



东非某高桩码头现浇面层混凝土裂缝控制

刘世奇, 赵宏飞

(中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510450)

摘要: 面层混凝土裂缝是高桩码头施工的质量通病, 不仅影响工程的外观质量, 还会降低结构耐久性, 因此需要研究码头面层裂缝成因, 并采取针对性的控制措施。介绍东非某高桩梁板码头的结构设计、施工工艺和试验段施工面层混凝土裂缝情况, 通过模拟计算混凝土结构收缩应力和现场调查, 分析裂缝产生原因为失水导致的干燥收缩和养护不良导致的塑性收缩。从优化原材料质量、优化混凝土配合比、完善施工工艺等方面提出控制措施, 在后续典型施工中面层混凝土数量减少 98%、裂缝最大宽度减少 60%, 控制效果良好。

关键词: 高桩码头; 面层; 裂缝; 收缩应力; 裂缝控制

中图分类号: U656.1+13; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0241-08

Control of crack on cast-in-site surface layer concrete of pile-supported wharf in East Africa

LIU Shiqi, ZHAO Hongfei

(The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510450, China)

Abstract: Cracks on the surface layer concrete, the influence factors of appearance quality of the project and reducing the durability of the structure, are common quality problem in the construction of pile-supported wharf. It is necessary to study the causes of cracks in the surface layer of the wharf and take targeted control measures. We introduce the structural design, construction technology and cracks in the concrete surface layer of the test section of a pile-supported beam-slab wharf in East Africa, and use simulation calculations of concrete structure shrinkage stress and on-site investigation to analyze the crack causes that are drying shrinkage caused by water loss and plastic shrinkage caused by poor curing. Then we propose control measures from the aspects of optimizing raw material quality, optimizing concrete mix ratio, and improving construction technology, etc. In the subsequent typical construction, the amount of surface concrete is reduced by 98% and the maximum width of cracks is decreased by 60%. The control effects are well.

Keywords: pile-supported wharf; surface layer; crack; shrinkage stress; crack control

高桩码头作为一种较为成熟的结构形式, 在东非港口建设中得到了广泛应用。然而面层混凝土裂缝在高桩码头施工中普遍存在, 不仅影响工程的外观质量, 更重要的是会降低结构耐久性, 增加维护费用^[1-2]。

国内学者在面层混凝土裂缝控制方面进行了很多研究, 如张伟等^[3]、黄沛等^[4]的研究均表明, 面层混凝土的细集料应为级配良好的中砂。然而在东非地区中砂资源匮乏, 细砂是一种常见的天

然细集料。同时, 东非沿海地区气候比国内更炎热, 日照强烈、气温高、风速大, 混凝土表面水分蒸发速率快^[5], 也会对面层混凝土裂缝控制产生较大影响。本文针对东非某高桩梁板码头试验段面层混凝土结构的开裂情况, 对裂缝的产生机理进行分析, 设立典型施工区域, 并结合现场的施工工艺提出优化控制措施, 将其应用于典型施工中, 旨在为类似工程面层混凝土裂缝控制提供参考和借鉴。

收稿日期: 2025-01-20

作者简介: 刘世奇(1997—), 男, 工程师, 从事公路、水运工程试验检测工作。

1 工程概况

工程位于非洲东海岸，常年气温高于 25 ℃。工程为高桩梁板码头，共 160 根灌注桩，组成 40 排基桩，码头总长度 315 m，垂直于码头岸线宽度为 20 m。面层混凝土强度等级为 C40，底部钢筋保护层厚度为 65 mm，其余位置为 50 mm。码头面层混凝土结构见图 1，分两次进行浇筑，浇筑总厚度为 450 mm，其中先浇筑板缝间厚 300 mm 的湿接缝，再进行厚 150 mm 面层的浇筑。

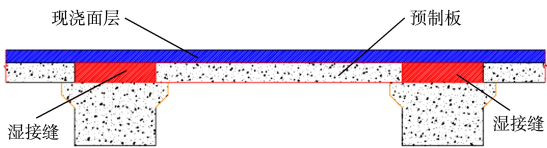


图 1 现浇面层混凝土结构
Fig. 1 Concrete structure of cast-in-site surface layer

2 码头面层混凝土施工及裂缝基本情况

2.1 码头面层混凝土施工工艺

工程正式施工前，在 ②3~②7 轴进行试验段施工，试验段长度 32 m，共计 93.8 m³ 混凝土。面层混凝土按照施工顺序分为 6 幅进行浇筑（靠岸侧为第 1 幅，码头前沿为第 6 幅），分块宽度不大于 5.5 m。每幅浇筑顺序沿码头纵向进行，不同幅间隔浇筑，先进行第 3 幅浇筑，随后依次进行第 2、4、5 幅浇筑，为减少各幅混凝土收缩体积差，每幅混凝土浇筑间隔为 48 h 以内，待过渡板安装完成后进行第 1 幅浇筑，最后进行前帽梁面层（第 6 幅）浇筑。现浇面层混凝土分幅见图 2（试验段实际施工时未进行第 6 幅的浇筑）。

面层混凝土浇筑时主要分 3 步，即振捣初平、人工收浆、抹面收光。其中在人工收浆全部完成后立即覆盖塑料薄膜防止水分蒸发，待混凝土初凝后进行二次抹光，待混凝土终凝后进行收光。浇筑完成 12 h 内进行切缝，纵向切缝位置设置于纵梁两侧、面层顶线及板中心线；横向切缝位置设置于横梁两侧、面板接缝及板中心线的位置。切缝位置见图 3，切缝深 15 mm、宽 5 mm。切缝完成后覆盖塑料薄膜保水，再覆盖土工布洒水养护 14 d。

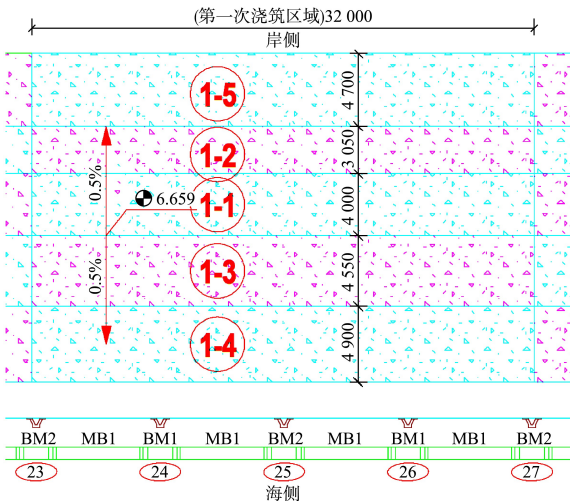


图 2 现浇面层混凝土分幅（高程：m；尺寸：mm）
Fig. 2 Concrete division of cast-in-site surface layer (elevation: m; dimension: mm)

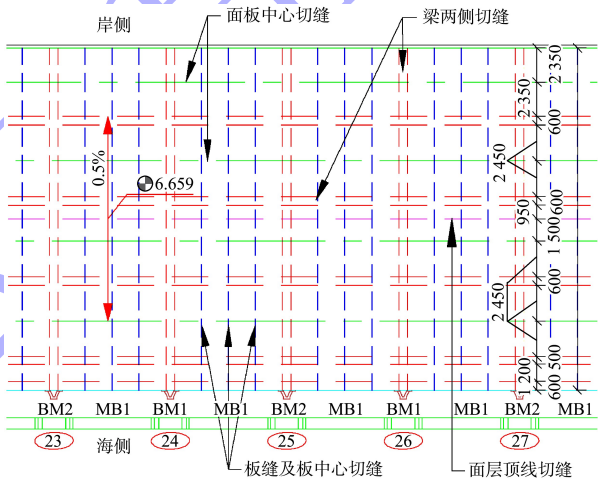


图 3 现浇面层混凝土切缝位置（高程：m；尺寸：mm）
Fig. 3 Position of concrete cutting joint on cast-in-place surface layer (elevation: m; dimension: mm)

面层混凝土采用 TWIGA CEMI 42.5N 水泥，初凝时间为 70~90 min，水泥细度 428 m²/kg；粉煤灰为印度 Jaycee 产 ASTM C618 F 级粉煤灰；粗集料为 LINDI 生产的花岗岩，空隙率约 45%；细集料受当地条件限制，只有细度模数为 1.6~1.7 的天然坑砂，含泥量 2.5%；外加剂为聚羧酸高性能减水剂；纤维为聚乙烯醇纤维，掺量取推荐值 0.9 kg/m³。面层 C40 混凝土配合比见表 1，混凝土入模坍落度 190 mm，28 d 抗压强度为 49.2 MPa。

表 1 面层 C40 混凝土配合比							
Tab. 1	Mix ratio of surface layer C40 concrete						kg/m ³
水泥	粉煤灰	砂	小石子	大石子	水	减水剂	纤维
338	92	675	462	693	155	5.59	0.9

2.2 码头面层混凝土裂缝情况

浇筑完成后 1~2 d 龄期内, 在部分面层混凝土区域内出现了大量的网状龟裂, 见图 4a), 密度很大, 具有明显的边界, 最大裂缝宽度均小于 0.05 mm, 深度也较浅。

浇筑完成后 30~90 d 龄期内, 面层混凝土普遍在刻线内部出现了网状裂缝, 见图 4b), 裂缝往往起始于切缝处, 但不会越过切缝往相邻片区发展, 最大裂缝宽度在 0.1 mm 左右, 且属于浅层裂缝, 往往需要洒水才能显现。由于其长度、宽度和深度都较小, 即使数量较多, 也不会对面层结构的耐久性产生严重影响。

网状裂缝出现的同时, 面层混凝土出现了部分垂直岸线方向和少量平行岸线方向的裂缝, 见图 4c), 这些裂纹往往会伴随其他方向的次级裂缝。其中主裂缝的长度较长, 往往会越过切缝, 朝相邻片区发展, 但尚未横跨码头面层; 其最大宽度大于 0.2 mm, 深度则贯穿了上部钢筋保护层, 但未贯穿整个面层, 对面层混凝土结构的外观和耐久性产生严重影响。主裂缝周围垂直方向会伴随出现少量次级裂缝, 长度也较小, 往往不会越过切缝; 其宽度与网状裂缝类似, 在 0.10~0.15 mm, 深度较浅, 对面层混凝土结构的外观和耐久性影响不大。



图 4 码头面层混凝土裂缝形式

Fig. 4 Concrete crack patterns on surface layer of wharf

码头面层混凝土裂缝情况见表 2。

表 2 码头面层混凝土裂缝情况

Tab. 2 Concrete crack situation on surface layer of wharf

裂缝类型	裂缝密度/ (条·m ⁻²)	最大裂缝 宽度/mm	裂缝出现 时间/d
龟裂	—	0.05	1~2
网状裂缝	1.2	0.10	30~90
主裂缝	0.1	0.25	30~90
次级裂缝	0.3	0.15	30~90

3 面层混凝土裂缝成因分析

3.1 龟裂产生原因

面层混凝土早期产生的裂缝主要是胶凝收缩裂缝、温差变形裂缝和塑性收缩裂缝。由于本工程面层混凝土采用分层浇筑的方法施工, 面层混凝土仅厚 150 mm, 混凝土中心胶凝材料水化产生的热量可以较快地散发出去, 因此面层混凝土因中心与表层温差产生温度应力而开裂的风险较小。

胶凝收缩是由于胶凝材料发生水化反应而造成的体积变化, 也叫自生收缩。一般来说, 胶凝收缩的变形量不大, 同时面层混凝土粉煤灰掺量为 21.4%, 粉煤灰的掺入可有效减少胶凝收缩, 甚至可能发生胶凝膨胀^[6], 由此因胶凝收缩应力而产生的开裂风险同样较小。

通过观察裂缝分布可以发现, 龟裂区域混凝土颜色与周边无裂缝混凝土颜色差距较大, 裂缝区域的边界较为整齐。结合现场施工情况发现, 龟裂区域保湿塑料膜覆盖不到位, 因此可以认定造成龟裂的主要原因是养护不到位而产生的塑性收缩。塑性收缩主要发生在混凝土初凝之后, 混凝土剧烈水化造成混凝土泌水, 同时表面水分剧烈蒸发的速率超过内部水向表面迁移的速率时, 则会造成毛细管产生负压, 使表层混凝土浆体产生塑性收缩^[7], 同时由于集料和胶凝材料之间也

会发生不均匀的塑性收缩变形,导致混凝土表面产生裂纹。一般来说,塑性收缩裂缝往往较宽、较深,但是由于本文工程在终凝后又进行了一次收面,使得养护不良区域表面塑性收缩变形较小,且终凝后混凝土抗拉强度高于初凝后的混凝土,使得裂缝的深度和宽度都较小,表现为龟裂。

3.2 网状裂缝和主裂缝产生原因

网状裂缝和主裂缝均于面层混凝土 30 d 龄期后出现并发展,由于此时面层混凝土的主要水化反应早已完成,裂缝不是由于水化热温升引起的

温差应力造成,而是由混凝土失水收缩引起的干缩应力造成。

为了进一步分析面层混凝土的干缩应力情况,采用王铁梦^[8]的混凝土结构裂缝控制理论,计算不同龄期下的混凝土收缩:

$$\varepsilon_y(t) = 3.24 \times 10^{-4} M_1 M_2 \cdots M_n (1 - e^{-0.01t}) \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_y(t)$ 为任意时间的收缩应变; t 为时间, d; $M_1, M_2, \cdots, M_n$ 为非标准状态下的修正系数,本文工程根据实际情况取值,见表 3,无法在表中直接取得的系数均用插值法得出。

表 3 非标准状态下的修正系数

Tab. 3 Correction coefficient under non-standard conditions

修正系数	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
取值	1.120	1.216	1.000	0.948	3.030	0.930	1.000	0.840	1.000	0.810

由于混凝土的应力数值与弹性模量成正比,因此弹性模量计算公式的选择直接影响力计算的精度,本文任意时间混凝土弹性模量计算公式采用双指数式^[9]:

$$E(\tau) = \beta E_0 [1 - \exp(-a\tau^b)] \quad (2)$$

式中: $E(\tau)$ 为混凝土龄期为 τ 时混凝土的弹性模量, GPa; β 为掺合料修正系数,粉煤灰掺量为 20% 时取 0.99; E_0 为混凝土标准养护下 28 d 的弹性模量,因混凝土 28 d 抗压强度较高为 49.2 MPa,弹性模量取 33 GPa; a 、 b 为系数,取 $a = 0.4$ 、 $b = 0.6$ 。

对于混凝土来说,由于内部材料在长期荷载下发生黏性流动,从而产生徐变现象。对应到本文中,需要考虑由于应力松弛从而导致的收缩应力下降,即:

$$\sigma_x^*(t, \tau) = \sigma_x(\tau) H(t, \tau) \quad (3)$$

式中: $\sigma_x^*(t, \tau)$ 为 τ 龄期的混凝土松弛应力; $\sigma_x(\tau)$ 为弹性应力; $H(t, \tau)$ 为 τ 龄期时,应力延续至 t 时的松弛系数,按照文献[8]表 5-1 中 $\tau = 10$ d 取值。

本文采用 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》^[10]的推荐公式计算混凝土抗拉强度,即:

$$f_{tk}(\tau) = f_{tk}(1 - e^{-\gamma\tau}) \quad (4)$$

式中: $f_{tk}(\tau)$ 为混凝土龄期为 τ 时的抗拉强度标准值; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值,因混凝土抗压强度高于 C40 等级,故取 2.5 MPa; γ 为系数,因混凝土中粉煤灰存在二次水化,取 0.1。

基于现场面层混凝土裂缝出现时间以及混凝土养护时间,计算面层混凝土收缩应力、抗拉强度和抗裂安全系数,计算结果见表 4。

表 4 码头面层混凝土计算结果

Tab. 4 Calculation results of surface layer concrete of wharf

龄期/d	收缩应力/MPa	抗拉强度/MPa	抗裂安全系数
12	0.96	1.75	1.81
14	0.90	1.88	2.10
20	1.03	2.16	2.10
30	1.39	2.38	1.71
45	1.95	2.47	1.27
60	2.46	2.49	1.01

由表 4 可知,面层混凝土的抗裂安全系数在 20 d 达到最高,随后持续降低。根据 JTS/T 202-1—2022《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》^[11],由于混凝土内表温差,导致混凝土表面受到拉应力,对于严酷侵蚀环境的混凝土,其抗裂安全系数需要达到 1.6,若面层未出现裂缝,收缩应力会持续增加,混凝土抗拉强度与收缩应力的比值持续降低,直到出现裂缝释放应力为止^[12]。本文工

程地处非洲, 面层受到风吹日晒的直接影响, 先于中心混凝土失水干缩, 面层混凝土则受到拉应力。同时由于面层混凝土表面在实际生产中, 往往会存在缺陷或者应力集中区, 如振捣收面不充分、钢筋保护层厚度不一、现浇横梁和板缝拼接等变截面处等, 在这些区域更容易产生微裂纹, 相比于其他区域, 微裂纹在拉应力的作用下会更容易形成裂缝, 从而将拉应力释放, 裂缝会向微裂纹水平方向以及下表面发展。因此, 在这种情况下, 即使 30 d 龄期的面层混凝土其抗裂安全系数达到 1.71, 但是其表面依然有一定可能产生裂缝; 此时, 由于应力释放, 致使下表面的混凝土裂缝反而较少。

4 面层混凝土裂缝控制措施

4.1 原材料质量

工程采用天然坑砂作为细集料, 细度模数 1.6~1.7, 含泥量为 2.5%。泥粒和石粉作为有害成分, 能阻碍水泥与集料的黏结, 从而降低混凝土强度; 同时由于泥粒吸附的自由水, 一般位于 2.5~10 nm 的微小毛细管中^[13], 在混凝土干燥过程中会缓慢损失, 对混凝土的收缩产生较大影响。同时有研究^[14]表明, 集料中含泥量超过 1.5% 后, 对力学性能和干缩性能产生较大不利影响; 含泥量超过 1.0% 后, 混凝土的抗裂性能会大幅下降。

工程地处非洲东部, 当地经济条件不发达, 不具备生产优质机制砂的条件, 只能对现有细集料进行处理。因此工程使用洗砂机对混凝土细集料水洗, 去除砂中的石粉、泥粒等有害物质, 同时一定程度地改善混凝土级配。细集料经过水洗后, 含泥量降低至 0.8%, 细度模数升高为 1.9~2.0。将水洗砂与未水洗砂作为变量测定水泥胶砂强度, 并在不改变混凝土水灰比的前提下配制面层混凝土, 检测其 28 d 立方体抗压强度和抗折强度, 试验结果见表 5。可以看出, 水洗砂的使用可以有效

提高混凝土的抗压和抗折强度。

表 5 水洗砂与非水洗砂试验结果
Tab. 5 Test results of washed sand and

砂类型	unwashed sand				MPa	
	水泥胶砂 2 d		水泥胶砂 28 d		混凝土 28 d	
	抗压强度	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度	抗折强度
水洗砂	24.7	3.8	49.6	7.6	52.1	5.9
未水洗砂	22.5	3.6	44.5	7.1	48.5	5.2

4.2 面层混凝土配合比

从本文工程裂缝成因来看, 混凝土配合比的优化方向为降低干缩和增强抗拉强度。

1) 增加混凝土中粉煤灰掺量。按照毛细管张力理论, 混凝土干缩的主要是由于水泥石中的毛细管失水后, 产生的毛细管张力引起的水泥石收缩, 毛细管直径越小, 因失水产生的张力就越大。一般来说, 直径在 10~50 nm 的中毛细孔对于混凝土的收缩影响较大, 粉煤灰作为矿物掺合料, 其微集料效应可以有效降低中毛细孔比例^[15]; 同时粉煤灰早期水化作用不强, 后期二次水化则会和 CH 晶体生成 CSH 凝胶, 再填充水泥石中的毛细孔, 使孔径分布更加合理^[16], 从而减少混凝土的干缩。

2) 降低混凝土用水量和坍落度。坍落度和用水量过高均会导致混凝土体系中的胶凝材料体积偏小, 造成水分蒸发量大, 混凝土的干缩也大^[17]。同时, 面层混凝土的坍落度过高, 在振捣时容易造成混凝土中粗集料下沉、表面泌水等不良影响, 使混凝土较容易出现塑性收缩, 更容易出现早期裂缝^[18]。

3) 增加混凝土中纤维掺量。在混凝土硬化后, 纤维在混凝土中起到约束和牵扯作用, 一方面纤维可以阻挡混凝土中微裂缝的发展, 增大其断裂能的消耗形成封闭的孔洞^[19]; 另一方面, 在已经产生裂缝的机体中, 纤维的桥接作用可以有效传递荷载, 钝化裂纹尖端的应力集中^[20]。根据文献[21]的研究, 纤维的掺量不宜过高, 体积掺

量应在 0.10%~0.13%，由于本文工程粗集料空隙率高、胶砂体积较大，纤维掺量需要比推荐值更高。

综上所述，工程在综合考虑混凝土抗裂性能要求、现场施工要求以及工程经济性后，优化面层混凝土配合比粉煤灰掺量增加到 25.2%，在保持水胶比基本不变的前提下减少混凝土用水量至 149 kg/m^3 ，混凝土入模坍落度减少至 160 mm，纤维掺量增加至 1.2 kg/m^3 。优化后面层 C40 混凝土配合比见表 6。

表 6 优化后面层 C40 混凝土配合比
Tab. 6 Mix ratio of surface layer C40 concrete
after optimization

kg/m ³							
水泥	粉煤灰	砂	小石子	大石子	水	减水剂	纤维
314	106	681	466	699	149	5.2	1.2

4.3 施工过程

1) 加强混凝土养护。本文工程面层混凝土早期出现龟裂的主要原因就是养护不到位，因此需要施工现场增加检查和巡逻频率，确保护养用塑料薄膜和土工布覆盖到位，保证面层混凝土在养护龄期内时刻处于湿润状态。

2) 缩短单次浇筑面层混凝土长度。本文工程试验段施工一次浇筑面层长度达 32 m，混凝土浇筑体长度越短，混凝土受到来自基础的拉应力就越小。将单次浇筑面层混凝土长度缩短为 16 m，可以有效减少面层混凝土所受的拉应力。

5 工程应用

根据上述裂缝控制措施，在 ②7~②9 轴进行面层典型施工。经过 60 d 的长期观察后，在典型施工段表面发现不规则裂缝 10 条，见图 5，方向垂直于码头岸线方向，属于浅层裂缝，裂缝密度 0.03 条/m^2 ，相比于采取控制措施前下降了 98%；最大裂缝宽度小于 0.1 mm，相比于采取控制措施前下降了 60%。



图 5 采取控制措施后的码头面层

Fig. 5 Surface layer of wharf after taking control measures

6 结语

1) 高桩梁板码头面层即使经过多次收面，仍会因养护不到位、不及时造成面层混凝土表面发生塑性收缩，易导致面层混凝土出现龟裂。对于已经采取分层分幅工艺浇筑的面层混凝土，出现裂缝的主要原因是混凝土发生干燥收缩，导致混凝土表面抗裂安全系数小于规定的安全限值，使得裂缝产生并发展。

2) 对于采用细砂拌制的面层混凝土，应加强原材料控制，严格控制其中含泥量使其小于 1%，采用水洗法可以较好地去除细砂中的泥粒等杂质并优化其级配。

3) 尽管本文工程面层混凝土施工试验段已经采取多种裂缝控制措施，但裂缝作为面层混凝土的质量通病，无法将其完全消除。同时，影响裂缝产生的因素也较为复杂，需要从多个方向进行考虑。通过增加混凝土中粉煤灰掺量、降低混凝土用水量和坍落度、使用纤维或增加其在混凝土中的掺量、加强混凝土养护、缩短单次浇筑面层混凝土长度等裂缝控制措施，使得工程面层混凝土典型施工段的裂缝数量和宽度均有了显著降低，能够为类似工程提供一定的参考和借鉴。

参考文献：

- [1] 袁原,焦绪学,冯光华.东非某全直桩码头项目面层裂缝控制技术研究[J].港工技术,2020,57(5):65-68.

- YUAN Y, JIAO X X, FENG G H. Analysis on control measures of cracks on concrete surface of full straight pile wharf in East Africa [J]. Port engineering technology, 2020, 57(5): 65-68.
- [2] 施新雨. 东非某项目码头面层裂缝产生原因及施工对策分析[J]. 珠江水运, 2023(22): 79-81.
- SHI X Y. Analysis on causes of cracks on wharf surface and construction countermeasures in East Africa[J]. Pearl River water transport, 2023(22): 79-81.
- [3] 张伟, 张怡戈, 王新刚. 高桩码头面层现浇混凝土裂缝成因分析及控制措施[J]. 混凝土, 2013(7): 152-154.
- ZHANG W, ZHANG Y G, WANG X G. High pile wharf surface layer concrete cracks cause analysis and control measures [J]. Concrete, 2013(7): 152-154.
- [4] 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措施[J]. 中国港湾建设, 2009(1): 22-24.
- HUANG P, JIN X K, WANG X G. Cause of cracks of Tianjin Port high-pile wharf surface layer concretes and its control measures[J]. China harbour engineering, 2009(1): 22-24.
- [5] 张英杰, 迟玮海. 聚丙烯纤维混凝土在集装箱码头上的研究与应用[J]. 水运工程, 2005(5): 55-61.
- ZHANG Y J, CHI W H. Research and application of polypropylene fiber concrete in container terminal [J]. Port & waterway engineering, 2005(5): 55-61.
- [6] 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.
- ZHU B F. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [7] 张巍, 杨全兵. 混凝土收缩研究综述[J]. 低温建筑技术, 2003(5): 4-6.
- ZHANG W, YANG Q B. Review on shrinkage of concrete[J]. Low temperature architecture technology, 2003(5): 4-6.
- [8] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- WANG T M. Control of cracking in engineering structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [9] 王新刚. 大体积混凝土温度应力实用计算方法及控裂工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- WANG X G. Practical calculation method for mass concrete temperature stress and crack control engineering examples[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [10] 大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Standard for construction of mass concrete: GB 50496-2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [11] 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范: JTS/T 202-1—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- Technical specification for thermal cracking control of mass concrete of port and waterway engineering: JTS/T 202-1-2022 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.
- [12] 宋雪峰, 李超, 邓春林. 高桩墩台式码头面层混凝土裂缝成因及控制措施[J]. 水运工程, 2015(3): 104-108.
- SONG X F, LI C, DENG C L. Causes and control of the crack on surface layer of the dolphin type berth on high piles [J]. Port & waterway engineering, 2015 (3): 104-108.
- [13] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- FENG N Q. High performance concrete structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [14] 李进辉, 李兆松, 刘雨, 等. 碎石含泥量对海工高性能混凝土性能影响试验研究[J]. 混凝土, 2013(7): 127-130.
- LI J H, LI Z S, LIU Y, et al. Investigated on effect of clay content in crushed stone on properties of high performance marine concrete [J]. Concrete, 2013 (7): 127-130.
- [15] 李彪, 钱晓倩, 林天乐, 等. 双掺粉煤灰与硅灰混凝土的强度与早期收缩试验研究[J]. 混凝土, 2022(12):

- 29-32, 43.
- LI B, QIAN X Q, LIN T L, et al. Experimental study on strength and early shrinkage of concrete mixed with fly ash and silica fume[J]. *Concrete*, 2022(12): 29-32, 43.
- [16] LAM L, WONG Y L, POON C S. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems[J]. *Cement and concrete research*, 2000, 30(5): 747-756.
- [17] 顾祥奎, 王晓晖, 庄骅. 洋山四期工程码头现浇面层混凝土裂缝控制[J]. *水运工程*, 2016(9): 140-146.
- GU X K, WANG X H, ZHUANG H. Control of concrete cracks in cast-in-place surface of Yangshan phase IV project[J]. *Port & waterway engineering*, 2016 (9): 140-146.
- [18] 王雪芳, 郑建岚. 坍落度与减水剂对混凝土早期开裂性能的影响[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(5): 681-685.
- WANG X F, ZHENG J L. Effect of the workability and superplasticizers on the early-age cracking behaviors of concrete[J]. *Journal of Xiamen University (natural science)*, 2008, 47(5): 681-685.
- [19] ROMUALDI J P, MANDEL J A. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement[J]. *ACI journal proceedings*, 1964, 61(6): 657-672.
- [20] 潘慧敏, 马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(6): 956-961.
- PAN H M, MA Y Z. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete and its mechanism of crack resistance and toughening[J]. *Journal of building materials*, 2017, 20(6): 956-961.
- [21] 张佚伦. 聚丙烯纤维混凝土早期收缩与抗裂性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- ZHANG Y L. Experimental investigation on early-age shrinkage and cracking-resistance property in polypropylene fiber-reinforced concrete[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- (本文编辑 王璁)
- ~~~~~
- (上接第 202 页)
- [9] 王宽君, 吴昊, 倪卫达, 等. 基于 CPTU 的广东海域黏土工程特性评价[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(S1): 191-202.
- WANG K J, WU H, NI W D, et al. Engineering properties assessment of marine clay in Guangdong offshore area based on CPTU[J]. *Journal of engineering geology*, 2021, 29(S1): 191-202.
- [10] DUAN W, CONGRESS S S C, CAI G J, et al. Empirical correlations of soil parameters based on piezocone penetration tests (CPTU) for Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge (HZMB) project[J]. *Transportation geotechnics*, 2021, 30: 100605.
- [11] 王宽君, 沈侃敏, 汪明元, 等. 黄海海域风电工程软弱海床强度 CPTU 原位解译方法[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(2): 99-108.
- WANG K J, SHEN K M, WANG M Y, et al. CPTU interpretation method of weak seabed strength of offshore wind power project in Yellow Sea area[J]. *Actaenergieae solaris sinica*, 2023, 44(2): 99-108.
- [12] 王宽君, 沈侃敏, 汪明元, 等. 基于孔压静力触探的杭州湾海域软黏土强度解译参数研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(S1): 521-532.
- WANG K J, SHEN K M, WANG M Y, et al. Strength interpretation parameter of piezocone penetration test for soft clay in offshore area of Hangzhou Bay[J]. *Rock and soil mechanics*, 2023, 44(S1): 521-532.
- [13] 水运工程岩土勘察规范: JTS 133—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- Code for geotechnical investigation on port and waterway engineering: JTS 133-2013 [S]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [14] 水运工程静力触探技术规程: JTS/T 242—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- Technical specification for cone penetration testing in port and waterway engineering: JTS/T 242-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- (本文编辑 赵娟)