



高桩墩台式码头面层混凝土 裂缝成因及控制措施

宋雪峰, 李 超, 邓春林

(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行业重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 面层混凝土裂缝是码头工程的质量通病, 严重影响着码头的整体观感及结构耐久性, 必须有针对性地对裂缝形态及成因进行研究, 并采取有效的控制措施。介绍了华南某高桩墩台式码头的构造设计及施工工艺特点, 分析码头面层结构各类混凝土裂缝的形态特征及分布情况, 并通过模拟计算混凝土结构的温度与应力, 分析各类裂缝的成因。结合码头的具体施工工艺提出了针对高桩墩台式码头面层混凝土裂缝的综合控制措施。

关键词: 高桩墩台; 面层混凝土; 裂缝控制; 裂缝成因

中图分类号: TU 377

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0104-05

Causes and control of the crack on surface layer of the dolphin type berth on high piles

SONG Xue-feng, LI Chao, DENG Chun-lin

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology, Ministry of Communications,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: This study investigated the definite forms of several kinds of cracks, analyzed and discussed the cause of each kind of cracks according to the current situation of the cracks on surface layer of the dolphin type berth on high piles. Then put forward the measures for prevention and control of the cracks on wharf surface according to the specific situation of the construction.

Keywords: high-pile pier; surface concrete; crack control; causes for cracks

华南某码头为高桩墩台式结构, 其中墩台混凝土分多层浇筑, 面层混凝土于浇筑完成后的 3 ~ 30 d 龄期内出现了不同类型、不同程度的裂缝: 在施工初期, 墩台为整块浇筑, 其中面层混凝土在浇筑后即出现大量的平行和垂直于码头岸线方向的长裂缝, 并伴随有其他方向上的短浅裂缝。之后采取了面层分块施工、调整混凝土配合比等措施, 面层深长裂缝大大减少, 但是在混凝土浇筑施工后的养护期内发现仍有大量不规则的、长度较短的浅层裂缝产生。

本文针对该高桩墩台式码头面层混凝土结构

的开裂情况, 针对每一种裂缝的成因进行分析和探讨, 并结合具体施工工艺提出了码头面层裂缝的综合防治措施。

1 面层混凝土裂缝成因分析

1.1 基本情况

某高桩墩台式码头由桩基群和多个前、后墩台组成。其中墩台厚 2.8 m, 长度与宽度均约为 30 m, 大部分墩台面层配 1 层钢筋, 钢筋直径为 $\phi 28$ mm, 钢筋间距为 150 mm, 面层保护层设计厚度为 50 mm。码头结构见图 1。

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 宋雪峰 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事混凝土结构耐久性技术研究。

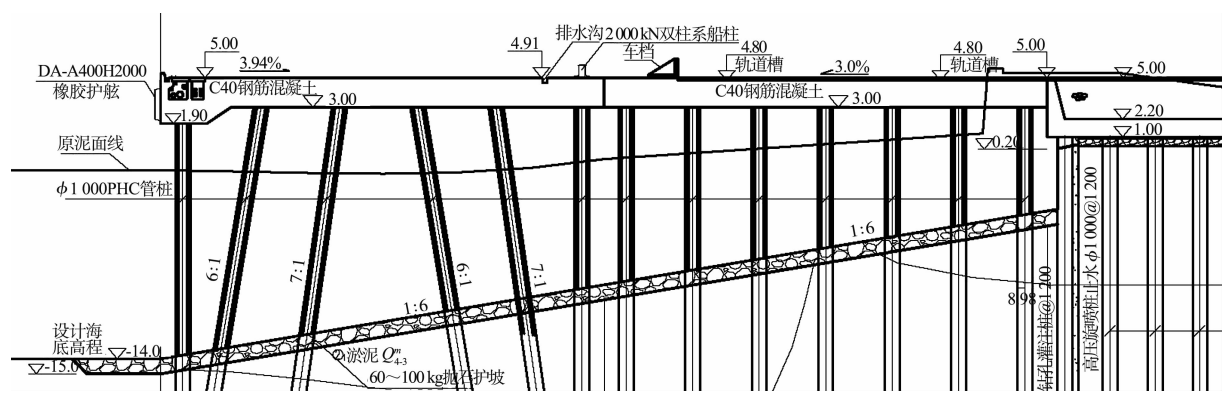


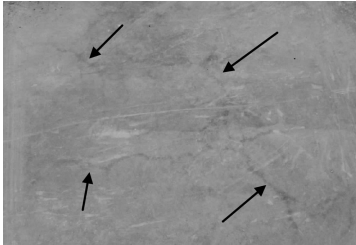
图 1 码头结构 (尺寸单位: mm, 高程单位: m)

墩台混凝土分多层浇筑, 其中面层混凝土厚约 50 cm。在墩台早期施工中, 采用了 C40 掺粉煤灰的混凝土, 面层混凝土为整块浇筑, 在浇筑完成后的 5~20 d 龄期内面层混凝土出现大量的平行和垂直于码头岸线方向的长裂缝, 并伴随有其他方向上的短浅裂缝(图 2a))。之后采取了面层分块施工、调整混凝土配合比等措施, 面层深长裂缝大大减少, 但是在混凝土浇筑施工后的养护期内发现仍有大量不规则的、长度较短的浅层裂缝产生(图 2b))。

经现场考察, 墩台中下层混凝土并未开裂, 裂缝仅出现于墩台面层。因此, 结合面层混凝土结构形式以及约束特征, 根据裂缝对面层混凝土外观及耐久性的影响程度, 墩台面层混凝土裂缝可分为主要裂缝、次要裂缝以及不规则裂缝 3 种形式 (表 1)。



a) 平行和垂直于码头岸线方向的长裂缝



b) 不规则的浅层裂缝

图 2 墩台面层混凝土裂缝

表 1 面层混凝土裂缝特征

裂缝类型	形态特征	出现时间	说明
主要裂缝	平行或垂直码头岸线方向, 基本贯穿于平台面层混凝土, 数量较多, 长度最长, 深度较深, 宽度较大	浇筑后 5~20 d	整块浇筑出现较多
次要裂缝	出现于第一种裂缝的附近, 长度短, 深度与宽度变化较为复杂, 并与第一种裂缝呈一定角度, 数量较少	浇筑后 5~20 d	整块浇筑出现较多
不规则裂缝	长度、宽度较为不规则, 基本为独立产生, 深度较浅, 数量较多	浇筑后 3~30 d	分块浇筑出现较多

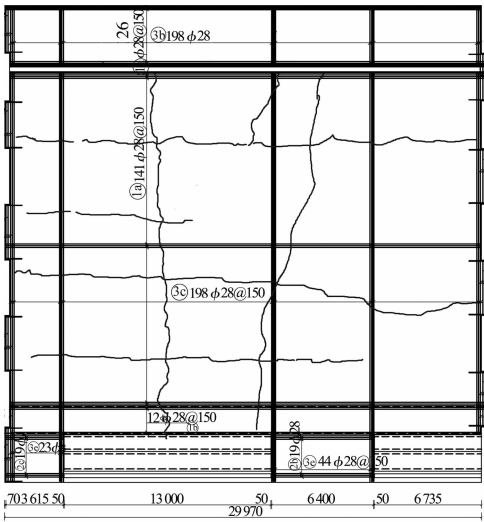
第 1 种裂缝形态见图 3a), 沿垂直或平行于码头岸线方向延伸发展, 裂缝的长度较长, 基本大于面层宽度的 1/2, 甚至沿垂直码头岸线方向横跨整个面层。这种裂缝宽度较大, 大部分大于 0.3 mm。第 1 种裂缝数量较多, 且长度最长、深度最深、宽度较大, 是影响面层混凝土结构外观及耐久性的主要裂缝, 也是整块浇筑面层混凝土

的开裂主要形式, 以及导致其它裂缝产生、扩展并相互交叉连接的主要原因。因此, 在第 1 种裂缝附近经常会伴随出现其它种类的裂缝。

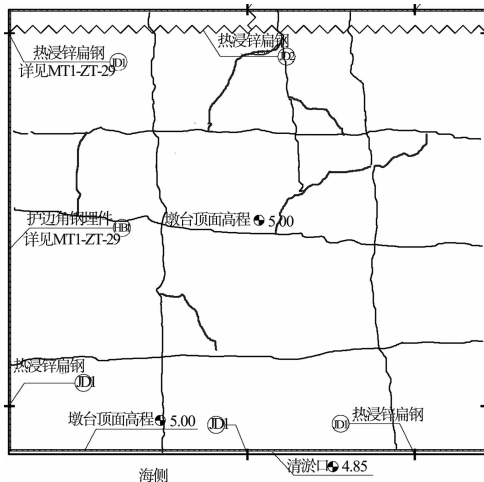
第 2 种裂缝形态见图 3b), 出现在第 1 种裂缝附近, 大多与主要裂缝延伸方向一致, 也有部分与第 1 种裂缝呈一定角度。这类裂缝的长度并不长, 大多小于面层宽度的 1/3, 但其深度与宽度变化较

为复杂,导致裂缝的发展形式多样,裂缝宽度集中在 0.1~0.3 mm。相对于第 1 种裂缝,这种裂缝深度变化较大,但大部分并未贯通面层整体。第 2 种裂缝与第 1 种裂缝应力释放程度密切相关,只是在第 1 种裂缝之间或附近出现,数量较少,属于第 1 种裂缝的伴生裂缝。虽然这类裂缝较少,但属于深层裂缝,对面层混凝土的外观及结构耐久性影响较大,是影响面层混凝土质量的次要裂缝因素。

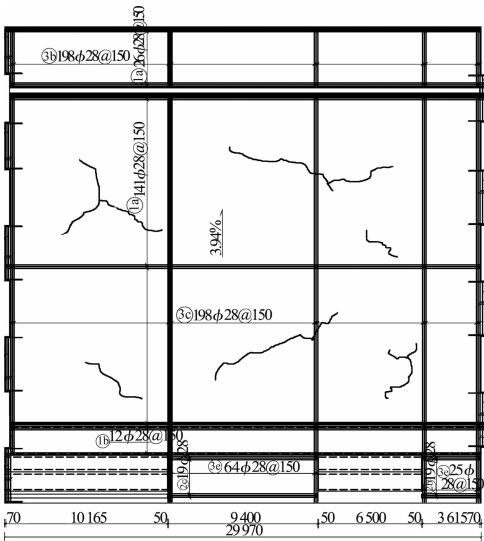
第 3 种裂缝形态见图 3c),多出现于采用分块浇筑措施之后的面层混凝土,为不规则裂缝,延伸方向变化多样,裂缝的长度、深度及宽度均比前两种裂缝小,一般为浅层裂缝,宽度大多不超过 0.2 mm。第 3 种裂缝的数量虽然最多,但其深度和宽度小,对混凝土面层的外观质量、耐久性的影响相对最轻。



a) 第1种裂缝



b) 第2种裂缝



c) 第3种裂缝

图 3 面层混凝土裂缝形态 (尺寸单位: mm, 高程单位: m)

1.2 开裂原因分析

混凝土结构的温度与应力中,温度部分可以通过现场监测或软件模拟计算两种方法准确获得;应力部分目前由于混凝土早期应力形式较为复杂无法准确获得,只有通过模拟计算^[1-2]。因此,可采用相同的混凝土性能参数和相同施工条件,建立数值仿真模型对面层混凝土结构进行计算。混凝土性能和计算参数如下:28 d 弹性模量 3.5×10^4 MPa,泊松比 0.17,比热 0.92 kJ/(kg·℃),热传导率 8.9 kJ/(m·h·℃),线膨胀系数 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,混凝土密度 2 365 kg/m³;强度发展趋势:混凝土强度变化趋势拟合函数;收缩:按 C40 混凝土收缩拟合函数;约束:弹性约束;环境温度:23~33℃;表面对流函数:底面取 8 kJ/(m²·h·℃);与空气接触的表面取 50 kJ/(m²·h·℃)。

1) 第 1 种、第 2 种裂缝。

分析面层混凝土结构温度场和应力场分布可以得到,整块浇筑工艺下应力主要集中在与下层混凝土直接接触的面层混凝土底部强约束区,处于弱约束区的面层混凝土上表面的应力相对较小。具体温度和应力值见表 2。

沿墩台长度方向的温度与收缩应力是由于面层混凝土体积变形在底部强约束作用下产生的,体积变形包括由最高温度降低至环境平均温度的降温梯度引起的温度收缩以及混凝土自收缩等。

由于应力集中于面层混凝土底部, 在 136 h 应力大于 2.01 MPa 危险应力界限时, 混凝土抗拉强度与温度收缩应力比值降低至 1.4, 面层出现开裂风险。当面层未出现裂缝时, 拉应力会继续增加, 混凝土抗拉强度与温度应力比值继续降低, 直至出现裂缝释放应力为止, 计算结果表明, 在 168 h 时抗拉强度与温度应力比值降低至 1.0, 开裂机率趋近 100%。裂缝在底板中部产生, 向表面发展, 形成垂直和平行于面层长度方向的贯穿性裂缝, 即上述第 1、第 2 种裂缝。

表 2 混凝土硬化过程面层结构温度、应力参数	
类别	出现时间/h
最高温度 46.6 ℃	36
最大降温速率 4.1 ℃/d	96
最大内外温差 9.1 ℃	48
危险拉应力 2.01 MPa	136

温度收缩应力作用下, 面层混凝土结构可视为轴心受拉构件, 当面层结构受拉开裂后, 开裂截面混凝土退出工作, 全部应力由钢筋承担。按照 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》裂缝宽度验算公式, 计算最不利条件下面层混凝土结构开裂后, 温度收缩应力直接作用于钢筋时产生的裂缝最大宽度:

$$w_{\max} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \left(\frac{c + d}{0.30 + 1.4 \rho_{te}} \right) \quad (1)$$

式中: $w_{\max}$ 为最大裂缝宽度; α_1 为构件受力特征系数; α_2 为考虑钢筋表面形状的影响系数; α_3 为考虑荷载长期效应组合或重复荷载影响的系数; c 为最外排纵向受拉钢筋的保护层厚度; d 为钢筋直径; E_s 为钢筋弹性模量; ρ_{te} 为纵向受拉钢筋的有效配筋率; σ_{s1} 为按荷载长期效应组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的应力。

由式(1)可知, 在温度收缩应力与配筋率一定的条件下, 裂缝最大宽度受保护层厚度决定。按照设计文件的保护层厚度 50 mm 计算, 面层混凝土结构不同方向的裂缝出现位置在长度和宽度的 1/2 处, 受力钢筋配筋率为 1.03%。当面层混凝土结构因温度收缩应力而产生裂缝时, 计算出平行于宽度方向与平行于长度方向的最大裂缝宽度均

为 0.37 mm, 与工程现场实际情况基本相符。

因此, 墩台面层混凝土结构整块浇筑后, 墩台面层混凝土浇筑于下层混凝土之上, 由于两层混凝土的体积收缩不同步形成了较大的约束, 面层混凝土在水化过程中持续受到温度应力和收缩应力的双重影响, 当面层混凝土具有开裂风险后, 会沿平行或垂直于码头岸线方向, 在结构中部及长度或宽度的 1/4 及其附近出现裂缝, 这与墩台面层混凝土结构整块浇筑出现较多的第 1 种、第 2 种裂缝的实际情况相符。

2) 第 3 种裂缝。

在缩短面层混凝土的浇筑长度与宽度后, 即从整块浇筑 30 m × 30 m 缩短为 10 m × 10 m 分块浇筑, 经计算得到面层结构温度与收缩应力降低了约 15%, 应力值均低于危险应力界限。说明采取缩短浇筑长度与宽度的分块施工工艺后, 面层结构因温度收缩应力而出现贯穿性裂缝的风险极大降低, 对垂直和平行于码头岸线方向的长深型裂缝(上述第 1 种裂缝和第 2 种裂缝)能够起到有效的控制, 因为在经过分块浇筑处理之后, 虽然面层混凝土的约束条件仍然存在, 由于构件尺寸减小, 减少了构件的温度与收缩应力, 原因如下:

1) 根据 GB 50496—2009《大体积混凝土施工规范》及王铁梦大体积混凝土结构裂缝控制理论^[1], 地基或旧混凝土基础的最大水平拉应力可由下式进行计算:

$$\sigma_{x\max} = -E\alpha T \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \sqrt{\frac{C_x}{HE} \frac{L}{2}}} \right) \quad (2)$$

式中: L 为混凝土浇筑体的长度 (mm); H 为混凝土浇筑体的厚度, 该厚度为块体实际厚度与保温层换算混凝土虚拟厚度之和 (mm); C_x 为外约束介质的水平变形刚度 (N/mm³), 一般可按 GB 50496—2009《大体积混凝土施工规范》附录中的表 B.6.6 进行取值; E 为混凝土弹性模量; α 为混凝土线膨胀系数; T 为约束体与被约束体的温差。可以看出, 混凝土浇筑体长度 L 越大, 则最大拉应力越大。因此在墩台面层分块施工之后,

减小了墩台面层混凝土结构的最大水平拉应力。

2) 混凝土构件尺寸的减小,有利于减小由混凝土水化引起的内表温差及构件与环境的温差,有助于降低水化温度引起的应力。这与现场实际调研结果及数值模拟计算结果相符。

虽然分块施工减少了构件的最大拉应力,但这部分应力仍然存在于面层结构中,当面层局部区域因塑性收缩或干燥收缩而产生收缩应力时,就会在面层产生不规则的裂缝,即第3种裂缝。经检测第3种裂缝的宽度大多处于0.02~0.2 mm,深度为4~30 mm不等,属浅表层裂缝。第3种裂缝的主要诱因是塑性收缩或干燥收缩,大多是由于混凝土配合比不合理、振捣抹面不充分、养护不及时或不充分、钢筋保护层厚度过大等原因造成的。

2 面层混凝土裂缝控制措施^[3-5]

1) 加强混凝土质量控制。由于墩台混凝土采用商品混凝土,因此施工单位需针对不同批次、不同工程部位的混凝土原材料性能及混凝土早期性能进行控制,包括对混凝土坍落度、含气量、泌水率、凝结时间、抗压强度等相关物理性能进行跟踪记录及备案,如出现原材料质量波动、混凝土性能波动等情况应及时做出相关调整。

2) 在施工条件允许的条件下,适当减少墩台每一层之间的浇筑时间间隔。减少每一层混凝土之间浇筑时间间隔能够有效减小新旧混凝土之间的体积收缩差,能够减少面层混凝土受到的约束。

3) 面层混凝土建议采用考虑后浇带的分块施工工艺。后浇带可有效预防现浇钢筋混凝土结构由于温度、收缩造成的裂缝,经过构件内部收缩,在若干时间后再浇捣该施工缝混凝土,将结构连成整体。

4) 面层混凝土二次抹面工艺。在混凝土终凝前1~2 h采用二次抹压处理工艺,并及时用塑料薄膜覆盖,可有效控制混凝土表面非结构性细小裂缝的出现和开展,避免混凝土表面水分过快散失出现干缩裂缝,必要时,可在混凝土终凝

前1~2 h进行多次抹压处理。

5) 采用防裂钢丝网。在面层混凝土采用防裂钢丝网片,可有效分散面层混凝土硬化过程中的收缩应力。

6) 保护层厚度控制。施工过程中需加强对面层混凝土保护层厚度的控制,避免厚度偏差过大。

7) 加强养护工艺。注意面层混凝土早期的养护,可考虑表面喷洒保水剂或采用蓄水养护工艺、土工布加塑料薄膜养护等等,减少早期干燥收缩裂缝及塑性裂缝的产生。

3 结语

1) 高桩墩台式码头面层混凝土的施工期裂缝是因为分层浇筑混凝土的体积收缩不同步形成了较大约束,同时由于面层混凝土水化过程中持续受到的温度应力和收缩应力的双重影响而产生;

2) 模拟计算了面层混凝土结构的温度与应力,分析了面层混凝土的开裂风险,并通过计算面层最大裂缝宽度验算了应力计算结果的准确性;

3) 面层混凝土裂缝综合控制措施有:加强混凝土质量控制、减少每一层浇筑时间间隔、采用考虑后浇带的分块施工工艺、混凝土二次抹面工艺、采用防裂钢丝网、保护层厚度控制、加强养护工艺等。

参考文献:

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 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.
- [3] 黄沛, 金秀坤, 王新刚. 天津港高桩码头面层混凝土裂缝成因分析及裂缝控制技术措施[J]. 中国港湾建设, 2009(2): 22-24.
- [4] 杨帆. 高桩码头面层裂缝的施工控制[J]. 港口科技, 2011(8): 25-27.
- [5] 李晓径. 浅析码头现浇面层裂缝的成因及解决办法[J]. 科技资讯, 2010(8): 91.

(本文编辑 武亚庆)