

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.017

RC 开方形孔深梁的受剪承载力计算公式探讨

李 华¹, 李可飞², 张鹄志²

(1. 重庆重大建设工程质量检测有限公司, 重庆 400045; 2. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》附录 G 中深受弯构件受剪承载力计算公式 (GB/T 50010 公式) 未考虑孔洞影响、无法准确适用于开方形孔深梁设计的问题, 围绕开方形孔深梁受剪承载力计算方法进行了分析探讨。在统计相关试验数据评估传统方法可靠性的基础上, 通过非线性有限元仿真对比了 9 组构件的极限承载力, 分析了孔洞参数对受力性能的影响, 同时采用拟合方法给出了 GB/T 50010 公式的修正公式, 并验证了修正公式的适用性。分析结果表明: 传统围绕孔洞增配钢筋的经验配筋法可靠度不足; 开方形孔对深梁受剪承载力的削弱程度主要受孔洞位置和开孔率的影响, 孔洞形心到加载点与支座连线上压力路径的垂直距离越短、开孔率越大, 构件受剪承载力则越低, 且开孔行为主要削弱了混凝土对于构件受剪承载力的贡献; 修正后的计算公式通过调整混凝土抗剪贡献项, 可充分考虑单孔或双孔的不利影响, 在特定孔洞尺寸与位置范围内, 有效提高开孔深梁受剪承载力预测的准确性。

关键词: 深受弯构件; 开方形孔深梁; 受剪承载力; 开孔率; 压力路径

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)06-0138-09

Investigation on formula of shear capacity to RC deep beam with square openings

LI Hua¹, LI Kefei², ZHANG Huzhi²

(1. Chongqing Chongda Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd., Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The shear capacity formula for deep flexural members in Appendix G of GB/T 50010-2010 *Code for Design of Concrete Structures*, namely the GB/T50010 formula, does not account for the influence of openings and thus cannot be accurately applied to the design of deep beams with square openings. To address this issue, the calculation method for the shear capacity of deep beams with square openings was investigated. Based on the statistical analysis of relevant test data to evaluate the reliability of the traditional method, the ultimate bearing capacity of nine groups of members was compared through nonlinear finite element simulation. The influence of opening parameters on the force performance was analyzed. At the same time, the modified formula of the GB/T50010 formula was given by using the fitting method, and the applicability of the modified formula was verified. The results indicate that the traditional empirical reinforcement method, which involves adding additional reinforcement around openings, lacks sufficient reliability. For a deep beam with square openings, the reduction in shear capacity is primarily governed by the opening position and opening ratio. Specifically, shorter vertical distances from the opening centroid to the compressive path (i.e., the line connecting the loading point and the support) and a larger opening ratio correlate with a decrease in the member's shear capacity. Moreover, the opening behavior mainly reduces the contribution of concrete to the shear capacity of the member; the modified formula, by adjusting the concrete's shear contribution term, can fully consider the adverse effects of single or double openings. Within a defined range of opening sizes and positions, the modified formula significantly improves the prediction accuracy of the shear capacity of a deep beam with openings.

Key words: deep flexural member; deep beam with square opening; shear capacity; opening ratio; compressive path

钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 深受弯构件^[1-4] 在工程中得到广泛应用, 由于它们在受弯时不符合平截面假定, 使得基于一维杆件和截面平衡的传统方法^[5] 在设计中难以应对。为此, 学者们进行了大量试

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2024JJ9062)

作者简介: 李华 (1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事工程质量检测方法与结构优化设计研究。E-mail: 565332268@qq.com

通信作者: 张鹄志 (1984—), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构基本理论与结构优化设计研究。E-mail: zhanghz_hnu@163.com

引用本文: 李华, 李可飞, 张鹄志. RC 开方形孔深梁的受剪承载力计算公式探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 138-146.

LI Hua, LI Kefei, ZHANG Huzhi. Investigation on formula of shear capacity to RC deep beam with square openings[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 138-146.

验研究以了解这类构件的受力机理,研究内容包括剪跨比和跨高比^[6-9]、纵筋和水平分布筋及箍筋的配筋率^[9-10]、截面有效高度^[11]、孔洞尺寸和间距^[6]等对受剪承载力和其他受力性能的影响。

我国混凝土结构设计规范(GB 50010 系列)选用的 RC 深梁设计方法也经历了数代发展,最早是 1987 年规范编制组基于 490 根深梁试验与仿真结果的统计,在一般梁承载力计算公式基础上开展经验性修正,构建了我国特有的深梁承载力经验计算公式及设计方法;随着规范 3 次修订,这套方法不断调整经验系数以提升设计可靠度,直到现行的 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》(以下简称“GB/T 50010”)还将相应内容从正文条文调整到了附录。推动这种改进的原因之一,是近些年来有不少学者对这些公式进行了评估,认为它们存在一系列问题,包括高估水平腹筋和低估竖向腹筋对深梁受剪承载力的贡献^[12]、对大尺寸构件的尺寸效应影响考虑不周^[13]等,可能造成最终设计的可靠度不足;它们在合理性和经济性等方面稍逊于美国 ACI 318-19 *Building Code Requirements for Structural Concrete* 推荐的拉压杆模型方法^[14-15]。因此,对这套方法的修正成为一项研究课题,有学者对受剪承载力公式计算剪跨比限定条件给出了调整建议^[16],有学者补充了间接荷载作用下的设计方法^[17]。此外,还有学者致力于将这套方法拓延到包含 FRP 筋^[13]、高强轻骨料混凝土^[7,18]等新材料的深梁设计中,以顺应由材料进步推动的结构发展。

需要指出的是,为了满足各类管道穿行的工程需求,有时需要在深梁上开孔,这势必会造成构件应力场更加复杂,设计也相应更加困难。但相关研究大多集中在实腹深梁,少量开孔深梁受力特性研究^[8,15,19-20]主要集中于试验现象描述,对孔洞参数与承载力关系的分析较为有限。此外,GB/T 50010 中也未针对这类深梁给出具体设计建议。因此,探索开孔深梁的受力性能,了解孔洞尺寸参数的影响,对于更合理地完成工程设计十分重要。为此,本文针对开孔深梁的孔洞位置和尺寸,通过对近年文献中的相关试验数据的统计并结合非线性有限元仿真(以下简称“仿真”)分析,对 GB/T 50010 附录 G 中建议的深受弯构件受剪承载力计算公式(以下简称“GB/T 50010 公式”)进行评估,并提出考虑孔洞位置与开孔率影响的受剪承载力修正公式,以提升开孔深梁设计的准确性与合理性。

1 GB/T 50010 公式在开孔深梁上的应用评估

1.1 GB/T 50010 公式

GB/T 50010 公式忽略了水平分布筋的贡献率可达 10%~30%。根据弹性力学理论,随着截面高度的增加,深梁正截面受弯承载力提高幅度大于斜截面受剪承载力,故深梁大多呈现斜截面剪切破坏形态。GB/T 50010 推荐按式(1)(2)计算均布荷载和集中荷载(为主)作用下深梁受剪承载力 V_{GB} 。

$$V_{GB} \leq 0.7 \frac{8 - l_0/h}{3} f_t b h_0 + \frac{l_0/h - 2}{3} f_{yv} \frac{A_{sv}}{s_h} h_0 + \frac{5 - l_0/h}{6} f_{yh} \frac{A_{sh}}{s_v} h_0 \tag{1}$$

$$V_{GB} \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + \frac{l_0/h - 2}{3} f_{yv} \frac{A_{sv}}{s_h} h_0 + \frac{5 - l_0/h}{6} f_{yh} \frac{A_{sh}}{s_v} h_0 \tag{2}$$

式中: l_0 为计算跨度; h 为截面高度; h_0 为截面有效高度, $h_0 = h - a_s$,其中 a_s 为纵向受拉钢筋合力点至截面受拉边缘的距离,跨中截面 a_s 取 $0.1h$,支座截面 a_s 取 $0.2h$; b 为截面宽度,即梁体厚度; f_t 为混凝土抗拉强度; f_{yv} f_{yh} 分别为竖向和水平分布钢筋的抗拉强度; A_{sv} 、 A_{sh} 分别为竖向和水平分布钢筋的总截面积; s_v 、 s_h 分别为竖向和水平分布钢筋的间距; λ 为计算剪跨比,当 $l_0/h \leq 2.0$ 时,取 $\lambda = 0.25$,故式(2)可简化为

$$V_{GB} \leq 1.4 f_t b h_0 + 0.5 f_{yh} \frac{A_{sh}}{s_v} h_0 \tag{3}$$

GB/T 50010 并未推荐针对开孔构件的具体设计方法。对于开孔深梁,当孔洞率不过大时,工程惯常做法是先将其视为实腹,据式(1)(2)计算出受力钢筋后,再在孔洞四周增配补强构造钢筋。这种做法的优点是操作简便易实现。

1.2 基于试验统计的应用评估

表 1 为已有相关开孔深梁试验研究成果^[8,15,19-20]的统计,由表 1 可见:①所有试件的 V_t/V_{GB} 均小于 1,且比值集中在 0.5~0.8,表明受剪承载力的实测值均低于其设计值;②大部分构件的 F_M 小于 F_V ,即理论上该构件按实腹考虑时应发生弯曲破坏,但试验结果却显示构件发生剪切破坏,表明开孔对深梁受剪承载力的削弱程度高于受弯承载力。以上两点表明 GB/T 50010 公式在开孔深梁上可靠性不足。此外,表 1 反映出已有

试验成果中依据 GB/T 50010 设计的开孔深梁试件数量有限,且多集中于特定孔洞参数,导致 GB/T 50010 公式对开孔深梁的适用性缺乏较全面的验证。

表 1 经验法设计的 RC 开方形孔深梁试验结果统计

Table 1 Statistical results of test on RC deep beams with square openings designed by empirical method																	
数据来源	试件编号	尺寸参数		底部纵筋		竖向分布钢筋		水平分布钢筋		混凝土		承载力					
		b/mm	λ	$\rho/\%$	f_y/MPa	$\rho_{yv}/\%$	f_{yv}/MPa	$\rho_{yh}/\%$	f_{yh}/MPa	f_t/MPa	f_c/MPa	V_l/kN	V_{GB}/kN	V_l/V_{GB}	F_M/kN	F_V/kN	
文献[19]	KSL-C-a-1	160	0.25	0.35	396	0.16	590	0.39	590	2.03	18.3	338	613	0.55	644	943	
	KSL-C-b-1	160	0.25	0.35	396	0.16	590	0.39	590	1.99	20.5	259	605	0.43	644	1 728	
	KSL-C-c-1	160	0.25	0.35	396	0.16	590	0.39	590	2.18	19.3	460	646	0.71	314	323	
文献[15]	KSL-2-C	160	0.25	0.31	497	0.41	590	0.33	590	2.12	19.7	230	378	0.61	297	378	
	KSL-3-C	160	0.25	0.31	497	0.42	590	0.33	590	2.16	20.0	280	384	0.73	297	384	
文献[8]	B-9	120	0.25	1.49	335	0.56	300	1.43	335	2.32	24.9	210	271	0.78	386	271	
文献[20]	KSL-2	160	0.25	0.38	488	1.73	512	0.55	512	2.20	22.7	385	460	0.84	436	460	

注: ρ 、 ρ_{yv} 、 ρ_{yh} 分别为梁底纵筋、竖向分布钢筋和水平分布钢筋的配筋率; f_c 为混凝土的抗压强度; V_l 为试件的受剪承载力实测值; V_{GB} 为试件取实测材料强度平均值后按式(2)计算得到的受剪承载力设计值; F_M 、 F_V 分别为 GB/T 50010 公式计算得到的受弯承载力和受剪承载力设计值对应的极限荷载设计值。

1.3 仿真评估

孔洞位置和孔洞尺寸是影响开孔深梁承载力的重要因素^[21-22],因此以孔洞位置和尺寸为变量,补充 48 根腹部开孔的仿真深梁进行评估分析。

1.3.1 仿真构件概况及分组

仿真构件划分为 9 组,所有构件基本尺寸(除孔洞参数外)、材料强度和配筋方式均相同,主要设计参数如图 1 和表 2 所示(表中未列出的基本尺寸见图 1);仿真构件混凝土采用 C40,梁底受拉纵筋为 8 Φ 32,箍筋和水平分布钢筋均为 Φ 12@200,在孔洞四周每边增配 2 Φ 12(布成一排)钢筋以补强。前 6 组为开单孔深梁组,设计变量依次为:孔洞的水平位置、跨中开孔时的孔洞竖向位置、加载点与支座连线上开孔时的孔洞位置、一侧开孔时的孔洞竖向位置、加载点与支座连线方向上开孔时的孔洞尺寸、跨中开孔时的孔洞尺寸;第 7 组与第 8 组为开异侧双孔深梁组,设计变量分别为两侧加载点与支座连线上均开孔时的孔洞尺寸、一侧加载点与支座连线上开较大孔洞时另一侧较小孔洞的位置;第 9 组为开同侧双孔深梁组,设计变量为双孔的孔洞尺寸或位置。需要说明的是,考虑到深梁多用作转换构件,常承受较大的集中力,工程中在梁上开孔大多为满足设备管道通行需求,孔洞多设置为圆形或方形,仅从形状来看,两者对构件极限承载力的影响相差不大^[22],故算例中的构件均为集中荷载作用下开方形孔的深梁。

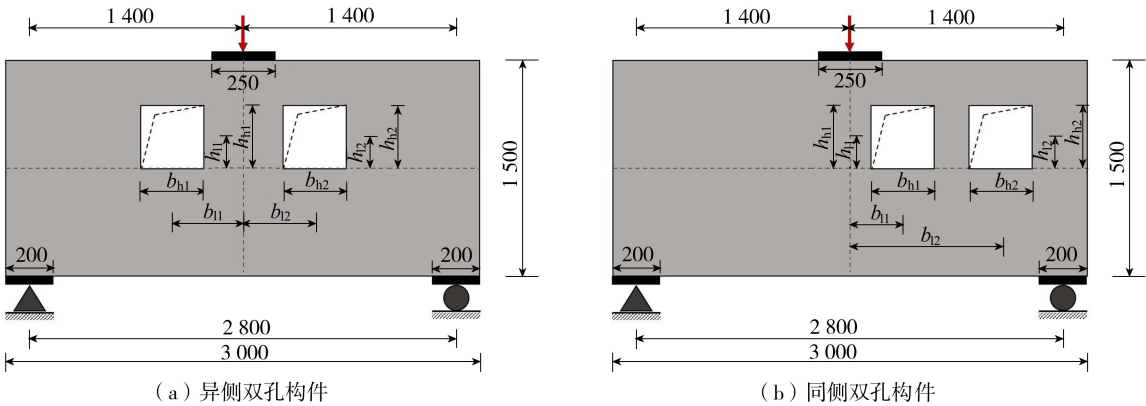


图 1 开孔深梁仿真构件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimension of simulated members for deep beam with openings (unit: mm)

1.3.2 有限元参数及模型验证

采用有限元程序 ABAQUS 进行有限元分析,钢筋与混凝土采用内置区域约束方式。混凝土单元采用 C3D8R 八节点实体单元和 CDP 损伤塑性模型进行模拟,CDP 模型中的膨胀角设为 54° ^[23]。CDP 模型综合考虑了混凝土材料的刚度退化和不可逆变形,引入累积损伤变量 DCDP 来表示损伤程度,其值为 0 表示材料未损坏,1 表示完全失效或损坏。钢筋单元采用 B31 两节点梁单元和双线性模型进行模拟,双线性模型通

过弹性模量、屈服应力和切线模量定义应力-应变关系曲线,适用于符合 Mises 屈服准则的材料。材料本构模型选取如图 2 所示(图中 E_c 为混凝土受压的弹性模量; E_s 为钢筋的弹性模量)。在单元网格划分时,梁体以及支座与加载点处垫块的单元边长分别设为 50 mm 和 25 mm。

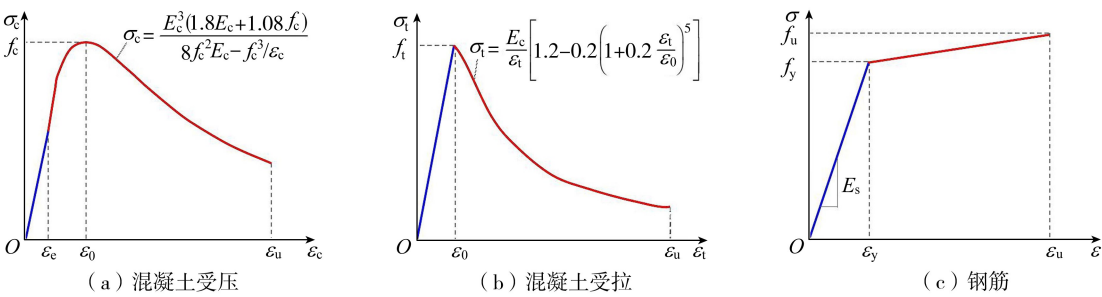


图 2 材料本构模型曲线

Fig. 2 Constitutive model curves of materials

采用文献[19]中的某简支开孔深梁试件,基于该试件的实测材料强度和本节的本构模型,以及混凝土弹性模量取 30 GPa、泊松比取 0.2,HRB335 级和 HPB300 级钢筋弹性模量分别取 200 GPa 和 210 GPa、泊松比均取 0.3,开展仿真分析,结果如图 3 和图 4 所示。

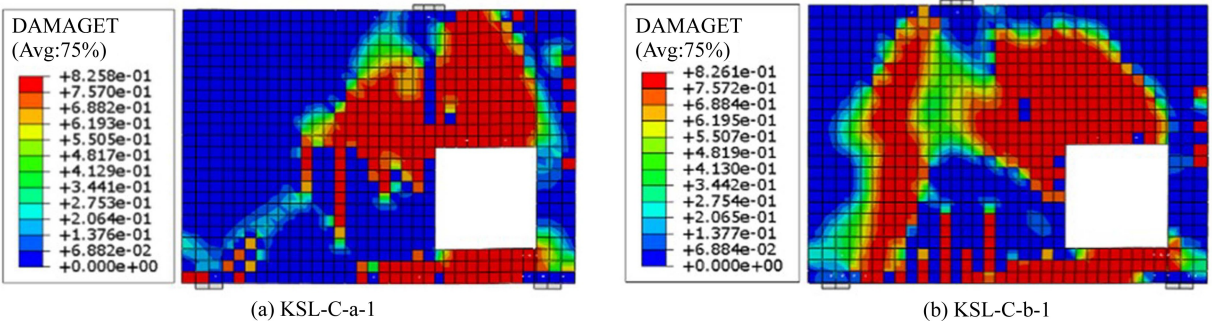


图 3 仿真分析中的混凝土受拉损伤云图

Fig. 3 Concrete tensile damage cloud map in simulation analysis

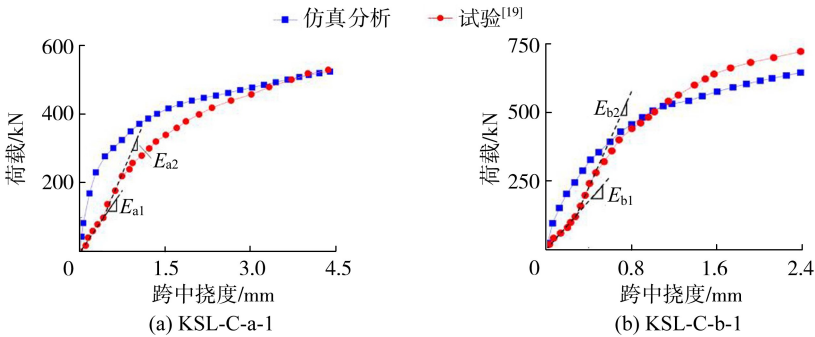


图 4 仿真分析与试验荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curve in simulation analysis and experiment

图 3 结果表明仿真构件的混凝土受拉损伤与文献[19]中试件裂缝发展及最终损伤形态规律相近;从图 4 可以看出,仿真与试验得到的荷载挠度曲线均较为吻合,此外在加载初期,试件刚度略小于仿真构件,随后其刚度又短暂升高,两组试验曲线的斜率分别从 E_{a1} 和 E_{b1} 增大至 E_{a2} 和 E_{b2} ,该现象可能与试验早期加载时支座位移和变形有关,导致观察到的试件刚度在初期略低于实际值。经过以上对比,本文所采用的有限元模型的有效性和可靠性得到证实。

1.3.3 承载力仿真结果

对于表 2 中的 9 组构件,基于上述的材料本构模型,取 GB/T 50010 建议的材料强度标准值,即 C40 混凝土抗压和抗拉强度分别取 26.8 MPa 和 2.39 MPa,HRB400 级和 HPB300 级钢筋抗拉强度分别取 400 MPa 和

300 MPa,HRB400 级钢筋弹性模量取 200 GPa、泊松比取 0.3(其他参数同前),开展仿真分析,得到极限承载力 V_s 如表 2 所示。从表 2 可知,算例的 V_s 均小于 V_{GB} ,表明开孔造成深梁承载力下降,再次印证按式(1)(2)预测开孔深梁极限承载力是偏危险的。

2 开孔深梁受力性能分析

2.1 混凝土受拉损伤与主压应力

仿真结果(表 2)表明,开孔对构件承载力的影响主要与孔洞位置及开孔尺寸有关,因此选取最能反映这两个关键变量的第 1、3、5 组构件对混凝土受拉损伤(图 5)与主压应力分布(图 6)做进一步的分析与讨论。

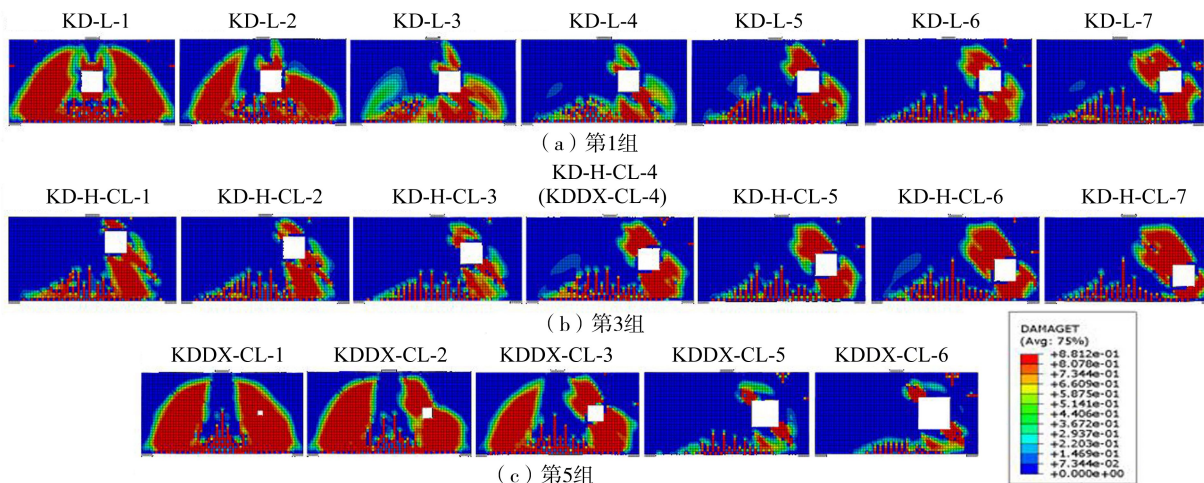
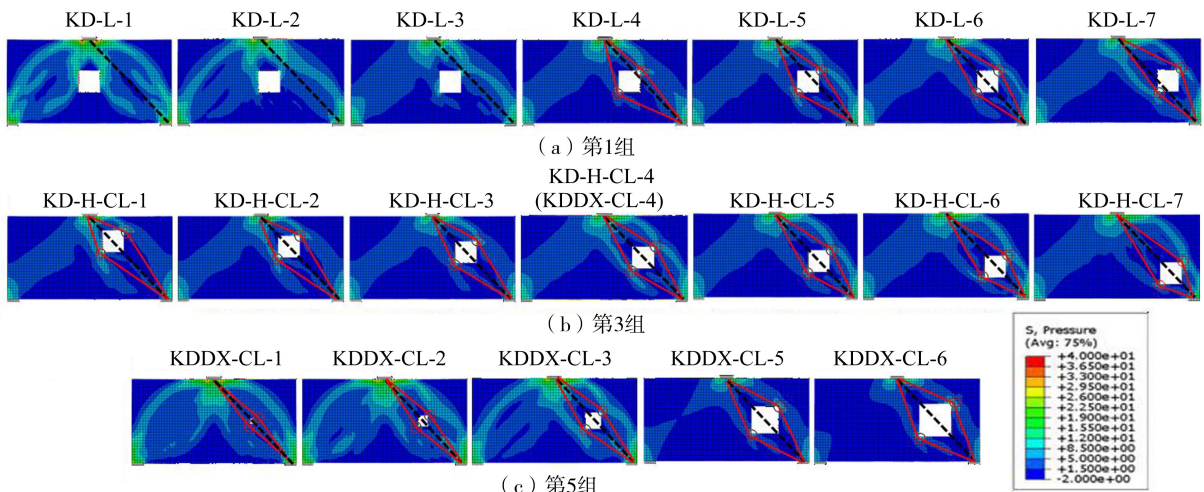


图 5 混凝土的受拉损伤云图

Fig. 5 Tensile damage cloud map of concrete



注:黑色虚线为“直接压力路径”,红色实线为“等代压力路径”。

图 6 混凝土的主压应力分布云图

Fig. 6 Principal stress distribution cloud map of concrete

- a. 第 1 组:构件的孔洞均位于梁腹,设计变量为孔洞的水平位置,具体为孔洞形心沿梁水平方向向右侧边逐步偏移。由图 5(a)可知,随着孔洞从跨中向侧边偏移,构件上混凝土的拉伸损伤也愈发集中在开孔侧,从而引起该侧抗力下降;由图 6(a)可知,在构件 KD-L-1、KD-L-2、KD-L-3 中,当孔洞位置未阻断“直接压力路径”(美国规范 ACI 318-19 称之为“load path”)时,该连线部位明显形成了一条“直接压力路径”将荷载传递给支座,而在构件 KD-L-4~KD-L-7 中,当孔洞位置阻断了这条连线时,也阻碍了“直接压力路径”的形成,需要形成从孔洞两侧绕过孔洞的“等代压力路径”。孔洞与“直接压力路径”之间距离的变化会对构件造成不同程度的影响,而这种经验配筋方式却不能相应抵消孔洞位置改变对构件承载力造成的不利影响。
- b. 第 3 组:构件孔洞的形心均位于集中力“直接压力路径”上,设计变量为孔洞在该路径上的不同竖向

高度。由图 5(b)可知,该组的 7 个构件破坏形态十分相似;由图 6(b)可知,该组的 7 个构件均形成了从孔洞两侧绕过孔洞、“传力”水平基本相当的两条“等代压力路径”。孔洞与“直接压力路径”之间距离保持不变但孔洞位置改变时,并未对构件造成明显不同的影响,由此可见孔洞位置并不是影响开孔深梁承载力的直接因素,而是孔洞与“直接压力路径”的距离。

c. 第 5 组:构件孔洞的形心均位于集中力“直接压力路径”上,且位于梁腹,设计变量为开孔率。由图 5(c)可知,开孔率越大,构件上混凝土的拉伸损伤也越集中在开孔侧,当开孔率大到一定的程度时,实腹侧几乎不再发生损伤;由图 6(c)可知,开孔率越大,开孔侧“等代压力路径”上的应力水平比实腹侧“直接压力路径”上的应力水平高出越多,表明了孔洞尺寸越大,开孔侧的应力集中现象越明显。孔洞尺寸越大对构件造成的不利影响越严重,而这种经验配筋方式却不能相应抵消孔洞尺寸改变对构件造成的不利影响。

2.2 孔洞位置和尺寸对深梁受力性能的影响

由前文可知,孔洞与“直接压力路径”的距离和孔洞尺寸是影响开孔深梁“传力”的控制因素,而且经验设计法中简单地围绕洞口布置钢筋的方式,作为补强受开孔影响的“压力路径”的措施,既不充分,也不够有针对性。因此,合理地设计孔洞附近的补强钢筋,包括确定其方向、位置、长度、数量和直径等,成为开孔深梁配筋设计最重要的问题之一。

孔洞位置和开孔率均是影响深梁承载力的重要因素,它们主要影响构件混凝土中从加载点到支座的“直接压力路径”的形成,从而对构件极限承载力起着决定性作用。仿真深梁的承载力随孔洞形心到“直接压力路径”最短距离(l_d)和随开孔率(φ)的分布如图 7 所示,当 l_d 减小、 φ 增大时, V_s/V_{GB} 整体呈现降低趋势,即孔洞距“直接压力路径”越近、开孔率越大,构件受剪承载力越低。需要说明的是,数据点分布的离散性与其他变量的干扰有关,特别是 l_d 与 φ 的互相干扰。

为更深入地观察,进一步分组讨论 9 组仿真构件极限承载力随孔洞参数的变化。由于开孔率 φ 实质上由孔洞面积 A_o 决定,且本文仿真对象均为开方形孔深梁, A_o 可由孔洞边长 b_o 确定,因此以距离比 l_d/l 和边长比 b_o/l 为变量(l 为梁的长度),绘制 V_s 的分布散点图,结果如图 8 所示(图中 V_m 为修正后的受剪承载力)。

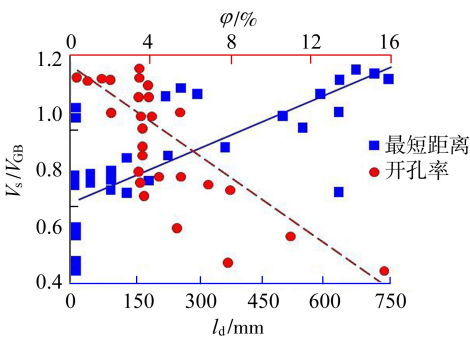


图 7 深梁承载力与孔洞参数的关系
Fig. 7 Relationship between shear capacity of deep beams and opening parameters

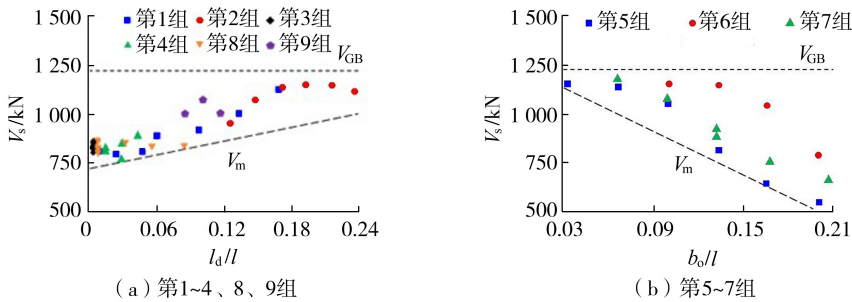


图 8 V_s 、 V_m 与 V_{GB} 对比
Fig. 8 Comparison of V_s , V_m , and V_{GB}

由图 8(a)可看出,随着 l_d/l 增大, V_s 大致呈线性提高;由图 8(b)可看出,随着开孔率的增大, V_s 大致呈线性降低。可见,孔洞形心距“直接压力路径”越近、开孔率越大,构件受剪承载力越低。

3 GB/T 50010 公式修正

以 l_d/l 和 b_o/l 为变量,根据图 8 中构件的 V_s 分布对深梁受剪承载力计算公式(即式(3))进行修正拟合。由第 2.2 节分析结果可知,各组 V_s 随相应变量基本呈线性分布,故公式拟合将基于一次函数进行;此外,式(3)由两部分组成:第一项为减压区混凝土提供的受剪承载力,第二项为水平分布钢筋提供的受剪承载力。由于开孔深梁中水平钢筋的配筋率通常不低于实腹深梁,表明孔洞主要削弱的是混凝土对受剪承载

力的贡献(即式(3)的第一项)。因此,修正思路为给式(3)的第一项乘以一个考虑孔洞参数的降低因子。经过多元线性拟合,修正后考虑孔洞参数影响的深梁受剪承载力 V_m 计算公式为

$$V_m \leqslant \left(1.231 \frac{l_d}{l} - 3.565 \frac{b_o}{l} + 0.99\right) \times 1.4f_tbh_0 + 0.5f_{yh} \frac{A_{sh}}{s_v}h_0 =$$
$$\left(\frac{1.723l_d - 4.991b_o}{l} + 1.386\right)f_tbh_0 + 0.5f_{yh} \frac{A_{sh}}{s_v}h_0 \tag{4}$$

9 组构件拟合直线见图 8,可以看出绝大多数构件 V_s 大于 V_m ,证明了基于式(4)预测开孔深梁受剪承载力计算有着较高的可靠度;而 V_s 略小于 V_m 的个别构件,其孔洞位置十分接近构件边缘,说明孔洞位置过于接近受压区或受拉区边缘以及孔洞边长过大将会使开孔对构件承载力的不利影响加剧。因此,对于开孔深梁,孔洞边缘距构件边缘不宜小于 0.15 倍截面高度。第 9 组算例为同侧双孔深梁,对于该组中的大部分构件,规定同侧开孔时孔洞间距必须大于或等于最大的孔洞边长,此时直接取影响较大的孔洞按式(4)计算得到的 V_m 小于 V_s ,表明按式(4)预测承载力仍是合理的。

对表 1 中开方形孔且最终完全由斜截面控制失效的深梁试件,用式(4)进行受剪承载力计算,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,所有开孔深梁试件的 V_t/V_m 均不小于 1,证明了修正公式(式(4))的可靠性。需要特别说明的是,对于文献[15,20]中的对称开孔试件,由于两个孔洞分别对两侧各自的“直接压力路径”影响相同,所以按仅一个孔洞的相关参数计算受剪承载力,式(4)也是适用的。继而不难推断,对于异侧双孔深梁,可按两侧孔洞单独开设的两个开单孔深梁分别计算受剪承载力,再取其中的较小值作为原深梁的受剪承载力。此外,在本文算例中,最大开孔率为 8%,而当深受弯构件开孔率大于 6%时,孔洞对构件承载力的不利影响也会加剧^[6]。因此,本文认为深梁开孔率不得大于 6%,且每个构件上的孔洞数量不宜超过 1 个,不应超过 2 个。

表 3 试件的 V_t 与 V_m 对比
Table 3 Comparison of V_t and V_m of specimens

开孔形式	试件编号	l_d/l	b_o/l	V_t/kN	V_m/kN	V_t/V_m
单侧开孔	KSL-C-a-1 ^[19]	0.058	0.259	338	228.1	1.48
单侧开孔	KSL-C-b-1 ^[19]	0.013	0.259	259	203.1	1.27
对称双孔	KSL-2-C ^[15]	0.008	0.147	230	229.6	1.00
对称双孔	KSL-3-C ^[15]	0.055	0.147	280	248.9	1.12
对称双孔	KSL-2 ^[20]	0.010	0.167	385	272.9	1.41

4 结 论

- a. 对于开孔深梁,先视为实腹深梁计算受力钢筋所需的用量,再在孔洞四周构造性地增配补强钢筋的工程习惯做法会导致构件承载力可靠度不足,实际极限承载力仅为按 GB/T 50010 推荐深受弯构件设计方法所得受剪承载力计算值的 50%~80%。
- b. 对于开方形孔洞的深梁,孔洞形心到“直接压力路径”的垂直距离越短、开孔率越大,其受剪承载力就越低。
- c. 据孔洞影响调整混凝土受剪承载力项系数得到的开孔深梁受剪承载力计算修正公式,在开孔率不大于 6%、孔洞数量不超过 2 个的限定条件下,可以充分考虑开单孔和双孔对深梁承载力的影响,提高开孔深梁受剪承载力预测的可靠性,实际极限承载力为按修正公式计算受剪承载力值的 1.0~1.5 倍。

参考文献:

[1] 仲济涛,王来,李云峰,等. 基于拉压杆模型的预应力深梁抗剪承载力[J]. 中国公路学报,2018,31(5):92-98. (ZHONG Jitao, WANG Lai, LI Yunfeng, et al. Shear-carrying capacity of prestressed concrete deep beams based on the strut-and-tie model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5):92-98. (in Chinese))

[2] 张鹤志,王熙,谢献忠,等. 不同荷载工况下钢筋混凝土深梁的拓扑优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):366-372. (ZHANG Huzhi, WANG Xi, XIE Xianzhong, et al. Topology optimization design for RC deep beams under different load conditions[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(4):366-372. (in Chinese))

[3] 金浏,宋博,张江兴,等. 钢筋混凝土深受弯构件抗剪承载力计算修正方法[J]. 土木工程学报,2023,56(7):23-33. (JIN Liu,SONG Bo,ZHANG Jiangxing,et al. A modified method for calculating the shear capacity of RC deep flexural members [J]. China Civil Engineering Journal,2023,56(7):23-33. (in Chinese))

[4] 汪基伟. 五跨弹性支承连续深受弯梁的内力计算[J]. 河海大学学报,1998,26(3):109-111. (WANG Jiwei. Calculation of internal forces of elastically supported continuous deep beams [J]. Journal of Hohai University, 1998, 26 (3) : 109-111. (in Chinese))

[5] 袁健,易伟建. 钢筋混凝土浅梁受剪承载力的修正计算[J]. 建筑结构学报,2020,41(3):71-80. (YUAN Jian,YI Weijian. Modified calculation of shear capacity of slender reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Structures,2020,41(3):71-80. (in Chinese))

[6] 黄泰赞,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 Taiyun,CAI Jian. Experimental study on simply supported reinforced concrete beams with rectangular web openings[J]. China Civil Engineering Journal. 2009,42(10):36-45. (in Chinese))

[7] 吴涛,刘喜,王宁宁,等. 高强轻骨料混凝土深受弯构件受剪性能试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(10):40-48. (WU Tao,LIU Xi,WANG Ningning, et al. Experimental study on shear behavior of deep flexural members made of high-strength lightweight aggregate concrete[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(10):40-48. (in Chinese))

[8] 王旭. 钢筋混凝土开洞短梁的受剪性能和承载力研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2011.

[9] 郑李昂. 带锚固板高强钢筋混凝土深梁受剪性能试验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2021.

[10] 蒋宁. 剪跨比为 1.5 的无腹筋简支梁受剪性能试验研究及有限元分析[D]. 重庆:重庆大学,2005.

[11] 李烨,李哲,易伟建,等. 无腹筋混凝土短梁受剪承载力尺寸效应研究[J]. 土木工程学报,2022,55(12):1-12. (LI Ye,LI Zhe,YI Weijian,et al. Study on size effect in shear strength of reinforced concrete short beams without web reinforcement[J]. China Civil Engineering journal,2022,55(12):1-12. (in Chinese))

[12] 易伟建,黄斌,陈晖. 腹筋对连续深梁剪切破坏影响的有限元分析[J]. 计算力学学报,2017,34(2):175-182. (YI Weijian, HUANG Bin,CHEN Hui. Finite element analysis on effect of web reinforcement on shear failure of continuous deep beams. [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2017,34(2):175-182. (in Chinese))

[13] 金浏,雷宇霜,杜修力. BFRP 筋及钢筋混凝土深梁剪切破坏尺寸效应对比分析[J]. 土木工程学报,2022,55(8):55-66. (JIN Liu,LEI Yushuang,DU Xiuli. Comparison of size effect in shear failure of BFRP and steel-reinforced concrete deep beams [J]. China Civil Engineering Journal,2022,55(8):55-66. (in Chinese))

[14] 林云. 钢筋混凝土简支深梁的试验研究及有限元分析[D]. 长沙:湖南大学,2011.

[15] 贺华军. 开孔简支深梁的优化配筋试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.

[16] 陈晖,易伟建,黄斌. 基于数据库的连续深受弯构件受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(5):273-283. (CHEN Hui,YI Weijian, HUANG Bin. Research on shear strength of reinforced concrete continuous deep flexural members based on database[J]. Journal of Building Structures,2016,37(5):273-283. (in Chinese))

[17] 祝有天. 钢筋混凝土开洞深梁在间接荷载作用下的试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

[18] 魏慧. 大尺寸高强轻骨料混凝土深受弯构件受剪性能研究[D]. 西安:长安大学,2018.

[19] 黄仕海. 钢筋混凝土 D 区构件的研究与分析[D]. 长沙:湖南大学,2013.

[20] 张鹄志,徐文韬,戚菁菁,等. 拓扑优化设计方法与经验设计方法的 RC 开孔深梁对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(1):128-136. (ZHANG Huzhi,XU Wentao,QI Jingjing, et al. Comparative experimental study of RC deep beam with openings between topology optimization and empirical design method[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021, 18(1):128-136. (in Chinese))

[21] EL-KASSAS A I,HASSAN H M,ARAB M A E S. Effect of longitudinal opening on the structural behavior of reinforced high-strength self-compacted concrete deep beams[J]. Case Studies in Construction Materials. 2020,12:e00348.

[22] AL-SHEIKH S A. Flexural behavior of RC beams with opening[J]. Concrete Research Letters,2014,5(2):812-824.

[23] SALEH M, ALHAMAYDEH M, ZAKARIA M. Finite element analysis of reinforced concrete deep beams with square web openings using damage plasticity model[J]. Engineering Structures,2023,278:115496.