

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.018

# 超韧性水泥基复合材料圆管横向压缩吸能特性

唐传茗, 许默涵, 王率帅, 舒源, 刘正阳

(国防科学技术大学, 长沙 410072)

**摘要:**以公路护栏吸能特性为背景,对超韧性水泥基复合材料制成的圆管试件进行抗压吸能试验,研究不同配合比下各试件的抗压强度和荷载与变形能力的关系,研究纤维掺量对试件抗压强度的影响以及变形破坏和吸能特性,选出最适合的纤维掺量与配合比。试验结果表明:合理的配合比和纤维掺量使超韧性水泥基复合材料制成的圆管具有较高的抗压强度和良好的吸能能力。

**关键词:**超韧性水泥基复合材料;PVA 纤维;抗压强度;吸能;变形性能

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0098-05

## Lateral compression energy absorption of super toughness cementitious composites pipe

Tang Chuanming, Xu Mohan, Wang Shuaishuai, Shu Yuan, Liu Zhengyang

(National University of Defense Technology, Changsha 410072, P. R. China)

**Abstract:** We study the ratio of different compressive strength and deformation under load and the relationship of each specimen through the compression test of the specimens of cementitious composite materia tube. We also study relations between different fiber content and compressive strength, and deformation failure regularity and energy absorption characteristics under lateral flattened and choose the most suitable fiber type and dosage. The results showed that: a reasonable mix and fiber content make the pipe of super toughness cementitious composite material have a high compressive strength and good energy absorption effect.

**Key words:** super toughness cementitious composites; PVA fiber; compressive strength; energy absorption; deformation properties

随着中国高速公路飞速发展,公路上发生交通事故也逐年增加,其中 1/3 的事故是由汽车与护栏碰撞造成。国外公路交通较发达国家在高速公路出现初期对护栏结构进行研究,中国对公路护栏的研究开始于 20 世纪 70 年代,至今在研究和实践上取得了巨大进步,但从整体上与国外相比仍有不小差距。传统吸能防护材料钢材韧性好,在撞击、爆炸、武器冲击等载荷作用下不易发生断裂,且可通过变形吸收大部分冲击能量,钢材吸能层在车辆、地下防

护工程、道路护栏上得到广泛应用<sup>[1]</sup>,但钢材耐腐蚀、氧化性能差,不宜长久保持,长时间放置下存在安全隐患。混凝土材料耐久性很好,但其抗拉强度低、韧性差和开裂后裂缝宽度难以控制等缺点,一般不被考虑作为缓冲防护材料。近年出现的超高韧性水泥基复合材料,具有较高强度的同时展现出良好的变形性能,为混凝土材料运用护栏等吸能结构,提供了更多可能。

目前中国对超高韧性水泥基复合材料应用方面

收稿日期:2015-11-10

作者简介:唐传茗(1994-),男,主要从事防灾减灾与防护工程研究,(E-mail)200725260@qq.com。

晏麓晖(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)yan\_l\_h@aliyun.com。

的研究有一定进展。张君和公成旭<sup>[2]</sup>在高韧性纤维增强水泥基复合材料单轴抗拉性能研究发现在水泥净浆或砂浆中加入 1.0~2.5% 聚乙烯醇或超高分子量聚乙烯纤维可以大幅度提高混凝土的抗拉强度和韧性,在拉伸荷载作用下可产生多条细密裂缝,极限拉应变可稳定地达到 3% 以上,大约是普通混凝土的 100~300 倍、钢筋混凝土的 5~10 倍。在极限荷载作用下不会像普通混凝土容易发生断裂,同时具有很好的吸能性能。

高淑龄<sup>[3]</sup>与徐世焱<sup>[4]</sup>也对超高韧性水泥基复合材料拉伸性能进行了深入研究。超高韧性水泥基复合材料在吸能防护方面应用的研究,不仅在民用及军事领域均具有巨大的应用前景,而且具有很强市场潜力,优越的性能和较大的经济效益,对建筑材料技术的革新也具有重要意义。

笔者将不同配合比下超高韧性水泥基复合材料圆管进行抗压试验,分析研究该材料的抗压强度、吸能性能、变形特点和最佳掺量比例。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

水泥采用京都 P.O 32.5 水泥,密度为 3.1 g/cm<sup>3</sup>;砂采用 100~200 目的普通石英砂,表观密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>;聚乙烯醇为日本 kuraray 公司生产,其

性能见表 1。粉煤灰采用低钙灰;硅灰白度 40~50,真密度 2.2 g/cm<sup>3</sup>,减水剂为 NF-2 缓凝高效减水剂,水为普通自来水。

表 1 聚乙烯醇(PVA)纤维的材料性能

密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	直径/nm	长度/mm
1.3	1 620	42.8	0.039	12

### 1.2 配合比设计

本实验主要研究不同体积掺量聚乙烯醇(PVA)纤维对超韧性水泥基复合材料圆管侧向吸能特性的影响,根据文献,探索水泥、粉煤灰、硅灰、水浆比及砂浆比等材料不同掺量对圆管吸能特性的影响规律,以期找到现有研究阶段中最佳的吸能配合比。

本实验设置 14 组构件,其中 1~7 组证实不同聚乙烯醇(PVA)纤维体积掺量对超韧性水泥基复合材料圆管侧向吸能特性的影响;6、8、9、10、11 组探究不同粉煤灰与硅灰掺量对圆管吸能特性的影响;12~14 组分别探究添加硅灰,改变水浆比或砂浆比对圆管吸能特性的影响。

超高韧性水泥基复合材料圆管试验配合比如表 2 所示。

表 2 超高韧性水泥基复合材料圆管试验配合比

试验编号	PVA 纤维体积 掺量/g(百分比)	水泥/kg (百分比)	粉煤灰/kg (百分比)	硅灰/kg (百分比)	水浆比/%	砂浆比/%
E1	0(0)	7.297(50)	7.297(50)	0(0)	40	36
E2	85.4(0.5)	7.297(50)	7.297(50)	0(0)	40	36
E3	170.8(1.0)	7.297(50)	7.297(50)	0(0)	40	36
E4	256.2(1.5)	7.297(50)	7.297(50)	0(0)	40	36
E5	298.9(1.75)	7.297(50)	7.297(50)	0(0)	40	36
E6	341.6(2.0)	7.297(50)	7.297(50)	0(0)	40	36
E7	427.3(2.5)	7.297(50)	7.297(50)	0(0)	40	36
E8	341.6(2.0)	5.838(40)	8.756(60)	0(0)	40	36
E9	341.6(2.0)	4.378(30)	10.216(70)	0(0)	40	36
E10	341.6(2.0)	8.756(60)	5.838(40)	0(0)	40	36
E11	341.6(2.0)	10.216(70)	4.378(30)	0(0)	40	36
E12	341.6(2.0)	8.756(60)	5.838(40)	0(0)	50	36
E13	341.6(2.0)	7.297(50)	5.838(40)	1.459(10)	40	36
E14	341.6(2.0)	8.756(60)	5.838(40)	0(0)	40	50

## 2 抗压试验

### 2.1 制作试件

本次实验的试件为内径 10 cm, 外径 20 cm, 高为 20 cm 的超韧性水泥基复合材料圆管, 试件成型的过程<sup>[9]</sup>如下:

1) 准备基材。先将水泥, 粉煤灰和细沙混合, 低速搅拌 2 min; 然后加入高效减水剂, 并继续搅拌 2 min 以获得均匀流动的基材。

2) 加入纤维。低速搅拌的同时手工缓慢加入纤维以确保能够均匀分布而不出现结团的现象。

3) 浇筑、养护。试件采用预制模型浇筑成型, 所有的试件分两次浇筑, 首先浇入一半, 然后震动 2 min 以确保材料震动密实; 然后以同样的方式浇入剩余的一半, 最后将表面抹平并覆盖一层聚乙烯膜防止水分蒸发。在室温下养护 24 h。然后拆模放入标准养护室进行水养护(温度  $20 \pm 2$  °C)分别至 7 d、28 d。本实验共有 14 组用同样工艺制作, 每一组制作 3 个同掺量的试件以减小误差。



图 1 试件原件图

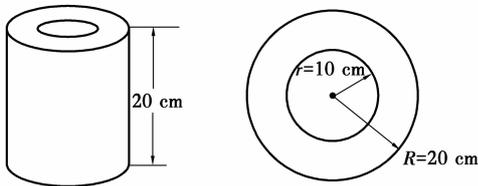


图 2 试件示意图

### 2.2 加载和测量

超高韧性水泥基复合材料圆管抗压试验在量程为 200 kN 的压力试验机进行, 采用 0.01 mm/s 位移控制的加载方式, 采集数据包括时间、位移、力, 所有数据采集频率为 5 Hz, 当荷载变化率大于 40 kN/s 或试件提供的反力小于 2 kN 时, 停止加载。加载方式如图 3 所示, 构件旁木块主要在加载初期保持构件稳定, 而后移除。



图 3 试验中构件



图 4 试验后构件

### 2.3 试验结果分析

1) 通过对 1~7 组实验数据的选取与处理, 获得其荷载峰值和相应峰值位移变形如表 3 所示。

表 3 混凝土圆管的受压峰值与峰值对应的形变量

试件编号	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
峰值试验力/kN	7.148 9	7.271 9	9.018 7	9.904 2	11.164 2	11.180 4	11.854 3
峰值对应变形/mm	0.941 3	1.387 7	1.534 0	1.687 7	2.176 7	2.823 3	2.560 0

通过上述试验结果可知, 在混凝土其他配合比例不变的情况下, 仅改变 PVA 纤维的体积掺量条件下, 试件峰值试验承载力和峰值荷载对应变形都随 PVA

纤维体积掺量的提高而升高, 即 PVA 不仅能提高强度, 而且能大幅度提高试件的韧性至 3 倍, 这对吸能效果的增强是有利的, 峰值试验力也随着 PVA 纤维

掺量的增多而增大,最佳 PVA 体积掺量为 2.0%<sup>[5]</sup>。

2)不同掺量对试件的影响,如表 4 所示。

表 4 不同掺量对试件受压峰值与峰值对应的变形

试件编号	E6	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14
峰值试验力/kN	12.781 4	9.976 5	7.869 9	11.286 3	14.871 6	12.777 1	10.985 8	14.327 7
对应变形/mm	2.523 3	2.760 7	2.846 2	2.537 4	2.415 3	2.810 3	2.089 7	2.232 7

a. 由 E6、E8、E9、E10、E11 试验结果可知,当试件的 PVA 纤维掺量、水浆比和砂浆比一定时,在一定范围内水灰比越大试件的峰值试验力越高,但是峰值对应形变会有所下降,试件的韧性将会随之降低。

b. 由 E6、E10、E13 试验结果可知,当试件的 PVA 纤维掺量、水浆比和砂浆比一定时,硅灰的掺加对试件的峰值试验力与峰值试验力对应形变值均带来了不利影响。

c. 由 E10、E14 试验结果可知,当试件的 PVA 纤维掺量、水泥质量比、粉煤灰质量比、硅灰质量比和水浆比一定时,砂浆比越大,试件的峰值试验力越高,但会降低峰值试验力对应的形变值即降低韧性。

d. 由 E10、E12 试验结果可知,当试件的 PVA 纤维掺量、水泥质量比、粉煤灰质量比、硅灰质量比和砂浆比一定时,水浆比越大,峰值对应形变越大韧性有所提高,但是峰值压力有所降低。

3)试验力-位移曲线图分析。

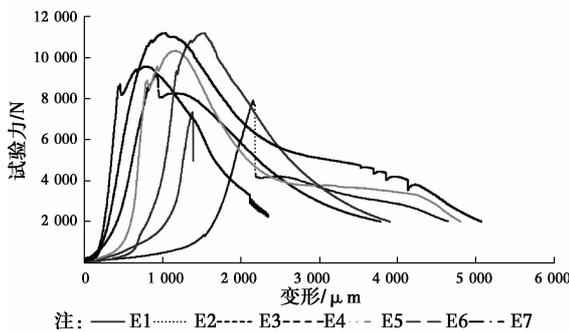


图 5 位移-试验力曲线图

a. 由 E1 曲线可知,素混凝土试件在达到极限荷载后发生脆性破坏,破坏情况如图 6。试件破坏切口较为平滑,破坏迅速,为典型脆性破坏。

b. 由 E2-8 曲线可知,混凝土试件里添加 PVA 纤维后,在极限荷载作用下,试件的脆性逐渐降低,最大位移增大,其韧性随 PVA 纤维的掺量的增加而增加。当 PVA 纤维体积掺量达到 1.0%以上,试件

破坏脆性不明显,至实验结束试件不会发生贯穿性裂缝,裂缝被致密的 PVA 纤维连接,破坏情况如图 7。



图 6 E1-01 试件破坏情况



图 7 E4-01 试件破坏情况

4)吸能性能的分析。吸能公式的计算采用实验力在位移上的积分,即各个位移-试验力曲线的面积。

$$E_{吸} = \int_u^v F(x) d\delta \quad (1)$$

需要注明的是对曲线积分上下限的选取,实际上考虑到局部压缩效应,前期缓慢上升段应去掉。综合各曲线特点,取下限  $u$  使  $F(u)=500$  N,以消除误差影响。本实验在试验降到 2 kN 以下截止,因后期试验力降到一定程度后变形量随试验力变化加剧,已不再适合防护吸能。

a. 由图 5, E2-8 曲线可知, 配合比一定时, PVA 纤维掺量增加, 吸能效果明显增强, 当纤维体积掺量为 2.0% 时效果最好。

b. 由图 8, E6、8-14 曲线可知, PVA 纤维掺量一定时, 不同配合比下, E11 组的吸能效果最好。

现将各组试件吸能量与对第一组的比值计算如表 5。

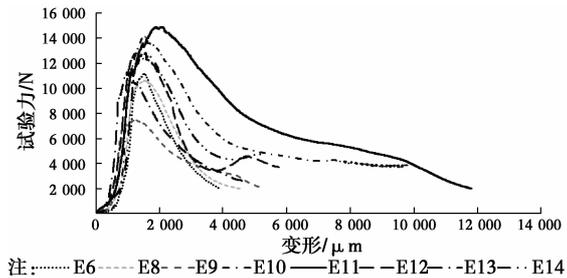


图 8 位移—试验力曲线图

表 5 吸能对比表

组序	1	2	3	4	5	6	7
吸能比例	1	2.665 2	5.920 0	11.803 6	10.570 6	12.219 7	16.290 4
组序	8	9	10	11	12	13	14
吸能比例	15.215 1	13.605 3	15.898 1	21.536 5	21.409 0	15.218 51	19.443 7

c. 由表 5 可知, 吸能效果最好的是 E11 组, PVA 纤维最佳的掺量为 2.0%~2.5%, 本次实验所确定试件吸能的最佳配合比: 70% 水泥, 30% 粉煤灰, 水浆比为 40%, 砂浆比为 36%。

d. 由表 5 可知, 超高韧性水泥基复合材料圆管的吸能效果是不掺加 PVA 纤维的 20 倍以上, 再以多排钢管压扁试验<sup>[10]</sup>为参考, 通过提高钢筋混凝土材料性能, 采取最佳结构合理配备吸能原件, 基本能达到公路护栏防撞要求, 能够替代钢管实现吸能防护功能。

### 3 结 论

1) 掺加 PVA 纤维能提高混凝土圆管的峰值试验力和形变值, 韧性明显增强, 有效避免脆性破坏。在合理配合比下, 适当提高 PVA 纤维的掺量, 能够提高其峰值试验力和变形能力; PVA 纤维体积掺量为 2.0% 时对材料的吸能提升最好。

2) 在 PVA 纤维掺量一定时, 提高水泥含量和减小粉煤灰含量, 能够提高混凝土圆管的峰值试验力, 但韧性略有降低; 砂浆比增大, 能够增大峰值试验力和降低韧性; 水浆比适当, 能够增大试件的变形量, 但峰值试验力有所降低; 硅灰增加, 降低形变值, 对峰值试验力也略有下降。

3) 配合比一定时, PVA 纤维掺量的增加能够明显提高吸能效果, 能够达到素混凝土管的 20 倍以上; 本次实验吸能效果最佳的配合比为: PVA 纤维体积掺量为 2.0%, 70% 水泥, 30% 粉煤灰, 水浆比为 40%, 砂浆比为 36%。

#### 参考文献:

- [1] 余同希. 利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置[J]. 力学进展, 1986, (1).
- [2] 张君, 公成旭. 高韧性纤维增强水泥基复合材料单轴抗拉性能研究[C]// 第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集: 纤维混凝土的技术进展与工程应用, 2006: 27-32.
- [3] 高淑玲. PVA 纤维增强水泥基复合材料假应变硬化及断裂特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [4] 高淑玲, 徐世焯. PVA 纤维增强水泥基复合材料拉伸特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(2): 233-239.
- [5] 王海超, 张玲玲, 高淑玲, 等. PVA 纤维对超高韧性纤维增强水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 混凝土, 2013(4): 4-7.
- [6] 丁一, 陈小兵, 李荣. ECC 材料的研究进展与应用[J]. 建筑结构, 2007, 37(增 1): 94-98.
- [7] 王晓刚, WittmanFH, 赵铁军. 优化设计水泥基复合材料应变硬化性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2006(3): 46-49.
- [8] 高淑玲, 徐世焯. 利用水平外力总功研究 PVA 纤维增强水泥基复合材料韧性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(2): 324-329.
- [9] 科技日报. 10 项最有影响新技术: 可弯曲水泥韧性高 [EB/OL]. 北京: 科技日报, 2007.
- [10] 顾红军, 赵国志, 张恒喜, 等. 多排钢管冲击压扁行为研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23(2): 78-81.