



改性竹筋混凝土受弯构件力学性能试验研究

邹立华¹, 钟坤禄¹, 谢吉鸿¹, 张天宇², 李梁峰², 黄凯¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 福建省建筑科学研究院, 福州 350025)

摘要: 针对竹筋混凝土结构存在的问题, 提出了多种对竹筋的改性方法。在此基础上, 对 12 根采用不同配筋和不同改性方法的受弯构件(11 根竹筋混凝土梁和 1 根钢筋混凝土梁)进行了试验研究, 分析了不同改性方法和不同配筋率竹筋混凝土受弯构件的力学性能、破坏形态及其影响因素。研究表明: 竹筋能有效提高混凝土受弯构件的承载能力; 经过适当方法改性后的竹筋能确保竹筋和混凝土之间的有效粘结, 其正截面强度计算可以采用平截面假定; 竹筋混凝土受弯构件的破坏均为脆性破坏, 其破坏形态与其截面配筋率有关。

关键词: 改性竹筋混凝土; 受弯构件; 力学性能; 平截面假定; 脆性破坏

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)05-0033-08

Experimental analysis of mechanical property of processed bamboo reinforced concrete flexural member

Zou Lihua¹, Zhong Kunlu¹, Xie Jihong¹, Zhang Tianyu², Li Liangfeng², Huang Kai¹

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China.

2. Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350025, P. R. China)

Abstract: To overcome the existing problems of bamboo reinforced concrete structure, several processing methods are proposed to improve the performance of bamboo bar. Experiments on twelve flexural members, including eleven bamboo reinforced concrete beams and one steel reinforced concrete beam, is carried out. The mechanical properties, failure modes and influential factors of flexural beams with different processing methods and reinforcement ratios are studied. The results show that: bamboo could improve effectively the flexural capacity of concrete beam, and the effective bonding between bamboo reinforcement and concrete could be achieved if the bamboo is processed by proper methods. Moreover, the plane-section assumption can be used for bearing capacity calculation of bamboo reinforced concrete beams. The failure mode of bamboo reinforced concrete beams is brittle fracture and the detailed fracture pattern is related to reinforcement ratios.

收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(51108091); 住房和城乡建设部研究开发项目(2009-R4-8)

作者简介: 邹立华(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震工程及新型结构形式研究, (E-mail) zouliahua66@163.com.

黄凯(通信作者), 男, 博士, 副研究员, (E-mail) huangkaie@qq.com.

Received: 2015-04-21

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51108091); Research & Development Project of MOHURD (No. 2009-R4-8)

Author brief: Zou Lihua (1966-), professor, doctoral supervisor, main research interest: anti-seismic structural engineering and new structural forms, (E-mail) zouliahua66@163.com.

Huang Kai (corresponding author), PhD, associate research fellow, (E-mail) huangkaie@qq.com.

Key words: processed bamboo reinforced concrete; flexural members; mechanical properties; plane-section assumption; brittle fracture

在土木工程中,钢筋混凝土结构因其性能卓越而被普遍使用。然而,钢筋的使用需消耗大量不可再生的资源,并对生态环境造成很大破坏。因此,学者们一直在寻求更为经济环保的钢筋替代材料。竹材因其优越的抗拉性能且可快速再生而备受瞩目。自 Chow^[1]最先提出将竹材应用于混凝土后,竹筋混凝土的研究引起了学者们的极大兴趣。藤田章等^[2]在对普通竹筋混凝土进行试验研究后发现:竹材可在混凝土中承受拉力,但存在与混凝土粘结性能差、易腐及易胀缩等问题。为此,细田贯一等^[3]将竹材表面刻槽以增大其与混凝土的粘结强度,并在其上涂刷热沥青做防水处理,但刻槽会减小竹材的有效受拉面积,而涂刷沥青会因沥青层变形过大而降低竹筋与混凝土的粘结能力,Akeju 等^[4]的研究也得出相似结论;Ghavami^[5-6]和 Agarwal 等^[7]等先后采用不同化学粘合剂对竹筋表面进行防水及防腐处理,Kute 等^[8]亦进行了类似研究,结果均显示:防水处理可有效减少竹材收缩变形,但导致竹材与混凝土间粘结力降低。此后,Dinesh、Rahman 等^[9-13]也对竹材在混凝土中应用进行了相关研究,但均未对其总体不足提出理想的解决措施。中国的相关研究较少,胡松林^[14]、孙绳曾^[15]等在 20 世纪 50 年代对竹筋混凝土板进行了短暂的研究和推广,胡杏芳^[16]对竹筋防水进行过相关研究。但由于当时的技术水平及特殊的历史条件,并没有很好地解决竹筋混凝土所存在的问题,从而制约了竹筋混凝土的推广和应用,也没有留下多少相关的研究文献。随着经济和社会的发展,节能和环保成为工程建设活动的重要评价指标,而科学技术的进步也为解决竹筋混凝土所存在的问题提供了可能。为此,笔者在已有研究成果的基础上,结合现有材料技术,对竹筋混凝土进行不同改性处理,并对改性后的竹筋混凝土受弯构件进行力学性能试验研究。

1 材料选择及改性方法

1.1 材料选择

竹材:选用产于福建、竹龄为 4 a、底部直径为 150 mm 左右的楠竹,取距根部 1 m 以上、长约 4 m 以内部分为试验竹材,用机械均匀劈裂成条,并置于阴凉处晾干至含水量为 20% 左右。

树脂:双酚 A 型环氧树脂(E-44)

沥青:普通石油沥青

1.2 改性方法

为研究不同改性方法对竹筋混凝土构件力学性能的影响,对代替钢筋的竹条采用如下不同改性处理:

方法 1:表面进行刻槽处理,见图 1(a)。

方法 2:在竹条表面均匀涂刷热沥青(厚度为全部覆盖竹材并不产生自然流动为宜),再在沥青表面均匀撒放无机颗粒(材料和粒径与所用混凝土细骨料相同,密度为能基本全部覆盖沥青为宜),见图 1(b)。

方法 3:在竹条表面均匀涂刷树脂(单层覆盖竹材并不产生自然流动为宜),再在树脂表面粘结有机颗粒(5~10 mm 见方的方形小竹块,间距为 5~10 mm 为宜),见图 1(c)。

方法 4:将竹条放入树脂内浸泡,30 min 后取出,将表面树脂涂匀并于阴凉处晾置 30 min,然后在树脂表面均匀撒放无机颗粒,材料,粒径及密度等要求同方法 2,见图 1(d)。改性处理主要是为提高竹筋与混凝土之间的粘结力,竹筋力学性能并无改变。此外,经过改性方法 2、3、4 后,在竹筋表面形成沥青或树脂不透水层,有利于竹材防水和减缓腐蚀的发生。

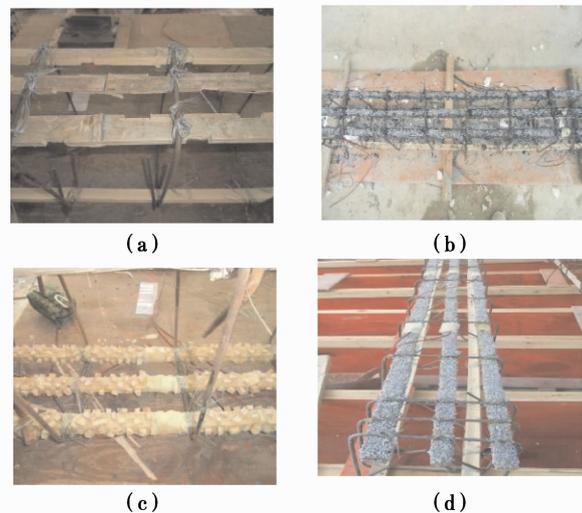


图 1 改性方法

Fig. 1 Processed methods

2 试件及试验设备

2.1 试件

试验试件总计 12 根 250 mm×300 mm 矩形截面梁,试验净跨为 1 900 mm。所用材料力学参数详

见表 1,各试件编号及配筋情况详见表 2。为与普通钢筋混凝土构件受弯性能进行对比,确保除受弯性

能外的其他性能相近,在试验中箍筋依旧采用钢筋,配筋为 $\Phi 8@100$ 。

表 1 材料性能
Table 1 Property of materials

材 料	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	极限强度(混凝土立方体抗压强度)/MPa
竹材	0.143×10^5		177
混凝土	0.315×10^5		16.7
箍筋	2.060×10^5	356	418
纵向钢筋	2.066×10^5	354	423

表 2 构件参数
Tab. 2 Specification of beams

梁编号	改性方式	配筋率/%	竹筋(钢筋)截面规格	配筋数量/根
B-W-1	无改性	0.89	25.0 mm × 8.9 mm	3
B-L-2	方法 2	0.89	25.0 mm × 8.9 mm	3
B-K-3	方法 1	0.89	25.0 mm × 8.9 mm	3
B-J-4	方法 3	0.89	25.0 mm × 8.9 mm	3
B-S-5	方法 4	0.59	25.0 mm × 8.9 mm	2
B-S-6	方法 4	0.89	25.0 mm × 8.9 mm	3
B-S-7	方法 4	1.19	25.0 mm × 8.9 mm	4
B-S-8	方法 4	1.48	25.0 mm × 8.9 mm	5
B-S-9	方法 4	2.07	25.0 mm × 8.9 mm	6
B-S-10	方法 4	3.26	45.0 mm × 9.1 mm	6
G-11	带肋钢筋	0.56	直径 $D=16$ mm	2
B-G-12	竹筋弯起	0.89	25.0 mm × 8.9 mm	3

2.2 试验设备及加载方式

1) 试验设备: DH3816 静态应变采集箱 1 台、DH3818 静态应变测试仪、50 t 油压千斤顶、压力传感器、YHD-100 型位移传感器、ZXL-201 智能裂缝测宽仪及卷尺。

2) 加载方式: 由千斤顶及反力架施加荷载, 刚性梁分配荷载, 使得跨中形成纯弯段。在千斤顶加载点处放置预先标定过的压力传感器, 连接 DH3818 应变测试仪来显示荷载增量。加载采用分级加载制度, 每级加载值为 5 kN, 当梁临近开裂和破坏时, 适当降低每级加载值以便观察其受力情况。

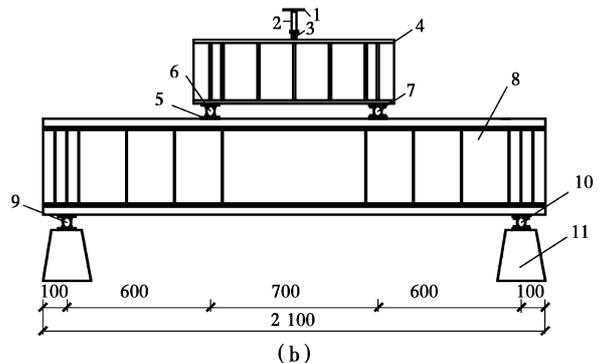
3) 量测内容: 在纵向筋材和箍筋上粘贴应变片以测量筋材变形, 在每条纵筋的跨中位置均匀布置 3 个应变片, 在距离支座 300 mm 的箍筋上布置箍筋应变片。此外, 在试验过程中, 沿跨中截面高度均匀布置 7 片混凝土应变片。以上应变均通过 DH3816 静态应变采集箱采集。

为观察裂缝发展情况, 将试验梁刷白, 并在梁侧面画上间距为 50 mm 的网格线, 裂缝宽度由 ZXL-201 智能裂缝测宽仪测得; 在梁支座和 $L/2$ 处安装 YHD-100 型位移传感器, 并将其连接于 DH3816 静

态应变采集箱, 利用采集系统测出挠度。



(a)



(b)

1. 反力梁及龙门架; 2. 50 t 千斤顶; 3. 压力传感器; 4. 工字钢分配梁;
5. 钢垫板; 6. 分配梁固定铰支座; 7. 分配梁滚动铰支座;
8. 试验梁; 9. 固定铰支座; 10. 滚动铰支座; 11. 底座

图 2 加载装置
Fig. 2 Test setup

3 试验结果及分析

3.1 破坏形态

由试验可以看出,初始加载时,随着荷载的增加,普通竹筋混凝土、改性竹筋混凝土和钢筋混凝土所表现出的性能基本相同,均表现为线性变化。随着荷载的增加,各试件受拉区混凝土先后开裂,开裂荷载除个别试件外均在 40 kN 左右。这说明,混凝土受弯构件的开裂荷载主要取决于混凝土的抗拉强度,而与所用配筋的种类和配筋率大小关系不是太明显,也说明普通竹材与混凝土之间有一定的粘结强度。

然而,与钢筋混凝土适筋梁(图 3(f))不同的是,竹筋混凝土受弯构件在受拉区混凝土开裂后,裂缝长度瞬间增大,受压区高度迅速减小(图 3(a)~(e)),且裂缝一旦形成,便具有一定的宽度。这是因为,开裂以前,应力主要由受拉区混凝土承担,而竹材应力很小,裂缝形成以后,受拉区混凝土退出工作,原来由受拉区混凝土承担的应力转而由受拉竹筋承担,因而竹筋应力迅速增大。由于竹材的弹性模量较小(约为钢材的 1/10),故裂缝一旦形成,便具有一定宽度,从而使截面中性轴迅速上移,导致受压区高度迅速减小。

与普通竹筋混凝土相比,除 B-L-2(方法 2)外(图 3(b)),改性竹筋混凝土受弯构件的初始裂缝宽度相对较小。如 B-J-4(方法 3)和 B-S-6(方法 4)的初始裂缝宽度仅为 0.1 mm,而相应配筋率的普通竹筋混凝土初始裂缝宽度为 1.5 mm。这说明,竹筋经改性处理以后,能有效增大混凝土与竹筋之间的粘结力,使竹筋和混凝土能协同工作。对于 B-L-2,即采用沥青包裹的改性方法,虽然其表面也散放了无机颗粒,但当施加荷载时,沥青层因产生过大的剪切变形而导致与混凝土之间产生滑移,从而减小了竹筋和混凝土的粘结强度,以致其初始裂缝宽度甚至大于普通竹筋混凝土(图 3(e))。

随着荷载的进一步增大,裂缝宽度增大,受压区高度继续减小,当荷载增加到一定值时,构件破坏。与钢筋混凝土适筋梁(图 3(f))不同的是,拥有相应配筋率的竹筋混凝土梁(图 3(g))裂缝发展较快,裂缝数量相对较少。更为重要是,在通常配筋率条件下,构件破坏时,受拉区竹筋先断裂,随即受压区混凝土压碎,属于脆性破坏,类似于钢筋混凝土梁的少筋破坏;而对于除 B-L-2 外的改性竹筋混凝土试件,当配筋率达到一定值时(3%左右),破坏时混凝土先

压碎,而竹筋未断裂,截面因失去继续承载能力而破坏,也属于脆性破坏,类似于钢筋混凝土梁的超筋破坏。但与普通竹筋混凝土(图 3(e))相比,除 B-L-2 外(图 3(b)),改性竹筋混凝土梁在破坏时混凝土梁裂缝宽度较小,数量较多,且分布较均匀(图 3(a)、(c)和(d))。在试验过程中,所有试件的箍筋均未到达屈服应变。

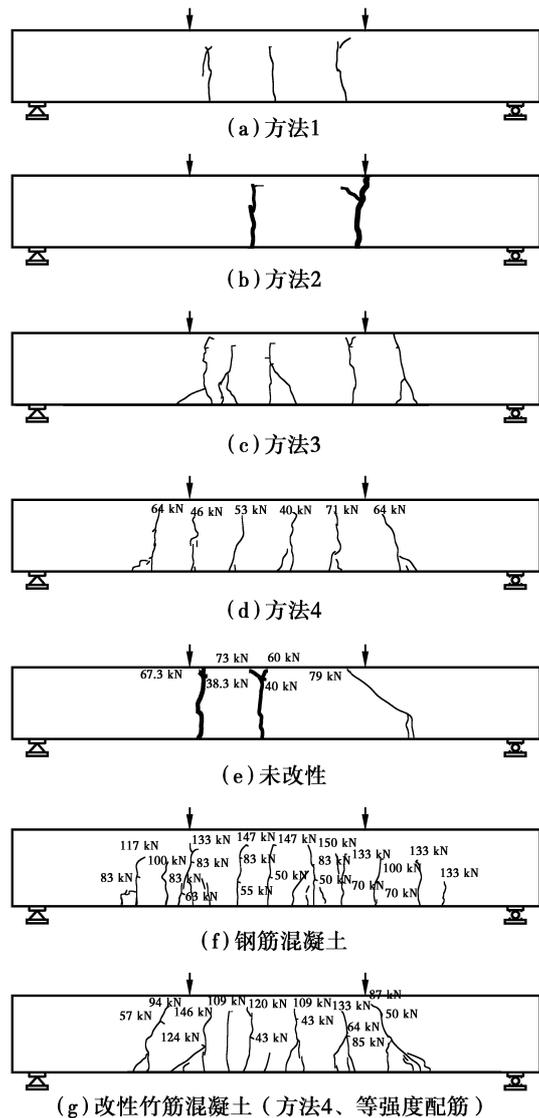


图 3 裂缝最终形态图
Fig. 3 Crack configuration of beam

3.2 构件荷载挠度关系

3.2.1 不同材料影响 图 4 为竹筋混凝土梁(B-S-7)和钢筋混凝土梁(G-11)的跨中荷载挠度关系图。其中,若将 G-11 按竹筋极限强度计算其等效配筋率为 1.34%,与 B-S-7 的竹筋配筋率相近。由图 4 可以看出:开裂前,钢筋混凝土和竹筋混凝土挠度变化基本相同,荷载挠度曲线斜率接近一致,这是因为开

裂前构件的抗弯刚度主要由构件截面形式和混凝土强度等级决定。

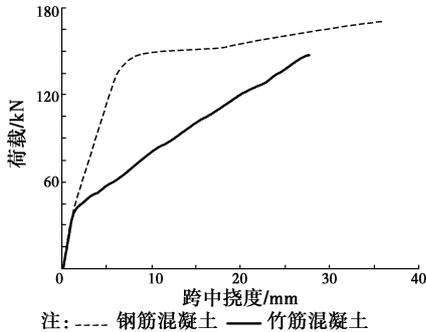


图 4 不同材料构件荷载挠度关系图

Fig. 4 The load-deflection curves of beams with different materials

开裂后,与钢筋混凝土相比,竹筋混凝土的荷载挠度曲线斜率减小,变形增大,而钢筋混凝土开裂前后曲线斜率未出现明显变化,变形较小。这是因为截面开裂后,原来由受拉区混凝土承担的应力转由受拉竹筋承担,竹筋应力迅速增大,由于竹材的弹性模量较小,故开裂后构件截面刚度减小,变形瞬间增大。随着荷载继续增加,竹筋混凝土梁的变形呈线性增长直至破坏,破坏前荷载挠度曲线并未出现屈服平台,而钢筋混凝土梁出现了屈服,屈服后变形快速增长。

3.2.2 不同改性方法影响 图 5 为不同改性方法构件的跨中荷载挠度关系图。由图 5 可以看出:开裂前,除方法 2 外,各种改性方法构件和普通竹筋混凝土构件的变形规律相差不大,开裂荷载也相差不大;开裂后,在开裂初期,B-W-1(无改性)、B-L-2(方法 2)及 B-K-3(方法 1)的的挠度变化非常迅速,其曲线斜率接近于 0,而相应的 B-J-4(方法 3)和 B-S-6(方法 4)的挠度增长则要平缓得多,随着荷载的增加,除 B-L-2 外,各构件的挠度变化趋势又开始趋于一致,但当荷载达到一定值时,B-W-1 的挠度又开始快速增长,而 B-J-4(方法 3)和 B-S-6(方法 4)的变化趋势则保持不变,直至破坏。这是因为普通竹筋混凝土的竹筋与混凝土之间的粘结强度较小,混凝土开裂以后,混凝土与竹筋之间产生一定程度的滑移,使得构件在开裂的一瞬间就具有较大的裂缝宽度,也即同时产生较大的挠度,此后裂缝间的混凝土与竹筋之间的粘结力与拉应力维持平衡,当荷载继续增加时,竹筋与混凝土之间产生新的滑移。而 B-J-4(方法 3)和 B-S-6(方法 4)则不同,由于竹筋和混凝土之间存在可靠的粘结,第一批裂缝产生以后,混

土和竹筋之间并不产生滑移,裂缝间的混凝土应力重分布,直到下一批裂缝产生,因而裂缝宽度并不大,瞬间挠度也就小。而 B-L-2 情况较为特殊,由于沥青层相对较厚,在混凝土与竹筋之间形成软弱的剪切变形层,使构件开裂后的瞬间挠度甚至大于普通竹筋混凝土。B-K-3(方法 1)虽能增大竹筋和混凝土之间的粘结力,但其粘结力主要依赖于竹材表面为数不多的刻槽,粘结点过于集中,因而其初始挠度也较大,且刻痕使竹筋有效面积减小,导致截面承载能力减小。

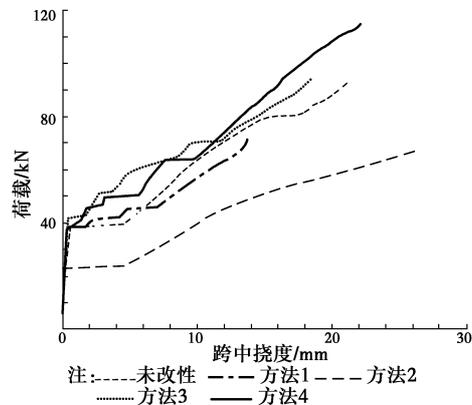


图 5 不同改性方法构件荷载挠度关系图

Fig. 5 The load-deflection curves of beams under different processed methods

3.2.3 不同配筋率及端部弯钩影响 图 6 为改性竹筋混凝土(方法 4)不同配筋率受弯构件的跨中荷载挠度关系图。由图 6 可以看出,总体来说,配筋率的大小对构件截面开裂荷载影响并不明显。但开裂以后,配筋率越大,构件瞬间挠度越小,挠度增长也越慢,需要指出是,当截面配筋率低至 0.6% 左右时,截面的开裂荷载和极限荷载非常接近,挠度曲线接近于水平直线。

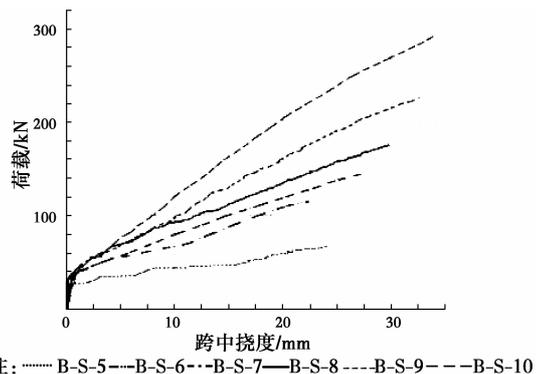


图 6 不同配筋率荷载挠度关系

Fig. 6 The load-deflection curves of beams with different reinforcement ratios

图 7 为竹筋端部设置弯钩(B-G-12)与不设置弯钩(B-W-1)的普通竹筋混凝土梁的跨中荷载挠度曲线,由图可以看出,在大部分时间里,两者的荷载挠

度曲线非常接近,且当荷载增加到一定值(接近破坏)时,带弯钩构件的挠度曲线趋于水平直线。这说明,竹筋端部的弯钩所起的锚固作用并不明显,没有增大竹筋与混凝土之间的粘结力。

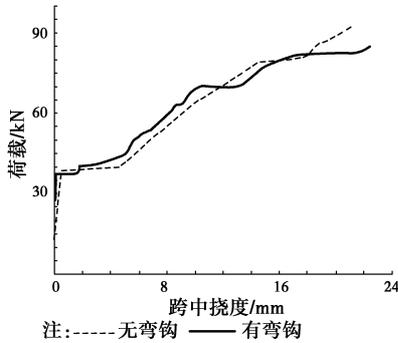


图 7 有无弯钩荷载挠度关系

Fig. 7 The load-deflection curves of beams with strips hooks and without strips hooks

3.3 沿截面高度混凝土应变分布规律

钢筋混凝土受弯构件的正截面强度计算是以平截面假定为基础的,它要求钢筋与混凝土之间不产生滑移。由于竹筋混凝土受弯构件中材料的特殊性,竹筋和混凝土之间的滑移情况以及是否满足平截面假定等尚待研究。为此,分别测试了在不同改性方法中竹筋混凝土受弯构件在不同荷载作用下混凝土应变沿截面高度分布情况(图 8 示)。由于截面开裂后裂缝较宽,部分应变未能准确采集到,因此,图中主要给出了截面开裂前的应变分布。

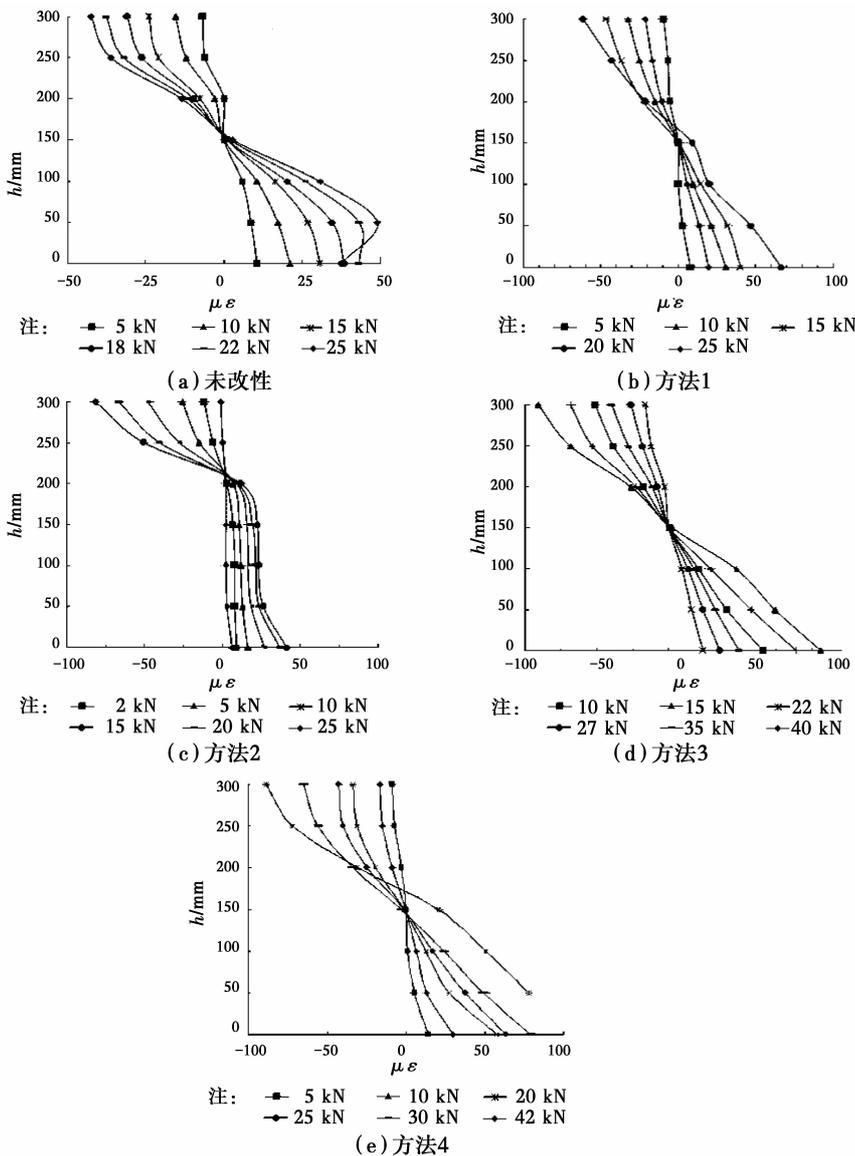


图 8 沿截面高度混凝土应变图

Fig. 8 Concrete strains along the height of section

由图 8 可以看出:除 B-W-1(竹筋未处理)和 B-L-2(方法 2)外,在开裂前,改性构件的混凝土应变沿截面高度基本呈线性分布,随着荷载增加,中性轴位于截面中部基本不变;截面受拉区混凝土开裂后,中性轴位置上移,但应变分布仍近似呈直线分布(图 8(b)和(e))。这说明,改性竹筋混凝土受弯构件的竹筋和混凝土之间有较为可靠的粘结力,因而,在进行正截面强度计算时,原来适用于钢筋混凝土受弯构件正截面计算的平截面假定,在改性竹筋混凝土受弯构件正截面强度计算中仍然适用。

对于普通竹筋混凝土受弯构件(B-W-1),当荷载较小时,混凝土应变沿截面高度基本呈线性分布,中性轴位于截面中线附近;随着荷载的增大,应变分布逐步表现非线性,荷载越大,非线性越明显,但中性轴位置基本不变。而对于采用方法 2 改性的受弯构件 B-L-2(图 8(c)),一开始混凝土应变分布就表现出明显的非线性,中性轴位置也明显高于其它构件,且荷载越大,非线性越明显,但中性轴位置并不随荷载增大而明显上移。这是因为,普通竹筋混凝土的竹筋与混凝土之间虽有一定粘结力,但粘结强度较小,当荷载达到一定值后,竹筋和混凝土之间便会产生滑移,从而使混凝土应变分布呈非线性;而对于采用沥青包裹(方法 2)的竹筋混凝土构件,沥青成为竹筋和混凝土之间的抗剪软弱层,构件一旦施加荷载,竹筋和混凝土之间便会产生显著滑移,导致混凝土应变分布呈现非线性,截面中性轴上移。

3.4 承载力能力变化规律

由试验可知(表 3),在相同的试验条件下,除 B-L-2 外,改性方法不同的竹筋混凝土构件的开裂荷载相差不大,同一改性方法不同配筋率的构件,其开裂荷载相差也不大,这说明,一般情况下,竹筋混凝土受弯构件截面的开裂荷载主要由截面情况及混凝土抗拉强度所决定,而与配筋率等因素关系不大。但当竹筋与混凝土之间存在严重滑移时,可能会减小构件的开裂荷载。

与开裂荷载不同,配筋率对极限承载力影响明显。在一定范围内(0.59%~2.07%),竹筋混凝土梁受弯构件的极限承载力随配筋率提高而增大。但当配筋率达到一定值后,随着配筋率的增加,其极限承载力增幅不大。这是因为:破坏模式由竹条受拉破坏(相当于钢筋混凝土少筋破坏)变为混凝土受压破坏(相当于钢筋混凝土超筋破坏),竹条强度未完全利用而混凝土已压碎破坏,因而,此时增大配筋率

对极限承载力的影响不大。从表 3 还可看出,等强度配筋率的改性竹筋混凝土受弯构件的极限承载力与相应的钢筋混凝土受弯构件承载能力接近。

表 3 构件开裂荷载和极限荷载

Table 3 The cracking load and ultimate load of beam

编 号	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	破坏模式
B-W-1	38.3	91.7	少筋
B-L-2	23.3	83.7	少筋
B-K-3	39.0	73.3	少筋
B-J-4	42.0	93.0	少筋
B-S-5	27.0	67.0	少筋
B-S-6	40.0	115.0	少筋
B-S-7	41.0	146.3	少筋
B-S-8	40.0	175.0	少筋
B-S-9	40.7	226.7	少筋
B-S-10	41.3	293.3	超筋
G-11	45.6	170.0	适筋
B-G-12	37.0	85.0	少筋

由于竹筋与钢筋的材料特性存在较大区别,钢筋混凝土构件受弯承载力公式将不再适用。竹筋混凝土正截面承载力公式需根据竹筋材料特性,重新推定。

4 结 论

1) 竹筋能有效提高混凝土受弯构件的极限承载能力,按本文方法(方法 3 和方法 4)对竹筋进行改性处理后,不仅能有效提高竹筋与混凝土之间的粘结力,满足正截面强度计算所需的平截面假定,还提高了竹材防水及防腐能力。

2) 竹筋的配筋率对竹筋混凝土受弯构件的力学性能及破坏形态有明显影响。当配筋率小于 3% 时,其破坏特性类似于钢筋混凝土受弯构件的少筋梁破坏,配筋率达到 3% 以后,其破坏特性类似于钢筋混凝土受弯构件的超筋破坏。构件破坏均为脆性破坏,为安全起见,竹筋混凝土的正截面设计宜以超筋破坏为设计标准,最小配筋率不宜小于 3%。

3) 沥青包裹竹筋的方式不宜用于竹筋混凝土竹材的改性,这样会在竹筋与混凝土之间形成软弱剪切层,使之产生较大滑移。

4) 竹筋端部的弯钩锚固作用并不明显。

参考文献:

- [1] Chow H K. Bamboo as material for reinforced concrete [D]. America; Massachusetts Institute of Technology, 1914.
- [2] 藤田章, 島田一, 巽纯一, 等. 关于竹筋混凝土的研究 [M]. 北京: 建筑工程出版社, 1957.
Teng T Z, Dao T Y, Xun C Y, et al. Researches on bamboo reinforced concrete [M] . Beijing: Architectural Engineering Press, 1957. (in Chinese)
- [3] 细田贯一. 竹筋混凝土 [M]. 北京: 建筑工程出版社, 1956.
Hosoda K. Bamboo reinforced concrete [M]. Beijing: Architectural Engineering Press, 1956. (in Chinese)
- [4] Akeju T A, Falade I. Utilization of bamboo as reinforcement in concrete for low-cost housing [J]. Structural Engineering Mechanics and Computation, 2001, 2: 1463-1470.
- [5] Ghavami K. Ultimate load behaviour of bamboo reinforced lightweight concrete beam [J]. Cement and Concrete Composites, 1995, 17(4): 281-288.
- [6] Ghavami K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements [J] . Cement and Concrete Composites, 2005, 27(6): 637-649.
- [7] Agarwal A, Nanda B, Maity D, et al. Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns [J]. Construction and Building Material, 2014, 71: 610-617.
- [8] Kute S Y, Wakchaure M R. Performance evaluation for enhancement of some of the engineering properties of bamboo as reinforcement in concrete [J]. Journal of the Institution of Engineers, 2013, 94(4): 236-242.
- [9] Dinesh B H, Nagarnaik P B, Parbat D K, et al. Experimental investigation of bamboo reinforced concrete slab [J]. American Journal of Engineering Research, 2014, 3(1): 128-131.
- [10] Prem K V, Vasugi V. Study on mechanical strength of bamboo reinforced concrete beam [J]. International Journal of Engineering & Technology, 2014, 2(3): 103-106.
- [11] Rahman M M, Rashid M H, Hossain M A, et al. Performance evaluation of bamboo reinforced concrete beam [J]. International Journal of Engineering & Technology, 2014, 11(4): 113-118.
- [12] Khan I K. Performance of bamboo reinforced concrete beam [J]. International Journal of Science, 2014, 3(3): 837-840.
- [13] Sevalia J K, Siddhpura N B, Agrawal C S, et al. Study on bamboo as reinforcement in cement concrete [J]. International Journal of Engineering Research & Applications, 2013, 3(2): 1181-1190.
- [14] 胡松林. 竹筋混凝土板的初步研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1956(10): 1-22.
Hu S L. Preliminary study on bamboo reinforced concrete plate [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1956(10): 1-22. (in Chinese)
- [15] 孙绳曾. 竹筋混凝土板继续试验研究总结 [J]. 同济大学学报, 1957(4): 131-166.
Sun S Z. The continue research on bamboo reinforced concrete plate [J]. Journal of Tongji University, 1957(4): 131-166. (in Chinese)
- [16] 胡杏芳. 竹材的防水处理 [J]. 同济大学学报, 1957(4): 186-192.
Hu X F. Water proofing treatment of bamboo bar [J]. Journal of Tongji University, 1957(4): 186-192. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)