

# 装配式空心钢管混凝土拱桥可行性研究

许红胜, 何任珂, 颜东煌, 岳亚超, 吴佳东

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为减小大跨度钢管混凝土拱桥自重,提高大跨度钢管混凝土拱桥的施工便利性,提出使用预制空心钢管混凝土构件代替实心钢管混凝土构件作为大跨度钢管混凝土拱桥拱肋的新思想。该文采用有限元分析方法对某特大桥进行了试设计研究,建立空心钢管混凝土拱桥模型和实心钢管混凝土拱桥模型,在不同工况组合条件下,对两者拱肋内力、挠度进行了分析比较,使用现有规范的计算公式进行承载力验算。结果显示:空心钢管混凝土方案与原实心钢管混凝土方案相比,拱肋各杆轴力有明显减少,不同杆件、不同主拱圈截面弯矩有减少亦有增加,不同方案对挠度的影响不大,空心钢管混凝土构件均满足承载力要求。分析结果表明空心钢管混凝土代替钢管混凝土的新思想具有可行性,可以减小大跨度拱桥整体自重,减少混凝土用量,降低拱肋上、下弦杆轴力,在提高大跨度拱桥整体力学性能和经济性方面具有一定优势。

**关键词:**空心钢管混凝土; 钢管混凝土; 装配式; 有限元分析; 钢管混凝土拱桥; 可行性分析

## 1 前言

空心钢管混凝土结构是目前主要用于建筑工程、电力工程中的常见结构形式,其主要采用工厂预制空心钢管混凝土构件,现场进行节点拼装,从而完成建造的预制装配化结构。相比传统的实心钢管混凝土(以下简称钢管混凝土)结构,空心钢管混凝土结构具有构件自重较小、钢管与管内混凝土协同受力性能良好、抗冲击性能良好、预制装配化程度高、无大体量管内混凝土筑填施工等优点。因此结合空心钢管混凝土的优势,对大跨度桥梁进行创新优化设计,可以达到减少桥梁混凝土用量、降低自重、缩短施工工期等目的。

钢管混凝土拱桥是一种钢—混凝土组合结构,将钢管内填充混凝土,使混凝土处于三向受压状态,可以提高混凝土抗压强度,外围薄壁钢管既能起到纵筋作用,又有箍筋作用。当前,钢管混凝土拱桥因为其出色的力学性能、方便的施工工艺和较短的整体施工工期,在大跨度桥梁中运用广泛,国内外不少专家学者对钢管混凝土拱桥做了大量研究分析。如研究并分析钢管混凝土拱桥灌注混凝土工序对其承载力的影响;钢管混凝土拱桥拱肋初应力的影响;钢管混凝土拱桥受力

性能优化;大跨度钢管混凝土拱桥拱轴线线形优化以及拱肋施工误差对受力的影响等。

上述研究侧重分析初应力、拱轴线、施工工序等对钢管混凝土拱桥的影响,并针对具体影响因素进行钢管混凝土拱桥优化设计。目前尚未有针对空心钢管混凝土构件用于钢管混凝土拱桥的应用研究文献,该文以某特大桥为依托提出创新思想——空心钢管混凝土构件替代钢管混凝土构件用于拱桥上下弦杆的新型拱桥结构形式,将新方案与原设计方案进行对比,研究拱肋内力与挠度实际受到的影响和优化效果。

## 2 工程概况

依托大桥为计算跨度 482 m 的上承式钢管混凝土变截面桁架拱桥,拱轴线采用悬链线,拱轴系数  $m=1.6$ ,矢高  $h=96.4$  m,矢跨比  $f/L=1/5$ ,拱轴系数  $m=1.6$ ,拱脚高度为 13.0 m,拱顶高度为 8 m。拱肋拟采用外径 1 360 mm,暂定拱肋上、下弦杆均采用壁厚 35 mm 圆形钢管,如图 1 所示,新方案使用外径 1 360 mm,壁厚 35 mm,50%空心率圆形空心钢管混凝土作为拱肋上、下弦杆,如图 2 所示。钢管拱肋暂定采用内法兰盘栓接和管外焊接的形式进行对接,拱上

立柱采用排架式空心钢箱结构,立柱间用横联连接。主桥桥面系主梁为波形钢腹板组合梁。桥面系采用钢-混凝土叠合梁,跨径组合为 $3\times(4\times40)\text{ m}$ 引桥+ $(15\times34.2)\text{ m}$ 主桥+ $(2\times40+2\times30)\text{ m}$ 引桥,桥面板宽 $15.55\text{ m}$ 。某特大桥立面布置图如图3所示。

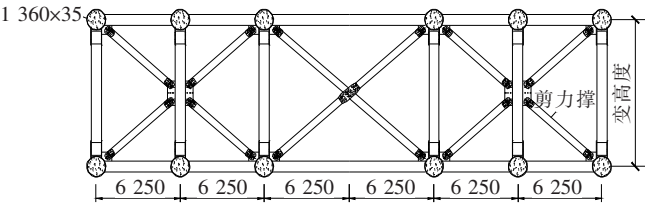


图1 原钢管混凝土拱肋横截面图(单位:mm)

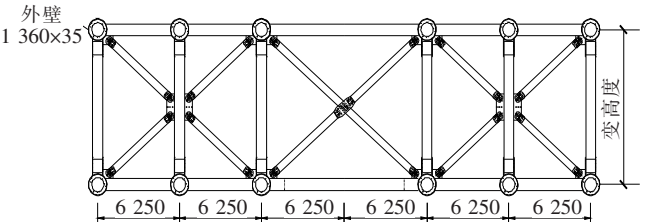


图2 空心钢管混凝土拱肋横截面图(单位:mm)

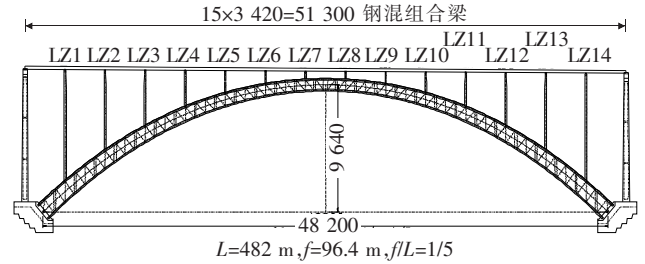


图3 某特大桥立面布置图(单位:cm)

原主拱圈设计采用钢管混凝土作为拱肋上、下弦杆,考虑到钢管混凝土大跨度拱桥自重较大,拱脚推力较大,建议使用空心钢管混凝土作为拱肋上、下弦杆。

3 有限元计算模型

该特大桥尚处于设计阶段,有限元模型的建立参照平罗高速公路大小井特大桥的部分设计内容,具体内容如下:① 钢管钢材型号及管内混凝土标号;② 各节段拱圈位置钢管壁厚设计;③ 横联与米撑的结构设计;④ 拱上立柱的结构设计。拱圈线形以给出的初步设计CAD图中的测绘数据为基础,结合拱轴悬链线进行复核。

根据以上信息,采用有限元软件SAP2000,建立钢管混凝土拱桥和空心钢管混凝土拱桥两套仿真计算分析模型,其中空心钢管混凝土取空心率50%,其余

条件钢管混凝土与空心钢管混凝土均一致。模型采用简化框架模型,其中边界条件拱脚约束3个方向平移,桥面约束1个方向平移,有限元模型如图4所示。

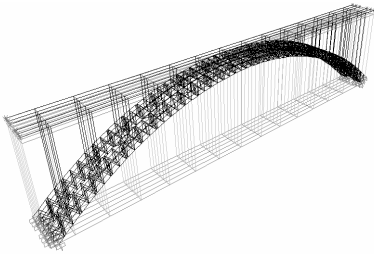


图4 某特大桥有限元模型

4 有限元计算分析

4.1 工况组合

基于JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》,主要考虑以下4种组合:组合1~3为基本组合,组合4为偶然组合,见表1。

表1 各工况组合

组合	荷载
1	$1.1\times(1.2\times\text{恒荷载}+1.4\times\text{汽车荷载})$
2	$1.1\times(1.2\times\text{恒荷载}+1.4\times\text{汽车荷载}+0.75\times1.1\times\text{风荷载})$
3	$1.1\times(1.2\times\text{恒荷载}+1.4\times\text{汽车荷载})+0.75\times(1.1\times\text{风荷载}+1.4\times\text{人群荷载})$

4.2 分析计算步骤

① 利用所参考的设计方案,使用SAP2000有限元分析软件计算各工况组合条件下,钢管混凝土拱桥成桥状态拱肋各位置内力;② 计算各工况组合条件下,空心钢管混凝土拱桥成桥状态拱肋各位置内力;③ 将所求得的钢管混凝土与空心钢管混凝土内力进行比较,用 $(N_{hs}-N_s)/N_s=\delta_N$ 、 $(M_{hs}-M_s)/M_s=\delta_M$ (其中 $N_s$ 为钢管混凝土轴力, $N_{hs}$ 为空心钢管混凝土轴力, $M_s$ 为钢管混凝土弯矩, $M_{hs}$ 为空心钢管混凝土弯矩, $\delta_N$ 为弯矩减少程度, $\delta_M$ 为弯矩减少程度)直观分析;④ 利用SAP2000有限元软件计算两者挠度并分析比较;⑤ 为确保两者满足承载能力要求的大前提,按照现有规范和规程初步判断两者承载能力是否达到要求。其中有限元计算和实际承载能力计算时,钢管和混凝土按照组合截面、组合材料考虑。

4.3 计算结果

为直观比较两种方案,按照以上分析计算步骤,

通过使用 SAP2000 有限元分析软件计算,最终得到各工况组合条件下,最大内力同幅位置,钢管混凝土与空

心钢管混凝土成桥状态下的轴力比较,结果如图 5~9 所示。

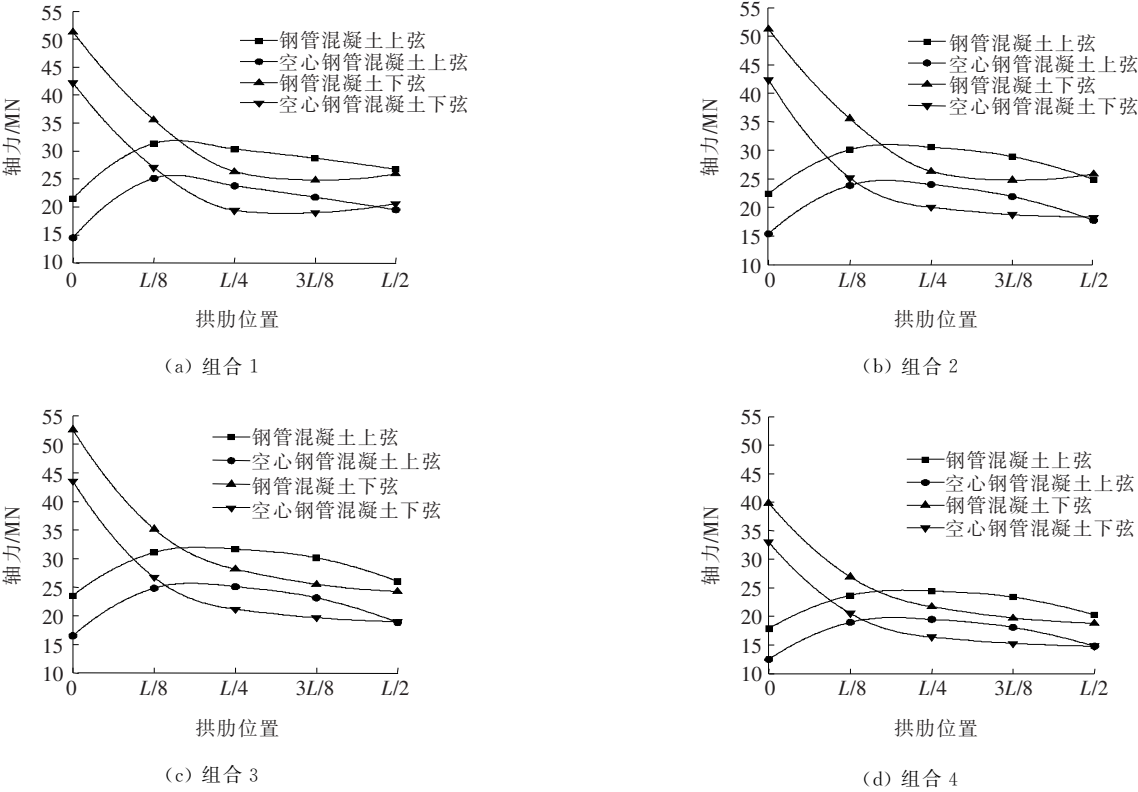


图 5 组合 4 钢管混凝土与空心钢管混凝土成桥状态下轴力对比图

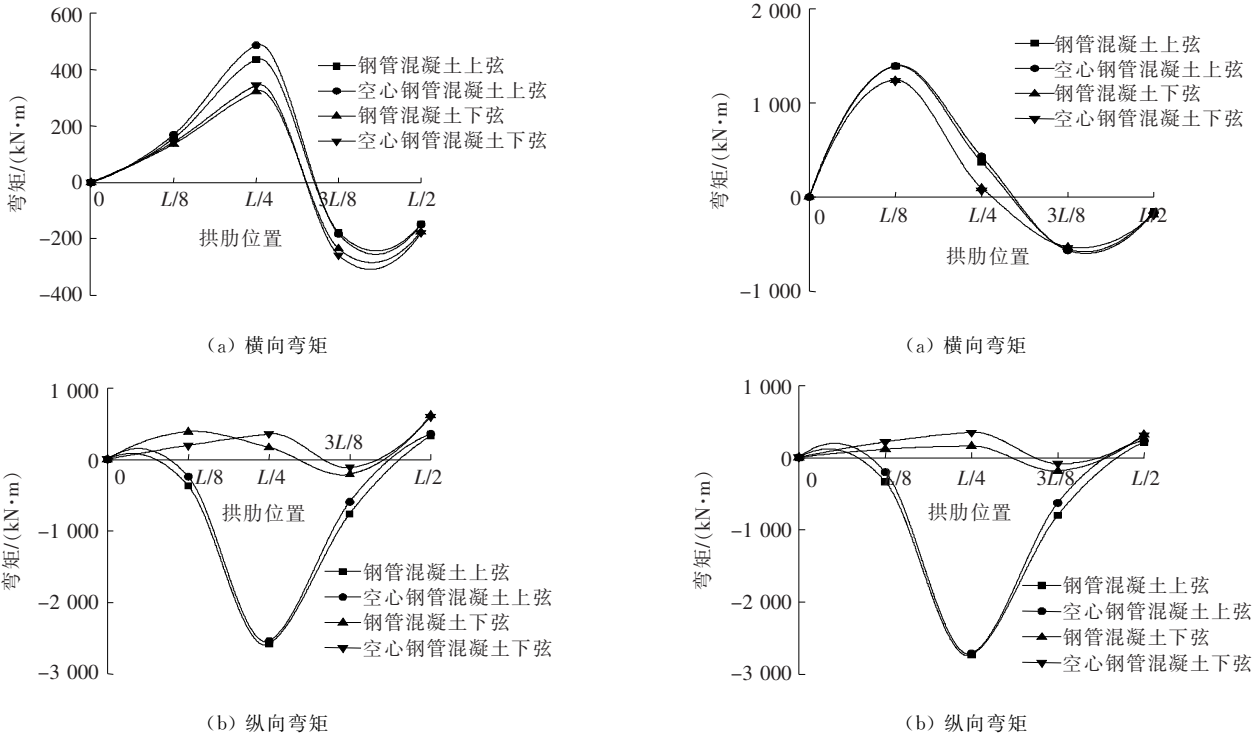


图 6 组合 1 钢管混凝土与空心钢管混凝土成桥状态下弯矩对比图

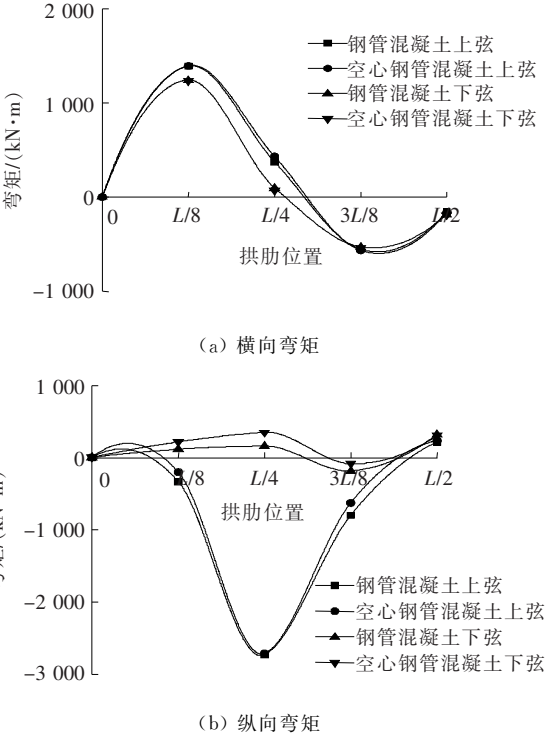


图 7 组合 2 钢管混凝土与空心钢管混凝土成桥状态下弯矩对比图

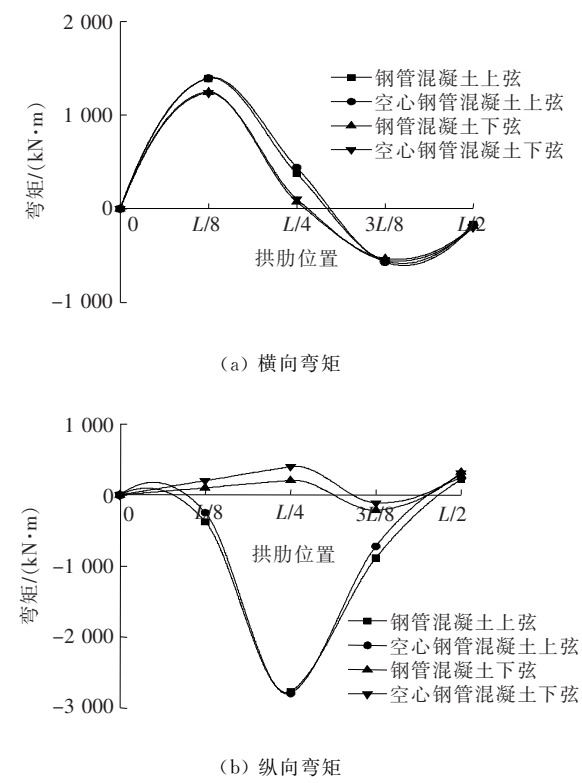


图 8 组合 3 钢管混凝土与空心钢管混凝土  
成桥状态下弯矩对比图

从图 5 可知:空心钢管混凝土拱桥与钢管混凝土拱桥轴力有显著差异,截面结构形式的不同与拱肋轴力变化存在明显相关性,使用空心钢管混凝土代替钢管混凝土作为拱肋上、下弦杆,各组合、各位置在成桥状态下上、下弦拱肋轴力整体降低。在成桥状态下,采

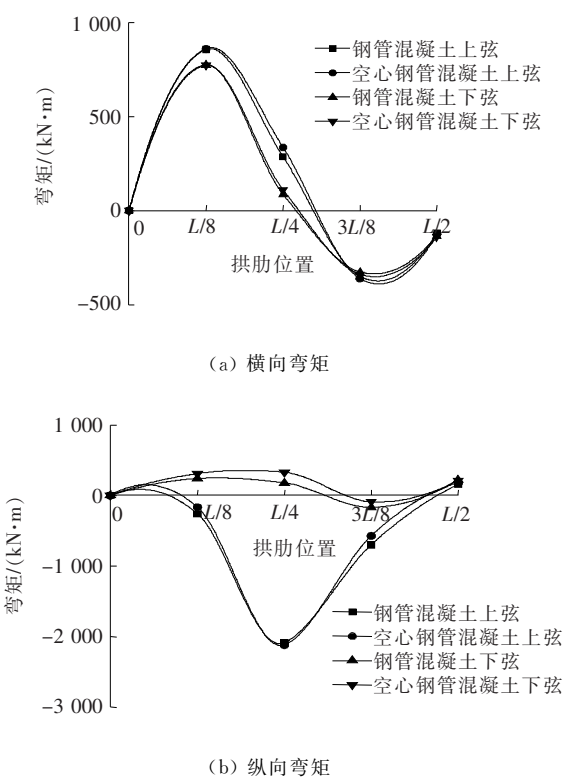


图 9 组合 4 钢管混凝土与空心钢管混凝土  
成桥状态下弯矩对比图

用空心钢管混凝土代替钢管混凝土上、下弦杆轴力变化如表 2 所示,由表 2 可知:各组合都反映出轴力降低的变化情况,其中拱脚处上弦杆轴力减小程度最大,对拱脚下弦杆减小程度最小,而其他位置轴力都有明显降低,平均降低超过 20%。

表 2 空心钢管混凝土代替钢管混凝土后上、下弦杆轴力变化 %

组合	拱脚		L/8		L/4		3L/8		拱顶	
	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦
1	-32.6	-17.7	-19.9	-23.9	-21.6	-26.4	-24.4	-23.5	-27.1	-20.4
2	-31.2	-17.6	-20.7	-25.1	-21.4	-25.8	-24.2	-23.7	-28.7	-22.2
3	-29.9	-17.2	-20.1	-24.0	-20.6	-24.9	-23.2	-23.0	-27.6	-21.6
4	-30.0	-17.2	-19.9	-23.8	-20.3	-24.5	-22.7	-22.9	-27.0	-21.2
平均值	-31.0	-17.4	-20.2	-24.2	-20.9	-25.4	-23.6	-23.2	-27.6	-21.3

注:“-”表示减小,下同。

导致轴力整体下降的直接原因是使用 50%空心率的空心钢管混凝土代替钢管混凝土,减小了主拱圈拱肋整体混凝土用量,从而使该桥梁自重显著降低。总体而言,使用新方案,在成拱之后,减轻了桥梁整体自重,对于拱桥拱肋轴力的减少起到了一定作用,并且拱脚处轴力的降低会导致拱座受到的推力减少,从而

改善拱座施工整体的经济性。  
从图 6~9 可以看到:在成桥状态下各组合绝大部分反映出横向弯矩会因为空心钢管混凝土代替钢管混凝土而增加(仅组合 3、4 状态下 L/8 拱肋下弦杆有两处略微减少)。在成桥状态下,空心钢管混凝土代替钢管混凝土后,上、下弦杆弯矩变化如表 3 所示。

表 3 空心钢管混凝土代替钢管混凝土后上、下弦杆弯矩变化

%

项目		L/8		L/4		3L/8		拱顶	
		上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦
组合 1	横向	8.30	5.10	11.50	7.00	3.80	10.00	8.70	2.86
	纵向	-34.80	-49.10	-1.50	112.80	-21.80	-43.30	-3.60	-3.55
组合 2	横向	0.10	0.80	15.60	36.80	2.20	2.61	8.60	5.00
	纵向	-39.00	86.20	-0.66	120.40	-21.57	-52.72	5.20	-6.50
组合 3	横向	0.20	-0.70	17.20	40.70	2.90	3.20	6.00	5.60
	纵向	-34.10	99.00	0.90	94.80	-18.90	-47.50	11.90	-4.30
组合 4	横向	0.50	-0.30	17.20	27.80	3.40	3.30	5.80	5.40
	纵向	-36.80	28.90	1.60	84.80	-18.10	-46.70	14.60	-3.20

由表 3 可知:空心钢管混凝土替换钢管混凝土后产生一些不利影响,如各组合条件下  $L/4$  拱肋下弦杆纵向弯矩都会增加,均超过 80%;但纵向弯矩在  $3L/8$  拱肋下弦杆均有较大减少,在  $3L/8$  拱肋上弦杆均有减少,在拱顶下弦杆均有较小的减少。拱桥拱脚处弯矩过小,对比意义不大,该处不对拱脚处进行分析。

进一步地,对钢管混凝土拱桥与空心钢管混凝土拱桥在不同组合下各个截面弯矩进行对比,结果如表 4 所示。由表 4 可知:拱桥除在组合 4 情况下  $L/4$  处、组合 1 和 2 情况下拱顶处,空心钢管混凝土拱桥截面弯矩超过钢管混凝土拱桥截面弯矩外,其他位置空心钢管混凝土拱桥截面弯矩均小于钢管混凝土拱桥截面弯矩。

表 4 空心钢管混凝土代替钢管混凝土后拱桥截面弯矩变化

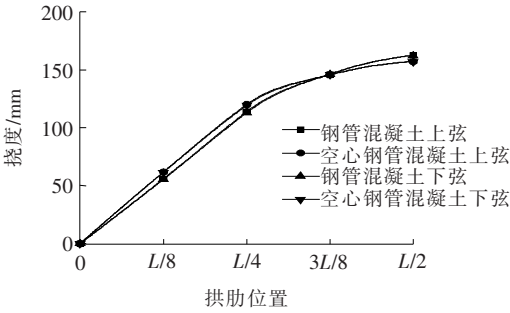
%

组合	L/8	L/4	3L/8	拱顶
1	-50.69	-5.40	-27.54	68.59
2	-50.94	-5.37	-27.36	52.31
3	-45.17	-4.57	-18.93	-34.98
4	-43.43	12.48	-23.54	-55.88

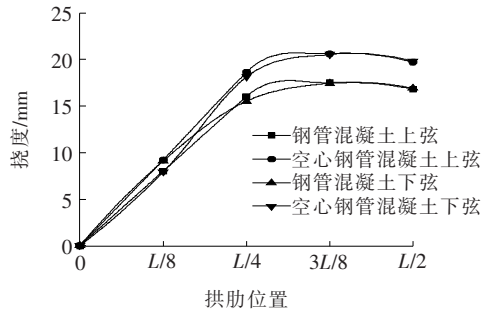
综合两种拱桥各位置上、下弦杆与截面之间弯矩变化可得:空心钢管混凝土拱桥与钢管混凝土拱桥因为自重和刚度不同且这两种因素相互影响,钢管混凝土拱桥自重大、弦杆刚度小,同组合情况下,对比同一个位置弯矩是不相等的,可以明确两种拱桥之间整个主拱圈截面弯矩图不存在一个包裹另一个现象,所以空心钢管混凝土拱桥与钢管混凝土拱桥在不同组合、不同位置各有优势。

运用 SAP2000 有限元软件,对钢管混凝土与空心钢管混凝土按以下 3 种情况进行挠度分析对比:① 一次成桥下恒荷载作用;② 一次成桥下活荷载(汽车荷载)

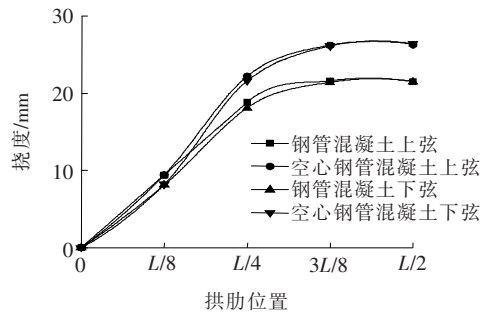
单独作用;③ 一次成桥下活荷载与其他荷载(风荷载和人群荷载)作用。各位置挠度比较如图 10 所示。空心钢管混凝土代替钢管混凝土后各截面挠度变化见表 5。



(a) 情况①



(b) 情况②



(c) 情况③

图 10 钢管混凝土与空心钢管混凝土成桥状态挠度比较



表5 空心钢管混凝土代替钢管混凝土后各截面挠度变化 %

项目	L/8		L/4		3L/8		拱顶	
	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦
情况①	10.70	10.90	5.30	5.50	-0.50	-0.50	-3.40	-3.30
情况②	14.40	14.40	16.20	16.70	17.60	17.70	17.40	17.30
情况③	0.00	0.10	18.40	19.10	21.60	21.70	22.60	22.50

从图 10 和表 5 可见:在 3 种情况下,大部分位置出现空心钢管混凝土挠度大于钢管混凝土的情况, L/4 和 L/8 拱肋处,空心钢管混凝土挠度大于钢管混凝土挠度,但整体而言同一位置空心钢管混凝土和钢管混凝土挠度相差较小,均不超过 7 mm。导致两种方案挠度产生差异的因素在于拱桥自重降低和抗弯能力减弱。其中自重降低与挠度降低呈正相关,混凝土用量降低导致抗弯能力降低,这与挠度降低呈负相关,两者综合影响导致空心钢管混凝土拱肋与钢管混凝土拱肋挠度相差较小。两种方案挠度虽有差异,但采用新方案亦能够满足主拱圈线形要求,对桥梁整体安全性影响不大,拱桥拱脚挠度过小,此处不做比较分析。

4.4 承载能力分析

考虑轴心受压的位置。两种方案拱脚处弯矩过

小,偏心距可忽略不计,均按轴心受压判断。由 JTG/T D65-06-2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》、CECS254:2009《空心钢管混凝土结构技术规程》可知:现有钢管混凝土受压承载力计算公式为:  $\gamma N \leq \varphi_i K_p K_{df} f_{sc} A_{sc}$ , 空心钢管混凝土受压承载力计算公式为:  $N_0 = k_c k_2 A_{h0} \varphi f_h$ 。通过计算,可得该工程实例钢管混凝土与空心钢管混凝土轴心受压承载力如表 6 所示。由表 6 可知:新方案会使受压承载力下降 28.05%。由图 5(c)可知:钢管混凝土拱桥最不利位置(拱脚下弦)轴力为 52.54 MN,空心钢管混凝土拱桥最不利位置(拱脚下弦)轴力为 43.51 MN,两者均小于自身轴心受压承载力,按轴心受压考虑基本满足要求。

表6 受压承载能力比较

项目	受压承载力/MN
空心钢管混凝土( $d=1\ 360\text{ mm}$ , $t=35\text{ mm}$ ,Q345D,C60 空心率 50%)	44.27
钢管混凝土( $d=1\ 360\text{ mm}$ , $t=35\text{ mm}$ ,Q345D,C60)	61.53
减少程度/%	-28.05

考虑拱肋在实际工作中,截面会产生偏心距,按照 JTG/T D65-06-2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》公式:  $\gamma N \leq \varphi_i \varphi_e K_p K_{df} f_{sc} A_{sc}$ , 计算出钢管混凝土偏心受压承载力为 58.14 MN,最不利位置轴力低于该值。而空心钢管混凝土偏心受压需进行偏心受压稳定性验算,计算公式为:当  $\frac{N}{\varphi A_{h0}} \geq 0.2 f_h$ , 使用  $\frac{N}{\varphi N_0} + \frac{\beta_m M}{1.07 M_0 \left(1 - 0.4 \frac{N}{N_E}\right)} \leq 1$  验算,当  $\frac{N}{\varphi A_{h0}} < 0.2 f_h$ , 使用  $\frac{N}{1.4 \varphi N_0} + \frac{\beta_m M}{M_0 \left(1 - 0.4 \frac{N}{N_E}\right)} \leq 1$  验算。经计算各截面中稳定验算结果最大值为  $0.56 < 1$ ,可知钢管混凝土与空心钢管混凝土各截面均满足偏心受压要求。

通过 CECS 254:2009《空心钢管混凝土结构技术规程》、《空心钢管混凝土结构技术规程理解与应用》现有公式:  $M_0 = \gamma_m W_h f_h$ , 可计算出空心钢管混凝土受弯承载力为 13 470 kN·m,由 SAP2000 有限元分析软件得到所有截面弯矩结果均小于该值,受弯承载力满足要求。根据 JTG/T D65-06-2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》要求,当钢管混凝土拱桥偏心受压时,弯矩与轴力同时考虑,计算出偏心受压承载力,其结果满足偏心受压承载力要求即可。

5 结论

(1) 由 SAP2000 有限元仿真分析结果和理论计算结果进行对比可知,拱肋上、下弦杆采用 50% 空心

率空心钢管混凝土与钢管混凝土结构,均能满足承载能力要求。使用空心钢管混凝土代替钢管混凝土后能降低自重,理论计算显示在能够保障拱桥整体安全性能的同时,又能提高桥梁整体施工中的经济性。

(2) 拱肋上、下弦杆采用空心钢管混凝土,上、下弦杆轴力均得到明显降低,其中拱脚上弦杆轴力降低程度最明显,拱肋上、下弦杆  $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 、拱顶处均有较明显减低。拱脚处轴力降低直接使拱座推力大幅度减少,从而能够降低拱座混凝土体积及其施工工期,节约工程成本,产生直接经济效益。

(3) 拱肋上、下弦杆采用空心钢管混凝土代替钢管混凝土,在不同位置上弦杆的弯矩、主拱圈截面弯矩和挠度均有变化。空心钢管混凝土拱肋下弦杆  $L/4$  弯矩增加较为明显,而空心钢管混凝土拱桥主拱圈截面  $L/8$  弯矩减少较为明显。各位置截面弯矩均远小于受弯承载力,挠度变化不明显,对拱桥整体安全性影响不大。

(4) 从空心钢管混凝土代替钢管混凝土作为拱肋的分析结果可知,空心钢管混凝土拱脚处轴力明显比空心钢管混凝土拱桥其他位置大,后续工作可考虑在拱桥拱肋上、下弦杆使用空心钢管混凝土的同时,在最不利位置或关键位置使用钢管混凝土,以保障桥梁的安全性能。

#### 参考文献:

- [1] 钟善桐. 空心钢管混凝土的应用和研究[C]. 第四届全国现代结构工程学术研讨会, 2004.
- [2] 钟善桐. 钢管混凝土结构研究新进展——《空心钢管混凝土结构设计技术规程》简介[J]. 钢结构, 2009(5).
- [3] 张威振, 丁发兴, 方常靖. 空心钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 中外公路, 2018(4).
- [4] 余敏, 查晓雄. 实空心钢管混凝土柱在汽车撞击下的性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2011(1).
- [5] 王红伟, 谢开仲, 郭晓, 等. 大跨度钢管混凝土拱桥拱肋混凝土灌注过程稳定性研究[J]. 世界桥梁, 2019(5).
- [6] 周倩, 周建庭, 张嘉诚, 等. 大跨钢管混凝土拱桥混凝土自

调载灌注方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020(3).

- [7] 顾箭峰. 钢管混凝土拱桥灌注混凝土仿真分析研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.
- [8] 周水兴, 张敏, 王小松, 等. 钢管初应力对钢管砼拱桥承载力影响非线性分析[J]. 计算力学学报, 2010(2).
- [9] 陈鸿福. 钢管混凝土拱桥关键力学性能分析研究[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2014.
- [10] 曹志光. 初应力对钢管混凝土拱桥极限承载力的影响研究[D]. 中南大学硕士学位论文, 2010.
- [11] 涂光亚, 袁航. 大跨度钢管混凝土拱桥成桥状态钢管应力优化研究[J]. 中外公路, 2020(2).
- [12] 李剑桥. 基于粒子群算法大跨径上承式钢管混凝土拱桥优化分析[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [13] 单继栋. 大跨径钢管混凝土拱桥合理拱轴线形研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2018.
- [14] 柳江涛. 缆索吊装钢管混凝土拱桥拱肋的线形问题研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2011.
- [15] Xuesong Zhang, Ningyi Liang, Xiaohong Lu, et al. Optimization Method for Solving the Reasonable Arch Axis of Long-Span CFST Arch Bridges[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2 019(1): 1-13.
- [16] Jing-xian Shi, Zhuo-yin Jiang, Qing-hua Ding. Simulation Calculation and Monitoring of Deformation of Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridge[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 423(1): 21-28.
- [17] 卢伟升, 颜东煌. 大跨度钢管混凝土拱桥拱肋施工误差影响分析[J]. 中外公路, 2015(3).
- [18] JTG/T D65-06-2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [19] CECS 254:2009 空心钢管混凝土结构技术规程[S].
- [20] 查晓雄, 钟善桐, 徐国林. 空心钢管混凝土结构技术规程理解与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [21] 蒋玮, 李莘哲. 钢管拱桥缆索吊装施工中主索结构状态高精度计算[J]. 中外公路, 2020(2).
- [22] 孙智慧, 滕乐, 秦健淇. 大跨度钢管混凝土桁拱桥拱脚外包段受力分析与优化设计[J]. 中外公路, 2020(4).