

ICS 93.08  
CCS P 66

DB 23

黑 龙 江 省 地 方 标 准

DB 23/T 3970—2025

---

寒区聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固桥  
梁技术规程

2025-12-01 发布

2026-01-01 实施

黑龙江省市场监督管理局 发布



## 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 材料 .....	2
4.1 一般规定 .....	2
4.2 聚酯乳液 .....	2
4.3 填充料 .....	3
4.4 钢材 .....	4
5 配合比 .....	5
5.1 一般规定 .....	5
5.2 技术指标 .....	5
6 设计 .....	6
6.1 一般规定 .....	6
6.2 抗弯加固设计 .....	6
6.3 构造要求 .....	12
7 施工 .....	12
7.1 一般规定 .....	13
7.2 施工流程 .....	13
7.3 表面处理 .....	13
7.4 锚固系统安装 .....	13
7.5 钢丝绳下料及锚固 .....	13
7.6 支护模板制作及立模 .....	14
7.7 聚氨酯水泥复合材料配制 .....	14
7.8 聚氨酯水泥复合材料拌合要求 .....	15
7.9 现场浇筑聚氨酯水泥复合材料 .....	15
7.10 养生 .....	15
7.11 施工安全和环保措施 .....	15
8 检验与验收 .....	15
8.1 一般规定 .....	15
8.2 检验 .....	16
8.3 验收 .....	17

## 前　　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由黑龙江省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：东北林业大学、哈尔滨荣佳盈标准化咨询服务有限公司、黑龙江省交投峰悦资产经营有限公司、黑龙江黑航航务勘察设计院有限公司、沈阳农业大学、黑龙江省公路事业发展中心、龙建路桥股份有限公司、哈尔滨市道路桥梁工程处、黑龙江东方学院、黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司、哈尔滨市建筑工程研究设计院有限公司、黑龙江益通钢波纹装备制造有限公司、黑龙江隆通管业有限公司、哈尔滨学院、齐齐哈尔市交通运输综合行政执法支队。

本文件主要起草人：孙全胜、杨建喜、杨晓光、张可心、于天宁、李绪森、徐江、李军卫、代金良、赵莹、白馨梅、赵运铎、孙明刚、王心智、刘彦程、李晶、黄喜冬、张超、于文、千玉锦、关迎丽、薛兴伟、吴鹤翔、王闯、李建飞、王芳姐、翟登攀、刘正億、关宇翔、高仰煊、赵姿琳、李志飞、蒋文字。

# 寒区聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固桥梁技术规程

## 1 范围

本文件规定了寒区聚氨酯水泥预应力钢丝绳加固桥梁技术的术语和定义、材料、配合比、设计、施工、检验与验收等内容。

本文件适用于全年最低温度不低于-40 ℃、单孔跨径小于等于20 m的钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁（板）桥的加固设计、施工及检验与验收，其他桥梁类型的加固可参考执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 1346 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法
- GB 1499.1 钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋
- GB 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 8358 钢丝绳 破断拉力测定方法
- GB/T 20118 钢丝绳通用技术条件
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50661 钢结构焊接规范
- GB 50728 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范
- JC 474 砂浆、混凝土防水剂
- JG/T 289 混凝土结构加固用聚合物砂浆
- JGJ/T 70 建筑砂浆基本性能试验方法标准
- JGJ 145 混凝土结构后锚固技术规程
- JGJ/T 325 预应力高强钢丝绳加固混凝土结构技术规程
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG/T J21-01 公路桥梁荷载试验规程
- JTG/T J22 公路桥梁加固设计规范
- JTG/T J23 公路桥梁加固施工技术规范
- DL/T 5126 聚合物改性水泥砂浆试验规程

## 3 术语和定义

JTG/T J22和JTG/T J23界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**聚氨酯**

聚酯多元醇（或聚醚多元醇、聚乙烯醇）（本规程简称白料）、异氰酸酯（本规程简称黑料）、消泡剂等原料经过一系列酯化反应形成的聚合物。

**3.2****聚氨酯水泥复合材料**

以聚氨酯原料为主剂，掺入硅酸盐水泥及填充料（矿粉、粉煤灰等）聚合形成的具有高强高韧性的复合材料。

**3.3****聚灰比**

拌制聚氨酯水泥复合材料时，聚酯乳液质量与水泥质量的比值。

**3.4****消泡剂**

掺在聚酯乳液中，用以消除聚酯乳液在酯化反应过程中产生过多气泡的外加剂。

**3.5****外加剂**

聚氨酯水泥复合材料化学外加剂，在拌制聚氨酯水泥复合材料过程中掺入的、用以改善聚氨酯水泥复合材料性能的化学物质。

**4 材料****4.1 一般规定**

4.1.1 聚氨酯水泥预应力钢丝绳加固的钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁（板）桥，其长期使用的环境温度范围为-40 ℃～60 ℃。处于特殊环境下（如介质腐蚀、高温、高湿、放射等）的混凝土结构，应采用耐环境因素的聚氨酯水泥复合材料外，还应遵守 GB 50010 的规定，并应采用相应的防护措施。

4.1.2 预应力钢丝绳应具有产品合格证及强度、弹性模量、伸长率和应力松弛性能等检测报告。

**4.2 聚酯乳液****4.2.1 二苯基甲烷 4,4' -二异氰酸酯**

二苯基甲烷4,4' -二异氰酸酯的技术指标应满足表1的要求。

**表1 二苯基甲烷 4,4'-二异氰酸酯的技术指标**

项目	单位	优等品	一等品	合格品
色度	铂钴单位	≤30	≤100	≤120
MDI含量	% (m/m)	≥99.6		≥99.4
凝固点	℃		≥38.1	
水解氯含量	% (m/m)	≤0.003	≤0.005	
环己烷不溶物 (24 h)	% (m/m)	≤0.3	—	—
环己烷不溶物	% (m/m)	≤0.5		≤1.0
色度劣化指标	铂钴单位	≤50	—	—
环己烷不溶物劣化指标	% (m/m)	≤1.65	—	—

**4.2.2 聚酯多元醇**

聚酯多元醇的理化性能应满足表2的要求。

表2 聚酯多元醇的理化性能

项目	单位	优等品	一等品	合格品
色度	铂钴单位	≤180	≤250	≤300
水分	%	≤0.025	≤0.05	≤0.10
酸值	mg KOH/g	0.3~0.5		≤1.0
羟值	mg KOH/g	53.5~58.5	53.0~59.0	
反应指数	min	230±15	—	—

#### 4.2.3 聚醚多元醇

聚醚多元醇的理化性能应满足表3的要求。

表3 聚醚多元醇的理化性能

项目	单位	优等品	一等品	合格品
色度	铂钴单位	≤50	≤300	≤400
羟值	mg KOH/g	54.0~58.0	53.0~59.0	
酸值	mg KOH/g	≤0.05	≤0.10	≤0.15
水分含量	%	≤0.06	≤0.10	
粘度(25 °C)	mPa·S	280~320	260~370	—
钠、钾含量	ppm	≤5	≤20	—
不饱和值	mol/kg	≤0.05	≤0.08	—
pH值	无量纲	5.5~7.5		—

#### 4.2.4 聚乙烯醇

聚乙烯醇的理化性能应满足表4的要求。

表4 聚乙烯醇的理化性能

项目	单位	优等品	一等品	合格品
醇解度	%(mol/mol)	85.0~87.0	84.0~88.0	84.0~88.0
粘度	mPa·S	3.4~4.2	3.0~5.0	
挥发分	%	≤5.0	≤5.0	≤6.0
灰分	%	≤0.4	≤0.5	
pH值	无量纲	5~7	4~7	

### 4.3 填充料

#### 4.3.1 水泥

水泥的品种、性能和质量应满足强度等级不低于42.5级的硅酸盐水泥或快硬硅酸盐水泥；当有耐腐蚀和耐高温要求时，应采用相应的特种水泥。水泥的细度宜小于380 m<sup>2</sup>/kg；不同品牌或不同强度等级的水泥不应混合使用。

#### 4.3.2 聚氨酯水泥复合材料

4.3.2.1 聚氨酯水泥复合材料的基本性能指标应符合表5规定。

表5 聚氨酯水泥复合材料的基本性能指标

聚氨酯复合 材料等级	劈裂抗拉强度 (MPa)	与混凝土正拉 粘结强度 (MPa)	抗折强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	与钢丝绳粘结抗剪强度 标准值 (MPa)
I	≥7.0	≥2.5, 且为混凝土 内聚破坏	≥12.0	≥55.0	≥9.0
II	≥5.5		≥10.0	≥45.0	≥5.0

注：表中的指标值为龄期 28 d 指标，除注明为标准值外，均为平均值。

4.3.2.2 钢丝绳锚固区和反力支撑范围以外宜选用Ⅱ级聚氨酯水泥复合材料。

4.3.2.3 聚氨酯水泥复合材料粘结剪切性能湿热老化试验方法应按GB 50728执行，合格后方可使用。

4.3.2.4 聚氨酯水泥复合材料的耐冻融性能检验试验方法应按GB 50728执行。

4.3.2.5 聚氨酯水泥复合材料现场拌制时，应按预先确定的配合比进行拌制，且每次拌合量宜在 30 min 内使用完毕。

#### 4.4 钢材

##### 4.4.1 钢筋

钢筋应符合GB/T 1499.1和GB/T 1499.2的规定。

##### 4.4.2 钢板、型钢

钢板、型钢应采用Q235钢、Q355钢、Q390钢、Q420钢，并应符合GB/T 1591的规定；钢材冲击韧性应符合JTG D64—2015的相关规定。

##### 4.4.3 钢丝绳

4.4.3.1 对处于腐蚀环境的钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁（板）桥进行加固时，应采用不锈钢钢丝绳。

4.4.3.2 对处于一般环境的钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁（板）桥进行加固时，宜选用镀锌钢丝绳，但应采取有效的防锈措施。

4.4.3.3 钢丝绳抗拉强度标准值（ $f_{rk}$ ）不应小于表6的规定。

表6 钢丝绳抗拉强度标准值

种类	符号	公称直径 (mm)	高强不锈钢钢丝绳		高强镀锌钢丝绳	
			抗拉强度标准值 (MPa)	材料分项系数 $\gamma_r$	抗拉强度标准值 (MPa)	材料分项系数 $\gamma_r$
1×19	$\phi^s$	3.0~7.0	1650	1.47	1560	1.47
			1770	1.47	1650	1.47

4.4.3.4 高强钢丝绳抗拉强度设计值应按本规程表6中的强度标准值除以材料分项系数（ $\gamma_r$ ）确定。

4.4.3.5 钢丝绳的弹性模量、伸长率应不小于表7的规定。

表7 钢丝绳弹性模量、伸长率

类别	弹性模量 $E_{rw}$ (MPa)	伸长率 (%)
不锈钢钢丝绳	$1.10 \times 10^5$	1.6
镀锌钢丝绳	$1.40 \times 10^5$	2.1

4.4.3.6 钢丝绳强度、弹性模量、伸长率等的试验方法及截面面积计算宜按 JGJ/T 325 执行。当对试验结果有争议时，应按 GB/T 8358 规定的仲裁试验方法执行。

4.4.3.7 钢丝绳的应力松弛性能试验方法宜符合 GB/T 5224 的规定。

4.4.3.8 钢丝绳的保护层厚度应从钢丝绳外表面算起，且不应小于钢丝绳的公称直径，并应根据 GB 50010 规定的环境类别，符合下列规定：

- a) 一类环境，应不小于 20 mm；
- b) 二 a 类以上环境，应不小于 25 mm；
- c) 二 b 类以上环境，应不小于 35 mm。

4.4.3.9 钢丝绳不得涂有油脂。

#### 4.4.4 焊接材料

焊接材料应符合 GB 50661 的相关规定。

#### 4.4.5 高强螺栓

高强螺栓应符合 GB 50017 的相关规定。

#### 4.4.6 锚固系统

预应力钢丝绳的锚固系统由锚头、锚具和锚板组成，且锚具与锚板应通过焊接连接，锚板应通过胶粘剂、锚栓、锚固胶或植筋胶与桥梁结构连接成整体。锚固系统应满足下列要求：

- a) 锚具与锚板宜采用 Q235-D 级钢或 Q355-D 级钢，对锚固系统的焊接构件，应采用可焊性好的钢材，且不应低于 Q235-D 级；
- b) 桥梁加固需要植筋时，宜采用 HRB400 级热轧带肋钢筋或 RRB400 级余热处理钢筋，并应符合 GB 1499.1 及 GB 1499.2 的规定；
- c) 锚固件为螺杆时，应采用全螺纹非焊接螺杆，钢材等级应采用 Q355-D 级；
- d) 锚固件为锚栓时，其钢材的主要性能指标应满足 JTG/T J22 的规定。

### 5 配合比

#### 5.1 一般规定

5.1.1 聚氨酯水泥复合材料配合比应通过完整的配合比试验确定。

#### 5.2 技术指标

5.2.1 常用材料用量应满足表 8 的要求。

表8 常用材料用量

项目	质量百分比 (%)
聚酯乳液用量(聚酯乳液占填充料质量百分比)	67~200
异氰酸酯用量(占聚酯乳液的质量百分比)	33~50
外加剂用量(外加剂占填充料质量百分比)	0~1

5.2.2 聚氨酯水泥复合材料技术指标应满足表 9 的技术要求。

表9 聚氨酯水泥复合材料技术指标

检验项目		单位	技术指标			试验方法依据
密度		kg/m <sup>3</sup>	1200	1300	1400	
凝结时间	初凝	min	$\geq 15$			GB/T 1346
	终凝	h	$\leq 25$			
抗压强度(24 h)	MPa	MPa	$\geq 30$	$\geq 40$	$\geq 50$	DL/T 5126
抗折强度(24 h)	MPa	MPa	$\geq 15$	$\geq 20$	$\geq 25$	DL/T 5126
粘结强度(24 h)	MPa	$\geq 2.5$ 且不允许界面破坏			JG/T 289	
抗渗压力(24 h)	MPa	$\geq 1.5$			JC 474	
收缩率(24 h)	%	$\leq 0.1$			JG/T 289	
抗冻性能	强度损失率	%	$\leq 1.0$			JGJ/T 70
	质量损失率	%	$\leq 1.0$			JGJ/T 70
氯离子渗透性	—	不降低			DL/T 5126	

注：有其他特殊性能要求时，进行相关材料性能试验。

## 6 设计

### 6.1 一般规定

6.1.1 采用聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁（板）桥前，应按国家现行标准、规范、规程对原结构进行检测、鉴定或评估。

6.1.2 抗弯加固时，原结构构件的实际混凝土强度等级应不低于C30。

6.1.3 采用聚氨酯水泥预应力钢丝绳加固桥梁结构构件时，应按GB 50010进行承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算。钢筋和混凝土材料强度设计值应根据检测得到的实际强度推算。

6.1.4 钢丝绳的自由长度超过10 m时，应设置定（限）位装置。

6.1.5 钢丝绳张拉时，应采用应力、伸长量双重控制。拉力偏差应在±100 N范围内，伸长量偏差应在±0.5 mm范围内。

6.1.6 当被加固构件有防火要求时，应符合GB 50016的规定。

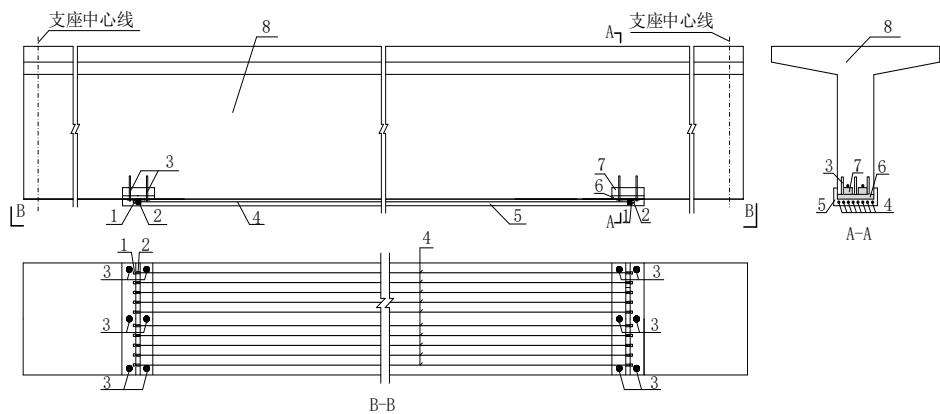
### 6.2 抗弯加固设计

6.2.1 聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁（板）桥时，梁加固示意图和板加固示意图分别如图1和图2所示。承载力计算除应符合GB 50010对受弯构件正截面承载力计算的基本假定外，尚应符合下列规定：

- a) 聚氨酯水泥预应力钢丝绳应与原结构钢筋、混凝土变形协调；
- b) 应验算构件的抗剪承载力，且抗剪破坏不得先于抗弯破坏发生；
- c) 加固后抗弯承载力的提高幅度不宜超过60%。

6.2.2 梁侧面布置聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固时，钢丝绳布置高度不应超过梁截面高度的1/4。

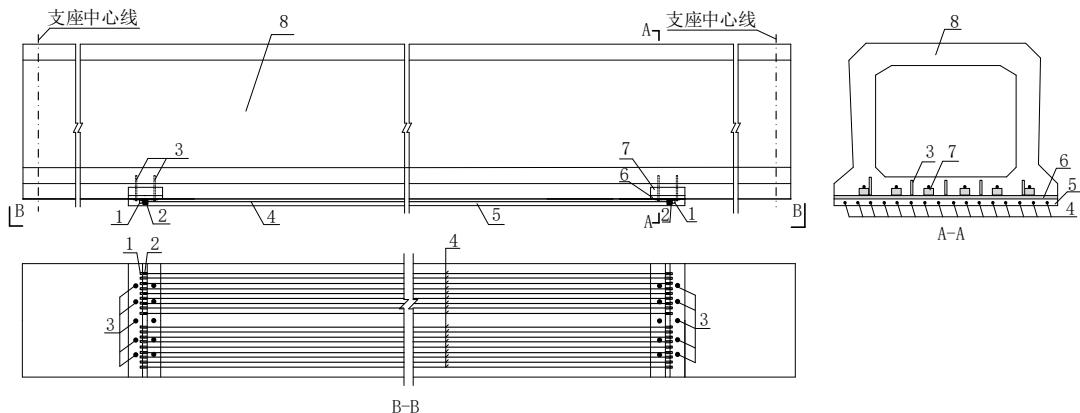
6.2.3 聚氨酯水泥预应力钢丝绳对梁（板）负弯矩区抗弯加固时，梁（板）负弯矩区受弯加固示意图如图3所示。锚具位置应设在正弯矩区，加固范围应自支座边缘起计算，且对于梁，加固范围不应小于L/3；对于板，加固范围应不小于L/4。钢丝绳需绕过混凝土桥墩时，宜在梁（板）两侧的4倍板厚( $h_f'$ )范围内布置。



标引序号说明:

- 1——锚头;
- 2——锚具;
- 3——锚栓;
- 4——预应力钢丝绳;
- 5——聚氨酯水泥复合材料;
- 6——锚板1;
- 7——锚板2;
- 8——待加固T梁。

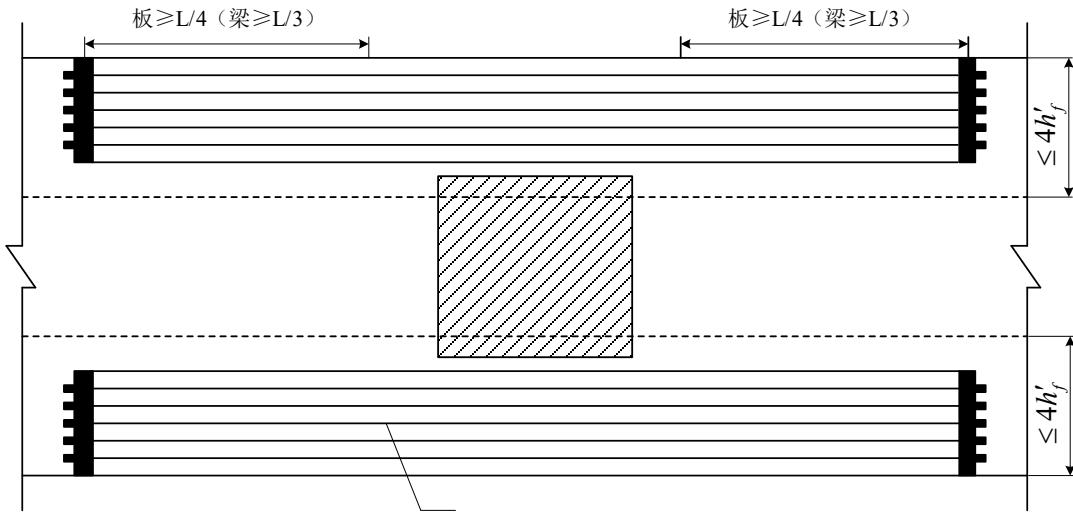
图1 梁加固示意图



标引序号说明:

- 1——锚头;
- 2——锚具;
- 3——锚栓;
- 4——预应力钢丝绳;
- 5——聚氨酯水泥复合材料;
- 6——锚板1;
- 7——锚板2;
- 8——待加固板。

图2 板加固示意图



标引序号说明：

- 1—混凝土梁（板）；
- 2—混凝土桥墩；
- 3—预应力钢丝绳；
- L—梁（板）的计算跨径；
- $h'_f$ —板厚或梁（板）翼缘板板厚。

图3 梁（板）负弯矩区抗弯加固示意图

#### 6.2.4 桥梁构件抗弯加固后相对界限受压区高度 ( $\xi_{b,r}$ ) 应符合下列规定：

- 对于重要构件， $\xi_{b,r}$ 应采用原结构构件相对界限受压区高度 $\xi_b$ 的0.90倍；
- 对于一般构件， $\xi_{b,r}$ 应采用原结构构件相对界限受压区高度 $\xi_b$ 的0.95倍。

#### 6.2.5 对矩形、T形或I形截面构件抗弯加固时，梁（板）构件抗弯加固计算示意图如图4所示，其正截面抗弯承载力计算应符合下列规定：

- 矩形截面或中性轴位于T形或I形截面翼板内 ( $x \leq h'_f$ ) 时，正截面承载力应按下列公式确定：

$$\alpha_1 f_{c0} b'_f x + f'_{yo} A'_{so} = f_{yo} A_{so} + f_{pyo} A_{po} + f_r A_r \dots \dots \dots (1)$$

$$M \leq \alpha_1 f_{c0} b'_f x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{yo} A'_{so} (h_0 - a'_s) + f_{yo} A_{so} (a - a_s) - f_{pyo} A_{po} (a_p - a) + f_r A_r (a_r + a) \dots \dots (2)$$

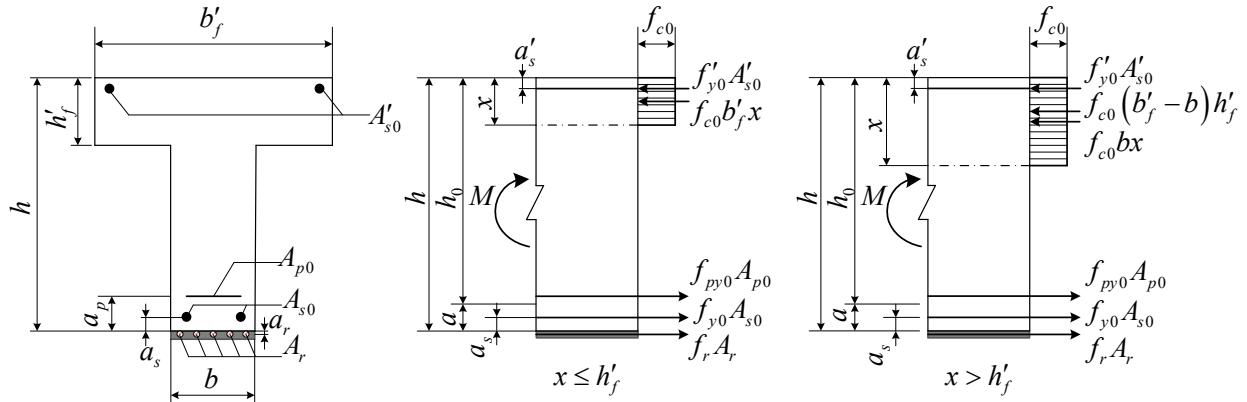


图4 梁（板）构件抗弯加固计算示意图

b) T形或I形截面且中性轴位于截面腹板内( $x > h'_f$ )时, 正截面承载力应按下列公式确定:

$$\alpha_1 f_{c0} (b'_f - b) h'_f + \alpha_1 f_{c0} b x + f'_{y0} A'_{s0} = f_{y0} A_{s0} + f_{py0} A_{p0} + f_r A_r \dots \quad (3)$$

$$M \leq f_{c0} b \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{c0} (b'_f - b) (h_0 - \frac{h'_f}{2}) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a'_s) \dots \quad (4)$$

$$h_0 = h - a \dots \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{f_{y0} A_{s0} a_s + f_{py0} A_{p0} a_p + f_r A_r a_r}{f_{y0} A_{s0} + f_{py0} A_{p0} + f_r A_r} \dots \quad (6)$$

式中:

$\alpha_1$  ——系数, 按 GB 50010 的规定计算;

$f_{c0}$  ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值;

$b'_f$  ——受压翼缘的有效宽度, 按 GB 50010 的规定取值;

$x$  ——矩形截面或 T 形截面受压区高度;

$f'_{y0}$  ——原构件普通钢筋抗压强度设计值;

$A'_{s0}$  ——原构件受压区普通钢筋截面面积;

$f_{y0}$  ——原构件普通钢筋抗拉强度设计值;

$A_{s0}$  ——原构件受拉区普通钢筋截面面积;

$f_{py0}$  ——原构件体内预应力钢筋抗拉强度设计值;

$A_{p0}$  ——原构件体内预应力钢筋截面面积;

$f_r$  ——高强钢丝绳抗拉强度设计值;

$A_r$  ——高强钢丝绳计算截面面积;

$M$  ——构件加固后弯矩组合设计值;

$h_0$  ——截面有效高度;

$a'_s$  ——受压区原普通钢筋的合力作用点至受压区边缘的距离;

$a$  ——受拉区原普通钢筋、原预应力筋及预应力高强钢丝绳合力作用点至受拉区边缘的距离;

$a_s$  ——受拉区原普通钢筋的合力作用点至受拉区边缘的距离;

$a_p$  ——受拉区原预应力筋合力点至截面受拉边缘的距离;

$a_r$  ——高强预应力钢丝绳合力点至截面受拉边缘的距离, 对于钢丝绳布置于梁底时,  $a_r = 0$ ; 对于钢丝绳布置于梁侧面时, 按实际取值;

$h'_f$  ——受压翼缘的厚度;

$b$  ——矩形截面宽度或 T 形截面的腹板宽度;

$h$  ——截面高度。

6.2.6 聚氨酯水泥预应力钢丝绳加固钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁(板)桥时, 正常使用极限状态下裂缝控制验算应符合 GB 50010 规定确定裂缝控制等级及最大裂缝宽度限制计算, 并应符合 JGJ/T 325 的规定。

6.2.7 正常使用极限状态下的挠度验算, 应按荷载效应标准组合并考虑荷载长期作用影响的刚度(B)进行计算, 且所计算的挠度值应不超过 GB 50010 的限值, 并应符合 JGJ/T 325 的规定。

6.2.8 预应力损失应计算锚具变形损失值( $\sigma_{l2,r}$ )、分批张拉损失值( $\sigma_{l4,r}$ )、预应力钢丝绳松弛损失值( $\sigma_{l5,r}$ ), 且各项预应力损失值宜根据试验确定, 可按下列要求估算:



$M_k$ ——按作用（荷载）效应标准值组合计算的弯矩值；

$W_0$ ——原结构构件换算截面边缘弹性抵抗矩。

b) 由预应力钢丝绳的预加力、原有预应力筋的预加力产生的混凝土法向应力应按下列公式计算：

1) 先张法构件（原预应力筋）：

$$\sigma_{pc} = \frac{N_{p0,r} + N_{p0}}{A_0} \pm \frac{N_{p0,r}e_{p0,r}}{I_0} y_0 \pm \frac{N_{p0}e_{p0}}{I_0} y_0 \dots \quad (14)$$

2) 后张法构件（原预应力筋）：

$$\sigma_{pc} = \frac{N_{p0,r}}{A_0} \pm \frac{N_{p0,r}e_{p0,r}}{I_0} y_0 + \frac{N_p}{A_n} \pm \frac{N_pe_{pn}}{I_n} y_n \dots \quad (15)$$

式中：

$\sigma_{pc}$ ——预应力钢丝绳的预加力、原有预应力筋的预加力产生的混凝土法向应力；

$N_{p0,r}$ ——预应力钢丝绳的预加力；

$N_{p0}$ ——先张法构件原有预应力筋的预加力；

$N_p$ ——后张法构件原有预应力筋的预加力；

$A_0$ ——原构件换算截面面积；

$e_{p0,r}$ ——原构件换算截面重心至预应力钢丝绳合力点的距离；

$I_0$ ——原构件换算截面惯性矩；

$y_0$ ——换算截面重心至所计算预应力钢丝绳处的距离；

$e_{p0}$ ——原构件换算截面重心至原预应力筋及受拉钢筋合力点的距离；

$A_n$ ——原构件净截面面积；

$e_{pn}$ ——原构件净截面重心至原预应力筋及受拉钢筋合力点的距离；

$y_n$ ——原构件净截面重心至所计算钢丝绳处的距离。

c) 原有预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时的原有预应力筋应力应考虑预应力钢丝绳的预加力引起原有预应力筋的弹性压缩损失 ( $\alpha_{Ep}m\Delta\sigma_{pc}$ )，且混凝土法向应力应按下列公式计算：

1) 先张法（原有预应力筋）：

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l - \alpha_{Ep}m\Delta\sigma_{pc} \dots \quad (16)$$

2) 后张法（原有预应力筋）：

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E\sigma_{pc} - \alpha_{Ep}m\Delta\sigma_{pc} \dots \quad (17)$$

式中：

$\sigma_p$ ——原构件混凝土法向应力；

$\sigma_{con}$ ——原有预应力筋张拉控制应力；

$\sigma_l$ ——原有预应力筋的有效预应力；

$\alpha_{Ep}$ ——预应力钢丝绳弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

$\alpha_E$ ——原有预应力筋弹性模量与混凝土弹性模量之比。

6.2.10 计算截面上混凝土法向预应力等于零时，原有预应力筋与普通钢筋合力、预应力钢丝绳的预加力及三者合力作用点的偏心距应按下列公式计算：

a) 原有预应力筋与普通钢筋合力应按下列公式计算

1) 先张法构件（原预应力筋）

$$N_{p0} = \sigma_{p0}A_{p0} - \sigma_{l5}A_{s0} \dots \quad (18)$$

## 2) 后张法构件（原预应力筋）

b) 预应力钢丝绳的预加力应按下列公式计算:

c) 原有预应力筋、普通钢筋及预应力钢丝绳的合力作用点相对于换算截面重心的偏心距应按下式计算：

式中：

$\gamma_r$ —预应力钢丝绳的合力作用点至换算截面重心处的距离;

$y_p$ ——受拉区原预应力筋的合力作用点至换算截面重心处的距离；

$\gamma_s$ —受拉区原普通钢筋的合力作用点至换算截面重心的距离。

6.2.11 对于预应力钢丝绳张拉阶段预拉区允许出现拉应力的构件和预压时全截面受压的构件，在预应力钢丝绳的预加力、原有预应力筋的预加力、自重及施工荷载作用下截面边缘的混凝土法向应力宜按下列公式计算：

$$\sigma_{cc} = \sigma_{pc} + \frac{M_k y_0}{I_0} \leq 0.8 f_{c0,k} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

式中：

$\sigma_{cc}$  ——施工阶段计算截面预压区边缘纤维的混凝土压应力；

$M_k$  ——构件自重及施工荷载的标准组合在计算截面产生的弯矩值；

$\sigma_{ct}$  ——施工阶段计算截面预拉区边缘纤维的混凝土拉应力；

$f_{c0,k}$ —原构件混凝土抗压强度标准值;

$f_{t0,k}$ ——原构件混凝土抗拉强度标准值。

### 6.3 构造要求

6.3.1 预应力钢丝绳的布置间距应大于等于锚头直径，且不应小于 8 mm，当加固量较大时，可在梁底布置 2 层钢丝绳，两层钢丝绳锚具应交叉布置，且内层锚具宜比外层锚具低 10mm 及以上。

6.3.2 端部锚具的具体结构形式需根据钢丝绳所承担的拉力确定，锚具厚度宜为20mm~30mm，宽度宜为30mm~50mm，开槽深度应大于等于锚头挤压后的半径。

6.3.3 预应力钢丝绳的端部锚头由锚具、挤压机械对其进行强力挤压，使锚具与钢丝绳形成一体，挤压压力大小应通过实验确定，保证锚头完全挤压密实、无飞边现象，且锚头挤压力应符合 JGJ/T 325 相关规定。

6.3.4 采用焊接纵筋法时，端部槽口的开凿宽宜取 100 mm，混凝土开槽深度不宜小于锚板厚度，且以暴露出原结构内部的纵筋并能牢固焊接端部锚具为宜。

6.3.5 采用化学螺栓法固定端部锚具时，化学螺栓的间距应不小于 50 mm，设置数量按 GB 50017 相关规定计算。

## 7 施工

## 7.1 一般规定

### 7.1.1 施工前技术准备:

- a) 黑料和白料进场时, 供货方应提供企业产品质量检验合格证。材料必须提供有资质检测单位出具的有效型式检验报告;
- b) 施工材料进场应按批次和规定频率进行检验, 并应按设计要求使用;
- c) 加固工程施工前, 施工单位应会同施工监理工程师进行聚氨酯水泥复合材料的现场配合比试验, 各项技术指标应满足设计要求;
- d) 桥梁结构维修加固工程的每道工序均应按企业的施工技术规程及本规程进行质量控制; 每道工序完成后应进行检查验收, 必要时应按隐蔽工程的要求进行检查验收, 合格后方允许进行下一道工序的施工; 相关各专业工种交接时, 应进行交接检验。

7.1.2 聚氨酯水泥复合材料应在环境温度-5 ℃以上且湿度 70 %以下的自然条件下施工; 当施工环境温度低于-5 ℃时, 应停止胶粘剂、锚固胶或植筋胶的施工或采取有效的保温措施。

7.1.3 胶粘剂、锚固胶或植筋胶的施工界面应干燥, 每次的拌合量宜在 30 min 内使用完毕。

7.1.4 钢丝绳施工控制应力应按采用的施加预应力方法计算。若采用千斤顶张拉, 可按张拉力 $\sigma_{con,r} A_r$ 控制; 若按伸长率控制, 伸长率中应计入裂缝闭合的影响。

7.1.5 预应力钢丝绳张拉顺序宜为先中间后两侧, 并应使原结构构件不发生扭转、侧弯, 且张拉时宜采用分级张拉和对称张拉的原则。

## 7.2 施工流程

聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固公路桥梁的施工流程: 桥梁主梁表面处理→制作和焊接梁端锚具→制作挤压锚头→钢丝绳下料→安装钢丝绳并进行张拉锚固→制作并支护模板→配制聚氨酯水泥复合材料并进行浇筑→聚氨酯水泥复合材料养生(不少于24 h)→拆除支护模板→完成桥梁加固。

## 7.3 表面处理

7.3.1 加固施工前原结构表面应进行现场清理、修整。

7.3.2 加固施工前应清除原结构构件表面的剥落、疏松、蜂窝、腐蚀等劣化混凝土, 去除浮浆、浮尘等杂质, 在涂抹砂浆前涂刷界面剂, 表面粗糙度应不小于 5 mm。

7.3.3 为保证界面处理的均匀性, 宜采用压缩空气净洁原结构表面。

7.3.4 采用聚氨酯水泥复合材料维修加固钢筋混凝土桥梁时, 若原构件表面处于潮湿或渗水状态, 修补前应先进行疏水、止水和干燥处理。

## 7.4 锚固系统安装

7.4.1 锚具应与锚板焊接, 且焊接应在锚板锚固施工前完成。

7.4.2 锚板锚固位置应按设计放线、定位、开槽。

7.4.3 锚板与混凝土接触面应采用涂抹或灌注的方式满涂胶粘剂, 并应通过锚栓或植筋将锚板与原结构锚固成一体。

7.4.4 胶粘剂、锚固胶、植筋胶等应在完全固化并达到强度要求后, 进行钢丝绳的张拉施工。

## 7.5 钢丝绳下料及锚固

7.5.1 预应力钢丝绳抗弯加固混凝土梁施工时, 应按下列规定进行预应力钢丝绳下料及张拉, 预应力钢丝绳下料长度示意图如图 5 所示:

- a) 钢丝绳下料前, 应先通过试验实测张拉控制应力下拉应变 ( $\varepsilon$ )、锚具外缘尺寸 ( $L_i$ ) , 并应按下式计算预应力高强钢丝绳的下料长度 ( $L_0$ ) :

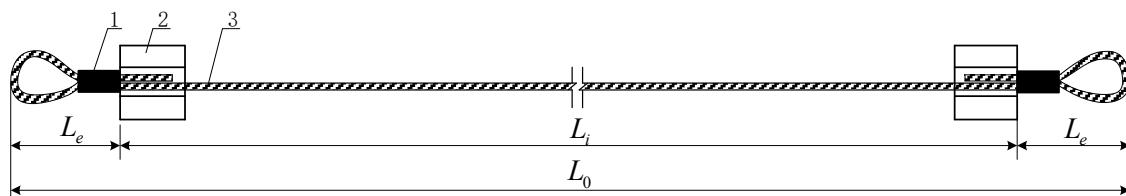
式中：

$L_0$ ——钢丝绳的下料长度，单位为毫米（mm）；

$L_i$ —锚具外缘尺寸，单位为毫米（mm）；

$\varepsilon$  ——试验实测张拉控制应力下拉应变;

$L_e$ ——预应力钢丝绳锚固端预留长度，单位为毫米（mm）。



#### 标引序号说明：

## 1—铺头

2—锚具；

3—预应力钢丝绳。

图5 预应力钢丝绳下料长度示意图

- b) 每根钢丝绳应在其设置的槽道内预紧，并应编号与锚具槽道一一对应；
  - c) 钢丝绳端部应折成双股穿入套管内孔，采用挤压锚具对套管强力挤压，使钢丝绳与锚具形成整体。套管挤压前，锚具接合面及膜腔应预先清洁；挤压时，套管截面长轴应与加压方向一致，且套管应与膜腔槽口完全对齐后再实施挤压；挤压锚头应一次压制完成，且在挤压过程中不得损伤钢丝绳。

7.5.2 锚头外观及尺寸应逐一检验，表面应光滑，无裂纹、飞边和毛刺，尺寸应符合 JGJ/T 325 相关规定。

7.5.3 钢丝绳张拉前，应检查钢丝绳非张拉锚头在锚具槽道内是否准确就位。

7.5.4 钢丝绳张拉时应横向对称，对称轴两边张拉完成的钢丝绳数量之差不应多于3根。

## 7.6 支护模板制作及立模

7.6.1 根据设计聚氨酯水泥复合材料的截面积制作模板，立模时应满足下列要求：

- a) 施工单位应按照模板施工图纸制作模板，其挠度应不超过模板构件跨度的 1/400；
  - b) 板与板之间的接缝应保持严密，必要时可采用压条、封缝胶等措施，以防漏料；
  - c) 模板内侧可涂刷脱模剂或粘贴塑料薄膜胶带。

7.6.2 将模板固定在梁底，模板两端部与混凝土接触位置进行封闭，防止浇筑过程中聚氨酯水泥复合材料流出。

## 7.7 聚氨酯水泥复合材料配制

7.7.1 应根据一次浇筑体积来确定聚氨酯水泥复合材料的用量：

式中：

$W_p$ ——聚氨酯水泥复合材料的用量，单位为千克（kg）；

$\rho_P$ ——聚氨酯水泥复合材料的密度，单位为千克每立方米（kg/m<sup>3</sup>）；

$V_P$ ——一次性浇筑聚氨酯水泥复合材料的体积，单位为立方米（m<sup>3</sup>）。

7.7.2 聚氨酯水泥复合材料的聚酯乳液、填充料等各组分原材料的用量，应根据现场配合比试验确定的最佳配合比计算、下料，用量误差精度应不大于0.5%。

## 7.8 聚氨酯水泥复合材料拌合要求

7.8.1 水泥炒干脱水时，将水泥放入炒炉中加热，保持炒炉匀速转动，翻炒时间宜为90 min~120 min，消除水泥中的自由水和结合水，防止与聚氨酯胶液反应时出现气泡。

7.8.2 聚氨酯胶液由异氰酸酯（黑料）和组合聚醚（白料）按照设计的比例进行混合，采用搅拌机搅拌2 min~5 min后保证胶液均匀混合，通过观察黑料和白料混合后胶液的颜色是否一致判定两种液体是否混合均匀。

7.8.3 制备聚氨酯水泥复合材料时，将炒干脱水的水泥和均匀混合的聚氨酯胶液高速搅拌3 min，均匀混合后形成聚氨酯水泥复合材料。

7.8.4 将聚氨酯水泥复合材料浇筑到预先准备好的模具中，抹平试模表面残留的胶体，常温下宜为60 min，聚氨酯水泥复合材料凝固完毕，在常温下养生24 h，进行试件脱模。

## 7.9 现场浇筑聚氨酯水泥复合材料

7.9.1 在浇筑作业前，应保证界面干燥、净洁。

7.9.2 现场浇筑充分搅拌均匀的聚氨酯水泥复合材料，应保证无结块、无沉淀，并严防水、油、灰尘等混入。

7.9.3 浇筑作业应按施工技术方案要求分片、分段、自下而上施工。

7.9.4 分段浇筑时，应严格控制分段浇筑的时间间隔，保证前后两次浇筑的时间间隔应不少于24 h。

## 7.10 养生

聚氨酯水泥复合材料自然条件下凝结固化应不少于24 h，养护期间严禁雨水淋湿或浸泡。

## 7.11 施工安全和环保措施

7.11.1 现场施工操作安全应满足现行相关规范、标准、规程的要求。

7.11.2 聚氨酯水泥复合材料加固桥梁的作业台架，必须牢固可靠，并应设置安全护栏，经安全部门、监理单位检查验收合格后使用。

7.11.3 施工中输料管、接头和出料弯头有磨薄、击穿或松脱等现象时应及时处理。

7.11.4 施工中检修机械或设备故障时，必须在断电、停风条件下进行。

7.11.5 浇筑作业区应有良好通风和有效降尘措施。

7.11.6 材料的运输和贮存应符合产品说明和环保要求。

7.11.7 原结构构件下方应铺设塑料布，防止溅出的聚氨酯水泥复合材料流入地面或滴入河流中。

# 8 检验与验收

## 8.1 一般规定

采用聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固梁（板）桥结构构件的设计、施工、检验与验收，除应符合本规程外，尚应符合JTG/T J23的规定。

## 8.2 检验

### 8.2.1 加固工程用原材料检验应符合下列规定:

- a) 每批次材料均应按规定频率进行质量抽检, 合格后方可使用;
- b) 聚酯水泥复合材料进场时必须有企业出具的质量合格证明书, 并应对其品种、级别、包装或散装仓号、出厂日期等进行检查;
- c) 加固材料进场后应进行最佳配合比试验, 实验项目包括凝结时间、抗压强度、抗折强度以及与混凝土界面之间的粘结强度。

### 8.2.2 加固层厚度的检验方法及允许偏差应符合下列规定:

- a) 施工结束后应检查加固层厚度, 加固层厚度的检查部位, 应根据不同构件的加固面确定。检查点间距应不大于 2 m, 单个构件每一加固面的检查点宜不少于 3 个;
- b) 加固层厚度正偏差应小于等于 5 mm。表面平整度应小于等于 0.3 %, 当设计有特殊要求时, 应符合其规定值, 但设计规定的允许偏差值, 不得大于本规程的规定值。

### 8.2.3 聚氨酯水泥复合材料强度的检验应符合下列规定:

- a) 采用聚氨酯水泥复合材料加固混凝土桥梁的不同部位时, 应进行抗折强度检验。当设计有特殊要求时, 应增加相应性能要求的试验;
- b) 采用同材料、同配合比、同工艺的聚氨酯水泥复合材料可划分为一个验收批, 在同一验收批中检验次数应不少于 3 次;
- c) 用于检验聚氨酯水泥复合材料的试块, 应会同监理人员随机取样制作。养护试块每次取样应至少留置一组; 同条件养护的试块留置组数应根据实际需求确定;
- d) 抗折试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 采用规程试验方法测得其强度。同条件养护的试块, 其抗折强度值应不低于表 9 规定值的 90 %。
- e) 每组 3 个试块中有明显缺陷的试块应予以舍弃。每组试块的强度代表值应按下列规定确定:
  - 1) 取 3 个试块抗折强度的平均值;
  - 2) 当 3 个试块抗折强度的最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15 % 时, 宜取中间值;
  - 3) 当 3 个试块抗折强度的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15 % 时, 该组试块不应作为强度评定的依据。
- f) 现场拉拔试验参照 GB 50367 进行。

### 8.2.4 聚氨酯水泥复合材料浇筑质量检验应符合下列规定:

- a) 聚氨酯水泥复合材料在施工过程中应留样检验, 应每 200 m<sup>2</sup> 取样一批, 不足 200 m<sup>2</sup> 按一批取样, 每批取样测试抗折强度、抗压强度两个指标, 每个指标试件留样应不少于 1 组;
- b) 聚氨酯水泥复合材料浇筑质量可用小锤敲击法检查, 单块空鼓面积超过 10 cm<sup>2</sup>, 应凿除表层砂浆, 重新涂抹密实。

### 8.2.5 钢丝绳应在加固工程现场取样检验, 并应符合下列规定:

- a) 钢丝绳应每 5 000 m 作为一检验批次, 每批次取样应不小于 10 根, 不足 5 000 m 时, 应按一批取样;
- b) 钢丝绳的尺寸、外形、重量、锌层质量应按 GB/T 20118 验收;
- c) 应确定预应力钢丝绳的应力—应变关系曲线, 试验方法及其力学性能应按本规程规定执行;
- d) 预应力钢丝绳张拉控制应力应采用拉力计检验、校核, 拉力值偏差应在±100 N 范围内, 且拉力计应每张拉 2 000 根标定一次;
- e) 预应力钢丝绳张拉后, 应逐根检查预应力是否张拉到位, 锚头有无滑移, 发现异常应及时更换处理。

### 8.2.6 锚固系统检验应符合下列规定:

- a) 锚具与锚板的材料应符合本规程的相关规定, 锚具与锚板焊接宜在工厂完成, 焊接质量应按 GB 50661 的规定进行检验;
- b) 胶粘剂、锚固胶及植筋胶的类别、规格应符合设计要求, 安全性指标应符合 GB 50367 的规定;
- c) 锚孔质量检查应包括锚孔位置、直径、深度、垂直度以及清孔情况等, 按 JGJ 145 的规定检验;
- d) 群锚纵横排列应符合设计规定, 安装后的锚栓外观应排列整齐、外露部分长短一致;
- e) 锚头应进行静拉力试验检验, 对于承受动力荷载的结构还宜进行振动冲击试验检验, 并应符合下列规定:
  - 1) 锚头应制成钢丝绳锚固试样进行静拉力试验, 且每 1 000 根钢丝绳应随机抽检 5 根, 不足 1 000 根时, 宜按 5 根取样;
  - 2) 锚头静拉力试验应在预应力锚具试验机上进行, 在加载至钢丝绳破断前, 锚头应无滑移; 加载至钢丝绳破断时, 锚头不得损坏;
  - 3) 振动冲击试验在疲劳试验机上进行, 锚头应承受沿钢丝绳轴向的交变应力, 交变应力值为钢丝绳最小破断拉力的 15 %~30 %, 试验频率应不超过 250 次/min, 振动冲击次数应不小于  $1 \times 10^5$  次, 锚头应无滑移、裂纹;
  - 4) 任一根试样静拉力试验或振动冲击试验不合格时, 应加倍抽样检验, 再不合格时, 应判定为不合格, 并应重新选料。

## 8.3 验收

### 8.3.1 加固工程验收时, 应提供下列文件:

- a) 施工图设计文件及材料检验报告、施工质量检验记录等文件;
- b) 钢丝绳、聚氨酯水泥复合材料、锚栓、胶粘剂等材料的出场合格证书、检测报告、进场后的复验报告;
- c) 施工过程记录。

### 8.3.2 聚氨酯水泥复合材料性能指标应符合本规程规定, 浇筑现场验收时, 应检查聚氨酯水泥复合材料浇筑层厚度记录、空鼓检验结果及整改记录。

### 8.3.3 钢丝绳及锚头验收时, 应检查下列内容:

- a) 钢丝绳力学性能检验报告以及伸长量、张拉力值记录;
- b) 锚头外观及静拉力试验检验报告。

### 8.3.4 锚固系统验收应符合下列规定:

- a) 锚具及槽道尺寸应符合规程规定;
- b) 锚具与锚板之间焊缝应饱满, 表面无裂纹、气孔、夹渣等, 焊缝高度不应小于设计要求;
- c) 锚栓或植筋的直径、位置及植入深度等应复核设计要求;
- d) 锚板边缘的溢胶应色泽均匀, 胶体应完全固化;
- e) 隐蔽工程应检查过程控制质量检查记录, 包括锚具及槽道尺寸检查、焊缝检查、锚孔质量检查、胶粘剂均匀性检查记录等。

### 8.3.5 工程验收时, 除应对检验项目的文件资料进行检查与验收外, 还应到工程现场进行逐项检验、验收。

### 8.3.6 工程交(竣)工验收时, 应通过桥梁荷载试验评定加固后桥梁结构技术状态及承载能力, 宜按 JTGT J21-01-2015 的规定验收。