

玻璃钢筋增强树脂混凝土梁的弯曲性能研究

王 伟,晏石林,张 炎

(武汉理工大学理学院,武汉 430070)

摘 要: 对玻璃钢筋增强树脂混凝土(GFRP)梁进行弯曲性能试验研究,并在现有的玻璃钢筋增强水泥混凝土梁分析模型的基础上,提出了用于玻璃钢筋增强树脂混凝土梁挠度计算的修正模型。利用该修正模型对梁内部出现微裂纹后的挠曲性能进行评估,其结果与实测结果吻合较好。

关键词: 玻璃钢筋; 树脂混凝土; 梁; 挠度

中图分类号: TU 599

文献标志码: A

文章编号: 1671-4431(2005)02-0007-03

The Flexural Properties of GFRP Polymer Concrete Beam

WANG Wei, YAN Shi-lin, ZHANG Yan

(School of Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This paper presented some experiments and theoretical analysis about the flexural capability of the GFRP polymer concrete beam. Based on the used analysis model about GFRP concrete beam, it put forward a modified model used to calculate the flexibility of the GFRP polymer concrete which is obtained by combining the characteristics of the GFRP polymer concrete beam with the results of flexural experiments. This modified model is used to evaluate the flexural capability of some beams after the first crack appeared. It is found that the results from the model and the experiments matched well.

Key words: fiber reinforced polymer (FRP) rebar; resin concrete; beam; deflection

树脂混凝土是以树脂(聚合物)作为胶结剂与集料混合,通过聚合作用而成的一种复合材料。树脂混凝土与普通水泥混凝土相比,优点为:抗拉、抗压、抗弯强度大;耐化学腐蚀性、耐磨性好;不吸水、低收缩;良好的耐水性和抗冻性;硬化时间可以控制;减震性和电绝缘性好;成品表面光滑^[1]。作为增强材料,玻璃钢筋(GFRP rebar)与钢筋相比,优点为:耐腐蚀性强;纵向抗拉强度高;容重小;抗疲劳性能好;电磁绝缘性好。因此,充分利用二者的优点,将玻璃钢筋与树脂混凝土复合制成的玻璃钢筋增强树脂混凝土代替传统的钢筋增强混凝土,在有色冶金、化工、建筑防腐、海底基础设施等领域得到了越来越广泛的应用。但是玻璃钢筋的弹性模量较低,约为钢筋的 25%,即使采用碳纤维复合材料作为加强筋,模量最多也只达到钢筋的 70%;而且,树脂混凝土的弹性模量只有水泥混凝土的 50%~70%。所以玻璃钢筋增强树脂混凝土受弯构件在受力过程中会出现较大的挠度,在这种材料的构件设计中,挠度的控制成为一个关键问题。对玻璃钢筋增强树脂混凝土梁的计算模型进行了试验研究和理论分析,对梁在开裂前后的弯曲性能进行了评估。

1 试验研究

1.1 试验材料

1) 玻璃钢筋 直径为 8 mm,南京斯贝尔复合材料有限公司;2) 树脂 XLJ-1 型呋喃树脂,黄石市汇波防

收稿日期:2004-10-21.

基金项目:国家自然科学基金(19972049).

作者简介:王 伟(1978-),女,硕士. E-mail:starwei2002@163.com

腐有限公司;3)集料 由固化剂、石英粉、砂、碎石、粗石组成,黄石市汇波防腐有限公司。

1.2 材料性能

采用的玻璃钢筋是由无碱无捻玻璃纤维纱和不饱和聚酯树脂通过拉挤成型工艺制成的复合材料圆截面棒材,树脂混凝土由耐腐蚀性很好的呋喃树脂和各种级配的砂、石子、粉料固化剂等混合固化而成。对材料的力学参数进行测试^[2],其主要力学性能指标见表 1。

1.3 试验构件与试验装置

在玻璃钢筋增强树脂混凝土梁的制作过程中,为了提高玻璃钢筋与树脂混凝土的粘结强度,在玻璃钢筋表面预先进行了处理,即用 Tex2400 的玻璃纤维纱浸渍 E-44 型环氧树脂在玻璃钢筋表面稀疏地交叉缠绕一层,待凝胶固化后再布置于模具中进行树脂混凝土的浇灌。玻璃钢筋增强树脂混凝土梁的制作工艺流程如图 1 所示。

试验所用的的简支梁截面为 100 mm ×150 mm,长 1 700 mm,净跨长为 1 500 mm,在距梁的下表面 20 mm 处布置 2 根玻璃钢筋,图 2 为制作成的玻璃钢筋增强呋喃树脂混凝土梁。采用三点加载弯曲试验装置(如图 3 所示)。重块分级加载,千分表记录位移。荷载每隔 30 min 增加一次。为了消除支座沉陷的影响,除了在梁的跨中下表面处安装一个千分表外,在两支座附近也各安装了一个千分表,用来测量各点的位移值,确定跨中挠度。

表 1 材料的力学性能

材料	弹性模量 / (10 ⁴ MPa)	抗拉强度 / MPa	抗压强度 / MPa
玻璃钢筋	5.0	608	-
呋喃混凝土	1.238	6.0	53

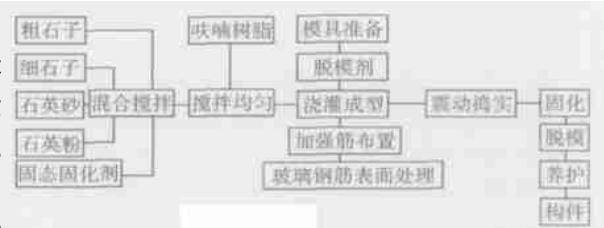


图 1 玻璃钢筋增强树脂混凝土梁的
制作工艺



图 2 玻璃钢筋增强呋喃树脂混凝土梁

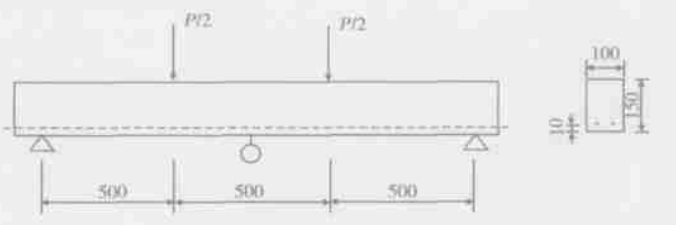


图 3 试验装置图(单位:mm)

1.4 实验结果

表 2 给出实验梁的配筋率 ρ 、实验过程中肉眼观察到的出现裂纹时的弯矩 M_{cr} 和梁破坏时的弯矩 M_{max} 。图 4 给出梁的荷载-挠度实验曲线,图 5 为其中 1 根玻璃钢筋增强呋喃树脂混凝土梁破坏前裂纹的分布情况,其它 2 根基本相同。

表 2 玻璃钢筋增强呋喃树脂混凝土
梁弯曲试验结果

配筋率 ρ / %	开裂弯矩 M_{cr} / (kN · m)	最大弯矩 M_{max} / (kN · m)
0.67	2.267 5	5.393 3

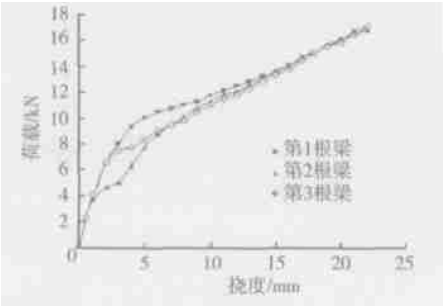


图 4 梁的荷载-挠度试验曲线

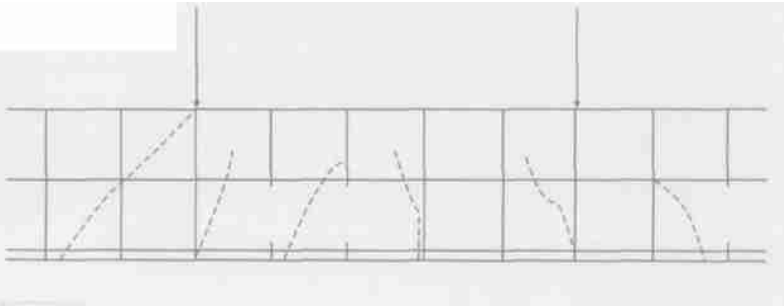


图 5 裂纹的分布情况

分别对 3 根梁进行三点加载弯曲实验,观察到从开始加载直到弯矩约为开裂弯矩 M_{cr} 的 25 % 时,这段时间内梁的挠度变化不大,荷载-挠度曲线基本表现出线性关系。随着荷载的继续增加,由于混凝土梁内部微裂纹的增加导致混凝土的刚度降低,荷载-挠度曲线呈曲线关系。当荷载达到并超过梁的开裂荷载时,由于表面裂纹的形成致使梁的挠度迅速增加,裂缝逐渐扩展,最终整个梁断裂。

实验中观察到 3 根梁的第 1 条裂纹出现的位置都处于纯弯曲段内,分别位于力的 2 个作用点附近,梁的下表面。随着荷载的继续增加,第 1 条裂纹沿着垂直水平面稍微向梁中心倾斜的方向迅速延伸,当荷载继续增加 1 kN 后,第 1 条裂纹已扩展约为梁深的 1/3,当荷载继续增加 2 kN 后第 1 条裂纹已扩展约为梁深的 2/3,此时裂纹最宽处约为 1 mm。在荷载增加的同时,等弯矩段相继出现多条裂纹,裂纹扩展的趋势与第 1 条裂纹相似。当荷载继续增加时,在等弯矩段外也出现多条细纹。由于在力的作用点处的弯矩和剪力最大,因此 3 根梁都是沿着力作用点附近的裂纹破坏。

2 玻璃钢增强呋喃树脂混凝土梁挠度预测的修正模型

近年来有很多研究者针对玻璃钢增强水泥混凝土的挠度问题做了大量的理论与实验研究,提出了一些分析模型,如美国混凝土协会提出的 ACI 440.1R-01 模型^[3],以及加拿大 ISIS(革新建筑智能传感)网络设计指南建议的 ISIS Canada 模型等^[4]。利用 ACI 440.1R-01 模型对实验的梁进行计算,预测其挠度。预测结果与实验所测结果的平均值进行比较,如图 6 所示。由于树脂混凝土与水泥混凝土力学特性的差别,从图 6 中可看出,利用该模型预测的梁挠度值偏小,针对实验结果对该模型进行了如下修正

$$\text{有效惯性矩} \quad I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M_a} \right]^3 \beta_d I_g + 0.52 \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (1)$$

当实际弯矩 $M_a > 60 \% M_{cr}$ 时,截面有效惯性矩 I_e 才有式(1)的关系式,否则取未断裂时截面的惯性矩 I_g 。模型中混凝土的弹性模量 E_c 、开裂强度 f_{cr} 与极限抗压强度 f_c 的关系式分别为

$$E_c = 1\,697 \sqrt{f_c} \quad f_{cr} = 0.83 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

代表玻璃钢与呋喃树脂混凝土的粘结情况的系数 β_d 取为 1。

$$\text{梁的挠度计算式} \quad \Delta = \frac{PL_1}{48 E_c I_e} (3L^2 - 4L_1^2) \quad (3)$$

在实验中 $L = 1\,500 \text{ mm} \quad L_1 = 500 \text{ mm}$

修正后的挠度预测结果与实验测得的 3 根梁的荷载-挠度的平均值相比较,吻合较好,见图 7。利用该修正模型对另外 5 根玻璃钢增强树脂混凝土梁的挠度值进行预测,其中有 2 根梁与前面提到的梁相同,其余 3 根梁中的增强筋直径为 5 mm,增强筋的根数为 3。预测结果与实验值也吻合较好(由于篇幅限制,在这里不做详述)。由此可以说明该修正模型针对实验所提到的材料是有一定参考价值的。

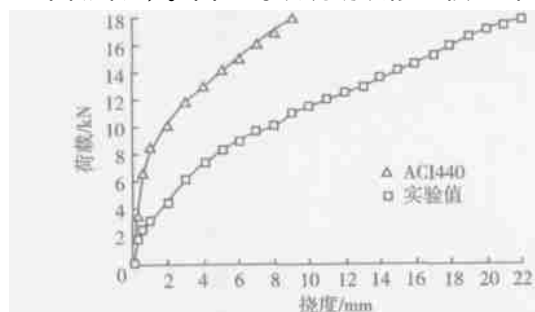


图 6 利用模型 ACI 440.1R-01 预测的结果

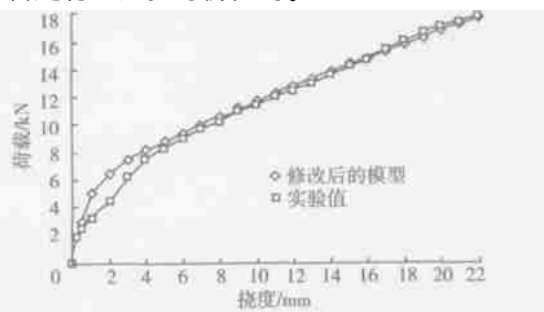


图 7 利用修正后的 ACI 440.1R-01 预测的结果

3 结 论

- 采用玻璃钢增强树脂混凝土,由于增强筋和基体材料都属同类材料(都含有树脂),所以比玻璃钢增强水泥混凝土的相容性更好;
- 呋喃树脂混凝土的弹性模量与抗压强度等关系与水泥混凝土不同,因此玻璃钢/树脂混凝土结构不能完全沿用玻璃钢/水泥混凝土结构的计算模型和计算公式;
- 通过对玻璃钢增强树脂混凝土梁的弯曲试验分析,对内部微裂纹形成后玻璃钢/呋喃树脂混凝土梁的计算方法进行了研究,提出了具有一定参考价值的修正计算模型。

(下转第 16 页)

300次冻融循环要求,具有较好的抗冻性。随着时间的延长,水泥水化不断消耗水泥浆中水分,水泥浆中相对湿度逐渐降低,早期时相对湿度变化较快,后期相对湿度变化较慢^[5]。当水泥浆中的相对湿度小于陶粒中相对湿度时,陶粒中的水就会逐渐释放出来,起到混凝土内部“自养护”的作用,使陶粒界面处的水泥水化更充分,混凝土内部这种“自养护”比依靠外界条件养护更有利^[6],水泥石结构更加致密,140 d的 A_c 界面的水化产物致密度较 A_0 的高(见显微照片图2、图3),这对提高混凝土的抗冻性十分有利。

4 结 论

a. 轻集料预湿程度对不同养护龄期的页岩陶粒混凝土的抗冻性影响不同。

b. 标养28 d的页岩陶粒混凝土的抗冻性随着预湿程度的增大而略有降低,但经300次冻融循环后,相对动弹模仍在85%以上,质量损失为0~2.8%,仍具有良好的抗冻性。标养140 d的页岩陶粒混凝土的抗冻性基本不受预湿程度的影响,而与未预湿处理的混凝土相当,经500次冻融后,相对动弹模仍在96%以上,质量损失为0.23%~0.25%,具有优良的抗冻性。

c. 预湿陶粒“自养护”增强效应可改善陶粒与水泥石的界面结构,对提高陶粒混凝土的抗冻性有利。轻集料预湿程度不同的页岩陶粒混凝土抗冻性之间的差别,随着龄期的延长而趋于减小。

d. 对页岩陶粒预湿程度大的混凝土,提高其含气量可明显提高其抗冻性。

参考文献

- [1] 重庆建筑工程学院,南京工学院. 混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981.
- [2] 王发洲,胡曙光,丁庆军,等. 大流动性高强轻集料混凝土的研究[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(3):30~32.
- [3] GBJ82-85,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].
- [4] 唐世海,刘巽伯. 粉煤灰陶粒混凝土抗冻性[J]. 混凝土与水泥制品,1990,(2):4~7.
- [5] 覃维祖. 利用粉煤灰开发高性能混凝土若干问题的探讨[J]. 粉煤灰,2000,(5):3~6.
- [6] 蒋正武,孙振平,王培铭. 水泥浆体中自身相对湿度变化与自收缩的研究[J]. 建筑材料学报,2003,(4):345~349.

(上接第9页)

参考文献

- [1] Houssam Toutanji, Yong Deng. Deflection and Crack-width Prediction of Concrete Beams Reinforced with Glass FRP Rods[J]. Construction and Building Materials, 2002,17:1~6.
- [2] 纪午生,陈伟. 常用建筑材料试验手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [3] Samir A A, Faisal F W. Flexural Behavior of High-strength Fiber Reinforced Concrete Beams[J]. ACI Struct J, 1993,90(3):279~286.
- [4] Saleh Hamed Alsayed. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars[J]. Cement and Concrete Composites, 1998,20:1~11.