无筋钢纤维混凝土管片设计研究

李广涛
中铁第六勘察设计院集团有限公司，天津 300308

[摘要]澳门完善新口岸区污水截流管隧道工程，为国内首例成功应用无筋钢纤维混凝土管片项目。本次研究依托本项目，通过对无筋钢纤维混凝土管片设计中分块及荷载选择、计算模型及公式选取，结合有限元结构计算软件分析，通过基础力学试验验证，合理确定设计参数，提供一套完整的设计方法。
[关键词]无筋；钢纤维；混凝土管片；荷载；力学试验
DOI：10.33142/ec.v8i2.15340　　中图分类号：TU528　　文献标识码：A

Research on the Design of Unreinforced Steel Fiber Reinforced Concrete Pipe Segments

LI Guangtao
Electrification Design Institute Branch of China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin, 300308, China

Abstract: Macao has improved the sewage interception pipe tunnel project in the new port area, which is the first successful application of non reinforced steel fiber reinforced concrete pipe segments in China. This study is based on this project, and through the selection of blocks and loads, calculation models and formulas in the design of unreinforced steel fiber reinforced concrete pipe segments, combined with finite element structural calculation software analysis, verified through basic mechanical tests, reasonably determined design parameters, and provided a complete design method.
Keywords: gluten free; steel fiber; concrete pipe segments; load; mechanical tests

引言

盾构隧道作为地下工程的重要组成部分，隧道管片作为盾构隧道的永久性支护结构，其性能将直接影响隧道的质量和使用寿命[1]。传统钢筋混凝土管片虽然应用广泛，但存在配筋量大、韧性差、抗裂性能差、预制自动化程度低、运输安装过程中极易发生破损开裂等问题[2]。而在管片中掺入钢纤维后，可有效提高混凝土管片的抗裂、抗冲击性，提高水泥亲和性，增加构件强度、延长使用寿命，达到改善复核材料力学性质的目的[3]。无筋钢纤维混凝土管片在诸多性能明显优于传统钢筋混凝土管片，同时减少施工过程钢筋笼的制作及后期维修的工作量和维护的费用，具有长期经济效益。

目前国内钢纤维混凝土的研究主要集中在少筋钢纤维混凝土管片的研究和生产[4]，对于无筋钢纤维混凝土管片设计方法的研究尚属空白，因此具有重要的研究价值[5]。本文将结合工程实例，介绍其设计方法及过程，为其他工程提供参考及借鉴。

1 工程概况

澳门完善新口岸区污水截流管隧道位于澳门特别行政区政府，为国内首条应用无筋钢纤维混凝土的盾构隧道。污水隧道连接新口岸区宋玉生广场及 NAPE/EP3 污水泵房，沿友谊大马路敷设，线路全长约 2560m。

盾构隧道为单线隧道，隧道覆土 7.5m～12m，内径 2800mm，隧道总长 2279m，采用预制无筋钢纤维混凝土管片和钢管片两种形式。无筋钢纤维混凝土管片外径 3200mm，环宽为 1000mm，管片厚度 200mm；钢管片外径 3180mm，环宽 600mm，管片厚度 190mm。盾构隧道线路水准平面曲线有 50m、100m、150m 三种，水准平面曲线半径 50m 处采用钢管片，其他段采用无筋钢纤维混凝土；盾构隧道内之污水管采用 DN2000 球墨延性铸铁管，铸铁管采用插管型柔性介面。

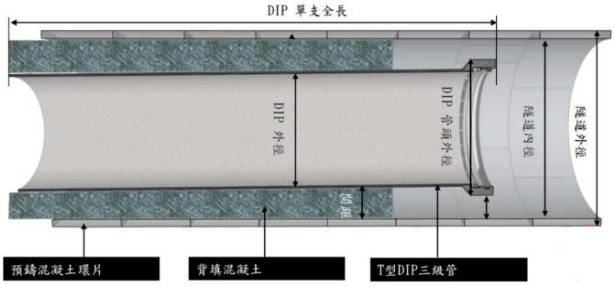


图 1　盾构隧道段 DIP 管断面布置图

2 无筋钢纤维管片结构设计

2.1 管片形式

本项目采用通用环管片，无筋钢纤维混凝土管片内径 2.8m，外径 3.2m，管片厚 200mm，混凝土环宽为 1m。混凝土管片环分为 6 块，包含 1 块封顶块，2 块临接块，3 块标准块。

衬砌环的接缝连接采用斜螺栓，包括 14 颗环缝连接螺栓和 12 颗纵缝连接螺栓。每个环缝处，标准块有三颗

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

螺栓，B 标准块两颗螺栓及封顶块有一颗螺栓。

表 1 管片设计参数表

名称	参数
组合类型	3（A 型）+2（B 型）+1（K 型）
管片宽度	1000mm
内直径	2.8m
外直径	3.2m
管片厚度	0.2m
螺栓	T25- 8.8 级
环缝防水材料	三元乙丙橡胶与遇水膨胀橡胶

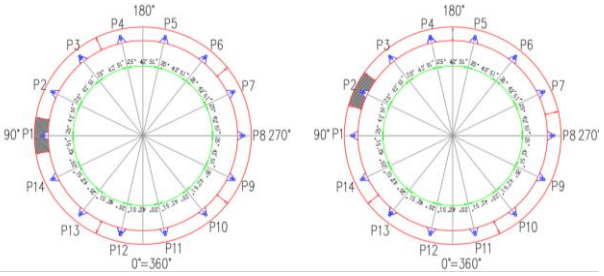


图 2 不同 K 块位置管片点位图

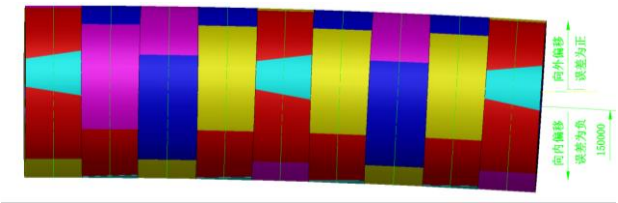


图 3 管片拼装三维俯视图

2.2 材料

2.2.1 钢纤维

本项目采用高强钢丝切断型钢纤维，根据《钢筋钢纤维混凝土预制管片技术规程》DB21/T 3165-2019 条文件说明 4.2.4 条，钢纤维用量估计为 35kg/m^3，f_{R3k}≤3.6MPa，实际用量需以实验为准。钢纤维应满足《混凝土用钢纤维》GB/T 39147-2020 规定的技术要求，性能参数见下表。

表 2 钢纤维参数表

	型号：JS-DGX（.75/60）	抗拉强度：≥1800MPa
	等效直径：0.75±0.075mm	弯曲性能：20/20 不断
	长度：60±6mm	杨氏模量：≥210GPa
	长径比：80±8	勾尺寸为 5±1mm
	重量：0.14mg	成型方式：切断细钢丝法
	公差等级：IT3，主参数＞16	

钢纤维的材质、化学成份、抗蚀要求如下：钢纤维的材质主要是：冷拉丝。钢纤维的化学组成为：碳（C）0.05%，硫（S）0.026%，硅（Si）0.09%，锰（Mn）0.32%，磷（P）0.018%。

钢纤维的防蚀要求：采用酸洗磷化处理（符合 JB/T 6978-2016），在混凝土添加使用防腐阻锈剂，沿海腐蚀环境下推荐掺量为 8～12kg/m^3。

2.2.2 无筋钢纤维混凝土

依据《钢纤维混凝土》JC/T 472-2015 规定，钢纤维混凝土轴心抗压强度标准值 f_{fck} 应取用同强度等级普通混凝土轴心抗压强度标准值，参数如下：

表 3 钢纤维混凝土参数表

混凝土等级	C50
混凝土抗渗等级	P8
混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck}（Mpa）	32.4
混凝土轴心抗压强度的设计值 f_c（Mpa）	23.1
弹性模量 $E_{c,28}$（GPa）	34.5
泊松比 v	0.2

3 管片结构计算

根据澳门当地相关要求，需要计算混凝土管片从生产，运输，安装，到运营阶段抵挡长期水土压力等工况，鉴于篇幅原因，重点介绍使用阶段结构计算。

3.1 荷载及组合

3.1.1 计算荷载

隧道衬砌使用阶段所承受的荷载包括短期及长期地层静荷载，并应考虑 200 年洪水位时荷载。

（1）永久荷载：管片自重、水土压力、上部建筑物基础产生的荷载。

（2）活载：地面活载一般按 20KN/m^2 计算。

3.1.2 荷载组合

管片结构按不同阶段可能出现的最不利荷载组合进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算。荷载组合系数见下表：

表 4 荷载组合系数

序号	荷载项目	正常使用极限状态		承载能力极限状态	
		恒载	活载	恒载	活载
1	长期水土压力	1	1	1.4	1.4
2	洪水位	1	1	1.4	1.4

3.2 长期地层荷重和洪水水压力计算

3.2.1 模型参数

盾构隧道采用 Plaxis 2D 有限元模型分析盾隧道开挖过程中长期地层荷重和洪水水压力工况。次分析均采用 plaxis 软件中的 HS 模型进行分析，经对比土体硬化模型（HS 模型）比摩尔-库仑模型结果更真实可靠。分析时对模型做如下假设：土壤为均质，等向性材料；采用平面应变分析。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

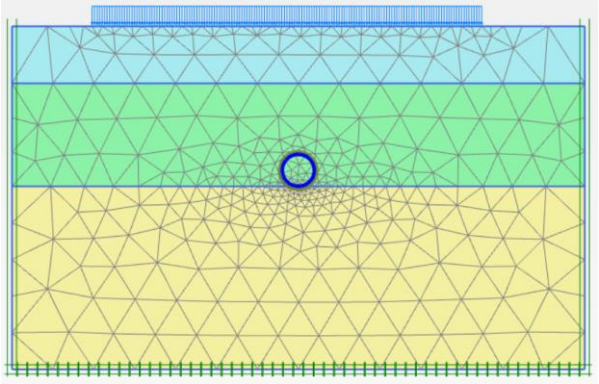


图 4 plaxis 模型

盾构隧道埋深在 7.5-12m，根据地质钻孔显示，隧道主要处于<2-1>淤泥～淤泥质土层内，选取最不利断面计算模型如下所示：

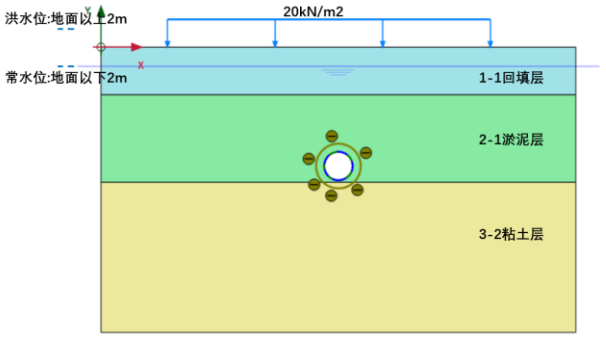


图 5 断面 plaxis 2D 模型

3.2.2 管片计算内力

采用 plaxis 有限元软件验算长期水土压力和洪水位工况下断面的正常使用极限状态和承载力极限状态。断面各工况的正常使用极限状态内力汇总如下表 5；断面各工况的承载力极限状态内力汇总如下表 6。

3 无筋钢纤维混凝土力学试验

无筋钢纤维混凝土基础力学试验主要包括轴心抗压强度和残余弯拉强度试验，轴心抗压强度和残余弯拉强度的测定主要为了后期裂缝发展规律研究提供计算数据。轴心抗压试验与普通混凝管片并无差异，重点介绍下残余弯拉强度试验。

切口梁弯曲韧性试验方法参照欧洲材料与结构协会标准《RELEM TC 162-TED》[7]及《欧盟金属纤维混凝土试验方法标准》EN14651-2005 中相关内容来测定弯曲韧性评价指标。残余弯拉强度试验采用尺寸为 150mm×150mm×550mm 切口梁试件，采用切割机在梁跨中底部切割出深度为 25mm、宽度为 2mm 的切口。试验仪器采用 MTS25t 液压伺服刚性试验机，利用动态应变仪自动记录各个阶段试验数据。荷载和挠度数据由计算机自动记录，并实时绘制出荷载与挠度的关系曲线。试验加载及数据测量简图见图 6。

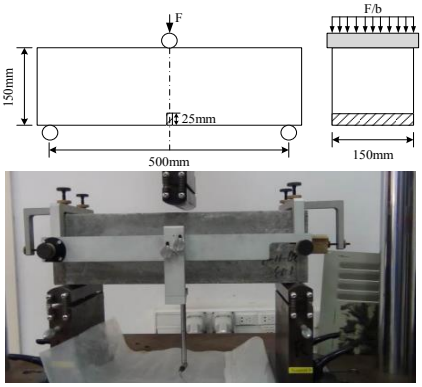


图 6 试验加载及数据测量示意图

为积累无筋钢纤维管片实验数据，对钢纤维掺量分别为 40kg/m^3、30kg/m^3、25kg/m^{3}进行切口梁弯曲韧性试验，并形成荷载—挠度曲线，如图 7 所示。

表 5 不同水位工况管片正常使用极限状态内力表

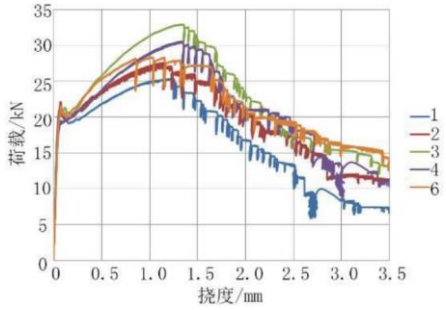
工况	N max.，kN/m	M 修正(Nmax.)，kN.m/m	Nmin.，kN/m	M 修正(Nmin.)，kN.m/m	Qmax.，kN/m	M 修正(s+max)，kN.m/m	N(s+max)，kN/m	M 修正 s- max，kN.m/m	N(s-max)，kN/m
常水位	-294.0	-23.4	-210.7	22.3	28.9	22.3	-210.7	-23.5	-293.2
洪水位	-397.9	-14.7	-329.5	13.2	-16.9	13.5	-335.0	-14.9	-396.7

表 6 不同水位工况管片承载力极限状态内力表

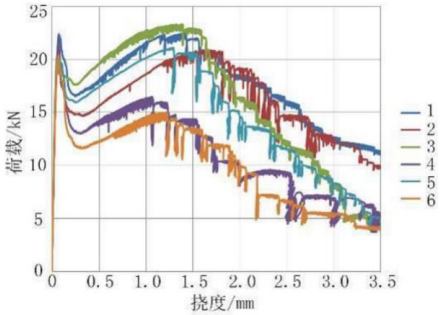
工况	N max.，kN/m	M 修正(Nmax.)，kN.m/m	Nmin.，kN/m	M 修正(Nmin.)，kN.m/m	Qmax.，kN/m	M 修正(s+max)，kN.m/m	N(s+max)，kN/m	M 修正 s- max，kN.m/m	N(s-max)，kN/m
常水位	-411.6	-32.7	-295.0	31.2	40.5	31.2	-295.0	-32.9	-410.5
洪水位	-557.1	-20.6	-461.3	18.5	-23.7	18.9	-469.0	-20.8	-555.4

表中：N max.--最大轴力；M(Nmax.)--最大轴力对应的弯矩；Nmin. --最小轴力；M(Nmin.)--最小轴力对应的弯矩；Qmax.--最大剪力；M(s+max)—最大正弯矩；N(s+max)—最大正弯矩对应的轴力；Ms-max—最大负弯矩；N(s-max)—最大负弯矩对应的轴力。

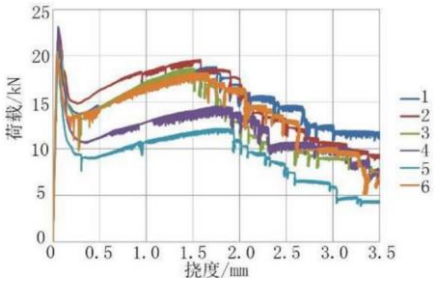
Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.



（a）C50-40kg/m³



（b）C50-30kg/m³



（c）C50-25kg/m³

图 7　切口梁的荷载-挠度曲线

对比图 7，混凝土标号为 C50 的三组切口梁荷载—挠度曲线可知，钢纤维掺量的提高并没有对峰值荷载产生太大的影响，三组梁的峰值荷载均为 23kN 左右。切口梁承载力达到峰值荷载之后，三组曲线均有下降，钢纤维掺量为 25kg/m³ 的切口梁曲线下降最剧烈，其荷载值下降了 30%左右，而钢纤维掺量为 40kg/m³ 的切口梁仅下降了 10%左右。此后三组梁均表现出很好的应变硬化状态，钢纤维掺量为 40kg/m³ 的切口梁进入硬化状态后承载力明显高于其他两组梁，其承载力极限值较掺量为 25kg/m³ 和 30kg/m³ 的切口梁分别高出 70%、40%。

根据切口梁试验结果可以评定钢纤维混凝土的弯曲韧性，弯曲韧性的评价指标主要有弯拉强度指标及残余弯拉强度指标。

根据《RILEM TC 162-TDF》弯曲韧性根据试件的荷载—挠度曲线进行计算，拟选取后者进行计算。结合试验结果，通过试验过程中切口梁挠度分别达到 0.47mm、1.32mm、2.17mm、3.02mm 时的应力，得出切口梁弯曲韧性试验结果，具体结果见表 7。

表 7　钢纤维混凝土切口梁弯曲韧性试验结果

材料配比	编号	f_L/MPa	$f_{r,1}$/MPa	$f_{r,2}$/MPa	$f_{r,3}$/MPa	$f_{r,4}$/MPa
40kg/m³	1	6.46	6.87	7.69	4.95	2.72
	2	6.43	7.44	8.39	5.98	3.80
	3	6.05	8.07	10.44	6.82	4.87
	4	5.74	7.43	9.64	6.68	—
	5	5.82	5.60	6.59	3.47	3.02
	6	6.14	8.00	8.80	6.40	5.12
	平均值	6.11	7.24	8.59	5.72	3.91
30kg/m³	1	6.27	5.70	7.13	5.70	4.00
	2	6.30	5.03	6.56	5.96	3.95
	3	6.51	6.23	7.48	4.97	2.62
	4	6.34	4.57	4.69	3.03	2.22
	5	6.17	5.43	6.42	4.29	2.62
	6	6.07	3.88	4.61	2.92	1.73
	平均值	6.28	5.14	6.15	4.48	2.86
25kg/m³	1	6.15	4.61	5.61	4.92	3.74
	2	6.98	5.15	6.10	4.43	3.38
	3	6.57	4.59	5.82	3.63	2.87
	4	7.01	3.45	4.30	4.05	3.17
	5	6.41	2.89	3.67	3.06	1.89
	6	6.48	4.52	5.64	4.54	3.20
	平均值	6.60	4.20	5.19	4.11	3.04

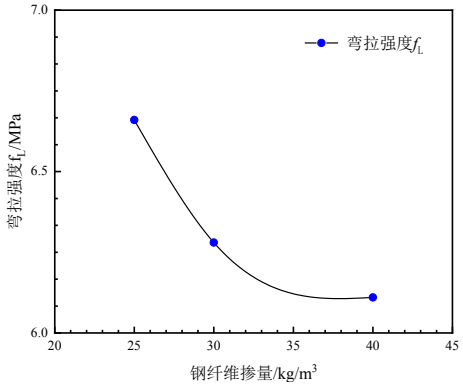


图 8　不同钢纤维掺量对 f_L 的影响

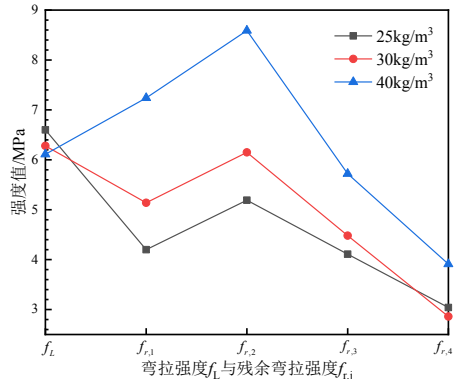


图 9　平均弯拉强度 f_L 和残余弯拉强度 $f_{r,j}$

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

如图 8 和图 9 所示，钢纤维掺量的增加使混凝土平均弯拉强度 f_L 略有减小，当钢纤维掺量从 25kg/m^3 提高到 40kg/m^3 时，钢纤维混凝弯拉强度 f_L 降低了 7.4%，分析钢纤维掺量与残余强度 $f_{r,3}$ 关系可以发现，钢纤维混凝土的残余强度随着钢纤维的掺量增大而增大。钢纤维混凝土中钢纤维掺量从 25kg/m^3 提高到 30kg/m^3 时，掺量提高了 20%，残余强度 $f_{r,3}$ 提高了 9.0%；钢纤维掺量从 30kg/m^3 提高到 40kg/m^3 时，掺量提高了 33.3%，残余强度 $f_{r,3}$ 提高了 27.7%。

实验结论：经实验验证，混凝土标号为 C50，采用钢纤维 JS-DGX(.75/60)掺量为 40kg/m^3，管片弯拉强度及弯曲韧性均能满足设计要求。

4 结论

依托澳门完善新口岸区污水截流管隧道，通过对无筋钢纤维混凝土设计中参数及公式选取，结合有限元结构计算软件分析，通过基础力学试验验证，合理确定设计参数。根据隧道施工及运营阶段以来的使用情况反馈，隧道管片设计完全满足使用需求，同时较传统钢筋管片仅钢筋一项减少投资约 50%。因此采用本文中的计算方法是可靠的。通过分析主要结论如下：

（1）无筋钢纤维混凝土管片结构及构件设计要求基本与普通混凝管片一致，但是设计参数选取中应该依据相关钢纤维混凝土规范要求。

（2）无筋钢纤维混凝土管片钢纤维掺量可根据计算及经验暂估，但最终通过混凝土力学试验综合确定。

（3）随着钢纤维掺量的增加，纯钢纤维混凝土管片的力学性能得到很大程度改善。在外部荷载作用下，无筋钢纤维混凝土管片的荷载-位移曲线均有明显的硬化现象，说明钢纤维主要在管片开裂后发挥作用，能够吸收更多的能量，对应的韧性有所提高。

（4）无筋钢纤维混凝土管片大大减少了钢筋含量，具有较好经济价值。

无筋钢纤维混凝土管片取消传统配筋管片中繁琐的钢筋绑扎工序，简化施工流程，减少了施工时间与人力投入，提高了管片预制的自动化程度，提高管片质量及使用寿命，在提升工程质量与经济效益方面展现出显著优势，具有良好的推广价值。

[参考文献]

[1]徐振,李德明,王彬,等.硬岩隧道纯钢纤维混凝土管片应用[J].山东大学学报(工学版),2020,50(5):44-49.
[2]孙斌,丁聪.高铁隧道大直径盾构钢纤维混凝土管片设计及优势简析[J].河北工业大学学报,2015,44(6):112-115.
[3]赵宇石,周予启,王少敏.地铁盾构管片用钢纤维混凝土性能特征研究[J].建材世界,2022,43(1):27-29.
[4]罗启正.钢纤维掺量及长径比对无筋管片混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2023,3(3):43-44.
[5]周强,王嘉伟,朱宇杰,等.无筋钢纤维混凝土管片承载力设计方案研究[J].建筑结构,2023,53(12):1459-1464.
[6]徐成.无筋钢纤维混凝土管片裂缝发展及正截面设计方法研究[D].四川:西南交通大学,2021.
[7]RILEMTC162-TDF,欧洲材料与结构协会(RILEM)的标准[Z],钢纤维增强混凝土(SFRC)的测试和设计方法,发表于《MaterialsandStructures》期刊.

作者简介：李广涛（1980—），男，河南淇县人，2004 年毕业于中南大学土木工程专业，本科，工程师，从事隧道及地下工程结构设计工作。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.