

高桩码头预制梁裂缝成因分析及控制措施

边超

(天津深基工程有限公司)

摘要:为解决高桩码头预制梁构件浇筑后顶端向下出现不同长度裂缝的问题,通过分析施工配合比、减水剂性能、顶端浮浆厚度及养护措施等影响因素,针对性制定改进方案。具体包括优化混凝土配合比,降低砂率并增加粗骨料用量,调整减水剂配方及掺量以提升保坍性能,控制顶层振捣参数并掺入聚丙烯纤维,采用喷洒养护液结合铺贴塑料薄膜的锁水养护工艺。工程应用结果显示,预制梁顶端裂缝问题得到有效解决,构件表面无蜂窝麻面、色差等缺陷,外观质量优良。实践证明,该技术方案可显著减少同类裂缝产生,为高桩码头预制梁施工提供了可靠的技术参考。

关键词: 预制梁; 裂缝; 产生原因; 预防措施

0 引言

高桩码头预制梁构件作为上部结构的重要组成部分,不仅长期处于干湿循环的侵蚀环境中,还需承受船舶撞击力、波浪力等动态荷载。预制梁构件的顶部是钢筋保护层较薄且应力集中的关键部位,其产生的裂缝不仅会削弱预制梁构件承载力还会造成氯离子加速渗透,进而造成钢筋锈蚀,最终对高桩码头结构的耐久性和使用寿命造成影响。

国内众多学者针对混凝土裂缝开展了大量研究,邓岩^[1]提出的表面封闭-压力注浆-外包钢筋加固修复技术,适用于已成型预制构件裂缝治理,未涉及到防裂解决措施;李绍军^[2]虽揭示了砂率与早期收缩的相关性(砂率每增加1%,收缩率提高3.2%),为混凝土收缩研究提供了重要数据支撑,然而其研究未结合高桩码头预制梁构件的大尺寸浇筑工况详细说明;王小军^[3]提出的全流程防裂措施缺乏减水剂保坍性能与养护湿度的量化耦合分析,同时指出在高桩码头预制梁“材料-工艺-环境”多因素防裂领域存在技术缺口。

本文以盐城港响水港区小蟒牛作业区码头二期工程(1号—3号泊位)项目为依托,针对高桩码头预制梁构件拆模前顶部裂缝问题,通过现场实测与模拟试验,建立“材料性能-施工工艺-环境因素”多维度成因模型,并提出量化防治方案以提供技术支撑。

1 工程简介

盐城港响水港区小蟒牛作业区码头二期工程

(1号—3号泊位)位于江苏省盐城市响水县灌河东岸,距灌河入海口约4 km,地处规划的小蟒牛作业区范围内。项目包括1个2万吨级件杂货泊位、2个5万吨级散货泊位及配套设施,设计年通过能力1180万t。

码头总长度为698 m,宽度为40 m,码头通过3座引桥与后方陆域连接,引桥宽度约15 m。码头前沿顶高程+4.4 m,码头前沿停泊水域宽度65 m,设计底高程为-16.0 m。港池回旋水域设置为椭圆形,尺寸为558 m×335 m。港池设计底高程为-13.78 m。

工程堆场及其生产、生活辅助作业区位于泊位后方陆域堆场。陆域堆场基本平行于码头岸线布置,南北向最宽处约680 m,东西向最宽处约480 m。

2 高桩码头预制梁类构件裂缝类型、危害及成因

2.1 裂缝类型、分布特征及危害

1) 腹板竖向裂缝:多见于横梁预制初期,在腹板内外侧均有分布。裂缝走向垂直,长度差异较大,短则数厘米,部分工程实例中最长可达62 mm;宽度初期多在0.1 mm左右,随时间及环境因素影响,部分会发展至0.2 mm。深度通常不贯穿腹板,但会一定程度侵入内部,对腹板结构性能造成影响。从成因来看,主要是混凝土早期收缩不均或振捣不密实所致,在预制阶段需重点关注这类早期缺陷的防控。

2) 翼缘板横向裂缝:翼缘板横向裂缝常为腹板裂缝的延伸,当独立出现时,长度较短,一般

在几厘米到十几厘米之间。其走向与翼缘板横向方向一致，垂直于梁的纵向。宽度同样较窄，多为0.1~0.2 mm。深度较浅，基本处于翼缘板表层一定厚度内。这类裂缝的成因与混凝土抗拉强度不足相关。

3) 梁端底板纵向裂缝：梁端底板纵向裂缝多在腹板纵向预应力筋张拉后出现。这类裂缝沿梁端底板纵向分布，长度从梁端向内部延伸，具体因工程实际情况有所差异。宽度通常在0.1~0.3 mm，深度会侵入底板内部一定程度，对底板结构性能造成影响。其产生主要与局部应力集中相关，也可能由张拉工艺操作不当导致。

4) 梁体面板龟裂：梁体面板龟裂呈现蛛网般分布，裂缝走向错综复杂，相互交织。其深度较浅，多集中在面板表面1~3 mm范围内。这类裂缝多是水分快速蒸发或养护措施不到位导致。在混凝土浇筑完成后，如果环境温度高、风速大，表面水分会迅速散失，而内部水分无法及时补充，导致混凝土表面收缩不均匀，产生拉应力，进而形成龟裂。

上述4类裂缝都会影响混凝土的渗水及冻胀破坏，削弱钢筋与预应力钢束的抗锈蚀能力，导致降低预制梁类构件的承载能力和抗渗性能，影响结构安全性和使用寿命。

2.2 裂缝成因分析

1) 施工配合比不佳

通过对施工混凝土进行观察，发现预制梁的混凝土坍落度满足设计要求，但目测骨料偏少，浆体较多，振捣很容易产生浮浆导致骨料下沉。结合以往预制构件施工的配合比进行对比分析，发现原配合比设计坍落度120~160 mm，砂率高达39%，砂率明显偏高，粗骨料用量偏少。

2) 减水剂性能不佳

对现场施工的混凝土进行坍落度检测及保坍性能检查，发现混凝土到达施工现场开始放料时的坍落度满足设计要求，随着浇筑时间的延续，

30 min的坍落度损失达20 mm，1 h的坍落度损失达50 mm，1 h后的混凝土很难从罐车中放出，需要人工配合振捣棒才能下料，施工振捣完成后表面水分散失过快。

3) 梁顶端浮浆过厚

通过对施工中梁的顶面进行浮浆检查，发现距离顶面5 cm范围内基本都是砂浆，骨料较少，浮浆过厚。

4) 混凝土养护不到位

对施工完成的预制梁养护情况进行检查，发现施工后的梁仅端头及侧面进行了保湿养护，而顶面及翼缘板裸露在外，并没有进行有效的保湿养护。

3 预制梁类构件裂缝的解决措施

3.1 施工配合比不佳的解决措施

通过调整减水剂掺量可在保持混凝土强度的同时减少用水量，从而降低流动性，适当减少其用量有助于控制流动性，避免泌水和离析。同时降低砂率也能减小流动性，因砂率降低会减少砂浆相对含量，在保证工作性前提下可适当下调。增加粗骨料用量可减少砂浆占比，既降低流动性，又能提高强度和耐久性。在保持水胶比0.31不变下，优化调整配合比为水泥:粉煤灰:砂子:碎石:减水剂:引气剂:水 = 400:100:601:1068:6.5:0.18:155，砂率由39%降至36%。

前期对梁类构件的裂缝检测结果见表1，暴露出原有配合比在施工质量上的不足，为解决这一问题，通过对比多组配合比，试验数据如表2所示，其中配比编号2~3砂率为36%的配合比在各项指标中表现最优。采用该配比施工，发现搅拌的混凝土和易性较好，骨料明显增多，在浇筑过程中骨料无下沉现象，顶面浮浆厚度明显减少，有效避免了因浮浆过厚导致的表层强度不足问题。施工后的预制梁经观察未出现流动性过大导致的麻面、裂缝等缺陷，完全符合设计对混凝土强度、外观及耐久性的要求。

表1 梁类构件裂缝检测结果表

项目	检查数量/樘	出现裂缝数量/条	裂缝宽度/mm	裂缝长度/mm	频率/%	合格率/%
横梁	189	39	0.50	60	20.6	79.4
纵梁	72	15	0.40	32	20.8	79.2
轨道梁	110	25	0.20	25	22.7	77.3
平均值	124	26	0.36	39	21.4	78.6

表2 混凝土工作性能试验表

强度等级	配比编号	胶凝材料	水胶比	砂率/%	减水剂掺量/%	坍落度/mm	包裹性	离析	泌水
C40 F250	1-1	500	0.31	39	1.5	185	较好	无	无
	1-2	500	0.31	38	1.5	175	一般	轻微	轻微
	1-3	500	0.31	36	1.5	170	较差	较重	较重
	2-1	500	0.31	39	1.3	170	较好	无	无
	2-2	500	0.31	38	1.3	165	较好	无	无
	2-3	500	0.31	36	1.3	155	较好	无	无

3.2 减水剂性能不佳的解决措施

发现减水剂性能不佳,第一时间联系减水剂厂家派技术员驻站处理。技术员到站后针对在用的原材料进行混凝土的试拌调整,在砂率36%配合比的基础上,通过多次试验,不断优化减水剂配方及掺量,来改善混凝土的保坍性能。从表3数据可知,通过调整减水剂配方后,当外加剂掺

量在1.3%时的混凝土状态最佳,坍落度及保坍性能均能满足现场120~160 mm的施工要求。实际施工时,连续跟踪一周的混凝土施工情况,混凝土从出机开始到运输至现场浇筑完成始终保持较好的状态。表4数据表明,采用调整后的减水剂配比进行预制梁的施工,梁体裂缝得到了很大的改善。

表3 混凝土工作性能随时间变化试验表

强度等级	胶凝材料	水胶比	砂率/%	减水剂掺量/%	初始坍落度/mm	30 min坍落度/mm	1 h坍落度/mm	1.5 h坍落度/mm	包裹性	离析	泌水
C40F250	500	0.31	36	1.5	180	180	175	170	较差	较重	较重
	500	0.31	36	1.4	175	170	170	165	一般	轻微	轻微
	500	0.31	36	1.3	160	160	155	150	良好	无	无

表4 调整减水剂配比后预制梁裂缝检测结果

检查项目	数量	出现裂缝数量/榀	裂缝宽度/mm	裂缝长度/mm	频率/%	合格率/%
横梁	105	3	0.10	5	2.8	98.2
纵梁	90	2	0.20	4	2.2	97.8
轨道梁	130	4	0.20	3	3.1	96.9
平均值	108	3	0.17	4	2.7	97.6

3.3 顶面浮浆过厚的解决措施

加强施工振捣环节的旁站监督管理,在控制混凝土坍落度的同时,分层浇筑厚度 ≤ 500 mm,斜面浇筑时坡度 $\leq 1:3$,确保距顶层40 cm下层混凝土初凝前完成上层浇筑。振捣作业需严格遵循“快插慢拔”操作规程,振捣时间为15~20 s/点,以混凝土表面泛浆且无气泡逸出为合格标准。混凝土浇筑距梁体顶层40 cm时,暂停浇筑,待混凝土初步凝结后再进行顶层梁体浇筑,且振捣棒插入深度不大于40 cm,以防止下层振捣产生的灰浆被振捣棒带至最上层,同时缩短振捣时间以减少灰浆上浮。通过连续几天的监督控制,严格按措施执行后,梁体顶端裂缝情况有了质的改变,效果明显。

当梁体顶部混凝土浇筑至距设计顶面40 cm时,应在混凝土拌合物添加聚丙烯纤维。可有效提升混凝土抗裂性,减少温度引发的微裂缝,增强抗渗性、耐冲击性与抗震性能,提高韧性和强度;还能解决混凝土离析问题,提升浇筑体整体均匀性,显著减少裂缝数量、缩短裂缝长度、减小裂缝宽度,降低贯通裂缝生成概率,阻断内部毛细裂缝,明显改善抗渗性能。

选定2榀横梁,顶部混凝土采用掺加聚丙烯纤维,与不掺加聚丙烯纤维的横梁同时浇筑,待拆完模板后进行比较。经检验,掺入聚丙烯纤维的梁体无裂缝;未掺入聚丙烯纤维的梁体局部则存在少许裂缝,但掺加聚丙烯纤维的混凝土造价增加20元/m³,导致施工成本有所增加。

3.4 混凝土养护不到位解决措施

混凝土浇筑完成二次收面后在梁顶部覆盖 3~5 cm 深水进行养护直到拆除模板。从实际效果来看(如图 1 所示),这种方式能有效避免梁体裂缝出现,但也存在明显缺陷,由于养护水长期浸泡,导致养护水嵌入混凝土与模板缝,拆除模板后混凝土表面有水纹、粘皮,整个构件侧面呈现发黑现象,严重影响外观质量。



图 1 覆水养护效果图

为避免顶部及翼缘板因暴露面积较大、水分易流失,且养护不到位(保湿不及时、水分蒸发过快)而产生裂缝,需在混凝土浇筑完成并经二次收面后,及时对表面喷洒养护液并务必保证均匀、厚度一致,避免漏喷现象(否则会影影响养护效果),待其形成封闭薄膜后,立刻覆盖塑料薄膜以有效

锁水养护。经此措施,拆除模板后,梁体顶面及侧面均无裂缝,表面平整度高,且无蜂窝麻面、色差等缺陷,构件整体色泽均匀、质感细腻,外观质量良好。

喷洒养护液及覆膜养生效果如图 2 所示。



图 2 喷洒养护液及覆膜养护效果

4 效果检查

2024 年 11 月 1 日—12 月 23 日对施工的高桩码头预制梁构件进行裂缝检查,结果显示,高桩码头预制梁构件出现少量裂缝现象,前期可能存在的相关问题得到显著改善,具体检查结果见表 5。通过上述一系列针对性解决措施,预制构件因施工配合比不佳、减水剂性能问题、顶面浮浆过厚及混凝土养护不到位等可能引发的裂缝问题得到了有效控制,构件的强度、外观及耐久性均达到设计要求,施工质量得到了切实保障。

表 5 高桩码头预制梁构件裂缝检查结果

项目	裂缝出现率标准/%	检查数量/榀	出现裂缝数量/条	裂缝宽度/mm	裂缝长度/mm	裂缝出现率/%	检查结果	检查方法
横梁	≤5	93	3	0.40	4	3.20	检查 93 榀横梁,其中 3 榀横梁翼缘板存在裂缝	目测观察
纵梁		51	2	0.40	3	3.90	检查 51 榀纵梁,其中 2 榀纵梁存在裂缝	目测观察
轨道梁		43	1	0.30	2	2.30	检查 43 榀轨道梁,其中 1 榀轨道梁存在裂缝	目测观察
合计		187	6	0.37 (平均值)	3 (平均值)	3.13 (平均值)	共计检查 187 榀梁,出现裂缝的梁数 6 榀	目测观察

5 巩固措施

1) 搅拌站方面

加强对搅拌站地材质量控制,尤其是地材的含泥量指标。含泥量不满足规范要求很容易导致混凝土出现开裂现象。对设计坍落度为 140±20 mm 的混凝土,调整和优化预制梁配合比,确保砂率不宜过高,一般控制在 35%~37%之间,增加粗骨料用量,降低混凝土的流动性,减少施工振捣时产生的浮浆量,控制骨料下沉量。同时减水

剂保坍性能要调整,保证混凝土水分不至散失过快,降低因水分散失过快而导致早期出现收缩裂缝的风险。

2) 施工现场

梁顶层浇筑时控制好振捣时间和插入深度,不要出现过振而导致浮浆上浮,骨料下沉的问题。同时加强对顶面及翼缘板处的保湿养生,浇筑完成初凝后及时喷洒养护液同时铺贴一层塑料薄膜进行锁水养护。

3) 其他方面

加强对作业人员的交底教育，在梁浇筑完成后初凝二次收面时，严禁工人手扶顶面外伸筋，避免钢筋晃动导致顶部外伸筋附近出现裂缝等次生问题的发生。

6 结语

本研究围绕高桩码头预制梁构件拆模前顶部裂缝问题，以盐城港响水港区小蟒牛作业区码头二期工程为依托，通过对原材料性能、施工工艺和环境因素进行分析，揭示了减水剂性能不佳、施工配合比不佳、梁顶端浮浆过厚以及混凝土养护不到位是导致预制梁浇筑后产生裂缝主要原因。针对性地提出配合比优化、调整减水剂掺量、工艺改进、引入聚丙烯纤维材料及喷洒养护液结合覆盖塑料薄膜的综合防控方案显著提升了预制梁构件质量。为同类工程提供了可借鉴的技术方案。

然而，本研究仍存在一些不足之处。如聚丙烯纤维的应用方面，只进行了短期效果验证，其长期性能对预制梁耐久性的影响有待进一步观测；

对于不同环境因素(如极端天气条件)研究不够深入，缺乏实质性依据。未来需要从以下方面进行优化：

1) 开展聚丙烯纤维长期性能的跟踪研究，评估其在长期干湿循环、荷载作用下对预制梁抗裂性和耐久性的影响；

2) 对不同气候区的极端环境条件，建立可实行方案；

3) 尝试将研究成果与智能施工技术相结合，开发物联网的预制构件原材料性能、施工工艺和环境因素的施工过程监测系统，进一步提升预制构件的防裂智能化水平。

参考文献：

- [1] 邓岩. 混凝土建筑结构施工中的裂缝修复技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024(9): 79-81.
- [2] 李绍军. 混凝土结构工程裂缝控制修复技术[J]. 中国水泥, 2024(8): 112-113, 116
- [3] 王小军. 高桩码头混凝土裂缝预防与控制措施[J]. 珠江水运, 2024(9): 113-115.