

# 大跨度四边支承单层柱面网壳的稳定性能

曹正罡, 范峰, 孙瑛, 王玉芹, 王伟

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, caohit@hit.edu.cn)

**摘要:** 为拓宽单层柱面网壳的应用跨度, 以参数分析作为研究手段, 利用通用有限元程序 ANSYS 以及自编的前后处理程序, 针对波宽为 20 m 四边支承柱面网壳开展 400 余例非线性全过程分析, 考察屈曲模态、临界荷载、塑性发展分布等特征响应, 总结长宽比、矢宽比、初始几何缺陷、荷载不对称分布等因素对网壳临界荷载的影响规律. 研究结果显示: 四边支承柱面网壳的直杆以受弯作用为主, 壳面中部是结构的薄弱区域; 当长宽比过大时, 应通过增设加劲肋提高壳面刚度, 加劲肋的间距应使得网壳长宽比保持在 1.0 为宜; 柱面网壳对于初始几何缺陷较为敏感, 当缺陷值达到波宽的 1/300 时, 网壳的弹塑性临界荷载将降低 30% 以上; 当荷载呈不对称分布且  $p/g = 1.0$  时, 网壳的临界荷载将降低到均布荷载作用情况下的 86% ~ 94%.

**关键词:** 柱面网壳; 弹塑性; 稳定性; 屈曲模态; 临界荷载

中图分类号: TU 393.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)10-1524-06

## Stability of large-span single-layer cylindrical reticulated shells supported along four edges

CAO Zheng-gang, FAN Feng, SUN Ying, WANG Yu-qin, WANG Wei

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, caohit@hit.edu.cn)

**Abstract:** To widen the span range available for single-layer cylindrical reticulated shells, parameter analyses based upon nonlinear complete-process analysis were carried out. More than 400 examples of single-layer cylindrical reticular shells with width of 20 meters and supported along the four edges were calculated by finite element method software ANSYS and self-developed pre- and post-processing programs. The buckling modes, critical loads, plastic development levels were collected to investigate the effect of length-width ratio, rise-span ratio, initial geometric imperfection, and unsymmetrical distribution of loads. The results show that single-layer cylindrical reticular shells supported along the edges are still characterized by bending action, and the central regions of shell structure are the most sensitive areas. When the length-width ratio becomes larger, it is necessary to add the stiffening ribs to enhance the rigidity of shells, and the spacing of which should be set to make the length-width ratio be 1.0. The cylindrical reticulated shells are concluded to be sensitive to initial geometric imperfection, when the initial imperfection value reaches 1/300 of the width, the critical loads of reticulated shell will be reduced by 30%. And when the loads are unsymmetrical distributed with  $p/g = 1.0$ , the critical loads will be 86% -94% of those under symmetrical loading distribution.

**Key words:** cylindrical reticulated shells; elasto-plastic; stability; buckling mode; critical load

近 30 年来, 国内外学者在网壳结构的稳定性

能研究方面取得了丰硕成果<sup>[1-6]</sup>, 所研究的网壳结构形式也多种多样. 其中针对柱面网壳结构的研究<sup>[7-8]</sup>我国学者自上世纪 90 年代中期就已经开始, 在此基础上提出的柱面网壳极限承载力的简化计算公式已成功应用到现有规程<sup>[9]</sup>. 近几年, 研究人员进一步对柱面网壳弹塑性稳定性能

收稿日期: 2009-03-12.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20070420876);

国家自然科学基金资助项目(50778054).

作者简介: 曹正罡(1975—), 男, 博士, 讲师;

范峰(1971—), 男, 教授, 博士生导师;

王伟(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

开展重点分析,获得了较为系统的研究成果<sup>[10-12]</sup>.这些研究针对的柱面网壳均以15 m做为适用跨度并符合当时的建设要求,但随着单层柱面网壳建设跨度的逐渐增大,前期研究成果的局限性就凸显出来.为此,本文针对四边支承条件下三向网格柱面网壳,将研究波宽( $b$ )增大到20 m,而且为提高结构整体刚度考虑了利用加劲肋来提高网壳的整体刚度.在此基础上,利用有限元软件 ANSYS 开展系统的弹性和弹塑性全过程分析.通过考察屈曲模态、塑性发展分布及矢宽比(矢高/波宽)、长宽比(长度/波宽)、初始几何缺陷和荷载不对称分布等因素对极限荷载的影响,总结柱面网壳结构的弹性、弹塑性稳定性能,进而为开展更大跨度柱面网壳设计与建设提供技术指导.

## 1 参数分析方案

### 1.1 结构计算模型

四边支承柱面网壳构造通常分为两种情况:当长宽比( $L/b$ ) $<2.2$ 时,构造如图1(a)所示;

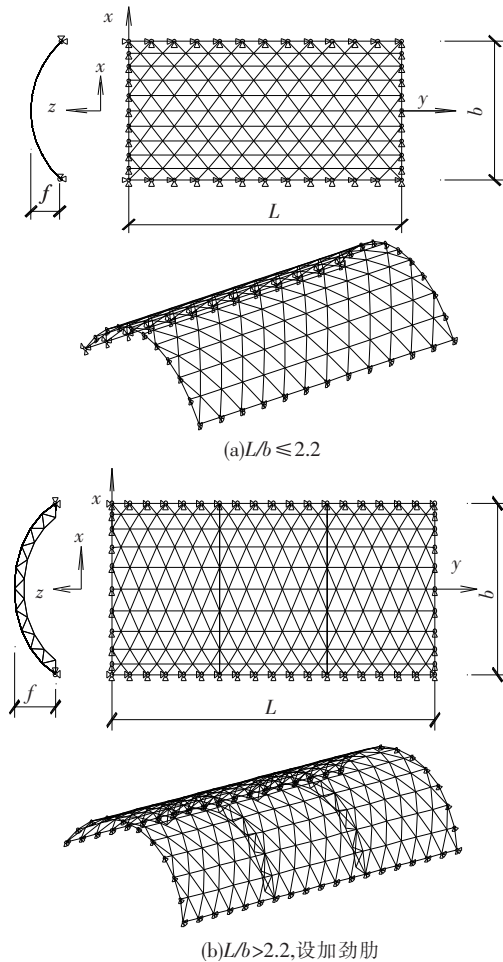


图1 柱面网壳网格布置

长宽比 $>2.2$ 时,沿长度方向一倍宽范围内加设一道加劲肋,以提高结构的整体刚度和稳定性,加劲肋结构形式为平面桁架,见图1(b).有限元模型中网壳各节点采用刚性连接;网壳的支承形式为两纵边节点三向固定铰支,两端面节点只限制平面内位移( $X$ 、 $Z$ 向位移),不限制纵向位移( $Y$ 向位移).

### 1.2 长宽比与矢宽比

选取6种网壳长度: $L = 20, 28, 36, 44, 52, 60$  m.相应的长宽比: $L/b = 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0$ .考虑4种矢宽比 $f/b = 1/2, 1/3, 1/4, 1/5$ .网壳网格划分沿长度方向每3 m一格,沿圆弧方向按等弧长原则划分为10段.

### 1.3 荷载分布形式

考虑满跨均布和半跨均布两种荷载分布形式.其中,恒荷 $g$ 满跨分布,活荷载 $p$ 可满跨均匀布置也可半跨均布.考虑了活荷 $p$ 与恒荷 $g$ 的4种比例: $p/g = 0, 1/4, 1/2, 1.0$ ;荷载分布形式见图2.

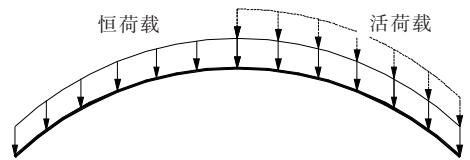


图2 不对称荷载分布形式

### 1.4 杆件截面

网壳杆件均采用 Q235B 圆钢管.分别选取3套常用杆件截面,以截面①、截面②、截面③表示,所选截面见表1.杆件的选取原则为按照规程 JGJ61-2003 静力稳定性验算原则,利用非线性弹塑性有限元分析,通过调整杆件截面,以保证结构的整体稳定承载力相对正常使用荷载的2倍安全系数,同时杆件的应力比控制在0.6以内.

表1 柱面网壳几何构造及杆件配置 mm

$L/b$	杆件形式	截面①	截面②	截面③
$L/b \leq 2.2$	纵杆、直杆	102 × 8	102 × 8	108 × 6
$f/b = 1/2 \sim 1/5$	斜杆	121 × 10	121 × 10	127 × 8
	纵杆、直杆	89 × 5	73 × 4	95 × 4
$L/b = 2.6, 3.0$	斜杆	102 × 7	89 × 6	108 × 6
	$f/b = 1/4, 1/5$	肋弦杆	102 × 7	89 × 6
	肋腹杆	89 × 5	73 × 4	27 × 4
	纵杆、直杆	89 × 5	73 × 5	95 × 4
$L/b = 2.6, 3.0$	斜杆	102 × 7	89 × 7	108 × 6
	$f/b = 1/2, 1/3$	肋弦杆	133 × 8	121 × 8
	肋腹杆	121 × 6	102 × 6	27 × 4

### 1.5 初始几何缺陷

将网壳最低阶特征屈曲模态作为最不利初始

几何缺陷分布模式,考虑初始缺陷值分别为  $r = 2.7 \text{ cm} (L/750)$ ,  $4.0 \text{ cm} (L/500)$ ,  $6.7 \text{ cm} (L/300)$  3种情况.

## 2 屈曲模态及塑性发展分布

### 2.1 屈曲模态

屈曲模态代表结构在临界点处的位移发展趋势,对结构的屈曲模态进行分析,可以了解网壳结构的薄弱环节,预测结构可能发生的失稳形式.图

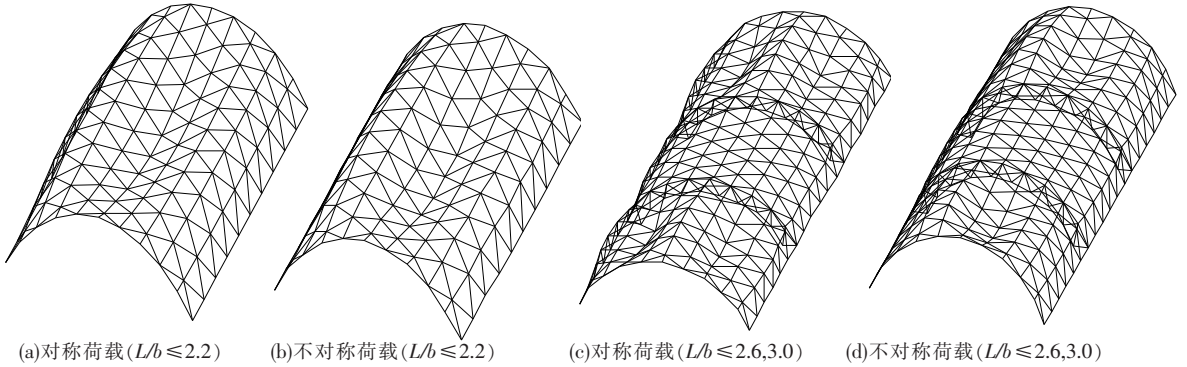


图3 网壳屈曲模态

### 2.2 塑性发展分布

对应于网壳的屈曲模态,失稳过程中的塑性发展过程更能直接反应出结构内部的内力分布机制.考虑材料非线性影响后,外荷载达到结构极限承载力之前,壳面中部杆件会不同程度进入塑性,结构刚度会在壳体几何变形与塑性发展的共同作用下而逐渐减弱.图4给出了长宽比为2.2、矢宽比为1/5的柱面网壳的塑性发展分布图,对应的位置分别为网壳出现塑性时刻(a)、临界时刻(b)、失稳后某一时刻(c);图中圆圈大小表明塑性发展的程度,实心圆圈表明杆件全截面进入塑性.显然,对应前文所展示的屈曲模态可知,网壳进入塑性的位置与壳面凹陷区域基本一致,进入塑性的杆件全部是壳面中部的斜向杆件,屈曲前并没有杆件全截面进入塑性,屈曲后全截面进入塑性的杆件出现在壳面中央,这表明柱面网壳壳面中部在直杆方向上承受的弯矩作用较大,整体结构仍以受弯状态为主.

## 3 各种因素对临界荷载的影响

本文共对400余例柱面网壳进行全过程参数分析,以研究各参数对网壳临界荷载的影响规律.对每例结构取第一个临界点处极限荷载值作为结构的临界荷载.

### 3.1 初始几何缺陷影响

限于篇幅,图5中仅给出了长宽比为1.4、2.6两种情况下具有不同初始缺陷时柱面网壳临

界荷载的变化规律.图3给出了柱面网壳在不同荷载分布情况下的屈曲模态,可以看出,在对称荷载作用下网壳呈现对称的变形趋势,主要体现在跨中部位发生较大凹陷(图3(a)),这表明网壳中部是柱面网壳刚度较弱的部分.当将这一区域内增置加劲肋后,网壳的屈曲模态表现为在加劲肋外侧壳面两边侧发生对称凹陷(图3(c)),加劲肋作用体现的非常明显.当屋面荷载呈现不对称分布时,壳面的凹陷略偏向于荷载较大的一侧(图3(b),(d)).

界荷载的变化规律.

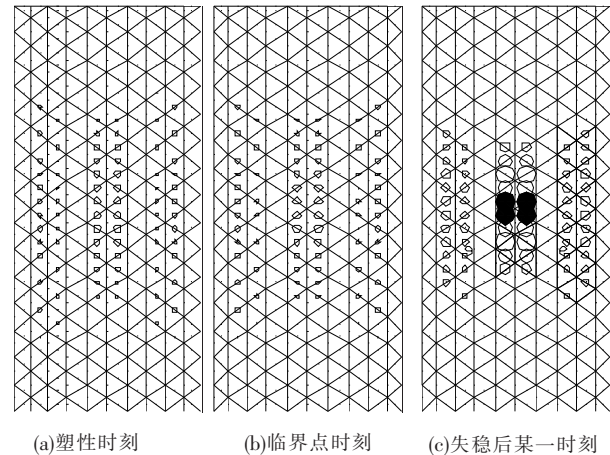


图4 网壳塑性发展分布图( $L/b = 2.2$ 、 $f/b = 1/5$ 、 $p/g = 0$ )

由图5(a)、(b)可见,随初始几何缺陷的增加,弹性、弹塑性稳定极限荷载呈下降趋势.这主要是由于几何缺陷的存在使得网壳壳面整体刚度减弱,同时壳面内力分布不均匀,外荷载作用下杆件更容易进入塑性,并且缺陷的大小影响着杆件塑性发展的程度,进而进一步削弱了网壳的整体刚度,使得结构的临界荷载显著降低.当  $r = 6.7 \text{ cm} (L/300)$  时,  $f/b = 1/3$  的柱面网壳弹塑性临界荷载相对于完整网壳平均降低了30%;  $f/b = 1/2$  的柱面网壳则降低了46%.当荷载不对称分布与初始几何缺陷共同存在时,这种规律并没有发生明显的变化,这表明柱面网壳临界荷载对于初始几何缺陷的变化更加敏感.

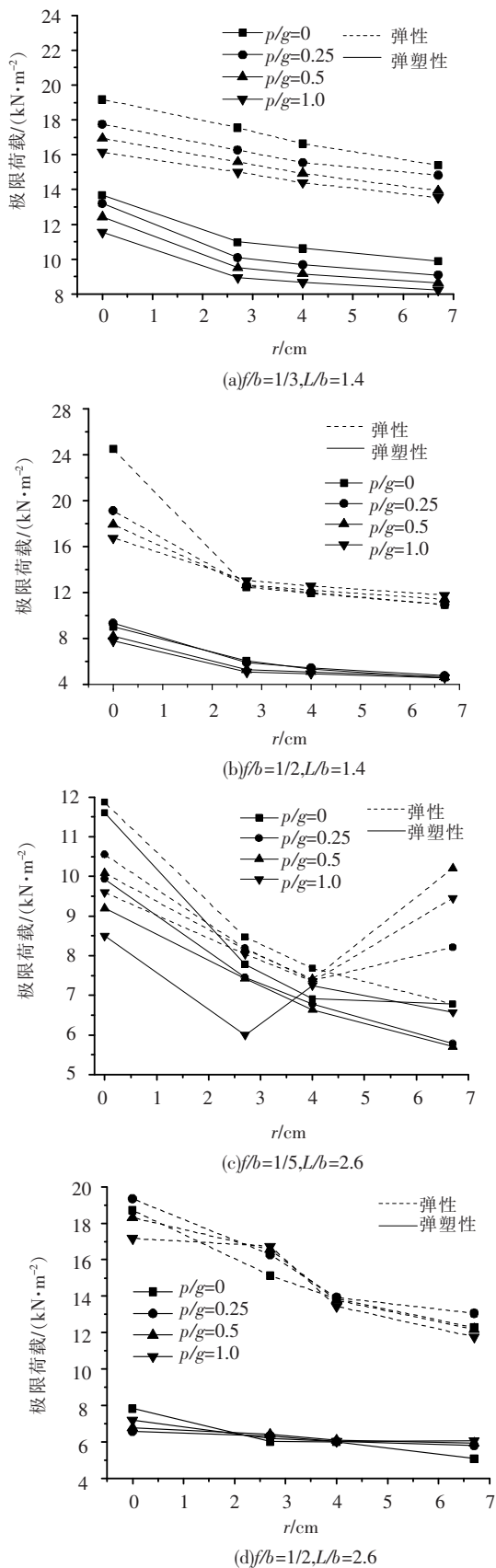


图 5 临界荷载随初始几何缺陷的变化曲线

更进一步研究初始几何缺陷对于设有加劲肋柱面网壳临界荷载的影响规律. 从图 5(c) 中加肋柱面网壳临界荷载随初始几何缺陷变化规律曲线可见看出,  $f/b = 1/5$  时, 弹性临界荷载随初始几

何缺陷的增加呈现出先降后升的趋势, 而弹塑性临界荷载则始终呈现下降的趋势. 这主要是在于初始缺陷达一定值后, 结构在失稳前变形过大而发生“形状畸变”, 从而使得临界荷载出现上扬现象, 此时计算出的弹性临界荷载已不具有实际意义; 当考虑塑性影响后, 网壳的整体刚度在构件进入塑性后进一步削弱, 这也就是导致结构的临界荷载始终随初始几何缺陷的增大而降低的直接原因. “畸变现象” 做为一种极端情况, 并不是出现在所有网壳结构中, 例如, 图 5(d) 中给出的  $L/b = 2.6$ 、 $f/b = 1/2$  柱面网壳, 其弹性和弹塑性临界荷载都是随初始几何缺陷的增大而逐渐降低的; 当  $r = 6.7$  cm ( $L/300$ ) 时, 网壳临界荷载平均降低了 29%.

### 3.2 长宽比影响

图 6 给出了各不对称荷载分布情况下, 柱面网壳临界荷载随长宽比变化的规律曲线.

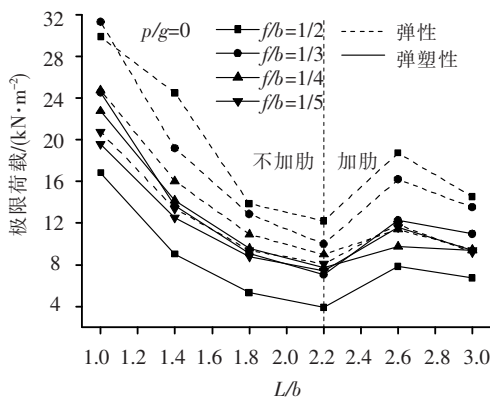


图 6 柱面网壳临界荷载随 L/b 的变化曲线 ( $r = 0$ )

图中可见, 不设肋的柱面网壳 ( $L/b \leq 2.2$ ) 的临界荷载随长宽比的增加呈下降趋势; 加肋加劲肋后 ( $L/b > 2.2$ ) 稳定极限荷载有所提高, 但不等同于  $L/b = 1.0$  时柱面网壳的临界荷载值, 显然加肋对于提高网壳结构整体刚度起到了一定作用, 但并不能起到完全支承作用. 因此提高加肋的刚度对于保证网壳临界荷载起到至关重要的作用; 而且对于四边支承的柱面网壳结构当长度较大时, 应合理增设加劲肋, 使网壳分段长宽比保持在 1.0 为宜.

### 3.3 矢宽比影响

柱面网壳的矢宽比类似于两铰拱结构的矢跨比, 是影响结构力学性能的重要参数. 图 7 给出了具有不同长宽比的柱面网壳, 当  $p/g = 0$  时结构临界荷载随矢宽比的变化规律曲线. 图中结果显示, 网壳的弹性临界荷载随矢宽比的增加变化趋势较为复杂, 但总体上呈现为上升趋势; 而弹塑性临界荷载则呈现出先升后降的趋势. 矢宽比为 1/2

时,网壳的临界荷载最低.显然这也与网壳结构整体受力性能以及塑性发展情况密切相关,材料为弹性时,矢跨比越大,网壳的整体刚度越大,因此结构抵抗外荷载和保持原有形状的能力也就越强.但相同网格数布置情况下,矢宽比大的网壳壳面中央部分每个节点上承受的荷载越大,同样的外荷载作用下,杆件的内力响应也就越大,这样当考虑材料非线性的影响后,壳面中央区域的杆件也容易过早进入塑性,导致壳面刚度的削弱而无法抵抗荷载的进一步增大而丧失稳定性.但这同样还要考虑矢宽比提高对于整体刚度的影响作用,两者对于临界荷载的影响是相互抵制的,究竟哪个因素对于临界荷载的影响更显著,这要根据具体网壳的几何特征及杆件配置情况而定.

因此,设计过程中提高矢宽比的同时,应增加网壳在波宽方向的网格数,降低节点负荷面积及相连杆件的内力响应,从而达到通过增大矢宽比来有效提高网壳整体临界荷载的作用.

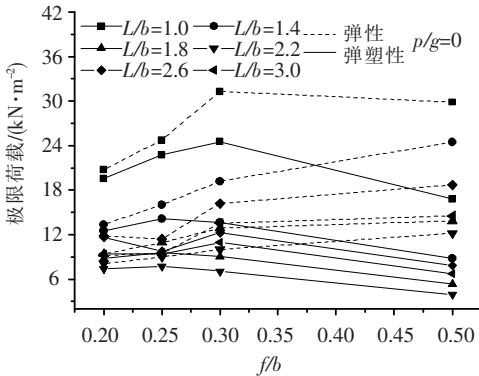


图 7 网壳临界荷载随  $f/b$  的变化曲线 ( $r = 0$ )

### 3.4 荷载不对称分布的影响

网壳结构对于荷载不对称分布的敏感性是值得关注的一个重要问题,因为荷载的不均匀分布在实际工程中是普遍存在的现象.

图 8 分别给出了矢宽比为 1/5 和 1/2、具有不同长宽比的柱面网壳临界荷载随不对称荷载分布比例变化的曲线.由图可见,随着不对称荷载比例的增加,无论是弹性临界荷载还是弹塑性临界荷载都呈现出下降的趋势,而且规律性基本一致.经统计,当  $p/g = 1.0$  时,矢宽比为 1/5 的柱面网壳临界荷载平均降低到对称荷载作用情况下 86%;而矢宽比为 1/2 的柱面网壳则仅降低到 94%.显然,四边支承情况下柱面网壳对于荷载不对称分布的敏感性并不类似于两铰拱结构,而且结构长度的改变也没有引起这种敏感性的变化.

这也可以从前文图 3 中给出的网壳在不对称荷载作用下的屈曲模态得出相应的结论.显然对

称荷载作用与不对称荷载作用下,网壳的屈曲模态形式大体相同.只是当荷载对称作用时,网壳的失稳区域出现在壳面中线两侧呈对称分布或在壳面中央;而当荷载不对称分布时,则失稳区域仅出现在壳面中线一侧或同样主要在壳面中央,但荷载偏大一侧变形趋势更明显.这种情况下,无论荷载是否对称分布,发生失稳的壳面区域并无明显突变,失稳壳面的初始刚度也就相差不大,而网壳的临界荷载基本上是与网壳失稳区域内壳面的薄膜刚度和弯曲刚度有关,也就是导致两种不同分布荷载形式下的临界荷载比较接近.

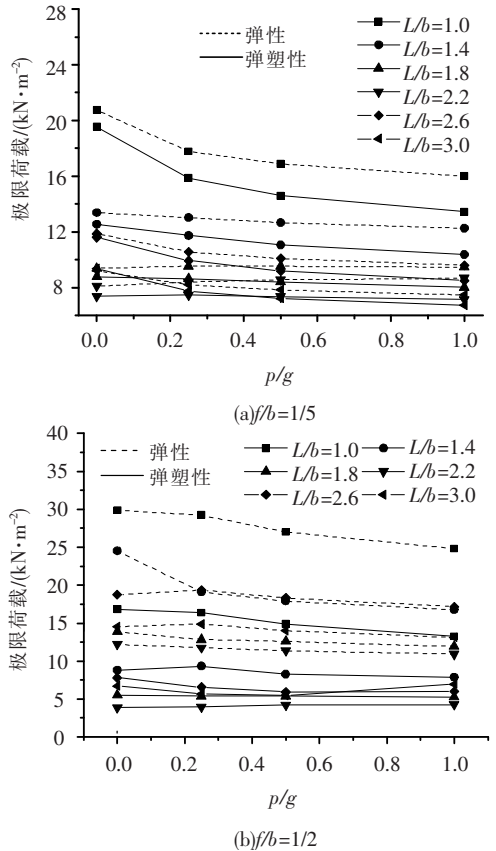


图 8 网壳临界荷载随  $p/g$  的变化曲线 ( $r = 0$ 、截面①)

## 4 结 论

1) 四边支承柱面网壳的屈曲模态主要表现为壳面中部区域的大面积凹陷,进入塑性的杆件也出现在相应的位置,表明结构仍是以受弯作用为主,壳面中部区域是结构的薄弱环节,可通过增设加劲肋提高壳面刚度.

2) 四边支承柱面网壳对于初始几何缺陷较为敏感,当初始几何缺陷达到跨度的 1/300 时,网壳的弹塑性临界荷载平均降低 30% 以上,而且初始几何缺陷过大而引起的网壳“畸变”现象在考虑材料非线性的影响后将消失.

3) 长宽比的增大将导致四边支承柱面网壳

临界荷载的显著降低,但可通过增设加劲肋消除这一因素的影响.增设加劲肋的间距应使得网壳的长宽比保持在 1.0 左右为宜.

4) 矢宽比的增大将有效提升网壳的壳面刚度,提高结构的临界荷载,但对于同样波宽的网壳,矢宽比越大,壳面节点承担的荷载值也相应增大,从而可能导致网壳临界荷载的反而降低.因此提高矢宽比的同时,应增加网壳在波宽方向的网格数,降低节点负荷面积,从而提高结构的整体临界荷载.

5) 荷载的不对称分布将导致四边支承柱面网壳临界荷载略有降低,当  $p/g = 1.0$  时,网壳的临界荷载将降低到对称荷载作用情况下的 86% ~ 94%.网壳在不对称荷载作用下的屈曲模态在形式上与对称荷载作用下基本一致,只是壳面凹陷的区域出现在荷载偏大的一侧.

### 参考文献:

- [1] 沈世钊,陈昕.网壳结构稳定性[M].北京:科学出版社,1999:148 - 153.
- [2] KATO S, YAMASHITA T, UEKI T. Evaluation of elasto-plastic buckling strength of two-way grid shells using continuum analogy [C]//Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures. Seoul, Korea, [s. n.], 2000:105 - 114.
- [3] KATO S, YAMAUCHI Y, UEKI T. Buckling load of elliptic paraboloidal single layer reticulated roofs under uniform load [J]. International Journal of Space Structures, 2005, 20(2): 91 - 106.
- [4] KATO S, KIM J M, NIHO Y. Proportioning method for member sections of single layer reticulated domes based on the results of liner buckling analysis [C]//Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures. Seoul, Korea, [s. n.], 2000: 25 - 40.
- [5] KATO S, KIM J M, CHEONG M C. A new proportioning method for member sections of single layer reticulated domes subjected to uniform and non-uniform loads[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 1265 - 1278.
- [6] YAMADA S, TAKEUCHI A, TADA Y, *et al.* Imperfection-sensitive overall buckling of single-layer latticed domes [J]. Journal of engineering mechanics, 2001, 4:382 - 386.
- [7] 张峰.单层柱面网壳非线性稳定性分析[D].哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1997.
- [8] 刘承宗,赵惠麟,周志勇.单层组合网壳的双重非线性稳定问题[J].东南大学学报,1998,28(2):75 - 80.
- [9] JGJ61 - 2003,网壳结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2003:17 - 20.
- [10] 陈军明,陈应波,李秀才.单层柱面网壳结构的非线性稳定研究[J].武汉理工大学学报,2003,25(4): 51 - 54.
- [11] 曹正罡.网壳结构弹塑性稳定性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [12] 范雪莲.单层柱面网壳的弹塑性稳定分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.

(编辑 赵丽莹)