

文章编号:1671-1637(2014)06-0017-10

BFRP 加固损伤混凝土梁挠度计算方法

秦丽辉^{1,2}, 李岩², 王宗林², AL-DULAIMI A F N³

(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; 3. 姆萨巴技术学院 建筑工程系, 巴比伦 姆萨巴)

摘要:为了准确计算玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)加固损伤混凝土梁的挠度,为 BFRP 加固损伤混凝土梁的设计与施工提供理论依据,按照配筋率不同设计了 11 片试验梁进行试验,每组试验梁设置不同的 BFRP 布加固量与加载方法。计算了各试验梁的荷载-挠度曲线,分析了未加固梁、1 层 BFRP 布加固梁、2 层 BFRP 布加固梁在不同初始荷载下的挠度变化规律。给出了 BFRP 加固损伤混凝土梁跨中挠度的计算公式,对比了挠度计算值与实测值。分析结果表明:BFRP 加固混凝土梁的挠度受初始荷载和加固量的影响,有初始荷载的加固梁挠度较无初始荷载的加固梁挠度增大 30%~94%,2 层 BFRP 布加固梁的挠度较 1 层加固梁的挠度增大 19%~42%,计算挠度时需考虑 BFRP 布滞后应变的影响;挠度计算值与实测值的最大差值平均为 7.26 mm,初始荷载小与配筋率高的试验梁挠度计算值与实测值较为接近,可以用于实际工程计算。

关键词:桥梁工程;损伤混凝土梁;玄武岩纤维增强复合材料;挠度;加固;初始荷载

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A

Deflection calculating method of damaged concrete beams strengthened with BFRP

QIN Li-hui^{1,2}, LI Yan², WANG Zong-lin², AL-DULAIMI A F N³

(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; 3. Department of Building and Construction Engineering, Al-Mussaib Technical College, Al-Mussaib, Babylon, Iraq)

Abstract: In order to accurately calculate the deflection of damaged concrete beam strengthened with basalt fiber reinforced plastics(BFRP) and provide theoretical foundation for the design and construction of the beam, according to different reinforcement ratios, eleven test beams with different amounts of strengthened BFRP sheet and loading methods were designed. The load-deflection curves of different test beams were obtained. Under different pre-loading programs, the changing rules of deflection of un-strengthened beams, strengthened beams with one layer and two layers of BFRP sheet were analyzed respectively. The calculation formulas of mid-span deflection of damaged concrete beam strengthened with BFRP were presented, and the calculated deflections and measured values were compared. Analysis result indicates that the deflections of damaged concrete beams strengthened with BFRP are influenced by initial load and amount of BFRP sheet layer. The deflections of strengthened beams with initial load increase by 30%-94% compared with strengthened beams without initial load, and the deflections of strengthened

收稿日期:2014-06-18

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,工学博士,从事桥梁加固研究。

beams with two layers of BFRP sheet increase by 19%~42% compared with strengthened beams with one layer of BFRP sheet. The impact of post-strain of BFRP should be considered in deflection calculation. The average value of the maximum difference between the calculated deflection and measured value is 7.26 mm. When the initial load is small and the reinforcement ratio is high, the calculated deflection of concrete beam is closer to the measured value, and the method can be used in the engineering practice. 2 tabs, 12 figs, 26 refs.

Key words: bridge engineering; damaged concrete beam; BFRP; deflection; strengthening; initial load

Author resume: QIN Li-hui(1977-), female, lecturer, PhD, +86-451-55191534, qinlh1977@126.com.

0 引 言

20 世纪末,随着国际市场纤维价格的降低,纤维增强复合材料(Fiber Reinforcement Compost Plastic, FRP)加固混凝土结构的方法逐渐得到应用。与传统加固方法相比,纤维片材具有抗拉强度高、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^[1]。玄武岩纤维增强复合材料(Basalt Fiber Reinforced Plastics, BFRP)作为近年新兴的纤维材料,不仅抗拉强度和弹性模量性能较高,而且其粘结性、耐热性与抗腐蚀性等性能优越,尤其在进行混凝土结构加固应用方面,能够有效弥补现有纤维材料的不足,发展前景广阔。

国外关于混凝土梁挠度的研究包括:Choi 等给出了计算再生混凝土梁长期挠度的修正公式,修正公式的计算结果与试验结果拟合较好^[2];Cha 等提出了外部荷载作用下混凝土梁挠度曲线的近似算法,得到的挠度曲线与实际案例中的精确曲线相同^[3];Mohammadhassani 等基于人工神经网络、线性回归分析与自适应模糊神经网络开展了混凝土深梁挠度预测研究,提出的预测模型的相关系数为 0.993 1,置信水平较高^[4-5];Gribniak 等开展了基于计算机模拟的钢筋混凝土梁挠度计算研究,认为在考虑混凝土收缩后有限元数值模拟的精度会得到提高^[6];Castel 等研究了开裂混凝土梁的整体刚度计算方法,认为现有基于经验曲线得到的开裂混凝土加载时的整体刚度被严重低估^[7]。关于纤维布加固混凝土梁的挠度研究主要有:Mari 等给出了纤维布加固混凝土梁的长期挠度简化算法,算法具有简洁、精准的优点,可以用于纤维布加固混凝土梁的设计^[8];Rafi 等构建了纤维布加固混凝土梁的长期挠度计算模型,模型计算结果与实际记录结果相吻合^[9];Miás 等研究了玻璃纤维布加固混凝土梁材料性能对挠度的影响,认为配筋率越高,混凝土强度越

低,总挠度与瞬时挠度的比值越高^[10],而且开展了玻璃纤维布加固混凝土梁即时挠度的试验研究,认为 ACI 440.1R-06 与修正 Bischoff 公式计算的即时挠度精度较高^[11];Kara 等研究了钢纤维布加固高强混凝土梁的挠度计算方法,认为将钢纤维布加入高强混凝土梁有利于减小梁的挠度^[12];Mohamed 等研究了钢板与纤维布联合加固混凝土梁挠度的计算方法,认为 Branson 公式由于低估了弯曲响应导致高估了挠度,并提出了修正公式^[13]。

中国关于纤维布加固混凝土梁挠度的相关研究包括:高丹盈等基于有效惯性矩构建了钢纤维布加固混凝土梁挠度计算模型,研究表明,在混凝土梁中掺入钢纤维可使混凝土梁跨中挠度减小 15%~61%^[14];余琼等进行了碳纤维布加固混凝土梁的挠度研究,分析了预应力对梁刚度的影响,认为采用弯矩比来定义预应力更为合理^[15];唐义军提出了碳纤维布加固混凝土梁的荷载-挠度全曲线简化计算方法,认为分阶段截面弹塑性分析方法可以满足工程设计要求^[16];王文炜等研究了玻璃纤维布加固混凝土梁的挠度计算方法,计算精度与试验值基本吻合^[17];李春红等开展了考虑拱效应的玻璃纤维复合增强塑料筋混凝土板的挠度计算研究,预测结果与试验值之比为 0.969,认为预测结果与试验值的吻合情况较现行规范更好^[18]。关于混凝土梁挠度计算方法的研究主要包括:张岩等进行了双面组合连续损伤梁的挠度研究,分析结果表明双面组合连续梁的刚度随混凝土极限拉应变的提高而增加^[19];周勇军等给出了桥梁跨中截面对应不同车速的动挠度曲线,得出了挠度与应变的冲击系数并不相等的结论^[20];徐荣桥等研究了组合梁挠度的改进折减刚度计算方法,克服了规范中抗剪连接程度增大,组合梁抗弯刚度反而减小导致挠度增大的矛盾,与精确解吻合较好^[21];江南等分析了不同矢跨比悬索桥挠度的变化规律,认为研究悬索桥的结构刚度时应综合考虑重力刚度与几何刚度的贡献^[22];张元

海等研究了剪力滞效应对简支箱梁挠度的影响,结果表明剪力滞效应无论在集中荷载还是均布荷载作用下均会显著提高筒支箱梁挠度^[23];杜进生等研究了部分预应力混凝土梁的挠度计算方法,计算得到的截面有效惯性矩与规范法计算值之比为 0.89~1.10^[24];孟刚等研究了预应力超高强混凝土梁挠度计算方法,适用于预应力超高强混凝土梁跨中挠度计算^[25];丁敏等给出了简支组合梁挠度曲线方程,结果表明其计算结果与实际情况吻合较好^[26]。

已有文献对其他类型纤维布加固梁与各种类型梁的挠度计算开展了研究,但对 BFRP 加固混凝土梁的挠度计算未见报道。本文开展了 BFRP 加固损伤混凝土梁的挠度试验研究,提出了 BFRP 加固损伤混凝土梁挠度的计算方法,为 BFRP 加固损伤混凝土梁的设计与施工提供理论依据。

1 试验方案与试验结果分析

1.1 试验方案

表 1 为试验梁参数,综合已有文献并考虑到尺寸效应等因素对试验结果的影响,选取的试验梁截

面的宽度与高度分别为 150、250 mm,试验梁长度为 2 600 mm,计算跨径为 2 400 mm,混凝土强度等级为 C40。试验梁按照配筋率不同分为 2 组:A 组纵向受力钢筋型号为 HRB335,直径为 12 mm 的 2 根钢筋(2Φ12)布置于受拉区,架立钢筋型号为 HPB235,直径为 8 mm(2φ8);B 组纵向受力钢筋型号为 HRB335,直径为 16 mm 的 2 根钢筋(2Φ16)布置于受拉区,架立钢筋型号为 HPB235,直径为 8 mm(2φ8)。2 组试验梁的箍筋均采用 HPB235,直径为 8 mm,间距为 100 mm(φ8@100),φ 表示光圆钢筋,Φ 表示螺纹钢筋,@ 表示箍筋间距。试验方案的设计过程中考虑到梁内纵筋配筋率的大小与所粘贴 BFRP 布量的多少对加固梁受力性能会产生一定的影响,计算时将试验梁截面纵筋配筋率设计为 0.70% 和 1.22% 两个水平。试验梁的配筋见图 1。

表 1 试验梁参数

Tab. 1 Parameters of test beams

试验梁	配筋	配筋率/%	箍筋	试验梁片数
A 组	2φ8/2Φ12	0.70	φ8@100	7
B 组	2φ8/2Φ16	1.22	φ8@100	4

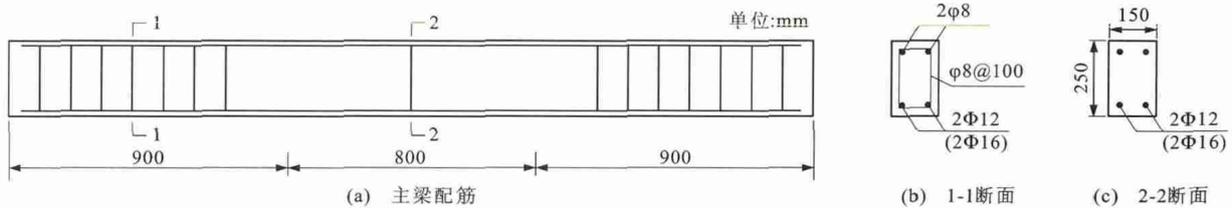


图 1 试验梁配筋

Fig. 1 Reinforcement of test beam

BFRP 布宽度 100 mm,有 1 层和 2 层,为了避免试验梁出现 BFRP 布的早期剥离,对试验梁采用 U 型箍进行锚固,锚固措施采用 2 个 U 形箍和 4 个 U 形箍 2 种形式,试验梁 BFRP 布加固粘贴方式见图 2。

试验采用矩形截面钢筋混凝土试验梁 2 点静力加载,即所有试验梁均在三等分点加载,试验加载装置与应变测点位置见图 3。采用该方案加载可在试验梁中部形成较大的纯弯段,不仅有利于观测裂缝和变形,而且其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,加载采用机械螺旋千斤顶,千斤顶配合分配梁分配荷载至 2 个跨度三等分点。试验梁两支座端部各留出 100 mm。为避免混凝土局部压碎,支座与加载点处均设置钢垫板,厚度为 10 mm,宽度为 100 mm。

试验过程中对试验梁预加不同的荷载,通过分析软件模拟在不同初始裂缝、初始应力和加载历史

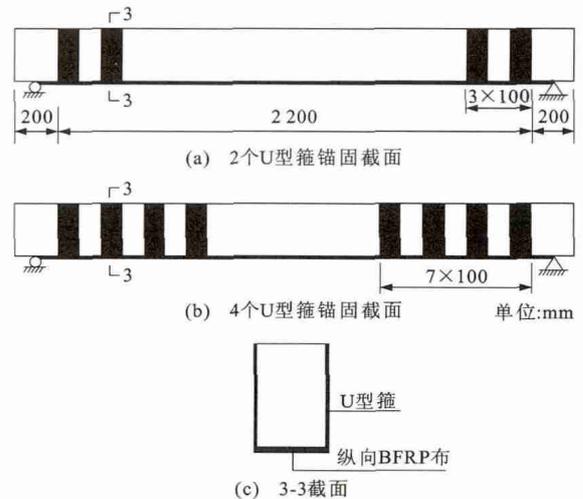


图 2 试验梁 BFRP 加固

Fig. 2 Test beams strengthened with BFRP

条件下的加固效果。为了使加固梁在加固前产生不同程度的损伤,加固梁的预加载值分别取极限荷载的 0、30%、60%、80% 施加,详见表 2。表 2 的编号

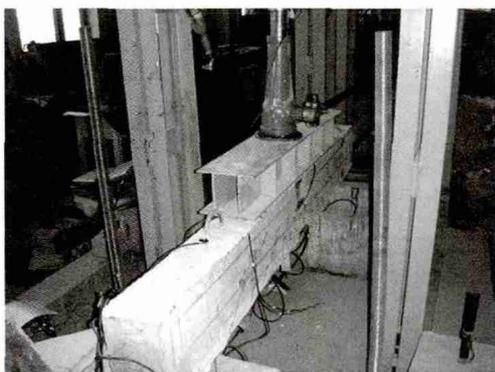
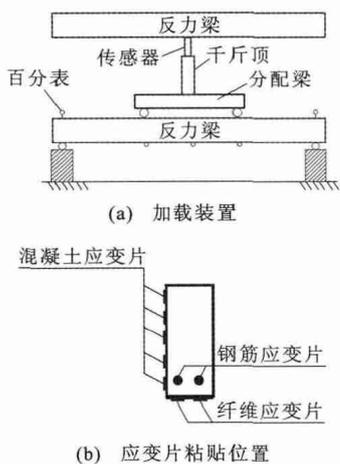


图 3 加载装置与应变测点布置

Fig. 3 Loading device and layout of strain test points

表 2 试验梁加载方法

Tab. 2 Loading methods of test beams

编号	配筋率/ %	BFRP 加固情况	锚固情况	加载方法
A-0	0.70	不加固	无锚固	直接加载至破坏
A1-0	0.70	底面 1 层	2 个 U 形箍	加固后直接加载至破坏
A1-1	0.70	底面 1 层	2 个 U 形箍	加载至 30% M_u , 卸载, 加固后加载至破坏
A1-2	0.70	底面 1 层	2 个 U 形箍	加载至 60% M_u , 卸载, 加固后加载至破坏
A2-0	0.70	底面 2 层	4 个 U 形箍	加固后直接加载至破坏
A2-1	0.70	底面 2 层	4 个 U 形箍	加载至 30% M_u , 卸载, 加固后加载至破坏
A2-2	0.70	底面 2 层	4 个 U 形箍	加载至 60% M_u , 卸载, 加固后加载至破坏
B-0	1.22	不加固	无锚固	直接加载至破坏
B2-0	1.22	底面 2 层	4 个 U 形箍	加固后直接加载至破坏
B2-2	1.22	底面 2 层	4 个 U 形箍	加载至 60% M_u , 卸载, 加固后加载至破坏
B2-3	1.22	底面 2 层	4 个 U 形箍	加载至 80% M_u , 卸载, 加固后加载至破坏

中 A-0、B-0 分别为配筋率为 0.70%、1.22% 的未加固对比梁,其余试验梁编号中第 1 个数字表示试验梁底面 BFRP 粘贴层数,第 2 个数字表示试验梁预加载情况, M_u 为对比梁的极限荷载。试验按《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)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。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 布进行加固,最后进行荷载试验。

1.2 试验结果分析

1.2.1 未加固梁的荷载-挠度曲线

图 4 为未加固对比梁 A-0、B-0 的荷载-挠度曲线。未加固梁为普通钢筋混凝土梁,其受力过程主要分为弹性阶段、带裂缝工作阶段和塑性发展阶段,这 3 个阶段又分别对应于试验梁开裂前、开裂至钢筋屈服与钢筋屈服至破坏 3 个变形阶段。

由图 4 可以看出:随着荷载的增加,试验梁的荷载-挠度曲线具有明显的线性阶段、屈服阶段与达到极限承载力的阶段;在弹性工作阶段,梁内混凝土的应变、钢筋的应变和试验梁的跨中挠度均呈线性发展趋势,开裂荷载相对较小;混凝土开裂后,梁体刚度有所下降,梁内混凝土与钢筋的应变曲线均发生

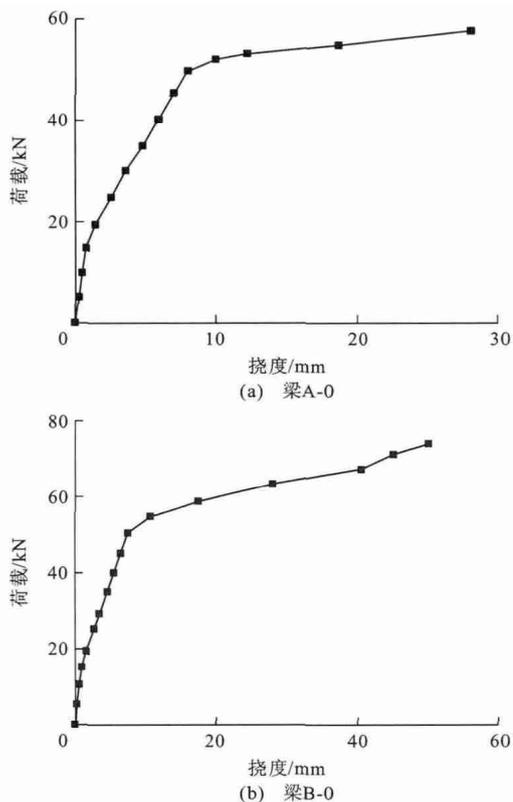


图 4 未加固梁荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves of un-strengthened beams

了明显的转折;当进入裂缝工作阶段后,梁内混凝土与钢筋跨中挠度变化明显,应变发展更为迅速;当达到纵筋屈服阶段后,试验梁的混凝土与钢筋跨中挠度变化更加强烈,应变变化急剧增加;在整个塑性阶段,梁的承载力增长幅度较小,但是相对变形变化较大,因而未加固梁发生了受压破坏。

1.2.2 BFRP加固无损梁荷载-挠度曲线

BFRP直接加固试验梁A1-0、A2-0、B2-0的试验过程与对比梁类似,荷载-挠度曲线见图5,可以看出:同样是直接加载到极限破坏,由于梁A2-0粘贴了2层BFRP布,而梁A1-0只粘贴了1层,所以A2-0的屈服台阶和极限承载力均大于A1-0,说明纤维布粘贴层数对结构有较大影响,但二者线性阶段的曲线基本重合,具有相似的开裂荷载;梁B2-0的纵筋配筋率高于梁A2-0、A1-0,开裂荷载略大于A系列试验梁,且屈服台阶与承载力也较大,说明配筋率对承载力有明显贡献。

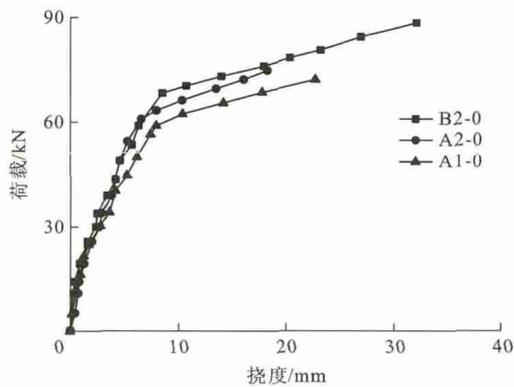


图5 加固无损梁荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of strengthened nondestructive beams

1.2.3 BFRP加固损伤梁荷载-挠度曲线

损伤混凝土试验梁经过粘贴BFRP布加固后继续进行加载试验,由于具有初始的裂缝、荷载、加载历史与变形,其受力性能与直接加固梁有一定程度的差别。试验中对试验梁施加60%的最大初始荷载时,尚未达到试验梁受力纵筋屈服荷载,此过程中主要包括以下3个受力阶段。

(1)预加载阶段。预加载阶段中试验梁与对比梁受力状态相同,经过预加载后试验梁一般均已开裂。

(2)再加载至钢筋屈服阶段。采用BFRP布对损伤试验梁进行加固处理后,继续进行加载试验。由于BFRP布的应变滞后于钢筋和混凝土应变,并且试验梁内部具初始损伤缺陷,因此,损伤试验梁在该阶段受力状态与无初始荷载加固梁有所不同。在该阶段,损伤试验梁在初始荷载作用下已具备一定

程度的初始挠度,因而其跨中挠度比加载前期直接加固梁的跨中挠度要大,但由于受到玄武岩纤维布的约束作用,试验梁的刚度性能得到了提升,因此,其跨中的荷载-挠度曲线会出现转折变化,随着荷载的不断增加,梁的跨中荷载-挠度曲线越来越接近直接加固梁的挠度曲线,且挠度变化的斜率越来越小,但仍处于上升趋势。直到加载达到钢筋屈服荷载,即到达了本受力阶段的末期,损伤梁的跨中挠度仍然明显大于直接加固梁的跨中挠度,损伤梁荷载一定程度上低于直接加固梁。由于初始裂缝的存在导致的差异,其裂缝的发展和均匀性也比没有直接加固梁的裂缝特征好。

(3)塑性发展阶段。将外部荷载施加于BFRP加固的损伤梁上,当荷载强度超过钢筋屈服后,梁体的荷载-挠度曲线、混凝土应变与荷载-钢筋应变曲线均发生了明显转折。同时,虽然受到BFRP布应变滞后效应的影响,损伤梁的变形大于直接加固梁的变形,但两者的受力特点和变形特征基本相同。在荷载作用后期,由于在裂缝较大处产生纤维布剥离破坏且破坏持续发展,最终导致不同的结构破坏形式。

当梁A2-2外荷载为15.20 kN时,跨中纯弯段出现裂缝,之后裂缝逐渐扩展;当荷载为36.65 kN时,纤维布开始出现剥离,并伴随一定的声响;荷载进一步增加为59.68 kN时,钢筋屈服,试验梁受拉区出现较大裂缝,最大裂缝宽度为4.3 mm;继续加载至试验梁破坏,最终极限荷载为70.09 kN,最终挠度为28.62 mm。

当梁B2-2外荷载为17.04 kN时,跨中纯弯段出现裂缝,随后裂缝缓慢扩展;当荷载增加为40.12 kN时,试验梁纯弯段有轻微BFRP布与混凝土梁剥离的声响,但剥离现象不明显;当荷载增加为71.61 kN时,钢筋发生屈服;继续加载至试验梁破坏,最终极限荷载为85.10 kN,挠度为41.82 mm。

由以上分析可知,增加配筋率可使试验梁开裂荷载有一定程度的增大(12.1%),且由于钢筋的作用使试验梁屈服荷载和极限荷载显著提高。图6为试验梁A2-2、B2-2的荷载-挠度曲线,可以发现,试验梁B2-2荷载-挠度曲线中各个对应挠度的荷载均比试验梁A2-2大,说明试验梁B2-2的受力性能明显优越,所以配筋率较高的试验梁B2-2没有发生试验梁A2-2的BFRP布剥离现象。

图7为试验梁A1-1、A1-2的荷载-挠度曲线,可以发现:当试验梁A1-1、A1-2的荷载为14.93 kN

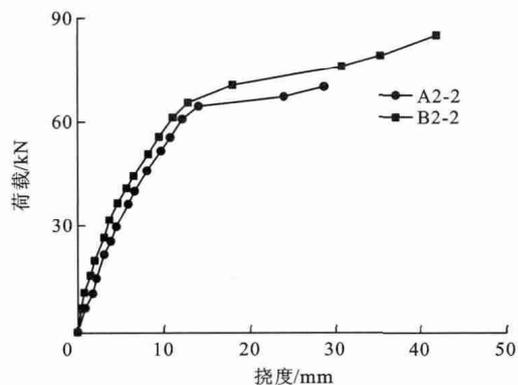


图 6 梁 A2-2 与 B2-2 的荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curves of A2-2 and B2-2 beams

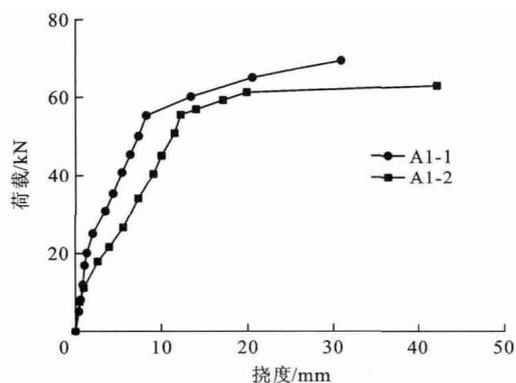


图 7 梁 A1-1 与 A1-2 的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves of A1-1 and A1-2 beams

时,结构均出现裂缝,随后裂缝缓慢增长;当荷载为 55.31 kN 时,梁 A1-1 钢筋发生屈服;当荷载为 61.90 kN 时,梁 A1-2 钢筋发生屈服;继续加载至破坏,梁 A1-1 的极限荷载为 69.39 kN,挠度为 30.91 mm,破坏形式为纤维断裂,梁 A1-2 的极限荷载为 62.92 kN,挠度为 42.21 mm,破坏形式为纤维剥离。

图 8 为试验梁 A2-1、A2-2 的荷载-挠度曲线, A2-1、A2-2 的开裂荷载均为 15.20 kN,裂缝随着荷载的增加而增长,并分别在荷载为 60.78、59.68 kN 时发生钢筋屈服现象,在 72.51、70.09 kN 时达到

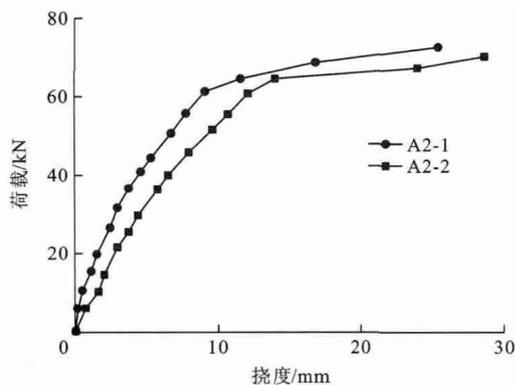


图 8 梁 A2-1、A2-2 的荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves of A2-1 and A2-2 beams

结构破坏,最终挠度分别为 25.43、28.62 mm,破坏形式为纤维剥离且受拉区出现较大裂缝。

图 9 为试验梁 B2-2、B2-3 的荷载-挠度曲线,荷载为 17.04 kN 时,梁 B2-2、B2-3 均出现裂缝,荷载增加为 71.61 kN(B2-2)和 58.10 kN(B2-3)时出现钢筋屈服,并分别在 85.10、80.78 kN 时最终破坏,最终挠度分别为 41.82、62.19 mm,破坏形式为 BFRP 布拉断伴随受拉区混凝土断裂。

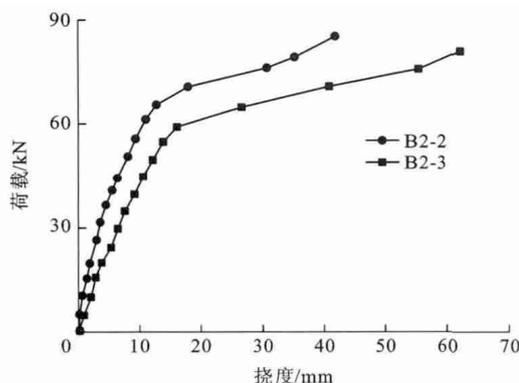


图 9 梁 B2-2、B2-3 的荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves of B2-2 and B2-3 beams

1.2.4 未加固梁与加固梁跨中挠度对比

受拉钢筋屈服前,相比未加固对比梁,加固梁的跨中挠度逐渐增加,与对比梁的相应跨中挠度差值也逐渐增大。钢筋屈服后,对比梁跨中挠度迅速增加,而加固梁的挠度增长幅度相对较为缓慢。

作为极限荷载时的变形,未加固梁挠度明显大于加固梁的挠度,其中最大差值为采取两端 4U 加固的试验梁 B2-0 挠度比梁 B-0 减小 56%。在 2 组 BFRP 抗弯加固试验梁中,一次加固至极限荷载的梁 A1-0、A2-0、B2-0 的加固效果较好,挠度分别为 22.74、18.25、32.12 mm。试验梁 A1-1、A1-2 经过加载、卸载、加固、加载 4 个步骤,相当于对有初始损伤的钢筋混凝土梁进行加固,第 1 次加载对梁体造成的损伤影响加固效果,使得加固后挠度比一次加载工况略大,分别为 30.9、42.2 mm。相同的加载历史条件下,底面 BFRP 布 2 层加固时比 1 层加固时挠度小,各试验梁在极限状态下的最大挠度见图 10。

在混凝土开裂前,即变形的第 1 阶段,在荷载作用下加固梁挠度较小,BFRP 布加固后试验梁的刚度略大于对比梁,但开裂荷载的差别不大。

当 BFRP 加固量增加同时梁的配筋率也增大时,对梁的变形影响较大。例如试验梁 B 系列中,梁内粘贴 2 层 BFRP 布的梁 B2-0 与 B-0 相比较,变形差别较大;试验梁 A 系列中 A1-0 与 A-0 相比,变

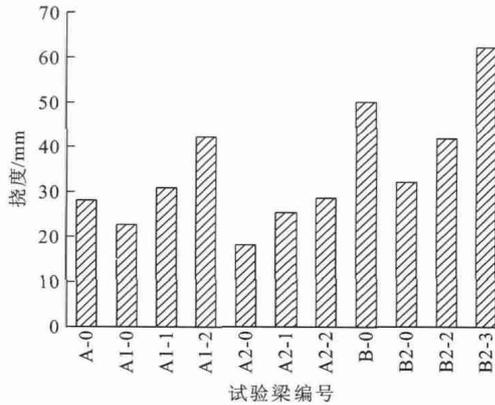


图 10 试验梁最大挠度对比

Fig. 10 Comparison of maximum deflections of test beams

形差别较小。当混凝土梁发生开裂至钢筋屈服阶段,即梁的变形的第 2 阶段时,试验梁的荷载-挠度曲线随即发生转折,但由于采用了 BFRP 布进行加固,试验梁的荷载-挠度曲线转折程度较小,相比对比梁,加固后梁的刚度有较大幅度提高,提高的幅度与相对加固量有关,即随着 BFRP 布加固量的提高其极限荷载逐渐增大。

随着荷载的增加,当发生钢筋屈服时,即变形的第 3 阶段,梁的变形曲线再次出现较大程度的转折。加固梁的变形对比梁大,其原因为一旦进入屈服阶段,钢筋的强度会迅速下降,导致试验梁发生破坏。当采用 BFRP 布进行加固后,BFRP 布承担了钢筋屈服后梁的所有荷载,使得 BFRP 布发挥了作用。试验梁荷载不断增加,梁的变形也不断增加,其荷载-挠度曲线转折相对较小,特别是在加固量相对较大时,两者的差别更为突出。由图 10 可以看出,有初始荷载的加固梁挠度比无初始荷载的加固梁挠度增大 30%~94%,2 层 BFRP 布加固梁的挠度比 1 层加固梁的挠度增大 19%~42%。

2 挠度计算方法

采用 BFRP 布加固钢筋混凝土梁后,纤维布在一定程度上减小了相应荷载作用下钢筋的应力。在相同荷载作用下,一定程度上也减小了加固梁的挠度。当加固梁有初始荷载作用时,BFRP 布也减小了钢筋的部分应力。试验结果表明,当试验梁存在初始荷载作用时,加固后梁刚度的计算应该综合考虑初始荷载和 BFRP 布 2 种因素对梁的影响。BFRP 布加固钢筋混凝土梁的挠度计算主要包括混凝土开裂前、混凝土开裂至钢筋屈服与钢筋屈服后这 3 个不同的受力阶段。

采用最小刚度原则计算挠度,本文中加固梁的

挠度计算公式为

$$f = \beta M l_0^2 / B \quad (1)$$

式中: f 为混凝土梁的跨中挠度; β 为挠度系数,数值与荷载种类和梁的支撑条件有关; M 为弯矩; l_0 为混凝土梁的计算跨径; B 为混凝土梁的跨中抗弯刚度。

2.1 开裂前加固梁的刚度计算

根据在工程实践中观测到的混凝土梁的破坏形式,未加固梁的开裂荷载一般均小于所承受的初始荷载,开裂前刚度的计算公式为

$$B = 0.85 E_c I_0 \quad (2)$$

式中: E_c 为混凝土的弹性模量; I_0 为玄武岩纤维布加固梁的换算截面惯性矩。

在计算截面惯性矩时仅考虑混凝土和钢筋的作用,此时截面惯性矩为

$$I_0 = \frac{1}{12} b h^3 + b h \left(\frac{h}{2} - y_0 \right)^2 + n_s A_s (h_0 - y_0)^2 \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{b h^3 / 3 + n_s A_s h_0^2}{b h + n_s A_s} \quad (4)$$

式中: b 、 h 分别为梁横截面的宽度和高度; y_0 为换算截面重心到梁顶的距离; h_0 为梁横截面的有效高度; n_s 为 BFRP 布与混凝土弹性模量的比值; A_s 为受拉钢筋面积。

2.2 开裂至钢筋屈服时加固梁的刚度计算

当加固梁在初始荷载作用下已经开裂,刚度计算分为加固前和加固后 2 个阶段。加固前可以采用普通钢筋混凝土梁的刚度公式进行计算。采用 BFRP 布加固后,在 BFRP 布的作用下刚度有一定程度的增加,但和 BFRP 布直接加固梁进行对比发现,BFRP 布的作用是滞后的,有初始荷载作用的加固梁在弯矩作用下截面的应力-应变关系见图 11,表示为

$$M = E_s \epsilon_s A_s \eta h_0 + E_R A_R (\epsilon_R + \epsilon') (\eta h_0 + a_s) \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_R} = \frac{(1-D)h_0}{(1-D)h_0 + a_s} \quad (6)$$

$$A_h = \frac{E_R (\eta h_0 + a_s) [(1-D)h_0 + a_s] A_R}{E_s \eta h_0 (1-D)h_0} \quad (7)$$

式中: E_s 、 E_R 分别为受拉钢筋和 BFRP 布的弹性模量; ϵ_s 、 ϵ_R 分别为受拉钢筋和 BFRP 布的应变; ϵ' 为梁底初始应变; A_R 为 BFRP 布的面积; η 为梁横截面的内力臂系数; a_s 为受拉钢筋合力作用点到梁横截面最近边的距离; D 为截面实际受压区高度与梁横截面有效高度的比值; A_h 为 BFRP 布换算的等效钢筋面积。

整理式(5)~(7)得

$$M + E_R \epsilon' A_R (\eta h_0 + a_s) = E_s \epsilon_s \eta h_0 (A_s + A_h) \quad (8)$$

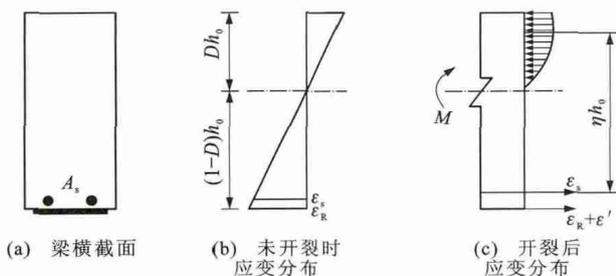


图11 应力-应变关系

Fig. 11 Relationships between stress and strain

有初始荷载的矩形截面梁的刚度 B_s 为

$$B_s = \frac{E_s h_0^2 (A_s + A_h)}{1.15\psi + 0.2 + 6\alpha_E \rho} \quad (9)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_t}{\rho_t \sigma_k} \quad (10)$$

$$\rho_t = \frac{A_s + A_h}{A_t} \quad (11)$$

$$\sigma_k = \frac{M}{(A_s + A_h) \eta h_0} \quad (12)$$

式中: ρ 为梁内钢筋的配筋率; f_t 为混凝土轴心的抗拉强度; α_E 为梁内钢筋与混凝土的弹性模量比值; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋的应变不均匀系数; σ_k 为外荷载作用下梁内纵向受拉钢筋应力; ρ_t 为按照有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率; A_t 为受拉混凝土的有效截面面积。

若有滞后应变,应在式(12)中加入 BFRP 布滞后应变的影响,表示为

$$\sigma_k = \frac{M + E_R \epsilon'_R (\eta h_0 + a_s)}{(A_s + A_h) \eta h_0} \quad (13)$$

2.3 钢筋屈服后加固梁的刚度计算

此阶段计算梁的刚度时可以对有初始荷载加固梁的钢筋屈服弯矩、屈服曲率、极限弯矩、极限曲率进行计算,刚度为

$$B = \frac{M}{\varphi_0} \quad (14)$$

$$\varphi_0 = \frac{M - M_y}{M_u - M_y} (\varphi_u - \varphi_y) + \varphi_y \quad (15)$$

式中: φ_0 为截面曲率; M_y 、 M_u 分别为屈服弯矩与极限弯矩; φ_y 、 φ_u 分别为屈服曲率与极限曲率。

以本文中矩形截面梁为例,钢筋屈服后梁的刚度计算公式为

$$M_y = f_y \eta_1 h_0 (A_s + A_h) + E_R \epsilon'_R (\eta h_0 + a_s) \quad (16)$$

$$M_u = \left[f_y A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + E_R (\epsilon_R + \epsilon') \cdot A_R \left(h - \frac{x}{2} \right) \right] \eta_2 \quad (17)$$

式中: f_y 为钢筋抗拉强度; η_1 为钢筋屈服后的内力

臂系数,建议取值为 0.96; η_2 为实测加固梁极限弯矩时的内力臂系数,根据经验取值为 1.1~1.2; x 为混凝土受压区高度。

2.4 混凝土梁挠度计算值与实测值对比分析

图 12 为本文方法计算的 BFRP 布加固梁跨中挠度与实测值的对比结果,可以看出:试验梁 A1-1、A1-2、A2-1、A2-2、B2-2、B2-3 的挠度计算值与实测值的最大差值分别为 6.52、5.96、3.33、3.75、11.80、12.20 mm,平均为 7.26 mm。采用本文挠度计算方法对初始荷载小、配筋率高的试验梁挠度进行计算,其计算值与实测值接近,可以用于实际工程计算。图 12 中挠度的计算值普遍比实测值偏小,是因为在采用公式计算时引入了多种系数作为安全储备。

3 结 语

(1)采用 BFRP 布加固混凝土梁,使梁的整体刚度有所提高;在极限荷载状况下,未加固试验梁挠度明显大于加固梁的挠度,采取两端 4 个 U 形箍加固的试验梁挠度比未加固梁减小 56%;在相同的加载历史条件下,底面 BFRP 布 2 层加固比 1 层加固时的挠度小。

(2)在初始荷载作用下,加固梁在采用 BFRP 布加固后,计算刚度时应综合考虑纤维布和初始荷载的共同影响;BFRP 布加固钢筋混凝土梁的挠度计算应包括开裂前、开裂至钢筋屈服阶段和钢筋屈服后 3 个不同的受力阶段。

(3)本文提出了基于 3 个不同受力阶段的 BFRP 布加固混凝土损伤梁的挠度计算方法,在开裂至钢筋屈服阶段,考虑了 BFRP 布滞后应变的影响,计算结果与实测值较为接近。采用本文方法得到的挠度计算值与实测值的最大差值平均为 7.26 mm,对初始荷载小、配筋率高的试验梁挠度进行计算,其计算值与实测值接近,可以用于实际工程计算。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 李春霞. CFRP 加固荷载混凝土梁抗弯承载力及可靠度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
LI Chun-xia. Flexural bearing and reliability of loaded concrete beams strengthened with CFRP[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [2] CHOI W C, YUN H D. Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate[J]. Materials and Design, 2013, 51(5): 742-750.
- [3] CHA P, CARBON K. An efficient approach to approximate the deflection curve of an arbitrarily supported beam subject

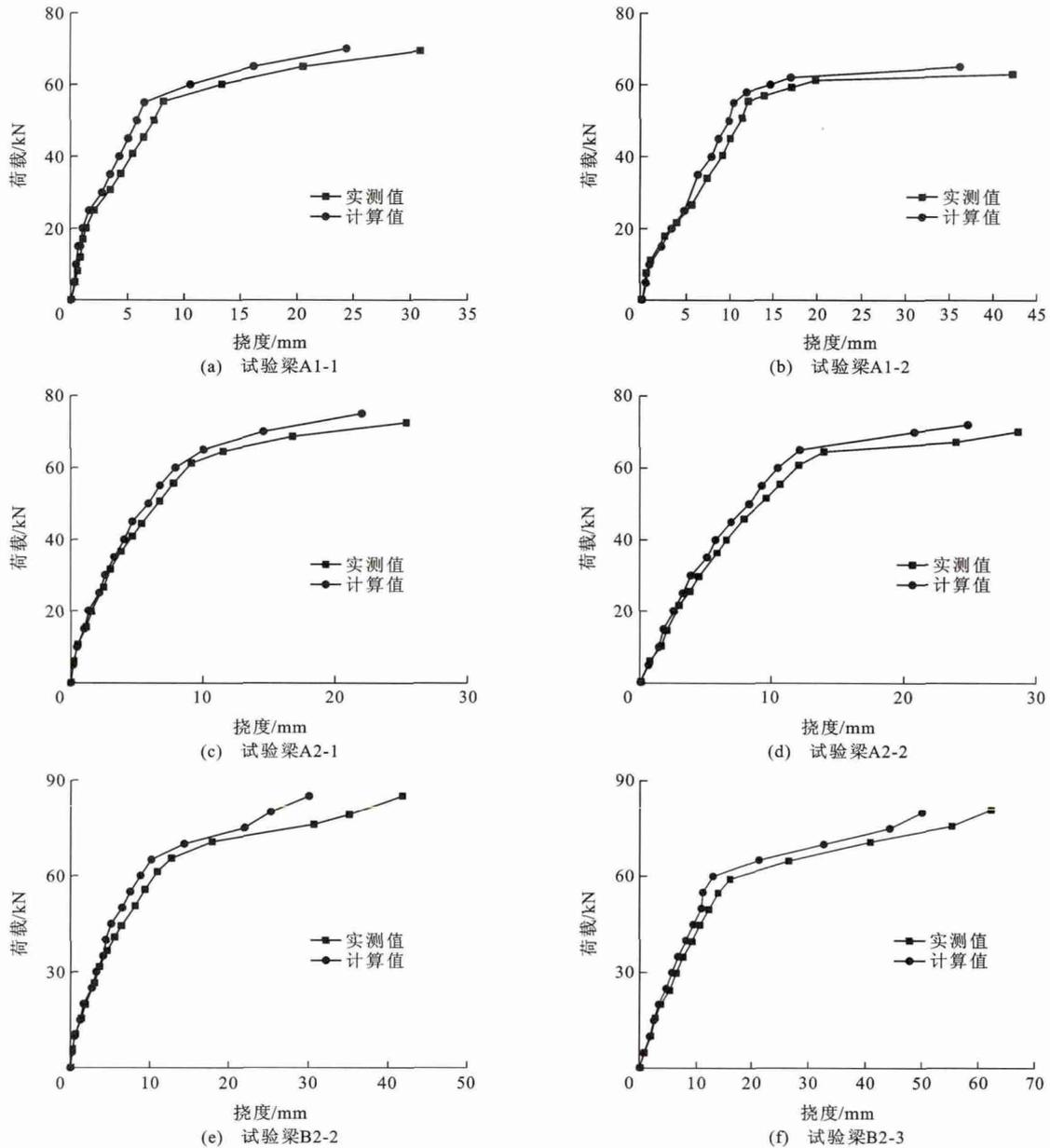


图 12 挠度计算值与实测值的对比

Fig. 12 Comparison of calculated and measured deflections

to external loads[J]. International Journal of Mechanical Engineering Education, 2013, 41(2): 146-168.

- [4] MOHAMMADHASSANI M, NEZAMABADI-POUR H, JUMAAT M Z, et al. Application of artificial neural networks (ANNs) and linear regressions (LR) to predict the deflection of concrete deep beams[J]. Computers and Concrete, 2013, 11(3): 237-252.
- [5] MOHAMMADHASSANI M, NEZAMABADI-POUR H, JUMAAT M Z, et al. Application of the ANFIS model in deflection prediction of concrete deep beam[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2013, 45(3): 319-332.
- [6] GRIBNIAK V, CERVENKA V, KAKLAUSKAS G. Deflection prediction of reinforced concrete beams by design codes and computer simulation[J]. Engineering Structures, 2013, 56(11): 2175-2186.

- [7] CASTEL A, FRANÇOIS R. Calculation of the overall stiffness and irreversible deflection of cracked reinforced concrete beams[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(12): 2035-2042.
- [8] MARÍ A R, OLLER E, BAI RÁN J M, et al. Simplified method for the calculation of long-term deflections in FRP-strengthened reinforced concrete beams[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 1368-1376.
- [9] RAFI M M, NADJAI A. A suggested model for European code to calculate deflection of FRP reinforced concrete beams[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(3): 197-214.
- [10] MIÁS C, TORRES L, TURON A, et al. Effect of material properties on long-term deflections of GFRP reinforced concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41(4): 99-108.

- [11] MIÀS C, TORRES L, TURON A, et al. Experimental study of immediate and time-dependent deflections of GFRP reinforced concrete beams[J]. *Composite Structures*, 2013, 96(2): 279-285.
- [12] KARA I F, DUNDAR C. Prediction of deflection of high strength steel fiber reinforced concrete beams and columns[J]. *Computers and Concrete*, 2012, 9(2): 133-151.
- [13] MOHAMED H M, MASMOUDI R. Deflection prediction of steel and FRP-reinforced concrete-filled FRP tube beams[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(3): 462-472.
- [14] 高丹盈, 张明. 基于有效惯性矩的碳纤维高强混凝土梁刚度计算方法[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(5): 62-68, 139. GAO Dan-ying, ZHANG Ming. Calculation method for stiffness of steel fiber reinforced high-strength concrete beams based on effective moment of inertia[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(5): 62-68, 139. (in Chinese)
- [15] 余琼, 张燕语. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁挠度研究[J]. *结构工程师*, 2011, 27(1): 139-143. YU Qiong, ZHANG Yan-yu. Study on deflection of RC beams strengthened with prestressed CFRP[J]. *Structural Engineers*, 2011, 27(1): 139-143. (in Chinese)
- [16] 唐义军. 碳纤维布加固 RC 梁后的荷载-挠度全曲线的简化计算[J]. *四川建筑科学研究*, 2012, 38(3): 109-111. TANG Yi-jun. The simplification computation of entire load-deflection curve of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber sheet[J]. *Sichuan Building Science*, 2012, 38(3): 109-111. (in Chinese)
- [17] 王文伟, 赵国藩. 玻璃纤维布加固的钢筋混凝土梁挠度计算[J]. *四川建筑科学研究*, 2004, 30(3): 33-36. WANG Wen-wei, ZHAO Guo-fan. Calculation of deflection of RC beams strengthened with GFRP sheets[J]. *Sichuan Building Science*, 2004, 30(3): 33-36. (in Chinese)
- [18] 李春红, 魏德敏, 郑愚. GFRP 筋混凝土板在拱效应下的挠度计算[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(4): 474-479. LI Chun-hong, WEI De-min, ZHENG Yu. Deflection estimation of concrete slab reinforced with GFRP bars with consideration of arching action[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2012, 33(4): 474-479. (in Chinese)
- [19] 张岩, 段树金, 郑岗. 考虑混凝土损伤的双面组合连续梁挠度和裂缝宽度研究[J]. *石家庄铁道大学学报: 自然科学版*, 2011, 24(3): 24-28. ZHANG Yan, DUAN Shu-jin, ZHENG Gang. Study on deflection and crack width of double composite continuous beam considering concrete damage[J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science*, 2011, 24(3): 24-28. (in Chinese)
- [20] 周勇军, 蔡军哲, 石雄伟, 等. 基于加权法的桥梁冲击系数计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2013, 13(4): 29-36. ZHOU Yong-jun, CAI Jun-zhe, SHI Xiong-wei, et al. Computing method of bridge impact factor based on weighted method[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(4): 29-36. (in Chinese)
- [21] 徐荣桥, 陈德权. 组合梁挠度计算的改进折减刚度法[J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 285-291. XU Rong-qiao, CHEN De-quan. Modified reduced stiffness method for calculating the deflection of composite beams[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 285-291. (in Chinese)
- [22] 江南, 沈锐利. 矢跨比对悬索桥结构刚度的影响[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(7): 90-97. JIANG Nan, SHEN Rui-li. Influence of rise-span ratio on structural stiffness of suspension bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(7): 90-97. (in Chinese)
- [23] 张元海, 林丽霞, 刘勇. 剪力滞效应对箱形梁挠度影响的研究[J]. *计算力学学报*, 2012, 29(4): 625-630. ZHANG Yuan-hai, LIN Li-xia, LIU Yong. Influence of shear lag effect on deflection of box girder[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(4): 625-630. (in Chinese)
- [24] 杜进生, 区达光. UPPC 梁的开裂截面惯性矩及挠度计算研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(2): 170-176. DU Jin-sheng, AU F T K. Moment of inertia of cracked sections and deflections for UPPC beams[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(2): 170-176. (in Chinese)
- [25] 孟刚, 贾金青, 王吉忠. 预应力超高强混凝土筒支梁抗弯性能分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34(5): 575-580. MENG Gang, JIA Jin-qing, WANG Ji-zhong. Study on flexural behavior of prestressed ultra-high strength concrete beams[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(5): 575-580. (in Chinese)
- [26] 丁敏, 蒋秀根, 孟石平, 等. 整体-局部弯曲模型及其在简支组合梁中的应用[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 233-240. DING Min, JIANG Xiu-gen, MENG Shi-ping, et al. Global-local bending model and its application in simply supported composite beam[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 233-240. (in Chinese)