻尼系数，底层为C35混凝土时， C_x 取 1.5 N/mm^3 ； L 为码头分段长度，本案例初始长度为12500mm； T 为混凝土总温差； $H(t, \tau)$ 为徐变松弛系数； H 为距离浇筑界面（约束面）的高度，本案例为0~3000mm。

总温差 T 的取值是理论计算的关键，包括收缩当量温差 T_1 和混凝土降温冷缩温差 T_2 ，收缩当量温差 T_1 的计算公式为：

$$T_1 = \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (2)$$

式中： T_1 为收缩当量温差； ε 为混凝土相对收缩量； α 为混凝土热膨胀系数，取 $10 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。本案例中C40素混凝土收缩量一般达到 400×10^{-6} ，且第2层混凝土浇筑时，第1层混凝土已基本完成收缩（浇筑80~90d），所以第2层混凝土的收缩就是两层混凝土的收缩差，根据式(2)计算得收缩当量温差为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ，混凝土最高温升为 $65 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ，考虑到上层混凝土水化过程中，底层混凝土也会升温膨胀，中心温度与两层混凝土浇筑界面的温差会导致降温冷缩裂缝，根据监测结果并查阅相关资料^[2]，温差一般为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，混凝土总温差 T 为两者之和，取 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

式(1)的基本假定是截面各处的应力相等，但是对于高长比较大的构件，水平应力在高度方向上分布可能不均匀，尤其是受到底层的连续约束的构件，浇筑界面处的应力非常大，水平应力沿高度方向向上逐渐递减。本案例中 $H/L = 0.24 > 0.2$ ，不能按照全截面等应力对待。 H 取值为0~3000mm，分3种情况计算各高度范围内的水平应力。混凝土开裂前，分段长度 L 为浇筑分段长度12500mm，中心截面0~3m高度范围（第2层底面处高度为

0 m,第2层顶面处高度为3 m)内的水平应力计算结果见图3。若混凝土中心截面开裂,分段长度 L 变为6 250 mm,中心截面0~3 m高度范围内的水平应力计算结果见图4。若混凝土发生2次开裂,分段长度 L 变为3 125 mm,中心截面0~3 m高度范围内的水平应力计算结果见图5。

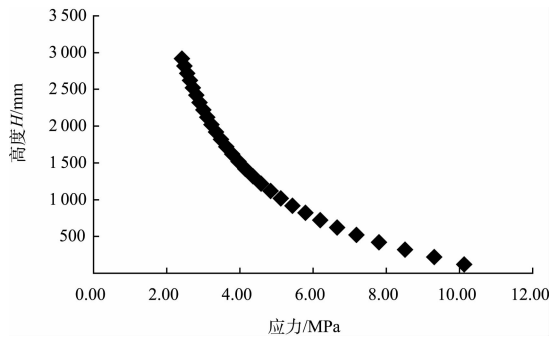


图3 构件不开裂情况中心截面的应力分布

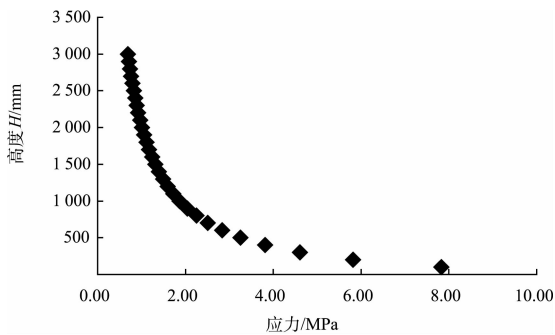


图4 构件1次开裂后中心截面的应力分布

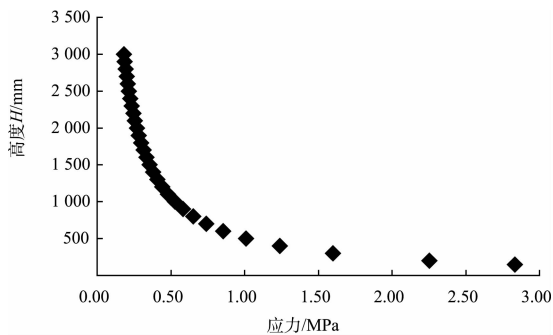


图5 构件2次开裂后中心截面的应力分布

按照混凝土抗拉强度为抗压强度的1/12计算^[3-6],C35混凝土抗拉强度约为3.0 MPa,若混凝土内部的水平应力超过3.0 MPa,混凝土就存在开裂风险。从图3可以看出,若混凝土未开裂,中心截面浇筑界面(高度 H 为0 mm的位置)的水平应力达到10.2 MPa,高度为2 500 mm处的水

平应力约为3.0 MPa,构件从中部截面开裂的可能性非常大。从图4可以看出,构件1次开裂后,长度为6 250 mm隔墙中心截面浇筑界面的水平应力依然较高,达到7.8 MPa,高度为500 mm以下区域的水平应力大于3.0 MPa,构件发生2次开裂的可能性依然很大。图5是构件2次开裂后长度为3 125 mm隔墙中心截面水平应力的分布情况,可以看出,中心截面浇筑界面的应力降低至2.8 MPa左右,小于混凝土的抗拉强度,混凝土开裂的风险较小。从上面计算分析可知,构件发生2次开裂的风险较大,但发生3次开裂的风险较小,2次开裂会产生两条裂缝,即12.5 m分段长度内产生1~3条裂缝的可能性较大。这与图2中60 d后构件中的裂缝分布情况较吻合。

从式(1)可知,温度收缩应力与总温差 T 成正比,降低混凝土的降温冷缩温差 T_2 和收缩当量温差 T_1 均可降低混凝土内部的温度收缩应力。混凝土的降温冷缩温差 T_2 可以通过降低混凝土的入模温度、水化温升等措施达到,但是可能要付出较高的代价。因为混凝土7 d的收缩量仅为90 d收缩量的40%左右^[7],缩短分层浇筑的时间间隔可以有效降低混凝土的相对收缩差,减小收缩当量温差 T_1 ,这是减少分层浇筑混凝土之间约束应力最有效的办法。若分层浇筑的时间缩短至0 d,也就是全断面1次浇筑,理论上说对裂缝的控制最有利。以下就全断面浇筑方式进行混凝土内部应力分析,这种工况下基础约束主要来自沉箱的4个侧壁以及沉箱内填充基础的约束力,相当于在梁上浇筑面板的约束度,根据经验,基础阻尼系数取 0.6 N/mm^3 ;分层高度取图1所示的第1层混凝土的厚度,即1 300 mm,因为高度小于0.2倍分段长度,按全截面等应力计算混凝土内部的水平拉应力。

根据式(1)进行混凝土内部水平拉应力的计算,内部平均应力为2.2 MPa,低于混凝土抗拉强度。全断面浇筑可以有效避免底层混凝土硬化后对上层新浇筑混凝土的约束,减少混凝土相对收缩差,降低了约束应力,结构开裂的可能性大大降低。

3.2 裂缝间距分析

裂缝间距的影响因素主要包括墙体高度、混凝土弹性模量、基础阻尼系数、混凝土热膨胀系数、混凝土徐变系数等^[1], 计算公式为:

$$[L] = 1.5 \cdot \sqrt{\frac{HE}{C_x}} \cdot \operatorname{arccosh} \frac{\alpha T}{\alpha T - \varepsilon_p} \quad (3)$$

式(3)中参数的物理含义与式(1)一致, ε_p 为混凝土徐变系数, 本案例为仅配制少量构造钢筋的素混凝土, 徐变性能较差, 取 0.000 03, 墙体高度取 0.2L, 即 2 500 mm。具体参数的取值见表 1。

表 1 基础参数

计算内容	弹性模量 E/MPa	热膨胀系数 α	总温差 T/°C	基础阻尼系数 $C_x/(N \cdot mm^{-3})$	分段长度	高度 H/mm	松弛系数 H(t, τ)	徐变 ε_p
分层浇筑应力	3 500	10×10^{-6}	60	1.5	12 500, 6 250, 3 125	0 ~ 3 000	0.5	
全断面浇筑应力	3 500	10×10^{-6}	60	0.6	1 300	1 300	0.5	
裂缝间距	3 500	10×10^{-6}	60	1.5		2 500		0.000 03

从式(3)可见, 基础阻尼系数越小, 裂缝间距越大, 基础阻尼系数趋向于 0 时, 裂缝间距趋向于无穷大。根据式(3)的计算, 隔墙裂缝的平均间距 [L] 计算值为 4.5 m。

对 36 段分层浇筑的隔墙内的竖向裂缝(浇筑 60 d 后)进行统计, 每段隔墙中竖向裂缝数量介于 1~4 条, 裂缝总条数为 75 条, 每段隔墙的裂缝平均数量为 2.1 条, 裂缝的平均间距为 4.1 m, 与理论计算值接近。

3.3 控制胸墙混凝土裂缝措施

根据第 3.1 和 3.2 节的分析, 管廊两侧胸墙混凝土开裂主要原因是受底层强度较高的混凝土的约束导致水平应力超过混凝土抗拉强度。从表 1 中的参数取值看, 混凝土弹性模量、热膨胀系数等参数基本稳定, 若要改善混凝土的开裂问题, 主要有 3 种方法: 减小分段长度 L、降低基础阻尼系数 C_x 、降低混凝土总温差 T。

减小分段长度 L, 将分段长度从 12.5 m 降低至 3.125 m, 理论上说可以有效控制混凝土开裂问题。但是分段长度过短会人为制造很多施工缝, 导致结构出现渗漏问题, 且分段太短会显著降低施工效率, 造成人力、资源的浪费, 影响施工进度。

降低基础阻尼系数, 能显著降低底层约束导致的拉应力。分层浇筑的混凝土结构, 可以考虑在两层混凝土界面设置滑动层, 根据具体结构选择合适的滑动层, 可采用沥青砂、两层油毡夹滑石粉、二油一毡等滑动层体系。当基础设置于岩石基础上时, 宜在基岩面上设粗砂滑动层, 减小

因混凝土收缩产生的约束应力, 将垫层表面尽量做平整、光滑, 可以最大限度地减少对上部结构的约束^[1]。

降低混凝土总温差 T, 可以从 3 个方面开展: 1) 选用低水化热水泥, 调整优化混凝土配合比, 降低单方混凝土水泥用量, 减少混凝土水化温升, 控制混凝土入模温度等; 2) 降低混凝土的绝对收缩量, 如加强混凝土养护, 优化配合比减小浆集比, 适当掺入减缩剂等; 3) 降低第 3 层混凝土与第 1 层混凝土的相对收缩差, 即在第 1 层混凝土浇筑后尽快浇筑第 2 层混凝土, 第 1 层混凝土的收缩相对第 2 层混凝土是自由收缩, 不会产生约束应力, 将两层混凝土的浇筑间隔控制在 7 d 以内可以显著降低相对收缩差, 有条件时采用全断面浇筑。

4 结语

1) 分层浇筑的混凝土结构, 上层混凝土易产生规则、竖向的裂缝, 主要原因是上层混凝土的收缩受到底层混凝土的约束导致。

2) 对于约束应力主导的混凝土裂缝问题, 有条件时把分层浇筑改成全断面 1 次浇筑可以大大降低混凝土开裂风险。

3) 分层浇筑施工时, 适当减小分段长度; 降低混凝土的总温差, 如控制混凝土的入模温度和水化温升、缩短分层浇筑时间间隔等; 减小基础阻尼系数, 如设置滑动层等; 可以有效降低混凝土约束应力, 减少开裂问题。

(下转第 168 页)