CECS CECS×××

中国工程建设标准化协会标准

**钢筋钢纤维混凝土预制管片技术规程**

Technical specification for precast steel fiber-rebar reinforced

concrete segment

（征求意见稿）

**2021北京**

中国工程建设标准化协会标准

**钢筋钢纤维混凝土预制管片技术规程**

Technical specification for precast steel fiber-rebar reinforced

concrete segment

**T/CECS \*\*\* -20XX**

主编单位：北京城建设计发展集团股份有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20XX年××月××日

中国计划出版社

20XX 北京

**前言**

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2020年第一批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2020〕12）的要求，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分8章和3个附录，主要技术内容是：总则、术语和符号、基本规定、材料、极限状态设计、构造规定、施工验算、管片生产、隧道施工与验收。

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混凝土专业委员会归口管理，由北京城建设计发展集团股份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需要修改或补充之处，请将有关意见和建议寄送至北京城建设计发展集团股份有限公司（地址：北京市西城区阜城门北大街5号，邮政编码：100037；邮箱：wisdlu@126.com），以供今后修订时参考。

主编单位：北京城建设计发展集团股份有限公司

沈阳地铁集团有限公司

参编单位：西南交通大学

中国铁路设计集团有限公司

辽宁省交通规划设计院有限责任公司

中铁第六勘察设计院集团有限公司

贝卡尔特应用材料科技（上海）有限公司

亚泰集团沈阳现代建筑工业有限公司

主要起草人：鲁卫东 李志业 王志杰 孙 斌 任 昕 贾永刚 王瑞峰 李海锋

主要审查人：

**目 次**

[1 总 则 6](#_Toc88817855)

[2 术语和符号 7](#_Toc88817856)

[2.1 术语 7](#_Toc88817857)

[2.2 符号 9](#_Toc88817858)

[3 基本规定 11](#_Toc88817859)

[3.1 一般规定 11](#_Toc88817860)

[3.2 承载能力极限状态计算 12](#_Toc88817861)

[3.3 正常使用极限状态验算 13](#_Toc88817862)

[3.4 耐久性设计 14](#_Toc88817863)

[4 材 料 15](#_Toc88817864)

[4.1 钢纤维 15](#_Toc88817865)

[4.2 钢纤维混凝土 15](#_Toc88817866)

[5 极限状态设计 18](#_Toc88817867)

[5.1 一般规定 18](#_Toc88817868)

[5.2 正截面偏心受压承载力计算 18](#_Toc88817869)

[5.3 斜截面受剪载力计算 21](#_Toc88817870)

[5.4 裂缝控制验算 22](#_Toc88817871)

[6 构造规定 23](#_Toc88817872)

[7 施工验算 25](#_Toc88817873)

[7.1 一般规定 25](#_Toc88817874)

[7.2 短暂状况承载力验算 25](#_Toc88817875)

[8 管片生产 27](#_Toc88817876)

[8.1 一般规定 27](#_Toc88817877)

[8.2 配合比设计及拌合物 27](#_Toc88817878)

[8.3 材料投放和搅拌 28](#_Toc88817879)

[8.4 浇筑、振捣及养护 28](#_Toc88817880)

[8.5 管片验收 29](#_Toc88817881)

[9 隧道施工与验收 31](#_Toc88817882)

[附录A 残余弯拉强度测试方法（切口梁法） 32](#_Toc88817883)

[A.1 试验设备 32](#_Toc88817884)

[A.2 试件的制作和养护 32](#_Toc88817885)

[A.3 试验步骤 33](#_Toc88817886)

[A.4 试验结果计算 35](#_Toc88817887)

[A.5 试验报告与评定 36](#_Toc88817888)

[附录B 不同极限状态抗拉强度 38](#_Toc88817889)

[附录C 管片承载力检验试验方法标准 42](#_Toc88817890)

[C.1 试验设备 42](#_Toc88817891)

[C.2 试验前的准备 43](#_Toc88817892)

[C.3 试验方法 44](#_Toc88817893)

[C.4 试验报告 45](#_Toc88817894)

[本规范用词说明 47](#_Toc88817895)

[引用标准名录 48](#_Toc88817896)

Contents

1 General Provision 1

2 Terms and Symbols 2

2.1 Terms 2

2.2 Symbols 3

3 General Requirements 6

3.1 General 6

3.2 Ultimate Limit States 7

3.3 Serviceability Limit States 10

4 Materials 12

4.1 Steel Fibre 12

4.2 Steel Fiber Reinforced Concrete 13

5 　Limit States Design 20

5.1 General 20

5.2 Calculation of Flexual and Axial Capacity 20

5.3 Calculation of Shear Capacity 20

5.3 Checking of Cracks 26

6 　Detailing Requirements 28

7 　Checking of Capacity in the Construction Stages 31

7.1 General 31

7.2 Checking of Temporary Load Capacity 32

8　 Segments Production and Construction 42

8.1 General 42

8.2 Design of Mix Proportion and Mixture 42

8.3 Dosing and Mixing 43

8.4 Pouring Vibrating and Curing 43

8.5 Segments Acceptance 45

9　 Tunnel Construction and Acceptance 42

Appendix A Residual Flexural Tensile Strength Test Method (Method of Notched Beam) 49

Appendix B Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Segments at Different Limit States 58

Appendix C Test Method Standard of Checking Precast Segments Capacity 62

Explanation of Wording in This code 68

List of Quoted Standards 69

Addition：Explanation of Provisions 71

1 总 则

**1.0.1** 为在钢筋钢纤维混凝土的管片设计和施工中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全可靠、经济适用、技术先进、保证质量，制定本规程。

**1.0.2**　本规程主要依据国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153、《混凝土结构设计规范》GB50010、《盾构隧道设计标准》GB/T51438和《盾构法隧道施工及验收规范》GB50446等标准的原则制定。

条文说明：本规程依据国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153、《混凝土结构设计规范》GB50010、《盾构隧道工程设计标准》GB/T 51438和《盾构法隧道施工及验收规范》GB50446等标准的原则，并借鉴现行欧洲、美国、日本等国钢纤维混凝土和盾构隧道结构相关标准制定。当隧道结构构造、管片受力、钢纤维等材料性能等基本条件与本规程的编制依据不同时，则需根据具体情况通过专门试验或分析加以解决。

**1.0.3**本规程适用于配置受力钢筋的钢纤维混凝土管片设计、制造、施工和验收。

**1.0.4**　钢筋钢纤维混凝土管片的设计和施工除应遵守本规程外，尚应符合所属行业相关国家标准和行业标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

**2.1.1** 　钢纤维 steel fiber

用钢质材料经一定工艺制成的，能随机分布于混凝土或砂浆中短而细的纤维。

条文说明：术语和符号与国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010和行业标准《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJ 465、《钢纤维混凝土》JGT 472、《混凝土用钢纤维》GBT 39147相协调，又增加了适用于本标准的术语和符号。

**2.1.2** 　钢纤维混凝土 steel fiber reinforced concrete

掺加适量、均匀分布的钢纤维作为增强材料的混凝土。

**2.1.3** 　钢筋钢纤维混凝土管片 steel fiber reinforced concrete segment with rebars

配有受力钢筋的钢纤维混凝土预制管片。

**2.1.4** 　钢纤维长度 length of steel fiber

钢纤维两个端部之间的距离。

**2.1.5** 　钢纤维长径比 aspect ratio of steel fiber

钢纤维的长度与直径或等效直径的比值。

**2.1.6** 　纤维体积掺量 fraction of fiber by volume

单位体积纤维混凝土中所含纤维的质量。

**2.1.7** 切口张开位移CMOD crack mouth opening displacement

长方体试件受中心荷载F，由传感器测得的试件切口顶端张开的水平位移值。

**2.1.8**　比例极限 limit of proportionality

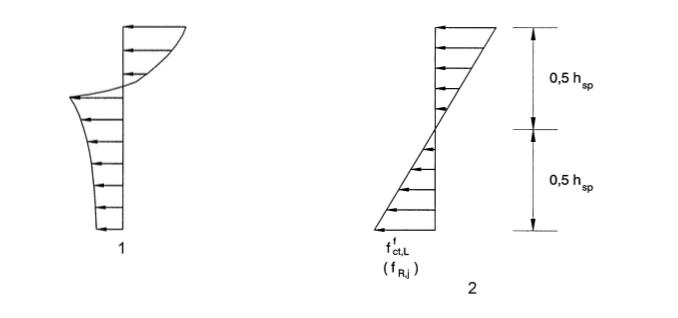
长方体三点弯曲试件受中心荷载FL，同时假设切口处截面应力呈线性分布，对应于试件切口截面开裂前的最大拉应力，亦称抗弯强度或抗折强度。

条文说明：本规程中的比例极限是指长方体切口梁三点弯曲试验测得的纤维混凝土抗弯强度或抗折强度，与普通混凝土棱柱体（无切口）四点弯曲试验测得的抗弯强度或抗折强度不同。

**2.1.9**　残余弯拉强度 residual flexural tensile strength

长方体三点弯曲试件受中心荷载Fj，同时假设切口处截面应力呈线性分布，对应于试件切口张开位移CMODj（j=1，2，3，4表示不同的CMOD值）或切口处竖向位移δj（δj>δFL）的切口顶端拉应力。

条文说明：切口梁试验时，切口处截面的应力分布不是线性的（图1）。为简化残余弯拉强度定义，本规程假设切口处开裂截面应力呈线性分布，并将发生标定变形时切口处截面的最大拉应力定义为相应极限状态的残余弯拉强度。正常使用极限状态残余弯拉强度和承载力极限状态残余弯拉强度为两个常用的残余弯拉强度，与之对应的CMOD变形值分别为0.5mm和2.5mm。



a)真实应力分布 b) 假定应力分布

图1 切口处截面应力分布

2.2 符号

**2.2.1** 作用和作用效应

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | ——钢纤维混凝土局部受压承载力； |
|  | | ——钢筋钢纤维混凝土板局部受冲切承载力； |
|  | ——对应于极限弯拉强度的荷载； | |
| *M* | | ——弯矩设计值； |
|  | | ——各短暂状况作用组合管片最大弯矩设计值； |
|  | | ——管片开裂弯矩设计值 |
| *N* | | ——轴力设计值； |
| *S* | | ——承载能力极限状态下作用组合的效应设计值； |
|  | | ——混凝土受剪承载力设计值； |
|  | | ——钢纤维混凝土受剪承载力设计值； |
|  | | ——钢纤维混凝土受剪承载力设计值； |
|  | | ——斜截面剪力设计值； |
|  | | ——箍筋受剪承载力设计值； |
|  | | ——管片截面受拉边或受压较小边的纵向普通钢筋的应力； |
|  | | ——受压区钢筋应力； |
|  | | ——纵向受拉钢筋应力或等效应力。 |

**2.2.2** 材料性能

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 、 | | ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值 |
| 、 | | ——钢纤维混凝土轴心抗压强度标准值、设计值 |
| 、 | | ——混凝土轴心抗拉强度的标准值、设计值 |
| 、 | | ——钢纤维混凝土抗拉强度标准值、设计值 |
| ， | ——比例极限弯拉强度标准值和平均值； | |
| 、 | | ——钢纤维混凝土承载能力极限状态抗拉强度标准值、设计值 |
| 、 | | ——钢纤维混凝土正常使用极限状态抗拉强度标准值、设计值 |
| ， | ——对应于*CMODj*的残余弯拉强度标准值和平均值； | |
|  | ——普通纵向钢筋抗拉、抗压强度设计值； | |
|  | | ——箍筋的抗拉强度设计值； |
|  | | ——钢纤维混凝土抗剪强度设计值； |

**2.2.3** 几何参数

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——受压区纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离（mm）； |
| 、 | ——普通纵向受拉、受压钢筋截面面积； |
|  | ——管片宽度； |
|  | ——对应于切口梁切口位移； |
|  | ——管片截面高度； |
|  | ——管片截面有效高度； |
|  | ——试件从切口顶端到试件顶部的距离； |
|  | ——钢纤维方向因子； |
|  | ——盾构管片尺寸对钢纤维离散影响系数； |
|  | ——管片截面尺寸对钢纤维离散性影响系数； |
|  | ——分位数系数； |
|  | ——管片截面受压区高度； |
|  | ——管片截面受拉区高度； |
|  | ——试件跨度； |
|  | ——裂缝间距； |
|  | ——裂缝平均间距； |
| *w*u | ——管片保护层边缘的裂缝宽度； |
|  | ——按荷载准永久组合并考虑长期作用影响计算的钢筋钢纤维混凝土管片最大裂缝宽度； |
|  | ——按荷载准永久组合并考虑长期作用影响计算的钢筋混凝土管片最大裂缝宽度； |
|  | ——钢纤维混凝土强度试验值的标准差； |
|  | ——承载能力极限状态钢纤维混凝土材料分项系数； |
|  | ——钢纤维混凝土承载能力极限状态拉应变； |

3 基本规定

3.1 一般规定

**3.1.1** 当存在下列情形时，盾构隧道衬砌宜采用钢筋钢纤维管片结构：

1 需要减少管片受力钢筋用量、减少或取消管片构造钢筋时；

2 管片结构受力大，钢筋混凝土管片配筋量不能满足设计要求时；

3 地层中存在腐蚀性介质，需要提高管片裂缝控制要求或抗腐蚀性能时；

4 管片结构承受动力或冲击荷载，需要提高管片结构韧性（鲁棒性）时；

5 有其它特殊要求时。

条文说明：由于钢纤维混凝土具有很好的裂后抗拉强度，因此，钢筋钢纤维管片极限状态设计时应考虑受拉区混凝土开裂后钢纤维对混凝土基体抗拉强度的贡献。试验研究结果表明一般情况下可减少配筋量约40%50%，裂缝宽度减小约30%50%。

根据耐久性研究结果表明，钢纤维混凝土可以减少早期表面收缩率约50%，减小碳化速度约15％～30％，可以有效延缓混凝土中钢筋开始锈蚀时间。由于抗裂性能的提高，使钢筋保护层抗钢筋锈胀力而开裂的时间高于普通混凝土约50％；钢纤维混凝土火灾后的抗压强度的损失约是素混凝土的70％，劈裂抗拉强度损失约是素混凝土的20％。这些研究结果表明钢纤维混凝土可以提高结构的耐久性。

根据环境条件、钢和混凝土材料性能，源自于阴极保护系统或地铁牵引系统的迷流导致埋入混凝土里的钢筋腐蚀。从近期的试验结果表明与传统钢筋相比迷流导致的钢纤维腐蚀现象大大降低。这些试验观察结果表明：导致杂散电流引起的钢纤维腐蚀的条件与传统钢筋所要求的条件明显不同；当对嵌入的钢纤维施加非常大的杂散电流时，钢纤维发生腐蚀。为引发杂散电流引起的钢纤维腐蚀，钢纤维必须先吸附电子并转移电流，即在钢纤维上形成阳极和阴极。钢纤维仅在周围的电势梯度非常高时才吸附电子转移电流，在实际结构中不出现高电势梯度，甚至在高氯化物污染环境中，钢纤维电势会降低。另外，钢纤维的掺入不会加剧迷流现象，试验表明当钢纤维混凝土试件长度与其截面积比值超过7.5倍之后，钢纤维的电阻值将显著超过钢筋混凝土电阻值。

对处于严重腐蚀环境的钢纤维混凝土预制管片支护结构，对其耐久性能及其评价指标有待于进一步研究。

**3.1.2** 钢筋钢纤维混凝土管片的结构安全等级应为一级，设计使用年限应为100年。

**3.1.3** 采用钢筋钢纤维混凝土管片的隧道结构计算及管片设计应符合现行国家标准《盾构隧道设计标准》GB/T 51438的有关规定。

**3.1.4** 钢筋钢纤维混凝土管片应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和正常使用极限状态验算。

**3.1.5** 钢筋钢纤维混凝土管片设计应符合下列基本假定：

1 管片结构截面应变分布应为线性分布；

2 钢筋应变应与周围混凝土应变相同；

3 极限状态设计时应计及钢纤维混凝土抗拉强度；

4 钢筋的应力应变关系应符合国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010中的规定；

5钢纤维混凝土的应力-应变关系应符合本规程附录B的规定。

条文说明：钢纤维混凝土受压应力-应变关系曲线与普通混凝土一致，受拉应力-应变关系曲线是由钢纤维混凝土切口梁试验测量并换算得到的应力-应变关系曲线，可用于确定不同极限状态的抗拉强度。钢筋钢纤维混凝土构件正截面承载力的设计方法需考虑开裂后钢纤维混凝土的残余抗拉强度，这一点与钢筋混凝土预制管片的设计有明显区别。本规程在承载力计算时的基本假定与国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010相比，除考虑钢纤维混凝土残余抗拉强度对承载力贡献外，其余基本相同。

3.2 承载能力极限状态计算

**3.2.1** 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态计算应包括下列内容：

1 应进行地层及地下水压力等静力作用下的承载能力极限状态承载力计算；

2 应根据抗震设防要求进行抗震承载力计算；

**3.2.2** 对于持久状况和短暂状况，钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态设计表达式应符合下式规定：

(3.2.2)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中： *𝛾0* | —— 重要性系数：持久状况下应取1.1，短暂状况下应取1.0； | |
| *S* | —— 承载能力极限状态下作用组合的效应设计值，对持久状况应按作用的基本组合计算；短暂状况计算应符合本标准第8章的规定； | |
| *R* | | ——承载力设计值； | |

条文说明：荷载基本组合效应设计值参考现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009和《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068进行确定。

持久状况是指在结构使用过程中一定出现且持续期很长的设计状况（如隧道衬砌承受外部水土压力等）；短暂状况是指在结构施工、安装、检修或使用过程中出现的概率较大且短暂出现的设计状况（如管片承受千斤顶顶力作用、管片脱模、堆放或吊运时承受弯矩作用等）。两种状况下结构的可靠度水平不同，但都应进行承载能力极限状态计算。对持久状况还应进行正常使用极限状态验算，即应进行裂缝宽度、挠度（隧道净空收敛）等验算；短暂状况可不作挠度验算，对抗裂、裂缝宽度则根据需要验算。

**3.2.3** 钢筋钢纤维混凝土管片承载力设计值应采用下式计算：

(3.2.4)

式中: ——以《混凝土结构设计规范》GB50010的规定为基础，考虑钢纤维影响的钢筋钢纤维混凝土管片承载力计算函数；

——按本规程4.3节的方法确定的钢纤维混凝土轴心抗压设计强度；

——钢筋设计强度，按《混凝土结构设计规范》GB50010的规定采用；

——几何参数的标准值，按《混凝土结构设计规范》GB50010的规定取值；

****——对应于正常使用极限状态或承载能力极限状态的钢纤维混凝土抗拉强度设计值，按本规程附录B的规定取值；

——钢纤维方向性系数

3.3 正常使用极限状态验算

**3.3.1** 钢筋钢纤维混凝土管片应采用荷载的准永久组合进行正常使用极限状态下最大裂缝宽度验算。

条文说明：标准组合和准永久组合均是属于正常使用极限状态设计的荷载效应组合。 标准组合为短期效应组合，主要用来验算一般情况下构件的挠度、裂缝等使用极限状态问题。可变荷载采用标准值（即超越概率为5％的上分位值）。 准永久组合为长期效应组合，荷载的准永久值等于荷载的标准值乘以准永久值系数。它考虑了可变荷载对结构作用的长期性。在设计基准期内，可变荷载超越荷载准永久值的概率在50％左右。准永久组合常用于考虑荷载长期效应对结构构件正常使用状态影响的分析中。

**3.3.2** 钢筋钢纤维混凝土管片的最大计算裂缝宽度允许值应根据隧道所处环境和防水措施确定；处于一般环境中的结构，按荷载准永久组合并计及长期作用影响计算时，钢筋钢纤维混凝土管片最大计算裂缝宽度允许值不应大于0.2mm；处于冻融环境或化学侵蚀环境等不利条件下的结构，其最大计算裂缝宽度允许值应符合国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476的规定。

条文说明：参考国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010中规定，受力裂缝是允许存在的，裂缝宽度小于或等于0.2mm时不会对钢筋或钢纤维混凝土耐久性造成不良影响。根据已有的研究成果表明，对于相同的裂缝宽度，钢纤维比钢筋表现出更有利的耐腐蚀性能。另外，钢纤维混凝土不会发生因腐蚀产物体积膨胀而引起混凝土剥落，钢纤维的存在反而能避免混凝土保护层剥落。为便于应用，本规程中的钢筋混凝土裂缝宽度和钢筋钢纤维混凝土裂缝宽度限值相同。

3.4 耐久性设计

**3.4.1**钢筋钢纤维管片应进行耐久性设计，耐久性设计应包括下列内容：

    1 确定隧道所处的环境类别和环境作用等级；

    2 提出对钢纤维混凝土材料的耐久性基本要求；

    3 确定管片钢筋的混凝土保护层厚度；

4 提出构件的裂缝控制要求

    5 提出隧道所处环境条件下的耐久性技术措施；

6 提出隧道施工阶段的养护及质量验收要求

    7 提出结构使用阶段的检测与维护要求。

**3.4.2** 用于四、五类环境的钢筋钢纤维管片应采取附加防腐蚀措施。

**3.4.3** 当使用期间隧道内部存在大量腐蚀性介质时，盾构隧道应设置二次衬砌，并应根据腐蚀性介质类型及腐蚀性的不同，采取相应的结构抗腐蚀性设计

**3.4.4** 钢筋钢纤维混凝土管片的耐久性设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010及《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476的规定。

4 材 料

4.1 钢纤维

**4.1.1** 钢纤维应选用高强钢丝切断型钢纤维。钢纤维掺量应满足钢纤维混凝土盾构管片设计承载力要求的强度和耐久性等指标要求。

**4.1.2** 钢纤维长度宜为50mm60mm, 且不宜小于粗骨料最大粒径的2.5倍。钢纤维直径宜为0.5mm0.9mm，长径比宜为6080。

**4.1.3** 钢纤维的抗拉强度应不低于1000级，宜选用1300级及以上的钢纤维。

条文说明：为有利于钢纤维混凝土管片生产并保证其强度、韧性及其耐久性，本标准提出了对钢纤维类型、形状、长度、长径比和抗拉强度的要求。

**4.1.4** 钢纤维的尺寸和强度质量要求应符合表4.1.4的规定。其它的质量要求应符合现行行业标准《混凝土用钢纤维》YB/T151的规定。

**表4.1.4 钢纤维的尺寸及强度允许公差**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 特 性 | 样本公差 | 均值公差 |
| 长度或伸展长度*l*f | ±3 mm | ±5% |
| 直径 *d*f | ±0.02 mm | ±0.015 mm |
| 抗拉强度*R*m， | ±10% | ±7.5 % |
| 长径比*λ*f | ±15% | ±7.5% |

4.2 钢纤维混凝土

**4.2.1** 钢纤维混凝土强度等级应由钢纤维混凝土的抗压强度等级和裂后抗弯强度等级共同确定，并应符合下列规定：

1 钢纤维混凝土强度等级应采用符号CF与抗压强度等级和裂后抗弯强度等级（以MPa计）表示；

2 钢纤维混凝土的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应符合国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。

3 钢纤维混凝土的裂后抗弯强度等级应由残余弯拉强度等级*f*R1k与残余强度比*f*R3k/*f*R1k表示，并应符合表4.2.1的的规定；

**表4.2.1 钢纤维混凝土裂后抗弯等级表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 残余弯拉强度等级 | *f*R1k/MPa | 残余强度比 | *f*R3k/*f*R1k |
| 2 | 2.0≤*f*R1k＜2.5 | b | 0.7≤*f*R3k/*f*R1k＜0.9 |
| 2.5 | 2.5≤*f*R1k＜3.0 | c | 0.9≤*f*R3k/*f*R1k＜1.1 |
| 3 | 3.0≤*f*R1k＜4.0 | d | 1.1≤*f*R3k/*f*R1k＜1.3 |
| 4 | 4.0≤*f*R1k＜5.0 | e | 1.3≤*f*R3k/*f*R1k<1.5 |
| N | N≤*f*R1k＜N+1 | f | 1.5≤*f*R3k/*f*R1k |

注： 和分别为正常使用状态(对应CMOD=0.5mm)和极限状态(对应CMOD=2.5mm)下的残余弯拉强度标准值。

4 残余弯拉强度等级应按切口梁残余弯拉强度标准值确定，并应符合本规程附录A的规定。

条文说明：本规程关于裂后抗弯等级表示方法的规定借鉴了现行欧洲标准《Modecode 2020》的规定，钢纤维混凝土的抗压强度等级表示方法的规定借鉴了现行《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJT 465中的规定。

**4.2.2** 用于钢筋钢纤维混凝土管片的钢纤维混凝土残余弯拉强度和比例极限弯拉强度应满足以下要求。

(4.2.2-1)

(4.2.2-2)

式中：——钢纤维混凝土比例极限弯拉强度标准值，应符合本规程附录A的规定。

条文说明：在管片里钢纤维部分替代钢筋，钢纤维混凝土成为可以承受拉力的材料，钢纤维混凝土材料应满足一定的性能要求。本规程借鉴了现行欧洲标准《Modecode 2020》的相关规定，通过规定与和与的最小比值来限制构件初裂后的强度下降幅度。为更好的控制钢纤维混凝土管片结构的延性性能，本规程对以上两项指标提出了比欧洲标准更高的要求（欧洲标准对两项指标的要求分别是0.4和0.5）。

**4.2.3** 用于钢筋钢纤维混凝土管片的钢纤维混凝土强度等级不应低于CF50 3C, 钢纤维最低掺量不应低于20kg/m3。

条文说明：钢筋钢纤维混凝土管片的抗弯强度等级宜采用3C级或以上强度等级。3C级表示钢纤维混凝土残余弯拉强度3MPa≤fR1k<4MPa, 0.9≤fR3k/fR1k<1.1。

表1所示残余弯拉强度值是参照试验用佳密克丝粘结成排的两端弯钩型高强钢丝切断钢纤维，其抗拉强度高于1600MPa，长度60mm, 直径0.75mm。经试验确定的残余弯拉强度和掺量的关系，仅供选择钢纤维用量参考。

表1 钢纤维掺量与残余弯拉强度关系

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| *f*R3k （MPa） | ≤2 | ≤2.5 | ≤3 | ≤3.6 | ≤3.9 | ≤4.3 | ≤4.8 | >4.8 |
| 钢纤维掺量（kg/m3） | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | >50 |

根据国外盾构隧道工程钢纤维混凝土管片的统计数据，一般情况下，钢纤维最高掺量60kg/m3，钢纤维最低掺量不低于20kg/m3。

**4.2.4** 钢纤维混凝土轴心抗压强度和轴心抗拉强度的设计值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定，按同强度等级混凝土规定值选用。

**4.2.5** 钢纤维混凝土裂后残余抗拉强度应符合下列规定：

1 残余抗拉强度应根据截面抗力等效的原则由残余弯拉强度换算得到；

2 当采用线性模型换算时，应符合本规程附录B的规定；

3 当采用刚塑性模型换算时，残余抗拉强度标准值和设计值应由下列公式计算确定：

 （4.2.5-1）

 （4.2.5-2）

式中：，*f*ftu——承载能力极限状态残余抗拉强度标准值和设计值（MPa）；

——钢纤维混凝土材料分项系数，对于管片压弯状态取1.25；

——钢纤维方向因子，取为1.0；

——盾构管片尺寸对钢纤维离散影响系数，取为1.0；

**4.2.6** 钢纤维混凝土的受压和受拉弹性模量、剪切模量、泊松比、线膨胀系数等，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定，按同强度等级混凝土规定值选用。

5 极限状态设计

5.1 一般规定

**5.1.1** 本章适用于持久设计状态钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态和正常使用极限状态设计，短暂状况下的施工验算应符合本标准第7章的规定。

**5.1.2** 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态设计应符合下列规定：

1 应确定钢纤维混凝土抗压和残余抗弯强度等级、钢纤维类型和性能要求；

2 应对隧道最不利内力截面进行管片正截面偏心受压承载力计算；

3 宜对最大剪力截面进行管片斜截面受剪承载力计算；

4 应对最大千斤顶作用力位置进行管片局部受压承载力计算。

**5.1.3** 管片局部受压承载力计算应符合现行国家标准《盾构隧道设计标准》GB/T 51438的有关规定。

5.2 正截面偏心受压承载力计算

**5.2.1** 钢纤维混凝土管片正截面偏心受压承载力极限状态应为下列状态之一：

1 截面边缘压应变达到极限压应变；

2 截面边缘拉应变达到极限拉应变，或截面边缘裂缝宽度达到2.5mm；

3 钢纤维混凝土中钢筋达到极限拉应变。

**5.2.2** 钢纤维混凝土极限压应变和钢筋达到极限拉应变应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定，按同强度等级混凝土规定值选用。

**5.2.3** 钢纤维混凝土极限拉应变应取2%。

**5.2.4** 管片正截面偏心受压承载力计算时，截面受压区和受拉区混凝土应力应符合下列规定：

1 受压区应力图形宜简化为等效的矩形应力图。矩形应力图的压应力值和受压区高度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定。

2 受拉区应力图形宜简化为等效的矩形应力图。矩形应力图的拉应力值应取承载力极限状态残余抗拉强度设计值，并应按本规程4.2.5条的规定计算；矩形应力图的受拉区高度应由下式计算：

 （5.2.4）

式中 ——管片截面受拉区高度（mm）；

——管片截面高度（mm）；

——管片截面受压区高度（mm）；

——系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定取值。

**5.2.5** 钢筋钢纤维混凝土管片正截面偏心受压承载力应符合下列规定（图5.2.5）：

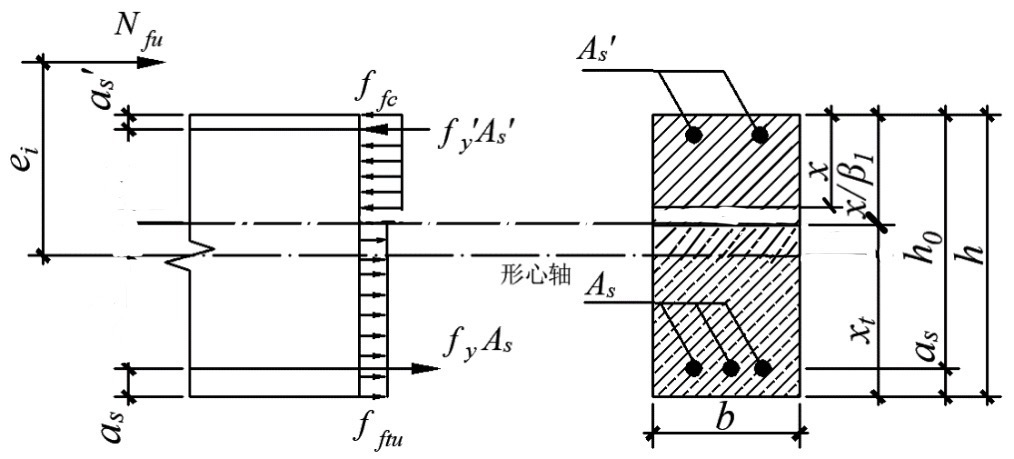


图5.2.5 管片正截面偏心受压承载力计算

（5.2.5-1）

（5.2.5-2）

（5.2.5-3）

 （5.2.5-4）

混凝土受压区高度尚应符合下列条件:

（5.2.5-5）

（5.2.5-6）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中： | ——隧道最不利内力截面基本组合轴力设计值（N）； | |
|  | ——钢纤维混凝土承载力极限状态残余抗拉强度设计值，按本规程附录B的方法计算（MPa）； | |
|  | | ——钢纤维混凝土轴心抗压强度，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定取同级混凝土轴心抗压强度（MPa）； | |
|  | | ——普通纵向钢筋抗拉、抗压强度设计值（MPa），按现行国家标准《混凝土结构的设计规范》GB 50010的规定取值； | |
|  | | ——管片截面受拉边或受压较小边的纵向普通钢筋的应力（MPa），应按5.2.2条的规定确定； | |
| 、 | | ——普通纵向受拉、受压钢筋截面面积（mm2）； | |
|  | | ——受压区纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离（mm）； | |
|  | | ——管片截面有效高度（mm），按现行国家标准《混凝土结构的设计规范》GB50010的规定取值； | |
|  | | ——管片截面宽度（mm）； | |
|  | | ——受压区混凝土等效应力值的影响系数，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定； | |
| *e* | | ——轴力作用点至纵向受拉普通钢筋中心线的距离（mm）； | |
|  | | ——初始偏心距（mm）； | |
|  | | ——轴力作用点至截面重心的距离，应取（mm）；M为隧道最不利内力截面基本组合弯矩设计值； | |
|  | | ——附加偏心距，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定取值（mm）； | |
|  | | ——纵向受拉钢筋屈服与受压区混凝土破坏同时发生时的相对界限受压区高度，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定。 | |

**5.2.6** 当按5.2.5条的规定计算时，钢筋应力应符合下列要求:

1 当不大于时为大偏心受压构件，应取*f*y ，此处，为相对受压区高度，取为*x/ h*0 ；

2 当大于时为小偏心受压构件，应按下式计算：

（5.2.6）

条文说明：试验研究表明，钢纤维的掺入使构件正截面受压区极限压应变有所提高，因而对受拉钢筋和受压区混凝土同时达到其强度设计值时的相对界限受压区高度ξb值有一定影响，但影响不显著。为了与有关混凝土结构设计规范相协调，本规程规定相对界限受压区高度ξb的计算及大、小偏心的判断方法与国家标准《混凝土结构设计规范》 GB50010的规定相同。

盾构管片受力状态基本为大、小偏心受压，本规程针对这两种受力状态不同于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的部分做了规定。

钢纤维对于混凝土轴心抗压强度的提高作用较小。根据相关试验研究表明，钢筋钢纤维混凝土小偏心受压构件承载力与普通混凝土构件基本接近。两者之比的平均值为1.019，变异系数为0.081。同时根据对小偏心受压管片承载力计算表明，计及钢纤维混凝土抗拉能力和按普通钢筋混凝土管片计算的承载力其误差约为5%。所以小偏心受压构件承载力计算可以按《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定计算。

钢筋钢纤维混凝土大偏心受压构件正截面承载力计算考虑钢纤维混凝土抗拉作用对承载力的有利影响。通过对12根钢筋钢纤维混凝土管片实体模型和36根大梁的试验以及北京、沈阳等地的工程实践研究结果表明，按本节给出的正截面极限状态承载能力的计算方法，得到的钢筋钢纤维混凝土管片的承载力均大于钢筋混凝土管片，可节省钢材约60%。以上试验也证明了本规程中的计算公式和的取值是偏于安全的。

**5.2.7** 当按5.2.5条的规定计算且公式(5.2.5-6)的条件不能满足时，其正截面受压承载力可采用下式计算：

（5.2.7-1）

（5.2.7-2）

（5.2.7-3）

式中 ——受压区钢筋应力（MPa）：

——钢纤维混凝土承载能力极限状态拉应变，按本规程附录B的规定取值。

条文说明：《混凝土结构设计规范》GB50010中规定，当时，简化计算并偏于安全地不考虑受压区混凝土对弯矩承载力的贡献。本规程考虑了受压区混凝土对弯矩承载力的贡献。此时，受压区钢筋应力小于屈服应力，需要根据平截面假定计算受压区钢筋的实际应力。计算结果是受压区高度增加。相对不考虑受压区应力对弯矩的贡献时配筋率将减少10%以上。

**5.2.8** 当钢筋钢纤维混凝土管片采用对称配筋，且混凝土受压区高度符合公式(5.2.5-6)和(5.2.5-6)的条件时，管片正截面偏心受压配筋可按下列公式计算：

（5.2.8-1）

（5.2.8-2）

5.3 斜截面受剪载力计算

**5.3.1** 当钢筋钢纤维混凝土盾构管片符合下列要求时，可不进行斜截面受剪载力计算。

（5.3.1）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中： *V* | | ——管片斜截面最大剪力设计值（kN）； |
| *N* | ——与剪力设计值相对应的基本荷载组合轴力设计值（kN）；当*N*大于0.3*f*fcbh时，取0.3*f*fc*bh*； | |

**5.3.2** 钢筋钢纤维混凝土盾构管片斜截面受剪承载力应符合以下规定：

（5.3.2-1）

（5.3.2-2）

（5.3.2-3）

（5.3.2-4）

（5.3.2-4）

 （5.3.2-5）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中： | | ——混凝土受剪承载力设计值（N）； |
|  | | ——考虑钢纤维对混凝土增强作用的受剪承载力设计值（N）； |
|  | | ——与箍筋有关的受剪承载力设计值（N），按式（6.2.5-5）的规定计算； |
|  | | ——管片截面尺寸对钢纤维离散性影响系数，取1.0； |
|  | | ——混凝土轴心抗拉强度设计值（MPa）； | |
|  | | ——钢纤维混凝土抗剪强度设计值（MPa）； | |
|  | | ——箍筋的抗拉强度设计值（MPa），按《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定取值； | |
| *A*sv | | ——配置在同一截面箍筋各肢的全部截面面积（mm2）。 | |

条文说明：钢纤维混凝土构件斜截面发生剪压破坏时，其抗剪承载力主要由剪压区混凝土抗剪承载力及箍筋抗剪承载力组成。钢纤维的掺入可使混凝土所承担的剪力较素混凝土有所提高。本条文是在国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的基础上增加了钢纤维混凝土对抗剪承载力的贡献，参考欧洲标 准《fib model code for concrete sturctures 2010》 并结合试验研究成果得到。

箍筋对抗剪承载力的贡献与普通钢筋混凝土构件相同。试验结果表明：钢纤维对箍筋的抗剪承载力没有影响，仍可按有关混凝土结构设计规范规定的斜截面箍筋受剪承载力的公式计算。

5.4 裂缝控制验算

**5.4.1** 钢筋钢纤维混凝土盾构管片正常使用极限状态的裂缝控制及钢筋应力应根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定按普通钢筋混凝土构件计算，然后考虑钢纤维的抗裂作用对计算结果予以修正。

**5.4.2** 按荷载准永久组合并考虑长期作用影响计算的钢筋钢纤维混凝土盾构管片最大裂缝宽度应按下式计算：

（5.4.2-1）

 （5.4.2-2）

式中：**——**钢筋钢纤维混凝土管片最大裂缝宽度（mm）；

**——**根据钢纤维混凝土强度等级，不考虑钢纤维影响，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010计算的最大裂缝宽度（mm）；

——钢纤维裂缝宽度影响系数；

——钢纤维混凝土正常使用极限状态残余抗拉标准强度（MPa），按本规程附录B的规定计算；

——钢纤维混凝土承载能力极限状态残余抗拉标准强度（MPa），按本规程附录B的规定计算；

——钢纤维混凝土轴心抗拉标准强度（MPa），按同级混凝土轴心抗拉标准强度取值；

条文说明：掺入钢纤维可以提高构件的抗裂度，减少正常使用状态下的裂缝宽度。本规程引入考虑钢纤维影响的修正项。

研究结果表明，钢纤维混凝土的抗拉作用降低了钢筋的应力，在同等承载力作用下减小了混凝土受拉区的平均应变，使裂缝宽度减小。参考德国国标《DIN 1045-1》 和对该国标补充的钢纤维混凝土技术标准《DafStb Technical Rule on Steel Fiber Reinforced Concerte》（由德国钢筋混凝土委员编写），对钢纤维混凝土的阻裂效应采用综合影响系数修正。

根据对同等承载力的钢筋混凝土管片和钢筋钢纤维混凝土管片1:1模型试验，得出的数值与钢纤维掺量及钢纤维抗拉强度特征值有关，将其综合为钢纤维混凝土极限状态残余抗拉强度标准值与混凝土轴心抗拉强度标准值的比值关系。

参考德国的试验研究结果，钢纤维体积率在0.25%~1.00%之间，对应的在0.10~0.58。本规程进行的钢纤维混凝土构件试验，钢纤维掺量在0.32%~0.45%范围内时，得出的约在0.13~0.40之间，与德国试验结果较为吻合。

6 构造规定

**6.0.1** 钢筋钢纤维混凝土管片的构造设计应符合现行国家标准《盾构隧道设计标准》GB/T51438的有关规定。

**6.0.2**钢筋钢纤维混凝土管片的最外层钢筋的保护层厚度不应小于40mm。

**6.0.3**钢筋钢纤维混凝土管片的钢筋锚固和连接设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定。

**6.0.4** 当钢纤维混凝土裂后抗弯强度等级小于4c时，钢筋钢纤维混凝土管片内侧和外侧纵向受力钢筋的配筋率百分率不应小于0.2和0.45*f*t */ f*y中的较大值。

条文说明：针对纵向受力钢筋提出的最小配筋率要求是为了避免少筋梁的受弯脆性破坏。钢纤维混凝土的残余弯拉强度达到一定标准就可以避免这种受弯脆性破坏。

**6.0.5**当钢纤维混凝土裂后抗弯强度等级小于4c时，钢筋钢纤维混凝土管片箍筋的最小配筋率）不应小于0.24*f*t */ f*yv。

条文说明：针对箍筋提出的最小配筋率要求是为了避免类似无腹筋梁的受剪脆性破坏。钢纤维混凝土的残余弯拉强度达到一定标准就可以避免这种受剪脆性破坏。参考规范model code 2010中规定，当钢纤维混凝土残余弯拉强度满足下式：

 说明式（6.0-1）

也可以作为不需要配置最小抗剪箍筋的条件。

式中：——对应于CMOD2为1.5mm时的残余弯拉强度标准值（Mpa），用本标准附录A的方法获取，也可用下式计算：

说明式（6.0-2）

其中，——正常使用极限状态抗拉强度标准值（MPa），按本标准附录B方法获得。

7 施工验算

7.1 一般规定

**7.1.1** 钢筋钢纤维混凝土管片应根据设计要求和管片制造和施工方案进行必要的施工验算。

条文说明：施工验算是装配式混凝土管片结构设计的重要环节，一般考虑管片脱模、翻转、运输、堆放及吊装等施工全过程。

**7.1.2** 管片在脱模、吊装、堆放、运输和拼装等短暂状况下的施工验算应进行承载能力极限状态设计，并应符合第规程第3.2节的规定。

条文说明：钢筋钢纤维管片生产和运输等短暂状态包括管片从厂内预制到在盾构内完成拼装的所有荷载工况。在这些短暂荷载工况下，管片中会产生一定的弯矩但不会产生轴力，所以管片应重点针对脱模、堆放、运输及吊装阶段所产生的弯矩进行承载力验算，且要求管片不开裂。

参考ACI 544-15中的《预制纤维增强混凝土管片设计与施工报告》，本规程确定了对管片进行脱模、堆放、运输、吊运等短暂状态承载力验算方法。

**7.1.3**钢筋钢纤维管片施工验算应符合下式列规定：

(7.1.3-1)

(7.1.3-2)

式中：——各短暂状况作用组合管片最大弯矩设计值(MPa)；

——管片开裂弯矩设计值(MPa)；

——管片宽度(mm)；

——管片截面高度(mm)；

——与各短暂状况混凝土龄期抗压强度对应的混凝土抗拉强度设计值(MPa)，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010表4.1.3-1以线性内插法确定。

7.2 短暂状况承载力验算

**7.2.1** 钢筋钢纤维混凝土管片脱模和拼装施工验算应符合下列规定：

1 管片脱模时的混凝土强度等级不应小于C20；拼装验算混凝土强度等级应按设计强度取值；

2 脱模和拼装验算时管片的计算模型应简化为承受竖向荷载作用、两端悬臂且中间有竖向约束的梁；

3 脱模验算竖向荷载设计值应取管片自重标准值乘以动力系数后与脱模吸附力之和，且不宜小于管片自重标准值的1.5倍；

4 脱模验算动力系数不宜小于1.2；脱模吸附力应根据管片和模具的实际情况选用，且不宜小于1.5kPa；

5 拼装验算竖向荷载设计值应取管片自重标准值乘以动力系数和分项系数；动力系数不宜小于1.5；分项系数宜取1.35；

6 管片中间竖向约束的范围应根据管片脱模时的起吊方式确定。

条文说明：钢筋钢纤维管片脱模阶段主要是脱模吊运和对钢筋钢纤维管片产生影响，此时钢筋钢纤维混凝土已有一定的形状并达到规定强度。通常有两种吊运方法，分别是真空吊运和机械吊运。当移动管片环时，就必须考虑钢筋钢纤维混凝土早期抗拉强度满足脱模阶段的承载能力。

钢筋钢纤维管片脱模阶段是将管片按中心支承两端悬臂的梁进行最大弯矩计算。通过对沈阳地铁区间隧道盾构管片脱模阶段要求的钢纤维混凝土不开裂的抗拉强度，这一抗拉强度是按国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010规定的抗拉强度与立方体抗压强度的关系，得出立方体抗压强度标准值达到20MPa即可满足该阶段承载力要求。

**7.2.2** 钢筋钢纤维混凝土管片堆放和运输施工验算应符合下列规定：

1 管片初期堆放时的混凝土强度等级不应小于C20；堆放层数不宜大于两层；

2 管片达到设计强度后，堆放和运输验算混凝土强度等级应按设计强度取值；堆放层数宜为一环管片的分块数；

2 堆放验算时管片的计算模型应简化为承受竖向荷载作用、两端悬臂且中部有竖向支座的简支梁；

3 竖向荷载设计值应取最下层管片以上管片自重标准值之和乘以动力系数和分项系数；动力系数不宜小于1.5；分项系数宜取1.35；

4 简支梁支座位置应与管片堆放支撑块位置对应，并应考虑支撑块偏心误差的不利影响；垫木偏心误差宜取100mm。

条文说明：在钢筋钢纤维管片达到28天强度前，管片进行拆模过程后，将会被堆放在堆场。初期堆放不大于2块管片。成品堆放一般情况下全环管片叠放成一堆。

成品管片堆放时，所有的支撑块应准确放置在同一条线上，但是实际情况中上层和下层支撑块之间总会产生偏心距，因此设计中通常考虑100mm的偏心距，这个偏心距可以朝向木块的内侧或是外侧。计算时除了底部管片的自重造成的弯矩，还需要考虑上方管片的自重和上方堆叠支撑块的偏心距，因此可以简化为简支梁受力模型。因作用在管片上的都是恒载，所以采用的荷载分项系数为1.35。

**8** 管片生产

8.1 一般规定

**8.1.1** 钢筋钢纤维管片生产应具有健全的质量管理体系、质量控制和检验制度。

**8.1.2** 钢筋钢纤维管片生产应编制施工组织设计或技术方案。管片生产操作人员应进行技术培训，合格后方可上岗。管片生产设备和设施应满足生产要求，并应定期对主要设备进行检定或测试。

**8.1.3** 钢筋钢纤维管片制造、运输、检验及验收除应遵守本章的规定外，尚应符合现行国家标准《盾构法隧道施工与验收规范》GB50446、《混凝土质量控制标准》GB 50164和行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55、《钢纤维混凝土》JG/T 472的相关规定。

8.2 配合比设计及拌合物

**8.2.1** 钢纤维混凝土原材料应符合下列规定：

1 钢纤维应具备产品质量证明文件，并应经复检合格；

2 钢纤维技术要求应符合本规程第4.1节的相关规定；

3 钢纤维的质量要求、检验规则和检验方法应符合现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472的规定；

4 钢纤维强度等级及钢纤维掺量宜根据钢纤维混凝土抗压强度等级和裂后抗弯强度等级的设计要求经试验确定；

5 混凝土骨料应采用非碱活性骨料；当采用碱活性骨料时，混凝土中碱含量的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；

6 钢筋的品种、级别、规格和位置应符合设计要求。

**8.2.2** 钢纤维混凝土的配合比应满足抗压强度、裂后抗弯强度、拌合物性能、耐久性和施工要求。

**8.2.3** 钢纤维混凝土配合比试配应采用工程实际使用的原材料，进行钢纤维混凝土拌合物性能、力学性能和耐久性试验。

**8.2.4** 钢纤维混凝土拌合物性能应符合国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164和行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472中的相关规定，混凝土的坍落度不宜大于120mm，不得出现离析、泌水和钢纤维结团现象。

**8.2.5** 钢纤维混凝土拌合物中水溶性氯离子含量应符合国家标准《钢纤维混凝土》JG/T 472中的相关规定，水溶性氯离子含量试验方法应符合行业标准《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T 322中的相关规定。

8.3 材料投放和搅拌

**8.3.1** 钢纤维混凝土生产时，宜采用专用设备进行原材料投料，且应保证钢纤维与粗骨料同时均匀分布在骨料皮带上。

条文说明：根据生产实际经验总结，钢纤维混凝土投料时，采用专用的投料设备进行投料，可以均匀分散材料，还可以有效地控制材料重量偏差。

**8.3.2** 钢纤维混凝土原材料投料计量误差应符合国家标准《预拌混凝土》GB/T14902和行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T221中的相关规定。钢纤维重量允许偏差为±1%。

**8.3.3** 钢纤维混凝土应采用强制式搅拌机搅拌。宜与砂石骨料同时投入搅拌机中先搅拌20s，再与拌合水一起搅拌20s，之后与水泥及掺合料混合搅拌90～100s，最后加入外加剂搅拌30s。搅拌时间可比普通混凝土适当延长20～30s。拌合过程中应避免钢纤维结团。

条文说明：根据生产实际经验总结，投料时，钢纤维宜与砂石骨料一起投入到搅拌机中先行搅拌，再与水泥浆体混合搅拌，这样有利于通过砂石搅拌使成板的钢纤维均匀分散，遇水泥浆液后钢纤维表面胶体溶解，有利于钢纤维分布均匀。钢纤维混凝土搅拌时间太短，不能得到匀质的混凝土拌合物，搅拌时间太长会影响混凝土和易性。因此，钢纤维混凝土搅拌时间可比普通混凝土适当延长20～30s为宜。

**8.3.4** 钢纤维混凝土制备过程中的质量控制应符合符合国家标准GB50204和GB/T14902的规定。

**8.3.5** 钢纤维混凝土裂后抗弯强度的试验和评定应符合本规程附录A的规定，其它性能的试验和评定应符合国家现行相关标准的规定。

8.4 浇筑、振捣及养护

**8.4.1** 钢纤维混凝土管片应采用震动平台或附着振动器进行振捣成型。浇筑和成型过程中应保证钢纤维混凝土密实，钢纤维分布均匀，避免出现拌合物离析、分层以及钢纤维裸露出管片表面。

条文说明：有钢纤维外露不仅会影响钢纤维混凝土管片的外观，还会给施工人员造成安全隐患。因此，要控制钢纤维混凝土振捣后的外观质量。

**8.4.2** 钢纤维混凝土管片浇筑成型后，应在管片背面混凝土初凝前再次进行压面。

**8.4.3** 当钢筋钢纤维混凝土管片生产时，混凝土性能检验试件的留置应符合下列规定：

1 应至少留置1组检验抗压强度的试件和1组同条件养护试件；

2 应至少留置1组检验裂后抗弯强度的试件和1组同条件养护试件；

3 检验钢纤维混凝土其它性能的试件的留置应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

**8.4.4** 应在钢筋钢纤维混凝土管片内弧面角部和端侧面，标记管片型号与编号、模具编号、生产日期和生产单位名称。

**8.4.5** 钢筋钢纤维混凝土管片脱模时的混凝土强度等级不应小于CF20。

**8.4.6** 钢筋钢纤维混凝土管片质量应符合下列规定：

 1 应按设计要求进行成品管片的结构性能检验，检验结果应符合设计要求；

 2 钢纤维混凝土抗压强度等级、裂后抗弯强度等级和抗渗等级等性能应符合设计要求；

 3 中心注浆孔（兼吊装）预埋件应进行抗拉拔试验，试验结果应符合设计要求；当设计无要求时，抗拉拔力不应低于管片自重的7倍；

 4 管片外观质量缺陷等级划分应符合现行国家标准《盾构法隧道施工与验收规范》GB50446的相关规定，钢纤维管片表面少量钢纤维外露（非毛刺）应划归为外观质量一般缺陷。

8.5 管片验收

**8.5.1** 钢筋钢纤维混凝土管片质量验收应符合下列规定：

1 钢筋钢纤维混凝土管片应按照分项工程进行质量验收；

2 分项工程验收时应合理划分检验批，制定抽样检验方案，抽样检验方案应在检查管片的规格、型号及性能检测的基础上制定；

3 分项工程的验收应在所含检验批验收合格基础上进行质量验收；

**8.5.2** 钢筋钢纤维混凝土管片检验批的质量验收应符合下列规定：

1 主控项目的质量经抽样检验应全部合格；

2 一般项目的质量经抽样检验应合格；一般项目当采用计数抽样检验时，其合格点率不应低于80%；

3 应具有完整的质量检验记录和重要工作操作记录。

**8.5.3** 钢筋钢纤维混凝土管片主控项目和一般项目除应符合现行国家标准《盾构法隧道施工与验收规范》GB50446和行业标准《隧道管片质量检测技术标准》CJJ/T164中的相关规定外，主控项目尚应符合下列规定：

1钢纤维混凝土的裂后抗弯强度应满足设计要求；

检验数量：首次生产时，每2000立方米抽检1组试件，每组4个试件，在3组符合工程设计要求之后可减少到每5000立方米1组试件。

检验方法：应符合本规程附录A和附录B的规定。

2钢筋钢纤维管片抗弯或压弯承载力性能应满足设计要求；

检查数量：第一次生产钢筋钢纤维管片应检验3块标准块的承载力，并全部满足设计要求。之后根据设计要求确定检验批量、抽样及复检数量。

检验方法：应符合本规程附录C的规定。

3 钢纤维混凝土管片结构表面应无钢纤维毛刺。

检验数量：全数检查。

检验方法：观察检查。

条文说明：本节规定了钢筋钢纤维管片成品检验批的主控项目和一般项目。除应符合现行规范相关规定外，还补充了与本规程内容联系密切的相关检验与验收项目。

**9** 隧道施工与验收

**9.0.1** 钢筋钢纤维管片的进场质量验收应符合本规程第8.8节的规定。

**9.0.2** 应合理规划钢筋钢纤维管片运输通道和临时堆放场地，按规定堆放并采取堆放保护措施。

**9.0.3** 当管片出现缺棱掉角、混凝土剥落、大于0.2mm或贯穿性裂缝等残缺时，必须进行修补。应分析管片残缺程度和形成原因并制定修补方案。修补材料强度不应低于管片强度。

**9.0.4** 未经设计允许不得对钢筋钢纤维管片进行切割、开洞。

**9.0.5** 成型隧道验收应符合现行国家标准《盾构法隧道施工与验收规范》GB50446的相关规定。

附录A 残余弯拉强度测试方法（切口梁法）

**A.0.1** 本方法适用于测定钢纤维混凝土的弯拉强度和残余弯拉强度。

**A.0.2** 试验把一集中荷载作用在简支带切口的长方体试件的跨中位置，测得切口张开处的水平位移与荷载变化的曲线或竖向挠度与荷载变化的曲线，根据曲线计算得出的给定切口张开位移的残余抗弯拉强度。

A.1 试验设备

**A.1.1** 液压伺服试验机：量程应不小于200kN，相对误差应不大于1.0%，试验机必须具有足够刚度，并能通过控制位移实现加载。

**A.1.2** 荷载传感器：量程200kN，精度不低于0.1kN。

**A.1.3** 夹式应变仪：量程不应小于5mm，精度不应低于0.01mm。

**A.1.4** 动态数据采集系统：应能实时采集荷载、应变与位移的数值，采样频率不宜低于5Hz。

**A.1.5** 挠度测量架应包括水平安装的铝板、固定钮、位移传感器触头顶板等。

**A.1.6** 试件加载如图A.1.6所示。辊轴直径为30mm±1mm，长度为160mm；三个辊轴可以自由滚动，两个支承辊轴中心线之间的间距为500mm2.0mm。



图A.1.6 试件加载位置

（1—支承辊轴，2—加载辊轴）

A.2 试件的制作和养护

**A.2.1** 试件制作及养护应符合国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081、《钢纤维混凝土》JG/T472的规定。

**A.2.2** 试件尺寸应采用150mm×150mm×550mm。

**A.2.3** 钢纤维混凝土试件的取样除应遵守现国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204中有关规定外，尚应遵守如下规定。

**1** 纤维混凝土拌合物的取样应具有代表性，宜采用多次采样的方法。一般在同一盘混凝土或同一车混凝土中的约1/4处、1/2处和3/4处之间分别取样，从第一次取样到最后一次取样不宜超过15min，然后人工搅拌均匀，拌合过程中始终用铁铲翻拌，不许用铁铲插捣。

**2** 从取样完毕到开始做各项性能试验不宜超过5min，取样后应尽快成型，取样到成型时间间隔不宜超过15min。

**A.2.4** 试件的填料步骤（图A.2.4），先填充区域1，再填充区域2，区域1的面积应达到区域2的2倍。当模具中的混凝土达到试件高度90%时进行振捣，振捣过程中加满和整平混凝土。振捣采用外部振动法。



图A.2.4 试件浇筑步骤

**A.2.5** 严禁用振捣棒插入模内振捣或用铁棒模内振捣。必要时可用振动棒接触试模外壁进行振捣。

**A.2.6** 将试件成型时的侧面作为支承面，支承面跨中预开口，开口宽度不大于5mm，深度25mm±1mm。开口采用切割机自动完成，切割采用在切口处喷水的湿切作业。切口要求在梁跨中且垂直于梁轴线。

A.3 试验步骤

**A.3.1** 进行试件尺寸测量，并作出安装位置和测试仪表位置的标记。

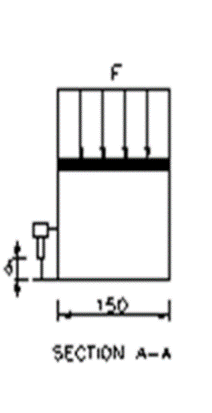
**A.3.2** 将试件无偏心的放置于支座上，以试件预开口底水平面作为支承面。位移传感器安装在跨中。预开口处张开水平位移和挠度测量的装置分别如图A.3.2-1和A.3.2-2所示。





图A.3.2-1 预开口处张开水平位移测量装置

1-预开口详图；2-传感器（夹式应变仪）；3-刀口



（a）预开口处挠度测量装置

1-滑动固定端；2-转动固定端；3-刚架



（b）位移传感器布置大样

1-1mm厚铝板；2-位移传感器（LVDT）；3-弹簧杆

图A.3.2-2 预开口处挠度测量装置

**A.3.3** 挠度测量装置采用型钢或铝材制作的刚架，固定刚架与试件侧面的螺栓，要求刚架的一端可以滑动，另一端可以转动（图A.3.2-2）。

**A.3.4** 当用挠度（δ）测试钢纤维混凝土韧性指标时，应将挠度值（δ）换算成跨中切口水平位移值（CMOD）。具体换算公式如下：

CMOD=（δ-0.04）/0.85 （A.3.4）

表A.3.4为常用的跨中切口水平位移值（CMOD）与等效挠度值（δ）的对照表。

**表A.3.4 跨中切口水平位移（CMOD）与等效挠度值（δ）**

|  |  |
| --- | --- |
| *CMOD*（mm） | *δ*（mm） |
| 0.05 | 0.08 |
| 0.1 | 0.13 |
| 0.2 | 0.21 |
| 0.5 | 0.47 |
| 1.5 | 1.32 |
| 2.5 | 2.17 |
| 3.5 | 3.02 |
| 4.0 | 3.44 |

**A.3.5** 加载前应预加载，确保试件、加载装置以及铰支座充分接触，仪器设备工作正常。

**A.3.6** 启动实验机，采用位移控制加载，控制CMOD的张开速度为0.05 mm/min ，当CMOD达到0.1mm时，调整加载速度为0.2mm/min.。

**A.3.7** 当CMOD达到4mm时终止试验。

**A.3.8** 当测得在CMODFL到CMOD为0.5mm范围内的最小荷载小于对应于CMOD为0.5mm时荷载的30%时，应重新检查试验装置并舍弃该试验结果。

**A.3.9** 若裂缝未出现在试件的预开口处，应舍弃该试验结果。

A.4 试验结果计算

**A.4.1 比例**极限弯拉强度的确定应符合下列规定：

**1 比例**极限弯拉强度按下式计算：

 （A.4.1）

式中：——**比例**极限弯拉强度（MPa）；

——对应于极限弯拉强度的荷载（N），按本条2款的方法确定；

——试件跨度（mm）；

——试件宽度（mm）；

——试件从切口顶端到试件顶部的距离（mm）。

**2** 对应于的荷载可按图A.4.1确定。在荷载-CMOD曲线（或荷载-挠度曲线）上画一条距离荷载坐标轴0.05mm的平行线，选取0mm~0.05mm范围内最大的荷载作为*F*L。



图A.4.1 荷载与切口张开位移CMOD关系曲线

**A.4.2** 残余弯拉强度应按下式计算：

 （A.4.2）

式中：——对应于切口张开位移值CMOD为CMODj时的残余抗弯拉强度（N/mm2）；

——对应切口张开位移CMOD为CMODj时的荷载值（N），可按图A.4.3确定；

**A.4.3** 计算残余弯拉强度值近似到0.1MPa。



图A.4.3 荷载*Fj*与切口张开位移值*CMODj*( *j*=1,2,3,4)

A.5 试验报告与评定

**A.5.1** 试验报告主要应包括试件混凝土配合比、试件制作与养护情况、试件尺寸、试验方法、荷载-CMOD曲线、比例极限弯拉强度和残余弯拉强度试验结果等。

**A.5.2** 进行钢纤维混凝土弯拉强度评定时，宜根据12根钢纤维混凝土标准梁试件的弯拉强度测定结果进行比例极限弯拉强度标准值和各残余弯拉强度标准值*f*Rjk的评定。评定方法应按概率统计的正态分布计算，利用公式（A.5.2-1）、式（A.5.2-2）计算得到。

(A.5.2-1)

(A.5.2-2)

式中：，**——比例**极限弯拉强度标准值和平均值，MPa；

，**——对应于***CMODj*的残余弯拉强度标准值和平均值，MPa；

——分位数系数，按表A.5.2的规定选择；

——钢纤维混凝土强度试验值的标准差，应符合《混凝土结构设计规范》GB50010的规定。样本数量n≥12，变异系数不宜大于25%。

根据不同样本数量，标准差未知，置信水平75%, 5%分位数系数*k*s按表A.5.2取值。

**表A.5.2 分位数系数ks表**

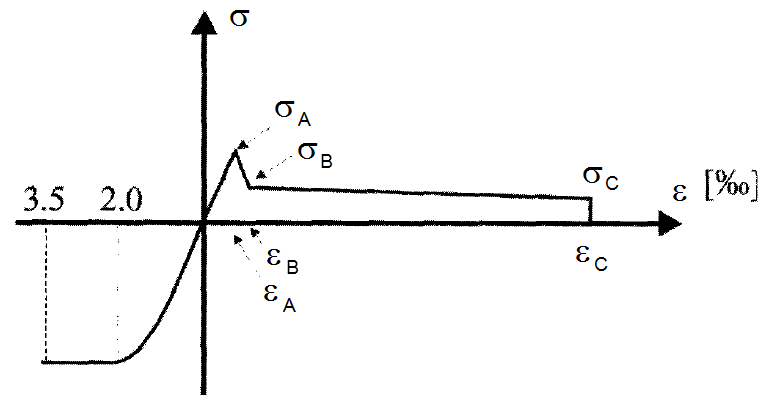
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样本数n | 6 | 9 | 12 | 15 | 20 | 25 | 100 |  |
| 分位数系数ks | 2.336 | 2.141 | 2.048 | 1.991 | 1.932 | 1.895 | 1.76 | 1.645 |

条文说明：分位数系ks取值表是根据试件样本的数量以及对可靠度指标的影响，并借鉴《ISO12491标准建筑材料和构件质量控制统计方法》即《Statistical methods for quality control of building materials and components》标准确定的。

**A.5.3** 检验产品质量时，可按规定检验批次进行检验。每组4个试件，弯拉强度和残余弯拉强度试验结果均应以4个试件试验值的平均值表示。若测试值中的最大值或最小值与两中间测值的平均值之差大于中间平均值的15%，则取中间值的平均值作为该组试件的试验值；如果两者与中间值平均值之差均大于15%，则该组试件的试验结果无效。其平均值应达到钢纤维混凝土弯拉强度评定时的平均值。

附录B 不同极限状态抗拉强度

**B.0.1** 钢纤维混凝土的简化应力-应变关系如图B.0.3所示。



图B.0.1 钢纤维混凝土应力-应变关系

图中：——钢纤维混凝土轴心抗拉强度代表值，其值可根据实际结构分析需要分别定义为轴心抗拉强度标准值或设计值(MPa)；

——钢纤维混凝土对应正常使用极限状态的残余抗拉强度标准值或设计值(MPa)；

——钢纤维混凝土对应承载能力极限状态的残余抗拉强度标准值或设计值(MPa)。

条文说明：根据试验结果，钢纤维混凝土的抗压强度和弹性模量与同级混凝土相比提高不明显，因此，受压状态的应力-应变关系可按国家标准《混凝土结构设计规范》（GB50010）的规定采用普通混凝土的应力-应变关系。

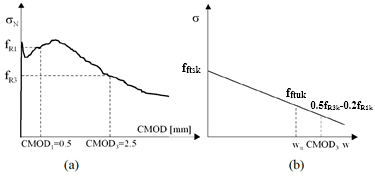
提高混凝土的抗开裂性能及混凝土开裂后的残余抗拉强度是钢纤维混凝土最重要的一个特性。由于混凝土试件的轴心抗拉试验及轴拉应力-应变全曲线实施难度较大，本规程借鉴欧洲规范EN14651的规定，采用切口梁弯曲实验（见本规程附录A三点受弯切口梁实验）确定荷载与切口位移的关系，通过分析试验结果和平衡方程，可获得构件开裂后不同开口位移与抗弯拉应力的对应关系，即可确定不同承载力极限状态相应的、的含义。

**B.0.2** 对应承载力极限状态的钢纤维混凝土残余抗拉强度标准值和设计值应符合下列规定：

当刚-塑性模型时：

 （B.0.2-1）

当采用线性模型时（图B.0.2）：



（a）软化材料做弯曲试验的一般结果图 （b）开裂后的线性本构模型

图B.0.2 线性模型残余弯拉强度与轴心抗拉强度的转化关系

 （B.0.2-2）

 （B.0.2-3）

 （B.0.2-4）

 （B.0.2-5）

 （B.0.2-6）

 （B.0.2-7）

式中：*f*ftu、——承载能力极限状态正截面受拉区抗拉强度设计值、标准值（MPa）；

——正常使用极限状态正截面受拉区抗拉强度标准值（MPa）；

——对应于切口位移2.5mm时钢纤维混凝土残余弯拉标准强度，按本规程附录A规定的方法计算，（MPa）；

——对应于切口位移0.5mm时钢纤维混凝土残余弯拉标准强度，按本标准附录A规定的方法计算，（MPa）；

——承载能力极限状态钢纤维混凝土材料分项系数，对于管片压弯状态取1.25；

——钢纤维方向因子，取为1.0；

——盾构管片尺寸对钢纤维离散影响系数，取为1.0；

*w*u——承载力极限状态时管片边缘的裂缝宽度；

——钢纤维混凝土极限拉应变，当截面拉应变变化时为，当截面拉应变为常量时为；

——裂缝间距，mm；

*——*裂缝平均间距；

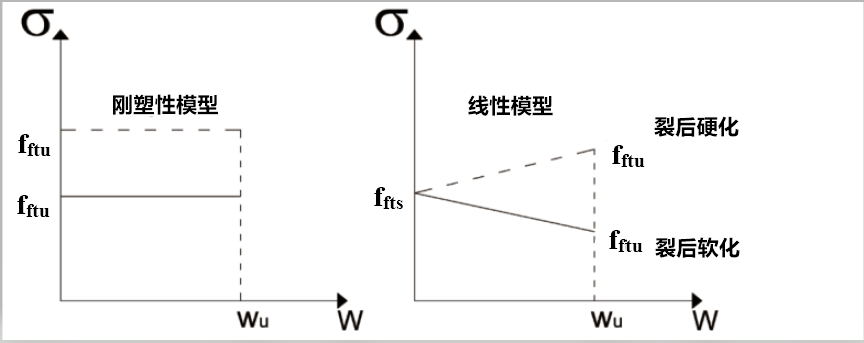
其余各符号及其各参数的计算方法应符合《混凝土结构设计规范》GB50010-2010第7.1.2条与第7.1.4条规定。

当时,则公式（B.0.4-3）中的*f*ftuk按下式计算：

 (B.0.2-8)

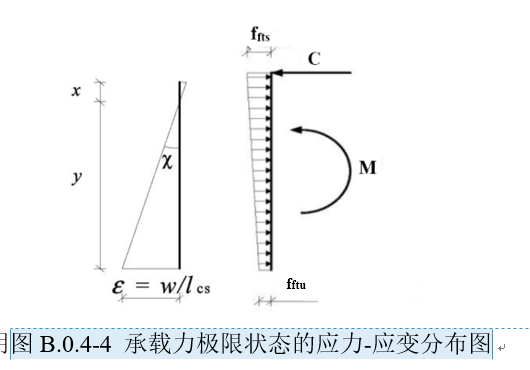
条文说明：承载能力极限状态抗拉强度借鉴了欧洲规范《model code2010》的的相关规定。

从切口梁弯曲试验得出弯曲受拉构件的应力-切口张开位移CMOD的本构关系，并根据极限承载力等效的原则，可简化并转化为刚-塑模型或线性模型（两种模型均可模拟裂后硬化和裂后软化性能），如说明图B.0.4-1所示。



（a）刚塑性模型 （b）线性模型

说明图B.0.2-1 简化的裂后应力-裂缝张开位移关系



说明图B.0.2-2 线性模型承载力极限状态的应力-应变分布图

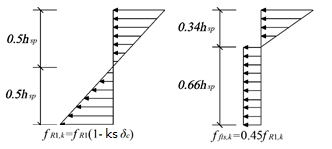
线性模型中的抗拉强度由满足允许的裂缝宽度条件下的所需延性决定。假定沿横截面为可变应变分布的极限拉应变等于2％或沿横截面为恒定拉伸应变分布的极限应变等于1％时，最大裂缝宽度可以按计算。在任何情况下，最大裂缝宽度不得超过2.5毫米。

钢纤维混凝土材料分项系数的取值。借鉴国外的规范：fib Model code for concrete structures 2010、Eurocode以及《FIBTG1.4.1\_Bulletin-AF (accepted version)-FINAL》中的规定，并结合我国管片实际生产现状,采用钢纤维混凝土材料分项系数为1.25。

管片属水平制作板型构件，纤维各个方向均匀分布，当板在受弯、劈裂和散裂状态下考虑方向因子Kf =1.0，不影响受力 。对于有利受力，如果经实验验证，则可以应用方向因子Kf >1.0。对于不利受力，必须通过实验确定后应用方向因子Kf <1.0。当板在受剪状态下考虑方向因子Kf =0.5。

关于的取值，目前没有试验研究能证明该系数确实因管片的构件尺寸对强度有所影响，通过计算研究表明，若参考德国标准，按计算，对承载力的影响仅仅在5%以内，对配筋率的影响就更微乎其微。若通过管片承载力试验，能验证该系数确实大于1，可以考虑kG＞1.0。结合目前的生产水平，取kG=1.0。

当试件达到正常使用极限状态对应裂口宽度前，压应力分布为线性（说明图B.0.3）模型，通过假定裂缝高度建立平衡方程式如下式。



说明图**B**.0.2-3 正常工作极限状态截面内力计算简化模型



推导出正常使用极限状态抗拉强度标准值，得条文中式(B.0.2-3)。

**B.0.3** 正常使用极限状态抗拉强度设计值：

 (B.0.3)

式中 ——正常使用极限状态正截面受拉区抗拉强度设计值、标准值（MPa）；

——正常使用极限状态钢纤维混凝土材料分项系数，取=1.0。

附录C 管片承载力检验试验方法标准

C.1 试验设备

**C.1.1** 试验台架。用于固定试件并承受施加荷载的千斤顶反力的台架，最大承载力应满足试验最大加载值的两倍，并有足够的刚度。

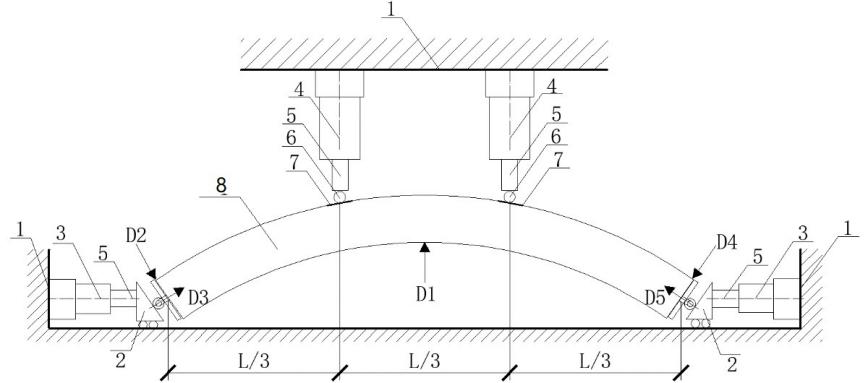
条文说明：该试验方法标准是根据管片的实际受力状态制定的。在借鉴国外同类管片试验方法的基础上，将水平荷载和竖向荷载均变为主动加载，以便模拟管片的实际受力状态。从而验证管片的承载能力是否满足设计要求。这种实验方法对于钢纤维混凝土管片十分重要。

**C.1.2** 试验用设备、仪表及其技术要求见表C.1.2。并应按规定期限进行标定。

表C.1.2 承载力性能试验仪器技术要求

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 仪器名称 | 单位 | 技术指标 | | |
| 量程 | 分度值 | 精度 |
| 压力传感器 | kN | 1000 | 0.1 | 1级 |
| 裂缝读数显微镜 | mm | 10 | 0.01 | 0.01 |
| 位移计 | mm | 30 | 0.01 | 1级 |
| 电子秒表 | s | ＞2h | 1s |  |
| 加压千斤顶 | kN | 1000 | 能保证连续或分级加压或泄压 | |
| 加载系统控制箱 | 对点连接所有压力传感器、位移计终端 | | | |
| 荷载、位移接受系统  （计算机接受系统） | 手动或自动记录各个加载级的压力、  位移等数据 | | | |

**C.1.3** 试验装置的安放位置示于图C.1.3。



图C.1.3 承载力试验装置示意图

1——加载反力架；2—活动垫块；

3—水平向加载千斤顶；4—竖向加载千斤顶；

5——压力传感器；6—加压棒；7—橡胶垫；8—管片；D1~D5—位移测点

C.2 试验前的准备

**C.2.1** 用浇筑试验管片同批次钢纤维混凝土浇筑6块立方体抗压试件和6块切口梁试件。浇筑方法应符合《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081和本规程附录A的规定。

条文说明：要求与测试管片同批次浇筑立方体抗压和切口梁试件，目的是一方面检验钢纤维混凝土各项强度指标是否满足设计要求，另一方面求出同批次钢纤维混凝土轴心抗压标准强度、正常使用极限状态标准强度和承载力极限状态标准强度，以便计算试验管片的计算承载力。

**C.2.2** 立方体抗压强度试件与切口梁试件应与试验管片在同等条件下养护。

**C.2.3** 与管片试验同期进行抗压强度试验和切口梁试验。试验方法应符合《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081和本规程附录A的规定。

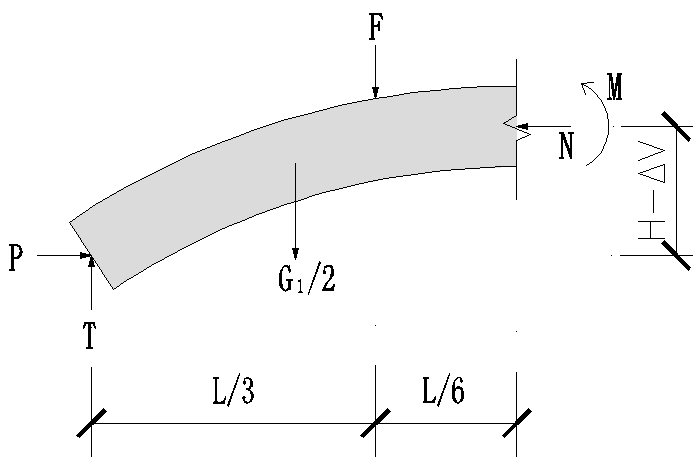
**C.2.4** 由立方体抗压标准强度试验值按《混凝土设计规范》GB50010的规定计算钢纤维混凝土轴心抗压标准强度试验值。

**C.2.5** 由残余弯拉fR1k、fR3k标准强度，按本规程附录B的方法计算fftsk、ffts、fftuk、fftu的抗拉标准强度试验值和设计强度试验值。设计强度试验值应不小于设计管片承载力时采用的抗拉设计强度。若小于设计管片承载力时采用的抗拉设计强度，则应重新计算钢纤维混凝土管片的设计承载力，且应满足设计工况的要求。

**C.2.6** 根据fftsk、fftuk抗拉标准强度试验值，按本规程第6章的规定计算被试验管片正常使用极限状态和承载能力极限状态的计算承载力。计算裂缝宽度分别为0.2mm和Wu（对应管片厚度300mm，钢筋应变约1%）时的加载值，Wu的计算方法应符合本规程附录B的规定。

**C.2.7** 计算试验过程加载等级，应符合以下规定。

1 根据设计承载力和偏心距，计算（图C.2.7）竖向千斤顶与水平千斤顶加载数值的关系：



图C.2.7 管片半结构受力图

 （C.2.7）

|  |  |
| --- | --- |
| 式中：P | ——水平千斤顶加载值（kN）； |
| F | ——竖向千斤顶加载值（kN）； |
|  | ——管片自重（kN）； |
|  | ——管片跨中在荷载作用下产生的竖向位移（m）； |
|  | ——管片跨径（m）； |
|  | ——水平支座中心到管片中心处截面形心的距离（m）。 |
| *N* | *——*基本荷载组合计算的轴向力（kN）。 |
| *M* | *——*基本荷载组合计算的弯矩（kN-m）； |
| *e* | ——设计承载力偏心距，*e=M/N*（m）； |

2 根据设计承载力偏心距和式(C.2.7），即可由每一加载级的水平加载值计算对应的竖向加载值。

条文说明：根据设计承载力和偏心距，得出（图C.2.7）平衡方程：

 则 　  　　　说明式（C.2‑1）

 　则  　　　　说明式（C.2‑2）

 则  说明式（D.2‑3）

　　联立说明式(C.2‑1)、(C.2‑3)，得竖向压力传感器与水平传感器读数的关系如条文中式（C.2.7）。

C.3 试验方法

**C.3.1** 将管片平稳安放在试验台架上，在加载点应垫上厚度不小于20mm的硬橡胶垫。

**C.3.2** 安装加载设备。千斤顶、压力传感器、位移计一并与加载系统控制箱对点连接。选择加荷点标距约为1/3管片的投影长度。加压棒的长度应能覆盖管片宽度，支承管片两端的水平支座可以沿台架底面滚动和转动。

**C.3.3 加**载分级和持续时间应符合如下规定。

**1** 开裂前按预计开裂荷载的20%为加载级差，每级保持荷载5min；

**2** 接近开裂时水平千斤顶加载级差为20kN，计算对应的竖向千斤顶加载级差；开裂出现时保持荷载10min，之后按此级差继续加载，直至裂缝宽度超过0.2mm；记录裂缝位置和最大裂缝宽度；

**3** 裂缝宽度超过0.2mm后，水平千斤顶加载级差为50kN，计算对应的竖向千斤顶加载级差，每级保持荷载10min；

**4**裂缝宽度超过计算的Wu之后，按设计承载力的5%或50kN取大值级差加荷，每级保持加荷时间10min。

条文说明：试验过程采用分级加载，且有一定的稳压时间。

**C.3.4** 各级加载并达到规定的稳压时间后，记录最大裂缝宽度，绘制裂缝分布图；采集各测点压力传感器、位移读数；试验结束后应先保存数据，再泄压；之后拆线路、传感器、千斤顶、上部试验台架，最后吊出试验管片。

**C.3.5** 符合以下条件之一终止试验：

**1** 试验承载力超过用同批次切口梁试件得出的fftsk、fftuk标准强度计算的钢筋钢纤维混凝土管片设计承载力；

**2**试验管片的裂缝宽度超过2.5mm。

C.4 试验报告

**C.4.1** 通过自动记录系统导出试验荷载数据及位移数据，整理出如下数据。

**1** 按下式计算各个加载级对应管片中心点的位移值，并绘制竖向荷载与管片跨中位移的关系曲线；

（C.4.1）

**2** 计算裂缝宽度为0.2mm时的加载值对应管片中心的弯矩和轴力，应大于按C.2.5条规定计算的正常使用极限状态的计算承载力；

**3** 计算裂缝宽度为Wu时的加载值对应管片中心的弯矩和轴力，应大于按C.2.5条规定计算的承载能力极限状态的计算承载力；

**4** 若没有得到准确的0.2mm、Wu裂缝宽度的承载力记录，则采用内插法求得0.2mm、Wu裂缝宽对应的荷载值和跨中挠度。

**C.4.2** 三个被试验管片的0.2mm、Wu裂缝宽时对应的试验弯矩和轴力均应大于按C.2.6条规定计算的正常使用极限状态承载力设计值和承载能力极限状态承载力设计值，则满足设计承载力要求。

条文说明：因管片的计算承载力是采用标准强度计算的。因此，要求每个被试验管片的试验承载力均应大于计算承载力，才能满足管片的承载力要求。

**C.4.3** 当出现下列情况之一时，检验失效，应重新检验，并应以重新检验的结果为准：

**1** 位移变量曲线出现异常突变；

**2** 管片在加载点处出现局部破坏。

**C.4.4** 完成试验报告。应包含以下内容。

**1** 试件制作日期；

**2** 试验日期；

3 立方体抗压强度和轴心抗压标准强度和设计强度；

4 残余弯拉强度fR1、fR3的标准值和设计值，ffts、fftu的标准强度和设计强度；

5 试验管片的计算承载力；

6 试验管片的试验承载力；

**7** 安全性评价结论。

本规范用词说明

**1** 为便于在执行本规范条文时区别对待，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：

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

《混凝土结构设计规范》GB 50010

《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068

《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153

《混凝土质量控制标准》GB 50164

《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204

《盾构法隧道施工与验收规范》GB 50446

《预拌混凝土》GB/T14902

《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081

《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082

《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476

《盾构隧道设计标准》GB/T 51438

《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55

《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T221

《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T322

《钢纤维混凝土》JG/T472

《隧道管片质量检测技术标准》CJJ/T164

《混凝土用钢纤维》YB/T151