

考虑粘结滑移的 FRP 筋混凝土柱偏压性能

朱春阳¹,王可心¹,孙天娇¹,郑 勇²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳卫德科技集团有限公司,辽宁 沈阳 110100)

摘 要 目的 研究考虑 FRP 筋-混凝土粘结滑移的 FRP-RC 柱力学性能,比较不同荷载偏心距与 FRP 筋直径情况下柱体压弯全过程与极限承载能力的差异.方法 在已有试验的基础上建立 FRP-RC 偏压柱有限元模型,并引入改进的 BPE (Bertero-Popov-Eligehausen) 模型,研究粘结滑移对压弯柱受力全过程的影响.结果 FRP 筋-混凝土粘结滑移初始刚度是影响柱体压弯性能的主要因素,当 BPE 模型上升段曲线指数减小 80%,柱体偏压刚度最大提高约 14%,承载力最大提高约 9%.峰值粘结应力及峰值滑移量对柱体压弯刚度影响不显著,但会小幅影响柱体承载能力.结论 当荷载偏心距增大,FRP 筋-混凝土粘结滑移对柱体力学性能的降低作用逐渐显现;当荷载偏心率相同时,随着柱截面配筋率增大,柱体极限承载力降低, $P-M$ 相关曲线偏离度增大.

关键词 FRP 筋混凝土;粘结滑移;压弯性能; $P-M$ 相关关系

中图分类号 TU377.9

文献标志码 A

Bias Compression Behavior of FRP Concrete Columns Considering Bond Slip

ZHU Chunyang¹, WANG Kexin¹, SUN Tianjiao¹, ZHENG Yong²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shenyang Weide Technology Group Co. Ltd., Shenyang, China, 110100)

Abstract: To study the mechanical properties of FRP-RC columns with FRP bars and concrete bond slip, and compare the difference between the whole process and ultimate bearing capacity of the columns under different load eccentricity and FRP bars diameter. The finite element model of FRP-RC biased columns was established on the basis of the existing experiments, and an improved BPE (bertero-popov-eligehausen) model was introduced to study the influence of bond slip on the whole process of stress of the bending columns. The initial bond-slip stiffness of FRP bars and concrete was the main factor affecting the bending performance of the column. When the curve index of the rising section of BPE model decreased by 80%, the maximum increase of the column's bias stiffness was about 14%, and the maximum increase of the bearing capacity was about 9%. The effect of peak bonding stress and peak slip on the bending stiffness of the column

收稿日期:2019-07-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504303);国家自然科学基金项目(51578347)

作者简介:朱春阳(1986—),男,副教授,主要从事新型组合结构及复材结构等方面研究.

was not significant, but would slightly affect the bearing capacity of the column. When the load eccentricity increases, the decreasing effect of FRP bar-concrete bond slip on the mechanical properties of the column gradually appears; When the eccentricity of load is the same, with the increase of reinforcement ratio of column section, the ultimate bearing capacity of column decreases and the deviation of P - M correlation curve increases.

Key words: FRP reinforced concrete; bond slip; compression-bending performance; P - M interaction diagram

利用 FRP 筋替代钢筋是提高钢筋混凝土结构耐久性的有效方法^[1-5]. 虽然 FRP 筋的抗压强度低于其抗拉强度,但以受压纵筋的形式应用于混凝土柱仍能取得一定的增强效果. 目前各国规范中关于 FRP 筋混凝土 (FRP-RC) 受压构件设计的规定非常有限^[6-8]. 而完善 FRP-RC 受压性能研究,对根本性解决强腐蚀环境下混凝土结构耐久性问题具有重要意义.

众多国内外学者相继开展了 FRP-RC 柱受压性能的研究, H. Karim 等^[9-13] 在考虑 FRP-RC 偏压柱的二阶效应与 FRP 筋-混凝土粘结滑移的前提下,对 FRP-RC 柱轴压性能与偏压性能进行了研究. N. N. S Paramanantham^[14] 通过偏心受压柱试验发现,荷载-位移全曲线分为三阶段,从而划分了柱体不同的破坏特征. R. Okelo 等^[15-17] 通过对筋体表面处理方式、FRP 筋直径、混凝土强度等影响粘结滑移规律的参数进行分析,对现有粘结-滑移模型的适用性进行了评估. 为了明确 FRP 筋-混凝土粘结滑移对 FRP-RC 柱力学性能的影响,笔者基于文献^[17] 中的 FRP-RC 短柱偏压试验,建立有限元模型并引入改进的 BPE (Bertero-Popov-Eligehausen) 模型,分析粘结滑移对 FRP-RC 柱压弯受力全过程与柱体截面极限承载能力的影响. 研究表明,随着荷载偏心率和 FRP 筋直径的增加,粘结滑移效应对柱体承载力的降低效果明显增加;考虑粘结滑移后不同 FRP 筋直径的柱体 P - M 相关曲线形态趋于一致.

1 有限元模型建立与验证

1.1 模型力学参数

参照文献^[17] 中的 FRP-RC 柱偏压试验建立有限元模型(见图 1). 材料参数如下: FRP 筋直径 10 mm, 肋间距 10 mm, 抗拉弹性模量为 92 400 MPa, 抗拉强度为 1 103 MPa, 抗压弹性模量为 60 200 MPa, 抗压强度为 689 MPa. 混凝土弹性模量 30 000 MPa, 抗压强度等级为 C30, 实测立方体抗压强度为 33.51 MPa. 偏心距 e 设置为 75 mm、125 mm 和 175 mm.

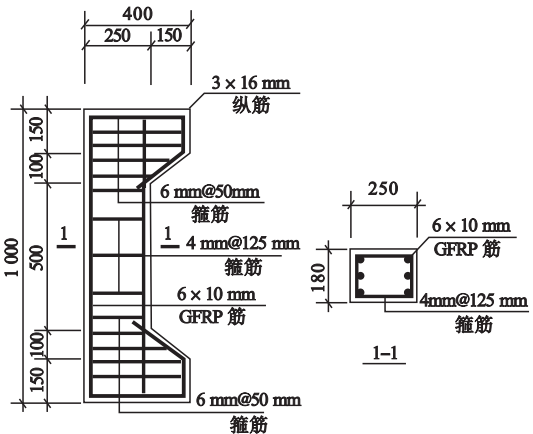


图 1 试件设计

Fig. 1 Design of the specimen

建立的 FRP-RC 偏压柱有限元模型,混凝土采用塑性损伤模型, FRP 筋采用线弹性模型. 混凝土采用三维实体八节点缩减积分单元 (C3D8R), FRP 筋采用三维二节点桁架单元 (T3D2). 考虑计算成本,设置有限元模型网格尺寸为 25 mm × 20 mm × 20 mm (见图 2).

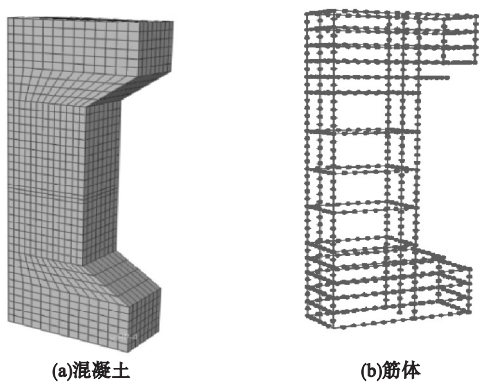


图 2 有限元网格划分
Fig. 2 Meshing of the model

1.2 FRP 筋 - 混凝土粘结滑移模拟

采用在 FRP 筋与混凝土节点之间设置弹簧单元的方法模拟两者间的粘结滑移行为. 在远离荷载作用一侧的 FRP 筋上, 沿其长度方向均匀布置若干组三向弹簧单元. 参照文献[18]中得出的 FRP 筋 - 混凝土粘结滑移(τ - s)关系, 描述有限元模型中非线性弹簧单元的力学行为.

在建模过程中, 弹簧单元间距参考粘结滑移试验中 FRP 筋的埋置长度. 故设定弹簧单元间距为 40 mm, 布置方式见图 3.

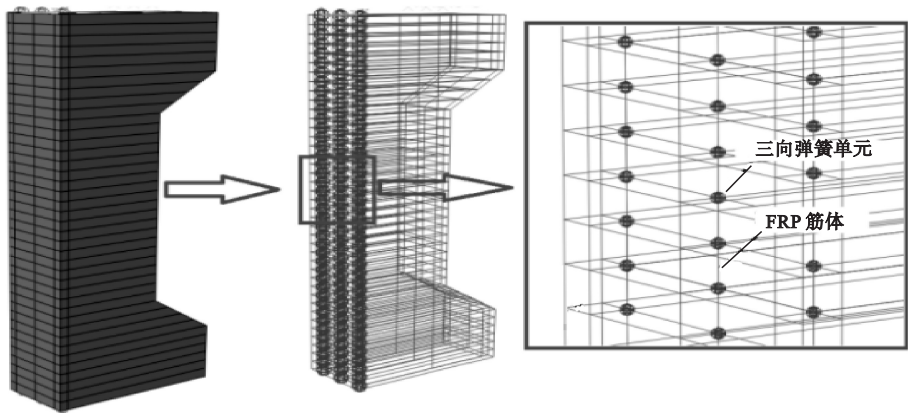


图 3 弹簧单元布置
Fig. 3 Layout of spring elements

1.3 模拟结果验证

图 4 为有限元计算与试验对比结果. 从图中可以看出, 有限元计算的初始刚度及峰值荷载较试验结果偏高, 但总体而言, 模拟获得的荷载 - 位移全曲线与试验结果趋势一

致, 关键形态特征相似. 考虑 FRP 筋粘结滑移效应后, 随着荷载偏心率 e 的增加, 柱体刚度出现明显下降, 承载力也随之降低, 有限元计算结果与试验结果吻合趋势更好, 可见 FRP 筋 - 混凝土的粘结滑移对柱体压弯性能的影响随荷载偏心率 e 的增大而显著变化.

2 柱体应力状态与滑移分布

2.1 加载特征点应力状态

图 5 为未考虑 FRP 筋粘结滑移效应下, 试件荷载 - 位移全曲线上特征点所对应的混凝土应力状态. 通过图 5 中的 (a)、(c)、(e) 图可以看出, 荷载位移全曲线前两阶段呈线性、后一阶段呈非线性. 这与文献[13]研究结论一致, 并且随着荷载偏心距的增大, 该特征更为明显. 曲线在第二阶段的刚度下降主

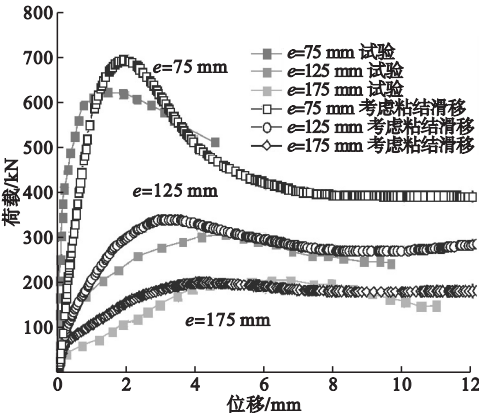
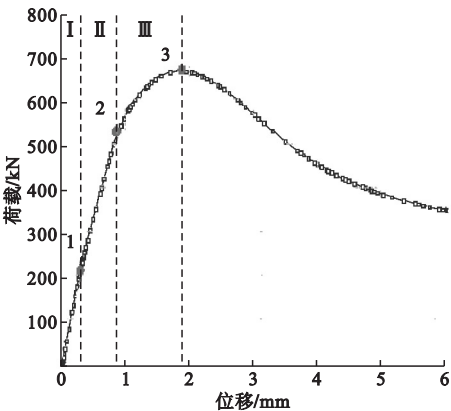


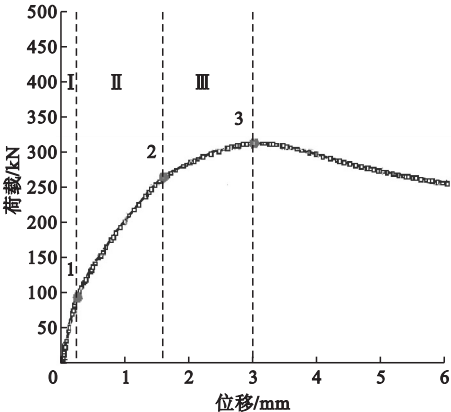
图 4 有限元计算与试验对比结果
Fig. 4 Comparison of FEM and experimental results

要是由受拉区混凝土开裂引起,而第三阶段刚度进一步下降是由于受压区混凝土达到屈服强度(对应混凝土塑性损伤模型压缩特性

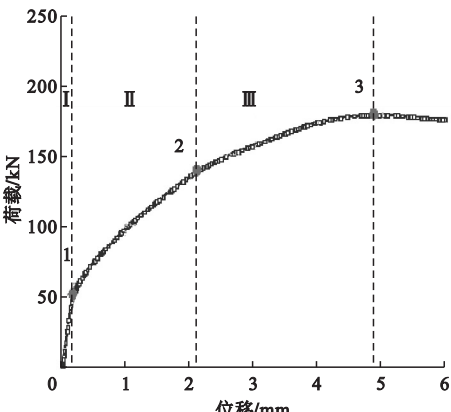
中的屈服应力的起始应力)所引起. 曲线峰值点对应于受压区部分混凝土达到极限抗压强度.



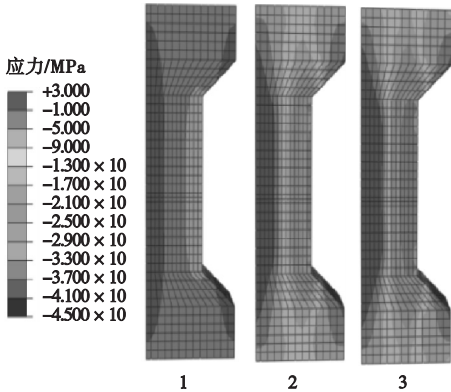
(a)偏心距 $e=75\text{mm}$ 时柱体荷载-位移曲线



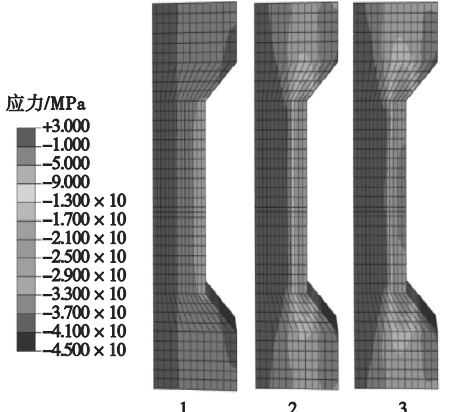
(c)偏心距 $e=125\text{mm}$ 时柱体荷载-位移曲线



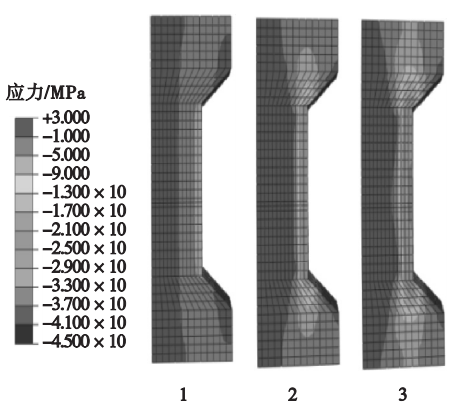
(e)偏心距 $e=175\text{mm}$ 时柱体荷载-位移曲线



(b)偏心距 $e=75\text{mm}$ 时柱体应力状态



(d)偏心距 $e=125\text{mm}$ 时柱体应力状态



(f)偏心距 $e=175\text{mm}$ 时柱体应力状态

图5 荷载-位移曲线上特征点所对应的应力状态

Fig. 5 Stress contour corresponding to the characteristic points on axial-lateral displacement curve

2.2 FRP 筋 - 混凝土相对滑移分布

图6为柱体达到峰值荷载时FRP筋-混凝土相对滑移量 s 沿试件高度 H 分布情

况,可见FRP筋-混凝土相对滑移量沿柱高度方向关于柱中部截面轴对称,滑移量 s 由中部至两侧端部逐渐增大,随着荷载偏心率

e 的减小及 FRP 筋直径 d 的增大,滑移量 s 减小. 所有试件中,相对滑移量均未超过文献[18]中的 FRP 筋-混凝土粘结滑移

($\tau-s$) 曲线中的峰值滑移量,说明在加载全过程中各试件均未出现明显的粘结滑移破坏.

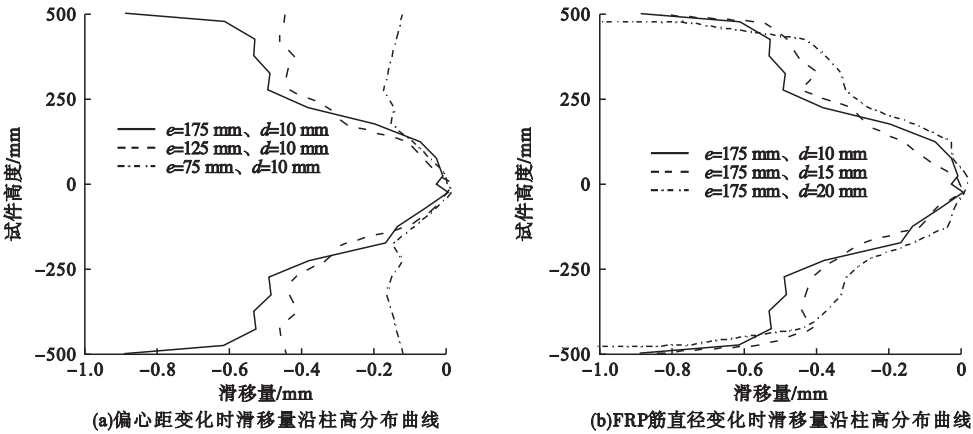


图6 FRP 筋-混凝土相对滑移量沿试件高度分布

Fig. 6 Distribution of FRP bar-concrete relative displacement along with the height of the specimen

3 τ - s 曲线关键影响参数

为了研究 FRP 筋-混凝土粘结滑移对柱体压弯性能的影响,基于改进的 BPE 粘结滑移模型^[16],开展有限元参数分析.改进的 BPE 模型表达式见式(1)~式(3),典型 τ - s 曲线如图 7 所示.

$$\tau = \tau_3, s > s_3. \tag{3}$$

式中: τ_1 为峰值粘结应力; s_1 为滑移量; τ_3 为摩擦力分量; α, p 为待定拟合参数.

基于文献[17]相关试验结果,设定加载初始段曲线形状参数 α 为 0.2~1.0,峰值粘结应力 τ_1 为 6~20 MPa,峰值相对滑移量 s_1 为 0.5~4.0 mm.

3.1 FRP 筋-混凝土粘结滑移初始刚度影响

图 8 为不同偏心距下 α 改变时有限元模拟得到的各试件荷载-位移曲线.从图中可以看出,随着 α 值的减小(粘结滑移初始刚度变大),试件荷载-位移曲线初始刚度及承载力提高;荷载偏心距增加,初始粘结滑移刚度提升对增大柱体刚度和承载力的效果更加明显.参数分析中, α 降低 80% 时,对于偏心距为 125 mm、175 mm 的试件,峰值承载力分别提高约 5.1% 和 9.3%,曲线第二阶段切线刚度提高 2.1% 和 13.6%.由于偏心距为 75 mm 时, α 降低时柱体刚度与承载力提升不明显,故只分析偏心距为 125 mm 与 175 mm 两种情况.

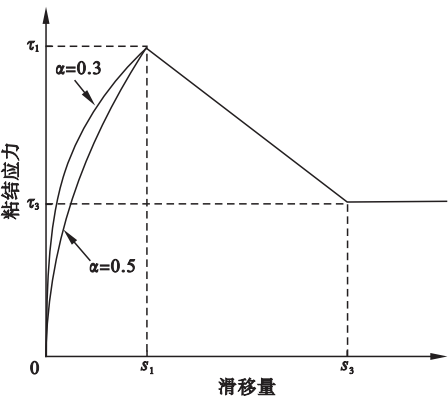


图7 改进的 BPE 模型

Fig. 7 Improved BPE model

上升段:

$$\tau/\tau_1 = (s/s_1)^\alpha, s \leq s_1. \tag{1}$$

下降段:

$$\tau/\tau_1 = 1 - p(s/s_1 - 1), s_1 < s \leq s_3. \tag{2}$$

残余应力段:

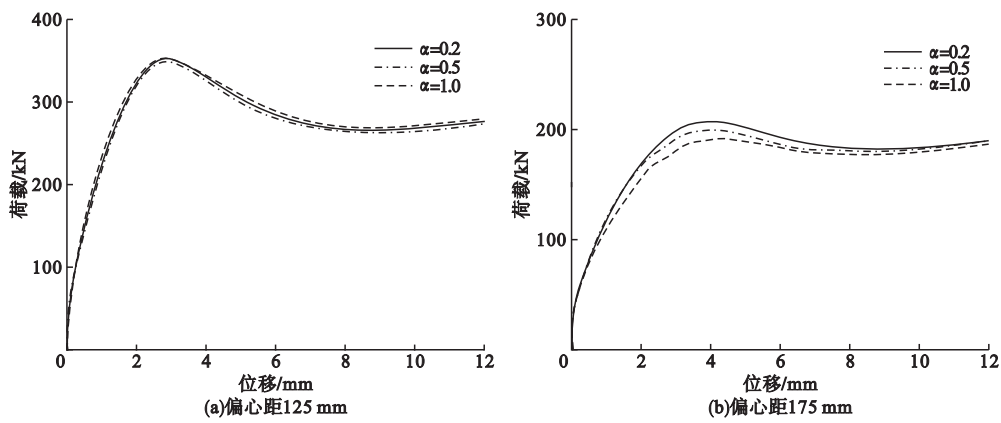


图8 参数 α 影响下各试件荷载-位移曲线

Fig. 8 Load displacement curves of each specimen under the influence of parameter α

3.2 峰值粘结应力 τ_1 及相对滑移量 s_1 影响

图9、图10为不同偏心距下 τ_1 与 s_1 (峰值粘结应力相对应的滑移量)改变时有限元模拟得到的各试件荷载-位移曲线。

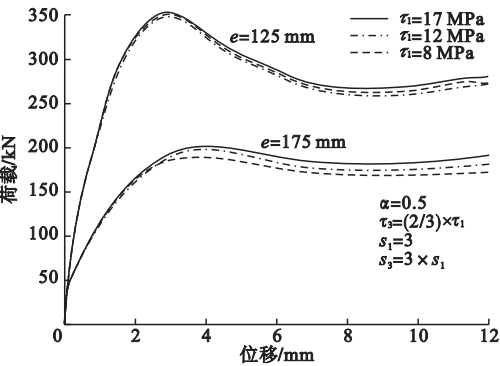


图9 参数 τ_1 影响下各试件荷载-位移曲线

Fig. 9 Load displacement curves of each specimen under the influence of parameter τ_1

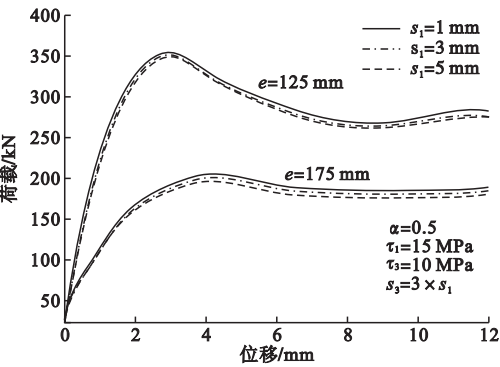


图10 参数 s_1 影响下试件荷载-位移曲线

Fig. 10 Load displacement curves of each specimen under the influence of parameters s_1

从图中可以看出,随着 τ_1 的减小及 s_1 的增大,柱体偏压承载力及刚度逐渐下降,且随着偏心距的增加,该规律更加明显.说明随着FRP筋与混凝土峰值粘结应力减小,粘结-滑移峰值割线刚度变小,试件偏压力学性能下降趋势更加明显。

4 考虑FRP筋-混凝土粘结滑移的截面承载力分析

4.1 FRP筋直径影响

图11为FRP筋直径为10 mm、15 mm和20 mm时,柱体在考虑与未考虑FRP筋混凝土粘结滑移情况下的荷载-位移曲线.现有研究表明,不考虑FRP筋直径对粘结滑移本构(τ - s 曲线)影响,实际上过高估计了FRP筋的粘结滑移强度,分析结果偏于保守.由图11可知,柱体承载力随着FRP筋直径的增加逐渐提升,峰值后期承载力退化随直径的增加而减弱;随直径的增加,FRP筋-混凝土粘结滑移对刚度及承载力的削弱愈加明显,且随着偏心距的增加,此规律更加明显。

4.2 轴力-弯矩相关关系分析

基于文献[17]中的FRP筋混凝土偏压试验,及不同荷载偏心距柱体的有限元分析结果,绘制出相应的轴力-弯矩(P - M)关系曲线.利用截面极限承载力计算公式(见式(4)~式(7)),绘制 P - M 关系曲线并与有限

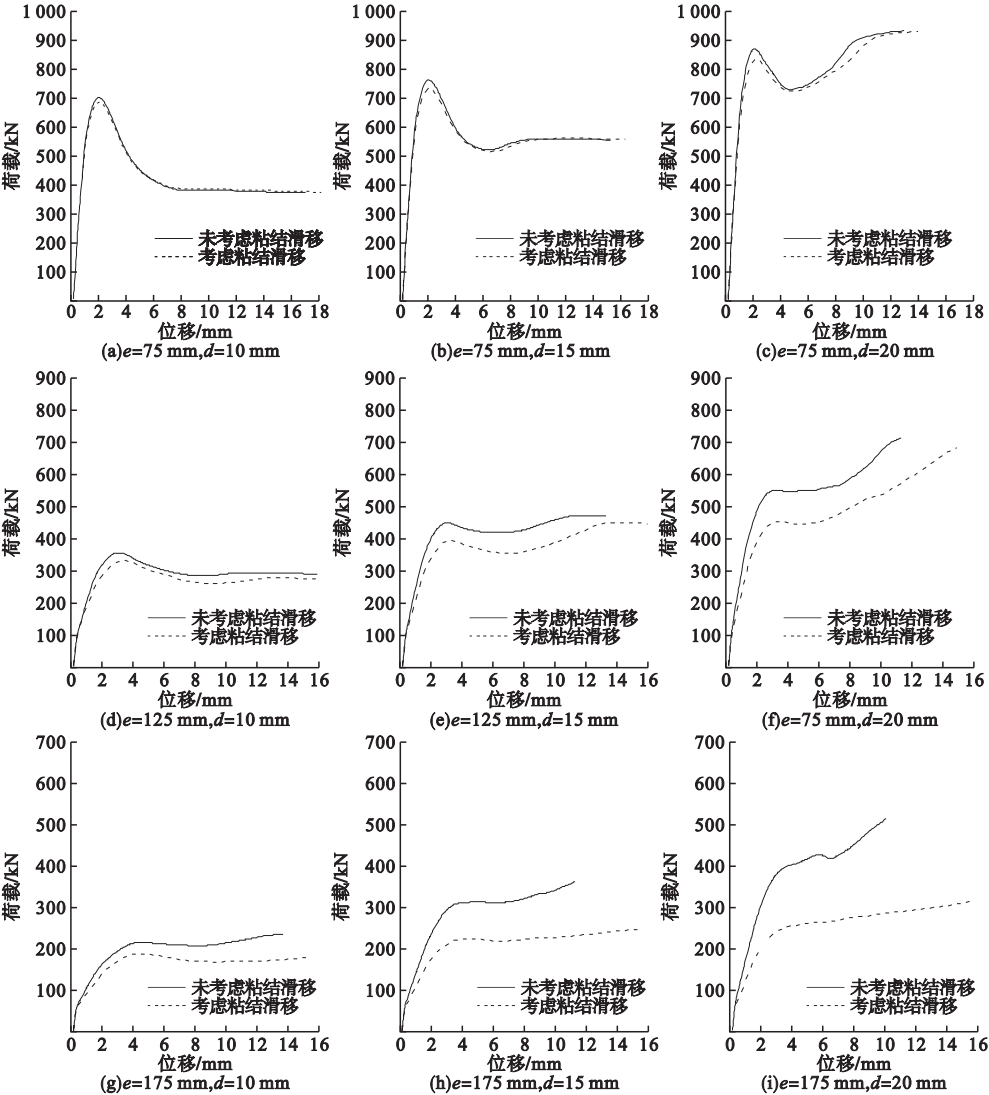


图 11 不同 FRP 筋直径下粘结滑移对压弯性能影响曲线

Fig. 11 Effect of bond slip on compression-bending performance under different FRP bar diameter conditions

元计算结果进行对比,结果见图 12。从图中可以看出,有限元计算结果与理论曲线吻合良好,当考虑 FRP 筋粘结滑移后,有限元计算结果与试验结果更为接近。

$$\sigma_{ft} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{\beta_1 h_0}{x} - 1 \right) E_{ft}. \tag{4}$$

$$\sigma_{fc} = \varepsilon_{cu} \left(1 - \frac{\beta_1 a_f}{x} \right) E_{fc}. \tag{5}$$

$$N_u = \alpha_1 f_c b x - \sigma_{ft} A_{ft} + \sigma_{fc} A_{fc}. \tag{6}$$

$$M_u = \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \sigma_{fc} A_{fc} (h_0 - a_f) - N_u \left(\frac{h}{2} - a_f \right). \tag{7}$$

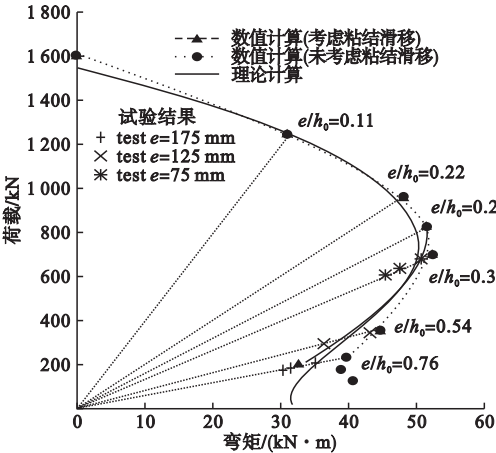


图 12 P-M 相关曲线

Fig. 12 P-M correlation curve

图 13 为不同 FRP 筋直径情况下,通过有限元计算获得的考虑与未考虑 FRP 筋粘结滑移的 $P-M$ 相关曲线. 图 14 为有无粘结滑移效应下,不同 FRP 筋直径情况下 $P-M$ 相关曲线. 由图13可知,当荷载偏心距较小

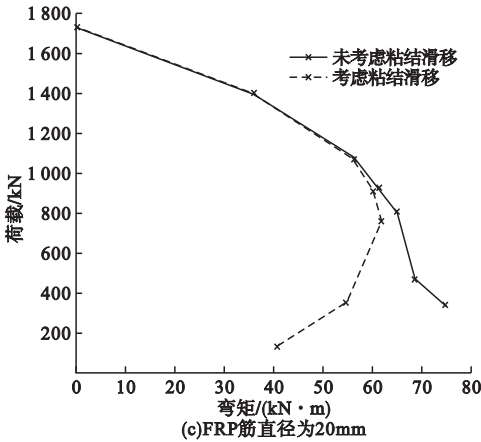
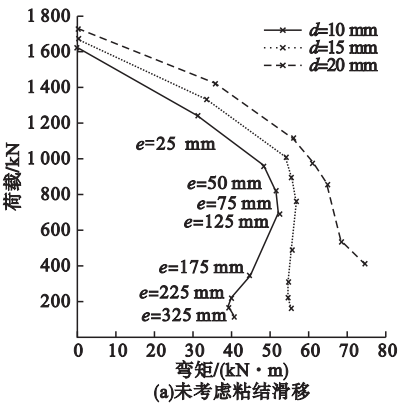
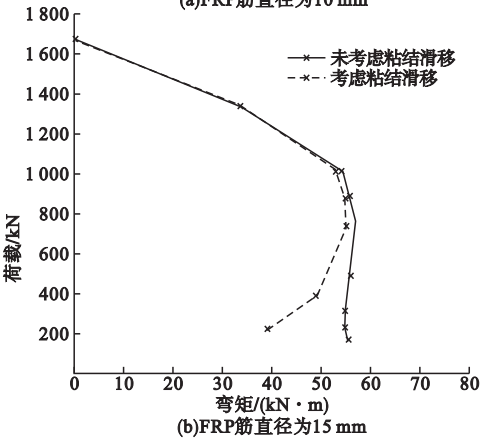
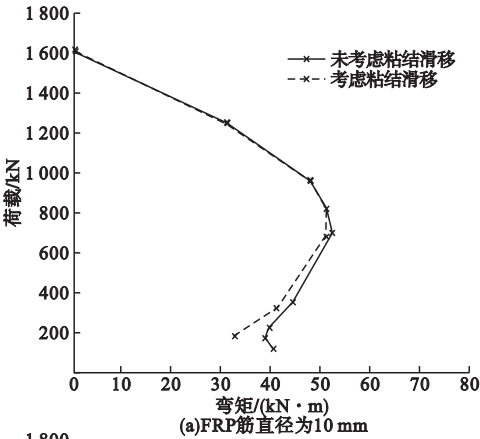


图 13 不同 FRP 筋直径下 $P-M$ 相关曲线
Fig. 13 $P-M$ correlation curves under different FRP bar diameters

时,FRP 筋粘结滑移对压弯构件承载力无显著影响;随荷载偏心距的增大,FRP 筋受拉应力水平提升,粘结滑移对压弯承载力的降低作用逐渐显现. 由图 14 可知,随着截面配筋率的提高,柱体承载力降低幅度增大,同时 $P-M$ 相关曲线偏离度增高. 考虑粘结滑移后不同 FRP 筋直径情况下柱体 $P-M$ 曲线形态趋于一致,都接近于低配筋率情况下的曲线形态,反映出随着 FRP 筋直径提升,FRP 筋-混凝土粘结滑移对柱体承载力削弱效应增强的客观规律.

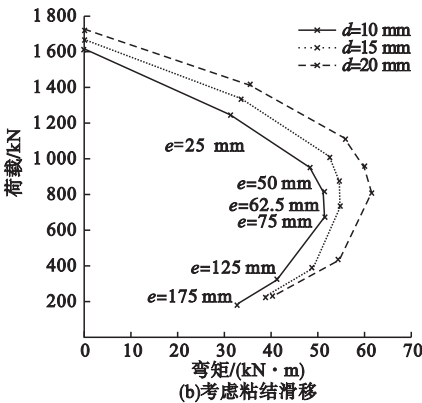


图 14 FRP 筋粘结滑移效应影响下 $P-M$ 相关曲线

Fig. 14 $P-M$ correlation curves under the influence of bond slip effect of FRP bars

5 结 论

(1)FRP-RC 柱偏压全过程存在两次较

为明显的刚度退化,第一次由受拉区混凝土开裂引起,第二次由受压区混凝土进入受压屈服强度引起.

(2) FRP 筋-混凝土粘结滑移初始刚度增大,柱体加载刚度及承载力提高. 峰值粘结应力及相应峰值粘结滑移量对柱体偏压刚度影响不明显,但随着 τ_1 的减小及 s_1 的增大,承载力有所下降.

(3) FRP-RC 柱 $P-M$ 相关关系曲线中,当荷载偏心距较小时,FRP 筋粘结滑移对压弯构件承载力无显著影响;随荷载偏心距的增大,粘结滑移对压弯承载力的降低作用逐渐显现.

(4) FRP-RC 柱截面配筋率增加,柱体极限承载力降低幅度增大, $P-M$ 相关曲线偏离程度增高.

参考文献

- [1] MANALO A, BENMOKRANE B, OARKK T, et al. Recent developments on FRP bars as internal reinforcement in concrete structures [J]. Concrete in Australia, 2014, 40(2): 46-56.
- [2] 陈升平, 马小霞, 罗寒寒, 等. FRP 筋钢纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(4): 60-64.
(CHEN Shengping, MA Xiaoxia, LUO Hanhan, et al. Experimental study on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams reinforced with FRP bars [J]. Sichuan building science, 2019, 45(4): 60-64.)
- [3] LUCA A D, MATTA F, NANNI A. Behavior of full scale glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete columns under axial load [J]. ACI structural journal, 2010, 107(5): 589-596.
- [4] TOBBI H, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Concrete columns reinforced longitudinally and transversally with glass fiber-reinforced polymer bars [J]. ACI structural journal, 2012, 109(4): 551-558.
- [5] AFIFI M Z, MOHAMED H M, BENMOKRANE B. Axial capacity of circular concrete columns reinforced with FRP bars and spirals [J]. Journal of composites for construction, 2014, 18(1): 538-565.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB50608—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the PRC. Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB50608—2010 [S]. Beijing: China planning

- press, 2011.)
- [7] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars: ACI440. 1R—15 [S]. Farmington Hills: American concrete association, 2015.
- [8] Japan Society of Civil Engineers. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials: JSCE—1997 [S]. Tokyo: JSCE, 1997.
- [9] KARIM H, SHEIKH M N, HADI M N S. Axial load-axial deformation behavior of circular concrete columns reinforced with FRP bars and helices [J]. Construction & building materials, 2016, 112: 1147-1157.
- [10] CHOO C C, HARIK E I, GESUND H. Strength of rectangular concrete columns reinforced with fiber reinforced polymer bars [J]. ACI structural journal, 2006, 103(3): 452-459.
- [11] 彭飞, 薛伟辰. FRP 筋混凝土偏压柱承载力计算方法 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 147-155.
(PENG Fei, XUE Weichen. Calculation approach of ultimate capacity of FRP reinforced concrete columns under eccentric compression [J]. Journal of building structures, 2018, 39(10): 147-155.)
- [12] AMER A. Behavior of concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced plastic bars [J]. Journal of engineering and applied science, 1999, 46: 1005-1022
- [13] ZADEH H J, NANNI A. Flexural stiffness and second-order effects in fiber-reinforced polymer-reinforced concrete frames [J]. ACI structural journal, 2017, 114(2): 533-543.
- [14] PARAMANANTHAM N N S. Investigation of the behavior of concrete columns reinforced with fiber reinforced plastic rebar [D]. Beaumont: Lamer University, 1994.
- [15] OKELO R, YUAN R L. Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete [J]. Journal of composites for construction, 2005, 9(3): 203-213.
- [16] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete [J]. Journal of composites for construction, 1997, 1(2): 40-51.
- [17] SUN L, WEI M, ZHANG N. Experimental study on the behavior of FRP reinforced concrete columns under eccentric axial load [J]. Construction and building materials, 2017, 152: 214-225.
- [18] 张戣. FRP 筋与混凝土粘结性能理论及试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
(ZHANG Yu. Experimental study on bond performance theory between FRP bar and concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)