

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160729.001

预应力高性能混杂纤维增强布加固 HPC 梁的 DNLC 单元研究

张剑^{*1}, 周储伟¹, 俞博², 林晶³(1. 南京航空航天大学 结构工程与力学系, 南京 210016; 2. 江西省交通科学研究院, 南昌 330200;
3. 同济大学 桥梁工程研究所, 上海 200092)

摘要: 对于不同混杂配比的预应力高性能混杂纤维增强(HFRP)布, 建立高性能 HFRP 布加固高性能混凝土(HPC)梁的双重非线性分层组合(DNLC)单元模型。根据实体退化单元理论, 采用初应力等参层单元对高性能 HFRP 布的体外预应力效应进行模拟, 同时正确地考虑 HPC 梁的材料非线性效应以及结构的几何非线性, 验证 DNLC 单元分析模型的正确性, 并对 HPC 梁的开裂荷载、普通钢筋应力、高性能 HFRP 布应力重分布等进行研究。结合试验资料分析表明, 预应力碳/玻璃纤维混杂(CFRP/GFRP)布加固 HPC 梁的理论结果与试验数据吻合程度良好, 采用等参层单元有效地模拟高性能 HFRP 布的预应力作用, 及所推导的 DNLC 单元正确性。预应力 GFRP 纤维布加固的开裂荷载等均较低, 预应力 CFRP 纤维布加固的开裂荷载等有所提高, 但剩余强度过大。HPC 梁开裂荷载前预应力高性能 HFRP 布应力发展缓慢, 屈服荷载后, 其发展迅速直至结构失效。

关键词: HFRP 布; HPC 梁; DNLC 单元; 预应力; 应力重分布

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2017)05-1152-07

Research on DNLC element for HPC beams strengthened with high performance prestressed HFRP sheet

ZHANG Jian^{*1}, ZHOU Chuwei¹, YU Bo², LIN Jing³

(1. Department of Mechanics and Structural Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330200, China; 3. Institute of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The calculative double nonlinear layered combinative (DNLC) element of high performance concrete (HPC) beams strengthened with prestressed hybrid fiber(HFRP) sheet were established for different kinds of mixture ratios. The prestress effect of HFRP sheet was effectively simulated by isoperimetric layer element with initial stress. After considering the material nonlinearity of the HPC beams and the geometry nonlinearity of the structures, the analytical model based on DNLC element was validated, and then the mechanical behaviors including the cracking loads, the stress development of the steel and the stress redistribution of HFRP sheet of the strengthened beams were studied. By comparing with the experimental results, the results of this method are in good agreement with the experimental results, which proves that the prestress of HFRP is efficiently modeled by isoperimetric layer element and the DNLC element is reliable. The characteristic loads of prestressed CFRP sheet are higher than those of prestressed GFRP sheet. However, the degree of increase of the cracking loads of prestressed CFRP sheet is smaller compared with hybrid fiber sheet and the residual strength of CFRP sheet is more than other hybrid fiber sheets. Before cracking loads, the stress redistribution of the hybrid fiber sheet changes a little and then after yielding loads, it increases fast until the structure fails.

Keywords: HFRP sheet; HPC beam; DNLC element; prestress; stress redistribution

收稿日期: 2016-06-03; 录用日期: 2016-07-12; 网络出版时间: 2016-07-29 10:51

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160729.1051.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(11232007;11272147); 江苏省自然科学基金(BK20130787); 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2014003)

通讯作者: 张剑, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料力学与土木工程加固 E-mail: zjmech@163.com

引用格式: 张剑, 周储伟, 俞博, 等. 预应力高性能混杂纤维增强布加固 HPC 梁的 DNLC 单元研究[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5): 1152-1158.

ZHANG J, ZHOU C W, YU B, et al. Research on DNLC element for HPC beams strengthened with high performance prestressed HFRP sheet[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5): 1152-1158 (in Chinese).

纤维增强复合材料(FRP)是由纤维材料与基体材料按一定比例混合并经过一定工艺复合形成的新材料^[1-2]。这种材料从上世纪中期问世以来, 在航空航天、化工和机械等领域得到广泛的应用。近年来, CFRP 以其高强、轻质、耐腐蚀等优点, 在土木工程中得到逐步应用, 并受到工程界的广泛关注^[3-4]。目前 CFRP 布的抗弯加固研究及应用大都集中于未加预应力的普通 CFRP 片材粘贴加固, 用以取代传统的粘钢加固技术。与粘钢加固相比, 普通 CFRP 布粘贴加固虽然具有诸多优势, 但与常见的非预应力加固技术一样, 普通 CFRP 布抗弯加固的材料实际利用率过低, 加固后结构的正常使用状态性能改善有限。采用预应力 CFRP 布加固, 可以有效地避免材料应力滞后的问题, 能充分发挥高强材料的补强效果^[5-6]。由于 CFRP 延性较差等缺点, 在常用的 FRP 材料中, 玻璃纤维增强(GFRP)复合材料的抗拉强度和弹性模量较低, 但延伸率相对较大, 价格相对便宜, 这对于 CFRP 来说正起到互补作用, 易于与 CFRP 材料的混杂编织, 故将两种纤维混杂后可表现出优于其单一纤维的力学性能^[7-8]。该方面的成果主要集中在试验研究, 如文献[9]改进预应力混杂 CFRP/GFRP 纤维布的张拉锚固夹具以保证纤维布不发生剥离破坏, 通过试验较为深入地研究了该加固体系的抗弯抗疲劳性能。文献[10]利用空间杆单元模拟预应力 CFRP 筋, 推导非线性单元对预应力 CFRP 筋混凝土梁进行全过程分析。文献[11]分析了高性能混凝土(HPC)梁的材料非线性, 研究相应单元对预应力 CFRP 筋混凝土梁进行全过程分析。迄今为止, 高性能混杂纤维增强(HFRP)布加固 HPC 梁的非线性力学性能等研究成果尚不多见。

为此, 本文将根据不同混杂配比的预应力高性能 HFRP 布, 在体内预应力束非线性单元的基础上^[10-11], 推导预应力高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的 DNLC 单元, 建立体外预应力分析模型。结合相关试验成果, 考证 DNLC 单元的正确性后, 对 HPC 梁的开裂荷载、高性能 HFRP 布应力重分布和普通钢筋应力发展等展开研究。

1 高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的 DNLC 单元

预应力高性能 HFRP 布加固 HPC 梁由混凝土、普通钢筋和预应力 HFRP 布组成, 其材料性能

和应力是非线性组合单元中 ζ 坐标的不连续函数(如图 1 所示)。而混凝土的屈服、开裂等结构行为需用到沿壳厚方向的积分来表达, 分层法简洁有效地解决了此种问题, 将不连续函数的积分问题转化为有限项级数求和问题, 同时体内配置数量众多的普通钢筋也可用层单元来处理, 且能保证精度。图 1 所示的实体退化单元里面有 9 个节点, 其中 4 个角节点为控制节点, 其余 5 个从节点的空间几何位置可由 4 个控制节点确定。单元 9 个节点的每个节点均有 3 个独立的线位移自由度和 2 个独立的转角位移自由度, 转角不受中面斜率的限制, 允许横向剪切变形出现。图 1 中 ξ 、 η 、 ζ 为退化壳元的自然曲线坐标系; \bar{v}_{1k} 、 \bar{v}_{2k} 、 \bar{v}_{3k} 为退化壳元节点 k 的节点坐标系; Δ_{1k} 、 Δ_{2k} 分别为延节点坐标系 \bar{v}_{1k} 、 \bar{v}_{2k} 的线位移; β_{1k} 、 β_{2k} 分别为绕 \bar{v}_{3k} 、 \bar{v}_{1k} 的转角位移。 u_k 、 v_k 、 w_k 为节点 k 在整体坐标系中的线位移, 与转角位移 β_{1k} 、 β_{2k} 组成节点 k 的节点位移列阵, 即: $\boldsymbol{\delta}_k = [u_k \ v_k \ w_k \ \beta_{1k} \ \beta_{2k}]^T$ 。

非线性层壳组合(NLC)单元的位移场通过形函数插值可表示为^[11]

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i + \sum_{i=1}^n N_i \frac{h_i}{2} \zeta (\bar{v}_{1i}^x \beta_{1i} - \bar{v}_{2i}^x \beta_{2i}) \quad (1)$$

$$v = \sum_{i=1}^n N_i v_i + \sum_{i=1}^n N_i \frac{h_i}{2} \zeta (\bar{v}_{1i}^y \beta_{1i} - \bar{v}_{2i}^y \beta_{2i}) \quad (2)$$

$$w = \sum_{i=1}^n N_i w_i + \sum_{i=1}^n N_i \frac{h_i}{2} \zeta (\bar{v}_{1i}^z \beta_{1i} - \bar{v}_{2i}^z \beta_{2i}) \quad (3)$$

式中: n 为单元的节点数; N_i 为节点 i 的形函数; h_i 为节点 i 处壳元厚度; \bar{v}_{1i}^x 为节点 i 的节点坐标系 v_1 与 x 轴夹角余弦值, 其余类推可得。

在预应力高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的受力性能分析中, NLC 单元刚度矩阵为

$$\mathbf{K}^{\text{CON}} = \sum_{j=1}^m \mathbf{K}_j^{\text{CON}} + \mathbf{K}^{\text{STE}} + \mathbf{K}^{\text{FRP}} \quad (4)$$

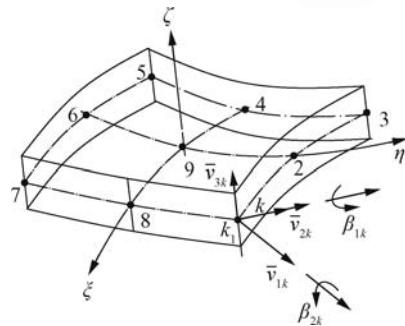


图 1 实体退化壳单元

Fig. 1 Solid degraded shell element

式中: m 为 NLC 单元中混凝土层数; \mathbf{K}^{LAY} 为 NLC 单元刚度矩阵; $\mathbf{K}_j^{\text{CON}}$ 为第 j 层混凝土层单元刚度矩阵; \mathbf{K}^{STE} 为构造钢筋层和箍筋层的刚度矩阵; \mathbf{K}^{FRP} 为预应力 HFRP 布的等参层单元刚度矩阵, 均可利用高斯求积公式求得^[10-11]。

对于梁底纵向受力钢筋, 用分层壳元模拟过于近似, 可用组合壳元模拟。NLC 单元中受力筋单元起点 A 和终点 B 如图 2 所示, 则钢筋单元的节点位移用 NLC 单元节点位移可表示为

$$\boldsymbol{\delta}_s = \mathbf{R}\boldsymbol{\delta}_c \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\delta}_s$ 为钢筋单元的节点位移列阵; $\boldsymbol{\delta}_c$ 为 NLC 单元节点位移列阵; \mathbf{R} 为转换矩阵, 可由位移场函数式(1)~(3)推求。应用虚功原理^[12], 推得受力筋单元对 NLC 单元刚度矩阵的贡献:

$$\mathbf{K}^{\text{COM}} = \mathbf{R}^T \bar{\mathbf{K}}_s \mathbf{R} \quad (6)$$

式中: \mathbf{K}^{COM} 为受力筋单元对 NLC 单元刚度矩阵的贡献; $\bar{\mathbf{K}}_s$ 为整体坐标系下受力筋单元刚度矩阵。与文献[10-11]相比, 本文采用等参梁单元可更准确地模拟其空间构形^[17]。故 DNLC 单元刚度矩阵为

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{K}^{\text{LAY}} + \mathbf{K}^{\text{COM}} + \mathbf{K}^{\text{GEO}} \quad (7)$$

式中: \mathbf{K}^e 为 DNLC 单元刚度矩阵; \mathbf{K}^{LAY} 、 \mathbf{K}^{COM} 分别由式(4)和式(6)确定; \mathbf{K}^{GEO} 为由式(17)确定的 DNLC 单元的几何刚度矩阵。

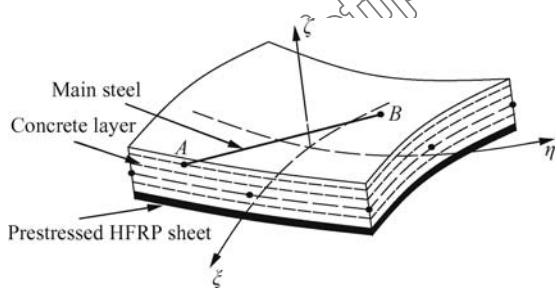


图 2 高性能 HFRP 布加固梁的非线性单元

Fig. 2 Nonlinear element of the beam strengthened with high performance HFRP sheet

2 高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的材料非线性

2.1 HPC 梁的 Ottosen 屈服模型

Ottosen 屈服准则引入应力角对屈服面的影响, 并以三角函数为基础提出四参数屈服准则, 其表达式为^[3]

$$f(I_1, J_2, \lambda) = a \frac{J_2}{f_c^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_c} + b \frac{I_1}{f_c} - 1 = 0 \quad (8)$$

$$\lambda = \lambda(\varphi)$$

$$= \begin{cases} k_1 \cos\left[\frac{1}{3} \arccos(k_2 \varphi)\right], & \varphi \geq 0 \\ k_1 \cos\left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos(-k_2 \varphi)\right], & \varphi < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为应力偏量第二不变量; $\varphi = \cos 3\theta$, θ 为 Haigh-Westergaard 坐标; f_c 为混凝土抗压强度; 参数 a 、 b 、 k_1 、 k_2 可用两个单轴强度和典型二轴、三轴强度来标定。

2.2 HPC 梁的 Hinton 压碎准则

高性能混凝土的压碎断裂由应变控制, Hinton 压碎准则表达式为^[9]

$$F(I'_1, J'_2) = (\alpha I'_1 + 3\beta J'_2)^{1/2} = \epsilon_u \quad (10)$$

式中: I'_1 为应变张量第一不变量; J'_2 为应变偏量第二不变量; ϵ_u 为混凝土极限压应变; 参数 α 、 β 可采用 Kupfer-Gerstle 试验结果进行标定。此外, 流动法则采用关联流动法则, 混凝土开裂后采用弥散裂缝模型, 并考虑拉伸刚化和裂面抗剪效应。

2.3 钢筋材料模型

高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的钢筋材料分为受力钢筋和普通构造钢筋。普通构造钢筋采用壳元中等效厚度的层单元^[11]。假定每一钢筋层的力学性能是单向的, 只能承受沿钢筋方向的轴向力。受力钢筋采用组合单元。采用双折线强化弹塑性模型模拟钢筋的本构关系。

2.4 高性能 HFRP 布材料模型

预应力高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的破坏模式有多种, 包括受压区混凝土压溃、高性能 HFRP 布拉断以及应予避免的 HFRP 布与混凝土基层间黏结剥离破坏^[12-14]。纤维布剥离导致结构失效时纤维布应力过低, 不利于材料高强性能的发挥, 通过改良张拉锚固夹具已予避免^[9]。本文采用初应力等参层单元对高性能 HFRP 布的体外预应力效应进行模拟, 结构分析中通过初应力法以实现高性能 HFRP 布的预应力效应, 并认为 HFRP 布拉断之前是完全弹性的, 即 HFRP 布达到抗拉强度就完全失效^[15-16]。

3 高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的几何非线性

根据 Von Karman 假设, 局部坐标系下的位移 u' 、 v' 对局部坐标 x' 、 y' 、 z' 的导数是小量, 且 w'

对 z' 的导数可忽略。则 Green 应变矩阵用局部坐标系表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x' \quad \varepsilon_y' \quad \gamma_{x'y'} \quad \gamma_{x'z'} \quad \gamma_{y'z'}]^T = \boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\varepsilon}_L \quad (11)$$

式中: 线性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 和非线性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_L$ 分别为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0 =$$

$$\left[\frac{\partial u'}{\partial x'} \quad \frac{\partial v'}{\partial y'} \quad \frac{\partial u'}{\partial y'} + \frac{\partial v'}{\partial x'} \quad \frac{\partial u'}{\partial z'} + \frac{\partial w'}{\partial x'} \quad \frac{\partial v'}{\partial z'} + \frac{\partial w'}{\partial y'} \right]^T \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_L = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial w'}{\partial x'} \right)^2 \quad \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w'}{\partial y'} \right)^2 \quad \frac{\partial w'}{\partial x'} \frac{\partial w'}{\partial y'} \quad 0 \quad 0 \right]^T \quad (13)$$

非线性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_L$ 可写成

$$\boldsymbol{\varepsilon}_L = \frac{1}{2} \mathbf{C} \boldsymbol{\theta} \quad (14)$$

式中: 矩阵 \mathbf{C} 和矩阵 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w'}{\partial x'} & 0 & \frac{\partial w'}{\partial y'} & 0 \\ 0 & \frac{\partial w'}{\partial y'} & \frac{\partial w'}{\partial x'} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w'}{\partial x'} & \frac{\partial w'}{\partial y'} \end{bmatrix}^T = \mathbf{G} \boldsymbol{\delta}^e \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{\delta}^e$ 为 DNLC 单元的节点位移列阵, \mathbf{G} 的元素对应于形函数对局部坐标偏导数。DNLC 单元的几何刚度矩阵 \mathbf{K}^{GEO} 为

$$\mathbf{K}^{GEO} = \int_V \mathbf{G}^T \mathbf{M} \mathbf{G} dV \quad (17)$$

式中: 矩阵 \mathbf{M} 为局部坐标系下第二类 Piola-Kirchhoff 应力矩阵^[17]。由 Newton-Raphson 方法求解非线性方程组, 并采用与文献^[10]相同的位移收敛

准则。

4 高性能 HFRP 布加固 HPC 梁的算例分析

4.1 试验梁资料

试验梁的尺寸为 150 mm×250 mm×2 800 mm, 混凝土强度等级为 C40, 掺加聚丙烯单丝纤维以改善其早期力学性能, 纵筋为 2φ14, 箍筋为 φ8@150, 对称配筋, 保护层厚度 25 mm, 试验梁的截面尺寸及配筋如图 3 所示, 钢筋的具体构造详见文献^[9]。采用五种不同的层内混杂形式高性能纤维布粘贴加固试验梁(碳纤维、碳玻体积比为 2:1、碳玻体积比为 1:1、碳玻体积比为 1:2、玻璃纤维), 五种高性能纤维布的厚度均为 0.195 mm, 极限强度、弹性模量等参数见表 1。为叙述简便, 碳纤维、碳玻体积比为 2:1、碳玻体积比为 1:1、碳玻体积比为 1:2、玻璃纤维分别简记为 C、CG21、CG11、CG12、G。

试验梁已通过改进的锚固夹具避免纤维布剥离破坏的发生。试验加载装置如图 4 所示, 试验梁预裂后卸载, 其后粘贴高性能纤维布, 逐级加载至结构破坏并采集相关试验数据。

4.2 DNLC 单元程序验证

根据本文推导的 DNLC 单元, 建立 HPC 梁有限元模型, 其中混凝土、箍筋、HFRP 布均用层单元模拟, 纵向受力钢筋采用组合单元模拟。试验梁共有 120 个单元, 533 个节点。因设计中已避免 HFRP 布的黏结滑移破坏^[9], 故 HPC 梁有限元模型不考虑 HFRP 布的黏结滑移效应。考察图 4 所

表 1 预应力高性能纤维增强(HFRP)布的基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of the prestressed HFRP sheet

Type of HFRP sheet	Ultimate strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Ductility/	Control stress for prestressing/MPa	Effective prestress/MPa
C	3848.2	234.2	1.64	2308.9	1924.1
CG21	3175.3	176.0	1.85	1905.2	1587.6
CG11	2942.4	126.9	2.03	1765.5	1471.2
CG12	2435.5	92.0	2.29	1461.3	1217.8
G	2003.2	75.0	2.71	1201.9	1001.6

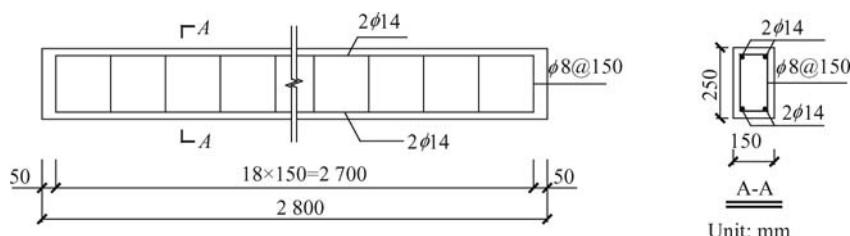


图 3 高性能混凝土试验梁截面尺寸及配筋图

Fig. 3 Sectional size and reinforcement set of the test HPC beam

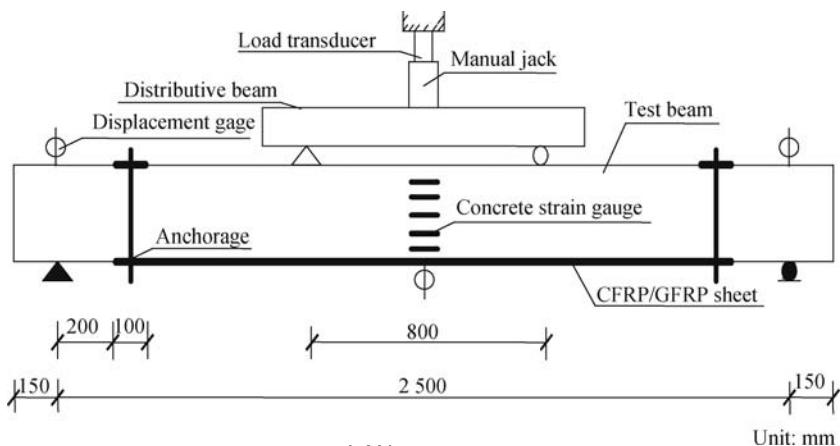


图 4 高性能混凝土试验梁加载示意图
Fig. 4 Configuration of added loads of the test HPC beam

示的加载方式,全过程分析中每个加载点每级加载3.0 kN,即每级共加载6.0 kN。在第十级加载等級之前,每级加载系数为1,其后每级加载系数为0.25。根据研制的DNLC单元计算程序,计算结果与试验数据的对比如图5所示。

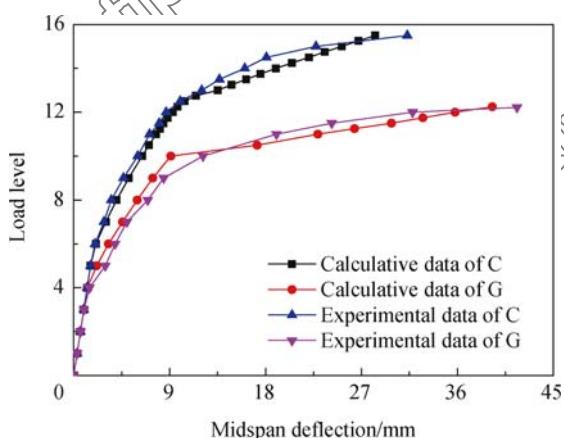


图 5 加固 HPC 梁的挠度计算值和试验值对比
Fig. 5 Comparison of calculated and test values of the strengthened HPC beam

可知,本文的计算结果与文献[9]的试验数据吻合良好,说明所推导DNLC单元的正确性,且该单元具有良好的数值稳定性和收敛性。也表明基于非线性组合单元的研究成果^[10-11],本文推导等参层单元模拟高性能HFRP布体外预应力效应的有效性。

4.3 有限元结果分析

(1) 挠度结果分析

在各级荷载作用下,不同HFRP布加固HPC梁的跨中挠度计算结果如图6所示。可知,(1)采

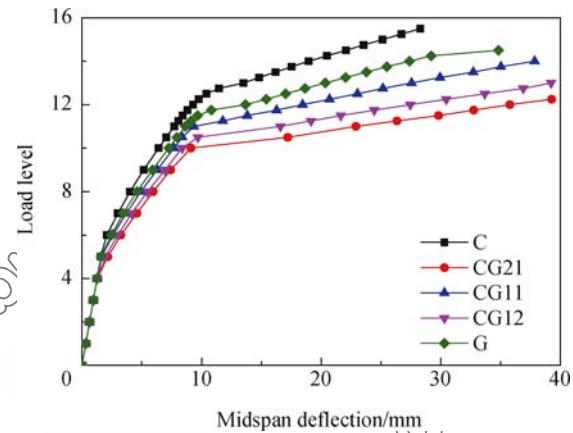


图 6 不同 HFRP 布加固 HPC 梁的荷载挠度曲线
Fig. 6 Load-deformation curves of HPC beams strengthened with different HFRP sheets

用相同用量和相同预应力水平的高性能HFRP布,预应力CFRP纤维布对应的极限荷载和屈服荷载均最大,GFRP纤维布对应的最小;(2)对于开裂荷载,采用预应力CFRP纤维布时为36 kN,其余四种不同的高性能HFRP布加固所对应的开裂荷载均为30 kN;(3)在开裂荷载前,五种加固方式对应的HPC梁体刚度均未出现明显折减,屈服荷载后HPC梁体刚度均折减迅速直至结构破坏。

(2) 钢筋应力结果分析

受拉区纵筋应力变化曲线如图7所示。可知,(1)该应力变化曲线分为三个阶段:在初始加载阶段,受拉区配筋应力变化较为平缓。当HPC梁出现开裂时即出现第一个拐点,受拉区配筋应力迅速增加直至达到屈服荷载。其后钢筋均达到屈服强度出现第二个拐点而进入塑性阶段,直至加固

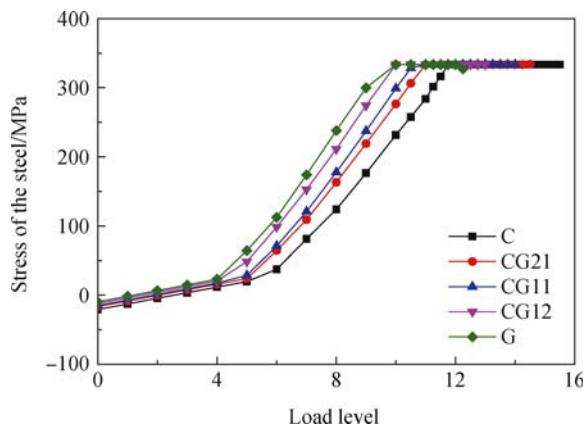


图 7 HPC 梁受拉区配筋应力变化曲线

Fig. 7 Stress curves of the steel in the tensile region of HPC beam

HPC 梁破坏; (2) 预应力 GFRP 布加固梁的受拉区纵筋最先屈服, 对应屈服荷载为 60 kN; 其后依次为 CG12、CG11、CG21; 预应力 CFRP 布对应的受拉区纵筋最后屈服, 对应屈服荷载为 70.8 kN。

(3) 高性能 HFRP 布应力结果分析

预应力高性能 HFRP 布应力变化曲线如图 8(a)所示。由图 8(a)数据可统计得预应力高性能 HFRP 布的应力重分布规律如图 8(b)所示。

由图 8(a)可知: (1) 在加载初期直至达到屈服荷载, 预应力 HFRP 布应力变化不大, 其后 HFRP 布应力迅速发展直至结构失效; (2) 预应力高性能 HFRP 布、纵向受力钢筋和 HPC 混凝土三者间协同受力性能良好。由图 8(b)可知, 随着加载量增大, 特别是屈服荷载后, 预应力高性能 HFRP 布的应力发展增大。由于 HPC 混凝土出现裂缝、压碎及受力钢筋屈服, 施加荷载逐渐转为由预应力

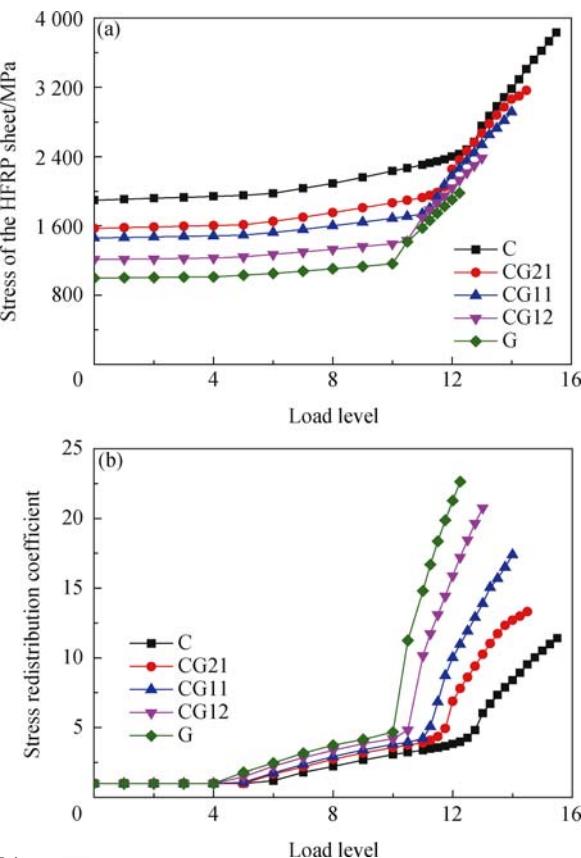


图 8 预应力 HFRP 布应力变化及应力重分布系数

Fig. 8 Curves of stress variation and stress redistribution coefficient of the prestressed HFRP sheet

HFRP 布承担, 故其应力变化速度加剧。

为定量分析 HFRP 布的强度富余程度, 提取图 8(a)的开裂荷载对应的纤维布工作应力, 按式(18)定义的 HFRP 布强度剩余系数 ξ , 分析可得到 HFRP 布强度剩余系数, 如表 2 所示。

表 2 开裂荷载对应的 HFRP 布强度剩余系数

Table 2 Strength residual coefficient of HFRP sheet with cracking load

Type of HFRP sheet	C	CG21	CG11	CG12	G
Cracking load/kN	36	30	30	30	30
Stress of HFRP sheet/MPa	1975.1	1612.4	1492.5	1243.6	1029.5
Strength residual coefficient/%	48.7	40.6	37.7	31.0	25.3

$$\xi = \frac{\sigma_{\text{Hu}} - \sigma_{\text{Hcr}}}{\sigma_{\text{Hu}}} \times 100\% \quad (18)$$

式中: ξ 为 HFRP 布强度剩余系数; σ_{Hu} 为表 1 所示的 HFRP 布极限强度; σ_{Hcr} 为开裂荷载对应的纤维布工作应力。

由表 2 可知, 达到开裂荷载时, CFRP 纤维布的强度剩余系数最大(48.7%), 其后依次为 CG21、CG11、CG12, 而 GFRP 纤维布的强度剩余系数最

小(25.3%), 材料发挥作用相对显著。

5 结 论

(1) 基于实体退化单元理论, 推导预应力高性能混杂纤维增强(HFRP)布加固高性能混凝土(HPC)梁的双重非线性分层组合(DNLC)单元, 用一种单元同时描述 HFRP 布、纵筋、箍筋和混凝土材料, 算例表明所推导 DNLC 单元的正确性和适用性;

(2) 采用初应力等参层单元有效地模拟高性能HFRP布的预应力作用，并正确地考虑HPC梁的材料非线性以及结构的几何非线性；

(3) 在加载初期直至达到屈服荷载，预应力HFRP布应力变化缓慢，其后HFRP布应力迅速发展直接结构失效。HPC混凝土出现裂缝及钢筋屈服，施加荷载逐渐转为由预应力HFRP布承担。

参考文献：

- [1] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 12-24.
- YE L P, FENG P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 12-24 (in Chinese).
- [2] RANIA A H, KHALED S, TIMOTHY H T. Fatigue flexural behavior of corroded reinforced concrete beams repaired with CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(1): 42-51.
- [3] 刘沐宇, 李开兵. 碳纤维布加固混凝土梁的疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 32-36.
- LIU M Y, LI K B. Fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP-sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 32-36 (in Chinese).
- [4] WIGHT R G, GREEN M F, ERKI M A. Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4): 214-220.
- [5] JOHN A, KENT A H, MICHAEL E P. Fatigue behavior of carbon reinforced polymer-strengthened reinforced concrete bridge girders[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(6): 501-509.
- [6] 薛伟辰, 曾磊, 谭园. 预应力CFRP板加固混凝土梁设计理论研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 127-133.
- XUE W C, ZENG L, TANG Y. Studies on design theories of concrete beams strengthened with prestressed CFRP plate [J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(4): 127-133 (in Chinese).
- [7] OWEN R, SAMI R F. Behavior of prestressed concrete strengthened with various CFRP systems subjected to fatigue loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10 (6): 492-502.
- [8] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1274-1280.
- DENG Z C. Flexural toughness and characterization method of hybrid fibers reinforced ultra-high performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1274-1280 (in Chinese).
- [9] 艾军. 预应力混杂CFRP/GFRP纤维布在混凝土桥梁加固中的关键技术研究[R]. 南京航空航天大学, 2013.
- AI J. The key technical research in concrete bridge consolidation with prestressed hybrid CFRP/GFRP sheet[R]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese).
- [10] 张剑, 王立峰, 叶见曙. 碳纤维增强复合材料筋混凝土梁非线性力学性能[J]. 复合材料学报, 2009, 26(4): 156-162.
- ZHANG J, WANG L F, YE J S. Nonlinear mechanical properties of concrete beam with carbon fiber reinforced composite rebars[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26 (4): 156-162 (in Chinese).
- [11] 张剑, 周储伟, 雷笑, 等. 混杂CFRP/GFRP筋HPC梁的非线性梁壳组合单元研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 66-71.
- ZHANG J, ZHOU C W, LEI X, et al. Nonlinear beam-shell composite element of HPC beam mixed with CFRP/GFRP rebars[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(2): 66-71 (in Chinese).
- [12] RAHAL K N, RUMAIH H A. Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars[J]. Engineering Structures, 2011, 33 (1): 53-62.
- [13] 朱永祥, 王文炜. 预应力碳纤维布加固混凝土梁预应力长期损失的增量微分法[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(4): 61-66.
- ZHU Y X, WANG W W. Incremental differential model for long-term prestress losses of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(4): 61-66 (in Chinese).
- [14] SUN W, GHANNOUM W M. Modeling of anchored CFRP strips bonded to concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 85: 144-156.
- [15] 王丹, 郭志昆, 邵飞, 等. 混杂纤维布加固轻骨料混凝土梁的试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 52-58.
- WANG D, GUO Z K, SHAO F, et al. Experimental study on LC beams strengthened with hybrid fiber sheets[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition) , 2016, 36(2): 52-58 (in Chinese).
- [16] HAWILEH R A, NAWAZ W, ABDALLA J A, et al. Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams [J]. Composite Structures, 2015, 122 (4): 468-476.
- [17] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- LV X L, JIN G F, WU X H. Nonlinear finite element theory and application of reinforced concrete structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999 (in Chinese).