

中华人民共和国行业标准

水运工程结构试验检测技术规范

JTS/T 233—2021

主编单位：交通运输部天津水运工程科学研究所

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期：2021年4月1日

人民交通出版社股份有限公司

2021·北京

交通运输部关于发布 《水运工程结构试验检测技术规范》的公告

2021 年第 1 号

《水运工程结构试验检测技术规范》为水运工程建设推荐性行业标准,标准代码为 JTS/T 233—2021,自 2021 年 4 月 1 日起施行,由交通运输部水运局负责管理和解释,其文本可在交通运输部政府网站水路运输建设综合管理信息系统“水运工程行业标准”专栏 (mwtis.mot.gov.cn/syportal/sybz) 查询和下载。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部

2021 年 1 月 5 日

制定说明

近年来,随着我国水运工程建设行业的快速发展,水运工程基础设施安全管理要求进一步提高,水运工程结构试验检测以其全面、准确、直观等特点,在提高水运工程基础设施安全管理水平,以及推动水运工程建设中新结构、新材料、新工艺的应用等方面发挥着重要作用。目前,水运工程结构试验检测技术尚未出台统一的水运行业标准,相关国家标准中的有关技术要求较为分散且不成体系,对相关技术在水运工程建设中的应用指导性不强。为统一水运工程结构试验检测技术要求,提高结构试验检测工作质量,促进结构试验检测技术发展,保障工程建设质量安全,交通运输部水运局组织有关单位,在深入调查研究和总结大量相关工程技术实践经验的基础上,结合国内外水运工程结构试验检测技术的现状和发展趋势,经广泛征求意见,反复修改完善,制定了《水运工程结构试验检测技术规范》。

本规范共分6章和6个附录,并附条文说明,主要包括结构动力测试、实验室结构试验、现场结构试验等技术内容。

本规范主编单位为交通运输部天津水运工程科学研究所,参编单位为中交四航工程研究院有限公司、天津大学、南京水利科学研究院、中交上海三航科学研究院有限公司、中交第一航务工程勘察设计院有限公司、天津水运工程勘察设计院。本规范编写人员分工如下:

- 1 总则:朱崇诚 张 强 郑锋勇 宣国祥 孟 静
- 2 术语:张 强 朱崇诚 孙熙平 吴 锋
- 3 基本规定:朱崇诚 郑锋勇 孙百顺 王元战 李 颖 宣国祥 周宝江
吴 锋
- 4 结构动力测试:王元战 孙熙平 吴 锋 郑锋勇 吕 黄 李越松 孟 静
孙百顺 张 强
- 5 实验室结构试验:吴 锋 郑锋勇 李 颖 吕 黄 王元战 孟祥玮 李 君
李越松 孟 静
- 6 现场结构试验:孙熙平 吕 黄 宣国祥 孟祥玮 周宝江 李越松 朱崇诚
李 颖 郑锋勇 王笑难 李 君

附录A:郑锋勇 李越松 孟 静 孙百顺

附录B:吴 锋 孙熙平 郑锋勇

附录C:朱崇诚 张 强 周宝江

附录D:朱崇诚 李越松 李 颖 李 君

附录E:吕 黄 李 颖 孙熙平

附录 F:张 强

本规范于2019年6月17日通过部审,2021年1月5日发布,自2021年4月1日起施行。

本规范由交通运输部水运局负责管理和解释。各单位在执行过程中发现的问题和意见,请及时函告交通运输部水运局(地址:北京市建国门内大街11号,交通运输部水运局技术管理处,邮政编码:100736)和本规范管理组(地址:天津市滨海新区塘沽新港二号路2618号,交通运输部天津水运工程科学研究所,邮政编码:300456),以便修订时参考。

目 次

| | | |
|------|---------------------|------|
| 1 | 总则 | (1) |
| 2 | 术语 | (2) |
| 3 | 基本规定 | (3) |
| 3.1 | 一般规定 | (3) |
| 3.2 | 试验检测程序 | (4) |
| 3.3 | 试验检测方法要求 | (6) |
| 4 | 结构动力测试 | (8) |
| 4.1 | 一般规定 | (8) |
| 4.2 | 测试内容 | (8) |
| 4.3 | 仪器设备 | (9) |
| 4.4 | 测试方法 | (9) |
| 4.5 | 数据处理与成果提交 | (11) |
| 5 | 实验室结构试验 | (13) |
| 5.1 | 一般规定 | (13) |
| 5.2 | 试验加载 | (14) |
| 5.3 | 试验量测 | (17) |
| 5.4 | 结构模型试验 | (18) |
| 6 | 现场结构试验 | (20) |
| 6.1 | 一般规定 | (20) |
| 6.2 | 码头结构加载试验 | (22) |
| 6.3 | 码头结构系靠泊试验 | (24) |
| 6.4 | 防波堤及护岸试验 | (26) |
| 6.5 | 船闸试验 | (27) |
| 6.6 | 干船坞与船台滑道试验 | (28) |
| 附录 A | 混凝土构件挠度检验试验 | (30) |
| 附录 B | 结构混凝土既有应力检测试验 | (32) |
| 附录 C | 现场结构试验检测环境条件调查方法和要求 | (34) |
| 附录 D | 混凝土结构构件裂缝宽度检验试验 | (35) |
| 附录 E | 防风锚碇抗拔试验 | (36) |
| 附录 F | 本规范用词说明 | (38) |
| | 引用标准名录 | (39) |

| | | |
|------|---|------|
| 附加说明 | 本规范主编单位、参编单位、主要起草人、主要审查人、总校人员 和管理组人员名单 | (40) |
| 条文说明 | | (43) |

1 总 则

1.0.1 为统一水运工程结构试验检测技术要求,提高结构试验检测工作质量,促进结构试验检测技术发展,适应水运工程建设管理的需要,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于水运工程结构的试验检测。

1.0.3 水运工程结构试验检测除应符合本规范的规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 结构试验检测 Structural Test and Inspection

在结构现场或实验室内,通过试验对结构在某些特定状况时的作用、作用效应、结构抗力、破坏形态、结构功能等进行测试或验证的活动。

2.0.2 结构动力测试 Structural Dynamic Test

对结构的动力特性参数和动力荷载效应等进行的试验活动。

2.0.3 既有应力 Existing Stress

由作用在结构上的各种荷载以及引起结构或约束变形的各种作用在结构内产生的应力总和。

2.0.4 探索性试验 Exploratory Test

为科学研究及开发新技术(材料、工艺、结构形式)等目的而进行的探讨结构性能和规律的试验。

2.0.5 验证性试验 Verifying Test

为证实科研假定和计算模型、核验新技术(材料、工艺、结构形式)的可靠性等目的而进行的试验。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 水运工程结构试验检测按照目的不同可分为探索性试验检测和验证性试验检测。

3.1.2 水运工程结构试验检测应以设计与施工资料、结构计算分析和工程实践经验为基础。

3.1.3 在下列情况下,水运工程应进行结构试验检测。

3.1.3.1 当采用新型结构缺乏适合的结构计算模型或现有计算方法精确度达不到要求时,结构的作用效应、破坏形态或结构抗力宜通过试验确定。

3.1.3.2 结构性能退化和环境条件比较复杂、详细的结构分析或检测不能做出清晰的说明或不能单独证明结构具有规定的可靠性时,既有结构的可靠性评估可采用现场结构试验的方法。

3.1.3.3 水运工程结构发生下列情况之一时,应根据其损坏情况和现场条件,采用仪器设备进行现场测试、荷载试验、室内辅助试验和校核计算等手段,对结构进行详细试验检测和综合分析:

- (1) 定期检查中发现影响主体结构安全重大问题的;
- (2) 定期检测中难以判明主体结构是否安全的;
- (3) 遭受特殊灾害或事故造成结构及主要构件损坏,可能危及结构安全的。

3.1.4 结构试验检测应考虑试验环境、试验条件等影响。

3.1.5 开展结构试验检测的全过程应采取有效的安全防护措施,确保试验人员人身安全和仪器设备安全。

3.1.6 结构试验检测使用的仪器设备应符合下列要求。

3.1.6.1 使用的仪器、仪表、传感器应具有性能稳定、可靠性高、耐久性好、抗干扰能力强、安装和操作方便的特点,且满足试验检测需要的量程、精度、采样频率、线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性、漂移、供电方式、寿命等性能指标,并按国家现行有关规定经检定合格或经校准确认其性能满足要求。

3.1.6.2 仪器设备应在规定的环境条件和周期内使用,使用期间应处于正常状态,并按要求进行维护保养。现场使用仪器设备时,应采取防风、防潮、防晒、防损坏等必要的防护措施。

3.1.6.3 对同类要素进行量测宜采用相同型号和规格的仪器、仪表、传感器。仪器设备发生变动时,应及时建立新旧系统转换关系。

3.1.6.4 结构试验检测采用的自动化测试系统宜具有数据采集、存储、传输、处理、分

析等功能,采用新型自动化测试系统前应进行可行性综合论证或验证。

3.1.7 结构试验检测应提供真实有效、信息完整的试验检测数据和试验检测结论。

3.1.8 对结构试验检测中发现的影响建筑物安全和正常使用的结构损伤、变形等问题,应及时采取措施。

3.1.9 对因试验检测造成的结构构件损伤应及时进行修补。

3.2 试验检测程序

3.2.1 结构试验检测工作应按方案阶段、实施阶段、报告编制阶段依次进行。

3.2.2 试验检测前应明确试验检测目的、试验检测指标、试验检测范围、试验计划等。

3.2.3 方案阶段的工作应符合下列规定。

3.2.3.1 结构试验检测应根据试验检测目的、内容、委托要求和国家现行标准的有关规定,在资料分析、结构现状描述、确定试验检测对象、结构计算分析的基础上制定试验检测方案。试验检测方案可包括下列内容:

- (1) 试验检测目的;
- (2) 委托要求;
- (3) 试验检测依据;
- (4) 工程概况;
- (5) 资料分析;
- (6) 结构现状描述;
- (7) 试验检测对象;
- (8) 试验检测项目;
- (9) 试验检测方法;
- (10) 试验荷载和测点布设;
- (11) 仪器设备;
- (12) 量测与记录;
- (13) 试验检测过程控制及测试数据分析;
- (14) 试验检测标志或终止条件;
- (15) 试验检测结果的分析方法;
- (16) 试验检测人员分工;
- (17) 进度计划;
- (18) 安全防护与环保措施;
- (19) 需要委托方现场配合的工作等。

3.2.3.2 资料分析应收集工程的勘察、设计、施工、竣工、使用、维护等方面的相关资料和图纸,必要时应进行补充勘测。

3.2.3.3 结构现状描述应针对试验检测的范围和要求,重点调查材料劣化、结构损伤变形和破坏等情况。

3.2.3.4 试验检测对象可由委托方指定或采用分类抽样方式确定。采用分类抽样方

式确定时应满足下列要求：

- (1) 具有代表性,试验检测结果能够反映结构构件的主要受力特点;
- (2) 位于荷载较大、抗力较弱、缺陷较多的部位;
- (3) 试验检测造成的损伤不会对拟继续使用的结构构件的安全性和正常使用功能造成明显影响;
- (4) 能方便地进行试验检测和量测。

3.2.3.5 结构计算分析的方法和参数确定应符合国家现行标准《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158)、《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)、《码头结构设计规范》(JTS 167)等的有关规定,并应满足下列要求:

- (1) 分析内容包括试验检测指标对应工况和试验检测中其他控制工况的结构响应,并满足制定试验检测方案的需要;
- (2) 采用的基本假定和计算模型能合理描述所选择的试验检测状态下的结构反应;
- (3) 以结构理论和工程实践经验为基础,必要时按地基与上部结构共同作用进行结构计算分析。

3.2.3.6 试验检测方案应在经过审定、批准后执行。

3.2.4 实施阶段的工作应符合下列要求。

3.2.4.1 试验检测实施阶段的工作应包括试验检测准备、过程控制、量测记录、必要的补充试验检测等。

3.2.4.2 试验检测准备应包括试验检测人员分工、试验对象预处理、搭设工作平台和基准架、布设测点和安装仪器设备、预加载试验、设置警示辅助设施等内容,并应满足下列要求:

- (1) 试验检测人员分工明确和相对固定,并设置专人负责指挥、加载、量测、安全监督等工作;
- (2) 对试验检测对象进行编号和标识、测画试验辅助线等内容,试验检测对象编号方法与设计、施工协调在记录中作出说明;
- (3) 工作平台能便于试验检测操作,且能保证试验检测人员和试验检测设备的安全;基准架能满足仪表、传感器安装的需要,具有足够的强度、刚度和稳定性,且与工作平台及试验检测对象分离;
- (4) 布设测点位置能反映试验检测对象的工作状态和结构性能,需要时布置少量校核性测点;
- (5) 预加载试验的加荷值控制在试件的弹性范围内,且不产生裂缝及其他形式的加载残余值;
- (6) 限行警示、照明、防护等辅助设施满足试验检测安全要求。

3.2.4.3 试验检测的过程控制应根据试验检测方案和试验检测现象进行,对试验检测有影响的关键性数据应及时进行分析判断。当结构响应与结构计算分析值出现明显差异,或出现可能影响试验检测安全的异常现象时,应及时停止试验检测,查明原因并采取适当措施。

3.2.4.4 试验检测应根据试验检测目的和试验检测方案,选择荷载、位移、应力应变、裂缝等有关内容进行量测,当温度、湿度等环境因素对量测结果有明显影响时,应同时量测环境参数。

3.2.4.5 试验检测应对结构已经存在的缺陷损伤破坏情况、试验检测过程中的主要变化和现象、量测参数的量测值、有关环境因素、试验检测时间等内容及时进行现场记录。记录可采用数值、文字描述、表格、简图、照片、视频等形式。当采取人工记录方式时,宜采用纸质专用记录表格;当采用仪器自动记录方式时,应将自动记录的数据打印输出,并经现场试验检测人员校对确认。对影像信息应标明获取的位置、时间等必要信息;对取得的试样应予以标识,并妥善运输和保存。试验检测记录应有试验检测人员、记录人员的签字,记录的信息应完整、准确、字迹清晰,记录的修改应采用杠改法且不得涂改。

3.2.4.6 进行复测、补充试验检测或辅助试验检测时宜考虑作用效应的时间效应,在间隔适当时间后进行。补充试验检测和辅助试验检测可选择试验检测对象邻近的非加载受荷部位进行。

3.2.5 报告编制阶段的工作应符合下列规定。

3.2.5.1 报告编制阶段的工作应包括试验检测计算分析、试验检测报告编写与交付、试验检测资料档案归档等。

3.2.5.2 试验检测结束后应及时进行计算分析,计算分析可包括下列内容:

(1) 整理试验检测数据,将试验检测参数用图、表或经验公式表示,必要时进行统计处理和误差分析,试验数据有异常时查明原因;

(2) 绘制试验检测参数或试验检测现象在时间和空间上的分布图及其与相关因素的关系图;

(3) 分析试验检测参数的变化趋势、单位变化量、变化幅度和变化规律;

(4) 将试验检测成果与理论曲线和以往的试验检测资料进行对比分析,判断结构的运行情况;

(5) 分析结构存在的问题,对工程运行管理和维修提出建议;

(6) 对后续试验检测提出建议。

3.2.5.3 试验检测完成后应按要求编写并交付试验检测报告。试验检测报告应由封面、扉页、目次、正文和参考资料等部分组成。扉页部分应注明完成日期,并有试验检测负责人、报告编写人、审核人和批准人的签名。正文部分应包括试验检测概况、试验检测方案、试验检测记录、试验检测结果分析、试验检测结论等内容。

3.2.6 结构试验检测的项目合同、委托书、技术资料、试验检测报告及审查鉴定意见等资料应按国家科技档案管理有关要求进行了归档并妥善保管。

3.3 试验检测方法要求

3.3.1 结构试验检测的方法应符合下列规定。

3.3.1.1 结构试验检测应根据试验目的、委托要求、结构特点和现场条件选择适用的

试验检测方法。

3.3.1.2 结构试验检测应优先选用直接的试验检测方法,也可选用直接方法与间接方法相结合的综合试验检测方法。

3.3.1.3 结构试验检测宜优先选用对结构构件无损伤的方法。对修复困难的结构进行试验检测时,应避免对其造成损伤。当选用造成试验检测对象局部损伤的试验检测方法时,宜选择结构构件受力较小的部位,并不得影响结构的安全性。对结构的安全性、适用性、耐久性造成影响的破坏性试验检测,其试验检测方案应经过论证。

3.3.1.4 当国家现行标准对试验检测方法有具体规定时,应按标准规定的方法进行试验检测。当国家现行标准规定或建议的试验检测方法没有具体要求时,试验检测单位应制定相应的试验检测细则,对仪器设备、试验检测操作、数据处理等方面做出规定,并应在试验检测方案和试验检测报告中予以说明。

3.3.1.5 单独采用自主开发、引进的试验检测方法和仪器设备进行试验检测时,应满足下列要求:

(1) 试验检测方法的适用性和仪器设备的准确性、稳定性通过论证;

(2) 试验检测方法和仪器设备与已有成熟方法和仪器进行了比对试验,有关指标满足试验检测要求;

(3) 试验检测单位制定相应的试验检测细则,并在试验检测方案和试验检测报告中予以说明。

3.3.2 在下列情况下,试验检测对象应为试验检测范围内的全部样本:

(1) 结构现状描述时;

(2) 在结构中查找存在缺陷或损伤的构件;

(3) 环境侵蚀、台风、火灾、爆炸、撞击等灾害事故发生后对结构受损情况的识别;

(4) 试验检测范围较小或构件数量较少。

3.3.3 试验检测范围较大、构件数量较多或存在相似情况时,可采用分类抽样方式,抽样方式应符合下列规定:

(1) 选择同类结构构件中荷载效应相对较大且结构安全状况相对较差的结构构件进行试验检测;

(2) 简单随机抽样或等距抽样方式,抽样最小样本容量符合国家现行标准的有关规定;

(3) 抽样方法在试验检测方案和试验检测报告中作出说明。

3.3.4 委托方指定试验检测对象或结构试验检测受到现场条件限制时,结构试验检测抽样可采用指定样本的方式,指定样本试验检测的结论不应扩大到未试验检测的结构构件范围。

3.3.5 考虑量测期的结构试验检测,其量测期应能够反映试验检测要素的变化过程。

3.3.6 现场结构试验检测实施时,对试验检测参数和结果影响较大的水文、气象、荷载、地基等环境影响和相关因素应同步进行检测和记录,对相关因素的检测方法应符合国家现行标准的有关规定。

4 结构动力测试

4.1 一般规定

4.1.1 结构动力测试可用于结构动力特性和动力响应的测试,以及评价振动源对结构的影响和结构健康监测等。

4.1.2 下列情况下可进行结构动力特性和动力响应测试:

- (1) 投产使用初期、使用期发现安全问题或超过设计使用年限的结构;
- (2) 改变用途或改变使用条件的结构;
- (3) 需要进行抗震、波浪动荷载或其他激励下的动力响应计算的结构;
- (4) 需要通过动力参数进行结构损伤识别和故障诊断的结构;
- (5) 在某种动力作用下,局部动力响应过大的结构。

4.1.3 结构动力测试应具有针对性,在初步调查的基础上,针对具体的结构制定测试方案。

4.1.4 结构动力测试中被测结构、测试手段、测试仪器的选取应根据测试目的和要求确定,测试数据应客观、真实。

4.2 测试内容

4.2.1 结构动力测试应包括结构动力特性测试和结构动力响应测试等内容。

4.2.2 结构动力特性测试应包括结构自振频率、振型和阻尼比测定等内容。

4.2.3 结构动力响应测试应包括动位移、速度、加速度、动应力、动应变等结构动态参数和作用于结构上的动力荷载,结构动力响应测试前应进行结构动力特性测试。

4.2.4 测试前应制定完整详细的测试方案,根据方案准备相关测试资料,必要时应进行有关计算,并应符合下列规定。

4.2.4.1 测试方案应包括测试目的、测试项目、测试设备及精度要求、测点布置和测试方法等内容。

4.2.4.2 相关测试资料应包括结构设计图纸、结构现状、场地的地质勘察资料、场地及其邻近的干扰振源资料等。

4.2.5 结构动力测试宜按照下列步骤进行:

- (1) 根据测试对象及其目的,选择合适的测试内容;
- (2) 根据场地情况、测试要求和结构特点布置测点;
- (3) 根据测试要求选择并安装传感器,传感器的安装应与测试目的相一致;
- (4) 连接导线,包括屏蔽线和接地线,对整个测试系统进行调试;

(5)合理设置测试参数,包括对采样频率、数据采集时间、数据采集系统放大倍数等参数进行设置;

(6)采集数据并保存。

4.3 仪器设备

4.3.1 位移计、速度计、加速度计和应变计等传感器应根据需要测试的动参数和振型阶数等情况选择,必要时应选择相应的仪表。

4.3.2 测试仪器的频率范围应根据被测结构的类别及振动频率选定。

4.3.3 测试仪器的分辨率应根据被测结构的最小振动幅值选定。

4.3.4 传感器应具备机械强度高、安装调节方便、便于携带的特点,具有防水、防电磁干扰等性能。

4.3.5 记录仪器或数据采集分析系统的电平输入及频率范围,应与测试仪器的输出相匹配。

4.3.6 结构动力特性测试的仪器设备应符合下列规定。

4.3.6.1 采用稳态正弦激振法测试时,宜采用旋转惯性机械起振机,也可采用液压伺服激振器或电磁激振器,使用频率范围宜取 0.1 Hz ~ 30 Hz,频率分辨率应高于 0.01 Hz。

4.3.6.2 采用锤击法测试时,测试仪器的使用频率范围应比稳态测试时大一个数量级。

4.3.6.3 采用初速度法测试时,宜采用火箭筒作激振源,其作用力大小应根据测试对象弹性阶段的动力特性要求选定,相应的作用时间宜为数毫秒至数十毫秒。

4.3.7 结构动力响应测试的仪器设备应符合下列规定。

4.3.7.1 结构动态参数测试应采用自动化仪器,其功能应满足实时控制和数据采集、数据处理、图形输出等要求。

4.3.7.2 测试仪器动态范围应大于 60 dB,测试信号分辨率应高于最小有效振动幅值的 1/10。

4.3.7.3 传感器的连接导线应采用屏蔽电缆,观测仪器的输出阻抗和输出电平应与记录仪器匹配。

4.4 测试方法

4.4.1 结构动力特性测试,根据测试的目的可选择下列方法。

4.4.1.1 结构基本振型的动力特性测试宜采用脉动法,在满足测试要求的前提下也可选用初位移法等其他方法。

4.4.1.2 结构平面内多个振型的动力特性测试宜选用稳态正弦波激振法。

4.4.1.3 结构空间振型和扭转振型的动力特性测试宜选用多振源相位控制同步的稳态正弦波激振法或初速度法。

4.4.1.4 评估结构的抗震性能时,可选用随机激振法或人工爆破模拟地震法。

4.4.2 结构动力特性测试的方法应符合下列规定。

4.4.2.1 脉动法测试时应满足下列要求：

- (1) 避免环境及系统干扰；
- (2) 测试记录时间,测试振型和频率时不小于 5min,测试阻尼时不小于 30min；
- (3) 当因测试仪器数量不足而做多次测试时,每次测试中至少保留一个共同的参考点。

4.4.2.2 机械激振振动法测试时应满足下列要求：

- (1) 正确选择激振位置,合理选择激振力,防止引起被测结构的振型畸变；
- (2) 当激振器安装在板上时,避免板的竖向自振频率和刚度的影响；
- (3) 激振测试中采用扫频方式寻找共振频率,在共振频率附近进行测试时,保证半功率带宽内有不少于 5 个频率的测点。

4.4.2.3 施加初位移的自由振动法测试时应满足下列要求：

- (1) 根据测试的目的布置拉线点；
- (2) 拉线与被测结构的连接部分能整体传力到被测结构主体受力构件上；
- (3) 每次测试时记录拉力数值和拉力与结构轴线间的夹角；
- (4) 量取波值时,舍弃突断衰减的最初两个波；
- (5) 拉测时不使被测结构出现裂缝。

4.4.2.4 施加初速度的自由振动法测试时应满足下列要求：

- (1) 火箭筒的数目根据试验目的及试验方案决定；
- (2) 火箭筒布置的位置在结构的顶部和结构主体部分的侧面；
- (3) 火箭筒的引爆采用干电池引爆方式；
- (4) 当采用多个火箭激振时,各个火箭筒同步引爆。

4.4.3 结构动力特性测试中,测点的设置位置和数量应满足所测振型阶数和测试设计的要求,并应在被测结构基础和周围地面设置测点。

4.4.4 传感器的布置应符合下列规定。

4.4.4.1 平动测点应在结构的质心附近布置传感器。

4.4.4.2 扭转测点应在结构平面上对称布置。

4.4.4.3 宜沿结构纵向、横向和竖向三个测试方向布置传感器。

4.4.4.4 传感器的布置应避免振型的节点和反节点处。

4.4.4.5 安装在结构上的传感器和监测仪器质量不应大于该结构物构件质量的 10%,安装应牢固。

4.4.4.6 传感器的安装谐振频率应远高于测试频率。

4.4.5 结构动力响应测试应符合下列规定。

4.4.5.1 结构动力响应测试的方法应满足下列要求：

(1) 结构动态参数采用相应的传感器直接测定;结构构件的轴力、剪力和弯矩等内力反应,根据测定的应变或位移经计算分析确定;

(2) 结构振动形态采用先测定各测点振幅值与方向,识别振幅的正、负,再根据同一时刻量测各测点振幅的连线方法确定;

(3) 结构动力放大系数通过测定结构最大动力效应与相应静力效应计算确定。

4.4.5.2 结构动力响应测点的位置和数量应满足确定结构振动形态和测试设计的要求,离振源近时测点间距离小,离振源远时测点间距离大,并应在被测结构基础和周围地面设置测点。

4.4.5.3 结构受力和变形可能最大的部位应设置测点。

4.4.5.4 结构周围设置测点的地面应平坦、坚实。

4.4.5.5 传感器的灵敏度主轴方向应与测试方向一致。

4.4.6 数据采集应符合下列规定。

4.4.6.1 采样频率的设定应符合奈奎斯特定理的基本要求,宜为被测结构频率的3倍~5倍。

4.4.6.2 应根据振动频率,确定动态信号测试仪采样间隔和采样时长。强迫振动法测试间隔应采集不少于2个完整波形,脉动法测试时长宜设为60min。

4.4.6.3 采集的数据有较大波动时,应重新采集。

4.4.7 进行结构动力特性和动力响应测试作业时,应避免对结构性能有明显影响的损伤,并应避免环境对测试系统的干扰。

4.4.8 结构动力测试采取的安全措施应符合下列规定。

4.4.8.1 结构动力测试仪器电源宜配置稳压装置。

4.4.8.2 测试仪器区域应有保护设施,测试区域边界应设置明显标志。

4.4.8.3 初位移法测试中,拉线与结构和测力计的连接应可靠,拉线被拉断后应防止其反弹伤人。

4.4.8.4 起振机在安装之前应进行检查,经过试机后方可吊装就位,地脚螺栓应埋设牢固。

4.4.8.5 使用火箭激振必须遵守火箭激振器的有关操作规定。

4.5 数据处理与成果提交

4.5.1 结构动力测试的数据处理可选择时域、频域等信号处理方法。

4.5.2 时域数据处理方法应符合下列规定。

4.5.2.1 对记录的测试数据应进行零点漂移、记录波形和记录长度的检验。

4.5.2.2 被测结构的自振周期,可在记录曲线上比较规则的波形段内取有限个周期的平均值。

4.5.2.3 被测结构的阻尼比,可按自由衰减曲线求取,采用稳态正弦波激振法时,可根据实测的共振曲线采用半功率点法求取。

4.5.2.4 被测结构同一时间点上各测点的幅值,应用记录信号幅值除以测试系统的增益,并按此求得振型。

4.5.3 频域数据处理方法应符合下列规定。

4.5.3.1 采样间隔应符合采样定理的要求。

4.5.3.2 对频域中的数据应采用滤波、零均值化等方法进行处理。

4.5.3.3 被测结构的自振频率,可采用自谱分析或傅立叶谱等分析方法求取。

4.5.3.4 被测结构的阻尼比,宜采用自相关函数分析、曲线拟合法或半功率点法等确定。

4.5.3.5 被测结构的振型,宜采用自谱分析、互谱分析或传递函数等分析方法确定。

4.5.3.6 对于复杂结构的测试数据,宜采用谱分析、相关分析或传递函数分析等方法进行分析。

4.5.4 脉动信号的频域处理平均次数不宜少于32次,且重叠系数宜大于1/2。

4.5.5 测试数据处理后应根据需要提供被测结构的自振频率、阻尼比和振型,以及动力响应最大幅值、时程曲线、频谱曲线等分析结果。

4.5.6 结构动力测试报告应包括下列内容:

- (1) 测试仪器的名称、型号、编号、准确度等级、检定日期;
- (2) 场地条件,测点布置,附简图和照片;
- (3) 测试过程中的情况说明;
- (4) 结构动力测试数据记录表;
- (5) 测试数据处理资料;
- (6) 结构动力特性和动力响应的时域曲线、频谱曲线;
- (7) 结构动力特性和动力响应与其他相关因素的关系资料;
- (8) 结构动力特性和动力响应成果;
- (9) 测试人、审核人、批准人、测试日期、测试单位。

5 实验室结构试验

5.1 一般规定

5.1.1 实验室结构试验应根据探索性试验或验证性试验的不同目的,采取相应的试验方法。

5.1.2 试验前应根据试验目的制定试验方案,试验方案宜包括下列内容:

- (1) 试验目的;
- (2) 试件方案;
- (3) 加卸载方案;
- (4) 量测方案;
- (5) 判断准则;
- (6) 安全措施。

5.1.3 实验室结构试验应包括下列内容:

- (1) 试验设计;
- (2) 试件的制作、养护和安装;
- (3) 材料性能试验;
- (4) 试验加载、量测及试验现象的观测及记录;
- (5) 试验结果的整理及分析;
- (6) 试验报告及结论。

5.1.4 方案设计宜采用数值模拟方法或简化计算方法,分析试件内力、变形规律,确定试件的几何尺寸、相似比、主要参数影响及量测方案等。

5.1.5 在室外进行试验时应采取遮盖和屏蔽等防护措施。

5.1.6 实验室结构试验中用于计算和分析的材料性能参数应通过实测确定,检测和试验方法应符合国家现行标准规定。进行模型和原型试验时,材料性能参数可采用同条件浇筑和养护的混凝土试块实测值。

5.1.7 需进一步核实试验对象的材料参数时,可在试验完成后直接从受力较小的部位钻取混凝土芯样或截取钢筋试样进行力学性能测试。

5.1.8 试验报告应包括下列内容:

(1) 试验概况,包括试验背景、试验目的、构件名称、试验日期、试验单位、试验人员和记录编号等;

(2) 试验方案,包括试件设计、加载设备及加载方式、量测方案;

(3) 试验记录,包括记录加载程序、仪表读数、试验现象、文字、图像及视频资料;

- (4) 结果分析,包括试验数据的整理,受力机理的初步分析;
- (5) 试验结论。

5.2 试验加载

5.2.1 结构试验的加载程序应符合下列规定。

- 5.2.1.1 探索性试验的加载程序应根据试验目的及受力特点确定。
- 5.2.1.2 验证性试验宜分级进行加载,荷载分级应包含各级临界试验荷载值。
- 5.2.1.3 以位移控制加载时,加载等级宜以屈服位移值的10%控制。

5.2.2 试件的加载区域以及与加载设备连接应有足够的刚度,其承载力应不低于最大试验荷载的1.2倍。

5.2.3 试件的支承应符合下列规定。

5.2.3.1 支承装置应保证试验试件的边界约束条件和受力状态符合试验方案的计算简图。

5.2.3.2 支承装置的承载力应不低于最大试验荷载的1.2倍。

5.2.3.3 支承装置不应产生影响试件正常受力和测试精度的变形。

5.2.3.4 支承装置上下钢垫板宜预埋在试件或支墩内,也可采用砂浆或干砂等垫平;试件承受较大支座反力时,应进行局部承压验算。

5.2.4 简支受弯试件的支座应符合下列规定。

5.2.4.1 简支支座应仅提供垂直于跨度方向的竖向反力。

5.2.4.2 单跨试件和多跨连续试件的支座,除一端应为固定铰支座外,其他应为滚动铰支座,铰支座的长度不宜小于试件在支承处的宽度。

5.2.4.3 固定铰支座应限制试件在跨度方向的位移,但不应限制试件在支座处的转动,支座可以采用图5.2.4-1所示的上垫板、刀口式垫板、图5.2.4-2所示的半圆钢或焊于钢板上的圆钢;滚动铰支座不应影响试件在跨度方向的变形和位移,以及在支座处的转动,支座可采用图5.2.4-3所示的圆钢或图5.2.4-4所示的下面有圆钢的刀口式滚动垫板。

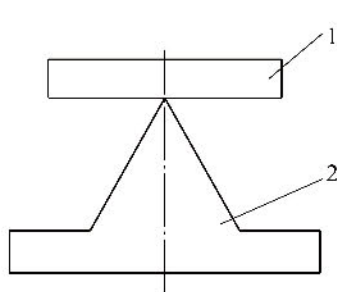


图 5.2.4-1 刀口式铰支座
1-上垫板;2-刀口式垫板

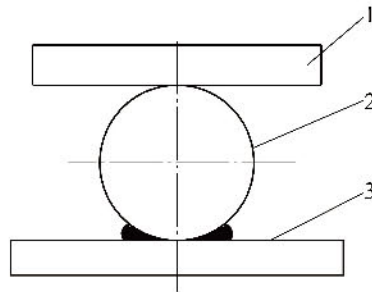


图 5.2.4-2 固定铰支座
1-上垫板;2-圆钢;3-下垫板

5.2.4.4 各支座的轴线布置应符合计算简图的要求;试件平面为矩形时,各支座的轴线应平行,且垂直于试件的纵向轴线;各支座轴线间的距离应等于试件的试验跨度。

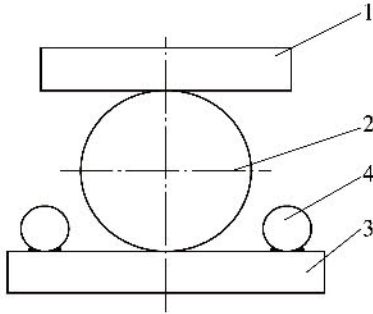


图 5.2.4-3 滚动式支座
1-上垫板;2-圆钢;3-下垫板;4-限位钢筋

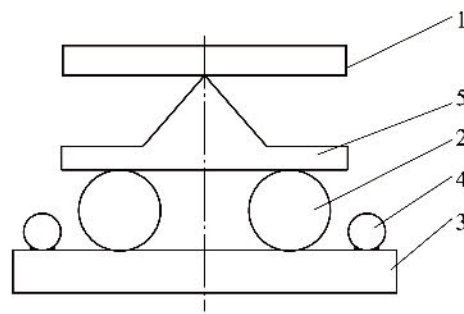


图 5.2.4-4 刀口式滚动支座
1-上垫板;2-圆钢;3-下垫板;
4-限位钢筋;5-刀口式垫板

5.2.4.5 试件铰支座的上垫板宽度宜与试件的设计支承宽度一致;垫板的厚宽比不宜小于 $1/6$ 。

5.2.4.6 难以满足上述理想简支条件时,应考虑支座处水平移动受阻引起的约束力或支座处转动受阻引起的约束弯矩等因素对试验的影响。

5.2.5 四角简支和四边简支双向板试件的支座宜采用图 5.2.5 所示的形式。

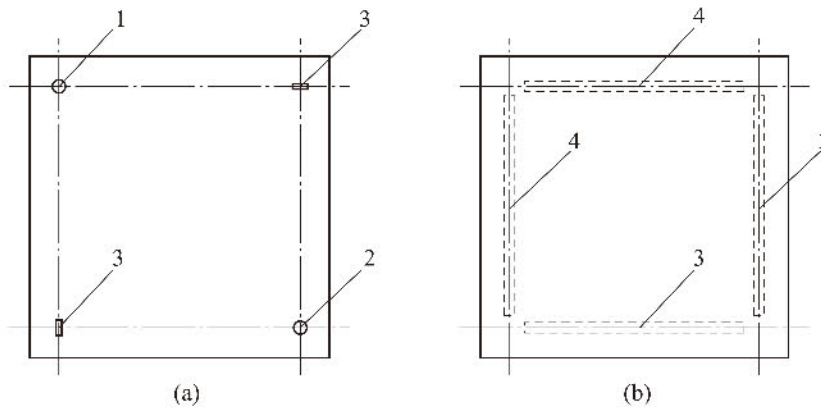


图 5.2.5 四角简支和四边简支双向板的支座形式
(a) 四角简支;(b) 四边简支

1-钢球;2-半圆钢球;3-滚轴;4-角钢

5.2.6 管桩及接头抗弯试验宜采用图 5.2.6 所示加载体系,并应符合下列规定。

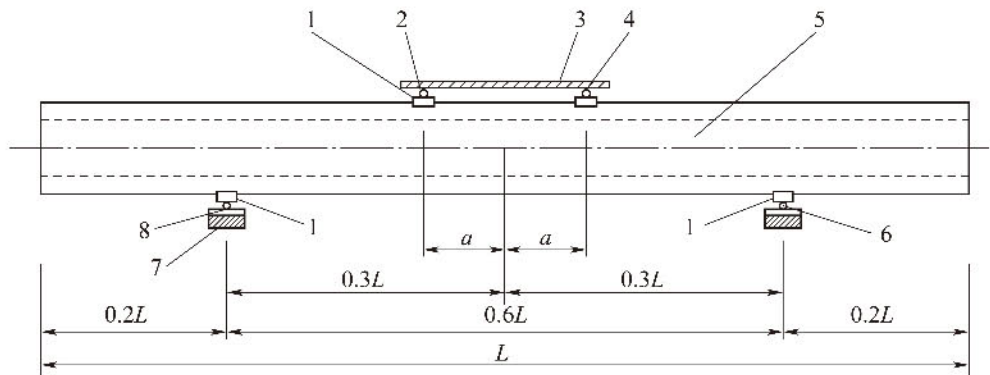


图 5.2.6 管桩及接头抗弯试验加载体系

1-U 形垫板;2-分配梁固定铰支座;3-分配梁;4-分配梁滚动铰支座;5-桩身或接头;6-滚动铰支座;7-支墩;8-固定铰支座;
 L -桩长; a - $1/2$ 加载跨距

5.2.6.1 桩身弯矩应按式(5.2.6)计算。

$$M = \frac{P}{4} \left(\frac{3}{5}L - 2a \right) + \frac{1}{40}W \cdot L \quad (5.2.6)$$

式中 M ——弯矩(kN·m)；

P ——荷载(kN),应考虑加载设备重量；

L ——桩长(m)；

a ——1/2 加载跨距(m),外径不大于 1000mm 时取 0.5m,外径大于 1000mm 时取桩身外径的 1/2；

W ——桩身自重(kN)。

5.2.6.2 桩长应符合表 5.2.6 的规定。

表 5.2.6 抗弯试验用管桩的最短单节桩长

| | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 管桩外径 D (mm) | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 1000 | 1200 | 1300 | 1400 |
| 最短单节桩长(m) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 |

5.2.7 试验前应计算试件自重及加载设备的重量、试件在各种临界状态下相应的荷载及变形预估值、加载量,计算加载量时应扣除试件自重及加载设备重量。

5.2.8 试件自重和加载设备的重量应经实测或计算确定,并根据加载模式进行换算,对验证性试验其数值不宜大于使用状态试验荷载值的 20%。

5.2.9 承受集中荷载的部位,应采取预埋钢筋网片或钢垫板等局部加强措施。内埋量测元件布置应合理,并应采取有效的保护措施。

5.2.10 结构试验开始前应通过预加载校验支座平稳性和仪表及加载设备,并对仪表进行调零。

5.2.11 结构试验的分级加载原则应符合下列规定。

5.2.11.1 进行抗裂试验,每级加载值不宜大于开裂荷载设计值的 20%,当达到开裂荷载设计值的 80%后,每级加载值不宜大于开裂荷载设计值的 5%。

5.2.11.2 进行破坏试验,每级加载值不宜大于极限荷载设计值的 10%,当达到极限荷载设计值的 80%后,每级加载值不宜大于极限荷载设计值的 5%。

5.2.12 每级荷载加载完成后的持荷时间不应少于 10min,且每级加载持荷时间宜相等。

5.2.13 验证性试验出现表 5.2.13 所列的现象之一时,应判断该试件已达到承载能力极限状态。

表 5.2.13 试件承载能力极限状态

| 受力类型 | 试验现象 |
|----------|------------------------------------|
| 受拉、受压、受弯 | 弯曲挠度达到跨度的 1/50 或悬臂长度的 1/25 |
| | 受拉主筋处混凝土裂缝宽度达到 1.50mm 或钢筋应变达到 0.01 |
| | 构件的受拉主筋断裂 |
| | 弯曲受压区混凝土受压开裂、破碎 |
| | 受压构件的混凝土受压破碎、压溃 |

续表 5.2.13

| 受力类型 | 试验现象 |
|----------|---------------------------|
| 受剪 | 构件腹部混凝土斜裂缝宽度达到 1.50mm |
| | 斜裂缝端部出现混凝土剪压破坏 |
| | 沿构件斜截面出现斜拉裂缝,混凝土断裂 |
| | 沿构件斜截面出现斜压裂缝,混凝土破碎 |
| | 沿构件叠合面、接搓面出现剪切裂缝 |
| 受扭 | 构件腹部混凝土斜裂缝宽度达到 1.50mm |
| 受冲切 | 沿冲切锥面顶、底的混凝土出现环状裂缝 |
| 局部受压 | 混凝土压陷、劈裂 |
| | 边角混凝土剥裂 |
| 钢筋的锚固、连接 | 受拉主筋锚固失效,主筋端部滑移达到 0.20mm |
| | 受拉主筋在搭接接头处滑移,传力性能失效 |
| | 受拉主筋搭接脱离或在焊接、机械连接处断裂,传力中断 |

5.2.14 分级加载试验时,试验荷载的实测值应按下列原则确定:

(1) 试件在持荷时间完成后出现承载能力极限状态时,取该级荷载值作为试验荷载实测值;

(2) 试件在加载过程中出现承载能力极限状态时,取前一级荷载值作为试验荷载实测值;

(3) 试件在持荷过程中出现承载能力极限状态时,取该级荷载和前一级荷载的平均值作为试验荷载实测值。

5.2.15 对于研究试件恢复性能的试验,加载完成后应按阶段分级卸载。卸载和量测应符合下列规定。

5.2.15.1 每级卸载值可取承载力试验荷载值的 20%,也可按各级临界试验荷载逐级卸载。

5.2.15.2 卸载时,宜在各级荷载下持荷并量测,持荷时间不宜少于 10min,直至卸载完毕。

5.2.15.3 全部卸载完成并恢复性能后重新量测残余变形和裂缝等,恢复性能的时间不宜小于 1h,也可根据需要确定时间。

5.3 试验量测

5.3.1 试验量测的内容应包括荷载、位移、应力应变和裂缝等。

5.3.2 试验量测方案应符合下列规定。

5.3.2.1 应分析试件内力、变形分布变化的规律,确定内力和变形的重点量测部位,合理布置传感器。

5.3.2.2 在试件的对称位置应布置一定数量的校核性量测点,并通过测量值的对比复核,确认测量数据的可靠性。

5.3.2.3 进行破坏试验时,位移计和应变计的布置应兼顾试验量测数据的有效性和仪器仪表的安全。

5.3.2.4 小模型试验量测仪表的安装位置应准确,并应考虑量测仪表的重量和刚度等影响。

5.3.3 结构试验用的量测仪表,应符合试验精度要求,并应定期检验校准,读数应比所用量测仪表的最小分度值小一位。仪表的预估试验量程宜控制在量测仪表满量程的30%~80%。

5.3.4 试验中的试件挠度量测应根据需要布置位移量测仪表,并应符合下列规定。

5.3.4.1 应在试件最大位移处及支座处布置测点,沿跨度等距布置不少于5个位移传感器。

5.3.4.2 对宽度较大的试件,应在试件的两侧布置测点,并取量测结果的平均值作为该处的实测值。

5.3.4.3 对具有边肋的单向板,除应量测边肋挠度外,还应量测板宽中间的最大挠度。

5.3.4.4 量测得到的构件挠度应考虑两边支座的不均匀沉陷影响,并按附录A的规定进行修正。

5.3.5 试验中应变的量测应符合下列规定。

5.3.5.1 采用电阻应变计量测应变时,应有可靠的温度补偿措施。在温度变化较大的地方采用机械式应变仪量测应变时,应对温度影响进行修正。

5.3.5.2 量测混凝土应变的电阻应变片长度不应小于50mm和4倍粗骨料粒径。

5.3.6 混凝土试件的开裂荷载可采用下列方法确定:

(1)采用直接观察法时,在试件表面刷白,用放大镜或电子裂缝观测仪观察第一次出现裂缝时的荷载值作为开裂荷载实测值;

(2)采用应变测量判断法时,在试件的最大主拉应力区,沿主拉应力方向连续布置应变计监测应变值的发展;当某应变计的应变增量有突变时,取当时的荷载值作为开裂荷载实测值,且判断裂缝出现在该应变计所跨的范围内;

(3)大跨度试件采用挠度转折法时,根据加载过程中试件的荷载-变形关系曲线转折判断开裂并确定开裂荷载。

5.3.7 裂缝出现后,应在试件上描绘裂缝的位置、分布、形态,记录裂缝宽度和对应的荷载值或荷载等级,并全过程观察记录裂缝形态和宽度变化,绘制构件裂缝形态图。

5.3.8 试验结果宜进行误差分析。

5.4 结构模型试验

5.4.1 结构模型试验试件的几何形状、结构尺寸、截面配筋数量、配筋形式、施加荷载以及构造措施等,宜满足表5.4.1所示的结构模型与原型结构的相似关系。当相似关系无法完全满足时,可按照等强度、等刚度的原则进行等效换算。

表 5.4.1 混凝土结构试验模型与原型结构的相似关系

| 类 型 | 物 理 量 | 量 纲 | 一 般 模 型 | 同材料缩尺模型 |
|---------|--------------------|-------------|------------------|---------|
| 混凝土材料性能 | 应力 σ_c | $[FL^{-2}]$ | S_σ | 1 |
| | 应变 ε_c | — | 1 | 1 |
| | 弹性模量 E_c | $[FL^{-2}]$ | S_σ | 1 |
| | 泊松比 μ_c | — | 1 | 1 |
| | 质量密度 ρ_c | $[FL^{-3}]$ | S_σ/S_L | $1/S_L$ |
| 钢筋材料性能 | 应力 σ_s | $[FL^{-2}]$ | S_σ | 1 |
| | 应变 ε_s | — | 1 | 1 |
| | 弹性模量 E_s | $[FL^{-2}]$ | S_σ | 1 |
| | 粘结应力 ν | $[FL^{-2}]$ | S_σ | 1 |
| 几何特征 | 几何尺寸 L | $[L]$ | S_L | S_L |
| | 线位移 u | $[L]$ | S_L | S_L |
| | 角位移 θ | — | 1 | 1 |
| | 钢筋面积 A_s | $[L^2]$ | S_L^2 | S_L^2 |
| 荷载 | 集中荷载 P | $[F]$ | $S_\sigma S_L^2$ | S_L^2 |
| | 线荷载 q_l | $[FL^{-1}]$ | $S_\sigma S_L$ | S_L |
| | 面荷载 q | $[FL^{-2}]$ | S_σ | 1 |
| | 力矩 M | $[FL]$ | $S_\sigma S_L^3$ | S_L^3 |

注:表中 S_L 、 S_σ 分别为模型的几何尺寸和应力相似系数。

- 5.4.2 研究参数变化对结构性能影响的试验,宜通过改变主要影响参数设计系列试件,当影响参数较多时,可采用正交设计法对多个影响参数进行组合设计。
- 5.4.3 模型试验中加载设备、支撑装置之间的连接方式和构造措施应能反映原型结构的边界约束条件。
- 5.4.4 设计制作试件应考虑试件安装和加载量测的需要。
- 5.4.5 试件的材料宜与实际结构一致。
- 5.4.6 试件混凝土的骨料粒径应根据模型的几何尺寸确定,骨料最大粒径不宜大于截面最小尺寸的 1/3。
- 5.4.7 制作的模型构件几何尺寸允许误差应为 $\pm 5\%$ 。
- 5.4.8 离心模型试验应按相似原理和允许误差要求选择模型尺寸、模型材料。

6 现场结构试验

6.1 一般规定

6.1.1 水运工程结构在下列情况可进行现场结构试验：

- (1) 结构大修前的可靠性鉴定、改扩建前的鉴定、抗震鉴定、超期或超载使用前的安全鉴定,需进行结构性能评估时;
- (2) 新建结构试运行期间或结构改扩建后需验证结构的有关设计性能时;
- (3) 对结构质量有怀疑或争议,需通过试验检测分析结构性能的可靠性时;
- (4) 对资料不全、情况复杂或质量存在明显缺陷的结构,需进行结构性能评估时;
- (5) 需要验证结构设计计算参数、方法和计算结果时;
- (6) 结构发生材料劣化、结构损伤、变形等变化,使结构计算分析存在较大困难时;
- (7) 采用新结构、新材料、新工艺的结构或难以进行理论分析的复杂结构,需通过试验对计算模型或设计参数进行复核、验证或研究其结构性能和设计方法时;
- (8) 结构受灾或发生事故,需通过试验分析事故原因及评估结构的可靠性时。

6.1.2 现场结构试验可分为下列类型：

- (1) 根据正常使用极限状态的检验项目成果,验证或评估结构的使用功能所进行的使用状态试验;
- (2) 根据承载能力极限状态的检验项目成果,验证或评估结构的承载能力所进行的承载能力试验;
- (3) 对复杂结构或有特殊使用功能要求的结构有针对性进行的其他试验。

6.1.3 试验前应收集、分析结构的下列内容：

- (1) 工程设计、施工和验收资料,分析资料的完整性和符合性;
- (2) 工程所在区域水文、气象和地质等资料,分析环境影响的变化情况;
- (3) 已进行的试验检测资料和试验结构施工记录;
- (4) 结构服役历史、后续使用年限内的荷载和功能要求;
- (5) 已有的缺陷以及可能存在的安全隐患等。

6.1.4 试验前应进行结构现状检测,并应符合下列规定。

6.1.4.1 结构现状检测应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)的有关规定。

6.1.4.2 对检测发现的结构已有缺陷、已发生的材料劣化、结构损伤和变形、节点弱化、搭接不足等结构不良状况,应进行详细的量测、记录和现场标识,并应分析其对试验安全和试验结果的影响程度,必要时应采取维修加固措施。

6.1.5 试验前应进行试验过程安全验算和结构预分析,并应符合下列规定。

6.1.5.1 试验过程安全验算应根据结构现状、工程勘察资料和试验目的,按现行行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)的有关规定执行。

6.1.5.2 结构预分析可采用有限单元法等数值分析方法,宜包括下列内容:

- (1)按试验目的确定最不利的荷载布置方式;
- (2)分析结构承载能力薄弱部位;
- (3)计算试验结构构件和节点在预计最大试验荷载及其他控制工况下的作用效应值;
- (4)计算试验结构构件开裂荷载和破坏荷载预估值等。

6.1.6 现场结构试验的受检构件选择应遵循下列原则。

6.1.6.1 受检构件应具有代表性,且宜选择处于荷载较大、抗力较弱或缺陷较多的部位。

6.1.6.2 受检构件的试验结果应能反映整体结构的主要受力特点。

6.1.6.3 受检构件应能方便地实施加载和进行量测。

6.1.6.4 对处于正常服役期的结构,加载试验造成的构件损伤不应影响结构的安全性和正常使用功能产生明显影响。

6.1.7 现场结构试验采用的试验基本参数应符合下列规定。

6.1.7.1 试验基本参数应包括结构几何尺寸、材料性能参数和岩土力学参数、荷载参数等。

6.1.7.2 对结构试验结果和试验安全影响大的基本参数宜通过现场实测取得。

6.1.7.3 结构混凝土既有应力检测应符合附录 B 的规定。

6.1.7.4 结构基本参数的检测方法和测点布设应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)和《水运工程质量检验标准》(JTS 257)的有关规定。

6.1.7.5 采用现场检测数据时,应分析检测部位、检测数量、检测时环境条件等因素的限制对相关参数统计不确定性的影响。环境条件的调查方法应符合附录 C 的规定。

6.1.8 当考虑后续使用年限的影响时,可变荷载调整系数应根据国家现行标准《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153)和《港口工程荷载规范》(JTS 144—1)的有关规定,并结合受检构件的具体情况确定。

6.1.9 结构破坏性试验应符合下列规定。

6.1.9.1 结构破坏性试验方案应进行可行性论证,拟继续使用的结构不得进行破坏性试验。

6.1.9.2 结构破坏性试验前,应分析结构受力特点、承载能力、破坏模式等。

6.1.9.3 荷载施加及结构变形均应在可控范围内。结构进入塑性阶段后,加载宜采用变形控制的方式,并应采取安全保护措施。

6.1.9.4 应根据试验方案严格控制试验过程并详细观测、记录现场情况。

6.1.10 现场结构试验的仪器设备和环境条件应符合下列规定。

6.1.10.1 试验仪器、仪表、传感器等应采取防水、防晒、防振和防碰撞等措施进行有效保护。

6.1.10.2 结构试验期间不宜进行对试验有影响的生产作业。在风、浪等气象、水文条件影响量测工作时,应采取有效的防护措施。

6.1.10.3 试验区域外围应设置警示围栏、警示标识和信号灯等设施,并宜设置监控系统对试验区域进行监控。

6.1.11 现场结构试验应对结构的沉降、位移、土压力和水压力等进行检测和分析,检测方法应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)和《水运工程测量规范》(JTS 131)的有关规定。

6.1.12 开展现场结构动力特性及动力响应试验检测应按照第4章的有关规定执行。

6.2 码头结构加载试验

6.2.1 现场码头结构加载试验应采用短期静力加载法,并根据检验目的和试验条件确定加载方式、加载量和卸载方式。对预计出现裂缝或承载能力极限状态等现象的重点观测部位应不被遮挡。

6.2.2 现场码头结构加载试验宜采用分级加载方式,施加荷载宜通过计算分析确定。

6.2.3 现场码头结构加载试验的测点数量应按试验要求确定,对荷载、挠度等重要检验参数宜布置可直接观测的仪表,并宜采用不同的量测方法对比、校核试验量测的结果。试验过程中宜进行下列观测:

- (1) 荷载-变形关系;
- (2) 控制截面上的混凝土应变;
- (3) 试件的裂缝形态、裂缝宽度的发展情况;
- (4) 试件承载能力极限状态的观测;
- (5) 卸载过程中及卸载后,试件挠度及裂缝的恢复情况及残余值。

6.2.4 用于研究结构受力特点、承载能力、破坏模式等所进行的结构破坏性试验应符合第6.1.9条的规定。

6.2.5 码头结构承载力、位移、构件应力应变等参数检验可采用结构静荷载试验方法,并应符合下列规定。

6.2.5.1 仅对部分码头结构进行试验时,试验的位置应根据试验目的、工程总体布置、结构现状和试验条件等因素综合确定。码头可选一个结构段或墩台作为试验结构,梁板式高桩码头的试验结构不宜少于3个连续布置的排架。试验结构需再次进行加载试验时,间歇时间不宜少于3d。

6.2.5.2 对结构加载试验需进行的岩土勘察应符合现行行业标准《水运工程岩土勘察规范》(JTS 133)和《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定。

6.2.5.3 试验荷载的荷载图式和最大加载量应根据试验目的、试验指标和结构特点确定,并应满足下列要求:

- (1) 码头结构梁、板、桩构件承载力检验按承载能力极限状态和设计状况根据现行设

计规范的规定确定荷载组合和荷载图式,最大加载量需考虑重要性系数、结构系数、作用分项系数、单桩轴向承载力分项系数、荷载冲击系数等相关系数的影响;

(2) 荷载布置方式按最不利原则确定。

6.2.5.4 试验荷载的加载方式应根据荷载图式、结构特点和现场条件确定,并应满足下列要求:

(1) 均布加载时,采用块体重物加载、散体重物加载等方式,块体重物加载时避免形成重物与结构共同受力,散体重物加载时避免形成反拱效应;

(2) 集中力加载采用重物、分配梁及配套加载设备、码头装卸运输设备等方式;

(3) 加载系统有足够的强度、刚度和稳定性,其承载力和加载能力不小于最大试验荷载的1.3倍。

6.2.5.5 码头结构加载试验应根据结构特点和现场条件搭设牢固的测试支架,并应便于布置测试传感器。

6.2.5.6 在水域进行码头结构静载荷试验应搭设牢固的试验操作平台,平台不得与试验对象或测试支架相连,其高程应考虑水位和风浪等的影响,平台应设置护栏、人梯、安全标识、信号灯、救生设备等安全设施,并应配备通信和交通等设备。

6.2.5.7 码头结构加载试验应根据试验目的和结构特点选择量测参数,量测宜包括下列内容:

(1) 试验荷载;

(2) 试验结构关键部位的水平位移、垂直位移、倾斜、挠度、扭转等变形;

(3) 试验结构关键部位的应变;

(4) 试验结构裂缝变化、外观变化;

(5) 结构整体水平位移、垂直位移、倾斜和扭转;

(6) 其他试验现象。

6.2.5.8 试验过程中结构出现下列现象时应立即停止加载并分析原因;可继续加载时,应增加荷载分级,并采取相应的安全措施:

(1) 结构的变形、应变等作用效应与结构预分析数据出现显著差异;

(2) 结构的裂缝、变形快速发展;

(3) 发生其他形式的意外试验现象。

6.2.5.9 符合下列条件之一时应终止加载:

(1) 试验的加载量达到试验要求的最大加载量;

(2) 达到试验要求的最大位移;

(3) 结构出现混凝土开裂、破碎、压溃,钢筋锚固失效、滑移等可判断承载力的试验现象;

(4) 控制性测点的变形、裂缝、应变等已达到理论控制值;

(5) 加载已达到加载系统的承载能力;

(6) 结构出现可判定为破坏的试验现象。

6.2.5.10 判断桩构件承载力可根据结构分析结果、工程经验和下列试验现象之一综

合考虑确定:

- (1)在某级荷载作用下,60min内桩顶处对应的沉降值仍大于0.1mm的稳定标准;
- (2)在某级荷载作用下,桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的5倍;
- (3) $Q-S$ 曲线出现可判定极限承载力的陡降段,且桩顶总沉降量达到理论分析值;
- (4)码头整体位移、构件控制截面应变等结构安全监测数值随荷载的关系曲线由直线段变化为曲线或出现陡然变大。

6.2.6 现场码头结构试验中需要进行混凝土结构构件裂缝宽度检验试验时,其检测试验方法可按附录D的规定执行。

6.2.7 现场码头结构试验中需要进行码头面防风锚碇结构抗拔承载力检测时,其检测试验方法可按附录E的规定执行。

6.2.8 试验结束后,应根据试验目的、委托要求和试验情况进行必要的成果分析,成果分析应符合下列规定。

6.2.8.1 对试验结果的合理性和试验过程中的结构状态分析,可通过下列方法综合判断:

- (1)对结构作用效应实测值与理论计算值进行分析比较;
- (2)分析结构作用效应的线性程度;
- (3)分析卸载后结构的残余变形和残余应变等。

6.2.8.2 应根据试验内容的不同提出相应的试验成果,试验成果宜包括下列内容:

- (1)试验记录、试验过程及相应试验现象描述;
- (2)试验结构基桩在分级荷载下的垂直位移值及荷载-垂直位移($Q-S$)曲线、垂直位移-时间对数($S-\lg t$)曲线等图表;
- (3)试验结构桩、梁、板构件关键部位的位移或挠度;
- (4)试验结构桩、梁、板构件关键部位在分级荷载下的应变值及应变分布图;
- (5)裂缝的位置、分布、宽度和对应的荷载值及裂缝分布图;
- (6)码头安全监测数据及分析;
- (7)其他需要说明的问题。

6.3 码头结构系靠泊试验

6.3.1 开展码头结构系靠泊试验前,应调研收集下列信息:

- (1)当地气象、水文、工程地质等环境资料;
- (2)设计文件、施工和验收资料、服役历史、目标使用期内的荷载和使用功能、已有的缺陷以及可能存在的安全隐患等;
- (3)必要时对受检结构进行检测,检测内容包括结构构件的材料性能、结构及护舷中存在的损伤、结构已产生的变形等。

6.3.2 码头结构系靠泊试验应选在允许作业的天气情况下开展,不宜在当地较极端的天气情况进行试验。

6.3.3 码头结构系靠泊试验前,应根据码头结构现场检测资料,采用现行行业标准《码

头结构设计规范》(JTS 167)规定的方法或有限元计算方法,对码头结构进行系靠泊能力分析。

6.3.4 码头结构系靠泊试验的船型选取,应根据码头结构系靠泊能力计算分析结果,在保证安全的条件下,按下列原则确定:

- (1) 当为灾后或事故后的码头,且拟降低码头靠泊能力时,选取降级后的满载船型;
- (2) 升级改造后的码头结构,选取升级改造后设计船型的满载船型;
- (3) 码头结构只有一种设计船型时,选取该船型的满载船型;当有多种设计船型时,选取吨位最大船型的满载船型。

6.3.5 码头结构系靠泊试验宜选取船舶靠泊、停泊、离泊三个时段工况进行测试工作。

6.3.6 码头结构系靠泊试验应包括下列内容:

- (1) 收集船舶的船名、船型尺度、系缆方式、总载重量、排水量、吃水等信息;
- (2) 测试或收集船舶系靠泊期间的水流、波浪、潮位、风况等环境条件;
- (3) 测试船舶的姿态、轨迹、速度、撞击力、挤靠力、系缆力、护舷的变形及历程、码头主体结构应力等;
- (4) 需要时检测码头结构的位移变形和裂缝开展情况。

6.3.7 码头结构系靠泊试验观测点的设置应符合下列规定。

6.3.7.1 船舶对码头的撞击力、挤靠力和护舷变形的观测,应在码头泊位靠船位置的护舷处设置观测点,设置观测点的护舷不宜少于2个,每个护舷设置的变形观测点和测力观测点应各不少于1个。

6.3.7.2 船舶系缆力观测点的位置和数量应根据船舶的系缆方式确定,每组缆绳均应测读系缆力。

6.3.7.3 主体结构的变形与应力观测时,观测点布置应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)的有关规定。

6.3.7.4 靠泊时段进行码头结构的振动观测时,观测点布置应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)的有关规定。

6.3.8 码头结构系靠泊试验期间的环境条件观测应符合下列规定。

6.3.8.1 当港区附近无长期测风资料而需利用离港区较远气象站的观测数据时,可在港区附近设立临时测站,并根据短期同步相关分析确定港区风要素值。

6.3.8.2 码头及其附近的波浪要素宜有不少于1年的连续观测资料。当需设置波浪观测点时,单个泊位应至少布设2个测点,2个以上泊位不得少于4个测点,且同一测区测点应同步观测,必要时不同测区测点应同步观测。

6.3.9 船舶力观测方法应符合下列规定。

6.3.9.1 船舶撞击力、挤靠力的观测可采用测力计观测法。不具备测试条件时,可通过测试橡胶护舷压缩变形并根据其力学性能曲线来推算,护舷变形可采用大量程位移计观测法观测。

6.3.9.2 船舶系缆力的观测可采用测力计观测法,系缆方式的观测可采用摄像法。

6.3.9.3 船舶运动状态的观测宜采用摄像跟踪法、姿态仪法、差分GPS定位仪法等

方法。

6.3.9.4 船舶靠泊速度可采用测速仪进行测试。

6.3.10 船舶系靠泊时的码头结构水平变位观测,可根据条件选用视准线法、激光准直法或测边角法等;码头结构的动位移宜采用布设加速度传感器、位移传感器的方法进行检测。

6.3.11 码头结构系靠泊试验应对码头结构裂缝进行检测,检测方法应符合下列规定。

6.3.11.1 裂缝的分布位置、走向和长度观测可采用绘制裂缝分布图法。

6.3.11.2 裂缝宽度检测可采用光学裂缝放大仪法、近景摄影测量法等。

6.3.11.3 裂缝深度的检测可采用超声波法。

6.3.11.4 裂缝的连续变化情况观测可采用传感器自动测记法。

6.3.12 码头结构系靠泊试验应对码头结构倾斜变形进行检测,检测方法应符合下列规定。

6.3.12.1 从码头外部进行检测时,宜选用投点法、测水平角法等。

6.3.12.2 对整体刚度较大的重力式等结构型式的码头,宜采用倾斜仪直接观测法,也可采用差异沉降法。

6.3.12.3 码头顶部与下部结构具有竖向通视条件时,宜选用吊垂球法、激光准直仪法、激光位移计自动测计法或正垂线法等。

6.3.13 船舶系靠泊期间的码头结构应力观测可采用电阻式应变计、振弦式应变计、光纤光栅式应变计等方法进行。

6.3.14 船舶力观测精度应满足下列要求:

- (1) 测力计率定线性相对允许误差为 $\pm 3\%$;
- (2) 位移计率定线性相对允许误差为 $\pm 2\%$;
- (3) 船舶运动状态仪器观测的相对允许误差为 $\pm 5\%$ 。

6.3.15 码头结构系靠泊试验成果报告应包含下列内容:

- (1) 船舶的有关信息资料,包括船名、船型尺度、总载重量、排水量、吃水、系缆状态等;
- (2) 系靠泊期间的环境参数,包括温度、潮位、波浪、流速、流向、风况;
- (3) 船舶运动状态观测分析;
- (4) 船舶撞击力、挤靠力、系缆力的观测分析;
- (5) 护舷变形的观测分析;
- (6) 码头结构位移与变形的观测分析;
- (7) 码头结构的外观检查分析;
- (8) 码头主体结构应力应变的观测分析;
- (9) 码头结构靠泊时段的振动观测分析。

6.4 防波堤及护岸试验

6.4.1 防波堤及护岸结构稳定与功能性试验项目可包括波浪作用下结构断面动力特性和稳定性试验、防浪效果与越浪特性试验检测等。

6.4.2 防波堤及护岸结构在波浪作用下断面动力特性和稳定性试验的主要内容应根据其结构型式按表 6.4.2 确定,并应对现场波要素进行观测和记录。

表 6.4.2 防波堤与护岸结构稳定性试验主要内容

| 结构型式 | 试验检测内容 |
|-------|--|
| 斜坡式 | 堤顶及护面块体的稳定性;水下棱体及护底稳定性;胸墙稳定性;胸墙迎水面和墙底波压力等 |
| 宽肩台式 | 抛石动力稳定性;迎水面波浪的反射、透射;胸墙迎水面和墙底波压力等 |
| 直立式 | 直墙底与基床间的摩擦系数;抛石基床的稳定性;当为沉箱结构时,观测正向波压力、浮托力及不同开孔率的波浪涌高、背水面的水位变化等 |
| 桩基或墩式 | 桩基顶部横向水平力;墩式上部正向波压力、波浪爬高、浮托力及倾覆力矩;桩基稳定性;带梁板时的水平力、浮托力等 |
| 浮式 | 波的反射和透射;浮体的横摇、纵倾、垂荡等六自由度运动量;锚链结构受力等 |

6.4.3 防波堤与护岸结构防浪效果与越浪特性试验检测应验证下列要求:

- (1) 在设计波浪条件下,防波堤与护岸的设计功能能够得到保证;
- (2) 港池水域码头前沿波浪要素满足船舶安全航行、停泊和作业的要求;
- (3) 能阻挡底部泥沙运动,防止港池航道淤积;
- (4) 港口口门水流平顺,横流满足船舶安全航行要求;
- (5) 岸线稳定不被冲刷和淤积等。

6.4.4 防波堤及护岸结构稳定与功能性试验可采用现场结构试验检测和模型试验相结合的方法。

6.4.5 防波堤及护岸结构稳定与功能性试验应对容易引起结构失稳破坏的波浪潮位组合以及施工期的安全问题给予特别的注意,并应考虑波浪建筑物和地基的相互作用。

6.5 船闸试验

6.5.1 船闸结构试验检测应包括船闸水工结构试验检测和船闸闸阀门结构试验检测。

6.5.2 船闸结构试验检测项目和受检部位的选择应符合第 6.1.6 条规定。

6.5.3 船闸水工结构试验检测项目应包括材料性能、混凝土强度、变形与损伤、应力应变、锚杆(索)的锚固力等,必要时可进行结构构件性能的实荷检验或结构的动力测试。

6.5.4 船闸水工结构试验检测方法应符合本规范及《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152)等国家现行有关标准的相关规定。

6.5.5 船闸闸阀门结构试验检测的对象应包括闸阀门门体及其附属结构、闸阀门启闭机及连接机构。

6.5.5.1 船闸闸阀门结构试验检测项目应包括钢结构变形、钢结构动力特性、闸阀门启闭特性、阀门空化特性等。

6.5.5.2 船闸闸阀门结构变形及动力特性检测应按照本规范和现行国家标准《钢结构现场检测技术标准》(GB/T 50621)等的有关规定执行。

6.5.5.3 船闸闸阀门启闭特性检测可分为无水检测和有水检测两个阶段,检测内容应

包括下列部分:

(1)船闸闸门的启闭速度、闸门开度或位置、启闭力、启闭机油缸压力及主要构件的应力应变、闸门门体的振动加速度等;

(2)船闸阀门的启闭速度、阀门开度或位置、无水启闭力、静水启闭力和动水启闭力、启闭机油缸压力、启闭杆的窜动量、阀门门体及吊杆振动加速度等。

6.5.6 船闸闸阀门结构现场试验检测方法应符合下列规定。

6.5.6.1 启闭速度和开度检测宜采用开度计法。

6.5.6.2 启闭力检测宜采用应变计法,或通过启闭机油缸压力计算而得,启闭机油缸压力检测宜采用压力传感器法。

6.5.6.3 主要构件应力应变检测宜采用应变计法。

6.5.6.4 启闭杆窜动量检测宜采用位移计法。

6.5.6.5 门体及吊杆加速度检测宜采用加速度传感器法。

6.5.6.6 阀门空化特性检测宜采用水听器和声级计法。

6.5.7 船闸输水系统结构试验检测应符合下列规定。

6.5.7.1 船闸输水系统结构试验检测对象应包括输水廊道及其附属结构。

6.5.7.2 船闸输水系统结构试验检测项目应包括灌泄水水力特性、输水廊道和消能工压力特性等。

6.5.7.3 船闸输水系统结构试验检测宜采用现场观测手段,必要时可进行相关的物理模型试验。

6.5.8 船闸输水系统结构试验现场观测的方法应符合下列要求。

6.5.8.1 闸室、阀门井、进出水口处的水位变化检测宜采用超声波水位计或压力传感器等方法。

6.5.8.2 输水廊道和消能工压力检测宜采用压力传感器法。

6.6 干船坞与船台滑道试验

6.6.1 干船坞结构试验检测对象应包括干船坞水工建筑物、坞门及输水系统等。

6.6.2 干船坞结构试验检测宜包括下列内容:

(1)坞底板下浮托力试验检测;

(2)船坞输水系统水流条件试验检测;

(3)船坞周侧渗流试验检测;

(4)坞门抗震变形试验检测;

(5)坞底板锚杆抗拉试验检测。

6.6.3 干船坞试验检测方法应符合下列规定。

6.6.3.1 坞底板下浮托力试验检测可采用在坞底板减压排水口处埋设浮托力测定表进行周期检测的方法。当减压排水设施失灵时,可采用在减压排水沟处钻孔埋设水压力的方法进行检测。

6.6.3.2 船坞输水系统水流条件试验检测可采用实验室缩尺模型试验的方法。

6.6.3.3 船坞周侧渗流试验检测方法应符合下列要求:

- (1) 在坞墙后布置测点;
- (2) 钻孔埋设渗流压力与渗流量检测仪进行周期检测;
- (3) 对坞门坎帷幕渗流状况,在其内侧 1m ~ 2m 处钻孔埋设渗流压力与渗流量检测仪进行检测。

6.6.3.4 坞门抗震变形试验宜按下列步骤进行:

- (1) 根据试验目的制定试验计划及设计布点;
- (2) 按试验计划及布点要求,粘贴电阻应变片和加速度计等测试传感器;
- (3) 模拟地震动力施加作用力,观测测定坞门变形情况;
- (4) 试验资料整理分析并编写试验报告。

6.6.3.5 坞底板锚杆试验可按国家现行标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086)和《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120)等的有关规定进行。

6.6.4 船台滑道结构试验检测对象应包括船台滑道水工建筑物及船台滑道地基等。

6.6.5 船台滑道地基试验检测内容宜包括船台滑道基桩承载力和船台滑道基础变形。

6.6.6 船台滑道地基试验检测方法应符合下列要求。

6.6.6.1 船台滑道基桩承载力试验检测应按基桩静载荷试验方法进行,并应符合现行行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定。

6.6.6.2 船台滑道基础变形试验检测方法应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)和《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定。

附录 A 混凝土构件挠度检验试验

A.0.1 混凝土构件挠度检验试验可用于检验受弯混凝土梁板构件的挠度与规范要求的符合性。

A.0.2 当混凝土构件挠度的设计要求或实际要求高于规范要求时,应按较高的要求进行检验试验。

A.0.3 试验结构的加载范围应符合下列规定。

A.0.3.1 对简支结构可选择单个构件进行试验。

A.0.3.2 对连续结构应根据影响线选择试验跨。

A.0.4 试验荷载的荷载图式应符合下列要求。

A.0.4.1 按持久状况检验时,试验荷载组合和最大加载值应根据正常使用极限状态的准永久组合确定。

A.0.4.2 按短暂状况检验时,试验荷载组合和最大加载值应根据正常使用极限状态的短暂状况组合确定。

A.0.4.3 荷载布置方式应按最不利原则确定。

A.0.5 挠度量测应符合下列要求。

A.0.5.1 试验构件两端支座处应设置垂直位移测点和水平位移测点。

A.0.5.2 挠度量测仪器可采用位移传感器、百分表、挠度计等,量测系统的精度不应低于0.01mm。

A.0.6 可简化成水平直线的且加载后支座以沉降变化为主的单向受弯梁板构件跨中挠度,可根据图 A.0.6 所示几何关系按式(A.0.6)计算:

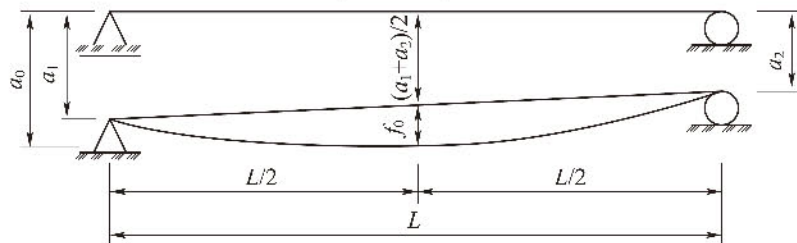


图 A.0.6 受弯构件跨中挠度量测

a_0 -构件跨中沉降; a_1 -左支座沉降; a_2 -右支座沉降; f_0 -跨中挠度; L -构件跨长

$$f_0 = a_0 - \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (\text{A.0.6})$$

式中 f_0 ——跨中挠度(mm);
 a_0 ——跨中沉降(mm);
 a_1 ——左支座沉降(mm);

a_2 ——右支座沉降(mm)。

A.0.7 混凝土构件的挠度应不影响结构的使用功能和外观要求及与其他构件的连接等要求,试验检验结果应符合式(A.0.7)要求:

$$f_{\max} \leq \frac{[f]}{\theta} \quad (\text{A.0.7})$$

式中 f_{\max} ——混凝土构件试验实测最大挠度值(mm);

$[f]$ ——规范规定的最大挠度限值(mm),按现行行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)的有关规定取值;

θ ——考虑作用的准永久组合对挠度增大的影响系数,按现行行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)的有关规定取值。

附录 B 结构混凝土既有应力检测试验

B.0.1 结构混凝土既有应力的测试可采用应力释放法,应力释放方式宜采用环孔法或开槽法。

B.0.2 结构应力检测位置应根据结构的受力特点和检测要求选择,检测结果应能反映结构或关键部位的受力状态和性能。

B.0.3 结构应力检测所用的应变测量仪器应根据试验目的以及对试件混凝土应变测量要求进行选择。测试释放应变的应变计宜采用电阻式应变计、光纤光栅式应变计等。

B.0.4 试验前应确定结构材料的性能参数,并计算出试验荷载下释放应变的预估值,作为选择应变计和量测仪器等的依据。混凝土弹性模量 E_c 应采用实测值,测试方法应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081)的有关规定。

B.0.5 应变计和量测仪器的量测范围应符合测试要求,量测精度、安装调试和测试数据的测读与整理应符合现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152)的有关规定。

B.0.6 应变计和采集传输系统应具有较强的抗干扰能力,安装应牢固,并应采取有效的防潮、防水等保护措施。

B.0.7 粘贴应变计前,试件待测部位的表面应符合粘贴应变计胶粘剂的要求,其表面处理应避免采用可能显著改变表面应力的研磨。

B.0.8 应变计的粘贴和保护应符合下列规定。

B.0.8.1 应变计的粘贴、接线、保护等应严格按照规范要求进行操作,其绝缘电阻应不小于 $300\text{M}\Omega$,应变计的连接导线应固定牢固。

B.0.8.2 平面应力采用应变花测量时,应变计轴线交点应位于测点中心。

B.0.8.3 温度补偿片宜与工作片粘贴在同一构件上,并应避免受孔边应力集中影响。

B.0.8.4 应采取有效措施避免应变计和连接导线在钻孔开槽过程中与冷却水接触。

B.0.9 环孔法可采用混凝土取芯机钻孔,取芯机应符合下列规定:

(1)取芯机具有足够的刚度、操作灵活,并有水冷却系统;

(2)取芯机采用金刚石或人造金刚石薄壁钻头,钻头胎体无肉眼可见的裂缝、少角、缺边、倾斜和喇叭口变形。

B.0.10 开槽法宜选用手持式混凝土切割机,切割机应有水冷却系统,锯片宜采用金刚石或人造金刚石薄壁锯片。

B.0.11 钻孔直径 D 应符合式(B.0.11-1)或式(B.0.11-2)的要求:

$$D \geq L + 4 \quad (\text{测试构件为单向应力状态}) \quad (\text{B.0.11-1})$$

$$D \geq 1.42L + 4 \quad (\text{测试构件为平面应力状态}) \quad (\text{B.0.11-2})$$

式中 D ——钻孔直径(cm)；

L ——应变计长度(cm)。

B.0.12 多点测量时,相邻孔间的净距应不小于 15 倍钻孔直径。

B.0.13 钻孔前应标记钻孔位置,钻孔中心与应变花测量中心重合偏差应不超过 ± 0.015 倍钻孔直径。

B.0.14 钻孔时应严格控制取芯机钻进速度。

B.0.15 结构混凝土既有应力试验应按下列步骤进行:

- (1) 设备固定,确认钻孔或切割位置;
- (2) 根据试验要求粘贴应变计;
- (3) 对应变计进行防水处理;
- (4) 读取应变初值;
- (5) 进行钻孔或切割操作;
- (6) 读取应力释放后的应变值直至测试结束。

B.0.16 检测试验造成的构件损伤不应影响结构的安全性和正常使用功能,破损的部位应及时修补。

B.0.17 钻孔或切割应分级进行,分级原则应符合下列规定。

B.0.17.1 在达到钻孔或切割方向应力完全释放时理论计算深度 H 的 50% 以前,每级深度不宜大于 10% H 。

B.0.17.2 在超过 50% H 以后,每级深度不宜大于 5% H 。

B.0.18 试验应同时绘制深度 - 应变 ($H-\varepsilon$) 曲线,当满足式 (B.0.18) 条件时,可终止试验:

$$\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{\varepsilon_i} \leq 0.05 \quad (\text{B.0.18})$$

式中 $\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}$ ——相邻两次测试所得的应变值。

B.0.19 单向应力状态下的混凝土结构应力按式 (B.0.19) 计算:

$$\sigma_c = E_c (\varepsilon_0 - \varepsilon_n) \quad (\text{B.0.19})$$

式中 σ_c ——混凝土结构应力 (MPa);

E_c ——测试构件混凝土弹性模量 (N/mm^2);

$\varepsilon_0, \varepsilon_n$ ——测试所得应变初值和终值。

B.0.20 平面应力状态下,直角应变花测试方式和等角应变花测试方式的主应力应分别按材料力学计算公式计算。

B.0.21 检测报告应包括下列内容:

- (1) 试验内容;
- (2) 主要仪器设备型号、主要参数及编号;
- (3) 测点布置,钻孔方法及孔径、孔深;
- (4) 钻孔深度和应变测试值曲线图;
- (5) 应力计算结果及分析。

附录 C 现场结构试验检测环境条件调查方法和要求

C.0.1 水运工程结构现场试验检测前应根据需要调查分析下列环境条件：

- (1) 工程区域气温、湿度、风向、风速等气象条件变化；
- (2) 工程设计水域的波浪、水深、水位、流速、流向等水文条件变化；
- (3) 冰情变化；
- (4) 工程地质条件；
- (5) 试验结构及其周围冲刷变化；
- (6) 工程区域环境灾害发生情况。

C.0.2 环境条件调查应充分利用已有的观测成果，需要时可进行专门的现场观测。

C.0.3 工程设计水域水深和冲淤变化的检测断面及测点布设应符合下列要求：

(1) 高桩码头每个排架布设 1 个断面，墩式码头每个墩台不少于 2 个断面，其他结构型式每 5m ~ 10m 布设 1 个断面；

(2) 高桩码头在基桩处设置测点，其他结构型式在检测断面上每 3m ~ 10m 布设 1 个测点。

C.0.4 环境条件现场观测方法应符合现行行业有关标准《水运工程测量规范》(JTS 131)、《港口与航道水文规范》(JTS 145)、《水运工程岩土勘察规范》(JTS 133) 等的有关规定。

C.0.5 结构试验检测采用环境条件现场观测数据时，应分析因观测数量和观测时间的限制对相关参数统计不确定性的影响。

附录 D 混凝土结构构件裂缝宽度检验试验

D.0.1 混凝土结构构件裂缝宽度检验试验可用于检验裂缝控制等级为三级的混凝土结构构件最大裂缝宽度与规范要求的符合性。

D.0.2 当混凝土结构构件最大裂缝宽度限值的设计要求或评估要求高于规范要求时,应按较高的要求进行检验试验。

D.0.3 简支结构加载范围可选择单个构件进行试验,连续结构加载范围应根据影响线选择试验跨。

D.0.4 试验荷载的荷载图式应符合下列要求。

D.0.4.1 在使用阶段允许出现裂缝的钢筋混凝土构件进行裂缝宽度检验时,试验荷载组合和最大加载值应根据正常使用极限状态的准永久组合确定;当有必要考虑作用的频遇组合时,可采用频遇组合值代替准永久组合值。

D.0.4.2 荷载布置方式应按最不利原则确定。

D.0.5 裂缝量测应符合下列要求。

D.0.5.1 裂缝量测的内容应包括宽度及其变化过程。

D.0.5.2 在试验结构构件裂缝宽度最大处应布设测点,每条裂缝宽度测点数不应少于3个。

D.0.5.3 裂缝宽度量测可采用光学裂缝放大镜法、游标卡尺法、千分表法、石膏饼法、着色法、传感器自动测记法等。裂缝宽度量测精度不应低于0.05mm。

D.0.5.4 裂缝的分布和长度的量测可采用绘制裂缝分布图法,裂缝长度量测精度不应低于1.0mm。

D.0.5.5 裂缝深度检测可采用超声波法等,裂缝深度值应精确至1.0mm。

D.0.6 混凝土结构构件裂缝宽度检验应符合式(D.0.6)要求:

$$W_{s,max} \leq [W'_{max}] \quad (\text{D.0.6})$$

式中 $W_{s,max}$ ——混凝土结构构件裂缝宽度检验试验实测最大裂缝宽度(mm);

$[W'_{max}]$ ——混凝土结构构件最大裂缝宽度检验限值(mm),按表D.0.6取用。

表 D.0.6 混凝土结构构件最大裂缝宽度检验限值(mm)

| | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|
| 设计规范的限值 $[W_{rxs}]$ (mm) | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.40 |
| 检验限值 $[W'_{rxs}]$ (mm) | 0.15 | 0.17 | 0.20 | 0.25 |

附录 E 防风锚碇抗拔试验

- E.0.1** 防风锚碇抗拔试验适用于检验防风锚碇整体抗拔承载力。
- E.0.2** 试验加载宜采用油压千斤顶,千斤顶的作用合力方向应与防风锚碇螺栓群的中心线重合。
- E.0.3** 防风锚碇抗拔试验的加载反力装置应选用支座横梁反力装置,并应符合下列规定。
- E.0.3.1** 加载反力装置提供的反力不得小于最大试验荷载的1.2倍。
 - E.0.3.2** 应对加载反力装置的主要构件进行强度和变形验算。
 - E.0.3.3** 加载时支座下的混凝土应力不应大于混凝土轴心抗压设计强度。
 - E.0.3.4** 应对支座反力产生的基底应力进行验算,反力支座宜选在桩顶或码头结构承重主梁上。
- E.0.4** 试验仪器设备性能指标应符合下列规定。
- E.0.4.1** 力传感器测量误差不应大于1%,压力表精度应优于或等于0.4级。
 - E.0.4.2** 在试验荷载达到最大试验荷载时,试验用油泵、油管的压力不应超过其额定工作压力的80%。
 - E.0.4.3** 千斤顶、压力表和压力传感器的量程应在最大试验荷载的1.2倍~2.5倍范围内。
 - E.0.4.4** 变形测量仪器的测量误差不应大于0.1%FS,分辨力应优于或等于0.01mm。
- E.0.5** 防风锚碇抗拔试验的最大试验荷载应在设计工作荷载和极限荷载之间取值。
- E.0.6** 荷载量测应符合下列规定。
- E.0.6.1** 宜采用并联于千斤顶油路的压力表测定油压,并根据千斤顶校准结果换算荷载。
 - E.0.6.2** 每个螺栓上应安装测力传感器并同步测量,各螺栓受力大小与平均受力相差不得大于5%。
 - E.0.6.3** 从压力表数据换算的荷载值与由力传感器测得的力值,两者的偏差不得超过1%FS。
- E.0.7** 防风锚碇结构受力变形宜采用位移计或百分表等变形测量仪器进行测量,其安装应符合下列规定。
- E.0.7.1** 变形测点应对称布置在测定的锚碇结构四周且不少于4个,并应直接布置在防风锚碇顶部或与防风螺栓直接固定的其他构件上。
 - E.0.7.2** 基准梁支点与反力支座和防风锚碇基坑边缘的距离不得小于1.5倍反力支座边宽,且不小于2m。

E.0.7.3 基准梁应具有足够的刚度,并应稳定固定在支点上。

E.0.7.4 基准梁、支点和固定变形测量仪的夹具应避免受阳光照射、振动和其他外界因素的影响。

E.0.8 试验加卸载方式应符合下列规定。

E.0.8.1 应采用维持荷载法进行试验,且应逐级加载。加卸载等级和维持时间应符合表 E.0.8 的规定。

表 E.0.8 防风锚碇抗拔试验加卸载等级和持荷时间

| | | | | | | |
|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 试验荷载 | $0.25P_L$ | $0.5P_L$ | $0.75P_L$ | $1.0P_L$ | P_{max} | $0.25P_L$ |
| 维持时间(min) | 5 | 5 | 10 | 15 | 15 | 5 |

注: P_L 为设计工作荷载, P_{max} 为试验极限荷载。

E.0.8.2 加卸载时,荷载应传递连续、均匀、无冲击,每级荷载在持荷时间内的变化幅度不得超过该级荷载增减量的10%。

E.0.8.3 每级荷载施加后,应每隔1min测读一次变形和荷载数据,达到维持时间后方可施加下一级荷载。

E.0.9 试验结果应按每级荷载对应的变形列表整理,并应绘制荷载-变形曲线,需要时可绘制其他辅助分析曲线。

E.0.10 防风锚碇抗拔试验合格标准应符合下列要求:

- (1) 在最大试验荷载作用下,锚碇坑结构变形增量不出现明显变化;
- (2) 单个螺栓拉力在持续时间内降低不超过5%,且锚碇坑周围混凝土不出现开裂。

E.0.11 试验报告应包括下列内容:

- (1) 工程概况;
- (2) 试验锚碇坑的平面位置;
- (3) 加载过程描述;
- (4) 各级荷载下每个力传感器读数和每根锚碇螺栓的拉力、荷载-变形和时间-变形等内容;
- (5) 试验结论。

附录 F 本规范用词说明

为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度的用词说明如下:

- (1)表示很严格,非这样做不可的,正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- (2)表示严格,在正常情况下均应这样做的,正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- (3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的,正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- (4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

引用标准名录

1. 《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081)
2. 《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086)
3. 《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152)
4. 《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153)
5. 《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158)
6. 《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344)
7. 《钢结构现场检测技术标准》(GB/T 50621)
8. 《混凝土结构现场检测技术标准》(GB/T 50784)
9. 《水运工程测量规范》(JTS 131)
10. 《水运工程岩土勘察规范》(JTS 133)
11. 《港口工程荷载规范》(JTS 144—1)
12. 《港口与航道水文规范》(JTS 145)
13. 《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)
14. 《码头结构设计规范》(JTS 167)
15. 《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)
16. 《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)
17. 《水运工程质量检验标准》(JTS 257)
18. 《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)
19. 《建筑变形测量规范》(JGJ 8)
20. 《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120)

附加说明

本规范主编单位、参编单位、主要起草人、 主要审查人、总校人员和管理组人员名单

主编单位:交通运输部天津水运工程科学研究所

参编单位:中交四航工程研究院有限公司

天津大学

南京水利科学研究院

中交上海三航科学研究院有限公司

中交第一航务工程勘察设计院有限公司

天津水运工程勘察设计院

主要起草人:朱崇诚(交通运输部天津水运工程科学研究所)

张 强(交通运输部天津水运工程科学研究所)

郑锋勇(交通运输部天津水运工程科学研究所)

孙熙平(交通运输部天津水运工程科学研究所)

(以下按姓氏笔画为序)

王元战(天津大学)

王笑难(交通运输部天津水运工程科学研究所)

孙百顺(交通运输部天津水运工程科学研究所)

吕 黄(中交四航工程研究院有限公司)

李 君(南京水利科学研究院)

李越松(交通运输部天津水运工程科学研究所)

李 颖(天津水运工程勘察设计院)

孟祥玮(交通运输部天津水运工程科学研究所)

孟 静(交通运输部天津水运工程科学研究所)

吴 锋(中交上海三航科学研究院有限公司)

周宝江(中交第一航务工程勘察设计院有限公司)

宣国祥(南京水利科学研究院)

主要审查人:仇伯强

(以下按姓氏笔画为序)

朱平、李元青、李承钢、李森林、苏林王、陈强、裴华富
总校人员：刘国辉、李荣庆、吴敦龙、刘连生、董方、朱崇诚、郑锋勇、
吴锋、吕黄、周宝江、孟静、刘本芹

管理组人员：朱崇诚(交通运输部天津水运工程科学研究所)
孙熙平(交通运输部天津水运工程科学研究所)
孟静(交通运输部天津水运工程科学研究所)
冯小香(交通运输部天津水运工程科学研究所)

中华人民共和国行业标准

水运工程结构试验检测技术规范

JTS/T 233—2021

条文说明

目 次

| | | |
|-------------|------------------------|------|
| 1 | 总则 | (47) |
| 3 | 基本规定 | (48) |
| 3.1 | 一般规定 | (48) |
| 3.2 | 试验检测程序 | (48) |
| 3.3 | 试验检测方法要求 | (48) |
| 4 | 结构动力测试 | (49) |
| 4.4 | 测试方法 | (49) |
| 4.5 | 数据处理与成果提交 | (49) |
| 5 | 实验室结构试验 | (50) |
| 5.1 | 一般规定 | (50) |
| 5.2 | 试验加载 | (51) |
| 5.3 | 试验量测 | (51) |
| 5.4 | 结构模型试验 | (52) |
| 6 | 现场结构试验 | (53) |
| 6.1 | 一般规定 | (53) |
| 6.2 | 码头结构加载试验 | (53) |
| 6.3 | 码头结构系靠泊试验 | (53) |
| 6.4 | 防波堤及护岸试验 | (54) |
| 6.5 | 船闸试验 | (54) |
| 6.6 | 干船坞与船台滑道试验 | (54) |
| 附录 A | 混凝土构件挠度检验试验 | (55) |
| 附录 B | 结构混凝土既有应力检测试验 | (57) |
| 附录 D | 混凝土结构构件裂缝宽度检验试验 | (58) |
| 附录 E | 防风锚碇抗拔试验 | (60) |

1 总 则

1.0.1 水运工程具有投资巨大、资源占用多、对环境影响深远等特点,同时又具有建设条件复杂、使用条件复杂、结构受力状况复杂、造成变形和破坏的外部条件及内部因素复杂等共性。因此,及时掌握结构在各种因素影响下的性态变化,对预防工程安全事故、控制工程安全风险、提高工程全寿命效益是十分重要的。结构试验检测是获取工程结构实际性态数据、科学评价结构性能的基本技术手段,也是进行结构研究、发展新结构、新理论的重要手段,具有准确、直观、针对性强、争议小、技术难度大、实施费用高等特点。制定本规范,有助于提高水运工程领域结构专业的科学设计和管理水平,促进我国水运工程建设管理的科学化、规范化。

1.0.3 水运工程结构试验检测的一些技术规定,此前已经纳入了国家和行业有关标准中,本规范对这类内容未作具体规定,凡涉及这些内容的规定条款未尽事项,需遵照相关标准规定执行。

本条规定中所指的国家现行有关标准主要包括《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152)、《混凝土结构现场检测技术标准》(GB/T 50784)、《水运工程测量规范》(JTS 131)、《港口工程荷载规范》(JTS 144—1)、《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)、《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS/T 236)、《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)、《水运工程混凝土结构实体检测技术规程》(JTS 239)、《水运工程混凝土质量检验标准》(JTS 257)、《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)等。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 引自国家标准《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158—2010)第6.3.1条。

3.1.2 引自国家标准《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158—2010)第D.0.10条。

3.1.3 根据行业标准《港口设施维护技术规范》(JTS 310—2013)第6.5节“特殊检测”的有关规定制定。

3.1.4 水运结构试验环境、试验条件等较复杂,特别是现场试验,受潮位、波浪、荷载等因素影响较大。因此,在进行试验时要特别注意试验环境、试验条件等因素的影响。

3.2 试验检测程序

3.2.1 结构试验检测工作技术复杂、难度大,每个阶段的工作重点和工作成果不同,前一阶段的工作成果是后一阶段的工作基础,所以有必要对结构试验检测划分工作阶段。

3.3 试验检测方法要求

3.3.1.1~3.3.1.5 结构试验检测要依据委托方提出的试验检测要求确定适当的试验检测项目和试验检测方法。强调使用直接的试验检测方法,直接方法的系统不确定性(偏差)小,争议相对较小,允许使用对直接法进行修正或校准的间接方法。制定试验细则的目的是可以据此复现试验过程。

结构试验检测技术目前还在不断发展中,鼓励试验检测机构自主开发或引进先进的试验检测方法和仪器设备,并不断完善,以推动行业技术进步,并满足水运工程建设实践需求。

3.3.3 对抽样最小样本容量的有关规定主要有行业标准《水运工程质量检验标准》(JTS 257—2008)规定的抽样方案等。在试验检测条件受到限制的情况下,结构试验检测可能需要采用一些特殊的方法并适当减少检测数量,但要保证试验检测结果的可靠性,并在试验检测方案和试验检测报告进行明示。

4 结构动力测试

本章关于结构动力测试的试验内容、仪器设备、测试方法、数据处理等条文规定主要依据码头动力测试的实践经验制定。

4.4 测试方法

4.4.4.6 传感器与被测物的连接刚度和传感器的质量本身构成了一个弹簧和质量二阶单自由度系统,安装谐振频率应和结构的振动频率错开,避免出现共振现象。常用传感器的下列六种安装方式,其安装谐振频率由高到低依次为:

- (1) 传感器与被测结构采用螺栓直接连接(即刚性连接);
- (2) 传感器与被测结构采用薄层胶、石蜡等直接粘贴;
- (3) 用螺栓将传感器安装在垫座上;
- (4) 传感器吸附在磁性垫座上;
- (5) 传感器吸附在厚磁性垫座上,垫座与被测结构采用钉子连接固定,且垫座与被测结构间悬空;
- (6) 传感器通过触针与被测结构接触。

4.4.6.1 奈奎斯特采样定理一般指采样定理,又称取样定理、抽样定理。它是美国电信工程师 H·奈奎斯特在 1928 年提出的,在数字信号处理领域中,采样定理是连续时间信号(通常称为“模拟信号”)和离散时间信号(通常称为“数字信号”)之间的基本桥梁。该定理说明采样频率与信号频谱之间的关系,是连续信号离散化的基本依据。它为采样率建立了一个足够的条件,该采样率允许离散采样序列从有限带宽的连续时间信号中捕获所有信息。

4.5 数据处理与成果提交

4.5.2、4.5.3 依据国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》(GB/T 50784—2013)第 12.3.8 条规定编写。现代测振仪器已实现数字化和集成化,可以对数据进行快速、实时分析。

4.5.2.4 增益的一般含义就是放大倍数。在电子学上,通常为一个系统的信号输出与信号输入的比率。

5 实验室结构试验

5.1 一般规定

5.1.1 根据试验目的的不同,实验室试验基本分为探索性试验和验证性试验两种类型。

探索性试验是为研究结构在不同作用下的内力、变形等效应,分析其受力机理,确定影响结构抗力的因素和参数,探讨其变化规律,为建立结构理论、计算模型或经验公式提供科学依据的试验。验证性试验是针对已有的结构理论、分析模型、计算方法、构造措施等进行限定目标的试验,通过试验验证并修改、调整相应的计算方法、设计参数、构造措施等,使其更加科学、合理、完善。

探索性试验一般侧重于基本理论,侧重于本领域的基础研究;验证性试验一般针对已有理论模式或工程背景。两类试验由于目的不同,试验方式也存在一定差异。

5.1.2 试验方案是试验进行全过程的指导性文件,试验前根据试验目的制定详细的试验方案是为了指导试验顺利进行。本条列举了试验方案应包括的基本内容。

对预制构件产品的合格性检验,试件方案是样品的抽样检验方案。安全措施主要是针对试验人员和试验设备所采取的安全防护措施。

5.1.4 为保证试验的目的性和针对性,试验前的理论分析非常重要。对于较复杂的试验试件,可采用有限元分析等方法,计算试件的内力和变形,或进行受力全过程的分析,根据分析结果校核并指导试验方案的制定。

5.1.6 由于施工、养护、维护和材料自身性能变化的影响,实际工程中常出现材料性能实测值与原设计值不符的情况,特别是混凝土材料,其强度、弹性模量等性能参数会随时间持续变化。此外,构件截面尺寸、混凝土保护层厚度、钢筋实际截面面积等参数也会因施工误差或耐久性影响,与原设计值不符。由于混凝土结构试验是研究结构或构件的实际性能,故需要采用材料的实际性能参数进行计算和分析。

对于模型试件和模拟原型试件的某些不适合直接测试或需要破损才能测试的材料参数,应在浇筑试件的同时浇筑立方体试块,并以同条件养护,可通过测试试块的性能参数代替试件实测值。

5.1.7 当试验前未能测定材料性能或者对测得的数据有怀疑时,可在试验后从试件上受力较小且混凝土未开裂的区域钻取芯样,测定混凝土材料性能参数;从未屈服部位截取出钢筋试样,测定钢筋的材料性能参数。

5.1.8 试验报告是对试验过程的真实反映和试验结果的集中体现,应准确、清楚、全面地反映科研或工程背景、试验目的、试验方案、详尽的试验过程和现象描述、量测结果等。报告内容应实事求是,并对试验结果进行分析,得出试验结论。

5.2 试验加载

5.2.2 由于试件的材料强度、约束条件等存在一定的不确定性,试件的支座、加载区域、与加载设备的连接装置等在设计时需要留有一定的安全余量,避免因刚度不足或者在试件正常破坏前发生局部支撑破坏,导致试验无法完成或者发生危险。如果是重复利用的装置,还要考虑在反复受力及反复安装拆卸过程对其性能的影响。

5.2.3 本条是对试验支承装置的原则性要求。设置试件的支承装置时,需要使试件的受力状态符合试验方案的要求,避免因试验装置的刚度、承载力、稳定性不足而影响试验结果。同时,支承装置在试验时的受力变形不影响试件在加载过程的受力、变形。

5.2.4 本条是对简支梁、单向简支板等简支受弯试件支座的规定,试验中可能采用的其他形式的支座构造,需要满足本条的要求。当无法满足理想简支条件时,一般情况下水平移动受阻会在加载之初引起水平推力,在加载后期引起水平拉力,而转动受阻会引起阻止正常受力变形的约束弯矩。

5.2.7 为避免试验时盲目加载,需要通过事先计算的结果来指导试验的加载程序,控制各种临界状态,并与实测的试验结果进行相互对比分析。考虑模型材料性能与设计要求可能存在的偏差,方案编制阶段计算有关指标时,钢筋、混凝土的材料性能参数可采用设计值,到正式试验前,需要取实测值进行修正。

5.2.10 试验预加载的主要目的是检验试验装置及仪表、设备,并对其进行相应的调整。同时也对垫层等进行压实,消除试件与装置之间的空隙,使试件支垫平稳。

5.2.11 分级加载是按正常使用极限状态、承载能力极限状态的顺序按预定的步距逐级进行加载。接近开裂荷载计算值时,加密荷载步距以准确测得开裂荷载值;接近承载力试验荷载值时,需加密荷载步距以得到准确的承载力检验荷载实测值,并避免试件发生突然性的破坏。

5.2.13 本条规定与国家标准《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)、《先张法预应力混凝土管桩》(GB 13476—2009)的规定一致。

5.3 试验量测

5.3.2 实验室试验条件较好且对量测的精度有较高要求,为准确掌握重点部位的内力和变形情况,需要布置较多的力值、位移、应变和裂缝测点。利用试件的对称性布置校核性量测点,能够保证测试数据的完整性和准确性,也能够防止因个别测点的传感器失灵而导致的数据缺失。

5.3.3 仪表精度的选用既要注意满足量测要求,也要避免盲目追求高精度。

对量测仪表的有效性要求,体现在仪表具备定期经检验校准的合格证,并处于计量有效期内。

预估量程过大,则测量误差偏大;预估量程过小,则试验过程中容易超出量程范围导致数据缺失或损坏仪表。因此,需要根据预估值选择合适的仪表量程。如果仪表在全量程范围内呈良好的线性,则预估量程也可以低于满量程的30%。

5.3.4 试件自重和加载设备重量产生的挠度值一般在开始试验量测时就已经产生,所以实测值未包含这部分变形,故分析试件总挠度时需要通过计算考虑试件在自重和加载设备重量作用下的挠度计算值。

5.3.5.1 由于电阻应变计对环境温度比较敏感,因此测量需要消除温度对量测结果的影响。通常对于电阻应变计测量可以采用桥路补偿法,也可以采用自补偿应变片等方法。

5.3.5.2 由于混凝土属于材质不均匀且强度不等的材料,采用大栅长应变计测量其表面较大范围内的平均应变,能够更好地反映混凝土表面应变情况。

5.3.6 对混凝土结构试验,尤其是抗裂性能检验,开裂判断是试验现象观测的重点。本条给出了判断试件混凝土开裂的3种方法。第1种直接观察法最简单,也很有效,但需要与直接观察配合;第2种应变计判断法的成本较高,适用于对特定部位抗裂要求较高或难以直接观测开裂的特定部位,如对高腐蚀环境中的结构开裂的判断,也可用于结构监测;第3种挠度转折法适用于大跨度结构。

5.3.8 试验误差对试验结果的影响程度是不同的。如果试验误差对试验结果的精确度或准确性存在较明显的影响,需要进行试验结果的误差分析。通过误差分析,可以判定试验结果的准确性和影响试验精度的主要方面,便于改进试验方案,提高试验质量。根据误差的性质和产生的原因,分为系统误差、偶然误差和过失误差。前两种误差可根据误差分析采取针对性措施减少其影响;而过失误差由于无规律可循,需要避免其产生。

5.4 结构模型试验

5.4.1 模型的设计制作与试验是根据相似理论,用适当的比例尺和相似材料制成与原型几何相似的试验对象,在模型上施加相似力系,使模型受力后符合原型结构的实际工作状态,最后按照相似理论由模型试验结果推算实际结构的工作。为此,这类模型要求有比较严格的模拟条件,即要求做到几何相似,力学相似和材料相似。

由于严格的相似条件给模型设计和制作带来了一定困难,在结构试验中尚有另一类型的模型,它仅是原型结构缩小几何比例尺寸的试验模型,将该模型的试验结果与理论计算对比较核,用以研究结构的性能,验证设计假定与计算方法的正确性,并认为这些结果所证实的一般规律与计算理论可以推广到实际结构中去。对这类试验就不一定要满足严格的相似条件,如通过钢筋混凝土结构受弯构件的小梁试验可以同样说明钢筋混凝土结构正截面的设计计算理论。

5.4.2 参数较多时简单进行排列组合会导致试件数量增多,试验成本和工作量大幅增加。因此,采用正交设计等方法进行试件设计的优化,能降低试验成本和工作量。

5.4.5 钢筋与混凝土之间的粘结情况对结构非弹性阶段的荷载-变形性能以及裂缝的分布和发展有直接影响。但由于粘结力问题本身的复杂性,对模型结构的粘结性要求至今没有完善的结论。从已有的研究工作得知,使模型钢筋产生一定程度的锈蚀或用机械方法在模型钢筋表面压痕模拟原结构中的变形钢筋,将使模型结构的粘结力和裂缝情况比用光面钢筋更接近实际情况。

6 现场结构试验

6.1 一般规定

6.1.5 本条阐述了对资料收集分析、结构现状检测、试验过程结构安全验算和结构预分析的要求。结构预分析结果是制定加载方案和进行加载过程控制的重要依据。结构预分析中,对作用效应的数值分析通常采用仿真分析的方法,这样得到的分析结果有利于与试验结果进行对比,以指导试验进行。但结构预分析中未考虑有关分项系数,不能用于工程决策等用途。

6.2 码头结构加载试验

6.2.1 根据试验目的控制加载量,是为避免对结构造成不可恢复的永久性损伤或局部破坏。考虑合理简洁的卸载方式,是为了避免试验中发生意外安全事故。采用多种载荷组合的方式,是为了避免加载重物堆积过多而增加试验的工作量,并一定程度提高加载的安全性。

6.2.5.1 本条中关于间歇时间的要求与行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237—2017)的规定一致。

6.2.5.5 所谓牢固的测试支架,是指具有足够的强度、刚度和稳定性,在波浪、水流等荷载作用和环境影响下不会因为自身的变形和变位影响测试精度。

6.2.5.10 根据行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237—2017)的有关规定制定。目前,对多根基桩组成的结构,其结构中桩基承载力试验还没有系统的相关研究成果,实际操作中还是参照单桩试验的判定方法。

6.3 码头结构系靠泊试验

6.3.5 靠泊时段是指船舶开始靠泊到靠泊稳定的时段;停靠时段是指船舶靠泊稳定至船舶准备离泊时段;离泊时段是指船舶准备离泊至离泊结束时段。

船舶靠泊时极易出现对码头结构的撞击。船舶停靠系泊时,船舶受潮水涨落、大风、水流的影响,也易出现对码头结构的过大作用。船舶离泊时,由于并不是同时解缆,往往是带着头缆进行掉头离泊,此时的系缆力往往也较大。因此,在这三个时段都需要测试船舶对码头的作用。

6.3.9.1 挤靠力的大小与船舶系泊期间的排水量、系泊角度有关,也与船舶系泊时的系缆方式、水流流向和流速、潮位涨落、风力和风向有关,因此需要测试相关参数。

采用测力传感器实测船舶挤靠力的方法比较难以实现,这方面的实例也未查找到,有

关资料介绍的都是通过测试橡胶护舷压缩变形并根据其力学性能曲线来反推挤靠力。

6.3.9.2 对于配有快速脱缆钩设施的码头,其系泊缆绳载荷监测系统具有系缆力测量功能,可利用该系统进行系缆力测试。该系统由以下几部分组成:安装在每个快速脱缆钩上的测力传感器;脱缆钩附近安装的传感器接线/放大器箱;现场总线局域网(或无线局域网);中央控制和管理系统,包括计算机硬件和专用监控管理软件;扩展信息显示/报警装置。

6.3.9.4 靠船速度的测试手段较多,在此对其测试方法不作规定。靠泊角度可通过测试船身直线段水平向任意两点距码头前沿的距离推算出。

6.3.12 码头结构倾斜变形检测的规定引用自行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235—2016)中第6.4节的有关规定。

6.3.14 船舶力观测精度要求引用自行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235—2016)中第7.7节的有关规定。

6.4 防波堤及护岸试验

6.4.3 由于原型试验无法控制波浪条件,因此,需要等待出现设计波浪条件的时机,这样才可能验证到防波堤与护岸的设计功能。

6.4.5 防波堤施工期安全越来越受到重视。原因是在防波堤结构没有完成之前,例如斜坡堤护面没有安放好时,堤心石是裸露的,对波浪的抵御能力很差。工程上有斜坡堤在建设过程中受波浪作用毁损的例子。防波堤及护岸结构有时会建设于软黏土地基之上,地基失稳是防波堤损坏的主要原因之一。因此,在进行防波堤与护岸结构试验检测时,一定要充分注意地基在上部结构和波浪等荷载作用下的变形和软化问题。

6.5 船闸试验

6.5.4 条文中的国家现行有关标准主要包括《建筑结构检测技术标准》(GB 50344)、《混凝土结构现场检测技术标准》(GB/T 50784)、《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152)、《锚杆锚固质量无损检测技术规程》(JGJ/T 182)、《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS 22)等。

6.5.7.2 消能工是指消除泄水建筑物或落差建筑物下泄急流的多余动能,防止或减轻水流对水工建筑物及其下游河渠等的冲刷破坏而修建的工程设施。本条文指的是闸室内部消能槛、消能梁等用于消耗水流能量的结构。

6.6 干船坞与船台滑道试验

6.6.3.5 锚杆试验在国家和行业标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)、《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)和《锚杆锚固质量无损检测技术规程》(JGJ/T 182—2009)中都有相关规定,可以参照执行。

附录 A 混凝土构件挠度检验试验

A.0.1 条文是根据行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011)中第3.3.2条的规定提出。该条内容如下:

3.3.2 混凝土构件的挠度应不影响结构的使用功能和外观要求,其计算值不应超过表3.3.2规定的限值。

表 3.3.2 最大挠度限值 $[f]$

| 构件种类 | 轨道梁 | 一般梁 | 板 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| $[f]$ | $l_0/800$ | $l_0/600$ | $l_0/300$ |

注:① l_0 ——计算跨度;

②短暂状况的正常使用极限状态对挠度有要求时,应根据具体情况确定;

③对悬臂构件的挠度限值,其计算跨度 l_0 按实际悬臂长度的2倍取用。

A.0.7 条文中公式的计算原理参考行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011)中第6.5.1条和第6.5.2条的规定,两条文详细规定如下:

6.5.1 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件在正常使用极限状态下的挠度,可根据构件的刚度用结构力学方法计算。受弯构件的挠度应按准永久组合并考虑荷载长期作用的刚度 B 进行计算,挠度计算值不应超过表3.3.2规定的限值。

6.5.2 矩形、T形、倒T形和I形截面受弯构件的长期刚度可按下列公式计算:

$$B_1 = \frac{B_s}{\theta} \quad (6.5.2-1)$$

$$\theta = 2 - 0.4 \frac{\rho'}{\rho} \quad (6.5.2-2)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot h_0} \quad (6.5.2-3)$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{b \cdot h_0} \quad (6.5.2-4)$$

式中 B_1 ——受弯构件的长期刚度($N \cdot mm^2$);

B_s ——受弯构件的短期刚度($N \cdot mm^2$);

θ ——考虑作用的准永久组合对挠度增大的影响系数,预应力混凝土受弯构件取2.0;

ρ ——纵向受拉钢筋配筋率;

ρ' ——纵向受压钢筋配筋率;

- A_s ——受拉区纵向普通钢筋的截面面积(mm^2)；
- A'_s ——受压区纵向普通钢筋的截面面积(mm^2)；
- b ——矩形截面的宽度或倒 T 形截面的腹板宽度(mm)；
- h_0 ——截面有效高度(mm)。

附录 B 结构混凝土既有应力检测试验

B.0.1 应力释放法是指利用机械加工进行切割或钻孔,使原来受力的部位变为自由状态,即应力被释放。通过测量应力释放前后的应变变化,经换算得到该部位的工作应力。应力释放法包括剥层法、钻孔法、盲孔法、环孔法及开槽法。

剥层法是采用专门的机具取出贴有应变片的混凝土保护层,通过测试其应力的释放得到测试点的应力。这种方法由于实际操作时影响因素较多,测试精度难以保证,故采用得较少。

钻孔法是通过测试小孔边应力的释放来得到结构应力,其原理来源于弹性力学,但其基本假定对于钢筋混凝土这种非均质材料结构是否适用尚需验证。

盲孔法是由钻孔法发展而来,盲孔的位置可以任意选定,在钢结构上发展比较成熟,但在混凝土结构中应用效果并不理想。

环孔法是在测试点周围钻出一定深度的孔,解除测试点周围的约束使之产生弹性恢复变形,当孔深达到一定深度时,即可使测点处的局部工作应力完全释放,从而得到结构应力。

开槽法是由环孔法演变而来,采用开方形槽或横槽的方法来替代切割环孔。

B.0.8.1 在以往的测试、试验过程中,发现导线的扰动会影响测试系统的电阻,从而影响测试精度。因此,需要采取措施避免导线的扰动对测试结果的影响。

B.0.8.4 在钻孔过程中,因为钻削过程中产生的热量会使钻头温度升高,如果对钻头不采取冷却措施,钻头将会很快被磨损。同时,如果不采用水冷却,孔周围混凝土的温度也会相当高。因此,钻孔过程中一般采用水冷却方式。为了避免冷却水对在同构件上的工作片和温度补偿片测试结果造成影响,提出了本款规定。

B.0.9 由于混凝土属于材质不均匀且强度不等的材料,采用较长的应变计或电阻应变片测量混凝土构件表面较大范围内的平均应变,能够更好地反映混凝土表面应变情况。

采取温度补偿措施是为消除温度对应变测量结果的影响。电阻应变计可以采用桥路补偿法,也可以采用自补偿应变片等方法。

B.0.11 钻孔过程中,为防止钻孔孔边周围有混凝土破损,影响应变片测量精度,孔径要略大于应变片长度,同时孔径不能太大而影响测试构件整体性。根据测试经验,每边 2cm 基本满足要求。

B.0.14 如果钻头钻进的速度过大,产生的振动会较大,并且温度上升较快。

B.0.17 确定钻孔或切割分级要考虑两个方面:一是为了较准确地测试得到结构应力,分级数不能太少;二是为了避免测试时间拖得过长,分级数又不能太多。

B.0.18 根据实测经验,当达到钻孔或切割方向深度的 70%~80%时,应力释放基本完成。

附录 D 混凝土结构构件裂缝宽度检验试验

本章的试验内容根据行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011)第3.3.3条~第3.3.4条的规定提出,两条文详细规定如下:

3.3.3 结构构件设计的裂缝控制等级应根据使用要求划分为3级,并应符合下列规定。

3.3.3.1 严格要求不出现裂缝的构件,裂缝控制等级应按一级,按标准组合进行计算时,构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力。

3.3.3.2 一般要求不出现裂缝的构件,裂缝控制等级应按二级,按准永久组合进行计算时,构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力;按标准组合计算时,构件受拉边缘混凝土允许产生拉应力,但拉应力应满足下式要求:

$$\sigma_t \leq \alpha_{ct} \gamma f_{tk} \quad (3.3.3)$$

式中 σ_t ——构件受拉边缘混凝土拉应力;

α_{ct} ——混凝土拉应力限制系数;

γ ——受拉区混凝土塑性影响系数;

f_{tk} ——混凝土抗拉强度标准值。

3.3.3.3 允许出现裂缝的构件,裂缝控制等级应按三级,按准永久组合进行裂缝宽度计算,其最大宽度不应超过规定的限值。施工期有必要计算裂缝宽度时,裂缝宽度不宜超过规定的限值。

3.3.4 裂缝控制等级、混凝土拉应力限制系数和最大裂缝宽度限值,应根据结构的工作条件和钢筋种类按表3.3.4采用。

表 3.3.4 混凝土拉应力限制系数和最大裂缝宽度限值

| 构件类别 | 钢筋种类 | | 淡水港 | | | 海水港 | | | |
|----------|---------------|------------------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| | | | 水上区 | 水位变动区 | 水下区 | 大气区 | 浪溅区 | 水位变动区 | 水下区 |
| 钢筋混凝土结构 | — | 裂缝控制等级 | 三 | 三 | 三 | 三 | 三 | 三 | 三 |
| | | $[w_{max}]$ (mm) | 0.25 | 0.25 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.25 | 0.30 |
| 预应力混凝土结构 | 冷拉 HRB400 级钢筋 | 裂缝控制等级 | 二 | 二 | 二 | 二 | 二 | 二 | 二 |
| | | α_{ct} | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.8 |
| | 钢丝、钢绞线、螺纹钢 | 裂缝控制等级 | 二 | 二 | 二 | 二 | 一 | 二 | 二 |
| | | α_{ct} | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0 | 0.3 | 0.5 |

注:受冻融作用的海水环境结构的水位变动区按浪溅区规定采用。

裂缝控制等级一级、二级、三级分别对应严格要求不出现裂缝的构件、一般要求不出

现裂缝的构件和允许出现裂缝的构件,其对应的应力状态如下:

一级——要求作用的标准组合下构件受拉边缘应力不出现拉应力(零应力或压应力);

二级——要求作用准永久组合下构件受拉边缘混凝土应力保持零应力或压应力,在作用效应的标准组合下允许出现拉应力,但拉应力不大于 $\alpha_{ct}\gamma f_{tk}$,这意味着要求构件处于有限拉应力状态;

三级——允许构件受拉边缘混凝土产生裂缝,构件处于开裂状态,按准永久组合进行裂缝宽度计算,其最大宽度不应超过规定的限值。

水运工程预应力混凝土构件,除满足一级条件的以外,都属于二级控制构件。

针对裂缝控制等级为一级、二级的构件进行抗裂检验试验,目前的方法都需要实测开裂荷载。试验后的结构构件将难以避免存在裂缝现象,从而导致其与裂缝控制等级要求不符,试验结构构件将不能继续使用,属于破坏性试验和科研试验的范畴。因此本章内容仅针对裂缝控制等级为三级的混凝土结构构件的裂缝宽度检验。裂缝控制等级为一级、二级的混凝土结构构件的抗裂检验需要根据本规范实验室试验的规定进行。

D.0.6 最大裂缝宽度检验限值,是在设计规范限值的基础上,考虑荷载长期作用效应的影响,折算成短期值而得到的。条文中表 D.0.6 所给出的最大裂缝宽度检验限值是参考国家标准《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)第9.3.3条确定的,其中缝宽 0.20mm、0.30mm、0.40mm 所对应的检验限值为直接引用,缝宽 0.25mm 所对应的检验限值为内插获得。

附录 E 防风锚碇抗拔试验

E.0.1 该试验方法是采用接近于防风锚碇结构的实际工作条件,用于检验防风锚碇整体抗拔承载力,为工程验收提供依据。