

中小跨径桥梁荷载试验影响因素分析与思考<sup>\*</sup>

周广利

(山东省交通科学研究院, 山东 济南 250101)

**摘要:** 作为诊断中小跨径桥梁结构服役性能最为直接的方法之一, 荷载试验的开展质量及相关结论直接影响后续养护决策的制定。文中对当前中小跨径桥梁荷载试验实施的关键内容、试验结论的主要影响因素进行总结与分析, 并对现阶段荷载试验中的部分关键问题进行探讨, 结合工程实践经验对相关问题的处理及荷载试验质量提升等提出建议, 为中小跨径桥梁荷载试验过程的进一步细化及质量保障等提供参考。

**关键词:** 桥梁; 中小跨径桥梁; 荷载试验; 影响因素

**中图分类号:** U446.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2020)06-0140-05

桥梁荷载试验通过施加荷载对桥梁结构或构件的静、动力特性进行现场测试, 包括静载试验和动载试验。对于新建特大桥及采用特殊工艺、特殊结构的桥梁, 荷载试验作为测定施工质量和结构受力性能的重要手段, 常作为交工验收的必要程序, 也为后期桥梁运营养护和检测评定提供初始技术数据; 对于结构形式相对简单的预制装配中小跨径桥梁, 交工阶段往往不进行荷载试验, 而在施工阶段选取若干片梁板单独进行单梁静载试验; 对于技术状况等级为四、五类及拟提高荷载等级或需通行特殊重型车辆的旧桥, 荷载试验是桥梁外观调查评定的深化和补充, 结合材质状况检测数据, 通过结构验算实现对桥梁承载能力的量化分析和评定, 其结果通常作为桥梁加固和改造的重要依据。目前公路桥梁荷载试验主要依据 JTG/T J21-2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》和 JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》开展, 两规范是在《公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)》和《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的基础上总结经验编制形成, 尽管内容可操作性有了较大提升, 但在实施过程中仍然存在诸多问题。该文针对中小跨径桥梁荷载试验中常见的问题进行总结和梳理, 并提出针对性的解决建议。

## 1 荷载试验关键影响因素分析

桥梁荷载试验在试验准备、现场实施和试验结果分析等阶段均受诸多因素的影响。下面根据实际工程经验, 结合相关文献的研究成果, 对理论计算、

加载测试和数据处理等荷载试验主要环节的关键影响因素进行分析。

### 1.1 理论分析过程中的影响因素分析

#### 1.1.1 结构简化模型的建立

结构理论计算模型的建立是影响试验结论的关键环节。使用平面程序往往不能准确模拟复杂或异形桥梁的空间受力状况, 同时部分平面程序不能进行模态分析等动力学计算, 故结构计算优先采用空间有限元程序。在结构有限元模型建立时, 不管使用平面程序还是空间程序, 要尽量做到有限元模型与实际结构相一致。在实际工程中, 大型桥梁的挠度和应变校验系数较高, 实测的结构自振频率与计算值吻合较好, 而对于中小跨径桥梁, 特别是拼装结构的砼梁桥, 实测挠度、应变和自振频率等与理论计算值常偏差较大, 其主要原因在于模型的简化或等效出现了问题。设计中通常按较保守的方法进行模型处理和简化, 如空心板梁桥通常不考虑铰缝参与受力、桥面铺装层仅考虑部分参与受力等, 这些简化计算和荷载试验时结构的实际状态存在较大差别。对桥梁结构进行模态分析时, 若要计算结构的扭转振型, 必须使用梁格法或空间实体有限元方法计算获取扭转振型。而对于整体现浇的桥梁, 若宽跨比较小, 通常可简化为梁式结构; 但若宽跨比较大, 则优先使用梁格法或三维实体单元。

材料参数取值的合理和准确性直接影响桥梁结构的计算结果, 其中砼弹性模量的选择最重要。对于新桥的荷载试验, 可根据设计值选取材料参数; 对

<sup>\*</sup> 基金项目: 山东省交通科技创新计划项目(2016B49; 2019B25)

于旧桥,则宜根据材质检测结果设置材料参数。

### 1.1.2 横向分布计算方法选择和参数取值

横向分布系数能有效地将复杂的空间问题简化成对单梁的计算问题,跨中区域的横向分布系数可采用铰接梁法、刚接梁法、偏心压力法、比拟正交异性板法和弹性支撑法等,支点截面的横向分布多采用杠杆原理法。但理论计算横向分布系数与结构的真实状况存在差别,需根据桥梁结构形式和实际状况等因素选择最合适的方法和最合理的参数。如装配式小箱梁桥可采用刚性板梁、刚性横梁法和比拟正交异性板法进行计算,但对不同宽跨比的桥梁,宜根据实际选用不同计算方法,3~5片梁时优先使用刚性横梁法,5~9片梁时宜使用比拟正交异性板法。另外,是否考虑铺装层也对计算结果有明显影响。梁格法也是桥梁上部结构分析的有效方法,梁格法和经典横向分布计算方法对比使用能相互验证,有效降低计算误差,有助于试验结果的准确判定,提高试验结果的精度。

### 1.1.3 桥面铺装层参与结构受力的处理

在桥梁设计时,桥面铺装层通常视为桥梁的附属结构,不参与梁体受力,这种处理方法有利于提高结构安全储备,在设计角度是偏于安全的。大跨径桥梁的主梁高度大,铺装层对箱梁刚度和强度的提升较小,可忽略不计。对单梁的试验研究结果表明,桥面铺装能显著提高单梁的抗裂、刚度、极限承载力,极限承载力提高可达25%以上。因此,在中小跨径桥梁评估时,其计算模型宜适当考虑铺装层的影响,以减小计算假定导致的误差。对小箱梁桥的单梁和试验研究发现,若接触面进行凿毛处理,铺装层可100%参与受力,一般情况下约70%铺装层参与小箱梁共同受力,表明桥面铺装层对荷载试验结果有重要影响。为真实反映结构的受力状况,在进行理论计算和承载力评定时,需考虑桥面铺装层参与梁体受力。

### 1.1.4 铰缝、湿接缝等协同工作的考虑

目前公路上广泛采用深铰缝的空心板结构,铰缝尺寸相对于空心板不能忽略不计,同时空心板和铰缝结合面采取凿毛处理,空心板在荷载试验中能充分参与结构受力。在铰缝破损前的弹性工作阶段,铰缝完好,铰缝能均匀传递荷载,并与空心板共同受力。对于中小跨径桥梁的理论计算,不管采用平面还是空间有限元程序,均宜考虑铰缝和湿接缝对结构整体刚度、强度的影响,若铰缝和湿接

缝等使用的材料与主梁相同或差别不大,可考虑铰缝和湿接缝直接参与结构受力。

### 1.1.5 简支梁桥墩顶桥面连续的影响

简支梁桥是中国数量最多的桥梁结构形式,且大部分采用桥面连续铺装。桥面连续的简支桥梁结构通常按简支结构计算,设计阶段采用这种处理方法是偏于保守的,但在静载试验计算时若忽略桥面连续的影响,将导致理论挠度值出现较大偏差。根据相关研究成果,简支梁桥梁端处桥面连续铺装在汽车荷载作用下会产生过大的应力,墩顶连续处需布置加密钢筋网防止墩顶桥面横向开裂。采用桥面连续结构可起到改善空心板桥受力性能的作用,对于20m空心板桥,考虑桥面连续的结构模型的挠度和应变最大值分别为单跨结构模型的80%、87%。而在实际荷载试验中,墩顶通常存在1条或多条横向裂缝,当墩顶出现横向裂缝时,墩顶桥面铺装对挠度和应变的影响并不容易准确评估,宜根据检测情况考虑桥面连续铺装层厚度的折减。

### 1.1.6 斜弯桥梁的计算

斜度大于 $15^\circ$ 的预制装配式斜板、斜梁桥应按斜交桥理论计算荷载效应,平面弯桥一般可采用数值计算方法进行受力变形分析。与正交直线桥梁相比,斜弯桥梁受力特性有很大区别,主要有轴向变形和平面内弯曲的耦合、竖向挠曲与扭转的耦合及它们与截面畸变的耦合。因此,斜弯桥梁的荷载试验应以正交、直线桥梁为基础,结合斜弯桥梁的受力特性进行理论计算和方案制订。考虑斜弯桥梁的空间受力特性,其计算比正交直线桥梁要更全面,必要时宜采用空间有限元程序。

### 1.1.7 模态分析时预应力的处理

桥梁结构中的钢筋和钢绞线等可在一定程度上提升结构刚度,但在进行整体受力分析时,若各种钢筋和钢绞线考虑过细,有限元模型将过于复杂,影响计算效率,特别是使用ANSYS和ABAQUS等通用有限元程序时。相关研究成果表明,预应力可一定程度上提升结构的自振频率,但相比弹性模型等材料特性其影响较小,某些情况下甚至可忽略不计。因此,采用实体单元对结构进行三维有限元分析时,可不考虑预应力筋对结构整体刚度的影响。

### 1.1.8 模态分析时二期恒载的处理

桥面铺装层和护栏等二期恒载会对结构自振频率产生影响,对于中小跨径梁桥,考虑二期恒载的模型计算所得基准频率比不考虑的模型通常下降5%

左右。因此,进行结构模态分析时,水泥砼铺装层可部分参与结构受力,沥青铺装层和护栏等等效为附属质量。可采用以下两种处理方法:1)等效为集中质量,作用于相应的单元或节点上;2)把附属质量等效为结构主体质量,将主体材料的密度相应放大,实现对附加质量的模拟。

## 1.2 加载和测试阶段的关键点

### 1.2.1 试验工况和测试断面选择

桥梁静载试验要根据桥梁结构形式、检测目的、现场检测条件等综合确定主要加载工况和控制断面,一般需遵循最不利受力原则和最具代表性原则。选择的加载试验项目应抓住重点,不宜过多,但主要工况应为必做工况,如简支梁桥应以跨中截面的最大正弯矩工况为主、 $L/4$  截面最大正弯矩和支点附近截面最大剪力工况为辅。在制订试验方案时,在满足试验荷载效率的前提下,可合并相应工况,以提高试验效率。偏载工况通常是桥梁设计计算时最不利工况,往往能反映桥梁实际内力及变形状态与设计状况的差异,对于横向位置不对称的直桥、斜弯桥和异形桥需重点考虑。

### 1.2.2 试验跨选择

对于结构形式相同且跨数较多的桥梁,荷载试验优先选择在最具代表性或技术状况最差的孔径进行,试验跨的选择通常根据外观调查结果、综合现场的检测条件确定。但试验跨的选择仅依靠外观调查结果,难免存在主观性和偏差。可通过简单的跑车试验或脉动试验,利用冲击系数或自振频率结果粗略估算桥跨的健康状况,挑选最薄弱的试验跨。对于加固或改建后的桥梁,宜按照最不利受力原则,结合加固改建的具体内容、范围及改造前病害严重程度优化试验跨和试验断面选择。

### 1.2.3 测点布置

位移测点和应变测点应根据测试内容、测试断面合理布置,应能反映结构的受力特性。挠度主要体现结构的整体受力特性,纵桥向宜布设在各工况荷载作用下挠度曲线的峰值位置,横桥向应能充分反映横向挠度的分布特性,在偏载一侧可适量加密测点,多梁式结构宜逐片布置,整体式截面不少于3个。应变主要反映构件的局部受力特性,测点布置应遵循重点突出、上下兼顾的原则。使用单向应变计时要综合考虑测点位置和测试方向,且关键位置测点宜加密布设。根据构件高度方向布置传感器测定中心轴时,高度方向不少于5个测点且应远离中

性轴位置。需指出的是,钢筋砼受弯构件受拉区砼在试验时若发生开裂,砼应变测试结果会失真,此时应变测点宜布置在受拉区的主筋上。

### 1.2.4 变位测量方法选择

目前中小跨径桥梁变位测量常用仪器有机械式位移计、电测位移计、水准仪和全站仪等。机械式位移计安装、使用方便,精度高,受环境影响小,但不能自动记录,适用于挠度测点少、便于搭设支架的桥梁。电测位移计测量挠度精度高,稳定性好,响应快,且便于通过数据采集系统实现多测点的自动采集记录,适合实测挠度较小的中小跨径桥梁,但需现场搭设支架,在跨河或山谷不宜采用。对于跨度大、实测挠度大的桥梁,若精度要求不高,可选择精密水准仪、全站仪进行检测,但受光线和距离影响较大,且观测视线易受到加载车辆等的阻挡,不能自动采集,效率低。在实际工程中,要根据检测条件选择最有效的检测方法,条件允许时首选电测位移计。

### 1.2.5 应变测试传感器的选择

目前应变测试技术已十分完善,但由于砼材质的不均匀性和传感器的安装质量等因素,应变测量依然是桥梁荷载试验中的难点。目前使用最广泛的应变测试方法有电阻应变片、振弦式和光纤光栅式应变传感器。电阻应变片价格低廉,灵敏度高,响应速度快,且便于通过数据采集系统自动采集记录,但现场贴片要求高,工作量大,易受外界环境的影响。振弦式传感器的稳定性好,抗干扰能力强,安装和数据采集也较方便,但表贴式传感器对安装质量和安装底座处砼质量要求高,预埋式传感器则需在砼浇筑前安装。应变片全工作长度与桥梁测试点处的材料接触,而振弦式传感器是通过安装底座与桥梁结构实现协同变形,其安装质量特别是传感器与结构的黏结性能直接影响传感器与结构变形的一致性,从而决定测量数据的准确性。需指出的是,对于钢筋砼梁桥等规范允许出现裂缝的结构,若应变测点在试验前就存在受力裂缝,裂缝的存在使加载后砼应变能得以释放,此时进行砼表面应变测量往往没有工程意义,但可以根据实测应变值推算裂缝处的受力和扩展状况。

### 1.2.6 试验荷载的加载和控制

静载试验一般采用车辆加载或重物加载,加载级数根据加载的总荷载量和最小荷载增量确定,但即使受条件限制,至少也应分成3级施加。加载过程最好采用每级加载后卸载的方法,以准确测量每

一级荷载对应的变形。但这种方法加载时间长,严重影响试验效率,目前大多采用逐级加载、达到最大荷载后再逐级卸载的方法。施加荷载的准确性是影响静载试验结果的重要因素,无论采用何种方法加载,称量误差最大不得超过 5%。若使用车辆加载,装载物在车厢内平整放置,采用称重台或便携轴重仪进行称重,并逐个记录各车的编号、车重、轴重和轴距。若使用重物加载,应分别称量记录各级荷载量。使用体积估算加载物重量的方法在试验中往往不可靠,若使用重物加载而又不便进行称重,可使用压力传感器测量空心板的重量。试验开始前,宜先进行预加载,使荷载与变形关系趋于稳定,还可测试全部检测仪器是否工作正常。

### 1.2.7 支点位移

静载试验中往往忽略支点处位移的测量。但对于支点处支撑条件不良的情况,必须进行支座下沉量、墩台沉降量测量。若加载过程中出现偏心加载或梁体扭转,宜增加测点以消除影响。如单梁静载试验往往在预制梁场进行,若支点处的支撑条件较差,加载过程中梁体通常会出现不同程度的扭转或转动,需在各控制断面两侧布置挠度测点,以便在数据处理时进行修正。

### 1.2.8 脉动测试

在桥梁结构脉动试验中,要根据桥梁类型、跨径规模和计算结果合理确定传感器布置方案并选择适宜的参考点。中小跨径桥梁的刚度通常较大,测试中一般着重关注竖向振动特性。结构前 5 阶振型中以纵向弯曲振型和扭转振型为主,在模态测试中若要采集和分析结构的扭转振动情况,需纵向布置两列测点。对于拼装结构或有可能发生局部振动的结构,测点应布置在主梁的上方,以减小局部振动的影响。此外,宜按跨径四分点等分布置,固定参考点应避开振型相位反转点,且采样频率应结合理论计算结果取 10 倍以上的最高有用信号频率。

## 1.3 数据的处理

### 1.3.1 静载试验

静载试验数据分析中主要参数包括荷载试验效率、各测点的位移和应变校验系数、各测点的相对残余挠度和应变及各种试验曲线。对于装配式结构,通常要分析横向分布系数;对于整体式结构,需分析偏载系数等。

对于荷载试验效率,尽管在试验中会对荷载进行控制,但实际加载量和原设定的方案有一定偏差,

需根据加载量、加载位置等重新进行计算。在挠度分析时,必须区分总挠度、弹性挠度和残余挠度的关系,通常挠度数据处理时需剔除支点沉降的影响,应变数据处理时要进行温度影响修正。静载试验分析通常要绘制实测变位与荷载的关系曲线、控制断面的挠度(应变)分布图、沿纵桥向挠度分布图、截面应变沿高度分布图等,据此对试验结果进行评价,找出异常点、确定结构受力是否处于弹性阶段等。如通过预制空心板跨中断面各测点的挠度分布图能较直观地分析各片空心板的横向分布状况,判断是否出现较明显的单板受力。

若一个控制断面上布置多个实测点,而结构的横向联系又是可靠的,可使用平均校验系数对结构进行分析,也可使用平均挠度值绘制挠度和荷载关系曲线。但若出现横向联系较差或明显的单板受力,则平均校验系数的分析通常不可靠。静力试验数据分析时需对裂缝宽度或深度等进行观测,当裂缝较多时,至少要对关键断面或有代表性的位置裂缝进行分析和判断。

### 1.3.2 动载试验

通过脉动、行车和制动试验可获取位移、应力或加速度等各种振动信号的时间历程曲线,常用的试验数据分析处理方法有时域分析和频域分析。时域分析直接对时程曲线进行分析,可得出振幅、阻尼比和冲击系数等参数;频率分析把时域信号通过傅里叶变换转换为频域信号,得到振动能量按频率的分布状况,从而确定结构的频率及其分布特性。

对于中小跨径等刚度较大的桥梁,前 3~5 阶固有频率在动力分析时最为关注,是评价结构整体刚度的最重要指标。在结构模态分析时,固有频率较易获取,但仅靠单个测点获取的固有频率并不可靠,通常需结合固有振型和阻尼比综合确定。桥梁结构的实测频率一般大于理论计算值,若出现实测频率小于理论计算值的情况,表明桥梁实际刚度比理论值小,结构存在严重开裂等问题,需特别关注。

对于装配式中小跨径桥梁,通过结构模态振型和振幅的分析可对结构横向联系使用状况进行评价,通过结构阻尼比的变化可对结构边界条件、结构材料阻尼特性的改变进行分析判断。冲击系数优先采用桥面无障碍行车下的动挠度时程曲线确定,对实测冲击系数与设计值进行对比,但不能作为承载力评定依据,即使出现实测冲击系数大于设计值的情况,也仅能作出桥梁结构的行车性能差和桥面平

整度不良的评价。

## 2 关于现阶段桥梁荷载试验的思考

### 2.1 静、动载试验数据的相关性问题

对于同一结构,静载和动载试验采用不同的测试方法进行整体刚度或强度评定。静载试验中的挠度数据从整体上反映结构的总体刚度,应变数据反映控制断面的整体强度情况。动载试验中的模态测试主要也是从整体上反映结构的整体刚度状况。从经典的梁理论来看,静力学和模态分析结果应存在相关性。对于桥梁结构,若材料参数、结构尺寸、边界条件等考虑较全面和准确,其静、动载测试数据分析结论应在一定程度上相吻合,如理论挠度值远大于实测弹性挠度,理论频率值也应明显大于实测频率,这种吻合性在大跨径桥梁的静动载试验分析时体现得较好,而对于中小跨径桥梁这种相关性或一致性较差。在荷载试验进行前,首先要对有限元计算模型进行合理简化,尽量保证计算模型准确有效;试验过程中确保各操作环节规范;试验后可根据动测结果对静载模型进行合理优化,确保试验数据能真正反映结构的真实受力状况。

### 2.2 静载试验加载量

针对不同的试验目的,静载试验的加载量有所不同。若加载量为标准荷载(考虑冲击系数),该加载量相对较小,结构一般处于弹性阶段,这种静载试验一般以验证结构的正常使用性能为目的;若加载量为设计规范规定的极限承载能力,结构一般会出现受力裂缝,砼和钢筋会进入塑性阶段,这种静载试验一般以验证有效预应力和承载能力为目的;若加载量继续增大,以结构完全破坏为目的,这种试验一般是验证结构达到失效的荷载。在实际工程中,静载试验以标准荷载作为加载值,这种加载方式能反映结构的承载能力和理想状况的差别,且不会对正常结构造成损伤,缺点是无法对有效预应力等作出评价。在确定试验荷载时,必须对试验荷载下结构的主筋、砼应力状态和裂缝宽度等指标进行复核,确保试验过程中结构安全性在可控范围内。

### 2.3 推广单梁静载试验的必要性

根据上述静、动载试验影响因素分析,成桥状态的静载试验影响因素较多,桥面铺装、铰缝、墩顶连续等均会在一定程度上对试验结果造成影响。目前装配式梁桥依然是中国应用最广泛的桥梁结构类型,预制构件的施工质量也参差不齐,需加大对空心

板、T梁和小箱梁等预制构件的质量控制。预制构件受力模型简单,影响因素较少,便于对材料特性、有效预应力等影响承载能力的因素作出准确评价。因此,在施工期的质量控制环节,对于装配式结构,单梁试验相比成桥试验更具工程意义,建议推广单梁静载试验。

## 3 结语

文中考虑中小跨径桥梁荷载试验实施的相关规定及实际实施过程中遇到的问题,对中小跨径桥梁荷载试验内容及试验结论的关键影响因素等进行分析,并对现阶段中小跨径桥梁荷载试验的部分关键问题如静动载试验数据相关性问题、静载试验加载量及单梁静载试验推广的必要性等进行探索,为桥梁荷载试验的质量提升及试验过程的进一步细化等提供参考。

### 参考文献:

- [1] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 长安大学.公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21-01-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [3] 交通部第二公路勘察设计院.公路旧桥承载能力鉴定办法(试行)[S].北京:人民交通出版社,1989.
- [4] 交通部公路科学研究所,交通部公路局技术处,交通部公路规划设计院.大跨径混凝土桥梁的试验方法:YC-4/1978[S].北京:交通部公路科学研究所,1982.
- [5] 湛润水,胡钊芳.公路桥梁荷载试验[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 钱寅泉,周正茂,王素娟,等.装配式小箱梁桥荷载横向分布数值分析与试验[J].公路交通科技,2012,29(1):86-90.
- [7] 唐国斌,项贻强,管品武.桥面铺装对中小跨径桥梁力学性能影响研究[J].公路交通科技,2010,27(12):94-98.
- [8] 钱寅泉,周正茂,袁桂芳,等.桥面铺装与小箱梁的共同作用试验[J].公路交通科技,2012,29(2):82-86.
- [9] 王渠,吴庆雄,陈宝春.装配式空心板桥铰缝破坏模式试验研究[J].工程力学,2014,31(增刊1):504-509.
- [10] 王虎,胡长顺,王秉刚.简支梁桥梁端处桥面连续铺装层结构计算分析[J].西安公路交通大学学报,2000,20(4):1-4.
- [11] 吴颖恒,张俊平.桥面铺装对简支空心板桥受力行为的影响研究[J].广州大学学报(自然科学版),2011,10(1):60-64.

(下转第160页)

表 10 专家法边坡风险评估结果

评估指标	专家1评估结果		专家2评估结果		专家3评估结果		施工总体风险
	分值	信心指数	分值	信心指数	分值	信心指数	
气候条件	3	0.8	3	0.7	2	0.9	打分为3.03, 风险等级为3级
工程地质	4	0.8	4	0.8	4	0.8	
场地环境	3	0.7	3	0.7	2	0.7	
边坡高度	2	0.6	3	0.8	3	0.8	
风险等级	3.07		3.27		2.75		

该工程风险不可接受,必须采取风险管理和技术措施,并制订预防风险事件发生的方案。

### 3 结语

依据公路路堑高边坡的工程特点,采用层次分析法构建高边坡施工总体风险评估指标体系,并基于云模型提出公路路堑高边坡施工风险总体评估方法。将该方法应用于某公路路堑高边坡工程施工风险评估,结果表明工程地质条件为该工程的主要风险,风险等级最高,为3~4级,偏向3级风险,模型判别结果与专家打分法结果一致,证明所提出的路堑高边坡施工风险评估方法能反映其施工总体风险,具有一定应用价值。

采用语言评价反映评估指标权重和指标安全等级,可兼顾评价对象的模糊不确定性和随意性;基于云模型基本理论和计算方法,将指标权重和安全等级评价语言转化为云模型,可实现定性概念的定量表述,保留了指标的模糊性和随机性特点。该方法的评估过程和结果较好地反映了风险评估的随机不确定和模糊不确定的特点,为高边坡施工总体风险评估提供了一种合理新途径。

### 参考文献:

- [1] 涂圣文,郑克梅,张尧,等.基于改进 CRITIC 法与云模型相结合的高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估模型研究[J].安全与环境工程,2019,26(3):127—132.
- [2] 李炼.公路路堑高边坡施工安全风险评估[D].重庆:重

- 庆交通大学,2017.
- [3] 林俊勇.高速公路路堑高边坡施工安全风险评估研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [4] 张雷,王晓雪.边坡工程风险评估与风险因子比率分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(2):390—394+412.
- [5] 何海鹰,胡甜,赵健.基于 AHP 的岩质高边坡风险评估指标体系[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2861—2868.
- [6] 吴忠广,王海燕,陶连金,等.高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法[J].中国安全科学学报,2014,24(12):124—129.
- [7] 李典庆,肖特,曹子君,等.基于高效随机有限元法的边坡风险评估[J].岩土力学,2016,37(7):1994—2003.
- [8] LI De-yi.Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers journal of computer science and mathematics with application[J].Elsevier Science,1998,35(3):99—123.
- [9] 李德毅.不确定性人工智能[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [10] 刘常昱,李德毅,杜鹃,等.正态云模型的统计分析[J].信息与控制,2005,34(2):236—239.
- [11] 黄震,傅鹤林,张加兵,等.基于云理论的盾构隧道施工风险综合评价模型[J].铁道科学与工程学报,2018,15(11):3012—3020.
- [12] 傅鹤林,黄震,黄宏伟,等.基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J].工程科学学报,2017,39(5):794—801.

收稿日期:2020—07—27

\*\*\*\*\*

(上接第 144 页)

- [12] 李瑞鸽,张耀庭.预应力混凝土梁自振频率试验研究[J].桥梁建设,2008(1):33—36.
- [13] 刘龄嘉,贺拴海,赵小星.预应力对混凝土简支梁振动频率影响的试验研究[J].铁道建筑,2007(8):10—12.
- [14] 闫红,郭良友.多跨桥梁动静载试验时试验桥跨的选择[J].桥梁建设,2005(增刊1):139—141.
- [15] 钱寅泉,张学亮,袁桂芳.中小跨径桥梁挠度测试方法

- 比较[J].中外公路,2012,32(2):89—92.
- [16] 白应华,徐志红,罗凯,等.桥梁的动力参数测试及损伤识别的若干讨论[J].中国水运(理论版),2007,5(1):60—61.
- [17] 王岐峰,李炎,李万恒,等.桥梁自振特性与承载能力分析[J].公路交通科技,2005,22(11):93—95.

收稿日期:2020—03—31