

EPS 模块剪力墙偏心受压承载力试验

高立堂¹, 卜国艳¹, 王万敏², 宋春玲¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 目的 研究 EPS 模块剪力墙承载力以及其破坏形态, 确定偏心距对模块剪力墙承载力的影响. 方法 进行 EPS 模块剪力墙和普通剪力墙的偏心受压承载力试验, 分析其荷载-位移曲线、钢筋和混凝土的荷载-应变关系. 结果 墙体的承载力与偏心距呈现负相关的关系. 偏心距小于 200 mm 时, 墙体几乎是全截面受压; 当偏心距大于 300 mm 时, 所有测点的应变都快速增长; 构件的偏心距越大, 构件属于延性破坏的机率就越大. 墙体的大偏心和小偏心构件裂缝的位置是一致的, 都出现在芯肋处, 墙体最终的破坏都体现在受压区混凝土被压碎. EPS 模块剪力墙的承载力计算式可以在普通剪力墙计算式的基础上对混凝土强度做 0.7 的折减. 结论 EPS 模块剪力墙由于芯肋的存在使墙体出现薄弱部位, 削弱了墙体平面外的抗弯刚度, 使其平面外稳定性变差.

关键词 EPS 模块; 剪力墙; 偏心距; 竖向承载力

中图分类号 TU398⁺.2 文献标志码 A

Experimental Study on the Eccentric Compression of EPS Module Shear Wall

GAO Litang¹, BU Guoyan¹, WANG Wanmin², SONG Chunling¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China, 266033; 2. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd, Jinan, China, 250000)

Abstract: The capacity and failure mode of EPS module shear wall is studied to decide the influence on capacity of module shear wall from eccentricity in this paper. The eccentric bearing strength test about EPS module shear wall and normal shear wall is carried. The load-displacement curves and load-strain curves of steel bars and concrete is analysed. The bearing capacity of the wall has an negative correlation with eccentricity. When the eccentricity is less than 200 mm, the whole cover of the wall is pressed; When the eccentricity is greater than 300 mm, the strain of all the measure point grow rapidly; The eccentricity of component is greater, the wall is more likely to ductile failure. The big and small eccentricity of component have the same crack location, the crack appears in the rib and the location of the wall destroyed is in compressive zone that the concrete is

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178232/E080804)

作者简介: 高立堂(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事 EPS 模块剪力墙承载力性能研究.

crushed. Based on the formula of bearing capacity for normal shear wall, the compressive strength of concrete reduced by 0.7 in the putational formula of bearing capacity for EPS module shear wall. Because of the existence of the rib, weak parts of the EPS module shear wall are appeared, then the out-of-plane bending stiffness of wall is weaken and the out-of-plane stability becomes worse.

Key words: EPS module; shear wall; eccentricity; vortical bearing

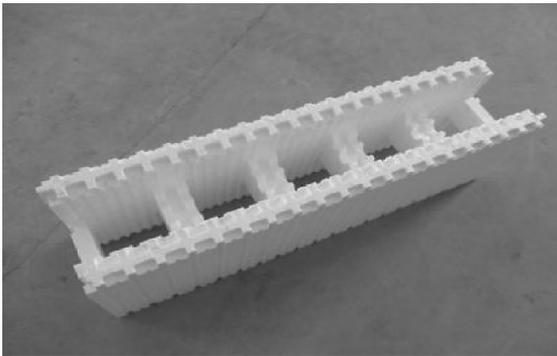
由于结构体系、建筑材料等条件限制,传统的剪力墙结构已经不能满足建筑节能和环境保护的需求^[1-7],因此,国内外学者将建筑节能的理念引入到剪力墙设计中,空心砖和砌块开始向节能墙板和复合墙体过渡^[8].美国瑞狄建筑利用由聚苯乙烯制成的保温墙板,在拼装完成后放置水平筋,浇筑混凝土,形成承重剪力墙,该结构体系具有良好的保温节能性^[9].青岛理工大学^[10-11]参考砌体配筋的方式,制作了一种由可发性聚苯乙烯珠粒经过高温发泡,然后一次性成型制得的板型材料(EPS)组成的模块剪力墙,由于EPS模块存在孔洞而致使其偏心承载力与普通剪力墙有较大不同.由于模块剪力墙中间

有芯肋,使其在抗震性能方面与普通墙体有所差别,但也表现出了较好的抗震性能.众多学者一直致力于研究剪力墙的抗震性能^[12-14],对其竖向承载力的研究却相对较少,尤其是该新型剪力墙的承载力的研究更是凤毛麟角.因此,笔者通过对EPS模块剪力墙和普通剪力墙的偏心受压承载力试验,研究EPS模块剪力墙承载力及其破坏形态.

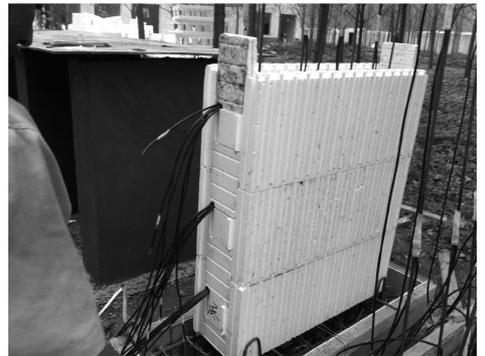
1 试验

1.1 试件设计

笔者设计了3面EPS模块错缝插接拼装而成的剪力墙(见图1)和1面普通墙.试件设计参数如表1所示.



(a) EPS模块



(b) 模块拼接

图1 EPS模块剪力墙

Fig. 1 EPS module shear wall

表1 试件设计参数

Table 1 Parameters of test specimens

墙体	长×宽×高/mm	竖向钢筋	水平钢筋	偏心距/mm	加载方式
WBC-1	1 200 × 735 × 130	Φ8@200	Φ8@300	100	小偏心
WBC-2	1 200 × 735 × 130	Φ8@200	Φ8@300	200	小偏心
WBC-3	1 200 × 735 × 130	Φ8@200	Φ8@300	300	大偏心
WBC-4	1 200 × 735 × 130	Φ8@200	Φ8@300	100	小偏心

考虑 EPS 模块自身尺寸及受力特点^[15], 设计试件长宽高为 735 mm × 1 200 mm × 130 mm, 在墙体的竖向和横向皆配置 $\Phi 8$ 的

钢筋, 间距分别为 200 mm、300 mm。首先要绑扎钢筋骨架, 然后将骨架放入模块之中, 最后浇筑 C35 混凝土。试件配筋如图 2 所示。

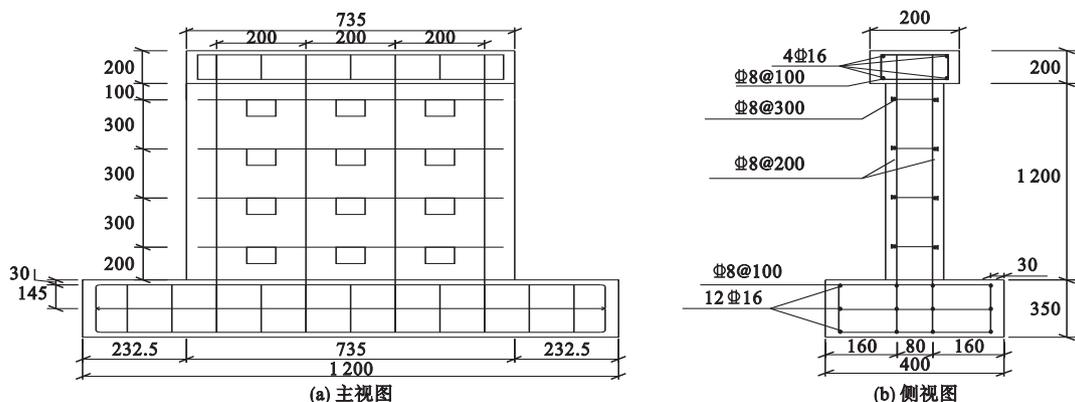


图 2 试件配筋图

Fig. 2 Test piece distribution

1.2 测点布置

笔者主要测量试件的位移和应变, 应变包括钢筋和混凝土的应变。钢筋应变片测点 1~8 布置如图 3 所示, 测点 9~12 和 13~16 分别与测点 1~4 和 5~8 对应, 位于墙的另一面。混凝土应变测点 1~5 布置如图 4 所示, 6~10 与测点 1~5 对称布置, 位于墙的另一面。位移主要是指墙的侧向位移和竖向位移, 侧向位移测点 1~8 如图 5 所示, 其中, 测点 1~3、7~8 表示平面外位移, 且 7~8 与 1~2 对称布置。4~6 为平面内位移测点, 竖向位移测点是 9, 主要利用电阻式应变位移计测得构件位移。

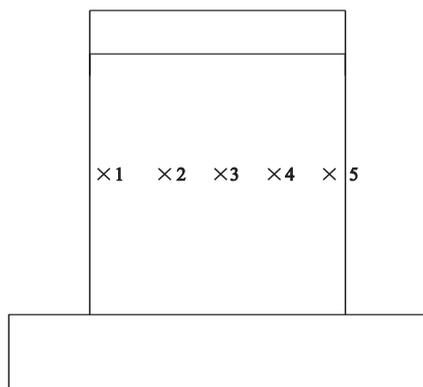


图 4 混凝土应变片测点布置图

Fig. 4 Layout plan of measuring point concrete strain gauge

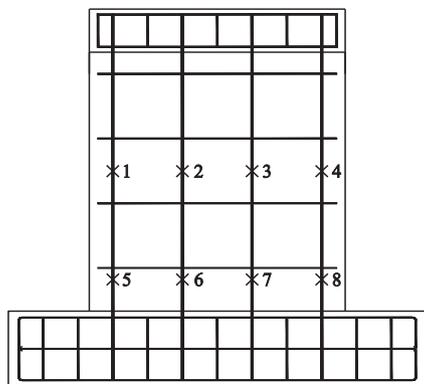


图 3 钢筋应变片测点布置图

Fig. 3 Layout plan of measuring points in rebar strain gauge

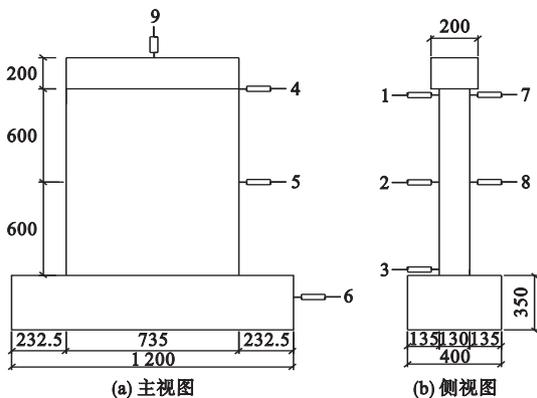


图 5 位移测点布置图

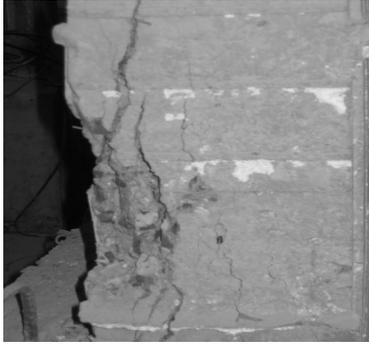
Fig. 5 Arrangement design of displacement measuring points

2 试验结果和分析

2.1 试验现象

为准确控制试验加载的数值,试验选用

分级加载的方式.首先分3级进行预加载,然后分级卸载,最后分级进行正式加载,直到墙体构件破坏为止.其中 WBC-1 ~ WBC-4 的破坏形态如图6所示.



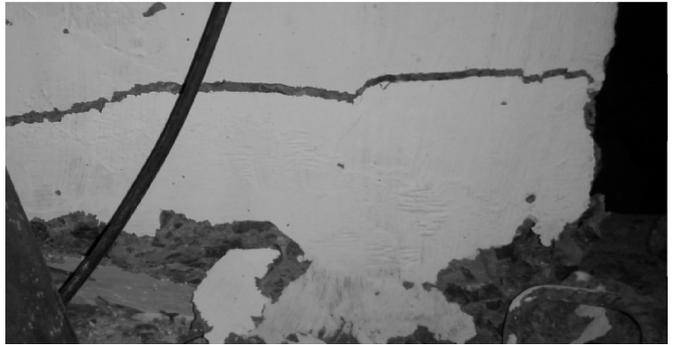
(a) WBC-1



(b) WBC-2



(c) WBC-3



(d) WBC-4

图6 试件破坏形态

Fig. 6 Specimen failure modes

WBC-1: 试件自墙底 200 mm 处开始破坏,当加载到一定程度时,试件表面混凝土剥落并伴随较大的声音.当荷载达到 941.2 kN 时,试件破坏较为严重,底部的竖向裂缝加宽加深(见图6(a)),近心侧混凝土被压碎.试件最终的破坏是以水平裂缝贯通墙体为标志.构件在破坏前未出现明显征兆,表现为脆性破坏.

WBC-2: 荷载达到 856.3 kN 时,试件裂缝比较集中,主要是在墙体芯肋处.荷载达到 912 kN 时,试验现象和 WBC-1 类似,近心侧混凝土被压碎(见图6(b)),随之水平主裂缝贯通墙体.试件破坏形态同 WBC-1,也属于脆性破坏.

WBC-3: 试件破坏始于试件中下部,开

始出现一些微小的裂缝,微小裂缝逐渐扩大,融汇成贯通裂缝.当荷载达到 480 kN 后,沿墙体高度方向,部分斜裂缝出现,主要集中在试件下部芯肋处.继续增加荷载,受拉区出现 3 条水平裂缝,裂缝宽度和深度都是逐步发展的,试件的破坏带有一定的征兆.当荷载达到 508.2 kN 时,受压区混凝土被压碎(见图6(c)),试件破坏,其破坏属于延性破坏.

WBC-4: 试件破坏始于墙体的下端,试件近心一侧由于承受压力较大,混凝土被压碎.当荷载为 1 324.8 kN 时,远离偏心一侧出现一条较宽的水平裂缝(见图6(d)),裂缝位置距离试件底部约 350 mm,其后裂缝迅速扩展延伸.在之后的加载过程中,水平裂缝又增加了两条.

2.2 荷载-位移曲线

图7为WBC-1~WBC-4墙体的荷载-竖向位移曲线。由图7可知,WBC-1~WBC-4墙体自加载开始直至破坏,其竖向位移大致都要经历3个阶段。第一阶段,位移和荷载之间是一种线性关系;第二阶段,位移和荷载之间的关系由线性关系转化为非线性

关系,近似抛物线的一种模式;第三阶段,在破坏荷载附近,墙体的竖向位移快速增大,荷载几乎无波动,预示着墙体达到破坏。EPS模块剪力墙与普通剪力墙相比,其承载力降低了60%左右,说明EPS模块剪力墙芯肋的存在确实影响了混凝土的抗压强度,使墙体的整体承载力降低。

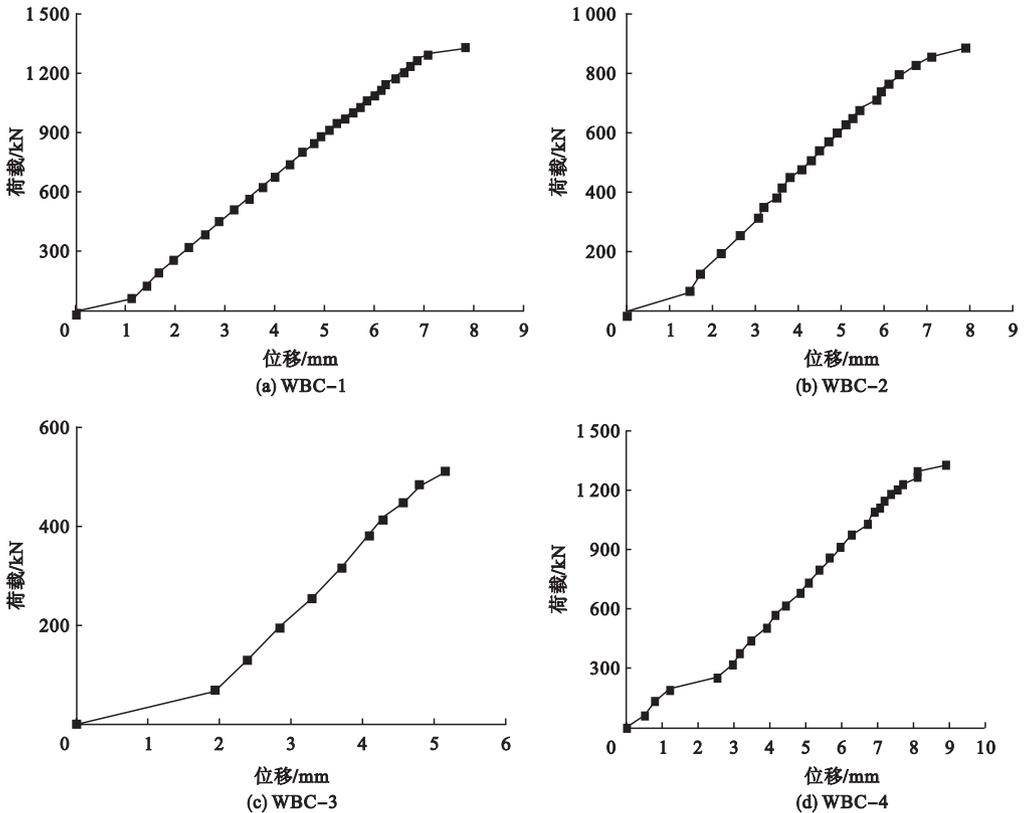


图7 偏心受压构件竖向变形情况

Fig. 7 Vertical deformation of eccentric compression member

图8为墙体的荷载-平面内位移曲线,图中1、2代表测点。WBC-1~WBC-4的曲线变化规律基本相同。荷载-平面内位移曲线和荷载-竖向位移曲线类似,同样要经历3个阶段。荷载和位移近似呈线性关系;随着荷载进一步增加,荷载和位移之间的线性关系转化为非线性关系;临近破坏荷载,墙体混凝土剥落直至被压碎,侧向变形剧增。此时变形曲线几乎呈现水平状态。对比分析WBC-1、WBC-2和WBC-3可知,随着偏心距的增大,侧向变形也越来越大,承载力逐

渐降低。

图9为荷载-墙体平面外位移关系,图中4、5代表测点。由于WBC-2和WBC-3数据的离散性较大,所以仅选取了WBC-1和WBC-4的数据。由图9可知,墙体平面外位移很小,可近似认为墙体在该平面内是稳定的。但与普通剪力墙相比,EPS模块剪力墙由于芯肋的存在,墙体出现薄弱部位,确实削弱了墙体平面外的抗弯刚度,使其平面外稳定性变差。

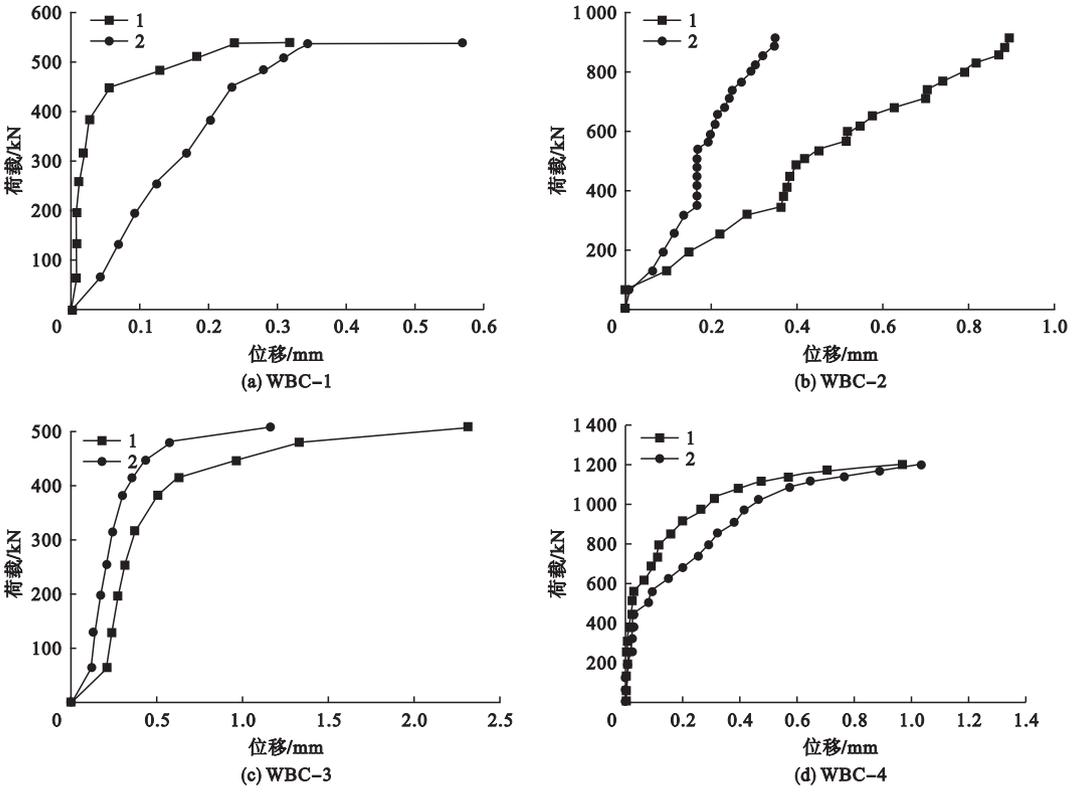


图8 墙体侧向变形

Fig. 8 Lateral deformation of wall

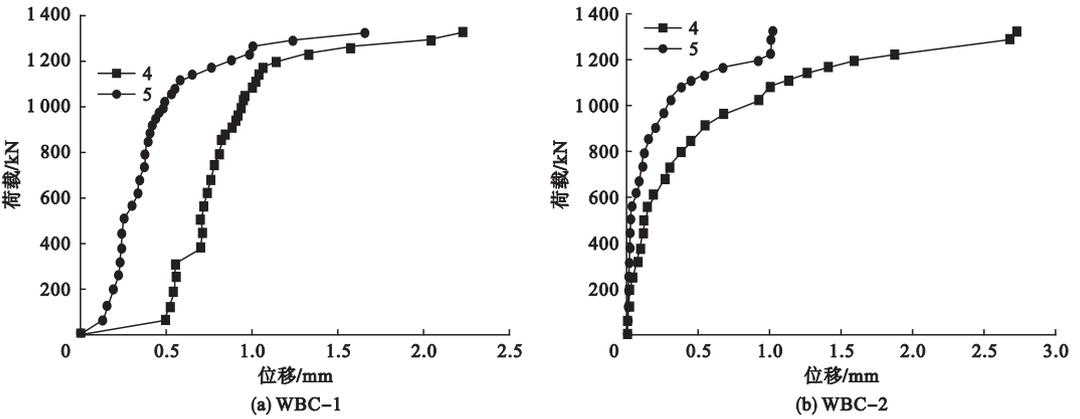


图9 荷载与墙体平面外挠度关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between load and plane deflection of the shear wall

2.3 混凝土应变

图10~图13为墙体混凝土的应变变化曲线.

(1)从图10~图12可知:当施加较小的偏心距时,整个截面几乎全部受压;当偏心距增大到一定程度时,远离加载点的一端混凝土

土开始受拉;当进一步增大偏心距时,应变均快速增长.墙体的承载力与偏心距呈现一种负相关的关系.另外,当偏心距较大时,混凝土的应变曲线的末端较为平缓,也可以说明偏心距较大的试件的破坏属于延性破坏.

(2)对比图 10 和图 13 可知:EPS 模块剪力墙内部芯肋的存在增加了模块墙体变形的

能力,使 WBC-1 较早的发生破坏,没能充分利用混凝土的塑性。

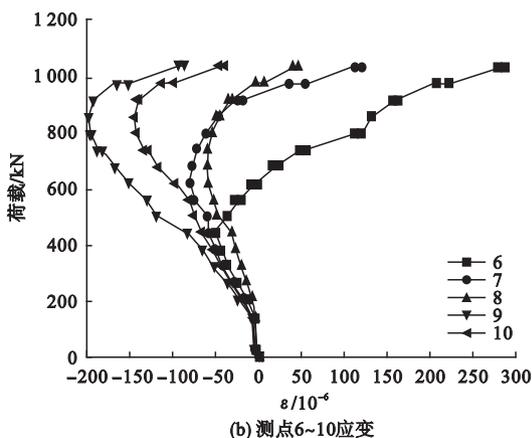
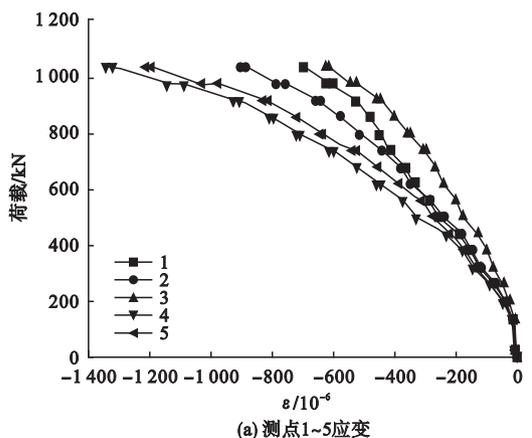


图 10 WBC-1 混凝土应变

Fig. 10 Concrete strain of WBC-1

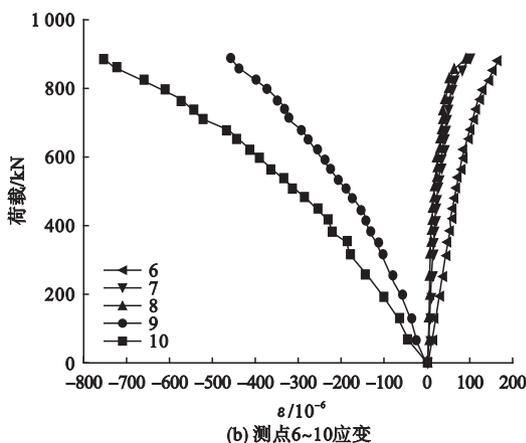
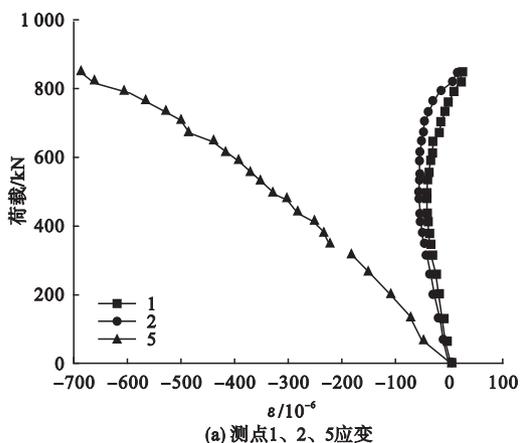


图 11 WBC-2 混凝土应变

Fig. 11 Concrete strain of WBC-2

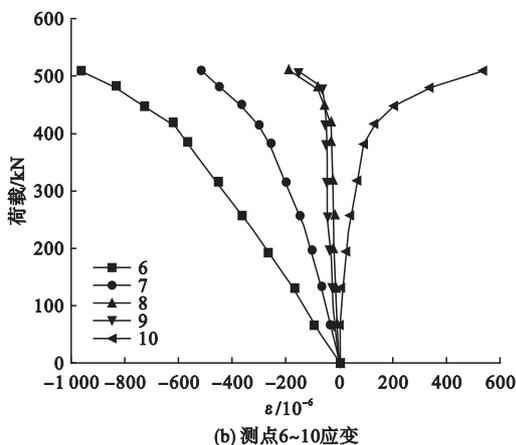
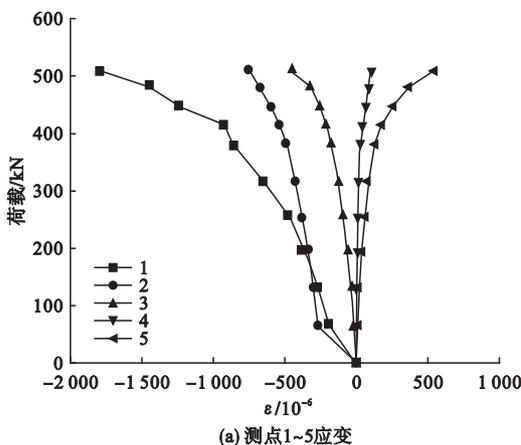


图 12 WBC-3 混凝土应变

Fig. 12 Concrete strain of WBC-3

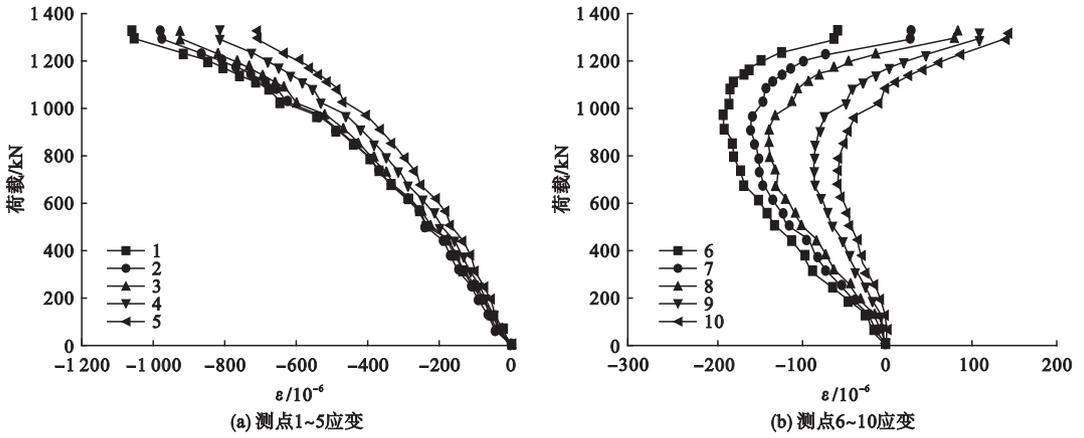


图 13 WBC-4 混凝土应变

Fig. 13 Concrete strain of WBC-4

2.4 钢筋应变

WBC-3 的钢筋应变变化关系(见图 14、图

笔者分析了有代表性的 WBC-1 和 15)。

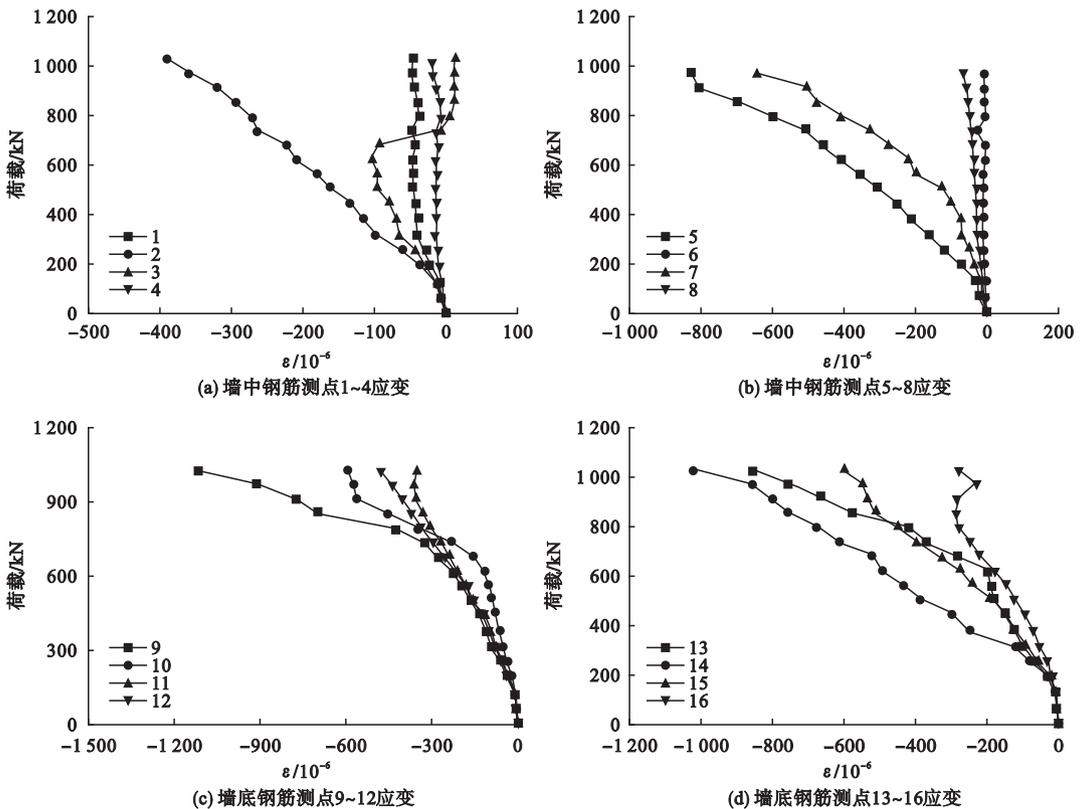


图 14 WBC-1 钢筋应变

Fig. 14 Reinforced strain of WBC-1

钢筋的荷载-应变曲线是由 3 个阶段组成,包括线性增长、非线性增长和水平上升阶段。加载初期,应变与荷载正相关;当荷载增加到大约破坏荷载的 80% 时,曲线开始由直

变曲,意味着钢筋已经达到了比例极限;接近破坏荷载时,虽然荷载变化不大,但是应变却大幅度增加。

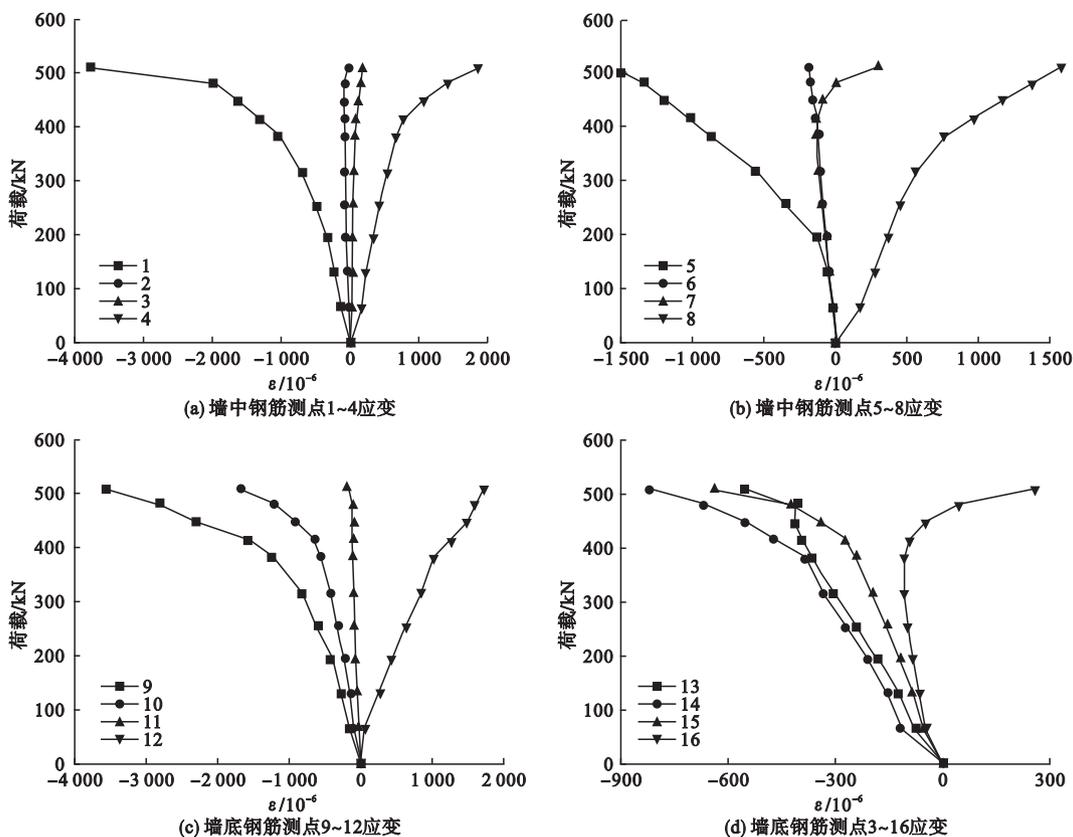


图 15 WBC-3 钢筋应变

Fig. 15 Reinforced strain of WBC-3

3 偏心受压承载力计算式推导

EPS 模块剪力承载力计算可按现行的混凝土结构设计规范中的方法进行计算,假定条件:①忽略剪力的影响;②混凝土与芯肋之间无相对滑移;③不考虑混凝土的受拉强度;④符合平面假定^[16-18].

墙体受压承载力 N 为

$$N \leq A'_s f'_y - A_s \sigma_s - N_{sw} + N_c \quad (1)$$

式中: A'_s 为受压钢筋截面面积; f'_y 为钢筋抗压强度设计值; A_s 为受拉钢筋截面面积; σ_s 为纵向钢筋应力。 N_{sw} 为沿截面腹部均匀配置的纵向钢筋所承担的轴力; N_c 为混凝土所承担的轴力。

$$N(e_0 + h_{w0} - \frac{h_w}{2}) \leq A'_s f'_y (h_{w0} - a'_s) -$$

$$M_{sw} + M_c \quad (2)$$

式中: e_0 为偏心距; h_{w0} 为剪力墙的有效高度;

h_w 为试件高度; a'_s 为受压区钢筋合力点到受压区边缘的距离。 M_{sw} 为沿截面腹部均匀配置的纵向钢筋对 A_s 重心的力矩, M_c 为混凝土对 A_s 重心的力矩。

$$N_c = \alpha_1 f'_c b' x \quad (3)$$

式中: α_1 为等效矩形应力图系数; f'_c 为 EPS 模块剪力墙混凝土抗压强度设计值,为 $0.7f_c$; b' 为截面有效宽度; x 为受压区高度。

$$M_c = \alpha_1 f'_c b' x (h_{w0} - \frac{x}{2}) \quad (4)$$

(1) 当 $x \leq \xi_b h_{w0}$ 时,试件为大偏心构件,求 WBC-3 的承载力。

$$\sigma_s = f_y \quad (5)$$

$$N_{sw} = (h_{w0} - 1.5x) b' f_{yw} \rho_w \quad (6)$$

式中: f_{yw} 为竖向分布钢筋抗拉强度设计值; ρ_w 为墙体竖向配筋率。

$$M_{sw} = 1/2 (h_{w0} - 1.5x)^2 b' f'_{yw} \rho_w \quad (7)$$

式(1)~(7)中有 σ_s 、 N_{sw} 、 N_c 、 x 、 M_{sw} 、 M_c 、 N

这7个未知数,将式(3)~(7)代入式(1)和式(2),联立式(1)和式(2)可求得WBC-3的承载力。

(2)当 $x > \xi_b h_{w0}$ 时,试件为小偏心构件,求WBC-1、WBC-2的承载力。

$$\sigma_s = \frac{f_y}{\xi_b - 0.8} \left(\frac{x}{h_{w0}} - \beta_c \right). \quad (8)$$

式中: β_c 为混凝土强度影响系数; ξ_b 为界限相对受压区高度。

$$N_{sw} = 0, \quad (9)$$

$$M_{sw} = 0, \quad (10)$$

$$\xi_b = \frac{\beta_c}{1 + \frac{f_y}{E_s \varepsilon_{cu}}}. \quad (11)$$

式中: E_s 为钢筋弹性模量; ε_{cu} 为混凝土极限压应变,取0.0033。

式(1)~(4)和式(8)~(11)中有 σ_s 、 N_{sw} 、 N_c 、 x 、 M_{sw} 、 M_c 、 N 这7个未知数,把式(1)~(4)和式(8)~(11)代入式(1)和式(2),联立式(1)和式(2)可求得WBC-1和WBC-2的承载力。

(3)WBC-4是普通剪力墙,而且是小偏心受压构件,与WBC-1和WBC-2的计算公式与求解方法唯一不同的地方在于,计算WBC-4墙体承载的时候,混凝土抗压强度直接采用轴心抗压强度,而未对其进行0.7的折减。

由于EPS模块剪力墙有芯肋,需对混凝土抗压强度进行0.7的折减^[19-20],通过式(1)~式(11)计算得到EPS模块剪力墙的竖向承载力。试验值取构件分级加载时达到极限状态时的承载力。各墙体承载力计算值与试验值对比如表2所示。

表2 各墙体承载力计算值与试验值对比

Table 2 Bearing capacity comparison of calculation and experimental value

试件编号	计算值/kN	试验值/kN	计算值/试验值
WBC-1	1 203.3	1 028.6	1.20
WBC-2	940.9	912	1.03
WBC-3	475	508.2	0.93
WBC-4	1 585.3	1 324.8	1.20

从表2可知,计算值与试验值的吻合程度在20%以内。误差的原因可以从以下几个方面考虑:①施工的差异;②混凝土材料的离散性;③试验仪器的误差;④实验室现有条件的限制。

4 结论

(1)墙体的大偏心和小偏心构件,开始加载后斜裂缝总是率先出现在芯肋处,墙体最终破坏是以受压区混凝土被压碎为标志。

(2)墙体的承载力与偏心距呈现一种负相关的关系。偏心距小于200 mm时,墙体几乎是全截面受压;当偏心距增大到一定的程度时,离加载点较远的一端,应变成为正值;当偏心距大于300 mm时,所有测点的应变都快速增长;构件的偏心距越大,那么构件属于延性破坏的几率就越大。

(3)EPS模块剪力墙与普通剪力墙类似,其承载力计算式可以在普通剪力墙计算式的基础上对混凝土强度做0.7的折减。

(4)EPS模块剪力墙由于芯肋的存在使墙体出现薄弱部位,削弱了墙体平面外的抗弯刚度,使其平面外稳定性变差。

参考文献

- [1] BENAYOU N A, SAMAD A A A, TRIKHA D N, et al. Flexural behaviour of precast concrete sandwich composite panel-experimental and theoretical investigations [J]. Construction and building materials, 2008, 22(4): 580-592.
- [2] BENAYOU A, SAMAD A A A, TRIKHA D N, et al. Structural behaviour of eccentrically loaded precast sandwich panels [J]. Construction and building materials, 2006, 20(9): 713-724.
- [3] LI S C, JIANG J J, YU Q R. Shear resistant behavior analysis of light composite shear walls [J]. Tsinghua science and technology, 2002, 7(6): 560-566.
- [4] 陈建国, 赵光明. CL-结构体系的施工工艺应用研究 [J]. 产品与节能技术, 2006, 187(34): 6-7.
(CHEN Jianguo, ZHAO Guangming. The research on the application of construction tech-

- nology in CL-construction system[J]. Energy-saving technology of product, 2006, 187(34): 6-7.)
- [5] 李贵明,倪春松,王立仁. 自密实混凝土在新型CL结构体系中的施工应用[J]. 河北建筑科技学院学报, 2002, 19(3): 39-40.
(LI Guiming, NI Chunsong, WANG Liren. Application of dense-in-itself concrete in construction of CL structure complex[J]. Journal of Hebei institute of architectural science and technology, 2002, 19(3): 39-40.)
- [6] 李成滨. 一种建筑用新型节能EPS模块: 201220357076. 6[P]. 2012-07-24.
(LI Chengbin. A new kind of energy-saving EPS module in building; 201220357076. 6[P]. 2012-07-24.)
- [7] 林国海,翟红远,魏有海. EPS模块在外墙外保温系统中的应用[J]. 建筑节能, 2011, 28(11): 65-69.
(LIN Guohai, ZHAI Hongyuan, WEI Youhai. EPS module utilized in exterior insulation systems[J]. Building energy efficiency, 2011, 28(11): 65-69.)
- [8] WAN L C, SU D X, JIAN W Z. Seismic performance of RC shear wall with concealed bracing[J]. Advances in structural engineering, 2003, 6(1): 1-13.
- [9] 冯葆纯,徐晨辉. 保温砌模现浇承重墙体系[J]. 建筑节能, 2003, 8: 43-45.
(FENG Baochun, XU Chenhui. Cast in situ load bearing wall system[J]. Building energy conservation, 2003, 8: 43-45.)
- [10] 肖暴飞. 低周反复荷载作用下HR-EPS模块剪力墙抗震性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
(XIAO baofei. Experimental research on seismic behavior of HR-EPS module shear wall under low-cycle repeatedly load[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014.)
- [11] 王雪莲. 不同剪跨比作用下HR-EPS模块剪力墙的抗震性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
(WANG Xuelian. Experimental research on seismic behavior of HR-EPS module shear wall under different shear span ratio[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014.)
- [12] JI X D, JIANG F M, QIAN J R. Seismic behavior of steel tube-double steel plate-concrete composite walls: experimental tests[J]. Journal of constructional steel research, 2013, 86(6): 17-30.
- [13] MAO C X, WANG Z Y, ZHANG I Q, et al. Seismic performance of RC flame-shear wall structure with novel shape memory alloy dampers in coupling beams[C]//15WCEE, Lisbon, Portugal, Paper-ID: 4988, September 24-28, 2012.
- [14] KIM H J, CHOI K S, OH S H, et al. Comparative study on seismic performance of conventional RC coupling beams and hybrid energy dissipative coupling beams used for RC shear walls[C]//15WCEE, Lisbon, Portugal, Paper-ID: 2254, September, 24-28, 2012.
- [15] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
(GUO Zhenhai. Reinforced concrete theory [M]. Tsinghua University Press, 2012.)
- [16] 朱张峰,郭正兴. 装配式短肢剪力墙低周反复荷载试验[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 125-130.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Low-cyclic reversed load test on new precast concrete short-leg shear wall[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(5): 125-130.)
- [17] 江永涛. 新型装配式混凝土墙抗震性能试验及正截面受弯承载力研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
(JIANG Yongtao. Study on the seismic behavior and normal section bending bearing capacity of the new precast concrete wall[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.)
- [18] 李响,梁兴文. 高性能混凝土剪力墙恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(5): 42-48.
(LI Xiang, LIANG Xingwen. Study on restoring for structural engineering and earthquake resistance of china education ministry [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2010, 30(5): 42-48.)
- [19] 李培培. HR-EPS模块复合保温剪力墙体系抗压性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
(LI Peipei. Experimental study on compression performance of HR-EPS module composite insulation shear wall system[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014.)
- [20] 宋春玲. EPS模块复合保温剪力墙体系竖向承载能力试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
(SONG Chunling. Experimental research on vertical bearing capacity of HR-EPS module composite insulation shear wall[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015.)