

文章编号: 1001-1455(2005)01-0035-06

载荷作用方式及范围对简支圆板反直观行为的影响*

李海旺, 秦冬祺

(太原理工大学土木系, 山西 太原 030024)

摘要: 采用有限元法, 研究了周边简支圆板在不同载荷作用方式和作用面积下的反直观动力响应。分析了加载方式和作用面积对反直观行为的影响, 得到了不同载荷下反直观行为的特点, 发现了反直观行为时程曲线的反弹次数与相应载荷区间之间的关系。研究表明: 不同载荷下, 反直观行为的变化规律基本相同, 但各有其特点; 首发反直观行为在整个反直观行为中起着重要作用; 用首发反直观动力响应的位移历史曲线可以判断继发反直观动力行为所在载荷区间的最少个数。

关键词: 固体力学; 反直观动力响应; 有限元法; 简支圆板; 载荷作用方式; 载荷作用范围

中图分类号: O347

国标学科代码: 130·1515

文献标志码: A

1 引言

20 世纪 80 年代, P. S. Symonds 等^[1~2]在做梁的动力响应实验中偶然发现: 个别梁的动力响应与众不同, 它的最终位移形态不在载荷作用方向, 而在其反方向。这一力学现象, 后来被证明的确存在^[3]。这一发现, 引起了力学界的高度重视, 许多科技人员参与了这方面的研究, 并已取得了一些成果。研究中还发现: 反直观动力响应是极其深刻而复杂的动力行为, 该行为的发生不仅受很多因素的影响, 而且对这些因素的变化也非常敏感。这就给进一步的研究带来了很大困难, 致使目前研究的范围比较局限, 多数研究的问题仅限于简单结构和简单加载方式。如等直梁受均布矩形脉冲载荷作用时的反直观行为^[4~6]; 薄板受均布脉冲载荷作用时的反直观行为^[7~11]。这些研究成果均表明: 载荷是影响结构反直观行为的重要敏感因素, 特别是在动力响应不稳定区域内, 其微小变化将会影响到反直观行为的发生与否。但载荷作用方式和作用范围如何影响薄板的反直观行为, 目前尚无人问津。本文中针对矩形和三角形脉冲两种载荷形式, 在五种不同作用面积下圆板的反直观行为, 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元动力分析程序开展了大量的计算。研究表明: 载荷的作用方式和范围对圆板的反直观行为有显著的影响, 不仅使发生反直观行为的荷载区间不同, 而且其位移响应模式、应力、应变分布都不相同, 此外从中还发现了一些反直观行为的规律, 为进一步探索反直观行为的机理提供了参考。

2 计算模型和材料模型

周边简支圆板, 其直径 $d=300$ mm, 厚度 $\delta=2.0$ mm 的计算模型见图 1。有限元模型的网格采用了两种不同的划分方法: 在第一种网格中, 为捕捉到反直观响应, 在载荷作用处, 网格适当加密一些; 第二种网格中, 考虑各载荷作用下的结果比较, 排除网格的数量和疏密的影响, 采用了统一的网格, 从圆周到圆心逐步加密。其材料模型采用各向同性等向强化的弹塑性模型, 参数为: 弹性模量 $E=80$ GPa, 材料密度 $\rho=2.7$ t/m³, 泊松比 $\mu=0.3$, 切线模量 $E_{tan}=0$, 屈服应力 $\sigma_0=0.3$ GPa。

加载方式采用两种集度为 p 的横向均布脉冲载荷, 作用方向朝上(见图 2), 在圆板上的作用范围为

* 收稿日期: 2004-03-16; 修回日期: 2004-07-08

基金项目: 山西省归国留学基金项目(200335)

作者简介: 李海旺(1961—), 男, 硕士, 副教授。

满布、 $1/3$ 、 $1/6$ 、 $1/12$ 、和 $1/24$ 的直径所对应的面积,分别用载荷作用范围模型(以下简称模型)A、B、C、D、和 E 表示。

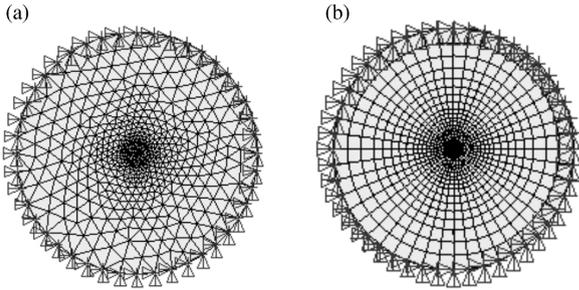


图 1 模型图

Fig. 1 The plate model

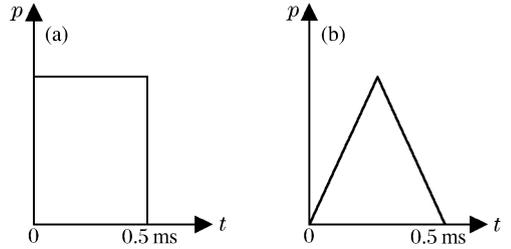


图 2 脉冲载荷形式

Fig. 2 Pulse loading profiles

3 结果与分析

在上述两种载荷作用方式和五种作用面积作用下,分别研究了它们的反直观响应,得到了发生反直观行为的载荷范围、板上各点的位移历史曲线和塑性应变分布规律等动力响应。研究表明,矩形脉冲和三角脉冲的位移历史曲线形式基本相同,现以矩形脉冲为例,将结果分析如下。

3.1 圆板中点竖向位移历史曲线的特点

图 3 为矩形脉冲载荷模型 A 到 E 的位移历史曲线,图中 p 为载荷集度。由图 3 可见,具有如下特点。

(1)反直观行为的位移历史曲线基本形式可分为两种:一是经过二次或一次反弹后到达载荷的反向并停留在该方向,如图 3 中模型 A(a)、A(b)、模型 B(a)、B(b)、模型 C(b)、D(b)和 E(b)所示;另一种是不经过反弹直接到达载荷的反向并停留在该方向,如图 3 中模型 A(c)、B(c)、C(c)、D(c)和 E(c)所示。这一现象说明,圆板的反直观行为可能经历多次反弹、也可能不经过反弹就发生。对于同一种载荷模型,随着载荷集度的增加,反弹的次数呈递减变化。也就是说,较小载荷使板产生较小塑性功耗散,只有经历多次正、反向屈服,使塑性功进一步耗散,才可能停在载荷的反向;随着载荷的增加,发生反直观行为所经历的正、反向屈服的次数也愈来愈少,直到最后不经反弹就能发生反直观为止。对于不同的载荷模型,反弹的次数也随之不同。如图 3 所示,荷载模型 A 和 B 经历二次、一次反弹和不反弹,而荷载模型 C、D、E 则经历一次和不反弹就发生反直观行为。

(2)在不同载荷作用下,首先发生反直观行为时的最大正向位移(以下简称首发最大正位移)几乎相等。由表 1 可见,满布载荷模型 A 的首发最大正位移为 12.40 mm;而模型 E 只有 2%的面积上作用有载荷,其首发最大正位移为 12.12 mm,其它载荷情况的首发最大正位移也约在这个范围。这一事实表明:最大位移响应是首发反直观行为的重要标志,不论载荷作用范围和大小如何,只要载荷所激起的最大位移响应在一定范围内,就可能使首发反直观行为发生。而相继发生的反直观行为对应的最大位移均比首发时大,虽然它们的大小随载荷而异,但仍一定范围内变化。对于矩形脉冲情况,首发和继发最大正位移在 12.00~21.00 mm 的范围内;而对三角形脉冲,其范围在 11.00~23.00 mm 内。由此可见,不论首发还是继发反直观行为,他们对应的最大正向位移响应范围约为直径的 4%~8%,其他的竖向位移响应都不对应反直观行为。

(3)根据圆板首发反直观行为位移历史曲线反弹的次数,可推断继发反直观行为载荷区间的最少个数,由图 3 中不同位移历史曲线可知,荷载模型 A、B 的首发反直观行为经历了二次反弹最后到达受力的反向状态,而模型 C、D、E 经历一次反弹就到达反向终点。经大量计算证实,这一表面现象却反映出反直观行为的规律性,即经多次反弹后的首发反直观行为的位移历史曲线暗示圆板还存在另外的载荷区间,使其继发反直观行为发生,如经两次反弹后的首发反直观行为暗示圆板至少另外存在一次反弹和

不反弹的两个载荷区间使其继发反直观行为。因此可判别图 3 中模型 A、B 最少有三个载荷区间使其发生反直观行为；而模型 C、D、E 则至少有两个载荷区间。这一推断也可由表 1 得到证实。这一发现，揭示了首发反直观行为反弹的次数与发生反直观行为的最少载荷区间个数的关系，为进一步探索反直观行为的机理提供了有价值的参考。

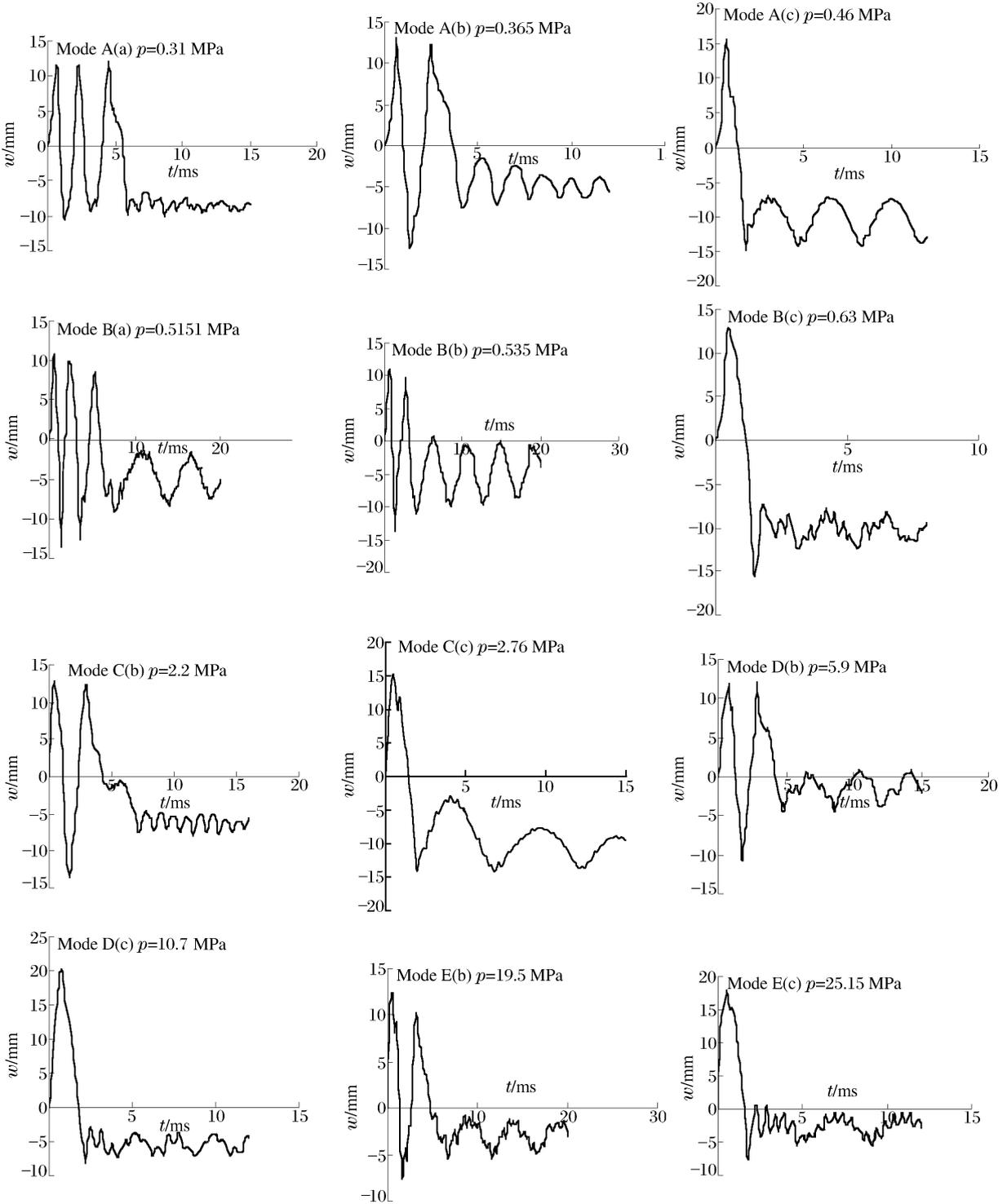


图 3 圆板中点的位移历史曲线

Fig. 3 The displacement vs. time curves of the plate center

表 1 五种荷载模型下矩形脉冲载荷和三角形脉冲载荷发生反直观行为的载荷区间及其最大位移范围

Table 1 The loading ranges and its related maximum displacement ranges corresponding to counter-intuitive behavior under the rectangle impulse and the triangle impulse of 5 loading areas

载荷类型	模型	载荷作用区间/MPa	正向位移/mm
矩形脉冲载荷	A	0.300~0.320, 0.365~0.373, 0.460~0.583	12.40~12.85, 13.18~13.81, 15.33~17.71
	B	0.515~0.525, 0.535~0.540, 0.630~0.875	10.80~10.91, 11.70~11.80, 12.88~15.70
	C	2.100~2.200, 2.760~3.020	12.38~12.39, 15.97~17.25
	D	5.900~6.300, 8.900~8.940, 9.700~9.800, 10.700~11.000	12.51~13.25, 15.88~16.59, 17.44~18.03, 19.56~21.53
	E	19.500~19.600, 19.900~20.050, 25.150~30.500	12.12~12.13, 12.36~13.46, 17.90~19.84
三角形脉冲载荷	A	0.596~0.605, 0.59~0.611 0.650~0.782	12.72~13.21, 13.40~14.03 15.18~16.49
	B	0.980~0.986, 0.996~1.080 1.120~1.660	11.50~11.54, 12.28~13.00 13.34~17.70
	C	2.935~2.948, 3.950~4.550	12.45~12.54, 13.90~16.81
	D	10.000~10.020, 11.580~11.600 15.100~16.500	12.51~12.52, 15.09~15.12 20.83~23.53
	E		

3.2 载荷作用面积对反直观行为的影响

(1)由表 1 可见,对于同一载荷模型,发生反直观行为的若干载荷区间中,首发载荷区间的范围均比最后的载荷区间小,表明后者的稳定性比前者好,发生反直观行为的机率也大。

(2)载荷作用面积减小时,发生反直观行为的载荷区间也减小,而压力值增大。以矩形脉冲为例,从载荷模型 A 到 E 发生反直观行为的相对比例依次为 1.00、0.67、0.48、0.46、0.35;而压力值由 0.3 MPa 增加到 30.5 MPa。即载荷愈集中,发生反直观行为的载荷范围也愈小,只有增加压力,才有可能发生反直观行为,这样,在板的很小范围内,产生很大的塑型变形,将会引起材料的局部损伤,也就是材料的局部破坏先于反直观行为的发生。由此推断,在集中力作用下,很难发生反直观行为。

(3)由于载荷作用面积不同,反直观行为的整体变形模式也不同,见图 4。当载荷分布均匀时,其变形模式为一般浅壳形式,见图 4(a);当载荷较集中时,在该处产生严重的局部效应,以致在反直观响应中,这个局部效应区的最后位置并非最低,而是略高出周围部位,其变形模式如同草帽行状,见图 4(b)。



图 4 模型 A 和 E 的变形图

Fig. 4 Displacement diagram of model A and E

3.3 矩形脉冲和三角形脉冲荷载下圆板反直观动力行为的比较

三角形脉冲荷载下发生反直观行为的规律和矩形脉冲荷载下基本相同,上述矩形脉冲荷载下的结果对三角形脉冲同样适合。由表1可见,在三角脉冲荷载下,发生反直观行为时所需的载荷数值较大,范围较小。这是由于矩形脉冲是阶跃荷载,而三角形脉冲则是斜坡荷载,只有用更大的载荷,才可能激起发生反直观行为所需的位移响应;另外,虽然两种荷载脉冲的时间相同,但两者的冲量不同,若载荷的峰值相同时,矩形脉冲对应的冲量大,所以,较小的载荷就可能发生反直观行为。

3.4 首发反直观行为的载荷与受载面积之间的关系

上述研究结果表明,首发反直观动力行为在整个反直观行为中起着重要作用,它的特点不仅能代表整个反直观行为的特点,而且能从它可推断继发反直观行为的载荷区间最少数目。为此,将首发反直观行为的载荷与受载面积之间的关系曲线以无量纲表示,如图5。其中, R 为圆板的半径, r 为受载面积对应圆的半径, p_0 为材料的屈服极限, p 为分布荷载的集度。由图5可见,矩形和三角形脉冲下,首发反直观行为的载荷与受载面积之间的关系均为双曲线形式,随着载荷作用面积的减少,发生

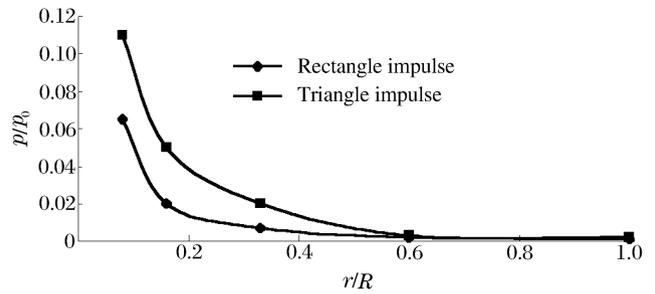


图5 首发反直观行为的载荷与受载面积之间的关系

Fig. 5 Relation between load and its applied area in first counter-intuitive behavior

反直观行为所需的载荷集度迅速增加,与此同时,该处的局部效应也愈来愈严重,若达到了材料的极限应力或极限应变,则材料发生破坏,不可能有反直观行为发生。又一次说明,载荷愈集中,发生反直观行为的机率愈少,以致于不可能发生。随着载荷作用面积的增加,两条曲线也愈来愈接近。表明两种荷载作方式下发生反直观行为的机率相差不多。使用该曲线,可估计周边简支圆板受矩形和三角形脉冲下的反直观行为的载荷的大小。

总之,在上述载荷作用方式及范围内,除模型E受三角形脉冲外,均能发生反直观行为,且它们的变化规律也基本相同,但载荷的作用方式及面积对反直观动力响应有明显的影响,不仅使发生反直观行为的载荷区间的多少和大小有明显的变化,发生的机率也因此而异。而且,发生反直观行为的最后模式形状也有所不同。

4 结论

通过对上述不同载荷作用方式及范围情况下的反直观行为的研究,可得如下结论:

(1) 结构的反直观行为的位移历史曲线,可经历多次或一次反弹到达载荷作用的反向发生反直观行为。随着载荷的增加,发生反直观行为前的反弹次数减少,直到不反弹就发生为止。

(2) 载荷作用面积是影响反直观行为的因素之一,当面积减小时,发生反直观行为的机率愈来愈小,在集中载荷作用下,很难发生反直观行为。

(3) 矩形和三角形脉冲荷载作用下所发生的反直观行为的规律基本相同,但矩形脉冲荷载下的反直观行为对应的载荷范围比三角形时大,发生的机率也高。

(4) 由首发反直观响应的位移历史曲线可判断继发反直观行为的载荷最少区间数目。

参考文献:

- [1] Symonds P S, YU T X. Counterintuitive behavior in a problem of elastic-plastic beam dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1989,52:517-522.
- [2] Borino G, Perego U, Symonds P S. An energy approach to anomalous damped elastic-plastic response to short

- pulse loading[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1991, 56: 430—438.
- [3] Qing M, Zhao L M, Yang G T. Experimental results on the counter-intuitive behavior of thin clamped beams subjected to projectile impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1991, 11: 341—348.
- [4] 席丰, 杨嘉林, 黎在良. 再访结构弹塑性动力响应的异常行为[J]. *固体力学学报*, 1999, 20(2): 113—122.
XI Feng, YANG Jia-lin, LI Zai-liang. Anomalous behavior revisited: dynamic response of elastic-plastic structures [J]. *ACTA Mechanica Solida Sinica*, 1999, 20(2): 113—122.
- [5] Lee J Y, Symonds P S, Borino G. Chaotic response of a two-degree-of-freedom elastic-plastic beam model to short pulse loading[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1992, 59: 711—721.
- [6] Koisky H, Rush P, Symonds P S. Some experimental observation of anomalous response of fully clamped beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1991, 11: 445—456.
- [7] Galiev S U. Distinctive features of counter-intuitive behavior of plates and shells after removal of impulse load[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19: 175—187
- [8] Bassi A, Genna F, Symonds P S. Anomalous elastic-plastic response to short pulse loading of circular plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 28: 65—91.
- [9] Galiev S U. Experimental observation and discussion of counterintuitive behavior of plates and shallow shells subjected to blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18: 783—802.
- [10] WU Gui-ying, ZHANG Nian-mei, YANG Gui-Tong. The research anomalous response on elastic-plastic plate with large deformation[A]. QIAN Wei-chang. 4th International Conference on Nonlinear Mechanics[C]. 上海: 上海大学出版社, 2002: 508—511
- [11] 吴桂英, 秦冬祺, 杨桂通. 冲击荷载作用下弹塑性板的反常动力响应研究. *爆炸与冲击*, 2003, 23(5): 420—424.
WU Gui-ying, QIN Dong-qi, YANG Gui-tong. A study on anomalous response of elastic-plastic plates under impulsive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 420—424.

Study of the effect of loading modes and areas on anomalous response of elastic-plastic plates

LI Hai-wang^{*}, QIN Dong-qi

(*Department of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*)

Abstract: The anomalous response of elastic-plastic circular plate subjected to various rectangle and triangle impulse loadings is studied. The influences of various loading modes and loading areas on the counter-intuitive behavior of the plate are numerically analyzed in detail. The characteristics of the counter-intuitive behavior under different loadings are obtained. The relation between the number of the displacement peaks in the time-displacement curve and the loading range corresponding to the anomalous response is discovered. The results show that the minimum number of the successive counter-intuitive behaviors can be evaluated from the time-displacement curve corresponding to the first counter-intuitive behavior.

Key words: solid mechanics; anomalous response; finite element method; simply supporting plate; loading mode; loading area

* Corresponding author: LI Hai-wang
E-mail address: 1h00001@public.ty.sx.cn
Telephone: 0351-8606390