

基于 IDA 的大跨连续梁桥地震易损性分析

赵人达¹, 高能¹, 贾毅¹, 邱新林²

(1. 西南交通大学土木工程学院桥梁工程系, 四川 成都 610031;

2. 广东省南粤交通潮漳高速公路管理中心, 广东 潮州 510101)

摘要 目的 分析公路连续梁桥的地震易损性, 为该桥的多级设防抗震设计研究提供理论依据。方法 基于性能抗震设计思想, 确定结构的 5 个性能水准, 以桥墩的位移延性比作为性能量化指标, 计算桥梁不同极限状态的损伤界限值。在此基础上, 采用 IDA 分析方法计算 20 条人工拟合地震波作用下的地震响应, 基于可靠度理论进行对数回归拟合分析, 最终获得地震易损性曲线。结果 理论易损性曲线表明该桥具有良好的综合抗震性能, 在 0.3 g 地震动作用下, 轻微损伤、中等损伤和严重损伤的概率分别为 57.9%、44.7% 和 3.6%。结论 易损性分析结果可以反映桥梁的综合抗震性能和各级损伤状态的超越概率, 对分析整个交通路网的抗震性能和制定紧急救援方案具有指导意义。

关键词 易损性; 增量动力法; 性能水准; 损伤指标; 地震

中图分类号 TU997; U448.14

文献标志码 A

Seismic Vulnerability Analysis of Long-span Continuous Beam Bridge Based on Incremental Dynamic Analysis

ZHAO Renda¹, GAO Neng¹, JIA Yi¹, QIU Xinlin²

(1. Department of Bridge Engineering, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. Chaozhang Traffic of Guangdong Province, Highway Management Center, Chaozhou, China, 510101)

Abstract: The analysis of seismic vulnerability of highway continuous beam bridge provides a theoretical basis for the multi-stage fortification and seismic design of the bridge. Based on performance seismic method, five levels of structure performance were defined. The bridge damage threshold values for different damage limit state were studied by taking displacement ductility ratio of the pier as a quantitative performance metric. Then, the seismic response under the action of 20 artificial earthquake ground motion curves were calculated by using the incremental dynamic analysis (IDA) method. Finally, the seismic vulnerability curves were obtained. The theoretical vulnerability curve shows that the bridge has a good comprehensive seismic performance. And the probability of

收稿日期: 2017-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308471); 国家重点研发计划项目(2016YFB1200401); 广东省科技厅科技计划项目(2014-02-015)

作者简介: 赵人达(1961—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事桥梁抗震与损伤评估研究。

slight damage, moderate damage and severe damage is 57.9%, 44.7% and 3.6%, respectively, under the action of 0.3g ground motion. The results obtained by the vulnerability analysis can be used to reflect the bridge seismic performance and damage probability. And it also has guiding significance for analyzing the seismic performance of the whole traffic network and making emergency rescue plan.

Key words: vulnerability analysis; incremental dynamic analysis; performance level; damage index; earthquake

自 20 世纪以来,国内外曾发生过多地破坏性极强的地震。例如 1976 年中国的唐山大地震,1994 年美国的 Northridge 地震,1995 年日本的阪神地震,1999 年台湾的 Chi - Chi 地震和 2008 年中国的汶川大地震^[1-2]。这些灾害性的地震对人类社会造成了巨大的伤害,同时也加速了地震灾害预测的相关研究。随着高速公路在我国西南、西北地区的大力新建,大跨度连续梁桥以其跨越能力强、受力合理、连续性好的优点被广泛应用。而桥梁结构作为整个交通生命线的关键,其重要性不言而喻,地震作用下桥梁结构损坏所导致的交通中断,往往阻碍了灾民转移,并给灾后救援工作带来了巨大的困难。地震易损性通常指结构在不同地震动强度下发生相应不同程度损伤的超越概率^[3-4],历次地震灾害表明桥梁结构在地震作用下是易损坏的。因此,以易损性的概念分析桥梁结构的抗震性能是目前符合知识现状和逻辑合理的分析手段,并成为桥梁抗震研究领域的热点问题。

地震易损性通常可以用易损性曲线表示,以易损性曲线的形式来研究结构的地震易损性,最早起源于 20 世纪 70 年代初核电站的地震概率风险评估^[5-6]。通过多年相关领域的交叉渗透和发展,易损性研究已逐渐从建筑结构方面开始向桥梁领域深入。Shinozuka^[7]作为地震易损性分析的先驱,根据日本阪神地震的桥梁震害记录,采用对数正态分布的假设最终得到了经验性地震易损性曲线;Mander^[8]基于 1995 年神户地震的桥梁损伤数据,采用双参数正态分布,根据经验得到了易损性曲线,并将桥梁破坏状态划分

为 5 个等级;Chomchuen 等学者^[9-10]采用能力谱法进行了理论易损性分析;Karim 等^[11]把桥墩简化为单自由度体系,计算桥墩的 Park - Ang 破坏指标,建立了钢筋混凝土桥墩的理论易损性曲线。

增量动力分析方法(IDA)是近年来才发展起来的一种评价结构抗震性能的参数分析方法^[12-13]。该方法将单一的时程分析扩展为增量时程分析,综合了静力推覆分析和非线性时程分析的诸多优点,因此也被称为“动力推覆分析”,在多自由度结构体系和高墩大跨桥梁结构的抗震分析中有着大量应用。

目前,大跨连续梁桥在中国公路系统和跨海大桥领域中的应用非常广泛,而相对应的地震易损性分析研究还非常少。鉴于桥梁结构在交通网络中的重要性,笔者针对此类桥梁,提出这类桥梁的理论地震易损性分析方法,定义了结构抗震性能五个水准,并根据破坏准则提出了墩柱不同程度破坏的损伤界限。通过有限元模型,结合增量动力分析方法得到结构的地震响应,并基于传统可靠度理论形成易损性曲线,探讨了此类桥梁的失效模式和损伤概率,为评估该类桥梁的抗震性能和预测预防桥梁地震灾害提供理论依据。

1 基于 IDA 的易损性曲线分析方法

易损性曲线可以表示为不同强度地震作用下结构反应超过破坏阶段所定义的结构承载能力的条件概率,它在一定程度上揭示了桥梁遭受不同程度损伤的概率与地面运动参数之间的关系。目前,国内外研究易损性曲线

的主流方法分为两种:经验易损性方法和理论易损性方法^[14]. 其中,形成理论易损性曲线的方法又分为基于数值模拟的损伤超越统计法和基于可靠度的直接回归拟合法^[15]. 笔者基于第二种方法,通过增量动力法得到结构的地震响应,结合结构性能损伤指标,将地震响应延性指标对数化后线性回归拟合,并计算结构在不同损伤状态下的超越概率,最终绘制易损性曲线. 地震易损性曲线具体形成过程如下.

(1)根据场地安全报告给出的规范反应谱生成若干条地震动记录,并选择一个合理的地震动强度参数.

(2)选择若干条地震动记录,并用一组调幅系数将每一条地震动记录调整为 0.1 ~ 1.0 g,增量可选用 0.05 g 或 0.1 g.

(3)根据大跨连续梁桥的支座布置,确定最不利墩柱的危险截面,通过选择的合理抗震性能量化指标计算损伤界限,最终得到结构不同破坏程度的损伤指标.

(4)结合所选的调幅地震动对有限元模型进行一系列非线性时程分析,得到结构的墩顶位移或墩底曲率等地震响应.

(5)将非线性时程分析求得的结构响应对数化后进行线性回归分析,得到结构延性指标对数与地震动参数对数的线性回归方程,如式(1)所示. 再利用式(2)和式(3)计算结构在不同破坏阶段的超越概率,其中 μ_d 、 μ_c 都服从对数正态分布.

$$\ln(\mu) = a + b \ln(PGA). \quad (1)$$

$$P_f = P\left[\frac{\mu_d}{\mu_c} \geq 1\right], \quad (2)$$

$$P_f = \varphi\left(\frac{\ln\left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right) = \varphi\left(\frac{a + b \ln(PGA) - \ln(\mu_c)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right). \quad (3)$$

式中: a 、 b 分别是指回归拟合的系数; μ_d 、 μ_c 分别是指结构需求和结构能力.

2 结构抗震性能水准的定义与量化

2.1 结构抗震性能水准的定义

抗震设计思想是结构抗震设计的基础,多年以来,随着抗震设计思想研究的不断深入和完善,结构抗震设防标准也从早期的单一设防逐步发展到如今的多级抗震设防. 基于性能的结构抗震设计思想最早起源于 20 世纪 90 年代的美国学者,他们提出随着技术水平的提高,结构不应仅以“生命安全”为准则,而应在此基础上注重结构的使用性能,考虑安全、使用、美观、经济等多方面因素,其实质就是“小震不坏,中震可修,大震不倒”这一基本抗震设防原则的拓展^[16]. 目前,在国内外权威的基于性能的结构抗震设计理论框架中,建议性地给出了五个性能水准,分别为充分运行、运行、基本运行、生命安全、接近倒塌. 为适应现行的公路桥梁结构极限状态理论的设计方法,文献[17]建议基于性能的桥梁抗震设计不仅要考虑结构破坏极限状态和正常使用极限状态,还要考虑有限损坏极限状态的要求. 因此,可将公路桥梁的五个抗震性能水准定性描述为无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和局部失效或倒塌,具体表述见表 1.

2.2 结构抗震性能水准的量化

桥梁抗震性能水准描述了桥梁结构在相应设防地震强度作用下的最大破坏程度. 然而在实际桥梁抗震设计中,还需选择合适的抗震性能量化指标来定量描述桥梁结构的抗震能力. 在传统的结构抗震设计中,一般将力作为抗震性能量化指标,这也是广大工程师所容易理解和接受的. 然而,在基于性能的桥梁抗震设计中,部分结构出现不同程度的损坏是被允许的,在这个前提下,传统力学概念无法全面地描述桥梁结构的各个性能水准,因此必须采用变形、能量或其他损伤量化指标. 对于大跨度连续梁桥,主梁在地震期间保持弹性阶段,盖梁和基础往往按照能力保护

表 1 桥梁抗震性能水准描述

Table 1 Description of bridge seismic performance

性能水准	损伤描述	功能状态描述
水准 I	无损伤	车辆正常通行
水准 II	轻微损伤	一般修整即可恢复正常运营功能
水准 III	中等损伤	经抢修可恢复使用,永久性修复可恢复正常运营
水准 IV	严重损伤	临时加固,可恢复部分运营功能
水准 V	局部失效或倒塌	部分倒塌,功能丧失,不可修复

构件进行设计,而墩柱是最容易发生损伤的构件,且墩柱的损伤往往直接导致桥梁功能的丧失,因此可以将桥梁地震损伤问题归结为桥墩的地震损伤.笔者建议采用 Hwang 提供的墩柱位移延性比作为桥梁抗震性能量化指标^[18],可以定义为

$$\mu = \frac{\Delta}{\Delta_{cy1}}.$$

(4)

式中: Δ 为桥梁地震期间墩顶的最大位移; Δ_{cy1} 为墩底纵向受拉钢筋首次达到屈服状态时的墩顶位移.

将桥梁抗震性能量化指标与各个性能水准相结合,具体表述见表 2.

表 2 桥梁抗震性能量化指标

Table 2 Quantitative indicators of the bridge seismic performance

性能水准	损伤描述	破坏特征描述	量化指标
水准 I	无损伤	墩柱无钢筋屈服,混凝土仅产生细小裂缝	$0 < \mu \leq \mu_{cy1}$
水准 II	轻微损伤	墩柱中出现第一根钢筋理论屈服,混凝土出现明显裂缝	$\mu_{cy1} < \mu \leq \mu_{cy}$
水准 III	中等损伤	墩柱局部塑性铰开始形成,出现非线性变形,保护层混凝土开始剥落,可见裂缝展开	$\mu_{cy} < \mu \leq \mu_{c4}$
水准 IV	严重损伤	塑性铰完全形成,形成较大宽度的裂缝,整个塑性铰区混凝土剥落	$\mu_{c4} < \mu \leq \mu_{cmax}$
水准 V	局部失效或倒塌	墩柱强度退化,主筋屈服,箍筋断裂,核心混凝土压碎	$\mu_{cmax} < \mu$

注: μ_{cy1} 为受拉钢筋首次屈服时位移延性比; μ_{cy} 为等效屈服位移延性比; μ_{c4} 为墩身混凝土压应变达到 0.004 的位移延性比; μ_{cmax} 为最大位移延性比.

3 工程算例

3.1 工程概述

潮安韩江特大桥跨航道处主桥地处广东省归湖镇,上部结构为预应力混凝土现浇连续箱梁,采用单箱单室结构,跨径组合为 55 m+4×90 m+55 m,箱梁梁高和底板厚度按 2 次抛物线设计,采用 C55 混凝土;桥墩为薄壁箱形墩,半幅墩身宽 6.5 m,厚为 2.5 m,横桥向两侧作三角外突设计,采用 C40 混凝土;墩身纵筋和箍筋均采用 HRB400 钢筋,纵筋采用直径 28 mm 的Ⅲ级钢筋,平均间距 10 cm 布置,箍筋采用直径

16 mm 的Ⅲ级钢筋,间距 0.3 m 布置;本桥属丘陵间洼地地貌,场地土类型为中硬土,场地类别为Ⅱ类.图 1 为桥墩截面尺寸及钢筋分布,图 2 为桥型布置图.

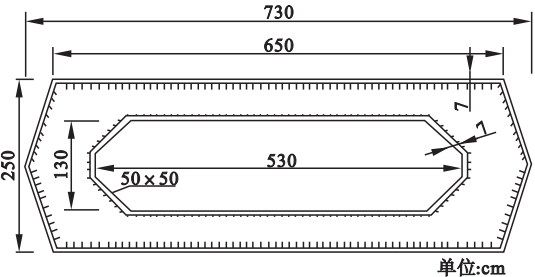


图 1 截面尺寸及钢筋分布

Fig. 1 Cross section and distribution of reinforcement

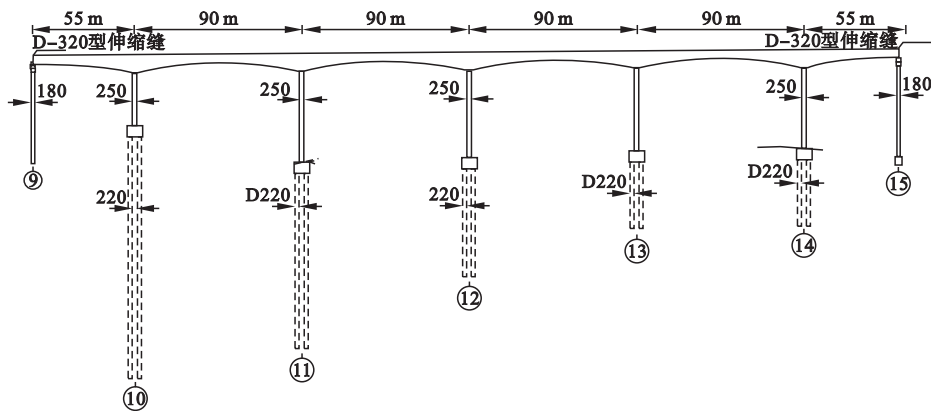


图2 韩江特大桥主桥桥型布置图

Fig.2 Bridge layout of Hanjiang river bridge

3.2 工程模型的建立

对地震作用下的整个桥梁结构来说,主梁不易发生结构性的破坏,而墩柱的损伤往往导致桥梁结构整体功能的失效,因此在桥梁抗震设计中,墩柱的易损性分析是尤为重要的一环.一般多跨连续梁桥的设计中,中墩采用固定支座,而边墩采用活动支座,因此此类桥梁的中墩往往是最容易受到损坏的结构.桥例简化模型如图3所示,其中12#墩柱采用固定支座,且承担最大的地震荷载,为最不利墩柱,取其作为主要研究对象,墩高为29.2 m,进行地震易损性分析.

笔者采用OpenSees 建立桥例有限元模型.桥墩采用非线性梁柱单元(Nonlinear Beam-Column Elements),并考虑P-Delta 效应;墩柱截面采用纤维模型,混凝土本构采用Concrete02 Mander 模型,并将混凝土截面划分为保护层混凝土和核心混凝土,核心混凝土考虑箍筋对其抗压强度的提高作用.钢筋本构采用Steel02 模型,在定义所有材料属性后划分纤维截面,对不同纤维赋予相应的材料属性.中墩与上部结构采用固定铰支的连接方式,主梁作用被简化为竖向质量荷载作用于主墩顶点.

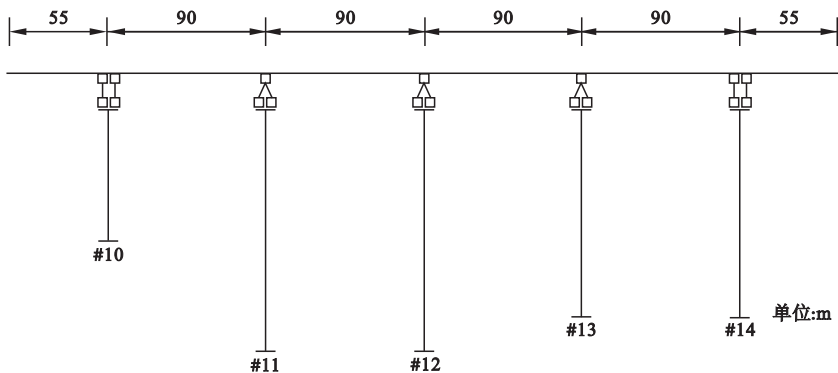


图3 桥梁简化模型

Fig.3 Simplified model of bridge

3.3 地震动的选择

地震动选取是结构进行易损性分析的关键,由于振幅、频谱、持时等特性的不同,地震动存在较大的随机性,相应的结构地震响应也存在较大的差异^[19].本例桥址做过地震安

全性评估,因此采用以地震安评报告提供的设计规准加速度反应谱为目标拟合而成的人工地震波进行抗震计算.地震波有效持续时间应为结构基本周期的5~10倍,由结构动力特性分析知,该桥的基本周期为5.34 s,此

外已有的大量研究表明,15~20 条地震波就能满足增量动力分析的精度要求,因此最终选取 30 s 的人工拟合地震波 20 条.

3.4 性能水准与损伤指标

确定桥梁抗震性能水准和计算结构的损伤指标是地震易损性分析的基础,损伤指标即是对性能水准的量化.笔者采用 Hwang 建议的位移延性比作为桥墩损伤的量化指标,并将结构破坏状态分为无破坏、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏五个等级^[20];对桥墩的墩底截面进行弯矩曲率分析,得到截面相关曲率延性指标如表 3 所示.根据曲率延性指标,采用文献[20]的方法计算各破坏状态的位移延性比,结果见表 4.

表 3 桥墩墩底截面延性指标

Table 3 Ductility index of bottom section for pier		
首次屈服曲率	等效屈服曲率	混凝土压应变
		0.004 时曲率
1.264×10^{-3}	1.494×10^{-3}	9.181×10^{-3}

表 4 损伤指标计算结果

Table 4 Calculated results of damage index	
破坏状态	破坏准则
无破坏	$u < 1$
轻微破坏	$1 < u \leq 1.182\ 0$
中等破坏	$1.1820 < u \leq 2.723\ 9$
严重破坏	$2.7239 < u \leq 5.723\ 9$
完全破坏	$u > 5.723\ 9$

3.5 易损性曲线

易损性曲线是指不同地震动强度下结构需求超过结构抗力的概率曲线.笔者选取 50 年超越概率 2.5% 的水平地震波 20 条,以峰值加速度 PGA 作为地震动参数,采用增量动力法,将 20 条地震波调整至 PGA 从 0.05~0.8 g 的地震动记录,共 320 条地震波,进行 IDA 时程分析.计算得到 20 条地震波在不同地震动强度下的墩顶位移平均值和位移延性比,结果见表 5.

表 5 IDA 时程分析结果

Table 5 Time history analysis results of IDA		
PGA/g	墩顶相对位移均值/mm	位移延性比
0.05	50.820	0.140 989
0.10	111.177	0.308 440
0.15	178.375	0.494 867
0.20	249.923	0.693 365
0.25	317.255	0.880 165
0.30	392.293	1.088 342
0.35	482.669	1.339 073
0.40	585.714	1.624 951
0.45	659.687	1.830 175
0.50	718.175	1.992 439
0.55	815.735	2.263 100
0.60	848.467	2.353 909
0.65	956.251	2.652 935
0.70	1 021.663	2.834 410
0.75	1 096.525	3.042 101
0.80	1 302.372	3.613 182

当结构能力与结构在地震作用下的需求被描述为对数正态分布时,桥梁结构达到不同损伤程度的失效概率也是按对数正态分布的.以 PGA 的对数值为横坐标,墩柱位移延性比的对数值为纵坐标进行线性回归分析,得到线性回归函数(见图 4).

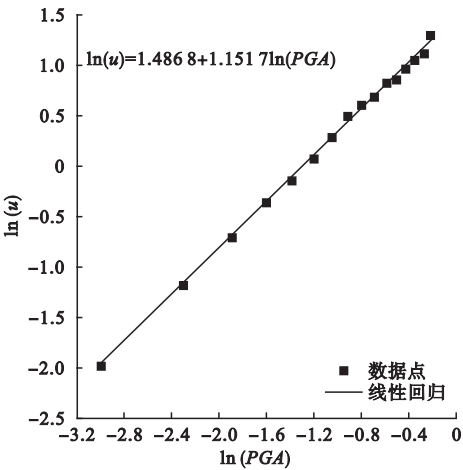


图 4 回归拟合曲线

Fig. 4 Regression fitting curves

从图 4 可以看出,散点较好地围绕在回

归函数直线附近,说明回归函数可以较好地反映结构反应与地面运动参数之间的关系.将该回归函数代入式(3)中,可以得到某一损伤状态下的超越概率函数如式(5)所示

$$P_f = \varphi\left(\frac{\ln(\frac{\mu_d}{\mu_c})}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right) = \varphi\left(\frac{1.486\,8 + 1.151\,7\ln(PGA) - \ln(\mu_c)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right). \quad (5)$$

其中根据 HAZUS99 提供的经验值(该经验值与桥梁的结构类型和损伤状态无关),当以 PGA 为自变量时, $\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}$ 取 0.5; μ_c 为结构承载能力平均值,即各个性能水准的损伤界限值; ϕ 为标准正态分布函数.图 5 以 12 号桥墩为例给出了地震易损性曲线.

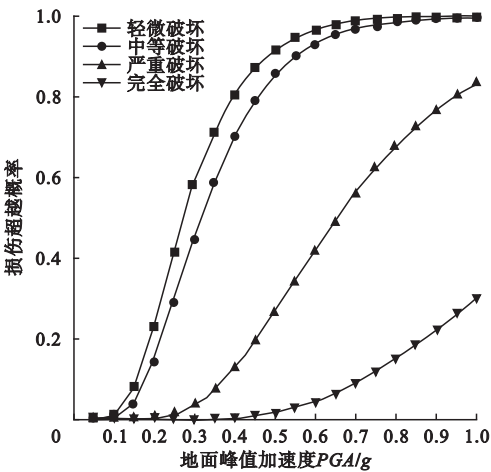


图 5 地震易损性曲线

Fig. 5 Seismic vulnerability curves

从图中可以看出,当 PGA 低于 0.4 g 时,轻微破坏和中等破坏的增长速度非常快,说明在此阶段内,桥梁轻微和中等破坏发展十分迅速,对地震动强度的变化十分敏感.当 PGA 达到 0.5 g 时,轻微破坏和中等破坏的超越概率都基本达到 100%,表明当地面峰值加速度达到 0.5 g 时,桥梁已达到中等破坏标准.严重损伤的状态要在 PGA 超过 0.2 g 时才出现,完全损伤状态要 PGA 超过 0.4 时才出现,且两者的增长速率较为平缓.

在同一 PGA 作用下,完全损伤的超越概率要远小于前三种损伤概率,说明该桥梁结构具有良好的安全性,不易发生完全损伤破坏.

4 结 论

(1)公路桥梁作为公路交通网中最重要的一环,应尽可能保证其在地震灾害下发挥正常使用功能,基于安全、经济、适用等多方面因素考虑,将其抗震性能分为 5 个等级,并进行了定性与定量的描述.

(2)通过量化的手段来评定结构的损伤程度,需要将损伤程度与破坏准则的量化指标对应起来.采用位移延性比作为量化指标,是一个合理的选择.

(3)地震易损性曲线可以直观地反映桥梁抗震性能的差异,根据曲线很容易取得某一水平地震动作用下桥梁结构的破坏概率,为桥梁预测预防地震灾害提供一定的依据.

(4)对于一般公路连续梁桥,结构发生轻微损伤和中等损伤的概率要远远大于严重破坏的概率,管养部门应重视公路梁桥的相关日常监测和损伤修复工作.

参考文献

[1] ZHANG Yun, TAN Ping, ZHOU Xiaorong. The research of input ground motion on seismic fragility analysis of bridge[J]. Advanced material research, 2012(490/495): 1826 – 1830.

[2] 白越. 基于 OpenSees 的高墩大跨混凝土连续刚构桥地震易损性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.

(BAI Yue. Study on seismic vulnerability of high pier large span concrete continuous rigid frame bridge based on OpenSees [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.)

[3] BOSTROM A, FRENCH S P, GOTTLIEB S J. Risk assessment, modeling and decision support: strategic decisions [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

[4] 于晓辉, 吕大刚. HAZUS 相容的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析 [J]. 工程力学, 2016(3): 152 – 160.

(YU Xiaohui, Lü Dagang. Seismic vulnerability analysis of HAZUS compatible reinforced

- concrete frame structures[J]. Engineering mechanics, 2016(3):152-160.)
- [5] 张菊辉,胡世德. 桥梁地震易损性分析的研究现状[J]. 结构工程师, 2005, 21(5):76-80.
(ZHANG Juhui, HU Shide. State of the art of bridge seismic vulnerability analysis research [J]. Structural engineers, 2005, 21(5):76-80.)
- [6] 张菊辉,管仲国. 规则连续梁桥地震易损性研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(20):140-145.
(ZHANG Juhui, GUAN Zhongguo. Study on seismic vulnerability of regular continuous beam bridge [J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(20):140-145.)
- [7] SHINOZUKA M. Statistical analysis of fragility curves[J]. ASCE journal of engineering mechanics, 2000, 126(12):1224-1231.
- [8] MANDER J B, DHAKAL R P, MASHIKO N, et al. Incremental dynamic analysis applied to seismic financial risk assessment of bridges [J]. Engineering structures, 2006, 29(10):2662-2672.
- [9] CHOMCHUEN P, BOONYAPINYO V. Incremental dynamic analysis with multi-modes for seismic performance evaluation of RC bridges [J]. Engineering structures, 2017, 40(3):29-43.
- [10] CHEN L, ZHENG K, HUAIGUANG L I, et al. Research of bridge seismic vulnerability based on extended incremental dynamic analysis[J]. Journal of highway & transportation research & development, 2012, 29(9):43-49.
- [11] KARIM K R, YAMAZAKI F. Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2001, 30(12):1839-1856.
- [12] WANG R, DONGBIN J I, YAN X U, et al. Nonlinear seismic demand analysis of concrete cable-stayed bridge tower using incremental dynamic analysis [J]. Earthquake engineering & engineering dynamics, 2014, 34(S1):500-504.
- [13] 周长东,陈静,曾绪朗,等. 钢筋混凝土圆形空心高墩地震易损性分析[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(11):65-71.
(ZHOU Changdong, CHEN Jing, ZENG Xu-lang, et al. Seismic vulnerability analysis of reinforced concrete circular hollow high pier[J]. Journal of railway engineering society, 2014, 31(11):65-71.)
- [14] 焦驰宇. 基于性能的大跨斜拉桥地震易损性分析[D]. 上海:同济大学, 2008.
(JIAO Chiyu. Performance based seismic fragility analysis of long-span cable-stayed bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.)
- [15] 张少雄. 高墩桥梁地震易损性分析研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
(ZHANG Shaoxiong. Seismic vulnerability analysis for bridge structures with high piers [D]. Chengdu: Southwest Jiongtong University, 2014.)
- [16] 孙颖,卓卫东,房贞政. 规则桥梁抗震性能水准的定义及其量化描述[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(5):104-112.
(SUN Ying, ZHUO Weidong, FANG Zhenzheng. Definition and quantified description of seismic performance levels for regular bridges [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 31(5):104-112.)
- [17] 范立础,卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
(FAN Lichu, ZHUO Weidong. Ductility seismic design of bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.)
- [18] HWANG H, HUO J R. Generation of hazard-consistent fragility curves [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 1994, 13(5):345-354.
- [19] 王国新,鲁建飞. 地震动输入的选取与结构响应研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(1):15-22.
(WANG Guoxin, LU Jianfei. Selection of ground motion and structural response [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(1):15-22.)
- [20] HWANG H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6):47-51.
(HWANG H, LIU Jingbo. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges[J]. China civil engineering journal, 2004, 37(6):47-51.)