

文章编号:1673-2049(2019)06-0010-08

加筋混凝土梁延性系数计算方法

屈文俊, 刘传名, 朱 鹏

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 由于纤维增强复合材料(FRP)筋不存在屈服状态, 传统的延性系数计算方法不适用于FRP筋混凝土梁和混合配筋(钢筋+FRP筋)混凝土梁。为了提出一个相对完善的、统一的加筋混凝土梁截面延性计算方法, 在对既有各类加筋混凝土梁延性指标计算方法进行分析的基础上, 从抗震对结构延性的要求出发, 依据延性系数的定义与动力要求统一的原则, 推导得出了加筋混凝土结构延性系数-地震力降低系数(μC)关系式。依据等位移下的 μC 关系式, 提出了加筋混凝土梁延性系数的计算方法。通过对比延性系数计算值与既有试验值, 证明了该方法的有效性。对混凝土及钢筋强度、混凝土极限压应变、截面有效配筋率和FRP筋配筋刚度比等影响加筋混凝土梁延性的因素进行了参数化分析。结果表明: 加筋混凝土梁的延性随着混凝土强度和极限压应变的增加而提高, 随着钢筋强度、有效配筋率和FRP筋配筋刚度比的提高而降低。

关键词: 加筋混凝土梁; FRP筋; 延性系数; 配筋率

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

Calculation Method for Ductility Coefficient of Reinforced Concrete Beams

QU Wen-jun, LIU Chuan-ming, ZHU Peng

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Due to the fiber reinforced polymer (FRP) bars no yield state, the traditional ductility coefficient calculation method is not suitable for FRP reinforced concrete beams and hybrid reinforced (steel bars + FRP bars) concrete beams. In order to put forward a relatively perfect and unified method for calculating the ductility of reinforced concrete beams, the existing calculation methods of ductility coefficients of reinforced concrete beams were analyzed. According to the definition of ductility coefficient and the dynamic requirement, the formula of ductility coefficient-seismic force reduction coefficient (μC) relation of reinforced concrete structure was derived from the requirement of seismic resistance to ductility of structure. A method for calculating ductility coefficient of reinforced concrete beam was presented according to the formula of μC relation under equal displacement assumption. The effectiveness of the method was proved by comparing the calculated values with the experimental results. The factors affecting the ductility of reinforced concrete beams, such as the strength of concrete and reinforcement, the ultimate compressive strain of concrete, the effective reinforcement ratio and the ratio of reinforcement stiffness of FRP bars, were analyzed. The results show that the improvement of concrete strength and ultimate compressive strain is beneficial to the ductility of reinforced concrete beams, while the increase of reinforcement strength, effective reinforcement

收稿日期: 2018-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678430); 国家重点研发计划专项项目(2017YFC0703003)

作者简介: 屈文俊(1958-), 男, 河南辉县人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: quwenjun. tj@tongji. edu. cn.

ratio and FRP reinforcement stiffness ratio has adverse effects on the ductility of reinforced concrete beams.

Key words: reinforced concrete beam; FRP bar; ductility coefficient; reinforcement ratio

0 引言

加钢筋混凝土结构主要指钢筋混凝土结构、FRP 筋混凝土结构及混合配筋(钢筋+FRP 筋)混凝土结构。由于 FRP 筋为线弹性材料,传统的延性系数计算方法不适用于配置 FRP 筋的混凝土梁。Leung 等^[1]、Refai 等^[2]、黄海群^[3]以及葛文杰^[4]对 3 类加钢筋混凝土梁受弯性能进行了试验研究,根据试验现象分析了加钢筋混凝土梁的延性性能,发现加钢筋混凝土梁的延性会随着 FRP 筋的增多而有一定程度的下降。在试验研究的基础上,Naaman 等^[5]、Spadea 等^[6]、Tan^[7]、徐泰^[8]从能量的角度,Abdelrahman 等^[9]、Zou^[10]、Mufti 等^[11]、Aiello 等^[12]、Lau 等^[13]从变形的角度提出了各自的定义和评价 FRP 筋混凝土梁延性的方法,但这些方法存在以下 3 个方面的问题:①各方法的计算结果不一致;②与原始的钢筋混凝土梁延性指标不匹配;③无法用钢筋混凝土梁截面允许的延性指标统一评价加钢筋混凝土梁截面的延性。鉴于此,本文在对各类延性指标计算方法进行分析的基础上,依据延性系数的定义与动力要求统一的原则,从抗震对结构延性的要求出发,推导得出一个统一的梁截面延性计算方法。

1 结构(构件、截面)的延性

延性是指结构、构件、截面以及材料在破坏前,承载能力没有明显下降的情况下所具有的非弹性变形能力^[14]。为评价钢筋混凝土梁的延性,定义了延性系数。

1.1 钢筋混凝土梁

一般情况下,钢筋混凝土梁的延性大小采用量纲一的延性系数 μ 度量,即

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1)$$

式中: δ 可以定义为与变形有关的各种参量,如挠度、应变、截面曲率、转角或位移等; δ_u 为构件的极限变形; δ_y 为构件的初始屈服变形。

目前,常用的钢筋混凝土梁延性度量法主要有 2 种:基于弯矩-曲率($M-\varphi$)曲线定义的曲率延性系数 μ_φ 和基于荷载-位移($P-\Delta$)曲线定义的位移延性系数 μ_Δ 。通常情况下,混凝土梁最大弯矩处截面的

曲率延性系数大于梁位移延性系数。钢筋混凝土梁的 $P-\Delta$ 曲线及截面 $M-\varphi$ 曲线见图 1,其中, Δ_{cr} , Δ_y , Δ_u 分别为开裂挠度、屈服挠度和极限挠度, P_{cr} , P_y , P_u 分别为开裂荷载、屈服荷载和极限荷载, φ_{cr} , φ_y , φ_u 分别为开裂曲率、屈服曲率和极限曲率, M_{cr} , M_y , M_u 分别为开裂弯矩、屈服弯矩和极限弯矩。

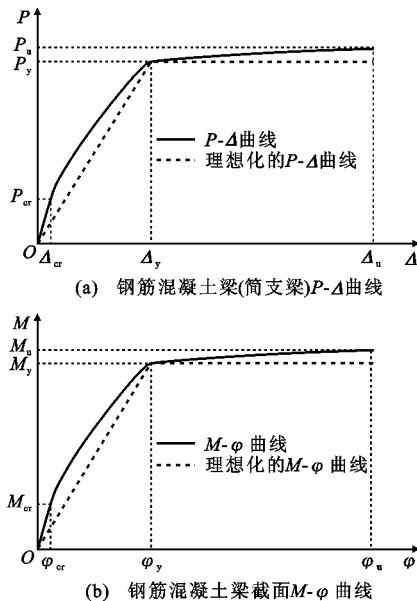


图 1 钢筋混凝土梁的 $P-\Delta$ 曲线及截面 $M-\varphi$ 曲线

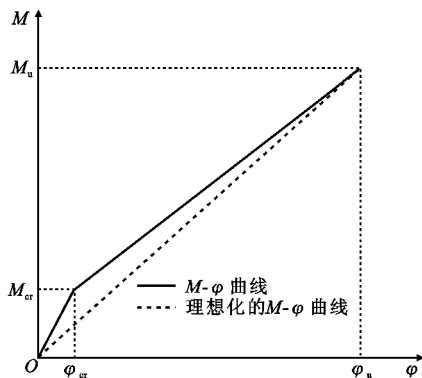
Fig. 1 $P-\Delta$ Curves and Section $M-\varphi$ Curves of Reinforced Concrete Beam

1.2 FRP 筋混凝土梁

由于 FRP 筋不存在屈服状态,FRP 筋混凝土梁在混凝土开裂后 $M-\varphi$ 曲线为线弹性,因此传统钢筋混凝土梁延性度量的方法对 FRP 筋混凝土梁不能适用。FRP 筋混凝土梁截面弯矩-曲率关系如图 2 所示。

早期研究中,Park 等^[15-16]采用人为定义 FRP 筋混凝土梁“名义屈服挠度”、“名义屈服曲率”的方法,直接应用传统“延性系数”来对 FRP 筋混凝土梁的延性性能进行分析。由于“名义屈服挠度”或“名义屈服曲率”是人为定义的,因此所计算的 FRP 筋混凝土梁的延性指标差异较大。

近年来,学者们尝试从能量或变形的角度入手,研究度量 FRP 筋混凝土梁延性的新方法。Naaman 等^[5]考虑弹性性能和非弹性性能之间的关系,采用能量比的形式定义 FRP 筋混凝土梁的延性 $\mu_{en} =$

图2 FRP筋混凝土梁截面 $M-\varphi$ 曲线Fig. 2 Section $M-\varphi$ Curves of FRP Reinforced Concrete Beam

$E_{\text{tot}}/E_{\text{ela}}$, 其中 E_{tot} 为构件的总能量, 即荷载-变形曲线所包围的总面积, E_{ela} 为构件破坏时释放的弹性能, 即荷载-变形曲线上卸载曲线所包围的面积。Spadea 等^[6] 建议能量延性系数 $\mu_E = E_{\text{tot}}/E_{0.75\text{pu}}$, 其中 $E_{0.75\text{pu}}$ 为荷载达到 75% 极限荷载时荷载-变形曲线所包围的总面积; 徐秦^[8] 定义 FRP 筋混凝土梁的延性比为: 在保持结构或材料基本承载能力的情况下, 达到极限状态时所吸收的总能量 E_u 和达到正常使用极限状态时所吸收的总能量 E_{fs} 的比值, 并取 FRP 筋应变 $\epsilon_{fs} = 0.002$ 时为梁的正常使用极限状态, 即延性比 $\beta_E = E_u/E_{fs}$ 。

基于变形概念的延性系数最早由 Abdelrahman 等^[9] 提出: 变形延性系数 Δ_u 由极限状态时的挠度 Δ_u 与构件在未开裂状态下对应于极限荷载的等效挠度 Δ_l 之比确定, 即 $\Delta_u = \Delta_u/\Delta_l$ 。Zou^[10] 对该理论进行了进一步研究, 并提出了相应的变形延性系数计算公式。Mufti 等^[11] 在综合考虑 FRP 筋混凝土梁正常使用状态下和极限状态下的弯矩及变形的基础上, 提出了综合性能系数 J 的概念, 该系数后来被加拿大《公路桥梁设计规范》^[17] 采用, 具体表达式为

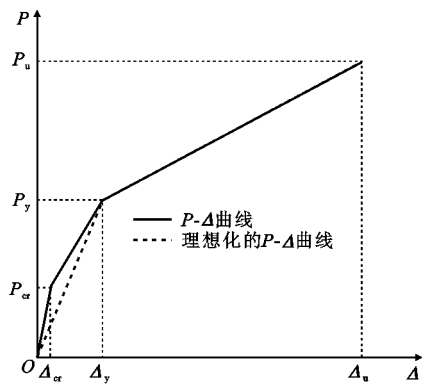
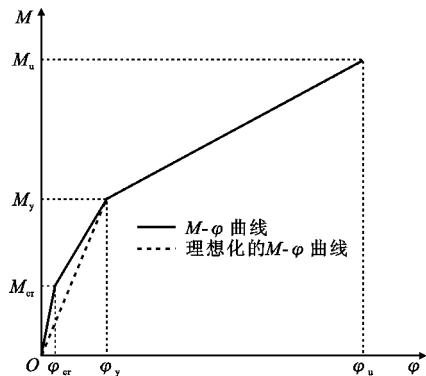
$$J = SD = \frac{M_u}{M_{0.001}} \frac{\varphi_u}{\varphi_{0.001}} \quad (2)$$

式中: S 为承载力系数; D 为变形系数; $M_{0.001}$, $\varphi_{0.001}$ 分别为对应受压边缘混凝土应变达到 0.001 时的弯矩和曲率。

冯鹏等^[18] 在对比分析变形系数、承载力系数、变形能系数以及综合性能系数的基础上, 选择了综合性能系数作为评价指标。

1.3 混合配筋混凝土梁

混合配筋混凝土梁的 $P-\Delta$ 曲线及截面 $M-\varphi$ 曲线见图 3。

(a) 混合配筋混凝土梁(简支梁) $P-\Delta$ 曲线(b) 混合配筋混凝土梁截面 $M-\varphi$ 曲线图3 混合配筋混凝土梁的 $P-\Delta$ 曲线及截面 $M-\varphi$ 曲线Fig. 3 $P-\Delta$ Curves and Section $M-\varphi$ Curves of Hybrid Reinforced Concrete Beam

尽管简化的混合配筋混凝土梁 $M-\varphi$ 曲线有一个对应于钢筋屈服的转折点, 但在钢筋屈服后, 弯矩随着曲率的增加亦有较大的增长, 故钢筋混凝土梁的延性计算公式亦不适用于混合配筋混凝土梁。为此, 学者们借鉴 FRP 筋混凝土梁延性分析的思路, 从耗能和变形 2 个角度来分析混合配筋混凝土梁的延性。

Tan^[7] 从能量的角度出发, 提出混合配筋混凝土梁的延性指数 $\mu_A = A_{0.8P}/A_y$ 和 $\mu_E = (E_{\text{tot}}/E_{\text{ela}} + 1)/2$, $A_{0.8P}$ 为荷载超过极限荷载后降到 80% 最大荷载时荷载-挠度曲线所包围的面积, A_y 为荷载-挠度曲线中屈服荷载下所包含的面积。

Aiello 等^[12] 从变形的角度出发, 提出采用变形系数来评价混合配筋混凝土梁的延性, 变形系数定义为: 极限状态构件吸收的能量与特定状态 (限定曲率为 $0.005/d$, d 为截面有效高度) 时吸收的能量之比。

Lau 等^[13] 通过极限位移比 $\beta = \Delta_u/L$ 和极限位移延性系数 $\mu = \Delta_u/\Delta_y$ 两个参数对混合配筋混凝土梁的弯曲延性进行分析。试验结果表明, 提高配筋率会使得梁在极限位移不增加的情况下屈服位移减

小,进而使得极限位移延性系数增加;此外,由于屈服位移在理论上难以计算,因此推荐使用极限位移比来评估混合配筋混凝土梁的延性。

综上分析,基于能量的延性系数实质上是将双线性理想弹塑性模型用能量形式表达后推导得到,而基于变形的延性系数实质上是通过定义一个名义屈服点而继续使用钢筋混凝土结构所采用的延性概念。上述 2 类延性指标虽然可以用来比较不同加筋混凝土梁的延性性能,但很难定量地评价其延性。因此,需要一种既能定性又能定量评估加筋混凝土梁延性的方法。

2 加钢筋混凝土梁截面的延性系数计算方法

对结构延性要求的目的是:①承受动力荷载时,保证结构在发生破坏前有能力吸收一定的能量,使其在遭受意外冲击或动力荷载时,不会因过大的能量输入而使结构破坏;②承受非动力荷载时,使结构在破坏前有明显的变形征兆,防止突然破坏。

抵抗动力荷载时,结构延性要求是一个结构安全问题:常遇荷载下,靠结构的抗力来抵抗;偶然的动力荷载作用下,靠塑性变形耗散能量来抵抗。

在各国建筑结构抗震规范中,都明确或隐含地规定了钢筋混凝土梁截面的延性指标要求。在抗震设计方面,结构位移延性系数的要求是根据弹性反应惯性荷载与规范规定的静力设计荷载的比值 C (地震力降低系数)来估算的。

2.1 钢筋混凝土结构 μ - C 关系

钢筋混凝土梁的 P - Δ 曲线及截面 M - φ 曲线如图 1 所示,假定结构为理想弹塑性体。根据弹性结构与弹塑性结构在动力荷载作用下最大位移相等的假定[图 4(a)],可以推得

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{P_e}{P_p} = C \quad (3)$$

即

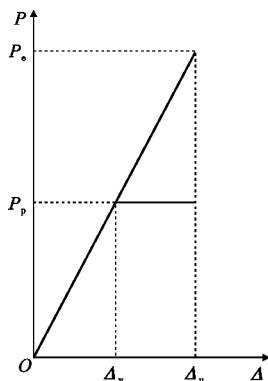
$$\mu = C \quad (4)$$

式中: P_e 为弹性反应惯性荷载,即设防烈度弹性反应荷载; P_p 为静力设计荷载,即设计地震力。

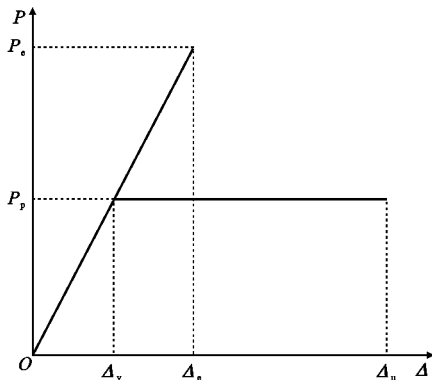
根据等能量的假定(弹性体系在最大位移时所储存的势能与弹塑性体系在最大位移时所储存的势能相等)[图 4(b)],可以推得

$$\frac{1}{2} \Delta_e P_e = \frac{1}{2} \Delta_y P_p + (\Delta_u - \Delta_y) P_p \quad (5)$$

整理得



(a) 最大挠度相等的反应



(b) 最大势能相等的反应

图 4 钢筋混凝土结构弹性与塑性结构的假定反应

Fig. 4 Elastic and Plastic Responses of Reinforced Concrete Structures

$$\mu = \frac{C^2 + 1}{2} \quad (6)$$

式中: Δ_e 为弹性反应挠度。

2.2 混合配筋混凝土结构 μ - C 关系

混合配筋混凝土梁的 P - Δ 曲线及截面 M - φ 曲线近似为双折线,如图 3 所示。根据弹性结构与弹塑性结构在动力荷载作用下最大位移相等的假定[图 5(a)],可以推得

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{P_e}{P_y} = C \frac{P_u}{P_y} \quad (7)$$

根据等能量的假定[图 5(b)],可以推得

$$\frac{1}{2} \Delta_e P_e = \frac{1}{2} \Delta_y P_y + \frac{1}{2} (\Delta_u - \Delta_y) (P_y + P_u) \quad (8)$$

整理得

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = (1 + C^2 \frac{P_u}{P_y}) / (1 + \frac{P_y}{P_u}) \quad (9)$$

2.3 FRP 筋混凝土结构 μ - C 关系

FRP 筋混凝土梁由于混凝土的塑性表现,其截面的 M - φ 曲线有一定的塑性表现,但一般近似地假定为线性的,如图 2 所示。对于弹性结构,其抗震设计就应以弹性反应来进行计算,即用基本烈度对应的地震动峰值进行结构的抗震计算,也就是说不考

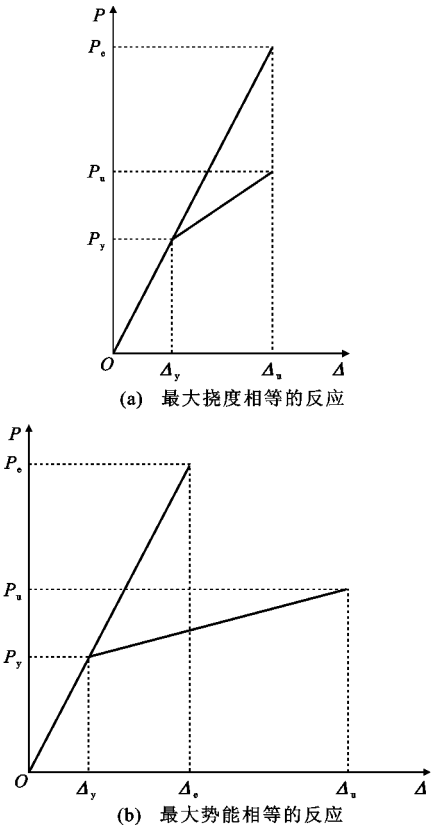


图 5 混合配筋混凝土结构弹性与塑性结构假定反应

Fig. 5 Elastic and Plastic Responses of Hybrid Reinforced Concrete Structures

考虑地震力降低系数 C , 求解截面延性系数就不存在意义。

2.4 抗震结构中 μ - C 的合理取值

Blume 通过绘制等位移下 μ - C 关系曲线和等能量下 μ - C 关系曲线, 并与 Clough 通过对单自由度体系的动力分析所得出的结果进行对比分析, 认为等能量下 μ - C 关系曲线可能是一条上边界线, 而等位移下 μ - C 关系曲线则更加贴合实际。

中国现行规范利用 45 个城镇的地震危险性分析得出烈度服从极值 III 型分布, 定义基本烈度(中震, 设防烈度)对应的超越概率为 10%, 小震对应的众值烈度超越概率为 63%。基本烈度与小震之间的差值为 1.55 度, 众值烈度与基本烈度对应的地震动峰值之比为 $1/3^{[19]}$, 即 $C=3.0=\mu$ 。

现行规范要求以小震对应的众值烈度为结构强度验算的标准, 即其中隐含意义为: 对不同类型建筑结构(包含混凝土结构)统一取 $C=3.0$, 即钢筋混凝土结构需满足 $\mu \geq 3.0$ 的延性需求。

世界各国规范对 C 取用了 1.25~8.5 范围内不同的数值^[20], 图 6 用经过模型化了的地震力-水平位移关系示意性地表示了这种设计地震力-延性

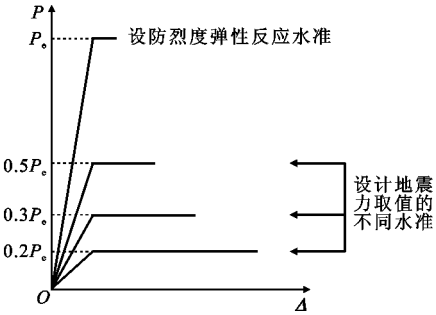


图 6 不同设计地震力取值水准下模型化 P - Δ 关系

Fig. 6 Modeling P - Δ Relation Under Different Design Seismic Force Levelings

关系。在抗震结构中, 取用等位移下 μ - C 关系是可以接受的。

2.5 梁截面延性系数计算方法推荐

取等位移下的 μ - C 关系式, 见公式(4)和公式(7)。由于 C 值为结构动力计算的要求, 为了与传统表达式统一, 取

$$\mu' = \frac{\Delta_u P_y}{\Delta_y P_u} \geq C \tag{10}$$

扩展到梁截面, 取梁截面的延性系数为

$$\mu = \frac{\varphi_u M_y}{\varphi_y M_u} \tag{11}$$

公式(11)适合于所有加钢筋混凝土梁, 对于钢筋混凝土梁, 公式(11)就转变为 $\mu = \varphi_u / \varphi_y$, 对于纯 FRP 筋混凝土梁, $\mu=1$ 。

3 加钢筋混凝土梁截面延性系数影响因素分析

图 7 为单筋矩形截面(适筋梁)受拉筋在钢筋屈服状态和极限状态时的截面应变及应力分布情况, 其中, ϵ_s 为纵筋应变, f_t 为 FRP 筋应力, ξ 为截面相对受压区高度, f_{ty} 为 FRP 筋允许拉应力, ϵ_c 为受压区边缘最大压应变。

参考钢筋混凝土梁的截面曲率计算方法, 结合现有加钢筋混凝土梁抗弯计算理论研究成果^[21], 由平截面假定, 可求得加钢筋混凝土梁的屈服曲率 φ_y 和极限曲率 φ_u 为

$$\varphi_y = \frac{\epsilon_y}{h_0 - x_y} = \frac{f_y}{(1 - \xi_y) E_s h_0} \tag{12}$$

$$\varphi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{x_u} = \frac{\epsilon_{cu}}{\xi_u h_0} \tag{13}$$

$$\xi_y = \sqrt{(\rho_{eq, E} \alpha_E)^2 + 2 \rho_{eq, E} \alpha_E} - \rho_{eq, E} \alpha_E \tag{14}$$

$$\xi_u = \frac{x}{\beta_1 h_0} = \frac{x_u}{h_0} = \frac{A - B + \sqrt{(A - B)^2 + 4 \beta_1 B}}{2 \beta_1} \tag{15}$$

式中: x_u 为截面中和轴高度; x 为截面受压区高度;

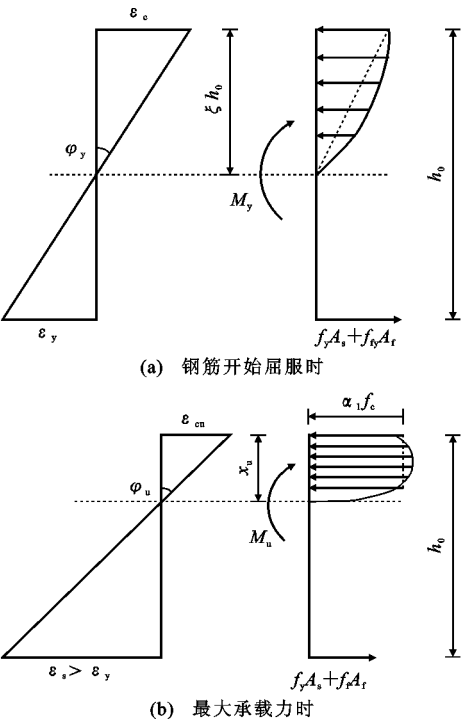


图 7 适筋梁截面钢筋屈服和极限状态下截面应力-应变分布

Fig. 7 Stress-strain Distribution of Section Under Yield and Limit State of Reinforced Beams

ϵ_y 为钢筋屈服应变; f_y 为钢筋屈服强度; h_0 为截面有效高度; E_s 为钢筋弹性模量; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变; $\rho_{eq,E}$ 为按照等刚度原则代换的有效配筋率, $\rho_{eq,E} = \rho_s + \rho_f E_f / E_s$, E_f 为相应 FRP 筋的弹性模量, $\rho_s = A_s / (bh_0)$, A_s 为截面受拉区钢筋面积; $\rho_f = A_f / (bh_0)$, A_f 为截面受压区 FRP 筋面积, b 为截面宽度; $A = f_y \rho_s / (\alpha_1 f_c)$, α_1 为系数, f_c 为混凝土棱柱体轴心抗压强度; $B = \epsilon_{cu} E_f \rho_f / (\alpha_1 f_c)$; β_1 为系数; α_E 为钢筋与混凝土弹性模量之比。

为验证推荐的延性系数适用性,表 1 给出了已有试验 34 根加钢筋混凝土梁截面延性系数计算值。

由表 1 可以看出:本文推荐的延性系数均随 FRP 筋配筋刚度比的减少而增加,这与已有加钢筋混凝土梁延性研究成果一致,同时将所计算的延性系数指标与试验中各加钢筋混凝土梁破坏现象相比较,证明了本文推荐的延性系数可以有效评估加钢筋混凝土梁的延性性能。

加钢筋混凝土受弯梁的破坏会随着截面内受拉区 FRP 筋配筋刚度比 $[A_f E_f / (A_f E_f + A_s E_s)]$ 的变化而表现出亲塑性或亲脆性的特点。本文对具有相同尺寸 (200 mm×400 mm) 的加钢筋混凝土适筋(单筋)梁进行变参数延性分析,从混凝土强度、钢筋强度、有

表 1 试验梁延性系数计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Ductility Coefficient of Test Beams

数据来源	试件编号	$\frac{A_f E_f}{A_f E_f + A_s E_s}$	$\frac{\rho_{eq,E}}{10^{-3}}$	$\frac{\varphi_y}{10^{-5}}$	$\frac{\varphi_u}{10^{-5}}$	μ
文献[1]	L0	0.000 0	8.06	2.45	15.62	6.37
	L2	0.156 0	8.56	2.22	8.84	2.77
	L5	0.217 0	9.23	2.25	7.88	2.36
	H2	0.156 0	8.56	2.17	12.27	3.20
	H5	0.217 0	9.23	2.20	10.72	2.63
文献[13]	G1.0-T 0.7-A90	0.238 0	8.68	1.27	3.93	2.11
	G0.6-T 1.0-A90	0.104 0	11.53	1.20	4.20	2.76
	G0.3-MD 1.0-A90	0.059 3	10.98	0.77	5.90	5.28
	MD1.3-A90	0.000 0	13.12	0.78	6.73	8.65
	MD2.1-A90	0.000 0	20.66	0.88	5.14	5.85
	T0.2-A135	0.000 0	2.33	0.79	22.75	28.70
文献[22]	HCBS1	0.000 0	8.88	2.46	46.39	18.90
	HCBC2	0.049 0	42.21	4.06	10.13	2.33
	HCBC3	0.111 0	35.63	3.84	10.62	2.32
	HCBC4	0.263 0	25.23	3.47	11.28	2.12
	HCBC5	0.457 0	18.66	3.22	11.53	1.81
文献[12]	A1	0.177 0	5.01	1.83	13.90	3.44
	A2	0.281 0	5.74	1.86	11.11	2.50
	A3	0.000 3	9.28	1.99	17.17	8.59
	B1	0.000 0	8.61	1.83	17.21	9.42
	C1	0.683 0	12.10	1.94	5.56	1.41
文献[3]	S1	0.000 0	11.48	1.13	6.52	5.80
	GF1	0.201 0	7.18	1.04	5.78	3.05
	GF2	0.288 0	7.23	1.05	5.27	2.54
	GF3	0.062 0	10.98	1.13	5.91	4.17
	GF4	0.124 0	11.80	1.14	4.98	3.18
文献[2]	B3	0.200 0	5.00	1.35	8.01	2.98
	C1	0.390 0	4.59	1.35	6.88	2.04
	C2	0.308 0	5.82	1.39	6.53	2.25
	C3	0.200 0	8.96	1.48	5.73	2.48
文献[4]	FS1	0.227 0	7.75	1.02	5.21	2.76
	FS2	0.164 0	8.96	1.04	5.21	3.10
	FS3	0.115 0	10.17	1.06	5.22	3.42
	S1	0.000 0	14.99	1.14	5.25	4.60

效配筋率 $\rho_{eq,E}$ 和混凝土极限压应变 4 个角度,探究影响加钢筋混凝土梁延性的主要因素。

如图 8 所示,延性系数随 FRP 筋配筋刚度比的

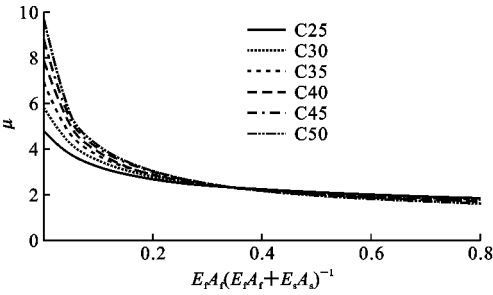


图 8 混凝土强度对截面延性的影响

Fig. 8 Effect of Concrete Strength on Section Ductility

增大而减小;当 FRP 筋配筋刚度比小于 0.2 时,混凝土强度对截面延性影响较为显著。对于 C25~C50 混凝土,混凝土强度越低,延性系数越小。

如图 9 所示,延性系数随钢筋强度的增加而减小,且 FRP 筋配筋刚度比越小,钢筋强度对截面延性的影响越大。

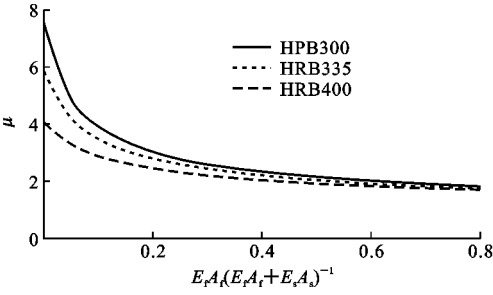


图 9 钢筋强度对截面延性的影响

Fig. 9 Effect of Steel Bar Strength on Section Ductility

如图 10 所示,有效配筋率 $\rho_{eq,E}$ 对截面延性有显著影响,有效配筋率 $\rho_{eq,E}$ 越大,截面延性越小。FRP 筋配筋刚度比越小,有效配筋率对截面延性的影响越显著。

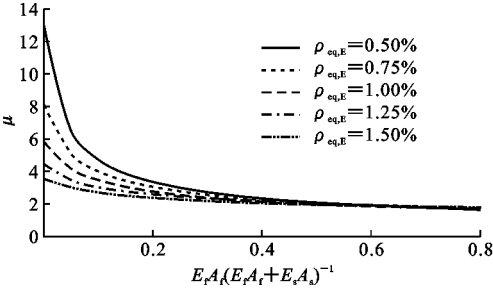


图 10 有效配筋率对截面延性的影响

Fig. 10 Effect of Effective Reinforcement Ratio on Section Ductility

如图 11 所示,截面延性随着混凝土极限压应变的增加而增加,这与现有加筋混凝土梁延性研究成果一致。相较其他影响因素,混凝土极限压应变对截面延性的影响不大。

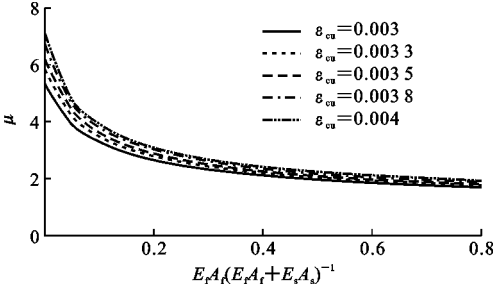


图 11 混凝土极限压应变对截面延性的影响

Fig. 11 Effect of Ultimate Compressive Strain of Concrete on Section Ductility

4 结 语

(1)由于 FRP 筋的线弹性材性,传统钢筋混凝土梁延性度量方法不适用于 FRP 筋混凝土梁和混合配筋混凝土梁。

(2)根据抗震对结构的延性要求,得出了加筋混凝土结构 μ - C 关系式。根据等位移下的 μ - C 关系,给出了结构(截面)延性系数的计算方法。计算值与试验值的对比证明了计算方法的有效性。

(3)影响加筋混凝土梁延性的因素有:混凝土及钢筋强度,混凝土极限压应变,截面有效配筋率 $\rho_{eq,E}$ 和 FRP 筋配筋刚度比。加筋混凝土梁的延性随着混凝土强度和极限压应变的增加而提高,但钢筋强度、有效配筋率 $\rho_{eq,E}$ 和 FRP 筋配筋刚度比的提高对截面延性有不利的影

参考文献:

References:

[1] LEUNG H Y, BALENDRAN R V. Flexural Behaviour of Concrete Beams Internally Reinforced with GFRP Rods and Steel Rebars[J]. Structural Survey, 2003, 21(4): 146-157.

[2] REFAI A E, ABED F, AL-RAHMANI A. Structural Performance and Serviceability of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 518-529.

[3] 黄海群. 混杂配筋混凝土梁抗弯性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.

HUANG Hai-qun. Study of Flexural Behavior of Hybrid Reinforced Concrete Beam[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.

[4] 葛文杰. FRP 筋和钢筋混合配筋及其复合筋增强混凝土受弯构件的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.

- GE Wen-jie. Experimental Study and Theoretical Analysis on Concrete Beams Reinforced with FRP Bars Blend with Steel Bars or FRP and Steel Composite Bars[D]. Nanjing: Southeast University, 2009.
- [5] NAAMAN A E, JEONG S M. Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons[C]// TAERWE L. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. London: Taylor & Francis, Inc., 1995: 379-386.
- [6] SPADEA G, BENCARDINO F, SWAMY R N. Optimizing the Performance Characteristics of Beams Strengthened with Bonded CFRP Laminates[J]. Materials and Structures, 2000, 33(2): 119-126.
- [7] TAN K H. Behavior of Hybrid FRP-Steel Reinforced Concrete Beams[C]// Japan Concrete Institute. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium (FRPRCS-3). Sapporo: Japan Concrete Institute, 1997: 487-494.
- [8] 徐 秦. FRP 筋混凝土受弯构件的结构性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- XU Qin, The Structural Property Research of Concrete Flexural Members Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [9] ABDELRAHMAN A A, TADROS G, RIZKALLA S H. Test Model for the First Canadian Smart Highway Bridge[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(4): 451-458.
- [10] ZOU P X W. Flexural Behavior and Deformability of Fiber Reinforced Polymer Prestressed Concrete Beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(4): 275-284.
- [11] MUFTI A A, NEWHOOK J P, TADROS G. Deformability Versus Ductility in Concrete Beams with FRP Reinforcement[C]// CECS. Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges & Structures. Montreal: CECS, 1996: 189-199.
- [12] AIELLO M A, OMBRES L. Structural Performances of Concrete Beams with Hybrid (Fiber-reinforced Polymer-steel) Reinforcements[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(2): 133-140.
- [13] LAU D, PAM H J. Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams [J]. Engineering Structures, 2010, 32: 3857-3865.
- [14] NAAMAN A E, HARAJLI M H, WIGHT J K. Analysis of Ductility in Partially Prestressed Concrete Flexural Members[J]. PCI Journal, 1986, 31(3): 64-87.
- [15] PARK R, THOMPSON K J. Ductility of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beam Sections[J]. PCI Journal, 1980, 25(2): 46-69.
- [16] PARK R, FALCONER T J. Ductility of Prestressed Concrete Piles Subjected to Simulated Seismic Loading[J]. PCI Journal, 1983, 28(5): 112-144.
- [17] CAN/CSA-S6-00, Canadian Highway Bridge Design Code[S].
- [18] 冯 鹏, 叶列平, 黄羽立. 受弯构件的变形性与新的性能指标的研究[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 28-36.
- FENG Peng, YE Lie-ping, HUANG Yu-li. Deformability and New Performance Indices of Flexural Members[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 28-36.
- [19] 翟长海, 谢礼立. 抗震规范应用强度折减系数的现状及分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 1-7.
- ZHAI Chang-hai, XIE Li-li. State-of-art of Applications of Strength Reduction Factors in Seismic Design Codes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(2): 1-7.
- [20] 杨 媛, 白绍良. 从各国规范对比看我国抗震设计安全水准评价中的有关问题[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(增1): 192-200.
- YANG Yuan, BAI Shao-liang. Issues on Reliability Level of China Seismic Design Code of Buildings by Comparison with Other Countries [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(S1): 192-200.
- [21] 庞 蕾, 屈文俊, 李 昂. 混合配筋混凝土梁抗弯计算理论[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 81-88.
- PANG Lei, QU Wen-jun, LI Ang. Calculation of Flexural Strength for Concrete Beams Reinforced with Hybrid (FRP and Steel) Bars[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 81-88.
- [22] 陈 辉. GFRP 筋与钢筋混合配筋混凝土受弯构件的试验研究与理论分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- CHEN Hui. Experimental Research and Theoretical Analysis of Hybrid Reinforced Concrete Bending Element with GFRP Bars and Steel Bars[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.