

复杂条件下 FRP-混凝土界面剥离机理研究分析

张裕华, 章子华*, 诸葛萍

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 从理论模型、试验研究和数值模拟讨论了影响 FRP-混凝土界面粘结性能的关键因素, 分析了环境因素和加载速率对 FRP-混凝土界面粘结性能以及极限承载力的影响, 指出了复杂条件下 FRP-混凝土界面分析亟待解决的关键问题。

关键词: 纤维增强复合材料; 混凝土; 粘结性能; 界面剥离; 有限元

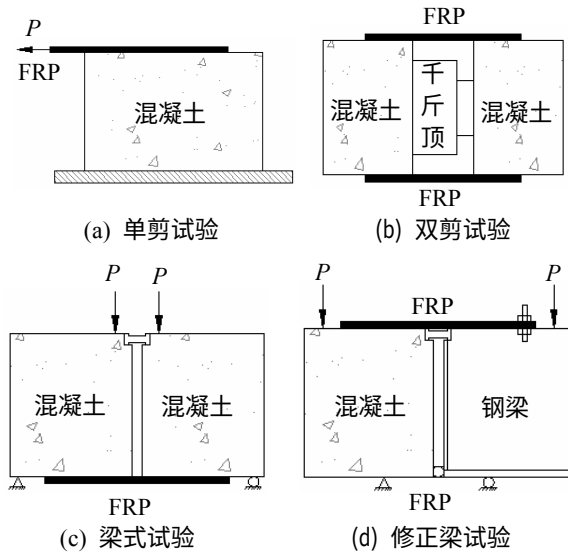
中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 02-0048-06

混凝土结构常因过载等原因出现构件开裂、承载力不达标等问题, 需加固后方可继续使用。纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer/Plastics, FRP)具有轻质、高强、耐腐蚀等突出优点, 外贴 FRP 施工技术简便, 所占净空小, 已在工程加固领域广泛应用^[1]。我国先后颁布的《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》和《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》推进了 FRP 的工程应用。

FRP 与混凝土之间通过粘结应力传递荷载, 在保证 2 种材料协同工作的基础上实现结构加固。在粘结质量可靠的前提下, FRP 的抗拉性能才能得到充分发挥; 粘结质量较差时, FR

图1 FRP-混凝土界面剥离试验^[8]

1.3 计算理论

通过试验可获得沿剪切力方向的 FRP 应变、位移、荷载等数据,在此基础上可计算以下参数:

(1)界面断裂能(G_f). 界面粘结滑移曲线所包含的面积即界面断裂能,其决定了界面承载力的大小,计算式为:

$$G_f = \frac{P_u^2}{2b_p^2 E_p t_p}, \quad (1)$$

其中, b_p 为 FRP 片材宽度, P_u 为单面的荷载极值, E_p 和 t_p 分别为 FRP 片材的弹性模量和计算厚度.

(2)界面剪应力. 通过界面应变测量和参数拟合可获得 FRP 应变分布. 如文献[9]采用的拟合公式为:

$$\varepsilon(x) = \frac{a/b}{1 + e^{(x-x_0)/b}}, \quad (2)$$

其中, a 和 b 为拟合参数, x

土薄层表面向树脂—混凝土剥离或混合剥离转变。胶层厚度的提高也会提高界面断裂能,减小峰值剪应力。Dai 等^[19]发现若采用剪切刚度较低(一般为普通结构胶刚度的 1/20~1/5)的软性结构胶来粘贴加固混凝土结构可提高界面抗剥离承载力。

如前所述,界面剥离往往发生与界面临近的混凝土薄层内,快速荷载下,FRP-混凝土界面也存在与纯混凝土材料类似的应变率效应。目前,该方面的研究尚不多见。施嘉伟等^[9]通过快速荷载作用下双面剪切试验发现界面极限承载力、界面断裂能、峰值剪应力以及 FRP 最大应变值等重要参数均与应变率成正相关关系。卢渊^[20]通过落锤冲击荷载下的梁式试验发现冲击荷载作用下极限粘结力、滑移量和粘结剪应力均随着落锤高度的升高而增大。笔者通过准静载与低速冲击荷载下的单面剪切试验发现:准静载作用下,混凝土强度对 FRP 应变分布影响明显,而在高加载速率下,混凝土强度对 FRP 应变分布影响较小;应变率越高,界面极限承载力峰值剪应力越大;低强度混凝土相较于高强度混凝土具有更显著的应变率效应。

1.5 环境因素对界面粘结性能的影响

混凝土结构的使用环境复杂多变,虽然 FRP 材料的稳定性较好,但在环境因素作用下,混凝土和胶体的材料性能会发生劣化,从而导致 FRP 加固结构的承载力和可靠性下降。

(1)高温和火灾。高温下胶体的软化直接对界面粘结强度和剪切强度造成影响,导致界面性能显著下降。胡克旭等^[21]发现当温度达到 40℃以上时,粘结强度会随着温度的升高而降低,界面剪切变形增大。当温度达到 100~180℃时,胶体呈流塑状态,界面粘结强度基本保持不变。Gamage 等^[22]通过高温下 CFRP-混凝土单面剪切试验发现,22~36℃时,CFRP-混凝土间的粘结强度基本保持不变;当温度高于 36℃时,粘结强度开始降低,当温度达到 60~70℃时,粘结强度下降速度显著加快。林燕

获得 FRP-混凝土界面的应力集中状况,解决了由界面应力集中引起的受弯 FRP 加固钢筋混凝土梁端部剥离问题. Teng 等^[31]对 FRP 加固简支梁进行了二维线弹性有限元模拟,获得了采用 CFRP、GFRP 和钢板三个不同方式加固的简支梁的界面应力分布,其结果与 Smith-Teng 公式结果大致相符. 叶锋^[32]基于线弹性模型对单剪搭接试验进行了分析. 采用二维线弹性模型模拟支座高度、FRP 板粘结长度、FRP 板厚度等因素,针对 FRP 板宽度则采用三维线弹性模型,获得了各种影响因素下的 FRP-混凝土界面的应力分布状态.

2.2 非线性模型

线弹性分析将 FRP-混凝土界面的粘结视为完全粘结,无法准确模拟界面的剥离破坏过程. 近年来,针对 FRP-混凝土界面粘结滑移显著的非线性特征,FRP-混凝土界面粘结性能的研究逐渐转向非线性分析. 非线性模型大致分为如下两类:

(1)聚力模型. 在 FRP 与混凝土之间插入一层无厚度界面单元,如无厚度 Goodman 单元^[33],FRP-混凝土界面发生剥离时,界面单元依次失效. 界面单元本构关系采用试验获得的界面粘结滑移曲线.

(2)以共用节点的方式直接连接混凝土单元与 FRP 单元,并通过混凝土单元开裂破坏来模拟 FRP-混凝土界面剥离,从而获得很多试验中难以观测的破坏过程细节^[34]. 但该方法对单元尺寸较为依赖,需将界面附近的混凝土单元划分得非常细才能获得比较准确的粘结滑移关系.

2.3 动态剥离

目前大部分数值模拟针对的是静力/准静力荷载下的 FRP-混凝土界面剥离,忽略了裂纹扩展的时变特性对剥离机理的影响. 而这与许多试验中观测到的现象相悖,如在阻力曲线(Resistance Curve)的裂缝稳定扩展阶段后存在明显的回跳(Snap-back)和翻转(Snap-through)现象^[37]. 快速荷载作用下,应变

界面剥离,忽略了界面的应变率效应.可通过单面或双面剪切试验研究不同加载速率下的界面粘结滑移关系,并以此为基础,在FRP与混凝土之间插入考虑应变率效应的无厚度界面单元,研究FRP加固混凝土构件的宏观力学行为.

参考文献:

- [1] MICELLI F, NANNI A. Tensile characterization of FRP rods for reinforced concrete structures[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2003, 39(4):293-304.
- [2] SAADATMANESH H, EHSANI M R, SAADATMANESH H, et al. RC beams strengthened with GFRP plates I: Experimental study[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 117(11):3417-3433.
- [3] ARDUINI M, NANNI A. Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 1(2):63-70.
- [4] 黄冰, 蔺新艳. FRP与混凝土界面粘结性能研究综述[J]. *广西水利水电*, 2006(2):14-16.
- [5] 田波, 王苏岩. FRP加固混凝土梁粘结剥离破坏研究进展[J]. *工程抗震与加固改造*, 2014, 36(1):105-110.
- [6] CHEN J F, YANG Z J, HOLT G D. FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: Effect of test methods on experimental bond strength[J]. *Steel & Composite Structures*, 2001(2):231-244.
- [7] 李远心, 琚宏昌, 张贝宜, 等. FRP-混凝土界面的剥离分析[J]. *四川建材*, 2013(3):54-57.
- [8] 曾宪桃, 任振华. FRP-混凝土界面特性研究的试验方法与剥离承载力问题[J]. *工程抗震与加固技术*, 2014, 36(2):88-93.
- [9] 施嘉伟, 朱虹, 吴智深, 等. FRP片材-混凝土界面应变率效应试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(12):99-107.
- [10] 彭晖, 高勇, 谢超, 等. FRP

- [29] TUA KTA C, BÜYÜKÖZTÜRK O, ASCE M, et al. Conceptual model for prediction of FRP-concrete bond strength under moisture cycles[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 15(5):743-756.
- [30] 张大伟, 金伟良, JUSTIN, 等. 浸水环境下 FRP-混凝土界面剪切黏结性能研究[J]. *施工技术*, 2013, 42(10):34-38.
- [31] 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 & Building Materials*, 2002, 16(1):1-14.
- [32] 叶锋. FRP-混凝土粘结性能的有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [33] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1984:1-184.
- [34] LU X Z, YE L P, TENG J G, et al. Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(4):564-575.
- [35] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP 片材与混凝土粘结性能的精细有限元分析[J]. *工程力学*, 2006, 23(5):74-82.
- [36] 俞裕果, 李静, 袁兵, 等. FRP-混凝土界面剥离承载力 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(11):3986-3992.
- [37] CARPINTERI A, CORNETTI P, PUGNO N. Edge debonding in FRP strengthened beams: Stress versus energy failure criteria[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(10):2436-2447.
- [38] ZHANG Z J, PAULINO G H. Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(6):1195-1254.
- [39] CORIGLIANO A, MARIANI S, PANDOLFI A. Numerical analysis of rate-dependent dynamic composite delamination[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(6):766-775.
- [40] CORIGLIANO A, MARIANI S, PANDOLFI A. Numerical modeling of rate-dependent debonding processes in composites[J]. *Composite Structures*, 2003, 61(1):39-50.
- [41] GUIMARD J M, ALLIX O