

# An Experimental Study on Measuring Average Strain of Ferrocement Plate by Using Resistive Strain Sensor Pasted on Copper Foil

Xiaoyong Wu<sup>1,2\*</sup>, Qian Lei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang Hubei

<sup>2</sup>College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang Hubei

Email: [xywu007@gmail.com](mailto:xywu007@gmail.com)

Received: May 7<sup>th</sup>, 2015; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2015; published: May 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

A method of using resistance strain sensor pasted on the thin copper with good ductility to measure the average strain of the ferrocement plate under the bending load is proposed. This method can get a full load and strain curve ferrocement plate under flexural load. By transformation, the crack width is calculated by the bending strain data including the initial crack width, final crack width and load curve of crack width. The load-displacement curve and the load-strain curve show that the ferrocement plate has good bending strength and crack resistance.

## Keywords

Resistive Strain Sensor, Ferrocement, Stress-Strain Curve, Copper Foil, Crack

---

# 附着铜箔式电阻应变传感器测量钢丝网水泥板平均应变实验研究

吴小勇<sup>1,2\*</sup>, 雷 倩<sup>2</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌

<sup>2</sup>三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌

Email: [xywu007@gmail.com](mailto:xywu007@gmail.com)

收稿日期: 2015年5月7日; 录用日期: 2015年5月22日; 发布日期: 2015年5月29日

## 摘要

提出将电阻应变传感器黏贴在薄而延性很好的铜箔上, 用来测量钢丝网水泥板弯曲加载下的平均应变的方法。这种方法可以得到钢丝网水泥板受弯曲作用下一个完整的载荷 - 应变曲线。通过转换, 通过弯曲应变数据结果计算出裂缝宽度, 这包括初始裂缝宽度、最终裂缝宽度和载荷 - 裂缝宽度曲线。荷载-位移曲线和载荷 - 应变曲线表明, 钢丝网水泥板具有良好的弯曲强度和抗裂性能。

## 关键词

电阻式应变传感器, 钢丝网水泥, 应力应变曲线, 铜箔, 裂缝

## 1. 引言

钢丝网水泥的行为不同于普通钢筋混凝土。与钢筋混凝土相比, 钢丝网水泥在两个方向有均匀同向特性。展现了抗拉强度高, 断裂模量高, 以及优越的抗裂性能。此外, 由于钢丝网网格具有较高的比表面积, 优越的配筋分散性, 导致较小的裂缝间距和裂缝宽度[1]。

从 50 年代后期开始试验调查研究钢丝网水泥的力学行为。各研究人员根据不同的目标进行了大量的钢丝网水泥的实验项目, 涉及测试试件的拉伸、压缩或弯曲[2]。几乎所有的实验分析都是基于传统的荷载位移或载荷应变(开裂之前)的测量数据, 因为应变计在裂缝出现后就失效了。其他调查人员使用放大 40 倍和 0.02 毫米的精度的显微镜式手持探测器测量裂缝宽度, 得到的数据并不连续, 也不是很准确, 并且这个仪器并不适合非常小的裂缝宽度[1]-[15]。

笔者提出先将铜箔粘贴在钢丝网砂浆板的受拉区, 再将电阻式应变计粘贴在铜箔上, 以此来测定带裂缝试件的平均受拉应变(包括试件开裂后)。以期得到一个完整的钢丝网砂浆受弯下荷载 - 应变曲线。通过转换, 最终可以获得初始裂缝宽度、裂缝宽度和荷载裂缝宽度曲线。基于此思路, 亦可探索使用铜箔测量混凝土柱外表面砂浆开裂前后的完整环向应变。根据试验成果分析裂缝的开展情况, 也作为钢丝网水泥控制现浇楼板斜角裂缝的一个手段。

## 2. 试验概况

实验的目的是测量钢丝网水泥板开裂前后的平均裂缝宽度, 分析钢丝网砂浆板弯曲性能和抗裂性能。

### 2.1. 材料

镀锌焊接钢丝网直径为 1.2 mm, 钢丝网孔距为 11 mm × 11 mm, 钢丝的力学性能采用图 1 的试验结果。

砂浆配比为: 水:水泥:砂 = 0.44:1:2 (质量比), 采用普通波特兰水泥, 砂浆强度根据 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 试块实测为 40.1 MPa。

### 2.2. 试验

为此, 如表 1 所示, 一共制作了 24 块钢丝网砂浆板, 一层钢丝网, 试件尺寸为 350 mm × 125 mm ×

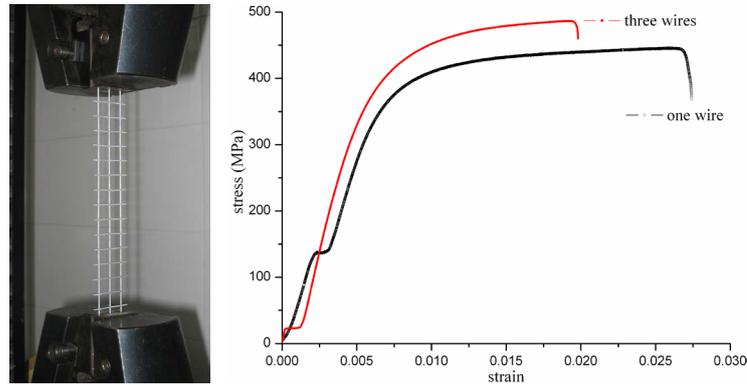


Figure 1. Mechanical behaviour of wire meshes tested under tension  
图 1. 钢丝的拉伸力学性能

Table 1. Results of ferrocement plates under bending test  
表 1. 钢丝网水泥板弯曲试验结果

试件分类	钢丝直径 (mm)	网格大小 (mm)	试件尺寸 (mm)	钢丝网层数	最大荷载 (N)	杨氏模量 <sup>a</sup> (MPa)	耗能 <sup>b</sup> ( $\times 10^{-3}$ J)		
砂浆试件	M. Arif 等	-	237 × 60 × 29	-	657	6025	88		
	试验	-	350 × 125 × 30	-	2173	5991	1251		
	M. Arif 等	φ1.44	15 × 15	237 × 60 × 29	3	2912	6180	2961	
	A	φ0.70	12 × 12		2783	9275	1326		
钢丝网水泥试件	B	φ1.00	13 × 13		2664	8813	1278		
	C	φ1.20	13 × 13		2976	6016	2337		
	试验	D	φ0.70	25 × 25	350 × 125 × 30	1	2656	9446	1185
	E	φ1.00	25 × 25		2877	10662	1232		
	F	φ1.50	13 × 13		3863	5744	4125		
	G	φ0.70	20 × 20		2960	8869	1568		

<sup>a</sup> 杨氏模量用弹性理论估算, 即  $E = Pl^3/48\delta l$ ; <sup>b</sup> 耗能 = 荷载 - 位移曲线下的面积。

30 mm (如图 2)。保护层厚度为 5 mm, 每个试件上用环氧树脂贴二条厚 0.01 mm、宽 10 mm 的铜箔, 然后将应变计贴在铜箔上, 铜箔延性很高(伸长率大于 20% [5]), 因此预计在砂浆开裂后, 铜箔不会断裂, 故应变计可以测量带有裂缝砂浆的平均应变值(如图 3)。为得到更为准确的平均应变, 本试验的选取混凝土电阻应变传感器长度为 50 mm。

试验加载(如图 2 和图 3)采用位移控制模式, 加载速率为 1 mm/min。测量了荷载 - 应变曲线(图 4)、初裂荷载、极限荷载和开裂挠度等, 重点探讨了荷载 - 应变关系。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 关于铜箔对试验结果的影响的讨论

如表 1 所示, 试件可分为贴与不贴铜箔两类。钢丝网水泥被报道在大多数试验的荷载位移关系(如图 4(a)), 然而, 没有一个荷载应变曲线报告, 因为没有方法来测量板破裂时的应变。通过使用铜箔, 得到弯曲作用下钢丝网水泥完整的荷载应变曲线(如图 4(b)), 根据测量的裂缝处的平均应变计算得到了裂缝宽度。

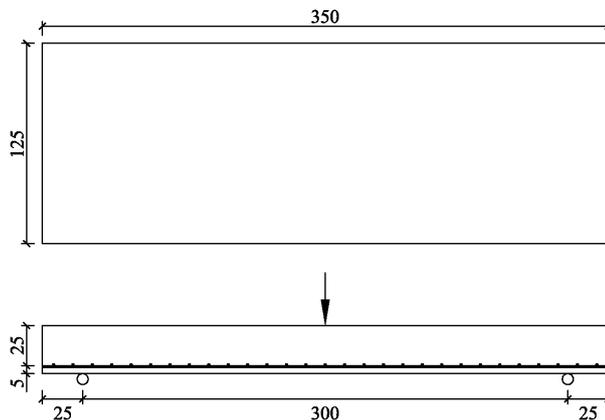


Figure 2. Specimen details for flexural tests  
图 2. 弯曲试验试件尺寸(单位: mm)



Figure 3. Testing of specimens under flexure  
图 3. 弯曲试验试件图(单位: mm)

板在弯曲的杨氏模量可以通过荷载 - 位移曲线估算(如表 1)。砂浆板具有弯曲脆性性能，而钢丝网水泥板表现出良好的延性性能。同样试验钢丝网水泥板的载荷 - 应变曲线有明显的延性特征。

### 3.2. 荷载 - 应变曲线与分析

弯曲荷载作用下，钢丝网水泥板和砂浆板有不同的荷载 - 位移曲线和荷载 - 应变曲线。荷载应变曲线的结果表明，该方法使用铜箔有能力衡量弯曲试件的完整的应变响应直到试件失效。

弯曲强度的改善取决于钢丝网在屈服阶段后行为。此外，这种改善强取决于钢丝网网格性能，以及钢丝网网体的体积分数。应该注意，适量多的钢丝网体积分数有利于钢丝网水泥板试件更多的耗能(如表 1)。与砂浆板试件相比，钢丝网水泥试件的裂缝更多更细，即裂缝宽度和裂缝间距均较小。这可能是由

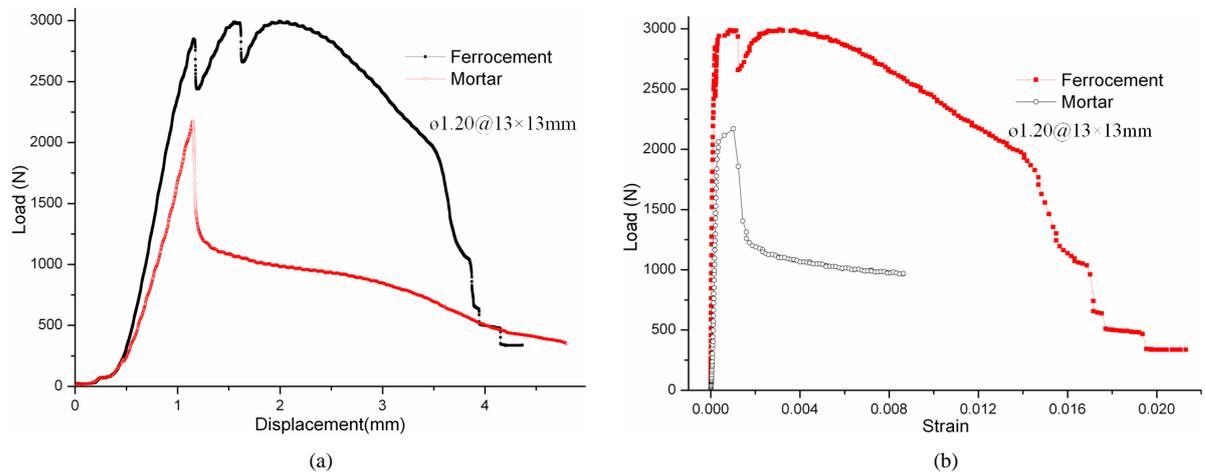


Figure 4. (a) Typical load-displacement curve; (b) Load-strain curve for specimens under flexure

图 4. (a) 典型荷载 - 位移曲线; (b) 弯曲作用下试件的荷载 - 应变曲线

于钢丝网具有更高的比表面积，产生更多的微小裂缝。

直径相同但网格更小的钢丝网试件的测试曲线更平滑，以及更高的弯曲载荷和耗能。这是因为网格体积分数的增加，钢丝在钢丝网水泥试件弯曲开裂后的贡献，改善构件的力学性能。类似的结果也可以在网格相同但直径更大的钢丝网试件测试结果中得到。此外，表 1 还列出了所有试件的峰值弯曲载荷，杨氏模量和耗能大小。

#### 4. 结论

从本次试验研究可以得出以下结论：

- 1) 试验表明，所有钢丝网水泥板表现出良好的延性。
- 2) 用附着铜箔式电阻应变传感器的方法测量钢丝网水泥板的应变是可行的和有效的。铜箔对测试结果几乎没有影响(虽然标本数较小)，因此，可以预期，这种方法也可以用于测量混凝土梁或板的应变和裂缝(包括开裂前后)。
- 3) 应当指出，钢丝网水泥板试件适量多的钢丝网含量带来的跟多的耗能。试件 A、B、C、D、E 和 G 的峰值荷载几乎相同的，直径为  $\phi 1.20$  mm 和网格尺寸  $13\text{ mm} \times 13\text{ mm}$  的 C 试件的耗能有明显的提高(大约 2 倍)直到试件失效。

#### 基金项目

湖北省自然科学基金面上项目(2014CFC1140); 三峡大学科学基金项目(KJ2011B031)。

#### 参考文献 (References)

- [1] Arif, M., Pankaj and Kaushik, S.K. (1999) Mechanical behaviour of ferrocement composites: An experimental investigation. *Cement and Concrete Composites*, **21**, 301-312.
- [2] Al-Kubaisy, M.A. and Jumaat, M.Z. (2000) Flexural behaviour of reinforced concrete slabs with ferrocement tension zone cover. *Construction and Building Materials*, **14**, 245-252.
- [3] Masood, A., Arif, M., Akhtar, S. and Haquie, M. (2003) Performance of ferrocement panels in different environments. *Cement and Concrete Research*, **33**, 555-562.
- [4] Shannag, M.J. and Ziyad, T.B. (2007) Flexural response of ferrocement with fibrous cementitious matrices. *Construction and Building Materials*, **21**, 1198-1205.
- [5] 宋小龙, 安继儒 (2007) 新编中外金属材料手册. 化学工业出版社, 北京.

- [6] 艾亿谋, 杜成斌, 居发亮 (2008) 基于电阻率的混凝土裂缝测量方法. *东南大学学报(自然科学版)*, **2**, 289-292.
- [7] 蒲琪, 张怀清, 代祥俊, 云海, 张东焕 (2009) 数字散斑相关方法测量混凝土裂缝尖端演化过程. *徐州建筑职业技术学院学报*, **3**, 11-14.
- [8] 邓鹏 (2010) 测量纤维增强喷射混凝土裂缝的新方法. *湖南交通科技*, **1**, 121-123.
- [9] 黄定卫, 张莹, 赵建伟 (2011) 基于 OTDR 的混凝土裂缝测量技术. *光纤与电缆及其应用技术*, **3**, 31-33.
- [10] Kohler, E.R. and Roesler, J.R. (2005) Crack width measurements in continuously reinforced concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering*, **131**, 645-652.
- [11] Childs, P., Wong, A.C.L., Terry, W. and Peng, G.D. (2008) Measurement of crack formation in concrete using embedded optical fibre sensors and differential strain analysis. *Measurement Science and Technology*, **19**, Article ID: 065301.
- [12] Huangm P., Qi, Z., Huang, W.W. and Lu, Y. (2014) Automatic crack length measurement of concrete structure based on image processing. *Advanced Materials Research*, **1030-1032**, 728-731.
- [13] Seher, M., In, C.-W., Kim, J.-Y., Kurtis, K.E. and Jacobs, L.J. (2013) Numerical and experimental study of crack depth measurement in concrete using diffuse ultrasound. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **32**, 81-92.
- [14] Haavik, D.J. (1990) Evaluating concrete cracking by measuring crack width. *Concrete Construction—World of Concrete*, **35**, 553-554, 556.
- [15] Yin, Z.Z., Wu, C.L. and Chen, G.D. (2014) Concrete crack detection through full-field displacement and curvature measurements by visual mark tracking: A proof-of-concept study. *Structural Health Monitoring*, **13**, 205-218.