

FRP 约束混凝土圆柱应力 - 应变分析模型

王震宇, 王代玉, 吕大刚

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, zhenyuwang@hit.edu.cn)

摘 要: 为精确模拟 FRP 约束混凝土的单轴受压性能, 提出了 FRP 约束混凝土圆柱应力 - 应变分析模型的建立方法. 在分析国内外大量试验数据基础上, 依据八面体强度准则提出了 FRP 约束混凝土圆柱极限强度的计算方法, 分析 FRP 约束混凝土圆柱极限应变与侧向约束强度的关系, 建立了极限应变的计算方法; 分析应力 - 应变全曲线试验结果中轴向应变与环向应变的关系, 建立由轴向应变确定环向应变的计算公式; 以 Mander 本构模型为主动约束关系, 采用增量方法计算了 FRP 约束混凝土圆柱的应力 - 应变系曲线, 模型预测结果与多数试验结果吻合较好.

关键词: FRP; 约束混凝土; 圆柱; 单轴受压; 应力 - 应变关系; Mander 模型

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 0367 - 6234(2010)02 - 0200 - 07

Stress-strain analytical model for FRP-confined concrete circular column

WANG Zhen-yu, WANG Dai-yu, LU Da-gang

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, zhenyuwang@hit.edu.cn)

Abstract: An analytical stress-strain model for concrete cylinders confined by fibre-reinforced polymer (FRP) was presented to accurately simulate the behavior of FRP-confined concrete under uniaxial compression. Based on large numbers of collected test data, a new equation for predicting the ultimate compressive strength of FRP-confined concrete circular columns was suggested according to the octahedral theory, and an equation for calculating the ultimate compressive strain was also proposed by considering the lateral confining pressure. The full-range lateral-to-axial strain relationship for FRP-confined concrete circular columns was obtained by analyzing the stress-strain curves measured in tests. Then an analytical stress-strain model was generated via an incremental process, in which a stress-strain model for actively-confined concrete proposed by Mander was used as the basic model. It is found that the predicting results agree well with test data.

Key words: FRP; confined concrete; circular column; uniaxial compression; stress-strain relationship; Mander model

近年来, 纤维增强复合材料(Fiber reinforced polymer/plastics, FRP) 凭借其高强、轻质、耐腐蚀、施工简便等优点, 已经在土木工程领域广泛应用, 尤其在柱的抗震加固方面^[1]. 利用 FRP 对柱构件进行抗震加固的前提是具有较为精确的应力 - 应变本构关系, 国内外关于 FRP 约束混凝土单轴受压应力 - 应变关系的研究工作已开展较多,

提出了较多 FRP 约束混凝土应力 - 应变本构模型, 这些模型可分为设计模型和分析模型两类^[2-3]: (1) 设计模型是基于试验结果的回归分析, 通过定义应力 - 应变曲线上的一些特征点来确定整个模型, 得到的本构关系可方便地应用于设计中, 但无法揭示纵向应变与横向应变的关系, 已有模型大都属于此类; (2) 分析模型将 FRP 和混凝土区分对待, 根据体积变形或泊松比的变化规律来考虑 FRP 对混凝土的约束作用, 从而确定约束混凝土的应力 - 应变关系. 分析模型较精确, 可得到约束混凝土的横向应变, 适合构件的非线

收稿日期: 2009 - 07 - 06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50408010); 地震行业科技专项基金资助项目(200808073).

作者简介: 王震宇(1971—), 男, 博士, 副教授.

性分析,但目前这类模型还较少.陶忠等^[4]以 Sargin 单轴本构作为主动约束应力 - 应变方程,对已有约束混凝土体积应变计算模型进行了修正,建立了轴向应变 - 横向应变的关系;Spoelstra 等^[5]提出了适用于 FRP 及箍筋的侧向约束分析模型,采用了 Mander 提出的箍筋约束混凝土应力 - 应变关系作为主动约束方程;敬登虎^[6]对 FRP 约束混凝土已有峰值应力和应变计算模型进行了比较分析,经回归分析提出了新的峰值应力和应变计算公式,采用 Spoelstra 的分析模型方法全过程计算 FRP 约束混凝土应力 - 应变关系;Teng J G 等^[3]收集了大量已有 FRP 约束混凝土的试验数据,建立了 FRP 约束混凝土极限强度和极限应变的数据库,并回归建立了计算公式,对轴向应变 - 横向应变关系也进行了回归分析,得到了相应的计算公式,采用 Mander 本构关系作为主动约束模型,全过程计算得到了 FRP 约束混凝土的应力 - 应变关系曲线;吴刚等^[7]在试验研究的基础上,比较分析了 FRP、箍筋及钢管约束混凝土圆柱性能的差异,建议了确定 FRP 约束混凝土圆柱无软化段时应力 - 应变关系的三折线模型.

已有本构模型大都基于各自的试验数据,由于试验材料及方法的不同,大多数模型都只与自己的试验数据吻合较好,真正能涵盖且符合大多数试验结果的本构模型还不多.本文首先对国内外大量 FRP 约束混凝土圆柱单轴受压的试验结果进行了收集与分析,在此基础上,首次提出了采用八面体强度准则计算 FRP 约束混凝土圆柱极限抗压强度的方法;通过对极限压应变和侧向约束应力的回归分析,建立了 FRP 约束混凝土极限压应变的计算公式;对试验曲线的轴向压应变与横向应变进行回归分析,得到了轴向 - 横向应变关系的计算公式;最后采用 Mander 模型作为主动约束方程,建立了 FRP 约束混凝土圆柱应力 - 应变本构关系的分析模型.

1 约束后极限强度与极限应变

FRP 约束混凝土圆柱大都为强约束情况,此时其应力 - 应变关系没有软化段,本文建立的分析模型即为 FRP 强约束时的本构模型.对于强弱约束的界定,采用美国混凝土协会 (ACI 440. 2R - 08) 建议^[8],以 FRP 侧向约束强度 f_l 与未约束混凝土峰值强度 f'_{c0} 之比大于 0. 08 时定义为强约束.侧向约束强度指 FRP 材料对混凝土所能提供的侧向约束力,其数学表达式为

$$f_l = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{D} = \frac{2E_{frp}t_{frp}\varepsilon_{feu}}{D} \tag{1}$$

式中: f_{frp} 为 FRP 的极限抗拉强度; t_{frp} 为 FRP 的计算厚度; D 为被约束混凝土圆柱体的直径; E_{frp} 为 FRP 的弹性模量; ε_{feu} 为 FRP 的有效极限拉应变,其表达式为

$$\varepsilon_{feu} = \kappa_{\varepsilon}\varepsilon_{fu} \tag{2}$$

式中: ε_{fu} 为 FRP 的极限拉应变; κ_{ε} 为考虑混凝土开裂处应力集中等原因导致 FRP 过早断裂的有效折减系数,根据试验研究的结果, Lam and Teng^[2] 建议取 0. 586; Harries and Carey^[9] 建议取 0. 58; Carey and Harries^[10] 建议其值在 0. 57 ~ 0. 61,敬登虎^[6] 建议对 FRP 约束混凝土圆柱取 0. 65,本文在计算时采用 Lam and Teng 的建议,这一建议也被 ACI 440. 2R - 08 所采纳.

FRP 约束混凝土为三向受压状态,而多向应力状态下的混凝土强度是应力状态的函数.因此,混凝土强度的正确估计要通过考虑应力状态各种分量的相互作用来得到.本文为考虑混凝土三向受压状态时各个应力分量的影响,基于八面体强度理论建立了 FRP 约束混凝土极限强度的计算模型,其数学表达式为

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(f_{cc} + 2f_l), \tag{3}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3}(f_{cc} - f_l). \tag{4}$$

式中: σ_{oct}, τ_{oct} 分别为八面体正应力和剪应力; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为 3 个方向的主应力,其中 $\sigma_1 = f_{cc}$, $\sigma_2 = \sigma_3 = f_l$, f_{cc} 为 FRP 约束混凝土单轴受压时的极限强度, f_l 为侧向约束强度.本文基于收集到的国内外 FRP 约束混凝土圆柱轴向受压的试验数据,计算了所有试件破坏时的八面体正应力和剪应力,结果如图 1 所示,试验数据基本信息如表 1 所示.

由图 1 可知,各试件破坏时的八面体正应力与剪应力符合很好的线性关系,其关系式为

$$\frac{\tau_{oct}}{f_{c0}} = 0. 221 + 0. 706 \frac{\sigma_{oct}}{f_{c0}} \tag{5}$$

式中 f_{c0} 为未约束混凝土单轴受压时的峰值应力,由式(3)、(4) 可知,八面体正应力 σ_{oct} 和剪应力 τ_{oct} 均与 FRP 约束混凝土极限抗压强度 f_{cc} 和侧向约束强度 f_l 有关,因此式(5) 建立了具有明确力学意义的 FRP 约束混凝土极限抗压强度的计算方

法,实质上确定了 FRP 约束混凝土破坏准则的受压子午线.

表 1 FRP 约束混凝土圆柱试验数据

数据出处	试件个数	纤维类型	直径/mm	高度/mm
文献[11]	18	Carbon	152	305
文献[3]	30/14	Carbon/Glass	152	305
文献[12]	6/3	Carbon/Aramid	100	200
文献[13]	3/4	Carbon/Aramid	100	200
文献[14]	4	Carbon	150	300
文献[15]	3	Glass	102	204
文献[16]	2/3	Glass/Carbon	150	300
文献[17]	6	Carbon	150	600
文献[18]	1/1	Carbon/Glass	102	204
文献[19]	2/2	Carbon/Glass	152	610
文献[20]	3	Carbon	76	305
文献[21]	2	Carbon	200	600
文献[22]	24	Carbon	100	300
文献[4]	5	Carbon	150	300
文献[23]	3/3	Carbon/Aramid	100	300
文献[24]	5	Glass	356	1 524
文献[25]	5	Carbon	356	1 524
文献[26]	16	Carbon	150	300
文献[27]	9	Carbon	152.5	305
文献[28]	3/3	Glass/Carbon	152.4	435
文献[29]	9	Glass	152.5	305
文献[30]	4	Glass	152	300

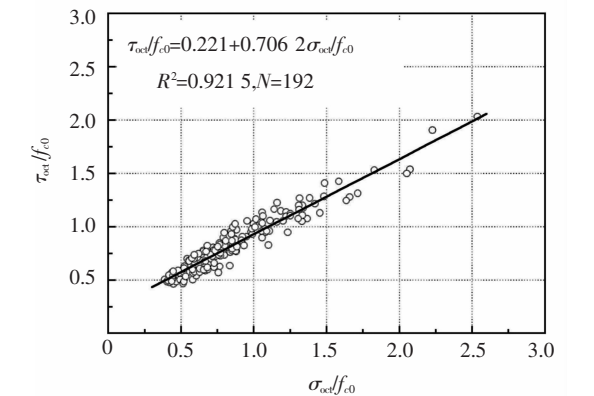


图 1 极限抗压强度的回归分析

FRP 约束混凝土圆柱的极限压应变与侧向约束强度 f_l 有关,已有研究者提出的极限压应变模型大都采用的表达形式为

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + k_2 \frac{f_l}{f_{c0}}. \tag{6}$$

式中: ε_{cc} 为 FRP 约束混凝土极限强度对应的极限压应变; ε_{c0} 为未约束混凝土的峰值应变; k_2 为应变提高系数. 现有的模型大都是对 k_2 进行修

正,但由于试验过程中应变的测量主要通过应变仪或者电阻应变片来测取,相对应力测量技术,应变的测量状态受外界影响较大,导致其精度有所降低,因此目前极限压应变计算结果的准确性都比较差^[1]. 实际上 FRP 存在约束效率的问题,随着 FRP 包裹层数的增加,其对混凝土极限应变的提高作用会趋于平缓,即 FRP 约束混凝土的极限压应变并不会随着侧向约束力的增大而一直线性增加,因此对 FRP 约束后圆柱的极限压应变采用式(6)的线性关系是不够准确的. 本文对收集到的极限压应变试验数据和侧向约束力,以曲线形式进行回归分析如图 2 所示,极限压应变为

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 32.738 \frac{f_l}{f_{c0}} - 18.455 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^2. \tag{7}$$

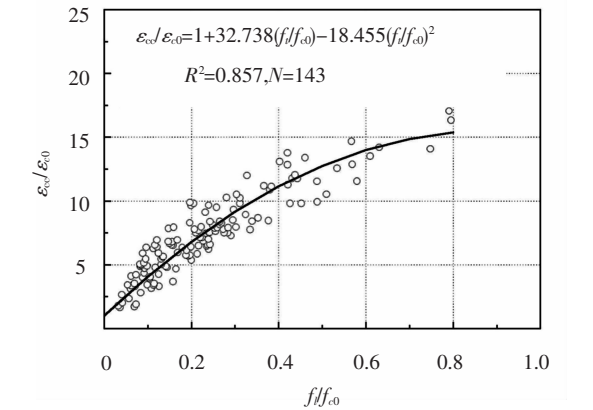


图 2 极限压应变的回归分析

由于收集的试验数据中有的未给出极限压应变的试验数据,因此在进行极限压应变的回归分析时,有效数据的个数为 143 个,少于极限强度试验数据. 与已有极限压应变计算方法相比,本文在回归分析时所用的试验数据较多,精度较好;而且可以看出,随着侧向约束强度的提高,FRP 约束混凝土极限压应变的提高幅度趋于平缓,更符合实际情况,本文极限压应变计算公式的适用范围是侧向约束强度与未约束混凝土峰值应力之比在 0.08 ~ 0.8.

2 轴向-横向应变的关系

一些学者对 FRP 约束混凝土在轴向受压过程中轴向-横向应变关系(割线泊松比 ν)的变化规律进行了研究^[3,7,31]. 有研究表明,在加载初始阶段,FRP 约束混凝土的 ν 在 0.2 左右,且保持恒定. 在这个阶段,约束混凝土表现为弹性且性能类似于未约束混凝土. 随着轴向应变的增加,混凝土由于内部微裂缝的发展, ν 开始显著增加,直到 FRP 的约束作用被完全激活,此后 ν 趋向于另一恒定值,直到 FRP 因

横向应变过大而拉断,此时的 v 称为 FRP 约束混凝土的极限泊松比 v_u ,其大小和 FRP 约束程度有关,约束作用越强越小,反之越大。

本文根据收集到的 FRP 约束混凝土应力 - 应变试验曲线,对其全过程的割线泊松比进行了研究,并对极限泊松比和 FRP 侧向约束刚度进行了回归分析,如图 3 所示,具体数学表达式为

$$v_u = 4.534 4 \left(\frac{E_l}{f_{c0}} \right)^{-0.614 3} \quad (8)$$

E_l 为 FRP 的侧向约束刚度

$$E_l = \frac{2E_{\text{frp}}t_{\text{frp}}}{D} \quad (9)$$

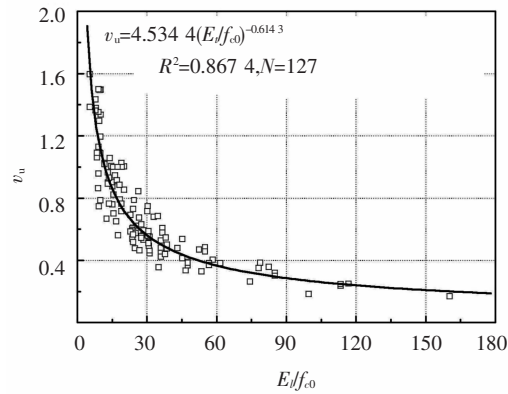


图3 极限压应变的回归分析

根据回归得到的极限泊松比,结合 FRP 约束混凝土轴向 - 横向应变关系的变化规律,本文提出了 FRP 约束混凝土圆柱轴向 - 横向应变的三折线模型:当轴向应变 ε_c 小于未约束混凝土峰值应变 ε_{c0} 时,泊松比等于 0.2;当 $\varepsilon_c > 2\varepsilon_{c0}$ 时,泊松比等于 v_u ;当 ε_c 在 ε_{c0} 和 $2\varepsilon_{c0}$ 之间时,横向应变由 $0.2\varepsilon_{c0}$ 线性地增加到 $2v_u\varepsilon_{c0}$ 。本文提出的轴向 - 横向应变的三折线模型与已有模型比较,如图 4 所示。由图中比较可知,文献[3]提出的模型及本文模型均与试验吻合较好,但文献[3]所提模型的计算公式较复杂,而本文模型为简化的三折线形式,方程形式简单,且同样具有较好的精度。

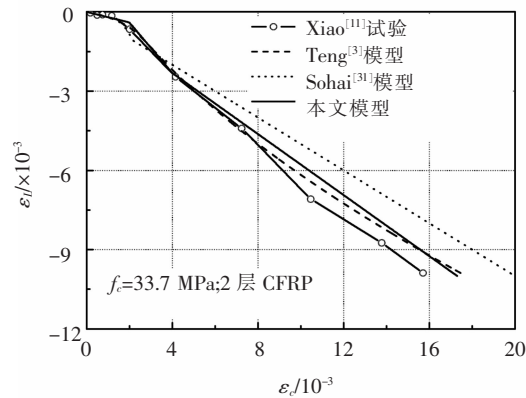


图4 本文模型与已有轴向 - 横向模型比较

3 应力 - 应变分析模型的计算步骤

FRP 对混凝土的约束作用为被动约束,即 FRP 对混凝土的约束应力是随轴向变形的增加而变化,被动约束是约束混凝土最常见的形式,而对被动约束混凝土力学性能的研究往往建立在主动约束混凝土的理论基础上。主动约束是指混凝土在侧向所受到的约束应力在轴向变形的过程中保持不变,对于 FRP 约束混凝土,在每个给定的侧向约束力下都可以认为是一个主动约束状态,可以利用主动约束本构关系得到一个主动约束下的应力和应变点,将每个给定侧向约束应力下得到的应力和应变点连接起来,可得到 FRP 被动约束混凝土的应力 - 应变关系,如图 5 所示。本文采用 Mander^[32] 提出的箍筋约束混凝土本构方程作为给定侧向约束力下 FRP 约束混凝土圆柱的主动约束模型,这是因为箍筋屈服后,其侧向约束应力将维持不变,符合主动约束状态,其表达式为

$$\sigma_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (10)$$

式中: $x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}$, $r = \frac{E_c}{E_c - E_{\text{sec}}}$, $E_c = 4\,730 \sqrt{f_c}$ (MPa),

$E_{\text{sec}} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$ 为 FRP 约束混凝土极限强度, E_c 为混凝土弹性模量, E_{sec} 为混凝土达到极限强度 f_{cc} 时的割线模量,其余符号意义与前文相同。

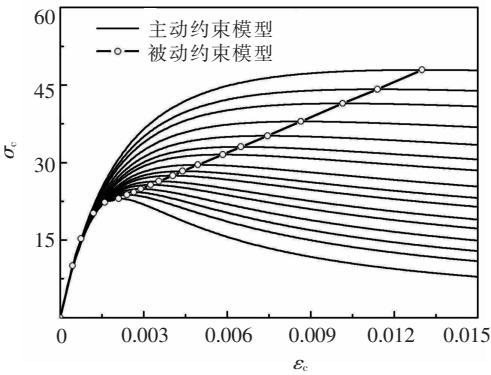


图5 分析模型计算示意图

由前述提出的极限抗压强度、极限应变及轴向 - 横向应变关系的计算公式,基于 Mander 主动约束本构方程,采用增量分析的数值方法,全过程计算了 FRP 约束混凝土圆柱的应力 - 应变关系曲线,具体计算步骤如下:

- 1) 给定一个轴向应变,通过轴向应变与横向应变之间的关系,得到该轴向应变对应的横向应变;
- 2) 由式(1)计算该横向应变下 FRP 对混凝土

土提供的侧向约束强度 f_l ;

3) 将 f_l 代入式(5)、(7),计算当前侧向约束强度所对应的极限抗压强度 f_{cc} 和极限压应变 ε_{cc} ;

4) 将 f_{cc} 和 ε_{cc} 代入式(10)的 Mander 主动约束方程,计算当前轴向应变对应的轴向应力,得到 FRP 约束混凝土应力-应变关系曲线上的一个点;

5) 给定轴向应变的增量,重复上述步骤,得到完整的 FRP 约束混凝土应力-应变关系曲线.

4 模型验证

4.1 本文模型计算结果与试验结果的比较验证

为验证本文所提模型的精度,对收集到的单轴受压应力-应变试验结果进行了模拟,试验结果与模型预测结果的比较如图 6 所示,限于篇幅这里仅列出部分比较结果.

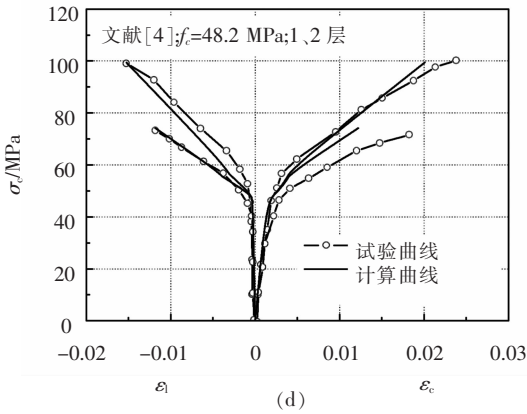
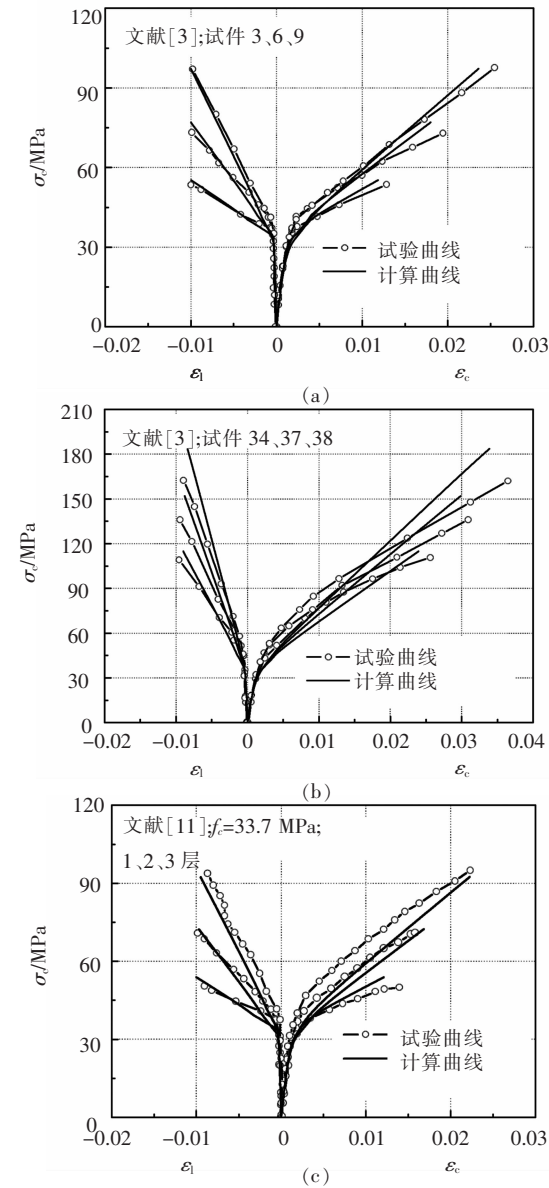


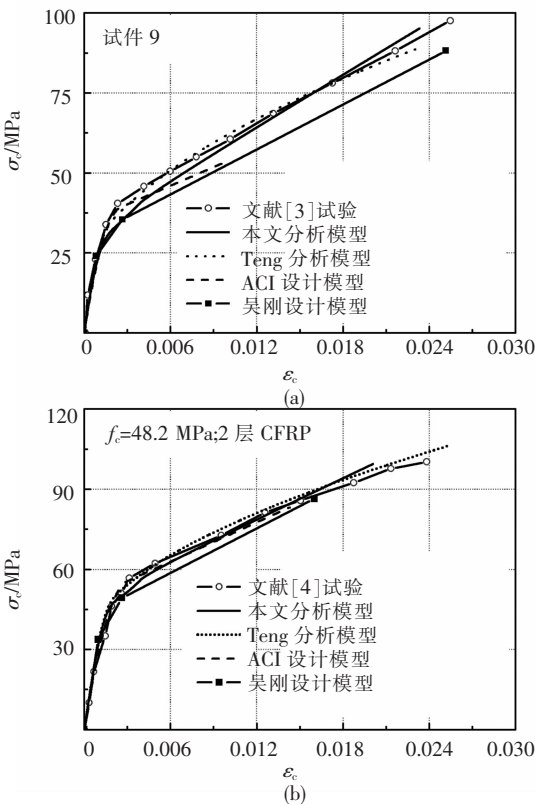
图 6 本文分析模型计算结果与试验结果的比较

本文模型计算的轴向应力-横向应变关系与试验曲线基本吻合,精度较高;轴向应力-轴向应变关系的计算曲线除个别试件误差稍大外,大部分计算曲线与试验曲线吻合较好,趋势基本一致,极限强度和极限应变的预测误差较小,说明本文所提应力-应变分析模型的正确性.

4.2 本文模型与已有本构模型的比较

为了进一步验证本文分析模型的适用性,将本文分析模型、试验结果和具有代表性的其它分析及设计模型进行了对比分析,部分比较结果如图 7 所示.

本文模型计算结果的整体趋势与试验数据吻合较好,极限强度和极限应变计算结果与试验的误差最小;文献[2]分析模型计算曲线和试验曲线趋势吻合也较好,但是其极限强度与极限应变的预测结果与试验结果相比偏小;ACI 设计模型



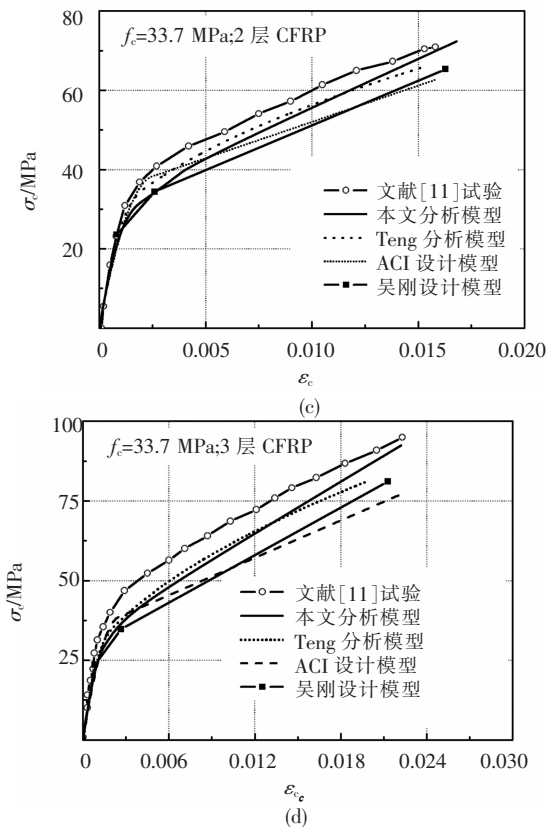


图7 本文模型和已有模型比较

的计算曲线与试验曲线大致符合,但出于安全储备的考虑,其极限应变的计算结果小于试验数据;文献[7]提出的三折线设计模型计算曲线与文献[3]的试验误差较大,与文献[11]和文献[4]试验结果趋势一致,但极限强度的预测结果偏小。

5 结 论

- 1) 基于八面体强度准则提出的 FRP 约束混凝土圆柱极限抗压强度计算公式具有很好的精度,且力学意义更加明确的。
- 2) 为了与实际情况相符,在 FRP 约束混凝土圆柱极限压应变的计算公式中应考虑 FRP 的利用效率。
- 3) 本文建议的 FRP 约束混凝土圆柱泊松比计算方法,泊松比随着 FRP 包裹层数的不同而变化,较其他分析模型有所改进,且泊松比的计算相对简单。
- 4) 与试验结果及其他模型比较表明,本文建立的 FRP 约束混凝土圆柱应力-应变关系分析模型与大多数试验结果吻合较好,且比其他模型在极限强度和极限应变的预测上具有更好的精度,适用于准确模拟 FRP 约束混凝土圆柱的单轴受压性能。

参考文献:

[1] 腾锦光,陈建飞,史密斯 S T,等. FRP 加固混凝土

结构[M]. 李荣,腾锦光,顾磊,译. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

[2] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17:471-489.

[3] JIANG T, TENG J G. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete [J]. Engineering Structures, 2007, 29:2968-2986.

[4] 陶忠,高献,于清,等. FRP 约束混凝土的应力-应变关系[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 187-195.

[5] SPOELSTR M R. FRP-confined concrete model[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(3): 143-150.

[6] 敬登虎. FRP 约束混凝土的应力-应变模型及其在加固中的应用研究[D]. 南京:东南大学, 2006.

[7] 吴刚,吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 1-9.

[8] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440. 2R-08) [S]. ACI, 2008.

[9] HARRIES K A, CAREY S A. Shape and ‘Gap’ effects on the behavior of variably confined concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(6): 881-890.

[10] CAREY S A, HARRIES K. An axial behavior and modeling of small-, medium-, and large-scale circular sections confined with CFRP jackets [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(4): 596-604.

[11] XIAO Y, WU H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets[J]. Journal of Material Civil Engineering, ASCE, 2000, 12(2): 139-146.

[12] WATANABLE K, NAKAMURA H, HONDA T, et al. Confinement effect of FRP sheet on strength and ductility of concrete cylinders under uniaxial compression [C]//Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium. Sapporo, Japan: Japan Concrete Institute, 1997, 1:233-240.

[13] ROCHETTE P, LABOSSIERE P. Axial testing of rectangular column models confined with composites [J]. Journal of Composite Constructions, ASCE, 2000, 4(3): 129-136.

[14] MATTHYS S, TAERWE L, AUDENAERT K. Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping [C]//Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Con-

- crete Structures, SP - 188. Farmington, Michigan, USA: American Concrete Institute, 1999:217 - 229.
- [15] KSHIRSAGAR S, LOPEZ-ANIDO R A, GUPTA R K. Environmental aging of fiber-reinforced polymer-wrapped concrete cylinders[J]. ACI Material Journal, 2000, 97(6):703 - 712.
- [16] AIREE C, GETTU R, CASAS J R. Study of the compressive behavior of concrete confined by fiber reinforced composites[C]//Composites in Constructions, Proceedings of the International Conference. Lisse, The Netherlands: A A Balkema Publishers, 2001:239 - 243.
- [17] DIAS da SILVA V, SANTOS J M C. Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composites[C]//Composites in Constructions, Proceedings of the International Conference. Lisse, The Netherlands: A A Balkema Publishers, 2001:257 - 262.
- [18] MICELLI F, MYERS J J, MURTHY S. Effect of environmental cycles on concrete cylinders confined with FRP[C]//Composites in Constructions, Proceedings of the International Conference. Lisse, The Netherlands: A A Balkema Publishers, 2001:317 - 322.
- [19] PESSIKI S, HARRIES K A, KESTNER J T, *et al.* Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets[J]. Journal of Composite Constructions, ASCE, 2001, 5(4):237 - 245.
- [20] TOUTANJI H. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(3):397 - 404.
- [21] KAWASHIMA K, HOSHIKUMA M. A Model for Confinement Effect for Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets[R]. Nceer-Incede Workshop on Earthquake Engrg, Frontiers of Transp Fac, NCEER. Buffalo: State University of New York, 1997.
- [22] 顾祥林, 李玉鹏, 张伟平, 等. 碳纤维布约束混凝土单轴受压时的应力 - 应变关系[J]. 结构工程师, 2006, 22(2):50 - 56.
- [23] 贾明英, 程华. 碳纤维布 (CFRP) 加固混凝土圆柱约束效应的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(1):35 - 36.
- [24] JAFFRY S A D, SHEIKH S A. Concrete Filled Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Shells under Concentric Compression[R]. Toronto: University of Toronto, 2001.
- [25] CAIRNS S W, SHEIKH S A. Circular Concrete Columns Externally Reinforced with Pre-fabricated Carbon Polymer Shells[R]. Toronto: University of Toronto, 2001.
- [26] LORENZIS de L. A Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with FRP Composites[D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2001.
- [27] SHAHAWY M, MORMIRAN A, AMOLD T. Cyclic loading of spirally reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 31(6):471 - 480.
- [28] SAAFI M, TOUTANJI A H, LI Z. Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(4):500 - 509.
- [29] MIRMIRAN A, SHAHAWY M. behavior of concrete columns confined by fiber composites[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, 123(5):583 - 590.
- [30] NANNI A, BRADFORD N M. FRP jacketed concrete under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(2):115 - 124.
- [31] SAMDANI S. Analytical Study of FRP-confined Concrete Columns[D]. Toronto: Master of Applied Science in Civil Engineering, University of Toronto, 2003.
- [32] MANDER J B, PRIESTLEY M J N. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8):1805 - 1826.

(编辑 赵丽莹)