

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220526

FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型研究

张亚坤, 侯黎黎, 张晓磊, 李作标

(黄河水利职业技术学院水利工程学院, 河南 开封 475004)

摘要: 为了得到较准确的 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的计算模型, 以 FRP 筋混凝土双向板为研究对象, 运用文献综述、数据统计、模型分析和回归计算等研究方法, 借助常用的 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型, 对 98 块 FRP 筋混凝土双向板冲切试验数据进行计算和评估, 并运用双向板临界冲切截面系数反演的方法, 提出了一种新的 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的计算模型, 该模型对 FRP 筋混凝土结构在集中荷载作用下冲切承载力的预测具有较高的精度, 计算结果与试验数据库吻合较好。该研究对 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的设计具有指导意义, 并对今后进一步提高 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型的精度提供了重要参考。

关键词: FRP 筋; 混凝土双向板; 冲切承载力; 计算模型; 临界冲切截面计算系数

中图分类号: TV332⁺.2; TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0124-05

1 引言

FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的计算是 FRP 筋混凝土结构设计的重要内容, 当前关于钢筋混凝土双向板冲切承载力计算研究已相对成熟, 但对于 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的计算方法, 各国规范及相关 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型尚未统一^[1-4]。现存计算模型中各因素对 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的影响程度有待于进一步研究, 模型的预测精度亦有待于进一步提高。针对 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型中存在的问题, 本文尝试建立 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力数据库和冲切承载力模型库, 对现存冲切承载力模型进行数值分析, 基于数学统计分析手段, 回归出具有较高精度的 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型, 并对所提出的模型进行了验证评价。

2 计算模型及试验数据

2.1 常见冲切承载力计算模型

表 1 收集了 FRP 筋混凝土双向板(混凝土双

向板)常见的冲切承载力计算模型, 这些模型一部分来自常用规范、标准和指南中的计算模型, 一部分来自相关研究的冲切承载力计算模型。其中, P_u 为板的冲切承载力, N; ρ 为配筋率, %; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, N/mm²; E_f 为 FRP 筋的弹性模量, GPa; E_s 为钢筋的弹性模量, 一般取 200 GPa; d 为板的有效厚度, mm; $b_{o,nd}$ 为板的临界冲切截面周长; n 为临界冲切截面周长计算系数, $n=0.50, 1.0, 1.5, 2.0$ 等, $b_{o,nd}=2c_1+2c_2+8nd$, c_1, c_2 分别为集中荷载的边长, mm; $\beta_d, \beta_p, \beta_r, \beta_h, \eta, \lambda_p, \varphi_c, \alpha_s, f_{pcd}, \gamma_b$ 分别为板的有效厚度影响系数、有效配筋率影响系数、荷载区域几何特征影响系数、截面高度影响系数、加载区域面积形状和计算截面周长与有效厚度比值综合影响系数、混凝土密度影响系数、混凝土阻力影响系数、集中荷载位置影响系数、混凝土强度影响系数和安全系数。

表 1 中的 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型主要分为经验模型和半经验半理论模型两大类。经验模型是规范中采用的模型, 如我国 GB50010-2010^[1]、英国 BS 8110 (BSI 1997)^[5]、美国 ACI440.1R-2015^[2]、欧洲 Euro-code-2004^[6]、

收稿日期: 2022-03-19, 修回日期: 2022-08-11

基金项目: 2020 年开封市科技发展计划(科技攻关 2001021); 2020 年度黄河水利职业技术学院青年骨干教师培养计划(2020HYGG01); 河南省高等学校重点科研项目计划(22B570001, 22B560007); 河南省高等职业学校青年骨干教师培养计划(2019GZGG071); 开封市黄河流域生态保护和高质量发展创新专项计划(2019018)

作者简介: 张亚坤(1983-), 男, 博士、副教授, 研究方向为新型复合材料及其结构性能, E-mail: yakunzhang@126.com

表 1 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力模型

Tab. 1 Classical punching model library of two-way concrete slabs reinforced with FRP bars

序号	出处	表达式
11	文献[1]	$P_u \leq 0.7\beta_h f_t \eta b_{o,0.5d} d$; $\eta = \min(\eta_1 = 0.4 + 1.2/\beta_c, \eta_2 = 0.5 + \alpha_s d/4b_{o,0.5d})$
4	文献[5]	$P_u = 0.79 \sqrt[3]{100\rho_f E_f/E_s} \sqrt[3]{f_{cu,k}/25} \sqrt[4]{400/d} b_{o,1.5d} d \leq 0.8 \sqrt{f_{cu,k}} b_{o,1.5d} d$
13	文献[2]	$P_u = 4 \sqrt{f'_c} b_{o,0.5d} (kd)/5$; $k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$; $\rho_f = A_f/(bd)$; $n_f = E_f/E_c$
9	文献[6]	$P_u = 0.18k \sqrt[3]{100\rho_f f'_c} b_{o,2d} d \geq P_{\min} = 0.035 \sqrt{k^3} \sqrt{f'_c} b_{o,2d} d$; $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$
12	文献[3]	$P_u = \min \begin{cases} 0.028\lambda\varphi_c (1 + 2/\beta_c) (\rho_f E_f f'_c)^{1/3} b_{o,0.5d} d \\ 0.147\lambda\rho_f \varphi_c (\alpha_s d/b_{o,0.5d} + 0.19) (\rho_f E_f f'_c)^{1/3} b_{o,0.5d} d \\ 0.056\lambda\varphi_c (\rho_f E_f f'_c)^{1/3} b_{o,0.5d} d \end{cases}$
3	文献[4]	$P_u = \beta_d \beta_p \beta_r f_{pcd} b_{o,0.5d} d / \gamma_b$; $\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \leq 1.5$; $\beta_p = \sqrt[3]{100\rho_f E_f/E_s} \leq 1.5$; $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25b_{o,0.5d}/d)$; $f_{pcd} = 0.2 \sqrt{f'_c} \leq 1.2 \text{ N/mm}^2$
5	文献[7]	$P_u = 0.33 \sqrt[3]{E_f/E_s} \sqrt{f'_c} b_{o,0.5d} d$
6	文献[8]	$P_u = 0.79 \sqrt[3]{100\rho_f (E_f/E_s) (0.0045/\epsilon_y)} \sqrt[3]{f_{cu}/25} \sqrt[4]{400/d} b_{o,1.5d} d$; $\epsilon_y = 0.002$
7	文献[9]	$P_u = 1.36 \sqrt[3]{100\rho_f E_f/E_s f'_c} \sqrt[4]{d}^{-1} b_{o,1.5d} d$
8	文献[10]	$P_u = 2.77 \sqrt[3]{\rho_f f'_c} \sqrt{E_f/E_s} b_{o,1.5d} d$
10	文献[11]	$P_u = 0.33 \sqrt{f'_c} b_{o,0.5d} d \alpha (1.2)^N$; $\alpha = 0.62 \sqrt[3]{\rho_f E_f} (1 + 8d/b_{o,0.5d})$
1	文献[12]	$P_u = [4.5 \sqrt[3]{\rho_f f'_c} b_{o,1.5d} d] / \sqrt[4]{d}$
2	文献[13]	$P_u = 1.36 (\sqrt[3]{100\rho_f f'_c} / \sqrt[4]{d}) b_{o,1.5d} d$
14	文献[14]	$P_u = 2.3 \sqrt[3]{100\rho_f E_f f'_c/E_s} \sqrt{d/b_{o,0.5d}} b_{o,0.5d} d$

加拿大 CSA S86-2012^[3] 及日本 JSCE1997^[4] 等规范中的模型。半经验半理论模型是在规范模型的基础上修正所得,如 El-GHANDOUR 等 1999 模型^[7] 的原型为美国 ACI-318-95 规范,并基于应变法对 FRP 筋的轴向刚度的换算方法进行修正得来的,由于未考虑 FRP 筋配筋率这一重要因素,其预测结果的离散性很大。El-GHANDOUR 等 2000 模型^[8] 是通过规定 FRP 筋的极限应变,修正 BS8110-1997 规范而来的。GARDNER N^[13] 模型未考虑 FRP 筋的轴向刚度,从而导致预测结果高于试验结果。STIJN MATTHYS 等^[9] 采用等效配筋率对 GARDNER N^[13] 模型进行修正,修正结果虽保证了结果的离散性,但预测结果仍大于试验结果,偏不安全。Ospina^[10] 模型是对 STIJN MATTHYS 等^[9] 模型进行轴向刚度换算修正而来的。

从表 1 中常用的 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型的表达形式可看出,各模型在构建 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的计算模型中考虑的主要因素有混凝土强度、FRP 筋纵筋配筋率、FRP 筋纵筋拉伸模量、临界冲切截面周长、有效板厚等。然而,在具体模型中,各模型对这些因素的考虑又存在巨大分歧。就混凝土强度而言,混凝土圆柱体抗压强度 $\sqrt{f'_c}$ 、 $\sqrt[3]{f'_c}$ 的选用也不统一;就临界冲切截面周长的计算而言, $b_{o,0.5d}$ 、 $b_{o,1.5d}$ 、 $b_{o,2d}$ 也不统一。

2.2 试验数据

为了研究 FRP 筋混凝土双向板的冲切承载力,收集了 1994~2021 年集中荷载下 FRP 筋混凝土双向板冲切试验资料,建立了一个容量为 98 的 FRP 筋混凝土双向板的冲切数据库(表 2)。数据库中包括文献出处、构件编号、混凝土圆柱体抗压强度 f'_c 、有效板厚 d 、FRP 筋配筋率 ρ 、FRP 筋弹性模量 E_f 、荷载边长 c_1 和 c_2 、FRP 筋类型及试验冲切承载力 P_u 。数据库中所有的双向板都发生了以混凝土锥体形式脱离板体为标志的冲切破坏。我国规范均以立方体抗压强度表征混凝土的强度等级、以混凝土轴心抗压强度作为结构性能计算指标,而国外多以混凝土圆柱体抗压强度 f'_c 作为混凝土的强度指标。为了将收集到的混凝土强度数据统一起来,便于进行回归分析,表 2 中将混凝土强度转化为其圆柱体抗压强度 f'_c ,转换关系见文献[15]。

2.3 评估分析

为了评估模型的精度,将各模型预测的冲切承载力 P_{pred} 与试验承载力 P_u 的比值(P_{pred}/P_u) 进行统计计算,分别得到(P_{pred}/P_u) 的平均值 μ 、标准差 σ 和变异系数 c_v ,从而对各模型预测的精度进行评估。各模型计算结果见表 3。

由表 3 可知, (P_{pred}/P_u) 的平均值大于 1,表明模型预测高估了双向板的冲切承载力,偏于不安全; (P_{pred}/P_u) 的平均值小于 1,表明模型预测

表 2 FRP 筋混凝土双向板冲切试验数据库

Tab. 2 Database of experimental two-way concrete slabs reinforced with FRP bars or grid

序号	出处	数量	$f'_c/(N \cdot mm^{-2})$	D/mm	$\rho/\%$	E_f/GPa	c_1/mm	c_2/mm	类型	P_u/kN
1	文献[16]	4	36~42.4	61	0.95	113	75	75	C	78~99
2	文献[17]	2	41~52	55	0.31	100	89	89	C	61~65
3	文献[18]	8	33.2~37.3	95~126	0.19~1.05	91.8~147.6	133~204	133~204	C	142~347
4	文献[19]	3	59	165	0.57	147	225	575	C	1 000~1 328
5	文献[20]	1	35	137.5	2.4	42	305	710	G	756
6	文献[10]	3	28.9~37.5	120	0.73~1.46	28.4~34	250	250	G	203~260
7	文献[21]	5	29.6~46.4	142	0.15~0.38	45~110	200	200	G	170~317
8	文献[22]	4	26~40	100	0.95~1.67	42	250	250	G	210~249
9	文献[23]	2	35~71	100	1.05~1.18	42	250	250	G	218~275
10	文献[24]	5	44.3~49.6	156~163	1~1.21	38.5~122.5	250	600	G	674~799
11	文献[25]	1	44.8	75	1.33	100	250	250	C	234
12	文献[26]	4	33~39.7	82~112	0.81~1.541.1	46	200	200	G	165~230
13	文献[27]	3	36.3	110	1.18~3	48.2	225	225	G	222~248
14	文献[28]	7	17.7~44.4	130	0.29~0.55	45.63	150	150	B	166.6~252.5
15	文献[29]	11	32.4~48.6	131~284	0.34~1.56	48.1~48.2	300~450	300~450	G	386~1 248
16	文献[30,31]	15	34.3~75.8	117~284	0.4~1.61	41~122	300~600	250~300	G	329~1 600
17	文献[32]	8	46~52	55~75	0.3~0.9	144	88.6~100	88.6~100	C	57.2~128.7
18	文献[33]	12	26.7~43.2	83~138	0.7~1.28	51.1~54.4	300~350	300~350	G	134~413

注:表中 C 表示 CFRP 筋;G 表示 GFRP 筋;B 表示 BFRP 筋。

表 3 (P_{pred}/P_u) 的平均值、标准差和变异系数

Tab. 3 Mean, standard deviation and coefficient of variation of (P_{pred}/P_u)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
模型出处	文献[1]	文献[5]	文献[2]	文献[6]	文献[3]	文献[4]	文献[7]	文献[8]	文献[9]	文献[10]	文献[11]	文献[12]	文献[13]	文献[14]
平均值	0.78	1.23	2.23	0.82	1.22	1.25	1.28	0.91	1.24	1.04	1.08	0.85	1.20	1.29
标准差	0.19	0.23	0.45	0.20	0.22	0.21	0.28	0.22	0.22	0.16	0.17	0.21	0.29	0.20
变异系数/%	24.05	17.40	20.25	23.97	17.67	16.62	21.43	24.43	17.40	15.66	15.82	24.65	24.65	15.75

低估了双向板的冲切承载力,偏于保守; (P_{pred}/P_u) 的平均值越接近 1,表明模型预测结果越接近双向板的冲切承载力。(P_{pred}/P_u) 的标准差和变异系数反映了计算结果的离散程度。从表 3 不难看出,所有模型中,Opsina 模型^[10] 计算精度最高, P_u/P_{pred} 的平均值为 1.04,标准差为 0.16,变异系数为 15.66%。

3 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力模型构建及评价

3.1 冲切承载力计算模型

双向板的临界冲切截面计算周长是决定双向板冲切承载力的重要因素,其取值直接影响 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力预测结果的精度。而在现存的 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力计算模型中,双向板的临界冲切截面计算周长 $b_{o,nd}$ 的取值亦存在较大分歧,如我国规范 GB50010-2010^[1]、美国 ACI440.1R-2015^[2]、加拿大 CSA S86-2012^[3] 中临界冲切截面计算周长取 $b_{o,0.5d}$; 英国 BS 8110^[31] 中临界冲切截面计算周长取 $b_{o,1.5d}$; 欧洲 Euro-code-2004^[32] 中临界冲切截面计算周长取 $b_{o,2d}$ 。由于 Opsina 模型^[10] 具有较高的精度,故采用 Opsina 模型对收集到的数据进行反向计算,统计得到 FRP 筋混凝土双向板的临界

冲切截面计算周长 $b_{o,1.6d}$,即临界冲切截面计算周长计算系数 $n=1.6$ 。采用 $n=1.6$ 进行 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的计算更加科学。

利用样本数据库,对 $y = \frac{P_u}{\sqrt{(100\rho_f E_f/E_s f'_c)} b_{o,1.6d}}$ 与 $k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$ 进行回归分析,结果见图 1。

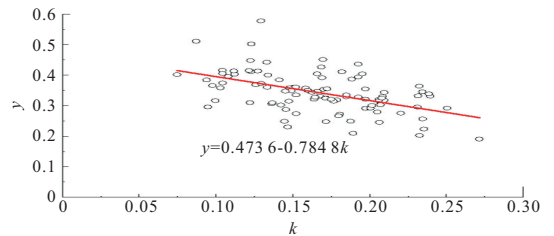


图 1 y-k 关系拟合曲线

Fig. 1 Relationship between y and k

进而得到 FRP 筋混凝土双向板冲切承载力的计算模型:

$$P_u = (0.4736 - 0.7848k) \sqrt{100\rho_f \frac{E_f}{E_s} f'_c} b_{o,1.6d} \tag{1}$$

其中

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f; n_f = E_f/E_c$$

式中, ρ_f 为 FRP 筋的配筋率,%; E_c 为混凝土的弹性模量, GPa; $b_{o,1.6d}$ 为双向板的临界冲切截面

计算周长, mm。

3.2 计算模型评估

为了评估所提模型对 FRP 钢筋混凝土双向板冲切承载力预测结果的精确程度, 将表 2 中的 FRP 钢筋混凝土双向板基本参数代入公式计算相应的冲切承载力 P_{pred} , 并将其与试验所得承载力进行对比分析。图 2 为 P_{pred} 与 P_u 的对比关系, 样本点紧密靠近在 $P_{pred} = P_u$ 所表达的 45° 斜线附近, 二者比值的平均值为 1.00, 标准差为 0.16, 变异系数为 16.42%。图 3 为 P_u 与 P_{pred} 比值的分布情况, 结果近似服从正态分布, 分布在区间 [0.75, 1.25] 的样本点占 92%。可见, 所构建的 FRP 钢筋混凝土双向板冲切承载力计算模型的计算结果与试验结果吻合较好, 具有较高的精度。

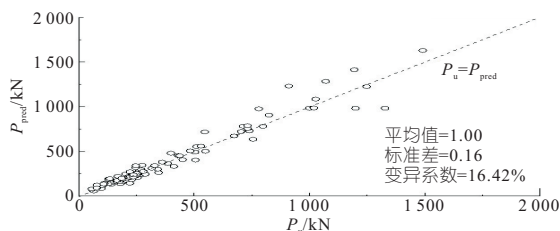


图 2 拟合公式计算结果与试验结果对比

Fig. 2 Comparison between P_u and P_{pred}

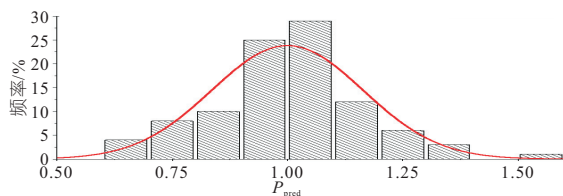


图 3 (P_u/P_{pred}) 的概率分布

Fig. 3 Probability distribution of P_u/P_{pred}

4 结论

a. 混凝土强度、FRP 筋配筋率和弹性模量、临界冲切截面周长、有效板厚是影响 FRP 钢筋混凝土双向板冲切强度的关键因素。

b. 通过反演分析, 得到 FRP 钢筋混凝土双向板临界冲切截面周长计算系数 $n = 1.6$, 即临界截面周长为 $b_{o, 1.6d}$ 。

c. 通过回归分析, 得到 FRP 钢筋混凝土双向板冲切承载力的计算模型, 模型计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[2] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fi-

ber-reinforced polymer (FRP) bars: fiber reinforced polymers: ACI 440: 2015 [S]. Farmington Hills: American concrete Institute, 2015.

- [3] Canadian Standards Association. Design and construction of building structures with fibre reinforced polymers: CAN/CSA S806: 2012 [S]. Rexdale: Canadian standards association, 2012.
- [4] Japan Society of Civil Engineers. Recommendation for design and construction of concrete using continuous fibre reinforcing materials: JSCE: 1997 [S]. Tokyo: Concrete engineering series, 1997.
- [5] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Structural use of concrete BS 8110: Part 1: code of practice for design and construction: BS 8110: 1997 [S]. London BSI, 1997.
- [6] European Committee for Standardization. Eurocode 2: design of concrete structures: Part 1-1: general rules and rules for buildings: BS EN 1992-1-1: 2004 [S]. Brussels: GB-BSI, 2004.
- [7] EL-GHANDOUR A W, PILAKOUTAS K, WALDRON P. Punching shear behavior of fiber reinforced polymers reinforced concrete flat slabs: experimental study [J]. Journal of composites for construction, 2003, 7(3): 258-265.
- [8] EL-GHANDOUR A W, PILAKOUTAS K, WALDRON P. Punching shear behavior and design of FRP RC flat slabs [C]//Proceedings of the international workshop on punching shear capacity of RC Slabs, dedicated to professor svenkinnunen. stockholm, Sweden: Silfwerbrand and G. Hssanzadeh, 2000: 359-366.
- [9] STIJN MATTHYS, LUC TAERWE. Concrete Slabs Reinforced with FRP Grids. II: Punching Resistance [J]. Journal of composites for construction, 2000, 4(3): 154-161.
- [10] CARLOS E OSPINA, SCOTT D B ALEX, ER, J J ROGER CHENG. Punching of two-way concrete slabs with fiber-reinforced polymer reinforcing bars or grids [J]. Structural journal, 2003, 100(5): 589-598.
- [11] EL-GAMAL S E, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Behavior of concrete bridge deck slabs reinforced with FRP bars under concentrated loads [J]. ACI structural journal, 2005, 102(5): 723-735.
- [12] JACOBSON D A, BANK L C, OLIVA M G, et al. Punching shear capacity of double layer frp grid reinforced slabs [Z]. ACI spec publ 2005; SP; 230-49: 857-76.
- [13] GARDNER N. Relationship of the punching shear capacity of reinforced concrete slabs with concrete strength [Z]. ACI Struct J 1990; 87: 66-71.
- [14] JU MINKWAN, JU JIAN WEN WOODY, SIM JONGSUN G. A new formula of punching shear strength for fiber reinforced polymer (FRP) or steel reinforced two-way concrete slabs [J]. Composite structure, 2021, 259: 1-9.
- [15] GAO DANYING, ZHANG CHANGHUI. Shear strength prediction model of frp bar-reinforced con-

- crete beams without stirrups [J]. *Mathematical problems in engineering*, 2020; 1-11.
- [16] AHMAD S H, ZIA P, YU T J, et al. Punching shear tests of slabs reinforced with 3-dimensional carbon fiber fabric[J]. *Concrete international*, 1994, 16(6): 36-41.
- [17] BANTHIA N, AL-ASALY M, MA S. Behavior of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced plastic grid[J]. *Journal of materials in civil engineering*, 1995, 7(4): 252-257.
- [18] MATTHYS STIJN, TAERWE LUC. Concrete slabs reinforced with frp grids. II : punching resistance [J]. *Journal of composites for construction*, 2000, 4(3): 154-161.
- [19] HASSAN T, ABDELRAHMAN A, TADROS G, et al. Fibre reinforced polymer reinforcing bars for bridge decks[J]. *Canadian journal of civil engineering*, 2000, 27(5): 839-849.
- [20] SHERVAN KHANNA O, MUFTI AFTAB A, BAKHT BAIDAR. Experimental investigation of the role of reinforcement in the strength of concrete deck slabs[J]. *Canadian journal of civil engineering*, 2000, 27(3): 475-480.
- [21] ABDEL WAHAB EL-GHANDOUR, KYPROS PILAKOUTAS, PETER WALDRON. Punching shear behavior of fiber reinforced polymers reinforced concrete flat slabs: experimental study[J]. *Journal of composites for construction*, 2003, 7(3): 258-265.
- [22] HUSSEIN A, RASHID I. Two-way concrete slabs reinforced with GFRP bars [C]//Proceeding of the 4th international conference on advanced composite materials in bridges and structures. Calgary, Alberta: Canadian science publishing, 2004.
- [23] ZHANG Q, MARZOUK H, HUSSEIN A. A preliminary study of high-strength concrete two-way slabs reinforced with GFRP bars [C]//Proceedings of the 33rd CSCE Annual Conference: General Conference and International History Symposium. Toronto, Canada: CSCE, 2005; 1-10.
- [24] SHERIF EL-GAMAL, EHAB EL-SALAKAWY, BRAHIM BENMOKRANE. Behavior of concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer bars under concentrated loads[J]. *Structural journal*, 2005, 102(5): 723-735.
- [25] ZHAHLOUL A. Punching shear strength of interior and edge column-slab connections in CFRP reinforced flat plate structures transferring shear and moment [D]. Ottawa, Ontario: Carleton university, 2007.
- [26] RAMZY Z, MAHMOUD Z, SALMA T. Punching behavior and strength of two-way concrete slab reinforced with glass-fiber reinforced polymer (GFRP) rebars [C]//Structural composites for infrastructures applications conference, Hurghada, Egypt, 2007; 1-16.
- [27] LEE JOO-HAYOON, YOUNG-SOO COOK, WILLIAM D, et al. Improving punching shear behavior of glass fiber-reinforced polymer reinforced slabs[J]. *ACI structural journal*, 2009, 106(4): 427-434.
- [28] 肖志龙. FRP 筋混凝土双向板冲切性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [29] CHRISTIAN DULUDE, MOHAMED HASSAN, EHAB A. AHMED, et al. Punching shear behavior of flat slabs reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars[J]. *Structural journal*, 2013, 110(5): 723-734.
- [30] BOUGUERRA K, AHMED E A, EL-GAMAL S, et al. Testing of full-scale concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars [J]. *Construction and building materials*, 2011, 25(10): 3956-3965.
- [31] MOHAMED HASSAN, EHAB AHMED, BRAHIM BENMOKRANE. Punching-shear strength of normal and high-strength two-way concrete slabs reinforced with GFRP bars[J]. *Journal of composites for construction*, 2013, 17(6): 1-12.
- [32] SADJAD AMIR HEMZAH, SALAM AL-OBAIDI, THULFIQAR SALIM. Punching shear model for normal and high-strength concrete slabs reinforced with CFRP or steel bars[J]. *Jordan journal civil engineering*, 2019, 13(2): 250-268.
- [33] 周旭晓. GFRP 筋混凝土方板抗冲切试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.

Study on Punching Shear Capacity Model of FRP Reinforced Two-way Concrete Slab

ZHANG Ya-kun, HOU Li-li, ZHANG Xiao-lei, LI Zuo-biao

(School of Hydraulic Engineering, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In order to obtain a more accurate calculation model of punching shear capacity of FRP reinforced two-way concrete slab, taking the FRP reinforced two-way concrete slab as the research object, using the research methods of literature review, data statistics, model analysis and regression calculation, and with the help of the commonly used calculation model of punching shear capacity of FRP reinforced two-way concrete slab, based on the collected punching test data of 98 FRP reinforced two-way concrete slabs, the inversion method of critical punching section coefficient of two-way slabs was used to establish a new calculation model of punching bearing capacity of FRP reinforced two-way concrete slabs. The model has high accuracy in predicting the punching bearing capacity of FRP reinforced concrete structures under concentrated load. The predicted results are in good agreement with the experimental database. The model has guiding significance for the design of punching shear capacity of FRP reinforced two-way concrete slab, which provides an important reference for further improving the accuracy of punching shear capacity calculation model of FRP reinforced two-way concrete slab in the future.

Key words: FRP reinforcement; two-way concrete slab; punching shear capacity; calculation model; calculation coefficient of critical section perimeter