

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.02.018

基于美标的桥梁抗震加固评估方法研究

成先杰^{1,2}, 田 径^{1,2}

(1.中交第二航务工程局有限公司设计研究院,湖北 武汉 430040;2.海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室,湖北 武汉 430040)

摘 要:详细论述了美国标准关于桥梁抗震加固设计的评估分析方法,提出了指数法和损伤评估法两种定量的初步评估法。其中,指数法能定量评估旧桥进行抗震加固的迫切性大小,便于相关部门制定区域旧桥抗震加固维修优先级目录。损伤评估法通过易损曲线的建立,侧重评估桥梁进行抗震加固的直接成本,并结合非直接成本评估旧桥抗震加固的合理性。通过中美标设计反应谱的换算,两种方法均可作为国内强震区域旧桥是否需要抗震加固或桥梁抗震加固优先级的参考,其中损伤评估法也可以作为国内桥梁抗震加固直接成本估算的参考。最后结合工程实例运用指数法和损伤评估法进行了具体分析运用,对国内大量旧桥进行快速抗震评估具有积极意义。

关键词:抗震加固;初步评估;指数法;损伤评估法;易损曲线

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)02-0070-05

0 引言

美国位于环太平洋地震带附近,尤其是加州位于地震多发区。对于地震多发地旧桥及在役桥梁,抗震评估显得尤为重要。美国联邦高速公路管理局(FHWA)发布了《高速公路桥梁抗震加固手册》^[1],系统提出了对旧桥进行抗震性能评估的方法。我国于2008年发布了《公路桥梁加固设计规范》^[2],并且2020年9月更新了《公路桥梁抗震设计规范》^[3],定性提出了初步评估的原则,即需综合考虑桥梁结构的重要性、结构的实际情况和经济性等因素,确定桥梁是否处于高地震危险性状况,以及是否需要加固。本文主要针对美国旧桥抗震加固初步评估方法进行详细阐述,并结合我国桥梁实际情况提出可借鉴的参考建议。

1 桥梁重要性分类

桥梁重要性分类是抗震加固评估的基础。美标将桥梁分为重要桥梁和标准桥梁两类。桥梁满足以下条件之一便可定为重要桥梁,重要桥梁以外的桥梁为标准桥梁。

(1)提供生命安全的桥梁,如提供医院应急服务通道、承担电力、用水管道服务的桥梁。

(2)损坏后带来巨大经济影响的桥梁,如交通大动脉枢纽等对当地经济至关重要的桥梁。

(3)被当地应急救援部门定义为关键桥梁的桥梁。

(4)为民防、消防、公共卫生机构提供重要交通保证的桥梁。

(5)国防、军事、战略支援运输的桥梁。

2 抗震设防目标

基于桥梁重要性、地震等级、桥梁剩余服役寿命,对桥梁设防目标分成了4个等级:PL0、PL1、PL2和PL3(见表1、表2)。其中,PL0表示由于桥梁剩余服务期较短,建议拆除重建。PL1(生命安全)表示震后桥梁可发生严重破坏,桥梁服务功能中断,但能保障生命安全,桥梁不倒塌;桥梁可能需要震后重建。PL2(部分通行)表示震后桥梁受损较小,简单清理后应急车辆能通行;震后桥梁可修复。PL3(完全通行)表示震后桥梁损坏可忽略,车辆均可以通行;震后可以在不影响正常交通情况下进行修复。

表1 美标桥梁抗震设防目标

设计地震水平	标准桥梁			重要桥梁		
	ASL1	ASL2	ASL3	ASL1	ASL2	ASL3
Lower	PL0	PL3	PL3	PL0	PL3	PL3
Upper	PL0	PL1	PL1	PL0	PL1	PL2

注:Lower表示回归期为100a的地震,Upper表示回归期为1000a的地震。

表2 服役寿命分类

服役寿命分类	剩余服务年限/a
ASL 1	0~15
ASL 2	16~50
ASL 3	>50

收稿日期:2022-02-16

作者简介:成先杰(1988—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

Lower 等级相当于国内 E1 的较小地震,Upper 相当于 E2 地震,但是国内 E1、E2 地震整体比 Lower 和 Upper 地震重现期长,设计地震要求更高。设防目标的基本理念仍是“中震可修,大震不倒”。

3 加固设计反应谱

设计地震反应谱为“三段线”形式(见图 1),通过 USGS 可以查询到美国不同区域地震特性参数。

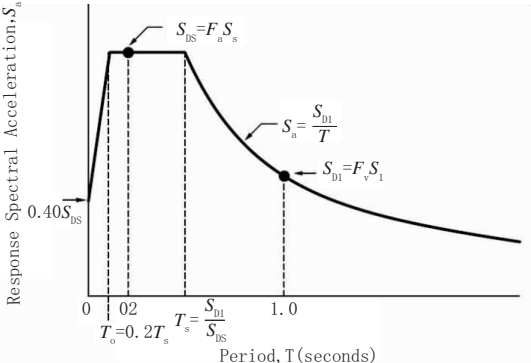


图 1 美标设计反应谱曲线

对比我国设计反应谱,其关键参数换算如下:

$$\begin{cases} S_{\max} = S_{DS} \\ S_{\max} T_g = S_{D1} \\ T_g = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \end{cases}$$

已知国标对应的反应谱参数 $S_{\max}$ 和 T_g ,可以换算得到美标对应的反应谱设计参数 S_{DS} 和 S_{D1} ,便于加固评估方法在国内项目中的使用。

美标基于设计反应谱峰值,将地震划分为 I、II、III、IV 四个级别(见表 3)。

表 3 S_{DS} 取值

地震级别	采用 $S_{DS}=F_a S_s$
I	$S_{DS} \leq 0.15$
II	$0.15 < S_{DS} \leq 0.35$
III	$0.35 < S_{DS} \leq 0.6$
IV	$0.6 < S_{DS}$

基于地震等级、抗震设防目标及两阶段地震,美标建立了基于性能的抗震加固分类(见表 4)。表 5 对应为不同抗震加固等级下不同构件评估的最小要求,该分类将指导加固桥梁的评估及设计方法。

表 4 基于性能的抗震加固分类

地震级别	设防目标				
	Upper 地震			Lower 地震	
	PL0	PL1	PL2	PL0	PL3
I	A	A	B	A	C
II	A	B	B	A	C
III	A	B	C	A	C
IV	A	C	D	A	D

表 5 抗震加固分类等级最小要求

项目	Lower 地震				Upper 地震			
	A	B	C	D	A	B	C	D
初步评估构件	不需要	—	支撑长度,连接,桥墩,基础,液化分析	支撑长度,连接,桥墩,桥台,基础,液化分析	不需要	支撑长度,连接,液化分析	支撑长度,连接,桥墩,基础,液化分析	支撑长度,连接,桥墩,桥台,基础,液化分析
支座及连接	不需要	—	需要	需要	不需要	需要	需要	需要
损坏后需要加固的构件								
桥墩及基础	不需要	—	需要	需要	不需要	不需要	需要	需要
桥台	不需要	—	不需要	需要	不需要	不需要	不需要	需要
液化	不需要	—	需要	需要	不需要	需要	需要	需要

4 桥梁抗震评估方法

美标的抗震加固初步评估主要有两种不同的方法:指数法和损伤评估法。

4.1 指数法

指数法评估流程见图 2。指数法计算得到桥梁的最终排序 R 在 0~100 之间。 R 值越高,桥梁进行抗震加固的迫切性越强。然后结合该桥的社会影响进行综合考量,最终确定该桥是否优先进入详细评估阶段或不建议抗震加固。

4.1.1 V_1 易损指数计算

支座、抗震挡块、支撑长度为桥梁抗震倒塌破坏

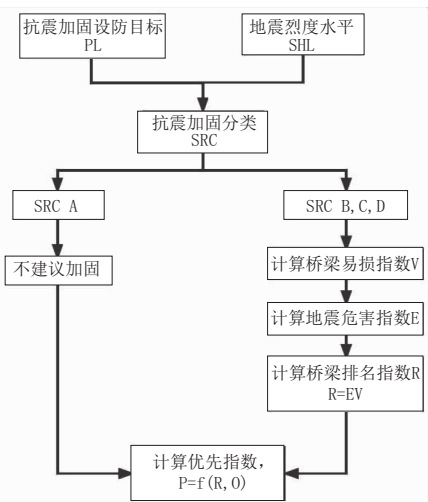


图 2 指数法评估流程

的关键部位。因此,美标将这些因素单独分别出来定义为易损指数 V_1 。而其他因素包括桥墩、桥台、基础液化共同定义为易损指数 V_2 。最终易损指数 V 取 V_1 、 V_2 的较大值。

V_1 考虑桥梁的横向移动(V_T)和纵向移动(V_L)易损情况。

对于横向移动指数(V_T),如果桥梁为连续梁桥且桥台和梁体固结,可以认为 $V_T=0$ 。如果桥梁只有一片梁且桥墩为独柱墩,或者该桥有 2~3 片梁,且外侧梁体支撑在支座边缘,则可认为 $V_T=10$ 。基本理念是,如果桥梁地震作用下容易落梁,则 V_T 取接近 10 的值;如果桥梁不存在横向落梁风险,则可取接近 0 的值。

对于纵向移动指数(V_L),主要通过最小支撑长度(L)与规范容许值(N)来判定:

$L \geq N$,无论支座类型, $V_L=0$ 。

$N > L \geq 0.5N$,不采用摇轴支座时, $V_L=5$ 。

$N > L \geq 0.5N$,采用摇轴支座时, $V_L=10$ 。

$0.5N > L$,无论支座类型, $V_L=10$ 。

4.1.2 V_2 易损指数计算

$$V_2 = CVR + AVR + LVR \leq 10$$

4.1.2.1 CVR 计算

当桥梁定义为 SRC B 类桥时, $CVR=0$ 。其他情况桥墩易损指数(CVR)应考虑剪切破坏、钢筋搭接长度、基础缺陷 3 种主要因素。

(1)桥墩抗剪破坏易损性。

$$CVR = Q - P_R$$

$$Q = 13 - 6 \left(\frac{L_c}{(P_s F b_{\max})} \right)$$

式中: L_c 为桥墩有效长度。 P_s 为桥墩主筋的截面配筋率。 F_s 为框架系数,上下固结多柱桥墩取 2.0;一端固结多柱桥墩取 1.0;上构箱形截面、顶底均固结的多柱墩取 1.5;上构非箱形截面、顶底均固结的独柱墩取 1.2。 $b_{\max}$ 为桥墩长边尺寸。 P_R 折减因素见表 6。

表 6 P_R 折减因素

因素	P_R
$S_{D1} < 0.5$	3
夹角 $\leq 20^\circ$	2
连续梁桥,桥台与梁体固结,梁体跨宽比小于 4	1
钢筋等级 Grade 40 或以下	1

(2)桥墩钢筋搭接处抗弯破坏。

对于上部结构长度超过 90 m 或上部结构墩顶设置伸缩缝的桥梁,当桥墩塑性铰区域有钢筋搭接

时, CVR 根据 S_{D1} 确定。

当 $S_{D1} < 0.5$, $CVR = 7$;

当 $S_{D1} \geq 0.5$, $CVR = 10$ 。

(3)基础缺陷。

当桥墩为桩基础,且原设计并未考虑桩基出现地震上拔力而进行配筋设计,或桩周土约束较差。以上情况桥梁满足 $S_{D1} > 0.5g$ 时,

当 $0.5 \leq S_{D1} \leq 0.6$, $CVR = 5$;

当 $S_{D1} > 0.6$, $CVR = 10$ 。

基于上述计算的 CVR 值,取三者最大值作为最终的 CVR 值。

4.1.2.2 AVR 计算

桥台在地震作用下,一般情况下不易出现整体垮塌现象。因此,桥台易损性主要考虑桥台破坏引发桥梁交通中断情况。中等强度地震作用下,台背填土沉降一般为 3%~5%填土高度^[4]。但是当台后填土施工质量较差或填土溢出桥台时,沉降量可高达 10%~15%。当桥台由于地震土压力或上构传递力导致桥台发生破坏时,额外的填土沉降还将产生。除去特殊情况,一般桥台 AVR 小于 5。台后填土沉降按下列原则估算:

$0.24 < S_{D1} \leq 0.39$,沉降为 1%填土高度;

$0.39 < S_{D1} \leq 0.49$,沉降为 2%填土高度;

$0.49 < S_{D1}$,沉降为 3%填土高度。

当计算沉降大于 150 mm 时, $AVR=5$ 。

4.1.2.3 LVR 计算

地震作用下,土体的破坏会导致桥梁出现不同程度破坏,土体发生地震液化是其中最为重要的一种形式。我国可以根据《公路桥梁抗震设计规范》进行液化判别,美标一般基于 Seed 法进行判别^[5]。对于存在液化风险的桥梁, LVR 取 10。

4.1.3 R 易损指数计算

$$R = EV$$

$$E = 10 S_{D1} < 10$$

式中: V 为 V_1 、 V_2 的较大值。

4.2 损伤评估法

损伤评估法(基于 NBI)根据桥梁的易损性曲线,对桥梁直接维修加固费用进行评估,然后结合间接费对桥梁进行初步评估。该方法更加看重桥梁加固的经济性,适用于主跨在 150 m 以内的桥梁。1993—1994 年间,美国加州集中对 165 座桥梁进行了抗震加固维修,将加固成本高低划分为三类,具体见表 7。一般认为,当加固成本超过重建成本的 60%~

70%时,不建议考虑抗震加固。

表 7 美国加州 165 座桥梁抗震加固维修成本汇总

成本水平	上部结构	上部结构 + 下部结构	上部结构 + 下部结构 + 基础
低	1.3%	0.7%	2.3%
中	3.1%	15.4%	15.4%
高	13.2%	64.8%	232.9%

易损曲线的建立基于桥梁抗震能力与荷载水平大致符合正态分布或对数正态分布的随机变量。因此,易损曲线可以对数正态累积概率密度函数的形式给出。

$$F(S_a)=\Phi[\frac{1}{\beta_c}\ln(\frac{S_a}{A_i})]$$

其中,根据 Basoz and Mander^[6]等的论证, β_c 推荐采用 0.6。 A_i 为不同损伤状态对应的加速度,主要依据桥梁结构形式,是否按照抗震设计来确定,可依据美国国家桥梁清单(NBI)进行查询(<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi.htm>)。

为方便计算,易损曲线也可近似按照下式计算:

$$P[D>DS_i|S_a]=\frac{1}{1+(\frac{S_a}{A_i})^{\frac{-1.7}{\beta_c}}}$$

式中: DS_i 为结构的损伤状态,分别为完好、轻微、中等、严重、倒塌。

基于获得的标准易损曲线参数,结合桥梁实际特性,进行相应的参数修正,即得到最终易损曲线。由目标地震加速度计算得到各损伤状态下的概率,结合表 8 即可计算抗震加固直接成本。

表 8 加固成本测算

损伤状态	加固成本范围	平均加固成本
1	0	0
2	0.01 ~ 0.03	0.02
3	0.02 ~ 0.15	0.08
4	0.10 ~ 0.40	0.25
5	0.10 ~ 1.00	2/n<1

注:n 为跨度数。

5 工程案例分

以美洲某桥为例,采用指数法和损伤评估法分别进行桥梁抗震加固初步评估。

如图 3 所示,该桥为(35+35+25)m 三跨简支 I 梁,位于重要港口通道上,对当地港口运输起到重要作用,定义为重要性桥梁。

5.1 指数法

桥梁剩余使用寿命估算约为 37 a,属于 ASL 2。

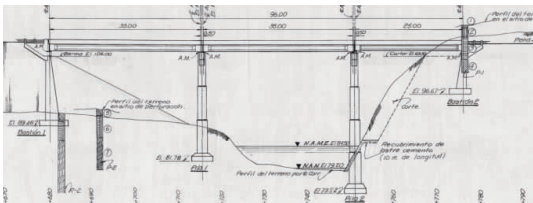


图 3 某桥示意图

由于为重要性桥梁,因此 Upper 地震下设防目标为 PL1。

(1) $S_{DS}=0.94g$ (见表 9),设计地震等级为 IV 级。

表 9 桥梁基本信息

通车时间	S	S_{DS}	S_{D1}	横向限位
1984 年	1.5	0.94g	0.69g	部分损坏

(2)抗震加固分类为 SRC C。

(3)病害指数 V_1 计算。

a. 横向移动病害指数 V_T :该桥为简支梁桥,其中横向限位块发生局部破坏, $V_T=5$ 。

b. 纵向移动病害指数 V_L :该桥桥台、桥墩纵向支撑长度均为 50 cm,而美标计算需求支撑长度为 70.6 cm,该桥支撑长度 $0.5 N<L<N$,故 $V_L=5$,故 $V_1=MAX(V_T,V_L)=5$ 。

(4)桥墩易损指数 CVR 。由于该桥桥墩塑性铰区域有钢筋搭接,同时 $S_{D1}=0.69g>0.5g$,故 $CVR=10$ 。

(5)桥台易损指数 AVR 。根据 S_{D1} 值估算台背填土沉降量,该桥 $S_{D1}=0.69g$,因此台背沉降为 $3\% \times h=0.03 \times 2\,900=87\text{ mm}<150\text{ mm}$, $AVR=0$ 。

(6)液化易损指数 LVR 。根据地勘,该桥土体无液化风险,故 $LVR=0$ 。

(7) $V_2=CVR+AVR+LVR=10+0+0=10$ 。

(8) $V=MAX(V_1,V_2)=10$ 。

(9) $E=10\,S_{D1}=10 \times 0.69=6.9<10$ 。

(10) $R=V_E=69$ 。

5.2 损伤评估法

该桥为多跨简支,独柱桥墩,根据 NBI 查表得到 $a_2=0.35g,a_3=0.42g,a_4=0.50g,a_5=0.70g$ 。

系数修正: $K_{shape}=1.0$

跨数修正: $K_{3D}=1+0.25/(n-1)=1.125$

斜桥修正: $K_{skew}=\text{sqrt}(\cos \alpha)=1.0$

$A_2=K_{shape}\,a_2/S=1.0 \times 0.35/1.5=0.233$

$A_3=K_{skew}\,K_{3D}\,a_3/S=1.0 \times 1.125 \times 0.42/1.5=0.315$

$A_4=K_{skew}\,K_{3D}\,a_4/S=1.0 \times 1.125 \times 0.50/1.5=0.375$

$A_5=K_{skew}\,K_{3D}\,a_5/S=1.0 \times 1.125 \times 0.70/1.5=0.525$

得到易损曲线如图 4 所示。

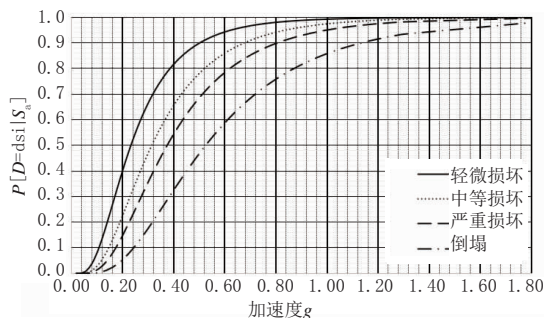


图4 易损曲线

根据易损曲线,按照 $S_a=S_{D1}/1.5=0.46g$ 查询各易损状态下的概率值,进而计算该桥抗震加固需要的费用占新桥的比例,计算结果见表10。

表10 加固成本分析表

等级	$P[D>DS_i S_a]$	$P[DS_i S_a]$	RCRi	合计
1	1.000	0.128	0	0.00
2	0.872	0.136	0.02	0.00
3	0.736	0.103	0.08	0.01
4	0.633	0.220	0.25	0.06
5	0.413	0.413	0.67	0.28
合计		1.000		0.35

根据表10计算得到该桥的抗震加固直接费用占重建的比例约为35%。该费用可作为加固评估的参考因素,当直接抗震加固费用超过新建桥梁的60%~70%时,一般不考虑抗震加固,而更加倾向于拆除重建。

根据上述两种方式计算得到该桥进行抗震加固排序指数 $R=69$,直接抗震加固费用占重建费用比例为35%。同时考虑该桥位于港口运输要道上,加固费用在合理范围内,因此建议进行抗震加固。

6 结论及建议

(1)基于美标就抗震加固初步评估阶段提出了定量的判别方法,尤其对于旧桥较多的高烈度区域,可按照本文方法对桥梁进行优先级排序,对加固排序指数较高、加固费用少的桥梁可以优先加固。

(2)指数法侧重于评估桥梁加固的紧迫性,损伤评估法则着重于加固成本考量。两种方法使用简单,可以综合考虑。国内旧桥抗震加固评估也可以借鉴这两种方法。

(3)基于易损评估法,在获取桥梁的设计地震、桥跨等初步资料后,可以大概预估该桥的抗震加固成本,可以作为项目前期的经济对比分析的参考。一般对于抗震加固成本超过60%~70%重建桥梁时,建议考虑拆除重建。

(4)本文抗震加固初步评估还需结合桥位处的环境、间接成本、社会影响等进行综合分析。

参考文献:

- [1] Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures Part 1 - Bridges, [S]. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2006.
- [2] JTG/T J22—2008,公路桥梁加固设计规范[S].
- [3] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [4] Fung G G, LeBeau R J, Klein E E, et al. Field Investigation of Bridge Damage in the San Fernando Earthquake, "State of California, Division of Highways, Bridge Department, 1971.
- [5] Soil Liquefaction During Earthquakes [S]. Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [6] Basoz N, and Mander J B, Enhancement of the Highway Transportation Lifeline Module in HAZUS, Final Pre-Publication Draft (#7) prepared for the National Institute of Building Sciences, March 31, 1999.

(上接第69页)

位移能力满足要求。

综上所述,本工程采用的结构体系及抗震设计新方案很好地满足了高震区条件下的安全性和适用性,为今后类似工程设计提供了新的思路和有益的参考。

参考文献:

- [1] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
- [2] 上海市政交通设计研究院有限公司.高烈度区双层高架桥梁抗震性能分析[R].上海:上海市政交通设计研究院有限公司, 2021
- [3] 袁万城,等.拉索减震支座及桥梁抗震设计应用研究[J].工程力学, 2011,28(S2):204.