

截面填充率对部分填充钢箱 - 混凝土拱受力性能的影响分析

肖锦文, 邹中权*

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭
Email: *zouzhq72@126.com

收稿日期: 2020年9月21日; 录用日期: 2020年10月7日; 发布日期: 2020年10月14日

摘要

为了了解截面填充率对部分填充钢箱 - 混凝土拱受力性能的影响, 本文利用ABAQUS有限元软件建立部分填充钢箱 - 混凝土拱的数值模型, 分析了截面填充率对该类结构受力特性的影响。分析结果表明: 对称加载时的极限承载力明显要大于非对称加载时的极限承载力; 极限荷载随着截面率的增大而提高; 填充率对拱结构的刚度和破坏形态影响不大, 但其延性随填充率的增大而降低。本文所获得分析成果可为该类结构的进一步研究及工程应用提供参考。

关键词

部分填充钢箱 - 混凝土拱, 有限元法, 极限荷载, 截面填充率

Analysis of the Influence of Section Filling Rate on the Mechanical Performance of Partially Filled Steel Box-Concrete Arch

Jinwen Xiao, Zhongquan Zou*

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan
Email: *zouzhq72@126.com

Received: Sep. 21st, 2020; accepted: Oct. 7th, 2020; published: Oct. 14th, 2020

Abstract

In order to understand the effect of section filling rate on the mechanical properties of partially filled steel box-concrete arches, this paper uses ABAQUS finite element software to establish a

*通讯作者。

numerical model of partially filled steel box-concrete arches, and analyzes the effect of section filling rate on the mechanical properties of this type of structure influences. The analysis results show that the ultimate bearing capacity under symmetric loading is obviously greater than that under asymmetric loading; the ultimate load increases with the increase of the section ratio; the filling ratio has little effect on the stiffness and failure mode of the arch structure, but its ductility decreases with increasing filling rate. The analysis results obtained in this paper can provide references for further research and engineering applications of this type of structure.

Keywords

Partially Filled Steel Box-Concrete Arch, Finite Element Method, Ultimate Load, Section Filling Rate

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

混凝土拱桥由于跨越能力大、承载能力高、经济实用、造型美观而成为我国西部山区跨越深谷、河流常用的桥型之一。但是由于材料性能限制、施工困难等因素,修建大跨径混凝土拱桥存在较大的困难。因此,人们长期以来寻求拱桥结构体系和施工技术的创新,以降低工程造价和施工难度,拓展拱结构的应用空间。

将钢与混凝土组合起来形成组合体系拱桥被认为是解决混凝土拱桥缺点的最有效途径之一,其中最为典型的的就是钢管混凝土拱桥。并且钢管混凝土拱桥[1]在我国桥梁建设中很快得到应用推广。然而,钢管混凝土最适合应用的场合是纯压结构。而拱桥由于活载作用、温度变化、收缩徐变、基础变位等影响,不可避免的存在弯矩的作用,使其处于偏心受压状态,从一定程度上减小了钢管混凝土的使用效益。

文献[2]等为了解决山区拱脚的施工问题,提出了一类新型结构——钢箱-混凝土拱桥,其特点是在空钢箱顶板上浇筑混凝土形成组合截面。由于空钢箱可以作为后浇筑混凝土的支架和施工平台,因而大大降低了施工难度。该类结构中由于空钢箱上方的混凝土没有受到三向约束,其强度没有提高。

借鉴矩形钢管混凝土的优势,文献[3]等提出了一种适用于受弯构件的新型钢-混凝土组合结构——部分填充钢箱-混凝土结构。其特点是将空钢箱分成上下两个部分,在受压部分填充混凝土,受拉区则为空钢箱。这种结构中截面受压区的混凝土由于受到钢箱的三向约束,抗压强度和构件延性都大大提高,从而提高了构件的受力性能。

显然,基于部分填充钢箱-混凝土结构材料分布的特点,将其应用于偏心受压构件也是合理的。实际工程中拱桥多处于偏心受压状态,因而可以考虑将部分填充钢箱-混凝土应用于拱结构,从而形成一种新型组合拱——部分填充钢箱-混凝土组合拱[4]。本文采用非线性有限元方法对截面填充率度部分填充钢箱-混凝土拱结构受力性能的影响进行分析,以便了解其受力性能。

2. 有限元分析

2.1. 材料的本构关系

2.1.1. 钢材的本构关系

目前,常用的钢材本构模型有理想弹塑性本构模型、两段式强化本构模型、五段式弹塑性本构模型等[5][6]。本文为了能够较快速,较方便,较准确的分析模型,选用如图1(a)所示的理想弹塑性本构进行分析,其表达式为:

$$\begin{cases} \sigma = E_s \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ \sigma = \sigma_s & \varepsilon > \varepsilon_s \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2. 核心混凝土的本构关系

核心混凝土本构关系模型需要考虑钢箱对混凝土的约束套箍作用。韩林海等[7][8]以套箍效应系数为主要参数,提出了组成方钢管混凝土核心混凝土的本构关系模型。其本构关系曲线如图 1(b)所示。其模型综合反应了钢箱-混凝土结构中核心混凝土的约束特点,模型适用性广。具体表达式为:

$$y = \begin{cases} 2 \cdot x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0 \cdot (x-1)^n + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$; $y = \frac{\sigma}{f_c}$; $\beta_0 = \frac{f_c^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}}$; $\eta = 1.6 + 1.5/x$; $\varepsilon_0 = \varepsilon_c \cdot \zeta^{0.2} \cdot 10^{-6}$; $\varepsilon_s = \varepsilon_c + 800 \cdot \zeta^{0.2} \cdot 10^{-6}$;

$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_c} = \rho \frac{f_y}{f_c}$; f_c 的单位为 MPa。

ξ 表示套箍效应系数,其中: $\rho = A_s / (A_c + A_s)$ 为截面含钢率; A_s 和 A_c 分别是钢箱和混凝土的面积(空钢箱不考虑钢箱横截面面积); f_y 为钢材的设计强度; f_c 为混凝土的设计强度。

混凝土受拉本构关系如图 1(c)所示,其表达式为:

$$\begin{cases} y = 1.2x - 0.2x^6 & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\alpha_i (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_i}$, $y = \frac{\sigma}{f_t^*}$, α_i 为单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值,按表 1 取用, f_t^* 为混凝土的单轴抗拉强度, ε_i 为与 f_t^* 相应的混凝土峰值拉应变,按表 1 取用。

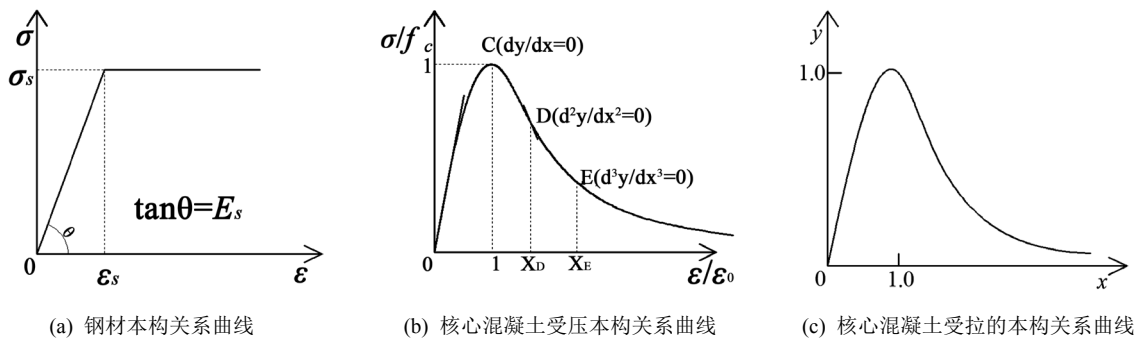


Figure 1. Schematic diagram of the constitutive relationship curve of steel and concrete materials

图 1. 钢材和混凝土材料本构关系曲线示意图

Table 1. The parameter value of concrete uniaxial tensile stress-strain curve

表 1. 混凝土单轴受拉应力-应变曲线的参数值

f_t^* (MPa)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$\varepsilon_i (\times 10^{-6})$	65	81	95	107	118	128	137
α_i	0.31	0.7	1.25	1.95	2.81	3.82	5

2.2. 模型参数

计算模型的钢箱截面尺寸为 100×60 mm(高 \times 宽), 计算跨径为 2400 mm, 计算矢高为 800 mm, 钢板厚度为 2 mm。核心混凝土选用 C40, 钢箱选用 Q235 钢材。为了分析不同填充度对部分填充钢箱 - 混凝土拱受力性能的影响, 钢箱的截面填充率在 30%~70%之间变化。此处截面填充率 $\gamma = A_c/A_p$, A_c 和 A_p 分别是混凝土的面积和钢箱围成的净面积。通过调整混凝土与空钢箱之间隔板的位置来调整混凝土的填充高度, 从而实现了截面填充率的改变。混凝土填充高度分别取 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 7 cm, 对应的 γ 分别为 30%, 40%, 50%, 60%, 70%。

2.3. 加载条件和网格划分

每个构件均考虑仅在 L/4 加载和在 L/4、L/2、3L/4 三点加载两种工况。加载通过在各加载点处添加钢板垫块作为加载平台来实现。垫块与钢箱表面采用绑定约束即完全是一个整体。以荷载控制来进行加载, 在加载平台上面施加表面压强。核心混凝土采用 C3D8R 实体单元, 钢箱采用 S4R 壳单元, 并且采用扫掠网格技术(SWEEP)对钢箱壳单元、混凝土实体单元分别划分网格。钢箱与混凝土之间的相互作用采用法向硬接触以及切向库伦摩擦接触(摩擦系数 μ 取 0.6) [9]。

3. 有限元分析结果

3.1. 截面填充度对变形性能的影响

3.1.1. L/4 加载

L/4 偏载工况下各不同截面填充率构件在 L/4 和 3L/4 处的荷载 - 位移曲线如图 2 所示。可以看出, 在 L/4 非对称加载时, 拱结构的荷载 - 位移曲线经历了明显的弹性阶段、弹塑性阶段以及屈服强化阶段, 五个不同的截面填充率下荷载 - 位移曲线在弹性阶段基本保持重合, 说明拱结构刚度基本是一致的。进入弹塑性阶段后, 各曲线的最大荷载不一样, 但仍基本保持平行, 说明刚度仍基本相同。由此可见, 截面填充度对部分填充钢箱 - 混凝土拱刚度的影响不明显。

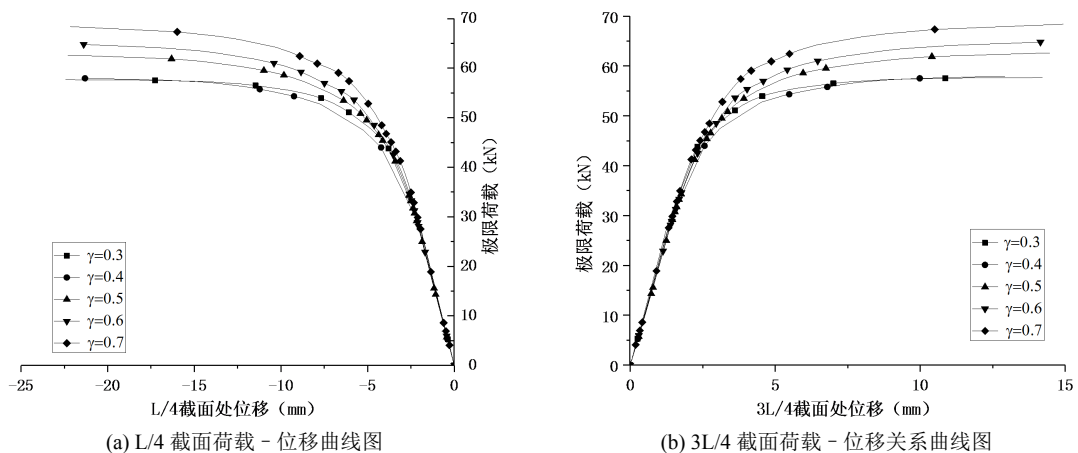


Figure 2. Load-displacement relationship curve diagram of L/4 loaded components with different cross-section filling rates
图 2. L/4 加载不同截面填充率构件的荷载 - 位移关系曲线图

3.1.2. 三点对称加载

L/4、L/2、3L/4 三点对称加载工况拱顶和 L/4 处的荷载-位移曲线如图 3 所示。可以看出, 无论是在哪个截面, 拱结构的荷载 - 位移曲线经历了明显的弹性阶段、弹塑性阶段以及屈服强化阶段, 五个不同

的截面填充率下荷载 - 位移曲线在线性阶段大致保持一致, 说明三点对称加载情况下截面填充率对结构刚度的影响比较小。

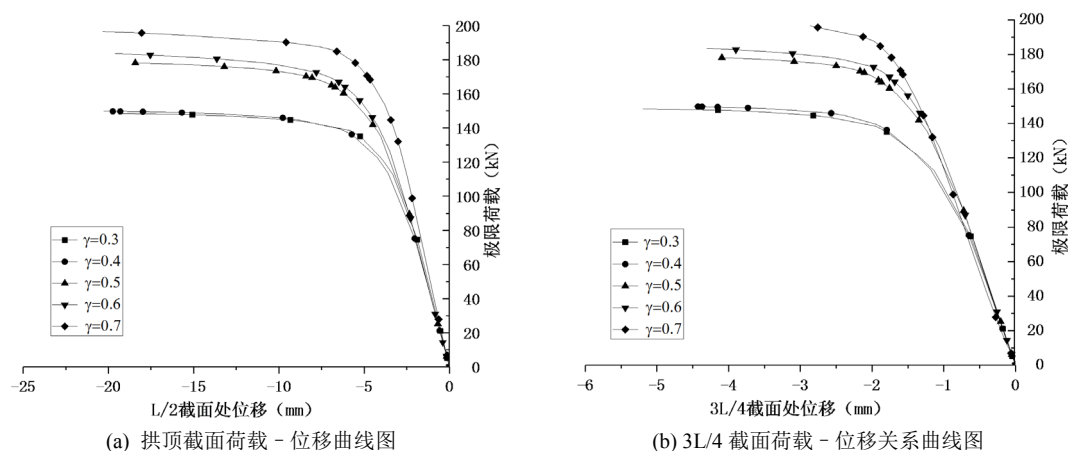


Figure 3. Load-displacement relationship curve diagram of three-point symmetrical loading members with different cross-section filling rates

图 3. 三点对称加载不同截面填充率构件的荷载 - 位移关系曲线图

从图 2、图 3 可以看出, 随着截面填充度的提高, 构件屈服荷载和极限荷载都有所提高, 但其极限变形均基本不变或者有所减小。可见随着截面填充度的增高, 结构的延性在降低。

3.2. 截面填充度对破坏形态的影响

3.2.1. L/4 加载

图 4(a)为构件在 L/4 非对称加载的变形图, 从图中明显可以看出, 拱结构基本上以拱顶为中心呈现竖向反对称变形; 图 4(b)为构件在 L/4 加载时, 最后阶段混凝土压应力云图, 从云图中可以看出, 在加载点处, 混凝土最大压应力已经超过了其抗压强度, 混凝土已经被压碎, 可以认为拱结构已破坏, 失去承载能力。因此, 在 L/4 非对称加载时, 拱结构的最终破坏形态是内填混凝土被压碎。

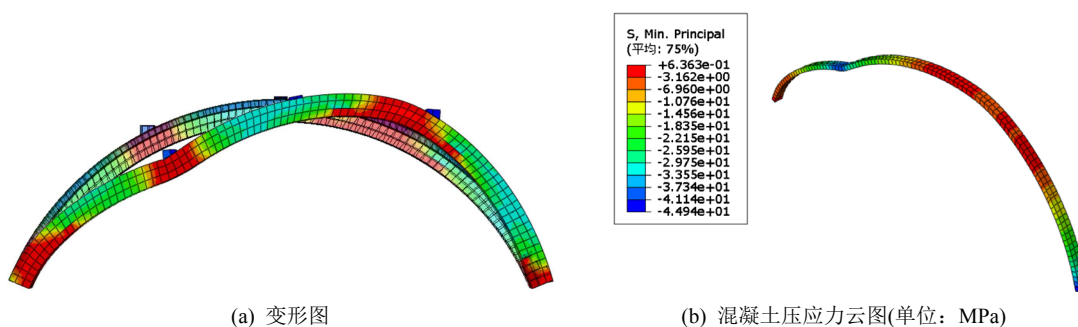


Figure 4. The failure mode of partially filled steel box-concrete arch under L/4 loading

图 4. L/4 加载情况下部分填充钢箱 - 混凝土拱的破坏形态

3.2.2. 三点对称加载

图 5(a)为构件在三点对称加载时的变形图, 从图中可以看出, 拱结构基本以拱顶为中心呈现竖向正对称变形; 图 5(b)为构件在三点对称加载时, 最终阶段混凝土压应力云图。可以看出, 混凝土的最大压应力已经远远超过了其抗压强度, 混凝土已经被压碎, 可以认为拱结构以破坏, 失去承载能力。因此,

在三点对称加载时, 拱结构的最终破坏形态仍然是内填混凝土被压碎。由此可见, 截面填充度对部分填充钢箱 - 混凝土拱的破坏形态影响不大。

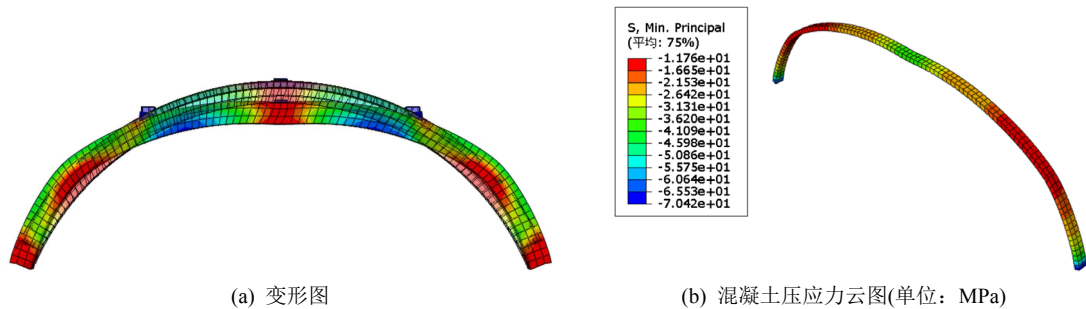


Figure 5. Failure mode of partially filled steel box-concrete arch under three-point symmetrical loading
图 5. 三点对称加载情况下部分填充钢箱 - 混凝土拱的破坏形态

3.3. 截面填充度对极限承载力的影响

将极限荷载定义为构件荷载 - 挠度曲线的顶点, 整理得到极限荷载与截面填充率之间的关系曲线如图 6 所示。其中图 6(a)为 L/4 非对称加载, 极限荷载为 L/4 截面荷载(挠度曲线的顶点; 图 6(b)为三点对称加载, 极限荷载为拱顶截面荷载 - 挠度曲线的顶点。从图中可以看出, 总体而言, 拱结构的极限承载力随着截面填充度的提高而增大, 但两者并不呈简单的线性增长关系; 三点对称加载情况下的承载力要大大高于非对称加载的承载力, 在填充度相同的情况下, 前者大致为后者的三倍。

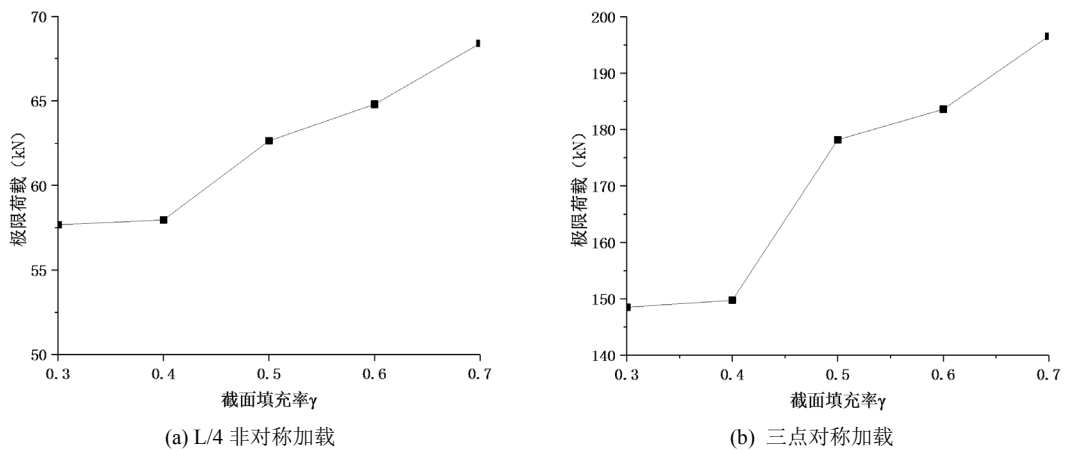


Figure 6. The effect of section filling rate on bearing capacity
图 6. 截面填充率对承载力的影响

4. 结语

本文计算分析了部分填充钢箱 - 混凝土拱结构极限承载力问题, 讨论了截面填充率对极限承载力的影响。所得结论如下:

- 1) 不论是对称加载还是非对称加载, 截面填充率对部分填充钢箱 - 混凝土拱的刚度影响不明显, 但其延性随截面填充率的提高而降低;
- 2) 截面填充率对部分填充钢箱 - 混凝土拱的破坏形态影响不大, 最终破坏均为内填混凝土的压碎, 且其破坏应力均大于混凝土的单轴强度, 说明钢箱的套箍作用较为明显;

3) 不管是以什么方式加载, 极限荷载随着截面率的增大而提高; 但三点对称加载时比 L/4 非对称加载时极限承载力提高要明显很多。

4) 三点对称加载情况下的承载力要大大高于非对称加载的承载力。

基金项目

湖南省自然科学基金(14JJ2094)。

参考文献

- [1] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 50-61.
- [2] 周志祥. 适于山区深谷的竖转钢箱——混凝土组合拱桥[A]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会, 2012: 4.
- [3] 钟新谷, 郑玉国, 舒小娟, 等. 钢箱 - 混凝土组合截面梁的力学性能的初步试验研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(4): 46-49.
- [4] 刘雄. 部分填充钢箱 - 混凝土拱受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
- [5] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **114**, 1804-1826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [6] 雷拓, 钱江, 刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究[J]. 结构工程师, 2008, 24(2): 22-27.
- [7] 韩林海, 陶忠. 方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]. 土木工程学报, 2001(2): 17-25.
- [8] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]: [博士学位论文]. 福州: 福州大学, 2005.