

型钢混凝土剪力墙弯矩-曲率骨架曲线参数研究*

阙昂, 马恺泽, 刘超
(长安大学建筑工程学院, 西安 710061)

[摘要] 为提高混凝土剪力墙的承载力和变形能力,可以在剪力墙截面两端边缘约束构件内设置型钢。根据8个型钢混凝土剪力墙弯曲破坏的试验结果,以开裂点、屈服点、峰值点和极限点为特征点,将这种剪力墙截面的弯矩-曲率骨架曲线简化为四线型;基于平截面假定并考虑约束边缘构件及型钢的影响,提出了剪力墙开裂弯矩和曲率、屈服弯矩和曲率、峰值弯矩和曲率以及极限弯矩和曲率的表达式。研究表明,基于平截面假定所得的开裂弯矩和曲率、屈服弯矩和曲率及极限弯矩和曲率的计算值均与试验值吻合较好。

[关键词] 型钢混凝土剪力墙; 约束边缘构件; 弯矩-曲率; 骨架曲线; 极限弯矩

中图分类号: TU973.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-848X(2015)S2-0451-05

Moment-curvature relationship analysis of steel reinforcement concrete shear wall

Que Ang, Ma Kaize, Liu Chao

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to improve the lateral capacity of the reinforcement shear wall, the steel can be encased to the confined end-zones in the both ends of the shear wall cross-section. According to the experimental results of 8 high steel reinforcement concrete shear walls flexural failure, the moment-curvature skeleton curve of this shear wall cross-section is simplified as four linear through cracking point, yield point, peak point and ultimate point. Based on the plane-section assumption, the expressions of cracking bending moment and curvature, yield moment and curvature, the peak moment and curvature, the ultimate moment and curvature are derived. The effects of confined end-zones and steel effect on the moment and curvature are taken into account. The analysis results show that, the calculated values of the cracking moment and curvature, as well as the yield moment and curvature, which are based on the plane-section assumption, are in good consistent with the experimental data. Similarly, the calculated values of the ultimate moment and curvature obtained according to the plane-section assumption and to consider the impact of confined end-zones are also in good accordance with the experimental data.

Keywords: steel reinforcement concrete shear wall; confined end-zones; moment-curvature relationship; skeleton curve; ultimate moment

0 引言

型钢混凝土剪力墙是一种新型钢-混凝土组合剪力墙,在高层及超高层建筑中应用较多,其抗震性能的优劣对整个建筑的抗震性能影响极大。国内外学者对其进行了一些试验研究。John Wallace^[1]等进行了组合剪力墙在水平荷载作用下的试验,试件包括4片SRC剪力墙,2片钢管混凝土剪力墙,轴压比试验值为0.1和0.2。Dan D等^[2]对16个SRC剪力墙进行了往复水平加载试验,研究了加载方式、轴压比、含钢率及高宽比等因素对SRC剪力墙位移延性的影响。Zhou Ying等^[3]完成了6片剪跨比为2.43、轴压比试验值为0.33~0.35的钢筋、钢骨和钢管混凝土剪力墙试件的反复水平加载试验。结果表明:试件的纵筋和钢骨(钢管)受压屈服先于受拉屈服,试件的破坏形态为底部混凝土压碎,试件丧失竖向承载力。梁兴文等^[4]做了6个剪跨比分别为2.1、1.5和1.0的型钢

高性能混凝土剪力墙的抗震性能试验,发现型钢对剪力墙抗震性能有明显影响。

在建立剪力墙的恢复力模型或地震损伤模型时,需要确定特征点的参数。目前大多数文献^[5-9]根据试验数据用统计回归方法确定各特征点参数。用此法所得的参数,简单实用,但由于所得参数受试验数据和试验条件的限制,其适用范围有限。

本文根据型钢混凝土剪力墙弯曲破坏的试验结果,以开裂点、屈服点、峰值点和极限点将这种剪力墙截面的弯矩-曲率骨架曲线简化为四线型;基于平截面假定,分别推导了开裂弯矩和曲率、屈服弯矩和曲率、峰值弯矩和曲率、极限弯矩和曲率的表达式。提出型钢混凝土剪力墙截面弯矩-曲率全曲线方程。

* 国家自然科学基金项目(51308052)。

作者简介:阙昂,硕士研究生,Email:735297984@qq.com。

1 骨架曲线

根据型钢混凝土剪力墙试件在低周反复水平荷载作用下的滞回曲线,取其外包线得骨架曲线,如图2所示,并将其简化为四线型,如图1所示。图中 M_{cr} , ϕ_{cr} , M_y , ϕ_y , M_p , ϕ_p , M_u , ϕ_u 分别表示开裂点、屈服点、峰值点和极限点对应的弯矩和曲率。

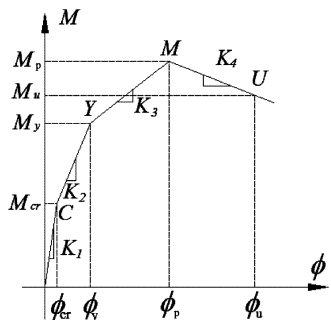


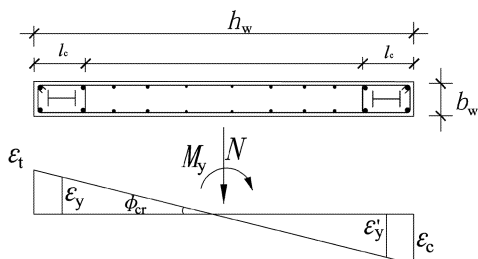
图1 弯矩-曲率骨架曲线

2 弯矩-曲率骨架曲线的特征点参数

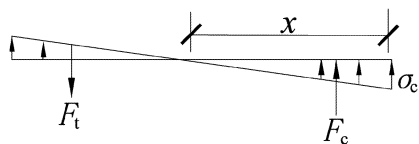
2.1 开裂弯矩和曲率

当型钢混凝土剪力墙截面受拉区边缘应变达到混凝土极限拉应变 ε_t 时,剪力墙截面达到开裂极限状态。开裂极限状态时剪力墙截面的应力-应变图如图2所示。

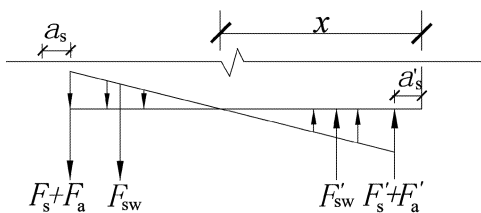
压区混凝土的应力远小于其抗压强度,假定截面受压区压应力为线性分布。为简化计算,可按开裂弯矩相等原则,将受拉区的曲线应力图形转换为三角形线性分布,其最外边缘混凝土应力取 f_t ,相应的应变取 $\varepsilon_t = f_t/E_c$ 。由图2(a)所示的截面应变图,可得



(a) 开裂截面受力及应变分布图



(b) 混凝土应力分布图



(c) 钢筋应力分布图

图2 开裂状态截面应力-应变图

截面的开裂曲率,即:

$$\phi_{cr} = \frac{\varepsilon_t}{h_w - x} \quad (1)$$

由平截面假定可得:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= x\phi_{cr} \\ \varepsilon_y &= (h_{w0} - x)\phi_{cr} \\ F_s &= E_s(h_{w0} - x)\phi_{cr}A_s \\ F_a &= E_s(h_{w0} - x)\phi_{cr}A_a \\ F'_s &= E_s(x - a'_s)\phi_{cr}A'_s \\ F'_a &= E_s(x - a'_s)\phi_{cr}A'_a \\ F_{sw} &= 0.5(h_{w0} - x)^2b_w\rho_wE_s\phi_{cr} \\ F'_{sw} &= 0.5(x - a'_s)^2b_w\rho_wE_s\phi_{cr} \\ F_c &= 0.5b_wx\sigma_c = 0.5b_wx^2E_c\phi_{cr} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ε_c 为受压区边缘混凝土压应变; ε_y 为受拉区边缘约束构件中型钢应变; ε'_y 为受压区边缘约束构件中型钢应变; f_t 为受拉边缘混凝土应力; F_s , F_a 为受拉区边缘约束构件中纵向钢筋和型钢合力; F_{sw} 为受拉区竖向分布筋合力; F'_s , F'_a 为受压区边缘约束构件中纵向钢筋和型钢合力; F'_{sw} 为受压区竖向分布筋合力; F_t 为受拉区混凝土合力; F_c 为受压区混凝土合力; h_w , h_{w0} 分别为剪力墙截面高度、有效高度; b_w 为剪力墙截面厚度。

根据截面力的平衡方程可得:

$$\begin{aligned} N + E_s(h_{w0} - x_y)\phi_{cr}(A_s + A_a) + \frac{1}{2}(h_{w0} - x)^2b_w\rho_wE_s\phi_{cr} + \\ \frac{1}{2}f_tb_w(h_w - x) = E_s(x - a'_s)\phi_{cr}(A'_s + A'_a) + \frac{1}{2}(x - \\ a'_s)^2b_w\rho_wE_s\phi_{cr} + \frac{1}{2}b_wx^2E_c\phi_{cr} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\phi_{cr} = \frac{N + f_tb_w(h_w - x)/2}{b_wx^2E_c/2 - E_s(h_w - 2x)[A_s + A_a + b_w\rho_w(h_{w0} - a'_s)/2]} \quad (4)$$

联立式(1)和式(4),可求解截面受压区高度 x 值和曲率 ϕ_{cr} 值。

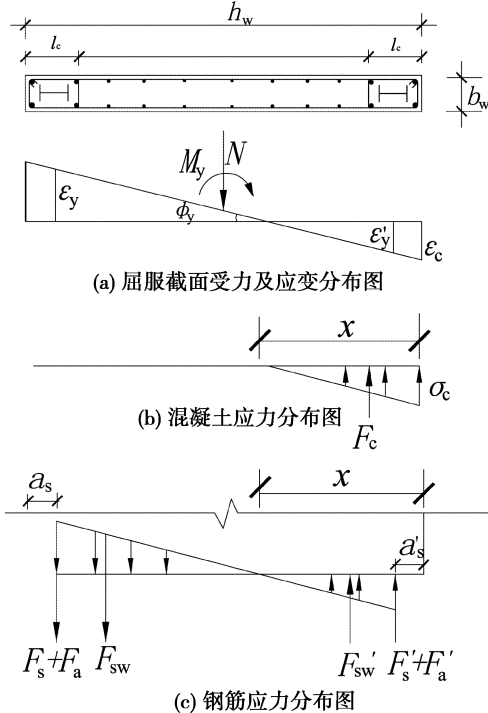
对截面形心轴取矩,可得剪力墙截面开裂弯矩表达式:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= F_s\left(\frac{h_w}{2} - a_s\right) + \frac{F_{sw}}{6}(h_w + 2x - 4a_s) + \frac{F'_t}{6}(h_w + 2x) + \\ &F'_s\left(\frac{h_w}{2} - a'_s\right) + F'_{sw}\left(0.5h_w - \frac{2}{3}a'_s - \frac{1}{3}x\right)F_c\left(\frac{1}{2}h_w - \frac{1}{3}x\right) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 屈服弯矩和曲率

型钢混凝土剪力墙截面受拉区型钢应变达到屈服应变 ε_y 时,剪力墙截面达到屈服极限状态,相应的

受压区边缘混凝土应变为 ε_c 。分析时不考虑受拉混凝土的作用,受压区混凝土应力假定为三角形线性分布,则剪力墙在屈服状态下的截面应力、应变分布如图3所示。



(a) 屈服截面受力及应变分布图

(b) 混凝土应力分布图

(c) 钢筋应力分布图

图3 截面屈服状态应力-应变图

由图3(a)所示的截面应变图可得截面屈服曲率为:

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{h_{w0} - x} \quad (6)$$

由平截面假定,可得:

$$\varepsilon_y' = (x - a_s')\phi_y$$

$$\varepsilon_c = x\phi_y$$

$$F_s = f_y A_s$$

$$F_a = f_y A_a$$

$$F_s' = E_s \varepsilon_s' A_s'$$

$$F_a' = E_s \varepsilon_a' A_a'$$

$$F_{sw} = \rho_w b_w (h_{w0} - x) f_y / 2$$

$$F_{sw}' = \rho_w b_w (x - a_s')^2 E_s \phi_y / 2$$

$$F_c = b_w E_c x^2 \phi_y / 2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & N + f_y A_s + f_a A_a + \frac{1}{2} \rho_w b_w (h_{w0} - x) f_y \\ &= E_s \phi_y (x - a_s') (A_s' + A_a') + \\ & \frac{1}{2} \rho_w b_w (x - a_s')^2 E_s \phi_y + \frac{1}{2} b_w E_c x^2 \phi_y \end{aligned} \quad (8)$$

$$\phi_y =$$

$$\frac{N + f_y A_s + f_a A_a + \rho_w b_w (h_{w0} - x) f_y / 2}{E_s (x - a_s') [A_s' + A_a' + \rho_w b_w (x - a_s') / 2] + b_w E_c x^2 / 2} \quad (9)$$

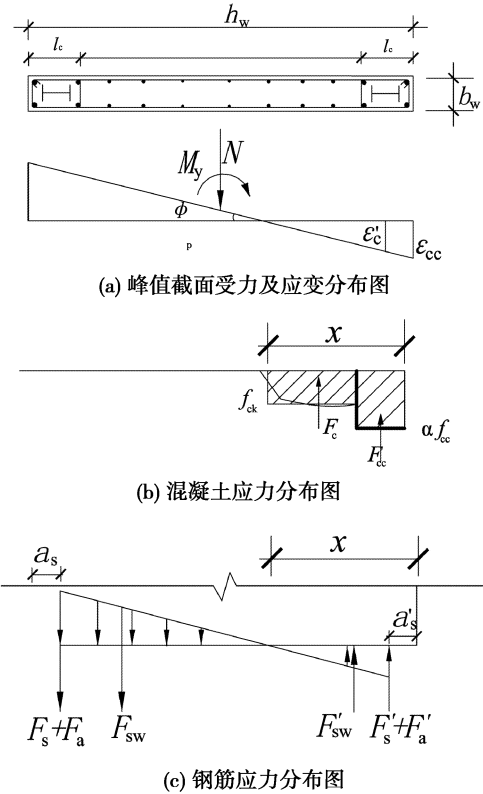
联立式(6)与(9)可求解截面受压区高度 x 和屈服曲率 ϕ_y 。

根据弯矩平衡关系,对截面形心轴取矩,可得剪力墙的屈服弯矩表达式:

$$\begin{aligned} M_y = & (F_s + F_a) \left(\frac{h_w}{2} - a_s \right) + \frac{1}{6} F_{sw} (h_{w0} - 3a_s + 2x) + \\ & \frac{1}{6} F_c (3h_w - 2x) + \frac{1}{6} F_{sw}' (3h_w - 4a_s' - 2x) + (F_s' + \\ & F_a') \left(\frac{h_w}{2} - a_s' \right) \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 峰值弯矩和曲率

对有约束边缘构件的型钢混凝土剪力墙,当剪力墙受压区边缘混凝土应变达到约束混凝土峰值压应变 ε_{cc} ,且非约束区受压外侧应变达到混凝土峰值压应变 ε_c 时,剪力墙截面达到最大承载能力。则剪力墙在受拉破坏时的截面应力-应变分布如图4所示。



(a) 峰值截面受力及应变分布图

(b) 混凝土应力分布图

(c) 钢筋应力分布图

图4 截面极限状态应力-应变图

计算截面混凝土的压力时,用等效矩形应力图代替实际的混凝土压应力图形,等效矩形应力图形高度 x 为压区实际高度 x_n 的 0.8 倍。由此可得截面的峰值曲率,即:

$$\phi_p = \frac{\varepsilon_{cc}}{1.25x} \quad (11)$$

式中 ε_{cc} 为约束混凝土的峰值压应变。

采用文献[10]中约束混凝土的基本关系,即:

$$\begin{cases} \varepsilon_{cc} = (1 + 3.50\lambda_v)\varepsilon_{co} \\ \varepsilon_{ccu} = (2.34 + 2.49\lambda_v^{0.73})\varepsilon_{cc} \\ f_{cc} = (1 + 1.79\lambda_v)f_c \end{cases} \quad (12)$$

式中: ε_{cc} 为约束混凝土的峰值应变; ε_{co} 为无约束混凝土的峰值应变,取 0.0018; λ_v 为配箍特征值; f_{cc} 为约束混凝土轴心抗压强度; f_c 为非约束混凝土抗压强度。

由平截面假定,可得:

$$\begin{aligned} F_{sw} &= \rho_w b_w (h_{w0} - 1.5x) \\ F_{cc} &= \alpha b_w l_c f_{cc} \\ F_c &= f_c b_w (x - l_c) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: F_{cc} 为约束混凝土的压力; α 为与约束区有关的系数,取 0.85; F_c 为非约束混凝土的压力。

当 $x > l_c$ 时,将有关参数代入式(11)可得:

$$x = \frac{N + b_w h_{w0} \rho_w f_{yw} + b_w l_c f_c - \alpha b_w l_c f_{cc}}{1.5 b_w \rho_w f_{yw} + b_w f_c} \quad (14)$$

对截面形心轴取矩,则得剪力墙截面受压区高度大于约束区长度时的受弯承载力,即:

$$\begin{aligned} M_p &= \alpha b_w l_c f_{cc} (h_w - l_c)/2 + 0.5 b_w (x - l_c) f_c (h_w - l_c - x) + \\ &0.5 b_w (h_{w0} - 1.5x) \rho_w f_{yw} (1.5x - a_s) + 2 f_y (A_s + A_a) (h_w/2 - a_s) \end{aligned} \quad (15)$$

当 $x < l_c$ 时,同理可得:

$$x = \frac{N + b_w h_{w0} \rho_w f_{yw}}{1.5 b_w \rho_w f_{yw} + \alpha b_w f_c} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} M_p &= \alpha b_w x f_{cc} (h_w - x)/2 + f_y (A_s + A_a) (h_w - 2a_s) + \\ &0.5 b_w (h_{w0} - 1.5x) \rho_w f_{yw} (1.5x - a_s) \end{aligned} \quad (17)$$

2.4 极限弯矩和曲率

极限弯矩 M_u 取 0.85 的峰值弯矩 M_p , 极限曲率取极限弯矩对应的曲率。定义剪力墙受压区约束混凝土应变达到相应的极限压应变 ε_{ccu} 时的截面曲率为极限曲率 ϕ_u , 即:

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{ccu}}{x_n} = \frac{\varepsilon_{ccu}}{1.25 \xi h_{w0}} \quad (18)$$

研究表明^[11], 当截面边缘混凝土压应变达到混凝土峰值应变后时, 截面受压区高度基本保持不变。所以极限曲率时的受压区高度可按式(14)或式(16)确定。

3 计算结果与试验结果的比较

表 1 为按上述公式所得的开裂弯矩、屈服弯矩和峰值弯矩的计算值以及计算值与试验值之比。由表可知, 弯矩计算值与试验值之比的平均值和变异系数, 对于开裂弯矩分别为 1.035, 0.120; 对于屈服弯矩分别为 0.978, 0.074; 对于峰值弯矩分别为 0.981, 0.076。可见, 计算值与试验值符合较好, 表明上述假定和计算方法是合理可靠的。

弯矩计算值与试验值的比较 表 1

试件 编号	开裂弯矩/(kN·m)			屈服弯矩/(kN·m)			峰值弯矩/(kN·m)		
	试验 值	计算 值	计算值/ 试验值	试验 值	计算 值	计算值/ 试验值	试验 值	计算 值	计算值/ 试验值
SCW-1	295.6	322.2	1.09	558.5	625.5	1.088	614.6	636.7	1.036
SCW-2	400.6	336.5	0.84	583.9	624.8	1.073	665.6	712.2	1.070
SCW-3	294.4	282.6	0.96	593.0	610.8	1.038	662.9	668.9	1.009
SCW-4	400.0	472.0	1.18	622.8	579.2	0.993	709.5	681.1	0.991
SCW-5	301.6	265.4	0.96	627.4	639.9	1.019	703.9	682.8	0.991
SCW-6	394.2	480.9	1.22	651.3	612.2	0.991	749.4	711.9	0.985
SCW-7	396.0	423.7	1.07	642.6	591.2	0.938	756.2	680.6	0.987
SCW-8	401.0	417.0	1.04	655.3	583.2	0.942	797.0	836.9	1.014
SHPCW-1	667.5	607.4	0.94	1054.9	1023.3	0.97	1388.0	1179.8	0.807
SHPCW-2	801.0	752.9	0.94	1202.1	1154.0	0.96	1459.4	1363.1	0.934
CSW-2	90.0	97.2	1.01	192.0	174.7	0.95	273.0	241.3	0.884
CSW-3	150.0	159.0	1.00	198.0	211.9	1.07	297.0	283.9	0.956
CSW-4	240.0	220.8	0.98	624.0	536.6	0.83	626.4	570.0	0.990
SRCW1	1021.3	1133.6	1.11	1022.7	961.3	0.94	1187.4	1056.8	0.990
SRCW2	1135.9	1294.9	0.86	1103.6	1180.9	1.16	1320.5	1372.0	1.039
SRCW3	1250.9	1113.3	0.98	1229.4	1118.8	0.94	1444.1	1527.9	1.058
CSRCW-1	209.3	244.9	1.20	593.3	623.0	1.20	921.4	995.1	1.078
CSRCW-2	209.6	194.9	0.98	532.2	505.6	1.05	809.1	784.8	0.974
CSRCW-4	246.0	305.0	1.24	620.4	601.8	1.02	844.5	943.3	1.117

4 结论

根据上述分析, 可得以下结论:

(1) 基于平截面假定所推导的型钢混凝土剪力墙开裂弯矩、屈服弯矩和极限弯矩计算公式, 其计算值与试验值比较符合。

(2) 对于约束区长度较大的约束箍筋配筋方式, 承载能力极限状态时约束边缘构件中的混凝土不一定全部达到约束混凝土抗压强度。因此, 在剪力墙承载力计算时, 如假定约束区长度内的混凝土均达到约束混凝土抗压强度, 则应对约束混凝土抗压强度予以折减。

参 考 文 献

- [1] JOHN W WALLACE, KUTAY O RAKCAL, MARCUS CHERLIN. Lateral-load behavior of shear walls with structural steel boundary columns[C]//Proceedings of sixth ASCCS Conference on composite and hybrid structures. Los Angeles, USA, 2000:801-808.
- [2] DAN D, FABIAN A, STOIAN V. Theoretical and experimental study on composite steel concrete shear walls with vertical steel encased profiles[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(5):800-813.

- [3] ZHOU YING, LU XILING. Seismic behavior of composite shear walls with multi-embedded steel section [J]. The Structural Design of Tall Special Buildings, 2010, 19(6): 618-639.
- [4] 梁兴文, 白亮, 杨红楼, 等. 型钢高性能混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 131-138.
- [5] 蒋冬启, 肖从真, 陈涛, 等. 高强混凝土钢板组合剪力墙压弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 12(3): 17-25.
- [6] 钱稼茹, 魏勇. 高轴压比钢骨混凝土剪力墙的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008(4): 43-50.
- [7] 刘航, 蓝宗建, 庞同和. 劲性钢筋混凝土低剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(5): 32-37.
- [8] 郭子雄, 童岳生, 钱国芳. RC 低矮抗震墙恢复力模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(1): 25-28.
- [9] 李国强, 崔大光. 钢骨混凝土梁柱框支剪力墙试验与恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 73-80.
- [10] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报, 2002, 42(10): 1369-1373.
- [11] THOMSEN J H, WALLACE J. Displacement-based design of slender reinforced concrete walls-experimental verification[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 618-630.