

碗扣式支架安全状态综合评估方法

刘来君,陈永瑞,孙维刚,申 林,韩 飞

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为评估碗扣式模板支撑架的安全稳定性,提出碗扣架安全状态评估方法。该方法首先选取 9 个常态监测项目作为评价指标,根据不同杆件间距、顶底杆自由长度和碗扣节点刚度选取多套碗扣架,提取与指标相关数据。然后采用主成分分析法分析各指标相关性,构建碗扣架安全状态评估方法,按照碗扣架安全状态得分评估碗扣架安全等级。最后以西安市辛家庙立交桥为例,通过 MIDAS/CIVIL 有限元分析程序分别对同一桥跨的 24 套碗扣架方案进行模拟试验,通过特征值分析、屈曲分析和静力分析提取与指标相关的数据,用所选取的指标对该方法进行验证。研究结果表明:选取的安全评价指标能够表征碗扣式支架的整体刚度、安全储备能力、静力特性和稳定性,现场测量方便,该方法在碗扣架安全评价中合理有效,具有较强的实用性;将主成分分析法引入碗扣架安全评估是可行的,评估结果能够综合反映各评价指标的重要性和碗扣架的实际安全状态,可为碗扣架的安全分析和评价提供理论指导。

关键词:桥梁工程;碗扣架;安全状态;安全评估;主成分分析

中图分类号:U445 **文献标志码:**A

Comprehensive safety state assessment method of cuplok scaffolding

LIU Lai-jun, CHEN Yong-rui, SUN Wei-gang, SHEN Lin, HAN Fei

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To assess the safety and stability of cuplok scaffolding, the comprehensive assessment method was put forward. Firstly, 9 normal monitoring subjects were chosen as the assessment indexes and the data related to indexes was extracted from a series of cuplok scaffoldings with different bar spacing, free length of top and bottom vertical bars, and stiffness of joints. Then the principal component analysis method was introduced to analyze the correlation among each index and create the comprehensive assessment method of cuplok scaffolding, which can give out the safety grade according to the safety state evaluation score. Finally, taking Xinjiamiao overpass in Xi'an as an example, 24 different cuplok scaffolding designs of the same span were analyzed through eigenvalue analysis, buckling analysis and static analysis by MIDAS/CIVIL. And the method was verified through the data extracted from the analysis. The results show that the safety assessment indexes can absolutely express the integral rigidity, safety stock, static stress state and stability, and can be easily measured in-place. So these indexes are well chosen, reasonable and effective in the assessment. The introduction of principal component analysis into the cuplok scaffolding safety assessment, which can reflect the importance of each assessment index

and the actual measured safety status of cuplok scaffolding, is feasible. This method has a strong practicability and is expected to provide theoretical guidance for safety analysis and assessment of cuplok scaffolding. 8 tabs, 4 figs, 16 refs.

Key words: bridge engineering; cuplok scaffolding; safety state; safety assessment; principal component analysis

0 引 言

中国桥梁总量以每年万余座的速度增长,目前总量已达数十万座,其中现浇混凝土桥梁在城市立交桥中应用最为广泛。碗扣式模板支撑架(以下简称“碗扣架”)承载能力强,构造简单,拼装方便,是中国目前现浇箱梁普遍应用的模板支撑体系^[1]。但近几年中国发生多起由于碗扣架失稳导致的大型桥梁施工过程中整体垮塌事故,造成重大人员伤亡和巨大经济损失^[2],所以综合评估施工过程中碗扣架的安全稳定状态至关重要。

目前针对碗扣架的研究主要从承载能力的影响因素分析^[2]、计算分析方法^[3-5]、安全状态监测^[6-7]、可靠性评价^[7] 4 个方面展开。

节点和斜撑的模拟是碗扣架计算的重点之一。节点刚度对支架受力存在显著影响,支架节点刚度不同将导致支架受力不均^[8-9]。对于无侧限支架,节点松动可明显降低支架的承载能力;对于剪刀撑设置较密的刚性支架,节点松动对支架承载能力影响相对较小^[3]。碗扣架节点具有半刚性特性,有限元分析时可以通过折减约束立杆的水平杆件抗弯刚度简化模拟^[10]。构造因素、杆件初始缺陷、施工质量、施工荷载对碗扣架承载能力均有影响^[9]。设置剪刀撑能明显提高碗扣架承载能力;顶杆伸出高度过大会降低碗扣架承载能力;碗扣架承载力随高宽比增大而降低;步距小的碗扣架承载能力高于步距大的碗扣架^[11]。对于不同间距、步距和扫地杆长度的支架,可以通过现场测量和节点试验,对碗扣架的几何缺陷和节点刚度进行调查研究;通过统计学方法模拟碗扣架中随机构件的特性及初始缺陷等不确定性,获得碗扣架结构抗力的统计资料,进而从概率角度评价碗扣架的可靠性^[9]。经试验验证,考虑套筒接头、半刚性节点、接地杆形心初始偏差及几何初始缺陷等不确定因素的三维精确模型可以准确预测支架的受力状态^[12]。此外为了混凝土施工时碗扣架的安全稳定性,有必要对碗扣架关键断面及最不利受力部位杆件的应力、弯矩、节点位移、地基沉降影响、碗扣架的振动特性等进行

实时监测^[13],通过各项监测数据与预设阈值比较可以对碗扣架不安全状态进行预警^[11]。

以往研究大多侧重于碗扣架的承载能力影响因素、计算与预测方法和试验验证,这些研究成果推动了碗扣架安全控制技术中基础理论的发展,但是在其安全评估方面,大多针对各指标进行单独研究,缺少综合评价方法。虽然有研究从概率学出发评估碗扣架的可靠性,但统计工作量过于庞大,实用性不高^[9];同时以往研究偏重于承载能力预测,忽略了碗扣架实际安全状态的评估。近年来有学者提出将碗扣架实际受力状态监测纳入碗扣架安全控制工作,但没有提出其安全状态的综合评估方法^[13]。鉴于此,本文立足于综合评估碗扣架安全状态,依据碗扣架的受力特性和构造特点,以及施工现场监测的可行性,提出了用表征碗扣架工作状况的 9 项常态监测科目作为其安全状态评价指标。并首次将主成分分析法引入到碗扣架安全状态综合评价中,得出一种针对碗扣架实际安全状态的综合评价方法,使评价结果更加系统化、整体化和科学化。

1 碗扣架安全状态评估方法

1.1 指标抽取

碗扣架的安全状态是一个定性的概念,其安全状态评价是结合施工荷载作用下碗扣架的相关实测数据与有限元分析结果,通过一系列的指标将其量化的过程。由于碗扣架本身构件数量庞大,不具备所有构件同时监测的条件,但又必须全面反映其真实的安全状态。所以碗扣架安全状态评价指标的选取应当具有易于测量、系统涵盖、客观灵敏且表征明确的原则。鉴于此,本文选取表征碗扣式支架工作状态的 9 项常态监测指标作为其安全状态的评价指标。

(1) 一阶模态振型频率 f

当碗扣架振动频率接近自振频率时容易发生共振,自振频率可以反映碗扣架的整体刚度和整体稳定性。

(2) 一阶屈曲模态系数 ω

一阶屈曲模态系数 ω 反映碗扣架承载能力储

备空间的大小, ω 值越大则碗扣架承载能力储备空间越大, ω 值越小则碗扣架承载能力储备空间越小。

$$\omega = \frac{F_{ex}}{F} \quad (1)$$

式中: F_{ex} 为碗扣架极限承载能力; F 为碗扣架当前承受荷载。

(3) 立杆最大轴力 F_{Vmax}

碗扣架立杆是承受施工荷载的主要构件, 立杆内力主要为轴压力, 取立杆轴压力最大值 F_{Vmax} 反映立杆轴向受力安全状态。

(4) 立杆最大弯矩 M_{Vmax}

碗扣架立杆以轴向受压为主, 但由于节点的半刚性特性, 当碗扣架底部发生不均匀沉降或碗扣架局部发生变形时, 立杆周围水平杆件对其存在约束作用, 从而在立杆内部产生弯矩。选取立杆弯矩最大值可以反映立杆受弯的最不利状态及节点刚度。

(5) 水平杆最大轴压力 F_{Hmax}^-

碗扣架水平杆件内力一般较小, 但当碗扣架发生局部变形并受到周围杆件约束时, 水平杆件内产生轴向力。碗扣架水平杆件所受轴力分为轴拉力和轴压力 2 种, 轴压力主要由节点横向位移产生。取水平杆轴压力最大值可以反映水平杆受压稳定性最不利状态。

(6) 水平杆最大轴拉力 F_{Hmax}^+

节点横向与竖向位移均可产生水平杆件轴拉力。取水平杆最大轴拉力可以反映水平杆受拉最不利状态。

(7) 水平杆最大弯矩 M_{Hmax}

水平杆件弯矩产生的原因与立杆弯矩相类似。碗扣架水平杆件所受弯矩值 M_H 越大, 则碗扣架变形越明显, 发生局部失稳的概率越大, 总体承载能力降低。取碗扣架区域内水平杆件弯矩最大值可以反映水平杆件受弯最不利状态及节点的刚度。

(8) 节点最大水平位移 H_{max}

节点位移是反映碗扣架变形情况最直观的参数。节点水平位移越大, 则在一定范围内碗扣架局部稳定性越差, 可用其最大值反映碗扣架局部稳定性最不利状态。

(9) 节点最大竖向位移 V_{max}

碗扣架节点竖向位移与节点在地基上投影点一定范围内基础沉降、立杆碗扣节点及套筒接长点结合紧密程度和荷载作用下的弹性变形等因素有关。节点竖向位移越大, 则碗扣架安全稳定性越差, 可用其最大值反映碗扣架局部稳定性最不利状态。

安全状态评估需选取指标的最不利状态, 故以上各内力及位移指标均选取所有监测值的最大值。测量时可选取碗扣架最不利断面作为控制断面, 布设多个测点测取相关数据, 然后取其最大值。

桥梁碗扣架安全状态评价指标体系如图 1 所示。

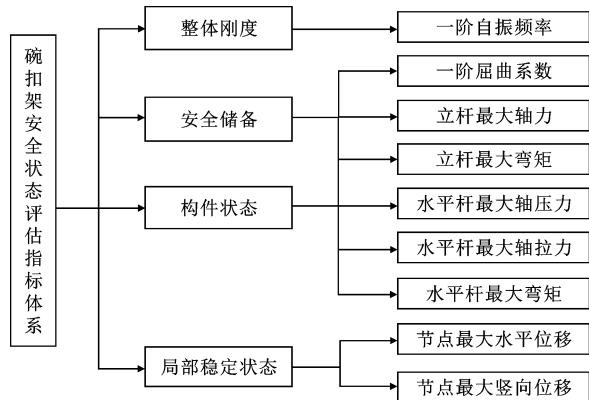


图 1 碗扣架安全状态评价指标

Fig. 1 Safety status assessment indexes of cuplock scaffolding

1.2 评估方法

主成分分析法是在 1901 年由公认的统计学之父 Karl Pearson 针对非随机变量的讨论引入的。多指标的主成分分析法可以在不损失或尽量少损失原有指标信息的前提下, 将原来个数较多且彼此相关的指标数据用线性组合的方法转换为个数相对较少且彼此独立或不相关的综合指标, 起到“降维”的作用, 从而达到简化的目的^[14]。主成分分析法作为基础的数学分析方法, 其实际应用十分广泛, 在人口统计学、数量地理学、分子动力学模拟、数学建模、数理分析等学科中均有应用, 是 1 种常用的多变量分析方法。近年来, 主成分分析法也被应用于桥梁结构状态评价^[15]和路面沥青使用性能评价^[16]等领域。由于碗扣架监测指标相对较多, 为了系统、整体反映其安全状态, 并不损失各个指标所表征的基本信息, 本文引入主成分分析法。

主成分分析方法实现的主要程序如下所述。

(1) 确定样本观测值, 即样本矩阵 \mathbf{X}

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{p1} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 数据标准化, 得到标准化矩阵 \mathbf{Y} , 即

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{p1} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{1n} & \cdots & y_{pn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sqrt{S_{ij}}}$, $(i = 1, 2, \dots, p)$; $\bar{x}_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}$, $(i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n)$; $S_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)$

(3) 计算样本相关矩阵 \mathbf{R} , 即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{p1} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{1n} & \dots & r_{pn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: $r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n y_{ik} y_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \frac{(x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{S_{ij}}$. S_{ij} 为各项指标的样本标准差。

(4) 计算 \mathbf{R} 的特征值和特征向量

通过正交变换, 得到特征值矩阵 \mathbf{M} , 即

$$\mathbf{M} = \mathbf{Q}' \mathbf{R} \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_p \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 为 \mathbf{R} 的 p 个特征值。

设从大到小排列为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p > 0$, \mathbf{Q} 的各列向量 $\boldsymbol{\zeta}_j = (\zeta_{1j}, \zeta_{2j}, \dots, \zeta_{pj})^T$, $(j = 1, 2, \dots, p)$, 为 λ_j 所对应的正规化特征向量。

(5) 建立主成分

主成分分析法就是通过降维技术, 将 p 个指标所表达的信息用少量的 k 个主成分来表达, 并进行综合评价 ($k < p$), k 值由累积贡献率 η 确定, 即

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^k \lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \tag{6}$$

其中 $\lambda_j (j = 1, 2, \dots, p)$ 由大到小排列, 当累积贡献率 $\eta \geq 0.85$ 时, 成分 F_1, F_2, \dots, F_k 为主成分。

2 实例验证

2.1 碗扣架搭设方案

以西安市辛家庙高架立交桥作为碗扣架安全状态评估方法的验证实例, 见图 2。该桥上部结构为 $(24.5 + 4 \times 30)$ m 单箱 3 室预应力连续现浇箱梁, 梁高 1.7 m, 顶板宽 13 m, 底板宽 9 m。选取第 5 联 30 m 跨碗扣架作为研究对象。由于现场获取大样本实测数据难度较大, 样本量太少又不足以验证评估方法的正确性。为了解决以上矛盾, 本文针对所选取的桥跨, 根据立杆间距、水平杆步距、顶部立杆

伸出高度、接地杆自由长度以及节点刚度的不同, 共提出 24 套搭设方案 (下页表 1), 并通过 MIDAS/CIVIL 有限元程序分别对 24 个方案进行特征值分析、屈曲分析和静力分析, 完成模拟试验, 见图 3。然后根据本文提出的 9 项指标提取相关数据, 对综合评估方法进行验证。模拟试验的前提和假设条件如下:

(1) 各碗扣架所受施工荷载相同, 以所浇筑混凝土箱梁自重的 1.2 倍计;

(2) 各碗扣架四面设剪刀撑, 横断面剪刀撑间距取 4.5 m, 剪刀撑倾斜角度约 45° ;

(3) 模型中杆件以梁单元模拟, 半刚性节点在刚性节点基础上通过立杆释放 10%、水平杆件释放 30% 梁端约束实现;

(4) 为模拟不均匀沉降产生的效果并简化模拟程序, 假设在跨中位置发生 11 mm 沉降 (参考实测沉降最大值确定)^[14], 跨中两侧立杆沉降值以余弦曲线分配; 同一横断面内立杆沉降值相同。



图 2 辛家庙立交桥碗扣架现场搭设情况
Fig. 2 Cuplock scaffolding in Xinjiamiao overpass construction

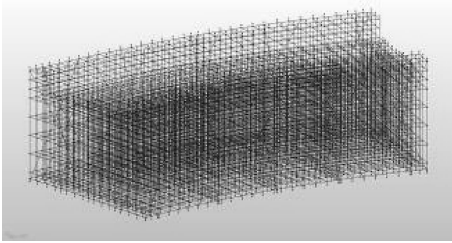


图 3 碗扣架 MIDAS/CIVIL 模拟试验模型
Fig. 3 Model by MIDAS/CIVIL in cuplock scaffolding simulation test

2.2 样本数据

从碗扣架 24 种搭设方案的模拟试验中提取各方案的一阶振型频率 f 、一阶屈曲模态系数 ω 、立杆最大弯矩 $M_{V_{\max}}$ 、立杆最大轴压力 $F_{V_{\max}}$ 、水平杆最大弯矩 $M_{H_{\max}}$ 、水平杆最大轴压力 $F_{H_{\max}}$ 、水平杆最大轴拉力 $F_{H_{\max}}^+$ 、节点最大水平位移 H_{\max} 、节点最大竖向位移 V_{\max} 数据作为样本数据, 见下页表 2。

表 1 碗扣架搭设方案参数

Tab. 1 Parameters for each setting plan of cuplok scaffolding						m					
方案序号	立杆步距	立杆间距	伸出长度	扫地杆长度	节点刚度	方案序号	立杆步距	立杆间距	伸出长度	扫地杆长度	节点刚度
P ₁	0.9	0.9	0.3	0.3	R	P ₁₃	1.2	1.2	0.6	0.3	R
P ₂	0.9	0.9	0.3	0.3	S	P ₁₄	1.2	1.2	0.6	0.3	S
P ₃	0.9	0.9	0.3	0.6	R	P ₁₅	1.2	1.2	0.6	0.6	R
P ₄	0.9	0.9	0.3	0.6	S	P ₁₆	1.2	1.2	0.6	0.6	S
P ₅	0.9	0.9	0.6	0.3	R	P ₁₇	1.2	0.9	0.3	0.3	R
P ₆	0.9	0.9	0.6	0.3	S	P ₁₈	1.2	0.9	0.3	0.3	S
P ₇	0.9	0.9	0.6	0.6	R	P ₁₉	0.9	1.2	0.3	0.3	R
P ₈	0.9	0.9	0.6	0.6	S	P ₂₀	0.9	1.2	0.3	0.3	S
P ₉	1.2	1.2	0.3	0.3	R	P ₂₁	0.9	1.2	0.6	0.6	R
P ₁₀	1.2	1.2	0.3	0.3	S	P ₂₂	0.9	1.2	0.6	0.6	S
P ₁₁	1.2	1.2	0.3	0.6	R	P ₂₃	1.2	0.9	0.6	0.6	R
P ₁₂	1.2	1.2	0.3	0.6	S	P ₂₄	1.2	0.9	0.6	0.6	S

注:R表示刚性,S表示半刚性。

表 2 碗扣架模拟加载数据

Tab. 2 Data from load simulation on each erection plan of cuplok scaffolding									
方案	f/Hz	ω	$M_{V\max}/$ (kN·m)	$F_{V\max}/$ kN	$M_{H\max}/$ (kN·m)	$F_{H\max}^{+}/$ kN	$F_{H\max}^{-}/$ kN	$H_{\max}/$ mm	$V_{\max}/$ mm
P ₁	5.19	6.41	1.11	−73.45	0.45	21.10	−19.68	2.11	11.91
P ₂	3.79	3.89	1.01	−71.02	0.25	22.92	−20.48	2.11	11.90
P ₃	4.01	4.79	0.48	−63.74	0.26	26.01	−19.46	2.39	11.97
P ₄	3.12	3.59	0.44	−62.53	0.12	27.35	−20.25	2.50	11.90
P ₅	5.14	4.47	1.11	−73.46	0.45	21.10	−19.68	1.93	11.89
P ₆	4.35	3.25	1.01	−71.04	0.25	22.92	−20.48	2.11	11.90
P ₇	3.99	4.47	0.48	−63.76	0.26	26.01	−19.46	2.39	11.87
P ₈	3.08	3.25	0.43	−62.55	0.12	27.35	−20.25	2.50	11.90
P ₉	4.30	2.75	1.25	−83.78	0.50	28.63	−12.93	2.51	14.00
P ₁₀	3.04	1.64	1.11	−81.52	0.28	30.88	−12.77	2.68	13.99
P ₁₁	3.46	2.53	0.54	−75.77	0.25	34.54	−12.54	3.04	14.14
P ₁₂	2.62	1.58	0.48	−74.90	0.14	35.48	−12.43	3.11	14.12
P ₁₃	4.27	1.93	1.25	−83.80	0.50	28.63	−12.93	2.51	14.00
P ₁₄	3.02	1.35	1.11	−81.53	0.28	30.88	−12.77	2.68	13.99
P ₁₅	3.43	1.93	0.54	−75.79	0.25	34.54	−12.54	3.04	14.14
P ₁₆	2.60	1.36	0.48	−74.91	0.14	35.48	−12.43	3.11	14.13
P ₁₇	4.78	5.40	1.07	−78.62	0.48	20.03	−28.49	1.96	11.78
P ₁₈	3.48	3.34	0.97	−75.91	0.27	21.96	−29.00	1.95	11.80
P ₁₉	4.42	6.45	1.18	−64.13	0.43	23.70	−22.30	2.05	11.86
P ₂₀	3.12	3.69	1.01	−62.74	0.24	24.89	−22.52	2.18	11.85
P ₂₁	3.42	3.75	0.48	−57.59	0.22	27.20	−22.11	2.44	11.72
P ₂₂	2.59	2.58	0.41	−57.09	0.12	27.72	−22.31	2.50	11.93
P ₂₃	3.79	4.06	0.47	−67.48	0.27	23.88	−28.14	2.50	11.86
P ₂₄	2.90	2.92	0.43	−66.07	0.13	25.44	−28.64	2.64	11.88

注:轴力中拉力为+,压力为一。

2.3 数据处理

按式(3)对表 2 中的数据进行标准化变换,得到变换后的标准化数据,见下页表 3。根据式(4)对表

2 中标准化数据进行相关性分析,得到各指标相关系数矩阵,见下页表 4。

从相关性矩阵可以看出, f 与 ω 正相关,其他条

表 3 评价指标标准化数据

Tab. 3 Standardization data of the evaluation indexes

方案	f	ω	$M_{V\max}$	$F_{V\max}$	$M_{H\max}$	$F_{H\max}^{+}$	$F_{H\max}^{-}$	H_{\max}	V_{\max}
P ₁	1.98	2.07	0.99	−0.31	1.37	−1.27	−0.06	−0.95	−0.65
P ₂	0.16	0.34	0.68	−0.01	−0.20	−0.88	−0.20	−0.95	−0.66
P ₃	0.45	0.96	−0.94	0.90	−0.16	−0.22	−0.02	−0.18	−0.60
P ₄	−0.70	0.14	−1.07	1.05	−1.24	0.07	−0.16	0.12	−0.66
P ₅	1.91	0.74	0.99	−0.31	1.37	−1.27	−0.06	−1.44	−0.67
P ₆	0.89	−0.10	0.68	−0.01	−0.20	−0.88	−0.20	−0.94	−0.66
P ₇	0.42	0.74	−0.94	0.89	−0.16	−0.22	−0.02	−0.18	−0.69
P ₈	−0.76	−0.10	−1.07	1.05	−1.26	0.07	−0.16	0.12	−0.66
P ₉	0.83	−0.44	1.43	−1.59	1.76	0.34	1.14	0.15	1.32
P ₁₀	−0.81	−1.20	0.98	−1.31	0.01	0.83	1.16	0.62	1.31
P ₁₁	−0.26	−0.59	−0.74	−0.60	−0.24	1.61	1.20	1.59	1.45
P ₁₂	−1.35	−1.24	−0.93	−0.49	−1.09	1.81	1.22	1.80	1.44
P ₁₃	0.79	−1.00	1.43	−1.59	1.76	0.34	1.14	0.15	1.32
P ₁₄	−0.83	−1.40	0.98	−1.31	0.01	0.83	1.16	0.62	1.31
P ₁₅	−0.30	−1.00	−0.74	−0.60	−0.24	1.61	1.20	1.59	1.45
P ₁₆	−1.38	−1.40	−0.93	−0.49	−1.09	1.81	1.22	1.80	1.44
P ₁₇	1.45	1.38	0.87	−0.95	1.61	−1.50	−1.61	−1.36	−0.78
P ₁₈	−0.24	−0.03	0.57	−0.61	−0.07	−1.09	−1.70	−1.39	−0.76
P ₁₉	0.98	2.10	1.20	0.85	1.24	−0.71	−0.52	−1.11	−0.70
P ₂₀	−0.70	0.21	0.67	1.02	−0.32	−0.46	−0.56	−0.75	−0.71
P ₂₁	−0.31	0.25	−0.93	1.66	−0.42	0.04	−0.49	−0.05	−0.83
P ₂₂	−1.39	−0.56	−1.14	1.72	−1.21	0.15	−0.52	0.12	−0.63
P ₂₃	0.16	0.46	−0.95	0.43	−0.07	−0.68	−1.55	0.13	−0.70
P ₂₄	−0.99	−0.32	−1.09	0.61	−1.16	−0.34	−1.64	0.49	−0.68

表 4 评价指标的相关系数矩阵

Tab. 4 Correlation coefficient among indexes

参数	f	ω	$M_{V\max}$	$F_{V\max}$	$M_{H\max}$	$F_{H\max}^{+}$	$F_{H\max}^{-}$	H_{\max}	V_{\max}
f	1.000	0.708	0.590	−0.229	0.847	−0.657	−0.179	−0.667	−0.307
ω	0.708	1.000	0.195	0.383	0.428	−0.786	−0.585	−0.746	−0.747
$M_{V\max}$	0.590	0.195	1.000	−0.604	0.809	−0.387	0.104	−0.531	0.105
$F_{V\max}$	−0.229	0.383	−0.604	1.000	−0.536	−0.242	−0.497	−0.180	−0.705
$M_{H\max}$	0.847	0.428	0.809	−0.536	1.000	−0.416	0.044	−0.488	0.056
$F_{H\max}^{+}$	−0.657	−0.786	−0.387	−0.242	−0.416	1.000	0.779	0.956	0.844
$F_{H\max}^{-}$	−0.179	−0.585	0.104	−0.497	0.044	0.779	1.000	0.651	0.865
H_{\max}	−0.667	−0.746	−0.531	−0.180	−0.488	0.956	0.651	1.000	0.768
V_{\max}	−0.307	−0.747	0.105	−0.705	0.056	0.844	0.865	0.768	1.000

件不变的情况下,承载能力高的碗扣架刚度较大; f 与 $M_{V\max}$ 、 $M_{H\max}$ 正相关,支架刚度越大,杆件承受的弯矩也就越大, f 与 $M_{H\max}$ 相关性最高; f 与 $F_{V\max}$ 、 $F_{H\max}^{+}$ 、 $F_{H\max}^{-}$ 负相关,支架刚度越大,荷载重分布能力越强,最大轴力值相对降低; f 与 H_{\max} 、 V_{\max} 负相关,支架刚度越大,节点位移相对减小。

ω 与 $M_{V\max}$ 、 $M_{H\max}$ 正相关,即最大弯矩越大,极限承载能力越高。在相同沉降和局部变形条件下,

弯矩值大说明碗扣架刚度高,极限承载能力高; ω 与 $F_{H\max}^{+}$ 、 $F_{H\max}^{-}$ 、 H_{\max} 、 V_{\max} 负相关,水平杆轴力与节点位移越大,碗扣架极限承载能力越低, $F_{H\max}^{+}$ 、 $F_{H\max}^{-}$ 、 H_{\max} 、 V_{\max} 的值与支架不均匀沉降和局部变形有关,不均匀沉降与局部变形越大, $F_{H\max}^{+}$ 、 $F_{H\max}^{-}$ 、 H_{\max} 、 V_{\max} 值越大,碗扣架极限承载能力越低。

$M_{V\max}$ 与 $F_{V\max}$ 负相关性比较明显; $M_{V\max}$ 值越小

表明立杆受水平杆件约束作用越小,此时荷载主要由立杆承担,故在总荷载不变的情况下立杆轴力越大,立杆所受弯矩越小。

$F_{V_{\max}}$ 与 $M_{H_{\max}}$ 、 $F_{H_{\max}}^{+}$ 、 $F_{H_{\max}}^{-}$ 、 V_{\max} 负相关性比较明显,水平杆件弯矩、轴力越大,表明水平杆件对立杆约束越强,故立杆轴力向周围杆件分配,所以立杆轴力越小;当节点产生竖向位移时,周边立杆对其约束作用显著加强,其所受轴力被周边杆件分担,故立杆轴力此时随竖向位移增大而减小。

$M_{H_{\max}}$ 与 $M_{V_{\max}}$ 显著正相关,碗扣架水平杆件与立杆弯矩通过节点传递,故当立杆弯矩增大时,水平杆件弯矩亦同时增大。

求解相关系数矩阵的特征值,并求得与之相对应的贡献率及累积贡献率,如表 5 所示。

表 5 特征值及对应贡献率

Tab. 5 Eigenvalue and its contribution degree

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
F_1	4.884	54.27	54.27
F_2	2.970	33.01	87.28
F_3	0.593	6.59	93.87
F_4	0.296	3.28	97.15
F_5	0.133	1.48	98.63
F_6	0.088	0.98	99.61
F_7	0.022	0.24	99.85
F_8	0.013	0.14	99.99
F_9	0.001	0.01	100.00

从表 5 可以得到 $\sum_{i=1}^k \lambda_i = 87.28\%$,依据主成分选取原则: $\eta \geq 0.85$,得到 2 个主成分 F_1 、 F_2 为

$$\begin{aligned} F_1 = & -0.748f - 0.884\omega - 0.412M_{V_{\max}} - 0.253F_{V_{\max}} - \\ & 0.516M_{H_{\max}} + 0.974F_{H_{\max}}^{+} + 0.72F_{H_{\max}}^{-} + \\ & 0.953H_{\max} + 0.817V_{\max} \\ F_2 = & 0.524f - 0.096\omega + 0.812M_{V_{\max}} - 0.883F_{V_{\max}} + \\ & 0.808M_{H_{\max}} + 0.059F_{H_{\max}}^{+} + 0.517F_{H_{\max}}^{-} - \\ & 0.06H_{\max} + 0.566V_{\max} \end{aligned}$$

由表 6 数据分析可得:第 1 主成分 F_1 的贡献率高达 54.27%,主要包含水平杆件最大轴拉力 $F_{H_{\max}}^{+}$ 、水平杆件最大轴压力 $F_{H_{\max}}^{-}$ 、碗扣架一阶屈曲模态系数 ω 、节点最大水平位移 H_{\max} 、节点最大竖向位移 V_{\max} 。如果碗扣架局部存在较大变形或立

杆基础发生明显不均匀沉降,将导致周边水平杆件内部产生较大轴力,所以水平杆件轴力是评价碗扣架安全状态的重要指标。碗扣架为多次超静定结构,由杆件通过半刚性节点连接而成。理想状态下,碗扣架节点不发生位移。但实际荷载作用下碗扣架节点不可避免产生一定的位移,这些位移主要由 3 个方面原因造成:①立杆基础的不均匀沉降;②立杆接长点空隙压缩;③附近杆件产生大变形。当节点位移量达到一定值就可能导致局部失稳。所以节点最大水平位移和最大竖向位移是评价碗扣架局部稳定性的重要指标^[15]。一阶屈曲模态系数 ω 是由碗扣架极限承载能力与当前工作荷载的比值得到,表征工作状态下碗扣架承载能力安全储备量, ω 值越大则碗扣架承载能力储备量越大。

第 2 主成分 F_2 的贡献率为 33.01%,远大于第 3 主成分 F_3 (6.59%),主要体现立杆最大弯矩 $M_{V_{\max}}$ 、水平杆最大弯矩 $M_{H_{\max}}$ 、立杆最大轴力 $F_{V_{\max}}$ 这 3 项指标。碗扣架在刚性地基、杆件刚度足够的理想工作条件下,荷载由立杆传递至地基,碗扣节点不发生位移,水平杆件不受弯矩作用。但在实际工作中,碗扣节点由于基础沉降、立杆接长点空隙压缩,杆件屈曲变形等原因产生不同程度位移。由于半刚性节点对杆件的相互约束作用,当节点产生位移时,水平杆件和立杆产生弯矩。当荷载及节点刚度一定的情况下,杆件弯矩值越大,则杆件附近节点位移越大,故杆件弯矩是评价碗扣架局部稳定性的重要指标。立杆受压是碗扣架正常安全状态下最主要的受力方式,一般立杆所受轴压力远小于其极限抗压能力。但实际情况是受压构件可能在轴压力远小于其受压强度时发生压杆失稳。鉴于此种考虑,第 2 主成分中包含立杆轴压力意义明确。

2.4 碗扣架综合评价分析

由表 5 可知 2 个主成分的贡献率分别是: $\lambda_{F_1} = 54.27\%$ 、 $\lambda_{F_2} = 33.01\%$,由此可得碗扣架安全状态综合评价得分值 F 的计算公式为

$$F = 0.5427F_1 + 0.3301F_2 \tag{7}$$

将表 2 中各样本的数据代入式(7),可以得到各样本的综合评价得分值,见下页表 7。

表 6 主成分特征向量

Tab. 6 Eigenvector of principal component

指标	f	ω	$M_{V_{\max}}$	$F_{V_{\max}}$	$M_{H_{\max}}$	$F_{H_{\max}}^{+}$	$F_{H_{\max}}^{-}$	H_{\max}	V_{\max}
F_1	-0.748	-0.884	-0.412	-0.253	-0.516	0.974	0.720	0.953	0.817
F_2	0.524	-0.096	0.812	-0.883	0.808	0.059	0.517	-0.060	0.566

表 7 各碗扣架搭设方案安全状态综合评价值

Tab. 7 Comprehensive evaluation of safety statue for each erection of cuplok scaffolding

排序	方案编号	F	排序	方案编号	F	排序	方案编号	F
1	P ₁₆	53.76	9	P ₆	37.44	17	P ₁₈	34.23
2	P ₁₂	53.63	10	P ₂	37.23	18	P ₂₂	34.00
3	P ₁₄	53.52	11	P ₅	37.03	19	P ₂₀	33.88
4	P ₁₀	53.36	12	P ₈	36.82	20	P ₁₇	33.26
5	P ₁₅	53.05	13	P ₄	36.63	21	P ₂₁	33.09
6	P ₁₁	52.72	14	P ₇	36.14	22	P ₂₄	32.84
7	P ₁₃	52.50	15	P ₁	36.12	23	P ₁₉	32.18
8	P ₉	52.07	16	P ₃	36.03	24	P ₂₃	32.00

评价标准等级如表 8 所示。

表 8 碗扣架安全状态综合评价标准

Tab. 8 Comprehensive evaluation criterion for safety statue of cuplok scaffolding

指标	良好	一般	较次	较差
F	<32	32~42	42~52	>52

分析表 7 中各碗扣架搭设方案安全状态综合评分结果,可以得出以下几点结论:

(1)24 个不同搭设方案,最高得分值 $F_{P16} = 53.76$,最低得分值 $F_{P23} = 32.00$ 。

(2)各碗扣架搭设方案得分区域分布显著,可以将 24 个搭设方案按得分值大小分为 3 个区域 A_1 、 A_2 、 A_3 ,如图 4 所示。 A_1 得分最高,包含方案 $P_9 \sim P_{16}$,得分区间为 52.07~53.76; A_2 包含方案 $P_1 \sim P_8$,得分区间为 36.03~37.44; A_3 包含方案 $P_{17} \sim P_{24}$,得分区间为 32.00~34.23。

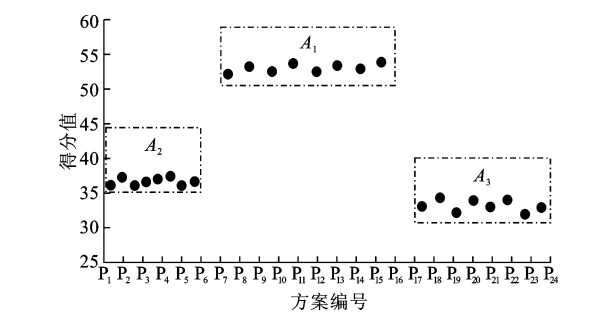


图 4 各支架得分分布区间

Fig. 4 Scores distribution of scaffoldings

(3) A_1 区采用 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 的平面布置形式, A_2 区采用 $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ 的平面布置形式, A_3 区采用 $0.9\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 或 $1.2\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ 的平面布置形式。从得分分布区间来看,立杆间距和水平步距对碗扣架安全状态综合评价得分值影响较大。

(4)以 A_1 区为例, $F_{P15} = 52.08 > F_{P9} = 51.22$,说明顶底杆伸出越长,碗扣架综合评价得分越高; $F_{P13} = 51.64 > F_{P9} = 51.22$,说明顶杆伸出越长,得

分越高; $F_{P15} = 52.08 > F_{P13} = 51.64$,说明接地杆自由长度越长,得分越高; $F_{P10} = 52.44 > F_{P9} = 51.22$, $F_{P12} = 52.63 > F_{P11} = 51.77$, $F_{P14} = 52.59 > F_{P13} = 51.64$, $F_{P16} = 52.76 > F_{P15} = 52.08$,表明节点刚度大的方案得分低于节点刚度弱的方案。

(5) A_3 区得分低于 A_1 、 A_2 区,但 A_3 区支架杆件布置的密集度不如 A_1 区。通过分析,主要是由于计算过程中,模型中 A_3 区剪刀撑角度大于 A_1 区剪刀撑角度(45°),改善了立杆受力状态造成。由此可以看出,剪刀撑布置形式对碗扣架的受力状态影响相当显著。

(6)综合评估结果表明,碗扣架立杆最大轴压力、水平杆最大轴拉力和水平杆最大轴压力对碗扣架综合评估结果影响比较大,尤其是立杆最大轴压力影响最大。这与碗扣架是以立杆为主要受力构件的半刚性节点结构有关,在以后的碗扣架施工监测中应当加大立杆轴力测点数量及观测频率,以保证其安全性。

鉴于以上结论与相关试验研究结果及相关规范对本文碗扣架搭设方案的评定结果总体一致,说明本文方法可以有效地评价桥梁碗扣架的整体安全状态,对碗扣架安全状态评估方法研究具有一定的理论指导和借鉴意义。

3 结 语

(1)针对碗扣架安全状态提出 9 项评价指标,将主成分分析法引入到现浇桥梁碗扣架安全状态评价方法研究中,得出 1 种新的碗扣架整体安全状态评价方法。通过实例验证了评估结果明确且合理。

(2)根据碗扣架安全状态综合评价结果,碗扣架步距、立杆间距、顶杆伸出高度、接地杆自由长度较大时,得分值相对较高;节点刚度越强,得分相对越低。综合评价得分值低的碗扣架,其安全状态优于综合评价得分值高的碗扣架。

(3)提出的评价方法具有普遍适用性,通过指标的调整与优化,该综合评价方法可应用于碗扣架搭设方案的优化、经济性比选等其他工程领域。

参考文献:

References:

- [1] 高秋利. 碗扣式钢管脚手架和支撑架受力性能试验与分析[D]. 天津:天津大学,2011.
GAO Qiu-li. Experiment and analysis on load-bearing capacity of steel tubular scaffolds with bowl-button-type connection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [2] 谢楠,王勇. 超高模板支架的极限承载能力研究[J]. 工程力学,2008,25(增1):148-153.
XIE Nan, WANG Yong. Study on load-carrying capacity of super high supports for formwork[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (S1): 148-153. (in Chinese)
- [3] Prabhakaran U, Beale R G, Godley M. Analysis of scaffolds with connections containing looseness[J]. Computers & Structures, 2011, 89(21):1944-1955.
- [4] Zordan T, Briseghella B, Liu T. Finite element model updating of a tied-arch bridge using Douglas-Reid method and Rosenbrock optimization algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4):280-292.
- [5] 易桂香,辛克贵,黄勋. 有多层立杆的双排碗扣式脚手架稳定性分析[J]. 工程力学,2012,29(3):62-66.
YI Gui-xiang, XIN Ke-gui, HUANG Xun. Analysis of stability of double-pole steel-tubular scaffolding with bowl-buckle (DSSB) and multi-story of vertical tubes [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (3): 62-66. (in Chinese)
- [6] 谢楠. 混凝土浇筑期高大模板支架工作状态的试验测试[J]. 工程力学,2011,28(增1):85-89.
XIE Nan. In-situ test of working state of high false-work during concrete placement[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S1):85-89. (in Chinese)
- [7] 杨美良,李振华,钟扬,等. 混凝土箱梁桥 0[#] 1[#] 块施工托架安全性分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2014,34(1):64-69.
YANG Mei-liang, LI Zhen-hua, ZHONG Yang, et al. Safety analysis of bracket structure for main beam 0[#] 1[#] segment construction of concrete box girder bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(1):64-69. (in Chinese)
- [8] 王旭,陆春阳. 碗扣连接刚度对支架整体受力的影响分析[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册). 北京:人民交通出版社,2010:416-421.
WANG Xu, LU Chun-yang. Analysis on the influence of bowl cuplock rigidity on the carrying capacity of scaffold [C]//Bridge and Structural Engineering Branch of China Civil Engineering Society. Proceedings of the 19th National Academic Bridge Conference (Part ii). Beijing: China Communications Press, 2010: 416-421. (in Chinese)
- [9] Chandrangsut T, Rasmussen K J R. Investigation of geometric imperfections and joint stiffness of support scaffold systems[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(4):576-584.
- [10] 林立,周康喆,张首飞. 碗扣式钢管脚手架节点受力性能研究[J]. 四川建筑科学研究,2012,38(3):336-339.
LIN Li, ZHOU Kang-zhe, ZHANG Shou-fei. Research on cuplock joint mechanical properties of steel tubular scaffolding[J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(3): 336-339. (in Chinese)
- [11] 陈永瑞. 碗扣式模板支撑架设计及施工监控[D]. 西安:长安大学,2011.
CHEN Yong-rui. Study on the cuplock steel tubular scaffolding design and construction monitoring [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [12] Zhang H, Chandrangsut T, Rasmussen K J R. Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems [J]. Structural Safety, 2010, 32(6):393-401.
- [13] Chen Y R, Liu L J, Duan Y C. Study on safety control of CSTS and application[J]. Advanced Materials Research, 2013, 671-674(3):2057-2062.
- [14] Wold S, Esbensen K, Geladi P. Principal component analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1987, 2(1):37-52.
- [15] 秦煜,刘来君,张艳,等. 混凝土桥梁结构工作状态综合评价体系[J]. 广西大学学报:自然科学版,2011,36(4):587-593.
QIN Yu, LIU Lai-jun, ZHANG Yan, et al. Comprehensive evaluation system for working conditions of concrete bridge structures[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36(4): 587-593. (in Chinese)
- [16] 李波,韩森,徐鸥明,等. 基于主成分分析法的沥青路面使用性能评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):15-18.
LI Bo, HAN Sen, XU Ou-ming, et al. Evaluation of asphalt pavement performance based on principal component analysis[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 15-18. (in Chinese)