

# 不同的配钢对 SRC 受弯构件延性的影响<sup>\*</sup>

张 惠 华

( 华侨大学土木工程系, 泉州 362011 )

**摘要** 采用弯矩-曲率法分析不同形式的配钢对( 劲性钢筋混凝土 ) SRC 受弯构件截面延性的影响. 并通过对一组相同面积、不同形式钢材截面延性的分析与比较, 提出了劲性钢筋混凝土受弯构件截面延性提高, 屈服强度变化不大的配钢形式.

**关键词** 劲性钢筋混凝土, 延性, 配钢

**分类号** TU 528. 571. 04

劲性钢筋混凝土结构承载能力高、抗震性能好, 是一种适合在抗震地区和高层建筑中使用的经济型结构. 然而如何配置钢筋与钢骨, 使构件在提高截面延性的同时, 承载力不至于降低. 本文采用弯矩-曲率(  $M-\Phi$  ) 法, 对相同面积、不同形式钢材的劲性钢筋混凝土受弯构件截面的  $M-\Phi$  进行计算分析. 比较其截面延性的变化规律, 提出劲性钢筋混凝土受弯构件延性良好, 屈服强度不低的配钢形式.

## 1 基本假定

基本假定条件如下:

- (1) 杆件截面在受力前后, 变形符合平截面假定;
- (2) 不考虑受拉区混凝土的作用;
- (3) 钢骨和钢筋均为理想的弹塑性材料, 应力-应变曲线如图 1 所示, 即

$$\sigma_{ss} = E_{ss}\epsilon_{ss}, \epsilon_{ss} \leq \epsilon_{sy}; \quad \sigma_{ss} = f_{ss}, \epsilon_{ss} > \epsilon_{sy}, \quad (1)$$

$$\sigma_s = E_s\epsilon_s, \epsilon_s \leq \epsilon_y; \quad \sigma_s = f_s, \epsilon_s > \epsilon_y, \quad (2)$$

式中  $\sigma_{ss}, \epsilon_{ss}$  为钢骨的应力和应变;  $\sigma_s, \epsilon_s$  为钢筋的应力和应变;  $f_{ss}, f_s$  为钢骨和钢筋的屈服强度,  $E_{ss}, E_s$  为其弹性模量;  $\epsilon_{sy}, \epsilon_y$  为其屈服应变, 即  $\epsilon_{sy} = f_{ss}/E_{ss}$ ,  $\epsilon_y = f_s/E_s$ ;

- (4) 混凝土的应力-应变关系取用规范 GBJ-89 的理论曲线, 如图 2 所示, 即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= \sigma_0 [ 2 \cdot \epsilon_c / \epsilon_0 - (\epsilon_c / \epsilon_0)^2 ], & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0, \\ \sigma_c &= \sigma_0, & \epsilon_c > \epsilon_0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $\sigma_0$  为混凝土的弯曲抗压强度,  $\sigma_c, \epsilon_c$  为混凝土的应力和应变,  $\epsilon_{cu}$  为其极限压应变,  $\epsilon_{cu} = 0.0033$ ,  $\epsilon_0 = 0.002$ ;

(5) 假定工字钢为薄壁构件;

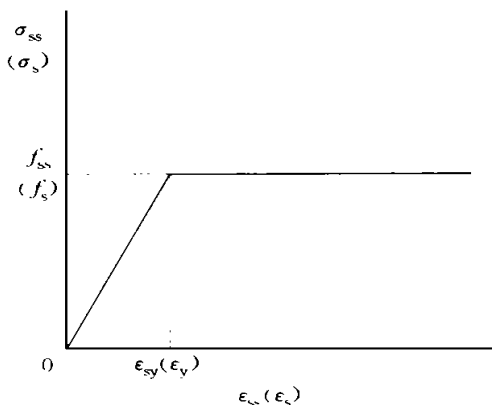


图 1 钢筋(钢筋)的应力-应变曲线

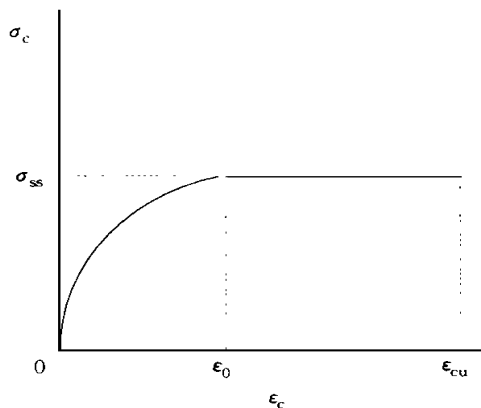


图 2 混凝土的应力-应变曲线

(6) 假定工字钢不发生局部屈曲.

## 2 截面弯矩与曲率的关系

劲性钢筋混凝土受弯构件的截面尺寸, 如图 3 所示. 工字钢腹板对称布置于梁中, 其与翼缘的面积分配, 可参照同型号的工字型钢.  $h, b$  分别为截面的高度和宽度;  $h_0$  为受拉钢筋的合

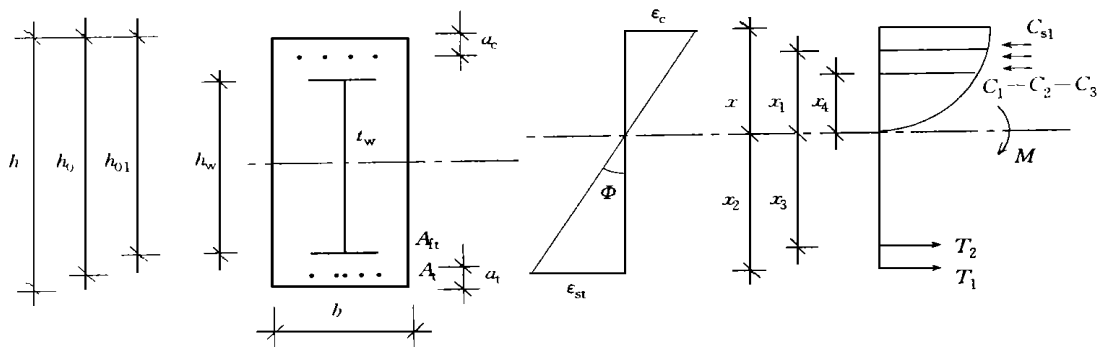


图 3 劲性钢筋混凝土截面的尺寸及应变和内力

力点至受压边缘的距离;  $a_t$  为受拉钢筋的形心至受拉边缘的距离;  $a_c$  为受压钢筋的形心至受压边缘的距离;  $A_c, A_t$  为受压和受拉钢筋的面积;  $h_w, t_w$  为工字钢腹板的高度和厚度;  $h_{01}$  为钢骨受拉翼缘的形心至受压边缘的距离  $h_{01} = \frac{h}{2} + \frac{h_w}{2}$ ;  $A_{fc}, A_{ft}$  为工字钢受压翼缘和受拉缘的面积;  $x$  为截面的受压区高度;  $x_1$  为受压钢筋的合力点至中和轴的距离,  $x_1 = x - a_c$ ;  $x_2$  为受拉钢筋的合力点至中和轴的距离,  $x_2 = h_0 - x$ ;  $x_3$  为钢骨受拉翼缘的形心至中和轴的距离,  $x_3 = h_{01} - x$ ;  $x_4$  为钢骨受压翼缘的形心至中和轴的距离,  $x_4 = h_w - x_3$ ;  $x_5$  为腹板受拉区屈服的高度,  $x_5 = x_3 - f_{ss}/E_s$ ;  $\Phi, \epsilon_{sc}, \epsilon_{st}$  为钢骨的压应变和拉应变;  $\epsilon_c, \epsilon_s$  为钢筋的压应变和拉应变;  $\Phi$  为截面的曲率;  $M$  为截面承受的弯矩.  $C_1 - C_2 - C_3$  为受压区混凝土的合力,  $C_{s1}$  为受压钢筋的合力,  $C_{s2}$  为受压钢骨的合力,  $T_1$  为受拉钢筋的合力,  $T_2$  为受拉钢骨的合力.

屈服强度是构件设计强度的依据,提高它构件的承载能力提高,成本降低;延性则是防止构件脆性破坏,改善其抗震性能的重要指标. 通常在钢材总面积不变的情况下,增加受拉部分的钢材,截面的屈服强度提高,延性降低;增加受压部分的钢材,截面的延性提高,屈服强度降低. 如何布置钢筋和钢骨,使其延性提高的同时,承载能力不降低,是本文将要讨论的问题. 由文[1]可知要满足上述要求,钢骨应尽量布置在截面的受拉和受压边缘. 因此,劲性钢筋混凝土受弯构件的钢筋和钢骨在弯矩作用下,可能产生下列5种情况的屈服形式. 根据力的平衡原理,建立其平衡方程.

## 2.1 受拉、受压的钢筋与钢骨均未屈服

混凝土受压边缘的应变小于或等于 $\epsilon_0$ . 即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c &= \chi\Phi \quad \epsilon_0, \quad \epsilon_{sc} = \chi_1\Phi \quad f_s/E_s, \quad \epsilon_{st} = \chi_2\Phi \quad f_s/E_s, \\ \epsilon_{ss1} &= \chi_3\Phi \quad f_{ss}/E_{ss}, \quad \epsilon_{ssc} = \chi_4\Phi \quad f_{ss}/E_{ss}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由于 $\sum N_i = 0$ , 得

$$C_{11} - C_{12} - C_{13} + C_{1s1} + C_{1s2} - T_{11} - T_{12} = 0, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } C_{11} &= \int_0^x \sigma_{c1} b dx, \quad \sigma_{c1} = \sigma_0 [2\chi\Phi \epsilon_0 - (\chi\Phi \epsilon_0)^2]; \quad C_{12} = \sigma_{c2} A_c, \quad \sigma_{c2} = \sigma_0 [2\chi_1\Phi \epsilon_0 - (\chi_1\Phi \epsilon_0)^2]; \\ C_{13} &= \sigma_{c3} A_{fc} + \int_0^{x_4} \sigma_{c4} t_w dx, \quad \sigma_{c3} = \sigma_0 [2\chi_4\Phi \epsilon_0 - (\chi_4\Phi \epsilon_0)^2], \quad \sigma_{c4} = \sigma_0 [2\chi\Phi \epsilon_0 - (\chi\Phi \epsilon_0)^2]; \\ C_{1s1} &= E_s \chi_1 \Phi A_c; \quad C_{1s2} = E_{ss} \chi_4 \Phi A_{fc} + \int_0^{x_4} E_{ss} \chi \Phi t_w dx; \quad T_{11} = E_s \chi_2 \Phi A_t; \quad T_{12} = \Phi \chi E_{ss} A_{ft} \\ &+ \int_0^{x_3} E_{ss} \chi \Phi t_w dx. \end{aligned}$$

而对中和轴求矩 $\sum M_i = M$ , 即

$$M = M_{1c1} - M_{1c2} - M_{1c3} + M_{1s1} + M_{1s2} + M_{1t1} + M_{1t2},$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } M_{1c1} &= \int_0^x \sigma_{c1} b x dx; \quad M_{1c2} = \sigma_{c2} A_c \chi_1; \quad M_{1c3} = \sigma_{c3} A_{fc} \chi_4 + \int_0^{x_4} \sigma_{c4} t_w x dx; \quad M_{1s1} = E_s \chi_1^2 \Phi A_c; \quad M_{1s2} = \\ &A_{fc} \Phi E_{ss} \chi_4^2 + \int_0^{x_4} \Phi E_{ss} t_w \chi^2 dx; \quad M_{1t1} = E_s \chi_2^2 \Phi A_t; \quad M_{1t2} = E_{ss} \Phi \chi_3^2 A_{ft} + \int_0^{x_3} E_{ss} t_w \Phi \chi^2 dx. \end{aligned}$$

## 2.2 受拉钢筋已屈服, 受拉钢骨翼缘、受压钢筋及受压钢骨翼缘尚未屈服

混凝土受压边缘的应变小于或等于 $\epsilon_0$ . 即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c &= \chi\Phi \quad \epsilon_0, \quad \epsilon_{sc} = \chi_1\Phi \quad f_s/E_s, \quad \epsilon_{st} = \chi_2\Phi \quad f_s/E_s, \\ \epsilon_{ss1} &= \chi_3\Phi \quad f_{ss}/E_{ss}, \quad \epsilon_{ssc} = \chi_4\Phi \quad f_{ss}/E_{ss}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

同理

$$C_{21} - C_{22} - C_{23} + C_{2s1} + C_{2s2} - T_{21} - T_{22} = 0, \quad (8)$$

$$\text{式中 } C_{21} = C_{11}, \quad C_{22} = C_{12}, \quad C_{23} = C_{13}, \quad C_{2s1} = C_{1s1}, \quad C_{2s2} = C_{1s2}, \quad T_{22} = T_{12}, \quad T_{21} = f_s A_t.$$

$$M = M_{2c1} - M_{2c2} - M_{2c3} + M_{2s1} + M_{2s2} + M_{2t1} + M_{2t2}, \quad (9)$$

$$\text{式中 } M_{2c1} = M_{1c1}, \quad M_{2c2} = M_{1c2}, \quad M_{2c3} = M_{1c3}, \quad M_{2s1} = M_{1s1}, \quad M_{2s2} = M_{1s2}, \quad M_{2t1} = f_s A_t \chi_2, \quad M_{2t2} = M_{1t2}.$$

## 2.3 受拉钢筋、受拉钢骨的翼缘和部分腹板已屈服, 受压钢筋和受压钢骨均未屈服

混凝土受压边缘的应变小于或等于 $\epsilon_0$ . 即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c &= \chi\Phi \quad \epsilon_0, \quad \epsilon_{sc} = \chi_1\Phi > f_s/E_s, \quad \epsilon_{st} = \chi_2\Phi \quad f_s/E_s, \\ \epsilon_{ssc} &= \chi_4\Phi \quad f_{ss}/E_{ss}, \quad \epsilon_{sst} = \chi_3\Phi > f_{ss}/E_{ss}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$C_{31} - C_{32} - C_{33} + C_{3s1} + C_{3s2} - T_{31} - T_{32} = 0, \quad (11)$$

式中  $C_{31} = C_{11}$ ,  $C_{32} = C_{12}$ ,  $C_{33} = C_{13}$ ,  $C_{3s1} = C_{1s1}$ ,  $C_{3s2} = C_{1s2}$ ,  $T_{31} = T_{21}$ ,  $T_{32} = f_{ss} A_{ft} + \chi_{tw} f_{ss} + \int_0^{x_3 - x_5} E_{ss} \chi \Phi_w dx$ .

$$M = M_{3c1} - M_{3c2} - M_{3c3} + M_{3cs1} + M_{3cs2} + M_{3t1} + M_{3t2}, \quad (12)$$

式中  $M_{3c1} = M_{1c1}$ ,  $M_{3c2} = M_{1c2}$ ,  $M_{3c3} = M_{1c3}$ ,  $M_{3cs1} = M_{1cs1}$ ,  $M_{3cs2} = M_{1cs2}$ ,  $M_{3t1} = M_{2t1}$ ,  $M_{3t2} = f_{ss} A_{ft} \chi + \chi_{tw} f_{ss} (x_3 - x_5/2) + \int_0^{x_3 - x_5} E_{ss} \chi^2 \Phi_w dx$ .

**2.4 受拉和受压钢筋、受拉钢骨的翼缘和部分腹板已屈服, 受压钢骨未屈服**  
混凝土受压边缘的应变小于或等于  $\epsilon_0$ . 即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c &= \chi \Phi < \epsilon_0, \quad \epsilon_{sc} = \chi_1 \Phi > f_s / E_s, \quad \epsilon_{st} = \chi_2 \Phi > f_s / E_s, \\ \epsilon_{ssc} &= \chi_4 \Phi > f_{ss} / E_{ss}, \quad \epsilon_{sst} = \chi_3 \Phi < f_{ss} / E_{ss}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

同理

$$C_{41} - C_{42} - C_{43} + C_{4s1} + C_{4s2} - T_{41} - T_{42} = 0, \quad (14)$$

式中  $C_{41} = C_{11}$ ,  $C_{42} = C_{12}$ ,  $C_{43} = C_{13}$ ,  $C_{4s1} = f_s A_c$ ,  $C_{4s2} = C_{1s2}$ ,  $T_{41} = T_{21}$ ,  $T_{42} = T_{32}$ .

$$M = M_{4c1} - M_{4c2} - M_{4c3} + M_{4cs1} + M_{4cs2} + M_{4t1} + M_{4t2}, \quad (15)$$

式中  $M_{4c1} = M_{1c1}$ ,  $M_{4c2} = M_{1c2}$ ,  $M_{4c3} = M_{1c3}$ ,  $M_{4cs1} = f_s A_c \chi$ ,  $M_{4cs2} = M_{1cs2}$ ,  $M_{4t1} = M_{2t1}$ ,  $M_{4t2} = M_{3t2}$ .

**2.5 受拉和受压钢筋、受拉钢骨的翼缘和部分腹板已屈服, 受压钢骨未屈服**  
混凝土受压边缘的应变大于  $\epsilon_0$ , 小于或等于  $\epsilon_{t1}$ . 即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{t1} < \epsilon_c < \chi \Phi < \epsilon_0, \quad \epsilon_{sc} = \chi_1 \Phi > f_s / E_s, \quad \epsilon_{st} = \chi_2 \Phi > f_s / E_s, \\ \epsilon_{ssc} &= \chi_4 \Phi < f_{ss} / E_{ss}, \quad \epsilon_{sst} = \chi_3 \Phi > f_{ss} / E_{ss}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

同理

$$C_{51} - C_{52} - C_{53} + C_{5s1} + C_{5s2} - T_{51} - T_{52} = 0, \quad (17)$$

式中  $C_{51} = \int_0^{\Phi \epsilon_0} \sigma_{c1} b dx + (x - \Phi \epsilon_0) b \sigma_0$ ,  $C_{52} = f_s A_c$ ,  $C_{53} = C_{13}$ ,  $C_{5s1} = C_{4s1}$ ,  $C_{5s2} = C_{1s2}$ ,  $T_{51} = T_{21}$ ,  $T_{52} = T_{42}$ .

$$M = M_{5c1} - M_{5c2} - M_{5c3} + M_{5cs1} + M_{5cs2} + M_{5t1} + M_{5t2}, \quad (18)$$

式中  $M_{5c1} = \int_0^{\Phi \epsilon_0} \sigma_{c1} b x dx + \frac{1}{2} (x^2 - \frac{\Phi^2}{\epsilon_0^2}) b \sigma_0$ ,  $M_{5c2} = \sigma_0 A_c \chi_1$ ,  $M_{5c3} = M_{1c3}$ ,  $M_{5cs1} = M_{4cs1}$ ,  $M_{5cs2} = M_{1cs2}$ ,  $M_{5t1} = M_{2t1}$ ,  $M_{5t2} = M_{3t2}$ .

下面介绍上述五种情况的求解步骤.

(1) 用试算法求解, 当  $x_2 \Phi = f_s / E_s$  时, 满足方程 (4), 且方程 (5) 成立的  $x$ ,  $\Phi$  值, 并代入方程 (6) 求解  $M$  值.

(2) 对满足方程 (7) 的  $x$ ,  $\Phi$  进行循环计算, 求解满足方程 (8) 的  $x$ ,  $\Phi$  值, 代入方程 (9) 求解  $M$  值, 直至  $x_3 \Phi = f_{ss} / E_{ss}$  为止.

(3) 对满足方程 (10) 的  $x$ ,  $\Phi$  进行循环计算, 求解满足方程 (11) 的  $x$ ,  $\Phi$  值, 代入方程 (12) 求解  $M$  值, 直至  $x_1 \Phi = f_s / E_s$  为止.

(4) 对满足方程 (13) 的  $x$ ,  $\Phi$  进行循环计算, 求解满足方程 (14) 的  $x$ ,  $\Phi$  值, 代入方程 (15) 求解  $M$  值, 直至  $x_4 \Phi = f_{ss} / E_{ss}$  或  $x \Phi = \epsilon_{t1}$  时结束.

(5) 对满足方程(16)的 $x, \Phi$ 进行循环计算, 求解满足方程(17)的 $x, \Phi$ 值, 代入方程(18)求解 $M$ 值, 直至 $x^4 \Phi = f_{ss}/E_{ss}$ 或 $x \Phi = \epsilon_{cu}$ 时结束。

3 计算实例与结果分析

与钢筋混凝土受弯构件相同, 提高混凝土的强度等级, 设置加密箍筋, 增加受压钢筋也能有效地提高劲性钢筋混凝土截面的延性。本文仅对劲性钢筋混凝土受弯构件, 设置不同形式钢材后的截面 $M-\Phi$ 的变化情况进行分析。并通过一组相同面积、不同形式钢材截面的 $M-\Phi$ 的计算分析与比较, 得出其延性良好承载能力较高的配钢形式。

算例 主要参数为截面尺寸 $b=250\text{ mm}$ ,  $h=500\text{ mm}$ ,  $a_{st}=a_{sc}=35\text{ mm}$ , 钢材总面积 $A_s=8\,746\text{ mm}^2$ , 钢骨 $f_{ss}=235\text{ MPa}$ ,  $E_{ss}=206\times10^3\text{ MPa}$ , 钢筋 $f_s=235\text{ MPa}$ ,  $E_s=210\times10^3\text{ MPa}$ , 混凝土强度等级为 $C_{30}$ ,  $\sigma_0=20\text{ MPa}$ , 计算结果见附表, 表中 $M_y, \Phi_y$ 为钢筋刚屈服时

附表 算例的计算结果表

编号	$A_t$	$A_c$	$A_{ft}$	$A_{fc}$	$h_t\times l_w$	$M_y\times10^3$ /MPa	$\Phi_y\times10^{-6}$ /rad·mm <sup>-6</sup>	$M_u\times10^3$ /MPa	$\Phi_u\times10^{-5}$ /rad·mm <sup>-1</sup>	$\Phi_u/\Phi_y$
L-1	903	903	1 950	1 950	320×9.5	2.516	4.245	3.614	2.401	5.656
L-2	2 853	903	0	1 950	320×9.5	3.073	4.405	3.866	2.401	5.450
L-3	903	2 853	1 950	0	320×9.5	2.679	4.115	3.843	2.377	5.775
L-4	1 403	403	1 950	1 950	320×9.5	2.845	4.450	3.891	1.512	3.330
L-5	1 903	903	1 950	950	320×9.5	3.269	4.785	4.152	1.045	2.184
L-6	903	1 903	950	1 950	320×9.5	2.059	3.820	3.048	3.034	7.942
L-7	2 853	2 853	0	0	320×9.5	3.242	4.262	4.095	2.378	5.580
L-8	4 373	4 373	0	0	0	4.267	4.290	—	—	—
L-9	2 500	3 206	0	0	320×9.5	2.965	4.077	3.877	2.775	6.805
L-10	3 206	2 500	0	0	320×9.5	3.510	4.466	4.301	1.693	3.791
L-11	3 093	3 093	0	0	320×8.0	3.404	4.267	4.191	2.569	6.022
L-12	3 093	3 093	0	0	270×9.5	3.349	4.266	3.349	2.421	5.675

的弯距和曲率,  $M_u, \Phi_u$ 为混凝土或钢骨翼缘压曲时的极限弯距和极限曲率, 延性系数为 $\Phi_u/\Phi_y^{[1]}$ ,  $M-\Phi$ 曲线如图4所示。

从上述的计算结果表明: 在相同面积钢材的情况下, 与对称配置钢筋、钢骨的L-1相比, L-2增加受拉钢筋, 减少受拉翼缘, 截面的屈服强度提高了22.14%, 延性降低了3.64%; L-3增加受压钢筋, 减少受压翼缘, 截面的延性提高了2.1%, 屈服强度提高了6.48%。因此, 在配置钢材时, 应尽量增加受拉和受压钢筋的面积, 减少钢骨翼缘的面积。但不能取消钢骨的腹板, L-8取消了钢骨的腹板, 截面的屈服强度提高了

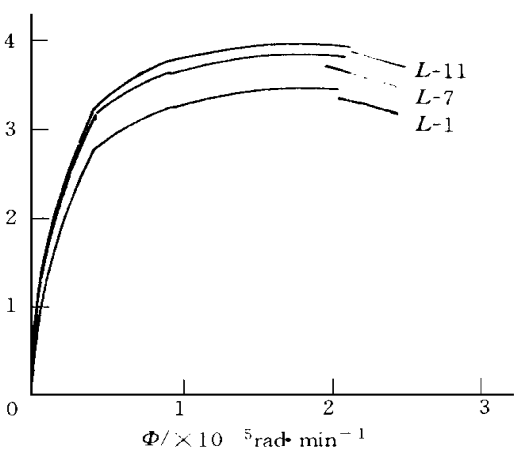


图4 截面弯矩-曲率关系曲线

69.6%, 但延性却降低了 82.32%, 变成了脆性破坏。这是因为没有钢骨的存在, 受拉钢筋屈服后, 截面不能继续承受荷载。而设置钢骨腹板后, 未屈服的腹板还可以继续承受增加的荷载, 使截面保持平衡, 中和轴继续上升, 截面的延性进一步提高。同时, L-11 与 L-7 的计算结果还表明, 腹板在保证不产生局部屈曲的前提下, 应尽量做得薄些, 截面的延性和屈服强度会更高。与 L-7 相比, L-11 的截面延性提高了 7.92%, 屈服强度提高了 5% 从  $M-\Phi$  的关系曲线得知, 劲性钢筋混凝土构件由于钢骨的存在, 屈曲后强度仍可提高, 这表明它在大震过后, 还能继续抵抗余震, 具有两道设防功效。

## 4 结论

综上所述, 劲性钢筋混凝土受弯构件的纵向钢筋不仅是箍筋的架立筋, 也是主要的受力钢筋, 其成本比型钢低; 减少钢骨翼缘的面积, 更方便于混凝土的浇捣。因此, 建议劲性钢筋混凝土受弯构件的受力钢材, 仍以钢筋为主。

### 参 考 文 献

- 1 张惠华, 方德平, 林雨生. 劲性混凝土受弯构件延性分析. 见: 沈祖炎主编. 1997 年上海高层建筑钢结构技术交流会论文集. 上海: 同济大学出版社, 1997. 186 ~ 194
- 2 车宏亚. 钢筋混凝土结构原理. 天津: 天津大学出版社, 1990. 102 ~ 103

## Effect of Different Steel Disposition on the Ductility of Steel Reinforced Concrete Flexural Member

Zhang Huihua

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** By applying bending moment-curvature method, an analysis is given to the effect of different steel disposition on the ductility of steel reinforced concrete flexural member. By analysing and comparing the section ductility of a set of steel materials with similar area but different forms, the author advances a proposal on the forms of steel disposition which will increase the section ductility of steel reinforced concrete flexural member without significant change of its yield strength.

**Keywords** steel reinforced concrete, ductility, steel disposition