

建筑技术

不同配筋组合对钢筋混凝土梁 $M-\varphi$ 曲线的影响

刘海峰¹ 郑 鹏²

(青海建筑职业技术学院¹,西宁 810012;重庆市设计院²,重庆 400015)

摘要 以钢筋混凝土梁为研究对象,基于平截面假定通过编制非线性计算程序,计算分析了不同配筋率下单筋钢筋混凝土梁和相同受拉钢筋配筋率下,不同数量受压钢筋的钢筋混凝土梁截面的 $M-\varphi$ 曲线。讨论了配筋率和受压钢筋配置对钢筋混凝土梁延性及承载力的影响。

关键词 钢筋混凝土梁 配筋率 $M-\varphi$ 曲线 延性性能

中图法分类号 TU375.1; 文献标志码 A

梁端是钢筋混凝土框架及框架-剪力墙结构提高抗震性能的关键部位之一。抗震规范规定钢筋混凝土框架设计应确保“强柱弱梁、强剪弱弯”的原则。即通过合理的设计,以期在梁端出现塑性铰并有足够的转动能力来耗散地震能量^[1],从而保证其它构件有足够的强度和整个框架结构的整体性。震害表明,地震时梁的破坏较多的发生在梁端,很多属于延性较差的剪压或斜压破坏,不能满足抗震要求,在抗震设计中应当予以避免。国内外对钢筋混凝土梁端抗震性能进行了不少研究^[2-5]。本文在已有研究^[6,7]的基础上,基于平截面假定,通过编制的非线性计算程序,计算了不同配筋参数下梁截面的 $M-\varphi$ 曲线,分析了受拉钢筋配筋率和受压钢筋配置对钢筋混凝土梁承载力及延性的影响。

1 计算模型选取

1.1 平截面假定

截面变形后仍保持平面,截面应变为直线分布;不考虑钢筋与混凝土之间的相对位移;不考虑受拉区裂缝间混凝土工作对受拉钢筋应变的影响。

1.2 材料应力-应变曲线选取

钢筋应力-应变关系采用理想弹塑性模型,并

考虑其屈服硬化,按三折线模型选取,如图 1。钢筋应变超过屈服平台应变 ε_{sh} 后取 $E' = 0.01E_s$, $E_s = 2 \times 10^5$ MPa。

混凝土应力-应变关系采用混凝土结构设计规范 GB 50010—2010^[8]附录 C 中建议采用的混凝土单轴受压和单轴受拉的应力-应变本构模型,如图 2 所示。

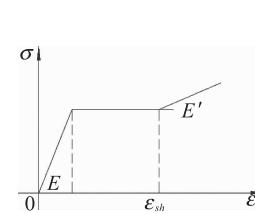


图 1 钢筋应力-应变关系

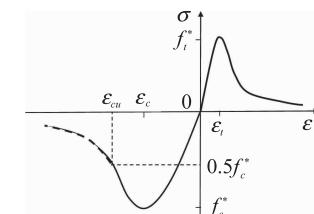


图 2 混凝土应力-应变关系

1.3 截面分层

矩形截面钢筋混凝土构件,在正截面受力作用下,截面的应变、应力分布如图 3^[9]所示。为较精确的进行数值分析,将混凝土截面分成有限条带,并假定每一条带上的应力 $\sigma_{c,i}$ 均匀分布,混凝土和钢筋的应力统一规定为压应力为正,拉应力为负。

在条带划分时,为了能使计算模型中截面上的应力分布接近实际情况,一般采用多条带划分,根据平截面假定可以得截面曲率为:

$$\varphi = (\varepsilon'_c + \varepsilon_s)/h_0 \quad (1)$$

式(1)中: ε'_c 为受压区边缘混凝土压应变; ε_s 为受拉钢筋应变; h_0 —截面有效高度; φ —截面曲率。截面

2011年11月11日收到

第一作者简介:刘海峰(1974—),女,汉族,河南商丘人,硕士,副教授,研究方向:混凝土结构受力性能及抗震性能研究及教学工作。
E-mail:lhf_xn@163.com。

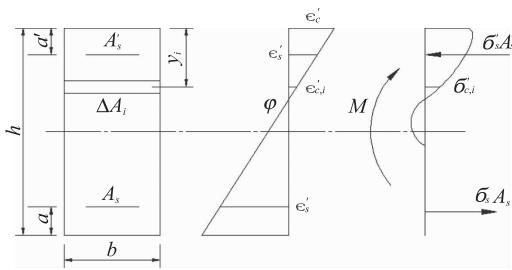


图3 矩形截面梁应变和应力图

上任意一条带中心处的应变为 $\varepsilon_{c,i}$ 为:

$$\varepsilon_{c,i} = \varepsilon'_c - \varphi y_i \quad (2)$$

式(2)中 y_i 为任意一条带的高度中心距截面受压区边缘的距离。受压与受拉钢筋应变 ε'_s 和 ε_s 为:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon'_c - \varphi a' \quad (3)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon'_c - \varphi h_0 \quad (4)$$

由混凝土和钢筋的应力-应变关系,可得截面上任一条带的混凝土应力 $\sigma_{c,i}$ 及钢筋的应力 σ'_s 和 σ_s 。即可求出每一条带上相应作用的力。

其中混凝土为:

$$N_i = bd_i \sigma_{c,i} = \Delta A \sigma_{c,i} \quad (5)$$

受压和受拉钢筋为:

$$N'_s = A'_s \sigma'_s \quad (6)$$

$$N_s = A_s \sigma_s \quad (7)$$

根据力的平衡条件可以得式(8):

$$\sum_i^n \sigma_{c,i} \Delta A_i + \sigma'_s A'_s + \sigma_s A_s = N \quad (8)$$

对截面形心轴取距得到公式(9)。

$$M = \sum_i^n \sigma_{c,i} \Delta A_i (h/2 - y_i) + \sigma'_s A'_s (h/2 - a') + \sigma_s A_s (a - h/2) \quad (9)$$

1.4 弯矩-曲率求解过程

为求得弯矩和曲率的对应关系。首先从弯矩或曲率两者之间选定一个作为已知,来确定另一个。由于弯矩-曲率存在下降段,某些区段的弯矩值对应两个曲率,故先假定曲率为已知,然后求相应的内力,具体求解步骤如下:

(1) 取曲率 $\varphi = \varphi + \Delta\varphi$;

(2) 假定梁截面受压区边缘的混凝土应变为 ε'_c ;

(3) 求各混凝土条带和钢筋的应变;

(4) 按混凝土和钢筋的应力-应变关系求与应变相对应的应力值;

(5) 按式(8)求内力总和,判别是否满足平衡条件;

(6) 若不满足平衡条件,调整应变值 ε'_c ,重复步骤(3)-(5);

(7) 满足平衡条件后,按式(9)求内力弯矩,从而得出 φ 所对应的弯矩 M ;

重复步骤(1)-(7),直到得出所考察的整个的 $M-\varphi$ 关系。

2 计算结果及分析

2.1 受拉钢筋配筋率影响

通过改变受拉钢筋配筋率来考察其对梁截面延性的影响。所取截面相关参数如表1所示,其中混凝土强度等级为C30,钢筋为HRB335级。计算结果见表2, $M-\varphi$ 相关曲线见图4。

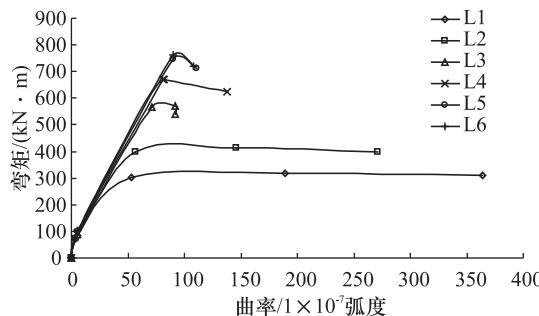
表1 计算对象的相关参数

梁号	$b \times h/\text{mm}$	h_0/mm	A_s/mm^2	$\rho/\%$
DL-1		567	1 404	0.82
DL-2		565	1 884	1.11
DL-3	300 × 600	537	2 945	1.83
DL-4		533	3 695	2.31
DL-5		533	4 926	3.08
DL-6		533	5 542	3.46

注: $b \times h$ 为截面宽度和高度, h_0 为截面有效高度, A_s 为受拉钢筋的面积, ρ 为受拉钢筋配筋率。DL-5, DL-6 为超筋梁。

表2 计算结果及梁的延性

梁号	开裂弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	开裂曲率/ rad	屈服弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	屈服曲率/ rad	极限弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$		极限曲率/ rad		最终曲率/ rad	最终系数
					极限弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	极限曲率/ rad	极限弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	极限曲率/ rad		
DL-1	71.46	4	303.78	53	316.59	189	309.69	364	6.9	
DL-2	74.33	4	398.84	57	411.84	146	399.48	271	4.7	
DL-3	89.85	5	565.93	71	569.13	92	539.21	173	2.4	
DL-4	93.99	5	669.77	81	671.90	82	625.63	138	1.7	
DL-5	101.05	5	663.56	126	745.08	90	711.77	111	-	
DL-6	104.28	5	669.71	123	760.10	90	721.91	108	-	

图 4 $M-\varphi$ 相关曲线图

通过分析表 2 和图 4 可得：

1) 各梁开裂后 $M-\varphi$ 曲线坡度降低, 即截面刚度下降; 钢筋屈服后表现出更多的非线性能, 刚度进一步退化。

2) 随着受拉钢筋配筋率的加大, 梁截面抗弯能力逐渐增大; 但是梁截面的延性逐渐减低。尤其是配筋率较高的梁 L5 和 L6, 属于超筋梁, $M-\varphi$ 曲线陡降, 属于脆性破坏。

3) 随着受拉钢筋配筋率的加大, 开裂弯矩有所增大, 但影响不大, 梁截面开裂弯矩主要由混凝土的抗拉强度决定, 开裂前钢筋与混凝土同时受拉, 开裂时曲率很小, 钢筋应力不大, 虽然钢筋对开裂弯矩有一定的贡献, 但是影响不大。

4) 随着受拉钢筋配筋率的加大, 梁截面的延性逐渐减低。即随着配筋率的加大, 受压区高度逐渐加大, 由平截面假定知, 钢筋屈服时相应受压区混凝土压应变也加大, 更接近混凝土的极限压应变, 因此延性降低。

5) 随着配筋率的增大, $M-\Phi$ 关系曲线的下降段逐渐变陡, 具有明显的脆性特征。

2.2 受压钢筋配筋率的影响

通过改变受压钢筋配筋率来考察其对梁截面延性的影响。配置不同数量受压钢筋的钢筋混凝土梁计算参数见表 3 所示, 混凝土强度等级为 C30, 钢筋为 HRB335 级, 计算结果见表 4, $M-\varphi$ 相关曲线见图 5。

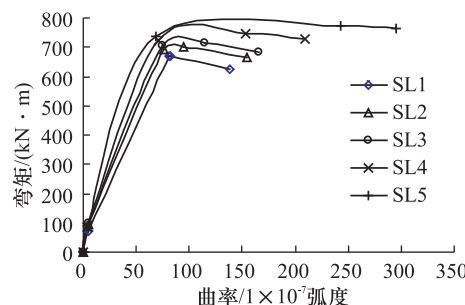
表 3 计算对象的相关参数

梁号	$b \times h/\text{mm}$	As/mm^2	$A's/\text{mm}^2$	$\rho/\%$
SL-1				0
SL-2				402
SL-3	300×600	3 695	628	2.31
SL-4				1 256
SL-5				1 964

注: $b \times h$ 为截面宽度和高度, As 为受拉钢筋的面积, $A's$ 为受压钢筋面积, ρ 为受拉钢筋配筋率。

表 4 计算结果及梁的延性

梁号	开裂弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	开裂曲率/ 10^{-7}rad	屈服弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	屈服曲率/ 10^{-7}rad	极限弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	极限曲率/ 10^{-7}rad	最终系数	曲率/延性系数
SL-1	71.461	5	669.766	81	671.901	82	625.6	138
SL-2	96.469	5	691.297	76	698.909	95	664.8	155
SL-3	97.758	5	705.362	75	712.625	115	684.4	166
SL-4	86.882	4	724.229	71	746.901	153	730.3	209
SL-5	90.284	4	737.559	68	771.038	243	764.8	295

图 5 $M-\varphi$ 相关曲线图

分析表 4 和图 5 可得:

- 1) 随着受压钢筋的增多, 开裂弯矩变化不大, 梁截面抗弯能力逐渐增大但是总体提高不大;
- 2) 随着受压钢筋的增多, 梁截面的延性逐渐加大。即随着受压钢筋的增多, 受压区高度逐渐变小, 由平截面假定知, 钢筋屈服时相应的受压区混凝土压应变也变小, 较混凝土的极限压应变相差越大, 具有较好的延性。

3 结论

- 1) 随着受拉钢筋配筋率的增大, 梁截面抗弯承

载能力得到很大提高,开裂弯矩的变化很小。

2) 随着受拉钢筋配筋率的增大,梁截面的延性逐渐降低,尤其是超筋梁几乎没有延性,呈现明显的脆性破坏特征。

3) 受压钢筋配置对提高梁的承载能力影响不大,但可以明显改善梁的延性,在抗震设计时,配置受压钢筋是提高梁延性性能有效的途径。

4) 通过改善梁端的延性性能,以期在地震作用下梁端“塑性铰”有足够的转动能力,达到耗散地震能量得作用。

参 考 文 献

- 1 刘海峰,赵斌.钢筋混凝土框架节点在地震作用下的剪切机理.建筑技术开发,2004;31(5):4—6
- 2 古松.RC 梁正截面承载力试验的计算机模拟.四川建筑科学

研究,2008;34(5):47—49

- 3 鞠彦忠,阎贵,张杰,等.少筋钢筋混凝土桥墩 $M-\varphi$ 曲线的计算.中国安全科学学报,2003;13(10):63—65
- 4 张利,李子青,胡兆同,等.数值法求解圆柱形钢筋混凝土桥墩的 $M-\varphi$ 曲线.西安公路交通大学学报,2001;21(3):45—48
- 5 刁波,叶英华,焦俊婷,等.用不同规范本构关系分析钢筋混凝土压弯截面.哈尔滨工业大学学报,2005;37(6):63—65
- 6 Yay C Y, Chan S L, So a K W. Biaxial bending design of arbitrarily shaped reinforced concrete column. ACI Structural Journal, 1993;(3):269—278
- 7 李秋英.简易法计算混凝土矩形截面受弯构件配筋量.河北煤炭,2002;(1):19—20
- 8 中华人民共和国城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范.北京:中国建筑工业出版社,2011
- 9 周志祥,胡弘莽.高等钢筋混凝土结构.北京:人民交通出版社,2002

The Influences of Different Steel Arrangements on $M-\varphi$ Curve of Reinforced Concrete Beams

LIU Hai-feng¹, ZHEN Peng²

(Qinghai Architectural Professional Technology College¹, Xining 810012, P. R. China,
Chongqing Architectural Design Institute², Chongqing 400015, P. R. China)

[Abstract] Reinforced concrete beams are studied, a nonlinear analysis program is built based on plane cross section assumption to analyze singly reinforced beams with different steel ratios and doubly reinforced beams with identical tensile steel ratio and variant compress steel ratios to get their $M-\varphi$ curves. Finally, the influences of reinforcement ratios and compress steel arrangements on both the ductility and bearing capacity of reinforced concrete beams are discussed.

[Key words] reinforced concrete beams steel ratio $M-\varphi$ curve ductility