

基于裂后残余弯拉强度理论的 钢纤维混凝土管片设计及应用

Design and Applications of SFRC Segments Based on Post-
crack Residual Flexural Tension Strength

北京城建设计发展集团股份有限公司

姓名：鲁卫东





1. 基于裂后弯拉强度的钢纤维混凝土设计理论

Design Method of SFRC

2. 目前盾构隧道钢筋混凝土管片应用的难题

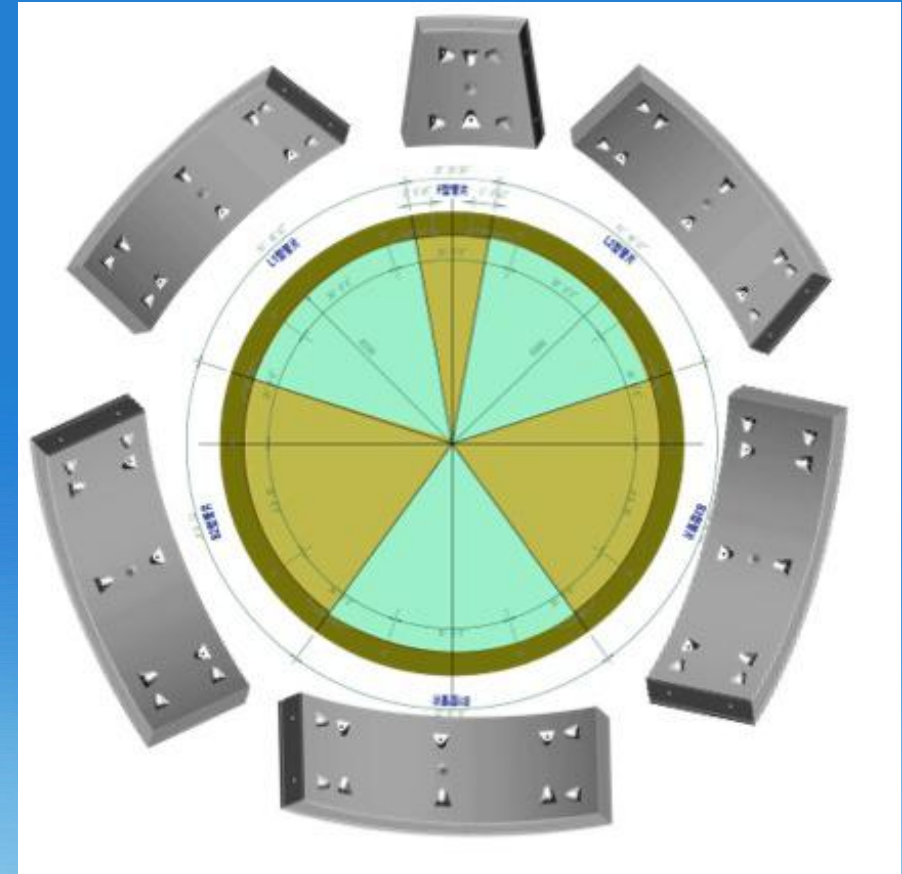
Problems among current applications

3. 钢筋钢纤维混凝土管片的设计与应用（沈阳地铁）

Design and Applications of SFRC+Rebar Segments

4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用（深圳地铁）

Design and Applications of SFRC only Segments





1. 基于裂后弯拉强度理论的钢纤维混凝土设计方法

Design Method of SFRC Structures Based on Post-crack Residual Flexural Tension Strength

- 钢纤维材料性能发展 Development of the SF material
 - 钢纤维类型多，增强性能不同
 - 多用于大体积混凝土、工业地坪、路面铺装
 - 高强钢丝切断型钢纤维的发展，可用于提高承载力（高强度 强锚固 高延展性）
 - 软化及硬化性能
 - 混凝土配比、拌合工艺

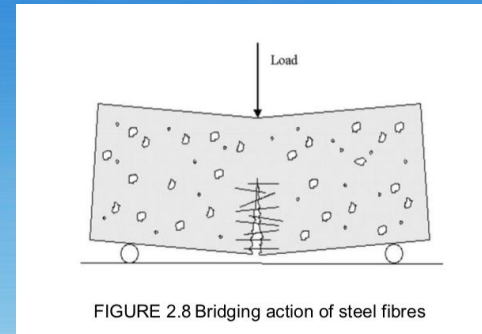
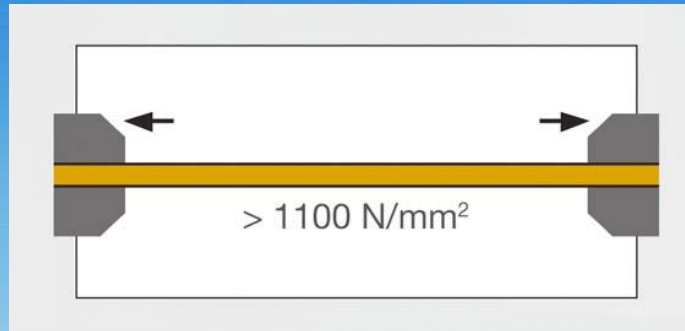
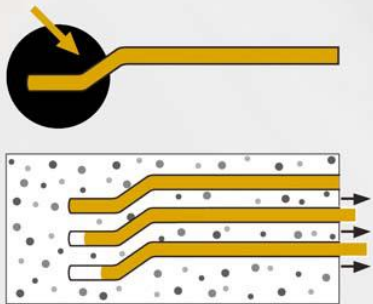


FIGURE 2.8 Bridging action of steel fibres

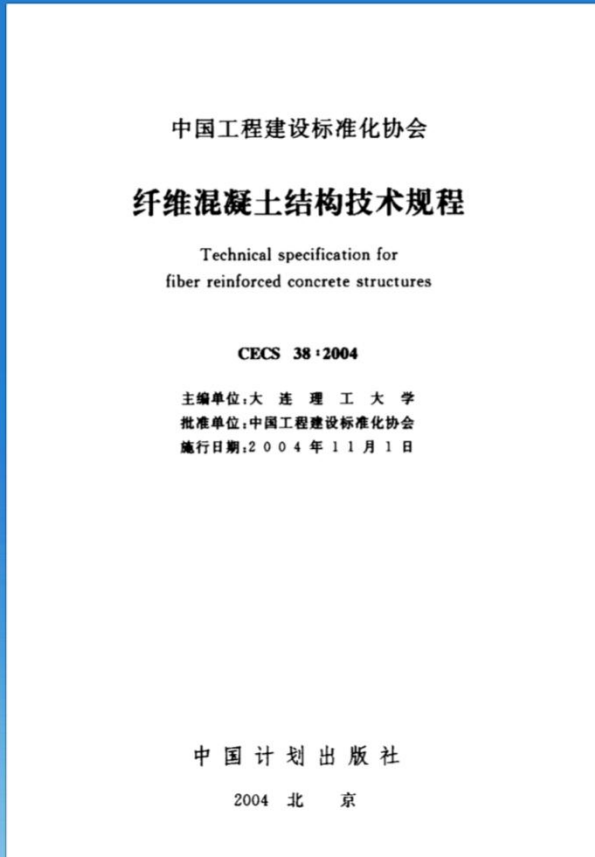




1. 基于裂后弯拉强度理论的钢纤维混凝土设计方法

Design Method of SFRC Structures Based on Post-crack Residual Flexural Tension Strength

- 钢纤维材料性能发展 Development of the SF material
- 现行中国设计规范-基于试验的钢纤维影响系数法 Current Chinese design code based on test
 - 应力应变本构关系、高强纤维作用
 - 裂后抗拉强度、标准试验方法、纤维增强作用小



3.3.5 钢纤维混凝土强度的标准值和设计值可按下列规定采用:

- 1 钢纤维混凝土轴心抗压强度的标准值和设计值,可根据钢纤维混凝土的强度等级按现行有关混凝土结构设计规范的规定采用。
- 2 钢纤维混凝土抗拉强度的标准值和设计值可分别按下列公式计算确定:

$$f_{tk} = f_{tk}(1 + \alpha_1 \lambda_f) \quad (3.3.5-1)$$

$$f_{ti} = f_{ti}(1 + \alpha_1 \lambda_f) \quad (3.3.5-2)$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \quad (3.3.5-3)$$

式中 f_{tk} 、 f_{ti} ——钢纤维混凝土抗拉强度标准值、设计值;
 f_{tk} 、 f_{ti} ——根据钢纤维混凝土强度等级,按现行有关混凝土结构设计规范确定的基体混凝土抗拉强度标准值、设计值;

λ_f ——钢纤维含量特征值;
 ρ_f ——钢纤维体积率;
 l_f ——钢纤维长度;
 d_f ——钢纤维直径或等效直径;
 α_1 ——钢纤维对钢纤维混凝土抗拉强度的影响系数,宜通过试验确定。当钢纤维混凝土强度等级为

钢纤维品种	纤维外形	强度等级	α_1	α_{tm}
高强钢丝切断型	端钩形	CF20~CF45	0.76	1.13
		CF50~CF80	1.03	1.25

2 构件的截面受拉区钢纤维混凝土应力图形可简化为等效矩形应力图。受拉区等效矩形应力图高度可按下列公式计算:

受弯构件、大偏心受压构件和大偏心受拉构件

$$x_1 = h - \frac{x}{\beta_1} \quad (5.2.1-1)$$

轴心受拉构件和小偏心受拉构件

$$x_1 = h \quad (5.2.1-2)$$

式中 x_1 ——受拉区等效矩形应力图高度;
 h ——构件截面高度;
 x ——受压区等效矩形应力图的高度,应按现行有关混凝土结构设计规范的规定采用;
 β_1 ——系数,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定采用。

受拉区等效矩形应力图形的抗拉强度可按下列公式计算:

$$f_{tm} = f_{ti} \beta_{ts} \lambda_f \quad (5.2.1-3)$$

式中 f_{tm} ——受拉区钢纤维混凝土等效矩形应力图形的抗拉强度;
 β_{ts} ——钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件正截面受拉区钢纤维混凝土抗拉作用的影响系数,宜通过试验确定。当无试验资料,且钢纤维混凝土的强度等级在CF20~CF80之间时,可参照表5.2.1取用。

表 5.2.1 钢纤维对构件受拉区钢纤维混凝土抗拉作用的影响系数参考值

构件类型	受弯构件和 大偏心受压构件	轴心受拉构件和 小偏心受拉构件	大偏心受拉构件
β_{ts} 值	1.30	0.40	0.65



1. 基于裂后弯拉强度理论的钢纤维混凝土设计方法

Design Method of SFRC Structures Based on Post-crack Residual Flexural Tension Strength

- 钢纤维材料性能发展 Development of the SF material
- 现行中国设计规范-基于试验的钢纤维影响系数法 Current Chinese design code based on test
 - 应力应变本构关系、高强纤维作用
 - 裂后抗拉强度、标准试验方法、纤维增强作用小
 - 无筋钢纤维混凝土构件设计比照素混凝土
 - 主要适用于受压及小偏心构件
 - 裂缝宽度验算
 - 构件延性要求

5.1 无筋钢纤维混凝土结构构件承载力计算

5.1.1 无筋钢纤维混凝土结构构件的设计原则、适用范围以及有关作用效应的设计取值等,均应符合现行有关混凝土结构设计规范关于素混凝土结构构件的规定。

5.1.2 无筋钢纤维混凝土受压构件计算应符合下列规定:

1 无筋钢纤维混凝土受压构件的受压承载力,当设计不考虑受拉区钢纤维混凝土参与工作时,应按现行有关混凝土结构设计规范关于素混凝土的规定计算。

2 不允许开裂的无筋钢纤维混凝土偏心受压构件的受压承载力,应按现行有关混凝土结构设计规范关于素混凝土构件的规定计算。计算时将素混凝土的抗拉强度设计值以钢纤维混凝土的抗拉强度设计值代替。

5.1.3 无筋钢纤维混凝土受弯构件的正截面受弯承载力应按现行有关混凝土结构设计规范关于素混凝土构件的规定计算。计算时以钢纤维混凝土的抗拉强度设计值代替素混凝土的抗拉强度设计值。

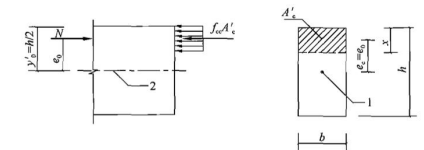


图 D.2.1 矩形截面的素混凝土受压构件受压承载力计算
1—重心; 2—重心线

D.2.2 对不允许开裂的素混凝土受压构件(如处于液体压力下的受压构件、女儿墙等),当 e_0 不小于 $0.45y'_0$ 时,其受压承载力应按下列公式计算:

1 对称于弯矩作用平面的截面

$$N \leq \varphi \frac{\gamma f_c A}{\frac{e_0 A}{W} - 1} \quad (D.2.2-1)$$

2 矩形截面

$$N \leq \varphi \frac{\gamma f_c b h}{\frac{6e_0}{h} - 1} \quad (D.2.2-2)$$

式中: f_c ——素混凝土轴心抗拉强度设计值,按本规范表 4.1.4-2 规定的混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 值乘以系数 0.55 取用;

γ ——截面抵抗矩塑性影响系数,按本规范第 7.2.4 条取用;

W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩;



1. 基于裂后弯拉强度理论的钢纤维混凝土设计方法

Design Method of SFRC Structures Based on Post-crack Residual Flexural Tension Strength

- 钢纤维材料性能发展 Development of the SF material
- 现行中国设计规范-基于试验的钢纤维影响系数法 Current Chinese design code based on test
- 基于残余抗拉强度的设计理论 Design theory based on residual tensile strength
 - 标准化试验（切口梁）、残余弯拉强度、强度比、延性、韧性
 - 理论体系（本构模型、应变软化、应变硬化、刚塑性模型、线性模型、有筋和无筋）
 - 管片强度及裂缝宽度验算公式及弯矩-轴力相关曲线
 - 纤维贡献大 试验证明

Test on beam of fibre-reinforced concrete with a notch



Crack width for three-point loading on a fibre-reinforced beam with a notch

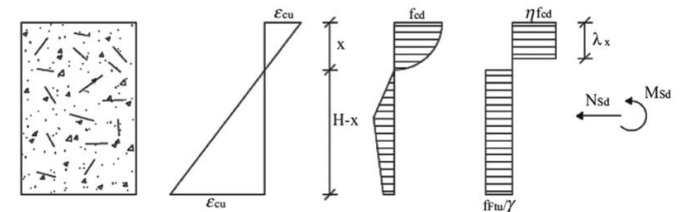
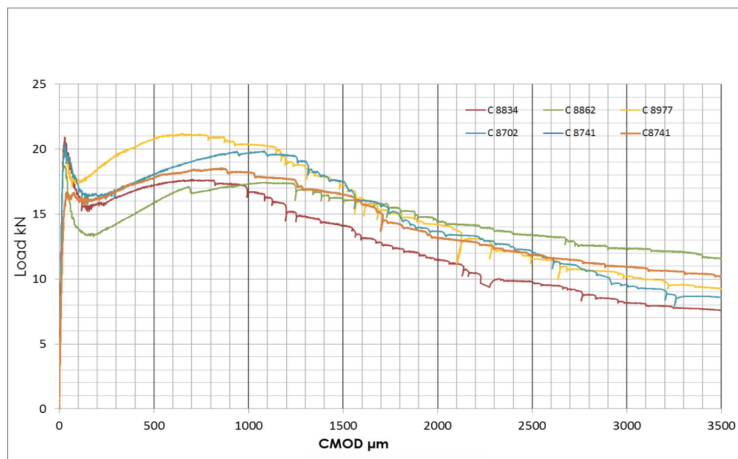


Fig. 10.1b—FRC constitutive law used for design of segments against ultimate loads in Monte Lirio tunnel (Caratelli et al. 2012).

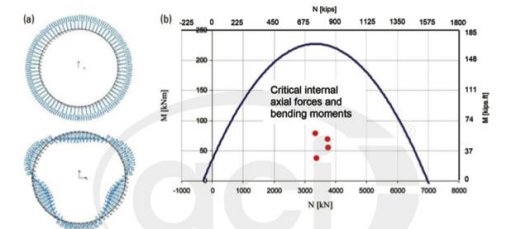


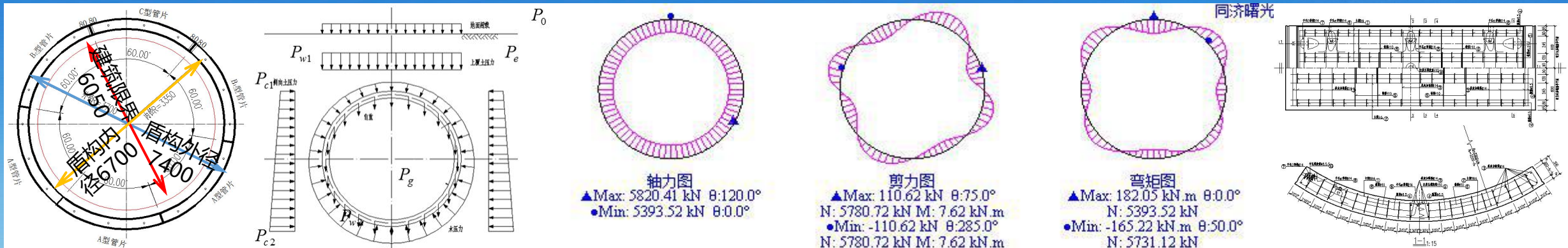
Fig. 10.1c—(a) Developed axial forces and bending moments due to earth pressure and groundwater load acting on tunnel lining; and (b) design checks using the axial force-bending moment interaction diagram (Caratelli et al. 2012).



1. 基于裂后弯拉强度理论的钢纤维混凝土设计方法

Design Method of SFRC Structures Based on Post-crack Residual Flexural Tension Strength

- 钢纤维材料性能发展 Development of the SF material
- 现行中国设计规范-基于试验的钢纤维影响系数法 Current Chinese design code based on test
- 基于残余抗拉强度的设计理论 Design theory based on residual tensile strength
- 钢纤维混凝土在盾构隧道管片衬砌的适用性 Advantages of SFRC in segmental lining
 - 隧道管片衬砌：压弯构件、轴力大、预制拼装、裂缝要求严、耐久性要求高、保护层厚、易破损、受施工及环境影响大
 - 钢纤维混凝土：可承受拉力和弯矩、延性好、工业化生产、控裂效果好、无钢筋、全面增强、韧性好





1. 基于裂后弯拉强度理论的钢纤维混凝土设计方法

Design Method of SFRC Structures Based on Post-crack Residual Flexural Tension Strength

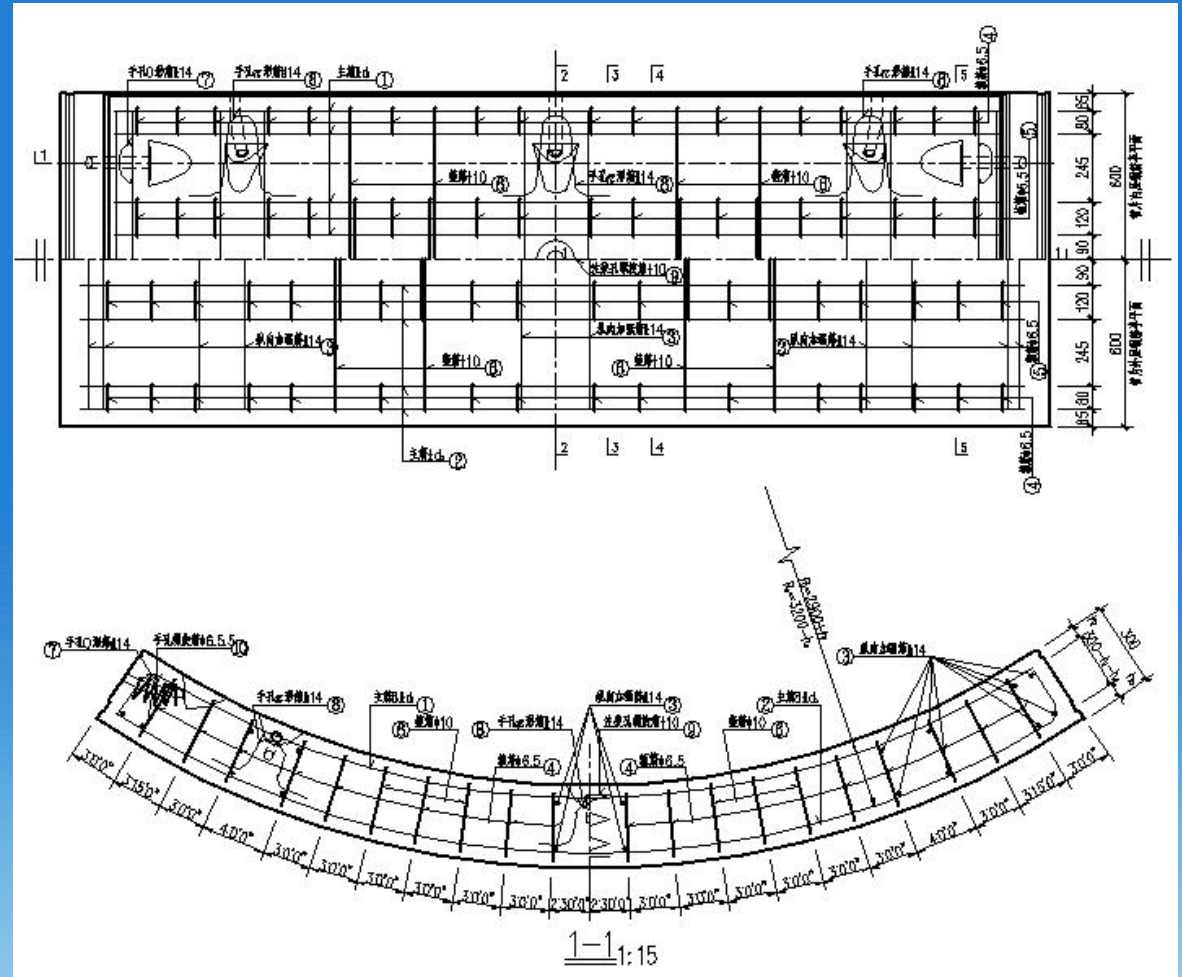
- 钢纤维材料性能发展 Development of the SF material
 - 现行中国设计规范-基于试验的钢纤维影响系数法 Current chinese design code based on test
 - 基于残余抗拉强度的设计理论 Design theory based on residual tensile strength
 - 纤维混凝土在盾构隧道管片衬砌的适用性 Advantages of SFRC in segmental lining
 - 钢纤维混凝土管片强度及裂缝宽度验算 ULS and SLS verification
 - 国外隧道工程中已大量应用钢纤维混凝土管片 Widely applied in shield tunnels abroad
- 1) FIB/CEB Model Code 2010 for Concrete Structures(混凝土结构设计规范) 国际结构联合会
 - 2) AFTES Design, Dimensioning and execution of precast steel fibre reinforced concrete arch segments(2013) 钢纤维增强拱形管片的设计, 计算及生产 (法国地下工程协会)
 - 3) DAUB Recommendations for design, production and installation of segmental rings 管片设计, 生产及安装指南 (德国隧道协会)
 - 4) ACI 544-7R-16: Report on design and construction of fibre reinforced precast concrete tunnel segments 纤维混凝土预制管片的设计以及施工 (美国混凝土协会)
 - 5) ITAtech No.7/April 2016(ISBN:978-2-9701013-2-1) guidance for precast fibre reinforced concrete segments. 预制纤维混凝土管片指南 (国际隧道协会)
 - 1) 英国Heathrow机场隧道
 - 2) 巴黎地铁EOLE隧道、METEOR隧道
 - 3) 德国ESSEN地铁隧道
 - 4) 意大利地铁隧道
 - 5) 伦敦Lee隧道
 - 6) 西班牙马德里地铁
 - 7) 香港地铁
 - 8) 马来西亚地铁
 - 9) 新加坡地铁
 - 10) 多哈地铁



2. 目前盾构隧道钢筋混凝土管片应用的难题

Problems among current applications

- 深埋隧道大量增加，管片配筋量太大 Heavily reinforced segments for deep buried tunnels
(配筋量120kg/m³~220kg/m³、造价高、加工困难、对裂缝控制不利。。。)



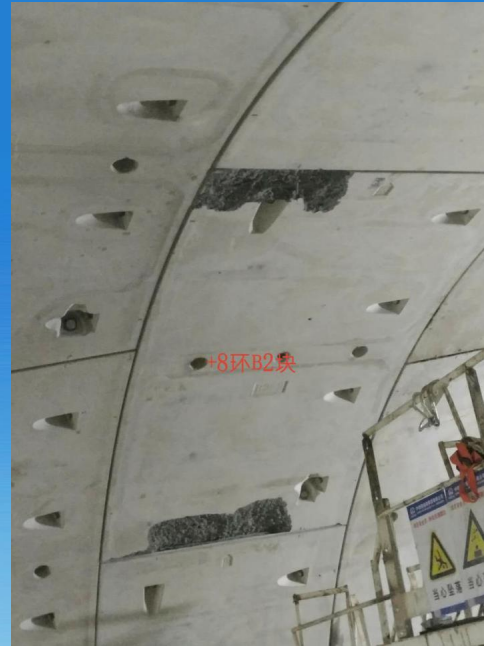


2. 目前盾构隧道钢筋混凝土管片应用的难题

Problems among current applications

- 深埋隧道大量增加，管片配筋量太大 Heavily reinforced segments for deep buried tunnels
- 管片保护层厚度大，运输及施工期间易发生严重破损 Vulnerable to damages at transient stage

(脱模、运输、吊装、拼装、顶进、注浆，内侧修补、外侧未知)





2. 目前盾构隧道钢筋混凝土管片应用的难题

Problems among current applications

- 深埋隧道大量增加，管片配筋量太大 Heavily reinforced segments for deep buried tunnels
- 管片保护层厚度大，运输及施工期间易发生严重破损 Vulnerable to damages at transient stage
- 软土地层中管片衬砌敏感度高，易受外界环境变化影响

Tunnels in soft ground vulnerable to environment changes at permanent stage



钢筋混凝土管片

Reinforced Concrete Segment



钢管片

Steel Segment



2. 目前盾构隧道钢筋混凝土管片应用的难题

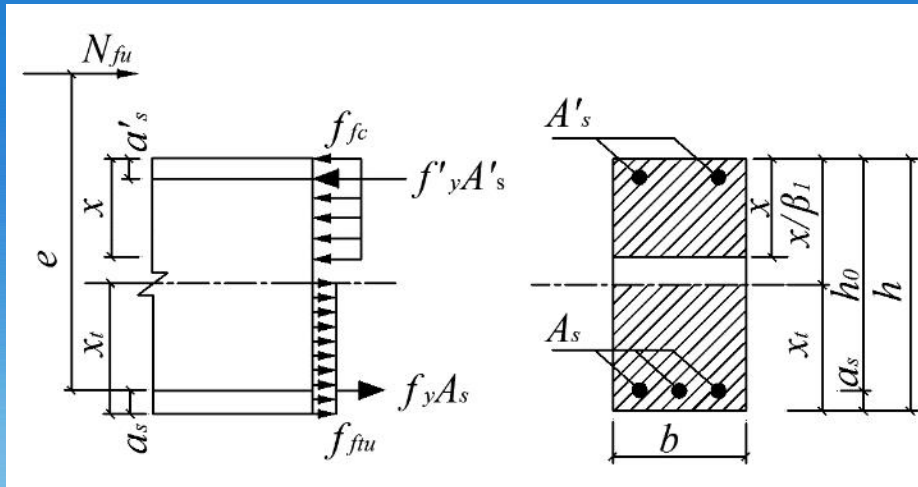
Problems among current applications

- 深埋隧道大量增加, 管片配筋量太大 Heavily reinforced segments for deep buried tunnels
- 管片保护层厚度大, 运输及施工期间易发生严重破损 Vulnerable to damages at transient stage
- 软土地层中管片衬砌敏感度高, 易受外界环境变化影响

Tunnels in soft ground vulnerable to environment changes at permanent stage

- 钢纤维混凝土管片的优势 Advantages of SFRC segments

(抗拉强度、裂缝控制、韧性、压弯构件、预制构件、全面增强、耐久性、经济性)



矩形截面大偏心受压构件正截面计算简图

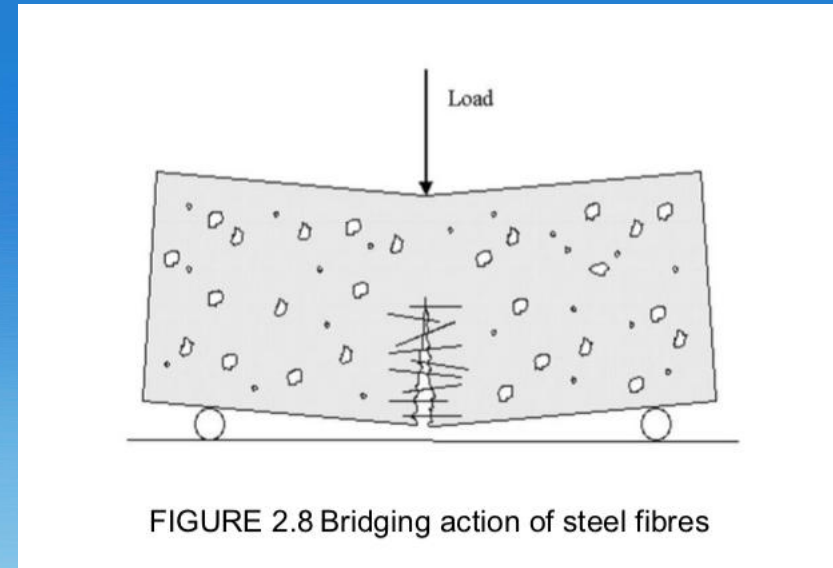


FIGURE 2.8 Bridging action of steel fibres



3. 钢筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC+Rebar Segments

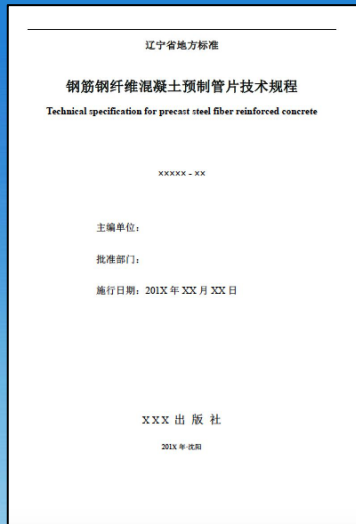
- 2010年以前的试验工程 Trail Applications before 2010
 - 国内相关规范有《纤维混凝土结构技术规程》CECS38-2004、《纤维混凝土应用技术规程》JGJT 221-2010和《钢纤维混凝土试验方法》CECS13: 89等，设计方法-基于试验的纤维影响系数法，钢纤维混凝土优势未充分发挥。
 - 北京地铁10号线和上海地铁M6号线盾构隧道工程进行了研究和试验段应用，配筋量做了一定减小，耐久性状态良好。



3. 钢筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC+Rebar Segments

- 近年来的研究和试验工程 Recent research and Trail Applications
 - 研发团队进行大量的结构试验（小梁、大梁、足尺试验），对基于残余抗拉强度的钢纤维设计理论进行了验证，并深入进行了工程试验应用。
 - 沈阳地铁钢筋钢纤维混凝土管片试验工程(大约1km)
 - 相关研究和规范编制（有筋和无筋、材料、试验、设计、预制、施工、验收）
- 钢筋钢纤维混凝土管片优势 Advantages of SF+rebar RC segments
 - 提高承载力，减小钢筋用量
 - 大幅度减小裂缝宽度，大量减小控制裂缝钢筋
 - 节省钢筋、减小加工难度、经济效益



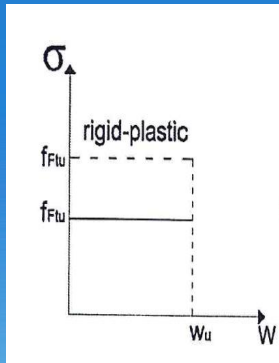
目 录	
1 总 则.....	1
2 术语和符号.....	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 基本设计规定.....	5
3.1 一般规定.....	5
3.2 承载力极限状态计算.....	5
3.3 正常使用极限状态验算.....	6
4 材料.....	7
4.1 钢纤维.....	7
4.2 其他原材料.....	7
4.3 钢纤维混凝土.....	8
5 结构计算.....	10
5.1 基本规定.....	10
5.2 荷载作用.....	10
5.3 管片横向内力计算.....	10
5.4 管片变形计算.....	11
5.5 管片接头螺栓预紧力计算.....	12
6 承载力计算.....	13
6.1 一般规定.....	13
6.2 承载力极限状态计算.....	13
6.3 正常使用极限状态验算.....	16
7 钢筋纤维混凝土管片构造规定.....	17
7.1 一般规定.....	17
7.2 管片拼装.....	17
7.3 管片构造.....	18
7.4 其它.....	19
8 施工阶段承载力验算.....	20

8.1 一般规定.....	20
8.2 临时荷载承载力验算.....	20
8.3 结构承载力计算.....	23
9 管片制造.....	26
9.1 配合比设计.....	26
9.2 投料和搅拌.....	26
9.3 拌合物性能要求.....	26
9.4 模具.....	26
9.5 浇筑与成型.....	27
9.6 钢筋骨架制作与预埋件安装.....	27
9.7 钢纤维混凝土浇筑及振捣成型.....	27
9.8 养护.....	27
9.9 脱模.....	27
9.10 弹性密封剂与超塑化剂的粘贴.....	28
9.11 堆放.....	28
9.12 产品标识、修补和运输.....	28
9.13 检验和验收.....	28
10 管片施工.....	32
10.1 一般规定.....	32
10.2 进场验收.....	32
10.3 运输与存放.....	32
10.4 盾构机顶进.....	32
10.5 管片的拼装.....	33
10.6 螺栓连接.....	34
10.7 整环注浆.....	34
10.8 检验和验收.....	34
10.9 隧道周边环境原状监测.....	35
附录 A 残余抗弯拉强度测试方法（切口梁法）.....	36
附录 B 钢筋纤维混凝土管片设计不同板厚状态抗拉强度.....	42
附录 C 预制管片承载力检验试验方法标准.....	45
本规范用词说明.....	49

3. 钢筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC+Rebar Segments

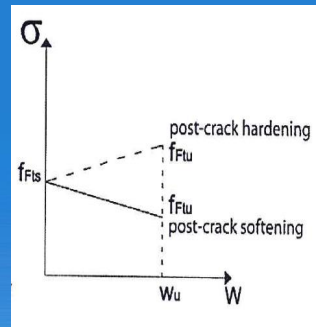
- 材料试验和残余强度等级 Material test and residual strength grade
 - 钢纤维材料性能、强度、种类、掺量
 - 钢纤维混凝土残余强度等级、抗拉强度、强度比、延性要求
- 本构模型及设计方法 Constitution mode and design method
 - 刚塑性模型、线性模型（应力应变软化材料、硬化材料）
 - 强度计算时各本构模型参数的确定
 - 配筋计算公式及MN相关曲线
 - 裂缝宽度验算公式及参数



Rigid-plastic model

The rigid-plastic model identifies an unique reference value, f_{Ftu} , based on the ultimate behaviour. Such a value is determined as:

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} \quad (5.6-4)$$



Linear model

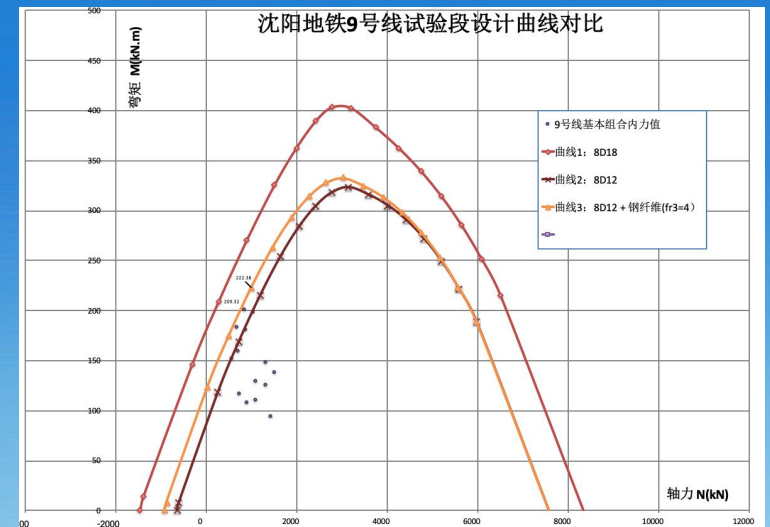
The linear model identifies two reference values, namely f_{Fts} and f_{Ftu} .

They have to be defined through residual values of flexural strength using the following equations:

$$f_{Fts} = 0.45 f_{R1} \quad (5.6-5)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{R1}) \geq 0 \quad (5.6-6)$$

where w_u is the maximum crack opening accepted in structural design; its value depends on the ductility required.





4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

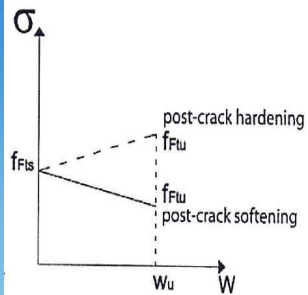
- 近年来的研究和试验工程 Recent research and Trail Applications
 - 2012年~2016年，深圳地铁集团有限公司组织开展了《纤维混凝土管片可靠度及耐久性设计关键技术研究》课题
 - 深圳地铁7号线西丽湖~西丽区间进行了无筋钢纤维混凝土管片实际工程应用（长19.5m，13环）
 - 相关研究（材料、试验、设计、预制、施工、耐久性、防迷流）
 - 相关规范编制中（设计、施工及验收、试验、整环试验）
- 无筋钢纤维混凝土管片优势 Advantages of SF only RC segments
 - 取消钢筋笼，大量减小钢筋量
 - 无加工焊接作业，大大减小人工量
 - 节能、节地、省时、环保
 - 耐久性高
 - 经济效益显著



4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

- 材料试验和残余强度等级 Material test and residual strength grade
 - 钢纤维材料性能、强度、种类、掺量
 - 钢纤维混凝土残余强度等级、抗拉强度、强度比、延性要求
- 本构模型及设计方法 Constitution mode and design method
 - 线性模型（应变硬化材料）
 - 强度计算时本构模型参数的确定
 - 无筋钢筋钢纤维混凝土承载力验算公式、 ULS阶段MN相关曲线
 - 裂缝宽度验算公式及参数、 SLS阶段MN相关曲线



Linear model

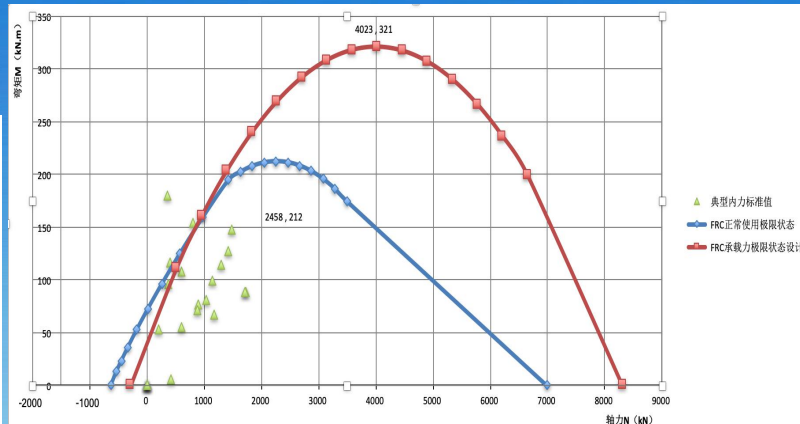
The linear model identifies two reference values, namely f_{Fls} and f_{Flu} .

They have to be defined through residual values of flexural strength using the following equations:

$$f_{Fls} = 0.45f_{R1} \quad (5.6-5)$$

$$f_{Flu} = f_{Fls} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fls} - 0.5f_{R3} + 0.2f_{R1}) \geq 0 \quad (5.6-6)$$

where w_u is the maximum crack opening accepted in structural design; its value depends on the ductility required.



无筋钢纤维混凝土管片MN相关曲线

7.2.1 偏心受压管片承载力极限状态计算, 当 $N_{rk} \leq \alpha_1 \beta_1 f_{tk} b h$ 时应符合以下规定。

- 1 截面的应变状态符合平截面假定, 应力-应变状态如图 7.2.1-1。
- 2 受拉区应力为承载力极限状态的抗拉强度设计值 f_{ftw} ;

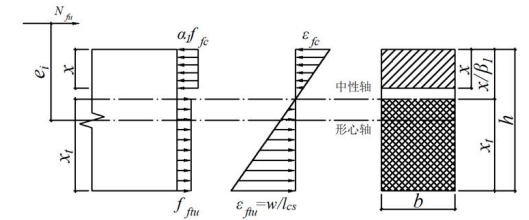


图 7.2.1-1 矩形截面偏心受压正截面承载力计算简图

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。

4 偏心受压承载力应按式 (7.2.1-1)、式 (7.2.1-2) 计算。

$$N_{rk} \leq \alpha_1 f_{tk} b x - f_{tw} b x_1 \quad (7.2.1-1)$$

$$N_{rk} (e_t - x_1 + \frac{h}{2}) \leq \alpha_1 f_{tk} x b (\frac{x}{\beta_1} - \frac{x}{2}) + f_{tw} b \frac{x_1^2}{2} \quad (7.2.1-2)$$

$$x_1 = h - \frac{x}{\beta_1} \quad (7.2.1-3)$$

$$e_t = e_0 + e_a \quad (7.2.1-4)$$

7.3.2 当裂缝宽度不大于 0.2mm, 且轴力符合式 (7.3.2-1) 时, 承载力验算符合以下规定。

$$0 \leq N_{rk} \leq (0.31875 f_{tk} - 0.2125 f_{tsk}) b h \quad (7.3.2-1)$$

- 1 截面的应力-应变状态如图 7.3.2。
- 2 受拉区应力为正常使用极限状态的抗拉强度 $f_{tsk} = 0.85 f_{tsk}$;
- 3 受压区边缘应力采用实际应力 f_{cs} : $0 \leq f_{cs} \leq 0.85 f_{ck}$ 。

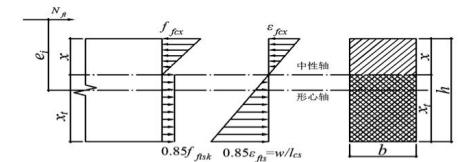


图 7.3.2 矩形截面第一阶段偏心受压构件正截面承载力计算简图

4 承载力按式 (7.3.2-2)~式 (7.3.2-3) 计算。

$$N_{rk} \leq f_{cs} b x / 2 - 0.85 f_{tsk} b x_1 \quad (7.3.2-2)$$

$$N_{rk} (e_t + \frac{h}{2} - x_1) \leq f_{cs} b \frac{x}{2} \cdot \frac{2x}{3} + 0.85 f_{tsk} b x_1 \frac{x_1}{2} \quad (7.3.2-3)$$

4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

- 材料试验和残余强度等级 Material test and residual strength grade
 - 钢纤维材料性能、强度、种类、掺量
 - 钢纤维混凝土残余强度等级、抗拉强度、强度比、延性要求
- 本构模型及设计方法 Constitution mode and design method
 - 线性模型（应变硬化材料）
 - 强度计算时本构模型参数的确定
 - 无筋钢筋钢纤维混凝土承载力验算公式、 ULS阶段MN相关曲线
 - 裂缝宽度验算公式及参数、 SLS阶段MN相关曲线
 - 施工阶段验算（脱模、吊运、堆放、千斤顶局压）

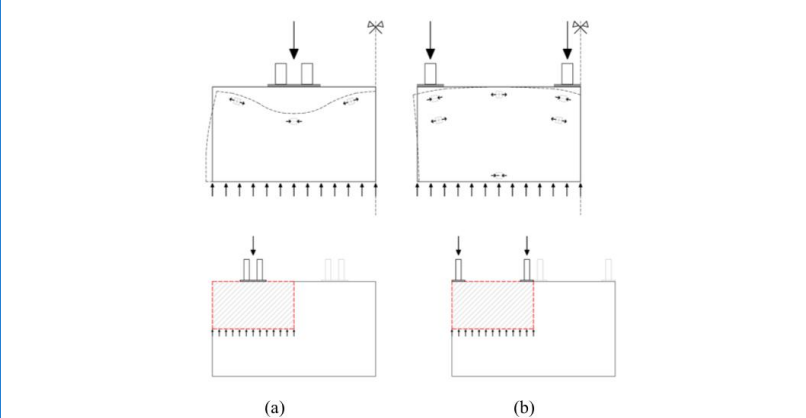


Fig. 4.2-1: Distribution of stresses in the tunnel segment loaded by the TBMs jacks: French segment configuration (a); German segment configuration (b) (de Waal, 1999).

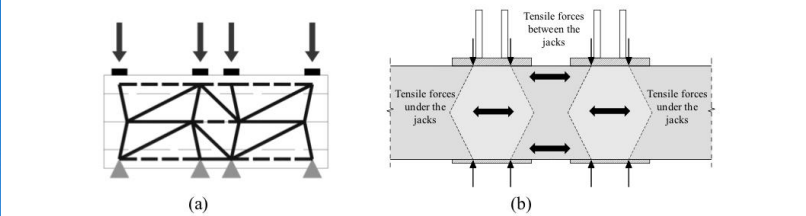


Fig. 4.2-2: Strut-and-tie model for evaluating the global tunnel segment behavior (a, Schnüting, 2003), (b, Blom, 2006).

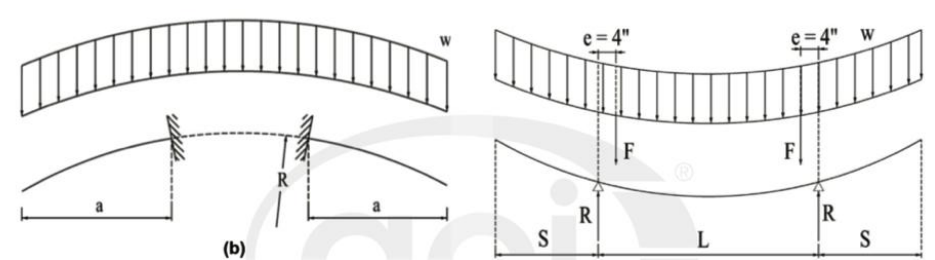
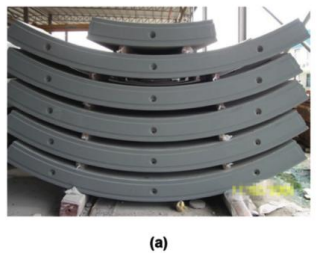


Table 4.4—Summary of required design checks and factors for production and transient stages

Load case number	Phase	Dynamic shock factor	Maximum unfactored bending moment	Key design parameters
1	Stripping	—	$wa^2/2$	$\sigma_p (f'_{t0}$ and $f'_{t00})$ at 4 hours f'_t at 4 hours
2	Storage	—	$w(L^2/8 - S^2/2) + F_1e$ $w(S^2/2) + F_1e$	$\sigma_p (f'_{t0}$ and $f'_{t00})$ at 4 hours f'_t at 4 hours
3	Transportation	2.0	$w(L^2/8 - S^2/2) + F_2e$ $w(S^2/2) + F_2e$	$\sigma_p (f'_{t0}$ and $f'_{t00})$ at 28 days f'_t at 28 days
4	Handling	2.0	$wa^2/2$	$\sigma_p (f'_{t0}$ and $f'_{t00})$ at 28 days f'_t at 28 days

Notes: F1 is self-weight of all segments completing a ring, excluding bottom segment; and F2 is self-weight of all segments placed in one truck or rail car for transportation phase, excluding bottom segment.



4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

- 管片构造及接头设计 Detailing of segments and joints
- 技术经济优势 Economic advantage
- 材料及管片质量控制 Quality control
- 施工和验收 Constuction and acceptance

在国内使用的螺栓及应用情况如下图。Domestic use of bolts and applications as shown in the following figure.

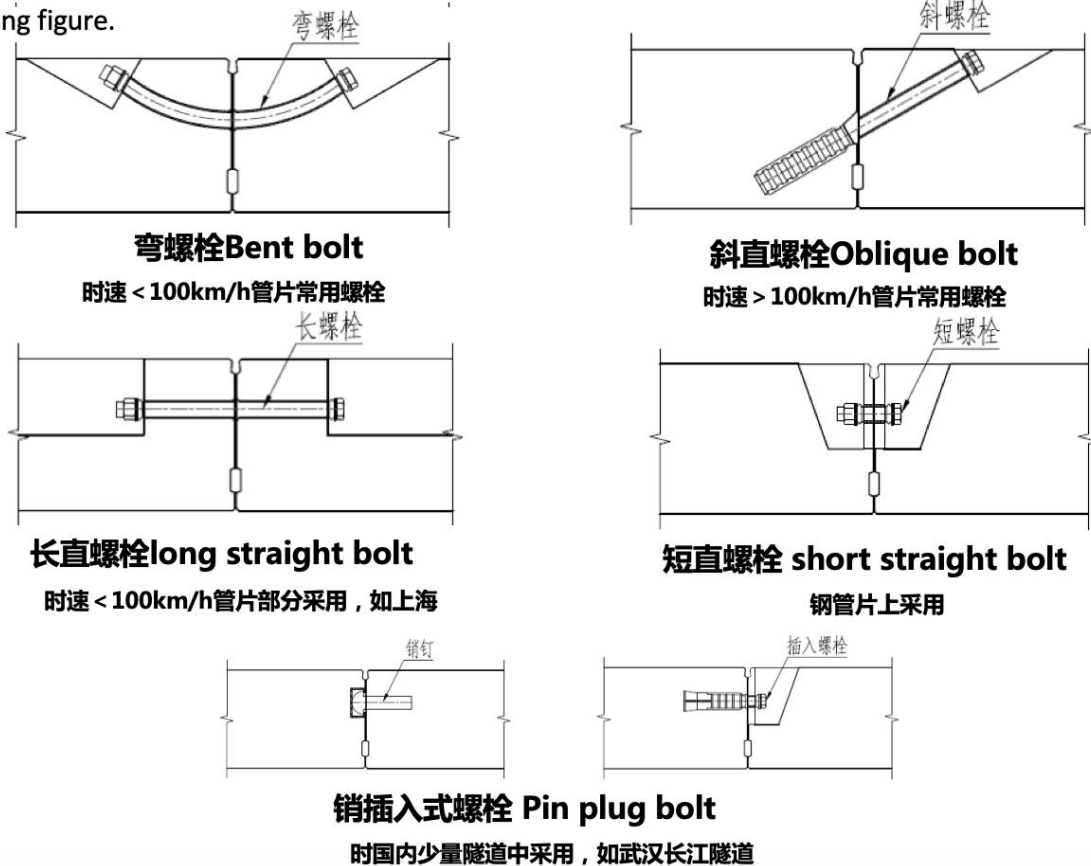


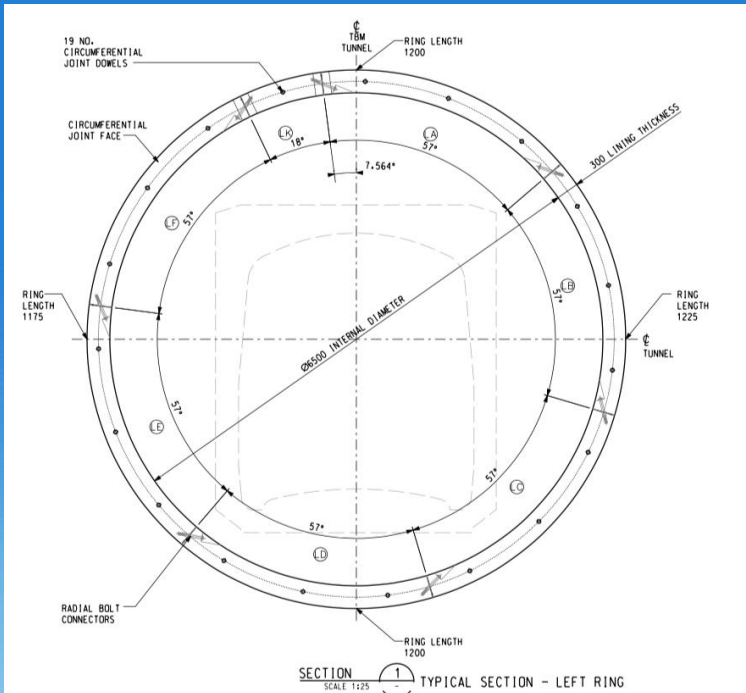
Figure 1. Transient load situations during production: (a) demoulding; (b) stacking; (c) handling and (d) transport



4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

- 需进一步研究的内容：
 - 无筋SFRC管片的设计理论和管片构造 Design and detailing of SFRC segments without rebars
 - 管片计算内力及现场实测 Internal force computation and monitoring



极限状态法内力计算 ULS 管片内力 荷载组合

正常使用状态验算 SLS 裂缝宽度验算 隧道变形验算

Limit State Design method ULS SLS Check of width of cracks and deformation

(全土柱 泰沙基理论) 浅埋隧道 深埋隧道

load (whole Earth column Tyshaki Theory)

Shallow buried tunnels and Deep buried tunnels.

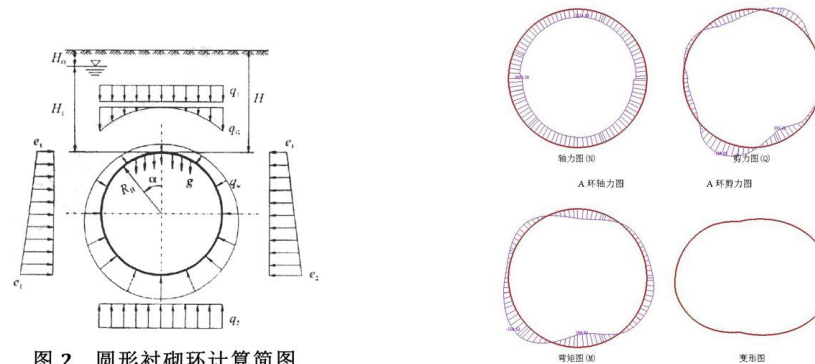
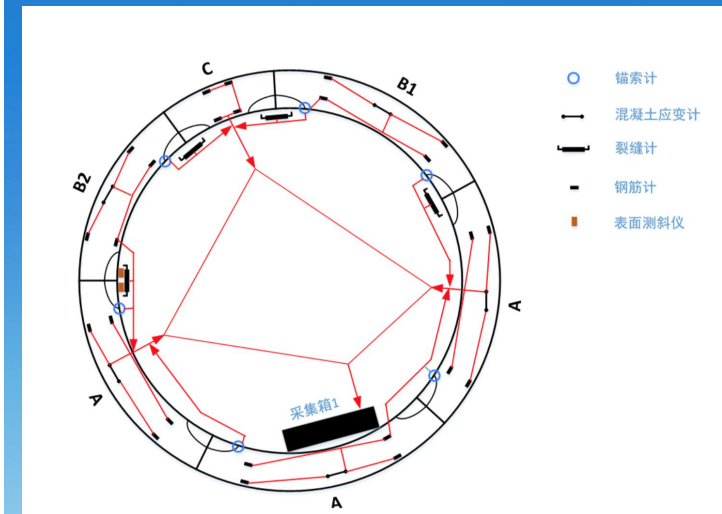


图 2 圆形衬砌环计算简图

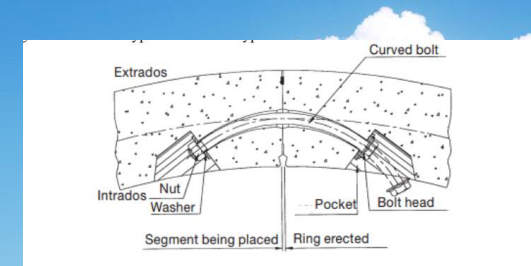
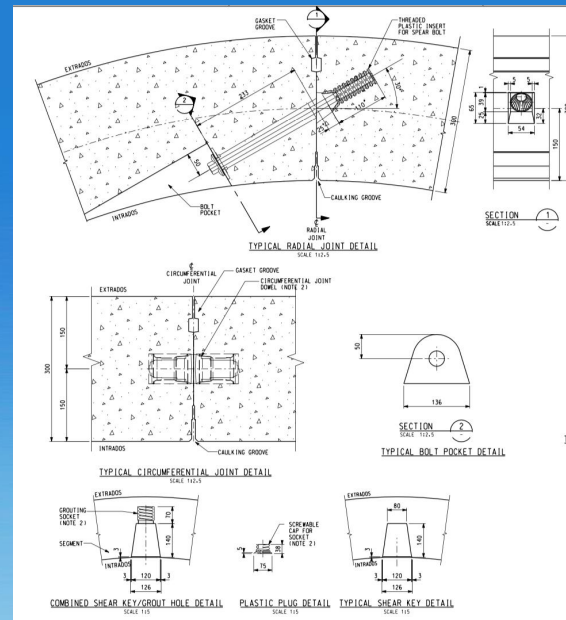
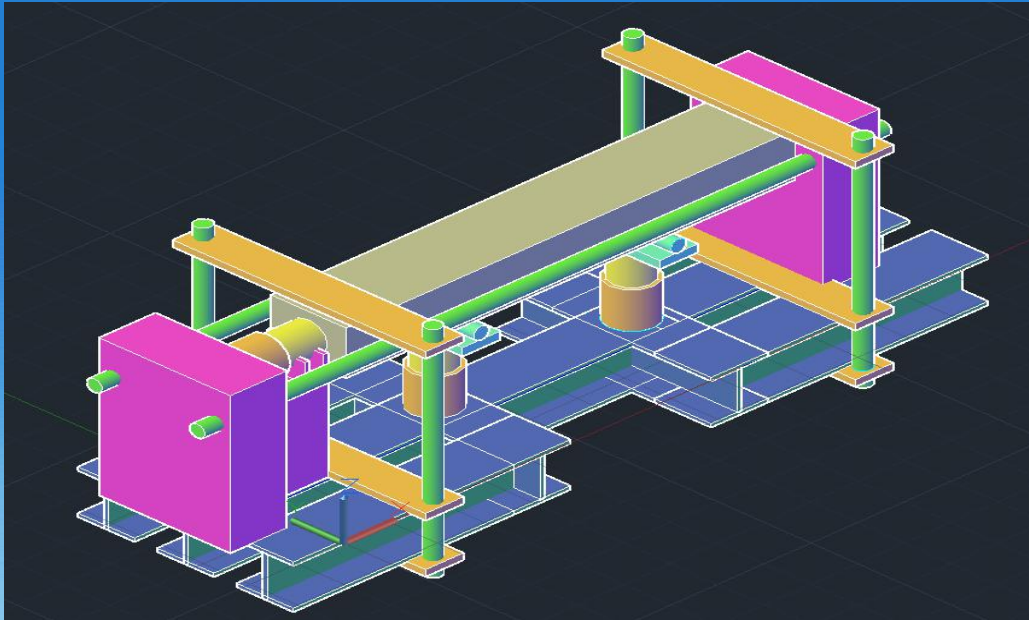




4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

- 需进一步研究的内容：
 - 无筋SFRC管片的设计理论和管片构造 Design and detailing of SFRC segments without rebars
 - 管片计算内力及现场实测 Internal force computation and monitoring
 - 裂缝宽度计算及试验确认（有筋和无筋） Crack width check and confirmation by tests
 - 接头试验及无螺栓接头 Joints tests and jointless design





4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

- 需进一步研究的内容：
 - 无筋SFRC管片的设计理论和管片构造 Design and detailing of SFRC segments without rebars
 - 管片计算内力及现场实测 Internal force computation and monitoring
 - 裂缝宽度计算及试验确认（有筋和无筋） Crack width check and confirmation by tests
 - 接头试验及无螺栓接头 Joints tests and jointless design
 - 对不同地质和埋深、环境的适用性 Applicability to different berried depth and geology

(深埋隧道、深厚软土、
复合地层、环境变化)

冲洪积地层：北京 沈阳 长春

深厚淤泥软土地层：天津 上海 南京 杭州等

岩石地层：重庆 贵阳等

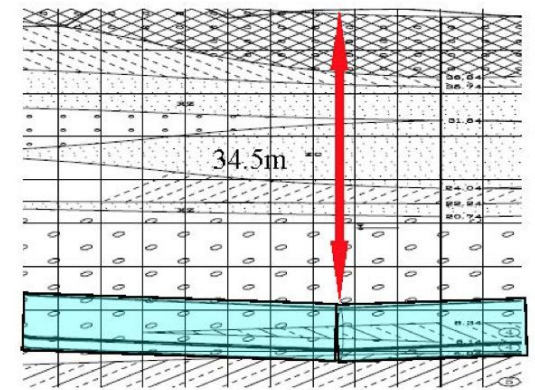
软硬不均复合地层：大连 青岛 广州 深圳等

Alluvial alluvial strata: Changchun, Shenyang, Beijing.

Deep silt soft soil layer: Tianjin, shanghai, Nanjing, Hangzhou, etc.

Lithostratigraphy: Chongqing Guiyang et al.

Uneven soft and hard composite strata: Dalian, Qingdao, Guangzhou, Shenzhen and so on



北京地铁8号线盾构隧道纵断



4. 无筋钢纤维混凝土管片的设计与应用

Design and Applications of SFRC only Segments

- 需进一步研究的内容：
 - 无筋SFRC管片的设计理论和管片构造 Design and detailing of SFRC segments without rebars
 - 管片计算内力及现场实测 Internal force computation and monitoring
 - 裂缝宽度计算及试验确认（有筋和无筋） Crack width check and confirmation by tests
 - 接头试验及无螺栓接头 Joints tests and jointless design
 - 对不同地质和埋深、环境的适用性 Applicability to different berried depth and geology
 - 国家或行业系列规范编制 National code series
(地方标准、行业标准、国家标准)
(设计、材料、产品、施工、验收、试验、质量评定等)



Figure 1. Transient load situations during production: (a) demoulding; (b) stacking; (c) handling and (d) transport



Metro Trans

谢谢！
THANKS！

