

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201911025

## 锈蚀RC柱的概率抗剪承载力模型与校准分析\*

余波<sup>1,2,3</sup>, 丁自豪<sup>1,4</sup>, 凌干展<sup>1,5</sup>, 黄莹<sup>1,2,3</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004;  
3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西南宁 530004; 4. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031;  
5. 广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530200)

**摘要:** 为了克服传统确定性抗剪承载力模型无法合理考虑随机性所存在的不足, 综合考虑力学机制和多种随机性, 研究建立了锈蚀钢筋混凝土(RC)柱抗剪承载力分析的概率模型, 并据此提出了可以校准传统确定性模型的概率方法。首先依据桁架-拱模型的剪力传递机制, 综合考虑锈蚀对纵筋和箍筋的截面积、箍筋有效屈服强度、混凝土有效抗剪截面积的影响, 建立了锈蚀RC柱的确定性抗剪承载力模型; 然后综合考虑模型假定、试验数据和材料参数等方面所存在的随机性, 建立了抗剪承载力分析的概率模型; 最后基于概率模型的置信区间, 提出了传统确定性抗剪承载力模型的概率校准方法。分析表明, 该模型可以描述抗剪承载力的概率特性, 并评估传统确定性抗剪承载力模型的预测精度。

**关键词:** 钢筋混凝土柱; 锈蚀; 抗剪承载力; 概率模型; 概率校准

**中图分类号:** TU311.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0118-08

## Probabilistic Shear Strength Model and Its Calibration for Corroded RC Columns

YU Bo<sup>1,2,3</sup>, DING Zihao<sup>1,4</sup>, LING Ganzhan<sup>1,5</sup>, HUANG Ying<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;  
2. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, China;  
3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China;  
4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
5. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530200, China)

**Abstract:** In order to overcome the disadvantage of traditional deterministic shear strength models which cannot reasonably consider uncertainties, a probabilistic shear strength model and corresponding probabilistic calibration method for corroded reinforced concrete (RC) columns were established by taking into consideration both mechanical mechanism and uncertainties. Firstly, the deterministic shear strength model of corroded RC column was established based on the shear transfer mechanism of truss-arch model by considering the influences of corrosion on cross-sectional area and mechanical

\* 收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2020-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668008, 51738004)、广西杰出青年科学基金项目(2019GXNSFFA245004)、广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281344)资助

作者简介: 余波(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事混凝土耐久性、结构可靠度与结构抗震研究。

E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn

通讯作者: 黄莹(1979—), 女, 讲师, 硕导, 博士。主要从事混凝土结构力学分析研究。E-mail: Huangying@gxu.edu.cn

properties of steel bar as well as effective shear area of concrete. Then the probabilistic shear strength model was established by considering the uncertainties from model assumption, experimental data and material parameters. Finally, the probabilistic calibration method for the traditional deterministic shear strength models was proposed based on the confidence internals of probabilistic model. Analysis shows that the model can represent the probabilistic characteristics of shear strength and calibrate the prediction accuracy of traditional deterministic shear strength models.

**Keywords:** reinforced concrete column; corrosion; shear strength; probabilistic model; probabilistic calibration

## 引言

钢筋混凝土(RC)柱是建筑、桥梁等工程结构的重要受力构件。大量的震害分析和研究表明,二十世纪七、八十年代之前修建的RC柱普遍存在配筋不足和箍筋间距过大等缺陷,在地震等侧向荷载作用下极易发生受剪破坏<sup>[1-2]</sup>。同时,RC柱在长期的服役过程中,由于混凝土碳化和氯盐侵蚀等作用导致钢筋时常发生锈蚀,不仅会造成钢筋的截面积减小和力学性能降低<sup>[3-4]</sup>,而且其锈胀产物会诱导混凝土保护层的开裂或剥落<sup>[5-6]</sup>,从而降低RC柱的抗剪承载能力,危害在役结构的安全性。因此,准确分析锈蚀RC柱的抗剪承载力对于在役混凝土结构的安全性分析与评定具有重要意义。

国内外研究者基于未锈蚀RC柱的抗剪承载力模型,建立了多种锈蚀RC柱的抗剪承载力模型。其中,文献[7]和文献[8]分别基于规范[9]和规范[10]中的抗剪承载力计算公式,通过引入与纵筋锈蚀程度相关的修正系数来考虑锈蚀对混凝土抗剪承载力贡献的影响,同时考虑锈蚀箍筋的有效屈服强度,建立了锈蚀RC柱的抗剪承载力模型,但均忽略了锈蚀对箍筋截面积的影响;文献[11-13]的模型在未锈蚀RC柱的抗剪承载力模型<sup>[14]</sup>基础上,分别选取不同的经验位移延性折减系数,并考虑锈蚀对箍筋或混凝土抗剪承载力贡献的影响,建立了锈蚀RC柱的抗剪承载力模型。文献[11]通过引入与箍筋锈蚀程度相关的经验系数,从整体上考虑了钢筋锈蚀对抗剪承载力的影响,但是不能分别反映锈蚀对箍筋和混凝土抗剪贡献的影响;文献[12]的模型只考虑了锈蚀对箍筋有效截面积的影响,而没有考虑箍筋锈蚀后的有效屈服强度和混凝土劣化后的有效抗剪截面积;文献[13]综合考虑了锈蚀对箍筋的截面积和屈服强度以及对保护层混凝土劣化的

影响,但是属于确定性模型,无法合理考虑模型假定、试验数据和材料参数等因素存在的随机性。因此,有必要研究建立一种综合考虑力学机制和随机性影响的锈蚀RC柱的抗剪承载力模型。

鉴于此,本文首先基于RC柱的桁架-拱模型,并考虑锈蚀对各种因素的影响,提出了锈蚀RC柱的确定性抗剪承载力模型,然后综合考虑模型假定、试验数据和材料参数等方面存在的随机性,建立了锈蚀RC柱抗剪承载力分析的概率模型,进而提出了可以校准传统确定性抗剪承载力模型的概率方法。

## 1 确定性抗剪承载力模型

根据RC柱抗剪机理分析的桁架-拱模型<sup>[15]</sup>,在竖向轴压荷载 $P$ 和水平剪力 $V$ 的共同作用下,RC柱的抗剪承载力由桁架模型和拱模型所提供的抗剪承载力贡献组成。由于锈蚀会导致钢筋和混凝土的几何参数和力学性能发生劣化,从而造成桁架模型和拱模型的抗剪承载力贡献降低。因此,锈蚀RC柱的抗剪承载力 $V_{nc}$ 可以描述为:

$$V_{nc} = V_{tc} + V_{ac} \quad (1)$$

式中, $V_{tc}$ 和 $V_{ac}$ 分别为桁架模型和拱模型的抗剪承载力贡献。

在桁架模型中<sup>[15]</sup>,水平方向的力由箍筋承担,根据力平衡条件可知:

$$A_{svc} f_{yvc} = (f_2 \sin^2 \theta_c - f_1 \cos^2 \theta_c) b_c s \quad (2)$$

式中, $f_{yvc}$ 为锈蚀箍筋的有效屈服强度; $f_1$ 和 $f_2$ 分别为混凝土压杆的斜拉平均应力和斜压平均应力; $\theta_c$ 为锈蚀RC柱的临界斜裂缝倾角; $s$ 为箍筋间距; $b_c$ 为锈蚀RC柱的有效截面宽度; $A_{svc}$ 为锈蚀箍筋的最小剩余截面积:

$$A_{svc} = (1 - \eta_{vs}) A_{sv} \quad (3)$$

式中, $\eta_{vs}$ 为箍筋的最大截面锈损率; $A_{sv}$ 为未锈蚀箍

筋的截面积。

其中,  $f_{yvc}$  可以根据箍筋的截面锈损率确定<sup>[16]</sup>:

$$f_{yvc} = \begin{cases} f_{yv}, & \eta_{vs} < 5\% \\ \frac{0.985 - 1.028\eta_{vs}}{1 - \eta_{vs}} f_{yv}, & \eta_{vs} \geq 5\% \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $f_{yv}$  为箍筋未锈蚀时的屈服强度。

根据混凝土保护层厚度  $c$ 、箍筋间距和箍筋锈蚀程度, 可以确定锈蚀 RC 柱的有效截面宽度<sup>[17]</sup>:

$$b_c = \begin{cases} b, & \eta_{vs} \leq 30\% \\ b - 2(c + d_s) + \frac{s}{5.5}, & \eta_{vs} > 30\%, s \leq 5.5c \\ b - \frac{5.5}{s}(c + d_s)^2, & \eta_{vs} > 30\%, s > 5.5c \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $b$  为 RC 柱锈蚀前的截面宽度;  $d_s$  为箍筋锈蚀前的直径。

考虑到钢筋锈蚀前后的弹性模量变化不大<sup>[18]</sup>, 锈蚀 RC 柱的临界斜裂缝倾角  $\theta_c$  的计算模型为<sup>[19]</sup>:

$$\theta_c = \arctan \left( \frac{0.608\rho_{vc}\gamma_E + \zeta_1 \frac{\rho_{vc}A_{vc}}{\rho_{lc}A_{gc}}}{1 + 4\rho_{vc}\gamma_E} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

式中,  $E_s$  为钢筋锈蚀前的弹性模量;  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $\gamma_E = E_s/E_c$  为弹性模量比;  $\zeta_1$  为 RC 柱的边界条件系数, 两端固定时取  $\zeta_1 = 0.57$ , 一端固定一端铰接时取  $\zeta_1 = 1.57$ ;  $A_{vc} = b_c d_v$ , 为锈蚀 RC 柱截面的有效抗剪面积 ( $\text{mm}^2$ ), 其中,  $d_v$  为柱截面两侧纵向钢筋的中心距 (mm);  $\rho_{vc} = A_{svc}/(bs)$  为锈蚀 RC 柱的配箍率;  $\rho_{lc} = (1 - \eta_{ls})A_l/A_{gc}$ , 为锈蚀 RC 柱的纵筋配筋率,  $A_l$  为未锈蚀纵筋的截面积,  $A_{gc} = b_c d_c$ , 为锈蚀 RC 柱的截面积,  $\eta_{ls}$  为纵筋的截面锈损率。 $\eta_{ls}$  与  $\eta_m$  之间的经验关系为<sup>[16]</sup>:

$$\eta_{ls} = \begin{cases} 0.013 + 0.987\eta_m, & \eta_m < 10\% \\ 0.061 + 0.939\eta_m, & 10\% \leq \eta_m < 20\% \\ 0.129 + 0.871\eta_m, & 20\% \leq \eta_m < 30\% \\ 0.199 + 0.801\eta_m, & 30\% \leq \eta_m < 40\% \end{cases} \quad (7)$$

式中, 质量锈损率  $\eta_m = (m_s - m_{sc})/m_s$ ,  $m_{sc}$  为钢筋锈蚀后的质量,  $m_s$  为未锈蚀钢筋的质量。

$d_c$  为锈蚀 RC 柱的有效截面高度, 与  $\eta_{vs}$  之间的经验关系为<sup>[20]</sup>:

$$d_c = \begin{cases} d, & \eta_{vs} < 10\% \\ d - 2c, & \eta_{vs} \geq 10\% \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $d$  为未锈蚀 RC 柱的截面高度。

根据摩尔应力圆分析<sup>[15]</sup>, 结合公式(2)可以确定锈蚀 RC 柱桁架模型的抗剪承载力贡献值  $V_{tc}$  为:

$$V_{tc} = \frac{A_{svc} f_{yvc} d_v}{s} \cot \theta_c + f_1 b_c d_v \cot \theta_c \quad (9)$$

由公式(9)可知, 桁架模型中箍筋和混凝土压杆所承担的抗剪承载力贡献分别为:

$$V_{sc} = \frac{A_{svc} f_{yvc} d_v}{s} \cot \theta_c \quad (10)$$

$$V_{cc} = f_1 b_c d_v \cot \theta_c = \beta_c b_c d_v \sqrt{f'_c} \quad (11)$$

式中,  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $\beta_c$  为混凝土的抗剪承载力贡献修正系数<sup>[21-22]</sup>:

$$\beta_c = \frac{0.40}{1 + 1500\epsilon_{xc}} \quad (12)$$

式中,  $\epsilon_{xc}$  为锈蚀 RC 柱截面中点处的纵向应变<sup>[22]</sup>, 其表达式为:

$$\epsilon_{xc} = \begin{cases} 0.003, & \epsilon_{xc} \geq 0.003 \\ 0.5V/E_s A_{lc}, & 0 < \epsilon_{xc} < 0.003 \\ 0.5V/(E_s A_{lc} + E_c A_g), & -0.0002 \leq \epsilon_{xc} \leq 0 \\ -0.0002, & \epsilon_{xc} < -0.0002 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $V = V_{tc}L/\zeta_2 d_v - 0.5P + 0.5V_{tc} \cot \theta_c$ ,  $L$  为锈蚀 RC 柱柱高,  $\zeta_2$  为构件的边界条件系数, 对于两端固定的 RC 柱, 取  $\zeta_2 = 2$ , 对于一端铰接一端固定的 RC 柱, 取  $\zeta_2 = 1$ ;  $A_{lc}$  为锈蚀 RC 柱的纵向受拉钢筋的截面积。

根据桁架模型与拱模型之间的变形协调条件, 可以确定拱模型的抗剪承载力  $V_{ac}$  为<sup>[15]</sup>:

$$V_{ac} = \frac{K_{ac}}{K_{tc}} V_{tc} \quad (14)$$

式中,  $K_{ac}$  和  $K_{tc}$  分别为锈蚀 RC 柱拱模型和桁架模型的抗剪刚度, 计算公式分别为<sup>[15, 23]</sup>:

$$K_{ac} = E_c b_c c_{ac} \sin^2 \alpha_c \cos \alpha_c^2 \quad (15)$$

$$K_{tc} = \frac{\gamma_E \rho_{vc} \cot^2 \theta_c}{1 + 4\gamma_E \rho_{vc} (1 + 0.39 \cot^2 \theta_c)^2} E_c A_{vc} \quad (16)$$

式中,  $\alpha_c$  为对角拱压杆与 RC 柱纵轴方向的夹角, 其计算公式为:

$$\alpha_c = \arctan \left( \frac{d_c - x_c}{\zeta_3 L} \right) \quad (17)$$

式中, 当 RC 柱两端固定时取  $\zeta_3 = 1$ , 一端铰接一端固定时取  $\zeta_3 = 2$ 。  $x_c$  为锈蚀 RC 柱的中性轴宽度<sup>[24]</sup>:

$$x_c = \left( 0.25 + 0.85 \frac{P}{f'_c A_{gc}} \right) d_c \quad (18)$$

式(15)中,  $c_{ac}$  为锈蚀 RC 柱拱模型中拱压杆水平方向的宽度, 其表达式为:

$$c_{ac} = \begin{cases} x_c - c, \eta_{vs} < 10\% \\ x_c - 0.5c, \eta_{vs} \geq 10\% \end{cases} \quad (19)$$

根据式(14)~(19)可以确定锈蚀 RC 柱拱模型的抗剪承载力贡献  $V_{ac}$  为:

$$V_{ac} = \kappa_c V_{tc} \quad (20)$$

式中,  $\kappa_c$  为锈蚀 RC 柱桁架模型与拱模型的抗剪刚度比值, 其计算公式为:

$$\kappa_c = \frac{c_{ac} \sin^2 2\alpha_c}{4\gamma_E \rho_{vc} d_v \cot^2 \theta_c} [1 + 4\gamma_E \rho_{vc} (1 + 0.39 \cot^2 \theta_c)^2] \quad (21)$$

联立式(9)和式(20), 可以建立锈蚀 RC 柱的确定性抗剪承载力模型:

$$V_{nc}^t = \left( \beta_c b_c d_v \sqrt{f_c'} + f_{yvc} \frac{A_{sv} d_v}{s} \cot \theta_c \right) (1 + \kappa_c) \quad (22)$$

## 2 锈蚀 RC 柱的概率抗剪承载力模型

### 2.1 概率抗剪承载力模型的解析表达式与先验信息

由式(22)可知, 参数  $b_c$ 、 $d_v$ 、 $f_c'$ 、 $f_{yvc}$ 、 $A_{sv}$  和  $s$  等可以通过设计值或公式计算确定, 可视为确定性参数。而参数  $\beta_c$ 、 $\cot \theta_c$ 、 $\kappa_c$  需要通过一定的模型假定和试验数据拟合分析确定, 存在一定的随机性, 且计算过程较为复杂, 尤其是参数  $\beta_c$  的求解涉及迭代求解。因此, 有必要综合考虑由于模型假定引起的主观不确定性以及由于施工误差和不均匀锈蚀等造成的试验数据和材料参数的客观不确定性, 建立锈蚀 RC 柱的概率抗剪承载力模型。本文将  $\beta_c$ 、 $\cot \theta_c$ 、 $\kappa_c$  分别描述为概率模型参数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$ , 同时考虑系统误差的影响, 建立了综合考虑力学机制和不确定性的锈蚀 RC 柱概率抗剪承载力模型:

$$V_{nc}^p = \left( \alpha_1 b_c d_v \sqrt{f_c'} + f_{yvc} \frac{A_{sv} d_v}{s} \alpha_2 \right) (1 + \alpha_3) + \varepsilon \sigma \quad (23)$$

式中,  $V_{nc}^p$  为锈蚀 RC 柱的概率抗剪承载力预测值;  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T$ , 为概率模型参数;  $\varepsilon \sigma$  为模型误差, 其中,  $\varepsilon \sim N(0, 1)$ ,  $\sigma$  为模型误差的标准差。

根据贝叶斯公式<sup>[25]</sup>,  $\alpha$  的后验分布为:

$$P(\alpha | V_{nc}^p) = \frac{P(\alpha) P(V_{nc}^p | \alpha)}{\int P(\alpha) P(V_{nc}^p | \alpha) d\alpha} \quad (24)$$

式中,  $P(\alpha | V_{nc}^p)$  为  $\alpha$  的后验分布概率密度函数;

$P(\alpha)$  为  $\alpha$  的先验分布概率密度函数;  $P(V_{nc}^p | \alpha)$  为似然函数;  $\int P(\alpha) P(V_{nc}^p | \alpha) d\alpha$  为正则化因子, 求解过程较为困难。鉴于此, 采用 MCMC 法<sup>[26-27]</sup> 确定  $\alpha$  的后验分布信息。

由式(24)可知, 为了确定  $\alpha$  的后验分布信息, 首先需要确定  $\alpha$  的先验分布信息。根据文献[11-13, 28-32]中的 54 组试验数据, 结合式(12)、式(6)和式(21), 对参数  $\beta_c$ 、 $\cot \theta_c$ 、 $\kappa_c$  的计算值进行统计分析, 如图 1 所示。由图 1 所知, 参数  $\beta_c$ 、 $\cot \theta_c$ 、 $\kappa_c$  均匀分布在其均值附近, 因此将其均值视为模型参数  $\alpha$  的先验均值, 同时, 通过研究发现, 为了保证模型参数后验分布的平稳性和收敛性, 变异系数取值不宜过小, 因此本文假定  $\alpha$  的变异系数为 0.6, 且服从正态分布, 进而可以确定  $\alpha$  的先验分布信息, 见表 1。

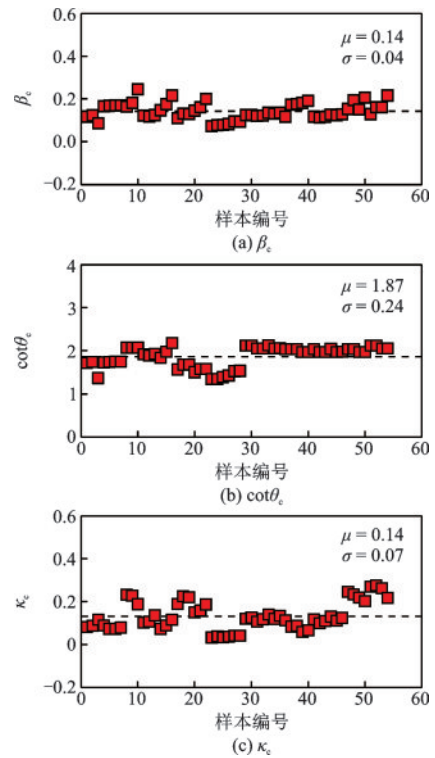


图 1  $\beta_c$ 、 $\cot \theta_c$  和  $\kappa_c$  的统计信息

Fig.1 Statistical information of  $\beta_c$ ,  $\cot \theta_c$  and  $\kappa_c$

表 1  $\alpha$  的先验分布信息

Table 1 Prior information of  $\alpha$

模型参数	均值	标准差	变异系数	分布类型
$\alpha_1$	0.14	0.084	0.6	正态分布
$\alpha_2$	1.87	1.122	0.6	正态分布
$\alpha_3$	0.14	0.084	0.6	正态分布

## 2.2 概率抗剪承载力的数字特征和经验分布类型

基于收集的54组剪切破坏型锈蚀RC柱的试验数据,把每一组数据视为一个工况,采用基于DRAM算法的MCMC法可以产生大量模型参数 $\alpha$ 的后验分布样本,通过对这些随机样本进行Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验可以确定模型参数 $\alpha$ 的后验分布类型。本文通过MCMC法产生10万组模型参数的后验分布值,并从达到稳态后的样本中选取9组容量为1000的样本进行K-S检验,当显著水平取0.05时,K-S检验的限值为0.0430,若模型参数抽样样本的显著性水平小于此限值,则表示所检验的样本总体服从该分布。模型参数 $\alpha$ 的K-S检验计算结果统计量见表2。由表2可知, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ 均不拒绝服从正态分布。

表2  $\alpha$ 的K-S检验统计量

Table 2 Statistics of K-S test of  $\alpha$

概率模型参数	正态分布	对数正态分布	伽马分布	瑞利分布	威布尔分布
$\alpha_1$	0.0231	×	0.0361	×	0.0212
$\alpha_2$	0.0246	0.0187	0.0159	×	×
$\alpha_3$	0.0395	×	×	0.0206	0.0234

注:“×”表示模型参数 $\alpha$ 的后验值不服从对应的分布类型

经统计分析, $\alpha$ 的后验分布统计信息见表3。由表3可知,模型参数之间呈负相关。基于式(22)的锈蚀RC柱确定性抗剪承载力计算表达式,结合模型参数 $\alpha$ 的10万组后验分布数据,可以分别确定54个试验工况中每个工况所对应的10万组抗剪承载力后验值,通过对其进行K-S检验,可以发现锈蚀RC柱的概率抗剪承载力后验随机样本不拒绝服从正态分布和对数正态分布,考虑到抗剪承载力值为非负数,因此采用对数正态分布作为锈蚀RC柱抗剪承载力的分布类型。

表3  $\alpha$ 的后验分布信息

Table 3 Posterior information of  $\alpha$

概率模型参数	均值	标准差	分布类型	相关系数		
				$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
$\alpha_1$	0.1396	0.0317	正态分布	1.00	-0.61	-0.26
$\alpha_2$	1.5410	0.1980	正态分布	-0.61	1.00	-0.51
$\alpha_3$	0.1381	0.0736	正态分布	-0.26	-0.51	1.00

## 2.3 概率抗剪承载力均值模型的对比较验证分析

基于54个试验工况,通过MCMC法对每个工况产生10万组后验值,通过统计分析可以计算出每个工况的锈蚀RC柱抗剪承载力概率后验均值,通过与54组试验数据测试值进行对比分析,可以验证由式(23)所描述的锈蚀RC柱概率抗剪承载力均值的有效性,如图2所示。由图2可知,式(23)的计算值与试验值的比值散点分布在等值线附近,且大部分落在等值线的 $\pm 30\%$ 区间内,说明式(23)具有较好的计算精度。

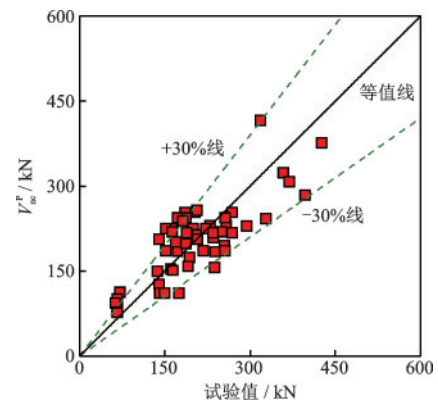


图2 抗剪承载力的计算值与试验值的散点分布

Fig.2 Scatter plot between tested and calculated shear strength

## 3 抗剪承载力模型的概率校准分析

基于每一个工况所对应的10万组后验值的统计均值和标准差,结合其服从的对数正态分布类型,可以确定锈蚀RC柱抗剪承载力的概率密度函数和累积分布函数,进而可以确定抗剪承载力在任意给定置信水平 $1 - \varphi$ 条件下的置信上限和置信下限。本文以置信水平取0.50和0.95为例,可以分别计算出锈蚀RC柱的抗剪承载力在具有50%和95%保证率情况下的置信区间,如图3所示。由图3可知,对于锈蚀RC柱,绝大部分的抗剪承载力试验数据散点分布在50%置信区间的上下限之间,且全部分布在95%置信区间的上下限之间,说明概率模型能够有效描述抗剪承载力的随机特性。

从文献中收集了5个锈蚀RC柱确定性抗剪承载力模型,见表4。基于锈蚀RC柱抗剪承载力的置

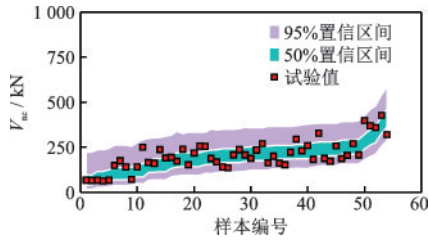


图3 试验值与置信区间的对比

Fig.3 Comparison between tested results and confidence intervals

信区间,可以对比分析现有确定性模型的预测精度,如图4所示。由图4(a)可知,本文建立的确定性抗剪承载力模型的预测值散点绝大多数落在50%

置信区间的上下限之间,表明该模型的预测结果离散性较小、计算精度较高。由图4(b)、4(e)、4(f)可知,文献[7,12-13]模型的计算值基本落在95%置信上限和50%置信下限之间,说明上述模型往往会高估锈蚀RC柱的实际抗剪承载力,其中文献[12-13]模型有部分计算值超过了95%置信上限,说明该类模型的预测精度不稳定,离散性较大。由图4(c)、4(d)可知,文献[8]模型和文献[11]模型的计算值绝大多数落在50%置信上限和95%置信下限之间,表明该类模型往往会低估锈蚀RC柱的实际抗剪承载力,但其中文献[11]模型的预测结果相对较为稳定。

表4 传统的锈蚀RC柱抗剪承载力模型

Table 4 Traditional shear strength models for corroded RC column

模型	年份	表达式	注释
文献[7]模型	2001	$V_{nc}^{e1} = \beta_1 \frac{0.2}{\lambda + 1.5} f_c b h_0 + 1.25 \frac{f_{yvc} A_{sv}}{s} h_0 + 0.07P$	
文献[8]模型	2014	$V_{nc}^{e2} = \beta_2 \frac{1.75}{\lambda + 1} f_i b h_0 + f_{yvc} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07P$	$\lambda$ 为剪跨比; $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 分别表示考虑纵筋锈蚀后的混凝土抗剪承载力贡献折减系数; $f_c$ 和 $f_i$ 分别表示混凝土轴心抗压和抗拉强度设计值; $h_0$ 为验算截面的有效高度; $A_{core}$ 为核心混凝土的截面积; $A_{cover}$ 为保护层混凝土的截面积; $A_g$ 为未锈蚀RC柱有效抗剪截面积; $\zeta$ 为与保护层混凝土开裂程度相关的折减系数
文献[11]模型	2016	$V_{nc}^{e3} = \left( \frac{1}{1 + 1.59 \frac{\eta_{vs}}{100}} \right) \left( \frac{0.7 A_{sv} f_{yv} d}{s} + \frac{0.35 \sqrt{f_c'}}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f_c'} A_g}} 0.8 A_g \right)$	
文献[12]模型	2017	$V_{nc}^{e4} = \frac{(1 - \eta_{vs}/100) A_{sv} f_{yv} d}{s} + \frac{0.5 \sqrt{f_c'}}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f_c'} A_g}} 0.8 A_g$	
文献[13]模型	2018	$V_{nc}^{e5} = \frac{A_{svc} f_{yvc} d}{s} + \left[ \frac{0.5 \sqrt{f_c'}}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f_c'} (A_{core} + \sqrt{\zeta} A_{cover})}} \right] \times 0.8 (A_{core} + \sqrt{\zeta} A_{cover})$	

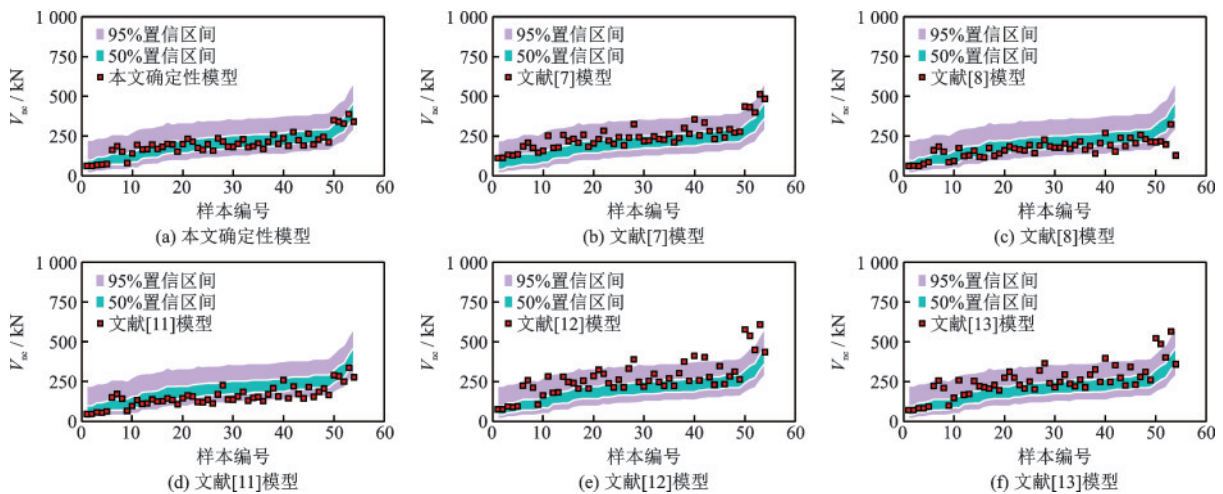


图4 基于置信区间的确定性抗剪承载力模型校准分析

Fig.4 Calibration of deterministic shear strength models based on confidence intervals

## 4 结 论

综合考虑力学机制和随机性的影响,建立了锈蚀 RC 柱的概率抗剪承载力模型,并提出了确定性抗剪承载力模型的概率校准方法。主要结论如下:

(1)基于锈蚀 RC 柱的概率抗剪承载力模型,不仅可以合理考虑由于模型假定、试验数据、材料参数等因素所造成的随机性,而且可以校准传统确定性抗剪承载力模型的计算精度。

(2)基于桁架-拱模型所建立的锈蚀 RC 柱确定性抗剪承载力模型,具有较高的计算精度,且离散性较小。

(3)校准分析表明,文献[7,12-13]模型往往会高估锈蚀 RC 柱的实际抗剪承载力,且离散性较大;而文献[8,11]模型往往会低估锈蚀 RC 柱的抗剪承载力。

### 参考文献:

- [1] Jimenez J I, Villarreal J I, Centeno M R, et al. Tehuacan, Mexico Earthquake of June 15, 1999[J], Seismological Research Letters, 1999, 70(6): 698-704.
- [2] Tran C T N, Li B. Ultimate displacement of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2013, 17: 282-300.
- [3] Fernandez I, Bairan J M, Mari A R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and  $\sigma - \epsilon$  behavior[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 772-783.
- [4] Ou Y C, Susanto Y T T, Hwasung R. Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 93-104.
- [5] Chernin L, Val D V. Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 1854-1869.
- [6] Lu C H, Jin W L, Liu R G. Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures [J]. Corrosion Science, 2011, 53(4): 1337-1347.
- [7] 颜桂云. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力性能的试验研究与承载力的理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.
- [8] 王振. 锈蚀钢筋混凝土短柱抗震性能及加固的试验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2014.
- [9] 混凝土结构设计规范:GB J10—89[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [10] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] Vu N S, Yu B, Li B. Prediction of strength and drift capacity of corroded reinforced concrete columns[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 304-318.
- [12] Zhang D W, Zhao Y X, Jin W L, et al. Shear strengthening of corroded reinforced concrete columns using pet fiber based composites [J]. Engineering Structures, 2017, 153: 757-765.
- [13] Vu N S, Li B. Seismic performance assessment of corroded reinforced concrete short columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4): 04018018.
- [14] Sezen H, Moehle J P. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1692-1703.
- [15] Pan Z F, Li B. Truss-arch model for shear strength of shear-critical reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(4): 548-560.
- [16] 惠云玲, 林志伸, 李荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析 [J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 10-13, 33.
- [17] Hui Y L, Lin Z S, Li R. Experimental study and analysis on the property of corroded rebar[J]. Industrial Construction, 1997, 27(6): 10-13, 33. (in Chinese)
- [18] Higgins C, Farrow III W C, Potisuk T, et al. Shear capacity assessment of corrosion-damaged reinforced concrete beams[R]. Washington D C: Oregon Department of Transportation, 2003.
- [19] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 586-592.
- [20] Zhang W P, Shang D F, Gu X L. Stress-strain relationship of corroded steel bars[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(5): 586-592. (in Chinese)
- [21] Kim J H, Mander J B. Influence of transverse reinforcement on the seismic performance of corroded reinforced concrete columns [J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(5): 401-408.

- ment on elastic shear stiffness of cracked concrete elements[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(8): 1798-1807.
- [20] 赵羽习, 金伟良. 锈蚀箍筋混凝土梁的抗剪承载力分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(1): 19-24.  
Zhao Y X, Jin W L. Analysis on shearing capacity of concrete beams with corroded stirrups [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(1): 19-24. (in Chinese)
- [21] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. *ACI Journal Technical Paper*, 1986, 83(2): 219-231.
- [22] Canadian Standards Association. Design of concrete structures [M]. Mississauga, Ontario, Canada: CSA Committee, 2004.
- [23] Kim J H, Mander J B. Truss modeling of reinforced concrete shear-flexure behavior[R]. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1999.
- [24] Paulay T, Priestley M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings[M]. New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [25] Bernardo J M, Smith A F M. Bayesian theory [M]. Chichester, UK: Wiley, 2009.
- [26] 张建新. 基于贝叶斯方法的有限元模型修正研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
Zhang J X. Research on the modification of finite element model based on Bayesian method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [27] Haario H, Laine M, Mira A, et al. DRAM: Efficient adaptive MCMC [J]. *Statistics and Computing*, 2006, 16(4): 339-354.
- [28] Lee H S, Kage T, Noguchi T, et al. An experimental study on the retrofitting effects of reinforced concrete columns damaged by rebar corrosion strengthened with carbon fiber sheets[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(4): 563 - 570.
- [29] Ou Y C, Chen H. Cyclic behavior of reinforced concrete beams with corroded transverse steel reinforcement [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(9): 04014050.
- [30] Vu N S. Experimental and analytical investigations on seismic behavior of corroded reinforced concrete members[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2017.
- [31] Ma G, Li H, Hwang H J. Seismic behavior of low-corroded reinforced concrete short columns in an over 20-year building structure [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 106: 90-100.
- [32] Li Q, Niu D T, Xiao Q H, et al. Experimental study on seismic behaviors of concrete columns confined by corroded stirrups and lateral strength prediction [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 704-713.

(本文责编:赵霞)