

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.005

自密实混凝土叠合剪力墙屈服位移计算方法

宋祥¹, 叶燕华^{1,2}

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省绿色建筑工程技术中心, 江苏 南京 210009)

摘要:在平截面假定的基础上, 根据自密实混凝土(SCC)叠合剪力墙的受力特点, 提出了其顶端屈服位移的计算方法, 并用 5 个 SCC 叠合剪力墙试件的屈服位移试验值进行验证。通过计算分析, 得到了轴压比、混凝土强度、分布钢筋的配筋率、锚固钢筋的配筋率与 SCC 叠合剪力墙屈服位移之间的关系。研究表明: 在设计中选择经济合理的锚固钢筋配筋率、限制 SCC 叠合剪力墙的轴压比以及适当增加混凝土强度可以提高墙体在屈服状态的变形能力; 提出的计算方法合理可靠, 求得的计算值与试验值吻合较好。

关键词:自密实混凝土; 叠合剪力墙; 屈服曲率; 屈服位移

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0023-05

Yield displacement calculation method of SCC composite shear walls

Song Xiang¹, Ye Yanhua^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. Jiangsu Green Building Research Center, Nanjing 210009, China)

Abstract: Based on the plane section assumption and the characteristic of self compacting concrete (SCC) composite shear walls, the calculation method of yield displacement was established and tested by the experimental results of five SCC composite shear walls. Then, the interrelated relationships among the axial compression ratio, the strength of concrete, the reinforcement ratio of distributing bars, the reinforcement ratio of anchor bars and the yield displacement were obtained. The results show that choosing the reasonable reinforcement ratio of anchor bars, limiting the axial compression ratio and increasing the characteristic value of strength of concrete can improve the yield displacement of SCC composite shear walls. The reliability of the method is certified through the comparison of the analysis results and the experimental results.

Key words: self compacting concrete; composite shear walls; yield curvature; yield displacement

叠合剪力墙结构体系由预制墙板中现浇混凝土叠合而成, 该体系从德国引进, 具有设计简单、施工方便、工业化程度高的特点, 能够有效的降低建筑施工过程的建筑能耗, 提高施工速度, 促进中国建筑工业化的目标^[1-2]。用自密实混凝土(SCC)代替叠合剪力墙结构体系中的普通混凝土, 不但可以提高墙

体的浇筑质量, 同时可以提高墙体的各项性能, 具有良好的应用前景^[3-5]。目前大量的震害及试验^[6-10]研究表明建筑物变形能力不足是导致其在地震中倒塌的主要原因, 且《高层建筑混凝土结构技术规程》^[11]也对结构的变形能力提出了明确的要求。而剪力墙作为结构中承受侧向力的主要构件, 承受地

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51178218)

作者简介: 宋祥(1991-), 男, 硕士生, 主要从事混凝土结构研究, (E-mail) songxiang3098@163.com。

叶燕华(通信作者), 女, 教授, 硕士生导师, (E-mail) yyh_5610@163.com。

震作用产生的大部分水平荷载,其变形能力将直接影响结构的变形能力。故要将 SCC 叠合剪力墙广泛推广,必须明确其在各个状态下的变形能力。但目前还没有关于 SCC 叠合剪力墙变形能力的计算方法,为此,本文通过理论分析结合已有的试验研究结果,提出 SCC 叠合剪力墙屈服状态时的位移计算方法。

1 截面屈服曲率计算

1.1 混凝土本构关系

普通混凝土采用《混凝土结构设计规范》^[12] 规定的受压混凝土的应力-应变关系,即

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{c1} [1 - (1 - \epsilon_c/\epsilon_{01})^2] & \epsilon_c \leq \epsilon_{01} \\ f_{c1} & \epsilon_{01} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_c 和 ϵ_c 为混凝土的压应力和压应变; f_{c1} 为普通混凝土的轴心抗压强度; ϵ_{01} 为普通混凝土的峰值应变,本文取 $\epsilon_{01} = 0.002$; ϵ_{cu} 为混凝土的极限应变。

自密实混凝土采用文献^[13]中的应力-应变关系,即

$$y = \begin{cases} ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3 & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{a(x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x = \epsilon_c/\epsilon_{02}$; $y = \sigma_c/f_{c2}$; f_{c2} 为自密实混凝土的轴心抗压强度; $a_1 = 3.703 - 0.035f_{c2,10}$, $f_{c2,10} = 0.79f_{c2}$; ϵ_{02} 为自密实混凝土峰值应变,本文取 $\epsilon_{02} = 0.0022$ 。

1.2 基本假定

目前剪力墙的屈服状态有两种定义方式,分别为受压区混凝土进入塑性阶段时所对应的状态和受拉区边缘钢筋屈服时的状态。对文献^[4]中所用的 SCC 叠合剪力墙试件进行分析可得,当受拉区边缘钢筋屈服时受压区混凝土仍处于弹性状态,随着侧向力增大,处于弹性状态的混凝土应变仍然会线性增长,墙体的截面曲率不会突然增大导致墙体进入屈服状态,直至受压区混凝土进入塑性状态。故本文采用文献^[14]的建议,将受压区混凝土进入塑性阶段时所对应的状态定义为屈服状态,此时受压区边缘混凝土的应变约为 0.0014。

相关试验结果^[4]表明,SCC 叠合剪力墙以弯曲破坏为主,故采用平截面假定对其进行分析。叠合板与现浇混凝土协同受力,只考虑其抗压作用,不考虑其抗拉作用。不考虑墙体保温板的受力。SCC 叠合剪力墙的纵向受力钢筋主要有两种,分别为预

制板内的分布钢筋和现浇混凝土中的锚固钢筋,其中分布钢筋未锚固入底座,只考虑其受压作用,不考虑其受拉作用,锚固钢筋贯通墙体与底座,考虑其受拉和受压作用。所有钢筋取理想弹塑性模型。

1.3 计算方法

SCC 叠合剪力墙在屈服状态时的截面应力-应变分布见图 1。

由图 1 可得屈服状态的截面曲率为 φ_y 。

$$\varphi_y = \frac{\epsilon_c}{x_n} \quad (3)$$

式中: ϵ_c 为屈服状态受压区边缘混凝土的应变; x_n 为截面的受压区高度。

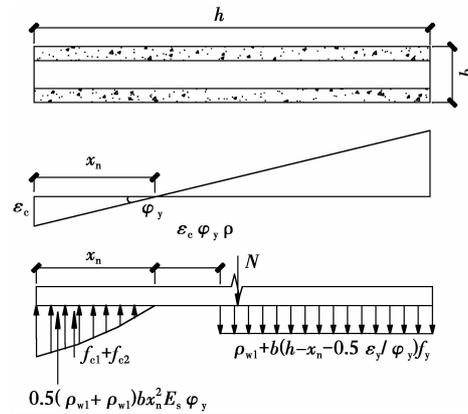


图 1 屈服状态时截面应力-应变图

截面的受力平衡方程为

$$F_{c1} + F_{c2} + F'_{y1} + F'_{y2} = N + F_y \quad (4)$$

受压区普通预制混凝土与自密实混凝土的合力分别为

$$\begin{aligned} F_{c1} &= b_1 \int_0^{x_n} \sigma \left(\frac{\epsilon_c}{x_n} \right) dy = \\ & \left[\epsilon_c/\epsilon_0 - \frac{1}{3} (\epsilon_c/\epsilon_0)^2 \right] f_{c1} b_1 x_n = k_1 f_{c1} b_1 x_n \quad (5) \\ F_{c2} &= b_2 \int_0^{x_n} \sigma \left(\frac{\epsilon_c}{x_n} \right) dy = \\ & \left[\frac{a}{2} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} + \frac{(3 - 2a)}{3} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 + \right. \\ & \left. \frac{(a - 2)}{4} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^3 \right] f_{c2} b_2 x_n = k_2 f_{c2} b_2 x_n \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $k_1 = \epsilon_c/\epsilon_0 - \frac{1}{3} (\epsilon_c/\epsilon_0)^2$; $k_2 = \left[\frac{a}{2} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} + \frac{(3 - 2a)}{3} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 + \frac{(a - 2)}{4} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^3 \right]$; b_1 和 b_2 分别为现浇自密实混凝土和预制板的截面宽度。

受压区锚固钢筋和分布钢筋的压力分别为

$$F'_{y1} = 0.5 \rho_{w1} b x_n^2 E_s \bar{\omega}_y, F'_{y2} = 0.5 \rho_{w2} b x_n^2 E_s \bar{\omega}_y \quad (7)$$

式中: ρ_{w1} 和 ρ_{w2} 分别为锚固钢筋和分布钢筋的配筋

率; E_s 为钢筋的弹性模量。

受拉区锚固钢筋的拉力为

$$F_{y1} = \rho_{w1} b \left(\frac{h - x_n - 0.5\epsilon_y}{\varphi_y} \right) f_y \quad (8)$$

式中: ϵ_y 和 f_y 分别为锚固钢筋的屈服应变和屈服应力。

则屈服状态的截面屈服曲率为

$$\varphi_y = \frac{N + \rho_{w1} b \left(\frac{h - x_n - 0.5\epsilon_y x_n}{\epsilon_c} \right) f_y - k_1 f_{c1} b_1 x_n - k_2 f_{c2} b_2 x_n}{0.5(\rho_{w1} + \rho_{w2}) l x_n^2 E_s} \quad (9)$$

将式(3)与式(9)联立可求得屈服状态时的截面曲率 φ_y 。

2 顶端屈服位移计算

2.1 计算方法

假设墙体的质量和刚度沿高度均匀分布,且只考虑墙体的弯曲变形,忽略其剪切变形。当墙体基础顶面的截面达到屈服曲率时,顶端的侧向位移定义为墙体的屈服位移。则墙体受到顶端集中荷载、均布荷载和倒三角荷载时,其顶端屈服位移 Δ_y 分别为^[15]

$$\Delta_y = \frac{1}{3} \varphi_y H^2 \quad (\text{顶端集中荷载}) \quad (10)$$

$$\Delta_y = \frac{1}{4} \varphi_y H^2 \quad (\text{均布荷载}) \quad (11)$$

$$\Delta_y = \frac{11}{40} \varphi_y H^2 \quad (\text{倒三角荷载}) \quad (12)$$

2.2 数据验证

试验数据来自文献[4],5个试件均为 SCC 叠合剪力墙,其中试件 W1 和 W3 内设置厚度为 50 mm 的保温板,其他参数见表 1。所有试件均受顶端集中荷载,破坏形式为弯曲破坏。先由式(3)和式(9)求得试件的截面屈服曲率,再由式(10)求得试件的

顶端屈服位移,计算结果见表 2。由表 2 可得,计算结果与试验结果符合较好。

表 1 试件参数

试件编号	高度 H/mm	长度 h/mm	厚度 b/mm	轴压比	暗柱
W1	1 800	1 400	250	0.2	设置
W2	1 800	1 400	200	0.2	设置
W3	1 800	1 400	250	0.2	无
W4A	1 800	1 400	200	0.1	无
W4B	1 800	1 400	200	0.2	无

表 2 顶端屈服位移计算值与试验值比较

试件编号	计算值/mm	试验值/mm	相对误差
W1	6.49	8.48	-23.47%
W2	6.34	6.97	-9.04%
W3	6.06	5.98	1.34%
W4A	8.14	7.97	2.13%
W4B	6.27	6.78	7.52%

3 影响 SCC 叠合剪力墙屈服位移的因素分析

由以上计算公式可以看出,影响 SCC 叠合剪力墙屈服位移的因素可能有轴压比 λ_v 、混凝土强度 f_c 、分布钢筋的配筋率 ρ_{w1} 、锚固钢筋的配筋率 ρ_{w2} ,则对这些因素进行计算分析。在分析时,只改变某一参数,其他参数保持不变(取常用值)。

3.1 轴压比

轴压比对 SCC 叠合剪力墙屈服位移的影响见图 2,可以看出在其他条件不变的情况下,屈服位移随着轴压比的增大而减小。这是由于增大轴压比会使受压区混凝土较早进入塑性阶段,从而加快墙体屈服。故在设计中需要限制 SCC 叠合剪力墙的轴压比,以保证其变形能力。

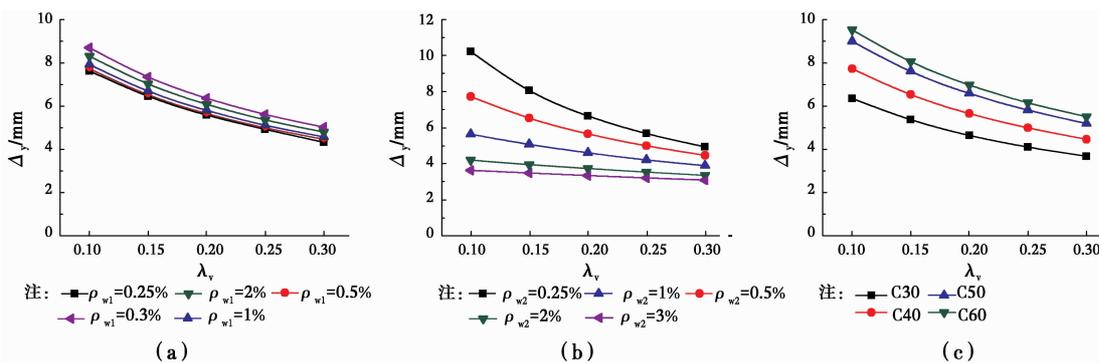


图 2 $\Delta_y - \lambda_v$ 影响曲线

3.2 混凝土强度

分析混凝土强度对屈服位移的影响时,将普通混凝土和自密实混凝土的强度作为同一参数且同时改变。则混凝土强度对 SCC 叠合剪力墙屈服位移的影响见图 3,可以看出在其他条件不变的情况下,

屈服位移随着混凝土强度的增大而增大。当混凝土强度增大时,其作用与增大轴压比相反,可以推迟受压区混凝土进入塑性阶段,延缓墙体的屈服。故在设计中适当增加混凝土的强度可以提高墙体的变形能力。

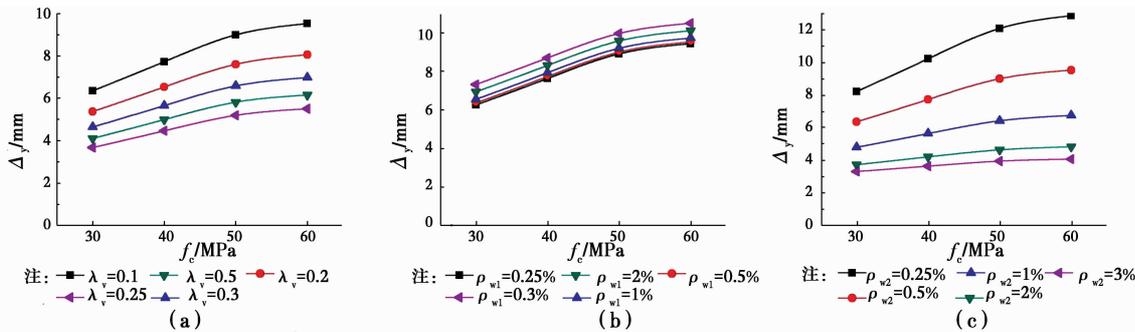


图 3 Δy - fc 关系曲线

3.3 分布钢筋的配筋率

分布钢筋的配筋率对 SCC 叠合剪力墙屈服位移的影响见图 4,可以看出其对屈服位移的影响并不大。这是由于分布钢筋位于预制板内,并未锚固

入底座,从而只能承受压力,但当墙体屈服时,受压区应变并未达到钢筋的屈服应变,预制板内的分布钢筋无法充分发挥作用。

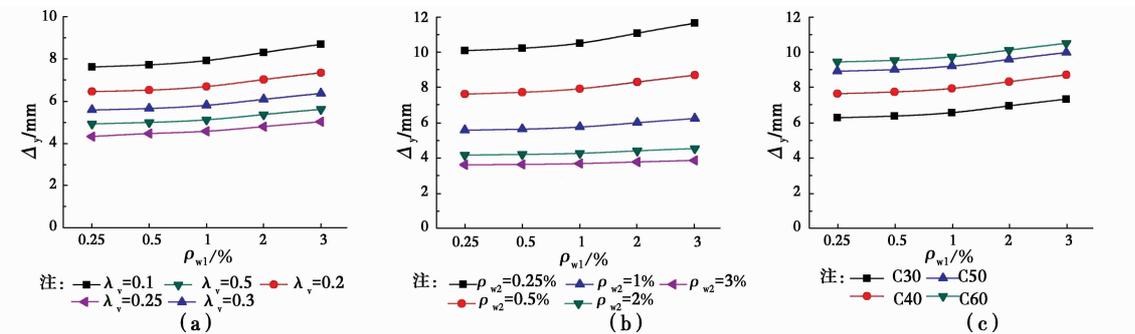


图 4 Δy - ρw1 关系曲线

3.4 锚固钢筋的配筋率

锚固钢筋的配筋率对 SCC 叠合剪力墙屈服位移的影响见图 5,可以看出在其他条件不变的情况下,屈服位移随着锚固钢筋配筋率的增大而减小。且从图 2~4 中可以看出锚固钢筋的配筋率是影响墙体屈服位移的主要因素,当墙体锚固钢筋的配筋

率过大时,改变其他条件均不能改善墙体的变形能力。这是由于设置较多的锚固钢筋时,墙体类似于超筋梁,变形能力较差,且破坏模式为脆性破坏,故墙体中锚固钢筋的配筋率应经济合理。但在设计中,为保证墙体极限状态的承载力,不宜以降低锚固钢筋的配筋率来增大墙体在屈服状态的变形能力。

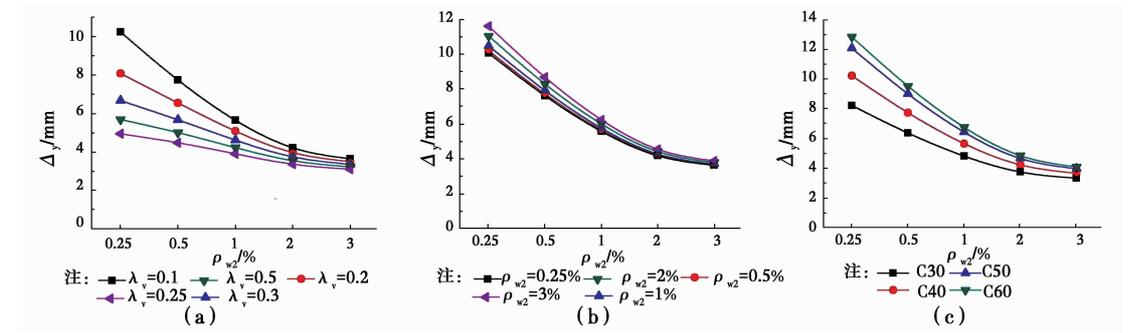


图 5 Δy - ρw2 关系曲线

4 结 论

1)提出了 SCC 叠合剪力墙屈服位移的计算方法,由该计算方法求得的计算值与试验值吻合较好。

2)影响 SCC 叠合剪力墙屈服位移的因素有:轴压比、混凝土强度、锚固钢筋的配筋率。在设计中,应选择经济合理的锚固钢筋配筋率、限制 SCC 叠合剪力墙的轴压比以及适当提高混凝土强度以保证墙体的变形能力。

参考文献:

- [1] 王滋军,王宇,刘伟庆,等. 新型钢筋混凝土叠合剪力墙结构在我国的研究与应用现状[J]. 混凝土, 2012(11): 108-110.
- [2] 刘霞,叶燕华,王滋军,等. 新型钢筋混凝土叠合结构体系研究[J]. 混凝土, 2010(7): 124-126.
- [3] 孙锐,叶燕华,汪恒,等. 自密实混凝土及其在叠合剪力墙中的应用[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2014, 36(2): 118-122.
- [4] 叶燕华,孙锐,汪恒,等. 预制混凝土双板内浇自密实混凝土剪力墙抗震性能[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(8): 1232-1238.
- [5] Hassan A A A, Hossain K M A, Lachemi M. Behavior of full-scale self-consolidating concrete beams in shear [J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30: 588-96.
- [6] Priestley M J N, Kowalsky M J. Direct displacement-based seismic design of concrete buildings[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000, 33(4): 421-444.
- [7] Priestley M J N. Displacement-based seismic design of structures [M]. Pavia, Italy: IUSS Press, 2007: 313-330.
- [8] Medhekar M S, Kennedy D T L. Displacement-based seismic design of building-theory [J]. Engineering Structures, 2000, 22(3): 201-209.
- [9] Paulay T. An estimation of displacement limits for ductile systems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 583-599.
- [10] Tjen N, Tjhin M A, Aschheim J W W. Yield displacement-based seismic design of RC wall buildings [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 2946-2959.
- [11] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 胡琼,颜伟华,郑文忠. 自密实混凝土应力-应变全曲线方程[J]. 低温建筑技术, 2008(5): 70-72.
- [14] 剡理祯,梁兴文,徐洁,等. 钢筋混凝土剪力墙变形能力计算方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(11): 92-98.
- [15] 赵花静,梁兴文,宋璨. 高强混凝土剪力墙屈服位移计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(3): 58-80.

(编辑 王秀玲)