

ICS 01.040.93

CCS P 25

团 体 标 准

T/GDHS 003—2021

无腹筋预应力超高性能混凝土 梁桥技术规范

Technical specification for prestressed ultra-high performance concrete beam
bridge without stirrups and bent-up reinforce bar

2021 - 04 - 12 发布

2021 - 04 - 12 实施

广东省公路学会 发 布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	2
3.1 术语	2
3.2 符号	3
4 材料	5
4.1 超高性能混凝土	5
4.2 钢筋、预应力钢筋	7
4.3 接缝材料	7
5 基本规定	7
5.1 设计	7
5.2 施工	8
5.3 验收	8
6 设计	9
6.1 持久状况承载能力极限状态计算	9
6.2 持久状况正常使用极限状态计算	19
6.3 持久状况和短暂状况构件的应力计算	20
6.4 构件计算规定	23
6.5 构造规定	23
7 施工	28
7.1 一般规定	28
7.2 预制场地规划与布置	28
7.3 施工支架、模板系统	29
7.4 超高性能混凝土原材料	30
7.5 超高性能混凝土拌合物制备	30
7.6 超高性能混凝土拌合物运输	31
7.7 超高性能混凝土拌合物浇筑	32
7.8 梁体养护及存放	33
7.9 预应力工程	34
8 运输、安装施工	35
8.1 一般规定	35
8.2 运输	35

8.3	安装施工.....	35
9	验收.....	36
9.1	超高性能混凝土材料检验.....	36
9.2	无腹筋预应力超高性能混凝土梁体检验.....	37
9.3	无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥检验.....	38
9.4	预应力筋加工、安装和张拉检验.....	38
9.5	预制梁节段拼装检验.....	38
附录 A	（规范性） 弯曲试验及数据处理方法.....	39
附录 B	（规范性） 四点弯曲试验和数据处理方法.....	46
附录 C	（规范性） 纤维取向系数 K 的计算.....	50
附录 D	（规范性） 超高性能混凝土中钢纤维体积率的试验、检验方法.....	51
	参考文献.....	52

前 言

本文件按照GDHS-BZBX-01-2021《广东省公路学会标准编写规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中路杜拉国际工程股份有限公司提出。

本文件由广东省公路学会归口。

本文件起草单位：中路杜拉国际工程股份有限公司、广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司、湖南省交通规划勘察设计院有限公司、广东工业大学、广州市市政集团有限公司、广东华隧建设集团股份有限公司、佛山市交通科技有限公司、广东省建工设计院有限公司、广东省建筑设计研究院有限公司、广州北环高速公路有限公司。

主编：孙向东

参加编写人员：毛志坚、梁立农、向建军、姜海波、郭云飞、詹国良、曾国东、田月强、李瑜、郭文华、王华、杨斌、周敏、霍文斌、周南杰、杜钊、张庆辉、林东

主审：邵长宇

参加审查人员：丁庆军、张钱松、洪显诚、涂满明、胡利平、宁平华、房金钱、王佳胜、庄明融、彭霞

本文件为首次发布。

引 言

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥为一种新型结构,与传统的预应力混凝土和钢梁桥相比,其设计、施工和验收均有所不同。目前,国内没有颁布超高性能混凝土梁桥的相关规范,为确保工程应用的规范性,以普通预应力钢筋混凝土行业标准为基础,吸纳国内外研究成果,并参考国外有关超高性能混凝土梁桥标准、规范,编制形成本文件,作为该类梁桥设计、施工和验收的技术规范。

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥结构充分利用超高性能混凝土的抗压性能,显著减小桥梁构件尺寸,利用超高性能混凝土抗拉性能取消梁内腹筋,简化了施工工艺。该结构主梁采用无腹筋预应力超高性能混凝土梁,桥面板采用普通钢筋混凝土或超高性能混凝土,大幅减轻结构自重、提升结构耐久性和简化预制施工工序。

本文件的编制过程中,参考了广州北环高速公路有限公司、中路杜拉国际工程股份有限公司和重庆交通大学工程设计研究院有限公司开展的《16m跨无主筋工字型UHPC预制简支梁关键技术研究》课题相关数据。

请各有关单位,在文件使用过程中,将发现的问题和意见及时反馈至中路杜拉国际工程股份有限公司(地址:广州市番禺区大石街石北工业路644号巨大创意产业园19栋204室,邮政编码:511430),以便修订时研用。

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥技术规范

1 范围

本文件规定了无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥的材料、设计、施工和验收的要求。
本文件适用于新建或改扩建无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥的设计、施工和验收。

2 规范性引用文件

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

- GB 13014 钢筋混凝土用余热处理钢筋
- GB/T 1499.1 钢筋混凝土用钢第1部分：热轧光圆钢筋
- GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50164 混凝土质量控制标准
- GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 31387 活性粉末混凝土
- JTG D60 公路桥涵通用设计规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
- JGJ/T 10 混凝土泵送施工技术规程
- JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范
- JGJ/T 283 自密实混凝土应用技术规程
- JT/T 695 混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件
- CJJ 11 城市桥梁设计规范
- CJJ 139 城市桥梁桥面防水工程技术规程
- CJJ 166 城市桥梁抗震设计规范
- CJJ/T 111 预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规程
- T/CBMF 37-2018 (T/CCPA 7-2018) 超高性能混凝土基本性能与试验方法
- T/CECS 10080 预制节段拼装用环氧胶粘剂

3 术语和符号

3.1 术语

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

超高性能混凝土 ultra-high performance concrete

兼具超高抗渗性能和力学性能的纤维增强水泥基复合材料。

3.1.2

无腹筋 without stirrups and bent-up bar

无箍筋和普通弯起钢筋。

3.1.3

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥 prestressed ultra-high performance concrete beam bridge without stirrups and bent-up reinforce bar

配置预应力钢筋且无箍筋和弯起钢筋的超高性能混凝土梁桥。

3.1.4

纤维取向系数 fiber orientation coefficient

纤维混凝土结构中纤维实际沿某一特定方向分布的取值系数，即在模制试件（假设满足空间随机分布）得到力学性能特征值与在结构上切割制备试件（实际分布情况）得到的力学性能特征值的比值。

3.1.5

现浇超高性能混凝土接缝 cast-in-place ultra-high performance concrete joint

构件或预制节段之间采用现浇超高性能混凝土连接的接缝。

3.1.6

应变硬化 strain hardening

当拉应力超过弹性极限抗拉强度后，拉应力不低于弹性极限抗拉强度，且拉应力随着拉应变增大而增加的现象。

3.1.7

应变软化 strain softening

当拉应力超过弹性极限抗拉强度后，拉应力低于弹性极限抗拉强度，且拉应力随着应变增大而缓慢下降的现象。

3.1.8

高温蒸汽养护 steam treating

超高性能混凝土构件在高温80℃以上蒸汽环境内进行的改善提升构件性能的养护过程。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

3.2.1 材料性能

E_c	——超高性能混凝土的弹性模量
f_{cd}	——超高性能混凝土轴心抗压强度设计值
f_{ck}	——超高性能混凝土轴心抗压强度标准值
f'_{ck}	——施工阶段的超高性能混凝土轴心抗压标准值
f_{cuk}	——边长100mm立方体的超高性能混凝土抗压强度标准值
f_{pd}	——预应力钢筋抗拉强度设计值
f'_{pd}	——预应力钢筋抗压强度设计值
$f_{pd,e}$	——体外预应力钢筋抗拉强度设计值
$f_{pd,i}$	——体内预应力钢筋抗拉强度设计值
$f'_{pd,i}$	——体内预应力钢筋抗压强度设计值
f_{pk}	——预应力钢筋抗拉强度标准值
$f_{pk,e}$	——体外预应力钢筋抗拉强度标准值
$f_{pk,i}$	——体内预应力钢筋抗拉强度标准值
f_{sd}	——普通钢筋抗拉强度设计值
f'_{sd}	——普通钢筋抗压强度设计值
f_{td}	——超高性能混凝土轴心抗拉强度设计值
f_{tfk}	——超高性能混凝土产生裂缝后的抗拉强度标准值
f_{tfm}	——超高性能混凝土产生裂缝后的抗拉强度平均值
f_{tk}	——超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值
f'_{tk}	——施工阶段的超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值
f_{tke}	——超高性能混凝土弹性极限抗拉强度标准值
f_{tme}	——超高性能混凝土弹性极限抗拉强度平均值
G_c	——超高性能混凝土的剪切模量
K	——纤维取向系数

3.2.2 作用与作用效应

M_{cr}	——受弯构件的正截面开裂弯矩值
M_d	——弯矩的组合设计值
M_{ud}	——受弯构件的正截面抗弯承载力设计值
V_c	——构件斜截面超高性能混凝土抗剪承载力设计值
V_d	——剪力的组合设计值
V_f	——构件斜截面纤维抗剪承载力设计值
V_p	——构件斜截面预应力钢筋抗剪承载力设计值
V_u	——构件斜截面抗剪承载力
σ_f	——纤维增强截面残余抗拉强度平均值
σ_{con}	——预应力钢筋的锚下张拉控制应力
σ_{cp}	——作用频遇组合和预加力产生的超高性能混凝土的主压应力
σ_{pc}	——永存（有效）预应力在截面边缘产生的超高性能混凝土法向预压应力
$\sigma_{pd,e}$	——体外预应力钢筋的极限应力设计值
σ_{pe}	——预应力钢筋的永存（有效）预应力
σ_{pi}	——传力锚固后预应力钢筋的初始应力

- $\sigma_{p0,i}$ ——截面受拉区预应力钢筋合力点处超高性能混凝土正应力等于零时的预应力钢筋的应力
 $\sigma'_{p0,i}$ ——截面受压区预应力钢筋合力点处超高性能混凝土正应力等于零时的预应力钢筋的应力
 σ_{st} ——作用频遇组合下构件抗裂验算截面边缘超高性能混凝土的法向拉应力
 σ_{tp} ——作用频遇组合和预加力产生的超高性能混凝土的主拉应力

3.2.3 几何参数

- $A_{p,e}$ ——截面体外预应力钢筋的截面面积
 $A_{p,i}$ ——截面受拉边或受压较小边体内预应力钢筋的截面面积
 $A'_{p,i}$ ——截面受压较大边体内预应力钢筋的截面面积
 $A_{pb,e}$ ——斜裂缝范围内体外弯起预应力钢筋的截面面积
 $A_{pb,i}$ ——斜裂缝范围内体内弯起预应力钢筋的截面面积
 A_s ——截面受拉边或受压较小边纵向钢筋的截面面积
 A'_s ——截面受压较大边纵向钢筋的截面面积
 a_s ——截面受压较小边钢筋合力点至截面受压较小边缘的距离
 a'_s ——截面受压较大边钢筋合力点至截面受压较大边缘的距离
 a' ——受压区普通钢筋和体内预应力钢筋的合力点至受压边缘的距离
 $a_{p,i}$ ——截面受压较小边体内预应力钢筋合力点至截面受压较小边缘的距离
 $a'_{p,i}$ ——截面受压较大边体内预应力钢筋合力点至截面受压较大边缘的距离
 b ——矩形截面的宽度，带翼形截面腹板的宽度
 b_f ——带翼形截面受压较小边翼板的宽度
 b'_f ——带翼形截面受压较大边翼板的有效宽度
 $b'_{f,s}$ ——带翼形截面受压翼板的抗剪有效宽度
 b'_h ——带翼形截面腹板承托或加腋的宽度
 h_f ——带翼形截面受压较小边翼板的厚度
 h'_f ——带翼形截面受压较大边翼板的有效宽度内的平均厚度
 h_0 ——截面受拉边或受压较小边的普通钢筋和体内预应力钢筋合力点至受压较大边缘的距离
 h'_0 ——截面受压较大边钢筋合力点至受压较小边缘的距离
 h_s ——受拉区普通钢筋合力点至截面受压区边缘的距离
 $h_{p,i}$ ——受拉区体内预应力钢筋合力点至截面受压区边缘的距离
 $h_{p,e}$ ——体外预应力钢筋合力点至截面受压边缘的初始距离
 $h_{pu,e}$ ——体外预应力钢筋合力点至截面受压较大边缘的极限距离
 L ——构件的计算跨径
 S_0 ——换算截面重心轴以上（或以下）部分面积对截面重心轴的面积矩
 W_0 ——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩
 x ——截面受压区高度或接缝截面剪压区的高度
 x_b ——截面纵向受拉钢筋达到抗拉强度设计值、受压区超高性能混凝土外缘同时达到极限压应变时的受压区高度
 θ ——临界斜裂缝与梁轴线间夹角

3.2.4 计算系数及其他

- c ——粘结强度或粘结力系数
 γ_0 ——结构的重要性系数
 γ ——截面受拉区超高性能混凝土的塑性影响系数或接缝对二次效应的影响系数
 γ_c ——超高性能混凝土材料分项系数
 ϕ ——截面形状影响系数
 ϕ_b ——接缝对抗弯承载力的影响系数

4 材料

4.1 超高性能混凝土

4.1.1 超高性能混凝土原材料的要求和制备方法应符合《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)的规定。

4.1.2 超高性能混凝土强度等级应按边长为 100mm 立方体试件的抗压强度标准值确定。

条文说明

沿用《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)第 9 条规定,立方体抗压强度标准值的测定采用边长 100mm 的立方体试件作为标准试件,超高性能混凝土强度等级的保证率取为 95%。其抗压强度试验值均不应乘以尺寸换算系数。

4.1.3 超高性能混凝土立方体抗压强度标准值 f_{cuk} 、轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 应符合表 1 的要求。超高性能混凝土立方体抗压强度标准值 f_{cuk} 和轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 按《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37-2018)(T/CCPA 7-2018)试验方法进行测定。

表1 超高性能混凝土强度标准值

强度种类	强度等级							
	UC130	UC140	UC150	UC160	UC170	UC180	UC190	UC200
f_{cuk} (MPa)	130	140	150	160	170	180	190	200
f_{ck} (MPa)	91.0	98.0	105.0	112.0	120.0	125.0	134.0	140.0
f_{tk} (MPa)	6.2	6.7	7.2	7.7	8.3	8.8	9.3	9.8

条文说明

参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)、《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ43/T325-2017)中混凝土轴心抗压强度的计算方法,超高性能混凝土轴心抗压强度 f_{ck} 可取 $0.88\alpha_1\alpha_2f_{cuk}$,其中,系数 0.88 为考虑实际工程构件与立方体试件强度差异的折减系数; α_1 为脆性折减系数,超高性能混凝土掺入一定含量的钢纤维后,其脆性明显低于普通混凝土,故脆性折减系数取 1.0; α_2 为棱柱体与立方体试件强度的比值,已有研究表明,其取值范围为 0.78~0.82,本文件近似取中值 0.80。

4.1.4 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值 f_{cd} 和轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 2 采用。

表2 超高性能混凝土强度设计值

强度种类	强度等级							
	UC130	UC140	UC150	UC160	UC170	UC180	UC190	UC200
f_{cd} (MPa)	62.5	67.5	72.5	77.2	82.5	86.2	92.2	95.5
f_{td} (MPa)	4.2	4.6	5.0	5.3	5.6	6.0	6.4	6.7

条文说明

考虑材料分项系数的抗压强度设计值,记为 f_{cd} ,用于构件设计。对于混凝土材料,材料分项系数 γ 取 1.45,轴心抗压强度设计值 f_{cd} 取为 $0.88 \times 0.80 \times f_{cuk} / 1.45$ 。

考虑材料分项系数的抗拉强度设计值,记为 f_{td} ,对于混凝土材料,材料分项系数 γ 取 1.45,因此轴心抗拉强度设计值 f_{td} 取为 $f_{tk} / 1.45$ 。

4.1.5 超高性能混凝土受压或受拉时的弹性模量 E_c 应按表 3 采用。

表3 超高性能混凝土的弹性模量

弹性模量 ($\times 10^4$ MPa)	强度等级							
	UC130	UC140	UC150	UC160	UC170	UC180	UC190	UC200
E_c	4.15	4.20	4.35	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50

条文说明

弹性模量与纤维掺量紧密相关,本文件给出不同强度等级弹性模量下限值。超高性能混凝土弹性模量 E_c 宜采用 100mm \times 100mm \times 300mm 的试件,按照《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)的相应规定进行测试。

4.1.6 超高性能混凝土的剪切模量 G_c 可按本文件表 3 数值的 0.4 倍采用,超高性能混凝土的泊松比 ν 可采用 0.2。

4.1.7 超高性能混凝土线膨胀系数应按 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 采用。

条文说明

对于温度线膨胀系数,各国超高性能混凝土指南(规范)规定值介于 $1.0 \sim 1.35 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 间。一般认为,超高性能混凝土材料中温度线膨胀系数大的水泥基材料含量高,线膨胀系数小的粗骨料含量低或不含,故其线膨胀系数应高于普通混凝土 ($1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$),且低于钢材 ($1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$),结合国内相关试验研究,本文件超高性能混凝土线膨胀系数取 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

4.1.8 承载能力极限状态超高性能混凝土受压应力-应变关系应根据试验确定。其中超高性能混凝土的极限压应变设计值取 $\epsilon_{cu} \geq 0.0035$, 极限拉应变设计值取 $\epsilon_{tu} \geq 0.0025$ 。

条文说明

本文件规定极限压、拉应变设计值按照附录 B 得到的试验结果确定。无试验数据时,参考国内外研究成果,超高性能混凝土的极限压应变设计值取 $\epsilon_{cu} \geq 0.0035$, 极限拉应变设计值取 $\epsilon_{tu} \geq 0.0025$ 。

4.1.9 超高性能混凝土抗拉性能可分为应变软化型、低应变硬化型和高应变硬化型,其分类应符合表 4 要求,且应按照附录 A 和附录 B 描述的试验方法进行测试。

表4 超高性能混凝土抗拉性能分级

类别	指标
应变软化型 (T1 类)	$f_{tfm}/K_{global} < f_{tme}$ 且 $f_{tfk}/K_{global} < f_{tke}$
低应变硬化型 (T2 类)	$f_{tfm}/K_{global} \geq f_{tme}$ 且 $f_{tfk}/K_{global} < f_{tke}$
高应变硬化型 (T3 类)	$f_{tfm}/K_{global} \geq f_{tme}$ 且 $f_{tfk}/K_{global} \geq f_{tke}$

注: f_{tke} —超高性能混凝土弹性极限抗拉强度标准值; f_{tme} —超高性能混凝土弹性极限抗拉强度平均值; f_{tfk} —超高性能混凝土产生裂缝后的抗拉强度标准值; f_{tfm} —超高性能混凝土产生裂缝后的抗拉强度平均值; K_{global} —整体纤维取向系数,按第4.1.10条规定取值。

条文说明

对超高性能混凝土的高应变硬化、低应变硬化和应变软化性能进行了分类,超高性能混凝土弹性极限抗拉强度标准值 f_{tke} 、超高性能混凝土弹性极限抗拉强度平均值 f_{tme} 、超高性能混凝土产生裂缝后的抗拉强度标准值 f_{tfk} 和超高性能混凝土产生裂缝后的抗拉强度平均值 f_{tfm} 通过四点弯曲试验确定。

4.1.10 纤维取向系数 K 宜通过附录C的方法进行计算,若无实测数据,整体纤维取向系数 K_{global} 取 1.25,局部纤维取向系数 K_{local} 取 1.75。

条文说明

为了考虑纤维取向对超高性能混凝土抗拉性能的影响,本条文引入纤维取向系数 K 对超高性能混凝土力学性能指标进行折减,在没有开展现场模型试验时,取整体纤维取向系数 K_{global} 为1.25,局部纤维取向系数 K_{local} 为1.75。局部纤维取向系数适用于局部效应分析(如预应力锚固区和桥面板冲切等问题),整体纤维取向系数适用于整体效应分析(如板或梁的抗弯和抗剪强度等问题)。

4.1.11 无腹筋预应力超高性能混凝土的容重取 $25\text{kN}/\text{m}^3$ 。

4.1.12 超高性能混凝土的工作性能,按照水泥净浆流动度试验,流动度不宜小于 180mm,且应符合《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283)的规定。

4.1.13 在不同的养护条件下，超高性能混凝土的收缩应变和徐变系数按表 5 取值。

表5 超高性能混凝土的收缩应变和徐变系数

养护条件	终凝后收缩应变 ($\times 10^{-6}$)	徐变系数
80℃高温蒸汽养护 72 小时以上 (或 90℃高温蒸汽养护 48 小时以上)	≤ 50	0.2
自然养护 (相对湿度 50%~70%, 龄期 28 天)	700	0.8

条文说明

收缩徐变系数可按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082) 试验确定, 当无试验数据时, 可按本文件给出的超高性能混凝土收缩应变和徐变系数一般值取用。当采用 90℃蒸汽养护方式时, 超高性能混凝土收缩在 48 小时, 即在养护期内已基本完成, 后期收缩增量可忽略不计。

4.2 钢筋、预应力钢筋

普通钢筋应符合《钢筋混凝土用钢第1部分: 热轧光圆钢筋》(GB/T 1499.1)、《钢筋混凝土用钢第2部分: 热轧带肋钢筋》(GB/T 1499.2) 和《钢筋混凝土用余热处理钢筋》(GB 13014) 的规定。

预应力钢筋应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 和《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224) 的规定。

4.3 接缝材料

当超高性能混凝土预制节段接缝采用环氧树脂胶时, 其胶体性能及粘结能力应符合《预制节段拼装用环氧胶粘剂》(T/CECS 10080) 的规定。

5 基本规定

5.1 设计

5.1.1 本文件采用以概率理论为基础和按分项系数表达的极限状态设计方法, 桥梁结构的设计基准期为 100 年。

5.1.2 桥梁结构应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计, 其作用和作用组合应符合《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60) 的要求。

5.1.3 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥构件的超高性能混凝土强度等级不应低于 UC130。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥构件的超高性能混凝土强度等级不应低于 UC130, 即立方体抗压强度标准值不低于 130MPa。各国超高性能混凝土构件最低强度要求差异较大, 早期标准规定较高, 如法国 2001 年和 2013 年指南和日本 2004 指南均定为 150MPa, 韩国 2012 年的指南更达到 180MPa。然而, 过高的抗压强度难以充分发挥作用, 随着行业的发展和从业者对超高性能混凝土认识的深入, 目前超高性能混凝土最低抗压强度有降低的趋势, 如法国 NF P 18-470 定为 130MPa, 瑞士 SIA 2052 和美国 ASTM C1856/1856M-17 定为 120MPa。结合目前国内和国外工程应用实践, 将超高性能混凝土最低抗压强度定为 130MPa 较为合适, 利于材料组分的调整、降低施工难度和工程造价, 提升超高性能混凝土竞争力。

5.1.4 当超高性能混凝土材料满足 4.1.9 规定的高应变硬化型性能指标要求时, 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥结构无需进行裂缝宽度验算。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥纵向采用全预应力构件, 无需进行裂缝宽度验算, 中小跨径配筋超高性能混凝土

构件，当采用 T3 类超高性能混凝土时，钢筋屈服时裂缝宽度仅 0.02mm~0.03mm，与常规混凝土水化初始裂缝相近，故无需进行裂缝宽度计算。

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥结构采用全预应力构件，无拉应力，且压应力均小于 $0.6f_{cuk}$ ，国内外研究成果揭示该受力状态下超高性能混凝土具有无限循环疲劳寿命。

5.1.5 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥宜采用标准化结构形式和跨径，不同跨径宜采用下列断面形式：

- a) 跨径 $L \leq 10\text{m}$ 时，宜采用无腹筋预应力超高性能混凝土 π 型梁；
- b) 跨径 $10 < L \leq 20\text{m}$ 时，宜采用无腹筋预应力超高性能混凝土 I 型梁；
- c) 跨径 $20 < L \leq 30\text{m}$ 时，宜采用无腹筋预应力超高性能混凝土 T 型梁；
- a) 跨径 $L > 30\text{m}$ 时，宜采用无腹筋预应力超高性能混凝土 U 型梁。

5.1.6 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥结构重要性系数应取 1.1。

5.1.7 桥梁分类、桥梁设计使用年限、作用分类和作用效应组合应符合《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的规定。

5.1.8 桥梁结构的抗震设计应符合《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T2231-01）和《城市桥梁抗震设计规范》（CJJ 166）的规定。

5.1.9 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥应根据结构特点、使用年限和环境条件等进行耐久性设计。

条文说明

环境条件详见 6.5.1 条要求。

5.1.10 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥的上部结构构件的连接接缝可采用干接缝、环氧胶接缝或现浇超高性能混凝土接缝，应根据使用环境要求和构造特点进行构件连接接缝设计。

5.2 施工

5.2.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥施工前应根据技术特点和条件编制施工组织设计和专项施工技术方案，内容应包括施工方案、质量管理和安全措施等。

5.2.2 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥施工应根据设计要求、预制场地条件和施工工艺等，合理选用短线法、长线法节段预制或整跨预制。

5.2.3 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体宜采用工厂化预制，配备相应的生产设施，并应有完善的质量管理体系和必要的试验检测设备。

条文说明

超高性能混凝土收缩较大，容易开裂，构件宜于温度和湿度可控的条件下预制，无腹筋预应力超高性能混凝土梁宜进行蒸汽养护，增大预制构件密实性和强度；无腹筋预应力超高性能混凝土构件尺寸较小，预制精度要求较高；上述特点要求无腹筋预应力超高性能混凝土梁体宜采用工厂化预制。

5.2.4 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体的运输及拼装设备应满足节段重量、运输条件和架设安装等工艺要求。

5.2.5 吊装设备、拼装设备和支撑等临时结构应编制专项施工技术方案，并应制定相应的安全生产应急措施。

5.2.6 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体施工应制订包含预制阶段、拼装或整体吊装阶段在内的全过程测量控制方案。

5.3 验收

5.3.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥工程质量的检验和评定，本文件未进行规定的，应符合《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的要求。

6 设计

6.1 持久状况承载能力极限状态计算

6.1.1 一般规定

6.1.1.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体的持久状况设计应按承载能力极限状态的要求，对构件进行承载能力计算。

6.1.1.2 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体截面承载力计算以破坏形态及相应受力状态为基础，在变形协调的条件下建立受力平衡方程，各种材料的极限应力应达到相应规定的强度设计值。

6.1.1.3 构件正截面承载能力应按下列基本假定计算：

- 构件弯曲后，其变形后仍然为平面，并且同变形后的杆件轴线垂直；
- 截面受拉超高性能混凝土的抗拉强度不予考虑；
- 纵向体内钢筋的应力等于钢筋应变与其弹性模量的乘积，但其值应符合下列要求。

$$-f'_{sd} \leq \sigma_{si} \leq f_{sd} \dots\dots\dots (1)$$

$$-(f'_{pd} - \sigma_{p0,i}) \leq \sigma_{pi} \leq f_{pd} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

σ_{si} ——第*i*层纵向普通钢筋的应力，正值表示拉应力，负值表示压应力；

σ_{pi} ——第*i*层预应力钢筋的应力，正值表示拉应力，负值表示压应力；

f'_{sd} ——纵向普通钢筋的抗压强度设计值；

f_{sd} ——纵向普通钢筋的抗拉强度设计值；

f'_{pd} ——纵向预应力钢筋的抗压强度设计值；

f_{pd} ——纵向预应力钢筋的抗拉强度设计值；

$\sigma_{p0,i}$ ——第*i*层纵向预应力钢筋截面重心处混凝土法向应力等于零时，预应力钢筋中的应力。

6.1.2 受弯构件

6.1.2.1 受弯构件截面的纵向受拉钢筋达到抗拉强度设计值和受压区超高性能混凝土外缘同时达到极限压应变时，正截面的相对界限受压区高度应按表6取用。

表6 相对界限受压区高度 ξ_b

钢筋种类	超高性能混凝土强度等级		
	UC150 及以下	UC160~UC190	UC200 以上
HRB400、HRBF400、RRB400	0.48	0.45	0.42
HRB500、HRBF500	0.45	0.42	0.40
预应力钢绞线、钢丝	0.35	0.32	0.30

注1：截面受拉区内配置不同种类钢筋时， ξ_b 值应选用其中各种钢筋的最小值。
注2： $\xi_b = \frac{\chi_b}{h_0}$ ， χ_b 为截面纵向受拉钢筋达到抗拉强度设计值和受压区超高性能混凝土外缘同时达到极限压应变时的受压区高度。

条文说明

本条文规定原理与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)第5.2.1规定相同。主梁受弯构

件的纵向受拉钢筋屈服和截面受压区混凝土破坏同时发生（即界限破坏）时，构件正截面相对界限受压区高度 ξ_b ，可根据平截面假定求得。

6.1.2.2 受弯构件正截面抗弯承载力宜采用材料应力-应变本构关系进行精确计算。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土构件一般采用无明显屈服台阶的预应力钢筋，构件破坏时超高性能混凝土和钢筋已进入材料弹塑性阶段，钢筋的极限应力精确值需要通过其应力-应变本构关系进行确定。

为准确考虑钢筋极限应力和超高性能混凝土应变硬化等本构特征，无腹筋预应力超高性能混凝土受弯构件正截面抗弯承载力计算宜采用材料应力-应变本构关系进行精确计算，实际本构关系根据材料试验获取。

6.1.2.3 受压区呈矩形截面的受弯构件，正截面抗弯承载力计算如图1所示。

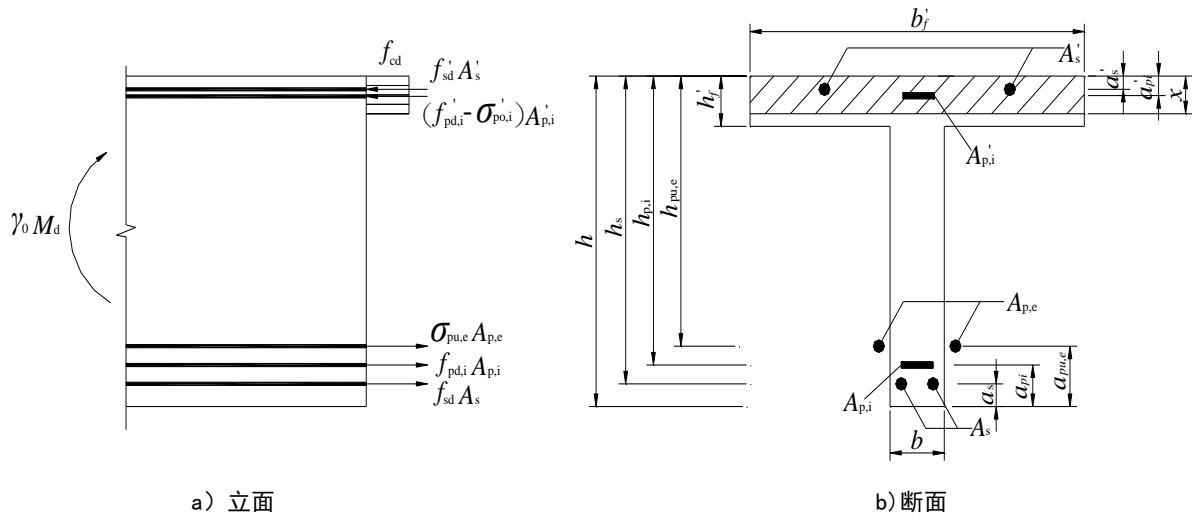


图1 受压区呈矩形截面受弯构件的正截面抗弯承载力计算图示

正截面抗弯承载力应按下列式计算。

$$\gamma_0 M_d \leq \phi_b [b'_j x f_{cd} (h_0 - \frac{x}{2}) + A'_s f'_{sd} (h_0 - a'_s) + A'_{p,i} (f'_{pd,i} - \sigma'_{p0,i}) (h_0 - a'_{p,i}) - A_{p,e} \sigma_{p,d,e} (h_0 - h_{p,u,e})] \dots \dots \dots (3)$$

截面受压区高度 x 按下式计算：

$$A_{p,e} \sigma_{p,d,e} + A_{p,i} f_{pd,i} + A_s f_{sd} = A'_s f'_{sd} + A'_{p,i} (f'_{pd,i} - \sigma'_{p0,i}) + f_{cd} b'_j x \dots \dots \dots (4)$$

截面受压区高度应符合下列要求：

$$x \leq \xi_b h_0 \dots \dots \dots (5)$$

当截面受压区配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受压（即 $(f'_{pd,i} - \sigma'_{p0,i})$ 为正值）时。

$$x \geq 2a' \dots \dots \dots (6)$$

若不满足式（6）的条件，则正截面抗弯承载力应符合下列要求：

$$\gamma_0 M_d \leq \phi_b [A_{p,e} \sigma_{p,d,e} (h_{p,u,e} - a'_s) + A_{p,i} f_{pd,i} (h_{p,i} - a'_s) + A_s f_{sd} (h_s - a'_s)] \dots \dots \dots (7)$$

当截面受压区仅配普通钢筋或配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受拉（即 $(f'_{pd,i} - \sigma'_{p0,i})$ 为负值）时。

$$x \geq 2a'_s \dots \dots \dots (8)$$

若不满足式（8）的条件，则正截面抗弯承载力应符合下列要求：

$$\gamma_0 M_d \leq \phi_b [A_{p,e} \sigma_{pd,e} (h_{pu,e} - a'_s) + A_{p,i} f_{pd,i} (h_{p,i} - a'_s) + A_s f_{sd} (h_s - a'_s) - A'_{p,i} (f'_{pd,i} - \sigma'_{p0,i}) (a'_{p,i} - a'_s)] \dots \dots \dots (9)$$

式中：

- γ_0 ——结构重要性系数，按本规程5.1.6的规定取用；
- M_d ——截面弯矩的组合设计值；
- ϕ_b ——接缝对抗弯承载力的影响系数：接缝截面 $\phi_b=0.95$ ；非接缝截面 $\phi_b=1.0$ ；
- b'_f ——矩形截面的宽度或带翼形截面受压翼板的有效宽度；
- x ——截面受压区高度；
- f_{cd} ——超高性能混凝土的轴心抗压强度设计值；
- h_0 ——受拉区普通钢筋和体内预应力钢筋的合力点至受压边缘的距离；
- A'_s ——受压区钢筋的截面面积（接缝处钢筋不连续时 A'_s 取零）；
- f'_{sd} ——普通钢筋的抗压强度设计值；
- a'_s ——受压区钢筋合力点至截面受压边缘的距离；
- $A'_{p,i}$ ——受压区体内预应力钢筋的截面面积；
- $f'_{pd,i}$ ——体内预应力钢筋的抗压强度设计值；
- $\sigma'_{p0,i}$ ——受压区体内预应力钢筋合力点处超高性能混凝土正应力等于零时的预应力钢筋的应力；
- $a'_{p,i}$ ——受压区体内预应力钢筋合力点至受压边缘的距离；
- $A_{p,e}$ ——体外预应力钢筋的截面面积；
- $\sigma_{pd,e}$ ——体外预应力钢筋的极限应力设计值；
- $h_{pu,e}$ ——体外预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离；
- $A_{p,i}$ ——受拉区体内预应力钢筋的截面面积；
- $f_{pd,i}$ ——体内预应力钢筋的抗拉强度设计值；
- A_s ——受拉区普通钢筋的截面面积（接缝处普通钢筋不连续时 A_s 取零）；
- f_{sd} ——普通钢筋的抗拉强度设计值；
- a' ——受压区普通钢筋和体内预应力钢筋的合力点至受压边缘的距离；
- $h_{p,i}$ ——受拉区体内预应力钢筋合力点至受压区边缘的距离；
- h_s ——受拉区体内纵向受拉普通钢筋合力点至截面受压区边缘的距离。

以上符号意义参见图1。

6.1.2.4 受压区呈 T 形截面的受弯构件，正截面抗弯承载力计算如图 2 所示。

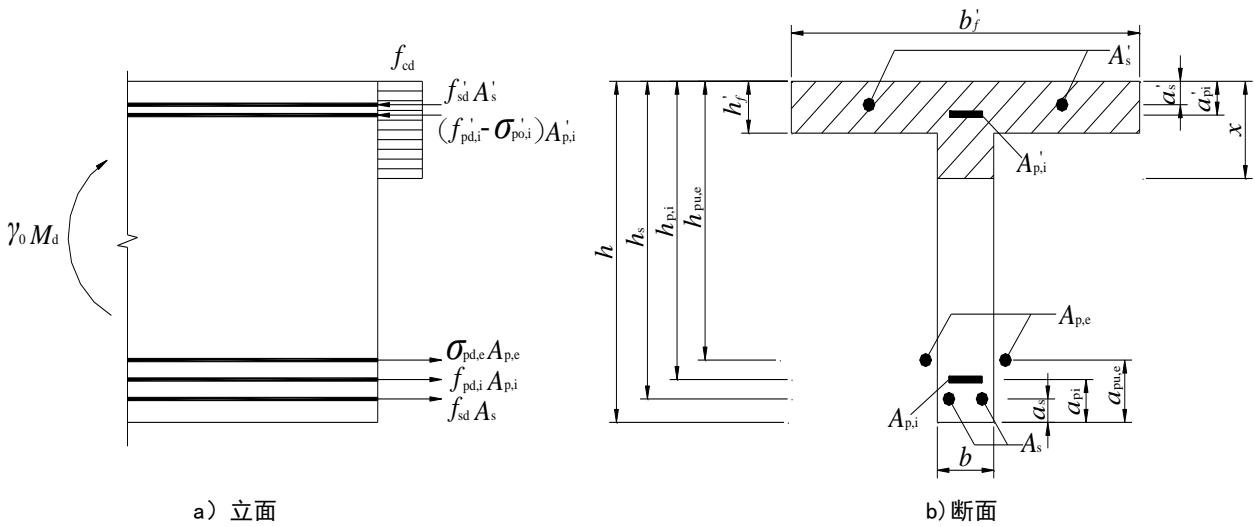


图2 受压区呈 T 形截面受弯构件的正截面抗弯承载力计算图示

正截面抗弯承载力应按下列式计算：

$$\gamma_0 M_d \leq \phi_b \left\{ \left[b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \right] f_{cd} + A'_s f'_{sd} (h_0 - a'_s) + A'_{p,i} (f'_{p,d,i} - \sigma'_{p0,i}) (h_0 - a'_{p,i}) - A_{p,e} \sigma_{p,d,e} (h_0 - h_{p,u,e}) \right\} \dots \dots \dots (10)$$

截面受压区高度 x 应按下列式计算：

$$A_{p,e} \sigma_{p,d,e} + A_{p,i} f_{p,d,i} + A_s f_{s,d} = A'_s f'_{s,d} + A'_{p,i} (f'_{p,d,i} - \sigma'_{p0,i}) + f_{c,d} [b x + (b'_f - b) h'_f] \dots \dots \dots (11)$$

式中：

- b ——腹板的宽度；
- h'_f ——受压翼板的厚度。

其余符号意义和规定同6.1.2.3条及参见图2。

6.1.2.5 斜截面抗剪承载力计算如图 3 所示。

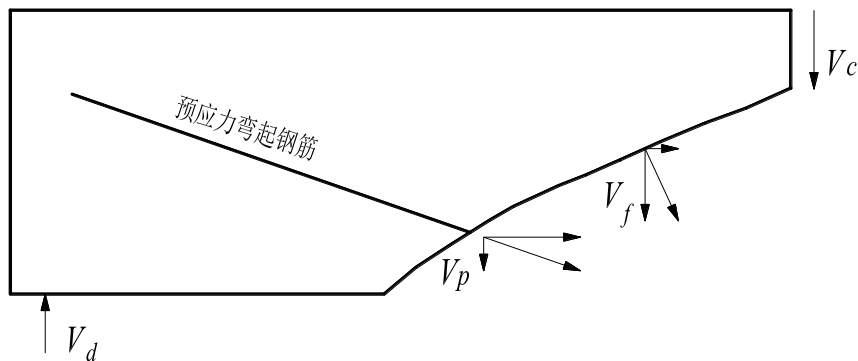


图3 受弯构件斜截面抗剪承载力计算

斜截面抗剪承载力的计算按下式计算：

$$\gamma_0 V_d \leq V_u \dots\dots\dots (12)$$

矩形、T形和I形截面的受弯构件，其斜截面抗剪承载能力 V_u 应下列公式计算：

$$V_u = V_c + V_f + V_p \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；
- V_d ——剪力组合设计值；
- V_u ——构件斜截面抗剪承载能力；
- V_c ——超高性能混凝土基体抗剪承载力设计值；
- V_f ——构件斜截面上纤维抗剪承载力设计值；
- V_p ——构件斜截面上预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值。

a) 超高性能混凝土基体抗剪承载力设计值 V_c 。

1) 普通钢筋超高性能混凝土截面， V_c 按下式计算。

$$V_c = \frac{0.21}{\gamma_c} k_N (f_{cuk} - 15)^{1/2} b h_0 \dots\dots\dots (14)$$

2) 预应力钢筋超高性能混凝土截面， V_c 按下式计算。

$$V_c = \frac{0.24}{\gamma_c} k_N (f_{cuk} - 15)^{1/2} b z \dots\dots\dots (15)$$

3) 素超高性能混凝土截面， V_c 按下式计算。

$$V_c = \frac{0.18}{\gamma_c} k_N (f_{cuk} - 15)^{1/2} b h \dots\dots\dots (16)$$

$$k_N = 1 + 3 \frac{N_{Ed}}{(f_{cuk} - 15) A_c} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

- f_{cuk} ——立方体抗压强度标准值，按本文件表1取值；
- b ——矩形截面宽度或T形截面腹板宽度；
- z ——弯矩作用下构件的内力臂，取 $z = 0.9h_0$ ；
- h_0 ——截面受压边缘到纵向受拉钢筋的距离，取 $h_0 = 7/8 h$ ；
- k_N ——荷载或预应力提高系数；
- N_{Ed} ——荷载基本组合下轴力设计值，受压为正，当为拉力时不考虑提高系数；
- A_c ——构件截面面积；
- γ_c ——超高性能混凝土材料分项系数，取1.45。

b) 纤维抗剪承载力设计值 V_f 。

$$V_f = \frac{A_{fv} \sigma_f}{\tan \theta} \dots\dots\dots (18)$$

1) 对于应变软化或低应变硬化材料。

$$\sigma_f = 0.62 \times \frac{1}{\omega^*} \int_0^{\omega^*} \sigma_f(\omega) d\omega \dots\dots\dots (19)$$

$$\omega^* = \max(\omega_u, \omega_{max}) \dots\dots\dots (20)$$

式中：

- σ_f ——纤维增强截面的残余抗拉强度平均值；
- A_{fv} ——纤维作用面积，对于矩形或T形截面， $A_{fv} = bz = 0.9bh_0$ ；
- θ ——临界斜裂缝与梁轴线间夹角，建议取值不小于 30° ；
- ω^* ——最大允许裂缝宽度；
- ω_u ——抗弯极限状态下最大裂缝宽度；
- ω_{max} ——最大裂缝宽度限值，取0.3mm。

2) 对于应变硬化材料。

$$\sigma_f = 0.62 \times \frac{1}{\varepsilon^* - \varepsilon_{el}} \int_{\varepsilon_{el}}^{\varepsilon^*} \sigma_f(\varepsilon) d\varepsilon \dots\dots\dots (21)$$

$$\varepsilon^* = \max(\varepsilon_u, \varepsilon_{u,lim}) \dots\dots\dots (22)$$

式中：

- ε_u ——承载能力极限状态最大弯拉应变计算值；
- $\varepsilon_{u,lim}$ ——超高性能混凝土抗拉极限应变；
- ε_{el} ——超高性能混凝土弹性极限应变。

c) 预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值 V_p 。

1) 对于体内预应力弯起钢筋。

$$V_p = 0.75 f_{pd,i} \sum A_{p,i} \sin \theta_{p,i} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

- $f_{pd,i}$ ——体内预应力筋抗拉强度设计值；
- $A_{p,i}$ ——斜截面内弯起体内预应力钢筋的截面面积；
- $\theta_{p,i}$ ——体内预应力筋弯起钢筋（在斜截面受压端正截面处）的切线与水平线夹角。

2) 对于体外预应力弯起钢筋。

$$V_p = 0.75 f_{pd,e} \sum A_{p,e} \sin \theta_{p,e} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

- $f_{pd,e}$ ——体外预应力筋抗拉强度设计值；
- $A_{p,e}$ ——斜截面内弯起体内预应力钢筋的截面面积；
- $\theta_{p,e}$ ——体内预应力筋弯起钢筋（在斜截面受压端正截面处）的切线与水平线夹角。

条文说明

临界斜裂缝方向基本与主压应力方向相同，与梁轴线间夹角可取不小于 30° ，根据大量工程试件及试验分析，设计时临界斜裂缝与梁轴线间夹角取 30° 能够满足结构抗剪可靠度要求。纤维增强截面的残余抗拉强度平均值 σ_f 根据试验确定，在无具体试验数据时， σ_f 可取 $(0.45 \sim 0.6) f_{tk}$ ，超高性能混凝土材料具有明显应变硬化特征时取大值，超高性能混凝土材料具有应变软化特征时取小值。

斜截面抗剪承载力公式的适用性，已通过抗剪试验验证。

6.1.2.6 矩形、T形和I形截面的受弯构件，其抗剪截面尺寸应符合下列要求。

$$\gamma_0 V_d \leq 2.3 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b z (f_{cuk} - 15)^{2/3} \tan \theta \dots \dots \dots (25)$$

式中：

- α_{cc} ——荷载长期效应系数，取0.85；
- γ_c ——超高性能混凝土材料分项系数，取1.45；
- b ——腹板厚度；
- z ——弯矩作用下构件的内力臂，取 $z = 0.9h_0$ ；
- f_{cuk} ——立方体抗压强度标准值；
- θ ——临界斜裂缝与梁轴线间夹角，建议取值不小于 30° 。

条文说明

本条对抗剪截面尺寸做出限定，主要是为了防止钢筋混凝土梁斜裂缝开展过宽或出现斜压破坏。

6.1.2.7 不同时段浇注界面的剪切力应满足下列要求。

$$v_{Edi} \leq V_{Rdi} \dots \dots \dots (26)$$

v_{Edi} 是指界面上剪应力的设计值，如下确定：

$$v_{Edi} = \frac{\beta V_{Ed}}{z b_i} \dots \dots \dots (27)$$

V_{Rdi} 是指界面上抗剪强度设计值，如下确定：

$$V_{Rdi} = c f_{td} + \mu \sigma_n + \rho f_{sd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 1.15 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} (f_{cuk} - 15)^{2/3} \dots \dots \dots (28)$$

式中：

- β ——新浇超高性能混凝土区域的纵向力与受压区域或拉伸区域的纵向力之比；
- V_{Ed} ——截面竖向剪切力设计值；
- z ——截面内力臂；
- b_i ——界面的宽度（具体见界面示意图（图4）中的定义）；
- V_{Rdi} ——界面处的设计抗剪强度；
- α_{cc} ——荷载长期效应系数，取0.85；
- γ_c ——超高性能混凝土材料分项系数，取1.45；
- f_{td} ——超高性能混凝土抗拉强度设计值；
- σ_n ——由界面上最小外部法向力引起的单位面积应力，该应力可以与剪切力同时发生作用，受压为正，以使 $\sigma_n < 0.6f_{cd}$ ，受拉为负。如果 σ_n 是拉力，则 $c f_{td}$ 应取为0；
- ρ ——交界面抗剪钢筋配筋率，取 A_s/A_i ；
- A_s ——纵向抗剪钢筋截面面积；
- A_i ——交界面面积；
- α ——见交界面连接示意图（图5）中的定义，应通过 $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 限定；
- c ——取决于界面粗糙度的系数（见条文6.1.2.8）；
- μ ——取决于界面粗糙度的系数（见条文6.1.2.8）。

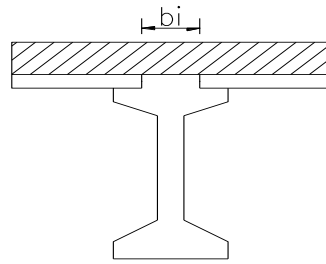


图4 界面示意图

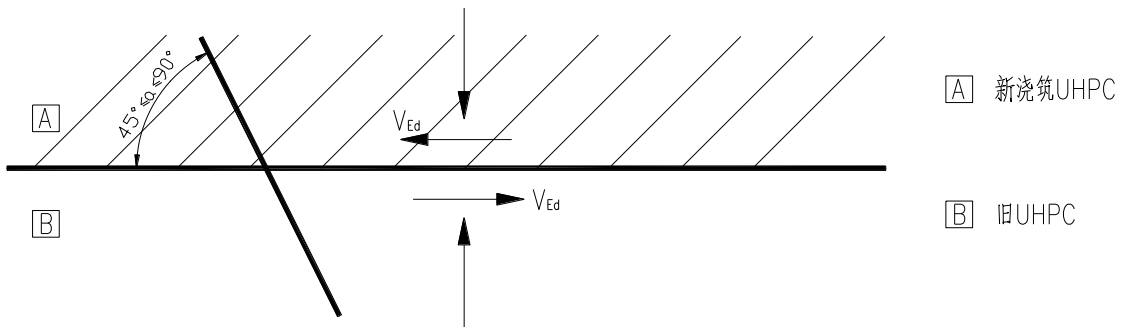


图5 交界面连接示意图

6.1.2.8 界面粗糙度的系数 c 和界面粗糙度的系数 μ 的取值按下列要求。

- a) 如果没有详细的说明，则界面粗糙度的系数 c 和 μ ，可按下列要求进行取值。
 - 1) 很光滑表面（使用钢模具、塑料模具或特制木质模具浇注而成的表面）： $c=0.25\sim 0.1$ 且 $\mu=0.5$ 。
 - 2) 光滑表面（滑模或挤压成型表面，或振动后无需进一步加工的自由表面）： $c=0.2\sim 0.35$ 且 $\mu=0.6$ 。
 - 3) 粗糙表面（粗糙度至少为6mm和间距约为20mm的表面，通过拉毛、骨料外露或等效的其他方法制成）： $c=0.4\sim 0.45$ 且 $\mu=0.7$ 。
 - 4) 锯齿状表面： $c=0.50$ 且 $\mu=0.9$ 。
- b) 界面抗剪钢筋，界面钢筋的剪力示意图如图6。

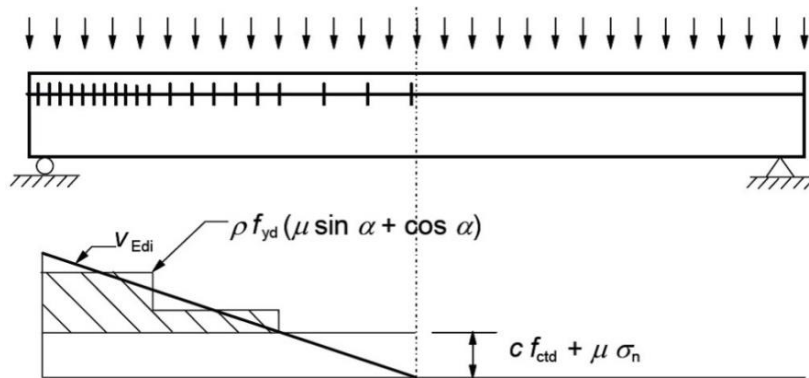


图6 界面钢筋的剪力示意图

- c) 在接缝处存在着明显的裂缝时，对于光滑接缝和粗糙接缝， c 应取为0，对于刻痕接缝， c 应取为0.5。
- d) 在活载荷条件下，a)中 c 值应减半。

条文说明

本条为验算不同时段浇筑界面抗剪承载力，不同时段浇筑界面是以前后两次浇筑超高性能混凝土的初凝时间进行划分，超过初凝时间的，视为不同时段浇筑界面。

6.1.3 局部承压构件

6.1.3.1 配置间接钢筋的超高性能混凝土构件，其局部受压区的截面尺寸应满足下列要求。

$$\gamma_0 F_{ld} \leq 1.3\eta_f \beta f_{cd} A_{ln} \dots\dots\dots (29)$$

$$\eta_f = \begin{cases} 0.25\lambda_f + 0.60 & \lambda_f \leq 1.6 \\ 1.0 & \lambda_f > 1.6 \end{cases} \dots\dots\dots (30)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \dots\dots\dots (31)$$

式中：

- F_{ld} ——局部受压面积上的局部压力设计值，对后张法构件的锚头局压区，应取1.2倍张拉时的最大压力；
- f_{cd} ——超高性能混凝土轴心抗压强度设计值；
- η_f ——超高性能混凝土局部承压修正系数；
- λ_f ——钢纤维特征含量， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ ，其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量， l_f 为钢纤维长度或等效长度， d_f 为钢纤维直径或等效直径；
- β ——超高性能混凝土局部承压强度提高系数；
- A_b ——局部受压时的计算底面积；
- A_l ——不扣除孔洞的超高性能混凝土局部受压面积。当受压面设有钢垫板时，局部受压面积应计入在垫板中按45°刚性角扩大的面积；
- A_{ln} ——扣除孔洞的超高性能混凝土局部受压面积。当受压面设有钢垫板时，局部受压面积应计入在垫板中按45°刚性角扩大的面积；对于具有喇叭管并与垫板连成整体的锚具， A_{ln} 可取垫板面积扣除喇叭管尾端内孔面积。

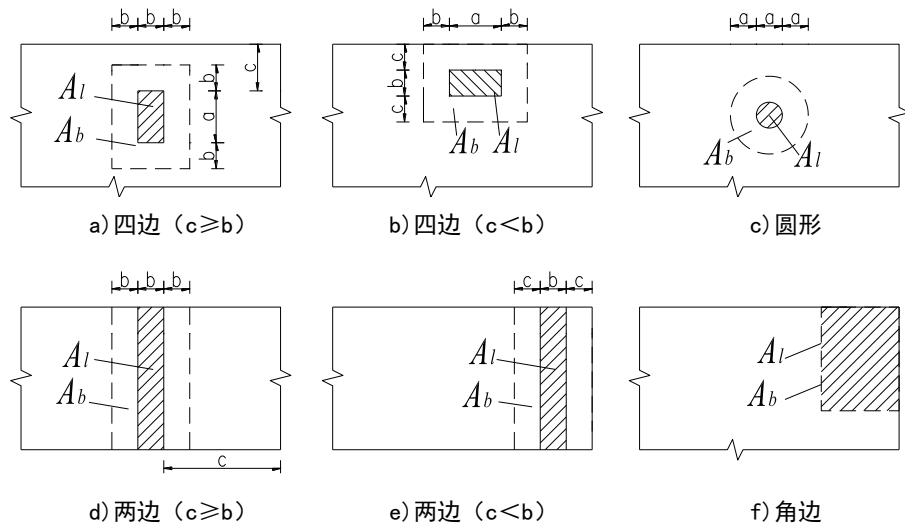


图7 局部承压时计算底面积 A_b 的示意图

6.1.3.2 配置间接钢筋的局部受压构件，其局部抗压承载力应按下列要求计算：

$$\gamma_0 F_{ld} \leq 0.9(\eta_f \beta_{cor} f_{cd} + 2\rho_v \beta_{cor} f_{sd}) A_{ln} \dots\dots\dots (32)$$

$$\beta_{cor} = \sqrt{\frac{A_{cor}}{A_l}} \dots\dots\dots (33)$$

间接钢筋体积配筋率（核心面积 A_{cor} 范围内单位混凝土体积所含间接钢筋的体积）按下列公式计算。

a) 方格网（见图 8a）；

$$\rho_v = \frac{n_1 A_{s1} l_1 + n_2 A_{s2} l_2}{A_{cor} s} \dots\dots\dots (34)$$

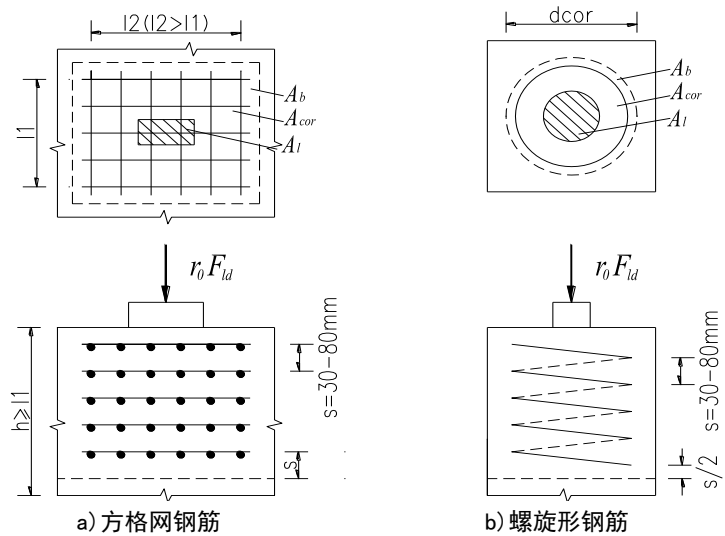
此时，在钢筋网两个方向的钢筋截面面积相差不应大于 50%。

b) 螺旋筋（见图 8b）；

$$\rho_v = \frac{4A_{ss1}}{d_{cor} s} \dots\dots\dots (35)$$

式中：

- β_{cor} ——配置间接钢筋时局部抗压承载力提高系数，当 $A_{cor} > A_b$ 时，应取 $A_{cor} = A_b$ ；
- A_{cor} ——方格网或螺旋形间接钢筋内表面范围内的超高性能混凝土核心面积，其重心应与 A_l 的重心相重合，计算时按同心和对称原则取值；
- n_1 ——方格网沿 l_1 方向的钢筋根数；
- A_{s1} ——方格网沿 l_1 方向单根钢筋的截面面积；
- n_2 ——方格网沿 l_2 方向的钢筋根数；
- A_{s2} ——方格网沿 l_2 方向单根钢筋的截面面积；
- A_{ss1} ——单根螺旋形间接钢筋的截面面积；
- d_{cor} ——螺旋形间接钢筋内表面范围内超高性能混凝土核心面积的直径；
- s ——方格网或螺旋形间接钢筋的层距。



方格网钢筋不应少于4层，螺旋形钢筋不应少于4圈；带喇叭管的锚具垫板，板下螺旋筋圈数的长度不应小于喇叭管长度（见图8）。

图 8 局部承压配筋图

6.2 持久状况正常使用极限状态计算

6.2.1 一般规定

6.2.1.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥的持久状况应按正常使用极限状态要求，采用作用效应频遇组合、准永久组合或作用效应频遇组合并考虑长期效应的影响，对构件的抗裂性能、裂缝宽度和挠度进行验算。在上述各种组合中，汽车荷载效应可不计冲击影响。

6.2.1.2 无腹筋预应力超高性能混凝土构件应按全预应力设计，此类构件在作用频遇组合下控制的正截面受拉边缘不允许出现拉应力。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土构件应按全预应力设计，在频遇组合作用下构件任何截面的受拉边缘不允许出现拉应力，因此需要保持较大的预应力度。

6.2.1.3 预应力钢筋的锚下张拉控制应力应符合下列要求。

a) 体内预应力钢绞线、钢丝。

$$\sigma_{con} \leq 0.75f_{pk,i} \dots \dots \dots (36)$$

b) 体内预应力螺纹钢筋。

$$\sigma_{con} \leq 0.85f_{pk,i} \dots \dots \dots (37)$$

c) 体外预应力钢绞线、钢丝。

$$\sigma_{con} \leq 0.70f_{pk,e} \dots \dots \dots (38)$$

式中：

σ_{con} ——体内预应力钢筋的锚下张拉控制应力；

$f_{pk,i}$ ——体内预应力钢筋的抗拉强度标准值；

$f_{pk,e}$ ——体外预应力钢筋的抗拉强度标准值。

6.2.2 预应力损失计算

预应力损失计算宜符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的要求。

6.2.3 抗裂验算

无腹筋预应力超高性能混凝土构件应按下列要求进行正截面和斜截面抗裂验算。

a) 构件正截面的拉应力应满足下列抗裂要求。

1) 全预应力构件的接缝截面，在作用效应频遇组合下

$$\sigma_{st} - 0.80\sigma_{pc} \leq 0 \dots \dots \dots (39)$$

2) 全预应力构件的非接缝截面，在作用效应频遇组合下

$$\sigma_{st} - 0.85\sigma_{pc} \leq 0 \dots \dots \dots (40)$$

b) 构件斜截面的主拉应力应满足下列抗裂要求。

1) 全预应力构件的接缝位置，在作用效应频遇组合下

$$\sigma_{tp} \leq 0.4f_{tk} \dots \dots \dots (41)$$

2) 全预应力构件的非接缝位置, 在作用效应频遇组合下

$$\sigma_{tp} \leq 0.6f_{tk} \dots\dots\dots (42)$$

式中:

σ_{st} ——作用频遇组合下构件抗裂验算截面边缘超高性能混凝土的法向拉应力;

σ_{pc} ——永存预应力在截面边缘产生的超高性能混凝土压应力;

f_{tk} ——超高性能混凝土抗拉强度标准值;

σ_{tp} ——作用频遇组合和预加力产生的超高性能混凝土的主拉应力。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土桥梁的上部结构应采用全预应力混凝土的要求进行设计。因此, 上部结构构件正截面和斜截面在作用效应频遇组合下的抗裂要求, 根据接缝截面与非接缝截面的区分取用。非接缝截面的在作用效应组合下的抗裂要求, 按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 的相应规定取用。

6.2.4 挠度验算

6.2.4.1 无腹筋预应力超高性能混凝土构件的截面刚度和挠度按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 和《城市桥梁设计规范》(CJJ 11) 的规定计算。

条文说明

依据实桥试验研究揭示, 超高性能混凝土桥梁梁高截面减小后, 相对同类型常规混凝土桥梁挠度有所增大, 但并未影响行车舒适性。同时, 超高性能混凝土构件蒸养后, 徐变系数较小, 长期荷载挠度增加有限。无腹筋预应力超高性能混凝土构件的截面刚度按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 和《城市桥梁设计规范》(CJJ 11) 的规定计算, 能满足要求。

6.2.4.2 无腹筋预应力超高性能混凝土受弯构件和大偏心受压构件应考虑接缝对其挠度增大的影响, 扩大系数可取 1.1。

条文说明

节段预制拼装无腹筋预应力超高性能混凝土受弯构件在使用荷载下的挠度大于整体施工构件在 10%之内。为了计入该影响, 考虑将受弯构件和大偏心受压构件的挠度计算值取 1.1 的增大系数。

6.3 持久状况和短暂状况构件的应力计算

6.3.1 持久状况无腹筋预应力超高性能混凝土构件应力计算

6.3.1.1 无腹筋预应力超高性能混凝土构件进行持久状况设计时, 应计算其使用阶段构件的正截面法向压应力、受拉区预应力钢筋的拉应力和斜截面主压应力, 并不得超过本节规定的限值。计算时作用取其标准值, 汽车荷载效应考虑冲击作用。

6.3.1.2 使用阶段无腹筋预应力超高性能混凝土受弯构件截面的最大压应力, 应符合下列要求:

a) 正截面最大压应力;

$$\sigma_{cc} \leq 0.50f_{ck} \dots\dots\dots (43)$$

b) 最大主压应力:

$$\sigma_{cp} \leq 0.60f_{ck} \dots \dots \dots (44)$$

式中:

f_{ck} ——超高性能混凝土的轴心抗压强度标准值。

条文说明

使用阶段无腹筋预应力超高性能混凝土构件正截面和斜截面最大压应力验算,参照了《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。

6.3.1.3 使用阶段无腹筋预应力超高性能混凝土构件预应力钢筋的拉应力,应符合下列要求:

a) 体内预应力钢筋的最大拉应力:

$$\sigma_{p,k} \leq 0.65f_{pk,i} \dots \dots \dots (45)$$

b) 体外预应力钢筋直线段的最大拉应力:

$$\sigma_{p,e} \leq 0.60f_{pk,e} \dots \dots \dots (46)$$

式中:

$f_{pk,i}$ ——体内预应力钢筋的抗拉强度标准值;

$f_{pk,e}$ ——体外预应力钢筋的抗拉强度标准值。

条文说明

根据试验结果,接缝对正常使用阶段体内预应力钢筋的受力没有影响,故体内预应力钢筋最大拉应力的规定同《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)。体外预应力钢筋在弯曲段(转向器内)的弯曲半径较小,相应弯曲引起的应力增量较大,本文件采用钢筋的轴向应力和弯曲应力之和作为最大拉应力的控制指标,并以体外和体内预应力钢筋在弯曲段内最大拉应力(均取最小半径)相当的原则确定体外预应力钢筋的最大拉应力。考虑到体外预应力钢筋可滑动转向器(散束式转向器和成品索集束式转向器等)的最小弯曲半径由钢筋的疲劳应力幅控制,且该类转向器的最小弯曲半径均比其它转向器大,因此取各类转向器中转向段弯曲半径最小的灌注水泥浆集束式转向器作为本规定的控制标准,最后偏安全地得到体外预应力钢筋直线段的最大拉应力限值 $\sigma_{p,e}$ 不大于 $0.60f_{pk,e}$ 。

6.3.2 短暂状况构件的应力计算

6.3.2.1 无腹筋预应力超高性能混凝土构件按短暂状况设计时,应根据构件的预制、运输、安装和维护等工况,考虑结构自重和可能出现的荷载按标准值(除有特别规定外)组合(荷载分项系数取1.0),计算构件正截面和斜截面应力,使其不超过本节规定的限值。

6.3.2.2 当采用吊机(车)在桥梁上进行安装作业时,应对已安装就位的构件进行验算,吊机(车)作用应乘以1.15的分项系数,但当吊机(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,则可不必要验算。

6.3.2.3 当进行构件运输和安装计算时,构件或节段的自重应乘以动力系数,动力系数应按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)的规定采用。

6.3.2.4 对后张法构件施加预应力时,超高性能混凝土的立方体强度不应低于设计强度等级的90%,弹性模量不应低于超高性能混凝土28天弹性模量的90%。

6.3.2.5 无腹筋预应力超高性能混凝土构件，在预应力和构件自重等施工荷载作用下载面边缘超高性能混凝土的法向压应力应符合下列要求。

a) 接缝截面。

$$\sigma_{cc}^t \leq 0.65f'_{ck} \dots\dots\dots (47)$$

b) 非接缝截面。

$$\sigma_{cc}^t \leq 0.70f'_{ck} \dots\dots\dots (48)$$

式中：

σ_{cc}^t ——施工荷载作用下载面预压区边缘超高性能混凝土的法向压应力；

f'_{ck} ——与预制、运输和安装各施工阶段超高性能混凝土立方体抗压强度 f'_{cu} 相应的轴心抗压强度。

条文说明

施工阶段无腹筋预应力超高性能混凝土构件非接缝截面的最大压应力同《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。对于接缝截面，由于节段预制拼装混凝土构件施工周期短，接缝结合材料可能还未达到正常使用阶段的性能，因此，预应力混凝土和钢筋混凝土构件在接缝截面的最大压应力限值均有所降低。

6.3.2.6 无腹筋预应力超高性能混凝土构件，在预应力和构件自重等施工荷载作用下，截面边缘超高性能混凝土的最大拉应力应符合下列要求。

a) 受拉区体内纵向连续钢筋的配筋率不少于 0.2%时。

1) 接缝截面。

$$\sigma_{ct}^t \leq 0.50f'_{tk} \dots\dots\dots (49)$$

2) 非接缝截面。

$$\sigma_{ct}^t \leq 0.70f'_{tk} \dots\dots\dots (50)$$

b) 受拉区体内纵向连续钢筋的配筋率大于 0.4%时。

1) 接缝截面。

$$\sigma_{ct}^t \leq 0.80f'_{tk} \dots\dots\dots (51)$$

2) 非接缝截面。

$$\sigma_{ct}^t \leq 1.15f'_{tk} \dots\dots\dots (52)$$

式中：

σ_{ct}^t ——施工荷载作用下载面预拉区边缘超高性能混凝土的拉应力；

f'_{tk} ——施工阶段的超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值。

c) 全预应力构件的接缝截面不允许出现拉应力。

条文说明

构件非接缝截面的最大拉应力验算参照《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。考虑到接缝部位混凝土或粘结材料的强度缺陷，同时也为确保持久状况正常使用极限状态的抗裂性能，接缝截面的最大拉应力同抗裂验算中一样进行适当折减。

6.4 构件计算规定

6.4.1 桥面板

桥面板的计算应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第4.2节的相关规定。

6.4.2 组合式受弯构件

组合式受弯构件的计算应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第8.1节的相关规定。

6.4.3 后张预应力超高性能混凝土锚固区

后张预应力超高性能混凝土锚固区的计算应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第8.2节的相关规定。

6.4.4 支座处横隔梁

支座处横隔梁的计算应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第8.3节的相关规定。

6.4.5 支座

支座的计算应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第8.7节的相关规定。

6.4.6 桥梁伸缩缝

桥梁伸缩缝的计算应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第8.8节的相关规定。

6.5 构造规定

6.5.1 一般规定

6.5.1.1 普通钢筋和预应力钢筋的混凝土保护层厚度应符合下列要求：

- a) 普通钢筋保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离，不应小于钢筋公称直径；当钢筋为束筋时，保护层厚度不应小于束筋的等代直径；
- b) 先张法构件中预应力钢筋的保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离，不应小于钢筋公称直径；后张法构件中预应力钢筋的保护层厚度取预应力管道外缘至混凝土表面的距离，不应小于其管道直径的0.4倍；
- c) 普通钢筋和预应力钢筋的保护层厚度不应小于1.5倍钢纤维长度；
- d) 最外侧钢筋的混凝土保护层厚度应符合表7的要求值。

表7 超高性能混凝土保护层最小厚度

环境类别	超高性能混凝土梁、板最小保护层厚度（mm）
I类-一般环境	15
II类-冻融环境	20

表7 (续) 超高性能混凝土保护层最小厚度

环境类别	超高性能混凝土梁、板最小保护层厚度 (mm)
III类-近海或海洋氯化物环境	25
IV类-除冰盐等氯化物环境	20
V类-盐结晶环境	20
VI类-化学腐蚀环境	25
VII类-磨蚀环境	25

注1: 表中数值是针对各环境类别的最高作用等级、钢筋和超高性能混凝土无特殊防腐措施规定的。
注2: 对钢筋和超高性能混凝土有特殊防腐措施处理的, 保护层最小厚度可将表中相应数值减小5mm, 但不得小于15mm。
注3: 对于设计使用年限少于25年的临时构件或易于更换的结构构件, 保护层厚度可以适当减小, 但不宜小于10mm。

条文说明

由于超高性能混凝土具有致密的微观结构, 因而具有良好的耐久性。对比法国超高性能混凝土结构设计规范 NF P 18-710 2016、日本超高性能混凝土结构设计与施工指南 JSCE 2006、瑞士超高性能混凝土设计指南 SIA 2052 2016、美国超高性能混凝土华夫板设计指南 FHWA 2013 和澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000 中关于最小保护层厚度的规定, 并综合考虑粘结力的可靠传递、钢筋抗腐蚀和结构耐火性等因素, 制定本条文所规定的保护层厚度的要求。

6.5.1.2 预应力钢筋净距应满足下列要求:

- 先张法构件中预应力钢筋的钢筋净距不应小于1.5倍钢筋公称直径, 不应小于1.5倍纤维长度, 且不应小于30mm;
- 后张法构件中预应力钢筋管道的管道净距不应小于0.5倍管道直径, 不应小于1.5倍纤维长度, 且不应小于40mm, 不宜采用管道叠置。

条文说明

对比法国超高性能混凝土结构设计规范 NF P 18-710 2016、日本超高性能混凝土结构设计与施工指南 JSCE 2006、瑞士超高性能混凝土设计指南 SIA 2052 2016、美国超高性能混凝土华夫板设计指南 FHWA2013 和澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000 中关于最小钢筋净距的规定, 并综合考虑粘结力的可靠传递和可施工性等因素, 制定本条文所规定的最小钢筋净距的要求。

6.5.1.3 当计算中充分考虑钢筋的强度时, 其最小锚固长度应符合表8的要求。表8 钢筋最小锚固长度 l_a

项目	钢筋种类												
	HPB300				HRB400、HRBF400、RRB400				HRB500				
	强度等级												
	UC130	UC140	UC150	≥UC150	UC130	UC140	UC150	≥UC150	UC130	UC140	UC150	≥UC150	
受压钢筋 (直端)	14d	12d	11d	10d	8d	7d	6d	6d	10d	9d	8d	7d	
受拉 钢筋	直端	16d	14d	13d	12d	10d	9d	8d	7d	12d	11d	10d	9d
	弯钩端	14d	12d	11d	10d	8d	7d	6d	6d	11d	9d	8d	7d

注1: d为钢筋公称直径 (mm)。
注2: 采用环氧涂层钢筋时, 受拉钢筋最小锚固长度应增加25%。
注3: 当超高性能混凝土在凝固过程中易受扰动时, 锚固长度应增加25%。
注4: 当带肋钢筋的公称直径大于25mm时, 锚固长度应增加25%。
注5: 当受拉钢筋末端采用弯钩时, 锚固长度为包括弯钩在内的投影长度。

条文说明

超高性能混凝土与配筋材料（钢筋和钢绞线）之间的粘结性能很大程度上决定了应力传递过程和传递长度。鉴于超高性能混凝土材料的力学性能与普通混凝土有本质的差别，使用目前混凝土设计规范中的粘结性能及应力传递长度（钢筋最小锚固长度）对超高性能混凝土将显得过于保守。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）第 9.1.4 条的条文说明公式进行计算。

根据计算，超高性能混凝土中钢筋锚固长度为 5d~15d，与普通混凝土的 30d~40d 相比大幅减小。考虑到制作和安装偏差，钢筋最小锚固长度在计算锚固长度的基础上，考虑 1.5d 的制作和安装偏差作为锚固长度储备。受压钢筋锚固长度在受拉钢筋锚固长度基础上减去 2d，并不小于 6d。

6.5.1.4 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥构造设计除应符合本文件外，尚应符合《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。

6.5.1.5 按抗震延性要求设计的构件，其纵向受力钢筋应采用国家标准《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB/T 1499.2）中牌号带“E”的热轧带肋钢筋。

6.5.1.6 构件中钢筋及其金属连接构件的保护层应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的要求。

6.5.1.7 无腹筋预应力超高性能混凝土受弯构件的接缝截面，最小配筋率应满足下列条件。

$$\frac{M_{ud}}{M_{cr}} \geq 1.0 \dots\dots\dots (53)$$

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + 0.7\gamma f_{tk})W_0 \dots\dots\dots (54)$$

式中：

M_{ud} ——受弯构件的正截面抗弯承载力设计值，按本规范第 6.1.2.3 和 6.1.2.4 条有关公式的不等号右边式计算；

M_{cr} ——受弯构件的正截面开裂弯矩值；

σ_{pc} ——扣除全部预应力损失的预应力钢筋和普通钢筋的合力在接缝截面抗裂边缘产生的预压应力；

f_{tk} ——超高性能混凝土的抗拉强度标准值；

γ ——截面受拉区超高性能混凝土的塑性影响系数， $\gamma = 2S_0/W_0$ ，其中： S_0 为换算截面重心轴以上（或以下）部分的截面对重心轴的面积矩； W_0 为换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

条文说明

为了保证构件抗弯承载力不小于截面开裂弯矩，以避免开裂后即发生脆性破坏。公式基于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的相关规定，考虑接缝截面混凝土抗拉强度折减系数 0.7。

6.5.2 主梁构造

6.5.2.1 预制节段的划分尺寸和重量应根据吊装和运输等限制条件确定。当节段采用短线法预制时，构造设计应利于施工标准化。

6.5.2.2 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥顶板、底板厚度和构造应满足纵向受力、横向受力和预应力钢筋布置要求，且厚度不宜小于 100mm。

6.5.2.3 无腹筋预应力超高性能混凝土箱梁（U型梁）、I型梁和T型梁腹板厚度应符合下列要求：

- a) 腹板内未布置体内纵向和竖向预应力钢筋时，腹板厚度不宜小于 100mm；
- b) 腹板内布置体内纵向钢筋时，腹板厚度不宜小于 150mm。

6.5.2.4 预制节段接缝处应均匀设置匹配的剪力键，剪力键的构造应满足短暂状况截面抗剪验算。

6.5.2.5 预制节段接缝应采用干接缝、环氧胶接缝或现浇超高性能混凝土接缝，现浇超高性能混凝土接缝宽度不应大于 100mm。

6.5.3 主梁预应力体系

6.5.3.1 先张法无腹筋预应力超高性能混凝土构件宜采用钢绞线、螺旋肋钢丝用作预应力钢筋，当采用光面钢丝作预应力钢筋时，应采取适当措施，保证钢丝在超高性能混凝土中的可靠锚固。

6.5.3.2 在先张法无腹筋预应力超高性能混凝土构件中，预应力钢绞线之间的净距不应小于其公称直径的 1.5 倍，对于用 7 根钢丝捻制的标准型预应力钢绞线不应小于 25mm；预应力钢丝间净距不应小于 15mm。

6.5.3.3 后张法无腹筋预应力超高性能混凝土构件的端部锚固区，应采用带喇叭的锚垫板，锚垫板下设间接钢筋。

6.5.3.4 后张法无腹筋预应力超高性能混凝土构件的曲线预应力钢筋的曲线半径应符合下列要求：

- a) 钢束丝、钢绞线的钢丝直径小于或等于 5mm 时，不宜小于 4m；钢丝直径大于 5mm 时，不宜小于 6m；
- b) 预应力螺纹钢筋的直径小于或等于 25mm 时，不宜小于 12m；直径大于 25mm 时，不宜小于 15m。

6.5.3.5 后张法无腹筋预应力超高性能混凝土构件的曲线形钢丝束、钢绞线束的锚下最小直线段长度宜取 0.80m~1.50m。

6.5.3.6 体外预应力体系应包括体外预应力钢束、锚固系统、转向装置和减振装置四个部分（图 9）。

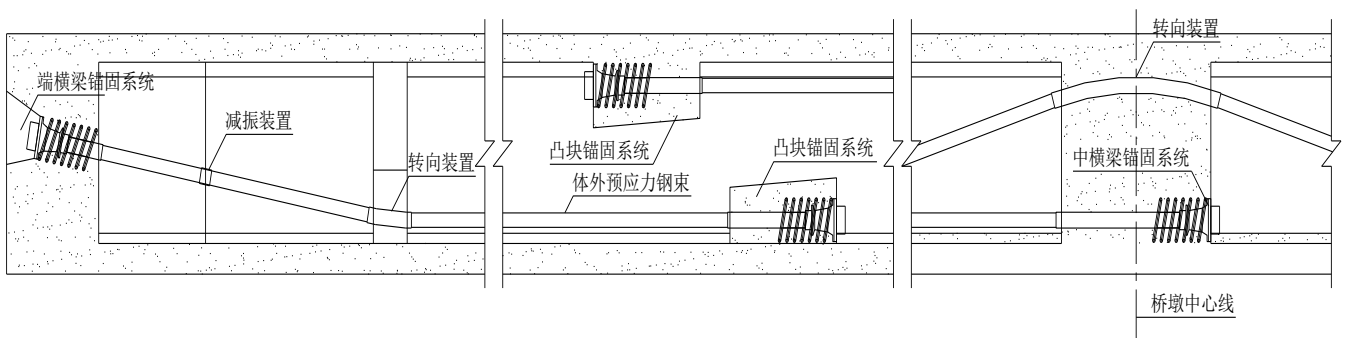


图 9 锚固构造示意

6.5.3.7 体外预应力钢束在转向处应设置转向和定位构造。体外预应力钢束宜锚固在横梁上（图 10a）或顶、底板与腹板内角处凸块上（图 10b），锚固横梁的厚度和锚固凸块的长度均不宜小于 1000mm。

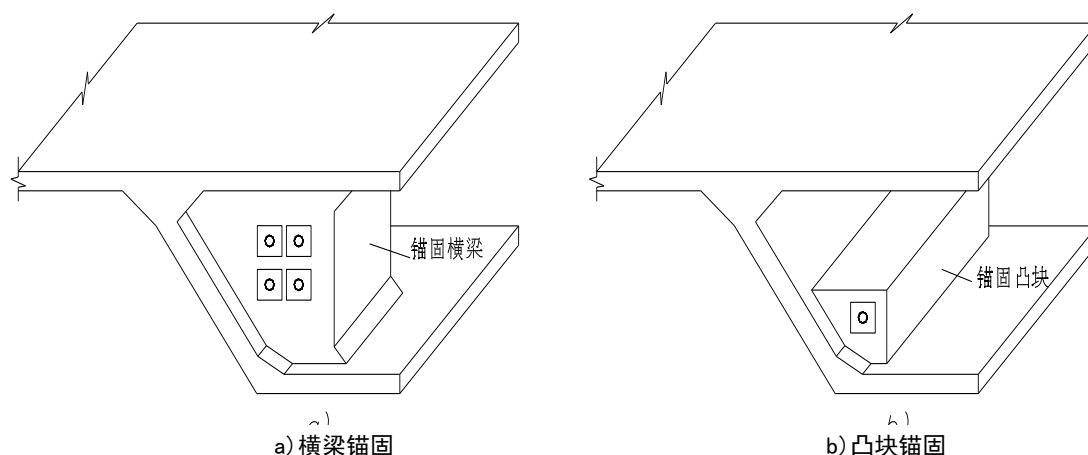


图 10 锚固构造示意

6.5.3.8 体外预应力钢束的转向器如图 11-a 所示，转向器可采用集束式转向器（图 11-b、c、d）或散束式转向器（图 11-e）。

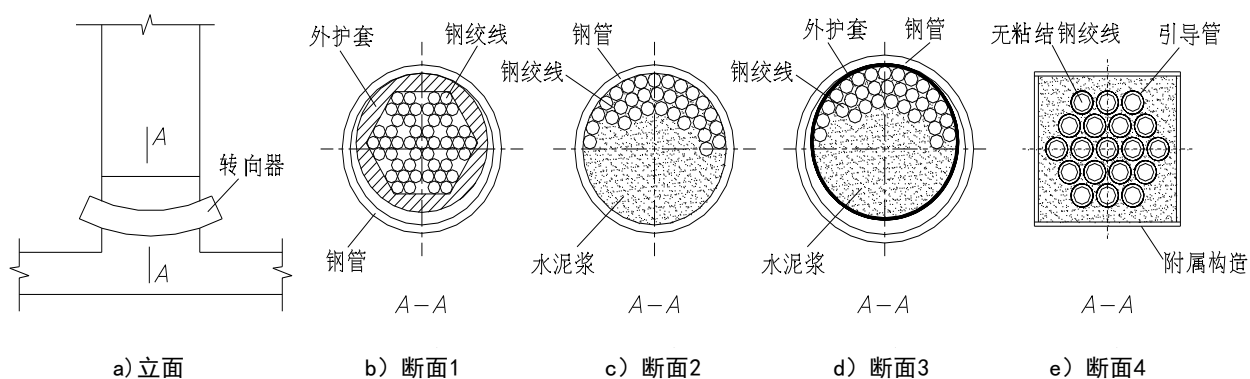


图 11 转向器示意图

6.5.3.9 体外预应力结构应预留换索施工的空间和构造。

6.5.3.10 体外索自由段索体与梁体的竖向自振频率（基频）之比小于 5 时，应设置减振装置。

6.5.3.11 体内预应力钢束管道在接缝处应采取有效密封措施。

6.5.4 其它构造及附属设施

6.5.4.1 箱梁每个箱室的最低处应设置排水孔。

6.5.4.2 箱梁各腹板应沿桥长方向均匀布置通气孔。

6.5.4.3 上部结构外边檐应设置滴水构造。

6.5.4.4 桥面铺装应设置防水层，并满足《城市桥梁桥面防水工程技术规程》（CJJ 139）的要求。

6.5.4.5 节段拼装无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥应对接缝部位进行表面涂装，并符合《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》（JT/T 695）的要求。

6.5.4.6 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体宜进行表面涂装，并符合《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》（JT/T 695）的要求。

条文说明

梁体表面钢纤维锈点对构件外观质量有一定影响，为增强超高性能混凝土梁体外观质量，建议超高性能混凝土梁体进行表面涂装。

6.5.4.7 节段预制拼装桥梁应根据采用结构的特点设置检修通道，检修通道应有必要的检修、养护和部件的更换所需的空間，以及通风和排水设施。

7 施工

7.1 一般规定

7.1.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥的施工应选择具有相关工程经验的技术人员和专业施工设备的单位完成。

条文说明

超高性能混凝土作为一种新型的结构材料，其材料的配制、搅拌、浇筑和养护等诸多方面与常规混凝土不同，该项工作需要一定的施工经验基础上，才能完成。

7.1.2 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥的预制应在专业的预制场地进行。无腹筋预应力超高性能混凝土节段梁预制时，应根据预制场地实际条件，优先考虑长线法进行节段预制。连接接缝宜采用环氧树脂结缝。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土梁为全预应力构件，构件预制精度要求高，节段拼接面的承压面积小，承压大，为控制预制梁的轴向线型和匹配精度，宜采用长线法进行节段预制。

7.1.3 施工前应建立健全质量保证体系和质量管理体系、安全生产管理体系和环保管理体系，对工程的施工实施质量、安全和环保控制。根据设计要求、合同条件和现场情况等，编制实施性施工组织设计。

条文说明

超高性能混凝土对施工条件要求相对严苛，需要精细化的作业组织和施工控制，在全过程作业中，详细的施工管理保障体系是确保施工质量的前提。

7.1.4 施工单位应建立各道工序的质量检查制度和检查项目，制定统一规范表格，并应留有完整的检查记录。

条文说明

为保证超高性能混凝土施工过程的可追溯性，在施工过程中，应进行完整的检查和记录，并留存。

7.1.5 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥的施工事项，应符合国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）和行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定。

7.2 预制场地规划与布置

7.2.1 预制场的规划布置应便于梁体的预制、养护、移运、堆放和装车等要求，并应符合下列要求：

- a) 场地应平整、坚实，功能分区包括产梁区、存梁区、蒸汽养护区、材料堆放区和钢筋钢绞线加工区等；
- b) 预制台座、蒸养台座、存梁台座和场内移运道路应具有足够的承载力；
- c) 搅拌站、产梁区和超高性能混凝土拌合物运输通道应搭设棚架，避免日晒及雨淋，影响预制梁施工质量。

7.2.2 预制测量控制系统应符合下列要求：

- a) 测量控制点应远离热源、振动源，并有保护装置；
- b) 测量控制点应具有良好的通视条件；
- c) 应配备备用的测量控制点；
- d) 定期对测量控制点进行复核。

7.2.3 预制场规划需要有完善的排水系统和扬尘回收处理系统，同时做好场内污水处理，不应随意乱排。

条文说明

超高性能混凝土废料携带水泥浆和钢纤维废料，在拌合物搅拌设备和运输设备清洗时，以及超高性能混凝土的其他废料，会对环境及人员造成损害。

7.3 施工支架、模板系统

7.3.1 模板及支架的设计应满足下列要求：

- a) 模板应采用大块钢模板，其质量应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）的规定；支架应采用钢材或常备式定型钢材构件等制作；
- b) 面板应采用 5mm 以上钢板制作，钢模外表面应进行防腐防锈处理；
- c) 端头模宜采用嵌入式，端头模、侧模和底模应连接紧密牢固；
- d) 模板在出厂前应进行拼装验收，质量合格后方可使用；
- e) 根据梁体截面及长度对振捣器进行合理布置，具体布置形式及振捣参数，应结合实际工程经验或工艺试验成果确定，确保梁体密实、外观无气泡。

条文说明

超高性能混凝土组分中，骨料直径较小，超高性能混凝土拌合物流动性极佳，因此对模板的紧密性要求较高；超高性能混凝土拌合物粘性大，其内部裹包的气泡不易排出，因此对于振捣器的选择、振捣位置和振捣时间的确定，需结合工程实际经验或试验成果确定。

7.3.2 无腹筋预应力超高性能混凝土节段梁模板除满足《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）要求外，还应符合下列要求：

- a) 端头模应垂直、牢固和密封，匹配节段移出就位时应根据梁体线型精确定位，待浇筑节段的侧模及底模应符合节段的线形要求；
- b) 匹配节段应有可靠精确的空间调整装置；
- c) 侧模与匹配节段连接牢固、无错台，确保预制节段梁外观线形顺直；
- d) 根据不同的截面形式，设计成可调整、方便拆除的内模板系统，应保证其刚度及承载能力满足节段预制的精度要求；
- e) 剪力键模板要准确、稳固的定位在端头模上，尺寸及角度需满足设计要求。

7.3.3 模板及支架应具有足够的强度、刚度和稳定性，应能可靠地承受施工过程中所产生的各类荷载，新浇筑超高性能混凝土对模板所产生的荷载，除按《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）中规定荷载进行验算，还需采取可靠措施，防止内模上浮，以保证模板结构的可靠。

条文说明

超高性能混凝土具备优异的流动性，在浇筑过程中以及浇筑完成后的一段时间，基本处于流塑状态，对仰面模板具有较大的上浮力。

7.3.4 用于起吊梁体的构造、体外预应力钢束转向器构造等预埋件应有定位及固定措施。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥体内没有可供预埋件固定的钢筋框架，需单独设置定位和固定措施。

7.4 超高性能混凝土原材料

7.4.1 超高性能混凝土所使用的各种原材料，均应符合《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定，并应在进场时对其性能和质量进行检验。

7.4.2 外加剂应按品种和生产厂家分别标识、贮存。粉状外加剂应防止受潮结块，如有结块，应进行检验，检验合格后应经粉碎至全部通过 600 μm 筛孔后方可使用。液态外加剂应贮存在密闭容器内，并应防晒和防冻。如有沉淀等异常现象，应检验合格后方可使用。

7.4.3 矿物掺合料应按品种、质量等级和产地分别标识、贮存，不应与水泥等其他粉状物混杂，并应防潮、防雨。

7.4.4 纤维应按品种、规格和生产厂家分别标识和贮存，并应防潮、防锈。

7.4.5 超高性能混凝土的各种原材料可根据配比提前进行预拌和，形成干混料。干混料的供应宜提供产品说明书和出厂产品性能检验报告，并应满足下列要求：

- a) 应标明产品名称、推荐用水量(及推荐外加剂产品型号和掺量)、该推荐用水量(及外加剂掺量)范围、建议搅拌方式、振捣和养护注意事项等，同时还需注明贮存、运输时的相关注意事项；
- b) 应标明产品批次、出厂日期、可存放期和产品型号；
- c) 出厂产品的性能检验报告应列出产品名称、委托检验单位及人员、受委托检验单位及人员、主要检验性能指标、检验依据标准、测试人员及审查人员、送检日期、检验日期和审核日期等内容。

条文说明

由于超高性能混凝土供应商所采用原材料、配制理论等存在差异，因此，需要随产品提供产品说明书文件，帮助作业人员掌握使用方法，指导施工作业。目前，超高性能混凝土作为一种新型的建筑材料，各供应商将超高性能混凝土的配比划分为商业机密，因此，在对超高性能混凝土进行质量控制时，可要求提供配合比所采用原材料和预混混合料的质量证明文件，并对原材料和预混混合料分别进行验证，对超高性能混凝土进行质量控制。

7.4.6 干混料应存储于干燥、通风、防潮和不受雨淋的场所，并按品种、批号分别堆放，不得混堆混用，且应先存先用。当受潮或存放时间超过 3 个月时，应取样复验，复验合格后方可使用。

7.5 超高性能混凝土拌合物制备

7.5.1 超高性能混凝土拌和物的制备可采取以下三种方式：

- a) 直接投放各种原材料的搅拌方式，即在搅拌设备内一次完成超高性能混凝土的制备；
- b) 将各种固体原材料(除纤维外)、减水剂预拌成干混料，经包装后运输至预制工厂或施工现场，加水和钢纤维拌和成为浇筑用超高性能混凝土；
- c) 将各种固体原材料、纤维和减水剂预拌成干混料，经包装后运输至预制工厂或施工现场，加水拌和成为浇筑用超高性能混凝土。

条文说明

预制构件的生产，推荐采用a)制备方法，若条件不允许，可采用b)制备方法，在采用c)制备方法时，需结合搅拌工艺试验和拌合物检验，检验和验证超高性能混凝土内部纤维的均匀。

7.5.2 超高性能混凝土的搅拌制备应符合下列要求：

- a) 搅拌前，应检查搅拌设备状态，并严格按施工配合比进行拌和；
- b) 设备搅拌能力应大于预制场浇筑需求；
- c) 超高性能混凝土正式生产前，须通过试验确定分段搅拌时间等工艺参数；
- d) 搅拌应保证拌和物质量均匀，出机拌和物中不得有钢纤维结团情况，同一盘的均质性应符合《混凝土质量控制标准》（GB 50164）的规定；

- e) 超高性能混凝土搅拌后，应取样进行工作性能测试，测试方法采用水泥净浆流动度试验，并取样测定钢纤维体积含量；
- f) 超高性能混凝土搅拌过程应采用适宜的温度控制措施，超高性能混凝土的出料温度应控制在30℃以下，超高性能混凝土入模温度宜控制在35℃以下。当结构物最薄厚度大于30cm，入模温度上限需根据实际工作性能和工艺验证结果确定；
- g) 搅拌结束后，应及时清洗搅拌设备。

条文说明

超高性能混凝土宜一次搅拌一次浇筑，在进行多次搅拌时，需采取可靠措施，保证浇筑的连续性。在多次搅拌浇筑至单构件中时，易出现外观色差、浇筑间隔引起的施工冷缝等问题，需谨慎考虑；超高性能混凝土对温度较为敏感，入模温度应进行严格控制。

7.5.3 超高性能混凝土原材料的计量应符合下列要求：

- a) 固体原材料或干混料应按质量计量，水和液体外加剂可按体积计量；
- b) 原材料计量应采用电子计量设备。计量设备应具有法定计量部门签发的有效检定证书，并应定期检验。生产单位每月应至少自检一次。每一工作班开始前，应对计量设备进行零点校准；
- c) 原材料计量允许偏差应符合表9规定的范围，并应每班检查1次。

表9 超高性能混凝土原材料计量允许偏差

偏差种类	原材料品种						
	水泥*	掺合料*	钢纤维	外加剂	骨料*	水	干混料*
每盘计量允许偏差 (%)	±2	±2	±2	±1	±2	±1	±2
累计计量允许偏差 (%)**	±1	±1	±2	±1	±2	±1	±1

注1：* 当超高性能混凝土供应方式为干混料供应时，水泥、掺合料、骨料的计量替换为干混料的计量。
注2：** 累计计量允许偏差是指每一运输车中各盘混凝土的每种材料计量和的偏差。

7.5.4 超高性能混凝土拌和物的配合比确定及力学性能检验应符合下列要求：

- a) 超高性能混凝土的配合比应采用按原材料质量比表示的配合比或混合料，并应通过试配确定。试配时应使用施工实际采用的材料，配制的超高性能混凝土拌和物应满足和易性、凝结时间等施工技术条件；
- b) 制成的超高性能混凝土应满足力学性能、耐久性能等质量要求，并根据设计要求进行抗压强度、抗折强度、抗拉强度和弹性模量检测；
- c) 超高性能混凝土拌和物的抗压、抗折强度每50m³检验一次，批量不到50m³，按50m³计算，每班次应至少检验一次，每次检验应至少留置两组试件。试件应在浇筑地点随机取样制作；

条文说明

超高性能混凝土的配置，是通过原材料经过粒径分析，基于堆积密度模型理论推导而获得，因此，原材料的变化，对超高性能混凝土的质量会产生根本性的影响。

7.6 超高性能混凝土拌合物运输

7.6.1 超高性能混凝土拌和物采用混凝土搅拌车运输时，应符合下列要求：

- a) 混凝土搅拌车的性能应良好，其运输能力应大于浇筑能力；

- b) 接料前, 应排净混凝土搅拌车罐内的积水;
- c) 运输途中及等候卸料时, 搅拌车罐体宜保持 5-10 转/分钟转速, 不得停转;
- d) 卸料前, 混凝土搅拌车罐体转速宜以不小于 14 转/分钟转速搅拌 20s 以上后再卸料; 卸料后, 应及时用清水清洗干净;
- e) 超高性能混凝土拌和物从搅拌机卸入搅拌车至卸料完成的时间不宜长于 90min, 如需延长运送时间, 应采取有效技术措施, 并通过试验验证, 确保超高性能混凝土拌和物的工作性能满足施工要求;
- f) 夏季高温季节时超高性能混凝土运输时间达到 30min 以上时, 罐车最少运输方量, 不应小于 6m^3 ;
- g) 对于寒冷、严寒或炎热的气候情况, 混凝土搅拌运输车应有保温或隔热措施。

条文说明

超高性能混凝土对水和温度较为敏感, 搅拌车内的积水或长时间的运输, 会导致超高性能混凝土工作性能下降、钢纤维结团或力学性能下降。合理的运输方式可以保证浇筑的连续性, 有利于避免无腹筋预应力超高性能混凝土结构出现因浇筑间断产生的冷缝或薄弱层。

7.6.2 超高性能混凝土拌和物采用泵送方式输送时, 应符合《混凝土泵送施工技术规程》(JGJ/T 10) 的规定。

7.7 超高性能混凝土拌合物浇筑

7.7.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥独立构件的浇筑应采用一次性浇筑成型。

7.7.2 超高性能混凝土料供应连续, 间隔时间应结合搅拌生产能力或工艺试验成果确定。

7.7.3 超高性能混凝土拌和物可采用料斗直接浇筑; 条件允许时, 可采用搅拌车运输、泵送方式浇筑。

7.7.4 同一梁体或节段应连续浇筑, 单构件连续浇筑总时间宜控制在 1 小时以内, 若不能达到, 需经过工艺试验验证, 避免超高性能混凝土表面结壳、出现冷缝, 确保纤维连续。

条文说明

超高性能混凝土的暴露表面易快速结壳, 浇筑宜连续不间断。必须间断时, 其前后两次浇筑间隔时间不宜过长, 一般不超过 20 分钟, 避免因超高性能混凝土结壳而产生冷缝, 影响钢纤维的连续性, 埋下质量隐患。

7.7.5 超高性能混凝土拌和物浇筑应保证纤维分布的均匀性和结构的连续性, 并应符合下列要求:

- a) 浇筑前要检查模板及其支架、钢筋以及保护层厚度、预埋件位置和尺寸, 确认无误后, 方可进行浇筑。浇筑的超高性能混凝土应填充到钢筋、埋设物周围及模板内各角落;
- b) 模板温度应采取措施控制, 夏季模板温度不高于 30°C , 冬季模板温度高于 5°C ;
- c) 可采用平板振捣或模外振捣器振捣成型, 严禁采用插入式振捣器振捣。所采用的振捣机械和振捣方法除应保证密实外, 还应避免拌和物离析、分层以及纤维露出构件表面;
- d) 超高性能混凝土拌和物浇筑倾落的自由高度不应超过 2 米, 当倾落高度大于 2 米时, 应加串筒、斜槽或溜管等辅助工具, 避免钢纤维从水泥浆中离析或结团;
- e) 浇筑过程中应随机抽样制作同条件试件。同条件试件应在与结构或构件相同环境条件下成型、养护;
- f) 超高性能混凝土入模方向和方式, 应易于模板内空气的排出, 尽量避免卷入空气。

条文说明

超高性能混凝土组分中含有短细钢纤维, 采用插入式振捣器振捣, 会使纤维变形, 影响超高性能混凝土的力学性能。

7.7.6 施工前应及时掌握气温、雨雪、风暴和汛情等预报, 制定应急预案, 做好安全防范工作, 下列情况时, 不应进行浇筑施工:

- a) 露天生产时, 单日温差超过 20°C ;

- b) 出现 6 级或 6 级以上的强风；
- c) 模板温度高于 30℃。

条文说明

超高性能混凝土在水化过程中，由于水胶比低，水化热高，在单日温差大或外界环境温度的剧烈变动的情况下，极易出现裂缝；在大风天气，浇筑过程中，表面水分和温度的快速丢失，会造成浇筑过程中暴露表面的结壳和终凝前的结构开裂。

7.7.7 如进行露天雨期现场浇筑时，超高性能混凝土的施工应符合下列要求：

- a) 关注天气情况，超高性能混凝土浇筑应安排在天气良好时段进行，应避开大风、大雨天气施工；
- b) 雨期施工时，应准备足量的防雨篷、帆布和塑料布或塑料膜等防雨器材和材料，防雨棚支架宜采用方便安装和拆卸的钢结构；
- c) 超高性能混凝土浇筑过程中遭遇降雨，当降雨影响超高性能混凝土质量时应停止施工，并对已浇部分超高性能混凝土层进行防雨遮挡，等待雨停后继续施工；若需不停顿继续进行浇筑施工，应搭设防雨棚，保证超高性能混凝土浇筑不受下雨影响；
- d) 施工过程中若遭遇未预料大雨情况，必须在中途停止当次浇筑时，应停止施工，并宜将已浇筑超高性能混凝土清除。

7.7.8 如进行野外现场浇筑时，超高性能混凝土的大风天气施工应符合下列要求：

- a) 在日照较强、空气干燥的多风季节或山区、沿海经常刮风地区，应做好防护措施，防止刚浇筑完成的超高性能混凝土表面发生塑性收缩开裂；
- b) 养护过程中，应有专人负责巡视和检查，发现养护膜破损或养护剂缺失的情况，应及时处理。

7.7.9 超高性能混凝土高温期（现场连续 4 小时平均气温高于 30℃或日间最高气温高于 35℃）施工应符合下列要求：

- a) 应选择在早晨、傍晚或夜间施工，避开高温时段施工；
- b) 施工中应随时检测气温以及干混料、搅拌水和拌和物温度，监控超高性能混凝土表面温度，温度高于 70℃时应及时采取降温措施；
- c) 保湿养护时，应控制养生水温与超高性能混凝土表面的温差不大于 12℃。不得采用冰水或冷水养生。

条文说明

当超高性能混凝土表面温度高于 70℃时，对超高性能混凝土外表面或外模板，采取热水（与外表面温差小于 5℃）持续浇淋，缓慢降低超高性能混凝土温度。

7.7.10 超高性能混凝土冬期（室外昼夜日平均气温连续 5 天低于 5℃）施工的相关要求，应符合下列要求：

- a) 当施工气温处于 0℃~5℃时，超高性能混凝土施工应采取有效的保温覆盖措施，并应随时检测气温和混合料、拌和水的温度；
- b) 冬期施工时，模板温度应高于 5℃。

7.8 梁体养护及存放

7.8.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体养护一般采用高温蒸汽养护；如采用自然养护，需通过材料适应性和工艺适应性试验确定养护条件。

7.8.2 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体浇筑完成后，应及时进行保湿养护，并宜符合下列要求：

- a) 采用覆盖节水保湿薄膜或喷洒养护剂进行保湿养护。施工前应通过工艺试验，确定节水保湿膜或养护剂的施工方法、用量；
- b) 终凝前，严禁松动模板或在周边进行震动较大的施工作业；
- c) 保湿养护时间不宜少于 24 小时，且同条件养护试件的抗压强度达到 40MPa 后方可拆模；
- d) 应注意拆模时梁体表面与环境温度的温差，当温差大于 15℃时，不宜拆模；
- e) 干燥天气拆模时，环境湿度低于 60%，需对梁体表面进行保湿养护，养护期不低于 3 天或至高温蒸养前结束。

7.8.3 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体高温蒸汽养护应符合下列要求：

- a) 梁体的高温蒸汽养护应在保湿养护完成后实施，保湿养护与高温蒸汽养护时间间隔不应长于 7 天。在间隔期间，应做好梁体的防晒、防雨措施；
- b) 根据梁体规格、尺寸和养护要求确定养护棚、锅炉布置和养护方案；
- c) 蒸汽养护棚应具有足够的强度、刚度、稳定性和密封性；养护棚不得与梁体表面接触；
- d) 采用温度自动控制系统对升温、恒温和降温过程进行控制；
- e) 蒸汽管道宜布置在梁体下方，且不应直接喷在梁体表面，应采取有效措施，防止养护棚内冷凝水直接滴在梁体表面；
- f) 养护升温阶段，升温速度不应大于 10℃/小时；养护结束后，降温速度不应超过 15℃/小时。当养护温度恒定在 90℃以上时，总养护时间不应少于 48 小时，当养护温度恒定在 80℃~90℃时，总养护时间不应少于 72 小时；养护过程中，相对湿度不低于 95%；
- g) 采用先张法施工时，先进行预应力放张，再进行高温养护。

7.8.4 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体的存放应符合下列要求：

- a) 梁体的存放不应超过 2 层，若存放超过 2 层，需进行梁体受力和稳定性验算，并满足要求；
- b) 梁体堆放时，需做好支垫措施，支垫位置应经过设计验算；
- c) 存梁区需设置完善的排水系统，确保存梁台座基础稳定。

7.8.5 无腹筋预应力超高性能混凝土节段梁养护完成后应及时进行整修，整修程序应符合以下要求：

- a) 对各预埋孔道、预埋件进行检查，清理孔道内的杂物，确保通畅；
- b) 压水检查孔道是否有串孔，若有串孔时，应及时对串孔进行有效补救；
- c) 对相邻节段梁错台进行检查，超过允许偏差的要进行打磨修整处理。

7.9 预应力工程

预应力工程应符合下列要求：

- a) 采取可靠的定位措施对管道进行固定，确保浇筑时管道不偏移或上浮；
- b) 采用钢筋定位管道时，钢筋与模板之间应设置垫块；
- c) 管道的定位筋间距：直线段不大于 60cm，曲线段不大于 30cm；
- d) 垫块应采用与梁体同等级超高性能混凝土制作，垫块厚度不应出现负误差，正误差不大于 3mm；垫块宜与钢筋绑扎牢固，且绑扎丝头不得伸入保护层内；
- e) 采用后张法施工，蒸养前，需采取措施，对预埋管道进行适当封闭，同时预应力筋的安装应在蒸养完成后进行，不得与梁体一同蒸养；
- f) 采用先张法施工，预应力筋放张前，梁体强度及龄期应满足设计规定，设计未规定时，龄期不低于 24 小时，抗压强度不低于 90MPa；

- g) 节段预制梁预应力管道定位要准确、牢固，接缝位置需做好止浆措施。

条文说明

无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥结构内没有钢筋骨架，后张法预埋的波纹管没有可靠的钢筋骨架进行固定，在进行结构构造设计和施工时需要着重考虑；当后张法施工时，蒸养过程中应采取措施封堵波纹管，避免过多的水蒸气进入，对波纹管造成腐蚀，同时钢绞线严禁与结构一同高温蒸养，避免出现锈蚀。预应力的张拉在高温蒸汽养护之后进行。

8 运输、安装施工

8.1 一般规定

无腹筋预应力超高性能混凝土梁的运输安装应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）及《预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规程》（CJJ/T 111）的相关规定。

8.2 运输

8.2.1 无腹筋预应力超高性能混凝土梁的场内移运、存放施工应符合下列要求：

- 梁体移动、吊装的吊点设置需经过设计复核，用于起吊梁体的吊环严禁采用冷加工钢筋，可采用HPB300级钢筋或钢绞线，其计算应满足《混凝土结构设计规范》（GB 50010）要求；
- 梁体在脱底模、移运、存放和吊装时，需同条件养护试件的抗压强度达到90MPa以上，梁体在吊装过程产生的最大拉应力不应超过2MPa；
- 后张梁、板在孔道压浆后进行移运时，其压浆浆体强度应不低于40MPa；
- 梁体存放及转运时高度不得超过2层，并应在梁底铺设柔性支垫层防止损伤。

8.2.2 无腹筋预应力超高性能混凝土梁的场外运输应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）要求之外，还应符合下列要求：

- 应根据预制场地理位置、结合实际运输通道条件、整梁（节段）重量和尺寸等因素选择合适的运输设备；
- 整梁（节段）在运输过程中，应采取保护、固定措施；
- 支撑装置的设置应避免运输设备振动对梁体造成不利影响，并应根据运输线路上的最大纵横坡设置限位装置；
- 整梁（节段）陆路运输时，应根据道路限高、限宽、限重和道路的最大纵坡合理选择运输路线，必要时应对沿线桥梁的承载力进行复核，运输车辆行驶应设置警示标识和警示灯光；
- 整梁（节段）水路运输时，应结合水位条件勘查运输线路上的桥孔通航限高条件，运输出航前，应根据气象、水文条件确认是否满足船舶出航运输的要求。

8.3 安装施工

8.3.1 无腹筋预应力超高性能混凝土节段梁采用现场就地拼装或整体吊装架设时，临时支架除应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）要求之外，还应符合下列要求：

- 拼装场地地基坚实，具备吊装设备和运输设备通行能力；若采用支架作为拼装平台，承重梁宜采用型钢、钢管或贝雷梁等构件制作，支撑承重梁的立柱或临时墩可根据跨径大小选择单点或多点支撑，立柱或临时墩可采用钢管桩、贝雷支墩等；
- 拼装节段时，应对首节段的空间位置进行临时定位、固定；
- 应事先在预制场内对节段匹配面进行预处理：清除污染物及松散混凝土、浮浆后，应进行冲洗、干燥处理；

- d) 节段就位、拼装过程中，应采取可靠措施，确保键齿完整，就位准确；
- e) 胶接缝施工时，涂抹厚度不宜超过 3mm，其有效工作时间应按整孔拼装要求确定；
- f) 施加临时预应力时，结构胶应在梁体的全断面挤出，应对孔道做好止浆防护，严禁结构胶进入预应力孔道；
- g) 节段的拼装、临时预应力施加、节段的固定和结构胶的清除工作都应在结构胶失去和易性之前完成；
- h) 预应力张紧后，不应出现除支点外的其他点支撑受力。

8.3.2 逐跨拼装无腹筋预应力超高性能混凝土节段梁的施工除应符合《预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规范》(CJJ/T 111)的相关要求之外，还应符合下列要求：

- a) 应根据设计图纸准确确定每跨内首节段的平面位置即高程；
- b) 每个节段拼装完成后，应及时检测节段的高程和轴线，其误差标准应满足规定，如误差超过规定时，应及时调整；
- c) 每联或每跨超高性能混凝土梁完成后，应及时进行检查验收，其质量标准见验收章节的规定。

9 验收

9.1 超高性能混凝土材料检验

9.1.1 超高性能混凝土材料应检验立方体抗压强度、轴心抗拉强度和耐久性指标。

9.1.2 超高性能混凝土的配合比检验，可以采用按原材料质量比表示的配合比或 7.5.1 条中 b 或 c 中混合料进行检验。

条文说明

超高性能混凝土原材料和配合比的检验，在超高性能混凝土的制备技术未完全公开的前提下，因涉及到超高性能混凝土供应商的商业机密，为保证超高性能混凝土的质量和超高性能混凝土供应商的诉求，可以提供原材料检验文件和混合料配合比的形式确定。

9.1.3 超高性能混凝土的性能应分批进行检验评定。一个检验批的混凝土应由力学性能等级相同、试验龄期相同、生产工艺条件和配合比基本相同的超高性能混凝土组成。

条文说明

每一检验批的超高性能混凝土组成，要求力学性能等级、试验龄期、生产工艺条件和配合比基本相同，是确保同一检验批的数据准确、离散性小的基础。

9.1.4 超高性能混凝土的抗压强度每 50m³检验一次。批量不到 50m³，按 50m³计算。每班次应至少检验一次，每次检验应至少留置两组试件。试件应在浇筑地点随机取样制作。

9.1.5 超高性能混凝土中钢纤维体积率按照附录 D 方法检验，每班次或 50m³检验一次，超高性能混凝土拌合物的钢纤维体积率偏差应小于 5%。

9.1.6 超高性能混凝土试件应采用与实际工程相同的养护条件进行养护。

条文说明

超高性能混凝土强度评定试件的养护方法与普通混凝土强度评定试件的养护方法存在区别。超高性能混凝土强度评定试件采用热养护后，其强度、收缩和徐变等与标准养护试件不同，采用标准养护试件作为强度评定依据，不具有代表性。

9.1.7 超高性能混凝土的力学性能检验结果应满足表 10 的要求。对超高性能混凝土有耐久性，应按照《超高性能混凝土基本性能与试验方法》（T/CBMF 37-2018）（T/CCPA 7-2018）描述的方法进行检测，其检验结果应满足表 11 的要求。

表10 超高性能混凝土力学性能等级

强度等级	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
UC130	≥130	≥6.2	≥41.5
UC140	≥140	≥6.7	≥42.0
UC150	≥150	≥7.2	≥43.5
UC160	≥160	≥7.7	≥45.0
UC170	≥170	≥8.3	≥45.0
UC180	≥180	≥8.8	≥45.0
UC190	≥190	≥9.3	≥45.0
UC200	≥200	≥9.8	≥45.0

表11 超高性能混凝土的耐久性能

参数	要求
$D_{Cl}/(\times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s})$	$D_{Cl} \leq 20$

9.2 无腹筋预应力超高性能混凝土梁体检验

9.2.1 结构表面不得出现超过设计规定的受力裂缝。

9.2.2 无腹筋预应力超高性能混凝土预制节段梁实测允许偏差应符合表 12 的要求，预制梁实测允许偏差应符合表 13 的要求。

表12 预制节段梁允许偏差

序号	项目	规定值或允许偏差 (mm)	检验频率		检验方法	
			范围	点数		
1	表面平整度	5	每个节段	2	2m 直尺检验	
2	长度	0, -5		3	丈量	
3	断面尺寸	宽度		±5	2	丈量
		高度		±5	2	
		壁厚		+5, 0	8	
4	轴线偏移量	纵轴线		5	1	经纬仪测量
		横隔梁轴线		5	1	

表13 预制梁允许偏差

序号	项目		规定值或允许偏差 (mm)	检验频率		检验方法
				范围	点数	
1	断面尺寸	宽	±5	端部 L/4 处和跨中	5	尺量
		高	±5		5	
		壁厚	+5, 0		5	
2	跨径		+5, -10	端部两侧上缘和下缘	4	尺量
3	平整度		5	桥面板	2	2m 直尺、塞尺尺量

9.2.3 无腹筋预应力超高性能混凝土梁、板安装允许偏差应满足《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的相关要求。

9.3 无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥检验

9.3.1 桥梁中线、高程和桥宽等总体的偏差检验应满足《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的相关要求。

9.3.2 桥梁总体外观质量应符合下列要求：

- a) 桥梁的内外轮廓线形应无异常突变；
- b) 结构内外部、支座和伸缩缝处应无残渣、杂物；
- c) 桥头不得出现跳车。

9.4 预应力筋加工、安装和张拉检验

预应力筋加工、安装和张拉的检验应满足《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的相关要求。

9.5 预制梁节段拼装检验

无腹筋预应力超高性能混凝土预制梁节段拼装的检验应满足《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的相关要求。

附 录 A
(规范性)
弯曲试验及数据处理方法

A.1 试件及试验设备

A.1.1 试件的尺寸和制备

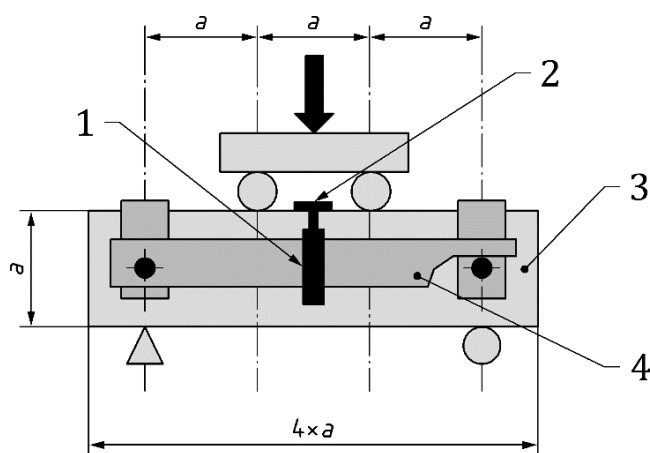
棱柱体试件尺寸为 $a \times a \times 4a$ ，其中 a 取7cm~20cm之间，且应为超高性能混凝土所采用最长纤维长度的5至7倍。试件可利用模具单独浇筑或者从实际结构上切割得到。对于从实际结构上切割得到的棱柱体试件，在保证长高比不变的情况下，试件宽度可在0.5至1.5倍试件高度范围变化。

对于要切口的棱柱体试件，切口应位于受拉面中部，且受拉面应是模具一侧。切口的深度等于最长纤维长度的一半，且切口的宽度应小于3mm。

试件数量应大于6个，所有试件制作过程中禁止使用插入式振动棒振捣。试件成型后禁止堆放。

A.1.2 试验装置及加载设备

对于四点弯曲试验，是为了确定弹性极限抗拉强度，位移传感器应通过特定支架固定在试件上，以测量试验过程中的挠度（图A.1）。



标引序号说明：

1-位移传感器；

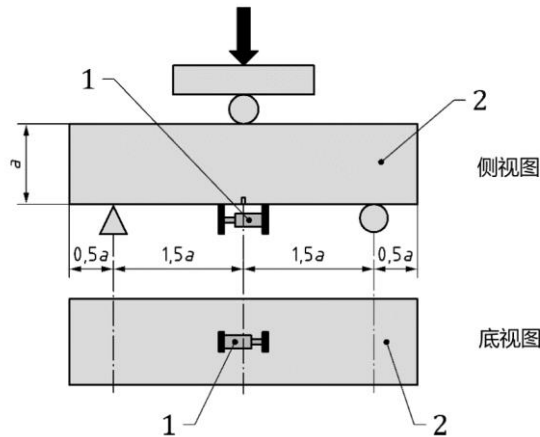
2-顶板，例如由铝制成；

3-无切口超高性能混凝土试件；

4-支架。

图A.1 四点弯曲试验中的挠度测量

对于三点弯曲试验，是为了确定产生裂纹后的抗拉强度和超高性能混凝土拉伸性能等级（见4.1.9）。跨越切口的位移传感器固定在棱柱体试件下缘受拉纤维周围（图A.2）。不同试件两个传感器定位装置之间的距离需保持一致且小于5cm。传感器量程应小于2mm。位移测量的精度应小于量程的0.5%。



标引序号说明：
 1-位移传感器；
 2-带切口超高性能混凝土试件。

图A.2 三点弯曲试验中裂缝宽度的测量

试验加载设备可采用万能试验机，并通过通过载荷、位移作动器或外部传感器进行伺服控制。万能试验机的加载速率应按如下方式之一进行控制：

- a) 通过试验机位移作动器控制：(0.25±0.1) mm/min；
- b) 通过位移传感器控制：(0.1±0.05) mm/min。

A.2 试验环境

试验环境温度：10℃~35℃。

A.3 检测布置

试件的试验加载面采用浇筑时的两个侧面。

正式试验前需要对试件预加载，预加载应小于理论弹性极限荷载大小的10%，且在后续试验中考虑。当试件的跨中挠度达到0.015a（a为棱柱体试件的高度）时应终止试验。数据记录频率不低于每秒5次。

试验记录的数据包含：时间、裂缝宽度或下缘纤维延伸、挠度、力以及试验机作动器的位移等。

A.4 结果处理

A.4.1 无切口棱柱体四点弯曲试验的数据处理

A.3.1 拉伸下弹性极限的确定

通过四点弯曲试验得到的力-挠度曲线确定失去线性行为特征时的力 F_n ，与之对应的应力称为弯曲弹性极限抗拉强度，可以由式（A.1）计算：

$$f_{te} = f_{t,fl} \frac{\kappa a^{0.7}}{1 + \kappa a^{0.7}} \dots\dots\dots (A.1)$$

$f_{t,fl}$ 通过式 (A.2) 计算:

$$f_{t,fl} = \frac{3F_n}{b \cdot a} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- F_n ——弹性极限力, 单位N;
- a ——棱柱体试件高度, 单位mm;
- b ——棱柱体试件宽度, 单位mm;
- κ ——形状系数, 取值0.08。

条文说明

对于T3类的超高性能混凝土, 系数 κ 需重新校准, 它通常大于0.08, 因此会增加计算得到极限 f_{te} 值。应用数理统计方法, 进一步确定弹性极限抗拉强度平均值 f_{tme} 和弹性极限抗拉强度标准值 f_{tke} 。

A.3.1.2 T3类超高性能混凝土情况下的数据处理

对于T3类超高性能混凝土, 应使用本标准附录B中的逐步反演方法通过四点弯曲试验推测出应力应变关系。

A.4.2 有切口棱柱体3点弯曲试验的数据处理

A.3.2.1 裂纹宽度的测定

由于每一条弹性变形测试曲线需根据在切口传感器的标距长度进行平均, 因此应将弹性区域末端测量的裂缝宽度值作为裂缝宽度的零点, 这只需通过改变基准点, 并将曲线的新原点置于开裂时的时间步长上。

在没有记录裂缝宽度的情况下, 应该根据测量的挠度 f 来估计。给定对应于弹性区域末端的挠度 f_0 , 裂缝宽度 (w) 由以下关系 (A.3) 确定:

$$w = \frac{4}{3} \times 0.9 \times (f - f_0) \dots\dots\dots (A.3)$$

A.3.2.2 数据滤波

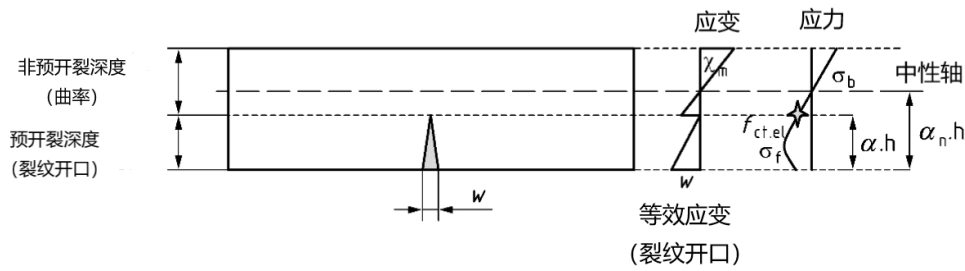
应对力-裂缝宽度测试曲线上的数据进行滤波, 进而降低实验数据的噪声, 以便于在逆推法中应用。用步长内数据的移动平均值作为步长内数据的中点值。对裂缝宽度曲线采用20 μ m步长, 对力曲线采用40 μ m步长。最后将各类相关的曲线处理成相同的x轴。

A.3.2.3 逆推法

通过逆推法对弯矩-裂缝宽度曲线进行分析可得到轴拉应力-裂缝宽度曲线。相应的数据应采用滤波后的数据。

A.3.2.4 裂缝截面的平衡关系

图A.3为弯曲下棱柱体试件的裂缝区域应力应变分布示意图。根据截面的力学平衡可得到方程(A.4)至(A.9), 其中下标 b 表示非开裂部分的贡献, 而下标 f 表示开裂部分的贡献。



图A.3 裂缝区域的应力应变分布

截面轴力 N 按式A.4计算:

$$N = N_b + N_f = 0 \dots\dots\dots (A.4)$$

$$N_b = \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^2}{2} [(1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2] \dots\dots\dots (A.5)$$

$$N_f = \frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w} \int_0^w \sigma_f \cdot d\omega \dots\dots\dots (A.6)$$

截面弯矩 M 按式A.7计算:

$$M = M_b + M_f \dots\dots\dots (55)$$

$$M_f = \alpha h \cdot N_f - \frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{w^2} \int_0^w \sigma_f \cdot \omega \cdot d\omega \dots\dots\dots (A.8)$$

$$M_b = \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^3}{3} [(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3] + h \cdot \alpha_n \cdot N_b \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

- M ——截面弯矩, 单位为 $MN \cdot m$;
- N ——截面轴力, 单位为 MN ;
- α ——裂缝的相对高度;
- α_n ——中性轴的相对高度, 可由 $\sigma_t = E_{cm} \cdot \chi_m \cdot h \cdot ((\alpha - \alpha_n))$;
- χ_m ——非开裂部分的曲率, 单位为 m^{-1} ;
- f_{te} ——超高性能混凝土弹性拉伸极限抗拉强度, 单位MPa;
- E_{cm} ——杨氏模量的平均值, 单位MPa;
- b ——截面的宽度, 单位m;
- h ——截面的高度 (在扣除缺口深度之后), 单位m。

裂缝宽度与非开裂部分的曲率可通过几何方程 (A.10) 确定:

$$w = [\chi_m + 2 \cdot \chi_e] \frac{2 \cdot (\alpha h)^2}{3} \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

- χ_e ——等效弹性曲率, 单位 m^{-1} , $\chi_e = M / (E_{cm} \cdot I)$;
- I ——截面惯性矩, 单位 m^4 。

通过式 (A.11) 得到裂缝相对高度与中性轴相对高度的关系:

$$(\alpha_n - \alpha) \cdot h \cdot \chi_m \cdot E_{cm} = f_{te} \dots\dots\dots (A.11)$$

由于位移传感器位置通常略微低于试件切口底部, 距离为 e 。逆推分析中需要通过式 (A.12) 校正

测量结果:

$$w = w_{mes}[\alpha \cdot h / (\alpha \cdot h + e)] \dots \dots \dots (A. 12)$$

w_{mes} —— 裂缝宽度实测值。

A. 3. 2. 5 迭代求解

应力-裂缝宽度曲线由成对点 (w_i, σ_{fi}) 离散的确定。应力-裂缝宽度关系可由梯形公式近似表示, 即:

$$\int_0^{w_{i+1}} \sigma_f \cdot d_w = \int_0^{w_i} \sigma_f \cdot d_w + \left(\frac{\sigma_{fi} + \sigma_{f_{i+1}}}{2} \right) (w_{i+1} - w_i) \dots \dots \dots (A. 13)$$

式 (A. 14) 和 (A. 15) 给出了第 $i+1$ 步的轴力 $N_{f_{i+1}}$ 和弯矩 $M_{f_{i+1}}$ 的递推公式:

$$N_{f_{i+1}} = N_{fi} \cdot \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} + \alpha_{i+1} \cdot b \cdot h \cdot \left(\frac{\sigma_{fi} + \sigma_{f_{i+1}}}{2} \right) \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \dots \dots \dots (A. 14)$$

$$M_{f_{i+1}} = M_{fi} \cdot \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 + \alpha_{i+1} \cdot h \cdot N_{f_{i+1}} \cdot \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) - \frac{(\alpha_{i+1} \cdot h)^2 \cdot b}{2} \cdot \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 \cdot \sigma_{f_{i+1}} \dots \dots \dots (A. 15)$$

求解上述等式, 可在第 $i+1$ 次迭代中分别求解未知的应力 $\sigma_{f_{i+1}}$ 和裂缝深度 α_{i+1} 。

为了简化分析, 选择开裂时刻 (弹性区域末端) 作为初始开裂弯矩 M_b^0 :

$$M_b^0 = M_{ext} = \frac{-bh^2 \cdot \sigma_f^0}{6} \dots \dots \dots (A. 16)$$

此时 $M_f^0 = 0$; $N_b^0 = 0$; $N_f^0 = 0$ 。

在每个增量计算结束时, 需通过式 (A.17) 的移动平均运算对数据进行平滑处理。

$$\sigma_{fi} = (2\sigma_{fi} + \sigma_{f_{i+1}}) / 3 \dots \dots \dots (A. 17)$$

A. 4. 3 浇筑、切割和切口造成的边缘效应修正

本节主要考虑由于浇筑、切割和切口造成的边缘效应对三点弯曲试验结果的影响。

A. 3. 3. 1 模具面

当利用模具或模板制备棱柱体试件时, 纤维的取向在模具或模板边附近趋向于二维。因此, 在宽度 $L_f/2$ 上采用系数 1.2 以考虑等效的三维效应。 L_f 为最长的纤维长度。当该面位于试验中的受压面时采用 1.0 系数。

A. 3. 3. 2 切割面

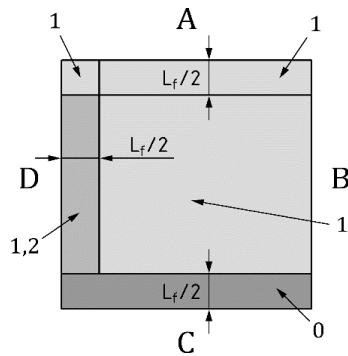
由于一半纤维不在切割边的有效锚固宽度 $L_f/2$ 内。因此, 在宽度 $L_f/2$ 上采用 1/2 系数。当该面位于实验中的受压面时采用 1.0 系数。

A. 3. 3. 3 切口面

在计算拉伸应力的有效面积时不考虑切口的表面积。

A.3.3.4 修正计算方法

棱柱体不同位置的权重系数不同，图 A.4 和图 A.5 给出了模具制备得到的棱柱体和切割得到的棱柱体试件系数的示意图。设核心截面的系数为 1，通过面积加权平均法计算试件的边缘效应修正系数。对试验得到的应力-应变试验曲线中的应力值乘以边缘效应修正系数就可以得到最终的应力-应变曲线。



标引序号说明：

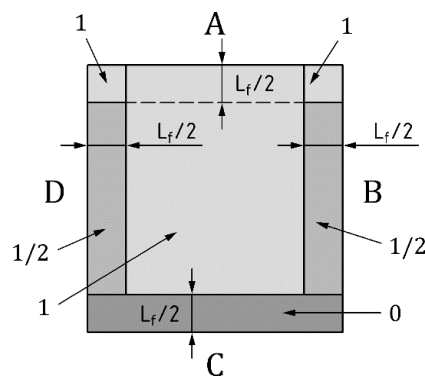
A—模具面，受压面；

B—非模具面；

C—模具面，切口面；

D—模具面。

图A.4 模具制备的棱柱体试件边缘效应的计算示例



标引序号说明：

A—非模具面，受压面；

B—切割面；

C 切口面；

D—切割面。

图A.5 切割得到的棱柱体试件边缘效应的计算示例

A. 4. 4 其他

弯曲试验及获得的数据，同时考虑以下情况：

- a) 根据 A. 4 和 A. 5 的数据处理方法可以获得设计用的超高性能混凝土拉伸应力应变曲线的分段线性关系。这条曲线的特征点有：
 - 1) 弹性极限抗拉强度（裂缝开度为 0）；
 - 2) 裂缝宽度等于 0.3mm 时的应力或最大应力（如果对应的裂纹宽度大于 0.3mm）；
 - 3) 裂缝宽度等于棱柱体试件高度的 1% 时的应力；
 - 4) 裂纹宽度大于 $L_f/4$ 时认为应力为 0（ L_f 是最长纤维的长度）。
- b) 如果弹性极限抗拉强度大于产生裂纹后的抗拉强度或者裂缝宽度为 0.3mm 时的应力，则相应弹性极限抗拉强度取这些数值的最小值。
- c) 与这些简化表示相关的应力值应精确到最近的 0.1MPa。

附 录 B
(规范性)
四点弯曲试验和数据处理方法

B.1 试件及试验设备

同附录A。

B.2 检测布置

同附录A。

B.3 试验环境

同附录A。

B.4 结果处理

B.4.1 弹性行为的测定

弯曲弹性模量 E 的确定应在由 n 次试验 ($n \geq 6$) 得到的平均弯矩挠度曲线的上升阶段的线性部分的中三分之一处进行。然后将该区间中的曲线斜率乘以系数 $(23 \cdot p^2)/(216 \cdot b \cdot e^3/12)$ ，以获得弯曲弹性模量。

弹性极限抗拉强度 f_{te} 可由弯矩—挠度曲线确定。首先手动确定线性区间 ΔM 的幅度，然后通过 $\Delta M/3$ 和 $2\Delta M/3$ ，绘制一条线，如图B.1所示。然后在实验曲线上找到明显偏离直线的点 M^* 。点 M^* 对应的弯矩值应乘以 $6/be^2$ ，就得到弹性极限抗拉强度 f_{te} 。可通过数理统计方法进一步获得弹性极限抗拉强度平均值 f_{cme} 和弹性极限抗拉强度特征值 f_{tke} 。应力—应变本构曲线的线性部分就由弹性极限抗拉强度 f_{te} 确定，应力—应变本构曲线的非线性部分由B.4.2的弯矩—挠度曲线逐步反演方法获得。

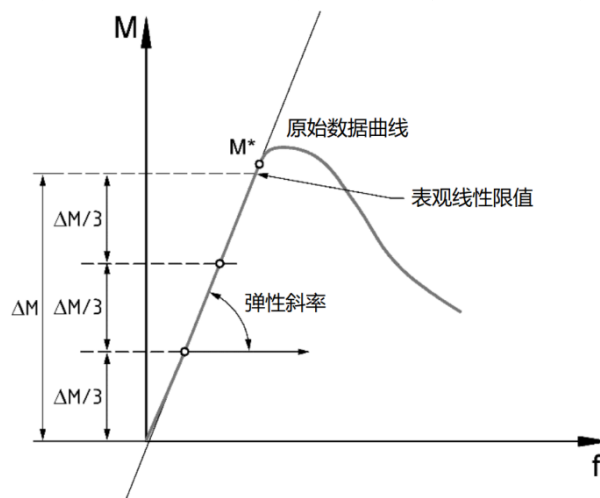


图 B.1 弹性行为的测定

B.4.2 弯矩—挠度曲线逐步反演方法

应力-应变本构曲线的非线性部分可由试验获得的弯矩—曲率关系确定。实际上在材料非线性阶段，曲率 χ 和挠度 δ 之间的线弹性关系不再适用。因此如图B.2所示，曲率的变化快于弯矩的变化，此时应通过逐步反演方法进行迭代求解弯矩-曲率关系。

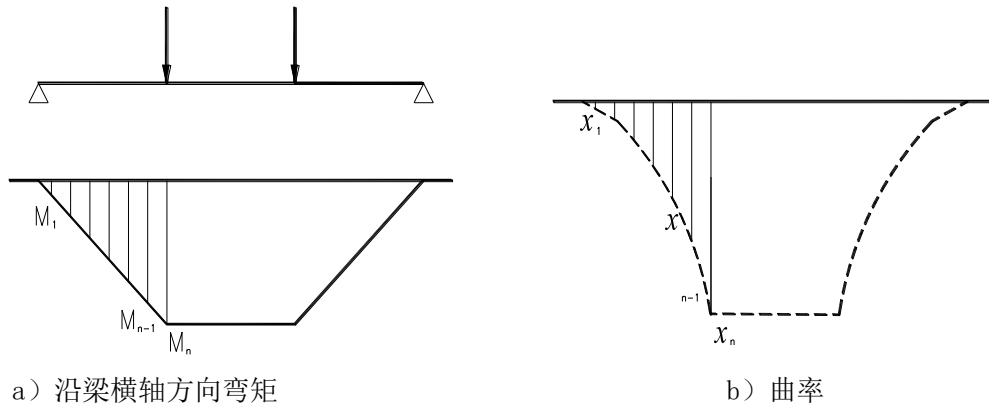


图 B.2 屈服后力矩与曲率曲线

弯矩为零时，挠度和曲率为零。

已知弯矩 M_n 和挠度 δ_n ，且假设已知弯矩 M_i 和相应的曲率 $\chi_i (i=1, \dots, n-1)$ ，就可以求出曲率 χ_n （见图B.2）。对所有曲率 χ_i 进行两次积分得到挠度。弯矩 M_i 和曲率 χ_i 确定后，就可以进一步得到应力应变关系。

第0步， $\varepsilon_0 = 0$ 且 $\sigma_0 = 0$ 。对于第 n 步，假设已知前 $n-1$ 步的 ε_i 和 σ_i ，以及第 n 步的弯矩 M_n 和曲率 χ_n 。设 β_i 是弯矩 M_i 下中性轴的相对高度，根据平截面假定可得：

$$\varepsilon_n = -\chi_n \beta_n \cdot e \dots \dots \dots (B.1)$$

根据水平方向合力为零可得：

$$N = N_c + N_t = \frac{1}{2}(1 - \beta_n)^2 e^2 \cdot b \cdot \chi_n \cdot E + \frac{1}{\chi_n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i) \cdot \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \cdot b = 0 \dots \dots \dots (B.2)$$

第 $n-1$ 步受压区 N_c 满足：

$$N_c(n-1) = \frac{1}{2}(1 - \beta_{n-1})^2 e^2 \cdot b \cdot \left(-\frac{\varepsilon_{n-1}}{\beta_{n-1}e}\right) \cdot E \dots \dots \dots (B.3)$$

第 $n-1$ 步受拉区 N_t 满足：

$$N_t(n-1) = \left(-\frac{\beta_{n-1}e}{\varepsilon_{n-1}}\right) \cdot b \cdot \int_{\varepsilon_{n-1}}^0 \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = -\frac{1(1-\beta_{n-1})^2}{2\beta_{n-1}} e \cdot b \cdot (-\varepsilon_{n-1}) \cdot E \dots \dots \dots (B.4)$$

第 n 步可以表达为：

$$N_t(n) = \left(-\frac{\beta_n e}{\varepsilon_n}\right) \cdot b \cdot \int_{\varepsilon_n}^0 \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = -\frac{\beta_n e}{\varepsilon_n} \cdot b \cdot \int_{\varepsilon_{n-1}}^0 \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon - \frac{\beta_n e}{\varepsilon_n} \int_{\varepsilon_n}^{\varepsilon_{n-1}} \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon \dots \dots \dots (B.5)$$

整理后得到：

$$-\frac{1(1-\beta_n)^2}{2\beta_n} e \cdot b \cdot (-\varepsilon_n) \cdot E = \frac{1\beta_n}{2\varepsilon_n} \cdot \frac{(1-\beta_{n-1})^2}{(\beta_{n-1})^2} \cdot (\varepsilon_{n-1})^2 \cdot e \cdot b \cdot E - \frac{\beta_n}{\varepsilon_n} \cdot \frac{\sigma_n + \sigma_{n-1}}{2} \cdot (\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n) \cdot e \cdot b \dots (B.6)$$

根据 $\varepsilon_{mes,n}$ 或 χ_n 和 β_n 的关系求出 ε_n ，进而我们可以得到 σ_n 和 β_n 之间关系。

第 n 步的弯矩方程为：

$$M = M_c + M_t = \frac{e^3}{3} \cdot (1 - \beta_n)^3 \cdot b \cdot \chi_n \cdot E + \left(\frac{1}{\chi_n}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i) \frac{(\varepsilon_{i-1} + 2\varepsilon_i) \cdot \sigma_i + (2\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i) \cdot \sigma_{i-1}}{6} \cdot b \dots \quad (B.7)$$

式中， M_n 是 σ_n ， β_n 和 ε_n （或 χ_n ）的函数。 ε_n 可由 $\varepsilon_{mes,n}$ 或 χ_n 和 β_n 获得。因为 σ_n 是 β_n 的函数，所以弯矩 M_n 也是 β_n 的函数。此时我们就将三个未知数 ε_n ， σ_n 和 β_n 的关系简化成了一个方程和一个未知数的问题。

B.4.3 简化表示

对于纯弯和弯压构件，可按照图B.3曲线进行简化应力应变关系。

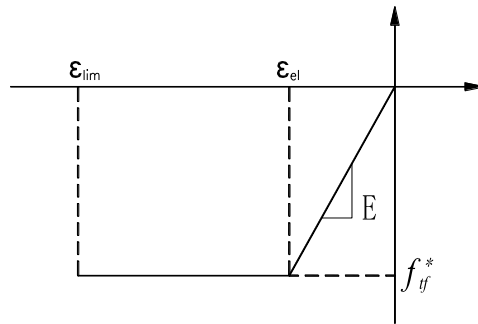


图 B.3 简化规则

弹性模量 E 应根据B.1.1确定，弹性应变极限 ε_{el} 应在获得产生裂缝后的抗拉强度 f_{tf}^* 后导出。

纯弯段的曲率 χ （单位 m^{-1} ）、挠度 δ （单位 m ）和跨度 p （单位 m ）之间的关系为：

$$\delta = \frac{23}{216} \chi p^2 \dots \dots \dots (E.8)$$

f_{tf}^* 和 ε_{lim} 应在最大力矩 M 状态下的应变和应力关系得出（图B.4）：

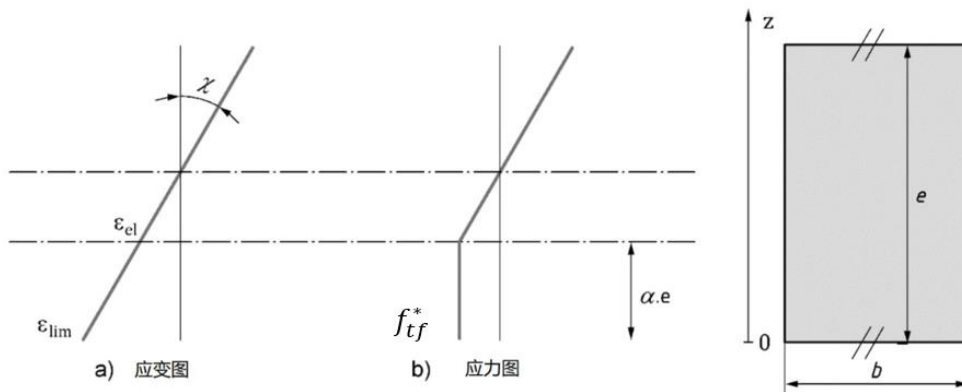


图 B.4 简化法则下应变和应力的分布

裂缝深度 $\alpha \cdot e$ 和 f_{tf}^* 的表达式为：

a) 当 $0 \leq z \leq \alpha \cdot e$ ：

$$\sigma(z) = f_{tf}^* \dots \dots \dots (B.9)$$

b) 当 $\alpha \cdot e \leq z \leq e$ ：

$$\sigma(z) = f_{tf}^* + (z - \alpha \cdot e) \cdot \chi \cdot E \dots \dots \dots (B.10)$$

相应的轴力 N 和弯矩 M 为:

$$N = b \cdot e \cdot f_{tf}^* + \frac{1}{2} b \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot e^2 \chi \cdot E \dots\dots\dots (B. 11)$$

$$M = b \cdot \frac{e^2}{2} \cdot f_{tf}^* + b \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha^3}{6} \right) \cdot e^3 \chi \cdot E \dots\dots\dots (B. 12)$$

由于 $N = 0$:

$$M = (2\alpha^3 - 3\alpha^2 + 1) \cdot \frac{b \cdot e^3 \chi \cdot E}{12} \dots\dots\dots (B. 13)$$

已知 M 和 χ , 求出 α 后, 可进一步得到:

$$f_{tf}^* = -\frac{1}{2}(1 - \alpha)^2 \cdot e \cdot \chi \cdot E \dots\dots\dots (B. 14)$$

$$\text{and } \varepsilon_{lim} = -\chi \cdot \alpha \cdot e + \frac{f_{tf}^*}{E} \dots\dots\dots (B. 15)$$

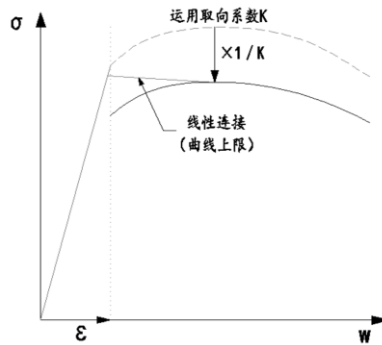
f_{tf}^* 应精确到0. 1MPa。

附 录 C
(规范性)
纤维取向系数 K 的计算

C.1 计算原理

为了考虑纤维取向对超高性能混凝土抗拉性能的影响，引入纤维取向系数 K 对超高性能混凝土抗拉性能指标进行折减。

利用纤维取向系数 K 对超高性能混凝土抗拉性能的折减方法是：首先根据附录A或附录B，将标准模具弯折试验得到的响应曲线的非线性部分应乘以 $1/K$ 。其次将该响应曲线的线性部分最大值和折减后的非线性部分最大值（开裂后强度 f_{ctf} ）之间进行线性连接，如图D.1所示。如果非线性部分没有局部最大值，则应使用对应裂缝宽度为0.3mm的强度值 f_{ctf} 代替 f_{ctf} 进行连接。



图C.1 取向系数 K 的应用

C.2 计算方法

C.2.1 数据的来源

为获得纤维取向系数 K ，需要通过以下两种类型试件进行弯折试验：

- a) 从实际结构中沿着所需拉应力方向切割的试件；
- b) 与结构浇筑同时用标准模具制作的试件。

相同类型的试件数量不少于6个，试件尺寸及试验方法参照附录A和附录B。

C.2.2 结果处理

纤维取向系数 K 的计算公式为：

$$K_{global} = \frac{\text{标准模具试件的试验曲线峰值平均值}}{\text{切割制备试件的试验曲线峰值平均值}} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$K_{local} = \frac{\text{标准模具试件的试验曲线峰值平均值}}{\text{切割制备试件的试验曲线峰值最小值}} \dots\dots\dots (C.2)$$

其中 $1.0 \leq K_{global} \leq 2.0$ ， $1.0 \leq K_{local} \leq 2.5$ 。

当缺乏试验数据时，取

$$K_{global} = 1.25 \quad K_{local} = 1.75$$

附 录 D

(规范性)

超高性能混凝土中钢纤维体积率的试验、检验方法

D.1 试验设备

试验仪器设备应符合下列规定：

- a) 电子天平：称重 1kg，精度不应低于 1g；
- b) 容量筒：钢制容积 5L；直径和筒高均为 186mm±2mm，壁厚 3mm；
- c) 振动台：频率宜为 50Hz±3Hz，空载时振幅宜为 0.5mm±0.1mm；
- d) 不锈钢丝筛网：网孔尺寸应为 2.5mm×2.5mm；
- e) 其他：振槌、铁铲、容器和磁铁等。

D.2 检验布置

检验应遵循以下步骤进行：

- a) 应把容量筒内外擦拭干净；
- b) 应一次性将拌合物灌倒高出容量筒口，并利用振动台或振槌进行振实。振动过程中如拌合物沉落低于筒口，应随时添加，直至表面出浆；
- c) 刮去多余的拌合物，并填平表面凹陷部分；
- d) 将拌合物倒入不小于 10 倍拌合物体积的大容器中，加水搅拌，用磁铁收集水中的钢纤维，并仔细洗净粘附在钢纤维上的异物；
- e) 将收集的钢纤维在 105℃±5℃ 的温度下烘干至恒重，烘干时间应不少于 4 小时，然后每隔 1 小时称重一次，直至连续两次称量之差小于较小值的 0.5% 时为止。冷却至室温后称其质量，精确至 1g。

D.3 结果处理

D.3.1 钢纤维体积率按式 (E.1) 计算

$$V_{sf} = \frac{m_{sf}}{\rho_{sf}V} \times 100 \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

- V_{sf} ——钢纤维体积率 (%)；
- m_{sf} ——容量筒中钢纤维质量 (g)；
- V ——容量筒容积 (L)；
- ρ_{sf} ——钢纤维密度 (kg/m^3)。

D.3.2 试验结果处理

试验应分两次进行，两次测定的偏差应小于两次测量平均值的 5%，否则结果无效，应重新检测；取两次测定值的平均值作为钢纤维含量试验结果。

参 考 文 献

[1] NF P 18-710, 2016 National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete
