

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.01.002

方钢混凝土柱填充墙面外性能分析

曹立染¹, 陈东¹, 吴升²

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 合肥东部新中心建设投资有限公司 工程建设部, 安徽 合肥 230000)

摘要: 在填充墙中设置构造柱是提高砌体结构面外承载力的重要措施, 为了解决传统钢筋混凝土构造柱施工复杂、质量无法保证、难以回收利用等缺陷, 提出在填充墙中设置方钢管混凝土构造柱, 以进一步提高对墙体的约束能力和砌体结构的安全性。通过对6块填充墙进行平面外加载试验, 以分析两种不同构造柱下填充墙缩尺模型的面外承载能力。并采用ABAQUS模拟填充墙的面外极限荷载。试验结果表明, 两构造柱的填充墙具有相同的面外受力表现, 而方钢管混凝土构造柱较传统构造柱对墙体的约束效果提升了80.3%, 面外极限荷载约提升了249.9%。

关键词: 方钢管混凝土构造柱; 填充墙; 平面外加载; 极限荷载

中图分类号: TU398^{+.7} **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2024)01-0008-07

引文格式: 曹立染, 陈东, 吴升. 方钢混凝土柱填充墙面外性能分析[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(1): 8-14.

Performance Analysis of Square Steel Concrete Columns Filled with Exterior Walls

CAO Liran¹, CHEN Dong¹, WU Sheng²

(1. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Engineering Construction Department, Hefei East New Center Construction Investment Co., LTD., Hefei 230000, China)

Abstract: For the structural columns to be set up in fill walls is an important measure to improve the out-of-plane bearing capacity of masonry structures. In order to address such shortcomings as complex construction, quality assurance, and difficulty in recycling in traditional reinforced concrete structural columns, it is proposed to install square steel tube concrete structural columns in fill walls for a further improvement of the constraint capacity of the wall and the safety of the masonry structure. Based on the out-of-plane loading tests conducted on 6 fill walls, an analysis is made of the bearing capacity of two scaled models of fill walls under different structural columns, followed by a simulation of the out-of-plane ultimate load of the fill walls by using ABAQUS. The experimental results show that the fill walls under the two structural columns are characterized with the same out-of-plane stress performance, while the confinement effect of the square steel tube concrete structural column on the wall has been improved by 80.3%, and the out-of-plane ultimate load has been increased by 249.9%.

Keywords: concrete filled square steel column; fill wall; out-of-plane loading; ultimate loading

收稿日期: 2023-04-07

基金项目: 安徽省教育厅高校自然科学基金资助项目(KJ2021A0608); 安徽省住房与城乡建设科技计划基金资助项目(2020-YF47)

作者简介: 曹立染, 男, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为装配式混凝土结构, E-mail: 2733871551@qq.com

通信作者: 陈东, 男, 安徽建筑大学教授, 博士, 主要研究方向为建筑信息化, E-mail: chendong@ahjzu.edu.cn

0 引言

未设置构造措施的砌体填充墙因难以承受平面外作用^[1]而发生严重的破坏,会产生巨大的安全隐患。F. Akhoundi 等^[2]研究发现,门窗等开口会使砌体填充墙更容易受到平面外破坏。大多数填充墙加固技术研究中没有提供设计方法和指导方针^[3],而构造柱是提高填充墙面外承载力的主要措施。D. Matošević 等^[4]对有、无构造柱墙体的受力性能进行了研究,发现带构造柱的墙体受力性能提高,同时分析得知连接措施对结构的刚度和承载力产生的影响较小,但是墙体的耗能能力增强。钢筋混凝土构造柱难以符合未来绿色建筑发展方向。为此,近些年来,科研工作者们提出了各种新型的构造柱结构。张春涛等^[5]提出了方钢管砂卵石组合圈梁构造柱,并且通过试验验证了该构造柱对填充墙的形变起到了有效的约束作用,能够提高墙体的承载力,但是缺乏对比传统构造柱的性能表现。郑妮娜等^[6]通过试验得出芯柱式构造柱在与墙体协调变形上要优于传统构造柱的,但是芯柱式构造柱仍需现场预留预制试块位置,绑扎钢筋现场浇筑,需要耗费大量时间。

采用方钢管混凝土构造柱作为约束填充墙的措施,可以在提高墙体受力性能的同时,简化施工过程,促进装配化施工的发展。因此,本研究拟以试验对比6个方钢管混凝土构造柱和钢筋混凝土构造柱在平面外作用下约束砌体填充墙的效果,对比分析方钢管混凝土构造柱填充墙的面外表现,并用数值模型分析方钢管混凝土构造柱填充墙的面外受力极限性能。

1 试验概况

1.1 材料与墙体设计

试验制作1:2的缩尺试件:方钢管混凝土构造柱砌体填充墙(concrete filled square steel filled column masonry wall, CSCW)试件3个,编号为CSCW-1、CSCW-2、CSCW-3;钢筋混凝土构造柱砌体填充墙(reinforced concrete construction column masonry fill wall, RCW)试件3个,编号为RCW-1、RCW-2、RCW-3。试验采用A5.0蒸压加气混凝土砌块,M5.0的砂浆,C20砼,3 mm厚Q235方钢管。纵向钢筋采用HRB400直径为12 mm的钢筋,拉结筋采用HRB400直径为6 mm的钢筋。方钢管混凝土构造柱与钢筋混凝土构造柱截面尺寸均为100 mm×100 mm,砌体填充墙的长度为3 000 mm,高度为2 000 mm,厚度为100 mm。墙体中央设置构造柱,沿墙高度方向每500 mm设置1根嵌入墙体深度为700

mm的拉结筋。混合砂浆抹灰,为了增强构造柱与墙体的整体性,在构造柱及其附近墙体粘贴抗裂网格布,涂上白色颜料,如图1所示。

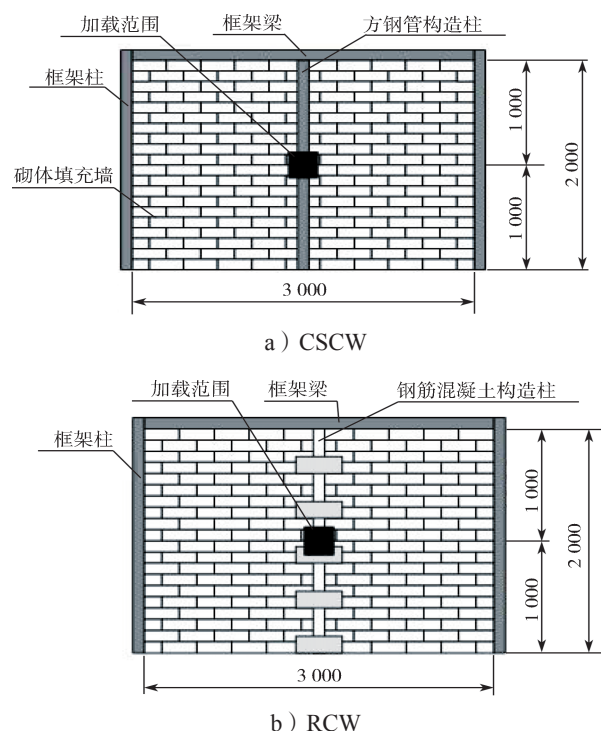


图1 填充墙结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fill wall structure

方钢管混凝土构造柱顶部与预留插筋焊接,底部焊接L形钢板并与预埋钢板焊接,柱与墙体通过高强度砂浆和拉结筋形成整体,如图2所示。钢筋混凝土构造柱布置4根直径为12 mm的HRB400钢筋,马牙槎按规范设置。

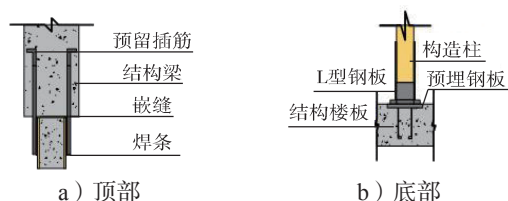


图2 构件连接示意图

Fig. 2 Component connection diagram

1.2 试验设备及加载方式

试验加载装置如图3所示,由液压式千斤顶提供荷载,通过型钢传递作用,将压力传感器置于千斤顶与型钢之间。墙体应变数据用动静态应变仪记录,砌体填充墙和构造柱的位移用位移计进行测量,裂缝宽度采用裂缝宽度观测仪测量。位移计的排布位置与应变片一致。在砌体填充墙的非加载面(non loading surface, NLS)布置9片应变片,其中沿构造柱竖向设置3个等距应变片,墙体两边按照一致的高度各设置3个应变片。砌体填充墙的加载面(loading

surface, LS) 沿构造柱竖向设置 3 个等距应变片。位移计对称摆放在 NLS 面上, 如图 4 所示。

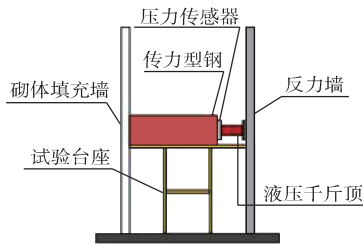


图 3 试验加载装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental loading device



图 4 加载装置现场图

Fig. 4 Loading device physical map

荷载施加于墙体正中央。预加载值为 4 kN, 做 2 次循环回到初始位置, 检查仪器是否运转正常。试验使用分级加载, 每级加载时间为 2~3 min, 加载值为 1 kN, 加载至 RCW 破坏时停止试验。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象分析

RCW 在加载初期, 应力、位移增长较慢, 墙面出现细微裂缝, 后期位移发展速度增加。构造柱断裂时 RCW 被破坏, 此时砌体填充墙中部产生明显的突出, 钢筋混凝土构造柱出现开裂和断裂等不同程度的破坏形式, 墙体周围产生较宽裂缝, 墙体与柱仍能协同变形, 但不具备继续承载的能力。CSCW 在加载过程中, 墙体和构造柱的位移相比 RCW 的明显减小, 填充墙仅出现少许细小裂缝。停止加载时 CSCW 均未被破坏, 构造柱与墙体的整体性没有被破坏。试件 RCW-1、RCW-2、RCW-3 的面外极限承载力分别为 23.5、25.5、23.5 kN。CSCW 试件加载至 25.5 kN, 此时试件并未被破坏, 仍能继续承载。当加载至 10.5 kN 时, CSCW 在 NLS 先出现 0.04 mm 的竖向裂缝; 随着荷载增加至 11.9 kN, 横向裂缝出现在墙体中部, 裂缝宽度为 0.07 mm; 加载后期, 在墙体周围发展一些细微裂缝, 产生的最大裂缝宽为 0.50 mm。当加载至 5.6 kN 时, RCW 在 NLS 顶部先出现竖向裂缝, 裂缝宽度最大为 0.06 mm, 随即横向裂缝出现在墙体中部, 在加载过程中发出响声, 沿墙体中间的竖向裂

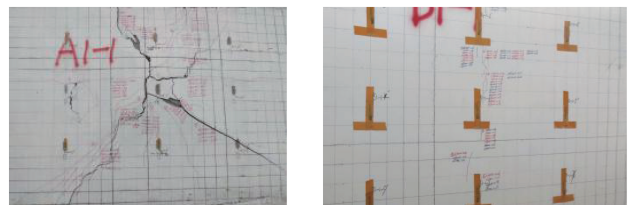
缝向四周延伸成斜裂缝, 最后裂缝贯穿墙面, 产生的最大裂缝宽度为 17.1 mm。各模型 NLS 上的裂缝开展荷载结果如表 1 所示。

表 1 NLS 上裂缝开展荷载表

Table 1 NLS upper crack development load table

模型 编号	横向裂缝		竖向裂缝		最大裂缝	
	荷载 /kN	宽度 /mm	荷载 /kN	宽度 /mm	荷载 /kN	宽度 /mm
RCW-1	9.5	0.05	5.6	0.06	25.5	17.10
RCW-2	8.5	0.04	6.7	0.06	25.5	1.89
RCW-3	10.5	0.04	7.5	0.06	23.5	3.80
CSCW-1	11.9	0.07	10.5	0.04	25.5	0.50
CSCW-2	14.0	0.08	13.1	0.05	25.5	0.25
CSCW-3	19.5	0.07	18.5	0.04	28.5	0.23

CSCW 第一条裂缝出现时的荷载为 10.5 kN, 约为 RCW 出现第一条裂缝时的荷载 5.6 kN 的 1.88 倍, 与最大荷载时的裂缝相差 16.6 mm。填充墙裂缝开展如图 5 所示。



a) RCW

b) CSCW

图 5 填充墙裂缝开展图

Fig. 5 Crack propagation diagram of fill walls

方钢管混凝土构造柱的刚度大于钢筋混凝土构造柱的, 拉结筋使得构造柱与墙体能够更好地协调变形, 从而约束墙体的位移发展速率, 使 CSCW 面外承载力大于 RCW 的, 同时限制了墙体裂缝开展。由表 1 可知, CSCW 出现第一条裂缝时的荷载均大于 RCW, 且最大裂缝比 RCW 小很多。

2.2 构造柱和墙体应变分析

实验所得构造柱和墙体应变如图 6 和 7 所示。方钢管构造柱与钢筋混凝土构造柱在加载初期, 各部分的应变走势基本一致, 当荷载增加到一定程度时, 钢筋混凝土构造柱由于混凝土表面裂缝加速开展, 导致应变数值激增, 且混凝土开裂不规则, 导致部分应变数据产生跳跃, 甚至应变片被拉断。

由图 6 和 7 可知, 方钢管混凝土构造柱的应变均小于钢筋混凝土构造柱的, 且两者的应变最大值均在构造柱和墙体加载点处。CSCW 与 RCW 中, 构造柱中部最大应变差 2 494 $\mu\epsilon$; CSCW 与 RCW 中, 填充墙中部最大应变差 306 $\mu\epsilon$ 。这是由于构造柱承担了绝大部分荷载, 构造柱刚度的差异导致柱上应变数据差值较大, 填充墙的应变差距较小, 说明方钢管混凝土

土构造柱与钢筋混凝土构造柱约束墙体的效果相似, 但前者的约束能力更强。

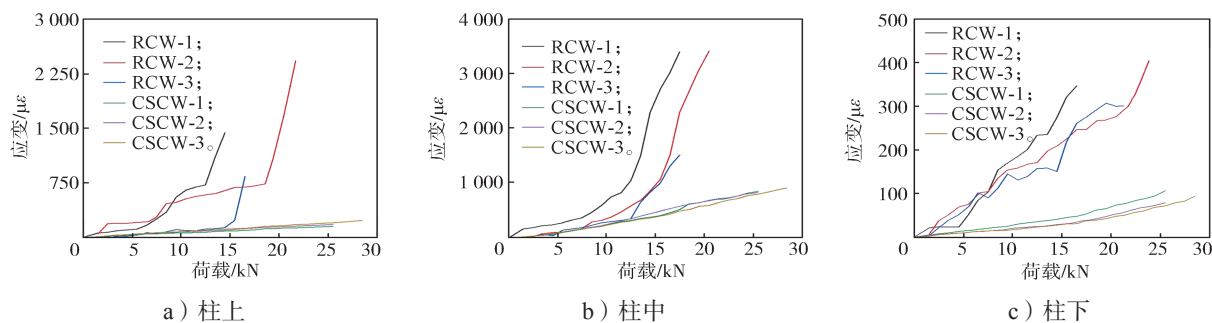


图6 构造柱应变对比图

Fig. 6 Comparison diagram of structural column strain

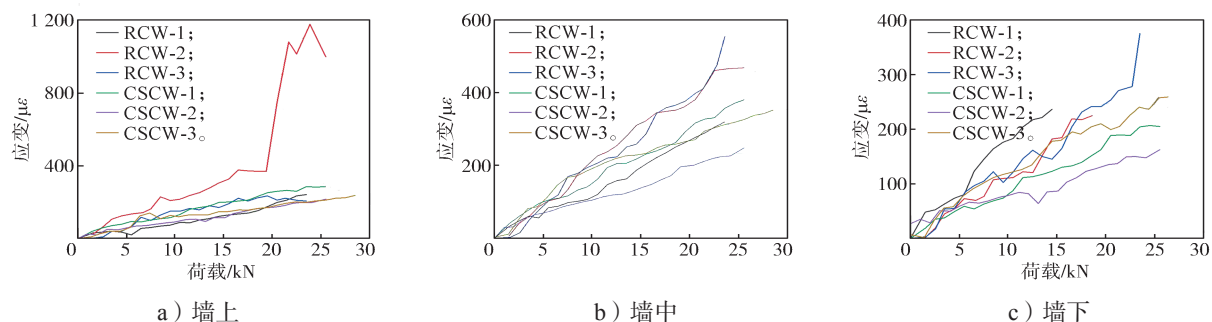


图7 填充墙应变对比图

Fig. 7 Comparison diagram of the fill wall strain

2.3 构造柱和墙体位移分析

实验所得构造柱和墙体位移对比如图8和9所示。由图可知, CSCW和RCW的墙体和构造柱位移均为中部最大、两端较小。方钢管构造柱的最大位移

为4.2 mm, 相比钢筋混凝土构造柱的最大位移26.6 mm, 明显减小, 位移差为22.4 mm。方钢管构造柱能够更好地约束周围墙体的变形, CSCW与RCW墙体的最大位移差为12.0 mm。

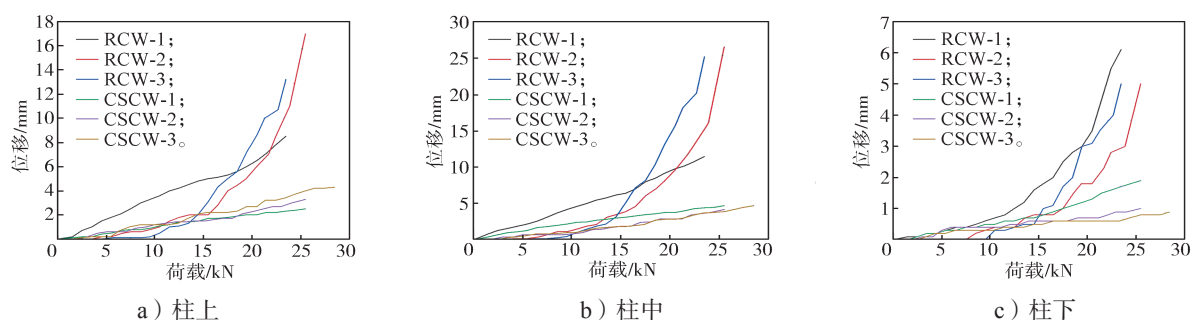


图8 构造柱试验位移对比图

Fig. 8 Test displacement comparison diagram of constructional columns

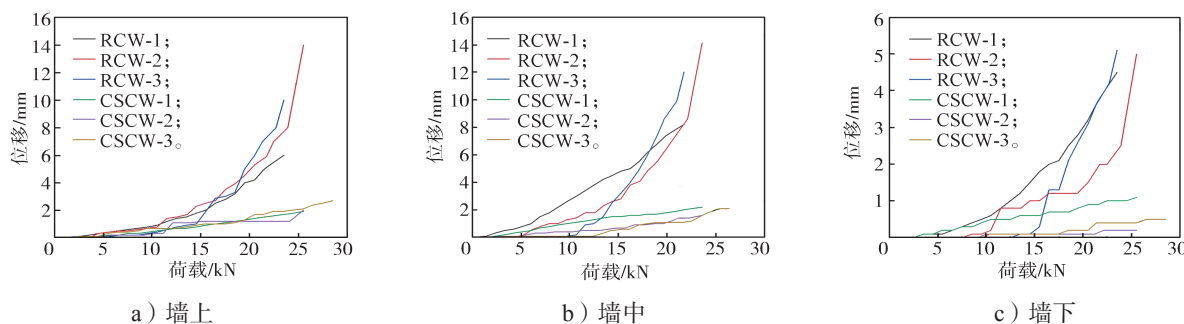


图9 填充墙试验位移对比图

Fig. 9 Displacement comparison of fill wall tests

由于施加的面外荷载大部分由构造柱承担,导致构造柱的位移大于填充墙的位移。由表 2 所示构造柱与墙体在加载附近的位移差可知,方钢管构造柱约束墙体的约束效果明显优于传统构造柱的约束效果,最大位移的差值为 10.7 mm,对墙体约束效果提升了约 81.1%。这一结果表明,方钢管混凝土构造柱的强度和刚度更大,与墙体连接效果更好,受力性能更好,约束墙体的能力更强。

表 2 中部构造柱与墙体位移及差值

Table 2 Displacement and difference value between the central structural column and the wall

模型编号	墙体位移/mm	构造柱位移/mm	位移差/mm
RCW-1	8.2	11.5	3.3
RCW-2	14.1	26.6	12.5
RCW-3	12.0	25.2	13.2
CSCW-1	2.1	4.7	2.6
CSCW-2	1.6	4.2	2.6
CSCW-3	2.2	4.7	2.5

通过比较分析 CSCW 和 RCW 面外试验结果,验证了方钢管混凝土构造柱不仅有着与钢筋混凝土构造柱相同的作用效果,而且有着更好的面外受力性能。且方钢管混凝土构造柱提高了墙体的初裂位移,使墙体初裂至裂缝贯通的时间延长,承载能力比较稳定,有明显的持荷优势。

3 数值分析

3.1 数值模型的建立

为了进一步研究 CSCW 的面外受力性能,建立了 ABAQUS 有限元模型,分析 CSCW 的面外最大承载能力时,仅研究方钢管混凝土构造柱约束填充墙的效果,对墙体进行整体分析,不深入探讨砂浆和砌块的相互作用对墙体的影响。选用整体式模型^[7-8]进行分析,墙体和构造柱的单元采用 C3D8R,拉结筋的单元采用 T3D3,方钢管和钢筋采用理想弹塑性模型,弹性模量取值为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3。依据相关标准^[9],砂浆强度等级为 M5.0, A5.0 蒸压加气混凝土的泊松比取 0.20,弹性模量取 2 300。由于砌体受拉破坏特性与混凝土相似,故采用郑妮娜^[10]化简后的公式。杨卫忠^[11]的受压本构关系式能够较好地反映砌体受力性能,其单向受压应力-应变关系如式(1)所示。

$$\frac{\sigma}{f_m} = \frac{\eta}{1 + (\eta - 1)(\varepsilon/\varepsilon_m)^{\eta/(\eta-1)}} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}, \quad \eta = \frac{E\varepsilon_m}{f_m} \quad (1)$$

式中: σ 为外部压应力;

f_m 为砌体轴心抗压强度平均值;

ε 为外部压应变;

ε_m 为 f_m 对应的应变值;

E 为弹性模量。

钢管中的核心混凝土受压本构^[12]关系如式(2)所示。

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ x / [\beta_0 (x-1)^\eta + x], & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y = \sigma/\sigma_0$, 且 $\sigma_0 = f'_c$ (N/mm²), 其中 f'_c 为混凝土轴心抗压强度;

$x = \varepsilon / \varepsilon_0$, 且 $\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800 \xi^{0.2} \times 10^{-6}$, 其中 $\varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6}$;

$$\beta_0 = (f'_c)^{0.1} / 1.2\sqrt{1+\xi};$$

$$\eta = 1.6 + 1.5x.$$

混凝土受拉本构关系按照规范^[13]给出的混凝土单轴受拉的应力-应变曲线。

3.2 数值模拟结果

数值模拟所得构造柱的荷载-应力关系如图 10 所示。

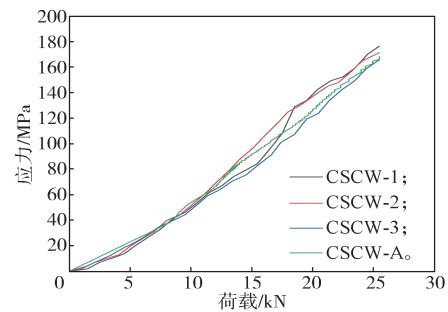


图 10 构造柱荷载-应力图

Fig. 10 Structural column load stress diagram

观察图 10 可知,模拟结果与试验值吻合度较高,试验最大应力为 176.3 MPa, CSCW-A 最大应力为 167.7 MPa,仅相差约 4.5%。

构造柱的应力云图如图 11 所示。

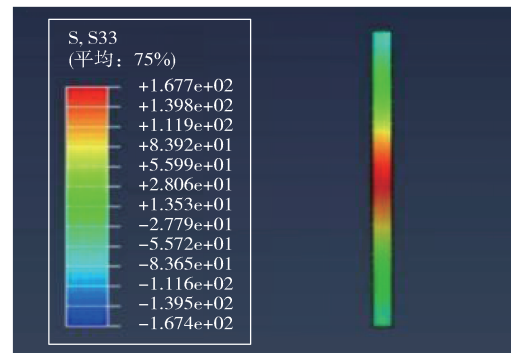


图 11 构造柱应力云图

Fig. 11 Stress column nephogram

由图 11 可知,模拟构造柱应力分布与试验应力

分布相似, 均为中部应力最大, 上部和下部相对较小, 且数值较为接近。

图 12 与图 13 对比了构造柱与墙体各个部分的位移。如图所示, 构造柱与墙体各个部分的试验曲线与

模拟曲线的拟合程度较高, 仅有填充墙下部位移图的试验数据记录出现问题, 导致两条曲线偏差过大。这表明建立的模型能够较为准确地反映在面外荷载作用下 CSCW 的受力情况。

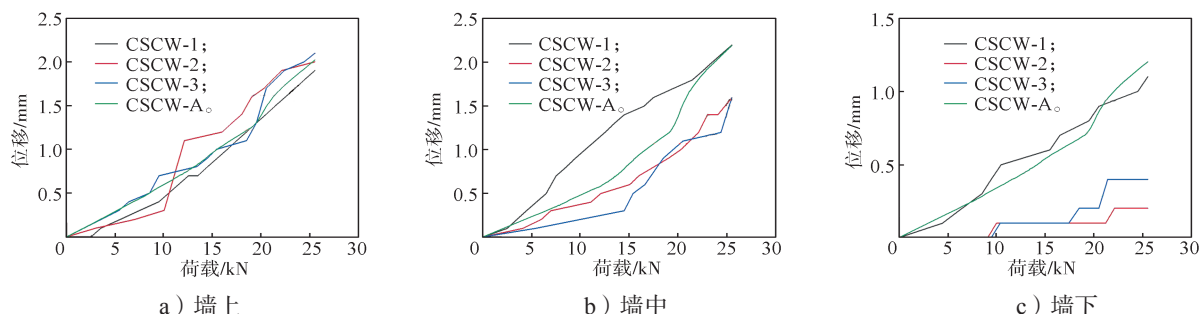


图 12 填充墙位移对比图

Fig. 12 Comparison diagram of fill wall displacement

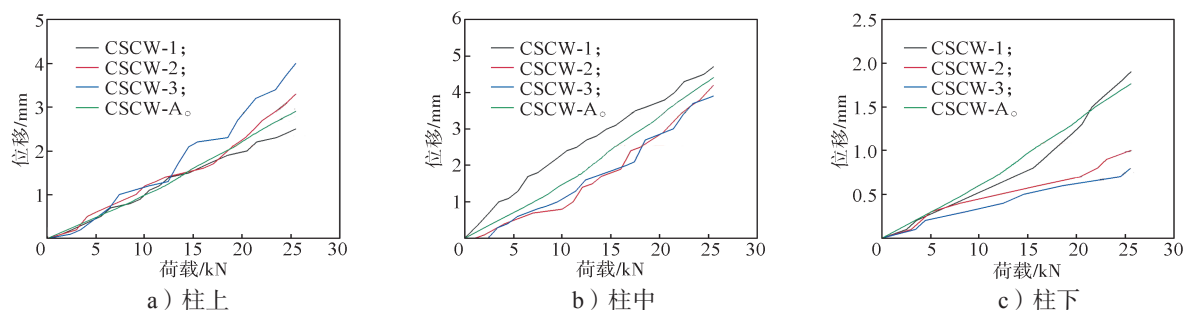


图 13 构造柱位移对比图

Fig. 13 Comparison diagram of the structural column displacement

采用有限元模型分析 CSCW 的面外极限受力情况, 综合 CSCW 的受拉损伤云图、构造柱荷载-位移图分析其最大承载力。当荷载达 35.21 kN 时, 方钢管屈服, 由于方钢管约束核心混凝土使得 CSCW 仍可以继续承载, 随着荷载的继续增加, 由于内部混凝土的挤压变形, 导致方钢管的应力继续增加, 位移逐渐增大。当荷载达 89.22 kN 时, CSCW 的受拉损伤云图如图 14 所示。

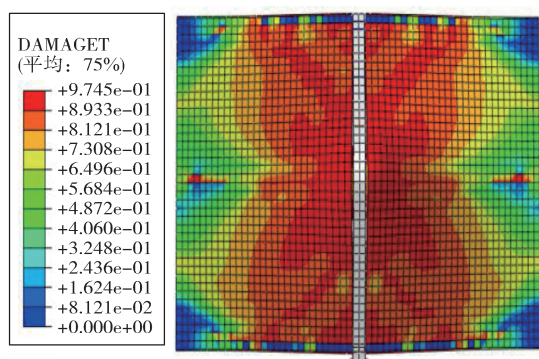


图 14 CSCW 受拉损伤应力分布云图

Fig. 14 CSCW tensile damage stress distribution nephogram

由图 14 可知, 此时方钢管构造柱附近的填充墙的受拉损伤已达最大值, 损伤分布与 RCW 破坏时裂

缝分布基本一致, 进一步验证了 CSCW 与 RCW 有着相同的受力表现。如图 15 所示, 此时构造柱的位移大小为 202.98 mm。随着荷载的增加, 损伤范围不断扩散, 直至整个填充墙面, 位移发展速率激增, 认为填充墙无法继续承载。达到极限荷载时, 构造柱周围墙体的位移约为 205.15 mm, 这表明方钢管混凝土构造柱能够很好地约束墙体位移。

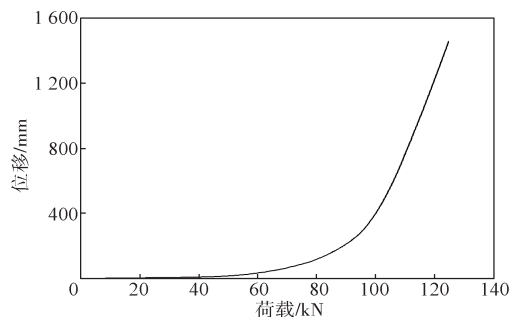


图 15 构造柱的荷载-位移曲线

Fig. 15 Load displacement curve of structural columns

4 结论

1) 通过试验对比了 CSCW 和 RCW 在面外荷载下的性能表现, 发现方钢管混凝土构造柱的作用类似

于钢筋混凝土构造柱。CSCW 的面外受力性能要优于 RCW 的。当加载至 RCW 的极限荷载时, CSCW 中的钢材未屈服, 而 RCW 出现较多裂缝, 构造柱在强度、刚度及约束墙体性能方面有所减弱。

2) 通过对比 RCW 与 CSCW 的破坏过程和形式、位移、裂缝、应变数据, 发现方钢管混凝土构造柱在强度、刚度和位移约束等方面均优于钢筋混凝土构造柱, 表明 CSCW 的面外承载力和整体性能得到提高。在相同荷载作用下, 方钢管混凝土构造柱的最大位移比钢筋混凝土构造柱的减少了 84.2%, 墙体最大位移比钢筋混凝土构造柱墙体位移减少了 85.1%, 墙体裂缝出现的时间更晚, 对墙体的约束效果提升了 80.3%, 出裂荷载提高了 1.88 倍。这一结果表明, 方钢管混凝土构造柱刚度较大, 延缓了裂缝出现时间, 能更有效地约束墙体。

3) 建立有限元模型分析了 CSCW 的面外极限承载能力, 发现方钢管屈服后 CSCW 位移仍发展缓慢, 能够更好地约束填充墙变形。其面外极限承载力为 89.22 kN, 相比于钢筋 RCW 的承载力, 提高了 249.9%。

参考文献:

- [1] LUNN S D, RIZKALLA H S. Strengthening of Infill Masonry Walls with FRP Materials[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(2): 206–214.
- [2] AKHOUNDI F, VASCONCELOS G, LOURENÇO P. Experimental Out-of-Plane Behavior of Brick Masonry Infilled Frames[J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2020, 14(2): 221–237.
- [3] FURTADO A, RODRIGUES H, ARÊDE A, et al. Experimental Tests on Strengthening Strategies for Masonry Infill Walls: A Literature Review[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263(120520): 16–17.
- [4] MATOŠEVIĆ D, SIGMUND V, GULJAŠ I. Cyclic Testing of Single Bay Confined Masonry Walls with Various Connection Details[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014, 13(2): 565–586.
- [5] 张春涛, 邓传力, 刘宜丰. 方钢管砂卵石组合圈梁构造柱约束墙体抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(3): 24–33.
ZHANG Chuntao, DENG Chuanli, LIU Yifeng. Experimental Study on Seismic Resistance of Brick Wall Constrained by Tie Column-Beam System with Sand-Cobble-Filled Square Steel Tube[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(3): 24–33.
- [6] 郑妮娜, 李英民, 刘凤秋. 芯柱式构造柱约束墙体抗震性能拟静力试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2013, 46(增刊 1): 202–207.
ZHENG Nina, LI Yingmin, LIU Fengqiu. Pseudo-Static Test Study on Seismic Behavior of Masonry Wall Restrained by Core-Tie-Columns[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(S1): 202–207.
- [7] 李利群, 刘伟庆. 混凝土小型空心砌块约束砌体的非线性有限元分析 [J]. *南京工业大学学报*, 2002, 24(3): 15–19.
LI Liqun, LIU Weiqing. Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Small Hollow Block Restrained Masonry[J]. *Journal of Nanjing University of Technology*, 2002, 24(3): 15–19.
- [8] 徐德良, 刘伟庆, 刘经纬, 等. 大开间约束砖砌体横墙的非线性分析 [J]. *世界地震工程*, 2002, 18(2): 105–109.
XU Deliang, LIU Weiqing, LIU Jingwei, et al. A Static Nonlinear Analysis of Confined Brickmasonry Walls in a Multistory Building with a Large-Bay[J]. *World Earthquake Engineering*, 2002, 18(2): 105–109.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 蒸压加气混凝土制品应用技术标准: JGJ/T17—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 13–14.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Application Technical Standard of Autoclaved Aerated Concrete Products: JGJ/T17—2020[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020: 13–14.
- [10] 郑妮娜. 装配式构造柱约束砌体结构抗震性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
ZHENG Nina. Study on Seismic Performance of Assembled Constructional Column Confined Masonry Structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [11] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型 [J]. *建筑结构*, 2008, 38(10): 80–82.
YANG Weizhong. Constitutive Relation Model of Masonry Under Compression[J]. *Building Structure*, 2008, 38(10): 80–82.
- [12] HAN L, YAO G, TAO Z. Performance of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Tubes Under Pure Torsion[J]. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(1): 24–36.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 209–215.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 209–215.

(责任编辑: 廖友媛)