

无筋钢纤维混凝土盾构管片技术规范（征求意见稿）

2024 年 11 月 广州

目 录

第 1 章 总则	2
第 2 章 术语与符号	3
2.1 术语	3
2.2 符号	4
第 3 章 基本规定	5
3.1 一般规定	5
3.2 极限状态设计	5
3.3 耐久性设计	6
第 4 章 材料与性能要求	8
4.1 一般规定	8
4.2 钢纤维	8
4.3 其他原材料	8
4.4 钢纤维混凝土	9
第 5 章 极限状态分析与验算	12
5.1 一般规定	12
5.2 承载能力极限状态计算	12
5.3 正常使用极限状态计算	12
第 6 章 施工阶段受力验算	15
6.1 一般规定	15
6.2 管片脱模计算	15
6.3 管片堆载及运输计算	16
6.4 管片安装顶推计算	16
6.5 管片背后注浆计算	18
第 7 章 抗震措施	19
7.1 一般规定	19
7.2 抗震措施	20
第 8 章 预制与拼装	22
8.1 一般规定	22
8.2 拌合物质量控制	22
8.3 钢纤维混凝土浇筑、振捣与搅拌	22
8.4 密封垫圈与缓冲垫圈黏贴	23
8.5 养护与脱模	23
8.6 管片施工	23
8.7 检查与验收	23
附录	23
附录 A 纤维混凝土抗弯性能试验方法	24
附录 B 钢纤维混凝土本构关系	28

第 1 章 总则

1.0.1 为规范无筋钢纤维混凝土管片设计、预制和施工，做到安全适用、绿色低碳、技术先进、经济合理，保证质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于轨道交通、公路、铁路、水利、电力、市政及地下综合管廊等盾构隧道工程无筋钢纤维混凝土管片的设计、预制和施工。

1.0.3 无筋钢纤维混凝土管片的设计、预制和施工除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

第2章 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 管片 shield segment

盾构隧道预制衬砌环的基本单元。管片的类型主要有钢筋混凝土管片、纤维混凝土管片、钢管片、铸铁管片、复合管片。

2.1.2 钢纤维 steel fiber

用钢材料经一定工艺制成、能随机分布于混凝土或砂浆中短而细的纤维。

2.1.3 钢纤维混凝土 steel fiber reinforced concrete

掺加适量、均匀分布钢纤维的混凝土。

2.1.4 钢纤维混凝土管片 steel fiber reinforced concrete shield segment

以钢纤维混凝土为主要原材料制成的管片。

2.1.5 无筋钢纤维混凝土盾构管片 fiber reinforced concrete shield segment without main rebars

无筋或不配受力钢筋的钢纤维混凝土管片

2.1.6 钢纤维长度 length of steel fiber

钢纤维外端部之间的距离。

2.1.7 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。

2.1.8 钢纤维掺量 fraction of fiber by volume

钢纤维在混凝土中的掺加量，以每立方米混凝土掺加的钢纤维的质量计量，单位为千克每立方米 (kg/m^3)。

2.1.9 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。

2.1.10 极限弯拉强度 limit of proportionality

长方体三点弯曲试件发生 CMOD 在 $0\sim 0.05\text{mm}$ 范围内最大荷载 F 对应的试件切口顶端应力，也称极限拉应力。

2.1.11 残余弯拉强度 residual flexural tensile strength

长方体三点弯曲试件受中心荷载，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。

2.1.12 钢纤维混凝土正常使用极限状态抗拉强度 steel fiber reinforced concrete tensile strength of serviceability limit state

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。

2.1.13 钢纤维混凝土承载力极限状态抗拉强度 steel fiber reinforced concrete tensile strength of ultimate limit state

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。

2.2 符号

- f_c —— 根据钢纤维混凝土强度等级；
- f_t —— 钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值；
- f_{Ri} —— 钢纤维混凝土残余弯拉强度设计值；
- f_{fctk} —— 钢纤维混凝土的比例极限弯拉强度标准值；
- f_{fc} —— 钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值；
- f_{ftu} —— 承载能力极限状态钢纤维混凝土抗拉强度设计值；
- f_{ft} —— 钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值；
- f_{R1k} —— 对应切口位移 0.5mm 时钢纤维混凝土残余弯拉强度标准值；
- 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；
- f_{fsk} —— 正常使用极限状态下钢纤维混凝土的抗拉强度标准值。

第3章 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 无筋钢纤维混凝土管片设计应包括下列内容：

- 1 管片选型、分块、厚度、环宽、楔形量、连接方式、防水；
- 2 作用分类及作用效应组合；
- 3 管片结构的极限状态设计；
- 4 管片施工阶段受力验算；
- 5 管片抗震措施；
- 6 耐久性设计；
- 7 管片防火要求。

3.1.2 无筋钢纤维混凝土管片应按正常使用阶段和施工阶段分别进行结构的强度、刚度和稳定性计算。

3.1.3 本规范采用的设计方法、可靠度和极限状态表达式应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的规定。

3.1.4 无筋钢纤维混凝土管片的设计使用年限应符合工程功能要求或相关规范规定。

3.1.5 无筋钢纤维混凝土管片适用于较为均质的地层，对于变化较大的地层采取管片加强或地层处理措施。

3.1.6 无筋钢纤维混凝土在高温环境下，内部钢纤维仍能保持其机械性能，能够最大程度减小混凝土的剥落破坏，可掺入聚丙烯微纤维并搅拌均匀，掺量宜为 1.5~3kg/m³。

3.1.7 对于无筋钢纤维混凝土管片应根据设计耐火极限和受力情况等进行耐火性能验算和防火保护设计，或采用耐火试验验证其耐火性能，高温状态下的钢纤维与混凝土基体的材料特性，应符合现行国家标准《建筑防火通用规范》GB 55037 相关规定。

3.2 极限状态设计

3.2.1 对于持久设计状况、短暂设计状况和地震设计状况，当采用内力形式表达时，无筋钢纤维混凝土管片结构构件应采用下列承载能力极限状态设计表达式：

$$\gamma_0 S \leq R \quad (3.2.1-1)$$

$$R = R_f(f_c, f_t, f_{Ri}, a_k, \dots) / \gamma_{Rd} \quad (3.2.1-2)$$

式中：

γ_0 ——结构重要性系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定确定；当对于偶然作用下的无筋钢纤维混凝土管片结构构件进行承载能力极限状态设计时，结构重要性系数不应小于 1.0。

S ——承载能力极限状态下作用组合效应的设计值，包括受弯、受剪、受拉、受压，且应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 及《盾构隧道工程设计标准》GB/T 51438 的规定确定；当对于偶然作用下的无筋钢纤维混凝土管片结构构件进行承载能力极限状态设计时， S 应按照偶然组合设计；

R ——结构构件的抗力设计值，包括受弯、受剪、受拉、受压；

$R_f(\cdot)$ ——结构构件的抗力函数，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定，并应考虑纤维的影响；

γ_{Rd} ——结构构件的抗力模型不定性系数，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定；

f_c ——根据钢纤维混凝土强度等级，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定的混凝土轴心抗压强度设计值；当对于偶然作用下的无筋钢纤维混凝土管片结构构件进行承载能力极限状态设计时，应采用强度标准值；

f_t ——钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值；当对于偶然作用下的无筋钢纤维混凝土管片结构构件进行承载能力极限状态设计时，应采用强度标准值；

a_k ——几何参数标准值；

f_{Ri} ——残余强度指标。

3.2.2 对于正常使用极限状态，应根据不同的设计要求，采用荷载的准永久组合并考虑长期作用的影响，并按下列设计表达式进行设计：

$$S \leq C \quad (3.2.2)$$

式中：

S ——正常使用极限状态荷载组合的效应设计值，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 及《盾构隧道工程设计标准》GB/T 51438 的规定确定；

C ——无筋钢纤维混凝土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 耐久性设计

3.3.1 本规范采用的耐久性设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010、《混

凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 及《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJ/T 465 的规定。

3.3.2 根据环境类别和环境作用等级的无筋钢纤维混凝土管片结构，应采取防腐蚀措施。

3.3.3 对无筋钢纤维混凝土管片外观度有较高要求时，可考虑采用带涂层的钢纤维。

3.3.4 无筋钢纤维混凝土管片应进行检漏试验，试验方法按《预制混凝土衬砌管片》GB/T 22082 规定执行。

3.3.5 有抗冻要求的无筋钢纤维混凝土管片应进行抗冻试验，试验方法按国家现行有关混凝土试验标准、方法的规定执行。

第4章 材料与性能要求

4.1 一般规定

4.1.1 钢纤维混凝土的抗压强度不宜低于CF50。

4.1.2 钢纤维混凝土的残余弯拉强度应符合工程设计要求，管片生产前应通过试验验证。

4.1.3 管片极限状态下的钢纤维混凝土抗拉强度应通过残余弯拉强度计算确定。

4.2 钢纤维

4.2.1 钢纤维应采用端钩型高强钢丝钢纤维，钢纤维掺量应满足钢纤维混凝土盾构管片的强度、韧性和耐久性等设计要求。

4.2.2 钢纤维抗拉强度不宜小于 1700MPa。用于钢纤维混凝土预制管片的钢纤维几何参数范围见表 4.2.2。

表 4.2.2 钢纤维几何参数范围

长度 或伸展长度 (mm)	直径 (或等效直径) (mm)	长径比
≥ 50	0.62~1.0	50~100

4.2.3 钢纤维的尺寸和强度质量要求按照表 4.2.3。其它质量要求参照国家标准《混凝土用钢纤维》GB/T 39147 规定。

表 4.2.3 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	≥ 50 mm	± 3 mm	$\pm 5\%$
直径 (或等效直径) d_f	> 0.5 mm	± 0.02 mm	± 0.015 mm
抗拉强度 R_m , MPa		$\pm 15\%$	$\pm 7.5\%$
长径比 λ_f		$\pm 15\%$	$\pm 7.5\%$

4.2.4 钢纤维应在混凝土拌合物中均匀分布，宜采用粘结成排型。

4.2.5 钢纤维与硬化混凝土间应具有良好的粘结性能。

4.3 其他原材料

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

4.3.2 粗、细骨料应符合现行行业标准《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。粗骨料最大公称粒径不宜大于钢纤维长度的 1/2。

4.3.3 外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119 的规定,并不得使用含氯盐的外加剂。

4.3.4 混凝土拌合用水应符合行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

4.3.5 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。

4.3.6 预埋件等其它配件应符合设计要求。

4.4 钢纤维混凝土

4.4.1 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现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定,按同强度等级混凝土标准值选用。

4.4.2 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,应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定,按同强度等级混凝土规定值选用。

4.4.3 钢纤维混凝土的轴心抗拉强度取值应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010,按同强度等级混凝土规定值选用。

4.4.4 钢纤维混凝土管片的不同承载能力极限状态的弯拉强度应通过试验确定,试件数量不低于 12 个,试验方法应符合本规程附录 A 的规定。无筋钢纤维混凝土管片的残余弯拉强度韧性等级应不低于 4c, 4c 级表示钢纤维混凝土残余弯拉强度 $\text{Mpa} 4 \leq f_{R1k} < 4.5 \text{Mpa}$, $0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1$, 残余弯拉强度韧性等级详见下表。

表 4.4.4 残余弯拉强度韧性等级表

残余弯拉强度等级	$f_{R1k}/\text{N}/\text{mm}^2$	韧性分级	f_{R3k}/f_{R1k}
4	$4 \leq f_{R1k} < 4.5$	c	$0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.1$
4.5	$4.5 \leq f_{R1k} < 5$	d	$1.1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.3$
5	$5 \leq f_{R1k} < 5.5$	e	$1.3 \leq f_{R3k}/f_{R1k}$
5.5	$5.5 \leq f_{R1k} < 6$	—	—
6	$6 \leq f_{R1k} < 6.5$	—	—
6.5	$6.5 \leq f_{R1k} < 7$	—	—

表中： f_{R1k} ——对应于切口位移 CMOD 为 0.5mm 时残余弯拉强度标准值，应符合附录 A 的规定；
 f_{R3k} ——对应于切口位移 CMOD 为 2.5mm 时残余弯拉强度标准值，应符合附录 A 的规定。

4.4.5 承载力极限状态下受拉区钢纤维混凝土抗拉强度设计值按公式(4.4.5-1)计算：

$$f_{ftu} = K_F K_G f_{ftuk} / \gamma_F \quad (4.4.5-1)$$

对于刚塑性模型：

$$f_{ftuk} = \frac{f_{R3k}}{3} \quad (4.4.5-2)$$

对于线性模型：

$$f_{ftuk} = 0.5f_{R3k} - 0.2f_{R1k} \quad (4.4.5-3)$$

式中： f_{ftu} ——承载力极限状态正截面受拉区抗拉强度设计值（MPa）；

f_{ftuk} ——承载力极限状态正截面受拉区抗拉强度标准值（MPa）；

γ_F ——承载力极限状态钢纤维混凝土材料分项系数 1.4；

k_F ——钢纤维方向系数；

k_G ——管片尺寸对钢纤维离散影响系数；

4.4.6 正常使用极限状态下受拉区抗拉强度设计值按公式(4.4.6-1)计算：

$$f_{fts} = K_F K_G f_{ftsk} / \gamma_F \quad (4.4.6-1)$$

$$f_{ftsk} = 0.45f_{R1k}$$

$$(4.4.6-2)$$

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

f_{ftsk} ——正常使用极限状态正截面受拉区抗拉强度标准值（MPa）；

γ_F ——取 $\gamma_F=1.0$ 。

4.4.7 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 当进行管片的压弯、受拉、受剪、裂缝宽度和挠度控制计算时， $k_F = 1.0$ ；
- 3 对于不属于以上情况， $k_F = 0.5$ 。

4.4.8 管片尺寸对钢纤维离散影响系数 k_G 应符合公式（4.4.8-1）计算：

$$k_G = \text{Min}(1 + 0.5A_{ct}, 1.3) \quad (4.4.8-1)$$

式中： A_{ct} 为开裂横截面或塑性铰的混凝土受拉区面积（ m^2 ）。

当进行受扭计算时 $k_G = 1.0$ 。

4.4.9 为保证钢纤维混凝土管片有足够的延性和内力重分布能力，钢纤维混凝土韧性比应满足以下要求。

$$f_{R1k}/f_{fctk} \geq 0.6 \quad (4.4.9-1)$$

式中： f_{fctk} ——钢纤维混凝土的比例极限弯拉强度标准值，按附录 A 的试验方法获得。

4.4.10 钢纤维混凝土的本构关系按本标准附录 B 确定。

4.4.11 钢纤维混凝土配合比试验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。

4.4.12 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现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定。

第5章 极限状态分析与验算

5.1 一般规定

5.1.1 无筋钢纤维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。

5.1.2 无筋钢纤维混凝土管片内径与厚度比宜介于 18 至 30 之间。

5.1.3 无筋钢纤维混凝土管片的钢纤维掺量不宜小于 $30\text{kg}/\text{m}^3$ ，且不宜大于 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 。

5.1.4 无筋钢纤维混凝土单块管片的弧长与厚度比不应大于 10。

5.1.5 盾构隧道的设计荷载及组合应符合国家标准《盾构隧道工程设计标准》GB/T 51438 及相关行业技术规范等的规定。

5.2 承载能力极限状态计算

5.2.1 无筋钢纤维混凝土管片的正截面承载力计算应符合下列规定：

1 无筋钢纤维混凝土管片正截面承载力计算，除应考虑钢纤维混凝土的抗拉作用外，尚应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定。轴心受压和小偏心受压构件正截面承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定。

2 无筋钢纤维混凝土管片受拉区钢纤维混凝土抗拉强度设计值按照本规范 4.3.6 节采用。

3 无筋钢纤维管片承载能力极限状态计算按照《钢纤维混凝土结构设计标准》(JGJ/T465)

5.2 节规定执行。

5.2.2 无筋钢纤维混凝土管片斜截面承载力计算按照《钢纤维混凝土结构设计标准》(JGJ/T465) 5.3 节规定执行。

5.2.3 无筋钢纤维混凝土管片扭曲截面承载力计算按照《钢纤维混凝土结构设计标准》(JGJ/T465) 5.4 节规定执行。

5.2.4 无筋钢纤维混凝土管片受冲切承载力计算按照《钢纤维混凝土结构设计标准》(JGJ/T465) 5.5 节规定执行。

5.2.5 无筋钢纤维混凝土管片局部受压承载力计算按照《钢纤维混凝土结构设计标准》(JGJ/T465) 5.6 节规定执行。

5.2.6 无筋钢纤维混凝土管片疲劳验算按照《钢纤维混凝土结构设计标准》(JGJ/T465) 5.7 节规定执行。

5.3 正常使用极限状态计算

5.3.1 采用反算法进行无筋钢纤维管片正常使用极限状态验算。验算时，应符合以下规定：

- 1 加载后计算截面保持平面。
- 2 混凝土与钢纤维之间完全粘结。
- 3 不计剪切变形和应力。

5.3.2 将计算截面沿高度离散为多层（上部为受压区，下部为受拉区），如图 5.3-1 所示。计算中先假设顶底拉、压应变 ε_{top} 、 ε_{bot} ，根据应变及其位置关系计算出各层应变（式 5.3.2-1），结合切口梁试验得到的钢纤维混凝土弯曲拉应力-应变关系及素混凝土压应力-应变关系，计算出对应分层应力并带入式 5.3.2-2、5.3.2-3 验证是否满足等式。如果不能满足，则重新假设应变，直至满足。假设的应力、应变应满足 5.3.3~5.3.6 的要求。

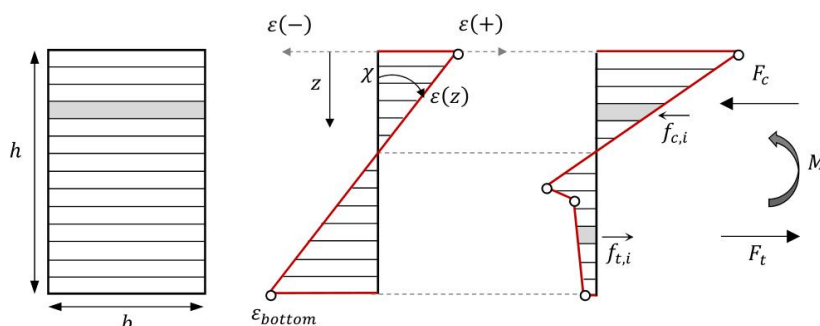


图 5.3-1 正常使用极限状态计算简图

$$\chi = \frac{\varepsilon_{top} - \varepsilon_{bot}}{h} = \frac{\varepsilon_{top} - \varepsilon(z)}{z} \quad (5.3.2-1)$$

$$N = \int_{A_c} f_{c,i} dA_{c,i} + \int_{A_t} f_{t,i} dA_{t,i} \quad (5.3.2-2)$$

$$M = \int_{A_c} z f_{c,i} dA_{c,i} + \int_{A_t} z f_{t,i} dA_{t,i} \quad (5.3.2-3)$$

式中：

N ——轴力设计值；

M ——弯矩设计值；

$f_{c,i}$ ——第*i*层压应力；

$f_{t,i}$ ——第*i*层拉应力；

$A_{c,i}$ ——第*i*层受压区面积；

$A_{t,i}$ ——第*i*层受拉区面积。

5.3.3 无筋钢纤维管片正常使用极限状态下压应力不应大于 $0.6f_{ck}$ ， f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值。

5.3.4 无筋钢纤维管片正常使用极限状态下拉应力满足 4.4.6 规定的拉应力设计值。

5.3.5 无筋钢纤维管片正常使用极限状态下拉应变不应大于 w_d/h , 其中 w_d 一般 0.2mm, h 为计算截面高度。

第6章 施工阶段受力验算

6.1 一般规定

6.1.1 管片脱模计算一般规定内容参考《钢筋钢纤维混凝土预制管片技术规程》(DB21/T 3165)相关规定。

6.1.2 管片堆叠应放置木块进行支撑,并保持上下对齐,每层支撑点与支点轴线之间应考虑 100 mm 的偏心距。

6.1.3 在管片的运输阶段,底部管片与运输车辆接触位置应设橡胶垫片。

6.1.4 千斤顶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%。当撑靴出现偏心时,需验算油缸撑靴下方产生的拉应力和中间的劈拉应力。

6.2 管片脱模计算

6.2.1 管片脱模阶段的承载力验算应符合以下要求。

1 计算模型(图 6.2-1)可简化为自重作用下的两个悬臂梁,悬臂梁长度取管片水平投影长度的一半。

2 恒荷载分项系数应为 1.4,等效静力标准值应取管片自重标准值与荷载分项系数乘积。

3 脱模阶段动力系数不宜小于 1.2。

4 截面中的最大弯矩应满足下式的规定:

$$M_d = \frac{(w + 1.6A/T)a^2}{2} \quad \#(6.2-1)$$

式中: M_d ——管片脱模过程中的最大弯矩 (kN·m);

a ——在管片脱模和吊运阶段,管片轴线到管片外边缘的距离 (mm);

w ——管片自重线荷载 (kN/m);

A ——管片内弧面积 (mm²);

T ——管片轴线投影长度 (mm)。

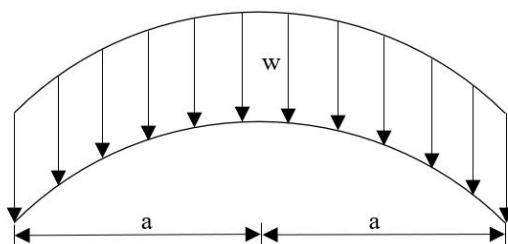


图 6.2-1 脱模阶段管片的受力分析模型

6.3 管片堆载及运输计算

- 1 当管片内弧面向上平放堆载不超过五层时无需进行受力验算。
- 2 管片堆叠时木块支撑的轴线距离 (l_0) 宜为管片投影长度的 0.5~0.6 倍, 并垂直对齐以减小由自重 (P) 引起的弯矩 (跨中和支撑处分别为 $M_{p, pos}$ 和 $M_{p, neg}$)。

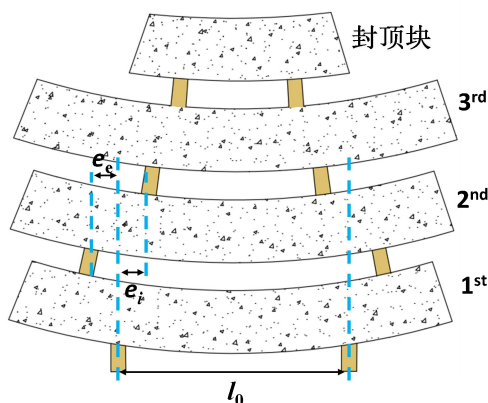


图 6.3-1 管片堆载示意图

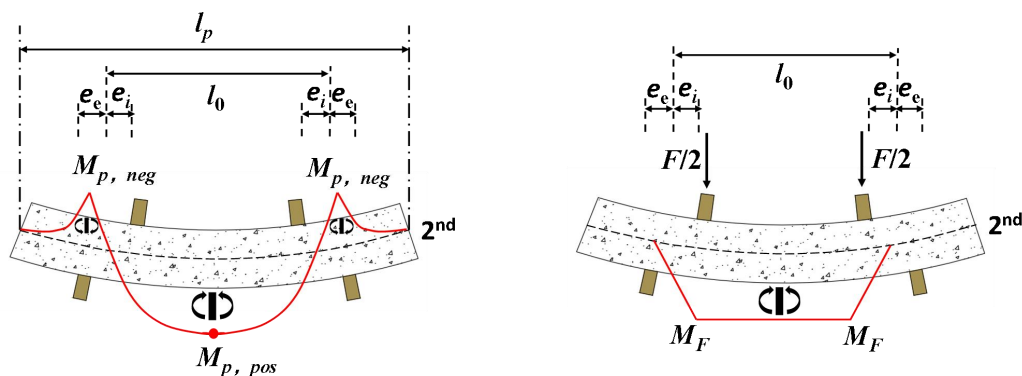


图 6.3-2 管片堆载弯矩图

- 3 管片堆载受力验算时, 必须考虑上部管片自重偏心影响下产生的力矩 (M_F) (见图 6.3-2)。
- 4 在管片堆载及运输阶段, 临时荷载的施工验算应考虑动力系数 ($\gamma_{dyn}=2.0$) 和自重荷载分项系数 ($\gamma_G=1.4$)。

6.4 管片安装顶推计算

钢纤维混凝土管片承受盾构顶推力作用下的瓶型支撑应力影响范围如图 6.4-1 所示, 管片承受盾构顶推力作用的受力分析见图 6.4-2。采用简化方法计算时可参考《全断面隧道掘进机泥水平衡盾构机》(GB/T 35019) 中相关规定。

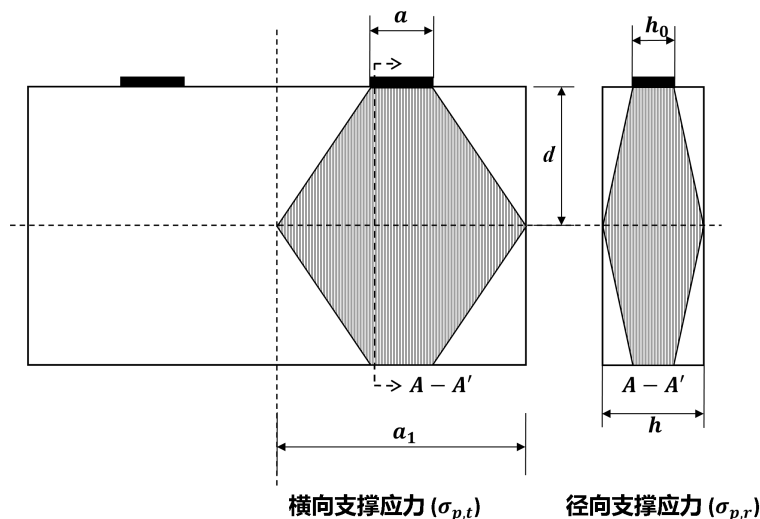


图 6.4-1 在撑靴作用下瓶型支撑应力示意图

图 6.4-1 中 a 和 h_0 分别表示千斤顶靴板长度和千斤顶靴板与管片实际接触宽度。当管片环缝面为平面时, h_0 取靴板的宽度, 当管片环缝面带凹凸榫槽时, h_0 取实际接触宽度。 a_1 和 h 分别表示相邻两组千斤顶间的距离和管片厚度。

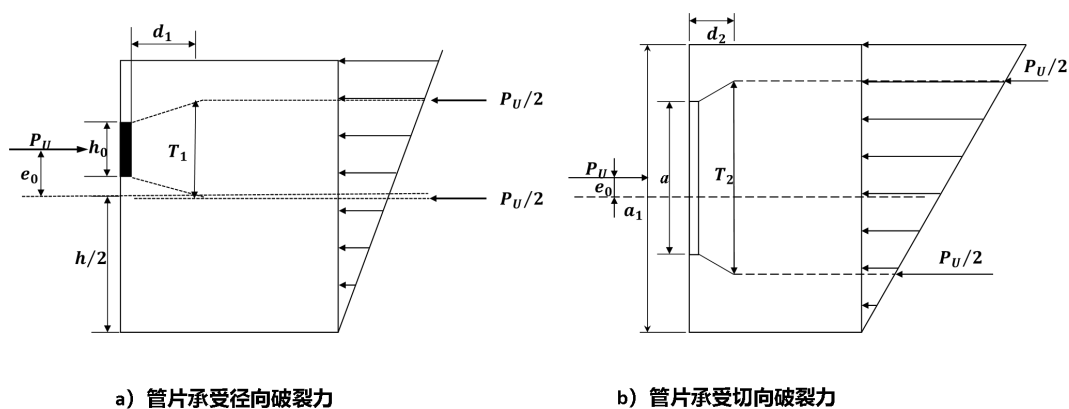


图 6.4-2 钢纤维混凝土管片承受推进力作用示意图

图 6.4-2 中 e_0 表示千斤顶荷载偏心距, 若无具体数据通常取 30mm。 d_1 和 d_2 分别表示径向破裂面和切向破裂面到千斤顶靴板作用面的距离。 P_U 表示千斤顶的最大顶推力, T_1 和 T_2 分别表示钢纤维混凝土管片在推进力作用下的径向和切向破坏荷载。 d_1 、 d_2 、 T_1 和 T_2 参照《钢筋钢纤维混凝土预制管片技术规程》(DB21/T3165) 中的方法计算。

径向最大破裂应力按下式计算:

$$\sigma_{p,r} = \frac{T_1}{\phi h_0 d_1} \leq f_{\text{ft}} \quad (6.4-1)$$

切向最大破裂应力按下式计算:

$$\sigma_{p,t} = \frac{T_2}{\phi a d_2} \leq f_{ft} \quad (6.4-2)$$

式中： ϕ ——折减系数，一般取 0.7；

f_{ft} ——钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值（MPa），参照《钢纤维混凝土结构设计标准》（JGJ/T 465）中的方法计算。

6.5 管片背后注浆计算

1. 隧道顶冠与仰拱之间径向浆液压力的垂直梯度由式（6.5-1）确定。

$$\Delta P_{g,invert} = \rho_{eq} * D_e \# \quad (6.5-1)$$

式中： ρ_{eq} ——浆液等效比重（kg/m³）；

D_e ——隧道管片衬砌外径（m）。

2. 对于自重和灌浆压力的荷载组合，荷载分项系数均为 1.25。
3. 单个衬砌环的理论注浆量应按下列公式计算：

$$Q = V\lambda$$

$$V = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)L}{4}$$

式中：Q——单个衬砌环的理论注浆量（m³）；

V——盾构施工注浆空隙体积（m³）；

λ ——注浆量充填系数（%）；

D_1 ——盾构切削外径（m）；

D_2 ——预制管片外径（m）；

L——预制管片衬砌环单环的幅宽（m）。

第 7 章 抗震措施

7.1 一般规定

7.1.1 无筋钢纤维混凝土隧道的抗震设防类别，应根据隧道遭遇地震后可能造成的人员伤亡、经济损失、社会影响及其在抗震救灾中的作用等因素确定，应符合现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB50223 的相关规定：

1 甲类工程的抗震设计应结合场地地震安全性评价结果进行专题研究，其设防标准不得低于乙类工程。

2 乙类和丙类工程地震作用应按现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB18306 规定的本地区抗震设防要求确定，或采用经地震主管部门批准的工程场地地震安全性评价的结果确定，但不应低于本地区抗震设防要求确定的地震作用。

表 7.1.1 抗震设防类别划分

抗震设防类别	定义
甲类	指使用上有特殊设施，涉及国家公共安全的重大地下结构工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果，需要进行特殊设防的地下结构
乙类	指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关地下结构，以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果，需要提高设防标准的地下结构
丙类	除上述两类以外按标准要求进行设防的地下结构

7.1.2 无筋钢纤维混凝土隧道工程进行抗震设计，应符合下列规定：

1 位于设防烈度小于 6 度地区的盾构隧道，可不进行抗震计算。

2 位于设防烈度 6-7 度地区无筋钢纤维混凝土隧道工程必须进行抗震设计，应符合现行国家标准《地下结构抗震设计标准》GB51336 的相关规定。

3 位于设防烈度大于 7 度或有特殊抗震要求的盾构隧道，其抗震设计应进行专门研究。

表 7.1.2 各类工程抗震设防措施等级

工程类别 \ 烈度	抗震设防		
	6	7	8
甲类	7	专门研究	专门研究
乙类	7	7	专门研究
丙类	6	7	专门研究

7.1.3 无筋钢纤维混凝土隧道工程的抗震性能要求应按下表划分等级。

表 7.1.3 无筋钢纤维混凝土隧道结构的抗震性能要求等级划分

等级	定义
性能要求I	地震作用下，无筋钢纤维混凝土隧道管片不受损坏或不需进行修理能保持其正常使用功能，附属设施不损坏或轻微损坏但可快速修复，结构处于线弹性工作阶段
性能要求II	地震作用下，无筋钢纤维混凝土隧道管片受轻微损伤但短期内经修复能恢复其正常使用功能，结构整体处于弹性工作阶段
性能要求III	地震作用下，无筋钢纤维混凝土隧道主体结构不出现严重破损并可经整修恢复使用，结构处于弹塑性工作阶段
性能要求IV	地震作用下，不倒塌或发生危及生命的严重破坏

7.1.4 无筋钢纤维混凝土隧道工程应按多遇地震、设计地震、罕遇地震，极罕遇地震四个地震动水准进行抗震设计，设防目标应符合表 7.1.4 要求。

表 7.1.4 无筋钢纤维混凝土隧道结构的设防水准及性能要求

抗震设防类别	抗震设防水准			
	多遇地震	基本地震	罕遇地震	极罕遇地震
甲类	性能要求I	性能要求I	性能要求II	性能要求III
乙类	性能要求I	性能要求II	性能要求III	—
丙类	性能要求II	性能要求III	性能要求IV	—

7.1.5 无筋钢纤维混凝土盾构结构施工阶段可不计地震作用影响。

7.2 抗震措施

7.2.1 无筋钢纤维混凝土管片应符合下列规定：

1 抗震等级为 I 级别的无筋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 30kg/m³；

2 无筋钢纤维混凝土管片应控制好截面尺寸，保证剪切破坏不宜先于弯曲破坏、混凝土的压溃不宜先于钢纤维的屈服、钢纤维粘结-滑移破坏不宜先于钢纤维破坏。

7.2.2 无筋钢纤维混凝土盾构隧道应具备必要的抗震承载能力、良好的变形能力和消耗地震能量的能力，且不得影响临近既有建筑、构筑物或地下结构的抗震安全性。

7.2.3 无筋钢纤维混凝土盾构隧道在周边地层或荷载发生较大变化处位置宜设变形缝或采取增强环缝变形能力的措施，提高其抗震能力。

7.2.4 无筋钢纤维混凝土盾构隧道变形缝设计应根据隧道纵向允许沉降曲率、沉降差等要求确定，并符合《地下结构抗震设计标准》GB/T51336 的有关规定，不得产生影响使用的差异沉降。

7.2.5 无筋钢纤维混凝土盾构管片的接缝构造弹性密封垫应加厚，减小地震引起的管片错台、变位。

第8章 预制与拼装

8.1 一般规定

8.1.1 无筋钢纤维管片制造、检验及验收除应遵守本章的规定外，尚应符合国家标准《预制混凝土衬砌管片》(GB/T 2208)、《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》(JGJ55)、《钢纤维混凝土标准规范》(JGT47)中的相关规定。

8.1.2 无筋钢纤维管片施工、检验及验收除应遵守本章的规定外，尚应符合国家标准《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446)中的相关规定。

8.2 拌合物质量控制

8.2.1 钢纤维混凝土配合比应符合国家标准《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。

8.2.3 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，钢纤维混凝土坍落度应控制在 50-110mm 之间，不得出现离析和泌水现象。

8.2.4 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。

8.3 钢纤维混凝土浇筑、振捣与搅拌

8.3.1 搅拌

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。钢纤维掺量允许偏差为 $\pm 1.0\%$

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。

3 钢纤维混凝土应采用强制式搅拌机拌和，钢纤维禁止首先投入搅拌机。搅拌时间不小于 150s，拌合过程中应避免钢纤维结团。

4 钢纤维应在混凝土配料过程中加入，不得在预拌混凝土搅拌车中加入钢纤维。所使用的钢纤维应均匀地分布在混凝土中，在配料和搅拌过程中不得形成结团。

5 钢纤维混凝土中钢纤维含量应采用水洗法，检验钢纤维在混凝土中的分散性满足试件最

大值、最小值与中间值之差不小于中间值的 $\pm 5\%$ 要求，且钢纤维含量最小值与最大值应在设计含量的 90%-110%之间。试验方法遵循《钢纤维混凝土》JG/T 472 中“8.3 拌合物中钢纤维含量”要求。检测批量按照每周 3 次，每次 2 组，每组 5L 钢纤维混凝土。

8.3.2 浇筑、振捣

1 浇注混凝土前，应检查模具是否清洁并清除多余的脱模油。混凝土应在搅拌后尽快入模。振捣后的混凝土应做到密实、均匀、无空隙，混凝土须平整，无蜂窝、气孔和凸起。

2 钢纤维混凝土应采用震动平台或附着振动器进行振捣成型，禁止使用人工振捣装置，破坏钢纤维在混凝土中的分布。

8.4 密封垫圈与缓冲垫圈黏贴

密封垫圈与缓冲垫圈黏贴内容参考《盾构法隧道管片用软木橡胶衬垫》GB/T 31061、《盾构管片密封垫》GB/T 18173.4 相关规定。

8.5 养护与脱模

1 管片脱模时的混凝土强度应不低于 20 MPa。

2 管片脱模起吊时，应采用真空吸盘，保持平衡起吊，不得单侧起吊或强行起吊。

3 管片养护及脱模内容参考《预制混凝土衬砌管片生产工艺技术规程》JC/T2030 相关规定。

8.6 管片施工

管片施工参考《预制混凝土衬砌管片》GB169-T22082、《纤维混凝土盾构管片》GB / T 38901、《预制混凝土衬砌管片》GB/T 22082 相关规定执行。

8.7 检查与验收

管片检查与验收参考《盾构隧道管片质量检测技术标准》55 CJJ / T 164 相关规定。

附录 A 纤维混凝土抗弯性能试验方法

A.0.1 适用范围

本附录适用于纤维混凝土切口梁的抗弯性能。本附录适用于长度不超过 60 mm 的结构型纤维，还可用于不同结构型纤维的组合。

A.0.2 试件

试件为按 GB/T 50081 规定制备的样品，规格为 150 mm×150 mm×550 mm。

A.0.3 试验仪器设备

A.3.1 加载设备应具有足够的刚度和加载能力，采用液压伺服系统，可进行闭环加载。

A.3.2 裂缝口扩展宽度(CMOD)测量可采用夹式引伸计测量，挠度测量采用位移传感器(如 LVDT)。夹式引伸计和位移传感器的量程均不应小于 10 mm，测量精度均不应低于 0.01 mm。

A.3.3 荷载传感器，测量精度不应低于 0.1 kN。

A.3.4 数据采集系统可同时采集荷载和变形数据，采集频率可根据具体的试验要求确定，不宜低于 5Hz。

A.3.5 挠度测量架，包括水平安装的刚性支架、转动固定端等。

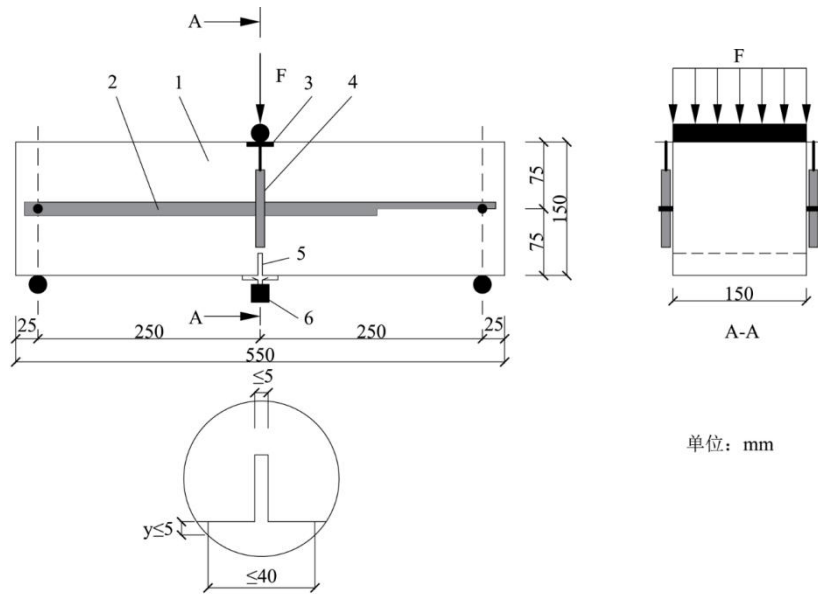
A.0.4 试验方法

A.4.1 试验前先在试件的侧面跨中位置进行切口，切口宽度不应大于 5 mm，切口深度为 (25 ± 1) mm。

A.4.2 将试件无偏心地放置于试验支座上，以试件切口面作为支撑面。采用两分点加载，作用点距支座距离为二分之一跨度。

A.4.3 试验可同时测量裂缝口扩展宽度 CMOD 或跨中挠度 δ ，也可单独测量其中之一。

A.4.4 试验装置如图 A.4.4 所示,在试件跨中位置底部切口处中央安装夹式引伸计测量裂缝口扩展宽度 CMOD。采用钢架和转动固定端固定位移传感器测量跨中挠度 δ 。



说明：

- | | |
|-----------------|----------|
| 1——试件； | 4——位移传感器 |
| 2——挠度测量架（铝制或钢质） | 5——切口 |
| 3——挡板（铝制或钢质） | 6——夹式引伸计 |

图 A.4.4 试验装置示意图

A.4.5 加载前应进行预加载，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.4.6 加载过程：当采用挠度控制时，加载速率为 0.2 mm/min；当采用测试 CMOD 时，应首先以 0.05 mm/min 速率进行加载，当 CMOD 或者 δ 达到 0.1 mm 后，调整速率为 0.2 mm/min。

A.4.7 当试件裂缝口扩展宽度 CMOD 达到 4 mm，或者挠度值 δ 达到 3.5 mm，或者试件破坏时，可终止试验。

A.4.8 若试件不在切口处断裂，则舍弃该测试结果。

A.0.5 试验结果处理

A.5.1 根据试验数据，绘制荷载-裂缝口扩展宽度（ F -CMOD）曲线或者荷载-挠度（ F - δ ）曲线。

A.5.2 所绘制的 F -CMOD 曲线如图 A.5.2-1 所示，所绘制的 F - δ 曲线如图 A.5.2-2 所示。

A.5.3 F_L 为裂缝口扩展宽度 CMOD 或者挠度值 δ 在 0 mm~0.05mm 范围内的荷载最大值。

A.5.4 CMOD₁、CMOD₂、CMOD₃、CMOD₄ 或者 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 对应的残余弯拉荷载分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 。CMOD 的取值以及其与 δ 的对应关系见表 A.5.4。

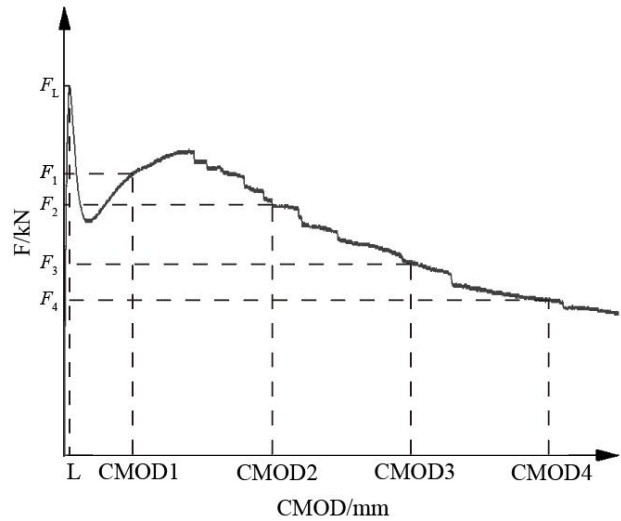


图 A.5.4-1 荷载-裂缝口扩展宽度曲线

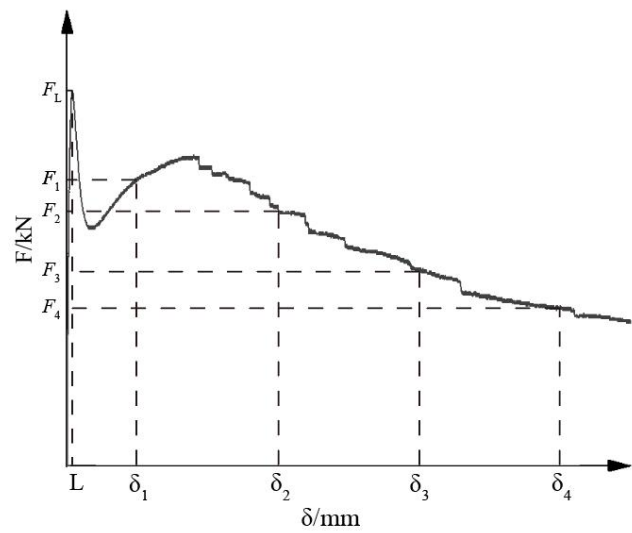


图 A.5.2-2 荷载-挠度曲线

表 A.5.4 CMOD 与 δ 的对应关系

CMOD/mm		δ /mm	
CMOD ₁	0.5	δ_1	0.47
CMOD ₂	1.5	δ_2	1.32
CMOD ₃	2.5	δ_3	2.17
CMOD ₄	3.5	δ_4	3.02

A.5.5 一般情况下， F -CMOD 曲线和 F - δ 曲线对应的 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 数值相近。当两者存在较大偏差时，以 F -CMOD 曲线为准。

A.5.6 试件抗弯比例极限 f_L 和残余弯拉强度 f_{Rj} 的计算方法，按式（A.5.6-1）和式（A.5.6-2）：

$$f_L = \frac{3F_L L}{2bh_{sp}^2} \quad (A.5.6-1)$$

$$f_{R,j} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (A.5.6-2)$$

式中:

f_L ——纤维混凝土的抗弯比例极限 (MPa);

$f_{R,j}$ ——对应于 CMOD 为 $CMOD_j$ 或 δ 为 δ_j 的残余抗抗弯强度 (MPa);

F_L —— f_L 对应的荷载 (kN);

F_j —— $f_{R,j}$ 对应的荷载 (kN);

l ——试件跨度 (mm);

b ——试件宽度 (mm);

h_{sp} ——跨中截面未切口高度 (mm)。

附录 B 钢纤维混凝土本构关系

B.0.1 纤维混凝土的受压应力-应变关系，应参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，按同强度等级普通混凝土的受压应力-应变关系确定。

B.0.2 纤维混凝土简化受拉应力-应变关系应由切口梁抗弯性能试验推导，如图 E.0.2.1 所示。

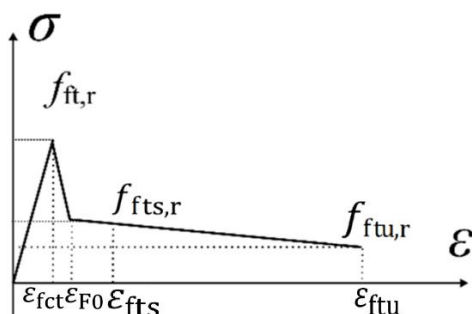


图 B.0.2.1 钢纤维混凝土受拉应力—应变关系

图中：

$f_{ft,r}$ ——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取设计值、标准值或平均值（MPa）；

ε_{fct} ——钢纤维混凝土的开裂应变；

ε_{f0} ——钢纤维混凝土裂后转折点应变；

ε_{fts} ——钢纤维混凝土正常使用极限状态下的受拉应变值；

ε_{ftu} ——钢纤维混凝土承载力极限状态下的受拉应变限值，截面拉应力均匀分布的情况下取 1%，截面拉应力不均匀分布的情况下取 2%；

$f_{fts,r}$ ——对应于应变 ε_{fts} 时钢纤维混凝土的残余抗拉强度代表值，其值可根据实际结构分析需要分别取设计值、标准值或平均值（MPa）。

$f_{ftu,r}$ ——对应于应变 ε_{ftu} 时钢纤维混凝土残余抗拉强度代表值，其值可根据实际结构分析需要分别取设计值、标准值或平均值（MPa）；

当 $\varepsilon \leq \varepsilon_{fct}$ 时：

$$f_{ft,r} = E_{fct} \varepsilon_{fct} \quad (\text{B.0.2-1})$$

上式中：

E_{fct} ——纤维混凝土的受拉弹性模量（MPa）。

当 $\varepsilon > \varepsilon_{\text{fct}}$ 时:

按刚-塑性模型如图 B. 0. 2. 2(a) 所示, 钢纤维混凝土残余抗拉强度代表值 $f_{\text{ftu}, \text{r}}$ 根据下式(B. 0. 2-2) 计算。

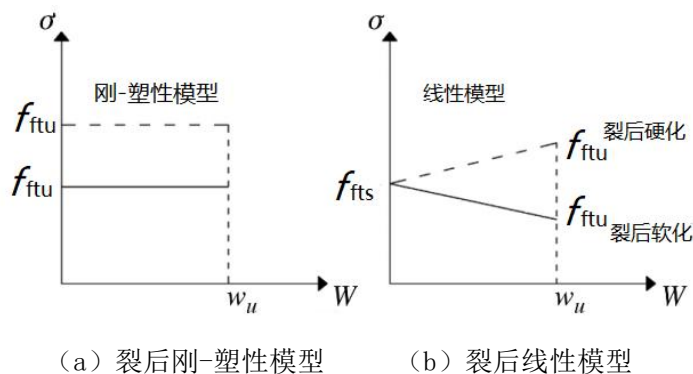


图 B. 0. 2. 2 简化的钢纤维混凝土裂后本构模型图

$$f_{\text{ftu}, \text{r}} = \frac{f_{\text{R3}}}{3} \quad (\text{B. 0. 2-2})$$

上式中:

f_{R3} ——对应于切口位移 CMOD 为 2.5mm 时残余弯拉强度代表值, 应符合附录 A 的规定,

其值可根据实际结构分析需要分别取设计值、标准值或平均值 (MPa)。

按线性模型如图 B. 0. 2. 2(b) 所示, 钢纤维混凝土残余抗拉强度代表值 $f_{\text{fts}, \text{r}}$, $f_{\text{ftu}, \text{r}}$ 根据下式 (B. 0. 2-3) 和 (B. 0. 2-4) 计算。

$$f_{\text{fts}, \text{r}} = 0.45 f_{\text{R1}} \quad (\text{B. 0. 2-3})$$

$$f_{\text{ftu}, \text{r}} = f_{\text{fts}, \text{r}} - \frac{w_u}{2.5} (f_{\text{fts}, \text{r}} - 0.5 f_{\text{R3}} + 0.2 f_{\text{R1}}) \geq 0 \quad (\text{B. 0. 2-4})$$

$$\varepsilon_{\text{F0}} = 2 \varepsilon_{\text{fct}} \quad (\text{B. 0. 2-5})$$

$$\varepsilon_{\text{fts}} = \frac{\text{CMOD1}}{l_{\text{cs}}} \quad (\text{B. 0. 2-6})$$

$$\varepsilon_{\text{ftu}} = \frac{w_u}{l_{\text{cs}}} \quad (\text{B. 0. 2-7})$$

式中:

CMOD1——对应于切口位移 CMOD₁=0.5mm;

w_u ——承载能力极限状态设计时结构允许的最大裂缝宽度 (mm), 不得大于 2.5 mm;

l_{cs} ——结构特征长度 (mm), 在钢纤维混凝土构件受弯或压弯、拉弯状态下, 可假设 $l_{\text{cs}} =$ 截面高度 h 。