

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

孙智慧¹, 滕乐^{2*}, 秦健淇²

(1. 内江职业技术学院, 四川 内江 641000; 2. 西南交通大学)

摘要: 为研究大跨度钢管混凝土桁拱桥拱脚结构的复杂构造和受力问题, 该文以一座主跨为 280 m 钢管混凝土桁拱桥为背景, 采用 Midas/FEA 建立基于拱脚和桥面板与钢横梁详细组合单元的全桥模型, 详细计算了外包混凝土拱脚结构各构件在恒载和最不利车道荷载作用下的应力响应规律, 分析了外包混凝土对拱脚各构件的受力影响。进一步对比分析了加大拱脚钢管混凝土构件直径和加厚拱脚外包钢管壁厚两种优化方案对无外包混凝土拱脚各构件的受力影响规律。计算结果表明: ① 外包混凝土可有效减小拱脚各构件的应力; ② 对于无外包混凝土拱脚结构, 拱脚下弦杆是控制设计的关键; ③ 增加钢管混凝土拱脚上下弦杆的管径和外包钢管壁厚均可有效减小无外包混凝土拱脚下弦杆的应力; ④ 考虑施工效率和成本, 实际工程中建议采用增加钢管壁厚的无外包混凝土拱脚设计方案。

关键词: 钢管混凝土桁拱桥; 拱脚外包混凝土; 结构优化; 受力分析

1 引言

钢管混凝土组合结构因具有极限承载能力高、整体和局部稳定性好、便于施工、造价低、耗材少等优点, 近年来被广泛应用在桥梁建设中。钢管混凝土桥拱脚固结点几何形状和受力相当复杂, 且不具有普遍性, 另外, 桁架拱的主管和支管通常采用焊接的方式连接, 由于主拱上、下弦杆为钢管混凝土组合结构, 而支管为空钢管结构, 导致在主管和支管连接的节点处容易产生应力集中和疲劳问题, 此类桥型的钢混构件和拱脚局部受力问题因此成为学者们研究的热点。

刘俊杰等采用 Midas 系列软件建立拱脚局部模型, 研究了主跨为 120 m 钢管混凝土拱脚局部受力问题, 分析了拱脚在不利工况下的应力状态; 李金凯建立钢管混凝土梁组合桥的全桥模型以及拱脚实体模型, 详细分析了拱脚的受力状态, 并对拱脚工字钢和钢箱两种锚固方式进行了对比分析; 杨高等采用 Ansys 建立拱脚三维有限元模型, 分析了下承式钢管混凝土拱桥拱脚在拱肋张拉吊杆前后两种工况下的应力分布规律; 吴刚对三拱肋钢管混凝土系杆拱桥进行了数值仿真研究, 分析了不同工况下拱脚区域的应力分布规律; 陈金龙等采用数值计算的方法研究了钢管混凝土拱桥拱肋与预应力混凝土系梁连接部位在不同荷载工

参考文献:

- [1] 李传习, 邹桂生. 法国米约高架桥——7 塔斜拉桥的设计与施工[J]. 世界桥梁, 2005(4).
- [2] 赵人达, 张双洋. 桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J]. 中国公路学报, 2016(2).
- [3] 邵厚坤, 周以诚, 等. 用顶推法施工的狄家河桥[J]. 铁道学报, 1979(1).
- [4] 蔺锡九. 逐段顶推架桥技术在我国的应用和发展[J]. 交通科学技术, 1991(8).

- [5] 周光强, 向剑, 等. 杭州九堡大桥多跨连续组合拱桥步履式整体顶推技术[J]. 施工技术, 2011(5).
- [6] 刘迎春, 杨云安, 等. 波形钢腹板 PC 连续梁桥顶推施工过程中受力分析[J]. 公路, 2015(7).
- [7] 田启军, 陈湘林. 顶推施工中导梁的应用与锚固措施的优化[J]. 中外公路, 2003(6).
- [8] 田仲初, 张华年. 顶推施工中系梁的合理配置[J]. 世界桥梁, 2005(4).

收稿日期: 2020-05-10(修改稿)

作者简介: 孙智慧, 男, 硕士, 讲师. E-mail: 376789987@qq.com

* 通信作者: 滕乐, 男, 博士研究生. E-mail: lth74@mst.edu

况下的受力情况;董晓兵等采用两步有限元法分析了下承式钢管混凝土系杆拱桥的局部应力,并对此做了综合评价;孙潮等通过有限元分析和光弹试验,研究了主跨为 100 m 下承式拱梁组合桥拱脚节点的应力分布规律,并提出了相应的施工控制措施。

目前对钢管混凝土拱桥拱脚局部受力问题的研究关注点集中在拱脚的受力状态上,鲜有学者针对拱脚的复杂受力状态提出相应的优化方案并对优化方案进行论证。针对现有研究的不足,该文依托某跨度 280 m 公路钢管混凝土中承式桁拱桥工程,采用有限元软件 Midas/FEA,建立基于拱脚和桥面板与钢横梁详细组合单元的全桥模型,分析在恒载和车道荷载作用下拱脚各构件的受力特性,在此基础上考虑施工工艺,提出拱脚优化方案,并对优化方案进行系统论证。

2 工程概况

某钢管混凝土拱桥为中承式桁架公路拱桥,跨度 280 m,桥型布置图如图 1 所示。桥宽 33.8 m,桥面行车道采用连续混凝土 T 形梁,下部基础形式为重力式明挖扩大基础,桥面布置为双向四车道,两侧均有一个人行道。主拱为等截面钢管混凝土桁架,吊杆横梁为钢和混凝土组合梁,立柱横梁为钢横梁;吊杆采用低应力防腐蚀索体。拱脚构造如图 2 所示,采用拱桁外包混凝土矩形截面,矩形截面尺寸为宽 2.8 m、高 6.0 m,外包段从拱座起算 1.2 m 范围内采用实心截面,其余 12.21 m 采用箱形截面。

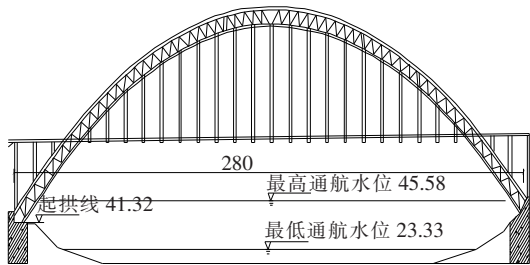


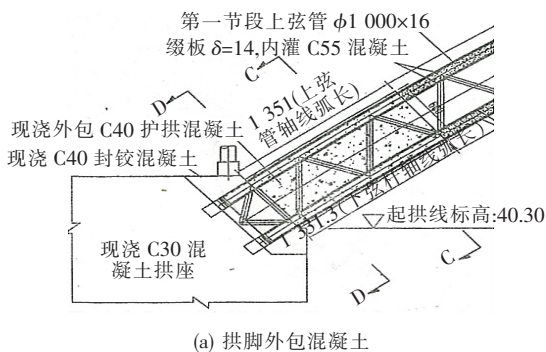
图 1 主桥桥型布置(单位:m)

3 有限元仿真计算

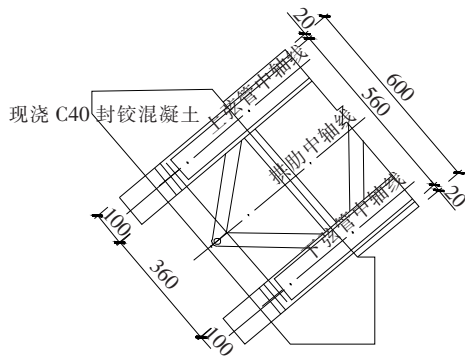
3.1 全桥组合单元模型

在钢管混凝土桁拱桥中,拱脚处有外包混凝土、钢管、内填混凝土和钢腹杆等构件,结构相对复杂。在实际受力状态下,拱脚处结构同时受到较大轴力和弯矩

的作用,受力情况也非常复杂。而采用杆系单元难以准确模拟最不利工况下拱脚各构件的应力。为了更准确地得到钢管混凝土拱桥拱脚处的受力状态,采用 Midas/FEA 建立拱脚局部细化的全桥组合单元模型。



(a) 拱脚外包混凝土



(b) 拱脚及其拱座

图 2 拱脚细部构造图(单位:cm)

在 Midas/FEA 全桥组合单元模型中,采用实体单元模拟拱脚部位的拱座、外包混凝土、缀板内混凝土以及钢管内混凝土。另外桥面板、桥面板与钢横梁之间的混凝土也采用实体单元;钢管和吊杆分别采用析出单元和桁单元模拟;采用梁单元模拟拱桁、腹杆以及横向联系;钢腹板和钢横梁采用板单元模拟。

3.2 模型材料参数

钢管混凝土桁拱桥预应力束采用 1860 钢绞线,桁架拱主桁和横梁采用 Q345C 钢管,钢管型号为 $\phi 1\ 000\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ (拱脚段,其余为 $\delta = 14\text{ mm}$),加劲肋采用 Q234C 钢材,主桁、横梁以及立柱内混凝土分别采用 C55、C50 和 C30 混凝土,主桥横梁位于工字形钢板梁顶部,在预制工字形钢板梁顶部和现浇混凝土结合面设置剪力钉,吊杆材质为 1570 钢绞线,纵向间距为 10 m,双吊杆之间纵向间距为 1.37 m,全桥共 68 根吊杆,全桥有限元模型构件材料参数取值如表 1 所示。

3.3 模型荷载取值

在全桥梁单元模型和全桥组合单元模型中,二期恒载采用均布荷载,大小为 158.1 kN/m。另外,还在

表 1 模型材料参数

构件	材料	线胀系数/ [$\times 10^{-5} (\text{℃})^{-1}$]	弹性模量/ ($\times 10^4 \text{ MPa}$)	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比
预应力束	1 860 钢绞线	1.2	19.50	78.5	0.3
桁架拱主桁、横梁	Q345C 钢管	1.2	20.60	78.5	0.3
主桁内混凝土	C55 混凝土	1.0	3.55	25.0	0.2
横梁内混凝土	C50 混凝土	1.0	3.45	25.0	0.2
立柱	C30 混凝土	1.0	3.00	25.0	0.2
吊杆	1 570 钢绞线	1.2	19.50	78.5	0.3

两个全桥模型中施加汽车荷载,汽车荷载根据公路Ⅰ级荷载中的车道荷载取值,其中集中荷载标准值 P_k 取 360 kN,均布荷载标准值 q_k 取 10.5 kN/m。全桥组合单元模型从全桥梁单元模型中,提取出拱脚下弦杆受压最大时,车道荷载加载布置情况。全桥梁单元模型和全桥组合单元模型车道荷载布置如图 3 所示。人群荷载按照规范取值,荷载集度为 2.4 kN/m²。

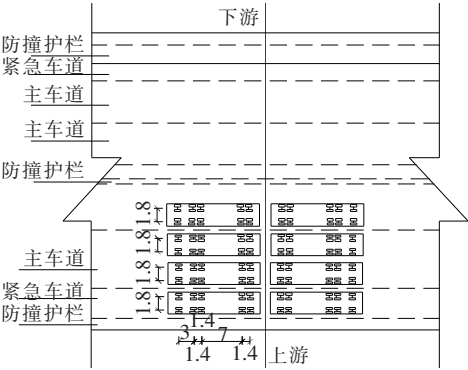


图 3 车道荷载布置图(单位:m)

3.4 有外包混凝土拱脚应力分析

在恒载和恒载+车道荷载两种不同荷载工况作用下,分别对全桥有限元模型展开有限元计算。以恒载作用为例,拱脚各构件的最大应力云图如图 4 所示。事实上无论是恒载作用下,还是恒载加车道荷载组合作用下,拱脚各构件的最大和最小主应力空间分布表现出以下共性:① 在最大主应力方面,拱脚上弦杆钢管及其外包混凝土的最大主应力最大值均出现在拱桁底部,而下弦杆钢管和其外包混凝土以及主拱拱脚外包混凝土的最大主应力最大值均出现在拱桁与外包混凝土结合段;② 在最小主应力方面,拱脚上弦杆钢管及其外包混凝土的最小主应力最大值均出现在拱桁与外包混凝土结合段,而下弦杆钢管和其外包混凝土的最小主应力最大值则出现在实体拱桁与梁单元拱桁结合段,主拱拱脚外包混凝土的最小主应力最大值位于

外包混凝土底部;③ 对于钢腹板,其最大主应力和最小主应力的最大值均位于拱桁与钢腹板连接处。

进一步地,将拱脚各构件的应力计算结果汇总于表 2,表中,括号内外数值分别为恒载+车道荷载共同作用和恒载作用下的应力结果。由表 2 可知:结构恒载作用下,主拱拱脚附近为负弯矩。主拱受力为压弯模式;弯矩作用下拱脚上弦杆钢管(混凝土)受拉大于下弦钢管(混凝土),叠加轴向压应力后,其最大主应力(最大拉应力)应高于下弦杆,最小主应力(最大压应力)应低于下弦杆;钢腹杆主应力高于上下弦钢管的原因是其采用 Q345C 空钢管,没有混凝土分担,故其抗弯刚度和轴向刚度低于上下弦杆钢管。

4 拱脚无外包混凝土可行性探讨

钢管混凝土桁拱桥拱脚外包混凝土的作用主要对钢管起保护层作用,防止钢管锈蚀,提高钢管混凝土的耐久性,虽然拱脚外包混凝土在一定程度上可以保护主桁,但其在实际应用过程中同样存在不可忽视的缺陷:① 拱脚外包混凝土施工工序繁琐,导致施工工期加长,增加工程成本;② 拱脚外包混凝土实际受力复杂,施工过程中,拱脚某些构件容易在外包混凝土湿重的作用下产生大变形或者因为杆件被压溃而失稳。实际上,钢管混凝土拱桥的拱脚锈蚀保护问题可以通过喷涂防锈涂料来解决,而且从前文对拱脚有外包混凝土的全桥模型计算结果可知,拱脚外包混凝土受力较小。因此,从提高施工便捷性,降低工程成本和结构局部失稳风险的角度出发,针对依托工程,开展钢管混凝土拱桥拱脚无外包混凝土的可行性探讨。

4.1 拱脚无外包混凝土方案

首先在不改变原工程其他设计参数的基础上,计算该钢管混凝土拱桥在拱脚无外包混凝土条件下结构的受力情况,恒载+车道荷载工况下拱脚主要构件应

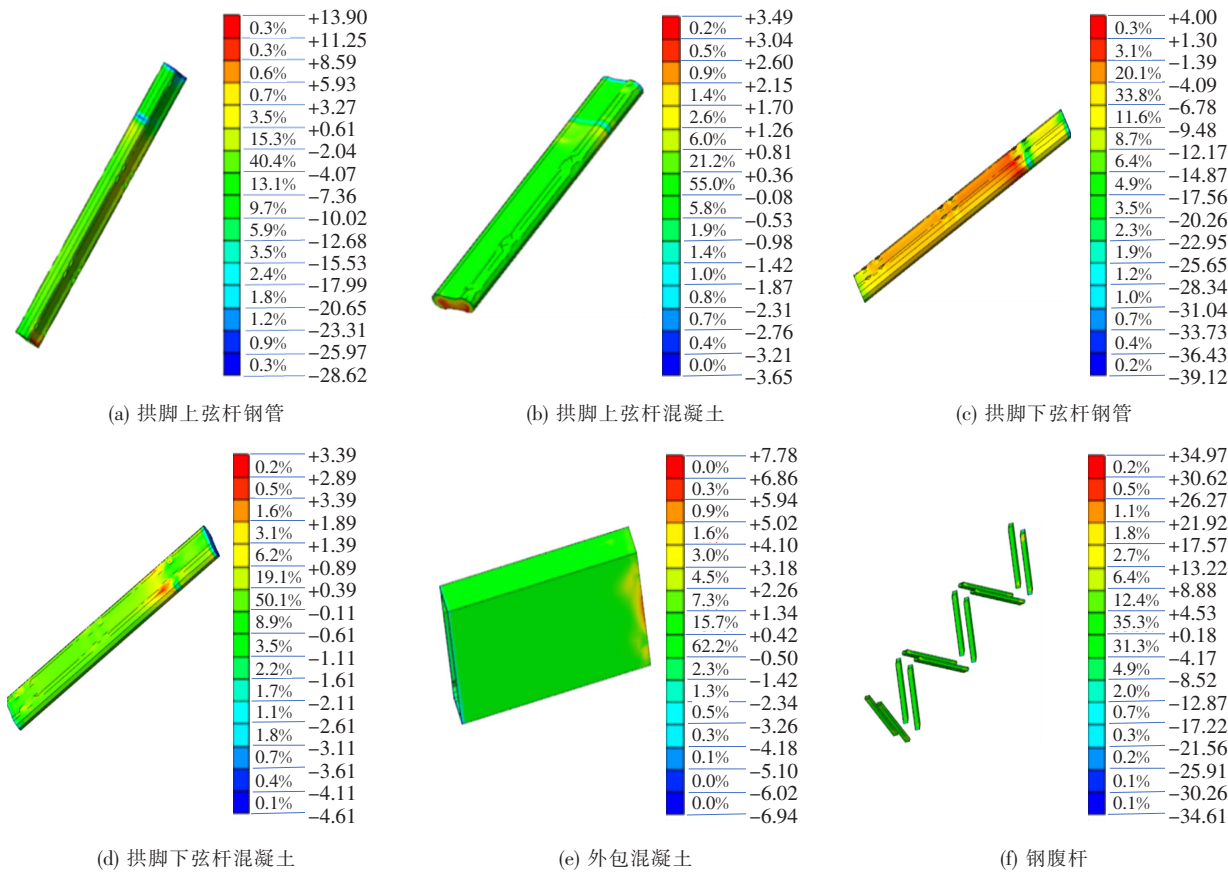


图 4 恒载作用下拱脚主要构件最大主应力云图(单位:MPa)

表 2 拱脚各构件应力计算结果 MPa

构件	恒载(恒载+车道荷载)		
	最大主应力	最小主应力	换算应力
上弦杆钢管	13.90	-104.51	100.29
	(21.36)	(-143.85)	(131.49)
下弦杆钢管	4.00	-132.71	119.47
	(4.87)	(-215.61)	(192.00)
上弦杆混凝土	3.49	-17.53	—
	(5.47)	(-24.31)	
下弦杆混凝土	3.39	-24.40	—
	(4.03)	(-35.72)	
拱脚外包混凝土	7.78	-28.77	—
	(9.86)	(-47.35)	
钢腹杆	34.97	-93.04	96.39
	(75.48)	(-155.47)	(139.74)

表 3 无外包混凝土拱脚关键构件应力最大值 MPa

构件	最大主应力	最小主应力	换算应力
上弦杆钢管	51.81	-194.96	175.54
上弦杆混凝土	9.71	-26.91	—
下弦杆钢管	13.75	-269.96	237.67
下弦杆混凝土	11.42	-48.77	—

$$\gamma N \leq \varphi_1 K_p K_d f_{sc} A_{sc} \quad (1)$$

$$\gamma N \leq \varphi_1' \varphi_e' \sum (K_p^i K_d f_{sc} A_{sc}) \quad (2)$$

式中: γ 为钢管混凝土拱桥结构重要性系数; N 为构件轴力的设计值; φ_1' 为长细比折减系数; φ_e' 为弯矩折减系数; K_p^i 为钢管初应力折减系数; K_d 为混凝土脱空折减系数; f_{sc} 为钢桁架轴心抗压强度设计值; A_{sc} 为钢桁架组合截面面积。

拱脚无外包混凝土受压构件承载力验算结果如表 4 所示。

表 4 表明: 仅在原设计的基础上去掉拱脚外包混凝土而不改变其他设计参数, 拱脚下弦杆钢管在轴心荷载、偏心荷载作用下的内力验算值均小于设计值, 安全储备不够, 可见外包混凝土对结构受力起到了一定

力计算结果如表 3 所示。对表 3 的计算结果按式(1)、(2)作进一步验算, 分析原设计在去掉拱脚外包混凝土后, 桥梁在恒载和车道荷载作用下的受力性能。

表 4 拱脚无外包混凝土方案组合荷载作用下
关键构件承载力验算结果

截面	承载力/kN
设计值(上弦杆)	49 912.92
设计值(下弦杆)	63 285.47
验算值(轴心)	56 778.92
验算值(偏心)	50 289.64

作用,仅去掉拱脚外包混凝土而不对原设计做优化的方案不可行。为此,需展开进一步探讨,在原设计去掉拱脚外包混凝土的基础上,对拱脚构件进行优化,分析是否存在不采用外包混凝土,又能保证结构具有充足的安全储备的拱脚设计方案。

4.2 无外包混凝土方案优化

在前文分析的基础上,对拱脚无外包混凝土设计提出以下两种优化方案,拱脚优化截面如图 5 所示。

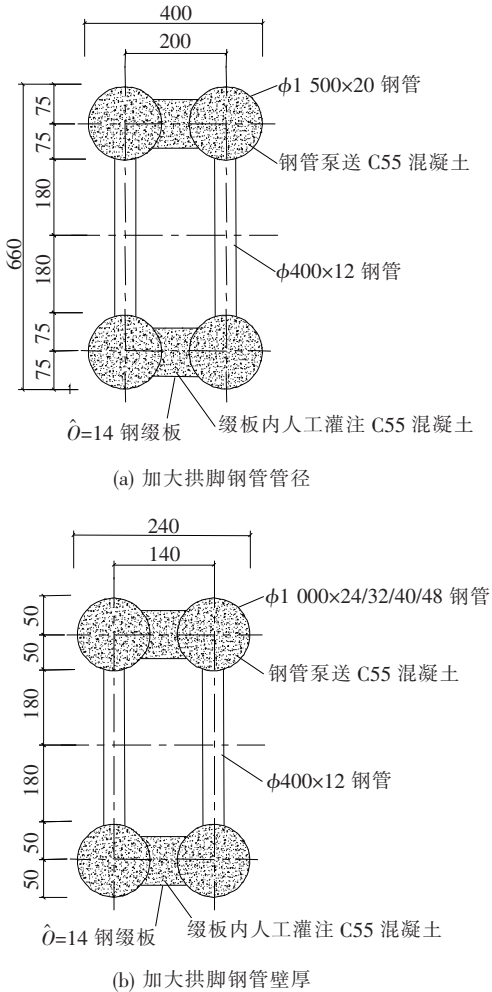


图 5 无外包混凝土方案优化拱脚截面图
(单位:除钢管直径和壁厚为 mm 外,其余:cm)

方案 1:无外包混凝土加大拱脚钢管管径方案。该方案核心在于增大拱脚起拱线 1 000 cm 范围内钢管管径,同时增加拱脚管内混凝土面积,优化后的拱脚采用直径为 150 cm 的弦杆,外包钢管壁厚度取 20 mm,起拱线 1 000~1 800 cm 范围内弦杆直径由 150 cm 线性减少至 100 cm。

方案 2:无外包混凝土加大拱脚钢管壁厚方案。该方案只增加钢管厚度而不增加拱脚混凝土体积,优化后的拱脚弦杆直径为 100 cm,在起拱线 400、400~700、700~1 000、1 000~1 300 cm 4 个不同范围内的外包钢管壁厚分别为 48、40、32 和 24 mm,该方案可以避免在拱脚设置变截面拱桁,减小施工难度。两种方案的拱脚关键构件应力计算结果见表 5、6,表中括号内的数值表示方案 2 的计算结果,而括号外则表示方案 1 的计算结果。

表 5 无外包混凝土不同优化方案的拱脚关键

构件	构件应力最大值		MPa
	最大主应力	最小主应力	
上弦杆(钢管)	25.82	-86.06	76.56
	(36.98)	(-140.48)	(130.87)
上弦杆(混凝土)	8.76	-15.53	—
	(9.21)	(-24.89)	
下弦杆(钢管)	20.51	-190.23	169.49
	(14.65)	(-199.20)	(173.72)
下弦杆(混凝土)	10.96	-34.71	—
	(11.68)	(-36.83)	

表 6 相对无外包混凝土方案,优化方案的拱脚

构件	关键构件应力降幅		MPa
	最大主应力降幅	最小主应力降幅	
上弦杆(钢管)	25.99	108.9	98.98
	(14.83)	(54.48)	(44.67)
上弦杆(混凝土)	0.95	11.38	—
	(0.50)	(2.02)	
下弦杆(钢管)	6.76	79.73	68.18
	(0.90)	(70.76)	(63.95)
下弦杆(混凝土)	0.46	14.06	—
	(0.26)	(11.94)	

由表 5 可知:拱脚关键构件中,下弦杆的压应力水平最大,其钢管壁和内填混凝土的最大压应力值分别为 190.03 和 34.91 MPa。由表 6 可知:与仅去除拱脚

外包混凝土方案相比,优化方案 1 拱脚下弦杆钢管和内填混凝土最大压应力分别下降 79.73 和 14.06 MPa,降幅为 29.56%和 28.71%;而方案 2 对应的最大压应力则分别为 70.76 和 11.94 MPa,降幅分别为 26.30%和 25.20%。由此可见,去除拱脚外包混凝土后,加大拱脚钢管管径或者壁厚可以有效地降低拱脚附近弦杆钢管及管内混凝土的应力水平。

虽然优化方案 1 的最大压应力降幅整体上略大于优化方案 2,但会因为拱脚段钢管直径的增加,拱脚附近拱桥截面为变截面,导致施工难度增加。因此,可认为方案 2 优于方案 1。进一步对优化方案 2 的拱脚关键构件进行承载力验算,结果如表 7 所示。

表 7 优化方案 2 关键构件承载力验算

截面	承载力/kN
设计值(上弦杆)	50 900.97
设计值(下弦杆)	64 561.37
验算值(轴心)	70 356.39
验算值(偏心)	68 953.13

由表 7 可知:与仅去除拱脚外包混凝土的方案相比,优化方案的拱脚下弦杆钢管在轴心荷载、偏心荷载作用下的内力验算值均大于设计值,结构安全储备明显提高。

综上所述,将现有的拱脚外包混凝土设计方案优化为无外包混凝土方案具有理论上的可行性,而采用去除拱脚外包混凝土并加大拱脚钢管壁厚可以在保证结构具有充足的安全储备的同时,提高施工效率,降低工程成本。

5 结 论

通过数值仿真的手段,建立基于拱脚和桥面板与钢横梁详细组合单元的全桥模型,研究了某跨度钢管混凝土中承式桁拱桥拱脚的受力特性,并探讨了拱脚无外包混凝土的可行性,得到以下主要结论:

(1) 钢管混凝土拱桥拱脚固结点结构构造和受力均很复杂,构件连接节点处应力集中现象明显;在结构恒载作用下,主拱拱脚附近为负弯矩;主拱受力为压弯模式;弯矩作用下拱脚上弦杆钢管(混凝土)受拉大于下弦钢管(混凝土),叠加轴向压应力后,其最大主应力(最大拉应力)应高于下弦杆,最小主应力(最大压应力)应低于下弦杆。

(2) 外包混凝土结构可有效减少拱脚各构件的受

力。去掉外包混凝土结构导致拱脚上弦杆钢管和混凝土最大主应力增幅分别为 140%和 77%,下弦杆钢管和混凝土最大主应力增幅分别为 182%和 183%。

(3) 增大无外包混凝土拱脚结构的钢管混凝土管径和钢管壁厚可有效减少拱脚各构件的应力。增大钢管混凝土管径导致拱脚下弦杆钢管和混凝土的应力降幅为 30%和 29%;增加钢管壁厚导致拱脚下弦杆钢管和混凝土的应力降幅分别为 26%和 25%。基于施工可行性和经济性,增大壁厚方案被实际施工采用。

参考文献:

- [1] 陈宝春. 拱桥技术的回顾与展望[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009(1).
- [2] 刘俊杰, 贾新聪. 120 m 钢管混凝土拱桥拱脚局部应力分析[J]. 四川建材, 2018(12).
- [3] 李金凯. 钢管混凝土梁拱组合桥拱脚局部应力分析[J]. 铁道勘察, 2017(6).
- [4] 杨高平, 张霆浩. 下承式钢管混凝土系杆拱桥拱脚局部应力分析[J]. 南阳理工学院学报, 2014(3).
- [5] 吴刚. 三拱肋钢管混凝土系杆拱桥拱脚局部应力分析[J]. 山西建筑, 2014(8).
- [6] 陈金龙, 乔建东. 大跨度钢管混凝土拱桥拱脚局部应力分析[J]. 湖南交通科技, 2010(1).
- [7] 董晓兵, 石磊. 下承式叠合梁钢管混凝土拱桥拱脚局部应力分析[J]. 交通科技, 2010(3).
- [8] 孙潮, 陈宝春, 张伟中, 等. 钢管混凝土拱梁组合桥拱脚结点应力分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2004(2).
- [9] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] 刘滔, 刁砚. 中承式钢管混凝土拱桥拱脚应力分析[J]. 四川建材, 2019(2).
- [11] 魏俊锋. 下承式钢管混凝土刚架系杆拱桥拱脚应力分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016(6).
- [12] 鲁勤. 提篮式钢管混凝土系杆拱桥拱脚结点应力分析[J]. 交通科技, 2018(6).
- [13] 王楚杰. 分环成型钢管混凝土劲性骨架主拱圈及其拱脚受力分析[D]. 广西大学硕士学位论文, 2018.
- [14] 刘涛涛. 钢管混凝土拱桥拱脚开裂原因分析[J]. 山西建筑, 2017(6).
- [15] 邓风亭. 下承式钢管混凝土系杆拱桥拱脚裂缝及其控制对策研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2016.
- [16] 阳瑞. 钢管混凝土系杆拱桥拱脚局部分析[J]. 四川水泥, 2019(3).
- [17] 闫广鹏. 大跨径钢管混凝土拱桥拱脚应力分析[J]. 交通科技, 2017(3).
- [18] 张洪金. 下承式钢管混凝土组合拱桥拱脚节点设计[J]. 公路, 2017(12).