

近断层桥梁水平向抗震设计规准反应谱修正

谢皓宇^{1,2}, 于雯³, 唐光武^{1,2}, 刘海明^{1,2}, 刘怀林^{1,2}

(1. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400067; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067;
3. 中交路建交通科技有限公司, 北京 101399)

摘要:现行桥梁抗震设计规范中设计反应谱主要基于远场观测记录获得,不能准确反映近断层区域的地震动特性和结构地震响应特性,因此近断层区域的桥梁抗震设计可能偏于不安全。基于此,通过美国太平洋地震研究中心数据库按照震源距、矩震级以及地面峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)为原则筛选了近断层地震动时程,以场地地基条件和PGA作为分组原则计算了平均谱,再基于最小二乘分段拟合方法对其标定,得到了近断层地震水平向设计规准反应谱的放大系数、衰减指数以及特征周期等3项主要参数的统计推荐值,最后调整并提出了考虑近断层地震特性的规准反应谱,可以为我国桥梁抗震设计规范中近断层地震动作用的体现提供依据。

关键词:桥梁抗震设计;近断层地震动;最小二乘标定;水平向设计反应谱

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

Modification of the horizontal seismic design gauge response spectrum for near-fault bridges

XIE Haoyu^{1,2}, YU Wen³, TANG Guangwu^{1,2}, LIU Haiming^{1,2}, LIU Huailin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Chongqing 400067, China; 2. CMCT Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 3. Road & Bridge International Communication Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: The current seismic design codes for bridges primarily rely on design response spectra derived from far-field observational records, which fail to accurately reflect the ground motion characteristics and structural seismic response characteristics in near-fault regions. As a result, the seismic design for bridges in near-fault regions may be unsafe. To address the issue, near-fault ground motion time histories are selected from the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) database based on principles including source distance, moment magnitude, and peak ground acceleration (PGA). Average spectra are calculated using site foundation conditions and PGA as grouping principles, and then calibrated using a least-squares piecewise fitting method. This process yields statistical recommendations for three key parameters of the near-fault horizontal design gauge response spectrum: amplification factor, attenuation index, and characteristic period. Finally, adjustments were made to propose a gauge response spectrum that considers near-fault earthquake characteristics, providing a basis for incorporating near-fault ground motion effects into China's seismic design codes for bridges.

Key words: bridge seismic design; near-fault ground motion; least square calibration; horizontal design response spectrum

收稿日期:2023-10-19; 修回日期:2024-02-01

基金项目:重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX0775);重庆市交通科技项目(CQJT-ZCXM2024-07);国家自然科学基金项目(12032008)

作者简介:谢皓宇(1991—),男,副研究员,硕士,主要从事地震工程与结构抗震工程研究。E-mail:xiehaoyu@cmhk.com

通信作者:唐光武(1963—),男,研究员,硕士,主要从事桥梁抗震设计与智能检测监测研究。E-mail:tanguangwu@cmhk.com

0 引言

近断层地震动,也称近场地震动,一般认为断层距小于20 km范围内的区域发生的地震动能够作为近断层地震动,其时-频域特性及对工程结构地震响应的影响是近年来结构抗震工程的热门课题之一。历史上多次强震震害调查表明,由于存在破裂方向性效应、上盘效应、滑冲效应、强烈的长周期成分以及显著的竖向地震动效应等,近断层区域内的工程结构震害十分严重。

加速度设计反应谱是目前结构抗震设计和研究的重要基础。随着实际的近断层地震动记录数据的积累和对动力特性的深入研究,对近断层地震动的反应谱特征和设计反应谱谱型的研究也不断深入,并考虑了越来越多的影响因素^[1]。针对近断层地震动水平向设计谱的特性,曾永平等^[2]通过分析对比,认为在长周期范围内(1.5~9.0 s),脉冲型地震动的反应谱明显高于其他反应谱,近断层地震动会对目标结构产生更大的响应与破坏,采用我国规范中基于中远场地震动记录得到的设计反应谱是偏于不安全的^[3]。周正华等^[4]、倪永军等^[5]将近断层地震动的反应谱进行统计,也得出了类似的结论。周继磊等^[6]对脉冲型与非脉冲型地震加速度时程功率谱进行计算与分析,提出一种新型功率谱模型拟合平均功率谱参数。PU等^[7]基于结构周期、结构阻尼和地震动脉冲周期,建立了加速度谱函数,通过引入加速度和位移谱的阻尼修正因子,进一步发展了高阻尼系统的位移谱。

在现行规范中的近断层地震动抗震设计反应谱方面,欧洲规范(Eurocode 8)^[8]提出近断层区反应谱不低于常规反应谱,但未对近断层修正系数提出明确的规定;美国加州桥梁抗震设计规范^[9]则提出近断层设计反应谱通过调整中远断层设计反应谱来确定,在0.5 s以下时保持不变,1.0 s以上在中远场设计反应谱基础上乘以放大系数,0.5~1.0 s之间通过线性插值确定;我国GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[10]规定5 km以内设计谱的谱加速度宜乘以增大系数1.5,5~10 km宜乘以不小于1.25的增大系数;我国JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》^[11]和CJJ 166—2011《城市桥梁抗震设计规范》^[12]均仅对桥梁的建设场地采取避让断层的建议,提出需注意设计加速度反应谱长周期段的可靠性,对于近断层地震动的设计谱修正则未作明确要求。

现有研究认为,近断层结构设计中若采用我国规范中常规的反应谱是偏于不安全的,有必要针对近断层地震动的特性修正设计反应谱。目前,我国建筑抗震设计规范通过乘以峰值的放大系数对近断层地震设计反应谱进行修正,而桥梁抗震设计规范则没有给出明确的修正方法。鉴于此,本文选取大量近断层地震动的记录数据,选定拟合模型,从放大系数、特征周期和衰减指数三个方面进行研究,得到保证率为84%的规范谱,以期对我国桥梁抗震设计规范中近断层地震动水平向设计反应谱的修正提供依据,具有重要的学术价值和工程意义。

1 近断层地震动的选取

各国地质构造不同导致地震动特征虽有所不同,但主要影响因素是震级、震中距和场地条件,通过美国太平洋地震研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)数据库按照以下原则进行近断层地震动筛选:①断层距 $R_{jb} < 20$ km;②矩震级 $M_w \geq 5$;③地面峰值加速度 $PGA \geq 0.05 g$ 。此外,在做近断层区桥梁抗震设计时难以判断可能遭遇的地震动是脉冲型地震动还是非脉冲型地震动,而美国加州桥梁抗震设计规范对近断层设计反应谱修正时也未区分近断层脉冲型地震动与非脉冲型地震动,所以本文在修正时也未对这个问题做出相应的区分。

共选取530组地震动,包含2个水平方向。为使选取的地震动记录与我国公路桥梁抗震设计规范的场地划分方式匹配,便于近断层地震动设计加速度反应谱的研究结果在实际工程中使用,记录台站的场地类别划分选用郭锋等^[13]给出的美国规范对应的 V_{s30} 与我国规范规定的场地类别的对应关系,如表1所示。

表1 V_{s30} 与我国桥梁抗震设计规范场地类别对应关系

Table 1 Corresponding relationship between V_{s30} and site category of seismic design code for bridges in China

规范场地类别	I ₀	I ₁	II	III	IV
$V_{s30}/(m/s)$	(1000, +∞)	(550, 1000]	(265, 550]	(165, 265]	(0, 165]

不同的抗震设计环境,对应的抗震设计参数取值则不同,得到的规范设计反应谱也不同,根据不同的地震环境、不同的设计参数将实际地震动记录划分为多个分组。GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[14]给出了Ⅱ类场地不同峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)的分区范围,Ⅰ₀、Ⅰ₁、Ⅲ、Ⅳ类场地地震动峰值加速度根据Ⅱ类场地地震动峰值加速度和调整系数得到,调整系数也可以从区划图中参考,计算得到的各类场地地震动峰值加速度分区的峰值加速度范围如表 2 所示。

表 2 各类场地地震动峰值加速度分区的峰值加速度范围
Table 2 PGA range of ground motions considering PGA subregion in different sites

地震动 PGA 分区	场地类别				
	I ₀	I ₁	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
0.05 g	[0.03,0.06]	[0.03,0.07]	[0.04,0.09]	[0.05,0.11]	[0.05,0.11]
0.10 g	(0.06,0.10]	(0.07,0.12]	(0.09,0.14]	(0.11,0.16]	(0.11,0.15]
0.15 g	(0.10,0.14]	(0.12,0.16]	(0.14,0.19]	(0.16,0.19]	(0.15,0.19]
0.20 g	(0.14,0.24]	(0.16,0.27]	(0.19,0.28]	(0.19,0.28]	(0.19,0.28]
0.30 g	(0.24,0.34]	(0.27,0.38]	(0.28,0.38]	(0.28,0.38]	(0.28,0.34]
0.40 g	(0.34,0.68]	(0.38,0.75]	(0.38,0.75]	(0.38,0.75]	(0.34,0.68]

根据各类场地地震动峰值加速度分区的峰值加速度范围对实际地震动记录进行分组,将地震动 2 个水平分量当做独立的地震动记录来处理,不同分组条件下地震动数量如表 3 所示。

表 3 水平向不同分组条件下地震动数量
Table 3 Quantity of seismic ground motions under different horizontal divisions

地震动 PGA 分区	场地类别				
	I ₀	I ₁	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
0.05 g	1	8	31	12	0
0.10 g	2	8	98	33	1
0.15 g	2	55	128	31	1
0.20 g	0	47	182	39	4
0.30 g	1	48	122	42	1
0.40 g	7	40	115	49	2

由于 I₀和Ⅳ类场地条件下实际地震动数量较少,故不对这两类场地进行研究。

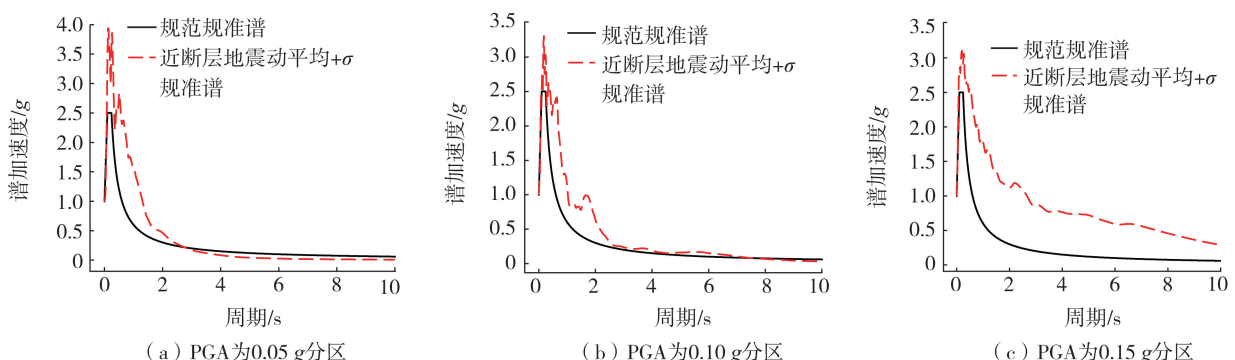
2 近断层记录与规范规范谱对比

根据实际强震记录计算的弹性加速度反应谱平滑标准化为抗震设计反应谱形式的过程称为反应谱的标定,标准化的抗震设计反应谱通常采用动力放大系数谱表示,动力放大系数谱定义为

$$\beta(T) = \frac{S_a(T)}{a_{\max}} \quad (1)$$

式中: $\beta(T)$ 为自振周期 T 的单自由度体系对地面加速度的放大系数,也称为规范化反应谱; $S_a(T)$ 为加速度反应谱; a_{\max} 为地面运动加速度峰值。

取相同场地条件下的多条地震加速度记录,取阻尼比 0.05,得到相应于该阻尼的加速度反应谱,根据式(1)求出规范谱,经过统计平均和平滑化处理,可以得到比较规则变化的规范谱简单曲线。按照分组分别计算了 530 组地震动 2 个水平分量的规范反应谱,给出了不同设计分组平均规范反应谱同规范规范设计反应谱的对比情况,如图 1~图 3 所示。



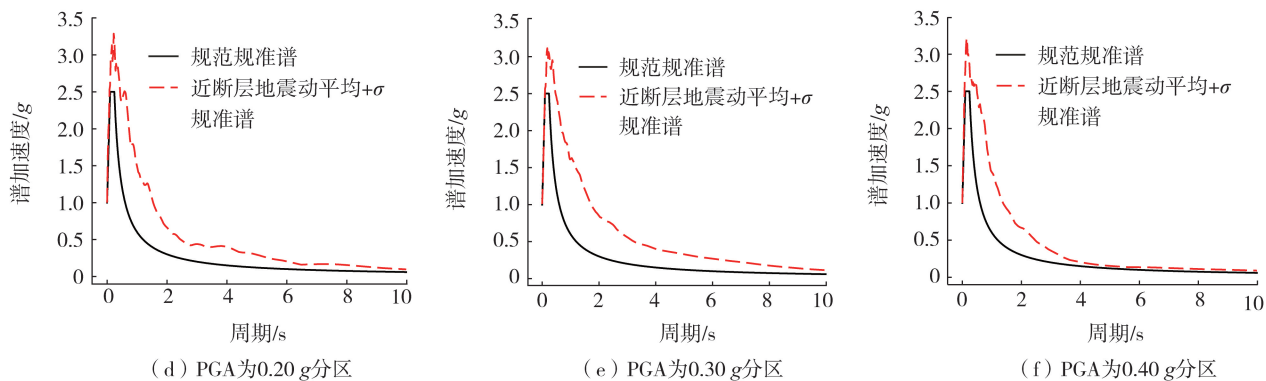


图1 I₁类场地地震动平均+1倍标准规范谱与规范标准设计谱对比图

Fig.1 Comparison between the mean +1 standard deviation gauge spectrum of recorded ground motions and the standard gauge design spectrum for site category I₁

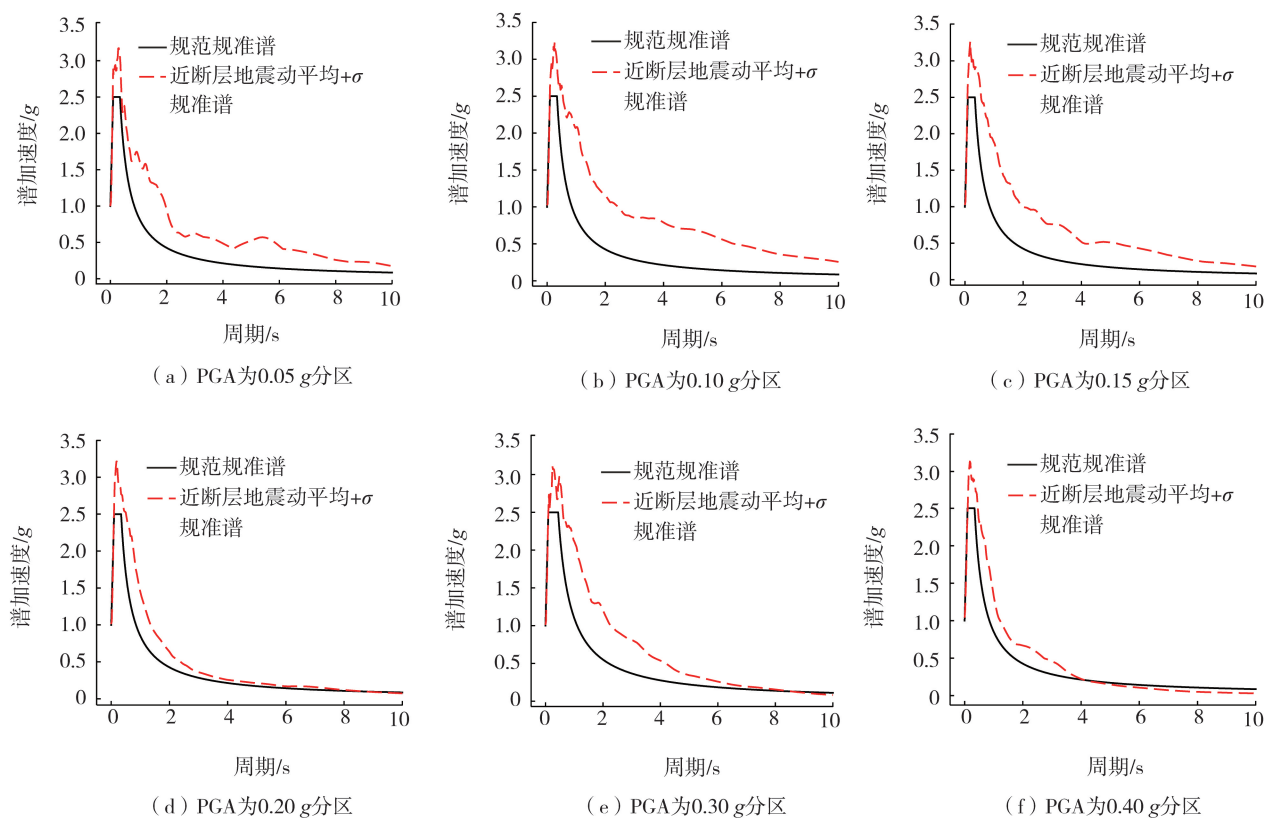
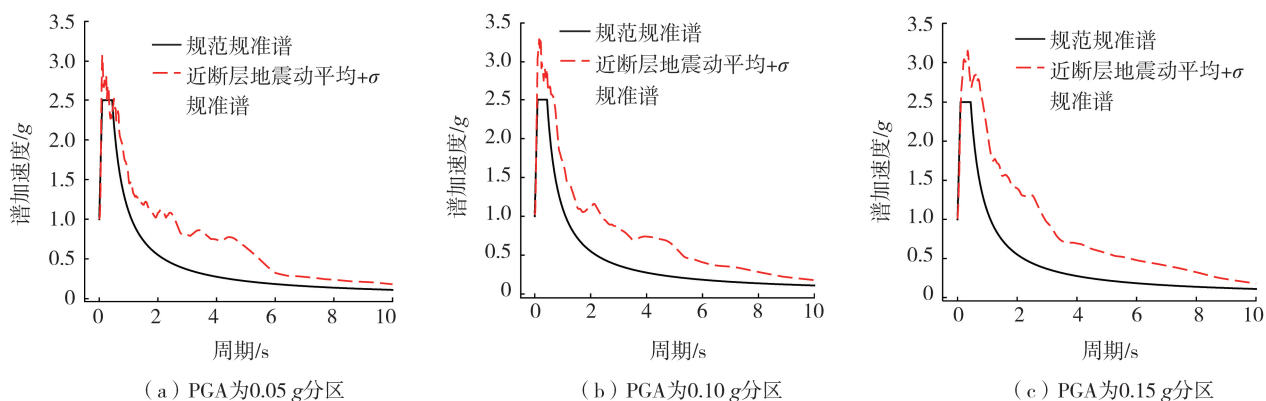


图2 II类场地地震动平均+1倍标准规范谱与规范标准设计谱对比图

Fig.2 Comparison between the mean +1 standard deviation gauge spectrum of recorded ground motions and the standard gauge design spectrum for site category II



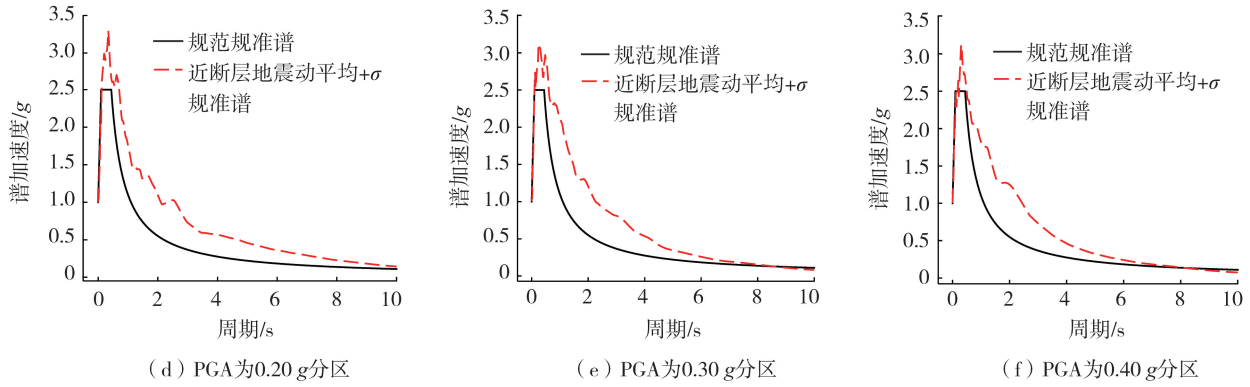


图 3 III类场地地震动平均+1 倍标准规范谱与规范标准设计谱对比图

Fig. 3 Comparison between the mean +1 standard deviation gauge spectrum of recorded ground motion and the standard gauge design spectrum for site category III

可以看出,各场地类别条件下规范标准设计反应谱均不能很好地包络住实际近断层地震动标准谱,尤其是长周期段。因此,有必要对近断层地震动标准谱进行修正,得到适合于抗震设计的标准反应谱。

3 近断层水平向标准谱的修正

3.1 标准谱的拟合

采用最小二乘分段拟合方法^[15]对实际地震动标准谱进行标定,逐一对标准谱曲线进行拟合,得到反应谱的 3 个特征参数分别是标准谱平台高度 β_{max} 、特征周期 T_g 、下降段衰减指数 γ ,拟合方法如式(2)所示:

$$\beta(T) = \begin{cases} 1.0 + (\beta_{max} - 1.0) \frac{T}{T_0}, & 0 \leq T < T_0 \\ \beta_{max}, & T_0 \leq T < T_g \\ \beta_{max} (T_g/T)^\gamma, & T_g \leq T \leq T_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_0 为第一拐点,在各国规范中通常取 0 或者 0.1,本文采用我国规范建议值 0.1 s; T_m 为标定反应谱曲线下降段的截止周期,同我国公路桥梁抗震规范取 10 s。

最小二乘标定的是平台段和曲线下降段,将式(2)等式两边同时除以 β_{max} ,可得式(3):

$$\frac{\beta(T)}{\beta_{max}} = \begin{cases} 1.0, & T_0 \leq T < T_g \\ (T_g/T)^\gamma, & T_g \leq T \leq T_m \end{cases} \quad (3)$$

在式(3)基础上,设 $x = \ln(T/T_g)$, $y = \ln(\beta(T)/\beta_{max})$,那么有:

$$y(x) = \begin{cases} 0, & -x_0 \leq x < 0 \\ -\gamma \cdot x, & 0 \leq x \leq x_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_0 = \ln(T_g/T_0)$; $x_m = \ln(T_m/T_g)$ 。

经式(2)~式(4)变换后,标定后反应谱曲线转化为两直线段,平台值 β_{max} 为 T_0 到 T_g 之间的平均值,如式(5)所示:

$$\beta_{max} = \frac{1}{T_g - T_0} \int_{T_0}^{T_g} \beta(T) dT \quad (5)$$

平台值确定后,衰减指数 γ 在周期 $T_g \sim T_m$ 内按照式(5)进行线性回归确定。此方法将第一拐点周期取为 0.1 s 计算时要反复对 T_g 赋值,使得回归分析中的剩余标准差达到最小的周期确定为 T_g 。

为减小地震动离散性的影响,保证结构抗震设计的安全度,本文以 84% 保证率(平均谱+1 倍标准差谱)拟合了近断层水平向地震动的标准谱。相关参数如表 4~表 6 所示。

表4 放大系数 β 统计值

Table 4 Statistical values of amplification coefficient β

地震动 PGA 分区	场地类别		
	I ₁	II	III
0.05 g	2.46	2.27	2.44
0.10 g	2.53	2.56	2.44
0.15 g	2.40	2.65	2.43
0.20 g	2.70	2.67	2.67
0.30 g	2.42	2.52	2.54
0.40 g	2.57	2.49	2.31

表5 衰减指数 γ 统计值

Table 5 Statistical values of attenuation index γ

地震动 PGA 分区	场地类别		
	I ₁	II	III
0.05 g	1.21	1.07	0.86
0.10 g	1.46	0.89	0.86
0.15 g	0.83	1.03	1.24
0.20 g	1.23	1.38	1.04
0.30 g	1.04	1.65	1.31
0.40 g	1.45	1.58	1.24

表6 特征周期 T_g 统计值

Table 6 Statistical values of characteristic period T_g

地震动 PGA 分区	场地类别			s
	I ₁	II	III	
0.05 g	0.42	0.98	0.76	
0.10 g	0.66	0.91	0.75	
0.15 g	0.97	0.86	1.43	
0.20 g	0.68	0.70	0.84	
0.30 g	0.91	0.87	1.09	
0.40 g	0.74	0.79	1.08	

由表4~表6可知,平台段高度、衰减指数、特征周期和不同的地震动PGA分区不存在明显的规律,即不同烈度下参数离散性不大,规准设计反应谱修正时不专门具体区分烈度。因此,仅按照场地类别对近断层规准设计反应谱进行计算,参数见表7,拟合归准谱及平均+1倍标准差规准谱的对比如图4~图6所示。

表7 近断层抗震设计反应谱参数取值(保证率84%)

Table 7 Parameter values of near-fault design response spectrum (guarantee rate at 84%)

场地类别	规准设计反应谱参数		
	β	γ	T_g
I ₁	2.59	1.04	0.73
II	2.55	1.20	0.84
III	2.54	1.11	1.04

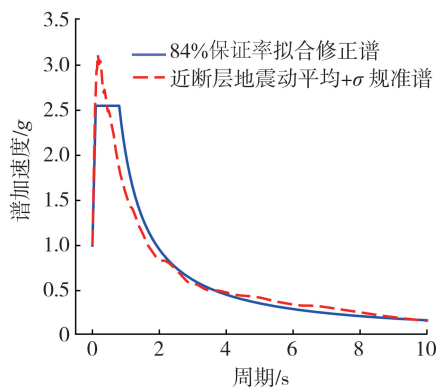


图4 I₁类场地地震动平均+1倍标准差规准谱与保证率84%拟合设计反应谱对比

Fig. 4 Comparison of mean +1 standard deviation gauge spectrum and the design response spectrum fitted with the guarantee rate 84% for site category I₁

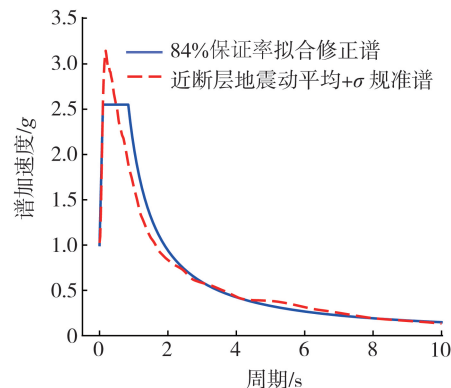


图5 II类场地地震动平均+1倍标准差规准谱与保证率84%拟合设计反应谱对比

Fig. 5 Comparison of mean +1 standard deviation gauge spectrum and the design response spectrum fitted with the guarantee rate 84% for site category II

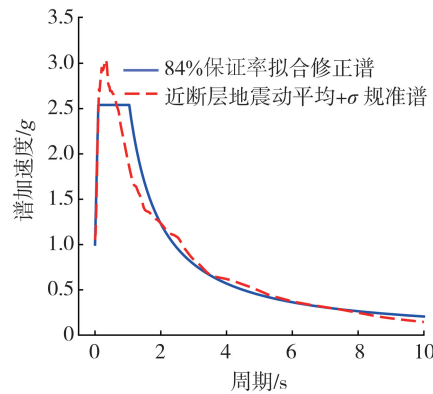


图 6 III类场地地震动平均+1 倍标准差规范谱与保证率 84%拟合设计反应谱对比

Fig. 6 Comparison of mean +1 standard deviation gauge spectrum and the design response spectrum fitted with the guarantee rate 84% for site category III

3.2 适用于规范的修正方法

由表 4~表 7 可知,随着场地的变软,平台段高度减小,特征周期延长,以上所述均符合近断层地震动随场地变软的变化特征,随着场地变软,地震动中的长周期成分得到放大。

由表 7 可知,放大系数统计的平均值在 3 类场地中分别取 2.59、2.55、2.54,认为跟现行公路桥梁抗震设计规范中的规范谱常数取值 2.5 基本一致,因此仍保留常数项 2.5 的取值;衰减指数的平均值在 3 类场地中分别取 1.04、1.21、1.11,考虑到抗震设计规范的易用性和可操作性,统一取 1.1,不针对不同场地区分;对表 7 中的特征周期统计值取整处理后则可以直接在修正谱中使用,见表 8, I₀类场地和 IV 类场地则分别参考 I₁类场地和 III 类场地的取值,全部取值可以包络表 7 中的统计值。

表 8 修正谱中的特征周期 T_g 取值

Table 8 Value of characteristic period T_g in the modified spectrum s

I ₀ 类场地	I ₁ 类场地	II类场地	III类场地	IV类场地
0.75	0.75	0.85	1.05	1.05

参考美国加州桥梁抗震设计规范,在我国抗震规范设计谱的基础上,在 0.5 s 以下及 1.0 s 以上仅考虑修正特征周期,同时在 0.5~1.0 s 之间通过线性插值确定,如式(6)所示:

$$\beta(T) = \begin{cases} 1.0 + (\beta_{\max} - 1.0) \frac{T}{T_0}, & 0 \leq T < 0.1 \\ \beta_{\max}, & 0.1 \leq T < 0.5 \\ 2\beta_{\max} [(T_g)^\gamma - 1] T - \beta_{\max} [(T_g)^\gamma - 2], & 0.5 \leq T < 1.0 \\ \beta_{\max} (T_g/T)^\gamma, & 1.0 \leq T \leq 10 \end{cases} \quad (6)$$

II 类场地的修正规范谱谱型与现行桥梁抗震设计规范规范谱对比如图 7 所示。

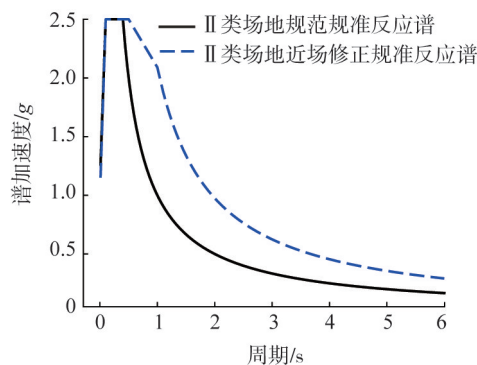


图 7 II 类场地修正规范谱谱型与现行桥梁抗震设计规范规范谱对比

Fig. 7 Comparison of modified near-fault design gauge spectrum with the present bridge seismic code design spectrum for site category II

4 结论

通过选取实际地震动记录,生成近断层地震动水平向规准加速度谱,并根据不同分组条件与规范规准设计谱进行对比,再根据拟合模型进行拟合分析,修正桥梁抗震设计规范中的水平向抗震设计谱,得到如下主要结论:

1)我国现行行业规范JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》中所给出的水平向设计加速度反应谱难以包络实际近断层地震动规准谱,尤其是长周期段,使用规范规准谱进行抗震设计的桥梁可能偏于不安全。

2)通过拟合得到的近断层水平向地震动规准设计谱平台段高度在 2.5 左右,其值与现行桥梁抗震设计规范水平向设计反应谱的平台高度 2.5 基本一致,可以验证选取 84%保证率的准确性。

3)实际近断层地震动拟合得到的反应谱下降段衰减指数略大于规范给定的衰减指数。

4)通过实际近断层地震动拟合得到的加速度反应谱特征周期比现行规范中的加速度反应谱特征周期整体偏大,符合近断层地震动长周期速度脉冲影响下的频域特性。

5)提出了适用于公路桥梁抗震设计中近断层水平向地震设计规准谱的修正方法,可以作为抗震规范中近断层地震动作用设计反应谱的参考。

参考文献:

- [1] 唐光武,于雯,谢皓宇,等.近场地震作用下桥梁结构动力响应研究进展[J].公路交通技术,2023,39(1):60-68.
TANG Guangwu, YU Wen, XIE Haoyu, et al. Advances in researches of structural dynamic response of bridges under near-fault ground motions[J]. Technology of Highway and Transport, 2023, 39(1): 60-68. (in Chinese)
- [2] 曾永平,陈克坚,庞林,等.近断层地震反应谱特性分析研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(5):1141-1146.
ZENG Yongping, CHEN Kejian, PANG Lin, et al. Study on response spectrum characteristics of near-fault ground motions[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(5): 1141-1146. (in Chinese)
- [3] CAI Z H, WANG Z J, LIN K Q, et al. Seismic behavior of a bridge with new composite tall piers under near-fault ground motion conditions[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7377.
- [4] 周正华,周雍年,赵刚.强震近场加速度峰值比和反应谱统计分析[J].地震工程与工程振动,2002,22(3):15-18.
ZHOU Zhenghua, ZHOU Yongnian, ZHAO Gang. Statistical analysis of peak ratios and response spectra of near-field accelerograms[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2002, 22(3): 15-18. (in Chinese)
- [5] 倪永军,朱晞.近断层地震的加速度峰值比和反应谱分析[J].北方交通大学学报,2004,28(4):1-5.
NI Yongjun, ZHU Xi. Analysis of acceleration peak ratios and response spectra for near-fault earthquakes[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(4): 1-5. (in Chinese)
- [6] 周继磊,杨迪雄,陈国海.近断层脉冲型地震动功率谱特性分析[J].世界地震工程,2017,33(1):18-26.
ZHOU Jilei, YANG Dixiong, CHEN Guohai. Characteristic analysis of power spectrum for near-fault impulse type ground motion[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 18-26. (in Chinese)
- [7] PU W C, WU M, HUANG B, et al. Quantification of response spectra of pulse-like near-fault ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 104: 117-130.
- [8] European Committee for Standardization. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance[S]. London: ICE Publishing, 2012.
- [9] California Department of Transportation. Caltrans seismic design criteria version 1.6[S]. Sacramento: California Department of Transportation, 2010.
- [10] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [11] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
JTG/T 2231-01—2020 Specifications for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020. (in Chinese)
- [12] CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
CJJ 166—2011 Code for seismic design of urban bridges[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 郭锋,吴东明,许国富,等.中外抗震设计规场地分类对应关系[J].土木工程与管理学报,2011,28(2):63-66.
GUO Feng, WU Dongming, XU Guofu, et al. Site classification corresponding relationship between Chinese and the overseas seismic design codes[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(2): 63-66. (in Chinese)
- [14] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S].北京:中国标准出版社,2015.
GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [15] 郭晓云,薄景山,巴文辉,等.最小二乘法分段拟合标定反应谱方法[J].世界地震工程,2012,28(3):29-33.
GUO Xiaoyun, BO Jingshan, BA Wenhui, et al. Sectional least square fitting method for calibrating seismic design response spectrum[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(3): 29-33. (in Chinese)