

钢筋混凝土开洞深梁的试验研究 及非线性有限元分析*

王新玲 龚绍熙

(土建系 混凝土结构及砌体结构研究室)

摘 要: 本文通过 14 根钢筋混凝土简支开洞深梁在顶部集中荷载作用下的试验结果, 分析了开洞深梁的正截面受力性能和弯曲破坏形态; 通过非线性有限元分析, 讨论了开洞深梁在弹性、弹塑性和破坏阶段的应力状态。

关键词: 深梁, 开洞, 试验研究

钢筋混凝土深梁在工业与民用建筑中有广泛的应用, 如高桩码头上的横梁、框支剪力墙底层大梁、地下室侧墙等都有可能属于深梁的范畴。而在实际工作中, 由于要解决人或设备的通道问题, 不可避免地要遇到深梁的开洞问题。本文针对洞口开在跨中段及洞口开在剪弯段二种开洞深梁进行了正截面工作性能和弯曲破坏形态的试验研究和非线性有限元分析。

1 开洞深梁的试验概况

1.1 第一批试验构件: 洞口开在跨中段如图 1 所示。其中 DB-1~DB-9, 采用正交设计; 还包括 KD-14, KD-15 为无腹筋构件, 其主要参数见表 1。

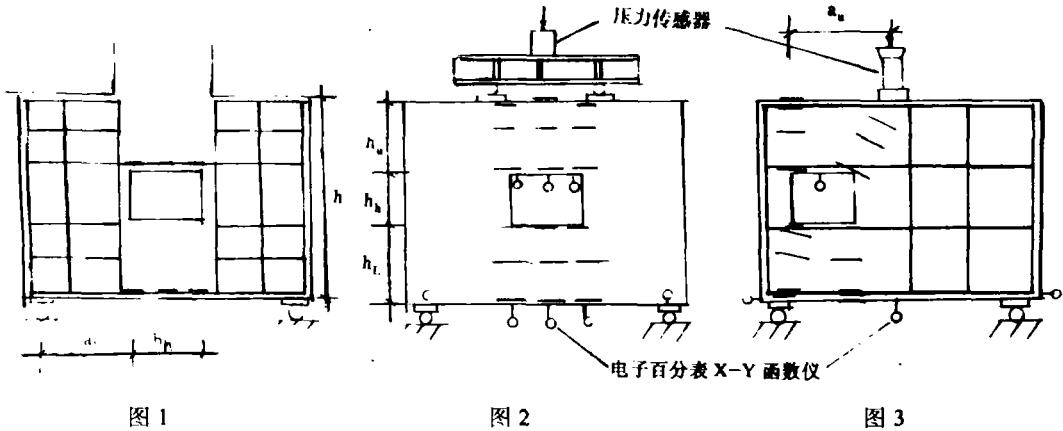
1.2 第二批试验构件: 洞口开在剪弯段, 包括 KB-1~KB-3, 其主要参数见表 1, 配筋见图 3。

试验在 5000KN 压力弯曲试验机上进行, 试验装置见图 2、图 3, 按破坏荷载的 5~10% 分段加载, 用电阻应变仪量测钢筋和砼的应变。用百分表测量挠度。借助放大镜观察和量测裂缝。用 X-Y 函数仪记录跨中荷载—挠度曲线。

* 收稿日期: 1989.05.12

表1 试验构件一览表

试 件 号	洞 口 尺 寸 (mm)					l/h	砼强度 (MPa)		纵 向 钢 筋			
	h _u	h _b	h _L	a _L	b _L		f _{cu}	f _c	洞 顶		梁 底	
									A _{u1} (mm ²)	f _y (MPa)	A _{u2} (mm ²)	f _y (MPa)
DB-1	100	400	300	350	500	1.5	39.6	26.3	2φ10 157	390.5	2φ14 308	256.6
DB-2	300	300	200	350	500	1.5	33.7	22.7	157	390.5	267	286.4
DB-3	500	200	100	350	500	1.5	36.9	24.5	157	390.5	226	316.1
DB-4	200	400	200	550	500	2.0	44	29.3	157	390.5	226	316.1
DB-5	400	300	100	550	500	2.0	48.2	31.9	157	390.5	308	256.6
DB-6	300	200	300	550	500	2.0	48.2	31.9	157	390.5	267	286.4
DB-7	300	400	100	950	500	3.0	48	31.9	157	390.5	267	286.4
DB-8	200	300	300	950	500	3.0	43.4	28.9	157	390.5	226	316.1
DB-9	400	200	200	950	500	3.0	51.3	34.1	157	390.5	308	256.5
KB-1	200	200	200	200	300	2.0	45.3	30.1	2φ6.5 66.4	552.9	226	296.2
KB-2	250	200	150	50	300	2.0	53	35.3	66.4	552.9	226	296.2
KB-3	250	150	200	100	300	2.0	62.1	41.3	66.4	552.9	226	296.2
KB-14	175	350	375	550	250	1.5	45.1	30	57	494	101	496.9
KB-15	325	250	325	550	350	1.5	40.2	29.4	57	494	101	496.9



2 开洞深梁的工作性能

和不开洞深梁类似, 开洞深梁从加荷到破坏也经历了弹性、弹塑性和破坏三个受力阶段。

2.1 弹性工作阶段

变形及应力随荷载线性增加,当达到开裂荷载(25%~35%的 F_0)时,跨中开洞深梁突然出现图4(a)所示的通缝①或②,剪弯段开洞深梁则在洞口角处出现图4(b)所示的缝①、②,随即又出现裂缝③、④或⑤。

2.2 弹塑性工作阶段

第一批裂缝的出现标志着开洞深梁进入弹塑性工作阶段。 $F-\omega$ 曲线出现了第一个转折点,如图5。随荷载增加,跨中开洞深梁的下横梁产生三条主裂缝,此时下横梁拉力均由纵筋承担,中和轴上升,再加载,上横梁裂缝④、⑤、⑥相继出现,上横梁纵筋应力突然增大, $F-\omega$ 曲线出现第二个转折点;剪弯段开洞深梁则是①~④特征裂缝延伸、加宽,拉区纵筋应力突增,变形加快。

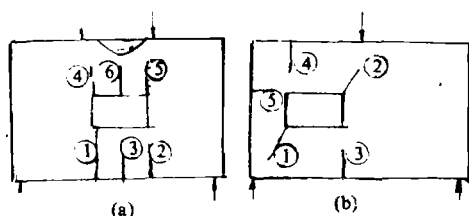


图4

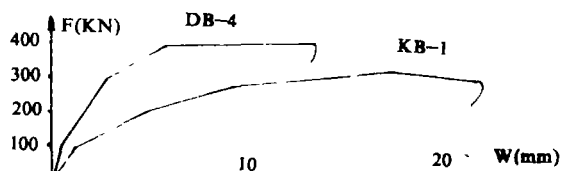


图5

2.3 破坏阶段

当增至极限荷载的80%~100%时,跨中开洞深梁继梁底纵筋屈服后,便是上横梁纵筋屈服;剪弯段开洞深梁裂缝处的纵筋屈服,标志着开洞深梁进入破坏阶段。此时,变形和应力剧增, $F-\omega$, $F-\epsilon_s$ 曲线变得平缓。再加载,屈服后的纵筋应力不增加,而应变增长,裂缝加宽,中和轴上升,形成明显的弯曲破坏机构,最后梁顶部跨中砼压碎,承载力下降,梁即告破坏。

3 开洞深梁的破坏形态

3.1 上横梁局部弯坏:如跨中开洞深梁DB-1,相当于两端固定的小梁图6(b),当下横梁一开裂,即施加于上横梁上的水平推力消失,上横梁随即开裂(约束处及跨中处均裂)如图6(a),即变为两点加载的简支梁,加载至底部纵筋屈服,顶部砼压碎,梁破坏,而下横梁的应力、变形均较小,未充分发挥作用。

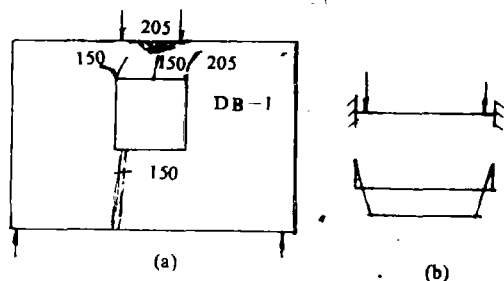


图6

3.2 跨中开洞深梁的适筋梁破坏:如DB-2~DB-9

首先形成图 4(a)的裂缝, 由梁和拱作用体系过渡到图 7(a)所示的“双拉杆拱”作用体系, 然后下横梁纵筋屈服, 随之上横梁纵筋亦屈服, 此时, 中和轴上升较高, 压区较小, 砼压应力较大, 稍增荷载, 砼即被压碎。尤其当洞口 h_b 较大, h_u 较小的梁, 屈服荷载 F_y 和极限荷载 F_u 相差极小, 类似于浅梁的适筋梁; 而 h_u 较大的梁, F_y 和 F_u 相差较大, 类似于无洞深梁。因此, 开洞深梁有一般梁和深梁两重特性。

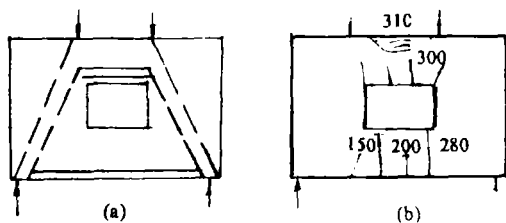


图 7

3.4 剪弯段开洞深梁的弯曲破坏机构

随洞口上方和侧方抗弯承载力的大小分别形成图 8 所示的由四个弯曲破坏域和四个板块组成的二种破坏机构, 均由裂缝处受拉杆纵筋屈服形成的, 转动变形较明显, 属延性破坏。

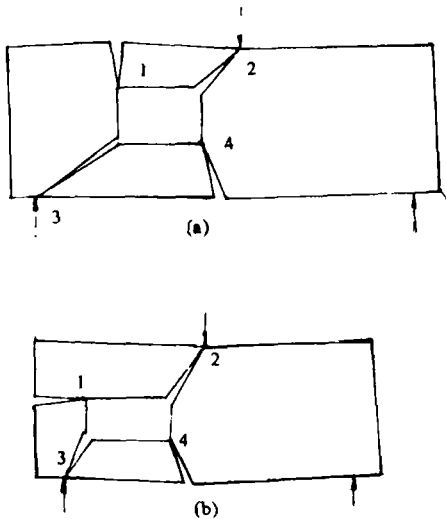


图 8

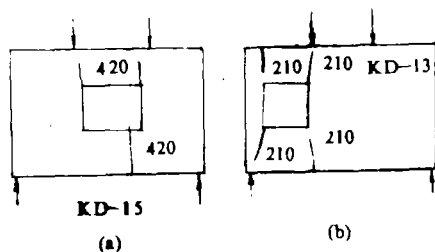


图 9

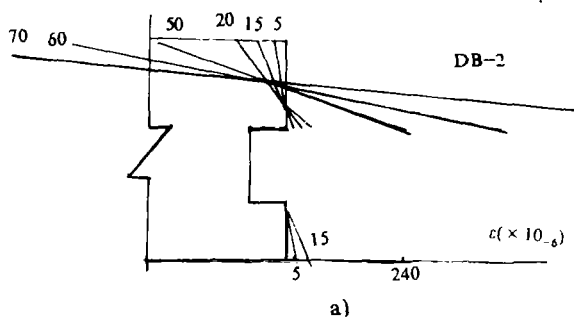
3.5 少筋破坏: (KD-11~KD-15)⁽⁵⁾

拉区纵筋配置较少。弹性阶段, 应力、变形随荷载线性增加且很小, 梁一旦开裂, 则临界裂缝同时出现, 纵筋随之屈服, 砼未压碎, 梁破坏如图 9, 变形较小, 属脆性破坏。

4 截面平均应变分布

通过对 12 根梁正截面应变变量测表明:

跨中开洞深梁的上、下横梁截面平均应变分别近似符合平截面假定, 且在弹性阶段, 上、下横梁截面应变近似平行, 弹塑性阶段偏离增大, 见图 10(a)。剪弯段开洞深梁



的 4 个弯曲破坏域的截面平均应变均符合平截面假定, 见图 10(b)。

5 开洞深梁的非线性有限元分析

采用文献[2]所编的钢筋砼平面问题非线性有限元程序, 对 12 根试验梁进行了分析。其中: 砼采用三角形单元, 钢筋采用线性单元, 二者之间采用刚性连接。

- 非线性有限元分析表明:
- 5.1 裂缝开展, 破坏形态与实验结果符合较好, 见图 11。(荷载单位为“吨”)。
 - 5.2 跨中截面平均应变分布规律同实验结果相一致, 见图 12。

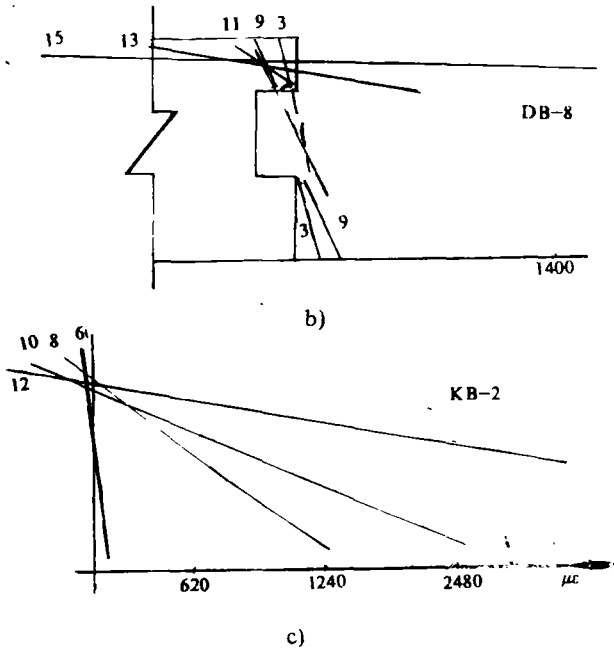


图 10

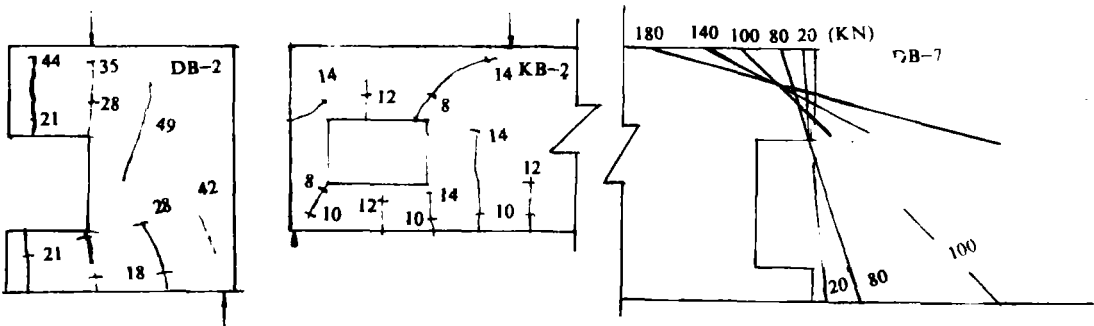


图 11

图 12

5.3 应力状态

从图 13(a)主应力迹线图可看出: 跨中开洞深梁受力模式仍为“双拉杆拱”, 最大主压应力在梁跨中顶部及加荷点, 下横梁全部受拉、破坏时, 上、下横梁纵筋屈服。从图 13(b)看出, 剪弯段开洞深梁基本受力模式仍为“拉杆拱”, 由于洞口截断了从加载点到支座的传力路线, 因此削弱了“拱腹”作用,

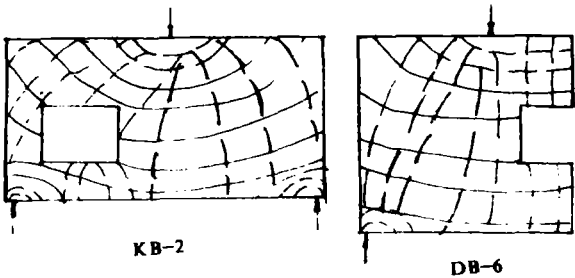


图 13

在洞口角处分别产生了压应力, 拉应力集中, 最后破坏是拉区纵筋屈服, 顶部砼压碎和实验结果一致。

5.4 计算开裂荷载、极限荷载值和实验值比较见表 2。

可见, 开裂荷载计算值与实验值符合较好, 极限荷载计算值稍偏低。

表 2 实验值与计算值比较

梁 编 号	实验值 F_{cr}^t (KN)	计算值 F_{cr}^c (KN)	$\frac{F_{cr}^t}{F_{cr}^c}$	实验值 F_y^t (KN)	计算值 F_y^c (KN)	$\frac{F_y^t}{F_y^c}$
DB-1	150	150	1.0	210	240	0.875
DB-2	220	190	1.2	600	490	1.22
DB-3	200	180	1.14	700	650	1.08
DB-4	150	150	1.0	330	280	1.18
DB-5	120	125	0.96	400	325	1.23
DB-6	200	200	0.9	360	320	1.25
DB-7	56	60	0.93	200	200	1.0
DB-8	110	110	1.0	160	130	1.23
DB-9	120	110	1.09	220	210	1.05
KB-1	75	75	1.0	240	210	1.14
KB-2	60	70	0.86	198	160	1.24
KB-3	60	75	0.8	245	225	1.1

$n = 12$
 $\mu = 0.992$
 $\delta = 0.118$

$n = 12$
 $\mu = 1.15$
 $\varepsilon = 0.138$

综上所述, 非线性有限元计算不失为一个研究开洞深梁受力全过程的好的辅助手段。

参 考 文 献

(1) 深梁专题组. 钢筋混凝土简支梁试验研究(综合报告). 1985, 10

(2) 许琪楼. 钢筋混凝土平面问题非线性有限元方法. 郑州工学院学报. 1986

- (3) F.K.Kong and G.R.Sharp. Struclural idcalization for decp beam with web opemings, Magazine of Concrete Research. June 1977
- (4) 周迪遇. 简支开洞深梁在顶部荷载作用下工作性能及抗弯承载力的试验研究. 郑州工学院学报. 1986

The Experimental Study and Nonlinear Finite Element Analysis of the Reinforce Concrete Deep Beam With Web Opening

Wang Xinling Gong Shaoxi

(The Research Room for Concrete and Masonry structures
Civil Engineering Department)

Abstract: In this paper, By means of the experimental results of 14 simple supported deep beams with web opening under the top concentrated loads, the behavior and flexural failure modes of the deep beams with web opening are analyzed. And the stresses states in elastic, unelastic work and failure stages of the deep beams are analyzed and discussed in nonlinear element method.

Keywords: deep beam, web opening, experimental study