

# 含缺陷的固支梁受冲击载荷作用的 实验研究

杨嘉陵 余同希 张元

(北京大学,北京100871)

**摘要** 本文报导了含缺陷的固支梁受圆柱形飞射物撞击的实验过程和实验结果,分析和讨论了输入能量、切口深度、质量比等参数对非完善梁塑性动力响应特性的影响。

**关键词** 固支梁,缺陷,塑性铰,动力响应

## 一、引言

自从采取刚塑性的分析方法来研究结构在强动载荷作用下的塑性动力响应以来,为了检验理论模型对实际受载结构的逼近程度,同时也是为了弥补理论分析的不足,从而提供修正和完善理论的依据,很多学者进行了一系列结构在强动载荷作用下的实验研究<sup>[1-3]</sup>。通过这些实验发现了一阶近似理论存在的不足,提出了考虑诸如弹性效应,剪力效应,有限变形等二级效应的影响。关于这些问题可参看文献[4]。可是从过去的实验来看,绝大部分都限于研究完善结构,而从塑性动力响应的角度出发去进行含缺陷结构的实验研究的文献还比较少。1986年,R. L. Woodward等<sup>[5]</sup>报导了他们做的带缺口的自由梁在冲击载荷作用下的实验,结果表明,应变在缺口处确有刚塑性分析中预测的集中现象。他们指出,由于应变局部化导致塑性铰的形成,因此对含缺口的梁采用刚塑性的分析方法是适宜的。Petroski<sup>[6]</sup>等报导了含缺口的悬臂梁受冲击载荷作用的实验结果,并且采用刚塑性的模态法进行了理论分析。此外还有一些实验是研究含几何缺陷的结构如门形框架,直角钢架等<sup>[7-8]</sup>。这些文献中实验的特点是支承对结构的约束较弱,梁中的内力主要表现为弯矩(除开剪力的影响)。为了进一步研究在拉弯联合作用下,含缺陷梁的动力响应特性,本文报导带缺口的矩形截面固支梁在支承轴向不可移的条件下,受圆柱形飞射物撞击动力响应的一些实验结果。本文的理论分析可参看文献[9]。

## 二、实验方案概述

### 1. 材料性质

为了便于理论分析,我们选用的材料为低碳钢(15号)。这种钢有明显的屈服段,在确定试件尺寸以前,首先将这种材料加工成拉伸试件,确定其主要的力学性能(见表1)。

### 2. 试件设计

确定试件尺寸的基本原则是: a) 撞击过程中输入结构的能量远远大于梁所能吸收的

极限弹性能,一般在五倍以上。b)撞击输入结构的动能与梁的极限弯矩之比大约在1~6之间。这样试件的有效段加工成中跨长为200mm,宽为20mm,高为5mm的矩形截面梁,分别在距跨度中心为50mm和90mm的对称截面处。受撞击方向的上下端面切割宽度为

表1 实验数据

Table 1 Data of the tests

材料	密度 /(kg/mm <sup>3</sup> )	杨氏模量 /(kg/mm <sup>2</sup> )	屈服应力 /(kg/mm <sup>2</sup> )	强度极限 /(kg/mm <sup>2</sup> )
软钢	$7.55 \times 10^{-6}$	$2.10 \times 10^4$	23.14	38.21

表2 实验数据

Table 2 Data of the tests

组号	缺口位置 ( $\beta_1$ )	缺口深度 (A) /(mm)	弹体质量 ( $G_1$ ) /(g)	集弹器质量 ( $G_2$ ) /(g)	质量比 /(g)	弹体速度 ( $v_0$ ) /(m/s)	梁中心挠度 /(mm)	缺口转角 ( $\theta_{cr}$ ) /(rad)
1	0.90	0.5	17	42	0.8	199.2	13.1	0.022
	0.90	0.5	17	42	0.8	98.1	4.8	0.015
	0.90	0.5	17	42	0.8	153.0	9.1	0.018
	0.90	0.5	17	42	0.8	218.4	17.0	0.022
	0.90	0.5	17	42	0.8	231.0	18.3	0.018
2	0.90	0.5	17	42	0.8	314.5	25.3	0.010
	0.90	1.0	17	42	0.8	81.0	3.2	0.018
	0.90	1.0	17	42	0.8	117.3	6.3	0.046
	0.90	1.0	17	42	0.8	157.3	9.8	0.038
	0.90	1.0	17	42	0.8	193.4	11.8	0.058
	0.90	1.0	17	42	0.8	230.8	17.2	0.084
	0.90	1.0	17	42	0.8	213.0	14.1	0.057
3	0.90	1.0	17	42	0.8	136.0	7	0.041
	0.90	1.0	17	42	0.8	272.0	22.5	0.066
	0.90	1.5	42	17	0.80	145.3	11.0	0.108
	0.90	1.5	42	17	0.80	157.2	12.1	0.120
	0.90	1.5	42	17	0.80	207.8	14.8	0.146
	0.90	1.5	42	17	0.80	244.8	21.0	0.152
4	0.90	1.5	42	17	0.80	242.0	20.8	0.152
	0.90	1.5	42	17	0.80	225.8	17.6	0.142
	0.90	1.5	42	17	0.80	190.0	13.5	0.128
	0.90	0.5	335	25	4.86	210.2	12.8	0.020
	0.90	0.5	335	25	4.86	140.1	5.6	0.0175
	0.90	0.5	335	25	4.86	170.3	9.3	0.022
5	0.90	0.5	335	25	4.86	277.4	17.2	0.016
	0.90	0.5	335	25	4.86	353.1	19.0	0.014
	0.90	0.5	335	25	4.86	298.2	15.1	0.013
	0.90	1.5	25	335	4.86	189.9	11.0	0.116
	0.90	1.5	25	335	4.86	149.0	9.5	0.080
6	0.90	1.5	25	335	4.86	253.6	19.2	0.146
	0.90	1.5	25	335	4.86	161.2	10.1	0.096
	0.90	1.5	25	335	4.86	125.6	7.5	0.064
	0.50	1	17	42	0.8	137.3	8.2	0.002
	0.50	1	17	42	0.8	241.2	16.8	-0.014
6	0.90	1	17	42	0.8	258.8	20.5	-0.022
	0.50	1	17	42	0.8	155.2	9.5	0.016
	0.50	1	17	42	0.8	158.0	9.5	0.011
	0.50	1	17	42	0.8	228	15.1	0.012

0.5mm不同深度的凹槽,如图1(b)所示,具体尺寸见各组试件参数(见表2)。梁的对称中心有一直径为3mm小孔,通过这个孔可以固定一个飞射物(子弹)回收装置。该装置是一

个含有喇叭孔的锥形柱体,其剖面形状见图1(a),弹体直接射入喇叭孔内,从而保证梁受撞击以后,飞射物在梁中心一起运动不产生脱离。梁有效段以外两端保留110mm,伸进固支夹具内,接触面加工成锯齿形,以保证在响应过程中不发生轴向位移。考虑到撞击力可能很大,为了进一步防止可能出现的轴向移动,梁的有效段外还加工两个销钉孔与夹具固接。试件最后确定的外形见图1(b)。在设计中还必须注意弹体回收装置的材料强度要尽可能大于梁和子弹的材料强度,所以回收装置用45#钢加工,子弹用15#钢加工。

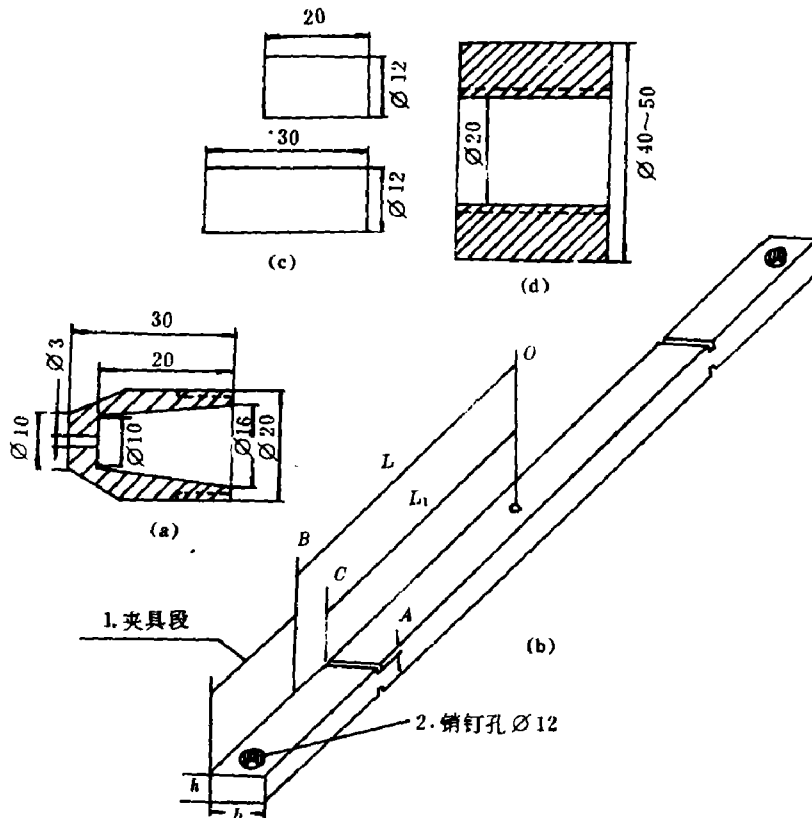


图1 (a) 弹体回收器;(b) 试件外形;(c) 子弹;(d) 配重

Fig. 1 (a) Projectile-capture device, (b) Shape of the test specimen;

1. Clamping section, 2. Pin hole  $\varnothing 12$ , (c) Projectiles, (d) Additional lump

### 3. 实验范围

固支梁加入缺口以后,结构参数又增加了两个,即缺口所处的位置和缺口的深度。为了弄清各参数的含义,我们定义:

$\Delta$  = 缺口的深度(单位 mm);  $g = (G_1 + G_2) / \rho L = G / \rho L$  其中  $G_1$ 、 $G_2$  分别是子弹和弹体回收装置的质量,  $\rho L$  表示  $L$  段梁的质量;  $v_0$  = 子弹撞击时刻的速度;  $M_0$  = 梁完善截面的塑性极限弯矩;  $\beta_1 = L_1 / L$ ,  $L_1$  是缺口与撞击点  $O$  之间的距离;  $\zeta_f$  = 撞击点最终挠度/ $L$ 。

实验中选取不同参数组成6个组: 1组  $\Rightarrow \beta_1 = 0.90$ ;  $g = 0.80$ ;  $\Delta = 0.5$ , 2组  $\Rightarrow \beta_1 = 0.90$ ;  $g = 0.80$ ;  $\Delta = 1.0$ , 3组  $\Rightarrow \beta_1 = 0.90$ ;  $g = 0.80$ ;  $\Delta = 1.5$ , 4组  $\Rightarrow \beta_1 = 0.90$ ;  $g = 4.86$ ;  $\Delta = 0.5$ , 5组  $\Rightarrow \beta_1 = 0.90$ ;  $g = 4.86$ ;  $\Delta = 1.5$ , 6组  $\Rightarrow \beta_1 = 0.50$ ;  $g = 0.80$ ;  $\Delta = 1.0$ 。

每组参数制做 6~10 根试件,平头子弹是直径为 12mm,长度分别为 20mm 和 30mm 的圆柱体。质量分别是 17g 和 25g,见图 1(c)。为了获得大质量比( $q=4.86$ )的工况,我们采取在回收装置上加配重块的办法来达到这一目的。配重块是一个厚壁圆柱体见图 1(d),内表面加工有螺纹与弹体回收装置的外螺纹配合。保证 $(G_1+G_2)/\rho L \approx 4.86$ 。

平头子弹飞行的速度控制在 70m/s~350m/s 之间获得梁在不同能量撞击下的实验数据。假设子弹与回收装置之间发生完全非弹性碰撞,因此可以利用

$$G_1 v_0' = (G_1 + G_2) v_0 \quad (1)$$

计算出输入结构中的动能,(1)式的  $v_0$  表示碰撞以后,子弹附在回收装置上共同运动的速度,于是输入梁中的无量纲动能为

$$\lambda = \frac{(G_1 + G_2) v_0'^2}{2M_0} = \frac{1}{2M_0} \frac{G_1^2 v_0'^2}{G_1 + G_2}$$

#### 4. 实验过程

实验装置示意图见图 2。

(1)弹速测量:考虑到我们采用的是火药发射枪,发射子弹的同时,烟雾喷出枪口使光电测速传感器动作不稳定,所以改用靶网做传感器,其原理与光电器类似。

$$\bar{v}(\text{平均弹速}) = \frac{\Delta s(\text{靶网间距离})}{\Delta t(\text{记录时间})}$$

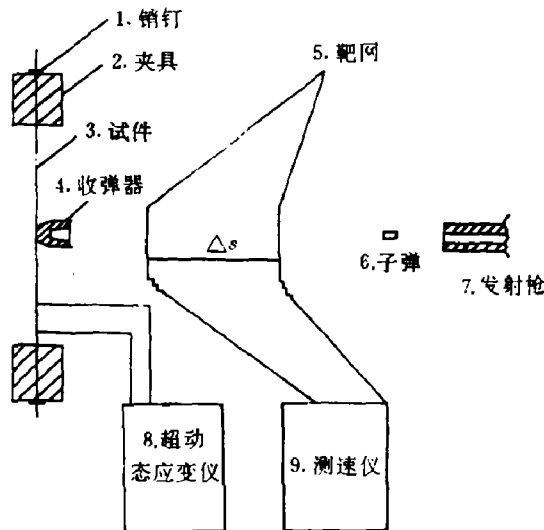


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram for general arrangement

1. Pin, 2. Clamping apparatus, 3. Specimen, 4. Projectile-capture device, 5. Target net, 6. Projectile, 7. Gun, 8. Superdynamic strain gauge, 9. Speed measuring device

(2)缺口最终转角的测量:实验前,在缺口对应的两端面垂直裂缝线的方向用画针画三条基准线,然后用显微镜读出每条基准线上缺口之间的宽度(用  $Y_1$  表示),实验完毕后卸下试件,再用显微镜读出基准线上缺口宽度(这里用  $Y_2$  表示),利用下列公式就可求得

缺口处的最终转角

$$\theta_f \approx \left| \frac{(Y_2^A - Y_1^A) - (Y_2^B - Y_1^B)}{h} \right|$$

上标  $A, B$  表示试件的  $A$  面或  $B$  面,  $h$  表示梁的高度。

(3)最终挠度测量:将实验完毕后的试件卸下,直接放在坐标纸上绘出其最终形状,然后按标定的基准线测量各点的位移。

### 三、实验结果讨论

图 3 是根据实验画出的对  $g, \beta_1, \lambda$  取相同值的三个试件在缺口深度  $\Delta = 0.5, 1, 1.5$  条件下,梁跨度上各点的切线与水平线的夹角(表征曲率分布)。

图 4~图 8 给出了梁中点的最终挠度以及缺口处的最终转角与无量纲输入能量( $\lambda$ )的关系。

1)实验表明缺口处有明显的应变集中现象,这种现象表现在该截面有一个固定的转角  $\theta_{cf}$ ,随着缺口的加深,应变集中更加明显( $\theta_{cf}$ 越大)。图 3 是应变集中随  $\Delta$  增大的三个典型试件,从图中可以看到缺陷处( $\beta_1 = 0.9$ )都有  $\theta$  的突变,形成高曲率区,这说明缺陷处形成塑性铰不仅是理论上关于描述大塑性应变区的一种理想化模型,而且在实验中也确实能观察到。另外两个高应变区集中在  $B$  点和  $O$  点附近,这个现象和理论预报是一致的。如果我们注意图 3 中的  $\theta$  变化,就可以发现,对于  $\Delta = 0.5, 1$  的两曲线,高应变集中在  $B$  点、 $C$  点和  $O$  点附近,  $\Delta = 1.5$  的曲线高应变集中在  $C, O$  点附近,理论计算表明前两个响应表示梁最终将收敛到  $B-O$  模式,所以  $B$  点、 $O$  点将形成高应变集中区。后一个响应表示梁最终将收敛到  $C-O$  模式。这样  $B$  点不会形成塑性铰,也就没有高应变集中在该点。而  $C-O$  模式是耗散能量的主要模态,所以高应变集中到  $C, O$  点附近。

2) $\theta_{cf}$  不仅取决于缺陷深度  $\Delta$ ,而且与缺陷位置和输入能量有关系。(a)从图 6~图 8 中可以看到,对于  $\beta_1 = 0.9$  的浅缺口梁  $\theta_{cf}$  开始与  $\lambda$  成递增关系,但是当  $\lambda$  超过一定值以后,

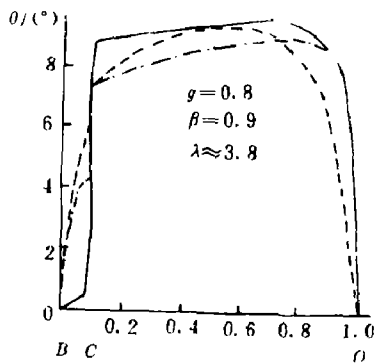


图 3 梁变形后各点的切线与水平线的夹角

Fig. 3 Angle of tangent with horizontal line for the section of the beam after deformation

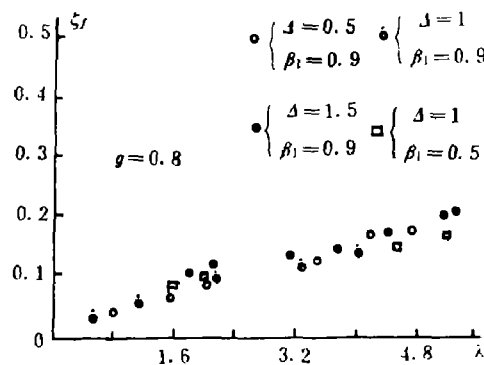


图 4 梁中点的挠度

Fig. 4 Deflection of the beam centre

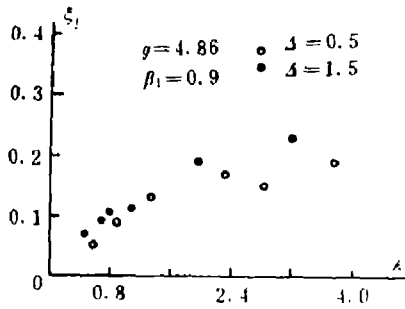


图 5 梁中点的挠度

Fig. 5 Deflection of the beam centre

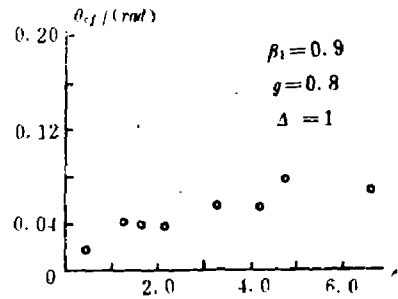


图 6 缺口处的转角与输入动能之间的关系

Fig. 6 Relationship between the angle of the notched section and the input kinetic energy

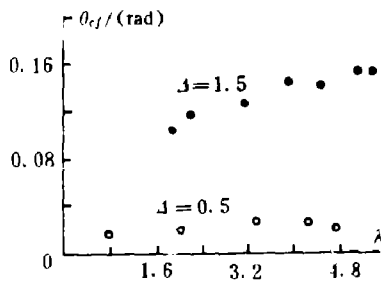


图 7 缺口处的转角与输入动能之间的关系 ( $\beta_1=0.9; g=0.8$ )

Fig. 7 Relationship between the angle of the notched section and the input kinetic energy ( $\beta_1=0.9; g=0.8$ )

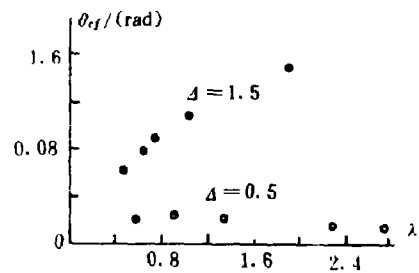


图 8 缺口处的转角与输入动能之间的关系 ( $\beta_1=0.9; g=4.86$ )

Fig. 8 Relationship between the angle of the notched section and the input kinetic energy ( $\beta_1=0.9; g=4.86$ )

$\theta_{cf}$ 不再增加,如果 $\lambda$ 进一步增大, $\theta_{cf}$ 会出现下降趋势。这是由于在小 $\lambda$ 情况下,弯矩是控制梁变形的主要因素,而轴力效应很弱,因此与弯矩相对应的 $\theta_{cf}$ 在 $\lambda$ 的一定范围内会呈现递增关系,随着 $\lambda$ 上升,膜力影响增大,控制梁变形的机制从弯矩转化到膜力方面,于是体现弯矩效应的 $\theta_{cf}$ 开始减少。(b)对于 $\beta_1=0.9$ 的深缺口梁( $\Delta=1.5$ ),如果是大质量比( $g=4.86$ )工况, $\theta_{cf} \sim \lambda$ 一直呈单调递增关系,而且 $\theta_{cf}$ 的值比浅缺口时要高出一个数量级。对于小质量比( $g=0.8$ ), $\theta_{cf} \sim \lambda$ 曲线在 $\lambda < 3.6$ 以前也成递增关系,说明 $\Delta$ 增大限制了膜力的增加(因为截面严重削弱),同时由于应变集中更为突出使得缺陷处的塑性铰形成变得容易,而弯矩主导变形的机制转化到膜力主导变形的机制大大向后推迟,特别在大质量比情况下,梁的变形过程接近于静态,所以弯矩效应始终很明显,表现出来就是 $\theta_{cf}$ 随 $\lambda$ 递增。但是当 $\lambda$ 比较大以后( $\lambda > 3.6$ ),对于小质量比,理论分析表明,梁的影响模式将从C-O转变为B-C-O,最后到B-O模式终止,塑性功部分转移到B点上。所以表现出 $\theta_{cf}$ 不再随 $\lambda$ 增大。

3)除了  $B, C, O$  三点以外,梁其它部分的曲率分布也依赖于集中质量,缺口深度,位置和输入动能。对于浅缺口小质量比情形,如果  $\lambda$  适中,梁的最终形状有明显的高阶模态效应(即移行铰的痕迹)(见图 3,  $\Delta=0.5$ ),这种形状与无缺口的小质量比梁受撞击后的形状相似。但是  $\Delta$  增大以后,高阶模态的效应明显减弱,最终的高曲率区主要集中在撞击点,支承和缺陷处,而其它部分曲率变化很小,这可能是缺陷处的应变集中限制了梁其它部分的塑性变形,根据理论分析,在缺陷附近的区段内,存在一个刚性段,而且随缺口加深,这个区段扩大。

4)对于小质量比,梁的最终挠度对缺口的深度和位置不敏感。当输入能量取定时, $\Delta$  的变化以及缺口位置的变化对梁中点的最大挠度影响不大,我们把  $g=0.8; \Delta=0.5, 1.0, 1.5; \beta_1=0.9, 0.5$  的几组实验点描在同一张图上(见图 4)。从  $\zeta_f \sim \lambda$  关系可以看出尽管这几组试件各取的缺陷位置和深度不同。但实验点的变化趋势和幅度值都相差不多, $\Delta$  增大时, $\zeta_f$  在同一  $\lambda$  下的增加是很小的。对于大质量比  $\zeta_f$  对缺口深度的变化就要明显一些。我们同样把  $g=4.86$  的两组实验数据合在一起(见图 5)。从图中看出对  $\Delta=1.5$  时的缺陷梁, $\zeta_f \sim \lambda$  的实验曲线比  $\Delta=0.5$  的情形显然要高出一些。理论分析表明。 $\beta_1=0.9, \Delta=1.5, g=4.86$  这组试件的参数,在本实验所取的  $\lambda$  范围内梁的响应最终都将收敛到  $C-O$  模式。

#### 参 考 文 献

- [1] Forretal M J, Wesenberg D L. J Appl Mech, 1977,44:779
- [2] Liu H J, Jones N. Int J Impact Engng, 1987,6:303
- [3] Jones R. Structural impact. Cambridge; Cambridge UP, 1989
- [4] Jones N. Appl Mech Rev, 1989, 42:95
- [5] Woodward R L, Baxter B J. Int J Impact Engng, 1986,4:57
- [6] Petroski H J, Asce M, Verma A, et al. J Eng Mech, 1985,111(7):839
- [7] Bodner S R, Symonds P S. Int J Solid and Structures, 1979,15:1
- [8] 周 青,余同希,黄筑平.爆炸与冲击,1989,9(4):120~129
- [9] 杨嘉陵,含缺陷的梁在强动载荷作用下的塑性动力响应及其破坏:[学位论文].北京:北京大学,1990

## EXPERIMENTS ON THE CLAMPED IMPERFECT BEAMS SUBJECTED TO IMPACT

Yang Jialing Yu Tongxi Zhang Yuan

(Peking University, Peking 100871)

**ABSTRACT** The results of the clamped imperfect (or notched) beams subjected to impact at the mid-span tests are reported. The maximum angle at notched section and the deflection of the

beams are measured to assess the plastic behavior of the dynamic loaded imperfect beams. As the tests show that the imperfections have the effect of concentrating the strain locally, the rigid-plastic analysis in which the plastic strain is idealized to the plastic hinges seems to be a reasonable approximation. The angles at notch sites are large for the deep notches near the clamped end of the beams. However, the relation between the angle of the notch and the input energy is found to be complicated because of the membrane force developed by the finite displacement of the geometry change of the beams. For the light strikers, the deflection of the beams is insensitive to the notch depth and its position.

**KEY WORDS** clamped beams, imperfection, plastic hinge, dynamic response