

基于 AHM-TOPSIS 法的空间 Y 形钢箱拱桥拱肋吊装方案比选*

魏 驰¹, 谢可辉¹, 杨怀盼¹, 陈其达², 赵嘉健³

(1.长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2.中铁二十局集团第五工程有限公司, 云南 昆明 650200; 3. 中铁建安工程设计院有限公司, 陕西 西安 710024)

[摘要] 将属性层次分析法与 TOPSIS 法相结合, 能考虑不同评价指标的权重, 提高评价的科学性和客观性, 充分利用属性层次模型 (AHM) 的优点, 避免 TOPSIS 法中权重分配可能出现的主观性影响。泾河大桥的拱圈分为独拱段和双拱段, 拱圈在空间上呈 Y 字形。针对 Y 形主、副拱肋缆索吊装问题, 开展了主、副拱分开吊装及主、副拱同时吊装 2 种拱肋吊装施工方案研究, 基于 AHM-TOPSIS 法对空间 Y 形钢箱拱桥 2 种施工方案进行比较, 通过桥梁有限元计算, 模拟分析 2 种吊装方案, 分别得到对应施工吊装方案对桥梁应力、结构稳定性等方面的影响, 对比选出最佳施工方案: 主、副拱分开吊装有明显优越性。因此, 建议空间 Y 形钢箱拱桥施工时, 选择主、副拱分开吊装施工方案。

[关键词] 桥梁工程; 拱桥; Y 形钢箱拱桥; 吊装; AHM-TOPSIS 法; 方案; 施工技术

中图分类号: U445.4; U448.22 文献标识码: A 文章编号:

*陕西省交通运输厅项目: V 形峡谷大跨度空间 Y 型钢箱肋拱桥施工关键技术研究(21-62k)

[作者简介] 魏 驰, 硕士研究生, E-mail: 1105733508@qq.com

[收稿日期] 2023-08-11

Comparison and Selection of Arch Rib Hoisting Schemes for Spatial Y-shaped Steel Box Arch Bridge Based on AHM-TOPSIS Method

WEI Chi¹, XIE Kehui¹, YANG Huaipan¹, CHEN Qida², ZHAO Jiajian³

(1. School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. China Railway 20th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China; 3. China Railway Jian'an Engineering Design Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: The combination of attribute analytic hierarchy process and TOPSIS can consider the weights of different evaluation indicators, improve the scientificity and objectivity of evaluation, make full use of the advantages of AHM, and avoid the possible subjective influence of weight allocation in TOPSIS. The arch circle of Jinghe Bridge is divided into single arch section and double arch section, and the arch circle is Y shape in space. Aiming at the problem of Y-shaped main-secondary arch rib cable hoisting, research was carried out on the construction scheme of separate hoisting and simultaneous hoisting for the main and secondary arches. Based on AHM-TOPSIS method, the two construction schemes of spatial Y-shaped steel box arch bridge were compared, and the two hoisting schemes were simulated and analyzed through the bridge finite element calculation. The influence of the corresponding construction hoisting scheme on the stress and structural stability of the bridge is obtained respectively, and the best construction scheme is selected by comparison: The main and secondary arches hoisting separately has obvious advantages. Therefore, it is suggested that the construction scheme of the Y-shaped steel box arch bridge should be selected to lift the main and secondary arches separately.

Keywords: bridges; arch bridges; Y-shaped steel box arch bridges; hoisting; AHM-TOPSIS method; schemes; construction

0 引言

空间 Y 形拱肋下承式拱桥是一种新型拱桥造

型, 摒弃了传统拱桥二维拱肋结构形式, 采用单双主、副拱联合受力新模式, 且为空间三维曲线拱,

这种异形拱在国内中下承式拱桥建设中尚属首例。由于缺少这种新型结构的施工经验，在其施工方案的选择上也存在很大分歧，运用传统的专家打分法或层次分析法等进行方案评价时，或多或少地存在不同程度的缺陷。属性层次模型（AHM）相比于传统层次分析法有很大改进，它不仅继承了层析分析法的优点，还无须计算特征向量及进行一致性检验，是一种计算简单、运用简便的权重计算方法。逼近理想解排序法（TOPSIS）通过计算评判对象的目标值与理想值间的欧氏距离，对各评判方案与理想最佳方案间的贴近程度进行排序，形成决策依据。两者结合，不仅具有 TOPSIS 法的优点，并且优化了原有的权重计算方式，从而得到一种更加简便科学的方案评价模型^[1]。本文将属性层次分析法和逼近理想解排序法相结合，建立空间 Y 形拱肋吊装施工阶段的施工方案比选模型，进行 Y 形拱肋施工方案比选。

1 AHM-TOPSIS 综合评价体系构建

1.1 AHM 算法赋予权重

AHM 相较于 AHP（层次分析法），不必进行层级指标间的一致性检验，具有很强的易操作性，

表 1 AHP 中 1~9 比例标度的含义

Table 1 The meaning of 1~9 proportional scales in AHP

标度 a_{ij}	含义
1	元素 i 与元素 j 同等重要
3	元素 i 比元素 j 略微重要
5	元素 i 比元素 j 明显重要
7	元素 i 比元素 j 非常重要
9	元素 i 比元素 j 极端重要
2, 4, 6, 8	为上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 i 与元素 j 的重要性之比为 a_{ij} ，则元素 j 与元素 i 的重要性之比 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

1.2 TOPSIS 综合评价模型体系的构建

TOPSIS 是一种常用的综合评价方法，能充分利用原始数据的信息，其结果能精确反映各评价方案间差距^[4-7]。假设有 m 个方案，每个方案中又有 n 个评判标准，则其初始判断矩阵为：

$$A = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于方案内的评价指标间可能在量纲等方面存

用相对判断的概念使得计算过程更简易^[2]。AHM 将 AHP 中的比例标度进行转换，构建比较判断矩阵

$$U = (U_{ij})_{n \times n}。$$

$$u_{ij} = \begin{cases} \frac{\beta k}{\beta k + 1} & a_{ij} = k \\ \frac{1}{\beta k + 1} & a_{ij} = \frac{1}{k} \\ 0 & a_{ij} = 1, i = j \\ 0.5 & a_{ij} = 1, i \neq j \end{cases}, u_{ij} \text{ 满足: } \begin{cases} u_{ij} + u_{ji} = 1 (i \neq j) \\ u_{ij} = 0 & (i = j) \end{cases} \quad (1)$$

式中： a_{ij} 为根据表 1 所得出的第 i 元素比第 j 元素

的相对重要程度； $\beta \geq 1$ ，通常取 $\beta = 1$ 或 2 ， $\beta \rightarrow \infty$

时，得到极端情况，在此取 $\beta = 2$ 。

根据 AHM 判断矩阵计算出属性权重

$w_G = (w_{Gu_1}, w_{Gu_2}, \dots, w_{Gu_n})^T$ ，而其相对属性权重向量

$$w_{Gu_i} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n u_{ij} \quad [3]。$$

在极大不同，因此需对各评价指标进行无量纲处理，将其标准化。

相对隶属度公式为：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$$

对于负相关指标为：

$$y'_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$$

相对隶属度矩阵为:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据 AHM 判断矩阵计算出属性权重

$w_G = (w_{Gu_1}, w_{Gu_2}, \cdots, w_{Gu_n})^T$, 得到加权标准化决策矩阵:

$$Z = \begin{bmatrix} y_{11}w_{Gu_1} & y_{12}w_{Gu_2} & \cdots & y_{1n}w_{Gu_n} \\ y_{21}w_{Gu_1} & y_{22}w_{Gu_2} & \cdots & y_{2n}w_{Gu_n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{m1}w_{Gu_1} & y_{m2}w_{Gu_2} & \cdots & y_{mn}w_{Gu_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m1} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

通过计算正负理想解:

$$\begin{cases} C^+ = \{(\max c_{ij} | j \in J_1), (\min c_{ij} | j \in J_2)\} \\ C^- = \{(\min c_{ij} | j \in J_1), (\max c_{ij} | j \in J_2)\} \end{cases} \quad (5)$$

得到评价对象与理想解间的欧式距离:

$$D = \begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2} \end{cases} \quad (6)$$

评价评判对象与正理想解的贴近度:

$$E_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (7)$$

式中: $E_i^+ \in [0,1]$ 。

E_i^+ 越大时, 结果越趋于正理想解, 反之则趋于负理想解^[8-10]。最终表示方案的综合评价结果向量为 $F = W \times E$ 。

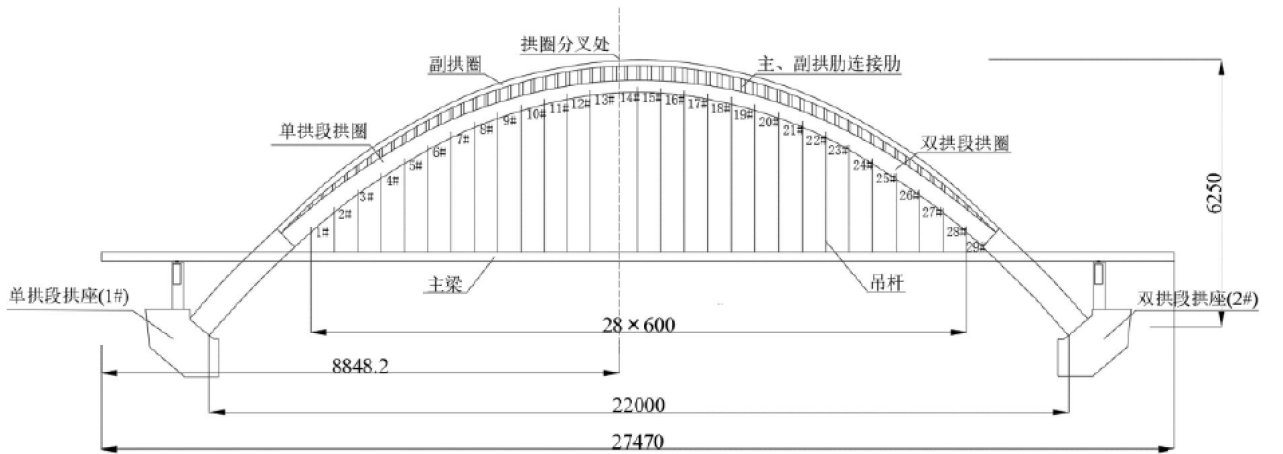
其中, J_1 为越大越优型指标集; J_2 为越小越优

型指标集; D_i^+ , D_i^- 分别为评价对象距正、负理想解的距离; c_j^+ , c_j^- 分别为 C^+ , C^- 中相对应的元素^[11-13]。

2 应用实例

2.1 工程简介

泾河大桥位于咸阳市境内, 横跨泾河两岸, 右岸位于礼泉县, 为单拱侧; 左岸位于淳化县, 为双拱侧。桥梁全长 284m, 桥跨布置为 (19.5+220+19.5)m, 桥梁标准断面宽 18m, 观景平台处梁宽 36m。空间 Y 形拱桥拱圈和拱座分为独拱段和双拱段, 拱圈在空间上呈 Y 字形。这种空间 Y 形拱桥结构新颖, 设计方案摒弃了传统的二维拱肋结构形式, 采用单双主、副拱联合受力模式, 且为空间三维曲线拱^[14-15]。主桥立面和平面如图 1 所示。



a 立面

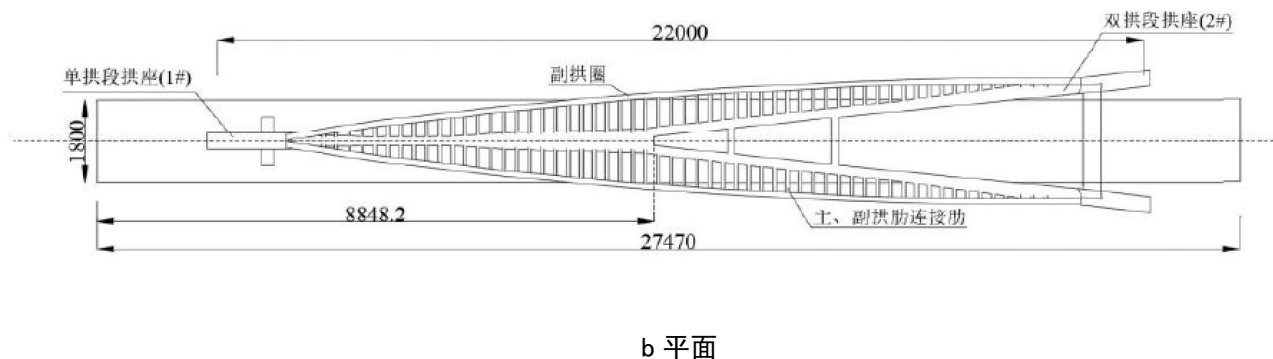


图 1 主桥立面与平面（单位：cm）

Fig.1 Elevation and plan of the main bridge (unit: cm)

2.2 评价指标体系建立

评价指标体系的建立需遵从 4 个原则，即层次及系统性、全面和科学性、易操作和可行性、合理和稳定性。即整个评价指标体系需多个层次，并彼此间能形成具有包含关系的系统，且需理论联系实际，选取影响整个方案的关键性因素，而且这些要素应能及时获取并具有真实可靠性，最后要剔除波动性强的指标，使得选取的指标具有稳定性且符合要求。

空间 Y 形钢箱拱桥由于其特殊的空间构造，其拱肋缆索吊装常用的施工方案有 2 种，即主、副拱分开吊装与主、副拱同时吊装。对于这 2 种方案的选取可从施工成本、截面应力、结构稳定性、挠度变形、施工工期 5 个层次进行分析，通过参考既有桥梁的施工技术标准及实际工程条件，构建对空间 Y 形钢箱拱桥缆索吊装施工方案的评价指标体系。

2.3 施工方案吊装分析结果

2.3.1 方案 1 吊装分析

2.3.1.1 有限元模型建立

1) 采用 MIDAS Civil 建立空间 Y 形钢箱拱桥杆系模型。单元类型选择梁单元和杆单元，全桥有限

元模型共有 1 311 个结点、1 254 个单元，其中包括 1 210 个梁单元和 44 个杆单元。空间 Y 形钢箱拱桥主要材料属性如表 2 所示，方案 1 主、副拱分开吊装有限元模型如图 2 和图 3 所示。

2) 桥梁的主拱圈是单双拱圈结合的异形拱圈结构，共由 15 个节段组成。主拱肋截面均为箱形变截面，采用等截面箱形截面梁单元模拟。副拱肋和连接肋均为梁单元建模，二者间采用弹性连接的刚接处理，保证连接部分协同受力。副拱肋建模时需建立多个结点，用数个直线单元模拟副拱肋曲线。连接肋采用梁单元模拟。主拱肋与连接肋的连接为刚性连接，主节点位于主拱肋，从节点位于连接肋。建模时由于简化结构所导致质量缺失的部分转换为均布荷载。

3) 空间 Y 形钢箱拱桥为无铰拱，边界条件是固定约束。空间 Y 形钢箱拱桥的荷载状况模拟方法如下：①结构自重，主副拱肋、风撑、连接肋等构件自重采用 MIDAS Civil 材料库中的数据；②将主、副拱肋内横隔板自重转换为节点荷载；③温度，按整体升、降温 20℃考虑。

表 2 空间 Y 形钢箱拱桥主要材料特性

Table 2 Main material characteristics of Y-shaped steel box arch bridge in space

材料名称	类别	构件	弹性模量 /MPa	泊松比	线膨胀系数 /°C ⁻¹
钢绞线	$f_{pk}=1\ 860\text{MPa}$	吊索	2.0E5	0.3	1.2×10^{-5}
钢材	Q420qDNH	拱肋	2.0E6	0.3	1.2×10^{-5}

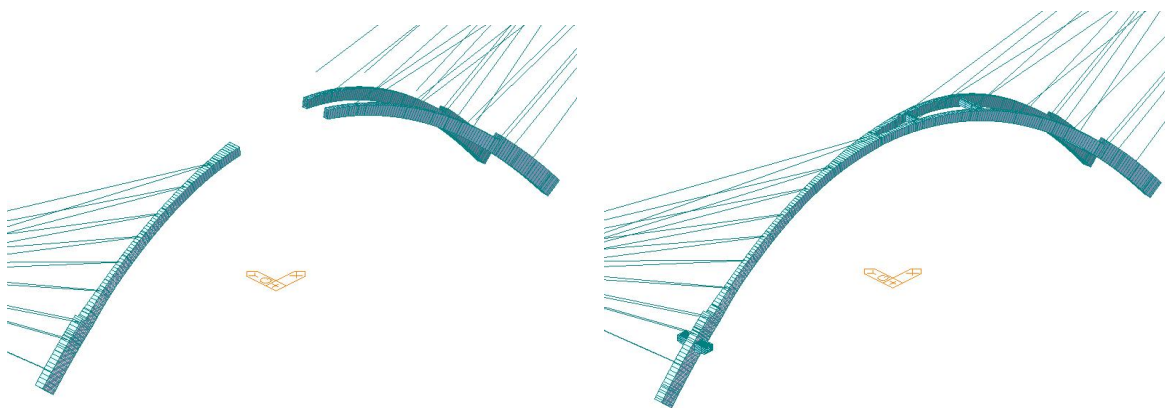


图 2 主拱肋关键施工阶段有限元模型

Fig.2 Finite element model at the key construction stage for the main arch rib



图 3 副拱肋及连接肋关键施工阶段有限元模型

Fig.3 Finite element model at key construction stages for auxiliary arch ribs and connecting ribs

2.3.1.2 截面应力分析

为保证拱肋吊装施工时安全性，以恒荷载+索力作为计算工况进行加载，得到方案 1 拱肋吊装过程中各施工阶段的截面最大拉应力与最大压应力，计算结果如表 3 所示。

表 3 方案 1 截面应力

施工阶段	Table 3 Section stress in scheme 1		MPa	
	上截面		下截面	
	拉应力	压应力	拉应力	压应力
CS1	0.13	0.26	0.99	2.19
CS2	1.25	1.37	1.85	4.57
CS3	3.31	7.56	2.75	8.04
CS4	1.80	18.71	3.17	15.80
CS5	0	27.19	4.28	24.87
CS6	0	41.66	6.11	21.92
CS7	0	64.66	6.92	30.39
CS8	0	55.23	7.33	53.06
CS9	0	86.78	9.23	81.79
CS10	0	65.17	11.67	64.73

由表 3 可知，主、副拱分开吊装施工过程中，拱肋的上、下缘截面最大压应力分别为 86.78，81.79MPa，拱肋的上、下缘截面最大拉应力分别为

3.31，11.67MPa；两者均小于钢材强度，因此满足施工阶段应力验算要求。

2.3.1.3 施工阶段挠度变形分析

为保证拱肋施工线形及成桥线形合理性，以恒荷载+索力作为计算工况进行加载，方案 1 各拱肋节段在吊装过程中的各施工阶段挠度变形结果如表 4 所示。

表 4 方案 1 施工阶段挠度变形

Table 4 Deflection and deformation at construction phase in scheme 1 mm

施工阶段	挠度变形	施工阶段	挠度变形
CS1	-0.06	CS6	-35.36
CS2	-0.23	CS7	-41.99
CS3	-6.15	CS8	-46.23
CS4	-10.36	CS9	-47.65
CS5	-21.67	CS10	-48.34

由表 4 可知，各施工阶段拱肋竖向挠度变形最大值出现在副拱合龙阶段的拱顶截面，最大竖向位移为 48.34mm。在主拱合龙后，副拱吊装施工阶段的挠度变形变化较小，可看出在桥梁施工过程中，主拱对桥梁的挠度变形中起着关键作用。

2.3.1.4 结构稳定性分析

泾河大桥桥址区河谷为“V”形河谷，两岸基岩裸露，山坡陡峻，自然坡度 60°~75°，局部 75°~85°。两岸地形相对较陡，由于特殊地形，风荷载对拱肋的影响不能忽视，本节在不考虑风缆的情况下对拱肋进行稳定性验算。

为验证 2 种方案在风荷载作用下拱肋的稳定性，将恒载+索力+风荷载作为计算工况进行加载，计算其稳定系数。假定风荷载垂直作用于拱肋侧面，其标准值的计算按相应规范计算，计算结果如下：

$$\gamma = 0.012017e^{-0.0001z} = 0.012017e^{-0.0001 \times 270} = 0.0117$$

$$V_d = k_2 k_3 V_{10} = 1.5 \times 1.7 \times 25.3 = 64.515 \text{ m/s}$$

$$W_d = \frac{\gamma V_d^2}{2g} = \frac{0.017 \times 64.515^2}{2 \times 9.81} = 2.4846 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{wh} = k_0 k_1 k_3 W_d A_{wh} = 0.75 \times 1.8 \times 1.3 \times 2.4846 \times 121 = 527.62 \text{ kN}$$

将 F_{wh} 换算成均布荷载，则

$$F = \frac{527.62}{24} = 21.9 \text{ kN/m}$$

为简便起见，将拱顶节段的风荷载等效均布荷载加载至其他施工阶段的拱肋上，对其进行稳定性分析，计算在不设置风缆时自重和风荷载及索力作用下的各施工阶段的特征值。计算结果如表 5 所示。

表 5 方案 1 施工阶段特征值

Table 5 Characteristic values at construction phase in scheme 1

施工阶段	特征值	施工阶段	特征值
CS1	2 399.0	CS6	352.0
CS2	2 215.0	CS7	79.4
CS3	1 568.0	CS8	35.8
CS4	1 127.0	CS9	26.1
CS5	823.0	CS10	16.9

由表 5 可知，方案 1 主、副拱分开吊装时，在自重及风荷载作用下，各施工阶段拱肋特征值随着工序的进行逐渐降低，在最终副拱合龙阶段达到最低值 16.9，高于相关规范要求，施工阶段稳定性验算通过。

2.3.2 方案 2 吊装分析

2.3.2.1 有限元模型建立

具体建模细节同上，方案 2 主、副拱同时吊装有限元模型如图 4 所示。

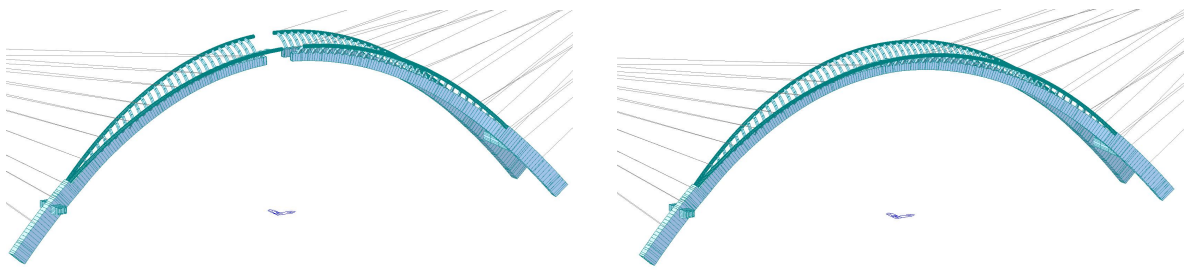


图 4 主、副拱同时吊装关键施工阶段有限元模型

Fig.4 Finite element model at key construction stages for simultaneous hoisting of the main and secondary arches

2.3.2.2 截面应力分析

方案 2 拱肋吊装过程中各施工阶段的截面最大拉应力与最大压应力如表 6 所示。

表 6 方案 2 截面应力

Table 6 Section stress in scheme 2 MPa

施工阶段	上截面		下截面	
	拉应力	压应力	拉应力	压应力
CS1	0.46	0.13	0.12	1.69
CS2	1.36	0.78	0.83	3.45
CS3	2.27	5.32	2.26	4.12
CS4	2.23	5.74	3.83	7.50
CS5	1.81	5.74	5.65	11.31
CS6	0	6.74	6.42	12.64
CS7	0	10.51	7.22	12.69
CS8	0	16.82	9.77	17.96
CS9	0	18.52	11.03	24.33
CS10	0	34.88	12.56	30.72
CS11	0	57.19	13.77	52.53
CS12	0	72.46	14.51	75.22

由表 6 可知，主、副拱同时吊装施工过程中，拱肋的上、下缘截面最大压应力分别为 72.46，75.22MPa，拱肋的上、下缘截面最大拉应力分别为 2.27，14.51MPa。

2.3.2.3 施工阶段挠度变形分析

各拱肋节段在同时吊装过程中各施工阶段的挠度变形结果如表 7 所示。

表 7 方案 2 施工阶段挠度变形

Table 7 Deflection and deformation at construction phase in scheme 2 mm

施工阶段	挠度变形	施工阶段	挠度变形
CS1	−0.06	CS7	−2.52
CS2	−0.22	CS8	−10.12
CS3	−1.50	CS9	−11.34
CS4	−1.79	CS10	−21.68
CS5	−1.81	CS11	−47.88
CS6	−2.40	CS12	−61.53

由表 7 可知，各施工阶段拱肋竖向挠度变形最大值出现在合龙阶段的拱顶截面，最大竖向位移为

61.53mm。

2.3.2.4 横向稳定性

根据规范，主拱肋拱顶段的风荷载计算如下：

$$F_{wh} = k_0 k_1 k_3 W_d A_{wh} = 0.75 \times 1.8 \times 1.3 \times 2.4846 \times 78 = 340 \text{ kN}$$

$$\gamma = 0.012017 e^{-0.0001z} = 0.012017 e^{-0.0001 \times 270} = 0.0117$$

将 F_{wh} 换算成均布荷载，则

$$V_d = k_2 k_5 V_{10} = 1.5 \times 1.7 \times 25.3 = 64.515 \text{ m/s} \quad F = \frac{340}{24} = 13 \text{ kN/m}$$

$$W_d = \frac{\gamma V_d^2}{2g} = \frac{0.017 \times 64.515^2}{2 \times 9.81} = 2.4846 \text{ kN/m}^2$$

主拱肋合龙后的施工阶段风荷载同方案 1，其各施工阶段特征值如表 8 所示。

表 8 方案 2 施工阶段特征值

Table 8 Characteristic values at construction phase in scheme 2

施工阶段	特征值	施工阶段	特征值
CS1	2 383.0	CS7	183.9
CS2	2 190.0	CS8	104.1
CS3	1 455.0	CS9	46.7
CS4	1 171.0	CS10	26.1
CS5	731.1	CS11	11.8
CS6	327.4	CS12	9.6

由表 8 可知，主、副拱同时吊装时，在自重及风荷载作用下，各施工阶段拱肋特征值随着工序的进行也逐渐降低，在合龙阶段达到最低值 9.6，高于相关规范规定，施工阶段稳定性验算通过，但与方案 1 相比较低。

2.3.3 影响因素对比分析

本文选定截面应力、挠度变形、结构稳定性、施工工期和施工成本作为主要影响因素，对比如表 9 所示。

表 9 影响因素对比

Table 9 Comparison of influencing factors

影响因素	方案 1（分开吊装）	方案 2（同时吊装）
截面应力	截面最大压应力为 86.78 MPa，截面最大拉应力为 11.67MPa（合龙后压应力为 65.17MPa）	截面最大压应力为 75.22MPa，截面最大拉应力为 14.51MPa
挠度变形	最大竖向位移为 48.34mm，线形较好	最大竖向位移为 61.53mm，线形较差
结构稳定性	特征值最低值 16.9，稳定性好	特征值最低值 9.6，稳定性较方案 1 差
施工成本	施工成本较高	施工成本较低
施工工期	施工工期较长	施工工期较短

2.3.4 AHM-TOPSIS 法比选方案

针对上述确定的拱肋吊装施工方案的影响因

素，按照表 1 对其重要性程度进行打分对比，建立 AHM 判断矩阵，结果如表 10 所示。

表 10 AHM 判断矩阵

Table 10 AHM judgment matrix

影响因素	截面应力	结构稳定性	挠度变形	施工成本	施工工期	权重 W
截面应力	0	0.5	0.857 1	0.933 3	0.947 4	0.323 8
结构稳定性	0.5	0	0.857 1	0.933 3	0.947 4	0.323 8
挠度变形	0.142 9	0.142 9	0	0.909 1	0.933 3	0.212 8
施工成本	0.066 7	0.066 7	0.090 9	0	0.857 1	0.108 1
施工工期	0.052 6	0.052 6	0.066 7	0.142 9	0	0.031 5

空间 Y 形钢箱拱桥 2 种施工方案的施工成本、截面应力、结构稳定性、挠度变形、施工工期这 5 个指标分析如表 11 所示，其中截面应力采用合龙后

的应力根据实际施工情况估算，分开吊装方法将花费约 3 000 万元，同时吊装方法将花费约 2 000 万元。此外，在施工工期方面，估算拱肋分开吊装工期在

约 12 个月，拱肋同时吊装工期在约 9 个月。

表 11 施工方案指标对比

Table 11 Comparison of construction plan indicators

施工方案	截面最大应力 /MPa	结构稳定性	挠度变形/mm	施工成本/万元	施工工期/月
方案 1	65.17	16.9	48.34	3 000	12
方案 2	75.22	9.6	61.53	2 000	9

通过式 (2) 构建初始评判矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 65.17 & 16.9 & 53.34 & 3 & 12 \\ 75.22 & 9.6 & 61.53 & 2 & 9 \end{bmatrix}$$

对其进行无量纲化处理, 将其正则化, 得到相对隶属度矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.5358 & 0.6377 & 0.5400 & 0.4 & 0.4286 \\ 0.4642 & 0.3623 & 0.4600 & 0.6 & 0.5714 \end{bmatrix}$$

根据表 11 得到 AHM 判断矩阵中各指标的属性权重矩阵:

$$w_G = (0.3238, 0.3238, 0.2128, 0.1081, 0.0315)^T$$

从而得到加权标准化决策矩阵:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & z_{m1} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1735 & 0.2065 & 0.1149 & 0.0432 & 0.0 \\ 0.1503 & 0.1173 & 0.0979 & 0.0649 & 0.0 \end{bmatrix}$$

通过式 (2) ~ 式 (7) 得到评价对象与理想解间的欧式距离:

参考文献:

[1]朱文浩,邹坦.基于 AHM 和改进 TOPSIS 的绿色铁路施工阶段方案比选[J].土木工程与管理学报,2018,35(3):187-191.

ZHU W H, ZOU T. Comparison and selection of green railway construction phase plans based on AHM and improved TOPSIS [J]. Journal of civil engineering and management, 2018, 35 (3): 187-191.

[2]李玲燕,顾昊.基于 AHM-可拓评价模型的老旧小区绿色改造综合效益评价研究[J].生态经济,2021,37(3):95-100, 160.

LI L Y, GU H. Comprehensive benefit evaluation of green transformation in old residential areas based on AHM extension evaluation model [J]. Ecological

$$D_1 = \begin{cases} D_1^+ = 0.022 \\ D_1^- = 0.094 \end{cases}, D_2 = \begin{cases} D_2^+ = 0.094 \\ D_2^- = 0.022 \end{cases}$$

与评判对象和正理想解的贴近度:

$$E_1^+ = 0.809, E_2^+ = 0.191$$

很明显 $E_1^+ > E_2^+$, 因此根据 AHM-TOPSIS 评价体系求得, 方案 1 主、副拱分开吊装为最优吊装施工方法。本方法得到的最优方法在上述 5 个方面最贴近理想方案, 考虑到实际施工难度及技术条件, 根据比选, 本工程选择主、副拱分开吊装作为拱肋实际吊装方案。

3 结语

1)AHM-TOPSIS 综合评价模型优化了指标权重计算方法, 计算简单明了, 且权重分配更加科学。

2)选取截面应力、结构稳定性、挠度变形、施工工期、施工成本 5 个施工阶段的主要影响因素作为 2 种施工方案比较的主要评价指标。

结果表明, 2 种方案与评判对象和正理想解的贴近度分别为 $E_1^+ = 0.809$, $E_2^+ = 0.191$, 主、副拱分开吊装的施工方案最优。

economy, 2021, 37(3): 95-100, 160.

[3]刘翔,王训洪,黄敦杰,等.基于博弈论-物元模型的露天矿山土地复垦为草地潜力评价[J].矿业研究与开发,2022,42(4):147-152.

LIU X, WANG X H, HUANG D J, et al. Potential evaluation of open-pit mine land reclamation into grassland based on game theory matter element model [J]. Mining research and development, 2022, 42(4): 147-152.

[4]薛志恒,陈鑫,刘人杰.基于毕达哥拉斯-TOPSIS 的仓库消防安全评价[J].消防科学与技术,2022,41(3):371-375.

XUE Z H, CHEN X, LIU R J. Warehouse fire safety evaluation based on pythagoras TOPSIS [J]. Fire

science and technology, 2022, 41(3): 371-375.

[5]尹磊.基于 GIS 的杭州市应急避难场所收容能力评价[J].有色金属设计,2021,48(3):120-124.

YIN L. GIS based evaluation of emergency shelter capacity in Hangzhou City [J]. Nonferrous metals design, 2021, 48(3): 120-124.

[6]肖云梅.基于 TOPSIS 的公路货运枢纽布局优化分析[J].交通科技与经济,2013,15(6):66-69.

XIAO Y M. Optimization analysis of highway freight hub layout based on TOPSIS [J]. Technology & economy in areas of communications, 2013, 15(6): 66-69.

[7]黄嘉昕,周彬彬,金承珂.基于 AHP 的感应开盖传感器决策方案应用[J].中国高科技,2021(16):60-61.

HUANG J X, ZHOU B B, JIN C K. Application of AHP based decision-making scheme for induction opening sensor [J]. China high and new technology, 2021(16): 60-61.

[8]邹沛霖.基于 TOPSIS 法的岸基救助船优选研究[J].中国海事,2021(1):61-65.

ZOU P L. Research on optimal selection of shore based salvage ships based on TOPSIS method [J]. China maritime safety, 2021(1): 61-65.

[9]李海君,徐廷学,应新永.基于测试数据与扩展 TOPSIS-灰色关联的导弹状态评估决策[J].航空兵器,2021,28(6):88-94.

LI H J, XU T X, YING X Y. Missile state evaluation decision based on test data and extended TOPSIS grey correlation [J]. Aero weaponry, 2021, 28(6): 88-94.

[10]章运超,王家生,朱孔贤,等.基于 TOPSIS 模型的河长制绩效评价研究——以江苏省为例[J].人民长江,2020,51(1):237-242.

ZHANG Y C, WANG J S, ZHU K X, et al. Performance evaluation of river chief system based on TOPSIS model: a case study of Jiangsu Province [J]. Yangtze River, 2020, 51(1): 237-242.

[11]柴乃杰,鲍学英,张天奇,等.TOPSIS-熵权决策法在绿色施工节水措施综合效益评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):156-161.

CHAI N J, BAO X Y, ZHANG T Q, et al. Application of TOPSIS entropy weight decision method in comprehensive benefit evaluation of green construction water saving measures [J]. Journal of water resources and water engineering, 2017, 28(5): 156-161.

[12]杨展华,许成,胡继鹏,等.基于熵值-TOPSIS 法的国有企业内部经济责任审计评价体系研究[J].中国内部审计,2021(2):18-26.

YANG Z H, XU C, HU J P, et al. Research on the evaluation system of internal economic responsibility audit in state owned enterprises based on entropy TOPSIS method [J]. Internal auditing in China, 2021(2): 18-26.

[13]魏丽,顾平.基于 BSC 思想的电子采购供应商的选择[J].中国商贸,2012(34):179-181.

WEI L, GU P. Selection of electronic procurement suppliers based on BSC concept [J]. China journal of commerce, 2012(34): 179-181.

[14]李鹏.论中承式空间 Y 型钢箱拱桥缆索吊主索承重安全性分析[J].四川水泥,2021(4):335-337.

LI P. Safety analysis of the main cable load bearing capacity of the mid supported space Y-shaped steel box arch bridge [J]. Sichuan cement, 2021(4): 335-337.

[15]黄骞,邬晓光,胡科坚,等. V 形峡谷地区空间 Y 形钢箱拱桥缆索吊装系统设计[C]//世界交通运输工程技术论坛(WTC2021)论文集(上),2021.

HUANG Q, WU X G, HU K J, et al. Design of cable hoisting system for Y-shaped steel box arch bridge in V-shaped canyon area [C]//Proceedings of World Transportation Engineering Technology Forum (WTC2021) (Part 1), 2021.