 CECS XX：XX

中国工程建设标准化协会标准

**应变硬化水泥基复合材料结构  
技术规程**

**Technical specification for strain-hardening cementitious composites structures**

（征求意见稿）

2021 北 京

**目 次**

[1 总 则 1](#_Toc85121657)

[2 术语、符号 3](#_Toc85121658)

[**2.1** 术语 3](#_Toc85121659)

[**2.2** 符号 4](#_Toc85121660)

[3 基本规定 7](#_Toc85121661)

[**3.1** 一般规定 7](#_Toc85121662)

[4 材 料 10](#_Toc85121663)

[**4.1** 原材料 10](#_Toc85121664)

[**4.2** 性能等级 12](#_Toc85121665)

[5 建筑结构设计 19](#_Toc85121666)

[**5.1** 一般规定 19](#_Toc85121667)

[**5.2** 承载能力极限状态 19](#_Toc85121668)

[**5.3** 正常使用极限状态 25](#_Toc85121669)

[**5.4** 框架梁柱节点抗震设计 26](#_Toc85121670)

[**5.5** 剪力墙洞口连梁抗震设计 29](#_Toc85121671)

[6 桥梁与道路工程设计 33](#_Toc85121672)

[**6.1** 一般规定 33](#_Toc85121673)

[**6.2** 持久状况承载能力极限状态计算 35](#_Toc85121674)

[**6.3** 持久状况正常使用极限状态计算 37](#_Toc85121675)

[**6.4** 构造规定 37](#_Toc85121676)

[7 结构加固与修复设计 40](#_Toc85121677)

[**7.1** 一般规定 40](#_Toc85121678)

[**7.2** 梁的加固 41](#_Toc85121679)

[**7.3** 柱的受压加固 43](#_Toc85121680)

[**7.4** 节点加固 44](#_Toc85121681)

[**7.5** 楼板加固 45](#_Toc85121682)

[**7.6** 砌体加固 46](#_Toc85121683)

[**7.7** 裂缝修补 48](#_Toc85121684)

[**7.8** 喷射ECC 49](#_Toc85121685)

[8 制备与施工 50](#_Toc85121686)

[**8.1** 一般规定 50](#_Toc85121687)

[**8.2** 原材料贮存与计量 50](#_Toc85121688)

[**8.3** 制备与运输 52](#_Toc85121689)

[**8.4** 浇筑 54](#_Toc85121690)

[**8.5** 加固施工 56](#_Toc85121691)

[**8.6** 养护 59](#_Toc85121692)

[9 检测与验收 61](#_Toc85121693)

[**9.1** 检测评定 61](#_Toc85121694)

[**9.2** 质量验收 62](#_Toc85121695)

[10 材性测试 64](#_Toc85121696)

[**10.1** 试件尺寸 64](#_Toc85121697)

[**10.2** 浇筑与养护 64](#_Toc85121698)

[**10.3** 仪器设备 65](#_Toc85121699)

[**10.4** 立方体抗压强度 66](#_Toc85121700)

[**10.5** 轴心抗压强度 67](#_Toc85121701)

[**10.6** 弹性模量 67](#_Toc85121702)

[**10.7** 抗折强度 68](#_Toc85121703)

[**10.8** 受拉特性 70](#_Toc85121704)

[本规程用词说明 72](#_Toc85121705)

[引用标准名录 73](#_Toc85121706)

[附录A ECC加固钢筋混凝土梁承载力计算方法 75](#_Toc85121707)

[附录B ECC加固钢筋混凝土柱承载力计算方法 84](#_Toc85121708)

[附录C ECC加固混凝土梁柱节点和楼板承载力计算方法 86](#_Toc85121709)

[**C.1** ECC加固混凝土梁柱节点承载力计算方法 86](#_Toc85121710)

[**C.2** ECC加固钢筋混凝土楼板承载力计算方法 87](#_Toc85121711)

[附录D ECC加固砌体承载力计算方法 97](#_Toc85121712)

**CONTENTS**

[Chapter 1 General Provisions 1](#_Toc340602522)

Chapter 2 Terms and Symbols 3

**2.1** Terms 3

**2.2** Symbols 4

Chapter 3 General Requirements  [7](#_Toc340602526)

**3.1** General 7

Chapter 4 Materials 10

**4.1** Raw materials 10

**4.2** Performance grade 12

Chapter 5 Building structures 19

**5.1** General 19

**5.2** Ultimate limit states 20

**5.3** Serviceability limit states 25

**5.4** Seismic design of beam-column joints 26

**5.5** Seismic design of coupling beams of shear walls 29

Chapter 6 Bridge and road engineering 33

**6.1** General 33

**6.2** Calculation of ultimate limit states under persistent situations 35

**6.3** Calculation of serviceability limit states under persistent situations 37

**6.4** Detailing requirements 38

Chapter 7 Structural strengthening and repair 40

**7.1** General 40

**7.2** Beam Strengthening 41

**7.3** Column strengthening 43

**7.4** Strengthening of beam-column joints 45

**7.5** Slab strengthening 45

**7.6** Mansory strengthening 46

**7.7** Reparing of cracks 48

**7.8** Shotcreting 49

Chapter 8 Preparation and construction 50

**8.1** General 50

**8.2** Storage and metering of raw meterials 50

**8.3** Production and transportation 52

**8.4** Casting 54

**8.5** Strengthening construction 56

**8.6** Curing 59

Chapter 9 Inspection and acceptance 61

**9.1** Inspection and assessment 61

**9.2** Quality acceptance 62

Chapter 10 Test methods of mechanical properties 64

**10.1** Specimen size 64

**10.2** Preparation and curing of specimens 64

**10.3** Instrument equipment 65

**10.4** Cubic compressive strength 66

**10.5** Axial compressive strength 67

**10.6** Elastic modulus 67

**10.7** Flexural tensile strength 68

**10.8** Tensile properties 70

Explanation of Wording in This Standard 72

List of Quoted Standards 73

Appendix A Calculation method of bearing capacity of reinforced concrete beams strengthened

by ECC 75

Appendix B Calculation method of bearing capacity of reinforced concrete coulumns strengthened

by ECC 84

Appendix C Calculation method of bearing capacity of reinforced concrete beam-column joints

and slabs strengthened by ECC 86

**C.1** Reinforced concrete beam-column joints strengthened by ECC 86

**C.2** Reinforced concrete slabs strengthened byECC 87

Appendix D Calculation method of bearing capacity of masonry structures strengthened by

ECC 97

总 则

1. 为指导应变硬化水泥基复合材料在建筑、桥梁、公路、隧道等工程建设及其加固修补工程设计和施工中的应用，促进技术进步、保障工程质量，按照安全、适用、经济、美观、耐久、环保的原则，制定本规程。

条文说明

近20多年来，以超高韧性纤维增强水泥基复合材料（Engineered Cementitious Composites，简称ECC）为主要代表的应变硬化水泥基复合材料得到了较为广泛的研究和应用。相比于普通混凝土，应变硬化水泥基复合材料具有极高的受拉延性和极小的裂缝宽度，在受拉开裂之后具有明显的应变硬化过程，最终极限拉应变可达到3%以上；并且在此过程中也产生了良好的裂缝控制能力，在极限拉应变处裂缝平均宽度不超过150μm。上述特性能够显著提升传统混凝土结构的延性和韧性，改善结构的抗裂、抗震和耐久性能。

目前国内尚没有针对应变硬化水泥基复合材料和结构设计与施工方面系统的规范/规程，不能满足当前应变硬化水泥基复合材料结构快速发展的需要。

本规程编写时吸取了应变硬化水泥基复合材料和结构设计和施工中的最新研究成果和实际工程经验，参考和借鉴了国外先进的标准规范，并广泛征求了设计、施工、建设、管理等部门的意见，旨在为应变硬化水泥基复合材料在建筑、桥梁、公路、隧道等工程建设及其加固修补工程的设计和施工中的应用提供指导性和参考性的技术规定。

1. 本规程适用于采用应变硬化水泥基复合材料的新建建筑结构、桥梁隧道结构和公路工程，以及既有结构加固修补工程的设计、施工与验收。

条文说明

应变硬化水泥基复合材料在新建和既有结构中均有较为广泛的应用实例和推广前景，本规范主要总结了目前研究和应用比较成熟的场景，给出了相应的技术规定，具体包括：建筑结构构件设计与施工（包括梁、板、柱、梁柱节点和剪力墙中的连梁）、既有建筑结构加固与裂缝修补（包括梁、板、柱、梁柱节点和砌体）、钢-混凝土组合梁负弯矩区、伸缩缝填料、新建及加固桥面铺装、路面修补、隧道衬砌喷射修补等。

除此之外，实际上ECC还有更为广阔的应用场景和发展空间。本规程在配筋ECC构件正截面和斜截面承载力计算、ECC材料力学性能等基本理论以及ECC制备与施工等方面的规定，对于其他类型ECC结构的设计和施工也具有一定的参考价值。

1. 应变硬化水泥基复合材料结构设计、施工与验收除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

条文说明

限于篇幅，本规程仅就应变硬化水泥基复合材料结构设计、施工与验收中，能够充分体现应变硬化水泥基复合材料特点及其与普通混凝土材料区别的关键技术，给出相关规定。实际上，作为一种水泥基材料，其在材料和结构层面，还必须遵守相关的国家现行有关标准，本规程不再赘述。

术语、符号

* 1. 术语

**2.1.1 应变硬化水泥基复合材料 strain-hardening cementitious composites**

具有受拉应变硬化特征的水泥基复合材料。

**2.1.2 超高韧性纤维增强水泥基复合材料 engineered cementitious composites**

一种基于细观力学设计的纤维增强水泥基复合材料，是一种典型的应变硬化水泥基复合材料，具有高抗拉延性、应变硬化和多点开裂特征。本规程所指应变硬化水泥基复合材料均为超高韧性纤维增强水泥基复合材料，简称ECC。

**2.1.3抗拉开裂强度tensile cracking strength**

轴拉应力-应变曲线上初始线性段末端对应的应力值。

**2.1.4抗拉开裂应变tensile cracking strain**

轴拉应力-应变曲线上初始线性段末端对应的应力值。

**2.1.5 应变硬化 strain-hardening**

当拉应力超过抗拉开裂强度后，拉应力随应变增大仍不断增大的现象。

**2.1.6 抗拉强度tensile strength**

轴拉应力-应变曲线上的应力峰值。

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

轴拉应力-应变曲线上应力峰值所对应的拉应变。

**2.1.8 预混料 premix**

由水泥、矿物掺和料和/或骨料按级配要求而配制的干粉料。

条文说明

超高韧性纤维增强水泥基复合材料，英文名称为Engineered Cementitious Composites（简称ECC），指基于细观力学理论，通过对基体、纤维及两者界面的精细化设计，得到的具有单轴拉伸条件下应变硬化特征的一种水泥基复合材料。ECC的应变硬化性能是通过多缝开裂实现的，其极限拉应变可达5%以上，且极限拉应变对应的最大裂缝宽度不大于0.15 mm，在具有较高的抗拉延性同时还能够保持较小的裂缝宽度。因而ECC的抗冻、抗水渗透、抗氯离子渗透、早期抗裂、抗碳化、抗硫酸盐侵蚀等耐久性指标也均明显优于普通混凝土。

实际上，除了ECC之外，超高性能混凝土（UHPC）等其他水泥基复合材料也可以实现应变硬化，但其极限拉应变通常小于1%，且裂缝宽度更大。因此本规程中的应变硬化水泥基复合材料专指超高韧性纤维增强水泥基复合材料（ECC），相关规定不适用于其他类型的应变硬化水泥基复合材料。

关于抗拉开裂强度、抗拉开裂应变、应变硬化、抗拉强度、极限拉应变的术语定义，均基于以下材料单轴拉伸应力-应变曲线。一般来说，水泥基材料单轴拉伸存在应变硬化和应变软化两种现象。对于普通混凝土材料，当拉应力超过抗拉开裂强度后，拉应力随应变增大迅速下降，呈现应变软化的现象。对于ECC，由于对基体、纤维及两者界面的精细化设计，当拉应力超过抗拉开裂强度后，拉应力随应变增大仍可不断增大，呈现多点开裂和应变硬化的现象，同时也带来了较高的抗拉延性。



图1 水泥基材料典型单轴拉伸应力-应变曲线

* 1. 符号
     1. **材料性能**

*E*s—钢筋的弹性模量；

*E*c—ECC的弹性模量；

*E*c0—混凝土的弹性模量；

*G*c—ECC的剪切变形模量；

*c*—ECC的比热容；

*f*c—ECC轴心抗压强度设计值；

*f*c0—混凝土轴心受压抗压强度设计值；

*f*ck—ECC轴心抗压强度的标准值；

*f*cu.k—ECC立方体抗压强度标准值；

*f*t—ECC轴心抗拉强度设计值；

*f*tk—ECC轴心抗拉强度标准值;

*f*tc—ECC轴心抗拉开裂强度设计值；

*f*tc,k—ECC轴心抗拉开裂强度标准值;

*f*tk0—混凝土轴心抗拉强度标准值；

*f*y—普通钢筋抗拉强度设计值；

*f*’y—普通钢筋抗压强度设计值；

**c—ECC的线膨胀系数；

**tc—ECC抗拉开裂应变；

**tu—ECC极限拉应变；

*λ*—ECC的导热系数；

* + 1. **作用与作用效应**

*M*—弯矩设计值；

*N*—轴向力设计值；

*V*es—采用ECC加固后提高的受剪承载力；

**cu—非均匀受压时ECC的极限压应变；

**s—钢筋的拉应力，屈服前*σ*s = *E*s *ε*s，屈服后*σ*s = *f*y，*ε*s为钢筋的拉应变；

* + 1. **几何参数**

*A*—构件的截面面积；

*A*s—受拉区纵向普通钢筋的截面面积；

*A*’s—受压区纵向普通钢筋的截面面积；

*A*svj—核心区有效验算宽度范围内同一截面验算方向箍筋各肢的全部截面面积；

*A*t—试件变形测量区的初始横截面积；

*L*tg—微变形测量仪的测量标距；

*a*’s—受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

*b*—截面的宽度；

*h*—截面的高度；

*h*0—截面有效高度；

*s*—沿构件长度方向的箍筋间距；

* + 1. **计算系数及其他**

*x*b—界限受压区高度；

**—应力等效系数；

**—等效受压区高度系数；

**RE—承载力抗震调整系数；

**—纵向受拉钢筋配筋率，对钢筋水泥基材料受弯构件，取为*A*s/*bh*0；

**te—纵筋有效配筋率；

**b—相对界限受压区高度。

基本规定

* 1. 一般规定
     1. ECC应具有拉应力超过抗拉开裂强度后拉应力仍随应变增加不断增大的力学特征。
     2. ECC结构包括配筋和不配筋两种形式，用于结构受力时宜采用配筋ECC。
     3. ECC结构应采用以概率理论为基础的极限状态设计法，用分项系数设计表达式进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算。
     4. ECC结构应进行下列两类极限状态设计：

1. 承载能力极限状态：对应于结构及其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态，包括构件和连接的强度破坏、疲劳破坏，结构、构件丧失稳定及结构倾覆、滑移。
2. 正常使用极限状态：对应于结构及其构件达到正常使用或耐久性的某项限值的状态，包括影响结构、构件正常使用的变形、开裂及影响结构耐久性的局部损坏。
   * 1. ECC在建筑结构中的具体应用场景可包括建筑结构构件设计与施工（包括梁、板、柱、梁柱节点和剪力墙中的连梁）、既有建筑结构加固与裂缝修补（包括梁、板、柱、梁柱节点和砌体）。

条文说明

ECC在抗拉、抗压延性，裂缝宽度控制，耐久性等方面的优点，使其在建筑结构构件中具有良好的应用前景，例如应用于梁、板、柱、节点和剪力墙连梁等基本构件时，在提升其抗震、抗裂能力，简化配筋构造等方面具有明显的优势，同时也非常适合进行加固和裂缝修补。

* + 1. ECC在桥梁隧道结构和公路工程中的具体应用场景可包括钢-混凝土组合梁负弯矩区、桥梁及路面伸缩缝填料、新建及加固桥面铺装、路面修补、隧道衬砌喷射修补等。

条文说明

ECC在抗拉、抗压延性，裂缝宽度控制，耐久性等方面的优点，使其在桥梁隧道结构和公路工程中也具有良好的应用前景，例如应用于钢-混凝土组合梁负弯矩区、桥梁及路面伸缩缝填料、桥面铺装等时，在提升其抗裂能力和耐久性，简化配筋构造等方面具有明显的优势，同时也非常适合进行桥面铺装、路面和隧道衬砌等基础设施的结构加固和裂缝修补。

* + 1. ECC结构的设计与施工应遵循以下原则：

1. 材料结构一体化设计。应在充分发挥材料性能优势的基础上，根据结构具体性能需求，确定合理的材料性能指标和应用区域，特别是确定合理的ECC抗拉强度和极限拉应变。
2. ECC与普通混凝土、钢材之间的界面需保证可靠有效的传力。
3. ECC的制备与浇筑过程应采取措施保证纤维分散的均匀性。

条文说明

本条结合ECC材料特点，规定了ECC结构设计与施工应遵循的基本原则。

第1款是新材料结构设计中应该重点考虑的原则。ECC材料作为一种可设计的材料，其抗拉强度、极限拉应变等关键力学指标都是可以依据细观力学原理，通过原材料选取、配合比调整等方法实现定制化设计的。而结构中不同的构件类型、荷载和环境条件，都会对材料产生不同的性能需求。因此应当具体问题具体分析，对不同的工程提出不同的材料性能指标要求，以做到物尽其用。同时考虑到ECC材料相比于普通混凝土更高的成本，应当在其具体的结构应用区域范围上做出尽量优化的选择，以实现“好钢用在刀刃上”，从而降低综合成本。

第2款是为保证ECC材料能够充分发挥作用。由于实际工程应用中，往往是局部应用ECC，因而存在ECC与普通混凝土，ECC与钢材等的界面，设计和施工中必须考虑到界面这一可能的薄弱环节，对其进行必要的构造加强和受力验算。

第3款是考虑到ECC作为一种纤维增强材料，其优越力学性能的关键在于纤维桥接作用的有效发挥。纤维分布的均匀程度、纤维方向的随机性等都对其力学性能有不可忽略的影响，因此在制备与浇筑过程中应特别关注并采取必要的措施保证纤维分散的均匀性。

材 料

* 1. 原材料
     1. 配制ECC的水泥应符合现行相应标准的性能指标要求。

条文说明

配制ECC所用的水泥品种不做特殊规定，一般适用于结构混凝土的水泥均可用于配制ECC，其性能指标应符合现行相应标准的要求。

* + 1. 配制ECC的矿物掺合料应符合现行相应标准的性能指标要求。

条文说明

配制ECC宜掺加矿物掺合料，其性能指标应符合现行相应标准的要求。国内外研究结果表明，矿物掺合料在优化纤维-基材界面、调整浆体流变性、降低水泥水化热等方面的作用明显，其具体掺量可根据ECC的设计要求进行调整。

* + 1. 配制ECC的骨料应符合现行相应标准的性能指标要求，宜为中砂、细砂或特细砂，并且骨料最大粒径不宜大于5.0 mm。

条文说明

配制ECC不宜采用粗骨料，所采用的细骨料宜为中砂、细砂或特细砂。根据大量试验研究结果，骨料粒径偏大时不利于纤维桥接作用的发挥，ECC的应变硬化性能将受到削弱。当采用公称粒径大于5.0 mm的骨料时，应通过试验确认所制备的ECC拉伸应变硬化性能满足本规程要求。

* + 1. 纤维宜选用短切高强度高模量聚乙烯醇（PVA）纤维和聚乙烯（PE）纤维，其力学性能指标应符合表4.1.4的规定。可选用聚丙烯（PP）纤维、钢纤维、玄武岩纤维等其他品种的纤维作为辅助纤维，其性能指标应符合现行相应标准的规定，并通过试验确认所制备的ECC拉伸应变硬化性能满足本规程要求。所用纤维应具有良好的分散性、耐碱性和抗老化性，不得含有杂质，表面不得污染，其耐久性能指标应符合相应标准的要求。

表4.1.4 短切高强度高模量PVA纤维和PE纤维的力学性能指标

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项 目 | 抗拉强度(×103N/mm2) | 弹性模量(×104N/mm2) |
| PVA纤维 | ≥1.2 | ≥3.0 |
| PE纤维 | ≥2.4 | ≥6.0 |

条文说明

配制ECC应掺入增强增韧纤维，目前常用的纤维有短切高强度高模量聚乙烯醇（PVA）纤维、高强度高模量聚乙烯（PE）纤维、聚丙烯（PP）纤维等。配制ECC宜选用PVA纤维或PE纤维作为主掺纤维，本条给出了两种纤维的抗拉强度和弹性模量的指标要求。其他品种的纤维，如PP纤维、钢纤维、玄武岩纤维等，可作为辅助纤维与主掺纤维混合使用，也可单独使用，并应通过试验确认所制备的ECC拉伸应变硬化性能满足本规程要求。

* + 1. 外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119的规定。

条文说明

配制ECC的外加剂不做特殊规定，其性能指标应符合现行国家标准GB 8076和GB 50119的规定。

* + 1. ECC的拌和用水和养护用水应符合国家现行标准《混凝土用水标准》JGJ 63的要求。
    2. ECC结构中采用的其他材料，如钢筋、螺栓、钢板、型钢及复合材料，其性能指标应符合现行相应标准的要求。

条文说明

在ECC结构中，ECC材料通常需要与钢筋、螺栓、钢板、型钢、复合材料等材料配合使用，各种材料的性能指标均应符合现行相应标准的要求。

* + 1. 应用ECC材料进行结构加固修复时，界面剂可采用水泥净浆或无机界面剂。配制界面剂的粉料应在有效期内使用，不得受潮、结块。界面剂的各项性能指标应符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367和《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728的规定。
  1. 性能等级
     1. ECC的强度等级应按立方体抗压强度标准值*f*cu,k确定。立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作、养护的100 mm×100 mm×100 mm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%保证率的抗压强度值。

条文说明

ECC的强度等级由立方体抗压强度标准值确定，立方体抗压强度标准值*f*cu,k是本规程ECC各种力学指标的基本代表值。根据国内外研究结果， 100 mm×100 mm×100 mm与150 mm×150 mm×150 mm立方体试件的抗压强度可认为相等，因此本规程规定ECC立方体抗压强度的测定采用边长100mm的立方体试件作为标准试件。ECC强度等级的保证率为95%，按ECC强度总体分布的平均值减去1.645倍标准差的原则确定。

由于ECC掺有较多掺合料，在不同掺合料种类和用量的情况下，ECC强度的发展规律会有所不同，确定ECC立方体抗压强度标准值的试验龄期不仅限于28d，可由设计根据具体情况适当延长。

* + 1. ECC轴心抗压强度的标准值*f*ck应按表4.2.2采用。

表4.2.2 ECC轴心抗压强度标准值 (N/mm2)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | ECC20 | ECC30 | ECC40 | ECC50 | ECC60 | ECC70 | ECC80 |
| 轴心抗压强度  标准值, *f*ck | 13.4 | 20.1 | 26.8 | 33.4 | 41.2 | 49.3 | 57.7 |

条文说明

ECC轴心抗压强度标准值*f*ck由立方体抗压强度标准值*f*cu,k经计算确定。考虑到实际工程结构中ECC的实体强度与立方体试件ECC强度之间的差异，参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中混凝土轴心抗压强度标准值的计算方法，ECC轴心抗压强度标准值*f*ck按0.88*α*c1*α*c2*f*cu,k计算确定。其中，强度修正系数0.88是考虑实际构件与试件ECC强度的差异而采用的折减系数；*α*c1为棱柱体强度与立方体强度之比，对ECC50及以下强度等级的ECC取0.76，对ECC80取0.82，中间按线性插值；*α*c2为脆性折减系数，由于ECC为高延性材料，不发生脆性破坏，故*α*c2取值为1.0。ECC轴心抗压强度标准值*f*ck的计算结果见表4.2.2。

* + 1. ECC轴心抗拉开裂强度的标准值*f*tc,k和轴心抗拉强度的标准值*f*tk宜通过试验确定，轴心抗拉开裂强度和轴心抗拉强度的试验方法应按本规程“第十章-材性测试”执行；当无试验数据时，ECC轴心抗拉开裂强度的标准值*f*tc,k可按表4.2.3-1采用，轴心抗拉强度的标准值*f*tk可按表4.2.3-2采用。

表4.2.3-1 ECC轴心抗拉开裂强度标准值 (N/mm2)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | ECC20 | ECC30 | ECC40 | ECC50 | ECC60 | ECC70 | ECC80 |
| 轴心抗拉开裂  强度标准值, *f*tc,k | 1.20 | 1.79 | 2.39 | 2.99 | 3.59 | 4.19 | 4.78 |

表4.2.3-2 ECC轴心抗拉强度标准值 (N/mm2)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | ECC20 | ECC30 | ECC40 | ECC50 | ECC60 | ECC70 | ECC80 |
| 轴心抗拉强度  标准值, *f*tk | 1.52 | 2.28 | 3.04 | 3.80 | 4.56 | 5.32 | 6.08 |

条文说明

由于ECC所用纤维、原材料品种多，差异性大，且轴心抗拉开裂强度和轴心抗拉强度的测试离散性较大，本规程规定ECC轴心抗拉开裂强度标准值*f*tc,k和轴心抗拉强度标准值*f*tk宜通过试验确定，当无实测数据时可分别按表4.2.3-1和表4.2.3-2采用。

**1**  根据大量试验数据，ECC轴心抗拉开裂强度与立方体抗压强度平均值之间的统计关系可取为：

*μ*tc=0.068*μ*cu （1）

其中，*μ*tc为实测ECC轴心抗拉开裂强度的平均值，*μ*cu为实测ECC立方体抗压强度的平均值。

参考《活性粉末混凝土结构技术规程》DBJ043/T 325的计算方法，考虑实际构件与试件ECC抗拉开裂强度差异的折减系数仍沿用抗压强度的取值0.88，ECC轴心抗拉开裂强度的变异系数*δ*近似取为与立方体抗压强度的变异系数相同，则ECC轴心抗拉开裂强度标准值可按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2） |

ECC轴心抗拉开裂强度标准值*f*tc,k的计算结果见表4.2.3-1。

**2** 根据大量试验数据，ECC轴心抗拉强度与立方体抗压强度平均值之间的统计关系可取为：

*μ*t=0.101*μ*cu （3）

其中，*μ*t为实测ECC轴心抗拉强度的平均值，*μ*cu为实测ECC立方体抗压强度的平均值。

由于ECC轴心抗拉强度多采用薄板型试件测试，纤维倾向于二维分布，而实际工程结构构件中纤维倾向于三维分布，因此试验测得的轴心抗拉强度偏高。根据国内外研究结果，纤维倾向影响系数可以偏安全地取为0.85。考虑实际构件与试件ECC抗拉强度差异的折减系数仍沿用抗压强度的取值0.88，ECC轴心抗拉强度的变异系数*δ*近似取为与立方体抗压强度的变异系数相同。测得的轴心抗拉强度则ECC轴心抗拉强度标准值可按下式计算：

 （4）

ECC轴心抗拉强度标准值*f*tk的计算结果见表4.2.3-2。

* + 1. ECC轴心抗压强度的设计值*f*c应按表4.2.4-1采用；轴心抗拉开裂强度的设计值*f*tc可按表4.2.4-2采用；轴心抗拉强度的设计值*f*t可按表4.2.4-3采用。

表4.2.4-1 ECC轴心抗压强度设计值 (N/mm2)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | ECC20 | ECC30 | ECC40 | ECC50 | ECC60 | ECC70 | ECC80 |
| 轴心抗压强度  设计值, *f*c | 9.6 | 14.3 | 19.1 | 23.9 | 29.4 | 35.2 | 41.2 |

表4.2.4-2 ECC轴心抗拉开裂强度设计值 (N/mm2)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | ECC20 | ECC30 | ECC40 | ECC50 | ECC60 | ECC70 | ECC80 |
| 轴心抗拉开裂  强度设计值, *f*tc | 0.85 | 1.28 | 1.71 | 2.14 | 2.56 | 2.99 | 3.42 |

表4.2.4-3 ECC轴心抗拉强度设计值 (N/mm2)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | ECC20 | ECC30 | ECC40 | ECC50 | ECC60 | ECC70 | ECC80 |
| 轴心抗拉强度  设计值, *f*t | 1.09 | 1.63 | 2.17 | 2.71 | 3.26 | 3.80 | 4.34 |

条文说明

ECC的强度设计值由强度标准值除ECC材料分项系数c确定。ECC的材料分项系数取为1.40。

* + 1. ECC的极限拉应变*ε*tu应根据工程实际需要进行定制化设计，并通过轴拉试验确定；ECC的极限拉应变*ε*tu不应小于1.0%。

条文说明

ECC的极限拉应变*ε*tu可依据细观力学原理，通过原材料选取、配合比调整等方法实现定制化设计。根据文献报道，目前极限拉应变*ε*tu超过13%的ECC已经可以在实验室中制备。由于ECC极限拉应变*ε*tu的大小与ECC强度等级并非一一对应，本规程规定ECC的极限拉应变*ε*tu应根据工程实际需要进行定制化设计，并通过试验确定。为了发挥ECC的拉伸应变硬化和高延性优势，本规程规定ECC的极限拉应变*ε*tu应不小于1.0%。

* + 1. ECC极限拉应变*ε*tu对应的平均裂缝宽度不应大于0.10 mm，最大裂缝宽度不应大于0.15 mm。

条文说明

ECC的应变硬化性能是通过多缝开裂实现的，在裂缝数量一定时，裂缝宽度越大，ECC的极限拉应变越高。根据试验研究结果，有些ECC材料虽然可以实现拉伸高延性，但其平均裂缝宽度超过0.2mm，这对于结构耐久性是不利的。因此，本规程在ECC轴拉性能测试中规定，极限拉应变*ε*tu对应的平均裂缝宽度应不大于0.10 mm，最大裂缝宽度应不大于0.15 mm，以保证ECC材料自身具有足够的裂缝控制能力，从而满足结构层面的裂缝控制要求。

* + 1. ECC的受拉和受压弹性模量*E*c宜按表4.2.7采用；剪切变形模量*G*c可按相应弹性模量值的40%采用；泊松比可取为0.2。

表4.2.7 ECC的弹性模量*E*c (×104N/mm2)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | ECC20 | ECC30 | ECC40 | ECC50 | ECC60 | ECC70 | ECC80 |
| 弹性模量, *E*c | 1.29 | 1.62 | 1.86 | 2.04 | 2.18 | 2.29 | 2.39 |

注：1. 当有可靠试验依据时，弹性模量可根据实测数据确定。

2. 当掺有大量矿物掺合料时，弹性模量可按规定龄期根据实测数据确定。

条文说明

ECC的受压和受拉弹性模量*E*c是基于大量试验结果，按照普通混凝土类似的表达形式统计回归得出。ECC的弹性模量*E*c以其立方体抗压强度标准值*f*cu,k按下列公式计算：

 （5）

ECC弹性模量*E*c的计算结果见表4.2.7。配合比不同将导致变形性能的不确定性，因此必要时可根据试验确定弹性模量。

试验研究结果表明，ECC的泊松比*ν*c分布在0.16~0.24，均值约为0.209，标准差约为0.030，并且与ECC强度等级的相关性不大，因此本规程将ECC的泊松比*ν*c取为0.2。由于ECC泊松比*ν*c的取值与普通混凝土一致，参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定，本规程将ECC的剪切变形模量*G*c取为弹性模量的40%。

* + 1. ECC的热工参数宜通过试验确定。当缺乏足够的试验数据时，ECC在0℃~100℃范围内的热工参数可按下列规定取值：

线膨胀系数*α*c：0.8×10-5/℃；

导热系数*λ*：2.3kJ/(m•h•℃)；

比热容*c*：1.4kJ/(kg•℃)。

条文说明

本条提供了进行ECC结构在收缩、温度等间接作用效应计算时所需的线膨胀系数、导热系数和比热容等热工参数。根据已有研究结果，在0℃~100℃范围内ECC的线膨胀系数*α*c介于0.7~0.9×10-5/℃，导热系数*λ*介于1.7~4.6 kJ/(m•h•℃)，比热容*c*介于0.9~2.0 kJ/(kg•℃)，由此确定ECC各热工参数的近似值。

* + 1. ECC的收缩和徐变宜通过试验或已有数据确定，并应符合设计要求。对于有特殊要求的结构或构件，可通过湿养护或掺入膨胀剂、减缩剂等措施控制材料收缩，或采用具有低干缩特性的ECC。

条文说明

由于ECC材料不含粗骨料，其收缩和徐变应予以有效控制，并应符合设计要求。已有试验研究表明，ECC的收缩和徐变受到原材料、外加剂、养护方式等因素的显著影响，差异性大、很难标准化，故本规程规定ECC的收缩和徐变宜通过试验或已有数据确定。根据已有研究结果，湿养护或掺入膨胀剂、减缩剂等措施控制ECC收缩的效果显著，并且低干缩ECC也已在国内研究应用多年，可以满足对ECC收缩和徐变有特殊要求的结构或构件。

* + 1. ECC的抗冻、抗水渗透、抗氯离子渗透、早期抗裂、抗碳化、抗硫酸盐侵蚀等耐久性能应符合设计要求。当有可靠试验依据时，ECC结构构件在各类环境下的保护层厚度可比现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010和《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476规定的保护层最小厚度适当降低，降低幅度不宜超过10 mm，且保护层最小厚度不得低于10 mm。对于受力钢筋保护层厚度大于50 mm的结构构件，可适当放宽保护层的构造要求，必要时可取消配置防裂、防剥落的钢筋网片。

条文说明

国内外研究结果表明，ECC的抗冻、抗水渗透、抗氯离子渗透、早期抗裂、抗碳化、抗硫酸盐侵蚀等耐久性指标均明显优于普通混凝土。在实际应用中，应根据工程设计要求进行ECC的耐久性检测评定。考虑到ECC的耐久性优势，本条规定ECC结构构件在各类环境下的保护层厚度在有可靠试验依据时，可比现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010和《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476规定的保护层最小厚度适当降低。现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010对大于50mm的保护层规定采取有效的构造措施，防止混凝土开裂剥落、下坠，通常为保护层采用纤维混凝土或加配钢筋网片。由于ECC本身具有良好的应变硬化性、裂缝自控功能和耐久性，ECC结构构件不存在开裂剥落和下坠的情况，因此可以放宽ECC保护层的构造要求。

建筑结构设计

* 1. 一般规定
     1. 结构分析的模型应符合下列要求：

1. 结构分析采用的计算简图、几何尺寸、计算参数、边界条件、结构材料性能指标以及构造措施等应符合实际工作状况。
2. 结构上可能的作用及其组合、初始应力和变形状况等，应符合结构的实际状况。
3. 结构分析中所采用的各种近似假定和简化，应有理论、试验依据或经工程实践验证；计算结果的精度应符合工程设计的要求。
   * 1. 结构分析应符合下列要求：
4. 满足力学平衡条件。
5. 在不同程度上符合变形协调条件、平衡方程及本构方程。
6. 应采用合理的材料本构关系或构件单元的受力-变形关系。
   * 1. 结构分析时，应根据结构类型、材料性能和受力特点等选择下列分析方法：
7. 弹性分析方法。
8. 塑性内力重分布分析方法。
9. 弹塑性分析方法。
10. 塑性极限分析方法。
11. 试验分析方法。
    1. 承载能力极限状态
       1. ECC构件的极限承载力计算，应满足以下规定：
12. 应根据设计状况和构件性能设计目标确定ECC和钢筋的强度取值。
13. 钢筋应力不应大于钢筋的强度取值。
14. ECC应力不应大于ECC的强度取值。

条文说明

本规范应用于ECC结构及构件的设计时，应同时符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010在承载能力极限状态等方面的规定，相同之处按普通混凝土结构设计的有关标准和规范执行。

* + 1. ECC构件正截面承载力应按下列基本假定进行计算：

1. 钢筋纵向应变沿截面的高度方向呈直线变化。
2. 纵向钢筋的极限拉应变取为0.01。
3. 纵向钢筋的应力取钢筋的应变与弹性模量的乘积，其值应满足《混凝土结构设计规范》GB 50010相关规定。
4. ECC受压的应力与应变关系按下列规定取用：

当0≤*ε*c≤*ε*0时

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.2-1） |

当*ε*0≤*ε*c≤*ε*cu时

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.2-2） |

式中： *ε*c——ECC压应变；

*σ*c——ECC压应变为*ε*c时的ECC压应力；

*f*c——ECC轴心抗压强度设计值；

*ε*0——ECC压应力*f*c达到时的压应变，本规范取0.48%；

*ε*cu——正截面的ECC极限压应变，本规范取0.69%。

1. 考虑ECC的抗拉强度，ECC受拉应力与应变关系按下列规定取用：

当0≤*ε*c≤*ε*tc时

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.2-3） |

当*ε*tc≤*ε*c≤*ε*tu时

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.2-4） |

式中： **t——ECC拉应变；

*σ*t——ECC拉应变为*ε*t时的ECC拉应力；

*f*t——ECC轴心抗拉强度设计值；

*f*tc——ECC轴心抗拉开裂强度设计值；

*ε*tc——ECC抗拉开裂应变；

*ε*tu——ECC峰值拉应力所对应的拉应变，即极限拉应变。

条文说明

ECC的单轴受压和受拉本构关系与普通混凝土差别较大，在正截面分析中需要准确考虑。本规范中ECC单轴受压本构采用非线性模型，符合ECC实际单轴受压应力-应变全曲线特征，与普通混凝土材料受压模型近似。在不同掺合料种类和用量的情况下，ECC强度的变化规律会有所不同，根据大量的ECC单轴受压特征数据统计分析，规定ECC压应力达到*f*c时的压应变取0.48%，正截面的ECC极限压应变取0.69%。ECC 具有优秀的拉伸性能、较高的延性和裂缝控制能力。为了简化应用，ECC的单轴受拉本构采用了双线性拉伸模型，为了充分体现ECC应变硬化的特征，采用上升段来体现其拉伸性能，计算公式如式(5.2.2-4)所示。

* + 1. ECC构件正截面承载力计算时，受压区应力图形可简化为等效的矩形应力图，应力等效系数*α*1和等效受压区高度系数*β*1按表5.2.3确定。矩形应力图应力值可由ECC轴心抗压强度设计值*f*c乘以系数*α*1确定。

表5.2.3 非线性受压模型对应的*α*1和*β*1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *ε*c | 0.0003 | 0.0006 | 0.0009 | 0.0012 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0021 | 0.0024 |
| *α*1 | 0.0913 | 0.1778 | 0.2594 | 0.3361 | 0.4081 | 0.4752 | 0.5376 | 0.5952 |
| *β*1 | 0.6702 | 0.6739 | 0.6778 | 0.6818 | 0.6861 | 0.6905 | 0.6951 | 0.7000 |
| *ε*c | 0.0027 | 0.0030 | 0.0033 | 0.0036 | 0.0039 | 0.0042 | 0.0045 | 0.0048 |
| *α*1 | 0.6482 | 0.6964 | 0.7399 | 0.7788 | 0.8132 | 0.8429 | 0.8681 | 0.8889 |
| *β*1 | 0.7051 | 0.7105 | 0.7162 | 0.7222 | 0.7286 | 0.7353 | 0.7424 | 0.7500 |
| *ε*c | 0.0051 | 0.0054 | 0.0057 | 0.0060 | 0.0063 | 0.0066 | 0.0069 |  |
| *α*1 | 0.9054 | 0.9186 | 0.9292 | 0.9380 | 0.9452 | 0.9513 | 0.9564 |  |
| *β*1 | 0.7580 | 0.7661 | 0.7741 | 0.7818 | 0.7893 | 0.7964 | 0.8031 |  |

条文说明

基于5.2.2条规定的ECC单轴受压本构关系，采用与混凝土结构类似的分析方法，可以得到等效的矩形应力图中应力等效系数和等效受压区高度系数。矩形应力图应力值可由ECC轴心抗压强度设计值*f*c乘以系数*α*1确定，矩形应力图高度可取平截面假定所确定的中和轴高度乘以系数*β*1。

* + 1. ECC构件纵向钢筋屈服和受压区ECC破坏同时发生时，对有明显屈服点的钢筋，相对界限受压区高度应按下列公式计算：

|  |  |
| --- | --- |
| *ξ*b *=x*b / *h*0 | （5.2.4-1） |
|  | （5.2.4-2） |

式中：*ξ*b——相对界限受压区高度；

*x*b——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；

*E*s——钢筋弹性模量，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010相关条款取用；

*ε*cu——非均匀受压时ECC的极限压应变，按本规程第5.2.2条确定；

*β*1——截面等效受压区高度系数，按本规程第5.2.3条确定。

条文说明

ECC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混凝土压脆同时发生的破坏状态。根据平截面假定，可得出截面相对受压区*ξ*b的计算公式。

* + 1. 纵向钢筋应力按《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定确定。
    2. 受弯构件正截面受弯承载力应符合下列规定（图5.2.6）：



图5.2.6 矩形单筋截面受弯构件正截面受弯承载力计算

当纵向钢筋配筋率*ρ*/*ρ*b≤0.45：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.6-1） |
|  | （5.2.6-2） |

ECC受压区高度应按下列公式确定：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.6-3） |

ECC受压区高度尚应符合下列条件：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.6-4） |
|  | （5.2.6-5） |

式中： *ρ*b——界限配筋率；

*M*——弯矩设计值；

*ε*s——钢筋的拉应变；

*σ*s——钢筋的拉应力，屈服前*σ*s = *E*s *ε*s，屈服后*σ*s = *f*y；

*f*tc——ECC的轴心抗拉开裂强度设计值；

*α*1——应力等效系数，按本规范5.2.3条的规定计算；

*β*1——受压区等效高度系数，按本规范5.2.3条的规定计算；

*A*s、*A*s’——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

*b*——构件截面宽度；

*h*0——构件截面有效高度；

*f*y——受拉纵向钢筋抗拉强度设计值；

*x*——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度；

*as’*——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离。

条文说明

ECC 材料在宏观上表现出显著的应变硬化特性，部分基体材料开裂后，开裂处释放的应力会通过桥接作用传递给尚未开裂的基体材料，使得ECC在经受大变形下仍然可以继续承担较开裂荷载高的荷载。

ECC受弯构件正截面受弯承载力应考虑ECC构件的抗拉作用。在不同掺合料种类和用量的情况下，ECC强度和变形会存在一定差异性，当无现场ECC试件参数时，设计人员可取正截面ECC极限压应变为0.69%进行设计。

* + 1. 当ECC构件纵向钢筋配筋率*ρ*/*ρ*b>0.45时，不应考虑ECC的抗拉强度。
    2. ECC轴心受压构件正截面受压承载力应符合下列规定：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.2.8） |

式中： *N*——ECC构件的轴向压力设计值；

*φ*1——受压构件的稳定系数，按《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定确定；

*f*c——ECC轴心抗压强度设计值；

*A*——构件截面面积；

*f ' y*——钢筋抗压强度设计值，按《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定确定；

*A**' s*——全部纵向受压钢筋截面面积；

* + 1. ECC梁的受剪截面应符合下列条件：

 (5.2.10-1)

 (5.2.10-2)

 (5.2.10-3)

 (5.2.10-4)

当 *β* 计算值大于1时，取*β* =1。

式中，*ν* ——ECC软化系数，*ν =*0.75-*σ*c/170 且*ν* ≥0.4；

*f*c——ECC轴心抗压强度设计值；

*ρ*sv——ECC梁截面配箍率；

*f*vy——箍筋屈服强度设计值，按《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定确定；

*σ*f ——斜裂缝处ECC提供的最大桥接应力，取*σ*f =0.5*f*t；

*z* ——上下纵筋间距，取*z* = 0.9*h*0，*h*0为截面有效高度；

*φ*——ECC梁斜裂缝角度，取*φ=*45*°*；

*λ*——剪跨比；

*η*——考虑箍筋约束的截面有效系数，取*η=*1*-b/(*4*z*)。

条文说明

ECC梁抗剪承载力采用桁架-拱模型，包括桁架模型和拱模型提供抗剪承载力的线性组合。ECC梁斜裂缝角度，当无实际设计参考资料时，可弱化箍筋和纤维对抗剪作用的贡献，偏安全地取*φ*=45°。*σf*为斜裂缝处ECC提供的最大桥接应力，考虑到裂缝面拉应力不均匀的折减因子，取*σf*=0.5*f*t。

* 1. 正常使用极限状态
     1. ECC构件应进行受拉边缘应力或正截面抗裂验算，裂缝控制等级及抗裂验算可按《混凝土结构设计》GB 50010相关规定进行。
     2. ECC受弯构件挠度可依据最小刚度原则按结构力学方法进行计算，且不应超过现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010规定的限值。
     3. ECC受弯构件考虑长期作用影响的刚度*B*可按下式进行计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5.3.4） |

式中： *ψ*——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数，按5.3.2条取值；

*n*s——钢筋弹性模量与ECC弹性模量的比值，即 *E*s/*E*c；

*ρ*——纵向受拉钢筋配筋率，对钢筋水泥基材料受弯构件，取为*A*s/*bh*0；

*γ*' f——T形，I 形界面受压翼缘面积与腹板面积的比值；

*b*, *h*0——截面的宽度和有效高度。

*B*s——ECC构件的短期刚度。

* + 1. 考虑荷载长期作用对钢筋增强ECC受弯构件挠度增大的影响系数*θ*可按下列规定取用：

1. 当*ρ*' = 0时，取*θ* = 2.4；当*ρ*' = *ρ*时，取*θ* = 1.9; 当为中间值时，可按线性内插。此处，*ρ*'= *A**' s* / *bh*0，*ρ*= *A*s / *bh*0；
2. 对翼缘位于受拉区的倒T形截面，*θ*应增加20%。
   1. 框架梁柱节点抗震设计
      1. 节点核心区应用ECC的框架梁柱节点抗震受剪承载力应符合下列规定：
3. 9度设防烈度的一级抗震等级框架

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.4.1-1) |

1. 其他情况

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.4.1-2) |

式中： *N*——对应于考虑地震组合剪力设计值的节点上柱底部的轴向力设计值；当*N*为压力时，取轴向压力设计值的较小值，且当*N*大于0.5*fcbchc*时，取0.5*fcbchc*；当*N*为拉力时，取为0；*bc*和*hc*分别为柱截面长度和宽度；

*Asvj*——核心区有效验算宽度范围内同一截面验算方向箍筋各肢的全部截面面积；

*hb0*——框架梁截面有效高度，节点两侧梁截面高度不等时取平均值；

*hj*——框架节点核心区的截面高度，可取验算方向的柱截面高度*h*c；

*bj*——框架节点核心区的截面有效验算宽度，当*b*b不小于*b*c/2时，可取*b*c；当*b*b小于*b*c /2时，可取（*b*b+0.5*b*c）和*b*c中较小值；当梁与柱的中线不重合且偏心距*e*0不大于*b*c/4时，可取（*b*b+0.5*h*c）、（0.5*b*b+0.5*b*c+0.25 *h*c -*e*0）和*b*c三者中的最小值。此外，*b*b为验算方向梁截面宽度，*b*c为该侧柱截面宽度；

*fcd*——ECC轴心抗压强度设计值；

*fyv*——横向钢筋的抗拉强度设计值；

*s*——沿构件长度方向的箍筋间距；

*a*s'——受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离。

条文说明

本条参照《混凝土结构设计规范》GB 50010的11.6.4条，考虑到ECC可以提升框架节点核心区的抗剪强度，并结合试验结果，对基体材料的贡献项进行修改，以减少ECC框架节点的箍筋用量。

* + 1. 框架梁和框架柱的纵向受力钢筋在框架节点区的锚固和搭接应符合下列要求：对于框架中间层中间节点、中间层端节点、顶层中间节点以及顶层端节点，梁、柱纵向钢筋在节点部位的锚固和搭接，应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010的相关构造规定。其中*ll*E按式(5.4.2-1)取用，*l*abE按式(5.4.2-2)取用：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.4.2-1) |
|  |  | (5.4.2-2) |

式中： *l*——纵向受拉钢筋搭接长度修正系数，按《混凝土结构设计规范》GB 50010第8.4.4条规定取用；

*aE*—纵向受拉钢筋的抗震锚固长度修正系数，对一、二级抗震等级取1.15，对三级抗震等级取1.05，对四级抗震等级取1.00；

*a*—锚固长度修正系数，对普通钢筋按《混凝土结构设计规范》GB 50010第8.3.2条规定取用，当多于一项时，可按连乘计算，但不应小于0.6，对预应力筋，可取1.0；

*l*ab—受拉钢筋的基本锚固长度，可按《混凝土结构设计规范》GB 50010第8.3.1条规定乘0.9的折减系数取用。

条文说明

本条参照《混凝土结构设计规范》GB 50010的8.3.1条和11.6.7条，考虑到ECC可以提升钢筋的锚固强度，并结合试验结果，对*ll*E和*l*abE进行折减，其中*ll*E折减为混凝土计算结果的80%，*l*abE折减为混凝土计算结果的90%。

* + 1. 框架节点区箍筋的最大间距、最小直径宜按表5.4.3采用。对一、二、三级抗震等级的框架节点核心区，配箍特征值分别不宜小于0.06、0.05和0.04，且其箍筋体积配筋率分别不宜小于0.30％、0.25％和0.20％。

表5.4.3 梁柱框架节点箍筋的构造要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 抗震等级 | 箍筋最大间距 （mm） | 箍筋最小直径 （mm） |
| 一级 | 纵向钢筋直径的12倍和200中的较小值 | 10 |
| 二级 | 纵向钢筋直径的16倍和200中的较小值 | 8 |
| 三级 | 纵向钢筋直径的16倍和300中的较小值 | 8 |
| 四级 | 纵向钢筋直径的16倍和300中的较小值 | 6 |

条文说明

本条参照《混凝土结构设计规范》GB 50010的11.6.8条，考虑到ECC可以提升框架节点的抗剪强度和约束能力，对节点箍筋的构造要求进行适当放宽。根据试验结果，ECC节点中配置按照规范计算的50%箍筋即可获得与配置100%箍筋的混凝土节点相似的抗震性能，因此将箍筋最大间距放大至原要求的2倍，并下调最低配箍特征值和箍筋体积配筋率要求。

* + 1. 当在装配整体式混凝土框架节点核心后浇区域应用ECC时，应对预制梁混凝土与ECC的界面设置抗剪键和界面抗剪钢筋，以保证界面连接性能。

条文说明

随着装配式结构的推广，ECC在装配式结构中有着广阔的发展前景。但在试验中也观察到ECC和混凝土的新旧界面间发生界面破坏，因此需要采取措施保证界面的牢固性。

* 1. 剪力墙洞口连梁抗震设计
     1. ECC连梁配筋形式宜采用普通配筋或混合配筋形式，如图5.5.1所示。其中普通配筋连梁参与抗弯的钢筋全部为与连梁轴向平行的纵筋；混合配筋连梁则包含纵筋和斜筋。对于一、二级抗震等级的连梁，当跨高比不大于2.5时，宜采用混合配筋形式；其他情况下可采用普通配筋形式。

|  |
| --- |
|  |
| (a) 普通配筋连梁 |
|  |
| (b) 混合配筋连梁 |

图5.5.1 不同配筋形式的ECC连梁

条文说明

小跨高比连梁更容易发生剪切破坏，考虑到斜筋连梁施工困难和ECC对连梁剪切承载力的贡献，因此建议采用混合配筋连梁形式。随着连梁跨高比的增大，弯曲破坏更易发生，对于跨高比较大的ECC连梁也可采用普通配筋连梁。

* + 1. 各等级的普通配筋连梁，其截面限制条件及斜截面受剪承载力应符合下列规定：

1. 受剪截面应符合下列要求：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.5.2-1) |

1. 斜截面受剪承载力应符合下列要求：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.5.2-2) |

式中： *b*——连梁截面的宽度；

*h*0—连梁截面的有效高度；

*h*—连梁截面的高度；

*ln*—连梁净跨；

*fyv*—箍筋的抗拉强度设计值；

*Asv*—箍筋面积；

*s*—箍筋间距；

**c—ECC强度影响系数：当ECC强度等级不超过C50时，**c取1.0；当ECC强度等级为C80时，**c取0.8；其间按线性内插法确定；。

条文说明

根据试验结果，ECC可显著提高连梁的抗剪承载力，因此不再区分跨高比不同对连梁受剪截面的影响，统一取为《混凝土结构设计规范》GB 50010第11.7.9条中对于跨高比大于2.5的混凝土连梁的受剪截面限值。根据现有ECC连梁试验数据，回归了ECC连梁的剪切承载力计算公式，如式(5.5.2-2)所示。

* + 1. 混合配筋连梁其截面限制条件及斜截面受剪承载力应符合下列规定：

1. 受剪截面应符合下列要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.5.3-1) |

1. 斜截面受剪承载力应符合下列要求：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.5.3-2) |

式中： *n*d——每束斜筋数量；

*Asd*—每根斜筋的面积；

*fyd*—斜筋的抗拉强度设计值；

**—斜筋与连梁轴向的夹角。

条文说明

根据试验结果，ECC可显著提高连梁的抗剪承载力，因此适当增加《混凝土结构设计规范》GB 5001011.7.9条中对于配置斜向交叉钢筋的混凝土连梁的受剪截面限值。根据现有ECC连梁试验数据，回归了ECC连梁的剪切承载力计算公式，如式(5.5.3-2)所示。

* + 1. 连梁可按照基于平截面假定的截面模型计算其抗弯承载力。计算含斜筋连梁的抗弯承载力时，可将斜筋束等效为单根纵筋，等效纵筋面积为该束斜筋总面积乘以斜筋与连梁轴向夹角的余弦，高度与斜筋束在端部的几何中心位置一致。连梁在墙肢约束作用下会产生较大的轴力，在计算连梁抗弯承载力时宜考虑0.1的轴压比。

条文说明

根据配置斜筋连梁的试验数据，采用此方法等效计算得到的弯曲承载力与试验结果吻合良好。在地震中，连梁会受到墙肢的约束作用而产生轴压力。在试验中也测得连梁的最大轴压比，集中分布在10%附近。根据平截面假定10%的轴压力会明显增加试件的抗弯承载力。

* + 1. 连梁实际承载力为按5.5.3条计算抗剪承载力和5.5.4条计算抗弯承载力二者之间较小值。

条文说明

根据现有试验结果，ECC连梁主要发生由弯曲承载力控制的弯曲破坏或剪切受压破坏和由剪切承载力控制的剪切受拉破坏，因此连梁的实际承载力需取弯曲承载力和剪切承载力的较小值。

* + 1. 剪力墙及筒体洞口连梁的纵向钢筋、斜筋及箍筋的构造应符合下列要求：

1. 连梁沿上、下边缘单侧纵向钢筋的最小配筋率不应小于0.15％，且配筋不宜少于2Φ12；混合配筋连梁中每束对角斜筋应至少由2根直径不小于12mm的钢筋组成。
2. 普通配筋连梁全长箍筋的构造可按《混凝土结构设计规范》GB50010第11.3.6条和第11.3.8条框架梁梁端加密区箍筋的构造要求采用；混合配筋连梁沿连梁全长箍筋的间距可按《混凝土结构设计规范》GB50010表11.3.6-2中规定值的3倍取用。

条文说明

本条参照《混凝土结构设计规范》GB 50010的11.7.1条，同时结合试验结果，考虑到ECC可以提升混合配筋连梁的抗剪强度和对斜筋的约束能力，对混合配筋连梁的最大箍筋间距进行适当放宽。

* + 1. 宜在ECC连梁与混凝土墙肢连接界面处设置剪力键，以保证界面连接性能，同时应设置一定数量的界面构造钢筋。

条文说明

随着装配式结构的推广，ECC在装配式结构中有着广阔的发展前景。但在试验中也观察到ECC和混凝土的新旧界面间发生界面破坏，因此需要采取措施保证界面的牢固性。

桥梁与道路工程设计

* 1. 一般规定
     1. 公路桥梁及道路用钢筋增强ECC结构及构件的设计使用年限应符合现行行业标准《公路工程技术标准》JTG B01的规定。

条文说明

本规范应用于公路桥涵及道路的钢筋增强ECC结构及构件的设计时，应同时符合现行行业标准《公路工程技术标准》JTG B01在使用年限等方面的规定。

* + 1. 桥梁及道路用ECC宜满足高强度、干燥收缩小等特征。具体材料性能指标要求包括：强度等级不低于C40，干燥收缩不大于400。

条文说明

桥梁与道路结构及构件在应用ECC时，应充分考虑结构自身受力特征，需要对材料特征及性能指标提出最低要求，在有充分试验验证的情况下，可以对提及的指标做适当放宽处理。

* + 1. 桥面负弯矩区可部分采用ECC代替传统混凝土来提高其抗裂性能。当同时采用抗拔不抗剪连接技术与ECC材料时，结构在正常使用极限状态可不验算裂缝宽度。

条文说明

ECC应用于桥梁工程负弯矩区可以有效解决混凝土开裂问题，本条基于ECC多点开裂及最大裂缝宽度不超过规范裂缝宽度限值的特征，给出了不需要进行专门裂缝宽度验算的建议。



(a) 连续组合梁负弯矩区 (b) 组合刚构桥负弯矩区



(c) 悬索桥桥面系吊杆附近 (d)斜拉桥桥面系拉索附近

图6.1.3 负弯矩区抗裂桥面铺装应用示意

* + 1. ECC可用来实现预制梁桥面连续，采用ECC方案时，桥面连续长度应根据跨度进行调整且不宜小于2m，桥面连续范围配筋同原普通混凝土结构设计。

条文说明

ECC应用于简支梁桥面连续可以取消伸缩缝等构造，其良好的延性可以用来释放梁段的位移和转角，减小桥面连续结构的受力，极限拉应变可满足桥面连续部位的变形要求，在降低开裂风险的同时可以简化施工。



图6.1.4无伸缩缝桥面连续应用示意

* + 1. ECC作为桥面铺装层时，不宜考虑其参与结构受力，铺装层设计应按现行行业标准《公路沥青路面设计规范》JTG D50实施。

条文说明

ECC应用于桥面铺装材料时通过对裂缝宽度的有效控制可以增强桥面铺装的耐久性，同时降低钢桥面的腐蚀风险。



图6.1.5钢桥面铺装应用示意

* + 1. 公路ECC桥涵结构及构件所处环境类别应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362和《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310的规定确定。
    2. 公路ECC桥涵结构设计应满足耐久性的构造要求，并遵循可检查、可维修的基本原则，应符合现行行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310的规定外，其中ECC保护层最小厚度应符合本规范第6.4.1条的规定。
    3. 采用ECC的公路钢混组合桥梁中的连接件设计应参照《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01中的相关规定进行验算。
    4. 采用ECC作为路面时，应根据公路等级、交通荷载、路基条件、当地温度和湿度状况以及使用性能要求，选择及组合与之相适应的路面结构。
    5. 采用ECC作为道路面板中纵向和横向接缝时，接缝设计可参考《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40。

条文说明

ECC的超高韧性可以改善路面接缝易开裂的问题。

* + 1. 本规范未明确规定的结构设计事项，应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362和《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40的相关规定。
  1. 持久状况承载能力极限状态计算
     1. 公路ECC桥涵结构及构件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及稳定计算，必要时尚应进行结构的倾覆和滑移验算。在进行承载能力极限状态计算时，作用的效应（其中汽车荷载应计入冲击系数）应采用其组合设计值，结构材料性能应采用其强度设计值。

条文说明

本节所述承载能力极限状态计算，均指对持久状况下的ECC结构。这种状况的承载能力极限状态应包括对构件的抗弯、抗压、抗拉、抗剪、抗扭等的强度及受压构件的稳定进行计算；必要时，还应对结构的倾覆和滑移进行验算。这是结构设计最主要的部分。具体规定可参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362及《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40的相关规定。

* + 1. 公路ECC桥涵疲劳验算时，应对ECC桥面板的弯拉应力，即正截面受拉区边缘的ECC弯拉应力进行验算，并应符合下列规定：

1. 疲劳应力计算应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）考虑荷载作用，各项荷载应取用标准值。
2. ECC应力计算可采用名义应力法，按线弹性状态计算。
3. ECC桥面板疲劳验算时，受拉区边缘ECC弯拉应力应不大于名义疲劳弯拉应力允许值。
4. 名义疲劳弯拉应力允许值可取，其中名义静力弯拉应力容许值取裂缝宽度为0.05mm时ECC构件对应的名义弯拉应力。
   * 1. ECC作为道路面层时，其结构设计标准应为设计基准期内，在行车荷载和温度梯度综合作用下，面层不产生疲劳断裂；并以最重轴载和最大温度梯度综合作用下，不产生疲劳断裂作为验算标准。具体验算可参考《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40的相关规定。
     2. ECC作为道路面层时，设计强度应采用28d龄期的抗折强度。在极重、特重以及重交通荷载等级下，抗折强度标准值不应小于6MPa；在中等交通荷载等级下，抗折强度标准值不应小于5.5MPa；在轻交通荷载等级下，抗折强度标准值不应小于5MPa。
   1. 持久状况正常使用极限状态计算
      1. 公路ECC桥涵的持久状况设计应按正常使用极限状态的要求，采用作用频遇组合、作用准永久组合或作用频遇组合并考虑作用长期效应的影响，对构件的抗裂、裂缝宽度和挠度进行验算，并使各项计算值不超过本规范规定的各相应限值。在上述的各种组合中，汽车荷载效应可不计冲击系数。

条文说明

正常使用极限状态设计应按作用频遇组合和准永久组合计算作用效应；作用频遇组合为永久作用标准值与主导可变作用频遇值、伴随可变作用准永久值的组合，与原规范的短期效应组合类同；作用准永久组合为永久作用标准值与主导可变作用准永久值的组合。具体规定可参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362及《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40的相关规定。

* + 1. ECC构件的裂缝宽度验算是指验算ECC表面裂缝宽度，各类环境中ECC最大裂缝宽度限值应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362规定。
    2. 钢筋增强ECC受弯构件的挠度验算除应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362的规定，还应在受弯构件的开裂截面抗弯刚度Bcr计算时考虑ECC拉应力的贡献。挠度长期增长系数计算中使用的ECC徐变系数取值应通过试验确定。
    3. 钢筋增强ECC构件在混凝土裂缝宽度限值不小于0.15mm的环境下可不做裂缝宽度验算。

条文说明

应变硬化水泥基复合材料在开裂状态时裂缝宽度小于0.1mm，可以有效保证结构耐久性。在近海或海洋氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境、化学腐蚀环境下，混凝土裂缝宽度限值为0.15mm；一般环境、冻融环境、磨蚀环境下，混凝土裂缝宽度限值为0.20mm。在上述环境下可不验算ECC裂缝宽度。

* 1. 构造规定
     1. 普通钢筋和预应力钢筋的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. 最外侧钢筋的混凝土保护层厚度应不小于表6.5.1的规定值。
   * 1. 普通钢筋和预应力钢筋的混凝土保护层厚度应满足下列要求：

表6.4.2 混凝土保护层最小厚度

|  |  |
| --- | --- |
| 环境类别 | 应变硬化水泥基复合材料梁、板最小保护层厚度（mm） |
| Ⅰ类-一般环境 | 15 |
| Ⅱ类-冻融环境 | 20 |
| Ⅲ类-近海或海洋氯化物环境 | 25 |
| Ⅳ类-除冰盐等氯化物环境 | 25 |
| 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低作用等级、钢筋和ECC无特殊防腐措施规定的。

2 对钢筋和ECC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。

3 对工程预制的混凝土构件，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。

* + 1. 普通钢筋和预应力钢筋的混凝土钢筋净距应满足下列要求：

1. 普通钢筋净距不应小于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20mm。
2. 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。
3. 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。
   * 1. 在满足最小保护层厚度、钢筋布置要求的条件下，钢筋增强ECC板应满足结构承载力、刚度及局部稳定等要求，且板的最小厚度不应小于50mm。
     2. T形、I形、箱形截面ECC梁的腹板宽度，未配置箍筋时不应小于75mm，配置箍筋时不应小于100mm。当腹板厚度有变化时，其过渡段长度不宜小于12倍腹板宽度差。
     3. ECC梁式桥中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。
     4. ECC路面层的计算厚度，可根据交通荷载等级、公路等级和变异水平等级综合确定。设计厚度应依据计算厚度加6mm磨耗层后，按10mm向上取整。
     5. ECC路面层厚度宜为普通混凝土面层厚度的0.75~0.65倍。特重或重交通荷载时，其最小厚度应为180mm；中等或轻交通荷载时，其最小厚度应为160mm。

条文说明

公路桥涵及道路的钢筋增强ECC结构及构件的构造规定条文依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362及《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40的相关规定及应变硬化水泥基复合材料在公路桥涵及道路的工程经验总结确定。

结构加固与修复设计

* 1. 一般规定
     1. 采用ECC材料对混凝土结构构件进行加固时，ECC加固层宜配置增强筋材，例如普通钢筋网、钢绞线网片，FRP格栅等。

条文说明

ECC具有超高的拉伸延性，在拉伸作用下与钢筋网及钢绞线网片具有较好的协同作用，适宜于结构工程加固。

* + 1. 采用筋材增强ECC加固混凝土结构构件时，应按现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153及《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068采用以概率理论为基础的极限状态设计法进行承载能力极限状态计算，并应符合下列规定：

1. 原结构构件的受力钢筋和混凝土材料宜根据检测得到实际强度，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010确定其相应的材料强度设计指标。被加固混凝土构件实测混凝土强度等级不应低于C15。
2. 被加固结构的原承载力设计值不应低于其荷载效应准永久组合值。
3. 结构上的荷载作用，应经调查或检测核实，并按照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009确定的规定和要求确定其标准值或代表值。
4. 钢绞线等增强筋材应根据构件达到极限状态时的应变，按其应力应变关系确定其相应的应力。
5. 验算加固后结构构件承载力时，应考虑结构在加固时的实际受力状况，及加固部分与原结构共同工作的程度。
6. 考虑地震作用效应组合的结构构件，应将其截面承载力除以承载力抗震调整系数，并按现行行业标准《建筑抗震加固技术规程》JGJ 116的规定取值。
7. 应计算加固后对结构中其它构件受力产生的影响。
   * 1. 加固施工时宜卸除结构上的活荷载作用，并应采取减小被加固构件的初始受力对加固后二次受力的影响的措施。当不能完全卸载进行加固时，应分析计算二次受力对加固的不利影响。
     2. 当被加固结构、构件的表面有防火要求时，应按现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016规定的耐火等级及耐火极限要求，对加固层进行防护。
     3. 加固后如果改变传力路径或使结构质量增大时，应对相关结构、构件及建筑物地基基础进行必要的验算。
     4. 对于加固部分构件的梁、柱边缘宜进行倒角处理。圆角半径不应小于10mm，折角处理时直角边长不应小于15mm。
     5. 采用ECC材料对混凝土结构构件和砌体进行加固时，应保证新增加固部件与原结构连接可靠，形成整体共同工作。
   1. 梁的加固
      1. 采用钢绞线网片ECC对钢筋混凝土梁进行受弯加固时的承载力宜按附录A.0.1条计算。

条文说明

为了提高加固结构的安全性，附录A.0.1条未考虑ECC材料的抗拉贡献。

* + 1. 采用FRP格栅-ECC面层对钢筋混凝土梁进行受弯加固时的承载力宜按附录A.0.2条计算。

条文说明

为了提高加固结构的安全性，附录A.0.2条未考虑ECC材料的抗拉贡献。

* + 1. 采用ECC进行钢筋混凝土梁受剪加固时的承载力计算，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010对受剪构件斜截面承载力计算的基本假定。
    2. 采用ECC进行钢筋混凝土梁受剪加固时的承载力宜按附录A.0.3条计算。

条文说明

附录A.0.3条计算公式为经验公式，目前对于ECC材料的抗剪加固研究相对缺乏，可结合精细有限元等辅助计算和设计方法。

* + 1. 采用ECC面层加固钢筋混凝土构件前，应先清理、修补原构件，并进行界面处理。ECC面层的厚度，不应小于25mm，也不宜大于35mm；加固层内设置增强筋材时，增强筋材的保护层厚度不应小于15mm。ECC面层的表面应喷涂一层与该品种砂浆相适配的防护材料，提高面层耐环境因素作用的能力。
    2. ECC抗拉开裂强度设计值时，不规定最小配箍率。ECC抗拉开裂强度设计值时，应在梁上布置配箍率大于0.15%的抗剪钢筋。箍筋间距应小于构件有效高度的3/4，且小于400mm。

条文说明

通常条件下，ECC材料均能满足的要求，但是高粉煤灰掺量的ECC一般强度较低，需要核算其抗拉开裂强度并满足最小配箍率要求。

* + 1. 若计算表明梁需要抗剪钢筋时，布置箍筋间距应小于构件有效高度的1/2且小于300 mm，在等于构件有效高度的抗剪钢筋区域末端处提供相同数量的抗剪钢筋。箍筋布置应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定。
    2. 当箍筋锚固在受拉区域时，由于锚定在拉伸区域中的ECC的粘结强度尚未明确，应通过测试等方法进行确认。

条文说明

相比混凝土，ECC材料与钢筋具有更高的粘结强度。ECC与钢筋的粘结测试方法可采用单轴拉伸试验。

* + 1. 采用钢绞线网片对钢筋混凝土梁进行受弯加固时，应符合下列规定：

1. 对梁、板构件进行正截面受弯加固时，钢绞线网片宜延伸至支座边缘；钢绞线网片端部与加固构件应有可靠连接。
2. 对梁、板负弯矩区进行受弯加固时，钢绞线网片的截断位置距支座边缘的延伸长度应根据负弯矩分布确定，且对板不小于1/4跨度，对梁不小于1/3跨度，截断位置钢绞线与加固构件需有可靠连接。
3. 当采用钢绞线网片对框架梁负弯矩区进行受弯加固时，应采取可靠锚固措施与支座连接。当钢绞线网片需绕过柱时，宜在梁侧4倍受压翼缘高度的范围内布置，当有可靠依据和经验时，此限制可适当放宽。
4. 在集中荷载作用点两侧宜设置构造的钢绞线网片U形箍。
   * 1. 采用FRP格栅-ECC进行加固时，应符合以下构造要求。
5. 对正弯矩区进行受弯加固时，FRP格栅宜延伸至支座边缘。在集中荷载作用点两侧应设置构造的FRP格栅U形箍（对梁）。
6. FRP格栅的切断位置距其充分利用截面的距离不应小于按下式计算得出的粘结延伸长度*ld*，并应延伸至不需要FRP格栅截面之外不小于200mm（图7.2.10）。

(7.2.10-1)

式中，*ld*——FRP格栅从强度充分利用截面向外延伸所需的粘结长度；

*cf*——充分利用截面处FRP格栅的拉应变；

*cf*——FRP格栅与混凝土间的粘结强度设计值，取0.5MPa；

*bcf*——受拉面上粘贴的FRP格栅的宽度。

*L*d

≥200mm

FRP格栅

梁

原钢筋部分承担的弯矩

加固后提高的弯矩

图7.2.10 FRP格栅的粘结延伸长度

* 1. 柱的受压加固
     1. 采用ECC加固混凝土柱应符合国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010规定的结构分析基本原则，且一般情况下，应采用线弹性方法计算结构的作用效应。
     2. 采用ECC加固混凝土柱时，应按照以下规定进行承载能力极限状态和正常使用极限状态的设计验算：

1. 被加固柱的作用效应，应按照下列要求确定：（1）受压柱的计算图形，应符合其实际受力和构造状况；（2）作用效应和组合值系数以及作用的分项系数，应按照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009确定，并应考虑由于实际荷载偏心、结构变形、温度作用等造成的附加内力。
2. 受压柱的尺寸，对原有部分采用实测值；对新增部分，可采用加固设计文件给出的名义值。
   * 1. 采用增大截面法加固钢筋混凝土轴心受压柱时，其正截面轴心受压承载力应按附录B.0.1条计算。
     2. 采用增大截面法加固钢筋混凝土偏心受压柱时，其正截面受压承载力应按附录B.0.2条计算。
     3. 加固混凝土结构时，ECC加固层厚度宜为25mm~45mm，增强筋材的保护层厚度不应小于15mm。
     4. 为了保证ECC加固层与原混凝土之间的可靠粘结，加固构件表面应进行凿毛处理，凿毛后粗糙度等级不宜低于Ⅱ级；对于临时建筑结构的加固，混凝土构件表面的粗糙度等级不宜低于Ⅰ级：
3. 构件表面经凿毛后的粗糙度可按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7.3.8-1) |

式中：——界面粗糙度；

——平均抹砂深度；

——表面凿毛最大深度限制，取10mm；

1. 加固混凝土构件表面凿毛程度可按下列规定划分为三个粗糙度等级：

Ⅰ级粗糙度：；

Ⅱ级粗糙度：；

Ⅲ级粗糙度：；

* 1. 节点加固
     1. 采用增强筋材加固后框架节点的抗剪承载力宜按附录C.1.1条计算，应考虑三部分贡献：1）原框架节点核心区混凝土抗剪承载力；2）新增加的加固层增强筋材的抗剪承载力；3）加固层ECC材料的抗剪承载力。
     2. 加固混凝土框架节点时，ECC加固层厚度宜为25mm~45mm；当增强筋材的保护层厚度不小于15mm，被加固构件的耐火极限要求分别为1.5h、2.0h、2.5h时，应在ECC层表面分别加抹不少于2mm、5mm、10mm厚的石膏、石灰砂浆面层或防火砂浆。

条文说明

相比混凝土，ECC材料具有更高的耐火极限和火灾后剩余强度。为进一步提高火灾安全性，本条建议对ECC层表面做防火处理。

* + 1. 增强筋材采用普通钢筋网和CFRP网时，应在加固构件表面植入剪切销钉，植入深度不应小于5d（d为销钉直径），且不应小于40mm，剪切销钉的间距不应小于销钉植入深度的2倍，销钉与试件边缘的距离不应小于60mm。
  1. 楼板加固
     1. 采用ECC进行楼板抗弯加固时，应对原混凝土表面进行人工凿毛处理，粗糙度为0.9-1.5mm；浇筑ECC前需对凿毛后的混凝土表面浇水润湿，确保ECC加固层与混凝土变形协调，共同受力。

条文说明

ECC与混凝土的基体均为水泥基材料，通过表面凿毛处理可有效提高两者之间的机械咬合作用。

* + 1. 采用FRP格栅增强ECC进行楼板加固时，应符合以下规定：

1. FRP格栅可采用单层或双层，格栅应采用专用的金属胀栓固定在构件上；金属胀栓间距宜为400mm，交错布置。
2. 当设置单层FRP格栅时，ECC厚度不宜小于15mm；当设置双层格栅时，ECC厚度不宜小于30mm。
3. 宜采用喷射法进行ECC施工。
   * 1. 采用普通钢筋网增强ECC进行楼板加固时，应符合以下规定：
4. 普通钢筋网可采用单层或双层，普通钢筋网应采用专用的金属胀栓固定在构件上，且保证施工过程中钢筋弯位置不发生变动。
5. 当设置单层普通钢筋网时，ECC厚度不宜小于25mm；当设置双层普通钢筋网时，ECC厚度不宜小于40mm；两层普通钢筋网间距大于钢筋网纵向钢筋直径，且最外层普通钢筋网保护层厚度大于15mm。
6. 宜采用喷射法进行ECC施工。
   * 1. 采用ECC直接进行楼板加固时的承载力宜按附录C.2.1条计算。
     2. 采用FRP格栅增强ECC进行楼板加固时的承载力宜按附录C.2.2条计算。
     3. 采用普通钢筋网增强ECC进行楼板加固时的承载力宜按附录C.2.3条计算。
   1. 砌体加固
      1. 采用ECC面层加固砌体结构时，面层厚度宜为10 mm-25 mm；采用双面加固时，每侧ECC面层的厚度不宜小于10mm；采用单面加固时，面层厚度不宜小于15 mm。当面层厚度超过25 mm时，宜采用钢筋网、高强钢绞线网或FRP格栅等增强筋材与ECC复合加固，增强筋材保护层厚度不小于15 mm。采用增强筋材与ECC复合加固砌体结构时，原墙体砌块的实际强度等级不宜低于MU7.5。
      2. 加固后砌体结构的环境温度不宜超过80℃。

条文说明

ECC中的有机短切纤维（如PVA纤维）在高温及次高温环境下，易出现纤维变脆现象，导致ECC延性降低。

* + 1. 被加固砌体构件表面粗糙度等级应满足国家行业标准《水泥基复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程》CECS 242中的有关规定。
    2. 加固后砌体结构的安全等级，应根据结构破坏后果的严重性、结构的重要性和加固设计使用年限，由委托方按实际情况共同商定。
    3. 未经技术鉴定或设计许可，不得改变加固后砌体结构的用途和使用环境。
    4. 本规程的各种砌体加固方法，在具体采用时应在设计、计算和构造上执行现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011和现行行业标准《建筑抗震加固技术规程》JGJ 115的有关规定和要求。
    5. ECC加固砌体结构宜采用线弹性分析方法计算结构的作用效应，并应符合现行国家标准《砌体结构设计规范》GB50003的有关规定。
    6. 原结构、构件的砌体强度等级应按下列规定取值：

1. 当原设计文件有效，且不怀疑结构有严重的性能退化时，可采用原设计值。
2. 结构的可靠性鉴定认为应重新进行现场检测时，应采用检测结果推定的标准值。
   * 1. 采用ECC面层或钢筋网-ECC复合加固轴心受压的砌体结构时，其正截面受压承载力宜按附录D.0.1条计算。
     2. 采用ECC面层或增强筋材-ECC复合加固墙体时，其受剪承载力宜按附录D.0.2条计算。
     3. 采用ECC面层加固后提高的受剪承载力宜按附录D.0.3条计算。
     4. 采用ECC面层或增强筋材-ECC面层对砌体结构进行抗震加固时，宜采用双面加固以增强结构的整体性。
     5. 采用ECC面层或增强筋材-ECC面层加固砌体墙的抗震受剪承载力宜按附录E.0.4条计算。
     6. ECC面层加固墙体四周应采用嵌缝、L形倒角或拉结钢筋等方式与楼板、梁、柱或墙体可靠连接。ECC面层加固遇门窗洞口时，单面加固宜将面层延伸至洞口侧边锚固，双面加固宜将两侧的面层在洞口处闭合。
     7. 钢筋网—ECC加固砌体结构时，竖向受力钢筋直径不应小于10 mm，净距不应小于30 mm。受力钢筋距砌体面的距离不应小于5 mm。
     8. 钢筋网—ECC加固砌体结构时，钢筋网的横向钢筋遇门窗洞口时，对单面加固情形，宜将钢筋弯入洞口侧面并沿周边锚固；对双面加固情形，宜将两侧的横向钢筋在洞口处闭合，且应在钢筋网折角处设置竖向构造钢筋；在门窗转角处，应设置附加的斜向钢筋。
     9. 高强钢绞线网片—ECC加固砌体结构时，高强钢绞线网片端部锚板的厚度应由计算确定，但不应小于8mm。
     10. FRP格栅—ECC加固砌体结构时，FRP格栅与被加固砌体之间的锚固宜设置为梅花形布置。FRP格栅四周应与楼板、梁、柱或墙体可靠连接。
   1. 裂缝修补
      1. 采用ECC进行承重与非承重构件表面裂缝修补时，应符合以下基本规定：
3. 对承载力不足引起的裂缝，除应按本节方法进行修补外，尚应采用适当的加固方法进行加固；
4. 经可靠性鉴定确认为必须修补的裂缝，应根据裂缝的种类进行修补设计，确定其修补材料、修补方法和修补时间；
5. ECC面层与原结构应有可靠的粘结，面层厚度一般为10 mm-25 mm；当面层厚度超过25 mm时，宜在面层内每25mm增设一层钢筋网片或FRP格栅，形成配筋ECC面层；
6. 原构件表面应经处理，一般情况下，应予以凿毛处理，凿毛深度不应小于5 mm。
   * 1. 用于裂缝修补的ECC材料应符合下列性能要求：
7. 用于竖向结构外表面或水平结构下表面修复的ECC材料，在工作性满足要求的前提下选择较低的坍落度；
8. 使用喷射施工方式时，应符合现行有关标准的要求；
9. 用于非受力表面裂缝修补的ECC强度等级不应低于ECC20；用于受力表面裂缝修补的ECC强度等级不应低于原材料强度等级；ECC材料的抗拉强度标准值不宜小于2 MPa。
   * 1. 配筋ECC面层中的钢筋网片或FRP格栅应符合下列规定：
10. 钢筋网片可采用ϕ6- ϕ8钢筋，钢筋间距不宜大于300mm；
11. FRP格栅宜采用网眼目数为1，公称断裂强力不小于30kN/m的格栅。
    * 1. 抗渗裂缝修补前应铲除裂缝周围至少500 mm的旧面层，并应在构件表面沿裂缝走向骑缝凿出槽深和槽宽分别不小于20 mm和15 mm的U形沟槽；当裂缝宽度小于1 mm时，也可凿成V形沟槽。
      2. 应采取措施防止ECC面层端部剥离破坏，可在墙上开槽将面层端部嵌入墙内或采用嵌缝、L形倒角等形式加强端部锚固。
      3. 遇门窗洞口时，双面修补宜将两侧的修补面层在洞口处闭合，单面修补宜将修补面层延伸至洞口侧边锚固。
    1. 喷射ECC
       1. 混凝土喷射设备的选用应符合下列规定：
12. 生产能力不应小于3.0m3/h；
13. 允许输送骨料的最大粒径为25mm；
14. 水平输料距离不宜小于50m，竖向输料距离不宜小于20m；
15. 有良好的密封性和连续均匀输料能力。
    * 1. 空气压缩机的选用应符合下列规定：
16. 单台供风量不宜小于9m3/min；
17. 压缩空气进入喷射机前，应进行油水分离；
18. 应能供给稳定的风压，风压不宜小于0.6MPa；
19. 当多台喷射机同时工作时，空气压缩机的供风量应为各台喷射机用风量之和的1.2~1.4倍。
    * 1. 宜选用强制式混凝土搅拌机。搅拌机容量应与混凝土喷射设备生产能力相匹配，且容量不宜小于400L，生产能力宜为3 ~5m3/h。
      2. 输料管的承压能力不宜小于0.8MPa，管径应满足输送设计最大粒径骨料的要求，并应具有良好的耐磨性能。
      3. 供水设施应能保证连续供水，且喷头出的水压宜为0.15~0.2MPa。

制备与施工

* 1. 一般规定
     1. ECC的制备应按产品说明要求的配合比进行。ECC的基准强度应符合设计要求，可参照普通混凝土的配制方法选取水灰比、用水量等配合比参数，并应依设计要求合理使用膨胀剂、减缩剂等掺合料和外加剂。

条文说明

ECC的制备与施工要求和普通混凝土类似。ECC的配合比设计、基准强度确定、配制方法、外加剂掺量都应符合相应标准的要求。

* + 1. ECC的施工应按设计要求进行，在充分了解材料浇筑和硬化性能的基础上编制专项施工技术方案，并配置相应的专业人员和仪器设备。

条文说明

ECC的专项施工技术方案可分为两个方面：一方面是搅拌站的生产技术方案（涉及原材料、ECC的制备及运输等），进行生产质量控制；另一方面是工程现场的施工技术方案（涉及浇筑、成型、养护及其相关的工艺及技术等），进行现场施工质量控制。这两方面也可以合为一体。

* + 1. 在ECC拌合物的运输和浇筑过程中，不应向拌合物中加水。

条文说明

在运输和浇筑过程中，向ECC拌合物中加水会严重影响ECC的性能，包括但不限于降低ECC的强度、耐久性等，造成很大的危害，严重影响工程质量，必须禁止。

* 1. 原材料贮存与计量
     1. 各种原材料应分仓贮存，贮存处应有明显标识，并应符合下列规定：

1. 水泥应按品种、强度等级和生产厂家分别贮存，不得与矿物掺合料等其他粉状料相混，并应采取遮雨、防尘措施，不应使用贮存期超过3个月的水泥。
2. 矿物掺合料应按品种、质量等级和生产厂家分别贮存，不得与水泥等其他粉状料相混，并应采取遮雨、防尘措施。
3. 骨料应按品种、规格分别堆放，不得相混或污染。堆场应为能排水的硬质地面，并应采取遮雨、防尘措施。
4. 纤维应按品种、规格和生产厂家分别贮存，并应采取防潮、防尘措施。
5. 外加剂应按品种和生产厂家分别贮存，液态外加剂应贮存在密闭容器内，并应采取防晒、防冻措施，使用前应搅拌均匀；固态外加剂应防止受潮结块。

条文说明

ECC所用的原材料种类多，一些原材料为粉末状且外观较为相似，分仓贮存和明显的标识可以避免混乱和用料错误。

1. 一般混凝土搅拌站都备有两种水泥，所以水泥应按品种、强度等级和生产厂家分别标识和储存，不得与矿物掺合料等其他粉状料相混。遮雨、防潮和防尘等措施可以有效预防水泥受潮、结块及污染，从而保证水泥的活性。水泥在储存过程中会吸收大气中的水分缓慢水化，储存期超过3个月的水泥已不能保证其性能，不应使用。
2. 矿物掺合料的外观与水泥极为类似，因此矿物掺合料应按品种、质量等级和生产厂家分别标识和储存，不应与水泥等其他粉状料相混，不应使用受潮、结块的矿物掺合料。
3. 骨料应按品种、规格分别堆放。强度较高的ECC对用水量的变化极其敏感，采用能排水的硬质地面和遮雨措施可以防止骨料含水量波动，保证施工配合比的准确性。
4. 纤维一般为袋装，应按品种、规格和生产厂家分别标识和贮存。选用钢纤维作为辅助纤维时，应采取防潮、防锈措施。

外加剂应按品种和生产厂家分别贮存，液态外加剂（比如高效聚羧酸系减水剂）应贮存在密闭容器内，受晒、受冻后的性能会降低；固态外加剂受潮、结块后的性能会降低。

* + 1. 原材料计量应采用电子计量设备，其精度应符合现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171的规定。

条文说明

ECC生产对原材料计量要求较高，尤其是对水和外加剂的计量要求高。采用电子计量设备有利于保证计量精度，保证ECC生产质量。计量设备的精度应符合现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171的规定。

* + 1. 原材料的计量允许偏差应低于表8.2.3的规定，并应每班检查一次。

表8.2.3 原材料的计量允许偏差（按质量计，%）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 原材料品种 | 水泥 | 矿物掺合料 | 骨料 | 纤维 | 外加剂 | 水 |
| 最大计量偏差 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 |

条文说明

为保证ECC的质量，原材料的计量允许偏差应严格满足表8.2.3的规定，并应每班检查一次。

* + 1. 原材料计量过程中，应根据骨料的含水率变化及时调整骨料和水的称量。

条文说明

如果骨料的含水率变化而未及时调整骨料和水的称量，水胶比会发生改变，从而影响ECC的性能。

* 1. 制备与运输
     1. ECC可采用集中搅拌或现场搅拌方式生产，采用的搅拌机应符合现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171的规定，宜采用强制式搅拌机。

条文说明

ECC生产方式较为灵活，可采用集中搅拌或现场搅拌。现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171对主要参数系列、搅拌设备、供料设备、供料系统、贮料仓、配料装置、混凝土贮斗、安全环保和其他方面做了全面细致的规定，对保证ECC生产质量十分重要。ECC的原材料种类多，用量相差大，用水量小，不易搅拌均匀，宜采用强制式搅拌机。

* + 1. 制备ECC所用的水泥、矿物掺合料和/或骨料等干粉料宜在工厂混合为预混料。将预混料运输到预拌混凝土厂或施工现场后，加水和外加剂搅拌3~5min至浆体均匀，然后分两次缓慢撒入纤维再搅拌3~5min。搅拌机的下料处应设有防止纤维结团的装置。

条文说明

本条文规定了ECC按预混料处理时的搅拌工艺流程。

* + 1. 当不采用预混料时，搅拌的投料顺序宜为骨料、水泥、矿物掺合料、水、外加剂、纤维。骨料、水泥、矿物掺合料等干料料先预搅拌3~5min至混合均匀，投入水和外加剂后搅拌3~5min至浆体均匀，然后分两次缓慢撒入纤维再搅拌3~5min。搅拌机的下料处应设有防止纤维结团的装置。

条文说明

本条文规定了不采用预混料处理时ECC的搅拌工艺流程。

* + 1. ECC每盘的最大搅拌量应通过已有现场数据或试验合理确定，并考虑搅拌机类型、容量和搅拌效率；如在搅拌前拌制过其他品种的混凝土材料，应清洗搅拌机。

条文说明

通过已有现场数据或试验确定ECC每盘的最大搅拌量是可行的。清洗搅拌机可以清除之前残留在搅拌机内的其他品种混凝土材料，保证ECC产品质量。

* + 1. 运输ECC的搅拌运输车应符合现行行业标准《混凝土搅拌运输车》JG/T 5094的规定。

条文说明

运输ECC的搅拌运输车应满足现行行业标准《混凝土搅拌运输车》JG/T 5094的规定。

* + 1. 搅拌运输车装料前应确保搅拌罐内无积水或积浆。

条文说明

搅拌运输车的搅拌罐内积水或积浆会使ECC的配合比不准确。

* + 1. ECC拌合物自搅拌机卸入搅拌运输车至现场卸料的时间间隔不宜大于90min；拌合物的运输应确保浇筑连续。

条文说明

ECC拌合物从搅拌机卸入搅拌运输车至卸料时的时间不超过90min是易行的。运输时间过长，ECC拌合物的流动性降低过多，难于浇筑密实。ECC拌合物的运输、输送入模的过程宜连续进行，避免结构构件产生冷缝或薄弱层。

* 1. 浇筑
     1. ECC拌合物浇筑前，应检查模板支撑的稳定性以及接缝的密合情况。

条文说明

ECC拌合物中浆体多，流动性大，浇筑时对模板的压力大，易产生漏浆及涨模，因此支模是ECC施工的关键环节之一。

* + 1. ECC拌合物浇筑时应保证纤维分散的均匀性。应预先制订浇筑位置和方法的详细方案，以保证浇筑施工连续进行。

条文说明

浇筑时ECC拌合物的纤维分散不均和结团现象会严重影响ECC的性能。预先制订浇筑位置和方法的详细方案可以避免因浇筑施工间断而产生薄弱层。

* + 1. 当浇筑尺寸较大的结构构件时，应采取温控措施。

条文说明

浇筑大尺寸ECC结构构件的情况是存在的，温升会降低ECC的性能，因此应采取温控措施。

* + 1. ECC应采用机械振捣，确保振捣密实，并应不发生离析、泌水。

条文说明

采用机械振捣容易使ECC均匀和密实，但振捣时间过长易产生离析和分层，施工时应进行控制。

* + 1. 分层浇筑或接头部位都可能成为ECC薄弱环节，当上述浇筑情形不可避免时，应采取适当措施防止出现冷缝。

条文说明

ECC分层分块浇筑时，容易在分层、接头位置形成薄弱层。当上述浇筑情形不可避免时，应按照相关标准的规定采取措施防止出现冷缝。

* + 1. 当夏季施工时，ECC拌合物入模温度不应高于35℃，宜选择温度较低时段进行浇筑；当冬季施工时，拌合物入模温度不应低于5℃，并应有保温措施。

条文说明

本条规定了ECC入模温度的上下限值要求。最低入模温度可以保证ECC在低温施工阶段具有一定的抗冻性；控制最高入模温度有利于裂缝控制。

* + 1. 泵送设备和管道的选择、布设与泵送操作可按现行行业标准《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10的有关规定执行；缺乏ECC泵送经验时，施工前宜进行试泵。

条文说明

ECC泵送是施工的关键环节之一。现行行业标准《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10给出了泵送设备和管道的选择、布设与泵送操作的相关规定。一般认为：ECC拌合物内含纤维，与输送管之间的阻力大，尤其在大高程泵送情况下，有一定的控制难度。施工前进行ECC试泵能够提高泵送的可靠性。

* + 1. 当泵送高度超过100m时，宜采用高压泵进行泵送；当泵送高度超过100m、ECC强度等级不低于ECC50时，宜采用150mm管径的输送管。

条文说明

泵送间歇后，开始泵送瞬间ECC与管壁摩擦阻力大，较大高程的ECC泵送对泵压要求高。采用较大管径的输送管有利于减小高强ECC因阻力作用对泵送产生的影响。

* + 1. 当改泵较高强度等级的ECC时，应清空输送管道中原有的较低强度等级ECC。

条文说明

输送管道中原有的较低强度等级ECC混入后来浇筑的较高强度等级ECC中会引发工程事故。

* + 1. 浇筑过程中应抽样制备同条件试件，在与结构或构件相同的环境下成型、养护。

条文说明

本条规定在浇筑过程中应抽样制备同条件试件，并进行同条件成型、养护，以备ECC性能检测评定使用。

* 1. 加固施工
     1. 采用ECC加固结构的材料检验、安装施工和工程质量验收应进行全过程控制。
     2. ECC加固施工前，应检查和修补结构原有裂缝、爆皮等缺陷。
     3. ECC加固施工应配合其他专业的预留预埋工作，不得破坏原有预埋管线。
     4. 采用ECC加固混凝土结构和砌体结构时，应对结构构件加固区采取标识措施，未经技术鉴定或设计许可，严禁任何人在加固定成后对加固区进行破坏性施工。
     5. ECC加固施工应符合下列流程：

1. 施工准备；
2. 基层处理；
3. 增强筋材施工；
4. 界面剂施工；
5. 涂抹或浇筑ECC材料；
6. 养护。
   * 1. 施工准备应符合下列规定：
7. 作业面经过交接，应无水电管线等障碍物，垂直面上应无交叉作业。
8. 应对被加固结构进行卸荷及设置临时支撑。
9. 应在施工现场加固构件旁采用相同材料和施工工艺制作施工样板。
10. ECC加固的现场施工样板应进行实体见证检验，且其检验结果应满足下列条件之一：

1) 正拉粘结强度不小于2.0N/mm2；

2) 样板破坏形式为基材内聚破坏。

* + 1. 基层处理应符合下列规定：

1. 应按图纸现场放线定位，确定加固范围。清除结构原有抹灰等装修面层时，应处理至裸露原结构坚实面，基层处理的边缘应比设计抹灰尺寸外扩50mm。
2. 对原混凝土结构待加固面应进行凿毛处理，并应清理表面、喷水湿润，保持面层潮湿但无明水状态。水质应达到砂浆的用水要求。
3. 对松散、剥落等缺陷较大的部位剔除后应按本规程第4.1.8节要求涂刷界面剂，后用ECC进行修补，表面刮毛，经修补后的基面应适时进行喷水养护，养护时间不应少于7天。
4. 对裸露、锈蚀的钢筋应进行除锈处理。
   * 1. 钢筋网施工应符合下列规定：
5. 施工前应对钢筋进行调直。加工好的钢筋或钢筋网应按被加固构件做相对应的编号和分批存放。
6. 钢筋网安装前，应在被加固构件面采用机械钻孔，孔的布置应为梅花状布置，孔内粉末及污物应及时清除。在孔内植入剪切销钉、锚筋、穿墙筋等，其竖向间距和横向间距均不应大于500mm。宜在植入剪切销钉等24h后进行下一道工序。
7. 钢筋网与剪切销钉、锚筋或穿墙筋除采用铁丝交叉扎牢外，也可以采用点焊固定。
   * 1. 钢绞线网片施工应符合《钢绞线网片聚合物砂浆加固技术规程》(JGJ 337)的规定。
     2. 钢丝绳网片施工应符合《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367）的规定。
     3. FRP格栅施工应符合下列规定：
8. FRP格栅施工应与ECC层施工同时进行。
9. 界面处理后在混凝土表面抹界面剂，然后抹第一层ECC，填实并压平。在第一层ECC初凝之前铺设第一层纤维织物，然后抹第二层ECC。
10. 第二层ECC初凝前压实两到三遍，铺设第二层纤维织物，然后抹面层ECC，厚度将第二层织物完全覆盖即可，待ECC初凝后压光两三遍，以保证密实度。如需继续铺设织物，可照上述步骤进行施工。
    * 1. 界面剂施工应符合下列规定：
11. 喷涂界面剂前，应用高压气泵将构件加固面上因作业带来的浮尘、浮渣等清理干净；并应提前6h对被加固构件表面进行喷水养护，保持湿润且无明水。
12. 界面剂配制应采用液状产品，并应按产品使用说明将界面剂乳液与粉料按规定配比在搅拌桶中配制，用电动搅拌器搅拌均匀。
13. 基层养护完成后即可涂刷或喷涂界面剂。界面剂施工应按ECC抹灰施工段进行，界面剂应随用随搅拌，喷涂应分布均匀。
    * 1. ECC施工宜采用机械喷涂抹灰，也可采用人工抹灰。ECC抹灰范围应比设计抹灰范围外扩不小于20mm。如果空间允许也可用浇筑施工方式。
      2. 采用机械喷涂抹灰应符合下列规定：
14. 喷涂顺序和路线宜先远后近、先上后下、先里后外。喷枪移动轨迹应规则有序，不宜交叉重叠，喷头与受喷面应基本垂直喷射距离宜保持0.6-1.0m。应保持喷射混凝土表面平整，湿润光泽，无干块滑移、流淌现象。
15. 应在界面剂凝固前喷涂第一层ECC，并应将ECC均匀喷涂在被加固表面及筋材之间。喷涂厚度应基本覆盖筋材，并完成一次喷涂。第一层喷涂表面应拉毛。
16. 后续ECC的喷涂应在前次ECC初凝后进行。后续喷涂分层厚度控制在10mm~15mm，喷涂要求均匀密实，应使前后喷涂层结合紧密。尚未达到设计厚度时，在后续喷涂前应将上一层ECC表面拉毛；已达到设计厚度时，表面抹平、压实、压光。
17. 喷涂过程中应加强对成品的保护，对各部位喷溅粘附的ECC应及时清除干净。
    * 1. 人工抹灰应符合下列规定：
18. 应在界面剂凝固前抹第一层ECC。第一层ECC施工时应压实，使ECC透过增强筋材与被加固构件基层结合紧密。第一遍抹灰厚度不宜超过15mm，且宜覆盖增强筋材。第一层抹灰表面应拉毛。
19. 后续抹灰应在前次抹灰初凝后进行。后续抹灰的分层厚度应控制为10mm~15mm。抹灰要求挤压密实，使前后抹灰层结合紧密。尚未抹至设计厚度时，在后续抹灰前应将上一层抹灰表面拉毛；已抹至设计厚度时，表面抹平、压实、压光。
    1. 养护
       1. ECC浇筑或抹灰成型后，应及时对暴露面进行覆盖。ECC终凝前，其表面应用抹子搓压两遍以上，平整后重新覆盖。采用塑料布覆盖养护的ECC材料，其敞露的全部表面应覆盖严密，并应保持塑料布内表面有凝结水。

条文说明

ECC早期收缩比较大，表面水分损失会加剧ECC开裂倾向。因此，应采取措施防止ECC浇筑成型后的表面水分损失。

* + 1. ECC在终凝后可采取潮湿养护或蒸汽养护。其中，潮湿养护可采用蓄水、浇水、喷淋洒水或覆盖保湿等方式，养护时间不宜少于7d。蒸汽养护可按普通混凝土预制构件的养护方法执行。

条文说明

本条规定了ECC的养护方式可为潮湿养护或蒸汽养护。潮湿养护时间不宜少于7d；蒸汽养护可参照现行相应标准执行。

* + 1. 当ECC材料表面不便浇水或使用塑料布时，宜涂刷养护剂。当采用养护剂进行养护时，养护剂的有效保水率不应小于90%。在风速较大的环境养护时，应采取适当的防风措施。室内施工后，宜将门窗关闭，室外构件要采取措施防止烈日曝晒。

条文说明

涂刷养护剂适用于ECC材料表面不便浇水（如竖向结构的立面）或使用塑料布的情况。对于风速较大的环境，大风会使ECC表面迅速失水，还可能破坏养护覆盖条件，引起表面开裂。采取防晒措施可以减少表面水分损失。

* + 1. 当冬季施工和夏季施工时，ECC的养护的可按照普通混凝土的养护方法执行。

条文说明

ECC结构在冬季、夏季施工时，养护方法应按现行相应标准的规定执行。

检测与验收

* 1. 检测评定
     1. ECC的原材料进场时，应按规定批次查验出厂检验报告或合格证等质量证明文件，外加剂产品和纤维还应提供使用说明书。
     2. 原材料进场后应进行进场检验，合格后方可使用，检验项目与批次应符合本规程第4章及现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164的规定。
     3. ECC的性能应分批进行检测评定。同一个检验批应由强度等级相同、试验龄期相同、生产工艺条件和配合比相同的ECC组成。
     4. ECC拌合物的取样应符合下列规定：

1. ECC工程施工中的取样应符合《混凝土工程施工质量验收规范》GB50204的有关规定。
2. 浇筑成型的ECC施工现场拌合物取样应从同一次搅拌或同一车运输的ECC中取出，取样量应不小于试件所需量的1.5倍，且不宜小于10L。

条文说明

ECC拌合物的质量控制是施工质量控制的关键环节之一。本条规定了ECC拌合物的取样标准。

* + 1. ECC拌合物的检验应符合下列规定：

1. 检验拌合物各组成材料的称量是否与配合比相符。同一配合比每台班不得少于1次。
2. 检验拌合物的坍落度、扩展度及表观密度，每台班每一配合比不得少于1次。
3. 对于有抗冻性要求的应变硬化水泥基复合材料，应检验拌合物含气量，每台班不得少于1次。
4. 检验拌合物的水溶性氯离子含量，同一工程同一配合比不得少于1 次。

条文说明

本条规定了ECC拌合物的检验项目与检验频率。计量、坍落度、扩展度、表观密度、抗冻性相关的含气量、氯离子含量等项目的检验是ECC拌合物质量控制的重要保证。

* + 1. ECC的力学性能应每50m3检验一次，不足50m3的按50m3计算，每工作台班应至少检验1次。

条文说明

为了减小因ECC生产量不大而造成的质量波动，检验批划分区间较小。每50m3的ECC检验一次力学性能。当批量不到50m3时，按50m3计算。如果每天生产量较小，则每工作台班（8小时）应至少检验一次。

* + 1. ECC抗压强度、抗折强度、轴心抗拉力学性能和弹性模量等力学性能的检验应符合第十章相关规定。
    2. ECC耐久性能的检验评定应符合现行行业标准《混凝土耐久性检验评定标准》（JGJ/T 193）的规定。

条文说明

ECC耐久性能的表征参数，如抗冻性、抗渗性、抗碳化性、抗硫酸盐侵蚀性、早期抗裂性等的检验方法都应符合现行行业标准《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193的规定。

* 1. 质量验收
     1. ECC的质量验收应符合表9.2.1的规定。

表9.2.1 ECC的质量验收

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 检查项目 | 允许偏差或允许值 |
| 主控项目 | 拌合物性能 | 工作性良好、匀质、质量稳定，并达到设计要求 |
| 抗拉强度 | 达到设计要求 |
| 抗压强度 | 达到设计要求 |
| 极限拉应变 | 满足本规程4.2.4的要求 |
| 一般项目 | 表观质量 | 平整、密实、无空鼓 |

* + 1. ECC工程的验收应符合现行国家标准《混凝土工程施工质量验收规范》GB50204、设计文件与合同的规定，并应按设计要求和质量合格条件进行分项工程验收。设计文件或合同中要求的其它检验项目，其试验方法应符合现行有关标准的规定，无标准的应按设计文件或合同规定执行。
    2. 当ECC的检验有不合格项目出现时，应组织专家进行评审，专家意见作为验收文件的一部分备案。

# 材性测试

* 1. 试件尺寸
     1. 立方体抗压强度试件宜为边长100mm×100mm×100mm的立方体试件。
     2. 轴心抗压强度和弹性模量试件宜为边长100mm×100mm×300mm的棱柱体试件。
     3. 抗折强度试件宜为边长100mm×100mm×400mm的棱柱体试件。
     4. 受拉特性包括抗拉开裂强度、抗拉强度、极限拉应变和平均裂缝宽度，试件可采用200mm×100mm×20mm的薄板试件或图10.1.4所示的狗骨型试件。其中部较窄的等截面区域为变形测量区，长80mm，宽30mm；两端较宽的区域为夹持区，夹持区长度可根据夹持方式的不同在40mm～70mm的范围内调整；有效测量区不小于80 mm。



图10.1.4 受拉特性试件尺寸（单位：mm）

* 1. 浇筑与养护
     1. ECC材性测试试件的浇筑应满足《混凝土结构工程施工规范》（GB 50666）的规定。
     2. 试件凝固成型后，应立即用塑料薄膜覆盖。试件应在(20±5)℃的环境温度中静置(24±1)h，然后编号、拆模。试件拆模后立即放入为温度为(20±2)℃、相对湿度在95％以上的标准养护室中养护。养护时，试件应间隔10mm～20mm放置在支架上，其表面应保持潮湿，且不应被水直接冲淋。试件养护的龄期从加水拌合开始计时。
  2. 仪器设备
     1. 测试立方体抗压强度和轴心抗压强度的压力试验机应满足《试验机通用技术要求》（GB/T 2611）和《液压式压力试验机》（GB /T 3722）的规定。此外，其荷载测量精度为±1％，试件破坏荷载应处在压力试验机力传感器量程的20％～80％范围内。
     2. 测试弹性模量的压力试验机要求与本规程10.3.1一致。微变形测量仪可选用位移传感器或电阻应变仪。其中，位移传感器的测量精度为±0.001mm，固定架标距为150mm；电阻应变仪的测量精度为±0.001%。
     3. 测试抗折强度的压力试验机要求与本规程10.3.1一致。抗折试验装置要求如下：

1. 试件的支座和加载头应采用直径20mm～40mm、长度不小于110mm的硬钢圆柱，支座立脚点固定铰支，其他为滚动铰支。
2. 试验时，4根硬钢圆柱所在的4个竖向平面应保持平行、等距。



图10.3.3 抗折强度试验装置 (单位：mm)

* + 1. 拉伸试验机应满足《试验机通用技术要求》（GB/T 2611）的有关规定，且应满足下列要求：

1. 荷载测量精度为±1％，试件最大荷载应处在试验机力传感器量程的20％～80％范围内；
2. 试验机应具有位移控制功能，并且能够均匀连续地加载；
3. 试件通过两个夹具同试验机连接，其中一个夹具与试验机刚接，另一个夹具与试验机铰接；
4. 微变形测量仪可选用位移传感器或引伸计，其测量精度为±0.001mm；
5. 游标卡尺，其测量精度为±0.05mm。
   1. 立方体抗压强度
      1. 立方体抗压强度试验的具体步骤如下：
6. 从养护室中取出试件，并将试件表面擦净。
7. 将试件安装在试验机的下压板上，试件的承压面应与成型时的顶面垂直，试件中心应与试验机下压板中心对准。
8. 开启试验机，当上压板与试件接近时，调整球座，使二者接触均衡。
9. 在试验过程中连续均匀地加载，当立方体抗压强度低于30MPa时，加载速度取0.3MPa/s～0.5MPa/s；高于或等于30MPa且低于60MPa时，加载速度取0.5MPa/s～0.8MPa/s；高于或等于60MPa时，加载速度取0.8MPa/s～1.0MPa/s。将试件加载至破坏，记录破坏荷载。
   * 1. 立方体抗压强度应按式(10.4.2)计算，精确到0.1MPa：

(10.4.2)

式中：——立方体抗压强度，单位为MPa；

——试件破坏荷载，单位为N；

——试件承压面积，单位为mm2。

* + 1. 立方体抗压强度试验以3个试件为一组，每组试件的立方体抗压强度按如下规定确定：

1. 该组试件的立方体抗压强度为3个测值的算术平均数，精确至0.1MPa。
2. 3个测值中的最小值或最大值中如有一个与中间值的差距超过中间值的15％时，把最大值和最小值一并剔除，取中间值作为该组试件的立方体抗压强度。
3. 如最大值和最小值与中间值的差距均超过中间值的15％，则该组试件的试验无效。
   1. 轴心抗压强度
      1. 轴心抗压强度试验的具体步骤与本规程10.4.1条相同。
      2. 轴心抗压强度应按式(10.5.2)计算，精确到0.1MPa：

(10.5.2)

式中： ——轴心抗压强度，单位为MPa；

——试件破坏荷载，单位为N；

——试件承压面积，单位为mm2。

* + 1. 轴心抗压强度试验以3个试件为一组，每组试件的轴心抗压强度确定方法与本规程10.4.3条相同。
  1. 弹性模量
     1. 测试弹性模量时，取3个试件按本规程10.5.1的规定测定轴心抗压强度，另外3个试件用于测定弹性模量。弹性模量试验的具体步骤应按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》（GB/T 50081）的规定进行。
     2. 弹性模量应按式(10.6.2)计算，精确到100MPa：

(10.6.2)

式中： ——弹性模量，单位为MPa；

——1/3轴心抗压强度时的荷载，单位N；

——基准应力为0.5MPa时的初始荷载，单位为N；

——试件承压面积，单位为mm2；

——时两个微变形测量仪测得试件两侧应变的算术平均数；当采用位移传感器时，单个应变值由/计算得出，其中为时位移传感器的读数，为测量标距，两个值的单位均为mm，当采用电阻应变仪时，应变值由电阻应变仪直接得到；

——时两个微变形测量仪测得试件两侧应变的算术平均数；当采用位移传感器时，单个应变值由/计算得出，其中为时位移传感器的读数，单位为mm；当采用电阻应变仪时，应变值由电阻应变仪直接得到。

* + 1. 每组试件的弹性模量按如下规定确定：

1. 该组试件的弹性模量为3个测值的算术平均数，精确至100MPa。
2. 如果其中有1个试件的轴心抗压强度与用以检验控制荷载的轴心抗压强度值相差超过后者的20％时，弹性模量按另2个试件测值的算术平均数计算。
3. 如果有2个或2个以上试件的轴心抗压强度与用以检验控制荷载的轴心抗压强度值相差超过后者的20％时，则该组试件的试验无效。
   1. 抗折强度
      1. 抗折强度试验的具体步骤如下：
4. 从养护室中取出试件，并将试件表面擦净；
5. 按图10.3.3所示安装试件，安装尺寸的偏差应不大于1mm；试件的承压面应为试件成型时的侧面，支座及承压面应与硬钢圆柱充分接触；
6. 在试验过程中连续均匀地加载，当立方体抗压强度低于30MPa时，加载速度取0.3MPa/s～0.5MPa/s；高于或等于30MPa且低于60MPa时，加载速度取0.5MPa/s～0.8MPa/s；高于或等于60MPa时，加载速度取0.8MPa/s～1.0MPa/s；
7. 加载至试件破坏，记录破坏荷载及试件下边缘断裂位置。
   * 1. 抗折强度应按式(10.7.2)计算，精确到0.1MPa：

(10.7.2)

式中： ——抗折强度，单位为MPa；

——试件破坏荷载，单位为N；

——支座间跨度，单位为mm；

——试件截面宽度，单位为mm；

——试件截面高度，单位为mm。

* + 1. 抗折强度试验以3个试件为一组，每组试件的抗折强度按如下规定确定：

1. 该组试件的抗折强度为3个测值的算术平均数，精确至0.1MPa。
2. 3个测值中的最小值或最大值中如有一个与中间值的差距超过中间值的15％时，把最大值和最小值一并剔除，取中间值作为该组试件的立方体抗压强度。
3. 如最大值和最小值与中间值的差距均超过中间值的15％，则该组试件的试验无效。
4. 3个试件中若有1个下边缘断裂位置位于两个集中荷载作用面之外，则抗折强度按另外2个试件的结果计算；若这2个测值的差值不大于这2个测值的较小值的15％时，则该组试件的抗折强度按着2个测值的算术平均数计算，否则该组试件的试验无效。
5. 3个试件中若有2个下边缘断裂位置位于两个集中荷载作用面之外，则该组试件的试验无效。
   1. 受拉特性
      1. 抗拉开裂强度、抗拉强度、极限拉应变和平均裂缝宽度试验的具体步骤如下：
6. 从养护室中取出试件，并将试件表面擦净。
7. 使用游标卡尺测量试件变形测量区的厚度和宽度，计算初始横截面积。
8. 采用位移传感器时，两个位移传感器应分别安装在试件变形测量区两个宽面或两个侧面的中线上；采用引伸计时，引伸计应固定在试件变形测量区宽面的中线上；标距应为50mm，其准确数值应使用游标卡尺进行测量并记录。
9. 采用位移控制方式进行加载，位移控制速度应为0.3~0.6mm/min；当试件承受的拉力下降至最大拉力的80％时，停止加载。
   * 1. 抗拉开裂强度试验以6个试件为一组，6个试件测值的算术平均数作为该组试件的抗拉开裂强度。抗拉开裂强度应按式(10.8.2)计算，精确到0.01MPa：

(10.8.2)

式中： ——抗拉开裂强度，单位为MPa；

——应力－应变曲线上上升段出现拐点时的拉力峰值，单位为N；

——试件变形测量区的初始横截面积，单位为mm2。

* + 1. 抗拉强度试验以6个试件为一组，6个试件测值的算术平均数作为该组试件的抗拉强度。抗拉强度应按式(10.8.3)计算，精确到0.01MPa：

(10.8.3)

式中： ——抗拉强度，单位为兆帕MPa；

——试件所能承受的最大拉力值，单位为牛顿N；

——试件变形测量区的初始横截面积，单位为mm2。

* + 1. 极限拉应变试验以6个试件为一组，6个试件测值的算术平均数作为该组试件的极限拉应变。试验报告中应注明微变形测量仪的种类和测量标距长度。极限拉应变应按式(10.8.4)计算，精确到0.01%：

(10.8.4)

式中： ——极限拉应变，单位为％；

——最大拉力时微变形测量仪的读数，单位为mm；

——加载前微变形测量仪的读数，单位为mm；

——微变形测量仪的测量标距，单位为mm。

* + 1. 平均裂缝宽度试验以6个试件为一组，6个试件测值的算术平均数作为该组试件的平均裂缝宽度。试验报告中应注明微变形测量仪的种类和测量标距长度。单个试件的平均裂缝宽度应按下式计算，精确至0.1μm：

 （10.8.5）

式中：*w*a —— 单个试件的平均裂缝宽度，单位为μm。

*N*c —— 试件前后两面微变形测量仪标距内裂缝数量的平均值。

本规程用词说明

**1** 为便于在执行本标准条文时区别对待，对于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”，坂面词采用“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：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

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

引用标准名录

1. 《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
2. 《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068
3. 《建筑结构荷载规范》GB 50009
4. 《建筑抗震设计规范》GB 50011
5. 《混凝土结构设计规范》GB 50010
6. 《砌体结构设计规范》GB50003
7. 《建筑设计防火规范》GB 50016
8. 《混凝土结构加固设计规范》GB 50367
9. 《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476
10. 《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081
11. 《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728
12. 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666
13. 《混凝土工程施工质量验收规范》GB50204
14. 《混凝土质量控制标准》GB 50164
15. 《混凝土外加剂》GB 8076
16. 《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171
17. 《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119
18. 《试验机通用技术要求》GB/T 2611
19. 《液压式压力试验机》GB /T 3722
20. 《公路工程技术标准》JTG B01
21. 《公路沥青路面设计规范》JTG D50
22. 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362
23. 《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310
24. 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01
25. 《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40
26. 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60
27. 《建筑抗震加固技术规程》JGJ 116
28. 《钢绞线网片聚合物砂浆加固技术规程》JGJ 337
29. 《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193
30. 《建筑抗震加固技术规程》JGJ 115
31. 《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10
32. 《混凝土用水标准》JGJ 63
33. 《混凝土搅拌运输车》JG/T 5094
34. 《水泥基复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程》CECS 242
35. 《活性粉末混凝土结构技术规程》DBJ043/T 325

附录A ECC加固钢筋混凝土梁承载力计算方法

**A.0.1** 采用钢绞线网片ECC对钢筋混凝土梁进行受弯加固时的承载力计算应符合以下规定：

1. 不考虑ECC的抗拉贡献，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010对受弯构件正截面承载力计算的基本假定外，尚应符合下列规定：

1) 构件达到受弯承载能力极限状态时，钢绞线的拉应变*rw*应按截面应变保持平面的假定确定，但不应超过钢绞线的极限拉应变*rwu*；

2) 当考虑二次受力影响时，应按截面应变保持平面的假定计算加固前受拉区边缘混凝土的初始应变*i*；

3) 钢绞线的拉应力*rw*可近似按下式确定：

(A.0.1-1)

式中：*Erw*——钢绞线的弹性模量（N/mm2）；

*rw*——钢绞线的拉应变。

4) 在达到受弯承载力极限状态前，ECC与混凝土之间不应发生粘结剥离破坏。

1. 在矩形截面受弯加固时，其正截面受弯承载力应按下列公式计算（图A.0.1）：

(A.0.1-2)

(A.0.1-3)

(A.0.1-4)

(A.0.1-5)

式中：*M*——构件加固后的正截面受弯承载力设计值（N·mm）；

*As*、*A's*——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积（mm2）；

*Arw*——受拉区钢绞线的截面面积（mm2）；

*fy*、*f'y*——钢筋的抗拉、抗压强度设计值（N/mm2）；

*fc*——混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm2）；

*frw*——钢绞线的抗拉强度设计值（N/mm2）；

*Erw*——钢绞线的弹性模量（N/mm2）；

*x*——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度（mm）；

**—系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010确定；

*cu*——混凝土极限压应变，取*cu*=0.0033；

*i*——初始弯矩*Mi*小于未加固截面受弯承载力的20%时，可忽略二次受力的影响；当考虑二次受力影响时，加固前构件在初始弯矩作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变，按第A.0.1条计算；当不考虑二次受力时，*i*取为0；

*rw*——受弯加固时钢绞线的强度利用系数；当按公式（A.0.1-4）计算的值大于1.0时，取为1.0；

*b*、*h*——加固前矩形截面的宽度、高度（mm）；

*h0*——加固前的截面有效高度（mm）；

a's——受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压区边缘的距离（mm）；

——钢绞线合力点至截面受拉区边缘的距离（mm）。

**

*h*0

*a'*

*h*

*M*

*rwfrwArw*

*1fcbx*

*fyAs*

*f'yA's*

b

*A*'s

*A*s

图A.0.1 受弯构件正截面承载力计算

1. 对翼缘位于受压区的T形截面受弯构件，当在其受拉面采用钢绞线网片ECC进行受弯加固时，应按本规程附录C第C.2.1条的原则和现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010中T形截面构件受弯承载力的计算方法计算和验算。
2. 考虑二次受力影响时，加固前在初始弯矩作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变应按下列公式计算：

(A.0.1-6)

(A.0.1-7)

(A.0.1-8)

(A.0.1-9)

(A.0.1-10)

(A.0.1-11)

(A.0.1-12)

(A.0.1-13)

(A.0.1-14)

式中：*Mi*——加固前受弯构件计算截面上实际承担的初始弯矩（N·mm）；

*ci*——加固前初始弯矩*Mi*作用下受压边缘的压应变；

*si*、*si*——加固前初始弯矩*Mi*作用下受拉钢筋的拉应变、拉应力（N/mm2）；

**——受压边缘混凝土压应变综合系数；

**——受拉钢筋拉应变不均匀系数；

**——内力臂系数，取0.87；

*Ec*、*Es*——混凝土、钢筋的弹性模量（N/mm2）；

*E*——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

**——受拉钢筋配筋率；

*ftk*——混凝土抗拉强度标准值（N/mm2）；

*te*——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率*As*/*Ate*；

*Ate*——有效受拉混凝土截面面积（mm2）；

*bf*、*hf*——受拉翼缘的宽度、高度（mm）；

'f——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值；

*b'f*、*h'f*——受压翼缘的宽度、高度（mm）。

1. 计算正截面受弯承载力时，应验算构件的斜截面受剪承载力，构件受剪破坏不应先于受弯破坏。

**A.0.2** 采用FRP格栅-ECC面层对钢筋混凝土梁进行受弯加固时的承载力计算应符合下列规定：

1. 采用FRP格栅对梁、板构件进行受弯加固时的承载力计算，除应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010对受弯构件正截面承载力计算的基本假定外，尚应符合下列要求：

1) 构件达到受弯承载能力极限状态时，FRP格栅的拉应变*cf*按截面应变保持平面的假定确定，但不应超过FRP格栅的允许拉应变[*cf*]；

2) 当考虑二次受力影响时，应根据加固的荷载状况，按截面应变保持平面的假定计算加固前受拉区边缘混凝土的初始应变*i*；

3) FRP格栅的拉应力*cf*应取FRP格栅弹性模量*Ecf*与其拉应变*cf*的乘积*Ecfcf*；

4) 在达到受弯承载能力极限状态前，FRP格栅与混凝土之间不发生粘结剥离破坏。

1. 在矩形截面受弯构件的受拉面上粘贴FRP格栅进行受弯加固时，不考虑ECC的受拉贡献，其正截面受弯承载力应按下列公式计算：

1) 当混凝土受压区高度*x*大于*cfbh*，且小于*bh0*时（图A.0.2a）

(A.0.2-1)

混凝土受压区高度*x*和受拉面上FRP格栅的拉应变*cf*应按下列公式确定：

(A.0.2-2)

(A.0.2-3)

2) 当混凝土受压区高度*x*不大于*cfbh*时（图A.0.2b）

(A.0.2-4)

3) 当混凝土受压区高度*x*小于2a'时

(A.0.2-5)

式中， *M*——包含初始弯矩的总弯矩设计值；

*As*、*A's*——受拉钢筋、受压钢筋的截面面积；

*Acf*——受拉面上粘贴的FRP格栅的截面面积；

*fy*、*f'y*——受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值；

*fc*——混凝土轴心抗压强度设计值；

*Ecf*——FRP格栅的弹性模量；

*x*——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度；

*cfb*——FRP格栅达到其允许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限相对受压区高度，取*cfb*=0.8cu/(*cu*+[*cf*]+*i*)；

*cu*——混凝土极限压应变，取*cu* =0.0033；

*i*——考虑二次受力影响时，加固前构件在初始弯矩作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变，按本规程第B.0.2条第4款计算；当可以不考虑二次受力时，取*i* =0；

[*cf*]——FRP格栅的允许拉应变，取[*cf*]=*kmcfu*，且该取值不应大于FRP格栅极限拉应变*cfu*的2/3和0.01两者中的较小值；

*cf*——FRP格栅的拉应变；

*km*——FRP格栅厚度折减系数，取*km* =（1.16-*ncfEcftcf*/308000）≤0.90，其中*tcf*的单位为mm，*Ecf*的单位为MPa；

*ncf*——FRP格栅的层数；

*tcf*——单层FRP格栅的厚度；

*b*、*h*——截面宽度、高度；

*h0*——截面的有效高度；

*a's*——受压钢筋截面重心至混凝土受压区边缘的距离。

*h*

*h*0

*M*

*cf*+**i

**s

*xn*

**cu

*a*'

b

*Acf*

*A*'s

*A*s

*cf*

*x*

*fc*

*fyAs*

*f'yA's*

（a）*x*>*cfbh*时

*h*

*h*0

*M*

*cf*＞[*cf*]

**s

*xn*

**c＜**cu

*a*'

b

*Acf*

*A*'s

*A*s

*Ecf*[*cf*]

*fc*

*fyAs*

*f'yA's*

（b）*x*≤*cfbh*时

图A.0.2 矩形截面正截面受弯承载力计算

注：图中*xn*为实际混凝土受压区高度。

1. 对翼缘位于受压区的T形截面受弯构件，当在其受拉面粘贴FRP格栅进行受弯加固时，应按《混凝土结构设计规范》GB50010关于T形截面构件受弯承载力的计算方法进行计算。
2. 考虑二次受力影响时，加固前在初始弯矩*Mi*作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变*i*应按下列公式计算：

(A.0.2-6)

(A.0.2-7)

(A.0.2-8)

(A.0.2-9)

(A.0.2-10)

(A.0.2-11)

式中：

*M*i——加固前受弯构件计算截面上实际作用的初始弯矩，当初始弯矩*M*i小于未加固截面受弯承载力的20%时，可忽略二次受力的影响；

*ci*——加固前初始弯矩*M*i作用下受压边缘的混凝土压应变；

**si、**si——加固前初始弯矩*M*i作用下受拉钢筋的拉应变、拉应力；

**——受压边缘混凝土压应变综合系数；

**——受拉钢筋拉应变不均匀系数；

**——内力臂系数，取0.87；

*Ec*、*Es*——混凝土、钢筋的弹性模量；

*E*——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

**——受拉钢筋配筋率；**=*As*/*bh0*;

*f*tk——混凝土抗拉强度标准值；

**te——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率*A*s/*A*te;

*Ate*——有效受拉混凝土截面面积，对受弯构件取0.5*bh*+（*bf*-*b*）*hf*。式中：*bf*、*hf*分别为受拉翼缘的宽度、高度；

*'f*——受压翼缘加强系数，取（*b'f*-*b*）*h'f*/*bh0*，*b'f*、*h'f*分别为受压翼缘的宽度、高度；

1. 计算正截面受弯承载力时，尚应符合下列要求：

1) 受压区高度*x*不宜大于0.8*bh0*，其中界限相对受压区高度*b*应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定计算；

2) 加固后在荷载效应标准组合下受拉钢筋的拉应力不应超过钢筋抗拉强度标准值。

1. 当FRP格栅粘贴于梁侧面的受拉区进行受弯加固时，粘贴区域宜在距受拉区边缘1/4梁高范围内。在进行正截面受弯承载力计算时，应将公式（A.0.2-2）~（A.0.2-5）中的*h*改用FRP格栅截面面积形心至梁受压区边缘的距离*hcf0*代替，且宜将侧面FRP格栅的截面面积乘以折减系数（1-0.5*h'cf*/*h*），其中*h'cf*为侧面FRP格栅的粘贴高度。对受弯加固的构件尚应验算构件的受剪承载力，避免受剪破坏先于受弯破坏发生。

**A.0.3**采用ECC对钢筋混凝土梁进行受剪加固时，其斜截面受剪承载力应按下列公式计算：

（B.0.3-1）

式中：——加固后梁的斜截面受剪设计值（N），由于ECC允许出现裂纹，因此可以将减小0.7倍。

——不含任何抗剪钢筋的梁基体的受剪承载力设计值（N）；

——抗剪钢筋的受剪承载力设计值（N）；

——ECC增强纤维承担的剪力（N）；

——纵向预应力钢中与剪力平行的有效拉力分量（N）。

其中，剪力应按下列方法确定。

1. 不含抗剪钢筋的梁基体的受剪承载力设计值

(A.0.3-2)

当取1.5 (A.0.3-3)

当取1.5 (A.0.3-4)

(A.0.3-5)

(A.0.3-6)

(A.0.3-7)

式中：——不含抗剪钢筋的混凝土抗压强度设计值，；

——ECC增强层或构件宽度（mm）；

——ECC增强层或构件有效高度（mm）；

——一般取1.3；

——受拉钢筋横截面面积；

——轴向压力设计值(N)；

——弯矩设计值(N·mm)；

——与设计弯矩对应的消除拉伸纤维极限轴向应力所需的弯矩值(N·mm)；

——混凝土抗压强度设计值(N/mm2)。

1. 抗剪钢筋的受剪承载力设计值

(B.0.3-8)

式中：——抗剪钢筋总横截面面积；

——抗剪钢筋屈服强度设计值， ；

——抗剪钢筋与梁轴线的夹角；

——抗剪钢筋间距；

——压应力合成位置到受拉钢筋质心的距离，一般取；

——一般取1.1。

1. ECC增强纤维承担的剪力

(B.0.3-9)

式中：——ECC拉伸屈服强度设计值，当时，；

——斜向裂缝与ECC增强层或构件纵轴夹角，；

——一般取1.3。

1. 纵向预应力钢中与剪力平行的有效拉力分量

(B.0.3-10)

式中：——纵向预应力钢的有效拉力(N)；

——纵向预应力与构件纵轴线的夹角；

——一般取1.1。

附录B ECC加固钢筋混凝土柱承载力计算方法

**B.0.1** 采用增大截面加固钢筋混凝土轴心受压构件时，其正截面轴心受压承载力应按照下式确定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (B.0.1-1) |

式中：——构件加固后的轴向压力设计值

——构件稳定系数，更具加固后的截面尺寸，按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定值采用；

、——构件加固前混凝土截面面积和加固后新增ECC部分截面面积；

、——新增纵向受力筋材和原纵向钢筋的抗压强度标准值；

——新增纵向受力筋材的净截面面积

——综合考虑新增加ECC和加固受力材料的利用程度的修正系数，取0.8；

、——分别为新增ECC材料和旧混凝土轴心受压抗压强度设计值；

**B.0.2** 采用增大截面加固钢筋混凝土偏心受压柱时，其矩形截面受压承载力应按照下式确定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (B.0.2-1) |
|  |  | (B.0.2-2) |
|  |  | (B.0.2-3) |
|  |  | (B.0.2-4) |

式中：——旧混凝土和ECC组合而成的截面的混凝土轴心抗压强度设计值，可按照确定；

、——分别为新增ECC材料和旧混凝土轴心受压抗压强度设计值；

——原构件受拉或者受压较小的边纵向钢筋应力；当算得时，取；

——受拉边或者受压较小的边新增纵向受拉筋材应力；当计算得时，取；

——原构件受拉或者受压较小的边纵向钢筋截面面积；

——原构件受拉压边纵向钢筋截面面积；

——偏心距，按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定值采用；

——原构件受拉边或者受压较小的边纵向钢筋得合力点到加固后截面近边的距离；

——原构件受压边的边纵向钢筋得合力点到加固后截面近边的距离；

——受拉边或者受压较小边新增纵向受力筋材合力点至加固后截面近边的距离；

——受压边新增纵向受力筋材合力点至加固后截面近边的距离；

——受拉边或受压较小边新增纵向受力材料合力点至加固后截面受压较大边缘的距离；

——原构件的截面有效高度。

附录C ECC加固混凝土梁柱节点和楼板承载力计算方法

**C.1** ECC加固混凝土梁柱节点承载力计算方法

**C.1.1** 采用增强筋材加固后节点的抗剪承载力可按下式计算：

 (C.1.1-1)

 (C.1.1-2)

 (C.1.1-3)

 (C.1.1-4)

式中：——加固后节点的抗剪承载力；

——原节点钢筋混凝土提供抗剪承载力；

——增强筋材提供抗剪承载力；

——ECC加固层提供抗剪承载力；

——原节点混凝土部分提供的抗剪承载力；

——原节点箍筋提供的抗剪承载力；

——正交梁对节点的约束影响系数：：当楼板为现浇、梁柱中线重合、四侧各梁截面宽度不小于该侧柱截面宽度1/2，且正交方向梁高度不小于较高框架梁高度的3/4时，可取为1.50，但对9度设防烈度宜取为1.25；当不满足上述条件时，应取为1.00；

——原混凝土抗拉强度；

——框架节点核心区的截面有效验算宽度，当不小于时，可取和中的较小值；当梁与柱的中线不重合且偏心距不大于时，可取、和三者中的最小值。此处为验算方向梁截面宽度，为该侧柱截面宽度；

——框架节点核心区的截面高度，可取验算方向的柱截面高度；

——节点上柱底部的轴向力设计值；

——柱的截面宽度；

——核心区有效验算宽度范围内同一截面验算方向箍筋各肢的全部截面面积；

——框架梁截面有效高度；

——梁纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离；

——增强筋材强度发挥系数；

——增强筋材抗拉强度；

——单侧核心区增强筋材在同一截面的全部截面面积；

——加固层界面传递增强系数，取1.65；

——ECC抗拉强度；

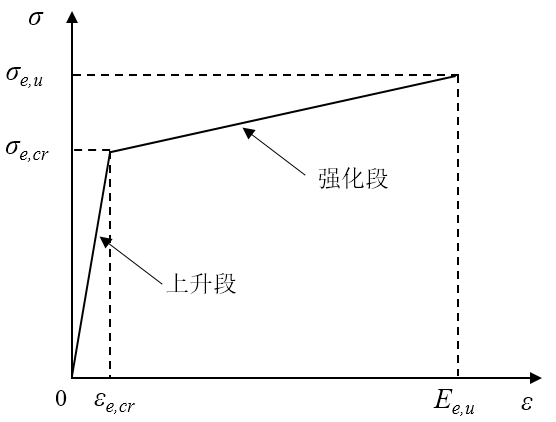
——ECC厚度。

**C.2** ECC加固钢筋混凝土楼板承载力计算方法

**C.2.1** 采用ECC直接对板受弯加固时的承载力计算：

1. 除应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010对受弯构件正截面承载力计算的基本假定外，还应符合下列要求：

1) ECC加固层在拉伸荷载下应力-应变本构关系模型采用分段式，模型分为两部分，即考虑ECC弹塑性变化的上升段和应力应变强化段，如下图所示。模型表达式如下：



图C.2.2-1 ECC拉应力-应变关系

(C.2.1-1)

式中，*σe、εe*——分别为ECC拉应力、拉应变；

*σe,cr、σe,u*——分别为ECC的开裂应力与极限应力，可通过实测获得；

*εe,cr、εe,u*——分别为ECC的开裂应变和极限应变，可通过实测获得。

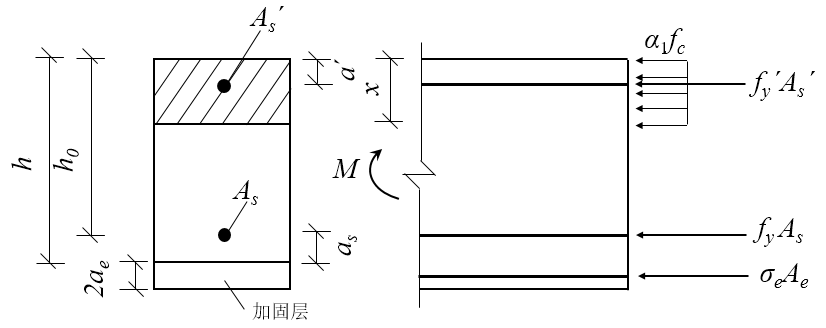
2) 构件达到受弯承载能力极限状态时，ECC加固层拉应变*εe*按截面应变保持平面的假定确定，但加固层中间厚度处拉应变不应超过允许拉应变[*εe*]；

3) ECC加固层拉应力*σe*应按照上述模型确定，根据最大拉应变[*εe*]可确定中间厚度处最大拉应力[*σef*]；

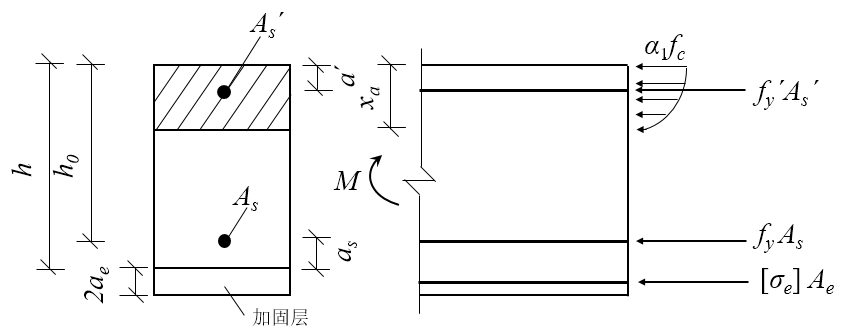
4) 当考虑二次受力影响时，应根据加固的荷载状况，按截面应变保持平面的假定计算加固前受拉区边缘混凝土的初始应变*εi*；

5) 在达到受弯承载能力极限状态前，ECC加固层与混凝土之间不发生粘结剥离破坏。

1. 在楼板受拉面上直接使用ECC进行受弯加固时，其正截面受弯承载力计算方法与采用FRP格栅增强ECC加固楼板方法相同，仅需要将原公式中*ξefb、σef*、[*σef*]、*εef*、[*εef*]、*Aef*、*aef*替换为对应的*ξeb、σe*、[*σe*]、*εe*、[*εe*]、*Ae*、*ae*即可，采用ECC直接加固的楼板正截面受弯承载力计算如图D.2.2-2所示：



（a）*x*大于*ξeb*(*h+ae*)时



（b）*x*小于或等于*ξeb*(*h+ae*)时

图C.2.2-2 楼板正截面受弯承载力计算

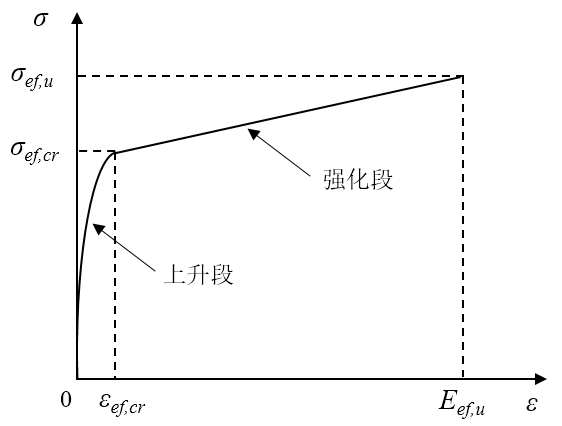
注：图中*xa*为实际混凝土受压区高度。

1. 考虑二次受力影响时，加固前在初始弯矩*Mi*作用下，截面受拉区边缘混凝土的初始应变*εi*计算方法与采用FRP格栅增强ECC加固楼板方法相同。

**C.2.2** 采用FRP格栅增强ECC对板受弯加固时的承载力计算：

1. 除应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010对受弯构件正截面承载力计算的基本假定外，还应符合下列要求：

1) FRP格栅与ECC认为是一个复合层，共同受力。该FRP-ECC复合层在拉伸荷载下应力-应变本构关系模型采用分段式，模型分为两部分，即考虑ECC弹塑性变化的上升段和应力应变强化段，如下图所示；



图C.2.2-1 FRP-ECC复合层拉应力-应变关系

模型表达式如下：

(C.2.2-1)

其中，

(C.2.2-2)

式中：*Ee、Ef*——分别为ECC和FRP格栅的弹性模量；

*Ae、Af、Aef*—分别为ECC，FRP格栅和FRP-ECC复合层的截面面积；

*εef,cr、εef,u*—分别为FRP复合层的开裂应变和极限应变；

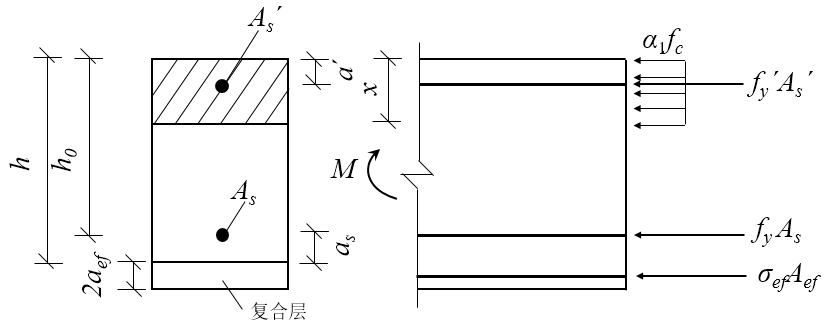
2) 构件达到受弯承载能力极限状态时，FRP格栅和ECC（中间厚度处）的拉应变*εef*按截面应变保持平面的假定确定，但不应超过两者允许拉应变[*εef*]的最小值；

3) FRP-ECC复合层拉应力*σef*应按照上述模型确定，根据最大拉应变[*εef*]可确定复合层中间厚度处最大拉应力[*σef*]；

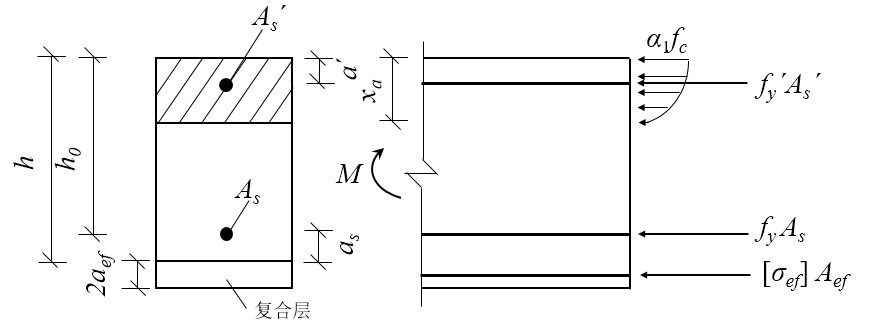
4) 当考虑二次受力影响时，应根据加固的荷载状况，按截面应变保持平面的假定计算加固前受拉区边缘混凝土的初始应变*εi*；

5) 在达到受弯承载能力极限状态前，FRP-ECC复合层与混凝土之间不发生粘结剥离破坏。

1. 在楼板受拉面上使用FRP格栅增强ECC复合层进行受弯加固时，其正截面受弯承载力应按下列公式计算：



（a）*x*大于*ξefb*(*h+aef*)时



（b）*x*小于或等于*ξefb*(*h+aef*)时

图C.2.2-2 楼板正截面受弯承载力计算

注：图中*xa*为实际混凝土受压区高度

1) 当混凝土受压区高度*x*大于*ξefb*(*h+aef*)，且小于*ξbh*0时[图C.2.2-2(a)]

(C.2.2-3)

混凝土受压区高度x和受拉面上FRP-ECC复合层的拉应变*ε*ef应按下列公式确定：

(C.2.2-4)

2) 当混凝土受压区高度*x*不大于*ξefb*(*h+aef*)时[图D.2.1-2(b)]：

(C.2.2-5)

3) 当混凝土受压区高度*x*小于2*a*΄时：

(C.2.2-6)

式中，M——包含初始弯矩的总弯矩设计值；

*As、As*΄——受拉钢筋、受压钢筋的截面面积；

*Aef*——受拉面上FRP-ECC复合加固层的截面面积；

*fy、fy*΄——受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值；

*fc*——混凝土轴心抗压强度设计值；

*x*——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度；

*ξb*——原始构件界限相对受压区高度；

*ξefb*——FRP-ECC复合加固层达到其允许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限相对受压区高度，取

*εcu*——混凝土极限压应变，取*εcu*=0.0033；

*εi*——考虑二次受力影响时，加固前构件在初始弯矩作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变，按本规程第D.2.1条第3款计算；当可以不考虑二次受力时，取*εi*=0；

[*εef*]——FRP-ECC复合加固层的允许拉应变，取实际使用FRP格栅材料和ECC材料各自极限拉应变的2/3中的最小值；

*εef*——FRP-ECC复合加固层中间厚度处的拉应变；

*b*、*h*——原始构件截面宽度、高度；

*a΄*——原始构件受压钢筋截面重心至混凝土受压区边缘的距离；

*as*——原始构件受拉钢筋截面重心至混凝土受拉区边缘的距离；

*aef*——FRP-ECC复合加固层厚度的1/2。

1. 考虑二次受力影响时，加固前在初始弯矩*Mi*作用下，截面受拉区边缘混凝土的初始应变*εi*应按下列公式计算：

(C.2.2-7)

(C.2.2-8)

(C.2.2-9)

(C.2.2-10)

(C.2.2-11)

(C.2.2-12)

式中，*Mi*——加固前楼板构件计算截面上实际作用的初始弯矩，当初始弯矩小于未加固截面受弯承载力的20%时，可忽略二次受力的影响；

*εci*——加固前初始弯矩*Mi*作用下受压边缘的混凝土压应变；

*εsi*、σ*si*——加固前初始弯矩*Mi*作用下受拉钢筋的拉应变、拉应力；

*ζ*——受压边缘混凝土压应变综合系数；

*ψ*——受拉钢筋拉应变不均匀系数；

*η*——内力臂系数，取0.87；

*Ec*、*Es*——混凝土、钢筋的弹性模量；

*αE*——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

*ρ*——受拉钢筋配筋率，；

*ftk*——混凝土抗拉强度标准值；

*ρte*——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率；

*Ate*——有效受拉混凝土截面面积，取0.5*bh*；

*γf*΄——受压翼缘加强系数，对楼板构件取0；

1. 计算正截面受弯承载力时，尚应符合下列要求：

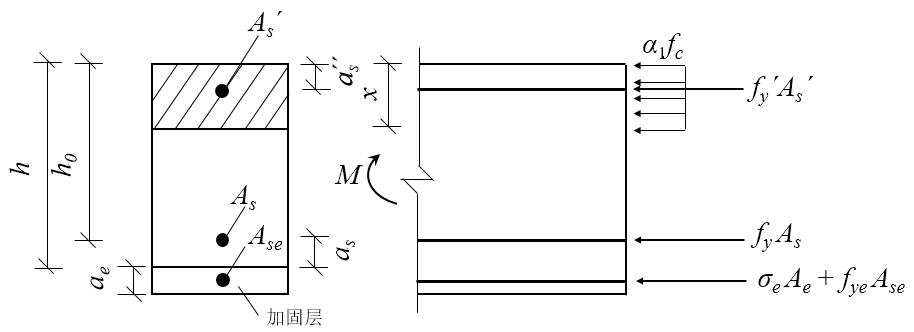
1) 受压区高度*x*不宜大于0.85*ξbh*0，其中界限相对受压区高度应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定计算；

2) 加固后受弯承载力的提高幅度不应超过40%；

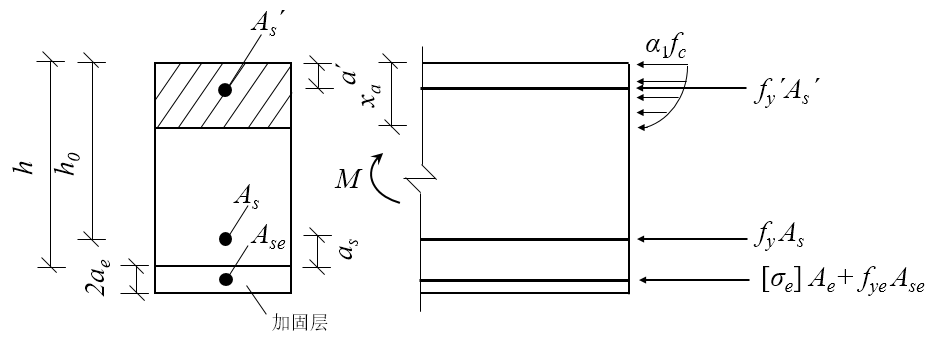
3) 加固后在荷载效应标准组合下受拉钢筋的拉应力不应超过钢筋抗拉强度标准值。

**C.2.3** 采用普通钢筋网增强ECC对板受弯加固时的承载力计算：

1. 除应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010对受弯构件正截面承载力计算的基本假定外，还应符合采用ECC直接加固方法的相关计算要求。
2. 在楼板受拉面上采用普通钢筋网增强ECC进行受弯加固时，其正截面受弯承载力应按下列公式计算：



（a）*x*大于*ξeb*(*h+ae*)时



（b）*x*小于或等于*ξeb*(*h+ae*)时

图C.2.3-1 楼板正截面受弯承载力计算

注：图中*xa*为实际混凝土受压区高度

1)当混凝土受压区高度*x*大于*ξeb*(*h+aef*)，且小于*ξbh*0时[图C.2.3-1(a)]：

(C.2.3-1)

混凝土受压区高度*x*和受拉面上ECC复合层的拉应变*εe*应按下列公式确定：

(C.2.3-2)

2) 当混凝土受压区高度*x*不大于*ξeb*(*h+ae*)时[图C.2.3-1(b)]：

(C.2.3-3)

3) 当混凝土受压区高度*x*小于2*a*΄时：

(C.2.3-4)

式中，*Ase*——钢筋网受拉钢筋的截面面积；

*fye*——钢筋网受拉钢筋抗拉强度设计值；

[*εe*] ——ECC加固层的允许拉应变，取ECC材料极限拉应变的2/3和钢筋极限拉应变（取0.01）中的最小值；

其他符号含义见C.2.1节。

1. 考虑二次受力影响时，加固前在初始弯矩*Mi*作用下，截面受拉区边缘混凝土的初始应变*εi*计算公式与采用FRP增强ECC加固受弯承载力计算公式中相同。当初始弯矩*Mi*小于未加固截面受弯承载力的20%时，可忽略二次受力的影响。
2. 计算正截面受弯承载力时，尚应符合下列要求：

1) 受压区高度x不宜大于0.85*ξbh*0，其中界限相对受压区高度应按现行国家标注《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定计算；

2) 加固后受弯承载力的提高幅度不应超过40%；

3) 加固后在荷载效应标准组合下受拉钢筋的拉应力不应超过钢筋抗拉强度标准值。

附录D ECC加固砌体承载力计算方法

**D.0.1** 采用ECC面层或钢筋网-ECC复合加固轴心受压的砌体结构时，其正截面受压承载力应按下列公式验算：

 (D.0.1-1)

式中：*N*——加固后砌体轴心压力设计值；

*φ*——轴心受压构件的稳定系数，可根据加固后截面的高厚比及配筋率，按照《砌体结构加固设计规范》GB50702相关规定采用；

*fm*——被加固砌体抗压强度设计值；

*Am*——被加固砌体截面面积；

*αe*——ECC材料强度利用系数，取值*αe*=0.75；

*fe*——ECC材料轴心抗压强度设计值，应按第四章规定取值；

*Ae*——新增ECC面层的截面面积；

*αs*——钢筋强度利用系数，取值*αs*=0.9；

*fs’*——新增纵向钢筋抗压强度设计值；

*As*——新增纵向钢筋截面面积。

**D.0.2** 用ECC面层或增强筋材-ECC加固后，墙体的受剪承载力应符合以下规定：

 (D.0.2-1)

式中：*V*——砌体墙面内剪力设计值；

*Vm*——原砌体受剪承载力，按照国家标准《砌体结构设计规范》（GB50003）计算确定；

*Ves*——采用ECC面层加固后提高的受剪承载力，按本规范中D.0.3节计算。

**D.0.3** 采用ECC面层加固后提高的受剪承载力*Ves*应按下列规定计算：

1. 采用ECC面层加固：

 (D.0.3-1)

式中：*f et*——ECC材料轴心抗拉强度设计值；

*αe* —— ECC材料强度利用系数，可取*αe* =0.7；

*b* ——ECC材料面层厚度（双面加固时，取其厚度之和）；

*h* ——采用ECC面层加固的墙体水平方向长度。

1. 采用钢筋网-ECC面层加固：

 (D.0.3-2)

式中：*fet*——ECC材料轴心抗拉强度设计值；

*αe* —— ECC材料强度利用系数，可取*αe* =1.2；

*b* ——ECC材料面层厚度（双面加固时，取其厚度之和）；

*h* ——采用ECC面层加固的墙体水平方向长度；

λ——砌体的剪跨比，当λ≤1.5时，取λ=1.5；当λ≥3时，取λ=3。

*f*y——水平向钢筋的设计强度值。

*A*s——水平向单排钢筋截面面积。

s——水平向钢筋的间距。

1. 采用钢绞线-ECC面层加固：

 (D.0.3-3)

 (D.0.3-4)

式中：*fet*——ECC材料轴心抗拉强度设计值；

*αe* —— ECC材料强度利用系数，可取*αe* =1.2；

*b* ——ECC材料面层厚度（双面加固时，取其厚度之和）；

*h* ——采用ECC面层加固的墙体水平方向长度；

*αrw*——钢丝绳参与工作系数，按现行国家标准《砌体结构加固规范》GB50702的有关规定取值；

*frw*——受剪加固采用的钢丝绳网抗拉强度设计值，按现行国家标准《砌体结构加固规范》GB50702的有关规定取值；

A*rwi*——穿过计算斜截面的第i个水平向钢丝绳的截面面积；

*n*——穿过计算斜截面的水平向钢丝绳根数。

1. 采用FRP格栅-ECC面层加固：

 (D.0.3-5)

 (D.0.3-6)

 (D.0.3-7)

式中：*fet*——ECC材料轴心抗拉强度设计值；

*αe* —— ECC材料强度利用系数，可取*αe* =1.2；

*b* ——ECC材料面层厚度（双面加固时，取其厚度之和）；

*h* ——采用ECC面层加固的墙体水平方向长度；

*ψf*——侧面加固折减系数，ECC取0.75；

*Vz*——钢丝绳参与工作系数，按现行国家标准《砌体结构加固规范》GB50702的有关规定取值；

*Vh*——受剪加固采用的钢丝绳网抗拉强度设计值，按现行国家标准《砌体结构加固规范》GB50702的有关规定取值；

*η*——抛物线型应力分布等效系数，取值0.4；

*ffu*——FRP格栅的设计抗拉强度，按现行行业规范《纤维增强复合材料格栅》JG/T364的有关规定取值；

*Af* ——两侧FRP格栅水平肢的总面积；

*df* ——FRP格栅最上边纵筋和最下边纵筋间的距离；

*sf* ——FRP格栅网眼水平间距。

**E.0.4** ECC面层或增强筋材-ECC面层加固砌体墙的抗震受剪承载力应按下式验算：

 (D.0.4-1)

式中：*VE*——考虑地震组合的墙体剪力设计值；

*VME*——原墙体截面抗震受剪承载力，按现行国家标准《砌体结构设计规范》 GB 50003的有关规定计算；

*Ves*——采用ECC面层或增强筋材—ECC复合加固砌体后提高的受剪承载力，按本规程D.0.3条计算；

*γES*——承载力抗震调整系数，按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011和现行国家行业标准《建筑抗震加固技术规程》JGJ115的有关规定计算。