

# 重力式码头国际热点研究问题与案例解析

胡升<sup>1</sup>, 朱瑞虎<sup>2</sup>, 吴腾<sup>2</sup>

(1. 安徽省交通科学研究院, 安徽 合肥 230000; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 按照推进建设交通强国的要求, 在基础设施建设质量安全领域需紧盯国际先进技术及成果, 进行梳理并及时转化为国内生产力。本文通过国内外资料搜集, 就国际关于重力式码头质量的热点研究问题进行了总结, 并通过具体案例进行了详细说明, 为国内相关从业人员提供参考和借鉴。

**关键词:** 重力式码头; 质量; 国际热点; 案例解析

中图分类号: U655

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2022) 07—0054—03

2019年和2021年, 中共中央、国务院先后印发《交通强国建设纲要》<sup>[1]</sup>和《国家综合立体交通网规划纲要》<sup>[2]</sup>, 全面建设现代化高质量国家综合立体交通网已成为我国向交通强国迈进的重要目标。高质量国家综合立体交通网需要高质量的交通工程配套与支撑, 因此, 交通运输部近几年开展了“平安百年品质工程”建设工作<sup>[3]</sup>, 全力打造精品工程、平安工程、高质量工程。按照推进建设交通强国的要求, 在基础设施建设质量安全领域, 要补齐短板, 夯实基础, 推动关键技术的研究和应用。目前, 发达国家的基础研究依然走在世界的前列, 部分热点研究问题仍需“对标对表国际”、寻找差距、补齐短板。

重力式码头是我国分布较广, 使用较多的一种码头结构形式。服役环境恶劣, 承载力超载、船舶碰撞等问题的发生严重影响码头的使用安全, 甚至会发生事故。本文总结了国际典型港口重力式码头的相关质量安全研究问题并结合案例进行分析, 为国内相关从业者提供参考。通过国际论文检索分析总结, 重力式码头的热点问题如下:

## 1 通过监测预警对质量风险进行分析与研究

该研究主要针对可能引发工程质量的不确定性因素加以有效的监测、分析及处理, 以最少成本作为代价, 实现施工质量及运营控制方面的保障。此类方法的手段较多, 如对监测资料的分析、对项目的观察等, 其运用的数学工具包括数理统计、概率论等, 并结合系统论这一科研方法, 对码头诸多方面潜在的风险进行探究。

### 1.1 案例 1: 西班牙巴利阿里港务局重力式码头监测系统<sup>[4]</sup>

西班牙巴利阿里港务局在博塔福克防波堤工程中

为 8 号沉箱开发了一套监测仪器系统, 该系统在沉箱 4 个侧立面及海底布设监测传感器, 该传感器测量压力和加速度响应, 其原理是用惯性系统完成的测量三个笛卡尔轴的角速度和加速度, 并转化为压力和加速度响应。港务局和马德里理工大学基于监测数据开展两个方向研究: 一个是基于 Goda 和 Sainflou 研究垂直防波堤设计新理论, 一个是基于监测数据开发结构报警监测系统。这种报警系统收集数据并实时处理, 比较沉箱所受的压力规律与设计临界状态, 给出了一个安全系数实时指出实时风险水平; 报警系统位于港口控制中心, 为在紧急疏散的情况下提供建议。

### 1.2 案例 2: 科伦坡某重力式码头沉降位移监测分析与应对措施<sup>[5]</sup> (中交第四航务工程局承建)

结合前期设计施工经验, 在科伦坡港 (斯里兰卡西南部) 某在建码头工程中, 对施工期间沉箱沉降位移进行观测分析, 总结已安放沉箱沉降位移稳定与施工工序时间上的对应关系, 指出上部结构施工应在箱内、箱外回填完成 3 个月后进行。根据检测资料从码头设计施工的角度出发, 通过设计调整轨道安装方式, 预留前轨沉降量; 施工上延后顶层胸墙浇筑时间, 减少码头工后沉降、位移对码头使用的影响。

## 2 结构加固与改造技术研究

码头结构加固与改造是通过对在役老码头进行检测、评估、加固及改造等技术措施, 恢复受损码头结构的原有功能并满足其使用要求, 或者提高已有码头结构的承载力和稳定性以满足结构荷载增加及使用功能改变等要求。随着一批老码头达到设计使用年限, 以及船舶大型化、专业化发展趋势迅猛, 港口工程即将进入大规模的码头结构加固改造时期。然而, 目前对码头结构加

固改造的研究较少，尤其是重力式码头结构加固改造的设计理论和计算方法远落后于工程实践。

### 2.1 案例 3：意大利热那亚港重力式码头墙身升级<sup>[6]</sup>

热那亚港是意大利的主要海港，圣乔治码头是热那亚港的一个设施。该码头是 20 世纪 20 年代建造的，经营多年，用于进口煤炭。由于业务繁忙为了能够停靠大型船只，将码头前沿开挖由水深 -11 米开挖到 -14 米，因此对码头墙身进行改造。如图 1 所示，改造主要采取 3 个措施：①用钢棒从墙身上部直接伸到码头底部至 -18 米位置，钢棒将重力式码头块体连接到一起，提高整体稳定性，同时伸到下部与注入高强混凝土形成整体。②码头底部注入高强混凝土通过钢棒与原墙身形成一个嵌入墙。③安装了有源地面锚。

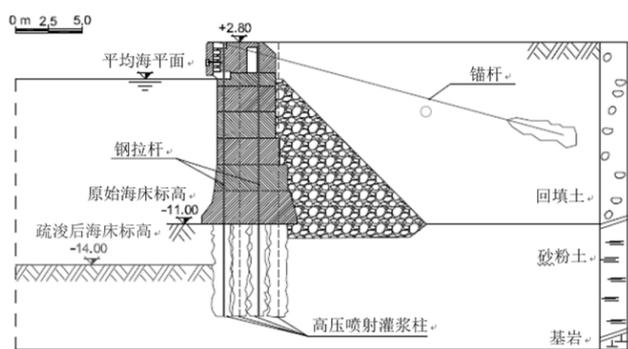


图 1 圣乔治码头改造示意图

### 2.2 案例 4：加拿大蒙特港码头混凝土性能恶化原因调查<sup>[7]</sup>

蒙特港港口有 5 个码头修建于 1901-1928 年，由钢筋混凝土沉箱或大体积混凝土组成。码头调查包括混凝土水上部分目测和通过试验测试抗压强度，弹性模量，快速氯离子渗透性 (RCP)，水溶性氯离子渗透剖面，以及详细的微观结构检查。通过调查发现以下结论：①由于冻害原因老旧混凝土表面出现结垢和开裂，还有部分表面损坏是由于水位处的冰磨损造成的。混凝土破坏的主要原因是：硫酸盐侵蚀、冻融、腐蚀的钢筋；②钢筋混凝土沉箱存在锈蚀严重、混凝土剥落和外露钢筋层外露的情况，这样的沉箱氯离子浓度最高；③ 1936 年，对 45 号码头和 B4 号码头外段进行混凝土和砂浆修补由于采用浅销锚固，与原混凝土粘结不良，导致大面积剥落，在混凝土内部形成空洞；④尽管破坏迹象已比较严重，但混凝土依然具有合理的强度和弹性模量值可，对其进行必要的修复可延长其使用寿命。

## 3 结构形式改进与优化研究

在传统重力式码头形式基础上，很多学者针对重力式码头的具体施工环境和运营要求对码头结构形式进行了改进，并通过数值模拟、模型试验和现场施工对改进结构进行了研究，表明该结构形式具有较好的稳定性和先进性。

### 3.1 案例 5：美国拱背式墙体研究<sup>[8]</sup>

美国伊利诺斯大学学者对拱背式码头墙身（见图 2）进行了研究，重力式码头挡土墙的背面形状是影响挡土墙后侧土压力的重要参数。为了研究拱背式码头墙身力学性能，进行了加速度为 1g 的振动试验。该实验用碎石和硅砂模拟回填土和底土。在墙身布设土压力传感器，在墙身后侧装孔隙水压力传感器。试验结果表明墙后阴坡面土压力随拱背式坡度增大而增大，墙后阴坡面土压力随拱背式坡度增大而减小。根据墙的背面形状不同，总推力和倾覆力矩的大小也不相同，拱背式墙身的优点是提高了施加在墙身的总推力作用点高度，减小墙身在地震中的损伤比例。

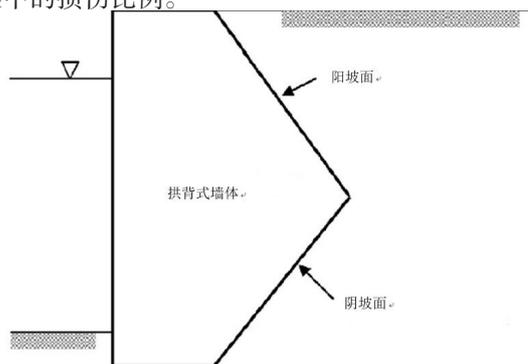


图 2 拱背式重力式码头墙示意图

### 3.2 案例 6：斯里兰卡渔业码头修复工程一用石笼代替块石<sup>[9]</sup>（中国援建）

斯里兰卡渔业码头修复工程在贝鲁沃勒渔港新建重力式码头，码头为重力式石笼结构，石笼上部为现浇混凝土垫层，然后为混凝土胸墙，石笼采用镀锌覆塑 (PVC) 钢丝制作，石笼内填块石，保证空隙率最小，在石笼安装之后用胶合钢丝或钢环将相邻的石笼连接起来（变形缝处不能连接）。采用石笼代替块石或混凝土作为重力式码头的胸墙有许多优点，首先，施工可以不需要围堰，石笼装填可以在干地进行，装填好后吊入工程区域，这样，可减少工程投资，缩短工期；其次，石笼具有一定的空隙，可以消减港池内入射波浪的能量，减小入射波的反射，保证停靠船舶的泊稳要求，方便渔民装卸作业。

#### 4 地震作用下重力式码头动力响应及地基液化研究

在地震作用下,重力式码头会发生滑移、倾覆等严重震害,地基破坏或液化是重力式码头地震破坏的主要特点,所以通过地震作用重力式码头的动力响应(位移、加速度等)和地基液化分析了地震液化条件下重力式码头的变形破坏机理是工程界的研究热点。

##### 4.1 案例 7: 英国大型重力式码头地震液化模拟研究<sup>[10]</sup>

英国剑桥大学 2019 年发表了“大型重力式码头地震液化模拟研究”,该文通过动力离心机模型试验研究了土体液化时的重力式码头沉降,研究表明重力式码头结构在中等密度砂土上时,地震引起的液化沉降是一个显著的风险。试验结果显示,在强震作用下,即使自由场的土体完全液化,码头下方的土体也不会发生完全液化,但由于结构下方产生超孔隙水压力导致土体液化引起结构沉降。在某种程度上,这种沉降是可以接受的,仅需要在地震后对码头结构进行修复工作即可。

##### 4.2 案例 8: 意大利神经网络在重力式码头地震作用下的损伤评价<sup>[11]</sup>

意大利学者 Armando Calabrese 研究了神经网络在重力式码头地震作用下的损伤评价。通过数值模拟分析了意大利南部某重力式码头的地震时程响应。在此过程中,地震作为随机变量输入,通过重力式码头的地震时程响应分析,并利用人工神经网络来寻求地震下模型土力学场参数和码头响应之间的非线性关系,研究了不同几何形状、液化发生和破坏机理的类型,提出了新的脆性函数。研究表明液化增加了码头的破坏几率,码头岸壁宽/高越大,水平滑动破坏的发生概率就越高于向海侧倾倒的概率。

除上述研究外,部分学者还开展了结构可靠性、设计优化、设计施工规范更新等研究。由于研究较精细、各国规范标准不统一,在此不展开论述。

#### 5 结语

通过国内资料搜集,就当前关于重力式码头耐久的热点研究问题进行了总结,并通过具体案例对热点问题进行了详细说明。随着中国企业在海外码头建设项目的日益增多,对标对表国际、紧盯国际先进技术以及最新研究成果,系统梳理重力式码头耐久性常见问题及解决措施有很大的必要性,本文可为相关从业人员提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 中共中央、国务院. 关于印发《交通强国建设纲要》的通知[Z]. 2019-9-14.

[2] 中共中央、国务院. 关于印发《国家综合立体交通网规划纲要》的通知[Z]. 2021-2-24.

[3] 交通运输部办公厅. 关于印发《“平安百年品质工程”建设研究推进方案》的通知[Z]. 2018-11-23.

[4] Garate J.L.A., Monzon MC P., Montes JR G., et al.. Development of a critical structure state alarm system based on the instrumentation of the botafoc breakwater#8 caisson.[C].Nanjing. Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS.2008:1860-1867.

[5] 陈振道, 朱启汉, 梁伟. 科伦坡某重力式码头沉降位移监测分析与应对措施[J]. 中国水运, 2018, 18(4): 146-196.

[6] Paolo R., Viviene M.E.F., Giuseppe S.. Renovation of quay walls to meet more demanding requirements: Italian experiences[J]. Coastal Engineerin, 2019, 147: 25-33.

[7] K.H. Khayat, A. Tagnit-Hamou, N. Petrov. Performance of concrete wharves constructed between 1901 and 1928 at the Port of Montreal[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35: 226-232.

[8] Abouzar Sadrekarimi, Abbas Ghalandarzadeh, Jamshid Sadrekarimi. Static and dynamic behavior of hunchbacked gravity quay walls[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28: 99-117.

[9] 殷福安, 徐开年, 张明强. 斯里兰卡渔业码头修复工程设计与施工特点[J]. 人民长江, 2011, 42(20): 62-85.

[10] Gopal S.P. Madabhushi, Jad I. Boksmati, Samy G. Torres. Modelling the behaviour of large gravity wharf structure under the effects of earthquake-induced liquefaction[J]. Coastal Engineerin, 2019, 147: 107-114.

[11] Armando Calabrese, Carlo G. Lai. Fragility functions of blockwork wharves using artificial neural networks[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 52: 88-102.