

文章编号:1671-8879(2020)02-0083-07

在役多梁式 RC 简支梁桥的体系时变可靠度评估方法

王晓明¹, 段瑞芳², 白云腾³, 田建辉²

(1. 长安大学 公路大型结构安全教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通职业技术学院, 公路与铁道工程学院, 陕西 西安 710018; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为科学评价在役多梁式简支梁、板桥的结构性能, 针对其体系承载的冗余性、体系失效的随机性与时变性、及体系时变的随机性, 对多梁式钢筋混凝土(RC)简支桥开展体系时变可靠度评估模型研究。通过事故调查与概念分析, 系统研究其失效模式和失效机制的特点和属性; 针对多梁弯曲失效模式, 提出一套定量分析方法和指标, 建立在役多梁式钢筋混凝土简支桥的失效模式。根据简支桥的承载特点, 建立考虑多重失效机制的失效模式分析模型; 根据多梁式体系的承载传力特点, 推导横向联系不同状态时, 体系的失效概率表达; 基于全概率公式, 建立多重失效机制条件下, 在役多梁式 RC 简支桥的体系时变可靠度评估模型; 提出不同失效模式的贡献率指标, 并提出多梁弯曲失效模式的定量分析指标与方法, 分析其主要影响因素。以标准通用板梁桥为例, 通过算例分析对提出的方法进行验证。研究结果表明: 最不利构件评估和传统的体系评估模型未能全面考察结构的传力机制和各构件相互的作用及其变化, 可能对结构安全性做出保守或危险的误判; 提出的模型可从体系层次准确地反映结构承载性能可靠性退化规律, 既可考虑体系失效的随机性和时变性, 又可表现出横向连接的退化对结构体系改变的随机性, 更加合理地反映了寿命周期内梁桥体系的安全可靠性。

关键词:桥梁工程; 在役梁桥; 多梁式简支桥; 钢筋混凝土; 体系时变可靠度评估

中图分类号:U448.25 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.010

Time-dependent system reliability assessment of existing multi-beam RC simply supported bridges

WANG Xiao-ming¹, DUAN Rui-fang², BAI Yun-teng³, TIAN Jian-hui²

(1. Engineering Research Center for Large Highway Structure Safety, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Highway and Railway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To scientifically evaluate the structural performance of multi-beam simply supported bridges in service, the redundancy of system bearing, in view of the randomness and time-varying of system failure, and the randomness of system time-varying, time-varying reliability evaluation model was established. Through accident investigation and conceptual analysis, the

收稿日期:2019-09-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51308055); 陕西交通职业技术学院校级教研教改项目(XZ1807)

作者简介:王晓明(1983-), 男, 山西朔州人, 副教授, 工学博士, E-mail:wxm@chd.edu.cn。

characteristics and attributes of failure mode and failure mechanism were systematically studied. A set of quantitative analysis methods and indicators were proposed for multi-beam bending failure mode. According to the bearing characteristics of the simply supported bridge, the failure mode analysis model considering multiple failure mechanisms were established. According to the bearing capacity characteristics of the multi-beam system, the failure probability expression of the system was derived with or without the horizontal connection. Based on the full probability formula, the time-varying reliability evaluation model under multiple failure mechanism was proposed, the contribution rate indicators of different failure modes were proposed. The results show that the most unfavorable component evaluation and the traditional system evaluation model may not make a comprehensive investigation of the structural force transmission mechanism and the interaction of each component and its changes, which may make a conservative or dangerous misjudgment to the structural safety. The model can accurately reflects the law of reliability degradation of structural bearing performance from the system level, considering both the randomness and time-varying of system failure, and the randomness of structural connectivity changes caused by the degradation of horizontal connectivity. 1 tab, 6 figs, 26 refs.

Key words: bridge engineering; existing beam bridge; multi-beam simply supported bridge; reinforcement concrete; time-dependent system reliability assessment

0 引言

多梁式钢筋混凝土简支梁、板桥是中国公路、市政道路建设的主要桥型。近年来,随着服役时间的增加,该类桥型安全事故频发。科学评价该类桥型的结构性能成为亟待解决的问题。在役桥梁运营是一个车辆荷载、外部环境耦合作用于结构体系的随机过程,科学的评估方法不仅要分析结构体系对车辆荷载的抵抗性能,还要考虑环境作用引起的结构性能退化;同时还需要考虑整个过程各物理量的不确定性。

基于可靠度的评估方法可全面有效考虑实际运营中的各种情况,形成更加准确评估,是在役梁桥承载能力评估中的主要发展方向,但目前能够满足工程应用的研究仍多局限于构件层面^[1-3]。结构随机非线性分析方法与系统可靠度理论的发展相互不匹配,各国结构设计规范多存在构件层次与体系层次的随机性和非线性 2 个基本矛盾^[4],而基于这些规范设计出来的结构的整体可靠性却是未知的^[5-6]。目前体系可靠度的工程应用往往会遇到组合爆炸与相关失效 2 个难以克服的问题^[7-8]。从桥梁工程的体系可靠度评估发展^[9-14]来看,基于对体系特性与破坏行为的深入了解,结合相匹配的体系可靠度算法,避免囿于数学推演中,是体系可靠度工程应用的重点方向。

针对桥型特点,寿命周期内在役多梁式钢筋混

凝土(RC)简支梁桥的安全评估需要重点考虑以下因素:①体系承载的冗余性,即最不利主梁达到承载极限后,系统再度分配作用荷载继续承载的特性;②体系失效的随机性,即结构体系承载失效过程中各物理量具有不确定性和随机性;③体系失效的时变性,即主梁承载性能改变引起的时变性,以及体系传力格局改变引起的时变性;④体系时变的随机性,即横向联系退化的随机性,其决定了体系传力格局改变的随机性。

结构体系的失效模式是指结构破坏行为的形式;而失效机制是指结构功能失效的机理,即结构极限状态^[15-16]。科学的多梁式简支梁体系可靠度评估模型需要在物理上考虑每种失效模式,在机理上考虑每种极限状态。简支梁作为一种基本的结构形式,其失效模式非常明确。但是当多片简支梁组成简支梁桥时,其失效模式仍有待进一步的研究。梁桥中,典型的受力为弯与剪,与之对应的失效机制则主要包括弯曲失效和剪切失效^[17]。弯曲失效属于延性失效,在结构受力非线性发展过程中,从塑性铰形成到达到塑性铰极限转动能力有一个较长的延性过程,结构可以利用这一过程重新分配内力,继续增加的外荷载转由相邻构件承担,使构件逐一达到极限承载能力,直至形成整体或局部的破坏机构。剪切失效机制属于脆性失效,构件从承载极限荷载到破坏整个过程瞬间完成,新增加的荷载没有时间完成传递,在单个构件层次即可形成局部结构倒塌。

Frangopol 等在桥梁结构系统失效路径搜索的基础上,将桥梁结构简化为串-并联系统,然后利用系统工程的原理,计算桥梁的冗余因子^[18-19]。Estes 等在分析高速公路上1座多片钢混组合简支梁桥时,根据上部结构端部和中心隔板的横向传力作用,假设任何3根相邻大梁的失效是上部结构失效的必要条件^[20]。根据该思想,Akgul 等以相邻2片主梁失效为体系失效的准则,对多座混凝土简支梁、连续梁桥和简支结合梁进行评估^[21-24];李广慧假定3根相邻工字形钢梁的屈服作为判断叠合桥梁结构系统破坏与否的标志,即失效准则^[25]。但 Frangopol 等制定的体系破坏准则是根据经验的定性分析,未能给出详尽可靠的解释;同时由于该方法的理论性强,计算冗余因子的过程中做了大量的简化、假设,该方法的工程应用目前还存在较大的局限性。不同失效机制的破坏属性也不同,对结构体系的失效行为产生的影响也不同,上述研究并没有体现这种差异与影响,这可能会对体系失效的概率形成误判。另外,上述模型都侧重于体系失效的随机性与时变性,未能兼顾退化过程中体系的改变。Wang 等根据横向联系对体系的作用,考虑了横向联系退化引起的体系失效模型的改变,但这种改变是根据主观经验确定的,未能考虑这种影响的随机性^[26]。

综上,在役桥梁可靠度评估模型研究需进一步解决:①基于各构件对体系承载性能的作用,全面考察体系各主要的失效模式;②考查弯、剪失效机制对构件间相互作用,以及体系破坏形式的影响规律,建立考虑多重失效机制的评估模型;③建立多梁弯曲失效模式识别的定量分析方法;④考虑材料退化引起的体系随机改变的影响。本文在承载能力极限状态下,以体系预定的承载功能丧失为准则,针对上述不足开展研究,以期在役多梁式RC简支桥体系时变可靠度评估模型建立提供支撑。

1 在役多梁式RC简支桥的体系时变可靠度评估模型建立

多梁式简支板、梁桥的主要特点是:通过现浇横向连接使得预制主梁共同受力。该类型桥梁中,主梁是承载构件,其以横向连接的拓扑形式构成结构体系共同受力;横向连接是传力构件,其状态决定着构件间协同工作的规律,内力在弹性阶段的分布以及在塑性阶段的重分布。

本文基于对多梁式RC简支桥体系中各类构件作用的理解,考虑多重失效机制的影响,推导各类型

桥梁体系失效概率的数学表达,并构建了合理的体系可靠度评价模型。

1.1 考虑多重失效机制的失效模式

抗弯和抗剪失效将导致结构整体或局部的倒塌,都会造成结构预定承载功能的丧失。因此,承载能力极限状态下的体系可靠度分析需同时考虑弯曲和剪切2种失效机制。这时的结构体系可靠度分析问题实质上是同时考虑结构整体倒塌及局部倒塌概率的分析问题。

简支桥的失效机制可概括为跨中加载的弯曲失效,梁端加载的剪切失效。运营中的任一加载工况(偏载、中载、均匀加载)必然会经历车辆的上桥,行驶到跨中,再下桥,这时,同一类工况里纵向的不同位置加载均要经历。另外,对于中小跨径桥梁,车辆在桥上变道的几率极低,可以忽略不计。因此,将跨中的弯曲失效和梁端的剪切失效直接串联起来是科学合理的。

1.2 横向连接失效的单梁失效模式

若主梁间横向连接失效,主梁构件就是纯粹意义上的简支梁,属于静定结构;无论是跨中弯曲破坏还是梁端的剪切失效,均会导致结构的整体失效。相应的失效模式为单梁弯曲失效或单梁的剪切失效模式,此时可用式(1)表示失效事件,即

$$(M_u \leq M(F)) \cup (Q_u \leq Q(F)) \quad (1)$$

式中: M_u 、 $M(F)$ 分别为跨中截面的抗弯承载能力和弯曲效应; Q_u 、 $Q(F)$ 分别为梁端截面的剪切抗力和剪力效应; F 为作用在结构上的荷载值。

同时考虑抗弯与抗剪失效时,多梁式简支桥的失效概率 P_i^s 可改写为

$$P_i^s = P \left\{ \bigcup_{i=1}^n [(M_{u,i} \leq M_i(F)) \cup (Q_{u,i} \leq Q_i(F))] \right\} \quad (2)$$

式中: $i=1,2,\dots,n$,为结构可能失效截面的数量; P_i^s 为单梁失效模式下的失效概率, $P(\cdot)$ 为其函数表达式。

$(M_{u,i} \leq M_i(F))$ 表示第*i*个截面弯曲失效,而 $(Q_{u,i} \leq Q_i(F))$ 表示第*i*个截面的剪切失效。因此,同时考虑抗弯和抗剪失效模式,此系统相当于由抗弯失效元件和抗剪失效元件串联而成的系统,只要任何一个元件失效都会导致结构整体失效。

1.3 横向连接完好的多梁失效模式

当主梁间横向连接没有失效时,尽管多片主梁组成的整体是结构概念上的简支梁,但对于主梁构件,存在横桥向的多余约束,属于超静定结构。此时,失效模式为多梁弯曲失效或单梁的剪切失效,其

失效事件可描述为

$$\{\tilde{P}_{u,s} < F\} \cup \left\{ \bigcup_{i=1}^n (Q_{u,i} \leq Q_i(F)) \right\} \cap \{\tilde{P}_{u,s} \geq F\} \quad (3)$$

式中: $\tilde{P}_{u,s}$ 为通过非线性全过程分析确定的体系极限承载力。

式(3)中表述的是 2 个不交的子集失效事件,则多梁失效模式的失效概率 P_f^m 可表示为

$$P_f^m = P \left\{ \bigcup_{i=1}^n (Q_{u,i} \leq Q_i(F)) \mid \tilde{P}_{u,s} \geq F \right\} \cdot P(\tilde{P}_{u,s} \geq F) + P(\tilde{P}_{u,s} < F) \quad (4)$$

由式(4)可见,对于超静定结构,考虑多重失效机制的体系可靠度问题是同时考虑结构延性整体倒塌和脆性局部倒塌的可靠度问题。

1.4 考虑不同失效模式的基本单元

上述单梁失效模式、多梁失效模式在概率上是完备且对立的,取决于横向联系的状态,故可引入全概率公式来描述整个体系的失效概率 $P_{f,s}$,即

$$P_{f,s} = P\{R_s < S_s \mid R_{LC} < S_{LC}\} P(R_{LC} < S_{LC}) + P\{R_s < S_s \mid R_{LC} \geq S_{LC}\} P(R_{LC} \geq S_{LC}) = P_f^s P_f^i + P_f^m (1 - P_f^i) \quad (5)$$

式中: $P_f^i = P(R_{LC} < S_{LC})$ 为横向联系失效的概率; $1 - P_f^i = P(R_{LC} \geq S_{LC})$ 为横向联系完好的概率,其中 R_{LC} 、 S_{LC} 分别为横向联系的抗力与效应, R_s 、 S_s 分别表示结构体系的抗力与效应。

将式(2)、式(4)代入式(5),即可确定 $P_{f,s}$ 。

1.5 考虑不同加载工况的整体模型

多梁式简支梁桥的主要形式是多片梁装配组合形成整体,需要全面考虑不同主梁组合形成的失效可能,其本质上是考虑车辆极大荷载值在横桥向出现的位置,即加载工况。该过程中,需要根据不同加载工况(中载、偏载等)的多梁弯曲失效模式特点,进行区别对待。

整个体系的全局失效概率可以表示为

$$P_f^* = P(F_1 \cup \dots \cup F_j \cup \dots \cup F_n) \quad (6)$$

式中:不同加载工况失效事件 F_j 的失效概率 $P(F_j)$ 由式(5)计算。

全局失效概率 P_f^* 时的体系可靠指标 β_s^* 为

$$\beta_s^* = -\Phi^{-1}(P_f^*) \quad (7)$$

式中: $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的逆。

1.6 不同构件对体系失效的作用效率指标

除了结构体系的整体可靠度,不同构件对体系失效的作用效率指标也是影响维修加固决策的一个重要指标,它可以指示结构在不同寿命阶段引发体

系失效的主要薄弱环节。

根据 Bayes 定律,本文分别考察单梁失效模式与多梁失效模式对体系失效的概率贡献,其计算如下

$$P_f^s = \frac{P_f^s P_f^c}{P_f^*} \quad (8)$$

$$P_f^m = \frac{P_f^m (1 - P_f^c)}{P_f^*} \quad (9)$$

当 P_f^s 值高时,体系失效主要是单梁失效模式,管养策略需要优先关注横向联系(即横向传力构件);当 P_f^m 值高时,体系失效主要是多梁失效模式,改善主梁性能对提高体系可靠度更为有效。

2 算例

以交通运输部颁发的标准通用板梁桥为例,某桥采用 20 块预制钢筋混凝土空心板,板长 12.96 m,板宽 99 cm;桥面布置为 2.5+15+2.5 m;该桥采用《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89):设计荷载为汽-20,挂-100;人群荷载为 3.5 kN/m²;空心板采用 40 号混凝土;铰缝为 30 号细骨料混凝土。

荷载横向分布系数计算时,跨中采用铰接板法,支点按杠杆原理计算。跨中荷载横向分布系数由 4 车加载工况控制,但是乘以折减系数后,实际由 2 车加载工况控制,见图 1。支点处荷载横向分布系数为 0.5。

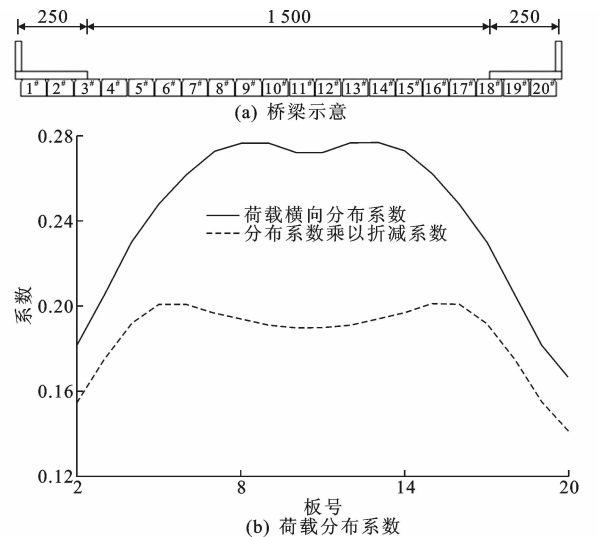


图1 分布系数与折减系数

Fig. 1 Distributions of coefficients and reduction factors

经 K-S 检验,主梁抗力不拒绝对数正态分布,其随机特性见图 2。图 2 中 σ 为标准差。

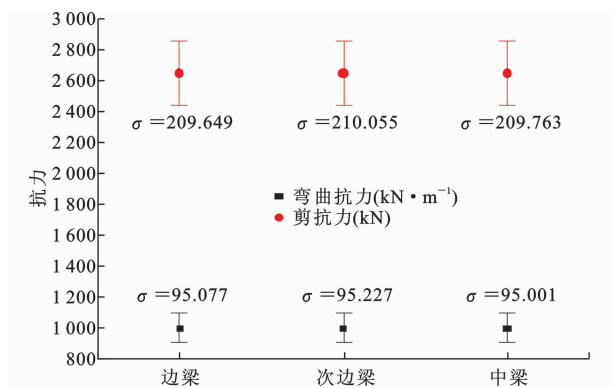


图 2 主梁抗力的随机特性

Fig. 2 Random characteristics of girder resistance

分别对各主梁的弯矩承载能力极限状态与剪切承载能力极限状态进行可靠度分析,可靠指标见图 3(本文仅给出空心板的一半)。

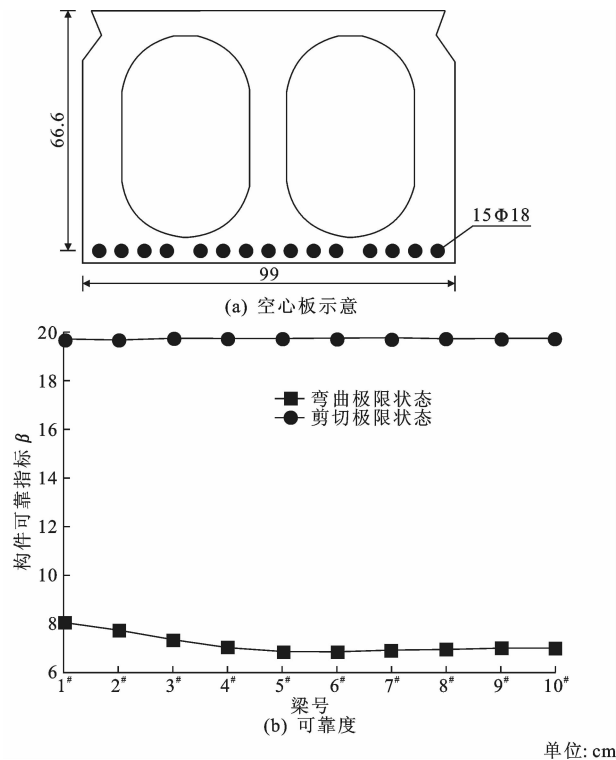


图 3 各主梁失效可靠度指标

Fig. 3 Failure reliability indexes of main girder

2.1 与基于现行规范的评估方法对比

基于现行规范《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)的评估方法,是根据最不利主梁的构件极限承载力确定,其本质上是构件评估。

本文模型的体系评估与现行规范的构件评估对比,结果见图 4。由图 4 可知:最不利主梁的最低可靠指标为弯曲机制下的 6.8,然而,尽管主梁可靠度不变,体系的可靠度也随着横向联系发生变化;当横向联系 $\beta_{LC} > 11$ 时,全桥的可靠指标 β_{sys} 达 11.3,此

时仍然采用基于最不利构件的评估思路将太过保守,其管养策略将导致资金浪费;当横向联系较低时,出现单梁失效模式的机率非常高(如 $\beta_{LC} = 4$, $\beta_{sys} = 5.2$),此时仍然采用基于最不利构件的评估思路将非常不安全,将导致管养决策失误。

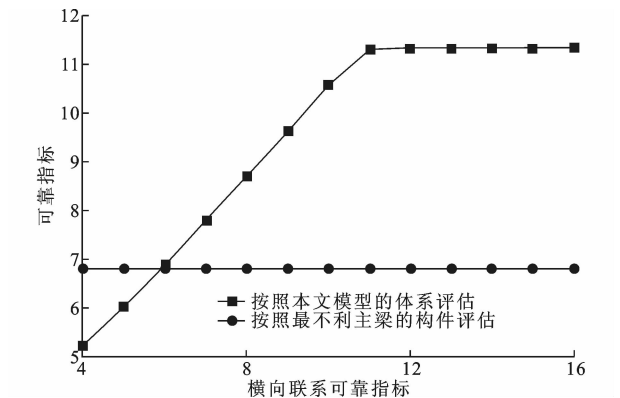


图 4 体系评估与构件评估比较

Fig. 4 Comparisons of system evaluation and components evaluation

2.2 与其他概率拓扑模型对比

将本文模型与根据文献确定体系评估模型 A^[20-24]和模型 B^[10-14]进行比较,各评估模型的特点见表 1。3 种模型多梁弯曲失效模式的共同失效主梁根数定义为:偏载工况为 2 根,中载工况为 3 根。

表 1 各评估模型的体系可靠度分析对比

Tab. 1 Comparisons of system reliability analysis of each evaluation model

评估模型	体系失效准则	是否考虑横向联系	主梁失效模式	对主梁失效机制的处理方式	
				弯曲	剪切
模型 A	主梁失效	否	多梁失效	延性	延性
模型 B	主梁、横向联系任一失效	是	多梁失效	延性	延性
本文模型	主梁失效	是	多梁失效、单梁失效	延性	脆性

从表 1 可知:模型 A 与模型 B 未能区分弯剪失效机制的性质及其对承载功能的影响,模型均对二者进行一致化处理;本文模型则可反映弯剪机制对构件间相互作用以及体系破坏形式影响规律的差异。

经体系可靠度计算求解,各模型的体系可靠指标如图 5 所示。由图 5 可知:模型 A 与本文模型均仅将主梁失效作为体系破坏准则,但模型 A 的评估结论偏危险,这是由于该模型未考虑可能的单梁失效模式;模型 B 与本文模型均考虑了横向联系作用,但由于模型 B 未能区分主梁与横向联系对体系

承载的作用,将横向联系的传力失效等同于主梁的承载失效,使得体系可靠度几乎完全依赖于横向联系(其曲线斜率为 45°),当 $\beta_{LC}=4$ 时,评估结果已经低于目标可靠指标 β_{target} ,偏于保守;3 个模型均在当横向联系 $\beta_{LC} > 11$ 时,体系的可靠度趋于相同;而 β_{LC} 越小,评估结果差异越大。可见本文模型能够合理评估多梁式简支桥的安全性。

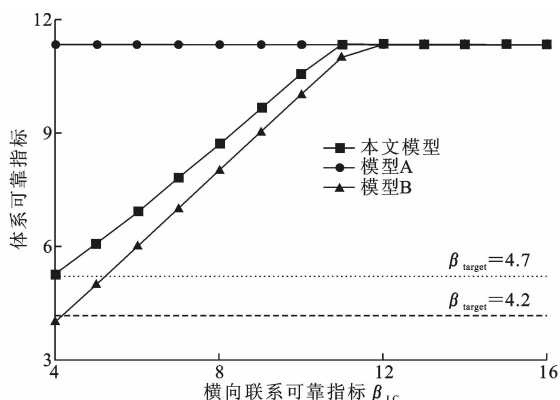


图5 各模型体系可靠度分析比较

Fig. 5 Comparisons of system reliability analysis of each model

2.3 不同构件对体系失效的作用效率指标

由式(8)、式(9)确定不同构件对体系失效的作用效率指标见图6。由图6可知:随着横向联系可靠度增大,多梁失效模式的概率贡献越来越大,表明改善主梁性能对提高体系可靠度更为有效;反之若单梁失效模式的概率贡献越来越大,则表明横向传力构件是引发体系失效的主要薄弱环节,管养策略需重点关注横向联系。

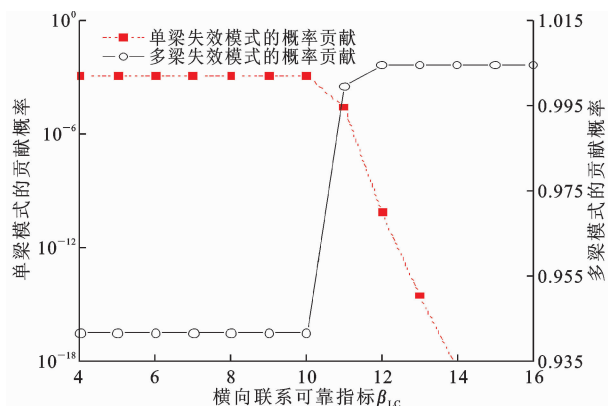


图6 不同构件的作用效率指标

Fig. 6 Action efficiencies indexes of different components

3 结语

(1)最不利构件评估与传统的体系评估模型均未能全面考察结构的传力机制和各构件相互的作用及变化,可能对结构安全性做出保守或危险的误判。

(2)本文模型可从体系层次准确反映结构承载性能可靠性退化的规律,既可考虑体系失效的随机性和时变性,又可表现出横向连接的退化对体系改变的随机性,能够合理评估多梁式简支桥的安全性。

(3)本文提出的不同构件作用效率指标,不仅可给出体系整体可靠度,还可在不确定分析过程中,指示结构在不同寿命阶段最可能引发体系失效的主要构件,可为维护策略提供概率的定量分析支持。

(4)本文给出了多梁式简支桥弯曲失效机制下,多梁失效模式的定量分析方法,并给出建议值。但在具体推广应用时,需要结合更多的破坏试验和数值分析结果,对不同跨径、不同横向连接形式的结构进行分别验证,最终形成针对性的建议表格。

参考文献:

References:

- [1] MELCHERS R E, BECK A T. Structural reliability analysis and prediction[M]. London: John Wiley & Sons, 2018.
- [2] STRAUSS A, HOFFMANN S, WENDNER R, et al. Structural assessment and reliability analysis for existing engineering structures, applications for real structures[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2009, 5(4): 277-286.
- [3] BERGMEISTER K, NOVAK D, PUKL R, et al. Structural assessment and reliability analysis for existing engineering structures, theoretical background[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2009, 5(4): 267-275.
- [4] 李杰. 生命线工程研究中的关键力学问题[J]. 工程力学, 2003, 20(增): 45-54.
LI Jie. Key mechanical problems in the lifeline engineering research[J]. 2003, 20(S): 45-54.
- [5] SONG P Y, LU D, YU X H, et al. Nonlinear global seismic reliability analysis of buildings[C]// ICOSAR. Proceedings of the 10th international conference on structural safety and reliability (ICOSAR2009). Osaka: CRC Press, 2009: 1750-1757.
- [6] 范文亮. 基于非线性发展过程的结构体系可靠度分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.
FAN Wen-liang. Reliability analysis of structural systems based on nonlinear development process[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] 李杰, 范文亮. 钢筋混凝土框架结构体系可靠度分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 15-20.
LI Jie, FAN Wen-liang. Reliability analysis of reinforced concrete frame structure system[J]. Journal of

- Civil Engineering, 2008, 41(11): 15-20.
- [8] 王学敏, 谢里阳, 周金宇, 等. 相关失效系统的可靠性模型[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2004, 25(9): 887-890.
- WANG Xue-min, XIE Li-yang, ZHOU Jin-yu, et al. Reliability model of related failure system[J]. Journal of Northeast University: Natural Science Edition, 2004, 25(9): 887-890.
- [9] BIONDINI F, BONTEMPI F, FRANGOPOL D M, et al. Reliability of material and geometrically non-linear reinforced and prestressed concrete structures[J]. Computers & Structures, 2004, 82(13/14): 1021-1031.
- [10] IMAI K, FRANGOPOL D M. System reliability of suspension bridges [J]. Structural Safety, 2002, 24(2): 219-259.
- [11] IMAI K, FRANGOPOL D M. Reliability-based assessment of suspension bridges: Application to the Inoshima Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(6): 398-411.
- [12] NOWAK A S, CHO T. Prediction of the combination of failure modes for an arch bridge system[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(12): 1561-1569.
- [13] CHO T, KIM T S, LEE D H, et al. Reliability analysis of a suspension bridge affected by hydrogen induced cracking based upon response surface method [J]. ISIJ international 2009, 49: 1414-1423.
- [14] PARK M Y, CHO H N, CHO T, et al. Probabilistic risk assessment of a cable-stayed bridge based on the prediction method for the combination of failure modes[J]. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2006; 26: 647-657.
- [15] FENG Y. Enumerating significant failure modes of a structural system by using criterion methods [J]. Computers & Structures, 1988, 30(5): 1152-1157.
- [16] YE Lie-ping, ZHE Qu. Failure mechanism and its control of building structures under earthquakes based on structural system concept[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2010, 3(4): 249-259.
- [17] 朱伯龙, 董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- ZHU Bo-long, DONG Zheng-xiang. Nonlinear analysis of reinforced concrete[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985.
- [18] FRANGOPOL D M, CURLEY J P. Effects of damage and redundancy on structural reliability[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(7): 1533-1549.
- [19] BIN Z. Redundancy, reliability updating and risk-based maintenance optimization of aging structures[D]. Bethlehem: Lehigh University, 2015.
- [20] ESTES A C, FRANGOPOL D M. Repair optimization of highway bridges using system reliability approach [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(7): 766-775.
- [21] AKGUL F, FRANGOPOL D M. Rating and reliability of existing bridges in a network [J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(6): 383-393.
- [22] AKGUL F, FRANGOPOL D M. Lifetime performance analysis of existing steel girder bridge superstructures [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(12): 1875-1888.
- [23] AKGUL F, FRANGOPOL D M. Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges. II: Application [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(2): 129-141.
- [24] AKGUL F, FRANGOPOL D M. Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges. I: Theory [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(2): 122-128.
- [25] 李广慧. 高速公路桥梁结构体系可靠性评估[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005.
- LI Guang-hui. Reliability evaluation of highway bridge structure system[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2005.
- [26] WANG X M, SHI X F, RUAN X, et al. Time-dependent reliability assessment of existing RC beam bridge [C]//ISRERM. Proceedings of ISRERM2010. Shanghai: Tongji University, 2010: 661-666.