

# 球面组合肋壳力学性能研究

常玉珍<sup>1</sup>, 龙彦鹏<sup>1</sup>, 牛泽林<sup>1</sup>, 冯 婷<sup>1,2</sup>, 程迪炎<sup>1</sup>, 矫璐超<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 洛阳腾飞市政工程有限公司, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 组合肋壳是由组合肋与钢筋混凝土薄壳共同组成的一种新型大跨度空间组合壳体结构, 为研究静力荷载下整体结构静力响应、破坏过程与失效机理, 进行 1:10 球面组合肋壳静力加载试验. 通过跟踪整个加载过程, 得到组合肋壳裂缝发展、结构最终破坏形态和最大变形点荷载位移曲线等静力性能指标, 分析结构内力传递路径、承载能力及破坏机理. 研究表明: 组合肋壳具有较高的承载能力, 良好抗倒塌能力; 组合肋主要承受轴向力, 钢筋混凝土薄壳以薄膜内力为主, 在靠近圈梁区域弯矩逐渐增大; 荷载通过壳面首先传向正交的两根主肋, 再由主肋所连接的次肋向圈梁传递; 随着荷载增大, 加载点附近出现塌陷区, 结构发生局部强度破坏. 最后利用有限元软件对组合肋壳进行数值分析, 结果与试验吻合.

**关键词:** 球面组合肋壳; 试验研究; 极限承载力; 强度破坏; 破坏机理

中图分类号: TU373

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)03-0346-08

## Study on the mechanical behavior of spherical composite ribbed shell

CHANG Yuzhen<sup>1</sup>, LONG Yanpeng<sup>1</sup>, NIU Zelin<sup>1</sup>, FENG Ting<sup>1,2</sup>, CHENG Diyan<sup>1</sup>, JIAO Luchao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Luoyang Tecfure Municipal Engineering Co., LTD., Luoyang 471000, China.)

**Abstract:** The composite ribbed shell is a new large-span space structure with composite ribs and reinforced concrete shell. The static loading test was conducted on 1/10 scale spherical composite ribbed shell, and the static behavior, failure mode were investigated. Through tracking the loading process, the static behavior indexes including the crack development, the failure pattern and the load-displacement curve are obtained to study the transfer path, bearing capacity and failure mechanism. The results show that composite ribbed shell has comparatively high bearing ability and anti-collapse behavior. The internal force in composite rib was dominated by axial force, while in RC shell mainly by thin film force, and the bending moment was increased near the foundation edge gradually. The load on shell surface was transferred to the orthogonal two main rib, then from the minor ribs to the foundation edge. With the loading increased, shell surface and the concrete part in composite rib were both crushed, the structure failure is local strength damage. Finally, A numerical analysis is made, the result is consistent with the test.

**Key words:** spherical composite ribbed shell; experimental study; ultimate bearing capacity; strength failure; failure mechanism

随着新工艺和新技术的发展, 新型大跨度组合空间结构不断涌现出来, 组合结构充分利用不同结构形式、不同材料优越性能, 能够在很大程度上降低不稳定影响因素, 提高结构承载力和耐久性<sup>[1]</sup>. 因此, 有关新型结构的力学性能和失效机理等问题一直都是各国学者关注的热点, 并针对不同结构进行了一系列试验研究<sup>[2-6]</sup>, 其中, 崔昌禹<sup>[7]</sup>等以自由曲面结构形态创建的典型凹凸自由曲面作为研究对象, 制作混凝土壳体模型结构并进行静力试验研究, 研究发现结构在加载点附近发生局部强度破坏; 聂桂波<sup>[8]</sup>等针对大连体育馆弦支

穹顶结构缩尺模型进行张拉, 并进行静载试验研究; 郑晓清<sup>[9]</sup>等对内圈环杆加强的环向折线形单层球面网壳结构进行了全跨、半跨荷载下的静力加载试验, 并将试验数据与理论分析结果进行对比. 姚云龙, 董石麟<sup>[10]</sup>等研究了内外双重张弦网壳结构整体预张力的分布特性和静力荷载下的内力和变形特点. 陈东兆, 郝际平<sup>[11]</sup>对鞍形网壳模型进行了竖向加载试验, 测试了各级荷载作用下杆件应变和上弦节点挠度, 得到荷载-挠度曲线, 从而得出该结构模型的竖向极限承载力. 王振华等<sup>[12]</sup>设计了肋环型索穹顶与肋环双斜杆型单层网壳组

收稿日期: 2017-04-10

修改稿日期: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51308443); 陕西省教育厅专项科研项目(15JK1384); 陕西省自然科学基金面上项目(2014JM2-5053)

第一作者: 常玉珍(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事钢-混凝土组合结构、大跨度空间结构体系方面研究. E-mail: changyz@xauat.edu.cn

合的结构,并对其进行下部索穹顶预应力张拉试验和结构在全跨和半跨荷载下的静力性能试验,发现修正的计算模型能准确反应结构的力学性能.试验研究在进一步加深对新型结构体系的理解,验证结构受力性能和理论分析正确性等方面具有重要意义.

钢筋混凝土组合肋壳结构由组合肋与混凝土薄壳组成,钢肋作为浇筑组合肋的模板,组合肋作为混凝土薄壳浇筑的支架和模板,克服钢筋混凝土薄壳施工过程中繁琐的模板工程,还可以增加结构刚度,提高其承载力和稳定性.纵观目前钢筋混凝土组合肋壳的研究发现,研究主要集中在静力荷载下结构稳定性承载力、简单动力荷载作用下结构的性能及组合肋承载力等理论方面<sup>[13]</sup>,试验研究鲜有报道.本文根据一定的工程背景提出结构原型、相似性原理和试验室具体条件,进行了结构设计和试验模型制作,开展静力荷载下组合肋壳结构试验,分析结构应力分布特性、裂缝开展与结构破坏特点,考察结构极限承载力、失效模式,为理论分析和工程设计提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试验模型设计与加工

参考拱支壳体结构和短程线钢网壳结构设计思路<sup>[14]</sup>,沿球壳最大弧线方向设置两条主肋,欲充分利用主肋拱受压性能,考虑到实际结构中混凝土浇筑问题,沿主肋进行肋格划分,即每一根肋为一段圆弧上的拱,组合肋组成肋格网壳,上面浇筑混凝土薄壳,整个结构下部设有圈梁支座.按照这一思路设计并制作组合肋壳试件模型.

按照 1/10 比例设计球面组合肋壳结构,跨度  $L=2\text{ m}$ 、矢跨比  $f/L=1/4$ ,结构有正交的两根主肋,与主肋平行方向各有 2 根次肋,组合肋节点 9 个.组合肋截面高度 50 mm,宽度 30 mm,钢肋板底板厚度  $t_1$  和侧板厚度  $t_2$  均为 1 mm,钢筋混凝土薄壳厚度  $t$  为 10 mm.下部圈梁宽度 300 mm,高度 300 mm,配置有钢筋.其中组合肋采用 C30 细石混凝土,圈梁采用 C30 普通混凝土,壳面采用细石砂浆(立方体抗压强度为 56.61 MPa).试验模型如图 1 所示.

首先用 1 mm 厚 Q235 钢板弯折形成拱形钢肋,钢肋与钢肋交点处焊接而成,在钢肋内每隔 50 mm 放置与钢肋同截面的隔板,防止浇筑过程中混凝土下滑,每隔 30 mm 植入两根直径为 1 mm 钢丝,以便与上部混凝土薄壳内钢筋网连接(见图 2(a)).

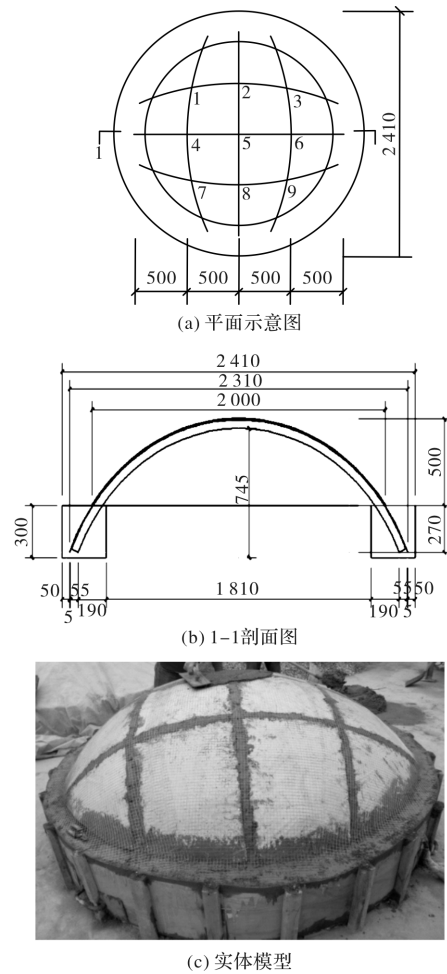


图 1 组合肋壳试验模型(单位: mm)

Fig. 1 Experimental model of composite ribbed shell/mm

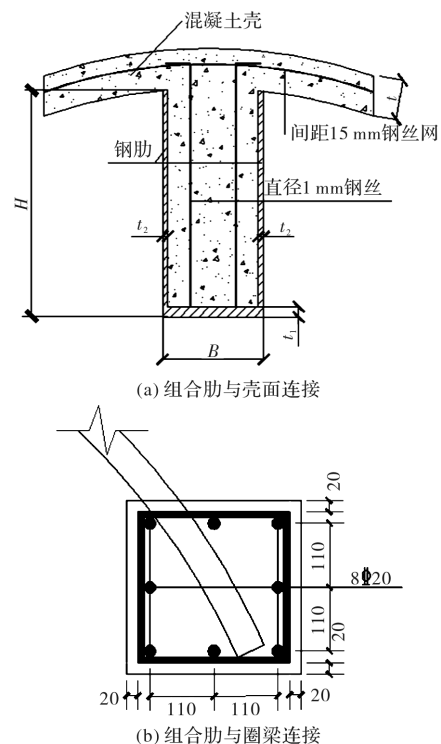


图 2 细部构造图(单位: mm)

Fig. 2 details of the structure/mm

第二步支设模板,搭设圈梁模板,绑扎受力钢筋,然后将钢筋焊接而成的肋网格插入圈梁,固定见图 2(b)。U 型钢肋直接作为组合肋内混凝土浇筑模板,壳体的模板采用木模板直接搭钢筋上,在距离壳体模板 5 mm 高度处布置间距为 15 mm 的钢丝网。第三步混凝土的浇筑,在钢筋内浇筑 C30 细骨料混凝土,完成组合肋施工后,在圈梁浇筑 C30 普通混凝土,在钢筋内混凝土初凝前,进行壳体细石水泥砂浆的浇筑,为防止局部

破坏,在距圈梁 100 mm 处壳体厚度从 10 mm 连续增加 40 mm。在浇注试件的同时预留普通混凝土立方体标准试块,细骨料混凝土立方体标准试块和水泥砂浆试块。

1.2 材性试验

按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)和《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228-2002)分别进行混凝土及钢板材性试验。试验及计算结果见表 1—2。

表 1 混凝土材料性能/MPa

Tab. 1 Concrete material properties/MPa

混凝土强度等级	立方体抗压强度 $f_{cu}$	轴心抗压强度 $f_{ck}$	轴心抗拉强度 $f_{tk}$	弹性模量 $E_c$
C30 细骨料	46.78	31.29	2.56	$3.39 \times 10^4$
C30 普通	31.65	21.16	2.06	$3.03 \times 10^4$

表 2 钢材材料性能/MPa

Tab. 2 Steel material properties/MPa

钢材类型	屈服强度 $f_y$	极限强度 $f_u$	弹性模量 $E_s$	伸长率/%
Q235	295	417	$2.0 \times 10^5$	21.1

1.3 加载装置及加载制度

壳体上节点 2, 4, 6, 8 四个点位施加竖向荷载,在四个加载点处均放置矩型钢管混凝土短柱,短柱位于组合肋节点上部的混凝土壳面上,短柱的截面尺寸与组合肋节点尺寸相同,以保证主要受力区域位于节点处。整个加载采用两级杠杆加载体系,以保证四个加载点上的竖向荷载在加载全过程保持相等,为避免加载过程加载点位置出现向下滑移,制作了节点位置附加装置,加载装置见图 3。荷载传感器与液压千斤顶相连,实验过程中读取荷载传感器数值来控制加载,结构加载在西安建筑科技大学土木工程结构抗震重点实验室进行,利用 50t 的油压千斤顶进行。

采用荷载控制加载方案,包括加载体系自重 3.8 kN 在内 20 kN 为第 1 级荷载,100 kN 前每级荷载增量为 20 kN,100 kN 以后每级荷载增量为 10 kN,每级荷载持荷 5 s 后采集数据一次。

1.4 测点布置与数据采集

为得到集中荷载下结构的竖向位移及变化规律,在组合肋壳顶部(节点 6)、加载点(节点 2, 8)附近三个关键点处设置了竖向电子位移计。四点竖向加载方案对于结构而言是对称结构对称加载形式,水平位移很小,故未设水平位移计。圈梁截面大、配筋充足,可以提供周边固定的约束边界,仅在圈梁钢筋处布置了应变片。

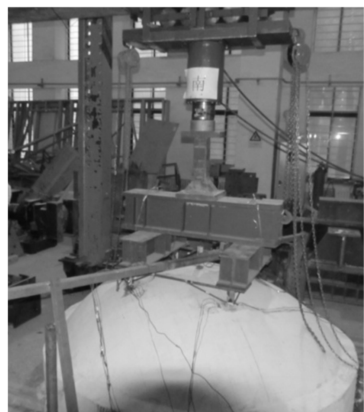
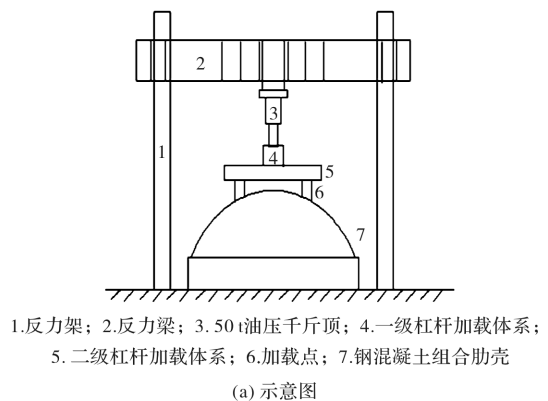


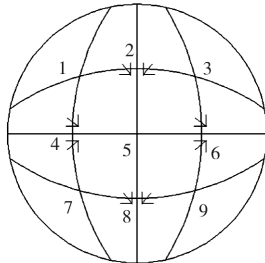
图 3 加载装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the loading device

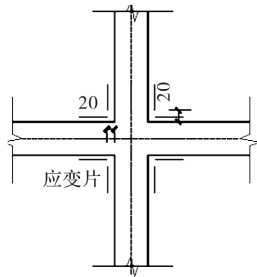
为确定组合肋壳壳体及组合肋的应力与应变分布特性,在壳体表面加载端(节点 2, 4, 6, 8)两侧 30 mm 各一个应变花(见图 4(a)),为考察组

合肋在加载过程中所承担的荷载,选取2,3,5,7,8五个节点,在节点组合肋两侧面及底面均设置了应变片,具体位置:钢肋底板、腹板的应变片在节点附近20 mm处,见图4(b)。

在加载过程中,采集应变、位移等数据,观察各个加载步壳体变形特点、裂缝出现与发展情况及结构最终破坏形态。



(a) 应变花布置



(b) 节点处钢肋应变片布置

图4 测点布置图(单位:mm)

Fig. 4 Measuring point layout/mm

## 2 试验现象

根据整个加载过程大致分为弹性阶段、带裂缝工作阶段、结构破坏阶段和卸载阶段,其主要试验现象如下。

### 2.1 弹性阶段

加载初期,结构加载区域(节点2,4,6,8)附近出现向下位移,最高点(节点5)出现向上位移,如图5所示,结构的荷载一位移曲线呈线性增长,曲线斜率很大,加至80 kN 位移仅为1 mm 左右,整个壳体未出现裂缝,变形不明显,整个加载过程基本在弹性阶段,壳体结构刚度很大。

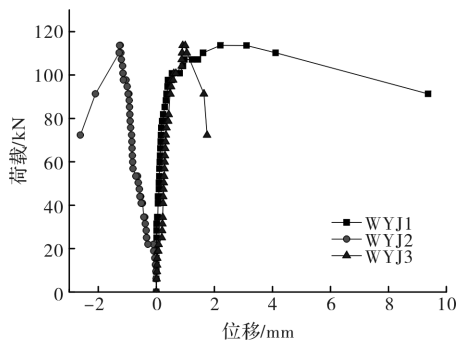
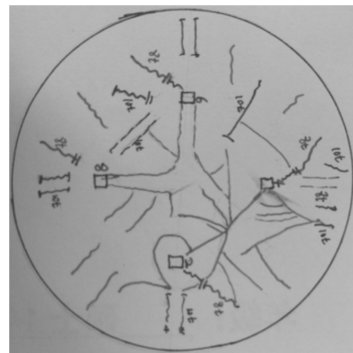


图5 破坏点荷载一位移曲线

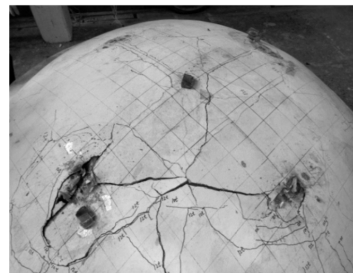
Fig. 5 Load-displacement curve

### 2.2 带裂缝工作阶段

当加载到80 kN 时,出现第一批微裂纹,主要分布在加载端(节点2,4,6,8)附近的上部壳面上,随着荷载的增加,该裂缝继续向加载端扩展,在正交的两个主肋其中一根靠近圈梁的部位也出现微裂缝,如图6(a)所示,结构进入带裂缝工作阶段。随着荷载的增加,位移增长较快,裂缝持续增加,加载端附近裂缝不断扩展,微小裂缝在四个加载端附近形成环状的小裂缝群,但是裂缝宽度很小,在钢筋混凝土薄壳顶部,两根主肋与混凝土薄壳相交的部位也随即出现细微裂缝。加载端处向下的位移继续增大,最高点处向上鼓起,位移向上为1.5 mm 左右。



(a) 裂缝分布示意图



(b) 试件破坏



(c) 破坏时节点2形态



(d) 破坏时节点6形态



(c) 壳面与组合肋分离

图6 结构破坏图

Fig. 6 The damage map

### 2.3 破坏阶段

当加载至 120 kN 时, 裂缝急剧增加, 出现连续的噼里啪啦的声音, 荷载—位移曲线不再上升, 出现平直段, 加载端向下的位移为 2 mm 左右, 然后位移继续增大, 最终节点 2 处的加载端附近微裂缝扩展后形成环形裂缝区域, 其中一条较深的裂缝延伸到同侧的另一个加载端(节点 4), 中间部分壳面上鼓。另一侧的两个加载端(节点 6, 8)仅在组合肋与壳体的相交处出现裂缝, 加载端没有出现密集裂缝分布区, 此刻这一侧的加载端没有发生破坏。薄壳上在组合肋与壳体相交的部位均出现裂缝, 加载端一侧的裂缝继续向下扩展, 直到壳面与圈梁交界处, 裂缝布满整个壳面。荷载无法继续施加, 改成位移控制加载, 随着四个加载点位移继续增大, 裂缝继续开展, 裂缝宽度增大, 出现更为清脆的破坏声音, 同时出现加载点 2 处混凝土蹦出, 加载端随加载支座出现下陷, 随即四个加载点所围的中间壳面沿对角的两个加载点连线方向壳面裂开, 反方向也出现微裂缝(见图 6(b))。

### 2.4 卸载阶段

随着荷载的下降, 破坏的加载端处的位移增长迅速, 最终位移达到 9 mm 左右, 而另一侧未破坏加载端的位移很小, 仅为 2 mm 左右, 最高点向上的位移为 3 mm 左右再次印证了结构刚度很大这一理论。

砸开破坏的加载端(节点 2)处的壳体, 观察组合肋的变形情况, 如图 6(c)所示, 节点核心区表面混凝土被压碎, 钢筋板与内部混凝土分离, 节点四周的钢筋侧板出现褶皱破坏, 钢筋混凝土薄壳与组合肋之间的插筋已经断裂。砸开另一侧未破坏的加载端(节点 6)处的壳体, 如图 6(d)所示, 节点区混凝土基本完好, 在组合肋节点之间的钢筋侧板仅出现小幅度的褶皱, 这一部分钢筋板与混凝土出现分离。打开节点 5 部位的钢筋混凝土薄壳, 该节点处钢筋混凝土薄壳内钢筋网出现部分拉断, 节点旁边组合肋内混凝土出现受拉折断,

壳体与组合肋两者连接的绑丝被拉断而脱离, 如图 6(e)所示。

## 3 试验结果分析

对采集到的数据进行处理, 进一步分析在整个受力过程中荷载的传递路径, 组合肋与混凝土薄壳内力分布, 以及结构静力失效机理。

### 3.1 内力分布

在集中力作用下, 四个加载端节点发生向下运动, 顶部壳面先下降后上升, 处于不同位置的组合肋节点表现出不同的应力状态。在加载阶段初期, 整个结构处于受压状态, 随着荷载增大, 组合肋截面由全截面受压迅速转为底板受拉, 钢侧板上部分区域受压, 下部分区域受拉, 其内混凝土也是如此, 这个阶段持续时间很短。进入带裂缝阶段后, 节点 2 处钢筋荷载应变曲线显示无论是底板还是侧板均处于受拉状态, 本次试验组合肋截面高度仅有 50 mm, 应变片贴的位置接近截面中心, 表明组合肋截面整体处于受拉状态, 两个侧板拉应变远小于底板的拉应变。顶点(节点 5)在荷载作用下一直发生向上变形, 节点 5 由原来全截面受压逐渐变为截面上半部分受拉, 下半部分受压, 组合肋底板受拉, 由于组合肋与其上混凝土薄壳通过插筋相连, 使得两部分共同受力。随荷载增大, 出现组合肋节点局部压碎区域, 此时加载点处组合肋截面上部混凝土受压压碎, 钢筋侧板出现受压屈曲, 其他 3 个加载点以及除顶点以外的其余节点均未出现混凝土压碎, 表现为底板受拉; 结构最高点(节点 5)与加载点不同, 表现为节点底板与侧板受拉状态, 不同节点处钢筋板的应力变化情况如图 7 所示。文献[9]中关于组合肋截面性能研究与本试验结果吻合。

钢筋混凝土薄壳壳面荷载应变曲线表明, 其应变以压应变为主, 如图 8 所示, 对称结构承受四个集中力的对称荷载, 应变也是对称分布的, 所以破坏加载端节点 2 处壳体的横向和竖向应变的变化趋势相同, 而 45°对角方向的应变, 由于荷载是沿壳体横向竖向施加, 小于横向和竖向的应变(75%左右)。随着荷载增大, 应变值逐渐增大, 80 kN 之前基本呈线性变化, 90~100 kN 之后, 应变突然增大, 出现平稳段。

### 3.2 破坏机理分析

组合肋壳在荷载外部荷载较小的时候, 主要有钢筋混凝土薄壳和组合肋共同承担, 全截面处于受压状态, 钢筋混凝土薄壳部分主要承受薄膜压力, 组合肋轴向受压。随着荷载增大, 由壳面传递的荷载逐渐向正交的两个主肋传递, 在加载

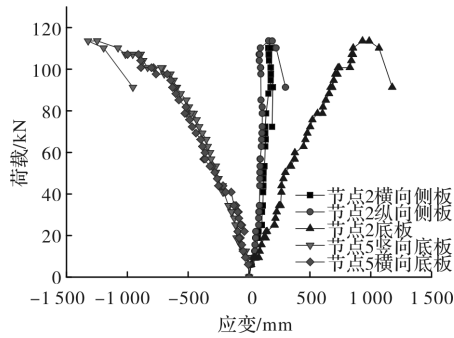


图7 钢筋的荷载—应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of steel ribs

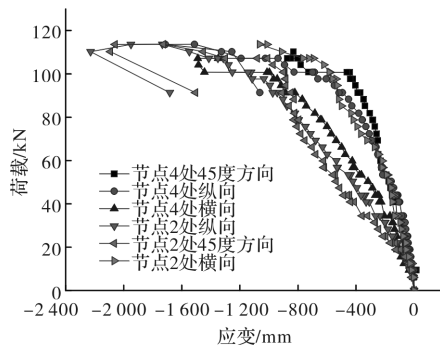


图8 壳面荷载—应变曲线

Fig. 8 Load-strain of damage to load-side shell

端随着位移增大,组合肋有全截面受压逐渐转变为组合肋截面下部分受拉,结构中间节点有受压变为组合肋节点部位上截面受拉,下截面受压,同时内力由主肋向其连接的次肋传递,再有次肋传向圈梁。随着位移增大,加载点附近出现壳面破坏,下面组合肋截面混凝土压碎,钢筋板褶皱,结构局部强度破坏引起结构破坏,同时在加载区域壳面形成环形的裂缝区域,未出现结构的坍塌破坏。

结构破坏时结构具有较高的承载能力,与钢网壳相比具有较强抗倒塌能力。组合肋不仅在结构施工中作为浇筑钢筋混凝土薄壳的模板,还可以提供结构的承载能力,同时U型组合肋截面中钢筋部分对其内部混凝土的约束作用提高了混凝土的抗压性能,底部肋板抗拉与混凝土抗压的结合也大大提高了组合肋抗弯性能。

## 4 有限元分析

### 4.1 有限元分析模型

采用有限元分析软件 ANSYS 对试件进行分析,有限元模型尺寸和边界条件与试验一致,加载方式采用荷载控制,采用自上而下的方式建立钢筋混凝土组合肋壳整体模型,组合肋选用自定义截面的 beam189 单元,壳面选用 shell93 单元。在组合肋与钢筋混凝土薄壳交界的地方采用工作平面将面剖分,把分界线定义为组合肋,面定义为

钢筋混凝土薄壳,并通过截面形心的偏移使得组合肋和钢筋混凝土薄壳在结合处有公共节点满足变形协调。混凝土在计算中是选用具有下降段的分段式 Kent-Park 本构模型,钢材采用二折线的弹性-强化模型,材料属性按照材性试验结果确定,没有考虑焊缝和残余应力的影响,假定各材料为理想材料,服从 Mises 屈服准则,同时考虑几何非线性和材料非线性。试件有限元分析模型如图 9。

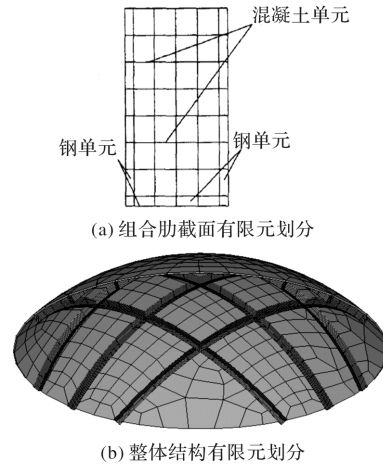


图9 有限元分析模型

Fig. 9 Finite element analysis model

### 4.2 有限元分析结果与试验结果对比

#### 4.2.1 整体结构力学性能对比

按照上述有限元模型进行计算得到的荷载-位移曲线与实验得到的曲线进行对比(图 10),发现 ANSYS 模拟和试验测得的荷载-位移曲线变化趋势相同,均分为弹性阶段,弹塑性阶段,平稳段和下降段。不同的是,弹性阶段,试验测得的数据斜率更大,表明结构的刚度更大,变形很小,仅为 1 mm 左右;试验测得的荷载-位移曲线有较长的平稳段,而软件模拟的曲线到达极限荷载后直接下降,试验的极限承载力小于 ANSYS 模拟分析的极限承载力。结构最终破坏形态相似,在加载区域发生局部强度破坏。

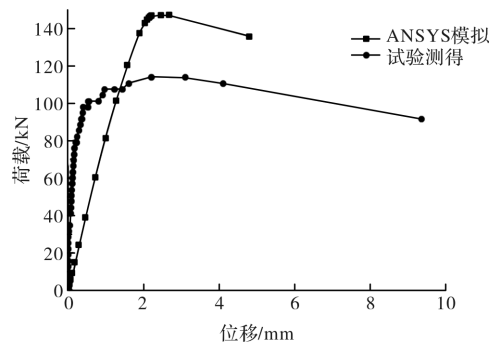


图10 荷载—位移曲线对比

Fig. 10 Load-displacement curve comparison

在有限元仿真过程中,混凝土和钢材均采用理想化模型,没有考虑到试件加工过程中各种因素影响,例如试件设计中,按照缩尺进行设计时,钢筋部分的厚度很薄,不同弧段钢筋连接时采用焊接,施工时出现的应力集中,钢筋焊接后的空间位置出现的初始误差,以及施工过程中,混凝土浇筑和养护过程中雨水的侵蚀等因素,对材料的抗拉的降低等.

4.2.2 组合肋部分

钢混凝土组合肋壳结构是由肋拱、壳系共同作用的组合空间结构.按一定规律布置的组合肋部分为圆弧拱,如图 11 有限元分析所示,在集中荷载作用下,组合肋在整个加载过程中的受力类似于拱主要承受轴向压力,在破坏阶段,组合肋的最大压力位于两根主肋相交的最高点处和最外层肋格的跨中区域,为 339.78 kN,仅在四个加载端处为拉力,最大为 94.48 kN,而组合肋的弯矩远远小于轴力,最大弯矩仅为 6.893 N·m. 试验

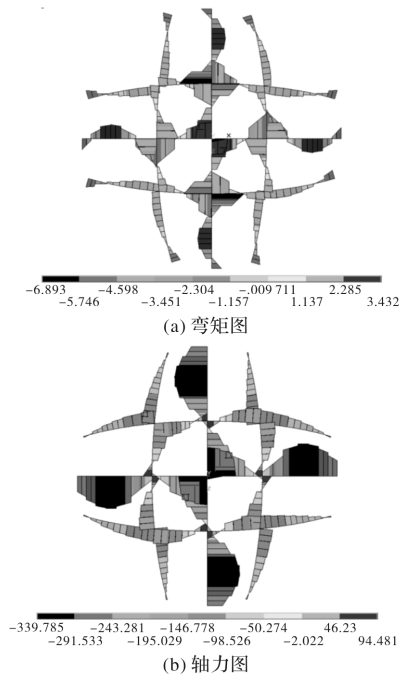


图 11 组合肋有限元分析

Fig. 11 Finite element analysis of composite ribs

测试数据也显示,在四个集中荷载的作用下,结构四个加载点出现向下变形,加载端附近为负弯矩,受轴向拉力,最高点向上鼓起,附近为正弯矩,受轴向压力,两者受力一致.

4.2.3 混凝土薄壳部分部分

在肋壳结构的边缘主要是组合肋承受弯曲内力,而在壳体中部主要是薄壳的薄膜压力,而且混凝土壳对组合肋壳中的骨架——组合肋起到一定抗失稳的约束作用,两者协同工作,结构的整体刚度增大,提高了承载能力.

对混凝土薄壳进行有限元分析,分成四个工作阶段,每个阶段取一个对应的荷载值,提取出壳体所受的压力和弯矩见表 3. 随着荷载值增大,壳体所受的压力和弯矩增大. 如图 12 所示,四个加载端附近的壳体受压,最高点与壳体边缘受拉,与试验一致. 对比图(a)、(b)可知,混凝土薄壳主要承受薄膜压力,壳面上的弯矩很小.

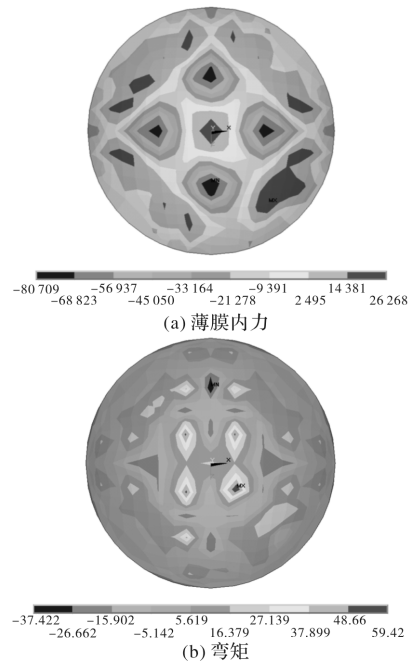


图 12 混凝土薄壳有限元分析

Fig. 12 Finite element analysis of concrete thin shells

表 3 混凝土薄壳受力

Tab. 3 concrete shell stress

工作阶段	荷载值/kN	最大压力/kN	最大正弯矩/kN·M	最大负弯矩/kN·M
弹性阶段	62.8	54.64	0.029	0.031
带裂缝阶段	131.9	89.28	0.068	0.058
破坏阶段	137.2	90.04	0.073	0.058
卸载阶段	115.7	70.20	0.064	0.048

5 结论

(1)整个加载过程中,裂缝出现较晚但数量较

多,在加载点附近首先出现微裂缝,在一个加载点附近发生局部强度破坏,此处壳面压碎,下面组合肋的钢筋出现褶皱,球面组合肋壳破坏形式

与钢网壳以及钢筋混凝土薄壳结构不同。

(2)在荷载作用下,组合肋受力类似圆弧拱以受压为主,其轴力远远大于弯矩,结构四个加载点向下变形,加载端附近为负弯矩,受轴向拉力,钢肋的侧板上部受拉,下部受压,钢肋底板受拉。钢筋混凝土壳面主要是薄膜压力为主,薄膜弯矩很小。在结构边缘主要是组合肋承受弯曲内力。

(3)荷载一位移曲线在弹性阶段斜率较大,最终位移很小,说明结构的刚度很大,具有较高的承载能力。比较试验结果与有限元分析结果,结构荷载位移曲线走向一致,内力分布以及结构破坏相同,两者吻合较好。

## 参考文献 References

- [1] 王俊,赵基达,蓝天,等.大跨度空间结构发展历程与展望[J].建筑科学,2013,29(11):2-10.  
WANG Jun, ZHAO Jida, LAN Tian, et al. Development Progress and Future Prospect of Large-span Spatial Structures[J]. BUILDINGSCIENCE, 2013, 29(11):2-10.
- [2] 杜文凤,高博青,董石麟.改进悬臂型张梁结构理论分析及试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(11):57-64.  
DU Wenfeng, GAO Boqing, DONG Shilin. Theoretical and experimental study of an improved cantilever string structure[J]. Journal of Building Structures. 2010. 31(11): 57-64.
- [3] 朱奕锋,冯健,蔡建国,等.梅江会展中心张弦桁架连续倒塌分析[J].建筑结构学报,2013,34(3):45-53.  
ZHU Yifeng, FENG Jian, CAI Jianguo et al. Analysis on progressive collapse resistance of truss string structure of Meijiang exhibition center[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(3):45-53.
- [4] 郝维平.钢筋混凝土双曲抛物面薄壳结构力学性能研究[D].杭州:浙江大学,2012.  
HAO Weiping. Mechanical properties of hyperbolic parabola twisted concrete shell[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [5] 赵宪忠,闫伸,陈以一.空间网格结构连续性倒塌试验研究[J].建筑结构学报.2016,37(6):1-8.  
ZHAO Xianzhong, YAN Shen, CHEN Yiyi. Progressive collapse test of a space frame structure [J]. Journal of Building Structures. [J]. Journal of Building Structures. 2016, 37(6):1-8.
- [6] 方小丹,曾宪武.华南理工大学体育馆预应力钢筋混凝土双曲抛物面组合扭壳设计[J].建筑结构学报.2011,32(8):18-25.  
FANG Xiaodan, ZHENG Xianwu. Design of prestressing RC hyperbolic parabola composite twisted shell of SCUT stadium[J]. Journal of Building Structures. 2011, 32(8): 18-25.
- [7] 崔昌禹,崔国勇,姜宝石.自由曲面混凝土壳体结构静力试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(11):77-84.  
CUI Changyu, CUI Guoyong, JIANG Baoshi. Experimental study on static behavior of free surface concrete shell[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11):77-84.
- [8] 聂桂波,支旭东,范峰,等.大连体育馆弦支穹顶结构张拉成形及静载试验研究[J].土木工程学报,2012,45(2):1-10.  
NIE Guibo, ZHI Xudong, FAN Feng, et al. Study of the tension formation and static test of a suspend dome for Dalian gymnasium [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2):1-10.
- [9] 郑晓清,董石麟,白光波,等.环向折线形单层球面网壳结构的试验研究[J].空间结构,2012,18(4):3-12.  
ZHENG Xiaoqing, DONG Shilin, BAI Guangbo, et al. Experimental research on circumferential folded single-layer reticulated spherical shell[J]. Spatial Structures, 2012, 18(4):3-12.
- [10] 姚云龙,董石麟,刘宏创,等.内外双重张弦网壳结构的模型设计及静力试验[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(7):1129-1139.  
YAO Yunlong, DONG Shilin, LIU Hongchuang, et al. Model designing double inner and static experimental study on outer latticed shell stringy structure[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(7):1129-1139.
- [11] 陈东兆,郝际平.后张拉预应力成形鞍形网壳竖向极限承载力试验研究[J].空间结构,2011,17(2):13-19.  
CHEN Dongzhao, HAO Jiping. Experimental study on vertical ultimate load capacity of post-tensioned and shaped hyper space truss [J]. Spatial Structures, 2011, 17(2):13-19.
- [12] 王振华,董石麟,田伟,等.索穹顶与单层网壳组合结构的模型试验研究[J].浙江大学学报(工学版).2010,44(8):1608-1614  
WANG Zhenhua, DONG Shilin, TIAN Wei, et al. Experimental research on a composite structure combined of cable dome and single-layer lattice shell[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science). 2010, 44(8):1608-1614.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢筋混凝土薄壳结构设计规程:JGJ22-2012[S].北京:中国建筑科学研究院,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for design of reinforced concrete shell structures: JGJ22-2012 [S]. Beijing: China Academy of Building Research, 2012.
- [14] 常玉珍.新型空间结构钢筋混凝土组合肋壳性能研究[M].西安:西安地图出版社,2013.  
CHANG Yuzhen, Study on the performance of a new type of steel concrete composite ribbed shell[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 2013.

(编辑 吴海西)