文章编号：1673-9469（2018）02-0006-05　　doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.002

杂交椭球抛物面网壳参数化设计及受力性能比对分析

王晓晓[1]，鹿晓阳[1]，王亚茹[2]，张 昊[2]，谢思路[2]

(1. 山东建筑大学 工程力学研究所，山东 济南 250101；2. 山东建筑大学 土木工程学院，山东 济南 250101)

摘要：以常州体育馆凯威特 - 联方型椭球抛物面网壳为例，应用 APDL(Ansys Parametric Design Language) 参数化设计语言，研制了两类 6 种杂交椭球抛物面网壳参数化设计宏程序；应用 ANSYS 软件对 6 种类型网壳进行了受力性能比对分析。结果表明：同等工况下，凯威特 - 联方型椭球抛物面网壳结构形式和受力性能最合理，实际工程中可优先选用；第一类以凯威特型为顶部结构的杂交椭球抛物面网壳矢跨比 f/S 取 1/4~1/3，第二类以凯威特型为底部结构的网壳矢跨比 f/S 取 1/3~1/2 受力性能最优。

关键词：杂交椭球抛物面网壳；参数化设计；受力性能比对分析

中图分类号：TU393.3/TU311.41　　**文献标志码**：A

Parametric design and the force performance analysis of hybrid ellipsoidal paraboloid reticulated shell

WANG Xiaoxiao[1]，LU Xiaoyang[1]，WANG Yaru[2]，ZHANG Hao[2]，XIE Silu[2]

(1.Research Institute of Engineering Mechanics，Shandong Jianzhu University，Ji nan250101，China；
2.Institute of Civil Engineering，ShandongJianzhuUniversity，Ji nan250101，China)

Abstract：Taking the Changzhou Stadium - Kiewitt lamella ellipsoid parabolic shell as an example，two types of 6 kinds of hybrid ellipsoidal paraboloid reticulated shell parameterized design macro program are developed by using the APDL(Ansys Parametric Design Language)parameterized design language. ANSYS software is used to compare and analyze the force performance of 6 kinds of reticulated shells. The results show that：Under the same condition，the structure and mechanical properties of Kewitte - lamella ellipsoid parabolic shell is the most reasonable. Therefore，it's a priority selection in practical engineering. The vector span f/S of the first type hybrid elliptic paraboloid reticulated shell is 1/4~1/3 and the optimal force performance of second kinds of reticulated shells with sagittal span ratio f/S to 1/3~1/2 is optimal. This paper provides a certain reference for the shape optimization and engineering design of this kind of reticulated shell.

Key words：hybrid ellipsoidal paraboloid reticulated shell；parametric design；Mechanical performance analysis.

近年来随着人们体育、文娱、旅游活动的增加和建筑新技术不断涌现，人们对公共建筑空间的要求越来越高，由不同类型结构组合而成的杂交结构已成为目前多功能大跨空间结构发展的新方向[1]。杂交椭球抛物面网壳外形流畅、结构新颖[2-4]，可改善单一型网壳顶点附近连杆较多及应力集中的弊端，使网格分布均匀，结构受力性能提高。本文应用 APDL(Ansys Parametric Design Language) 参数化设计语言，研制了杂交椭球抛物面网壳 6 种形式参数化设计宏程序，并应用 ANSYS 软件对 6 种结构 198 种工况进行了受力性能比对分析，得到一些具有工程意义的结论。

收稿日期：2018-02-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (11272188)；山东省研究生创新计划项目 (SDYY08038)；山东建筑大学研究生优质课程项目 (YZKC201605)
作者简介：王晓晓 (1989-)，女，河北邯郸人，硕士，从事结构受力分析与优化设计研究。

1 六种杂交椭球抛物面网壳结构几何描述及参数化设计

本文涉及的五种椭球抛物面网壳分别是，肋环型、施威德勒型、凯威特型、联方型和三向格子型；实现结构杂交时，需要满足：(1) 两种结构杂交圈 (或环) 上，两种结构的节点数要相同。(2) 杂交后的网壳结构总体性能 (总造价和受力性能) 要优化 [5]。据此，建立了两类 6 种杂交椭球抛物面网壳。第一类以凯威特型为顶部结构 (三种)：凯威特 - 肋环杂交型 (简记为 KIE-RIB)、凯威特 - 施威德勒杂交型 (KIE-SCH)、凯威特 - 联方杂交型 (KIE-LAM)；第二类以凯威特型为底部结构 (三种)：肋环 - 凯威特杂交型 (RIB-KIE)、施威德勒 - 凯威特杂交型 (SCH-KIE)、联方 - 凯威特杂交型 (LAM-KIE)。

杂交椭球抛物面网壳主要几何参数共有 7 个，长轴 S_1、短轴 S_2、矢高 f、比例系数 t、环向对称区域份数 Kn、径向节点总圈数 Nx 和上部结构径向节点圈数 Ns(图 1)。其中比例系数 $t=Nx-i/(Nx-0.5)$，(i=1，2，…Nx)，据比例系数 t 将矢高 f 进行统一划分，从而获得每一圈 (或环) 在矢高 f 上的投影坐标 z。

借鉴球面网壳、圆形水平投影杂交马鞍型网壳和旋转抛物面网壳参数化设计思想 [6-7]，研制了两类 6 种杂交椭球抛物面网壳参数化设计宏程序，下面以凯威特 - 联方杂交椭球抛物面网壳为例进行说明。

1.1 杂交椭球抛物面网壳参数化设计

在直角坐标系下给定长轴 S_1、短轴 S_2、矢高 f，椭球抛物面方程为

$$z=-4f\left(\frac{x^2}{S_1^2}+\frac{y^2}{S_2^2}\right)+f$$

(1) 计算各节点坐标，定义节点编号

在球面坐标系下，先从上部凯威特结构开始。令顶点为 1 号节点、坐标为 (0，0，f)，引入比例系数 t，据比例系数 t 将椭球抛物面上径向曲线进行等长度划分，从而获得每一点的坐标 z，根据得到的 z 获得每一圈的 x、y 坐标，并根据确定的坐标对每一个节点进行编号。

(2) 杆件连接

首先进行上部凯威特结构杆件连接。环向杆件连接，在第 i(i=1，2…Ns) 圈第 j(j=1，2…Kn-1) 对称区内的节点循环，$1+Kn\times(i-1)\times i/2+j$ 和 $2+Kn\times(i-1)\times i/2+j$ 连接生成一般对称区环向杆，$2+Kn\times(i-1)\times i/2$ 和 $1+Kn\times(i-1)\times i/2+Kn\times i$ 连接生成最后一对称区环向杆。径向杆件连接，先连接顶点 1 和第一圈各节点 $1+j$，从第 2 圈开始由内向外循环、对各个对称区内的每个杆件循环，判断是否是当前对称区的最后一根杆并判断是否是最后一对称区，$1+Kn\times(j-1)\times j/2+1$ 和 $1+Kn\times(j+1)\times j/2+(k-1)\times(j+1)+i$($1\le i\le Nx+1$；$1\le k\le Kn$；$1\le j\le Nx-1$) 连接，生成最后一对称区的杆件。$1+Kn\times(j-1)\times j/2+(k-1)\times(j+1)+i$ 和 $1+Kn\times(j+1)\times j/2+(k-1)\times(j+1)+i$ 连接，生成非对称区内的杆件。

下部联方结构杆件连接。环向杆连接，第 i($Ns+1\le i\le Nx$) 圈 第 j($1\le j\le Kn\times Ns-1$) 对称区域是连接节点 $1+Kn\times Ns\times(i-Ns/2-1/2)+j$ 与 $2+Kn\times Ns\times(i-Ns/2-1/2)+j$ 而成，各圈最后一对称区的单元是由节点 $1+Kn\times Ns\times(i-Ns/2+1/2)$ 和 $2+Kn\times Ns\times(i-Ns/2-1/2)$ 连接而成。

径向杆连接分为三部分。第一部分第 j($1\le j\le Kn\times Ns$) 对称区第 i 圈与 i+1 圈间的杆由节点 $1+Kn\times Ns\times(i-Ns/2-1/2)+j$ 和 $1+Kn\times Ns\times(i-Ns/2+1/2)+j$ 连接而成。第二部分是第 i(奇数) 圈和第 i+1 圈之间斜杆连接，由节点 $1+Kn\times Ns\times(i-Ns/2-1/2)+j$ 和 $2+Kn\times Ns\times(i-Ns/2+1/2)+j$ 连接而成。第三部分是第 i(偶数) 圈和第 i+1 圈之间斜杆连接，由节点 $2+Kn\times Ns\times(i-Ns/2-1/2)+j$ 和 $1+Kn\times Ns\times(i+1/2-$

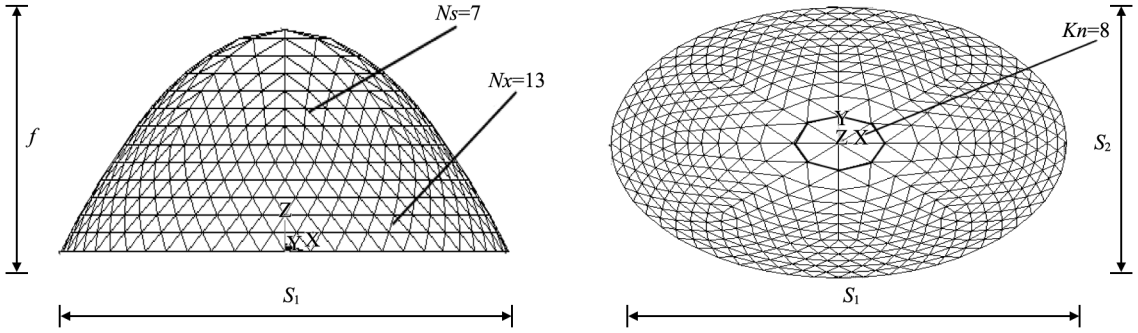


图 1 凯威特 - 联方杂交椭球抛物面网壳宏观几何参数 (S_1=90、S_2=60、f=30、Kn=8、Ns=7、Nx=13)

Fig.1 Macroscopic geometrical parameters of the Kewitte - lamella hybrid ellipsoid parabolic reticulated shell

$Ns/2)+j$ 连接而成。

最后过渡区(即第 Ns 圈和第 $Ns+1$ 圈之间)杆件连接，第 j 对称区 $(1 \le j \le Kn \times Ns-1)$ 由节点 $1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+j$ 与节点 $1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+Kn \times Ns+j$ 连接而成，由节点 $1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+j$ 和 $1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+Kn \times Ns+j+1$ 连接生成一般对称区杆件连接，$1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+Kn \times Ns$ 和 $1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+Kn \times Ns \times 2$ 生成最后一对称区的杆件连接，最后 $1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+Kn \times Ns$ 和 $1+Kn \times (Ns-1) \times Ns/2+Kn \times Ns+1$ 连接。即形成凯威特 - 联方杂交椭球抛物面网壳。

1.2 两类 6 种杂交椭球抛物面网壳建模实例

6 种类型结构参数化设计模型图如图 2。

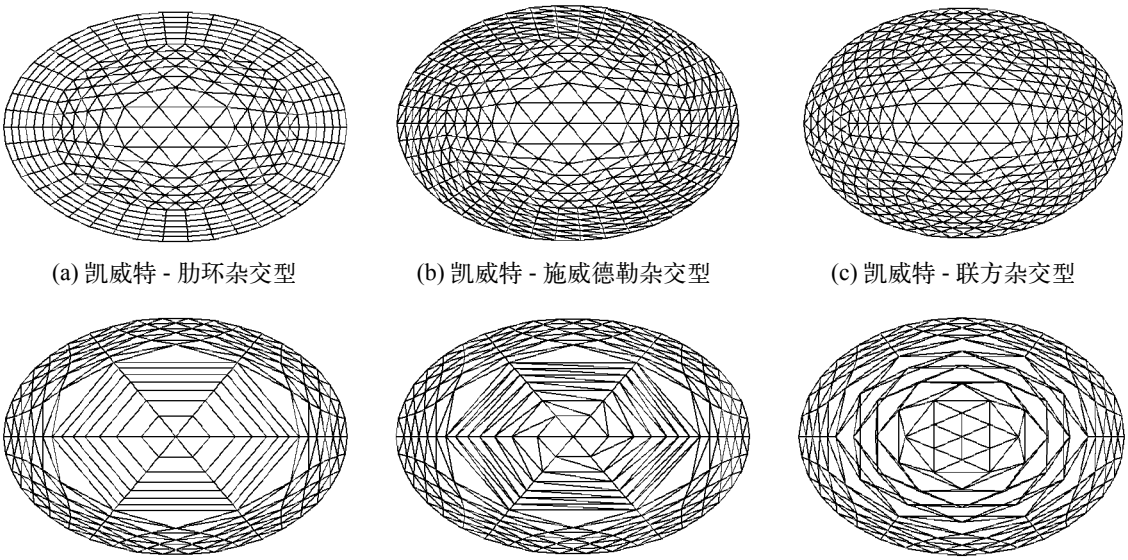
2 杂交椭球抛物面网壳结构受力分析

网壳最外一圈节点施加可动铰支座 (只限制 x、y、z 三个方向线位移，不限制转动)，考虑结构自重 (含杆件和节点)，屋面均布外荷载取 2.35 kN/m^2[8]。杆件采用 Q235 无缝钢管，钢材密度 ρ=7 850 kg/m^3，弹性模量 E=2.06 × 10^{11} N/m^2，泊松比 =0.3；杆件选用 ANSYS 中 BEAM4 梁单元[9]，杆件截面为 Φ168 × 5.0，结构许用位移为跨度的 1/400[10]，许用应力为 215 MPa；采用理想弹塑性材料模型，不考虑材料的强化、屈服前钢材为线弹性。

2.1 六种不同网壳类型结构受力和变形特点

第一类杂交椭球抛物面网壳在 S_1=60 m、S_2=40 m、f=15 m、Kn=8、Nx=14、Ns=10，第二类杂交椭球抛物面网壳在 S_1=60 m、S_2=40 m、f=20 m、Kn=14、Nx=14、Ns=5 时，结构承受施加荷载后的分析数据见表 1，应力云图与位移云图见图 3 所示。

根据表 1 和图 3 可知：(1)6 种杂交椭球抛物面网壳均满足结构刚度要求 (最大位移均小于 10 cm)，



(a) 凯威特 - 肋环杂交型 (b) 凯威特 - 施威德勒杂交型 (c) 凯威特 - 联方杂交型

(d) 肋环 - 凯威特杂交型 (e) 施威德勒 - 凯威特杂交型 (f) 联方 - 凯威特杂交型

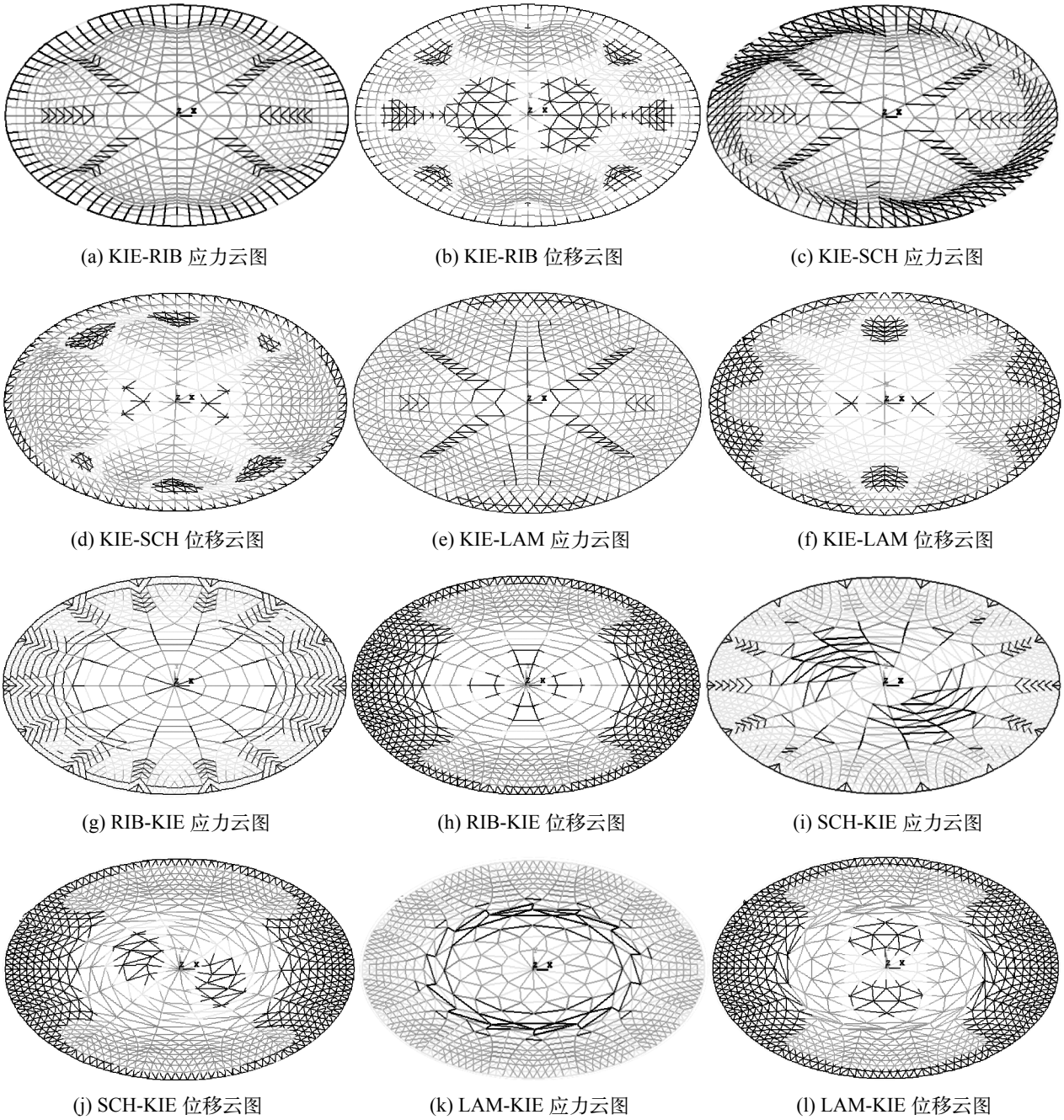
图 2 六种杂交椭球抛物面网壳结构图 (S_1=90、S_2=60、f=30、Kn=6、Ns=7、Nx=13)

Fig.2 Structure diagram of six kinds of hybrid ellipsoid parabolic reticulated shells

表 1 杂交椭球抛物面网壳结构受力分析

Tab.1 Mechanical analysis of hybrid ellipsoidal paraboloid reticulated shell

结构类型		最大位移 /cm	许用位移 /cm	最大应力 /MPa	许用应力 /MPa
第一类杂交椭球抛物面网壳	KIE-RIB	0.53	10	-54.7	215
	KIE-SCH	0.59		-60.8	
	KIE-LAM	0.56		-41.9	
第二类杂交椭球抛物面网壳	RIB- KIE	1.31		-75	
	SCH - KIE	0.86		-91.3	
	LAM - KIE	1.37		-106	



(a) KIE-RIB 应力云图　(b) KIE-RIB 位移云图　(c) KIE-SCH 应力云图

(d) KIE-SCH 位移云图　(e) KIE-LAM 应力云图　(f) KIE-LAM 位移云图

(g) RIB-KIE 应力云图　(h) RIB-KIE 位移云图　(i) SCH-KIE 应力云图

(j) SCH-KIE 位移云图　(k) LAM-KIE 应力云图　(l) LAM-KIE 位移云图

图 3 六种杂交椭球抛物面网壳应力云图和位移云图

Fig.3 Stress cloud and displacement cloud of six kinds of hybrid ellipsoidal paraboloid shells

KIE-RIB 和 KIE-SCH 最大位移集中在过渡区附近与八条主肋相连的杆件以及顶点处一到两圈径向杆，KIE-LAM 较大位移集中在短跨主肋过渡区附近；RIB-KIE、SCH-KIE、LAM-KIE 位移较大的部位均分布在上部结构前几圈的环向杆和径向杆，上部结构刚度小于下部结构。(2)6 种杂交椭球抛物面网壳均满足结构强度要求，最不利应力均表现为压应力，KIE-LAM 最大位移和最大应力均较小，强度和刚度较好，故实际工程中可优先选用 KIE-LAM。(3) 在各项参数跨度、矢高和网格数相同的情况下，KIE-SCH 强度小于 KIE-RIB，可见增设单斜杆件没有明显改善结构的受力性能，反而增加结构的自重使结构应力更大。因此，实际工程中要合理选择杆件连接方式。

2.2 矢高 *f* 对网壳静力性能的影响

选取 S_1=80 m、S_2=50 m、f=12~40(步长为 4)、Nx=14 的第一类 (Kn=8，Ns=9)、第二类 (Kn=12，Ns=4) 椭球抛物面网壳进行静力性能分析，得到随着 f 变化，网壳所对应的最大位移值和最不应力值，分析数据见图 4。

由图 4 可知：(1) 随着 f 的增大，RIB-KIE、SCH-KIE、LAM-KIE 最大位移和最不利应力呈现递减的一致变化规律，在矢高 f 取 12、16 m 时，LAM-KIE 最大应力超出许用应力，可见，LAM-KIE 在实际工程中壳体不易太过扁平。建议第二类网壳矢跨比取大一些，可明显改善网壳的强度和刚度。(2)KIE-RIB、KIE-SCH、KIE-LAM 随着 f 的增加，最大位移和最不利应力呈先减小后增大的趋势，KIE-RIB 在 f=20 时最大位移和最不利应力达到最小值。f=20 增大到 f=28 时，KIE-SCH 的最大位移增加了 10.3%，最不利应力减小了 2.35%，f 对最大位移较敏感；KIE-LAM 最大位移增加了 8.09%，最不利应力减小了 12.45%，f 对最不利应力较敏感，综上建议第一类网壳矢跨比 f/S 取 1/4~1/3。

2.3 支座形式对结构静力性能的影响

选取 S_1=80 m、S_2=50 m、f=30 m，Nx=14 的第一类 (Kn=8，Ns=10)、第二类 (Kn=14，Ns=5) 椭球抛物面网壳分别在铰接和刚接两种支座形式下进行受力性能比对分析，得到结构的最大位移值和最不应力值，如表 2 所示。

由表 2 知：支座形式对第二类杂交式椭球抛物面网壳最大位移和最不利应力几乎没影响。第一类网壳支座形式采用刚接最大位移比采用铰接小，但是最大应力比采用铰接大，可见刚接可改善第一类网壳的刚度，但对强度不利。

3 结论

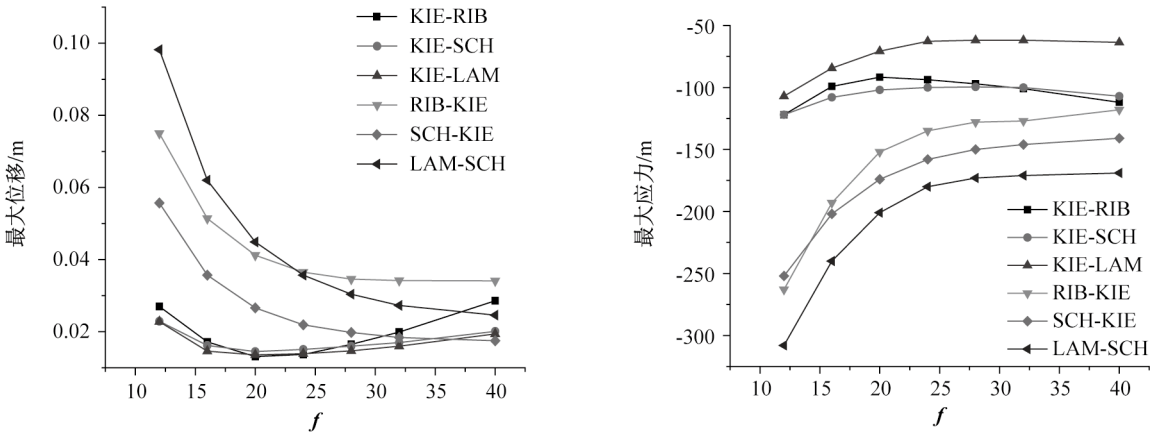


图 4 六种杂交椭球抛物面网壳最大位移和最大应力随 f 变化的规律

Fig.4 The law of change with f of maximum displacement and maximum stress of six kinds of hybrid ellipsoidal parabolic reticulated shells

表 2 支座形式对结构静力性能的影响

Tab.2 Effect of bearing form on structural static performance

结构类型		支座形式	最大位移 /m	许用位移 /m	最大应力 /MPa	许用应力 /MPa
第一类杂交椭球抛物面网壳	KIE-RIB	铰接	0.018 2	0.125	-99.1	215
		刚接	0.015 7		-134	
	KIE-SCH	铰接	0.016 5		-99.8	
		刚接	0.015 8		-138	
	KIE-LAM	铰接	0.015 3		-61.8	
		刚接	0.015 2		-72.7	
第二类杂交椭球抛物面网壳	RIB-KIE	铰接	0.034 2		-125	
		刚接	0.034 0		-125	
	SCH-KIE	铰接	0.018 6		-148	
		刚接	0.018 7		-147	
	LAM-KIE	铰接	0.028 7		-172	
		刚接	0.028 7		-171	

注：铰接只限制 x、y、z 三个方向线位移、不限制转动；刚接限制 x、y、z 三个方向线位移和转动。(下转第 15)

的水平位移影响较大，对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。在其它条件相同的情况下，随着波长的增大，桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小。

参考文献：

[1] 王元战，焉 振，王禹迟 . 格型钢板桩结构有限元数值分析 [J]. 岩土力学，2013，34(4)：1163-1170.

[2] 蔡正银，侯 伟 . 单锚板桩结构的工作机理研究 [J]. 岩土工程学报，2015，37(1)：29-34.

[3] BAUER J，REUL O，KEMPFERT H G.Lateral pressure on piles due to horizontal soil movement[J].International Journal of Physical Modelling in Geotechnics，2016，16(4)：173-184.

[4] QU H L，LUO H，LIU L，et al.Analysis of Dynamic Coupling Characteristics of the Slope Reinforced by Sheet Pile Wall[J].Shock and Vibration，2017(7)：1-10.

[5] JIAO Z，TAN H，MEI T，et al.Numerical analysis on dynamic responses of the sheet-pile wharf with separated relieving platform under horizontal seismic loads [J]. Journal of Coastal Research，2015，73：270–276.

[6] 付长静，李国英，米占宽，等 . 卸荷式板桩高桩梁板码头结构土压力简化计算 [J]. 岩土力学，2015，36(8)：2426-2432.

[7] 胡黎明，赵 敏，吴照群，等 . 近海取水工程板桩墙安全性离心模型试验研究 [J]. 岩土力学，2011，32(6)：1741-1747.

[8] GUHARAY A，BAIDYA D K.Reliability-Based Analysis of Cantilever Sheet Pile Walls Backfilled with Different Soil Types Using the Finite-Element Approach[J]. International Journal of Geomechanics，2015，15(6)：06015001.

[9] JTS167-3-2009，板桩码头设计与施工规范 [S].

[10] JTS145-2-2013，海港水文规范 [S].

（责任编辑　王利君）

（上接第 10 页）

1) 在凯威特 - 肋环杂交型、凯威特 - 施威德勒杂交型、凯威特 - 联方杂交型、肋环 - 凯威特杂交型、施威德勒 - 凯威特杂交型、联方 - 凯威特杂交型 6 种类型结构中，同等工况下，凯威特 - 联方型网壳结构形式和受力性能最合理，在实际工程设计时，可优先选用。

2) 数据研究发现，长轴跨度 S_1=55~95 变化时，两类杂交椭球抛物面网壳最大位移和最不利应力均满足许用值，可见在本文给定的各项参数下两类网壳均可达到大跨跨度。联方 - 凯威特型网壳结构随跨度增加结构受力性能下降，长轴跨度超过 100 m 时，结构最不利应力不满足许用值，因此工程中建议 LAM-KIE 跨度上限为 90~100 m。

(3) 通过分析可知，第一类以凯威特型为顶部结构的杂交椭球抛物面网壳矢跨比 *f/S* 取 1/4~1/3，第二类以凯威特型为底部结构的网壳矢跨比 *f/S* 取 1/3~1/2 受力性能最合理。

参考文献：

[1] 鹿晓阳，赵晓伟，陈世英 . 离散变量网壳结构优化设计 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.

[2] 姜正荣，王仕统，石开荣，等 . 厚街体育馆大跨度椭圆抛物面弦支穹顶结构的非线性屈曲分析 [J]. 土木工程学报，2013(9)：21-28.

[3] 罗 斌，郭正兴，冯 远，等 . 常州市体育馆椭圆抛物面弦支穹顶稳定性研究 [J]. 建筑结构学报，2009，30(6)：148-154.

[4] 杜文风，喻福东 . 沁阳市体育馆椭圆抛物面弦支穹顶稳定性研究 [J]. 建筑结构，2013(22)：39-42.

[5] 鹿晓阳，付浩鑫，赵晓伟，等 . 杂交型椭球面网壳参数化设计及受力性能分析 [J]. 山东建筑大学学报，2016，31(6)：511-520.

[6] 苏 亚，鹿少博，鹿晓阳，等 . 杂交型马鞍网壳结构参数化设计及形状优化 [J]. 山东建筑大学学报，2015(2)：38-46.

[7] 赵忠佳 . 旋转抛物面网壳参数化设计及稳定性分析 [D]. 济南：山东建筑大学，2016.

[8]GB50009—2012，建筑结构荷载规范 [S].

[9] 陈志华，刘红波，周 婷 . 空间钢结构 APDL 参数化计算与分析 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2013.

[10]JGJ7-2010，空间网格结构技术规程 [S].

（责任编辑　王利君）