

# 一种快速架设的充气式桥梁结构研究

张立乾, 闫晶, 陈红, 李兵, 孟良, 吴星, 冯中华

北京特种工程设计研究院, 北京  
Email: 847220673@qq.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月24日

## 摘要

创新发明了一种新型的快速架设的充气式桥梁结构体系, 主体由充气环和其上的桥面承载板构成。以充气环为竖向支撑基本受力构件, 充气环既可以单环独形成支撑, 又可以多个单环并列拼装成一组形成支撑, 当桥梁跨越山谷时, 充气环可以作为支撑单元在桥梁跨度方向形成竖向支撑, 从而减少桥面支撑距离, 多组充气环之间以及充气环和两侧山谷之间形成填充嵌锁关系后, 可以进一步减少桥面沿跨度方向支撑点的距离, 从而减小桥面承载板的厚度, 实现快速拼装、快速架设的目的。用于桥梁承载的充气环一般为高压充气, 其内压为0.2 Mpa~0.7 Ma。基于ABAQUS计算分析软件, 对充气式桥梁的刚度及强度进行了初步验证, 计算分析表明: 在结构承载强度及刚度方面, 这种结构体系是可行的。在构件的拼接、连接及结构体系稳定方面尚需进一步深入研究。

## 关键词

充气环, 支撑, 内压, 强度, 刚度

# Study on a Kind of Fast Erection Inflatable Bridge Structure

Liqian Zhang, Jing Yan, Hong Chen, Bing Li, Liang Meng, Xing Wu, Zhonghua Feng

Beijing Special Engineering Design and Research Institute, Beijing  
Email: 847220673@qq.com

Received: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Dec. 16<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 24<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

A new type of rapidly erected inflatable bridge structure system is innovatively invented. The main body is composed of inflatable ring and deck bearing plate. With inflatable support ring as

the basic stress component, the inflatable ring can form support by single ring alone, and multiple single ring can be assembled in a group to form a support. When the bridge crosses the valley, the inflatable ring can be used as the support unit to form vertical support in the direction of bridge span, so as to reduce the bridge deck support distance, and form filling between multiple groups of inflatable rings and between the inflatable ring and the valleys on both sides. After the interlocking relationship, the distance of supporting points along the span direction of the bridge deck can be further reduced, so as to reduce the thickness of the bearing plate on the bridge deck, and realize the purpose of rapid assembly and rapid erection. The inflatable ring used for bridge bearing is usually high-pressure inflation, and its internal pressure is 0.2 MPa~0.7 Ma. Based on ABAQUS calculation and analysis software, the stiffness and strength of inflatable bridge are preliminarily verified. The calculation and analysis show that the structural system is feasible in terms of bearing strength and stiffness. Further research is needed in the aspects of component splicing, connection and structural system stability.

## Keywords

Inflatable Ring, Support, Internal Pressure, Strength, Stiffness

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

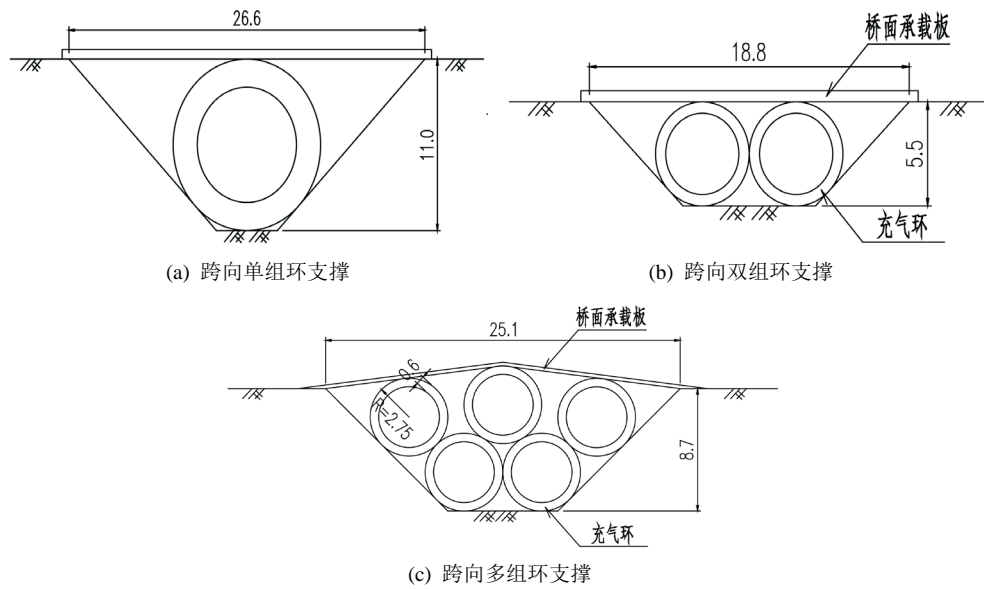
## 1. 引言

充气支撑环是一种气胀式结构[1], 具有一定的承载能力, 气胀式结构的承载原理是: 膜囊在充气后得到较大内压, 内压使膜面产生张力, 膜的张力连同内压可抵抗外载荷, 从而实现承力的作用[2]。它具有重量轻、承载能力强的优点。目前充气式结构多用于航空航天、近空间飞行器和大型建筑领域[3] [4] [5]。在桥梁领域尤其是满足应急快速架设桥梁领域则未见报道。

## 2. 快速架设的充气式桥梁结构体系

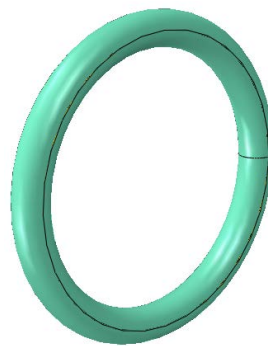
创新发明了一种新型的快速架设的充气式桥梁结构体系, 主体由充气环和其上的桥面承载板构成。以充气环为竖向支撑基本受力构件, 充气环既可以单环独形成支撑, 又可以多个单环并列拼装成一组形成支撑, 当桥梁跨越山谷时, 充气环可以作为支撑单元在桥梁跨度方向形成竖向支撑, 从而减少桥面支撑距离, 多组充气环之间以及充气环和两侧山谷之间形成填充嵌锁关系后, 可以进一步减少桥面沿跨度方向支撑点的距离, 从而减小桥面承载板的厚度, 实现快速拼装、快速架设的目的。用于桥梁承载的充气环一般为高压充气, 其内压为 0.2 Mpa~0.7 Ma, 充高压气环一般由密闭内胆、受力层、外套三次叠合构成, 密闭内胆主要提供封闭不漏气的环境, 有高韧橡胶材料构成; 受力层由高抗拉强度的材料构成, 可采用碳纤维、聚酯纤维或在橡胶层外复合高强钢丝等材料; 外套主要提供表面必要的摩阻力和抗磨损的能力, 可由帆布等材料构成。三层叠合的厚度一般在 5 mm~10 mm 之间。

图 1 为例给出了跨越山谷的三种型式。图 a 为单环支撑示意, 可将单跨跨度减小至二分之一; 图 b 为双环支撑, 可将单跨跨度减少至三分之一; 图 c 为多环支撑, 适用于山谷较深的情况, 在满足稳定的条件下, 可以实现双层充气环叠合支撑。可见基于充气环作为支撑构件的结构型式可以有相对灵活的组合, 从而适用于不同跨度、不同的深度。

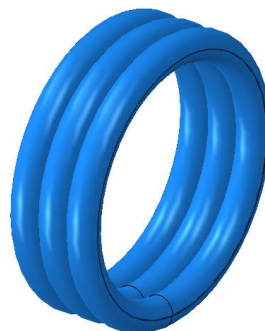


**Figure 1.** Schematic diagram of inflatable bridge structure system (Units: m)  
**图 1.** 充气式桥梁结构体系示意(单位: m)

图 1(a)中所示的充气环外圆直径对应 11.0 m, 充气环断面直径为 1.8 m, 图 1(b)、图 1(c)中所示的充气环外圆直径对应 5.5 m, 充气环断面直径为 0.6 m, 单环的三维计算模型图见图 2 所示。横向几个单环并列拼装构成一组, 见图 3 所示。



**Figure 2.** Three dimensional diagram of single ring  
**图 2.** 单环三维示意



**Figure 3.** Three dimensional diagram of multi ring parallel assembly  
**图 3.** 多环并列拼装三维示意

### 3. 快速架设的充气式桥梁结构体系承载性能研究

#### 3.1. 计算模型

物理力学模型模拟的问题涉及大变形、接触高度非线性问题，桥面承载板、山谷底部及两侧的山体以及充气环均采用三维壳单元进行分析。基于 ABAQUS 分析软件建立数值计算模型，模型物理力学参数见表 1 所示。

**Table 1.** Physical mechanics indicator  
**表 1.** 物理力学指标表

模型名称	密度 $\text{g/mm}^3$	弹性模量 MPa	泊松比	结构厚度(mm)	结构宽度(m)
山谷两侧山体	—	3.0E4	0.27	500	7
充气环	1.0	4E3	0.32	10/6	—
桥面承载板	7.85	2.0E5	0.3	250	6

模型尺寸：山体边界选择了相对尺寸较大的单元，大小为  $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ mm}$  左右；充气环为提高接触分析精度，细分了单元，其大小为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  左右；桥面承载板单元的划分尺寸介于二者之间，单元大小为  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 。

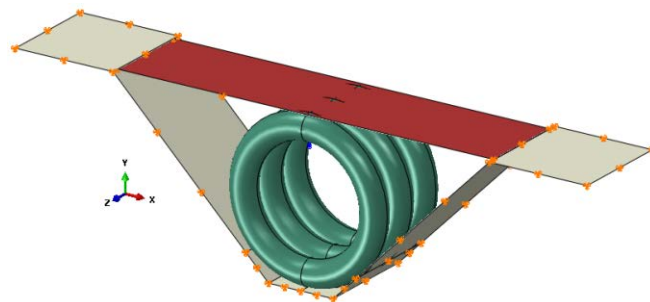
材料本构关系：采用弹性本构。

相互作用：充气环和山体之间为接触关系，切向摩擦系数为 0.1，法向接触为硬接触；充气环和桥面承载板之间为接触关系，切向摩擦系数为 0.1，法向接触为硬接触。充气环横向拼接之间为“Tie”连接。

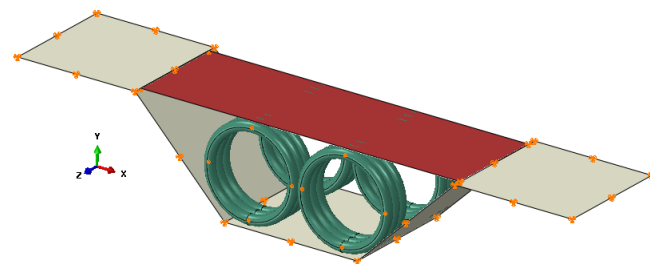
边界条件：山谷四周为固定约束，桥面承载板两端为简支约束。

载荷：加载步分为三步，即充气环内部加压、结构自重、桥面局部载荷( $6.41 \text{ kN/m}^2$ )。充气环施加内压即在膜单元内表面施加压强载荷。

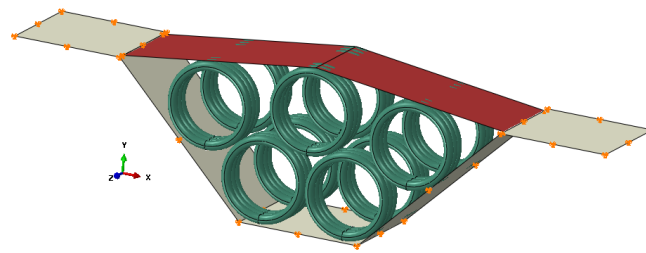
图 1 对应的三种结构体系三维模型图见图 4 所示。



(a) 跨向单环支撑



(b) 跨向双组环支撑



(c) 跨向多组环支撑

Figure 4. Calculation model of inflatable bridge structure  
图 4. 充气式桥梁结构计算模型

### 3.2. 跨向单环承载力分析

充气环加压后的 Mises 应力云图见图 5 所示，峰值为 70.6 Mpa；桥面加载后 Mises 应力云图见图 6 所示，峰值为 72.1 Mpa，变化仅为 1.5 Mpa，可见在桥面施加总重 102.3 吨的均布载荷后，充气膜的应力并没有大幅提高，说明了充气膜在受力的均衡性方面有着明显优势。膜体应力均在膜体材料允许应力范围之内。

充气环加压后的竖向位移云图见图 7 所示，桥面跨中峰值为 43.9 mm，呈上拱形态；桥面加载后竖向位移云图见图 8 所示，桥面跨中峰值为-47.3 mm，二者之和即为桥跨在桥面载荷作用下的竖向位移，即 91.1 mm，为跨度 26,600 mm 的 1/292，可见在桥面施加总重 102.3 吨的均布载荷后，跨中垂向位移在允许的范围之内，说明了充气环结构在刚度方面能满足要求。

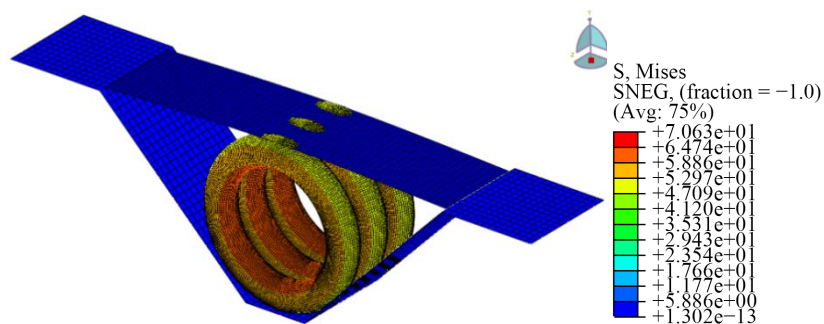


Figure 5. Mises stress nephogram of structure after pressurization of inflatable ring (0.7 MPa)

图 5. 充气环加压(0.7 MPa)后结构 Mises 应力云图

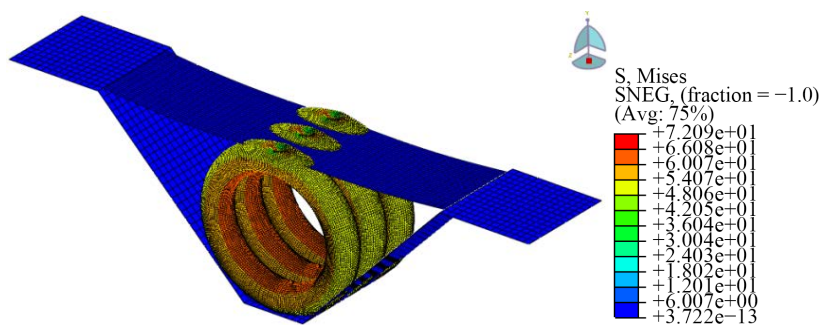


Figure 6. Mises stress nephogram of structure after bridge deck loading (0.00641 MPa)

图 6. 桥面加载(0.00641 Mpa)后结构 Mises 应力云图

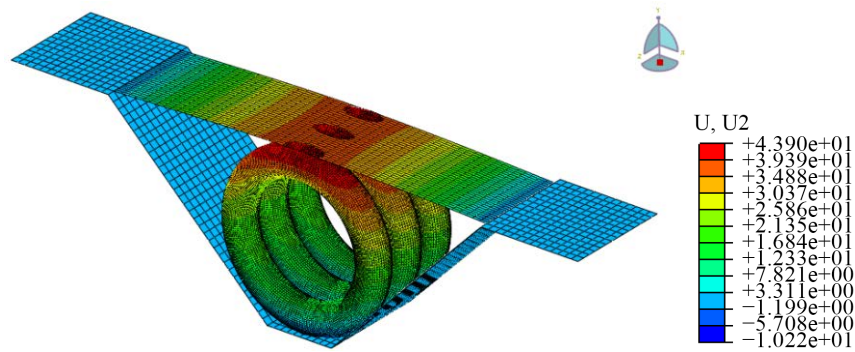


Figure 7. Mises stress nephogram of structure after pressurization of inflatable ring (0.7 MPa)

图 7. 充气环加压(0.7 MPa)后结构竖向位移云图

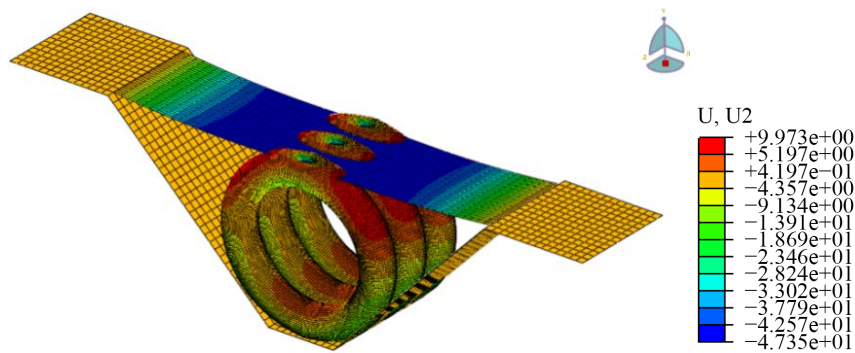


Figure 8. Cloud chart of vertical displacement of structure after bridge deck loading (0.00641 MPa)

图 8. 桥面加载(0.00641 Mpa)后结构竖向位移云图

### 3.3. 跨向双环承载力分析

充气环加压后的 Mises 应力云图见图 9 所示, 峰值为 41.3 Mpa; 桥面加载后 Mises 应力云图见图 10 所示, 峰值为 60.7 Mpa, 应力增加 19.4 Mpa, 膜体应力均在膜体材料允许应力范围之内。

充气环加压后的竖向位移云图见图 11 所示, 桥面跨中峰值为 8.1 mm, 呈上拱形态; 桥面加载后竖向位移云图见图 12 所示, 桥面跨中峰值为-20.6 mm, 二者之和即为桥跨在桥面载荷作用下的竖向位移, 即 28.7 mm, 为跨度 18,800 mm 的 1/655, 可见在桥面施加总重 72.3 吨的均布载荷后, 跨中垂向位移在允许的范围之内, 说明了充气环结构在刚度方面能满足要求。

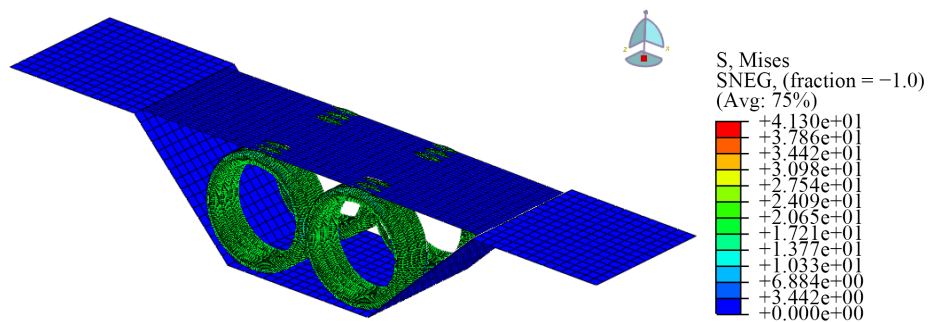
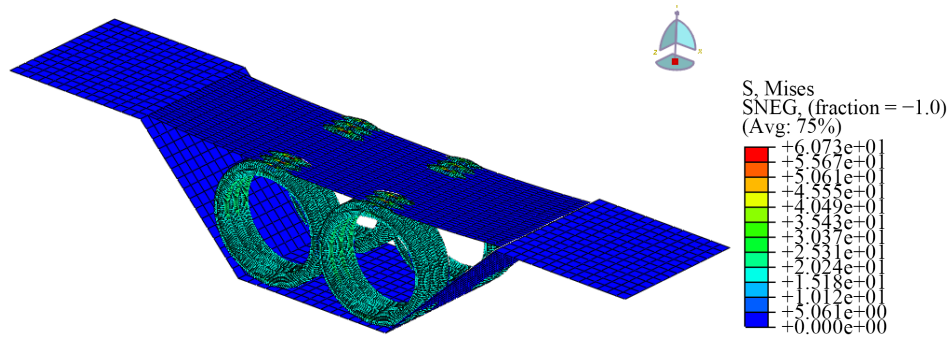
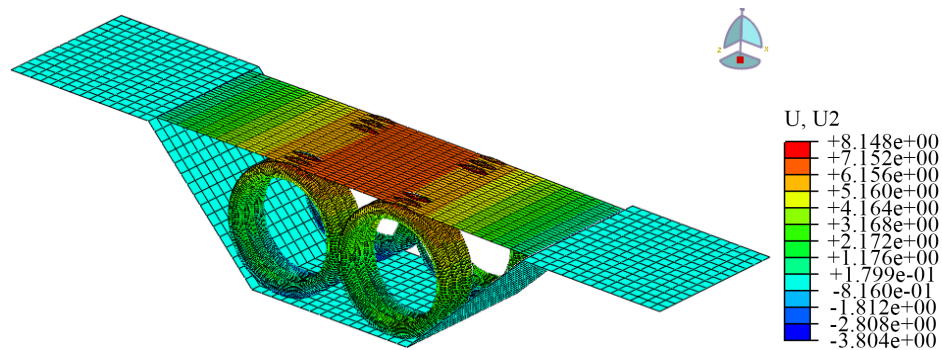


Figure 9. Mises stress nephogram of structure after pressurization of inflatable ring (0.7 MPa)

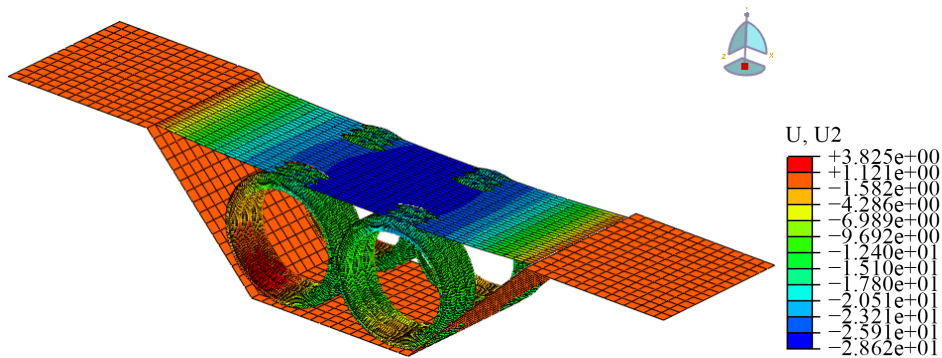
图 9. 充气环加压(0.7 MPa)后结构 Mises 应力云图



**Figure 10.** Mises stress nephogram of structure after bridge deck loading (0.00641 MPa)  
**图 10.** 桥面加载(0.00641 Mpa)后结构 Mises 应力云图



**Figure 11.** Mises stress nephogram of structure after pressurization of inflatable ring (0.7 MPa)  
**图 11.** 充气环加压(0.7 MPa)后结构竖向位移云图



**Figure 12.** Cloud chart of vertical displacement of structure after bridge deck loading (0.00641 MPa)  
**图 12.** 桥面加载(0.00641 Mpa)后结构竖向位移云图

### 3.4. 跨向多环承载力分析

充气环加压后的 Mises 应力云图见图 13 所示, 峰值为 52.3 Mpa; 桥面加载后 Mises 应力云图见图 14 所示, 峰值为 58.4 Mpa, 应力增加 6.1 Mpa, 膜体应力均在膜体材料允许应力范围之内。

充气环加压后的竖向位移云图见图 15 所示, 桥面跨中峰值为 10.1 mm, 呈上拱形态; 桥面加载后竖向位移云图见图 16 所示, 桥面跨中峰值为-33.6 mm, 二者之和即为桥跨在桥面载荷作用下的竖向位移, 即 43.7 mm, 为跨度 25,100 mm 的 1/574, 可见在桥面施加总重 96.5 吨的均布载荷后, 跨中垂向位移在允许的范围之内, 说明了充气环结构在刚度方面能满足要求。

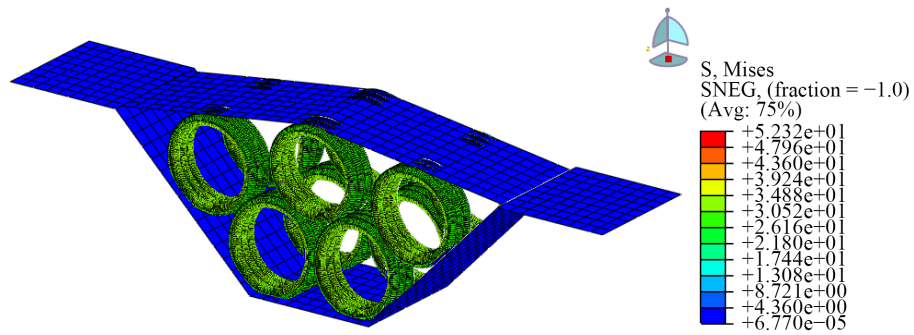


Figure 13. Mises stress nephogram of structure after pressurization of inflatable ring (0.7 MPa)  
图 13. 充气环加压(0.7 MPa)后结构 Mises 应力云图

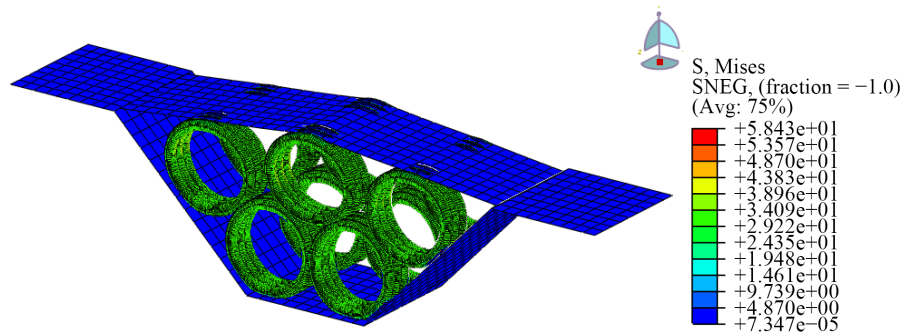


Figure 14. Mises stress nephogram of structure after bridge deck loading (0.00641 MPa)  
图 14. 桥面加载(0.00641 Mpa)后结构 Mises 应力云图

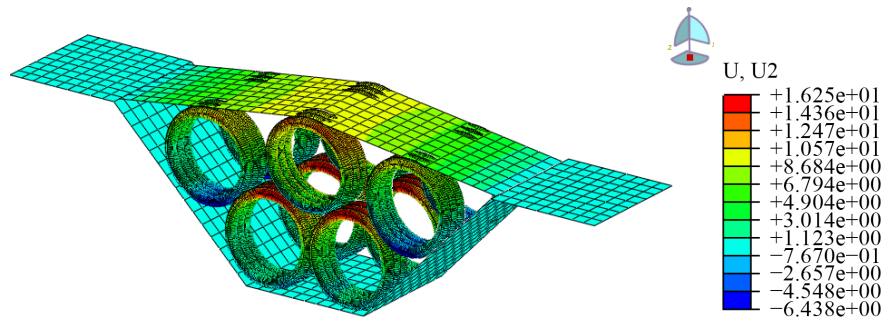


Figure 15. Mises stress nephogram of structure after pressurization of inflatable ring (0.7 MPa)  
图 15. 充气环加压(0.7 MPa)后结构竖向位移云图

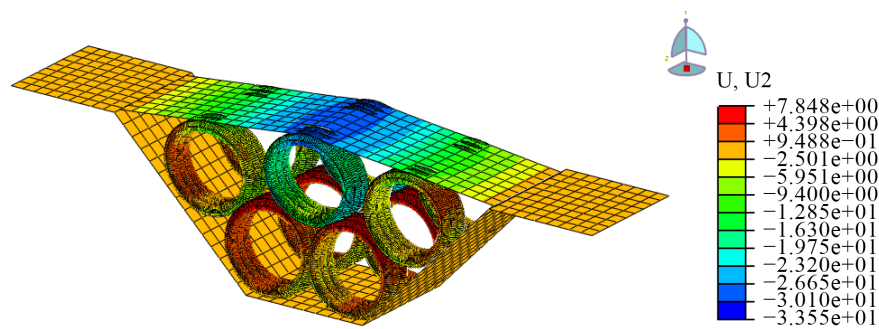


Figure 16. Cloud chart of vertical displacement of structure after bridge deck loading (0.00641 MPa)  
图 16. 桥面加载(0.00641 Mpa)后结构竖向位移云图



基于以上分析可知,充气环在强度及刚度两个方面都能满足桥梁承载要求,且具有较大的安全储备。目前高强膜材的抗拉强度可达 1000 Mpa 以上,而以上三种桥型最大的膜材应力均在几十兆帕以内,膜体厚度尚有进一步减薄的空间,但考虑到膜体的厚度和其刚度有一定关系,故膜体厚度也不能过薄,一般取 3 mm~10 mm 是恰当的。

单充气环的膜体质量可控制在 80 Kg~150 Kg,从而为实现快速拼装提供了可能。充气环的组合可以大幅降低桥面承载板的单跨跨径,也为桥面承载板实现快速拼装提供了可能。

另外结构安全除了强度、刚度以外,还有稳定问题值得重视,充气环构成的承载体系尚有稳定问题值得进一步研究,包括整体稳定和局部稳定,而这些又和充气环拼接工艺、稳定措施紧密相关,另外在构造方面还有充气环作为竖向支撑和桥面承载板之间的连接等问题,这些内容将在下一阶段重点研究。

#### 4. 结论

创新发明了一种新型的快速架设的充气式桥梁结构体系,具有明显的优点和特点。

1) 数值计算证明充气环在充气桥实现竖向承载方面能满足强度和刚度的需要,膜体应力控制在几十兆帕之内,跨中竖向挠度控制在跨径的 1/290 之内,整体上是科学可行的。

2) 充气环质量很轻,一般能控制在 150 Kg 之内,为实现快速拼接提供了方便。

3) 充气环在组合方面比较灵活,既可以在跨度方向组合,又可以在山谷深度方向组合,从而可以较好地适应不同的跨越地形。

4) 高强膜体材料的发展为充气环提供较多可以选择的材料,如碳素纤维、聚酯纤维、玻璃纤维等等,均可满足应力需求。

5) 充气环尚有稳定问题值得进一步研究,包括整体稳定和局部稳定,另外在构造方面还有充气环作为竖向支撑和桥面承载板之间的连接等问题。

#### 参考文献

- [1] 冯远红, 闫文魁, 殷继刚, 陈务军. 拱形气肋充气阶段力学性能分析与试验[J]. 空间结构, 2009, 15(2): 75-77+74.
- [2] 冯远红, 杨风雷, 闫文魁. 拱形气肋承载力分析与试验[J]. 工业建筑, 2009(S2): 398-400.
- [3] 于宁. 充气环结构的承载能力分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [4] 赵大鹏. 大型充气膜结构特性分析与高强膜材试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [5] 唐雅芳. 气囊膜形态、结构特性与新型膜材力学性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2006.