



基于板壳理论的锈蚀板柱节点变形及冲切承载力计算模型

覃健桂 朱烨斌 李易 李治 邓小芳 钱凯

COMPUTATIONAL MODEL OF DEFORMATION AND PUNCHING SHEAR CAPACITY OF CORRODED SLAB-COLUMN CONNECTION UPON PLATE AND SHELL THEORY

QIN Jian-gui, ZHU Ye-bin, LI Yi, LI Zhi, DENG Xiao-fang, QIAN Kai

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.04.0284

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同配筋率下钢筋混凝土板柱节点抗冲切承载力试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE PUNCHING AND SHEARING RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLAB–COLUMN JOINTS WITH DIFFERENT REINFORCEMENT RATIOS

工程力学. 2024, 41(S): 66-73 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.S028

锈蚀箍筋矩形柱轴压承载力试验及理论研究

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES ON AXIAL COMPRESSION CAPACITY OF RECTANGULAR COLUMNS WITH CORRODED STIRRUPS

工程力学. 2024, 41(9): 123-133 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.07.0641

火灾后混凝土连续板剩余承载力试验研究及理论分析

EXPERIMENTAL STUDY AND THEORETICAL ANALYSIS ON THE RESIDUAL CAPACITIES OF FIRE–DAMAGED CONCRETE CONTINUOUS SLABS

工程力学. 2022, 39(2): 96-109 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.12.0914

板柱节点冲剪破坏后的精细有限元分析

FINE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SLAB-COLUMN JOINTS AFTER PUNCHING SHEAR 工程力学. 2020, 37(6): 206-215 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0494

锈蚀焊接空心球节点随机抗压承载力研究

RANDOM COMPRESSION CAPACITY OF CORRODED WHSJS 工程力学. 2021, 38(5): 219–228, 238 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0472

超高性能混凝土板冲切与弯曲性能研究

RESEARCH ON PUNCHING SHEAR AND BENDING BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE SLABS 工程力学. 2021, 38(4): 30-43 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0349





订阅号:面向作者

扫码关注微信公众号,获得更多资讯信息

1

文章编号: 1000-4750(2024)00-0001-11

基于板壳理论的锈蚀板柱节点变形及 冲切承载力计算模型

覃健桂1,2,朱烨斌1,李 易3,李 治1,2,邓小芳1,2,钱 凯1,2

(1. 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室,桂林理工大学,广西,桂林 541004;
 2. 广西岩土力学与工程重点实验室,桂林理工大学,广西,桂林 541004;
 3. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室,北京 100124)

摘 要:为了高效、准确地计算钢筋锈蚀的板柱节点变形能力和冲切承载力,该文基于板壳理论建立了其荷载-挠度曲线计算模型,利用该模型可以计算锈蚀板柱节点的变形、开裂荷载以及冲切承载力。通过将板柱节点的 试验结果与该模型及不同规范中计算模型的计算结果进行对比,结果表明:该文提出的计算模型能较准确地计 算锈蚀板柱节点的荷载-挠度曲线、开裂荷载及极限承载力;相对于规范 ACI 318-19、GB 50010-2010 和 CSA A23.3-14 计算模型,该文模型的计算精度更高。

关键词: 板柱节点; 钢筋锈蚀; 板壳理论; 荷载-挠度曲线; 冲切承载力 中图分类号: TU375.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2024.04.0284

COMPUTATIONAL MODEL OF DEFORMATION AND PUNCHING SHEAR CAPACITY OF CORRODED SLAB-COLUMN CONNECTION UPON PLATE AND SHELL THEORY

QIN Jian-gui^{1,2}, ZHU Ye-bin¹, LI Yi³, LI Zhi^{1,2}, DENG Xiao-fang^{1,2}, QIAN Kai^{1,2}

Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;
 Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To calculate the deformation and punching shear capacity of a slab-column connection with corroded steel bars efficiently and accurately, a load-deflection curve computational model was established by the basis of the plate and shell theory. The computational model in this study can be used to calculate the deformation, cracking load, and punching shear capacity of the corroded slab-column connections. The test results of slab-column connections were compared with the calculation results of the computational model in this study and different standards. The results show that: the computational model proposed can predict the load-deflection curves, cracking loads and punching shear capacity of slab-column corroded connections accurately; compared with the punching shear capacity calculated by ACI 318–19, GB 50010–2010 and CSA A23.3–14, the computational model proposed has better calculation accuracy.

Key words: slab-column connection; steel rebar corroded; plate and shell theory; load-deflection curve; punching shear capacity

收稿日期: 2024-04-18; 修改日期: 2024-06-25

基金项目:国家自然科学基金区域联合重点项目(U22A20244);国家自然科学基金地区项目(52168028)

通信作者: 钱 凯(1983-), 男,浙江宁波人,教授,博士,博导,主要从事结构防灾减灾研究(E-mail: qiankai@glut.edu.cn).

作者简介: 覃健桂 (1992--), 男, 广西梧州人, 副教授, 博士, 主要从事结构防灾减灾研究 (E-mail: qinjiangui@glut.edu.cn);

朱烨斌 (2000-), 男,浙江嵊州人,硕士生,主要从事结构防灾减灾研究 (E-mail: zhuyebin@glut.edu.cn);

李 易 (1981--), 男,湖北襄阳人,教授,博士,主要从事工程结构防灾减灾研究 (E-mail: yili@bjut.edu.cn);

李 治(1991-), 男, 江西赣州人, 副教授, 博士, 主要从事结构防灾减灾研究(E-mail: lizhi@glut.edu.cn);

邓小芳 (1984-), 女,湖北公安人,副教授,博士,主要从事结构防灾减灾研究 (E-mail: dengxiaofang@glut.edu.cn).

学

结构连续倒塌指结构在发生局部损伤后,由 于不能找到有效的荷载重分布路径,进而引发损 伤在剩余结构中传播,最终导致大范围不成比例 的倒塌[1-4]。在桥梁工程、地下工程及建筑工程 中,板柱结构连接处易发生冲切破坏,导致整体 结构内力传递机制改变,从而发生连续倒塌。近 年来,佛罗里达州一栋公寓大楼的倒塌再次引起 人们对板柱结构安全性的极大关注[5]。至今,已有 学者给出了计算板柱节点的极限承载力的方法, 并且提出了许多计算模型。MUTTONI^[6]完善了临 界剪切裂缝模型,并应用于计算无腹筋板柱节点 的极限承载力。PARK 等门提出截面应变计算模 型,该模型由抗剪能力曲线和需求曲线的交点确 定临界截面的极限承载力。BROMS^[8]提出切向应 变理论模型, 该模型考虑了尺寸效应的影响, 可 用于分析对称及非对称的冲切破坏。MILLIGAN 等网以柱形状和尺寸为参数对板柱节点进行研 究,认为最小柱尺寸和有效板厚的比值是影响板 柱结构极限承载力的重要因素。NAVARRO 等^[10] 采 用有限元软件 ABAQUS 建立精细模型研究不同构 造参数对板柱节点承载力的影响。易伟建等[11] 基于抛物线形的 Mohr-Coulomb 破坏准则, 推导出 求解混凝土板柱节点冲切承载力最小上限解的偏 微分方程,并求解出了圆柱节点承载力解析解和 方柱节点承载力的级数解。朱大壮等[12]考虑包含 纵筋配筋率在内的主要影响因素,建立了适用于 钢筋混凝土无腹筋板柱抗冲切承载力计算公式。 此外,还有部分学者通过高温劣化效应[13]及节点 域混凝土替换[14]来研究板柱节点抗力性能。

钢筋锈蚀作为钢筋混凝土结构耐久性主要影响因素之一,大量学者研究了钢筋锈蚀对构件性能的影响。目前锈蚀构件的研究主要集中在锈蚀钢筋混凝土梁^[15-17]和柱^[18],对锈蚀钢筋混凝土板柱节点的研究较少。SAID^[19],Qian等^[20-21]用通电加速锈蚀的方法,研究了锈蚀率和锈蚀区域对双向钢筋混凝土板性能的影响,结果表明,在相同锈蚀率下,随着锈蚀区域的扩大,板的承载力下降的更明显。IKEHATA等^[22]用通电加速锈蚀的方法,研究了受压钢筋锈蚀引起的水平裂缝对混凝土板的抗冲切性能有显著影响。QIAN等^[23]指出目前各国规范提供的板柱节点冲切强度计算公式以及临界剪切裂缝模

型没有充分考虑钢筋锈蚀的影响,进而对临界剪 切裂缝理论进行了修正,以较好地预测锈蚀板柱 节点的极限承载力。

综上,已有学者提出了板柱节点的冲切承载 力计算模型。然而,《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[24]第3.4节对结构变形及裂缝控制做 出来要求,然而已有的计算模型无法预测节点的 开裂荷载及其变形。由于板壳理论可以通过构造 平板的边界条件,进而求解出平板在外力下的变 形及应力状态^[25-26],而板柱节点中的楼板属于典 型的平板结构,故而本文基于板壳理论,引入钢 筋锈蚀参数,建立考虑钢筋锈蚀的板柱结构的荷 载-挠度曲线、开裂荷载及极限承载力计算模型。

1 基于板壳理论的板柱节点计算模型

1.1 板柱节点边界条件

对于如图 1 所示的四边简支的板柱节点,记 其边长为 *a*×*b*,楼板厚度为 *t*,柱子为 *l*×*l* 的方形柱。



Fig. 1 Slab-column connection

根据板壳理论^[25-26],图1所示的板的面外变 形与板上荷载的相互关系可用式(1)表示:

$$D\nabla^4 w = q \tag{1}$$

$$D = \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)}$$
(2)

$$\nabla^4 w = \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}$$
(3)

式中: w 为板的挠度; q 为板面上均布荷载; v 为 泊松比, 混凝土板取 0.2; E 为板的弹性模量, 板 开裂前 E=E₁ 表示, 开裂后 E=E₂ 表示, 钢筋屈服 后 E=E₃, E₁、E₂、E₃ 可用式 (4) 表示:

$$\begin{cases} E_1 = 10^4 \beta_1 E_c \rho^2 \sqrt{1 - \frac{t^2}{ab}}, & \max(\sigma_x, \sigma_y) \leq f_{t, corr} \\ E_2 = \beta_2 \rho E_s, & f_{t, corr} < \max(\sigma_x, \sigma_y) \leq f_{sy} \\ E_3 = \beta_3 \rho E_s, & \max(\sigma_x, \sigma_y) > f_{sy} \end{cases}$$
(4)

式中: ρ 为配筋率; E_c 为混凝土弹性模量; E_s 为 钢筋弹性模量; σ_x 、 σ_y 分别为板表明沿x、y方向 应力; β_1 、 β_2 、 β_3 为钢筋锈蚀情况下的刚度影响系数; $f_{t,corr}$ 为钢筋锈蚀后的混凝土名义抗拉强度; f_{sy} 为钢筋锈蚀后的筋屈服强度,均在后文中给出。

由于板件四周简支,则在 *x*=0 处,该边的边 界条件可用式 (5) 表示:

$$(w)_{x=0} = 0, \quad (M_x)_{x=0} = 0 \tag{5}$$

$$M_x = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \tag{6}$$

由于在 x=0 的边上,满足挠度 w=0,则在整 条边上满足 $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$,因此在 x=0 的边界处,其边 界条件表达式可用式 (7) 表示:

$$(w)_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)_{x=0} = 0 \tag{7}$$

同理,在其他三条边上,其边界条件可用式(8)~ 式(10)表示:

$$(w)_{x=a} = 0$$
, $\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)_{x=a} = 0$ (8)

$$(w)_{y=0} = 0$$
, $\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)_{y=0} = 0$ (9)

$$(w)_{y=b} = 0$$
, $\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)_{y=b} = 0$ (10)

1.2 板柱节点边界条件方程组求解

为满足边界条件式 (7)~式 (10), 挠度 w 可取 为如式 (11) 所示的三角级数:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$
(11)

$$\pi^4 D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = q \quad (12)$$

为更好求解式 (12),可将 *q*=*q*(*x*, *y*) 展开为如式 (13) 所示的重三角级数:

$$q = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$
(13)

由傅里叶级数的展开公式得系数 C_{mn}的表达 式如式 (14) 所示:

$$C_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy \qquad (14)$$

将式 (13)、式 (14) 代入式 (12) 可得 *A_{mn}* 的表 达式如式 (15) 所示:

$$A_{mn} = \frac{4\int_{0}^{a}\int_{0}^{b}q_{0}\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}dxdy}{\pi^{4}abD\left(\frac{m^{2}}{a^{2}}+\frac{n^{2}}{b^{2}}\right)^{2}}$$
(15)

对于式 (15) 中,板柱节点仅考虑柱中荷载 时,均布荷载 q₀ 可用式 (16) 表示:

$$q_{0} = \begin{cases} \frac{F}{l^{2}}, & x \in \left[\frac{a-l}{2}, \frac{a+l}{2}\right], y \in \left[\frac{b-l}{2}, \frac{b+l}{2}\right] \\ 0, & \ddagger \& \end{cases}$$
(16)

因此,将式 (16)代入式 (15)中进行积分,进 而求得 A_{mn}的表达式如式 (17)所示:

$$A_{mn} = \frac{16F\sin\frac{m\pi}{2}\sin\frac{n\pi}{2}\sin\frac{m\pi l}{2a}\sin\frac{m\pi l}{2b}}{mnDl^2\pi^6 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2}$$
(17)

式中, F为柱头荷载。

由于在楼板开裂前后板的变形模量 *E* 不同, 因此将式 (2)、式 (4)、式 (17) 代入式 (11) 即可得 到板任意位置处的挠度 *w* 可用式 (18) 表示:

$$\begin{cases} w = \lambda \frac{F}{E_1} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \\ \max(\sigma_x, \sigma_y) \leqslant f_{t, corr} \\ w = w_{cr} + \lambda \frac{F - F_{cr}}{E_2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \\ f_{t, corr} < \max(\sigma_x, \sigma_y) \leqslant f_{sy} \\ w = w_{sy} + \lambda \frac{F - F_{sy}}{E_3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (18) \\ f_{sy} < \max(\sigma_x, \sigma_y) \\ B_{mn} = \frac{\sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{m\pi l}{2a} \sin \frac{n\pi l}{2b}}{mn \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \\ \lambda = \frac{192(1 - v^2)}{t^{3/2\pi^6}} \end{cases}$$

式中: *F*_{cr} 为楼板开裂荷载; *F*_{sy} 为楼板钢筋屈服时的荷载。

由板壳理论^[25-26] 可得到板底应力表达式如式(19) 所示:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{6M_x}{t^2} = -\frac{6D}{t^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y = \frac{6M_y}{t^2} = -\frac{6D}{t^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xz} = \frac{3F_{Sx}}{2t} = \frac{3}{2t} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) \\ \tau_{yz} = \frac{3F_{Sy}}{2t} = \frac{3}{2t} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} \right) \end{cases}$$
(19)

2 考虑锈蚀的钢筋混凝土力学性能

钢筋锈蚀的过程中会发生如图 2 所示的材料 劣化。钢筋的有效面积随着腐蚀程度的加深而减 小,从而导致钢筋的各项力学性能降低。此外, 锈蚀产物的积累会导致锈胀加剧混凝土开裂。钢 筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的重要原因 之一。



钢筋力学性能随钢筋锈蚀率的改变主要体现 在钢筋强度的降低,梁岩等^[27]给出了钢筋锈蚀情 况下屈服强度降低的计算公式如式(20)~式(22)所示:

$$f_{\rm sy} = (1.0 - \alpha_y X_{\rm corr}) f_{\rm sy0}$$
(20)

$$f_{\rm su} = (1.0 - \alpha_{\rm u} X_{\rm corr}) f_{\rm su0} \tag{21}$$

$$\alpha_{\rm y} = 0.02 \times \left(\frac{a}{t}\right)^{1.5} + 5.73 \times \left(\log\rho\right)^2 + 0.72$$
 (22)

式中: f_{sy0} 、 f_{sy} 分别为钢筋锈蚀前后的屈服强度; f_{su0} 、 f_{su} 分别为钢筋锈蚀前后的极限强度; X_{corr} 为 钢筋锈蚀率; α_u 取经验常数 0.00154。

对于混凝土梁,过镇海等^[28] 认为当混凝土临 近开裂前,梁的截面保持平截面变形,假设混凝 土的最大拉应变达到 2 倍轴心受拉峰值应变时即 将开裂,故而通过截面抵抗矩塑性系数与混凝土 轴心抗拉强度的乘积来计算梁开裂时的名义弯曲 抗拉强度。类似地,对于考虑钢筋锈蚀的板柱节 点,本文取截面抵抗矩塑性系数α来计算其名义开 裂强度,具体如式 (23) 所示;此外,采用 JIANG 等^[29] 提出的公式计算钢筋锈蚀后混凝土的抗压强 度如式 (25):

$$f_{\rm t,corr} = \alpha f_{\rm t} \tag{23}$$

$$\alpha = \left[\frac{\rho a}{100t} + \left(\frac{3a}{100t} - 0.98\rho\right)X_{\text{corr}} - \frac{6a}{100t} + 2.12\right]\sqrt{\rho} \quad (24)$$

$$f'_{c,corr} = f'_{c} [0.5 + 0.5 \cos(X_{corr}^{0.514} \pi)]^2$$
(25)

式中: f_t 、 $f_{t,corr}$ 分别为混凝土在钢筋锈蚀前后的抗拉强度; $f'_{c,corr}$ 分别为钢筋锈蚀后混凝土的抗压强度。

由于钢筋锈蚀是一个复杂的过程,而前人的 研究^[30] 表明,只有在距柱面 1.5t 范围内的配筋才 能有效抵抗冲切力。因此,针对 1.5t 范围内钢筋 锈蚀的楼板,本文中用β₁、β₂、β₃来考虑钢筋-混 凝土滑移系数对板变形刚度的影响,为了计算精 确性,利用文献 [23] 中的试验结果来回归得到其 计算公式如式 (26)~式 (29):

$$\beta_1 = -\frac{a\rho}{100t} + \left(\frac{a}{100t} - 1.91\rho\right) X_{\text{corr}} + \frac{7a}{100t} + 0.27 \quad (26)$$

$$\beta_1 = -\frac{1}{100t} + \frac{1}{100t} + \frac$$

$$p_2 = -0.07p_{-}^2 - 0.12A_{\text{corr}} + 2.43 \tag{21}$$

$$p_3 = \gamma_1 \alpha_y + \gamma_2 \alpha_{\rm corr} + \gamma_3 \rho + 5.07 \rho \alpha_{\rm corr} + 0.85$$
(28)
$$(\gamma_1 = 2.41X - 0.51\rho$$

$$\begin{cases} \gamma_2 = 5.42X_{\text{corr}} - 13.34 \\ \gamma_3 = -0.78\rho + 1.78 \end{cases}$$
(29)

3 模型简化与验证

3.1 试验概况

为验证本文模型的准确性,利用课题组已有 的板柱节点试验结果^[23]对其进行验证,节点参数 如表1所示。

表1 板柱节点参数

Table 1 Parameters of slab-column connections

试件编号	楼板尺寸	柱尺寸	板底配筋/	配筋率	锈蚀率
	$(a \times b \times t)/m$	l/mm	mm	_ ρ /(%)	$X_{\rm corr}/(\%)$
S1-0					0
S1-10	2 2×2 2×0 150	200	₼12@105	0.01	10
S1-20	2.2^2.2^0.130		₩12@105	0.91	20
S1-30					30
S2-0	2.2×2.2×0.150	200		0.52	0
S2-10			#120100		10
S2-20			£12@190		20
S2-30		_			30
S3-0					0
S3-10	2.2×2.2×0.125	200	#12⊚105	1 16	10
S3-20		200	±12@105	1.10	20
S3-30					30

试件混凝土材料属性如表2所示。

表 2 混凝土材料属性 Table 2 Properties of concrete

试件编号	混凝土抗压	混凝土弹性模量	混凝土抗拉	钢筋弹性模量
	强度 $f'_{\rm c}/{\rm MPa}$	$E_{\rm c}/{\rm MPa}$	强度f _t /MPa	$E_{\rm s}$ /GPa
S1	36.3	31760	2.8	210
S2	43.7	33240	3.1	210
S3	37.6	32020	2.8	210

试件详图如图 3 所示,板柱节点的钢筋锈蚀区 为 1.5 倍楼板厚度区域内,加载装置如图 4 所示。

3.2 模型简化

式 (18) 为多重级数表达式,为了验算该式收 敛性,本文利用试件 S1-0 对该式进行验算,分别 取 *m、n* 值为 1、3、5、7、9。由于板四周边界施 加位置距离板边 200 mm,因此取 *a*=1800 mm, *b*=1800 mm,*l*=200 mm,*t*=125 mm,此时不同 *m、n* 取值的板中心 (*x*=900 mm, *y*=900 mm) 荷载- 挠度曲线如图 5 所示。可以看出,当 m=1、n=1 时,式(18)的计算精度满足需求,因此可将式(18) 化简成式(30):







$$B = \frac{\sin\frac{\pi l}{2a}\sin\frac{\pi l}{2b}}{\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right)^2}$$
(31)

当板件为方形板时 (*a=b*),由式 (19)及式 (30) 得到板面应力表达式如式 (32) 所示:

$$\sigma_{x} = \sigma_{y} = \frac{24Fa^{2}(1+\nu)\sin^{2}\frac{\pi l}{2a}}{t^{2}l^{2}\pi^{4}}\sin\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{a}$$
(32)

由试验结果可知,试件第一条裂缝为弯曲裂缝,且出现在柱边(x=a/2,y=(b-l)/2),此时利用式(32)可得开裂荷载表达式如式(33)所示:

$$F_{\rm cr} = \frac{f_{\rm t,corr} t^2 l^2 \pi^4}{24a^2(1+\nu)\sin^2\frac{\pi l}{2a}\sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi l}{2a}\right)}$$
(33)

随着荷载的持续增加,板内钢筋受力逐渐 增加,当板内钢筋屈服时,则楼板变形刚度再次 发生变化,可由式 (34)计算钢筋屈服时的柱上 荷载:

$$F_{\rm sy} = F_{\rm cr} + \frac{\rho f_{\rm sy} t^2 l^2 \pi^4}{24a^2(1+\nu)\sin^2\frac{\pi l}{2a}\sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi l}{2a}\right)}$$
(34)

试验表明:板柱节点在柱周围形成如图 6 所 示破坏模式,即沿着柱边呈 45°角向板底发展的裂缝,该裂缝主要由沿 x/y 方向的正应力及沿板厚方 向的切应力共同作用而产生,式 (32)给出了板上 应力计算方法,而根据板壳理论,板上切应力可 用式 (35)计算:

$$\tau = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left(z^2 - \frac{t^2}{4} \right) \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w \tag{35}$$

式中, z为计算点至板中面的距离。



图 6 板柱节点破坏示意图 Fig. 6 Failure mode of slab-column connections

由式 (35) 可知, z=0 时板中切应力最大,此时 将式 (30) 代入式 (35) 中可得切应力表达式如式 (36) 所示:

$$\tau = \frac{12aF}{tl^2\pi^3}\cos\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{a}$$
(36)

由于本文中 *σ_x=σ_y*,因而当板上某点在正应 力与切应力共同作用下,其主应力可用式 (37) 计算:

$$\sigma = \sigma_x \pm \sqrt{\sigma_x^2 + \tau^2} \tag{37}$$

当主应力 $\sigma=f_{t,corr}$ 时,在板中出现如图 6 所示 的主裂缝,此时板柱节点发生破坏。从板柱节点 破坏顺序可知,当钢筋屈服后,由于钢筋的弹性 模量大幅度减小,不能约束板的变形,此时才会 在板中出现如图 6 所示的主裂缝,因此可利用式(32)、 式(36)、式(37)整理得到 $\sigma=f_{t,corr}$ 时的极限承载力 表达式,如式(38) 所示:

$$\begin{cases} F_{u} = F_{sy} + \Delta F \\ \Delta F = \frac{-B_{u} - \sqrt{B_{u}^{2} - 4A_{u}f_{t,corr}}}{2A_{u}} \\ B_{u} = -\frac{48a^{2}(1+\nu)\sin^{2}\frac{\pi l}{2a}}{t^{2}l^{2}\pi^{4}}\sin\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{a} \\ A_{u} = -\frac{144a^{2}}{t^{2}l^{4}\pi^{6}}\cos^{2}\frac{\pi x}{a}\sin^{2}\frac{\pi y}{a} \\ \frac{\pi r}{a} = -\frac{144a^{2}}{t^{2}l^{4}\pi^{6}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{144a^{2}}{t^{2}l^{4}\pi^{6}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ \frac{\pi r}{a} = -\frac{144a^{2}}{t^{2}l^{4}\pi^{6}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{144a^{2}}{t^{2}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{14a^{2}}{t^{2}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{14a^{2}}{t^{2}}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{14a^{2}}{t^{2}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{14a^{2}}{t^{2}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{14a^{2}}{t^{2}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}\frac{\pi r}{a} \\ A_{u} = -\frac{14a^{2}}{t^{2}}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\cos^{2}\frac{\pi r}{a}\sin^{2}$$

t/2,可算得本文试件的极限承载力F_u。

3.3 试验-理论计算结果对比

1) 荷载-挠度曲线对比

利用式 (30) 可计算不同板件中心 (x=900 mm, y=900 mm) 荷载-挠度曲线如图 7 所示。可见,本 文模型所计算的板柱节点荷载-挠度曲线与试验结 果相近,表明本文提出的计算模型能较好地预测 锈蚀板柱节点的荷载-挠度曲线。

2) 开裂荷载和极限承载力对比

为了验证本文模型对节点开裂荷载及极限承载力预测结果的准确性,由试验及式(33)计算得到的试件开裂荷载及极限承载力如表3所示。

由表 3 可以看出,板柱节点开裂荷载和极限 承载力的试验和计算值之比的平均值均为 0.98, 标准差分别为 0.05 和 0.04,表明本文提出的计算





Fig. 7 Comparison of load-displacement curves of calculation and test results



and test results									
)_1) /d.		开裂荷载		极限承载力					
试件	试验/kN	计算值/kN	试验/计算	试验/kN	计算值/kN	试验/计算			
S1-0	128	127.54	1.00	376	372.18	1.01			
S1-10	125	123.04	1.02	335	343.14	0.98			
S1-20	124	118.55	1.05	302	314.11	0.96			
S1-30	119	114.06	1.04	289	285.07	1.01			
S2-0	101	103.43	0.98	280	292.23	0.96			
S2-10	100	102.37	0.98	244	256.15	0.95			
S2-20	99	101.31	0.98	212	220.06	0.96			
S2-30	99	100.25	0.99	192	183.98	1.04			
S3-0	89	94.29	0.94	274	292.98	0.94			
S3-10	82	89.62	0.91	238	262.02	0.91			
S3-20	78	84.95	0.92	228	231.06	0.99			
S3-30	73	80.28	0.91	215	200.10	1.07			
平均值	-	_	0.98	_	_	0.98			
标准差	_	—	0.05	_	_	0.04			
变异系数/(%)) —	_	4.93	_	_	4.57			

模型对板柱节点的开裂荷载和极限承载力的预测 精度较高,且数据离散程度较小。

3.4 本文模型与规范计算结果对比

将本文建立的锈蚀板柱节点承载力计算模型 与规范 ACI 318-19^[31]、GB 50010-2010^[24]、CSA A23.3-14^[32]建议公式的预测值对比,以此来评估 本文模型的精确性。

1) 美国规范 ACI 318-19^[31]

在美国规范 ACI 318-19^[31] 中,假定关键截面 距离柱面 *d*/2 处 (*d* 为试件的有效高度),其受冲切 承载力 *V*。取式 (39)~式 (41) 中计算的最小值:

$$V_{\rm c} = \frac{1}{12} \left(2 + \frac{4}{\beta} \right) \lambda_{\rm s} \lambda \sqrt{f_{\rm c}'} b_0 d \tag{39}$$

$$V_{\rm c} = \frac{1}{12} \left(\frac{\alpha_{\rm s} d}{b_0} + 2 \right) \lambda_{\rm s} \lambda \sqrt{f_{\rm c}} b_0 d \tag{40}$$

$$V_{\rm c} = \frac{1}{3} \lambda_{\rm s} \lambda \sqrt{f_{\rm c}'} b_0 d \tag{41}$$

式中: β 为柱长宽比; λ_s 为尺寸效应因子, 按式 (42) 计算; λ 为混凝土密度影响系数, 正常密度混凝土 取 1.0; α_s 为柱位置影响系数, 内柱取 40, 边柱 取 30, 角柱取 20; b_0 为临界截面的周长; d 为板 截面有效高度; f_c 为混凝土抗压强度:

$$\lambda_{\rm s} = \sqrt{\frac{2}{1+0.004d}} \leqslant 1 \tag{42}$$

2) 中国规范 GB 50010-2010^[24]

在中国规范 GB 50010-2010^[24] 中,对关键截 面的假定和美国规范 ACI 318-19^[31] 相同,其受冲 切承载力计算公式如式 (43):

$$V_{c} \leq 0.7 \beta_{h} f_{i} \eta u_{m} h_{0}$$
 (43)
系数 η 按式 (44) 计算:

$$\eta = \min\left\{0.4 + \frac{1.2}{\beta_{\rm s}}, 0.5 + \frac{\alpha_{\rm s}d}{4u_{\rm m}}\right\}$$
(44)

式中: $β_h$ 为板的截面高度影响系数 (当楼板厚度 $d_0 \leq 800 \,\mathrm{mm}$ 时, $β_h$ 取1.0; 当楼板厚度 $d_0 > 2000 \,\mathrm{mm}$ 时, $β_h$ 取0.9; 其间用线性内插法取用); f_t 为混凝 土的轴向抗拉强度; u_m 为临界截面的周长; h_0 为 板截面有效高度; $β_s$ 为局部荷载或集中反力作用 面积为矩形时的长边与短边尺寸的比值, $β_s$ 小于 2 时取 2, 且 $β_s$ 不宜大于 4; α_s 为柱位置影响系 数, 内柱、边柱和角柱分别取 40、30 和 20。

3) 加拿大规范 CSA A23.3-14[32]

根据加拿大规范 CSA A23.3-14^[32],受冲切承载力 *V*。由式 (45)~式 (47) 计算的最小值:

$$V_{\rm c} = 0.19 \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \lambda \phi_{\rm c} \sqrt{f_{\rm c}'} b_0 d \tag{45}$$

$$V_{\rm c} = \left(\frac{\alpha_{\rm s} d}{b_0} + 0.19\right) \lambda \phi_{\rm c} \sqrt{f_{\rm c}'} b_0 d \tag{46}$$

$$V_{\rm c} = 0.38\lambda\phi_{\rm c}\sqrt{f_{\rm c}'}b_0d \tag{47}$$

式中: β 为柱的长边和短边之比; λ 为混凝土密度 系数,取1; ϕ_c 为混凝土阻尼系数,取0.65; α_s 为 柱位置调整系数,内柱和边柱分别为4和3; b_0 为 距柱面0.5d的控制周长; d为板的有效高度; f'_c 为 混凝土抗压强度。

4) 试验和计算的受冲切承载力对比

利用规范 ACI 318-19^[31]、GB 50010-2010^[24]、 CSA A23.3-14^[32]建议公式的预测值对与试验结果^[23] 对其进行对比,结果如图 8 所示。

由图 8 可见,由于规范 ACI 318-19^[31]、GB 50010-2010^[24]和 CSA A23.3-14^[32]建议的公式未





Fig. 8 Comparison of bearing capacity between test results and calculation results by different models

考虑钢筋锈蚀的影响,计算钢筋锈蚀板柱节点的 受冲切承载力精度较低。相较而言,本文提出的模 型的计算结果与三个规范相比,其计算精度更高。

3.5 本文模型与其他文献结果对比

为验证本模型能用于计算不同构造的板柱节 点冲切承载力,对来自文献 [20,33-40] 的 43 组 不同配筋率、跨度、板厚、混凝土强度以及锈蚀 率的板柱节点冲切承载力试验值与本文模型计算 结果进行对比,具体数据与结果见表 4 及图 9。

表 4 不同文献试件冲切承载力与模型计算值

		_		-			_			
试件来源	试件	楼板跨度/mm	楼板厚度/mm	柱尺寸/mm	配筋率/(%)	锈蚀率/(%)	混凝土抗压 强度 <i>f</i> _//MPa	钢筋屈服 强度 <i>f</i> y/MPa	试验值/kN	计算值/kN
SAID等 ^[19]	S0	1900	150	250	1.00	0.00	41.10	475.0	392.0	396.86
	S15-D1	1900	150	250	1.00	15.00	41.10	475.0	341.0	351.18
	S25-D1	1900	150	250	1.00	25.00	41.10	475.0	314.0	320.73
	S50-D1	1900	150	250	1.00	50.00	41.10	475.0	268.0	244.60
张元伟[33]	A20-1	1400	120	250	1.57	0.00	34.14	458.4	356.0	319.50
	A20-2	1400	150	250	1.20	0.00	35.03	458.4	470.0	439.11
	A20-3	1400	180	250	0.97	0.00	36.81	458.4	646.0	581.33
	A35-1	1400	120	250	1.57	0.00	33.19	458.8	360.0	364.66
	A35-2	1400	120	250	1.14	0.00	41.85	371.0	357.0	329.08

Table 4 Punching capacity of calculation and test results from different literatures

		-	-	-		-	-		-	续表 4
试件来源	试件	楼板跨度/mm	楼板厚度/mm	柱尺寸/mm	配筋率/(%)	锈蚀率/(%)	混凝土抗压 强度 <i>f</i> c/MPa	钢筋屈服 强度 <i>f</i> y/MPa	试验值/kN	计算值/kN
	A35-3	1400	120	250	0.79	0.00	44.81	413.5	293.0	291.05
张元伟[33]	A50-1	1400	120	250	1.57	0.00	51.63	458.4	412.0	403.37
	A50-2	1400	120	250	1.14	0.00	52.15	371.0	354.0	317.66
	C7-30-1	2550	180	250	0.86	0.00	32.29	604.0	443.0	495.36
	C7-30-2	2550	180	250	1.28	0.00	29.69	604.0	570.0	625.59
	C7-30-3	2550	180	250	1.73	0.00	35.56	453.6	690.0	724.48
	C7-50-1	2550	180	250	0.86	0.00	52.96	604.0	693.0	665.23
彭检[34]	C7-50-2	2550	180	250	1.28	0.00	48.56	604.0	771.0	797.09
	C7-50-3	2550	180	250	1.73	0.00	48.98	453.6	800.0	869.34
	C7-70-1	2550	180	250	0.86	0.00	66.53	453.6	610.0	641.24
	C7-70-2	2550	180	250	1.28	0.00	68.77	453.6	785.0	816.15
	C7-70-3	2550	180	250	1.73	0.00	70.11	453.6	860.0	993.70
	C5-1	1950	180	250	0.86	0.00	34.80	459.0	678.0	579.72
	C5-2	1950	180	250	1.28	0.00	33.90	459.0	692.0	715.68
赵音等[3]	C7-1	2550	180	250	0.86	0.00	32.30	459.0	443.0	517.51
	C7-2	2550	180	250	1.28	0.00	29.70	459.0	570.0	624.84
	PG-1	3000	250	260	1.50	0.00	32.86	573.0	1023.0	1397.40
	PG-4	3000	250	260	0.25	0.00	38.33	541.0	603.0	564.86
	PG-5	3000	250	260	0.33	0.00	34.88	555.0	550.0	533.64
GUANDALINI等[36]	PG-10	3000	250	260	0.33	0.00	33.93	577.0	540.0	586.74
	PG-7	1500	125	130	0.75	0.00	41.31	550.0	241.0	250.04
	PG-8	1500	130	130	0.28	0.00	41.31	525.0	140.0	169.35
	PG-9	1500	130	130	0.22	0.00	41.31	525.0	115.0	155.13
1 100 年[37]	PL3	3000	250	520	1.59	0.00	36.50	583.0	1324.0	1513.30
LIP2460	PL4	3000	320	340	1.58	0.00	30.50	531.0	1625.0	2128.90
日体持续国	SH1	2550	180	250	1.28	0.00	27.50	453.6	503.4	516.64
勿忭建守[30]	SL1	2550	180	250	0.86	0.00	30.00	453.6	507.1	438.86
林旭健等[39]	—	1840	150	150	0.79	0.00	24.93	454.0	275.0	295.18
	—	1840	153	300	1.01	0.00	25.08	455.0	430.0	373.82
	_	1840	152	300	1.04	0.00	23.86	451.0	408.0	365.27
	S-N	700	100	150	0.92	0.00	30.00	484.0	217.0	181.49
COMAA笙[40]	S-L	700	100	150	0.92	4.73	30.00	484.0	195.0	176.34
GOMAA等 ^[40]	S-M	700	100	150	0.92	9.65	30.00	484.0	171.0	171.20
	S-H	700	100	150	0.92	15.30	30.00	484.0	145.0	166.05







由图 9 及表 4 可以看出,不同文献中试件冲 切承载力试验结果与计算结果比值的均值为 1.03, 标准差为 0.13,变异系数为 12.32%,表明本文模 型可以准确预测不同构造的板柱节点承载力。

4 结论

本文基于板壳理论,考虑钢筋锈蚀对混凝土 和钢筋力学性能的影响,建立了四周简支的钢筋 锈蚀板柱节点变形及承载力计算模型。通过将本 文模型的计算结果与不同文献中试验结果以及不 同规范中计算模型的计算结果进行比较,对在 1.5 倍楼板厚度区域内发生不同锈蚀率的板柱节点 得到以下结论:

(1) 通过与板柱节点开裂荷载和极限承载力的 试验和计算值之比的平均值均为 0.98,标准差分 别为 0.05 和 0.04,表明本文提出的计算模型对板 柱节点的开裂荷载和极限承载力的预测精度较 高,且数据离散程度较小。

(2) 将本文模型与规范 ACI 318-19、GB 50010-2010 及 CSA A23.3-14 中计算模型所计算的冲切 承载力进行比较,表明本文模型能更准确地计算 板柱节点极限承载力。

(3)利用本文模型计算不同文献中的板柱节点 试件冲切承载力,试验结果与计算结果比值的均 值为1.03,标准差为0.13,变异系数为12.32%, 表明本文模型可以准确预测板柱节点承载力。

参考文献:

 李治, 翁运昊, 邓小芳, 等. 焊接连接预制混凝土梁-板子 结构抗连续倒塌性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 121 - 128.
 LI Zhi, WENG Yunhao, DENG Xiaofang, et al. Behavior of precast concrete beam-slab substructures with welded connections to resist progressive collapse [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(10): 121 - 128. (in Chinese)

 [2] 李治, 原小兰, 董腾方, 等. 爆炸荷载作用下 RC 梁-板子 结构抗连续倒塌动力效应研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 27-35, 46.
 LI Zhi, YUAN Xiaolan, DONG Tengfang, et al. Anti-

progressive collapse dynamic effect of RC beam-slab substructure under blast load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 27 – 35, 46. (in Chinese)

- [3] 李治, 薛天琦, 原小兰, 等. 角柱失效下不等跨 RC 空间 梁-柱子结构抗连续倒塌机理研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(6): 115 125, 179.
 LI Zhi, XUE Tianqi, YUAN Xiaolan, et al. Load resisting mechanism of RC spatial beam-column substructures with unequal spans in the loss of a corner column scenario [J]. Journal of Vibration and Shock, 42(6): 115 125, 179. (in Chinese)
- [4] 李治, 原小兰, 薛天琦, 等. 不同去柱工况下多层钢框架 结构抗连续倒塌机理研究[J]. 工程力学, 2024, 41(4): 140-150.
 LI Zhi, YUAN Xiaolan, XUE Tianqi, et al. Behavior of progressive collapse of multi-layer steel frame structure under different column removal conditions [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(4): 140 - 150. (in Chinese)
- [5] LU X Z, GUAN H, SUN H L, et al. A preliminary analysis and discussion of the condominium building collapse in surfside, Florida, US, June 24, 2021 [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2021, 15(5): 1097 – 1110.
- [6] MUTTONI A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement [J]. ACI

Structural Journal, 2008, 105(4): 440 - 450.

- [7] PARK H G, CHOI K K, CHUNG L. Strain-based strength model for direct punching shear of interior slabcolumn connections [J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 1062 – 1073.
- [8] BROMS C E. Tangential strain theory for punching failure of flat slabs [J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(1): 95 - 104.
- [9] MILLIGAN G J, POLAK M A, ZURELL C. Finite element analysis of punching shear behaviour of concrete slabs supported on rectangular columns [J]. Engineering Structures, 2020, 224: 111189.
- [10] NAVARRO M, IVORRA S, VARONA F B. Parametric computational analysis for punching shear in RC slabs [J]. Engineering Structures, 2018, 165: 254 – 263.
- [11] 易伟建, 刘彪. 混凝土板柱节点冲切承载力的极限分析
 [J]. 工程力学, 2017, 34(8): 125 132, 143.
 YI Weijian, LIU Biao. Ultimate strength analysis of punching shear capacity of concrete slab-column connections [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 125 132, 143. (in Chinese)
- [12] 朱大壮,黄冰峰,朴贤日,等.不同配筋率下钢筋混凝土 板柱节点抗冲切承载力试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(增刊 1): 66 - 73.
 ZHU Dazhuang, HUANG Bingfeng, PIAO Xianri, et al. Experimental study on the punching and shearing resistance of reinforced concrete slab-column joints with different reinforcement ratios [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(Suppl 1): 66 - 73.
- [13] 钱凯, 胡志俊, 翁运昊, 等. 高温下 RC 板柱节点抗冲切 性能数值研究[J/OL]. 工程力学. https://doi.org/10.6052/ j.issn.1000-4750.2024.01.0075, 2024-05-24.
 QIAN Kai, HU Zhijun, WENG Yunhao, et al. Numerical study on punching shear performance of RC slab-column connections during high temperature [J/OL]. Engineering Mechanics. https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.
 01.0075, 2024-05-24. (in Chinese)
- [14] 邓小芳, 兰冬璆, 翁运昊, 等. 局部替换 ECC 板柱节点 抗冲切性能研究[J/OL]. 工程力学. https://doi.org/10. 6052/j.issn.1000-4750.2023.09.0698, 2024-03-01.
 DENG Xiaofang, LAN Dongqiu, WENG Yunhao, et al. Study on punching shear resistance of slab-column connections with partial ECC replacement [J/OL]. Engineering Mechanics. https://doi.org/10.6052/j.issn. 1000-4750.2023.09.0698, 2024-03-01. (in Chinese)
- [15] 余波, 陈冰. 锈蚀钢筋混凝土梁抗剪承载力计算的概率 模型[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 115 - 124.
 YU Bo, CHEN Bing. Probabilistic model for shear strength of corroded reinforced concrete beams [J].
 Engineering Mechanics, 2018, 35(11): 115 - 124. (in Chinese)
- [16] 邢国华,武名阳,常召群,等. 锈蚀预应力混凝土梁承载 力及破坏模式研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 177 – 188.
 XING Guohua, WU Mingyang, CHANG Zhaoqun, et al. Load bearing capacity and failure mode of corroded

Load bearing capacity and failure mode of corroded prestressed concrete beams [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 177 – 188. (in Chinese)

[17] 李鹏飞,许乐欣,毛燕,等.锈蚀-疲劳耦合作用下钢筋混 凝土梁挠度计算方法研究[J].工程力学,2023,40(增刊 1): 207 - 212, 247.

LI Pengfei, XU Lexin, MAO Yan, et al. Deflection calculation of reinforced concrete beams under corrosion-fatigue coupling action [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(Suppl 1): 207 – 212, 247. (in Chinese)

- [18] 罗小勇,程俊峰,龙昊,等. 锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能 试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 69 - 79.
 LUO Xiaoyong, CHENG Junfeng, LONG Hao, et al. Experimental study on seismic behavior of RC columns with corroded reinforcing bars [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 69 - 79. (in Chinese)
- [19] SAID M E, HUSSEIN A A. Effect of bandwidth reinforcement corrosion on the response of two way slabs[J]. Construction and Building Materials, 2019, 216: 137-148.
- [20] QIAN K, LIU J G, YU X H, et al. Experimental and numerical investigation of punching shear capacity of corroded reinforced concrete slab-column connections [J]. Structures, 2022, 43: 1548 – 1557.
- [21] WENG Y H, FU F, QIAN K. Punching shear resistance of corroded slab-column connections subjected to eccentric load [J]. Journal of Structural Engineering, 2023, 149(1): 04022219.
- [22] IKEHATA S, ISHIGURO H, NAKANO T, et al. Experimental evaluation of punching shear capacity of reinforced concrete slabs with horizontal crack due to compression rebar corrosion [J]. Structural Concrete, 2020, 21(3): 890 – 904.
- [23] QIAN K, LI J S, HUANG T, et al. Punching shear strength of corroded reinforced concrete slab-column connections [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103489.
- [24] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国 建筑工业出版社, 2015.
 GB 50010-2010, Code for design of concrete structures
 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [25] QIN J G, PAN J R, WANG Z, et al. Initial rotational stiffness of end-plate connections based on the theory of plates and shells [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41: 102764.
- [26] TIMOSHENKO S, WOINOWSKY-KRIEGER S. Theory of plates and shells [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill College, 1959: 110 – 116.
- [27] 梁岩, 班亚云, 罗小勇, 等. 不同荷载模式下锈蚀钢筋力 学性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 22 - 30.
 LIANG Yan, BAN Yayun, LUO Xiaoyong, et al. Study on mechanical performance of corroded reinforcement bar under different loading modes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 22 - 30. (in Chinese)
- [28] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理与分析[M].北京:清 华大学出版社,2003:239-252.
 GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory

and analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press,

2003: 239 – 252. (in Chinese)

- [29] JIANG C, WU Y F, DAI M J. Degradation of steel-toconcrete bond due to corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 1073 – 1080.
- [30] TENG S, CHANTHABOUALA K, LIM D T Y, et al. Punching shear strength of slabs and influence of low reinforcement ratio [J]. ACI Structural Journal, 2018, 115(1): 139-150.
- [31] ACI 318–19, Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- [32] CSA A23.3–14, Design of concrete structures [S]. Rexdale, Ontario: Canadian Standards Association, 2014.
- [33] 张元伟. 钢筋混凝土板抗冲切试验研究[D]. 长沙: 湖南 大学, 2009.
 ZHANG Yuanwei. Punching shear research on reinforced concrete slabs [D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
 [34] 彭检. 钢筋混凝土板柱节点抗冲切试验研究[D]. 长沙:
- [34] 彭桓. 钢肋混凝土极柱节点抗冲切试验研充[D]. 长沙: 湖南大学, 2013. PENG Jian. Experimental study on punching shear failure of reinforced concrete slabs-column connections [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [35] 赵晋, 易伟建, 朱泽华. 板柱节点冲切破坏后受力性能 试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7): 35-42.
 ZHAO Jin, YI Weijian, ZHU Zehua. Experimental research on post-punching behavior of slab-column connections [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7): 35-42. (in Chinese)
- [36] GUANDALINI S, BURDET O L, MUTTONI A. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(1): 87 – 95.
- [37] LIPS S, FERNÁNDEZ RUIZ M, MUTTONI A. Experimental investigation on punching strength and deformation capacity of shear-reinforced slabs [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(6): 889 – 900.
- [38] 易伟建, 邹品增, 邓清. 柱截面形状对板柱节点受冲切 性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 87-95.
 YI Weijian, ZOU Pinzeng, DENG Qing. Experimental

study of the effects of cross-sectional shape of column on punching shear performance of slab-column connection [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 87 – 95. (in Chinese)

- [39] 林旭健, 郑作樵, 钱在兹. 混凝土弯冲板的破坏机构与极限强度[J]. 工程力学, 2003, 20(1): 58-62, 75.
 LIN Xujian, ZHENG Zuoqiao, QIAN Zaizi. New collapse mechanism and ultimate punching shear strength of reinforced concrete slabs [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(1): 58-62, 75. (in Chinese)
- [40] GOMAA A M, LOTFY E M, KHAFAGA S A, et al. Experimental, numerical, and theoretical study of punching shear capacity of corroded reinforced concrete slab-column joints [J]. Engineering Structures, 2023, 289: 116280.