

UDC

中华人民共和国行业标准



CJJ/T 280-2018

备案号 J 2534-2018

纤维增强复合材料筋混凝土桥梁 技术标准

Technical standard for concrete bridge
with FRP reinforcements

2018-04-10 发布

2018-10-01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部 发布

中华人民共和国行业标准

纤维增强复合材料筋混凝土桥梁
技术标准

Technical standard for concrete bridge
with FRP reinforcements

CJJ/T 280 - 2018

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2 0 1 8 年 1 0 月 1 日

中国建筑工业出版社

2018 北 京

中华人民共和国行业标准
**纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁
技术标准**

Technical standard for concrete bridge
with FRP reinforcements
CJJ/T 280 - 2018

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：2 $\frac{3}{4}$ 字数：72 千字

2018年10月第一版 2018年10月第一次印刷

定价：**19.00** 元

统一书号：15112·32358

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

本社网址：<http://www.cabp.com.cn>

网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

中华人民共和国住房和城乡建设部 公 告

2018 第 51 号

住房和城乡建设部关于发布行业标准 《纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁 技术标准》的公告

现批准《纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁技术标准》为行业标准，编号为 CJJ/T 280-2018，自 2018 年 10 月 1 日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2018 年 4 月 10 日

前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2015年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标[2014]189号)的要求,标准编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国际标准和国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,编制了本标准。

本标准的主要技术内容是:1.总则;2.术语和符号;3.基本规定;4.材料;5.承载能力极限状态计算;6.正常使用极限状态验算;7.构造要求;8.施工与验收。

本标准由住房和城乡建设部负责管理,由上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司(地址:上海市东方路3447号,邮编:200125)。

本标准主编单位:上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司
同济大学

本标准参编单位:北京市市政工程设计研究总院有限公司
天津市市政工程设计研究院
深圳市市政设计研究院有限公司
中交第二公路勘察设计研究院有限公司
中国建筑第八工程局有限公司
南京锋晖复合材料有限公司
柳州欧维姆机械股份有限公司
德士达建材(广东)有限公司

深圳海川新材料科技股份有限公司
中铁二十三局集团有限公司
中国建筑第七工程局有限公司

本标准主要起草人员：薛伟辰 周 良 彭 飞 李雪峰
秦大航 朱 玉 陆元春 曹 景
陈宜言 谭 园 胡 翔 沈 锋
李 东 陆绍辉 钟庆明 李 明
马荣全 刘 婷 王晓辉 彭元诚
冯克岩 姜瑞娟 郑乔文 胡方健
张蜀泸 陆 勇 邓玮琳 孙学锋
张晓松 郑仁光 王 圆 彭 俊
闫兴非 刘智君 姜海西 董桔灿
庞忠华 肖 毅 刘民军
本标准主要审查人员：王用中 韩振勇 程为和 韩大章
李文杰 杨勇新 赵人达 向中富
张宇峰 许清风

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
3.1	一般规定	5
3.2	作用及结构计算	6
3.3	耐久性设计	6
4	材料	7
4.1	纤维增强复合材料筋	7
4.2	混凝土	8
4.3	钢筋	9
4.4	锚具系统	9
5	承载能力极限状态计算	11
5.1	一般规定	11
5.2	正截面承载力计算	11
5.3	斜截面承载力计算	25
5.4	持久状况构件应力计算	27
5.5	短暂状况构件应力计算	29
6	正常使用极限状态验算	32
6.1	一般规定	32
6.2	纤维增强复合材料筋预应力损失计算	36
6.3	抗裂与裂缝宽度验算	39
6.4	挠度验算	42
7	构造要求	45

7.1	一般规定	45
7.2	纤维增强复合材料筋锚固与搭接	45
7.3	纤维增强复合材料筋配筋率	46
7.4	纤维增强复合材料箍筋	47
7.5	预应力纤维增强复合材料筋	48
8	施工与验收	49
8.1	一般规定	49
8.2	纤维增强复合材料筋下料及安装	50
8.3	预应力纤维增强复合材料筋张拉	51
8.4	混凝土浇筑	51
	本标准用词说明	52
	引用标准名录	53
	附：条文说明	55

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	5
3.1	General Requirements	5
3.2	Load and Structural Calculation	6
3.3	Durability Requirements	6
4	Materials	7
4.1	FRP Reinforcement	7
4.2	Concrete	8
4.3	Steel Reinforcement	9
4.4	Anchorage System	9
5	Ultimate Limit States Design	11
5.1	General Requirements	11
5.2	Calculation of Flexural and Axial Capacity	11
5.3	Calculation of Shear Capacity	25
5.4	Calculation of Stress in FRP PC Member under Persistent Situation	27
5.5	Calculation of Stress of Member under Transient Situation ...	29
6	Checking of Serviceability Limit States	32
6.1	General Requirements	32
6.2	Loss of Prestress for FRP	36
6.3	Checking of Cracking and Crack Width	39
6.4	Checking of Deflection of Flexural Member	42

7	Detailing Requirements	45
7.1	General Requirements	45
7.2	Anchorage and Splices of FRP Reinforcement	45
7.3	Limits of Longitudinal FRP Reinforcement	46
7.4	Detailing of FRP Stirrup	47
7.5	Detailing of Prestressed FRP Reinforcement	48
8	Construction and Acceptance	49
8.1	General Requirements	49
8.2	Placement and Installation of FRP Reinforcement	50
8.3	FRP Tendon Prestressing	51
8.4	Concrete Casting	51
	Explanation of Working in This Standard	52
	List of Quoted Standards	53
	Addition; Explanation of Provisions	55

1 总 则

1.0.1 为使纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁的设计和施工符合安全可靠、适用耐久、技术先进、经济合理、绿色环保的要求，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于城市桥梁中纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁的设计、施工及验收。

1.0.3 纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁的设计、施工及验收除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 纤维 fiber

土木工程中所采用的各类高性能纤维，其种类主要为玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维和玄武岩纤维。

2.1.2 纤维增强复合材料筋 fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement

采用连续纤维为增强相，聚合物树脂为基体相，两相材料通过复合工艺组合而成的一种聚合物基复合材料，简称 FRP 筋。按纤维种类分，包括碳纤维增强复合材料筋 (CFRP 筋)、玻璃纤维增强复合材料筋 (GFRP 筋)、芳纶纤维增强复合材料筋 (AFRP 筋) 和玄武岩纤维增强复合材料筋 (BFRP 筋)。

2.1.3 普通 FRP 筋混凝土构件 FRP reinforced concrete (RC) member

配置受力的非预应力 FRP 筋的混凝土构件，简称普通 FRP 筋混凝土构件。

2.1.4 预应力 FRP 筋混凝土构件 FRP prestressed concrete (PC) member

配置受力的预应力 FRP 筋，通过张拉或其他方法建立预应力的混凝土构件。

2.1.5 FRP 筋混凝土桥梁 concrete bridge reinforced/prestressed with FRP reinforcements

配置受力的非预应力 FRP 筋或预应力 FRP 筋的混凝土桥梁。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能

E_c ——混凝土的弹性模量；

E_f ——FRP 筋的弹性模量；

E_s ——钢筋的弹性模量；

f_{ck} 、 f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

f_{fk} 、 f_{fd} ——FRP 筋的抗拉强度标准值、设计值；

f_{fpk} 、 f_{fpd} ——预应力 FRP 筋抗拉强度标准值、设计值；

f'_{sk} 、 f'_{sd} ——非预应力钢筋、预应力筋抗压强度设计值；

f_{sk} 、 f_{sd} ——非预应力钢筋抗拉强度标准值、设计值；

f_{tk} 、 f_{td} ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值。

2.2.2 作用与作用效应

M_d ——弯矩设计值；

M_{cr} ——受弯构件的正截面开裂弯矩值；

M_q ——按荷载效应准永久组合计算的弯矩；

N_d ——轴向力设计值；

V_d ——剪力设计值；

V_c ——构件斜截面上混凝土受剪承载力设计值；

V_f ——构件斜截面上箍筋受剪承载力设计值；

V_p ——构件斜截面上预应力筋受剪承载力设计值；

W_{fk} ——按荷载准永久组合或标准组合，并考虑长期作用影响的计算最大裂缝宽度；

σ_{fp} ——预应力 FRP 筋的应力；

σ_{fpe} ——预应力 FRP 筋的有效预应力；

$\Delta\sigma_{fp}$ ——预应力 FRP 筋的应力增量。

2.2.3 几何参数

a_f 、 a'_f ——纵向受拉、受压 FRP 筋的合力点至截面近边缘的距离；

a'_s ——受压区纵向钢筋面积重心至受压边缘的距离；

- A_c ——混凝土桥面板的截面面积；
 A_t 、 A'_t ——受拉区、受压区 FRP 筋的截面面积；
 A_{fp} ——预应力 FRP 筋的截面面积；
 A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向非预应力钢筋的截面面积；
 B ——受弯构件的截面刚度；
 b ——构件的截面宽度；
 b'_t ——T 形、I 形截面受压区的翼缘计算宽度；
 d ——FRP 筋的直径；
 d_b ——FRP 箍筋的直径；
 e_a 、 e_i ——附加、初始偏心距；
 h ——截面高度；
 h_0 ——截面有效高度；
 h'_t ——T 形、I 形截面受压区的翼缘高度；
 i ——偏心方向的截面回转半径；
 I ——截面惯性矩；
 L ——计算跨径；
 l_{tbl} ——FRP 弯钩处的尾长；
 r_b ——FRP 箍筋弯折半径；
 s ——沿构件长度方向上的箍筋间距或螺旋筋的间距；
 x ——混凝土受压区高度。

2.2.4 计算系数及其他

- α_E ——FRP 筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；
 ρ_t ——纵向受拉 FRP 筋的配筋率；
 ρ_{fv} ——FRP 箍筋的配筋率；
 ρ_{\min} ——受弯构件的纵向受拉 FRP 筋的最小配筋率；
 ϵ_{cu} ——正截面混凝土极限压应变；
 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；
 φ ——稳定系数；
 C_m ——构件端截面偏心距调整系数；
 η_{ns} ——弯矩放大系数。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 FRP 筋混凝土桥梁设计应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，并应采用分项系数的表达式进行设计。

3.1.2 FRP 筋混凝土桥梁应进行下列两类极限状态设计：

1 承载能力极限状态：对应于结构及其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态；

2 正常使用极限状态：对应于结构及其构件达到正常使用或耐久性的某项限值的状态。

3.1.3 FRP 筋混凝土桥梁应根据下列状况进行相应的极限状态设计：

1 持久状况：桥梁结构使用时的正常情况，该状况应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计，荷载组合应采用基本组合、标准组合、频遇组合或准永久组合；

2 短暂状况：桥梁结构出现的临时情况，包括结构施工和维修时的情况等，该状况应进行承载能力极限状态设计，必要时应进行正常使用极限状态设计，荷载组合应采用基本组合或标准组合等；

3 偶然状况：桥梁结构出现的异常情况，包括结构遭受撞击时的情况等，该状况应进行承载能力极限状态设计，荷载组合应采用偶然组合；

4 地震状况：桥梁结构遭受地震时的情况，该状况应进行承载能力极限状态设计，必要时应进行正常使用极限状态设计，荷载组合应采用地震组合。

3.1.4 普通 FRP 筋混凝土构件的 FRP 筋可选用 GFRP 筋、CFRP 筋、AFRP 筋或 BFRP 筋。

3.1.5 预应力 FRP 筋混凝土构件中纵向受力筋的选用可按下列规定执行：

1 预应力筋应选用 CFRP 筋、AFRP 筋；

2 非预应力筋在一般环境和一般冻融环境时可选用普通钢筋；在除冰盐环境、近海或海洋环境、盐结晶环境、大气污染环境以及化学腐蚀环境中，非预应力筋宜选用环氧涂层钢筋或不锈钢钢筋。

3.1.6 FRP 筋混凝土桥梁的设计基准期应为 100 年。

3.1.7 FRP 筋混凝土桥梁的安全等级应按现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的规定执行。

3.2 作用及结构计算

3.2.1 FRP 筋混凝土桥梁的作用、作用组合，应根据工程性质，按现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 或《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定执行。

3.2.2 FRP 筋混凝土桥梁应根据工程性质，按现行行业标准《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166、《公路工程抗震规范》JTG B02 或《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02 - 01 进行抗震设计。

3.2.3 FRP 筋混凝土桥梁应根据现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T D60 - 01 进行抗风设计。

3.3 耐久性设计

3.3.1 FRP 筋混凝土桥梁及构件的设计使用年限应符合现行行业标准《公路工程技术标准》JTG B01 的规定。

3.3.2 FRP 筋混凝土桥梁应按现行行业标准《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07 - 01 的规定确定所处环境类别以及环境作用等级。

3.3.3 FRP 筋混凝土桥梁中当使用普通钢筋作箍筋时，构件的保护层厚度应符合现行行业标准《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07 - 01 的规定。

4 材 料

4.1 纤维增强复合材料筋

4.1.1 CFRP 筋、AFRP 筋和 GFRP 筋应符合现行国家标准《结构工程用纤维增强复合材料筋》GB/T 26743 的规定，BFRP 筋应符合现行行业标准《纤维增强复合材料筋》JG/T 351 的规定。

4.1.2 GFRP 筋中的玻璃纤维应使用高强型、含碱量小于 0.8% 的无碱玻璃纤维或耐碱玻璃纤维，不得使用中碱玻璃纤维及高碱玻璃纤维。

4.1.3 FRP 筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率，弹性模量和伸长率应取平均值。FRP 筋的纤维体积含量不应小于 60%。桥梁用 FRP 筋的力学性能应符合表 4.1.3 的规定。

表 4.1.3 桥梁用 FRP 筋的主要力学性能指标

FRP 筋类型	抗拉强度标准值 (MPa)		弹性模量 (MPa)	伸长率 (%)
AFRP 筋	≥ 1300		$\geq 6.5 \times 10^4$	≥ 2.0
BFRP 筋	≥ 800		$\geq 5.0 \times 10^4$	≥ 1.6
CFRP 筋	≥ 1800		$\geq 14.0 \times 10^4$	≥ 1.5
GFRP 筋	$d \leq 10\text{mm}$	≥ 700	$\geq 4.5 \times 10^4$	≥ 1.8
	$10\text{mm} < d \leq 22\text{mm}$	≥ 600		≥ 1.5
	$d > 22\text{mm}$	≥ 500		≥ 1.3

4.1.4 非预应力 FRP 筋和预应力 FRP 筋的抗拉强度设计值应按下列公式确定：

$$f_{td} = \frac{f_{tk}}{\gamma_f \gamma_c} \quad (4.1.4-1)$$

$$f_{tdl} = \frac{f_{tk}}{\gamma_f \gamma_c} \quad (4.1.4-2)$$

式中： f_{fd} ——FRP 筋的抗拉强度设计值 (MPa)；
 f_{fdl} ——预应力 FRP 筋的抗拉强度设计值 (MPa)；
 f_{fpk} ——预应力 FRP 筋的抗拉强度标准值 (MPa)；
 f_{fk} ——FRP 筋的抗拉强度标准值 (MPa)；
 γ_f ——FRP 筋的分项系数，取 1.3；
 γ_c ——FRP 筋的环境影响系数，按表 4.1.4 取值。

表 4.1.4 FRP 筋的环境影响系数 γ_c

环境条件	纤维类型	γ_c
一般环境	CFRP	1.1
	AFRP	1.3
	GFRP	1.1
	BFRP	1.2
海洋环境 侵蚀性环境	CFRP	1.2
	AFRP	1.5
	GFRP	1.6 (强碱环境中取 2.0)
	BFRP	1.2

4.2 混 凝 土

4.2.1 混凝土强度等级应按边长为 150mm 立方体试件的抗压强度标准值确定。

4.2.2 FRP 筋混凝土桥梁主要受力构件混凝土强度等级应符合下列规定：

- 1 普通 FRP 筋混凝土构件不应低于 C30；
- 2 预应力 FRP 筋混凝土构件不应低于 C40。

4.2.3 混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 、轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 、轴心抗压强度设计值 f_{cd} 、轴心抗拉强度设计值 f_{td} 和弹性模量 E_c 应按表 4.2.3 采用。

表 4.2.3 混凝土强度标准值 (MPa)

强度等级	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{ck}	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
f_{tk}	2.01	2.20	2.40	2.51	2.65	2.71	2.85	2.93	3.00	3.05	3.10
f_{cd}	13.8	16.1	18.4	20.5	22.4	24.4	26.5	28.5	30.5	32.4	34.6
f_{td}	1.39	1.52	1.65	1.74	1.83	1.89	1.96	2.02	2.07	2.10	2.14
E_c	3.00×10^4	3.15×10^4	3.25×10^4	3.35×10^4	3.45×10^4	3.55×10^4	3.60×10^4	3.65×10^4	3.70×10^4	3.75×10^4	3.80×10^4

注：当采用引气剂及较高砂率的泵送混凝土且无实测数据时，表中 C50~C80 的 E_c 值应乘以折减系数 0.95。

4.2.4 混凝土的剪切模量 G_c 可按弹性模量 E_c 的 0.4 倍采用；混凝土的泊松比 ν_c 可取为 0.2；混凝土的温度线膨胀系数 α_c 可取为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

4.3 钢 筋

4.3.1 普通钢筋可选用 HPB300、HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 和 RRB400 钢筋，选用的钢筋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/T 1499.1 或《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：带肋钢筋》GB/T 1499.2 的规定。

4.3.2 环氧涂层钢筋的力学性能指标，应符合现行国家标准《钢筋混凝土用环氧涂层钢筋》GB/T 25826 的规定。

4.3.3 不锈钢钢筋的力学性能指标，应符合现行行业标准《钢筋混凝土用不锈钢钢筋》YB/T 4362 的规定。

4.4 锚具系统

4.4.1 预应力 FRP 筋锚具可采用机械式、黏结式或混合式的锚固方式。预应力 FRP 筋锚具应根据 FRP 筋的品种、张拉力值及

工程应用的环境类型选用适当类型的锚具，并应采取措施降低因锚固对 FRP 筋产生的环向剪切应力。

4.4.2 预应力 FRP 筋用锚具、夹具和连接器的静载锚固性能及疲劳性能应符合国家现行标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 和《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的有关规定。

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 当采用内力的形式表达时，FRP 筋混凝土桥梁构件的承载能力极限状态计算应采用下列表达式：

$$\gamma_0 S \leq R \quad (5.1.1)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构的重要性系数，对应于设计安全等级一级、二级、三级的 FRP 筋混凝土桥梁分别取不小于 1.1、1.0、0.9；

S ——作用组合（其中汽车荷载应计入冲击作用）的效应设计值；

R ——构件承载力设计值。

5.1.2 对于受弯构件，可不计入受压区 FRP 筋对正截面承载力的作用；对于受压构件，可计入受压区 FRP 筋对正截面承载力的作用。

5.1.3 当计算先张法预应力 FRP 筋混凝土构件端部锚固区的正截面和斜截面抗弯承载力时，锚固区内预应力 FRP 筋的抗拉强度设计值，在锚固起点应取为零，在锚固终点应取为 f_{fd} ，两点之间应按线性内插法取值。预应力 FRP 筋的预应力锚固长度 l_n 应按下列式计算：

$$l_n = \frac{f_{fd}}{8f_{td}} d \geq 65d \quad (5.1.3)$$

式中： f_{fd} ——预应力 FRP 筋的抗拉强度设计值；

f_{td} ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

d ——预应力 FRP 筋的直径（mm）。

5.2 正截面承载力计算

5.2.1 普通 FRP 筋混凝土受弯构件正截面受弯承载力应按下列

基本假定进行计算：

- 1 构件弯曲后，其截面仍保持平面；
- 2 不考虑截面混凝土的抗拉强度；
- 3 受拉 FRP 筋的应力等于 FRP 筋应变与弹性模量的乘积，

且不大于抗拉强度设计值 f_{fd} 。

5.2.2 纵向受拉 FRP 筋达到抗拉强度设计值与受压区混凝土破坏同时发生的相对界限受压区高度 ξ_{fb} ，可按下列式计算：

$$\xi_{fb} = \frac{\beta \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + f_{fd}/E_f} \quad (5.2.2)$$

式中： β ——混凝土等效矩形应力系数， β 按表 5.2.2 确定；

ϵ_{cu} ——正截面非均匀受压时混凝土的极限压应变，当混凝土强度等级为 C50 及以下时，取 $\epsilon_{cu} = 0.0033$ ；当混凝土强度等级为 C80 时，取 $\epsilon_{cu} = 0.003$ ；中间强度等级按线性内插法求得；

E_f ——FRP 筋的弹性模量 (MPa)；

f_{fd} ——FRP 筋的抗拉强度设计值 (MPa)。

表 5.2.2 混凝土等效矩形应力系数 β 值

混凝土强度等级	C50 及以下	C55	C60	C65	C70	C75	C80
β	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74

5.2.3 纵向受拉 FRP 筋达到抗拉强度设计值与受压区混凝土破坏同时发生的等效界限配筋率 $\rho_{ef,b}$ ，可按下列式计算：

$$\rho_{ef,b} = \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \xi_{fb} \quad (5.2.3)$$

式中： $\rho_{ef,b}$ ——当 FRP 筋与受压边缘混凝土同时达到极限应变时，构件的等效界限配筋率；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa)。

5.2.4 普通 FRP 筋混凝土受弯构件纵向受力 FRP 筋的等效配筋率 ρ_{ef} ，可按下列公式计算：

- 1 矩形截面或翼缘位于受拉边的 T 形截面：

$$\rho_{cf} = \frac{A_f}{b h_{of}} \quad (5.2.4-1)$$

2 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面：

$$\rho_{cf} = \frac{A_f}{b h_{of}} - \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{(b'_f - b) h'_f}{b h_{of}} \quad (5.2.4-2)$$

式中： h'_f ——T 形、I 形截面受压区的翼缘高度 (mm)；

b ——矩形截面的宽度或 T 形、I 形截面的腹板宽度 (mm)；

b'_f ——T 形、I 形截面受压区的翼缘有效宽度 (mm)；对于矩形截面，取 $b'_f = b$ ；

h_{of} ——截面有效高度 (mm)；

A_f ——受拉区纵向 FRP 筋的截面面积 (mm^2)。

5.2.5 矩形截面或翼缘位于受拉边的 T 形截面普通 FRP 筋混凝土受弯构件，其正截面受弯承载力应符合下列规定：

1 当 $\rho_{cf} \leq 1.5\rho_{cf,b}$ 时：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{fd} A_f \left(h_{of} - \frac{x}{2} \right) \quad (5.2.5-1)$$

混凝土受压区高度 x 应按下式计算：

$$x = \left(0.25 + 0.75 \frac{\rho_{cf}}{\rho_{cf,b}} \right) \xi_{fb} h_{of} \quad (5.2.5-2)$$

2 当 $\rho_{cf} > 1.5\rho_{cf,b}$ 时：

$$\gamma_0 M_d \leq \sigma_f A_f \left(h_{of} - \frac{x}{2} \right) \quad (5.2.5-3)$$

混凝土受压区高度 x 和 FRP 筋的应力 σ_f 应按下列公式计算：

$$f_{cd} b x = \sigma_f A_f \quad (5.2.5-4)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_{cu} \left(\frac{\beta h_{of}}{x} - 1 \right) \leq f_{fd} \quad (5.2.5-5)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；

M_d ——弯矩设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)；

x ——等效矩形应力图的混凝土受压区高度 (mm)；

σ_f ——FRP 筋的应力 (MPa);

ρ_{ef} ——受拉区纵向 FRP 筋的等效配筋率, 按本标准式 (5.2.4-1) 计算。

5.2.6 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面 FRP 筋混凝土受弯构件 (图 5.2.6), 其正截面承载力计算应符合下列规定:

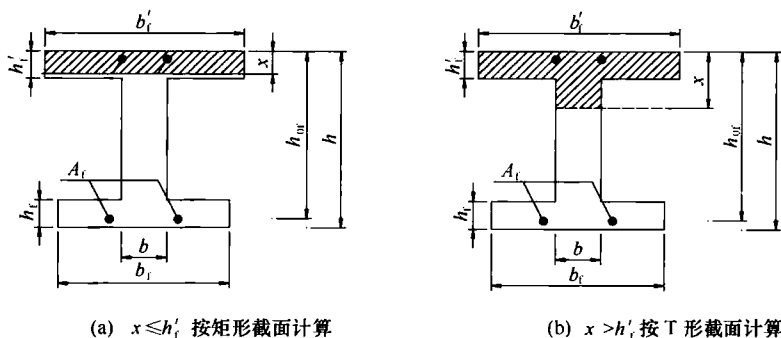


图 5.2.6 T 形、I 形截面 FRP 筋混凝土受弯构件正截面承载力计算

1 当按本标准第 5.2.5 条计算满足 $x \leq h'_f$ 时, 应按宽度为 b'_f 的矩形截面计算;

2 当按本标准第 5.2.5 条计算不满足 $x \leq h'_f$ 时, 应符合下列规定:

1) 当 $\rho_{ef} \leq 1.5\rho_{ef,b}$ 时:

$$\gamma_0 M_d \leq f_{td} A_f \left(h_{0f} - \frac{x}{2} \right) + \alpha f_{cd} (b'_f - b) h'_f \left(\frac{x}{2} - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (5.2.6-1)$$

混凝土受压区高度 x , 应按下式计算:

$$x = \left[\left(0.15 + 0.1 \frac{b'_f}{b} \right) + \left(0.85 - 0.1 \frac{b'_f}{b} \right) \frac{\rho_{ef}}{\rho_{ef,b}} \right] \xi_{fb} h_{0f} \quad (5.2.6-2)$$

混凝土受压区等效矩形应力图形的强度折减系数 α , 应按下式计算:

$$\alpha f_{cd} b x + \alpha f_{cd} (b'_f - b) h'_f = f_{td} A_f \quad (5.2.6-3)$$

2) 当 $\rho_{cf} > 1.5\rho_{cf,1}$ 时:

$$\gamma_0 M_d \leq \sigma_f A_f \left(h_{0f} - \frac{x}{2} \right) + f_{cd} (b'_f - b) h'_f \left(\frac{x}{2} - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (5.2.6-4)$$

混凝土受压区高度 x 和 FRP 筋应力 σ_f , 应按下列公式计算:

$$f_{cd} b x + f_{cd} (b'_f - b) h'_f = \sigma_f A_f \quad (5.2.6-5)$$

$$\sigma_f = E_f \epsilon_{cu} \left(\frac{\beta h_{0f}}{x} - 1 \right) \leq f_{fd} \quad (5.2.6-6)$$

式中: ρ_{cf} ——受拉区纵向 FRP 筋的配筋率, 按本标准式 (5.2.4-2) 计算;

α ——混凝土受压区等效矩形应力图形的强度折减系数;
当 $\alpha > 1$ 时, 取 $\alpha = 1.0$ 。

5.2.7 同时配置预应力 FRP 筋和非预应力钢筋的混凝土受弯构件, 其正截面受弯承载力应按下列基本假定进行计算:

- 1 构件弯曲后, 其截面仍保持平面;
- 2 不考虑截面混凝土的抗拉强度;
- 3 预应力 FRP 筋的应力等于 FRP 筋应变与弹性模量的乘积, 且不大于抗拉强度设计值 $f_{f,td}$;
- 4 构件内纵向非预应力钢筋的应力等于钢筋应变与其弹性模量的乘积, 但其值符合下式的要求:

$$f'_{sd} \leq \sigma_s \leq f_{sd} \quad (5.2.7)$$

式中: σ_s ——纵向非预应力钢筋的应力 (MPa);

f_{sd} 、 f'_{sd} ——纵向非预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值 (MPa)。

5.2.8 纵向非预应力受拉钢筋屈服与受压区混凝土破坏同时发生时的相对界限受压区高度 $\xi_{s,b}$, 可按下列公式计算:

$$\xi_{s,b} = \frac{\beta \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + f_{sd}/E_s} \quad (5.2.8)$$

式中: E_s ——纵向受拉钢筋的弹性模量 (MPa)。

5.2.9 纵向预应力 FRP 筋达到抗拉强度设计值与受压区混凝土破坏同时发生的相对界限受压区高度 $\xi_{fp,b}$, 可按下列公式计算:

$$\xi_{\text{frp},b} = \frac{\beta \varepsilon_{\text{cu}}}{\varepsilon_{\text{cu}} + (f_{\text{fpd}} - \sigma_{\text{fp0}}) / E_{\text{frp}}} \quad (5.2.9)$$

式中： E_{frp} ——预应力 FRP 筋的弹性模量 (MPa)；

σ_{fp0} ——预应力 FRP 筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力 FRP 筋的应力 (MPa)，按本标准第 6.1.5 条确定；

f_{fpd} ——预应力 FRP 筋的抗拉强度设计值 (MPa)。

5.2.10 纵向预应力 FRP 筋达到抗拉强度设计值与受压区混凝土破坏同时发生的等效界限配筋率 $\rho_{\text{efp},b}$ ，可按式计算：

$$\rho_{\text{efp},b} = \frac{f_{\text{cd}}}{f_{\text{fpd}}} \xi_{\text{frp},b} \quad (5.2.10)$$

5.2.11 同时配置预应力 FRP 筋和非预应力钢筋的混凝土受弯构件，其等效配筋率 ρ_{efp} 可按下列公式计算：

1 矩形截面或翼缘位于受拉边的 T 形截面受弯构件：

$$\rho_{\text{efp}} = \frac{A_{\text{frp}}}{bh_{\text{ofp}}} + \frac{A_s}{bh_{\text{ofp}}} \frac{f_{\text{sd}}}{f_{\text{fpd}}} - \frac{A'_s}{bh_{\text{ofp}}} \frac{f'_{\text{sd}}}{f_{\text{fpd}}} \quad (5.2.11-1)$$

2 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面受弯构件：

$$\rho_{\text{efp}} = \frac{A_{\text{frp}}}{bh_{\text{ofp}}} + \frac{A_s}{bh_{\text{ofp}}} \frac{f_{\text{sd}}}{f_{\text{fpd}}} - \frac{A'_s}{bh_{\text{ofp}}} \frac{f'_{\text{sd}}}{f_{\text{fpd}}} - \frac{f_{\text{cd}}}{f_{\text{fpd}}} \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_{\text{ofp}}} \quad (5.2.11-2)$$

式中： A_{frp} ——受拉区纵向预应力 FRP 筋的截面面积 (mm^2)；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向非预应力钢筋的截面面积 (mm^2)；

h_{ofp} ——预应力 FRP 筋力作用点到构件顶面的距离 (mm)。

5.2.12 矩形截面或翼缘位于受拉边的 T 形截面预应力 FRP 筋混凝土受弯构件，其正截面受弯承载力应符合下列规定：

1 当 $\rho_{\text{efp}} < \rho_{\text{efp},b}$ 时：

$$\gamma_0 M_d \leq A'_s f'_{\text{sd}} \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) + A_s f_{\text{sd}} \left(h_{\text{os}} - \frac{x}{2} \right) + A_{\text{frp}} f_{\text{fpd}} \left(h_{\text{ofp}} - \frac{x}{2} \right) \quad (5.2.12-1)$$

混凝土受压区高度 x 应按式计算：

$$x = \left(0.25 + 0.75 \frac{\rho_{\text{efp}}}{\rho_{\text{efp},b}} \right) \xi_{\text{fp},b} h_{0\text{fp}} \quad (5.2.12-2)$$

2 当 $\rho_{\text{efp}} \geq \rho_{\text{efp},b}$ 时:

$$\gamma_0 M_d \leq A'_s f'_{\text{sd}} \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) + A_s f_{\text{sd}} \left(h_{0s} - \frac{x}{2} \right) + A_{\text{fp}} \sigma_{\text{fp}} \left(h_{0\text{fp}} - \frac{x}{2} \right) \quad (5.2.12-3)$$

混凝土受压区高度 x 和预应力 FRP 筋的应力 σ_{fp} 应按下列公式计算:

$$f_{\text{cd}} b x = A_s f_{\text{sd}} - A'_s f'_{\text{sd}} + A_{\text{fp}} \sigma_{\text{fp}} \quad (5.2.12-4)$$

$$x = \frac{\beta \epsilon_{\text{cu}}}{\epsilon_{\text{cu}} + (\sigma_{\text{fp}} - \sigma_{\text{fp},k}) / E_{\text{fp}}} h_{0\text{fp}} \quad (5.2.12-5)$$

混凝土受压区高度 x 应符合下列公式要求:

$$x \leq \xi_{s,b} h_{0\text{fp}} \quad (5.2.12-6)$$

$$x \geq 2a'_s \quad (5.2.12-7)$$

式中: σ_{fp} ——预应力 FRP 筋的应力 (MPa);

$\rho_{\text{efp},b}$ ——等效界限配筋率,按本标准式 (5.2.10) 计算;

ρ_{efp} ——等效配筋率,按本标准式 (5.2.11-1) 计算;

h_{0s} ——受拉区纵向钢筋面积重心至构件顶面的距离 (mm);

a'_s ——受压区纵向钢筋面积重心至构件顶面的距离 (mm)。

5.2.13 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面预应力 FRP 筋混凝土受弯构件 (图 5.2.13), 其正截面承载力计算应符合下列规定:

1 当按本标准第 5.2.12 条计算满足 $x \leq h'_f$ 时, 应按宽度为 b'_f 的矩形截面计算:

2 当按本标准第 5.2.12 条计算不满足 $x \leq h'_f$ 时, 应符合下列规定:

1) 当 $\rho_{\text{efp}} < \rho_{\text{efp},b}$ 时:

$$\gamma_0 M_d \leq A'_s f'_{\text{sd}} \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) + A_s f_{\text{sd}} \left(h_{0s} - \frac{x}{2} \right) + A_{\text{fp}} f_{\text{fpk}} \left(h_{0\text{fp}} - \frac{x}{2} \right)$$

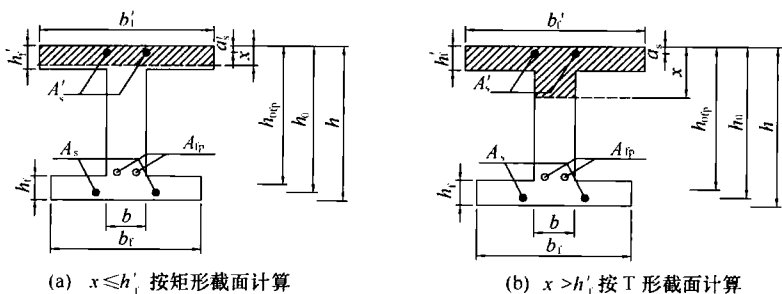


图 5.2.13 T形、I形截面预应力 FRP 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算

$$+ \alpha f_c (b'_f - b) h'_f \left(\frac{x}{2} - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (5.2.13-1)$$

混凝土受压区高度 x ，应按下式计算：

$$x = \left[\left(0.15 + 0.1 \frac{b'_f}{b_w} \right) + \left(0.85 - 0.1 \frac{b'_f}{b_w} \right) \frac{\rho_{\text{efp}}}{\rho_{\text{efp},h}} \right] \xi_{\text{fp},h} h_{\text{ofp}} \quad (5.2.13-2)$$

混凝土受压区等效矩形应力图形的强度折减系数 α ，应按下式计算：

$$\alpha f_{\text{cd}} b x + \alpha f_{\text{cd}} (b'_f - b) h'_f + f'_{\text{sd}} A'_s = f_{\text{sd}} A_s + f_{\text{fp}} A_{\text{fp}} \quad (5.2.13-3)$$

2) 当 $\rho_{\text{efp}} \geq \rho_{\text{efp},h}$ 时：

$$\gamma_0 M_d \leq A'_s f'_{\text{sd}} \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) + A_s f_{\text{sd}} \left(h_{\text{os}} - \frac{x}{2} \right) + A_{\text{fp}} \sigma_{\text{fp}} \left(h_{\text{ofp}} - \frac{x}{2} \right) + f_c (b'_f - b) h'_f \left(\frac{x}{2} - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (5.2.13-4)$$

混凝土受压区高度 x 和预应力 FRP 筋应力 σ_{fp} 应按下列公式计算：

$$f_{\text{cd}} b x + f_{\text{cd}} (b'_f - b) h'_f + f'_{\text{sd}} A'_s = f_{\text{sd}} A_s + \sigma_{\text{fp}} A_{\text{fp}} \quad (5.2.13-5)$$

$$x = \frac{\beta \epsilon_{\text{cu}}}{\epsilon_{\text{cu}} + (\sigma_{\text{fp}} - \sigma_{\text{fp}^*}) / E_{\text{fp}}} h_{\text{ofp}} \quad (5.2.13-6)$$

式中： ρ_{efp} ——等效配筋率，按本标准式 (5.2.11-2) 计算；

α ——混凝土受压区等效矩形应力图形的强度折减系数；
当 $\alpha > 1$ 时，取 $\alpha = 1.0$ 。

5.2.14 体外预应力 FRP 钢筋混凝土受弯构件（图 5.2.14），其正截面受弯承载力应满足下式要求：

$$\gamma_0 M_d \leq f'_{sd} A'_s \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) + f_{sd} A_s \left(h_{0s} - \frac{x}{2} \right) + A_{fp} \sigma_{fpu} \left(h_{ofp} - \frac{x}{2} - \delta_c \right) \cos \varphi + f_{cd} (b'_f - b) h'_f \left(\frac{x}{2} - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (5.2.14)$$

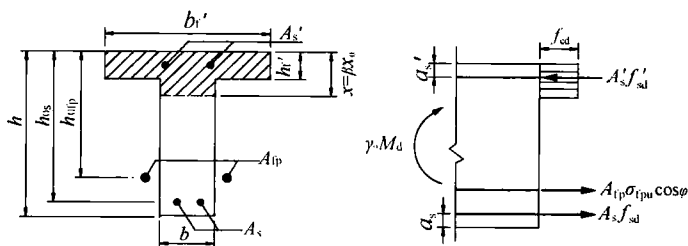


图 5.2.14 体外预应力 FRP 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算

式中： A_{fp} ——体外预应力 FRP 筋的截面面积（ mm^2 ）；

σ_{fpu} ——体外预应力 FRP 筋的极限应力（MPa），按本标准第 5.2.15 条计算；

x ——混凝土受压区高度（mm），取 βx_0 ；

x_0 ——极限状态时的中和轴高度（mm），按本标准第 5.2.17 条计算；

h_{ofp} ——体外预应力 FRP 筋合力点距构件顶面的距离（mm）；

b'_f ——T 形、I 形截面受压区的腹板计算宽度（mm）；对于矩形截面，取 $b'_f = b$ ；对于 T 形、I 形截面，当 $x \leq h'_f$ 时，取 $b'_f = b$ 重新计算；

φ ——临界截面处体外预应力 FRP 筋与构件水平方向的夹角（rad）；

δ_c ——体外预应力 FRP 筋偏心距损失 (mm)，按本标准第 5.2.16 条计算。

5.2.15 体外预应力 FRP 筋极限应力 σ_{fpu} ，应按下式计算：

$$\sigma_{fpu} = \sigma_{fp0} + \Delta\sigma_{fpu} \leq f_{fpd} \quad (5.2.15)$$

式中： $\Delta\sigma_{fpu}$ ——体外预应力 FRP 筋的极限应力增量 (MPa)，按本标准第 5.2.18 条计算。

5.2.16 体外预应力 FRP 筋偏心距损失 δ_c ，可按下列公式计算：

1 跨中无转向块：

$$\delta_c = \frac{\epsilon_{cu} L_p L_c}{4x_0} \quad (5.2.16-1)$$

2 跨中截面设置一个转向块：

$$\delta_c = 0 \quad (5.2.16-2)$$

3 跨中对称设置两个转向块 (图 5.2.16)：

$$\delta_c = \frac{\epsilon_{cu} L_p L_c}{4x_0} \left[1 - \frac{3\Delta_1}{L} + \frac{2\Delta_1^2}{L^2} \right] \quad (5.2.16-3)$$

式中： Δ_1 ——转向块至邻近支座的水平距离 (mm)；

L ——支座间的水平距离 (mm)；

L_p ——等效塑性铰区长度 (mm)，取决于荷载的类型；

对于均布荷载作用， $L_p = L/3 + h_{0s}$ ；对于跨中单个

集中荷载， $L_p = L/10 + h_{0s}$ ；对于跨中两个对称集

中荷载， $L_p = L - 2a + h_{0s}$ ；

a ——加载点至支座的距离 (mm)。

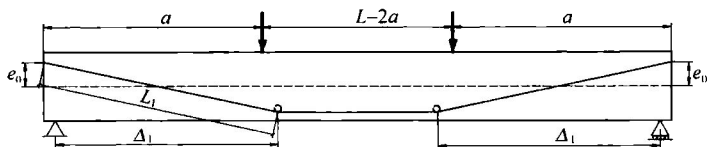


图 5.2.16 体外预应力 FRP 筋混凝土受弯构件示意

5.2.17 体外预应力 FRP 筋混凝土受弯构件的中和轴高度 x_0 ，

可按下列公式计算：

$$A_1 x_0^3 + B_1 x_0^2 + C_1 x_0 + D_1 = 0 \quad (5.2.17-1)$$

$$A_1 = \beta f_{cl} b \quad (5.2.17-2)$$

$$B_1 = (f'_{sl} A'_s - f_{sl} A_s - A_{fp} \sigma_{\eta s} \cos \varphi) + f_{cl} (b'_f - b) h'_f \quad (5.2.17-3)$$

$$C_1 = -\frac{E_{fp}}{L_{fp}} X_1 A_{fp} \epsilon_{cu} \cos \varphi \quad (5.2.17-4)$$

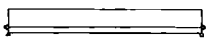
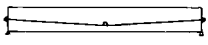
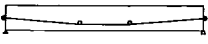
$$D_1 = -\frac{E_{fp}}{L_{fp}} Y_1 A_{fp} \epsilon_{cu}^2 \cos \varphi \quad (5.2.17-5)$$

式中： X_1 、 Y_1 ——计算参数，按表 5.2.17 进行计算；

E_{fp} ——体外预应力 FRP 筋的弹性模量 (MPa)；

L_{fp} ——锚固端之间的体外预应力 FRP 筋总长度 (mm)。

表 5.2.17 体外预应力 FRP 筋混凝土受弯构件
正截面受弯承载力计算参数

体外预应力 FRP 筋线形	X_1 (mm ²)	Y_1 (mm ³)
	$\frac{3}{2} L_{fp} e_0 \cos \varphi$	0
	$\frac{3}{2} e_0 L_{fp} \cos \varphi + \frac{1}{2} L_{fp} L \sin \varphi$	$\frac{L_p^2 L^2 \cos^2 \varphi}{16 L_1}$
	$\frac{3}{2} L_{fp} e_0 \cos \varphi + \left(\frac{3}{2} - \frac{\Delta_1}{L} \right) L_{fp} \Delta_1 \sin \varphi$	$\frac{\Delta_1^2 L_{fp}^2 \cos^2 \varphi}{4 L_1} \left(\frac{3}{2} - \frac{\Delta_1}{L} \right)^2$

注： e_0 为锚固端距梁中线的距离 (mm)，向下为正； L_1 为锚固端到靠近转向块之间的距离 (mm)。

5.2.18 体外预应力 FRP 筋的极限应力增量 $\Delta \sigma_{fp}$ ，可按下式计算：

$$\Delta \sigma_{fp} = \frac{E_{fp}}{L_{fp}} \left(X_1 + Y_1 \frac{\epsilon_{cu}}{x_0} \right) \frac{\epsilon_{cu}}{x_1} \quad (5.2.18)$$

5.2.19 FRP 筋混凝土轴心受压构件的正截面承载力，应符合下式要求：

$$\gamma_0 N_d \leq 0.90 \varphi (f_{cl} A + 0.002 E_f A'_f) \quad (5.2.19)$$

式中： N_d ——轴向力设计值（N）；

φ ——稳定系数，按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定确定；

A'_f ——全部纵向 FRP 筋的截面面积（ mm^2 ）；

A ——构件截面面积（ mm^2 ）。当纵向 FRP 筋的配筋率大于 3% 时， $A=A-A'_f$ 。

5.2.20 弯矩作用平面内截面对称的偏心受压构件，当同一主轴方向的杆端弯矩比（ M_{d1}/M_{d2} ）不大于 0.9 且轴压比不大于 0.9 时，若构件的长细比满足式（5.2.10）的要求，可不考虑轴向压力在该方向挠曲杆件中产生的附加弯矩影响；否则应根据本标准第 5.2.21 条的规定，按截面的两个主轴方向分别考虑轴向压力在挠曲杆件中产生的附加弯矩影响。

$$\frac{l_0}{i} \leq 29 - 12 \left(\frac{M_{d1}}{M_{d2}} \right) \quad (5.2.20)$$

式中： M_{d1} 、 M_{d2} ——分别为已考虑侧移影响的偏心受压构件两端截面按结构弹性分析确定的对同一主轴的组合弯矩设计值（N·mm），绝对值较大端为 M_{d2} ，绝对值较小端为 M_{d1} ，当构件按单曲率弯曲时， M_{d1}/M_{d2} 取正值，否则取负值；

l_0 ——构件的计算长度，可近似取偏心受压构件相应主轴方向上下支撑点之间的距离（mm）；

i ——偏心方向的截面回转半径（mm）。

5.2.21 FRP 筋混凝土偏心受压构件考虑轴向压力在挠曲杆件中产生的二阶效应后控制截面的弯矩设计值，应按下列公式计算：

$$M_d = C_m \eta_{ns} M_{d2} \quad (5.2.21-1)$$

$$C_m = 0.7 + 0.3 \frac{M_{d1}}{M_{d2}} \quad (5.2.21-2)$$

$$\eta_{ns} = 1 + \frac{1}{1000 (M_{d2}/N_d + e_a)/h_0} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_c \quad (5.2.21-3)$$

$$\zeta_c = \frac{0.5f_{cd}A}{N_d} \quad (5.2.21-4)$$

- 式中： C_m ——构件端截面偏心距调整系数，小于 0.7 时取 0.7；
 η_{ms} ——弯矩放大系数；
 N_d ——与弯矩设计值 M_{d12} 相应的轴向力设计值 (N)；
 e_a ——附件偏心距，取 20mm 和偏心方向截面最大尺寸的 1/30 中的较大值；
 ζ_c ——截面曲率修正系数，计算值大于 1.0 时取 1.0；
 h ——截面高度 (mm)；对于圆形截面，取直径；
 h_0 ——截面有效高度 (mm)；
 A ——构件截面面积 (mm^2)。

5.2.22 矩形截面 FRP 筋混凝土偏心受压构件正截面受压承载力，应符合下列公式要求：

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd}bx - \sigma_f A_f + \sigma'_f A'_f \quad (5.2.22-1)$$

$$\gamma_0 N_d e \leq f_{cd}bx \left(h_{0f} - \frac{x}{2} \right) + \sigma'_f A'_f (h_{0f} - a'_f) \quad (5.2.22-2)$$

$$\sigma_f = E_f \epsilon_{cu} \left(\frac{\beta h_{0f}}{x} - 1 \right) \leq f_{fd} \quad (5.2.22-3)$$

$$\sigma'_f = E_f \epsilon_{cu} \left(1 - \frac{\beta a'_f}{x} \right) \leq f'_{fd} \quad (5.2.22-4)$$

$$e = e_i + \frac{h}{2} - a_f \quad (5.2.22-5)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (5.2.22-6)$$

式中： x ——混凝土受压区高度 (mm)；

A_f 、 A'_f ——受拉区、受压区纵向 FRP 筋的截面面积 (mm^2)；

f'_{fd} ——FRP 筋抗压强度设计值 (MPa)，可取为抗拉强度设计值的 50%；

e_i ——初始偏心距 (mm)；

e_0 ——轴向压力对截面重心的偏心距 (mm)，取为 M_d/N_d ，当需要考虑二阶效应时， M_d 为按本标准第 5.2.21

条确定的弯矩设计值；

a_f 、 a'_f ——纵向受拉和受压 FRP 筋的合力点至截面近边缘的距离 (mm)；

σ_f 、 σ'_f ——受拉区、受压区纵向 FRP 筋的应力 (MPa)， σ_f 受拉为正， σ'_f 受压为正。

5.2.23 沿周边均匀配置纵向 FRP 筋的圆形截面偏心受压构件 (图 5.2.23)，其正截面受压承载力应符合下列公式要求：

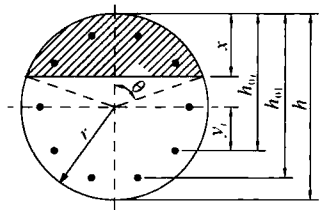


图 5.2.23 圆形截面 FRP 筋混凝土偏心受压构件正截面承载力计算

$$\gamma_0 N_d e_i \leq \frac{2}{3} f_{cd} r^3 \sin^3 \theta + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} (r - y_i) \quad (5.2.23-1)$$

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd} r^2 (\theta - \sin \theta \cos \theta) + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} \quad (5.2.23-2)$$

$$\cos \theta = 1 - \frac{x}{r} \quad (5.2.23-3)$$

$$\sigma_{fi} = E_f \epsilon_{cu} \left(\frac{\beta h_{oi}}{x} - 1 \right) \quad (5.2.23-4)$$

式中： x ——混凝土受压区高度 (mm)；

r ——圆形截面半径 (mm)；

e_i ——初始偏心距 (mm)，按本标准式 (5.2.22-6) 确定；

θ ——对应于混凝土受压区截面面积的圆心角的 1/2 (rad)， $0 \leq \theta \leq \pi$ ；

A_{fi} ——第 i 层 FRP 筋的面积 (mm^2)；

h_{oi} ——第 i 层 FRP 筋到构件受压顶面的距离 (mm)；

y_i ——第 i 层 FRP 筋到构件中心线的距离 (mm)；

σ_{li} ——对应于第 i 层 FRP 筋的应力 (MPa), 受拉为正。

5.3 斜截面承载力计算

5.3.1 普通 FRP 筋混凝土构件及预应力 FRP 筋混凝土构件的斜截面承载力计算位置和抗剪截面尺寸要求, 应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定。

5.3.2 配置 FRP 箍筋的普通 FRP 筋混凝土构件的斜截面受剪承载力, 应符合下式要求:

$$\gamma_n V_d \leq V_c + V_f \quad (5.3.2)$$

式中: V_d ——构件斜截面上的最大剪力设计值 (N);

V_c ——构件斜截面上混凝土受剪承载力设计值 (N), 按本标准第 5.3.3 条确定;

V_f ——构件斜截面上箍筋受剪承载力设计值 (N), 按本标准第 5.3.4 条确定。

5.3.3 FRP 筋混凝土受弯构件斜截面上混凝土受剪承载力设计值, 应按下列公式计算:

$$V_c = 0.37 \sqrt{f_{ct}} b x_u \quad (5.3.3-1)$$

$$x_u = k h_{0f} \quad (5.3.3-2)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f \alpha_{FE} + (\rho_f \alpha_{FE})^2} - \rho_f \alpha_{FE} \quad (5.3.3-3)$$

$$\rho_f = A_f / b h_{0f} \quad (5.3.3-4)$$

式中: b ——矩形截面的宽度, T 形截面或 I 形截面的腹板宽度 (mm);

x_u ——截面中和轴到受压区边缘的距离 (mm);

k ——截面中和轴到受压区边缘的距离与截面有效高度之比;

A_f ——纵向受拉 FRP 筋截面面积 (mm^2);

ρ_f ——纵向受拉 FRP 筋配筋率;

α_{FE} ——FRP 筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值。

5.3.4 FRP 筋混凝土受弯构件斜截面上 FRP 箍筋受剪承载力设计值，应按下列公式计算：

1 当配置垂直于构件轴线的箍筋时：

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} h_{0f}}{s} \quad (5.3.4-1)$$

$$A_{fv} = nA_{fv1} \quad (5.3.4-2)$$

2 当配置不垂直于构件轴线的箍筋时：

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} h_{0f}}{s} (\sin\alpha + \cos\alpha) \quad (5.3.4-3)$$

3 当配置连续 FRP 矩形螺旋箍筋时：

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} h_{0f}}{s} \sin\alpha \quad (5.3.4-4)$$

式中： A_{fv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积 (mm^2)；

n ——同一截面内箍筋的肢数；

A_{fv1} ——单肢箍筋的截面面积 (mm^2)；

f_{fv} ——箍筋的弯拉强度设计值 (MPa)，按本标准第 5.3.5 条确定；

s ——沿构件长度方向上的箍筋间距或螺旋筋的间距 (mm)；

α ——倾斜箍筋或螺旋筋与构件纵向轴线的夹角 (rad)。

5.3.5 FRP 箍筋的弯拉强度设计值，应按下列公式确定：

$$f_{fv} = \left(0.3 + 0.05 \frac{r_b}{d_b}\right) f_{fd} \leq 0.004E_f \quad (5.3.5)$$

式中： f_{fd} ——FRP 箍筋直线段抗拉强度设计值 (MPa)；

d_b ——FRP 箍筋的直径 (mm)；

r_b ——FRP 箍筋的弯曲半径 (mm)；

E_f ——FRP 箍筋的弹性模量 (MPa)。

5.3.6 预应力 FRP 筋混凝土构件的斜截面受剪承载力，应符合下列要求：

$$\gamma_0 V_d \leq V_c + V_f + V_p \quad (5.3.6)$$

式中： V_c ——构件斜截面上混凝土受剪承载力设计值（N），按本标准第 5.3.7 条计算；

V_f ——构件斜截面上箍筋受剪承载力设计值（N），按本标准第 5.3.4 条计算；

V_p ——预应力 FRP 筋竖向分力承担的剪力设计值（N），按本标准第 5.3.8 条计算。

5.3.7 预应力 FRP 筋混凝土构件斜截面上混凝土受剪承载力设计值，可按下式计算：

$$V_c = 0.15\sqrt{f_{cd}}bh_{0f} \quad (5.3.7)$$

5.3.8 预应力 FRP 筋竖向分力承担的剪力设计值，可按下式计算：

$$V_p = \sigma_{fpk}A_{fp}\sin\theta \quad (5.3.8)$$

式中： σ_{fpk} ——计算截面处预应力 FRP 筋的有效预应力（MPa），按本标准第 6.1.5 条计算；

θ ——计算截面处预应力 FRP 筋与构件轴线方向的夹角。

5.4 持久状况构件应力计算

5.4.1 按持久状况设计的预应力 FRP 筋混凝土受弯构件，应计算其使用阶段正截面混凝土的法向压应力、受拉区预应力 FRP 筋的拉应力和斜截面混凝土的主压应力。计算时作用取其标准值，汽车荷载应计入冲击系数。

5.4.2 未开裂预应力 FRP 筋混凝土受弯构件，由作用标准值产生的混凝土法向应力和预应力 FRP 筋的应力增量，应按下列公式计算：

1 混凝土法向压应力 σ_{kc} 和拉应力 σ_{kt} ：

$$\sigma_{kc} \text{ 或 } \sigma_{kt} = \frac{M_k}{I_0}y_0 \quad (5.4.2-1)$$

2 预应力 FRP 筋的应力增量 $\Delta\sigma_{fp}$ ：

$$\Delta\sigma_{fp} = \alpha_E\sigma_{kt} \quad (5.4.2-2)$$

式中： M_k ——按作用标准值组合计算的弯矩值（ $N \cdot mm$ ）；

I_0 ——换算截面惯性矩（ mm^4 ）；

y_0 ——构件换算截面重心轴至受压区或受拉区计算点处的距离（ mm ）。

5.4.3 允许开裂的预应力 FRP 筋混凝土受弯构件，由作用标准值产生的混凝土法向压应力和预应力 FRP 筋的应力增量，应按下列公式计算：

1 开裂截面混凝土压应力 σ_{cc} ：

$$\sigma_{cc} = \frac{N_{p0}}{A_{cr}} + \frac{N_{p0}e_{0N}c}{I_{cr}} \quad (5.4.3-1)$$

$$e_{0N} = e_N + c \quad (5.4.3-2)$$

$$e_N = \frac{M_k \pm M_{p2}}{N_{p0}} - h_{ps} \quad (5.4.3-3)$$

$$h_{ps} = \frac{\sigma_{fp}A_{fp}h_{fp} - \sigma_{fs}A_s h_s}{N_{p0}} \quad (5.4.3-4)$$

2 开裂截面预应力 FRP 筋的应力增量 $\Delta\sigma_{fp}$ ：

$$\Delta\sigma_{fp} = \alpha_{FE} \left(\frac{N_{p0}}{A_{cr}} - \frac{N_{p0}e_{0N}(h_{fp} - c)}{I_{cr}} \right) \quad (5.4.3-5)$$

式中： N_{p0} ——混凝土法向应力等于零时预应力钢筋和普通钢筋的合力（ N ），先张法构件和后张法构件均按本标准式（6.1.6-1）及第 6.3.6 条计算；

σ_{fp} ——构件受拉区预应力 FRP 筋合力点处混凝土法向应力等于零时预应力 FRP 筋的应力（ MPa ），先张法构件按本标准式（6.1.5-2），后张法构件按本标准式（6.1.5-5）计算；

e_{0N} —— N_{p0} 作用点至开裂截面重心轴的距离（ mm ）；

e_N —— N_{p0} 作用点至截面受压区边缘的距离（ mm ）， N_{p0} 位于截面之外为正； N_{p0} 位于截面之内为负；

c ——截面受压区边缘至开裂换算截面重心轴的距离（ mm ）；

h_{ps} ——预应力 FRP 筋与非预应力钢筋合力点至截面受压

区边缘的距离 (mm);

h_{lp} ——截面受拉区预应力 FRP 筋合力点至截面受压区边缘的距离 (mm);

h_s ——截面受拉区非预应力钢筋合力点至截面受压区边缘的距离 (mm);

A_{cr} ——开裂截面换算截面面积 (mm^2);

I_{cr} ——开裂截面换算截面惯性矩 (mm^4), 按本标准第 6.4.4 条计算。

5.4.4 使用阶段预应力 FRP 筋混凝土受弯构件正截面混凝土的压应力和预应力 FRP 筋的拉应力, 应符合下列规定:

1 受压区混凝土的最大压应力:

$$\left. \begin{array}{l} \text{未开裂构件 } \sigma_{kc} + \sigma_{pt} \\ \text{允许开裂构件 } \sigma_{cc} \end{array} \right\} \leq 0.50 f_{ck} \quad (5.4.4-1)$$

2 受拉区预应力 FRP 筋的最大拉应力:

1) 体内预应力 FRP 筋:

$$\left. \begin{array}{l} \text{未开裂构件 } \sigma_{fpk} + \Delta\sigma_{lp} \\ \text{允许开裂构件 } \sigma_{fpk} + \Delta\sigma_{lp} \end{array} \right\} \leq 0.65 \frac{f_{fpk}}{\gamma_c} \quad (5.4.4-2)$$

2) 体外预应力 FRP 筋:

$$\sigma_{fpk} \leq 0.60 \frac{f_{fpk}}{\gamma_c} \quad (5.4.4-3)$$

式中: f_{fpk} ——受拉区预应力 FRP 筋的抗拉强度标准值 (MPa);

σ_{fpk} ——受拉区预应力 FRP 筋的有效预应力 (MPa), 按本标准第 6.1.5 条计算;

σ_{pt} ——由预应力产生的混凝土法向拉应力 (MPa), 先张法构件按本标准式 (6.1.5-1) 计算, 后张法构件按本标准式 (6.1.5-4) 计算;

γ_c ——FRP 筋的环境影响系数, 按本标准表 4.1.4 取值。

5.5 短暂状况构件应力计算

5.5.1 当桥梁构件按短暂状况设计时, 应计算其在制作、运输

及安装等施工阶段，由自重、施工荷载等引起的正截面和斜截面的混凝土应力。施工荷载除有特别规定外均应采用标准值，当有组合时不计入荷载组合系数。

5.5.2 当采用吊机（车）行驶于桥梁进行安装时，应对已安装就位的构件进行验算，吊机（车）应乘以 1.15 的分项系数；当吊机（车）产生的效应设计值小于按持久状况承载能力极限状态计算的作用效应设计值时，则可不进行验算。

5.5.3 当进行构件运输和安装计算时，构件自重应乘以动力系数。动力系数应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定采用。

5.5.4 对构件施加预应力时，混凝土的立方体强度不得低于设计混凝土强度等级的 80%，弹性模量不得低于混凝土 28d 弹性模量的 80%。

5.5.5 普通 FRP 筋混凝土受弯构件正截面应力应按下列公式计算，并应符合下列规定：

1 受压区混凝土的压应力：

$$\sigma_{cr}^i = \frac{M_k^i x_{i0}}{I_{cr}} \leq 0.80 f'_{ck} \quad (5.5.5-1)$$

2 受拉区 FRP 筋的应力：

$$\sigma_i^i = \frac{M_k^i}{0.9 A_i h_{ef}} \leq 0.75 f_{fk} \quad (5.5.5-2)$$

式中： M_k^i ——由施工荷载标准值产生的弯矩值（N·mm）；

f'_{ck} ——施工阶段相应于混凝土立方体抗压强度 f'_{c0} 的混凝土轴心抗压强度标准值（MPa）；

x_{i0} ——换算截面的受压区高度（mm），按换算截面受压区和受拉区对中性轴面积矩相等的原则求得。

5.5.6 普通 FRP 筋混凝土受弯构件，在自重等施工荷载作用下中性轴处的主拉应力（剪应力） σ_{tp}^i 应符合下式要求：

$$\sigma_{tp}^i = \frac{V_k^i}{b z_{i1}} \leq f'_{tk} \quad (5.5.6)$$

式中： V_k ——由施工荷载标准值产生的剪力值（N）；

b ——矩形截面宽度、T形和I形截面的腹板宽度（mm）；

z_0 ——受压区合力点至受拉FRP筋合力点的距离（mm），按受压区混凝土应力图形为三角形确定；

f'_{tk} ——施工阶段混凝土轴心抗拉强度标准值（MPa）。

5.5.7 预应力FRP筋混凝土受弯构件，在预应力和构件自重等施工荷载作用下截面边缘混凝土的法向应力，应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62的规定。

6 正常使用极限状态验算

6.1 一般规定

6.1.1 普通 FRP 筋混凝土构件及预应力 FRP 筋混凝土构件的正常使用极限状态应采用下列极限状态设计表达式进行验算：

$$S_{sk} \leq C \quad (6.1.1)$$

式中： S_{sk} ——正常使用极限状态作用组合的效应设计值；

C ——构件达到正常使用要求所规定的变形、应力和裂缝宽度等的限值。

6.1.2 预应力 FRP 筋混凝土构件可根据桥梁和所处环境的要求，进行下列构件设计：

1 全预应力 FRP 筋混凝土构件。此类构件在作用频遇组合或准永久组合下控制的正截面的受拉边缘不允许出现拉应力。

2 部分预应力 FRP 筋混凝土构件。此类构件在作用频遇组合或准永久组合下控制的正截面的受拉边缘可出现拉应力；当拉应力加以限制时，为 A 类预应力 FRP 筋混凝土构件；当拉应力超过限值时，为 B 类预应力 FRP 筋混凝土构件。

6.1.3 预应力 FRP 筋的张拉控制应力 σ_{con} 的限值应符合表 6.1.3 的规定。

表 6.1.3 预应力 FRP 筋的张拉控制应力 σ_{con} 上下限值

FRP 筋类型	CFRP 筋	AFRP 筋
σ_{con} 上限值	$0.65f_{tpk}$	$0.55f_{tpk}$
σ_{con} 下限值	$0.40f_{tpk}$	$0.35f_{tpk}$

6.1.4 在作用准永久组合下，普通 FRP 筋混凝土构件中 FRP 筋的应力 σ_{sq} 、预应力 FRP 筋混凝土构件中预应力 FRP 筋的应力 σ_{sq1} ，应符合下列公式要求：

$$\sigma_{fq} \leq \frac{f_{fk}}{\gamma_{fc} \gamma_c} \quad (6.1.4-1)$$

$$\sigma_{fqk} \leq \frac{f_{fk}}{\gamma_{fc} \gamma_c} \quad (6.1.4-2)$$

式中： σ_{fq} ——按作用准永久组合计算的非预应力 FRP 筋应力 (MPa)，按本标准式 (6.3.5-3) 计算，将按作用频遇组合计算的弯矩值 M_s 改用按作用准永久组合计算的弯矩值 M_q ；

σ_{fqk} ——按作用准永久组合计算的预应力 FRP 筋的应力 (MPa)，按本标准式 (5.4.4-2) 计算，在计算预应力 FRP 筋的应力增量时将按作用标准组合计算的弯矩值 M_k 改用按作用准永久组合计算的弯矩值 M_q ；

γ_{fc} ——正常使用状态下 FRP 筋的蠕变断裂折减系数，按表 6.1.4 取值；

γ_c ——FRP 材料的环境影响系数，按本标准表 4.1.4 取值。

表 6.1.4 正常使用状态下 FRP 筋的蠕变断裂折减系数 γ_{fc}

FRP 筋类型	GFRP 筋	CFRP 筋	AFRP 筋	BFRP 筋
γ_{fc}	3.5	1.1	2.0	2.0

6.1.5 由预应力产生的混凝土法向应力及相应阶段预应力 FRP 筋的应力，应符合下列规定：

1 先张法构件的应力应按下列公式计算：

由预应力产生的混凝土法向压应力 σ_{pc} 和拉应力 σ_{pt} ：

$$\sigma_{pc} \text{ 或 } \sigma_{pt} = \frac{N_{p0}}{A_n} \pm \frac{N_{p0} e_{p0}}{I_0} y_0 \quad (6.1.5-1)$$

预应力 FRP 筋合力点处混凝土法向压应力等于零时的预应力 FRP 筋应力：

$$\sigma_{fqk} = \sigma_{con} - \sigma_l + \sigma_{l1} \quad (6.1.5-2)$$

相应阶段预应力 FRP 筋的有效预应力：

$$\sigma_{lpe} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (6.1.5-3)$$

2 后张法构件的应力应按下列公式计算：

由预应力产生的混凝土法向压应力 σ_{1pc} 和拉应力 σ_{1pt} ：

$$\sigma_{1pc} \text{ 或 } \sigma_{1pt} = \frac{N_p}{A_n} \pm \frac{N_p e_{1pn}}{I_n} y_n \pm \frac{M_{p2}}{I_n} y_n \quad (6.1.5-4)$$

预应力 FRP 筋合力点处混凝土法向压应力等于零时的预应力 FRP 筋应力：

$$\sigma_{1pt} = \sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{1pc} \quad (6.1.5-5)$$

相应阶段预应力 FRP 筋的有效预应力：

$$\sigma_{1pe} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (6.1.5-6)$$

式中： A_n ——净截面面积，即为扣除管道等削弱部分后的混凝土全部截面面积与纵向非预应力钢筋截面面积换算成混凝土的截面面积之和；对由不同混凝土强度等级组成的截面，应按混凝土弹性模量比值换算成同一混凝土强度等级的截面面积（ mm^2 ）；

A_0 ——换算截面面积，包括净截面面积 A_n 和全部纵向预应力 FRP 筋截面面积换算成混凝土的截面面积（ mm^2 ）；

N_{p0} 、 N_p ——先张法构件、后张法构件的预应力 FRP 筋和非预应力钢筋的合力（N）；

I_0 、 I_n ——换算截面惯性矩、净截面惯性矩（ mm^4 ）；

e_{p0} 、 e_{pn} ——换算截面重心、净截面重心至预应力 FRP 筋和非预应力钢筋合力点的距离（mm）；

y_0 、 y_n ——换算截面重心、净截面重心至计算纤维处的距离（mm）；

σ_{con} ——预应力 FRP 筋的张拉控制应力值（MPa）；

σ_l ——相应阶段预应力 FRP 筋的预应力损失值（MPa），按本标准第 6.2.2 条～第 6.2.7 条计算；使用阶段时为全部预应力损失值；

σ_{l1} ——由混凝土弹性压缩引起的预应力损失值（MPa），按本标准式（6.2.5-2）计算；

α_{FE} ——预应力 FRP 筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

M_{p2} ——由预加力 N_p 在后张法预应力 FRP 筋混凝土连续梁等超静定结构中产生的次弯矩 (N·mm)。

6.1.6 预应力 FRP 筋和非预应力钢筋的合力 N_{p0} 、 N_p 及合力的偏心距 e_{p0} 、 e_{pm} 计算应符合下列规定：

1 先张法构件应按下列公式计算：

$$N_{p0} = \sigma_{fp0} A_{fp} - \sigma_{f6} A_s \quad (6.1.6-1)$$

$$e_{p0} = \frac{\sigma_{fp0} A_{fp} y_{fp} - \sigma_{f6} A_s y_s}{N_{p0}} \quad (6.1.6-2)$$

2 后张法构件应按下列公式计算：

$$N_p = \sigma_{fpc} A_{fp} - \sigma_{f6} A_s \quad (6.1.6-3)$$

$$e_{pm} = \frac{\sigma_{fpc} A_{fp} y_{fpm} - \sigma_{f6} A_s y_{sn}}{N_p} \quad (6.1.6-4)$$

式中： σ_{fp0} ——受拉区预应力 FRP 筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力 FRP 筋应力 (MPa)，按本标准第 6.1.5 条计算；

σ_{fpc} ——受拉区预应力 FRP 筋的有效预应力 (MPa)，按本标准第 6.1.5 条计算；

A_{fp} ——受拉区预应力 FRP 筋的截面面积 (mm²)；

A_s ——受拉区非预应力钢筋的截面面积 (mm²)；

y_{fp} ——受拉区预应力 FRP 筋合力点至换算截面重心轴的距离 (mm)；

y_s ——受拉区非预应力钢筋重心至换算截面重心轴的距离 (mm)；

y_{fpm} ——受拉区预应力 FRP 筋合力点至净截面重心轴的距离 (mm)；

y_{sn} ——受拉区非预应力钢筋重心至净截面重心轴的距离 (mm)；

σ_{i6} ——受拉区预应力 FRP 筋在各自合力点处由混凝土收缩和徐变引起的预应力损失值 (MPa), 按本标准第 6.2.7 条计算。

6.1.7 对先张法预应力混凝土构件端部区段进行正截面、斜截面抗裂验算时, 预应力传递长度 l_{tr} 范围内预应力钢筋的实际应力值, 在构件端部取为零, 在预应力传递长度末端取有效预应力值 σ_{lpe} , 两点之间按线性变化取值。预应力 FRP 筋的预应力传递长度 l_{tr} 应按式计算:

$$l_{tr} = \frac{\sigma_{lpe}}{8f'_{tk}}d \geq 65d \quad (6.1.7)$$

式中: σ_{lpe} ——放张时预应力 FRP 筋的有效应力 (MPa);

d ——预应力 FRP 筋的直径 (mm);

f'_{tk} ——与放张时混凝土立方体抗压强度 f'_{cu} 相应的轴心抗压强度标准值 (MPa)。

6.2 纤维增强复合材料筋预应力损失计算

6.2.1 预应力 FRP 筋混凝土构件在正常使用极限状态计算中, 应考虑由下列因素引起的预应力损失:

1 预应力 FRP 筋与管道壁之间的摩擦引起的预应力损失 σ_{l1} ;

2 锚具变形、FRP 筋回缩和接缝压缩引起的预应力损失 σ_{l2} ;

3 预应力 FRP 筋与台座之间的温差引起的预应力损失 σ_{l3} ;

4 混凝土弹性压缩引起的预应力损失 σ_{l4} ;

5 预应力 FRP 筋应力松弛引起的预应力损失 σ_{l5} ;

6 混凝土的收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l6} ;

7 预应力 FRP 筋与锚圈口之间的摩擦、台座的弹性变形等因素引起的其他预应力损失。

6.2.2 后张法构件张拉时, 预应力 FRP 筋与管道壁之间的摩擦引起的预应力损失, 可按式计算:

$$\sigma_{l1} = \sigma_{\text{con}} [1 - e^{-kx + \mu\theta}] \quad (6.2.2)$$

式中： x ——张拉端至计算截面的孔道长度（m）；对于曲线预应力 FRP 筋，可近似取该段孔道在构件纵轴上的投影长度；

θ ——张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角（rad）；

k ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数，按表 6.2.2 采用；

μ ——预应力 FRP 筋与孔道壁之间的摩擦系数，按表 6.2.2 采用。

表 6.2.2 预应力 FRP 筋与孔道壁间摩擦系数

FRP 筋类型	k (/m)	μ (/rad)
CFRP 筋	0.001	0.30
AFRP 筋	0.003	0.25

6.2.3 后张法构件张拉时，锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值 σ_{l2} ，可按下列规定计算：

1 直线预应力 FRP 筋：

$$\sigma_{l2} = \frac{a}{l} E_p \quad (6.2.3)$$

式中： a ——张拉端锚具变形和 FRP 筋内缩值（mm），按表 6.2.3 采用；

l ——张拉端至锚固端之间的距离（mm）。

2 曲线预应力 FRP 筋可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的有关规定计算。

表 6.2.3 锚具类型和预应力 FRP 筋内缩值（mm）

锚具类型	内缩值
黏结型锚具	1~2
夹片型锚具	8

注：表中夹片型锚具的内缩值是有顶压时的内缩值。

6.2.4 先张法预应力混凝土构件，当采用加热方法养护时，由 FRP 筋与台座之间的温差引起的预应力损失可按下式计算：

$$\sigma_{l3} = \Delta t \cdot |\alpha_f - \alpha_c| \cdot E_{fp} \text{ (MPa)} \quad (6.2.4)$$

式中： Δt ——混凝土加热养护时，预应力 FRP 筋与承受拉力的设备之间的温差（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

α_f 、 α_c ——FRP 筋、混凝土的轴向温度膨胀系数； α_f 与 FRP 筋的种类有关，无产品指标时可按最不利情况在表 6.2.4 范围内取用。

表 6.2.4 FRP 筋、混凝土的轴向温度膨胀系数

材料	轴向温度膨胀系数 (1×10^{-5})
CFRP 筋	0.6~1.0
AFRP 筋	-2.0~-6.0

6.2.5 预应力 FRP 筋混凝土构件，由混凝土弹性压缩引起的预应力损失可按下列规定计算：

1 后张法预应力混凝土构件当采用分批张拉时，先张拉的 FRP 筋由张拉后批 FRP 筋引起的混凝土弹性压缩的预应力损失，可按下式计算：

$$\sigma_{l1} = \alpha_{FE} \sum \Delta\sigma_{pc} \quad (6.2.5-1)$$

式中： $\Delta\sigma_{pc}$ ——在计算截面先张拉的 FRP 筋重心处，由后张拉各批 FRP 筋产生的混凝土法向应力（MPa）。

2 先张法预应力混凝土构件，放松 FRP 筋时由混凝土弹性压缩引起的预应力损失，可按下式计算：

$$\sigma_{l1} = \alpha_{EP} \Delta\sigma_{pc} \quad (6.2.5-2)$$

式中： $\Delta\sigma_{pc}$ ——在计算截面先张拉的 FRP 筋重心处，由全部 FRP 筋预加力产生的混凝土法向应力（MPa）。

6.2.6 预应力 FRP 筋的应力松弛 σ_{l5} ，可按下式计算：

$$\sigma_{l5} = r\sigma_{con} \quad (6.2.6)$$

式中： r ——松弛损失率，宜根据实测数据确定；当无实测数据时， r 可按表 6.2.6 的数值取用。

表 6.2.6 预应力 FRP 筋的松弛损失率 r

FRP 筋类型	松弛损失率 r (%)
CFRP 筋	2.2
AFRP 筋	16.0

6.2.7 由混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{li} ，可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的相关规定进行计算。

6.2.8 预应力 FRP 筋混凝土构件，其各阶段的预应力损失值的组合应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定。

6.3 抗裂与裂缝宽度验算

6.3.1 预应力 FRP 筋混凝土受弯构件，应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 进行正截面和斜截面抗裂验算。

6.3.2 普通 FRP 筋混凝土构件和 B 类预应力 FRP 筋混凝土构件，在正常使用极限状态下的裂缝宽度，应按作用频遇组合并考虑长期效应的影响进行验算。

6.3.3 普通 FRP 筋混凝土构件的最大裂缝宽度限值应为 0.50mm。

6.3.4 B 类预应力 FRP 筋混凝土构件，其计算的最大裂缝宽度不应超过下列规定的限值：

1 当采用普通钢筋作为非预应力筋的构件时，其最大裂缝宽度限值应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定；

2 当采用环氧涂层钢筋或不锈钢钢筋作为非预应力筋的构件时，其最大裂缝宽度限值应为 0.2mm。

6.3.5 矩形、T 形和 I 形截面 FRP 筋混凝土受弯构件，其最大裂缝宽度 W_{rk} 可按下列公式计算：

$$W_{fk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{fs}}{E_f} \left(\frac{30 + d}{0.28 + 10\rho} \right) \quad (6.3.5-1)$$

$$C_2 = 1 + 0.5 \frac{N_l}{N_s} \quad (6.3.5-2)$$

$$\sigma_{fs} = \frac{M_s}{0.9 A_f h_{of}} \quad (6.3.5-3)$$

$$\rho = \frac{A_f}{b h_{of} + (b_f - b) h_f} \quad (6.3.5-4)$$

$$d_c = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (6.3.5-5)$$

式中： C_1 ——FRP 筋表面形状系数，可取 $C_1 = 1.4$ ；

C_2 ——长期效应影响系数；

C_3 ——与构件受力性质相关的系数，板式受弯构件 $C_3 = 1.15$ ，其他受弯构件 $C_3 = 1.0$ ；

N_l 、 N_s ——按作用准永久组合和作用频遇组合计算的内力值（弯矩或轴向力）；

M_s ——按作用频遇组合计算的弯矩值（ $N \cdot mm$ ）；

σ_{fs} ——FRP 筋应力（MPa）；

d ——纵向受拉 FRP 筋直径（mm），当用不同直径的 FRP 筋时， d 改用换算直径 d_c ；

n_i ——受拉区第 i 种 FRP 筋的根数；

d_i ——受拉区第 i 种纵向 FRP 筋的公称直径（mm）；

v_i ——受拉区纵向 FRP 筋的相对黏结特性系数。 v_i 宜根据试验数据确定，取黏结试验所得的 FRP 筋黏结强度与相同条件带肋钢筋黏结强度的比值。当 v_i 大于 1.0 时，取 1.0；无试验数据时，可选用 $v_i = 0.7$ ；

ρ ——纵向受拉 FRP 筋配筋率，当 $\rho > 0.02$ 时，取 $\rho = 0.02$ ；当 $\rho < 0.006$ 时，取 $\rho = 0.006$ ；

A_f ——受拉区纵向 FRP 筋的截面面积（ mm^2 ）；

b_f ——构件受拉翼缘宽度 (mm);

h_f ——构件受拉翼缘厚度 (mm)。

6.3.6 B类预应力 FRP 筋混凝土受弯构件, 其最大裂缝宽度 W_{fk} 可按下列公式计算:

$$W_{fk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_t} \left(\frac{30 + d}{0.28 + 10\rho} \right) \quad (6.3.6-1)$$

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s \pm M_{p2} - N_{p0}(z - e_p)}{(A_{fp} E_{fp} / E_s + A_s) z} \quad (6.3.6-2)$$

$$\rho = \frac{A_s + A_{fp}}{bh_0 + (b_f - b)h_f} \quad (6.3.6-3)$$

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma'_f) \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \quad (6.3.6-4)$$

$$\gamma'_f = \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0} \quad (6.3.6-5)$$

$$e = e_p + \frac{M_s \pm M_{p2}}{N_{p0}} \quad (6.3.6-6)$$

$$e_p = y_{ps} - e_{p0} \quad (6.3.6-7)$$

式中: C_1 ——非预应力钢筋表面形状系数, 对于光面钢筋, $C_1 = 1.4$; 对带肋钢筋, $C_1 = 1.0$; 对环氧树脂涂层带肋钢筋, $C_1 = 1.5$;

σ_{ss} ——非预应力钢筋等效应力 (MPa);

d ——纵向受拉 FRP 筋直径 (mm), 当用不同直径的 ERP 筋时, d 改用换算直径 d_e ;

e_p ——混凝土法向应力等于零时纵向预应力 FRP 筋和非预应力钢筋的合力 N_{p0} 的作用点至受拉区纵向预应力 FRP 筋和非预应力钢筋合力点的距离 (mm);

y_{ps} ——受拉区纵向预应力 FRP 筋和非预应力钢筋合力点的偏心距 (mm);

N_{p0} ——混凝土法向预应力等于零时纵向预应力 FRP 筋和

非预应力钢筋的合力，先张法构件和后张法构件均按本标准式 (6.1.6-1) 计算，该式中的 σ_{fp} ，先张法构件按本标准式 (6.1.5-2) 计算；后张法构件按本标准式 (6.1.5-5) 计算；

e ——预应力 FRP 筋合力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离 (mm)；

e_{p0} ——混凝土法向预应力等于零时纵向预应力 FRP 筋和非预应力钢筋的合力 N_{p0} 的作用点的偏心距 (mm)；

z ——受拉区纵向预应力钢筋和非预应力钢筋合力点至截面受压区合力点的距离 (mm)；

h_0 ——截面有效高度 (mm)；

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 (N·mm)；

ρ ——纵向受拉筋有效配筋率，当 $\rho > 0.02$ 时，取 $\rho = 0.02$ ；当 $\rho < 0.006$ 时，取 $\rho = 0.006$ ；

γ'_i ——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值。

6.4 挠度验算

6.4.1 受弯构件应按作用频遇组合并考虑长期效应的影响验算挠度。挠度限值可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的有关规定确定。

6.4.2 受弯构件在正常使用极限状态下的挠度，可根据给定的构件刚度用结构力学的方法计算。

6.4.3 受弯构件的刚度可按下式规定进行计算：

1 普通 FRP 筋混凝土构件：

$$B = \frac{B_0}{\frac{1}{\beta_d} \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^2 \right] \frac{B_0}{B_{cr}}} \quad (6.4.3-1)$$

$$\beta_d = 0.5 \left(\frac{E_f}{E_s} + 1 \right) \quad (6.4.3-2)$$

$$M_{cr} = \gamma f_{tk} W_0 \quad (6.4.3-3)$$

$$\gamma = \frac{2S_0}{W_0} \quad (6.4.3-4)$$

式中： B ——开裂构件等效截面的抗弯刚度（ $N \cdot mm^2$ ）；

B_0 ——全截面的抗弯刚度（ $N \cdot mm^2$ ）， $B_0 = 0.95E_c I_0$ ；

B_{cr} ——开裂截面的抗弯刚度（ $N \cdot mm^2$ ）， $B_{cr} = E_c I_{cr}$ ， I_{cr} 为开裂截面换算截面惯性矩（ mm^4 ），按本标准第 6.4.4 条计算；

γ ——构件受拉区混凝土塑性影响系数；

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值（MPa）；

β_d ——弹性模量修正系数；

S_0 ——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（ mm^3 ）；

W_0 ——换算截面抗裂边缘的弹性抵抗矩（ mm^3 ）。

2 预应力 FRP 筋混凝土构件：

1) 全预应力混凝土和 A 类预应力混凝土构件：

$$B_0 = 0.95E_c I_0 \quad (6.4.3-5)$$

2) 允许开裂的 B 类预应力混凝土构件：

在开裂弯矩 M_{cr} 作用下， $B_0 = 0.95E_c I_0$ (6.4.3-6)

在 $(M_s - M_{cr})$ 作用下， $B_{cr} = E_c I_{cr}$ (6.4.3-7)

开裂弯矩 M_{cr} 按下式计算：

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0 \quad (6.4.3-8)$$

式中： σ_{pc} ——扣除全部预应力损失预应力 FRP 筋和非预应力钢筋合力 N_{p0} 在构件抗裂边缘产生的混凝土预压应力（MPa），先张法构件和后张法构件均按本标准式（6.1.5-1）计算，但后张法构件采用净截面；该式中的 N_{p0} 与本标准第 6.3.6 条的规定相同。

6.4.4 受弯构件的开裂截面换算截面惯性矩 I_{cr} ，可按下列假定计算：

1 截面应变保持平面；

2 受压区混凝土的法向应力图取为三角形；

3 不考虑受拉区混凝土的抗拉强度。

6.4.5 受弯构件在使用阶段的挠度应按作用频遇组合和本标准第 6.4.3 条规定的刚度计算的挠度值，乘以挠度长期增长系数 η_0 。当采用 C30~C80 混凝土时， $\eta_0 = 2.00 \sim 1.65$ ，中间强度等级可按线性内插法求得。

6.4.6 预应力 FRP 筋混凝土受弯构件由预加力引起的反拱值，可采用结构力学方法按刚度 $E_c I_0$ 进行计算，并乘以长期增长系数。计算使用阶段预加力反拱值时，预应力 FRP 筋的预加力应扣除全部预应力损失，长期增长系数应取用 2.0。

7 构造要求

7.1 一般规定

7.1.1 纵向受力的 FRP 筋水平方向的净间距不应小于 25mm 和 FRP 筋的最大直径。当需配置多层纵向 FRP 筋时，各层 FRP 筋之间的净间距不应小于 25mm 和 FRP 筋的最大直径。FRP 筋不宜捆绑在一起作为 FRP 束筋使用。

7.1.2 普通 FRP 筋混凝土构件的保护层厚度应符合下列规定：

1 普通 FRP 筋混凝土构件的保护层厚度不应小于 FRP 筋的直径 d ；

2 当 FRP 筋用于混凝土板时，最小保护层的厚度不应小于 20mm；当 FRP 筋用于混凝土梁时，最小保护层厚度不应小于 25mm。

7.1.3 预应力 FRP 筋混凝土构件的保护层厚度应符合下列规定：

1 最外侧预应力 FRP 筋的保护层厚度，不应小于 40mm；

2 当采用普通钢筋作为非预应力筋的构件时，最外侧钢筋的保护层厚度应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定；当采用环氧涂层钢筋或不锈钢钢筋作为非预应力筋的构件时，最外侧钢筋的保护层厚度应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中 I 类环境类别下的规定。

7.1.4 当受拉区主筋的混凝土保护层厚度大于 50mm 时，应在保护层内设置直径不小于 6mm、间距不大于 100mm 的 FRP 筋网。

7.2 纤维增强复合材料筋锚固与搭接

7.2.1 受拉 FRP 筋的锚固长度应通过试验确定。当无试验数据

时，锚固长度可按下式计算，且 GFRP 筋、CFRP 筋、AFRP 筋和 BFRP 筋的最小锚固长度分别不应小于 $20d$ 、 $35d$ 、 $25d$ 和 $20d$ 。当锚固长度不足时，应采用可靠的机械锚固措施。

$$l_a = \frac{f_{fd}}{8f_{td}}d \quad (7.2.1)$$

式中： l_a —— FRP 筋锚固长度 (mm)；

d —— FRP 筋的直径 (mm)；

f_{fd} —— FRP 筋抗拉强度设计值 (MPa)；

f_{td} —— 混凝土抗拉强度设计值 (MPa)。

7.2.2 受拉 FRP 纵筋绑扎接头的搭接长度不应小于 $1.6l_a$ ；当 FRP 筋的实际应力与抗拉强度设计值的比值小于 0.5，且搭接长度范围内配置的 FRP 筋面积占计算所需总面积的 50% 以下时，搭接长度可折减为 $1.4l_a$ 。

7.2.3 构件中纵向受压 FRP 筋的搭接长度不应小于受拉 FRP 纵筋搭接长度的 70%。

7.3 纤维增强复合材料筋配筋率

7.3.1 普通 FRP 筋混凝土受弯构件的纵向受拉 FRP 筋的最小配筋率应按下式计算：

$$\rho_{\min} = \frac{1.1f_{td}}{f_{fd}} \quad (7.3.1)$$

式中： ρ_{\min} —— 受弯构件的纵向受拉 FRP 筋的最小配筋率；

f_{td} —— 混凝土抗拉强度设计值 (MPa)；

f_{fd} —— FRP 筋抗拉强度设计值 (MPa)。

7.3.2 FRP 筋混凝土受压构件全部纵向受力 FRP 筋的配筋率应按构件的毛截面面积计算，其配筋率不应小于 1%，且不应大于 8%。

7.3.3 FRP 筋混凝土受压构件，矩形截面的纵向 FRP 筋不应少于 4 根，圆形截面的纵向 FRP 筋不应少于 6 根，且纵向 FRP 筋的直径不应小于 15mm。

7.3.4 预应力 FRP 筋混凝土受弯构件的配筋率应满足下列要求：

$$M_{ud} \geq 1.2M_{cr} \quad (7.3.4)$$

式中： M_{ud} ——受弯构件正截面抗弯承载力设计值（N·mm），按本标准公式（5.2.12-1）、式（5.2.12-3）、式（5.2.13-1）或式（5.2.14）的等号右边式子计算；

M_{cr} ——受弯构件正截面开裂弯矩值（N·mm），按本标准式（6.4.3-8）计算。

7.4 纤维增强复合材料箍筋

7.4.1 FRP 箍筋的弯折半径 r_b 与箍筋直径 d_b 的比值应满足下式要求：

$$\frac{r_b}{d_b} \geq 3.0 \quad (7.4.1)$$

式中： r_b ——FRP 箍筋弯折半径（mm）；

d_b ——FRP 箍筋直径（mm）。

7.4.2 FRP 箍筋的锚固可采用 90 度的弯钩（图 7.4.2），弯钩处的尾长 l_{thf} 应满足下式要求：

$$l_{thf} \geq 12d_b \quad (7.4.2)$$

式中： l_{thf} ——FRP 箍筋弯钩处的尾长（mm）。

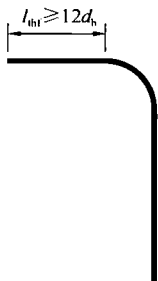


图 7.4.2 FRP 箍筋弯折的构造要求

7.4.3 FRP 箍筋的间距不应大于截面有效高度的 0.5 倍。

7.4.4 受弯构件的 FRP 箍筋配筋率应按下式计算：

$$\rho_{fv} = \frac{A_{fv}}{b_s} \geq \frac{0.35f_{td}}{f_{fv}} \quad (7.4.4)$$

式中： A_{fv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积 (mm^2)；

b ——构件的截面宽度 (mm)；

s ——沿构件长度方向上的箍筋间距或螺旋筋的间距 (mm)；

f_{td} ——混凝土抗拉强度设计值 (MPa)；

f_{fv} ——箍筋的弯拉强度设计值 (MPa)。

7.5 预应力纤维增强复合材料筋

7.5.1 后张法预应力 FRP 筋混凝土构件的曲线预应力 FRP 筋的曲率半径不应小于 5m，且不应小于管道直径的 100 倍。

7.5.2 在先张法预应力 FRP 筋混凝土构件中，预应力 FRP 筋的净间距不应小于其直径的 1.5 倍，且不应小于 25mm。

7.5.3 在后张法预应力 FRP 筋混凝土构件中，预应力 FRP 筋管道的净间距不应小于管道直径，且不应小于 40mm。

7.5.4 预应力 FRP 筋混凝土构件锚固区应配置横向间接钢筋。

7.5.5 体外预应力 FRP 筋混凝土构件的设计应符合下列规定：

1 体外预应力 FRP 筋可采用直线、双折线或多折线布置方式，且宜对称布置。对于矩形或 I 字形截面梁，体外预应力 FRP 筋布置在梁的两侧；对于箱形截面梁，体外预应力 FRP 筋宜对称布置在梁腹板的内侧。

2 体外预应力 FRP 筋在转向块处的弯折转角不宜大于 7° ，且应采取减少体外预应力 FRP 筋与转向块之间的摩擦。转向块处的曲率半径不宜小于 3.0m。

8 施工与验收

8.1 一般规定

8.1.1 FRP 筋应具有出厂质量证明书和试验报告单，进场时应检查其外观和标志，并应按 FRP 筋的类型、等级、规格及生产厂家分批抽取试样进行力学性能检验。FRP 筋经进场检验合格后方可使用。

8.1.2 FRP 筋在工厂加工成型后，应采用包装材料包装，运输时应采取可靠保护措施，避免包装破损及散包。运输和起吊过程中应采取措施防止 FRP 筋弯曲损伤。

8.1.3 FRP 筋在工地存放时，应防火，避免高温、紫外线和化学物质的作用，应按不同规格、品种分批分别顺直整齐地堆置，并应设立识别标志。FRP 筋宜存放在通风干燥的室内，当存放在室外时，FRP 筋不应直接置于地面，应垫高或堆置在台座上，并应采取覆盖措施。当 FRP 筋存放时，不应暴露于 60℃ 以上的高温环境中。

8.1.4 FRP 筋的种类、直径和级别应按设计规定采用；当需替换时，应取得设计人员的书面认可。

8.1.5 FRP 筋的表面不应有明显的划痕，断面面积损失率不得超过 1%；当不满足要求时，应作为废料处理。

8.1.6 预应力 FRP 筋用锚具、夹具和连接器进场时，应核对其型号、规格和数量，对于适用的预应力 FRP 筋品种、规格和强度等级，尚应检查厂家应提供的产品质保书、产品技术手册、锚固区传力性能等检验报告，以及夹片式锚具的锚口摩擦损失测试报告或参数。验收合格后，还应按现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 中的相关规定进行抽样复检。

8.1.7 FRP 筋混凝土桥梁施工的其他相关要求应符合国家现行

标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 及《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 的规定。

8.1.8 FRP 筋混凝土桥梁验收的其他相关要求应符合国家现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 及《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 的规定。

8.2 纤维增强复合材料筋下料及安装

8.2.1 FRP 筋不宜现场修剪。当需截断时，应采用空载速度不小于 600r/min 的高速磨切机，在截断过程中不应造成 FRP 筋表面损伤。

8.2.2 FRP 筋连接宜采用绑扎搭接，搭接长度应符合本标准第 7 章的规定。FRP 筋骨架绑扎应牢固，绑扎线宜采用塑料、喷涂丝或尼龙材质进行绑扎。

8.2.3 在绑扎 FRP 筋时，应设置防浮下拉筋。

8.2.4 不应在 FRP 筋上直接站立、行走或放置重物。

8.2.5 FRP 筋安装时，应采用定位件固定 FRP 筋位置，并宜采用塑料或其他无腐蚀性材料的专用定位件。定位件应具有足够的承载力、刚度、稳定性和耐久性。

8.2.6 绑扎的 FRP 筋网和 FRP 筋骨架不得有变形和松脱，FRP 筋安装的允许偏差应符合表 8.2.6 的规定。

表 8.2.6 FRP 筋安装的允许偏差 (mm)

序号	检查项目		允许偏差	
1	FRP 筋骨架外轮廓尺寸	长度	±10	
		宽度、高度或直径	±5	
2	受力 FRP 筋	两排以上排距	±5	
		同排	梁、板	±5
			基础、墩台、柱	±20
3	箍筋、分布筋间距		±10	
4	绑扎 FRP 筋网尺寸	长度、宽度	±10	
		网眼尺寸	±20	

续表 8.2.6

序号	检查项目		允许偏差
5	保护层厚度	柱、梁	±5
		基础、墩台	±10
		板	±3

8.2.7 体外预应力 FRP 筋应采取包裹、涂刷防紫外线材料或其他有效方式进行防护。

8.3 预应力纤维增强复合材料筋张拉

8.3.1 当 FRP 筋施加预应力时，结构或构件混凝土的强度、弹性模量（或龄期）应符合设计规定；当设计未规定时，混凝土的强度不应低于设计强度等级值的 80%，弹性模量不应低于混凝土标准养护 28d 弹性模量的 80%。

8.3.2 当预应力 FRP 筋张拉和放张时，应采取有效安全防护措施。在张拉过程中，预应力筋两端的正面不得站人和穿越。

8.3.3 当在安装预应力 FRP 筋的结构或构件附近进行电焊时，应对全部预应力 FRP 筋、管道和附属构件进行保护。

8.4 混凝土浇筑

8.4.1 浇筑混凝土前应对预埋于混凝土中的锚具、管道和 FRP 筋等进行全面检查验收，符合要求后方可进行浇注。

8.4.2 浇筑混凝土时，FRP 筋表面应无泥、油及其他污染物。

8.4.3 使用插入式振捣器时，振捣器应垂直插入混凝土中，并应避免碰撞 FRP 筋、模板、各种预埋件等。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

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

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 2 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666
- 3 《钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋》GB/T 1499.1
- 4 《钢筋混凝土用钢 第2部分：带肋钢筋》GB/T 1499.2
- 5 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370
- 6 《钢筋混凝土用环氧涂层钢筋》GB/T 25826
- 7 《结构工程用纤维增强复合材料筋》GB/T 26743
- 8 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2
- 9 《城市桥梁设计规范》CJJ 11
- 10 《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166
- 11 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85
- 12 《公路工程技术标准》JTG B01
- 13 《公路工程抗震规范》JTG B02
- 14 《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01
- 15 《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07-01
- 16 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60
- 17 《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T D60-01
- 18 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62
- 19 《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50
- 20 《纤维增强复合材料筋》JG/T 351
- 21 《钢筋混凝土用不锈钢钢筋》YB/T 4362

中华人民共和国行业标准

纤维增强复合材料筋混凝土桥梁
技术标准

CJJ/T 280 - 2018

条文说明

编制说明

行业标准《纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁技术标准》CJJ/T 280-2018，经住房和城乡建设部2018年4月10日以2018第51号公告批准、发布。

本标准制定过程中，编制组进行了FRP筋混凝土桥梁应用现状的调查研究，总结了我国FRP筋混凝土桥梁工程应用的实践经验，同时参考了国外先进技术标准，通过FRP筋黏结锚固性能、FRP筋耐久性能、普通FRP筋及预应力FRP筋混凝土受弯构件长短期受力性能、FRP筋混凝土偏压构件受力性能等试验，取得了一系列重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁技术标准》编制组按照章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	59
2	术语和符号	60
3	基本规定	61
3.1	一般规定	61
3.2	作用及结构计算	62
4	材料	63
4.1	纤维增强复合材料筋	63
4.2	混凝土	63
4.3	钢筋	64
4.4	锚具系统	64
5	承载能力极限状态计算	65
5.1	一般规定	65
5.2	正截面承载力计算	65
5.3	斜截面承载力计算	68
5.4	持久状况构件应力计算	68
5.5	短暂状况构件应力计算	69
6	正常使用极限状态验算	70
6.1	一般规定	70
6.2	纤维增强复合材料筋预应力损失计算	70
6.3	抗裂与裂缝宽度验算	71
6.4	挠度验算	72
7	构造要求	74
7.1	一般规定	74
7.2	纤维增强复合材料筋锚固与搭接	74
7.3	纤维增强复合材料筋配筋率	74

7.4	纤维增强复合材料箍筋	75
7.5	预应力纤维增强复合材料筋	75
8	施工与验收	76
8.1	一般规定	76
8.2	纤维增强复合材料筋下料及安装	76

1 总 则

1.0.1 国外 FRP 筋混凝土桥梁在城市桥梁工程中已经得到广泛应用，尤其是 FRP 筋的防腐性能，采用 FRP 筋被认为是一种大幅提高结构耐久性的方法，在主梁、立柱、桥面铺装或挡土墙等构件中都进行了使用。目前，美国、加拿大、日本等国家已有大量的应用案例。国内部分桥梁也采用了 FRP 筋混凝土桥梁的结构形式。为了规范 FRP 筋混凝土桥梁的结构设计，使其更具有科学性、先进性及合理性，总结理论研究和工程实践经验，并按照桥梁结构设计总体性规范的要求进行 FRP 筋混凝土桥梁设计标准的编制非常具有必要性。

1.0.2 本条给出了本标准适用的范围。

本标准依据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 规定的设计原则编制，适用范围为城市道路工程中涉及的纤维增强复合材料筋混凝土桥梁的设计、施工及验收。

1.0.3 需要满足的其他相关标准由本标准的适用范围确定。

2 术语和符号

术语列出了与 FRP 筋混凝土桥梁相关的专业性术语，以达到概念解释与表达统一的目的。符号按材料性能、作用与作用效应、几何参数、计算系数及其他等几个部分列出。主体符号参照城市桥梁设计规范，以达到设计使用习惯的一致性。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 按照极限状态法进行设计是现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的基本要求。极限状态分为承载能力和正常使用两类。

承载能力极限状态涉及桥梁的结构安全，包括构件及连接强度、疲劳、结构整体稳定等。正常使用极限状态涉及桥梁的使用条件及耐久性，包括结构的变形、抗裂性等。桥梁结构满足两种极限状态，保证了结构的安全性、适用性及耐久性，使桥梁结构满足可靠性的要求，达到全部预定的功能。

以概率理论为基础的极限状态设计，在基准期内结构的可靠指标满足目标指标，结构安全是指在统计基准期中概率意义上的安全。

3.1.2、3.1.3 承载能力极限状态计算，包括了持久状况及偶然状况下，构件截面的承载能力计算以及稳定、倾覆、疲劳的计算。在作用及荷载的组合中，截面抗弯、抗剪承载能力以及整体稳定计算时效应组合按照基本组合；倾覆计算和疲劳计算时效应组合按照标准组合。

正常使用极限状态计算，包括了持久状况下构件的挠度、抗裂性及应力等验算。应力验算是用工程实践经验来控制结构的正常使用状态，实质上也是强度计算的补充。

短暂状况一般可以采用应力控制，但对于结构受力状态比较复杂的施工工况，也应该进行承载能力及变形的验算及控制。

3.1.4 本条规定了普通 FRP 钢筋混凝土构件中受力筋的选用原则。目前工程中常用的 FRP 筋包括 GFRP 筋、CFRP 筋、BFRP

筋和 AFRP 筋。在普通 FRP 筋混凝土构件中，设计人员可根据 FRP 筋的力学性能、价格等因素选择 FRP 筋的类型。

3.1.5 预应力 FRP 筋应选用高强度、低蠕变、低松弛 FRP 筋，建议预应力 FRP 筋的选择依次为 CFRP 筋和 AFRP 筋。

3.1.6 设计基准期是为确定可变作用等的取值而选用的时间参数。采用以可靠性理论为基础的极限状态设计法需要确定选定的时间段，将其作为评定各种可变作用取值及与时间相关的材料性能取值的依据，这个时间段即为设计基准期。基准期内的结构安全并非绝对意义上的安全，而是结构的可靠指标满足目标指标，在统计基准期中概率意义上的安全。根据国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 - 2008 第 3.3.2 条的规定，桥梁结构的设计基准期应为 100 年。

3.2 作用及结构计算

3.2.1 FRP 筋混凝土桥梁的作用、作用组合，应根据桥梁的类型，按现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 或《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定执行。

4 材 料

4.1 纤维增强复合材料筋

4.1.1 目前工程中常用的 FRP 筋包括 GFRP 筋、CFRP 筋和 AFRP 筋和 BFRP 筋等，其物理力学性能应符合国家现行相关标准的规定。

4.1.2 由于混凝土的碱性比较强，桥梁结构用 GFRP 筋仅限于高强型、含碱量小于 0.8% 的无碱或耐碱玻璃纤维，不得使用中碱及高碱玻璃纤维。

4.1.3 按照现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的规定，FRP 筋的强度标准值应具有 95% 的保证率，弹性模量取平均值。除了 FRP 筋的拉伸强度、弹性模量外，还应有剪切强度、抗压强度、耐久性和耐火性能等方面的数据支持。

4.1.4 FRP 筋的分项系数主要考虑 FRP 筋及预应力 FRP 筋混凝土构件的可靠性指标与现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 一致，并考虑 FRP 筋的脆性特点确定的。

FRP 筋在长期所处环境的酸碱盐、湿度、温度、日照等作用下，性能会有不同程度地降低。由于不同环境情况对不同品种纤维材料劣化影响程度不同，考虑到耐久性的要求，采用不同的系数给予折减。环境影响系数是根据国内外试验研究结果并参考了美国规范《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》(ACI 440.1R-15) 的规定进行取值。

4.2 混 凝 土

4.2.1 抗压强度标准值系指试件用标准方法制作、养护至 28d 龄期，以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度（以

MPa 计)。

混凝土强度等级是混凝土各项力学指标的基本代表值，为边长 150mm 的立方体抗压强度总体分布平均值减去 1.645 倍标准差（方差）的值，前冠 C。

4.2.3、4.2.4 混凝土的物理力学指标取值按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定。

4.3 钢 筋

4.3.1~4.3.3 普通钢筋、环氧涂层钢筋和不锈钢钢筋应满足国家现行有关标准的要求。

4.4 锚 具 系 统

4.4.1 机械式锚具为依靠物理作用将 FRP 筋挤压、夹持锚固住的锚具，其锚固可靠性依赖于机械夹持的稳定性。黏结式锚具为采用胶黏剂依靠化学粘结作用将 FRP 筋锚固住的锚具，其锚固可靠性依赖于胶黏剂的性能及耐久性。混合式锚具为采用机械及黏结式相结合的方式将 FRP 料筋锚固住的锚具，其锚固可靠性依赖于两者的共同作用。由于 FRP 是各向异性材料，其在锚固端可能发生轴向拉应力和环向剪切应力的作用下的提前破坏，故应采取降低锚具在锚固过程中对 FRP 筋造成的环向剪切应力。

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 本条给出承载能力极限状态计算的表达式，适用于构件的承载力计算。本标准同时规定在计算采用预应力超静定结构的承载能力极限状态时，应考虑由预应力引起的次效应，与现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 保持一致。

5.1.2 由于 FRP 筋的弹性模量通常较低，对于受弯构件，受压区 FRP 纵筋对正截面承载力的影响不大，为计算方便可不计入其对正截面承载力的作用。对于受压构件，受压区 FRP 纵筋能提高构件的有效抗弯刚度和正截面承载力，故可计入受压区 FRP 纵筋的作用。

5.2 正截面承载力计算

5.2.1 认为普通 FRP 筋混凝土受弯构件正截面的应变关系符合平截面假定。FRP 筋的应变不应超出其极限拉应变。

5.2.2 普通 FRP 筋混凝土受弯构件的相对界限受压区高度可根据应变协调条件得到。设计时，可先根据平衡状态初步确定构件的抗弯承载力。

5.2.3 传统的钢筋混凝土设计是利用钢筋屈服后所表现的大应变以达到构件延性设计的目的。与钢筋不同，FRP 筋是一种线弹性的脆性材料，因此普通钢筋混凝土的延性设计理论并不完全适用于普通 FRP 筋混凝土设计。国内外试验表明，普通 FRP 混凝土受弯构件的破坏模式可以划分为 FRP 筋断裂（受拉破坏）和混凝土压碎（受压破坏）两种破坏模式。其中，受压破坏被认为是更理想的破坏模式，但对于某些受弯构件（如桥面板），受

拉破坏更为常见。因此，普通 FRP 筋混凝土构件的设计在既满足强度又满足刚度要求的前提下，任何一种破坏模式的出现都是允许的。 $\rho_{cf,b}$ 就是界定构件发生何种破坏模式的等效界限配筋率。

5.2.5、5.2.6 由于 FRP 筋的线弹性特征和材料力学性能的变异性，普通 FRP 筋混凝土受弯构件存在一个受拉破坏和受压破坏皆有可能的过渡区。经大量试验数据的统计分析，确定了过渡区的上限为 $1.5\rho_{cf,b}$ （参见 Weichen Xue, et al., “Design Equations for Flexural Capacity of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber - Reinforced Polymer Bars”, Journal of Composites for Construction, 2016, 20 (3): 04015069）。当构件的配筋率 ρ_{cf} 不大于 $1.5\rho_{cf,b}$ 时，破坏模式由受拉破坏控制；当构件的配筋率 ρ_{cf} 大于 $1.5\rho_{cf,b}$ 时，破坏模式由受压破坏控制。

对于受拉破坏控制截面，受压区混凝土未达到极限压应变，其应力分布理论上需根据内力平衡条件、变形协调条件以及混凝土的应力-应变关系迭代确定。本标准编制组基于参数分析结果，回归分析得到受压区高度简化计算公式。对于受压破坏控制截面，受压区混凝土达到极限压应变，截面受压混凝土的应力图形简化为矩形，混凝土强度可取为轴心抗压强度设计值 f_{cd} （详见《纤维增强复合材料筋混凝土桥梁技术标准》专题报告，《纤维增强复合材料筋混凝土桥梁技术标准》编制组，2017）。

5.2.7 基本假定同本标准第 5.2.1 条。增加对纵向受力钢筋的规定。

5.2.8、5.2.9 同时配置非预应力钢筋和预应力 FRP 筋的混凝土构件可能发生钢筋屈服后预应力 FRP 筋拉断破坏（破坏模式 I）、钢筋屈服后混凝土压碎破坏（破坏模式 II）和钢筋屈服前混凝土压碎破坏（破坏模式 III）等三种弯曲破坏模式。相对界限受压区高度 $\xi_{s,b}$ 和 $\xi_{fp,b}$ 就是区分这三种破坏模式的界限。通常情况下， $\xi_{s,b} > \xi_{fp,b}$ 。因此，当 $\xi_{fp,b} \leq \xi < \xi_{s,b}$ 时，构件发生钢筋屈服后混凝土压碎破坏（破坏模式 I）；当 $\xi < \xi_{fp,b}$ 时，钢筋屈服后预应力 FRP 筋拉断破坏（破坏模式 II）；当 $\xi \geq \xi_{s,b}$ 时，构件发

生钢筋屈服前混凝土压碎破坏（破坏模式Ⅲ）。其中，最理想的破坏模式为破坏模式Ⅱ，不宜出现破坏模式Ⅲ。

5.2.10、5.2.11 当构件的等效配筋率 $\rho_{\text{efp}} < \rho_{\text{efp,b}}$ 时，发生钢筋屈服后预应力 FRP 筋拉断破坏（破坏模式Ⅰ）；当 $\rho_{\text{efp}} \geq \rho_{\text{efp,b}}$ 时，发生钢筋屈服后混凝土压碎破坏（破坏模式Ⅱ）。

5.2.12、5.2.13 同时配置非预应力钢筋和预应力 FRP 筋的混凝土构件，其正截面抗弯承载力可根据内力平衡条件、变形协调条件以及混凝土的应力-应变关系确定。基于受拉破坏控制截面的参数分析结果，给出了截面受压区高度简化计算公式。在设计时，可先根据正常使用极限状态要求确定预应力 FRP 筋的面积，再根据承载力极限状态确定非预应力筋的面积。

5.2.14~5.2.18 本标准给出的体外预应力 FRP 筋混凝土梁正截面承载力计算方法适用于简支梁。体外预应力 FRP 筋混凝土梁正截面抗弯承载力计算的关键是确定体外预应力筋的极限应力和偏心距损失。由于体外预应力筋与周围混凝土不存在黏结，故无法通过平截面假定求解体外预应力筋的极限应力，而需通过考虑梁整体变形协调条件来确定。此外，体外预应力 FRP 筋混凝土梁的抗弯承载力还需考虑体外预应力 FRP 筋偏心距损失的影响。本标准给出的计算公式适用于 3 种典型荷载类型（跨中单个集中荷载、跨中两个对称集中荷载和均布荷载）和 3 种典型转向块布置形式（跨中无转向块、跨中设置一个转向块和跨中对称设置两个转向块）的体外预应力 FRP 筋混凝土梁受弯承载力计算。

5.2.19 FRP 混凝土轴心受压构件的纵向 FRP 筋一般达不到抗压强度。基于国内外试验结果，本标准规定轴压构件中的 FRP 筋的压应变限值为 0.002。

5.2.20 由于 FRP 筋的弹性模量通常低于钢筋的弹性模量，FRP 筋混凝土受压构件比同等配筋率的钢筋混凝土受压构件更容易失稳，因此本标准规定单向弯曲的 FRP 筋混凝土受压构件考虑长细比效应的限值为 17。该限值低于国内外规范中钢筋混凝土受压构件的限值。

5.2.21 通过 FRP 筋混凝土受压构件的试验研究和非线性有限元参数分析,修正了弯矩放大系数。由于 FRP 筋的弹性模量较低,FRP 筋混凝土受压构件的弯矩放大系数略大于同等配筋率钢筋混凝土受压构件的弯矩放大系数。该方法的基本思路与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 所用方法相同。

5.2.22 已有试验和分析表明,满足最小配筋率要求的 FRP 筋混凝土偏心受压构件通常发生混凝土压碎的破坏模式。基于平衡条件、协调条件和材料本构关系,本条给出了矩形截面柱的正截面承载力计算公式。

5.3 斜截面承载力计算

5.3.2~5.3.5 普通 FRP 筋混凝土构件的受剪承载力计算公式参照美国规范《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》(ACI 440.1R-15)的规定。

5.3.6 预应力 FRP 筋混凝土构件的受剪承载力计算公式参照美国规范《Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons》(ACI 440.4R-04)的规定。

5.4 持久状况构件应力计算

5.4.1 预应力 FRP 筋混凝土构件由于施加预应力以后截面应力状态较为复杂,除了计算构件承载能力外,尚需计算弹性阶段的构件应力。这些应力包括正截面混凝土的法向压应力、受拉区预应力 FRP 筋的拉应力和斜截面混凝土的主压应力。构件应力计算实质上是构件的强度计算,是构件承载力计算的补充。应力计算时,作用取标准值,汽车荷载应计入冲击系数,预应力效应应考虑在内,所有荷载分项系数取为 1.0。对预应力 FRP 筋混凝土简支梁,只需计算预应力引起的主效应;预应力 FRP 筋混凝土连续梁等超静定结构,尚需计算预应力、温度作用等其他可作用引起的次效应。

5.4.2、5.4.3 未开裂和允许开裂预应力 FRP 筋混凝土受弯构件，由作用标准值产生的混凝土法向应力和预应力 FRP 筋的应力计算，除了预应力筋弹性模量引起的差异外，与现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定一致。

当截面受拉区设置多层预应力 FRP 筋时，可仅计算最外层 FRP 筋的拉应力增量，此时，式 (5.4.3-4) 和式 (5.4.3-5) 中的 h_0 应为最外层预应力 FRP 筋重心至截面受压区边缘的距离。

5.4.4 使用阶段预应力 FRP 筋混凝土受弯构件的预应力 FRP 筋的限值应考虑环境影响系数的折减。

5.5 短暂状况构件应力计算

5.5.1 构件短暂状况的应力计算实属弹性阶段的强度计算，除有特别规定外，施工荷载采用标准组合。短暂状况一般不进行正常使用极限状态计算，可通过施工措施或构造布置来防止构件的大变形或出现不必要的裂缝。

5.5.4 对构件施加预应力时，混凝土要达到一定的强度和弹性模量。

5.5.6 普通 FRP 筋混凝土受弯构件，在自重等施工荷载作用下中性轴处的主拉应力的计算和限值，应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定。

6 正常使用极限状态验算

6.1 一般规定

6.1.1 正常使用极限状态是通过作用组合效应值的限值进行控制而实现的。FRP 筋混凝土桥梁正常使用极限状态除了验算构件的抗裂、裂缝宽度和挠度外，尚需验算作用准永久组合下受拉区 FRP 筋的应力。

6.1.3 借鉴美国规范《Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons》(ACI 440.4R-04) 中关于预应力 FRP 的张拉控制应力上限，本条将 CFRP 筋和 AFRP 筋的 σ_{con} 上限值分别取为 $0.65f_{\text{pk}}$ 和 $0.55f_{\text{pk}}$ 。如果控制应力取值过低，则预应力 FRP 筋在经历了各项损失后，对混凝土产生的预压应力过小，不能有效地提高预应力混凝土构件的抗裂度和刚度。此外，如果预应力过低，为了给构件提供相同的抗裂度所需 FRP 筋的根数增多，锚具数量增多，张拉锚固成本增加。因此，给出 CFRP 筋和 AFRP 筋的 σ_{con} 下限值分别为 $0.40f_{\text{fk}}$ 和 $0.35f_{\text{fk}}$ 。

6.1.4 蠕变断裂是指 FRP 筋在低于其抗拉强度拉力的长期作用下发生断裂的现象，这是 FRP 筋特有的问题。为了保证 FRP 筋在设计基准期内不发生断裂，其长期承受的应力不能大于某一个限值。根据国内外已有试验数据和美国规范《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》(ACI 440.1R-15)，CFRP 筋、AFRP 筋、GFRP 筋和 BFRP 筋的蠕变断裂折减系数分别取 1.4、2.0、3.5 和 2.0。

6.2 纤维增强复合材料筋预应力损失计算

6.2.1 由于 FRP 筋预应力损失涉及多方面因素，情况较为复

杂。因此，各项预应力损失值应首先结合工程具体条件由试验确定，当无条件进行试验或无可靠的实测数据时，才可采用本标准给出的数据和计算方法确定。

本条未给出的其他预应力损失，如预应力 FRP 筋与锚圈口之间的摩擦、先张法台座变形引起的损失等，当计算需要时，必须预先通过试验确定，或采用生产厂家及施工单位常年累计的数据。

6.2.2~6.2.7 FRP 筋预应力损失的计算方法与预应力钢筋基本相同。但是，由于 FRP 筋的物理力学性能以及与混凝土间的黏结性能、摩擦系数均与预应力筋不同，因此需重新确定内缩值 a 、摩擦系数 k 和 μ 。内缩值 a 应首先根据实测数据确定，如无实测数据，也可按照本标准表 6.2.3 所列数值确定。本标准表 6.2.3 中的内缩值是根据国内外试验数据所得，CFRP 筋和 AFRP 筋的系数 k 和 μ 参照日本规范《Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials》(JSCE-1997) 建议的值确定。

6.3 抗裂与裂缝宽度验算

6.3.3 由于 FRP 筋是非金属材料，耐腐蚀性能好，裂缝宽度的限定主要取决于美学的要求和对安全感的要求。参考加拿大规范《Canadian Highway Bridge Design Code》(CSA-S6-14)，将普通 FRP 筋混凝土构件的最大裂缝宽度限值放宽至 0.50mm。

6.3.4 同时配非预应力钢筋和预应力 FRP 筋的混凝土构件，可根据非预应力筋的类型按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中规定的限值取用。其中，采用环氧涂层钢筋或不锈钢钢筋的作为非预应力筋的构件，其最大裂缝宽度限值按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中环境类别 I 类确定。

6.3.5 试验研究表明，普通 FRP 筋混凝土受弯构件在正常使用极限状态下的内力臂系数要大于同等配筋率的钢筋混凝土受弯构

件，因此计算 σ_{fe} 的公式 (6.3.5-3) 中的内力臂系数由行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62-2004 中的 0.87 修正为 0.90。不同类型、表面特征的 FRP 筋与混凝土之间的黏结性能不同，因此，FRP 筋相对黏结特性系数宜尽可能参考已有试验数据取值。当无试验数据时，参考美国规范《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》(ACI 440.1R-15) 中的规定，建议 FRP 筋相对黏结特性系数可取 0.7。

6.3.6 由于 FRP 筋的弹性模量与钢筋有较大差异，在进行裂缝宽度计算时，应根据 FRP 筋与钢筋的弹性模量比，将 FRP 筋的实际截面面积修正为等效截面面积，非预应力拉筋等效应力和纵向受拉筋等效配筋率分别采用式 (6.3.6-2) 和式 (6.3.6-3) 进行计算。

6.4 挠度验算

6.4.1 构件的挠度限值取决于结构正常使用要求，因此挠度限值仍与一般混凝土构件相同。

6.4.3 FRP 筋及预应力 FRP 筋混凝土受弯构件的挠度计算可参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定进行，其中构件刚度可按本式进行计算，考虑 FRP 筋的弹性模量与钢筋的差异，引入了弹性模量修正系数 β_1 。

6.4.4 本条给出了正常使用极限状态下受弯构件的开裂截面换算截面惯性矩 I_{cr} 计算假定。对于矩形截面普通 FRP 筋混凝土构件，其开裂截面换算截面惯性矩 I_{cr} 按下式计算：

$$I_{cr} = \frac{bh_{0f}^3}{3} k^3 + \alpha_{FE} A_f h_{0f}^2 (1-k)^2 \quad (1)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f \alpha_{FE} + (\rho_f \alpha_{FE})^2} - \rho_f \alpha_{FE} \quad (2)$$

式中： I_{cr} ——构件开裂截面换算截面惯性矩 (mm^4)；

b ——矩形截面的宽度，T 形截面或 I 形截面的腹板宽度

(mm);

k ——截面中和轴到受压区边缘的距离与截面有效高度之比;

A_f ——纵向受拉 FRP 筋截面面积 (mm^2);

ρ_f ——纵向受拉 FRP 筋配筋率;

α_E ——FRP 筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值;

h_{of} ——纵向受拉 FRP 筋合力点至截面受压区边缘的距离 (mm)。

6.4.5 通过对普通 FRP 筋混凝土梁及预应力 FRP 筋混凝土梁为期 5 年的长期性能试验,并结合国内外试验数据和有限元分析结果,本条建议当采用 C30~C80 混凝土时, $\eta_0 = 2.00 \sim 1.65$ 。

7 构造要求

7.1 一般规定

7.1.1 本条对纵向受力 FRP 筋的横向和纵向净间距作出了规定。

7.1.2 由于 FRP 筋是非金属的材料，耐腐蚀性能好，FRP 筋混凝土构件的最小保护层厚度可适当放宽。同时，为了保证 FRP 具有可靠的锚固，本条对最小保护层厚度作了限制。

7.1.3 同时配非预应力钢筋和预应力 FRP 筋的混凝土构件，最小保护层厚度根据非预应力钢筋的类型按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中规定的限值执行。

7.2 纤维增强复合材料筋锚固与搭接

7.2.1 受拉 FRP 筋的锚固长度应通过试验确定。无试验数据时，本条给出的 FRP 筋的锚固长度参考了国内外研究资料和美国规范《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》(ACI 440.1R-15)。

7.2.2 根据国内外研究资料，并参考美国规范《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》(ACI 440.1R-15) 和加拿大规范《Design and Construction of Buildings Components with Fiber-Reinforced Polymers》(CSA/CAN S806-2012)，本条对 FRP 筋的搭接长度作出了规定。

7.3 纤维增强复合材料筋配筋率

7.3.1 为了防止构件发生混凝土一开裂，FRP 筋就拉断的破坏

模式，需限制纵向受拉 FRP 筋的最小配筋率。

7.3.2 FRP 筋混凝土受压构件的纵筋最小配筋率和最大配筋率，参考加拿大规范《Design and Construction of Buildings Components with Fiber-Reinforced Polymers》（CSA/CAN S806-2012）的规定。

7.3.3 直径较小的 FRP 筋受压易发生失稳破坏，故规定受压构件中纵向 FRP 筋的直径不应小于 15mm。

7.3.4 为了防止预应力 FRP 筋混凝土受弯构件发生混凝土开裂、FRP 筋立即拉断的破坏模式，本条给出了纵向受力筋的最小配筋要求。

7.4 纤维增强复合材料箍筋

7.4.1 已有试验表明，过小的 FRP 箍筋弯折半径会造成其弯拉强度的急剧下降，因此本条规定 FRP 箍筋的弯折半径与其直径的半径的比值不得小于 3。

7.4.3、7.4.4 为防止 FRP 筋及预应力 FRP 筋混凝土构件发生斜拉破坏、限制斜裂缝宽度，参照美国规范《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》（ACI 440.1R-15）给出了 FRP 箍筋最大间距和最小配箍率要求。

7.5 预应力纤维增强复合材料筋

7.5.1 孔道的曲率半径应满足孔道内预应力 FRP 筋的强度不会因为筋的转向而下降。本条规定的曲率半径是上限，如有可靠经验时可适当放宽。

7.5.4 锚固区应配置足够的横向间接钢筋以防止局部受压破坏。

8 施工与验收

8.1 一般规定

8.1.1 FRP 筋进场时，应抽取试件做力学性能检验。检验抽样应按如下原则进行：

1 以同一规格、同一种材料、同一生产工艺，稳定连续生产的 500 根为一批，不足此数量时，按一批计；

2 外观检验和尺寸偏差采取一次随机抽样，每批取样数量为 5 根；

3 拉伸性能采用二次随机抽样，样本数各为 5 根。拉伸性能检验应根据现行国家标准《结构工程用纤维增强复合材料筋》GB/T 26743 的规定进行。检验结果的判断规则应符合现行国家标准《结构工程用纤维增强复合材料筋》GB/T 26743 的规定。

8.1.2 FRP 筋表面没有保护包装时，表面的纤维易受到损伤，从而降低 FRP 筋的抗拉强度。过度弯曲也会造成纤维的损伤。

8.1.3 在高温环境下，纤维材料的力学性能会发生劣化，而长时间暴露在紫外线或潮湿环境中，FRP 筋中的聚合物组分会发生变化从而造成抗拉强度有极大的削弱，因此存放 FRP 筋时，应防火、避免高温、紫外线和化学物质的作用，同时保持通风干燥。

8.2 纤维增强复合材料筋下料及安装

8.2.1 FRP 筋的成型和制作一般在工厂完成，宜尽量避免现场裁剪。

8.2.2 在对 FRP 筋进行绑扎时，为避免 FRP 筋表面受损，宜采用塑料或尼龙材质绑扎线。表面有塑料保护层的电线也可以作为 FRP 筋的绑扎线。

8.2.3 因为 FRP 筋的密度比较低，在浇筑混凝土时，FRP 筋有可能会上浮偏移，因此需采取防止上浮的措施。

8.2.7 体外预应力 FRP 筋应采取有效的包裹措施防止紫外线照射。