

应变硬化水泥基复合材料构件受剪性能与承载力计算方法研究

侯昌明¹ 李毅东¹ 汤永联¹ 张智勇¹ 张永兴^{2,*}

(1.广东电网有限责任公司佛山供电局,佛山 528010; 2.广东天信电力工程检测有限公司,广州 510000)

摘要 为掌握应变硬化水泥基复合材料构件的受剪性能,为其用于工程结构提供参考,对剪跨比等于3的应变硬化水泥基复合材料构件进行受剪破坏试验研究,重点分析应变硬化水泥基复合材料构件的受剪破坏行为,包括构件的剪切荷载-位移关系、构件的裂缝扩展过程、构件断裂面形态及最终破坏形态。此外,基于应变硬化水泥基复合材料裂缝面的基体接触作用、纤维桥联作用对应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力产生的贡献,提出了考虑裂缝面基体接触作用和纤维桥联作用的应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力计算方法。研究表明:应变硬化水泥基复合材料构件的受剪承载力可以通过分别计算裂缝面的基体接触作用、增强纤维桥联作用所承担的受剪承载力得到,本文提出的应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力计算公式较为精确。

关键词 应变硬化水泥基复合材料构件, 受剪性能, 试验研究, 裂缝扩展, 计算方法

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **DOI:** 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0001

Study on Shear Performance and Loading Carrying Capacity of Strain Hardening Cementitious Composite Member

HOU Changming¹ LI Yidong¹ TANG Yonglian¹ ZHANG Zhiyong¹ ZHANG Yongxing^{2,*}

(1.Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd., Foshan 528010, China;

2.Guangdong Tianxin Electric Power Engineering Testing Co.,Ltd, Guangzhou 510000, China)

Abstract In order to understand the shear behavior of strain hardening cementitious composite (SHCC) member and provide the technical support for its application in engineering, the experimental investigation of SHCC member with shear span length to effective depth ratio about 3 was carried out, in which the shear failure behavior of SHCC member was analyzed, including shear load versus displacement, crack propagation, ultimate fracture pattern and fracture surface. In addition, based on the contributions to the shear bearing capacity of SHCC member from both the matrix contact effect and fiber bridging effect on the crack surface of SHCC, a calculation method for the shear bearing capacity of SHCC member considering the matrix contact effect and fiber bridging effect on the crack surface of SHCC is proposed. The research has shown that the shear bearing capacity of SHCC member can be obtained by separately calculating the shear bearing capacity of the matrix contact effect and the fiber bridging effect on the crack surface of SHCC, and the

收稿日期: 2024-08-16

基金项目: 广东电网有限责任公司基建技术创新专题

作者简介: 侯昌明(1970-),男,学士,高级工程师,主要从事电力基础设施研究。E-mail:foshanhcm@163.com

*联系作者: 张永兴(1981-),男,江苏扬州,博士,正高级工程师,主要从事混凝土及地下工程结构研究。E-mail:zhangyongxing81@aliyun.com

proposed formula for calculating the shear bearing capacity of SHCC member is effective precise.

Keywords SHCC member, shear performance, experimental study, crack propagation, calculation method

0 引言

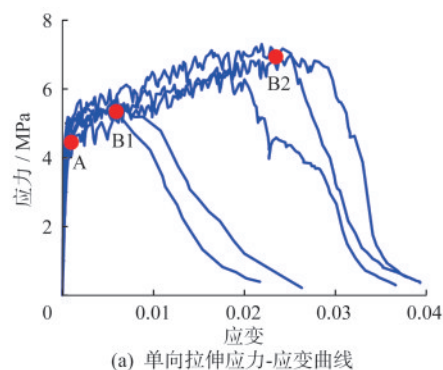
纤维增强水泥基复合材料因其具有较好的力学性能,以及优异的增强、阻裂、增韧等功能而得到广泛应用^[1-4]。其中,应变硬化水泥基复合材料可根据不同需求而采用不同的配合比^[5-6],不仅具有高延性(起因于材料的多缝开裂特征)、表面保护功能、可持续性^[7-9],还具有高拉伸、高压缩强度等超高性能^[10-11]。将应变硬化水泥基复合材料应用于工程结构,可以很好发挥其优势,提高工程结构的延性和耐久性。

然而,应变硬化水泥基复合材料构件剪切破坏时会伴随较多的微裂缝,破坏形态明显不同于普通的混凝土构件。目前,对应变硬化水泥基复合材料构件受剪性能的研究很少,仅有 Kanakubo 教授等通过平面内剪切试验考察应变硬化水泥基复合材料试件裂缝面剪切变形过程^[12],Suryanto 等采用固定弥散裂缝模型模拟应变硬化水泥基复合材料构件剪切破坏^[13]。然而,应变硬化水泥基复合材料构件受剪开裂后,裂缝面压缩侧接触面积的咬合作用与拉伸侧纤维桥联作用均影响裂缝面的剪应力转移^[14]。可见,应变硬化水泥基复合材料构件受剪破坏机理非常复杂,既有研究明显不足。基于此,本文对应变硬化水泥基复合材料构件的受剪性能进行试验研究,重点分析其受剪破坏行为。

1 应变硬化水泥基复合材料单向拉伸与压缩特性

图1为应变硬化水泥基复合材料哑铃形试件进行单向拉伸试验的结果。应变硬化水泥基复合材料各组分含量见表1。 π 型位移计贴于试件正反两面,测量裂缝张开的位移(容许最大值为 ± 5 mm),位移计量测长度与精度分别为100 mm

与1/2 000 mm,千斤顶容许荷载为50 kN。从单向拉伸应力-应变曲线可见,该类水泥基复合材料具有明显的应变硬化特性(图1中点B1、B2);从试件破坏后的裂缝分布可见,试件在应变硬化阶段出现许多细小裂缝,细小裂缝的间距小于3 mm。伴随着部分细小裂缝局部化扩展而逐渐变宽,单向拉伸应力-应变曲线出现软化下降段,试件最终破坏。此外,该材料弹性模量为29.0 GPa,轴心抗压强度为91.0 MPa,对应的应变为0.004,压缩破坏的断裂能为83.9 N/mm。



(b) 单向拉伸试件裂缝分布

图1 单向拉伸试验结果

Fig.1 Results obtained from uniaxial tensile test

2 试验方案

2.1 试件设计

图2为用于受剪试验的应变硬化水泥基复合材料构件示意图,构件的剪跨比约等于3,试件详细参数见表2。应变硬化水泥基复合材料构件水平向长1 200 mm,截面尺寸分别为50 mm \times 200

表1

应变硬化水泥基复合材料配合比

Table 1

Mix proportion of strain hardening cementitious composite

水灰比	单位含量/(kg \cdot m ⁻³)						
	水	水泥	硅粉	细砂	PE纤维	塑化剂	减气剂
0.18	263.7	1 338.6	334.7	167.3	14.6	33.5	7.4

mm、100 mm×200 mm。截面有效高度为 150 mm，剪切跨长 450 mm。纵向钢筋采用 $\phi 25$ 高拉伸强度螺纹钢棒(实测的弹性模量为 200 GPa, 屈服强度为 1 050 MPa), 且构件未设置箍筋, 以确保应变硬化水泥基复合材料构件的破坏形态为受剪破坏。

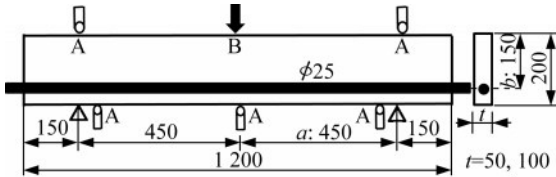


图2 试验构件几何图(单位:mm)

Fig.2 Geometrical size of test specimens (Unit:mm)

表2 应变硬化水泥基复合材料构件设计参数

Table 2 Design parameters of strain hardening cementitious composite test specimens d

试件	a/d	a/mm	d/mm	t/mm	$P_s/\%$
3-50	3	450	150	50	3.37
3-100		450	150	100	1.69

2.2 试验测量

上述构件均在三点弯曲试验装置下进行加载试验(图2点B位置), 对所施加的荷载(图2点B位置)进行测量, 并对荷载处及支撑点处位移(图2点A位置)同时进行测量, 如图3所示。

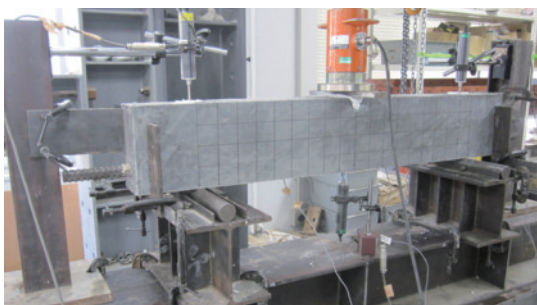


图3 加载试验装置

Fig.3 Test setup

2.3 试验结果

2.3.1 荷载-位移曲线

图4为试验所得剪切荷载-位移曲线。从图中可见, 应变硬化水泥基复合材料构件受剪破坏过程中, 达到峰值剪切荷载前, 剪切荷载随位移线性增加; 在峰值剪切荷载后, 构件突然破坏。

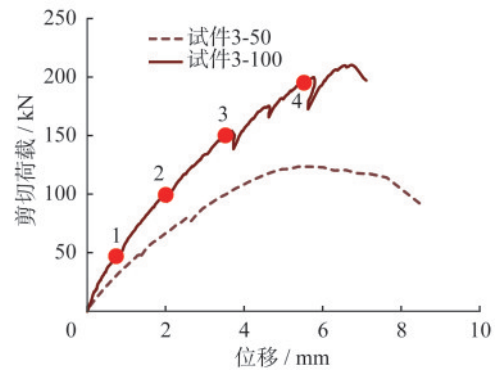


图4 剪切荷载-位移曲线

Fig.4 Curves of shear load versus displacement

2.3.2 裂缝扩展过程及形态

图5为应变硬化水泥基复合材料构件受剪破坏过程中的裂缝扩展。从图中可见, 应变硬化水泥基复合材料构件首先在受拉区底部出现垂直裂缝, 其后构件在斜向剪切方向出现细小微裂缝。此后, 应变硬化水泥基复合材料构件斜向剪切方向细小微裂缝随外部荷载增加而显著增加, 并在应变硬化水泥基复合材料构件受剪破坏过程中逐渐占据主导作用。

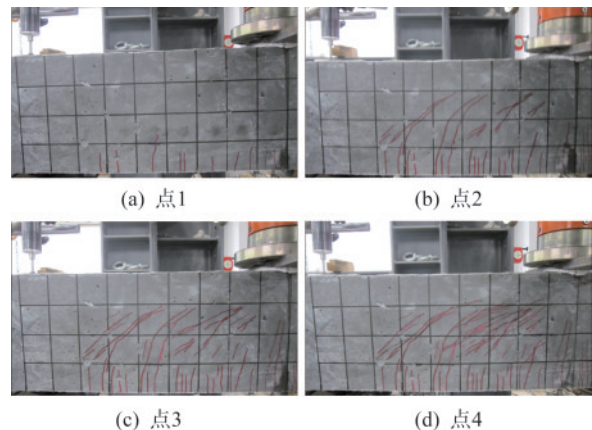


图5 试件受剪开裂过程

Fig.5 Shear cracking processes of tested specimen

图6为应变硬化水泥基复合材料构件在试验结束后的破坏形态及断裂面。从破坏形态可见, 该构件为斜向受剪破坏, 构件剪切跨中部出现众多沿斜向剪切方向的细小裂缝, 且细小裂缝间距均小于 3 mm, 其分布与单向拉伸试验应变硬化水泥基复合材料裂缝分布类似, 表明应变硬化水泥基复合材料构件在受剪破坏过程中显现出应变硬化特性, 可见纤维桥联作用影响应变硬化水泥基复合材料构件受剪性能。此

后,因应变硬化水泥基复合材料构件斜向剪切方向部分细小裂缝局部化,使得构件裂缝面增强纤维逐渐丧失其桥联作用,形成构件剪切破坏面并发生受剪破坏。从图6(b)可见,应变硬化水泥基复合材料构件在靠近荷载点处出现崩裂(黄色标记处),而在其他区域均十分光滑(蓝色标记处),可较好解释前述图4所示应变硬化水泥基复合材料构件在剪切荷载峰值后出现突然破坏。

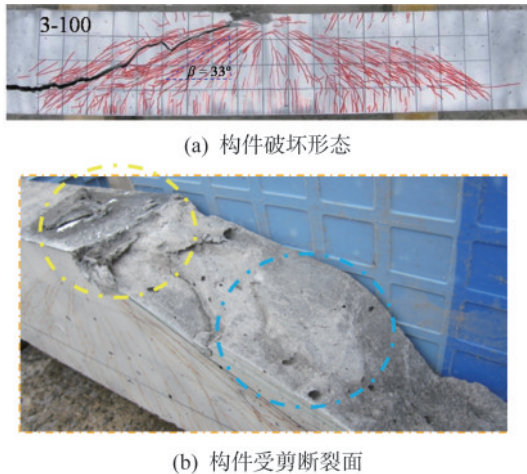


图6 构件破坏形态及断裂面

Fig.6 Failure mode and fracture surface of strain hardening cementitious composite member

3 应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力计算

3.1 受力模式

如前述试验结果所示,应变硬化水泥基复合材料构件剪切破坏前出现许多细小裂缝,裂缝表面的纤维桥联作用可延缓构件剪切破坏行为,且破坏后的构件断裂表面光滑(凹凸程度低),其破坏特征明显不同于普通或高强混凝土构件剪切破坏。基于前述试验结果,受剪破坏的应变硬化水泥基复合材料构件受力模式可简化为图7。其中,应变硬化水泥基复合材料构件压缩应力引起的破坏区域到纵向钢筋形心的距离 z 一般取 $7/8d$, L 表示应变硬化水泥基复合材料构件受剪开裂后的斜向剪切裂缝。

3.2 受剪承载力计算

基于前述讨论,应变硬化水泥基复合材料裂缝面的基体接触作用、纤维桥联作用均对应变硬

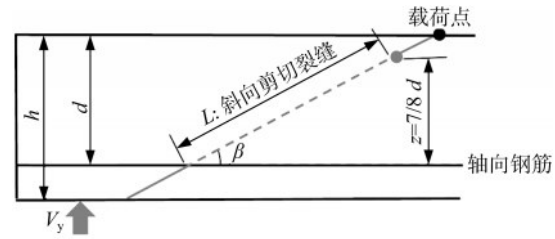


图7 受剪破坏构件受力模式

Fig.7 Force mode of shear-failed member

化水泥基复合材料构件受剪承载力产生贡献。因而,通过分别计算裂缝面基体接触作用和纤维桥联作用贡献可以得到应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力,可由式(1)表示:

$$V_y = V_c + V_f \quad (1)$$

式中: V_y 为应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力(kN); V_c 为基体承担的剪力(kN); V_f 为增强纤维承担的剪力(kN)^[15]。

$$V_c = 0.18 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (2)$$

$$V_f = (f_v / \tan \beta) \cdot b \cdot z \quad (3)$$

式中: f'_c 为应变硬化水泥基复合材料压缩强度(MPa); b 为构件宽度(mm); d 为构件有效高度(mm); f_v 为应变硬化水泥基复合材料拉伸强度(MPa); z 为应变硬化水泥基复合材料构件压缩应力引起的破坏区域到纵向钢筋形心的距离,一般取 $7/8d$ (mm); β 为斜向裂缝与构件纵轴夹角。

表3为试验所得的构件剪切应力 τ_{test} 与计算所得的构件剪切应力 τ_y 。其中, τ_c 、 τ_f 分别为计算所得的基体、纤维桥联作用承担的剪切应力。斜向裂缝与构件纵轴夹角 β 采用实测数据(如图6所示),材料强度采用实测值。从表3可见,应变硬化水泥基复合材料构件计算所得的剪切应力 τ_y 与试验所得的剪切应力 τ_{test} 相近,表明应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力可以通过分别计算应变硬化水泥基复合材料裂缝面基体接触作用、增强纤维桥联作用所承担的受剪承载力得到,上述提出的公式较为精确。

表3 试验与理论计算所得构件剪切应力

Table 3 Experimental and theoretical shear stresses of specimens

试件	b	d	β	剪切应力/MPa			
				τ_c	τ_f	τ_y	τ_{test}
3-50	50	150	33°	1.7	5.4	7.1	8.3
3-100	100	150	33°	1.7	5.4	7.1	7.0

4 结 论

(1) 受剪切作用的应变硬化水泥基复合材料构件, 剪切荷载未达峰值时随位移线性增加, 但构件在剪切荷载达到峰值后出现突然破坏。

(2) 受剪切作用的应变硬化水泥基复合材料构件首先在剪弯段受拉区出现竖向裂缝, 其后在斜剪方向出现不依赖于既有竖向裂缝的细小裂缝(随荷载增加而显著增加), 且斜剪方向部分细小裂缝局部化使得裂缝面增强纤维逐渐丧失其桥联作用, 形成构件剪切破坏面并发生受剪破坏。

(3) 裂缝面基体接触作用与纤维桥联作用均对应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力产生贡献, 所提出的考虑裂缝面基体接触作用、纤维桥联作用对构件受剪承载力贡献的应变硬化水泥基复合材料构件受剪承载力计算公式较为精确。

参 考 文 献

- [1] 杨石刚, 罗泽, 许继恒, 等. 侵入爆炸作用下钢纤维混凝土结构的破坏模式[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(1): 151-163.
YANG Shigang, LUO Ze, XU Jiheng, et al. Failure modes of concrete structure under penetration and explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(1): 151-163. (in Chinese)
- [2] 李家兴, 杨勇新, 贾彬, 等. 纤维混凝土中聚乙烯醇纤维分散性试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(12): 91-97.
LI Jiaying, YANG Yongxin, JIA Bin, et al. Experimental study on dispersibility of polyvinyl alcohol fiber concrete [J]. Building Structure, 2023, 53(12): 91-97. (in Chinese)
- [3] 李兵, 林煜期, 王宏, 等. 低坍落度聚丙烯纤维混凝土的高温后性能研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1522-1528.
LI Bing, LIN Yuqi, WANG Hong, et al. Properties of low slump polypropylene fiber concrete after high temperature treatment [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(4): 1522-1528. (in Chinese)
- [4] 曾庆典, 苏骏. 超低温作用后高延性水泥基复合材料抗弯性能试验研究[J/OL]. 建筑结构, 2026(2): 100-106. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20230566>.
- ZENG Qingdian, SU Jun. Experimental study on bending resistance of high ductility cementitious composites after ultra-low temperature [J/OL]. Building Structure, 2026(2): 100-106. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20230566>. (in Chinese)
- [5] LI Q H, GAO X, XU S L. Multiple effects of nano-SiO₂ and hybrid fibers on properties of high toughness fiber reinforced cementitious composites with high-volume fly ash [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72: 201-212.
- [6] 田砾, 王飞, 赵铁军, 等. 骨料级配对应变硬化水泥基材料力学性能的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2010, 31(2): 8-11.
TIAN Li, WANG Fei, ZHAO Tiejun, et al. Influence of aggregate gradation on mechanical performance of strain-hardening cement-based composites (SHCC) [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2010, 31(2): 8-11. (in Chinese)
- [7] YERMAK N, PLIYA P, BEAUCOUR AL, et al. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 240-250.
- [8] 田稳苓, 马林翔, 卿龙邦, 等. 钢纤维分布均匀性对水泥基复合材料断裂能的影响[J]. 混凝土, 2016(5): 74-77.
TIAN Wenling, MA Linxiang, QING Longbang, et al. Influence of steel fibre distribution uniformity on fracture energy of cement-based composite materials [J]. Concrete, 2016(5): 74-77. (in Chinese)
- [9] 刘曙光, 闫敏, 闫长旺, 等. 聚乙烯醇纤维强化水泥基复合材料的抗盐冻性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(1): 63-67.
LIU Shuguang, YAN Min, YAN Changwang, et al. Deicing salt resistance of PVA fiber reinforced cementitious composite [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(1): 63-67. (in Chinese)
- [10] 徐世焯, 王楠, 尹世平. 超高韧性水泥基复合材料增强钢筋混凝土梁弯曲控裂试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 115-122.
XU Shilang, WANG Nan, YIN Shiping, et al. Experimental study on flexural characteristics of RC beams strengthened with post-poured ultra high toughness cementitious composites [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 115-122. (in

- Chinese)
- [11] SHIN S K, KIM K, LIM Y M. Investigation of the strengthening effect of DFRCC applied to plain concrete beams [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007, 29(2):465-473.
- [12] KANAKUBO T, SHIMIZU K, NAGAI S, et al. Shear transmission on crack surface of ECC [C]// *Proceedings of FraMCoS-7*, May 23-28, 2010, Jeju, Korea:1623-1630.
- [13] SURYANTO E, NAGAI K, MAEKAWA K. Modeling and analysis of shear-critical ECC members with anisotropic stress and strain fields [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2010, 8(2):239-258.
- [14] 张永兴. 应变硬化水泥基复合材料构件剪切破坏评价方法研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(12):66-73.
ZHANG Yongxing. Evaluation method on shear failure behavior of strain-hardening cementitious composite member[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(12):66-73. (in Chinese)
- [15] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks (HPFRCC), *Concrete engineering series 82* [S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008.