



腹部开孔的钢筋混凝土梁抗弯性能有限元分析

王晓煜¹, 李九阳², 王晓雨²

(1. 山西省建筑设计研究院有限公司, 山西 太原 030013; 2. 长春工程学院 土木学院, 吉林 长春 130012)

摘要:为解决现代建筑中管线敷设与主体结构的空间冲突问题,本文以腹部开孔的钢筋混凝土梁为研究对象,采用有限元软件 ABAQUS 建立 7 根开孔梁及 1 根实腹梁的非线性数值模型,通过四点弯曲加载模拟,重点分析了孔洞形状、横向位置及数量对梁极限承载力的影响规律。结果表明:圆形孔因无尖锐角点,应力集中效应最弱,对承载力和延性的折减最小;孔洞越靠近支座,极限承载力的削弱越显著,破坏模式由延性弯曲转变为脆性剪切;孔洞数量增加会引发“削弱累积效应”,导致承载力非线性加速下降,并易诱发沿多孔连通路路径的整体性脆性破坏。本文成果可为腹部开孔钢筋混凝土梁的工程应用与优化设计提供理论依据。

关键词:钢筋混凝土梁;腹部开孔;抗弯性能;有限元分析

中图分类号: TU375.1; TU311.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)06-0015-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.06.061

Finite element analysis on bending resistance of reinforced concrete beams with abdominal incision

WANG Xiaoyu¹, LI Jiuyang², WANG Xiaoyu²

(1. Shanxi Provincial Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030013, Shanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, Jilin, China)

Abstract: To address the spatial conflict between pipeline laying and the main structure in modern buildings, reinforced concrete beams with abdominal incisions are taken as the research object. The finite element software ABAQUS is used to establish nonlinear numerical models of 7 beams with incisions and 1 solid-web beam. Through four-point bending loading simulations, the influence of the shape, lateral position, and number of the incisions on the ultimate bearing capacity of the beams is analyzed in detail. Results show that circular holes have the weakest stress concentration effect due to the absence of sharp corner points, minimizing degradation of bearing capacity and ductility; The closer the incision is to the bearing, the more pronounced the weakening of the ultimate bearing capacity, and the failure mode shifts from ductile bending to brittle shear; An increase in the number of incisions triggers a “weakening cumulative effect”, leading to a nonlinear accelerated decrease in bearing capacity and easily inducing overall brittle failure along the multi-incision connecting path. The results provide a theoretical basis for the engineering application and optimization design of abdominal incision reinforced concrete beams.

Key words: reinforced concrete beam; abdominal incision; bending resistance; finite element analysis

收稿日期: 2025-12-4

基金项目: 吉林省科学技术厅科技创新基地(平台)建设项目(YDZJ202302CXJD052);吉林省科学技术厅科技发展计划资助项目(20210203178SF)

作者简介: 王晓煜(1998—),男,工程师,从事结构设计方面的研究。

通信作者: 李九阳(1972—),女,教授,从事土木工程与新材料方面的研究。

随着现代建筑功能日趋复杂与智能化,对空间利用率及设备管线布设的要求不断提高。在商业、医疗、工业等建筑中,密集的管线系统与主体结构在空间分配上存在冲突。传统设计将结构与管线分离,通常导致管线敷设于梁下,显著压缩了建筑净高^[1]。为保障使用功能,往往需增加层高或压缩管线空间,从而造成建造成本上升或运维困难。因此,实现结构与管线的协同设计,推动建筑空间向集约化与智能化发展,已成为提升建筑空间效率与功能品质的关键。

在此背景下,腹部开孔钢筋混凝土梁作为一种创新结构构件应运而生。该管线允许杂乱的管线经由腹部孔洞隐藏于结构内部,有效提升了室内空间的整洁度与美观性。然而,腹板开孔在优化建筑功能的同时,也从根本上改变了梁的受力状态,引发复杂的结构性能问题。孔洞直接减小了梁的有效截面面积与惯性矩,导致其刚度与承载力下降;孔洞边缘,尤其是孔角区域,易产生显著的应力集中,成为裂缝萌生与扩展的起源,构成构件的潜在薄弱部位。

针对腹部开孔钢筋混凝土梁,已有大量学者开展研究。蔡健等^[2-3]对腹部开设圆孔和方孔的钢筋混凝土梁进行了研究,提出了与现行规范相衔接的设计方法:当孔径不大于梁高的1/3,且梁腹开设多个孔时,孔距不应小于孔径的两倍。MANSUR等^[4]研究了不同参数对腹部开孔钢筋混凝土梁受力性能的影响,通过改变孔洞宽度、高度及孔洞中心与支座的距离,得出孔长与孔高是影响开孔梁极限承载力的主要参数,且极限承载力随孔洞长度和高度的增加而减小。黄泰赟等^[5]通过对42根腹部开设矩形孔的钢筋混凝土简支梁进行集中力加载试验,发现开矩形孔梁主要发生剪切破坏和斜压破坏。JABBAR等^[6]对不同形状开孔的钢筋混凝土梁进行了研究,结果表明,开孔梁的极限荷载略有降低,而极限挠度相应增大;其中,圆形孔的抗剪性能最优。

基于此,本文以腹部开孔钢筋混凝土梁为研究对象,设计了8根试验梁(含1根实腹对照梁),系统变化孔的形状(圆形、方形、矩形)、横向位置(跨中、三分点、四分点)及数量(1、2、3个)。

采用有限元软件 ABAQUS 建立参数化模型,通过四点弯曲加载模拟,分析梁的变形与损伤演化规律,绘制跨中荷载-位移曲线。研究旨在揭示孔型、位置及数量对梁极限承载力与变形的影响机制,为腹部开孔钢筋混凝土梁的工程应用提供理论依据与设计参考。

1 有限元模型建立与验证

1.1 混凝土本构关系

(1) 受压本构模型。混凝土受压行为采用 HOGNESTAD 提出的应力-应变全曲线模型^[7-8]。该模型应用广泛,其上升段采用二次抛物线,能够准确反映混凝土受压特性;下降段采用斜直线。具体计算公式如下。

$$\begin{cases} \sigma = f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \sigma = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right] & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为混凝土受压应力, MPa; f_c 为混凝土抗压强度(峰值应力), MPa; ε 为混凝土受压应变; ε_0 为峰值应力对应的应变,取 0.002; ε_u 为极限压应变,取 0.003 8。

(2) 受拉本构模型。受拉本构模型采用过镇海^[9]及《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)建议的模型。该模型上升段(OA段)形式简洁,能良好反映应力-应变关系;下降段为平滑曲线,计算结果与实际受力情况吻合较好。计算公式如下。

$$\begin{cases} y = 1.2x - 0.2x^6 & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\alpha_1(x-1) + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为应变, $x = \varepsilon/\varepsilon_t$; y 为应力, $y = \sigma/f_t$; α_1 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数参考值, $\alpha_1 = 0.312f_t^2$; f_t 为混凝土抗拉强度, MPa; ε_t 为混凝土拉应变。

(3) 弹塑性参数。混凝土塑性损伤参数如表 1 所示。

1.2 钢筋本构关系

钢筋材料采用双折线型理想弹塑性本构模型。其应力-应变关系表达式:

$$\begin{cases} \sigma_s = E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s = f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,h} \end{cases} \quad (3)$$

表 1 混凝土弹塑性参数

弹性模量/MPa	泊松比	膨胀角/(°)	偏心率	双轴抗压强度/ 单轴抗压强度	混凝土屈服形态的影响	黏性参数
26 500	0.2	30	0.1	1.16	0.666 67	0.005

式中： σ_s 为钢筋应力，MPa； E_s 为钢筋弹性模量，MPa； ε_s 为钢筋的当前应变； ε_y 为钢筋的屈服应力所对应的应变； f_y 为钢筋的屈服应力，MPa； $E_{s,h}$ 为极限拉应变。

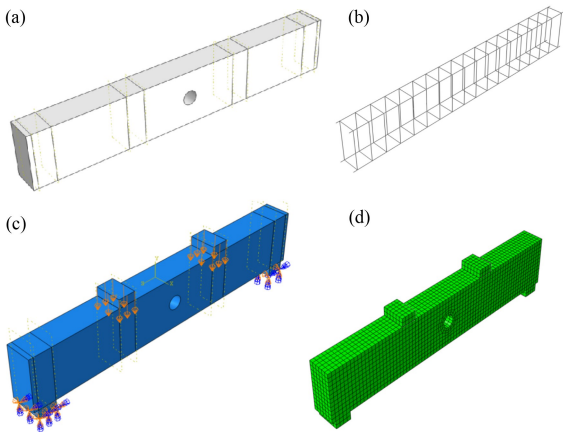
钢筋的弹塑性参数如表 2 所示。

表 2 钢筋弹塑性参数

钢筋类型	弹性模量/ $\times 10^5$ MPa	泊松比	屈服应力/ MPa
HPB300	2.1	0.3	300
HRB400	2.0	0.3	400

1.3 有限元模型建立

参照韩雪^[10]针对 B01-1 试件的参数，在 ABAQUS 中建立有限元模型。模型采用四点加载方式。为避免局部应力集中，在加载点与支座处分别设置尺寸为 100 mm×50 mm×150 mm 的刚性垫块。混凝土部件与钢筋笼部件的几何模型如图 1(a)、(b)所示。边界条件设置如下：左端采用固定铰支座；右端采用滑移铰支座，鉴于集中力加载易导致计算不收敛，模拟采用位移控制加载。构件的约束与加载方式如图 1(c)所示。网格划分方面，混凝土部件采用 C3D8R(八节点线性六面体缩减积分)单元，并引入沙漏控制；针对腹部开孔区域，采用沿中性轴扫描算法进行网格划分，



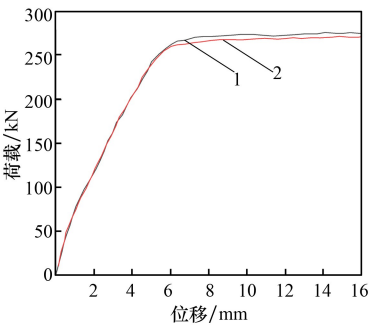
(a) 混凝土部件；(b) 钢筋笼部件；
(c) 构件约束和加载方式；(d) 网格划分

图 1 有限元模型

或使用壳单元过渡转化为结构化网格。钢筋部件采用 T3D2 Truss 单元，指派单元类型为桁架。最终形成的开孔梁网格模型如图 1(d)所示。

1.4 有限元模型验证

为验证腹部开孔钢筋混凝土梁有限元模型的可靠性，并为进一步的参数化分析奠定基础，将有限元模拟得到的荷载-跨中竖向位移曲线、极限承载力等主要性能指标与韩雪^[10]B01-1 试件的试验结果进行对比分析，荷载-位移曲线对比如图 2 所示。由图 2 可知：两者的荷载-位移曲线形态及变化趋势基本一致，证明了该有限元模型模拟效果较好，可用于后续的分析研究。



1—有限元模型；2—B01-1。

图 2 荷载-跨中竖向位移曲线对比分析

1.5 腹部开孔梁参数

共建立 8 根梁的有限元模型，其中包含一根实腹梁(SFL)作为对比试件。梁截面尺寸为 150 mm×300 mm，跨度为 1 800 mm，净跨为 1 650 mm；受拉纵筋为 2C14，架立筋为 2C8，箍筋为 A6@170，混凝土强度等级为 C30，保护层厚度为 20 mm。各试件参数及分组如表 3 所示。根据变化参数可分为 3 组：孔洞形状(C-80-1-Mid、S-50-1-Mid、R-75-1-Mid)、孔洞位置(C-80-1-Mid、C-80-1-Third、C-80-1-Quarter)以及孔洞个数(C-80-1-Quarter、C-80-2-Shear、C-80-3-Comb)。除开孔参数外，所有试件其余尺寸及配筋均相同，且不同形状孔洞的面积近似相等。开孔梁 C-80-1-Mid 的示意如图 3 所示。

表 3 试件尺寸参数

试件编号	孔洞尺寸/mm	孔洞形状	孔洞个数/个	孔洞位置	备注
SFL	—	—	—	—	—
C-80-1-Mid	80	圆形	1	跨中	纯弯段
S-50-1-Mid	50×115	矩形	1	跨中	纯弯段
R-75-1-Mid	75	方形	1	跨中	纯弯段
C-80-1-Third	80	圆形	1	一侧三分点	纯弯段
C-80-1-Quarter	80	圆形	1	一侧四分点	纯弯段
C-80-2-Shear	80	圆形	2	两侧三分点	剪弯区
C-80-3-Comb	80	圆形	3	跨中和两侧四分点	纯弯区和剪弯区

注：试件编号规则为“形状-尺寸-个数-位置”。如 C-80-1-Mid 代表直径为 80 mm 的 1 个圆形孔位于跨中。

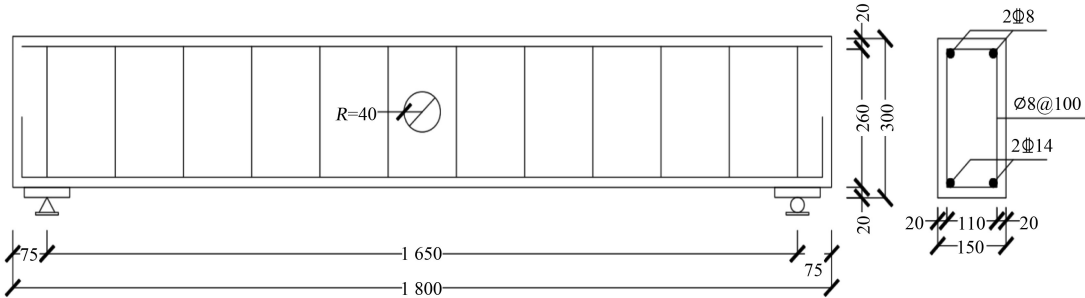


图 3 腹部开孔的钢筋混凝土梁 C-80-1-Mid 示意

mm

2 有限元结果分析

2.1 孔洞形状对受力性能的影响

2.1.1 承载力分析

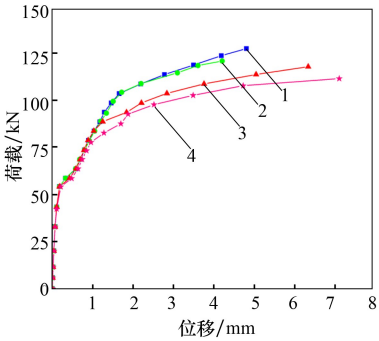
表 4 为不同孔型梁的极限承载力。由表 4 可知：设置孔洞会显著降低梁的极限承载力，且削弱程度受孔型影响显著。与实腹梁 SFL 相比，C-80-1-Mid（圆形孔）的极限承载力降低了 5.27%。由于圆形孔无尖锐转角，应力集中效应相对最弱，其对承载力的削弱最小。S-50-1-Mid（矩形孔）的极限承载力降幅为 7.66%，矩形孔角部产生的应力集中导致其承载力降幅高于圆形孔。R-75-1-Mid（方形孔）的降幅最大，达 12.55%；方形孔角部几何突变最为剧烈，应力集中现象最显著，因而对承载力的削弱最为明显。综合表明，不同孔型的承载力影响排序：圆形孔<矩形孔<方形孔。即孔洞尖角越尖锐，应力集中越显著，对梁极限承载力的削弱作用越强。

2.1.2 变形与破坏特征

图 4 为不同孔型梁的荷载-位移曲线，反映

表 4 不同孔型梁的极限承载力

试件编号	孔洞形状	极限承载力/kN
SFL	—	127.59
C-80-1-Mid	圆形	120.86
S-50-1-Mid	矩形	117.82
R-75-1-Mid	方形	111.58



1—SFL；2—C-80-1-Mid；
3—S-50-1-Mid；4—R-75-1-Mid。

图 4 不同孔型梁荷载-位移曲线

了梁在受力过程中的刚度、峰值荷载和延性变化。由图 4 可知：各曲线在加载初期的斜率（即刚度）非常接近，说明开设孔洞对梁的初始刚度影响不

大。其中，无孔梁和圆形孔梁的荷载 - 位移曲线下降相对平缓，表明其破坏过程具有一定的延性；而方形孔梁和矩形孔梁的曲线在峰值后下降更为陡峭，尤其是方形孔梁，表现出明显的脆性破坏特征。即达到最大承载力后迅速失效。

2.1.3 机理分析

图 5 为方形孔洞角点处的应力云图。由图 5 可知：该处存在严重的应力集中现象。机理分析如下：在荷载作用下，力流经孔洞时，会在尖角处产生远高于平均应力的峰值应力，这使得该区域成为裂缝萌生和扩展的起点。图 6(破坏形态)证实了这一点。SFL 与 C - 80 - 1 - Mid 的破坏裂缝主要出现在梁底的受拉区，属于典型的弯曲破坏。而 S - 50 - 1 - Mid、R - 75 - 1 - Mid 的破坏裂缝则首先从孔洞的尖角处开始，并向上、向下斜向发展，最终导致梁的破坏，这是一种典型的由应力集中引发的脆性劈裂破坏。

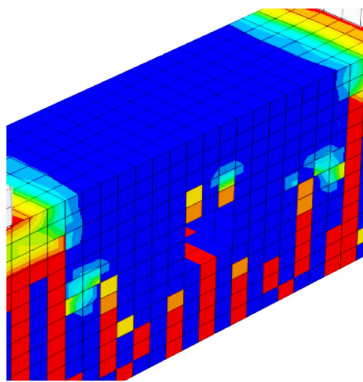
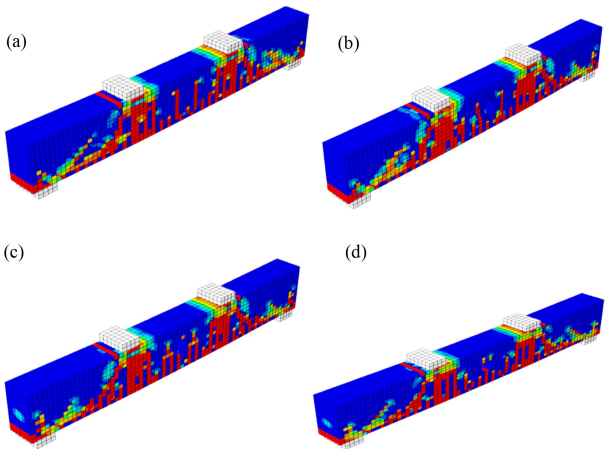


图 5 R - 75 - 1 - Mid 方形边角应力集中现象



试件编号：(a) SFL；(b) C - 80 - 1 - Mid；
(c) S - 50 - 1 - Mid；(d) R - 75 - 1 - Mid

图 6 不同孔型梁的破坏形态

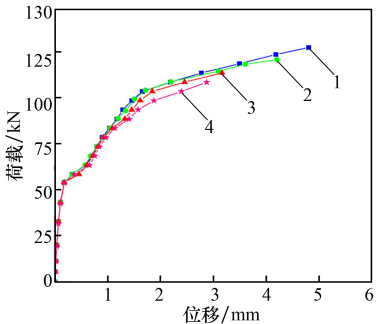
2.2 孔洞位置对受力性能的影响

表 5 为不同开孔位置梁的极限承载力。由表 5 可知：相比 SFL，C - 80 - 1 - Mid、C - 80 - 1 - Third、C - 80 - 1 - Quarter 的极限承载力依次下降 5.27%、10.72%、15.09%。孔洞位置离跨中越远、越靠近支座，对承载力的削弱就越大。随着孔洞由纯弯段进入弯剪段，其周围的受力情况由纯弯矩作用变为弯剪共同作用，这种复杂的应力状态引发了应力集中，从而降低了开孔梁的极限承载力。

表 5 水平不同开孔位置梁的极限承载力

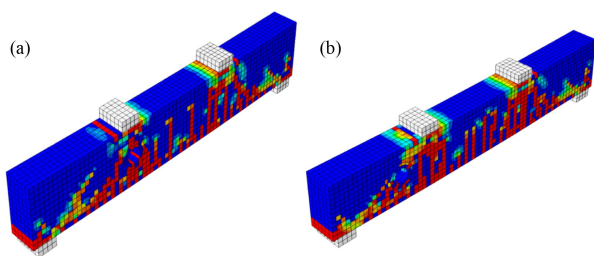
试件编号	孔洞位置	极限承载力/kN
SFL	—	127.59
C - 80 - 1 - Mid	跨中	120.86
C - 80 - 1 - Third	一侧三分点	113.90
C - 80 - 1 - Quarter	一侧四分点	108.34

图 7 为不同开孔位置梁荷载 - 位移曲线。由图 7 可知：所有开孔梁的初始刚度与 SFL 相比差异不大。因为初始刚度主要由材料性质和截面惯性矩决定，单个孔洞的局部削弱对其影响较小。达到峰值荷载后，曲线下降段的斜率存在显著不同。C - 80 - 1 - Mid 的破坏是以受拉钢筋屈服为主导的延性弯曲破坏，因此曲线峰值后有一个相对平缓的下降段；而 C - 80 - 1 - Third 和 C - 80 - 1 - Quarter 的破坏模式是典型的斜截面剪切破坏。图 8 为不同开孔位置梁的破坏形态。由图 8 可知：孔洞直接位于高剪力区，云图清晰显示高应力区从加载点向孔洞角落、再向支座方向延伸，形成一条清晰的斜向主压应力迹线，孔洞的尖角处成为显著的应力集中点。这种剪切破坏具有突发性，



1—SFL；2—C - 80 - 1 - Mid；
3—C - 80 - 1 - Third；4—C - 80 - 1 - Quarter。

图 7 不同开孔位置梁荷载 - 位移曲线



试件编号: (a) C-80-1-Third; (b) C-80-1-Quarter

图 8 不同开孔位置梁的破坏形态

因此荷载-位移曲线在达到峰值后会急剧下降,表现出显著的脆性特征。孔洞越靠近支座,曲线的下降段就越陡峭,延性越差。

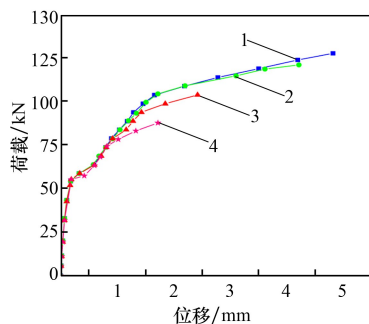
2.3 孔洞个数对受力性能的影响

表 6 为不同孔洞个数梁的极限承载力。由表 6 可知:相比 SFL, C-80-1-Mid、C-80-2-Shear、C-80-3-Comb 的极限承载力依次下降 5.27%、19.08%、31.39%。孔洞数量的增加会显著降低梁的极限承载力,且承载力下降的幅度并非线性,而是随着孔洞增多而加剧,表现出明显的“削弱累积效应”。这表明孔洞之间存在相互作用,共同导致了截面的严重削弱和内力重分布,从而加速了承载力的丧失。

表 6 不同孔洞个数梁的极限承载力

试件编号	孔洞个数	极限承载力/kN
SFL	—	127.59
C-80-1-Mid	1	120.86
C-80-2-Shear	2	103.24
C-80-3-Comb	3	87.54

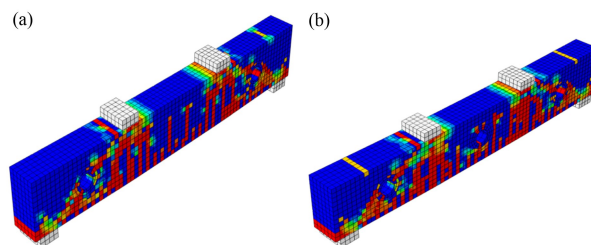
图 9 为不同开孔率梁荷载-位移曲线。由图 9 可知:与 SFL 相比,开孔梁的荷载-位移曲线在



1—SFL; 2—C-80-1-Mid;
3—C-80-2-Shear; 4—C-80-3-Comb。

图 9 不同开孔率梁荷载-位移曲线

初始阶段的斜率略微降低。图 10 为不同孔洞个数梁的破坏形态。由图 10 可知:每个孔洞的角点处都产生了严重的应力集中。当孔洞数量增加时,这些高应力区会相互连接、影响,在梁身上形成一条连续的高应力带。这使得梁不再是因为某个截面被破坏而失效,而是沿着一条由孔洞定义的薄弱线发生整体性的撕裂或剪切破坏。



试件编号: (a) C-80-2-Shear; (b) C-80-3-Comb

图 10 不同孔洞个数梁的破坏形态

3 结 论

(1) 关于孔洞形状:开圆形孔洞的力学性能最优,极限承载力相较于实腹梁仅下降约 5.3%,且荷载-位移曲线下降段平缓,延性良好;而矩形和方形孔洞由于尖角处存在严重的应力集中,成为裂缝萌生和扩展的起源,导致承载力损失更大。

(2) 关于孔洞位置:当孔洞位于跨中时,对承载力削弱程度较低,梁仍表现为延性弯曲破坏;当孔洞移至三分点、四分点等弯剪区时,承载力急剧下降(降幅达 15.1%),且破坏模式转变为由斜裂缝控制的脆性剪切破坏。

(3) 关于孔洞个数:增加孔洞数量会导致承载力加速衰减,开双孔和三孔梁的承载力损失分别为 19.1% 和 31.4%。多个孔洞的应力集中区域相互连通,在梁身形成一条连续的薄弱路径,最终导致梁沿此路径发生整体性的脆性撕裂破坏。

参考文献:

- [1] 刘红梅,金江,王海霞. 钢筋混凝土开孔梁试件非线性有限元分析[J]. 工业建筑,2005,35(增刊1): 117-119;123.
- [2] 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.

-
- [3] 蔡健,李静,段圣吉,等. 腹部开设圆孔钢筋混凝土梁的试验研究(Ⅲ)[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),1998,26(1):50-53.
- [4] MANSUR M A,LEE Y F,TAN K H,et al. Tests on RC continuous beams with openings[J]. Journal of Structural Engineering,1991,117(6):1593-1606.
- [5] 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.
- [6] JABBAR D N,AL-RIFAIE A, HUSSEIN A M, et al. Shear behaviour of reinforced concrete beams with small web openings [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 42:2713-2716.
- [7] 余小伍. CFRP-混凝土-钢管组合柱轴压性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [8] 张俊林,任慧韬,王苏岩. FRP管-混凝土-钢管复合套管约束性能有限元分析[J]. 大连理工大学学报,2016,56(4):375-381.
- [9] 过镇海. 混凝土的强度和变形-试验基础和本构关系[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [10] 韩雪. 钢筋混凝土开孔梁受弯承载力有限元分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.