

文章编号: 1000-4750(2020)09-0123-10

高强矩形螺旋钢筋约束高强混凝土剪力墙 截面弯矩-曲率计算方法研究

赵花静¹, 李青宁², 赵 珺¹, 李书锋³, 郑 玉²

(1. 西安建筑科技大学理学院, 陕西, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055;

3. 许昌学院交通运输学院, 河南, 许昌 461000)

摘 要: 为改善高强混凝土剪力墙的抗震性能, 将高强矩形螺旋钢筋 (HRSRs) 应用于高强混凝土剪力墙的约束边缘构件及墙身。通过对 10 个 HRSR 高强混凝土剪力墙抗震性能的研究, 并基于对 HRSR 强约束作用的考虑, 提出与 HRSR 高强混凝土剪力墙开裂状态、屈服状态、峰值状态和极限状态对应的弯矩-曲率计算方法。研究表明, 该文建议的压弯构件弯矩-曲率计算公式能较为准确地描述剪力墙各阶段的荷载-变形关系, 计算值与试验值吻合较好。与普通箍筋形式的高强混凝土剪力墙相比, 采用连续封闭的 HRSR, 能够显著提高高强混凝土剪力墙截面的承载能力和变形能力。

关键词: 高强矩形螺旋钢筋; 剪力墙; 压弯构件; 弯矩-曲率; 承载力

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.10.0603

CALCULATION METHOD FOR MOMENT-CURVATURE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE SHEAR WALL CONFINED WITH HIGH-STRENGTH RECTANGLE SPIRAL REINFORCEMENTS

ZHAO Hua-jing¹, LI Qing-ning², ZHAO Jun¹, LI Shu-feng³, ZHENG Yu²

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. Department of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

3. School of transportation, Xuchang University, Xuchang, He'nan 461000, China)

Abstract: In order to improve the seismic performance of high-strength concrete shear walls, the high-strength rectangular spiral reinforcements (HRSRs) are applied to the constrained edge members and wall body of high-strength concrete shear wall. Through the seismic performance investigations of 10 high-strength concrete shear walls confined with HRSR, and considering the strong constraint of HRSR, the bending moment curvature calculation method of high-strength concrete shear walls confined with HRSR is proposed corresponding to the cracking, yielding, peak and ultimate states. The study shows that the bending moment curvature formula of the bending member can describe the load-deformation relation of the shear wall more accurately, and the calculated values are in good agreement with the experimental values. Compared with the form of common stirrup, the continuous closed HRSR can significantly improve the sectional bearing capacity and deformation capacity of high-strength concrete shear walls.

Key words: high-strength rectangular spiral reinforcements; shear walls; eccentrically compressed members; moment-curvature; bearing capacity

收稿日期: 2019-10-21; 修改日期: 2020-05-09

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2019JQ-765, 2019JM-168); 教育厅专项科研计划项目(18JK1420); 西安建筑科技大学基础研究基金项目(JC1611, RC1901)

通讯作者: 赵花静(1985—), 女, 陕西人, 副教授, 博士, 从事钢筋混凝土剪力墙结构研究 (E-mail: zhaohj@xauat.edu.cn).

作者简介: 李青宁(1952—), 男, 陕西人, 教授, 硕士, 博导, 从事高层抗震研究及桥梁抗震研究 (E-mail: lqn419@126.com);

赵 珺(1980—), 女, 陕西人, 副教授, 博士, 从事钢筋混凝土构件研究及桥梁抗震研究 (E-mail: zhaojun@xauat.edu.cn);

李书锋(1990—), 男, 河南人, 讲师, 博士, 从事高强混凝土梁柱节点抗震研究 (E-mail: lsfl516@163.com);

郑 玉(1992—), 男, 山东人, 硕士生, 从事钢筋混凝土结构抗震性能研究 (E-mail: 553079169@qq.com).

剪力墙墙肢的塑性变形能力和抗地震倒塌能力,除了与纵筋配筋率、截面相对受压区高度或轴压比有关外,还与墙体采用的混凝土材料^[1]、两端的约束范围、约束区配箍特征值及配箍形式等有关^[2]。通常在剪力墙两端设置约束边缘构件,使墙肢端部成为箍筋约束混凝土,从而具有较大的受压变形能力^[3]。因为高强矩形螺旋箍筋所具有的高强、连续、封闭的特点,已被广泛应用于梁、柱、节点等构件^[4-5]。本文将其应用到高强混凝土剪力墙约束边缘构件中,能够显著提高约束混凝土的极限压应变,从而有效提高高强混凝土剪力墙的承载能力和变形能力。

本文基于 10 片 HRSR 高强混凝土剪力墙的低周往复加载试验结果,拟对考虑边缘构件约束混凝土影响的 HRSR 高强混凝土剪力墙截面弯矩-曲率分析法^[6]进行研究;以开裂点、屈服点、峰值点和极限破坏点为特征点,将实际的弯矩-曲率曲线简化为 4 线型骨架曲线模型^[7];基于试验中剪力墙截面应变的实际分布,分别建立 HRSR 高强混凝土剪力墙开裂状态、屈服状态、峰值状态、极限破坏状态时的弯矩-曲率计算方法,推导了各状态弯矩和曲率的表达式。

1 试验概况

1.1 试件设计

对两组共 10 个 1/2 缩尺模型—HRSR 高强混凝土剪力墙试件^[8-9]进行了拟静力试验。墙体截面两端设置约束边缘构件,纵筋采用 HRB400 级热轧钢筋。箍筋和水平分布筋采用直径为 5 mm 的 HTH1000 高强度热处理钢筋^[10],以嵌套方式配置,形成高强矩形螺旋箍筋和高强螺旋水平分布筋。试件几何尺寸及配筋见图 1。主要参数详见表 1。混凝土及钢筋的力学性能指标见表 2 和表 3。

1.2 加载装置与加载制度

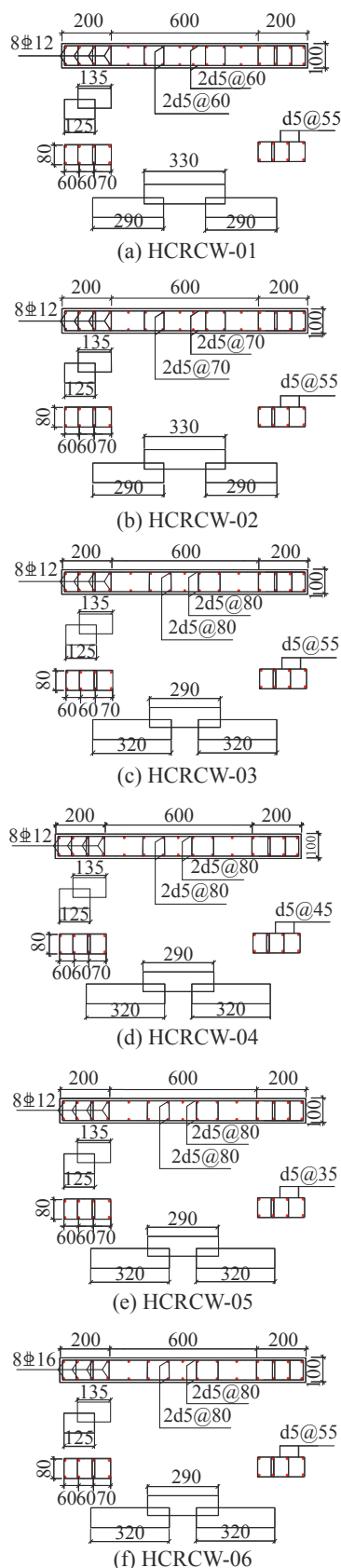
试验拟静力加载装置如图 2 所示。加载制度同文献 [8]。

1.3 测试内容及测点布置

试验中主要测试内容有:1)墙顶水平荷载和位移;2)墙体塑性铰区弯曲变形、钢筋滑移变形以及总水平位移;3)墙体塑性铰区以上区域剪切变形;4)梁的刚体位移;5)墙体塑性铰区纵筋及竖向分布筋应变;6)荷载-位移滞回曲线。位移计布置如图 3 所示。

2 本构关系

本文采用的高强箍筋约束高强混凝土应力-应变全曲线^[11],如图 4 所示。该模型的上升段和下



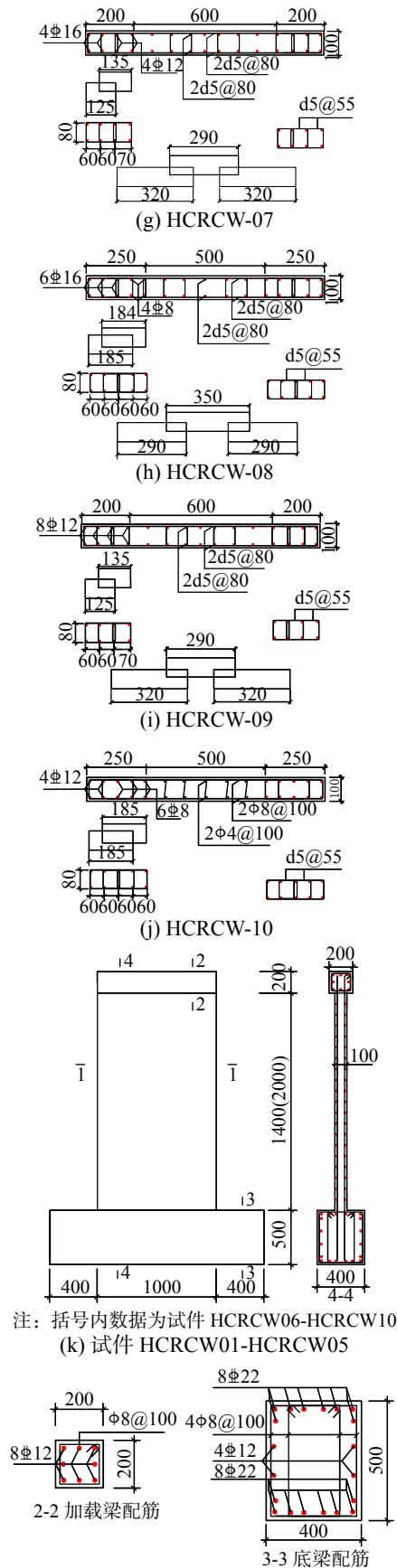


图1 试件几何尺寸及配筋 /mm
Fig. 1 Dimensions and reinforcements arrangement of specimen

降段分别采用 Popovics 模型^[12] 和 Fafitis 和 Shah 模型^[13] 的表达形式。因本文与文献 [11] 所采用的为同一批高强矩形螺旋钢筋, 且通过对峰值状态时的剪力墙约束区应变试算比较符合, 因此采用该本构模型。

其具体表达式如下:

$$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = 1 + 1.25 \left(\frac{f_{le}}{f_{c0}} \right)^{0.46} \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 35.46 \left(\frac{f_{le}}{f_{c0}} \right)^{0.98} \quad (2)$$

$$f_c = f_{cc} \left[\frac{\alpha (\varepsilon_c / \varepsilon_{cc})}{\alpha - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{cc})^\alpha} \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_c = \frac{x_p - l_c}{x_p} \varepsilon_{cc} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{85} = \varepsilon_{085} + 3 \times 10^6 (\rho_{sv} \varepsilon_{cc})^2 - 52.57 \rho_{sv} \varepsilon_{cc} \quad (5)$$

式中: f_{cc} 与 ε_{cc} 分别为约束混凝土的峰值应力和峰值应变; f_{c0} 与 ε_{c0} 分别为非约束混凝土的峰值应力和峰值应变, 取 $\varepsilon_{c0} = 0.002$ ^[8]; f_c 与 ε_c 分别为墙身混凝土的抗压强度及对应的应变; α 为控制曲线初始刚度和上升段的系数, α 值越大, 表明上升段越接近直线且弹性模量越大。 ε_{85} 与 ε_{085} 分别为约束与非约束混凝土强度下降至峰值的 85% 时所对应的应变^[11]; f_{le} 为约束混凝土达到峰值应力时对应的箍筋有效侧向约束力^[14]; ρ_{sv} 为面积配箍率。

3 骨架曲线

取低周反复水平荷载作用下剪力墙试件 $P-\Delta$ 滞回曲线的外包线得其骨架曲线, 将其简化为 4 线型, 如图 5 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、峰值点和极限破坏点对应的弯矩和曲率^[7]。

4 HRSR 高强混凝土剪力墙正截面弯矩-曲率方程

针对以弯压破坏为主的 HRSR 高强混凝土剪力墙构件, 考虑其边缘构件高强螺旋箍筋对混凝土的约束作用, 分析轴力 N 和弯矩 M 共同作用下的偏心受压计算, 提出对称配筋的 HRSR 高强混凝土剪力墙各阶段正截面弯矩-曲率的计算方法。

4.1 开裂弯矩和曲率

图 6 为实测的 HRSR 高强混凝土剪力墙开裂点截面应变分布图。当剪力墙截面受拉区边缘混

表 1 试件主要参数
Table 1 Parameters of specimens

试件编号	约束区长度/mm	λ	n	约束边缘构件纵筋		约束边缘构件箍筋			墙体配筋		
				配筋	$\rho_s/(%)$	配筋	$\rho_{sv}/(%)$	λ_v	水平分布筋	竖向分布筋	$\rho_w/(%)$
HCRCW-01	200	1.5	0.31	8 Φ 12	4.5	d5@55	1.5	0.38	d5@60	d5@60	0.65
HCRCW-02	200	1.5	0.22	8 Φ 12	4.5	d5@55	1.5	0.38	d5@70	d5@70	0.56
HCRCW-03	200	1.5	0.22	8 Φ 12	4.5	d5@55	1.5	0.38	d5@80	d5@80	0.49
HCRCW-04	200	1.5	0.31	8 Φ 12	4.5	d5@45	1.8	0.47	d5@80	d5@80	0.49
HCRCW-05	200	1.5	0.22	8 Φ 12	4.5	d5@35	2.3	0.60	d5@80	d5@80	0.49
HCRCW-06	200	2.1	0.22	8 Φ 16	8.0	d5@55	1.5	0.38	d5@80	d5@80	0.49
HCRCW-07	200	2.1	0.22	4 Φ 16+4 Φ 12	6.3	d5@55	1.5	0.38	d5@80	d5@80	0.49
HCRCW-08	250	2.1	0.22	6 Φ 16+4 Φ 8	5.6	d5@55	1.5	0.38	d5@80	d5@80	0.49
HCRCW-09	200	2.1	0.22	8 Φ 12	4.5	d5@55	1.5	0.38	d5@80	d5@80	0.49
HCRCW-10	250	2.1	0.17	4 Φ 12+6 Φ 8	3.0	d5@55	1.5	0.38	Φ 8@100	Φ 4@100	1.00

注： λ 为剪跨比； n 为试验轴压比； ρ_s 、 ρ_w 分别为纵筋和水平分布筋配筋率； λ_v 为配箍特征值。

表 2 混凝土力学性能指标
Table 2 The mechanical properties of concrete

混凝土设计强度等级	f_{cu}/MPa	$f_{cu,m}/\text{MPa}$	$f_{c,m}/\text{MPa}$
C50	65.91, 57.36	57.1	44.2
	60.42, 50.69		
	52.51, 55.70		

注： f_{cu} 为标准立方体试块抗压强度实测值； $f_{cu,m}$ 为立方体抗压强度实测值的平均值； $f_{c,m}$ 表示轴心抗压强度平均值。

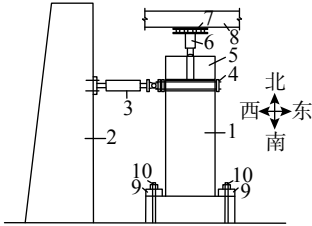
表 3 钢筋力学性能指标
Table 3 The mechanical properties of reinforcements

钢筋种类	钢筋直径	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa	$\delta/(%)$
高强钢筋	d=5	965	1120	2.05×10^5	10
	Φ 8	535	665	2.06×10^5	25
HRB400	Φ 12	437.5	585	2.03×10^5	25
	Φ 16	452.5	610	2.01×10^5	25

注：表中 f_y 表示钢筋屈服强度； f_u 表示钢筋抗拉强度的试验值； E_s 为钢筋弹性模量； δ 为钢筋断后伸长率。



(a) 现场加载装置



注：1—试件；2—反力墙；3—往复作动器；4—水平连接装置；5—刚性垫梁；6—千斤顶；7—滑动支座；8—反力梁；9—压梁；10—地锚螺栓

(b) 加载示意图

图 2 试验装置图

Fig. 2 Test set-up

凝土应变达到其极限拉应变 ϵ_{tu} 时，受拉区混凝土开裂，剪力墙截面进入开裂状态，对应的开裂弯矩为 M_{cr} 。

该阶段基本特点为：1) 剪力墙截面受拉区边缘混凝土达到其极限拉应变 ϵ_{tu} ，截面受拉区混凝土应力呈曲线分布，为简化计算，按照开裂弯矩

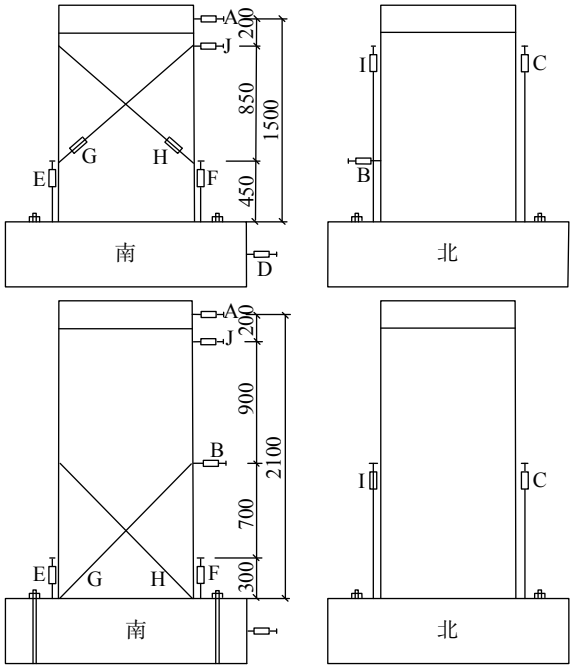


图 3 测点布置图 /mm

Fig. 3 Displacement measuring point arrangement

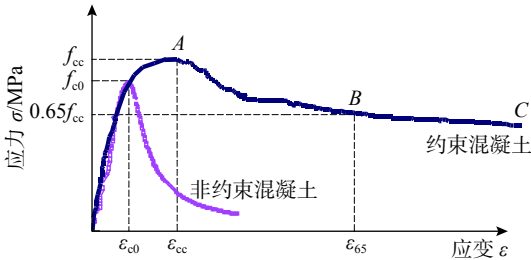


图 4 应力-应变全曲线

Fig. 4 Stress-strain curve

相等原则，将受拉区曲线应力图转换为三角形分布图^[15]，其最外边缘混凝土应力取 γf_t ， $\gamma=2.0$ ；2) 截面受压区混凝土应力仍处于弹性阶段，压应力图形为三角形分布；此时螺旋箍筋的拉应力很小，对核心混凝土的约束作用不明显，因此不考虑

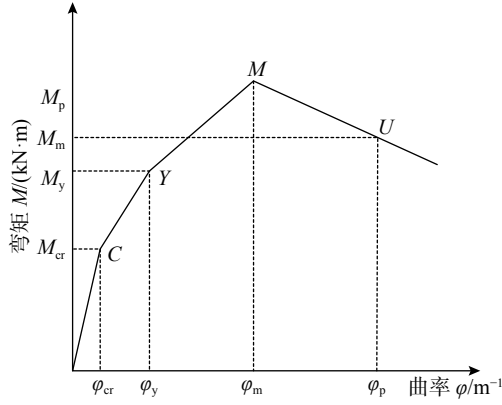


图5 弯矩-曲率骨架曲线

Fig. 5 Moment-curvature skeleton curve

高强螺旋箍筋约束作用；3) 考虑约束边缘构件中受拉和受压纵筋的作用；4) 竖向分布筋应力按三角形分布计算；若其配筋率较小时，可忽略其作用。

根据上述分析，可得图7所示剪力墙开裂截面的应力、应变分布。由图7所示截面应变图，可得截面开裂曲率，即：

$$\varphi_{cr} = \frac{\varepsilon_{tu}}{h_w - x_{cr}} = \frac{1}{h_w - x_{cr}} \frac{\gamma f_t}{E_c} \quad (6)$$

则由平截面假定可得下列基本关系：

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= x_{cr} \cdot \varphi_{cr}; \quad \varepsilon_s = (h_{w0} - x_{cr}) \cdot \varphi_{cr}, \\ \sigma_c &= E_c \varepsilon_c = E_c x_{cr} \cdot \varphi_{cr}, \\ \sigma_s &= E_s \varepsilon_s = E_s (h_{w0} - x_{cr}) \cdot \varphi_{cr}, \\ \sigma'_s &= E_s \varepsilon'_s = E_s (x_{cr} - a'_s) \cdot \varphi_{cr} \end{aligned} \quad (7)$$

由图7所示的截面应力图，可得：

$$\begin{aligned} T_s &= \sigma_s A_s = \sigma_s \rho_s b_w l_c, \\ T_c &= 0.5 \gamma f_t b_w (h_w - x_{cr}), \\ T_{sw} &= 0.5 (h_w - x_{cr} - l_c)^2 b_w \rho_w E_s \varphi_{cr}, \\ T'_s &= \sigma'_s A'_s = \sigma'_s \rho'_s b_w l_c, \\ T'_{sw} &= 0.5 (x_{cr} - l_c)^2 b_w \rho_w E_s \varphi_{cr}, \\ C_c &= 0.5 b_w x_{cr} \sigma_c = 0.5 b_w x_{cr}^2 E_c \varphi_{cr} \end{aligned} \quad (8)$$

式中： 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； ε_c 为受压区边缘混凝土压应变； ε_s 为受拉区纵向受力钢筋应变； ε'_s 为受压区纵向受力钢筋应变； γf_t 为受拉边缘混凝土等效应力； σ_c 为受压区边缘混凝土应力； σ_s 为受拉区纵向受力钢筋应力； σ'_s 为受压区纵向受力钢筋应力； T_s 为纵向受拉钢筋合力； T_{sw} 为受拉区竖向分布筋合力； T_c 为受拉区混凝土合力； T'_s 为纵向受压钢筋合力； T'_{sw} 为受压区竖向分布筋合力； E_c 为受压区混凝土合力。

根据截面力的平衡方程可得：

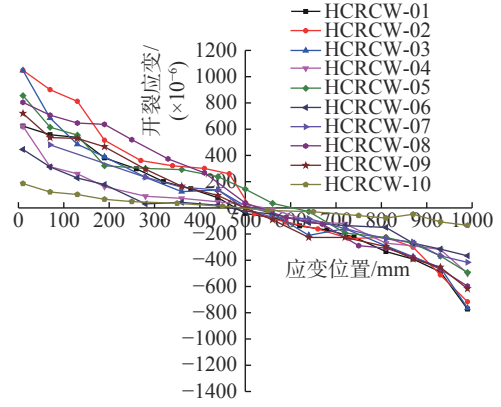


图6 实测开裂状态截面应变分布图

Fig. 6 Measured strain distribution of section at cracking state

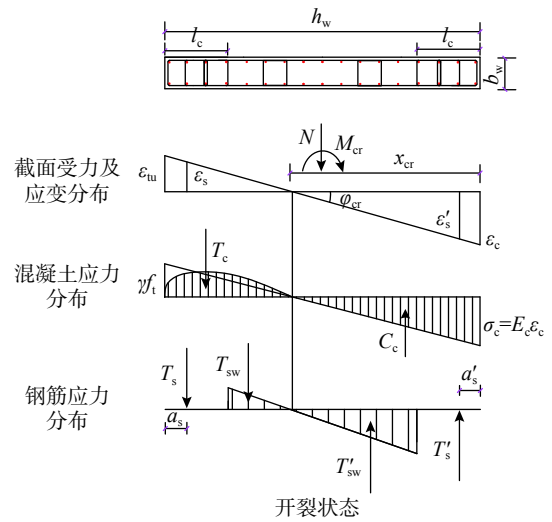


图7 截面开裂状态应力、应变分布图

Fig. 7 Stress and strain distribution of section at cracking state

$$N + T_c + T_s + T_{sw} = T'_s + T'_{sw} + C_c \quad (9)$$

联立式(6)和式(9)，可求解截面受压区高度 x_{cr} 和曲率 φ_{cr} 。

对截面形心轴取矩，可得剪力墙截面开裂弯矩表达式：

$$\begin{aligned} M_{cr} &= T_s \cdot \left(\frac{h_w}{2} - a_s \right) + T_{sw} \cdot \left(\frac{h_w + 2x_{cr} - 4l_c}{6} \right) + \\ &T_c \cdot \left(\frac{h_w}{6} + \frac{x_{cr}}{3} \right) + T'_s \cdot \left(\frac{h_w}{2} - a'_s \right) + \\ &T'_{sw} \cdot \left(\frac{3h_w - 4l_c - 2x_{cr}}{6} \right) + N_c \cdot \left(\frac{h_w}{2} - \frac{x_{cr}}{3} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

4.2 屈服弯矩与曲率

图8为实测HRSR高强混凝土剪力墙屈服点截面应变分布图。可以看出，截面屈服时受拉区纵向受力钢筋应变已达到其屈服应变，且实测平均应变沿墙截面高度的变化规律仍能基本符合平

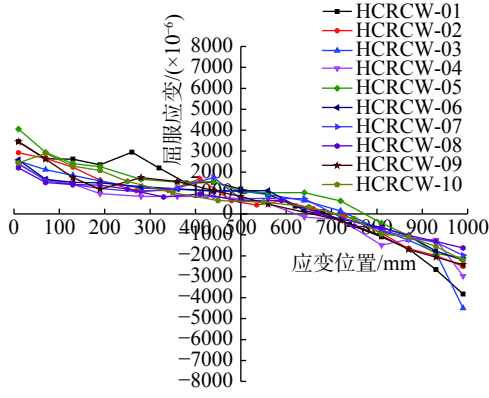


图 8 实测的屈服状态截面应变分布图

Fig. 8 Measured strain distribution of section at yielding state

截面假定。所有试件在截面受拉区边缘出现应变突增，主要原因是受剪切变形的影响；其中试件 HCRCW-01、HCRCW-02 和 HCRCW-07 在截面中心区域竖向受拉分布筋出现应力突然增大，应变加快。原因在于该处有斜裂缝穿过，导致钢筋应力增长。总体而言，截面应变仍然满足平截面假定。

当剪力墙截面约束边缘构件外侧纵向受拉钢筋应变达到其屈服应变 ε_y 时，剪力墙截面达到屈服状态。该阶段基本特点为：1) 截面受拉区大部分混凝土已开裂，仅靠近中和轴附近的一小部分混凝土承受拉力，故不考虑受拉混凝土的作用；受压区混凝土应变 $\varepsilon_c < \varepsilon_{c0}$ ，处于弹性阶段，压应力分布为三角形线性分布，不考虑高强螺旋箍筋约束作用；2) 受拉纵筋应力达到其屈服强度时，受压纵筋应力可先按屈服 $\sigma'_s = f_y$ 计算，然后验证 $\varepsilon'_s \geq \varepsilon_y$ 是否成立，不成立时，按压筋未屈服计算，即 $\sigma'_s = (x_y - a'_s)\phi_y E_s$ ；3) 水平分布筋未发生屈服，竖向分布筋受压应力较小，不予考虑。仅考虑受拉区竖向分布筋的贡献，应力按三角形分布计算。

如图 9 所示，截面的屈服曲率为：

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{h_{w0} - x_y} \quad (11)$$

则由平截面假定可得下列基本关系：

$$\begin{aligned} \varepsilon'_s &= (x_y - a'_s)\phi_y; \varepsilon_c = x_y\phi_y, \\ \varepsilon_{sw} &= (h_w - x_y - l_c)\phi_y, \\ \sigma_c &= E_c\varepsilon_c; \sigma_{sw} = E_s\varepsilon_{sw} \end{aligned} \quad (12)$$

式中， ε_{sw} 和 σ_{sw} 分别为受拉区边缘竖向分布筋的应变、应力。

截面屈服时各应力的合力分别为：

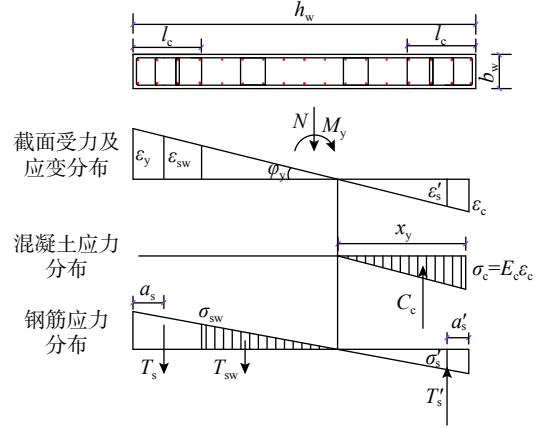


图 9 截面屈服状态应力、应变分布图

Fig. 9 Stress and strain distribution of section at yielding state

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{1}{2} f_y A_s; T'_s = \frac{1}{2} \sigma'_s A'_s, \\ T_{sw} &= 0.5 f_{yw} \rho_w b_w (h_w - 2l_c), \\ C_c &= 0.5 \sigma_c b_w x_y \end{aligned} \quad (13)$$

根据竖向力的平衡关系得：

$$N + T_s + T_{sw} = T'_s + T'_{sw} + C_c \quad (14)$$

联立式 (11) 与式 (14) 可求解截面受压区高度 x_y 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：

$$\begin{aligned} M_y &= T_s \left(\frac{h_w}{2} - a_s \right) + T_{sw} \left(\frac{h_w}{6} - \frac{2l_c - x_y}{3} \right) + \\ &T'_s \left(\frac{h_w}{2} - a'_s \right) + C_c \left(\frac{h_w}{2} - \frac{x_y}{3} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

4.3 峰值弯矩与曲率

试验表明^[8-9]，剪力墙边缘构件设置高强螺旋箍筋可提高其极限承载力及变形能力，因此计算时应考虑高强螺旋箍筋对核心区混凝土的约束作用^[16]。图 10 为实测 HRSR 高强混凝土剪力墙峰值荷载点截面应变分布图。可以看出，截面受压区约束边缘构件应变出现大幅度增长，截面应变不再符合平截面假定。由图 10 可知，从截面受拉端至非约束区受压外侧应变分布为线性分布，截面受压侧约束边缘构件应变梯度增大^[17]。依据峰值荷载状态实测应变，HRSR 高强混凝土剪力墙达到峰值荷载时，约束区截面外侧（扣除混凝土保护层）受压应变平均值为 13892×10^{-6} ，非约束区受压外侧平均应变为 2980×10^{-6} ，达到了非约束混凝土的极限压应变。

本文提出高强螺旋钢筋约束高强混凝土剪力

墙截面峰值状态承载力计算简图如图 11 所示, 当截面受压外侧达到约束混凝土的极限压应变 ε_{ccu} (取应力下降至峰值应力 85% 时对应的应变 ε_{85}), 非约束区受压外侧应变达到混凝土极限压应变 ε_{cu} ($\varepsilon_{cu}=0.003$) 时, 剪力墙截面达到最大承载能力, 此时对应的峰值弯矩为 M_p 。

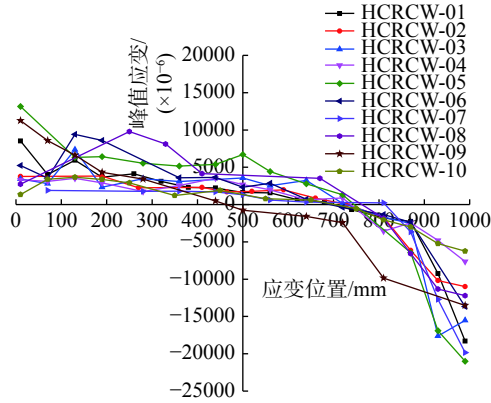


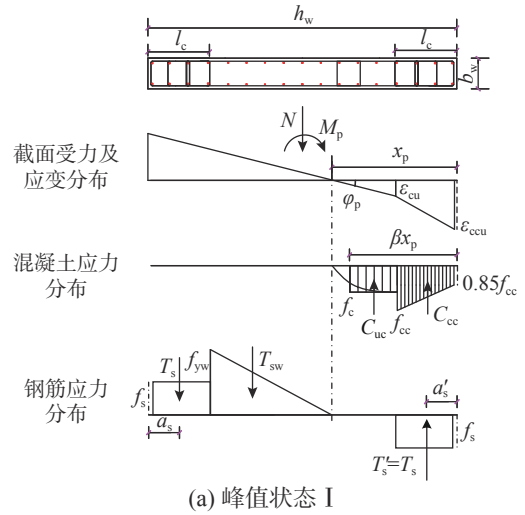
图 10 峰值状态截面应变分布图
Fig. 10 Measured strain distribution of section at peaking state

该阶段的基本特点为: 1) 墙体屈服后, 截面受拉区与受压区应变分布不再符合平截面假定, 主要由于粘结滑移影响而导致^[18]; 2) 不考虑受拉混凝土的作用; 受压区非约束区混凝土应力达到 f_c , 约束混凝土内侧应力达到峰值应力 f_{cc} ^[11], 约束混凝土外边缘应力约为峰值应力的 0.85 倍, 即受压区约束混凝土应力取峰值应力 f_{cc} 下降至 $0.85f_{cc}$ 的直线; 3) 在峰值荷载状态下, 拉、压约束边缘构件纵向钢筋应力均已达到极限抗拉强度 $f_s=f_u$ (用于设计计算时取 $f_s=f_y$); 4) 达到峰值承载力时, 墙体水平分布筋未达到屈服, 受压区竖向分布筋尚未屈服, 不予考虑。只考虑竖向分布钢筋受拉作用。

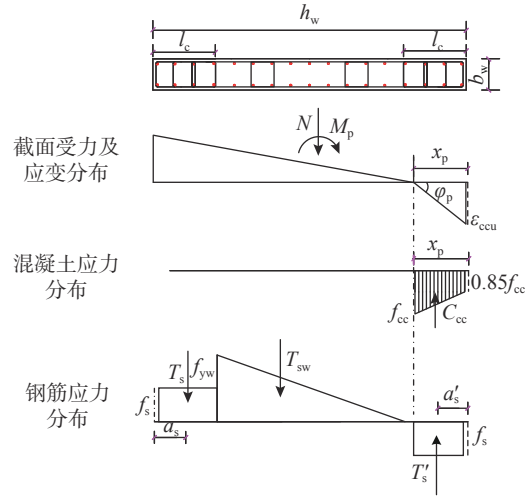
竖向分布筋屈服强度较高 ($f_{yw} = 965$ MPa), 当剪力墙达到峰值荷载时, 靠近约束边缘构件的竖向分布筋能达到屈服强度, 受拉应变平均值为 4765×10^{-6} , 靠近形心轴的受拉应变平均值为 1660×10^{-6} , 根据试验中应变的实际大小及分布, 规定受拉区竖向分布筋应力呈三角形分布。

因非约束区混凝土应力呈曲线分布, 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为压区实际高度的 0.8 倍^[13, 18-19]。

约束区混凝土采用文献 [11] 的高强箍筋约束高强混凝土应力-应变关系, 非约束区混凝土采用



(a) 峰值状态 I



(b) 峰值状态 II

图 11 截面峰值状态应力、应变分布图

Fig. 11 Stress and strain distribution of wall at peaking state

文献 [15] 的应力-应变关系。

1) 当 $x > l_c$ 时 (即受压区高度大于约束区长度时), 如图 11(a) 所示, 可得截面的峰值曲率, 即

$$\varphi_p = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_p - l_c} \quad (16)$$

式中, ε_{cu} 为非约束混凝土极限压应变, 取 $\varepsilon_{cu} = 0.003$; x_p 为峰值状态下剪力墙截面受压区高度; l_c 为剪力墙约束区高度。

截面各力的关系式如下:

$$\begin{aligned} C_{cc} &= 0.5(1 + 0.85)f_{cc}b_wl_c, \\ C_{uc} &= 0.8(x_p - l_c)b_wf_c, \\ T_{sw} &= 0.5f_{yw}\rho_w b_w(h_w - x_p - l_c), \\ T_s &= T'_s = A_s f_y = b_w l_c \rho_s f_y \end{aligned} \quad (17)$$

根据力的竖向平衡可得:

$$N + T_{sw} = C_{uc} + C_{cc} \quad (18)$$

对形心轴取矩, 截面峰值弯矩为:

$$M_p = M_{cc} + M_{uc} + M_s + M_{sw} + M'_s \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned} M_{cc} &\approx C_{cc} \left(\frac{h_w - l_c}{2} \right), \\ M_{uc} &= C_{uc} \left(\frac{h_w - x - l_c}{2} \right), \\ M_s &= T_s \left(\frac{h_w}{2} - a_s \right), \\ M_{sw} &= T_{sw} \left(\frac{h_w}{2} - l_c - \frac{h_w - x_p - l_c}{3} \right), \\ M'_s &= T'_s \left(\frac{h_w}{2} - a'_s \right) \end{aligned} \quad (20)$$

联立式 (16)~式 (20) 可求得 x_p 和 M_p 。

2) 当 $x < l_c$ 时 (即受压区高度小于约束区长度时), 如图 11(b) 所示, 可得截面的峰值曲率, 即:

$$\varphi_p = \frac{\varepsilon_{85}}{x_p} \quad (21)$$

截面各力的关系式如下:

$$\begin{aligned} C_{cc} &= 0.5(1 + 0.85)f_{cc}b_w x_p, \\ T_{sw} &= 0.5f_{yw}\rho_w b_w (h_w - 2l_c), \\ T_s &= A_s f_y = b_w l_c \rho_s f_y, \\ T'_s &= b_w x_p \rho_s f_y \end{aligned} \quad (22)$$

根据力的竖向平衡可得:

$$N + T_{sw} + T_s = C_{cc} + T'_s \quad (23)$$

对形心轴取矩, 截面峰值弯矩为:

$$\begin{aligned} M_p &= C_{cc} \left(\frac{h_w - x_p}{2} \right) + T_s \left(\frac{h_w}{2} - a_s \right) + T'_s \left(\frac{h_w}{2} - a'_s \right) + \\ &T_{sw} \left(\frac{h_w}{2} - l_c - \frac{h_w - 2l_c}{3} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

联立式 (16), 式 (21)~式 (24) 可求得 x_p 和 M_p 。

4.4 破坏弯矩与曲率

当剪力墙承载力降到 85% 峰值荷载时, 受压区约束混凝土应变达到相应的极限压应变 ε_{ccu} 。此时, HRSR 混凝土剪力墙达到破坏状态。该阶段截面应变不再符合平截面假定。受拉纵筋均达到极限抗拉强度甚至可能发生断裂, 受压区混凝土被压碎。

达到破坏状态时, 破坏弯矩 $M_u = 0.85M_p$, ε_{ccu} 取约束混凝土强度下降至峰值强度的 65% 时所对应的应变^[11], 即:

$$\varepsilon_{ccu} = 6 \times 10^6 (\rho_{sv} \varepsilon_{cc})^2 - 332.51 (\rho_{sv} \varepsilon_{cc}) + 0.0208 \quad (25)$$

破坏曲率 φ_u 为截面边缘压应变达到 ε_{ccu} 对应的曲率, 即:

$$\varphi_u = \varepsilon_{ccu} / x_u \quad (26)$$

试验表明, 当截面边缘混凝土压应变达到混凝土峰值应变后, 截面受压区高度基本保持不变^[7,18], 因此计算破坏曲率时可取受压区高度 $x_u = x_p$ 。

5 计算结果与试验结果对比分析

表 4 和表 5 分别列出了 10 个 HRSR 混凝土剪力墙开裂点、屈服点以及峰值点时水平承载力的计算值与试验值, 其中试件 HCRCW-04 在塑性较区加有槽钢, HCRCW-08 和 HCRCW-09 分别在剪力墙塑性较区和墙身外套螺旋钢筋, 因此这三个试件计算结果与试验结果相比均偏小, 误差较大。在后面的结果分析中, 剔除这三个试件的影响。

表 4 开裂、屈服荷载计算值与试验值的比较

Table 4 Comparison between calculated values and test values of cracking and yielding loads

试件编号	开裂状态			屈服状态		
	试验值/ kN	计算值/ kN	计算值/ 试验值	试验值/ kN	计算值/ kN	计算值/ 试验值
HCRCW-01	250.40	214.54	0.86	543.50	510.27	0.94
HCRCW-02	174.70	171.84	0.98	457.40	432.96	0.95
HCRCW-03	200.40	171.84	0.86	466.80	431.34	0.92
HCRCW-04	351.20	214.54	0.61	572.10	506.97	0.89
HCRCW-05	175.00	171.84	0.98	470.50	431.34	0.92
HCRCW-06	177.30	134.82	0.76	428.31	437.58	1.02
HCRCW-07	175.40	128.87	0.73	389.53	375.81	0.96
HCRCW-08	149.90	123.13	0.82	421.79	376.01	0.89
HCRCW-09	150.20	122.74	0.82	360.62	308.10	0.85
HCRCW-10	125.10	117.89	0.94	282.54	281.90	1.00

表 5 峰值荷载计算值与试验值的比较

Table 5 Comparison between calculated values and test values of peaking load

试件编号	试验值/ kN	计算值/ $f_s = f_u / \text{kN}$	计算值/ 试验值	计算值/ $f_s = f_y / \text{kN}$	计算值/ 试验值
HCRCW-01	617.4	611.66	0.99	528.99	0.86
HCRCW-02	544.8	558.84	1.03	482.59	0.89
HCRCW-03	556.2	554.11	1.00	478.05	0.86
HCRCW-04	666.8	610.36	0.92	529.72	0.79
HCRCW-05	555.3	560.15	1.01	487.76	0.88
HCRCW-06	514.8	562.77	1.09	476.20	0.93
HCRCW-07	470.9	479.28	1.02	411.57	0.87
HCRCW-08	509.3	458.27	0.90	395.63	0.78
HCRCW-09	426.4	395.80	0.93	341.46	0.80
HCRCW-10	340.5	330.59	0.97	291.41	0.86

由表 4 结果可知, 开裂状态误差较大。因试件加载时, 通过肉眼判断其产生裂缝为开裂状态, 这种方法并不精确, 裂缝可能产生在加载过程中, 观察具有滞后性, 且高强螺旋箍筋的约束作用, 也能提高开裂荷载, 计算时未考虑这部分作用, 因此导致计算值偏小。

从表 4 可以看出, 试件 HCRCW-01 开裂荷载较大, 说明开裂荷载随着轴压比的增大而提高。开裂荷载计算值与试验值比值的平均值为 0.873, 标准差为 0.101, 变异系数为 0.115。计算结果偏于安全。由表 4 可以看出, 屈服荷载计算值与试验值相比, 基本吻合。其中试件 HCRCW-06 和 HCRCW-07 计算值偏大, 主要因为其纵筋配筋率过大, 并未全部达到屈服, 计算时过高估计了纵筋的贡献。屈服荷载计算值与试验值比值的平均值为 0.959, 标准差为 0.0385, 变异系数为 0.040。

分别按照 $f_s = f_u$ 和 $f_s = f_y$ 两种方法计算 HRSR 剪力墙的峰值荷载, 结果见表 5。图 11 是按照 HRSR 高强混凝土剪力墙截面应变分布实测值进行简化而得, 结果证明, 计算的峰值荷载计算值与试验

值比值的平均值为 1.024, 标准差为 0.038, 变异系数为 0.037。从表 5 可以看出, 当纵筋的强度取极限抗拉强度时, 即 $f_s = f_u$ 时, 峰值荷载吻合良好, 这与试验现象是相符的, 因试件达到峰值荷载时纵向受力钢筋已达到了极限抗拉强度。当进行试件设计时, 应采用 $f_s = f_y$, 至少有 10% 的安全储备。可以看出, 采用高强矩形螺旋钢筋约束的高强混凝土剪力墙能够充分发挥纵筋的抗拉强度以及混凝土的抗压强度, 达到较高的承载力, 表明本文建议的峰值荷载计算公式较为合理。

表 6 列出了 HRSR 高强混凝土剪力墙各阶段曲率的计算值与试验值, 对比结果可知, 曲率计算值与试验值偏差较大, 尤其是开裂状态。主要原因是开裂荷载无法精确判定所导致。试件 HCRCW-04 因在塑性铰区加有槽钢, 试验时未监测塑性铰区的弯曲变形。试件 HCRCW-08 因塑性铰区加有外套螺旋钢筋, 试验值与计算值差别较大。从表 6 中可以看出, 试件达到屈服荷载前, 曲率随着轴压比的增加而逐渐增大; 达到屈服荷载后, 曲率随着轴压比的增加而逐渐减小。

表 6 截面曲率计算值与试验值的比较

Table 6 Comparison between calculated values and test values of curvature

试件编号	开裂曲率/($\times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$)			屈服曲率/($\times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$)			峰值曲率/($\times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$)		
	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
HCRCW-01	0.096	0.091	0.95	0.883	0.576	0.65	1.70	1.83	1.08
HCRCW-02	0.056	0.073	1.32	0.467	0.524	1.12	1.78	1.61	0.90
HCRCW-03	0.067	0.073	1.10	0.472	0.524	1.11	1.98	2.70	1.36
HCRCW-04	—	0.091	—	—	0.575	—	—	4.53	—
HCRCW-05	0.075	0.073	0.97	0.633	0.524	0.83	3.24	4.27	1.32
HCRCW-06	0.104	0.070	0.67	0.617	0.556	0.90	2.88	2.85	0.99
HCRCW-07	0.054	0.072	1.33	0.500	0.547	1.09	2.97	2.77	0.93
HCRCW-08	0.108	0.071	0.65	0.880	0.612	0.70	3.40	2.37	0.70
HCRCW-09	0.071	0.073	1.03	0.567	0.524	0.92	2.63	2.70	1.03
HCRCW-10	0.054	0.074	1.36	0.700	0.586	0.84	1.15	1.42	1.23

6 结论

本文通过对 10 片 HRSR 高强混凝土剪力墙试件的拟静力试验研究与理论分析, 得出以下结论:

(1) 基于 HRSR 对高强混凝土的约束作用, 且根据试件截面应变分布实测值, 利用四折线模型, 建立 HRSR 高强混凝土剪力墙开裂、屈服、峰值和极限破坏状态对应的弯矩-曲率计算方法。通过与试验结果比较, 其计算值与试验值吻合较好, 表明本文建议的方法较为合理。

(2) 采用 HRSR 约束的高强混凝土剪力墙, 能够充分发挥纵筋的抗拉强度以及混凝土的抗压强度, 达到较高的承载力。约束边缘构件采用的高强连续封闭螺旋箍筋, 在达到承载能力极限状态时核心区混凝土全部达到约束混凝土抗压强度, 因此计算时应采用约束混凝土本构关系。

(3) 计算结果表明, HRSR 高强混凝土剪力墙塑性铰区外套高强矩形螺旋钢筋可以提高其承载力和变形能力, 本文在计算时, 未考虑该部分作

用, 因此导致试件 HCRCW-08 和 HCRCW-09 计算值偏小。在后续研究中, 应进一步考虑该部分作用。

参考文献:

- [1] 邓明科, 李琦琦, 刘海勃, 景武斌等. 高延性混凝土低矮剪力墙抗震性能试验及抗剪承载力计算[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 63 — 72.
Deng Mingke, Li Qiqi, Liu Haibo, Jing Wubin. Experimental study of seismic behavior and shear strength calculation of high ductile concrete low-rise shear wall [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 63 — 72. (in Chinese)
- [2] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 崔晓玲, 梁兴文, 高兑现. 带端柱高性能混凝土剪力墙承载力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(3): 367 — 373.
Cui Xiaoling, Liang Xingwen, Gao Duixian. Loading capacity of high performance concrete shear wall with end columns [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(3): 367 — 373. (in Chinese)
- [4] Prasenjit S H, Lakshmi V P M. Experimental investigation of reinforced SCC beam-column joint with rectangular spiral reinforcement under cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 171 — 185.
- [5] Jing D H, Yu T, Liu X D. New configuration of transverse reinforcement for improved seismic resistance of rectangular RC columns: concept and axial compressive behavior [J]. Engineering Structures, 2016, 111: 383 — 393.
- [6] 王斌, 史庆轩, 蔡文哲. 带翼缘剪力墙截面曲率分析及延性的计算[J]. 工程力学, 2019, 36(12): 165 — 1762.
Wang Bin, Shi Qingxuan, Cai Wenzhe. Curvature analysis ductility calculation of flanged shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(12): 165 — 1762. (in Chinese)
- [7] 梁兴文, 赵花静, 邓明科. 考虑约束边缘构件影响的高强混凝土剪力墙弯矩-曲率骨架曲线参数研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增刊 2): 62 — 67.
Liang Xingwen, Zhao Huajing, Deng Mingke. Moment-curvature relationship analysis of high-strength concrete shear wall with partially confined end-zones [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(Suppl 2): 62 — 67. (in Chinese)
- [8] 赵花静, 李青宁, 姜维山, 张兴虎. 高强矩形螺旋钢筋约束高强混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 54 — 64.
Zhao Huajing, Li Qingning, Jiang Weishan, Zhang Xinghu. Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete shear walls confined with high-strength spiral reinforcements [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 54 — 64. (in Chinese)
- [9] Huajing Zhao, Qingning Li, Can Song, Haotian Jiang, Jun Zhao. Seismic tests of RC shear walls confined with high-strength rectangular spiral reinforcement [J]. Steel and Composite Structures, 2017, 24(1): 1 — 13.
- [10] DBJ 61/T 119—2016, 高强箍筋约束混凝土结构技术规范 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016.
DBJ 61/T 119—2016, Technical specification for high-strength stirrup confined concrete structures [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [11] 杨坤, 史庆轩, 赵均海. 高强箍筋约束高强混凝土本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 34 — 41.
Yang Kun, Shi Qingxuan, Zhao Junhai. Study on the constitutive model of high-strength concrete confined by high-strength stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 34 — 41. (in Chinese)
- [12] Popovics S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1973, 3(5): 583 — 599.
- [13] Fatifis A. Lateral reinforcement for high-strength concrete columns [J]. ACI Publication, 1985, 87: 213 — 232.
- [14] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 14(8): 1804 — 1826.
- [15] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
Guo Zhenhai, Shi Xudong. Reinforced concrete theory and analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 钱稼茹, 魏勇, 赵作周. 高轴压比钢骨混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 43 — 50.
Qian Jiaru, Wei Yong, Zhao Zuozhou. Experimental study on seismic behavior of SRC shear walls with high axial force ratio [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 43 — 50. (in Chinese)
- [17] 白亮, 谢鹏飞, 周天华, 张轶. 钢管约束高强混凝土剪力墙压弯承载力及截面变形能力设计方法研究[J]. 工程力学, 2017, 34(11): 175 — 183.
Bai Liang, Xie Pengfei, Zhou Tianhua, Zhang Yi. Study on design method of axial force-moment capacity and sectional deformation capacity of steel tube confined high-strength concrete shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(11): 175 — 183. (in Chinese)
- [18] 党争, 梁兴文, 邓明科等. 局部采用纤维增强混凝土剪力墙压弯性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 120 — 130.
Dang Zheng, Liang Xingwen, Deng Mingke. The compression-bending behavior of shear wall with fiber-reinforced concrete in bottom region [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 120 — 130. (in Chinese)
- [19] 梁兴文, 史庆轩. 混凝土结构设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Liang Xingwen, Shi Qingxuan. Concrete structure design principle [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese)