文章编号:1674-2974(2025)07-0038-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025065

钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力统一模型及其可靠度分析

张扬[1],熊学玉[1,2†],颜阳[1,3],董震[4]
[1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;
2. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学),上海 200092;
3. 中铁上海设计院集团有限公司,上海 200070;
4. 中建科技集团华东有限公司,上海 200126]

摘 要:为了弥补现有钢筋混凝土开洞梁抗剪承载能力模型的不足,考虑破坏模式、洞口形状、洞口尺寸、洞口位置(水平和竖向)、加固配筋形式以及混凝土强度等参数,基于规范建立了抗剪承载力统一模型.通过159个试验数据确定抗剪承载力统一模型,并用来评估现有模型和统一模型.结果表明:按照破坏模式建立抗剪承载力模型是合理的;抗剪承载力统一模型具有较高的准确度,孔侧剪压破坏模式下抗剪承载力模型的均值AV、整体绝对误差IAE和相对平均误差MRE分别为1.035、0.177和0.231,弦杆剪切破坏模式下抗剪承载力模型的AV、IAE和MRE分别为1.007、0.166和0.212;随着混凝土强度的增加,可靠指标β逐渐增加,随着洞口高度的增加,可靠指标β逐渐降低;当洞口高度为$0.5d_e$(截面有效高度),可靠指标β仍然能够满足规范要求,建议洞口高度不超过$0.4d_e$.本文建立的抗剪承载力统一模型具有较高的适用性、准确性和可靠性.

关键词:钢筋混凝土开洞梁;加固配筋形式;洞口参数;抗剪承载力;统一模型;可靠度分析

中图分类号:TU375.1 **文献标志码**:A

Unified Shear Bearing Capacity Model of Reinforced Concrete Beams with Openings and Its Reliability Analysis

ZHANG Yang[1], XIONG Xueyu[1,2†], YAN Yang[1,3], DONG Zhen[4]
[1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education (Tongji University), Shanghai 200092, China;
3. China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, Shanghai 200070, China;
4. East China Co., Ltd., of China Construction Science & Technology Group Co., Ltd., Shanghai 200126, China]

Abstract: To make up for the deficiency of the existing shear bearing capacity model of reinforced concrete

* **收稿日期**:2024-06-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078364),National Natural Science Foundation of China(52078364);安徽省住房城乡建设科学技术计划资助项目(2022-YF116),Anhui Province of Housing and Urban-Rural Construction Science and Technology Plan Project(2022-YF116);上海市住房和城乡建设管理委员会科研项目(2021-002-022),the Scientific Research Project of Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management(2021-002-022)
作者简介:张扬(1994—),男,湖北枣阳人,同济大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: xiong_xueyu@tongji.edu.cn

beams with openings, a unified shear bearing capacity model was established based on the codes, considering the parameters such as the failure mode, opening shape, opening size, opening position (horizontal and vertical), reinforcement form and concrete strength. Based on 159 test data, the unified shear bearing capacity model was estabished according to the existing codes, and the test data were used to evaluate the existing model and the unified model. The results showed that it was reasonable to establish the shear strength model according to the failure modes. The unified shear bearing capacity model had a high degree of accuracy. The average value AV, the integral absolute error IAE, and the mean relative error MRE of the shear bearing capacity model under the opening side shear compression failure mode were 1.035, 0.177, and 0.231, respectively. The AV, IAE, and MRE of the shear bearing capacity model under the shear failure mode of the chord were 1.007, 0.166, and 0.212, respectively. With the increase in concrete strength, the reliability index β gradually increased. With the increase of the opening height, the reliability index β decreased gradually. When the opening height was $0.5d_e$ (sectional effective height), the reliability index β can still meet the requirements of the code. It is suggested that the opening height should not exceed $0.4d_e$. In a word, the unified shear bearing capacity model established in this paper has high applicability, accuracy, and reliability.

Key words: reinforced concrete beam with openings; reinforcement form; opening parameters; shear bearing capacity; unified model; reliability analysis

近年来,为了方便设备管线的穿越,钢筋混凝土开洞梁的应用越来越广泛.在设计中采用钢筋混凝土开洞梁,可以满足舒适度、增加净空和减少造价的要求,同时可以在建筑高度不变的情况下,增加建筑层数和容积率,另外,可以在保证建筑层数的情况下,减小建筑物层高和建筑高度.总的来说,钢筋混凝土开洞梁的应用可以减少碳排放,获得良好的社会与经济效益.然而,在钢筋混凝土梁上开设洞口,对钢筋混凝土梁的刚度和承载能力可能会产生较大的影响,因此,钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力的准确预测对钢筋混凝土开洞梁的应用具有重要作用.

国内外研究学者已经对钢筋混凝土开洞梁进行了部分研究.Mansur[1]建议将洞口分为大洞口和小洞口.对于小洞口,根据破坏模式(梁式破坏与框架式破坏)分别建立了抗剪承载力模型.Mwonga等[2]开展了钢筋纤维混凝土开洞梁(不同洞口尺寸)抗剪试验,基于ACI规范,建立了理论抗剪承载力模型.结果表明,抗剪承载力的预测值与试验值之间具有良好的相关性,比值为0.85~1.12.Chen等[3]研究了荷载位置和洞口倒角对钢筋混凝土双孔梁抗剪性能的影响,基于不同的规范,提出了钢筋混凝土双孔梁抗剪承载力的修正计算方法,修订后中国规范的计算偏差在10%以内.Ali等[4]对12个使用高强混凝土的钢筋混凝土开洞梁进行了抗剪试验,基于ACI318、Canadian规范和AASHTO LRFD,分别建立了抗剪承载力模型,试验值与预测值的均值为1.03.Shoeib等[5]对15个钢筋混凝土开洞梁进行了测试,建立了由竖向箍筋提供的抗剪承载力计算公式.同时,考虑混凝土、洞口侧边箍筋以及上下弦箍筋的抗剪贡献,建立了钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力模型,试验值与预测值的比值为0.85~1.52.蔡健等[6-11]开展了钢筋混凝土开洞梁的抗剪性能试验,试验参数包括不同的洞口尺寸、加载位置、加固方案以及混凝土强度等,结果表明,破坏模式主要分为孔侧剪压、孔侧斜拉、孔侧斜压、弦杆剪切、洞间剪切破坏以及传统的实心梁破坏模式.针对孔侧剪压破坏和弦杆剪切破坏分别建立了抗剪承载力模型,计算结果偏小,安全冗余度高.零志彦[12]对钢筋混凝土开洞梁缩尺模型进行了试验研究,试验参数为洞口角部形状以及加载点位置.基于中国规范建立的抗剪承载力模型可以预测试验值,计算值与试验值的比值为0.76~1.03,约有14%的安全冗余度.

目前,国内外学者建立了多种不同的抗剪承载力模型.然而,通过对模型进行评估和应用,上述的计算模型可能存在一些问题:1)现有模型的应用范围不明确.大多数计算模型没有明确计算参数的范围.2)计算模型应用的准确度不高.计算模型对文章本身的试验数据预测精度较高,而对于其他试验数据预测精度不高.3)计算模型形式复杂多样.由于洞口加固配筋形式多样,计算模型差别较大,适

用范围较窄.4)大多数计算模型的冗余度较高,不利于材料强度的发挥.5)现有计算模型不具有统一性,不利于模型的应用.到目前为止,仍然没有一种广泛认可和接受的计算模型.基于此,本文首先建立了钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力的数据库,包括 不同的破坏模式、洞口形状、洞口尺寸、洞口位置(水平和竖向)、加固配筋形式以及混凝土强度等参数;其次,考虑上述参数,基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13],建立了钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力统一模型;再次,通过数据库对统一模型和已有模型进行评估;最后,对统一模型的可靠度进行评估.

1 数据库

本文尽可能地整理了钢筋混凝土开洞梁的抗剪承载力数据,共159个试件,包括63个孔侧剪压破坏试件和96个弦杆剪切破坏试件.梁的截面高度d和宽度b的范围分别为150~518 mm和100~205 mm.洞口形状主要包括正方形、长方形和圆形,高度h_{op}和长度l_{op}的范围分别为30~300 mm(0.18d~0.67d)和30~1 200 mm(0.18d~3d).洞口中心偏心距e(洞口中心水平线与梁截面中心水平线之间的距离,负值表示往上偏移,正值表示往下偏移)的范围为-60~68 mm.立方体抗压强度f_{cu}或圆柱体抗压强度f_c(转换系数为0.79)介于17.55 MPa与146 MPa之间.具体参数见表1,其中V_u为剪承载力.由此可以看出,建立的数据库参数范围广泛,包含了常见的破坏模式、洞口形状、混凝土强度类型、洞口大小分类以及不同的加固配筋形式等.另外,若文中未体现保护层,按20 mm取值.

表1 钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力数据库

Tab.1 Database of shear bearing capacity of RC beams with openings

文献	破坏模式	d/mm	b/mm	洞口形状	h_{op}/d	l_{op}/d	e/mm	f_{cu}或f_c/MPa	V_u/kN	数量
Mwonga等[2]	孔侧剪压	250	150	方形	0.25~0.35	0.25~0.35	0	34.68~40.54	33.5~40.5	4
Aksoylu等[14]	孔侧剪压	250	125	圆形	0.30	—	0	35	58.7	1
Özkılıç等[15]	孔侧剪压	150	100	圆形	0.20~0.47	—	0	28.5	13.82~25.22	5
Ali等[4]	孔侧剪压	400	200	方形	0.35	0.18~0.35	0	89	182~200	2
黄泰赟等[16]	孔侧剪压	400~513	183~205	方形	0.18~0.32	0.31~0.65	-14~5	43.6~55.2	70.2~187.3	13
蔡健等[17]	孔侧剪压	399~411	176~188	圆形	0.20~0.42	—	0~68	17.55~44.1	77.5~180	14
李青等[18]	孔侧剪压	400	200	圆形	0.30~0.40	—	0	28.6	67.45~81.1	3
李志奇等[19]	孔侧剪压	400	200	圆形	0.30	—	0	28.6	84.3	1
蔡健等[9]	孔侧剪压	500	200	方形	0.32	0.64	0	58.5	166.7~274.7	10
黄泰赟等[20]	孔侧剪压	400~512	183~201	方形	0.31~0.32	0.32~0.67	-5~20	40.5~55.2	70.2~192.5	10
Abdalla等[21]	弦杆剪切	250	100	方形	0.40~0.60	0.40~1.20	0	42~52	11~21.5	4
Mansur等[22]	弦杆剪切	400	200	方形	0.35~0.55	1.00~3.00	0~20	28.8~35.1	34.3~74.63	12
Mwonga等[2]	弦杆剪切	250	150	方形	0.45	0.45	0	34.68~40.54	25~28	2
Elsanadedy等[23]	弦杆剪切	450	200	方形	0.50	1.00~1.50	0	50	34.5~41	2
Hassan等[24]	弦杆剪切	350	150	方形	0.29	0.43~1.29	0	35.2	40~57.5	3
Elansary等[25]	弦杆剪切	300	150	方形	0.33~0.50	0.67~1.00	0	39.67	46.5~66	4
Elsayed等[26]	弦杆剪切	300	150	方形	0.33~0.47	0.47~0.67	0	138~146	65~105.5	7
Ali等[4]	弦杆剪切	400	200	方形	0.25~0.40	0.70~1.40	0	48~91	97~169	7
Shoeib等[5]	弦杆剪切	300	150	方+圆	0.25~0.50	0.25~1.00	0	31~34	31.25~92.5	10
张墨平等[27]	弦杆剪切	500	200	方形	0.40~0.60	0.80~1.20	0	40	45.9~100.55	3
王晓刚等[28]	弦杆剪切	500	200	方形	0.40~0.60	0.80~1.20	0	40	45.9~100.55	6
蔡健等[6]	弦杆剪切	500	200	方形	0.32~0.48	0.64~0.80	0	38.4	120~179.3	3
黄泰赟等[16]	弦杆剪切	408~518	188~205	方形	0.31~0.56	0.61~1.28	-52~60	40.5~54.1	90~210.7	14
蔡健等[17]	弦杆剪切	403~404	180~182	圆形	0.40~0.49	—	0	28.1~29.1	85~120	3
黄泰赟等[20]	弦杆剪切	500~515	196~203	方形	0.31~0.33	0.61~0.64	-60~32.5	41.3~52.2	175~210.7	5
Abdel-Kareem[29]	弦杆剪切	300	120	方形	0.33~0.67	0.50~1.50	0~50	35~45	13~31	7
Allam[30]	弦杆剪切	400	150	方形	0.38	1.13	25	35	52.5~80	2
Jassim等[31]	弦杆剪切	190	120	方形	0.26	0.95	10	34.4	38.75~42.5	2

2　抗剪承载力统一模型的建立

对于钢筋混凝土开洞梁,大洞口与小洞口开洞梁的受力机理是不同的[1,10],小洞口开洞梁可视为混凝土斜压腹杆的桁架受力模型,而大洞口开洞梁可以视为无斜压腹杆的平行弦杆和斜压腹杆桁架.因此,不同洞口尺寸的钢筋混凝土开洞梁的破坏模式也是不同的,通常来说,较大的洞口更容易发生弦杆剪切破坏.梁的抗剪承载力与破坏模式息息相关,因此,按照破坏模式建立钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力模型是目前公认的[1,7-8],也是必要的.目前,钢筋混凝土开洞梁的破坏模式主要分为孔侧剪压、孔侧斜拉、孔侧斜压、弦杆剪切、洞间剪切破坏以及传统实心梁的破坏模式[7-8,16-17,20],具体的破坏模式与洞口尺寸、加载位置以及加固方式等有关.对于孔侧斜拉、孔侧斜压以及洞间剪切破坏来说,采取构造措施就可避免出现此类破坏[7-8].以下,针对孔侧剪压破坏和弦杆剪切破坏(最常见的破坏模式),基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13]分别建立抗剪承载力统一模型.在设计中,取两个计算模型中较小值作为钢筋混凝土开洞梁的抗剪承载力.为了建立统一计算模型,同时考虑各种加固配筋形式,本文综合了国内外钢筋混凝土开洞梁加固配筋形式,包括洞口侧边箍筋、上下弦箍筋、上下弦纵筋以及洞口斜筋,见图 1.其中,A_{s1}、A_{s2}、A_{s3}和A_{s4}分别为上下弦杆中纵筋面积,A_{sv}^{t}和A_{sv}^{b}分别为洞口上下弦杆处箍筋面积,A_{sv}和A_{d}分别为洞口侧边箍筋与斜筋面积,α为洞口侧边斜筋与水平线之间的夹角,h_c和h_t分别为上下弦杆的高度.

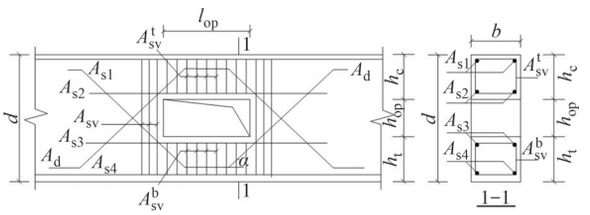


图 1　钢筋混凝土开洞梁通用加固配筋形式

Fig.1　General reinforcement form of reinforced concrete beams with openings

2.1　孔侧剪压破坏模式下统一计算模型

基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13],钢筋混凝土实心梁的抗剪承载力V_u主要由混凝土、箍筋以及弯起钢筋来提供,见式(1).

$$V_u=\frac{1.75}{\lambda+1}f_t b d_e+\frac{A_{sv}f_{sv}}{s}d_e+0.8f_y A_d\sin\alpha \quad (1)$$

式中:λ为剪跨比($1.5\leqslant\lambda\leqslant3$);$d_e$为截面有效高度;$f_{sv}$为箍筋抗拉强度;$s$为箍筋间距;$f_y$为弯起钢筋抗拉强度;$f_t$为混凝土抗拉强度,$f_t=0.395f_{cu}^{0.55}$[13].

对于孔侧剪压破坏模式下钢筋混凝土开洞梁,受力机理类似于实心梁,只是破坏平面通过洞口[1,7-8],因此,用于抵抗剪力的截面有效高度d_e替换为d_e-h_{op}.对于圆形洞口,可转化为方形洞口[7,11].通过对表 1 中的数据进行分析,得到未配置箍筋时钢筋混凝土开洞梁与实心梁抗剪承载力比值与洞高比值的关系($V_{u,1}$和$V_{u,0}$为未配置箍筋时开洞梁与实心梁的抗剪承载力),如图 2 所示.从图 2 可以看出,随着洞口高度h_{op}的增加,混凝土提供的抗剪承载力显著下降(先慢后快),呈现显著的非线性形式.同样地,图 3 给出了洞高比值对箍筋提供的抗剪承载力的影响($V_{u,2}$为配置箍筋时开洞梁的抗剪承载力).从图 3 可以看出,随着洞口高度的增加,箍筋提供的抗剪承载力下降更显著,表现出显著的非线性.当洞口高度h_{op}超过$0.4d_e$时,洞口侧边箍筋的抗剪效应可以忽略,钢筋混凝土开洞梁往往会发生弦杆剪切破坏,因此,基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13],可以得:

$$V_u=\frac{1.75}{\lambda+1}f_t b d_e\left[1-m_1\left(h_{op}/d_e\right)^{m_2}\right]+\frac{A_{sv}f_{sv}}{s}d_e\left[1-m_3\left(h_{op}/d_e\right)^{m_4}\right]+0.8f_y A_d\sin\alpha \quad (2)$$

式中:m_1~m_4为待确定的常数.

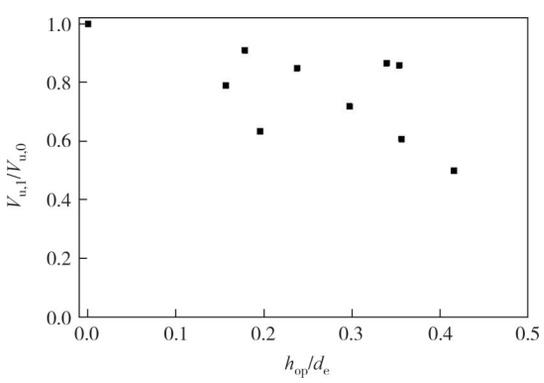


图 2　洞口高度对混凝土提供的抗剪承载力的影响

Fig.2　Influence of opening height on shear bearing capacity provided by concrete

通过对表 1 中孔侧剪压破坏的试验数据进行非线性拟合,得到m_1、m_2、m_3和m_4分别为 5.290、4.398、1.288 和 0.932,因此,孔侧剪压破坏模式下抗剪承载

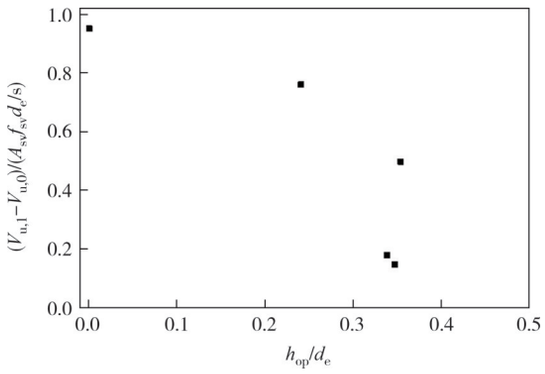


图3 洞口高度对箍筋提供的抗剪承载力的影响

Fig. 3 Influence of opening height on shear bearing capacity provided by stirrups

力统一模型为式(3),适用范围为$h_{op}\leqslant 0.47d$.可以看出,当式(3)中洞口高度h_{op}为0时,计算模型可以回归到实心梁抗剪承载力模型.

$$V_u=\frac{1.75}{\lambda+1}f_t b d_e\left[1-5.29\left(h_{op}/d_e\right)^{4.398}\right]+\frac{A_{sv}f_{sv}}{s}d_e\left[1-1.288\left(h_{op}/d_e\right)^{0.932}\right]+0.8f_y A_{sb}\sin\alpha \tag{3}$$

2.2 弦杆剪切破坏模式下统一计算模型

对于弦杆剪切破坏的试件而言,一般是受拉弦杆先达到抗剪承载力,然后上下弦杆剪力重分布,随后上弦杆达到抗剪承载力.上弦杆受力表现为偏心受压,下弦杆表现为偏心受拉,弦杆中点处出现反弯点[1,8].因此,钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力应是上下弦杆抗剪承载力的叠加.基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13],上下弦杆的抗剪承载力模型为:

$$V_u=V_{ut}+V_{ub} \tag{4a}$$

$$V_{ut}=\frac{1.75}{\lambda_t+1}f_t b h_{t0}+f_{yv}\frac{A_{sv}^t}{s_t}h_{t0}+0.07N_t \tag{4b}$$

$$V_{ub}=\frac{1.75}{\lambda_b+1}f_t b h_{b0}+f_{yv}\frac{A_{sv}^b}{s_b}h_{b0}-0.2N_b \tag{4c}$$

式中:V_{ut}和V_{ub}分别为上下弦杆的抗剪承载力;N_t和N_b分别为上下弦杆的轴向力;h_{t0}和h_{b0}分别为上下弦杆的截面有效高度;λ_t和λ_b分别为上下弦杆的剪跨比,$\lambda_t=0.5l_{op}/h_{t0}(1.5\leqslant\lambda_t\leqslant 3)$,$\lambda_b=0.5l_{op}/h_{b0}(1.5\leqslant\lambda_b\leqslant 3)$;$f_{yv}$为箍筋的屈服强度.

对于集中荷载作用下,假定弦杆中点处出现反弯点,弦杆的轴向力N_t和N_b为[7-8, 10, 12]:

$$N_t=N_b=\frac{\left(V_{ut}+V_{ub}\right)c}{d-\left(h_t+h_b\right)/2} \tag{5}$$

式中:c为洞口中心处与支座的距离;h_t和h_b分别为上下弦杆的高度.

钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力的求解需联立式(4)和式(5).然而,在评估模型中发现,联立式(4)和式(5)存在无解的特例.另外,这样的求解方法不利于模型的利用.因此,基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13]和蔡健等[6]模型,建立弦杆剪切破坏模式下抗剪承载力模型.

由式(5)可以看出,N_t和N_b与上下弦杆的剪力和c有密切关系.将式(5)代入式(4)中,整理后可知,混凝土和箍筋提供的抗剪承载力都与c有密切关系.图4展示了c/d与弦杆剪切破坏时抗剪承载力的关系.从图4可以看出,抗剪承载力随着c/d的增加而减小,表现出明显的非线性,这主要是由于c/d变大时,弯矩作用增大,主拉应力增大,抗剪承载力减小,这与文献[16-17]的研究结果是一致的.

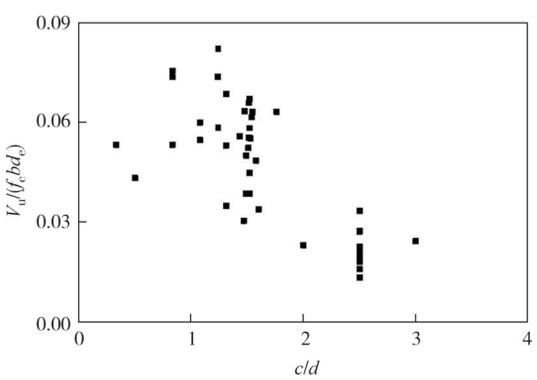


图4 c/d与抗剪承载力的关系

Fig. 4 Relationship between c/d and shear bearing capacity

另外,在计算抗剪承载力时,部分学者认为下弦杆可以承担部分剪力[6-8].基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13]和蔡健等[6]模型,假定

$$V_u=V_{ut}+k_1V_{ub} \tag{6a}$$

$$V_{ut}=\frac{1.75}{\lambda_t+1}f_t b h_{t0}\left[1-k_2(c/d)^{k_3}\right]+f_{yv}\frac{A_{sv}^t}{s_t}h_{t0}\left[1-k_4(c/d)^{k_5}\right] \tag{6b}$$

$$V_{ub}=\frac{1.75}{\lambda_b+1}f_t b h_{b0}\left[1-k_6(c/d)^{k_7}\right]+f_{yv}\frac{A_{sv}^b}{s_b}h_{b0}\left[1-k_8(c/d)^{k_9}\right] \tag{6c}$$

式中:k_1~k_9为待确定的常数.

通过对表1中弦杆剪切破坏的试验数据进行非线性拟合,得到式(7),适用范围为$c\leqslant 3d$.当c等于0时,可以回归到《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13]和蔡健等[6]模型.

$$V_u = V_{ut} + 0.998V_{ub} \tag{7a}$$

$$V_{ut} = \frac{1.75}{\lambda_t + 1} f_t b h_{t0}\left[1 - 0.015(c/d)^{0.019}\right] + f_{yv}\frac{A_{sv}^t}{s_t} h_{t0}\left[1 - 0.53(c/d)^{0.01}\right] \tag{7b}$$

$$V_{ub} = \frac{1.75}{\lambda_b + 1} f_t b h_{b0}\left[1 - 0.018(c/d)^{0.011}\right] + f_{yv}\frac{A_{sv}^b}{s_b} h_{b0}\left[1 - 0.081(c/d)^{2.859}\right] \tag{7c}$$

3　抗剪承载力统一模型准确度评估

3.1　现有抗剪承载力模型

为了验证统一模型的准确度,整理了钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力模型,见表2.除了Mansur[1]模型,国外学者几乎不会依据破坏模式分类来计算抗剪承载力.其中,有些计算模型忽略了箍筋对抗剪承载力的贡献[24, 32],大部分由混凝土提供抗剪承载力的计算模型几乎一样,采用d_e–h_{op}替换d_e.对于国内学者,几乎都按照破坏模式分类计来算抗剪承载力,大部分计算模型都类似地考虑混凝土和箍筋的抗剪贡献,区别主要在于一些系数的取值.

采用平均值AV、整体绝对误差IAE和相对平均误差MRE来评价抗剪承载力模型的准确度,见式(8)~式(10).当AV接近1,IAE和MRE接近0时,表明模型更准确[33-34].

表2　钢筋混凝土开洞梁现有抗剪承载力模型

Tab.2　Existing shear bearing capacity model of RC beams with openings

来源	破坏模式	模型
Abdalla等[21]	两者兼具	$\frac{V_b}{V} = \frac{\sqrt{A_{bw}I_b}}{\sqrt{A_{bw}I_b} + \sqrt{A_{tw}I_t}}, V_t = V - V_b, V_{ct} = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\, b_w d_t$
Mansur[1]	孔侧剪压	$V_n = V_c + V_s, V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\, b_w(d - d_o), V_s = \frac{A_v f_{yv}}{s}(d_v - d_o)$
Mwonga等[2]	两者兼具	$V_n = V_c + V_s, V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\, b_w(d - d_o), V_s = \frac{A_v f_{yv}}{s} d$
Chen等[3]	两者兼具	$V = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_d \alpha_h + f_{yv}\frac{nA_s}{2s} h_d$
Hassan等[24]	两者兼具	$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\, b_w(d - h_o)$
Shoeib等[5]	两者兼具	$V_n = V_c + V_s, V_c = \frac{1}{6} k\sqrt{f_c'}\, b_w(d - d_o), V_s = A_{v,side} f_{fy}\frac{d_v - d_0}{l_0} + \frac{A_{v,top} f_{fv}}{S_{top}} d_{top} + \frac{A_{v,bot} f_{fv}}{S_{bot}} d_{bot}$
Ali等[4]	两者兼具	$V_n = 0.17\sqrt{f_c'}\, b_w(d - d_0) + \left(A_v f_{yv} d\cot\theta\right)/s$
Özkılıç等[15]	两者兼具	$V_n = V_c + V_{sl} + V_{sd}, V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_c}\, b(d - d_0) V_{sl} = \frac{A_{sl} f_{ywl}}{s}(d - d_0) V_{sd} = A_{sd} f_{ywd}\sin\theta$
El-Maaddawy等[32]	两者兼具	$V_c = 5.35(f_c'\rho)^{1/3}(d/a)^{4/3} b(d - d_0)/\eta$
梁辰坤[35]	两者兼具	$V_n = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b(h_0 - D) + f_{yv}\frac{A_{sv}}{s}(h_0 - D) + \beta f_{yc} A_{sc}$
蔡健等[6]	弦杆剪切	$V_u = V_t + \eta V_b + 0.05F_p, V_t = \frac{1.75}{\lambda_t + 1} f_t b h_{t0} + f_{yv}\frac{A_{sv,t}}{s_t} h_{t0}, V_b = \frac{1.75}{\lambda_b + 1} f_t b h_{b0} + f_{yv}\frac{A_{sv,b}}{s_b} h_{b0}$
张学文等[7]	孔侧剪压	$V = \frac{0.2}{\lambda + 1.5} f_c b(h_0 - d) + f_{yv}\frac{A_{sv}}{s}(h_0 - d - 50) + f_y A_{sb}\sin\alpha_s,$
	弦杆剪切	$V_t = 0.9V, V_b = 1.2V - V_t, N_t = N_b = M/\left[h - 0.5(h_t + h_b)\right]$
		$V_t = \frac{0.2}{\lambda_t + 1.5} f_c b h_{t0} + 0.4 w f_{yv}\frac{A_{sv}^t}{s_t} + 0.07N_t, V_b = \frac{0.2}{\lambda_b + 1.5} f_c b h_{b0} + 0.4 w f_{yv}\frac{A_{sv}^b}{s_b} + 0.07N_b$
蔡健等[8-9]	孔侧剪切	$V_u = V_c + V_s + V_{sv} + V_{sb}, V_c = \alpha_c k_c f_t b h_0, V_s = k_s A_s, V_{sv} = k_{sv} f_{yv} A_{sv}(h_0 - h_h)/s, V_{sb} = f_y A_{sb}\sin\alpha_s$
	弦杆剪切	$V_u = V_c + V_t, N_c = N_t = \left[(V_c + V_t)a\right]/\left[h - 0.5(h_t + h_c)\right]$
		$V_c = \frac{1.75}{\lambda_c + 1} f_t b h_{c0} + \eta f_{yv}\frac{A_{sv,c}}{s_c} h_{c0} + 0.07N_c, V_t = \frac{1.75}{\lambda_t + 1} f_t b h_{t0} + f_{yv}\frac{A_{sv,t}}{s_t} h_{t0} - 0.2N_t$
殷芝霖等[36]	两者兼具	$V_1^c = \frac{0.2}{\lambda_c + 1.5} b h_0^c f_c + 1.25 f_y\frac{A_{sv}^c}{s_c} h_0^c + 0.07N_c, V_1^t = \frac{0.2}{\lambda_t + 1.5} b h_0^t f_c + 1.25 f_y\frac{A_{sv}^t}{s_t} h_0^t - 0.2N_t$
蔡健等[11]	孔侧剪切	$V_u = \frac{0.2}{\lambda + 1.5} b f_c(h_0 - d) + f_{yv}\frac{A_{sv}}{s}(h_0 - D) + 0.8 f_y A_{sb}\sin\alpha_s$

续表2

来源	破坏模式	模型
蔡健等[10]	弦杆剪切	$V_{\mathrm{b}}=\frac{0.2}{\lambda_{\mathrm{b}}+1.5}f_{\mathrm{c}}bh_{\mathrm{b0}}+1.25f_{\mathrm{yv}}\frac{A_{\mathrm{sv}}}{s_{\mathrm{c}}}h_{\mathrm{b0}}-0.2N$, $V_{\mathrm{t}}=\frac{0.2}{\lambda_{\mathrm{t}}+1.5}f_{\mathrm{c}}bh_{\mathrm{t0}}+1.25f_{\mathrm{yv}}\frac{A_{\mathrm{sv}}}{s_{\mathrm{t}}}h_{\mathrm{t0}}+0.07N$, $N_{\mathrm{b}}=N_{\mathrm{t}}=\frac{Ma}{h-0.5\left(h_{\mathrm{t}}+h_{\mathrm{b}}\right)}$
零志彦[12]	弦杆剪切	$V_{\mathrm{c}}=\frac{1.75}{\lambda_{\mathrm{c}}+1}f_{\mathrm{t}}bh_{\mathrm{c0}}+\eta f_{\mathrm{yv}}\frac{A_{\mathrm{sv,c}}}{s_{\mathrm{c}}}h_{\mathrm{c0}}+0.07N_{\mathrm{c}}$, $V_{\mathrm{t}}=\frac{1.75}{\lambda_{\mathrm{t}}+1}f_{\mathrm{t}}bh_{\mathrm{t0}}+f_{\mathrm{yv}}\frac{A_{\mathrm{sv,t}}}{s_{\mathrm{t}}}h_{\mathrm{t0}}-0.2N_{\mathrm{t}}$, $N_{\mathrm{c}}=N_{\mathrm{t}}=\frac{\left(V_{\mathrm{c}}+V_{\mathrm{t}}\right)a}{h-0.5\left(h_{\mathrm{t}}+h_{\mathrm{c}}\right)}$

注:公式中符号含义参考原参考文献.

$$\mathrm{AV}=\frac{\sum_1^n\frac{\mathrm{Theo}_i}{\mathrm{Expe}_i}}{n} \tag{8}$$

$$\mathrm{IAE}=\frac{\sum_1^n\left|\mathrm{Theo}_i-\mathrm{Expe}_i\right|}{\sum_1^n\left|\mathrm{Expe}_i\right|} \tag{9}$$

$$\mathrm{MRE}=\frac{1}{n}\sum_1^n\left|\frac{\mathrm{Theo}_i-\mathrm{Expe}_i}{\mathrm{Expe}_i}\right| \tag{10}$$

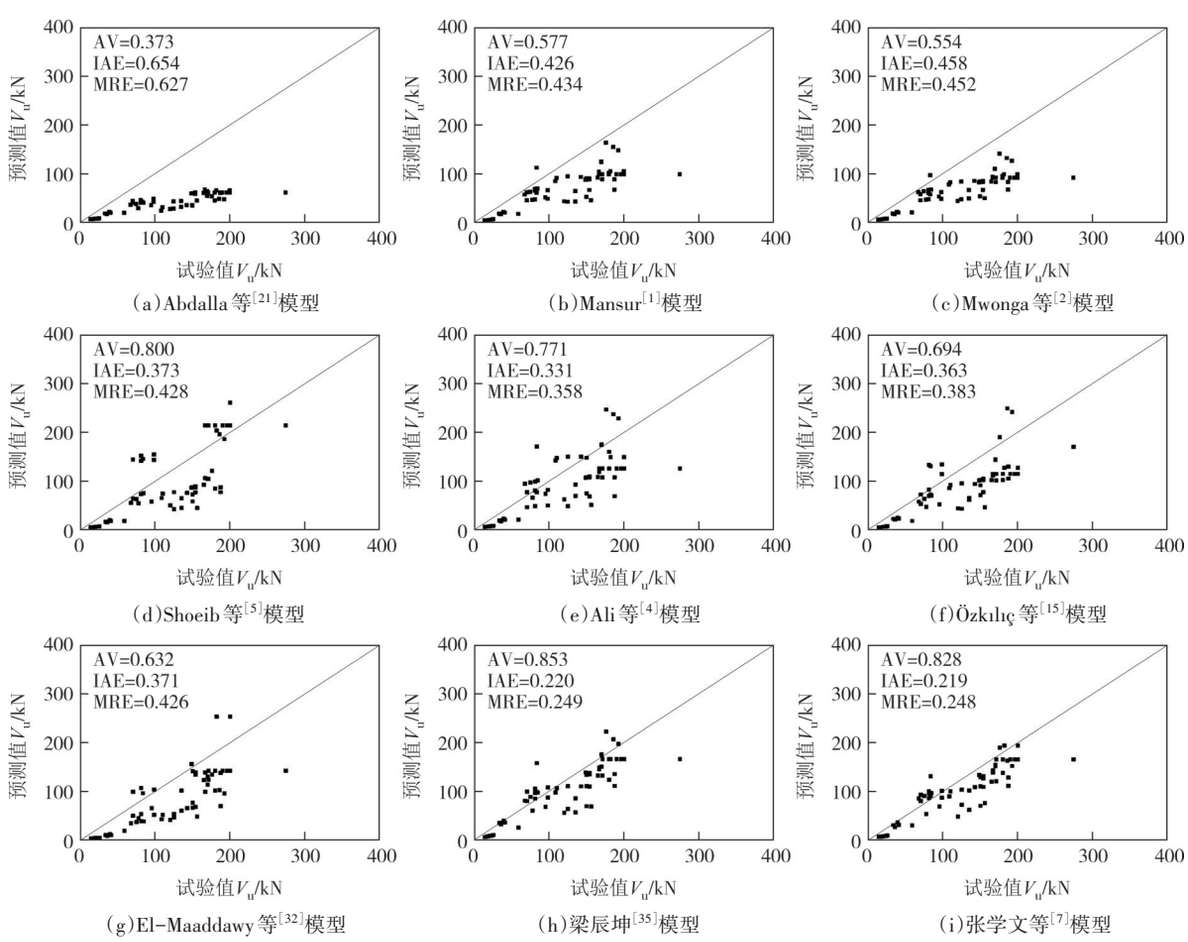
式中:n为样本数量;Theo_i为预测值;Expe_i为试验值.

3.2 孔侧剪压破坏模式下抗剪承载力模型评估

使用表1中的孔侧剪压破坏的抗剪承载力数据对表2中抗剪承载力模型和统一模型进行评估,结果见图5.总的来说,国内学者建立的抗剪承载力模型的准确度高于国外学者建立的计算模型,这表明依据破坏模式来建立抗剪承载力模型是正确的.在已有计算模型中,蔡健等[8-9]模型的AV、IAE和MRE分别为0.999、0.229和0.272,而统一模型的AV、IAE和MRE分别为1.035、0.177和0.231.相比较而言,本文建立的抗剪承载力模型准确程度更高.

3.3 弦杆剪切破坏模式下抗剪承载力模型评估

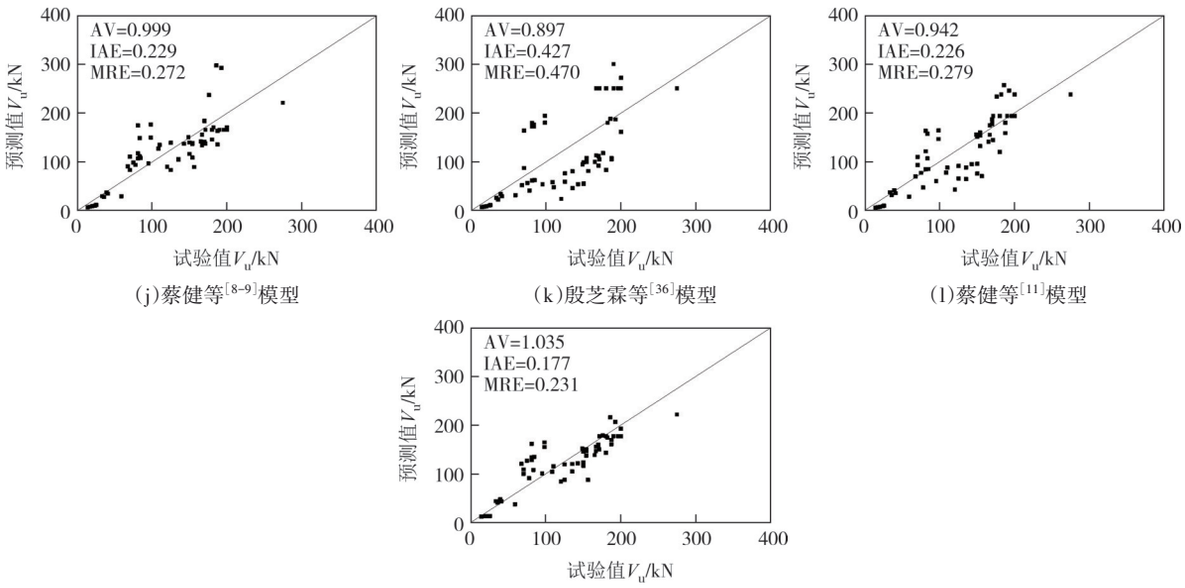
同时,采用表2中弦杆剪切破坏模式下抗剪承载力模型和统一模型来预测表1中的弦杆剪切破坏的抗剪承载力,结果见图6.同样地,国内学者建立的计算模型的准确度仍然高于国外学者,原因在于国内学者是依据破坏模式来建立抗剪承载力模型的.



(a)Abdalla等[21]模型 (b)Mansur[1]模型 (c)Mwonga等[2]模型

(d)Shoeib等[5]模型 (e)Ali等[4]模型 (f)Özkılıç等[15]模型

(g)El-Maaddawy等[32]模型 (h)梁辰坤[35]模型 (i)张学文等[7]模型



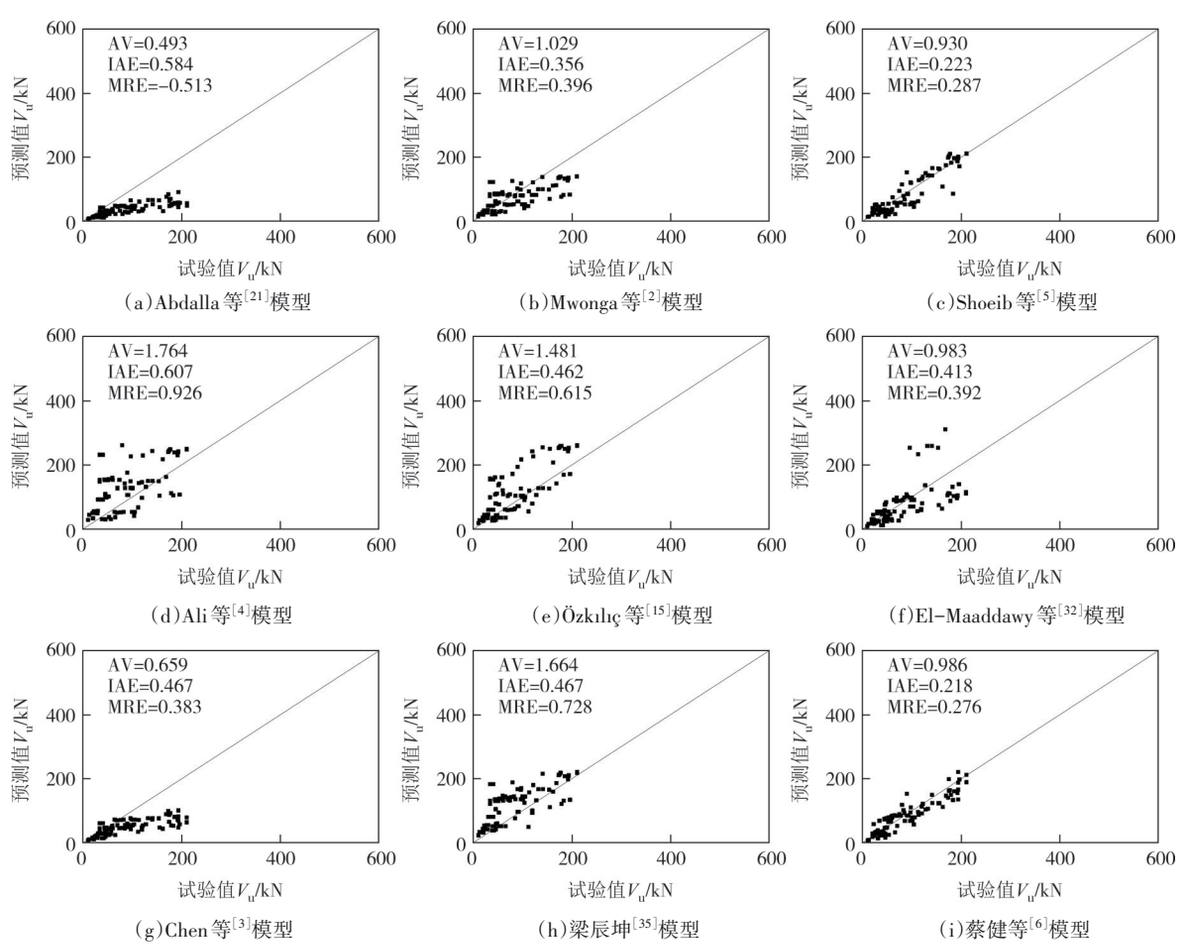
(j)蔡健等[8-9]模型　(k)殷芝霖等[36]模型　(l)蔡健等[11]模型

(m)统一模型

图 5　孔侧剪压破坏模式下抗剪承载力模型评估结果

Fig. 5　Evaluation results of shear bearing capacity model under opening side shear compression failure mode

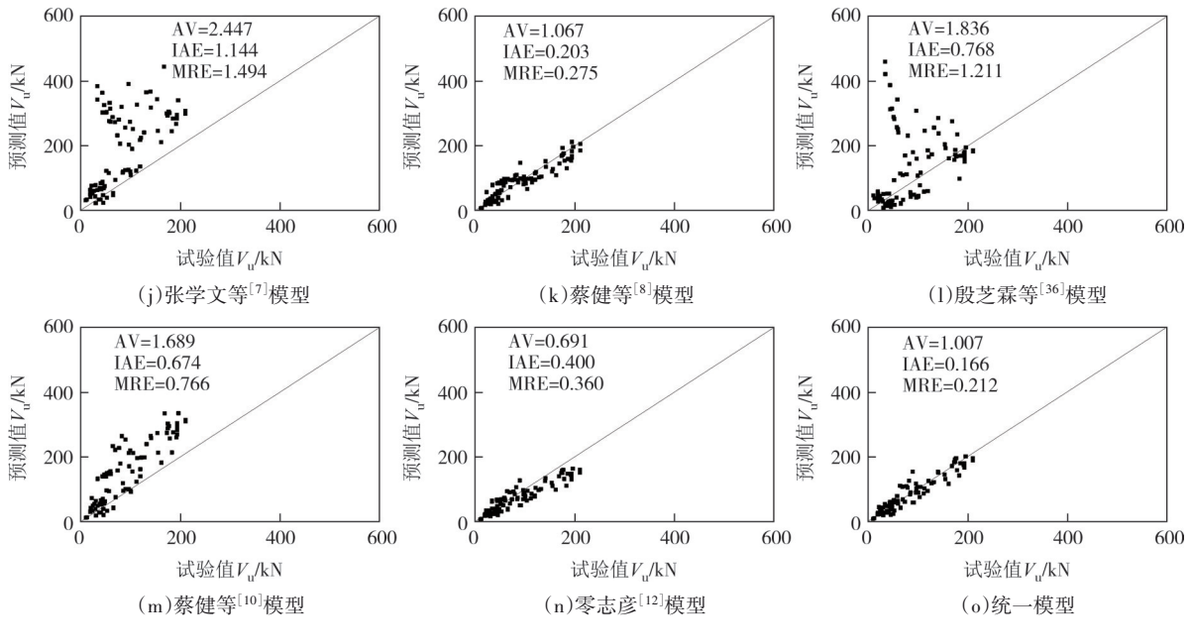
另外,在国内学者建立的计算模型中,蔡健等[6,8]模型的准确度较高,文献[6]和[8]中 AV、IAE、MRE 分别为 0.986、0.218、0.276 和 1.067、0.203、0.275. 对于蔡健等[6]模型而言,在上下弦杆抗剪承载力模型中忽略轴向力是可行的,这也证明了统一模型的合理性. 相比较而言,统一模型的 AV、IAE 和 MRE 分别为 1.007、0.166 和 0.212,表明本文建立的抗剪承载力模型准确度更高.



(a)Abdalla 等[21]模型　(b)Mwonga 等[2]模型　(c)Shoeib 等[5]模型

(d)Ali 等[4]模型　(e)Özkılıç 等[15]模型　(f)El-Maaddawy 等[32]模型

(g)Chen 等[3]模型　(h)梁辰坤[35]模型　(i)蔡健等[6]模型



(j)张学文等[7]模型 (k)蔡健等[8]模型 (l)殷芝霖等[36]模型

(m)蔡健等[10]模型 (n)零志彦[12]模型 (o)统一模型

图6 弦杆剪切破坏模式下抗剪承载力模型评估结果

Fig.6 Evaluation results of shear bearing capacity model under shear failure mode of chord

4 抗剪承载力统一模型可靠度评估

为了进一步推广抗剪承载力统一模型的应用,本文对抗剪承载力统一模型的可靠度进行评估.考虑到几何尺寸不确定性、材料性能不确定性、计算模式不确定性以及荷载模式不确定性,评估了本文建立的抗剪承载力统一模型的可靠度.

4.1 统计参数随机性

几何尺寸不确定性、材料性能不确定性以及荷载模式不确定性主要考虑材料、几何尺寸以及荷载效应对可靠度的影响,具体统计参数参考文 献[37-38],见表3,其中,k_l、k_c、k_s和k_d分别为几何尺寸、混凝土抗拉强度、钢筋强度和荷载效应的统计参数均值,δ_l、δ_c、δ_s和δ_d分别为几何尺寸、混凝土抗拉强度、钢筋强度和荷载效应的变异系数.

4.2 计算模式不确定性

计算模式的不确定性主要考虑计算模式的基本假定以及模型的准确度对可靠度的影响.通过对表1中的数据进行统计分析,钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力模型在两种破坏模式下不确定参数K_p的均值k_{Kp}以及变异系数δ_{Kp}分别为1.070和0.250,1.014和0.225.

表3 统计参数

Tab.3 Statistical parameters

统计参数	几何参数		材料参数						荷载		
	k_l	δ_l	强度等级	k_c	δ_c	钢筋型号	k_s	δ_s	类型	k_d	δ_d
b	1.00	0.02	C30	1.395	0.172	HPB300	1.020	0.080	恒载	1.060	0.070
d_e	1.00	0.03	C40	1.345	0.156	HRB335	1.140	0.070	楼面活载(办公楼)	0.524	0.288
d	1.00	0.02	C50	1.325	0.149	HRB400	1.114	0.072	楼面活载(住宅)	0.644	0.233
h_o	1.00	0.02	C60	1.302	0.141	—	—	—	—	—	—
A_{sv}	1.00	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—
s	0.99	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A_{sb}	1.00	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—
c	1.00	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—

4.3 抗力统计参数

钢筋混凝土开洞梁抗剪承载能力V为:

$$V = K_p R_p\left(f_i \cdot a_i\right) \tag{11}$$

式中:K_p为计算模式不确定性随机变量;R_p为计算公式确定的抗力;f_i和a_i分别为第i种材料的材料性能和几何参数.

钢筋混凝土开洞梁抗剪承载能力V统计参数的均值k_V和变异系数δ_V,由式(12)和式(13)计算.

$$k_V = \frac{\mu_{K_p}\mu_{R_p}}{V_d} \tag{12}$$

$$\delta_V = \sqrt{\delta_{K_p}^2 + \delta_{R_p}^2} = \sqrt{\delta_{K_p}^2 + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial R_p}{\partial X_i}\right)^2 \sigma_{X_i}^2} \tag{13}$$

式中:V_d为计算公式确定的抗剪承载能力设计值;μ_{R_p}和δ_{R_p}分别为R_p的均值和变异系数;X_i为R_p的有关变量;σ_{X_i}为X_i的标准差.

4.4 可靠指标β

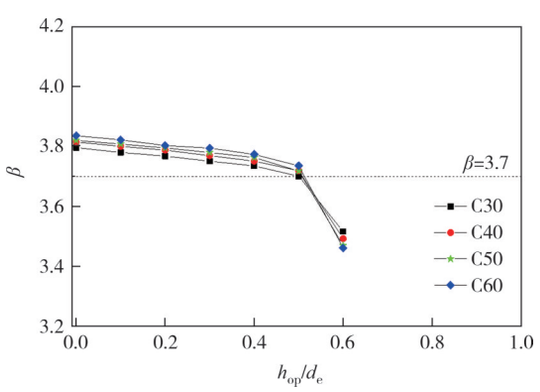
结构的极限状态方程为:

$$Z = R - \gamma_0 S \tag{14}$$

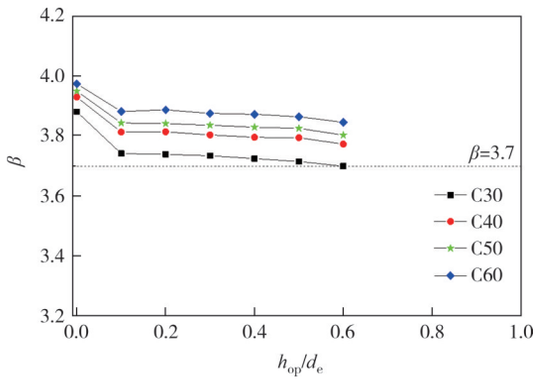
式中:Z为功能函数;R为抗力函数;S为荷载效应;γ_0为结构重要性系数.

由于Monte-Carlo方法具有稳定性好、计算精度高以及适用于复杂函数等特点(抽样次数$N \geqslant 100/p_f$,p_f为破坏概率),因此,本文采取Monte-Carlo方法计算可靠指标β,主要考虑了洞口高度和混凝土强度对可靠度的影响,具体计算方法参考文献[39-41].

图7给出了洞口高度和混凝土强度对抗剪承载力模型可靠度的影响.从图7中可以看出,随着混凝土强度的增加,可靠指标β逐渐增加.然而,随着混凝土强度的增加,可靠指标β增加速率明显减小,这表明通过增加混凝土强度来提高可靠度是不经济的.随着洞口高度的增加,可靠指标β逐渐降低.当洞口高度为$0.5d_e$时,可靠指标β仍然能够满足《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)[42]的脆性破坏规定($\beta>3.7$).当洞口高度大于$0.5d_e$时,可靠指标β急剧降低,此时可靠指标β不满足要求,这主要是由于收集洞口高度大于$0.5d_e$的数据太少.另外,为确保有足够的可靠度要求,建议洞口高度不宜超过$0.4d_e$.



(a)孔侧剪压破坏模式



(b)弦杆剪切破坏模式

图7　洞口高度和混凝土强度对抗剪承载力模型可靠度的影响

Fig.7　Influence of opening height and concrete strength on the reliability of shear bearing capacity model

5 结 论

为了克服现有钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力模型的局限性,通过收集的159个试验数据,考虑破坏模式、洞口形状、洞口尺寸、洞口位置(水平和竖向)、加固配筋形式以及混凝土强度等参数,基于规范建立了抗剪承载力统一模型.同时,通过试验数据来评估本文建立的抗剪承载力模型的准确性和可靠性.

1)对现有计算模型评估的结果表明,按照破坏模式来建立钢筋混凝土开洞梁抗剪承载力模型是合理的.国内学者建立的抗剪承载力模型的准确度高于国外学者建立的计算模型.

2)对于孔侧剪压破坏模式下钢筋混凝土开洞梁,随着洞口高度的增加,混凝土提供的抗剪承载力呈现明显的非线性趋势.同样地,随着洞口高度的增加,箍筋提供的抗剪承载力下降更显著,表现出显著的非线性.当洞口高度超过$0.4d_e$时,洞口侧边箍筋的抗剪效应可以忽略,钢筋混凝土开洞梁往往会发生弦杆剪切破坏.基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)建立的孔侧剪压破坏模式下抗剪承载力统一模型具有较高的准确度,AV、IAE和MRE分别为1.035、0.177和0.231.

3)由于c/d变大时,弯矩作用增大,主拉应力增大,抗剪承载力减小.因此,抗剪承载力随着c/d的增加而减小,表现出明显的非线性.基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),建立弦杆剪切破坏模式下抗剪承载力模型.AV、IAE和MRE分别为1.007、0.166和0.212,表明本文建立的弦杆剪切破坏模式下抗剪承载力模型同样具有较高的准确度.

4)随着混凝土强度的增加,可靠指标β逐渐增加.可靠指标β增加速率随着混凝土强度的增加而减小.随着洞口高度的增加,可靠指标β逐渐降低.当洞口高度为$0.5d_e$时,可靠指标β仍然能够满足规范要求.当洞口高度大于$0.5d_e$时,可靠指标β不满足要求.为确保有足够的可靠度要求,建议洞口高度不宜超过$0.4d_e$.

参考文献

[1] MANSUR M A. Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in shear[J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20(6): 477-486.

[2] MWONGA M M, KABUBO C, GATHIMBA N. Effect of polyethylene terephthalate fibres on the structural performance of reinforced concrete beams with openings in the shear region[J]. Construction and Building Materials, 2023, 369: 130539.

[3] CHEN Z, XU R T, LING Z, et al. Experimental and numerical analysis of shear performance of reinforced concrete beams with double openings [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(3): 195.

[4] ALI S R M, SAEED J A. Shear capacity and behavior of high-strength concrete beams with openings [J]. Engineering Structures, 2022, 264: 114431.

[5] SHOEIB A E, SEDAWY A E. Shear strength reduction due to introduced opening in loaded RC beams[J]. Journal of Building Engineering, 2017, 13: 28-40.

[6] 蔡健,叶嘉彬,左志亮,等.腹部开矩形孔预应力混凝土简支梁受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(8):100-107.
CAI J, YE J B, ZUO Z L, et al. Experimental study on shear behavior of simply supported prestressed concrete beams with rectangular web openings [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(8): 100-107. (in Chinese)

[7] 张学文,蔡健. 腹部开孔的钢筋混凝土简支梁抗剪承载力计算方法初探[J]. 工程力学,2000,17(增刊1):852-858.
ZHANG X W, CAI J. Preliminary study on calculation method of shear bearing capacity of simply supported reinforced concrete beams with openings in abdomen[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(Sup.1): 852-858. (in Chinese)

[8] 蔡健,王英涛,陈庆军,等.腹部开孔钢筋混凝土简支梁受剪承载力计算[J].建筑结构学报,2014,35(3):149-155.
CAI J, WANG Y T, CHEN Q J, et al. Calculation of shear capacity of reinforced concrete simply supported beam with web openings[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 149-155. (in Chinese)

[9] 蔡健,叶嘉彬,左志亮,等.矩形开孔钢筋混凝土伸臂梁受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(4):38-46.
CAI J, YE J B, ZUO Z L, et al. Experimental study on overhanging reinforced concrete beams with rectangular web openings[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 38-46. (in Chinese)

[10] 蔡健,陈眼云,李静. 开有矩形孔的钢筋混凝土梁的承载力近似计算[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),1995,23(3):36-43.
CAI J, CHEN Y Y, LI J. An approximate method for calculating the strength of reinforced concrete beam wtth rectangle openings [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 1995, 23(3): 36-43. (in Chinese)

[11] 蔡健,陈眼云,李静. 开圆孔或方孔的钢筋混凝土梁承载力近似计算[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),1995,23(1):44-53.
CAI J, CHEN Y Y, LI J. An approximate method for calculating the strength of reinforced concrete beams with circular or square openings [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 1995, 23(1): 44-53. (in Chinese)

[12] 零志彦.梁腹双开大洞口钢筋混凝土梁力学性能试验研究[D].南宁:广西大学,2022.
LING Z Y. Experimental study on mechanical properties of reinforced concrete beam with double large openings [D]. Nanning: Guangxi University, 2022. (in Chinese)

[13] 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.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[14] AKSOYLU C, YAZMAN Ş, ÖZKILIÇ Y O, et al. Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite [J]. Composite Structures, 2020, 249: 112561.

[15] ÖZKILIÇ Y O, AKSOYLU C, HAKEEM I Y, et al. Shear and bending performances of reinforced concrete beams with different sizes of circular openings[J]. Buildings, 2023, 13: 1989.

[16] 黄泰赟, 蔡健.腹部开有矩形孔的钢筋混凝土简支梁的试验研究[J].土木工程学报, 2009, 42(10):36-45.
HUANG T Y, CAI J. Experimental study on simply supported reinforced concrete beams with rectangular web openings[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(10): 36-45. (in Chinese)

[17] 蔡健,黄泰赟,李静.腹部开有圆孔的钢筋混凝土简支梁的试验研究[J].土木工程学报,2009,42(10): 27-35.
CAI J, HUANG T Y, LI J. Experimental study of simply supported reinforced concrete beams with circular web openings[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(10): 27-35. (in Chinese)

[18] 李青,袁广林,李庆涛,等. 剪弯段开孔混凝土梁补强后受力性能试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(8):67-72.
LI Q, YUAN G L, LI Q T, et al. Study of mechanical properties of rc beams after reinforcing the opening on the bending shear section [J]. Industrial Construction, 2015, 45(8): 67-72. (in Chinese)

[19] 李志奇,袁广林,邱辉. 剪弯段开双孔钢筋混凝土梁受力性能的试验研究[J]. 混凝土,2015(5):29-33.
LI Z Q, YUAN G L, QIU H. Study on mechanical properties of reinforced concrete beams with double holes on shear bending region[J]. Concrete, 2015(5): 29-33. (in Chinese)

[20] 黄泰赟,蔡健,陈静芬.开矩形孔的钢筋混凝土梁的试验研究

[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 20-24.
HUANG T Y, CAI J, CHEN J F. Experimental investigation of reinforced concrete beam with rectangular opening[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(10): 20-24. (in Chinese)

[21] ABDALLA H A, TORKEY A M, HAGGAG H A, et al. Design against cracking at openings in reinforced concrete beams strengthened with composite sheets [J]. Composite Structures, 2003, 60(2): 197-204.

[22] MANSUR M A, TAN K H, LEE S L. Design method for reinforced concrete beams with large openings [J]. ACI Journal, 1985, 82(4): 517-524.

[23] ELSANADEDY H M, AL-SALLOUM Y A, ALMUSALLAM T H, et al. Experimental and numerical study on FRP-upgraded RC beams with large rectangular web openings in shear zones [J]. Construction and Building Materials, 2019, 194: 322-343.

[24] HASSAN A, ATTA A M, EL-SHAFIEY T F. Restoration of the shear capacity for RC beams with web openings using precast SHCC plates[J]. Structures, 2020, 25: 603-612.

[25] ELANSARY A A, ATY A A A, ABDALLA H A, et al. Shear behavior of reinforced concrete beams with web opening near supports[J]. Structures, 2022, 37: 1033-1041.

[26] ELSAYED M, BADAWY S, TAYEH B A, et al. Shear behaviour of ultra-high performance concrete beams with openings [J]. Structures, 2022, 43: 546-558.

[27] 张墨平, 王晓刚, 宋小伟, 等. 腹板开大洞口RC梁的体外加固技术对比试验研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2018, 31(3): 267-274.
ZHANG M P, WANG X G, SONG X W, et al. Comparative study on external strengthening methods of RC beams with large web openings[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2018, 31(3): 267-274. (in Chinese)

[28] 王晓刚, 范文武 张墨平, 等. 腹板开大洞口钢筋混凝土梁的受剪性能试验研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2016, 29(3): 210-215.
WANG X G, FAN W W, ZHANG M P, et al. Experimental research on shear of reinforced concrete beams with large web openings[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2016, 29(3): 210-215. (in Chinese)

[29] ABDEL-KAREEM A H. Shear strengthening of reinforced concrete beams with rectangular web openings by FRP composites [J]. Advances in Concrete Construction, 2014, 2(4): 281-300.

[30] ALLAM S M. Strengthening of RC beams with large openings in the shear zone [J]. Alexandria Engineering Journal, 2005, 44(1): 59-78.

[31] JASSIM N Q, JARALLAH H K. Performance enhancement of RC beams with large web openings by using reactive powder composite: an experimental study [J]. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, 2018, 21(3): 405-416.

[32] EL-MAADDAWY T, EL-ARISS B. Behavior of concrete beams with short shear span and web opening strengthened in shear with CFRP composites [J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(1): 47-59.

[33] ZHANG Y, XIONG X Y, MUSA M M E, et al. Analysis of a compressive strength model for FRP-confined damaged concrete columns based on the Drucker-Prager yield criterion [J]. Structural Concrete, 2022, 23(3): 1816-1827.

[34] ALWANAS A A H, AL-MUSAWI A A, SALIH S Q, et al. Load-carrying capacity and mode failure simulation of beam-column joint connection: application of self-tuning machine learning model[J]. Engineering Structures, 2019, 194:220-229.

[35] 梁辰坤. 腹板开孔的混凝土工字梁抗剪性能试验研究与分析[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.
LIANG C K. Experimental study and analysis of I-shaped concrete beams with web opening [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[36] 殷芝霖, 李玉温. 预应力混凝土和钢筋混凝土开孔梁的受力性能及其设计方法[J]. 工业建筑, 1988, 18(8):2-10.
YIN Z L, LI Y W. Mechanical properties and design methods of prestressed concrete and reinforced concrete perforated beams[J]. Industrial Construction, 1988, 18(8):2-10. (in Chinese)

[37] 袁健, 易伟建. 钢筋混凝土梁受剪承载力可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(4): 109-128.
YUAN J, YI W J. Reliability analysis of shear capacity of reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(4): 109-128. (in Chinese)

[38] 郭圣祈, 汪梦甫. 等同现浇的装配式钢筋混凝土剪力墙抗弯承载力可靠度分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 202-212.
GUO S Q, WANG M F. Reliability analysis of the flexural load-bearing capacity of equivalent cast-in-place precast RC shear walls [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 202-212. (in Chinese)

[39] LIAO Q, YU J T, SU Y R, et al. Reliability-based design method for shear capacity of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC) beams [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02681.

[40] SIMWANDA L, GATHEESHGAR P, IKOTUN B D, et al. Reliability analysis of shear design provisions for cold formed steel sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 217: 108656.

[41] DING F X, XIONG S N, ZHANG H Y, et al. Reliability analysis of axial bearing capacity of concrete filled steel tubular stub columns with different cross sections [J]. Structures, 2021, 33: 4193-4202.

[42] 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)