

文章编号:1673-2049(2016)04-0076-06

玄武岩纤维混凝土梁裂缝和变形试验研究

王 钧, 栾 奕, 叶焕军

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为研究玄武岩纤维的掺入对钢筋混凝土梁裂缝和变形的影响,以玄武岩纤维体积掺率和纤维长度为变化参数,设计制作5根试验梁,通过静载试验获得了玄武岩纤维混凝土梁在受力过程中的裂缝分布、裂缝宽度和跨中挠度等试验数据,并与普通混凝土梁进行对比。基于试验数据分析结果提出了玄武岩纤维混凝土梁最大裂缝宽度和短期刚度计算方法。结果表明:玄武岩纤维的掺入可有效阻止钢筋混凝土梁裂缝的开展并提高梁构件的延性。

关键词:玄武岩纤维;混凝土梁;试验研究;裂缝;变形

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

Experimental Research on Crack and Deformation of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams

WANG Jun, LUAN Yi, YE Huan-jun

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to study the influence of mixing of basalt fiber on crack and deformation of reinforced concrete beams, five test beams were made with the parameters of volume ratio and length of basalt fiber, and the static load tests were carried out. The test data of crack distribution, crack width and mid-span deflection of basalt fiber reinforced concrete beams in the process of stress were obtained and compared with common concrete beams. Based on the analysis results of test data, the calculation methods of maximum crack width and short term stiffness of basalt fiber reinforced concrete beams were presented. The results show that the mixing of basalt fiber can effectively prevent cracks extension in reinforced concrete beams and improve the ductility of beams.

Key words: basalt fiber; concrete beam; experimental research; crack; deformation

0 引言

混凝土是当今建筑行业使用最广泛的建筑材料之一,其应用遍布于民用和工业建筑、交通、水利、军事、海港等各工程领域,但混凝土抗拉强度低、易开裂、变形性能差等缺陷在一定程度上影响了工程质量,限制了其更广泛的应用。长期以来许多学者都在探索改善混凝土性能的方法和途径^[1]。吴中伟^[2]

曾经提出“复合化是水泥基材料高性能化的主要途径,纤维增强是核心”。纤维混凝土较普通混凝土具有更好的抗裂性能,已成为当今混凝土改性研究的热点^[3-4]。纤维的掺入使普通混凝土梁最大裂缝宽度与短期刚度的计算公式不再适用于纤维混凝土梁,目前各国相关学者对于纤维混凝土的研究主要集中在碳纤维与钢纤维上,对于玄武岩纤维混凝土多见其基本力学性能的研究,而对玄武岩纤维混凝

收稿日期:2016-03-11

基金项目:黑龙江省应用技术研究与开发计划项目(2013G0763)

作者简介:王 钧(1967-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jun. w. 619@163. com。

土梁短期刚度和裂缝的研究尚未见系统报道。玄武岩纤维作为一种新兴的环保型无机纤维材料,具有性价比高、抗拉强度高、耐腐蚀、耐高温、抗裂性能好等优点,是其他纤维材料的良好替代品^[5]。相关研究表明^[6-9],把纤维掺入到混凝土中可有效阻止混凝土梁裂缝的开展并提高混凝土梁的变形能力。针对上述情况,本文通过玄武岩纤维混凝土简支梁受弯试验,着重探究玄武岩纤维的掺入对混凝土梁裂缝开展与变形的影响,为玄武岩纤维混凝土在工程中的应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试验梁设计

根据玄武岩纤维长度和体积掺率的不同,设计并制作 5 根试验梁,试验梁的外形尺寸和配筋均一致,梁宽 b 为 160 mm,梁高 h 为 300 mm,跨度 l 为 2 300 mm,净跨 l_0 为 2 100 mm。受拉纵筋采用 HRB335 级钢筋,受压纵筋采用 HPB300 级钢筋,箍筋采用直径为 10 mm 的 HPB300 级钢筋,箍筋间距为 100 mm。试验梁参数如表 1 所示。试验梁配筋如图 1 所示。

表 1 试验梁参数

Tab. 1 Parameters of Test Beams

梁编号	纤维体积掺率/%	纤维长度/mm	纵向受拉钢筋型号	纵向受压钢筋型号
L-0-0	0.0	0	2 Φ 20	2 Φ 10
L-1-12	0.1	12	2 Φ 20	2 Φ 10
L-2-12	0.2	12	2 Φ 20	2 Φ 10
L-1-30	0.1	30	2 Φ 20	2 Φ 10
L-2-30	0.2	30	2 Φ 20	2 Φ 10

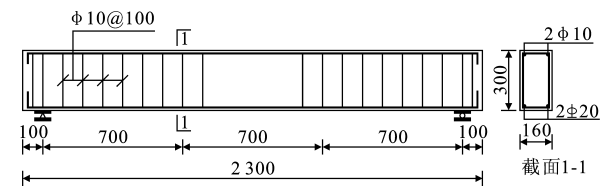


图 1 试验梁配筋(单位:mm)

Fig. 1 Reinforcement of Test Beams (Unit:mm)

试验梁混凝土强度设计等级为 C40。制备混凝土所用材料包括:P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,Ⅰ级粉煤灰,细度模数为 2.46 的中砂,最大粒径为 26.5 mm 的碎石,40%减水率的聚羧酸盐高效减水剂,长度分别为 12,30 mm 的四川拓鑫短切玄武岩纤维。玄武岩纤维物理性能如表 2 所示。

1.2 加载和量测方案

试验梁加载方式为三分点加载,每级荷载 10

表 2 玄武岩纤维物理性能

Tab. 2 Physical Properties of Basalt Fiber

直径/ μm	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂延伸率/%
15	2.65	95~115	3 300~4 500	2.4~3.0

kN,为准确测得开裂荷载,当加载至计算开裂荷载的 80%时每级荷载改为 1 kN,试验梁开裂后加载恢复至每级 10 kN。试验梁纵筋屈服荷载与极限荷载的量测方式与开裂荷载的量测方案相同。在试验梁每级荷载持荷过程中,仔细记录每级荷载作用下裂缝宽度和裂缝开展高度,并标注在梁构件上。为量测试验梁混凝土在加载过程中的应力变化情况,在试验梁跨中梁侧面沿梁高度方向和梁水平方向横向粘贴混凝土应变片,应变片布置如图 2 所示。试验梁加载装置如图 3 所示。

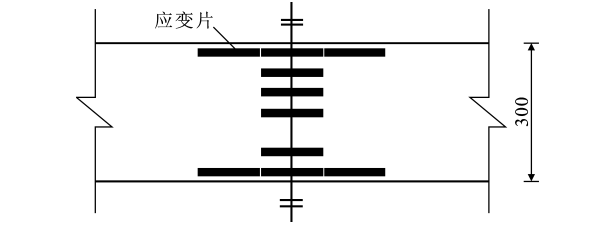


图 2 应变片布置(单位:mm)

Fig. 2 Arrangement of Strain Gauges (Unit:mm)

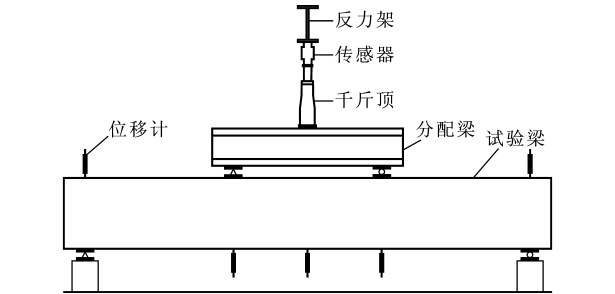


图 3 试验梁加载装置

Fig. 3 Loading Equipment of Test Beams

2 试验现象与结果

2.1 试验现象

表 3 为试验梁在不同荷载下的最大裂缝宽度和跨中挠度。根据表 3 中 5 根试验梁由加载至破坏全过程数据对比可知:相同荷载作用下玄武岩纤维混凝土梁最大裂缝宽度比普通混凝土梁最大裂缝宽度小;加载至 100 kN 时,与梁 L-0-0 相比,梁 L-2-30 的裂缝宽度降低 37.5%;加载至 120 kN 时,梁 L-0-0 的裂缝宽度为 0.21 mm,梁 L-2-30 的裂缝宽度仅为 0.14 mm,且裂缝开展较为缓慢;加载至极限荷载的 45%左右时,纯弯段基本不再有新的主裂缝生

表 3 试验梁在不同荷载下的最大裂缝宽度和跨中挠度
Tab.3 Maximum Crack Widths and Mid-span Deflections of Test Beams Under Different Loads

梁编号	荷载/kN	最大裂缝宽度/mm	跨中挠度/mm
L-0-0	40		1.05
	70		2.49
	80	0.13	
	100	0.16	3.97
	120	0.21	
L-1-12	40		0.99
	70		2.46
	80	0.12	
	100	0.16	3.96
	120	0.20	
L-2-12	40		0.96
	70		2.45
	80	0.10	
	100	0.14	3.92
	120	0.20	
L-1-30	40		0.95
	70		2.40
	80	0.10	
	100	0.13	3.86
	120	0.17	
L-2-30	40		0.95
	70		2.34
	80	0.08	
	100	0.10	3.68
	120	0.14	

成,当加载至极限荷载的 75%左右到试验梁破坏前时,主裂缝附近生成细小的裂缝。相同荷载作用下,5 根试验梁在开裂前的挠度基本相同,梁开裂至受拉纵筋屈服阶段,玄武岩纤维混凝土梁的挠度比普通混凝土梁挠度小,随着玄武岩纤维体积掺率的增大和纤维长度的增加,试验梁跨中挠度呈现减小趋势。5 根试验梁最终破坏形式均为纵向受拉钢筋屈服,受压区混凝土被压碎,图 4 为试验梁裂缝开展和分布,其中梁底编号表示裂缝出现顺序,各裂缝右侧标注数字代表裂缝发展至该处的相对荷载。由图 4 可知,与普通混凝土梁相比,玄武岩纤维混凝土梁裂缝更密集,破坏时梁 L-0-0,L-1-12,L-2-12,L-1-30,L-2-30 挠度依次增大,其中梁 L-1-30 相比梁 L-2-12 的 2 个关键参数值有增有减,致使最终破坏时挠度接近。

2.2 试验结果

图 5 为梁 L-2-30 跨中混凝土应变沿梁高分布,纵坐标中的梁截面高度 0 表示试验梁上表面,其中,

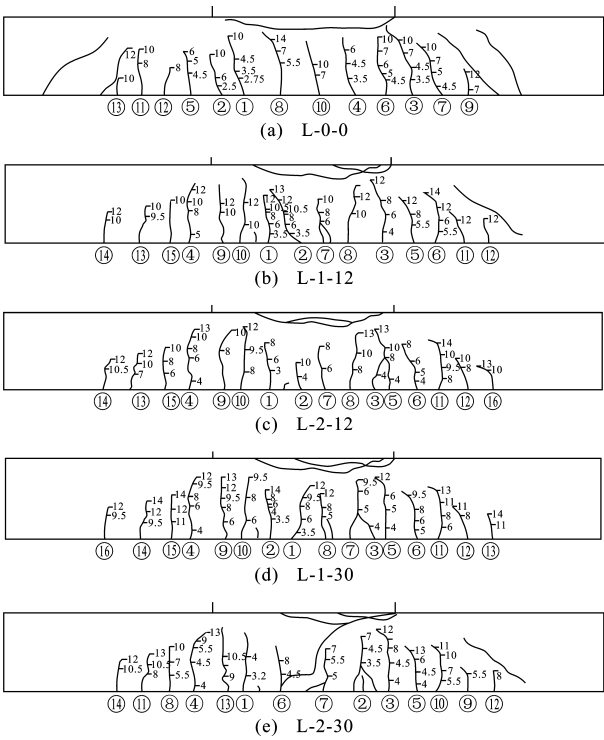


图 4 试验梁裂缝开展和分布
Fig. 4 Crack Developments and Distributions of Test Beams

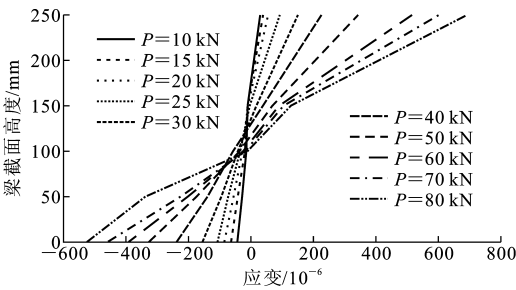


图 5 梁 L-2-30 跨中混凝土应变沿梁高的分布
Fig. 5 Strain Distribution of Concrete in Beam L-2-30 Mid-span Along Beam Height

P 为荷载。从图 5 可以看出,玄武岩纤维混凝土梁应变沿梁高的分布基本符合平截面假定。

3 试验分析

3.1 裂缝分析

最大裂缝宽度随荷载变化曲线如图 6 所示。裂缝观测仪观测到的跨越裂缝的玄武岩纤维如图 7 所示。

由图 6 可以看出:相同荷载作用下,玄武岩纤维混凝土梁最大裂缝宽度均小于普通混凝土梁,混凝土中掺入玄武岩纤维能起到阻裂效果;对比试验梁 L-1-12 与 L-2-12,L-1-30 与 L-2-30,当玄武岩纤维长度相同时,玄武岩纤维体积掺率越大,相同荷载作用下试验梁最大裂缝宽度越小,增大玄武岩纤维体

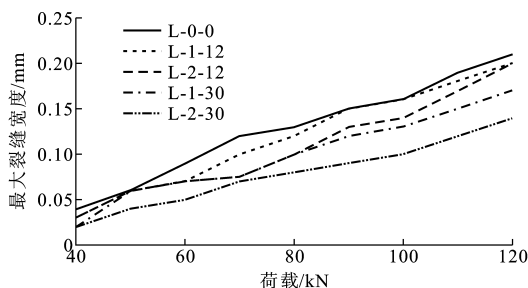


图 6 最大裂缝宽度随荷载变化曲线

Fig. 6 Changing Curves of Maximum Crack Width Under Different Loads

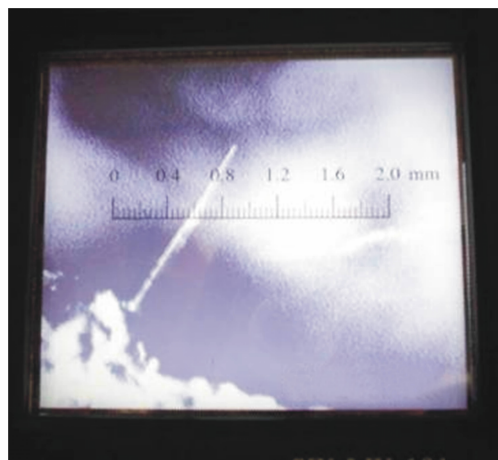


图 7 跨越裂缝的玄武岩纤维

Fig. 7 Basalt Fiber Across Cracks

积掺率在一定程度上可提高混凝土的抗裂性能;将试验梁 L-1-12 与 L-1-30, L-2-12 与 L-2-30 进行对比发现,随着玄武岩纤维长度的增加,相同荷载作用下试验梁裂缝宽度有所减小,此现象证实了玄武岩纤维长度是影响混凝土抗裂性能的因素之一,适当增加纤维长度可对混凝土的抗裂性能产生有利影响。玄武岩纤维在混凝土中乱向分布,其良好的抗拉强度性能降低了微裂缝周围的应力集中现象,阻止了混凝土梁内部微裂缝的发展,当混凝土开裂时,跨越裂缝的纤维能继续承受裂缝间的拉应力,在一定范围内提高玄武岩纤维长度,增大纤维的体积掺率,可使玄武岩纤维乱向分布更广,跨越的微裂缝数更多,阻裂效果更明显。

3.2 试验梁变形分析

试验梁荷载-跨中挠度曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出:玄武岩纤维混凝土梁同普通混凝土梁的受力过程均经历 3 个阶段,即未开裂阶段、带裂缝工作阶段与破坏阶段。

未开裂阶段 5 根试验梁荷载-挠度曲线呈直线变化,玄武岩纤维混凝土梁与普通混凝土梁荷载-挠

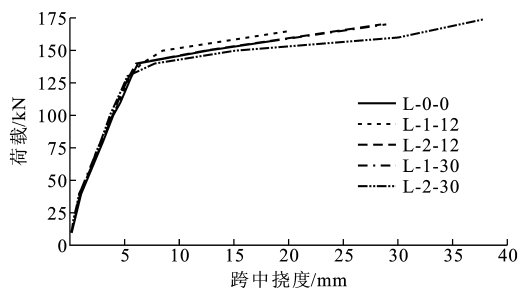


图 8 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 8 Curves of Load-mid-span Deflection

度曲线的斜率几乎相同,掺有玄武岩纤维的试验梁挠度相比梁 L-0-0 变化不大。

带裂缝工作阶段试验梁受拉区混凝土开裂,试验梁荷载-挠度曲线出现转折,由于受拉区钢筋的作用,混凝土即使开裂,裂缝发展也比较缓慢,在该阶段试验梁荷载-挠度曲线斜率相比未开裂阶段有所下降,但基本呈直线状,可认为试验梁在此阶段仍具有很好的线弹性。从表 3 可知,玄武岩纤维的体积掺率和长度都是影响试验梁变形的因素,玄武岩纤维可连接裂缝两端,与混凝土共同承担拉应力,起到阻裂作用,提高了混凝土梁的整体性,进而改善梁的刚度。

破坏阶段随着荷载的不断增加,受拉区钢筋屈服,荷载-挠度曲线再次出现拐点,试验梁挠度增量增大,试验梁最终破坏时玄武岩纤维混凝土梁挠度大于普通混凝土梁,原因是玄武岩纤维的掺入能增强混凝土梁的变形能力,提高受弯构件的延性。

4 试验梁最大裂缝宽度与短期刚度计算

4.1 最大裂缝宽度计算

以《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中钢筋混凝土梁的裂缝宽度计算公式为参考并结合文献[10]~[12],提出玄武岩纤维混凝土梁的裂缝宽度计算方法。

普通钢筋混凝土梁最大裂缝宽度为

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

$$\Psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{\text{tk}}}{\rho_{\text{te}} \sigma_{\text{sk}}} \quad (2)$$

$$d_{\text{eq}} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (3)$$

式中: ω_{\max} 为普通钢筋混凝土梁最大裂缝宽度; E_s 为纵向受拉钢筋弹性模量; α_{cr} 为构件受力特征系数,取

1.9; Ψ 为裂缝间纵向钢筋应变不均匀系数; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值; σ_{sk} 为按荷载效应标准组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的应力; d_{eq} 为受拉钢筋的等效直径; c 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率; d_i 为第*i*种纵向受拉钢筋公称直径; n_i 为第*i*种纵向受拉钢筋的根数; v_i 为第*i*种纵向受拉钢筋的相对粘结特性系数。

通过对式(1)中受拉钢筋应力、钢筋应变不均匀系数、平均裂缝间距、构件受力特征系数的分析可知,玄武岩纤维的掺入只对钢筋应力的变化有着不可忽略的影响,这与文献[10]中钢纤维的掺入对混凝土梁最大裂缝宽度计算公式各参数的影响一致。

公式(1)适用于考虑长期荷载效应的情况,本文试验为短期荷载,为避免长期荷载效应产生的误差,对 α_{cr} 进行修正,取 $\alpha_{cr}=1.28$ 。由于玄武岩纤维的阻裂作用,利用公式(1)对试验梁最大裂缝宽度进行计算误差较大,需要对公式(1)进行修正,文献[12]中给出了钢纤维钢筋混凝土梁最大裂缝宽度计算公式,本文采用文献[12]中的计算模型,通过对系数 β_{cw}^b 的线性回归,给出玄武岩纤维混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算公式,即

$$\omega_{fmax}=\omega_{max}(1-\beta_{cw}^b\lambda_f)$$

(4)

式中: ω_{fmax} 为玄武岩纤维混凝土梁的最大裂缝宽度; β_{cw}^b 为考虑玄武岩纤维的掺入对受弯构件裂缝宽度的影响系数,对数据进行线性回归得 $\beta_{cw}^b=0.1$; λ_f 为玄武岩纤维特征参数。

利用公式(4)对试验梁最大裂缝宽度进行校核,对比结果如表4所示。由表4可知,试验梁最大裂缝宽度实测值与计算值吻合较好。

4.2 试验梁短期刚度计算

4.2.1 实测刚度确定

试验梁跨中挠度与刚度关系为

$$\Delta=S\frac{Pl^3}{B_{fs}}$$

(5)

式中: Δ 为跨中最大挠度; B_{fs} 为梁的截面抗弯刚度; S 为系数,本文取为0.01775。

4.2.2 梁短期刚度计算方法

文献[12]中给出了钢纤维钢筋混凝土受弯构件短期刚度的计算公式,本文采用此公式对系数进行线性回归,给出玄武岩纤维混凝土受弯构件短期刚度的计算公式,即

$$B_{fs}=B_s(1+\beta_B\lambda_f)$$

(6)

表4 最大裂缝宽度实测值与计算值对比

Tab.4 Comparisons Between Measured and Calculated Values of Maximum Crack Width

梁编号	荷载/kN	最大裂缝宽度 实测值 l_1 /mm	最大裂缝宽度 计算值 l_2 /mm	$\frac{l_1}{l_2}$
L-0-0	80	0.13	0.137	0.951
	90	0.15	0.159	0.941
	100	0.16	0.182	0.879
	110	0.19	0.205	0.929
	120	0.21	0.227	0.924
L-1-12	80	0.12	0.126	0.954
	90	0.15	0.147	1.023
	100	0.16	0.167	0.956
	110	0.18	0.188	0.956
	120	0.20	0.209	0.957
L-2-12	80	0.10	0.115	0.871
	90	0.13	0.134	0.971
	100	0.14	0.153	0.916
	110	0.17	0.172	0.989
	120	0.20	0.191	1.048
L-1-30	80	0.10	0.109	0.914
	90	0.12	0.127	0.941
	100	0.13	0.146	0.893
	110	0.15	0.164	0.916
	120	0.17	0.182	0.935
L-2-30	80	0.08	0.082	0.975
	90	0.09	0.096	0.941
	100	0.10	0.109	0.916
	110	0.12	0.123	0.977
	120	0.14	0.136	1.027

$$B_s=E_sA_s h_0^2/(1.15\Psi+0.2+\frac{6\alpha_E\rho}{1+3.5\gamma_f})$$

(7)

式中: B_{fs} 为玄武岩纤维混凝土梁短期刚度; β_B 为考虑玄武岩纤维的掺入对受弯构件短期刚度的影响系数,根据试验结果线性回归得 $\beta_B=0.02$; B_s 为普通混凝土短期刚度; ρ 为纵向受拉钢筋配筋率; α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值; γ_f 为受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值; h_0 为截面有效高度; A_s 为受拉区纵向普通钢筋的截面面积。

利用公式(6)对试验梁短期刚度进行校核,对比结果如表5所示。由表5可知,试验梁短期刚度计算值与实测值较为接近。

5 结 语

(1)玄武岩纤维的掺入可有效阻止钢筋混凝土受弯构件的裂缝开展。

(2)当玄武岩纤维混凝土梁处于弹性工作阶段

表 5 短期刚度实测值与计算值对比
Tab. 5 Comparisons Between Measured and
Calculated Values of Short-term Stiffness

梁编号	荷载/kN	刚度实测值 k_1 / (10^{12} kN · m ²)	刚度计算值 k_2 / (10^{12} kN · m ²)	$\frac{k_1}{k_2}$
L-0-0	50	5.706	5.369	1.062 8
	60	5.142	5.104	1.007 4
	70	4.873	4.926	0.989 2
	80	4.800	4.798	1.000 4
L-1-12	50	5.781	5.451	1.060 6
	60	5.244	5.181	1.012 2
	70	4.932	5.001	0.986 3
	80	4.885	4.871	1.002 8
L-2-12	50	5.936	5.534	1.072 7
	60	5.379	5.260	1.022 6
	70	4.952	5.077	0.975 5
	80	4.973	4.945	1.005 7
L-1-30	50	6.058	5.618	1.078 4
	60	5.407	5.340	1.012 5
	70	5.055	5.154	0.980 9
	80	5.028	5.021	1.001 5
L-2-30	50	6.142	5.703	1.077 0
	60	5.463	5.421	1.007 7
	70	5.185	5.232	0.991 0
	80	5.102	5.097	1.001 1

时,玄武岩纤维对试验梁跨中挠度影响不大,带裂缝工作阶段玄武岩纤维能提高钢筋混凝土梁刚度,减小跨中挠度,试验梁最终破坏时玄武岩纤维混凝土梁挠度均大于普通混凝土梁。

(3)基于试验数据,提出了玄武岩纤维混凝土梁最大裂缝宽度和短期刚度计算公式,结果表明计算值与试验实测值吻合较好。

参考文献:
References:

[1] 沈荣熹,崔 琪,李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料[M]. 北京:中国建材工业出版社,2004.
SHEN Rong-xi,CUI Qi,LI Qing-hai. New Type Fiber Reinforced Cement-based Composites [M]. Beijing: China Building Materials Press,2004.

[2] 吴中伟. 纤维增强——水泥基材料的未来[J]. 混凝土与水泥制品,1999(1):5-6.
WU Zhong-wei. Fiber Reinforcement — Future of Cement-based Materials[J]. China Concrete and Cement Products,1999(1):5-6.

[3] 张 野. 短切玄武岩纤维混凝土基本力学性能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011.
ZHANG Ye. Research on Basic Mechanical Properties

of Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete [D]. Harbin:Northeast Forestry University,2011.

[4] 陈寅春. 玄武岩纤维混凝土梁的试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
CHEN Yin-chun. Experimental Study on Basalt Fiber Concrete Beams[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2011.

[5] 潘慧敏. 玄武岩纤维混凝土力学性能的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2009,28(5):955-958,972.
PAN Hui-min. Experimental Study on Mechanical Property of Basalt Fibre Reinforced Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009, 28 (5): 955-958,972.

[6] URBANSKIA M,LAPKOB A,GARBACZ A. Investigation on Concrete Beams Reinforced with Basalt Rebars as an Effective Alternative of Conventional R/C Structures [J]. Procedia Engineering, 2013, 57: 1183-1191.

[7] 李素娟,曹志强,柳丽霞,等. 玄武岩纤维在土木工程领域的研究与应用[J]. 唐山学院学报,2010,23(3): 17-19.
LI Su-juan,CAO Zhi-qiang,LIU Li-xia, et al. Research and Application of Basalt Fiber in Civil Engineering [J]. Journal of Tangshan College, 2010, 23 (3):17-19.

[8] ROEHM C,SASMAL S,NOVAK B,et al. Numerical Simulation for Seismic Performance Evaluation of Fibre Reinforced Concrete Beam-column Sub-assemblages[J]. Engineering Structures,2015,91:182-196.

[9] FIORE V,SCALICI T,DI BELLA G,et al. A Review on Basalt Fibre and Its Composites [J]. Composites Part B:Engineering,2015,74:74-94.

[10] 黄承逵. 纤维混凝土结构[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
HUANG Cheng-kui. Fiber Reinforced Concrete Structure[M]. Beijing:China Machine Press,2004.

[11] 黄承逵,赵国藩,王志杰. 钢筋钢纤维混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法[J]. 大连理工大学学报,1993,33(5):558-565.
HUANG Cheng-kui,ZHAO Guo-fan,WANG Zhi-jie. Calculating Methods of Crack Width of Reinforced Concrete Beams with Steel Bars and Fibres[J]. Journal of Dalian University of Technology,1993,33(5): 558-565.

[12] CECS 38—2004,纤维混凝土结构技术规程[S].
CECS 38—2004,Technical Specification for Fiber Reinforced Concrete Structures[S].