

文章编号:1673-2049(2013)03-0014-06

冲击荷载作用下受损网壳结构全过程 动力响应分析

王秀丽, 马肖彤

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 选用 K6 型单层受损网壳结构模型, 利用国际通用计算动力荷载的非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟, 建模时考虑材料应变率的影响; 分别在顶点和损伤点施加冲击荷载, 追踪在不同荷载峰值作用下结构的全过程动力响应, 绘制节点的荷载-位移曲线, 依据 B-R 准则, 得到荷载作用在不同冲击点时网壳动力失稳的临界荷载, 并对比相同幅值静力荷载作用下的结构响应。结果表明: 冲击荷载作用下的结构响应远大于静力荷载作用下的, 且结构破坏形式也不相同; 对于受损结构, 要避免在受损区域承受冲击荷载, 受损部位需要进行及时维修加固。

关键词: 冲击荷载; 受损网壳; 动力稳定性; 全过程响应

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A

Whole Process of Dynamic Response of Damaged Reticulated Structure Shell Under Impact Load

WANG Xiu-li, MA Xiao-tong

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: A K6 damaged single-layer reticulated shell structure model was established with the international universal nonlinear finite element software ANSYS/LS-DYNA which was specialized in computing dynamic load. The influence of material strain rate was considered. The vertex points and damaged points were respectively applied with impact load to track the whole process of dynamic response of structure under different peak loads. Node load-displacement curves were calculated and described. According to B-R criteria, dynamic instability critical loads under different points of impact loads were got and compared to structural response under the actions of the same amplitude static loads. The results show that structural response under impact load is much greater than that under static load and the failure forms of structure are not the same. The conditions of damaged area exerted impact load need to be avoided for damaged structure and the damaged parts need repair and reinforce.

Key words: impact load; damaged reticulated shell; dynamic stability; whole process response

0 引言

冲击荷载是指外荷载随时间迅速变化的荷载,

是一种短时作用。建筑结构不可避免地会遭受到如风、地震甚至外来飞行物的冲击、撞击以及爆炸等动荷载的作用。因此, 分析动荷载对结构物的影响已

收稿日期: 2013-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278236)

作者简介: 王秀丽(1963-), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: wangxl@lut.cn.

经成为学者们着力研究的内容。尤其是在“9·11”世界贸易中心大楼倒塌事件及恐怖组织在全球各地制造的一些骇人的爆炸事件之后,人们对高层、大跨等标志性及生命线建筑的耐冲击性能也愈来愈重视。目前,各国许多学者已经开始致力于建筑结构在冲击作用下的动力响应研究。

各国对于框架结构在冲击荷载下的响应研究已较多,但在大跨空间结构方面:国外尚无此方面的专门研究,中国现有的研究也很少,目前的研究仅限于郭可^[1]和李海旺等^[2]对单层球面网壳所做的冲击荷载作用下的动力响应试验研究和数值分析与王多智^[3]和Zhi等^[4]所做的不同形式单层网壳在冲击荷载作用下的破坏机理以及抗冲击防护方法研究。

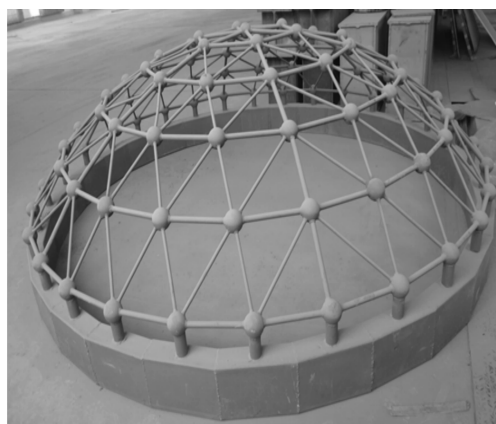
本文中笔者对1个3 m受损单层球面网壳在冲击荷载作用下的动力稳定性进行了研究^[5],分析了其在顶点加载与损伤点加载不同情况下结构的全过程动力响应,并对比了在相同幅值静力荷载作用下的结构响应,总结出受损网壳结构在不同点加载时的结构失效规律。

1 有限元建模

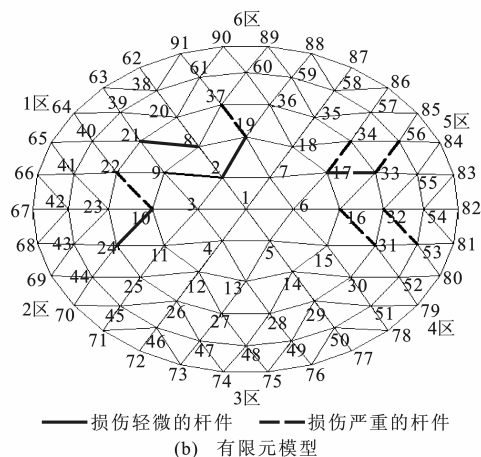
本文分析所采用的模型为一跨度3 m、矢跨比0.22、矢高0.667 m的单层K6型受损网壳;主肋和环杆截面为22 mm×3 mm,斜杆截面为14 mm×2 mm。网壳的部分斜杆存在不同程度的损伤,其中4根杆件损伤轻微,7根杆件受损较为严重,模型及受损杆件见图1。

由于冲击与爆炸问题属于强非线性动力学问题,在整个冲击过程中荷载与结构受力瞬息万变。本文中选用计算动力荷载的国际通用非线性有限元软件ANSYS/LS-DYNA进行数值模拟^[6],网壳杆件选用Beam161单元,Beam161单元是ANSYS/LS-DYNA中自带的三节点梁单元类型。屋面荷载以集中力的形式,通过质量单元Mass166施加到节点上^[7]。

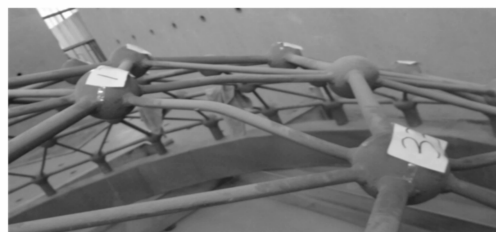
研究表明,在同一应变下,动态应力要比静态应力高很多,两者的差通常称为“过应力”。当应变率 $\dot{\epsilon}=10^{-5} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 、应变 $\epsilon=0.01$ 时许多金属材料都呈现出这种特性^[8-10]。材料屈服极限和瞬时应力都会随应变率的提高而提高,使得在冲击荷载作用下必须考虑材料的应变率效应。因此分析采用ANSYS/LS-DYNA中能够考虑上述因素影响的24号材料分段线性塑性模型,并输入与应变率相关的应力-应变曲线^[11]。它是一个很常用的塑性准则,特



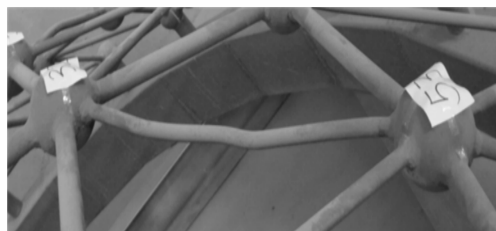
(a) 实际模型



(b) 有限元模型



(c) 受损杆件1



(d) 受损杆件2

图1 模型及受损杆件

Fig. 1 Models and Damaged Bars

别适用于钢材。采用这个材料模型,还可根据塑性应变定义失效。采用Cowper-Symbols模型考虑应变率的影响,它与屈服应力 σ_r 的关系为

$$\sigma_r = [1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{P}}] [\sigma_0 + f_h(\epsilon_{eff}^p)] \quad (1)$$

式中: σ_0 为常应变率处的屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为有效应变率; C, P 均为应变率参数; $f_h(\epsilon_{eff}^p)$ 为基于有效塑性

应变的硬化函数。

本模型材料屈服强度为 235 MPa,一般杆件弹性模量为 205 GPa,受损杆件根据剩余模态力理论与前期模态试验结果通过降低弹性模量来模拟,受损轻微杆件弹性模量取 164 GPa,受损严重杆件弹性模量取 115 GPa,泊松比为 0.3,材料失效由塑性应变控制,失效时的有效塑性应变取 0.25。材料本构关系如图 2 所示。

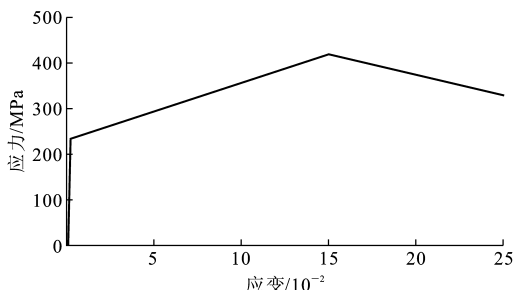


图 2 材料本构关系

Fig. 2 Constitutive Relationship of Material

2 计算分析

2.1 冲击荷载取值

根据所查阅文献及以往资料,本文中的冲击荷载选用三角形脉冲荷载,动力稳定临界值随着脉冲持续时段的增加而减小。冲击荷载的作用时间一般为几毫秒到十几毫秒,本文中选取冲击荷载作用时间为 6 ms,荷载峰值 P_{\max} 取从 5 kN 直到结构完全破坏所需的荷载,冲击荷载 P 如图 3 所示,其数学表达式为

$$P = \begin{cases} 2P_{\max} \frac{t}{\delta} & 0 \leq t < \frac{\delta}{2} \\ 2P_{\max} (1 - \frac{t}{\delta}) & \frac{\delta}{2} \leq t < \delta \\ 0 & t \geq \delta \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为冲击荷载作用时间; δ 为具体冲击荷载持续取值,取 $\delta = 6$ ms。

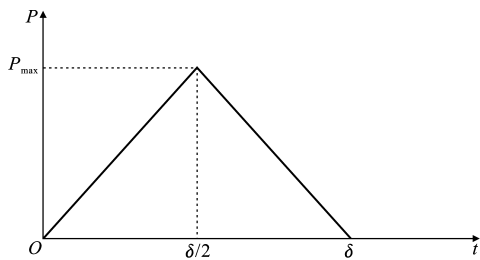


图 3 冲击荷载

Fig. 3 Impact Load

2.2 动力失稳的判别准则

动力稳定性的判别准则可通过稳定分析中各参

数的变化特征建立,也可通过观察动力平衡路径曲线的特性来判断;采用不同的动力稳定性数值分析方法和不同的参数来自动控制荷载增量步长及其符号改变^[12],因此,可相应地建立不同的参数判定准则。本文研究中尝试采用了 Budiansky-Rotll 准则(B-R 准则)作为结构动力失稳的判别准则。B-R 准则(又称为运动方程法)要求计算不同荷载水平作用下结构的动力响应,从而获得相对于不同荷载参数的结构响应最大值,如果在某一荷载下,荷载的微小增量导致了结构响应的显著增长,则称此时结构发生动力失稳,该荷载即被认为是该结构的动力稳定性临界荷载。以逐步加大的荷载幅值作为参数,对应每一荷载幅值做一次动力冲击分析,记录结构的动力特征响应,然后绘制荷载幅值与结构动力特征响应之间的关系曲线;通过该曲线可全面了解结构随荷载幅值增大其动力性状不断变化乃至失稳的全过程,结构动力稳定性的临界荷载也能以这一全过程曲线为基础来确定。从实用的角度来看,可以用逐步逼近的方法来求得这一临界荷载。计算上述全过程曲线时,在接近临界荷载处通常需要适当增加计算点。在逐步增大荷载幅值进行结构动力响应分析时,总是可以将稳定性临界荷载确定在某一范围内,在该范围内有针对性地增加计算点数,就能得到满足所需精度的稳定性临界荷载。

2.3 加载方法

对于无损单层网壳结构,一般在顶点施加冲击荷载会引起结构产生较大的动力响应;而本文分析中采用的模型为一存在薄弱部位的受损结构,需要考虑在薄弱部位施加冲击荷载作用时结构的动力响应,因此,选用冲击荷载的加载点为顶点和 17 号点(该点是静力计算中损伤区位移最大的点)。

2.4 计算分析

2.4.1 顶点加载

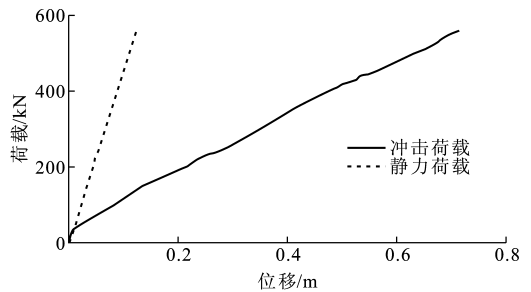
结构顶部作用冲击荷载,采用 B-R 准则作为失稳判别准则,不断跟踪冲击力荷载峰值与壳顶节点位移最大响应值之间的关系,绘制荷载-位移全过程曲线,见图 4(a)。从图 4(a)可以看出,当 $P_{\max} < 35$ kN 时,位移幅值从 0.849~9.535 mm 缓慢增长;当 $P_{\max} > 35$ kN 时,位移幅值超过《网壳结构技术规程》(JGJ 61—2003)所规定的限值 $L/300 = 10$ mm 且增长迅速,网壳发生第 1 次动力失稳,可初步判定顶点加载时动力临界荷载为 35 kN,其中, L 为网壳的跨度;当 $P_{\max} = 60$ kN 时,第 1 圈的主肋全部屈服,环杆部分由拉杆变为压杆,第 2 圈的主肋接近屈

服,最大有效塑性应变为 0.017;当 $P_{\max} = 70$ kN 时,第 2 圈的主肋全部屈服,斜杆有部分屈服,最大有效塑性应变为 0.021;当 $P_{\max} = 150$ kN 时,第 3 圈的受损杆件开始屈服,最大有效塑性应变为 0.043;当 $P_{\max} = 250$ kN 时,第 1 圈的所有杆件随着顶点一起下凹,第 3 圈的杆件基本屈服,第 1 圈的所有环杆屈服,同时拉杆全部变为压杆,最大有效塑性应变为 0.077,判定为第 2 次动力失稳;当 $P_{\max} = 450$ kN 时,第 2 圈的杆件下凹,第 1~4 圈的杆件全部屈服,最大有效塑性应变为 0.17,判定为第 3 次动力失稳;当 $P_{\max} = 560$ kN 时,第 1 圈的主肋杆件最大有效塑性应变达到 0.257,材料失效,杆件发生断裂破坏,顶点位移达到 712.2 mm,超过了结构的高度,结构发生完全破坏,见图 4(b)。在一系列加载过程中,受损杆件对整个结构响应的影响并不明显,主要是由于这些杆件并未与加载点相连,而是位于第 3 圈或第 4 圈,冲击荷载响应传递到这些杆件的时间较晚且冲击力也较小。

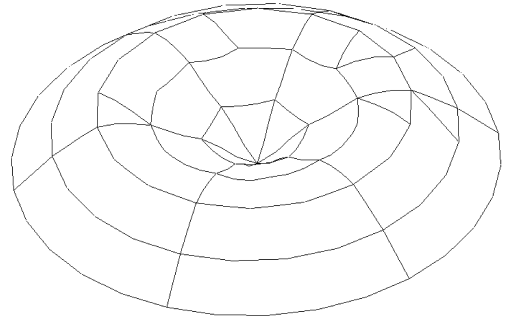
不同荷载峰值下的位移最大节点与应力最大杆件时程曲线见图 4(c),(d)。从图 4(c),(d)可以看出,在冲击的瞬间位移与应力一般只需要几毫秒就达到一个峰值,随后节点的位移、杆件的应力变化都开始稳定下来,一直绕着某个平衡位置小幅振荡,符合冲击作用下的结构响应规律。随着荷载峰值的不断增大,结构振荡越来越小,主要是因为较大荷载作用下结构的响应会瞬时达到较大值,变形也一次性达到极值。其他点的响应自冲击点位置(壳顶节点)开始,既而发散并传播开来,也就是说,离冲击位置越近的位置,其节点或杆件产生响应的时刻相对越早;离冲击位置越远的位置,其节点或杆件产生响应的时刻相对越晚。同时,随着冲击力荷载峰值的增大,结构响应传播的速率有所加快,结构位置产生响应的时刻有所提前,但是峰值响应出现的时间时早时晚,并未发现有一定的规律。

该网壳发生第 1 次失稳后,继续冲击壳顶时,第 2 次失稳的荷载比第 1 次高很多,冲击力荷载峰值达到第 1 次失稳时的 7.14 倍,说明本模型虽然为受损结构,但是发生首次失稳后,仍然有很强的抗冲击能力。将结构破坏时的荷载峰值 560 kN 等效为重物冲击碰撞,若冲击物的质量为 1 000 kg,则需要 $3.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度。

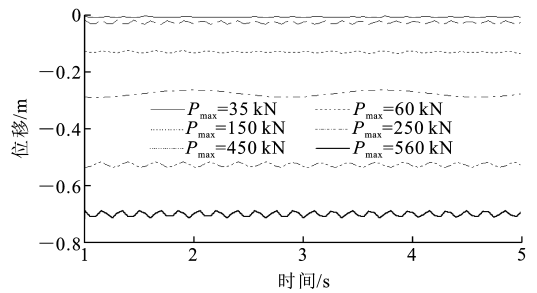
而在相应幅值的静力荷载作用下,位移远小于冲击荷载作用下的位移[图 4(a)]。在 560 kN 静力荷载作用下,结构最大位移虽为 123.65 mm,但只



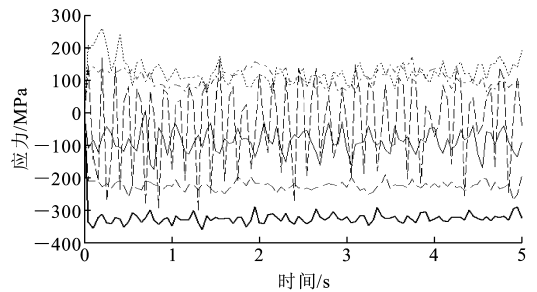
(a) 荷载-位移全过程曲线



(b) 最终变形



(c) 不同荷载峰值下的位移时程曲线



(d) 不同荷载峰值下的应力时程曲线

图 4 顶点加载分析

Fig. 4 Loading Analyses of Vertex Points

是顶点以及第 1 圈处的位移较大,而其他节点位移很小,结构并不会发生整体破坏。

2.4.2 受损点加载

为了更好地了解受损杆件对该结构抗冲击能力的影响,在受损较严重的杆件区域进行加载,得到荷载-位移全过程曲线,见图 5(a)。从图 5(a)可见,损伤点加载的荷载-位移曲线与顶点加载荷载-位移曲线的特征相似,但是各个荷载峰值对应的位

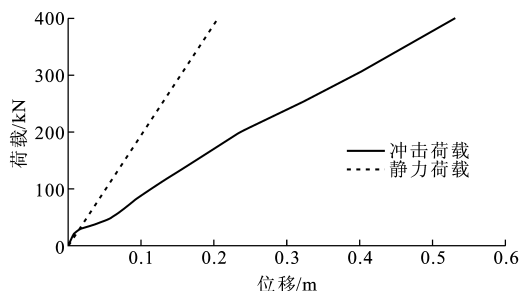
移相对于顶点加载时偏大。当 $P_{\max} < 25 \text{ kN}$ 时,位移幅值从 $1.26 \sim 10.56 \text{ mm}$ 缓慢增长;当 $P_{\max} > 25 \text{ kN}$ 时,位移幅值开始迅速增长且超过《网壳结构技术规程》所规定的 $L/300$,判定为结构发生第 1 次动力失稳,25 kN 可看作动力稳定临界荷载;当 $P_{\max} = 40 \text{ kN}$ 时,与加载点相连的 2 个受损杆件最先发生屈服,最大塑性应变为 0.013;与顶点加载相似,随着荷载峰值的增加,位移幅值与屈服的杆件也在不断地增加,当 $P_{\max} = 200 \text{ kN}$ 时,加载点区域的第 3 圈环杆屈服且发生整体下凹变形,最大塑性应变为 0.117,判定为结构发生第 2 次动力失稳;当 $P_{\max} = 300 \text{ kN}$ 时,加载点区域的第 4 圈环杆屈服,加载点所在的 $1/6$ 结构区域下凹,最大塑性应变为 0.184,判定为结构发生第 3 次动力失稳;当 $P_{\max} = 400 \text{ kN}$ 时,位移达到 529.7 mm ,屈服杆件进一步扩散,结构发生大面积凹陷,最大塑性应变为 0.281,部分杆件失效,结构发生功能破坏,最终变形见图 5(b)。

不同荷载峰值下的位移时程与应力时程曲线见图 5(c),(d)。从图 5(c),(d)可以看出,不同荷载峰值下的位移、应力时程曲线与顶点加载时有相同的变化规律,在冲击的瞬间都达到一个峰值,随后变化开始稳定下来,绕着某个平衡位置小幅振荡。此加载方法下结构发生第 1 次失稳后,当继续冲击加载点时,第 2 次失稳的荷载比第 1 次高更多,达到第 1 次失稳时的 16 倍,说明在受损点加载发生首次失稳后,结构仍有很强的抗冲击能力。将结构破坏的荷载峰值 400 kN 等效为重物冲击碰撞,若冲击物的质量为 $1\,000 \text{ kg}$,则需要 $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度。

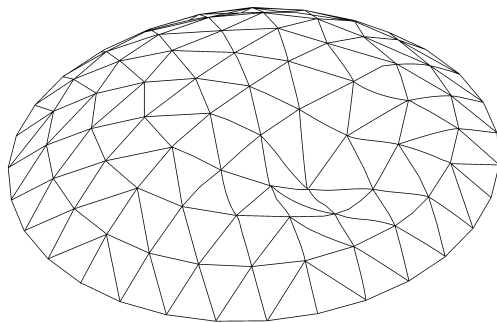
在相应幅值的静力荷载作用下,位移同样远小于冲击荷载作用下的位移[图 5(a)],但是均大于静力荷载顶点加载的情况,在 400 kN 静力荷载作用下,结构最大位移为 209.67 mm ,结构仍为局部位移过大破坏,而非整体倒塌破坏。在受损点加载时,结构的静动力响应均比顶点加载时大很多,动力临界荷载和结构最终破坏的荷载都比顶点加载时小,说明对于该受损模型来说,受损薄弱部位承受冲击荷载是十分不利的,需要对受损部位进行及时维修加固。

3 结 语

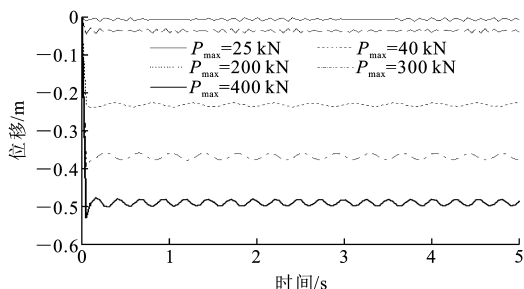
(1)在冲击荷载作用下结构的响应远大于同等峰值静力荷载作用下结构的响应,而且在冲击荷载作用下结构较容易发生整体倒塌破坏,在静力荷载作用下结构却更容易发生局部破坏。



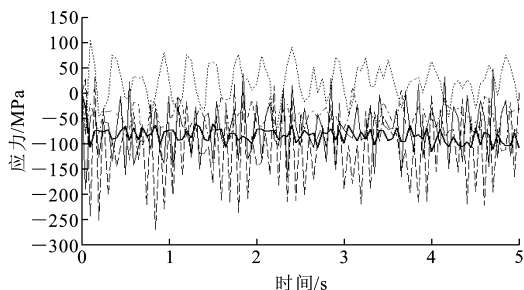
(a) 荷载-位移全过程曲线



(b) 最终变形



(c) 不同荷载峰值下的位移时程曲线



(d) 不同荷载峰值下的应力时程曲线

图 5 受损点加载分析

Fig. 5 Loading Analyses of Damaged Points

(2)顶点加载时,主要受力构件是主肋和环杆,斜杆受力较小;结构首次失稳的临界荷载约为结构破坏荷载时的 $1/16$,在结构发生首次失稳后,仍有较强的抗冲击能力。

(3)进行受损点加载时,结构的响应规律与顶点加载时相似;但是在受损点施加冲击荷载时,结构的响应大于顶点加载响应,这对结构是十分不利的,所以结构中的受损构件应及时维修加固,以免在遭受

冲击荷载时产生不可挽回的损失。

参考文献:

References:

- [1] 郭可. 单层球面网壳在冲击荷载作用下的动力响应分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
GUO Ke. Dynamic Analysis of Single-layer Reticulated Shells Under Impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [2] 李海旺, 郭可, 魏剑伟, 等. 撞击荷载作用下单层球面网壳动力响应模型实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 39-45.
LI Hai-wang, GUO Ke, WEI Jian-wei, et al. The Dynamic Response of a Single-layer Reticulated Shell to Drop Hammer Impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1): 39-45.
- [3] 王多智. 冲击荷载下网壳结构的失效机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG Duo-zhi. Failure Modes of Geodesic and Schwedler Reticulated Domes Under Impact Loads [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [4] ZHI Xu-dong, WANG Duo-zhi, FAN Feng, et al. Mechanical Behaviors of Single-layer Reticulated Domes Under Impact [C]//ICAIE. Proceedings of the Third International Symposium on Innovative Civil & Architectural Engineering. Seoul: ICAIE, 2008: 29-35.
- [5] 刘伟, 高维成. 网壳结构损伤识别理论及仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(2): 156-159.
LIU Wei, GAO Wei-cheng. Theory and Simulation of Damage Detection in Reticulated Shell [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(2): 156-159.
- [6] 瞿海雁, 李国强, 孙建运, 等. 侧向冲击作用下圆钢管混凝土构件的数值模拟分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 89-96.
QU Hai-yan, LI Guo-qiang, SUN Jian-yun, et al. Numerical Simulation Analysis of Circular Concrete-filled Steel Tube Specimen Under Lateral Impact [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 89-96.
- [7] 熊世树, 潘琴存, 熊明祥. 钢框架组合结构的冲击倒塌分析与防倒措施研究[J]. 铁道工程学报, 2006(8): 53-57.
XIONG Shi-shu, PAN Qin-cun, XIONG Ming-xiang. The Collapsed Analysis and Study of Protective Methods of Steel Frame with Composite Slab Under Impact Load [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(8): 53-57.
- [8] 陆新征, 江见鲸. 世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 8-10.
LU Xin-zheng, JIANG Jian-jing. Dynamic Finite Element Simulation for the Collapse of World Trade Center [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 8-10.
- [9] 陆新征, 卢啸, 张炎圣, 等. 超高车辆-桥梁上部结构撞击力的工程计算方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 49-55.
LU Xin-zheng, LU Xiao, ZHANG Yan-sheng, et al. Engineering Calculation Method for Collision Force Between Over-height Truck and Bridge Superstructure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 49-55.
- [10] 陆新征, 张炎圣, 叶列平, 等. 超高车辆-桥梁上部结构碰撞的破坏模式与荷载计算[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 60-67.
LU Xin-zheng, ZHANG Yan-sheng, YE Lie-ping, et al. Failure Modes and Load Calculation of Collision Between Over-high Truck and Bridge Superstructure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 60-67.
- [11] 安世亚太(北京)有限公司. ANSYS/LS-DYNA 使用指南[M]. 北京: 安世亚太(北京)有限公司, 1999.
Pera Global (Beijing) Limited Company. ANSYS/LS-DYNA Users Guide [M]. Beijing: Pera Global (Beijing) Limited Company, 1999.
- [12] 杜庆华, 熊祝华, 陶学文. 应用固体力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
DU Qing-hua, XIONG Zhu-hua, TAO Xue-wen. Application of Solid Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987.