

· 施工 ·



60 年来港工混凝土施工规范 发展状况及几点建议 *

李俊毅^{1,2}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要: 60 年前, 中华人民共和国交通部批准了部颁标准(试行) JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》, 开创了规范化港工建筑物安全性、适用性和耐久性的施工技术要求, 其中就已提出耐久性要求的指标, 而且在混凝土配合比设计时提出最大水灰比的要求, 已初步显示出“强度-耐久性”并重的现代混凝土设计理念。提高结构耐久性一直是百年大计甚至千年大计追求的目标, 施工规范一般从原材料、配合比设计、混凝土施工及特殊混凝土施工等方面进行了规定。仅从提高抗冻融性和抗开裂性方面, 进行回顾分析。引气是提高北方港工混凝土抗冻融性的基本措施, 掺膨胀剂和纤维是减少或避免导致结构劣化的开裂以保证混凝土结构耐久性的可选措施, 其应用技术不断发展和逐步列入规范, 提高了施工质量, 延长了港工混凝土结构的使用寿命。

关键词: 港口工程; 混凝土; 耐久性; 施工规范

中图分类号: U654; U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0188-10

Development status and some recommendations for code of port concrete construction in 60 years

LI Junyi^{1,2}

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Sixty years ago, the Ministry of Communications of the People's Republic of China approved the ministerial standard (trial) JTB 2003-63 *Technical Specification for Concrete in Port Construction*, which created the construction specification requirements to ensure the safety, suitability and durability of port construction buildings, among which the durability requirement was put forward, and the requirement of maximum water-cement ratio was put forward in the design of concrete mix ratio. It showed the modern concrete design concept of “strength-durability”. Improving the durability of the structure is always the goal of a hundred years or even a thousand years. The construction specifications are generally stipulated from the aspects of raw materials, mix ratio design, concrete construction and special concrete construction. The review analysis is carried out in this paper only from the improvement of freeze-thaw resistance and cracking resistance. Air-entraining is the basic measure to improve the freeze-thawing resistance of the northern port concrete, and the expansion agent and fiber are the optional measures to reduce or avoid the cracking that leads to structural deterioration to ensure the durability of the concrete structure. Its application technology is developed and gradually included in the specification, which improves the construction quality and prolongs the service life of the harbor concrete structure.

Keywords: port engineering; concrete; durability; construction specification

收稿日期: 2022-11-25

*基金项目: 交通运输部办公厅关于下达 2020 年度水运工程建设标准编制计划 (交办水函〔2020〕1124 号—24)

作者简介: 李俊毅 (1965—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事建筑材料科学的研究及试验检测管理。

我国交通行业最早的建设技术规范之一——部颁标准(试行)JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》于1963年1月29日由交通部批准(中华人民共和国交通部于1963年2月13日发布了交技技(63)潭字第25号《颁发港工混凝土技术规范(JTB 2003—63)作为部颁试行标准的通知》),见图1^[1],距今已60载。再研读该规范,深感震撼,其不仅建立了混凝土施工规范的基本框架,而且已显示出“强度-耐久性”并重的现代混凝土设计理念,对保证工程质量及提高港工建筑物使用年限等方面提供了最早的基本技术要求,为港工混凝土施工技术发展奠定了坚实基础。虽然该规范几经修订,但有些条款的技术理论很经典,至今仍发挥作用,例如引气是提高北方港工混凝土抗冻融性的基本措施。

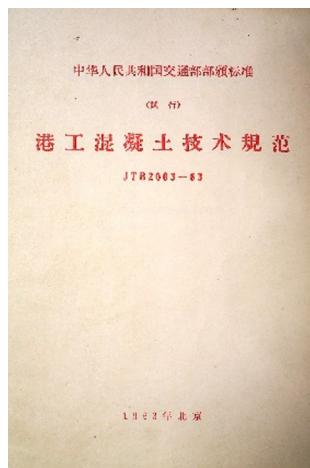


图1 JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》

近年来,有些曾经参加研讨的老专家们还挂念混凝土施工规范的未来,为此,公诸同好,想代为追溯港工混凝土施工规范发展历史的梗概,仅着重从提高抗冻融性和抗开裂性方面进行回顾分析。由于查询以往资料不足,仅粗浅介绍和分析,以飨读者,希望工程界和学术界了解,以温故知新,冀其再发展。不当之处,请指正。

1 港工混凝土施工规范的制修订历程

JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》是交通部于20世纪60年代部颁标准(试行)的第3本规范,之前2本为JTB 2001—62《重力式码头建筑物

设计规范》和JTB 2002—63《水运工程方块建筑物施工及验收技术规范》。而后,该规范在20世纪的历次修订为:1977年7月交通部水基局批准局颁标准(试行)《港口工程技术规范混凝土和钢筋混凝土(施工部分)》^[2](简称“77版规范”,1978年第1版由人民交通出版社出版发行),1981年发布的JTJ 221—82《港口工程技术规范 第六篇 基本工程 第二册 混凝土和钢筋混凝土(施工部分)》^[3](1982年第1版由人民交通出版社出版发行,修订说明中首次写明主编单位为交通部第一航务工程局、南京水利科学研究所),1987年发布而1988年施行的JTJ 221—87《港口工程技术规范(1987)下卷 第七篇 混凝土和钢筋混凝土 第二册 混凝土和钢筋混凝土施工》^[4](简称“87版规范”^[5],1988年第1版由人民交通出版社出版发行,附加说明中写明主编单位为交通部第一航务工程局)及JTJ 268—96《水运工程混凝土施工规范》^[6](主编单位为交通部第一航务工程局)。这为我国水运行业混凝土施工规范的标准化建设奠定了基础,经过不断完善,持续推动我国水运行业混凝土材料与工程技术的发展。

进入21世纪以来,又更新发布实施了JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》^[7](主编单位为中交天津港湾工程研究院有限公司)。现根据交办水函[2020]1124号《交通运输部办公厅关于下达2020年度水运工程建设标准编制计划的通知》^[8]及水运技术函[2020]195号《交通运输部水运局关于〈水运工程混凝土施工规范〉修订工作大纲的函》^[9]等文件要求,由主编单位中交天津港湾工程研究院有限公司及参编单位对JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》进行修订,交通运输部水运局已于2022年4月11日发布了《关于征求〈水运工程混凝土施工规范〉修订(征求意见稿)意见的函》^[10],后续工作正在进行中。

2 海港工程混凝土耐久性问题

交技技(63)潭字第25号文件指出:“由于港工建筑物经常或周期地与水接触,北方地区遭受

冰冻作用，海港建筑物还遭受海水的侵蚀作用，港工混凝土除强度必须满足设计要求外，尚须具备抗冻、抗蚀、抗渗等耐久性能”，该文件中着重提到北方地区港工混凝土耐久性，可见当时编制组具有鲜明的地域和时代特色。JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》第3条规定：港工混凝土除强度及混合物的稠度须满足设计及施工要求外尚应具备抗冻性、抗蚀性及抗渗性等性能。这一规定在历次修订版本规范中仅增加了防止钢筋锈蚀和抵抗冰凌撞击的性能要求。这已显示出“强度-耐久性”并重的现代混凝土设计理念贯穿至今，为港工混凝土施工技术发展指明了方向。

在编写 JTJ 221—82《港口工程技术规范 混凝土和钢筋混凝土(施工部分)》时，为进一步确定海港工程混凝土耐久性指标，分析了几家编写单位历年来对沿海港口工程混凝土和钢筋混凝土建筑物破坏原因调查、观测和试验的结果，认为天然冻融循环破坏是影响北方混凝土耐久性的主要因素，而海水中氯离子渗入混凝土内导致钢筋锈蚀破坏是影响南方钢筋混凝土耐久性的主要因素^[11]。然而，通过之后不断的调查分析，已认识到北方混凝土遭受冻融及钢筋锈蚀的叠加破坏作用^[12-13]。1991年在加拿大蒙特利尔举办的第2届混凝土耐久性国际会议上，美国加利福尼亚大学伯克利分校 Mehta 教授^[14]就提出：“当今世界上混凝土破坏原因按重要性递减顺序排列为：钢筋锈蚀、寒冷天气下的冻害、侵蚀环境的物理化学作用”。以于1919年建设的山东某栈桥码头为例，在1972年调查时发现，桩的潮差部位发生冻融剥落破坏，其之上部位因钢筋锈蚀而产生顺筋裂缝、胀裂或保护层脱落，梁板发生严重钢筋锈蚀，见图2^[15](有些部位曾修补过)。因此对北方混凝土应综合解决抗冻融性和抗钢筋腐蚀性的混凝土耐久性问题，而南方混凝土主要解决抗钢筋腐蚀性的耐久性问题。总而言之，合理提高混凝土耐久性是永恒的主题。



图2 某栈桥码头破损情况

3 提高混凝土抗冻融性措施

3.1 我国引气剂应用的历史

海工混凝土建筑物的使用年限与其所处的环境条件有密切关系，长期与海水接触、经常遭受海水腐蚀、干湿交替、波浪撞击和摩擦作用的混凝土比一般陆上混凝土建筑物的使用年限要短得多，寒冷地区的海上水工建筑物除遭受以上的破坏作用外，还遭受海水与低温的共同作用，这样就更加加速了混凝土的破坏速度。引气混凝土和普通混凝土比较，最主要的特点是能够显著提高混凝土的抗冻融性^[16]。1947年在塘沽新港北防波堤安装了22 t普通混凝土方块，其不足10年已棱角消失，变成椭圆状，甚至崩坏或看不出方块模样，见图3^[17]。吴中伟院士在1947—1949年间就对塘沽新港工程中混凝土崩溃问题进行了研究，得出冻融循环是破坏主因的结论，并提出应采用引气剂的措施^[18]。根据1959年提出的《海工混凝土耐久性研究报告》^[19](图4，笔者第一单位成立于1959年9月18日，当时名称为河北省交通厅航务工程局港工科学研究所)，从1949年开始在塘沽新港率先使用加气混凝土制作防波堤的方块和钢筋混凝土圈，以提高混凝土抗冻融性，至1959年底在塘沽新港、葫芦岛港、秦皇岛港、大连港、旅顺港及秀英港等的预应力钢筋混凝土桩、沉箱、钢筋混凝土镶面板及四角锥体防浪块等已制作约10万m³海工加气混凝土。1958年以前采用治淮委员会梅山水库现场制作的松香脂胶状加气剂和重工业部综合研究所于1950年研制的长城牌加气

剂等，也使用了唐山启新水泥公司于1950年制成的松香脂引气水泥^[20]，以及美国材料与试验协会标准ASTM C150—07 *Standard Specification for Portland Cement*^[21]所列的Type IA、Type IIA、Type II(MH)A及Type IIIA型引气水泥(A代表引气，MH代表中水化热)，此后使用自行制造的引气剂，效果良好，有些单位延续使用至今。



图3 方块安装时及破损后情况

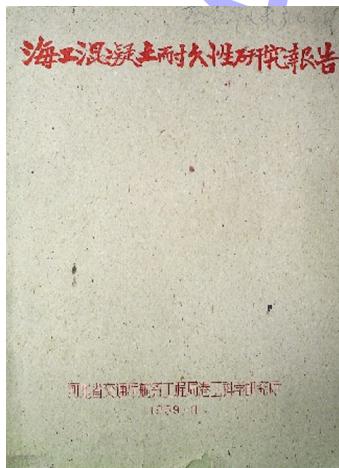


图4 1959年研究报告

JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》的适时颁布，为提高港工混凝土耐久性奠定基础，其中引气至今仍是保证混凝土抗冻融性的基本措施。

3.2 掺引气剂措施的建议

JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》中第18

条规定：为了提高港工建筑物的耐久性，在拌制的混凝土中应加入适量的外加剂。对于有抗冻性要求的混凝土，则必须加入加气剂，在确无加气剂时，可以塑化剂代之，其水灰比应适当降低以达到与加气剂相同的效果。77版规范及JTJ 221—82《港口工程技术规范 混凝土和钢筋混凝土(施工部分)》都在其第3章第4节外加剂的第1条中规定：对于有抗冻性要求的混凝土必须掺入加气剂。87版规范也在其第3章第4节外加剂的第1条中规定：对于有抗冻性要求的混凝土必须掺入引气剂(之前的术语“加气剂”从此改为“引气剂”)。但JTJ 268—96《水运工程混凝土施工规范》没有对引气剂提高混凝土抗冻融性提出类似之前版本规范明确的规定，仅一直保留了控制混凝土拌合物含气量合适范围的措施，以保证硬化混凝土的抗冻融性。JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》在抗冻混凝土配合比设计中又再次规定抗冻混凝土应掺入引气剂。JTS 202-2—2011《水运工程混凝土质量控制标准》^[22](之前版本且为第1版本是JTJ 269—96《水运工程混凝土质量控制标准》^[23])及JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》^[24]都规定，有抗冻要求的混凝土应掺入适量引气剂。JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》^[25]6.13.3条明确指出，有抗冻要求的混凝土宜掺入适量引气剂，同时宜掺入减水剂。DL/T 5241—2010《水工混凝土耐久性技术规范》^[26]提出，有抗冻要求的混凝土应掺加适量引气剂和高效减水剂。SL 677—2014《水工混凝土施工规范》^[27]及DL/T 5144—2015《水工混凝土施工规范》^[28]也都规定，有抗冻要求的混凝土应掺入引气剂。TB 10424—2018《铁路混凝土工程施工质量验收标准》^[29]提出，对含气量 $\geq 4.0\%$ 混凝土，必须采取减水剂和引气剂双掺方式进行配制。ASTM C 233—07 *Standard Test Method for Air-entraining Admixtures for Concrete*以中和松香树脂(neutralized vinsol resin)作为参考或基准的引气剂^[30]。GB/T 8075—2017《混凝土外加剂术语》^[31]给出了具有引气功能的引气剂或引气型普通减水剂、引气型高效减水剂的定义。GB 8076—2008

《混凝土外加剂》^[32]首次规定引气剂代号为 AE, 其中列出 6 种引气剂的第 1 种为可溶性树脂酸盐(松香酸)、第 2 种为文沙尔树脂及 GB/T 50119—2013《混凝土外加剂应用技术规范》^[33]中列出 6 种引气剂的第 1 种为松香热聚物、松香皂及改性松香皂等松香脂类, 其内核都是松香树脂, 这与自 JTB 2003—63《港工混凝土技术规范》中就规定使用至今的引气剂(松香热聚物和松香皂)相吻合, 毋庸置疑, 内核为松香树脂的引气剂仍被认为是保证北方港工混凝土抗冻融性最为有效的引气剂。

梅塔等^[34]指出, 保护混凝土免受冻害的必要条件不是总含气量, 而是硬化水泥浆体中孔间距在 100~200 μm。美国混凝土学会的报告 ACI 212.3R-10 *Report on Chemical Admixtures for Concrete*^[35]提出气泡间距系数不大于 200 μm 时使混凝土具有抗冻融性。英国/欧洲标准 BS EN 934-2: 2001 *Admixtures for Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures-Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling*^[36]要求引气剂产品质量达到气泡间距系数不大于 200 μm。文献[16]提出硬化混凝土气泡间距系数不大于 230 μm 的建议。1999 年有报道称, 在建设世界瞩目的三峡大坝工程时应用了高抗冻混凝土技术, 要求混凝土气泡间距系数小于 300 μm, 以保证其混凝土的耐久性^[37]。2009 年有学者指出, 只要混凝土气泡间距系数小于 300 μm, 混凝土就可以获得较好的抗冻性^[38]。GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》^[39]及上一个版本 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》^[40]都提出, 在含盐环境下冻融、高度饱和及中度饱和的引气混凝土平均气泡间距系数要求分别为 200、250 及 300 μm。TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》^[41]要求冻融破坏环境下硬化混凝土的气泡间距系数应小于 300 μm, TB/T 3275—2018《铁路混凝土》^[42]及 TB 10424—2018《铁路混凝土工程施工质量验收标准》也有相应规定。DL/T 5241—2010《水工混凝土耐久性技术规范》及 DL/T 5144—2015《水工混凝土施工规范》对混凝土有抗冻要求时, 宜控制现场

硬化混凝土的气泡间距系数小于 300 μm。

此外, 新拌混凝土气泡参数分析法评估混凝土抗冻性是新发展方向, 能够从浇筑前预测评估浇筑后硬化混凝土的抗冻融性^[43]。新拌混凝土含气量和气泡间距系数的双控有利于快速选择优质引气剂和预测硬化后混凝土实体的抗冻融性。

JTS 239—2015《水运工程混凝土结构实体检测技术规程》^[44]6.4 节提出, 以检测结构实体混凝土的气泡间距系数方法定性评估结构实体混凝土的抗冻融性, 相对于采用取芯加工试件进行冻融试验而言, 该检测方法不仅时间短(除取样、切割、研磨和抛光等制作观测用切片步骤外, 目前自动化分析硬化混凝土气泡参数的时间已经控制在 15 min 以内), 而且可对结构实体的多个部位进行核查, 及早发现问题和指导施工, 经研究分析, 提出了硬化引气混凝土的气泡间距系数宜不大于 300 μm 的要求, 经实践检验, 宽严适度, 并于 2022 年将此成果推荐纳入新编国家规范《海岸工程混凝土结构技术标准(征求意见稿)》中^[45]。

建议 JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》适时修订、增补或进一步明确引气混凝土的如下相关要求: 1) 有抗冻融性要求时宜采用引气混凝土; 2) 宜优选松香热聚物和松香皂引气剂; 3) 硬化引气混凝土的气泡间距系数宜不大于 300 μm, 在配合比设计时气泡间距系数检测结果宜不大于 250 μm; 4) 混凝土气泡间距系数应按 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》中硬化混凝土中气泡参数测定方法(直线导线法)进行检测(该方法与 ASTM C457-11 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-void System in Hardened Concrete*^[46] 中的 A 方法类同)。

4 提高混凝土抗裂性措施

4.1 掺膨胀剂措施的建议

工程中应用的普通混凝土属脆性材料, 其抗拉强度及极限延伸率均较低, 在干缩、徐变及温度变化等影响下, 容易引起混凝土开裂。开裂

后的混凝土给侵入介质提供了渗流通道，加速冻融破坏，促进钢筋锈蚀的发生和进展，严重影响混凝土结构建筑物的耐久性。掺膨胀剂混凝土技术是减少或避免混凝土开裂的有效措施之一，JTJ 268—96《水运工程混凝土施工规范》在其3.5.1和7.6.2.4条中提到膨胀剂，但未有实质性要求，可以说仅是一个导向。因此根据交水发[1998]820号《关于下达1998年水运工程建设标准定额编制计划的通知》^[47]及水运技术字[1999]286号《关于〈水运工程混凝土施工规范〉局部修订工作大纲的批复》^[48]等文件要求，由当时的天津港湾工程研究所独自承担对JTJ 268—96《水运工程混凝土施工规范》增订“膨胀混凝土施工”一节的工作，于2001年12月20日通过交通部水运司在天津组织的验收会，并发水运技术函字[2002]7号《关于印发〈水运工程混凝土施工规范〉(JTJ 268—96)局部修订项目“膨胀混凝土施工”验收意见的函》^[49]，其成果在全国各种技术交流会议上发表，例如在2000年大连举办第5届全国混凝土耐久性学术交流会上的《港工补偿收缩混凝土抗冻性的试验研究》^[50]及在2002年重庆举办的第3届全国混凝土膨胀剂学术交流会上的《〈水运工程混凝土施工规范〉(JTJ 268)9.7膨胀混凝土施工》^[51]等，简化后纳入JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》的“10.9膨胀混凝土施工”一节，附条文说明中也有简单解说。

由于GB/T 50119—2013《混凝土外加剂应用技术规范》、TB 10424—2018《铁路混凝土工程施工质量验收标准》(含一节9.6补偿收缩混凝土)及GB/T 23439—2017《混凝土膨胀剂》^[52]等的发布实施，经研究分析，除应主要修订补偿收缩混凝土的限制变形(膨胀或收缩)率要求(表1)外，还建议JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》适时修订、增补或进一步明确掺膨胀剂补偿收缩混凝土的如下相关要求：1)必须在有约束条件下使用，宜用于船坞及船台底板等大体积混凝土、闭合块、后浇带及修补空洞等。2)应优选硫铝酸钙型膨胀剂。3)膨胀剂中碱含量应≤0.75%，宜优选碱含量≤0.6%的膨胀剂。4)配合比设计采用

等量取代法掺膨胀剂，其用量宜为30~60 kg/m³；水胶比宜≤0.50；胶凝材料用量宜≥300 kg/m³。5)补偿收缩混凝土宜采取有效的持续蓄水、保湿或保水等养护措施，时间应≥14 d。6)成型试件的试模为钢质试模。7)成型Ⅱ类补偿收缩混凝土抗压强度试件宜带模标准养护7 d及以上，之后拆模，转标准养护至规定龄期；或执行JGJ/T 178—2009《补偿收缩混凝土应用技术规程》^[53]中的有关规定。8)补偿收缩混凝土限制变形率的试验检测应按GB/T 50119—2013《混凝土外加剂应用技术规范》的有关规定进行。

表1 补偿收缩混凝土限制变形率

分类	用途	限制变形率/%	
		水中14 d	水中14 d转空气中28 d
I	补偿混凝土收缩	≥0.015	≥-0.030
II	闭合块、后浇带等	≥0.025	≥-0.020

此外，新型氧化镁及其复合膨胀剂具有较好的补偿收缩性能，抗裂效果显著，已有T/CECS 540—2018《混凝土用氧化镁膨胀剂应用技术规程》^[54]，可深入对其研究和工程实践，推动港工掺膨胀剂补偿收缩混凝土技术的发展。

4.2 掺合成纤维措施的建议

混凝土裂缝不仅影响混凝土结构的安全性及外观，而且也严重影响混凝土结构的耐久性。采用纤维增强措施可以控制混凝土裂缝的产生和发展。用于混凝土和砂浆的纤维主要分为钢纤维和合成纤维等。合成纤维能够减少混凝土早期收缩裂缝，还有一定程度的增韧作用。合成纤维首次纳入的规程为CECS 38:2004《纤维混凝土结构技术规程》^[55]。

1998年笔者承担交通部水运工程技术开发项目“尼龙纤维增强混凝土的研究与应用”(专项合同:9811-59-0214)，进行了降低混凝土塑性收缩裂缝、抗冲击性及抗冻融性等方面试验，其中采用美国混凝土学会标准ACI 544.2R-89 *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*^[56]中推荐的Kraai方法^[57]，对不掺和掺尼龙纤维混凝土筛除石子的砂浆进行早期开裂对比试验，不掺纤维

砂浆 24 h 出现最大宽度 2.6 mm 裂缝，掺纤维砂浆只出现宽度 0.2 mm 以下裂缝，见图 5^[58]，主要结论为：尼龙纤维的增强作用对减少混凝土塑性收缩裂缝、提高抗冲击性及抗冻融性等具有明显作用^[59]；采用喷射尼龙纤维增强混凝土的施工工艺在海岸工程的北方某滨海发电厂取水口水工结构修补中得到成功应用^[60]，见图 6。



图 5 早期收缩开裂对比情况



图 6 喷射尼龙纤维增强混凝土
在北方某滨海发电厂结构修补中的应用

在编写 JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》时，参考了 CECS 38:2004《纤维混凝土结构技术规程》、GB/T 21120—2007《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》^[61]、CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标准》^[62]及 JGJ/T 221—2010《纤维混凝土应用技术规程》^[63]等标准，由于 NB/T 20410—2017《核电工程纤维混凝土技术规程》^[64]、TB 10424—2018《铁路混凝土工程施工质量验收标准》(含一节 9.3 纤维混凝土)、GB/T 21120—2018《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》^[65]、DL/T 5797—2019《水电水利工

程纤维混凝土施工规范》^[66]及 SL/T 805—2020《水工纤维混凝土应用技术规范》^[67]等的发布实施，经研究分析，建议 JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》适时修订、增补或进一步明确掺合成纤维混凝土的如下相关要求：1) 合成纤维品质应符合 GB/T 21120—2018《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》的有关规定，耐碱性能(极限拉力保持率)应 $\geq 95\%$ ，宜优先选用达到 99% 以上的产品；2) 合成纤维宜按每立方米混凝土的掺入量或施工方要求定制包装；3) 同一工程用的同品种、同规格、同生产批次且连续供应的合成纤维应按 50 t 为一个检验批，不足 50 t 也按一个检验批计；4) 合成纤维质量称量允许误差 $\pm 1\%$ ；5) 合成纤维混凝土拌和宜先干拌后湿拌；6) 掺合成纤维混凝土的纤维分散性相对误差为 $\pm 10\%$ ；7) 掺合成纤维混凝土的砂浆裂缝降低系数应 $\geq 55\%$ ，宜优选该系数 $\geq 70\%$ 的产品，其试验按 GB/T 21120—2018《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》中“砂浆裂缝降低系数试验方法”进行；8) 掺合成纤维混凝土不宜采用蒸汽养护。

5 结语

1) 我国首部水运行业混凝土施工技术规范发布已经 60 年，该规范是水运工程混凝土施工规范的起点，具有里程碑的意义，此后得到了长足的发展。该规范的产生、发展、提升和变化依赖于工程建设，服务于工程建设，提高于工程建设，发展于工程建设，历经 60 年，该规范编制工作应具有连续性、继承性、系统性和有效性，其技术条款规定应该更趋合理完善，从而推动工程质量更加可靠，为水运工程建设事业的持续和健康发展保驾护航。

2) 现行国家全文强制性工程建设规范 GB 55008—2021《混凝土结构通用规范》^[68]依据保证工程安全、促进能源资源节约利用、满足经济社会管理等方面控制底线要求，对工程建设项目的勘察、设计、施工、验收、维修、养护、拆除及再利用等提出要求，就是把控了工程全生命周期的基本

要求。GB 55008—2021《混凝土结构通用规范》总则第1.0.2条，指定了其适用范围，未限定在哪个领域，就是说所有的混凝土结构都要执行此规范。建议制定《水运工程混凝土结构通用规范》，全文强制，系统性涵盖水运工程混凝土结构全寿命周期的性能和关键技术措施，确保水运工程混凝土结构的技术底线要求，促进水运工程混凝土结构工程绿色、高质量发展。

3) 追溯水运行业混凝土施工规范的发展历史，本文仅从提高混凝土的抗冻融性和抗开裂性方面进行了分析，可能管见所及，挂一漏万，引用及探讨等难免不太妥当，要承前启后，扬长避短，力求适用，适度超前，向技术性法规方向发展，持续推进技术研究与工程实践相结合，助力“低碳混凝土”发展，使水运工程混凝土施工技术不断进步，有据可依，任重道远，未来可期。

参考文献：

- [1] 交通部基本建设总局. 港工混凝土技术规范: JTJ 2003—63[S]. 北京: 人民交通出版社, 1963.
- [2] 交通部水基局. 港口工程技术规范 混凝土和钢筋混凝土(施工部分) (试行) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1978.
- [3] 交通部第一航务工程局, 南京水利科学研究所. 港口工程技术规范 第六篇 基础工程 第二册 混凝土和钢筋混凝土(施工部分): JTJ 221—82[S]. 北京: 人民交通出版社, 1982.
- [4] 交通部第一航务工程局. 港口工程技术规范 混凝土和钢筋混凝土施工: JTJ 221—87[S]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [5] 交通部水运司. 关于做好水运工程新一轮有关规范背景材料编写工作通知: 水运技术函字[2001]026号[A]. 北京: 交通部水运司, 2001.
- [6] 交通部第一航务工程局. 水运工程混凝土施工规范: JTJ 268—96[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [7] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程混凝土施工规范: JTS 202—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [8] 交通运输部. 交通运输部办公厅关于下达2020年度水运工程建设标准编制计划的通知: 交办水函[2020]1124号[A]. 北京: 交通运输部, 2020.
- [9] 交通运输部水运局. 交通运输部水运局关于《水运工程混凝土施工规范》修订工作大纲的函: 水运技术函[2020]195号[A]. 北京: 交通运输部水运局, 2020.
- [10] 交通运输部水运局. 关于征求《水运工程混凝土施工规范》修订(征求意见稿)意见的函[A/OL]. (2022-04-11)[2022-07-01]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202204/t20220411_3650529.html.
- [11] 林宝玉, 蔡锐华. 海港工程混凝土和钢筋混凝土耐久性技术指标的确定[J]. 水运工程, 1982(2): 50-54.
- [12] 李俊毅, 郑代珍, 张杰. 试论北方港工高性能混凝土[J]. 中国港湾建设, 2001(3): 1-4.
- [13] 李俊毅. 论耐用100年以上的混凝土的基本技术条件[J]. 水运工程, 2002(5): 4-7.
- [14] MEHTA P K. Concrete durability-fifty years progress? [C]//CANMET, ACI. Proceeding of 2nd International Conference on Concrete Durability. Farmington Hills: ACI, 1991: 1-31.
- [15] 交通部第一航务工程局第二工程处, 交通部第一航务工程局设计研究院. 山东沿海混凝土建筑物使用年限调查研究[R]. 天津: 交通部第一航务工程局设计研究院, 1973.
- [16] 李俊毅. 硬化混凝土气泡间距系数的临界值[J]. 港口工程, 1997(3): 27-29.
- [17] 河北省交通厅航务工程局港工科学研究所. 海工混凝土耐久性研究报告[R]. 天津: 河北省交通厅航务工程局港工科学研究所, 1959.
- [18] 蒋家奋. 我国混凝土科学技术的先驱与奠基人: 庆祝吴中伟教授从事科技与教育工作60年[C]//中国硅酸盐学会. 水泥基复合材料科学与技术: 吴中伟院士从事科教工作六十年学术讨论会论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 1999: 1-5.
- [19] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 筑港科研五十年: 中交天津港湾工程研究院有限公司发展史1959—2009[R]. 天津: 中交天津港湾工程研究院有限公司, 2009.
- [20] HANSEN W C. History of air-entraining cements [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1961, 32(2): 243-245.
- [21] ASTM. Standard specification for Portland cement: ASTM C150-07[S]. West Conshohocken: ASTM, 2007.

- [22] 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程混凝土质量控制标准: JTS 202-2—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [23] 交通部第四航务工程局科研所. 水运工程混凝土质量控制标准: JTJ 269—96 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [24] 中交四航工程研究院有限公司, 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [25] 中交一公局有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T 3650—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [26] 南京水利科学研究院, 中国水利水电科学研究院. 水工混凝土耐久性技术规范: DL/T 5241—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [27] 长江勘察规划设计研究院. 水工混凝土施工规范: SL 677—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [28] 中国长江三峡集团公司, 中国葛洲坝集团股份有限公司, 中国水利水电第三工程局, 等. 水工混凝土施工规范: DL/T 5144—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [29] 中铁三局集团有限公司. 铁路混凝土工程施工质量验收标准: TB 10424—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.
- [30] WAKEMAN C W, DOCKWEILER E V, STOVER H E, et al. Use of concrete in marine environments[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1958, 29 (10): 841-856.
- [31] 中国建筑材料科学研究院. 混凝土外加剂术语: GB/T 8075—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [32] 中国建筑材料科学研究院. 混凝土外加剂: GB 8076—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [33] 中国建筑科学研究院. 混凝土外加剂应用技术规范: GB/T 50119—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [34] 梅塔, 蒙特罗. 混凝土微观结构、性能和材料[M]. 覃维祖, 王栋民, 丁建彤, 译. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [35] ACI. Report on chemical admixtures for concrete: ACI 212.3R-10[R]. Farmington Hills: ACI, 2016.
- [36] BSI. Admixtures for concrete, mortar and grout-part 2: concrete admixtures-definitions, requirements, conformity, marking and labelling: BS EN 934-2: 2001[S]. London: BSI, 2001.
- [37] 曹建国, 李金玉, 林莉, 等. 高抗冻和超抗冻混凝土的开发与应用[C]//中国硅酸盐学会. 水泥基复合材料科学与技术: 吴中伟院士从事科教工作六十年学术讨论会论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 1999: 184-187.
- [38] 胡泽清, 邹一宝, 马芳. 用气泡参数判定混凝土抗冻耐久性的探讨[J]. 粉煤灰, 2009, 21(3): 3-4, 13.
- [39] 清华大学. 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [40] 清华大学. 混凝土结构耐久性设计规范: GB/T 50476—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [41] 中国铁道科学研究院. 铁路混凝土结构耐久性设计规范: TB 10005—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [42] 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 中铁十二局集团有限公司. 铁路混凝土: TB/T 3275—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [43] 李俊毅, 李晓明, 许彩虹. 新拌混凝土气泡参数分析法评估混凝土抗冻性[J]. 水运工程, 2005(11): 5-8.
- [44] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程混凝土结构实体检测技术规程: JTS 239—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [45] 住房和城乡建设部办公厅. 关于国家规范《海岸工程混凝土结构技术标准 (征求意见稿)》公开征求意见的通知 [A/OL]. (2022-11-02) [2022-11-02]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zqyj/202211/20221102_768671.html.
- [46] ASTM. Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete: ASTM C457-11[S]. West Conshohocken: ASTM, 2012.
- [47] 交通部. 关于下达 1998 年水运工程建设标准定额编制计划的通知: 交水发[1998]820 号[A]. 北京: 交通部, 1998.
- [48] 交通部水运司. 关于对《水运工程混凝土施工规范》局部修订工作大纲的批复: 水运技术字[1999]286 号[A]. 北京: 交通部水运司, 1999.
- [49] 交通部水运司. 关于印发《水运工程混凝土施工规范》(JTJ 268—96)局部修订项目“膨胀混凝土施工”验收意见的函: 水运技术函字[2002]7 号[A]. 北京: 交通部水运司, 2002.
- [50] 李俊毅. 港工补偿收缩混凝土抗冻性的试验研究[C]//中国土木工程学会. 第 5 届全国混凝土耐久性学术交流会论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2000: 319-325.

- [51] 李俊毅.《水运工程混凝土施工规范》(JTJ 268)9.7 膨胀混凝土施工[C]//中国土木工程学会.第3届全国混凝土膨胀剂学术交流论文集:混凝土膨胀剂及其应用-混凝土裂渗控制新技术.北京:中国土木工程学会,2002: 534-536.
- [52] 中国建筑材料科学研究院.混凝土膨胀剂: GB/T 23439—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [53] 中国建筑材料科学研究院,长业建设集团有限公司.补偿收缩混凝土应用技术规程: JGJ/T 178—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [54] 中国建筑科学研究院有限公司,武汉三源特种建材有限责任公司.混凝土用氧化镁膨胀剂应用技术规程: T/CECS 540—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [55] 大连理工大学.纤维混凝土结构技术规程: CECS 38: 2004[S].北京:中国计划出版社,2004.
- [56] ACI. Measurement of properties of fiber reinforced concrete: ACI 544. 2R-89 [S]. Farmington Hills: ACI, 1989.
- [57] KRAAI P P. A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete [J]. Concrete construction, 1985, 30(9): 775-778.
- [58] 李俊毅,陈家华.尼龙纤维增强混凝土的试验研究[J].混凝土与水泥制品,1998(5): 48-51.
- [59] 李俊毅.尼龙纤维增强混凝土的研究与应用[R].天津:天津港湾工程研究所,2000.
- [60] 李俊毅,刘亚平.喷射合成纤维混凝土技术的研究及应用[J].混凝土,2006(7): 55-58.
- [61] 苏州混凝土水泥制品研究院,苏州中材建筑建材设计研究院有限公司.水泥混凝土和砂浆用合成纤维: GB/T 21120—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [62] 大连理工大学.纤维混凝土试验方法标准: CECS 13: 2009[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [63] 中国建筑科学研究院,大连悦泰建设工程有限公司.纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T 221—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [64] 中国核工业华兴建设有限公司.核电工程纤维混凝土技术规程: NB/T 20410—2017[S].北京:原子能出版社,2017.
- [65] 苏州混凝土水泥制品研究院有限公司,扬州大学,苏州混凝土水泥制品研究院检测中心有限公司.水泥混凝土和砂浆用合成纤维: GB/T 21120—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [66] 中国水利水电第五工程局有限公司.水电水利工程纤维混凝土施工规范: DL/T 5797—2019[S].北京:中国电力出版社,2020.
- [67] 南京水利科学研究院.水工纤维混凝土应用技术规范: SL/T 805—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [68] 住房和城乡建设部标准定额研究所.混凝土结构通用规范: GB 55008—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.

(本文编辑 王璁)

(上接第 164 页)

参考文献:

- [1] 蔡旭东,廖燕芬.飞来峡水利枢纽枯水期水库调度探讨[J].广东水利职业技术学院学报,2005,3(1): 17-19.
- [2] 范显华.长洲水利枢纽枯水期保通航水库调度及船闸运行方式探讨[J].红水河,2017,36(3): 12-16.
- [3] 湖南省交通规划勘察设计院.湘江长沙综合枢纽初步设计及施工图设计[R].长沙:湖南省交通规划勘察设计院,2009.

- [4] 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院.湘江长沙综合枢纽蓄水安全鉴定报告[R].长沙:湖南省水利水电勘测设计规划研究总院,2022.
- [5] 湖南省水利厅.湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(2019—2022年)[A].长沙:湖南省水利厅,2018.
- [6] 湖南省水利厅.湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(2023—2027年)[A].长沙:湖南省水利厅,2022.
- [7] 长沙市望城区人民政府.关于长沙市望城区河道禁止采砂的通告[A].长沙:长沙市望城区人民政府,2018.

(本文编辑 王璁)