DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.013
开放科学(资源服务)标识码OSID:

基于故障树的铁路简支梁桥震后功能状态评估

魏凯,胡振晨,鲁小罗,唐小珉
(西南交通大学 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室,成都 611756)

摘　要:为了合理评估铁路桥梁在地震作用后的通行功能,提出一种基于故障树模型的铁路简支梁桥震后功能状态评估方法。考虑桥梁各构件损伤与震后功能状态的关联性,建立以铁路桥梁震后功能状态为顶事件的故障树模型;根据故障树的基本事件定义了7种可能发生的地震破坏模式,建立综合考虑地震破坏模式的桥梁震后功能状态评估流程;以西南地区某典型32 m跨径铁路简支梁桥为参考,使用OpenSees建立1 000组不同桥梁结构参数的全桥有限元模型,采用提出的方法进行地震破坏模式和震后功能状态评估。结果表明:算例桥梁的地震破坏模式以支座与其他构件共同损伤为主导;随着地震动水准的提高,铁路桥梁震后通行功能急剧下降;轨道与其他构件共同损伤的破坏模式是导致铁路桥梁震后通行功能下降的关键因素。

关键词:铁路桥梁;简支梁桥;震后功能状态;故障树模型;地震破坏模式;通行功能
中图分类号:U446.3;U448.13　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2026)04-0146-08

Post-earthquake functional state assessment of railway simply supported bridges based on fault tree model

WEI Kai, HU Zhenchen, LU Xiaoluo, TANG Xiaomin
(State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, P. R. China)

Abstract: In order to reasonably evaluate the post-earthquake traffic function of railway bridges, a methodology founded upon a fault tree model was proposed for the purpose of assessing the functional state of railway simply supported bridges. First, an investigation was conducted into the correlation between damage to bridge components and post-earthquake functionality of the structures. To this end, a fault tree model was developed, with the post-earthquake functionality of the bridge designated as the top event. Thereafter, seven seismic failure modes were defined according to the basic events of the fault tree. A post-earthquake functional state assessment process for bridges was established considering different seismic failure modes. Finally, taking typical railway simply supported bridges with a span length of 32 m in Southwest China as a reference, this study used OpenSees to establish 1 000 full-bridge finite element models with different structural parameters. The proposed method was applied to assess the seismic failure modes and post-earthquake functional states. The findings indicate that the primary seismic failure modes of bridges involve combined damage to bearings and other components. With the increase in earthquake level, the post-earthquake traffic function of railway bridges decreases significantly. The failure mode involving combined damage to the rails and other components is the

收稿日期:2024-12-06
基金项目:国家自然科学基金(52222804、U21A20154)
作者简介:魏凯(1984-),男,教授,主要从事深水大跨桥梁研究,E-mail:kaiwei@swjtu.edu.cn。
Received: 2024-12-06
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52222804, U21A20154)
Author brief: WEI Kai (1984-), professor, main research interest: sea-crossing bridge, E-mail: kaiwei@swjtu.edu.cn.

key factor contributing to the decline in the post-earthquake traffic function of railway bridges.

Keywords: railway bridge; simply supported bridge; post-earthquake functional state; fault tree model; seismic failure mode; traffic function

在中国西部地区，铁路大部分穿梭于地质复杂的山区，断裂带分布广泛、地震活动频繁，铁路沿线桥梁面临显著地震灾害风险[1]。桥梁结构作为保障铁路交通运输网络畅通性的关键节点，一旦遭受地震破坏，可能导致其通行功能受损，造成严重的经济和社会损失。历次震害调查显示，铁路桥梁在地震作用下遭受了不同程度的破坏。例如，2022年青海门源地震导致震中区硫磺沟大桥出现严重破坏[2]，兰新高铁部分区段停运，随后桥梁的检测和修复工作持续了近8个月时间。中小跨径梁桥是中国铁路桥梁的主要结构形式，其中简支梁桥占绝对比例[3]。因此，深入了解该类桥梁的地震破坏模式及其震后功能状态对于保障桥梁功能的快速恢复、提升桥梁的抗震韧性具有重要的理论和现实意义。

近年来，学者们开展了桥梁震后功能评估的相关研究。蒋知之等[4]通过易损性方法建立公路桥梁震后通行能力理论模型，给出了定量分析通行能力的可行方案。Wang等[5]利用贝叶斯更新法修正地震易损性曲线，并结合交通量和通行时间对桥梁震后功能进行了评估。李天翊等[6]综合考虑桥梁构件震害破坏及其对车辆通行的影响，评估了公路桥梁震后通行功能损失。范乐雯[7]通过地震易损性分析对铁路梁式桥进行了震后通行能力评估。沈林白等[8]基于耐震时程法进行了铁路桥梁易损性和通行功能评估。上述研究大多基于构件的易损性分析来定量评估桥梁系统的震后功能，但未考虑多个构件发生损伤的破坏模式，鲜有研究从桥梁构件损伤的地震破坏模式角度来评估震后功能。然而，铁路桥梁的震后功能与其破坏模式紧密相关，地震破坏模式的识别可以明确地震作用下桥梁的关键易损构件及部位，为其震后功能评估及修复决策提供参考依据。综上所述，目前针对铁路简支梁桥的地震破坏模式和震后功能状态还缺乏系统的认知，亟待探寻一种从桥梁地震破坏模式的角度进行震后功能状态评估的方法。

笔者提出一种基于故障树模型的铁路简支梁桥震后功能状态评估方法。首先，从行车功能角度定义铁路桥梁的震后功能需求，以桥梁震后功能状态为顶事件、构件损伤状态为基本事件，建立桥梁震后功能故障树模型。其次，根据构件损伤基本事件的组合定义7种地震破坏模式，按照是否满足功能需求将桥梁震后功能状态划分为4个等级，基于故障树模型提出考虑地震破坏模式的桥梁震后功能状态分析方法。最后，结合提出的方法，以西南地区典型的32 m跨径铁路简支梁桥为例，考虑地震动和结构参数的不确定性，研究了桥梁地震破坏模式与震后功能状态的关系。

1　故障树模型

1.1　故障树基本原理

故障树分析法是一种自顶向下的图形演绎方法[9]，通过定义事件和逻辑符号来清晰地描述造成系统失效的各种原因，并以故障树图形的形式呈现。故障树图形是一种倒立树状图形，反映出各事件间的因果逻辑关系[10]。

建立故障树的具体流程为[10]：首先，将整个系统最不希望发生的情况作为顶事件；然后遵循从上至下的顺序逐层分析，找出导致顶事件发生的直接原因，即中间事件；再继续向下分析，直至找出不可分解的底事件（基本事件）；接着根据各层事件之间的逻辑关系，用逻辑门符号将它们连接起来；最后，去除对顶事件影响较小的事件及系统冗余部分，形成最终分析所用的故障树模型。

1.2　故障树模型建立

将桥梁震后功能状态故障作为铁路桥梁系统故障树的顶事件。以往研究对于系统功能状态的划分通常认为只存在“运行”和“失效”两种状态，这种划分方式不能合理表征桥梁结构的震后功能水平。因此，将桥梁是否满足行车要求作为表征铁路桥梁通行功能的指标，根据《铁路工程抗震设计规范（2009年版）》（GB 50111—2006）第3.0.1条定义的铁路工程性能要求，确定如下3个功能需求作为故障树的中间事件：

1）“达速通行”功能。桥梁结构满足列车达到设计时速运行的功能；

2）“限速通行”功能。桥梁结构可满足列车在车速大于最低时速且小于设计时速通行的功能；

3）“结构安全”功能。桥梁结构不能满足列车通行功能，但结构处于稳定状态。

桥梁构件的损伤破坏可能导致其无法满足功能需求，故将桥梁构件出现损伤作为故障树模型的底事件。为了明确损伤基本事件（底事件）的定量描述，需选择合适的损伤指标，以量化桥梁构件在地震作用下可能出现的损伤状态。分别选取轨道

不平顺变形、支座滑动位移和墩顶漂移比作为轨道、支座和桥墩的损伤指标。其中,轨道损伤指标参考《普速铁路线路修理规则》(TG-GW102—2019)中轨向不平顺容许偏差管理规定,通过梁端水平相对位移来衡量轨道的损伤程度。支座型号选取KZQZ-J-5000-ZX(活动端)和KZQZ-J-5000-GD(固定端)两种类型的双曲面球形支座,其损伤指标的划分参考王晓伟等[11]的研究成果,根据实际尺寸和滑动位移确定。为保证列车通行的平稳性,铁路简支梁桥多采用刚度大、配筋率低的圆端形桥墩,因此,传统的延性损伤指标不再适用。根据胡章亮等[12]的研究,采用墩顶漂移比作为桥墩的损伤量化指标,其计算公式为

$$\eta = u_i / H \tag{1}$$

式中:η为墩顶漂移比;u_i为桥墩处于第i个损伤状态时的墩顶位移;H为桥墩高度。

根据各构件损伤指标的定义,明确轨道、支座及桥墩的损伤基本事件,分别见表1、表2和表3。表1中X_i表示轨道发生了第i种损伤程度的基本事件;表2中Y_j表示支座发生第j种损伤程度的基本事件;s为支座水平设计位移量;D为支座平面非金属滑板直径,根据实际支座尺寸来确定;表3中Z_k表示桥墩发生第k种损伤程度的基本事件。

表1 轨道损伤基本事件

Table 1 Basic events of rail damage

基本事件	事件描述	损伤指标
X_0	几乎无损伤	$\Delta \leqslant 9$ mm
X_1	轨道扣件屈服	9 mm$<\Delta\leqslant$18 mm
X_2	轨道扣件严重塑性变形	$\Delta>18$ mm

表2 支座损伤基本事件

Table 2 Basic events of bearing damage

基本事件	事件描述	损伤指标
Y_0	支座位移小于正常使用位移值,基本无残余位移	$d=0$
Y_1	支座残余位移很小,滑板未滑出上顶板不锈钢范围	$0<d<s$
Y_2	支座残余位移较大,滑板小部分滑出上顶板范围	$s<d<s+D/4$
Y_3	支座大部分滑出梁底不锈钢板,梁体可支撑范围较小	$s+D/4<d<s+D/2$
Y_4	支座处于滑脱状态	$d>s+D/2$

考虑各构件损伤基本事件与桥梁震后功能状态的关联性,建立铁路简支梁桥震后功能的故障树模型,如图1所示。在故障树中,底事件(构件损伤)、中间事件(功能需求)和顶事件(功能状态)仅有两种状态,即发生故障和未发生故障。“OR”门表示下层任何子系统的故障都会导致上方系统故障。3个中间事件用虚箭线相连,表示箭尾的事件发生故障会导致箭头处的事件发生故障。

表3 桥墩损伤基本事件

Table 3 Basic events of pier damage

基本事件	事件描述	损伤指标
Z_0	几乎没有可见裂缝	$\eta\leqslant 0.13\%$
Z_1	钢筋发生屈服,混凝土表面明显开裂	$0.13\%<\eta\leqslant 0.34\%$
Z_2	局部塑性铰形成,保护层混凝土开始剥落	$0.34\%<\eta\leqslant 0.95\%$
Z_3	出现宽度较大的裂缝,塑性铰区混凝土大面积剥落	$0.95\%<\eta\leqslant 2.05\%$
Z_4	纵筋屈曲或拉断,核心混凝土压溃,墩柱接近倒塌	$\eta>2.05\%$

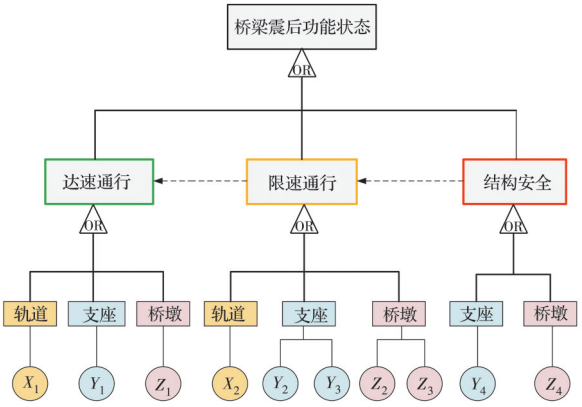


图1 铁路简支梁桥震后功能的故障树模型

Fig. 1 Fault tree model of post-earthquake function of the railway simply supported bridge

2 震后功能状态评估方法

2.1 地震破坏模式定义

根据图1建立的故障树模型,通过最小割集组合,总结了7种可能引起桥梁功能损失的地震破坏模式:R、B、P、RB、RP、BP和RBP。7种地震破坏模式与各构件损伤基本事件之间的关系按式(2)确定。

$$\begin{cases} \mathrm{R}=\{X_i, Y_0, Z_0\} \\ \mathrm{B}=\{X_0, Y_j, Z_0\} \\ \mathrm{P}=\{X_0, Y_0, Z_k\} \\ \mathrm{RB}=\{X_i, Y_j, Z_0\} \\ \mathrm{RP}=\{X_i, Y_0, Z_k\} \\ \mathrm{BP}=\{X_0, Y_j, Z_k\} \\ \mathrm{RBP}=\{X_i, Y_j, Z_k\} \end{cases}, \begin{pmatrix} i=1,2 \\ j=1,2,3,4 \\ k=1,2,3,4 \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中:$\{X_i, Y_j, Z_k\}$表示构件损伤基本事件的集合,X_i、Y_j和Z_k分别为表1、表2和表3中定义的基本事件。例如,集合$\{X_1, Y_2, Z_0\}$表示桥梁的轨道、支座和桥

墩分别处于轻微损伤、中等损伤和无损伤状态。R、B和P分别指代轨道、支座和桥墩破坏模式的编号。破坏模式R包含轨道出现损伤，即发生X_i(i=1、2)、支座和桥墩无损伤(Y_0和Z_0)的所有基本事件；破坏模式B和P定义同上。破坏模式RB表示轨道和支座均出现损伤，即发生X_i(i=1、2)和Y_j(j=1、2、3、4)、桥墩无损伤(Z_0)的所有基本事件；破坏模式BP和RP定义与RB类似。破坏模式RBP则表示轨道、支座和桥墩均出现损伤，即发生X_i(i=1、2)、Y_j(j=1、2、3、4)和Z_k(k=1、2、3、4)的所有基本事件。

2.2　震后功能状态分级

由式(2)可知，地震破坏模式是根据故障树基本事件的集合定义，而震后功能状态是通过基本事件向上分析得到的顶事件，二者均由构件的损失基本事件确定。因此，不同的地震破坏模式可能导致桥梁震后功能的差异。为探究地震破坏模式对桥梁震后功能的影响，通过故障树分析方法将破坏模式和震后功能状态联系起来，从是否满足功能需求的角度将铁路桥梁的震后功能状态划分为4个等级，如表4所示。

表4　铁路简支梁桥震后功能状态分级

Table 4　Classification of post-earthquake functional states of railway simply supported bridge

功能状态	功能需求			功能状态描述
	达速通行	限速通行	结构安全	
FS1	√	√	√	桥梁结构未受影响，通行功能正常
FS2	×	√	√	桥梁结构轻微受损，部分构件发生中等破坏；通行功能部分受影响，列车能够限速通行
FS3	×	×	√	桥梁结构出现中等破坏，部分结构发生严重破坏，不满足通行功能，结构未发生倒塌
FS4	×	×	×	各类构件发生严重破坏或失效，桥梁出现整体性倒塌，功能完全丧失

FS1：正常运行状态。此时桥梁结构的3个功能需求均满足。桥梁未受到地震灾害影响，结构与通行功能均完好。

FS2：限速运行状态。此时桥梁结构仅满足“限速通行”和“结构安全”功能需求。地震后桥梁结构轻微损坏，通行功能下降，经检查修复后，能恢复至正常运行状态。

FS3：结构安全状态。此时桥梁结构仅满足“结构安全”功能需求。地震导致桥梁结构产生较大破坏，桥梁失去运营功能，但结构未出现整体倒塌，经过抢修后可限速通车。

FS4：结构失效状态。此时桥梁结构的3个功能需求均不满足。地震后桥梁结构受力或变形超出控制范围或倒塌，结构完全失效、功能完全丧失，需要重建桥梁。

2.3　震后功能状态分析流程

铁路桥梁震后功能状态的评估流程如图2所示。

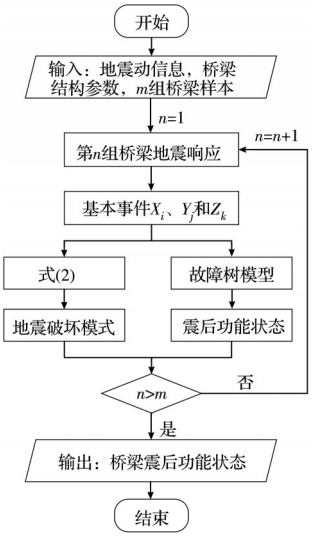


图2　铁路桥梁震后功能状态评估流程

Fig. 2　Post-earthquake functional state assessment process of railway bridges

根据图1的故障树模型可以建立构件损伤与桥梁震后功能状态之间的关系；将m组地震动-桥梁样本作为输入，通过非线性时程分析得到各组桥梁的地震响应；参照表1～表3对构件损伤基本事件的定量描述，确定各样本的X_i、Y_j和Z_k；通过故障树模型判断各桥梁样本的震后功能状态，通过式(2)确定该组桥梁样本的地震破坏模式。最终，对m组样本进行震后功能状态的评估。

3　算例分析

3.1　有限元模型

结合铁路简支梁桥的特点，选取西南地区某5跨32 m双线简支梁桥作为分析案例，基于OpenSees平台，建立全桥精细化有限元模型。其中，主梁采用线弹性梁单元模拟，圆端形桥墩采用基于力的纤维单元模拟，混凝土和钢筋材料分别采用Concrete01和Steel02模拟。支座采用零长度单元模拟，采用Steel01双折线本构模型模拟纵向活动支座的力学性能，采用MinMax材料模拟固定支座销钉剪坏前的力学性能，同时并联Steel01材料，以模拟销钉剪坏后支座的滑动行为。采用ImpactMaterial材料本构模拟相邻主梁间的碰撞效应。根据《铁路工程抗震设计规范(2009年版)》(GB 50111—2006)，采用等效土弹簧模拟桩基础。

由于承台刚度较大,假设各桩桩顶与承台中点之间不产生相对位移,采用主从节点约束模拟承台与桩顶之间的刚性连接。梁端变形会引起轨道结构的局部不平顺,进而影响列车运行的安全性和舒适性[13],这是引起铁路桥梁通行功能下降的重要因素,因此采用梁端水平相对位移作为轨道损伤量化指标。为了简化计算,在有限元模型中未对轨道进行建模。全桥动力分析模型如图3所示。

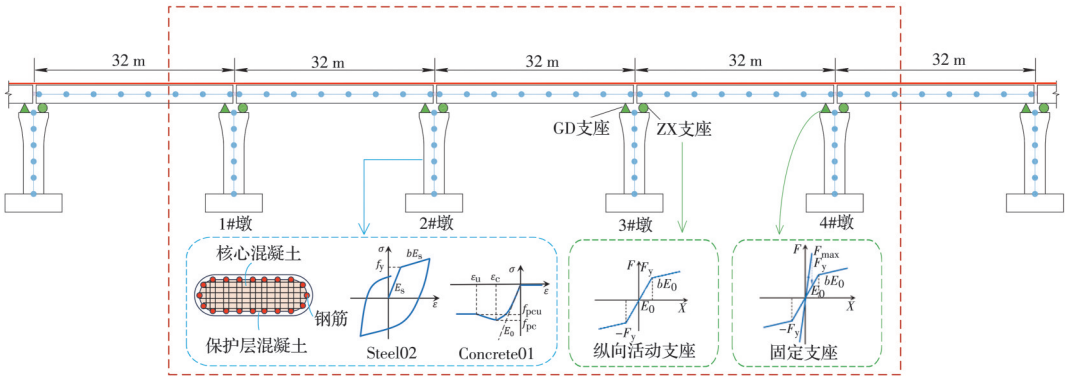


图3 桥梁有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the bridge

3.2 地震动-桥梁样本

为进一步考虑墩高不确定性对铁路简支梁桥地震破坏模式的影响,统计了西南某片区铁路简支梁桥的263个桥墩墩高,并通过对数正态分布拟合建立墩高的概率分布模型,如图4所示。墩高参数的拟合优度为0.985,拟合优度良好,其均值和标准差见图5。此外,针对该区域铁路简支梁桥的材料参数特征,共考虑包括墩高在内的11个结构和材料不确定性参数,各参数的概率分布见表5。

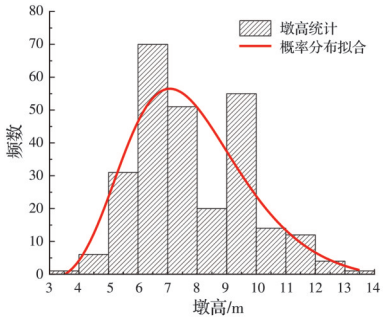


图4 桥梁墩高分布统计

Fig. 4 Distribution statistics of pier heights of bridges

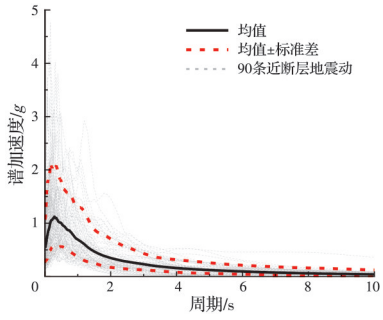


图5 地震动谱加速度

Fig. 5 Ground motion spectral acceleration

表5 结构和材料参数的概率分布

Table 5 Probability distributions of structural and material parameters

结构参数	概率分布类型	参数A	参数B	单位	参考文献
墩高	对数正态分布	2	0.24	m	
约束混凝土强度缩放系数	均匀分布	1.08	1.32		文献[14]
无约束混凝土峰值强度	正态分布	30.5	4.3	MPa	
约束混凝土极限应变	对数正态分布	−4.2	0.1		
保护层厚度	正态分布	50	10	mm	文献[15]
纵筋直径	正态分布	20	2	mm	文献[15]
HRB400钢筋屈服强度	对数正态分布	5.99	0.1	MPa	文献[14]
二期恒载	均匀分布	110	120	kN/m	
混凝土容重缩放系数	正态分布	1.05	0.105		文献[16]
支座刚度缩放系数	均匀分布	0.8	1.2		文献[17]
主梁间隙	均匀分布	5	15	cm	文献[17]

注:参数A、B根据分布类型的不同代表不同的含义,对于对数正态分布,参数A、B分别为取对数后的均值和标准差;对于正态分布,参数A、B分别为均值和标准差;对于均匀分布,参数A、B分别为上下界。

根据《铁路工程抗震设计规范(2009年版)》(GB 50111—2006),按照多遇、设计和罕遇地震3个水准开展相应的非线性时程分析。参照《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),多遇地震、设计地震和罕遇地震对应的峰值加速度PGA分别为0.12g、0.26g和0.38g。为了尽可能获取不同类型

的地震破坏模式，选取 Baker[18]推荐的 90 条近断层地震动作为输入，如图 5 所示。PGA 分布范围在[0.10g，1.58g]。采用三向地震动输入，以水平方向的主分量进行调幅，分别将 PGA 调幅至 0.12g、0.26g 和 0.38g。为考虑地震动水平方向输入的不确定性，主分量分别沿纵桥向和横桥向输入，从而确保 3 个地震动水准下各有 180 组地震动。

根据表 5 中桥梁结构参数的概率分布特征，对各参数进行拉丁超立方抽样（LHS），得到 1 000 组桥梁参数样本。在墩高的抽样过程中，根据统计的实际桥墩墩高分布规律，设置相邻桥墩的高差不超过 2.5 m 以及同组桥墩最大高差不超过 5.0 m 的约束条件，使得同一组桥梁参数样本的墩高各不相同，并且均在区间[3.5 m，15.0 m]内。将这 1 000 座桥梁模型分别与 3 个地震动水准下的 180 组地震动进行随机组合，得到地震动三水准下的 1 000 组地震动-桥梁模型样本对，综合考虑了地震动与结构参数的不确定性。

3.3　地震破坏模式识别

根据提出的方法，对不同水准地震作用的 1 000 组地震动-桥梁样本开展非线性时程分析。提取图 3 中第 2～4 跨范围内轨道、支座和墩柱的地震响应包络值，通过表 1～表 3 中对应的构件损伤指标来判别损伤基本事件，再根据式（2）对各桥梁样本的地震破坏模式进行识别。对三水准地震作用下各组桥梁的地震破坏模式进行统计，如图 6 所示。

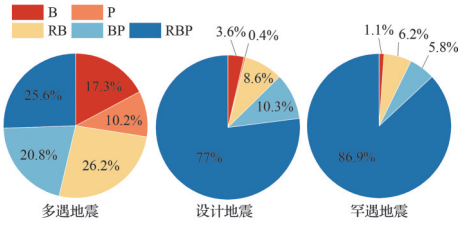


图 6　不同地震动水准下的桥梁地震破坏模式

Fig. 6　Failure modes of bridges under different earthquake levels

由图 6 可知，在三水准的地震作用下，所有桥梁样本中只出现了 B、P、RB、BP 和 RBP 五种地震破坏模式。多遇地震下破坏模式 P 的占比为 10.2%，而随着地震水准的提高，破坏模式 P 在罕遇地震下的占比下降至 0%。说明在较高水准的地震动作用下桥墩单独出现损伤的概率很小，容易发生与其他构件共同损伤的情况。5 种地震破坏模式中，除了破坏模式 P，其余 4 种均与支座的损伤基本事件相关，其中 RB、BP 和 RBP 在不同水准地震作用下的总占比均超过 70%。说明针对算例桥梁而言，其破坏模式以支座与其他构件的共同损伤为主导。此外，在多遇地震下，各破坏模式的占比差距不大，但随着地震动水准的提高，在罕遇地震下破坏模式 RBP 的占比上升至 86.9%，其他破坏模式的占比下降至 7% 以下。表明在较高地震动水准下桥梁结构主要发生多个构件共同损伤的破坏模式。

3.4　震后功能状态评估

根据故障树模型以及震后功能状态的定义，对不同水准地震作用下桥梁样本的震后功能状态进行识别统计，结果如图 7 所示。

由图 7 可知，多遇地震下 77.5% 的桥梁样本处于可通行状态（FS1 和 FS2），而设计地震下可通行状态仅占 16.6%，而罕遇地震时仅 6.6%。随着地震动水准的提高，震后功能状态 FS1 和 FS2 的总占比从 77.5% 下降至 6.6%，功能状态 FS3 和 FS4 的总占比则从 22.5% 上升至 93.4%，说明算例桥梁在较高地震动水准下的震后通行功能急剧下降。

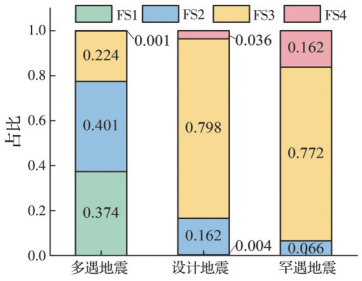
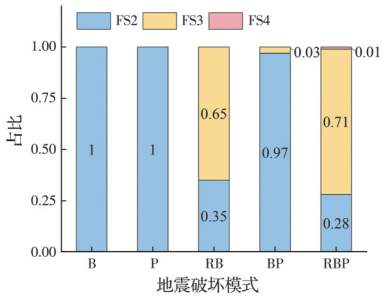


图 7　不同水准地震作用下的桥梁震后功能状态

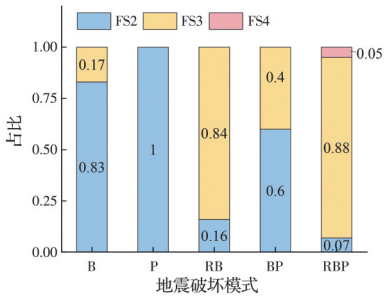
Fig. 7　Post-earthquake functional states of bridges under different earthquake levels

根据图 2 所示的评估流程，图 8 统计了各桥梁样本在不同地震破坏模式下的震后功能状态占比，图 8(a)、(b)、(c)分别统计了多遇、设计和罕遇地震作用下的占比情况。

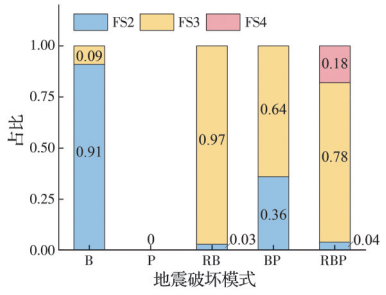
由图 8 可知，发生破坏模式 B 的桥梁样本震后功能状态以限速运行状态（FS2）为主，在三水准下占比均超过 83%；发生破坏模式 P 的桥梁样本均处于限速运行状态（FS2）；而发生破坏模式 BP 的桥梁样本在多遇和设计地震下均以限速运行状态（FS2）为主，在罕遇地震下则以结构安全状态（FS3）为主，占比 64%。此外，在发生破坏模式 RB 的桥梁样本中，震后功能状态以 FS3 为主，在罕遇地震下 97% 的桥梁处于结构安全状态（FS3），列车无法通行，说明轨道和支座均损伤的破坏模式大大降低了桥梁的震后功能。而仅在破坏模式 RBP 的桥梁样本中出现了结构失效状态（FS4），罕遇地震下占比为 18%，部分桥梁需要重建，说明 3 个构件均损伤的破坏模式更进一步地降低了桥梁的震后通行功能。可见，轨道与其他构件的共同损伤是导致桥梁震后通行功能下降的关键因素。



(a) 多遇地震



(b) 设计地震



(c) 罕遇地震

图 8 桥梁在不同破坏模式的震后功能状态占比

Fig. 8 Post-earthquake functional states of bridges under different failure modes

4 结论

建立了铁路桥梁震后功能状态的故障树模型，按照是否满足功能需求划分为 4 个等级，以西南地区典型 32 m 跨径铁路简支梁桥为例，分析其地震破坏模式，并根据故障树对其震后功能状态进行识别分析。主要结论如下：

1)桥梁样本中主要出现 5 种地震破坏模式：B、P、RB、BP 和 RBP。其中，破坏模式 RB、BP 和 RBP 在三水准下总占比均超过 70%，表明铁路简支梁桥以支座与其他构件的共同损伤为主要破坏模式。

2)随着地震动水准的提高，可通行功能状态(FS1 和 FS2)的占比下降至 6.6%，结构安全(FS3)和结构失效(FS4)状态的占比上升至 93.4%，说明地震动强度的增加会导致铁路桥梁的通行功能急剧下降。

3)发生破坏模式 B、P 和 BP 的桥梁震后功能状态以限速运行状态(FS2)为主。发生破坏模式 RB 和 RBP 的桥梁震后功能状态以结构安全状态(FS3)为主，且发生破坏模式 RBP 的桥梁样本中出现结构失效状态(FS4)。说明轨道与其他构件共同损伤的地震破坏模式是降低铁路桥梁震后通行功能的关键因素。

研究尚存在以下不足：仅通过梁端水平相对位移来衡量轨向不平顺，后续研究中还应对轨道板、扣件及钢轨进行精细化建模，更准确地量化轨道的损伤程度；仅针对 3 个地震动水准开展了震后功能状态评估，后续研究将结合故障树和易损性分析方法开展桥梁的概率震后功能状态评估。此外，采用的故障树分析方法同样适用于其他类型的桥梁，但故障树模型需根据具体桥型建立。

参考文献

[1] 雷虎军，朱广平，陈奕涵，等. 近断层地震作用下高速铁路大跨连续刚构桥易损性研究[J]. 中国铁路，2024(2): 46-54.
Lei H J, Zhu G P, Chen Y H, et al. Research on vulnerability of long-span continuous rigid-frame high speed railway bridge under near-fault earthquake[J]. China Railway, 2024(2): 46-54. (in Chinese)

[2] 王军文，田茂东，郝玉军，等. 硫磺沟大桥的地震破坏机理研究[J]. 土木工程学报，2025，58(11)：117-127.
Wang J W, Tian M D, Hao Y J, et al. Study on seismic failure mechanism of Liuhuanggou Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(11): 117-127. (in Chinese)

[3] 刘勇，戴公连，康崇杰. 中国高速铁路简支梁综述[J]. 铁道科学与工程学报，2015，12(2): 242-249.
Liu Y, Dai G L, Kang C J. Comprehensive comments on simply-supported girders of high-speed railway in China[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 242-249. (in Chinese)

[4] 蒋知之，李永义，孙庆峰，等. 震后公路桥梁通行能力理论模型研究[J]. 防灾减灾工程学报，2015，35(2): 226-231.
Jiang Z Z, Li Y Y, Sun Q F, et al. Research on theoretical model of traffic capacity of highway bridges after earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(2): 226-231. (in Chinese)

[5] Wang W, Wu F Y, Wang Z Y. Revising seismic vulnerability of bridges based on Bayesian updating method to evaluate traffic capacity of bridges[J]. Sustainability, 2020, 12(5): 1898.

[6] 李天翊，张东昱，张晓宇. 考虑构件震害影响的城市桥梁震后通行功能损失评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报，2025，57(1): 35-45.

Li T Y, Zhang D Y, Zhang X Y. Post-earthquake urban bridge traffic capacity loss assessment considering effects of structural component damage[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(1): 35-45. (in Chinese)

[7] 范乐雯. 铁路梁式桥震后通行能力评估[J]. 四川建筑, 2023, 43(2): 100-102, 106.
Fan L W. Evaluation of post-earthquake capacity of railway beam bridge[J]. Sichuan Architecture, 2023, 43(2): 100-102, 106. (in Chinese)

[8] 沈林白, 洪彧, 李敬研, 等. 基于易损性的铁路桥梁通行功能评估研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(10): 98-105.
Shen L B, Hong Y, Li J Y, et al. Research on traffic function assessment of post-earthquake railway bridges based on vulnerability[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(10): 98-105. (in Chinese)

[9] Ruijters E, Stoelinga M. Fault tree analysis: a survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools[J]. Computer Science Review, 2015, 15: 29-62.

[10] 黄鹏超. 基于功能需求导向的城市综合体震后修复路径优化方法[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2022.
Huang P C. Optimization method of post-earthquake repair path for urban complex based on functional demand orientation[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2022.

[11] 王晓伟, 叶爱君, 吴学平, 等. 梁式桥抗震韧性评估方法: Ⅰ. 基于专家意见的构件震后功能恢复模型[J]. 土木工程学报, 2025, 58(1): 65-76.
Wang X W, Ye A J, Wu X P, et al. Seismic resilience assessment method for girder bridges: Ⅰ. Expert opinion-based post-earthquake functionality recovery models of bridge components[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(1): 65-76. (in Chinese)

[12] 胡章亮, 魏标, 蒋丽忠, 等. 高速铁路桥墩损伤量化研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(5): 60-68.
Hu Z L, Wei B, Jiang L Z, et al. Research on damage quantification of high-speed railway bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(5): 60-68. (in Chinese)

[13] 魏亚辉, 徐鹤寿, 牛斌. 无砟轨道桥梁梁端变形对扣件影响的模型试验研究和数值分析[J]. 铁道建筑, 2011, 51(3): 99-102.
Wei Y H, Xu H S, Niu B. Model test study and numerical analysis on effect of additional force due to girder ends deformation on ballastless track fastening[J]. Railway Engineering, 2011, 51(3): 99-102. (in Chinese)

[14] 董俊. 铁路高墩大跨刚构-连续组合体系桥梁近场地震易损性分析研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
Dong J. Fragility analysis of railway long span rigid frame-continuous combination system bridge with high pier subjected to near-fault ground motion[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[15] Pang Y T, Wei K, Yuan W C. Life-cycle seismic resilience assessment of highway bridges with fiber-reinforced concrete piers in the corrosive environment[J]. Engineering Structures, 2020, 222: 111120.

[16] 吴文朋. 考虑不确定性的钢筋混凝土桥梁地震易损性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Wu W P. Seismic fragility of reinforced concrete bridges with consideration of various sources of uncertainty[D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[17] Nielson B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.

[18] Baker J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.

（编辑　王秀玲）