

基于监测数据的预应力混凝土梁施工质量评价

吴小平¹, 阮映辉², 陈岳飞^{3,5}, 刘志文³, 张英杰⁴

(1.浙江省公路与运输管理中心, 浙江 杭州 310009; 2.浙江台州市沿海高速公路有限公司, 浙江 台州 318000;
3.湖南大学风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 4.湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082;
5.长沙旭辉房地产开发有限公司, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 高速公路建设中混凝土施工质量是关注的重点,传统方法主要是通过人工检测与经验判断来评价混凝土梁的施工质量,存在一定的滞后与主观意见等影响。根据浙江沿海高速公路信息化平台所监测到的混凝土梁施工监测数据,采用层次分析法和模糊评价相结合的方法建立了预应力混凝土梁施工质量评价体系;然后采用专家问卷调查法与层次分析法相结合的方法确定各评价指标权重;最后根据台州沿海高速预应力混凝土梁施工监测数据,对不同施工标段预应力混凝土梁施工质量进行评价。结果表明:采用建立的预应力混凝土梁评价体系可及时、客观地对不同标段预应力混凝土梁施工质量进行评价,避免了人为因素影响;浙江沿海高速台州段不同施工标段预应力混凝土梁总体施工质量优良,各标段评价结果与该工程质量检测结果基本相符。

关键词: 预应力混凝土梁;施工质量评价;评价体系;权重;层次分析法

中图分类号: U445.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)08-0129-06

0 引 言

随着我国交通基础设施建设的持续推进,高速公路建设项目管理信息化要求日益提高。高速公路建设项目具有规模大、投资数额大、技术要求高、参建单位和人员多等特点,采用传统的工程项目管理方法无法及时更新动态信息,管理效率和质量均难以满足要求。因此,如何结合现代信息技术对工程质量和施工管理水平进行合理评价是高速公路建设管理面临的一个重要问题。

国内外许多学者针对基础设施建设的施工质量评价方法和体系开展了大量的研究工作。在高速公路施工质量评价方面,Zambrano 等开展了路基压实施工质量监控研究,提出路基先进密实质量控制方法(advanced compaction technology, ACT),实现了路基压实过程中的自动监测控制技术^[1]。卢晓红从评价指标体系构建、指标筛选方法、标准化方法和权重确定四个方面,对道路交通建设项目评价指标体系进行了深入分析与总结。最后以广西水任至南宁高速公路环境质量评价为例进行了实证分析^[2]。杜鹏以公路建设项目目标评价指标和评价方法的构建为主,建立了模糊综合评价模型^[3]。苏燕将层次分析方

法与模糊评价方法相结合,建立了多层次模糊综合评价方法,对北京市莲花池项目进行了实例分析^[4]。张颖红等将模糊可变评价模型应用于钢筋混凝土施工质量评价中,建立了钢筋混凝土施工质量模糊可变评价模型,采用模板工程、钢筋工程、混凝土工程的施工质量作为评价指标来评价钢筋混凝土施工质量。结果表明:模糊可变评价模型误判率低,识别正确率高^[5]。张玮等采用模糊综合评价方法建立了公路施工质量评价体系,建立评价模型的评判集,并对云南某高速公路整体施工质量进行了评价^[6]。郭月红等在模糊层次分析法基础上,提出“比例法”来代替隶属度函数法确定隶属度矩阵,并以实际工程为例进行验证。结果表明:比例法以实际检测结果为基础,构造的隶属度矩阵与桥梁施工质量真实情况较符,消除了隶属度函数法给评价结果带来的主观性影响^[7]。仇志明将模糊数学、层次分析法与德尔菲专家法相结合建立了钢筋混凝土梁施工质量综合评价指标体系(Fuzzy Analytic Delphi, FAD),并结合塔韩铁路大罕台川特大桥钢筋混凝土梁进行分析,对该工程钢筋混凝土梁质量进行了评价,评价结果与现场实际情况吻合较好^[8]。

重大水利水电基础设施施工质量控制关系大坝安全,常规质量控制手段由于人为干扰大,管理粗放,难以确保填筑碾压过程质量,因此,如何准确、合理评价大坝的施工质量也受到许多学者关注。马洪淇等针

收稿日期: 2021-12-08

作者简介: 吴小平(1978—),男,博士,高级工程师,从事工程建设管理工作。

对常规人工控制手段难以确保高心墙堆石坝施工质量,以及高强度连续施工下高混凝土坝施工进度难以实时控制等问题,提出了大坝填筑碾压实时监测技术、坝料运输实时监控及施工质量动态信息 PDA 实时采集技术等,提出了网络环境下数字大坝系统集成技术^[9]。钟登华等针对混凝土坝振捣施工质量评价问题,提出了基于双测距仪联合测距的混凝土振捣施工质量实时监控方法,建立了考虑混凝土特性参数不确定性的混凝土振捣质量动态评价模型^[10]。

本文在综述国内外基础设施施工质量评价方法的基础上,依托浙江沿海高速公路台州段信息化平台监测数据,将层次分析法与模糊评价方法相结合,建立了预应力混凝土梁施工质量评价方法,并针对浙江沿海高速台州段主要标段混凝土梁施工质量进行评价。

1 信息化管理平台简介

为了提升施工管理水平、确保工程建设质量,根据浙江沿海高速公路台州段工程项目管理信息化的实际需求,建立了以物联网、移动终端、二维码等信息技术为特征的工程建设信息化综合管理平台。该信息化综合管理平台包括 6 大管理系统、9 大监测系统,“6+9”管理模式让工程质量管理与控制从“事后监管”转向“事中监管”,从被动监测变为主动监管;各种数据的实时采集、分析汇总,可有效避免偷工减料与数据造假,并可有效提升管理效率与水平。

2 预应力混凝土梁施工质量评价体系

2.1 评价指标确定

预应力混凝土梁广泛应用于高速公路桥梁工程中,如何确保预应力混凝土梁的施工质量是高速公路项目建设管理的重要内容之一。预应力混凝土梁施工质量评价中涉及的主要影响因素为混凝土强度、钢筋强度、以及预应力张拉力和养护等条件,所涉及的影响因素相对较少,且各因素之间总体相互独立,为此可采用层次分析法(AHP)进行指标与权重的确定。根据预应力混凝土梁的特点,基于浙江沿海高速台州段信息化综合管理平台的监测数据,结合《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017)的相关规定,结合专家咨询法(问卷调查)和层次分析法来确定预应力混凝土梁施工质量评价体系目标层、准则层和指标层,即预应力混凝土梁施工质量评价的三个一级指标为混凝土强

度、钢筋强度、预应力张拉误差率,每个一级指标包含合格率、变异系数及平均值与目标值之比三个二级指标,表 1 为预应力混凝土梁施工质量评价指标。

表 1 预应力混凝土梁施工质量评价指标

评价对象	一级指标	二级指标
预应力混凝土梁 施工质量	混凝土强度	合格率
		变异系数
		平均值 / 设计值
	钢筋强度	合格率
		变异系数
		平均值 / 设计值
	预应力张拉误差率	合格率
		标准差
		平均值 / 设计值

2.2 权重系数确定

各评价指标权重的确定对于评价方法具有重要影响,权重系数确定是否合理将直接影响评价结果的可靠性与有效性。

权重系数的确定方法大致有如下三大类:分别是主观赋权法、客观赋权法、以及主客观综合集成赋权法。主观赋权法主要依赖专家知识经验进行主观判断来确定指标权重,常用的方法有专家估测法、层次分析法、二项系数法与环比评分法。客观赋权法主要通过对样本数据分析来计算出权重,主要的方法有变异系数法、多元统计法、向量相似度法、灰色关联度法、熵值法、粗糙集法以及神经网络法等。主客观综合集成权重法将主观、客观权重确定的优势结合而成的一种权重确定法^[11]。综合考虑,本文采用第一类方法主观赋权法中的专家估测法来确定各指标权重系数。在参考《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017)的基础上,通过设计调查问卷的方式,采用专家咨询法确定准则层和指标层对应的指标,再结合专家咨询法和层次分析法确定指标权重。表 2 为根据专家估测法确定的预应力混凝土梁施工质量评价一级指标及二级指标权重系数。

评价预应力混凝土梁施工质量的一级指标分别为混凝土强度、钢筋强度和预应力钢筋张拉误差率。样本数据绝大多数都在合格以上,因此若仅以合格率来评价则不具有区分度,故综合考虑将各一级指标划分为合格率、变异系数及平均值与设计值的比值三个二级指标进行评价。考虑到大多数测量值基本符合正态分布特征,故采用正态分布方法来划分等级,基于 Matlab 软件编写了数据分析处理程序,对样

表 2 预应力混凝土梁施工质量评价指标权重系数

评价对象	一级指标		二级指标	
	指标	权重	指标	权重
预应力混凝土梁施工质量	混凝土强度	0.50	合格率	0.7
			变异系数	0.2
			平均值 / 设计值	0.1
	钢筋强度	0.25	合格率	0.7
			变异系数	0.2
			平均值 / 设计值	0.1
	预应力张拉误差率	0.25	合格率	0.7
			标准差	0.2
			平均值	0.1

本数据进行正态分布曲线拟合,并计算样本数据的均值、标准差、变异系数、合格率和超限概率值等。预应力混凝土梁混凝土强度、钢筋强度与预应力钢筋张拉三个一级指标对应的二级指标等级取值限值汇总分别见表 3~表 5。

表 3 混凝土强度二级指标评价等级限值汇总表

评价等级	合格率	变异系数	平均值 / 标准值
优	90%≤优≤100%	0.0≤优<0.04	0.9≤优≤1.1
良	80%≤良<90%	0.04≤良<0.08	0.7≤良<0.9 或 1.1<良≤1.3
中	70%≤中<80%	0.08≤中<0.12	0.5≤中<0.7 或 1.3<中≤1.5
差	60%≤差<70%	0.12≤差<0.16	差<0.5 或 1.5<良≤差
不合格	超出以上范围		

表 4 钢筋强度二级指标评价等级限值汇总表

评价等级	合格率	变异系数	平均值 / 标准值
优	90%≤优≤100%	0≤优<0.04	0.9≤优≤1.1
良	80%≤良<90%	0.04≤良<0.08	0.7≤良<0.9 或 1.1<良≤1.3
中	70%≤中<80%	0.08≤中<0.12	0.5≤中<0.7 或 1.3<中≤1.5
差	60%≤差<70%	0.12≤差<0.16	差<0.5 或 1.5<良≤差
不合格	超出以上范围		

表 5 预应力钢筋张拉误差率二级评价指标等级限值汇总表

评价等级	合格率	变异系数	平均值 / 标准值
优	90%≤优≤100%	0≤优<3	-0.8≤优≤0.8
良	80%≤良<90%	3≤良<3.5	-1.2≤良<-0.8 或 0.8<良≤1.2
中	70%≤中<80%	3.5≤中<4	-1.6≤中<-1.2 或 1.2<中≤1.6
差	60%≤差<70%	4≤差<4.5	差<-1.6 或 1.6<良≤差
不合格	超出以上范围		

2.4 模糊综合评价

根据表 3~表 5 确定的评价等级,对各评价等级进行分数赋值,以实现预应力混凝土梁施工质量的最终量化评价。根据评价对象,按照确定的评价标准,建立评价集 $v=\{v_1,v_2,v_3,v_4,v_5\}$,其中 v_1,v_2,v_3,v_4,v_5 分别对应各二级评价指标的评价等级中优、良、中、差和不合格,表 6 为各评价等级对应的分数表。

表 6 各二级评价指标评价等级对应的分值表

等级	优	良	中	差	不合格
分数	100	75	50	25	0

3 工程实例

3.1 工程概况

依托浙江省沿海高速公路工程台州段进行预应力混凝土梁施工质量评价,浙江沿海高速公路台州段是国家“十二五”规划要求加快建设的国家高速公路网(“7918”网)的组成部分,是长三角区域规划中要求加快改扩建的甬台温高速公路的复线。浙江沿海高速台州段全线有 TJ9、TJ10、PPP1、PPP2、TS09~TS17 共 13 个施工标段。

3.2 TJ9 标段模糊综合评价

3.2.1 混凝土强度

浙江台州沿海高速公路信息化管理系统共对全线 TJ9、TJ10、PPP1、PPP2、TS09~TS17 共 13 个施工标段进行了监测,各标段生产的混凝土等级为 C15~C55,每个标段采用的混凝土等级各不相同,且每种等级混凝土试块的数量也不尽相同。对于数量较多的情况,进行正态性检验,采用 Matlab 软件进行正态分布曲线的拟合,最后给出样本数据的均值、标准差、变异系数、合格率和超限概率值等;对于数量较少的情况,不具有正态性,但计算其均值、标准差、变异系数、合格率等。

以 TJ9 标段设计强度等级为 C50 的混凝土试块立方体强度数据为样本进行分析,该样本数据立方体抗压平均强度达到 C50 以上,即 50 MPa 为合格,同时为了避免造成浪费,规定其上限值不能高于设计强度的 20%,即 60 MPa,共有 660 个监测数据。为判断样本数据是否符合正态分布,首先采用 Matlab 软件中的 Normplot 函数对其进行检验,结果见图 1(a)。由图 1(a)中可知该样本数据符合正态分布。进而采用 Matlab 对其进行正态分布拟合,结果见图 1(b)。根据拟合的正态分布曲线可知,样本均值为 $f_c=57.3$ MPa,标准差 $f_{c\sigma}=1.87$ MPa,变异系数 $C_v=0.033$,合格率为

96.4%,超出最大限值(即 60 MPa)的概率值为 4.14%,在 50~60 MPa 之间的概率为 92.23%,见图 1(c)。根据该方法进而可求得各标段混凝土立方体抗压强度平均值、标准差及变异系数等,表 7 所示为 TJ9 标段不同等级混凝土立方体抗压强度对应的统计参数汇总。

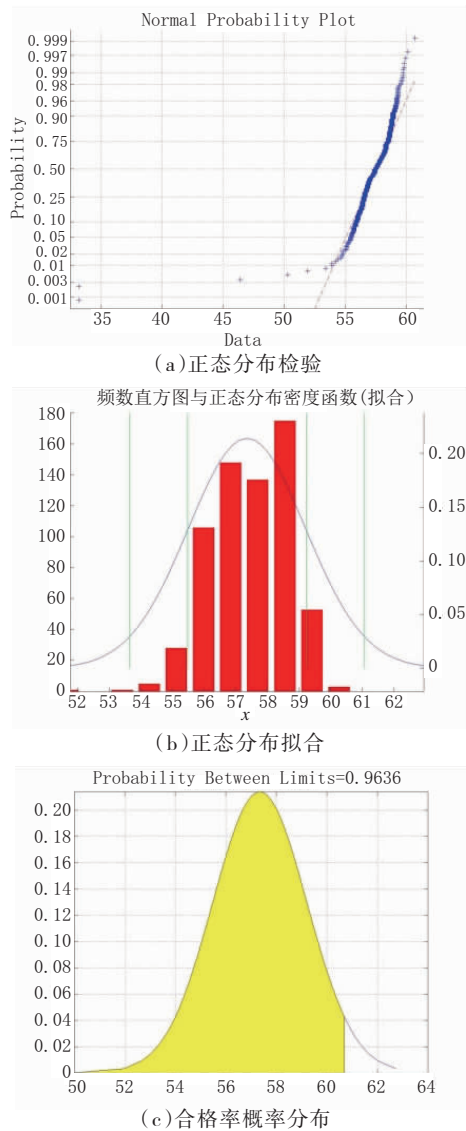


图 1 TJ9 标段 C50 混凝土立方体抗压强度正态分布检验与拟合

表 7 TJ9 标段不同标号混凝土立方体 28 d 抗压强度统计参数汇总

评价二级 指标	混凝土标号					
	C20	C30	C35	C40	C50	C55
数据样本数	20	54	78	117	660	1
是否符合 正态性	否	是	是	是	是	否
合格率 /%	100.0	100.0	100.0	100.0	96.4	100.0
平均值 /MPa	23.7	35.8	41.5	46.4	57.3	58.2
标准差 σ	0.5	0.4	0.4	0.6	1.9	0
变异系数 $C_v=\sigma/\mu$	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.0
平均值 / 标准值	1.18	1.18	1.18	1.16	1.15	1.06

3.2.2 钢筋屈服强度

全线各标段的钢筋直径为 6.5~32 mm 共 12 种规格,其中直径为 6.5~10 mm 钢筋采用 HPB300,其屈服强度为 300 MPa;直径为 12~32 mm 钢筋采用 HRB400,其屈服强度为 400 MPa。考虑到钢筋的屈服强度实验值与规定的屈服强度之比不大于 1.3,即 HPB300 钢筋屈服强度的范围是 300~390 MPa,HPB400 钢筋屈服强度范围是 400~520 MPa。钢筋屈服强度实测值符合正态分布的特性,用 Matlab 软件进行正态分布曲线的拟合,最后给出样本数据的合格率、均值、标准差和变异系数等。现取第 TJ9 标段 $\phi 28$ mm 钢筋屈服强度实验数据作为样本数据进一步加以说明。该样本数据的屈服强度要求满足 400~520 MPa 为合格,数据共有 26 个。图 2 为钢筋屈服强度正态分布检验与拟合曲线,由图 2 可知,钢筋屈服强度数据符合正态分布。TJ9 标段 $\phi 28$ mm 钢筋屈服强度等级评价汇总见表 8。由表 8 可知,TJ9 标段 $\phi 28$ mm 钢筋屈服强度评价等级情况:优秀占 92.50%、良好占 7.5%、中等、较差占和不合格均为 0,按最大隶属度原则,评价结果为优。

3.2.3 预应力钢筋张拉误差率

根据预应力钢筋施工技术标准,确定采用预应力钢筋张拉伸长量与理论伸长量的相对误差来评价预应力张拉施工质量,且规定误差率的合格范围不超过 $\pm 6\%$ 。预应力钢筋张拉的误差率总体上满足正态分布的特点,用 Matlab 进行正态分布曲线的拟合,最后给出样本数据的合格率、均值、标准差和变异系数等。现取第 TJ9 标段的预应力钢筋张拉误差的数据作来分析,该样本数据共有 2 716 个,为判断样本数据是否符合正态分布的特性,首先采用 Matlab 软件中的 Normplot 函数对样本数据进行正态性检验,见图 3。由图 3 可知,预应力钢筋张拉误差率符合正态分布,根据拟合的正态分布曲线,得到样本数据的均值为 1.328 3%,标准差为 3.585 3%,合格率为 88.3%。TJ9 标段预应力张拉等级评价汇总见表 9。由表 9 可知,TJ9 标段预应力张拉误差率评价等级情况为:优秀占 0.0%、良好占 70%、中等、较差占和不合格分别 30%、0.0%和 0.0%,按最大隶属度原则,评价结果为良好。

3.2.4 施工质量综合评价

以 TJ9 标段为例进行预应力混凝土梁施工质量综合评价,各二级评价指标对应的等级隶属度见表 10,表 11 为 TJ9 标段预应力混凝土梁施工质量综合

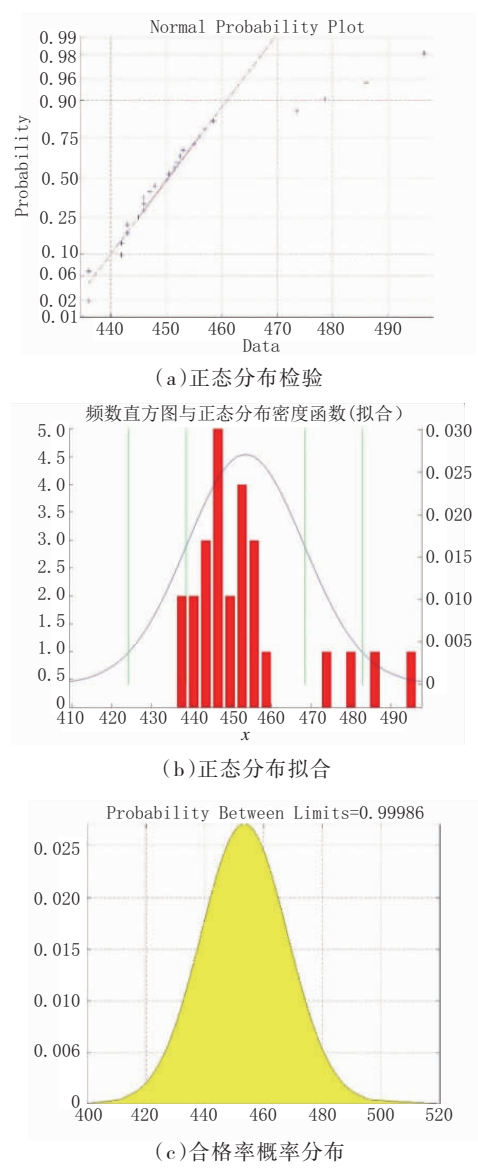


图 2 TJ9 标段钢筋屈服强度正态分布检验与拟合

表 8 TJ9 标段 $\phi 28$ mm 钢筋屈服强度等级评价汇总

一级 指标	二级 指标	权重	隶属度 /%				
			优秀	良好	中等	较差	不及格
钢筋 屈服 强度	合格率	0.7	100.00	0	0	0	0
	变异 系数	0.2	100.00	0	0	0	0
	平均值 / 标准值	0.1	25.00	75.00	0	0	0
	最终评价		92.50	7.50	0	0	0

评价结果汇总。由表 11 可知,TJ9 标段的施工质量评价为:优秀占 69.79%、良好占 22.71%、中等占 7.5%、较差占 0%,不合格占 0%,按最大隶属度原则,评价结果为优。

按照最大隶属度原则可知,TJ9 标段的预应力混凝土梁施工质量等级为优;按照不同等级对应的分值进行进行模糊综合打分,可知 TJ9 标段的预应力

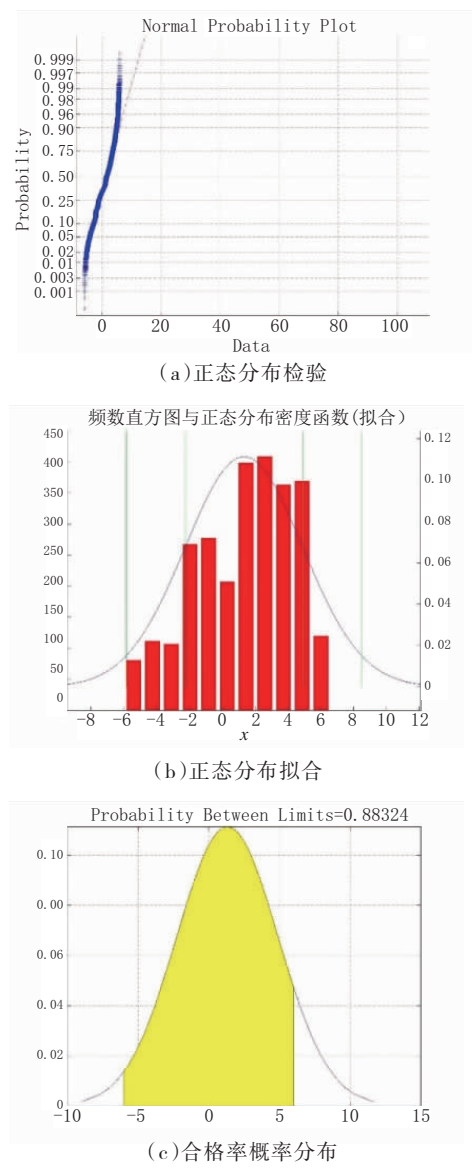


图 3 TJ9 标段预应力钢筋张拉误差率正态分布检验与拟合

表 9 TJ9 标段预应力钢筋张拉误差率等评价汇总

一级 指标	二级 指标	权重	隶属度 /%				
			优秀	良好	中等	较差	不及格
预应力 钢筋 张拉 误差率	合格率	0.7	0	100.00	0	0	0
	变异 系数	0.2	0	0	100.00	0	0
	平均值 / 标准值	0.1	0	0	100.00	0	0
	最终评价		0	70.00	30.00	0	0

混凝土梁施工质量最终分值;两者评价结果一致,均为优秀,表明该标段预应力混凝土梁施工质量为优。

采用上述方法,对其他标段预应力混凝土梁施工质量进行评价,图 4 为 2017 年下半年和 2018 年上半年 14 个标段桥梁施工质量综合评价结果图。由图 4 可知,浙江沿海高速台州段不同施工标段预应力混凝土梁施工质量总体为优良。

表 10 指标层对应的不同等级的隶属度

准则层	指标层	权重	隶属度 /%				
			优秀	良好	中等	较差	不及格
混凝土强度	合格率	0.7	100.00	0	0	0	0
	变异系数	0.2	100.00	0	0	0	0
	平均值 / 设计值	0.1	33.33	66.67	0	0	0
钢筋强度	合格率	0.7	100.00	0	0	0	0
	变异系数	0.2	100.00	0	0	0	0
	平均值 / 设计值	0.1	25.00	75.00	0	0	0
预应力张拉误差率	合格率	0.7	0	100.00	0	0	0
	标准差	0.2	0	0	100.0	0	0
	平均值	0.1	0	0	100.00	0	0

表 11 准则层对应的不同等级的隶属

目标层	准则层	权重	隶属度 /%				
			优秀	良好	中等	较差	不及格
桥梁施工质量	混凝土强度	0.5	93.33	6.67	0	0	0
	钢筋屈服强度	0.25	92.50	7.50	0	0	0
	预应力钢筋张拉误差	0.25	0	70.00	30.00	0	0
	最终评价		69.79	22.71	7.50	0	0

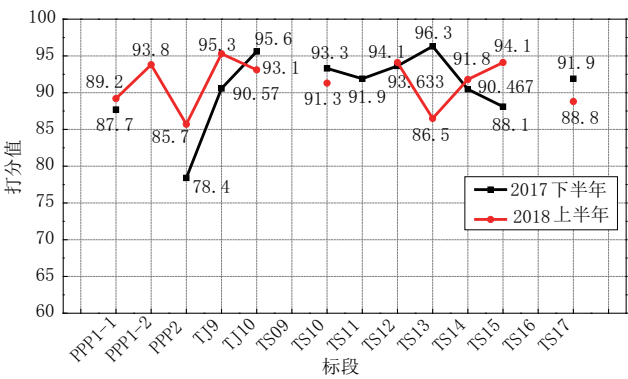


图 4 浙江沿海高速台州段不同施工标段预应力混凝土梁施工质量评价结果

4 结 论

以浙江台州沿海高速公路工程信息化管理系统监测数据为依托,进行了预应力混凝土梁施工质量评价体系研究,得到如下主要结论:

- (1)采用层次分析法与模糊数学相结合的方法,建立了预应力混凝土梁施工质量评价体系,结合专家问卷调查确定了对应的评价指标和权重系数;
- (2)基于监测数据对预应力混凝土梁施工质量评价体系中的各二级指标参数进行了统计分析,对其施工质量进行了模糊综合评价;
- (3)浙江沿海高速台州段不同施工标段预应力混

凝土梁总体施工质量优良,各标段评价结果与该工程质量检测结果基本相符。

参考文献:

[1] Zambrano Carlos,Drnevich Vincent,Bourdeau Philippe.Advanced Compaction Quality Control[R].FHWA/IN/JTRP-2006/10,School of Civil Engineering,Purdue University,2006.

[2] 卢晓红.道路交通建设项目评价指标与评价方法研究[D].西安:长安大学,2007.

[3] 杜鹏.公路建设项目目标评价指标体系及方法研究[D].长沙:湖南大学,2007.

[4] 苏燕.城市道路建设项目后评价方法研究[D].北京:北京工业大学,2008.

[5] 张颖红,黄中伟.钢筋混凝土施工质量综合评价的模糊可变评价模型[J].混凝土,2011,262(8):45-47.

[6] 张玮,李燕,陈春华,等.模糊综合评价法在公路施工质量评价中的应用[J].昆明冶金高等专科学校学报,2014,30(3):72-79.

[7] 郭月红.基于改进的 FAHP 评价法对桥梁施工质量评价[J].土木工程与管理学报,2017,34(1):44-48.

[8] 仇志明.桥梁工程钢筋混凝土施工质量评价模型[J].铁道标准设计,2014,58(2):61-63.

[9] 马洪琪,钟登华,张宗亮,等.重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J].中国工程科学,2011,13(12):20-27.

[10] 钟登华,沈子洋,王佳俊,等.基于实时监控的混凝土坝振捣施工质量动态评价研究[J].水利学报,2018,49(7):775-786.

[11] 刘秋艳,吴新年.多要素评价种指标权重的确定方法评述[J].知识管理论坛,2017,2(6):500-510.