



# 非洲某近百年历史的旧码头混凝土性能分析

张丽珍<sup>1</sup>, 刘海欣<sup>1</sup>, 张文龙<sup>2</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290;  
2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

**摘要:** 非洲某海港重力式方块码头建于1928年, 1950年进行扩建, 1968年进行修复时将上部胸墙混凝土拆除并重建钢筋混凝土。从始建至今将近百年, 结构破损严重。根据勘察报告揭示不同时期混凝土的性状, 描述不同时期混凝土结构的强度、孔隙率、裂缝发展程度等特点, 并分析其原因, 包括建设时混凝土技术水平, 施工的专业化、机械化程度, 码头环境条件, 使用年限和运营情况, 码头防护设施的设置情况, 以及在码头运营期间的历史背景等。其中, 码头结构建设时的混凝土发展水平、原材料选择、浇筑质量是影响旧码头混凝土性能的根本原因, 而混凝土在高酸、高盐的海水环境中受到长期溶蚀, 是影响混凝土性能的主要原因。通过混凝土特点和原因分析, 为修复方案的确定、修复工作的顺利开展提供依据, 以及为类似码头改造工程提供借鉴。

**关键词:** 旧码头改造; 混凝土碎裂; 混凝土耐久性

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0076-06

## Concrete performance of an old wharf with history of nearly a century in Africa

ZHANG Lizhen<sup>1</sup>, LIU Haixin<sup>1</sup>, ZHANG Wenlong<sup>2</sup>

(1. CCCCFHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China; 2. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** A gravity block wharf of a seaport in Africa was built in 1928 and expanded in 1950. During the restoration in 1968, the concrete breast wall was removed and reinforced concrete was rebuilt. Nearly a century since its establishment, the structure has suffered severe damage. According to the survey report, the characteristics of concrete in different periods are revealed, the strength, porosity, crack degree and other characteristics of concrete structure in different periods are described. The reasons for this are analyzed, including the level of concrete technology during construction, the degree of specialization and mechanization in construction, environmental conditions of the wharf, service life and operational status, the setting of wharf protective facilities, as well as the historical background during the operation. Among them, the development level of concrete, selection of raw materials and quality of pouring during the construction are fundamental reasons that affect the performance of concrete in the old wharf, while the main reason is long-term corrosion in high acid and high salt seawater environments. By analyzing the characteristics of concrete, this study provides a basis for the determination of repair plans and the smooth implementation of repair work, and provides references for similar wharf renovation projects.

**Keywords:** old wharf renovation ; concrete fragmentation; durability of concrete

由于混凝土具有原料丰富、价格低廉、生产工艺简单的特点, 且可浇筑成任意形状, 适用范

围广, 是土木工程必不可少的材料。从广义上讲, 混凝土问世的历史可追溯到远古时代, 但真正意

收稿日期: 2024-01-20

作者简介: 张丽珍 (1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口海岸工程设计及管理工作。

义上的现代混凝土的产生在1824年,英国人发明了水泥,从此混凝土以水泥作为胶凝材料,混凝土工程与混凝土技术才真正地开始了自己的发展历史<sup>[1]</sup>。1918年,美国建立了水灰比强度公式;1928年,法国提出混凝土收缩和徐变理论;1930年,瑞士应用数理统计法,提出混凝土强度与水泥强度等级和水灰比之间的关系。根据调查显示,20世纪30年代,混凝土的强度主要为10~30 MPa,高强度混凝土尚未出现<sup>[2]</sup>。随着混凝土技术的发展,1930年减水剂问世<sup>[3]</sup>。1937年,美国首先用亚硫酸盐纸浆液作为外加剂以改善混凝土和易性,并获得提高强度和耐久性的专利,开启了混凝土外加剂的研究,20世纪50年代后,外加剂开始大量使用<sup>[4]</sup>,混凝土的技术水平得到了进一步发展。

混凝土在海港码头工程的应用历史悠久,非洲某海港码头始建于1928年,采用重力式方块结构。码头运营至今,结构破损严重,急需进行修复。由于早期混凝土的设计方法、施工工艺、强度性质等和当代的混凝土差别显著,本文以该项目勘察资料为依据,分析不同时期混凝土结构的强度、孔隙率、裂缝发展程度等性能特点,并分析原因,旨在为修复方案设计提供依据,并为类似的超龄使用码头修复项目提供参考。

## 1 工程概况

非洲某海港码头始建于1928年。码头平面见图1。

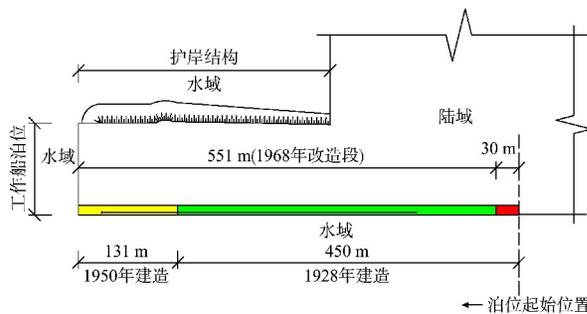


图1 码头平面

该码头历史上经过多次改扩建,主码头结构共包含3个时期的混凝土:1928年建方块素混凝土、1950年建方块素混凝土、1968年建胸墙钢筋

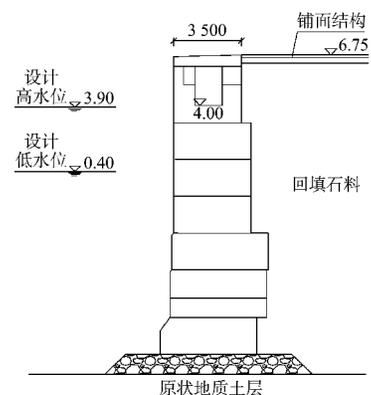
混凝土。

1) 码头采用重力式方块结构,岸线长450 m,港池底高程分别为-8.5、-10.5 m。码头顶高程为6.75 m。码头断面见图2a)。

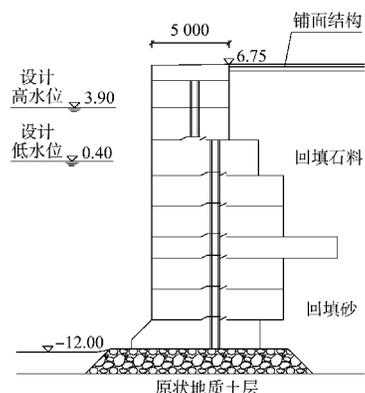
2) 1950年,仍采用重力式方块结构对码头进行扩建,延长了131 m,港池底高程-12 m,扩建段码头断面见图2b)。

3) 1968年,对整个码头进行了升级改造。其中原450 m码头段,30 m维持原状,剩余420 m码头进行升级改造,通过施打钢板桩使得港池底高程分别加深至-10、-12 m;顶部胸墙结构拆除重新浇筑混凝土。该段修复断面见图2c)。

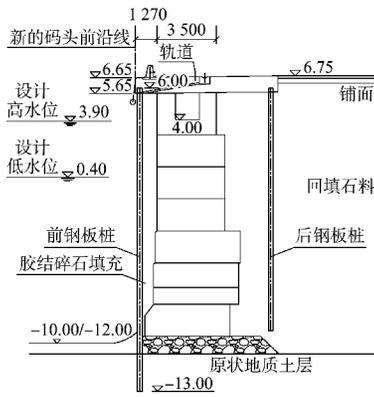
4) 1968年,对后扩建的131 m码头段也进行了升级改造,将胸墙和部分方块混凝土结构拆除后重新浇筑,通过胸墙加宽使码头前沿线外移并与其他段对齐,码头深度不变。该段修复断面见图2d)。



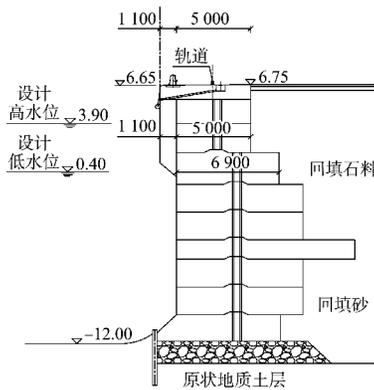
a) 1928年建450 m码头段



b) 1950年建131 m码头段



c) 1950年建131 m扩建码头段



d) 1968年131 m码头升级改造

图2 码头典型断面 (尺寸: mm; 单位: m)

## 2 勘察取样分析

### 2.1 混凝土指标

为探明码头结构现状,开展多次勘察钻孔。对不同时期混凝土样本的物理力学指标进行分析,各指标分布分别见图3~5,指标数值范围统计见表1。

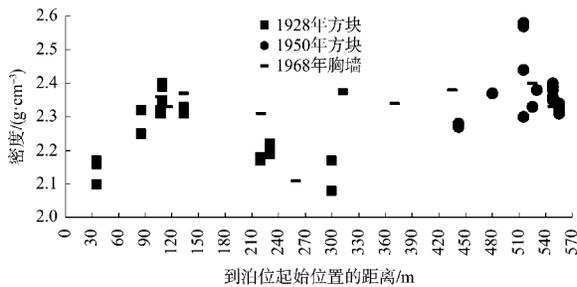


图3 混凝土样本密度分布

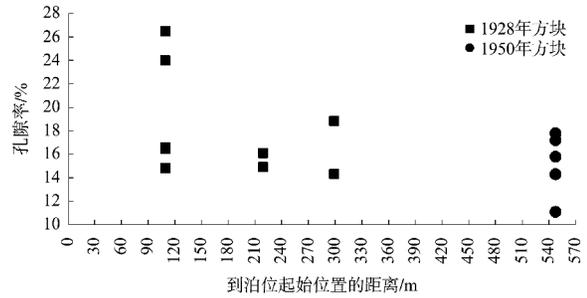


图4 混凝土样本孔隙率分布

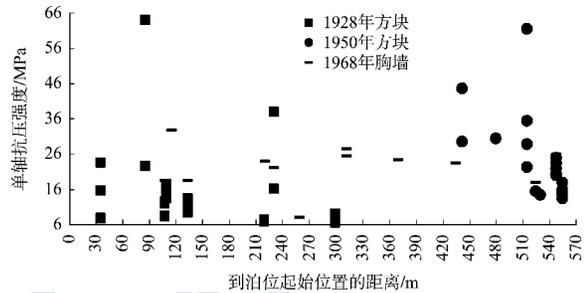


图5 混凝土样本单轴抗压强度分布

表1 混凝土物理力学指标

混凝土类型	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙率/%	单轴抗压强度/MPa
1928年方块混凝土	2.08~2.40	14.33~26.5	6.59~64.10
1950年方块混凝土	2.27~2.58	11.10~17.80	13.50~61.60
1968年胸墙混凝土	2.11~2.40	完整性很好,未检测	8.06~32.80

由以上图表可知,1928年方块混凝土的密度、单轴抗压强度最低,孔隙率最高;1950年方块混凝土的密度和强度均较高,孔隙率比较小;1968年胸墙混凝土的密度和抗压强度比较高,孔隙率非常低。

### 2.2 1928年建方块素混凝土现状

勘察报告显示,1928年建方块素混凝土的破损情况非常严重,主要表现为:

1) 码头前方前板桩受到严重腐蚀,尤其是水位变动区、浪溅区位置,局部板桩腐蚀成孔洞,孔洞后方板桩内充填的胶结碎石被淘刷,方块结构也有一定破损。混凝土方块结构的最大破损深度约达1.5 m。前板桩腐蚀和内部淘刷照片见图6,淘刷后形成的局部断面见图7。

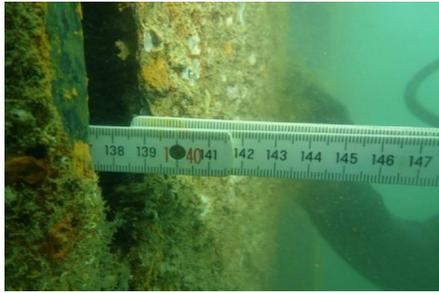


图 6 前板桩腐蚀和内部淘刷照片

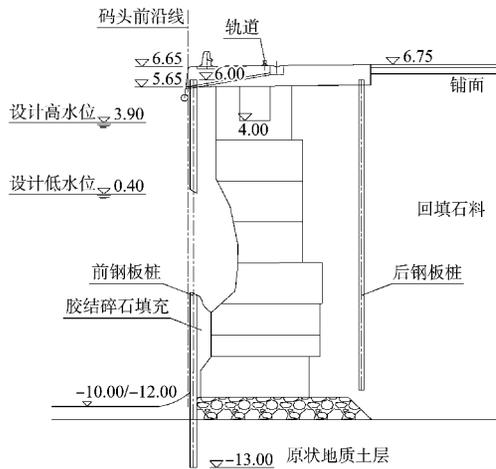


图 7 前板桩腐蚀和内部淘刷断面 (单位: m)

2) 在钻芯取样中发现方块混凝土存在局部碎裂、散装碎石、无胶结材料的情况。局部碎裂严重区域见图 8。对取样中方块混凝土的局部碎裂情况进行统计, 见表 2。

表 2 1928 年方块混凝土碎裂情况

钻孔编号	到泊位起始位置的距离/m	方块结构总高度/m	碎裂总高度/m	碎裂比例/%
BH01	35.0	14.60	4.95	33.9
BH02	85.0	11.55	4.50	39.0
BH03	99.0	11.55	2.00	17.3
BH04	107.0	11.55	2.00	17.3
BH05	133.0	11.55	2.20	19.0
BH06	139.0	11.55	2.00	17.3
BH07	170.0	11.55	3.20	27.7
BH08	219.0	11.55	0.60	5.2
BH09	230.0	12.60	0.80	6.3
BH10	259.0	13.55	1.10	8.1
BH11	299.0	13.55	1.60	11.8
BH12	333.5	13.55	0.80	5.9
BH13	373.5	13.55	1.20	8.9
BH14	413.5	13.55	0.00	0.0
BH15	442.0	15.05	1.00	6.6

注: 表中泊位起始位置见图 1 标识。碎裂总高度指样本所有破碎区域的高度和, 碎裂比例为碎裂总高度与方块结构总高度之比。



图 8 1928 年方块混凝土结构碎裂部分取样

从表 2 可以看出, 虽然 450 m 段的方块结构为同一时期建造, 但在靠近泊位起始位置处的方块碎裂更严重, 例如 BH0 和 BH02 破碎比例达到 30%~40%; 而与泊位起始位置越远, 碎裂比例越小, BH03~BH07 的破碎比例约为 17%~30%; BH08~BH15 的破碎比例约为 0%~12%。由于时隔多年, 当时建造施工时的实际情况已无从考证, 可能是在建造过程中原材料、施工工艺等的改进所致。

### 2.3 1950 年建方块素混凝土现状

根据报告指标分析, 1950 年建设的方块素混凝土与 1928 年混凝土相比, 质量、密度和抗压强度均显著提高, 孔隙率较低。取样照片见图 9。由图 9 可知, 1950 年的方块完整性非常好, 基本没有破碎情况。



图 9 1950 年方块混凝土结构取样

### 2.4 1968 年建胸墙钢筋混凝土现状

由于胸墙混凝土裸露在外, 和方块混凝土相比, 环境条件更加恶劣, 所以表面出现较多破损, 例如局部混凝土剥落、钢筋裸露等, 见图 10。根据表 1 显示, 1968 年建设的胸墙混凝土孔隙率很低, 完整性较好。取样照片见图 11。



图 10 1968 年胸墙混凝土结构表现



图 11 1968 年胸墙钢筋混凝土结构取样

### 3 混凝土性能原因分析

#### 3.1 混凝土浇筑时的技术与专业化水平较低

项目始建于 1928 年, 当时混凝土的计算理论和施工工艺并不成熟, 外加剂尚未应用, 且全世界各地区的技术发展水平不均衡。日本在 1955—1974 年建设的混凝土材料仍大量使用除盐不充分的海砂、未经检验的骨料, 浇筑缝不良, 振捣、养护不良, 配筋不足等现象广泛存在<sup>[5]</sup>。当时混凝土没有添加任何外加剂、掺和料, 对混凝土的各项指标, 如氯离子含量等没有进行严格控制, 材料选取不合格等, 从而导致混凝土的本身的浇筑质量较差、孔隙率较高、耐久性较差。

当时的机械化水平较低, 机械运输、泵送施工技术尚未普及, 机械化、专业化水平低, 更多地采用人工浇筑、人工振捣等, 因此浇筑质量更依赖于施工人员的技术水平, 从而出现浇筑质量不均匀、胶凝材料分布不均匀的情况, 例如 1928 年混凝土取样资料显示, 个别样本强度较高, 而个别样本却没有胶凝材料。随着科技的发展以及外加剂的广泛应用, 1950 年的方块混凝土浇筑技术水平有了极大改善。

#### 3.2 海洋环境对混凝土的侵蚀

理论研究表明, 在混凝土与周围介质接触的过程中, 侵蚀性物质渗透进入混凝土内部, 并与混凝土中的成分发生反应引起腐蚀, 最终发生统

裂剥落。侵蚀性物质主要为酸、盐溶液, 混凝土与磷酸、硫酸<sup>[6]</sup>等酸性溶液发生反应, 产生易被水溶蚀的无凝胶型的松软物质<sup>[7]</sup>。本项目为磷矿码头, 磷是一种高度活泼的元素, 在特定条件下可以与混凝土中的成分发生磷酸化反应, 导致混凝土损坏和腐蚀。而散货作业封闭条件较差, 作业过程中粉尘飞扬、洒落严重, 导致环境磷含量较高, 不利于混凝土的耐久性。海洋中富含的氯离子也是造成混凝土腐蚀破坏的重要原因<sup>[8]</sup>。腐蚀机理与酸性物质类似, 会发生反应产生大体积的固化物, 使得混凝土膨胀而破裂。

1928 年混凝土的密实度差、孔隙率高, 混凝土的渗透性也相应较高, 侵蚀性物质更容易渗透到混凝土内部, 导致混凝土极易开裂。而裂缝的出现进一步增大了渗透速度, 加快了溶蚀程度。溶蚀后胶结能力减弱, 最终导致混凝土材料的整体性被破坏。

#### 3.3 混凝土结构超负荷使用

1928 年用于建造码头的方块底高程分别为 -8.5、-10.5 m, 码头总高差分别为 14.25、17.25 m, 最底层方块宽度均为 5 m, 宽高比分别为 0.33、0.29。而 1950 年用于建造码头的方块底高程为 -12.0 m, 码头总高差为 18.75 m, 最底层方块宽度为 8.5 m, 宽高比为 0.44。随着理论计算的发展和进步, 1950 年在码头设置了卸荷板, 降低了方块所受后方土压力, 结构更安全。

因此, 在同样的外荷载作用下, 1928 年用于建造码头的方块混凝土将承受比 1950 年混凝土更大的应力, 尤其是底层方块更容易发生破坏。

#### 3.4 混凝土结构超龄使用, 耐久性降低

国内外学者对海水环境下混凝土性能变化的研究可追溯到 19 世纪 80 年代<sup>[9]</sup>。在洛杉矶港口浸泡时间长达 67 a 的大型混凝土的劣化情况研究表明, 海洋环境下, 降低混凝土渗透性和碱性, 添加掺合料有利于提高构件的耐久性。荷兰某海上暴露站曾制备 64 个中等强度的矿渣水泥混凝土, 浸泡 63 a 后观察混凝土的各指标对混凝土耐久性的影响。从 1899 年开始日本北海道累计制作

超 6 万个砂浆试件, 进行外观和抗拉强度检测, 经过 90 a, 与最大抗拉强度相比, 抗拉强度降低到 47%~66%<sup>[10]</sup>。从北海道北防波堤混凝土中取芯测试混凝土强度, 1933 年抗压强度为 40 MPa, 到 1993 年检测时(经过 60 a), 北防波堤抗压强度为 22~38 MPa, 平均为 30.3 MPa, 强度残存率约 75%, 南防波堤抗压强度为 15~33 MPa, 平均为 20.8 MPa。

国内外对海洋环境下混凝土参数演变的研究表明, 随着混凝土暴露龄期的增长, 其强度在暴露周期内呈先升后降的趋势。总体而言, 时间越久混凝土强度降低越多。

### 3.5 护舷等防撞设施设置不足

目前现有码头的护舷仅为小型圆筒状橡胶护舷, 见图 12。码头停靠船型为 6.5 万吨级散货船, 此护舷吸能远远不够。而在 1968 年码头改造之前, 原码头的护舷设施可能更差, 而且已经拆除。

护舷吸能不足将使得码头结构自身承受较大的冲击力, 易导致表层混凝土的碎裂。板桩孔洞内的方块结构局部破损, 可能由于船舶撞击所致。



图 12 码头现有护舷

### 3.6 战争原因

码头可能受到历史上战争的冲击, 码头方块结构曾经被水雷轰炸。因此, 板桩孔洞内的方块结构局部破损, 也可能是受战争的影响导致。

综上所述, 本项目的混凝土性能影响因素与项目自身特点、环境条件、历史等密切相关, 各因素综合分析见表 3。

表 3 混凝土性能影响因素

影响因素	原因分析	类型划分
混凝土浇筑时的技术、专业化水平	根据混凝土发展史, 1928 年混凝土理论发展、工艺技术、专业化水平均较低, 1950 年混凝土技术水平提高, 浇筑质量更有保障	根本原因
海洋环境对混凝土的侵蚀	海洋酸、盐环境的溶蚀, 使得混凝土膨胀而破裂。密实度差、孔隙率高的混凝土, 渗透性高, 侵蚀性物质更容易渗入到混凝土内部, 进一步加速混凝土的溶蚀、淘刷、破裂	主要原因
混凝土结构超负荷使用	方块结构的宽高比偏小, 底层方块承受了较大的应力	其他可能的原因
混凝土结构超龄使用, 耐久性降低	根据国内外的海洋环境下混凝土参数演变的相关研究, 使用时间越久, 混凝土强度降低越多	其他可能的原因
护舷等防撞设施设置不足	目前现有码头的护舷吸能不足, 导致码头结构自身承受较大的撞击能, 容易导致表层混凝土的碎裂	其他可能的原因
战争的冲击	历史上曾受到战争的冲击	其他可能的原因

## 4 结论

1) 1928 年方块混凝土的密度、单轴抗压强度低, 孔隙率高, 勘察样本胶凝材料流失、混凝土碎裂情况严重, 质量较差; 1950 年建设的方块混凝土以及 1968 年的胸墙混凝土, 其密度和强度均较高, 取样完整, 质量较好。

2) 影响旧码头混凝土质量的因素很多, 例如建设时混凝土技术水平, 施工的专业化和机械化程度, 码头环境条件, 使用年限和运营情况, 码头防护设施的设置情况, 以及在码头运营期间的历史背景等。不同码头的影响因素不同, 应具体分析。

(下转第 87 页)