

文章编号:1671-8879(2015)05-0089-08

BFRP 加固损伤混凝土梁裂缝间距与宽度计算

秦丽辉^{1,2}, 李 岩², 王宗林²

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要:为了准确计算玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁的裂缝间距与宽度,为玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁的设计与施工提供理论依据,设计了 2 组共计 11 片不同配筋率、不同纤维布加固量及不同加载方法的混凝土梁的试验方案。基于试验数据获取了各试验梁的裂缝形态分布及裂缝宽度数据,分析得出了未加固梁、1 层纤维布加固梁、2 层纤维布加固梁在不同初始荷载情况下的裂缝变化规律,并在此基础上给出了玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁裂缝间距与宽度的修正计算公式。研究表明:与实测结果相比,修正后裂缝间距与裂缝宽度公式的计算误差分别为 1.85%~6.5%和 3.33%~15.7%,而规范公式计算误差分别为 4.73%~13.2%和 8.69%~22.2%,与规范公式相比,提出的玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁裂缝间距与宽度修正计算公式具有更高的精确度。

关键词:桥梁工程;玄武岩纤维布;损伤混凝土梁;裂缝间距;裂缝宽度

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A

Crack spacing and width calculation of damaged concrete beams strengthened with BFRP sheet

QIN Li-hui^{1,2}, LI Yan², WANG Zong-lin²

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 2. School of Transportation Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to calculate crack's spacing and width of RC beam strengthened with BFRP accurately and provide theoretical basis for design and construction of RC beam strengthened with BFRP, experiment scheme was designed for two groups composed of eleven RC beams with different reinforcement ratios, different amount of strengthened BFRP sheets and different loading methods. Crack's morphology distribution and width of each beam was obtained according to experimental data. Crack's changing rules of unstrengthened beams, and strengthened beams with one layer and two layers BFRP sheets were analyzed under different conditions of pre-loading program. Modified formulas were presented for calculating crack's spacing and width of RC beam strengthened with BFRP. The results show that, compared with experimental results, crack

收稿日期:2015-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51108132)

作者简介:秦丽辉(1977-),女,吉林舒兰人,东北农业大学讲师,哈尔滨工业大学工学博士,E-mail:qinlh1977@126.com。

spacing and width calculation errors of modified formulas are 1.85%-6.5% and 3.33%-15.7% respectively. However, their calculation errors of specification formula are 4.73%-13.2% and 8.69%-22.2% respectively. It is concluded that crack spacing and width calculation formulas presented by this paper has higher accuracy than specification formula for damaged concrete beams strengthened with BFRP sheet. 2 tabs, 10 figs, 19 refs.

Key words: bridge engineering; BFRP; damaged concrete beam; crack's spacing; crack's width

0 引言

混凝土结构由于其受力性能好、造价低,在桥梁工程建设中被广泛采用。一般的钢筋混凝土结构设计使用寿命为 50 年,但是随着使用年限的增加,钢筋混凝土结构由于长期受潮湿、温度变化、酸碱腐蚀等因素,容易产生钢筋锈蚀、混凝土劣化、强度降低、损伤累积和抗力衰减等病害,混凝土结构的功能也在逐渐减弱。

国内外常用的混凝土结构加固方法大体可分为以下 10 种^[1]:加大截面加固法、粘钢加固技术法、喷射混凝土防护技术法、预应力加固技术法、增设构件加固技术法、托梁拔柱技术法、卸载加固技术法、增设支点加固法、外包钢加固技术法和纤维片材加固法。20 世纪末,随着国际市场纤维价格的大幅度降低,纤维增强复合材料(fiber reinforcement composit plastic, FRP)加固混凝土结构的方法逐渐引起土木工程学者们的关注。与传统材料加固方法相比,纤维片材具有以下优点^[2-3]:抗拉强度高,抗腐蚀性和耐久性好,自重轻,施工便捷,热膨胀系数与混凝土相近,变形能力强,可作为临时加固也可永久使用,适用面广。其中,玄武岩纤维(basalt fiber reinforced plastics, BFRP)作为近年来的新兴纤维材料,不仅抗拉强度和弹性模量性能较高,而且其粘结性、耐热性及抗腐蚀性等物理力学性能优越,在土木结构或构件中得到了广泛使用。尤其在进行混凝土结构缺陷加固和性能补强方面,凭借其独特的优势,有效地弥补了现有纤维材料中存在的不足,发展前景广阔。

国外关于混凝土梁的裂缝研究包括:短期和长期弯曲条件下的钢筋混凝土梁宽度计算^[4]、钢筋混凝土梁的粘性/重叠裂缝模型^[5]、应用振动试验评价钢筋混凝土梁裂缝研究^[6]、采用水泥复合材料控制钢筋混凝土梁裂缝发展研究^[7]。中国的相关研究则包括:CFRP 布加固混凝土梁的裂缝分析与计算^[8-9]、高强混凝土梁在疲劳荷载作用下的裂缝宽度

计算^[10]、钢筋混凝土梁短期裂缝宽度计算^[11]、玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点的抗震性能与承载力计算^[12-14]、玄武岩纤维加固震损砌体结构振动台试验^[15]、玄武岩纤维加固混凝土梁的冻融试验与性能等^[16-17]。此外,有关其他纤维材料加固混凝土梁的性能研究也较为广泛,如碳纤维加固钢筋混凝土梁的受弯性能与承载力分析^[18-19]等。

综上所述,关于玄武岩纤维布加固梁的裂缝研究尚未见报道,而且大多数研究未考虑梁的损伤影响。鉴于此,本文开展玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁的裂缝试验研究,提出玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁裂缝间距与宽度的计算方法,为玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁的设计与施工提供理论依据。

1 试验方案

如表 1 所示,选取的试验梁截面尺寸为 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,梁长 2 600 mm,计算跨径 $l = 2 400 \text{ mm}$,混凝土强度等级 C40。试验梁按照配筋率不同分为 2 组:A1 组纵向受力钢筋型号为 HRB335,直径为 12 mm 的 2 根钢筋布置于受拉区,架立钢筋型号为 HPB235,直径为 8 mm;A2 组纵向受力钢筋型号为 HRB335,直径为 16 mm 的 2 根钢筋布置于受拉区;架立钢筋型号为 HPB235,直径为 8 mm。箍筋均采用 HPB235,直径为 8 mm。考虑到梁内纵筋配筋率的大小及所粘贴玄武岩纤维布量的多少对加固梁受力性能会产生一定的影响,因此在计算时将试验梁截面纵筋配筋率设计为 0.7% 和 1.22% 这 2 个水平。试验梁的配筋如下页图 1 所示。

表 1 试验梁参数

Tab. 1 Parameters of test beams

试验梁	配筋	配筋率/%	箍筋	混凝土强度等级	片数
A1	2 ϕ 8/2 Φ 12	0.70	ϕ 8@100	C40	7
A2	2 ϕ 8/2 Φ 16	1.22	ϕ 8@100	C40	4

各试验梁梁底 BFRP 布置情况见下页图 2,

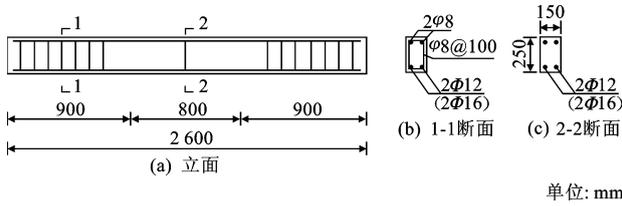


图 1 受弯试验梁配筋

Fig. 1 Reinforcement of flexural test beams

BFRP 布分别为宽 100 mm 的 1 层和 2 层。为了避免试验梁出现纤维布的早期剥离,对试验梁采用 U 型箍进行锚固,锚固措施考虑每端采用 2 个 U 形箍/端和 4 个 U 形箍/端 2 种形式,试验梁纤维布加固粘贴方式如图 2 所示。

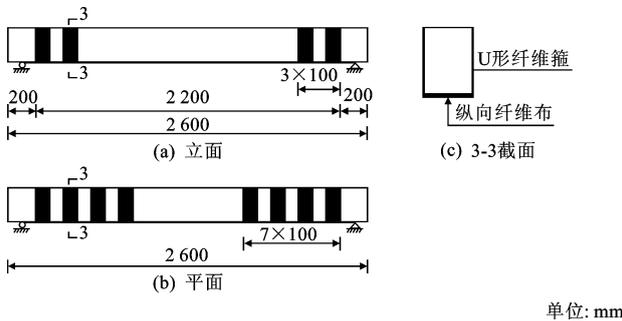


图 2 试验梁 BFRP 加固

Fig. 2 Details of flexural test beams with BFRP

试验采用矩形截面钢筋混凝土试验梁 2 点静力加载,即所有试验梁均采用在三分点加载,试验加载装置如图 3 所示。

采用该方案加载可在试验梁中部形成较大的纯弯段,在此纯弯段试验,既便于观测裂缝和变形,而且该范围内弯矩不变亦不受剪力的影响。试验过程中采用压力传感器配合应变仪器系统测定荷载值,采用机械螺旋千斤顶加载,千斤顶配合分配梁分荷至 2 个跨度三分点。试验梁两支座端部各留出 100 mm,为避免混凝土局部压碎,支座及加载点处均设置钢垫板,厚度均为 10 mm,宽度均为 100 mm。

在试验过程中对试验梁预加不同的荷载,通过分析软件模拟加固效果在不同初始裂缝、初始应力和加载历史条件下的影响。为了使加固梁在加固前产生不同程度的损伤,本试验加固梁的预加载值,分别取极限荷载 P_u 的 0、30%、60%、80% 比例 4 种情况分别施加,详见表 2。试验按《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)要求进行,每一级荷载持荷 2~3 min,待数据稳定后再加下一级荷载。等到接近极限承载力时加载增幅减小,达到设定值后卸载,再粘贴 BFRP 进行加固,最后进行荷载试验。

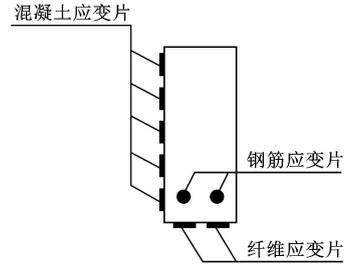
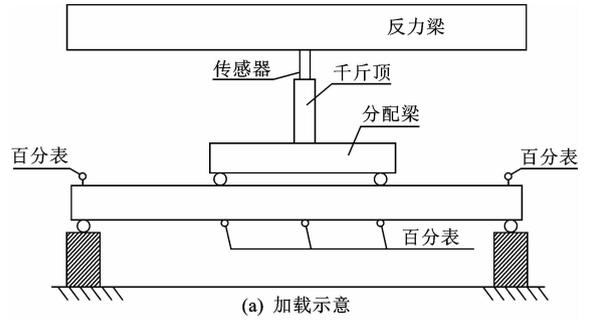


图 3 加载装置及应变测点布置

Fig. 3 Layout of loading system and location of strain gauges detail

表 2 BFRP 加固试验梁加载方法

Tab. 2 Loading method of test beams strengthened with BFRP sheet

编号	配筋率/%	加固量	锚固情况	加载方法
A1-0	0.70	不加固	无	(对比梁)直接加载至破坏
A1-1-0	0.70	底面 1 层	2U 形箍/端	加固后直接加载至破坏
A1-1-1	0.70	底面 1 层	2U 形箍/端	加载至 30% P_u 卸载加固后加载至破坏
A1-1-2	0.70	底面 1 层	2U 形箍/端	加载至 60% P_u 卸载加固后加载至破坏
A1-2-0	0.70	底面 2 层	4U 形箍/端	加固后直接加载至破坏
A1-2-1	0.70	底面 2 层	4U 形箍/端	加载至 30% P_u 卸载加固后加载至破坏
A1-2-2	0.70	底面 2 层	4U 形箍/端	加载至 60% P_u 卸载加固后加载至破坏
A2-0	1.22	不加固	无	(对比梁)直接加载至破坏
A2-2-0	1.22	底面 2 层	4U 形箍/端	加固后直接加载至破坏
A2-2-2	1.22	底面 2 层	4U 形箍/端	加载至 60% P_u 卸载加固后加载至破坏
A2-2-3	1.22	底面 2 层	4U 形箍/端	加载至 80% P_u 卸载加固后加载至破坏

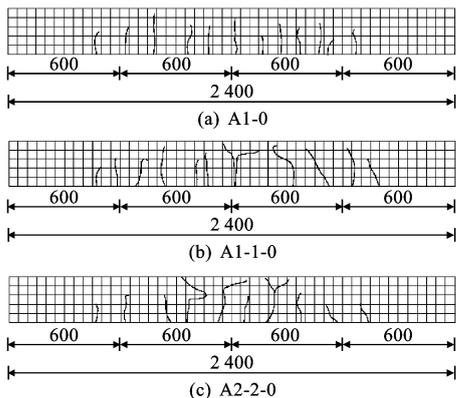
注:表中试验梁编号第 1 个数字表示配筋率;第 2 个数字表示粘贴层数;第 3 个数字表示初始荷载。

2 试验结果分析

2.1 无损梁裂缝形态

图4为未加固梁、1层纤维布与2层纤维布加固无损梁的裂缝形态分布,从图中可以看出,加固梁与未加固梁裂缝发展及最终形态是不一样的。加载初期,纤维布对梁有一定的约束作用,加固后梁的裂缝高度和宽度的发展和未加固梁相比,比较缓慢。随着荷载的增加,在加固梁垂直裂缝宽度较大处,部分试验梁开始出现了一些斜向的小裂缝,这些小裂缝与主裂缝相连,并最终形成了根状裂缝,这些根状裂缝直接导致梁底部保护层处的混凝土剥落,当荷载继续增大时,裂缝越来越大,直接导致纤维布发生剥离破坏。

在纤维布剥离前,主要垂直裂缝间也不同程度的出现了很多次生小裂缝,这些次生裂缝的高度和宽度均较小,且位于较宽的主要正截面裂缝之间,在纤维布空鼓后裂缝基本停止发展。由图4还可以发现,随着BFRP纤维布加固量的加大,加固梁的裂缝间距也有所减小,裂缝的最终条数和增加的幅度有所降低。



单位: mm

图4 无损梁裂缝形态分布

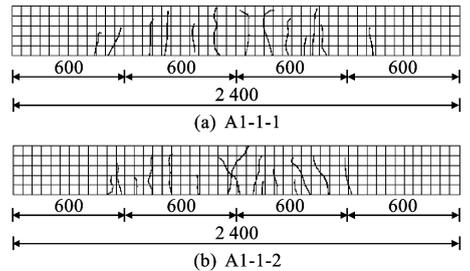
Fig. 4 Crack's morphology distribution of undamaged beams

2.2 损伤梁裂缝形态

对于有初始荷载的试验梁即损伤梁,在初次加载时,梁的裂缝高度和宽度发展较快,当卸载后再粘贴纤维布加固后,裂缝受到纤维布的约束,其发展速度明显减缓。

从试验过程中发现有初始荷载的加固梁与无损加固梁在加载后期裂缝形态基本一致,但在同级荷载作用下,有初载的试验梁其裂缝高度高于无损加固梁;同时,当初始荷载较大时,裂缝的间距有所增加。

图5为BFRP加固损伤梁的裂缝形态分布,初始荷载为17.3 kN的加固梁A1-1-1在纯弯段内最终有10条主要垂直裂缝,而A1-1-0在跨中纯弯段内产生了8条主要垂直裂缝。此外,当初始荷载较小时,由于在一次加载中裂缝形态的发展尚未成熟,加固后对裂缝形态发展的影响并不明显。



单位: mm

图5 损伤梁裂缝形态分布

Fig. 5 Crack's morphology distribution of damaged beams

2.3 试验梁裂缝宽度

进一步分析纤维布加固后对梁裂缝宽度的影响,根据试验结果对各试验梁在该基准点荷载时的最大裂缝宽度进行了统计,如图6所示。

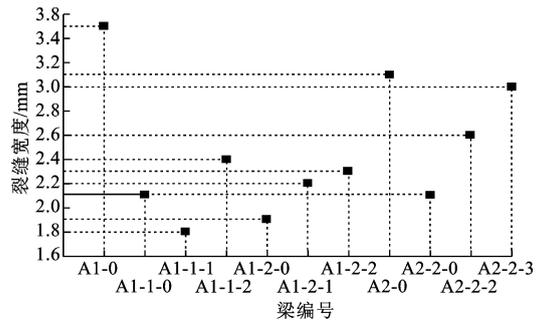


图6 试验梁裂缝宽度

Fig. 6 Crack's width of experimental beams

根据统计结果,在同级荷载作用下,对于截面相同的A1-0、A1-1-0试验梁,未加固梁的裂缝宽度比加固梁的大40%,且通过A1-1-0与A1-2-0的比较来看,最大裂缝宽度与加固层数有关系,加固层数越多,裂缝宽度越小,裂缝宽度值由2.1 mm减少到1.9 mm。根据A1-1-0、A1-1-1、A1-1-2的对比结果分析,有初始荷载的加固梁与同组无损加固梁相比,在同级荷载作用下,前者裂缝宽度比后者大;随着初始荷载的增加,裂缝宽度也相应增大。

需要注意的是,在相同级别荷载作用下,有一部分初始荷载较大的加固梁其裂缝宽度接近甚至超过同组对比梁(A2-2-3)的裂缝宽度。究其原因是由于加固期间持荷时间较长,具有初始荷载的加固梁在纤维布尚未粘结牢固前由于塑性变形而使裂缝发展

较快,因此对加固梁裂缝宽度产生不利影响的另一因素还有持荷时间。

综上,采用纤维布加固混凝土梁可以很好地抑制混凝土梁裂缝的发展,提高混凝土梁的刚度,但是由于有初始荷载的存在,在一定程度上降低了梁的刚度。

3 裂缝间距与宽度计算

在计算加固混凝土梁平均裂缝间距及宽度时,考虑玄武岩纤维布的影响,参照普通钢筋混凝土梁裂缝理论,基本假定如下:

(1)为简化计算,假定玄武岩纤维布粘贴位置与纵筋位置相同;

(2)假定玄武岩纤维布与纵筋有相同的应变不均匀系数,即裂缝截面玄武岩纤维布应变与纵筋应变相同。

纯弯构件裂缝间截面应力状态如图7所示,其中钢筋及玄武岩纤维布的不平衡力由粘结力平衡,截面1为第1条裂缝,截面2为即将出现的第2条裂缝。

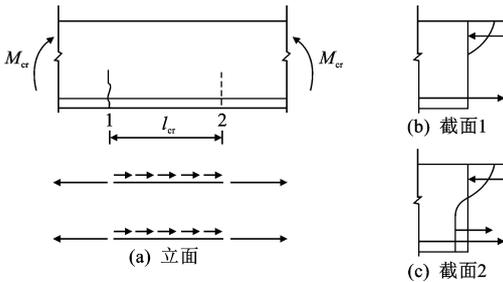


图7 混凝土梁裂缝间截面应力状态

Fig. 7 Stress state between cracks of RC beams

3.1 裂缝间距计算

由平衡条件可得

$$\tau_{ms} n \pi d l_{cr} + \tau_{mBf} b_{Bf} l_{cr} = A_s (\sigma_{s1} - \sigma_{s2}) + \gamma A_{Bf} (\sigma_{Bf1} - \sigma_{Bf2}) \quad (1)$$

在截面1处

$$M_{cr} = A_s \sigma_{s1} \eta h_0 + \gamma A_{Bf} \sigma_{Bf1} \eta h_0 \quad (2)$$

设 $\alpha = \frac{\gamma A_{Bf} \sigma_{Bf1}}{A_s \sigma_{s1}} = \frac{\gamma A_{Bf} E_{Bf}}{A_s E_s}$, 则有

$$M_{cr} = (1 + \alpha) A_s \sigma_{s1} \eta h_0 \quad (3)$$

式中: γ 为玄武岩纤维布受弯计算折减系数; α 为玄武岩纤维布刚度等效系数; b_{Bf} 为玄武岩纤维布长度(mm); n 为受拉钢筋数量; d 为受拉钢筋直径(mm); l_{cr} 为裂缝间距(mm); τ_{mBf} 、 τ_{ms} 分别为玄武岩纤维布和钢筋剪应力(MPa); σ_s 、 σ_{Bf} 分别为钢筋和玄武岩纤维布拉应力(MPa); A_s 、 A_{Bf} 分别为受拉区纵

向钢筋截面面积和玄武岩纤维布面积(mm^2); M_{cr} 为裂缝间距处弯矩($\text{k} \cdot \text{Nm}$); E_s 、 E_{Bf} 分别为钢筋和玄武岩纤维布弹性模量(MPa); η 为内力臂系数; h_0 为混凝土受压区高度(mm)。

由图7所示在截面2处, M_{cr} 包括两部分,一部分是由钢筋及玄武岩纤维布承担的 M_s ,另外一部分是由混凝土承担的 M_c (素混凝土的开裂弯矩),根据 $M_{cr} = M_c + M_s$,由截面2的平衡得

$$M_s = M_{cr} - M_c = (\sigma_{s2} A_s + \sigma_{Bf2} \gamma A_{Bf}) \eta_1 h_0 = (1 + \alpha) \sigma_{s2} A_s \eta_1 h_0 \quad (4)$$

式中: M_c 为素混凝土的开裂弯矩($\text{k} \cdot \text{Nm}$); M_s 为钢筋及玄武岩纤维布承担的弯矩($\text{k} \cdot \text{Nm}$); η_1 为截面1的内力臂系数。

所以

$$\tau_{ms} n \pi d l_{cr} + \tau_{mBf} b_{Bf} l_{cr} = \frac{M_{cr}}{\eta h_0} - \frac{M_{cr} - M_c}{\eta_1 h_0} \quad (5)$$

取内力臂系数 $\eta = \eta_1$, 则

$$l_{cr} = \frac{M_c}{\eta h_0 (\tau_{ms} n \pi d + \tau_{mBf} b_{Bf})} \quad (6)$$

M_c 可近似按下式计算

$$M_c = [0.5bh + (b_f - b)h_f] \eta_2 h f_t \quad (7)$$

$$\frac{1}{l_{cr}} = \frac{\eta h_0}{\eta_2 h} \left(\frac{\tau_{ms} n \pi d}{[0.5bh + (b_f - b)h_f] f_t} + \frac{\tau_{mBf} b_{Bf}}{[0.5bh + (b_f - b)h_f] f_t} \right) \quad (8)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度(MPa); b 为构件横截面宽度(mm); h 为构件横截面高度(mm); h_f 为构件受拉翼缘厚度(mm); b_f 为构件受拉翼缘宽度(mm); η_2 为截面2的内力臂系数。

设 ρ_{tes} 为按有效受拉截面面积计算的配筋率,则

$$\rho_{tes} = \frac{A_s}{0.5bh + (b_f - b)h_f} \quad (9)$$

设 ρ_{te} 为按刚度等效考虑玄武岩纤维布后按有效受拉截面面积计算的配筋率,则

$$\rho_{te} = \frac{(1 + \alpha) A_s}{0.5bh + (b_f - b)h_f} = (1 + \alpha) \rho_{tes} \quad (10)$$

设 θ 为玄武岩纤维布的裂缝影响系数

$$\theta = \frac{\tau_{mBf} b_{Bf}}{\tau_{ms} n \pi d} \quad (11)$$

则

$$\frac{1}{l_{cr}} = \frac{\eta h_0}{\eta_2 h} (1 + \theta) \frac{\tau_{ms} n \pi d}{[0.5bh + (b_f - b)h_f] f_t} = \frac{4 \tau_{ms} \eta h_0 (1 + \theta) \rho_{te}}{f_t \eta_2 h (1 + \alpha) d} = \frac{\eta h_0}{\eta_2 h} (1 + \theta) \frac{4 \tau_{ms} \rho_{tes}}{d f_t} \quad (12)$$

即

$$l_{cr} = k \frac{(1+\alpha)d}{(1+\theta)\rho_{te}} \quad (13)$$

式中: k 为影响系数。

$$k = \frac{f_t \eta_p h}{4 \eta h_0 \tau_{ms}} \quad (14)$$

$$\text{设 } \phi = \frac{\tau_{mBf}}{\tau_{ms}}, \text{ 则 } \theta = \phi \frac{b_{Bf}}{n\pi d}。$$

综上,玄武岩纤维布对平均裂缝间距的作用只表现在系数 α 及 θ 上,上述公式与普通混凝土按粘结滑移理论的推导公式基本相同。参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),得出采用玄武岩纤维布加固后梁的平均裂缝间距计算公式为

$$l_{cr} = \beta(1.9c + 0.08 \frac{1+\alpha d_{eq}}{1+\theta \rho_{te}}) \quad (15)$$

式中: β 为安全系数,对轴心受力构件取1.1;其他构件取1.0; c 为最外层受拉钢筋的外边缘到混凝土梁受拉区底边的距离(m), $c < 20$ 时,令 $c = 20$; $c > 65$ 时,令 $c = 65$; d_{eq} 为纵向受拉钢筋等效直径(m),

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i}; n_i \text{ 为第 } i \text{ 种纵向受拉钢筋根数}; v_i$$

为第 i 种纵向受拉钢筋相对粘结特性系数,对于光圆钢筋取0.7;变形钢筋取1.0; d_i 为第 i 种纵向受拉钢筋直径(m)。

二次加载影响下,玄武岩纤维布刚度等效系数 α 和玄武岩纤维布的裂缝影响系数 θ 需要一定程度的修正。设 κ 为二次加载对2个系数的影响因子,经过修正后的玄武岩纤维布刚度等效系数 α_B 和裂缝影响系数 θ_B 分别为

$$\alpha_B = \kappa \alpha \quad (16)$$

$$\theta_B = \kappa \theta \quad (17)$$

根据玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁的抗弯承载力试验,对不同初始荷载比率 f_{in} (即初始荷载与极限荷载之比),量测主裂缝宽度 l_{cr} ,并与公式计算得到的 l_{cr} 比较。代入刚度等效系数和裂缝影响系数的修正因子 κ ,得到初始荷载 $f_{in}-\kappa$ 的关系,见图8。

根据图8可拟合得到 $f_{in}-\kappa$ 的关系式

$$\kappa = 1.15 f_{in} + 0.29 \quad (18)$$

3.2 裂缝宽度计算

最大裂缝宽度的计算,参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),具体计算公式为

$$\omega_{max} = \alpha_{cr} \Psi \frac{\sigma_{ss}}{E_s} (1.9c + 0.08 \frac{1+\alpha_B d_{eq}}{1+\theta_B \rho_{te}}) \quad (19)$$

式中: ω_{max} 为最大裂缝宽度(mm); $\alpha_{cr} = \tau_1 \tau_s \alpha_c$,为构

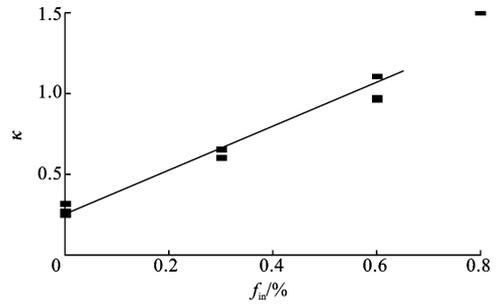


图8 初始荷载与裂缝修正因子($f_{in}-\kappa$)关系

Fig. 8 Relationship between initial load and crack correction factor

件受力特征系数,对于受弯构件取2.1; Ψ 为钢筋应变不均匀系数, $\Psi < 0.2$ 时取 $\Psi = 0.2$, $\Psi > 1.0$ 时取 $\Psi = 1.0$ 。

根据试验资料分析,短期裂缝宽度的扩大系数 τ_s 对于受弯构件取为1.66;反映裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度影响的系数 α_c 为0.85;考虑长期作用影响的扩大系数 τ_1 取为1.5。

按刚度等效考虑玄武岩纤维布按有效受拉截面积计算的配筋率 ρ_{te} 为

$$\rho_{te} = \frac{(1+\alpha_B)A_s}{0.5bh + (b_f - b)h_f} = (1+\alpha_B)\rho_{tes} \quad (20)$$

考虑玄武岩纤维布的影响,根据普通钢筋混凝土梁计算公式,可以把玄武岩纤维布按刚度等效为钢筋,采用如下公式计算

$$\Psi = 1.1 - \frac{0.65 f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{ss}} \quad (21)$$

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s}{(1+\alpha)A_s \eta h_0} \quad (22)$$

式中: f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值(MPa); M_s 为荷载标准组合下的弯矩值(kN·m)。

上述计算公式以普通钢筋混凝土梁理论为基础,并不适用于钢筋屈服后的弹塑性状态。根据玄武岩纤维布加固梁的试验结果,钢筋一旦发生屈服,其破坏裂缝将迅速开展,继而也将无法满足正常使用状态下对裂缝宽度的要求。

3.3 计算结果对比

利用规范中给出的公式与本文提出的玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁裂缝间距与裂缝宽度计算公式,对抗弯承载力试验中的各个试验梁进行计算,所得计算结果与试验中实测数据进行对比,如下页图9、图10所示。由图可知,考虑二次荷载作用下的玄武岩纤维布加固混凝土梁裂缝计算公式,修正后裂缝间距公式计算结果与实测结果误差在1.85%~6.5%之间,规范公式的计算结果与实测结果的误差

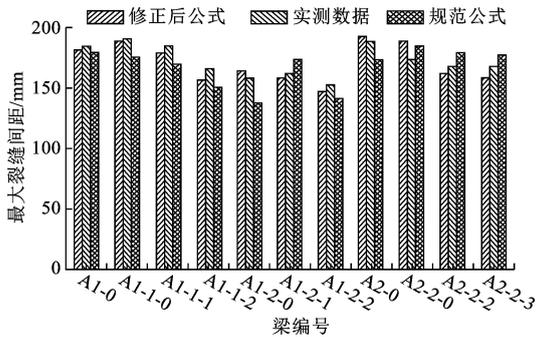


图9 最大裂缝间距对比

Fig. 9 Comparison of the maximum crack spacing

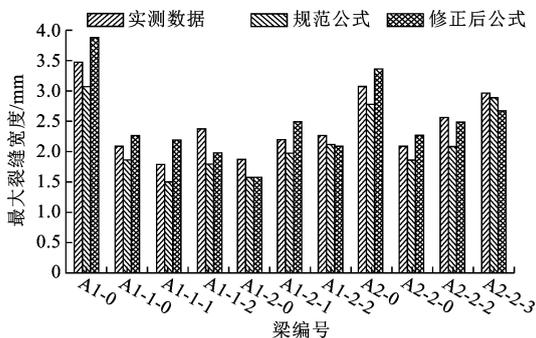


图10 最大裂缝宽度对比

Fig. 10 Comparison of the maximum crack width

在 4.73%~13.2% 之间。修正后裂缝宽度公式计算结果与实测结果的误差在 3.33%~15.7% 之间,规范公式的计算结果与实测结果的误差在 8.69%~22.2% 之间,与规范公式相比,修正后公式的计算结果具有更高的精确度,本文计算公式可以更好地描述结构裂缝的分布情况。

4 结 语

(1) 采用玄武岩纤维布加固混凝土梁,纤维布与底部混凝土间的粘结力起到抵制裂缝发展的作用,加固的纤维布数量越多,作用越明显。

(2) 对于玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁的裂缝间距计算,受二次加载影响,玄武岩纤维布的刚度等效系数和裂缝影响系数需进行修正,其修正系数与初始荷载比率(即初始荷载与极限荷载之比)呈正线性关系,修正后裂缝间距计算结果与试验结果误差在 1.85%~6.5% 之间,较为接近。

(3) 对于玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁的裂缝宽度计算,可以把玄武岩纤维布按刚度等效为钢筋,但其适用条件为钢筋未屈服,修正后裂缝宽度公式计算结果与实测结果误差在 3.33%~15.7% 之间,计算结果与试验结果较为接近。

(4) 本文所提出的计算公式是以普通钢筋混凝土

梁理论为基础的,根据玄武岩纤维布加固梁的试验结果,钢筋一旦发生屈服,其破坏裂缝将迅速开展,继而也将无法满足正常使用状态下对裂缝宽度的要求。鉴于此,今后应进一步研究钢筋屈服后处于弹塑性状态时梁的裂缝间距及宽度计算。

参考文献:

References:

- [1] 丁敬华,左登宏,康建军. 碳纤维布加固技术及其应用[J]. 安徽建筑,2004,31(5):104-105.
DING Jing-hua, ZUO Deng-hong, KANG Jian-jun. Strengthening technique and its application of BFRP sheet[J]. Anhui Architecture, 2004, 31(5): 104-105. (in Chinese)
- [2] 李春霞. CFRP 加固荷载混凝土梁抗弯承载力及可靠性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
LI Chun-xia. Analysis on reliability and flexural capacity of concrete beams strengthened by CFRP under secondary loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 谢建和,黄泓泓,李自坚,等. BFRP 和 CFRP 加固受弯混凝土界面疲劳性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(4): 53-59.
XIE Jian-he, HUANG Kun-hong, LI Zi-jian, et al. Experiment on fatigue behaviors of flexural concrete interface strengthened with BFRP and CFRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(4): 53-59. (in Chinese)
- [4] Vasanelli E, Micelli F, Aiello M A, et al. Analytical prediction of crack width of FRC/RC beams under short and long term bending condition[C]//Framcos Org. 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Toledo: Framcos Org, 2013: 39-54.
- [5] Carpinteri A, Corrado M, Paggi M. An integrated cohesive/overlapping crack model for the analysis of flexural cracking and crushing in RC beams[J]. International Journal of Fracture, 2010, 161(2): 161-173.
- [6] Capozucca R. A reflection on the application of vibration tests for the assessment of cracking in PRC/RC beams[J]. Engineering Structures, 2013, 48(2): 508-518.
- [7] Ferrier E, Larbi A S, Georgin J F, et al. New hybrid cement-based composite material externally bonded to control RC beam cracking[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36(6): 36-45.
- [8] 庄江波,叶列平,鲍轶洲,等. CFRP 布加固混凝土梁的裂缝分析与计算[J]. 东南大学学报: 自然科学版,

- 2006,36(1):86-91.
- ZHUANG Jiang-bo, YE Lie-ping, BAO Yi-zhou, et al. Crack width of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36(1): 86-91. (in Chinese)
- [9] Mei K H, Li Y J, Lu Z T. Application study on the first cable-stayed bridge with CFRP cables in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(4): 242-248.
- [10] 钟 铭, 王海龙, 王海良. 高强混凝土梁在疲劳荷载作用下的裂缝宽度计算[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 48-53.
- ZHONG Ming, WANG Hai-long, WANG Hai-liang. Calculation of crack width of high-strength concrete beams under fatigue loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 48-53. (in Chinese)
- [11] 杜毛毛. 钢筋混凝土梁短期裂缝宽度计算[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2012, 28(6): 1004-1008.
- DU Mao-mao. Calculation of short-term crack width of reinforced concrete beams[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2012, 28(6): 1004-1008. (in Chinese)
- [12] 周运瑜, 余江滔, 陆洲导, 等. 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点的抗震性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 1514-1521.
- ZHOU Yun-yu, YU Jiang-tao, LU Zhou-dao, et al. Seismic behavior of BFRP-reinforced pre-damaged concrete beam-column joints [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(4): 1514-1521. (in Chinese)
- [13] 余江滔, 苏 磊, 陆洲导, 等. 玄武岩纤维加固震损三维混凝土框架节点抗震试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 18-24.
- YU Jiang-tao, SU Lei, LU Zhou-dao, et al. Experimental study on BFRP-reinforced pre-damaged concrete beam-column joints by simulated earthquake [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(1): 18-24. (in Chinese)
- [14] 欧阳利军, 余江滔, 张克纯. 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点承载力计算分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(6): 33-36.
- OUYANG Li-jun, YU Jiang-tao, ZHANG Ke-chun. Computational analysis on bearing capacity of earthquake damaged RC frame joints strengthened with BFRP [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(6): 33-36. (in Chinese)
- [15] 雷 真, 周德源, 张 晖, 等. 玄武岩纤维加固震损砌体结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(15): 130-137.
- LEI Zhen, ZHOU De-yuan, ZHANG Hui, et al. Shaking table test on earthquake-damaged masonry structure strengthened with BFRP [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(15): 130-137. (in Chinese)
- [16] 陈建伟, 胡海涛, 王希宾, 等. 玄武岩纤维加固混凝土梁的冻融试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(3): 27-30.
- CHEN Jian-wei, HU Hai-tao, WANG Xi-bin, et al. Experiment with the freeze-thaw of the concrete beams reinforced by BF [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(3): 27-30. (in Chinese)
- [17] 苗吉军, 曾在平, 刘延春, 等. 冻融循环下玄武岩纤维加固混凝土构件性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010(增2): 266-269.
- MIAO Ji-jun, ZENG Zai-ping, LIU Yan-chun, et al. Research on behaviors of concrete members strengthened by basalt fiber reinforced plastic sheets under freeze-thaw environment [J]. Journal of Building Structures, 2010(S2): 266-269. (in Chinese)
- [18] 邬晓光, 张柳煜, 郝 毅, 等. 碳纤维加固钢筋混凝土梁的受弯全过程分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 53-57.
- WU Xiao-guang, ZHANG Liu-yu, HAO Yi, et al. Flexural-tensile strength of concrete beams in complete course of reinforcement with carbon-fiber-reinforced-polymer(CFRP) [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 53-57. (in Chinese)
- [19] 董三升, 雷自学, 晏兴威. 受压区高度对碳纤维加固桥梁的有效性影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(4): 63-67.
- DONG San-sheng, LEI Zi-xue, YAN Xing-wei. Influence of depth of compression zone on effectiveness of strengthened bridges with carbon fiber sheets [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 63-67. (in Chinese)