

引用本文:朱 倩,贾新宇,刘金烨,等. 钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力计算方法对比研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(4): 97-106.

ZHU Qian, JIA Xinyu, LIU Jinye, et al. Comparative study on shear capacity calculation method for shear walls with CFST columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 97-106.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04045

钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力计算方法对比研究

朱 倩, 贾新宇, 刘金烨, 泥朝阳, 赵均海

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为研究不同力学模型在钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力计算中的适用性,总结了国内外学者推导的经验公式和理论模型,建立了基于软化拉压杆模型、统一强度理论和国内外相关规范的承载力计算方法,对比分析了理论力学模型和多国规范在预测此类组合墙受剪承载力上的表现,探讨了轴压比、高宽比、宽厚比和材料性能等对计算结果误差的影响;最后结合已有试验数据,验证了各模型的计算精度和适用性。结果表明:由于未考虑构件各部分所分担的剪力,多数规范模型理论计算结果普遍低于试验值,而统一强度理论与软化拉压杆模型计算结果相对准确;软化拉压杆模型计算方法能充分考虑墙体各部分对承载力的贡献,计算偏差基本控制在 20% 以内;在各项参数变动的前提下,软化拉压杆模型更能准确预测钢管混凝土边框剪力墙的受剪承载力,计算值与试验值吻合良好,能合理反映钢管混凝土边框剪力墙的受剪机理,为其承载力计算方法的优化设计提供理论依据。

关键词:剪力墙;钢管混凝土边框柱;受剪承载力;软化拉压杆模型;统一强度理论

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)04-0097-10

Comparative study on shear capacity calculation method for shear walls with CFST columns

ZHU Qian, JIA Xinyu, LIU Jinye, NI Zhaoyang, ZHAO Junhai

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

Abstract: In order to study the applicability of different mechanical models in calculating the shear capacity of shear walls with concrete-filled steel tubular (CFST) columns, the empirical formulas and theoretical models deduced by domestic and foreign scholars were summarized. Various calculation methods were established based on the softened strut-and-tie model, unified strength theory and building codes at home and abroad. Then the performance of theoretical models and relevant building codes in predicting the shear capacity of such composite walls were compared and analyzed. Parametric studies were carried out to investigate the effects of axial compression ratio, aspect ratio, width thickness ratio and material properties on the calculation results. Finally, the accuracy and applicability of various mechanical models were validated by comparing

收稿日期:2022-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51878056);陕西省自然科学基金研究计划项目(2021JM-170, 2021JM-165, 2021JM-177);

长安大学国际教育专业建设项目(300108211034, 300108211044, 20211824)

作者简介:朱 倩(1987-),女,工学博士,副教授,硕士生导师,E-mail:zhuqianchd@126.com。

with experimental data. The results show that the design methods of most standard models are generally lower than the experimental values, while the unified strength theory and the softened strut-and-tie model are relatively accurate. Meanwhile, the proposed formulas with softened strut-and-tie model not only can fully consider the contribution of each wall component, but also the calculation error is basically controlled within 20%. Moreover, under the premise of changing individual parameter, the calculated values by the softened strut-and-tie model are in good agreement with the test data. The analysis results can reasonably describe the shear mechanism and provide a theoretical basis for the optimum design of shear walls with CFST columns.

Key words: shear wall; CFST column; shear capacity; softened strut-and-tie model; unified strength theory

0 引言

现代高层建筑广泛采用框架-剪力墙、剪力墙等结构体系,剪力墙作为主要的抗侧力构件,其性能优劣对建筑物的整体抗震性能影响甚大^[1]。不同形式的钢管中,钢管对混凝土的约束作用最为理想,钢管混凝土边框柱可抑制中间墙板裂缝的开展,有效提高剪力墙的抗侧刚度和承载力^[2];同时中国规范特别强调在剪力墙端部设置边缘构件的设计要求,有利于提高结构的抗震性能^[3]。钢管混凝土边框组合剪力墙(图1)在压力、弯矩和剪力共同作用下的传力机理较为复杂,受剪承载力是评价剪力墙结构抗震性能的重要指标之一^[4],因此对比分析其受剪性能对工程结构的安全性具有重要意义。

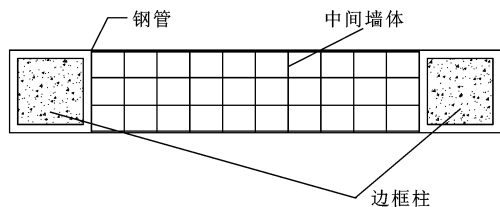


图1 钢管混凝土边框剪力墙截面

Fig. 1 Section of shear walls with CFST columns

国内学者近年来对于不同类型剪力墙的受剪性能及破坏模式的研究取得一系列研究成果。基于受剪机构和破坏模式推导了钢筋混凝土剪力墙极限承载力计算公式^[5];以边缘构件相对面积与纵筋率为变量,对受剪承载力进行了非线性回归分析^[6];推导了带端柱或翼缘钢筋等边缘构件混凝土剪力墙的受剪承载力修正计算公式^[7]。吴函恒等^[8]、方小丹等^[9]、高丹盈等^[10]分别基于协同效应的传力机制、试验结果统计分析、考虑钢纤维体积率和混凝土强度等影响,提出了不同类型混凝土剪力墙的受剪承载力计算公式;初明进等^[11]考虑竖向裂缝两侧混凝

土滑移建立了冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙受剪承载力的拉压杆-滑移模型和计算方法;朱倩等^[12]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、拉压异性效应等建立了钢管RPC复合剪力墙的受剪承载力计算公式。韩林海等^[13]和钱稼茹等^[14]分别对钢管混凝土柱受剪性能进行有限元分析和静力加载试验,推导了其受剪承载力理论公式。以上研究表明,因材料离散性和协同工作机理复杂,目前钢管混凝土剪力墙基于不同计算模型的受剪承载力研究资料相对匮乏,亟需建立合理、可靠的承载力计算模型。

鉴于此,本文将基于软化拉压杆模型、统一强度理论及国内外规范,对不同力学模型的钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力计算方法进行对比研究,探讨软化拉压杆模型在此类剪力墙理论计算中的适用性以及与现有规程计算公式相比的计算精度,并对不同变量的影响敏感性开展参数化分析。

1 受剪承载力计算模型

1.1 软化拉压杆模型

软化拉压杆模型是Hwang等^[15]基于拉压杆模型发展建立起来的,满足平衡条件、变形协调和物理方程,用于分析钢筋混凝土(RC)剪力墙的受剪承载力可获得较为理想的效果。图2为RC剪力墙的受剪原理^[16],其中传力机制包括对角传力机制、水平传力机制和垂直传力机制。

桁架承担的外力包括水平剪力 V_{wh} 、垂直剪力 V_{wv} 和斜向外力 C_d ,其中 $C_d = -D + F_h / \cos(\theta)$ 或 $C_d = -D + F_v / \sin(\theta)$ 。垂直剪力 V_{wv} 可由拉力或外加轴力提供;水平剪力 V_{wh} 由对角、水平及垂直传力机制共同抵抗,即

$$V_{wh} = -D \cos(\theta) + F_h + F_v \cot(\theta) \quad (1)$$

式中: D 为对角机制中的压力; θ 为对角压杆AB与

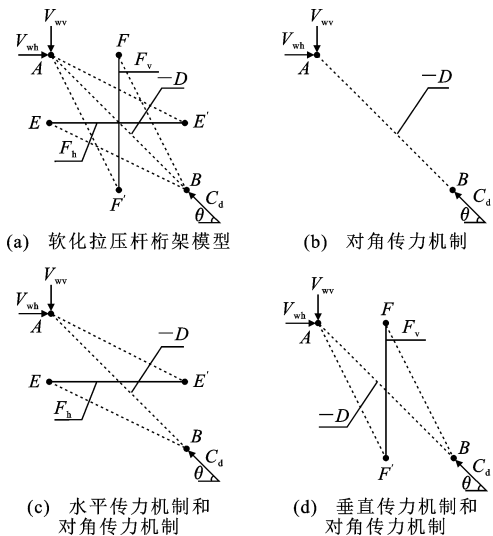


图 2 剪力墙的软化拉压杆模型

Fig. 2 Softened strut-and-tie model for shear wall

水平轴的夹角; F_h 为水平拉杆拉力; F_v 为垂直拉杆拉力。

水平剪力分配到 3 种传力机制中的比例为

$$-D\cos(\theta) : F_h : F_v\cot(\theta) = R_d : R_h : R_v \quad (2)$$

式中: R_d 、 R_h 、 R_v 分别为斜向、水平和垂直传力机制传递的水平剪力的比值。

1.2 简化软化拉压杆模型

为便于推广应用,将软化拉压杆模型进一步简化,得到计算结果与理论算法十分接近且相对保守的简化算法^[17]。墙体混凝土的对角抗压强度 $C_{d,n}$ 定义为

$$C_{d,n} = K\zeta f'_c A_{str} \quad (3)$$

$$A_{str} = a_w b_w \quad (4)$$

$$a_w = (0.25 + 0.85 \frac{N}{A_w f'_c})h \quad (5)$$

式中: K 为拉压杆指标; ζ 为软化系数; A_{str} 为对角压杆有效截面面积; a_w 为墙体受压区高度; b_w 为墙体截面宽度; h 为剪力墙截面高度; N 为墙体所受轴力; A_w 为墙体截面面积; f'_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度。

对混凝土软化效应做近似处理, ζ 值与主轴拉应变 ϵ_r 值密切相关,根据应变协调原理,将 ϵ_r 值代入公式 $\zeta = \frac{5.8}{\sqrt{f'_c}} \frac{1}{\sqrt{1+400\epsilon_r}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1+400\epsilon_r}}$, 得软化

系数为

$$\zeta = \frac{3.35}{\sqrt{f'_c}} \leq 0.52 \quad (6)$$

拉压杆指标 K 取为

$$K = K_h + K_v - 1 \quad (7)$$

式中: K_h 和 K_v 分别为水平拉杆指标和垂直拉杆指标,采用线性内插计算得到。

以上简化模型在低矮剪力墙受剪承载力计算中具有较好的精确度,而在中高墙体软化拉压杆模型中,由于其破坏形态为弯剪破坏,随着剪力墙高宽比的增加,荷载主要通过水平机构传递,传力机制如图 3 所示。

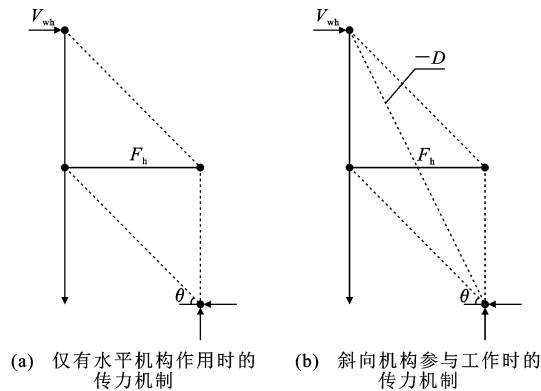


图 3 中高剪力墙软化拉压杆模型

Fig. 3 Softened strut-and-tie model for mid-rise shear wall

图 3(a)表示仅有水平机构传递荷载时,水平机构拉杆直至剪力墙达到极限承载力时仍未屈服[式(8)],此时不考虑斜向机构的作用。

$$\frac{f_{yh} A_{th}}{\cos(\theta)} [1 - \frac{\sin^2(\theta)}{2}] \geq \zeta f'_c A_{str} \quad (8)$$

式中: f_{yh} 为水平钢筋屈服强度; A_{th} 为水平拉杆的截面面积。

图 3(b)表示水平拉杆受力屈服,斜压杆参与荷载传递[式(9)],此时考虑斜向机构作用。

$$\frac{f_{yh} A_{th}}{\cos(\theta)} [1 - \frac{\sin^2(\theta)}{2}] < \zeta f'_c A_{str} \quad (9)$$

软化系数 ζ 的计算公式为^[17]

$$\zeta = \frac{3.91}{\sqrt{f'_c}} \leq 0.607 \quad (10)$$

1.3 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,使结构更加经济。统一强度理论是俞茂宏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,以 b 为参数隐含了无限多个屈服准则,其数学表达式为^[18]

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = f_t \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (11)$$

$$F = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = f_t \quad \sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (12)$$

式中: F 为主应力强度理论函数; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 3

个主应力; b 为反映中间主应力及相应面上正应力对材料破坏程度影响的参数, $0 \leq b \leq 1$; 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; α 为材料的拉压强度比, $\alpha = f_t/f_c$ 。

1.4 各规范承载力理论模型

国内外关于墙体受剪承载力模型的设计规范众多,但所依据的理论基础不同,如基于桁架理论建立的中国规范 GB 50010—2010^[19] 和美国规范 ACI 318^[20],前者考虑了轴压力对于受剪承载力的影响;欧洲 EC2 规范^[21]建立了墙体受剪承载力分析的经验强度退化模型;加拿大规范 CSA A23.3-04^[22]假定受剪承载力由混凝土和箍筋两部分贡献组成,基于修正压力场理论建立了计算模型;日本 AIJ 设计指南^[23]基于桁架-拱模型理论建立了墙体受剪承载力分析模型。根据上述 5 种规范,评估分析了各国规范在预测钢管混凝土剪力墙受剪承载力上的表现。

2 承载力计算方法

采用钢筋混凝土剪力墙与钢管混凝土边框柱受剪承载力分别计算再叠加的方式,基于软化拉压杆模型、统一强度理论和 5 种国内外规范,提出不同的钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力计算方法。

2.1 钢管混凝土边框柱受剪计算

钱稼茹等^[14]建立了钢管内混凝土强度等级不大于 C70 时钢管混凝土柱受剪承载力的计算公式,不同剪跨比 λ 、轴压比值对应的钢管混凝土柱受剪承载力 V_{col} 计算公式为

$$(1) 0 < \lambda < 0.5 \text{ 且 } N/(f_a A_a + f_c A_c) \leq 0.4 \text{ 时}$$

$$V_{col} = \frac{1.6}{\lambda + 0.3} f_t A_c + [0.3 - (0.6 - \frac{1+a^2}{2})\lambda] + 0.05 \frac{N}{\lambda} \quad (13)$$

$$(2) \lambda \geq 0.5 \text{ 且 } N/(f_a A_a + f_c A_c) \leq 0.4 \text{ 时}$$

$$V_{col} = 0.2 f_t A_c + \frac{1+a^2}{8\lambda} f_a A_a + 0.1 N \quad (14)$$

$$(3) 0 < \lambda < 0.5 \text{ 且 } N/(f_a A_a + f_c A_c) > 0.4 \text{ 时}$$

$$V_{col} = \frac{1.6}{\lambda + 0.3} f_t A_c + [0.3 - (0.6 - \frac{1+a^2}{2})\lambda] \cdot f_a A_a + 0.02 \frac{f_a A_a + f_c A_c}{\lambda} \quad (15)$$

$$(4) \lambda \geq 0.5 \text{ 且 } N/(f_a A_a + f_c A_c) > 0.4 \text{ 时}$$

$$V_{col} = 0.2 f_t A_c + \frac{1+a^2}{8\lambda} f_a A_a + 0.04 (f_a A_a + f_c A_c) \quad (16)$$

式中: a 为管内混凝土直径与钢管直径比; f_a 为钢管材料屈服强度; A_a 、 A_c 分别为钢管截面面积和管内混凝土截面面积。

2.2 基于软化拉压杆的承载力计算

根据简化的软化拉压杆模型对低矮剪力墙受剪承载力进行计算得

$$V_c = C_{d,n} \cos(\theta) = K \zeta f'_c A_{str} \cos(\theta) \quad (17)$$

式(17)中对角压杆有效截面积 A_{str} 、软化系数 ζ 、拉压杆指标 K 分别由式(4)、(6)、(7)计算得到。

对于中高剪力墙,当满足条件式(8)时,剪力墙极限承载力计算公式为

$$V_{wh} = \zeta f'_c A_{str} \cos(\theta) / [1 - \frac{\sin^2(\theta)}{2}] \quad (18)$$

当满足条件式(9)时,剪力墙极限承载力计算公式为

$$V_{wh} = \zeta f'_c A_{str} \cos(\theta) + f_{yh} A_{th} \frac{\sin^2(\theta)}{2} \quad (19)$$

根据剪力墙的抗震设计相关资料可知,反复荷载作用下中高剪力墙受剪承载力可取单调荷载作用下的 0.8 倍,即

$$V_c = 0.8 V_{wh} \quad (20)$$

因此,基于软化拉压杆模型的受剪承载力 V_{ul} 由边框柱和中间墙体共同组成,即 $V_{ul} = V_c + V_{col}$,其中边框柱依据剪跨比、轴压比采用不同的公式计算, V_{ul} 具体表达式为

$$V_{ul} = \begin{cases} K \zeta f'_c A_{str} \cos(\theta) + V_{col} & \text{低矮剪力墙, 其中 } \zeta = \frac{3.35}{\sqrt{f'_c}} \leq 0.52 \\ 0.8 \zeta f'_c A_{str} \cos(\theta) / [1 - \frac{\sin^2(\theta)}{2}] + V_{col} & \text{中高剪力墙, 其中 } \frac{f_{yh} A_{th}}{\cos \theta} [1 - \frac{\sin^2(\theta)}{2}] \geq \zeta f'_c A_{str} \text{ 且 } \zeta = \frac{3.91}{\sqrt{f'_c}} \leq 0.607 \\ 0.8 [\zeta f'_c A_{str} \cos(\theta) + f_{yh} A_{th} \frac{\sin^2(\theta)}{2}] + V_{col} & \text{中高剪力墙, 其中 } \frac{f_{yh} A_{th}}{\cos(\theta)} [1 - \frac{\sin^2(\theta)}{2}] \leq \zeta f'_c A_{str} \text{ 且 } \zeta = \frac{3.91}{\sqrt{f'_c}} \leq 0.607 \end{cases} \quad (21)$$

图 4 为剪力墙受剪承载力 V_c 计算流程图。将图 4 参数值和式(12)~(16)代入式(21),得到基于软化拉压杆模型的钢管混凝土边框剪力墙的承载力计算结果。

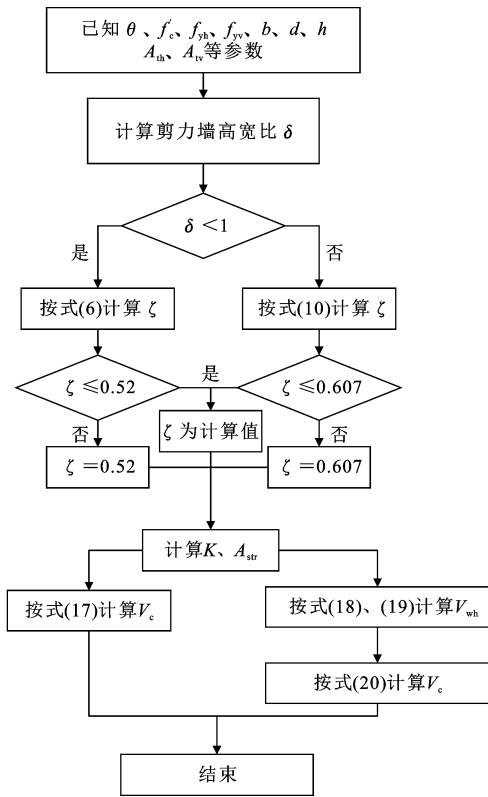


图4 受剪承载力计算流程

Fig. 4 Calculation flow chart of shear capacity

2.3 基于统一强度理论的受剪承载力计算

从简化计算模型出发,建立基于统一强度理论的复合剪力墙受剪承载力统一解^[12],即

$$V_{u2} = \begin{cases} \sigma_{c0} \eta_c h t \frac{A_c}{A_b} + \sigma_{b0} \eta_b l^2 t \frac{\xi}{h} + \gamma_v A_{sc} \tau_{scy} & A_c > A_b \\ \sigma_{c0} \eta_c h t + \sigma_{b0} \eta_b l^2 t \frac{A_c}{A_b} \frac{\xi}{h} + \gamma_v A_{sc} \tau_{scy} & A_c \leq A_b \end{cases} \quad (22)$$

式中: σ_{c0} 、 σ_{b0} 分别为等效弹性板与边框梁、柱的最大接触正应力; η_c 、 η_b 分别为等效弹性板与边框梁、柱的有效接触区长度系数; t 为墙体厚度; l 、 h 分别为等效弹性板的宽度、高度; ξ 为等效弹性板与框格接触面摩擦因数; γ_v 为抗剪承载力计算系数; τ_{scy} 为钢管混凝土抗剪屈服强度指标; A_{sc} 为钢管混凝土柱肢的截面积, A_c 、 A_b 根据文献^[12]中公式确定。

承载力计算公式考虑了中间主应力效应,并在一定程度上反映了轴压比、材料强度对钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力的影响。

2.4 基于规范的受剪承载力计算

(1) 中国现行规范^[19]

中国规范受剪承载力计算公式是根据试验数据以及桁架模型得出的具有一定保证率的半经验半理

论公式,即

$$V_c = \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[\frac{1}{\lambda - 0.5} (0.4 f_t b_w h_{w0} + 0.1 N \frac{A_{w0}}{A}) + 0.8 f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \right] \quad (23)$$

式中: N 为剪力墙截面轴向压力设计值; A 为剪力墙全截面面积; h_{w0} 为剪力墙截面有效高度; A_{w0} 为剪力墙腹板面积,对矩形截面取 A ; λ 为计算截面的剪跨比; s 为剪力墙水平分布钢筋间距; A_{sh} 为 s 内水平分布钢筋全肢截面面积; γ_{RE} 为抗震调整系数。

(2) 美国 ACI 318-14 规范^[20]

采用 45° 角桁架模型,该规范规定混凝土项与钢筋项共同承担处于设计水平的抗震受剪承载力 V_n ,计算公式为

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \lambda \sqrt{f'_{ck}} + \rho_t f_y) \quad (24)$$

式中: A_{cv} 为腹板厚度乘以截面在剪力方向的长度构成的剪力墙墙体面积; α_c 为考虑混凝土强度对墙体各抗剪强度相对贡献的系数; f_y 为钢筋屈服强度; λ 为轻质混凝土力学性能下降系数; ρ_t 为水平分布钢筋与垂直于该钢筋的混凝土总截面积的比值。

(3) 欧洲 EC2 规范^[21]

根据变角桁架模型,欧洲 EC2 规范规定配置受剪钢筋构件的抗震受剪承载力由式(25)、(26)中的较小值决定。

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} z \cot(\theta) \quad (25)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / [\cot(\theta) + \tan(\theta)] \quad (26)$$

式中: $V_{Rd,s}$ 为箍筋屈服时的最大剪力; $V_{Rd,max}$ 为混凝土压杆压碎的最大剪力; f_{ywd} 为箍筋屈服强度; f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值; A_{sw} 为箍筋截面面积;斜压杆与水平轴线之间夹角 θ 的建议取值范围在 $1 \sim 2.5$ 之间; α_{cw} 为系数,对于非预应力混凝土取 1 ; z 为内力臂,通常取为 $0.9 l_w$, l_w 为腹板长度; v_1 为混凝土开裂所导致的强度降低系数; b_w 为腹板宽度。

(4) 加拿大 CSA A23.3-04 规范^[22]

基于修正压力场理论,该规范规定剪力墙的抗震受剪承载力由混凝土项和钢筋项两部分组成,即

$$V_c = \phi_c \lambda \beta \sqrt{f'_c} b_w d_v + \frac{\phi_s A_v f_y d_v \cot(\theta)}{s} \quad (27)$$

式中: ϕ_s 为钢筋抗力系数; ϕ_c 为混凝土抗力系数,取为 0.65 ; λ 为考虑低密度混凝土影响系数,取为 1 ; β 为混凝土开裂对抗剪强度的影响系数,取为 0.21 ; d_v 为有效抗剪高度,取 $0.9d$ 和 $0.72h$ 中的较大者; $\sqrt{f'_c} \leq 8 \text{ MPa}$ 。

(5)日本 AIJ 设计指南^[23]

日本 AIJ 设计指南中,剪力墙公式基于桁架模型加拱模型建立,剪力由桁架机构和拱机构共同承担。受剪承载力设计公式为

$$V_c = t l_b \rho_w \sigma_{wy} \cos(\theta) + \tan(\phi) (1 - \beta) t l v \frac{\sigma_B}{2} \quad (28)$$

式中: t 为墙腹板厚度; l_b 为桁架结构中的剪力墙等效宽度; ρ_w 为墙体水平配筋率; σ_{wy} 为腹板钢筋屈服强度; σ_B 为混凝土抗压强度; ϕ 为混凝土压杆倾角,墙体中的 $\cot(\phi)$ 在所有情况下均假定为 1; v 为混凝土有效抗压强度系数; $\tan(\phi) = \sqrt{(h/l)^2 + 1} - h/l_a$; $\beta = [1 + \cot^2(\phi)] \rho_w \sigma_{wy} / (v \sigma_B)$ 。

将各规范计算得出的中间剪力墙受剪承载力与钢管混凝土边框柱承载力公式(13)~(16)进行相关组合,得到不同规范的组合剪力墙受剪承载力计算结果。

3 计算方法对比及试验验证

为验证不同理论模型计算钢管混凝土剪力墙受剪承载力的合理性,搜集了一系列低周反复荷载下的钢管混凝土边框剪力墙的试验数据。根据软化拉压杆模型、统一强度理论以及国内外规范公式计算结果,结合钢管混凝土柱受剪承载力^[14]对文献[10]、[13]以及文献[24]中各试件进行验算,得到矩形钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力。软化拉压杆模型计算值与试验值之比见图 5(图 5 中等值线表示试验值与计算值相等时的 45°线)。由图 5 可知,由软化拉压杆模型计算受剪承载力结果比值大多分布在等值线附近,平均值为 0.979,标准差为 0.128,偏差绝大部分控制在 20%之内。

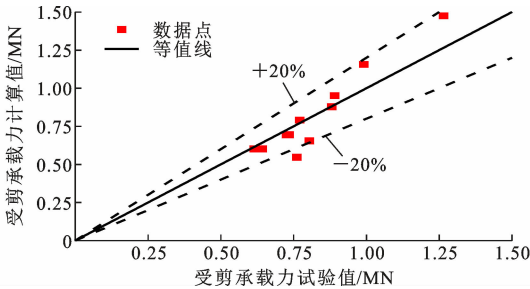


图 5 软化拉压杆模型承载力计算值与试验值对比

Fig. 5 Comparison between shear capacity calculation values and test values based on softening strut-and-tie model

各模型计算值与试验值的对比情况见图 6,其中受剪承载力计算值与试验值相等时用斜线表示,位于斜线上方的区域代表计算结果偏于不安全,位

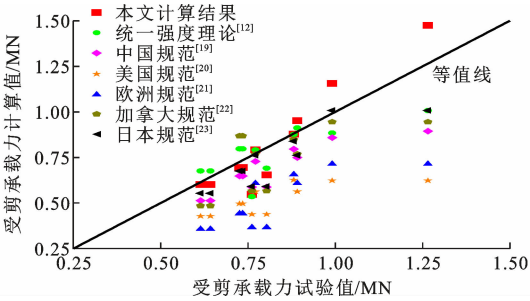


图 6 各计算模型受剪承载力对比

Fig. 6 Comparison of shear capacity of different calculation models

于斜线下方的区域代表计算结果偏于安全。表 1 列出了不同参数下各计算模型受剪承载力计算结果对比。可以看出,各国规范的比值平均值在 0.618~0.899 之间,能直接反映出各模型的计算准确性。

对比图 6 和表 1 可以看出:①各规范中加拿大规范计算得到的受剪承载力最大,欧洲规范最小,采用中国现行规范、美国规范 ACI 318、欧洲规范 EC2 的计算值普遍低于试验值,未能准确预估构件的实际承载力,主要是由于规范仅考虑各影响项的单纯叠加,未考虑各部分对分担剪力的贡献;②各模型计算结果普遍偏于安全,其中软化拉压杆模型与统一强度理论计算结果沿等值线分布较均匀,而软化拉压杆模型得到的理论计算结果与试验值之比的平均值最趋近于 1,相较于后者及国内外规范计算方法结果更精确,且其明确的计算模型较好地说明了剪力墙的受剪机理,更能够合理反映实际情况;③采用加拿大规范 CSA A23.3-04 的计算值离散性较大,利用软化拉压杆模型计算得到的标准差与统一强度理论相近,略大于其他规范,但其理论计算结果精确度相比于国内外规范优势明显。

4 参数分析

4.1 轴压比

图 7 为往复加载试验轴压比对剪力墙受剪承载力试验值与计算值比值的影响,此处轴压比表示剪力墙承受荷载与强度承载力之比,即墙肢截面轴向平均应力与轴心抗压强度的比值。因受力构件强度不足影响,个别试件未能完全发挥受剪承载力,其余大部分试件的计算值都偏于安全。轴压比小于 0.2 时,屈服荷载计算结果均较为保守;轴压比在 0.2~0.4 之间时,部分试件出现计算结果不安全的现象;轴压比大于 0.6 时,屈服荷载仍然存在偏于不安全的计算结果。但对比轴压比处于 0.2~0.4 之间时

表 1 不同参数下各计算模型受剪承载力计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results of shear capacity of calculation model under different parameters

数据来源	文献[24]	文献[24]	文献[24]	文献[24]	文献[24]	文献[24]	文献[10]	文献[13]	文献[13]	文献[13]	文献[13]	文献[13]	平均值	标准差
试件编号	SW2	SW3	SW5	SW6	SW7	SW8	CG-1.0-00-60	CFST-S-S1	CFST-S-S2	CFST-S-L1	CFST-S-L2			
剪力墙高宽比	1.84	1.84	1.84	1.84	1.37	1.37	0.80	0.95	0.95	0.62	0.62			
轴压比	0.35	0.35	0.65	0.65	0.65	0.35	0.20	0.31	0.62	0.31	0.62			
混凝土强度/MPa	60.1	60.1	35.2	35.2	34.1	34.1	56.3	32.9	32.9	32.9	32.9			
钢材强度/MPa	634.82	634.82	634.82	634.82	634.82	634.82	369.17	397.00	397.00	397.00	397.00			
V_{pu}/kN	734.72	725.70	652.56	614.06	803.60	760.94	881.00	771.00	891.00	991.00	1 265.00			
V_{u1}/kN	694.20	694.20	601.70	601.70	654.39	546.53	878.04	791.24	950.66	1 156.52	1 474.76			
V_{u1}/V_{pu}	0.945	0.957	0.936	0.980	0.814	0.718	0.997	1.026	1.067	1.167	1.166	0.979	0.128	
V_{u2}/kN	796.93	796.93	675.71	675.71	690.88	535.12	875.75	791.27	912.12	883.64	1 006.56			
V_{u2}/V_{pu}	1.085	1.098	1.052	1.100	0.860	0.703	0.994	1.026	1.024	0.892	0.796	0.966	0.128	
V_{u3}/kN	648.31	648.31	512.76	512.76	587.27	587.27	795.73	728.21	749.51	858.44	894.13			
V_{u3}/V_{pu}	0.882	0.893	0.798	0.731	0.772	0.903	0.945	0.841	0.867	0.707		0.834	0.071	
V_{u4}/kN	496.72	496.72	427.69	427.69	438.04	438.04	626.56	562.18	562.18	622.87	622.87			
V_{u4}/V_{pu}	0.676	0.684	0.666	0.696	0.545	0.576	0.711	0.729	0.631	0.629	0.492	0.640	0.071	
V_{u5}/kN	442.37	442.37	357.35	357.35	366.88	366.88	657.08	608.79	608.79	714.42	714.42			
V_{u5}/V_{pu}	0.602	0.610	0.556	0.582	0.457	0.482	0.746	0.790	0.683	0.721	0.565	0.618	0.102	
V_{u6}/kN	868.17	868.17	484.77	484.77	566.32	566.32	847.92	768.50	768.50	944.77	944.77			
V_{u6}/V_{pu}	1.182	1.196	0.754	0.789	0.705	0.744	0.962	0.997	0.863	0.953	0.747	0.899	0.166	
V_{u7}/kN	675.21	675.21	553.49	553.49	591.03	591.03	838.47	761.90	761.90	1 007.76	1 007.76			
V_{u7}/V_{pu}	0.919	0.930	0.861	0.901	0.735	0.777	0.952	0.988	0.855	1.017	0.797	0.885	0.085	

注: $V_{u1} \sim V_{u7}$ 分别为简化软化拉压杆模型、统一强度理论、中国规范、美国规范、欧洲规范、加拿大规范和日本 AIJ 设计指南计算的各试件受剪承载力; V_{pu} 为试件受剪承载力试验值。

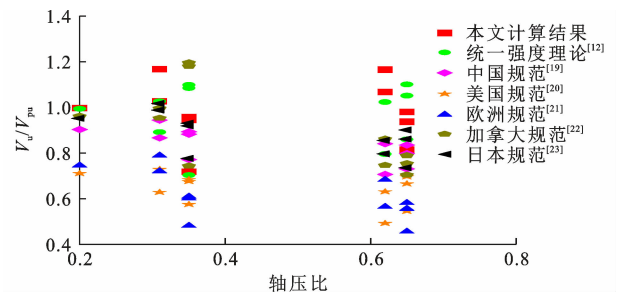


图 7 轴压比对 V_u/V_{pu} 的影响

Fig. 7 Influence of axial compression ratio on V_u/V_{pu}
更保守且绝大多数试件计算偏差控制在 20% 以内;对于软化拉压杆模型,轴压比小于 0.4 时的计算结果更准确。

4.2 高宽比

图 8 为剪力墙高宽比对墙体受剪承载力试验值与计算值比值的影响,此处反映墙体形状的参量高宽比与反映墙体抗震性能的剪跨比是一致的。由图 8 可知,随着高宽比的增大计算偏差波动范围由 20% 减小至 10%,与图 5 的结论相呼应。高宽比小于 1 时,部分试件计算结果偏于不安全,不同模型计算结果均较为分散;高宽比在 1~1.5 之间时,计算

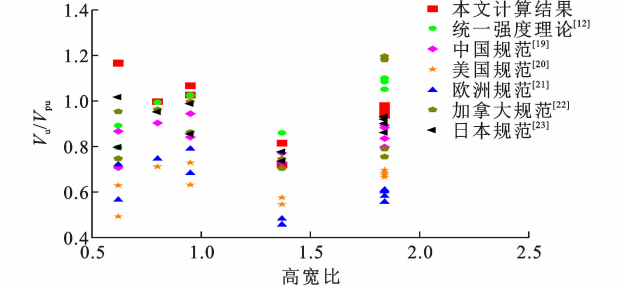


图 8 高宽比对 V_u/V_{pu} 的影响

Fig. 8 Influence of height to width ratio on V_u/V_{pu}
值偏于安全;当高宽比大于 1.75 时,各规范公式计算偏差比较集中,可以看出由统一强度理论和加拿大规范计算得到的承载力预测值偏大,软化拉压杆模型计算值与试验值吻合度最高。

4.3 宽厚比

图 9 为剪力墙宽厚比对受剪承载力试验值与计算值比值的影响。从图 9 可以看出:当剪力墙宽厚比在 5~6 之间时,由不同力学模型及规范公式计算的结果较集中,其中由软化拉压杆模型计算的比值趋近于 1,计算结果理想,而加拿大规范计算值超出试验结果 20% 左右,预测精度低;当剪力墙宽厚比

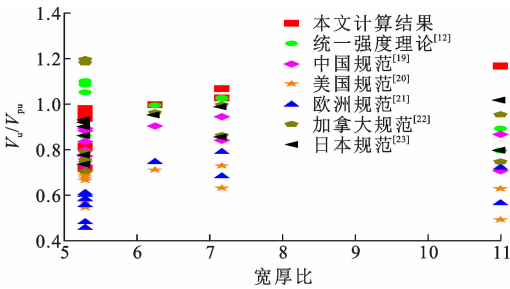


图 9 宽厚比对 V_u/V_{pu} 的影响

Fig. 9 Influence of width to thickness ratio on V_u/V_{pu}

在 6~8 之间时,绝大部分模型计算值与试验值之比有所增加,基于软化拉压杆模型和统一强度理论的计算结果偏差较小;当宽厚比为 11 时,各国规范计算数据离散性大,总体上计算偏差相对较高。这说明随着剪力墙宽厚比的增加,本文的计算偏差逐步增大且趋于不安全,即宽厚比较大时,软化拉压杆模型不适用;当宽厚比小于 8 时,两个模型的预测精度相对较好,这验证了其在钢管混凝土边框剪力墙上应用的可行性。

4.4 混凝土强度

图 10 为混凝土抗压强度标准值对剪力墙受剪承载力试验值与计算值比值的影响。混凝土强度小于 40 MPa 时,计算结果离散性较大但整体上偏于安全;当混凝土强度大于 55 MPa 时,计算偏差波动范围缩小至 10% 以内。由图 10 可以看出,采用欧美日各国规范,混凝土强度等级对计算结果的影响并不明显,根据加拿大规范得到的计算值随着混凝土强度等级的增大向不安全方向发展。基于软化拉压杆模型,随着混凝土强度等级提高,计算结果越趋于保守同时也更准确,这表明了软化拉压杆模型所提出计算公式的合理性。

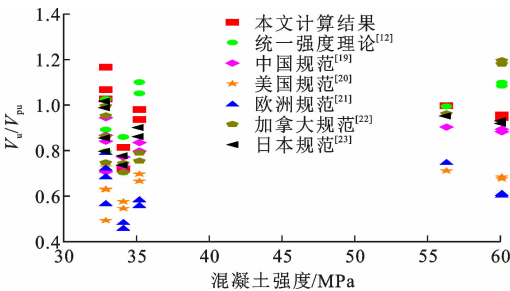


图 10 混凝土强度对 V_u/V_{pu} 的影响

Fig. 10 Influence of concrete strength on V_u/V_{pu}

4.5 钢材强度

图 11 为钢材强度对剪力墙受剪承载力试验值与计算值比值的影响。可以看出,随着钢材强度的增加,本文建议的承载力结果趋于保守也更准确。

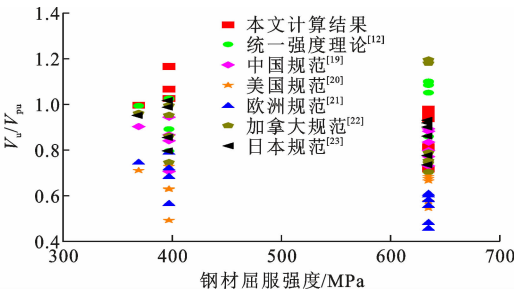


图 11 钢材屈服强度对 V_u/V_{pu} 的影响

Fig. 11 Influence of yield strength of steel on V_u/V_{pu}

不同钢材强度下,基于软化拉压杆模型和统一强度理论的公式计算值与试验值之比的均值为 0.966~0.979,较其余规范公式离散性小。钢材屈服强度小于 400 MPa 时,绝大部分散点结果偏于安全,但美国及欧洲规范计算值出现负偏差超过 30%,说明保守量过大。当钢材屈服强度大于 600 MPa 后,美国规范、欧洲规范及加拿大规范计算的准确性较差,软化拉压杆模型计算结果偏差率最小,但钢材屈服强度小于 400 MPa 时,该模型计算屈服荷载预测值超出试验值约 15%,数据不具可靠性,缺少一定的安全裕度。

5 结 语

(1)本文基于软化拉压杆模型、统一强度理论和国内外相关规范,提出不同力学模型的钢管混凝土边框剪力墙受剪承载力计算方法,并进行对比分析和试验验证,为该类墙体的受力分析提供新思路。

(2)通过对文献中多个试件承载力的试验结果计算验证可知,对于软化拉压杆模型,随着混凝土强度等级和钢材强度的提升,承载力结果趋于保守也更准确,但钢材屈服强度小于 400 MPa 时,该模型计算屈服荷载预测值偏大;随着宽厚比的增加,各国规范计算数据离散性增大。参数分析发现,轴压比小于 0.4 时屈服荷载计算精度较高,轴压比大于 0.6 时屈服荷载计算结果偏于不安全;随着高宽比的增大计算偏差波动范围由 20% 减小至 10%,高宽比大于 1.75 时,软化拉压杆模型计算偏差小,与试验值吻合度最高。宽厚比小于 8 时,软化拉压杆模型和统一强度理论的预测精度相对较好,比值趋近于 1,计算结果理想。

(3)采用软化拉压杆模型对钢管混凝土边框剪力墙的承载力进行分析,所得理论计算值与试验值较吻合,计算偏差绝大部分控制在 20% 之内,验证了该模型在钢管混凝土边框剪力墙上应用的可行性

和所提出计算公式的合理性。基于统一强度理论的计算结果同样具有较好的精度,但高宽比大于1.75时,预测值缺少安全裕度,该力学模型不适用。

(4)与其他计算方法相比,软化拉压杆模型在一定程度上克服了规范模型和统一强度理论模型存在的缺陷,可以较准确地预测钢管混凝土边框组合剪力墙的受剪承载力。由于该力学模型明确了混凝土、钢管和分布钢筋作为拉杆对受剪承载力的贡献,能够合理反映钢管混凝土边框剪力墙的剪切传力机理,更便于工程推广应用。

参考文献:

References:

- [1] SHIN H M, LEE H D, SHIN K J. Shaking table test and analysis of reinforced concrete frame with steel shear wall with circular opening and slit damper[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(4): 1420-1430.
- [2] ZHOU J, FANG X D, YAO Z Q. Mechanical behavior of a steel tube-confined high-strength concrete shear wall under combined tensile and shear loading[J]. Engineering Structures, 2018, 171: 673-685.
- [3] 徐培福, 黄吉锋, 陈富盛. 近50年剪力墙结构震害及其对抗震设计的启示[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 1-13.
- XU Peifu, HUANG Jifeng, CHEN Fusheng. Earthquake damages to shear wall structure in last fifty years and seismic design enlightenment[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 1-13.
- [4] 王威, 刘格炜, 苏三庆, 等. 波形钢板剪力墙及组合墙抗剪承载力研究[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 197-206, 226.
- WANG Wei, LIU Gewei, SU Sanqing, et al. Research on the shear bearing capacity of corrugated steel plate shear wall and composite wall[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7): 197-206, 226.
- [5] 陈怀亮, 卢中强, 张大长, 等. 基于抗剪机构和破坏模式的RC剪力墙极限承载力分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2006, 28(3): 65-70.
- CHEN Huailiang, LU Zhongqiang, ZHANG Dachang, et al. Study on ultimate strength of RC shear wall based on shear resistant mechanism and failure modes[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2006, 28(3): 65-70.
- [6] 李红运, 傅剑平, 姚佳琳. 考虑边缘构件剪力墙抗震抗剪承载力计算[J]. 工业建筑, 2019, 49(11): 64-71.
- LI Hongyun, FU Jianping, YAO Jialin. Calculation for shear capacity of shear walls with boundary elements[J]. Industrial Construction, 2019, 49(11): 64-71.
- [7] 鲁懿虬, 黄靓. 基于试验数据的带端柱或翼缘钢筋混凝土剪力墙抗剪承载力评估和分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(9): 92-98.
- LU Yiqiu, HUANG Liang. Evaluation and analysis of shear capacity of shear capacity of barbell-shaped or flanged reinforced concrete walls based on experimental data[J]. Building Structure, 2019, 49(9): 92-98.
- [8] 吴函恒, 周天华, 陈军武, 等. 装配式钢框架-预制混凝土抗侧力墙结构受剪承载力分析[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 107-113.
- WU Hanheng, ZHOU Tianhua, CHEN Junwu, et al. The shear bearing capacity of steel frame-concrete lateral-resistance-wall fabricated structure[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 107-113.
- [9] 方小丹, 孙孝明, 韦宏. 钢管高强混凝土剪力墙受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 82-93.
- FANG Xiaodan, SUN Xiaoming, WEI Hong. Experimental study on shear behavior of shear walls with steel tube-confined high-strength concrete[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 82-93.
- [10] 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 Danying, YOU Peibo, TANG Jiyu, 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.
- [11] 初明进, 冯鹏, 叶列平. 冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙受剪承载力计算模型[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 107-114.
- CHU Mingjin, FENG Peng, YE Lieping. Analytical model for predicting shear strength of cold-formed thin-walled steel reinforced concrete shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 107-114.
- [12] 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 Yongjie, YUE Xupeng, 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.
- [13] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

HAN Linhai, YANG Youfu. Modern concrete filled steel tube structural technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.

[14] 钱稼茹, 崔 瑶, 方小丹. 钢管混凝土柱受剪承载力试验[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 1-9.

QIAN Jiaru, CUI Yao, FANG Xiaodan. Shear strength tests of concrete filled steel tube columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(5): 1-9.

[15] HWANG S J, LEE H J. Analytical model for predicting shear strengths of exterior reinforced concrete beam-column joints for seismic resistance [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(5): 846-857.

[16] HWANG S J, FANG W H, LEE H J, et al. Analytical model for predicting shear strength of squat walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(1): 43-50.

[17] HWANG S J, LEE H J. Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(12): 1519-1526.

[18] YU M H. Unified strength theory and its applications [M]. Berlin: Springer, 2004.

[19] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Code for design of concrete structures; GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[20] Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-14 [S]. Washington DC: ACI, 2014.

[21] Eurocode 2: Design of concrete structures; EN 1992-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2001.

[22] Design of concrete structures; CAN A23. 3-04 [S]. Canada: Canadian Standards Association, 2004.

[23] The standard for structure calculation of steel reinforced concrete structures; AIJ 2001 [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2001.

[24] 曹万林, 王 敏, 王绍合, 等. 矩形钢管混凝土边框组合剪力墙及筒体结构抗震研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增 1): 58-70.

CAO Wanlin, WANG Min, WANG Shaohe, et al. Aseismic research of composite shear wall and core walls with rectangular concrete filled steel tube columns [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S1): 58-70.