辽宁省地方标准

DB

XXX-202X

备案号 XXX-202x

钢纤维混凝土预制管片技术规程

Technical specification for precast steel fiber reinforced concrete segments

（征求意见稿）

******发布　　*****实施

辽宁省住房和城乡建设厅

辽宁省市场监督管理局　　联合发布

前　　言

根据辽宁省住房和城乡建设厅关于下达2021年度辽宁省第二批工程建设地方标准编制/修订的通知》辽住建科[2021]33号的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见以及经过实际工程检验的基础上，修订了《钢筋钢纤维混凝土预制管片技术规程》，制定本规程。

本规程的主要技术内容是：钢筋钢纤维预制管片和无筋钢纤维混凝土管片的设计、制造与施工等一系列规定。

本规程共分10章，包括：总则、术语和符号、基本设计规定、材料、结构计算、钢筋钢纤维混凝土管片承载力验算、无筋钢纤维混凝土管片承载力验算、构造规定、施工阶段承载力验算、管片制造与施工

本规程发布实施后，任何单位和个人如有意见或建议均可通过来电来函反馈，我们会认真答复，并认真处理，根据实际情况依法进行评估及复审。

归口管理部门辽宁省城乡和住房建设厅，通信地址：辽宁省沈阳市和平区太原北街2号，联系电话：024-23448611

主编单位：沈阳地铁集团有限公司，通信地址：沈阳市沈河区东滨河路28-3，联系电话：024-24082122

本规程主编单位：沈阳地铁集团有限公司

大连公共交通建设投资集团有限公司

本规程参编单位：西南交通大学

北京城建设计发展集团股份有限公司

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

中铁九局集团有限公司

本规程主要起草人员：

本规程主要审查人员：

目　　次

1 总　　则 1

2 术语和符号 2

2.1 术语 2

2.2 符号 4

3 基本设计规定 7

3.1 一般规定 7

3.2 承载能力极限状态计算 8

3.3 正常使用极限状态验算 12

4 材料 14

4.1 钢纤维 14

4.2 钢纤维混凝土 15

5 结构分析 19

5.1 基本规定 19

5.2 荷载作用 19

5.3 管片横向内力计算 20

5.4 管片变形计算 22

5.5 管片接头螺栓强度计算 23

6　钢筋钢纤维混凝土管片承载力验算 24

6.1 一般规定 24
6.2 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态计算 24
6.3 钢筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态验算 30

7 无筋钢纤维混凝土管片承载力验算 32

7.1 一般规定 32
7.2 承载能力极限状态计算 33
7.3 正常使用极限状态承载力验算 36

8 构造规定 40

8.1 一般规定 40
8.2 管片拼装 41
8.3 管片构造 41

9 施工阶段承载力验算 44

9.1 一般规定 44
9.2 临时荷载承载力验算 45
9.3 盾构顶推力计算 51

10 管片制造与施工 55

10.1 一般规定 55
10.2 配合比设计及拌合物 55
10.3 材料投放和搅拌 56
10.4 浇筑、振捣及养护 56
10.5 弹性密封垫与缓冲垫的粘贴 57

10.6 管片制造与施工 57
10.7 管片检验和验收 58

附录 A 残余抗弯拉强度测试方法（切口梁法） 63

附录 B 钢纤维混凝土盾构管片设计不同极限状态抗拉强度 72

附录 C 管片承载力极限状态的 M-N 包络线绘制 76

C.1 一般规定 76
C.2 区间 1 包络图的计算公式和参数 78
C.3 区间 2 包络图的计算公式和参数 81
C.4 区间 3 包络图的计算公式和参数 83

附录 D 管片正常使用极限状态的 M-N 包络线绘制 85

D.1 一般规定 85
D.2 区间 1 包络图的计算公式和参数 86
D.3 区间 2 包络图的计算公式和参数 89
D.4 区间 3 包络图的计算公式和参数 90

附录 E 预制管片承载力检验试验方法标准 92

本规程用词说明 98

引用标准名录 99

附件 《钢筋钢纤维混凝土预制管片技术规程》条文说明 99

CONTENTS

1 General Provisions.....1
2 Terms and Symbols.....2
2.1 Terms.....2
2.2 Symbols.....4
3 General Requirements.....7
3.1 General.....7
3.2 Ultimate Limit States.....8
3.3 Serviceability Limit States.....11
4 Materials.....13
4.1 Steel Fibre.....13
4.2 Steel Fiber Reinforced Concrete.....14
5 Structural Analysis.....19
5.1 General.....19
5.2 Load.....19
5.3 Calculation of Segments Transverse Internal Force.....20
5.4 Calculation of Segments Deformation.....22
5.5 Calculation of Segments Joint.....23
6 Ultimate Limit States Design of Steel fiber Concrete Segments with rebar.....24
6.1 General.....24
6.2 Calculation of Capacity at Ultimate Limit States.....24
6.3 Check of Capacity at Serviceability Limit States.....30
7 Ultimate Limit States Design of Steel Fiber Concrete Segments..32

7.1 General..... 32
7.2 Calculation of Capacity at Ultimate Limit States..... 33
7.3 Check of Capacity at Serviceability Limit States..... 36
8 Detailing Requirement.....40
8.1 General..... 40
8.2 Segments Installation..... 40
8.3 Detailing of segments.....41
9 Checking capacity in Construction Stage..... 44
9.1 General..... 44
9.2 Checking capacity of temporary load.....45
9.3 Calculation of Sheild Thrust.....50
10 Segments Production and Construction.....55
10.1 General..... 55
10.2 Design of mix Proportion and Mixture.....55
10.3 Dosing and Mixing.....56
10.4 Pouring,Vibrating and Curing..... 56
10.5 Sticking of Elastic Gasket and Cushion.....57
10.6 Segments Construction..... 57
10.7 Segments Inspection and Acceptance.....58
Appendix A Residual Flexural Tensile Strength Test Method (Method of Notched Beam).....63
Appendix B Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Segments at Different Limit States.....72
Appendix C Drawing M-M Curve Line in Ultimate Limit States..... 77

Appendix D Drawing M-M Curve Line in Serviceability Limit States... 85
Appendix E Test Method Standard of Checking Precast Segments Capacity..... 92
Explanation of Wording in This code.....99
List of Quoted Standards..... 100
Explanation of Provisions.....102

1 总　　则

1. 0.1　为在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 本规程适用于无筋钢纤维混凝土管片和钢筋钢纤维混凝土管片的设计、制造与施工；不适用于非金属纤维混凝土管片的设计和施工。

1.0.3　本规程主要依据国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153、《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068、《混凝土结构设计规范》GB50010、《盾构隧道工程设计标准》GB/T51438、《盾构法隧道施工及验收规范》GB 50446 和《预制混凝土衬砌管片》GB/T22082 等标准的原则制定。

1.0.4　钢筋钢纤维混凝土管片和无筋钢纤维混凝土的设计和施工除应遵守本规程外，尚应符合所属行业相关的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

用钢质材料经加工制作的短纤维。

2.1.2 钢纤维混凝土 Steel fiber reinforced concrete

在水泥基混凝土中掺加乱向均匀分布的短切钢纤维混合而成的纤维混凝土。

2.1.3 钢纤维混凝土预制管片 Precast steel fiber reinforced concrete segment with rebars

以钢纤维增强混凝土为主要原材料制成的盾构管片包括钢筋钢纤维混凝土预制管片和无筋钢纤维混凝土预制管片。

2.1.4 钢筋钢纤维混凝土预制管片 Steel fiber reinforced concrete segments with rebars

以钢纤维增强混凝土为主要原材料，并配置受力钢筋的预制管片。

2.1.5 无筋钢纤维混凝土预制管片 Steel fiber reinforced concrete segments

以钢纤维增强混凝土为主要原材料，不配置受力钢筋的预制管片。

2.1.6 钢纤维等效直径 Equivalent diameter

异形、非圆形截面的钢纤维按等面积原则折算为圆形截面后的计算直径。

2.1.7 钢纤维长度 length of steel fiber

钢纤维外端部之间的距离。

2.1.8 钢纤维延展长度 developed length of steel fiber

异型钢纤维在保持横截面尺寸不变的条件下，展直后的长度。

2.1.9 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。

2.1.10 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。

2.1.11 韧性 toughness

钢纤维混凝土开裂后继续保持一定抗力的塑性变形能力，常用与荷载-变形或应力-应变关系曲线下面积有关的参数进行度量。

2.1.12 挠度 deflection

长方体受弯试件由传感器测得跨中相对试件支撑面处的竖向位移值。

2.1.13 预切口张开位移 （CMOD） crack mouth opening displacement

长方体三点弯曲试件受中心荷载 F，由传感器测得试件下端预切口处张开的水平位移值，简称 CMOD。

2.1.14 极限弯拉强度 limit of proportionality

长方体三点弯曲试件发生 CMOD 在 0～0.05mm 范围内最大荷

载 F_L 对应的试件切口顶端应力，也称极限拉应力。

2.1.15 残余弯拉强度 residual flexural tensile strength

长方体三点弯曲试件受中心荷载 F_j，对应于试件切口顶端张开的水平位移值 $CMOD_j$（$CMOD_j > CMOD_{FL}$，j=1，2，3，4 表示不同的 CMOD 位置）或切口处竖向位移 δ_j（此处 $\delta_j > \delta_{FL}$）的切口处截面顶端拉应力。

2.1.16 承载力极限状态钢纤维混凝土抗拉强度 steel fiber reinforced concrete tensile strength of ULS

钢纤维混凝土达到承载力极限状态规定的应变时，截面受拉区的拉应力。

2.1.17 正常使用极限状态钢纤维混凝土抗拉强度 steel fiber reinforced concrete tensile strength of SLS

钢纤维混凝土达到正常使用极限状态规定的裂缝宽度时，截面受拉区的拉应力。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应

N_{fu}，M_{fu}——按基本荷载组合计算的轴向力设计值、正截面弯矩设计值；

N_{fq}，M_{fq}——按荷载准永久组合计算的轴向力设计值、正截面弯矩设计值；

V_{fcs}——斜截面剪力设计值；

V_{fc}——钢纤维混凝土受剪承载力设计值；

V_s——箍筋受剪承载力设计值；

V_c——混凝土受剪承载力设计值；

V_f——钢纤维混凝土受剪承载力设计值；

F_{flu}——钢纤维混凝土局部受压承载力；

F_{lu}——混凝土局部受压承载力；

F_{fpu}——钢筋钢纤维混凝土板局部受冲切承载力；

F_{pu}——钢筋混凝土板受冲切承载力；

$w_{f\,max}$——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；

w_{max}——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；

σ_{sk}——纵向受拉钢筋应力或等效应力。

2.2.2　材料性能

f_{fck}、f_{fc}——　钢纤维混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

f_{ck}、f_c——　混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

f_{ftk}、f_{ft}——　钢纤维混凝土抗拉强度标准值、设计值；

f_{tk}、f_t——　混凝土抗拉强度标准值、设计值；

f_{ftuk}、f_{ftu}——　钢纤维混凝土管片达到承载能力极限状态时受拉区钢纤维混凝土等效矩形应力图形的抗拉强度标准值、设计值；

f_{ftsk}、f_{fts}——　钢纤维混凝土管片达到正常使用极限状态时受拉区钢纤维混凝土等效矩形应力图形的抗拉强度标准值、设计值。

2.2.3 几何参数

l_{f} ——钢纤维长度；

d_{f} ——钢纤维直径或等效直径。

3 基本设计规定

3.1 一般规定

3.1.1 钢纤维混凝土管片设计应包括下列内容：

1 结构方案设计，包括管片选型、分块及拼装方式；

2 作用及作用效应分析；

3 管片结构的极限状态设计；

4 管片接头构造及连接方式；

5 耐久性设计；

6 管片预制及施工的要求；

7 满足特殊要求结构的专门性能设计。

3.1.2 钢纤维混凝土管片的设计使用年限应为 100 年。

3.1.3 钢纤维混凝土管片设计应符合下列基本假定：

1 加载前后结构构件截面应变分布保持为平面；

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。

3.1.4 钢纤维混凝土管片设计应采用以概率理论为基础的极限状态法，并应对承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行计算。

3.1.5 无筋钢纤维混凝土盾构管片的设计，必须同时满足极限状态承载能力和正常使用极限状态承载能力的要求才允许使用。

3.1.6 钢纤维混凝土管片应对施工各阶段分别进行结构承载能力验算。并满足承载力要求是方能使用。

3.1.7 钢纤维混凝土管片的耐久性应符合国家标准《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。对于使用期限 100 年且用于四、五类环境的钢筋钢纤维管片应采取可靠的防腐蚀强化措施，并对其耐久性做出客观评价。

3.2 承载能力极限状态计算

3.2.1 对于承载能力极限状态，应按荷载的基本组合或偶然组合计算荷载组合的效应设计值，并应按下式进行计算：

$$\gamma_0 S_{\mathrm{d}} \leq R_d \qquad (3.2.1)$$

式中： γ_0 —— 重要性系数，按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用；

S_d ——承载能力极限状态下荷载效应组合的设计值，按现行《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定采用；

R_d —— 承载力设计值。

3.2.2 钢筋钢纤维混凝土管片承载力设计值应采用下式计算：

$$R_d = R_{\mathrm{f}}(f_{\mathrm{fc}}, f_{\mathrm{ft}}, f_{\mathrm{y}}, a_{\mathrm{k}}, k_f) \qquad (3.2.2)$$

式中：$R_f(\ )$——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纤维混凝土管片承载力计算函数；

f_{fc}——按本规程 4.2 节的方法确定的钢纤维混凝土轴心抗压设计强度；

f_y——钢筋设计强度，按《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定采用；

α_k——几何参数的标准值，按《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定取值；

f_{ft}——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；

k_f——钢纤维方向性系数

3.2.3 无筋钢纤维混凝土管片承载力设计值应采用下式计算：

$$R_d = R_f(f_{fc}, f_{ft}, a_k, k_f) \qquad (3.2.3)$$

式中各符号同前。

3.2.4 荷载基本组合的效应设计值 S_d 应按下式计算确定：

$$S_d = \sum_{j=1}^{m} \gamma_{G_j} S_{G_{jk}} + \sum_{i=1}^{n} \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} S_{Q_{ik}}$$

（3.2.4）

式中：γ_{Gj}——第 j 个永久荷载的分项系数，按本规程表 3.2.6 的规定取值；

γ_{Qi} ——第 i 个可变荷载的分项系数，按本规程表 3.2.6 的规定取值；

γ_{Li} ——第 i 个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数，设计使用年限 100 年取值 1.1；

S_{Gjk} ——按第 j 个永久荷载标准值 G_{jk} 计算的荷载效应值；

S_{Qik} ——按第 i 个可变荷载标准值 Q_{ik} 计算的荷载效应值；

m ——参与组合的永久荷载数；

n ——参与组合的可变荷载数。

3.2.5 荷载效应偶然组合的设计值 S_d 应按式(3.2.5-1)和式(3.2.5-2)计算确定：

地震组合：
$$S_d = \sum_{j=1}^{m} \gamma_{G_j} S_{G_{jk}} + \gamma_{EH} S_{EHK} + \gamma_{EV} S_{EVK} \qquad (3.2.5\text{-}1)$$

人防组合：
$$S_d = \sum_{j=1}^{m} \gamma_{G_j} S_{G_{jk}} + S_C \qquad (3.2.5\text{-}2)$$

式中：γ_{EH}、γ_{EV}——水平和竖向地震作用分项系数，应按本标准表 3.2.7 的规定取值；

S_{EHK}、S_{EVK}——水平和竖向地震作用效应值，应按本标准表 3.2.7 的规定取值；

S_c——人防荷载作用效应值。

3.2.6 永久荷载的分项系数应按表 3.2.6 的规定采用。

表 3.2.6 永久荷载分项系数

适用情况 作用分项系数	当作用效应对承载力不利时	当作用效应对承载力有利时
γ_G	1.3	≤1.0
γ_Q	1.5	0

3.2.7 水平和竖向地震作用分项系数的确定应符合表 3.2.7 的规定。

表 3.2.7 地震作用分项系数

地震作用	水平地震作用分项系数 γ_{EH}	竖向地震作用分项系数 γ_{EV}
仅计算水平地震作用	1.4	—
同时计算水平与竖向地震作用（水平地震为主）	1.4	0.5

同时计算水平与竖向地震作用（竖向地震为主）	0.5	1.4

3.3 正常使用极限状态验算

3.3.1 对于正常使用极限状态，应根据不同的设计要求，采用荷载准永久组合，并应按下列设计表达式进行设计：

$$S \leq C \qquad (3.3.1)$$

式中：S —— 正常使用极限状态荷载组合的效应设计值；

C ——钢纤维管片达到正常使用要求所规定的变形、应力、裂缝宽度等的限值。

3.3.2 荷载准永久组合的效应设计值 S_d 应按下列公式计算确定：

$$S_{\mathrm{d}} = \sum_{j=1}^{m} S_{\mathrm{G_{jk}}} + \sum_{i=1}^{n} \psi_{\mathrm{qi}} S_{\mathrm{Qik}} \qquad (3.3.2)$$

式中： ψ_{qi} ——第 i 个可变作用的准永久值系数。

3.3.3 钢纤维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。

3.3.4 管片用于四、五类环境时应进行专门研究并采取特殊防腐蚀措施。

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。其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 钢纤维长度不宜小于粗骨料最大粒径的 2.5 倍，长度宜为 50mm～60mm,直径（或等效直径）宜为 0.5mm～0.9mm，长径比宜为 60～80。

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。

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标准《混凝土用钢纤维》GB/T39147 的规定。

表 4.1.4 钢纤维的尺寸及强度允许公差

特性	范围	A 级		B 级		C 级	
		样本公差[b]	均值公差[c]	样本公差[b]	均值公差[c]	样本公差[b]	均值公差[c]
长度[a]	＞30 mm	±3 mm	±5%	±10%	±5%	±10%	±5%
	≤30 mm	±10%	±1.5 mm		±1.5 mm		±1.5 mm
（等效）直径 D	＞0.30 mm	±0.02 mm	±0.015mm	±10%	±5%	±15%	±10%
	≤0.30 mm				±0.015 mm		-
抗拉强度 R_m	所有	±15%	±7.5 %	±15%	±7.5 %	±15%	±7.5 %
长径比 λ	所有	±15%	±7.5%	±15%	±7.5%	±15%	±7.5%

[a] 长度 l 和（或）伸展长度 l_d。

[b] 单个样本允许偏差。

[c] 总样本平均值允许偏差。

4.1.5 钢纤维应在混凝土拌合物中不结团，宜采用粘结成排型，易于均匀分布，且与硬化混凝土间具有良好的粘结性能。

4.1.5 其他原材料应符合相应规范。

4.2 钢纤维混凝土

4.2.1 钢纤维混凝土的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 的规定，按同强度等级混凝土标准值选用。用于钢纤维混凝土管片的混凝土基体强度等级不应低于 C50。

4.2.2 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。

4.2.3 钢纤维混凝土的轴心抗压强度和轴心抗拉强度取值应符合国家标准《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。

4.2.4 钢纤维混凝土管片不同承载能力极限状态抗拉强度值的确定应符合以下规定。

1 残余抗拉强度应通过试验确定，试验方法应符合本规程附录 A 的规定。

2 当无试验数据时可在残余强度韧性等级表 4.2.4 给出的范围内取值，且应满足本节 4.2.5 条和 4.2.6 条的规定。等级示例如下：钢纤维混凝土残余强度韧性等级 3b,表示为：

$f_{R1k} \geqslant 3MPa$, $f_{R3k} / f_{R1k} \geqslant 0.7$。

表 4.2.4 钢纤维混凝土残余强度韧性等级表（N/mm²）

韧性等级	强度等级（f_{R1k}）										
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7
a（f_{R3k}≥0.5f_{R1k}）	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	3.00	3.50
b（f_{R3k}≥0.7f_{R1k}）	0.70	1.05	1.40	1.75	2.10	2.45	2.80	3.15	3.50	4.20	4.90
c（f_{R3k}≥0.9f_{R1k}）	0.90	1.35	1.80	2.25	2.70	3.15	3.60	4.05	4.50	5.40	6.30
d（f_{R3k}≥1.1f_{R1k}）	1.10	1.65	2.20	2.75	3.30	3.85	4.40	4.95	5.50	6.60	7.70
e（f_{R3k}≥1.3f_{R1k}）	1.30	1.95	2.60	3.25	3.90	4.55	5.20	5.85	6.50	7.80	9.10

表中：f_{R1k}——CMOD 为 0.5mm 时残余弯拉强度标准值，用本规程附录 A 的试验方法获得；

f_{R3k}——CMOD 为 2.5mm 时残余弯拉强度标准值，用本规程附录 A 的试验方法获得。

上表第 1 排数值代表残余弯拉强度标准值f_{R1k}，其余数值代表残余弯拉强度标准值f_{R3k}。

3 承载能力极限状态和正常使用极限状态抗拉强度标准值和设计值应按本规程附录 B 的规定计算。

4.2.5 用于钢筋钢纤维混凝土管片的钢纤维混凝土残余强度韧性等级应不低于 3c，且应满足式（4.2.5-1）要求。

$$f_{R1k}/f_{ftmk} \geq 0.5 \qquad (4.2.5\text{-}1)$$

式中：f_{ftmk}——钢纤维混凝土极限弯拉强度标准值（MPa），用本规程附录 A 的试验方法获得。

4.2.6 无筋钢纤维混凝土管片的钢纤维混凝土残余强度韧性等级应不低于 5d，且应满足式（4.2.5-2）的要求。

$$f_{R1k}/f_{ftmk} \geq 0.6 \qquad (4.2.5\text{-}2)$$

4.2.7 无筋钢纤维混凝土管片应满足延性破坏和应力重分布的要求。如图 4.2.7 所示应满足式（4.2.7-1）、(4.2.7-2)、(4.2.7-3)和（4.2.7-4）的要求，按附录 E 检验确定。

$$P_u \geq P_{cr}$$

(4.2.7-1)

$$P_u \geq P_{sls}$$

（4.2.7-2)

$$\delta_u \geq \delta_{sls}$$

（4.2.7-3)

$$\delta_{peak} \geq 5\ \delta_{sls}$$

（4.2.7-4)

式中：

P_u—承载力极限状态下受弯管片破坏时的竖向荷载,KN。

P_{cr}—承载力极限状态下受弯管片初裂时的竖向荷载,KN。

P_{sls}—正常使用极限状态下受弯管片的竖向荷载,KN。

δ_u—承载力极限状态下受弯管片在P_u荷载作用下破坏时的竖向位移,mm。

δ_{sls}—正常使用极限状态下受弯管片在P_{sls}荷载作用下的竖向位移,mm。

δ_{peak}—承载力极限状态下受弯管片在最大荷载 $P_{\max}$ 作用下的竖位移,mm。

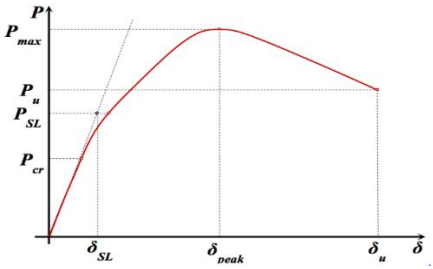


图 4.2.7 钢纤维混凝土结构荷载-位移曲线

4.2.7 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、耐久性和分散均匀性试验，且应符合以下规定：

1 残余弯拉强度试验应按照附录 A 的规定进行，切口梁试件不低于 12 根。

2 按附录 A 的规定计算试验残余弯拉强度标准值和韧性值。

3 试验残余弯拉强度韧性等级应不低于设计弯拉强度韧性等级。

4 应制定每批次钢纤维分散均匀性的生产措施。

4.2.8 钢纤维混凝土拌合物应具有良好的工作性，不得离析、泌水和钢纤维结团，并满足设计和生产要求。拌合物性能的试验方法应符合国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T50080 的规定。

5 结构分析

5.1 基本规定

5.1.1 盾构隧道结构的计算模型应根据地层情况、衬砌构造特点及施工工艺等确定，宜考虑衬砌与地层相互作用及装配式管片衬砌接头的影响。

5.1.2 钢纤维混凝土管片应进行承载能力极限状态计算和正常使用极限状态检算，最大裂缝宽度应符合本规程第 3.3.3 条的规定。偶然荷载组合计算时可不验算裂缝宽度。

5.1.3 当结构上部存在不对称荷载时，应按上部荷载分布情况计算竖向荷载。

5.1.4 隧道设计应按施工期间和正常使用期间可能出现的最高水位和最小覆盖层厚度进行抗浮稳定验算，按可能出现的最低水位和最大覆盖层厚度计算荷载基本组合的效应设计值。

5.2 荷载作用

5.2.1 盾构隧道的设计荷载应符合国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009、《地铁设计规范》GB 50157 或相关行业技术规范等的规定。

5.2.2 隧道地震荷载应按国家标准《城市轨道交通结构抗震设计规

范》GB 50909 或相关行业技术规范的规定执行。

5.2.3 人防荷载应按国家标准《人民防空工程设计规范》GB 50225 及行业标准《轨道交通工程人民防空设计规范》REJ 02 的规定计算确定。

5.3 管片横向内力计算

5.3.1 隧道横向内力计算应分别选取隧道顶覆土最厚（薄）、水压力最大（小）、存在超载或偏压、隧道穿越地层条件突变处等位置进行。

5.3.2 管片衬砌与地层间的相互作用计算应符合下列规定：

1 管片衬砌与地层间的相互作用宜采用假定抗力法或地基弹簧法进行模拟；

2 采用假定抗力法时，管片衬砌与地层间的相互作用应假定为位于隧道两侧的三角形分布的地层抗力；

3 采用地基弹簧法时，管片衬砌与地层间的相互作用应采用受压地基弹簧模拟，地基弹簧刚度应根据地质勘察资料取值。

5.3.3 隧道管片横向内力计算模型可采用匀质圆环模型、梁－弹簧模型等。

5.3.4 当采用基于匀质圆环模型的修正惯用法进行管片衬砌计算时，应符合下列规定：

1 该计算模型应适用于错缝拼装的管片衬砌隧道；

2 管片衬砌应等效为截面刚度相同的匀质圆环；

3 计算时应考虑管片接头效应对整体刚度进行折减；

4 管片的内力应计及环间接缝对内力传递的影响；

5 衬砌环整体刚度折减系数 η 和接头弯矩传递系数 ξ 可分别取 0.5～0.8 和 0.2～0.4。

5.3.5 当采用梁 - 弹簧模型（图 5.3.5）进行管片衬砌计算时，应符合下列规定：

1 该计算模型应适用于错缝拼装和通缝拼装的管片衬砌隧道；

2 计算模型不应少于 2 个或 3 个弹性铰圆环；

3 衬砌环环内接头应采用回转弹簧模拟；

4 衬砌环环间接头应采用切向剪切弹簧和径向剪切弹簧模拟；

5 剪切弹簧和回转弹簧的刚度应由试验或经验确定。

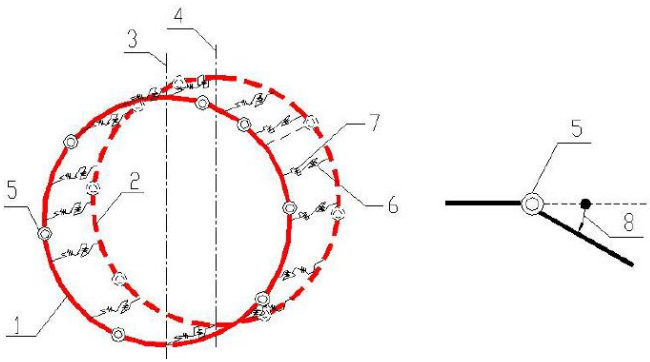


图5.3.5 梁-弹簧模型弯矩在接头处的传递

1——衬砌环 A 管片本体；2——相邻衬砌环 B 管片本体；3——衬砌环 A 竖直轴；4——衬砌环 B 竖直轴；5——环向接头回转弹簧；6——环间径向剪切弹簧；7——环间切向剪切弹簧；8——环向接头转角

5.3.6 盾构隧道纵向结构计算应满足以下规定：

1 隧道纵向结构计算，应依据以下情况按需要进行。

1）覆盖层厚度或者地层纵向有较大变化的部位；

2）穿越重要建（构）筑物或直接承受较大局部荷载；

3）地基沿纵向产生不均匀沉降；

4）地震作用；

2 盾构隧道纵向结构计算可采用以下模型：

1）梁-弹簧模型，该模型采用轴向弹簧、转动弹簧及剪切弹簧模拟接头和螺栓；

2）等效刚度模型，该模型管片沿纵向视为单一的细长梁，通过梁刚度的折减模拟接头对管片的削弱作用；

3）三维壳体模型， 该模型将管片视为横、纵各向同性壳体，纵向刚度折减同等效刚度模型，横向刚度折减同匀质圆环模型。

5.4 管片变形计算

5.4.1 盾构隧道衬砌结构应按荷载效应准永久组合进行变形计算。

5.4.2 盾构隧道直径变形和接缝张开量应符合表 5.4.2 的规定。

表 5.4.2 衬砌环直径变形、接缝张开量限值

类别	限值
直径变形	≤ 3D‰
接缝张开量	3mm~4mm　同时应小于弹性密封垫的允许张开量

注：D 为隧道外径，mm。

5.5 管片接头螺栓强度计算

5.5.1 盾构隧道衬砌结构应进行管片接头螺栓强度计算，包括连接螺栓抗拉强度、抗剪强度等。

5.5.2 管片衬砌环向螺栓强度验算应用管片接头处的计算弯矩和轴力，按照矩形截面偏心受压盾构管片的承载能力极限状态模型计算螺栓拉应力。

5.5.3 位于 7 度及以上地震设防区的隧道应进行地震作用下的纵向螺栓强度验算；隧道抗震计算应按国家标准《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909 关于纵向抗震计算的规定执行。

6 钢筋钢纤维混凝土管片承载力验算

6.1 一般规定

6.1.1 钢纤维混凝土管片基本设计规定应符合本规程第 3 章的规定。

6.1.2 钢纤维混凝土管片承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算除应符合本章的规定外，尚应符合国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《预制混凝土管片》GB 22082 的规定。

6.1.3 钢筋钢纤维混凝土管片中钢纤维的最低掺量应满足设计的残余强度韧性等级要求，且不宜低于掺量 20KG/m^3 。钢纤维混凝土的强度等级应符合本规程 4.2.5 条的规定。

6.1.4 管片的钢筋设计间距宜大于 2 倍的钢纤维长度，

6.2 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态计算

Ⅰ 正截面承载力计算

6.2.1 轴心受压和小偏心受压管片承载能力极限状态的计算应按国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定进行计算。

6.2.2 大偏心受压管片正截面受弯承载能力极限状态的计算应符合下列规定（图 6.2.2）：

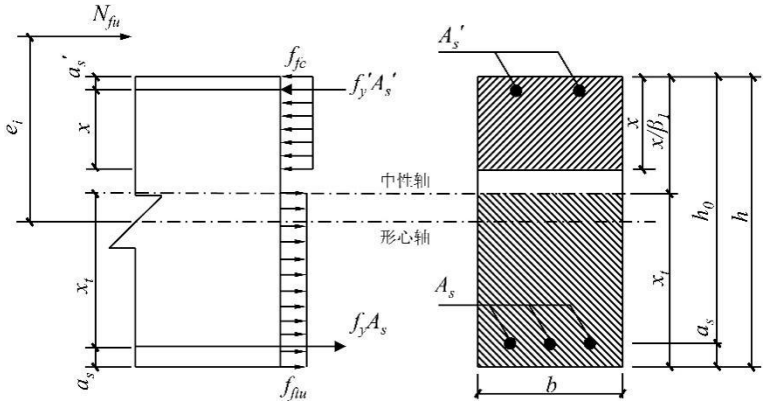


图 6.2.2 矩形截面大偏心受压构件正截面计算简图

1 正截面承载力计算应考虑钢纤维混凝土抗拉作用，受拉区应力分布状态可简化为等效矩形，受拉区高度按下式计算。

$$x_t = h - \frac{x}{\beta_1} \tag{6.2.2-1}$$

式中 x_t——受拉区等效矩形应力图形高度（mm）；

h——构件截面高度（mm）；

x——受压区等效矩形应力图形的高度（mm），将式（6.2.2-1）带入式（6.2.2-2）计算；

β_1——系数，按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定取值。

2 极限状态承载能力按式（6.2.2-2）～（6.2.2-4）计算：

$$N_{fu} \le \alpha_1 f_{fc} bx + f_y' A_s' - f_y A_s - f_{ftu} b x_t \tag{6.2.2-2}$$

$$N_{fu}(e_i - \frac{h}{2} + a_s') \le f_y A_s (h_0 - a_s') + f_{ftu} b x_t (h - \frac{x_t}{2} - a_s') - \alpha_1 f_{fc} bx(\frac{x}{2} - a_s') \tag{6.2.2-3}$$

$$e_i = e_0 + e_a \qquad (6.2.2\text{-}4)$$

式中：

N_{fu} ——钢纤维混凝土盾构管片基本荷载组合轴向压力设计值（N）；

f_f ——受拉区钢纤维混凝土抗拉强度（MPa），按本规程附录 B 的方法计算；

f_{fc} ——钢纤维混凝土轴心抗压强度（MPa），按《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；

f'_y、f'_y ——普通纵向钢筋抗拉、抗压强度设计值（MPa），按《混凝土结构的设计规范》GB 50010 的规定取值；

A_s、A'_s ——普通纵向受拉、受压钢筋截面面积（mm^2）；

a'_s ——受压区纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离（mm）；

h_0 ——截面有效高度（mm），按《混凝土结构的设计规范》GB50010 的规定取值；

b ——盾构管片截面宽度（mm）；

α_1 ——受压区混凝土等效应力值的影响系数，应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定；

e_i ——初始偏心距（mm）；

e_0 ——轴向力作用点至截面重心的距离（mm），$e_0 = M_{fu}/N_{fu}$；

M_{fu} ——钢纤维混凝土盾构管片基本荷载组合弯矩设计值（N- mm）；

e_a ——附加偏心距（mm），按《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定取值。

3 当受压区高度 $x \le 2a'_s$ 时，应按式（6.2.2-5）和式（6.2.2-6）计算。

$$N_{fu} = \alpha_1 f_{fc} bx + \sigma'_s A'_s - f_y A_s - f_{ftu} bx_t \qquad (6.2.2\text{-}5)$$

$$N_{\mathrm{fu}}(e_{\mathrm{i}}-\frac{h}{2}+a_{\mathrm{s}}')\le f_{\mathrm{y}}A_{\mathrm{s}}(h_0-a_{\mathrm{s}}')+f_{\mathrm{ftu}}bx_{\mathrm{t}}(h-\frac{x_{\mathrm{t}}}{2}-a_{\mathrm{s}}')+\alpha_1 f_{\mathrm{fc}}bx(a_{\mathrm{s}}'-\frac{x}{2}) \quad (6.2.2\text{-}6)$$

式中 σ_{s}'——受压区钢筋应力（MPa），按下式计算：

$$\sigma_{\mathrm{s}}'=E_{\mathrm{s}}\varepsilon_{cu}\left(1-\frac{\beta_1 a_{\mathrm{s}}'}{x}\right) \quad (6.2.2\text{-}7)$$

式中 E_{s}——钢筋弹性模量（MPa），按《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定取值。

4 混凝土受压区外边缘应变 $\varepsilon_{\mathrm{fc}}$ 不应大于混凝土极限压应变 $\varepsilon_{\mathrm{cu}}$，按式（6.2.2-8）计算：

$$\varepsilon_{\mathrm{fc}}=\frac{h-x_{\mathrm{t}}}{x_{\mathrm{t}}}\cdot\varepsilon_{\mathrm{ftu}}\le\varepsilon_{\mathrm{cu}} \quad (6.2.2\text{-}8)$$

式中： $\varepsilon_{\mathrm{cu}}$——混凝土极限压应变，按《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定取值；

$\varepsilon_{\mathrm{ftu}}$——钢纤维混凝土承载能力极限状态的拉应变，按本规程附录 B 的规定取值。

Ⅱ 斜截面载力计算

6.2.3 钢筋钢纤维混凝土盾构管片受剪截面限制条件应符合下式规定：

$$V_{\mathrm{fcs}}\le 0.25\beta_{\mathrm{c}}f_{\mathrm{fc}}bh_0 \quad (6.2.3)$$

式中：β_{c}——混凝土强度影响系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时，β_{c}取 1.0，当混凝土强度等级为 C80 时，β_{c}取

0.8；其间线性内插法确定。

6.2.4 不配置箍筋和弯起钢筋其斜截面的剪力设计值应符合下式规定：

$$V_{\mathrm{fcs}} \le V_{\mathrm{c}} + V_{\mathrm{f}} \tag{6.2.4}$$

此时仅需按构造配置箍筋。

6.2.5 当配置箍筋时，斜截面受剪承载力设计值应符合以下规定：

$$V_{\mathrm{fcs}} \le V_{\mathrm{fc}} + V_{\mathrm{sv}} + 0.07N_{\mathrm{fu}} \tag{6.2.5-1}$$

1 钢纤维混凝土受剪承载力设计值V_{fc}按式（6.2.5-2）～式(6.2.5-4)计算：

$$V_{\mathrm{fc}} = V_{\mathrm{c}} + V_{\mathrm{f}} \tag{6.2.5-2}$$

$$V_{\mathrm{f}} = 0.7K_{\mathrm{G}}\tau_{\mathrm{fd}}bh \tag{6.2.5-3}$$

$$V_{\mathrm{c}} = 0.7\beta_{\mathrm{h}}f_{\mathrm{t}}bh_0 \tag{6.2.5-4}$$

式中：V_{fcs} ——钢纤维混凝土管片斜截面承载力设计值（N）；

V_{fc} ——钢纤维混凝土受剪承载力设计值（N）；

V_{sv} ——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；

V_{f} ——考虑钢纤维对混凝土增强作用的受剪承载力设计值（N）；

V_{c} ——不考虑钢纤维对抗拉强度的影响，混凝土受剪承载力设计值（N）；

K_{G} ——盾构管片尺寸对钢纤维离散性影响系数，取 1.0；

β_h ——截面高度影响系数，$B_h = (\frac{800}{h_0})^{1/4}$，当 h_0 小于 800mm 时取 800mm；当 h_0 大于 2000mm 时取 2000mm；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值（MPa）；

τ_{fd} ——钢纤维混凝土抗剪强度设计值（MPa），按下式计算：$\tau_{fd} = 0.12 f_{R3k}$；

f_{R3k} ——对应切口位移 2.5mm 时钢纤维混凝土残余弯拉强度标准值（MPa），按本规程附录 A 的规定计算；

N_{fu} ——与剪力设计值相对应的基本荷载组合计算的轴向压力设计值（N）；当 N_{fu} 大于 $0.3f_{fc}bh$ 时，取 $0.3f_{fc}bh$。

2 箍筋作用截面增加的受剪承载力设计值按式（6.2.5-5）计算：

$$V_{sv} = \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 \qquad (6.2.5\text{-}5)$$

式中：f_{yv} ——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（mm^2）。

Ⅲ 局部受压承载力计算

6.2.6 钢筋的配置范围和构造要求应符合国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。其局部受压承载力设计值应按有关规程规定的公式计算，计算时公式中的 f_c 应取同强度等级普通混凝土抗压强度设计值。

6.3 钢筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态验算

6.3.1 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，应依据钢纤维混凝土强度等级根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定按普通钢筋混凝土盾构管片计算，并考虑钢纤维的影响对计算结果予以修正。

6.3.2 钢筋钢纤维混凝土盾构管片最大裂缝宽度应按式（6.3.2-1）~（6.3.2-3）计算：

$$\mathrm{W}_{\mathrm{f\,max}} = W_{\max}\left(1-\alpha_{\mathrm{f}}\right)^{2} \qquad (6.3.2\text{-}1)$$

$$\mathrm{W}_{\max} = \alpha_{\mathrm{cr}} \cdot \psi \cdot \frac{\sigma_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{s}}}(1.9\,c_{\mathrm{s}} + 0.08\,\frac{d_{\mathrm{eq}}}{\rho_{\mathrm{te}}}) \qquad (6.3.2\text{-}2)$$

$$\alpha_{\mathrm{f}} = \frac{\min(f_{\mathrm{ftsk}}, f_{\mathrm{ftuk}})}{f_{\mathrm{ftk}}} \qquad (6.3.2\text{-}3)$$

式中：$\mathrm{W}_{\mathrm{fmax}}$——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（mm）；

$\mathrm{W}_{\max}$——不考虑钢纤维的影响，按《混凝土结构设计规范》GB50010 规定计算的按荷载效应准永久组合并考虑长期荷载影响的管片最大裂缝宽度（mm）；

α_{f}——钢纤维对混凝土裂缝宽度的影响系数；

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

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

f_{ftk}——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；

σ_s——按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土管片纵向受拉普通钢筋应力，按《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定计算。

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 规定。

7 无筋钢纤维混凝土管片承载力验算

7.1 一般规定

7.1.1 无筋钢纤维混凝土盾构管片基本设计应符合本规程第 3 章的规定。

7.1.2 无筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态的裂缝宽度应满足耐久性要求，且在荷载持续作用的使用寿命期内，裂缝不继续扩展以及承载力不降低。

7.1.3 无筋钢纤维混凝土管片钢纤维的强度等级应符合本规程 4.2.6 条和 4.2.7 条的规定

7.1.4 对于允许开裂的无筋钢纤维混凝土管片，应符合本规程第 7.2 节和 7.3 节的规定进行承载力计算，同时应满足式（7.1.4）的要求方可使用无筋钢纤维混凝土管片。

$$R_{\mathrm{fq}} \leq R_{\mathrm{fu}} \tag{7.1.4}$$

式中 R_{fq} ——按正常使用极限状态计算的无筋钢纤维混凝土管片承载力；

R_{fu} ——按承载能力极限状态计算的无筋钢纤维混凝土管片承载力；

7.1.5 正常使用极限状态承载力验算仅限于裂缝宽度不大于 0.2mm 或满足其它裂缝宽度允许值范围的承载力验算。

7.1.6 对于不允许开裂的钢纤维混凝土管片按本规程 7.2 节的规定按受压构件进行承载力计算。

7.1.7 必须通过本规程第 8 章施工各个环节承载力验算才允许使用无筋钢纤维混凝土管片。

7.1.8 截面应变遵循平截面假定。

7.2 承载能力极限状态计算

Ⅰ 正截面承载力计算

7.2.1 无筋钢纤维混凝土管片受压承载力需满足下式要求。

$$N_{\mathrm{fu}} \le 0.9 f_{\mathrm{fc}} bh$$

7.2.2 当 $\alpha_1 \beta_1 f_{\mathrm{fc}} bh \le N_{\mathrm{fu}} \le 0.9 f_{\mathrm{fc}} bh$ 时，即全截面受压盾构管片，承载力计算应符合以下规定：

1 截面的应力-应变状态如图 7.2.2。

2 受压区上边缘压应力为 f_{fc}。

3 受压区下边缘压应力采用实际应力 f'_{fcx}：$0 \le f'_{\mathrm{fc}x} \le f_{\mathrm{fc}}$。

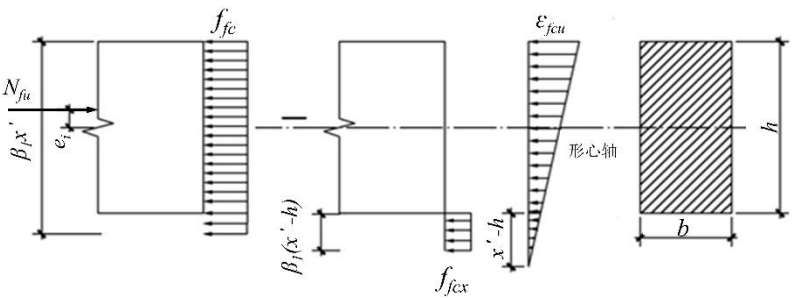


图 7.2.2 矩形截面全截面受压正截面承载力计算简图

4 当 $0 \le f'_{fcx} < f_{fc}$ 时，承载力按式（7.2.2-1）、式（7.2.2-2）计算。

$$N_{\mathrm{fu}} \le \alpha_1 \beta_1 f_{\mathrm{fc}} bx' - \beta_1 f'_{\mathrm{fcx}} b(x'-h) \qquad (7.2.2\text{-}1)$$

$$N_{fu}(e_i + x' - \frac{h}{2}) \le \alpha_1\beta_1 f_{fc} bx'(x' - \frac{\beta_1 x'}{2}) - \beta_1 f'_{fcx} b(x' - h)(\frac{(2-\beta_1)(x'-h)}{2})$$

（7.2.2-2）

$$f'_{fcx} = 1.65 f_{fc} \frac{(x'-h)}{x'}$$ （7.2.2-3）

式中： f_{fc} ——钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值（MPa），取同强度等级混凝土轴心抗压强度设计值；

N_{fu} ——按荷载基本组合计算的轴向受压承载力设计值（kN）；

f'_{fcx} ——下缘受压截面边缘的压应力（MPa）；

x' ——截面上缘到中性轴的距离（mm）；

5 当 $f'_{fcx} = f_{fc}$ 时，$N_{fu} = 0.9 f_{fc} bh$。

7.2.3 当轴力 $N_{fu} \le \alpha_1\beta_1 f_{fc} bh$ 时，偏心受压盾构管片承载能力极限状态计算应符合以下规定：

1 截面的应力-应变状态如图 7.2.3；

2 受压区简化为矩形，压应力为 f_{fc}；

3 受拉区简化为矩形，拉应力为 f_{ftu}

4 承载力按式（7.2.3-1）和式（7.2.3-2）计算。

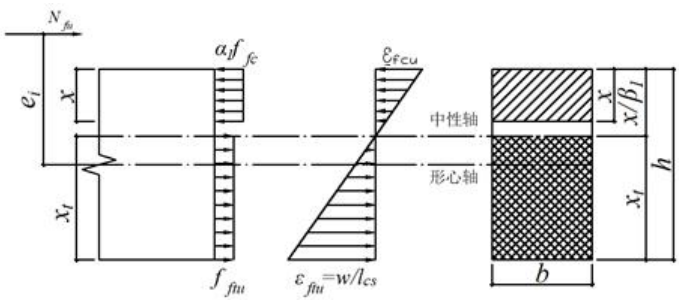


图 7.2.3 矩形截面偏心受压正截面承载力计算简图

图中：w ——结构允许裂缝宽度,承载力极限状态取 2.5mm；

l_{cs} ——特征长度(mm)；按本规程附录 B 的规定取值。

$$N_{fu} \le \alpha_1 f_{fc} bx - f_{ftu} bx_t \tag{7.2.3-1}$$

$$N_{fu}(e_i - x_t + \frac{h}{2}) \le \alpha_1 f_{fc} xb(\frac{x}{\beta_1} - \frac{x}{2}) + f_{ftu} b \frac{x_t^2}{2} \tag{7.2.3-2}$$

$$e_i = e_0 + e_a \tag{7.2.3-3}$$

$$x = \frac{f_{ftu} b\beta_1 h + \beta_1 N_{fu}}{\alpha_1 \beta_1 f_{fc} b + f_{ftu} b} \tag{7.2.3-4}$$

$$x_t = h - \frac{x}{\beta_1} \tag{7.2.3-5}$$

式中：f_{fc} ——钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值（MPa），取同强

度等级混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{fts}——正常使用极限状态钢纤维混凝土抗拉强度设计值（MPa），按本规程附录 B 的规定计算；

f_{ftu} ——承载能力极限状态钢纤维混凝土抗拉强度设计值（MPa），按本规程附录 B 的规定计算；

N_{fu} ——按荷载基本组合计算的轴向力设计值（kN）；

x ——受压区高度(mm)，按式（7.2.3-4）计算；

x_t ——受拉区高度(mm)，按式（7.2.3-5）计算。

其余符号同前。

Ⅱ斜截面承载能力极限状态验算

7.2.4 无筋钢纤维混凝土斜截面承载力计算方法应符合以下规定：

$$V_{\mathrm{fcs}} \le 0.035 k_{\mathrm{G}} \times \sqrt[2/3]{f_{ck}} b h_0 + V_{\mathrm{f}} + 0.15 N_{fu} \tag{7.2.4-1}$$

$$V_{\mathrm{f}} = 0.7 K_{\mathrm{G}} \tau_{\mathrm{fd}} b h \tag{7.2.4-2}$$

$$\tau_{\mathrm{fd}} = 0.12 f_{\mathrm{R3k}} \tag{7.2.4-3}$$

式中：V_{fcs} ——钢纤维混凝土盾构管片斜截面承载力设计值(N)；

V_{f} ——考虑钢纤维混凝土增强作用的受剪承载力(N)；

k_{G} ——盾构管片尺寸对钢纤维离散影响系数，取 1.0；

τ_{fd} ——钢纤维混凝土设计抗剪强度（MPa）。

Ⅲ 局部受压承载力计算

7.2.5 应符合本规程 6.2.6 条和 6.2.7 条的规定。

7.3 正常使用极限状态承载力验算

7.3.1 无筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态承载力计算应符合下列要求：

1 管片裂缝宽度 W 不大于 0.2mm；

2 受压区截面最大压应力为$0.6f_{\mathrm{fck}}$，最大压应变$\varepsilon_{\mathrm{cs}} = \frac{0.6 f_{\mathrm{fck}}}{E}$；

3 受拉区截面最大拉应力为f_{ftsk}，最大拉应变$\varepsilon_{\mathrm{fts}}$ =W/h。

7.3.2 当轴力符合式（7.3.2-1）时，承载力验算应符合以下规定：

$$0 < N_{\mathrm{fk}} \leq \frac{0.18a_1 f_{\mathrm{fck}}^2 bh^2 - 0.2 f_{\mathrm{ftsk}} h\mathrm{bE}}{0.2E_c + 0.6 f_{\mathrm{fck}} h} \qquad (7.3.2\text{-}1)$$

1 截面的应力-应变状态如图 7.3.2;

2 受拉区简化为矩形，下边缘应力f_{ftsk};

3 受压区边缘应力采用实际应力 f_{fcx}：$0 \leq f_{\mathrm{fcx}} \leq 0.6 f_{\mathrm{fck}}$ 。

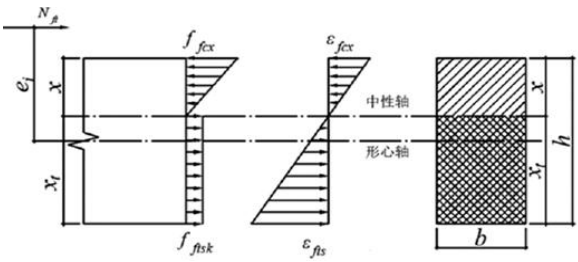


图 7.3.2 矩形截面第一阶段偏心受压构件正截面承载力计算简图

4 承载力按式（7.3.2-2）~式（7.3.2-4）计算。

$$N_{\mathrm{fk}} \leq \frac{f_{\mathrm{fcx}} bx}{2} - f_{\mathrm{ftsk}} bx_t \qquad (7.3.2\text{-}2)$$

$$N_{fk}\left(e_i + \frac{h}{2} - x_t\right) \leq \frac{\mathrm{f_{fcx}} bx^2}{3} + \frac{f_{\mathrm{ftsk}} bx_t^2}{2} \qquad (7.3.2\text{-}3)$$

$$x_{\mathrm{t}} = h - x \qquad (7.3.2\text{-}4)$$

式中：f_{ftsk}——正常使用极限状态下钢纤维混凝土的抗拉强度标准值（MPa），按本规程附录 B 的规定计算，；

f_{fck}——钢纤维混凝土轴心抗压强度标准值（MPa）；

N_{fk}——按荷载标准组合或准永久组合计算的受压承载力设计值(N)；

f_{fcx}——钢纤维混凝土管片对应受压区边缘压应力（MPa），按式（7.3.2-5）计算，MPa；

$$f_{\mathrm{fcx}}=\frac{0.2E(h-x_t)}{hx_t} \qquad (7.3.2\text{-}5)$$

其余符号同前。

7.3.3 当裂缝宽度不大于 0.2mm，且当轴力满足式（7.3.3-1）时，承载力验算应符合下列规定：

$$\frac{0.18a_1f_{\mathrm{fck}}^2bh^2-0.2f_{\mathrm{ftsk}}h\mathrm{bE}}{0.2E_c+0.6f_{\mathrm{fck}}h}<N_{\mathrm{fk}}<0.3f_{\mathrm{fck}}bh \qquad (7.3.3\text{-}1)$$

1 截面的应力-应变状态如图 7.3.3；

2 受压区应力为 $0.6f_{\mathrm{fck}}$；

3 受拉区边缘应力采用应力 f_{tsk} 。

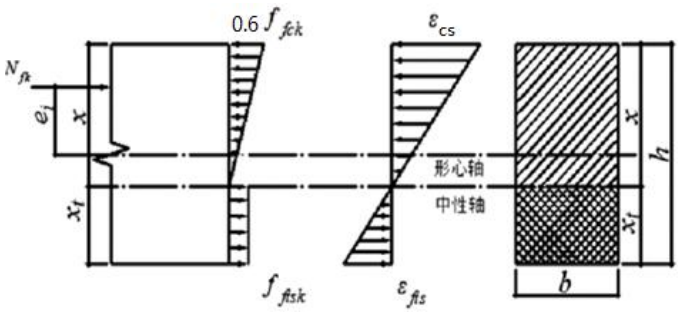


图 7.3.3 矩形截面第二阶段偏心受压构件正截面承载力计算简图

4 承载力按式（7.3.3-2）~式（7.3.3-3）进行验算。

$$N_{\mathrm{fk}}\le\frac{0.6f_{\mathrm{fck}}bx}{2}-f_{\mathrm{ftsk}}bx_{\mathrm{t}} \qquad (7.3.3\text{-}2)$$

$$N_{\mathrm{fk}}\left(e_{\mathrm{i}}+\frac{h}{2}-x_{\mathrm{t}}\right)\le 0.6f_{\mathrm{fck}}b\frac{x}{3}+f_{\mathrm{ftsk}}bx_{\mathrm{t}}\frac{x_{\mathrm{t}}}{2} \qquad (7.3.3\text{-}3)$$

$$x=\frac{N_{\mathrm{fk}}+f_{\mathrm{ftsk}}bh}{0.3f_{\mathrm{fck}}b+f_{\mathrm{ftsk}}b} \qquad (7.3.3\text{-}4)$$

其余符号同前。

7.3.4 全截面受压盾构管片，当 $N_{\mathrm{fk}}\ge 0.3f_{\mathrm{fck}}bh$ 时不必验算正常使用极限状态承载力。

8 构造规定

8.1 一般规定

8.1.1 钢纤维管片的构造规定满足本章的规定外，尚应符合国家标准《混凝土结构设计规程》GB 50010 和《纤维混凝土盾构管片》（GB/T 38901-2020）的规定。

8.1.2 钢纤维管片衬砌分块及管片尺寸应满足管片制作、吊装、运输以及施工的安全和方便。

8.1.3 钢筋钢纤维混凝土管片的长度与厚度之比（λ）应不大于13，无筋钢纤维混凝土管片长度与厚度之比（λ）应不大于 10。

8.1.4 钢纤维管片衬砌应设计为具有一定刚度的柔性结构，同时应限制其在荷载作用下的变形满足受力和防水要求。

8.1.5 钢纤维管片接头设计应满足受力、防水和耐久性要求。

8.1.6 钢纤维管片构造应根据隧道类型、受力条件、盾构机设备等要求，以及考虑经济性、可靠性、耐久性和便于制造、运输、安装等条件确定。

8.1.7 钢纤维管片分块方式应根据管片制作、运输、盾构推进千斤顶布置、拼装方式、结构受力与变形、防水要求等因素综合确定。

8.1.8 钢纤维管片宽度应根据隧道最小曲线半径、隧道直径、管片制作、运输、管片拼装工艺以及盾构千斤顶行程等因素综合确定。

8.2 管片拼装

8.2.1 管片拼装方式宜采用错缝拼装方式。

8.2.2 管片环与环之间、块与块之间的连接方式应符合下列规定：

1 管片之间宜采用螺栓连接；

2 根据管片形式、接头受力要求、拼装要求、接缝止水要求等，可采用弯螺栓、直螺栓、斜螺栓连接方式；

3 螺栓的机械性能等级应满足构造和结构受力要求；

4 接头抗弯刚度要求较高的隧道管片宜采用刚性接头板螺栓连接方式；

5 接头抗弯刚度要求不高的隧道管片也可采用销钉连接方式；

6 在满足施工安装的前提下应采用较小的螺栓手孔尺寸。

8.2.3 衬砌环整环拼装精度不应低于以下标准：

1 相邻环环面间隙不得大于 2mm；

2 纵缝相邻块块间间隙不大于 2.0mm；

3 成环内直径偏差：±2mm；

4 成环外径偏差：-2mm～+6mm；

5 螺栓孔同轴度小于 1mm。

6 相邻管片的径向错台不得大于 5mm；

7 相邻环片环面错台不得大于 6mm。

8.3 管片构造

8.3.1 钢纤维管片厚度应根据隧道直径、埋深、工程地质及水文地

质条件、施工阶段和使用阶段的荷载等经计算后确定，管片厚度宜符合表 8.3.1 的规定且最小厚度不宜小于 250mm。

表 8.3.1 常用钢纤维管片厚度值

管片外径 D（m）	2≤D<5	5≤D<8	D≥8
管片厚度 h（m）	（0.06~0.1）D	（0.05~0.06）D	（0.04~0.05）D

8.3.2 钢纤维管片接缝构造应满足受力、拼装定位、防水的要求，其尺寸和角度应有利于减少局部应力集中，以及管片制造、运输、拼装过程中的碰撞破损，并应符合下列规定：

1 管片边缘应做 5mm×5mm 的倒角；

2 管片边缘应设置高度不小于 2mm，宽度不小于 20mm 的接缝面退缩，正常拼装时管片之间接缝面退缩部分不得互相接触；

3 管片接缝内侧边缘处应预留嵌缝槽，其深宽比不应小于 2.5，槽宽不宜小于 10mm，槽深不宜小于 25mm。嵌缝槽断面可选择图 8.3.2 所示的构造形式。

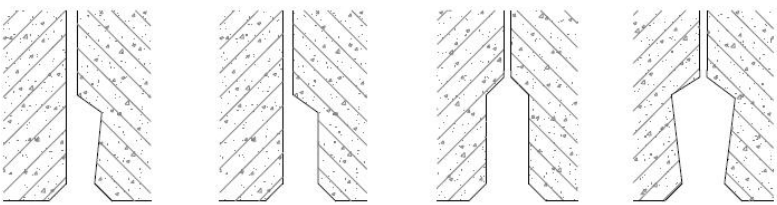


图8.3.2 钢纤维管片嵌缝槽断面构造形式

4 管片环缝应设置缓冲衬垫。

8.3.3 钢纤维管片环缝凹凸榫槽设计应符合下列规定：

1 凹凸榫槽宜设置于管片厚度方向的中部，其尺寸拟定时应不影响管片外侧的防水密封垫槽和内侧的嵌缝槽设置；

2 凹凸榫槽应进行盾构千斤顶作用下的混凝土局部受压承载能力验算。

8.3.4 钢纤维管片接头构造应符合下列规定：

1 纵向接头构造应根据隧道纵向变形要求、接头张开量限值、盾构千斤顶受力等要求采用平板型、凹凸榫槽型等形式；

2 隧道所处地层以深厚软土地层为主时，管片接头环面构造宜采用凹凸榫槽形式；

3 管片环向接头可采用平板型式，也可采用定位棒型式进行辅助拼装定位。

9 施工阶段承载力验算

9.1 一般规定

9.1.1 钢纤维混凝土管片在脱模、翻转、堆放、运输、吊装等短暂状态下应进行施工承载力验算。

9.1.2 钢纤维混凝土管片承载力验算采用的荷载系数，应符合以下规定：

1 应将盾构管片自重标准值乘以动力系数后作为等效静力荷载标准值。

2 管片各施工阶段的荷载系数应符合本章 8.2 节和 8.3 节的规定。

9.1.3 钢纤维混凝土管片脱模及初期堆放阶段时的立方体抗压标准强度不应低于 20MPa。在运输和吊装阶段的强度宜取 7 天龄期时的抗压强度设计值 f_c 。

9.1.4 钢纤维混凝土管片各施工阶段产生的附加弯矩应满足下式的规定：

$$M_u > M_d \qquad (9.1.4\text{-}1)$$

$$Q_u > Q_d \qquad (9.1.4\text{-}2)$$

式中：M_u——按 9.2.5 条规定计算的管片横截面设计抗弯承载力

（N·mm）；

M_d——按表 9.2.4 中规定计算的验算截面最大弯矩（N·mm）。

Q_u——按 9.2.5 条规定计算的管片横截面设计抗剪承载力（N）；

Q_d——按表 9.2.4 中规定计算的验算截面最大剪力（N）。

9.2 临时荷载承载力验算

9.2.1 钢纤维混凝土管片脱模阶段的承载力验算应符合以下规定。

1 计算模型（图 9.2.1）为自重作用下的两个悬臂梁,悬臂梁长度 a 取管片水平投影长度的一半。

2 等效静力标准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。

3 动力系数与脱模吸附力应符合下列规定：

（1）动力系数不宜小于 1.2；

（2）脱模吸附力应根据盾构管片和模具的实际情况选用，且不宜小于 0.0016MPa。

4 验算截面中产生的最大弯矩和剪力应符合表 9.2.4 中第 1 项的规定。且最大弯矩和剪力应符合 9.1.4 条的规定

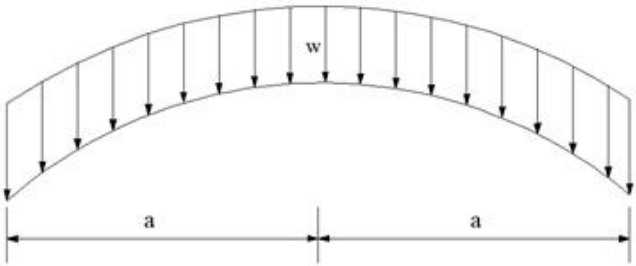


图 9.2.1 脱模阶段的计算模型

9.2.2 钢纤维混凝土管片脱模后初期堆放、运输及堆场堆放施工验算应遵守如下规定。

1 运输及堆放状态下临时荷载的施工验算（图 9.2.2）应考虑动力系数$\gamma_{dyn}=1.5$，自重荷载分项系数 1.30。

2 堆放、运输及堆放过程中的最佳支座间距宜为管片 0.5~0.6 倍的投影长度。

3 应按以下规定计算不利堆放状况在两个最不利截面（图 9.2.2）I-I 截面和 II-II 截面产生的弯矩以及 II-II 截面产生剪力：

（1）选取管片及支座最大间距 L=2.10m；

（2）考虑上、下层支撑块之间的内侧、外侧偏移，偏心距分别为+150mm～-150mm；

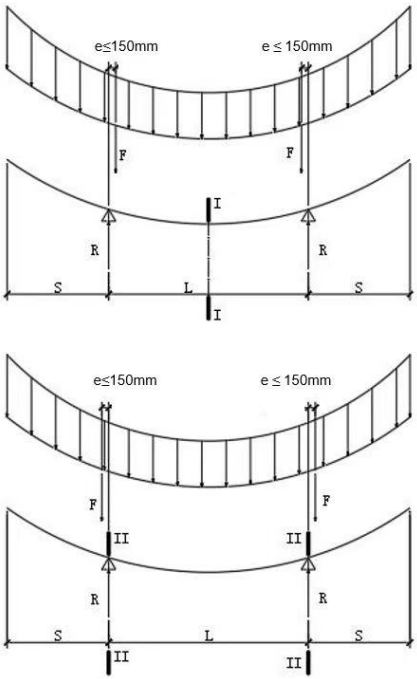


图 9.2.2 底部管片受力示意图

按表 9.2.4 中第 2 项的规定计算初期堆放产生的附加弯矩和剪力，并符合 9.1.4 条的规定。

5 按表 9.2.4 中第 3 项规定计算成品堆放和运输堆放产生的附加弯矩和剪力，并符合 9.1.4 条的规定。

9.2.3 钢纤维管片安装阶段施工验算应遵守如下规定：

1 计算中应考虑动力系数 $\gamma_{\mathrm{dyn}}=1.5$，自重荷载分项系数 1.3；

2 安装阶段采用单点举重臂进行操作(图 9.2.3)时，应表 9.2.4 中第 4 项规定计算起吊点根部截面的弯矩和剪力，并符合 9.1.4 条的规定。

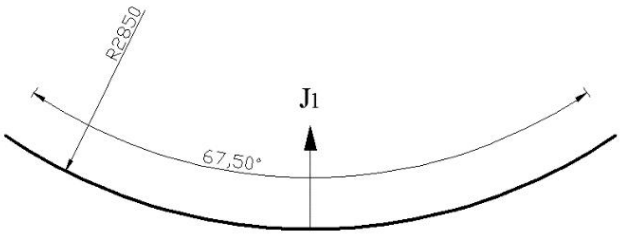


图 9.2.3　单点吊装受力示意图

9.2.4 钢纤维管片在各个施工阶段计算的附加弯矩应符合表 9.2.4 的规定。

荷载工况序号	名称	荷载系数	最大弯矩 M_d	最大剪力 Q_d	关键设计参数
1	脱模	1.2	$\frac{(w+0.0016A/T}{2}$	wa	四小时钢筋钢纤维混凝土强度标准值 $f_{fck}=20MPa$ $f_{ftk}=1.54MPa$
2	初次堆放	1.3	I：$w\left(\frac{L^2}{8}-\frac{S^2}{2}\right)+F_1e$ II：$w\left(\frac{S^2}{2}\right)+F_1e$	向外偏心：F_1+wS 向内偏心：$w(\frac{L}{2}-e)$	
3	堆放、运输	1.5	I：$w\left(\frac{L^2}{8}-\frac{S^2}{2}\right)+F_2e$ II：$w\left(\frac{S^2}{2}\right)+F_2e$	向外偏心：F_2+wS 向内偏心：$w(\frac{L}{2}-e)$	$f_{fck}=40MPa$ $f_{ftk}=2.64MPa$

表 9.2.4 钢纤维管片生产、堆放及运输各阶段所需承载力验算和计算参数

4	吊运	1.5	$\frac{wa^2}{2}$	$\frac{1}{2}wT$	

表中：a——在管片脱模和吊运阶段，起吊点到管片外边缘的距离（mm）；

e——管片堆放阶段上下支撑块的偏心距（mm）；

w——管片自重线荷载（kN/m），荷载系数符合 9.2.2 节和 9.2.3 节的规定；

F_1——管片初期堆放阶段管片自重减去最底部管片的自重，荷载系数符合本章 9.2.2 条的规定；

F_2——管片成品堆放阶段管片的自重减去最底部管片自重，荷载系数符合本章 9.2.2 条的规定；

A——管片内弧面积（mm^2）；

T——管片轴线投影长度（mm）；

L——支撑块之间的距离（mm）；

S——在管片堆放阶段，堆放支架到管片自由边缘的距离（mm）；

f_{fck}——钢纤维混凝土不同龄期抗压强度标准值（MPa），按表 9.2.4 的规定取值；

f_{ftk}——钢纤维混凝土不同龄期抗拉强度标准值（MPa），按表 9.2.4 的规定取值。

9.2.5 钢纤维混凝土管片在不同施工阶段承受的不开裂弯矩 M_u

和不开裂剪力按式（9.2.5-1）和式（9.2.5-2）计算：

$$M_{\mathrm{u}} = f_{\mathrm{ft}} \frac{bh^2}{6} \tag{9.2.5-1}$$

$$\mathrm{Q}_{\mathrm{u}} = f_{\mathrm{ft}} bh \tag{9.2.5-2}$$

式中：b ——截面宽度(mm)；

h ——截面高度(mm)；

f_{ft} ——钢纤维混凝土不同龄期的轴心抗拉强度设计值(MPa)，应符合《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的规定，由

同龄期混凝土立方体抗压强度按式（9.2.5-3）和（9.2.5-4）计算：

$$f_{\mathrm{ft}} = f_{\mathrm{ftk}} / \gamma_{\mathrm{c}} \tag{9.2.5-3}$$

$$f_{\mathrm{ftk}} = 0.88 \times 0.395 f_{\mathrm{fcum}}^{0.55} \left(1 - 1.645\delta\right)^{0.45} \times \alpha_{\mathrm{c2}} \tag{9.2.5-4}$$

式中：f_{ft} ——钢纤维混凝土不同龄期轴心抗拉强度设计值(MPa)；

f_{ftk} ——钢纤维混凝土不同龄期轴心抗拉强度标准值(MPa)；

f_{fcum}——钢纤维混凝土不同龄期立方体抗压强度试验平均值(MPa)；

γ_{c} ——钢纤维混凝土材料分项系数，取值 1.5；

α_{c2} ——钢纤维混凝土脆性折减系数，按《混凝土结构设计规程》GB 50010 的规定取值；

δ ——钢纤维混凝土立方体抗压强度变异系数，按《混凝

土结构设计规程》GB 50010 的规定取值。

9.3 盾构顶推力计算

9.3.1 应进行盾构掘进机的最大推力，并考虑纠偏时钢筋钢纤维管片的施工承载力验算。计算千斤顶撑靴上最大压应力作用于钢筋钢纤维管片上在油缸撑靴下方产生拉应力，并在中间产生劈拉应力。验算应符合以下规定。

1 钢筋钢纤维管片在盾构机千斤顶推力作用下的结构性能应与深梁在静载条件下的结构性能一致，计算模型如图 9.3.1。

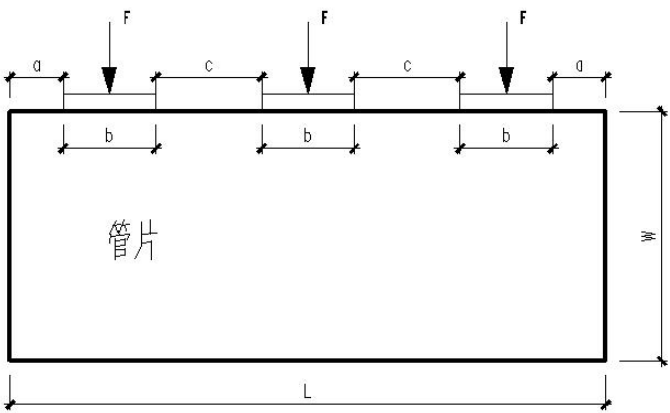


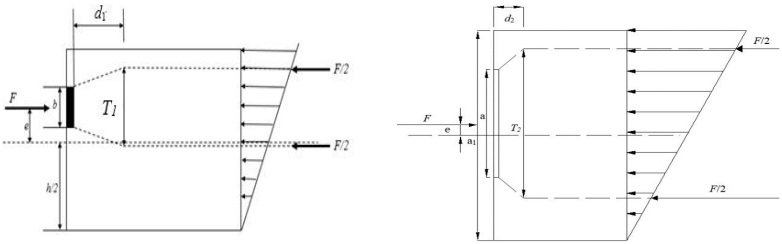
图 9.3.1 计算模型

2 千斤顶撑靴上的最大压力应将盾构总推力除以千斤顶组数，确定每组千斤顶上的平均推力再乘以荷载分项系数 1.2。推进过程中单个千斤顶的推力不应超过其设计总推力的 80%，且应满足本节式(9.3.2-5)和式(9.3.2-6)的规定。

3 除标准作用模式外，还应验算撑靴出现偏心时，作用于管片上在油缸撑靴下方产生的拉应力，并在中间产生劈拉应力。

4 计算方法宜采用数值模拟计算分析。

9.3.2 钢纤维混凝土管片承受盾构顶推力作用的计算模型（图9.3.2-1）采用简化方程式计算时应符合以下规定：



a） 管片承受径向破裂力作用　　b) 管片承受切向破裂力作用

图 9.3.2-1 钢纤维管片承受推进力作用示意图

1 钢纤维混凝土管片承受推进力破裂荷载按式（9.3.2-1）和式（9.3.2-2）计算。

$$T_1 = 0.25\mathrm{F}(1 - \frac{b}{h-2e}) \tag{9.3.2-1}$$

$$T_2 = 0.25\mathrm{F}(1 - \frac{a}{a_1-2e}) \tag{9.3.2-2}$$

式中：T_1——径向破裂力（N）；

T_2——切向破裂力（N）；

F——千斤顶在各种姿态时发生的最大顶推力（N）；

b——千斤顶靴板与管片实际接触宽度（mm）。当管片环缝面

为平面时，取靴板的宽度，当管片环缝面带凹凸榫槽

时，取实际接触宽度；

h——管片厚度（mm）；

e——千斤顶荷载偏心距（mm），如果没有提供特定的值，则

通常取 30mm；

a——千斤顶靴板长度（mm）；

a_1——相邻两组千斤顶间的距离（mm）。

2 钢纤维混凝土管片在千斤顶顶推力作用下（图 9.3.2-2）产生的破裂应力 σ_p 应满足式（9.3.2-3）和式（9.3.2-4）规定。

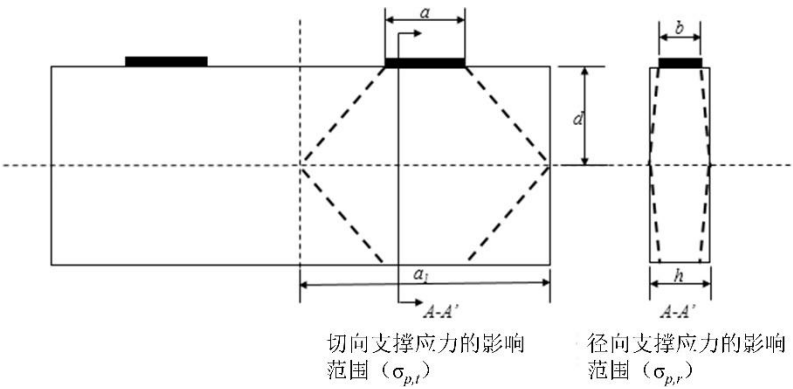


图 9.3.2-2 在撑靴作用下瓶形支撑的简化影响范围示意图

径向最大破裂应力按式(9.3.2-3)计算：

$$\sigma_{\mathrm{p,r}} = \frac{T_1}{ad_1} \leq f_{\mathrm{ft}} \tag{9.3.2-3}$$

切向最大破裂应力按式(9.3.2-4)计算：

$$\sigma_{\mathrm{p,t}} = \frac{T_2}{bd_2} \leq f_{\mathrm{ft}} \tag{9.3.2-4}$$

式中：f_{ft} ——钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值（MPa），按《混

凝土结构设计规程》（GB 50010）同级混凝土强度取值；

d_1——径向破裂面到千斤顶靴板作用面的形心距离（mm），按式(9.3.2-5)计算；

d_2——切向破裂面到千斤顶靴板作用面的形心距离（mm），按式(9.3.2-6)计算。

$$d_1 = 0.4(h - 2e) \tag{9.3.2-5}$$

$$d_2 = 0.4(a_1 - 2e) \tag{9.3.2-6}$$

3 钢纤维混凝土管片破裂应力 σ_p 若高于钢纤维混凝土设计抗拉强度，应另外设计钢筋来抵抗千斤顶力所产生的破裂应力，加强钢筋的设计横截面积 A_{s1} 和 A_{s2} 参考以下公式取值：

$$T_1 = \sigma_{p,r} a d_1 + f_y A_{s1} \tag{9.3.2-7}$$

$$T_2 = \sigma_{p,t} b d_2 + f_y A_{s2} \tag{9.3.2-8}$$

式中：f_y——钢筋抗拉强度设计值（MPa）；

A_{s1}——径向最大破裂应力方向的配筋面积（mm^2）；

A_{s2}——切向最大破裂应力方向的配筋面积（mm^2）。

4 若钢筋钢纤维混凝土管片原设计的配筋面积大于 A_{s1}、 A_{s2}，可不增加配筋面积。

5 承受千斤顶撑靴局部压应力承载力验算应符合本规程6.2.6条和6.2.7条的规定。

10 管片制造与施工

10.1 一般规定

10.1.1 钢纤维混凝土管片制造、检验及验收除应遵守本章的规定外，尚应符合国家标准《盾构法隧道施工与验收规程》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 中的相关规定。

10.1.2 钢纤维混凝土管片施工、检验及验收除应遵守本章的规定外，尚应符合国家标准《盾构法隧道施工与验收规程》GB50446 的相关规定。

10.2 配合比设计及拌合物

10.2.1 钢纤维混凝土配合比除应符合设计图纸要求外，尚应符合国家标准《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 中的相关规定。

10.2.2 钢纤维技术要求应符合本规程第 4.1 节中的相关规定。

10.2.3 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，工作性好，不得出现离

析和泌水现象。

10.2.4 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。

10.3 材料投放和搅拌

10.3.1 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%~1%。

10.3.2 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。

10.3.3 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。

10.4 浇筑、振捣及养护

10.4.1 钢纤维混凝土振捣工艺应确保混凝土表面不宜有钢纤维外露。

10.4.2 钢纤维混凝土宜采用震动平台或附着振动器进行振捣成型。当混凝土表面无明显塌陷、有水泥浆出现、不再冒气泡时，结束

振捣。

10.5 弹性密封垫与缓冲垫的粘贴

10.5.1 钢纤维混凝土管片弹性密封垫宜采用机械粘贴方式，当机械粘贴困难时，也可采用人工粘贴。涂刷粘接剂套上密封垫后，挤压时间不少于 5min。

10.5.2 钢纤维混凝土管片粘贴面和粘贴基面必须干净、干燥、坚实、光滑平整。

10.5.3 钢纤维混凝土管片缓冲垫粘贴后可用工具轻轻敲打，使之粘贴牢固。

10.6 管片制造与施工

10.6.1 钢纤维混凝土管片采用叉车倒运时，应对叉车的叉板进行软包裹，避免在倒运过程中对管片造成破坏。

10.6.2 钢纤维混凝土管片在吊装过程应符合行业标准《建筑施工起重吊装安全技术规程》JGJ 276 的规定。

10.6.3 钢纤维混凝土管片拼装作业

1 管片第一次安装应在直线段上进行。

2 安装千斤顶靴与靴板，两者的水平与垂直中心线应对齐。

3 千斤顶靴的水平中心线与管片顶推面的水平中心线的偏心距（mm）不宜大于 30mm。

4 单个千斤顶的推力不应大于额定顶推力。

5 盾构推进应严格控制盾构千斤顶的压力和伸缩量，千斤顶

油缸的左右区压差控制好不宜大，严禁突然加速，并应保持盾构姿态稳定。

6 钢纤维混凝土管片拼装时旋转、提升应确保匀速，避免突然加速或减速。

7 盾尾实际可调间隙应大于 40mm，需及时测量间隙。当间隙变小，应采用小纠偏量和平稳纠偏的方式调整盾构姿态。

8 钢纤维混凝土管片连接螺栓紧固质量应符合设计要求。螺栓复紧不少于两次，推出盾尾时必须复紧一次。

10.6.4 钢纤维混凝土管片螺栓紧固连接应符合设计及规程要求，若采用临时螺栓连接时，隧道成型后应及时将临时螺栓拧松并拆下，避免应力集中对管片造成破坏。

10.6.5 盾构始发及下穿危险源前要进行壁后注浆试验，总结施工参数，试验段长度宜为 50～100 米。

10.6.6 施工过程中要严格按照配合比进行同步注浆，采用同步注浆量及注浆压力指标双控，保证同步注浆量及注浆的及时性。

10.7 管片检验和验收

10.7.1 一般规定

1 钢纤维混凝土管片制造按照分项工程进行质量验收。

2 该分项工程应合理划分检验批，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。

4 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，重要的工作操作记录。

5 钢纤维混凝土管片主控项目和一般项目的质量验收应符合下列规定：

（1）钢纤维混凝土管片的混凝土强度、外观、尺寸、水平拼装、渗漏检验和抗拔性能除应符合行业标准《隧道管片质量检测技术标准》CJJ/T164中的相关规定，其中钢纤维混凝土管片表面钢纤维外露的技术要求应符合本规程第10.4节规定，划归为外观质量一般项目。

（2）钢纤维混凝土管片的钢筋原材料、钢筋加工和钢筋骨架质量应符合国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规程》GB50204中的相关规定。

（3）钢纤维尺寸、重量允许偏差、外观质量要求及检验方法应符合本规程第4.1节相关规定，划归为一般项目。

Ⅰ 主控项目

10.7.2 钢纤维抗拉强度、弯曲性能的技术要求除应符合本规程第4.1 节相关规定外，尚应符合行业标准《混凝土用钢纤维》YB/T151中的相关规定。

检查数量：钢纤维应按批检验，每批次不超过 60t，每一批由同一品种，同一尺寸规格，同一强度等级的钢纤维组成。抗拉强度、弯曲性能每批次 20 根。

检验方法：按行业标准《混凝土用钢纤维》YB/T151 中的相关规定。

10.7.3 钢纤维混凝土

1 钢纤维含量和均匀性应满足工程设计要求。钢纤维含量三个样品的平均值应大于设计掺量的90%，其中最大值、最小值与中间值之差均应小于中间值的-5%~5%。否则视试验结果无效且重新调整配合比，重新检验钢纤维的含量均匀性。

检验数量：首次生产时抽检频率12次/周，3个样品/次，12次都符合验收标准后可降低到12次/月。

检验方法：按行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472中的相关规定。

2 钢纤维混凝土的正常使用极限状态抗拉强度 f_{fts} 和承载力极限状态抗拉强度 f_{ftu} 应满足工程设计要求。

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。

10.7.4 钢纤维混凝土管片力学性能应符合设计要求。

检查数量：第一次生产钢纤维管片应检验 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 E 的规定。

10.7.5 钢纤维混凝土管片结构表面应无钢纤维毛刺、无裂缝、无缺棱掉角，管片接缝应符合设计要求。

检验数量：全数检查。

检验方法：观察检查。

10.7.6 钢纤维管片环向及纵向螺栓拧紧度。

检验数量：全数检查。

检验方法：观察检查。

10.7.7 钢纤维管片内表面的外露铁件防腐处理应符合设计要求。

检验数量：全数检查。

检验方法：观察检查。

Ⅱ 一般项目

10.7.8 钢纤维混凝土

1 钢纤维投放和搅拌应符合本规程第 10.3 节的规定。

检查数量：每工作台班抽检一次。

检验方法：观察。

2 钢纤维混凝土浇筑及振捣应符合本规程第 10.4 节规定。

检查数量：每工作台班抽检一次。

10.7.9 成型钢纤维混凝土管片允许偏差及检验方法应符合表 10.7.9-1 和表 10.7.9-2 的规定。

检验数量：每环检测。

检验方法：全站仪、水准仪。

表 10.7.9-1 钢筋钢纤维混凝土管片隧道允许偏差及检验频率

序号	检验项目	允许偏差（mm）			检验频率
		地铁隧道	公路隧道	水工隧道	
1	衬砌环直径椭圆度	（-5‰～+5‰）D	（-6‰～+6‰）D	（-10‰～+10‰）D	1 次/10 环

2	相邻管片径向错台	8	10	12	4 点/环
3	相邻环片面错台	13	15	17	1 点/环

表 10.7.9-2 无筋钢纤维混凝土管片隧道允许偏差及检验频率

序号	检验项目	允许偏差（mm）			检验频率
		地铁隧道	公路隧道	水工隧道	
1	衬砌环直径椭圆度	（-4‰～+4‰）D	（-5‰～+5‰）D	（-6‰～+6‰）D	6 次/环
2	相邻管片径向错台	4	5	6	6 点/环
3	相邻环片面错台	5	6	8	2 点/环

附录A 残余抗弯拉强度测试方法(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 l 为 500mm ± 2.0mm。

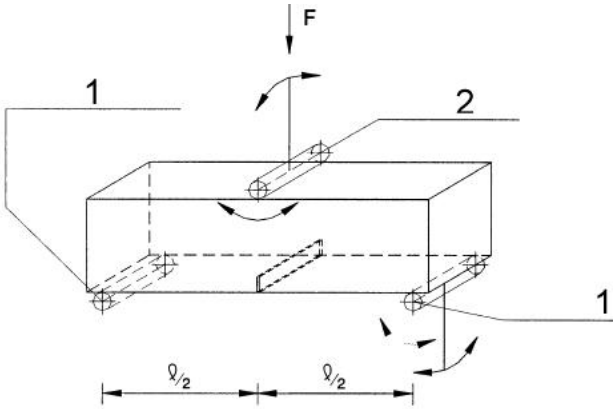


图 A.1.6 试件加载位置

（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程》GB 50204 中有关规定外，尚应遵守以下规定。

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。

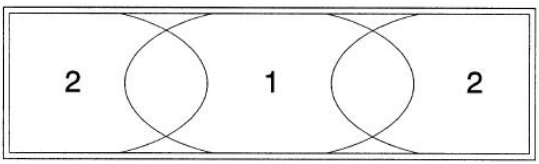


图 A.2.4 试件浇筑步骤

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。

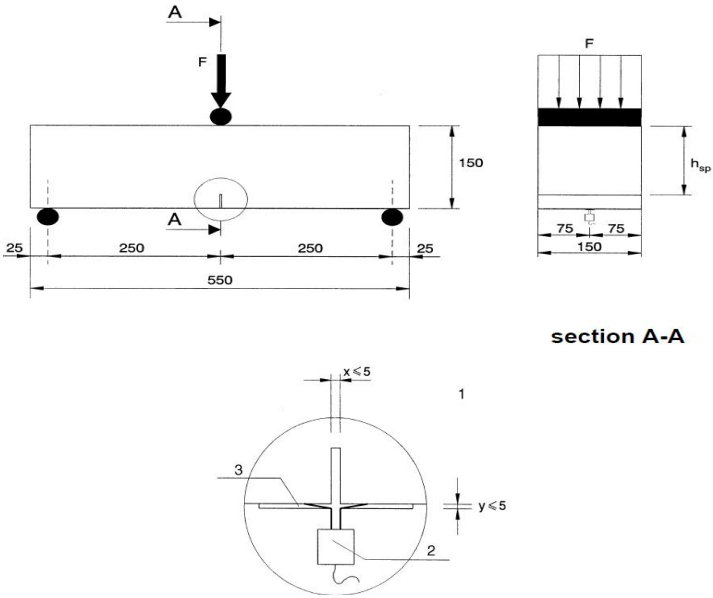
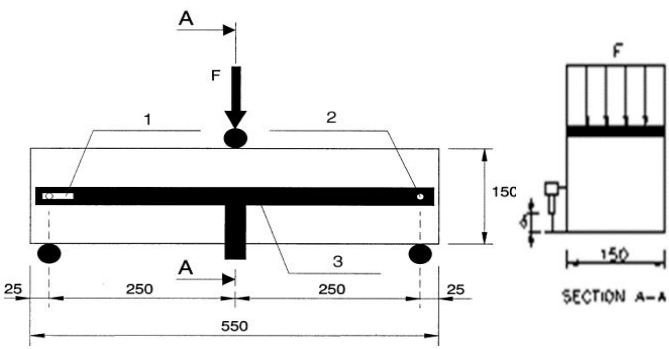


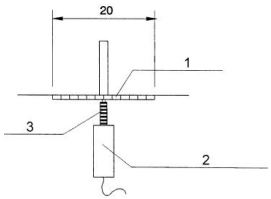
图 A.3.2-1 预开口处张开水平位移测量装置

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：

$$CMOD=(\delta-0.04)/0.85 \qquad (A.3.4)$$

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 $CMOD_{F_L}$ 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 极限弯拉强度的确定应符合下列规定：

1 极限弯拉强度 f_{ftmm} 按下式计算：

$$f_{ftmm} = \frac{3\mathrm{F}_L l}{2bh_{sp}^2} \qquad \text{（A.4.1）}$$

式中：f_{ftmm} ——极限弯拉强度，即极限最大应力（MPa）；

F_{L} ——对应于极限弯拉强度 f_{ftmm} 的荷载（N），按本条 2 款的方法确定；

l ——试件跨度（mm）；

b——试件宽度（mm）；

h_{sp}——试件从切口顶端到试件顶部的距离（mm）。

2 对应于 f_{ftmm} 的荷载 F_L 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。

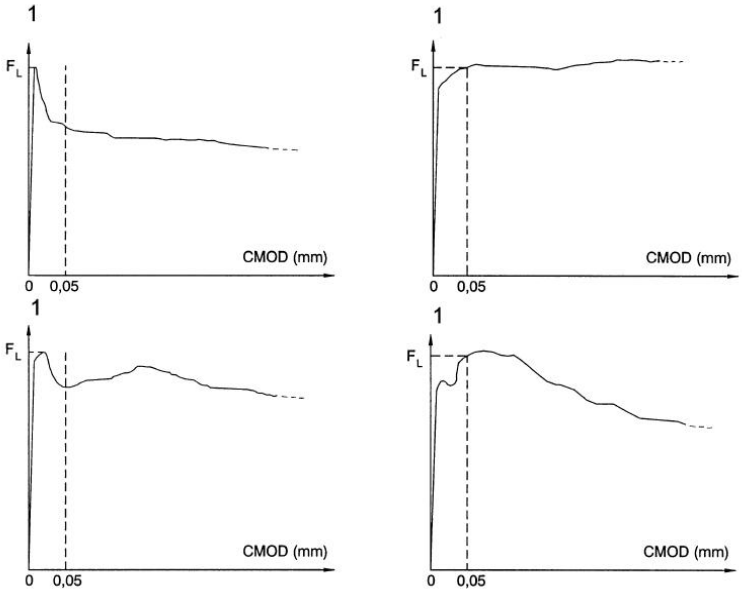


图 A.4.1 荷载与切口张开位移 CMOD 关系曲线

A.4.2 残余弯拉强度 f_{Rj} 应按下式计算：

$$f_{Rj} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \qquad (A.4.2)$$

式中：f_{Rj}——对应于切口张开位移值 CMOD 为 $CMOD_j$ 时的残余抗弯拉强度（N/mm^2）；

F_j——对应切口张开位移 CMOD 为 $CMOD_j$ 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。

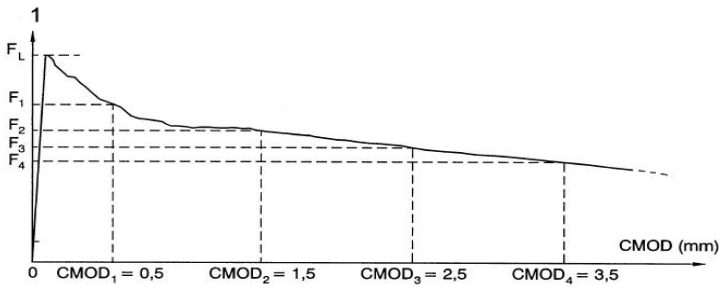


图 A.4.3 荷载 F_j 与切口张开位移值 $CMOD_j$(j=1,2,3,4)

A.5 试验报告与评估

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、弯拉强度和残余强度试验结果等。

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弯拉强度标准值 f_{ftmk} 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。

$$f_{\mathrm{ftmk}} = f_{\mathrm{ftmm}}\left(1 - k_{\mathrm{s}}\delta_{\mathrm{c}}\right) \tag{A.5.2-1}$$

$$f_{\mathrm{Rjk}} = f_{\mathrm{Rjm}}\left(1 - k_{\mathrm{s}}\delta_{c}\right) \tag{A.5.2-2}$$

式中：f_{ftmk}——极限弯拉强度标准值，MPa；

f_{Rjk}——对应于 $CMOD_j$的残余弯拉强度标准值，MPa；

f_{ftmm}——极限弯拉强度试验平均值，MPa；

f_{Rjm}——各残余弯拉强度试验平均值，MPa；

k_s——分位数系数，按表A.5.2的规定选择；

δ_c——钢纤维混凝土强度试验值的标准差，应符合《混凝土结构设计规程》GB50010 的规定。样本数量n≥12，变异系数δ_c不宜大于 25%，变异系数δ_c低于 15%时取值 15%。

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 k_s	2.336	2.141	2.048	1.991	1.932	1.895	1.76	1.645

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 钢纤维混凝土盾构管片设计不同极限状态抗拉强度

B.0.1 一般规定

1 本附录的概念均基于钢纤维混凝土结构设计的经验；

2 钢纤维混凝土结构设计以钢纤维混凝土的裂后残余强度为基础；

3 用于盾构管片结构的钢纤维混凝土必须满足不低于 CF50 的力学性能；

4 不适用于弹性模量随时间和温湿效应变化的钢纤维材料；

5 不适用于超高性能钢纤维混凝土。

B.0.2 受压状态的钢纤维混凝土的应力-应变关系可按《混凝土结构设计规程》GB50010 的规定采用普通混凝土的应力-应变关系。

B.0.3 受拉状态的简化应力-应变关系如图 B.0.3 所示。

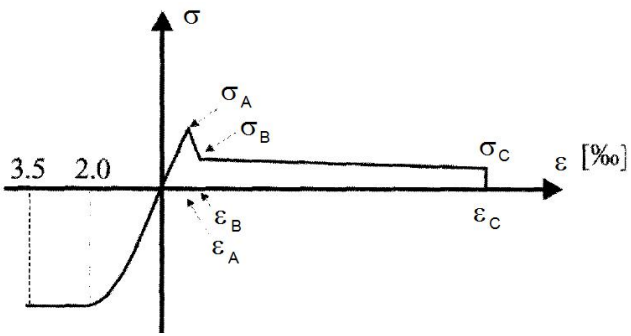


图 B.0.3 钢纤维混凝土应力-应变关系

图中：σ_A ——钢纤维混凝土单轴抗拉强度代表值，其值可根据实

际结构分析需要分别定义为抗拉标准强度、设计强度，MPa；

σ_B ——钢纤维混凝土对应正常使用极限状态抗拉标准强度、设计强度(MPa)；

σ_C ——钢纤维混凝土对应承载能力极限状态抗拉标准强度、设计强度(MPa)。

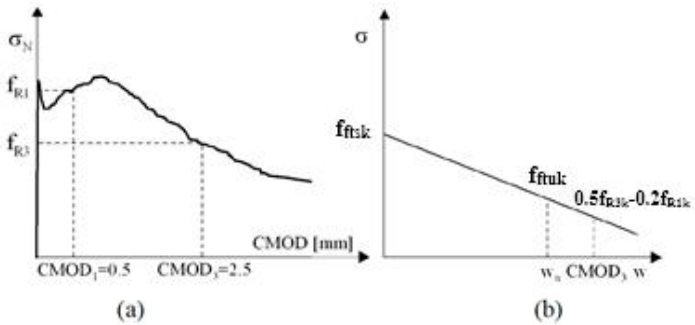
B.0.4 承载力极限状态下受拉区钢纤维混凝土抗拉设计强度 f_{ftu}，按下式计算：

$$f_{ftu} = k_f k_G f_{ftuk} / \gamma_F \qquad \text{（B.0.4-1）}$$

对于刚-塑性模型：

$$f_{ftuk} = 0.33 f_{R3k} \qquad \text{（B.0.4-2）}$$

对于线性模型（图 B.0.4）：



（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.0.4 线性模型弯拉强度与抗拉强度的转化

$$f_{ftuk} = f_{ftsk} - \frac{w_u}{2.5}\left(f_{ftsk} - 0.5 f_{R3k} + 0.2 f_{R1k}\right) \geq 0 \qquad \text{(B.0.4-3)}$$

$$f_{ftsk} = 0.45 f_{R1k} \qquad \text{(B.0.4-4)}$$

式中：f_{ftuk}——承载能力极限状态正截面受拉区抗拉设计强度（MPa）；

f_{ftuk}——承载能力极限状态正截面受拉区抗拉标准强度（MPa）；

f_{ftsk}——正常使用极限状态正截面受拉区抗拉标准强度（MPa）；

f_{R3k}——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）；

f_{R1k}——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）；

γ_{F}——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；

k_{f}——钢纤维方向因子，可取为1.0；

k_{G}——盾构管片尺寸对钢纤维离散影响系数，可取为1.0；

$CMOD_3$——对应于切口梁切口位移 2.5mm；

w_{u}——承载力极限状态时对应钢筋允许应变为 1%时，管片保护层边缘的裂缝宽度。按下式计算：

$$w_{\mathrm{u}} = \min\left(l_{\mathrm{cs}}\varepsilon_{\mathrm{ft}}, 2.5mm\right) \tag{B.0.4-5}$$

式中，$\varepsilon_{\mathrm{ftu}}$——当截面拉应变变化时为 2％ ，当截面拉应变为常量时为1％；

l_{cs}——裂缝间距，mm；

$$l_{\mathrm{cs}} = min\{s_{\mathrm{rm}}, x_{\mathrm{t}}\} \tag{B.0.4-6}$$

其中：s_{rm}——裂缝平均间距；

$$s_{rm} = 1.9\mathrm{c}_s + 0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \tag{B.0.4-7}$$

x_{t}——受拉区高度，按本规程式（6.2.2-1）计算。对于无钢筋钢纤维混凝土构件，在受弯或压弯、拉

弯状态下，可假设$x_t = h$。

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

当W_u=2.5mm 时,则公式（B.0.4-3）中的 f_{ftuk} 按下式计算：

$$f_{ftuk} = 0.5f_{R3k} - 0.2f_{R1k} \qquad (B.0.4\text{-}8)$$

B.0.5　正常使用极限状态抗拉强度设计值 f_{fts}：

$$f_{fts} = K_F K_G f_{ftsk}/\gamma_F \qquad (B.0.5\text{-}1)$$

式中:f_{fts}——正常使用极限状态正截面受拉区抗拉设计强度（MPa）；

f_{ftsk}——正常使用极限状态正截面受拉区抗拉标准强度(MPa)，按式（B.0.4-4）计算；

γ_F——正常使用极限状态取 1.0；

K_F——钢纤维方向因子，可取为 1.0；

K_G——盾构管片尺寸对钢纤维离散影响系数，可取为 1.0；

B.0.6　钢纤维方向系数k_f 应符合下列规定：

1　当有可靠试验依据时，k_f应通过试验确定；

2　当进行梁、板构件的受弯、受拉、裂缝宽度和挠度控制计算时，k_f = 1.0；

3　对于不属于以上二种的情况，k_f = 0.5。

B.0.7　管片尺寸对钢纤维离散影响系数k_G应按公式（B.0.7-1）计算：

$$k_G = \mathrm{Min}(1 + 0.5A_{ct}, 1.2) \qquad (B.0.7\text{-}1)$$

式中：A_{ct}——
开裂横截面或塑性铰的混凝土受拉区面积（mm）

附录 C 管片承载力极限状态的 M-N 包络线绘制

C.1 一般规定

C.1.1 本附录适用于无筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态 M-N 包络线的绘制。

C.1.2 承载能力极限状态 M-N 包络线定义为管片某一截面对应于不同应变应具有的承载能力，应符合本规程第 3.2 节的规定。

C.1.3 承载能力极限状态 M-N 包络线的绘制依据应符合平截面应变假定，应力-应变关系应符合本规程附录 B 的规定。

C.1.4 M-N 包络线的绘制过程应符合以下规定。

1 钢纤维混凝土压应力和拉应力的分布状态应根据截面应变分布以及应力-应变关系确定，受压区应力分布图形简化为三角形和矩形，受拉区应力分布图形简化为矩形（压弯状态）。

2 钢纤维混凝土承载力极限状态抗拉强度f_{ftu}按刚塑模型计算，计算方法符合本指南附录 B 的规定；截面受压区边缘最大压应力设计值f_{fc}应符合本指南 4.2 节的规定。

3 截面受压区边缘极限压应变$\varepsilon_{\mathrm{fcu}}$应符合混凝土的极限压应变的规定,截面受拉区边缘极限拉应变应符合下式规定：

$$\varepsilon_{\mathrm{ftu}}=\frac{w_u}{l_{\mathrm{cs}}} \tag{C.1-1}$$

式中 w_u——承载能力极限状态裂缝宽度，取 2.5mm；

l_{cs}——平均裂缝间距，对于承载能力极限状态取截面高度 h（mm）

4 截面轴向承载力设计值$N_{\mathrm{fu,r}}$和弯矩承载力设计值$M_{\mathrm{fu,r}}$应符

合下式的规定：

$$N_{\mathrm{fu,r}} = N_{\mathrm{fu}} \tag{C.1-2}$$

$$M_{\mathrm{fu,r}} = N_{\mathrm{fu}} e_0 \tag{C.1-3}$$

式中N_{fu} ——轴向力设计值。

e_0 ——轴向力对截面形心的偏心距。

5 承载能力极限状态的包络图可分 3 个区间（图 C.1）,每个区间的计算公式和参数应符合 C.2 节~C.4 节的规定。

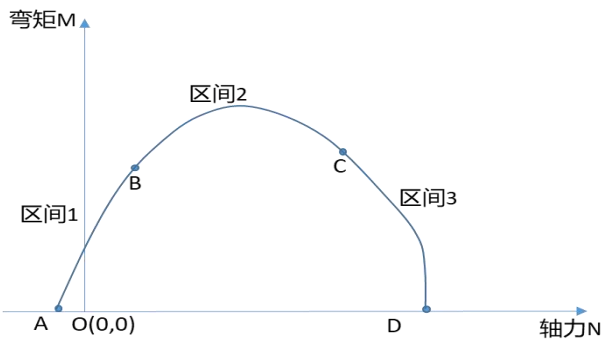


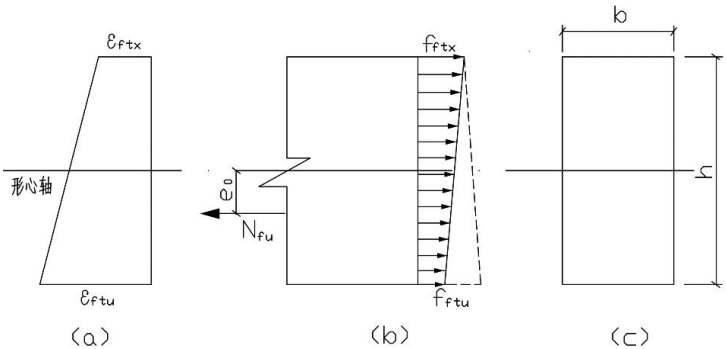
图 C.1 M-N 包络图

C.2　区间 1 包络图的计算公式和参数

C.2.1 截面下边缘拉应变为常量$\varepsilon_{\mathrm{ftu}}$，拉应力为常量$f_{\mathrm{ftu}}$。截面上边缘的应力应变应符合 C.2.2~C.2.4 条的规定。

C.2.2 截面上边缘应变符合$\varepsilon_{\mathrm{ftu}} \geq \varepsilon_{\mathrm{ftx}} > 0$ 时(图 C.2.2), 承载力应符合下列规定。

1.正截面承载力应按式（C.2.2-1）~ (C.2.2-5）计算：



(a)截面应变分布；(b)截面应力分布；(C)截面

图 C.2.2 区间 1 第 1 阶段偏心受拉构件正截面承载力计算简图

注：图中虚线表示受拉区呈硬化模型

$$N_{\mathrm{fu,r}} = f_{\mathrm{ftx}}bh - (f_{\mathrm{ftx}} - f_{\mathrm{ftu}})bh/2 \qquad \text{(C.2.2-1)}$$

$$M_{\mathrm{fu,r}} = f_{\mathrm{ftx}}bh^2/2 - (f_{\mathrm{ftx}} - f_{\mathrm{ftu}})bh^2/3 - N_{\mathrm{fu}}(\frac{h}{2} + 20) \qquad \text{(C.2.2-2)}$$

$$f_{\mathrm{ftx}} = f_{\mathrm{ftu}} + \frac{(f_{\mathrm{fts}} - f_{\mathrm{ftu}})(\varepsilon_{\mathrm{ftx}} - \varepsilon_{\mathrm{ftu}})}{\varepsilon_{\mathrm{ftr}} - \varepsilon_{\mathrm{ftu}}} \qquad \text{(C.2.2-3)}$$

$$\varepsilon_{\text{ftr}} = \frac{f_{\text{flk}}}{E_c} \tag{C.2.2-4}$$

$$f_{\text{flk}} = \max\left\{\left(1.6 - \frac{h}{1000}\right) f_{\text{tk}}, f_{\text{tk}}\right\} \tag{C.2.2-5}$$

式中:f_{ftx} ——某个应变状态截面上边缘拉应力设计值(KN);

b ——截面宽度(mm);

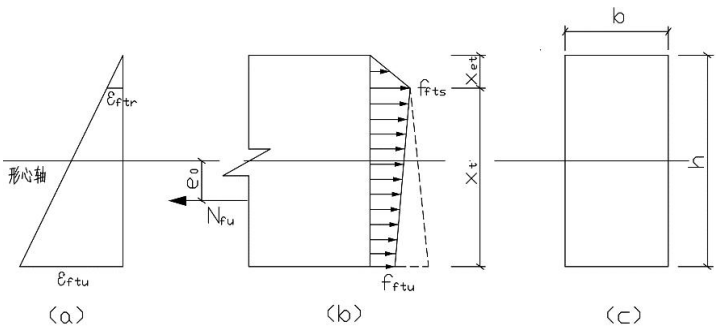
h ——截面高度(mm);

ε_{ftr} ——初裂截面拉应变;

E_c ——混凝土弹性模量(MPa)，按《混凝土结构设计规程》GB50010 的规定取值;

f_{flk} ——混凝土的抗折强度标准值（MPa）。

C.2.3 截面上边缘应变$\varepsilon_{ftx} = 0$ 时（图 C.2.3），正截面承载力应按式(C.2.3-1)~式(C.2.3-3)计算：



(a)截面应变分布；(b)截面应力分布；(c)截面

C.2.3 区间 1 第 2 阶段偏心受拉构件正截面承载力计算简图

$$N_{\text{fu,r}} = \frac{f_{\text{fts}} b x_{et}}{2} + f_{\text{fts}} b x_{\text{t}} - (f_{\text{fts}} - f_{\text{ftu}}) b \frac{x_t}{2}$$

(C.2.3-1)

$$M_{\mathrm{fu,r}} = \frac{f_{\mathrm{fts}} b {x_{et}}^2}{3} + f_{\mathrm{fts}} b x_t (\frac{x_t}{2} + x_{et}) - (f_{\mathrm{fts}} - f_{\mathrm{ftu}}) b \frac{x_t}{2} (\frac{2x_t}{3} + x_{et}) - N_{\mathrm{fu}} (\frac{h}{2} + 20) \quad \text{(C.2.3-2)}$$

$$x_{et} = \frac{\varepsilon_{\mathrm{ftr}} h}{\varepsilon_{\mathrm{ftu}}} \quad \text{(C.2.3-3)}$$

式中：x_{et} —— 截面未开裂受拉区高度（mm）；

x_t —— 截面开裂受拉区高度（mm）。

C.2.4 截面上边缘压应变符合 $0 < \varepsilon_{fcx} \leq \varepsilon_{fcu}$时（图 C.2.4），截面承载力应符合下列规定。

1 当$\varepsilon_{\mathrm{fc}} < \varepsilon_{\mathrm{fcx}} \leq \varepsilon_{\mathrm{fcu}}$时，受压区应力状态简化为矩形。正截面承载力应按下式(C.2.4-1)~(C.2.4-3)计算：

$$N_{\mathrm{fu,r}} = a_1 f_{\mathrm{fc}} b x - f_{\mathrm{ftu}} b \frac{x_t}{2}$$

(C.2.4-1)

$$M_{\mathrm{fur}} = \frac{a_1 f_{\mathrm{fc}} b x^2}{2\beta_1} + \frac{f_{\mathrm{ftu}} b {x_t}^2}{2} - N_{\mathrm{fu}} (\frac{h}{2} - x_t + 20)$$

(C.2.4-2)

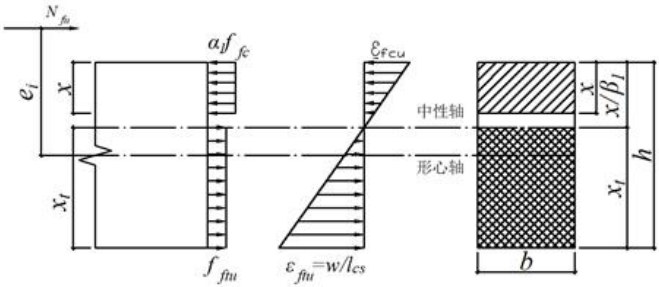
$$x = \frac{\varepsilon_{\mathrm{fcx}} h}{\varepsilon_{\mathrm{ftu}} + \varepsilon_{\mathrm{fcx}}} \quad \text{(C.2.4-3)}$$

$$x_{\mathrm{t}} = h - x/\beta_1 \quad \text{(C.2.4-4)}$$

式中：f_{fcx} ——某个应变状态截面的上边缘压应力设计值(KN)，符合本条第二款规定;

x ——截面受压区高度（mm）；

x_{t} ——截面受拉区高度（mm）。



(a) 截面应变分布；(b)截面应力分布；(c)截面

图 C.2.4 区间 1 第 3 阶段偏心受压构件正截面承载力计算简图

2 压应变符合 $0 < \varepsilon_{\mathrm{fcx}} \leq \varepsilon_{\mathrm{fc}}$时，受压区应力状态简化为三角形，压应力$f_{\mathrm{fcx}}$和 x 应分别按式(C.2.4-7)和 (C.2.4-3)计算：

$$N_{\mathrm{fu,r}} = a_1 f_{\mathrm{fcx}} b x/2 - f_{\mathrm{ftu}} b \frac{x_t}{2} \tag{C.2.4-5}$$

$$M_{\mathrm{fu,r}} = \frac{a_1 f_{\mathrm{fcx}} b x^2}{3} + \frac{f_{\mathrm{ftu}} b x_t{}^2}{2} - N_{\mathrm{fu}}(\frac{h}{2} - x_t + 20) \tag{C.2.4-6}$$

$$f_{\mathrm{fcx}} = \frac{f_{\mathrm{fc}} \varepsilon_{\mathrm{fcx}}}{\varepsilon_{\mathrm{fc}}} \tag{C.2.4-7}$$

$$x_{\mathrm{t}} = h - x \tag{C.2.4-8}$$

式中： $\varepsilon_{\mathrm{fc}}$ ——截面压应变，取值 0.2%

C.3 区间 2 包络图的计算公式和参数

C.3.1 截面上边缘压应变为常量ε_{fcu}，压应力为常量$\mathrm{f_{fc}}$。截面下边缘的应力应变应符合 C.3.2~C.3.3 条的规定。

C.3.2 截面下边缘应变符合$\varepsilon_{\mathrm{ftu}} > \varepsilon_{\mathrm{ftx}} > 0$ 时(图 C.3.2),，正截面承载力按下式(C.3.2-1)和式(C.3.2-2)计算：

$$N_{\mathrm{fu,r}} = a_1 f_{\mathrm{fc}} bx - f_{\mathrm{ftu}} bx_t \qquad \text{(C.3.2-1)}$$

$$M_{\mathrm{fu,r}} = a_1 f_{\mathrm{fc}} bx(\frac{x}{\beta_1} - \frac{x}{2}) ++ \frac{f_{\mathrm{ftu}} bx_t{}^2}{2} - N_{\mathrm{fu}}(\frac{h}{2} - x_t + 20) \qquad \text{(C.3.2-2)}$$

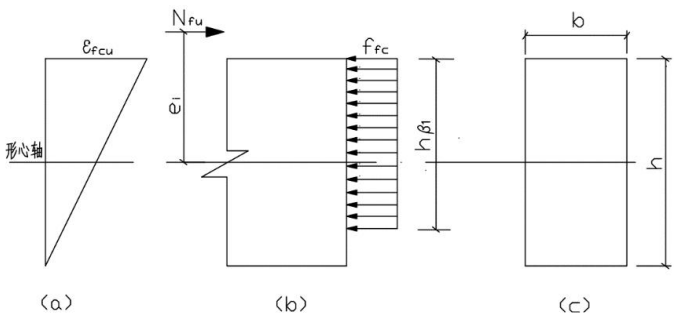
式中：f_{ftx}——某个应变状态截面的下边缘拉应力设计值(KN),

取$f_{ftx} = f_{ftu}$。

C.3.3 截面下边缘应变$\varepsilon_{\mathrm{ftx}} = 0$ 时(图 C.3.3),正截面承载力按下式(C.3.3-1)~式(C.3.3-3)计算：

$$N_{\mathrm{fu,r}} = a_1 \beta_1 f_{\mathrm{fc}} bh \qquad \text{(C.3.3-1)}$$

$$M_{\mathrm{fu,r}} = a_1 f_{\mathrm{fc}} bx(\frac{x}{\beta_1} - \frac{x}{2}) - N_{\mathrm{fu}} \frac{h}{2} \qquad \text{(C.3.3-2)}$$



(a)截面应变　(b)截面应力分布　(c)截面

图 C3.3 区间 2 第 2 阶段偏心受压构件正截面承载力计算简图

C.4 区间 3 包络图的计算公式和参数

C.4.1 截面上边缘压应变为常量ε_{cu}，压应力为常量f_{fc}。截面下边缘的应力应变应符合 C.4.2 条的规定。

C.4.2 截面下边缘压应变符合 $0 < \varepsilon_{fcx} \leq \varepsilon_{fcu}$时（图 C.4.2），承载力应符合下列规定。

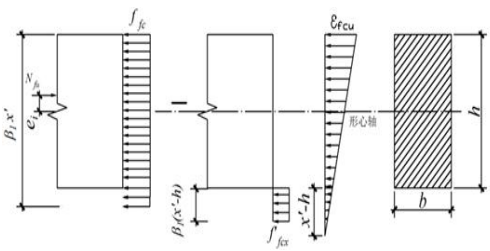
1. 轴向力 $N_{fur} < 0.9 f_c bh$ 时，正截面承载力按下式(C.4.2-1)~(C.4.2-3)计算：

$$N_{fu} \leq \alpha_1 \beta_1 f_{fc} b x' - \beta_1 f'_{fcx} b (x' - h) \qquad \text{（C.4.2-1）}$$

$$N_{fu}(e_i + x' - \frac{h}{2}) \leq \alpha_1 \beta_1 f_{fc} b x' (x' - \frac{\beta_1 x'}{2}) - \beta_1 f'_{fcx} b (x' - h)(\frac{(2-\beta_1)(x'-h)}{2}) \qquad \text{(C.4.2-2)}$$

$$f'_{fcx} = \frac{f_{fc}\varepsilon_{fcx}}{\varepsilon_{fc}} \qquad \text{(C.4.2-3)}$$

公式(C.4.2-4) 中应变$\varepsilon_{fcx} \leq 0.2\%$。



(a) 截面应力分布；(b) 截面应变；(C)截面

图 C.4.2 区间 3 受压构件正截面承载力计算简图

2 轴向力$N_{fur} \geq 0.9 f_c bh$时，$N_{fur} =$

$0.9f_{fc}bh,\ \ M_{\text{fur}}=0$。

附录 D 管片正常使用极限状态的 M-N 包络线绘制

D.1 一般规定

D.1.1 本节只适用于无筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态 M-N 包络线的绘制。

D.1.2 正常使用极限状态 M-N 包络线定义为对应于某一截面的管片应具有的抗力，应符合本指南第 3.3 节的规定。

D.1.3 正常使用极限状态 M-N 包络线的绘制依据应符合平截面应变假定，应力-应变关系应符合本规程附录 B 的规定。

D.1.4 M-N 包络线的绘制过程应符合以下规定。

1 正截面受压区应力图形为三角形,受拉区应力图形简化为矩形（压弯状态）。

2 钢纤维混凝土正常使用极限状态的抗拉强度f_{ftsk}应符合附录 B 的规定，按线性模型计算,取为f_{ftsk}。截面受压区边缘最大压应力标准值f_{fck}应符合本指南 4.2 节的规定，取为 $0.6f_{\mathrm{fck}}$。

3 截面受压区边缘最大压应变$\varepsilon_{\mathrm{cs}}$和截面受拉区边缘最大拉应变$\varepsilon_{\mathrm{ftx}}$应符合下式规定：

$$\varepsilon_{\mathrm{ftx}} = \frac{w_u}{l_{cs}} \qquad \text{（D.1-1）}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{cs}} = \frac{0.6 f_{\mathrm{fc}}}{E_{\mathrm{c}}} \qquad \text{（D.1-2)}$$

式中w_u ——正常使用极限状态裂缝宽度，取 0.2mm;

l_{cs} ——管片截面高度 h, mm。

4 截面轴向承载力设计值N_{uk}和弯矩承载力设计值M_{uk}应符合下式的规定：

$$N_{\mathrm{ufk}} = N_{\mathrm{fk}} \qquad \text{(D.1-3)}$$

$$M_{\mathrm{ufk}} = N_{\mathrm{fk}} e_0 \qquad \text{(D.1-4)}$$

5 包络图分 3 个区间参照附录 C 图 C.1，每个区间的计算公式和参数应符合以下 D.2 节~D.4 节规定。

D.2 区间 1 包络图的计算公式和参数

D.2.1 截面下边缘拉应变为常量$\frac{W_u}{l_{cs}}$，拉应力为常量$\mathrm{f_{ftsk}}$。截面上边缘的应力应变应符合 D.2.2~D.2.4 的规定。

D.2.2 截面上边缘应变符合$\frac{w_u}{l_{cs}} \geq \varepsilon_{\mathrm{ftx}} > 0$ 时(图 D.2.2)，正截面承载力按下列公式计算：

$$N_{\mathrm{ufk}} = f_{ftxk} bh - (f_{ftxk} - f_{ftsk}) bh/2 \qquad \text{(D.2.2-1)}$$

$$M_{\mathrm{uk}} = \frac{f_{ftxk} bh^2}{2} - (f_{ftxk} - f_{ftsk}) bh^2/3 - N_{fk} \left(\frac{h}{2} + 20\right)$$

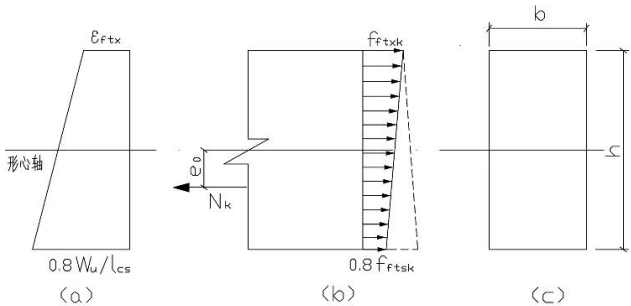
(D.2.2-2)

$$f_{\text{ftxk}} = f_{ftsk} + \left(f_{ftrk} - f_{ftsk}\right)(\varepsilon_{ftr} - \varepsilon_{fts})/$$

$$(\varepsilon_{ftx} - \varepsilon_{fts}) \qquad \text{(D.2.2-3)}$$

式中：f_{ftxk}——某个应变状态截面的上边缘拉应力标准值, KN；

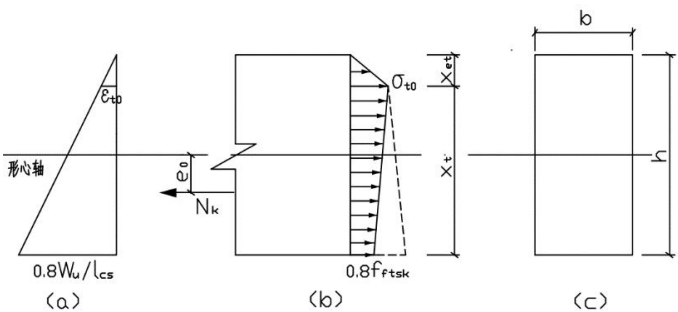
f_{ftrk}—初裂截面拉应力标准值,MPa，按附录 C 第 C.2.2 条计算。



(a) 截面应变；(b)截面应力分布；(c)截面

图 D.2.2　区间 1 第 1 阶段偏心受拉构件正截面承载力计算简图

D.2.3 截面上边缘应变$\varepsilon_{\text{ftx}} = 0$ 时(图 D.2.3)，正截面承载力应按下列公式计算：



(a)截面应变；(b)截面应力分布；(c)截面

图 D.2.3 区间 1 第 2 阶段偏心受拉构件正截面承载力计算简图

$$N_{\mathrm{ufk}} = \frac{f_{\mathrm{ftrk}} b x_{et}}{2} + f_{\mathrm{ftrk}} b \mathrm{x_t} - (f_{\mathrm{ftrk}} - f_{\mathrm{ftsk}}) b \frac{\mathrm{x_t}}{2}$$

(D.2.3-1)

$$M_{\mathrm{ufk}} = \frac{f_{\mathrm{ftrk}} b {x_{et}}^2}{3} + f_{\mathrm{ftrk}} b x_{\mathrm{t}} (\frac{x_{\mathrm{t}}}{2} + x_{et}) - (\sigma_{\mathrm{t0k}} - f_{\mathrm{ftsk}}) b \frac{x_t}{2} (\frac{2x_t}{3} + x_{et}) - N_{\mathrm{fk}} (\frac{h}{2} + 20)$$

(D.2.3-2)

$$x_{\mathrm{et}} = \frac{\varepsilon_{\mathrm{ftr}} h}{\frac{w_u}{l_{\mathrm{cs}}}}$$

(D.2.3- 3)

D.2.4 截面上边缘压应变符合f_{fcx}为$0 \le f_{\mathrm{fcx}} \le 0.6 f_{\mathrm{fck}}$时（图 D.2.4），截面承载力应符合下列规定。

1 正截面承载力按下式计算：

$$N_{\mathrm{fk}} \le \frac{f_{\mathrm{fcx}} b x}{2} - 0.9 f_{\mathrm{ftsk}} b x_t$$

(D.2.4-1)

$$M_{\mathrm{ufk}} \le \frac{\mathrm{f_{fcx}} b x^2}{3} + 0.9 \frac{f_{\mathrm{ftsk}} b x_t^2}{2} - N_{fk} (\frac{h}{2} - x_t + 20)$$

(D.2.4-2)

$$f_{\mathrm{fcxk}} = \frac{\varepsilon_{fcx} f_{fck}}{\varepsilon_{fc}}$$

(D.2.4-3)

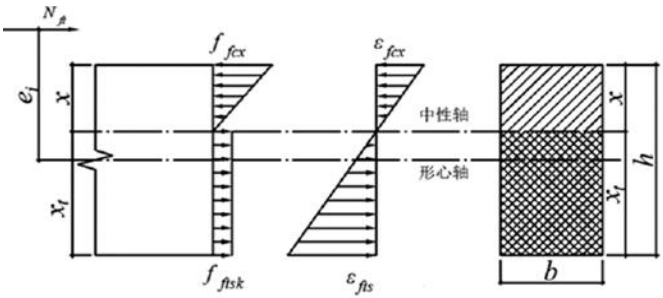
$$x = \frac{\varepsilon_{fcx} h}{\frac{w_u}{l_{cs}} + \varepsilon_{fcx}}$$

(D.2.4-4)

$$x_{\mathrm{et}} = \frac{\varepsilon_{ftr} (h - x)}{\frac{w_u}{l_{cs}}}$$

(D.2.4-5)

式中：f_{fcxk}——某个应变状态截面的上边缘压应力标准值(KN)。



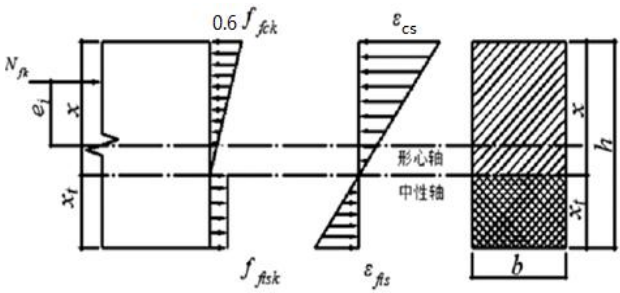
(a)截面应变；(b)截面应力分布；(c)截面

图 D.2.4 区间 1 第 3 阶段偏心受压构件正截面承载力计算简图

D.3 区间 2 包络图的计算公式和参数

D.3.1 截面上边缘压应变为常量ε_{fcxm}，压应力为常量 $0.6f_{\mathrm{fc}}$。截面下边缘的应力应变应符合 C.3.2~C.3.3 的规定。

D.3.2 截面下边缘应变符合$\frac{w_u}{l_{cs}} > \varepsilon_{\mathrm{ftx}} > 0$ 时(图 D.3.1),正截面承载力按下式计算：



(a)截面；(b)截面应变分布；(C)截面应力分布

图 D.3.1 区间 2 第 1 阶段偏心受压构件正截面承载力计算简图

$$N_{\mathrm{fk}} \leq \frac{0.6 f_{\mathrm{fck}} b x}{2} - 0.9 f_{\mathrm{ftsk}} b x_{\mathrm{t}} \qquad \text{(D.3.2-1)}$$

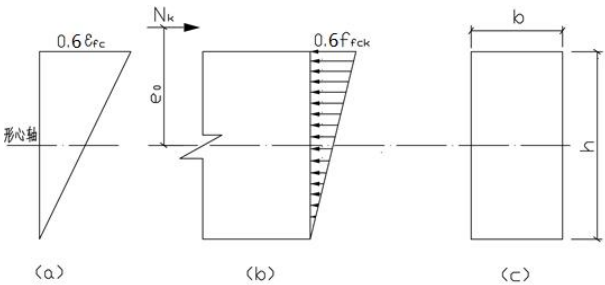
$$M_{\mathrm{ufk}} \leq 0.6 f_{\mathrm{fck}} b \frac{x^2}{3} + 0.9 f_{\mathrm{ftsk}} b \frac{x_t^2}{2} - N_{fk}\left(\frac{h}{2} - x_t + 20\right)$$

(D.3.2-2)

D.3.3 截面下边缘应变$\varepsilon_{ftx} = 0$ 时(图 D.3.3),正截面承载力按下式计算：

$$N_{\mathrm{ufk}} = 0.6 f_{\mathrm{fck}} b h / 2 \qquad \text{(D.3.3-1)}$$

$$M_{\mathrm{uk}} = 0.6 f_{\mathrm{fck}} b \frac{h^2}{3} - N_{\mathrm{fk}}\left(\frac{h}{2} + 20\right) \qquad \text{(D.3.3-2)}$$



(a)截面；(b)截面应变分布；(C)截面应力分布

图 D.3.3　区间 2 第 2 阶段受压构件正截面承载力计算简图

D.4 区间 3 包络图的计算公式和参数

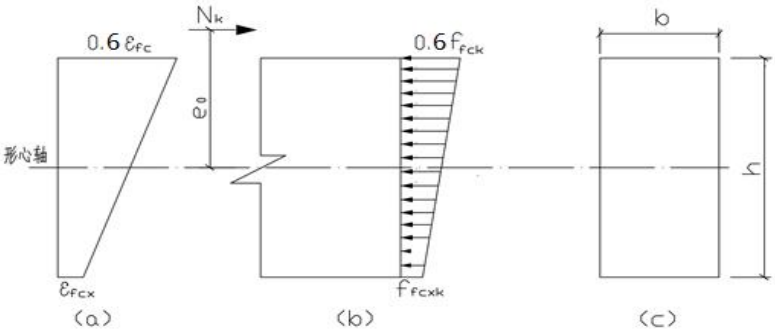
D.4.1 截面上边缘压应变为常量$\varepsilon_{\mathrm{fcxm}}$，压应力为常量 $0.6 f_{fc}$。截面下边缘的应力应变应符合 D.4.2 的规定。

D.4.2 截面下边缘压应变符合 $0 < \varepsilon_{\mathrm{fcx}} \leq \varepsilon_{\mathrm{fcxm}}$时（图 D.4），承载力应符合下列规定。1 当轴向力 $\mathrm{N} < 0.9 f_{\mathrm{fck}} b h$时，正截面承载力按下式计算：

$$N_{uK} = 0.6f_{fck}bh - (0.6f_{fck} - f_{fcxk})bh/2 \qquad \text{(D.4.2-1)}$$

$$M_{uK} = 0.6f_{fck}b\frac{h^2}{2} - (0.6f_{fck} - f_{fcxk})b\frac{h^2}{6} - N_{uk}(\frac{h}{2} + 20) \qquad \text{(D.4.2-2)}$$

$$f_{fcx} = \frac{0.6f_{fck}\varepsilon_{fcx}}{\varepsilon_{fcxm}} \qquad \text{(D.4.2-3)}$$



(a)截面；(b)截面应变分布；(C)截面应力分布

图 D.4　区间 3 受压构件正截面承载力计算简图

2　当轴向力 $N \geq 0.9f_{fck}bh$ 时，$N_{ufk} = 0.9f_{fck}bh$, $M_{ufk} = 0$ 。

附录 E 预制管片承载力检验试验方法标准

E.0.1 本附录适用于钢纤维混凝土管片压弯状态承载能力的检验。包括试验用仪器设备及其技术要求；试验流程的规定；试验结果分析及其承载力评价方法。

E.0.2 用于钢纤维混凝土管片纯弯状态承载能力的检验，应符合《纤维混凝土盾构管片》GB/T 38901-2020 的规定。

E.1 试验设备

E.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。

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

表 E.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			

E.1.3 试验装置的安放位置示于图 E.1.3。

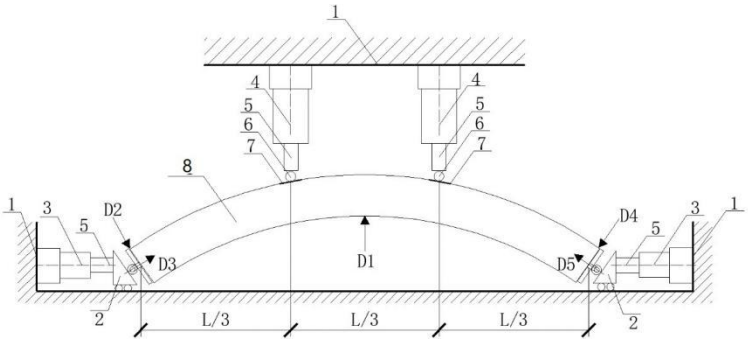


图 E.1.3 承载力试验装置示意图

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；D_1~D_5—位移测点

E.2 试验前的准备

E.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。

E.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。

E.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。

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

E.2.5 由残余弯拉 f_{R1k}、f_{R3k} 标准强度，按本规程附录 B 的方法计算 f_{ftsk}、f_{fts}、f_{ftuk}、f_{ftu} 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。

E.2.6 根据 f_{ftsk}、f_{ftuk} 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 W_u（对应管片厚度 300mm，钢筋应变约 1%）时的加载值，W_u 的计算方法应符合本规程附录 B 的规定。

E.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 E.2.7）竖向千斤顶与水平千斤顶加载数值的关系：

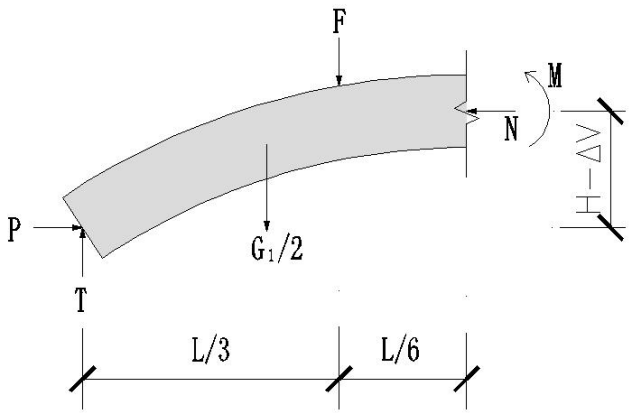


图 E.2.7 管片半结构受力图

$$F=\frac{3P(H-\Delta V+e)}{L}-\frac{3}{8}G_1 \qquad \text{（E.2.7）}$$

式中：P ——水平千斤顶加载值（kN）；

F ——竖向千斤顶加载值（kN）；

G_1 ——管片自重（kN）；

ΔV ——管片跨中在荷载作用下产生的竖向位移（m）；

L ——管片跨径（m）；

H ——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(E.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。

E.3 试验方法

E.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。

E.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。

E.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，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 时，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；记录裂缝开展情况和最大裂缝宽度并对裂缝的位置进行标记；

4 裂缝宽度超过计算的 W_u 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；

5 加荷至裂缝宽度达到 2.5mm 或承载力不再增加，终止试验。

E.3.4 各级加载并达到规定的稳压时间后，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。

E.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 f_{ftsk}、f_{ftuk} 标准强度计算的钢纤维混凝土管片承载力；

2 试验管片的裂缝宽度超过 2.5mm。

E.4 试验报告

E.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；

$$W_1 = D_1 - [(D_2 sin\alpha - D_3 cos\alpha) + (D_4 sin\alpha - D_5 cos\alpha)]/2 \quad (E.4.1)$$

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 E.2.5 条正常使用极限状态的计算承载力；

3 计算裂缝宽度为 W_u 时的加载值对应管片中心的弯矩和轴力，应大于 E.2.5 条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、W_u 裂缝宽度的承载力记录，则采用内插法求得 0.2mm、W_u 裂缝宽对应的荷载值和跨中挠度。

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

E.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。

E.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 f_{R1}、f_{R3} 的标准值和设计值，f_{fts}、f_{ftu} 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。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

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

下列标准或文件对于本部分的应用是必不可少的。凡是注出版年的引用标准或文件，仅所注出版年的版本适用于本部分。凡是不注出版年的引用标准或文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本部分。

1 《混凝土结构设计规程》 GB 50010

2 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153

3 《建筑结构可靠度设计统一标准》 GB50068

4 《混凝土质量控制标准》 GB 50154

5 《地铁设计规程》 GB50157

6 《混凝土结构工程施工质量验收规程》 GB 50204

7 《盾构法隧道施工与验收规程》 GB 50446

8 《混凝土结构耐久性设计规程》 GB/T 50476

9 《混凝土结构工程施工规程》 GB 50666

10 《城市轨道交通工程抗震设计规程》 GB50909

11 《金属材料室温拉伸试验方法》 GB/T 228

12 《预制混凝土衬砌管片》 GB/T 22082

13 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》 GB/T 50080

14 《普通混凝土力学性能试验方法标准》 GB/T 50081

15 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T 50082

16 《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1-2014

17 《普通混凝土配合比设计规程》 JGJ55

18 《钢筋焊接及验收规程》 JGJ18

19 《混凝土耐久性检验评定标准》 JGJ193

20 《混凝土中氯离子含量检测技术规程》 JGJ/T322

21 《纤维混凝土试验方法标准》 CECS 13

22 《混凝土碱含量限值标准》 CECS53

23 《轨道交通工程人民防空设计规程》 REJ02

24 《钢纤维混凝土》 JG/T472

25 《混凝土用钢纤维》YB/T151

26 《纤维混凝土盾构管片》GB38901-2020

27 《钢筋钢纤维混凝土管片技术规程》T/CECS 1374 2023

26 《fib model code for concrete structures 2010》

27 《DafStb Technical Rule on Steel Fiber Reinforced Concerte》 DIN 1045-1

28 《Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength （limit of proportionality （LOP）, residual)》 EN14651-2005

辽宁省地方标准

钢纤维混凝土预制管片技术规程

Technical specification for precast steel fiber reinforced concrete segments

条 文 说 明

制定说明

《钢纤维混凝土预制管片技术规程》规程制定过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结钢筋钢纤维混凝土管片的设计、制作、施工、检验及检测实践经验，同时参考了国外先进技术、技术标准，同时试验取得了重要技术参数。

为便于广大设计、施工、检测、可研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《钢纤维混凝土预制管片技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。为了减少篇幅，只列条文号，未抄录原条文。

目　　次

1 总则 105

2 术语和符号 106

3 基本设计规定 107

3.1 一般规定 107

3.2 承载能力极限状态设计 108

3.3 正常使用极限状态验算 109

4. 材料 110

4.1 钢纤维 110

4.2 钢纤维混凝土 110

5 结构分析 113

5.1 基本规定 113

5.2 管片横向内力计算 113

5.3 管片接头螺栓强度验算 116

6 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力验算 118

6.1 一般规定 118

6.2 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态计算 118

6.3 钢筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态验算 122

7 无筋钢纤维混凝土管片承载能力计算 123

7.1 设计基本规定 123
7.2 正截面承载能力极限状态计算 123
7.3 正常使用极限状态验算 125

8 构造规定 129

8.1 一般规定 129
8.2 管片构造 129

9 施工阶段承载力验算 131

9.1 一般规定 131
9.2 临时荷载验算 131
9.3 顶推力计算 133

10 管片制造与施工 135

10.1 配合比设计及拌合物 135
10.2 材料投放和搅拌 135
10.3 浇筑、振捣及养护 136
10.4 管片施工 136
10.5 检验和验收 136

附录 A 残余抗弯拉强度测试方法（切口梁法） 137

附录 B 钢纤维混凝土构件设计不同极限状态抗拉强度 138

附录 E 预制管片承载力检验试验方法标准 145

1 总则

1.0.2 本规程依据国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153、《混凝土结构设计规程》GB50010 和《盾构法隧道施工及验收规程》GB 50446 等标准的原则制定。当结构受力情况、材料性能等基本条件与本规程的编制依据有出入时，则需根据具体情况通过专门试验或分析加以解决。

1.0.4 本规程与相关的标准、规程进行了合理的分工和衔接，执行时尚应符合相关标准、规程的规定。

2 术语和符号

2.1～2.2 术语和符号与国家标准《混凝土结构设计规程》（GB50010）和行业标准《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJ*****报批稿接轨。又增加了适用于本标准的术语和符号。

3 基本设计规定

3.1 一般规定

3.1.3 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%。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三分梁试验得到的不同开裂状态的应力-应变关系曲线，可用于确定不同极限状态的抗拉强度。

3.1.4 钢筋钢纤维管片的设计方法、可靠度和极限状态方程表达方式，应符合国家标准《混凝土结构设计规程》GB50010 的规定。

3.1.5 钢筋钢纤维管片在施工阶段的强度验算，通常包括管片脱模、起吊、堆放、拼装和千斤顶顶进等内容的强度验算。

3.1.6 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。由于抗开裂性能的提高，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。

3.2 承载能力极限状态设计

3.2.1～3.2.2 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《混凝土结构设计规程》GB50010 相比，除考虑钢纤维混凝土抗拉强度对承载力贡献外，其余基本相同。

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

3.2.4 地震组合效应设计值参考国家标准《建筑抗震设计规程》GB50011 进行确定；人防荷载组合效应设计值参考现行国家标准《人民防空工程设计规程》GB50225 及现行行业标准《轨道交通工程人民防空设计规程》RFJ02 进行确定。

3.2.5 荷载分项系数参考现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068 进行取值。

3.2.6 地震作用分项系数参考现行国家标准《建筑抗震设计规程》GB50011 进行取值。

3.3 正常使用极限状态验算

3.3.3 参考国家标准《混凝土结构设计规程》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 时不会对钢筋钢纤维或无筋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行为。另外，不会发生因腐蚀产物扩大而引起混凝土的剥落，而恰恰相反能延缓混凝土保护层剥落的时间。因此，为了简单起见钢筋混凝土裂缝宽度和钢筋钢纤维混凝土裂缝宽度的限值相同。

4. 材料

4.1 钢纤维

4.1.1～4.1.3 提出钢纤维形状、长度、长径比、抗拉强度的要求。保证钢纤维混凝土管片的顺利生产及强度、韧性及其耐久性要求。

4.1.4 钢纤维的质量会影响钢纤维混凝土性能，所以要予以控制。

4.1.5 混凝土应采用普通硅酸盐水泥，且应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定。

粗、细骨料应符合行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 的规定,并宜采用 5mm～25mm 连续级配粗骨料以及级配 II 区中砂，不得采用海砂。 外加剂应符合国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规程》GB 50119 的规定，且不得使用含氯盐的外加剂。采用硅酸盐水泥配置的钢纤维混凝土，可掺用粉煤灰、硅粉、磨细矿渣粉等掺合料，掺合料性能应符合现行有关标准的规定，其掺量应通过试验确定。

4.2 钢纤维混凝土

4.2.1～4.2.3 对钢纤维混凝土强度等级提出要求.对钢纤维混凝土轴心抗压强度、轴心抗拉强度、弹性模量等的取值做出规定。

4.2.4 钢纤维混凝土残余弯拉强度的确定原则上应通过试验确定，或由钢纤维厂家提供其产品所需掺量的残余抗拉强度。在此基础上才能计算不同极限状态的抗拉强度。

应用条文表 4.2.4 时，可以选择不同的残余强度韧性等级来确定残余弯拉强度值，例如选择 3c 等级，3 表示 3MPa≤ f_{R1k}<4MPa，即 f_{R1k}≥3MPa，c 表示 0.9≤ f_{R3k}/f_{R1k}<1.1 即 f_{R3k}≥2.7MPa 。条文表 4.2.4 是参考欧标 model code 2010 性能等级（如下表 4.2-1 所示）制定的钢纤维混凝土残余弯拉强度韧性等级。可供设计参考。

表 4.2-1 Model code 2010 性能等级

残余强度等级	f_{R1k}/MPa	韧性等级	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}
N+1	N+1≤f_{R1k}<N+2		

注：残余弯拉强度标准值的确定应符合本规程附录 A 的规定。

钢筋钢纤维混凝土管片的残余强度韧性等级宜采用 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≤f_{R1k} 4MPa，0.9≤f_{R3k}/f_{R1k}<1.1。无筋钢纤维混凝土管片应具有弯曲硬化性能，所以宜采用高强度钢纤维和残余强度韧性等级 5d 或以上。目前国外完成的无筋钢纤维混凝土管片的钢纤维最高掺量 60kg/m^3。钢纤维最低掺量不低于 20kg/m^3。

表 4.2-2 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。依据混凝土强度 C50~C60，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 4.2-2 钢纤维掺量与残余弯拉强度关系

序号	1	2	3	4	5	6	7
f_{R3k} （MPa）	≤2	≤3	3~4	4~4.5	4.5~5.5	5.5~6	≥6
钢纤维掺量（kg/m^3）	20	25	30	35	40	45	≥50

4.2.5、4.2.6 在管片里钢纤维部分替代钢筋，钢纤维混凝土被考虑为受拉材料，构件应有足够的强度满足设计要求。所以通过规定 f_{R1k} 与 f_{ftmk} 和 f_{R3k} 与 f_{R1k} 的最小比值来限制构件初裂后的强度下降幅度。

4.2.7 钢纤维混凝土管片应具有延性和应力重分布能力，所以生产前和生产中都需要通过管片弯曲性能测试来检验的这两项性能。

4.2.8 拌合物不仅要满足浇筑生产要求，还必须满足力学性能如残余弯拉强度等。钢纤维的分散均匀性尤为重要，管片生产商应在生产制定生产流程包括保证钢纤维的分散均匀性的措施。

5 结构分析

5.1 基本规定

5.1.1 勘察单位钻孔取样进行土工试验时，应尽可能模拟实际工程施工及使用阶段的应力状态及具体条件。结构工程师进行结构稳定性、强度及正常使用极限状态验算时选取的土工参数应与实际地层受力状态一致。当采用多种方法测试岩土物理力学参数时，勘察单位应经过分析后提出在不同使用条件下的推荐取用参数。

盾构隧道管片结构的计算模型应根据不同的地层情况、衬砌构造特点及施工工艺等确定，宜考虑衬砌与地层相互作用及装配式管片衬砌接头的影响。管片拼装方式对管片结构受力存在一定的影响，为此，进行内力计算时应结合实际情况选取能够反映实际工况的模型进行计算。

5.1.2 盾构管片计算不仅要考虑使用阶段的荷载，还需考虑施工阶段的各种不利工况进行计算；同时应考虑使用阶段可能出现的极端的（最大或最小）不利水位及覆土厚度分别进行抗浮稳定性验算和承载力能力计算。

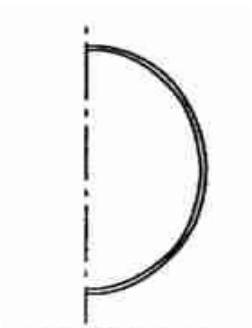
5.2 管片横向内力计算

5.2.1～5.2.3 对盾构隧道管片结构截面内力及变形方面的计算，目前国内外尚无完全成熟的、公认的计算方法，多以经验性的简

化计算为主。从国内外管片设计计算情况来看，管片结构计算方法主要有以下两种：匀质圆环模型法和梁-弹簧模型法。

匀质圆环模型又包含惯用法和修正惯用法。惯用法是将管片环作为刚度均匀的圆环来考虑的设计计算法，此方法不考虑管片接头部分的弯曲刚度下降，管片环和管片主截面具有同样刚度、并且弯曲刚度均匀的方法，如说明图 5.2.1(a)所示。而修正惯用法是基于惯用计算法发展起来的，修正惯用计算法除了将管片环考虑为弯曲刚度均匀的环，还考虑了管片接头部分的弯曲刚度下降和管片对应环向螺栓处的弯矩上升，更适用于目前常用的错缝拼装管片的内力计算。

梁-弹簧法是将管片主截面模拟成梁、将管片环向接头模拟成旋转弹簧，将环间纵向接头模拟成剪切弹簧，将地基与管片环之间的相互作用模拟成地基弹簧来表示，是一个较为接近实际情况的计算方法，如说明图 5.2.1(b)所示。



(a) 修正惯用法采用的匀质圆环

(b) 梁-弹簧法同时考虑旋转弹簧和剪切弹簧的圆环

说明图5.2.1 不同设计计算方法所采用的管片环结构特征

5.2.4 国内的相关研究表明，修正惯用法与圆环-铰接模型、梁-

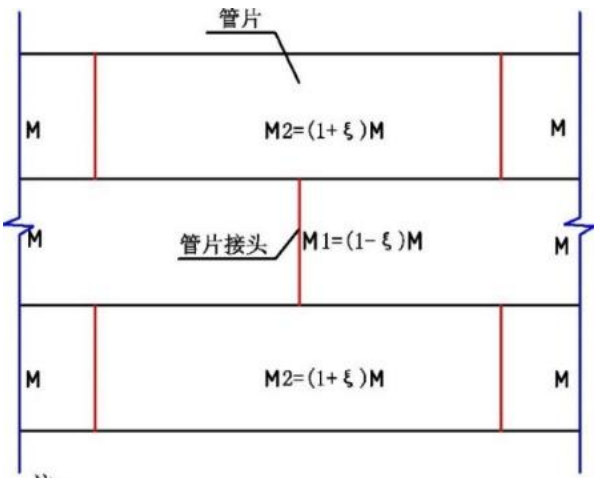
弹簧模型相比，是将衬砌圆环考虑为弹性匀质圆环，用小于 1 的刚度折减系数 η 来体现管片接头的影响。刚度折减不具体考虑接头的位置，用曲梁单元模拟刚度折减后的衬砌圆环。该法管片计算内力值较大，相关工程的应用情况表明，修正惯用法的计算结果比实际测量所得管片内力要稍大，从国内外相关的工程设计实例应用情况来看，修正惯用法的应用相当广泛，是一种简单实用的计算方法。

修正惯用法计算时取单环管片进行计算，计算结构内力 M、N，然后考虑错缝拼装后的整体补强效果，进行弯矩分配：

管片内力：计算的弯矩为（1+ ξ ）M，轴力为 N；

接头内力：计算的弯矩为（1- ξ ）M，轴力为 N。

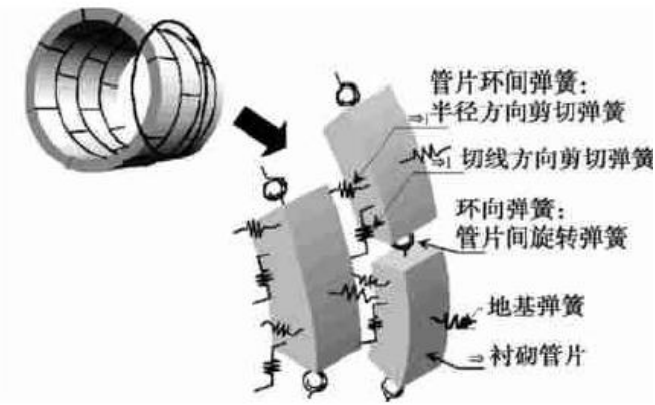
ξ 为弯矩增大系数，管片弯矩分配简图如说明图 5.2.2 所示：



说明图5.2.2 弯矩在接头处的传递

注：M 为匀质圆环模型的计算弯矩；M1 为修正后的管片接头弯矩；M2 为修正后的管片弯矩。

5.2.5 盾构隧道管片衬砌结构是由若干管片及其间的连接螺栓组成，梁-弹簧法从荷载作用效应方面讲是最为符合实际情况的计算方法，梁用于模拟管片部分，弹簧用于模拟管片间的接头部分，包括接头形式、螺栓和防水充填材料等。弹簧的轴向、剪切和转动效应分别用轴向刚度、剪切刚度和转动刚度来描述（说明图5.2.3）。但是具体计算较为繁琐，需要编制较为复杂的程序。另外，管片间螺栓的旋转弹簧模量、管片环间的剪切弹簧刚度等参数的确定也会对计算结果有较大的影响。但在计算参数已知、大直径大埋深的盾构隧道计算推荐采用梁-弹簧法设计。



说明图5.2.3 梁-弹簧法结构模型

5.3 管片接头螺栓强度验算

5.3.1 当作为匀质圆环计算管片环的截面内力时，必须对管片接头螺栓赋予和管片主截面同等程度的强度和刚度。因此，在惯用

计算法中，管片接头螺栓的设计截面内力为管片环上产生的正或负的最大弯矩及该位置上的轴力和最大剪力。但是现在所用的接头形式实际上难以满足和管片主截面具有同等程度的强度和刚度这一要求。事实上是通过错缝拼装管片环，用邻近管片的拼接效应进行弥补。因此，采用修正惯用计算法设计接头的截面内力时，对于弯矩可参照弯矩提高率，作折减处理。一般说来，混凝土管片将螺栓视为受拉钢筋来设计截面。

当作为具有旋转弹簧的管片环计算截面内力时，所用梁-弹簧模型进行计算能直接得到管片接头位置上的截面内力，可以选择其中最大的内力，将弯矩、轴力和剪力进行适当的组合进行设计。此时，所设计的管片接头必须能满足计算截面内力所采用的旋转弹簧的弹簧常数。

5.3.2 当管片环采用错缝拼装时，管片纵向接头螺栓应具有能将管片接头上折减掉的弯矩传递给邻近管片的刚度和强度。设计管片纵向接头时，宜采用梁-弹簧模型法计算设计截面内力。当采用利用惯用计算法和修正惯用计算法设计的管片环接头螺栓时，大多采用和管片间连接螺栓同等性能的螺栓，有时取直径略小一些、强度等级低一点的螺栓。管片纵向接头最好能够考虑到地震的影响、地基沉降而引起的隧道纵向错位和施工的影响而采取相应措施。另外，还要考虑到与隧道的防水性和施工性的关系进行接头螺栓的设计。

6 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力验算

6.1 一般规定

6.1.1 盾构管片受力状态基本为大、小偏心受压，本规程也仅针对这两种受力形式不同于国家标准《混凝土结构设计规程》GB 50010、《地铁设计规程》GB 50157 的部分做详细说明。

6.2 钢筋钢纤维混凝土管片承载能力极限状态计算

6.2.1 由于钢纤维对于混凝土轴心抗压强度的提高作用较小，所以钢筋钢纤维混凝土轴心受压和小偏心受压构件的承载力可以按国家标准《混凝土结构设计规程》GB 50010 的规定计算。

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《混凝土结构设计规程》GB 50010 的规定计算。

6.2.2 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。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 ξ_b 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程相协调，本规程规定相对界限受压区高度 ξ_b 的计算及大、小偏心的判断方法与国家标准《混凝土结构设计规程》 GB50010 的规定相同。

式(6.2.3-3)是对受压钢筋面积形心取矩得到的平衡方程。一般按对称配筋计算，则由式（6.2.2 -1）和式（6.2.2-2）可计算受压区高度为：

$$x=\frac{(N_{\mathrm{fu}}+f_{\mathrm{ftu}}bh)}{(f_{\mathrm{fc}}b+\frac{f_{\mathrm{ftu}}b}{\beta_1})}$$ 说明式（6.2-1）

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，得到的配筋率和钢纤维掺量与原设计的配筋率有相同甚至更高的承载力，钢筋钢纤维混凝土梁与管片的安全系数为 1.18～1.22，均大于钢筋混凝土管片的 1.06；可节省钢材约 60%。表明计算公式和对 f_{ftu} 的取值是偏于安全的。

3 对受压区高度 $x\leq 2a_s^{'}$ 的工程案例的承载力计算分析。《混凝土结构设计规程》GB50010 中规定，当 $x\leq 2a_s^{'}$ 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极限应力。需要按条文中式（6.2.2-7）计算受压区钢筋的实际应

力。将条文中式（6.2.2-7）和式（6.2.2-1）带入（6.2.2-5），即可求解受压区高度。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%～30%，偏心距越小配筋率减少的越多。也即考虑受压区压应力时弯矩承载力会提高，配筋率会减少。但此计算过程较为繁琐，需要利用计算软件求解受压区高度。为简化计算过程起见，可认为受压区高度不变，且 $\sigma_s^{'} = f_{\mathrm{y}}$。用说明式(6.2-1)计算受压区高度，用条文中式(6.2.2-6)计算弯矩承载力。

通过计算分析，按受压区高度不变相比受压区高度增加的计算结果，配筋率有所增加，但相差比例绝大部分小于 5%，个别超过 5%，但小于 10%。因此可以偏于安全的认为受压区高度不变计算配筋面积。

6.2.3 由于钢纤维混凝土抗拉强度与基体混凝土提高不多，为安全起见，钢筋钢纤维混凝土构件受剪截面尺寸限制条件仍应符合国家标准《混凝土结构设计规程》GB50010 的规定。

6.2.4 构造箍筋是为了避免无腹筋梁的受剪脆性破坏。而钢纤维恰能增加它的延性。参考规程 model code 2010 中规定，当纤维混凝土残余弯拉强度满足下式：

$$f_{\mathrm{ftu,2}} \geq 0.08\sqrt{f_{\mathrm{ck}}} \qquad \text{说明式（6.2-2）}$$

也可以作为不需要配置最小抗剪箍筋的条件。

式中：$f_{\mathrm{ftu,2}}$ ——对应于 CMOD_2 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：

$$f_{ftu2} = f_{ftsk} - \frac{1.5}{2.5}(f_{ftsk} - 0.5f_{R3k} + 0.2f_{R1k})$$ 说明式（6.2-3）

其中，$F_{fts,k}$——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。

6.2.5 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。条文中式（6.2.5-1）是在国家标准《混凝土结构设计规程》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，得到条文中式（6.2.5-2）和式（6.2.5-3）。

通过试验研究结果表明，钢筋钢纤维混凝土构件较之用条文中式（6.2.4-1）的计算结果有 1.12～1.42 的安全系数，且大于钢筋混凝土构件的安全系数 1.01～1.08。表明本规程条文中的公式具有足够的安全性。

因管片纵向钢筋配置较少，所以不考虑纵筋配筋率对受剪承载力的影响。

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程规定的斜截面箍筋受剪承载力的公式计算。实际上对于宽厚比较大，且配置封闭式箍筋较少的管片而言，建议不考虑箍筋的抗剪作用。若配筋设计中按梁构件一样配置封闭箍筋，可以考虑箍筋的抗剪承载力。

6.2.7～6.2.8 局部受压承载力计算，因钢纤维混凝土抗压强度取

同级混凝土抗压强度，因此，不考虑钢纤维对局部受压承载力提高的影响。

6.3 钢筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态验算

6.3.2 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，得到条文中公式（6.3.2-1）。

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，用式（6.3.2-1）～式（6.3.2-3）计算在设计承载力条件下的裂缝宽度，得出 α_{f} 的数值与钢纤维掺量及钢纤维特征值有关，将其综合为钢纤维混凝土极限状态抗拉强度标准值与混凝土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 α_{f} 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 α_{f} 约在 0.13～0.40 之间，与德国试验结果较为吻合。

7 无筋钢纤维混凝土管片承载能力计算

7.1 设计基本规定

7.1.2~7.1.4 无筋钢纤维混凝土管片为满足在长期荷载作用下正常使用极限状态的承载能力，必须要有足够的裂后抗拉强度，裂缝宽度才不继续扩展且承载力不降低。因此要求用于无筋钢纤维混凝土管片的材料应该符合应力应变硬化模型，且极限状态承载能力大于正常使用极限状态承载力。对于在腐蚀环境下无筋钢纤维混凝土管片的承载能力，需要经过试验验证满足裂后承载力不降低的规定方可使用。

7.1.5 无筋钢纤维混凝土管片无需计算裂缝宽度，只是在允许的裂缝宽度条件下满足正常使用极限状态承载力验算即可。

7.1.6 通过本规程第 9 章施工各个环节承载力验算才允许使用。当不能满足上述条件之一时，可以通过调整钢纤维掺量，调整混凝土强度等级或增加构造钢筋使其满足设计和施工要求。但需要考虑经济效益和生产制造的便捷性。

7.2 正截面承载能力极限状态计算

7.2.1 借鉴《混凝土结构设计规程》GB50010 对受压柱承载力计算的设计规定制定的。

7.2.2 该阶段为全截面受压的计算式。中性轴到截面顶端的距离由 h 变化为x'，$x'>h$,。在（$x'-h$）的范围内仍然符合等效压应力的基本假定。

将式（7.2.2-3）代入式(7.2.2-1)计算得x'。

该节的计算公式先后被约 60 根大梁和约 40 根构件的试验结果验证。得到约 90%的试验承载力大于用强度平均值得到的计算承载力。证明该章计算式安全可靠。同时用计算式（7.2.2-1）、式（7.2.2-2）在同等强度条件下按本规程附录 C 绘制的包络线也有一致的分布形态。如图 7.2。

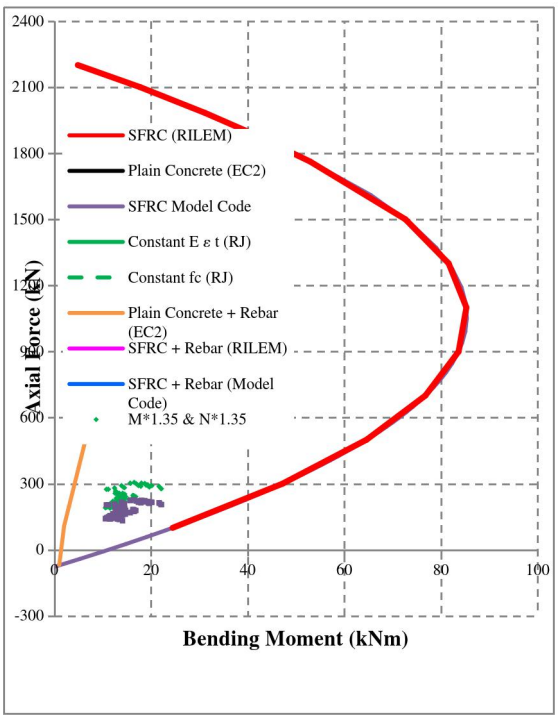


图 7.2 本章公式计算结果与双矩形承载力包络线的比较

7.2.3 借鉴《混凝土结构设计规程》GB50010 对素混凝土承载力设计规定制定的。考虑到钢纤维混凝土对抗拉强度的提高。

将式（7.2.2-3）代入式(7.2.2-1)计算得x'。（该句应放入条文说明中）

7.2.4 无筋钢纤维混凝土斜截面承载力计算方法借鉴欧洲规程《EN1992-1》和《Rilem TC162-Tdf》。经过 12 根大梁剪切承载力验算结果表明。按式（7.4-1）计算的承载力与试验结果对比有 2.0~2.4 倍的安全系数。证明计算公式可靠。

7.3 正常使用极限状态验算

7.3.1

1 对于允许开裂，当轴力设计值符合式（7.3.1-1）时：随着轴力的变化，受压区边缘应力逐步由 0 变化为抗压强度标准值，压应力为三角形分布。受拉区应力始终为正常使用极限状态抗拉强度标准值，为矩形分布。受压区边缘应力由截面的应变状态按式（7.3.1-4）计算所得，计算过程如式(7.3-1)。

$$f_{\mathrm{fcx}} = E_{\mathrm{c}}\varepsilon_{\mathrm{cx}} = \frac{f_{\mathrm{fck}}}{\varepsilon_{\mathrm{cs}}}\,0.8\varepsilon_{\mathrm{fts}}\frac{h-x_{\mathrm{t}}}{x_{\mathrm{t}}} = \frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}(h-x_{\mathrm{t}})}{\varepsilon_{\mathrm{cs}}x_{\mathrm{t}}} \tag{7.3-1}$$

达到临界状态时，截面的应变：$w_{\mathrm{s}} = 0.2\mathrm{mm}$；当$h = 300\mathrm{mm}$时，$\varepsilon_{\mathrm{fts}} = 0.067\%$；$\varepsilon_{\mathrm{cmax}} = 0.2\%$；可求出临界状态时的受拉区高度

x_t：

$$x_t=\frac{0.8\frac{w_s}{h}}{0.8\frac{w_s}{h}+0.8\varepsilon_{cmax}}h=0.25h \tag{7.3-2}$$

带入条文中式(7.3.1-1)，得到第一阶段的设计轴力界限，如式(7.3-3)：

$$N_{fk}\le\frac{0.8f_{fck}b(h-x_t)}{2}-0.8f_{ftsk}x_tb=(0.31875f_{fck}-0.2125f_{ftsk})bh \tag{7.3-3}$$

满足该条件时采用第一阶段公式。

2 承载力检算步骤

1）按本规程附录 B 的规定，计算正常使用极限状态下钢纤维混凝土的抗拉强度的标准值 f_{ftsk} 。

2）判断设计轴力满足条文中式（7.3.1-1）时，采用该阶段计算式；

3）将条文中式（7.3.1-4）带入式（7.3.1-2），计算受拉区高度 x_t。推导过程如下。

$$f_{fcsx}=E_c\varepsilon_{cx}=\frac{f_{fck}}{\varepsilon_{cs}}0.8\varepsilon_{fts}\frac{h-x_t}{x_t}=\frac{0.8f_{fck}\varepsilon_{fts}(h-x_t)}{\varepsilon_{cs}x_t}$$

式中

$$\varepsilon_{cs}=0.2\%;\varepsilon_{fts}=\frac{0.2mm}{h}=0.067\%$$

$$N_{\mathrm{fk}}=\frac{f_{\mathrm{fcsx}}b(h-x_{\mathrm{t}})}{2}-0.8f_{\mathrm{ftsk}}bx_{\mathrm{t}}$$

$$=\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}(h-x_{\mathrm{t}})^2}{2\varepsilon_{\mathrm{cs}}x_{\mathrm{t}}}b-0.8f_{\mathrm{ftsk}}bx_{\mathrm{t}}$$

$$0=\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}(h-x_{\mathrm{t}})^2}{2\varepsilon_{\mathrm{cs}}}b-0.8f_{\mathrm{ftsk}}bx_{\mathrm{t}}{}^2-Nx_{\mathrm{t}}$$

$$=\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}(h^2-2hx_{\mathrm{t}}+x_{\mathrm{t}}{}^2)}{2\varepsilon_{\mathrm{cs}}}-0.8f_{\mathrm{ftsk}}x_{\mathrm{t}}{}^2-\frac{Nx_{\mathrm{t}}}{b}$$

$$=(\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}}{2\varepsilon_{\mathrm{cs}}}-0.8f_{\mathrm{ftsk}})x_{\mathrm{t}}{}^2-(\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}h}{\varepsilon_{\mathrm{cs}}}+\frac{N}{b})x_{\mathrm{t}}+\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}}{2\varepsilon_{\mathrm{cs}}}h^2$$

$$A=\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}}{2\varepsilon_{\mathrm{cs}}}-0.8f_{\mathrm{ftsk}};\quad B=-(\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}h}{\varepsilon_{\mathrm{cs}}}+\frac{N}{b});\quad C=\frac{0.8f_{\mathrm{fck}}\varepsilon_{\mathrm{fts}}}{2\varepsilon_{\mathrm{cs}}}h^2$$

则 $$x_{\mathrm{t}}=\frac{-B-\sqrt{(B^2-4AC)}}{2A} \tag{7.3-4}$$

4）将 x_{t} 和 f_{fcx} 带入式（7.3.1-4）计算管片弯矩承载力 $M_{\mathrm{fu}}=N_{\mathrm{fu}}e_{\mathrm{i}}$，如果计算 M_{fu} 比设计值大，则满足设计要求。

7.3.2 当裂缝宽度不大于 0.2mm，且轴力符合式（7.3.2-1）时，该阶段受压区高度为设计轴力的函数，直至全截面受压。

该章的计算公式先后被约 60 大梁和约 40 个构件的试验结果验证。得到约 90%的试验承载力大于用试验强度值得到的计算承载力。证明该章计算式安全可靠。

8 构造规定

8.1 一般规定

8.1.1～8.1.3 钢纤维管片的主截面和主梁，对于设计荷载而言是一种主体性的结构构件，应有必要的强度和刚度，在加工和施工时必须确保形状和尺寸，以免产生不良变形或破坏，同时还必须充分考虑防水性。

8.1.5 钢纤维管片环宜由数块标准块、两块邻接块和一块封顶块组成。从过去的经验及实际运用情况来看，根据管片环外径，大断面铁路隧道多分为 6～9 块，公路隧道中多为 9～11 块，给排水及电力通信等中小断面隧道多为 4～7 块。

8.1.6 从便于搬运、组装以及在隧道曲线段上的施工，考虑盾尾长度等条件下，管片宽度小一些较好。但是，从降低隧道总长的管片制造成本，减少易出现漏水等缺陷的接头部数量、提高施工速度等方面考虑，则此宽度大一些为好。因此，管片宽度应根据隧道的断面，结合实际施工经验，选择在经济性、施工性方面较合理的尺寸。

8.2 管片构造

8.2.4 钢纤维管片接头所采用的基本结构形式主要就是螺栓接头

结构，这是一种利用螺栓将接头板紧固起来，将管片环组装起来的抗拉连接结构。

对有螺栓接头的钢筋钢纤维管片环按刚度均匀环对待时，要考虑将管片进行错缝组装。一般对管片接头也考虑为与管片接头具有相似的结构。

如果螺栓孔径比螺栓直径大的太多，根据管片情况会出现较大的错位，此时施工荷载的影响会变得较大，应该加以注意。管片组装用的螺栓可分为管片间环向连接螺栓和管片环间纵向连接螺栓。接头通常是将数个螺栓设置为 1 排或 2 排。当管片厚度较大时管片连接螺栓可设置在 1 排上，当厚度较大时，为确保强度和刚度，有时会设置 2 排。管片组装时，应注意不要给螺栓的紧固作用造成困难，同时还要考虑其配置不会损坏管片的可制作性，不降低防水效果，同时避免局部强度和刚度的降低。

8.2.5 目前，根据国外完成的有筋、无筋钢纤维混凝土钢纤维管片的统计数据，钢纤维最高掺量 60kg/m^3，钢纤维最低掺量不低于 20kg/m^3。

9 施工阶段承载力验算

9.1 一般规定

9.1.1～9.1.4 钢纤维管片的生产和临时荷载，包括管片从预制阶段到在盾构内拼装的所有荷载工况。通过脱模、堆放、运输及吊装阶段所产生的内力对钢筋钢纤维管片进行设计，在这些阶段的生产和临时荷载作用下，管片产生弯矩但不产生轴力。

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》，确定对管片进行脱模、堆放、运输、吊运等阶段的临时施工荷载承载力的验算方法。

9.2 临时荷载验算

9.2.1 钢纤维管片脱模阶段主要是脱模吊运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。

钢纤维管片脱模阶段最大弯矩的计算是将管片作为悬臂梁受力状态，并忽略吸盘尺寸的影响，偏于安全的选择管片水平投影长度的一半作为自由端长度。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《混凝土结构设计规程》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。

9.2.2~9.2.4 在钢纤维混凝土管片达到 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。

如图 8.2.2 所示的木块用来支撑堆体，放置于地面上以及上下两个管片之间。设计者通过调整支撑块之间的距离(图 8.2.2 中的 L)或支撑块到管片自由端的长度(图 8.2.2 中的 S)来优化管片中产生的最大弯矩。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，计算模型示于图 8.2.2。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。与 8.2.1 节的荷载工况相似，初期堆放阶段最关键的设计参数也是四小时龄期时的强度设计值。

钢纤维管片堆放阶段不产生轴力，因此只需要检算不利截面位置处的最大弯矩和剪力。

钢纤维混凝土管片脱模及初期堆放阶段的检验需要考虑钢筋钢纤维混凝土的早期强度。各阶段最小立方体抗压强度和抗拉强度标准值分别为：

脱模：$f_{\mathrm{fck}} = 20MPa$；$f_{\mathrm{fctk}} = 1.54MPa$

初期堆放：$f_{\mathrm{fck}} = 20MPa$；$f_{\mathrm{fctk}} = 1.54MPa$

运输、堆放及安装：$f_{\mathrm{fck}} = 40MPa$；$f_{\mathrm{fct}} = 2.64MPa$

9.2.5 钢纤维混凝土轴心抗拉强度是由立方体强度按照国家标准《混凝土设计规程》GB50010 的换算规律计算的。考虑了 1.5 的工作条件系数。

参考《fib model code for concrete structures 2010》所述，利用简化刚塑性模型可得式(8.2.5)。

9.3 顶推力计算

9.3.1 盾构机在掘进过程中，通过油缸撑靴将推力传递到钢纤维混凝土管片上。作用在钢纤维混凝土管片上的集中荷载会在油缸撑靴下方产生拉应力，并在中间产生劈拉应力。

通过盾构机掘进所需合力对千斤顶推力进行预估，这些力包括在岩石中的掘进力，盾壳和地层的摩擦力，对后齿轮的牵引力。可以通过隧道半径、岩石强度和刀具特性来推算岩层推力。对于软土隧道中可基于作用在开挖面上的土体或泥浆压力来计算盾构掘进力。一旦得到相应地层条件所需千斤顶推力，将总推力除以千斤顶组数就能确定每组千斤顶上的平均推力。而当盾构机在曲率较大的曲线隧道中推进时，必须考虑曲线隧道凸侧的千斤顶推力比凹侧要高的情况，通常对凸侧的千斤顶推力加倍。该工况的荷载分项系数取为 1.2，计算比较复杂，建议用二维或三维有限元模拟计算进行承载力验算。

本规程径向和切向破裂拉应力检算公式（8.3.2-3～8.3.2-6）主要参考了基于极限状态法的《German Tuneling Committee》

（2013）的规定。

9.3.2 根据沈阳地铁和其他一些地铁选用的盾构机推进参数，按条文给出的公式计算结果表明，径向破裂拉应力和切向破裂拉应力均小于钢纤维混凝土抗拉强度设计值。千斤顶顶推压应力小于局部荷载作用下钢纤维混凝土抗压强度设计值，并考虑了钢纤维混凝土管片是或否设置榫槽情况下的验算。

10 管片制造与施工

10.1 配合比设计及拌合物

10.1.1 考虑各生产单位的生产方式不同，有的企业采用固定模位生产，需要运输车运送钢纤维混凝土到指定位置后再浇筑。如果钢纤维混凝土坍落度过小，会影响钢纤维混凝土流动性，造成生产困难；如果钢纤维混凝土坍落度过大，会导致钢纤维混凝土初凝时间延后，钢纤维混凝土抹面时间也会相对延后，造成生产效率降低，综合以上因素，混凝土的坍落度不宜大于 120mm。

10.2 材料投放和搅拌

10.2.1 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；

10.2.2 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。

10.3 浇筑、振捣及养护

10.3.1 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。

10.4 管片施工

10.4.1 钢筋钢纤维混凝土管片在运输中要避免碰撞、摔落及与叉车、混凝土构件等的刚性接触，避免造成损坏。其他注意要点同普通钢筋混凝土管片。

10.5 检验和验收

本节规定的钢纤维混凝土、钢筋和预埋件、模具、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程相关规定外，多是与本规程内容联系密切的检验与验收项目，是经过大量实践总结得到的。

附录 A 残余抗弯拉强度测试方法（切口梁法）

A.0.1 分位数系 k_s 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。

附录 B 钢纤维混凝土构件设计不同极限状态抗拉强度

B.0.1　本附录的概念是利用钢纤维混凝土弯曲韧性的试验结果，根据构件开裂后的力学平衡方程得出不同极限状态的抗拉强度及其对应的应变，得到简化的受拉状态下钢纤维混凝土的应力-应变关系。

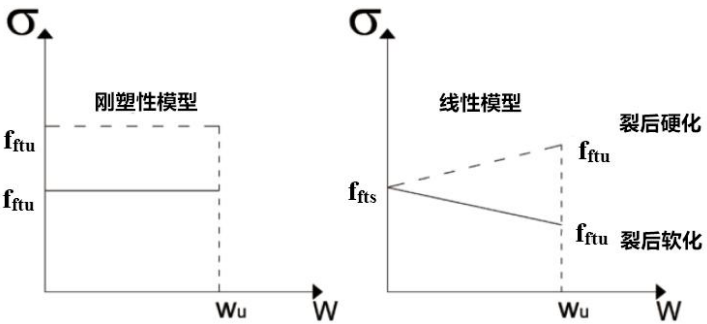
B.0.2　通常能有效抗压的素混凝土都同样适用于钢纤维混凝土。在受压状态下钢纤维能改善混凝土的脆性，特别是高性能和超高性能混凝土。根据试验结果钢纤维混凝土的抗压强度和弹性模量与同级混凝土相比提高不明显，因此，受压状态的应力-应变关系可按国家标准《混凝土结构设计规程》（GB50010）的规定采用普通混凝土的应力-应变关系。

B.0.3　提高抗拉强度及抗开裂性能是钢纤维混凝土最重要的一个特性。由于钢纤维混凝土试件的轴心抗拉试验及轴拉应力-应变全曲线在通常掺量范围内实施难度较大，采用切口梁弯曲实验（见本标准附录 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，获得构件开裂后不同开口位移与抗弯拉应力的对应关系。即可根据不同工程设计规程需求，确定不同承载力极限状态相应的 σ_B 、σ_C 的含义。

B.0.4 极限状态抗拉强度参考欧洲规程《model code2010》的本

构关系计算得到。

从切口梁弯曲试验得出弯曲受拉构件的应力-裂缝张开的本构关系，简化为开裂后的刚-塑模型或线性模型，线性模型分硬化或软化模型，如说明图 B.0.4-1 所示。

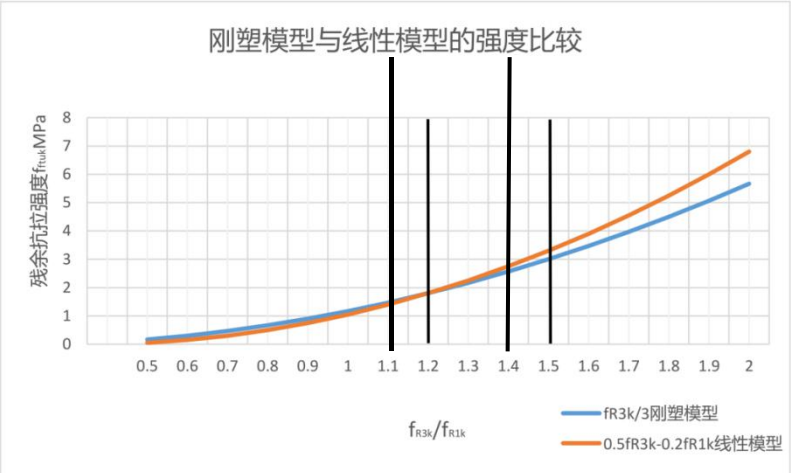


（a）刚塑性模型　　（b）线性模型

说明图 B.0.4-1 简化的裂后应力-裂缝张开位移关系

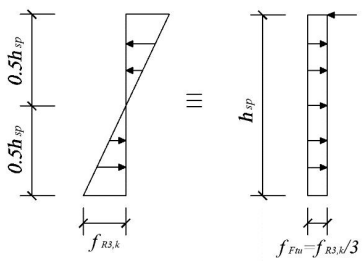
根据 13 组、每组样本不低于 6 个试件的切口梁试验结果，并结合国外的试验数据分析，得出用刚塑性模型和用线性模型计算的 f_{ftuk}。

说明图 B.0.4-2 中可以看出，f_{r3k}/f_{r1k} 小于 1.5 可以采用线性或刚塑性模型，f_{r3k}/f_{r1k} 大于 1.5 为安全起见，建议采用刚塑性模型。因此，设计时可自由选用刚塑性或线性本构模型。



说明图 B.0.4-2 用刚塑性模型和用线性模型计算的 f_{ftuk}

承载能力极限状态时，假定所有压力集中在钢纤维混凝土截面的顶部，这一假设是严格的刚-塑性模型，采用静态等效值考虑：得承载能力极限状态的应力分布如说明图 B.0.4-3。



说明图 **B**.0.4-3 承载力极限状态截面内力计算简化模型

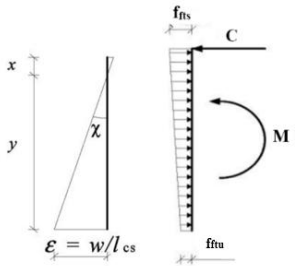
根据平衡方程：

$$M_{\mathrm{u}} = \frac{f_{\mathrm{R3k}} b h_{\mathrm{sp}}^2}{6} = \frac{f_{\mathrm{ftuk}} b h_{\mathrm{sp}}^2}{2}$$

则得出承载力极限状态抗拉强度标准值的计算式（B.0.4-2）。

公式（B.0.4-2）建立在理想的刚塑性应力分布模型上，而实

际情况应力分布会不同，通过假定截面应力-应变分布状态如说明图 B.0.4-4，根据平衡方程推导出条文中线性模型的计算公式（B.0.4-3）。



说明图 B.0.4-4 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f_{ftu}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$\varepsilon_{\mathrm{fu}}$等于 2%或沿横截面为恒定拉伸应变分布的极限应变 $\varepsilon_{\mathrm{fu}}$等于 1%时，最大裂缝宽度可以按$w_u = l_{\mathrm{cs}}\varepsilon_{\mathrm{fu}}$计算。在任何情况下，最大裂缝宽度不得超过 2.5 毫米。

当材料在$\varepsilon_{\mathrm{Fu}} = 1\%$时表现出硬化行为时，材料被认为是应变硬化材料。

对于如条文中图 B.0.4 所示的线性模型，当承载能力极限状态允许的裂缝宽度为 2.5mm 时，得到条文中抗拉强度标准值计算式（B.0.4-8）。

对于受拉区钢纤维混凝土拉应力的分布规律，分析了不同情况：

（1）按矩形分布，f_{ftuk}按式(B.0.4-2)计算；

（2）按矩形分布，f_{ftuk}按式(B.0.4-3)计算；

（3）按线性模型成梯形分布，应力分布如条文中图 B.0.4(b)，

f_{ftuk}按式(B.0.4-3)计算，f_{ftsk}按式(B.0.4-4)计算；

（4）γ_F取 1.25。

对 8 种设计工况用强度等级为 2b～5f 范围，得到的计算结果如下：

在应力简化图形为矩形时，f_{ftu}采用线性强度的承载能力大于刚塑性强度承载力，最大值增加 3.11%，平均为 0.70%。应力简化图形为梯形的情况下，对比情况(1)的计算结果，当$f_{ftu} > f_{fts}$（硬化模型)时，承载能力为负增长，最小为-0.74%，平均为-0.35%；当$f_{ftu} < f_{fts}$（软化模型）时，承载力增加，最大为 6.31%，平均为 2.84%。因此，采用式（B.0.4-2）计算 f_{ftuk}，且受拉区采用矩形分布的应力状态计算管片的承载力是足够安全的。

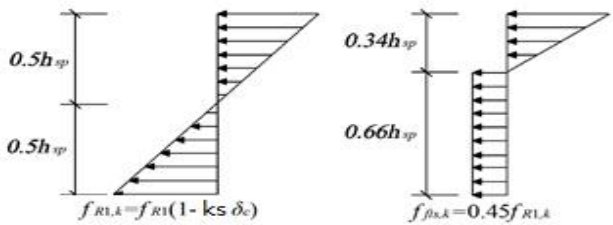
钢纤维混凝土材料分项系数γ_F的取值。借鉴国外的规程：fib Model code for concrete structures 2010、Eurocode 以及《FIBTG1.4.1_Bulletin-AF (accepted version)-FINAL》中的规定，并结合我国管片实际生产现状,采用钢纤维混凝土材料分项系数为 1.25。

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 K_f =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 K_f >1.0。对于不利受力，必须通过实验确定后应用方向因子 K_f <1.0。当板在受剪状态下考虑方向因子 K_f =0.5。

关于k_G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

$k_G = \mathrm{Min}(1 + 0.5A_{ct}, 1.2)$，式中$A_{ct}$为截面受拉区面积（$m^2$）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 k_G＞1.0。结合目前的生产水平，取 k_G=1.0。

B.0.5 当试件达到正常使用极限状态对应裂口宽度$CMOD_1$前，压应力分布为线性（说明图 B.0.5）模型。而实际情况应力分布会不同，通过假定裂缝高度建立平衡方程式如下式。



说明图**B**.0.5 正常工作极限状态截面内力计算简化模型

$$M_s = \frac{f_{R1k} b h_{sp}^2}{6} = \left(b \times 0.66 h_{sp}\right) 0.56 h_{sp} f_{ftsk}$$

推导出正常使用极限状态抗拉强度标准值 f_{ftsk}，得条文中式(B.0.4-4)。

B.0.6 **钢纤维方向因子** K_f = 1.0 适用于水平制作的梁和板构件。

B.0.7 **系数** K_G 对**超静定结构影响显著。**

附录 E 预制管片承载力检验试验方法标准

E.1 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。这种实验方法对于无筋钢纤维混凝土管片十分重要。

E.2.1~E.2.5 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。

E.2.7 根据设计承载力和偏心距，得出（图 E.2.7）平衡方程：

$\sum X=0$ $N=P$ 说明式 （E.2- 1）

$\sum Y=0$ 则 $T=F+G_1/2$ 说明式（E.2- 2）

$\sum M=Ne$

则

$$T\times(L/3+L/6)\text{-}(G_1/2)\times(\mathrm{L}/4)-P\times(H-\Delta V)-F\times(L/6)=Ne$$

说明式 (E.2- 3)

联立说明式(E.2- 1)、(E.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（E.2.7）。

E.3.3 试验过程采用分级加载，且有一定的稳压时间，

E.4.2 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。