

基于模糊理论评估连续梁桥地震破坏状况

忻仕超

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:为了研究不同强度等级地震作用下连续梁桥的破坏模式及破坏程度,采用多级模糊综合评判方法建立连续梁桥的综合评估模型。根据连续梁桥的特点,利用连续梁桥各单元及各构件的破坏程度建立多个因素集,根据各因素的权重和评价标准,对多个因素集进行逐级评判,根据最大隶属度原则得到地震作用下连续梁桥的破坏情况,并通过等级参数评判法对不同地震强度下连续梁桥的破坏情况进行等级评判,得到连续梁桥破坏情况与地震强度之间的关系。最后,基于多级模糊综合评判方法对一座连续梁桥实例进行评判。

关键词:连续梁桥;破坏模式;模糊综合评价法;地震作用;等级参数评判法

中图分类号:U441 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)01-0013-07

0 引言

以往的震害资料表明,地震作用下钢筋混凝土连续梁桥发生不同程度的破坏甚至倒塌,会造成极大的人员伤亡、经济损失和社会影响,研究钢筋混凝土连续梁桥在地震作用下的破坏模式,对提高结构抗震能力,确保地震作用下桥梁结构的安全性具有重要的理论和工程意义。目前模糊综合评价法在桥梁评估方面已有广泛的应用,万峰^[1]等利用模糊综合评价法对特定环境下的备选桥型进行评分,得到评价分数最高的桥型即为推荐桥型,为桥梁选型提供了一种更加直接客观的方法。焦玲^[2]通过建立基于层次分析法的多级模糊综合评估模型,对拱桥的健康状态进行了诊断评估,为拱桥的养护加固提供了依据。李书韬^[3]等基于模糊层次分析方法,利用 Zadeh 算子对风险概率和风险损失进行计算,得到桥梁施工期的风险水平,较好地考虑了工程项目中的模糊因素,较为全面的预见桥梁施工过程中的风险。黄侨^[4]等研究探讨了现有模糊综合评估存在的问题,并建立了一套适用于大跨度桥梁综合评估的模糊综合评判方法,为进一步制定养护维修决策提供定量的依据。但是,模糊综合评价法在连续梁桥的地震破坏评估方面的应用相对较少,本文采用模糊综合评价法对地震作用下连续梁桥各构件破坏程度进行逐级评估,得到连续梁桥在地震作用下的破坏模式及破坏程度。

1 地震作用下连续梁桥的多级模糊综合评判

模糊综合评判的基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则^[5],考虑与被评价事物相关的各个因素,对其进行合理的综合评价,具体步骤^[6]如下:

首先,建立被评价事物的因素集,分别对因素集中的单因素进行评价,并将单因素评价集整合得到综合评判矩阵;然后建立因素重要程度模糊集,通过综合评判矩阵和因素重要程度模糊集的合成运算,得到模糊综合评价集;最后根据最大隶属度原则,选择模糊综合评价集中最大项所对应的等级作为综合评判的结果。

连续梁桥主要由桥墩、主梁、基础、支座等构件组成,连续梁桥各构件在地震作用下会产生不同程度的破坏,而每个构件的破坏对整桥的影响并不相同,因此需要综合考虑连续梁桥各构件的受力特性和重要性,才能对连续梁桥在地震作用下的破坏做出准确的评估。

收稿日期:2015-03-26 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.2016.01.03

作者简介:忻仕超(1992-),女,硕士研究生,研究方向为偶然荷载作用下桥梁的连续倒塌。E-mail:xsc8023@163.com

忻仕超.基于模糊理论评估连续梁桥地震破坏状况[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(1):13-19.

1.1 建立因素集及评价集

以主梁为例,设因素集为

$$Y_{zl} = \{\text{主梁单元 1 破坏程度}(y_{zl1}), \text{主梁单元 2 破坏程度}(y_{zl2}), \dots, \text{主梁单元 } m \text{ 破坏程度}(y_{zlm})\}$$

目前我国相关桥梁抗震规范没有对地震破坏指数及相应的地震破坏程度进行规定,故根据《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)^[7]提出桥梁结构的地震破坏程度评价标准,建立评价集为

$$V = \{\text{基本完好}(v_1), \text{轻微破坏}(v_2), \text{中等破坏}(v_3), \text{严重破坏}(v_4), \text{倒塌}(v_5)\}$$

1.2 建立权重集

在给定荷载作用下,构件对广义结构刚度 K 的贡献直接体现了该构件在结构传力系统中的地位,因此以构件损伤所导致的广义结构刚度的损失率作为评价构件重要性系数的指标,并通过结构应变能的形式表达出来^[8]

$$I = \frac{U' - U}{U'} = 1 - \frac{U}{U'} \quad (1)$$

式中, U 为荷载作用下完好结构贮存的总应变能; U' 为荷载作用下拆除某一杆件单元后结构贮存的总应变能。

利用大型通用有限元软件 Ansys,通过生死单元法来逐个杀死单元,得到剩余结构的应变能,从而得到连续梁桥各个单元的重要性系数,把重要性系数归一化得到权重集为 $A_{zl} = \{a_{zl1}, a_{zl2}, a_{zl3}, \dots, a_{zln}\}$ 。

1.3 单因素隶属函数的确定

确定隶属函数的方法有直接法、推理法、F 统计法、三分法、二元对比排序法、F 分布和人工神经网络法等,其中 F 分布包括矩形分布、梯形分布、抛物型分布、正态分布、哥西分布和岭形分布^[9]。本文采用梯形分布确定隶属函数,如图 1 所示,其表达式如式(2)~式(6)所示。

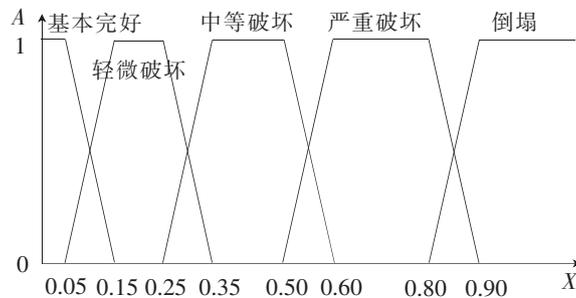


图 1 隶属函数

基本完好

$$A_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.05 \\ \frac{0.15 - x}{0.1} & 0.05 < x \leq 0.15 \end{cases} \quad (2)$$

轻微破坏

$$A_2(x) = \begin{cases} \frac{x - 0.05}{0.1} & 0.05 < x \leq 0.15 \\ 1 & 0.15 < x \leq 0.25 \\ \frac{0.35 - x}{0.1} & 0.25 < x \leq 0.35 \end{cases} \quad (3)$$

中等破坏

$$A_3(x) = \begin{cases} \frac{x - 0.25}{0.1} & 0.25 < x \leq 0.35 \\ 1 & 0.35 < x \leq 0.50 \\ \frac{0.6 - x}{0.1} & 0.50 < x \leq 0.60 \end{cases} \quad (4)$$

严重破坏

$$A_4(x) = \begin{cases} \frac{x-0.50}{0.1} & 0.50 < x \leq 0.60 \\ 1 & 0.60 < x \leq 0.80 \\ \frac{0.90-x}{0.1} & 0.80 < x \leq 0.90 \end{cases} \quad (5)$$

倒塌

$$A_5(x) = \begin{cases} \frac{x-0.80}{0.1} & 0.80 < x \leq 0.90 \\ 1 & x > 0.90 \end{cases} \quad (6)$$

式中, x 为地震损伤破坏指数; A 为连续梁桥各构件单元的破坏程度。

通过隶属函数运算,对因素集 Y_{zd} 中的单因素 y_{zi} ($i=1,2,\dots,m$) 作单因素评价,确定主梁中每个单元对评语 v_j ($j=1,2,\dots,n$) 的隶属度 r_{ij} ,从而得到一级综合评判矩阵如下

$$R_{zd} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

1.4 模糊综合评判模型

当权重集和综合评判矩阵确定后,通过选用合适的模糊综合评判模型进行评判,得到最终的评价结果。常见的模糊综合评判模型^[10]有以下几种:

(1) 主因素突出型模型 $M(\wedge, \vee)$

$$b_j = \vee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}) \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

式中, r_{ij} 为因素 u_i 对评语 v_j 的隶属度; a_i 为因素 u_i 的重要程度系数。

(2) 加权平均型模型 $M(\cdot, +)$

$$b_j = \sum_{i=1}^m (a_i \cdot r_{ij}) \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

(3) 取小上界和型 $M(\wedge, \oplus)$

$$b_j = \oplus \sum_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}) = \min\{1, \sum_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij})\} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

(4) 均衡平均型 $M(\wedge, +)$

$$b_j = \sum_{i=1}^m (a_i \wedge \frac{r_{ij}}{r_0}) \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

$$r_0 = \sum_{k=1}^m r_{kj} \quad (12)$$

选用模型 $M(\wedge, \vee)$, $M(\cdot, +)$, $M(\wedge, \oplus)$, $M(\wedge, +)$ 分别进行一级模糊综合评判,设所得模糊综合评价集分别为

$$A_{zd} \cdot R_{zd} = B_{zd1} = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}) \quad (13)$$

$$A_{zd} \cdot R_{zd} = B_{zd2} = (b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{25}) \quad (14)$$

$$A_{zd} \cdot R_{zd} = B_{zd3} = (b_{31}, b_{32}, b_{33}, b_{34}, b_{35}) \quad (15)$$

$$A_{zd} \cdot R_{zd} = B_{zd4} = (b_{41}, b_{42}, b_{43}, b_{44}, b_{45}) \quad (16)$$

1.5 多级模糊综合评判

由于构件单元较多,导致系统较复杂,影响因素较多,如果仅采用一级模型进行评判,得到的结果比较粗糙,不能很好地反应真实结果,所以本文采用多级模糊综合评判^[11]对评判过程进行改进,使得评判结果更为合理。

设二级评判因素集为 $W = \{B_{zd1}, B_{zd2}, B_{zd3}, B_{zd4}\}$ 。

各评价指标的权重分配为 $A_0 = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ 。

二级综合评判矩阵为

$$\mathbf{R}_{0zd} = \begin{pmatrix} B_{zd1} \\ B_{zd2} \\ B_{zd3} \\ B_{zd4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{pmatrix} \quad (17)$$

根据加权平均模型 $M(\cdot, +)$ 得到综合考虑四种模糊评判模型的二级模糊综合评价集为

$$\mathbf{B}_d = \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{R}_{0zd} = (b_{zd1}, b_{zd2}, b_{zd3}, b_{zd4}, b_{zd5}) \quad (18)$$

由最大隶属度原则可以得到主梁的破坏程度,其他构件的评价方法与主梁类似。

设三级评判指标集为 $Q = \{B_{zd}, B_{qd}, B_{jc}, B_{zz}\}$ 。其中, B_{zd} 为主梁二级模糊综合评价集; B_{qd} 为桥墩二级模糊综合评价集; B_{jc} 为基础二级模糊综合评价集; B_{zz} 为支座二级模糊综合评价集。

由上述得到的各构件的二级综合评价集构成三级综合评判矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} B_d \\ B_{qd} \\ B_{jc} \\ B_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{zd1} & b_{zd2} & b_{zd3} & b_{zd4} \\ b_{qd1} & b_{qd2} & b_{qd3} & b_{qd4} \\ b_{jc1} & b_{jc2} & b_{jc3} & b_{jc4} \\ b_{zz1} & b_{zz2} & b_{zz3} & b_{zz4} \end{pmatrix} \quad (19)$$

通过构件重要性评价得到连续梁桥各构件的权重分配为

$$\mathbf{A} = (a_d, a_{qd}, a_{jc}, a_{zz})。$$

采用加权平均模型 $M(\cdot, +)$ 进行三级综合评判得

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{R} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \quad (20)$$

按照最大隶属度原则选择最大的 b_j 所对应的评语 v_j 作为评判结果的方法只利用了 b_j 中的最大值,没有充分利用评语模糊子集 B 中的信息。因此本文基于等级参数评判法^[12],对评语集 V 中的每个评语等级 v_j 给出相应的等级参数,倒塌为 1,严重破坏为 0.8,中等破坏为 0.5,轻微破坏为 0.2,基本完好为 0,得到参数列向量为 $C = (0, 0.2, 0.5, 0.8, 1)^T$ 。

利用向量的内积运算得出等级参数评判结果为

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{C} = \sum_{j=1}^n b_j \cdot c_j = p \quad (21)$$

通过实数 p 可以比较连续梁桥各构件的破坏程度以及不同地震强度下整桥的破坏程度。

2 评价实例

2.1 桥梁概况

选用桥梁为三跨变截面连续梁桥,跨径组合为(55+90+55)m,主梁为变截面箱梁,结构高度为 2.2~6.0 m,梁体宽 30.6 m,梁底曲线由两端相切圆弧线组成,圆弧曲线半径分别为 104 m 和 313 m,跨中段设 3 m 直线段。主墩墩柱采用实心墩柱,顺桥向 3.6 m,横桥向 31.6 m。主梁采用 C60 混凝土,墩柱采用 C40 混凝土,钢筋采用 HRB335。

采用通用有限元软件 Ansys 建立该桥的有限元模型,主梁和桥墩均采用 beam189 单元模拟,其中主梁共有 200 个单元,每个桥墩各有 4 个单元。外力和地震力作用时,忽略地基—基础—结构的相互作用,桥面与桥墩之间的支座通过桥梁梁体和桥墩墩顶之间的节点位移耦合来模拟,桥台及桥墩底部采用约束节点群的形式作为边界条件。连续梁桥有限元模型如图 2 所示。



图 2 连续梁桥全桥有限元模型

2.2 地震损伤破坏指数

基于强度破坏准则和强度、刚度破坏准则^[13],以构件所受地震荷载与构件强度冗余量的比值定义构

件的地震损伤破坏指数,其表达式如下所示

$$D = \frac{F_E}{F_R} \quad (22)$$

式中, F_E 为构件所受地震荷载; F_R 为构件强度冗余量(扣除外荷载组合作用效应后所能继续承担的地震荷载)。

在计算上采用各构件单元的弯矩值来定义地震损伤破坏指数 $D^{[14]}$

$$D = \frac{M_{Ex}}{M_{fx} - M_{Sx}} \quad (23)$$

式中, M_{Ex} 为地震作用下构件第 x 号单元最不利截面的弯矩; 选用 EL-Centro 波从 X、Y 和 Z 三个方向进行激励; M_{fx} 为构件第 x 号单元最不利截面的破坏弯矩; M_{Sx} 为短期效应组合下构件第 x 号单元最不利截面的弯矩; 根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)^[15], 短期效应组合为恒载+0.7 汽车荷载+人群荷载+0.75 风荷载。

以峰值加速度为 $0.15g$ 的地震作用为例, 给出连续梁桥在地震作用下的多级模糊评判过程。由于主梁单元较多, 选取主梁地震损伤破坏指数最大的 20 个单元进行分析, 这 20 个单元分布在主梁两侧、墩梁连接处及跨中位置; 桥墩共 8 个单元, 故选取桥墩的所有单元进行分析。在峰值加速度为 $0.15g$ 的地震作用下的地震损伤破坏指数 D 如表 1、表 2 所示。

表 1 主梁单元地震损伤破坏指数 D_{zl}

单元号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_{zl}	0.005	0.084	0.026	0.129	0.246	0.246	0.229	0.117	0.139	0.235
单元号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
D_{zl}	0.234	0.175	0.065	0.115	0.260	0.260	0.198	0.011	0.088	0.005

表 2 桥墩单元地震损伤破坏指数 D_{qd}

单元号	1	2	3	4	5	6	7	8
D_{qd}	0.019	0.038	0.058	0.326	0.019	0.038	0.058	0.325

2.3 多级综合评判

建立一级评判因素集为

$Y_{zl} = \{ \text{主梁单元 1 的破坏程度}(y_{zl1}), \text{主梁单元 2 的破坏程度}(y_{zl2}), \dots, \text{主梁单元 20 的破坏程度}(y_{zl20}) \}$;

$Y_{qd} = \{ \text{桥墩单元 1 的破坏程度}(y_{qd1}), \text{桥墩单元 2 的破坏程度}(y_{qd2}), \dots, \text{桥墩单元 8 的破坏程度}(y_{qd8}) \}$ 。

通过加速度峰值为 $0.15g$ 的地震作用下连续梁桥各构件单元的地震损伤破坏指数, 应用隶属函数计算可得到一级模糊隶属关系矩阵如下:

根据前文所提到的基于广义结构刚度的构件重要性评价方法得到各单元重要性系数, 归一化后得到各单元的权重分配如下:

$A_{zl} = (0.108, 0.024, 0.040, 0.039, 0.029, 0.095, 0.10, 0.091, 0.027, 0.001, 0.001, 0.028, 0.092, 0.101, 0.095, 0.029, 0.039, 0.040, 0.024, 0.108)$; $A_{qd} = (0.075, 0.1, 0.125, 0.2, 0.075, 0.1, 0.125, 0.2)$ 。

选用模型 $M(\wedge, \vee)$ 分别进行一级模糊综合评判, 所得模糊综合评价集为 $B_{zl1} = (0.108, 0.101, 0.095, 0, 0)$; $B_{qd1} = (0.125, 0.2, 0.2, 0, 0)$ 。

选用模型 $M(\cdot, +)$ 进行一级模糊综合评判, 所得模糊综合评价集为 $B_{zl2} = (0.481, 0.617, 0.012, 0, 0)$; $B_{qd2} = (0.514, 0.184, 0.302, 0, 0)$ 。

选用模型 $M(\wedge, \oplus)$ 进行一级模糊综合评判, 所得模糊综合评价集为 $B_{zl3} = (0.694, 0.815, 0.124, 0, 0)$; $B_{qd3} = (0.6, 0.81, 0.4, 0, 0)$ 。

选用模型 $M(\wedge, +)$ 进行一级模糊综合评判, 所得模糊综合评价集为 $B_{z1} = (0.575, 0.586, 0.124, 0, 0)$; $B_{z4} = (0.6, 0.781, 0.4, 0, 0)$ 。

建立二级评判因素集为 $W_{z1} = \{B_{z1}, B_{z2}, B_{z3}, B_{z4}\}$; $W_{z4} = \{B_{z1}, B_{z2}, B_{z3}, B_{z4}\}$ 。

由以上计算结果可得二级评判矩阵如下:

各指标的权重分配为 $A_0 = (0.2, 0.3, 0.3, 0.2)$ 。

根据加权平均模型 $M(\cdot, +)$ 得到二级模糊综合评价集为 $B_{z1} = (0.489, 0.567, 0.085, 0, 0)$; $B_{z4} = (0.479, 0.494, 0.331, 0, 0)$ 。

根据等级参数评判法得到 $p_{z1} = 0.489 \times 0 + 0.567 \times 0.2 + 0.085 \times 0.5 + 0 \times 0.8 + 0 \times 1 = 0.156$; $p_{z4} = 0.479 \times 0 + 0.494 \times 0.2 + 0.331 \times 0.5 + 0 \times 0.8 + 0 \times 1 = 0.264$ 。

建立三级评判因素集为 $Q = \{B_{z1}, B_{z4}\}$ 。

由上述得到的各构件的二级综合评价集构成三级综合评判矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} 0.489 & 0.567 & 0.085 & 0 & 0 \\ 0.479 & 0.494 & 0.331 & 0 & 0 \end{pmatrix}。$$

各构件的权重分配为 $A = (0.252, 0.748)$ 。

采用加权平均模型 $M(\cdot, +)$ 进行三级综合评判得 $B = (0.482, 0.512, 0.269, 0, 0)$; $p = 0.482 \times 0 + 0.512 \times 0.2 + 0.269 \times 0.5 + 0 \times 0.8 + 0 \times 1 = 0.237$ 。

因此可以判断在峰值加速度为 $0.15g$ 的地震作用下, 该连续梁桥基本完好。

在加速度峰值为 $0.3g, 0.8g$ 的地震作用下连续梁桥的模糊评判过程与 $0.15g$ 时相似, 在此不再赘述。

在加速度峰值分别为 $0.15g, 0.3g, 0.8g$ 的地震作用下连续梁桥的二级评估向量如表 3 所示。

根据最大隶属度原则可以判断, 当地震加速度峰值为 $0.15g$ 和 $0.3g$ 时, 主梁和桥墩均轻微破坏, 但桥墩杆件中破坏程度大于主梁, 因此根据等级评判参数可以看出, 桥墩的整体破坏程度大于主梁。当地震加速度峰值为 $0.8g$ 时, 主梁和桥墩均发生中等破坏, 且桥墩的破坏程度大于主梁。

表 3 二级评估向量

加速度峰值	构件	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌	等级评判参数 p
0.15g	主梁	0.489	0.567	0.085	0	0	0.156
	桥墩	0.479	0.494	0.331	0	0	0.264
0.3g	主梁	0.407	0.440	0.318	0	0	0.247
	桥墩	0.498	0.512	0.381	0	0	0.293
0.8g	主梁	0.340	0.348	0.394	0.05	0	0.307
	桥墩	0.334	0.352	0.560	0	0	0.351

在加速度峰值分别为 $0.15g, 0.3g, 0.8g$ 地震作用下的三级评估向量如表 4 所示。

表 4 三级评估向量

地震等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌	等级评判参数 p
0.15g	0.482	0.512	0.269	0	0	0.237
0.3g	0.475	0.494	0.365	0	0	0.281
0.8g	0.336	0.351	0.518	0.013	0	0.340

根据最大隶属度原则可知, 当地震加速度峰值为 $0.15g, 0.3g$ 时, 该连续梁发生桥轻微破坏, 当地震加速度峰值为 $0.8g$ 时, 连续梁桥发生中等破坏, 随着地震强度的增大, 连续梁桥的破坏程度逐渐增大。

3 结论

(1) 模糊综合评判法能够对连续梁桥在地震作用下的破坏程度和破坏模式进行直观的评判, 评判结果合理且过程较为简便。

(2) 在应用模糊综合评价法对连续梁桥进行评价时, 模糊评判结果与破坏准则和地震损伤破坏指数

的选取有很大的关系,因此还需要进一步研究选定更加合理的破坏准则以及地震损伤破坏指数,从而使模糊综合评判更加准确。

(3)随着地震强度的增大,连续梁桥的破坏程度逐渐增大,且与主梁相比,桥墩的重要性程度更高,桥墩的破坏程度对整个桥梁的破坏程度起关键性影响。

参 考 文 献

- [1] 万峰,陈常松,张晨,等. 模糊综合评价法在桥型比选中的应用[J]. 中外公路,2015,35(4):97-101.
- [2] 焦玲. 模糊综合评价法在拱桥健康诊断中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2008.
- [3] 李书韬,程进. 模糊层次分析法在大跨度桥梁施工工期风险评估中的应用[J]. 结构工程师,2011,27(5):159-162.
- [4] 黄侨,唐海红,任远. 基于模糊理论的大跨度桥梁评估理论研究[J]. 公路交通科技,2010,27(1):62-66.
- [5] 刘合香. 模糊数学理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [6] 王风. 重载运输条件下钢轨应力状态监控点优选方法[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(增):113-116.
- [7] 中华人民共和国质量技术监督局. GB/T 17742-2008 中国地震烈度表[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [8] 叶列平,林旭川,曲哲,等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(1):1-6,20.
- [9] 杨伦标,高英仪,凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2011.
- [10] 陈水利,李敬功,王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [11] 陈军,张德明,简亚虎. 基于模糊层次分析法大型桥梁工程项目风险评估[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2010,23(3):29-33.
- [12] 张凯. 变电构架可靠性模糊综合评判研究[D]. 郑州:郑州大学,2003.
- [13] 刘伯权,白绍良,赖明. 抗震结构的破坏准则评述及探讨[J]. 重庆建筑工程学院学报,1993,15(4):1-8,21.
- [14] 黄贤智. 钢箱梁斜拉桥抗震能力评估方法研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
- [15] 中交公路规划设计院. JTG D60-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.

Research on Failure Mode of Continuous Beam Bridge Under Seismic by Fuzzy Theory

Xin Shichao

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the failure mode of continuous beam bridge under the various intensity of seismic, the synthetic evaluation model of the continuous beam bridge is established through the multi-layer fuzzy comprehensive evaluation method. According to the characteristics of continuous beam bridge, multi-factor gathers are set up with the destructing degree of elements and component of continuous beam bridge, then based on the weights and evaluation criterion of the indexes, the multi-factor gathers are evaluated step by step, the maximum membership degree principle is used to determine the destruction of continuous beam bridge under the seismic, and the destruction of continuous beam bridge under the various intensity of seismic is evaluated using judgment method of hierarchy attribute, and the relationship between the destruction of continuous beam bridge and seismic intensity is obtained. Finally, based on the multi-layer fuzzy comprehensive evaluation method, the fuzzy evaluation on a continuous girder bridge is conducted.

Key words: continuous girder bridge; failure mode; fuzzy evaluation method; earthquake action; judgment method of hierarchy attribute