

邢国华, 武名阳, 丁远泽, 常召群, 王志萌, 2020. 锈蚀钢筋混凝土框架中节点抗剪强度研究. 震灾防御技术, 15 (1): 33—42. doi: 10.11899/zzyf20200104

# 锈蚀钢筋混凝土框架中节点抗剪强度研究<sup>1</sup>

邢国华<sup>1,2)</sup> 武名阳<sup>1)</sup> 丁远泽<sup>1)</sup> 常召群<sup>1)</sup> 王志萌<sup>1)</sup>

1) 长安大学, 建筑工程学院, 西安 710061

2) 新疆大学, 建筑工程学院, 乌鲁木齐 830046

**摘要** 随着服役时间的增长, 侵蚀环境下钢筋混凝土框架节点因钢筋发生不同程度的锈蚀而造成承载性能下降, 严重影响建筑结构的安全使用。本文在已有钢筋混凝土框架节点抗剪强度理论模型的基础上, 考虑钢筋锈蚀对框架节点受力性能的影响, 建立锈蚀钢筋混凝土框架中节点受剪承载力计算公式。通过 11 组锈蚀钢筋混凝土节点试验数据, 对建议理论模型进行验证。研究表明, 锈蚀钢筋混凝土节点受剪承载力试验值与理论计算值之比的平均值为 0.951, 方差为 0.075, 二者吻合较好, 本文建议的计算方法可用于锈蚀钢筋混凝土框架中节点承载力分析。

**关键词:** 混凝土结构 锈蚀 节点 抗剪强度 耦合作用

## 引言

侵蚀环境下钢筋混凝土结构随着服役时间的增长, 会发生显著的材料性能退化与构件损伤, 从而引起结构性能退化, 耐久性和承载能力显著降低, 严重影响人民生命财产安全。框架节点作为混凝土结构中连接梁柱的关键构件, 发挥传递、分配内力和保证结构整体性的重要作用, 因此对锈蚀钢筋混凝土框架节点抗剪强度进行分析评估具有十分重要的研究意义。

多年来国内外学者对钢筋混凝土框架节点承载力和破坏模式开展了大量研究, 并提出相应的理论分析模型。唐九如(1989)、贺志坚等(1991)分析了钢筋混凝土框架节点抗震与抗剪机理; Kitayama 等(1991)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(中华人民共和国住房和城乡建设部等, 2015)根据工程经验与试验分析, 给出节点抗震与抗剪设计方法; Vecchio 等(1986)提出的修正斜压场理论可用于预测混凝土构件受剪行为。但已有承载性能分析模型尚未考虑钢筋锈蚀对钢筋混凝土框架节点受力性能的影响, 不能直接用于锈蚀钢筋混凝土框架节点抗剪强度的计算。

本文在上述已有理论模型与计算公式的基础上, 考虑钢筋锈蚀作用对框架节点受力性能的影响, 建立锈蚀钢筋混凝土框架中节点(以下简称“锈蚀节点”)受剪承载力计算公式, 并通过 11 组(郑山锁等, 2015; 周静海等, 2015)锈蚀节点试验结果, 对建议模型的合理性进行验证。

<sup>1</sup> 基金项目 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2018D01C038)

[收稿日期] 2019-06-28

[作者简介] 邢国华, 男, 生于 1983 年。教授, 博士。主要从事混凝土结构抗震方面的研究。E-mail: ghxing@chd.edu.cn

# 1 钢筋锈蚀对材料性能的影响

已有研究（张誉等，2003；Rodriguez 等，1994；1997）表明，钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构承载力的影响主要表现为：

（1）钢筋锈蚀造成混凝土与钢筋之间粘结性能显著退化；

（2）锈胀裂缝引起混凝土中斜裂缝间骨料咬合力减弱，从而造成纵筋销栓作用降低，使混凝土产生软化效应，强度降低；

（3）钢筋锈蚀后，其力学性能发生退化，有效截面减小。

对于钢筋混凝土框架节点抗剪性能而言，锈蚀造成混凝土与钢筋材料性能降低、粘结强度退化、有效截面减小等，进而使锈蚀节点受剪承载力显著下降。

## 1.1 锈蚀钢筋材料性能

钢筋在侵蚀环境下发生不均匀坑状锈蚀，其屈服强度和弹性模量有所下降，Lee 等（1998）给出钢筋坑蚀后材料性能计算公式：

$$f_{yc} = (1 - 1.98\eta_s)f_y \quad (1)$$

$$E_{sc} = (1 - 1.13\eta_s)E_s \quad (2)$$

式中， $f_{yc}$  为钢筋锈蚀后的屈服强度； $f_y$  为未锈蚀钢筋屈服强度； $E_{sc}$  为钢筋锈蚀后的弹性模量； $E_s$  为未锈蚀钢筋弹性模量； $\eta_s$  为钢筋锈蚀率。

钢筋锈蚀后，截面产生损伤，钢筋半径减小。由于钢筋坑蚀后剩余截面呈不规则形状，其真实截面面积难以计算，本文为简化分析，对坑蚀钢筋截面采用均匀锈蚀情况下的理论公式进行计算（王海龙等，2008）：

$$R_s = (\sqrt{1 - \eta_s})R \quad (3)$$

式中， $R$  为未锈蚀钢筋半径。

钢筋锈蚀后产生锈蚀产物后体积膨胀 2—4 倍（任海洋，2010），本文取膨胀系数为 4。如图 1 所示，假定锈蚀产物在钢筋周围均匀分布，则由锈蚀产物膨胀系数与钢筋变形协调关系可得下式：

$$\pi R^2 + (t - 1)(\pi R^2 - \pi R_{st}^2) = \pi R_{st}^2 \quad (4)$$

式中， $t$  为锈蚀产物膨胀系数； $R_{st}$  为锈蚀产物附着在钢筋后的钢筋名义半径。

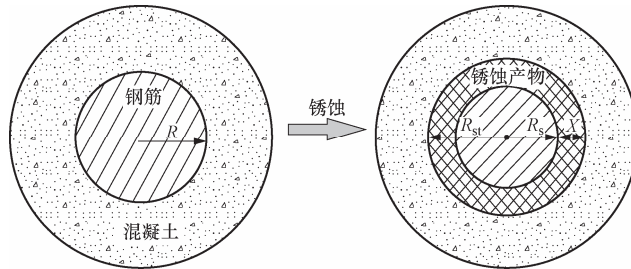


图 1 锈蚀钢筋截面变化

Fig. 1 Section change of the corroded steel bars

联立式（3）、式（4）可得下式：

$$R_{st} = (\sqrt{1+3\eta_s})R \quad (5)$$

$$X = (\sqrt{1+3\eta_s} - 1)R \quad (6)$$

式中,  $X$  为锈蚀钢筋半径膨胀值。

## 1.2 钢筋锈蚀对混凝土力学性能的影响

钢筋锈蚀会发生体积膨胀, 引起钢筋周围的混凝土产生微裂缝, 内部微裂缝造成构件截面损伤及混凝土材料性能下降(梁岩等, 2013)。由构件截面损伤造成的不利影响将在下文进行分析, 混凝土材料软化后的性能可由梁岩等(2013)提出的公式计算:

$$f'_{cc} = (0.7049 + 0.2951e^{-4.1317\eta_{s1}})f'_c \quad (7)$$

$$E_{cc} = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f'_{cc}} \quad (8)$$

式中,  $f'_{cc}$  为考虑钢筋锈蚀影响的混凝土抗压强度;  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $\eta_{s1}$  为节点核心区箍筋锈蚀率, 如果核心区未配箍筋, 可用框架柱纵筋锈蚀率代替;  $E_{cc}$  为考虑钢筋锈蚀影响的混凝土弹性模量。

## 2 锈蚀节点承载力计算模型

对于钢筋混凝土框架节点, 核心区抗剪强度主要由箍筋与混凝土共同承担, 适当的轴压力可增大框架节点抗剪强度。本文根据桁架模型计算箍筋对节点区抗剪贡献值, 对于混凝土项, 在桁架模型基础上, 基于混凝土被斜裂缝劈裂而导致最终破坏(Zararis 等, 2001; Tureyen 等, 2003), 计算混凝土提供的抗剪强度。

### 2.1 锈蚀箍筋提供的抗剪贡献值 $V_s$

根据钢筋混凝土框架节点建立桁架模型, 如图 2 所示, 通常拉杆由钢筋提供, 水平拉杆代表节点核心区箍筋, 竖直拉杆代表框架柱受拉纵筋; 压杆代表受压混凝土的作用, 竖直压杆由受压区混凝土和受压钢筋共同提供, 斜压杆由受压混凝土构成; 拉杆和压杆之间通过结点连接。

由于框架节点核心区受力情况复杂, 且影响因素众多, 依据美国混凝土结构规范 ACI 318—2014 中计算抗剪强度的桁架模型, 本文偏保守地取斜压杆与竖直拉杆夹角  $\theta$  为  $45^\circ$ , 则由桁架模型受力机理可知承担剪力的箍筋面积为:

$$A_s = n'\pi R_{s1}^2 d/s \quad (9)$$

式中,  $n'$  为箍筋肢数;  $R_{s1}$  为锈蚀箍筋剩余半径;  $d$  为框架节点核心区有效高度;  $s$  为箍筋间距。

据此建立的锈蚀箍筋抗剪贡献值为:

$$V_s = f_{yc} A_s \quad (10)$$

式中,  $f_{yc}$  为框架节点核心区锈蚀箍筋屈服强度。

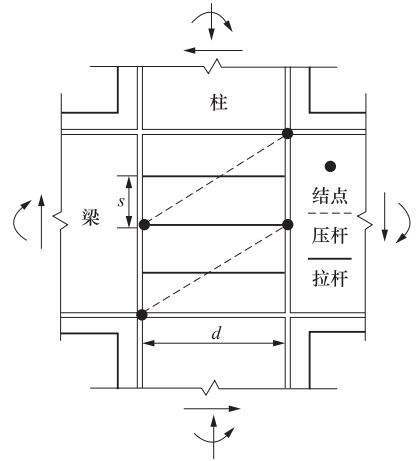


图 2 节点桁架模型

Fig. 2 Truss model of concrete joints

## 2.2 混凝土提供的抗剪贡献值 $V_c$

对于钢筋混凝土框架节点, 本文以节点核心区混凝土因斜裂缝劈裂而导致最终破坏为依据 (He 等, 2016; Walraven 等, 2012; Rangan, 1991), 计算核心区混凝土抗剪贡献值:

$$V_c = \beta_{\text{size}} b c f_{\text{ts}} \quad (11)$$

式中,  $\beta_{\text{size}}$  为考虑剪切脆性破坏的尺寸效应修正系数;  $b$  为框架柱截面宽度;  $c$  为受压区高度;  $f_{\text{ts}}$  为劈裂抗拉强度。

式 (11) 中  $f_{\text{ts}}$  可参照欧洲规范 Eurocode 2 (2004) 的规定取为:

$$f_{\text{ts}} = 0.3(f'_c)^{2/3} \quad (12)$$

混凝土劈裂抗拉强度  $f_{\text{tsc}}$  可由下式求得:

$$f_{\text{tsc}} = 0.3(f'_{\text{cc}})^{2/3} \quad (13)$$

研究表明, 受压区高度  $c$  主要取决于截面特征和纵筋配筋率。对于以受剪为主的框架节点, 纵筋一般需配置充足, 使得节点发生剪切破坏时, 远未达到弯曲破坏极限状态, 因此可采用线性弯曲理论计算钢筋混凝土节点受压区高度。根据 Zararis 等 (2001)、Tureyen 等 (2003) 的研究成果, 基于平截面假定, 可得锈蚀节点混凝土受压区高度为:

$$c = (\sqrt{m^2 \rho_{\text{sc}}^2 + 2m\rho_{\text{sc}}} - m\rho_{\text{sc}}) d \quad (14)$$

式中,  $m$  为锈蚀钢筋混凝土框架柱纵筋与混凝土弹性模量之比;  $\rho_{\text{sc}}$  为锈蚀钢筋混凝土框架柱纵筋配筋率。

大量试验研究表明, 混凝土等脆性材料受剪承载力存在尺寸效应, 即抗剪强度随着构件尺寸的增大而减小 (黄煜镔, 2002)。Bazant 等 (2005) 认为脆性材料破坏准则应考虑尺寸效应的影响, 基于断裂力学理论推导的混凝土构件尺寸效应修正系数为:

$$\beta_{\text{size}} = 1/\sqrt{1 + d/25d_a} \quad (15)$$

式中,  $d_a$  为混凝土中粗骨料最大粒径, 可取 20mm。

联立式 (11)、式 (12)、式 (13)、式 (14)、式 (15), 并考虑钢筋锈蚀对材料性能的影响, 可得  $V_c$  为:

$$V_c = 0.3\beta_{\text{size}} b c (f'_{\text{cc}})^{2/3} = \frac{0.3bd(f'_{\text{cc}})^{2/3} (\sqrt{m^2 \rho_{\text{sc}}^2 + 2m\rho_{\text{sc}}} - m\rho_{\text{sc}})}{\sqrt{1 + d/25d_a}} \quad (16)$$

## 2.3 轴压力提供的抗剪贡献值 $V_n$

适当的轴压力能延迟斜裂缝的出现, 并抑制斜裂缝的发展, 增大混凝土剪压区高度, 即增大框架节点桁架模型中斜压杆的等效宽度 (张仲先等, 2006), 可增大抗剪强度。因此轴压力对抗剪承载力的增大作用实质上是通过混凝土的受力实现, 而这种作用可通过轴压力对混凝土剪压区高度的增大程度体现, 即将混凝土项提供的抗剪承载力乘以由轴压比确定的剪压区高度增大系数 ( $\gamma$ ), 该系数可由《混凝土结构设计规范》中轴心受压柱抗剪强度计算公式中的轴力项除以混凝土项大致确定:

$$\gamma = 0.04k f_c b / f_t d \quad (17)$$

式中,  $k$  为轴压比, 当  $k > 0.3$  时取  $k = 0.3$ ;  $f_c$  为混凝土抗压强度设计值;  $f_t$  为混凝土抗拉强度设计值。

因此, 锈蚀节点轴压力提供的抗剪贡献值  $V_n$  为:

$$V_n = \gamma V_c \quad (18)$$

#### 2.4 耦合作用对锈蚀节点抗剪强度的影响

对于锈蚀节点，其抗剪强度不仅受钢筋与混凝土材料性能劣化的影响，还因二者劣化耦合作用而降低（吴元周等，2015）。上文分析仅考虑材料性能降低对抗剪强度的影响，本节将分析钢筋锈蚀与混凝土劣化的耦合作用对锈蚀节点抗剪强度的影响。

钢筋强度利用程度主要取决于钢筋与混凝土的有效粘结强度。钢筋锈蚀与混凝土碳化使得钢筋与混凝土之间的粘结性能显著退化，对节点区受拉箍筋与混凝土的协同受力产生很大影响，赵羽习（2001）提出钢筋锈蚀率对钢筋混凝土协同工作的影响可用箍筋项受剪承载力折减系数表示：

$$V'_s = \alpha V_s \quad (19)$$

$$\alpha = 1.0168 - 1.4 \eta_{s1} \quad (20)$$

式中， $V'_s$  为考虑粘结退化作用的锈蚀箍筋抗剪强度； $\alpha$  为考虑粘结退化作用的锈蚀箍筋抗剪强度折减系数； $\eta_{s1}$  为节点核心区箍筋锈蚀率， $\eta_{s1} < 0.012$  时  $\alpha = 1$ 。

钢筋锈蚀产生的锈蚀产物会使钢筋周围混凝土产生裂缝，进而降低混凝土抗剪强度。根据上文分析的混凝土抗剪受力机制和理想状态下钢筋均匀锈蚀的截面变化，可假定锈蚀产物在钢筋周围均匀分布，且钢筋锈蚀后增大的半径在周围混凝土中产生大小相等的锈胀裂缝，即混凝土裂缝深度为锈蚀钢筋半径膨胀值  $X$ 。如图 3 所示，由于锈蚀钢筋周围产生裂缝的混凝土退出抗剪工作，由上文分析及节点核心区配筋关系可知锈蚀节点核心区混凝土有效抗剪区域为：

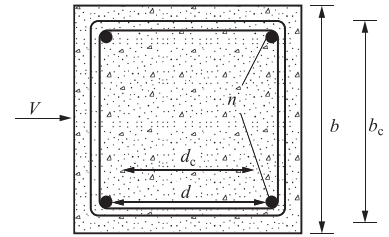


图 3 锈蚀节点有效抗剪截面

Fig. 3 Effective shear section of corroded joints

$$d_c = d - 2X_{s1} - 2X_{s2} \quad (21)$$

$$b_c = b - 4X_{s1} - 2nX_{s2} \quad (22)$$

式中， $d_c$  为考虑混凝土裂缝的框架节点核心区有效高度； $b_c$  为考虑混凝土裂缝的框架柱截面有效宽度； $X_{s1}$  为核心区箍筋锈蚀产生的混凝土裂缝深度； $X_{s2}$  为框架柱纵筋锈蚀产生的混凝土裂缝深度； $n$  为框架柱一侧的纵筋数。

钢筋锈蚀产生的混凝土微裂缝会减小框架节点混凝土截面抗剪面积，进而降低混凝土提供的抗剪强度。锈蚀节点核心区混凝土抗剪承载力的降低程度可用有效抗剪截面面积折减系数表示：

$$V'_c = \beta V_c \quad (23)$$

$$\beta = b_c d_c / bd \quad (24)$$

式中， $V'_c$  为考虑混凝土裂缝作用的混凝土项抗剪承载力； $\beta$  为考虑混凝土裂缝作用的混凝土项抗剪承载力折减系数。同理，考虑混凝土裂缝影响的轴压力项提供的抗剪贡献值为：

$$V'_n = \gamma V'_c \quad (25)$$

#### 2.5 锈蚀节点抗剪强度 $V$

综上所述，将锈蚀节点核心区各项提供的抗剪强度相加，建立锈蚀节点抗剪强度计算公式为：

$$V = V'_s + V'_c + V'_n \quad (26)$$

### 3 模型验证及分析

根据本文建议的计算方法,对 11 组(郑山锁等, 2015; 周静海等, 2015)锈蚀节点受剪承载力进行计算分析,各试件试验情况与理论计算结果如表 1 所示,统计情况如图 4 所示。由表 1、图 4 可知,锈蚀节点抗剪强度试验值与计算值之比的平均值为 0.951,方差为 0.075,吻合较好,故本文建议的方法可用于锈蚀节点抗剪强度的预测。

表 1 锈蚀节点抗剪承载力试验值与计算值对比

Table 1 Comparison of shear strength between test values and calculation values of corroded joints

文献	试件	截面尺寸( $b \times h$ )/mm		轴压比	节点配筋			$V_t$ /kN	节点锈蚀率 $\eta_s$ /%			$V_p$ /kN	$V_t/V_p$
		梁	柱		梁筋	柱筋	箍筋		梁筋	柱筋	箍筋		
郑山锁等 (2015)	JD-1	150×250	200×200	0.3	2×3 $\Phi$ 12	2×3 $\Phi$ 16	$\phi$ 6@60	54.3	0.00	0.00	0.00	63.0	0.862
	JD-2	150×250	200×200	0.3	2×3 $\Phi$ 12	2×3 $\Phi$ 16	$\phi$ 6@60	50.3	1.98	2.23	3.72	52.9	0.951
	JD-3	150×250	200×200	0.3	2×3 $\Phi$ 12	2×3 $\Phi$ 16	$\phi$ 6@60	46.8	2.76	3.13	6.38	48.3	0.969
	JD-4	150×250	200×200	0.3	2×3 $\Phi$ 12	2×3 $\Phi$ 16	$\phi$ 6@60	42.7	4.36	5.02	10.57	41.6	1.026
	JD-5	150×250	200×200	0.1	2×3 $\Phi$ 12	2×3 $\Phi$ 16	$\phi$ 6@60	40.6	1.92	2.34	6.41	46.7	0.869
	JD-6	150×250	200×200	0.45	2×3 $\Phi$ 12	2×3 $\Phi$ 16	$\phi$ 6@60	47.4	2.53	3.14	6.82	47.7	0.994
周静海等 (2015)	JH-1	170×300	250×250	0.2	2×2 $\Phi$ 20	2×2 $\Phi$ 20	—	35.4	0	0	—	36.6	0.967
	JH-2	170×300	250×250	0.2	2×2 $\Phi$ 20	2×2 $\Phi$ 20	—	32.6	2	2	—	33.1	0.985
	JH-3	170×300	250×250	0.2	2×2 $\Phi$ 20	2×2 $\Phi$ 20	—	26.7	5	5	—	30.3	0.881
	JH-4	170×300	250×250	0.2	2×2 $\Phi$ 20	2×2 $\Phi$ 20	—	24.9	10	10	—	26.9	0.926
	JH-5	170×300	250×250	0.2	2×2 $\Phi$ 20	2×2 $\Phi$ 20	—	24.8	15	15	—	24.1	1.029

注:  $V_t$ 为锈蚀节点抗剪承载力试验值;  $V_p$ 为锈蚀节点抗剪承载力理论计算值

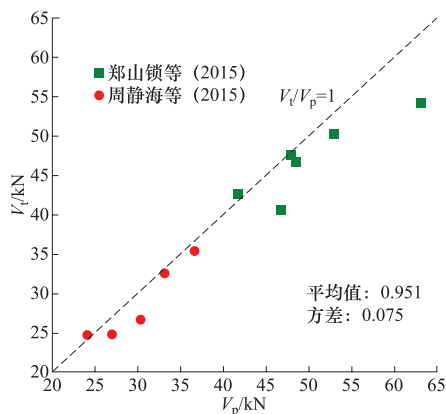


图 4 锈蚀节点抗剪强度试验值与计算值之比  
Fig. 4 Ratios between test values and calculated values of shear strength of corroded joints

本文在分析钢筋材料性能时,以实际工程中钢筋发生坑状锈蚀为依据,故建立的理论模型与实际情况较相近。而在计算锈蚀钢筋截面半径时,在钢筋均匀锈蚀的理想状态下建立公式,由于坑蚀钢筋最小截面面积小于均匀锈蚀钢筋的截面面积,所以锈蚀箍筋实际受剪承载力小于由式(10)计算得到的理论值。综上所述,本文建议的模型对箍筋抗剪贡献值的评估偏高,可能造成锈蚀节点抗剪强度理论计算值相对较大的情况。

绘制周静海等(2015)研究中得到的锈蚀节点抗剪强度试验值-柱纵筋锈蚀率变化曲线,如图 5 所示,由图 5 可知,随着锈蚀率的增大,节点核心区抗剪能力降低速度先快后慢,当纵筋锈蚀率大于 10%后,抗剪能力不再降低。出现上述现象的原因可能是:纵筋锈蚀后体积发生膨胀,在混凝土中形成锈胀裂缝(姬永生等, 2011;

姬永生等, 2011;

王海龙等, 2011; 吴庆等, 2009), 但由于裂缝影响因素十分复杂, 并非随着锈蚀率的增加线性增大(范颖芳等, 2002), 而是随着钢筋锈蚀率的增加先快速发展, 然后发展速度逐渐下降, 甚至停止发展。锈胀裂缝发展程度可影响混凝土材料性能和有效抗剪截面, 进而确定劣化混凝土提供的抗剪贡献值, 所以混凝土项抗剪贡献值也会随着钢筋锈蚀率的增大先快速降低, 然后逐渐趋于平稳。

周静海等(2015)的研究中锈蚀节点核心区未配置箍筋, 剪力全部由混凝土承担。本文建议的锈蚀节点混凝土项抗剪承载力计算模型是基于“锈蚀产物均匀分布且造成与锈蚀钢筋膨胀值相同的混凝土裂缝深度”理论假设建立的。实际上, 钢筋锈蚀在混凝土中产生的应力不均匀, 因此裂缝分布也不均匀(张仲先等, 2006), 而是呈星形不规则分布(梁岩等, 2013), 所以实际情况中混凝土裂缝深度和发展规律与理论分析具有较大差异, 这种差异会随着钢筋锈蚀率的增大而增大。由上述分析可知, 按本文建议的模型计算考虑混凝土裂缝的框架节点核心区有效区域  $d_c$ 、 $b_c$  与实际情况有所差异, 进而造成建议模型对锈蚀节点混凝土项抗剪承载力的评估可能出现偏差, 对钢筋锈蚀率较低的混凝土抗剪贡献值评估较准确。

由于轴压力对锈蚀节点抗剪强度的影响较小, 因此本文进行轴压力抗剪贡献值计算分析时, 仅分析其增大抗剪强度的原因, 并由此引入《混凝土结构设计规范》中轴心受压构件抗剪强度公式得出的混凝土抗剪贡献增大系数。因此, 本文建议的模型对轴压力抗剪贡献值的评估不够准确, 暂不能较好地反映轴压力变化对锈蚀节点抗剪强度的影响。

由于箍筋抗剪贡献在节点抗剪中起主要作用, 基于上述分析可知, 本文建议的模型在计算锈蚀节点抗剪强度时会出现理论计算值较实际值偏大的情况。

## 4 结论

(1) 考虑钢筋锈蚀使框架节点材料性能退化与钢筋混凝土劣化耦合作用, 基于桁架模型计算锈蚀箍筋承担的节点受剪承载力, 并考虑核心区混凝土和轴压力对节点抗剪强度的贡献, 建立锈蚀节点抗剪强度计算模型。

(2) 通过 11 组锈蚀节点试验数据, 对所建立的抗剪强度计算公式进行验证, 结果表明, 试验值与计算值之比的平均值为 0.951, 方差为 0.075, 吻合较好, 本文建议的分析方法可用于锈蚀节点受剪承载力的计算。

(3) 本文建议的模型对箍筋抗剪贡献值的评估偏大; 对混凝土抗剪贡献值的评估存在些许偏差, 当钢筋锈蚀率较低时评估较准确; 由于轴压力抗剪贡献模型的建立基于恒定轴力作用, 因此暂不能准确地反映轴压力变化对锈蚀节点抗剪强度的影响。总体而言, 本文建议的分析模型在计算锈蚀节点抗剪强度理论值时偏大。

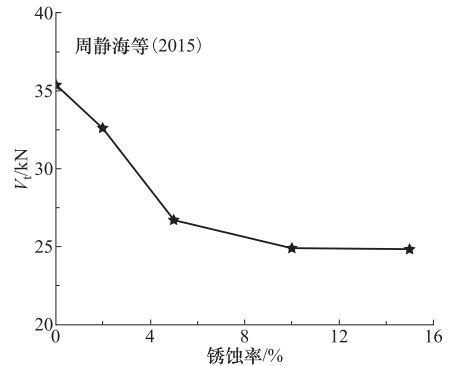


图 5 锈蚀节点抗剪强度试验值-纵筋锈蚀率变化曲线

Fig. 5 Curve of shear strength of corroded joints and corrosion ratio of longitudinal steel bars

## 参考文献

- 范颖芳, 周晶, 黄振国, 2002. 受腐蚀混凝土构件中混凝土膨胀内应力的研究. 四川建筑科学研究, **28** (4): 10—12.
- 贺志坚, 张兵, 张连德等, 1991. 钢筋混凝土框架节点抗剪机理探讨. 全国第九届混凝土结构节点与连接学术会议论文集.
- 黄煜镔, 2002. 混凝土脆性与力学参数的尺寸效应及其相互关系的研究. 重庆: 重庆大学.
- 姬永生, 袁迎曙, 宋萌等, 2011. 不同锈蚀条件下混凝土内钢筋锈蚀物膨胀性能比较和机理分析. 北京工业大学学报, **37** (11): 1677—1683.
- 梁岩, 罗小勇, 2013. 钢筋锈蚀对混凝土力学性能的影响研究. 四川建筑科学研究, **39** (4): 108—111, 159.
- 任海洋, 2010. 不同环境下钢筋锈蚀产物的力学性能研究. 杭州: 浙江大学.
- 唐九如, 1989. 钢筋混凝土框架节点抗震. 南京: 东南大学出版社.
- 王海龙, 金伟良, 孙晓燕, 2008. 基于断裂力学的钢筋混凝土保护层锈胀开裂模型. 水利学报, **39** (7): 863—869.
- 王海龙, 李朝红, 徐光兴, 2011. 带肋钢筋与混凝土粘结性能的微观数值模拟. 西南交通大学学报, **46** (3): 365—372.
- 吴庆, 袁迎曙, 蒋建华等, 2009. 锈蚀钢筋与混凝土黏结机理试验研究. 中国矿业大学学报, **38** (5): 685—691.
- 吴元周, 吕恒林, 方忠年等, 2015. 钢筋锈蚀及混凝土劣化耦合对梁构件力学性能的影响. 中国矿业大学学报, **44** (5): 793—799.
- 张誉, 蒋利学, 2003. 混凝土结构耐久性概论. 上海: 上海科学技术出版社.
- 张仲先, 黄彩萍, 2006. 柱轴力对框架外节点核心区水平抗剪能力的影响. 华中科技大学学报(城市科学版), (4): 20—22.
- 赵羽习, 2001. 钢筋混凝土结构粘结性能和耐久性的研究. 杭州: 浙江大学.
- 郑山锁, 孙龙飞, 刘小锐等, 2015. 近海大气环境下锈蚀 RC 框架节点抗震性能试验研究. 土木工程学报, **48** (12): 63—71.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2015. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范 [2015 版]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 周静海, 崔俊, 王凤池等, 2015. 锈蚀钢筋混凝土框架节点力学性能退化研究. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), **31** (4): 613—620.
- ACI 318—2014 Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington (MI): American Concrete Institute.
- Bazant Z. P., Yu Q., 2005. Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups. II: Verification and calibration. ASCE Journal of Structural Engineering, **131**(12): 1886—1897.
- Eurocode 2, 2004. Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN(Committee for Standardization).
- He Z. Q., Liu Z., John M. Z., 2016. Simplified shear design of slender reinforced concrete beams with stirrups. ASCE Journal of Structural Engineering, **142**(2): 06015003.
- Kitayama K., Otani S., Aoyama H., 1991. Development of design criteria for RC Interior beam-column joints,



- design of beam-column joints for seismic resistance. SP123, ACI.
- Lee H. S., Noguchi T., Tomosawa F., 1998. FEM analysis for structural performance of deteriorated RC structures due to rebar corrosion. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions. Tromso, Norway.
- Rangan B. V., 1991. Web crushing strength of reinforced and prestressed concrete beams. *ACI Structural Journal*, **88**(1): 12—16.
- Rodriguez J., Ortega L. M., Casal J., 1994. Corrosion of reinforcing bars and service life of reinforced concrete structures: corrosion and bond deterioration. International Conference on Concrete Across Borders. Odense, Denmark.
- Rodriguez J., Ortega L. M., Casal J., 1997. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*, **11**(4): 239—248.
- Tureyen A. K., Frosch R. J., 2003. Concrete shear strength: another perspective. *ACI Structural Journal*, **100**(5): 609—615.
- Vecchio F. J., Collins M. P., 1986. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Structural Journal*, **83**(2): 219—231.
- Walraven J., Belletti B., Esposito R., 2012. Shear capacity of normal, lightweight, and high-strength concrete beams according to Model Code 2010. I: Experimental results versus analytical model results. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **139**(9): 1593—1599.
- Zararis P. D., Papadakis G. C., 2001. Diagonal shear failure and size effect in RC beams without web reinforcement. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **127**(7): 733—742.

## Research on Shear Strength of Interior Joints in Corroded Reinforced Concrete Frame

Xing Guohua<sup>1,2)</sup>, Wu Mingyang<sup>1)</sup>, Ding Yuanze<sup>1)</sup>,  
Chang Zhaoqun<sup>1)</sup> and Wang Zhimeng<sup>1)</sup>

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

2) School of Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

**Abstract** With the increasing of service time, due to the corrosion of steel bars, the bearing performance of reinforced concrete frame joints under erosion environment is reduced, which seriously affects the safety of building structures. Based on existing theoretical models of shear strength of reinforced concrete frame joints, the calculation formula of shear strength of corroded reinforced concrete frame joints was proposed by considering the effect of steel bars corrosion. The test results of 11 sets of corroded reinforced concrete joints were used to validate the suggested model. The results show that the ratios between test values and calculated values of shear strength of corroded joints is 0.951, and the variance is 0.075, which is in good agreement. The calculation method proposed in this paper can analyze the bearing capacity of corroded reinforced concrete frame joints.

**Key words:** Concrete structures; Corrosion; Joints; Shear strength; Coupling effect