

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.059



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



FRP 加固混凝土梁界面应力的时变规律研究

孙涛¹, 姚未来¹, 刘元雪¹, 穆锐¹, 任俊儒¹, 成鑫磊¹, 雷屹欣¹, 严仁章²

(1. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401311; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:针对粘贴 FRP 加固结构技术大量应用的背景, 对长期持荷条件下加固混凝土梁 FRP 端部、中部混凝土裂缝附近界面应力的时变规律进行研究。建立分析 FRP 应变的有限元模型, 通过模拟结果与实测结果的对比验证有限元法的适用性。考虑端部胶层溢出、结构二次受力情况, 采用有限元法和解析法对 FRP 端部区域的时变应力进行分析; 采用解析法对混凝土中部裂缝附近区域的时变应力进行分析。结果表明: 混凝土徐变导致界面应力随时间增大, 剥离破坏的风险增大; 胶层蠕变导致应力随时间缓解, 有助于避免剥离破坏, 该结论对上述两个区域均适用, 且不受胶层溢出、二次受力的影响。FRP 端部区域时变应力的有限元结果与解析解结果吻合良好。

关键词:FRP 加固混凝土结构; 长期荷载; 材料蠕变; 界面应力; 胶层溢出; 二次受力

中图分类号:TU375.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)03-0151-11

Study on time-dependent interfacial stress of FRP-strengthened RC beam

SUN Tao¹, YAO Weilai¹, LIU Yuanxue¹, MU Rui¹, REN Junru¹, CHENG Xinglei¹,
LEI Yixin¹, YAN Renzhang²

(1. Military Installations Department, Army Logistics Academy, Chongqing 401311, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: Based on the massive applications of FRP-reinforced structure technology, the time-varying patterns of interfacial stresses of FRP-strengthened RC beams under sustained load are investigated in this study. A finite element (FE) model was developed to analyze the external FRP strains, and the correctness and usability of the FE method were verified by comparing the predicted results with the test results. For the FRP end area, both the FE method and the analytical method were applied to conduct investigations considering the spew fillet of adhesive and the secondary loading of the reinforced structures. For the area near the intermediate concrete crack, the analytical method was used to conduct calculations. The results show that the concrete creep leads to the increase of interfacial stresses with time, and the adhesive creep leads to the relief of stresses. This conclusion is applicable to both areas mentioned above and is not affected by the spew fillet of the adhesive and

收稿日期:2022-11-18

基金项目:重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX0194);重庆市博士直通车项目(CSTB2022BSXM-JSX0023)

作者简介:孙涛(1985-),男,博士,副教授,主要从事组合结构、钢结构研究,E-mail:suntao_tju@126.com

姚未来(通信作者),男,博士,E-mail:futureYWL@hotmail.com

Received: 2022-11-18

Foundation items: Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTB2022NSCQ-MSX0194); Doctoral Project of Chongqing Science and Technology Bureau (No. CSTB2022BSXM-JSX0023)

Author brief: SUN Tao (1985-), PhD, associate professor, main research interests: composite structure and steel structure, E-mail: suntao_tju@126.com.

YAO Weilai (corresponding author), PhD, E-mail: futureYWL@hotmail.com.

the secondary loading of the reinforced structures. In the FRP end region, the FE results and analytical results are in good agreement.

Keywords: FRP-strengthened RC structures; long-term loading; material creep; interfacial stress; spew fillet of adhesive; secondary loading

粘贴纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer/plastic, FRP)加固结构技术已经广泛应用。建筑结构使用年限较长,完成加固后结构仍将处于长期承受荷载的服役状态。长期持荷条件下,混凝土、结构胶(环氧树脂)均表现出明显的蠕变特性^[1-5]。

加固结构粘贴界面的受力状态十分重要,FRP 端部和中部混凝土裂缝附近区域存在界面应力集中现象,该现象是导致 FRP 剥离破坏的主要原因^[6]。材料蠕变导致界面应力依时改变,若应力随时间增大,则可能出现长期持荷下的剥离破坏。对 FRP 端部、混凝土裂缝附近的界面应力时变规律开展分析有助于评估剥离破坏的长期风险,对加固结构的安全服役具有重要意义,学者们对此开展了研究。

Guenaneche 等^[7]对 FRP 加固混凝土梁的微元体进行了分析,考虑粘贴界面滑移、胶层剪切变形,对界面切应力和竖向正应力进行了闭合解(closed-form solution)推导,通过将混凝土短期模量代换为龄期调整有效模量,完成了界面应力时变规律的分析。结果表明,在持荷后一个月内,界面应力随时间增大并达到峰值,随后随时间减小并逐渐趋于稳定。Fahsi 等^[8-9]进行了与 Guenaneche 等^[7]相似的研究,得出基本一致的结论,即长期界面应力先增大后减小,最后趋于稳定。但 Guenaneche 等^[7]与 Fahsi 等^[8-9]的研究仅考虑了混凝土的徐变、收缩,没有考虑胶层的蠕变特性,事实上,胶层的蠕变特性也比较明显,对其忽略与实际情况不符。Hamed 等^[10-12]基于虚功原理,利用泛函变分法对加固混凝土梁进行分析,考虑了混凝土徐变、开裂、胶层蠕变等因素。结果表明,混凝土徐变导致界面应力随时间增大,胶层蠕变可缓解界面应力。Zhang 等^[13-14]报道了采用有限元法开展界面应力时变特性的分析工作,但与 Guenaneche 等^[7]、Fahsi 等^[8-9]的研究相反是,Zhang 等^[13-14]仅考虑了胶层的蠕变,忽略了混凝土的徐变。但是,实际工程中,由于结构荷载临时增大等原因,相当数量的加固工程是针对新建建筑开展的,混凝土龄期尚早,徐变较明显,在研究界面应力时变特性时应对其进行考虑。

另外,上述研究^[7-14]还存在一些共性问题:1)实际工程中,为实现 FRP 与混凝土的充分接触和可靠

粘结,进行粘贴施工时采用橡胶锤轻敲 FRP 表面,导致 FRP 端部有环氧胶溢出。Teng 等^[15]在分析短期界面应力时明确说明了该现象,但上述分析长期界面应力的研究均未考虑该现象;2)实际工程中,加固前,混凝土结构一般已经服役过一段时间,存在受力变形和预先应力路径,完成粘贴加固后,FRP 处于零应力状态,仅当荷载进一步提高时,FRP 才与混凝土结构共同工作,该现象被称为加固结构的二次受力^[16-18]或 FRP 的应力(应变)滞后^[19]。而上述研究均未考虑该工程现象,所研究的混凝土结构均直接实施加固,未设置加固前的应力路径;3)上述研究提供了分析时变界面应力的两种主要途径,即闭合解法^[7-9]和有限元法^[13-14],闭合解法显式地表达了界面应力的解析式,比较适用于工程实践,但这两种方法之间缺乏相互验证。同时,上述研究均仅限于讨论 FRP 端部区域界面的应力状态,对混凝土中部裂缝附近时变界面应力进行分析的文献相当少,目前,仅 Hadjazi 等^[20]进行过报道,但作者将混凝土徐变和胶层蠕变组合在一起做了整体分析,不利于理解单种材料蠕变对界面应力时变规律的影响机制。

针对上述已有研究存在的不足,笔者开展了如下工作:基于 ABAQUS 开展 FRP 加固混凝土梁的有限元建模工作,通过将仿真结果与试验结果进行对比,验证有限元法的合理性;建立考虑材料蠕变递推形式的本构方程,并编制为用户子程序(user's subroutine),以实现结构蠕变的数值模拟;利用有限元模型对 FRP 端部区域的时变界面应力开展分析,考虑端部胶层溢出、结构二次受力;对 FRP 端部区域的时变界面应力开展闭合解求解,并与有限元计算结果进行对比;对混凝土中部裂缝附近区域界面应力的依时变化规律开展解析解研究,分别讨论混凝土徐变和胶层蠕变的效应。

1 有限元建模方法及结果验证

欧阳煜等^[21]报道了玻璃纤维片材(GFRP)加固混凝土梁的受弯性能研究,对该研究中的 ML02、ML03、ML04 梁开展数值模拟,以验证有限元法的适用性。

1.1 试验梁概况

ML02、ML03、ML04加固梁总跨度为1400 mm,有效跨度为1200 mm,截面高度为160 mm,截面宽度100 mm。受压区配置2根直径为8 mm的钢筋,受拉区配置2根直径为12 mm的钢筋,箍筋直径为6 mm,间距为100 mm,采用四点弯曲对称方式加载。ML02、ML03、ML04梁底部分别粘贴2、3、1层GFRP片材。混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}=18$ MPa,钢筋与GFRP片材力学性能详见文献[21]。

3根试验梁FRP端部各布置了4个应变片,加载过程中的应变数值见文献[21]。1~4号测点到端部的距离分别为12、42、65、85 mm。通过有限元模型计算上述4个测点的应变值并与实测数据进行对比。

1.2 有限元建模和结果验证

考虑到试验梁的受力对称性,建模时仅建立1/2模型,跨中截面设置对称边界条件。根据已有研究^[22],将分析简化为平面问题。混凝土、结构胶、GFRP片材采用平面应力完全积分单元CPS4建模,钢筋采用平面桁架单元T2D2建模。FRP端部区域存在应力集中现象,对该区域进行网格加密处理^[15](图1)。为提升计算精度,在混凝土-粘结胶界面、粘结胶-FRP界面,将不同材料的网格设置为共节点。此处的“共节点”指网格节点的几何对齐,而非刚性绑结和约束,界面两侧不同材料之间仍可发生相对错动,因而该设置方式不会对界面滑移及切应力的计算造成影响,文献[15]也采用了类似的方式。混凝土-结构胶、结构胶-FRP界面均采用ABAQUS提供的*Tie方式设置连接,并采用软件默认的参数。

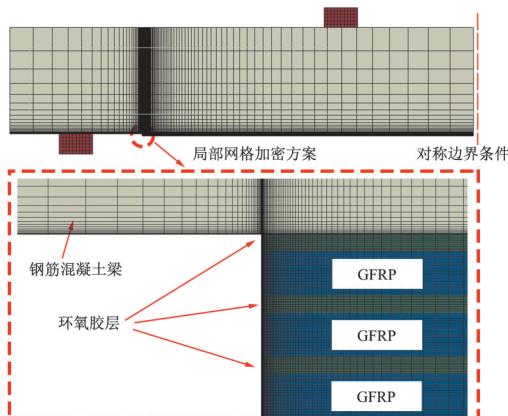
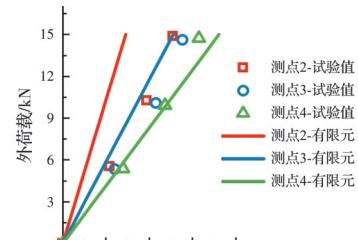


图1 有限元模型(ML03梁)

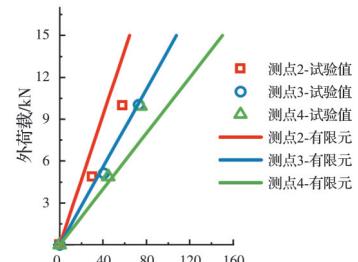
Fig. 1 FE model (specimen: ML03)

将计算得出的荷载-FRP应变关系与实测数据进行对比,如图2所示。对于ML02梁,测点2的误差较大,测点3数据基本吻合,测点4的吻合程度较

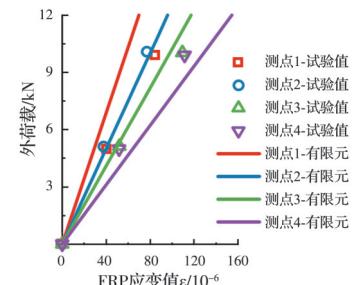
好;对于ML03梁,测点2误差较大,测点3吻合程度较好,测点4数据基本吻合;对于ML04梁,测点1偏差稍大,测点2、3吻合程度较好,测点4数据基本吻合。总体而言,测点1、2的吻合程度稍差,其可能的原因是:测点1所处位置位于FRP端部,测点2位置也十分靠近端部^[21],两处位置的应力分布本身比较复杂,奇异化程度较高(应力值随位置的微小变化而发生剧烈变化)^[15]。应变片具有一定标距长度,测得的数值为标距内的平均应变,这里的对比是将有限元模型中一点(单元节点)的应变与应变片测得的平均应变进行对比,由于应力奇异程度较高,一点应变值与标距内(尽管此标距可能较小)平均应变值差异较大。虽然笔者尝试输出有限元模型标距内的平均应变值再加以对比,但原始文献并未给出应变片的标距信息,因此,该工作暂无法开展。而对于3、4号测点,随着位置逐渐远离FRP端部,其应力奇异程度有所缓解,应力分布趋于平均,一点应变与标距内平均应变的差异降低,体现为数值



(a) ML02梁



(b) ML03梁



(c) ML04梁

图2 有限元结果验证

Fig. 2 Verification of the FE models

结果与试验结果吻合较好。

综上所述,由于端部附近应力分布规律的复杂性和应变片本身的测试特性,有限元模拟结果与距离端部较远测点的实测结果吻合较好,与距离端部较近测点的实测结果之间存在一定误差。但整体来看,实测结果表现出应变随荷载增大而线性增大的趋势,该趋势被有限元结果良好地复现出来。因此,认为该有限元模型合理并可接受。

2 材料的蠕变本构模型及有限元用户子程序

在对上述加固梁短期受荷行为数值分析的基础上,加入对材料蠕变特性的考虑,实现长期界面应力的仿真模拟。

2.1 混凝土的徐变和收缩

前期开展了碳纤维增强复合材料(CFRP)板加固混凝土梁的长期变形试验研究和有限元模拟工作,报道了考虑混凝土徐变、收缩的拟弹性(quasi-elastic)本构方程^[23-25],其核心公式为

$$\sigma^*(t_n) = E_\varphi(t_n, t_{n-1})(\varepsilon_n - \Delta\varepsilon_n) \quad (1)$$

式中: ε_n 为混凝土在时间段 $t_{n-1} \rightarrow t_n$ 内将要产生的总徐变、收缩应变; $\Delta\varepsilon_n$ 为该时段之前的应力历史对该时段产生的变形效应,包括外荷载 $\sigma(t_i)$ 的长期效应、徐变收缩次应力 $\sigma^*(t_i)$ 的长期效应; E_φ 为混凝土的龄期调整有效模量。 $\Delta\varepsilon_n$ 可以进一步表示为递推形式

$$\Delta\varepsilon_n = \varepsilon_{sh}(t_n) - \varepsilon_{sh}(t_{n-1}) + \sum_{j=1}^m A_{n,j}^* \cdot (1 - e^{-\lambda_j \cdot \Delta t_n}) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{sh}(t)$ 为 $0 \rightarrow t$ 时间段混凝土产生的收缩应变。

$A_{n,j}^*$ 与上一项 $A_{n-1,j}^*$ 的递推关系为

$$A_{n,j}^* = A_{n-1,j}^* \cdot e^{-\lambda_j \cdot \Delta_{n-1}} + \frac{a_j \cdot t_{n-1}^{c_j}}{E_c(t_{n-1})} \cdot \sigma(t_{n-1}) + a_j \cdot t_{n-2}^{c_j} \cdot e^{-\lambda_j \cdot \Delta_{n-1}} \cdot \frac{\chi(t_n, t_{n-2})}{E_c(t_{n-2})} \cdot \sigma^*(t_{n-1}) \quad (3)$$

$$A_{n=1,j}^* = a_j \cdot t_0^{c_j} \cdot \frac{\sigma_0}{E_c(t_0)} \quad (4)$$

式中: χ 为老化系数; $E_c(t_i)$ 表示 t_i 时刻混凝土的弹性模量; a_i, c_i, λ_j, m 为将徐变系数 $\varphi_c(t, \tau)$ 展开为Dirichlet级数形式过程中给定的参数(取 $m=4$)。

$$\varphi_c(t, \tau) = \sum_{j=1}^m (a_j \cdot \tau^{c_j}) [1 - e^{-\lambda_j(t-\tau)}] \quad (5)$$

混凝土的徐变、收缩行为采用美国混凝土协会(ACI-209)建议的模型^[26]进行计算。

2.2 胶层的蠕变

对环氧胶层沿切向、竖向、纵向的蠕变行为进行考虑。以剪切蠕变为例,仿照混凝土徐变本构方程(式(1)~式(5)),可得应力历史对时段 $t_{n-1} \rightarrow t_n$ 产

生的剪切蠕变变形 $\Delta\varepsilon_{n,xy}^a$ 为

$$\Delta\varepsilon_{n,xy}^a = \sum_{j=1}^m B_{n,j}^* \cdot (1 - e^{-\lambda_j^a \cdot \Delta t_n}) \quad (6)$$

$B_{n,j}^*$ 与上一项 $B_{n-1,j}^*$ 的递推关系为

$$B_{n,j}^* = B_{n-1,j}^* \cdot e^{-\lambda_j^a \cdot \Delta_{n-1}} + \frac{b_j^a(t_{n-1})}{G_a(t_{n-1})} \cdot \tau_a(t_{n-1}) + b_j^a(t_{n-2}) \cdot e^{-\lambda_j^a \cdot \Delta_{n-1}} \cdot \frac{1}{G_a(t_{n-2})} \cdot \tau_a^*(t_{n-1}) \\ B_{n=1,j}^* = b_j^a(t_0) \cdot \frac{\tau_a(t_0)}{G_a(t_0)} \quad (8)$$

式中: G_a, τ_a 分别表示剪切模量和切应力;参数 b_j^a, λ_j^a 为将胶层蠕变系数 $\varphi_a(t, t_0)$ 按Dirichlet级数展开后的材料参数,蠕变系数根据Choi等^[27]的研究确定,其展开形式为

$$\varphi_a(t, t_0) = \frac{5.1 \times (t - t_0)^{1.6}}{30 + (t - t_0)^{1.6}} = \sum_{j=1}^m b_j^a [1 - e^{-\lambda_j^a(t - t_0)}] \quad (9)$$

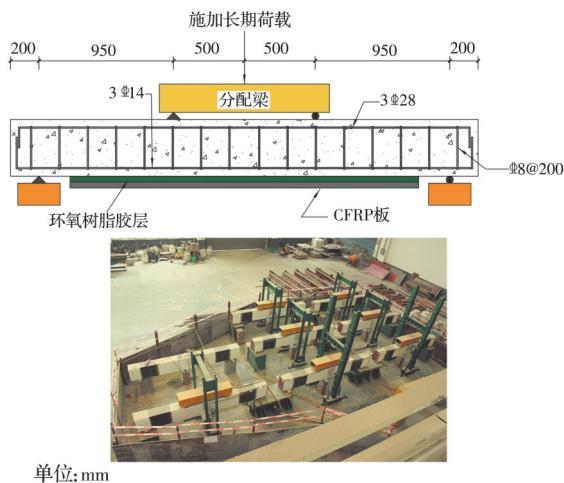
胶层沿竖向、纵向的蠕变规律可仿照上述内容进行建立。

2.3 用户子程序

将上述材料的时变本构行为编制为ABAQUS用户子程序,进行结构蠕变的分析计算。该子程序的基本思路是:首先完成加载瞬时响应的计算,将长期时间段进行离散,计算第1个时段内材料将要产生的蠕变变形,将该变形赋予材料单元的积分点,此时结构内部变形协调条件被破坏,有限元主程序立即介入继续计算,直至收敛, t_1 时刻的状态计算完成;然后按照递推方程计算第2个时段内材料将要发生的蠕变变形,将该变形赋予单元积分点,主程序再次介入计算,直至收敛, t_2 时刻的状态计算完成;以此类推,直至时刻 t_n 的状态计算完成。上述功能依托2个用户子程序完成:USDFLD、UEXPAN。

3 算例梁概况

笔者前期开展了加固梁的长期持荷试验^[23-24],完整掌握了试验梁几何尺寸、材料短期力学性能参数、混凝土徐变规律、胶层蠕变规律等信息。以该研究中的试验梁作为算例模型,开展FRP端部附近、中部裂缝附近界面应力时变规律的分析。算例梁总跨度3 300 mm,有效跨度2 900 mm,截面高度400 mm,截面宽度250 mm,CFRP纵向长度2 600 mm,截面宽度200 mm,采用四点弯曲对称方式加载(图3)。



4 FRP端部时变界面应力分析

采用有限元法和闭合解法研究FRP端部界面应力的时变规律。

4.1 有限元结果分析和讨论

4.1.1 端部胶层无溢出的情况

对算例梁进行有限元建模,并对FRP端部附近的网格作类似的加密处理。

1)材料的蠕变效应

仅考虑混凝土徐变时,界面应力的分布情况如图4所示,显示了瞬时加载完成时(持荷0 d)、持荷130 d后、持荷390 d后混凝土-粘结胶界面竖向正应力、切应力的分布规律。仅考虑胶层蠕变的结果如

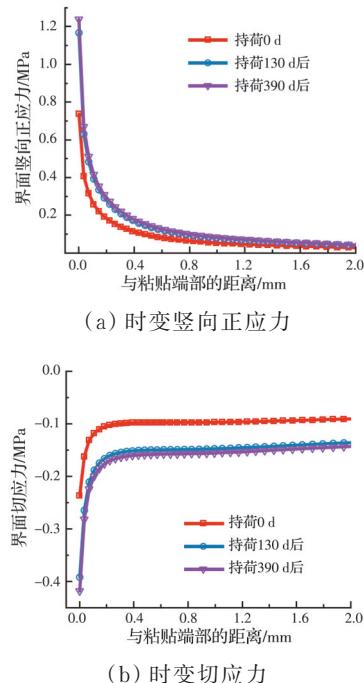


图5所示,同时考虑胶层蠕变和混凝土徐变的结果如图6所示。

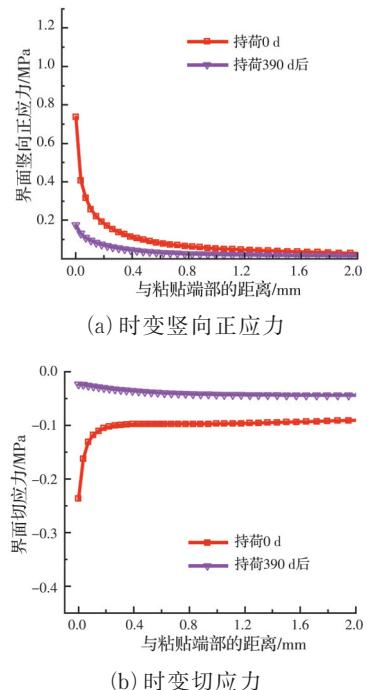


图5 胶层蠕变效应

Fig. 5 Effects of adhesive creep

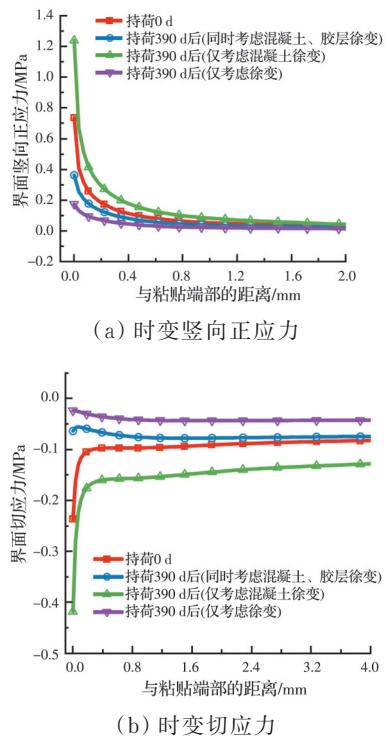


图6 同时考虑混凝土、胶层蠕变效应

Fig. 6 Combined effects of concrete and adhesive creep

如图4、图5所示,混凝土徐变导致粘贴端部附近的界面竖向正应力、切应力随时间的推移而增大;而胶层蠕变的效应相反,其导致界面应力随时间缓解,这与Hamed等^[10-12]的结果一致。但本研究

是通过完全不同的有限元分析过程得出该结论的,一定程度上验证了该结论的可靠性。当混凝土徐变与胶层蠕变同时发生时,上述两个效应出现叠加(图6),即时变界面应力处于单独考虑混凝土徐变结果与单独考虑胶层蠕变结果之间。其中,相对于瞬时加载应力,界面应力仍最终表现为随时间缓解,笔者认为这主要是输入的胶层蠕变特性较混凝土徐变特性更加显著所致。实际工程中,相当部分的加固针对龄期较老的既有建筑展开,混凝土徐变已比较微弱,胶层蠕变为控制因素,此例正确地反映了该种情况。此时,界面应力将随时间降低,剥离破坏风险下降,对加固结构长期安全服役有利。然而,也有相当数量的加固工程针对龄期尚早的混凝土结构展开,混凝土徐变仍比较明显,相较于胶层蠕变更为显著,可能出现界面应力随时间增大的结果,此时,需谨慎评估剥离破坏的长期风险。

2) 二次受力效应

对存在二次受力的情况进行讨论,算例梁首先以未加固梁的形态承受预荷载7.5 kN,然后不卸载加固,加固完成后继续施加荷载7.5 kN,构件承受的总荷载为15 kN,该梁在加固前设置了预先应力路径,存在典型的二次受力情况。将该情况与不施加预荷载直接加固后承受荷载15 kN的情况(即无二次受力情况)进行对比。

通过编辑ABAQUS关键字,采用“空气追踪单元”法对二次受力行为开展模拟,分为以下步骤:1)有限元建模期间,在建立真实胶层单元、CFRP单元时,额外复制一份粘结胶单元和CFRP单元,但复制单元的刚度比材料真实刚度低5个数量级,几乎不具备结构抗力,称为“空气单元”;2)施加预荷载7.5 kN时,删除真实粘结胶、CFRP单元,使结构仅保存混凝土单元、钢筋单元、“空气”粘结胶单元及“空气”CFRP单元,由于“空气”单元刚度可忽略,此时试件的响应基本等同于非加固混凝土梁的响应,同时,“空气”单元准确追踪了钢筋混凝土梁表面的变形情况;3)不带应变、共节点地激活真实粘结胶单元、CFRP单元,删除“空气”单元,真实单元的位置与混凝土梁表面的变形完全协调,实现真实粘结胶单元与CFRP单元既准确贴合在混凝土表面而应力又为零的现象的模拟;4)继续施加剩余的7.5 kN外荷载,此时钢筋混凝土梁、粘结胶、外部CFRP已经共同工作,瞬时荷载响应计算完毕后利用子程序进行结构蠕变行为的计算。

二次受力情况下,仅考虑混凝土徐变,界面应力的时变规律如图7所示。可见,由于FRP板存在

应力滞后现象,二次受力梁加载完成后的瞬时界面应力相较无二次受力梁的更低,但混凝土徐变导致界面应力随时间增大的规律保持不变。仅考虑胶层蠕变时,界面应力的分布规律如图8所示,胶层蠕变对界面应力的缓解作用也仍保持不变。

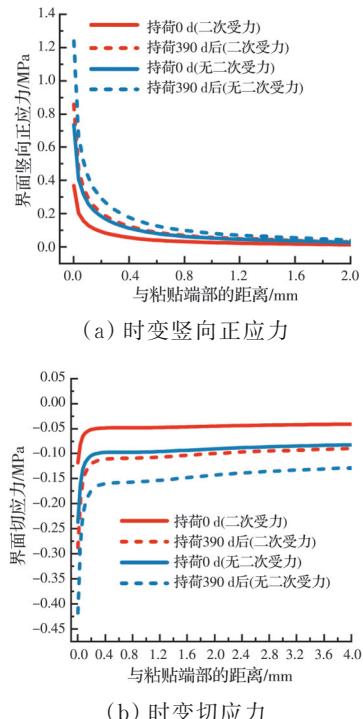


图7 混凝土徐变效应(二次受力)

Fig. 7 Effects of concrete creep (secondary loading)

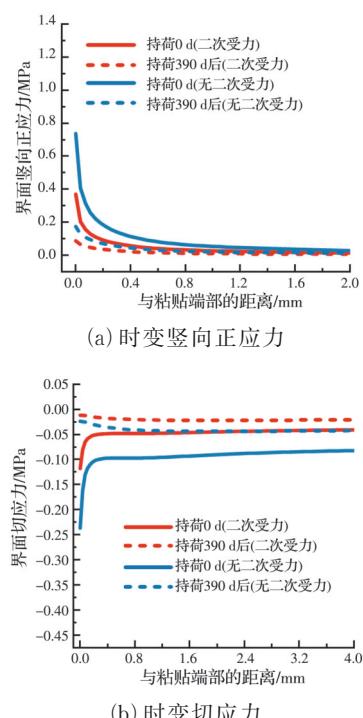


图8 胶层蠕变效应(二次受力)

Fig. 8 Effects of adhesive creep (secondary loading)

4.1.2 胶层端部溢出的情况

对于胶层在FRP端部溢出的情况,讨论3种形状的溢出^[15],图9所示为胶层溢出部分与相邻混凝土的网格共节点。

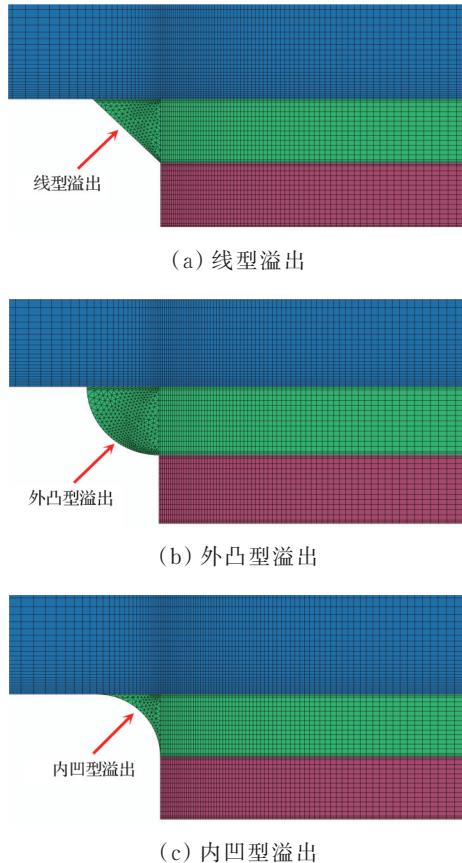


图9 3种胶层溢出方式

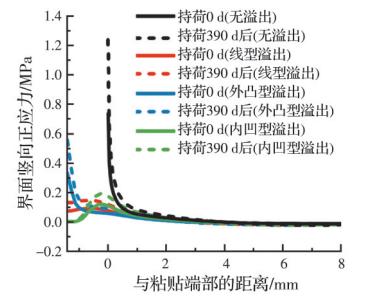
Fig. 9 Three modes of spew fillet

仅考虑混凝土徐变时,界面应力的分布规律如图10所示。相较于无溢出情况,胶层溢出显著缓解了界面的短期应力水平,有助于推迟或者避免剥离破坏,其中,内凹型的溢出形式对界面应力的缓解作用最明显。同时,无论是否有胶层溢出,混凝土徐变均导致界面应力随时间增大,但是,相对于无溢出情况,胶层溢出使得应力增大的幅度有所降低,对避免剥离破坏更为有利。仅考虑胶层蠕变时,界面的应力分布规律如图11所示。可见,无论胶层是否溢出,胶层蠕变均使得界面应力随时间缓解,但相较于无溢出情况,溢出情况的界面应力被降低至更低水平。

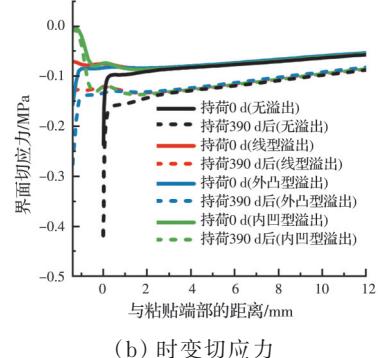
4.2 闭合解结果分析和讨论

Smith等^[28]给出了加载瞬时FRP端部界面应力的显式闭合解,对于本算例中的两点对称加载梁,经带入边界条件求解,可得界面切应力 $\tau(x)$ 、界面竖向正应力 $\sigma(x)$ 的解析解,参考文献[28]。

为计算时变界面应力,采用与Guenaneche等^[7]、



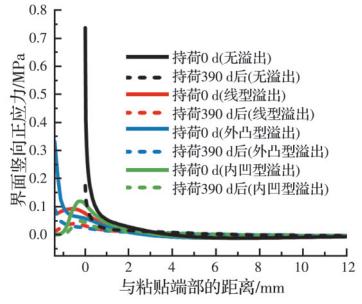
(a) 时变竖向正应力



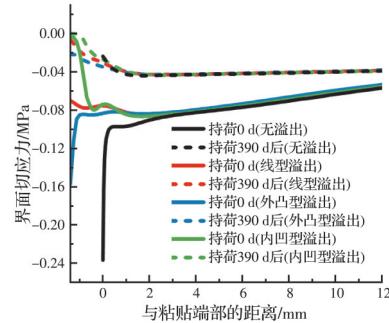
(b) 时变切应力

图10 混凝土徐变效应(胶层溢出)

Fig. 10 Effects of concrete creep (spew fillet)



(a) 时变竖向正应力



(b) 时变切应力

图11 胶层蠕变效应(胶层溢出)

Fig. 11 Effects of adhesive creep (spew fillet)

Fahsi等^[8-9]相似的处理方式,将 $\tau(x)$ 、 $\sigma(x)$ 解析式中的短期模量代换为含有蠕变系数的有效模量。混凝土、胶层的有效模量分别如式(10)~式(11)、式(12)~式(13)所示。

$$\bar{E}_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi(t, t_0) \varphi_c(t, t_0)} \quad (10)$$

$$\bar{G}_c(t, t_0) = \frac{\bar{E}_c(t, t_0)}{2(1 + v_c)} \quad (11)$$

$$\bar{E}_a(t, t_0) = \frac{E_a(t_0)}{1 + \varphi_a(t, t_0)} \quad (12)$$

$$\bar{G}_a(t, t_0) = \frac{\bar{E}_a(t, t_0)}{2(1 + v_a)} \quad (13)$$

式中: $E_c(t_0)$ 、 $E_a(t_0)$ 分别为混凝土、胶层的初始弹性模量; v_c 、 v_a 分别为混凝土泊松比(0.2)、环氧胶层泊松比(0.35)。

仅考虑混凝土徐变时界面应力的分布规律如图12所示,可见,混凝土徐变导致界面应力随时间增大的现象继续在解析解结果中体现。由于解析解假定沿胶层厚度方向的应力为均匀分布^[15],而有限元模型没有做此简化,因此,相较于解析解,有限元结果更能描述端部附近应力分布规律的复杂性,表现为:有限元结果与解析解结果在端部附近存在一定差异,在离端部较远处,应力奇异程度大幅降低,解析解的上述假定基本与真实情况相符,因此,两种结果趋于相等。文献[15]利用解析法和有限元法分析了短期加载下的界面应力,两种方法的结果也出现了类似的差异和关联。仅考虑胶层蠕变时界面应力的分布规律如图13所示。胶层蠕变导致界面应力缓解的现象也继续在解析解结果中体现,同样,解析解结果与有限元结果除在端部存在一定

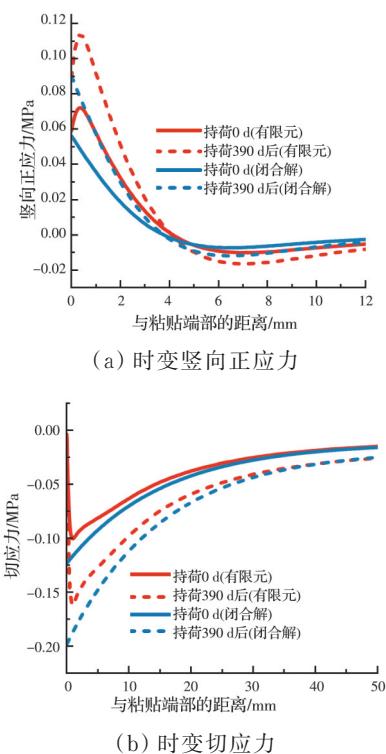
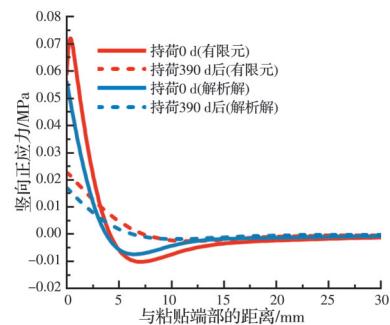


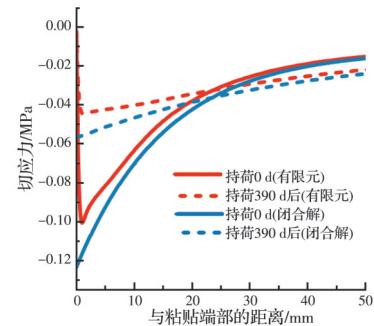
图12 有限元结果与闭合解结果对比(仅考虑混凝土徐变)

Fig. 12 Comparison between FE and closed form results
(concrete creep considered only)

差异外,在离端部较远处趋于相同。



(a) 时变竖向正应力



(b) 时变切应力

图13 有限元结果与闭合解结果对比(仅考虑胶层蠕变)

Fig. 13 Comparison between FE and closed form results
(adhesive creep considered only)

5 中部裂缝附近时变界面应力分析

Wang 等^[29]、Hadjazi 等^[30]给出了瞬时加载条件下混凝土中部裂缝附近界面切应力 $\tau(x)$ 的分布规律,如式(14)所示。

$$\tau(x) = A e^{-\lambda_1 x} + \tau_c \quad (14)$$

其中:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= C_\lambda \sqrt{K_b}, \quad \tau_c = C_\tau M' \\ C_\lambda &= \sqrt{b_2 \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{(Y_1 + Y_2 + h_a)(Y_1 + Y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right)} \\ C_\tau &= \frac{Y_1 + Y_2}{(E_1 I_1 + E_2 I_2) C_\lambda^2} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: K_b 为粘结-滑移本构曲线的初始切线刚度; b_2 为FRP宽度; h_a 为胶层厚度; E 、 A 、 I 分别表示弹性模量、截面积、对自身截面中性轴的惯性矩,下标1、2分别表示混凝土和FRP; Y_1 表示混凝土梁底部与混凝土截面中性轴的距离; Y_2 表示外粘板顶部距外粘板截面中性轴的距离; M' 为截面弯矩对 x 坐标的一阶导数。

参数 A 根据两点对称加载边界条件确定。

$$A = \frac{Y_1 \cdot E_1 I_1 \cdot [1 + (Y_1 + Y_2 + h_a) b_2 C_r] \cdot PL_2}{2K_r(E_1 I_1 + E_2 I_2) + \frac{Y_1 \cdot E_1 I_1 \cdot (Y_1 + Y_2 + h_a) b_2}{K_b}} \quad (16)$$

式中: P 为外荷载; L_2 为外荷载到梁端距离。

利用式(10)~(13),将具有时变特性的有效模量替换式(14)~(16)中的短期模量,可得混凝土中部裂缝附近界面切应力的时变规律。

仅考虑混凝土徐变时,中部裂缝附近界面切应

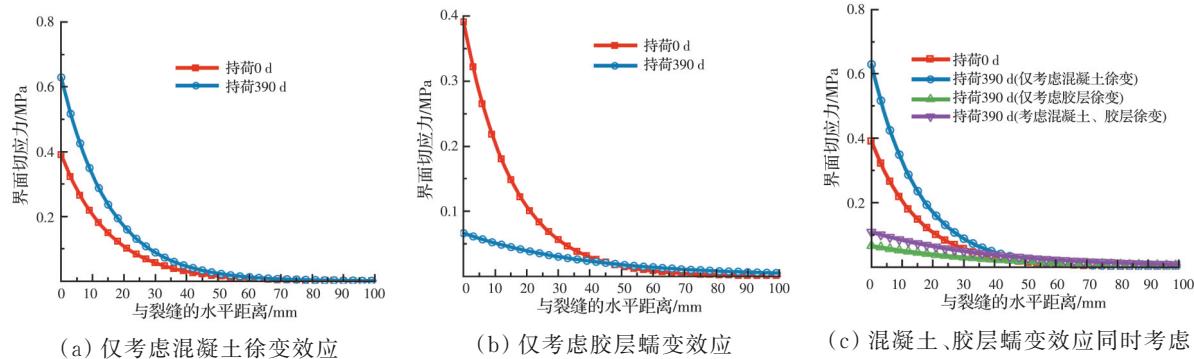


图14 材料蠕变对裂缝附近时变应力场的作用

Fig. 14 Effects of creep on the stress field near intermediate crack

6 结论与展望

对长期持荷条件下粘贴FRP加固混凝土梁界面应力的时变规律展开分析,对FRP端部、混凝土中部裂缝附近两个区域进行讨论,得到以下主要结论:

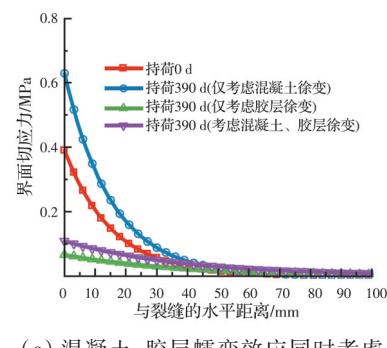
1)混凝土徐变导致FRP端部界面应力依时增大,对避免剥离破坏不利,胶层溢出、二次受力对该结论造成影响,但胶层溢出有助于降低应力的增大幅度。同时,混凝土徐变导致中部裂缝附近界面应力随时间增大。

2)胶层蠕变导致FRP端部界面应力随时间减小,对避免剥离破坏有利,胶层溢出、二次受力对该结论造成影响,但胶层溢出有助于将应力降至更低水平。同时,胶层蠕变也导致中部裂缝附近界面应力随时间缓解。

3)FRP端部附近时变界面应力的有限元解和闭合解吻合较好,形成了相互验证,闭合解显式地表达出了时变界面应力的解析式,适用于工程实践。

本文仅对短期加载下界面变形的有限元理论结果与实测结果进行了对比,而未对长期持荷下的理论结果与实测结果进行对比。主要原因是:电阻式应变片是测试界面变形的主要仪器,而应变片的

力的分布规律如图14(a)所示,可见,混凝土徐变使得应力随时间增大,将增大该位置发生剥离破坏的风险。仅考虑胶层蠕变时,界面切应力的分布规律如图14(b)所示。胶层蠕变使得裂缝附近的界面切应力随时间而缓解,有助于避免剥离破坏的发生。同时考虑混凝土、胶层蠕变的界面应力分布规律如图14(c)所示。混凝土徐变导致应力依时增大,胶层蠕变导致应力依时降低的效应同时存在,最终结果处于仅考虑混凝土徐变和仅考虑胶层蠕变的结果之间。



长期工作性能不可靠,迄今为止,笔者尚未发现界面长期变形的相关数据,因此无法开展对比工作。关于应变片的长期测试性能,笔者曾开展大量的实测工作,均证明其不适用于长期监测。因此,对于长期界面应力,本文暂时仅能提供理论(有限元法和解析法)解答,事实上,由于试验数据的缺失,相关同行的研究也主要处于理论分析层面。但理论计算结果仍可作为长期界面应力分析的基础和参考,待到未来出现合适的长期监测手段,即可开展相关验证性工作。笔者也会继续探索长期变形的可靠测试技术和方案,积极推动验证性工作的开展。

参考文献

- [1] LIU W B, ZHANG S G, SUN B Y, et al. Creep characteristics and time-dependent creep model of tunnel lining structure concrete [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2021, 25(3): 365-382.
- [2] MEI S Q, WANG Y F, ZOU R F, et al. Creep of concrete-filled steel tube considering creep-recovery of the concrete core [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(5): 997-1009.
- [3] KHABAZ-AGHDAM A, BEHJAT B, SILVA L F MDA, et al. A new theoretical creep model of an epoxy-graphene composite based on experimental investigation:

- Effect of graphene content [J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(18): 2461-2472.
- [4] LI X L, ZHANG X Y, CHEN J Z, et al. The mechanical properties and creep behavior of epoxy polymer under the marine environment: A molecular dynamics investigation [J]. *Materials Today Communications*, 2021, 28: 102737.
- [5] LI X L, ZHANG X Y, CHEN J Z, et al. Uniaxial tensile creep behavior of epoxy-based polymer using molecular simulation [J]. *Polymers*, 2021, 13(2): 261.
- [6] TENG J G, CHEN J F, TAO Y. FRP-strengthened RC structures [M]. 2nd edition. UK: John Wiley & Sons, 2016.
- [7] GUENANECHE B, KROUR B, TOUNSI A, et al. Elastic analysis of interfacial stresses for the design of a strengthened FRP plate bonded to an RC beam [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(7): 636-642.
- [8] FAHSI B, BENRAHOU K H, KROUR B, et al. Analytical analysis of interfacial stresses in FRP-RC hybrid beams with time-dependent deformations of RC beam [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2011, 24(6): 519-526.
- [9] FAHSI B, BENRAHOU K H, KROUR B, et al. On the effect of time-dependent deformations on the interface behaviour of RC beams strengthened by FRP plates [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011, 25(15): 1909-1924.
- [10] HAMED E, CHANG Z T. Effect of creep on the edge debonding failure of FRP strengthened RC beams: A theoretical and experimental study [J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74: 186-193.
- [11] HAMED E, BRADFORD M A. Creep in concrete beams strengthened with composite materials [J]. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2010, 29(6): 951-965.
- [12] HAMED E, BRADFORD M A. Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(13): 1595-1607.
- [13] ZHANG C, WANG J L. Viscoelastic analysis of FRP strengthened reinforced concrete beams [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(12): 3200-3208.
- [14] ZHANG C, WANG J L. Interface stress redistribution in FRP-strengthened reinforced concrete beams using a three-parameter viscoelastic foundation model [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(8): 3009-3019.
- [15] TENG J G, ZHANG J W, SMITH S T. Interfacial stresses in reinforced concrete beams bonded with a soffit plate: A finite element study [J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(1): 1-14.
- [16] 陈敬智. 碳纤维网格加固二次受力钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [17] CHEN J Z. Study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber mesh under secondary load [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021. (in Chinese)
- [18] 王梓鉴. 考虑二次受力影响的 CFRP 加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究与数值模拟[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2019.
- [19] WANG Z J. Experimental and numerical study of flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP considering secondary forces [D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [20] 邢建国. CFRP 布加固二次受力钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2019.
- [21] XING J G. Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets under secondary load [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2019. (in Chinese)
- [22] 陶甲. 预应力 FRP 网格加固 RC 梁抗剪性能研究[D]. 南京: 东南大学, .
- [23] TAO J. Study on shear behavior of RC beams strengthened with prestressed FRP grids [D]. Nanjing: Southeast University, . (in Chinese)
- [24] HADJAZI K, SEREIR Z, AMZIANE S. Creep response of intermediate flexural cracking behavior of reinforced concrete beam strengthened with an externally bonded FRP plate [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 94/95: 196-205.
- [25] 欧阳煜, 黄奕辉, 钱在兹, 等. 玻璃纤维片材加固混凝土梁的抗弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(3): 1-6, 19.
- [26] OUYANG Y, HUANG Y H, QIAN Z Z, et al. The analysis of flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with glass fiber reinforced plastic sheet [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(3): 1-6, 19. (in Chinese)
- [27] CHEN G M, CHEN J F, TENG J G. On the finite element modelling of RC beams shear-strengthened with FRP [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 32: 13-26.
- [28] JIANG S Y, YAO W L, CHEN J, et al. Finite element modeling of FRP-strengthened RC beam under sustained load [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018(9): 1-16.
- [29] JIANG S Y, YAO W L, CHEN J, et al. Time dependent behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to preload: Experimental study and finite element modeling [J]. *Composite Structures*, 2018, 200: 599-613.
- [30] 刘忠. 混凝土徐变收缩的递推 AEMM 法 [J]. 重庆交通大学学报, 1994, 13(Sup1): 31-34.

- LIU Z. AEMM method with recurrence relations in analysis of creep and shrinkage [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1994, 13(Sup1): 31-34. (in Chinese)
- [26] Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete: ACI 209.2R-08 [S]. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute. 2008.
- [27] CHOI K K, TAHA M M R, MASIA M J, et al. Numerical investigation of creep effects on FRP-strengthened RC beams [J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(6): 812-822.
- [28] SMITH S T, TENG J G. Interfacial stresses in plated beams [J]. Engineering Structures, 2001, 23(7): 857-871.
- [29] WANG J L. Cohesive zone model of intermediate crack-induced debonding of FRP-plated concrete beam [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(21): 6630-6648.
- [30] HADJAZI K, SEREIR Z, AMZIANE S. Cohesive zone model for the prediction of interfacial shear stresses in a composite-plate RC beam with an intermediate flexural crack [J]. Composite Structures, 2012, 94(12): 3574-3582.

(编辑 胡玲)