

T/CECS G ×××-××-××××

中国工程建设标准化协会标准

Standard of Association for Engineering Construction Standardization

公路桥梁体外预应力加固技术规程

Technical Specifications for Road Bridge Strengthening with
Externally Applied Prestressing

(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2020 年第二批中国工程建设标准化协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》（中建标公路[2020]150 号）的要求，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司承担《公路桥梁体外预应力加固技术规程》（以下简称“规程”）的制定工作。

为指导公路桥梁体外预应力加固工作，编写组在全面调研、吸收国内外相关经验和研究成果的基础上，经过反复讨论、总结凝练，制定了本规程。

本规程分为 10 章、2 篇附录，主要内容包括：1 总则，2 术语和符号，3 基本规定，4 材料，5 加固设计，6 加固计算，7 加固施工，8 施工监控，9 质量检验，10 监测与维护，附录 A 植筋计算及施工方法，附录 B 锚栓计算及施工方法。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对其适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或李雅娟（地址：陕西省西安市高新技术开发区科技四路 205 号；邮编：710075；电话：029-88853000；电子邮箱：939227042@qq.com），以便修订时研用。

主 编 单 位：

参 编 单 位：

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 基本规定	5
4 材料	7
4.1 混凝土	7
4.2 钢材及焊接材料	7
4.3 预应力钢筋及组件	9
4.4 防护材料	13
4.5 锚固件	13
4.6 胶黏剂	15
5 加固设计	19
5.1 一般规定	19
5.2 体外预应力钢筋布设方式	20
5.3 体外预应力钢束	21
5.4 锚固装置	22
5.5 转向装置	26
5.6 减振装置	29
5.7 防腐体系	29
6 加固计算	31
6.1 一般规定	31
6.2 持久状况承载能力极限状态计算	32
6.3 持久状况正常使用极限状态计算	38
6.4 持久状况与短暂状况应力计算	45

6.5 局部验算	48
7 加固施工	54
7.1 一般规定	54
7.2 施工准备及施工测量	55
7.3 原结构预处理	55
7.4 混凝土锚固装置及转向装置	56
7.5 钢结构锚固装置及转向装置	56
7.6 体外预应力施工	57
7.7 减振装置安装	59
7.8 防腐及防锈处理	59
8 施工监控	60
8.1 一般规定	60
8.2 监控内容	60
8.3 数据分析与反馈控制	62
9 质量检验	63
9.1 一般规定	63
9.2 植筋施工质量检验	64
9.3 锚栓施工质量检验	65
9.4 混凝土锚固装置和转向装置施工质量检验	66
9.5 钢结构锚固装置及转向装置施工质量检验	67
9.6 体外预应力安装与防护质量检验	68
9.7 质量检验资料	69
10 监测与维护	72
10.1 一般规定	72
10.2 监测	72
10.3 检查	72
10.4 维护与更换	74
附录 A 植筋计算及施工方法	76
A.1 设计规定	76
A.2 锚固计算	76

A.3 构造规定	78
A.4 施工方法	80
附录 B 锚栓计算及施工方法	82
B.1 设计规定	82
B.2 锚栓钢材承载力验算	82
B.3 基材混凝土承载力验算	83
B.4 构造要求	83
B.5 安装施工	84
本规程用词用语说明	86

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为指导公路桥梁体外预应力加固工程的设计、施工、质量检验与维护，恢复桥梁使用功能、增强承载能力，制订本规程。

1.0.2 本规程适用于采用体外预应力加固的各等级公路混凝土桥梁。

1.0.3 公路桥梁体外预应力加固应遵循以下基本原则：

- 1 应减少对原结构的损伤，保障结构或构件的强度、刚度和稳定性。
- 2 加固设计方案应技术可靠，可实施性强，并应进行动态设计。
- 3 加固施工时应确保施工安全、通行安全、环境安全。
- 4 体外预应力钢筋应可更换、可补张、可监测、可维护。

1.0.4 公路桥梁体外预应力加固除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行相关标准规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 体外预应力加固 structure member strengthening with externally applied prestressing

通过施加体外预应力，使原结构、构件的受力得到改善或调整的方法。

2.1.2 体外预应力钢筋 external prestressing tendon

布置在结构构件截面之外的预应力钢筋。通过与结构构件相连的锚固装置和转向装置将预应力传递到构件或结构上。

2.1.3 成品索 factory assembly tendon

在工厂内生产、组拼完成的体外索索体，包含锚头、索体及防护体系成套产品。

2.1.4 非成品索 on-site assembly tendon

由工厂生产的体外索索体运输到施工现场组装而成的体外索索体。

2.1.5 集束式 clustered arrangement

钢束按自然叠置状态排列。

2.1.6 散束式 scattered arrangement

钢束通过分散装置按规定分布状态排列。

2.1.7 转向装置 steering gear

用于固定体外束并使预应力转向的结构。

2.1.8 植筋 embedded steel bar

以专用的结构胶粘剂将带肋钢筋或全螺纹螺杆种植于混凝土基材中。

2.1.9 锚栓 anchor

将被连接件锚固到混凝土基材上的锚固组件，分为机械锚栓和化学锚栓。

2.1.10 应力扰动区 stress disturbed area

混凝土结构中截面应变分布不符合平截面假定的区域，也称 D 区。

2.1.11 拉压杆模型 strut-and-tie model

反映混凝土应力扰动区力流传递路径的桁架模型。

2.2 符号

2.2.1 材料性能

E_c ——原构件混凝土的弹性模量；

$E_{p,e}$ 、 $E_{pb,e}$ ——分别为体外预应力水平筋（束）、斜筋（束）的弹性模量；

$f_{cu,k}$ ——原构件混凝土强度等级；

f_{cd} ——混凝土的轴心抗压强度设计值；

f_{sd} ——原构件普通钢筋的抗拉强度设计值；

$f_{pd,i}$ ——原构件体内预应力筋的抗拉强度设计值；

$f_{pd,e}$ ——体外预应力筋（束）的抗拉强度设计值；

2.2.2 作用、作用效应

M_d ——构件加固后作用组合的弯矩设计值；

N_d ——构件加固后作用组合的轴向力设计值；

V_d ——构件加固后作用组合剪力设计值；

$\sigma_{pu,e}$ ——体外预应力水平筋（束）的极限应力；

$\sigma_{pe,e}$ ——体外预应力水平筋（束）的有效应力；

$\sigma_{pub,e}$ ——体外预应力斜筋（束）的极限应力；

$\sigma_{pe,i}$ ——原梁体内预应力筋的永存预应力；

N_{hd} ——转向装置的水平作用设计值；

N_{vd} ——转向装置的竖向作用设计值；

2.2.3 几何参数

- A_s ——原梁体内纵向受拉普通钢筋的截面积；
- A'_s ——原梁体内纵向受压普通钢筋的截面积；
- $A_{p,i}$ ——原梁体内预应力筋的截面面积；
- $A_{p,e}$ ——体外预应力筋（束）的截面面积；
- $h_{p,e}$ ——体外预应力筋（束）合力点到截面顶面的距离；
- l_e ——计算跨体外预应力的有效长度；

2.2.4 计算系数及其他

- α_{EP} ——原梁体内预应力钢筋与混凝土的弹性模量之比；
- γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；
- γ_p ——体外预应力钢材的安全系数；
- λ ——体外索斜筋（束）拉力与水平筋（束）拉力的比例系数；
- β ——局部承压强度提高系数；

3 基本规定

3.0.1 公路桥梁采用体外预应力加固时应进行适用性和可行性分析。

3.0.2 桥梁加固前应按照现行《公路桥梁承载能力检测评定规程》（JTG/T J21）对其承载能力进行检测评定，必要时应对原桥技术状况进行特殊检测。

条文说明

对被加固桥梁承载能力的准确把握是作好体外预应力加固设计的前提，故应根据检测、检算及荷载试验资料对其进行详细、客观的评估，使加固设计能够做到有的放矢、安全有效。

3.0.3 体外预应力加固适用于恢复或提高结构或构件的承载能力或改善结构或构件的抗裂性等。

3.0.4 体外预应力加固法可单独使用，也可与其他加固方法联合使用。

条文说明

体外预应力通过施加体外预应力，以预应力产生的轴向压力、弯矩或剪力抵消部分外荷载产生的内力，从而达到恢复或提升原桥使用性能并提高其承载力的目的，是一种主动加固方法。可以与增大截面、粘贴钢板、粘贴碳纤维等加固方法联合使用。

3.0.5 采用体外预应力加固的桥梁混凝土原构件的实测强度等级不宜低于 C30。

3.0.6 公路桥梁体外预应力加固宜按检测与评定→加固设计（方案设计、施工图设计）→加固施工（质量检验与监控）→质量验收→监测、维护的流程进行。

3.0.7 体外预应力加固用材料及产品应质量可靠、经久耐用，满足设计及相关规范、标准的要求。

3.0.8 桥梁体外预应力设计宜进行两阶段设计。

条文说明

体外预应力加固属于主动加固，技术相对复杂，施工要求较高，存在一定的工程风险，因此在设计阶段一般需要充分论证，进行方案设计及施工图设计。

3.0.9 桥梁体外预应力加固施工时应应对结构及构件的受力及变形进行全过程监控。

3.0.10 桥梁体外预应力加固质量验收应按照现行《公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG 5220）《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定进行。

3.0.11 体外索在运营期间应对其工作状态进行监测，并确保数据的连续性与完整性。

3.0.12 桥梁加固完工后应定期对体外预应力加固体系进行检查与维护。

4 材料

4.1 混凝土

4.1.1 体外预应力加固采用的混凝土材料应具备早强、收缩小、免振捣、抗裂性好、与原结构混凝土结合紧密等性能。

4.1.2 加固所用的混凝土强度等级不应低于原结构混凝土强度等级，且不低于 C50。

4.1.3 混凝土材料的配制和质量应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）的规定。

4.1.4 混凝土拌合水应符合现行《混凝土拌合用水标准》（JGJ63）的规定。

4.1.5 锚固装置和转向装置采用高性能混凝土时，其材料力学性能及耐久性应符合现行《高性能混凝土技术条件》（GB/T 41054）的相关规定。

4.2 钢材及焊接材料

4.2.1 普通钢筋的型号及强度设计值应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定，见表 4.2.1。

表 4.2.1 普通钢筋抗拉、抗压强度设计值

钢筋种类	f_{sd} (MPa)	f'_{sd} (MPa)
HPB300	250	250
HRB400、HRBF400、RRB400	330	330
HRB500	415	400

4.2.2 钢材和焊缝的型号及强度设计值应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定，见表 4.2.2-1~2。

表 4.2.2-1 钢材的强度设计值 (MPa)

钢材	抗拉、抗压和抗弯 f_d	抗剪 f_{vd}	断面承压 (刨
----	----------------	-------------	---------

牌号	厚度 (mm)			平顶紧) f_{cd}
Q235 钢	≤16	190	110	280
	16~40	180	105	
	40~100	170	100	
Q355 钢	≤16	275	160	355
	16~40	270	155	
	40~63	260	150	
	63~80	250	145	
	80~100	245	140	
Q390 钢	≤16	310	180	370
	16~40	295	170	
	40~63	280	160	
	63~100	265	150	
Q420 钢	≤16	335	195	390
	16~40	320	185	
	40~63	305	175	
	63~100	290	165	

表 4.2.2-2 焊缝的强度设计值 (MPa)

焊接方法和 焊条型号	构件钢材		对接焊缝				角焊缝
	牌号	厚度 (mm)	抗压 f_{cd}^w	抗拉 f_{td}^w		抗剪 f_{vd}^w	抗拉、抗 压和抗弯 f_{sd}^w
				焊缝质量等级			
				一级、二级	三级		
自动焊、半 自动焊和 E43 型焊条 的手工焊	Q235 钢	≤16	190	190	160	110	140
		16~40	180	180	155	105	
		40~100	170	170	145	100	
自动焊、半 自动焊和 E50 型焊条 的手工焊	Q355 钢	≤16	275	275	235	160	175
		16~40	270	270	230	155	
		40~63	260	260	220	150	
		63~80	250	250	215	145	

		80~100	245	245	210	140	
自动焊、半自动焊和E55型焊条的手工焊	Q390 钢	≤16	310	310	265	180	200
		16~40	295	295	250	170	
		40~63	280	280	240	160	
		63~100	265	265	225	150	
	Q420 钢	≤16	335	335	285	195	200
		16~40	320	320	270	185	
		40~63	305	305	260	175	
		63~100	290	290	245	165	

4.2.3 高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应符合现行《钢结构用高强度大六角螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》(GB/T 1231)的规定。普通螺栓应符合《六角头螺栓 C 级》(GB/T 5780)和《六角头螺栓》(GB/T 5782)的规定。

4.2.4 钢转向块、钢锚固块采用的钢材应不低于 Q355，必要时可采用耐候钢。

4.3 预应力钢筋及组件

4.3.1 钢绞线体外预应力组件包括体外索、锚具、转向块、减震装置等（见图 4.3.1）。

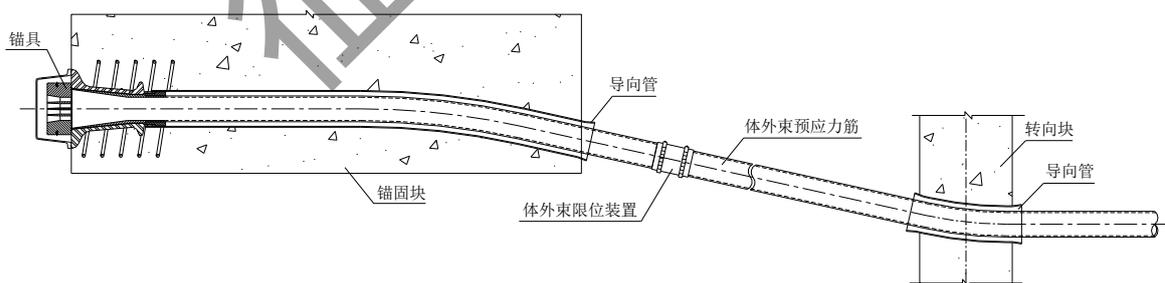


图 4.3.1 体外预应力组件示意

4.3.2 钢绞线应符合现行《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224)的规定；高强度钢丝应符合现行《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223)的规定；精轧螺纹钢应符合现行《预应力混凝土用螺纹钢》(GB/T 20065)的规定。

4.3.3 体外索的技术要求应符合现行《体外预应力索技术条件》（GB/T 30827）、《无粘结钢绞线体外预应力束》（JT/T 853）和《填充型环氧涂层钢绞线体外预应力束》（JT/T 876）的规定。

4.3.4 预应力钢筋的抗拉强度设计值，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定采用，见表 4.3.4。

表 4.3.4 预应力钢筋抗拉、抗压强度设计值

钢筋种类	f_{pk} (MPa)	f_{pd} (MPa)	f'_{pd} (MPa)
钢绞线 1×7	1720	1170	390
	1860	1260	
	1960	1330	
消除应力钢丝	1450	1000	410
	1570	1070	
	1770	1200	
	1860	1260	
预应力螺纹钢筋	785	650	400
	930	770	
	1080	900	

4.3.5 桥梁加固用体外预应力转向器和锚具组装件，应满足现行国家标准《体外预应力索技术条件》（GB/T 30827）规定的静载试验和疲劳试验技术要求。

4.3.6 体外索分为成品索和非成品索（见图 4.3.6）。体外预应力钢绞线可采用无粘结钢绞线或填充型环氧涂层钢绞线。

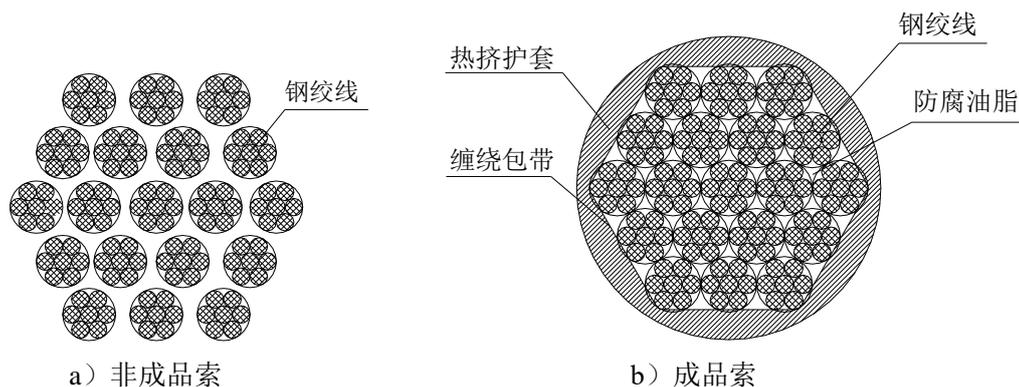


图 4.3.6 体外索截面示意

4.3.7 体外索转向器分为集束式和散束式（见图 4.3.7），集束式转向器及散束式转向器的导向管应采用无缝钢管，钢管材料应符合现行《结构用无缝钢管》（GB/T 8162）的规定。

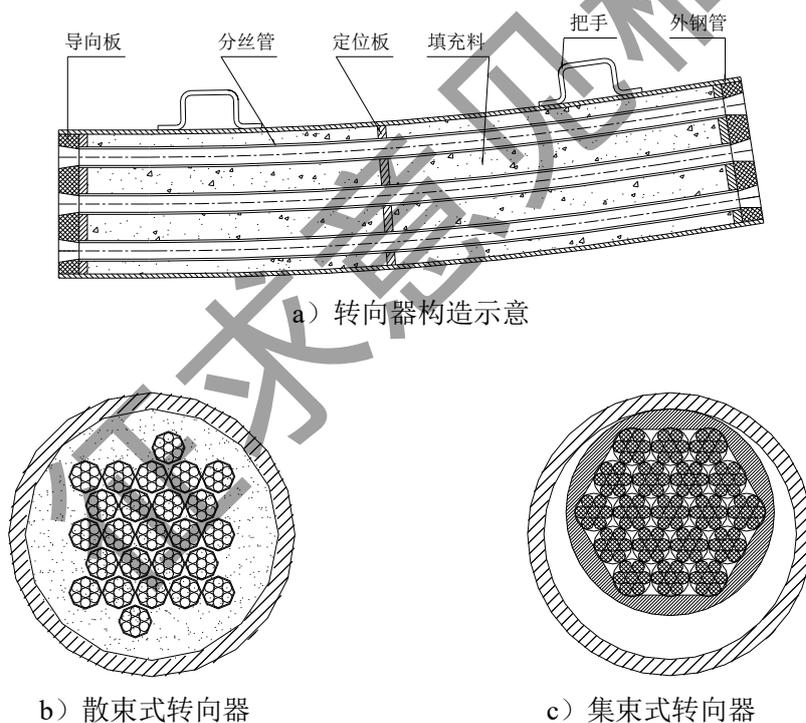
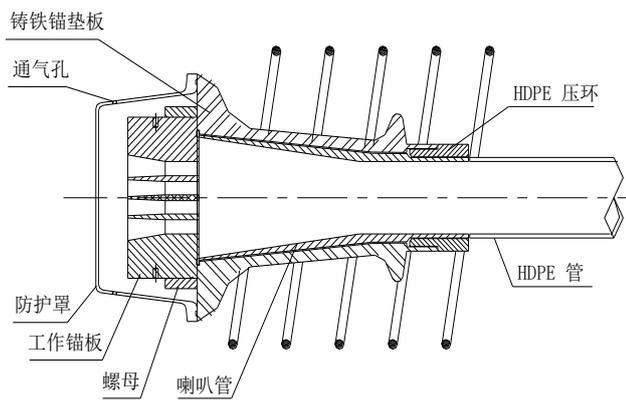
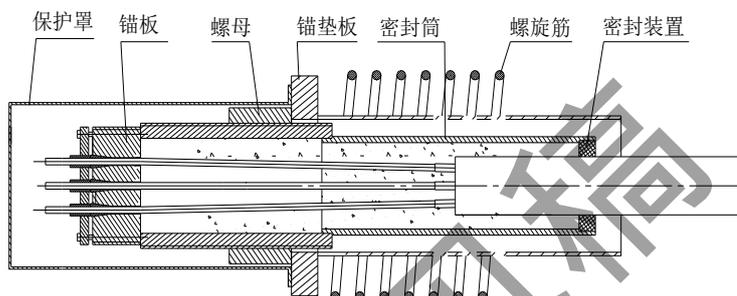


图 4.3.7 转向器截面示意

4.3.8 体外索锚具可采用铸造式锚具和钢板式锚具（见图 4.3.8），锚具组件应符合《预应力筋用锚具、夹具和连接器》（GB/T 14370）的规定。



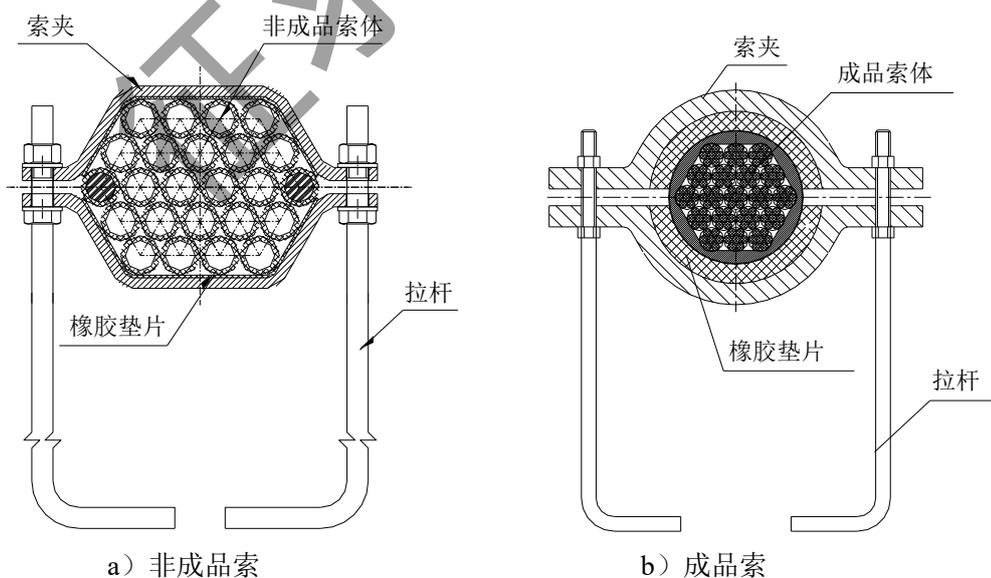
a) 铸造式锚具



b) 钢板式锚具

图 4.3.8 锚具组件结构示意图

4.3.9 体外索减震装置由定位部件和隔振材料组成（见图 4.3.9），减震装置应有适当的防腐措施，可重复拆卸及更换。



a) 非成品索

b) 成品索

图 4.3.9 减震装置示意

4.4 防护材料

4.4.1 防腐油脂应符合现行行业标准《无粘结预应力筋专用防腐润滑脂》(JG3007)的相关规定。

4.4.2 防腐涂层的性能应符合现行行业标准《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722)的相关规定。

4.5 锚固件

4.5.1 机械锚栓的性能应符合现行行业标准《混凝土用机械锚栓》JG/T 160的有关规定。对进口产品应具有该国或国际认证机构出具的地震区适用的认证证书。

4.5.2 机械锚栓的材质宜为碳素钢、合金钢、不锈钢或高抗腐蚀不锈钢，应根据环境条件及耐久性要求选用。钢材的性能指标应符合表 4.5.2-1 或表 4.5.2-2 的规定。

表 4.5.2-1 碳素钢及合金钢锚栓的力学性能指标

性能等级		4.8	5.8	6.8	8.8
锚栓钢材性能指标	抗拉强度标准值 f_{uk} (MPa)	400	500	600	800
	屈服强度标准值 f_{yk} (MPa)	320	400	480	640
	断后伸长率 δ_5	14	10	8	12

表 4.5.2-2 奥氏体不锈钢锚栓的力学性能指标

性能等级	螺纹直径 (mm)	极限抗拉强度标准值 f_{stk} (N/mm ²)	极限抗拉强度标准值 f_{stk} (N/mm ²)	伸长率 δ
50	≤ 39	500	210	0.6d
70	≤ 24	700	450	0.4d
80	≤ 24	800	600	0.3d

4.5.3 化学锚栓的螺杆可分为普通全牙螺杆和特殊倒锥形螺杆，螺杆材质应根据环境条件及受力要求选用。

4.5.4 化学锚栓螺杆的材质和性能等级应符合表 4.5.4-1 和表 4.5.4-2 的规定。

表 4.5.4-1 普通化学锚栓的锚固性能要求

项目	混凝土立方体抗压强度标准值 (N/mm ²)	裂缝宽度 (mm)	试验型式	锚栓埋深	性能要求
不开裂混凝土的基本抗拉性能	25 60	0	约束抗拉	—	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.20$, $\tau_{Rk, ucr} \geq 6.0 \text{N/mm}^2$
开裂混凝土中的基本抗拉性能	25 60	0.3	约束抗拉	—	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.20$, $\tau_{Rk, cr} \geq 6.0 \text{N/mm}^2$
抗拉临界边距	25	0	非约束抗拉	最小	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.20$, 承载力平均值不低于大边距参照试验的 95%
最小边、间距	25	0	—	最小	以最小边、间距安装锚栓 不造成裂缝
安装性能	25	0	约束抗拉	最大	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.30$, 干燥混凝土 $\alpha \geq 0.80$, 潮湿和有明水混凝土中 $\alpha \geq 0.75$
裂缝反复开合	25	0.1~0.3	—	中间值	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.30$, $\alpha \geq 0.90$
长期荷载	25	0	约束抗拉	中间值	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.30$, $\alpha \geq 0.90$, 位移增长率趋近于零
冻融循环	60	0	约束抗拉	中间值	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.30$, $\alpha \geq 0.90$, 位移增长率趋近于零
最高温度测试	25	0	约束抗拉	最小	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.20$, 短期最高温度承载力与长期最高温度承载力之比不小于 0.80
安装方向测试	25	0	约束抗拉	中间值	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.30$, $\alpha \geq 0.90$

注：表中 $\tau_{Rk, ucr}$ 为不开裂混凝土中化学锚栓粘结强度标准值； $\tau_{Rk, cr}$ 为开裂混凝土中化学锚栓粘结强度标准值； γ 为每根化学锚栓滑移系数； v_N 为化学锚栓抗拉承载力变异系数； α 为抗拉锚固系数。

表 4.5.4-2 特殊倒锥形化学锚栓的锚固性能要求

项目	混凝土立方体抗压强度标准值 (N/mm ²)	裂缝宽度 (mm)	安装扭矩 (N·m)	试验型式	锚栓埋深	性能要求
不开裂混凝土的基本抗拉性能	25 60	0	T_{inst}	非约束抗拉	—	$N_{Ru,m}^r \geq 13.5 \sqrt{f_{cu,k}} h_{ef}^{1.5}$, $\gamma \geq 0.80$, $v_N \leq 0.15$; 钢材破坏: $N_{1,i}^r > f_{yk} A_s$, $N_{Ru,m}^r > f_{stk} A_s$, $v_N \leq 0.10$

开裂混凝土中的基本抗拉性能	25 60	0.3	T_{inst}	非约束抗拉	—	$N_{Ru,m}^r \geq 9.4\sqrt{f_{cu,k}}h_{ef}^{1.5}$, $\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.15$
抗拉临界边距	25	0	T_{inst}	非约束抗拉	最小和最大	$\gamma \geq 0.80$, $v_N \leq 0.15$, 承载力平均值不低于大边距参照试验的 95%
最小边、间距	25	0	—	—	最小	以最小边、间距安装锚栓不造成裂缝
安装性能	25	0.3	T_{inst} , 10min 后 降至 $0.5T_{inst}$	非约束抗拉	最大	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.20$, 干燥混凝土中 $\alpha \geq 0.80$, 潮湿和有明水混凝土中 $\alpha \geq 0.75$
裂缝反复开合	25	0.1~0.3	T_{inst} , 10min 后 降至 $0.5T_{inst}$	非约束抗拉	最小	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.20$, $\alpha \geq 0.90$
长期荷载	25	0	T_{inst} , 10min 后 降至 $0.5T_{inst}$	约束抗拉	最小	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.30$, $\alpha \geq 0.90$, 位移增长率趋 近于零
冻融循环	60	0	T_{inst} , 10min 后 降至 $0.5T_{inst}$	约束抗拉	最小	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.30$, $\alpha \geq 0.90$, 位移增长率趋 近于零
最高温度测试	25	0	T_{inst}	非约束抗拉	最小	$\gamma \geq 0.80$, $v_N \leq 0.15$, 短期最高温度承载力与 长期最高温度承载力之 比不小于 0.8
安装方向测试	25	0.3	T_{inst} , 10min 后 降至 $0.5T_{inst}$	非约束抗拉	最大	$\gamma \geq 0.70$, $v_N \leq 0.20$, $\alpha \geq 0.90$

注：表中 $N_{Ru,m}^r$ 为特殊倒锥形化学锚栓基本抗拉性能试验的抗拉承载力平均值； $N_{1,i}$ 为第 i 个特殊倒锥形化学锚栓的滑移荷载； γ 为化学锚栓滑移系数； v_N 为化学锚栓抗拉承载力变异系数； α 为抗拉锚固系数。

4.5.5 植筋用钢筋应采用热轧带肋钢筋，不得使用光圆钢筋。

4.6 胶黏剂

4.6.1 桥梁加固胶应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》（GB 50728）的相关规定。

条文说明

加固用胶粘剂包括 A、B 两级，这两个等级的主要区别在于其韧性和耐湿热老化的合格指标不同。鉴于桥梁所处环境的复杂性剂体外预应力加固结构受力的重要性，

本规程只采用通过安全性鉴定的 A 级胶。安全性鉴定是对胶体性能的评估，且用于桥梁加固用的胶粘剂应具有国家认证机构出具的安全性鉴定报告。

4.6.2 植筋胶的安全性能应符合表 4.6.2-1 和表 4.6.2-2 的规定。改性剂应在工厂制胶时添加，不得在施工现场渗入。不应使用以水泥和微膨胀剂为主要成分配制的锚固剂作为胶粘剂材料。

条文说明

桥梁加固用的胶粘剂长期应用于复杂环境（温度、水分、化学介质等），因此有必要对其耐久性做出详细的检测内容，以确保体外预应力结构受力构件的安全度。相关的测试方法可参照《混凝土工程用锚固胶》（GB/T 37127-2018）执行。

表 4.6.2-1 改性环氧树脂类胶粘剂性能指标

序号	项目		A 级胶性能要求	
1	外观质量		无分层、结块、沉淀	
2	基本性能	劈裂抗拉强度 / MPa	≥ 8.5	
		抗弯强度 / MPa	≥ 50	
		抗压强度 / MPa	≥ 60	
		无约束线性收缩率 / %	≤ 0.3	
		钢对钢（钢片法）拉伸抗剪强度，标准值 / MPa	≥ 10.0	
		钢对钢 T 冲击剥离长度 / mm	≤ 25	
		约束拉拔条件下带肋钢筋与混凝土的粘结强度 / MPa	C30 $\phi 25$ L=150mm	≥ 17.0
			C60 $\phi 25$ L=125mm	≥ 17.0
			热变形温度 / $^{\circ}\text{C}$	≥ 65
	不挥发物含量 / %	≥ 99		
3	施工性能	可操作时间 / min. 注射筒装	≥ 10	
		下垂度 / mm	≤ 2.0	
		施工温度范围	按产品说明书	
4	长期使用性能	耐湿热老化性能，钢对钢（钢片法）拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 10	
		耐冻融性能，钢对钢（钢片法）拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 5	
		耐长期应力作用能力	蠕变的变形值小于 0.4mm	

5	耐介质侵蚀性能	耐疲劳应力作用能力, 200 万次	试件不破坏
		耐热老化能力, 钢对钢 (钢片法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 5
		耐碱性介质, 钢对钢 (钢片法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	
		耐酸性介质, 钢对钢 (钢片法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	
		耐盐雾介质, 钢对钢 (钢片法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 7
耐海水浸泡, 钢对钢 (钢片法) 拉伸抗剪强度降低率 / %			

注: 表中的性能指标除标有强度标准值外, 均为平均值。

表 4.6.2-2 改性乙烯酯类胶粘剂性能指标

序号	项目		A 级胶性能要求	
1	外观质量		无分层、结块、沉淀	
2	基本性能	无约束线性收缩率 / %	≤ 0.5	
		钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度, 标准值 / MPa	≥ 16.0	
		约束拉拔条件下带肋钢筋与混凝土的粘结强度 / MPa	30 MPa 强度的混凝土	≥ 12.0
			60 MPa 强度的混凝土	≥ 18.0
		热变形温度 / °C	≥ 65	
不挥发物含量 / %	≥ 99			
3	施工性能	可操作时间 / min.	≥ 5	
		下垂度 / mm	≤ 2.0	
		施工温度范围	按产品说明书	
4	长期使用性能	耐湿热老化性能, 钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 10	
		耐冻融性能, 钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 5	
		耐疲劳应力作用能力, 200 万次	试件不破坏	
		耐热老化能力, 钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 5	
耐碱性介质, 钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度降低率 / %				
耐酸性介质, 钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度降低率 / %				
耐盐雾介质, 钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度降低率 / %				
5	耐介质侵蚀性能	耐海水浸泡 (仅用于水下锚固), 钢对钢 (钢套筒法) 拉伸抗剪强度降低率 / %	≤ 7	

注: 表中的性能指标除标有强度标准值外, 均为平均值。

征求意见稿

5 加固设计

5.1 一般规定

5.1.1 体外预应力加固设计前应进行现场实施条件调查，并收集桥梁设计、竣（交）工资料及检测、荷载试验等养护历史资料。

5.1.2 公路桥梁体外预应力加固应在对原桥梁结构或构件强度、刚度及稳定性检算的基础上进行设计。

5.1.3 体外预应力加固构造设计应包括体外预应力钢筋布置设计、锚固装置或转向装置等新增构件构造设计、新增构件与原结构连接设计等。

条文说明

体外预应力构造体系一般包括体外预应力筋、锚固装置、转向装置、减振装置等。

5.1.4 体外预应力加固设计应对施工工艺、施工工序、施工监控内容等提出要求。

5.1.5 体外预应力筋宜采用成品索。

条文说明

考虑到现场条件限制、后期养护便捷及耐久性能，当条件允许时，建议优先采用成品索。

5.1.6 混凝土桥梁锚固装置宜采用混凝土结构，转向装置可采用混凝土结构或钢结构。

条文说明

根据工程实践经验，混凝土锚固装置可与原结构更好结合，整体受力性能好，可靠性更高。

5.1.7 体外预应力钢束的自由段长度过长时，应设置定位或减震装置。

5.1.8 加固所采用的体外预应力钢筋、锚固体系及钢构件等应进行防腐设计。

5.2 体外预应力钢筋布置方式

5.2.1 体外预应力钢筋可由局部布置的水平筋和斜筋组成，亦可由通长布置的钢绞线（束）、钢丝（束）组成。

5.2.2 体外预应力钢筋宜在原结构上对称、均衡布置，不宜采用使原结构产生面外弯曲效应或附加扭转效应的布置方式。

5.2.3 体外预应力钢筋布置应考虑原结构的结构形式、作业空间及受力状态合理选择锚固、转向装置位置。

5.2.4 体外预应力钢筋布置应考虑桥梁结构的内力分布状况，避免对原结构受力状态造成不利影响。

5.2.5 体外预应力钢筋纵断面布置应符合下列规定（见图 5.2.5-1~5.2.5-3）：

- 1 简支结构的体外预应力钢筋应单跨布置。
- 2 连续结构的体外预应力钢筋宜多跨连续布置，也可分跨、分段交叉布置。



图 5.2.5-1 单跨布置体外预应力钢筋示意

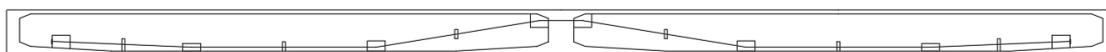


图 5.2.5-2 多跨连续布置体外预应力钢筋示意

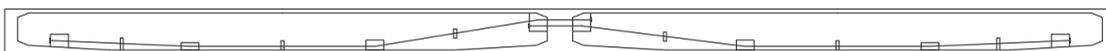


图 5.2.5-3 分跨交叉布置体外预应力钢筋示意

5.2.6 体外预应力钢筋横断面布置应符合下列规定：

- 1 矩形截面的体外预应力钢筋宜在截面下缘均匀布置，或在截面两侧对称布置。

2 箱型截面的体外预应力钢筋宜靠近腹板对称布设，在底板或顶板布设时应考虑有效宽度影响。

3 T 型、I 型、 π 型截面的体外预应力钢筋宜在腹板两侧对称布设。

5.2.7 体外预应力钢筋沿截面高度布设应符合下列规定：

1 受弯构件的体外预应力钢筋应在受拉侧远离截面中性轴布设，提高加固效率。

2 轴心受拉构件的体外预应力钢筋应在中性轴两侧对称布设，使全截面均匀受力。

5.2.8 曲线梁桥体外预应力钢筋布设应考虑曲线内、外侧梁长、梁高不同和横坡影响。

5.2.9 体外预应力钢筋布设线型可采用直线型、双折线型或多折线型。

5.3 体外预应力钢束

5.3.1 体外预应力钢束应根据运输条件、穿束方式、张拉空间及工艺等因素选择成品索或非成品索。

5.3.2 单束体外预应力钢束的钢丝、钢绞线规格应考虑锚固区局部承压、锚固装置与转向装置受力、千斤顶张拉作业、钢束失效风险等因素。

5.3.3 体外预应力钢束的张拉端或锚固端宜布置在原结构构造加强段，当张拉端或锚固端处原结构强度不足时应进行局部补强。

条文说明

体外预应力钢束的锚固装置通常设置在原结构横梁、横隔板或新增横梁、横隔板根部等加强段，并尽量靠近梗腋、倒角或承托布置。

5.3.4 沿原结构纵向通长布置的体外预应力钢束，其张拉端或锚固端宜靠近梁端布置。在原结构上分段、分跨或局部布置的体外预应力钢束，其张拉端或锚固端可靠近支点布置。

5.3.5 体外预应力钢束的最小弯曲半径控制值见表 5.3.5。

表 5.3.5 体外预应力钢束最小弯曲半径 R_{min} 控制值

规格	R_{min} 控制值 (m)
3×Φ15.2、5×Φ15.2、7×Φ15.2	3.0
12×Φ15.2	3.5
19×Φ15.2	4.0
27×Φ15.2	4.5
31×Φ15.2	5.0

5.3.6 体外预应力钢束宜以直线束形式伸入锚固装置，伸入锚固装置前完成弯曲转向。

5.3.7 体外预应力钢束的自由段长度宜控制在 8m 以内，否则应设置定位或减震装置。

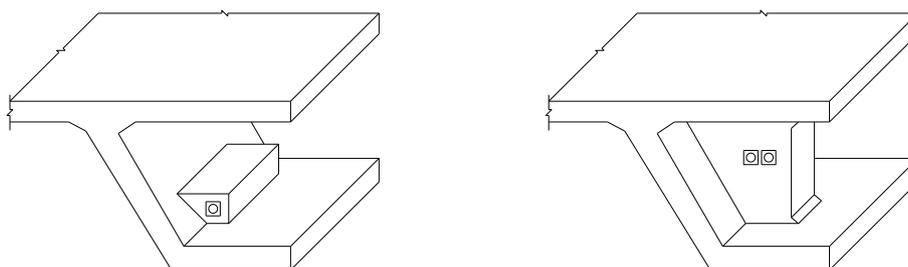
5.3.8 体外预应力锚具为夹片锚时，宜采用自带防松止退装置的成品锚具，或在设计中采取有效的防松止退构造措施。

5.4 锚固装置

5.4.1 体外预应力加固可采用混凝土锚固装置或钢结构锚固装置。

5.4.2 用于体外预应力锚固装置的混凝土强度等级不应低于 C50，承重部分的钢材强度等级不应低于 Q355。

5.4.3 混凝土锚固装置可采用附着式、半横梁式或横梁式，通过种植钢筋与原结构可靠连接（见图 5.4.3）。



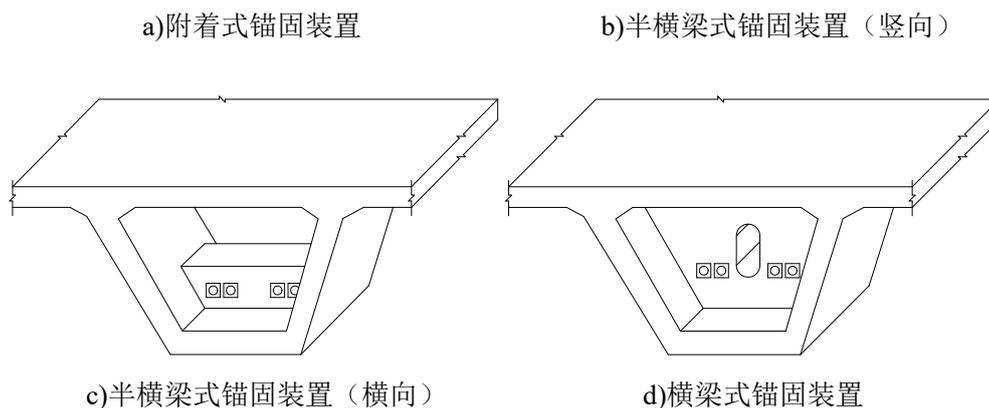


图 5.4.3 混凝土锚固装置构造示意

5.4.4 混凝土锚固装置的构造尺寸应符合下列规定：

- 1 锚固端面的尺寸应根据体外预应力钢筋（束）布置、锚具尺寸、张拉空间、局部承压等要求确定，其边缘与锚垫板边缘距离不宜小于 50 mm。
- 2 锚固装置的纵向尺寸应满足锚具的埋置深度及新旧混凝土连接强度要求，且不宜小于 1000mm。
- 3 体外预应力张拉造成原结构混凝土牵拉应力较大时，可在锚固装置与原结构连接处设置倒角、台阶或对原结构进行局部补强。
- 4 新、旧混凝土结合面应设置齿形剪力槽，剪力槽深度以露出原结构最外层钢筋外缘为宜，剪力槽宽度不宜小于 100mm 且不宜大于 150mm，剪力槽齿间净距不宜小于 150mm。

5.4.5 混凝土锚固装置应进行配筋计算，普通钢筋构造应符合下列规定：

- 1 锚固装置的锚下应配置抵抗劈裂力的箍筋，箍筋应采用植入原结构的 U 形箍筋或与植入原结构的锚固钢筋焊接的闭合箍筋，直径不宜小于 16mm，纵向间距宜设为 150~200mm。
- 2 同一锚固装置并排锚固多根钢束时，应同时配置内环箍和外环箍，内环箍筋箍住单个锚具，外环箍筋宜沿锚固装置周边箍住所有纵向钢筋和锚具。
- 3 锚固装置外侧面及箍筋的外侧角隅处应配置纵向防裂钢筋，直径不应小于 12mm。
- 4 锚固装置的倒角、台阶内应配置抵抗锚后牵拉的纵向加强钢筋，与植入原结构的钢筋钩接，其直径不宜小于 16mm。
- 5 当采用平板式锚垫板时，锚下应配置不少于 4 层的方格式矩形钢筋或不少于 4

圈的螺旋筋；当采用带锥形管的锚垫板时，锚下应配置螺旋筋，其纵向圈数的总长度不应小于锥形管长度。

6 体外预应力钢束以曲线形式伸入锚固装置时，应沿钢束转向器纵向配置 U 形防崩钢筋。防崩钢筋宜通过植筋与原结构连接，其纵向分布范围不宜小于钢束转向器曲线段全长。

7 锚固装置的纵向分布钢筋的直径不宜小于 12mm，间距不宜大于 200mm。

8 植筋在原结构混凝土中的有效锚固长度不宜小于其外径的 10 倍，并应满足附录 A 中的相关要求。

5.4.6 钢结构锚固装置可采用附着式、抱箍式或横梁式，通过锚栓、胶黏剂与原结构可靠连接。

5.4.7 钢结构锚固装置由承压组件、锚固组件及封锚组件三部分构成（见图 5.4.7）。

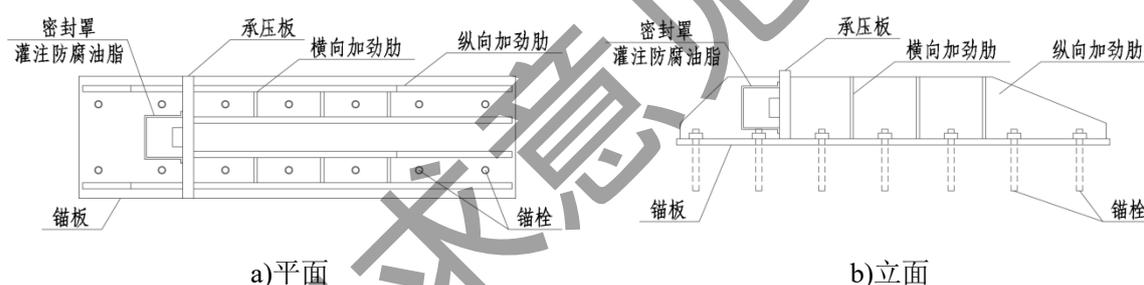


图 5.4.7 钢结构锚固装置构造示意

5.4.8 钢结构锚固装置的承压组件由锚板、承压板及加劲肋焊接而成，应符合下列规定：

- 1 承压组件的总体尺寸应根据体外预应力钢筋（束）布置、锚具尺寸、锚栓布置、受力需要、张拉空间等确定。
- 2 锚板、承压板及加劲肋应由钢板切割而成，不得采用拼接钢板。
- 3 锚板厚度应根据其平面尺寸、强度及变形计算确定，且不宜小于 20mm，宜采用灌胶工艺粘贴于原结构基材表面。
- 4 锚板上的锚孔与锚板边缘净距不宜小于 50mm。
- 5 锚板上的锚孔最大直径及孔壁与锚栓之间的最大间隙控制值见表 5.4.8。

表 5.4.8 锚孔最大直径及最大间隙控制值

锚栓直径 (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27	30
锚孔孔径 (mm)	14	16	18	20	22	24	26	30	33
最大间隙 (mm)	2	2	2	2	2	2	2	3	3

6 承压板应与张拉端钢束垂直，与锚板的内夹角不应大于 90° ，其高度和宽度应满足张拉空间、防松止退装置及封锚组件安装要求。承压板外边缘与锚垫板外边缘距离不宜小于 50mm，厚度不宜小于 20mm，并应满足强度及变形计算要求。

7 承压板上的开孔直径应略大于钢束或钢束导管外径，且与钢束或钢束导管外径之差宜不大于 5mm，且应将其边缘及孔口打磨光滑、无毛刺。

8 纵向加劲肋高度不应低于锚垫板外边缘且不宜大于承压板高度，其方向宜与张拉力方向一致，横向宜在钢束两侧对称布置，竖向宜与锚板垂直布置，厚度不宜小于 10mm，并应满足强度及变形计算要求。

9 横向加劲肋可根据强度及变形计算要求设置，其高度不宜大于纵向加劲肋高度，厚度不宜小于 8mm。在横向加劲肋上开孔时，其开孔要求应与承压板相同。

10 纵、横向加劲肋与锚板上的锚孔边缘净距不宜小于 50mm。

11 承压组件宜采用工厂制作，焊缝等级不应低于 I 级。

5.4.9 钢结构锚固装置的锚固组件应符合下列规定：

1 锚固组件可采用符合本规程第 4.5 节规定的机械锚栓或特殊倒锥形化学锚栓，锚栓选型、锚栓直径、锚栓布置、锚固深度、锚固计算及施工工艺等应满足附录 B 中的相关要求。

2 锚栓与锚板锚孔孔壁之间的间隙应采用胶黏剂填充密实，确保群锚中的所有锚栓均匀受力。

条文说明

锚固装置与原结构连接一般通过多根锚栓群锚锚固，填充锚栓与锚板锚孔孔壁之间的间隙有利于作用效应的传递，避免局部或部分锚栓承担剪力，防止锚固装置产生松动或扭转。

5.4.10 钢结构锚固装置的封锚组件由密封罩、防腐油脂组成，应符合下列规定：

1 密封罩外形尺寸宜略大于锚垫板，可采用壁厚不小于 2mm 的圆形或矩形防护筒。

2 密封罩宜通过螺栓与承压板连接并灌注防腐油脂。

5.5 转向装置

5.5.1 体外预应力加固可采用混凝土转向装置或钢结构转向装置。

5.5.2 用于体外预应力转向装置的混凝土强度等级不应低于 C50，钢材强度等级不应低于 Q355。

5.5.3 混凝土转向装置可采用附着式、半横梁式或横梁式，通过植筋与原结构可靠连接（见图 5.5.3）。

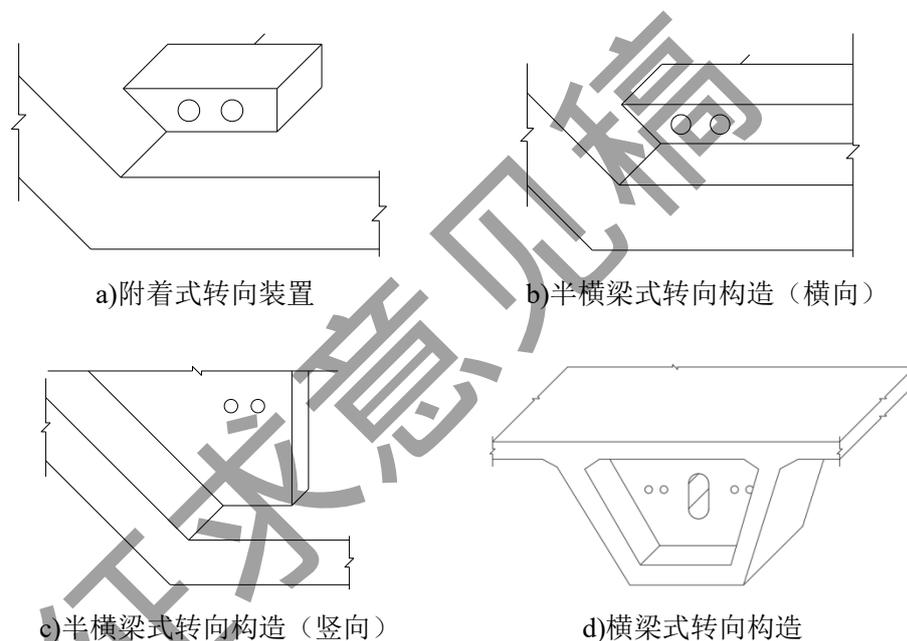


图 5.5.3 混凝土转向装置构造示意

5.5.4 混凝土转向装置的构造尺寸应符合下列规定：

1 转向装置的截面尺寸应根据体外预应力钢筋（束）布置、转向器截面尺寸等确定，其边缘与转向器边缘距离不宜小于 100 mm。

2 转向装置的纵向尺寸应根据转向器长度及其与原结构的连接强度等确定，不应小于转向器长度，且不宜小于 500mm。

3 新、旧混凝土结合面应设置齿形剪力槽，剪力槽深度以露出原结构最外层钢筋外缘为宜，剪力槽宽度不宜小于 100mm 且不宜大于 150mm，剪力槽齿间净距不宜小于 150mm。

5.5.5 混凝土转向装置应进行配筋计算，普通钢筋构造应满足下列要求：

- 1 转向装置应配置抵抗体外预应力钢束径向力的箍筋。
- 2 箍筋应采用植入原结构的 U 形箍筋或与植入原结构的锚固钢筋焊接的闭合箍筋，直径不宜小于 16mm，纵向间距宜设为 150~200mm。
- 3 箍筋宜同时配置内环箍和外环箍，内环箍筋箍住单个转向器，外环箍筋宜沿转向装置周边箍住所有纵向钢筋和转向器。
- 4 转向装置外侧面及箍筋的外侧角隅处应配置纵向防裂钢筋，直径不应小于 12mm。
- 5 应沿转向器纵向配置 U 形防崩钢筋。防崩钢筋通过植筋与原结构连接，其纵向分布范围不宜小于转向器曲线段全长。
- 6 植筋在原结构混凝土中的有效锚固长度不宜小于其外径的 10 倍，并应满足附录 A 中的相关要求。

5.5.6 混凝土转向装置中应设置集束式或散束式转向器，应符合下列规定：

- 1 体外预应力钢束为成品索或钢绞线股数不大于 15 的非成品索，宜采用集束式转向器；体外预应力钢束为钢绞线股数大于 15 的非成品索时，宜采用散束式转向器。
- 2 转向器纵向长度应大于体外预应力钢束弯曲长度，其管口与钢束直弯点距离不宜小于 100mm。
- 3 转向器中心弯曲半径不应大于体外预应力钢束的弯曲半径，管口内壁与钢束边缘的周边距离宜保持一致。
- 4 采用弧形钢管作为集束式转向器时，壁厚不宜小于 5mm，且应将其管口内边缘打磨光滑、无毛刺。
- 5 采用散束式转向器时，其导向管和内填材料应具有足够的强度，在张拉力作用下导向管管口位移与管口变形之和不应大于 5mm。

条文说明

集束式转向为预应力束整束在转向器中转向，分束式转向为钢绞线按一定次序、间距分散在转向器截面上并沿转向器进行转向。

5.5.7 钢结构转向装置可采用附着式、抱箍式或横梁式，通过锚栓、胶黏剂与原结构可靠连接。

5.5.8 钢结构转向装置由定位组件、锚固组件及转向器三部分构成（见图 5.5.8）。

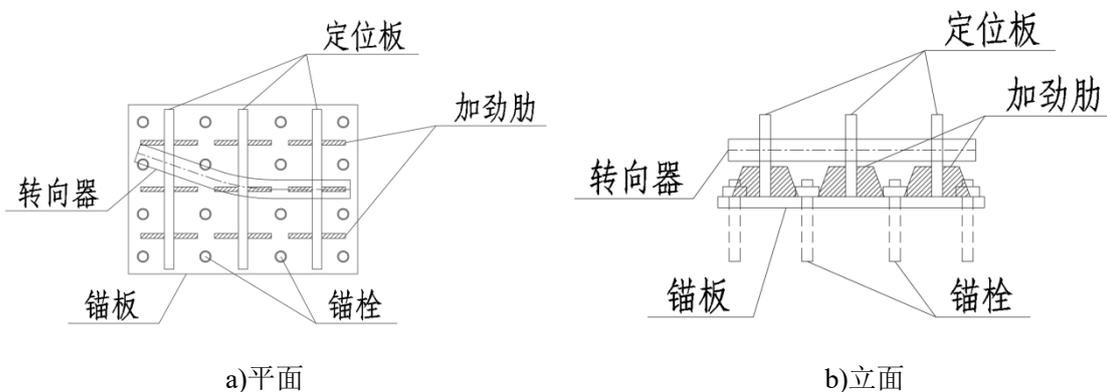


图 5.5.8 钢结构转向装置构造示意

5.5.9 钢结构转向装置的定位组件由锚板、定位板及加劲肋焊接而成，应符合下列规定：

- 1 定位组件的总体尺寸应根据体外预应力钢筋（束）布置、转向器尺寸、锚栓布置、受力需要等确定。
- 2 锚板、定位板及加劲肋应由钢板切割而成，不得采用拼接钢板。
- 3 锚板厚度应根据其平面尺寸、强度及变形计算确定，且不宜小于 10mm，宜采用灌胶工艺粘贴于原结构基材表面。
- 4 锚板上的锚孔边缘与锚板边缘距离不宜小于 50mm。
- 5 锚板上的锚孔最大直径及孔壁与锚栓之间的最大间隙控制值见本规程表 5.4.8。
- 6 定位板应与锚板及钢束弯曲平面垂直，其外边缘与转向器外边缘距离不宜小于 100mm，厚度不宜小于 8mm。
- 7 定位板上的开孔中心距离不宜小于 2 倍体外预应力钢束外径，净距不宜小于 50mm。
- 8 定位板上的开孔直径应略大于转向器外径，且与转向器外径之差不宜大于 5mm，与转向器周边点焊连接。
- 9 加劲肋可根据转向装置强度及变形计算要求设置，其高度不应低于转向器外边缘且不宜大于定位板高度，其方向宜与钢束弯曲平面一致，横向宜在转向器两侧对称布置，竖向宜与锚板垂直布置，厚度不宜小于 6mm。

10 定位板、加劲肋与锚板上的锚孔边缘净距不宜不宜小于 50mm。

11 定位组件宜采用工厂制作，焊缝等级不应低于 I 级。

5.5.10 钢结构转向装置的锚固组件应符合本规程第 5.4.9 条的规定。

5.5.11 钢结构锚固装置的转向器构造应符合本规程第 5.5.6 条的规定。

5.6 减振装置

5.6.1 减振装置宜采用钢结构定位块或索夹式减振器，通过锚栓、胶黏剂与原结构可靠连接（见图 5.6.1）。

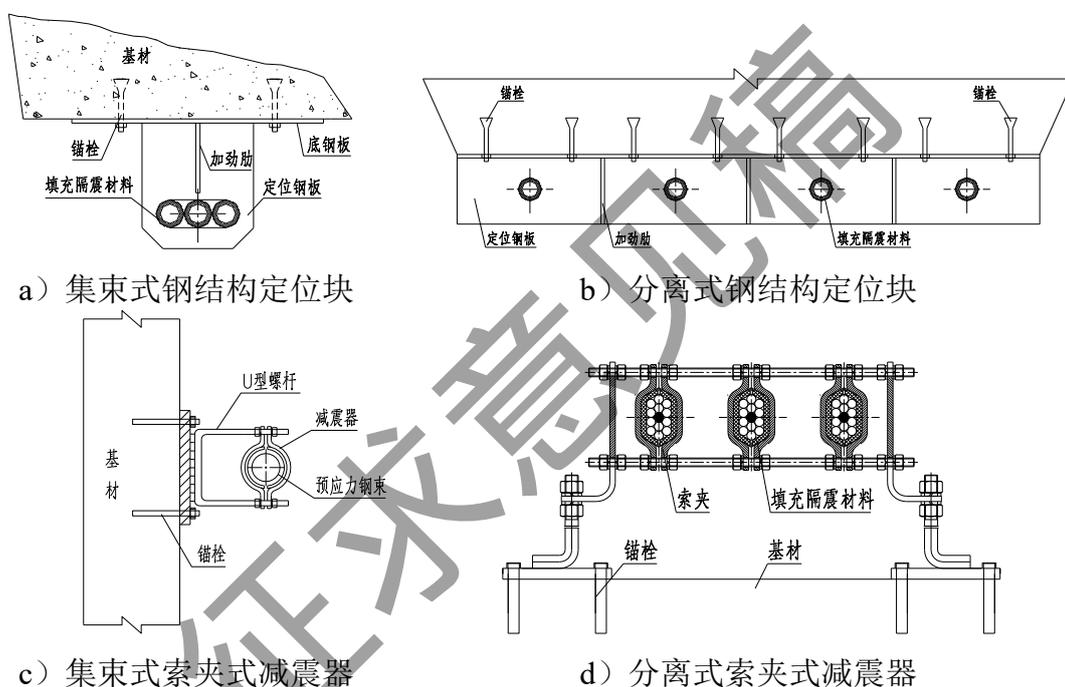


图 5.6.1 减震装置构造示意

5.6.2 减振装置用锚栓可采用符合本规程第 4.5 节规定的机械锚栓或化学锚栓，并应满足附录 B 中的相关要求。

5.6.3 减振装置中，体外预应力钢筋（束）与索夹及定位块的护套之间应填充橡胶等减振材料。

5.7 防腐体系

5.7.1 体外预应力钢筋应采用环氧涂层钢筋、环氧涂层钢绞线、带 PE 护套的环氧

涂层钢绞线或镀锌钢丝。

5.7.2 成品索防护材料应具备良好的耐腐蚀、耐老化、耐温、抗紫外线性能。

5.7.3 体外预应力锚固装置、转向装置、减振装置中的钢构件应进行防腐处理。防腐涂层应符合本规程第 4.4.2 条的规定。

5.7.4 体外预应力锚固装置密封罩内灌注的专用防腐油脂应符合本规程第 4.4.1 条的规定。

征求意见稿

6 加固计算

6.1 一般规定

6.1.1 体外预应力加固计算应符合下列规定：

- 1 通过必要的参数修正获得基于结构现状的计算模型。
- 2 合理考虑混凝土开裂对结构内力分布的影响。
- 3 有实测数据时，原结构混凝土强度等级、结构尺寸和结构自重等采用实测参数。
- 4 作用及作用效应组合系数，应符合设计所遵循的相关规范的规定；实际交通荷载与设计荷载差异较大时，宜根据实际交通调查结果对车辆荷载作用效应进行修正。
- 5 结构验算分为整体计算及局部计算两部分，结构验算应按现行《公路桥梁承载能力检测评定规程》（JTG/T J21）的要求考虑结构损伤的影响。

6.1.2 整体计算包括：持久状况承载力极限状态计算；持久状况正常使用极限状态计算；持久状况及短暂状况的应力计算。

6.1.3 局部计算包括：转向装置的承载力和抗裂性计算；锚固装置的承载力和抗裂性计算；锚板计算。

6.1.4 加固计算应考虑分阶段受力，新增构件与原结构有效结合前施加的荷载由原结构承担，有效结合后施加的荷载由加固后的结构整体承担。

6.1.5 同一断面在不同受力阶段，其组合截面的变形均可视为符合平截面假定。

6.1.6 钢结构锚固装置及转向装置宜通过有限元模型进行应力计算，计算应力应满足现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的相关要求。

6.1.7 钢结构锚固装置及转向装置的锚固计算应满足本规程附录 B 的相关要求。

6.2 持久状况承载能力极限状态计算

6.2.1 体外预应力加固混凝土受弯构件的正截面抗弯承载力计算时应根据截面形状和中性轴位置分两种情况考虑，并按下列规定计算：

1 矩形截面或中性轴位于 T 型或 I 型截面翼板内 ($x \leq h'_f$)：

$$f_{cd}b'_f x + f'_{sd}A'_s = \sigma_{pu,e}A_{p,e} + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{sd}A_s \quad (6.2.1-1)$$

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd}b'_f x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd}A'_s (h_0 - a'_s) \quad (6.2.1-2)$$

2 T 型或 I 型截面且中性轴位于截面腹板内 ($x > h'_f$)：

$$f_{cd}bx + f_{cd}(b'_f - b)h'_f + f'_{sd}A'_s = \sigma_{pu,e}A_{p,e} + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{sd}A_s \quad (6.2.1-3)$$

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd}bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{cd}(b'_f - b)h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + f'_{sd}A'_s (h_0 - a'_s) \quad (6.2.1-4)$$

为确保加固后的混凝土梁仍为塑性破坏，上述公式中的截面受压区高度 x 应满足下列条件：

$$x \leq \xi_b h_s \text{ 或 } x \leq \xi_b h_p \quad (6.2.1-5)$$

$$x \geq 2a'_s \quad (6.2.1-6)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构重要性系数；

M_d ——计算截面弯矩组合设计值；

$A_{p,e}$ ——体外预应力水平钢筋（束）的截面面积；

$\sigma_{pu,e}$ ——当构件达到极限抗弯承载能力时，体外预应力筋（束）的极限应力计算值，按公式(6.2.1-7)计算；

$A_{p,i}$ ——原梁体内预应力筋的截面面积；

$f_{pd,i}$ ——原梁体内预应力筋的抗拉强度设计值；

A_s ——原梁体内纵向受拉普通钢筋的截面面积；

A'_s ——原梁体内纵向受压普通钢筋的截面面积；

f_{sd} ——原梁体内纵向受拉普通钢筋的抗拉强度设计值；

f_{cd} ——混凝土的抗压强度设计值；

b'_f ——受压翼板的有效宽度，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 4.3.3 条规定取用；

b ——矩形截面宽度或 T 形截面的腹板宽度；

h'_f ——受压翼板的厚度；

h_s 、 h_p ——分别为原梁中普通钢筋和预应力钢筋的合力作用点至梁顶面的距离；

h_0 ——体（内）外预应力筋和原梁普通钢筋的合力点到梁顶面的距离，

$$h_0 = h - a;$$

a ——受拉区体内（外）预应力筋（束）和普通钢筋合力作用点至受拉区边缘的距离；

a'_s ——受压区普通钢筋的合力作用点至受压区边缘的距离；

ξ_b ——原钢筋混凝土梁或原预应力混凝土梁的相对界限受压区高度；

3 相对界限受压区高度 ξ_b 可根据原梁中受拉钢筋的种类由表 6.2.1 查取。

表 6.2.1 相对界限受压区高度 ξ_b

原结构中钢筋种类	C50 及 C50 以下混凝土	原结构中钢筋种类	C50 及 C50 以下混凝土
R235(I级钢筋)	0.62	5 号钢	0.60
HRB335(II级钢筋)	0.56	钢绞线、钢丝	0.40
HRB400、KL400(IV级钢筋)	0.53	精轧螺纹钢	0.40

注：

(1) 截面受拉区配置不同种类钢筋的受弯构件，其 ξ_b 值应选用相应于各种钢筋的较小者。

(2) 原构件混凝土强度等级超过 C50 时， ξ_b 应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG3362-2018）表 5.2.1 取值。

(3) 表中 I、II、IV 级钢筋及 5 号钢是指原《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTJ 023-85）中的钢筋牌号。

4 体外索的水平筋（束）极限应力 $\sigma_{pu,e}$ 计算公式。

正截面抗弯承载力计算中，体外索的水平筋（束）极限应力 $\sigma_{pu,e}$ 按下式计算：

$$\sigma_{pu,e} = \sigma_{pe,e} + \frac{6000(h_{p,e} - c)}{\gamma_p l_e} \leq f_{pd,e} \quad (6.2.1-7)$$

式中： $\sigma_{pe,e}$ ——体外预应力筋（束）的有效应力；

$h_{p,e}$ ——体外预应力筋重心至受压截面上缘的距离；

c ——不计体外预应力筋极限应力增量时的关键截面中性轴高度；

对于矩形截面或中性轴位于 T 型或 I 型截面翼板内:

$$c = \frac{A_{p,e} \sigma_{pe,e} + A_s f_{sk} - A'_s f'_{sk} - 0.8 f_{ck} (b - b_w) h_f}{0.8 f_{ck} b_w} \quad (6.2.1-8)$$

对于 T 型或 I 型截面且中性轴位于截面腹板内:

$$c = \frac{A_{p,e} \sigma_{pe,e} + A_s f_{sk} - A'_s f'_{sk}}{0.8 f_{ck} b} \quad (6.2.1-9)$$

γ_p ——体外预应力钢材的安全系数, $\gamma_p = 2.2$;

l_e ——计算跨体外索的有效长度, $l_e = \frac{2l_i}{N_s + 2}$;

N_s ——构件失效时形成的塑性铰数目, 对于简支梁, $N_s = 0$, 对于连续梁, $N_s = n - 1$; n 为连续梁的跨数;

l_i ——两端锚具间体外索的总长度; 对于简支梁加固体系, $l_e = l_i$;

$f_{pd,e}$ ——体外预应力筋(束)的抗拉强度设计值;

$A_{p,e}$ ——体外预应力筋的截面面积;

f_{sk} ——普通钢筋抗拉强度标准值;

f'_{sk} ——普通钢筋抗压强度标准值;

f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值;

b_w ——T 形截面的腹板宽度;

b ——T 形截面的翼缘板宽度。

条文说明

研究表明体外预应力筋极限应力可表示为有效应力与极限应力增量之和, 但研究者对极限应力增量的表达形式及影响因素的理解具有一定的差异。ACI 318-02 公式、Harajli 钢绞线应力计算模式(Harajli 公式)以及《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ92-2004)均为依据极限应力与截面配筋指标之间的关系而建立的; Chakrabarti 公式是在 ACI 318-02 公式基础上进行修改, 考虑了有效预应力、高跨比、混凝土强度、普通钢筋等影响因素; AASHTO-04、BS8100 规范中的公式是基于等效塑性区长度理论而建立的; 哈工大基于塑性理论并考虑二次效应的计算公式(哈工大公式)、同济大学基于试验统计分析并拟纳入《体外预应力混凝土桥梁设计指南》(送审稿)中的计算公式(同济大学公式)、杜进生等基于结构变形极限应力法计算公

式(与 AASHTO-04 公式同根, 建立的方法相同, 可看作 AASHTO-04 修正公式)等所考虑因素与研究重点各不相同。

为评价上述计算方法的正确性、准确性并挑选一种适用于我国公路桥梁体外预应力加固设计的方法, 在收集到的各国完成的 48 片体外预应力混凝土试验梁数据的统计分析, 对上述计算公式进行了分析和评述。

分析结果表明: AASHTO-04 公式、Harajli 公式、哈工大公式、AASHTO-04 修正公式及同济大学公式的计算结果均与试验结果吻合良好, 其计算值与试验值之比的平均值 \bar{x} 均在 0.88~1.07 之间。其中以哈工大公式的计算准确度相对较高, $\bar{x}=0.95$, 其离散系数 $c_v=0.04$, 但由于其计算方法比较复杂且仅适用于简支梁桥, 不便于采用。同济大学公式是以截面性质和配筋指标建立的回归公式, 从分析结果来看, 比值的平均值 $\bar{x}=0.95$, 但离散系数 $c_v=0.05$, 相对略大一些。AASHTO-04 修正公式 $\bar{x}=0.85$, 离散系数最小, $c_v=0.01$ 。由于 AASHTO-04 修正公式计算精度较好, 简捷适用且能够应用于连续梁桥结构计算, 选取 AASHTO-04 修正公式作为体外预应力筋极限应力计算公式。

AASHTO-04 规范中体外预应力筋的极限应力公式:

$$\sigma_{pu,e} = \sigma_{pe,e} + \frac{\phi E_p \varepsilon_{cu} (h_{p,e} - c)}{l_e} \leq f_{pde}。 \text{ 式中: } \phi \text{ 是等效塑性区长度与中性轴高度的比值,}$$

E_p 为体外预应力钢筋的弹性模量, ε_{cu} 是混凝土的极限压应变, 其余符号意义同上。

AASHTO-04 规范中 $\phi=10.5$, AASHTO-04 修正公式取 $\phi=10$, $E_p=2 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\varepsilon_{cu}=0.003$, 则 $\phi E_p \varepsilon_{cu}=6000$ 。由于求解关键截面中性轴高度 c 需要联立关键截面力的平衡方程和体外预应力筋的极限应力公式, 并通过求解一个关于 c 的一元二次方程才能得到, 为简化计算, c 采用不计体外预应力筋极限应力增量时的关键截面中性轴高度。AASHTO-04 修正公式也适用于体外筋为 FRP 筋的情况, 当体外预应力筋为 FRP 筋时, $\phi_{FRP} = \lambda \phi_{steel}$, $\lambda = E_p / E_{FRP}$, 则 $\phi E_p \varepsilon_{cu} = \phi_{FRP} E_{FRP} \varepsilon_{cu}$ 。

对于体外预应力钢材的安全系数 γ_p , 是《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中对于高强钢丝、钢绞线和精扎螺纹钢筋强度设计值与标准值之比; 其次是结构出现塑性铰破坏应比控制截面上钢筋屈服破坏具有更大的安全余地。综合考虑上述因素及综合模拟计算的结果, 取 $\gamma_p=2.2$ 。

6.2.2 体外预应力加固混凝土受弯构件的斜截面抗剪承载力可按下列规定计算：

1 计算假定

- (1) 在极限状态下，加固后的混凝土梁为剪压破坏；
- (2) 与斜裂缝相交的原梁箍筋、斜筋或梁内弯起预应力钢筋的应力均能达到其各自的抗拉强度设计值；
- (3) 体外索斜筋（束）或体外索弯起部分达到其极限应力 $\sigma_{\text{pub,e}}$ 。

2 体外预应力加固的矩形、T形和I形截面的受弯构件，其斜截面抗剪承载力按下式计算：

$$\gamma_0 V_d \leq V_{\text{cs}} + V_{\text{sb}} + V_{\text{pb,i}} + V_{\text{pb,e}} \quad (6.2.2-1)$$

$$V_{\text{cs}} \leq \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \times 0.45 \times 10^{-3} b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P)} \sqrt{f_{\text{cu,k}} \rho_{\text{sv}} f_{\text{sd,v}}} \quad (6.2.2-2)$$

$$V_{\text{sb}} = 0.75 \times 10^{-3} f_{\text{sd}} \sum A_{\text{sb}} \sin \theta_s \quad (6.2.2-3)$$

$$V_{\text{pb,i}} = 0.75 \times 10^{-3} f_{\text{pb,i}} \sum A_{\text{pb,i}} \sin \theta_i \quad (6.2.2-4)$$

$$V_{\text{pb,e}} = 0.8 \times 10^{-3} \sigma_{\text{pub,e}} \sum A_{\text{pb,e}} \sin \theta_e \quad (6.2.2-5)$$

式中：

V_d ——斜截面剪压端剪力的组合设计值（kN）；

V_{cs} ——斜截面内混凝土和箍筋共同承受的抗剪承载力设计值（kN）；

V_{sb} ——与斜截面相交的普通弯起钢筋的抗剪承载力设计值（kN）；

$V_{\text{pb,i}}$ 、 $V_{\text{pb,e}}$ ——与斜截面相交的体内、体外弯起预应力钢筋的抗剪承载力设计值（kN）；

α_1 ——异号弯矩影响系数，计算简支梁和连续梁近支点梁端的抗剪承载力时， $\alpha_1 = 1.0$ ；计算悬臂梁和连续梁近中间支点梁端的抗剪承载力时， $\alpha_1 = 0.9$ ；

α_2 ——预应力提高系数，当原梁为钢筋混凝土受弯构件时， $\alpha_2 = 1.0$ ；当原梁为预应力混凝土受弯构件时， $\alpha_2 = 1.25$ ；但当原梁中由钢筋合力引起的截面弯矩与外弯矩的方向相同时，或原梁为预应力混凝土 B 类构件， $\alpha_2 = 1.0$ ；

α_3 ——受压翼缘影响系数，对矩形截面， $\alpha_3 = 1.0$ ；对具有受压翼缘的 T 形或 [形截面， $\alpha_3 = 1.1$ ；

b ——斜截面受压端正截面处原梁的腹板宽度（mm）；

h_0 ——斜截面受压端正截面的有效高度 (mm)；

P ——原梁斜截面内的纵向钢筋配筋率， $P=100\rho$ ， $\rho=(A_s+A_{p,i})/(bh_0)$ ，当 $P>2.5$ 时，取 $P=2.5$ ；

$f_{cu,k}$ ——原梁混凝土的立方体抗压强度标准值 (MPa)；

ρ_{sv} ——原梁斜截面内箍筋配筋率， $\rho_{sv}=\frac{A_{sv}}{(bs_v)}$ ；

$f_{sd,v}$ ——原梁中箍筋抗拉强度设计值 (MPa)；

A_{sv} ——斜截面范围内同一截面箍筋各肢的总截面面积；

s_v ——斜截面内箍筋的间距 (mm)；

A_{sb} ——斜截面内在同一弯起平面内的普通弯起钢筋的截面面积 (mm²)；

$A_{pb,i}$ ——斜截面内在同一弯起平面内的体内预应力弯起钢筋的截面面积 (mm²)；

$A_{pb,e}$ ——斜截面内在同一弯起平面内的体外预应力弯起钢筋的截面面积 (mm²)；

θ_s ——体内普通弯起钢筋的弯起角度 (°)；

θ_i ——体内预应力筋 (束) 在斜截面受压端正截面处与梁轴线的夹角；

θ_e ——体外预应力筋 (束) 在竖直平面内的弯起角度 (竖弯角)， $\theta_e \leq 45^\circ$ 。

箱型截面受弯构件的斜截面抗剪承载力的验算，可参照本条规定执行。

3 体外预应力加固的矩形、T形和I形截面的受弯构件，为避免斜压破坏，其截面尺寸应符合下列要求：

$$\gamma_0 V_d - \sigma_{pub,e} A_{pb,e} \sin \theta_e \leq 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} b h_0 \quad (6.2.2-6)$$

式中： $\sigma_{pub,e}$ ——体外预应力斜筋 (束) 的极限应力 (MPa)，按公式(6.2.2-7) 计算；

b ——相应于剪力组合设计值处的矩形截面宽度 (mm) 或 T形和 I形截面腹板宽度 (mm)；

h_0 ——相应于剪力组合设计值处的截面有效高度，即自纵向受拉钢筋合力点至受压边缘的距离 (mm)；

4 体外索的斜筋极限应力 $\sigma_{\text{pub,e}}$ ，与转向块处的摩阻情况有关，可由水平筋（束）的极限应力求 $\sigma_{\text{pu,e}}$ 得：

$$\sigma_{\text{pub,e}} = \lambda \sigma_{\text{pu,e}} \quad (6.2.2-7)$$

式中： λ ——体外索斜筋（束）拉力与水平筋（束）拉力的比例系数，按如下方法确定：

有转向块（或转向横梁）时或采用水平向移动的滑块时

$$\lambda = \frac{1}{\cos \theta_e + f_o \sin \theta_e} \quad (6.2.2-8)$$

采用楔形滑块时：

$$\lambda = \cos \theta_e - f_o \sin \theta_e \quad (6.2.2-9)$$

式中： f_o ——摩擦系数，在缺少可靠实验数据的情况下，钢材间的摩擦取 $f_o = 0.16$ ；采用四氟乙烯滑板时取 $f_o = 0.06$ ；混凝土与钢材间的摩擦取 $f_o = 0.25$ 。

条文说明

试验证明，由于滑块或转向块的形式不同，体外索的斜筋角度不同，接触面上的摩擦系数也不同，因此体外索的斜筋（束）与水平筋（束）中的应力是不同的。在极限状态下也是如此，两者的比值为 λ ，即 $\sigma_{\text{pub,e}} = \lambda \sigma_{\text{pu,e}}$ 。计算分析表明，当摩擦系数 $f_o = 0.16 \sim 0.25$ 、体外预应力斜筋（束）的弯起角度 $\alpha = 10^\circ \sim 30^\circ$ 时，对于有水平向移动的滑块或转向块的情况 $\lambda = 0.970 \sim 1.057$ ；对于采用楔形滑块的情况， $\lambda = 0.741 \sim 0.957$ 。可见，体外预应力斜筋与水平筋的极限应力差别在抗剪承载力计算时是应该考虑的，尤其是后者。对于 λ 的计算公式，是借助于滑块或转向块的节点平衡方程导出的。

6.3 持久状况正常使用极限状态计算

6.3.1 体外预应力加固受弯构件可按下列三种情况设计：

1 全预应力混凝土加固结构。在作用（荷载）短期效应组合下控制截面边缘不容许出现拉应力，在结构自重和体外预应力作用下简支梁控制截面的上缘不得消压。

2A 类体外预应力混凝土加固结构，在作用（或荷载）短期效应组合下控制截面边缘可出现不超过限值的拉应力。

3 B 类体外预应力混凝土加固结构，在作用（或荷载）短期效应组合下控制截面边缘可出现超过限值的拉应力，但裂缝宽度应小于限值。

6.3.2 抗裂性验算应符合下列规定：

1 在作用（或荷载）频遇（或准永久）组合下，混凝土拉应力或主拉应力的计算方法可参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 6.3.2 和第 6.3.3 条。计算中应考虑由可变作用（或荷载）频遇值（或准永久值）引起的体外预应力筋（束）的拉力增量和加固中新增附加恒载的影响。

2 正截面和斜截面的抗裂性验算结果应满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）的相关要求。

6.3.3 裂缝宽度验算应符合下列规定：

1 体外预应力加固后的预应力混凝土 B 类构件，在正常使用极限状态下的裂缝宽度，应按作用（或荷载）短期效应组合并考虑长期效应影响进行计算。其计算的最大裂缝宽度不应超过现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）的相关规定。

2 加固构件截面的裂缝宽度计算时，原构件为钢筋混凝土梁时钢筋应力 σ_{ss} 应取为加固后原构件普通钢筋的应力；原构件为预应力混凝土时钢筋应力 σ_{ss} 应取为加固后原构件预应力钢筋相对于其重心点混凝土应力为零时的拉应力增量。

3 混凝土转向构造与原结构的交界面应验算其裂缝宽度。在验算裂缝宽度时，转向装置的水平分力 N_{hc} 、竖向分力 N_{vc} 、和弯矩 M_e 分别取为：

$$N_{hc} = 1.1N_{pe,e} \sqrt{1 - 2\cos\theta_e \cos\beta_e + \cos^2\theta_e} \quad (6.3.3-1)$$

$$N_{vc} = 1.1N_{pe,e} \sin\theta_e \quad (6.3.3-2)$$

$$M_e = N_{hc}d_1 + N_{vc}d_2 \quad (6.3.3-3)$$

式中： β_e ——体外预应力筋（束）在水平面内的弯转角（平弯角）；

θ_e ——体外预应力筋（束）在竖直面内的弯转角（竖弯角）；

d_1 ——钢管转向器形心距混凝土板表面的垂直距离；

d_2 ——钢管转向器形心距箍筋截面重心的水平距离，当转向块内箍筋沿纵桥向对称布置时，应取 $d_2 = 0$ ；

根据上述计算内力，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》

(JTG 3362-2018) 中偏心受拉构件计算混凝土转向块根部截面的裂缝宽度, 计算公式为:

$$W_{tk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.36+1.7\rho} \right) \quad (\text{mm}) \quad (6.3.3-4)$$

式中: C_1 ——钢筋表面形状系数, 对光圆钢筋, $C_1 = 1.4$; 对带肋钢筋, $C_1 = 1.0$; 对环氧树脂涂层带肋钢筋, $C_1 = 1.15$;

C_2 ——作用 (或荷载) 长期效应影响系数, 对混凝土转向块抗裂性计算取 $C_2 = 1.0$;

C_3 ——与构件受力性质有关的系数, 混凝土转向块为偏心受拉构件, $C_3 = 1.1$;

d ——箍筋或受拉钢筋直径 (mm);

ρ ——受拉钢筋配筋率, $\rho = (A_s + A'_s) / (b_1 b_2)$;

b_1, b_2 ——混凝土转向块的宽度和长度;

σ_{ss} ——受拉较大边的钢筋拉应力, 按下式计算:

$$\sigma_{ss} = \frac{N_{vc}}{A_s + A'_s} \quad (6.3.3-5)$$

条文说明

体外预应力加固的全预应力混凝土构件和 A 类构件的正截面抗裂性控制条件比《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) 中的相关要求可有所放松。主要是考虑对于运营多年的旧桥, 其耐久性的要求应比新建桥梁有所降低。同时考虑到旧桥混凝土可能存在损伤或缺陷, 不宜对其施加过大的预压应力, 以体现出新、旧桥梁之差异。

混凝土转向块的裂缝宽度计算公式直接引用了《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) 第 6.4.3 条和第 6.4.4 条的计算方法。控制内力按体外预应力的永存张拉力 $N_{pe,e}$ 取用。考虑到可变作用引起的拉力增量 $\Delta N_{p,e}$ 的不利影响, 取用了 1.1 的放大系数。

体外索加固体混凝土 B 类构件的抗裂性验算控制指标、容许的裂缝宽度及其相关的计算方法均与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) 相同。考虑到旧桥对于耐久性的要求可适当放宽, 因此裂缝宽度的限值可适当放宽, 但不应超过 20%。

在裂缝宽度计算公式中的钢筋应力 σ_{ss} 取值时，需考虑原梁为钢筋混凝土梁还是预应力混凝土梁的差异。对于前者取用钢筋的实际应力值，而对于后者应取体内预应力钢筋相对于其重心点混凝土应力为零时的拉应力增量。

6.3.4 正常使用极限状态下的挠度，应根据给定的截面刚度计算：

1 全预应力混凝土或 A 类预应力混凝土构件刚度：

$$B_0 = 0.95E_c I_0 \quad (6.3.4-1)$$

2 B 类预应力混凝土构件刚度：

在开裂弯矩 M_{cr} 作用下：

$$B_0 = 0.95E_c I_0 \quad (6.3.4-2)$$

在 $(M_s - M_{cr})$ 作用下：

$$B_{cr} = E_c I_{cr} \quad (6.3.4-3)$$

3 截面开裂弯矩计算公式。

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0, \quad \gamma = \frac{2S_0}{W_0} \quad (6.3.4-4)$$

式中： S_0 ——原梁全截面换算截面重心轴以上（或以下）部分面积对重心轴的面积矩；

I_{cr} ——加固后开裂截面对其中性轴的换算截面惯性矩；

W_0 ——原梁全截面换算截面对抗裂边缘的弹性抵抗矩。

σ_{pc} ——由体外（内）预应力筋（束）的永存预加力和水平筋（束）中可变作用频遇值产生的拉力增量 $\Delta N_{p,e}$ ，在构件抗裂验算边缘产生的混凝土预压应力，可按下列公式计算：

$$\sigma_{pc} = \left(\frac{N_{pe,i}}{A_0} + \frac{N_{pe,i} e_0}{I_0} y_0 \right) + \left(\frac{N_{pe,e}}{A_0} + \frac{N_{pe,e} e_c}{I_0} y_0 \right) \quad (6.3.4-5)$$

式中： $N_{pe,i}$ ——体内预应力筋的有效预加力 $N_{pe,i} = \sigma_{pe,i} A_{p,i}$ ，当原梁为钢筋混凝土梁时，该项为零；

$N_{pe,e}$ ——体外预应力筋（束）的永存预加力 $N_{pe,e} = \sigma_{pe,e} A_{p,e}$ ；

e_0 、 e_c ——分别为体内、外预应力钢筋重心至原梁全截面换算截面重心的距离；

- 4 加固后构件的变形应包括由体外预应力及短期作用（或荷载）引起的结构变形。
- 5 由体外预应力引起的变形值可按刚度 $E_c I_0$ 计算，计算中须扣除全部预应力损失，并乘以长期增长系数 $\eta_\theta = 1.35$ 。
- 6 在使用阶段的挠度应考虑长期荷载效应的影响，取可变作用的挠度长期增长系数 $\eta_\theta = 1.2$ 。
- 7 受弯构件按上述计算的荷载短期效应组合引起的长期挠度值在消除结构自重产生的挠度后，其跨中最大值不应超过计算跨径的 $1/600$ ，主梁的悬臂端不应超过悬臂长度的 $1/300$ 。

即按下式控制：

$$f_k = \eta_\theta (f_{Ms} - f_{MG}) \leq \frac{l}{600} \text{ 或 } \frac{l_1}{300} \quad (6.3.4-6)$$

式中： f_k ——截面控制挠度；

f_{Ms} ——短期作用（或荷载）产生的计算挠度；

f_{MG} ——自重、恒载作用产生的计算挠度；

l ——简支梁桥或连续梁、连续刚构桥的单跨计算跨径；

l_1 ——梁式桥主桥的悬臂长度。

6.3.5 体外预应力张拉控制应力及预应力损失可按下列规定计算。

1 体外预应力钢材的张拉控制应力：

钢绞线、钢丝束

$$\sigma_{con,e} \leq 0.65 f_{pk,e} \quad (6.3.5-1)$$

精轧螺纹钢

$$\sigma_{con,e} \leq 0.75 f_{pk,e} \quad (6.3.5-2)$$

式中： $f_{pk,e}$ ——体外预应力钢材的抗拉强度标准值，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）表 3.2.3-2 取值。

2 体外预应力筋（束）的预应力损失计算中应考虑：体外预应力筋（束）转向和锚固构造管道中的摩擦损失 σ_{l1} ，锚具变形、预应力筋（束）回缩和接缝压密损失 σ_{l2} ，分批张拉损失 σ_{l4} ，预应力筋（束）的松弛损失 σ_{l5} 。

上述各项预应力损失宜根据试验确定，当无可靠试验资料时可按下列公式估算：

(1) 在转向和锚固构造管道内的摩擦引起的预应力损失

$$\sigma_{l1} = \sigma_{con} \left(1 - e^{-(kx + \mu\theta)} \right) \quad (6.3.5-3)$$

式中： k ——单位长度管道轴线局部偏差的摩擦系数（1/m）；

x ——自张拉端的管道累计计算长度（m）；

μ ——体外预应力筋（束）与曲线管道的摩擦系数；

θ ——自张拉端的管道累计偏转角（rad），对于空间布束方式，应考虑空间包角的影响。体外预应力钢筋（束）的摩擦系数可按表 6.3.5-1 取值。

表 6.3.5-1 摩擦系数 k 与 μ 值

管道种类	k	μ
钢管穿无粘结钢绞线	0.004	0.09
钢管穿光面钢绞线	0.001	0.25
HDPE 管穿光面钢绞线	0.002	0.13

(2) 锚具变形、筋（束）回缩和接缝压密引起的预应力损失

$$\sigma_{l2} = E_{pe} \frac{\sum \Delta l}{l} \quad (6.3.5-4)$$

式中： E_{pe} ——体外预应力钢筋（束）的弹性模量；

Δl ——锚具变形、筋（束）回缩或接缝压密值，按表 6.3.5-2 取用；

l ——预应力筋（束）的计算总长度，对于折线布筋（束）情况应为相关各段长度之和。

表 6.3.5-2 锚具变形、筋（束）回缩和接缝压密值

锚具、接缝类型		Δl (mm)	锚具、接缝类型	Δl (mm)
夹片锚具	有顶压	4	墩头锚具	1
	无顶压	6	每块后加钢垫板的缝隙	1
带螺帽锚具的螺帽缝隙		1	水泥或环氧树脂砂浆的接缝	1

(3) 分批张拉引起的构件混凝土弹性压缩预应力损失

弹性压缩损失的平均值可近似按下式估算：

$$\sigma_{l4} = \frac{m-1}{2} \alpha_{EP} \Delta \sigma_{pe} \quad (6.3.5-5)$$

式中： α_{EP} ——体外预应力筋（束）的弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

$\Delta \sigma_{pe}$ ——在计算截面先张拉的体外预应力钢（束）中心处，由后张拉每一批体外预应力筋（束）产生的混凝土法向应力；

m ——体外预应力筋（束）分批张拉的次数。

由于施加体外预应力引起的原构件预应力筋（束）的弹性压缩损失 σ_{l4o} 可按下列式计算：

$$\sigma_{l4o} = \alpha_{EP} m \Delta \sigma_{pe} \quad (6.3.5-6)$$

式中： $\Delta \sigma_{pe}$ ——原梁控制截面上预应力钢筋重心处，由张拉的一批体外预应力筋（束）产生的法向应力。

(4) 钢筋松弛引起的预应力损失终极值

预应力钢丝、钢绞线：

$$\sigma_{l5} = \psi \zeta \left(0.52 \frac{\sigma_{p,ei}}{f_{pk}} - 0.26 \right) \sigma_{p,ei} \quad (6.3.5-7)$$

式中： ψ ——张拉系数，一次张拉时， $\psi=1.0$ ；超张拉时， $\psi=0.9$ ；

ζ ——钢筋松弛系数，普通松弛 $\zeta=1.0$ ；低松弛 $\zeta=0.3$ ；

$\sigma_{p,ei}$ ——传力锚固时体外预应力筋（束）的应力， $\sigma_{p,ei} = \sigma_{con,e} - \sigma_{l1} - \sigma_{l2} - \sigma_{l4}$

f_{pk} ——体外预应力筋（束）的抗拉强度标准值。

精轧螺纹钢：

一次张拉：

$$\sigma_{l5} = 0.05 \sigma_{con,e} \quad (6.3.5-8)$$

超张拉：

$$\sigma_{l5} = 0.05 \sigma_{con,e} \quad (6.3.5-9)$$

(5) 体外预应力筋（束）的应力损失总值

$$\sigma_l = \sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l4} + \sigma_{l5} \quad (6.3.5-10)$$

正常使用阶段，体外预应力筋（束）中的永存预应力 $\sigma_{pe,e}$ 按下式计算：

$$\sigma_{pe,e} = \sigma_{con,e} - \sigma_l = \sigma_{con,e} - (\sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l4} + \sigma_{l5}) \quad (6.3.5-11)$$

条文说明

考虑到加固桥梁多为运行十几年的旧桥，其混凝土的收缩、徐变已基本完成，故在体外预应力加固旧桥的预应力损失计算中不再考虑由于收缩、徐变引起的应力损失。

当外界环境温度突然升高且高于施工张拉温度时，由于预应力筋（索）与混凝土的线膨胀系数略有差异，将引起体外预应力筋（索）中的应力降低。这种应力降

低亦可视为预应力损失 σ_{l3} 。该损失可按式计算：

$$\sigma_{l3} = (\alpha_p - \alpha_c) \Delta t E_{p,e}$$

式中： Δt ——年最高月平均气温与施工温度差；

α_p 、 α_c ——分别为预应力筋（束）和混凝土的线膨胀系数，如无实测资料时可取为： $\alpha_p = 1.2 \times 10^{-5}$ ， $\alpha_c = 1.0 \times 10^{-5}$ 。

6.4 持久状况与短暂状况应力计算

6.4.1 持久状况应力计算应符合下列规定：

1 持久状况设计的体外预应力混凝土受弯构件，应计算其使用阶段正截面混凝土的法向压应力、斜截面混凝土的主压应力，原梁受拉区预应力钢筋的拉应力，以及体外预应力筋（束）中的拉应力。计算上述应力时，作用（或荷载）取其标准值。应力计算时汽车荷载应考虑其冲击系数。

2 体外预应力筋（束）中的拉力 $N_{p0,e}$ 等于其永存预加力与可变作用标准值产生的拉力增量之和，即：

$$N_{p0,e} = (\sigma_{pe,e} + \Delta\sigma_{p,e}) A_{p,e} \quad (6.4.1-1)$$

式中： $N_{p0,e}$ ——在使用阶段，体外预应力水平筋（束）中的拉力；

$\sigma_{pe,e}$ ——体外预应力水平筋（束）的有效应力；

$\Delta\sigma_{p,e}$ ——体外预应力水平筋（束）中由可变作用标准值引起的拉应力增量；

$A_{p,e}$ ——体外预应力水平筋（束）的截面面积。

3 加固后的全预应力混凝土或预应力混凝土 A 类构件的应力应按照《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 7.1.3 条计算。

(1) 采用体外预应力筋加固的钢筋混凝土构件的混凝土法向应力计算公式。

$$\sigma_{kcp} \text{ 或 } \sigma_{ktp} = \frac{N_{p0,e}}{A_0} \mp \frac{N_{p0,e} h_2}{I_0} y_0 \mp \frac{M_k}{I_0} y_0 \quad (6.4.1-2)$$

式中： σ_{kcp} 、 σ_{ktp} ——分别为使用阶段由作用（或荷载）标准值产生的混凝土法向压应力和拉应力；

M_k ——按作用（或荷载）标准值组合计算的弯矩值；

y_0 ——原梁换算截面重心轴至受压区或受拉区计算纤维处的距离；

A_0 、 I_0 ——分别为原梁（跨中）换算截面面积和惯性矩；

h_2 ——为原梁（跨中）换算截面重心至水平筋中心的垂直距离。

(2) 采用体外预应力筋加固的预应力混凝土构件，应考虑原构件中体内预应力筋引起的受压边缘压应力和拉应力。计算中应考虑由体外预应力引起的原构件体内预应力钢筋的弹性压缩损失的变化。

(3) 在体内、体外预应力水平筋（束）和作用（或荷载）标准值组合的共同作用下，原构件的混凝土压应力或拉应力按下式计算：

先张法：

$$\sigma_{\text{kc}} \text{ 或 } \sigma_{\text{kt}} = \frac{N_{\text{p0,e}} + N_{\text{p0}}}{A_0} \mp \frac{N_{\text{p0,e}} h_2}{I_0} y_0 \mp \frac{N_{\text{p0}} e_{\text{p0}}}{I_0} \pm \frac{M_{\text{k}}}{I_0} y_0 \quad (6.4.1-3)$$

后张法：

$$\sigma_{\text{kc}} \text{ 或 } \sigma_{\text{kt}} = \frac{N_{\text{p0,e}}}{A_0} + \frac{N_{\text{p}}}{A_{\text{n}}} \mp \frac{N_{\text{p0,e}} h_2}{I_0} y_0 \mp \frac{N_{\text{p}} e_{\text{pn}}}{I_{\text{n}}} y_{\text{n}} \pm \frac{M_{\text{k}}}{I_0} y_0 \pm \frac{M_{\text{p2}}}{I_{\text{n}}} y_{\text{n}} \quad (6.4.1-4)$$

原构件预应力钢筋的最大应力为：

$$\sigma_{\text{p,i}} = \sigma_{\text{pe,i}} + \alpha_{\text{EP}} \left(\frac{M_{\text{k}}}{I_0} y_0 \pm \frac{M_{\text{p2}}}{I_{\text{n}}} y_{\text{n}} \right) \quad (6.4.1-5)$$

式中： N_{p0} 、 N_{p} ——分别为原构件中预应力钢筋和普通钢筋的合力，按《公路钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）式（6.1.7-1）或式（6.1.7-3）计算；

A_{n} 、 I_{n} ——分别为原梁（跨中）净截面面积和惯性矩；

$\sigma_{\text{pe,i}}$ ——原梁体内预应力筋的永存预应力；

M_{p2} ——由预加力 N_{p} 在后张法预应力混凝土连续梁等超静定结构中产生的次弯矩，与 M_{k} 同号为正，异号为负；

e_{p0} 、 e_{pn} ——分别为原梁中先张法或后张法构件的预应力钢筋和普通钢筋的合力 N_{p0} 、 N_{p} 对换算截面或净截面的偏心距，按《公路钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）式（6.1.7-2）或式（6.1.7-4）计算；

4 采用体外预应力加固后的预应力混凝土 B 类构件的应力计算应符合下列规定：

(1) 混凝土 B 类构件混凝土的法向压应力 σ_{cc} 应按照《公路钢筋混凝土及预应力钢

《公路桥梁体外预应力加固技术规程》（JTJG 3362-2018）第 7.1.4 条的方法计算。

$$\sigma_{cc} = \frac{N_{p0}}{A_{cr}} + \frac{N_{p0}e_{0N}c}{I_{cr}} \quad (6.4.1-6)$$

式中： N_{p0} ——混凝土法向应力等于零时体内、体外预应力钢筋和原梁中普通钢筋的合力，应按《公路钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTJG 3362-2018）第 6.1.7 条计算，计算中必须增加体外预应力水平筋（束）的拉力 $N_{p0,e}$ 一项；

e_{0N} —— N_{p0} 作用点至开裂截面重心轴的距离， $e_{0N} = e_N + c$ ；

e_N —— N_{p0} 作用点至受压边缘的距离， N_{p0} 位于截面之外为正，位于截面之内为负， $e_N = \frac{M_k + M_{p2}}{N_{p0}} - h_{pse}$ ；

c ——截面受压区边缘至开裂换算截面重心轴的距离；

A_{cr} 、 I_{cr} ——分别为 B 类构件开裂截面换算截面的面积和对其重心轴的惯性矩；

h_{pse} ——体内、体外预应力钢筋与普通钢筋合力点至截面受压边缘应力距离，应按《公路钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTJG 3362-2018）第 7.1.4 条的式（7.1.4-4）计算，计算时其分子须增加 $\sigma_{pe,e}A_{pe}(h+a_{pe})$ 一项，分母中应包括 $N_{p0,e}$ 。

(2) 原构件开裂截面体内预应力钢筋的应力增量 $\Delta\sigma_{p,i}$ 计算公式。

$$\Delta\sigma_{p,i} = \alpha_{EP} \left[\frac{N_{p0}}{A_{cr}} - \frac{N_{p0}e_{0N}(h_p - c)}{I_{cr}} \right] \quad (6.4.1-7)$$

式中： α_{EP} ——原构件体内预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

h_p ——原构件受拉预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离。

原构件开裂截面体内预应力钢筋的最大拉应力 $\sigma_{p,i}$ 按下式计算：

原构件为先张法构件：

$$\sigma_{p,i} = \sigma_{pe,i} + \Delta\sigma_{p,i} \quad (6.4.1-8)$$

原构件为后张法构件：

$$\sigma_{p,i} = \sigma_{pe,i} + \Delta\sigma_{p,i} - \alpha_{EP} \left(\frac{M_{G1k}}{I_n} y_{pn} + \frac{M_{G2k}}{I_0} y_{p0} \right) \quad (6.4.1-9)$$

式中： $\sigma_{pe,i}$ ——原构件体内预应力钢筋的永存预应力；

$\Delta\sigma_{p,i}$ ——开裂截面体内预应力钢筋的应力增量；

M_{G1k} 、 M_{G2k} ——分别为原构件自重、二期恒载引起的截面弯矩；

I_n 、 I_0 ——分别为原构件全截面的净截面和换算截面惯性矩；

y_{pn} 、 y_{p0} ——分别为原构件中预应力钢筋重心至全截面净截面和换算截面重心的距离。

5 使用阶段体外预应力筋加固受弯构件正截面混凝土的压应力、预应力筋（束）中的拉应力应满足《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）的相关要求。

6.4.2 体外预应力加固施工过程的短暂状况构件应力计算，应参照《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）进行，计算时应考虑加固过程中的结构状态、临时支架及施工荷载。

6.5 局部验算

6.5.1 混凝土锚固装置承载力计算应符合下列规定：

1 体外预应力三角齿块和矩形齿块锚固区的承载力按《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）8.2.6 节计算。

2 配置间接钢筋的局部受压构件，其局部抗压承载力应按《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）5.7 节计算。

3 当锚固在原桥结构的横隔梁时，应进行局部区的锚下抗压承载力计算和总体区的抗拉承载力计算；采用拉压杆模型进行横梁锚固区计算时，钢筋（拉杆）的抗拉承载力计算应符合下列规定：

$$\begin{aligned} \gamma_0 T_s &\leq f_{sd} A_{ss} \\ \gamma_0 T_h &\leq f_{sd} A_{sh} \end{aligned}$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数；

T_s 、 T_h ——横梁底缘的竖向、横向拉杆内力设计值；

A_{ss} 、 A_{sh} ——横梁底缘 0.25 倍横梁厚度范围内各层竖向、横向钢筋截面面积总和；
 f_{sd} ——普通钢筋抗拉强度设计值。

条文说明

3 体外预应力锚固构造承载力计算本质是后张预应力混凝土锚固构造承载力计算。计算时应依据《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）8.2 节计算。后张锚固区又可分为局部区和总体区，局部区为锚具周围较小的区域，受力特点为三向受压；总体区的范围为局部区之外的整个锚固区，受力特点是预应力扩散引起的拉应力。

体外预应力齿块锚固区存在着集中锚固力的作用、几何形体上的突变以及预应力钢束弯曲引起的径向力作用，是受力十分复杂的 D 区。计算时应按照《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）8.2.6 节进行。

6.5.2 混凝土锚固装置裂缝宽度验算可采用拉压杆模型、实体有限元模型等进行计算。

6.5.3 混凝土转向装置承载力的计算应符合下列规定：

1 计算原则

- (1) 混凝土块式转向装置承载力计算时可忽略混凝土抗力的影响，转向力的竖向分力和水平分力均由箍筋承担。
- (2) 转向块的承载能力计算可分为抗拉承载力计算和抗剪承载力计算两部分。
- (3) 混凝土转向装置在正常使用极限状态和承载能力极限状态下的应力状况需经计算确定。
- (4) 应对转向块或转向肋位置的原结构进行局部分析。

2 转向装置的作用效应取值

计算转向装置的作用效应设计值时，不考虑可变荷载应力增量的影响，取永存预应力 $N_{pe,e}$ ，荷载分项系数取 1.3。承受空间体外预应力作用的转向装置，在承载能力极限状态下其作用的水平力和竖向力设计值 N_{hd} 和 N_{vd} 由下式确定。

$$N_{hd} = 1.3N_{p,e} \sqrt{1 - 2\cos\theta_e \cos\beta_e + \cos^2\theta_e} \quad (6.5.3-1)$$

$$N_{vd} = 1.3N_{p,e} \sin \theta_e \quad (6.5.3-2)$$

式中： N_{hd} ——转向装置的水平作用设计值，即体外预应力束张拉时对转向装置的合力在水平面内的分力设计值；

N_{vd} ——转向装置的竖向作用设计值，即体外预应力束张拉时对转向装置的合力在竖直方向的分力设计值；

$N_{p,e}$ ——体外预应力束的永存预加力，其值为 $N_{p,e} = \sigma_{pe,e} A_{p,e}$ ；

θ_e ——体外预应力筋（束）在竖直平面内的弯起角度（竖弯角）；

β_e ——体外预应力筋（束）在水平面内的弯起角度（平弯角）；

$\sigma_{pe,e}$ ——体外预应力筋（束）的有效应力；

$A_{p,e}$ ——体外预应力水平筋（束）的截面面积。

3 混凝土转向装置承载应计算其与混凝土板连接界面的抗剪承载力和抗拉承载力：

(1) 转向装置抗剪承载力计算

$$\gamma_0 N_{hd} \leq \phi_v f_{sd} \sum A_s \quad (6.5.3-3)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，计算时取 $\gamma_0 = 1.1$ ；

ϕ_v ——由剪拉组合作用引起的环向箍筋抗剪承载力降低系数，取：

$$\phi_v = 1 / \sqrt{3 + (N_{vd} / N_{hd})^2} \quad (6.5.3-4)$$

f_{sd} ——箍筋的抗拉强度设计值，按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）表 3.2.3-1 值的 0.8 倍取用；

$\sum A_s$ ——连接界面上箍筋截面面积之和。

(2) 转向装置抗拉承载力计算

转向装置抗拉承载力可按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 5.4.2 条规定计算。

$$\gamma_0 N_{vd} e_s \leq \phi_p f_{sd} A'_s (b_0 - a'_s) \quad (6.5.3-5)$$

$$\gamma_0 N_{vd} e'_s \leq \phi_p f_{sd} A_s (b'_0 - a_s) \quad (6.5.3-6)$$

其中：

$$b_0 = b_2 - a_s, b'_0 = b_2 - a'_s \quad (6.5.3-7)$$

$$e_s = \frac{b_2}{2} - e_0 - a_s, e'_s = \frac{b_2}{2} + e_0 - a'_s \quad (6.5.3-8)$$

$$M_d = N_{hd}d_1 + N_{vd}d_2, e_0 = \frac{M_d}{N_{vd}} \quad (6.5.3-9)$$

式中： φ_p ——由剪拉组合作用引起的环向箍筋抗剪承载力降低系数，取：

$$\varphi_p = 1 / \sqrt{3 + (N_{vd} / N_{hd})^2} \quad (6.5.3-10)$$

a_s ——受拉较大侧环向箍筋、锚固钢筋或植入钢筋合力作用点到该侧混凝土边缘的距离；

a'_s ——受拉较小侧环向箍筋、锚固钢筋或植入钢筋合力作用点到该侧混凝土边缘的距离；

A_s ——受拉较大侧环向箍筋、锚固钢筋或植入钢筋的截面面积；

A'_s ——受拉较小侧环向箍筋、锚固钢筋或植入钢筋的截面面积；

d_1 ——钢管转向器形心距混凝土板表面的竖直距离；

d_2 ——钢管转向器形心距箍筋截面重心的水平距离，当转向块内箍筋沿纵桥向对称布置时，应取 $d_2 = 0$ ；

b_1 、 b_2 ——分别为转向块横桥向和纵桥向的平面尺寸；

e_s 、 e'_s ——分别为偏心竖向力 N_{vd} 作用点距受拉较大边和受拉较小边钢筋重心的距离。

4 在混凝土转向装置中转向器的凹向区域内的混凝土承受局部压力，应进行局压承载力验算，计算公式如下：

$$\gamma_0 N_d \leq \beta f_{cd} A_1 \quad (6.5.3-11)$$

式中： N_d ——体外预应力对转向器产生的径向作用设计值；

f_{cd} ——转向装置混凝土抗压强度设计值；

β ——局部承压强度提高系数，对于混凝土转向装置取 $\beta = 1.732$

A_1 ——转向器下混凝土局部受压面积， $A_1 = Db_2$ ；

D ——转向钢管的外径；

b_2 ——转向钢管在混凝土转向装置中的长度。

条文说明

从转向方式上分，转向装置可以分为集束式和散束式。集束式转向器一般由无缝钢管制成，可实现整体换束；散束式转向器各预应力钢绞线间相互独立，不发生相互干涉。有限元计算结果表明：散束式转向装置的受力性能明显优于集束式转向装置。相对于集束式转向装置而言，散束式转向装置最大压应力可降低 90%以上，同时最大拉应力可降低 50%以上，显著改善转向装置的受力性能。

在混凝土转向装置中转向器的凹向区域内的混凝土承受局部压力，设计中必须考虑局部承压强度的问题，必要时在转向器的凹向区域配置防崩钢筋。局部承压的计算方法引用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 5.7.1 条的计算方法。

6.5.4 钢结构锚固装置或转向装置的锚板计算应符合下列规定：

1 计算原则

(1) 锚板平面外弯曲变形忽略不计时，被连接件与混凝土结合面受力变形后仍保持为平面，群锚锚栓内力按弹性理论计算。

(2) 锚板平面外弯曲变形不可忽略时，应考虑该弯曲变形的影响，锚栓内力可采用有限元法计算。计算时，混凝土和钢材的性能指标按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定采用，锚栓应采用实测的荷载-位移曲线。

2 锚板厚度应按以下公式设计：

$$t_{min} = \max\left(\frac{V_d}{d_t f_{yd}}; 0.6d\right) \quad (6.5.4)$$

式中： t_{min} ——锚板厚度最小值（mm）；

V_d ——单个锚栓所承受的剪力设计值（N）；

d_t ——锚板的开孔直径（mm）；

f_{yd} ——锚板屈服强度设计值（N/mm²）； d 为锚栓直径（mm）。

条文说明

现行《混凝土结构加固规范》（GB50367）对群锚锚栓的内力分析按弹性理论计算，此规范主要针对的是既有建筑物的加固；而桥梁体外预应力的加固多属于荷载大，群锚锚栓数量多的安装工况，在承受外剪力荷载作用时往往对锚板的承压强度要求很高，根据国外的研究和国内项目的调查发现，锚板一旦出现平面外弯曲变

形，则容易导致锚固点（拉索）的整体位移和失效。因此本条款给出对锚板厚度的设计要求。

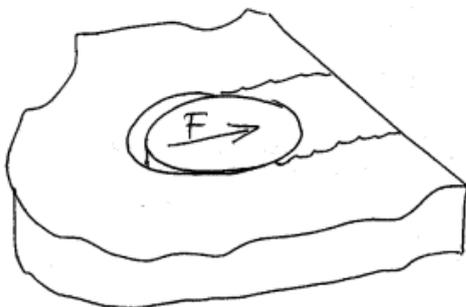
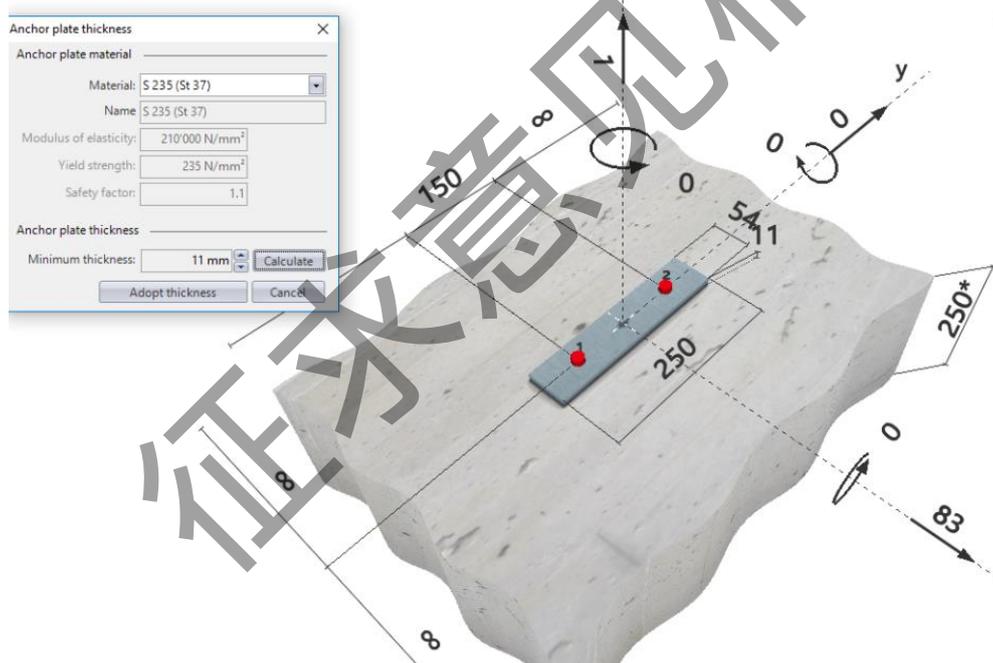


图 6.5.4 剪力荷载作用下的孔径破裂

计算案例：锚栓布置见下图，直径 M16，锚板材质 Q235 及开孔直径 18mm，单个锚栓承受外剪力荷载 41.5kN。



$$t_{min} = \max \left(\frac{41500N}{\frac{235N}{18mm \times \left(\frac{mm^2}{1.1}\right)}} = 10.8mm; 16 \times 0.6 = 9.6mm \right) = 10.8mm$$

7 加固施工

7.1 一般规定

7.1.1 体外预应力加固施工，应根据设计图纸与现场施工条件，编制施工组织设计及专项施工方案。经审查批复后方可实施。

7.1.2 施工前应建立健全质量、安全管理体系，明确安全质量目标，落实安全质量责任，提出安全保障措施和防范措施，制订突发事件应急预案。

7.1.3 体外预应力工程施工时，应编制施工安全技术方案，采取必要的安全防护措施，防止发生事故。

条文说明

安全防护措施包括三个方面的内容：作业人员的人身安全、操作设备的安全和结构物的安全。为保证施工作业安全地进行，就需要采取必要的安全防护措施。

7.1.4 施工前应建立健全环保管理体系，制定环境保护、节能减排和文明施工的实施方案，减少工程施工过程中对环境的污染。

7.1.5 预应力钢筋运输及安装过程中应防止其表面防护材料的污染、损伤。

条文说明

预应力筋应保持清洁，在存放和搬运过程中应避免使其产生机械损伤和有害的锈蚀。进场后的存放时间宜不超过 6 个月，且宜存放在干燥、防潮、通风良好、无腐蚀气体和介质的仓库内；在室外存放时，不得直接堆放在地面，应支垫并遮盖，防止雨露和各种腐蚀性介质对其产生不利影响。

7.1.6 加固用水泥、砂石料、钢材、胶黏剂、锚具、锚栓等材料进场应进行检验，其结果应符合国家、行业现行有关标准并满足设计要求。

7.1.7 施工前应对原结构表面缺陷、裂缝进行修补。

7.1.8 混凝土锚固装置及转向装置的浇筑施工、养生及体外预应力钢束张拉时宜临

时中断交通。

7.1.9 施工过程中进行电焊作业时，应对预应力束、管道和附属构件等进行保护，防止溅上焊渣或造成其他损坏。

7.2 施工准备及施工测量

7.2.1 施工前应熟悉设计文件，领会设计意图，由设计单位进行设计交底。

7.2.2 施工前应对施工作业人员进行技术交底、安全培训。特种作业人员，持证上岗。

7.2.3 合理布置施工场地，各种临时设施应满足施工，开工前应完成现场的四通一平工作。

7.2.4 体外预应力箱内施工时应采取通风、照明、防尘、防毒和防火措施；箱内不得存放易燃、易爆物品。

7.2.5 依据竣工图纸、设计图纸探测并标记拟设置锚固装置、转向装置等与原桥结合面处既有普通钢筋和预应力钢筋的位置。

7.2.6 根据设计图纸对新增锚固装置、转向装置、减振装置、拓孔位置、种植钢筋、体外预应力钢束等进行测量放样。

条文说明

按加固设计图纸，结合原桥施工图、竣工图确定结构中线，对称测量放样出每个新增锚固块、转向装置详细位置，并用墨斗弹线或油漆标记各新增锚固块、转向装置角点在原结构的位置，对每一束预应力束进行编号，同时用测量仪器放出体外预应力钢束在结构内位置，在横隔板穿孔具体位置标注穿孔位置。并核查纵向钢束布置是否与原有结构物冲突。

7.3 原结构预处理

7.3.1 新增混凝土锚固块、转向块施工前应对新旧混凝土结合面进行凿毛处理。不得使用可能导致原结构物损伤的大功率设备进行凿毛。

条文说明

结合面凿毛是为了加强新、旧混凝土材料的有效结合。凿毛采用人工结合小型专用机械的凿除方式，凿毛时不能对原桥结构有较大的冲击及振动以免造成结构损伤，并尽可能保持普通钢筋和预应力钢筋的完整性。

7.3.2 结合面凿毛应满足下列要求：

- 1 凿除原结构混凝土表面砂浆层，露出粗骨料 50%以上，同时表面凸凹不平度不小于 6mm。
- 2 清理结合面的凿除物，采用空压机吹去浮尘，再用高压水枪冲洗干净结合面，保湿时间不小于 6 小时。
- 3 若设计要求涂抹界面剂时，结合面应保持湿润但无水珠。

7.3.3 混凝土锚固装置、转向装置与原结构混凝土结合面应设剪力槽，剪力槽深度应符合设计要求且不宜大于原桥钢筋保护层厚度。

7.4 混凝土锚固装置及转向装置

7.4.1 混凝土锚固装置及转向装置的施工应符合下列规定：

- 1 按照设计图纸进行放样，混凝土锚固装置及转向装置位置及尺寸应满足设计要求。
- 2 植筋与原结构预应力筋或受力主筋位置冲突时，应征得设计同意后调整植筋的位置。植筋施工可按本规程附录 A 的相关要求执行。
- 3 预埋管道与锚具组件应定位准确，连接平顺、严密。预埋管道自由端应按设计要求进行扩口和圆化处理，形成喇叭口；设计未要求时，可按自由端 50mm 长范围逐渐扩径至 1.1D 进行制作（D 为预埋管道内径）。
- 4 新增混凝土浇筑应确保密实，充分养生，在达到设计要求的强度后方可进行下一步工序。

7.5 钢结构锚固装置及转向装置

7.5.1 钢结构锚固装置及转向装置的施工应符合下列规定：

- 1 按照设计图纸进行放样，钢结构锚固装置及转向装置位置及尺寸应满足设计

要求。

2 种植锚栓钻孔前，应探测原结构预应力筋或受力主筋位置，发生冲突时，应征设计同意后调整锚栓的位置或锚固构造。施工时可先钻孔，再根据钻孔位置，放样下料钢构件上的锚栓孔。

3 钢结构锚固装置及转向装置宜在工厂加工制作，外形尺寸应满足表 9.5.2 的相关要求。

4 锚固装置上的锚栓孔与混凝土基材上的锚栓孔中心偏差应满足表 9.5.2 的相关要求。

5 锚栓宜在钢构件就位并临时固定后种植，锚栓种植施工可按本规程附录 B 锚栓的相关要求执行。化学锚栓胶体固化期间不能扰动，钢构件螺母紧固应在胶体固化后进行。

6 钢构件锚固时，螺母紧固力应满足设计要求。钢构件安装完成后，应在结合面压注结构胶。

7 基材表面处理、钢材加工制作、钢材防腐涂装、钢构件安装等应符合本规程第五章及现行《公路桥梁施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定。

7.6 体外预应力施工

7.6.1 体外预应力筋采用非成品索时，其制作应符合以下规定：

1 预应力筋的下料长度应通过计算确定。计算时应综合考虑孔道长度、锚具长度、千斤顶长度、张拉伸长值和混凝土压缩变形量以及工作长度等因素。

2 预应力筋的下料，应采用切断机或砂轮锯切断，严禁采用电弧切割。

7.6.2 体外预应力筋采用成品索时，安装前应对外观、长度及规格进行检查。

7.6.3 体外束穿束应符合下列规定：

1 体外束穿束应在锚固装置及转向装置强度达到设计要求后方可进行。

2 体外束穿束前应对孔道进行清洁，孔道应畅通、无水和其他杂物。

3 非成品索穿束时，宜将一根钢束中的全部预应力筋编束后整体穿入孔道中，钢束的前端宜设置穿束网套或特制的牵引头，应保持预应力束顺直，不得扭转。成品索穿束时，应在索体表面做导向标记，以保证穿束时预应力束顺直，不扭转。

4 采用无粘结预应力钢绞线作为体外束的应剥除体外索两端的防护层，并将裸

露钢绞线的油脂清除干净。防护层的剥除长度应根据进入密封筒的最小长度、钢绞线张拉伸长量以及工作长度计算确定；张拉后体外索防护层进入密封筒的最小长度不宜小于 100mm。

7.6.4 锚具、夹具和连接器在安装前，应擦拭干净，安装时应符合下列规定：

- 1 锚具的安装位置应准确，且应与孔道对中。
- 2 采用夹片式锚具时，应防止锚具偏出锚垫板上止口；安装完成后的夹片外露长度应保持一致。
- 3 采用螺母锚固的支撑式锚具，安装前应逐个检查螺纹的配合情况，应保证在张拉和锚固过程中能顺利旋合拧紧。

条文说明

2 锚垫板上的对中止口可以保证锚具与垫板的对中，有利于锚具和预应力筋的均匀受力；如果锚具偏出中止口，则会形成不利的支撑状态。

3 利用螺母锚固的支撑式锚具，一般须在张拉至规定控制应力时拧紧螺母，所以在安装锚具之前需要逐个检查螺纹的配合情况，保证在张拉锚固时能顺利拧紧。

7.6.5 体外束张拉应符合下列规定：

1 体外预应力张拉时新增装置混凝土强度、弹性模量（或龄期）应满足设计要求；设计未规定时，新增装置混凝土强度不应低于设计强度等级值的 90%，弹性模量应不低于混凝土 28d 弹性模量的 90%。

2 预应力筋的张拉顺序应符合设计规定；当设计未规定时，宜采用分批、分阶段的方式对称、同步张拉；逐根或逐束张拉时，应考虑混凝土弹性压缩引起的预应力损失。

3 体外索张拉应按设计要求进行张拉；设计未规定时宜按以下工艺进行：

(1) 预张拉： $0 \rightarrow 10\% \sigma_{con}$ (初始张拉力)。在正式张拉前，应对体外索进行预张拉。确认体外索绷紧顺直不缠绕、锚具定位准确后，方可正式张拉。

(2) 正式张拉： $0 \rightarrow 15\% \sigma_{con} \rightarrow 50\% \sigma_{con} \rightarrow 80\% \sigma_{con} \rightarrow 100\% \sigma_{con}$ (持荷 15min 锚固)。张拉时应两端同时、同步、对称张拉。

(3) 锚固锁定：预应力筋的锚固，应在张拉控制应力处于稳定状态下进行。锚固阶段张拉端锚具变形、预应力筋的回缩量 and 接缝压缩值，应不大于设计规定。

4 两端张拉时，各千斤顶之间同步张拉力的允许误差宜为 $\pm 2\%$ 。

5 预应力束张拉以应力控制为主、伸长值校核的双控法。

6 体外束张拉应与施工监控相互配合，发现异常时应立即终止张拉，待查明原因并采取措施后，方可张拉。

7.7 减振装置安装

7.7.1 减振装置应按图纸设计位置进行放样，根据索体的空间位置对减振装置的连接构件精确下料。

7.7.2 减振装置应与主体结构连接可靠，宜先安装固定端，待体外索锚固完成后再调整安装索扣端。

7.7.3 安装索扣时通过调节螺杆将索体紧固，使索扣内橡胶垫与索体密贴，避免对预应力索体产生不利的横向力。

7.8 防腐及防锈处理

7.8.1 体外预应力索锚头防腐应按下列工序进行：

- 1 对锚固后的体外预应力锚头进行清洁。
- 2 安装带有注油口和排气口的密封罩。
- 3 从注油口压注专用防腐油脂，直至密封罩内充满油脂，排气口均匀出油。
- 4 用配套螺栓对注油口和排气口进行密封。

7.8.2 体外预应力索体防护套施工过程中的损伤应采用同类型防护材料进行热熔修补。

7.8.3 体外预应力体系的外露钢件，应按下列规定进行防腐涂装：

1 对于出厂已完成涂装的钢构件局部涂层损伤的应采用相同的涂装材料进行修补。

2 对需要进行现场防腐涂装的钢构件应进行表面清洁、除锈、糙化处理，按设计要求进行防腐处理。

8 施工监控

8.1 一般规定

8.1.1 施工监控前应根据设计文件、专项施工方案编制施工监控方案。

8.1.2 体外预应力张拉施工期间按钢束张拉步骤进行全过程施工监控。

8.1.3 施工监控前应对仪器设备进行标定、校准。

8.1.4 传感器、数据采集设备、测量仪器仪表选型应满足量程、分辨率、精度、稳定性、环境适应性等要求。

8.1.5 应根据设计文件和施工方案进行施工监控计算，确定体外预应力加固时的控制目标状态。

8.1.6 施工监控计算模型应合理、准确模拟体外预应力加固时桥梁结构的实际受力状态。

8.2 监控内容

8.2.1 体外预应力加固施工监控的主要内容应包括：

- 1 控制截面的应力（应变）。
- 2 控制截面的变形。
- 3 裂缝观测。
- 4 锚固装置及转向装置的新旧结构结合面观测。
- 5 体外索永存应力。
- 6 锚下张拉应力与伸长量。

条文说明

1 加固施工过程中原构件的受力会因为各类因素的影响而不断发生改变，通过对控制截面应力进行跟踪监测，分析是否处于合理的安全受力状态，并为下一步施工提供分析基础。

2 监测构件在体外索张拉前后的位移变化情况，并与理论分析结果相对比，以确保结构受力安全。

3 体外索张拉时对结构已有裂缝的变化情况进行监控并观察有无新增裂缝。

4 观测新旧结构结合面有无错动、开裂，新构件边缘有无翘起。

8.2.2 应力（应变）监控应符合下列规定：

1 监控测点宜布置在跨中、L/4、L3/4、墩顶及应力（应变）变化较大的截面。

2 测量体外预应力张拉前、后各测点的应变值，比较张拉前后应力（应变）变化情况。

3 宜选用集温度、应力测试一体的应力传感器。

8.2.3 变形监控应符合下列规定：

1 监控测点宜布置在跨中、L/4、L3/4、墩顶及变形较大的截面。

2 测量体外预应力张拉前、后各测点的位移，比较张拉前后位移变化情况。

3 可采用全站仪或精密水准仪等。

8.2.4 体外索永存应力应符合下列规定：

1 监控测点宜布置在体外索中段。

2 测量体外索张拉期间的永存应力，并与锚下张拉应力实测值进行分析、比较。

3 宜采用磁通量传感器或频率法进行索力测试。

8.2.5 锚下张拉应力监控宜采用压力传感器进行测试，并与千斤顶油压表测试结果进行比较。

8.2.6 体外索伸长量监控可采用尺量，初始值以初张拉完成后的伸长量读数为基准。

8.2.7 目测原构件及新增构件有无开裂及开裂变化情况，典型裂缝宜采用裂缝计进行监控，并对张拉前后的裂缝变化情况进行对比分析。

8.2.8 目测新旧构件结合面有无错动、开裂，新构件边缘有无翘起等状况。

8.3 数据分析与反馈控制

8.3.1 数据分析与反馈控制应以监测数据、材料参数、张拉力及其他施工荷载为依据。

8.3.2 监控的目标状态通过施工模拟计算确定，实测监控数据和理论计算值之间差值应满足监控目标要求。

8.3.3 体外预应力加固施工监控数据分析应符合下列规定：

- 1 根据桥梁实测监控数据，识别当前桥梁结构受力状态、几何状态。
- 2 对照相应工况理论计算数据，判别桥梁施工状态是否处于预控状态。
- 3 当施工状态偏离预期时，应查找原因，分析预测状态偏离对后续施工的影响。

条文说明

3 当误差超过限值时，应借助施工过程模拟计算模型，对桥梁结构受力安全和线形变化、以及误差对施工监控目标实现的影响进行分析，并采取反馈控制措施。

8.3.4 施工监控的反馈控制应符合下列规定：

- 1 当施工状态与监控目标相符时，下达下一步的正常施工指令。
- 2 当施工状态偏离监控目标较大时，影响结构安全时，应下达暂停施工指令，提出反馈控制建议。

条文说明

2 施工状态偏离主要指实测应力、变形与理论计算值偏差较大，结构出现明显受力裂缝，转向装置、锚固装置出现明显变形或错位等其他异常情况。

8.3.5 施工过程调控措施应符合下列规定：

- 1 由原结构隐蔽缺陷造成施工状态偏离时，应对缺陷处治后，再重新进行施工。

2 张拉过程中锚固装置或转向装置产生开裂、错位等导致施工状态偏离时，应对其进行加固处治后，方可继续施工。

3 由体外预应力张拉设备、仪表、传感器等造成施工状态偏离误判时，应查找原因、排除故障后，方可继续施工。

9 质量检验

9.1 一般规定

9.1.1 体外预应力加固工程应根据本规程相关规定进行检验，根据现行《公路养护工程质量检验评定标准》（第一册 土建工程）（JTG 5220）对工程质量进行评定。

9.1.2 体外预应力加固工程可分为若干个质量检验评定单元，并应符合下列规定：

1 混凝土锚固装置和转向装置的质量检验评定单元宜划分为：植筋施工、混凝土锚固装置和转向装置施工、体外预应力安装与防护。

2 钢结构锚固装置和转向装置的质量检验评定单元宜划分为：锚栓施工、钢结构锚固装置和转向装置施工、体外预应力安装与防护。

3 混合锚固和转向装置的质量检验评定单元可根据实际结构形式划分。

条文说明

3 采用混凝土锚固装置、钢结构转向装置时，质量检验评定单元可划分为：植筋施工、锚栓施工、混凝土锚固块施工、钢结构转向装置施工、体外预应力安装与防护；采用钢结构锚固装置、混凝土转向装置时，质量检验评定单元可划分为：植筋施工、锚栓施工、钢结构锚固装置施工、混凝土转向装置施工、体外预应力安装与防护。

9.1.3 浇筑在混凝土内的植筋、锚栓、钢构件等在混凝土浇筑前应检验评定合格。

9.1.4 评定为不合格的质量检验评定单元，应进行返工，满足相关要求后，可重新进行检验评定。

9.1.5 体外预应力加固工程评定合格后宜通过荷载试验检验加固效果。

9.2 植筋施工质量检验

9.2.1 植筋施工应符合下列基本要求：

- 1 所用材料的品种、型号、规格和质量应符合相关技术规范的规定，并满足设计要求。
- 2 植筋前应探测原结构内部预应力钢筋和主筋位置，钻孔时不应对其造成损伤。
- 3 植筋孔位附近的混凝土应无裂缝和疏松层，施工环境温湿度应符合植筋胶黏剂的使用要求。
- 4 植筋的数量不得少于设计要求，植筋间距及植筋至构件边缘距离不得小于构造规定值。
- 5 需焊接的植筋应采取降温措施，不得因焊接降低胶黏剂的技术性能。

9.2.2 植筋施工实测项目应符合表 9.2.2 的规定。

表 9.2.2 植筋施工实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	钻孔中心偏位 (mm)	± 10	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根
2	钻孔直径 (mm)	+3, 0	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根.
3	钻孔深度 (mm)	+10, 0	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根.
4 Δ	锚固深度 (mm)	不小于设计值	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根.
5	钻孔倾斜 ($^{\circ}$)	≤ 5	测角仪:抽查 10%，且不少于 5 根
6 Δ	拉拔力 (kN)	在合格标准内	按《公路养护工程质量检验评定标准》(第一册 土建工程) (JTG 5220-2020) 附录 M 检查: 抽查 2%~3%，且不少于 5 根

注：项次 6 的检查频率当采用非破损方法或植筋量小时用高限，采用破损方法或植筋量大时用低限。

9.2.3 植筋施工外观质量应符合下列规定：

- 1 钻孔内注入的胶黏剂应饱满。
- 2 钢筋表面应无颗粒状或片状锈、无裂纹等损伤，焊接不得脱开。

9.3 锚栓施工质量检验

9.3.1 锚栓施工应符合下列基本要求：

- 1 所用锚栓、胶粘剂的质量和规格必须符合现行有关规范及设计要求，且锚栓数量不得少于设计数量。
- 2 锚栓施工应严格按照设计、施工规范、相关技术操作规程进行。
- 3 基材强度应满足设计要求，基材表面应坚实、平整。
- 4 锚栓钻孔应避让原有主筋、预应力钢筋和预埋件。
- 5 机械型锚栓和化学锚栓应整套使用，不得替换任何部件。

9.3.2 锚栓施工实测项目应符合表 9.3.2 的规定。

表 9.3.2 锚栓施工实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	钻孔中心偏位 (mm)	±10	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根
2	钻孔直径 (mm)	+3, 0	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根.
3	钻孔深度 (mm)	+10, 0	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根.
4△	锚固深度 (mm)	不小于设计值	尺量:抽查 10%，且不少于 5 根.
5	钻孔倾斜 (°)	≤5	测角仪:抽查 10%，且不少于 5 根
6△	高强螺栓预紧力 (kN)	+15%, -0	扭力扳手: 抽查 10%，且不小于 5 个
7△	拉拔力 (kN)	在合格标准内	按《公路养护工程质量检验评定标准》(第一册 土建工程) (JTG 5220-2020) 附录 M 检查: 抽查 2%~3%，且不少于 5 根

注：项次 7 的检查频率当采用非破损方法或植筋量小时用高限，采用破损方法或植筋量大时用低限。

9.3.3 锚栓施工外观质量应符合下列规定：

- 1 化学锚栓的锚孔内胶粘剂应饱满，不得有未固化现象。
- 2 锚栓不得有松动，表面无锈蚀、无损伤。
- 3 锚栓孔周围混凝土表面不得出现裂缝。
- 4 结构表面不得有遗留废孔。

9.4 混凝土锚固装置和转向装置施工质量检验

9.4.1 混凝土锚固块和转向块施工应符合下列基本要求：

1 混凝土所用水泥、砂、石、水、外加剂及掺合料的品种、规格和质量应符合相关技术规范的规定并满足设计要求，按试验确定的配合比拌制，混凝土的收缩变形应在设计允许范围内。

2 新增钢筋与原结构钢筋的连接应满足设计要求，植筋应按本规程第9.2节进行检验，其他钢筋工程按现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）相关规定进行检验，并且合格。

3 新增混凝土锚固块或转向块表面应凿毛，露出新鲜、密实混凝土，表面应清洁、无污垢，凿除深度和粗糙度应符合设计要求，对原结构存在的病害应先进行修补处理。

4 剪力槽的尺寸及位置应符合设计要求，开凿时不得损伤原结构主筋及周边混凝土。

5 施工顺序及混凝土的养护应满足设计要求。

6 支架（吊架）和模板的强度、刚度、稳定性应符合相关施工技术规范的规定。

7 支架（吊架）变形及支架沉降应满足新增混凝土锚固块或转向块设计高程的要求。

9.4.2 混凝土锚固装置和转向装置施工实测项目应符合表 9.4.2 的规定。

表 9.4.2 混凝土锚固装置和转向装置施工实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1 Δ	混凝土抗压强度(MPa)	在合格标准内	按《公路养护工程质量检验评定标准》（第一册 土建工程）（JTG 5220-2020）附录 D 检查
2	断面尺寸（mm）	+10, -5	尺量：每个构件测 3 个断面
3	空间位置（mm）	±50	尺量：每个构件测 3 处
4	顶面或底面高程（mm）	±5	水准仪：测 5 处
5	平整度（mm）	≤5	2m 直尺：每侧面测 1~2 处，测竖向、水平两个方向

6	预埋管道位置 (mm)		≤ 5	尺量：每个预埋管道
7	剪力槽	平面尺寸 (mm)	+10, -10	尺量：每个剪力槽测 2 个断面
8		深度 (mm)	+5, 0	尺量：每个剪力槽测 2 个点

9.4.3 混凝土锚固装置和转向装置施工外观质量应符合下列规定：

- 1 新增锚固块和转向块混凝土表面应平整密实，无裂缝、空洞、蜂窝及露筋等缺陷。
- 2 新旧混凝土结合面不得出现裂缝，无明显施工接缝。

9.5 钢结构锚固装置及转向装置施工质量检验

9.5.1 钢结构锚固装置及转向装置施工应符合下列基本要求：

- 1 所用的钢板、钢管、锚固螺栓、胶黏剂等材料的品种、规格和质量应符合相关技术规范的规定并满足设计要求。
- 2 对原结构、构件的孔洞、蜂窝、裂缝、露筋等缺陷应按设计要求进行修补，钢板与原结构结合面应凿平、清理干净，含水率应满足胶黏剂的使用要求。
- 3 钢板粘贴面应按设计要求进行糙化处理，表面平整，不得有折角，粘贴前应清理、擦拭干净。
- 4 锚固螺栓数量不得少于设计数量，锚固螺栓的螺母承压面应与钢板密贴。
- 5 各钢构件的焊接工艺及焊接质量应符合相关技术规范的规定并满足设计要求。
- 6 钢结构转向装置及集束转向器的转向半径及方向应满足设计要求。
- 7 钢板、钢管、锚固螺栓等钢构件应按设计要求进行防腐涂装。

9.5.2 钢结构锚固装置及转向装置施工实测项目应符合表 9.5.2 的规定。

表 9.5.2 钢结构锚固装置及转向装置施工实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	钢转向装置制作	钢板长度 (mm)	+5, 0	尺量：每块
2		钢板宽度 (mm)	+5, 0	
3		倒角尺寸 (mm)	± 2	

4		对角线长度 (mm)	+10, 0	
5		孔中心距离 (mm)	±2	
6		偏转角 (°)	±1	
7 Δ		焊缝质量	符合设计要求	焊缝超声检测：每条
8		防腐涂层干膜总 厚度 (μm)	符合设计要求	按设计要求检查，设计未要求时用测厚仪检查：逐件，每件不少于5点
9 Δ		防腐涂层附着力 (MPa)	符合设计要求	按设计要求检查，设计未要求时用拉开法检查：抽查5%且不少于2件，每件测1处
10	钢转向装置及集束转向器安装	钢混结合面 缝隙 (mm)	不允许	目测
11		高强螺栓终拧扭 矩 (N.m)	符合设计要求	扭力扳手测：抽查30%
12 Δ		焊接质量	符合设计要求	焊缝超声检测：每条焊缝
13		安装中心位置 (mm)	±10	尺量：每根
14		线形转向角 (°)	±2	尺量：每根

9.5.3 钢结构锚固装置及转向装置施工外观质量应符合下列规定：

- 1 钢结构锚固装置及转向装置安装牢固、无松动。
- 2 焊缝应无裂纹、焊瘤、夹渣、电弧擦伤、未焊透、未填满弧坑，构件表面应无焊渣和飞溅物。
- 3 钢板、钢管、锚固螺栓等钢构件的防腐涂层应无破损、漏涂。

9.6 体外预应力安装与防护质量检验

9.6.1 体外预应力安装与防护应符合下列基本要求：

- 1 所用预应力筋（束）、锚具、连接器、防护层及防腐油脂等的品种、规格、性能应符合相关技术规范的规定并满足设计要求，预应力筋（束）展开后应平顺无弯折。
- 2 锚固装置和转向装置所采用的材料和制作应满足设计要求，与原结构构件连接牢固；转向装置不得损伤预应力筋（束）及其防护层，弯曲应圆顺。
- 3 施工顺序应满足设计要求。

- 4 张拉设备应配套标定和使用，并不得超过标定期限和使用次数。
- 5 预应力张拉时，混凝土齿板的强度和龄期应符合设计要求，并应严格按设计规定的张拉顺序操作，不得出现滑丝现象。
- 6 锚垫板平面应与预应力筋（束）轴线垂直，预应力筋（束）锚固后应采用机械切割，外露长度应符合设计要求。
- 7 减振装置应夹紧预应力筋（束），并不得改变其线形。
- 8 应按设计要求进行锚头和锚固段防护，锚具防护罩应安装牢固，内填防腐油脂充盈。

9.6.2 体外预应力安装与防护实测项目应符合表 9.6.2 的规定。

表 9.6.2 体外预应力安装与防护实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	钢束坐标	加固构件长方向 (mm)	±30	尺量：抽查 50% 预应力筋（束） 各锚固点和转向 点
2		加固构件横方向 (mm)	±10	
3		加固构件高方向 (mm)	±10	
4 Δ	张拉力	锚下控制应力	符合设计要求，设计未规定 时，±5%	检查油压表读 数：全部
		非成品索同束锚下 控制应力不均匀度	±2%	
5 Δ	张拉伸长率		符合设计要求，设计未规定 时，±6%	尺量：全部
6	断丝、 滑丝数	钢束	不允许	目测：全部
		钢筋		
7	减振装置纵向间距 (mm)		±100	尺量：抽查 20%

9.6.3 体外预应力安装与防护外观质量应符合下列规定：

- 1 预应力筋（束）的防护层应无裂纹、损伤，外表清洁，无易燃附着物。
- 2 预应力筋（束）与减振装置间的橡胶垫块（圈）不应出现缺失、破损、松动。

9.7 质量检验资料

9.7.1 体外预应力加固工程质量检验前，应提供下列资料：

- 1 经审查批复的设计文件。

- 2 经审查批复的专项施工方案及施工组织设计文件。
- 3 原材料质量合格证书。
- 4 体外预应力钢筋（束）、锚具、转向器、减振器、防护套管、防腐油脂等质量合格证书，出厂检验报告、进场复验报告。
- 5 工厂焊缝无损检测报告。

9.7.2 体外预应力加固工程质量检验时，应按《公路养护工程质量检验评定标准》（第一册 土建工程）（JTG 5220-2020）附表 K.1.1 的格式提供下列评定表及相关材料：

- 1 植筋施工质量检验评定表。
- 2 锚栓施工质量检验评定表。
- 3 混凝土锚固装置和转向装置施工质量检验评定表。
- 4 钢结构锚固装置和转向装置施工质量检验评定表。
- 5 体外预应力安装与防护质量检验评定表。
- 6 预应力张拉记录。
- 7 施工监控报告。

征求意见稿

10 监测与维护

10.1 一般规定

10.1.1 体外预应力加固施工完成后，应定期对体外索的防护系统及预应力结构进行检查和维护，确保体外预应力系统运营状态良好。

10.1.2 采用体外预应力加固的桥梁，宜对索力进行长期监测。

10.1.3 体外预应力系统经检查不满足要求时，应及时针对采取修复、补张拉、换索等措施，确保其在使用期限内的安全适用。

10.1.4 体外预应力加固桥梁的检查及养护，除应满足本规程规定外，尚应符合国家、行业现行相关标准、规范的规定。

10.2 监测

10.2.1 体外预应力宜对体外索索力、锚下应力及环境温度等进行监测。

10.2.2 监测宜采用自动化采集系统或人工量测的方式，人工量测按1次/年的频次进行。

10.2.3 监测传感器及数据采集设备应满足量程、分辨率、精度、稳定性、环境适应性等要求。

10.2.4 当桥梁设有健康监测系统时，监测数据宜纳入该系统同步进行管理。

10.2.5 根据监测结果，分析判断体外预应力加固体系是否处于正常工作状态。

10.3 检查

10.3.1 对体外预应力加固的桥梁应进行初始检查，初始检查宜与交工验收同时进行。

条文说明

初始检查目的是采集桥梁体外预应力的基础状态数据，建立初始技术档案，便于对与后期检查结果做对比分析，确定病害或缺陷发展程度，为桥梁进一步养护工作提供依据。

10.3.2 体外预应力加固体系初始检查内容包含体外预应力束索力、锚固装置和转向装置的尺寸、材质强度及表观缺陷。

10.3.3 体外预应力加固体系经常检查、定期检查应与桥梁检查频率保持一致。

10.3.4 经常检查应包括以下内容：

- 1 体外索护套是否有明显损伤。
- 2 钢制构件表面的涂层有无损坏，构件是否锈蚀。
- 3 体外索锚具护套是否松脱，是否有油脂流出。
- 4 锚固装置、转向装置与原结构的结合面有无明显错动。
- 5 体外索是否有异常振动。

10.3.5 定期检查应包括以下内容：

- 1 混凝土构件有无开裂及裂缝是否超限，有无渗水、蜂窝、麻面、剥落、掉角、孔洞、空洞、露筋及钢筋锈蚀。
- 2 钢构件涂层劣化情况，构件有无锈蚀、裂纹、变形、局部损伤，焊缝有无开裂或脱开，螺栓有无松动、脱落或断裂。
- 3 锚固装置、转向装置与原结构的结合面有无开裂、错位。
- 4 体外预应力索力有无异常变化，索体线形有无异常，索体有无异常振动。
- 5 体外预应力索防护套有无开裂、鼓包、破损、老化变质。
- 6 逐个检查锚具及周围锚固区的情况，锚具是否锈蚀，锚固区是否开裂。必要时可打开锚具后盖抽查锚杯内是否潮湿、防腐油脂是否结块、乳化失效。锚头是否锈蚀、开裂。
- 7 减振装置连接是否可靠，工作是否正常。

10.3.6 体外预应力体系存在严重损伤或存在失效风险时，应进行特殊检查。

10.4 维护与更换

10.4.1 体外预应力索体系出现损伤时应及时修复。

10.4.2 体外预应力索防护套出现局部刮擦破损时，宜采用同类防护材料通过现场热熔修复；防护套出现整体老化龟裂时，宜采用 PVF 缠包带修复。

条文说明

对 PE 护套进行修复时，将热缩带按一定的螺距均匀地缠绕在 PE 管上，并应保证有足够的搭接，使得加热热封后，沿体外索轴向形成均匀的双层缠绕。在接头和换卷搭接处，应保证有 75% 以上的搭接，使得沿体外索轴向形成均匀的三层缠绕，并且搭接长度不小于 3 倍索径。

10.4.3 混凝土构件表面、结合面出现开裂时，应对裂缝进行表面封闭或压力注胶。

10.4.4 钢构件出现涂层劣化或锈蚀时，应进行表面处理，并采用与原涂装匹配的涂层体系进行修复；螺栓出现松动或缺失时，应及时紧固或补充。

10.4.5 锚头防腐油脂出现流失或变质失效时，应及时补注或更换。

10.4.6 减振装置橡胶体出现老化或缺失时，应及时更换或补充。

10.4.7 体外预应力索索力损失超过设计值的 10%，且预应力体系完好时，应进行补张拉，并应符合下列规定：

- 1 应进行索力检测及专项设计。
- 2 补张拉力不超过原设计值。
- 3 补张拉过程应进行监控。

10.4.8 体外预应力索出现严重损伤，经评估无法修复时，应进行更换，并应符合下列规定：

- 1 更换前应进行结构检测、验算及专项设计。
- 2 根据计算分析确定合理的换索顺序，保证结构受力安全。
- 3 更换后的体外预应力索力应满足设计要求。
- 4 更换过程应进行监控。

10.4.9 体外预应力索更换应按下列流程进行：

- 1 卸除锚具防护罩，并清除防护罩内的防腐油脂。
- 2 放松需要更换的体外预应力索及减振装置。可通过放松螺母或切割进行预应力解除。
- 3 抽出旧索，换入新索。
- 4 将新索张拉至设计值并锚固。
- 5 对锚头进行防腐处理，安装减振装置。

征求意见稿

附录 A 植筋计算及施工方法

A.1 设计规定

A.1.1 本附录适用于桥梁钢筋混凝土、预应力混凝土构件的植筋锚固；桥梁圯工构件的植筋应按照本规程附录 B——锚栓的规定进行设计计算。

A.1.2 采用植筋技术时，桥梁主要构件的混凝土强度等级不应低于 C30。

A.1.3 采用植筋锚固时，桥梁锚固部位混凝土若有局部缺陷，应先进行补强或加固处理后再植筋。

A.1.4 植筋用钢筋应使用热轧带肋钢筋或全螺纹螺杆，不得使用光圆钢筋和锚入部位无螺纹的螺杆。用于植筋的热轧带肋钢筋宜采用 HRB400 级，全螺纹螺杆钢材等级应为 Q345 级，其质量和性能应符合本规程第 4 章的有关规定。

A.1.5 用于植筋的胶黏剂按材料性质可分为有机类和无机类，其质量和性能应符合本指南第 4 章的有关规定。有机胶黏剂应采用改性环氧树脂类或改性乙烯基酯类材料，其固化剂不应使用乙二胺。桥梁受力植筋用植筋胶应采用 A 级胶，仅按构造要求植筋时可采用 B 级胶。

A.1.6 采用植筋锚固的桥梁结构，其长期使用的环境温度不应高于 60℃；对处于特殊环境（如高温、高湿、介质腐蚀等）的桥梁结构进行植筋时，除应按国家现行有关标准的规定采用相应的防护措施外，尚应采用耐环境因素作用的胶黏剂。

A.2 锚固计算

A.2.1 承重构件的植筋锚固计算应遵守下列规定：

- 1 植筋设计应在计算和构造上防止混凝土发生劈裂破坏。
- 2 植筋胶黏剂的黏结强度设计值应按本附录的规定值采用。

A.2.2 单根植筋锚固的承载力设计值应符合下列要求：

$$N_t^b = f_{sd} A_s \quad (\text{A.2.2-1})$$

$$l_d \geq \psi_N \psi_{ac} l_s \quad (\text{A.2.2-2})$$

式中: N_i^b ——植筋钢筋的轴向受拉承载力设计值;

f_{sd} ——植筋钢筋的抗拉强度设计值;

A_s ——植筋钢筋的截面面积;

l_d ——植筋锚固深度设计值;

l_s ——植筋的基本锚固深度;

ψ_N ——考虑各种因素对植筋受拉承载力影响而需加大锚固深度的修正系数, 按本附录 A.2.4 条确定;

ψ_{ac} ——考虑植筋位移延性要求的修正系数, 当混凝土强度等级不高于 C30 时, 对抗震设防 6 度区及 7 度区的一、二类场地, 取 $\psi_{ac}=1.1$; 对 7 度区三、四类场地及 8 度区, 取 $\psi_{ac}=1.25$; 当混凝土强度高于 C30 时, 取 $\psi_{ac}=1.0$ 。

A.2.3 植筋的基本锚固深度应按下式确定:

$$l_s = 0.2\alpha_{spt} d \frac{f_{sd}}{f_{bd}}$$

式中: α_{spt} ——考虑混凝土劈裂影响的计算系数。当植筋表面至构件表面的最小

距离 c 不大于 $5d$ 时, 本附录表 A.2.3-1 确定; 当植筋表面至构件表面的最小距离 c 大于 $5d$ 时, 应取 1.0;

d ——植筋钢筋的公称直径(mm);

f_{bd} ——植筋用胶黏剂的黏结强度设计值 (N/mm²), 按本附录表 A.2.3-2 的规定值采用。

表 A.2.3-1 考虑混凝土劈裂影响的计算系数 α_{spt}

植筋直径 d (mm)	混凝土保护层厚度 c (mm)			
	25	30	35	≥ 40
≤ 20	1.0	1.0	1.0	1.0
25	1.05	1.0	1.0	1.0
32	1.15	1.1	1.1	1.05

注: 当植筋直径介于表列数值之间时, 可采用线性内插法确定 α_{spt} 值。

表 A.2.3-2 植筋用胶黏剂的黏结强度设计值 f_{bd}

胶黏剂等级	构造条件	混凝土强度等级		
		C30	C40	≥ 50
A、B 级胶	$S_1 \geq 5d$; $S_2 \geq 2.5d$	3.4	3.6	4.0
A 级胶	$S_1 \geq 6d$; $S_2 \geq 3.0d$	3.6	4.0	4.5
	$S_1 \geq 7d$; $S_2 \geq 3.5d$	4.0	4.5	5.0

注：1.当使用表中的 f_{bd} 值时，其构件的混凝土保护层厚度，应不小于现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的规定值。

2.表中 S_1 为植筋间距， S_2 为植筋边距。

3.表中 f_{bd} 值仅适用于带肋钢筋的黏结锚固。

A.2.4 考虑各种因素对植筋受拉承载力影响而需加大锚固深度的修正系数 ψ_N ，应按下列式计算：

$$\psi_N = \psi_{br} \psi_w \psi_t \quad (\text{A.2.4})$$

式中： ψ_{br} ——考虑结构构件受力状态对承载力影响的系数。当为主要承重构件时， $\psi_{br}=1.5$ ；当为一般构件接长时， $\psi_{br}=1.15$ ；当为构造植筋时， $\psi_{br}=1.0$ 。

ψ_w ——混凝土孔壁潮湿影响系数，对耐潮湿型胶黏剂，按产品说明书的规定值采用，但不应小于 1.1。

ψ_t ——使用环境温度 (t) 影响系数。当 $t \leq 60^\circ\text{C}$ 时， $\psi_t=1.0$ ；当 $60^\circ\text{C} < t \leq 80^\circ\text{C}$ 时，应采用耐中温胶黏剂，并按产品说明书规定的 ψ_t 值采用；当 $t \geq 80^\circ\text{C}$ 时，应采用耐高温胶黏剂，并应采取有效的隔热措施。

A.2.5 承重结构植筋的锚固深度必须经设计计算确定；不宜按短期抗拔试验值或参照厂商技术手册的推荐值采用。

A.3 构造规定

A.3.1 当按构造要求植筋时，其最小锚固长度 l_{\min} 应符合下列构造要求：

1 受拉钢筋锚固： $l_{\min} = \max\{0.3l_s, 10d, 100\text{mm}\}$ 。

2 受压钢筋锚固： $l_{\min} = \max\{0.6l_b, 10d, 100\text{mm}\}$ 。

A.3.2 当所植钢筋与原钢筋搭接（图 A.3.2）时，其受拉搭接长度 l_1 ，应根据位于同一连接区段内的钢筋搭接接头面积百分率，按下式确定：

$$l_1 = \xi l_d$$

式中： ξ ——受拉钢筋搭接长度修正系数，按表 A.3.2 取值。

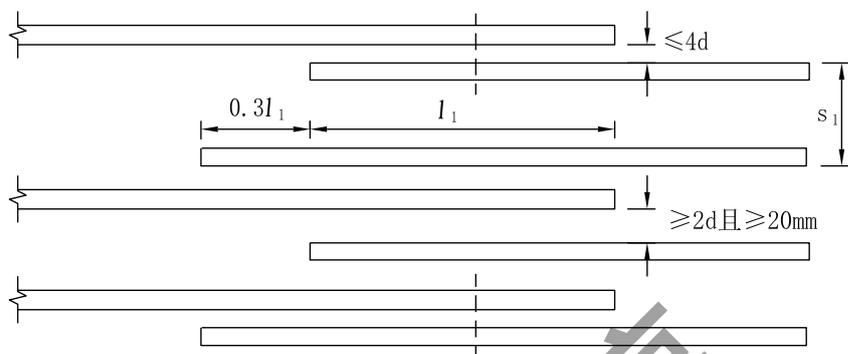


图 A.3.2 钢筋搭接

表 A.3.2 纵向受拉钢筋搭接长度修正系数

纵向受拉钢筋搭接接头面积百分率 (%)	≤ 25	50	100
ξ 值	1.2	1.4	1.6

注：1.钢筋搭接接头面积百分率定义按现行《混凝土结构设计规范》（GB 50010）的规定采用。

2.当实际搭接接头面积百分率介于表列数值之间时，按线性内插法确定 ξ 值。

3.对梁类构件，受拉钢筋搭接接头面积百分率不应超过 50%。

A.3.3 当植筋搭接部位的箍筋间距大于 100mm 时，应进行防劈裂加固。此时，可采用纤维复合布材的围束作为原构件的附加箍筋进行加固。围束可采用宽度为 150mm、厚度不小于 0.111mm 的条带缠绕而成，缠绕时围束间应无间隔，且每一围束，其所粘贴的条带不应少于 3 层。对方形截面尚应打磨棱角。也可剔去原构件混凝土保护层，增设新箍筋（或钢箍板）进行加密（或增强）后再植筋。

A.3.4 新植钢筋与原有钢筋在搭接部位的净间距，应按图 A.3.2 的标示值确定。若净间距超过 4d，则搭接长度 l_1 应增加 2d，但净间距不应大于 6d。

A.3.5 用于植筋的钢筋混凝土构件，其最小厚度 h_{\min} 应符合下列规定：

$$h_{\min} \geq l_d + 2D \quad (\text{A.3.5})$$

式中：D——钻孔直径设计值（mm），应按表 A.3.5 确定。

表 A.3.5 植筋直径与对应的钻孔直径设计值

钢筋直径 d (mm)	钻孔直径设计值 D (mm)	钢筋直径 d (mm)	钻孔直径设计值 D (mm)
12	15	22	28
14	18	25	31
16	20	28	35
18	22	32	40
20	25		

A.3.6 植筋时，其钢筋宜先焊后种植；若有困难而必须后焊，其焊点距基材混凝土表面应大于 $15d$ ，且应采用冰水浸渍的湿毛巾包裹植筋外露部分的根部。

A.4 施工方法

A.4.1 施工工艺流程见图 A.4.1。

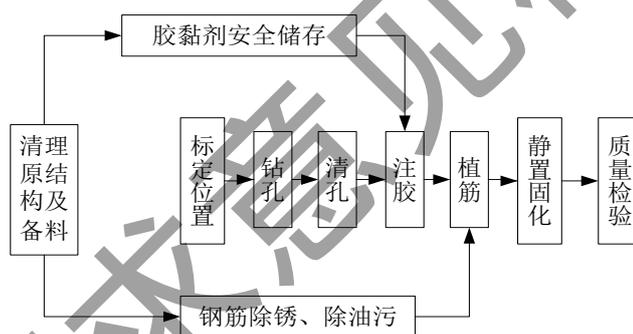


图 A.4.1 植筋施工工艺流程图

A.4.2 植筋施工时，基材表面温度和孔内表层含水率应符合设计和胶粘剂使用说明书要求，无明确要求时，基材表面温度不应低于 15°C ；植筋施工严禁在大风、雨雪天气露天进行。

A.4.3 植筋用胶黏剂应符合下列要求：植筋用胶黏剂分管式和机械注入式两种，其性能应符合本规程第 4 章的相关规定。施工时应注意材料和配胶方式的相互配套，不应在现场配制植筋用胶黏剂。

A.4.4 植筋钻孔前，应认真进行孔位的放样和定位，经核对无误后方可进行钻孔作业。植筋定位、钻孔应符合下列规定：

1 钻孔前可用钢筋探测仪探测桥梁构件植筋部位钢筋位置，或凿去保护层暴露钢筋，若植筋孔位处存在钢筋或钢束，则应适当调整钻孔位置，严禁损伤原预应力钢束。

2 钻孔施工遇到钢筋或预埋件时应立即停钻并适当移动钻孔孔位，若调整太大，应及时通知设计单位予以处理。

3 孔深与锚筋埋设深度相同，并参照《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22-2008）表 A.3.5。钻孔应保证孔道顺直。

4 施工中钻出的废孔，应采用高于构件混凝土一个强度等级的水泥砂浆、聚合物水泥砂浆或锚固胶黏剂进行填实，必要时插入钢筋。

A.4.5 清洁孔壁、钢筋可采用下列方法：

1 先将喷嘴伸入成孔底部并吹入洁净无油的压缩空气，向外拉出喷嘴，反复 3 次。

2 将硬毛刷插入孔中，往返旋转清刷 3 次。

3 再将喷嘴伸入钻孔底部吹气，向外拉出喷嘴，反复 3 次。

4 对要植入钢筋上的锈迹、油污进行除锈与清理。

5 植筋前用丙酮或工业酒精擦拭孔壁、孔底和植入的钢筋。

A.4.6 植筋注胶应符合下列要求：

1 不得采用将胶黏剂直接涂抹在钢筋上植入孔中的植筋方式。

2 植筋用胶黏剂应采用专用灌注器或注射器进行灌注，灌注量一般为孔深的 2/3，并应保证在植入钢筋后有少许胶黏剂溢出，孔口多余的胶应清除。

3 注入胶黏剂后应立即单向旋转插入钢筋，直至达到设计的深度，并保证植入钢筋与孔壁间的间隙基本均匀，校正钢筋的位置和垂度。

A.4.7 静置固化应符合下列要求：胶黏剂完全固化前，不应触动或振动已植钢筋，孔位附近不应有明水，以免影响其黏结性能。

A.4.8 植筋钢筋宜采用机械连接接头，也可采用焊接连接，连接接头的性能应符合国家现行相关标准的规定。

附录 B 锚栓计算及施工方法

B.1 设计规定

B.1.1 本附录适用于混凝土桥梁的主要承重构件的锚固，不适用于严重风化的混凝土桥梁。

B.1.2 混凝土桥梁采用锚栓加固时，承重构件混凝土强度等级不应低于 C30。

B.1.3 承重结构用的机械锚栓，应采用有锁键效应的自扩底型锚栓；承重结构用的胶粘型锚栓，应采用改性乙烯基酯粘结剂及与之配套的倒锥型螺杆。

B.1.4 不得采用膨胀型锚栓和自攻螺钉作为桥梁主要承重构件的连接件。

B.1.5 锚栓连接的设计计算，应采用开裂混凝土的假定；不得考虑非开裂混凝土对其承载力的提高作用。

B.1.6 锚栓应进行裂缝反复开合下的承载能力检测和抗震性能适用检测。

B.1.7 锚栓的受力分析应按《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367 - 2013）附录 F 的规定；对于钢锚板平面外弯曲变形不可忽略时，应考虑弯曲变形的影响。

B.2 锚栓钢材承载力验算

B.2.1 混凝土锚固安装的锚栓钢材承载力验算，应按锚栓受拉、受剪及同时受拉剪作用等三种受力情况分别进行。具体计算可按照《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367-2013）的规定执行。

B.2.2 对穿螺杆的受拉承载力，应按下式计算：

$$F_{V,Rd} = \min \left(\phi_b^2 \sqrt{f_{cd} \times f_{yd,b} \times \left(1 - \left(\frac{\sigma_{s,b}}{f_{yd,b}} \right)^2 \right)} \times A_{s,b} \times f_{yd,b}; \frac{A_{s,b} \times f_{yd,b}}{\sqrt{3}} \right)$$

式中： $F_{V,Rd}$ – 螺杆受力承载力设计值（N）

ϕ_b – 螺杆直径（mm）

f_{cd} – 混凝土抗压强度设计值（N/mm²）

$f_{yd,b}$ – 螺杆屈服强度设计值（N/mm²）

$\sigma_{s,b}$ – 螺杆轴向应力值（N/mm²）

$A_{s,b}$ – 螺杆截面面积（mm²）

条文说明

对穿螺杆是针对基材厚度不足的一种锚固解决方案。参照“CEB-FIP Model 1990”对螺杆的承载力校核给出计算公式；避免因对穿螺杆的数量不足，导致锚固点的基材局部剪切破坏。

B.3 基材混凝土承载力验算

B.3.1 锚栓安装的混凝土承载力验算，应考虑三种破坏模式：混凝土呈锥体受拉破坏、混凝土边缘呈楔形受剪破坏以及同时受拉、剪作用破坏。具体可按照《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367-2013）中的规定计算。

B.3.2 转向块、锚固块连接处的既有结构混凝土应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010）进行冲切承载力和局部承压承载力计算。在预应力张拉阶段局部受压承载力计算中，局部压力设计值应取1.2倍张拉控制力进行计算；在正常使用阶段验算中，局部压力设计值应取预应力筋极限强度标准值进行计算。

B.4 构造要求

B.4.1 桥梁混凝土构件的最小厚度不应小于100mm。

B.4.2 桥梁主要承重结构用锚栓，其公称直径不得小于12mm；按构造要求确定的锚栓深度 h_{ef} 不应小于80mm，且不应小于混凝土保护层厚度。

B.4.3 锚栓的最小边距 c_{min} 、临界边距 $c_{cr,N}$ 和群锚最小间距 s_{min} 、临界间距 $s_{cr,N}$ 应

符合表 4.3 的规定。

表 4.3 锚栓的间距和边距

c_{min}	$c_{cr,N}$	s_{min}	$s_{cr,N}$
$\geq 0.8h_{ef}$	$\geq 1.5h_{ef}$	$\geq 1.0h_{ef}$	$\geq 3.0h_{ef}$

B.4.4 在抗震设防区的承重结构中采用锚栓时，其埋深应分别符合表 4.4-1 和 4.4-2 的规定。

表 4.4-1 考虑地震作用扩底锚栓的埋深规定

锚栓直径 (mm)	12	16	20
有效锚固深度 h_{ef} (mm)	≥ 80	≥ 100	≥ 150

表 4.4-2 考虑地震作用胶粘型锚栓的埋深规定

锚栓直径 (mm)	12	16	20	24
有效锚固深度 h_{ef} (mm)	≥ 100	≥ 125	≥ 170	≥ 200

B.4.5 锚栓防腐标准应高于被固定物的防腐要求。

B.5 安装施工

B.5.1 锚栓孔的位置应符合设计要求。锚栓施工前，钻孔前应采用雷达原理的钢筋扫描仪探测桥梁构件内植筋和钢绞线位置分布，钢筋扫描仪需具有探测多层钢筋和钢绞线功能，严禁损伤原预应力钢束。

B.5.2 自扩底型锚栓安装，应采取有效措施，防止损坏锚栓头部的刀刀片。

B.5.3 锚栓区基材厚度、锚板孔径、锚固深度等构造措施应符合《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的规定，且应采取防止锚栓螺母松动和锚板滑移的措施。

B.5.4 化学锚栓施工应符合下列规定：

- 1 化学锚栓施工应按下列顺序：定位钻孔→清孔→注胶→静置固化。
- 2 定位钻孔前应用钢筋扫描仪探测钢筋位置，确定钢筋位置后，再按设计要求的孔位、孔径、孔深钻孔。为了避免钻孔打到主要受力钢筋，应采用具有雷达探测

原理的探测多层钢筋功能的扫描仪，对主筋和钢绞线探测定位，然后再避开主筋和钢绞线打孔。

3 清孔时，应用金属刷清理孔壁，然后用吹气筒或气泵深入孔底清灰尘。刷孔和吹灰步骤需要重复 3 次，直至孔中无灰尘。或采用无尘钻孔技术（电锤配吸尘器和空心钻头）施工，避免钻孔清孔过程产生大量灰尘。在化学锚栓注胶前监理应验孔，检查孔径，孔深，以及清孔是否到位。

4 注胶前应先让胶体充分混合，前 3 枪胶体应废弃。注胶时，锚固剂应采用专用的注射器（胶枪）从孔底部慢慢注入，胶枪逐渐往回，直到注满孔体积 2/3。当植筋深度超过 300mm，注胶应配合延长管从底部注胶，保证孔中饱满度，避免孔中残留大量空气。单向旋转插入螺杆，直到达到设计深度，并保证螺杆与孔壁之间的间隙均匀，矫正钢筋的位置和垂直度。

5 锚固剂完全固化前，不得触动或振动已植螺杆，以免影响其黏结性能。

B.5.5 机械锚栓施工应符合下列规定：

1 机械锚栓施工应按下列顺序：定位钻孔→清孔→安装。

2 定位钻孔前应用钢筋扫描仪探测钢筋位置，确定钢筋位置后，再按设计要求的孔位、孔径、孔深钻孔。为了避免钻孔打到主要受力钢筋，应采用具有雷达探测原理的探测多层钢筋功能的扫描仪，对主筋和钢绞线探测定位，最后确定钻孔位置并标记；自彻底锚栓钻孔时，应采用和锚栓匹配的专用限位钻孔钻头，不得采用普通钻头钻孔。

2 清孔时，应用金属刷清理孔壁，然后用吹气筒或气泵深入孔底清灰尘。刷孔和吹灰步骤需要重复 3 次，直至孔中无灰尘。或采用无尘钻孔技术（电锤配吸尘器和空心钻头）施工，避免钻孔清孔过程产生大量灰尘。在机械锚栓安装前前监理应验孔，检查孔径，孔深，以及清孔是否到位。

3 扩底型锚栓安装前，应按照产品说明书要求，对锚板开孔大小严格控制。安装锚栓工具应采用锚栓匹配专用安装工具安装，安装至锚栓螺杆露出安装到位标识环后停止。最后采用扭力扳手，紧固螺母，直至紧固到锚栓安装扭矩。

本规程用词用语说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用以下写法：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：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用词：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用词：正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规程的要求外，尚应符合国家和行业现行有关标准的相关规定”。

2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。

3) 当引用本规程中的其他规定时，表述为“应符合本规程第×章的有关规定”、“应符合本规程第×.×节的有关规定”、“应符合本规程第×.×.×条的有关规定”或“应按本规程第×.×.×条的有关规定执行”。