****T/CECSxxx-2021

中国工程建设标准化协会标准

**建筑及道路工程超高性能混凝土应用技术规程**

Technical specification for application of high performance concrete in building and road engineering

（**征求意见稿**）

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

建筑及道路工程超高性能混凝土应用技术规程

Technical specification for application of high performance concrete in building and road engineering

**T/CECS xxx－2021**

主编单位：上海市建筑科学研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2021年XX月XX日

中国计划出版社

2021年 北京

前 言

本标准根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2018年第一批协会标准制定、修订计划>的通知》（建标协字﹝2018﹞015号）文件的要求，编制组在深入调研、认真总结实践经验、参考国内外先进标准和广泛征求意见的基础上，编制本标准。

本标准共分13章。主要内容包括总则、术语和符号、构件结构设计基本规定、超高性能混凝土构件材料要求、受弯构件承载能力极限状态计算、受弯构件正常使用极限状态验算、预制结构构件接缝设计、预制构件制作与运输、外墙板基本规定、外墙板建筑设计、外墙板结构设计、外墙板制作与安装、外墙板检验与验收。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑与市政工程产品专业委员会归口管理，由上海市建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容的解释。本标准在执行过程中如有意见或建议，请寄送至上海市建筑科学研究院有限公司（地址：上海市闵行区申富路568号，邮编：201108，邮箱：fanjunjiang@sribs.com）。

**主 编 单 位：**上海市建筑科学研究院有限公司

**参 编 单 位：**

**主要起草人：**

**主要审查人：**

目 录

[**1 总 则** 1](#_Toc89350737)

[**2 术语和符号** 2](#_Toc89350738)

[**2.1 术语** 2](#_Toc89350739)

[**2.2 符号** 2](#_Toc89350740)

[**3 构件结构设计基本规定** 8](#_Toc89350741)

[**4 超高性能混凝土构件材料要求** 9](#_Toc89350742)

[**5 受弯构件承载能力极限状态计算** 13](#_Toc89350743)

[**5.1 一般规定** 13](#_Toc89350744)

[**5.2 正截面承载力计算** 13](#_Toc89350745)

[**5.3 斜截面承载力计算** 16](#_Toc89350746)

[**6 受弯构件正常使用极限状态验算** 19](#_Toc89350747)

[**6.1 裂缝控制计算** 19](#_Toc89350748)

[**6.2 受弯构件挠度验算** 20](#_Toc89350749)

[**7 预制结构构件接缝设计** 22](#_Toc89350750)

[**7.1 一般规定** 22](#_Toc89350751)

[**7.2 最小配筋率及配箍率** 23](#_Toc89350752)

[**7.3 钢筋的锚固** 23](#_Toc89350753)

[**8 预制构件制作与运输** 24](#_Toc89350754)

[**8.1 一般规定** 24](#_Toc89350755)

[**8.2 预埋件要求** 24](#_Toc89350756)

[**8.3 构件制作及运输** 24](#_Toc89350757)

[**9 外墙板基本规定** 26](#_Toc89350758)

[**9.1 一般规定** 26](#_Toc89350759)

[**9.2 技术要求** 26](#_Toc89350760)

[**9.3 性能参数** 27](#_Toc89350761)

[**10 外墙板建筑设计** 28](#_Toc89350762)

[**10.1 一般规定** 28](#_Toc89350763)

[**10.2 UHPC外墙性能设计** 28](#_Toc89350764)

[**10.3 UHPC外墙构造设计** 28](#_Toc89350765)

[**10.4 UHPC外墙板构造与连接设计** 28](#_Toc89350766)

[**11 外墙板结构设计** 30](#_Toc89350767)

[**11.1 一般规定** 30](#_Toc89350768)

[**11.2 荷载与作用** 31](#_Toc89350769)

[**11.3 作用效应组合** 32](#_Toc89350770)

[**11.4 承载力极限状态设计** 34](#_Toc89350771)

[**11.5 抗裂验算** 34](#_Toc89350772)

[**11.6 锚固承载力设计** 35](#_Toc89350773)

[**11.7 平板面板结构设计** 37](#_Toc89350774)

[**11.8 背负钢架板结构设计** 38](#_Toc89350775)

[**12 外墙板制作与安装** 40](#_Toc89350776)

[**12.1 一般规定** 40](#_Toc89350777)

[**12.2 外墙板制作** 40](#_Toc89350778)

[**12.3 安装施工** 40](#_Toc89350779)

[**12.4 安装质量要求** 41](#_Toc89350780)

[**13 外墙板检验与验收** 42](#_Toc89350781)

[**13.1 检验** 42](#_Toc89350782)

[**13.2 验收** 42](#_Toc89350783)

[**本规程用词说明** 44](#_Toc89350784)

[**引用标准名录** 45](#_Toc89350785)

[**条文说明** 46](#_Toc89350786)

# **1 总 则**

**1.0.1** 为提高超高性能混凝土在建筑工程中应用技术水平，促进超高性能混凝土在建筑中应用的科学化、规范化，做到技术先进、安全可靠、适用美观和经济合理，保证工程质量，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于超高性能混凝土在建筑工程中水平承重构件及非承重外墙板的应用。

**1.0.3** 超高性能混凝土在建筑中的应用除应符合本标准外，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** 超高性能混凝土 ultra high performance concrete (UHPC)

具有高抗拉、抗压、抗渗性能开裂后有表观应变硬化或软化行为特征的水泥基复合材料。其中弹性极限抗拉强度不小于5MPa、抗压强度不小于120MPa。

**2.1.2** 弹性极限抗拉强度 elastic limit tensile strength

单轴拉伸试件由弹性转变为非线性时的转折点所对应的拉伸应力。

**2.1.3** 抗拉强度 tensile strength

单轴拉伸试件应变硬化时所对应的最大拉应力。

**2.1.4** 极限拉应变 ultimate tensile strain

单轴拉伸试件达到最大拉应力时所对应的应变。

**2.1.5** 弹性极限抗弯强度 elastic limit bending strength

抗弯试件由线弹性转变为非线性时的转折点所对应的弯拉应力。

**2.1.6** 抗弯强度 bending strength

抗弯试件达到最大承载能力时对应的弯拉应力。

**2.1.7** 应变硬化 strain softening

当拉应力超过弹性极限抗拉强度后，拉应力随应变增大而不下降的现象。

**2.1.8** 预混料 premix

由水泥、矿物掺和料、骨料按级配配制的干粉料。

**2.1.9** 工作性 workability

新拌UHPC拌合物浇筑密实的施工性能，用扩展度表征。

**2.1.10** UHPC外墙板 glass fiber reinforced cement

以超高性能混凝土作为基材，采用浇筑工艺工厂化预制而成，安装在混凝土结构建筑上具有装饰作用的非承重外墙板。

**2.2 符号**

**2.2.1** 材料力学性能

*D*——材料刚度；

*E*——材料弹性模量；

*f*——钢材抗弯强度设计值；

*UC*——UHPC标号，U120表示立方体抗压强度为120MPa的UHPC；

*f*cuk——UHPC的立方体抗压强度标准值；

*f*ck——UHPC的轴心抗压强度标准值；

*f*c——UHPC的轴心抗压强度设计值；

*f*tek——UHPC的弹性极限抗拉强度标准值；

*f*te——UHPC的弹性极限抗拉强度设计值；

*f*tk——UHPC的轴心抗拉强度标准值；

*f*t——UHPC的轴心抗拉强度设计值；

*ε*tu——UHPC的极限拉应变；

*E*U——UHPC的弹性模量；

*μ*——UHPC的泊松比；

*f*sk*、f*sd——普通钢筋抗拉强度标准值、设计值；

*f* pk*、f* pd——普通钢筋、预应力钢筋抗压强度设计值；

*f'*sd*、f'* pd——体内预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

*f*Mk ——超高性能混凝土材料抗弯强度标准值；

*f*Lk——UHPC材料比例极限强度标准值；

*D*——UHPC平板刚度；

*v*——UHPC材料泊松比；

*E*——UHPC材料弹性模量；

**2.2.2** 作用和作用效应有关符号

*F*ld*——*集中反力或局部压力设计值；

*M*d*——*弯矩设计值；

*M*u*——*构件正截面抗弯承载力；

*M*s*——*按作用频遇组合计算的弯矩值；

*M'*k*——*由临时的施工荷载标准值产生的弯矩值；

*N*Ed*——*基本组合下轴力设计值；

*V*d*——*剪力组合设计值；

*V*u*——*构件斜截面抗剪承载力；

*V*c*——*构件斜截面 UHPC 受剪承载力设计值；

*V*s*——*构件斜截面箍筋受剪承载力设计值；

*V*p*——*构件斜截面上预应力弯起钢筋受剪承载力设计值；

*f*k——UHPC外墙板抗弯强度标准值；

*f*m——UHPC外墙板抗弯强度试验平均值；

*f*0——UHPC外墙板抗弯强度试验标准差；

*S* ——荷载效应按基本组合的设计值；

*S*E——地震作用效应和其他荷载效应按基本组合的设计值；

*R*——UHPC外墙板的抗力设计值；

*γ*0——UHPC外墙板重要性系数；

*γ*RE——UHPC外墙板承载力抗震调整系数；

*S*γ——荷载效应按标准组合的设计值；

*R*γ——UHPC外墙板抗裂承载力设计值；

*u*——UHPC外墙板在风荷载标准值作用下或在风荷载标准值与永久荷载标准值共同作用下产生的挠度值；

*u*lim——UHPC外墙板的挠度限值；

*γ*A——预埋锚固连接或后锚固连接重要性系数；

*S*——无地震作用效应或有地震作用效应的基本组合设计值；

*R*——锚固承载力设计值；

*k*——地震作用下锚固承载力降低系数；

γRE ——锚固承载力抗震调整系数；

*ω*k——风荷载标准值；

*β*gz——阵风系数；

*μ*sl——风荷载局部体型系数；

*μ*z——风压高度变化系数；

*ω*0——基本风压；

*q*Ek——垂直于UHPC外墙板面板平面的分布水平地震作用标准值；

*P*Ek——平行于UHPC外墙板面板平面的集中水平地震作用标准值；

*β*E——动力放大系数；

*α*max——水平地震影响系数最大值；

*G*k——UHPC外墙板（包括板和钢架）的重力荷载标准值；

*S*——荷载及作用效应组合的设计值；

*S*Gk——永久荷载效应标准值；

*S*Ek——地震作用效应标准值；

*γ*G——重力荷载分项系数；

γW——风荷载作用分项系数；

*γ*E——地震作用分项系数；

*γ*TM——温湿度作用分项系数

*ψ*w——风荷载组合值系数；

*ψ*E——地震作用组合值系数；

*ψ*TM——温湿度作用组合值系数；

*S*——荷载与作用按标准组合设计值；

*S*Gk*、S*Wk*、S*TMk——分别为重力荷载、风荷载、温湿度作用效应标准值；

*γ*G*、γ*W*、γ*TM——分别为重力荷载、风荷载和温湿度作用效应的分项系数；

*S*Gk*、S*Wk——分别为重力荷载、风荷载标准值；

γG、γW——分别为重力荷载、风荷载的分项系数；

*γ*0——构件重要性系数；

*σ* ——按基本组合，UHPC外墙板截面应力设计值;

*γ*m ——超高性能混凝土材料分项系数；

*γ*b ——超高性能混凝土标准试件与UHPC外墙板抗弯性能差异系数；

*f*Uk——UHPC材料抗拉强度标准值；

*γ*m ——UHPC材料分项系数；

*σ*r ——按标准组合，UHPC外墙板截面开裂应力设计值；

*γ*b ——UHPC标准试件与UHPC外墙板的抗弯性能差异系数；

*γ*g ——UHPC材料抗裂分项系数；

*f*Bk——UHPC材料抗拉初裂强度标准值；

*N*d ——荷载按基本组合计算的锚固拉力设计值；

*F*sk——锚栓（或锚杆）钢材破坏受拉承载力标准值；

*F*ck——UHPC锥体破坏受拉承载力标准值；

*F*sp*k*——UHPC劈裂破坏受拉承载力标准值；

*Γ*a ——锚固连接的重要性系数；

*Γ*sN ——锚栓钢材破坏受拉承载力分项系数；

*γ*cN ——UHPC锥体破坏受拉承载力分项系数；

*γ*spN ——UHPC劈裂破坏受拉承载力分项系数；

*V*d——荷载按基本组合计算的锚固剪力设计值；

*Q*sk ——锚栓钢材破坏受剪承载力标准值；

*Q*ck ——超高性能混凝土边缘破坏受剪承载力标准值；

*Q*cpk ——超高性能混凝土剪撬破坏受剪承载力标准值；

*γ*A ——锚固连接的重要性系数；

*γ*sV ——锚栓钢材破坏受剪承载力分项系数；

*γ*cV ——超高性能混凝土边缘破坏受剪承载力分项系数；

*γ*cnV——超高性能混凝土剪撬破坏受剪承载力分项系数；

*F*sd——锚栓钢材破坏受拉承载力设计值；

*Q*sd——锚栓钢材破坏受剪承载力设计值；

*F*cd——超高性能混凝土锥体破坏受拉承载力设计值；

*Q*cd——超高性能混凝土边缘破坏受剪承载力设计值；

*F*k——锚固受拉承载力标准值；

‾*F*——该批试件锚固受拉承载力平均值；

*S*N——该批试件锚固受拉承载力样本方差；

*F*i——单个试件的错固受拉承载力；

*n*——样本容量；

*t*a——学生氏函数；

*Q*k——锚固受剪承载力标准值；

‾*Q* ——该批试件锚固受剪承载力平均值；

*S*V ——该批试件锚固受剪承载力样本方差；

*Q*i ——单个试件的锚固受剪承载力；

*σ*k——UHPC平板在重力荷载或风荷载或地震作用下产生的截面应力标准值；

*q*k——重力荷载或风荷载或地震作用标准值；

*m*——四点支承UHPC平板弯矩系数；

*q*Gk——UHPC平板重力荷载标准值沿垂直于板面方向的分量；

*μ*——挠度系数；

*ω*k——风荷载标准值；

*σ*k——面板在重力荷载或风荷载或地震作用下产生的截面应力标准值；

**2.2.3** 几何参数有关符号

*b——*矩形截面宽度，T 形或 I 形截面腹板宽度；

*x——* 等效矩形应力图的受压区高度；

*x*0*——* 受压区高度；

*x'——* 截面受拉不开裂高度；

*x*t*——* 受拉区等效矩形应力图的高度；

*h——* 截面高度；

*h*0*——* 截面有效高度；

*h*0i*——* 受压区边缘至受拉区第 i 层钢筋截面重心的距离；

*A'*s*、A*s*——*构件受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

*A*p*——*UHPC 有效受拉高度范围内的预应力钢筋面积；

*A*sv*——*同一截面内箍筋各肢的总截面面积；

*a*s*、a*p *——*构件受拉区普通钢筋合力点、预应力筋合力点至受拉区边缘的距离；

*a'*s*——*构件受拉区普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至受拉区边缘的距离；

*b'*f*——* T 形或 I 形截面受压区的翼缘宽度；

*h'*f*——* T 形或 I 形截面受压区的翼缘厚度；

*S*v*——*箍筋的间距；

*z——*弯矩作用下构件的内力臂，即纵向受拉钢筋合力点至混凝土受压区合力的距离；

*z*0*——*受压区合力点至受拉钢筋合力点的距离，按受压区应力图形为三角形计算确定；

*A*——UHPC外墙板平面面积；

*l*y——UHPC平板支承点间长边边长；

*h*——UHPC平板厚度；

*u*——UHPC平板挠度；

*l*n——板区格长边净跨；

*h*——板区格面板厚度；

# **3 构件结构设计基本规定**

**3.0.1** UHPC结构设计包括结构方案设计、作用与作用效应分析、极限状态设计与验算、结构及构件的构造、连接措施及耐久性要求以及满足特殊要求的专门设计目标。

**3.0.2**  UHPC结构极限状态、直接作用、安全等级、设计使用年限应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定执行。

**3.0.3**  UHPC结构设计应明确结构用途和使用环境，在设计使用年限内未经技术鉴定或设计许可，不可改变结构用途和使用环境。

**3.0.4** 超高性能混凝土结构设计应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，并采用分项系数的表达式进行设计。结构的承载能力极限状态计算应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中相关规定执行。

**3.0.5**  结构的正常使用极限状态验算、受弯构件挠度限值、裂缝控制等级划分、最大裂缝宽度限值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定。

**3.0.6** 超高性能混凝土结构的耐久性设计的内容和环境类别划分应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的相关规定执行，UHPC材料抗渗性能分级应按现行团体标准《超高性能混凝土基本性能与试验方法》T/CBMF37-2018/ T/CCPA 7-2018中4.2条规定执行。

**3.0.7** 超高性能混凝土结构的作用、作用组合，应根据结构物所属工程类别符合现行国家、行业和中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

# **4 超高性能混凝土构件材料要求**

**4.0.1** 超高性能混凝土的原材料要求及试件制备（搅拌、成型、养护等）均应符合现行标准《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107-2020的相关规定。

**4.0.2** 普通混凝土、受力钢筋、构造钢筋以及预应力钢筋应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定。

**4.0.3** 超高性能混凝土抗压强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作、养护的边长为100mm 立方体试件，在28d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度标准值，采用粗骨料时应乘以0.95折减系数。超高性能混凝土立方体抗压强度标准值按表4.0.3取值。

表4.0.3 超高性能混凝土立方体抗压强度标准值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UC120 | UC140 | UC160 | UC180 | UC200 |
| *f*cuk | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |

**4.0.4** 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值*f*ck为100mm×100mm×300mm的棱柱体试块，按标准方法制作和养护的，按标准试验方法确定的具有95%保证率的抗压强度，按表4.0.4采用。

表4.0.4 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UC120 | UC140 | UC160 | UC180 | UC200 |
| *f*ck | 84 | 98 | 112 | 126 | 140 |

**4.0.5** 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值*f*c应按表4.0.5采用。

表4.0.5 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UC120 | UC140 | UC160 | UC180 | UC200 |
| *f*c | 56 | 66 | 75 | 85 | 95 |

**4.0.6** 超高性能混凝土抗拉强度等级按弹性极限抗拉强度*f*tek分为UT07、UT08、UT09、UT10四个等级，超高性能混凝土弹性极限抗拉强度*f*tek是按标准养护方法制作的单轴拉伸试件通过标准试验方法确定的具有95%保证率抗拉强度值。各强度等级的弹性极限抗拉强度标准值*f*tek按表4.0.6取值。

表4.0.6 超高性能混凝土弹性极限抗拉强度标准值（MPa）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UT07 | UT08 | UT09 | UT10 |
| *f*tek | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |

**4.0.7** 超高性能混凝土轴拉性能如图4.0.7所示，其中UT07为应变软化型，UT08、UT09、UT10为应变硬化型，各等级超高性能混凝土轴心残余抗拉强度或抗拉强度标准值*f*tk，以及抗拉强度对应的应变*ε*tu按表4.0.7取值。

表4.0.7 超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值（MPa）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UT07 | UT08 | UT09 | UT10 |
| *f*tk | 4.9 | 8.8 | 10.8 | 12.0 |
| *f*tk/*f*tek | 0.7 | 1.1 | 1.2 | 1.2 |
| $$ε\_{tu}$$ | - | 0.15% | 0.2% | 0.2% |

注：1. UT08、UT09、UT10应变硬化型UHPC确定轴心抗拉强度标准值*f*tk采用的单拉试件及其试验方法应符合T/CBMF37-2018/T/CCPA 7-2018 附录B要求。

2. UT07应变软化型UHPC轴心残余抗拉强度标准值*f*tk的确定，采用钢纤维混凝土残余弯拉强度测试方法（带缺口梁三点弯曲试件），取其切口张开宽度为0.5mm时对应的残余弯拉强度标准值的0.45倍为轴心抗拉强度标准值*f*tk，其试件制作及试验方法应符合现行行业标准《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJT 465-2019附录B的要求。



（a）UT08- UT10应变硬化型 （b）UT07应变软化型

图4.0.7 超高性能混凝土轴拉性能

**4.0.8** 超高性能混凝土弹性极限抗拉强度设计值*f*te及轴心抗拉强度设计值*f*t应按表4.0.8采用。

表4.0.8 超高性能混凝土抗拉强度设计值（MPa）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UT07 | UT08 | UT09 | UT10 |
| *f*te | 4.9 | 5.6 | 6.3 | 7.0 |
| *f*t | 3.5 | 6.2 | 7.6 | 8.4 |

**4.0.9** 超高性能混凝土单轴受压的应力-应变关系（图4.0.9）可按下式确定。



图4.0.9 超高性能混凝土单轴受压应力与应变关系模型

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $σ\_{c}=E\_{U}ε\_{c}$ $ε\_{c}<ε\_{c0}$ |  （4.0.9-1） |
|  | $σ\_{c}=f\_{c}$ $ε\_{c0}\leq ε\_{c}\leq ε\_{cu}$ | （4.0.9-2） |
|  | $$ε\_{cu}=0.0034+\left(f\_{cu,k}-120\right)\*10^{-5}$$ | （4.0.9-3） |

式中： $σ\_{c}$——超高性能混凝土压应变为$ε\_{c}$时的应力；

*E*U——超高性能混凝土弹性模量；

$f\_{c}$——超高性能混凝土轴心抗压强度设计值；

$f\_{cu,k}$——超高性能混凝土立方体抗压强度标准值；

$ε\_{c0}$——超高性能混凝土峰值应力$f\_{c}$对应的压应变；

$ε\_{cu}$——超高性能混凝土极限压应变，当处于轴心受压时取为$ε\_{c0}$。

**4.0.10**  应变硬化型超高性能混凝土配筋构件设计时采用的单轴受拉应力-应变关系（图4.0.10a）可按式（4.0.10-1）、（4.0.10-2）确定；应变软化型超高性能混凝土配筋构件设计时采用的单轴受拉的应力-应变关系（图4.0.10b）可按式（4.0.10-3）、（4.0.10-4）确定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  $σ\_{t}=E\_{U}ε\_{t}$ $0\leq ε\_{t}\leq ε\_{t0}$  | （4.0.10-1） |
|  |  $σ\_{t}=f\_{te}$ $ε\_{t0}\leq ε\_{t}\leq 2ε\_{tu}$ | （4.0.10-2） |
|  |  $σ\_{t}=E\_{U}ε\_{t}$ $0\leq ε\_{t}\leq ε\_{t0}$ | （4.0.10-3） |
|  |  $σ\_{t}=f\_{t}$ $ε\_{t0}\leq ε\_{t}\leq ε\_{tu}$ | （4.0.10-4） |

式中： $σ\_{t}$——超高性能混凝土拉应变为$ε\_{t}$时的应力；

$f\_{te}$——超高性能混凝土弹性极限抗拉强度设计值；

$f\_{t}$——超高性能混凝土轴心抗拉强度设计值；

$E\_{U}$——超高性能混凝土弹性模量；

$ε\_{t0}$——超高性能混凝土弹性极限拉应变；

$ε\_{tu}$——超高性能混凝土抗拉强度对应的拉应变，按表4.0.7取值。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）UT08- UT10应变硬化型 | （b）UT07应变软化型 |

图4.0.10 超高性能混凝土单轴受拉应力与应变关系模型

**4.0.11** 超高性能混凝土受压或受拉时的弹性模量可按表4.0.11采用；当有可靠试验依据时，可按试验数据确定。试验方法按照《活性粉末混凝土》GB/T 31387的相关规定执行。

表4.0.11 超高性能混凝土弹性模量（×104MPa）

|  |  |
| --- | --- |
| 弹性模量 | 抗压强度等级 |
| UC 120 | UC 140 | UC 160 | UC 180 | UC 200 |
| *E*U | 4.2 | 4.5 | 4.8 | 5.1 | 5.4 |

**4.0.12**  超高性能混凝土剪切变形模量*G*U可取表4.0.11中*E*U的0.4倍，泊松比可取0.20。

# **5 受弯构件承载能力极限状态计算**

**5.1 一般规定**

**5.1.1** 本章适用于非预应力和预应力钢筋超高性能混凝土受弯构件（预制楼梯、梁、板等）的承载能力极限状态计算。

**5.1.2** 无筋超高性能混凝土受弯构件的正截面受弯承载力计算，应符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中素混凝土结构构件设计的相关规定，计算时应以超高性能混凝土的强度设计值代替素混凝土的强度设计值。

**5.2 正截面承载力计算**

**5.2.1** 受弯构件正截面的承载力计算采用下列基本假定：

**1** 截面应变保持平面，即截面纤维应变与到中性轴的距离呈线性关系；

**2**超高性能混凝土受压的应力-应变关系按本规程第4.1.8 条规定确定；

**3**超高性能混凝土受拉的应力-应变关系按本规程第4.1.9 条规定确定；

**4**纵向受力钢筋的应力取钢筋应变与其弹性模量的乘积，但其值应符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中的相关规定。

**5.2.2** 受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时，将受压区超高性能混凝土的压应力三角形分布可简化为等效的矩形应力图。

等效矩形应力图的受压区高度*x*可根据平截面假定所确定的中性轴高度乘以系数*β*1确定，*β*1取0.67。

矩形应力图的应力值可取超高性能混凝土轴心抗压强度设计值*fc* 乘以系数 *α*1确定，*α*1取0.75。

**5.2.3** 受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时，受拉区超高性能混凝土的拉应力分布可简化为等效的矩形应力图。

受弯构件、大偏心受压构件和大偏心受拉构件受拉区等效矩形应力图高度应按公式5.2.3-1计算，轴心受拉构件和小偏心受拉构件应按公式 5.2.3-2计算。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$x\_{t}=h-\frac{x}{β\_{1}}$$ | （5.2.3-1） |
|  | $$x\_{t}=h$$ | （5.2.3-2） |

式中： *xt*——受拉区等效矩形应力图形高度；

*h*——构件截面高度；

*β*1——系数，按本标准第5.2.2条的规定计算；

*x*——受压区 超高性能混凝土等效矩形应力图高度。

矩形应力图的应力值可取超高性能混凝土轴心抗拉强度设计值*f*t乘以系数 *α*2确定。当超高性能混凝土抗拉强度等级为UT07时，*α*2取0.5，当超高性能混凝土抗拉强度等级为UT08~ UT10时，*α*2取0.75。

**5.2.4** 受弯构件、偏心受力构件，纵向受拉钢筋屈服与受压区超高性能混凝土破坏同时发生时的相对界限受压区高度*ξ*b 应按以下公式计算：

**1** 钢筋超高性能混凝土构件

有屈服点钢筋

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$ξ\_{b}=\frac{β\_{1}}{1+\frac{f\_{y}}{E\_{s}ε\_{c0}}}$$ | （5.2.4-1） |

无屈服点钢筋

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$ξ\_{b}=\frac{β\_{1}}{1+\frac{0.002}{ε\_{c0}}+\frac{f\_{y}}{E\_{s}ε\_{c0}}}$$ | （5.2.4-2） |

**2** 预应力超高性能混凝土构件

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$ξ\_{b}=\frac{β\_{1}}{1+\frac{0.002}{ε\_{c0}}+\frac{f\_{py}-σ\_{p0}}{E\_{s}ε\_{c0}}}$$ | （5.2.4-3） |

式中： *ξ*b——相对界限受压区高度，*ξ*b=*xb/h0*；

*xb*——界限受压区高度；

*h*0——截面有效高度：纵向受拉钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

*β*1——系数，按本标准第5.2.2条的规定计算；

*Es*——钢筋弹性模量；

*σ*p0——受拉区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力；

*ε*c0——非均匀受压时超高性能混凝土的峰值压应变，按4.1.8 规定取值。

**5.2.5** 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力应按以下公式计算：



图 5.2.5 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算

|  |  |
| --- | --- |
| $$M\leq α\_{1}f\_{c}bx(h\_{0}-\frac{x}{2})+f\_{y}^{'}A\_{s}^{'}(h\_{0}-a\_{s}^{'})-(σ\_{p0}^{'}-f\_{py}^{'})A\_{P}^{'}(h\_{0}-a\_{p}^{'})-α\_{2}f\_{t}bx\_{t}(\frac{x\_{t}}{2}-a)$$ | （5.2.5-1） |

超高性能混凝土受压区高度由以下公式确定：

|  |  |
| --- | --- |
| $$α\_{1}f\_{c}bx=f\_{y}A\_{s}-f\_{y}^{'}A\_{s}^{'}+(σ\_{p0}^{'}-f\_{py}^{'})A\_{P}^{'}+f\_{py}A\_{p}+α\_{2}f\_{t}bx\_{t}$$ | （5.2.5-2） |

超高性能混凝土受压区高度*x*还应符合下列条件：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$x\leq ξ\_{b}h\_{0}$$ | （5.2.5-3） |
|  | $$x\geq 2a^{'}$$ | （5.2.5-4） |

式中：*M*——弯矩设计值；

*fc*——超高性能混凝土轴心抗压强度设计值；

*ft*——超高性能混凝土轴心抗拉强度设计值；

*f y*、*fy*——纵向普通钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

*f*py、*f*py——纵向预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

*As*、*As*——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

*Ap*、*Ap*——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积；

**1——受压区等效矩形应力图系数，按本标准第5.2.2条的规定计算；

** *p*0——受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力；

*b*——矩形截面的宽度；

*h*0——截面有效高度；

*ξ*b——相对界限受压区高度，按式(5.2.4)计算；

*as*、*ap*——受拉区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受拉边缘的距离；

*as*、*ap*——受压区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

*a*——纵向普通受拉钢筋和预应力受拉钢筋的合力点至截面受拉边缘的距离；

*a*——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离，当受压区未配置 纵向预应力筋或受压区纵向预应力钢筋应力（** *p*0- *f*py）为拉应力时，式（5.2.5-4）中用*as*代替*a*。

**5.2.6** 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面受弯构件，其正截面受弯承载力计算应符合以下规定（图 5.2.6）：



图 5.2.6 I形截面受弯构件正截面受弯承载力计算

**1** 当满足式（5.2.6-1）的条件时，应按下列公式计算：

$f\_{py}A\_{p}+f\_{y}A\_{s}+α\_{2}f\_{t}bx\_{t}+α\_{2}f\_{t}(b\_{f}-b)h\_{f}\leq α\_{1}f\_{c}b\_{f}^{'}h\_{f}^{'}+f\_{y}^{'}A\_{s}^{'}-(σ\_{p0}^{'}-f\_{py}^{'})A\_{P}^{'}$（5.2.6-1）

 （5.2.6-2）

超高性能混凝土受压区高度由以下公式确定：

$f\_{py}A\_{p}+f\_{y}A\_{s}+α\_{2}f\_{t}bx\_{t}+α\_{2}f\_{t}(b\_{f}-b)h\_{f}=α\_{1}f\_{c}b\_{f}^{'}x+f\_{y}^{'}A\_{s}^{'}-(σ\_{p0}^{'}-f\_{py}^{'})A\_{P}^{'}$（5.2.6-3）

**2** 当不满足式（5.2.6-1）时，应按下列公式计算：

（5.2.6-4）

超高性能混凝土受压区高度由以下公式确定：

（5.2.6-5）

式中：*bf*、*b**f*——受拉区、受压区翼缘的宽度；

*hf* 、 *h**f*——受拉区、受压区翼缘的高度。

**5.2.7** 对于受拉区采用超高性能混凝土，受压区采用普通混凝土的组合混凝土受弯构件，超高性能混凝土的配置高度*x*u不宜小于超高性能混凝土受弯构件计算的受拉区高度*x*t，且不应小于0.6*x*t。当*x*u小于*x*t时，计算时应以*x*u代替*x*t。

**5.3 斜截面承载力计算**

**5.3.1** 钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土矩形、T 形和I形截面受弯构件的斜截面受剪承载能力计算时，剪力设计值的计算截面应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中第6.3.2条规定采用，受剪截面应符合下列条件：

当*h*w/*b*≤4时

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$V\leq 0.2f\_{c}bh\_{0}$$ | （5.3.1-1） |

当*h*w/*b*≥6时

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$V\leq 0.16f\_{c}bh\_{0}$$ | （5.3.1-2） |

当4≤*h*w/*b*≤6时，按线性内插法确定。

式中：*V*——构件斜截面上的最大剪力设计值；

*f*c——超高性能混凝土轴心抗压强度设计值；

*b*——矩形截面的宽度，T形截面或I型截面的腹板宽度；

*h*0——截面有效高度；

*h*w——截面的腹板高度：矩形截面，取有效高度；T形截面，取有效高度减去翼缘高度；I形截面，取腹板净高。

**5.3.2** 不配箍筋和弯起钢筋的超高性能混凝土一般板类受弯构件，其斜截面抗剪承载力应符合下列规定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$V\leq 0.7β\_{h}f\_{te}bh\_{0}+0.3f\_{t}bh\_{0}$$ | （5.3.2-1） |

式中：*β*h——截面高度影响系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相关规定采用；

$f\_{te}$——超高性能混凝土弹性极限抗拉强度设计值；

$f\_{t}$——超高性能混凝土抗拉强度设计值。

**5.3.3** 当仅配置箍筋时，矩形、T 形和I 形截面受弯构件斜截面承载力*V*应符合下列规定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$V\leq V\_{uc}+V\_{sv}+V\_{P}$$ | （5.3.3-1） |
|  | $$V\_{uc}=α\_{cv}f\_{te}bh\_{0}+0.3f\_{t}bh\_{0}$$ | （5.3.3-2） |
|  | $$V\_{sv}=f\_{yv}\frac{A\_{sv}}{s}h\_{0}$$ | （5.3.3-3） |
|  | $$V\_{P}=0.05N\_{p0}$$ | （5.3.3-4） |

式中：*Vu*c——超高性能混凝土所提供的抗剪承载力；

*V*sv——箍筋所提供的抗剪承载力；

*V*P——由预加力提供的抗剪承载力；

*f*yv——箍筋的抗拉强度设计值；

*s*——沿构件长度方向的箍筋间距；

*α*cv——斜截面超高性能混凝土抗剪承载力系数，对于一般受弯构件取0.7，对于集中荷载作用下的独立梁取*α*cv=1.75/(λ+1)，其中λ为剪跨比，当λ小于1.5 时，取1.5，当λ大于3.0 时，取3.0；

*N*p0——计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010第10.1.13计算。

**5.3.4** 当配置有箍筋和弯起钢筋时，矩形、T 形和I形超高性能混凝土受弯构件斜截面受剪承载力应符合下列规定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$V\leq V\_{uc}+V\_{sv}+V\_{P}+0.8f\_{yv}A\_{sb}\sin(α\_{s})+0.8f\_{pv}A\_{pb}\sin(α\_{p})$$ | （5.3.4） |

式中：*V*——配置弯起钢筋处的剪力设计值，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相关规定取用；

*Vu*c——超高性能混凝土所提供的抗剪承载力，按本标准5.3.3条计算；

*A*sb 、*A*pb——分别为同一平面内的弯起普通钢筋、弯起预应力筋的截面面积；

*α*s、*α*p——分别为斜截面上弯起普通钢筋、弯起预应力筋的切线与构件纵轴线的夹角。

**5.3.5** 矩形、T 形和I 形截面一般受弯构件，当符合下式要求时，可不进行斜截面受剪承载力计算，但其箍筋的配置应满足构造要求。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$V\leq V\_{uc}+0.05N\_{p0}$$ | （5.3.5） |

式中：*Vu*c——超高性能混凝土所提供的抗剪承载力，按本标准5.3.3条计算；

*N*p0——计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力，对于预应力超高性能混凝土连续梁以及允许出现裂缝的预应力超高性能混凝土简支梁，计算时应不考虑*N*p0的作用。

**5.3.6** 受拉区采用超高性能混凝土、受压区采用普通混凝土的组合混凝土受弯构件，按本标准第5.3.1~5.3.5 条规定进行斜截面设计计算时，组合混凝土提供的抗剪承载力应按超高性能混凝土和普通混凝土各自的配置高度及抗拉强度设计值分别计算，当受拉区超高性能混凝土配置高度*x*u大于截面全高度*h*的0.5倍时，*x*u应取为0.5*h*。

# **6 受弯构件正常使用极限状态验算**

**6.1 裂缝控制计算**

**6.1.1** 钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土受弯构件的裂缝控制等级、构件受拉边缘应力或正截面裂缝宽度验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 第7.1.1条相关规定，但应将混凝土轴心抗拉强度标准值用超高性能混凝土的弹性极限抗拉强度标准值代替。采用非线性方法对镂空结构、表皮结构以及薄壁饰面非承重构件进行验算时，构件裂缝宽度限值为0.3mm。

**6.1.2** 三级裂缝控制等级时，对于采用UT08、UT09以及UT10应变硬化型超高性能混凝土的钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土构件，可不进行裂缝宽度验算。

**6.1.3** 三级裂缝控制等级时，对采用UT07应变软化型超高性能混凝土的钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土构件，应按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期效应的影响验算裂缝宽度，其最大裂缝宽度可按下列公式计算：

$w\_{max}=α\_{s}ψ\frac{σ\_{s}}{E\_{s}}(2c\_{s}+0.28ϕ\frac{d\_{eq}}{ρ\_{te}})$ （6.1.3-1）

$ψ=1-0.57(1+α\_{E}ρ\_{te})\frac{f\_{tek}-f\_{tk}}{ρ\_{te}σ\_{s}}$ （6.1.3-2）

$ϕ=1-\frac{f\_{tk}}{f\_{tek}}$ （6.1.3-3）

$ρ\_{te}=\frac{A\_{s}+A\_{P}}{A\_{te}}$ （6.1.3-4）

式中：$α\_{s}$—构件表面裂缝相对于受拉纵筋重心处的裂缝宽度放大系数：对于梁，可取1.2，对于板，可取1.35；

$ψ$—裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数；

$σ\_{s}$—按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋应力或按标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋等效应力；

$E\_{s}$—钢筋的弹性模量；

$c\_{s}$—最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉底边的距离，需满足$c\_{s}\leq 75mm$；

$ϕ$—应变软化型UHPC在正常使用极限状态下的残余抗拉强度相对于弹性极限抗拉强度的下降幅度；

$ρ\_{te}$—按有效受拉超高性能混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率；

$A\_{s}$—受拉区纵向钢筋截面面积；

$A\_{te}$—有效受拉混凝土截面面积：取$A\_{te}=2.5\left(h-h\_{0}\right)b+\left(b\_{f}-b\right)h\_{f}$；

$d\_{eq}$—受拉区纵向钢筋的等效直径，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的第7.1.2条规定计算；

$α\_{E}$—钢筋弹性模量与超高性能混凝土弹性模量的比值，即$E\_{s}/E\_{U}$；

$f\_{tek}$—超高性能混凝土弹性极限抗拉强度标准值；

$f\_{tk}$—应变软化超高性能混凝土（残余）抗拉强度标准值。

**6.1.4** 在荷载标准组合下，预应力超高性能混凝土受弯构件受拉区纵向钢筋等效应力可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中7.1.4条计算；在荷载准永久组合下，钢筋超高性能混凝土受弯构件受拉区纵向普通钢筋的应力可按下列公式计算：

$σ\_{sq}=\frac{M\_{q}+(1.5η^{2}-4η+2)λf\_{tk}bh\_{0}^{2}}{ηh\_{0}A\_{s}}$ （6.1.4-1）

$η=0.96-0.34α\_{E}ρ(\sqrt{1+\frac{2}{α\_{E}ρ}}-1)$ （6.1.4-2）

式中：$A\_{s}$—受拉区纵向普通钢筋截面面积；

$M\_{q}$—按荷载准永久组合计算的弯矩值；

$η$—钢筋超高性能混凝土受弯构件在使用阶段的裂缝截面的内力臂系数；

$λ$—正常使用阶段受拉区超高性能混凝土等效应力图形系数：对于UT07应变软化UHPC，取1.0，对于UT08~ UT10应变硬化UHPC，取0.83；

$ρ$—纵向受拉钢筋配筋率，取$A\_{s}/(bh\_{0})$。

**6.1.5** 预应力超高性能混凝土受弯构件应分别对混凝土截面上主拉应力和主压应力进行验算，验算方法及验算系数应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中7.1.6、7.1.7条相关规定。

**6.2 受弯构件挠度验算**

**6.2.1** 钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土受弯构件的挠度可按结构力学方法计算，挠度限值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中7.2.1条的规定。

**6.2.2** 矩形、T形、倒T形和I形截面钢筋超高性能混凝土受弯构件考虑长期作用影响的刚度*B*按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中7.2.2条相关规定计算。

**6.2.3** 按裂缝控制等级要求的荷载准永久组合作用下，钢筋超高性能混凝土受弯构件的短期刚度*Bs*，可按下列公式计算：

$B\_{s}=\frac{E\_{s}A\_{s}h\_{0}^{2}}{\frac{α\_{E}ρ}{1.5(1-η)η}⋅\frac{M\_{q}+M\_{s}}{M\_{q}}+\frac{ψ}{η}⋅\frac{M\_{q}-M\_{c}}{M\_{q}}}$ （6.2.3-1）

$M\_{s}=(4.5η^{2}-6η+2)λf\_{tk}bh\_{0}^{2}$ （6.2.3-2）

$M\_{c}=-(1.5η^{2}-4η+2)λf\_{tk}bh\_{0}^{2}$ （6.2.3-3）

式中：$M\_{s}$—受拉区超高性能混凝土合力对受拉区纵向钢筋重心的力矩；

$M\_{c}$—受拉区超高性能混凝土合力对受压区超高性能混凝土重心的力矩；

$ψ$—裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数，按本标准第6.1.3条确定；

$η$—裂缝截面的内力臂系数，按本标准第6.1.4条确定。

**6.2.4** 按裂缝控制等级要求的荷载标准组合作用下，预应力超高性能混凝土受弯构件的刚度*B*，可按下列公式计算：

**1**要求不出现裂缝的构件

$B=0.95E\_{c}I\_{0}$ （6.2.4-1）

**2**允许出现裂缝的构件

$B=\frac{E\_{c}I\_{0}}{β(\frac{M\_{cr}}{M\_{k}})^{2}+[1-β(\frac{M\_{cr}}{M\_{k}})^{2}]\frac{E\_{c}I\_{0}}{E\_{c}I\_{cr}}}$ （6.2.4-2）

$M\_{cr}=(σ\_{pc}+γf\_{tek})W\_{0}$ （6.2.4-3）

式中：$I\_{0}$—开裂前截面的换算惯性矩；

$I\_{cr}$—裂缝截面的换算惯性矩；

$M\_{cr}$—预应力超高性能混凝土受弯构件正截面的开裂弯矩；

$M\_{k}$—按荷载标准组合计算的弯矩值；

$β$—考虑荷载长期或重复作用对平均应变的影响系数：对短期荷载，取1.0，对长期或重复荷载，取0.5；

$σ\_{pc}$—扣除全部预应力损失后，由预加力在抗裂验算边缘产生的超高性能混凝土预压应力；

$f\_{tek}$—超高性能混凝土弹性极限抗拉强度标准值；

$γ$—超高性能混凝土构件的截面抵抗距塑性影响系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中7.2.4条确定；

$W\_{0}$—超高性能混凝土构件的截面抵抗距。

# **7 预制结构构件接缝设计**

**7.1 一般规定**

**7.1.1** 普通钢筋和预应力钢筋的超高性能混凝土保护层厚度应满足下列要求：

**1** 普通钢筋保护层厚度取钢筋外缘至超高性能混凝土表面的距离，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。

**2** 先张法构件中预应力钢筋的保护层厚度取钢筋外缘至超高性能混凝土表面的距离，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超高性能混凝土表面的距离，不应小于其管道直径的1/2。

**3** 普通钢筋和预应力钢筋的保护层厚度应不小于1.5 倍钢纤维长度。

**4**  最外侧钢筋的保护层厚度应不小于表7.1.1 的规定值。

表7.1.1 超高性能混凝土保护层的最小厚度*c*（mm）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境类别 | 板、墙、壳 | 梁、杆 |
| 一 | 15 | 15 |
| 二 | 15 | 20 |
| 三a | 20 | 25 |
| 三b | 25 | 30 |

注：1）表中数值是针对各环境类别的最低作用等级、钢筋和UHPC 无特殊防腐措施规定的情况。

2）对钢筋和UHPC 有特殊防腐措施处理的情况，保护层最小厚度可将表中相应数值减小5mm，但不得小于15mm。

3）对工程预制的超高性能混凝土构件，其保护层最小厚度可将表中相应数值减小5mm，但不得小于15mm。

**7.1.2** 梁、板内的纵向受力钢筋应优先采用HRB400和HRB500级钢筋，梁、板内纵向钢筋的最小净距应满足下列要求：

**1**  纵向钢筋的净距不应小于纵向受力钢筋的直径，且不应小于钢纤维长度与20mm中的较大值。

**2**  受拉区钢筋按两根至三根成束布置时，钢筋的净距不得小于钢筋直径，且不应小于钢纤维长度及不小于25mm。

**3** 当钢筋（包括成束钢筋）层数等于或多于三层时，其净距横向不得小于1.5倍钢筋直径并不得小于35mm，竖向仍不得小于钢筋直径并不得小于20mm。

**4** 其它构造要求可参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010中的规定。

**7.1.3** 箍筋的末端应做成弯钩，弯曲角度可取135度。弯钩的弯曲直径应大于被箍的受力主钢筋的直径，且HPB300钢筋不应小于箍筋直径的2.5倍，HRB400钢筋不应小于箍筋直径的5倍。弯钩平直段一般结构不应小于箍筋直径的4倍，抗震结构不应小于箍筋直径的8倍。

**7.2 最小配筋率及配箍率**

**7.2.1**  钢筋UHPC和预应力UHPC受弯构件采用抗拉性能满足UT08~UT10等级要求的UHPC，且挠度和裂缝宽度验算满足本标准规定时，一侧受拉纵向普通钢筋的最小配筋百分率*ρ*min取0.2和10*f*t/*f*y中的较大值。

**7.2.2**钢筋UHPC和预应力UHPC受弯构件采用抗拉性能等级为UT07的应变软化UHPC，且挠度和裂缝宽度验算满足本标准规定时，一侧受拉纵向普通钢筋的最小配筋百分率*ρ*min取0.2和20*f*t/*f*y中的较大值。

**7.2.3** 当UHPC抗拉性能、抗剪承载力和抗裂验算满足本规范规定时，对采用UT08~UT10级应变硬化UHPC的钢筋UHPC受弯构件和预应力UHPC受弯构件的最小配箍率不作要求，对采用UT07级应变软化UHPC的钢筋UHPC受弯构件和预应力UHPC受弯构件的最小配箍百分率$ρ\_{sv,min}$不应小于$10\frac{f\_{te}}{f\_{yv}}$。

**7.2.4** UHPC现浇湿接缝的构造应进行必要的强化处理。湿接缝预埋钢筋直径不应小于12mm，间距不应大于200mm。钢筋的保护层厚度和锚固长度应分别满足本标准第7.3.1条的规定。

**7.3 钢筋的锚固**

**7.3.1** 当计算中充分考虑普通钢筋的强度时，其最小锚固长度应符合表7.3.1的规定。

表7.3.1 钢筋最小锚固长度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 钢筋种类 | HPB300 | HRB400、HRBF400、RRB400 | HRB500 |
| 受压钢筋 | 14d | 8d | 11d |
| 受拉钢筋 | 直端 | 16d | 10d | 13d |
| 弯钩端 | 14d | 8d | 11d |

注：1）d为钢筋公称直径（mm）。

2）对于受压束筋和等代直径*d*e≤28mm的受拉束筋的锚固长度，应以等代直径按表值确定，束筋的各单根钢筋可在同一锚固终点截断；对于等代直径*d*e＞28mm的受拉束筋，束筋内各单根钢筋，应自锚固起点开始，以表内规定的单根钢筋的锚固长度的1.3倍，呈阶梯形逐根延伸后截断，即自锚固起点开始，第一根延伸1.3倍单根钢筋的锚固长度，第二根延伸2.6倍单根钢筋的锚固长度，第三根延伸3.9倍单根钢筋的锚固长度。

3）当UHPC 在凝固过程中易受扰动时，锚固长度应增加25%。

4）当带肋钢筋的公称直径大于25mm 时，锚固长度应增加25%。

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。

**7.3.2**  当纵向受拉普通钢筋的末端采用弯钩和机械锚固措施时，弯钩和机械锚固的形式和技术要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中第8.3.3条的相关规定。

# **8 预制构件制作与运输**

**8.1 一般规定**

**8.1.1**  预制构件制作单位应具备相应的生产工艺设施，并应有完善的质量管理体系和必要的试验检测手段。

**8.1.2** 预制构件制作前，应对其技术要求和质量标准进行技术交底，并应制定生产方案；生产方案应包括生产工艺、模具方案、生产计划、技术质量控制措施、成品保护、堆放及运输方案等内容。

**8.1.3** 预制构件用钢筋的加工、连接与安装应符合国家现行标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204等的有关规定。

**8.1.4** 预制构件制作与运输应符合国家现行标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231和《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014的相关规定。

**8.2 预埋件要求**

**8.2.1** 预制结构构件采用钢筋套筒灌浆连接时，应在构件生产前进行钢筋套筒灌浆连接接头的抗拉强度试验，每种规格的连接接头试件数量不应少于3个。

**8.2.2**预留在预制构件中的预埋件进场时应按批检验，合格后方可使用；对有承载力要求的预埋件产品应按设计或产品标准要求制作有代表性试件，并进行试验验证，使用前应检查承载力检验的合格报告。

**8.2.3** 构件制作过程中预埋件安装的种类和数量应符合设计要求，预埋件定位应准确，其安装允许偏差应符合国家现行标准的有关规定，并应采取可靠的临时固定措施。

**8.2.4** 新型预埋件产品应用应制订专项产品工艺操作规程和质量控制标准。

**8.2.5** 预埋件加工的允许偏差应符合现行行业标准《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014中第11.2.4条规定。

**8.2.6** 在生产和运输过程中应对预制构件上的预埋件、预留筋、预留管线、预留孔洞等采取保护措施。

**8.3 构件制作及运输**

**8.3.1** 在超高性能混凝土浇筑前应进行预制构件的隐蔽工程检查，检查项目符合现行行业标准《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014中第11.3.1条规定。

**8.3.2** UHPC应采用强制式搅拌机搅拌，搅拌机的转速不宜低于40r/min。

**8.3.3** UHPC宜采用平板振捣器或模外振捣器振捣成型，当采用插入式振捣时，须试验确定对钢纤维分布无影响。浇筑和成型过程中应保证UHPC密实、纤维分布均匀以及构件的整体性，避免拌合物分层、离析以及纤维外露。

**8.3.4** 预制构件在采用蒸汽养护时，养护过程中温度控制宜采用自动控制系统，蒸汽养护应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387的规定。

**8.3.5** 预制构件的运输与堆放应符合现行行业标准《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014中第11.5.1~11.5.4条规定。

# **9 外墙板基本规定**

**9.1 一般规定**

**9.1.1**  本标准适用于以钢纤维、有机纤维/无机纤维作为增强纤维，采用浇筑工艺生产的用于建筑外围护的非承重外墙板，包括超高性能混凝土平板和背负钢架板，不适用于以玻璃纤维为增强纤维，采用喷射工艺生产的外墙板。

**9.1.2** 用于制备外墙板的超高性能混凝土的拌合物性能、力学性能、长期性能和耐久性能应符合现行标准《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107-2020中关于非结构类超高性能混凝土的相关规定。

**9.2 技术要求**

**9.2.1**  超高性能混凝土外墙板的物理力学性能指标应符合表9.2.1的规定。

表9.2.1 超高性能混凝土外墙板物理力学性能指标

|  |  |
| --- | --- |
| 性能 | 指标要求 |
| 抗压强度（MPa） | ≥100 |
| 抗弯极限强度（MPa） | ≥12 |
| 抗冲击强度（kJ/m2） | ≥10 |
| 体积密度（干燥状态）(g/cm3) | ≥2.2 |
| 吸水率（%） | ≤1.2 |
| 抗冻性 | 冻融循环后，无起层、剥落等破坏现象  |
| 收缩率（%） | ≤0.10 |
| 1. 抗弯比例极限强度、抗弯极限强度、抗冲击强度为UHPC结构层性能。2. 冻融循环次数为严寒地区100次，寒冷地区75次，其他地区50次。 |

**9.2.2** 超高性能混凝土外墙板的外观应符合下列规定：

 **1** 超高性能混凝土外墙板应边缘整齐，外观面不应有缺棱掉角，非明显部位缺棱掉角允许修补；

 **2** 超高性能混凝土外墙板侧面接缝部位不应有孔洞；板表面孔洞的长度不应大于3mm、深度不应大于2mm，板上孔洞不应多于1处/m2。有特殊表面装饰效果要求时除外。

**9.2.3** 超高性能混凝土外墙板的尺寸允许偏差应符合表9.2.3的规定。

表9.2.3 超高性能混凝土外墙板尺寸允许偏差及检查方法

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 允许偏差（mm） | 检验方法 |
| 长度 | 墙板长度≤2m时，允许偏差：±2mm/m； 墙板长度＞2m时，总的允许偏差：≤4mm  | 尺量检查 |
| 宽度 | 墙板宽度≤2m时，允许偏差：±2mm/m； 墙板宽度＞2m时，总的允许偏差：≤4mm  |  |
| 厚度 | 0~+2mm |  |
| 板面平整度 | ≤3mm，有特殊表面装饰效果要求时除外  |  |
| 对角线差（仅适用于矩形板）  | 板面积＜2m2时，对角线差：≤3mm； 板面积≥2m2时，对角线差：≤5mm。  |  |

**9.3 性能参数**

**9.3.1** UHPC外墙板抗弯强度标准值*f*k应根据抗弯试验结果，按下式计算值确定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$f\_{k}=f\_{m}-1.645f\_{0}$$ | （9.3.1） |

式中：*f*k——UHPC外墙板抗弯强度标准值（MPa）；

 *f*m——UHPC外墙板抗弯强度试验平均值（MPa）；

 *f*0——UHPC外墙板抗弯强度试验标准差（MPa）。

**9.3.2** UHPC材料的关键物理力学性能参数的取值可按表9.3.2的规定采用。

表1 UHPC材料关键物理性能参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 重力密度（kN/m3） | 弹性模量（GPa） | 泊松比 | 线膨胀系数（1/℃） |
| 22~26 | 40~50 | 0.19~0.24 | （10~15）×10-6 |

# **10 外墙板建筑设计**

**10.1 一般规定**

**10.1.1** UHPC外墙建筑设计应根据建筑物的建筑美学、使用功能、周围环境、建筑设计要求、技术经济分析，合理选择确定。

**10.1.2** UHPC外墙的分格尺寸、建筑构造、接缝与连接等应满足建筑设计的要求。

**10.1.3** UHPC外墙板的形状尺寸、表面造型、质感及色彩等应符合建筑立面设计要求，还应与制造工艺水平相适应。

**10.1.4** UHPC外墙板应根据建筑设计要求对表面提出防护处理要求。

**10.2 UHPC外墙性能设计**

**10.2.1** UHPC外墙性能设计应根据建筑物所在地的地理、气候、环境，建筑物的类别、体型、高度，使用功能以及设计使用年限等条件综合分析确定。

**10.2.2** UHPC外墙的抗风压性能、水密性能、气密性能、热工性能、空气声隔声性能、平面内变形性能、抗震性能、耐撞击性能、承重力性能等性能指标应符合设计要求，并应符合现行国家标准《建筑幕墙》GB/T 21086的有关规定。

**10.3 UHPC外墙构造设计**

**10.3.1**  UHPC外墙的建筑构造设计，应满足安全、适用、绿色、美观的原则，还应便于制作、安装、维修保养和局部更换。

**10.3.2**  UHPC外墙的立面分格尺寸应根据建筑物的设计风格、UHPC外墙板的自身特点、制造成本、运输安装条件等因素综合确定。

**10.3.3** UHPC外墙板连接部位应有防止板间摩擦产生噪声的措施。

**10.3.4**  UHPC外墙板的接缝宽度应能满足自身的变形和位移要求。

**10.4 UHPC外墙板构造与连接设计**

**10.4.1**  UHPC平板构造应符合下列规定：

**1** UHPC平板厚度不宜小于20mm；

**2** UHPC平板的锚固构造可采用预埋方式或后锚固方式，且其有效锚固深度不应小于板厚的1/2；

**3** UHPC平板边缘与支承点间的距离应小于支承间距的1/2，且应大于50mm。

**10.4.2** UHPC背附钢架板的构造要求应符合下列规定：

**1** UHPC面板厚度应按结构计算确定，且厚度不应小于10mm；UHPC外墙板面板的支承间距应按结构计算确定；面板边缘与相邻支承点间的间距应小于支承间距的1/2；

**2** 背附钢架的龙骨间距应与面板支承间距一致，龙骨截面尺寸应按结构计算确定；

**3** UHPC面板与背附钢架应采用预埋套筒（或后置预埋套筒等其他形式的连接件）连接，其连接构造应能保证面板受到垂直于板面的荷载可靠地传递到背负钢架上，且使面板与背负钢架沿平行于板面方向具有满足设计要求的相对位移能力；预埋套筒（或后置预埋套筒等其他形式的连接件）的数量应由结构计算确定。背栓和套筒宜选用不锈钢材质。

**10.4.3** UHPC外墙板与主体结构或支承结构应采用柔性连接，且应符合下列规定：

**1** 对主体结构允许误差、UHPC外墙板制作误差及施工安装误差等应具有三维可调适应能力；对于双曲面异形板，还应具有多自由度可调适应能力；

**2** 对UHPC外墙板与主体结构间因温湿度作用产生的相对变形或位移应具有适应能力；且应将这种温湿度作用在UHPC外墙板内产生的应力控制在设计允许的范围内；

**3** 应满足UHPC外墙板平面内变形性能的要求。

# **11 外墙板结构设计**

**11.1 一般规定**

**11.1.1** UHPC外墙板应根据围护结构要求进行结构设计，应具有足够的承载力、抗裂性、刚度、稳定性和相对于主体结构的位移能力。

**11.1.2** UHPC外墙板结构设计应按弹性方法计算作用效应，作用效应应符合下列规定：

**1** 非抗震设计时，应计算重力荷载、风荷载和温湿度作用效应；

**2** 抗震设计时，应计算重力荷载、风荷载、地震作用效应和温湿度作用效应。

**11.1.3** UHPC外墙板结构设计尚应分别计算生产、施工阶段的作用效应，并应分别进行作用效应组合。

**11.1.4**  UHPC外墙板应按各效应组合中的最不利组合进行设计。

**11.1.5** 对于承载力极限状态，UHPC外墙板应按下列规定验算承载力：

**1**  无地震作用效应组合时，承载力应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$γ\_{0}S\leq R$$ | （11.1.5-1） |

**2** 有地震作用效应组合时，承载力应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S\_{E}\leq \frac{R}{γ\_{RE}}$$ | （11.1.5-2） |

式中：*S* ——荷载效应按基本组合的设计值；

*S*E——地震作用效应和其他荷载效应按基本组合的设计值；

*R*——UHPC外墙板的抗力设计值；

*γ*0——UHPC外墙板重要性系数，取不小于1.0；

*γ*RE——UHPC外墙板承载力抗震调整系数，取1.0。

**11.1.6** 对于正常使用极限状态，荷载应按标准组合，UHPC外墙板应验算抗裂承载力和挠度，并应符合下列规定：

**1**  UHPC外墙板抗裂承载力应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S\_{γ}\leq R\_{γ}$$ | （11.1.6-1） |

式中：*S*γ——荷载效应按标准组合的设计值；

*R*γ——UHPC外墙板抗裂承载力设计值。

**2** UHPC外墙板的挠度应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$u\leq u\_{lim}$$ | （11.1.6-2） |

式中： *u*——UHPC外墙板在风荷载标准值作用下或在风荷载标准值与永久荷载标准值共同作用下产生的挠度值；

*u*lim——UHPC外墙板的挠度限值。

**11.1.7** 根据锚固连接破坏后果的严重程度，UHPC外墙板的预埋锚固设计或后锚固设计应按本标准表11.1.7的规定确定相应的安全等级，且不应低于UHPC外墙板自身的安全等级。

表11.1.7 预埋锚固连接与后锚固连接的安全等级

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 安全等级 | 破坏后果 | 锚固类型 |
| 一级 | 很严重 | 重要的锚固 |
| 二级 | 严重 | 一般的锚固 |

**11.1.8**  UHPC外墙板预埋锚固连接或后锚固连接的承载力应按下列规定验算：

**1** 无地震作用效应组合，预埋锚固连接或后锚固连接的承载力应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$γ\_{A}S\leq R$$ | (11.1.8-1) |

 **2** 有地震作用效应组合，预埋锚固连接和后锚固连接的承载力应分别符合下列公式要求：

预埋锚固连接：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$γ\_{A}S\leq R/γ\_{RE}$$ | (11.1.8-2) |

 后锚固连接：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$γ\_{A}S\leq kR/γ\_{RE}$$ | (11.1.8-3) |

式中：*γ*A——预埋锚固连接或后锚固连接重要性系数，对一级、二级的锚固安全等级，分别取1.2、1.1， 且*γ*A≥*γ*0；对有地震作用效应组合取1.0；

*S*——无地震作用效应或有地震作用效应的基本组合设计值，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009和《建筑抗震设计规范》GB 50011的规定进行计算；

*R*——锚固承载力设计值；

*k*——地震作用下锚固承载力降低系数，按表11.1.8确定；

γRE ——锚固承载力抗震调整系数，取1.0。

表11.1.8 地震作用下锚固承载力降低系数*k*

|  |  |
| --- | --- |
| 破坏形态及锚栓类型 | 受力性质 |
| 受拉 | 受剪 |
| 锚栓或植筋钢材破坏 | 1.0 | 1.0 |
| 超高性能混凝土破坏 | 机械锚栓 | 扩底型锚栓 | 0.8 | 0.7 |
| 膨胀型锚栓 | 0.7 | 0.6 |
| 化学锚栓 | 特殊倒锥形锚栓 | 0.8 | 0.7 |
| 普通化学锚栓 | 0.7 | 0.6 |
| 混合破坏 | 普通化学锚栓 | 0.7 | — |

**11.1.9** UHPC外墙板的结构设计也可采用有限元法进行计算。

**11.2 荷载与作用**

**11.2.1** UHPC外墙板的风荷载标准值应按下式计算，并且不应小于1.0kN/m2：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$ω\_{k}=β\_{gz}μ\_{sl}μ\_{z}ω\_{0}$$ | （11.2.1） |

式中：*ω*k——风荷载标准值（kN/m2）；

*β*gz——阵风系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定确定；

*μ*sl——风荷载局部体型系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定确定；

*μ*z——风压高度变化系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定确定；

*ω*0——基本风压(kN/m2)，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定确定。

**11.2.2** 当UHPC外墙板安装高度大于200m或体型、风荷载环境复杂时，宜进行风洞试验确定风荷载。

**11.2.3** 垂直于UHPC外墙板面板平面的分布水平地震作用标准值可按式11.2.3-1计算，平行于UHPC外墙板面板平面的集中水平地震作用标准值可按公式11.2.3-2计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$q\_{Ek}=β\_{E}α\_{max}G\_{k}/A$$ | （11.2.3-1） |
|  | $$P\_{Ek}=β\_{E}α\_{max}G\_{k}$$ | （11.2.3-2） |

式中：*q*Ek——垂直于UHPC外墙板面板平面的分布水平地震作用标准值(kN/m2)；

*P*Ek——平行于UHPC外墙板面板平面的集中水平地震作用标准值(kN)；

*β*E——动力放大系数，可取5.0；

*α*max——水平地震影响系数最大值，按表11.2.3采用；

*G*k——UHPC外墙板（包括板和钢架）的重力荷载标准值 (kN)；

*A*——UHPC外墙板平面面积(m2)。

表 11.2.3 水平地震影响系数最大值αmax

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 抗震设防烈度 | 6 度 | 7 度 | 8 度 |
| $$α\_{max}$$ | 0.04 | 0.08（0.12） | 0.16（0.24） |

注：括号中数值分别用于设计基本地震加速度为0.15g和0.30g的地区。

**11.2.4** UHPC外墙板的温度应力宜根据支承约束情况按表11.2.4确定。

表11.2.4 UHPC外墙板的温度应力值σts(N/mm2)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 环境条件 | 抗拉面 | 温度梯度(℃) | σts |
| 冬季 | 潮湿 | 5 | 0.4~0.8 |
| 10 | 0.9~1.7 |
| 15 | 1.4~2.5 |
| 夏季 | 干燥 | 5 | 0.2~0.5 |
| 10 | 0.4~0.9 |
| 15 | 0.6~1.3 |
| 20 | 0.8~1.8 |

**11.2.5** UHPC外墙板的湿度应力宜根据支承结构的约束情况按表12.2.5确定。

表11.2.5 UHPC外墙板的湿度应力值σss(N/mm2)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 完全限制 | 短期 | 全部使用期 |
| 室内 | 1.3~1.8 | 0.7~0. 9 |
| 室外 | 1.0~1.5 | 0.5~0.8 |

**11.3 作用效应组合**

**11.3.1**  UHPC外墙板按承载力极限状态设计时，沿垂直于板面方向的荷载与作用效应按下列规定进行组合：

1 无地震作用效应组合时，应按下式进行：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{G}S\_{GK}+ψ\_{W}γ\_{W}S\_{Wk}+ψ\_{TM}γ\_{TM}S\_{TMk}$$ | （11.3.1-1） |
|  |  |   |

2 有地震作用效应组合时，应按下式进行：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{G}S\_{GK}+ψ\_{W}γ\_{W}S\_{Wk}+ψ\_{E}γ\_{E}S\_{Ek}+ψ\_{TM}γ\_{TM}S\_{TMk}$$ | （11.3.1-2） |
|  |  |  |

式中：*S*——荷载及作用效应组合的设计值；

*S*Gk ——永久荷载效应标准值；

*S*Wk、*S*Ek、*S*TMk——分别为风荷载、地震作用和温湿度作用效应标准值；

*γ*G、*γ*w、*γ*E、*γ*TM——分别为重力荷载、风荷载、地震作用和温湿度作用的分项系数；

*ψ*w、*ψ*E、*ψ*TM——分别为风荷载、地震作用和温湿度作用的组合值系数。

**11.3.2** UHPC外墙板应按荷载和作用效应的最不利组合进行设计。

**11.3.3** 荷载和作用的分项系数应按下列规定确定：

**1** 永久荷载分项系数*γ*G：当其效应对结构不利时，应取1.2；当其效应对结构有利时，应取1.0；

**2** 风荷载分项系数*γ*w应取1.5；

**3** 地震作用分项系数*γ*E应取1.3；

**4** 温湿度作用分项系数*γ*TM应取1.2。

**11.3.4**  当有两个及两个以上可变荷载或作用（风荷载、地震作用和温湿度作用）效应参与组合时，第一个可变荷载或作用效应的组合值系数可取1.0；第二个可变荷载或作用效应的组合值系数可取0.6；第三个可变荷载或作用效应的组合值系数可取0.2。

**11.3.5** 对于水平安装或水平倒挂的UHPC外墙板，可不考虑地震作用效应的组合。

**11.3.6**  当UHPC外墙板进行抗裂验算时，其荷载与作用效应组合应按标准组合，并应按下列规定计算：

**1** 对于竖直安装的UHPC外墙板，沿垂直于板面方向的荷载与作用效应组合应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{W}S\_{Wk}+γ\_{TM}S\_{TMk}$$ |  (11.3.6-1) |

**2** 对于倾斜安装的UHPC外墙板，沿垂直于板面方向的荷载与作用效应组合应按下列公式计算：

当重力荷载对结构有利时：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{W}S\_{Wk}+γ\_{TM}S\_{TMk}$$ |  (11.3.6-2) |

当重力荷载对结构不利时：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{G}S\_{Gk}+γ\_{W}S\_{Wk}+γ\_{TM}S\_{TMk}$$ |  (11.3.6-3) |

式中：*S*——荷载与作用按标准组合设计值；

*SGk、SWk、STM*k——分别为重力荷载、风荷载、温湿度作用效应标准值；

*γG、γW、γTM* ——分别为重力荷载、风荷载和温湿度作用效应的分项系数，取1.0。

**11.3.7** UHPC外墙板进行挠度验算时，其荷载与作用效应按标准组合，且应符合下列规定：

1 对于竖直安装的UHPC外墙板，沿垂直于板面方向的荷载与作用效应组合值应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{W}S\_{Wk}$$ | (11.3.7-1) |

2 对于竖直安装的UHPC外墙板，沿垂直于板面方向的荷载与作用效应组合值应按下列公式计算：

当重力荷载对结构有利时：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{W}S\_{Wk}$$ | (11.3.7-2) |

当重力荷载对结构不利时：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{G}S\_{Gk}+γ\_{W}S\_{Wk}$$ | (11.3.7-3) |

式中：S ——荷载与作用按标准组合设计值；

SGk、SWk——分别为重力荷载、风荷载标准值；

γG、γw——分别为重力荷载、风荷载的分项系数，取1.0。

**11.4 承载力极限状态设计**

**11.4.1** 对于风荷载控制的基本组合，UHPC外墙板截面应力设计值验算应符合下列公式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$γ\_{0}σ\leq \frac{f\_{Mk}}{γ\_{m}γ\_{b}}$$ | (11.4.1) |

式中：*γ*0——构件重要性系数，γ0≤1.0；对于抗震设计，不考虑构件的重要性系数；

*σ* ——按基本组合，UHPC外墙板截面应力设计值；

*f*Mk ——超高性能混凝土材料抗弯强度标准值；

*γ*m ——超高性能混凝土材料分项系数，取1.4；

*γ*b ——超高性能混凝土标准试件与UHPC外墙板抗弯性能差异系数按本标准第11.4.2条的规定采用。

**11.4.2** UHPC标准试件与UHPC外墙板抗弯性能差异系数γb应符合表11.4.2的规定：

表11.4.2 超高性能混凝土标准试件与矩形截面外墙板抗弯性能差异系数γb

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 板厚h (mm) | 6~10 | 12~16 | 20 | 40 | 60 | 100 | 200 | 300 |
| 　γb | 1.0 | 1.05 | 1.08 | 1.15 | 1.2 | 1.25 | 1.37 | 1.5 |

**11.4.3** 对于温湿度效应控制的基本组合，UHPC外墙板截面应力设计值验算应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$γ\_{0}σ\leq \frac{f\_{Uk}}{γ\_{m}}$$ | (11.4.3) |

式中：*σ*——按基本组合，UHPC外墙板截面应力设计值（N/mm2）；

*f*Uk——UHPC材料抗拉强度标准值（N/mm2）；

*γ*0——构件重要性系数，*γ*0≤1.0；对于抗震设计，不考虑构件的重要性系数；

*γ*m ——UHPC材料分项系数，取1.4。

**11.5 抗裂验算**

**11.5.1** 对于风荷载控制的标准组合，其开裂应力设计值应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$σ\_{r}\leq \frac{f\_{Lk}}{γ\_{g}γ\_{b}}$$ | (11.5.1) |

式中：*σ*r ——按标准组合，UHPC外墙板截面开裂应力设计值（N/mm2）；

*γ*b ——UHPC标准试件与UHPC外墙板的抗弯性能差异系数；

*f*Lk——UHPC材料比例极限强度标准值（N/mm2）；

*γ*g ——UHPC材料抗裂分项系数，取1.8。

**11.5.2** 对于温湿度应力控制的标准组合，其开裂应力设计值应符合下式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$σ\_{r}\leq f\_{Bk}/γ\_{g}$$ | (11.5.2) |

式中：*f*Bk——UHPC材料抗拉初裂强度标准值（N/mm2）；

*γ*g ——UHPC材料抗裂分项系数，取1.8。

**11.6 锚固承载力设计**

**11.6.1** 荷载按基本组合，锚固受拉承载力设计值应符合表11.6.1的规定。

表11.6.1 锚固受拉承载力设计规定

|  |  |
| --- | --- |
| 破坏类型 | 设计规定 |
| 锚栓钢材破坏 | *γ*A*N*d*≤F*sk*/γ*sN |
| UHPC锥体受拉破坏 | *γ*A*N*d*≤F*ck*/γ*cN |
| UHPC劈裂破坏 | *γ*A*N*d*≤F*spk*/γ*spN |

注：*N*d ——荷载按基本组合计算的锚固拉力设计值（N）；

 *F*sk——锚栓（或锚杆）钢材破坏受拉承载力标准值（N）；

*F*ck——UHPC锥体破坏受拉承载力标准值（N）；

*F*sp*k*——UHPC劈裂破坏受拉承载力标准值（N）；

*Γ*a ——锚固连接的重要性系数，按本标准第11.1.6条和第11.1.7条采用；

 *Γ*sN ——锚栓钢材破坏受拉承载力分项系数，按本标准表11.6.5采用；

 *γ*cN ——UHPC锥体破坏受拉承载力分项系数，按本标准表11.6.5采用；

*γ*spN ——UHPC劈裂破坏受拉承载力分项系数，按本标准表11.6.5采用。

**11.6.2** 荷载按基本组合，锚固受剪承载力应符合表11.6.2的规定。

表11.6.2 锚固受剪承载力设计规定

|  |  |
| --- | --- |
| 破坏类型 | 设计规定 |
| 锚栓钢材破坏 | γAVd ≤Qsk/γsV |
| 超高性能混凝土楔形体破坏 | γAVd < Qck/γcV |
| 超高性能混凝土剪撬破坏 | γAVd < Qcpk/γcpV |

注：Vd——荷载按基本组合计算的锚固剪力设计值（N）；

 Qsk ——锚栓钢材破坏受剪承载力标准值（N）；

 Qck ——超高性能混凝土边缘破坏受剪承载力标准值（N）；

Qcpk ——超高性能混凝土剪撬破坏受剪承载力标准值（N）；

γA ——锚固连接的重要性系数，按本标准第11.1.6条和第11.1.7条采用；

γsV ——锚栓钢材破坏受剪承载力分项系数，按本标准表11.6.5采用；

γcV ——超高性能混凝土边缘破坏受剪承载力分项系数，按本标准表11.6.5采用；

γcnV——超高性能混凝土剪撬破坏受剪承载力分项系数，按本标准表11.6.5采用。

**11.6.3** 拉剪复合受力下锚栓或连接螺栓钢材破坏时的承载力，应符合下列公式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$(\frac{N\_{d}}{F\_{sd}})^{2}+(\frac{V\_{d}}{Q\_{sd}})^{2}\leq 1$$ | (11.6.3-1) |
|  | $$F\_{sd}=F\_{sk}/γ\_{sN}$$ | (11.6.3-2) |
|  | $$Q\_{sd}=Q\_{sk}/γ\_{sV}$$ | (11.6.3-3) |

式中：*Fsd*——锚栓钢材破坏受拉承载力设计值（N）；

*Qsd*——锚栓钢材破坏受剪承载力设计值（N）

**11.6.4** 拉剪复合受力下超高性能混凝土破坏时的承载力应符合下列公式要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$(\frac{N\_{d}}{F\_{cd}})^{1.5}+(\frac{V\_{d}}{Q\_{cd}})^{1.5}\leq 1$$ | (11.6.4-1) |
|  | $$F\_{cd}=F\_{ck}/γ\_{cN}$$ | (11.6.4-2) |
|  | $$Q\_{cd}=Q\_{ck}/γ\_{cV}$$ | (11.6.4-3) |

式中：*Fcd*——超高性能混凝土锥体破坏受拉承载力设计值（N）；

*Qcd*——超高性能混凝土边缘破坏受剪承载力设计值（N）

**11.6.5** UHPC外墙板锚固承载力分项系数γR宜根据锚固连接破坏类型及UHPC外墙板的类型不同，按表11.6.5确定。

表11.6.5 锚固承载力分项系数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项次 | 符号 | 锚固破坏类型 | UHPC背附钢架板或用于24m以下建筑高度的UHPC平板 | 用于高层建筑的UHPC平板 |
| 1 | γcN | UHPC锥体受拉破坏 | 1.8 | 3.0 |
| 2 | γcV | UHPC边缘受剪破坏 | 1.5 | 2.5 |
| 3 | γspN | UHPC劈裂破坏 | 1.8 | 3.0 |
| 4 | γcpV | UHPC剪撬破坏 | 1.5 | 2.5 |
| 5 | γsN | 锚栓钢材受拉破坏 | 1.2 | 1.3 |
| 6 | γsV | 锚栓钢材受剪破坏 | 1.2 | 1.3 |

**11.6.6** 对于UHPC外墙板的后锚固抗震设计，其锚固拉力设计值和锚固剪力设计值应按本标准第5. 4. 1条第2款的规定进行计算，后锚固受拉、受剪承载力应根据现行行业标准《混凝土结构后描固技术规程》JGJ 145的相关公式进行计算，其计算结果应符合本标准第5.1.9 条第2款的规定。

**11.6.7** UHPC平板和UHPC背附钢架板的锚固承载力标准值可按下列要求确定：

**1** 应根据设计要求，按工厂制作工艺技术规程制作不少于20 个锚固受拉试件（尺寸： 300mm×300mm) ，经标准养护后测试锚固受拉承载力，并应按下列公式计算预埋锚固受拉承载力标准值：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$F\_{k}=\overbar{F}\left[1-t\_{a}(n-1)\frac{S\_{N}}{F}\right]$$ | (11.6.7-1) |
|  | $$S\_{N}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum\_{i-1}^{n}(F\_{i}-\overbar{F})^{2}}$$ | (11.6.7-2) |

式中：*Fk*——锚固受拉承载力标准值（kN）；

 ‾*F*——该批试件锚固受拉承载力平均值（kN）；

*SN* ——该批试件锚固受拉承载力样本方差

*Fi* ——单个试件的错固受拉承载力（kN）；

*n*——样本容量；

*ta*——学生氏函数，按置信度1—α和样本容量n确定。

**2** 应根据设计要求，按工厂制作工艺技术规程制作不少于20个锚固受剪试件（尺寸： 300mm 300mm) ，经标准养护后测试锚固受剪承载力，并应按下列公式计算预埋锚固受剪承载力标准值：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$Q\_{k}=\overbar{Q}\left[1-t\_{a}\left(n-1\right)\frac{S\_{V}}{\overbar{Q}}\right]$$ | (11.6.7-3) |
|  | $$S\_{V}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum\_{i-1}^{n}\left(Q\_{i}-\overbar{Q}\right)^{2}}$$ | (11.6.7-4) |

式中：*Qk*——锚固受剪承载力标准值（kN）；

 ‾*Q* ——该批试件锚固受剪承载力平均值（kN）；

*SV* ——该批试件锚固受剪承载力样本方差；

*Qi* ——单个试件的锚固受剪承载力（kN）。

**11.6.8** 对于缺乏锚固承载力实验数据的UHPC外墙板，锚固受拉承载力标准值和锚固受剪承载力标准值宜按现行行业标准《混凝土结构后描固技术规程》JGJ 145 的相关公式计算确定。

**11.7 平板面板结构设计**

**11.7.1** UHPC平板采用四点支承时，在重力荷载或风荷载或地震作用下产生的截面应力标准值应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$σ\_{k}=\frac{6mq\_{k}l\_{y}^{2}}{h^{2}}$$ | (11.7.1) |

式中：*σk*——UHPC平板在重力荷载或风荷载或地震作用下产生的截面应力标准值（N/mm2），即*σ*k分别代表*σ*Gk或*σ*wk或*σ*Ek；

*q*k——重力荷载或风荷载或地震作用标准值（N/mm2）；

*l*y——UHPC平板支承点间长边边长（mm）；

*h*——UHPC平板厚度（mm）；

*m*——四点支承UHPC平板弯矩系数，根据UHPC平板支承点间的短边与长边边长之比*lx/ly*按表11.7.1确定。

表11.7.1 四点支承超高性能混凝土板的弯矩系数m

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *lx/ly* | 0.00 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 |
| *m* | 0.125 | 0.126 | 0.127 | 0.129 | 0.130 | 0.132 | 0.134 | 0.136 |
| *lx/ly* | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | — |
| *m* | 0.138 | 0.140 | 0.142 | 0.145 | 0.148 | 0.151 | 0.154 | — |

注：*l*x为支承点之间的短边变长。

**11.7.2** UHPC平板受温湿度作用产生的截面应力标准值宜按本标准第11.2.4条和第11.2.5条的要求确定。

**11.7.3**  UHPC平板应进行承载力验算和抗裂验算。

**11.7.4** UHPC平板的挠度应按下列要求验算：

**1**  UHPC平板的刚度*D*可按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$D=\frac{Eh^{3}}{12(1-v^{2})}$$ | (11.7.4-1) |

**2** UHPC平板的挠度应按下列规定计算：

**1**) 对于竖直外墙或当自重对结构有利时的倾斜外墙，其挠度值应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$u=\frac{μω\_{k}l\_{y}^{4}}{D}$$ | (11.7.4-2) |

**2)** 对于当自重对结构不利时的倾斜外墙，其挠度值应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$u=\frac{μ\left(q\_{Gk}+ω\_{k}\right)l\_{y}^{4}}{D}$$ | (11.7.4-3) |

式中：*D*——UHPC平板刚度（N/mm）；

*v*——UHPC材料泊松比，按本标准表11.7.4采用；

*q*Gk——UHPC平板重力荷载标准值沿垂直于板面方向的分量（N/mm2）；

*μ*——挠度系数，根据UHPC平板支承点间短边与长边边长之比*lx/ly*按表11.7.4采用；

*ωk*——风荷载标准值（N/mm2）；

*ly*——UHPC平板支承点间长边边长（mm）；

*E*——UHPC材料弹性模量（N/mm2）；

*h*——UHPC平板厚度（mm）；

*u*——UHPC平板挠度（mm）。

表11.7.4 四点支承UHPC平板的挠度系数*μ*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *lx/ly* | 0.00 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 |
| *μ* | 0.01302 | 0.01317 | 0.01335 | 0.01367 | 0.01417 | 0.01451 | 0.01496 | 0.01555 |
| *lx/ly* | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | — |
| *μ* | 0.01630 | 0.01725 | 0.01842 | 0.01984 | 0.02157 | 0.02363 | 0.02603 | — |

**3** 四点支承UHPC外墙板的挠度限值*μ*lim宜按其支承点间长边边长的*l*/240确定。

**11.8 背负钢架板结构设计**

**11.8.1** UHPC背负钢架板面板采用纵横相互平行排列的柔性描杆的支承形式可简化为点支承结构（图11.8.1) 。



图11.8.1 任一区格内的计算简图

**11.8.2** UHPC面板在重力荷载或风荷载或地震作用下，板区格截面产生的最大应力标准值应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$σ\_{k}=0.7312\frac{q\_{k}l\_{n}^{2}}{h^{2}}$$ | (11.8.2) |

式中：*σ*k——面板在重力荷载或风荷载或地震作用下产生的截面应力标准值（N/mm2），σk分别代表σGk或σwk或σEk；

*q*k——重力荷载或风荷载或地震作用标准值（N/mm2），*q*k分别代表*q*Gk或*ω*k或*q*Ek；

*l*n——板区格长边净跨（mm）；

*h*——板区格面板厚度（mm）。

**11.8.3** UHPC面板受温湿度作用产生的截面应力标准值宜按其受到柔性锚杆的实际约束工况或按本标准第11.2.4 条和第11.2.5条的要求确定。

**11.8.4** UHPC面板应分别进行承载力验算和抗裂验算。

**11.8.5** 背负钢架设计应符合下列规定：

**1** 龙骨截面主要受力部位的厚度应符合下列规定：

1）非轴拉受力状态的龙骨，其截面的宽厚比应符合钢结构设计标准的规定；

2）热轧钢型材的有效厚度不应小于3mm。

**2** 龙骨宜采用钢型材。钢型材宜采用耐候钢；碳素钢型材应热浸镀锌或采取其他有效防腐措施。处于潮湿或腐蚀条件下的钢型材，可按计算厚度增加1mm为设计厚度。

**3** 柔性锚杆和重力锚杆与龙骨的连接宜采用焊接或铰接，其连接承载力应能保证UHPC 面板所受到的各种荷载可靠地传递到相应龙骨上。

**4** 作用于龙骨上的荷载应根据UHPC面板在龙骨上的支承状况以及龙骨之间的传力途径计算确定。

**5** 承受轴力和弯矩作用的龙骨，其承载力应符合钢结构设计标准的相关规定；

**6** 不承受轴力的龙骨，其截面受弯承载力和受剪承载力应分别符合钢结构设计标准的规定；UHPC面板在龙骨上偏置使龙骨产生较大扭矩时，尚应进行龙骨受扭承载力计算；

**7** 龙骨之间的连接应能承受UHPC面板的各种荷载和作用及绕龙骨形心轴的扭转力；

**8** 背附钢架应进行挠度验算，其挠度限值为*l*/240。

# **12 外墙板制作与安装**

**12.1 一般规定**

**12.1.1** UHPC外墙板生产单位应具备相应的生产工艺设施和必要的试验检测手段，并应建立完善的质量管理体系。

**12.1.2** UHPC外墙板制作前，应根据设计要求、工艺要求和质量标准进行技术交底，并应制定相应的生产方案。

**12.2 外墙板制作**

**12.2.1** UHPC外墙板制作前应进行产品图的设计，产品图应与安装图相一致。

**12.2.2** UHPC外墙板产品图应标识构件尺寸、预埋件及背附钢架对应位置、构件剖面、细部详图、材料名称及规格等信息。

**12.2.3** UHPC外墙板制作的模具应有足够刚度和尺寸精度且不吸水。投入生产前应对模具进行验收。应选用对UHPC外墙板表面无污染的隔离剂并均匀涂覆。

**12.2.4** UHPC外墙板制作用超高性能拌合物的生产宜选用预混料并采用强制式搅拌机搅拌。

**12.2.5** UHPC外墙板制作用超高性能混凝土拌合物应具有自流平和自密实特性。

**12.2.6** UHPC外墙板浇筑时宜从模具的一侧开始浇筑，一次性浇筑至所需厚度，成型过程中不得进行插捣。

**12.2.7** UHPC外墙板在成型后，应立即在模具表面覆盖塑料薄膜，避免水分散失。

**12.2.8** UHPC外墙板制作时应做同期试件，当测得同期试件抗压强度达到UHPC设计强度的40%以上方可脱模，脱模时不应采用局部应力过于集中的方法，当外墙板特殊或尺寸太大无法采用人工脱模时，应在外墙板中埋入专用脱模套管或套环，借助起吊设备以及脱模辅助装置操作。

**12.2.9** 带有背附钢架的UHPC外墙板在进行装配作业时应采取必要的承托和定位措施，装配应按产品设计图纸进行。

**12.3 安装施工**

**12.3.1** UHPC外墙板应通过支承结构与主体结构连接。UHPC外墙板与支承结构应采用插槽连接或螺栓连接，严禁现场焊接。

**12.3.2** 横向尺度大的UHPC外墙板应采用两点或多点吊装，吊点设置应平衡。

**12.3.3** 有背附钢架的UHPC外墙板，吊点数量和位置应根据背附钢架刚度和构件的形状确定。吊装点应布置在钢架上，吊装荷载不应作用到构件或锚杆上。

**12.3.4** UHPC外墙板就位后经测量确定三维方向的位置和角度都应在允许误差范围内，方可固定。

**12.3.5** 檐线、腰线、窗台线等横向UHPC外墙板，应有不小于3%的排水坡度。

**12.3.6** UHPC外墙板接缝允许偏差内，可将部分安装偏差在构件接缝中调整。

**12.3.7** 背附钢架与超高性能混凝土板可以工厂安装或施工现场安装，安装完成后的面板挂点四周不应出现开裂现象。

**12.4 安装质量要求**

**12.4.1** UHPC外墙板与主体结构的净距应符合下列规定：

 **1** UHPC外墙板背面与预制混凝土结构净距不应小于40mm，与现浇混凝土结构净距不应小于50mm；

 **2** UHPC外墙板背面与钢结构净距不应小于40mm

 **3** UHPC外墙板与主体结构的连接点在上下、左右、前后三个方向内的调节空间净距不应小于25mm。

**12.4.2** UHPC外墙板与主体结构的净距应符合下列规定：

 **1** 安装后的UHPC外立面应线条清晰、层次分明、表面平整、曲面过渡光滑，横向构件应保证平直度，竖向构件应保证垂直度，整体效果应达到建筑设计要求；

 **2** UHPC外墙板表面应洁净，表面颜色和质感应符合样板要求；

 **3** UHPC外墙板间接缝应平直、均匀，不得有歪斜、错台及边角损坏。

**12.4.3** 安装偏差应符合下列规定：

 **1** 建筑平面内，UHPC外墙板与建筑轴线的距离偏差不应大于12mm；

 **2** 立面3m高度UHPC外墙板立面垂直度偏差不应大于5mm；立面15m高度UHPC外墙板立面垂直度偏差不应大于10mm；立面30m高度UHPC外墙板立面垂直度偏差不应大于20mm；

 **3** 单个UHPC外墙板顶部标高与设计标高偏差不应大于10mm，相邻构件顶部标高偏差不应大于5mm；

 **4** UHPC外墙板长度小于或等于6m时，接缝宽度与设计宽度偏差不应大于5mm；UHPC外墙板长度大于6m时，接缝宽度与设计宽度偏差不应大于10mm；

 **5** 相邻UHPC外墙板面内错台偏差不应大于5mm；

 **6** 与主体结构相连的连接件定位偏差不应大于5mm。

# **13 外墙板检验与验收**

**13.1 检验**

**13.1.1** UHPC外墙板的检验应包括缺陷、尺寸允许偏差、外墙板性能和色差。

**13.1.2** UHPC外墙板不应有严重缺陷，对于一般缺陷应在工厂内修复后方能出厂。

**13.1.3**  UHPC外墙板的尺寸允许偏差及检验方法应符合现行行业标准《玻璃纤维增强水泥外墙板》JC/T 1057及表13.1.3的 规定。

表13.1.3 UHPC外墙板尺寸允许偏差及检验方法

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 允许偏差（mm） | 检验方法 |
| 钢架位置偏差 | ±5 | 尺量检查 |
| 预埋件、孔、槽位置偏差 | ±5 | 尺量检查 |

**13.1.4**  UHPC外墙板性能检验应符合下列规定：

**1** UHPC外墙板每班生产的同时应按现行行业标准《玻璃纤维增强水泥外墙板》JC/T 1057要求制作试验板，应按现行国家标准《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》GB/T 15231 的规定进行相关性能测试，测试结果应符合设计要求；

**2** 生产企业应建立满足日常检测要求的实验室，生产期间每天应对测试样板进行测试，检测的结果在工程竣工后一年内应进行保存。

**13.1.5**  UHPC外墙板的色差应符合建筑外观效果要求。

**13.1.6**  UHPC外墙板检验合格后，应在产品的显著位置设置标识，标识的内容应包括产品编号、制作日期、合格状态、生产企业名称等信息。

**13.2 验收**

**13.2.1**  UHPC外墙板的验收包括技术资料复核、现场检查和抽样检查。

**13.2.2** UHPC外墙板的验收检验批的划分应符合下列规定：

**1** 设计、材料、工艺和施工条件相同的UHPC外墙板，每1000m2为一个检验批，不足1000m2应划分为一个独立检验批；每个检验批每100m2应至少查一处，每处不得少于10m2。

**2** 同一个单位工程中不连续的UHPC外墙板工程应单独划分检验批；

**3** 对于异形或有特殊要求的UHPC外墙板，检验批的划分应根据UHPC外墙板的结构、工艺特点及超高性能混凝土，外墙板工程的规模，宜由监理单位、建设单位和施工单位协商确定。

**13.2.3** 进场验收应检查UHPC外墙板产品合格证。

**13.2.4** UHPC外墙板进场时应进行外观、包装和尺寸的抽查，抽查比例不应小于1%。

**13.2.5** 项目进行前应按本标准表9.2.1中已提供性能指标要求的全部项目提供第三方检测报告，并符合业主和设计方的要求。

**13.2.6** UHPC外墙板应进行材料性能复试，复试试件应由UHPC外墙板供应商提供，并与施工项目配方及生产工艺一致。复试应在UHPC外墙板正式投产后进行，每项工程宜复试1次，特殊要求应在合同中明确。

**13.2.7** 性能复试项目应包括抗压强度、体积密度、抗弯极限强度、吸水率、抗冲击强度。另外，严寒地区应增加抗冻性试验并检测冻融循环100次极限抗弯强度。

**13.2.8** UHPC外墙板安装完成后尚应对安装质量按本标准第12.5节的规定进行验收。

**本规程用词说明**

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，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，首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指定应按照其他有关标准执行的写法为“应按照……执行”或“应符合……规定”。

**引用标准名录**

《建筑结构荷载规范》GB50009

《混凝土结构设计规范》GB 50010

《建筑抗震设计规范》GB 50011

《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231

《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》GB/T 15231

《建筑幕墙》GB/T 21086

《活性粉末混凝土》GB/T 31387

《混凝土结构后描固技术规程》JGJ 145

《玻璃纤维增强水泥（UHPC) 装饰制品》JC/T 940

《玻璃纤维增强水泥外墙板》JC/T 1057

《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014

《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107-2020

中国工程建设标准化协会标准

建筑工程超高性能混凝土应用技术标准

T/CECS xxx－2021

条文说明

目 录

[**1 总 则** 49](#_Toc89350879)

[**2 术语和符号** 50](#_Toc89350880)

[**3 构件结构设计基本规定** 51](#_Toc89350881)

[**4 超高性能混凝土构件材料要求** 52](#_Toc89350882)

[**5 受弯构件承载能力极限状态计算** 55](#_Toc89350883)

[**5.1 一般规定** 55](#_Toc89350884)

[**5.2 正截面承载力计算** 55](#_Toc89350885)

[**5.3 斜截面承载力计算** 56](#_Toc89350886)

[**6 受弯构件正常使用极限状态验算** 58](#_Toc89350887)

[**6.1 裂缝控制计算** 58](#_Toc89350888)

[**6.2 受弯构件挠度验算** 58](#_Toc89350889)

[**7 预制结构构件接缝设计** 60](#_Toc89350890)

[**7.1 一般规定** 60](#_Toc89350891)

[**7.2 最小配筋率及配箍率** 60](#_Toc89350892)

[**7.3 钢筋的锚固** 61](#_Toc89350893)

[**8 预制构件制作与验收** 62](#_Toc89350894)

[**8.1 一般规定** 62](#_Toc89350895)

[**8.2 预埋件要求** 62](#_Toc89350896)

[**8.3 构件制作及运输** 62](#_Toc89350897)

[**9 外墙板基本规定** 64](#_Toc89350898)

[**9.1 一般规定** 64](#_Toc89350899)

[**9.2 技术要求** 64](#_Toc89350900)

[**9.3 性能参数** 65](#_Toc89350901)

[**10 外墙板建筑设计** 66](#_Toc89350902)

[**10.1 一般规定** 66](#_Toc89350903)

[**10.2 UHPC外墙性能设计** 66](#_Toc89350904)

[**10.3 UHPC外墙构造设计** 66](#_Toc89350905)

[**10.4 UHPC外墙板构造与连接设计** 67](#_Toc89350906)

[**11 外墙板结构设计** 68](#_Toc89350907)

[**11.1 一般规定** 68](#_Toc89350908)

[**11.2 荷载与作用** 68](#_Toc89350909)

[**11.3 作用效应组合** 70](#_Toc89350910)

[**11.4 承载力极限状态设计** 71](#_Toc89350911)

[**11.5 抗裂验算** 71](#_Toc89350912)

[**11.6 锚固承载力设计** 72](#_Toc89350913)

[**11.7 平板面板结构设计** 73](#_Toc89350914)

[**11.8 背负钢架板结构设计** 73](#_Toc89350915)

[**12 外墙板制作与安装** 76](#_Toc89350916)

[**12.2 外墙板制作** 76](#_Toc89350917)

[**12.5 安装质量要求** 76](#_Toc89350918)

[**13 外墙板检验与验收** 77](#_Toc89350919)

[**13.1 检验** 77](#_Toc89350920)

# **1 总 则**

**1.0.1** 为规范超高性能混凝土结构设计、提高超高性能混凝土在建筑工程中应用技术水平，促进超高性能混凝土在建筑中应用的科学化、规范化，做到技术先进、安全可靠、适用美观和经济合理，保证工程质量，制定本标准。

**1.0.2** 本条规定了本标准的适用范围。

本标准适用于超高性能混凝土在建筑结构承重构件和建筑非承重外墙板中的应用。

# **2 术语和符号**

本章仅将本标准出现的、人们比较生疏的术语列出。术语的解释，其中部分是国际公认的定义，但大部分是概括性的涵义，并非国际或国家公认的定义。术语的英文名称不是标准化名称，仅供引用时参考。

# **3 构件结构设计基本规定**

**3.0.1**本条基本遵循常规混凝土结构设计的基本内容，其中作用及作用效应分析同普通结构 作用，将耐久性能要求列出，以突出 UHPC 的较高抗渗性能。此外，有专门设计目标的特 殊要求，如抗火性能要求等。

**3.0.2** 建筑工程中UHPC 结构的有关极限状态、直接作用、安全等级、设计使用年限的基本设计规定，遵循普通钢筋混凝土结构的基本设计规定，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中 3.1.3、3.1.4、3.1.5 条的规定执行。

**3.0.3** 由于 UHPC 材料的较高耐久性能，UHPC 结构一般情况下可按100 年的使用年限设计，但是在恶劣的使用环境下，UHPC结构的耐久性应重新进行测试与分析，以确保满足结构的使用年限。

**3.0.4** 本条规定根据国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 并参照相关行业相应规范的规定给出，承载力极限状态的规定与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中有关规定相一致。

**3.0.5** UHPC结构正常使用极限状态的受弯构件挠度限值、裂缝控制等级划分、最大裂缝宽度限值与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定保持一致。

**3.0.6**~**3.0.7** UHPC结构的耐久性设计的内容和环境类别划分与普通混凝土结构保持一致，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的相关规定执行，但由于UHPC具有较高的抗渗能力，其抗渗性能分级应按现行团体标准《超高性能混凝土基本性能与试验方法》T/CBMF37-2018/ T/CCPA 7-2018中4.2条规定执行。

# **4 超高性能混凝土构件材料要求**

**4.0.1** UHPC材料组分通常由水泥、硅灰、石英粉、石英砂、减水剂等组成。可含有矿物掺和料如粉煤灰、磨细高炉矿渣、石灰石粉等，也可添加适合的无机颜料，必要时可加入粗骨料。UHPC的原材料要求及试件制备（搅拌、成型、养护等）均应符合现行标准《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107-2020的相关规定。

**4.0.2** 普通混凝土、受力钢筋、构造钢筋以及预应力钢筋的相关规定，与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定保持一致，其中纵向受力筋为HRB400、HRBF400、HRB500、HRBF500。

**4.0.3** 立方体抗压强度标准值*f*cu,k是本标准超高性能混凝土各项力学性能指标的基本代表值。抗压强度等级，按照立方体抗压强度标准值，每20MPa 为一个等级。各强度等级对 应的立方体抗压强度标准值 *f*cu,k如表 1 所示。采用粗骨料粒径大于5mm时，超高性能混凝土的立方体抗压强度参照现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081相关规定，尺寸换算系数宜由试验确定，在未进行试验确定的情况下，对100mm×100mm×100mm试件可取0.95。

表1 超高性能混凝土立方体抗压强度标准值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UC120 | UC140 | UC160 | UC180 | UC200 |
| *f*cuk | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |

注：1）*f*cu,k为边长为 100mm 立方体试块，按标准养护方法制作养护的，按标准试验方法确定的具有 95%保证率的抗压强度。

2）当立方体抗压强度标准值处于两个强度等级之间时，抗压强度等级取低于其立方体抗压强度标准值对应的等级，且按该强度等级对应的立方体抗压强度标准值进行其它抗压 特征值的计算。

**4.0.4** UHPC 轴心抗压强度标准值 *f*ck 与立方体抗压强度标准值 *f*cu,k 按式 *f*ck=0.88αc*f*cu,k 计算，其中系数 0.88 为考虑实际工程构件与立方体试件 UHPC 强度之间的差异而取用的折减系数。*α*c 为 100mm×100mm×300mm 棱柱体强度与边长 100mm 立方体强度之比值，参照国内外超高性能混凝土相关数据及标准，取 0.8，即轴心抗压强度标准值计算式为*f*ck=0.7*f*cu,k。

**4.0.5** UHPC轴心抗压强度设计值*f*c可按式进行计算，系数*η*1 用于考虑 UHPC 在受压时变形能力相对较低，取值 0.85；*γ*为材料分项系数，取值1.3，即轴心抗压强度设计值计算式为*f*c=*f*ck/1.5。本条款相关系数主要引自瑞士 UHPC 标准 SIA2052 中的 4.2.2、2.4.2.4。

**4.0.6** UHPC 弹性极限抗拉强度标准值 *f*tek 为按照《超高性能混凝土基本性能与试验方法》（T/CBMF 37-2018 / T/CCPA 7-2018）附录 B 的单拉试件，按标准养护方法制作养护，按标准试验方法确定的具有95%保证率的弹性极限抗拉强度。各强度等级的弹性极限抗拉强度标准值 *f*tek 如表 2 所示。

表2超高性能混凝土弹性极限抗拉强度标准值（MPa）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | UT07 | UT08 | UT09 | UT10 |
| *f*tek | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |

注：UT07为应变软化型，UT08、UT09、UT10为应变硬化型，当弹性极限抗拉强度标准值处于两个强度等级之间时，弹性极限抗拉强度等级取低于其弹性极限抗拉强度标准值对应的等级，且按该强度等级对应的弹性极限抗拉强度标准值进行其他抗拉特征值的计算。

**4.0.7** 对于拉伸应变硬化型UT08、UT09、UT10，确定轴心抗拉强度标准值*f*tk采用的单拉试件及其试验方法应符合《超高性能混凝土基本性能与试验方法》T/CBMF37-2018/T/CCPA 7-2018 附录B要求，其抗拉强度标准值为弹性极限抗拉强度标准值的1.1~1.2倍。对于拉伸应变软化型UT07，进行直接拉伸试验比较困难而且结果可信度较低，可参照钢纤维混凝土进行取值，但由于现行规范《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJT 465-2019缺乏镀铜微细钢纤维的相关设计指标，本规范通过直接拉伸试验与缺口梁三点弯试验建立了超高性能混凝土残余弯拉强度与直接拉伸强度的转换关系。

试验共设计了24组不同纤维掺量的550mm\*150mm\*150mm的缺口梁试件，得出缺口水平张开位移0.5mm对应的残余弯拉强度标准值与50\*100轴心抗拉强度标准值的对应关系：

$f\_{tk}=0.45f\_{R1}$ （1）

**4.0.8** 超高性能混凝土的轴心抗拉强度设计值由强度标准值除以材料强度分项系数*γ*c 确定，弹性极限抗拉强度设计值: *f*te *ftek* / ** *c*，轴心抗拉强度设计值*f*t *ftk* / ** *c*，** *c*取1.4。

**4.0.9** UHPC 的受压应力-应变关系参照国内外超高性能混凝土相关数据及标准，在达到峰值压应力之前，呈现出高度的线弹性，因此其受压应力-应变曲线可采用理想弹塑性模型，但需要注意的是，当采用粗骨料时，在达到85%~90%峰值应力之后，呈现出非线性变化。

**4.0.10** UHPC 的受拉应力与应变关系在在达到弹性极限抗拉强度之前，呈现出线弹性特征，超过弹性极限抗拉强度后对应于不同抗拉强度等级时，存在着软化及强化两种情况，为便于构件承载力分析时考虑拉区 UHPC 的贡献，超过抗拉强度后的受拉应力与应变关系简化为水平段。但对于应变硬化UHPC应取其弹性极限抗拉强度作为水平段的强度值，对应极限拉应变可取峰值拉应变的2倍，而对于应变软化UHPC，由于开裂后即进入软化段，因此偏安全地取0.15%拉应变对应的峰后抗压强度为其水平段强度值，并取0.15%为极限拉应变，如图1所示。

 

（a）UT08- UT10应变硬化型 （b）UT07应变软化型

图1-1超高性能混凝土轴拉性能

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）UT08- UT10应变硬化型 | （b）UT07应变软化型 |

图1-2 超高性能混凝土单轴受拉应力与应变关系模型

**4.0.11** UHPC 的弹性模量，采用 100mm  100mm  300mm 的棱柱体试样按照《活性粉末混凝土》GB/T 31387相关规定测试。当无试验数据时，可按表2取值。

表2超高性能混凝土弹性模量（×104MPa）

|  |  |
| --- | --- |
| 弹性模量 | 抗压强度等级 |
| UC 120 | UC 140 | UC 160 | UC 180 | UC 200 |
| *E*U | 4.2 | 4.5 | 4.8 | 5.1 | 5.4 |

**4.0.12** UHPC 的泊松比，采用 100mm  100mm  300mm 的棱柱体试样按照《活性粉末混凝土》GB/T 31387相关规定测试。当无试验数据时，可按0.2取值。

# **5 受弯构件承载能力极限状态计算**

**5.1 一般规定**

**5.1.1** 由于UHPC抗压强度较高，表现出较大脆性，目前其在竖向承重构件的应用较少，现有数据积累不足，出于安全考虑，因此本章适用于非预应力和预应力钢筋超高性能混凝土受弯构件（预制楼梯、梁、板等）的承载能力极限状态计算。

**5.1.2** 对于无筋超高性能混凝土受弯构件的正截面受弯承载力计算，除应考虑UHPC受拉对承载力的贡献外，尚应符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中素混凝土结构构件设计的相关规定，计算时应以超高性能混凝土的强度设计值代替素混凝土的强度设计值。

**5.2 正截面承载力计算**

**5.2.1** 同济大学对不同配筋率下的钢筋超高性能混凝土梁受弯全过程跨中截面的应变分布进行了测试，结果表明：在达到极限荷载80%之前，即纵向受拉钢筋的应力达到屈服强度之前及达到屈服强度后的一定塑性范围内，截面的平均应变基本符合平截面假定。另外，瑞士规范、法国规范、日本规范在配筋超高性能混凝土构件正截面受弯承载能力分析计算方面均采用这一假定。故本规程对这一假定也予以沿用。

**5.2.2** 由于超高性能混凝土抗压强度较高，在承载能力极限状态时，正常配筋率情况下，受压区超高性能混凝土很难进入塑性状态，所以假设其受压区应力沿高度呈三角形分布，为方便计算，超高性能混凝土结构正截面承载力计算时仍沿用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010等规范的习惯，采用等效矩形应力图代替实际的三角形应力图分布。矩形应力图的强度取为混凝土轴心抗压强度设计值*f*c乘以系数α1，矩形应力图高度x与实际受压区高度x0的比值β1，采用本标准建议的UHPC设计受压应力-应变关系，并依据等效前后的合力和合力矩大小相等的原则，可得α1=0.75，β1=0.67。

**5.2.3** 考虑截面受拉区UHPC对承载力的贡献是UHPC受弯构件与普通钢筋混凝土受弯构件抗弯承载力计算的主要区别。本条文将受拉区UHPC的应力图简化为等效矩形应力图。为简化计算，等效矩形应力图高度取实际受拉区高度。另外由于钢纤维的作用，应变硬化型超高性能混凝土构件初裂后其抗拉强度仍会继续增大，直至裂缝处钢纤维拉断或拔出。但考虑极限状态时，受拉区靠近中和轴一定高度范围内的UHPC仍处于弹性阶段，而受拉区边缘一定高度范围内的UHPC可能已进入受拉应变软化阶段，截面受拉边缘附近拉应力较大区域的部分钢纤维可能被拉断或拔出。因此，本规程偏安全地将受拉区的应变硬化型UHPC抗拉强度按弹性极限抗压强度取为0.9*f*te或0.75*f*t。但对于应变软化型UHPC，因其开裂后就开始进入软化段，在承载力极限状态时抗拉强度下降较多，因此取0.5 *f*t可保证安全性。

**5.2.4** 超高性能混凝土受弯构件的破坏特征与普通混凝土构件基本相同，构件截面的界限破坏亦为受拉钢筋屈服与受压区边缘混凝土压碎同时发生的破坏状态。但由于超高性能混凝土抗压强度较高且在达到抗压强度之前应力应变呈线弹性变化，因此界限破坏状态下受压区边缘超高性能混凝土压应变为*ε*c0，根据平截面假定，可得出截面相对受压区*ξ*b的计算公式。

**5.2.5**本条参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010中受弯构件正截面承载力的计算方法，考虑超高性能混凝土受拉对受弯承载力的贡献，参照欧洲*fib* Model Code 2010中的规定，给出了钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土受弯构件正截面承载力计算公式。

**5.2.6** 为了验证本标准的抗弯承载力计算方法是否可靠，通过同济大学测试的适筋UHPC受弯构件的试验值与本规程计算方法得到计算值之比的均值为1.195，标准差为0.035，变异系数0.029。

**5.2.7** 对于受拉区采用超高性能混凝土，受压区采用普通混凝土的组合混凝土受弯构件，可考虑应变仍符合平截面假设，但由于两者弹性模量存在差异，应力分布较为复杂，为方便计算，规定超高性能混凝土的配置高度*x*u不宜小于超高性能混凝土受弯构件计算的受拉区高度*x*t，且不应小于0.6*x*t，否则不考虑UHPC受拉对承载力的贡献。且当*x*u小于*x*t时，计算时应以*x*u代替*x*t。

**5.3 斜截面承载力计算**

**5.3.1** 本条规定了超高性能混凝土受弯构件受剪承载力截面限制条件。超高性能混凝土受弯构件受剪承载力截面限制条件参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010中的形式，并根据现行工程建设标准《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJT 465-2019及试验结果确定公式（5.3.1-1）中的系数0.2和公式（5.3.1-2）中的系数0.16。

**5.3.2** 本条规定参考了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010中抗剪承载力的计算模式，将普通混凝土抗剪承载力替换为超高性能混凝土所提供的抗剪承载力。

**5.3.3** 超高性能混凝土受弯构件斜截面受剪承载能力计算沿用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010和现行工程建设标准《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJT 465-2019中将混凝土和箍筋的抗剪贡献以和的形式表达，其中超高性能混凝土对抗剪承载力的贡献包括两部分：超高性能混凝土剪压区贡献和钢纤维作用折算为箍筋后对承载力的贡献，其中钢纤维作用折算为箍筋时，需考虑纤维取向以及在剪压区强度不能充分发挥的影响乘以系数0.3进行折减。

**5.3.4** 本条参考了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 中 6.3.11-6.3.22 条规定，将普通混凝土的抗剪承载力替换为超高性能混凝土的抗剪承载力。

**5.3.5** 当设计剪力不超过超高性能混凝土所能提供的抗剪承载能力时，可按构造配置箍筋按构造配置箍筋的条件，现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 所采用的计算模式

**5.3.6** 对于受拉区采用超高性能混凝土，受压区采用普通混凝土的组合混凝土受弯构件在计算斜截面受剪承载力时，应考虑超高性能混凝土中纤维对抗剪承载力的贡献，并按普通混凝土抗剪承载力要求设置抗剪钢筋。

# **6 受弯构件正常使用极限状态验算**

**6.1 裂缝控制计算**

**6.1.1** 钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土受弯构件的裂缝控制等级、构件受拉边缘应力或正截面裂缝宽度验算与钢筋混凝土和预应力混凝土要求一致，因此仍然参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定，但由于超高性能混凝土开裂时对应的抗拉强度为弹性极限抗拉强度，所以应将混凝土轴心抗拉强度标准值用超高性能混凝土的弹性极限抗拉强度标准值代替。另外，由于镂空结构、表皮结构以及薄壁饰面为非承重构件，而且多数情况下内部未配置钢筋，因此在进行验算时，构件裂缝宽度限值取为0.3mm。

**6.1.2** 由于应变硬化UHPC具有较高的裂缝控制能力，通过配筋应变硬化UHPC的拉杆试验表明，在钢筋达到屈服之前，构件一直处于多点开裂的微裂纹状态，对应裂缝宽度约0.05mm，小于三级裂缝控制等级时的最小裂缝宽度限值0.1mm，而且在正常使用极限状态下，钢筋应力水平约为屈服强度的60%，因此，本条给出建议：对于应变硬化型超高性能混凝土的钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土构件，可不进行裂缝宽度验算。

**6.1.3** 由于应变软化UHPC的裂缝控制能力要弱于应变硬化UHPC，但相对于普通混凝土仍比较可观。本条参照欧洲*fib* Model Code 2010中的规定，考虑裂缝处超高性能混凝土仍具有残余抗拉强度，给出了应变软化UHPC受弯构件正截面的最大裂缝宽度计算公式。

**6.1.4** 钢筋应力是计算裂缝宽度的关键，根据平截面假定、受压区超高性能混凝土的法向应力图取为三角形、只考虑中和轴至受拉纵筋重心区段内的超高性能混凝土受拉和采用换算截面等假定，本条给出了考虑超高性能混凝土受拉时受拉纵向钢筋应力的计算公式。其中裂缝截面力臂系数，随弯矩、配筋率及超高性能混凝土残余抗拉强度而变化，考虑到计算的复杂性，通过计算分析，对于一般配筋率0.5%~2.5%，钢筋应力在屈服强度30%~70%的水平，可采用公式（6.1.4-2）近似计算，当然本标准不排斥采用更精确的方法计算裂缝截面力臂系数。

**6.2 受弯构件挠度验算**

**6.2.1~6.2.2**钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土受弯构件的挠度限值与钢筋混凝土和预应力混凝土保持一致，仍然参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定。

**6.2.3** 本条给出的钢筋超高性能混凝土受弯构件的短期刚度*Bs*计算公式是根据刚度解析法，考虑中和轴至受拉纵筋重心区段内的超高性能混凝土受拉，如图1所示，由几何条件、材料本构关系以及平衡方程而建立的计算式，形式上与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010保持一致。



图1 正常使用阶段UHPC受弯构件裂缝正截面应变及应力分布简图

截面刚度与曲率的理论关系式为：

$\frac{1}{ρ}=\frac{M\_{q}}{B\_{s}}=\frac{ε\_{sm}+ε\_{cm}}{h\_{0}}$ （1）

式中：$ε\_{sm}$—纵向受拉钢筋的平均应变；

$ε\_{cm}$—截面受压区边缘超高性能混凝土的平均应变。

根据裂缝截面受拉钢筋和受压区边缘超高性能混凝土各自的应变和相应的平均应变，由平衡方程，可建立下列关系：

$ε\_{sm}=ψ\frac{M\_{q}-M\_{c}}{E\_{s}A\_{s}ηh\_{0}}$ （2）

$ε\_{cm}=\frac{M\_{q}+M\_{s}}{3E\_{c}b(1-η)ηh\_{0}^{2}}$ （3）

式中：$M\_{s}$—受拉区超高性能混凝土合力对受拉区纵向钢筋重心的力矩，按式（4）计算

$M\_{c}$—受拉区超高性能混凝土合力对受压区超高性能混凝土重心的力矩；按式（5）计算

$M\_{s}=(4.5η^{2}-6η+2)λf\_{tk}bh\_{0}^{2}$ （4）

$M\_{c}=-(1.5η^{2}-4η+2)λf\_{tk}bh\_{0}^{2}$ （5）

将上述平均应变带入式（1），即可得短期刚度的基本公式：

$B\_{s}=\frac{E\_{s}A\_{s}h\_{0}^{2}}{\frac{α\_{E}ρ}{1.5(1-η)η}⋅\frac{M\_{q}+M\_{s}}{M\_{q}}+\frac{ψ}{η}⋅\frac{M\_{q}-M\_{c}}{M\_{q}}}$ （6）

**6.2.4** 本条给出的预应力超高性能混凝土受弯构件的刚度*B*计算公式，参照了欧洲*fib* Model Code 2010中的规定。对于不出现裂缝构件的刚度，考虑超高性能混凝土材料特性统一取$0.95E\_{c}I\_{0}$，可使计算结果更接近实际值且较为稳妥。对于允许出现裂缝构件的刚度，采用有效惯性矩法计算，并考虑在荷载的长期作用下，材料平均应变增长导致刚度降低构件挠度增大的情况，采用系数*β*进行修正。

# **7 预制结构构件接缝设计**

**7.1 一般规定**

**7.1.1** 由于 UHPC 具有致密的微观结构，因而具有良好的耐久性。对比《法国UHPC结构设计规范NF P 18-710 2016》、《日本UFC 结构设计与施工指南JSCE 2006》、《瑞士UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》、《美国UHPC 华夫板设计指南 FHWA2013》、《澳大利亚Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000》和*fib* Model Code 2010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、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。

**7.1.2** 对比《法国 UHPC 结构设计规范NF P 18-710 2016》、《日本UFC 结构设计与施工指南JSCE 2006》、《瑞士UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》、《美国UHPC华夫板设计指南 FHWA 2013》、《澳大利亚Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000》和*fib* Model Code 2010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、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。

**7.1.3** 本条文在现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的基础上，考虑了钢纤维对钢筋与混凝土粘结强度的有利影响，即钢纤维可部分替代箍筋作用，适当降低了箍筋弯钩平直段的长度。

**7.2 最小配筋率及配箍率**

**7.2.1~7.2.2** 受弯构件的最小配筋率是根据超高性能混凝土受弯构件截面的抗弯承载能力应不小于截面开裂弯矩的1.2倍的原则确定的，由于应变硬化UHPC与应变软化UHPC的拉伸性能存在显著差异，因此对其最小配筋率分别作了规定。

**7.2.3** 对于超高性能混凝土受弯构件，最小配箍用量的确定受最大斜裂缝宽度影响，超高性能混凝土受弯构件最小配箍率与超高性能混凝土轴心弹性极限抗拉设计值、钢筋抗拉设计值、纤维掺量及类型相关。最小配箍率可由构件抗剪承载力等于超高性能混凝土受弯构件开裂剪力来确定，超高性能混凝土受弯构件开裂剪力为：

$V\_{cr}=f\_{te}bh\_{0}$ （1）

斜截面受剪承载力为：

$V\leq α\_{cv}f\_{te}bh\_{0}+0.3f\_{t}bh\_{0}+f\_{yv}\frac{A\_{sv}}{s}h\_{0}$ （2）

由$V=V\_{cr}$，得：

$f\_{te}bh\_{0}\leq α\_{cv}f\_{te}bh\_{0}+0.3f\_{t}bh\_{0}+f\_{yv}\frac{A\_{sv}}{s}h\_{0}$ （3）

对于一般受弯构件$α\_{cv}=0.7$，则有：

$f\_{yv}\frac{A\_{sv}}{s}h\_{0}\geq 0.3(f\_{te}-f\_{t})bh\_{0}$ （4）

则最小配箍率为：

$ρ\_{sv,min}=0.3\frac{f\_{te}-f\_{t}}{f\_{yv}}$ （5）

进一步分析可知，对应变硬化UHPC，其抗拉强度设计值$f\_{t}$大于弹性极限抗拉强度设计值$f\_{te}$，其钢纤维折算为箍筋的等效配箍率已满足最小配箍率的要求，可不配置箍筋。

但对于应变软化UHPC，有：

$f\_{t}=0.7f\_{te}$ （6）

所以应变软化UHPC受弯构件，其最小配箍率为

$ρ\_{sv,min}=0.1\frac{f\_{te}}{f\_{yv}}$ 或$0.13\frac{f\_{t}}{f\_{yv}}$ （7）

**7.2.4** UHPC 现浇湿接缝因为钢纤维不连续，抗裂强度被削弱，应通过增大截面、设置加强钢板等措施强化处理现浇接缝构造。

**7.3 钢筋的锚固**

**7.3.1** UHPC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。鉴于钢筋与UHPC的粘结性能优于钢筋与普通混凝土间的粘结性能，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UHPC 将显得过于保守。超高性能混凝土中纵向受拉钢筋的最小锚固长度可按式（8）或（9）确定。

普通钢筋：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$l\_{ab}=α\frac{f\_{y}}{f\_{t}}d$$ | （8） |

预应力筋：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$l\_{ab}=α\frac{f\_{py}}{f\_{t}}d$$ | （9） |

式中：*l*ab——受拉钢筋在UHPC 中的基本锚固长度；

*f*y、*f*py——普通钢筋和预应力筋的抗拉强度设计值；

*d*——锚固钢筋的直径；

*α*——锚固钢筋的外形系数，按表1 取值。

表1 锚固钢筋的外形系数取值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 钢筋类型 | 光圆钢筋 | 带肋钢筋 | 螺旋肋钢丝  | 三股钢绞线 | 七股钢绞线 |
| $$α$$ | 0.2 | 0.17 | 0.17 | 0.2 | 0.21 |

**7.3.2** 考虑钢纤维对钢筋与混凝土粘结强度的有利影响，可适当降低受拉钢筋末端的平直段长度，但由于缺乏相关试验数据，仍采用与钢筋混凝土保持一致。

# **8 预制构件制作与验收**

**8.1 一般规定**

**8.1.1**  预制构件的质量涉及工程质量和结构安全，制作单位应符合国家及地方有关部门规定的硬件设施、人员配置、质量管理体系和质量检测手段等规定。

**8.1.2** 预制构件制作前，建设单位应组织设计、生产、施工单位进行技术交底。如预制构件制作详图无法满足制作要求，应进行深化设计和施工验算，完善预制构件制作详图和施工装配详图，避免在构件加工和施工过程中，出现错、漏、碰、缺等问题。对应预留的孔洞及预埋部件，应在构件加工前进行认真核对，以免现场剔凿，造成损失。

**8.1.3~8.1.4** 超高性能混凝土预制构件与普通混凝土预制构件的制作与运输要求基本一致，应符合国家现行标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231和《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014的相关规定。

**8.2 预埋件要求**

**8.2.1** 此条为强制性条文。预制构件的连接技术是本规程关键技术。其中，钢筋套筒灌浆连接接头技术是本规程推荐采用的主要钢筋接头连接技术，也是保证各种装配整体式混凝土结构整体性的基础。必须制定质量控制措施，通过设计、产品选用、构件制作、施工验收等环节加强质量管理，确保其连接质量可靠。

**8.2.2**预制构件生产前，要求对预埋件进行检验，检验内容除了外观质量、尺寸偏差、出厂提供的材质报告、接头型式检验报告等，钢筋套筒还应按要求制作钢筋套筒灌浆连接接头试件进行验证性试验。钢筋套筒验证性试验可按随机抽样方法抽取工程使用的同牌号、同规格钢筋，并采用工程使用的灌浆料制作三个钢筋套筒灌浆连接接头试件，如采用半套筒连接方式则应制作成钢筋机械连接和套筒灌浆连接组合接头试件，标准养护28d后进行抗拉强度试验，试验合格后方可使用。

**8.2.3** 预制构件中的预埋件及预留孔洞的形状尺寸和中心定位偏差非常重要，生产时应按要求进行抽样检验。施工过程中临时使用的预埋件可适当放松。

**8.2.4** 新型预埋件产品应用应制订专项产品工艺操作规程和质量控制标准。

**8.2.5** 预埋件的加工精度在一定程度上影响构件后期安装的精度，因此预埋件加工的允许偏差应符合现行行业标准《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014中第11.2.4条规定。

**8.2.6** 由于预埋件、预留管线、预留孔洞等属于易受力集中和损坏的部位，因此在生产和运输过程中应对预制构件上的预埋件、预留筋、预留管线、预留孔洞等采取保护措施。

**8.3 构件制作及运输**

**8.3.1** 在混凝土浇筑前，应按要求对预制构件的钢筋、预应力筋以及各种预埋部件进行隐蔽工程检查，这是保证预制构件满足结构性能的关键质量控制环节。

**8.3.2** UHPC应采用强制式搅拌机搅拌，有利于钢纤维分散均匀。

**8.3.3** 振捣易使超高性能混凝土密实，但振动时间过长容易使混凝土产生离析分层。超高性能混凝土的振捣方式应该与混凝土的工作性结合起来，混凝土粘稠度较好，抗离析能力较强，可采用插入式振捣，平板振捣或模外振捣，当混凝土粘稠度较低，抗离析能力较差时，应经试验确定振捣方式。

**8.3.4** 预制构件在采用蒸汽养护时，养护过程中温度控制采用自动控制系统可保证养护质量，蒸汽养护应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387的规定。

**8.3.5** 超高性能混凝土预制构件因具有高强特征，其在运输和堆放过程中损坏的情况要远小于普通混凝土预制构件，参照现行行业标准《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014中相关要求，是偏于稳妥的。

# **9 外墙板基本规定**

**9.1 一般规定**

**9.1.1**  目前市场上的超高性能混凝土外墙板根据增强纤维种类和制作工艺的区别主要分为三类：1）钢纤维增强浇筑工艺制作；2）有机/无机纤维增强浇筑工艺制作；3）玻璃纤维增强和喷射工艺制作。超高性能混凝土外墙板在发展的过程中，借鉴了GRC外墙板的制作工艺，出现了玻璃纤维增强喷射成型的超高性能混凝土外墙板，但由于玻璃纤维存在耐碱性问题，通常会存在老化问题，因而此类超高性能混凝土外墙板与GRC外墙板一样，性能会随着使用年限的增加而衰减。这种超高性能混凝土外墙板不符合超高性能混凝土超长耐久的设计理念，因此并未包含在本标准的范围内。

**9.1.2** 《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107-2020中将超高性能混凝土分为结构类超高性能混凝土和非结构类超高性能混凝土，非结构类超高性能混凝土主要是指起装饰作用的超高性能混凝土外墙板、装饰制品等。对于非结构类超高性能混凝土的性能指标要求如下，该指标制定过程中经过了多家国内装饰类超高性能混凝土产品的性能测试，因此本标准规定超高性能混凝土装饰外墙板制备的原料应满足该标准中对于非结构类超高性能混凝土的相关要求。

表1 超高性能混凝土外墙板物理力学性能指标

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 指标要求 |
| 拌合物性能 | 扩展度/mm | ≥650 |
| 扩展度经时损失/mm | ≤100 |
| 扩展时间/s | 3~10 |
| 力学性能 | 抗压强度/MPa | ≥100 |
| 抗拉性能 | 不低于UT1级 |
| 弹性模量/GPa | ≥40 |
| 抗弯强度/MPa | ≥10 |
| 耐久性能 | 氯离子扩散系数/×10-12m2/s | ≤0.6 |
| 干燥收缩/×10-6 | ≤300 |
| 自收缩/×10-6 | ≤1000 |

**9.2 技术要求**

**9.2.1**  本条规定了超高性能混凝土外墙板的产品性能，外墙板产品物理性能参照《玻璃纤维增强水泥（GRC）外墙板》JC/T 1057主要包括抗弯比例极限强度、抗弯极限强度、抗冲击强度、体积密度、吸水率、抗冻性和收缩率，各项性能指标的测试方法参照《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》GB/T 15231。性能指标数据根据多家UHPC外墙板企业的产品测试结果调研，按70%左右的合格率进行确定。

**9.2.2~9.2.3** 超高性能混凝土外墙板的外观和尺寸偏差要求参考了《玻璃纤维增强水泥（GRC）外墙板》JC/T 1057的规定，考虑到超高性能混凝土外墙板成本较高，一般在标志性建筑或重大建筑工程中应用，所以对于外观和尺寸偏差的要求比GRC外墙板更为严格。

**9.3 性能参数**

**9.3.1~9.3.2**  给出了超高性能混凝土的性能参数确定方法或依据，便于后续对超高性能混凝土外墙板进行设计验算。

# **10 外墙板建筑设计**

**10.1 一般规定**

**10.1.1~10.1.3** 完成UHPC外墙的立面设计和建筑构造设计；UHPC生产施工单位主要完成UHPC外墙的具体深化设计工作。

UHPC外墙的空间形状、表面造型、质感、色彩、分格尺寸、建筑构造及接缝等是UHPC外墙建筑设计的主要内容。上述各要素的设计确定不仅要考虑满足建筑物的使用功能，与周围环境相协调，以及经济适用等基本要求，还应与当前的制造工艺水平相适应；为确保该设计方案实施的安全性和可靠性，其建筑设计还应满足本标准的相应技术要求。

**10.1.4** UHPC外墙板在长期使用过程中会岀现表面被污染及各种因素造成的破坏等，因此设计时应考虑到使用过程中的维护、清洁和必要时进行更换等。

**10.2 UHPC外墙性能设计**

**10.2.1~10.2.2** 采用UHPC外墙板的建筑外墙的性能要求与建筑物的类别、高度及体形有关。如建筑物的性质及重要性不同，对UHPC外墙的性能要求也不同；还有建筑物高度及体形的不同，对UHPC外墙的抗风压变形性能要求也会不同。另一方面，UHPC外墙性能要求还与建筑物所在地的地理、气候、环境等条件相关。如沿海或台风多发地区，UHPC外墙的抗风压变形性能和抗雨水渗漏性能要求会比较高；又如寒冷地区和炎热地区则要求UHPC外墙的保温隔热性能会更高一些。总体性能要求应满足现行国家标准《建筑幕墙》GB/T 21086的规定。

**10.3 UHPC外墙构造设计**

**10.3.1** UHPC外墙在安全、实用、绿色、美观的前提下，便于制作安装、维修保养和局部更换是其建筑构造设计的基本要求。

**10.3.2** UHPC外墙的立面分格缝优先考虑设置在建筑阴角、装饰造型阴角和滴水线及便于安装并不影响美观的部位。对于较小的窗洞尺寸，一般采用整板内预留窗洞的方法解决。对于较大尺寸的窗洞，往往按结构位移最小原则分缝。

**10.3.3** 在连接部位的摩擦面设置柔性垫片是为了避免UHPC外墙板在连接处产生摩擦噪声；对于销槽连接形式，亦可在销槽内采用弹性胶灌注处理。

**10.3.4**  UHPC外墙板的接缝应有一定宽度，以满足UHPC外墙板的正常变形和位移要求。通常情况下，UHPC外墙板的接缝宽度可参照下列公式计算：

对于拼接胶缝：

 $W\_{b} = \frac{A}{δ}+B + C$ (1)

对于开放式接缝：

Wb *= B + C* (2)

式中：Wb——接缝宽度（mm）；

A——UHPC外墙板在一年内因温湿度变化可能产生的位移量（mm）；

*δ*——密封胶的位移能力（%）；

*B* ——UHPC外墙板的制造误差，可取3mm；

C——考虑地震作用等其他因素影响的预留量（mm）， 取不小于2mm。

**10.4 UHPC外墙板构造与连接设计**

**10.4.1**  为了确保UHPC平板结构及锚固的安全可靠，同时还考虑到UHPC平板没有加强肋，易产生变形。为此，本标准参考石材的厚度要求，对UHPC平板的最小厚度做出了规定。

UHPC平板的锚固构造一般采用预埋套筒的方式，也可采用预埋或后锚固背栓的方式。

为保证锚固的稳定性，有效锚固深度不应小于板厚的1/2。参考《金属与石材幕墙工程技术规范》JGJ 133对于石材背栓干挂的规定，支承点之间的间距不宜小于50mm。

**10.4.3** 柔性连接一方面保证UHPC外墙板能将其受到的各种荷载可靠地传递到主体结构上，同时还能使UHPC外墙板自身相对于主体结构具有足够相对位移能力，以避免因主体结构变形而承受过大的变形或因UHPC外墙板自身变形而产生过大的应力。

# **11 外墙板结构设计**

**11.1 一般规定**

**11.1.1** UHPC外墙是建筑物的围护结构，只承受自身重力荷载和作用其上的风荷载、地震作用以及温湿度作用等，不分担主体结构承受的荷载和地震作用。为此，UHPC外墙板与主体结构间应具有一定的相对位移能力，以免当主体结构因外荷载作用产生变形时，使UHPC外墙板产生不能承受的内力和变形。UHPC外墙板面板厚度通常为10mm~20mm， 一旦出现开裂，极易产生贯穿性裂缝而影响结构的安全度和装饰效果，因此，UHPC外墙板在正常使用条件下还应有优良的抗裂性。对于抗震设计的UHPC外墙，在多遇地震作用下，UHPC外墙不允许破坏，应保持完好；在设防裂度地震作用下，UHPC外墙不应有严重破坏，一般允许局部破碎，经修理后可继续使用；在罕遇地震作用下，UHPC外墙必然破坏严重，面板破碎，但骨架不应脱落，倒塌。

**11.1.2** 在通常情况下，UHPC外墙板在弹性范围内工作，因此，其内力与变形应按弹性方法分析计算。但对于短期使用的UHPC外墙板，当进行承载力设计时，其应力可能在比例极限强度以上的塑性区段，此种情况下，UHPC外墙板的内力和变形根据具体受力情况，按其他非线性方法分析计算。

UHPC外墙结构设计应区分是否有抗震要求。对于非抗震设防地区，只需考虑风荷载、重力荷载以及温湿度作用；对于抗震设防地区，除考虑上述荷载和作用外，还应考虑地震作用。

**11.1.3** UHPC外墙板在生产和施工阶段如出现过载或产生过大变形，则无法通过安装验收和交付正常使用。因此，对UHPC外墙板在生产和施工阶段可能产生的荷载和作用进行分析计算是必要的。一般情况下，在生产阶段应分析计算UHPC外墙板的自重荷载和脱模吸附力作用；在施工阶段，应分析计算UHPC外墙板的自重荷载和吊装惯性力作用（或其他施工荷载）。

**11.1.4~11.1.6** UHPC外墙应根据实际受力情况分别计算自重荷载、风荷载、地震作用以及温湿度作用。承载力极限状态设计时，应考虑作用效应的基本组合。正常使用极限状态设计时，应考虑作用效应的标准组合，UHPC外墙板除与其他结构构件一样需进行挠度验算外，还应进行抗裂承载力验算。本标准公式（11.1.5-1）、公式（11.1.5-2）和公式（11.1.6-1）分别为承载力设计表达式和抗裂设计表达式的通用形式，作用效应设计值S、SE和Sr可以是内力，也可以是应力；抗力设计值R和Rr可以是承载力设计值，也可以是材料强度设计值。

**11.1.7~11.1.8** UHPC外墙板的预埋锚固连接或后锚固连接的安全等级及本标准公式（11.1.8-1）、公式（11.1.8-2）、公式（11.1.8-3）的规定依照国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011和《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145的有关规定确定。

**11.1.9** 由于UHPC优越的力学性能，UHPC外墙板的板形和构造形式可以做的相当复杂，结构设计计算工作量也会比常规的外墙板更大，采用有限元法进行计算也是一种选择。

**11.2 荷载与作用**

**11.2.1** UHPC外墙板用于建筑物的围护结构，作用其上的风荷载按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009关于围护结构风荷载计算公式的规定进行计算。

基本风压ω0是根据全国各气象台站历年的最大风速记录，将不同风速仪高度和时次时距的年最大风速统一换算为离地10m 高，l0min平均年最大风速数据，根据该风速数据统计分析确定重现期为50年的最大风速，作为当地的基本风速，再按以下贝 努利公式计算得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$ω\_{0} = \frac{1}{2}pv\_{0}^{2}$$ | （4） |

风荷载高度的变化由风压高度变化系数描述，其值应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009确定。

局部风压体形系数是考虑建筑物表面风压分布不均匀而导致 局部部位的风压超过全表面平均风压的实际情况作岀的调整，局部风压体形系数按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009确定。

计算围护结构风荷载时的阵风系数应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009确定。

**11.2.2** UHPC外墙板多用于造形独特，立面多变的个性化建筑，风荷载在这些复杂多变的墙面上的分布与一般墙面相比有较大差异，这种墙面的风荷载体形系数不能统一给定。因此，当主体结构通过风洞试验决定体形系数时，UHPC外墙风荷载计算通常采用该体形系数。

对于高度大于200m的UHPC外墙工程，当没有可靠参照依据时，宜采用风洞试验确定其风荷载取值。

**11.2.3** 常遇地震（大约50年一遇）作用下，UHPC外墙的地震作用采用简化的等效静力方法计算，地震影响系数最大值按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的规定确定。考虑到UHPC外墙板的长期使用性能，为使设防烈度下不产生破损伤人，考虑动力放大系数煌。按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的有关非结构构件的地震作用计算规定，UHPC 外墙结构的地震作用动力放大系数可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$β\_{E}=γηξ\_{1}ξ\_{2}$$ | （5） |

式中：γ——非结构构件功能系数，可取1.4；

η——非结构构件类别系数，可取0.9；

ξ1——体系或构件的状态系数，可取2.0；

ξ2——位置系数，可取2.0。

按照公式（5）计算，UHPC外墙结构地震作用动力放大系数βE约为5.0。

**11.2.4~11.2.5** UHPC外墙板与石材相比，尽管两者的线膨胀系数相近，但由于UHPC外墙板的干湿变形明显大于石材，且其幅面尺寸可能是石材的几倍甚至十几倍；再加上UHPC外墙板自身的构造也远较石材复杂，因而，仅仅像石材那样采用构造措施解决UHPC外墙板的温湿度效应是不够的。为此，本标准采用了国外相应设计方法，即将UHPC外墙板可能产生的温湿度效应进行估算，并纳入基本组合或标准组合。

由于UHPC外墙板的实际使用工况复杂，目前国际上尚未建立关于UHPC外墙板温湿度效应的经验计算公式。本标准表11.2.4和表11.2.5系根据《玻璃纤维增强水泥（GRC）应用技术标准》JGJ/T 423的制定。其中，表11.2.4和表11.2.5分别表示UHPC外墙板随环境变化产生的温度应力变化范围和干湿应力变化范围。

表11.2.4中温度梯度系指UHPC板与主体结构或支承结构间的温度梯度，温度梯度系指表示一定温度梯度条件下UHPC外墙板内产生的温度应力范围。当板的几何尺寸小，且连接节点位移阻力小时，一般取较小值；当板的几何尺寸大，且连接节点位移阻力大时，一般取较大值。

表11.2.5中，当设计使用年限为短期时，UHPC外墙板的干湿应力较大，其干湿应力宜取该表第二列中的相应数值范围；而在长期使用条件下，UHPC板经长期干湿交替作用后，其干湿应力已大幅度降低，因而，其干湿应力宜取该表第三列相应数值范围。对于干湿应力的取值，当板的几何尺寸小，连接节点位移阻力小时，取较小值；当板的几何尺寸大，连接节点位移阻力大 时，取较大值。

**11.3 作用效应组合**

**11.3.1~11.3.5** 在对UHPC外墙板进行承载力极限状态设计计算时，作用在UHPC外墙板上的自重荷载、风荷载、地震作用以及温湿度作用的组合值计算，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定进行计算。

UHPC外墙板广泛用于个性化的建筑，其安装倾角（即UHPC外墙板外表面与水平面间的夹角）可能是任意角度。为了满足不同安 装倾角UHPC外墙板的作用效应计算，本标准公式（11.3.1-1）和公 式（11.3.1-2）中的重力荷载和地震作用可分别采用垂直于UHPC 构件板面方向的相应分量来代替。则公式（11.3.1-1）和公式 （11.3.1-2）可合并为如下公式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{G}S\_{Gk}cosθ+ψ\_{W}γ\_{W}S\_{Wk}+ψ\_{E}γ\_{E}S\_{Ek}sinθ+ψ\_{TM}γ\_{TM}S\_{TMk}$$ | （6） |

式中*θ***——**UHPC外墙板安装倾角。

对于竖直安装的UHPC外墙板，*θ*=90°，公式（6）可简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=ψ\_{W}γ\_{W}S\_{Wk}+ψ\_{E}γ\_{E}S\_{Ek}sinθ+ψ\_{TM}γ\_{TM}S\_{TMk}$$ | （7） |

对于水平倒挂的UHPC外墙板**，***θ***=** 0°，公式（6）可简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=γ\_{G}S\_{Gk}+ψ\_{W}γ\_{W}S\_{Wk}+ψ\_{TM}γ\_{TM}S\_{TMk}$$ | （8） |

对于水平安装的UHPC外墙板，*θ*=180°，公式（6）可简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$S=-γ\_{G}S\_{Gk}+ψ\_{W}γ\_{W}S\_{Wk}+ψ\_{TM}γ\_{TM}S\_{TMk}$$ | （9） |

公式（9）仅仅是作用效应组合值计算的一般内力表达式，式中第一项中的负号仅表示重力荷载的方向与风荷载作用方向相反，此种情形下，自重荷载对结构是有利的。为安全起见，现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009规定，其自重荷载分项系数取1.0，不考虑负号的影响。

作用于UHPC外墙板上的风荷载、地震作用、温湿度作用，同时到达最大值的可能性极小。因此，在进行作用效应组合时，第一项可变作用效应按100%考虑（组合值系数取1.0），第二项和第三项可变作用效应应适当折减。为此，本标准根据我国现行行业标准《金属与石材幕墙工程技术规范》JGJ 133的规定，对本标准公式（11.3.1-1）和公式（11.3.1-2）中的第一、第二、第三可变荷载组合值系数分别规定为1.0，0.6和0.2。

UHPC外墙板的自重是经常作用的永久荷载，所有的基本组合情况中都包括此项。但在计算永久荷载作用效应时，其参与组合的可变荷载仅限于竖向荷载；UHPC外墙板的自重一般小于1.0kN/m2明显低于风荷载，因此通常情况下是风荷载作用效应起控制作用。在此种情况下，《建筑结构荷载规范》GB 50009规定: 永久荷载分项系数处，当对结构有利时取1.0 （该情形适用于水平安装的情况）；当对结构不利时取1.2（该情形适用于水平倒挂的情况）。极少出现永久荷载效应起控制作用的情形。当然，当此情形出现时，永久荷载分项系数γg取1.35。

对于水平安装的UHPC外墙板，通常情况下，UHPC外墙板自重荷载与风荷载的效应组合值应大于UHPC外墙板自重荷载与雪荷载效应的组合值，因此，本节没有考虑雪荷载（或施工荷载）参与组合的情况。但在极个别地区和特定条件下出现上述相反的情形时，则应考虑雪荷载效应参加基本组合。

**11.3.6** UHPC外墙板按正常使用极限状态进行抗裂验算。在正常使用情况下，UHPC外墙板主要承受重力荷载、风荷载和温湿度作用。根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定，上述荷载与作用效应组合值应按标准组合计算。

对于UHPC竖直外墙，由于风荷载与重力荷载相互垂直，因此，在验算UHPC外墙板的抗裂性时，仅需按风荷载和温湿度作用考虑对其抗裂性的影响。

对于倾斜安装的UHPC外墙，当风荷载方向向上时，因UHPC外墙板重力荷载沿垂直于板面方向分量的方向向下对结构是有利的；另一方面，我国现行建筑幕墙规范规定风荷载设计值不低于1.0kN/m2，而UHPC外墙板的自重一般均小于1.0kN/m2，因此，在此种情形下，为计算偏于安全起见，在计算UHPC外墙板的抗裂性时，不考虑重力荷载对结构的有利影响，其荷载设计值采用风荷载与温湿度作用的标准组合。反之，当风荷载方向向下时，则风荷载与UHPC外墙板重力荷载沿垂直于板面方向分量的方向相同，此种情形下，在计算UHPC外墙板的抗裂性时，其荷载设计值应采用自重荷载、风荷载以及温湿度作用的标准组合。

**11.3.7** 考虑到UHPC外墙板的温湿度作用效应对其挠度无明显影响，故对于UHPC外墙板及其支承结构的挠度计算，仅需考虑自重荷载和风荷载的影响即可。自重荷载与风荷载的作用效应按标准组合，其组合值计算与抗裂荷载组合值计算相同（但不考虑温湿度作用效应参与组合）。

**11.4 承载力极限状态设计**

**11.4.1**  根据现行国家标准《建筑结构设计可靠度设计统一标准》 GB 50068及本标准第11.1.5条的要求，UHPC外墙板承载力极限状态设计计算的应力表达式用下式描述：

$γ\_{0}σ\leq \frac{f\_{PMk}}{γ\_{m}}$ （11）

式中: σ——UHPC外墙板应力设计值（N/mm2）；

*f*PMk ——UHPC外墙板强度抗弯标准值（N/mm2）；

*γ*m——UHPC材料分项系数；

γ0——结构重要性系数。

**11.4.2** UHPC标准试件与UHPC矩形截面构件抗弯性能差异系数的取值参考了GRC外墙板的规定。

**11.4.3** 由于UHPC受温湿度作用产生的应力属于轴力，因此，UHPC外墙板的强度设计值采用抗拉强度*f*AUk作为UHPC材料强度的代表值。

**11.5 抗裂验算**

**11.5.1** UHPC外墙板的抗裂验算是正常使用极限状态设计的基本内容，重要性远大于挠度验算。其主要原因是UHPC外墙板的抗拉初裂强度较低，而另一方面，UHPC外墙板大多限制在弹性范围工作，其变形较小，一般不会超过本标准规定的挠度限值。

根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定，对于正常使用极限状态设计，UHPC外墙板受重力荷载，风荷载和温湿度作用按标准组合计算其应力设计值。

**11.5.2** 由于温湿度作用控制的标准组合以轴力为主，UHPC外墙板的强度代表值采用抗拉初裂强度*f*Bk。

**11.6 锚固承载力设计**

**11.6.1~10.6.5** UHPC外墙板承受的各种荷载通过自身与预埋件间的锚固连接传递到主体结构上，可见，UHPC外墙板与预埋件间的锚固承载力对UHPC结构的安全性来说是非常重要的。因此， UHPC外墙板的锚固承载力设计是UHPC结构设计的重要组成部分。

通常，UHPC外墙板在锚固处的主要内力形式为：锚固受拉、锚固受剪和锚固拉剪复合受力等几种形式。锚固承载力的设计计算也主要是围绕这几种内力形式进行。为了说明这个问题，以下仅以预埋套筒受拉、受剪出现的破坏形式加以说明。

预埋螺母（或后锚锚栓）受拉时主要出现锥体受拉破坏（图16a）和劈裂破坏（图16b）两种形式。其中，锥体受拉破坏承载力高，是希望的破坏形式；而劈裂破坏一般发生在后锚固锚栓预紧力较大或预埋螺母（或后锚锚栓）离构件边缘距离过小所致，其受拉承载力较低，在设计时应通过构造设计或结构计算避免发生这种破坏。

预埋螺母（或后锚锚栓）锚固受剪时会发生边缘楔形体受剪破坏（图16c）和剪撬破坏（图16d）。其中，边缘楔形体受剪破坏，承载力大，是正常的受剪破坏形式；而剪撬破坏一般发生在粗短锚栓埋设深度较浅的情形，其承载力较低，锚固受剪设计应避免这种破坏形式发生。通常，剪撬破坏形式可通过结构计算避免发生。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 锥体受拉破坏 | (b) 锚固劈裂破坏 |
|  |  |
| (c) 边缘楔形体受剪破坏 | (d) 剪撬破坏 |

图16 预埋螺母（或后锚锚栓）破坏形式示意

UHPC外墙板锚固承载力设计计算公式及锚固承载力分项系数，系根据UHPC外墙板可能发生的锚固破坏形式及构件的类型、所使用的条件等按现行标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145 的规定确定。

**11.6.7** UHPC外墙板的锚固承载力推荐通过实验方法确定，其锚固承载力标准值根据样品试验实测得到的承载力数据，按美国PCI编制的《GFRC板推荐性规范》规定的数理统计方法计算确定，但其概率分布的分位值为0.05.tα(n-1)为根据置信度1-α和样本容量n按学生氏函数确定的统计值。

**11.6.8** 对于缺乏锚固承载力实验数据的UHPC外墙板的锚固承载力采用实验实测方法确定比较困难，通常采用现行行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145规定的相关公式计算确定。

**11.7 平板面板结构设计**

**11.7.1** UHPC外墙板在弹性范围工作，其挠度值一般小于板厚，因此本标准公式（11.7.1）完全满足四点支承UHPC矩形平板的应力计算。

**11.7.2** UHPC平板的板幅尺寸一般较小，通过采用柔性连接的构造设计后，产生的温湿度应力较小，其值参照本标准表11.2.4和表11.2.5取较小值。

**11.7.3、11.7.4**为了保证UHPC平板的结构安全及其正常使用，须对其进行承载力验算、抗裂验算和挠度验算。由于UHPC平板的安装倾角可能会大于或小于90°。因此，在进行荷载组合时，重力荷载标准值采用其沿垂直于板面方向的分量代替。

为了便于设计操作，UHPC平板的承载力验算和抗裂验算一般按下面内容进行：

1承载力验算：

1）对各种荷载和作用计算的截面应力标准值按本标准第11.3.1条~第11.3.5条的规定进行组合，并计算其应力设计值；

2）对于风荷载控制的基本组合，其应力设计值按本标准第11.4.1条验算；

3）对于温湿度效应控制的基本组合，其应力设计值按本标准第11.4.3条验算。

2抗裂验算：

1）对各种荷载和作用计算的截面应力标准值按本标准第11.3.6条的规定进行组合，并计算其应力设计值；

2）对于风荷载控制的标准组合，其应力设计值按本标准第11.5.1条验算；

3）对于温湿度效应控制的标准组合，其应力设计值按本标准第11.5.2条验算。

**11.8 背负钢架板结构设计**

**11.8.1~11.8.2** UHPC面板采用纵横相互平行排列的柔性锚杆的支承约束可简化为点支承形式。这种点支承UHPC板的结构计算采用直接设计法。其计算原理如下：

点支承UHPC面板内任一板区格的计算简图如本标准图11.8.1所示，板区格内的总弯矩M0按简支条件下长跨计算，如下式：

$M\_{0} =\frac{q\_{k}l\_{x}l\_{n}^{2}}{8}$ (21)

板区格沿长跨方向假想为支承板带和跨中板带，支承板带和 跨中板带各占板区格短跨长度的1/2 (图17)。板区格的内力分布如图18，其内力分配如下：



图17支承带与跨中带在板区格内的分布示意负弯矩 Ms= 0.65M0；正弯矩 Mf=0.35M0；

支承带负弯矩Mas= 0.75Ms= 0.4875M0；支承带正弯矩MAf=0.6Mf=0.21M0；跨中带负弯矩MBS=0.25MS= 0.1625M0；跨中带正弯矩MBf=0.4Mf=0.14M0。



图18板区格内的内力分布示意

在垂直于板面方向的重力荷载或风荷载或地震作用下板区格 截面产生的最大应力标准值按下式计算：

$σ\_{k}=\frac{M\_{As}}{W}=\frac{0.4875M\_{0}}{\frac{1}{6}\left(\frac{1}{2}l\_{x}\right)h^{2}}=0.7312\frac{q\_{k}l\_{n}^{2}}{h^{2}}$ (22)

式中：$σ\_{k}$——面板在重力荷载或风荷载或地震作用下产生的截面应力标准值（N/mm2），即$σ\_{k}$分别代表$σ\_{Gk}$或$σ\_{wk}$ 或$σ\_{Ek}$；

*qk*——重力荷载或风荷载或地震作用标准值（N/mm2），

即*qk*分别代表*qGk*或叫或*qEk*；

*ln*——板区格长边净跨（mm）；

*h*——板区格面板厚度（mm）。

**11.8.3** 对于板幅尺寸不大于6m的UHPC背附钢架板，当柔性锚杆的构造尺寸符合本标准推荐的构造尺寸条件下，其UHPC面板的温湿度应力一般小于0.3N/mm2，可忽略不计。但对于板幅尺寸大于6m的UHPC背附钢架板，其UHPC面板所产生的温湿度应力根据其面板所受柔性锚杆约束的实际工况或按本标准第11.2.4条和第11.2.5条的规定确定。

**11.8.4**  UHPC面板通过柔性锚杆支承在背附钢架上，其挠度由背附钢架控制。因此，UHPC面板仅需要进行承载力和抗裂验算。

对于板幅尺寸不大于6m且柔性锚杆构造尺寸基本合理的UHPC背附钢架板，因温湿度效应可忽略不计，其荷载与作用仅需考虑重力荷载、风荷载和地震作用。

对于板幅尺寸大于6m的UHPC背附钢架板除应考虑自重荷载、风荷载和地震作用外，还需按本标准第11.8.3条的规定合理估算UHPC面板的温湿度作用效应。在一般情况下，上述荷载的基本组合或标准组合，均由风荷载控制。但当板幅尺寸过大时，可能会出现由温湿度作用控制的基本组合或标准组合。由于这种工况会明显降低UHPC面板承受外荷载的能力，因此，尽量避免出现这种由温湿度作用控制的荷载组合工况。为了便于设计操作，UHPC面板的承载力验算和抗裂验算一般按下面内容进行：

1承载力验算：

1）对各种荷载和作用产生的截面应力标准值按本标准第11.3.1条~第11.3.5条的规定进行组合，并分别计算UHPC面板的应力设计值；

 2）对于风荷载控制的基本组合，UHPC面板的应力设计值按本标准第11.4.1条验算；

 3）对于温湿度效应控制的基本组合，UHPC面板的应力设计值按本标准第11.4.3条验算。

2 抗裂验算：

1）对各种荷载和作用产生的截面应力标准值按本标准第 11.3.6条的规定进行组合，并计算UHPC面板的应力设计值；

2）对于风荷载控制的标准组合，UHPC面板的应力设计值按本标准第11.5.1条验算；

3）对于温湿度效应控制的标准组合，UHPC面板的应力设计值按本标准第11.5.2条验算。

**11.8.5** 背附钢架一般由竖横两个方向的龙骨相互交叉焊接而成，除了承受弯矩和剪力外，横龙骨一般不承受轴力，竖龙骨视支承情况不同，还可能承受轴拉力或轴压力。

一般情况下，UHPC面板通过柔性锚杆和重力锚杆与竖向龙骨连接，竖向龙骨主要承受垂直于UHPC面板平面的风荷载，地震荷载以及平行于UHPC面板平面内自重荷载和温湿度作用。

竖向龙骨承受的上述荷载再传递到与之相连的横向龙骨上，在这种情况下应对横向龙骨进行抗弯承载力和抗剪承载力计算。对于上下横向龙骨间除两端外没有竖向龙骨连接且UHPC面板直接偏置于横向龙骨上的情形出现时，可能对横向龙骨产生过大的扭矩。此种情形下，应对横龙骨进行抗扭承载力计算。

# **12 外墙板制作与安装**

**12.2 外墙板制作**

**12.2.3** UHPC外墙板制作所用的模具可以是木模、玻璃钢模、钢模、硅胶模、水泥模、石膏模或复合模等，刚度和尺寸精度要求是为了确保UHPC外墙板产品不出现变形和尺寸偏差。

**12.2.4** UHPC外墙板生产厂家通常采购UHPC预混料后进行生产。由于超高性能混凝土用水量少，粘度大，还要保证纤维均匀分散，因此一般建议采用强制式搅拌机生产。

**12.2.5** 生产UHPC外墙板的混凝土拌合物应具有自密实或自流平特性，超高性能混凝土粘度较大，如果不是自流平，靠手动成型很难振实，也很容易引入缺陷。超高性能混凝土应通过配方改进减少气泡引入或加速气泡排出，从而提高外墙板的浇筑质量。

**12.2.6** UHPC外墙板成型过程中不应进行插捣，以防出现纤维的不均匀分布和引入缺陷。

**12.2.7** UHPC外墙板浇筑完成后必须及时覆盖塑料薄膜，超高性能混凝土拌合物失水后很容易起皮，影响结构的致密性，还容易引起收缩裂缝。

**12.2.8** UHPC材料脱模强度一般为产品设计强度值的40%，局部应力过于集中会导致UHPC局部出现破损或开裂。

**12.5 安装质量要求**

**12.5.1**安装施工放线与主体结构的测量配合，及时调整误差,确保UHPC外墙板安装所需要的精度，以及连接所要求的极限调整空间。

**12.5.2** UHPC外墙板本身或外墙板之间岀现色差，通常以6m距离观察是否影响整体效果作为评判依据。

 1 12.5.3 UHPC外墙板立面垂直度的偏差，指整个UHPC外墙板立面高度范围内任取3m高度立面偏差不大于5mm，任取15m高度立面偏差不大于10mm，对于高层建筑任取30m高度立面偏差不大于20mm。

# **13 外墙板检验与验收**

**13.1 检验**

**13.1.2** 严重缺陷是指严重影响产品结构或安装使用功能的缺陷。

**13.1.4** UHPC外墙板性能检测项目检测应符合下列规定：

 **1** 外观质量和尺寸偏差应按本标准表4.4.1-1~4.4.1-3和表4.4.2的要求进行检测；

 **2** 抗压强度、抗拉强度、体积密度、抗弯强度、抗弯比例极限强度和冻融循环100次极限弯曲强度应按现行国家标准《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》GB/T15231规定的方法进行检测；

 **3** 弹性模量应按现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T50081规定的方法进行检测；

 **4** 氯离子扩散系数、二氧化碳碳化深度应按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082规定的方法进行检测；

 **5** 吸水率、干燥收缩、抗冲击强度、不透水性、饱水状态抗折强度应按现行国家标准《纤维水泥制品试验方法》GBT 7019规定的方法进行检测

 **6**导热系数应按现行行业标准《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》GB10294规定的方法进行检测；

**7** 燃烧性能应按现行国家标准《建筑材料及制品燃烧性能分级》GB8624规定的方法进行检测；

**8**放射性应按现行国家标准《建筑材料放射性核素限量》GB6566规定的方法进行检测；

  **9**湿度变形、耐热水、耐干湿性能应按现行行业标准《外墙用非承重纤维增强水泥板》JG/T396规定的方法进行检测；

 **10** 泊松比应按现行行业标准《建筑幕墙用陶板》JG/T324规定的方法进行检测；

 **11** 线膨胀系数应按现行行业标准《水工混凝土试验规程》DL/T5150规定的方法进行检测；

 **12** 抗拉拔试验应按现行行业标准《建筑装饰用石材蜂窝复合板》JG/T328规定的方法进行检测。

 **13** 抗冻性试验应按现行行业标准《外墙用非承重纤维增强水泥板》JG/T396规定的方法进行检测；

**14** 应按现行国家标准《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》GB/T15231规定的方法进行冻融循环10次极限弯曲强度检测。

**13.1.5** 色差无法用量化的标准进行控制。一般而言，UHPC产品的属性决定了色差很难避免，色差可以通过规范材料与工艺得到有效控制，轻微色差能反映出UHPC材料的自然艺术表现力，但过大色差难以被建筑师或业主接受，这种带有主观的评判标准容易产生分歧，应本着协商的原则进行妥善处理。在工程实践中，色差过大不能被建筑师或业主接受时，通常在各方协商一致的前提下，通过必要的表面处理来改善色彩。