

引用本文:朱 倩,蒋永杰,岳旭鹏,等. 钢管 RPC 边框密肋复合剪力墙抗剪性能[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(5):142-150.

ZHU Qian,JIANG Yong-jie,YUE Xu-peng,et al. Shear Behavior of Multi-ribbed Composite Shear Walls with RPC Filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2020,37(5):142-150.

DOI:10.19815/j.jace.2020.05015

钢管 RPC 边框密肋复合剪力墙抗剪性能

朱 倩,蒋永杰,岳旭鹏,赵均海

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为研究新型钢管活性粉末混凝土(RPC)边框密肋复合剪力墙的抗剪性能,基于统一强度理论和斜压杆计算模型,考虑材料的中间主应力、拉压异性效应以及边框架与等效弹性板之间剪应力等因素的影响,建立了此类组合墙体的抗剪承载力计算公式。利用 ABAQUS 有限元软件,对不同混凝土强度、轴压比、钢管屈服强度的钢管 RPC 边框密肋复合剪力墙进行水平单调加载,将抗剪承载力数值模拟结果与理论计算结果进行对比分析。结果表明:抗剪承载力计算值与有限元值吻合较好,验证了理论计算方法的准确性与有限元模型的可靠性;随着密肋复合墙板肋格 RPC 强度等级的提高,剪力墙抗剪承载力显著提高;随着轴压比的增加,抗剪承载力先增加后下降,且延性性能下降;提高边框柱钢管屈服强度,剪力墙承载力略有增加,效果并不显著,但可以改善构件延性性能;提出的抗剪承载力计算公式为该新型复合剪力墙的发展提供了理论基础。

关键词:统一强度理论;钢管 RPC 柱;密肋复合墙体;抗剪承载力;数值模拟

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)05-0142-09

Shear Behavior of Multi-ribbed Composite Shear Walls with RPC Filled Steel Tubular Columns

ZHU Qian, JIANG Yong-jie, YUE Xu-peng, ZHAO Jun-hai

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

Abstract: In order to study the shear behavior of a new type of multi-ribbed composite shear walls with reactive powder concrete (RPC) filled steel tubular columns, the shear bearing capacity formulas for such composite walls were established based on both the unified strength theory and the calculation model of oblique compression strut. The intermediate principal stress, tensile-compressive strength difference and shear strength between the fringe frame and equivalent elastic plate were taken into account. Moreover, ABAQUS software was used to conduct horizontal monotonic loading on the composite shear walls with consideration of different RPC strengths, axial compression ratios and steel tubular yield strengths. The numerical simulation results and theoretical calculation results of shear capacity were compared and analyzed. The results show that the numerical simulation results are in better agreement with the theoretical calculated values, which verifies the accuracy of the theoretical method and the reliability of finite element

收稿日期:2020-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51878056);陕西省科技计划-社会发展领域项目(2019SF-256);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5023);长安大学大学生创新创业训练项目(S202010710122);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102289105,300102280203)

作者简介:朱 倩(1987-),女,山东菏泽人,讲师,工学博士,E-mail:zhuqianchd@126.com。

model. Meanwhile, the shear capacity significantly improves with the increase of rib RPC strength. By increasing the axial compression ratio, the shear capacity increases first and then decreases, and ductility performance becomes worse. The shear capacity slightly enhances with increasing the yield strength of frame-column steel tube, however it can improve the ductility of the composite wall. The proposed shear bearing capacity formulas provide a theoretical foundation for the development of this new composite wall.

Key words: unified strength theory; RPC filled steel tubular column; multi-ribbed composite shear wall; shear capacity; numerical simulation

0 引言

近年来剪力墙、框架-剪力墙等结构体系被广泛应用于高层建筑特别是超高层建筑中,墙体的抗剪极限承载力分析是结构极限承载力分析和抗震性能评价的主要内容。作为高层和超高层建筑中主要的抗侧力构件,其抗剪极限承载力分析尤为重要。

国内外有很多不同种类剪力墙形式,其中在剪力墙中置入钢管而形成的钢管混凝土组合剪力墙,能够充分发挥混凝土和钢 2 种材料性能的优势,从而提高剪力墙的抗剪承载力。目前,常见的钢管混凝土组合剪力墙形式有钢管混凝土组合柱剪力墙,如钱稼茹等^[1]、白亮等^[2]在约束边缘构件内配置 1 或 2 根钢管,赵作周等^[3]在剪力墙截面两端和中部配置多根钢管;另外有不少学者研究钢管混凝土柱边框组合剪力墙,如 Hu 等^[4]、高丹盈等^[5]将钢管混凝土柱作为边框设置在剪力墙两端。密肋复合墙板作为一种新型结构构件,是由钢筋混凝土及轻质填充砌块组成的一种网格状抗震结构墙体^[6-8]。考虑将钢管混凝土边框组合剪力墙与密肋复合墙板有效结合,其中活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)以其超高的力学性能给新型剪力墙结构增添了新的活力^[9-10]。为此,将钢管 RPC 柱作为边缘构件引入到密肋复合剪力墙中,形成一种新型钢管 RPC 边框柱密肋复合剪力墙,如图 1 所示。

新型复合墙体将钢管 RPC 柱强度刚度大、塑性韧性好的优点^[11-12]与 RPC 密肋剪力墙耗能减震、刚度可调的优势结合,实现分级能量释放,两者互相配合能够形成刚柔并济、变形协调的双重抗震结构体系,且震后可以根据损坏情况进行整片墙体或局部损坏砌块的更换,是值得发展的新型复合剪力墙形式。本文基于统一强度理论,建立钢管 RPC 边框柱密肋复合剪力墙的抗剪极限承载力计算公式,并采用 ABAQUS 软件进行受力全过程数值模拟,将模拟结果值与理论计算值作对比分析,验证理论方法

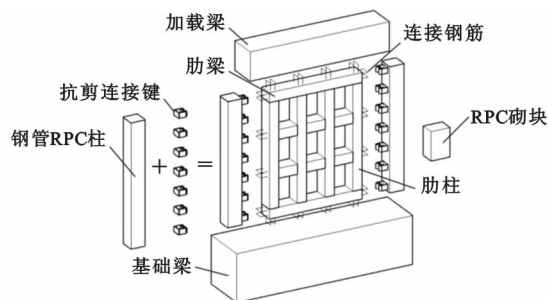


图 1 钢管 RPC 边框柱密肋复合剪力墙

Fig. 1 Multi-ribbed Composite Shear Walls with RPC Filled Steel Tubular Columns

的正确性及有限元模型的合理性。

1 复合剪力墙抗剪承载力理论分析

1.1 双剪统一强度理论

合理的强度理论可以更客观地表现材料的强度潜能,充分发挥其自承载能力,取得较好的经济效益。统一强度理论是 Yu^[13]在双剪强度理论的基础上,建立的一种全新考虑中间主应力影响的适用于各种不同材料的新理论,其数学表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = f_t \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1)$$

$$F' = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = f_t \quad \sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (2)$$

正应力-剪应力($\sigma\tau$)状态下的统一强度理论表达式为

$$F = \left(\sigma_0 + \frac{1+b-\alpha}{2\alpha} \right)^2 + \frac{(1+b+\alpha)^2}{\alpha(1+b)} \tau_0^2 = \frac{(1+\alpha+b)^2}{4\alpha^2} \quad |\tau_0| \geq |\sigma_0| \frac{\sqrt{\alpha}}{1-\alpha} \quad (3)$$

$$F' = \left(\sigma_0 + \frac{1-\alpha-ab}{2\alpha} \right)^2 - \frac{(1+b+\alpha)^2}{\alpha(1+b)} \tau_0^2 = \frac{(1+\alpha+b)^2}{4\alpha^2} \quad |\tau_0| < |\sigma_0| \frac{\sqrt{\alpha}}{1-\alpha} \quad (4)$$

式中: F, F' 为主应力强度理论函数; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为 3 个主应力; b 为反映中间主切应力及相应面上正应

力对材料破坏程度影响的参数, $0 \leq b \leq 1$; α 为材料的拉压强度比, $\alpha = f_t / f_c$, f_t, f_c 分别为材料的单轴抗拉强度和单轴抗压强度设计值; $\sigma_0 = \sigma / f_t$; $\tau_0 = \tau / f_t$ 。

1.2 抗剪承载力分析

从简化计算模型出发, 将中间墙板视为一种以砌块为基体、混凝土肋格为增强纤维的复合材料等效弹性板, 边框柱与等效弹性板协同工作原理类似于框格与砌块间的相互约束作用。随着墙体不断破坏损伤, 斜压杆等效轴向刚度逐步衰减, 肋格中裂缝逐渐发展, 直至达到墙体的抗剪极限承载力阶段停止。因此, 取斜压杆模型为墙体的抗剪计算模型不失为一种有效的宏观计算模型, 如图 2 所示。

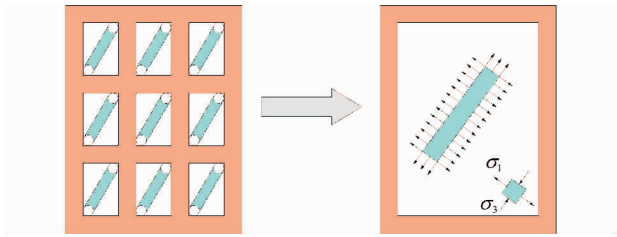


图 2 密肋复合墙计算简图

Fig. 2 Calculation Diagram of Multi-ribbed Composite Wall

1.2.1 复合材料等效弹性板的抗压强度

对于等效后的复合材料等效弹性板的抗压强度 f_c 不易从试验中取得, 故可在复合墙板中取一个代表性的微小体积单元, 如图 3 所示。

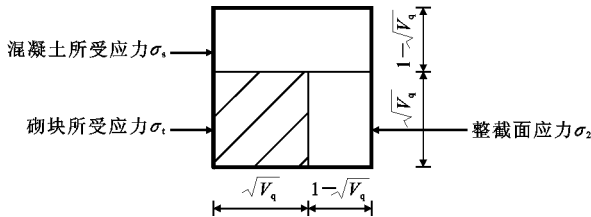


图 3 密肋复合墙板微单元

Fig. 3 Micro Element of Multi-ribbed Composite Wall

假定在水平荷载作用下, 砌块与混凝土纤维变形协调。根据参考文献[14], 可得复合材料抗压强度计算公式为

$$f_c = f_{cq} \frac{E_c}{E_q} \sqrt{V_q} + f_{co} \frac{E_c}{E_{co}} (1 - \sqrt{V_q}) \quad (5)$$

式中: f_{co} 为混凝土肋柱肋梁作为增强材料的抗压强度设计值; f_{cq} 为砌块抗压强度设计值; E_c 为复合材料的弹性模量; E_q 为基体弹性模量; E_{co} 为增强纤维的弹性模量; V_q 为基体体积分数。

1.2.2 密肋复合墙板抗剪极限承载力

研究表明^[14], 伴随着逐渐增加的侧向位移, 结

构抗力随之提高, 密肋复合墙板裂缝明显增加, 最终形成沿墙板对角线方向的斜裂缝, 直至某一极限状态, 角区材料在压应力和剪应力共同作用下破坏, 承载能力开始下降。因此, 基于以往研究结果^[15], 引入如下假设:

(1) 密肋复合墙板的抗剪极限承载力采用整体斜压杆模型, 抗剪承载力计算简图见图 4。

(2) 在达到极限承载力之前, 位于斜压杆两端角部节点总是先出现塑性铰。因此, 在极限荷载时, 角部节点的弯矩为

$$M_A = M_C = M_i \quad (6)$$

式中: M_A, M_C 分别为 A 点和 C 点处弯曲内力; M_i 为边框梁、柱截面极限弯矩 M_{ub}, M_{uc} 中的较小值。

(3) 达到结构极限承载力瞬时, 墙体构件同时作用有轴力和弯矩, 构件塑性铰处弯曲内力为

$$M_E = \lambda_b M_{ub}, M_F = \lambda_c M_{uc} \quad (7)$$

式中: M_E, M_F 分别为边框梁、柱中 E, F 点处弯曲内力; λ_b, λ_c 分别为边框梁、柱的弯矩折减系数, 根据理论分析, 建议折减系数的取值为 0.6^[16]。

基于以上假定, 墙板进入弹塑性阶段时, 受压角区复合墙板与边框架接触面上的压应力与剪应力均匀分布, 如图 4 所示; 达到极限荷载时, 受压角区材料在正应力与剪应力共同作用下发生破坏。

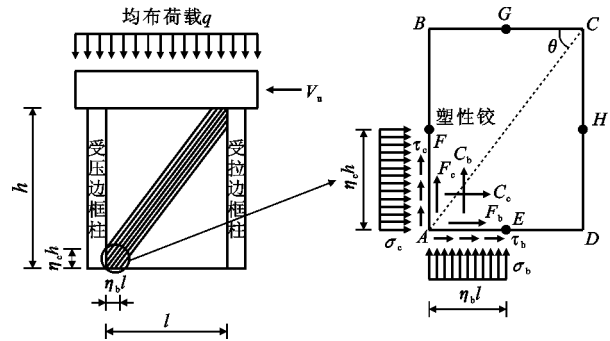


图 4 角部区应力

Fig. 4 Stress of Corner

取等效弹性板进行受力分析, 由外力 V_u 与内力 F_b, C_c 平衡得

$$V_u = F_b + C_c \quad (8)$$

由等效弹性板的弯矩平衡得

$$C_c \left(\frac{h}{2} - \eta_c \frac{h}{2} \right) - F_c \frac{l}{2} - C_b \left(\frac{l}{2} - \eta_b \frac{l}{2} \right) + F_b \frac{h}{2} = 0 \quad (9)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} C_c &= \sigma_c \eta_c h, C_b = \sigma_b \eta_b l \\ F_c &= \tau_c \eta_c h, F_b = \tau_b \eta_b l \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: C_c, C_b 和 F_c, F_b 分别为等效弹性板对柱、梁的正压力和剪力; τ_b, τ_c 为边框梁、柱与等效弹性板接触面上的等效剪应力; σ_b, σ_c 为等效弹性板与边框梁、边框柱接触面上的等效正应力; t 为墙体厚度; l, h 分别为等效弹性板的宽度、高度; η_b, η_c 为有效接触区长度系数。

喻磊等^[17]依据接触面上正应力与结构高宽比的关系及复合墙板框格试验规律,提出了框格角区

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{b0} &= - \left\{ \frac{1+b-\alpha}{2\alpha} + \sqrt{\left(\frac{1+b-\alpha}{2\alpha}\right)^2 - \left[1 + \frac{((1+b+\alpha)\xi/k)^2}{\alpha+(1+b)}\right] \left[\left(\frac{1+b-\alpha}{2\alpha}\right)^2 - \frac{(1+b+\alpha)^2}{4\alpha^2}\right]} \right\} \alpha f_c / \\ &\quad \{1 + [(1+b+\alpha)\xi k]^2 / [\alpha(1+b)]\} \\ \sigma_{c0} &= - \left\{ \frac{1+b-\alpha}{2\alpha} + \sqrt{\left(\frac{1+b-\alpha}{2\alpha}\right)^2 - \left[1 + \frac{((1+b+\alpha)\xi k)^2}{\alpha+(1+b)}\right] \left[\left(\frac{1+b-\alpha}{2\alpha}\right)^2 - \frac{(1+b+\alpha)^2}{4\alpha^2}\right]} \right\} \alpha f_c / \\ &\quad \{1 + [(1+b+\alpha)\xi k]^2 / [\alpha(1+b)]\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

接触区长度由等效弹性板 AE 段及 AF 段的弯矩平衡方程中可得

$$\left. \begin{aligned} 0.5\sigma_{b0}t(\eta_b l)^2 &= M_i + M_E \\ 0.5\sigma_{c0}t(\eta_c h)^2 &= M_i + M_F \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

将公式(7)代入式(13),可得接触区长度

$$\left. \begin{aligned} \eta_b l &= \sqrt{\frac{2(M_i + \lambda_b M_{ub})}{\sigma_{b0} t}} \\ \eta_c h &= \sqrt{\frac{2(M_i + \lambda_c M_{uc})}{\sigma_{c0} t}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

实际情况时,受压角区未必在其与边框柱、梁接触面上同时破坏,因此公式(12)仅给出接触面上压应力的上限值。实际压应力可由等效弹性板的弯矩平衡方程进行校核,将式(10)和式(11)代入平衡方程(9)中可得

$$k^2 \sigma_c \eta_c (1 - \eta_c - \xi) = \sigma_b \eta_b (1 - \eta_b - \xi) \quad (15)$$

仅作用在接触面上的真实正应力才可满足式(15),所以真实应力可取:

当 $A_c > A_b$ 时

$$\sigma_b = \sigma_{b0}, \sigma_c = \sigma_{c0} \left(\frac{A_c}{A_b} \right) \quad (16)$$

当 $A_c \leq A_b$ 时

$$\sigma_b = \sigma_{b0} \left(\frac{A_c}{A_b} \right), \sigma_c = \sigma_{c0} \quad (17)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A_b &= \sigma_{b0} \eta_b (1 - \eta_b - \xi k) \\ A_c &= k^2 \sigma_{c0} \eta_c (1 - \eta_c - \xi k) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

综上所述,基于统一强度理论可提出密肋复合墙板的抗剪承载力计算公式为

$$V_u = \begin{cases} \sigma_{c0} \eta_c h t \frac{A_c}{A_b} + \sigma_{b0} \eta_b l^2 t \frac{\xi}{h} & A_c > A_b \\ \sigma_{c0} \eta_c h t + \sigma_{b0} \eta_b l^2 t \frac{A_c}{A_b} \frac{\xi}{h} & A_c \leq A_b \end{cases} \quad (19)$$

正应力与剪应力之间的关系式

$$\left. \begin{aligned} \tau_b &= \xi \sigma_b / k \\ \tau_c &= \xi \sigma_c / k \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: k 为高宽比, $k = h/l$; ξ 为等效弹性板与框格接触面摩擦因数。

当等效弹性板与边框梁、柱接触面上的等效正应力达到最大值 σ_{b0}, σ_{c0} 时,此时框格角部出现塑性铰,基于统一强度理论将式(11)代入式(3)得

1.2.3 钢管混凝土边框柱抗剪极限承载力

参考韩林海等^[18]建立的钢管混凝土柱受剪时的有限元分析模型,分析其剪应力-剪应变($\tau\gamma$)关系的特点及影响因素,取 $\tau\gamma$ 曲线上剪应变达 10×10^{-3} 时的剪应力为抗剪强度承载力。通过对计算结果的回归分析,得到了钢管混凝土柱的抗剪承载力 V_{col} 表达式为

$$V_{col} = \gamma_v A_{sc} \tau_{scy} \quad (20)$$

式中: γ_v 为抗剪承载力计算系数,对于方钢管混凝土柱, $\gamma_v = 0.97 + 0.21n\psi$, ψ 为约束效应系数,表征钢管混凝土中钢管与混凝土考虑强度与面积因素的综合比例,取 $\psi = f_a A'_a / (f_{cc} A'_c)$, A'_a 为截面钢管的面积, A'_c 为钢管内混凝土的面积, f_a 为钢管的屈服强度, f_{cc} 为混凝土抗压强度设计值; τ_{scy} 为钢管混凝土抗剪屈服强度指标, $\tau_{scy} = (0.422 + 0.313\alpha_a^{2.33}) \cdot \psi^{0.134} (1.14 + 1.02\psi) f_{co}$, α_a 为钢管混凝土柱截面含钢率, $\alpha_a = A'_a / A'_c$ 。

1.2.4 复合剪力墙抗剪承载力统一解

钢管RPC边框密肋复合剪力墙抗剪承载力 V 是由边框柱和中间墙体共同组成,即

$$V = V_u + V_{col} \quad (21)$$

将式(19), (20)进行相关组合代入式(21),可得

$$V = \begin{cases} \sigma_{c0} \eta_c h t \frac{A_c}{A_b} + \sigma_{b0} \eta_b l^2 t \frac{\xi}{h} + \gamma_v A_{sc} \tau_{scy} & A_c > A_b \\ \sigma_{c0} \eta_c h t + \sigma_{b0} \eta_b l^2 t \frac{A_c}{A_b} \frac{\xi}{h} + \gamma_v A_{sc} \tau_{scy} & A_c \leq A_b \end{cases} \quad (22)$$

式(22)即为考虑了中间主应力和拉压异性效应的钢管RPC边框密肋复合剪力墙的抗剪承载力统一解。

2 有限元模型建立与验证

2.1 有限元模型建立

采用 ABAQUS 建立钢管 RPC 密肋复合剪力墙有限元模型,如图 5 所示。密肋复合墙板的尺寸为 1 300 mm×1 000 mm×150 mm;砌块尺寸为 300 mm×200 mm×150 mm;钢管 RPC 柱截面尺寸为 150 mm×150 mm;试件总高度为 2 100 mm;密肋复合墙板纵筋采用 Φ 8,箍筋采用 Φ 6。

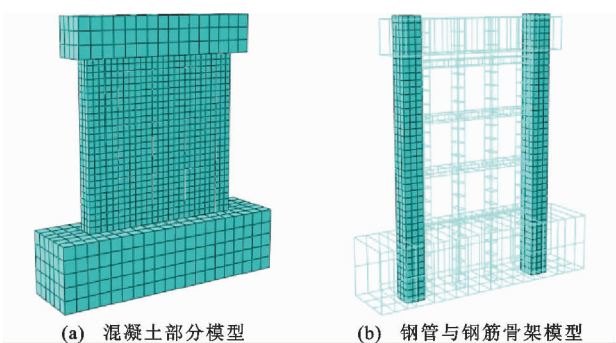


图 5 密肋复合剪力墙有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model of Multi-ribbed Composite Shear Wall

2.1.1 材料本构模型

本文受约束混凝土采用文献[18]的模型,其应力-应变本构关系由文献[19]确定,混凝土单轴受压应力-应变关系表达式采用文献[20]的模型。钢材的非线性行为采用双折线理想弹塑性模型,钢管弹性模量 $E_{s1}=2.06\times10^5$ MPa,钢筋弹性模量 $E_{s2}=2\times10^5$ MPa。钢材屈服后,考虑硬化效应,强化模量分别取 $0.01E_{s1}$ 和 $0.01E_{s2}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。

2.1.2 试件装配及相互作用

采用命令 Embedded 将钢筋整体嵌入到肋格和砌块组成的剪力墙实体单元中;钢管与 RPC 的接触包括切向和法向 2 个部分,法向采用硬接触,切向接触采用库仑摩擦模型,摩擦因数取为 0.6^[21]。在各

实体单元的截面之间均采用命令 Tie 进行绑定。

2.1.3 边界荷载

将模型试件底端假设为固定约束,在试件的顶部施加竖向压应力(压应力的大小取决于轴压比的计算公式);在水平方向上建立作用点 RP-1 并将其与加载点处的混凝土面进行耦合,便于施加水平单调位移荷载。

2.1.4 单元选用和网格划分

混凝土、钢管和 RPC 均采用 C3D8R 单元,钢筋采用 T3D2 单元。采用结构化网格划分技术对网格进行划分,钢管 RPC 边框密肋复合剪力墙的网格划分如图 5 所示。

2.2 有限元模型验证

将本文有限元分析与理论分析作对比,主要从承载力和荷载-位移曲线两方面进行对比。

2.2.1 承载力验证

将有限元模拟与理论计算值作对比。由表 1 可知,数值模拟结果与理论计算结果吻合较好,相对误差介于 1.18%~5.22%之间,说明基于统一强度理论的钢管 RPC 边框密肋复合剪力的承载力计算方法是可行的,同时也验证了有限元模型的合理性。

2.2.2 荷载-位移曲线对比

将表 1 中各试件在恒定竖向力和单调水平力作用下的荷载-位移曲线进行对比,如图 6 所示。由图 6 可知,所有试件的曲线均由开裂前的弹性阶段、屈服阶段和下降阶段组成。

从图 6 可以看出:随着肋柱肋梁 RPC 强度的提高,抗剪极限承载力明显提高;保持钢筋混凝土肋格强度等级不变,提高砌块的强度等级,可以大幅提高剪力墙的抗剪承载力,且延性也有小幅提升。轴压比为 0.2 时 6 榀墙体延性系数均在 3.8~4.8 之间,满足抗震结构对位移系数的要求^[23]。通过提高钢管混凝土边框柱中核心 RPC 强度等级可以小幅提高剪力墙抗剪承载力,且延性也略有增加。

表 1 试件数值模拟结果与理论计算结果对比

Tab. 1 Comparison of Numerical Simulation Results and Theoretical Calculation Results

试件编号	f_{cq} /MPa	f_{co} /MPa	f_a /MPa	f_{cc} /MPa	F_{FEM} /kN	F_{MAT} /kN	μ /%	ω
SW-1	48	58	235	48	1 203.94	1 155.86	4.16	3.8
SW-2	48	68	235	48	1 258.79	1 244.08	1.18	4.0
SW-3	48	77	235	48	1 313.65	1 373.73	4.37	4.2
SW-4	48	87	235	48	1 420.33	1 498.70	5.22	4.6
SW-5	58	68	235	48	1 437.80	1 459.69	1.50	4.8
SW-6	48	68	235	58	1 286.44	1 268.53	1.41	4.2

注:钢管内 RPC 抗压强度设计值 f_{cc} 取自文献[22]; F_{FEM} 为抗剪极限承载力模拟值; F_{MAT} 为抗剪极限承载力计算值; μ 为模拟值与计算值之间的相对误差; ω 为延性系数。

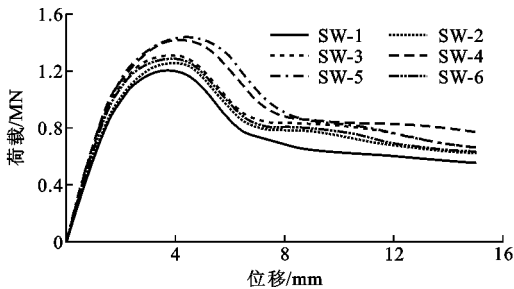


图 6 试件 SW-1~SW-6 的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement Curves of SW-1-SW-6

2.2.3 模型剪力墙损伤

图 7 给出了 SW-2 在轴压比 $n=0.2$ 下的破坏历程损伤图。由图 7(a)可知:初始阶段损伤从受压区柱脚开始,此时属于弹性阶段,主要由填充砌块发挥主导作用;随着位移的增大,砌块先于肋格破坏,各砌块中出现斜裂缝。图 7(b)中黑色区域应力较低,是因为随着裂缝的扩展导致应力下降,此时剪力墙整体呈现 45° 斜裂缝,剪力墙表现为剪切破坏,砌块已退出工作,主要由肋柱和肋梁组成的肋格发挥主导作用,墙体表现为刚架-斜压杆模型。继续增大位移,钢筋混凝土肋梁肋柱发生破坏,应力下降,损伤区域不断扩散,直至钢管 RPC 边框柱破坏,剪力墙丧失承载能力,见图 7(c)。

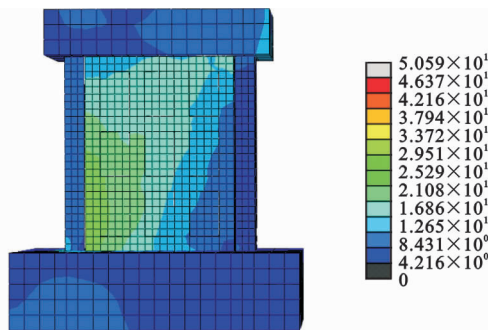
2.3 影响因素分析

限于篇幅,本文主要探讨轴压比、密肋复合剪力墙中肋格混凝土强度、钢管屈服强度对抗剪承载力的影响。

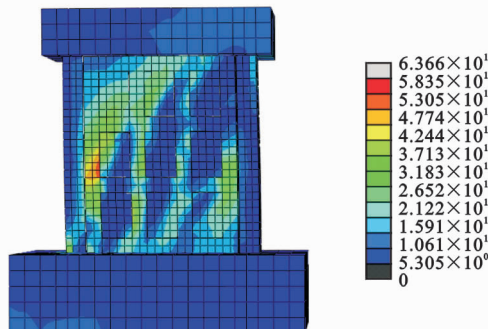
2.3.1 轴压比

根据以往研究文献结果,剪力墙轴力增大,则抗剪承载力越大,但延性明显降低。因此本文以轴压比为设计参数,分别取 $n=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 对剪力墙进行数值模拟。试件 SW-2 的受力性能随轴压比变化规律如图 8 所示。

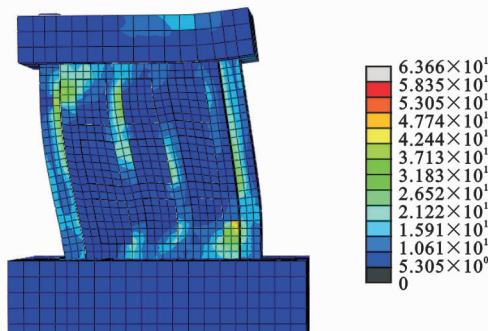
由图 8 可知,钢管 RPC 密肋复合剪力墙表现出良好的延性性能,轴压比对剪力墙的抗剪承载力具有一定的影响,随着轴压比增大,墙体抗剪能力有一定程度的提高,轴压比增大到 0.4 时,其对墙体抗剪力的提高作用不明显。这是因为一定的轴压力能够增强对混凝土的约束作用,提高墙体混凝土块体之间的骨料咬合力,发挥墙体斜压杆的作用。但轴压力对墙体抗剪能力的贡献还与混凝土强度有关,因此当轴压比 $n \leq 0.3$ 时,随着轴压比的增加,剪力墙抗剪承载力明显提高;当轴压比 $n > 0.3$ 时,抗剪承载力有所下降,承载力达到峰值点后迅速下降,延性较差。



(a) 弹性阶段



(b) 弹塑性阶段



(c) 破坏阶段

图 7 SW-2 破坏模式应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Break Mode Cloud Map of SW-2 (Unit:MPa)

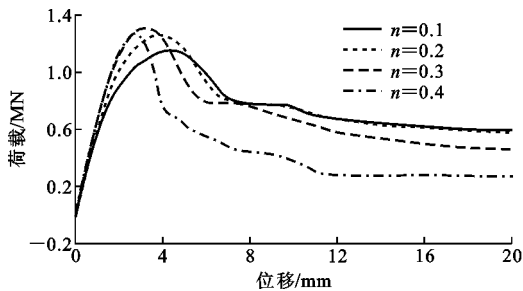


图 8 SW-2 不同轴压比的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement Curves of SW-2 with Different Axial Compression Ratios

2.3.2 肋格活性粉末混凝土强度

考虑肋柱肋梁的混凝土强度等级,分别选用 RPC120, RPC140, RPC160 和 RPC180,轴压比为 0.2。肋格选用不同活性粉末混凝土等级的剪力墙构件受力性能如图 9,10 所示。由图 9 可知,模拟值

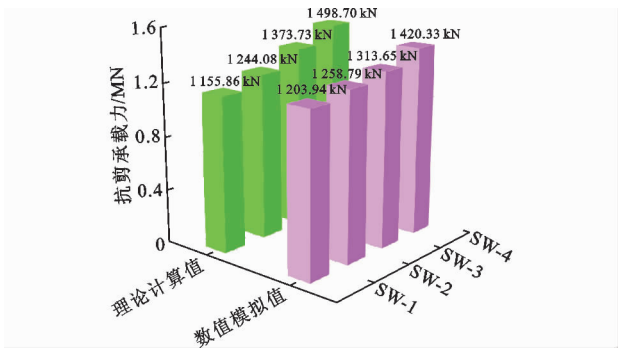


图 9 SW-1~SW-4 的抗剪承载力
Fig. 9 Shear Capacity of SW-1-SW-4

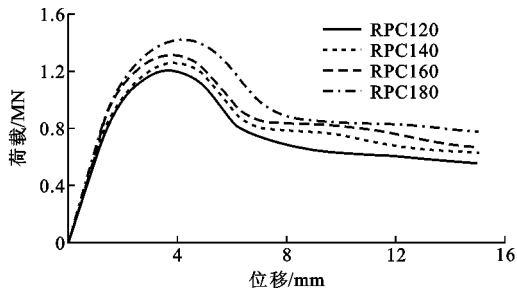


图 10 肋格混凝土强度影响的荷载-位移曲线
Fig. 10 Load-displacement Curves Influenced by
Concrete Strength of Rib

与理论计算值吻合良好,相对误差在 1.18%~5.22%之间。从图 10 可以看出,随着混凝土强度等级的提升,抗剪承载力明显增加,强度提升从 4.36% 逐渐增加到 8.12%,这表明增加肋格混凝土强度可以明显提高剪力墙抗剪承载力。在荷载下降段,承载力提高较为明显,说明提高肋格 RPC 强度可以改善构件的延性。

2.3.3 钢管屈服强度

图 11 给出了钢管屈服强度与复合剪力墙抗剪承载力的关系曲线。从图 11 可以看出,随着钢管强度从 235 MPa 增加到 420 MPa,边框的延性和极限承载力略有提高,这是因为边框柱中的核心混凝土受到钢管对其的“被动约束”作用,但是提高幅度逐渐减少,提高幅度从 2.7% 下降到 0.1%,表明提高边框柱中的钢管强度可以增强剪力墙的抗剪性能,效果并不明显,但可以改善构件延性性能。

3 结 语

(1) 基于统一强度理论,建立了钢管 RPC 边框密肋复合剪力墙的抗剪承载力计算公式,并进行了数值模拟分析;数值模拟结果与理论计算结果吻合良好,表明统一强度理论用于此类剪力墙抗剪承载力计算方法的合理性及本文建立的有限元模型的可

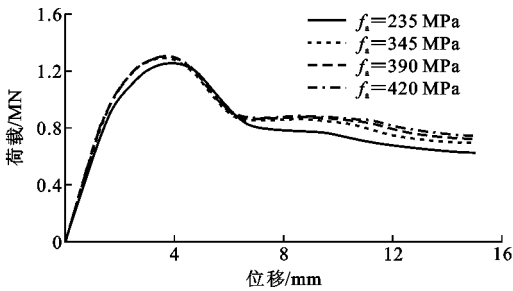


图 11 钢管屈服强度影响的荷载-位移曲线
Fig. 11 Load-displacement Curves Influenced by
Yield Strength of Steel Tube

靠性。

(2) 通过提高密肋复合墙体中肋格和砌块混凝土强度等级可以有效提高剪力墙抗剪承载力,且延性也有所提升。承载力计算公式中考虑了中间主应力效应,可充分利用材料的强度潜能,使结构更加经济。因此实际应用中应综合考虑承载力和经济性的要求。

(3) 轴压比对钢管 RPC 边框密肋复合剪力墙的抗剪承载力具有一定的影响。当轴压比 $n \leq 0.3$ 时,随着轴压比的增加抗剪承载力明显提高;当轴压比 $n > 0.3$ 时,抗剪承载力有所下降。

(4) 随着肋格混凝土强度和边框柱钢管屈服强度等级提高,剪力墙抗剪承载力有所提高,后者效果并不明显,但均使延性显著改善。因此作为改善剪力墙延性的有效途径,工程应用中可通过改变肋格混凝土强度等级和钢管屈服强度,以期实现一种既保持相当刚度与强度又具有充分延性的复合剪力墙。

参考文献:

References:

[1] 钱稼茹,江 枣,纪晓东.高轴压比钢管混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(7):40-48.
QIAN Jia-ru,JIANG Zao,JI Xiao-dong. Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Tube-reinforced Concrete Composite Shear Walls with High Axial Compressive Load Ratio [J]. Journal of Building Structures,2010,31(7):40-48.
[2] 白 亮,周天华,梁兴文,等.钢管约束高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2014,47(5):9-17.
BAI Liang,ZHOU Tian-hua,LIANG Xing-wen,et al. Experimental Study on the Seismic Behavior of Steel Tube Confined High-strength Concrete Shear Walls

- [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 9-17.
- [3] 赵作周, 贺小岗, 杨光, 等. 高轴压比下钢管高强混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(9): 108-116.
- ZHAO Zuo-zhou, HE Xiao-gang, YANG Guang, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of High-strength Concrete Filled Steel Tube Composite Shear Walls Under High Axial Compression Ratio [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 108-116.
- [4] HU H S, NIE J G, FAN J S, et al. Seismic Behavior of CFST-enhanced Steel Plate-reinforced Concrete Shear Walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 119: 176-189.
- [5] 高丹盈, 尤培波, 汤寄予, 等. 钢管混凝土边框钢纤维混凝土剪力墙受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(6): 10-20.
- GAO Dan-ying, YOU Pei-bo, TANG Ji-yu, et al. Calculation Method for Shear Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete Shear Wall with Concrete Filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 10-20.
- [6] 袁泉, 赵媛媛, 宗明奇, 等. 装配式型钢斜交密肋复合墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 122-130.
- YUAN Quan, ZHAO Yuan-yuan, ZONG Ming-qi, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Pre-cast Shape Steel Oblique Multi-ribbed Composite Wall [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(11): 122-130.
- [7] SUN J, JIA Y J, MO Y L. Evaluation of Elastic Properties and Lateral Stiffness of Multi-ribbed Walls Based on Equivalent Elastic Model[J]. Engineering Structures, 2014, 72: 92-101.
- [8] 郭猛, 王双娇, 袁泉, 等. 框格形式影响组合墙加固框架抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4): 65-71.
- GUO Meng, WANG Shuang-jiao, YUAN Quan, et al. Seismic Performance Experiment of Frame Strengthened by Composite Walls with Different Grid Forms [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(4): 65-71.
- [9] ERDOGDU S, KANDIL U, NAYIR S. Effects of Cement Dosage and Steel Fiber Ratio on the Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete[J]. Advances in Concrete Construction, 2019, 8(2): 139-144.
- [10] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 10-20.
- CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, SU Jia-zhan, et al. State-of-the-art Progress on Application of Ultra-high Performance Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 10-20.
- [11] 朱倩, 赵均海, 张常光, 等. 考虑界面黏结与尺寸效应的钢管活性粉末混凝土短柱轴压承载力统一解[J]. 工业建筑, 2016, 46(2): 145-151.
- ZHU Qian, ZHAO Jun-hai, ZHANG Chang-guang, et al. Unified Solutions of Axial Compression Bearing Capacity for RPC Filled Steel Tubular Stub Columns with Interface Bond and Size Effect [J]. Industrial Construction, 2016, 46(2): 145-151.
- [12] GUO Z K, CHEN W X, ZHANG Y Y, et al. Post Fire Blast-resistances of RPC-FST Columns Using Improved Grigorian Model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 107: 80-95.
- [13] YU M H. Unified Strength Theory and Its Applications[M]. Berlin: Springer Press, 2004.
- [14] 黄炜, 王君媛, 张程华, 等. 基于统一强度理论生态复合墙体受剪极限承载力分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(8): 23-26, 17.
- HUANG Wei, WANG Jun-yuan, ZHANG Cheng-hua, et al. Ultimate Shear Bearing Capacity Analysis of Eco-composite Wall Based on the Twin Shear Unified Strength Theory [J]. Industrial Construction, 2012, 42(8): 23-26, 17.
- [15] 姚谦峰, 黄炜, 田洁, 等. 密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 67-74.
- YAO Qian-feng, HUANG Wei, TIAN Jie, et al. Experimental Analyses of Mechanical Characteristics and Seismic Performance of Multi-ribbed Panel Wall[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(6): 67-74.
- [16] 张大长, 陈怀亮, 卢中强. 基于抗剪抵抗机构的无开洞RC剪力墙的极限承载力分析模型的探讨[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 134-139, 188.
- ZHANG Da-chang, CHEN Huai-liang, LU Zhong-qiang. The Investigation on Analysis Models of Ultimate Strength of Reinforced Concrete Shear Wall Based on Shear Resistant Mechanism[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 134-139, 188.
- [17] 喻磊, 姚谦峰, 陈平, 等. 砌体填充框架结构极限承载能力计算的一种新方法[J]. 工程力学, 2007, 24(6): 117-122.
- YU Lei, YAO Qian-feng, CHEN Ping, et al. A New Calculation Method for the Ultimate Load-bearing Capacity of Masonry-infilled Frames [J]. Engineering

Mechanics,2007,24(6):117-122.

[18] 韩林海,杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

HAN Lin-hai, YANG You-fu, Modern Concrete Filled Steel Tube Structural Technology [M]. 2nd ed. Beijing:China Architecture & Building Press,2007.

[19] 王秋维,王 杨,张春尧,等. 基于 ABAQUS 的钢管活性粉末混凝土短柱轴压受力性能研究[J]. 防灾减灾工程学报,2019,39(3):421-429.

WANG Qiu-wei, WANG Yang, ZHANG Chun-yao, et al. Numerical Simulation Analysis on Mechanical Behavior of Axially Loaded Reactive Powder Concrete Filled Steel Tube Short Columns[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39 (3):421-429.

[20] 罗 华,季文玉,闫志刚,等. 加载方式对钢管活性粉末混凝土短柱抗压性能影响的研究[J]. 铁道学报, 2014,36(9):105-110.

LUO Hua,JI Wen-yu,YAN Zhi-gang,et al. Research on Influence of Loading Methods on Compressive Behavior of Reactive Powder Concrete Filled Steel Tube Stub Columns Under Axial Loads[J]. Journal of the China Railway Society,2014,36(9):105-110.

[21] ELLOBODY E, YOUNG B. Nonlinear Analysis of Concrete-filled Steel SHS and RHS Columns [J]. Thin-walled Structures,2006,44(8):919-930.

[22] DBJ 43/T 325—2017,活性粉末混凝土结构技术规程 [S].

DBJ 43/T 325—2017,Technical Specification for Re-active Powder Concrete Structures[S].

[23] 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,2003.

GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyse[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003.