

基于软化拉-压杆模型钢骨超高强混凝土框架节点抗剪承载力计算

闫长旺^{*1,2}, 吕海锋^{1,2}, 贾金青², 张 菊¹, 刘曙光¹

(1. 内蒙古工业大学 矿业学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 钢骨超高强混凝土框架节点是一种新型组合结构. 为计算钢骨超高强混凝土框架节点的抗剪承载力, 基于钢筋混凝土框架节点软化拉-压杆模型, 以钢骨和超高强混凝土为压杆, 以钢骨、纵筋、箍筋为拉杆, 建立了钢骨超高强混凝土框架节点软化拉-压杆模型, 进行了框架节点抗剪承载力计算, 并与试验值进行了比较, 分析了轴压比和配箍率对计算值的影响. 结果表明, 抗剪承载力试验值与计算值的比在 1.2 左右, 吻合较好, 且计算值偏于安全; 随着轴压比的增大, 计算值增大; 随着配箍率的增大, 计算值亦增大. 所提出的钢骨超高强混凝土框架节点软化拉-压杆模型很好地反映出轴压比和配箍率对抗剪承载力的影响.

关键词: 钢骨超高强混凝土; 框架节点; 软化拉-压杆模型; 抗剪承载力; 轴压比; 体积配箍率

中图分类号: TU318.1; TU398.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201501008

0 引言

钢骨超高强混凝土框架节点是在焊接或轧制的钢骨周围, 配置钢筋并浇筑超高强混凝土的结构形式, 其内置钢骨可以显著改善超高强混凝土框架节点的抗震延性, 提高超高强混凝土框架节点的抗剪承载力. 在地震作用下钢骨超高强混凝土框架节点承担梁柱传来的弯矩、剪力、轴力, 受力状态比较复杂^[1-3], 核心区抗剪承载力受到混凝土强度、体积配箍率、轴压比等诸多因素的影响^[4-5].

拉-压杆模型是一种基于桁架理论, 适用于混凝土结构受力状态复杂区域抗剪承载力计算的模型^[6-7]. 模型中, 钢筋可以看作拉杆, 主要承受拉力; 混凝土可以看作压杆, 主要承受压力. Kotsovu 等^[8]基于拉-压杆模型, 提出混凝土框架边节点抗剪承载力计算方法, 计算结果与试验结果吻合较好. 由于混凝土在受压过程中会出现软化现象, Hwang 和 Lee 提出拉-压杆软化系数 ζ , 对拉-压杆模型进行了改进, 使之能够更好地估算出框架节点的抗剪承载力, 这就是钢筋混凝土框

架节点软化拉-压杆模型^[9].

本文以软化拉-压杆模型为基础, 通过对内置钢骨不同部位的受力及其作用进行划分, 提出适用于钢骨超高强混凝土框架节点的抗剪承载力计算方法, 并与试验数据对比, 分析节点抗剪承载力计算值与试验值的吻合程度, 以及抗剪承载力计算方法对试件设计参数轴压比和体积配箍率的灵敏程度.

1 试验概况与试验结果

1.1 试件制作

选用多层框架结构中间层梁与柱反弯点之间的钢骨超高强混凝土框架节点作为研究背景, 共制作了 6 节点试件, 试件构造如图 1 所示. 试件柱的截面尺寸为 220 mm × 220 mm, 柱的高度为 1 500 mm. 试件梁为等高梁, 梁截面尺寸为 180 mm × 250 mm, 梁长 2 220 mm. 超高强混凝土圆柱体抗压强度 f_c' 平均值为 92 MPa. 试件梁、柱中的纵筋全部采用 HRB335 级直径为 14 mm 的螺

收稿日期: 2014-04-20; 修回日期: 2014-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168034, 51178078); 内蒙古自然科学基金资助项目(2011BS0709); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划资助项目(NJYT-14-B08); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP1015).

作者简介: 闫长旺^{*}(1978-), 男, 博士, 教授, E-mail: ycw20031013@126.com; 贾金青(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师.

纹钢筋,柱配筋率为 1.66%,梁纵筋贯穿节点,梁配筋率为 0.68%。试件柱、节点核心区采用直径为 8 mm 的 HRB400 级螺纹钢筋,梁箍筋采用直径为 6 mm 的 HRB335 级螺纹钢筋。梁、柱中的钢骨均采用 Q235 级工字钢 I14,钢骨截面积为 21.51 cm²。试件所采用的钢材力学性能指标如表 1 所示。

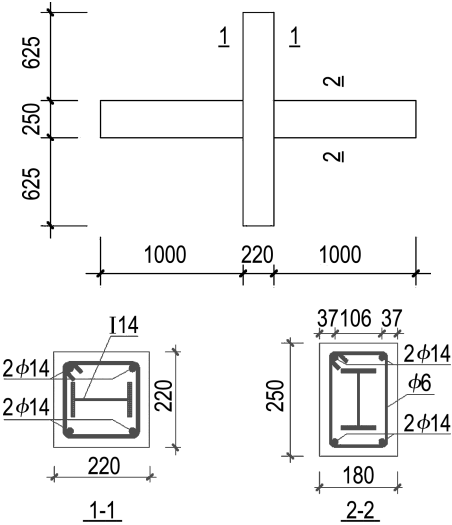


图 1 钢骨超高强混凝土框架节点试件构造图(单位:mm)

Fig.1 Specimens configuration diagram of steel reinforced ultra high strength concrete frame connection (unit: mm)

表 1 试件钢材力学性能指标

Tab.1 Mechanics properties of steel specimens

钢材类型	屈服强度 f_y /	极限强度 f_u /	延伸率
	MPa	MPa	$\delta_{10} / \%$
直径 6 mm 钢筋	382	551	19.7
直径 8 mm 钢筋	470	661	19.0
直径 14 mm 钢筋	357	469	20.6
工字钢 I14	254	368	22.0

试验研究参数为轴压比 n_1 : 0.35、0.40、0.45;体积配箍率 ρ_v : 1.0%、1.6%、2.2%。

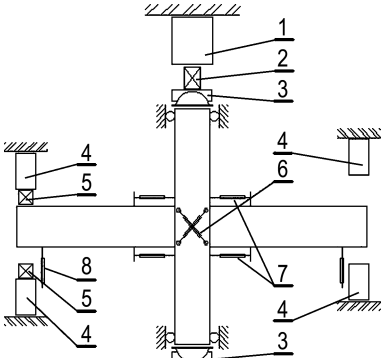
表 2 抗剪承载力试验值与计算值

Tab.2 Experimental values and calculated values of shear strength

试件	f_c' / MPa	$\rho_v / \%$	n_1	f_d' / MPa	钢筋强度 f_u / MPa		ζ	$\theta / (^\circ)$	A_{str} / cm^2	V_{exp} / kN	V_{sscm} / kN	$\frac{V_{exp}}{V_{sscm}}$
					箍筋	纵筋						
SSRC-I-40-1.0	92	1.0	0.40	368	661	469	0.35	48.5	37 686.07	990.32	806.67	1.23
SSRC-I-35-1.6	92	1.6	0.35	368	661	469	0.35	48.5	35 357.55	982.07	777.56	1.26
SSRC-I-40-1.6	92	1.6	0.40	368	661	469	0.35	48.5	37 686.07	1 002.21	822.62	1.22
SSRC-I-45-1.6	92	1.6	0.45	368	661	469	0.35	48.5	40 014.60	1 033.39	867.68	1.19
SSRC-I-40-2.2	92	2.2	0.40	368	661	469	0.35	48.5	37 686.07	1 016.35	846.71	1.20
SSRC-I-45-2.2	92	2.2	0.45	368	661	469	0.35	48.5	40 014.60	1 044.05	891.78	1.17

1.2 加载装置与加载制度

框架节点试件抗剪承载力试验采用梁端拟静力反复加载方式,试验加载装置如图 2 所示。加载制度采用力-位移混合控制加载方法,如图 3 所示。加载至梁端反复荷载显著降低时(小于峰值荷载的 85%时)或试件不能稳定地承受反复荷载时,停止试验。



1 200 t 千斤顶; 2 200 t 传感器; 3 平板铰支座;
4 30 t 千斤顶; 5 30 t 传感器; 6 LVDT;
7 50 mm 位移计; 8 200 mm 位移计

图 2 加载装置简图

Fig.2 Loading device sketch

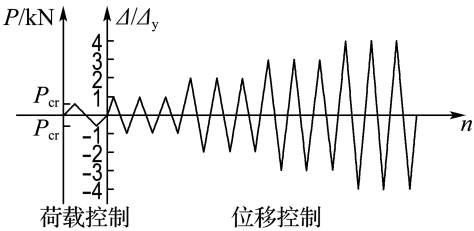


图 3 加载制度

Fig.3 Loading program

1.3 抗剪承载力试验结果

低周反复加载试验中,6 个试件的抗剪承载力试验值如表 2 中 V_{exp} 列所示。

2 基于软化拉-压杆模型的钢筋超
高强混凝土框架节点抗剪承载
力计算方法

2.1 钢筋混凝土框架节点软化拉-压杆模型

文献[9]中作者以混凝土为压杆,以纵筋和箍筋为拉杆,提出了钢筋混凝土框架节点软化拉-压杆模型,由水平机构、竖向机构、斜向机构三部分构成,抗剪机构如图 4 所示。其中,水平机构、竖向机构起拉杆作用,主要承受外荷载在节点区域产生的受拉分力;斜向机构起压杆作用,主要承受外荷载在节点区域产生的受压分力。

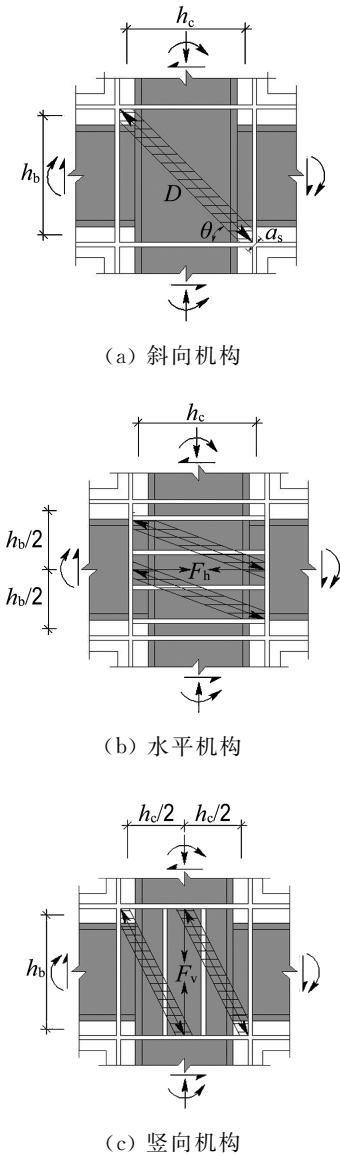


图 4 钢筋混凝土框架节点抗剪机构
Fig. 4 Shear-resistant mechanisms of reinforced concrete frame connection

文献[9]中钢筋混凝土框架节点抗剪承载力

$$V_j = K \zeta f'_c A_{strc} \tag{1}$$

$$A_{strc} = a_s \times b_s \tag{2}$$

式中: K 为模型中拉杆对节点核心区抗剪承载力的贡献系数; ζ 为混凝土抗压强度软化系数, $\zeta \approx 3.35/\sqrt{f'_c} \leq 0.52$; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; A_{strc} 为混凝土斜向压杆的有效作用截面积; a_s 为混凝土斜向压杆高度, $a_s \approx a_c$, a_c 为柱受压区高度; b_s 为混凝土斜向压杆宽度,取节点的有效宽度,即柱截面宽度。

2.2 钢筋超高强混凝土框架节点抗剪承载力计算方法

本文以文献[9]提出的软化拉-压杆模型为基础,在图 4 所示钢筋混凝土框架节点软化拉-压杆模型抗剪机构中,增加钢骨部分(图 4 中所示灰色部分为梁、柱钢骨),形成内置钢骨的钢筋混凝土框架节点软化拉-压杆模型,采用文献[10]中承载力叠加计算理论,提出钢筋超高强混凝土框架节点抗剪承载力计算方法。

钢筋超高强混凝土框架节点内置钢骨立面如图 5 所示,将节点区域内置的工字钢骨按图 6 所示进行分解,钢骨①、②、③、④部分与柱纵筋一起构成竖向拉杆,承受拉力作用;钢骨腹板⑤与节点区箍筋、梁纵筋一起构成水平向拉杆,承受拉力作用;钢骨各部分与超高强混凝土共同构成斜向压杆,承受压力作用。

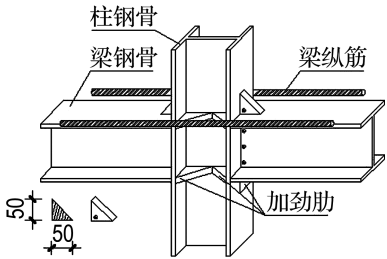


图 5 内置钢骨立面图
Fig. 5 Elevation drawing of encased steel

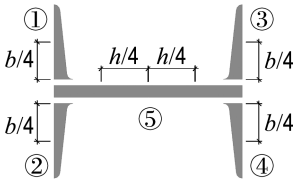


图 6 柱内置钢骨受力及其作用的划分
Fig. 6 Force division and effect of column encased steel

内置钢骨后, 需要考虑钢骨腹板所占的有效作用截面积 A_{strq} 和翼缘所占的有效截面积 A'_{strq} , 则框架节点斜向压杆有效作用截面积

$$A_{\text{str}} = A_{\text{strc}} + A_{\text{strq}} + A'_{\text{strq}} \quad (3)$$

$$A_{\text{strq}} = a_s \times d \times k, \quad k = E_q/E_c, \quad (4)$$

$$A'_{\text{strq}} = 2(b_q - d) \times t \times k \times \sin \theta \quad (4)$$

$$\theta = \arctan(h_b/h_c) \quad (5)$$

$$h_b = h - 2a'_b, \quad h_c = b - 2a'_c,$$

$$a'_b = \frac{f_{qb}A_{qb}a''_{qb} + f_{yb}A_{sb}a'_{sb}}{f_{qb}A_{qb} + f_{yb}A_{sb}},$$

$$a'_c = \frac{f_{qc}A_{qc}a''_{qc} + f_{yc}A_{sc}a'_{sc}}{f_{qc}A_{qc} + f_{yc}A_{sc}} \quad (6)$$

$$a_c = \left(0.25 + 0.85 \frac{N}{A_g f'_c}\right) h'_c \quad (7)$$

式中: d 为腹板厚度; k 为钢骨与混凝土弹性模量比; b_q 为型钢翼缘宽度; t 为钢骨翼缘平均厚度; θ 为斜向压杆与水平向夹角; h 为梁高度; b 为柱截面宽度; a'_b 、 a'_c 分别是梁、柱钢骨翼缘和纵向受力钢筋合力点到截面边缘的距离; f_{qb} 为梁钢骨抗拉强度; A_{qb} 为梁钢骨截面积; a''_{qb} 为梁钢骨保护层厚度; f_{yb} 为梁纵筋抗拉强度; A_{sb} 为梁纵筋总截面积; a'_{sb} 为梁纵筋中心到截面边缘的距离; f_{qc} 为柱钢骨抗拉强度; A_{qc} 为柱钢骨截面积; a''_{qc} 为柱钢骨保护层厚度; f_{yc} 为柱纵筋抗拉强度; A_{sc} 为柱纵筋总截面积; a'_{sc} 为柱纵筋中心到截面边缘的距离; N 为柱轴向力; A_g 为框架柱的毛截面面积; h'_c 为框架柱的截面高度。

2.3 抗剪承载力贡献系数 K

系数 K 是框架节点软化拉-压杆模型中的关键参数, 主要表示拉杆对框架节点抗剪承载力的贡献。内置钢骨的钢筋混凝土框架节点抗剪承载力贡献系数 K , 仍将以文献[9]的相关研究成果为基础, 按图 6 所示将内置钢骨作为拉杆、压杆的一部分, 按式(8)确定:

$$K = K_h + K_v - 1 \quad (8)$$

$$K_h = 1 + (\bar{K}_h - 1)F_{yh}/\bar{F}_h \leq \bar{K}_h,$$

$$K_v = 1 + (\bar{K}_v - 1)F_{yv}/\bar{F}_v \leq \bar{K}_v \quad (9)$$

$$\bar{K}_h = \frac{(1 - \gamma_h) + \gamma_h}{(1 - \gamma_h) + \gamma_h \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{2}\right)} \geq 1,$$

$$\bar{K}_v = \frac{(1 - \gamma_v) + \gamma_v}{(1 - \gamma_v) + \gamma_v \left(1 - \frac{\cos^2 \theta}{2}\right)} \geq 1 \quad (10)$$

$$\bar{F}_h = \gamma_h \times (\bar{K}_h \zeta f'_c A_{\text{str}}) \times \cos \theta,$$

$$\bar{F}_v = \gamma_v \times (\bar{K}_v \zeta f'_c A_{\text{str}}) \times \sin \theta \quad (11)$$

$$F_{yh} = A_{sh1} f'_{sh1} + A_{sh2} f'_{sh2} + A_{qh} f'_{qh},$$

$$F_{yv} = A_{sv} f'_{sv} + A_{qv} f'_{qv} \quad (12)$$

$$\gamma_h = \frac{2 \tan \theta - 1}{3} (0 \leq \gamma_h \leq 1), \quad \gamma_v = \frac{2 \cot \theta - 1}{3} \quad (13)$$

式中: K_h 、 K_v 分别为水平、竖向拉杆贡献系数; $\bar{K}_h$ 、 $\bar{K}_v$ 分别为拉杆配筋足够时水平、竖向拉杆贡献系数; γ_h 为水平拉杆的拉力与节点水平剪力的比值; γ_v 为竖向拉杆的拉力与节点竖向剪力的比值; $\bar{F}_h$ 、 $\bar{F}_v$ 分别为水平拉杆、竖向拉杆的平衡拉力; F_{yh} 、 F_{yv} 分别为水平机构承担的拉力与竖向机构承担的拉力; A_{sh1} 、 f'_{sh1} 分别为节点核心区柱箍筋作为水平拉杆的总截面积、屈服强度; A_{sh2} 、 f'_{sh2} 分别为节点核心区梁纵筋作为水平拉杆的总截面积、屈服强度; A_{qh} 、 f'_{qh} 分别为节点核心区钢骨腹板作为水平拉杆的总截面积、屈服强度; A_{sv} 、 f'_{sv} 分别为节点核心区柱纵筋作为竖向拉杆的总截面积、屈服强度; A_{qv} 、 f'_{qv} 分别为节点核心区钢骨翼缘作为竖向拉杆的总截面积、屈服强度。

3 抗剪承载力计算方法验证与分析

3.1 精确度验证与分析

运用节点抗剪承载力计算方法(1)~(13), 进行钢骨超高强混凝土框架节点抗剪承载力计算, 计算结果如表 2 中 V_{sscm} 列所示。计算过程中, 试件组成材料强度取实测强度值。对比表 2 中 V_{exp} 列所示抗剪承载力试验值和 V_{sscm} 列所示抗剪承载力计算值, 可以发现, 试验值与计算值的比值在 1.17~1.26, 计算值与试验值吻合较好, 具有较高的精度, 且有一定的安全储备。

3.2 对轴压比、体积配箍率的灵敏程度

轴压比(n_t)和体积配箍率(ρ_v)对试件抗剪承载力(V)的影响明显, 是抗剪承载力设计计算过程中需要考虑的重要因素^[11]。

图 7 所示为轴压比(n_t)和体积配箍率(ρ_v)对

试件抗剪承载力(V)的影响. 由图所示曲线可以看出,在轴压比为定值情况下,随着体积配箍率的逐渐增大,节点抗剪承载力计算值逐渐增大,与抗剪承载力试验值随体积配箍率的变化规律相同;在体积配箍率为定值情况下,随着轴压比的逐渐增大,节点抗剪承载力计算值逐渐增大,与抗剪承载力试验值随轴压比的变化规律相同. 轴压比和体积配箍率对抗剪承载力计算值的影响明显,所提出的钢骨超强混凝土框架节点抗剪承载力计算方法,很好地反映出轴压比和体积配箍率对抗剪承载力的影响.

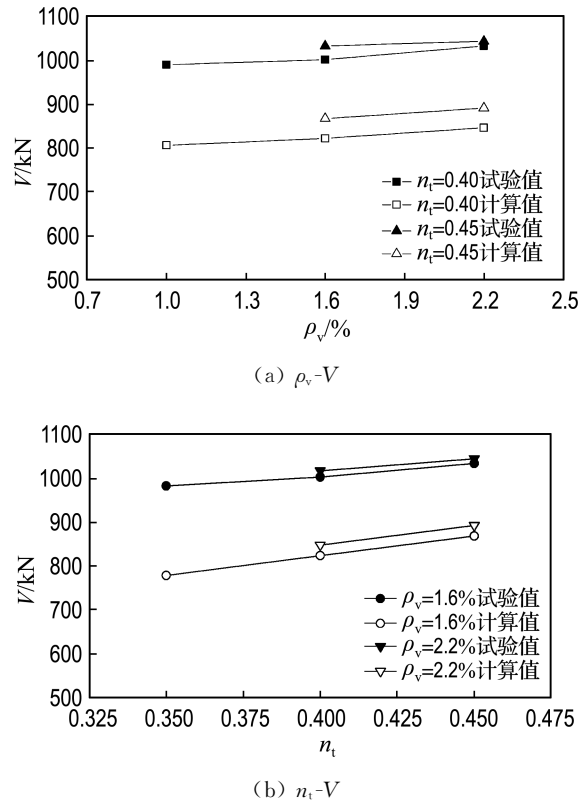


图 7 轴压比(n_t)和体积配箍率(ρ_v)对抗剪承载力(V)的影响

Fig. 7 Effects of axial compression ratio (n_t) and volumetric stirrup ratio (ρ_v) on shear strength (V)

4 结 论

(1)采用本文提出的抗剪承载力计算方法,进行钢骨超强混凝土框架节点抗剪承载力计算,试验值与计算值的比约为 1.2,吻合较好,且偏于

安全.

(2)抗剪承载力计算值,随着体积配箍率的增大而增大,随着轴压比的增大而增大,很好地反映出体积配箍率和轴压比对钢骨超强混凝土框架节点抗剪承载力的影响.

参考文献:

[1] 刘 鸣,刘伯权,邢国华. 基于简化拉压杆模型的钢筋混凝土框架异型节点抗剪性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2):63-67.
LIU Ming, LIU Bo-quan, XING Guo-hua. Shear behavior of RC irregular interior joints using simplified softened strut-and-tie model [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2):63-67. (in Chinese)
[2] Chen C C, Suswanto B, Lin Y J. Behavior and strength of steel reinforced concrete beam-column joints with single-side force inputs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8-9):1569-1581.
[3] Braconi A, Elamary A, Salvatore W. Seismic behaviour of beam-to-column partial-strength joints for steel-concrete composite frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(12):1431-1444.
[4] Lee J Y, Kim J Y, Oh G J. Strength deterioration of reinforced concrete beam-column joints subjected to cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2009, 31(9):2070-2085.
[5] Wang G L, Dai J G, Teng J G. Shear strength model for RC beam-column joints under seismic loading [J]. Engineering Structures, 2012, 40:350-360.
[6] Rahal K N. Simplified design and capacity calculations of shear strength in reinforced concrete membrane elements [J]. Engineering Structures, 2008, 30(10):2782-2791.
[7] Godat A, Chaallal O. Strut-and-tie method for externally bonded FRP shear-strengthened large-scale RC beams [J]. Composite Structures, 2013, 99:327-338.
[8] Kotsovou G, Mouzakis H. Exterior RC beam - column joints: New design approach [J].

Engineering Structures, 2012, **41**:307-319.

[9] 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.

[10] 中冶集团建筑研究总院. YB 9082—2006 钢骨混凝土结构设计规程[S]. 北京:冶金工业出版社, 2007.

Central Research Institute of Building and Construction, China Metallurgical Construction Group Corporation. YB 9082—2006 Technical Specification of Steel-Reinforced Concrete Structures [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007. (in Chinese)

[11] 霍林生,李宏男,肖诗云,等. 汶川地震钢筋混凝土框架结构震害调查与启示[J]. 大连理工大学学报, 2009, **49**(5):718-723.

HUO Lin-sheng, LI Hong-nan, XIAO Shi-yun, *et al.* Earthquake damage investigation and analysis of reinforced concrete frame structures in Wenchuan earthquake [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2009, **49**(5):718-723. (in Chinese)

Shear strength calculation of steel reinforced ultra-high strength concrete frame connection based on softened strut-and-tie model

YAN Chang-wang^{*1,2}, LÜ Hai-feng^{1,2}, JIA Jin-qing², ZHANG Ju¹, LIU Shu-guang¹

(1. School of Mining and Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Steel reinforced ultra-high strength concrete frame connection is a new type of composite structure. In order to calculate the shear strength of steel reinforced ultra-high strength concrete frame connection, a softened strut-and-tie model is proposed based on the reinforced concrete frame connection. In this model, steel and ultra-high strength concrete are considered as strut, and steel, longitudinal reinforcement, loop reinforcement are considered as tie. Shear strength of steel reinforced ultra-high strength concrete frame connection is calculated, the calculated values are compared with test values, and influences of axial compression ratio and stirrup ratio on the calculated values of shear strength are analyzed. The experimental results show that the ratios between test values and calculated values are approximately 1.2, and the calculated values agree well with test values and are reliable. The calculated values increase with axial compression ratio increment or with stirrup ratio increment. The proposed softened strut-and-tie model can reflect the influences of axial compression ratio and stirrup ratio on shear strength.

Key words: steel reinforced ultra-high strength concrete; frame connection; softened strut-and-tie model; shear strength; axial compression ratio; volumetric stirrup ratio