

**JTS**

中华人民共和国行业标准

**JTS 311—2011**

---

# 港口水工建筑物修补 加固技术规范

Technical Code for Repair and Strengthening of  
Harbor and Marine Structures

2011—01—25 发布

2011—01—25 实施

---

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业标准

# 港口水工建筑物修补加固技术规范

**JTS 311—2011**

主编单位：中交四航工程研究院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期：2011 年 1 月 25 日

**人民交通出版社**

2010 · 北京

# 关于发布《港口水工建筑物修补加固技术规范》(JTS 311—2011)的公告

2011 年第 2 号

现发布《港口水工建筑物修补加固技术规范》(以下简称《规范》)。本《规范》为强制性行业标准,编号为 JTS 311—2011,自发布之日起施行。《港口工程混凝土粘接修补技术规程》(JTJ/T 271—99)同时废止。

本《规范》第 3.0.11 条和第 5.2.6 条中的黑体字部分为强制性条文,必须严格执行。

本《规范》由部组织中交四航工程研究院有限公司等单位编制完成,由部水运局负责管理和解释,由人民交通出版社出版发行。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部

二〇一一年一月二十五日

# 制 定 说 明

本规范是在调查研究的基础上,总结大量港口水工建筑物修补加固技术经验,借鉴国内外相关标准,吸纳港口水工建筑物修补加固的先进技术成果,经广泛征求有关单位和专家意见,并结合我国港口建设、营运的现状和发展需要编制而成。主要包括混凝土结构破损修补、混凝土结构加固、钢结构修补与加固和质量检验与验收等技术内容。

本规范的主编单位为中交四航工程研究院有限公司,参加单位为南京水利科学研究院、中交天津港湾工程研究院有限公司、中交第四航务工程勘察设计院有限公司、中交四航局港湾工程设计院有限公司和湛江港(集团)有限公司。

随着我国水路运输的快速发展,大量在役港口水工建筑物由于使用和环境条件的影响,出现材料劣化、功能降低的现象日益严重,迫切需要对其进行修补加固,但我国目前尚无统一的港口水工建筑物修补加固技术规范。为保证港口水工建筑物的使用安全,有效延长其使用寿命,降低全寿命使用成本,交通运输部水运局组织中交四航工程研究院有限公司等单位制定《港口水工建筑物修补加固技术规范》。

本规范第 3.0.11 条和第 5.2.6 条中的黑体字部分为强制性条文,必须严格执行。

本规范共分 7 章 22 节和 10 个附录,并附条文说明。本规范编写人员分工如下:

1 总则:潘德强

2 术语:潘德强

3 基本规定:潘德强、王胜年

4 混凝土结构破损修补:王胜年、范卫国、周庆华、黄君哲、黄孝衡

5 混凝土结构加固:王友元、王永平、苏林王、吴瑞大、张 能

6 钢结构加固与修补:何文钦

7 检验与验收:黄君哲、苏林王、何文钦

附录 A、B:王胜年、黄君哲

附录 C、D:王胜年、黄君哲、范卫国

附录 E、F、G、H:王友元、苏林王

附录 J:何文钦

附录 K:潘德强

本规范于 2010 年 1 月 27 日通过部审,于 2011 年 1 月 25 日发布,自发布之日起实施。

本规范由交通运输部水运局负责管理和解释。请各有关单位在使用过程中,将发现的问题和意见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:广州市前进路 157 号,中交四航工程研究院有限公司,邮政编码:510230),以便修订时参考。

## 目次

|      |                 |      |
|------|-----------------|------|
| 1    | 总则              | (1)  |
| 2    | 术语              | (2)  |
| 3    | 基本规定            | (4)  |
| 4    | 混凝土结构破损修补       | (5)  |
| 4.1  | 一般规定            | (5)  |
| 4.2  | 修补材料            | (5)  |
| 4.3  | 非耐久性破损修补        | (7)  |
| 4.4  | 耐久性破损修补         | (7)  |
| 5    | 混凝土结构加固         | (9)  |
| 5.1  | 一般规定            | (9)  |
| 5.2  | 加固材料            | (10) |
| 5.3  | 加固方法及其选择        | (13) |
| 6    | 钢结构加固与修补        | (16) |
| 6.1  | 一般规定            | (16) |
| 6.2  | 材料              | (16) |
| 6.3  | 加大截面法加固         | (17) |
| 6.4  | 连接的加固           | (17) |
| 6.5  | 裂纹修复与加固         | (17) |
| 6.6  | 耐久性修复           | (18) |
| 7    | 检验与验收           | (20) |
| 7.1  | 一般规定            | (20) |
| 7.2  | 混凝土结构破损修补检验验收   | (20) |
| 7.3  | 电化学脱盐保护系统检验验收   | (20) |
| 7.4  | 混凝土外加电流阴极保护检验验收 | (21) |
| 7.5  | 混凝土结构加大截面加固检验验收 | (21) |
| 7.6  | 外粘型钢加固检验验收      | (22) |
| 7.7  | 粘贴钢板加固检验验收      | (22) |
| 7.8  | 粘贴碳纤维加固检验验收     | (22) |
| 7.9  | 钢结构加固与修补检验验收    | (22) |
| 附录 A | 修补材料性能试验方法      | (24) |
| A.1  | 立模浇筑混凝土性能试验     | (24) |
| A.2  | 喷射混凝土抗压强度试验     | (27) |

|             |                              |             |
|-------------|------------------------------|-------------|
| A.3         | 水下不分散混凝土性能试验 .....           | (28)        |
| A.4         | 修补砂浆材料性能试验 .....             | (31)        |
| A.5         | 修补粘结材料与基材的正拉粘结强度试验 .....     | (34)        |
| <b>附录 B</b> | <b>混凝土结构破损修补方法 .....</b>     | <b>(38)</b> |
| B.1         | 裂缝封闭修补 .....                 | (38)        |
| B.2         | 裂缝灌浆修补 .....                 | (38)        |
| B.3         | 聚合物水泥砂浆断面修补 .....            | (38)        |
| B.4         | 立模浇筑混凝土断面修补 .....            | (39)        |
| B.5         | 喷射混凝土断面修补 .....              | (39)        |
| B.6         | 水下构件破损修补 .....               | (39)        |
| <b>附录 C</b> | <b>混凝土结构电化学脱盐处理方法 .....</b>  | <b>(40)</b> |
| C.1         | 电化学脱盐保护系统的设计 .....           | (40)        |
| C.2         | 电化学脱盐保护系统的安装与调试 .....        | (42)        |
| <b>附录 D</b> | <b>混凝土结构外加电流阴极保护方法 .....</b> | <b>(44)</b> |
| D.1         | 外加电流阴极保护设计 .....             | (44)        |
| D.2         | 混凝土外加电流阴极保护施工 .....          | (47)        |
| <b>附录 E</b> | <b>混凝土结构加大截面加固设计 .....</b>   | <b>(48)</b> |
| E.1         | 受弯构件正截面加固计算 .....            | (48)        |
| E.2         | 受弯构件斜截面加固计算 .....            | (50)        |
| E.3         | 受压构件正截面加固计算 .....            | (51)        |
| E.4         | 构造规定 .....                   | (53)        |
| E.5         | 施工 .....                     | (54)        |
| <b>附录 F</b> | <b>外粘型钢加固法 .....</b>         | <b>(56)</b> |
| F.1         | 加固计算 .....                   | (56)        |
| F.2         | 构造规定 .....                   | (58)        |
| F.3         | 施工 .....                     | (58)        |
| <b>附录 G</b> | <b>粘贴钢板加固法 .....</b>         | <b>(60)</b> |
| G.1         | 受弯构件正截面加固计算 .....            | (60)        |
| G.2         | 受弯构件斜截面加固计算 .....            | (62)        |
| G.3         | 大偏心受压构件正截面加固计算 .....         | (64)        |
| G.4         | 受拉构件正截面加固计算 .....            | (65)        |
| G.5         | 构造规定 .....                   | (66)        |
| G.6         | 施工 .....                     | (67)        |
| <b>附录 H</b> | <b>粘贴碳纤维加固法 .....</b>        | <b>(69)</b> |
| H.1         | 受弯构件正截面加固计算 .....            | (69)        |
| H.2         | 受弯构件斜截面加固计算 .....            | (72)        |
| H.3         | 受压构件正截面加固计算 .....            | (74)        |

|                                                |      |
|------------------------------------------------|------|
| H.4 受压构件斜截面加固计算 .....                          | (76) |
| H.5 大偏心受压构件加固计算 .....                          | (76) |
| H.6 受拉构件正截面加固计算 .....                          | (77) |
| H.7 提高柱延性的加固计算 .....                           | (78) |
| H.8 构造规定 .....                                 | (79) |
| H.9 施工 .....                                   | (80) |
| 附录 J 最大名义应力计算 .....                            | (83) |
| 附录 K 本规范用词用语说明 .....                           | (84) |
| 附加说明 本规范主编单位、参加单位、主要起草人、总校人员和<br>管理组人员名单 ..... | (85) |
| 附 条文说明 .....                                   | (87) |

## 1 总 则

**1.0.1** 为使在役港口水工建筑物修补、加固做到技术可靠、安全适用、经济合理、保证质量,制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于在役港口水工建筑物混凝土结构、钢结构修补和加固的设计、施工、检验。

**1.0.3** 在役港口水工建筑物修补、加固前应对建筑物进行检测与评估。

**1.0.4** 在役港口水工建筑物的修补、加固除应符合本规范规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 混凝土结构

本规范混凝土结构系指钢筋混凝土结构、素混凝土结构,不包括预应力混凝土结构。

### 2.0.2 耐久性损伤

由化学、物理等因素作用造成结构功能随时间退化的累计损伤。

### 2.0.3 非耐久性破损

指施工遗留的混凝土缺陷,温度应力或收缩应力引起的裂缝,或因荷载、沉降引起的裂缝。

### 2.0.4 耐久性破损

主要指因混凝土表面碳化、氯离子侵入等造成的钢筋锈蚀引起的混凝土破损,或因冻融引起的混凝土破损。

### 2.0.5 目标使用年限

结构或构件经修补或加固后,按设计条件使用,期望继续使用的年限。

### 2.0.6 湿固化

指材料能在面干饱水混凝土界面或湿表面混凝土界面进行正常固化的性能。

### 2.0.7 界面粘结材料

用于混凝土修补区域界面处以增强粘结性能的材料。

### 2.0.8 聚合物水泥砂浆

掺有改性环氧乳液或其他改性共聚物乳液的水泥砂浆。

### 2.0.9 静止裂缝

裂缝形态、尺寸和数量均已稳定,不再发展的裂缝。

### 2.0.10 活动裂缝

裂缝宽度在现有环境和工作条件下始终不能保持稳定,易随结构受力、变形或环境温湿度变化而时张时闭的裂缝。

### 2.0.11 混凝土结构电化学脱盐

以降低混凝土保护层中氯离子浓度为目的的电化学脱盐技术。

### 2.0.12 混凝土结构外加电流阴极保护

以抑制钢筋表面形成腐蚀电池为目的的电化学防腐蚀技术。

### 2.0.13 加大截面加固

加大原构件截面面积和增配钢筋,以提高其承载力和刚度的加固方法。

### 2.0.14 结构胶粘剂

使承重结构能长期承受设计应力和环境作用的胶粘剂,简称结构胶。

### 2.0.15 外粘型钢加固

对钢筋混凝土梁、柱外包型钢、扁钢焊成构架并灌注结构胶粘剂,以达到整体受力,共同约束原构件的加固方法。

### 2.0.16 粘贴钢板加固

通过采用结构胶粘剂将钢板粘合于原构件的混凝土表面,使之形成具有整体性的复合截面,以提高其承载力的一种加固方法。

### 2.0.17 粘贴碳纤维复合材料加固

通过采用结构胶粘剂将碳纤维复合材料粘合于原构件的混凝土表面,使之形成具有整体性的复合截面,以提高其承载力和延性的一种加固方法。

### 3 基本规定

**3.0.1** 港口水工建筑物经检测评估确认结构有破损以及因破损而影响建筑物安全使用时,应根据评估结论和使用要求进行结构破损修补和加固。

**3.0.2** 港口水工建筑物的安全性、使用性、耐久性评估分级标准及处理要求,应按现行行业标准《港口水工建筑物检测与评估技术规范》(JTJ 302)的有关规定执行。

**3.0.3** 修补加固后建筑物的目标使用年限、使用条件,应结合建筑物检测、评估报告经综合论证确定。

**3.0.4** 修补、加固技术方案应根据结构物的检测及评估结果,综合考虑目标使用年限、使用条件和环境条件确定。

**3.0.5** 加固施工时的结构受力形态应与加固设计的结构受力形态相一致。

**3.0.6** 修补、加固施工过程中可能出现影响结构安全的因素,应在设计方案中提出相应的安全措施,施工时应严格执行。

**3.0.7** 选择修补、加固材料应综合考虑下列因素:

- (1) 结构破损或耐久性损伤原因;
- (2) 结构所处的环境条件及施工可行性;
- (3) 修补、加固材料与原结构材料的匹配性;
- (4) 修补加固后的有效性和耐久性等。

**3.0.8** 所采用的修补、加固材料应有性能检测报告、使用说明书和质量证明文件等,必要时应对使用材料进行抽样检测。

**3.0.9** 修补、加固施工竣工后,应将检测与评估报告、修补加固设计施工资料、验收资料等及时归档。

**3.0.10** 经修补或加固的结构,应定期跟踪检查,检查时间间隔应满足下列要求:

- (1) 破损修补每 2a 至少检查一次;
- (2) 加固每 1a 至少检查一次。

**3.0.11** 修补、加固后港口水工建筑物未经技术鉴定或评估,不得提高使用荷载或改变使用条件。

4 混凝土结构破损修补

4.1 一般规定

- 4.1.1 耐久性评估为 B、C、D 级的构件或安全性和使用性评估为 C、D 级的结构应进行修补。
- 4.1.2 混凝土结构破损应按附录 B 选择适宜方法进行修补,其修补设计、施工应按附录 B 的有关规定执行。
- 4.1.3 混凝土结构破损修补方案中含有电化学脱盐或外加电流阴极保护措施时,其修补设计、施工尚应符合附录 C 和附录 D 的有关规定。

4.2 修补材料

- 4.2.1 混凝土结构修补用的水泥,宜采用强度等级不小于 42.5 级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,需要时可采用特种水泥,水泥的性能和质量应符合国家现行有关标准的规定。
- 4.2.2 修补用的混凝土应符合下列规定。
- 4.2.2.1 用于立模浇筑的混凝土骨料最大粒径不宜大于 20mm,采用喷射混凝土时骨料最大粒径不宜大于 12mm。
- 4.2.2.2 用于修补的立模浇筑混凝土和喷射混凝土性能应分别符合表 4.2.2-1 和表 4.2.2-2 的规定,其性能测定方法应符合附录 A.1 和附录 A.2 的规定。

立模浇筑混凝土性能 表 4.2.2-1

| 新拌混凝土         |                        |                 |                    | 硬化混凝土         |                            |                    |
|---------------|------------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------------------|--------------------|
| 坍落流动度<br>(mm) | 500mm<br>坍落流动<br>时间(s) | V 型仪流出<br>时间(s) | L 型仪<br>流动高<br>度比值 | 抗压强度<br>(MPa) |                            | 新老混凝土粘结强度<br>(MPa) |
|               |                        |                 |                    | 7d            | 28d                        | 28d                |
| 600 ~ 700     | 2 ~ 5                  | 7 ~ 20          | 0.8 ~ 1.0          | ≥30           | 比原构件强度等级提高一<br>级,且不得低于 C30 | 不小于原混凝土抗<br>拉强度标准值 |

喷射混凝土性能 表 4.2.2-2

| 抗压强度 (MPa) |                        | 新老混凝土粘结强度 (MPa) |
|------------|------------------------|-----------------|
| 7d         | 28d                    | 28d             |
| ≥30        | 比原构件强度等级提高一级,且不得低于 C30 | 不小于原混凝土抗拉强度标准值  |

4.2.2.3 处于海水环境下修补混凝土的 56d 抗氯离子渗透性的电通量不应大于 1000C,其测定方法应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275)的规定。

4.2.2.4 用于水下构件修补的水下不分散混凝土性能应符合表 4.2.2-3 的规定,其性能测定方法应符合附录 A.3 的规定。

水下不分散混凝土性能 表 4.2.2-3

| 坍落扩展度<br>(mm) | 30min 坍落扩展度损失<br>(mm) | 水陆成型试件 28d<br>抗压强度比(%) | 水下成型试件 28d<br>抗压强度(MPa) |
|---------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| 400 ~ 600     | ≤50                   | ≥75                    | ≥30                     |

4.2.3 混凝土修补用的封缝材料和灌浆材料性能应符合表 4.2.3 的规定,其测定方法应符合现行国家标准《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567)的规定。

封缝和灌浆材料性能 表 4.2.3

| 胶体抗压强度<br>(MPa) | 胶体抗拉强度<br>(MPa) | 与干表面混凝土正拉粘结强度<br>(MPa) | 与湿表面混凝土正拉粘结强度<br>(MPa) |
|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| ≥50             | ≥10             | 不小于原混凝土<br>抗拉强度标准值     | 不小于原混凝土<br>抗拉强度标准值     |

4.2.4 修补活动裂缝应选用柔性的嵌缝密封材料,其性能应符合表 4.2.4 的规定,其测定方法应符合现行国家标准《建筑密封材料试验方法》(GB/T 13477)的有关规定。

柔性嵌缝密封材料性能 表 4.2.4

| 拉伸模量    | 定伸粘结性        | 浸水后定伸粘结性     | 冷拉—热压后粘结性        |
|---------|--------------|--------------|------------------|
| ≤0.6MPa | 无破坏(定伸 60%时) | 无破坏(定伸 60%时) | 无破坏(拉伸—压缩率 ±20%) |

4.2.5 用于填充修补的聚合物水泥砂浆性能应符合表 4.2.5 的规定,其测定方法应符合附录 A.4 的规定。

聚合物水泥砂浆性能 表 4.2.5

| 抗压强度(MPa) |                        | 抗折强度<br>(MPa) | 抗拉强度<br>(MPa) | 砂浆与老混凝土<br>粘结强度(MPa) | 干缩值(με) |      |
|-----------|------------------------|---------------|---------------|----------------------|---------|------|
| 7d        | 28d                    | 28d           | 28d           | 28d                  | 7d      | 28d  |
| ≥30.0     | 比原构件强度等级提高一级,且不得低于 C30 | ≥6.5          | ≥3.5          | 不小于原混凝土<br>抗拉强度标准值   | ≤300    | ≤500 |

4.2.6 对混凝土界面进行预处理的界面粘结材料和性能应符合表 4.2.6 的规定,其测定方法应符合现行国家标准《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567)和附录 A.5 的规定。

界面粘结材料性能 表 4.2.6

| 胶体抗压强度   | 胶体抗拉强度  | 与湿表面混凝土正拉粘结强度    |
|----------|---------|------------------|
| ≥50.0MPa | ≥5.0MPa | ≥2.5MPa,且混凝土内聚破坏 |

4.2.7 用于水下构件修补的水下包覆层材料性能应符合表 4.2.7 的规定,其测定方法应符合现行国家标准《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567)和附录 A.5 规定。

水下包覆层材料性能 表 4.2.7

|          |         |                  |
|----------|---------|------------------|
| 胶体抗压强度   | 胶体抗拉强度  | 与湿表面混凝土正拉粘结强度    |
| ≥50.0MPa | ≥6.0MPa | ≥2.5MPa,且混凝土内聚破坏 |

4.2.8 涂覆于修补构件混凝土表面的硅烷浸渍材料宜采用无溶剂的膏状异辛基三乙氧基硅烷或液态异丁基三乙氧基硅烷,其性能要求应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275)的有关规定。

4.2.9 涂覆于修补构件混凝土表面的涂层及性能应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275)的有关规定。

4.3 非耐久性破损修补

4.3.1 静止裂缝修补应满足下列要求:

- (1)对宽度为 0.2 ~ 0.3mm 的裂缝,按附录 B.1 的规定,采用封闭方法对裂缝进行修补;
- (2)对宽度大于 0.3mm 的裂缝或贯穿裂缝,按附录 B.2 的规定,采用化学灌浆法进行修补。

4.3.2 活动裂缝,应先查明其成因并采取控制措施。确认裂缝稳定后应按第 4.3.1 条规定的方法修补;若裂缝不能完全稳定,经评估对结构、构件的安全性不构成危害时,可采用柔性材料进行修补。

4.3.3 小面积缺损可按照附录 B.3 的规定,采用聚合物水泥砂浆进行断面修补;大面积缺损,当构件易于安装模板时宜按照附录 B.4 的规定,采用立模浇筑混凝土法进行断面修补;当构件难以安装模板时可按照附录 B.3 或附录 B.5 的规定,采用涂抹聚合物水泥砂浆或喷射混凝土法进行断面修补。

4.3.4 处于水下部位且截面不大的构件,其裂缝和缺损宜按照附录 B.6 的规定,采用水下包覆层法或立模浇筑水下不分散混凝土法修补。

4.4 耐久性破损修补

4.4.1 处于海水环境平均潮位以上的混凝土结构,因钢筋腐蚀产生的锈胀裂缝和层裂的修补应符合下列规定。

4.4.1.1 耐久性检测评估等级为 B 级且修补后目标使用年限不大于 10a 的混凝土结构,应按下列工序和要求进行修补:

- (1)凿除出现锈胀裂缝和层裂处的混凝土保护层;
- (2)用手工或动力工具除锈至 St 2 级;
- (3)用高压淡水冲洗钢筋及混凝土表面;
- (4)当钢筋损失较大时更换或补焊钢筋;
- (5)对修补断面涂覆界面粘结材料;
- (6)用立模浇注混凝土、喷射混凝土或聚合物水泥砂浆进行填充修补,恢复构件原断面。

**4.4.1.2** 耐久性检测评估等级为 B 级且修补后目标使用年限为 10 ~ 15a 或者耐久性检测评估等级为 C、D 级且修补后目标使用年限不大于 15a 的混凝土结构,除按第 4.4.1.1 款规定进行修补外,尚应对构件整个混凝土表面采取硅烷浸渍或涂覆混凝土表面涂层进行防护,其修补方法应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275)的有关规定。

**4.4.1.3** 耐久性检测评估等级为 B 级且修补后目标使用年限大于 15a 的混凝土结构,除按第 4.4.1.1 款规定进行修补外,应按附录 C 规定的电化学脱盐或附录 D 规定的外加电流阴极保护方法进行处理。

**4.4.1.4** 耐久性检测评估为 C、D 级,修补后目标使用年限大于 15a 的混凝土结构,除按第 4.4.1.1 款规定进行修补外,应采用外加电流阴极保护或其他有效措施进行处理。

**4.4.2** 因碳化引起的钢筋锈胀裂缝和层裂修补应符合下列规定。

**4.4.2.1** 对破损混凝土结构应按第 4.4.1.1 款规定的工序和方法进行修补。

**4.4.2.2** 确认钢筋锈蚀对承载力有影响时应采取加固措施。

**4.4.2.3** 确认结构使用寿命终止前混凝土保护层普遍碳化到钢筋位置时,宜对混凝土表面全面进行硅烷浸渍或涂覆混凝土表面涂层进行保护,修补方法应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275)的有关规定。

**4.4.3** 因冻融引起的混凝土结构破损修补应符合下列规定。

**4.4.3.1** 混凝土冻融劣化度评估为 B、C、D 级时,应按下列程序和要求进行修补:

- (1) 凿除混凝土构件破损部分表露疏松层、海生物及其他附着物;
- (2) 用高压淡水或喷砂清理混凝土表面;
- (3) 修补面涂覆界面粘结材料;
- (4) 采用比原结构抗冻等级和强度等级高一级的混凝土、修补砂浆或聚合物水泥砂浆进行修补,恢复构件原断面。

**4.4.3.2** 海水环境混凝土结构同时出现冻融损伤和钢筋锈蚀损伤时,其修补方法和程序应符合第 4.4.1 条的规定。

## 5 混凝土结构加固

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 港口水工建筑物安全性、使用性评估等级为 C、D 级应采取加固措施。

**5.1.2** 混凝土结构的加固设计应保证新增构件或部件与原结构连接可靠,形成整体共同工作,并应避免对未加固部分和地基基础造成不利影响。

**5.1.3** 混凝土结构加固方案应综合考虑以下因素:

- (1) 工况条件;
- (2) 变形过大的原因;
- (3) 承载能力下降原因及程度;
- (4) 结构物重要性;
- (5) 荷载条件及应力状态;
- (6) 环境条件;
- (7) 施工可行性;
- (8) 维护管理要求;
- (9) 加固后目标使用年限。

**5.1.4** 加固混凝土结构前应卸除作用在结构上的活荷载,并对混凝土结构表面破损进行修补。

**5.1.5** 加固混凝土结构应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计验算,并应符合下列规定。

**5.1.5.1** 混凝土结构加固设计计算方法应符合现行行业有关标准的规定,结构加固构件设计可按附录 E ~ 附录 H 的规定执行。

**5.1.5.2** 结构、构件的计算应考虑加固部分应变滞后以及加固部分与原结构共同工作程度,计算模型应符合实际受力状态。

**5.1.5.3** 结构上的作用应考虑因用途变更或已有结构改动所引起的变化,并按现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144—1)的有关规定确定。

**5.1.5.4** 原有的结构、构件的几何参数应采用实测值,新增部分应取设计值。

**5.1.5.5** 原结构、构件的混凝土强度等级和受力钢筋抗拉强度标准值应按现行国家标准《港口工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50158)的有关规定通过现场检测确定,当结构无明显功能性退化和施工缺陷时,结构、构件材料强度可采用设计标准值。

**5.1.5.6** 构件现场检测混凝土强度等级高于原设计强度等级时,应取原混凝土设计强度等级;当低于原设计强度等级时,应取现场检测的混凝土强度等级。

5.1.5.7 腐蚀后钢筋混凝土构件承载力应按现行行业标准《港口水工建筑物检测与评估技术规范》(JTJ 302)的有关规定计算。

5.1.5.8 加固后结构自重有明显增加时,应对地基基础进行必要的验算。

5.1.5.9 有抗震设防要求的结构加固应复核其抗震能力。

5.1.6 混凝土结构加固设计中采用植筋技术、锚栓技术应符合现行国家标准《混凝土加固设计规范》(GB 50367)的有关规定。

5.1.7 当被加固混凝土构件表面有防火要求时,防火等级和耐火极限要求应符合现行国家标准《建筑防火设计规范》(GB 50016)的规定。

5.2 加固材料

5.2.1 水泥、混凝土等加固材料应符合第 4.2.1 条和第 4.2.2 条的规定。

5.2.2 加固用的钢筋应符合下列规定。

5.2.2.1 钢筋宜选用 HRB335 级或 HPB235 级的热轧钢筋。

5.2.2.2 钢筋质量应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 1 部分:热轧光圆钢筋》(GB 1499.1)和《钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋》(GB 1499.2)的有关规定。

5.2.2.3 钢筋的力学性能设计值应符合现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)的有关规定。

5.2.3 加固用的钢板、型钢、扁钢和钢管等钢材应符合下列规定。

5.2.3.1 钢材宜选用 Q235 级或 Q345 级。

5.2.3.2 钢材质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》(GB/T 700)和《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591)的有关规定。

5.2.3.3 钢材的力学性能设计值应符合现行行业标准《港口工程钢结构设计规范》(JTJ 283)的有关规定。

5.2.4 加固用的焊条型号应与被焊接钢材的强度相适应,焊条质量应符合现行国家标准《碳钢焊条》(GB/T 5117)和《低合金钢焊条》(GB/T 5118)的有关规定。

5.2.5 碳纤维复合材料用的纤维必须为连续纤维,其性能应符合下列规定。

5.2.5.1 承重结构加固用的碳纤维必须选用聚丙烯腈基(PAN 基)12k 或 12k 以下的小丝束纤维,严禁使用大丝束纤维。

5.2.5.2 结构加固用碳纤维复合材料的性能指标必须符合表 5.2.5 的要求。碳纤维复合材料的抗拉强度标准值应具有 95% 的保证率。

碳纤维复合材料性能指标 表 5.2.5

| 项 目           | 单向织物(布)                |                        | 条 形 板                  |                        |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|               | 高强度 I 级                | 高强度 II 级               | 高强度 I 级                | 高强度 II 级               |
| 抗拉强度标准值 (MPa) | ≥3400                  | ≥3000                  | ≥2400                  | ≥2000                  |
| 受拉弹性模量 (MPa)  | ≥2.4 × 10 <sup>5</sup> | ≥2.1 × 10 <sup>5</sup> | ≥1.6 × 10 <sup>5</sup> | ≥1.4 × 10 <sup>5</sup> |
| 伸长率 (%)       | ≥1.7                   | ≥1.5                   | ≥1.7                   | ≥1.5                   |

续表 5.2.5

| 项 目                            | 单向织物(布)        |       | 条 形 板 |       |
|--------------------------------|----------------|-------|-------|-------|
|                                | 高强度Ⅰ级          | 高强度Ⅱ级 | 高强度Ⅰ级 | 高强度Ⅱ级 |
| 弯曲强度(MPa)                      | ≥700           | ≥600  | —     | —     |
| 层间剪切强度(MPa)                    | ≥45            | ≥35   | ≥50   | ≥40   |
| 仰贴条件下纤维复合材料与混凝土正拉<br>粘结强度(MPa) | ≥2.5,且为混凝土内聚破坏 |       |       |       |
| 纤维体积含量(%)                      | —              | —     | ≥65   | ≥55   |
| 单位面积质量(g/m <sup>2</sup> )      | ≤300           | ≤300  | —     | —     |

注:L形板的性能及适配性检验合格指标按高强度Ⅱ级条形板采用。

5.2.5.3 当符合表 5.2.5 性能指标要求的碳纤维复合材料与其他的改性环氧树脂胶配套使用时,必须对抗拉强度标准值、仰贴条件下纤维复合材料与混凝土正拉粘结强度和层间剪切强度进行检验,且检验结果必须符合表 5.2.5 的要求。

5.2.5.4 碳纤维复合材料性能指标的测定方法应满足下列要求:

- (1)抗拉强度、受拉弹性模量、伸长率根据现行国家标准《定向纤维增强塑料拉伸试验方法》(GB/T 3354)的有关规定测定;
- (2)抗弯强度根据现行国家标准《定向纤维增强塑料弯曲性能试验方法》(GB/T 3356)的有关规定测定;
- (3)仰贴条件下纤维复合材料与混凝土正拉粘结强度根据附录 A.5 测定;
- (4)层间剪切强度根据现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367)的有关规定测定;
- (5)碳纤维体积含量根据现行国家标准《碳纤维增强塑料纤维体积含量试验方法》(GB/T 3366)的有关规定测定;
- (6)碳纤维织物单位面积质量根据现行国家标准《增强制品试验方法》(GB/T 9914)的有关规定测定。

5.2.6 加固用的结构胶粘剂应符合下列规定。

5.2.6.1 加固浪溅区、水位变动区混凝土构件的胶粘剂应具有湿固化性能。

5.2.6.2 承重结构用的胶粘剂必须进行性能检验,其粘结抗剪强度标准值应具有 95% 的保证率。

5.2.6.3 浸渍、粘结碳纤维复合材料的胶粘剂的性能指标必须符合表 5.2.6-1 的规定,不得使用不饱和聚酯树脂、醇酸树脂等。

碳纤维复合材料浸渍、胶粘剂性能指标 表 5.2.6-1

| 性 能 项 目          |             | 性 能 要 求      | 试验方法标准                   |
|------------------|-------------|--------------|--------------------------|
| 胶<br>体<br>性<br>能 | 抗拉强度(MPa)   | ≥40          | 《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567) |
|                  | 受拉弹性模量(MPa) | ≥2500        |                          |
|                  | 伸长率(%)      | ≥1.5         |                          |
|                  | 抗弯强度(MPa)   | ≥50,且不得呈脆性破坏 |                          |
|                  | 抗压强度(MPa)   | ≥70          |                          |

续表 5.2.6-1

| 性能项目        |                       | 性能要求           | 试验方法标准                               |
|-------------|-----------------------|----------------|--------------------------------------|
| 粘结能力        | 钢—钢拉伸抗剪强度标准值<br>(MPa) | ≥14            | 《胶粘剂拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》(GB/T 7124) |
|             | 钢—钢不均匀扯离强度<br>(kN/m)  | ≥20            | 《胶粘剂不均匀扯离强度试验方法(金属与金属)》(GJB 94)      |
|             | 与干、湿表面混凝土的正拉粘结强度(MPa) | ≥2.5,且为混凝土内聚破坏 | 附录 A.5                               |
| 不挥发物固体含量(%) |                       | ≥99            | 《胶粘剂不挥发物含量的测定》(GB/T 2793)            |

注:表中性能指标,除标有强度标准值外,均为平均值。

5.2.6.4 底胶和修补胶应与浸渍、胶粘剂相适配,其性能应满足表 5.2.6-2 和表 5.2.6-3的要求。

底胶性能指标 表 5.2.6-2

| 性能项目                 | 性能要求           | 试验方法标准                                |
|----------------------|----------------|---------------------------------------|
| 钢—钢拉伸抗剪强度标准值(MPa)    | ≥14            | 《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》(GB/T 7124) |
| 与干、湿表面混凝土正拉粘结强度(MPa) | ≥2.5,且为混凝土内聚破坏 | 附录 A.5                                |
| 不挥发物固体含量(%)          | ≥99            | 《胶粘剂不挥发物含量的测定》(GB/T 2793)             |
| 混合后初粘度(MPa·s,23℃时)   | ≤6000          | 《塑料 环氧树脂 黏度测定方法》(GB/T 22314)          |

修补胶的性能指标 表 5.2.6-3

| 性能项目                  | 性能要求           | 试验方法标准                   |
|-----------------------|----------------|--------------------------|
| 胶体抗拉强度(MPa)           | ≥30            | 《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567) |
| 胶体抗弯强度(MPa)           | ≥40,且不得呈脆性破坏   |                          |
| 与干、湿表面混凝土的正拉粘结强度(MPa) | ≥2.5,且为混凝土内聚破坏 | 附录 A.5                   |

注:表中性能指标均为平均值。

5.2.6.5 粘贴钢板或外粘型钢的胶粘剂的性能指标必须符合表 5.2.6-4 的规定。

粘贴钢及外粘型钢用胶粘剂性能指标 表 5.2.6-4

| 性能项目 |             | 性能要求                 | 试验方法标准                   |
|------|-------------|----------------------|--------------------------|
| 胶体性能 | 抗拉强度(MPa)   | ≥30                  | 《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567) |
|      | 受拉弹性模量(MPa) | ≥3.5×10 <sup>3</sup> |                          |
|      | 伸长率(%)      | ≥1.3                 |                          |
|      | 抗弯强度(MPa)   | ≥45,且不得呈脆性破坏         |                          |
|      | 抗压强度(MPa)   | ≥65                  |                          |

续表 5.2.6-4

| 性能项目        |                       | 性能要求                    | 试验方法标准                                |
|-------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 粘结能力        | 钢—钢拉伸抗剪强度标准值(MPa)     | $\geq 15$               | 《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》(GB/T 7124) |
|             | 钢—钢不均匀扯离强度(kN/m)      | $\geq 16$               | 《胶粘剂不均匀扯离强度试验方法(金属与金属)》(GJB 94)       |
|             | 钢—钢粘结抗拉强度(MPa)        | $\geq 33$               | 《胶粘剂对接接头拉伸强度的测定》(GB/T 6329)           |
|             | 与干、湿表面混凝土的正拉粘结强度(MPa) | $\geq 2.5$<br>且为混凝土内聚破坏 | 附录 A.5                                |
| 不挥发物固体含量(%) |                       | $\geq 99$               | 《胶粘剂不挥发物含量的测定》(GB/T 2793)             |

注:表中各项性能指标,除标有强度标准值外,均为平均值。

5.2.6.6 港口水工建筑物钢筋混凝土结构加固用的胶粘剂,其钢—钢粘结抗剪性能应按现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367)规定的方法进行湿热老化检验,其强度降低百分率不得大于10%。

5.2.6.7 寒冷地区加固混凝土结构使用的胶粘剂,应具有耐冻融性能试验合格证明文件。冻融环境温度应为 $-25^{+2}\text{℃} \sim 35^{+2}\text{℃}$ ;循环次数不应少于50次;每一次循环时间应为8h;试验结束后,试件在常温条件下测得的强度降低百分率不应大于5%。

5.2.7 加固材料应进行物理力学性能检验,且其物理力学性能应满足要求。

5.3 加固方法及其选择

5.3.1 加固可采用加大截面加固法、外粘型钢加固法、粘贴钢板加固法、粘贴碳纤维复合材料加固法等。

5.3.2 加大截面加固法可用于钢筋混凝土受弯和受压构件的加固。加固应符合下列规定。

5.3.2.1 被加固的混凝土构件,按现场检测结果确定的原构件混凝土强度等级不宜低于C20。

5.3.2.2 当被加固构件界面处理及其粘结质量符合本规范要求时,可按加固后的截面计算。

5.3.2.3 正截面承载力应按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)的有关规定进行计算。

5.3.2.4 加固计算、构造规定和施工要求应符合附录E的规定。

5.3.3 外粘型钢加固法可用于平均潮位以上需要大幅度提高截面承载能力和抗震能力的钢筋混凝土梁、柱构件加固。加固应符合下列规定。

5.3.3.1 被加固的混凝土构件,按现场检测结果确定的原构件混凝土强度等级不应低于C20,且混凝土表面的正拉粘结强度不应低于2.0MPa。

5.3.3.2 粘结在混凝土表面上的型钢,其外表面应采取防腐蚀措施,防腐设计保护年限不应少于 10a。

5.3.3.3 采用外粘型钢加固混凝土结构构件时,应采用改性环氧树脂胶粘剂进行灌注。

5.3.3.4 加固计算、构造和施工要求应符合附录 F 的规定。

5.3.4 粘贴钢板加固法可用于平均潮位以上钢筋混凝土受弯、受拉构件的加固,不应用于素混凝土和纵向受力钢筋配筋率低于现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)规定最小配筋率的构件加固。加固应符合下列规定。

5.3.4.1 钢板受力方式应设计成承受轴向应力作用。

5.3.4.2 被加固的混凝土构件,按现场检测结果确定的原构件混凝土强度等级不应低于 C20,且混凝土表面的正拉粘结强度不应低于 2.0MPa。

5.3.4.3 粘贴在混凝土表面上的钢板不宜过厚,可按表 5.3.4 的数值选用,其外表面应采取防腐蚀措施,防腐设计保护年限不应少于 10a。

粘贴钢板厚度指标 表 5.3.4

|           |         |         |       |
|-----------|---------|---------|-------|
| 混凝土强度等级   | C20、C25 | C30、C35 | > C35 |
| 钢板厚度 (mm) | 2 ~ 3   | 3 ~ 4   | 4 ~ 5 |

5.3.4.4 加固计算、构造和施工要求应符合附录 G 的规定。

5.3.5 粘贴碳纤维复合材料加固法可用于平均潮位以上受弯、受拉、实心轴心受压和大偏心受压构件的加固。不应用于素混凝土和纵向受力配筋率低于现行国家行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTT 267)规定的最小配筋率的构件加固。加固应符合下列规定。

5.3.5.1 外贴碳纤维复合材料加固钢筋混凝土结构构件时,纤维受力方式应设计成仅受拉应力作用。

5.3.5.2 被加固的混凝土构件,其现场实测混凝土强度等级不应低于 C20,且混凝土表面的正拉粘结强度不应低于 2.0MPa。

5.3.5.3 碳纤维复合材料的设计、计算指标必须按表 5.3.5 的规定执行。

碳纤维复合材设计计算指标 表 5.3.5

| 性能项目          |      | 单向织物 (布)          |                   | 条形板               |                   |
|---------------|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|               |      | 高强度Ⅰ级             | 高强度Ⅱ级             | 高强度Ⅰ级             | 高强度Ⅱ级             |
| 抗拉强度设计值 (MPa) | 主要构件 | 1600              | 1400              | 1150              | 1000              |
|               | 一般构件 | 2300              | 2000              | 1600              | 1400              |
| 弹性模量设计值 (MPa) | 主要构件 | $2.3 \times 10^5$ | $2.0 \times 10^5$ | $1.6 \times 10^5$ | $1.4 \times 10^5$ |
|               | 一般构件 | $2.3 \times 10^5$ | $2.0 \times 10^5$ | $1.6 \times 10^5$ | $1.4 \times 10^5$ |
| 拉应变设计值        | 主要构件 | 0.007             | 0.007             | 0.007             | 0.007             |
|               | 一般构件 | 0.010             | 0.010             | 0.010             | 0.010             |

注:L形板按高强度Ⅱ级条形板的设计计算指标采用。

**5.3.5.4** 当混凝土构件钢筋锈蚀引起的混凝土表面裂缝宽度不大于 0.3mm 时,可按附录 H 的规定直接粘贴碳纤维进行加固;当构件腐蚀开裂表面裂缝宽度大于 0.3mm 时,应按附录 B 的规定进行修补后再采用外贴碳纤维进行加固。

**5.3.5.5** 粘贴在混凝土构件表面的碳纤维复合材料表面应采取涂层防护措施,所采用的涂层应与碳纤维复合材料具有良好的相容性。

**5.3.5.6** 采用粘贴碳纤维复合材料加固时,其加固设计和施工要求应符合附录 H 的规定执行。

## 6 钢结构加固与修补

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 耐久性评估为 B、C、D 级的结构构件,应根据结构型式和腐蚀、受损程度进行结构耐久性修补。

**6.1.2** 安全性评估为 C、D 级的结构构件,应根据结构型式和腐蚀、受损程度进行构件加固和结构耐久性修补。

**6.1.3** 加固方案应根据结构受力状况、构件型式和施工条件综合研究确定,可采用负荷加固、卸荷加固、从原结构上拆下加固或更新部件等。

**6.1.4** 结构加固设计应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态验算,加固后如改变传力路线或使结构自重明显增大,应对相关结构构件和地基基础进行验算。

**6.1.5** 构件加固可采用加大截面、裂纹修复和其他有效方法。

**6.1.6** 非直接加固的相关构件、连接和基础,应考虑结构加固引起自重及内力变化等不利因素的影响,并重新验算。

**6.1.7** 负荷状态下,当采用焊接加固时,原有构件或连接的实际名义应力值应小于 0.55 倍钢材屈服强度标准值,且不得考虑加固构件的塑性变形发展;当采用加大截面法加固时,最大名义应力值可按附录 J 计算,其绝对值不应大于 0.4 倍钢材屈服强度标准值;非焊接结构实际名义应力值应小于 0.7 倍钢材屈服强度标准值。

**6.1.8** 加固设计应考虑现场施工条件、待加固件劣化程度和可能出现的加固件应力滞后等因素,宜适当降低加固结构抗力强度设计值。

**6.1.9** 加固后的主要构件,必要时应对其剩余疲劳强度进行专题论证。

### 6.2 材 料

**6.2.1** 加固材料的选择应符合现行行业标准《港口工程钢结构设计规范》(JTJ 283)的有关规定。

**6.2.2** 加固件的钢材应与待加固件的钢材材质相同或相当,其质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》(GB/T 700)或《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591)的有关规定。

**6.2.3** 加固件的钢材强度设计值应按现行行业标准《港口工程钢结构设计规范》(JTJ 283)的规定值采用。

**6.2.4** 待加固件材料强度标准值应按现行国家标准《港口工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50158)的有关规定通过现场检测确定,当结构无明显功能性退化和施工缺陷时,材料标准值可采用设计标准值。

**6.2.5** 加大截面的钢材强度设计值宜采用加固件和原有构件钢材强度设计值中的较小者。

**6.2.6** 连接件材料应符合现行行业标准《港口工程钢结构设计规范》(JTJ 283)的有关规定,并应与加固件和待加固件的钢材相匹配。当加固件与待加固件的钢材强度不同时,连接材料宜与强度低的钢材相匹配。

**6.2.7** 结构耐久性修补材料的选择应符合现行行业标准《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》(JTS 153—3)的有关规定。

### 6.3 加大截面法加固

**6.3.1** 加固件截面型式应与待加固件缺陷和损伤的状况相适应。

**6.3.2** 加固设计应考虑结构的损伤程度、加固引起的不利变形、作用在结构上的荷载及其不利组合。对于超静定结构尚应考虑因截面加大、构件刚度改变使体系内力重新分布,应分阶段进行受力和计算。

**6.3.3** 负荷状态下采用焊接加固时的实际名义应力值和最大名义应力应符合第 6.1.7 条的规定。

**6.3.4** 轴心受力构件应考虑加固后可能出现的构件截面形心偏移的影响。

### 6.4 连接的加固

**6.4.1** 连接的加固方案应根据需加固的原因、受力状态、施工条件和原结构的连接方式综合确定。

**6.4.2** 连接的加固可采用焊缝、铆钉、普通螺栓和高强度螺栓等,同一受力部位不宜采用刚度相差较大的混合连接方法。

**6.4.3** 负荷状态下焊缝连接的加固,不宜采用长度垂直于受力方向的横向焊缝,不可避免时应采取专门的技术措施和施焊工艺。

**6.4.4** 采用焊接加固螺栓或铆钉连接的构件,应按焊缝承受全部作用力设计,且不宜拆除原有连接件。

**6.4.5** 螺栓或铆钉的连接需拆除更换并将连接孔扩钻平整时,应复核被连接板件的净截面强度。

### 6.5 裂纹修复与加固

**6.5.1** 在裂纹修复与加固前,应分析产生裂纹的原因及裂纹影响的严重性,并按现行行业标准《港口工程钢结构设计规范》(JTJ 283)的有关规定进行疲劳验算,必要时进行抗脆断专题论证。

**6.5.2** 在结构构件上发现裂纹时,宜在板件裂纹端外约 0.5 倍板厚处钻直径 1.0 倍板厚的小孔,并及时根据裂纹性质采取修复与加固措施。

**6.5.3** 裂纹修复宜采用焊接方法,应按下列工序和要求进行:

- (1)清洗裂纹两边 80mm 以上范围内板面油污至露出洁净的金属面;

(2)用碳弧气刨、风铲或砂轮将裂纹边缘加工出坡口,直达纹端的钻孔,坡口的形式根据板厚和施工条件按国家现行有关标准的要求选用;

(3)将裂纹两侧端部金属预热至 100 ~ 150℃,并在焊接过程中保持此温度;

(4)用与钢材相匹配的低氢型焊条或超低氢型焊条施焊;

(5)采用小直径焊条以分段分层逆向焊施焊;

(6)按设计要求检查焊缝质量;

(7)对承受动力荷载的构件,堵焊后其表面磨光至与原构件表面齐平,磨削痕迹线与裂纹切线方向基本垂直;

(8)对重要结构或厚板构件,堵焊后立即进行退火处理。

**6.5.4 网状、分叉裂纹和有破裂、过烧或烧穿等缺陷的梁、柱腹板部位,宜采用嵌板加固。采用嵌板加固应按下列工序和要求进行:**

(1)加固前检查确定缺陷的范围;

(2)将缺陷部位切成带圆角的矩形孔,切除部分的尺寸均比缺陷范围的尺寸大 100mm;

(3)用等厚度同材质的嵌板嵌入切除部位,嵌入板的长宽边缘与切除孔间二个边留有 2 ~ 4mm 的间隙,并将其边缘加工成对接焊缝要求的坡口形式;

(4)嵌板定位后,将孔口四角区域预热至 100 ~ 150℃,采用分段分层逆向焊法施焊;

(5)检查焊缝质量,打磨焊缝余高,使之与原构件表面齐平。

**6.5.5 附加盖板加固裂纹时,宜采用两面附加盖板,裂纹两端均应钻孔。**

**6.6 耐久性修复**

**6.6.1 耐久性修复应在结构破损修补以及构件加固完成后进行。**

**6.6.2 钢结构耐久性修复应结合耐久性现状、修补后目标使用年限、耐久性修复措施的保护效果和经济性综合考虑。**

**6.6.3 当钢结构耐久性评估等级为 B、C、D 级时,耐久性修复应符合表 6.6.3 的规定。**

钢结构耐久性修复措施 表 6.6.3

| 构件所处位置  | 修 复 措 施     |
|---------|-------------|
| 大气区和浪溅区 | 表面涂层        |
| 水位变动区   | 表面涂层 + 阴极保护 |
| 水下区     | 阴极保护        |

**6.6.4 对实施了防腐蚀措施的钢结构,当防腐蚀措施的保护效果评估等级为 B、C、D 级时,防腐蚀措施的修补应符合下列规定。**

**6.6.4.1 表面涂层修复应满足下列要求:**

(1)涂层劣化检测评估等级为 B 级时,采用与原涂层相同或相近的系统进行局部补涂修复;

(2)涂层劣化检测评估等级为 C 级时,采用与原涂层相同或相近的系统进行局部补涂修复,必要时根据结构目标使用年限进行涂层再设计保护;

(3)涂层劣化检测评估等级为 D 级时,全部清除已劣化的涂层,并根据目标使用年限进行涂层再设计保护。

**6.6.4.2 外加电流阴极保护系统应满足下列要求:**

(1)外加电流阴极保护效果评估等级为 B 级时,更换经检测已损坏或失效的电器、电路设备或辅助电极,并调整输出电流和输出电压,系统保护电位与原设计要求一致;

(2)外加电流阴极保护效果评估等级为 C 级且系统电器、电路设备或辅助电极无法修复时,根据目标使用年限进行再设计保护。

**6.6.4.3 牺牲阳极阴极保护系统应满足下列要求:**

(1)牺牲阳极阴极保护效果评估等级为 B 级且阳极剩余使用寿命满足设计使用年限时,阳极连接件松动,采取水下焊接的方法短路连接阳极与被保护钢结构;阳极脱落,补充或增加同种材质规格的阳极进行修复;

(2)牺牲阳极阴极保护效果评估等级为 C 级,或保护效果评估等级为 B 级且阳极剩余使用寿命不满足设计使用年限时,根据目标使用年限进行再设计保护。

**6.6.5 海水环境中钢结构防腐蚀措施的设计和施工应符合现行行业标准《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》(JTS 153—3)的有关规定。**

## 7 检验与验收

### 7.1 一般规定

- 7.1.1** 施工前应进行材料的性能检验,检验合格方可进行施工。
- 7.1.2** 现场使用的材料应按设计和施工要求进行抽样检验,并应满足设计要求。
- 7.1.3** 工程验收资料应包含下列内容:
- (1)委托任务书及修补加固过程有关协议文件;
  - (2)原结构设计文件、修补加固设计文件和设计变更文件;
  - (3)各种修补材料出厂质量证明文件和现场检验文件;
  - (4)施工组织设计及施工纪录;
  - (5)经确认的各道工序施工检查记录;
  - (6)施工图纸和竣工报告;
  - (7)维护管理建议。

### 7.2 混凝土结构破损修补检验验收

- 7.2.1** 修补完成后可采用目测、敲击等方法进行外观检验,构件修补连接处应结合紧密,发现有缝隙、夹层和空腔等修补缺陷时应及时采取补救措施。
- 7.2.2** 采用灌浆法进行修补的构件,修补效果可按现行行业标准《水运工程混凝土试验规程》(JTJ 270)的规定进行混凝土现场压水试验。
- 7.2.3** 水下修补工程可用潜水员水下探摸和水下录像进行外观检查。
- 7.2.4** 当对修补质量有怀疑时,可采用取芯法或超声波法进行检验。

### 7.3 电化学脱盐保护系统检验验收

- 7.3.1** 电化学脱盐保护系统检验应包括下列内容:
- (1)设备的检验;
  - (2)所有回路的极性检查;
  - (3)所有回路的电连接性检查;
  - (4)所有回路的绝缘性检查;
  - (5)局部破损混凝土保护层凿除和修补质量;
  - (6)参比电极安装位置的检验;
  - (7)混凝土表面处理质量及混凝土保护层厚度检验;
  - (8)辅助阳极的制作和安装质量检验;

(9)各种连接线和电缆的制作、铺设,直流电源的安装质量等检验。

#### 7.3.2 电化学脱盐保护系统的验收应包括下列内容:

- (1)修补材料的抗压强度、抗折强度和修补材料与老混凝土的粘结强度;
- (2)剩余氯离子含量小于水泥砂浆重量的0.1%且钢筋恢复钝化;
- (3)涂层厚度、涂层粘结强度或硅烷浸渍深度、吸水率、氯化物吸收量的降低效果等。

### 7.4 混凝土外加电流阴极保护检验验收

#### 7.4.1 外加电流阴极保护系统检验应包括下列内容:

- (1)各种仪器设备的检验;
- (2)所有回路的极性检查;
- (3)所有回路的电连接性检查;
- (4)所有回路的绝缘性检查;
- (5)参比电极安装位置的检验与验收;
- (6)混凝土表面处理质量及混凝土保护层厚度检验;
- (7)辅助阳极的制作和安装质量检验;
- (8)各种连接线和电缆制作、铺设,直流电源安装质量的检验与验收等。

#### 7.4.2 阴极保护系统的验收应符合下列规定。

7.4.2.1 普通混凝土中钢筋瞬时断电的电位不应负于 $-1100\text{mV}$ 。

7.4.2.2 预应力混凝土中钢筋瞬时断电的电位不应负于 $-900\text{mV}$ 。

7.4.2.3 大气中的混凝土结构任一代表性的测点,其电位实测值应满足下列要求之一:

- (1)直流电回路断开后 $0.1\sim 1.0\text{s}$ 测得的瞬时断电的电位负于 $-720\text{mV}$ ;
- (2)断电瞬间的初始极化电位,断电后 $24\text{h}$ 内电位衰减不小于 $100\text{mV}$ ;
- (3)断电瞬间的初始极化电位,断电后 $48\text{h}$ 或更长时间的电位衰减值不小于 $150\text{mV}$ 。

### 7.5 混凝土结构加大截面加固检验验收

7.5.1 新增混凝土的浇注质量不应有严重缺陷及影响结构性能和使用功能的尺寸偏差。

7.5.2 新老混凝土结合面粘结质量采用锤击或超声波检测判定为结合不良的测点数不应超过总测点数的10%,且不应集中出现在主要受力部位。

7.5.3 当设计对使用结构界面粘结材料的老混凝土粘结强度有复验要求时,应在新增混凝土28d抗压强度达到设计要求的当日,进行新老混凝土正拉粘结强度的见证抽样检验,其新老混凝土正拉粘结强度应不小于 $2.0\text{MPa}$ ,且应为正常破坏。

7.5.4 新增钢筋的保护层厚度抽样检验结果应合格。其抽样数量、检验方法以及验收合格标准应符合现行行业标准《水运工程质量检验标准》(JTS 257)的有关规定。

7.5.5 新增混凝土拆模后,应对构件的尺寸偏差进行检查。其检查数量、检验方法以及允许偏差值应按现行行业标准《水运工程质量检验标准》(JTS 257)的有关规定执行。对于水下混凝土修补工程,可采用潜水员水下探摸和水下录像进行外观检验。

## 7.6 外粘型钢加固检验验收

**7.6.1** 外粘型钢加固的施工质量检验,应在检查其型钢肢安装、缀板焊接合格的基础上,对胶粘强度和注胶饱满度进行检验,并应符合下列规定。

**7.6.1.1** 胶粘强度的检验应在注胶开始前在被加固构件上预贴正拉粘结强度检验用的标准块;粘贴后应在接触压条件下静置养护 7d;到期后应立即进行现场检验。

**7.6.1.2** 注胶饱满度应用仪器或敲击法进行检验,空鼓率不应大于 5%。

**7.6.2** 注胶干式外包钢加固应检验注胶的饱满度,空鼓率不应大于 10%;填塞胶泥的干式外包钢加固应检验外观质量,填塞应封闭完整并满足型钢肢安装要求。

**7.6.3** 型钢粘贴前应进行表面状况检查,粘结面应光滑平整且无油污、无锈迹。

**7.6.4** 被加固构件注胶后的外观应无污渍、无胶液挤出;注胶孔和排气孔的封闭应平整;注胶嘴底座及其残片应全部铲除干净。

**7.6.5** 外粘型钢加固海工混凝土结构后,应按国家现行有关标准检测型钢表面防腐涂层,涂层质量应符合设计要求。

## 7.7 粘贴钢板加固检验验收

**7.7.1** 粘贴钢板前应对钢板粘结面进行检查,其中除锈等级应达到 St 3.0,粗糙度等级应达到  $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

**7.7.2** 钢板与混凝土之间的粘结质量可用锤击法或其他有效方法进行检查。按检查结果推定的有效粘贴面积不应小于总粘贴面积的 95%。

**7.7.3** 钢板与原构件混凝土间的正拉粘结强度应符合第 5.2 节规定的合格指标要求。

**7.7.4** 粘贴钢板加固可采用目测或用放大镜对接头进行外观检验,构件修复连接处应结合紧密,不得有缝隙、夹层或空腔。胶层厚度应按  $(2.5 \pm 0.5) \text{mm}$  控制。

**7.7.5** 粘贴钢板加固海工混凝土后,应按国家现行有关标准检测钢板表面防腐涂层,涂层质量应满足设计要求。

## 7.8 粘贴碳纤维加固检验验收

**7.8.1** 粘贴碳纤维加固可采用目测或用放大镜对接头进行外观检验,外观应平整且不得有裂纹、鼓泡。

**7.8.2** 碳纤维复合材与混凝土之间的粘结质量可用锤击法或其他有效方法进行检查。按检查结果确认的总有效粘结面积不应小于总粘结面积的 95%。

**7.8.3** 碳纤维复合材与基材混凝土的正拉粘结强度,必须进行见证抽样检验。在粘贴碳纤维织物加固工程中选择测点时,应避免受力的重要部位,其检验结果应符合第 5.2 节规定的合格指标要求。检验完毕后,应对纤维织物被切割处进行修补。

## 7.9 钢结构加固与修补检验验收

**7.9.1** 加固工程质量检测应符合现行国家标准《钢结构工程质量检测验收标准》(GB

50221)的有关规定。检测记录应包括发现缺陷和损伤的部位、特征描述、已采取的工程措施等。

**7.9.2** 钢结构加固工程的竣工验收,应在全部加固施工完毕后进行,当设有卸荷装置时,应在卸荷装置拆除后进行。

**7.9.3** 钢结构加固工程验收,除应符合第 7.1.3 条规定外,尚应提供下列文件:

- (1)设计交底文件;
- (2)可靠性鉴定报告及有关文件;
- (3)焊缝质量检验报告及无损探伤报告。

**7.9.4** 钢结构加固工程的验收,除应符合本规范的规定外,尚应符合现行国家标准《钢结构施工及验收规范》(GB 50205)的有关规定。

## 附录 A 修补材料性能试验方法

### A.1 立模浇筑混凝土性能试验

#### A.1.1 混凝土坍落流动度应按下列方法测定。

##### A.1.1.1 试验设备应满足下列要求：

- (1)坍落度筒满足现行行业标准《水运工程混凝土试验规程》(JTJ 270)的有关规定；
- (2)钢板尺寸为 1000 mm × 1000 mm, 厚度至少为 3 mm 且表面平整；
- (3)钢直尺最大量程不小于 700 mm, 最小刻度不大于 1 mm；
- (4)秒表测量精度不大于 0.1 s。

##### A.1.1.2 试验应按下列步骤进行：

- (1)用湿布擦拭坍落度筒内外表面和钢板表面, 将坍落度筒放在水平放置的钢板上；
- (2)在 2 min 内连续将混凝土填充到坍落度筒中, 并使混凝土均匀分布；
- (3)抹平混凝土上表面, 使其与坍落度筒的上边缘齐平, 然后在 2 ~ 3 s 内垂直向上提起坍落度筒；
- (4)采用秒表测定自坍落度筒提起开始至混凝土达到直径为 500 mm 时的坍落流动时间, 测定时间精确至 0.1 s；

- (5)当混凝土停止流动后, 测量混凝土最大直径和与其垂直方向的直径。

##### A.1.1.3 试验结果的处理应满足下列要求：

- (1)坍落流动度试验结果取两个垂直方向直径测值的算术平均值, 计算精确到 5 mm；
- (2)如果两个垂直方向的坍落流动度直径的差异超过 50 mm 时, 从同一批次的混凝土中另外取样重新进行测试。

#### A.1.2 混凝土 V 型仪流出时间应按下列方法测定。

##### A.1.2.1 试验设备应满足下列要求：

- (1)V 型仪包括带活门的钢制漏斗和漏斗支架；
- (2)钢制漏斗内表面平整光滑, 容积为 10 L, 形状和尺寸见图 A.1.2；
- (3)采用能够调整水平的可拆卸式漏斗支架；
- (4)漏斗卸料口设置可以即时开放的水密性阀门；

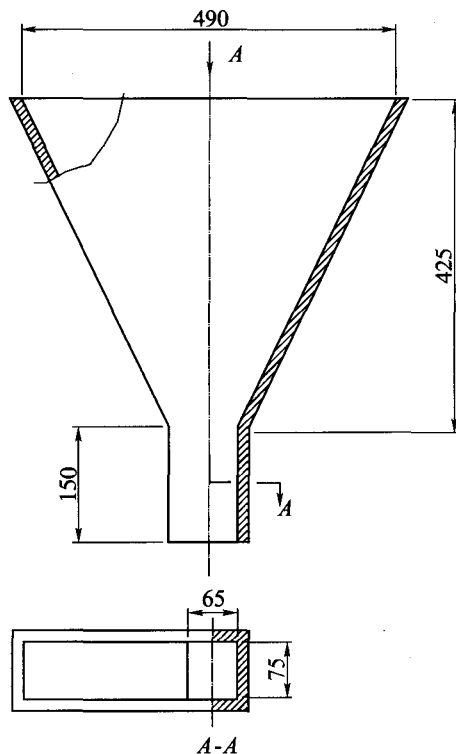


图 A.1.2 V 型仪漏斗尺寸示意图

(5) 秒表测量精度不大于 0.1s。

**A.1.2.2 试验应按下列步骤进行：**

- (1) 将漏斗垂直放置于漏斗支架上,用湿布擦拭漏斗内表面;
- (2) 将卸料容器放置在卸料口下方,关闭漏斗阀门;
- (3) 将 10L 混凝土试样轻轻倒入漏斗至达到漏斗的顶部,抹平混凝土表面;
- (4) 混凝土抹平后,在 10s 内打开阀门,用秒表测量混凝土完全流出漏斗所用的时间,记录精确到 0.1s,同时观察和记录流动及阻塞情况;

(5) 按照上述步骤,在 5 min 内使用不同试样进行 3 次混凝土完全流出漏斗时间测定。

**A.1.2.3 测试结果应取 3 次混凝土流过时间测定值的算术平均值,计算精确到 0.1s。**

**A.1.3 混凝土 L 型仪流动高度比值应按下列方法测定。**

**A.1.3.1 试验设备应满足下列要求：**

(1) L 型仪采用带滑动闸板的钢制装置,其形状和尺寸如图 A.1.3-1 所示;

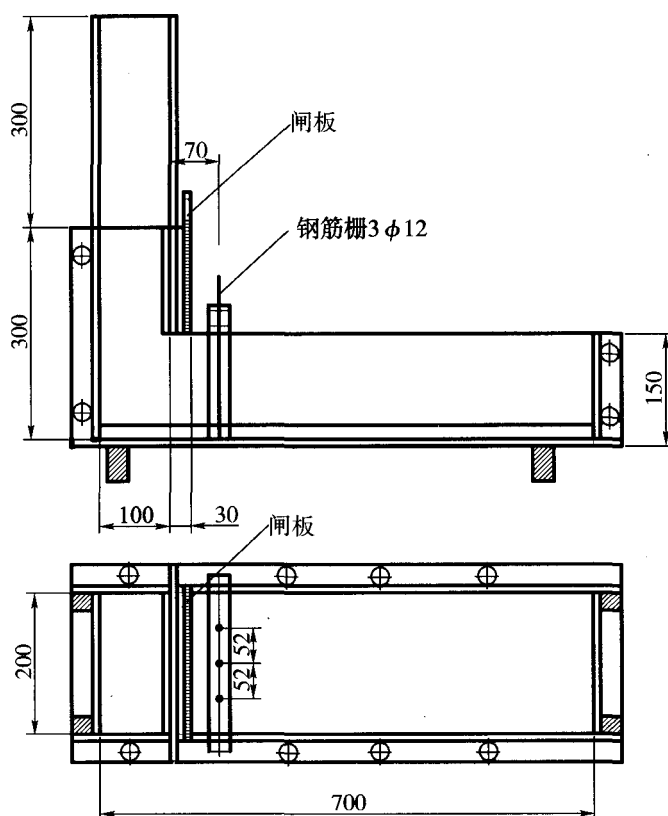


图 A.1.3-1 L 型仪箱体尺寸示意图

(2) 闸板的制造材料能够保证闸板在装填混凝土或者提起时不产生变形或损坏;

(3) L 型箱槽的边缘设置精度为 1mm 刻度尺;

(4) 秒表测量精度不大于 0.1s。

**A.1.3.2 试验应按下列步骤进行：**

(1) 将 L 型箱测试装置放置在水平面上,用湿布擦拭装置的内表面;

- (2) 关上闸板,将混凝土试样装入 L 型箱内;
- (3) 抹平混凝土表面,抹平后立刻提起闸板;
- (4) 当混凝土流动停止时,分别测量混凝土流出端高度和流动末端高度(图 A.1.3-2),精确至 1mm。

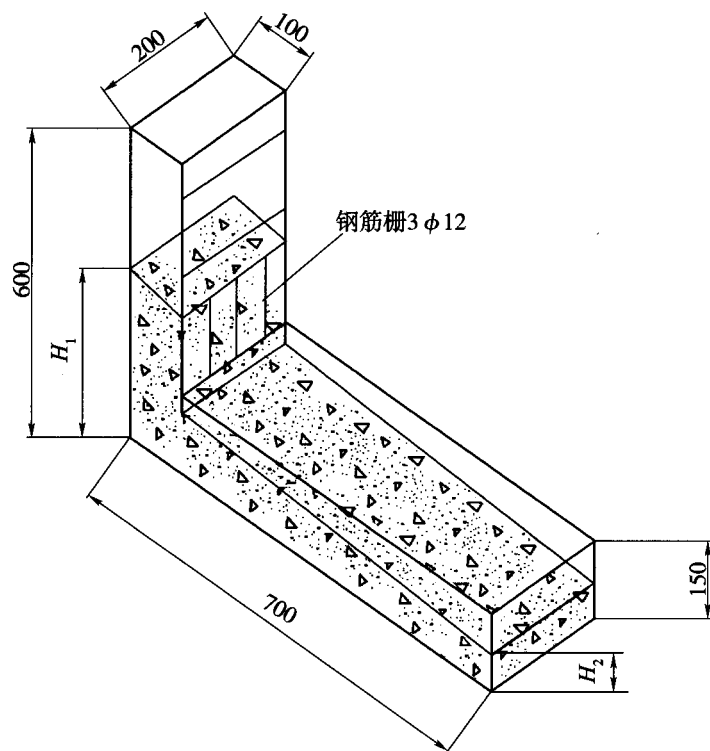


图 A.1.3-2 混凝土 L 型仪试验

**A.1.3.3 混凝土 L 型仪流动高度比值应按下列式计算:**

$$D = \frac{H_2}{H_1} \quad (\text{A.1.3})$$

式中  $D$ ——混凝土 L 型仪流动高度比值,计算精确至 0.1;

$H_1$ ——混凝土流出端高度(mm);

$H_2$ ——混凝土流动末端高度(mm)。

**A.1.4 混凝土粘结强度应按下列方法测定。**

**A.1.4.1 试验设备应满足下列要求:**

- (1) 压力试验机示值的相对误差不大于 2%,其量程的选择满足试件的预期破坏荷载值为该机标定的满负荷 20% ~ 80% 的要求;
- (2) 试验机上、下压板有足够的刚度,其中上压板带有球形支座,使压板与试件接触均衡;
- (3) 加压垫板尺寸比试件承压面稍大,表面平整度在 0.02mm 以内;
- (4) 垫条采用直径为 150mm 的钢制弧形垫条,其截面尺寸如图 A.1.4 所示;
- (5) 垫层采用木质三合板或硬质纤维板,宽度 15 ~ 20mm,厚度 3 ~ 4mm,长度不小于试件边长,垫层不重复使用;

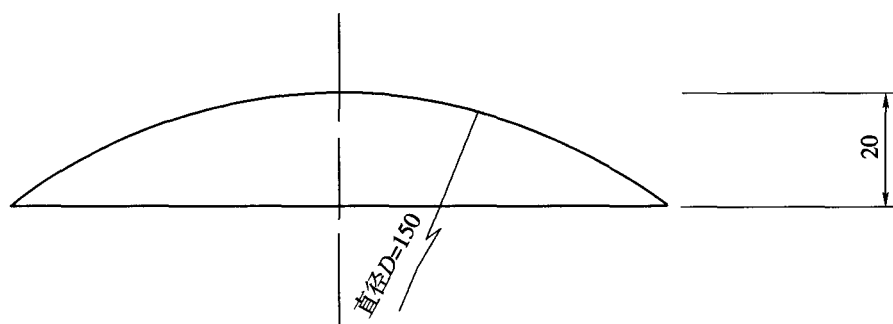


图 A.1.4 垫条截面尺寸(mm)

(6) 试模尺寸为 150mm × 150mm × 150mm。

#### A.1.4.2 试验应按下列步骤进行:

- (1) 成型比原构件混凝土强度等级提高一级且抗压强度不小于 30MPa 的 150mm × 150mm × 150mm 立方体试件,以 3 个试件为一组,室温潮湿养护 28d;
- (2) 将用于粘结试验的立方体试件中间位置劈裂成两半;
- (3) 选择劈裂面比较平整的一半试件,清除浮灰和其他不牢附着物;
- (4) 将一半试件置于立方体试模内,在劈裂面上涂上界面粘结材料,然后在试模的另一半成型修补用的混凝土,将试件置于温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  的环境中,潮湿养护 28d;
- (5) 试件从养护地点取出后擦试干净,测量尺寸,检查外观,在新老混凝土交界面部位划线定出试验劈裂面的位置;
- (6) 将试件放在压力试验机下压板的中心位置,在上、下压板与试件之间垫以圆弧形垫条及垫层各一条,垫条方向与成型时的顶面垂直,开动试验机,当上压板与试件接近时,调整球座使接触均衡;
- (7) 以 0.04 ~ 0.06MPa/s 的速度连续而均匀地加荷载,当试件接近破坏时停止调整油门直至破坏。

#### A.1.4.3 试验结果计算应满足下列要求:

(1) 修补混凝土粘结强度按下式计算:

$$f_{no} = \frac{2P}{\pi A} \quad (\text{A.1.4})$$

式中  $f_{no}$ ——修补混凝土粘结强度(MPa),计算精确至 0.1MPa;

$P$ ——破坏载荷(N);

$A$ ——试件劈裂面面积( $\text{mm}^2$ )。

(2) 粘结强度值取该组 3 个试件强度的算术平均值。当 3 个试件强度中的最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时,取中间值;当 3 个试件强度中的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15% 时,该组试验结果作废。

## A.2 喷射混凝土抗压强度试验

### A.2.1 试验设备应满足下列要求:

(1) 压力试验机示值的相对误差不大于 2%, 其量程的选择满足试件的预期破坏荷载值为该机标定的满负荷 20% ~ 80% 的要求;

(2) 试验机上、下压板有足够的刚度, 其中上压板带有球形支座, 使压板与试件接触均衡;

(3) 加压垫板尺寸比试件承压面稍大, 表面平整度在 0.02mm 以内;

(4) 轻便型混凝土取芯机和人造金刚石薄壁钻头, 钻头直径 100mm;

(5) 模板尺寸为 500mm × 400mm × 120mm (长 × 宽 × 高)。

#### A.2.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 喷射混凝土试件与实际工程的原材料、配合比、喷射条件相同, 试块从现场喷射的混凝土板件中钻取;

(2) 在喷射作业现场, 将模板喷筑面朝下倾斜与水平面夹角约 80°;

(3) 先在模板外试喷, 待操作正常后, 将喷头移至模板内从下往上逐层喷射混凝土;

(4) 刮平模板上混凝土表面, 将混凝土板移到试验室, 24h 后脱模;

(5) 在温度为 (20 ± 2) °C 的环境中潮湿养护至规定龄期, 钻取直径 100mm 的芯样, 将芯样端面切割并磨平, 端面不平整度不大于 0.05mm, 垂直度不大于 2°;

(6) 试验前将试件擦拭干净, 测量尺寸并检查外观, 试件尺寸测量精确至 1mm;

(7) 试件上、下端面的中心对准上下压板的中心, 试验机压板和试件受压面吻合;

(8) 试验时连续均匀地加荷直至试件破坏, 加荷速度根据试件强度确定, 强度等级小于 C30 时取 0.3 ~ 0.5MPa/s, C30 及以上时取 0.5 ~ 0.8MPa/s。

#### A.2.3 试验结果计算应符合下列规定。

##### A.2.3.1 喷射混凝土抗压强度应按下列式计算:

$$f_{cu} = 1.273 \frac{P}{d^2} \quad (\text{A.2.3})$$

式中  $f_{cu}$ ——混凝土抗压强度 (MPa), 计算精确至 0.1MPa;

$P$ ——破坏荷载 (N);

$d$ ——芯样试件直径 (mm)。

A.2.3.2 抗压强度值应取该组 3 个试件强度的算术平均值。当 3 个试件强度中的最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时, 应取中间值; 当 3 个试件强度中的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15% 时, 该组试验结果应作废。

### A.3 水下不分散混凝土性能试验

#### A.3.1 水下不分散混凝土坍落扩展度应按下列方法测定。

##### A.3.1.1 试验设备应满足下列要求:

(1) 坍落度筒满足现行行业标准《水运工程混凝土试验规程》(JTJ 270) 的有关规定;

(2) 捣棒直径 16mm, 长度 650mm 的金属棒, 一端做成弹头状;

(3) 钢板尺寸为 1000mm × 1000mm, 厚度至少为 3mm 且表面平整;

(4) 钢直尺最大量程不小于 700mm, 最小刻度不大于 1mm;

(5) 秒表测量精度不大于 0.1s。

#### A.3.1.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 用湿布擦拭坍落度筒内外表面和钢板表面,将坍落度筒放在水平放置的钢板上;  
(2) 在拌和均匀的混凝土拌合物中取出试样,尽快地分 3 层均匀地装入坍落度筒中,使捣实后每层高度约为筒高的 1/3 左右;

(3) 每装 1 层,用捣棒在混凝土全部截面积上均匀插捣 25 次,插捣沿螺旋线由边缘逐渐向中心进行,插捣近边缘混凝土时捣棒可以稍稍倾斜,插捣底层时捣棒贯穿至底部,插捣第二层和顶层时捣棒插透本层至下层表面为止;

(4) 3 层捣完后抹平混凝土上表面,使其与坍落度筒的上边缘齐平,然后在 5 ~ 10s 内垂直向上提起坍落度筒;

(5) 从开始装料到提起坍落度筒的整个过程不间断地进行,并在 150s 内完成;

(6) 采用秒表测定自坍落度筒提起开始至 30s 时,测量混凝土坍落扩展最大直径和与其垂直方向的直径。

#### A.3.1.3 试验结果的处理应满足下列要求:

(1) 坍落扩展度试验结果取两个垂直方向直径测值的算术平均值,计算精确到 5mm;

(2) 如果两个垂直方向的坍落扩展度直径的差异超过 50mm 时,从同一批次的混凝土中另外取样重新进行测试。

#### A.3.2 水下不分散混凝土 30min 坍落扩展度损失应按下列方法测定。

##### A.3.2.1 试验设备应符合第 A.3.1.1 款的规定。

##### A.3.2.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 坍落扩展度的测定按第 A.3.1.2 款进行;

(2) 拌合物的用量不少于 20L;

(3) 将出机后的混凝土拌合物在铁板上用人工拌两次均匀后,立即分成两份,一份装入密封的样品桶内,另一份立即测定坍落扩展度;

(4) 经过 30min 时倒出样品桶内混凝土,翻拌三次均匀后立即测定坍落扩展度。

##### A.3.2.3 混凝土 30min 坍落扩展度损失应按下列式计算:

$$SL = SL_0 - SL_n \quad (\text{A.3.2})$$

式中  $SL$ ——混凝土坍落扩展度损失(mm);

$SL_0$ ——混凝土拌合物刚出机后的坍落扩展度(mm);

$SL_n$ ——混凝土拌合物刚出机后停放 30min 时的坍落扩展度(mm)。

#### A.3.3 水下不分散混凝土试件应按下列方法成型。

##### A.3.3.1 试验设施应满足下列要求:

(1) 试模尺寸取 150mm × 150mm × 150mm;

(2) 标准养护室控制温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度不小于 95%,在没有标准养护室时,试件允许在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  的静水中养护,并在报告中注明;

(3) 水箱高度能保证试验过程中试模顶面以上水深维持 150mm,水箱长度和宽度根据试验需要确定。

### A.3.3.2 水下成型试件应按下列步骤进行:

(1) 将水下成型用的试模置于水箱中, 将水加至该试模顶面以上水深 150mm, 保持其水温在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;

(2) 用手铲将水下不分散混凝土拌和物从水面处向水中落下, 浇入试模中, 每次投料量为试模容积的  $1/10$  左右, 连续投料至超出试模表面, 每个试模的投料时间为  $0.5 \sim 1\text{min}$ , 水下浇注方法如图 A.3.3 所示;

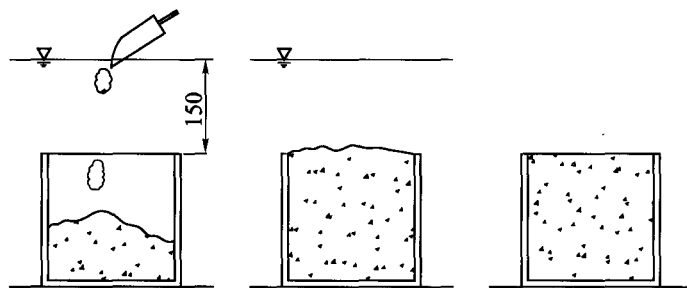


图 A.3.3 水下不分散混凝土水下浇注成型示意图

(3) 将试模从水中取出, 静置  $5 \sim 10\text{min}$ ;

(4) 用木锤轻敲试模的两个侧面促进排水, 然后将其放回水中;

(5) 超出试模的混凝土在初凝之前用抹刀抹平, 放置 2d 拆模, 在水中进行标准养护, 试件之间保持一定距离, 每一龄期以 3 个试件为一组;

(6) 在达到预定龄期时, 从水中将试件取出, 进行测试。

### A.3.3.3 陆上成型试件应按下列步骤进行:

(1) 将陆上成型用的试模置于空气中, 室内温度应保持在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;

(2) 用手铲将水下不分散混凝土拌和物连续浇入试模中, 连续投料至超出试模表面, 每个试模的投料时间为  $0.5 \sim 1\text{min}$ ;

(3) 超出试模的混凝土在初凝之前用抹刀抹平, 放置 2d 拆模, 在水中进行标准养护, 试件之间应保持一定距离, 每一龄期以 3 个试件为一组;

(4) 在达到预定龄期时, 从水中取出试件测试。

### A.3.4 水下不分散混凝土水陆抗压强度比应按下列方法测定。

#### A.3.4.1 试验设备应满足下列要求:

(1) 压力试验机的试验示值误差不大于标准值的  $\pm 2\%$ ;

(2) 加压垫板尺寸比试件承压面稍大, 表面平整度在  $0.02\text{mm}$  以内;

(3) 试模尺寸取  $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 。

#### A.3.4.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 试件在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  的水中养护至规定龄期时, 从水中取出后用湿布覆盖防止干燥;

(2) 试验前将试件擦拭干净, 测量尺寸并检查外观, 试件尺寸测量精确至  $1\text{mm}$ ;

(3) 试件上、下端面的中心对准上下压板的中心, 试验机压板和试件受压面吻合;

(4) 试验时连续均匀地加荷直至试件破坏, 加荷速度根据试件强度确定, 强度等级小于 C30 时取  $0.3 \sim 0.5\text{MPa/s}$ , C30 及以上时取  $0.5 \sim 0.8\text{MPa/s}$ 。

**A.3.4.3 试验结果计算应满足下列要求:**

(1) 混凝土抗压强度按下式计算:

$$f_{cu} = \frac{P}{A} \quad (\text{A.3.4})$$

式中  $f_{cu}$ ——混凝土抗压强度(MPa), 计算精确至 0.1MPa; $P$ ——破坏荷载(kN); $A$ ——试件承压面积( $\text{mm}^2$ )。

(2) 抗压强度值取该组 3 个试件强度的算术平均值。当 3 个试件强度中的最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时, 取中间值; 当 3 个试件强度中的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15% 时, 该组试验结果作废;

(3) 水陆抗压强度比为水下成型试件抗压强度与陆上成型试件抗压强度之比值, 计算结果精确到 1%。

**A.4 修补砂浆材料性能试验****A.4.1 修补砂浆抗压强度和抗折强度应按下列方法测定。****A.4.1.1 试验设备应满足下列要求:**

(1) 抗压试验机的最大量程不超过 300kN, 抗压夹具符合现行行业标准《40mm × 40mm 水泥抗压夹具》(JC/T 683) 的有关规定;

(2) 采用可装拆的 40mm × 40mm × 160mm 三联试模, 试模由隔板、端板、底座等组成, 试模符合现行国家标准《水泥物理检验仪器—胶砂试模》(GB 3350.5) 的有关规定。

**A.4.1.2 试验应按下列步骤进行:**

(1) 成型 3 条 40mm × 40mm × 160mm 试件, 24h 后拆模, 将试件置于温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $(65 \pm 5)\%$  的恒温恒湿室, 养护至 13d 时进行抗折强度试验;

(2) 抗折强度试验后的 6 个断块在抗压试验机进行抗压强度试验, 试件受压面积为 40mm × 40mm, 压力机加载速度控制在  $(5 \pm 0.5)$  kN/s 的范围内。

**A.4.1.3 试验结果计算应满足下列要求:**

(1) 抗折强度按下式计算:

$$R_f = \frac{3P \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (\text{A.4.1-1})$$

式中  $R_f$ ——抗折强度(MPa); $P$ ——破坏载荷(N); $L$ ——支撑圆柱中心距(mm); $b$ ——试件断面宽度(mm); $h$ ——试件断面高度(mm)。

(2) 抗压强度按下式计算:

$$R_c = \frac{P}{S}$$

(A.4.1-2)

式中  $R_c$ ——抗压强度(MPa);  
 $P$ ——破坏载荷(N);  
 $S$ ——受压面积(mm<sup>2</sup>)。

A.4.1.4 试验结果的评定应满足下列要求:

- (1)取同组 3 条抗折试件的算术平均值作为抗折强度试验结果,当试件中有 1 个测值超过平均值的 ±10% 时,删除该值,按余下两个测定值的算术平均值作为抗折强度测定结果,抗折强度计算精确至 0.1MPa;
- (2)取同组 6 个抗压试件的算术平均值为抗压强度试验结果,当试件中有 1 个测值超过平均值的 ±10% 时,删除该值,按余下 5 个测定值的算术平均值作为抗压强度测定结果,抗压强度计算精确至 0.1MPa;当其余 5 个中再有超过它们平均值的 ±10% 时,则该组试验结果作废。

A.4.2 修补砂浆抗拉强度应按下列方法测定。

A.4.2.1 试验设备应满足下列要求:

- (1)试验机采用最大量程不超过 20kN 的抗拉试验机或万能试验机;
- (2)试模为“8”字形钢试模(图 A.4.2-1),其尺寸和允许误差满足表 A.4.2 的要求;

试模尺寸与允许偏差表 A.4.2

| 符号       | A    | B    | C    | D    |
|----------|------|------|------|------|
| 尺寸(mm)   | 22.2 | 52.0 | 78.0 | 22.5 |
| 允许偏差(mm) | ±0.1 | ±0.4 | ±0.4 | ±0.1 |

(3)采用“8”字形抗拉试验夹具(图 A.4.2-2)。

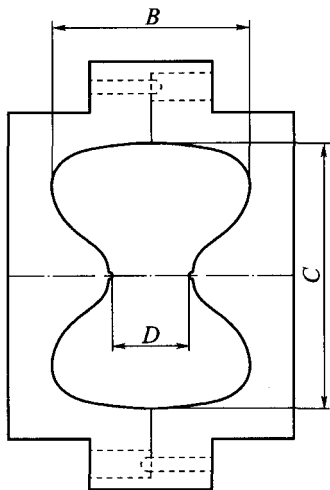


图 A.4.2-1 “8”字形钢试模示意图

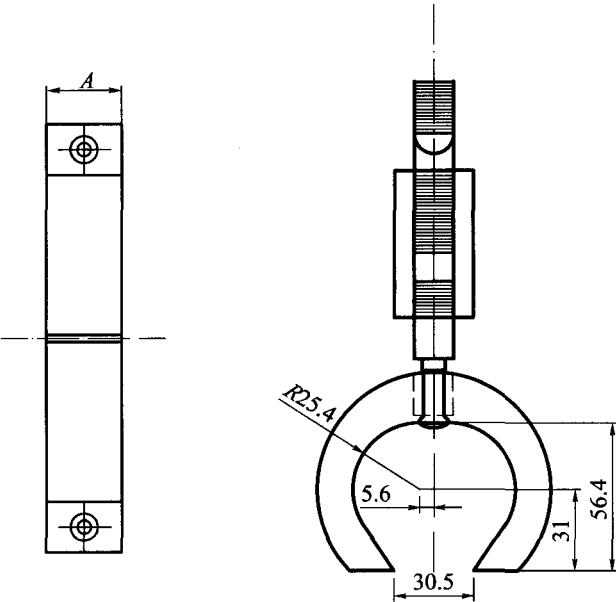


图 A.4.2-2 “8”字形抗拉试验夹具示意图

**A.4.2.2 试验应按下列步骤进行:**

(1) 每组成型 3 个“8”字形试件, 24h 后拆模, 将试件置于温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $(65 \pm 5)\%$  的恒温恒湿室, 养护 13d;

(2) 将夹具安装在抗折试验机上对“8”字形试件进行抗拉强度测定。

**A.4.2.3 试验结果计算应满足下列要求:**

(1) 抗拉强度按下式计算:

$$f_t = \frac{P}{S} \quad (\text{A. 4. 2})$$

式中  $f_t$ ——抗拉强度(MPa);

$P$ ——破坏载荷(N);

$S$ ——“8”字形试件破坏断面的面积( $\text{mm}^2$ )。

(2) 抗拉强度试验结果取同组 3 个试件的算术平均值, 计算结果精确至 0.1MPa。

**A.4.3 修补砂浆粘结抗拉强度应按下列方法测定。****A.4.3.1 试验设备应符合第 A.4.2.1 款的规定。****A.4.3.2 试验应按下列步骤进行:**

(1) 成型抗压强度不小于 40MPa 的“8”字形水泥砂浆试件, 室温潮湿养护 28d;

(2) 将用于粘结试验的“8”字形水泥砂浆试件中间拉断或锯断, 勿损伤端面;

(3) 将“8”字形水泥砂浆试件的一半置于“8”字形钢试模内, 在断裂面上涂上界面粘结材料, 然后在“8”字形钢试模的另一半浇注修补砂浆, 充分压实、抹平, 将试件置于温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、潮湿养护 28d;

(4) 在抗折试验机上安装夹具, 对“8”字形试件进行抗拉强度测定。

**A.4.3.3 试验结果计算应满足下列要求:**

(1) 抗拉强度按下式计算:

$$f_t = \frac{P}{S} \quad (\text{A. 4. 3})$$

式中  $f_t$ ——抗拉强度(MPa);

$P$ ——破坏载荷(N);

$S$ ——“8”字形试件破坏断面的面积( $\text{mm}^2$ )。

(2) 抗拉强度试验结果取同组 3 个试件的算术平均值, 计算精确至 0.1MPa。

**A.4.4 修补砂浆干缩值应按下列方法测定。****A.4.4.1 试验设备应满足下列要求:**

(1) 测长仪器用弓形螺旋测微计、比长仪或立式砂浆干缩仪, 测量精度为 0.01mm;

(2) 测头由直径 5.0mm 圆珠的不锈钢制成;

(3) 恒温养护箱温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $(65 \pm 5)\%$ ;

(4) 恒温水槽水温为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 能进行砂浆试件的养护;

(5) 捣棒直径 9mm, 长 300mm, 顶端呈半球状的钢棒;

(6) 试模为 40mm × 40mm × 160mm 的三联试模, 试模两端模板正中心有半球形凹槽, 其半径为 2.5mm。

#### A.4.4.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 擦净试模, 在其内壁涂一薄层矿物油, 将拌好的砂浆分两层装入, 两层厚度大致相等, 每层插捣次 10 次, 在浇捣完第一层后, 埋设试件两端的测头, 再浇第二层砂浆, 捣实并抹平表面;

(2) 试件成型后放在温度  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度不小于 80% 的养护箱中, 48h 后拆模, 将试件置于温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  的水中养护 5d;

(3) 取出试件擦去表面浮水, 测量试件的基准长度;

(4) 将试件放在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $(65 \pm 5)\%$  的恒温养护箱中养护至规定龄期, 测量试件养护后的长度。

#### A.4.4.3 试验结果计算应满足下列要求:

(1) 修补砂浆干缩值按下式计算:

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \quad (\text{A.4.4})$$

式中  $\varepsilon_t$ ——修补砂浆干缩值 ( $\mu\varepsilon$ );

$L_0$ ——试件的基准长度 (mm);

$L_t$ ——试件养护至规定龄期的长度 (mm);

$\Delta$ ——金属测头的长度 (mm)。

(2) 修补砂浆干缩值取同组 3 个试件的算术平均值, 计算精确至小数点后 3 位。

### A.5 修补粘结材料与基材的正拉粘结强度试验

#### A.5.1 试验设备应满足下列要求:

(1) 拉力试验机示值的相对误差不大于 1%, 其量程的选择应满足试样的预期破坏载荷值为该机标定的满负荷 20% ~ 80% 的要求;

(2) 试验机夹持器的构造满足试样在试验过程中保持垂直固定, 不产生偏心、剪切和扭转作用的要求;

(3) 试件夹应由带拉杆的钢夹套与带螺杆的钢标准块构成, 其形状及主要尺寸参照图 A.5.1 采用。

#### A.5.2 试件应符合下列规定。

A.5.2.1 试件应由混凝土试块、粘结材料和钢标准块相互粘合而成, 如图 A.5.2-1 所示。

#### A.5.2.2 试件的制备应满足下列要求:

(1) 受检粘结材料按规定的抽检规则进行取样, 按产品使用说明书规定的工艺要求进行配制和使用;

(2) 混凝土试块的尺寸为 100mm × 100mm × 100mm, 试件浇注后经 28d 标准养护, 其

混凝土强度比待修补构件高一等级。

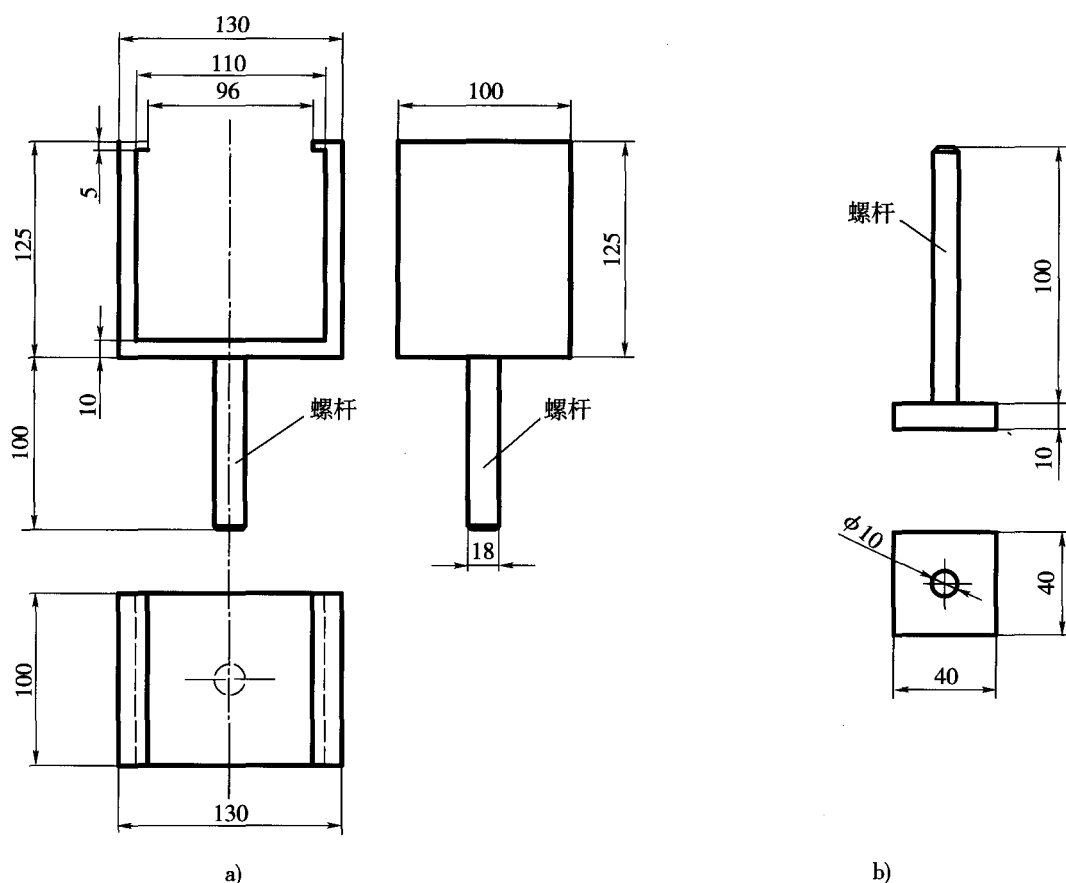
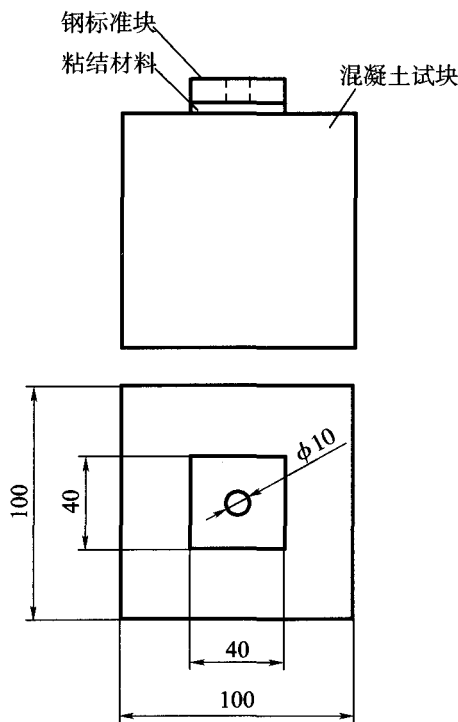


图 A.5.1 试件夹具及钢标准块尺寸(mm)

a)带拉杆钢夹套;b)带螺栓钢标准块

### A.5.2.3 试件的处理、粘结、浇注和养护应满足下列要求:

- (1)对混凝土粘结表面进行打磨,除去表面浮浆等不牢物;
- (2)对需要进行潮湿表面粘结力试验的试件,在混凝土表面打磨处理完成后,浸泡在清水中 24h,从水中捞起,用潮湿布抹除粘结表面的水滴,然后进行粘结材料的粘贴,粘贴完毕后置于养护室中固化 7d,养护室温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度不小于 85%;
- (3)若为多层粘结,在规定的间隔内取出试件,用潮湿布抹除粘结表面的水滴,进行后一层粘贴,最后一层粘结材料粘贴后,进行 7d 养护、固化;
- (4)用快固化的高强胶粘剂将钢标准块粘贴在试件表面;
- (5)每一道粘贴作业均检查对中情况;
- (6)钢标准块粘贴固化完成后,沿着钢标准块的 4 个边线进行切割,切割深度至基材混凝土;
- (7)试件安装在钢夹套内,拧上传力螺杆,安装完成后各组成部分的对中标线在同一轴线上,如图 A.5.2-2所示;
- (8)常规试验的试样数量每组不少于 5 个。



A.5.2-1 正拉粘结强度试验的试件(mm)

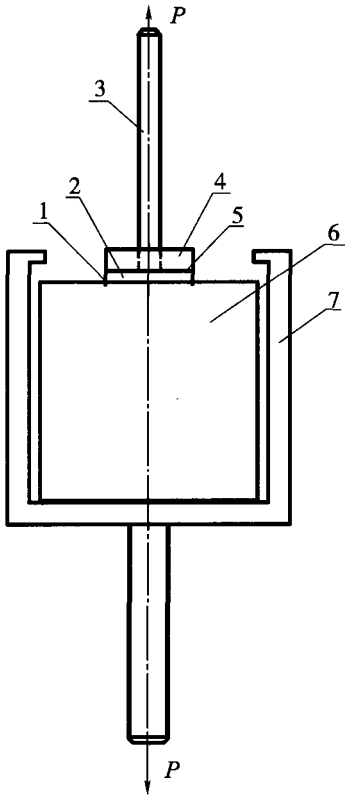


图 A.5.2-2 试件组装

1-混凝土试块切缝;2-受检粘结材料;3-传力螺杆;4-钢标准块;5-快固化高强度胶粘剂;6-混凝土试块;7-钢夹套

A.5.3 试验环境应满足下列要求：

- (1)干表面试件试验环境温度为(23±2)℃,相对湿度为45%~55%；
- (2)湿表面试件试验环境温度为(23±2)℃,相对湿度不小于85%。

A.5.4 试验应按下列步骤进行：

- (1)将安装在夹具内的试件置于试验机上下夹持器之间,并调整至对中状态后夹紧；
- (2)以均匀的速度加载,并控制试件在1~1.5min内破坏；
- (3)记录试件破坏时的荷载值及破坏形式。

A.5.5 试验结果计算应符合下列规定。

A.5.5.1 正拉粘结强度应按式计算：

$$f_t = \frac{P}{A} \tag{A.5.5}$$

式中  $f_t$ ——正拉粘结强度(MPa)；  
 $P$ ——破坏荷载(N)；  
 $A$ ——钢标准块与受检粘结材料的粘合面面积(mm<sup>2</sup>)。

A.5.5.2 试件破坏应区分为下列形式：

- (1)内聚破坏,即混凝土试件内破坏且破坏面积占粘合面面积85%及以上；

- (2) 层间破坏,即胶粘剂与混凝土间的破坏或内聚破坏面积占粘合面面积 15% 以下;
- (3) 粘结失效,即钢标准块与检验用高强、快固化胶粘剂之间的界面破坏。

**A.5.5.3 试验结果的评定应满足下列要求:**

- (1) 同组每个试件均为内聚破坏或层间破坏时,剔除最大和最小值,取余下 3 个值的算术平均值作为粘结强度测定结果;
- (2) 同组不少于 3 个试件为内聚破坏或层间破坏时,计算内聚破坏或层间破坏的平均值,当试件中有 1 个测值超过该组平均值的  $\pm 15\%$  时,删除该值,按余下测定值的算术平均值作为粘结强度测定结果;
- (3) 同组试件少于 3 个试件为内聚破坏或层间破坏时,此组试验结果作废,重新取样试验。

## 附录 B 混凝土结构破损修补方法

### B.1 裂缝封闭修补

#### B.1.1 裂缝封闭修补应满足下列要求：

- (1)沿裂缝走向骑缝凿深度不小于 30mm 和宽度不小于 20mm 的 U 形凹槽；
- (2)清除槽内松散层、油污、浮灰和其他不牢附着物；
- (3)准确称量、拌制封缝材料，一次或分次压入 U 形槽内使其略高出槽面，并抹平修整。

### B.2 裂缝灌浆修补

#### B.2.1 裂缝灌浆修补应满足下列要求：

- (1)清除混凝土裂缝表面松散物和缝内异物；
- (2)按 300 ~ 1000mm 间距设置灌浆嘴，裂缝的端部、裂缝交叉处及贯穿裂缝的两个侧面均埋设灌浆嘴；
- (3)埋设灌浆嘴使用钻孔法沿缝的两侧斜向成孔，孔深交叉穿过裂缝，并使灌浆嘴密封胶垫有足够的埋置深度，确保密封效果；
- (4)按第 B.1.1 条对裂缝进行封缝处理后，进行压气检查灌浆嘴的连通和封闭效果；
- (5)按试验的配比准确称量配制灌浆液，根据灌浆液的固化时间和灌浆速度随配随用；
- (6)按竖向缝自下而上、水平缝自一端向另一端的顺序进行压力灌浆，灌浆压力为 0.2 ~ 0.8MPa；
- (7)待浆液固化后，拆除灌浆嘴，并对混凝土表面进行修整。

### B.3 聚合物水泥砂浆断面修补

#### B.3.1 使用聚合物水泥砂浆进行断面修补应满足下列要求：

- (1)凿除破损部位松散混凝土至露出坚硬部分，用压力不小于 20MPa 的高压淡水清除混凝土表面浮灰、松散物和其他不牢附着物；
- (2)准确称量和配制混凝土界面粘结材料，按规定用量施涂于待修补的混凝土表面；
- (3)准确称量和配制聚合物水泥砂浆，在界面粘接材料未固化前一次或分次刮抹于混凝土表面，至恢复缺损处断面或达到规定的保护层厚度，并抹平修整；
- (4)根据聚合物水泥砂浆的性能要求，按规定的方式和时间进行养护。

## B.4 立模浇筑混凝土断面修补

### B.4.1 使用立模浇筑混凝土法进行断面修补时应满足下列要求:

- (1) 凿除破损部位松散混凝土至露出坚硬部分,用压力不小于 20MPa 的高压淡水清除混凝土表面浮灰、松散物和其他不牢附着物;
- (2) 按第 4.2.2 条的规定配制混凝土;
- (3) 混凝土的称量、搅拌、运输、浇筑和养护按国家现行有关标准的规定执行;
- (4) 立模浇筑混凝土在常温下采用淡水潮湿养护 15d,气温较高时适当缩短潮湿养护时间,气温较低时适当延长潮湿养护时间。

## B.5 喷射混凝土断面修补

### B.5.1 使用喷射混凝土法进行断面修补时应满足下列要求:

- (1) 凿除破损部位松散混凝土至露出坚硬部分,用压力不小于 20MPa 的高压淡水清除混凝土表面浮灰、松散物和其他不牢附着物;
- (2) 准确称量和配制混凝土界面粘结材料,按规定用量施涂于待修补的混凝土表面;
- (3) 按第 4.2.2 条的规定配制喷射混凝土,并于界面粘接材料未固化前喷补;
- (4) 喷射混凝土时先喷底面,后喷侧面,并分层喷补,第一层将钢筋覆盖住,第二层再喷至设计断面,喷射轨迹为直线,自梁一端向另一端推进,喷射时将钢筋周围空间喷实,并及时清除滞留的回弹砂浆;
- (5) 喷射过程中控制好水胶比,喷射混凝土密实均匀、表面明亮,无流浆、起砂和露石现象;
- (6) 掌握好喷射角度、喷射距离、风压和水压等,喷射角度通常为  $90^\circ$ ,喷射距离为 0.8 ~ 1.2m,水压为 0.3 ~ 0.4MPa;
- (7) 在修补喷射混凝土喷补完成后 2h 即开始喷雾养护,并保持湿润,24h 后用喷水养护,潮湿养护不少于 7d;
- (8) 喷射混凝土完成后及时进行外观检查,喷层外观密实均匀,无裂缝和孔洞,用锤击无哑声。

## B.6 水下构件破损修补

### B.6.1 对处于水下部位构件的破损修补应满足下列要求:

- (1) 水下凿除局部破损部位表层海生物、松散混凝土和其他不牢附着物至露出坚硬部分;
- (2) 用压力不小于 20MPa 的高压淡水冲洗待修复混凝土表面;
- (3) 对截面不大的桩、柱等裂缝和局部破损,采用水下包覆层修补;
- (4) 对构件大面积缺损或截面较大难以包覆构件的裂缝和局部破损,采用浇筑水下不分散混凝土的方法修补;
- (5) 采用水下混凝土修补时,在混凝土破损部位一定范围支立模板,然后采用导管法或料斗法浇筑水下不分散混凝土。

## 附录 C 混凝土结构电化学脱盐处理方法

### C.1 电化学脱盐保护系统的设计

**C.1.1** 电化学脱盐设计前应进行详细的调查和检测,调查和检测应包括下列内容:

(1)潮汐、温度、湿度、海水中氯离子含量、pH 值、水污染情况和港口水工建筑物周边其他侵蚀介质等环境资料;

(2)混凝土结构型式、构件所处位置、外形尺寸、钢筋配筋情况、混凝土保护层厚度、钢筋电连接等结构和构造资料;

(3)混凝土劣化状况、碳化深度、氯离子含量、电阻率、含水率和钢筋半电池电位等钢筋混凝土资料。

**C.1.2** 电化学脱盐保护系统设计应根据混凝土中氯离子浓度及其分布、目标使用年限进行。

**C.1.3** 电化学脱盐处理后,混凝土内水溶氯离子含量占水泥砂浆质量比应低于 0.1% 或使钢筋全面恢复钝化。

**C.1.4** 根据构件的具体情况,电化学脱盐保护系统应划分为若干电化学脱盐单元,并进行单独控制。脱盐单元内钢筋应成为电连接整体,连接电阻不应大于  $1.0\Omega$ ,且与辅助阳极之间在任何情况下不应存在短路。最小保护层厚度不宜小于 30mm。

**C.1.5** 电流密度值相对于表层钢筋面积宜为  $1.0 \sim 2.0\text{A}/\text{m}^2$ ,每平方米电量宜为 1000 ~ 1500C。

**C.1.6** 各脱盐单元的电流可按式计算:

$$I = i \cdot S \quad (\text{C.1.6})$$

式中  $I$ ——脱盐单元的电流(A);

$i$ ——脱盐单元内所选用的电流密度( $\text{A}/\text{m}^2$ );

$S$ ——脱盐单元内表层钢筋面积( $\text{m}^2$ )。

**C.1.7** 电化学脱盐保护系统应由直流电源、辅助阳极系统、电缆、监测与控制系统等组成,各组成部分应符合下列规定。

**C.1.7.1** 直流电源应满足下列要求:

(1)直流电源技术性能稳定可靠、环境适应性强,其外壳采用防干扰的金属外壳,并进行必要的防腐蚀处理;

(2)直流电源的输出电流、输出电压根据使用条件、阳极类型、钢筋保护所需电流和回路电阻等计算确定;

- (3) 直流输出不超过 50V, 波动量不超过 100mV/ms, 最小频率 100Hz;
- (4) 直流输出从零到满量程输出连续可调, 电源接线柱标识明确;
- (5) 直流电源布置在通风、干燥的环境中, 并根据电源台数、脱盐单元的划分情况、维护管理、经济等因素确定, 其安全措施符合电器设备的安全技术要求。

#### C.1.7.2 辅助阳极系统应满足下列要求:

- (1) 辅助阳极采用网状阳极, 在脱盐期间具有足够发射电流和对混凝土提供均匀电流的能力, 并满足阳极使用寿命要求;
- (2) 电解质材料根据具体情况选用饮用水、饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、0.1M LiOH 或 0.1M  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  等, 当钢筋周围混凝土中初始氯离子含量大于 0.35% 时在电解质中加入适量阳离子型阻锈剂;
- (3) 根据脱盐单元的具体情况选择辅助阳极的布置方式和电解质溶液的维持材料, 主要类型见表 C.1.7。

辅助阳极系统的安装固定和电解质溶液的保存方式

表 C.1.7

| 名称         | 辅助阳极的布置方式                   | 电解质溶液<br>维持材料 | 优 点                                    | 缺 点                  |
|------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------------|----------------------|
| 纤维<br>方式   | 在阳极的周围喷覆纤维材料                | 纤维            | ①即使混凝土表面形状复杂, 也可施工;<br>②水平面与垂直面, 都可以施工 | 电解质溶液的蒸发和泄漏较多        |
| 固定面<br>板方式 | 在混凝土表面上固定塑料板, 在其间填充阳极与电解质溶液 | 塑料平板          | ①电解质溶液很少蒸发和泄漏;<br>②水平面与垂直面, 都可以施工      | 在混凝土表面形状复杂的场合里施工困难   |
| 蓄存<br>方式   | 在混凝土顶面蓄存电解质溶液并临时安装阳极        | —             | ①施工容易;<br>②电解质溶液的泄漏少                   | 只限于水平面的施工; 电解质溶液蒸发较多 |

#### C.1.7.3 电缆应满足下列要求:

- (1) 阳极电缆、阴极电缆和监控系统电缆的数量和位置由计算确定, 阳极电缆和阴极电缆通常采用单芯多股铜芯电缆, 采用具有良好的绝缘、抗老化、耐海洋环境和海水腐蚀性能的电缆护套;
- (2) 所有电缆采取避免环境、人和动物破坏的保护措施, 具有区分电缆种类和区域编号的唯一性标识;
- (3) 所有密封于混凝土、导管或护套中的单芯电缆不小于  $2.5\text{mm}^2$ , 多芯电缆的阳极和阴极电缆不小于  $1.0\text{mm}^2$ , 监控电缆不小于  $0.5\text{mm}^2$ , 绝缘层符合现行国家标准《额定电压 1kV ( $U_m = 1.2\text{ kV}$ ) 到 35 kV ( $U_m = 40.5\text{ kV}$ ) 挤包绝缘电力电缆及附件》(GB/T 12706) 的有关规定;
- (4) 阴极、阳极电缆铜芯横截面积按下列公式计算:

$$S = \rho L / R \quad (\text{C. 1. 7-1})$$

$$R = V / I \quad (\text{C. 1. 7-2})$$

式中  $S$ ——电缆铜芯横截面积( $\text{mm}^2$ );

$\rho$ ——铜芯电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$L$ ——电缆长度(m);

$R$ ——电缆电阻( $\Omega$ );

$V$ ——电缆的允许压降(V);

$I$ ——流经电缆的电流(A)。

#### C.1.7.4 监测与控制系统应包括参比电极和监控设备,并应满足下列要求:

(1)脱盐过程中,检测钢筋极化电位,控制脱盐单元内不同测点极化电位差在 $\pm 300\text{mV}$ 范围内;

(2)监控电位的设备采用精度不低于 $\pm 5\text{mV}$ ,输入阻抗不小于 $10\text{M}\Omega$ 的数字万用表或选用符合要求的其他数据记录仪;

(3)参比电极选用 $\text{Ag}/\text{AgCl}/0.5\text{M KCl}$ 电极或 $\text{Mn}/\text{MnO}_2/0.5\text{M NaOH}$ 电极,便携式参比电极选用 $\text{Ag}/\text{AgCl}/0.5\text{M KCl}$ 电极或 $\text{Cu}/\text{饱和 CuSO}_4$ 电极,参比电极的精度达到 $\pm 5\text{mV}$ ( $20^\circ\text{C}$ ,24h),寿命不少于5a;

(4)每个典型脱盐单元布置3个以上参比电极,其安装位置代表结构物的电流分布情况。

#### C.1.8 实施电化学脱盐处理的混凝土修补材料应满足下列要求:

(1)修补材料抗压强度等级比老混凝土设计强度提高一个等级;

(2)修补材料的粘结强度不小于老混凝土的抗拉强度标准值;

(3)修补裂缝的材料具有堵塞裂缝的能力;

(4)修补材料的电阻率是老混凝土电阻率的50%~200%。

#### C.1.9 电化学脱盐完毕后,应进行硅烷浸渍或涂层封闭处理,并应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275)的有关规定。

### C.2 电化学脱盐保护系统的安装与调试

C.2.1 电化学脱盐系统的施工应包括脱盐单元内钢筋电连接、局部破损混凝土保护层凿除和修补、参比电极的安装、混凝土表面处理、辅助阳极的制作和安装、各种连接线接头的制作和电缆铺设、直流电源的安装等内容。

C.2.2 电化学脱盐系统安装前应确认使用的仪器和材料与设计一致。

C.2.3 电化学脱盐系统的安装应按设计进行。

C.2.4 电器的安装应符合现行国家标准《电器装置安装工程 低压电器施工及验收规范》(GB 50254)的有关规定,并应满足第C.1.7.1款的要求。

C.2.5 电化学脱盐系统安装结束后应进行全面检查,脱盐系统所有部件安装应与设计一致,电缆和设备应连接正确。

C.2.6 系统调试应包括下列内容:

- (1) 混凝土保护层和辅助阳极系统充分饱水后,检查并记录各脱盐单元的回路电阻,若短路,采取措施使其断开;
- (2) 以电流设计值的 10% ~ 20% 进行通电调试,测量并记录输出电压、输出电流和钢筋半电池电位;
- (3) 试通电至少 24h,每小时记录一次输出电压与电流;
- (4) 试通电完成后,逐步加大电流,直至设计值。

附录 D 混凝土结构外加电流阴极保护方法

D.1 外加电流阴极保护设计

D.1.1 阴极保护设计前应进行详细的调查和检测,调查和检测应包括下列内容:

- (1)潮汐、温度、湿度、海水中氯离子含量、pH 值、水污染情况和港口水工建筑物周边其他侵蚀介质等环境资料;
- (2)混凝土结构型式、构件所处位置、外形尺寸、钢筋配筋情况、混凝土保护层厚度、钢筋电连接等结构和构造资料;
- (3)混凝土劣化状况、碳化深度、氯离子含量、电阻率、含水率、钢筋半电池电位等钢筋混凝土资料。

D.1.2 阴极保护设计应对港口水工建筑物剩余使用年限和阴极保护使用年限进行经济技术综合论证分析。

D.1.3 阴极保护系统应根据构件的具体情况,分成若干个单独的阴极保护单元进行单独控制,各阴极保护单元应具有良好的电连接性,连接电阻应不大于 1.0Ω。

D.1.4 初始保护电流密度值应根据现场检测的结果按表 D.1.4 选取。

阴极保护电流密度参考值 表 D.1.4

| 钢筋周围的环境及钢筋的状况                        | 表层钢筋所需的保护电流密度<br>(mA/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 混凝土呈干燥状态、含有氯盐、质量好,保护层厚、钢筋轻微锈蚀        | 3 ~ 7                                 |
| 混凝土潮湿有氯盐、质量差,保护层薄或中等厚度               | 8 ~ 20                                |
| 混凝土氯盐含量高、潮湿、忽干忽湿、富氧,保护层薄,气候炎热,钢筋锈蚀严重 | 30 ~ 50                               |

D.1.5 总保护电流可按下式计算:

$$I = \sum I_n + I_f = \sum i_n s_n + I_f \tag{D.1.5}$$

- 式中  $I$ ——保护所需的总电流(A);
- $I_n$ ——各阴极保护单元的保护电流(A);
- $I_f$ ——其他附加保护电流(A);
- $i_n$ ——各阴极保护单元的初期保护电流密度(A/m<sup>2</sup>);
- $s_n$ ——各阴极保护单元内表层钢筋面积(m<sup>2</sup>)。

D.1.6 相对于 Ag/AgCl/0.5MKCl 参比电极,保护电位应符合下列规定。

D.1.6.1 普通混凝土中钢筋瞬时断电的电位不应负于 -1100mV。

D.1.6.2 预应力混凝土中钢筋瞬时断电的电位不应负于  $-900\text{mV}$ 。

D.1.6.3 大气中的混凝土结构任一代表性的测点,其电位实测值应满足下列要求之一:

- (1) 直流电回路断开后  $0.1 \sim 1.0\text{s}$  测得的瞬时断电的电位负于  $-720\text{mV}$ ;
- (2) 断电瞬间的初始极化电位,断电后  $24\text{h}$  内电位衰减不小于  $100\text{mV}$ ;
- (3) 断电瞬间的初始极化电位,断电后  $48\text{h}$  或更长时间的电位衰减值不小于  $150\text{mV}$ 。

D.1.7 外加电流阴极保护系统应包括直流电源、辅助阳极系统、电缆和监控系统,其组成部分应符合下列规定。

D.1.7.1 辅助阳极系统应满足下列要求:

- (1) 阳极材料的设计和选用满足设计寿命和电流承载能力的要求;
- (2) 根据设计使用年限、使用条件、混凝土构件型式、材料性能和适用性综合确定阳极系统;
- (3) 阳极系统选用有导电涂层阳极系统和活性钛阳极系统,常用阳极形式与布设见表 D.1.7。

常用阳极形式与布设方式 表 D.1.7

| 阳极形式         | 布置方式                           | 适用场合                                    | 常用阳极                |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| 网状阳极         | 紧贴构件混凝土表面布设于整个构件暴露面外敷混凝土覆盖     | 构件主箍筋均已锈蚀,整面凿除保护层,适用于介质侵蚀性强,配筋较大的场合     | 混合金属氧化物涂层钛基阳极       |
| 丝状阳极 + 面状次阳极 | 构件表面开槽,导电涂层将丝状主阳极浇筑于槽内,并涂布构件表面 | 使用介质侵蚀型较轻,配筋量较小,且有装饰性要求的场合              | 镀铂钛丝、铜包铌镀铂丝         |
| 棒状阳极         | 钻孔,内插棒状阳极                      | 适用于局部区域遭受氯离子污染的较大体积构件                   | 表面涂覆金属氧化物的钛棒与钛管     |
| 条状或带状阳极      | 构件表面开槽,用水泥基材料埋入                | 适用于构件遭受某一特定长条桩腐蚀破坏的修补;当间隔开槽布设时,亦可用于其他场合 | 小网孔的混合金属氧化物涂层钛基阳极带条 |

D.1.7.2 直流电源应满足下列要求:

- (1) 采用技术性能稳定可靠、环境适应性强的变压整流器或恒电位仪,其外壳采用防干扰的金属外壳,并进行防腐蚀处理;
- (2) 根据使用条件、阳极类型、钢筋保护所需电流和保护系统回路电阻等计算确定直流电源的输出电流、输出电压;
- (3) 具有恒电流或恒电位控制,并从零到最大额定输出连续可调;
- (4) 直流输出不超过  $50\text{V}$ ,人或动物易接近的阴极保护系统不超过  $24\text{V}$ ,波动量不超过  $100\text{mVrms}$ ,最小频率  $100\text{Hz}$ ;
- (5) 具有提供直流继电系统中断输出的功能,便于“瞬时中断”电位测量;
- (6) 至少提供一个阳极和一个阴极接线端至电缆箱,所有输出端应与箱内所有金属体间充分绝缘;

(7)明确标识电连接处,显示交流输入电源和直流输出的运行状态。

**D.1.7.3** 监控系统应由包括参比电极、其他电极、传感器和监控设备,其组成部分应满足下列要求:

(1)参比电极通常采用  $\text{Ag}/\text{AgCl}/0.5\text{M KCl}$  电极和  $\text{Mn}/\text{MnO}_2/0.5\text{MNaOH}$  电极,参比电极的精度达到  $\pm 5\text{ mV}$  ( $20^\circ\text{C}$ , 24h),寿命不少于 20a;

(2)每个阴极保护单元通常布置 4 个以上参比电极,其安装位置反映结构物的控制电位;对预应力钢筋,在距阳极最近处布置监控参比电极,防止预应力钢筋过极化引起氢脆;对重要或难以再次安装的混凝土结构与部位,考虑安装备用参比电极;

(3)监控设备具有测量保护电位、电流密度、直流电源的输出电流、输出电压、瞬时断电电位和瞬时断电后一定时间内的电位衰减等功能,并适应所处环境和抵御环境的侵蚀。

**D.1.7.4** 保护系统电缆应包括电源电缆、阳极电缆、阴极电缆、监控系统电缆等,并应满足下列要求:

(1)电缆使用颜色或数字区分,且电缆护套具有良好的绝缘、抗老化、耐海洋环境和海水腐蚀性等性能;

(2)阳极电缆和阴极电缆采用单芯多股铜芯电缆,每个阴极保护单元设计 2 根以上阴极电缆和阳极电缆;

(3)阴极电缆和阳极电缆的最高工作温度符合现行国家标准《额定电压  $1\text{kV}$  ( $U_m = 1.2\text{kV}$ ) 到  $35\text{ kV}$  ( $U_m = 40.5\text{ kV}$ ) 挤包绝缘电力电缆及附件》(GB/T 12706)中所允许的超过设计电流 25% 时所能承受的最高温度的规定;

(4)限制整个回路的电压降,即当整个阴极保护系统回路中的电流为设计最大电流的 125% 时,阴极保护电源的输出电压值与阳极/阴极间所要求的电压值相一致,同时确保为每一保护区域提供均匀的电流分配;

(5)所有密封于混凝土、导管或护套中的单芯电缆不小于  $2.5\text{mm}^2$ ,多芯电缆的阳极和阴极电缆不小于  $1.0\text{mm}^2$ ,监控电缆不小于  $0.5\text{ mm}^2$ ,所有电缆至少有 7 股;

(6)所有密封于混凝土、导管或护套中的电缆至少有符合现行国家标准《额定电压  $1\text{kV}$  ( $U_m = 1.2\text{ kV}$ ) 到  $35\text{ kV}$  ( $U_m = 40.5\text{kV}$ ) 挤包绝缘电力电缆及附件》(GB/T 12706)规定的绝缘层和护套各一层;阳极电缆具有适用于长期暴露于  $\text{pH} = 2$  的酸性条件中的性能;埋设在混凝土中的电缆具有适用于长期暴露于  $\text{pH} = 13$  的碱性条件中的性能;

(7)阴极、阳极电缆芯横截面积按下列公式计算:

$$S = \rho L / R \quad (\text{D.1.7-1})$$

$$R = V / I \quad (\text{D.1.7-2})$$

式中  $S$ ——电缆芯横截面积( $\text{mm}^2$ );

$\rho$ ——电缆芯材电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$L$ ——电缆长度(m);

$R$ ——电缆电阻( $\Omega$ );

$V$ ——电缆的允许压降(V);

$I$ ——流经电缆的电流(A)。

(8) 每个阴极保护单元内至少设计 1 根监控系统电缆, 不与保护系统中的阴极电缆兼用。

## D.2 混凝土外加电流阴极保护施工

**D.2.1** 外加电流阴极保护系统的安装与施工宜包括阴极保护单元内钢筋电连接、劣化混凝土保护层凿除和修补、监控系统安装、混凝土表面处理、阳极系统安装、各种连接线和电缆的制作及铺设、直流电源设备的安装等工序。

**D.2.2** 阴极保护系统安装与施工前应确认所用的仪器和材料与设计一致, 应按照施工图、仪器设备的使用说明或安装规格书的要求执行。

**D.2.3** 钢筋作为保护系统的阴极应进行充分的电连接以保证其电连续性, 连接电阻不应大于  $1.0\Omega$ 。

**D.2.4** 劣化混凝土保护层凿除和修补应符合第 4 章的有关规定。

**D.2.5** 监控系统的安装应符合第 D.1.7.3 款的规定。

**D.2.6** 混凝土表面预处理应清除混凝土表面所有的绑扎铁丝、钢筋头、钉子或其他可见的金属物等, 并应采用适当的材料修补, 修补层厚度宜大于 10mm。

**D.2.7** 阳极系统的安装应符合下列规定。

**D.2.7.1** 阳极系统的安装应牢固, 并应避免与任何钢筋、辅助金属构件、绑扎钢筋的金属丝或混凝土表面钢筋残骸以及被保护钢筋之间发生短路。

**D.2.7.2** 两阳极网带应至少有 50mm 的搭接, 搭接部分应采用三点焊接。

**D.2.7.3** 每个阳极区应具有良好的电连接性, 其连接电阻不应大于  $1.0\Omega$ 。

**D.2.7.4** 每一个阳极区安装完成后, 应对系统各阳极区之间的阳极和阳极的绝缘情况进行测试。

**D.2.7.5** 每个阴极保护单元应提供多个与阳极连接的阳极电缆, 电缆与阳极的连接方式和安装方式应通过试验或已有工程证实的方法实施。

**D.2.8** 进行连接线和电缆的制作时, 其接头应进行密封防水处理, 并应满足耐久使用要求。电缆的铺设应满足设计要求, 并应具有唯一性标识。所有电缆应采取适当的保护措施避免环境、人和动物的破坏。

**D.2.9** 电器的安装应符合现行国家标准《电器装置安装工程 低压电器施工及验收规范》(GB 50254) 的有关规定, 并应满足第 D.1.7.2 款的要求。

**D.2.10** 在外加电流阴极保护系统施工完毕提交竣工验收之前, 至少应进行连续 1 个月的通电调试, 调试应包括下列内容:

- (1) 通电调试期间保护电位;
- (2) 瞬时断电电位及电位衰减;
- (3) 钢筋的电流密度;
- (4) 直流电源的输出电流、输出电压读数;
- (5) 参比电极的读数。

## 附录 E 混凝土结构加大截面加固设计

### E.1 受弯构件正截面加固计算

**E.1.1** 采用加大截面加固受弯构件时,应根据原结构构造和受力的实际情况,选用在受压区或受拉区增设现浇钢筋混凝土外加层的加固方式。

**E.1.2** 当仅在受压区加固受弯构件时,其承载力、抗裂、裂缝宽度及挠度的计算和验算,可按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)关于叠合式受弯构件的规定进行。若验算结果表明,仅需增设混凝土叠合层即可满足承载力要求时,也应按构造要求配置受压钢筋和分布钢筋。

**E.1.3** 当在受拉区加固矩形截面受弯构件时(图 E.1.3),其正截面受弯承载力应按下列公式计算:

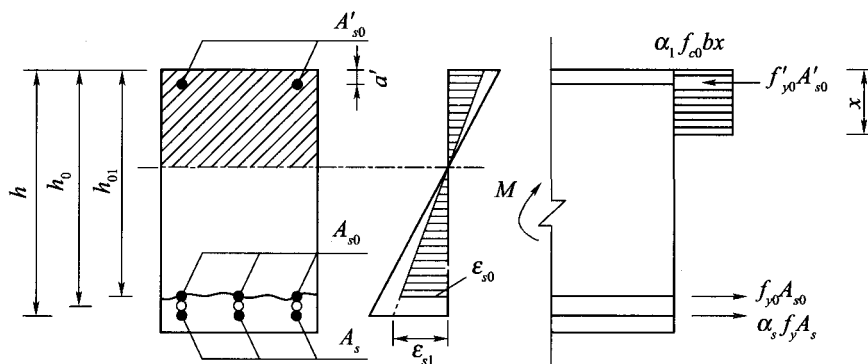


图 E.1.3 受弯构件加固计算简图

$$M \leq \alpha_s f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{y0} A_{s0} \left( h_{01} - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} \left( \frac{x}{2} - a' \right) \quad (\text{E.1.3-1})$$

$$\alpha_1 f_{c0} b x = f_{y0} A_{s0} + \alpha_s f_y A_s - f'_{y0} A'_{s0} \quad (\text{E.1.3-2})$$

$$2a' \leq x \leq \xi_b h_0 \quad (\text{E.1.3-3})$$

式中  $M$ ——构件加固后弯矩设计值( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );

$\alpha_s$ ——新增钢筋强度利用系数,取  $\alpha_s = 0.9$ ;

$f_y$ ——新增钢筋的抗拉强度设计值( $\text{MPa}$ );

$A_s$ ——新增受拉钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );

$h_0$ 、 $h_{01}$ ——构件加固后和加固前的截面有效高度( $\text{mm}$ );

$x$ ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度( $\text{mm}$ ),简称混凝土受压区高度;

$f_{y0}$ 、 $f'_{y0}$ ——原构件中钢筋的抗拉、抗压强度设计值( $\text{MPa}$ ),按第 5.1.5.5 款的规定

取值;

$A_{s0}$ 、 $A'_{s0}$ ——原构件中受拉钢筋和受压钢筋的锈后实际截面面积( $\text{mm}^2$ );

$a'$ ——纵向受压钢筋合力点至混凝土受压区边缘的距离( $\text{mm}$ );

$\alpha_1$ ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值;  
当混凝土强度等级不超过 C50 时,取  $\alpha_1 = 1.0$ ;当混凝土强度等级为 C80 时,取  $\alpha_1 = 0.94$ ;其间按线性内插法确定;

$f_{c0}$ ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.6 款的规定取值;

$b$ ——矩形截面宽度( $\text{mm}$ );

$\xi_b$ ——构件加大截面加固后的相对界限受压区高度( $\text{mm}$ )。

**E.1.4** 受弯构件加大截面加固后的相对界限受压区高度,应按下列公式计算:

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{\alpha_s f_y}{\varepsilon_{cu} E_s} + \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{cu}}} \quad (\text{E. 1.4-1})$$

$$\varepsilon_{s1} = \left( 1.6 \frac{h_0}{h_{01}} - 0.6 \right) \varepsilon_{s0} \quad (\text{E. 1.4-2})$$

$$\varepsilon_{s0} = \frac{M_{0k}}{0.87 h_{01} A_{s0} E_{s0}} \quad (\text{E. 1.4-3})$$

式中  $\xi_b$ ——构件加大截面加固后的相对界限受压区高度( $\text{mm}$ );

$\beta_1$ ——计算系数,当混凝土强度等级不超过 C50 时, $\beta_1$  取值为 0.8;当混凝土强度等级为 C80 时, $\beta_1$  值取为 0.74,其间按线性内插法确定;

$\alpha_s$ ——新增钢筋强度利用系数,取  $\alpha_s = 0.9$ ;

$f_y$ ——新增钢筋的抗拉强度设计值(MPa);

$\varepsilon_{cu}$ ——混凝土极限压应变,取  $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ ;

$E_s$ ——新增钢筋弹性模量(MPa);

$\varepsilon_{s1}$ ——新增钢筋位置处,按平截面假设确定的初始应变值;当新增主筋与原主筋的连接采用短钢筋焊接时,可近似取  $h_{01} = h_0$ ,  $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s0}$ ;

$h_0$ 、 $h_{01}$ ——构件加固后和加固前的截面有效高度( $\text{mm}$ );

$\varepsilon_{s0}$ ——加固前,在初始弯矩  $M_{0k}$  作用下原受拉钢筋的应变值;

$M_{0k}$ ——加固前受弯构件验算截面上原作用的弯矩标准值( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );

$A_{s0}$ ——原构件中受拉钢筋和受压钢筋的锈后实际截面面积( $\text{mm}^2$ );

$E_{s0}$ ——原构件钢筋弹性模量(MPa)。

**E.1.5** 当按公式(E.1.3-1)和公式(E.1.3-2)计算得到的加固后混凝土受压区高度与加固前原截面有效高度之比大于原截面相对界限受压区高度时,应考虑原纵向受拉钢筋应力尚达不到原构件中钢筋的抗拉强度设计值的情况。此时,应将原构件中钢筋的抗拉强度设计值改为原纵向受拉钢筋应力值,并应重新进行验算。验算时,原纵向受拉钢筋应力值可按式计算:

$$\sigma_{s0} = \left( \frac{0.8 h_{01}}{x} - 1 \right) \varepsilon_{cu} E_s \quad (\text{E. 1.5})$$

式中  $\sigma_{s0}$ ——原纵向受拉钢筋应力值(MPa);

$h_{01}$ ——构件加固前的截面有效高度(mm);

$x$ ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度(mm),简称混凝土受压区高度;

$\varepsilon_{cu}$ ——混凝土极限压应变,取  $\varepsilon_{cu}=0.0033$ ;

$E_s$ ——新增钢筋弹性模量(MPa)。

**E.1.6** 按公式(E.1.5)计算的结果,若满足公式(E.1.6-1),则应按验算结果确定加固钢筋用量;若满足公式(E.1.6-2),则原计算结果无需变动。

$$\sigma_{s0} < f_{y0} \quad (\text{E.1.6-1})$$

$$\sigma_{s0} \geq f_{y0} \quad (\text{E.1.6-2})$$

式中  $\sigma_{s0}$ ——原纵向受拉钢筋应力值(MPa);

$f_{y0}$ ——原构件中钢筋的抗拉强度设计值(MPa),按第5.1.5.5款的规定取值。

**E.1.7** 对翼缘位于受压区的T形截面受弯构件,其受拉区增设现浇配钢筋混凝土层的正截面受弯承载力,应按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)关于T形截面受弯承载力的规定进行计算。

## E.2 受弯构件斜截面加固计算

**E.2.1** 受弯构件加固后的斜截面应符合下列条件:

当  $\frac{h_w}{b} \leq 4.0$  时

$$V \leq 0.25\beta_c f_c b h_0 \quad (\text{E.2.1-1})$$

当  $\frac{h_w}{b} \geq 6.0$  时

$$V \leq 0.2\beta_c f_c b h_0 \quad (\text{E.2.1-2})$$

当  $4.0 < \frac{h_w}{b} < 6.0$  时,按线性内插法取用。

式中  $h_w$ ——截面的腹板高度(mm);对于矩形截面,取有效高度;对于T形截面,取有效高度减去翼缘高度;对于I形截面,取腹板净高;

$b$ ——矩形截面的宽度、T形或I形截面的腹板宽度(mm);

$V$ ——构件加固后的剪力设计值(N);

$\beta_c$ ——混凝土强度影响系数;当混凝土强度等级不超过C50时, $\beta_c$ 取值为1.0;当混凝土强度等级为C80时, $\beta_c$ 值取为0.8,其间按线性内插法确定;

$f_c$ ——构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

$h_0$ ——构件加固后的截面有效高度(mm)。

**E.2.2** 采用加大截面法加固受弯构件时,其斜截面受剪承载力应满足下列条件:

当受拉区增配配筋混凝土层,并采用U形箍与原箍筋逐个焊接时

$$V \leq 0.7f_{t0}bh_{01} + 0.7\alpha_c f_t b(h_0 - h_{01}) + 1.25f_{yv0} \frac{A_{sv0}}{s_0} h_0 \quad (\text{E.2.2-1})$$

当增设钢筋混凝土三面围套,并采用加锚式或胶锚式箍筋时

$$V \leq 0.7f_{t0}bh_{01} + 0.7\alpha_c f_t A_c + 1.25\alpha_s f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 1.25f_{yv0} \frac{A_{sv0}}{s_0} h_{01} \quad (\text{E.2.2-2})$$

式中  $V$ ——构件加固后的剪力设计值(N);

$f_t, f_{t0}$ ——新、老混凝土的轴心抗拉强度设计值(MPa);

$b$ ——矩形截面的宽度、T形或I形截面的腹板宽度(mm);

$h_0, h_{01}$ ——构件加固后和加固前的截面有效高度(mm);

$\alpha_c$ ——新增混凝土强度利用系数,取0.7;

$f_{yv}, f_{yv0}$ ——新箍筋和原箍筋的抗拉强度设计值(MPa);

$A_{sv}, A_{sv0}$ ——同一截面内新箍筋各肢截面面积之和及原箍筋各肢截面面积之和(mm<sup>2</sup>);

$s, s_0$ ——新增箍筋或原箍筋沿构件长度方向的间距(mm);

$A_c$ ——三面围套新增混凝土截面面积(mm<sup>2</sup>);

$\alpha_s$ ——新增箍筋强度利用系数,取0.9。

### E.3 受压构件正截面加固计算

**E.3.1** 采用加大截面加固钢筋混凝土轴心受压构件(图 E.3.1)时,其正截面受压承载力应按下式计算:

$$N = 0.9\varphi[f_{c0}A_{c0} + f'_{y0}A'_{s0} + \alpha_{cs}(f_c A_c + f'_y A'_s)] \quad (\text{E.3.1})$$

式中  $N$ ——构件加固后的轴向压力设计值(N);

$\varphi$ ——构件稳定系数,根据加固后的截面尺寸,按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)的规定值采用;

$f_{c0}$ ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

$A_{c0}, A_c$ ——构件加固前混凝土截面面积和加固后新增部分混凝土截面面积(mm<sup>2</sup>);

$f'_{y0}, f'_y$ ——原纵向钢筋和新增纵向钢筋的抗压强度设计值(MPa);

$A'_{s0}$ ——原受压钢筋的截面面积(mm<sup>2</sup>);

$\alpha_{cs}$ ——综合考虑新增混凝土和钢筋强度利用程度的修正系数,取0.8;

$f_c$ ——新混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

$A'_s$ ——新增纵向受压钢筋的截面面积(mm<sup>2</sup>)。

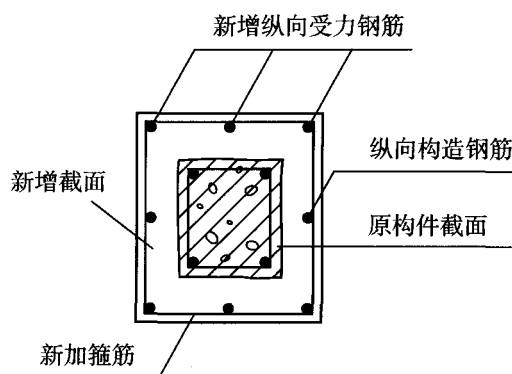


图 E.3.1 轴心受压构件加大截面加固示意图

**E.3.2** 采用加大截面加固钢筋混凝土偏心受压构件时(图 E.3.2),其矩形截面正截面承载力按下列公式计算:

$$N \leq \alpha_c f_{cc} b x + 0.9 f'_y A'_s + f'_{y0} A'_{s0} - 0.9 \sigma_s A_s - \sigma_{s0} A_{s0} \quad (\text{E.3.2-1})$$

$$f_{cc} = \frac{1}{2}(f_{c0} + 0.9f_c) \quad (\text{E. 3. 2-2})$$

$$N \cdot e \leq \alpha_1 f_{cc} b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + 0.9 f'_y A'_s (h_0 - a'_s) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a'_{s0}) + \sigma_{s0} A_{s0} (a_{s0} - a_s) \quad (\text{E. 3. 2-3})$$

$$\sigma_{s0} = \left( \frac{0.8h_{01}}{x} - 1 \right) E_s \varepsilon_{cu} \leq f_{y0} \quad (\text{E. 3. 2-4})$$

$$\sigma_s = \left( \frac{0.8h_0}{x} - 1 \right) E_s \varepsilon_{cu} \leq f_y \quad (\text{E. 3. 2-5})$$

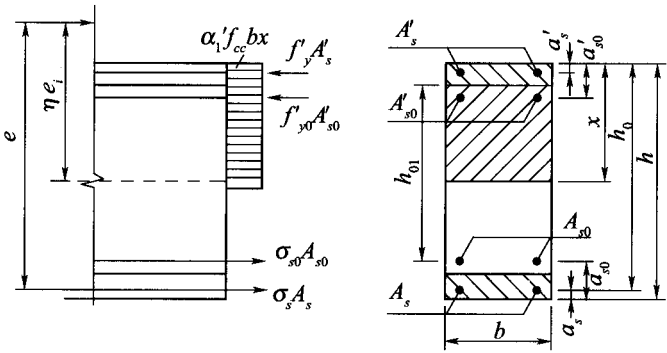


图 E.3.2 矩形截面偏心受压构件加固的计算简图

注:当为小偏心受压构件时,图中  $\sigma_{s0}$  可能变向。

式中  $N$ ——构件加固后的偏心压力设计值(N);

$\alpha_1$ ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值;  
当混凝土强度等级不超过 C50 时,取  $\alpha_1 = 1.0$ ;当混凝土强度等级为 C80 时,  
取  $\alpha_1 = 0.94$ ;其间按线性内插法确定;

$f_{cc}$ ——新老混凝土组合截面的混凝土轴心抗压强度设计值(MPa),可按公式  
(E. 3. 2-2)确定;

$b$ ——矩形截面的宽度、T形或I形截面的腹板宽度(mm);

$x$ ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度(mm),简称混凝土受压区高度;

$f'_y, f'_{y0}$ ——新增纵向钢筋和原纵向钢筋的抗压强度设计值(MPa);

$A'_s$ ——新增纵向受压钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );

$A'_{s0}$ ——原构件受压较大边纵向钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );

$\sigma_s$ ——受拉边或受压较小边的新增纵向钢筋应力(MPa);当算得结果大于新增纵向  
钢筋的抗拉强度设计值时,取值为新增纵向钢筋的抗拉强度设计值;

$A_s$ ——新增受拉钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );

$\sigma_{s0}$ ——原构件受拉边或受压较小边纵向钢筋应力(MPa);当算得结果大于原纵向  
钢筋的抗拉强度设计值时,取值为原纵向钢筋的抗拉强度设计值;

$A_{s0}$ ——原构件受拉边或受压较小边纵向钢筋截面面积( $\text{mm}^2$ );

- $f_c、f_{c0}$ ——分别为新、老混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；
- $e$ ——偏心距(mm),为轴向压力设计值  $N$  的作用点至新增受拉钢筋合力点的距离,按第 E.3.3 条确定；
- $h_0$ ——受拉边或受压较小边新增纵向钢筋合力点至加固后截面受压较大边缘的距离(mm)；
- $a'_s$ ——受压较大边新增纵向钢筋合力点至加固后截面近边的距离(mm)；
- $a'_{s0}$ ——原构件受压较大边纵向钢筋合力点到加固后截面近边的距离(mm)；
- $a_{s0}$ ——原构件受拉边或受压较小边纵向钢筋合力点到加固后截面近边的距离(mm)；
- $a_s$ ——受拉边或受压较小边新增纵向钢筋合力点至加固后截面近边的距离(mm)；
- $h_{01}$ ——原构件截面有效高度(mm)；
- $E_{s0}$ ——原构件钢筋弹性模量(MPa)；
- $\varepsilon_{cu}$ ——混凝土极限压应变,取  $\varepsilon_{cu}=0.0033$ ；
- $f_y、f_{y0}$ ——新增纵向钢筋和原纵向钢筋的抗拉强度设计值(MPa)；
- $E_s$ ——新增钢筋弹性模量(MPa)。

**E.3.3** 偏心距应按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)的规定计算,但其增大系数尚应乘以修正系数,修正系数应按表 E.3.3 选取。

修正系数  $\psi_\eta$  值 表 E.3.3

| 加固形式<br>偏心距      | 修正系数 $\psi_\eta$ 值 |           |
|------------------|--------------------|-----------|
|                  | 对围套或其他对称形式的加固      | 对非对称形式的加固 |
| $e_0/h \geq 0.3$ | 1.1                | 1.2       |
| $e_0/h < 0.3$    | 1.2                | 1.3       |

E.4 构造规定

**E.4.1** 新增混凝土层的最小厚度,板不应小于 40mm;梁、柱采用人工浇筑时,不应小于 60mm,采用喷射混凝土施工时,不应小于 50mm;并应满足现行行业标准《港口混凝土结构设计规范》(JTJ 267)中钢筋混凝土保护层最小厚度要求。

**E.4.2** 加固用的钢筋应采用热轧钢筋。板的受力钢筋直径不应小于 8mm,梁的受力钢筋直径不应小于 12mm,柱的受力钢筋直径不应小于 14mm,加锚式箍筋直径不应小于 8mm,U 形箍筋直径应与原箍筋直径相同,分布筋直径不应小于 6mm。

**E.4.3** 新增受力钢筋与原受力钢筋的净间距不应小于 20mm,并应采用短筋或箍筋与原钢筋焊接,其构造应满足下列要求：

- (1) 当新增受力钢筋与原受力钢筋的连接采用短筋焊接时(图 E.4.3a),短筋的直径不小于 20mm,长度不小于其直径的 5 倍,各短筋的中距不大于 500mm；
- (2) 当截面受拉区一侧加固时,设置 U 形箍筋(图 E.4.3b),U 形箍筋焊在原有箍筋上,单面焊缝长度为箍筋直径的 10 倍,双面焊缝长度为箍筋直径的 5 倍；

- (3) 当受构造条件限制必须采用植筋方式埋设 U 形箍 (图 E. 4. 3c) 时, 采用锚固专用的结构胶种植;
- (4) 当用混凝土围套加固时, 设置环形箍筋或胶锚式箍筋 (图 E. 4. 3d 或图 E. 4. 3e)。

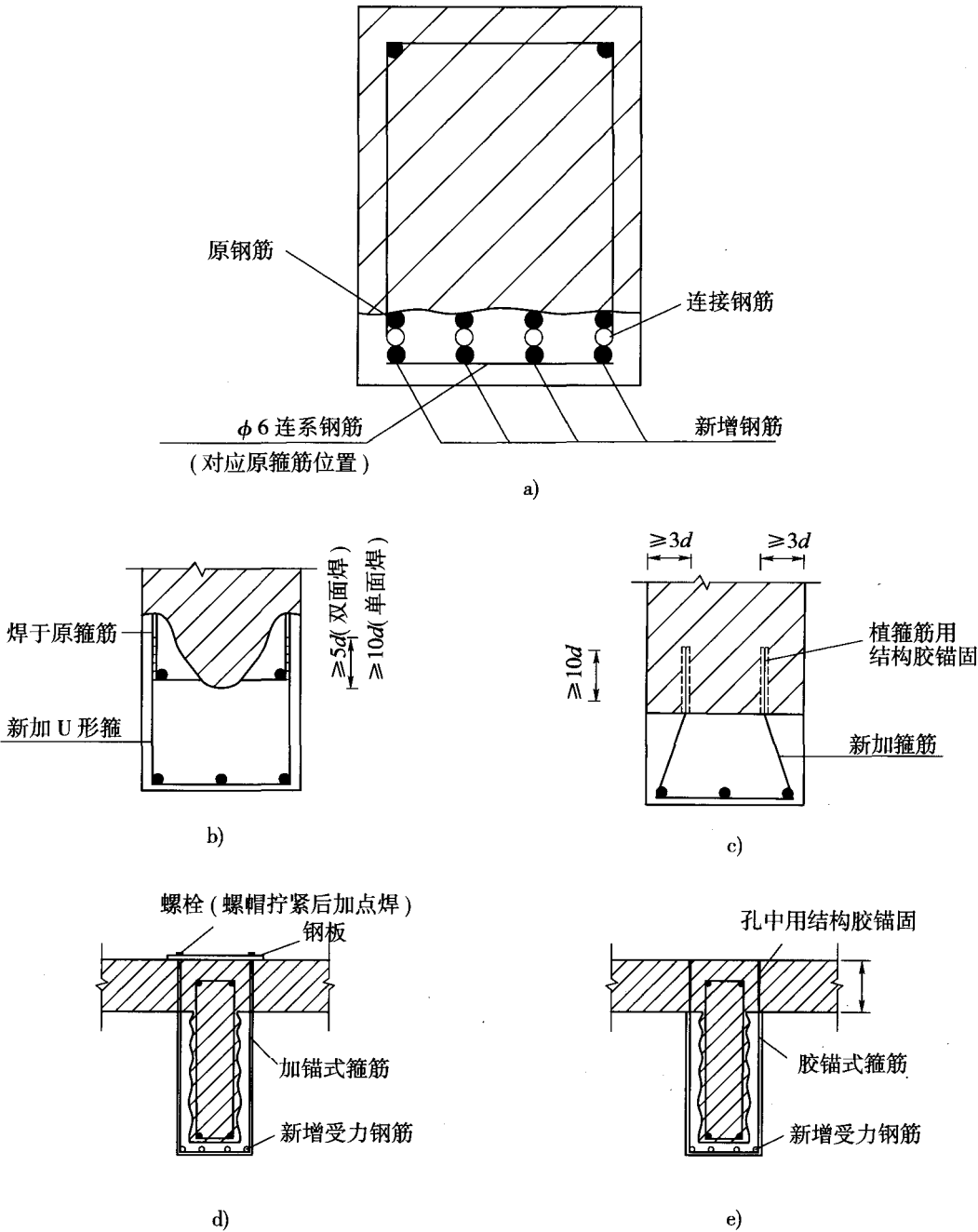


图 E. 4. 3 加大截面配置新增箍筋的连接构造示意图  
 $d$ -箍筋直径

E. 4. 4 梁的新增纵向受力钢筋两端应锚固可靠。

E. 5 施 工

E. 5. 1 加大截面加固应对原构件混凝土存在的缺陷清理至密实部位, 并将表面凿毛或

打成沟槽,沟槽深度不宜小于 6mm,间距不宜大于箍筋间距且不大于 200mm。

**E.5.2** 当采用三面或四面外包法加固梁或柱时,应将梁、柱的棱角打掉。

**E.5.3** 对原有受力钢筋进行除锈处理,在受力钢筋施焊前应采取卸荷或支顶措施,并应逐根分区分段进行焊接。

**E.5.4** 模板搭设、钢筋安置、新混凝土的浇筑及防护等应符合现行行业标准《水运工程混凝土施工规范》(JTJ 268)的有关规定。

## 附录 F 外粘型钢加固法

### F.1 加固计算

**F.1.1** 采用外粘角钢或槽钢加固钢筋混凝土轴心受压构件时,其正截面承载力应按下式计算:

$$N \leq 0.9\varphi(f_{c0}A_{c0} + f'_{y0}A'_{s0} + \alpha_a f'_a A'_a) \quad (\text{F.1.1})$$

式中  $N$ ——构件加固后轴向应力设计值(N);

$\varphi$ ——轴心受压构件的稳定系数,应根据加固后的截面尺寸,按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)采用;

$f_{c0}$ ——原混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

$A_{c0}$ ——构件加固前混凝土截面面积( $\text{mm}^2$ );

$f'_{y0}$ ——原纵向钢筋的抗压强度设计值(MPa);

$A'_{s0}$ ——原构件受压纵向钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );

$\alpha_a$ ——新增型钢强度利用系数,除抗震设计取 1.0 外,其他取 0.9;

$f'_a$ ——新增型钢抗压强度设计值(MPa),应按现行国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017)的规定采用;

$A'_a$ ——全部受压肢型钢的截面面积( $\text{mm}^2$ )。

**F.1.2** 采用外粘型钢加固钢筋混凝土偏心受压构件时(图 F.1.2),其矩形截面正截面承载力应按下列公式计算:

$$N \leq \alpha_1 f_{c0} b x + f'_{y0} A'_{s0} - \sigma_{s0} A_{s0} + \alpha_a f'_a A'_a - \alpha_a \sigma_a A_a \quad (\text{F.1.2-1})$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_{c0} b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a'_{s0}) + \sigma_{s0} A_{s0} (a_{s0} - a_a) + \alpha_a f'_a A'_a (h_0 - a'_a) \quad (\text{F.1.2-2})$$

$$\sigma_{s0} = \left[ \frac{0.8h_{01}}{x} - 1 \right] E_s \varepsilon_{cu} \quad (\text{F.1.2-3})$$

$$\sigma_a = \left[ \frac{0.8h_0}{x} - 1 \right] E_a \varepsilon_{cu} \quad (\text{F.1.2-4})$$

式中  $N$ ——构件加固后轴向压力设计值(N);

$\alpha_1$ ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值;当混凝土强度等级不超过 C50 时,取  $\alpha_1 = 1.0$ ;当混凝土强度等级为 C80 时,取  $\alpha_1 = 0.94$ ;其间按线性内插法确定;

$f_{c0}$ ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.6 款规定取值;

- $b$ ——原构件截面宽度 (mm);  
 $x$ ——混凝土受压区高度 (mm);  
 $f'_{y0}$ ——原构件受压区纵向钢筋抗压强度设计值 (MPa), 按第 5.1.5.5 款规定取值;  
 $A'_{s0}$ ——原构件受压较大边纵向钢筋截面面积 (mm<sup>2</sup>);  
 $\sigma_{s0}$ ——原构件受拉边或受压较小边纵向钢筋应力 (MPa), 当大于原纵向钢筋的抗拉强度设计值时, 取值为原纵向钢筋的抗拉强度设计值;  
 $A_{s0}$ ——原构件受拉边或受压较小边纵向钢筋截面面积 (mm<sup>2</sup>);  
 $\alpha_a$ ——新增型钢强度利用系数, 除抗震设计取 1.0 外, 其他取 0.9;  
 $f'_a$ ——型钢抗压强度设计值 (MPa);  
 $A'_a$ ——全部受压肢型钢截面面积 (mm<sup>2</sup>);  
 $\sigma_a$ ——受拉肢或受压较小肢型钢的应力 (MPa), 可按式 (F.1.2-4) 计算, 也可近似取  $\sigma_{s0}$ ;  
 $A_a$ ——全部受拉肢型钢截面面积 (mm<sup>2</sup>);  
 $e$ ——偏心距 (mm), 为轴向压力设计值作用点至受拉区型钢形心的距离, 按第 E.3.3 条计算;  
 $h_0$ ——加固后受拉肢或受压较小肢型钢的截面形心至原构件截面受压较大边的距离 (mm);  
 $a'_{s0}$ ——原截面受压较大边纵向钢筋合力点至原构件截面近边的距离 (mm);  
 $a_{s0}$ ——原构件受拉边或受压较小边纵向钢筋合力点至原截面近边的距离 (mm);  
 $a_a$ ——受拉肢或受压较小肢型钢截面形心至原构件截面近边的距离 (mm);  
 $a'_a$ ——受压较大肢型钢截面形心至原构件截面近边的距离 (mm);  
 $h_{01}$ ——加固前原截面有效高度 (mm);  
 $E_{s0}$ ——原构件钢筋弹性模量 (MPa);  
 $\varepsilon_{cu}$ ——混凝土极限压应变, 取  $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ ;  
 $E_a$ ——型钢的弹性模量 (MPa)。

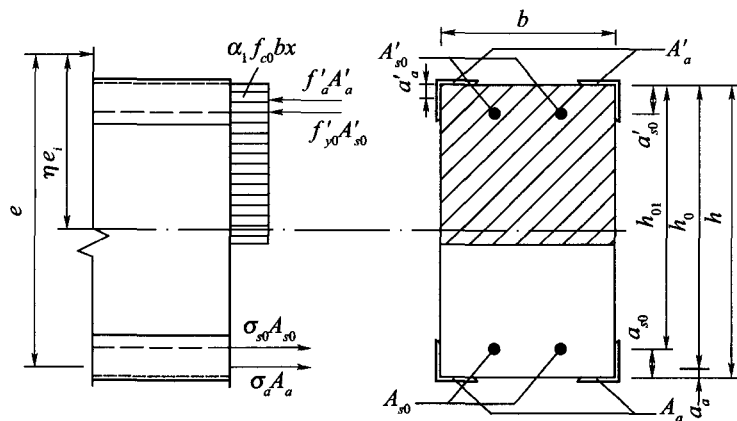


图 F.1.2 外粘型钢加固柱的截面计算简图

注: 当为小偏心受压构件时, 图中  $\sigma_{s0}$  可能变号

**F.1.3** 采用外粘型钢加固钢筋混凝土梁时,应在梁截面的四隅粘贴角钢,若梁的受压区有翼缘或有面板时,应将梁顶面两隅的角钢改为钢板,其正截面及斜截面的承载力可按附录 G 计算,但应将对应的钢板截面面积改为角钢截面面积。

**F.2 构造规定**

**F.2.1** 采用外粘型钢加固法时,应符合下列规定。

**F.2.1.1** 型钢宜选用角钢,角钢的厚度不应小于 5mm,角钢的边长,对梁不应小于 50mm,对柱不应小于 75mm。

**F.2.1.2** 沿梁、柱轴线方向应每隔一定距离用扁钢制作的箍板(图 F.2.1)与角钢焊接。当有面板时,U 形箍板或其附加的螺杆应穿过面板,并应与另加的条形钢板焊接(图 F.2.1a、图 F.2.1b)或嵌入面板后予以胶锚(图 F.2.1c)。

**F.2.1.3** 箍板应在胶粘前与加固角钢焊接。箍板截面不应小于 40mm×4mm,其间距不应大于 20 倍单根角钢截面的最小回转半径,且不应大于 500mm,在节点区,其间距应适当加密。

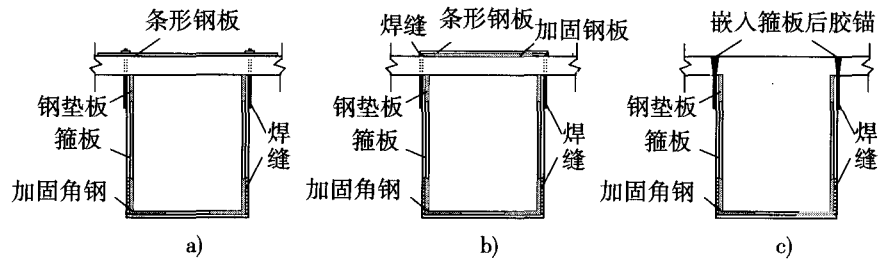


图 F.2.1 加锚式箍板示意图

**F.2.2** 外粘型钢的两端应有可靠的连接和锚固。

**F.2.3** 外粘型钢加固梁、柱时,应将原构件截面的棱角打磨成半径不小于 7mm 的圆角,外粘型钢的注胶应在型钢构架焊接完成后进行,外粘型钢的胶缝厚度宜控制在 3~5mm;局部允许有长度不大于 300mm、厚度不大于 8mm 的胶缝,但不得出现在角钢端部 600mm 范围内。

**F.2.4** 采用外粘型钢加固钢筋混凝土构件时,型钢表面和混凝土表面应采用具有防腐性能的饰面材料加以保护。

**F.3 施工**

**F.3.1** 施工前应认真阅读设计施工图,按设计图纸在混凝土粘钢位置测放打磨控制线,待打磨工作完成后应补加粘钢位置线。

**F.3.2** 采用外粘型钢加固混凝土梁、柱时,应先将原构件的表面打磨平整,截面棱角打磨成圆角,且圆角半径不应小于 7mm,应在表面清除干净后刷改性环氧树脂胶粘剂。

**F.3.3** 加固用的型钢应进行表面除锈、擦净,并应将型钢骨架贴附于梁、柱表面,用卡具卡紧,按设计要求将箍板与角钢焊接,最后用改性环氧树脂胶粘剂将型钢周围封闭,留出排气孔。

**F.3.4** 灌浆嘴宜粘贴于有利于灌浆的较低处,间距宜为 2 ~ 3m;灌浆嘴粘牢后应通气试压;灌浆时应以 0.2 ~ 0.4MPa 的压力将改性环氧树脂浆从灌浆嘴压入,当排气孔出现浆液后应停止加压,并以环氧胶泥堵孔,再以较低压力维持 10min 以上,灌浆后不应再对型钢进行锤击、移动或焊接。

**F.3.5** 外粘型钢加固后,应按现行国家有关标准对型钢表面进行防腐蚀处理。

## 附录 G 粘贴钢板加固法

### G.1 受弯构件正截面加固计算

**G.1.1** 采用粘贴钢板对梁、板等受弯构件进行加固时,除应符合现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)关于正截面承载力计算的规定外,尚应满足下列要求:

- (1) 构件达到受弯承载能力极限状态时,外贴钢板的拉应变按平截面假设确定;
- (2) 钢板应力取拉应变与弹性横量的乘积;
- (3) 当考虑二次受力影响时,按构件加固前的初始受力情况,确定粘贴钢板的滞后应变;
- (4) 在达到受弯承载能力极限状态前,外贴钢板与混凝土之间不出现粘结剥离破坏。

**G.1.2** 受弯构件加固后的相对界限受压区高度应按下列要求确定:

- (1) 对重要构件,采用加固前相对界限受压高度控制值的 0.9 倍;
- (2) 对一般构件,采用加固前相对界限受压高度控制值。

**G.1.3** 在矩形截面受弯构件的受拉面和受压面粘贴钢板进行加固时(图 G.1.3),其正截面承载力应按下列公式计算:

$$M \leq \alpha_1 f_{c0} b x \left( h - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} (h - a') + f'_{sp} A'_{sp} h - f_{y0} A_{s0} (h - h_0) \quad (\text{G.1.3-1})$$

$$\alpha_1 f_{c0} b x = \psi_{sp} f_{sp} A_{sp} + f_{y0} A_{s0} - f'_{y0} A'_{s0} - f'_{sp} A'_{sp} \quad (\text{G.1.3-2})$$

$$\psi_{sp} = \frac{\left( 0.8 \varepsilon_{cu} \frac{h}{x} \right) - \varepsilon_{cu} - \varepsilon_{sp,0}}{\frac{f_{sp}}{E_{sp}}} \quad (\text{G.1.3-3})$$

$$\varepsilon_{sp,0} = \frac{\alpha_{sp} M_{0k}}{E_s A_s h_0} \quad (\text{G.1.3-4})$$

$$x \geq 2a' \quad (\text{G.1.3-5})$$

式中  $M$  ——构件加固后弯矩设计值(N·mm);

$\alpha_1$  ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值;  
当混凝土强度等级不超过 C50 时,取  $\alpha_1 = 1.0$ ;当混凝土强度等级为 C80 时,取  $\alpha_1 = 0.94$ ;其间接线性内插法确定;

$f_{c0}$  ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.6 款规定取值;

$b, h$  ——矩形截面宽度和高度(mm);

$x$  ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度(mm),简称混凝土受压区高度,应满足式(G.1.3-5)的要求;

- $f'_{y0}$  ——原构件受压区纵向钢筋抗压强度设计值 (MPa), 按第 5.1.5.5 款规定取值;
- $A'_{s0}$  ——原构件受压纵向钢筋的截面面积 (mm<sup>2</sup>);
- $a'$  ——纵向受压钢筋合力点至截面受压边缘的距离 (mm);
- $f_{sp}、f'_{sp}$  ——加固钢板的抗拉、抗压强度设计值 (MPa);
- $A_{sp}、A'_{sp}$  ——受拉钢板和受压钢板的截面面积 (mm<sup>2</sup>);
- $f_{y0}$  ——原纵向钢筋的抗拉强度设计值 (MPa);
- $A_{s0}$  ——原构件受拉纵向钢筋截面面积 (mm<sup>2</sup>);
- $h_0$  ——构件加固前的截面有效高度 (mm);
- $\psi_{sp}$  ——考虑二次受力影响时, 受拉钢板抗拉强度有可能达不到设计值而引用的折减系数; 当  $\psi_{sp} > 1.0$  时, 取 1.0;
- $\varepsilon_{cu}$  ——混凝土极限压应变, 取 0.0033;
- $\varepsilon_{sp,0}$  ——受拉钢板的滞后应变, 若不考虑二次受力影响取 0;
- $E_{sp}$  ——加固钢板的弹性模量 (MPa);
- $M_{0k}$  ——加固前受弯构件验算截面上作用的弯矩标准值 (N·mm);
- $E_s$  ——新增钢筋的弹性模量 (MPa);
- $A_s$  ——新增构件受拉纵向钢筋截面面积 (mm<sup>2</sup>);
- $\alpha_{sp}$  ——综合考虑受弯构件裂缝截面内力臂变化、钢筋拉应变不均匀以及钢筋排列影响的计算系数, 按表 G.1.3 的规定采用。

计算系数  $\alpha_{sp}$  值 表 G.1.3

| $\rho_{te}$   |      | $\leq 0.007$ | 0.010 | 0.020 | 0.030 | 0.040 | $\geq 0.060$ |
|---------------|------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| $\alpha_{sp}$ | 单排钢筋 | 0.70         | 0.90  | 1.15  | 1.20  | 1.25  | 1.30         |
|               | 双排钢筋 | 0.75         | 1.00  | 1.25  | 1.30  | 1.35  | 1.40         |

注: ①表中  $\rho_{te}$  为原有混凝土有效受拉截面的纵向受拉钢筋配筋率, 按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267) 的规定计算;

②当原构件钢筋应力  $\sigma_{s0} \leq 150\text{MPa}$ , 且  $\rho_{te} \leq 0.05$  时, 表中  $\alpha_{sp}$  值可乘以调整系数 0.9。

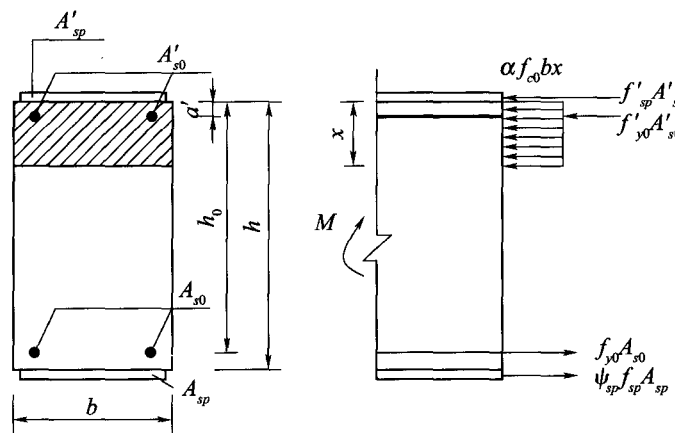


图 G.1.3 矩形截面正截面受弯承载力计算简图

**G.1.4** 对受弯构件正弯矩区的正截面加固,受拉钢板长度应适当延伸,其最小粘贴延伸长度应按下式计算:

$$l_{sp} = f_{sp}t_{sp}/f_{bd} \geq 170t_{sp} \tag{G.1.4}$$

式中  $l_{sp}$  ——受拉钢板粘贴延伸长度(mm);  
 $f_{sp}$  ——加固钢板的抗拉强度设计值(MPa);  
 $t_{sp}$  ——粘贴的钢板总厚度(mm);  
 $f_{bd}$  ——钢板与混凝土之间的粘结强度设计值(MPa),按表 G.1.4 采用。

钢板与混凝土之间的粘结强度设计值  $f_{bd}$  (MPa) 表 G.1.4

| 混凝土强度等级  | C15  | C20  | C25  | C30  | C35  | C40  | C45  | C50  | ≥C60 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_{bd}$ | 0.61 | 0.80 | 0.94 | 1.05 | 1.14 | 1.21 | 1.26 | 1.31 | 1.35 |

**G.1.5** 对受弯构件负弯矩区的正截面加固,钢板的截断位置距支座边缘的距离,除应按式(G.1.4)确定外,尚宜按有关构造规定进行设计。

**G.1.6** 对翼缘位于受压区的 T 形截面受弯构件的受拉面进行粘贴钢板受弯加固时,应按第 G.1.1 条 ~ 第 G.1.3 条的规定和现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)中关于 T 形截面受弯承载力的计算方法进行计算。

**G.1.7** 当钢板全部粘贴在梁底受拉面有困难时,可将部分钢板对称地粘贴在梁的两侧面。此时,侧面粘贴区域应控制在距受拉边缘 1/4 梁高范围内,并按式(G.1.7)计算确定梁的两侧面实际需粘贴的钢板截面面积。

$$A_{sp,l} = \eta_{sp}A_{sp,b} \tag{G.1.7}$$

式中  $A_{sp,l}$  ——梁两侧面需粘贴的钢板截面面积(mm<sup>2</sup>);  
 $A_{sp,b}$  ——按梁底面计算确定的但需改贴到梁的两侧面的钢板截面面积(mm<sup>2</sup>);  
 $\eta_{sp}$  ——考虑改贴梁侧面引起的钢板受拉合力及其力臂改变的修正系数,按表 G.1.7采用。

修正系数  $\eta_{sp}$  值 表 G.1.7

| $h_{sp}/h$  | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 |
|-------------|------|------|------|------|------|
| $\eta_{sp}$ | 1.11 | 1.23 | 1.37 | 1.54 | 1.75 |

注:表中  $h_{sp}$  为从梁受拉边缘算起的侧面粘贴高度; $h$  为梁截面高度。

**G.1.8** 钢筋混凝土结构构件加固后,其正截面受弯承载力的提高幅度不应超过 40%,并且应验算受剪承载力。

**G.1.9** 加固钢板不宜超过 2 层,且钢板总厚度不应大于 10mm。

**G.2 受弯构件斜截面加固计算**

**G.2.1** 采用扁钢条带对受弯构件的斜截面受剪承载力进行加固时,扁钢条带应粘贴成垂直于构件轴线方向的加锚封闭箍或其他有效的 U 形箍(图 G.2.1),扁钢也可用钢板替

代,但切割的边缘应加工平整。

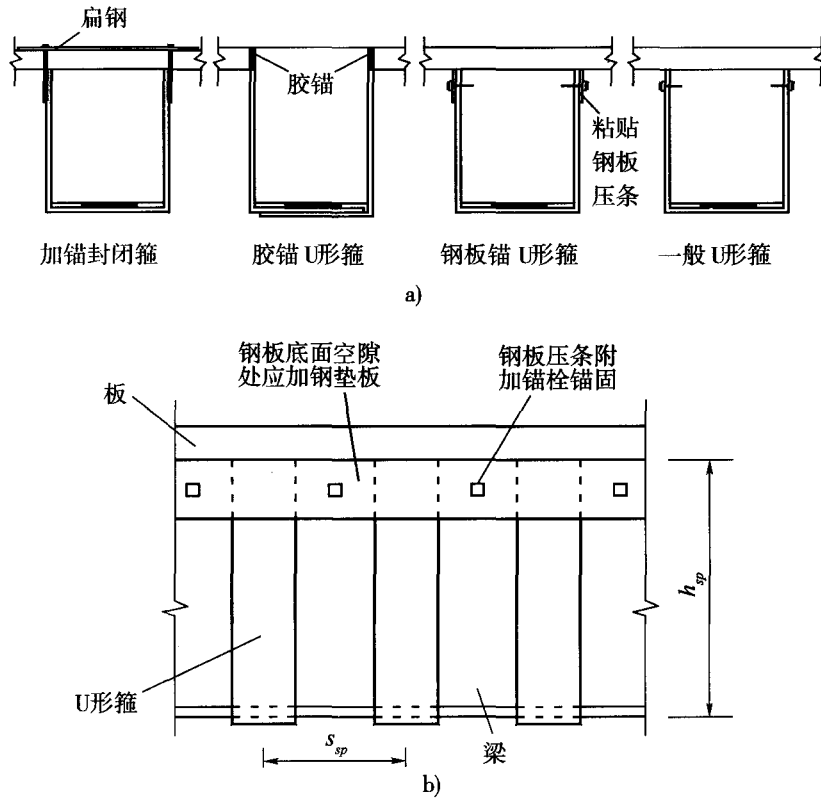


图 G.2.1 扁钢抗剪箍及其粘贴压条示意图

a)构造方式示意图;b)U形箍加纵向钢板压条示意图

**G.2.2 受弯构件加固后的斜截面应满足下列要求:**

当  $\frac{h_w}{b} \leq 4.0$  时

$$V \leq 0.25\beta_c f_{c0} b h_0 \quad (\text{G.2.2-1})$$

当  $\frac{h_w}{b} \geq 6.0$  时

$$V \leq 0.20\beta_c f_{c0} b h_0 \quad (\text{G.2.2-2})$$

当  $4.0 < \frac{h_w}{b} < 6.0$  时,按线性内插法确定。

式中  $h_w$  ——截面的腹板高度(mm):对矩形截面,取有效高度;对 T 形截面,取有效高度减去翼缘高度;对 I 形截面,取腹板净高;

$b$  ——矩形截面的宽度(mm);T 形或 I 形截面的腹板宽度;

$V$  ——构件斜截面加固后的剪力设计值(N);

$\beta_c$  ——混凝土强度影响系数;当混凝土强度等级不超过 C50 时,  $\beta_c$  取值为 1.0;当混凝土强度等级为 C80 时,  $\beta_c$  值取为 0.8,其间按线性内插法确定;

$f_{c0}$  ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

$h_0$  ——构件加固前的截面有效高度(mm)。

G.2.3 采用加锚封闭箍或其他 U 形箍对钢筋混凝土梁进行抗剪加固时,其斜截面承载力应满足下列公式要求:

V ≤ V<sub>b0</sub> + V<sub>b,sp</sub> (G.2.3-1)

V<sub>b,sp</sub> = ψ<sub>vb</sub>f<sub>sp</sub>A<sub>sp</sub>h<sub>sp</sub>/s<sub>sp</sub> (G.2.3-2)

式中 V——构件斜截面加固后的剪力设计值(N);

V<sub>b0</sub>——加固前梁的斜截面承载力(N),按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)计算;

V<sub>b,sp</sub>——粘贴钢板加固后,对梁斜截面承载力的提高值(N);

ψ<sub>vb</sub>——与钢板的粘贴方式及受力条件有关的抗剪强度折减系数,按表 G.2.3 采用;

f<sub>sp</sub>——加固钢板的抗拉强度设计值(MPa);

A<sub>sp</sub>——配置在同一截面处箍板的全部截面面积(mm<sup>2</sup>), A<sub>sp</sub> = 2b<sub>sp</sub>t<sub>sp</sub>,此处 b<sub>sp</sub> 和 t<sub>sp</sub> 分别为箍板宽度和箍板厚度;

h<sub>sp</sub>——梁侧面粘贴箍板的竖向高度(mm);

s<sub>sp</sub>——箍板的间距(mm)(图 G.2.1b)

抗剪强度折减系数 ψ<sub>vb</sub> 值 表 G.2.3

| 箍板构造     |                | 加锚封闭箍 | 胶锚或钢板锚 U 形箍 | 一般 U 形箍 |
|----------|----------------|-------|-------------|---------|
| 受力<br>条件 | 均布荷载或剪跨比 λ ≥ 3 | 1.00  | 0.92        | 0.85    |
|          | 剪跨比 λ ≤ 1.5    | 0.68  | 0.63        | 0.58    |

注:当 λ 为中间值时,按线性内插法确定 ψ<sub>vb</sub> 值。

G.3 大偏心受压构件正截面加固计算

G.3.1 采用粘贴钢板加固大偏心受压钢筋混凝土柱时,钢板应粘贴于构件受拉区边缘混凝土表面,且钢板长向应与柱的纵轴线方向一致。

G.3.2 在矩形截面大偏心受压构件受拉边混凝土表面上粘贴钢板加固时,其正截面承载力应按下列公式计算:

N ≤ α<sub>1</sub>f<sub>c0</sub>bx + f'<sub>y0</sub>A'<sub>s0</sub> + f'<sub>sp</sub>A'<sub>sp</sub> - f<sub>y0</sub>A<sub>s0</sub> - f<sub>sp</sub>A<sub>sp</sub> (G.3.2-1)

N · e ≤ α<sub>1</sub>f<sub>c0</sub>bx(h<sub>0</sub> -  $\frac{x}{2}$ ) + f'<sub>y0</sub>A'<sub>s0</sub>(h<sub>0</sub> - a') + f'<sub>sp</sub>A'<sub>sp</sub>h<sub>0</sub> + f<sub>sp</sub>A<sub>sp</sub>(h - h<sub>0</sub>) (G.3.2-2)

e = ηe<sub>i</sub> +  $\frac{h}{2}$  - a (G.3.2-3)

e<sub>i</sub> = e<sub>0</sub> + e<sub>a</sub> (G.3.2-4)

式中 N——轴向压力设计值(N);

α<sub>1</sub>——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值;当混凝土强度等级不超过 C50 时,取 α<sub>1</sub> = 1.0;当混凝土强度等级为 C80 时,取 α<sub>1</sub> = 0.94;其间按线性内插法确定;

- $f_{c0}$  ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.6 款规定取值;  
 $b, h$  ——矩形截面宽度和高度(mm);  
 $x$  ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度(mm),简称混凝土受压区高度,应满足式(G.1.3-5)的要求;  
 $f'_{y0}$  ——原构件受压区纵向钢筋抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.5 款规定取值;  
 $A'_{s0}$  ——原构件受压纵向钢筋的截面面积(mm<sup>2</sup>);  
 $f_{sp}, f'_{sp}$  ——加固钢板的抗拉、抗压强度设计值(MPa);  
 $A_{sp}, A'_{sp}$  ——受拉钢板和受压钢板的截面面积(mm<sup>2</sup>);  
 $f_{y0}$  ——原纵向钢筋的抗拉强度设计值(MPa);  
 $A_{s0}$  ——原构件受拉纵向钢筋截面面积(mm<sup>2</sup>);  
 $e$  ——轴向压力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离(mm);  
 $h_0$  ——构件加固前的截面有效高度(mm);  
 $a, a'$  ——纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离(mm);  
 $\eta$  ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心距增大系数,除应按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)的规定计算外,尚应乘以第 E.3.3 条规定的修正系数  $\psi_\eta$ ;  
 $e_i$  ——初始偏心距(mm);  
 $e_0$  ——轴向压力对截面重心的偏心距(mm),  $e_0 = M/N$ ;  
 $e_a$  ——附加偏心距(mm),按偏心方向截面最大尺寸  $h$  确定;当不大于 600mm 时,取 20mm;当大于 600mm 时,取  $h/30$ 。

#### G.4 受拉构件正截面加固计算

**G.4.1** 采用外贴钢板加固钢筋混凝土受拉构件时,钢板应按原构件纵向受拉钢筋的配筋方式粘贴于相应位置的混凝土表面上,且应处理好拐角部位的连接构造及其锚固。

**G.4.2** 轴心受拉构件的加固,其正截面承载力应按下列公式计算:

$$N \leq f_{y0} A_{s0} + f_{sp} A_{sp} \quad (\text{G.4.2})$$

式中  $N$  ——轴向拉力设计值(N);

$f_{y0}$  ——原纵向钢筋的抗拉强度设计值(MPa);

$A_{s0}$  ——原构件受拉纵向钢筋截面面积(mm<sup>2</sup>);

$f_{sp}$  ——加固钢板的抗拉强度设计值(MPa);

$A_{sp}$  ——加固钢板的截面面积(mm<sup>2</sup>)。

**G.4.3** 矩形截面大偏心受拉构件的加固,其正截面承载力应按下列公式计算:

$$N \leq f_{y0} A_{s0} + f_{sp} A_{sp} - \alpha_1 f_{c0} b x - f'_{y0} A'_{s0} \quad (\text{G.4.3-1})$$

$$N \cdot e \leq \alpha_1 f_{c0} b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a') + f_{sp} A_{sp} (h - h_0)$$

(G.4.3-2)

式中  $N$  ——轴向拉力设计值(N);

- $f_{y0}$  ——原纵向钢筋的抗拉强度设计值(MPa);
- $A_{s0}$  ——原构件受拉纵向钢筋截面面积( $\text{mm}^2$ );
- $f_{sp}$  ——加固钢板的抗拉强度设计值(MPa);
- $A_{sp}$  ——受拉钢板的截面面积( $\text{mm}^2$ );
- $\alpha_1$  ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值;  
当混凝土强度等级不超过 C50 时,取  $\alpha_1 = 1.0$ ;当混凝土强度等级为 C80 时,取  $\alpha_1 = 0.94$ ;其间的按线性内插法确定;
- $f_{c0}$  ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.6 款规定取值;
- $b, h$  ——矩形截面宽度和高度(mm);
- $x$  ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度(mm),简称混凝土受压区高度;
- $f'_{y0}$  ——原构件受压区纵向钢筋抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.5 款规定取值;
- $A'_{s0}$  ——原构件受压纵向钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );
- $e$  ——轴向拉力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离(mm);
- $h_0$  ——构件加固前的截面有效高度(mm);
- $a'$  ——纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离(mm)。

## G.5 构造规定

**G.5.1** 采用手工涂胶粘贴的钢板厚度不应大于 5mm。采用压力注胶粘贴的钢板厚度不应大于 10mm,且应按外粘型钢加固法的焊接节点构造进行设计。

**G.5.2** 对钢筋混凝土受弯构件进行正截面加固时,其受拉面沿构件轴向连续粘贴的加固钢板宜延长至支座边缘,且应在钢板的端部及集中荷载作用点的两侧对梁设置 U 形钢箍板、对板设置横向钢压条进行锚固。

**G.5.3** 当粘贴的钢板延伸至支座边缘仍不满足第 G.1.4 条延伸长度的要求时,应采取锚固措施,并应符合下列规定。

**G.5.3.1** 对梁应在延伸长度范围内均匀设置 U 形箍(图 G.5.3),且应在延伸长度的端部设置加强箍。U 形箍的粘贴高度为梁的截面高度;若梁有翼缘,应伸至其底面。U 形

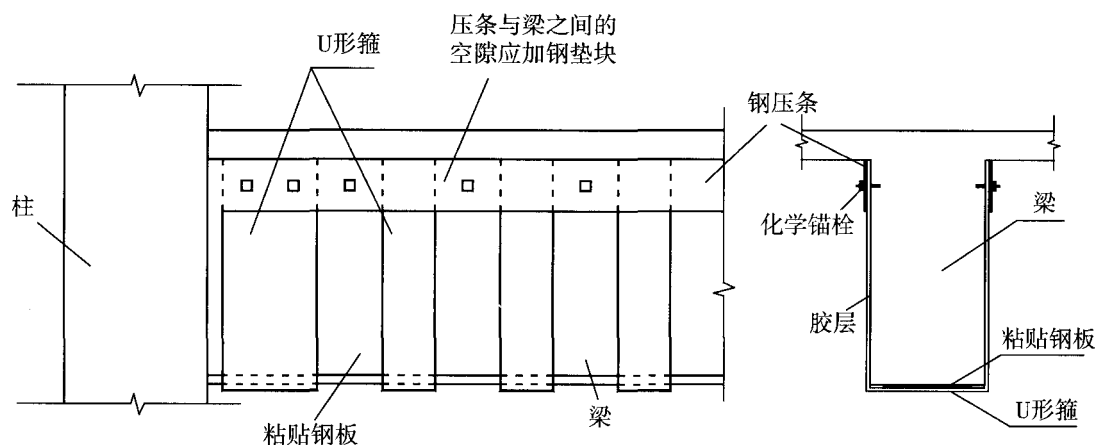


图 G.5.3 梁粘贴钢板端部锚固措施示意图

箍的宽度,对端箍不应小于加固钢板宽度的  $2/3$ ,且不应小于  $80\text{mm}$ ;对中间箍不应小于加固钢板宽度的  $1/2$ ,且不应小于  $40\text{mm}$ 。U 形箍的厚度不应小于受弯加固钢板厚度的  $1/2$ ,且不应小于  $4\text{mm}$ 。U 形箍的上端应设置纵向钢压条,压条下面的空隙应加胶粘钢垫块填平。

**G.5.3.2** 对板应在延伸长度范围内通长设置垂直于受力钢板方向的钢压条。钢压条应在延伸长度范围内均匀布置,且在延伸长度的端部必须设置钢压条。压条的宽度不应小于受弯加固钢板宽度的  $3/5$ ,钢压条的厚度不应小于受弯加固钢板厚度的  $1/2$ 。

**G.5.4** 当采用钢板对受弯构件负弯矩区进行正截面承载力加固时,钢板应在负弯矩包络图范围内连续粘贴,其延伸长度的截断点应按第 G.1.4 条确定。

**G.5.5** 当加固的受弯构件需粘贴不止一层钢板时,相邻两层钢板的截断位置应错开不小于  $300\text{mm}$ ,并应在截断处对梁加设 U 形箍或对板加设横向压条进行锚固。

**G.5.6** 当采用粘贴钢板箍对钢筋混凝土梁或大偏心受压构件的斜截面承载力进行加固时,其构造应符合下列规定。

**G.5.6.1** 加固钢箍宜选用封闭箍或加锚的 U 形箍;若仅按构造需要设箍,也可采用一般 U 形箍。

**G.5.6.2** 加固钢箍的受力方向应与构件轴向垂直。

**G.5.6.3** 封闭箍及 U 形箍的净间距不应大于现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)规定的最大箍筋间距的  $0.7$  倍,且不应大于梁高的  $0.25$  倍。

**G.5.6.4** 箍板的粘贴高度应符合第 G.5.3 条的规定;一般 U 形箍的上端应粘贴纵向钢压条予以锚固,钢压条下面的空隙应加胶粘钢垫板填平。

**G.5.6.5** 当梁的截面高度或腹板高度大于等于  $600\text{mm}$  时,应在梁的腰部增设一道纵向腰间钢压条(图 G.5.6)。

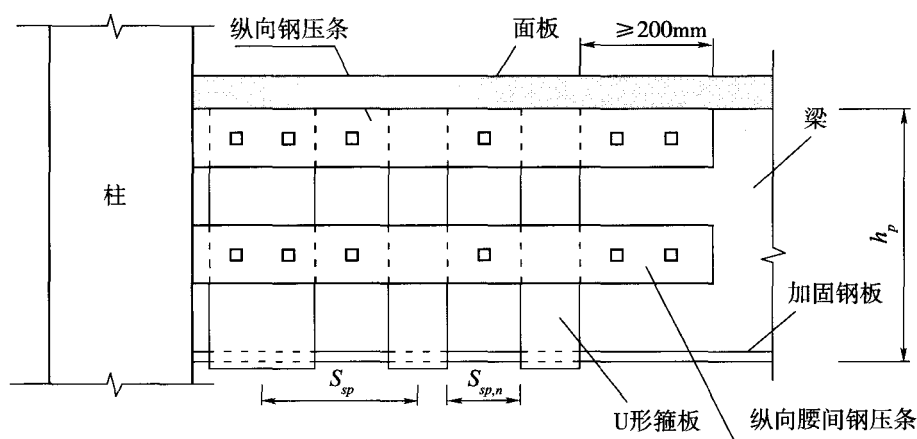


图 G.5.6 纵向腰间钢压条示意图

## G.6 施 工

**G.6.1** 施工应按设计图纸在混凝土粘贴钢板位置打磨,打磨完成后应测放粘钢位置及锚栓钻孔点位线。

**G.6.2** 原混凝土构件的结合面应凿毛、清除干净后打磨,直至完全露出新面,并吹除粉粒。

**G.6.3** 钢板的粘结面应进行除锈和粗糙处理。除锈等级应达到 St3.0,粗糙度等级应达到  $60 \sim 100\mu\text{m}$ ,其后应用脱脂棉沾丙酮擦拭干净。

**G.6.4** 锚栓孔钻孔施工后应检查成孔直径及深度。

**G.6.5** 胶粘剂应同时涂抹在已处理好的混凝土表面和钢板面上,厚度宜为  $1 \sim 3\text{mm}$ ,中间厚边缘薄。立面粘贴可加一层脱蜡玻璃丝布。

**G.6.6** 钢板粘贴好后应立即固定,并应加压至胶液刚从钢板边缝挤出。

**G.6.7** 粘贴钢板加固海工混凝土结构,应按国家现行有关标准对钢板表面进行防腐蚀处理。

## 附录 H 粘贴碳纤维加固法

### H.1 受弯构件正截面加固计算

**H.1.1** 采用碳纤维对梁、板等受弯构件进行加固时,除应符合现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)关于正截面承载力计算的规定外,尚应满足下列要求:

- (1) 碳纤维的应力与应变关系取直线式,其拉应力取拉应变与弹性模量的乘积;
- (2) 考虑二次受力影响时,按构件加固前的初始受力情况确定碳纤维的滞后应变;
- (3) 在达到受弯承载力极限状态前,加固材料与混凝土之间不出现粘结剥离破坏。

**H.1.2** 受弯构件加固后的相对界限受压区高度应满足下列要求:

- (1) 对重要构件,采用构件加固前相对界限受压区高度控制值的 0.75 倍;
- (2) 对一般构件,采用构件加固前相对界限受压区高度控制值的 0.85 倍。

**H.1.3** 在矩形截面受弯构件的受拉边混凝土表面上粘贴碳纤维加固时(图 H.1.3),其正截面承载力应按下列公式计算:

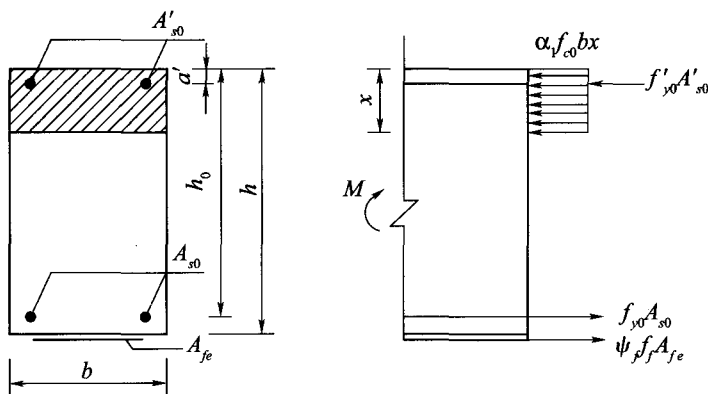


图 H.1.3 矩形截面构件正截面受弯承载力计算简图

$$M \leqslant \alpha_1 f_{c0} b x \left( h - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} (h - a') - f_{y0} A_{s0} (h - h_0) \quad (\text{H.1.3-1})$$

$$\alpha_1 f_{c0} b x = f_{y0} A_{s0} + \psi_f f_f A_{fe} - f'_{y0} A'_{s0} \quad (\text{H.1.3-2})$$

$$\psi_f = \frac{(0.8 \varepsilon_{cu} h/x) - \varepsilon_{cu} - \varepsilon_{f0}}{\varepsilon_f} \quad (\text{H.1.3-3})$$

$$\varepsilon_{f0} = \frac{\alpha_f M_{0k}}{E_s A_s h_0} \quad (\text{H.1.3-4})$$

$$x \geqslant 2a' \quad (\text{H.1.3-5})$$

式中  $M$ ——构件加固后弯矩设计值( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );

- $\alpha_1$ ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值；当混凝土强度等级不超过 C50 时，取  $\alpha_1 = 1.0$ ；当混凝土强度等级为 C80 时，取  $\alpha_1 = 0.94$ ；其间按线性内插法确定；
- $f_{c0}$ ——原构件混凝土的抗压强度设计值 (MPa)，按第 5.1.5.6 款规定取值；
- $b、h$ ——矩形截面的宽度和高度 (mm)；
- $x$ ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度 (mm)，简称混凝土受压区高度；
- $f_{y0}、f'_{y0}$ ——原构件截面受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值 (MPa)，按第 5.1.5.5 款规定取值；
- $A_{s0}、A'_{s0}$ ——原构件截面受拉钢筋和受压钢筋的锈后实际截面面积 (mm<sup>2</sup>)；
- $a'$ ——纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离 (mm)；
- $h_0$ ——构件加固前的截面有效高度 (mm)；
- $\psi_f$ ——考虑碳纤维实际抗拉应变达不到设计值的强度利用系数，当大于 1.0 时，取 1.0；
- $f_f$ ——碳纤维的抗拉强度设计值 (MPa)，应根据碳纤维的品种按表 5.3.5 采用；
- $A_{fe}$ ——碳纤维的有效截面面积 (mm<sup>2</sup>)；
- $\varepsilon_{cu}$ ——混凝土极限压应变，取 0.0033；
- $\varepsilon_{f0}$ ——考虑二次受力影响时，碳纤维的滞后应变，若不考虑二次受力影响，取 0；
- $\varepsilon_f$ ——碳纤维拉应变设计值，应根据碳纤维的品种按表 5.3.5 采用；
- $\alpha_f$ ——综合考虑受弯构件裂缝界面内力臂变化、钢筋拉应变不均匀以及钢筋排列影响等的计算系数，应按表 H.1.3 采用；
- $M_{0k}$ ——加固前受弯构件验算截面上原作用的弯矩标准值 (N·mm)；
- $E_s$ ——新增钢筋弹性模量 (MPa)；
- $A_s$ ——新增受拉钢筋的截面面积 (mm<sup>2</sup>)。

计算系数  $\alpha_f$  值 表 H.1.3

| $\rho_{ie}$ |      | $\leq 0.007$ | 0.010 | 0.020 | 0.030 | 0.040 | $\geq 0.060$ |
|-------------|------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| $\alpha_f$  | 单排钢筋 | 0.70         | 0.90  | 1.15  | 1.20  | 1.25  | 1.30         |
|             | 双排钢筋 | 0.75         | 1.00  | 1.25  | 1.30  | 1.35  | 1.40         |

注：①表中  $\rho_{ie}$  为混凝土有效受拉截面的纵向受拉钢筋配筋率，按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267) 的有关规定计算；

②当原构件钢筋应力  $\sigma_{s0} \leq 150\text{MPa}$ ，且  $\rho_{ie} \leq 0.05$  时，表中  $\alpha_f$  值可乘以调整系数 0.9。

H.1.4 实际应粘贴的碳纤维截面面积应按下列公式计算：

$$A_f = \frac{A_{fe}}{k_m}$$

(H.1.4-1)

当采用预成型板时

$$k_m = 1.0$$

(H.1.4-2)

当采用多层粘贴的纤维织物时

$$k_m = 1.16 - \frac{n_f E_f t_f}{308000} \leq 0.90 \tag{H.1.4-3}$$

式中  $A_f$  ——实际应粘贴的碳纤维截面面积( $\text{mm}^2$ )；  
 $A_{fe}$  ——碳纤维的有效截面面积( $\text{mm}^2$ )；  
 $k_m$  ——碳纤维厚度折减系数；  
 $n_f$ 、 $t_f$  ——分别为碳纤维层数和单层厚度(mm)；  
 $E_f$  ——碳纤维弹性模量设计值(MPa),应根据碳纤维的品种按表 5.3.5 采用。

**H.1.5** 对受弯构件正弯矩区的正截面加固,粘贴碳纤维长度应适当延伸,其最小粘贴延伸长度(图 H.1.5)应按下式计算:

$$l_c = \frac{\psi_l f_f A_f}{f_{f,v} b_f} + 200 \tag{H.1.5}$$

式中  $l_c$  ——碳纤维粘贴延伸长度(mm)；  
 $\psi_l$  ——修正系数;对于重要构件,取 1.45;对一般构件,取 1.0；  
 $f_f$  ——碳纤维抗拉强度设计值(MPa),按表 5.3.5 采用；  
 $A_f$  ——实际粘贴的碳纤维截面面积( $\text{mm}^2$ )；  
 $f_{f,v}$  ——碳纤维与混凝土之间的粘结强度设计值(MPa),取  $f_{f,v} = 0.40 f_t$ ;  $f_t$  为混凝土抗拉强度设计值,按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)规定值采用;当  $f_{f,v}$  计算值低于 0.40 时,取 0.40MPa;当  $f_{f,v}$  计算值高于 0.70 时,取 0.70MPa；  
 $b_f$  ——对梁为受拉面粘贴的碳纤维的总宽度(mm),对板为 1000mm 板宽范围内粘贴的碳纤维总宽度。

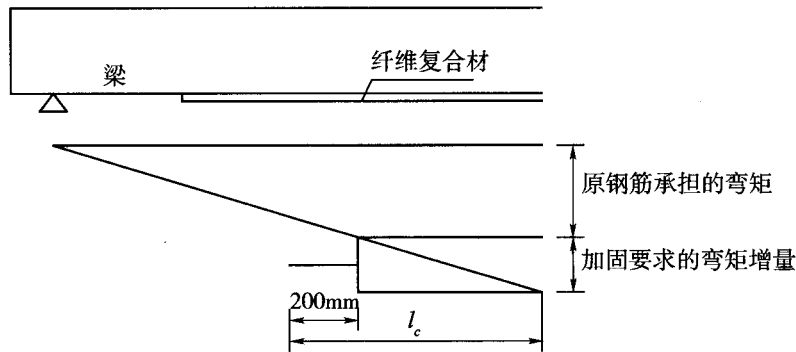


图 H.1.5 碳纤维的粘贴延伸长度示意图

**H.1.6** 对受弯构件负弯矩区的正截面加固,碳纤维的截断位置距支座边缘的距离除应根据负弯矩包络图按式(H.1.5)确定外,尚应符合构造的规定。

**H.1.7** 对翼缘位于受压区的 T 形截面受弯构件的受拉面粘贴碳纤维进行受弯加固时,应按粘贴碳纤维加固受弯构件正截面计算规定和现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)中关于 T 形截面受弯承载力的计算方法计算。

**H.1.8** 当碳纤维全部粘贴在梁底受拉面有困难时,可将部分碳纤维对称地粘贴在梁的两侧面。此时侧面粘贴区域应控制在距受拉区边缘 1/4 梁高范围内,且应按式(H.1.8)计算确定梁的两侧面实际需要粘贴的碳纤维截面面积。

$$A_{f,l} = \eta_f A_{f,b}$$

(H.1.8)

式中  $A_{f,l}$  ——梁两侧面需要粘贴的碳纤维截面面积( $\text{mm}^2$ );  
 $\eta_f$  ——考虑改贴梁侧面引起的碳纤维受拉合力及其力臂改变的修正系数,应按表 H.1.8 采用;  
 $A_{f,b}$  ——按梁底面计算确定的但须改贴到梁的两侧面的碳纤维截面面积( $\text{mm}^2$ )。

| 修正系数 $\eta_f$ 值 |      |      |      |      |      |
|-----------------|------|------|------|------|------|
| 表 H.1.8         |      |      |      |      |      |
| $h_f/h$         | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 |
| $\eta_f$        | 1.09 | 1.19 | 1.30 | 1.43 | 1.59 |

注:表中  $h_f$  为从梁受拉边缘算起的侧面粘贴高度;  $h$  为梁截面高度。

**H.1.9** 钢筋混凝土结构构件加固后,其正截面受弯承载力的提高幅度不应超过 40% ,并应验算其受剪承载力。

**H.1.10** 碳纤维复合材的加固量,对预成型板不宜超过 2 层,对湿法铺层的织物不宜超过 4 层。

**H.2 受弯构件斜截面加固计算**

**H.2.1** 对受弯构件的斜截面受剪承载力进行加固时,碳纤维应粘贴成垂直于构件轴线方向的环形箍或其他有效的 U 形箍(图 H.2.1)。

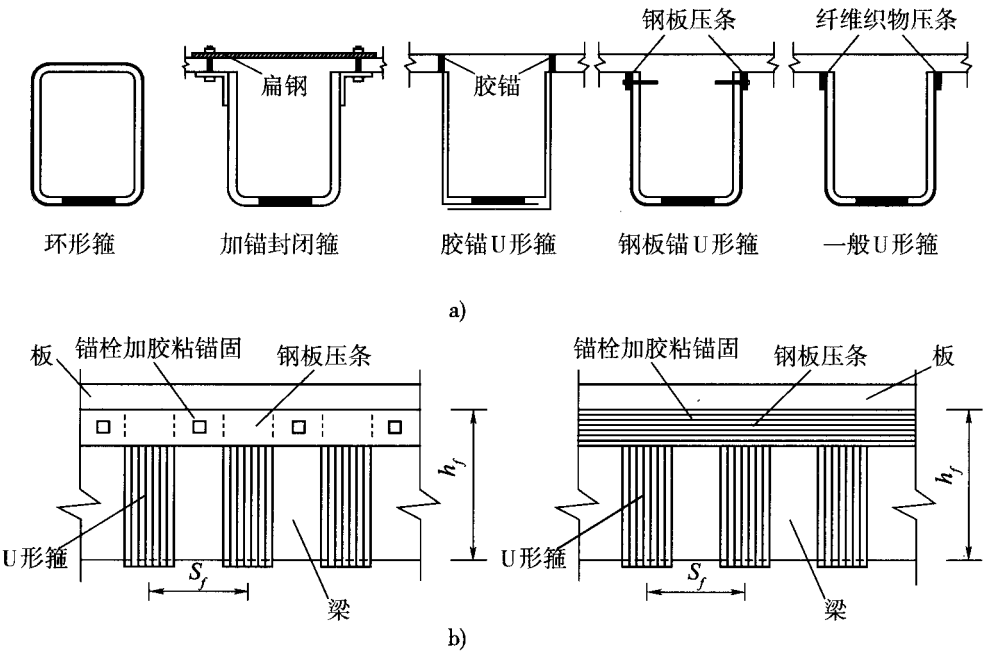


图 H.2.1 碳纤维抗剪箍及其粘结方式示意图  
a) 粘贴方式;b) U 形箍加纵向压条

**H.2.2 受弯构件加固后的斜截面应满足下列要求:**

当  $\frac{h_w}{b} \leq 4.0$  时,

$$V \leq 0.25\beta_c f_{co} b h_0 \quad (\text{H.2.2-1})$$

当  $\frac{h_w}{b} \geq 6.0$  时,

$$V \leq 0.20\beta_c f_{co} b h_0 \quad (\text{H.2.2-2})$$

当  $4.0 < \frac{h_w}{b} < 6.0$  时,按线性内插法取用。

式中  $h_w$  ——截面的腹板高度(mm):对矩形截面,取有效高度;对 T 形截面,取有效高度减去翼缘高度;对 I 形截面,取腹板净高;

$b$  ——矩形截面的宽度(mm);T 形或 I 形截面的腹板宽度;

$V$  ——构件斜截面加固后的剪力设计值(N);

$\beta_c$  ——混凝土强度影响系数;当混凝土强度等级不超过 C50 时,  $\beta_c$  取 1.0;当混凝土强度等级为 C80 时,  $\beta_c$  取 0.8,其间接线性内插法确定;

$f_{co}$  ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

$b$  ——矩形截面的宽度、T 形或 I 形截面的腹板宽度(mm);

$h_0$  ——截面有效高度(mm)。

**H.2.3 当采用条带构成的环形封闭箍或 U 形箍对钢筋混凝土梁进行抗剪加固时,其斜截面承载力应按下列公式计算:**

$$V \leq V_{b0} + V_{bf} \quad (\text{H.2.3-1})$$

$$V_{bf} = \frac{\psi_{vb} f_f A_f h_f}{s_f} \quad (\text{H.2.3-2})$$

$$A_f = 2n_f b_f t_f \quad (\text{H.2.3-3})$$

式中  $V$  ——构件斜截面加固后的剪力设计值(N);

$V_{b0}$  ——加固前梁的斜截面承载力(MPa),按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)计算;

$V_{bf}$  ——粘贴条带加固后,对梁斜截面承载力的提高值(MPa);

$\psi_{vb}$  ——与条带加锚方式及受力条件有关的抗剪强度折减系数,按表 H.2.3 确定;

$f_f$  ——受剪加固采用的碳纤维抗拉强度设计值(MPa),按表 5.3.5 规定的抗拉强度设计值乘以调整系数 0.56 确定;当为框架梁或悬挑构件时,调整系数改取 0.28;

$A_f$  ——配置在同一截面处构成环形或 U 形箍筋的碳纤维条带的全部截面面积( $\text{mm}^2$ ),按式(H.2.3-3)进行计算;

$h_f$  ——梁侧面粘贴的条带竖向高度(mm);对环形箍,取截面高度;

$s_f$  ——碳纤维条带的间距(mm)(图 H.2.1-b);

$n_f$  ——条带粘贴的层数;

$b_f$  ——条带宽度(mm);

$t_f$ ——条带单层厚度(mm)。

抗剪强度折减系数  $\psi_{vb}$  值 表 H.2.3

| 条带加锚方式 |                           | 环行箍及加锚封闭箍 | 胶锚或钢板锚 U 形箍 | 加织物压条的一般 U 形箍 |
|--------|---------------------------|-----------|-------------|---------------|
| 受力条件   | 均布荷载或剪跨比 $\lambda \geq 3$ | 1.00      | 0.92        | 0.85          |
|        | $\lambda \leq 1.5$        | 0.68      | 0.63        | 0.58          |

注:当  $\lambda$  为中间值时,按线性内插法确定  $\psi_{vb}$  值。

H.3 受压构件正截面加固计算

H.3.1 采用沿其全长无间隔地环向连续粘贴纤维织物的方法加固轴心受压构件时,应满足下列要求:

- (1) 圆形截面柱的长细比不大于 12;
- (2) 矩形截面柱的长细比不大于 14、截面高宽比不大于 1.5、截面高度不大于 600mm。

H.3.2 采用沿其全长无间隔地环向连续粘贴纤维织物的方法加固轴心受压构件时,其正截面受压承载力应按下列公式计算:

$$N \leq 0.9[(f_{c0} + 4\sigma_1)A_{cor} + f'_{y0}A'_{s0}] \tag{H.3.2-1}$$

$$\sigma_1 = 0.5\beta_c k_c \rho_f E_f \varepsilon_{fe} \tag{H.3.2-2}$$

对于圆形截面

$$A_{cor} = \pi D^2/4 \tag{H.3.2-3}$$

对于矩形截面

$$A_{cor} = bh - (4 - \pi)r^2 \tag{H.3.2-4}$$

式中  $N$ ——轴向压力设计值(N);

$f_{c0}$ ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

$\sigma_1$ ——有效约束应力(MPa);

$A_{cor}$ ——环向围束内混凝土面积(mm<sup>2</sup>),按式(H.3.2-3)、式(H.3.2-4)计算;

$f'_{y0}$ ——原构件截面受压钢筋的抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.5 款规定取值;

$A'_{s0}$ ——原构件截面受压钢筋的锈后实际截面面积(mm<sup>2</sup>);

$\beta_c$ ——混凝土强度影响系数;当混凝土强度等级不超过 C50 时, $\beta_c$  取 1.0;当混凝土强度等级为 C80 时, $\beta_c$  取 0.8,其间按线性内插法确定;

$k_c$ ——环向围束的有效约束系数,按第 H.3.3 条的规定采用;

$\rho_f$ ——环向围束体积比,按第 H.3.3 条的规定采用;

$E_f$ ——碳纤维的弹性模量(MPa);

$\varepsilon_{fe}$ ——碳纤维的有效拉应变设计值;重要构件取 0.0035;一般构件取 0.0045;

$D$ ——圆形截面柱的直径(mm);

$b$ ——正方形截面边长或矩形截面宽度(mm);

$h$ ——矩形截面高度(mm)；

$r$ ——截面棱角的倒角半径(mm)。

### H.3.3 环向围束的计算参数的确定(图 H.3.3)应满足下列要求：

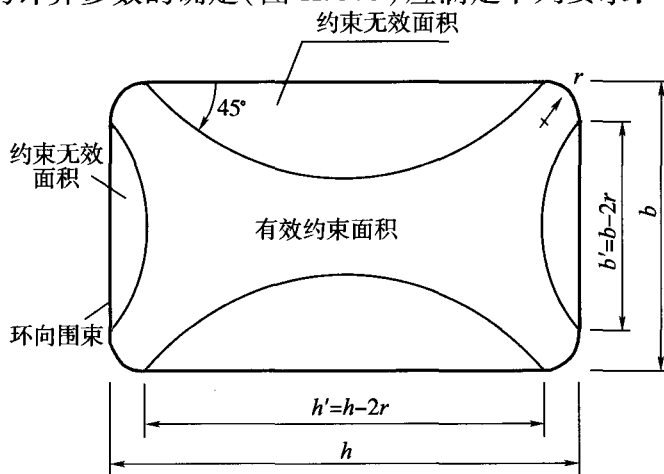


图 H.3.3 碳纤维抗剪箍及其粘结方式示意图

(1) 有效约束系数按下列公式确定：

圆形截面柱

$$k_c = 0.95 \quad (\text{H.3.3-1})$$

矩形截面柱

$$k_c = 1 - \frac{(b - 2r)^2 + (h - 2r)^2}{3A_{cor}(1 - \rho_s)} \quad (\text{H.3.3-2})$$

式中  $k_c$ ——有效约束系数；

$b$ ——矩形截面宽度(mm)；

$r$ ——截面棱角的倒角半径(mm)；

$h$ ——矩形截面高度(mm)；

$A_{cor}$ ——环向围束内混凝土面积( $\text{mm}^2$ )，按式(H.3.2-3)和式(H.3.2-4)计算；

$\rho_s$ ——柱中纵向钢筋的配筋率。

(2) 环向围束体积比按下列公式确定：

圆形截面柱

$$\rho_f = 4n_f t_f / D \quad (\text{H.3.3-3})$$

矩形截面柱

$$\rho_f = 2 \frac{n_f t_f (b + h)}{A_{cor}} \quad (\text{H.3.3-4})$$

式中  $\rho_f$ ——环向围束体积比；

$n_f$ 、 $t_f$ ——碳纤维的层数及每层的厚度(mm)；

$D$ ——圆形截面柱的直径(mm)；

$b$ ——矩形截面宽度(mm)；

$h$ ——矩形截面高度(mm)；

$A_{cor}$  ——环向围束内混凝土面积( $\text{mm}^2$ );按式(H.3.2-3)和式(H.3.2-4)计算。

H.4 受压构件斜截面加固计算

H.4.1 当采用碳纤维的条带对钢筋混凝土柱进行受剪加固时,碳纤维的条带应粘贴成环形箍且纤维方向应与柱的纵轴线垂直。

H.4.2 采用环形箍加固的柱,其斜截面受剪承载力应按下列公式计算:

$$V \leq V_{c0} + V_{cf} \tag{H.4.2-1}$$

$$V_{cf} = \psi_{vc} f_f A_f h / s_f \tag{H.4.2-2}$$

$$A_f = 2n_f b_f t_f \tag{H.4.2-3}$$

式中  $V$ ——构件加固后剪力设计值(N);  
 $V_{c0}$ ——加固前原构件斜截面受剪承载力(N),按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)的规定计算;  
 $V_{cf}$ ——粘贴碳纤维加固后,对柱斜截面承载力的提高值(N);  
 $\psi_{vc}$ ——与碳纤维受力条件有关的抗剪强度折减系数,按表 H.4.2 的规定值采用;  
 $f_f$ ——受剪加固采用的碳纤维抗拉强度设计值(MPa),按第 5.3.5 条规定的抗拉强度设计值乘以调整系数 0.5 确定;  
 $A_f$ ——配置在同一截面处碳纤维环形箍的全截面面积( $\text{mm}^2$ );  
 $h$ ——柱的截面高度(mm);  
 $s_f$ ——环形箍的中心间距(mm);  
 $n_f$ 、 $b_f$ 、 $t_f$ ——分别为碳纤维环形箍的层数、宽度和每层厚度(mm)。

|          |                          | $\psi_{vc}$ 值 |      |      |      | 表 H.4.2 |
|----------|--------------------------|---------------|------|------|------|---------|
| 轴 压 比    |                          | $\leq 0.1$    | 0.3  | 0.5  | 0.7  | 0.9     |
| 受力<br>条件 | 均布荷载或 $\lambda_c \geq 3$ | 0.95          | 0.84 | 0.72 | 0.62 | 0.51    |
|          | $\lambda_c \leq 1$       | 0.90          | 0.72 | 0.54 | 0.34 | 0.16    |

注:①  $\lambda_c$  为柱的剪跨比,对框架柱  $\lambda_c = \frac{H_n}{2h_0}$ ,  $H_n$  为柱的净高,  $h_0$  为柱截面有效高度;  
② 当  $\lambda_c$  为中间值时按线性内插法确定。

H.5 大偏心受压构件加固计算

H.5.1 当采用碳纤维加固大偏心受压的钢筋混凝土柱时,碳纤维应粘贴于构件受拉区边缘混凝土表面,且纤维方向应与柱的纵轴线方向一致。

H.5.2 矩形截面大偏心受压柱的加固,其正截面承载力应按下列公式计算:

$$N \leq \alpha_1 f_{c0} b x + f'_{y0} A'_{s0} - f_{y0} A_{s0} - f_f A_f \tag{H.5.2-1}$$

$$N \cdot e \leq \alpha_1 f_{c0} b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a') + f_f A_f (h - h_0) \tag{H.5.2-2}$$

$$e = \eta e_i + \frac{h}{2} - a \tag{H.5.2-3}$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (\text{H. 5.2-4})$$

式中  $N$ ——轴向压力设计值(N);

$\alpha_1$ ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值;当混凝土强度等级不超过 C50 时,取  $\alpha_1 = 1.0$ ;当混凝土强度等级为 C80 时,取  $\alpha_1 = 0.94$ ;其间按线性内插法确定;

$f_{c0}$ ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.6 款规定取值;

$b, h$ ——矩形截面宽度和高度(mm);

$x$ ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度(mm),简称混凝土受压区高度,应满足式(G.1.3-5)的要求;

$f'_{y0}$ ——原构件受压区纵向钢筋抗压强度设计值(MPa),按第 5.1.5.5 款规定取值;

$A'_{s0}$ ——原构件受压纵向钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );

$f_{y0}$ ——原纵向钢筋的抗拉强度设计值(MPa);

$A_{s0}$ ——原构件受拉纵向钢筋截面面积( $\text{mm}^2$ );

$f_f$ ——受剪加固采用的碳纤维抗拉强度设计值(MPa),按第 5.3.5 条规定的抗拉强度设计值乘以调整系数 0.5 确定;

$A_f$ ——碳纤维截面面积( $\text{mm}^2$ );

$h_0$ ——构件加固前的截面有效高度(mm);

$a'$ ——纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离(mm);

$e$ ——轴向压力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离(mm);

$\eta$ ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心矩增大系数,除应按现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)的规定计算外,尚应乘以第 E.3.3 条规定的修正系数  $\psi_\eta$ ;

$e_i$ ——初始偏心距(mm);

$a$ ——纵向受拉钢筋合力点至截面近边的距离(mm);

$e_0$ ——轴向压力对截面重心的偏心距(mm);

$e_a$ ——附加偏心距(mm),按偏心方向截面最大尺寸  $h$  确定;当  $h \leq 600 \text{ mm}$  时,取 20mm;当  $h > 600 \text{ mm}$  时,  $e_a = h/30$ 。

## H.6 受拉构件正截面加固计算

**H.6.1** 当采用外贴碳纤维加固钢筋混凝土受拉构件时,纤维织物应按原构件纵向受拉钢筋的配置方式粘贴于相应位置的混凝土表面上,且纤维方向应与构件受拉方向一致,并应处理好围拢部位的搭接和锚固。

**H.6.2** 轴心受拉构件的加固,其正截面承载力应按下式计算:

$$N \leq f_{y0} A_{s0} + f_f A_f \quad (\text{H. 6.2})$$

式中  $N$ ——轴向拉力设计值(N);

$f_{y0}$ ——原纵向钢筋的抗拉强度设计值(MPa);

$A_{s0}$ ——原构件受拉纵向钢筋截面面积( $\text{mm}^2$ );

$f_f$ ——碳纤维抗拉强度设计值 (MPa), 应根据其品种按表 5.3.5 的规定采用;

$A_f$ ——碳纤维截面面积 ( $\text{mm}^2$ )。

**H.6.3** 矩形截面大偏心受拉构件的加固, 其正截面承载力应按下列公式计算:

$$N \leq f_{y0} A_{s0} + f_f A_f - \alpha_1 f_{c0} b x - f'_{y0} A'_{s0} \quad (\text{H.6.3-1})$$

$$N \cdot e \leq \alpha_1 f_{c0} b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a') + f_f A_f (h - h_0) \quad (\text{H.6.3-2})$$

式中  $N$ ——轴向拉力设计值 (N);

$f_{y0}$ ——原纵向钢筋的抗拉强度设计值 (MPa);

$A_{s0}$ ——原构件受拉纵向钢筋截面面积 ( $\text{mm}^2$ );

$f_f$ ——碳纤维抗拉强度设计值 (MPa), 应根据其品种按表 5.3.5 的规定采用;

$A_f$ ——碳纤维截面面积 ( $\text{mm}^2$ );

$\alpha_1$ ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值; 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取  $\alpha_1 = 1.0$ ; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取  $\alpha_1 = 0.94$ ; 其间接线性内插法确定;

$f_{c0}$ ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa), 按第 5.1.5.6 款规定取值;

$b, h$ ——矩形截面宽度和高度 (mm);

$x$ ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度 (mm), 简称混凝土受压区高度;

$f'_{y0}$ ——原构件受压区纵向钢筋抗压强度设计值 (MPa), 按第 5.1.5.5 款规定取值;

$A'_{s0}$ ——原构件受压纵向钢筋的截面面积 ( $\text{mm}^2$ );

$e$ ——轴向拉力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离 (mm);

$h_0$ ——构件加固前的截面有效高度 (mm);

$a'$ ——纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离 (mm)。

## H.7 提高柱延性的加固计算

**H.7.1** 钢筋混凝土柱因延性不足而进行抗震加固时, 可采用环向粘贴碳纤维构成的环向围束作为附加箍筋。

**H.7.2** 当采用环向围束作为附加箍筋时, 应按式 (H.7.2-1) 和式 (H.7.2-2) 计算柱箍筋加密区加固后的箍筋体积配筋率, 且应满足现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267) 的有关要求。

$$\rho_v = \rho_{v,e} + \rho_{v,f} \quad (\text{H.7.2-1})$$

$$\rho_{v,f} = k_c \rho_f \frac{b_f f_f}{s_f f_{y0}} \quad (\text{H.7.2-2})$$

式中  $\rho_v$ ——箍筋体积配筋率;

$\rho_{v,e}$ ——被加固柱原有箍筋的体积配筋率; 当需重新复核时, 应按箍筋范围内的核心截面进行计算;

$\rho_{v,f}$ ——环向围束作为附加箍筋算得的箍筋体积配筋率的增量;

$k_c$ ——环向围束的有效约束系数, 圆形截面取 0.90, 正方形截面取 0.66, 矩形截

面取 0.42;

$\rho_f$ ——环向围束体积比,按第 H.3.3 条计算;

$b_f$ ——环向围束纤维条带的宽度(mm);

$f_f$ ——环向围束碳纤维的抗拉强度设计值(MPa),应根据其品种按表 5.3.5 采用;

$s_f$ ——环向围束纤维条带的中心间距(mm);

$f_{y0}$ ——原箍筋抗拉强度设计值(MPa)。

H.8 构造规定

**H.8.1** 对钢筋混凝土受弯构件正弯矩区进行正截面加固时,其受拉面沿轴向粘贴的碳纤维应延伸至支座边缘,且应在碳纤维的端部和集中载荷作用点的两侧对梁设置碳纤维的 U 形箍、对板设置横向压条进行锚固。

**H.8.2** 当碳纤维延伸至支座边缘仍不满足附录 H.1.5 条延伸长度的要求时应采取锚固措施,并应符合下列规定。

**H.8.2.1** 对梁应在延伸长度范围内均匀设置 U 形箍锚固(图 H.8.2a),并应在延伸长度端部设置 U 形箍锚固。U 形箍的粘贴高度应为梁的截面高度,若梁有翼缘或有现浇面板,应延伸至其底面。U 形箍的宽度,对端箍不应小于加固碳纤维宽度的 2/3,且不应小于 200mm;对中间箍不应小于加固碳纤维宽度的 1/2,且不应小于 100mm。U 形箍的厚度不应小于受弯加固碳纤维厚度的 1/2。

**H.8.2.2** 对板应在延伸长度范围内通长设置垂直于受力纤维方向的压条(图 H.8.2b)。压条应在延伸长度范围内均匀布置。压条的宽度不应小于受弯加固碳纤维条带宽度的 3/5,压条的厚度不应小于受弯加固碳纤维厚度的 1/2。

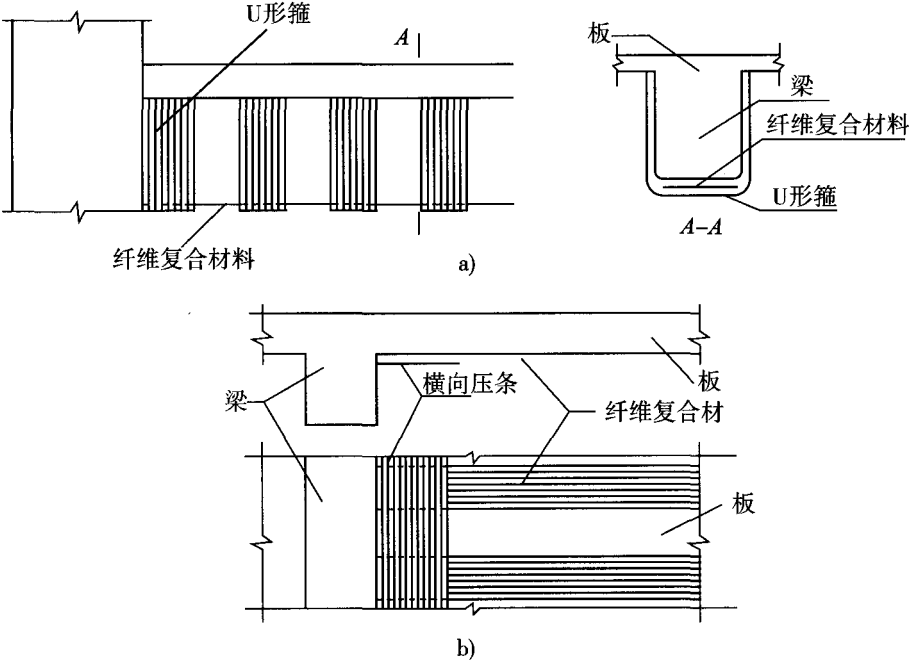


图 H.8.2 梁、板粘贴碳纤维复合材料端部锚固措施示意图  
a) U 形箍; b) 横向压条

**H.8.3** 当采用碳纤维对受弯构件负弯矩区进行正截面承载力加固时,碳纤维应在负弯矩包络图范围内连续粘贴;其延伸长度的截断点应位于正弯矩区,且距正负弯矩转换点不应小于1m。

**H.8.4** 在梁柱的端节点处,碳纤维只能贴至柱边缘而无法延伸时,应粘贴 L 形钢板和 U 形箍进行锚固。

**H.8.5** 当加固的受弯构件为板、壳、墙和筒体时,碳纤维应选择多条密布的方式进行粘贴,不得使用未经裁剪成条的整幅织物满贴。

**H.8.6** 当受弯构件粘贴的多层纤维织物允许截断时,相邻两层纤维织物宜按内短外长的原则分层截断;外层纤维织物的截断点宜越过内层截断点 200mm 以上,并应在截断点加设 U 形箍。

**H.8.7** 当采用碳纤维对钢筋混凝土梁或柱的斜截面承载力进行加固时,其构造应符合下列规定。

**H.8.7.1** 加固箍宜选用环形箍或加锚的 U 形箍。

**H.8.7.2** U 形箍的纤维受力方向应与构件轴向垂直。

**H.8.7.3** 当环形箍或 U 形箍采用碳纤维条带时,其净间距不应大于现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267)规定的最大箍筋间距的 0.7 倍,且不应大于梁高的 0.25 倍。

**H.8.7.4** U 形箍的粘贴高度应符合第 H.8.2 条的规定;U 形箍的上端应粘贴纵向压条予以锚固。

**H.8.7.5** 当梁的高度大于等于 600mm 时,应在梁的腰部增设一道纵向腰压带。

**H.8.8** 当采用碳纤维的环向围束对钢筋混凝土柱进行正截面加固或提高延性的抗震加固时,其构造应符合下列规定。

**H.8.8.1** 环向围束的纤维织物层数对圆形截面不应少于 2 层,对矩形截面柱不应少于 3 层;

**H.8.8.2** 环向围束上下层之间的搭接宽度不应小于 50mm,纤维织物环向截断点的延伸长度不应小于 200mm,且各条带搭接位置应相互错开。

**H.8.9** 当沿柱轴向粘贴碳纤维对大偏心受压柱进行正截面承载力加固时,除应按受弯构件正截面和斜截面加固构造的原则粘贴碳纤维外,尚应在柱的两段增设机械锚固措施。

**H.8.10** 当采用环形箍、U 形箍或环向围束加固矩形截面构件时,其截面棱角应在粘贴前通过打磨加以圆化。梁的倒角半径不应小于 20mm;柱的倒角半径不应小于 25mm。

## H.9 施 工

**H.9.1** 碳纤维加固施工应根据施工现场和被加固构件混凝土的实际状况,拟订施工方案和施工计划。

**H.9.2** 施工应按照下列工序进行:

- (1) 施工准备;
- (2) 混凝土表面处理;

- (3) 配制并涂刷底层树脂;
- (4) 配制找平材料并对不平整处进行处理;
- (5) 配制并涂刷浸渍树脂或粘贴树脂;
- (6) 粘贴碳纤维;
- (7) 表面防护。

**H.9.3** 在表面处理和粘贴碳纤维之前应对设计加固部位进行放线定位。

**H.9.4** 加固施工应先彻底清除待加固构件混凝土表面的附着物。混凝土表面的裂缝较小且保护层没有松动时,可对裂缝进行灌浆或封闭处理,裂缝的灌浆或封闭处理应符合附录 B 的规定;混凝土保护层已经松动时,应将松动的保护层全部凿除并对钢筋进行除锈后重新施工保护层。

**H.9.5** 被粘贴的混凝土表面应打磨平整,除去表层浮浆、油污等杂质,直至完全露出混凝土结构新面。构件转角粘贴处应打磨成圆弧状,圆弧半径应符合第 H.8.10 条规定。

**H.9.6** 施工时应考虑环境温度、湿度对胶粘剂固化的不利影响。施工环境温度不应低于 5℃;混凝土表层含水率大于 4% 时应采取干燥处理措施,达到要求后方可采用干固化胶粘剂粘贴施工,处于浪溅区、水位变动区构件的加固应采用湿固化胶粘剂粘贴施工。

**H.9.7** 胶粘剂配制时应按产品使用说明中规定的配比称量置于容器中搅拌至色泽均匀。搅拌用容器内及搅拌器上不得有油污及杂质,应根据现场实际情况确定胶粘剂的每次拌合量,并应严格控制使用时间。

**H.9.8** 根据底胶的特性要求,底胶应在规定的时间内均匀涂抹于混凝土表面,并应在底胶表面指触干燥后尽快进行下一步工序。

**H.9.9** 找平材料应按修补胶的工艺要求配制。混凝土表面缺陷部位应采用找平材料进行修补,其表面应平整且没有棱角。转角处应采用找平材料修复为光滑的圆弧,圆弧半径应符合第 H.8.10 条的规定。找平材料表面指触干燥后应尽快进行下一步工序。

**H.9.10** 粘贴碳纤维布应按下列步骤和要求进行:

- (1) 按设计要求的尺寸裁剪碳纤维布,且裁剪后的碳纤维布宽度不小于 150mm;
- (2) 将浸渍胶均匀、饱满地涂抹于需要粘贴部位的混凝土面上;
- (3) 将剪裁好的碳纤维布敷在涂好胶粘剂的基层上,顺纤维方向多次滚压,挤出气泡,使浸渍胶充分浸透碳纤维布,滚压时不损伤碳纤维布;
- (4) 多层粘贴时重复上述步骤,在纤维表面的浸渍树脂指触干燥后尽快进行下一层的粘贴;等待时间超过 60min 时,则在 12h 后重新涂刷胶粘剂;
- (5) 在最后一层碳纤维布的表面均匀涂抹一道浸渍胶。

**H.9.11** 粘贴碳纤维板应按下列步骤和要求进行:

- (1) 按设计要求的尺寸裁剪碳纤维板;
- (2) 将碳纤维板表面用丙酮擦拭至白布擦拭检查无碳微粒为止,需要粘贴两层时,底层碳纤维板的两面均擦拭干净;
- (3) 擦拭干净的碳纤维板立即涂刷粘结胶,使胶层呈中间凸起状,平均厚度不小于 2mm;

(4)将涂有粘结胶的碳纤维板轻压贴于需粘贴的位置,顺纤维方向均匀平稳压实,使粘结胶从两边溢出、密实无空洞;加压时板无移动错位;平行粘贴多条碳纤维板时,两条板带之间的空隙不小于5mm;

(5)需粘贴两层碳纤维板时,进行连续粘贴;不能连续粘贴时,在重新开始粘贴前将底层碳纤维板重新清理。

**H.9.12** 碳纤维片材施工应远离电气设备和电源,或采取可靠的防护措施。施工过程中应避免碳纤维片材的弯折。

**H.9.13** 胶粘剂的原料应密封储存,远离火源,避免阳光直射。

**H.9.14** 胶粘剂的配制和使用场所应通风良好。

## 附录 J 最大名义应力计算

**J.0.1** 轴心受压、受拉构件和受弯构件在负荷下焊接加固时,最大名义应力可按下列公式计算:

$$\sigma_{0\max} = \frac{N_o}{A_{on}} \pm \frac{M_{ox} + N_o \omega_{ox}}{\alpha_{Nx} W_{oxn}} \pm \frac{M_{oy} + N_o \omega_{oy}}{\alpha_{Ny} W_{oyn}} \quad (\text{J.0.1-1})$$

$$\alpha_{Nx} = 1 - \frac{N_o \lambda_x^2}{\pi^2 EA_o} \quad (\text{J.0.1-2})$$

$$\alpha_{Ny} = 1 - \frac{N_o \lambda_y^2}{\pi^2 EA_o} \quad (\text{J.0.1-3})$$

$$l_{ox} = \frac{M_{onx}(N_{oy} - N_o)(N_{oEx} - N_o)}{N_o N_{oy} N_{oEx}} \quad (\text{J.0.1-4})$$

$$l_{oy} = \frac{M_{ony}(N_{oy} - N_o)(N_{oEy} - N_o)}{N_o N_{oy} N_{oEy}} \quad (\text{J.0.1-5})$$

$$N_{oy} = A_o \cdot f_y \quad (\text{J.0.1-6})$$

$$N_{oEx} = \frac{\pi^2 EA_o}{\lambda_x} \quad (\text{J.0.1-7})$$

$$N_{oEy} = \frac{\pi^2 EA_o}{\lambda_y} \quad (\text{J.0.1-8})$$

$$M_{onx} = W_{onx} \cdot f_y \quad (\text{J.0.1-9})$$

$$M_{ony} = W_{ony} \cdot f_y \quad (\text{J.0.1-10})$$

式中

$\sigma_{0\max}$ ——最大名义应力(MPa);

$N_o$ 、 $M_{ox}$ 、 $M_{oy}$ ——原构件的轴力(N),绕  $x$  轴和  $y$  轴的弯矩(N·mm);

$A_{on}$ 、 $W_{oxn}$ 、 $W_{oyn}$ ——原构件的净截面面积( $\text{mm}^2$ ),对  $x$  轴和  $y$  轴的净截面抵抗矩( $\text{mm}^3$ );

$\alpha_{Nx}$ 、 $\alpha_{Ny}$ ——弯矩增大系数,对拉弯构件  $\alpha_{Nx} = \alpha_{Ny} = 1.0$ ;对压弯构件按式(J.0.1-2)和式(J.0.1-3)计算;

$A_o$ 、 $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ ——原构件的毛截面面积( $\text{mm}^2$ )、对  $x$  轴和  $y$  轴的长细比;

$\omega_{ox}$ 、 $\omega_{oy}$ ——原构件对  $x$  轴和  $y$  轴的初始挠度(mm),其值取实测值与按式(J.0.1-4)和式(J.0.1-5)计算的等效偏心距  $l_{ox}$  或  $l_{oy}$  之和;

$N_{oy}$ 、 $N_{oEx}$ 、 $N_{oEy}$ 、 $M_{onx}$ 、 $M_{ony}$ ——原构件的轴力(N)和弯矩(N·mm),分别按式(J.0.1-6)~式(J.0.1-10)计算;

$f_y$ ——钢材屈服强度标准值(MPa)。

## 附录 K 本规范用词用语说明

**K.0.1** 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用语说明如下:

(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”。

表示有选择,在一定条件下可以这样做的采用“可”。

**K.0.2** 条文中指应按其他有关标准、规范执行时,写法为“应符合……的有关规定”或“应按……执行”。

## 附加说明

# 本规范主编单位、参加单位、 主要起草人、总校人员和管理组人员名单

主 编 单 位:中交四航工程研究院有限公司

参 加 单 位:南京水利科学研究院

中交第四航务工程勘察设计院有限公司

中交四航局港湾工程设计院有限公司

中交天津港湾工程研究院有限公司

湛江港(集团)股份有限公司

主 要 起 草 人:潘德强(中交四航工程研究院有限公司)

王胜年(中交四航工程研究院有限公司)

王友元(中交四航工程研究院有限公司)

(以下按姓氏笔画为序)

王永平(中交四航工程研究院有限公司)

何文钦(中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

苏林王(中交四航工程研究院有限公司)

张 能(湛江港(集团)股份有限公司)

吴瑞大(中交四航局港湾工程设计院有限公司)

范卫国(南京水利科学研究院)

周庆华(中交四航工程研究院有限公司)

黄孝蘅(中交天津港湾工程研究院有限公司)

黄君哲(中交四航工程研究院有限公司)

总 校 人 员 名 单:胡 明(交通运输部水运局)

李德春(交通运输部水运局)

阚 津(交通运输部水运局)

吴敦龙(中交水运规划设计有限公司)

潘德强(中交四航工程研究院有限公司)

王胜年(中交四航工程研究院有限公司)

王友元(中交四航工程研究院有限公司)

黄君哲(中交四航工程研究院有限公司)

苏林王(中交四航工程研究院有限公司)

管理组人员名单:王胜年(中交四航工程研究院有限公司)

黄君哲(中交四航工程研究院有限公司)

苏林王(中交四航工程研究院有限公司)

何文钦(中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

胡继业(中交四航工程研究院有限公司)

中华人民共和国行业标准

# 港口水工建筑物修补加固技术规范

**JTS 311—2011**

条文说明

目 次

1 总则 ..... (91)

3 基本规定 ..... (92)

4 混凝土结构破损修补 ..... (93)

    4.1 一般规定 ..... (93)

    4.2 修补材料 ..... (93)

    4.3 非耐久性破损修补 ..... (94)

    4.4 耐久性破损修补 ..... (94)

5 混凝土结构加固 ..... (96)

    5.1 一般规定 ..... (96)

    5.2 加固材料 ..... (96)

    5.3 加固方法及其选择 ..... (97)

6 钢结构加固与修补 ..... (99)

    6.1 一般规定 ..... (99)

    6.4 连接的加固 ..... (99)

    6.5 裂纹修复与加固 ..... (100)

7 检验与验收 ..... (101)

    7.2 混凝土结构破损修补检验验收 ..... (101)

    7.3 电化学脱盐保护系统检验验收 ..... (101)

    7.4 混凝土外加电流阴极保护检验验收 ..... (101)

    7.5 混凝土结构加大截面加固检验验收 ..... (101)

    7.6 外粘型钢加固检验验收 ..... (102)

    7.7 粘贴钢板加固检验验收 ..... (102)

    7.8 粘贴碳纤维加固检验验收 ..... (102)

# 1 总 则

**1.0.1** 我国大量在役港口水工建筑物随着运行时间的增长,已出现材料劣化、功能降低的现象。随着我国经济建设的发展,港口水工建筑物在我国国民经济建设中起着越来越重要的作用。对于已经出现材料劣化、功能降低的港口水工建筑物,只有采取合理的修补对策,恢复其良好的使用功能和保证其安全的使用状态,才能最大限度地延长其使用寿命。

由于港口水工建筑物结构的安全性、耐久性受环境作用的影响较大,导致维修技术要求高,施工难度大。从我国现阶段港口水工建筑物使用状态来看,材料劣化及功能降低的情况普遍存在,随着时间的推移,对港口水工建筑物的维修将是越来越重要的工作。迄今为止,我国尚无一本涉及港口水工建筑物有关维修的规范。目前,《港口水工建筑物检测与评估技术规范》(JTJ 302—2006)已发布实施,该规范根据在役港口水工建筑物不同构造形式、劣化方式对港口水工建筑物的维修提供了必要的技术依据。在此基础上,制定《港口水工建筑物修补加固技术规范》,为港口水工建筑物修补、加固的设计和施工提供系统、实用的技术标准,对保证修补和加固工程质量、保证港口水工建筑物长期、连续、安全的使用等都具有重要的意义。

**1.0.3** 基于港口水工建筑物的安全性、使用性和耐久性受环境作用的影响很大,为了确保港口水工建筑物的修补、加固质量,需要针对受损原因和损坏状况,选择正确的修补、加固措施,因此,规定修补、加固前应对港口水工建筑物进行检测与评估。

### 3 基本规定

**3.0.2** 《港口水工建筑物检测与评估技术规范》(JTJ 302—2006)规定对安全性、使用性、耐久性评估均按 A、B、C、D 分级,每一级均有具体的分级标准和相应的处理要求,其评估分级和处理结果是确定港口水工建筑物修补、加固对策的依据。

**3.0.4** 港口水工建筑物耐久性损伤引起的结构破损或功能降低是由于材料劣化造成的,而材料劣化主要是环境作用造成,例如海水环境引起的混凝土冻融破坏以及氯离子渗入引起的钢筋腐蚀破坏等,其随时间的发展,劣化进程加快,腐蚀破坏越来越严重。因此,需要充分考虑环境作用下修补加固前结构的剩余使用寿命和修补加固后的目标使用寿命,才能选择恰当的修补、加固方案。

**3.0.9** 修补、加固竣工后,将修补、加固设计、施工、检验与验收等资料妥善保存,不仅有利于今后维护管理,而且通过以后跟踪检查或检测,可以发现原修补、加固设计、施工等环节需要改进的问题,对今后港口水工建筑物修补、加固和维护的技术进步将发挥很好的促进作用。

**3.0.10** 通常业主和设计单位都要求经修补、加固的结构或构件能达到预期的目标使用年限。鉴于港口水工建筑物环境作用对耐久性及其使用寿命影响的特点,未经修补的部位随着使用年限的延长易出现新的耐久性损伤;此外修补、加固材料的选择和施工不当也可能达不到预期的使用年限,这些因素都可能导致经修补、加固的结构或构件与未经修补加固的使用寿命不一定匹配的情况。因此定期跟踪检查不但是港口水工建筑物安全运行维护的需要,也是为修补加固后结构或构件能否达到目标使用年限以及达到目标使用年限后能否继续延长其使用寿命提供了判断依据。

**3.0.11** 港口水工建筑物修补、加固是以专门的结构用途、特定的使用条件和具体使用环境为条件进行设计的。倘若修补、加固后任意改变其用途或使用条件,有可能影响结构的安全性及耐久性。因此,本条作为强制性条文,必须严格执行。

## 4 混凝土结构破损修补

### 4.1 一般规定

**4.1.1、4.1.2** 港口水工建筑物耐久性评估达到 B、C、D 级以及使用性和安全性评估达到 C、D 级时,结构构件均不同程度地受损,需要对破损部位进行修补,一方面可避免耐久性进一步劣化,另一方面可保证结构正常使用,即使因耐久性劣化或荷载原因已影响到安全性而需要加固时,也要将破损部位修复完整。耐久性原因、施工原因以及荷载作用引起的破损破坏特征不同。破损修补的对策差异较大,破损修补方案应能保证修补质量和效果,且施工可行,需要综合考虑破损原因、损伤构件结构形式、构件所处的暴露环境等因素,按照附录 B 选择适宜的方法进行修补。

**4.1.3** 对于海水环境中因氯离子渗入引起局部钢筋腐蚀破坏的混凝土结构,即使是外观完好的构件,混凝土内已存在一定量的氯离子,是将来容易发生腐蚀破坏潜在的危害。为了消除这种危害,当修补后的结构目标使用年限较长,一般根据腐蚀程度对混凝土结构采用电化学脱盐或外加电流阴极保护措施。前者可以使混凝土中已存在的氯离子在电场作用下迁移出混凝土保护层,后者是对被保护的钢筋施加一定密度的阴极电流,使其不能进行释放电子的阳极反应,是长期保护钢筋不发生腐蚀的一种有效方法。

### 4.2 修补材料

**4.2.1** 港口水工建筑物混凝土结构修补用的水泥不推荐使用矿渣硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥,主要原因是这两种水泥本来就掺有大量矿渣或粉煤灰混合材,不适宜配制用于海水环境中的修补混凝土。除此以外,这两种水泥配制的混凝土早期强度低,矿渣硅酸盐水泥配制的拌和物还易泌水等。对于受到水位涨落影响的修补区域,考虑到施工需要,必要时可采用具有快速硬化的特种水泥。

**4.2.2** 修补用的混凝土,其强度等级之所以要求比原结构构件提高一级,且不得低于 C30,主要是为了保证新老混凝土界面有足够的粘结强度和新混凝土结构具有较好的耐久性。对处于海水环境混凝土结构、构件的修补,为了提高修补混凝土和喷射混凝土耐久性,还规定了抗氯离子渗透性不大于 1000C 的要求。

修补钢筋混凝土构件通常由于更换或增补钢筋,使钢筋的净距减小,钢筋往往非常密集,施工区域窄小,施工条件也相对较差。为了保证修补混凝土的密实性和新老混凝土的结合牢固,规定了混凝土粗骨料最大粒径的限值,并对立模浇筑的修补混凝土性能提出了较高的要求,特别是规定了混凝土应具有大流动性、自密实性和高耐久性能。这是由于使用普通的振捣设备难于使修补混凝土完全密实,特别是新老混凝土的交接面位置,因此,

混凝土具有自密实性能就显得非常重要。这是根据国内外近年来对处于海水环境混凝土结构腐蚀破坏修补的经验,并参照相关欧盟标准所作的相关规定。

水下不分散混凝土具有抗水冲刷、直接在水中浇筑不离析、且可自流平自密实的性能。本规范规定采用水下不分散混凝土对水下混凝土结构进行修补,并依据交通部西部交通建设科技项目“水下混凝土材料及耐久性研究”成果,规定了水下不分散混凝土坍落流动度的范围在 400 ~ 600mm,30min 坍落流动度损失不大于 50mm;同时,为了满足水下不分散混凝土的抗水冲刷性能,保证水下混凝土的修补质量,规定水陆成型试件 28d 抗压强度比不小于 75%。

**4.2.3、4.2.4** 由于港口水工建筑物主要构件通常处于水位变动区和浪溅区,混凝土表面多数情况下处于潮湿或饱水状态,因此规定修补用的封缝材料、灌浆材料、嵌缝材料要求具有湿固化性能。对修补活动裂缝的柔性嵌缝密封材料,考虑到需要适应反复变形的能力,其主要性能指标参照我国现行行业标准《道桥嵌缝用密封胶》(JC/T 976—2005)制定。

**4.2.5** 聚合物改性水泥砂浆是通过向水泥砂浆掺入聚合物乳胶改性而制成的一种有机复合材料,具有弹模低、抗拉强度高、与老混凝土粘结强度高特点,能承受较大振动、反复冻融循环、温湿度强烈变化等作用,特别适用于恶劣环境条件下混凝土结构表层修补。由于聚合物改性水泥砂浆修补层通常厚度较薄,在修补后因体积收缩容易开裂而影响修补质量,因此对修补砂浆的干缩值作了规定。

**4.2.6** 修补混凝土与原有混凝土的结合面是结构修补加固的薄弱位置,为了保证该位置新老混凝土的粘结强度,满足结构共同受力要求。对于港口水工建筑物的修补加固界面粘结材料,除了应具有湿固化性能外,同时根据目前国内外界面粘结材料的性能指标值,参照欧盟标准 BSEN 1504 等,规定了界面粘结材料强度的最小限值。

### 4.3 非耐久性破损修补

**4.3.1** 国内外相关研究表明,混凝土结构小于 0.2mm 的静止裂缝,对氯离子渗透影响不大,且随着混凝土不断水化,水化产物可不断填充裂缝,随时间增长甚至可以自愈。因此,本规范对非耐久性破损引起的小于 0.2mm 的静止裂缝,可以不作修补处理。

**4.3.2** 对活动裂缝由于其宽度在现有工作环境和荷载作用下始终不能保持稳定,受荷载、变形或环境温湿度变化而变化,采用常规的修补材料通常达不到理想效果。因此,要求对活动裂缝采用柔性嵌缝密封材料修补。

### 4.4 耐久性破损修补

**4.4.1** 海水环境氯离子引起的钢筋锈蚀,其特点是钢筋首先出现局部腐蚀并形成锈蚀产物,坑蚀及锈蚀产物中含有大量氯化物,如果修补前没有除尽这些锈蚀产物,一是影响修补混凝土与钢筋的粘结力,二是未除尽的锈蚀产物中的氯离子会在修补后继续腐蚀钢筋。

凿除出现锈胀裂缝和层裂处的混凝土保护层,这是由于这部分混凝土与钢筋间的粘结强度已显著削弱,最终会影响结构的承载力。

海水环境耐久性检测为 B 级时,混凝土结构、构件表面局部已有可见锈迹或局部出现宽度小于 0.3mm 的裂缝,此时钢筋锈蚀率很小,尚不影响结构的安全性。根据多年来港口水工建筑物的补修加固经验,按本规范第 4.4.1.1 款修补后目标使用年限可以达到 10a 左右;当耐久性检测评估等级为 B 级且修补后目标使用年限为 10 ~ 15a 或者耐久性检测评估等级为 C、D 级且修补后目标使用年限不大于 15a 时,需要考虑混凝土中已经存在的氯离子潜在的腐蚀危害性。根据经验,除按第 4.4.1.1 款修补外尚需对混凝土表面进行硅烷浸渍或涂层保护,以阻隔或延缓氯离子、氧气和水等有害介质对混凝土的侵入,减缓钢筋的腐蚀速度,可以达到修补后的目标使用年限为 10 ~ 15a。当要求目标使用年限大于 15a 时,由于混凝土中已存在的氯离子对钢筋腐蚀的危害性,对混凝土表面进行硅烷浸渍或涂层保护已不足以达到目标使用年限,需要根据具体情况采取电化学脱盐处理,使混凝土中的游离氯离子在电场作用下迁移出混凝土保护层;或者采取外加电流阴极保护,以抑制钢筋表面形成腐蚀电池使钢筋得到有效保护。

对耐久性评估为 C、D 级时,混凝土结构或构件表面锈蚀范围很广,已出现大面积顺筋裂缝,裂缝宽度可达 1.0mm 以上,有的构件混凝土保护层局部剥落,钢筋截面面积明显减少,已影响结构的承载能力,修补时混凝土保护层大部分需要凿除并采取相应补强措施,这种情况采用电化学脱盐法已不适宜。由于未修补处混凝土中已存在大量的氯离子,未修补处和修补处混凝土中钢筋之间极易形成原电池,从而使未修补处混凝土中钢筋在较短的时间内发生锈蚀。因此,对耐久性评估为 C、D 级的结构,当混凝土结构修补后目标使用年限大于 15a 时,为了确保修补效果达到目标使用年限,规定使用外加电流阴极保护措施进行保护。外加电流阴极保护措施是给钢筋持续施加一定密度的阴极电流,使钢筋不能释放电子,可长期保护钢筋不会腐蚀,也不必在混凝土保护层修复后,再采用硅烷浸渍或涂层保护措施。

## 5 混凝土结构加固

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 本条规定是根据《港口水工建筑物检测与评估技术规范》(JTJ 302—2006)“港口水工建筑物安全性、使用性和耐久性评估分级及处理要求”制定。

**5.1.2** 在役港口水工建筑物的加固设计不同于新建工程的设计,为了确保混凝土结构加固设计的可靠性和质量,设计方案需确保加固的构件与未加固的构件连接可靠,形成整体工作,避免对未加固的结构、构件和地基造成不利影响。

**5.1.3** 确定港口水工建筑物承载能力恢复或提高程度时,综合考虑承载力下降程度和原因、环境和荷载条件、结构或构件重要程度、施工可行性和维护管理难易程度以及加固后目标使用年限等因素,目的是为了科学、合理、可靠地确定承载力恢复或提高的程度。

**5.1.4** 加固混凝土结构前采取有效措施卸除或大部分卸除作用在结构上的活荷载,其目的是减少二次受力影响,亦即降低加固材料的滞后应变,使得加固后的结构能充分利用加固材料的强度。

**5.1.5** 对在役港口水工建筑物混凝土结构按承载能力极限状态和正常使用极限状态验算时首先需要考虑如何确定符合实际情况的作用(荷载)。由于在役建筑物与新建建筑物不同,必需对结构上的作用通过调查核实,再按《港口工程荷载规范》(JTS 144—1)规定的原则确定。若此项工作已在安全性评估中完成,可加以引用。

计算抗力时应采用结构材料的实际强度标准值。考虑到确定已有建筑物构件材料实际强度标准值需要大量取样检测,因此本规范规定,一般验算时构件材料的标准值可采用现行规范规定的标准值,若对材料强度有怀疑时,才进行现场检测并按现行国家标准《港口工程结构可靠度统一标准》(GB 50158)规定的原则确定。

**5.1.7** 本规范规定的外贴型钢加固法、粘贴钢板加固法、粘贴碳纤维加固法,加固时采用的胶粘剂一般是可燃的,因此当加固构件表面有防火要求时,应按现行国家标准《建筑防火设计规范》(GB 50016)规定进行防护。

### 5.2 加固材料

**5.2.2、5.2.3** 本规范对结构加固用的钢筋、钢板、型钢、扁钢和钢管等的选择主要基于以下原则:

(1)具有良好的可焊性,在钢筋、钢板、型钢、扁钢、钢管等之间的焊接性能能够得到可靠保证;

(2)在二次受力条件下具有较高的强度利用率,能充分地发挥被加固构件新增部分

材料的潜力,因此本规范不推荐使用高强度钢筋和钢材。

**5.2.5** 碳纤维按其主要原料分为三类,即聚丙烯腈(PAN)基碳纤维、沥青(PITCH)基碳纤维和粘胶(RAYON)基碳纤维。从结构加固性能要求来考量,只有PAN基碳纤维最符合承重结构的安全性要求,其他两类均不符合要求。

当采用聚丙烯腈基碳纤维时,必须采用12k或小于12k的小丝束是基于小于12k的小束的抗拉强度十分稳定,离散性小,对其性能和质量能有效控制而考虑的。

碳纤维复合材料性能指标(表5.2.5)是根据现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)的规定确定。

符合表5.2.5性能指标要求的碳纤维复合材料与其他的改性环氧树脂配套使用时,必须对抗拉强度标准值、仰贴条件下碳纤维复合材料与竖表面混凝土粘结强度、层面剪切强度进行检验,是考虑到即使某种碳纤维与某种胶粘剂的配套通过了安全性及适配性检验,但并不等于它与其他胶粘剂的配套也具有同等的安全性及适配性,故对此关键指标规定必须重新检验。

目前国内外生产用于工程结构粘贴纤维复合材料的胶粘剂,是以常温固化和满足现场施工需要为前提,因此其浸润性、渗透性和垂流度仅适用于单位面积质量在 $300\text{g}/\text{m}^2$ 及其以下的碳纤维织物,大于 $300\text{g}/\text{m}^2$ 则胶粘剂将很难浸透,致使碳纤维在层内和层面因缺胶而达不到设计所要求的粘结强度,故作出了严禁使用的规定。

**5.2.6** 为了确保加固结构安全,要求胶粘剂的粘结抗剪强度指标值应具有足够高的强度保证率,本规范采用的95%保证率系根据现行国家标准《港口工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50158)确定。

由于港口水工建筑物所处的环境与陆上建筑物有较大的区别,通常情况下大部分构件处于潮湿状态,或者施工时受到潮水或水气的影响,这对加固使用的结构胶粘剂的选择就显得非常的重要。为了确保加固的可靠性,对使用在浪溅区、水位变动区的胶粘剂规定了必须具有湿固化性能,在使用前根据加固的需要按本规范表5.2.6-1~表5.2.6-4的要求进行检验,确认其满足要求后才能使用于加固工程,以保证加固结构的安全可靠。至于不饱和聚酯树脂和醇酸树脂,由于其耐潮湿和耐老化性能差,因而不允许用于承重结构加固。

寒冷地区使用的胶粘剂,一般在其研制和开发过程中均进行冻融循环试验,并且都能符合耐冻融性能的要求。但对寒冷地区而言,这个问题十分重要,为此在本规范中对试验条件和性能要求作出了统一的规定,以确保使用安全。

### 5.3 加固方法及其选择

**5.3.2** 加大截面加固法具有工艺简单、成熟、加固费用较低,可用于大气区、浪溅区、水位变动区、水下区等优点;其缺点是湿作业工作量大,占用作业空间较多,增加自重较大。本条规定原构件混凝土强度等级不宜低于C20,是为了确保新老混凝土界面具有较高的粘结强度,以保证原构件与新增部分的结合面能够可靠的传力,并形成整体工作的效果。

**5.3.3** 外粘型钢加固法适用于平均潮位以上需要大幅度提高截面承载能力和抗震能力

的钢筋混凝土梁、柱构件加固,但费用较高。本条规定了采用符合表 5.2.6-4 性能要求的改性环氧树脂胶粘剂灌注和原混凝土强度等级不应低于 C20,且混凝土表面的正拉粘结强度不应低于 2.0MPa,是为了保证加固后的构件结合面能可靠地传力并形成整体工作。基于港口水工建筑物所处的腐蚀环境条件比较恶劣,因此规定了型钢应采取有效的防腐措施,保护年限不应少于 10a。

**5.3.4** 粘贴钢板加固具有施工操作安全、施工简便、作业空间较大、加固效果可靠、可有效地保护原构件的混凝土不再产生破损等优点,适用于平均潮位以上的钢筋混凝土受弯、受拉混凝土构件加固,不适用于素混凝土构件和纵向受力钢筋配筋率低于现行行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267—98)规定最小配筋率的构件加固。为了保证钢板与混凝土表面具有足够的粘结强度和加固后的构件能形成整体工作,规定了原混凝土强度等级不应低于 C20,且混凝土表面的正拉粘结强度不应低于 2.0MPa。

粘贴钢板的承重构件最忌在复杂应力状态下工作,故规定了应将钢板受力方式设计成仅承受轴向应力作用。

**5.3.5** 碳纤维复合材料加固混凝土结构是近 10 年发展起来的一种混凝土加固新技术,具有质轻高强、施工方便、能适应各种复杂形状的结构补强,具有不影响结构尺寸和外观、耐腐蚀等优异特性,已广泛应用于桥梁和工业与民用建筑。基于港口水工建筑物的环境特点,它适用于平均潮位以上受弯、受拉、实心轴心受压及大偏心受压混凝土构件的加固,不适用于素混凝土包括低于《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267—98)规定的最小配筋率的构件加固。这是基于碳纤维增强复合材料仅适用于承受拉应力的作用,一旦碳纤维复合材料与混凝土粘贴面出现剥离破坏时构件易发生脆性破坏而考虑的。

规定原构件混凝土强度等级不得低于 C20,且混凝土表面的正拉粘结强度不应低于 2.0MPa,主要是防止界面出现剥离破坏。由于港口水工建筑物的构件常处于潮湿环境,因此用于粘贴碳纤维复合材料的胶粘剂通常要求具有湿固化性能,以防止加固失效。

碳纤维复合材料的抗拉强度、弹性模量、拉应变设计值是根据现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)的规定确定的。

基于碳纤维复合材料仅适合于承受拉应力的作用,因此外贴碳纤维复合材料加固构件时,应将纤维受力方式设计成仅受拉应力作用。

国内外研究表明,钢筋锈蚀引起的混凝土表面胀裂裂缝宽度不大于 0.3mm 时,混凝土与钢筋之间的粘结强度无明显影响,钢筋截面损失率小于 5%,对钢材的力学性能也无任何影响,因此可以按附录 H 规定进行粘贴碳纤维加固。

## 6 钢结构加固与修补

### 6.1 一般规定

**6.1.7** 在负荷状态下加固施工的情况是经常发生的,甚至是很难避免的,主要要解决的问题是:加固施工时,原有构件中应力的限值为多少才能保证加固结构的安全和加固后构件工作的可靠性。限值过小,将极大地限制在负荷下加固的应用范围;限值过大,不仅会影响加固施工的安全,而且加固后继续加载时原有构件的塑性变形将增大,加固件的应力滞后现象更严重,加固效果不会好。本条负荷状态下的加固名义应力的控制值是根据《钢结构加固技术规范》(CECS 77:96)的规定确定的,主要考虑了加固时,结构材料因温度、安装等作用可能产生过大的残余应力和塑性变形而导致结构承载力丧失或耐久性降低。结构的名义应力是指按规范规定或由材料力学一般方法计算的结构应力。

**6.1.8** 加固结构抗力强度降低受多种因素影响:①施工条件恶劣,不易保证质量;②考虑应力重分布时,加固件的应力滞后问题;③焊接加固引起的附加变形对加固构件承载力的影响;④焊接加固时产生的残余应力,螺栓或铆钉加固时原有构件和加固件间连接刚度的差异等等。

降低系数在《钢结构加固技术规范》(CECS 77:96)中规定为:

(1)受弯构件加固,取 0.85;

(2)非焊接加固的轴心受力或焊接加固的轴心受拉,取 0.85;对焊接加固的受压构件,取  $0.85 \sim 0.23\sigma_0/f_y$ ;

(3)拉弯或压弯构件,取 0.85;

(4)角焊缝强度,取 0.85;螺栓强度,取 0.95。

降低系数在《钢结构检测评定及加固技术规程》(YB 9257—96)中规定为:

(1)对轴心受力的实腹构件,考虑到上述因素对构件承载能力的影响较大,取 0.8;

(2)对偏心受力和受弯构件,因附加变形的影响较小,取 0.9;

(3)对格构式构件,因单肢的截面积不大,焊接时产生的附加变形较小,取 0.9;

(4)焊缝强度取 0.9。

### 6.4 连接的加固

**6.4.4** 由于焊缝连接的刚度比普通螺栓或铆钉大得多,混合连接中焊缝达到极限状态时,普通螺栓或铆钉承担的荷载还很小,因此按焊缝承受全部作用力进行计算。

**6.4.5** 采用螺栓连接加固钢结构件及其节点,除了验算总承载力外,必须注意因增

加螺栓数量或扩大螺栓孔径后对构件(包括节点板)净截面的削弱,应再次校核净截面强度。

## **6.5 裂纹修复与加固**

**6.5.3、6.5.4** 裂纹修复加固施工规定是参考《钢结构加固技术规范》(CECS 77:96)的规定确定的。

## 7 检验与验收

### 7.2 混凝土结构破损修补检验验收

**7.2.1** 修补混凝土与老混凝土的粘结强度和密实性能,是影响港口水工建筑物混凝土结构破损修补质量的关键因素。工程实践证明,立模浇筑和喷射混凝土在施工过程中很容易在内部出现缝隙、夹层和空腔等修补缺陷,因此在修补完成后及时进行检查,发现问题及时采取补救措施非常重要。

### 7.3 电化学脱盐保护系统检验验收

**7.3.2** 混凝土电化学脱盐的验收除了检测新老混凝土粘结强度、脱盐后混凝土中氯离子浓度、涂层或硅烷等的性能之外,后期还需跟踪脱盐后混凝土保护层中氯离子再分布情况,并定期监测脱盐后钢筋电位以及检测钢筋恢复钝化的情况。

### 7.4 混凝土外加电流阴极保护检验验收

**7.4.2** 混凝土外加电流阴极保护除了按照本规范检验验收之外,还要定期跟踪混凝土各个部位钢筋的电位,如果出现部分区域电位达不到要求,需及时查明原因,采取有效措施,保障外加电流阴极保护系统有效运行。

### 7.5 混凝土结构加大截面加固检验验收

**7.5.1** 混凝土浇筑质量的严重缺陷通常会影响结构的性能、使用功能和耐久性能。对已出现的严重缺陷,由施工单位根据缺陷的具体情况提出技术处理方案,经监理(业主)和设计单位共同认可后进行处理,并重新检查验收。

**7.5.2** 本条主要为新老混凝土界面粘合不良(分离)的检测提供评定依据。

**7.5.3** 考虑到目前市场上界面粘结材料产品质量良莠不齐,加之现行产品标准不统一,容易将不合适产品用于在加固工程中。在这种情况下,界面粘结材料不仅起不到增强新老混凝土粘结能力的作用,相反地还会起到不应有的隔离作用。因此,在结构加固工程中,设计单位对新老混凝土界面粘结强度能否满足要求通常存有疑虑,从而要求进行复验。为此,制定本条文为复验提供依据。

**7.5.4** 混凝土保护层厚度关系到结构、构件的承载力、耐久性能和防火性能,特别是在氯盐环境中的混凝土结构,保护层厚度是决定其使用寿命的关键因素之一,因此本条必须作为一项主控项目进行检验。

**7.5.5** 混凝土外观质量的一般缺陷,通常不影响结构、构件的性能和使用功能,但通常业

主难于接受。因此,对查出的一般缺陷,应及时处理,并重新检查验收。

## 7.6 外粘型钢加固检验验收

**7.6.1、7.6.2** 由于无法从实际工程的型钢杆件上直接测得它与原构件混凝土之间的正拉粘结强度,因此,只能借助于旁贴钢标准块的方法,来评估该工程的粘贴质量是否达到这项指标的要求,若能满足以下3点要求,可以得到基本一致的检验效果:

(1)钢标准块粘贴位置的混凝土表面处理,应由同一操作人员在处理加固部位的混凝土表面时同时进行,且应按完全相同的工艺、等级、标准作业;

(2)钢标准块的粘贴,应使用同一次搅拌的胶粘剂,并与加固部位粘贴施工同时进行;

(3)钢标准块粘贴后应在接触压条件下静置固化。

**7.6.3** 型钢粘贴与钢板粘贴类似,钢板表面的粗糙度、清洁度、有无油污等都对粘贴质量产生很大影响,因此要对其表面状况进行检查。

## 7.7 粘贴钢板加固检验验收

**7.7.1、7.7.2** 由于海工混凝土结构长期受海洋环境腐蚀介质的侵蚀,导致钢板结构受到巨大的腐蚀威胁,因此在钢板粘贴前进行除锈、打毛的目的,一是为了增强钢板与混凝土界面的粘结力,二是为了防止腐蚀从界面开始发生。

**7.7.3、7.7.4** 结构胶粘剂粘贴钢板与基材混凝土的正拉粘结强度检验,主要是用于综合评估胶液的固化质量、钢板粘合面处理效果、施工工艺质量、胶粘剂与钢板及基材混凝土的粘结强度等,因此是一个非常重要的检验指标,必须按规定的测试方法和评定标准严格执行。同时应指出的是:粘贴钢板加固工程的这个检验项目,在一定程度上还属于间接的检验方法,因为它只能在加固部位的附近另贴钢板进行检验,而无法在受力钢板上直接抽样。在这种情况下,必须从打磨钢板、打磨混凝土、清理界面到涂刷胶液、加压养护整个过程都要做到检验用钢板与加固钢板同条件操作,不得改变检验用钢板的粘贴工艺,以避免检验失真。

**7.7.5** 海工混凝土结构长期处于恶劣的海洋腐蚀环境中,应按国家现行相关标准规范检验钢板防腐涂层的厚度、粘结强度等,以保证加固件达到设计的使用寿命。

## 7.8 粘贴碳纤维加固检验验收

**7.8.1、7.8.2** 近几年来,虽然有各种碳纤维加固质量的检测方法研究,但迄今尚未获得应用。在这种情况下,锤击检查法仍是最简便易行的方法,其有效性也已通过工程实践的检验,可在各种条件下使用。但应指出的是,锤击检查法易受人为偏差的影响。因此,为了提高检测结果的准确性,对重要结构的锤击检查,可由检测机构派出两组人员,各自独立地进行检测,然后取其平均值作为检测结果。若两组检测结果偏差大于15%,可分别再重复检测一次,并取4个值中互相接近的3个值的平均值作为检测结果。

**7.8.3** 结构胶粘剂粘贴碳纤维复合材与基材混凝土的正拉粘结强度检验,主要是用以综合评估胶液的固化质量、胶液对纤维织物的湿润、浸渍程度以及碳纤维复合材与原构件混凝土的粘结强度等,因此非常重要。