

近断层地震下梁式桥考虑 SSI 效应的能力谱法

李宇^{1†},董世杰¹,乔云强²,赖亚平²,薛晓锋¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆 401121)

摘要:合理地选取 215 条典型近断层地震动记录,并根据我国桥梁抗震设计规范的场地标准进行分类后,统计了适用于我国桥梁抗震设计的近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱,并拟合了阻尼比对近断层地震弹塑性反应谱的影响关系式,进而得到近断层地震的弹塑性需求谱.再将其与 FEMA440 的考虑土-结构相互作用(SSI 效应)的方法、Chopra 改进能力谱法相结合,完善了近断层地震下适用于我国梁式桥且能考虑 SSI 效应的能力谱法.最后,将本文方法应用于某梁式桥的抗震性能评估中,结果表明:对于近断层地震下考虑 SSI 效应的我国梁式桥,FEMA440 的计算结果偏于保守,而本文方法的计算结果则较为合理,可以应用于我国梁式桥的抗震性能评估中.

关键词:地震;桥梁;能力谱法;土-结构相互作用;弹塑性反应谱

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Capacity Spectrum Method Considering SSI Effects for Beam Bridges under Near-fault Ground motion

LI Yu^{1†}, DONG Shijie¹, QIAO Yunqiang², LAI Yaping², XUE Xiaofeng¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. TY. Lin International Engineering Consulting (China) Co. Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: A total of 215 typical near-fault ground motion (GM) records were selected reasonably and classified according to the Chinese seismic design code for bridges. Then, the near-fault elastoplastic acceleration and displacement spectra were counted, and the relationship between damping ratio and near-fault elastoplastic spectra was fitted, so as to obtain near-fault elastoplastic demand spectra. By combining the FEMA440 and Chopra capacity spectrum method with the established near-fault elastoplastic demand spectra, a capacity spectrum method considering soil-structure interaction (SSI) effects for Chinese beam bridges was suggested and applied in the seismic performance assessment for a beam bridge under near-fault GMs. The results show that, for the Chinese beam bridge considering SSI effects under near-fault GMs, the results calculated by FEMA440 are conservative, while the results calculated by the proposed method in this study are more reasonable, which can be applied to the seismic performance

* 收稿日期:2021-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408042), National Natural Science Foundation of China (51408042);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JM168, 2022JQ-507), Shaanxi Natural Science Foundation (2021JM168, 2022JQ-507);重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jcsx-mszd0430), Chongqing Technological Innovation and Application Demonstration Project (cstc2018jcsx-mszd0430)

作者简介:李宇(1982—),男,福建福州人,长安大学副教授,硕士生导师

† 通信联系人, Email: liyu@chd.edu.cn

evaluation for Chinese beam bridges.

Key words: earthquake; bridge; capacity spectrum method; soil-structure interaction effects; elastoplastic response spectra

抗震设计的能力谱法是一种计算结构弹塑性地震响应的近似方法,其计算精度虽然低于非线性时程分析法,但它的计算过程比较简洁、计算速率也较高,便于工程人员快速估算结构抗震性能。

能力谱法最初是由Freeman^[1]建议的,并为各国规范所采用^[2]。目前,已有许多学者对该法进行了改进,例如:Chopra等^[3]建议了改进的能力谱方法,并提出了多模态推覆分析方法;曹一山等^[4]提出了适用于桥梁结构的简化能力谱法;王克海等^[5]提出了基于模态分析的Pushover方法;Ahmad等^[6]、陈伟宏等^[7]、季春芳等^[8]、李延和等^[9]都将能力谱法应用于建筑结构的抗震性能评估中;李宇等^[10-11]将高阶振型的影响引入能力谱法中,并应用于铁路高桥墩的抗震性能评估中;FEMA440^[2]则给出考虑土-结构相互作用(SSI效应)的等效线性化方法,可用于中远场地震下的桥梁抗震设计。

虽然上述学者^[1-11]对能力谱法进行了大量的研究,但是还没有文献研究在近断层地震作用下的能力谱法。由于近断层地震可以使建筑物直接承受高能量的冲击,其脉冲性运动也会产生更为严重的震害^[12-14],因此,有必要研究近断层地震作用下的能力谱法。另外,FEMA440^[2]所建议的能力谱法虽然能够考虑SSI效应的影响,但它所采用的需求谱是依据国外规范,因此,不能直接应用于我国桥梁的抗震设计中。

综上所述,本文选取了215条近断层地震动记录,计算了适用于我国桥梁抗震设计的近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱,进而得到了考虑近断层地震影响的需求谱,并将其与FEMA440建议的考虑SSI效应的能力谱法相结合,完善了近断层地震下梁式桥考虑SSI效应的能力谱法。

1 FEMA440考虑SSI效应的方法^[2]

在FEMA440中,SSI效应包括^[2]:基础柔性效应、运动学效应和地基阻尼效应。基础柔性效应可以在建立结构的有限元模型时,采用模拟基础的转动和平动刚度的弹簧单元来考虑。运动学效应和地基阻

尼效应的确定方法阐述如下。

1.1 运动学效应

若基础的有效尺寸 $b_e = \sqrt{ab}$ (a 和 b 为基础的有效宽度和长,m),则平均效应和基础埋深效应的折减因子(RRS_{bsa} 和 RRS_e)分别为:

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{3389} \left(\frac{b_e}{T} \right)^{1.2} \quad (1)$$

$$RRS_e = \max \left\{ \cos \left(\frac{2\pi e}{Tn v_s} \right), 0.453, \cos \left(\frac{2\pi e}{0.2n v_s} \right) \right\} \quad (2)$$

式中: T 为周期,s; e 为基础埋深,m; v_s 为场地剪切波速,m/s; n 为剪切波速的折减系数,见表1。

表1 剪切波速的折减系数

Tab.1 Reduction factors of shear wave velocity			
0.10g	0.15g	0.20g	0.30g
0.90	0.80	0.70	0.65

定义 $RRS = RRS_{bsa} \times RRS_e$,并分别将弹塑性加速度和位移反应谱的谱值乘RRS,以此来考虑运动学效应对需求谱的影响。

1.2 地基阻尼效应

分别建立结构的固结和柔性基础的模型,并计算得它们的基阶周期分别为 T 和 T' ,s

计算固结基础模型的等效单自由度(SDOF)体系的刚度:

$$K_{fixed}^* = \alpha_1 M \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad (3)$$

式中: M 为固结基础模型的总质量(kg); α_1 为基阶振型的质量参与系数。

计算基础的平动刚度 K_x :

$$K_x = \frac{8}{2-\lambda} G r_x, \quad r_x = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \quad (4)$$

式中: λ 和 G 分别为土的泊松比和等效剪切模量(Pa); r_x 为等效半径,m; A_f 为基础面积,m²。

计算基础的等效转动刚度 K_θ 和转动半径 r_θ :

$$K_\theta = \frac{K_{fixed}^* (h^*)^2}{(T'/T)^2 - 1 - K_{fixed}^*/K_x} \quad (5)$$

$$r_\theta = \left[\frac{3(1-\lambda)K_\theta}{8G} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中: h^* 为等效计算高度,取结构70%的高度,m.

计算等效周期延长比(T'_{eff}/T_{eff}):

$$\frac{T'_{eff}}{T_{eff}} = \left\{ 1 + \frac{1}{\mu_{sys}} \left[\left(\frac{T'}{T} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{0.5} \quad (7)$$

式中: μ_{sys} 为土-结构系统的预期位移延性比.

计算地基辐射阻尼比 β_f :

$$\begin{cases} \beta_f = a_1(T'_{eff}/T_{eff} - 1) + a_2(T'_{eff}/T_{eff} - 1)^2 \\ a_1 = c_e \exp(4.7 - 1.6h/r_\theta) \\ a_2 = c_e [25 \ln(h/r_\theta) - 16] \\ c_e = 1.5(e/r_x) + 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: c_e 、 a_1 和 a_2 都为地基辐射阻尼比的参考系数.

最后,计算土-结构系统的总阻尼比 β_0 :

$$\beta_0 = \beta_f + \frac{\beta_i}{(T'_{eff}/T_{eff})^3} \quad (9)$$

式中: β_i 为初始阻尼比,一般取5%.

在此基础上,从用RRS修正后的需求谱(对应不同阻尼比)中,选取与 β_0 对应的需求谱,并与结构的能力谱相结合,以求解结构的性能点.这就考虑了运动学效应和地基阻尼效应的影响.

2 近断层地震的弹塑性反应谱

本节将统计适用于我国桥梁抗震设计的近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱,并以此作为本文建议的改进能力谱法的需求谱.

2.1 近断层地震动记录的选取

吕红山等^[15]、刘培玄等^[16]对我国抗震设计规范^[17-18]和美国“NEHRP报告”^[19]的场地类型进行了对比,得到了以下结论(表2):美国“NEHRP报告”^[19]中 v_{30} (土层深度30m处的剪切波速) >510 m/s、 $v_{30}=260\sim 510$ m/s、 $v_{30}=150\sim 260$ m/s、 $v_{30}<150$ m/s对应的场地类型与我国抗震设计规范^[17-18]中I~IV类场地相对应.

表2 中国和美国的场地分类指标对比

Tab.2 Comparison of site classification indicators between Chinese and American codes

美国		150	260	510	1 500
场地		E	D	C	B A
中国		150	250	500	800
场地		IV	III	II	I ₁ I ₀

另外,根据 Lioussatou 等^[12]、Alici 等^[13]、Li 等^[14]的研究成果,本文采用的近断层地震动记录的选取原则为:有明显速度脉冲^[20-21],矩震级 $M_R \geq 5.0$,断层投影距离 $D \leq 15$ km,PGA $\geq 0.05g$.

在此基础上,本文从美国的太平洋地震工程研究中心(PEER)的强震数据库中,选取了219条近断层地震动记录,它们的矩震级 M_R 和震中距 R (km)的分布关系见图1.然后,根据中美场地分类指标的对比表(表2),将选取的地震动记录按照我国抗震设计规范的场地类型进行分类,其中:I₀类37条、I₁类40条、II类53条、III类45条、IV类44条.

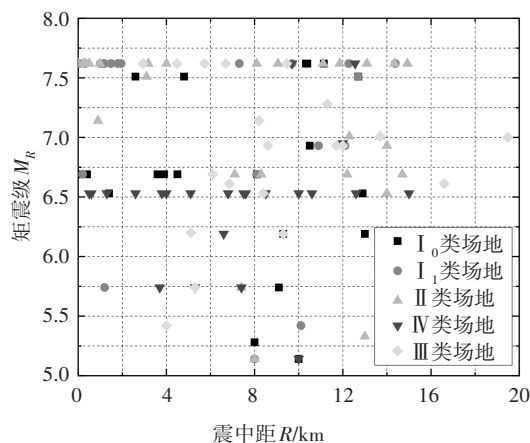
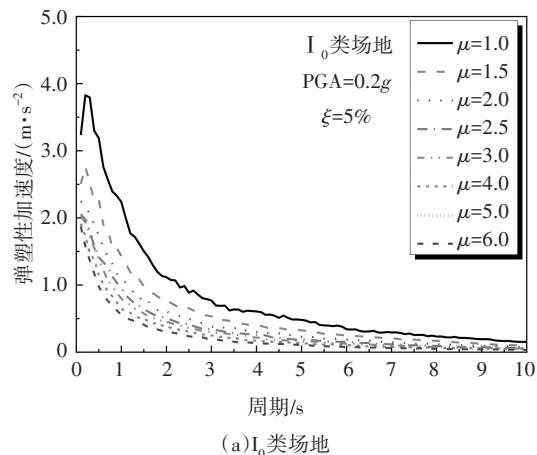


图1 矩震级 M_R 和震中距 R 的分布关系

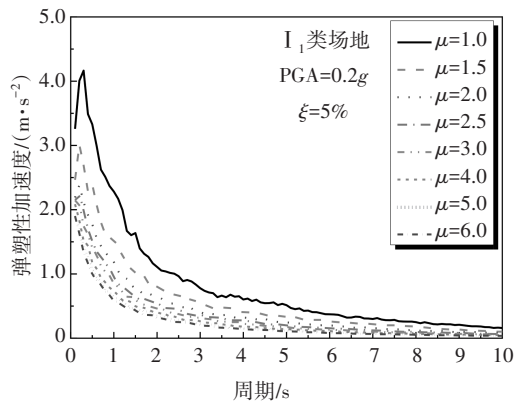
Fig.1 Relation between M_R and R

2.2 近断层地震的弹塑性反应谱

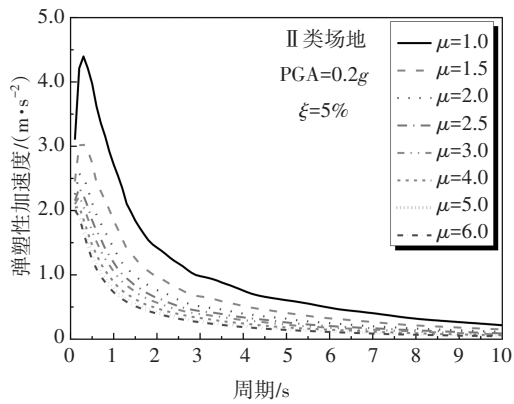
将选取的215条近断层地震动记录的峰值加速度PGA调幅到0.2g后,输入BISPEC软件中,采用Takeda刚度退化模型,并取阻尼比 $\xi=5\%$ 、屈服后刚度比 $\eta=0.05$ 和位移延性比 $\mu=1.0\sim 6.0$,可计算得对应于 $\xi=5\%$ 和 $\mu=1.0\sim 6.0$ 的近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱,如图2和图3所示.



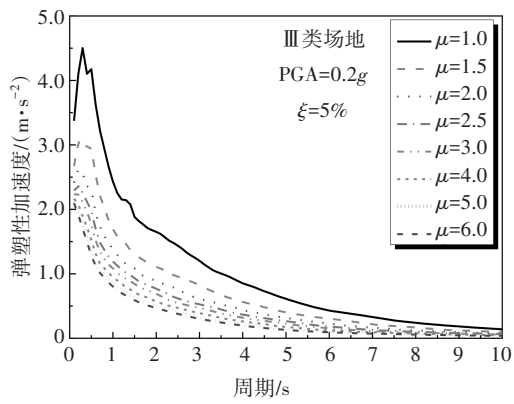
(a) I₀类场地



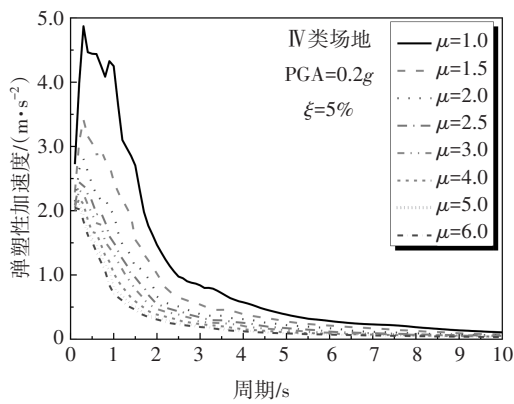
(b) I₁类场地



(c) II类场地



(d) III类场地



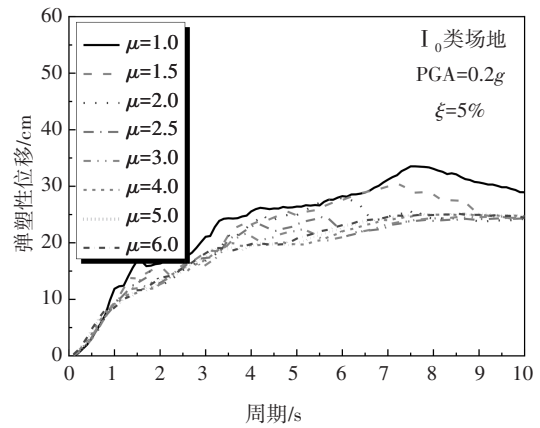
(e) IV类场地

图2 近断层地震弹塑性加速度谱

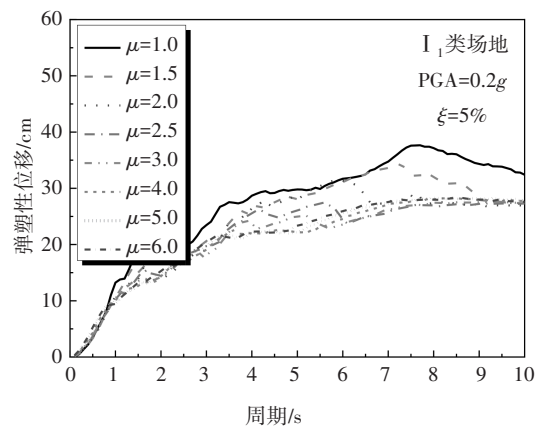
Fig.2 Near-fault elastoplastic acceleration response spectra

2.3 ξ对近断层地震弹塑性反应谱的影响关系式

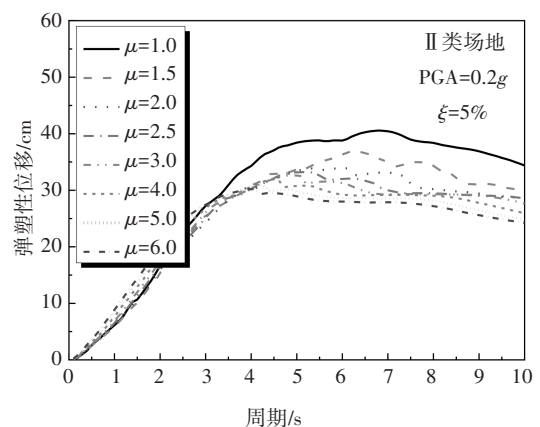
在考虑地基阻尼效应(1.2节)后,土-结构系统的总阻尼比会变为 β_0 [式(9)].因此,在采用能力谱法时,应选取与 β_0 对应的近断层地震弹塑性反应谱,来建立相应的需求谱.图2和图3分别为 $\xi=5\%$ 对应的近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱,不能直接用于土-结构系统.



(a) I₀类场地



(b) I₁类场地



(c) II类场地

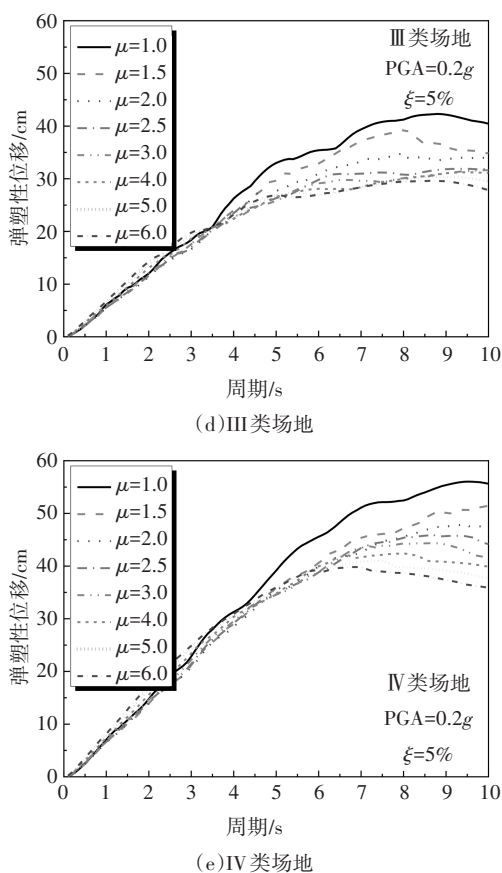


图 3 近断层地震弹塑性位移谱

Fig.3 Near-fault elastoplastic displacement response spectra

表 3 阻尼比对近断层地震弹塑性反应谱的影响系数

Tab.3 Impact factor of damping ratio on the near-fault elastoplastic spectra

场地	谱类型	参数						相关系数 R
		a	b	c	d	e	f	
II	位移谱	1.466 4	-1.267 6	0.336 2	0.166 8	-2.063 6	-0.488 0	0.999 2
	加速度谱	-0.168 0	21.412 8	0.947 8	1.245 1	-0.148 3	-23.176 5	0.997 6
III	位移谱	1.384 0	-1.129 0	0.362 2	0.148 0	-2.538 1	-0.466 2	0.998 9
	加速度谱	-0.896 4	39.325 1	0.986 5	1.942 4	-0.095 9	-40.700 5	0.998 0
IV	位移谱	1.392 8	-1.053 2	0.333 7	0.231 3	-1.027 6	-0.659 4	0.999 1
	加速度谱	-2.198 6	59.909 2	0.953 9	3.267 4	-0.058 8	-61.548 6	0.998 7

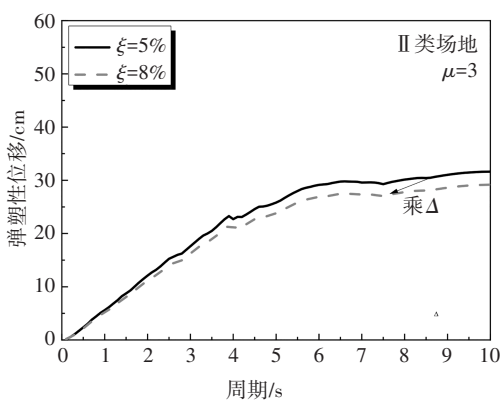


图 4 II 类场地 (mu=3) 的弹塑性位移反应谱

Fig.4 Elastoplastic displacement spectrum of class II site (mu=3)

为了能够利用图 2 和图 3 (对应 xi=5%) 快速求得 beta_0 对应的近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱, 以下将建立 xi=5% 和 beta_0 分别对应的近断层地震加速度和位移弹塑性反应谱之间的关系. 具体做法为:

1) 利用 2.2 节方法, 继续计算 xi=1%、10%、15%、20% 对应的 II~IV 类场地 (根据 FEMA440^[2], I_0 和 I_1 类场地不考虑 SSI 效应) 的弹塑性反应谱 (mu=1.0~6.0);

2) 分别计算 xi=1%、10%、15%、20% 与 xi=5% 的近断层地震弹塑性反应谱的比值;

3) 利用 Matlab 拟合 xi 对近断层地震弹塑性反应谱的影响系数, 即式 (10):

$$\Delta = a + b \times \xi^c + d \times \mu^e + f \times \xi^e \times \mu^e \quad (10)$$

式中: Delta 为任意 xi 的反应谱与 xi=5% 的反应谱的比值; a~f 为拟合参数, 见表 3.

在此基础上, 利用式 (10)、图 2 和图 3, 可求得任意 xi 的近断层地震弹塑性反应谱. 以 II 类场地为例 (设 mu=3), 先由式 (9) 求得土-结构系统的 xi=8%, 再由式 (10) 算得 Delta=0.922 3, 并乘图 3 的谱值, 可得到 xi=8% 的弹塑性位移反应谱 (图 4).

3 近断层地震下考虑 SSI 效应的能力谱法

本文根据 FEMA440^[2] 考虑 SSI 效应的方法 (第 1 节), 并采用 Chopra^[3] 的改进能力谱法的步骤, 再结合图 2、图 3、式 (10) 和表 3, 完善了近断层地震下适用于我国梁式桥的考虑 SSI 效应的能力谱法. 其详细步骤如下:

1) 按照《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)^[18] 计算基础的水平和转动刚度, 并采用弹簧单元来模拟基础, 进而建立考虑基础柔性效应的梁式

桥有限元模型,并对其进行 Pushover 分析,以得到 ADRS 形式的能谱;

2)按照梁式桥所处的场地和抗震设防标准,从图 2 和图 3 中选取对应的近断层地震弹塑性反应谱($\xi=5\%$),进而绘制近断层地震弹塑性需求谱;

3)由式(1)和式(2)计算折减因子 RRS,进而修正第 2)步的近断层地震弹塑性需求谱,以此来考虑运动学效应的影响;

4)由式(3)~式(9)计算得土-结构体系的阻尼比 β_0 ,并利用式(10)来修正第 3)步的近断层地震弹塑性需求谱,以此来考虑地基阻尼效应的影响;

5)将第 1)步的能力谱和第 4)步的近断层地震需求谱绘制到同一坐标系中,再根据 Chopra 等^[3]的改进能力谱法的计算步骤,求得等效 SDOF 体系的性能点,并转化为墩底剪力和墩顶位移.

4 工程实例

4.1 工程简介

某三级公路的梁式桥如图 5 和图 6 所示.上部结构为等截面五跨预应力简支箱梁(跨径 30 m);桥墩采用 C30 混凝土,截面配置 60 根 $\Phi 32$ 的 HRB400 纵筋和体积配箍率 0.5% 的 HPB300 箍筋;采用刚性扩大基础(C25 混凝土、边长 5 m 的正方形、厚度 2 m),基底埋深 4 m;处于 II 类场地,8 度设防.

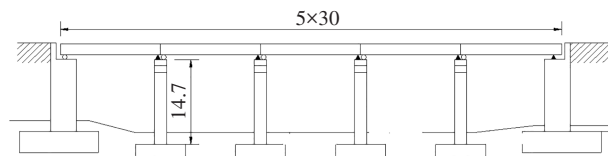
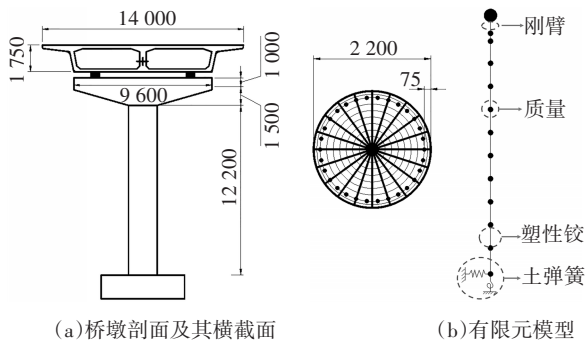


图 5 工程实例(单位:m)

Fig.5 Project case (unit:m)



(a)桥墩剖面及其横截面

(b)有限元模型

图 6 桥墩及其有限元模型(单位:mm)

Fig.6 Pier and its finite element model (unit: mm)

4.2 有限元建模

采用 SAP2000 软件,按照《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)^[17]建立该梁式桥的单墩有限元模型,如图 6(b)所示:1)将上部结构质量(5.31×10^5 kg)等效为集中荷载施加于模型顶部,并用刚臂与墩体相连;2)按照《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)^[17]计算得墩底塑性铰长度为 1.5 m,并用 XTRACT 软件计算塑性铰截面的 $M-\phi$ 曲线(图 7),以模拟墩底塑性铰;3)根据《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)^[18]计算的基础的平动和转动刚度分别为 150.85×10^5 kN/m 和 56.33×10^6 kN·m/rad,进而在模型底部加设弹簧单元来考虑基础柔性效应.

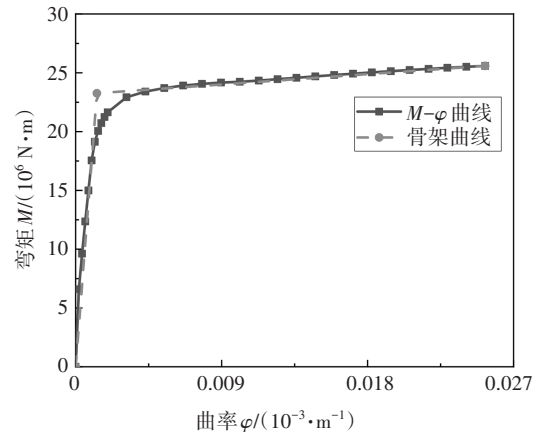


图 7 $M-\phi$ 曲线

Fig.7 $M-\phi$ curve

4.3 本文改进能力谱法的应用及验证

步骤 1 计算能力谱曲线(考虑基础柔性效应)

采用 SAP2000 软件,对考虑基础柔性效应的有限元模型[图 6(b)]进行 Pushover 分析,得到了该梁式桥考虑基础柔性效应的能力谱曲线(ADRS 形式).

步骤 2 计算需求谱曲线(考虑运动学效应和地基阻尼效应)

(1)利用式(1)~(2),可计算得运动学效应的折减因子 RRS(图 8).如果将图 2 和图 3 的近断层地震弹塑性反应谱的谱值乘 RRS,即可得到考虑运动学效应的近断层地震弹塑性反应谱.

(2)采用 SAP2000 软件,对有限元模型[图 6(b)]进行动力特性分析,可计算得:

- ①基础固结模型的基阶周期 $T=0.933$ 9 s;
- ②柔性基础模型的基阶周期 $T'=0.996$ 5 s;
- ③基础固结模型的基阶振型的质量参与系数和参与质量分别为 $\alpha_1=0.767$ 9 和 $m=8.493$ 9 $\times 10^5$ kg;

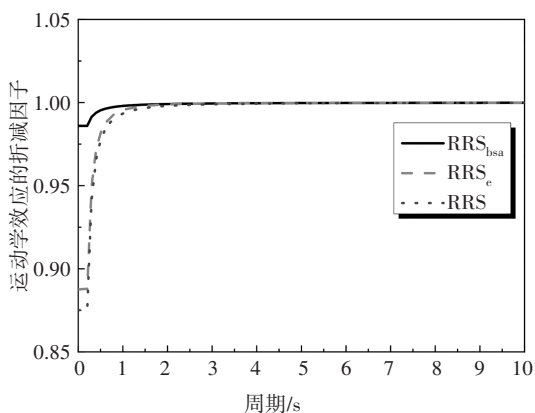


图8 运动学效应的折减因子
Fig.8 Reduction factor of kinematic effects

④根据式(3)~式(5)可计算得 $K_{fixed}^* = 38\,447\text{ kN/m}$ 、 $K_x = 2.762\,8 \times 10^6\text{ kN/m}$ 和 $K_\theta = 7.700\,6 \times 10^7\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 。

在此基础上,对应于不同的 μ ,可由式(7)计算得等效周期延长比 T'_{eff}/T_{eff} ,再由式(8)计算得地基辐射阻尼比 β_r ,最后由式(9)计算得土-结构体系的总阻尼比 β_0 。其中,不同 μ 对应的 T'_{eff}/T_{eff} 、 β_r 和 β_0 的计算结果如表4所示。

表4 不同 μ 对应的 T'_{eff}/T_{eff} 、 β_r 和 β_0
Fig.4 T'_{eff}/T_{eff} , β_r and β_0 with different μ

μ	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
T'_{eff}/T_{eff}	1.07	1.05	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01
$\beta_r/\%$	0.24	0.11	0.07	0.03	0.02	0.01	0.01
$\beta_0/\%$	4.35	4.49	4.59	4.71	4.77	4.81	4.84

然后,令 $\xi = \beta_0$,并代入式(10)中,即可计算得对应于不同 μ 的 Δ (即得到任意 β_0 的反应谱与图2-3的 $\xi = 5\%$ 的反应谱的比值)。将图2和图3的近断层地震弹塑性反应谱的谱值乘以 Δ ,即可得到考虑地基阻尼效应的近断层地震弹塑性反应谱。

(3)由于该桥处于II类场地且为8度设防,可根据《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)^[17]取设计加速度峰值 $PGA_d = 0.3g$ 。根据文献[22]的研究成果,可将图2和图3的近断层地震弹塑性反应谱乘 α_m ,以得到与 PGA_d 对应的近断层地震弹塑性反应谱。

$$\alpha_m = \frac{PGA_d}{PGA} = \frac{0.3g}{0.2g} = 1.5$$

式中: α_m 为近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱的调整系数。

(4)将(1)~(3)计算得到的RRS、 Δ 和 α_m 乘图2和图3的近断层地震弹塑性反应谱后,即可得到与 PGA_d 对应的、考虑运动学效应和地基阻尼效应的近

断层地震弹塑性反应谱。然后,按照文献[11]的方法,分别以弹塑性加速度为纵坐标(S_a)、弹塑性位移为横坐标(S_d),绘制出与 PGA_d 对应的、考虑运动学效应和地基阻尼效应的近断层地震弹塑性需求谱(图9)。

步骤3 将步骤1求得的考虑基础柔性效应的能力谱(图9)与步骤2求得的考虑运动学效应和地基阻尼效应的需求谱(图9)绘于同一坐标系中,再用Chopra^[3]的改进能力谱法来求性能点。具体做法为:

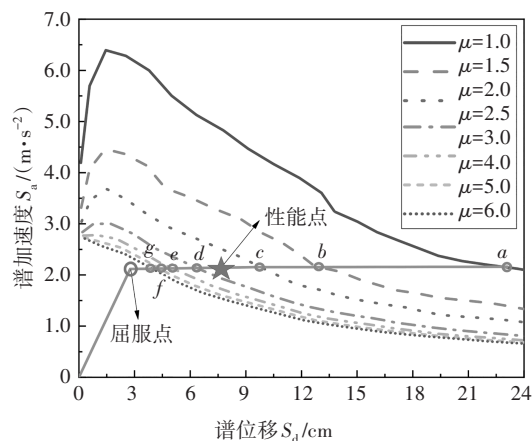


图9 ADRS形式的能力谱和需求谱

Fig.9 Capacity and demand spectra with ADRS form

(1)根据图9可求得各交点(a~f)的结构延性,如表5所示;c(d)点延性大(小)于需求延性。因此,结构的性能点(图9中的星号点)的延性应介于c点和d点之间,并可插值求得其延性为 $\mu = 2.727$ 。

表5 求解性能点

Fig.5 Solution of the performance point

交点	位移/cm	结构延性	需求延性
a点	23.145	8.380	1.0
b点	12.823	4.643	1.5
c点	9.123	3.303	2.0
d点	6.943	2.514	3.0
e点	4.915	1.780	4.0
f点	4.671	1.691	5.0
g点	3.866	1.400	6.0
屈服点	2.762	—	—
性能点	7.533	2.727	—

(2)在图9中,进一步查得结构性能点(星号点)的谱位移和谱加速度分别为: $S_d = 7.533\text{ cm}$ 和 $S_a = 2.236\text{ m/s}^2$ 。然后,根据等效SODF体系和MDOF体系的转换关系,按照文献[11]的方法,可计算得墩顶位移和

墩底剪力分别为8.152 cm和1 375.85 kN.

步骤4 从图1中分别选取I、II、III类场地的近断层地震动记录各7条,并将它们的PGA都调幅为0.3g后,输入有限元模型[图6(b)]中,进而用SAP2000进行非线性时程分析,可算得算例梁式桥的墩顶位移均值和墩底剪力均值,并与本文改进能力谱法和FEMA440的计算结果相互对比(图10),从中可知:

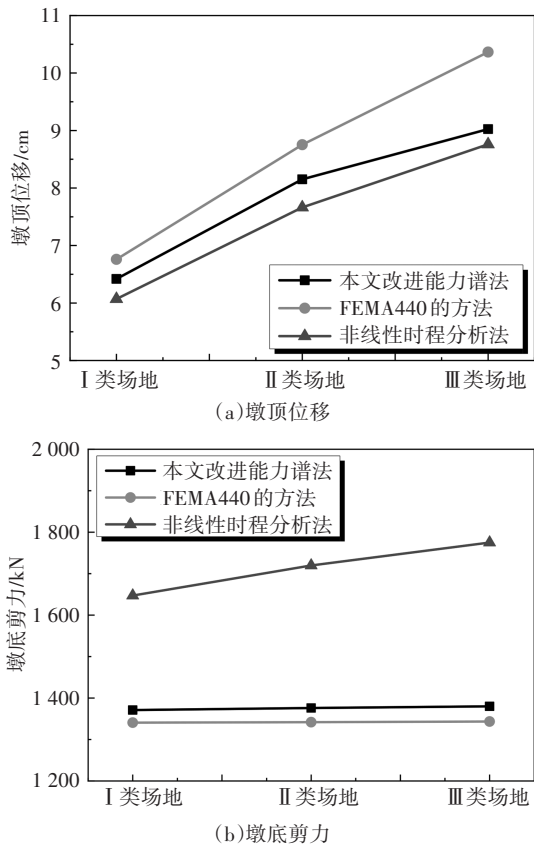


图10 计算结果的对比

Fig.10 Comparison of result

(1)与非线性时程分析法计算的墩顶位移相比,本文改进能力谱法和FEMA440的计算结果的误差分别为8.97%和16.32%.可见,对于近断层地震下考虑SSI效应的我国梁式桥,FEMA440的计算结果偏于保守,而本文改进能力谱法有效且可行的.

(2)与非线性时程分析法计算的墩底剪力相比,本文改进能力谱法和FEMA440的计算结果都偏小.这是因为能力谱法主要是考虑了结构基阶振型的计算结果,而非线性时程分析法则考虑了结构全部振型的计算结果.

综上所述,本文完善的近断层地震下适用于我国梁式桥考虑土-结构相互作用的能力谱法有效

可行的,可以用于我国梁式桥的抗震性能评估.

5 结论

虽然FEMA440建议的能力谱法能考虑土-结构相互作用(SI效应)的影响,但它所采用的需求谱是来自国外规范,即该法不能直接应用于我国桥梁的抗震设计中,而且该法也未能考虑近断层地震动的影响.因此,本文致力于完善近断层地震下我国梁式桥考虑SSI效应的能力谱法,主要工作有:

1)根据近断层地震动特性和我国抗震设计规范,从PEER强震数据库中合理选取了四类场地的215条近断层地震动记录.再采用BISPEC软件计算了适用于我国桥梁抗震设计的近断层地震弹塑性加速度和位移反应谱,并拟合了阻尼比对近断层地震弹塑性反应谱的影响关系式.

2)将计算得到的近断层地震弹塑性反应谱与FEMA440考虑SSI效应的方法、Chopra的改进能力谱法相结合,完善了近断层地震下适用于我国梁式桥且能考虑SSI效应的改进能力谱法,并应用于某梁式桥的抗震性能评估中.

3)与非线性时程分析法的计算结果对比后,可知:对于近断层地震下考虑SSI效应的我国梁式桥,FEMA440的计算结果偏于保守,而本文的改进能力谱法有效且可行的,可以应用于我国梁式桥的抗震性能评估中.

参考文献

- [1] FREEMAN S A. Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motion [C]//Proceedings of Douglas McHenry international symposium on concrete and concrete structures. Detroit, Michigan, USA: American concrete institute, 1978: 589-605.
- [2] Applied Technology Council (ATC-55 Project). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEM440) [R]. Washington D C. Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [3] CHOPRA A K, GOEL R K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 561-582.
- [4] 曹一山, 朱晞. 简化的能力谱方法在桥梁结构中的应用[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(2): 20-24.
CAO Y S, ZHU X. Application of simplified capacity spectrum method to bridge structure [J]. China Railway Science, 2004, 25(2): 20-24. (In Chinese)
- [5] 王克海, 李茜. 基于模态分析的Push-over方法在桥梁抗震分

- 桥中的应用[J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 79-84.
- WANG K H, LI Q. Mode-based Push-over method applied to aseismic analysis of bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2): 79-84. (In Chinese)
- [6] AHMAD Z, SHAHZADA K, GENCTURK B, *et al.* Seismic capacity assessment of unreinforced concrete block masonry buildings in Pakistan before and after retrofitting[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(3): 357-382.
- [7] 陈伟宏, 蒋认, 崔双双, 等. 基于动力能力谱法的RC结构位移放大系数[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 39-44.
- CHEN W H, JIAN R, CUI S S, *et al.* Structural displacement amplification factor of RC frames based on the dynamic capacity spectrum method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24): 39-44. (In Chinese)
- [8] 季春芳, 申彦利. 基于能力谱法矩形空心桥墩极限状态研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 121-127.
- JI C F, SHEN Y L. Study on the limit state of rectangular hollow pier based on the capacity spectrum method[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 121-127. (In Chinese)
- [9] 李延和, 李宁, 李林峰, 等. 自控耗能无黏结预应力框架抗震能力的谱法研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S1): 111-117.
- LI Y H, LI N, LI L F, *et al.* Seismic capacity of self-control energy dissipation UPPC frame based on capacity spectrum method[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S1): 111-117. (In Chinese)
- [10] 李宇, 朱晞, 杨庆山. 改进的简化能力谱法在铁路桥梁中的应用[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 100-106.
- LI Y, ZHU X, YANG Q S. Application of improved simplified capacity spectrum method for railway bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 100-106. (In Chinese)
- [11] 李宇, 潘彪, 李琛. 考虑高阶振型的改进能力谱法在铁路高桥墩中的应用[J]. 土木工程学报, 2016, 49(8): 92-98.
- LI Y, PAN B, LI C. Application of improved capacity spectrum method considering high-order mode to tall pier of railway bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(8): 92-98. (In Chinese)
- [12] LIOSSATOU E, FARDIS M N. Near-fault effects on residual displacements of RC structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(9): 1391-1409.
- [13] ALI C, F S, SUCUOĞLU H. Elastic and inelastic near-fault input energy spectra[J]. Earthquake Spectra, 2018, 34(2): 611-637.
- [14] LI Y, LI C, ZHAO G H. Seismic isolation design for simply-supported beam bridges based on the energy balance method under near-fault ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 145: 106730.
- [15] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-76.
- LÜ H S, ZHAO F X. Site coefficients suitable to China site category[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 67-76. (In Chinese)
- [16] 刘培玄, 刘红帅, 赵纪生, 等. 基于KiK-net台站的中美场地类别对比分析[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(6): 42-46.
- LIU P X, LIU H S, ZHAO J S, *et al.* Comparison of site classification between Chinese and American seismic codes based on data of Japanese KiK-net station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(6): 42-46. (In Chinese)
- [17] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 23-24.
- Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01-2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020: 23-24. (In Chinese)
- [18] 铁路工程抗震设计规范: GB 50111-2006[S]. 北京: 中国计划出版, 2009: 9-10.
- Code for seismic design of railway engineering: GB 50111-2006[S]. Beijing, China Planning Press, 2009: 9-10. (In Chinese)
- [19] Building Seismic Safety Council. NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures: FEMA450[R]. Washington D C: Building Seismic Safety Council, 2004: 19-38.
- [20] 喻梅, 吕佳伟, 贾宏宇, 等. 近断层脉冲型地震作用下高速铁路桥梁-轨道系统响应分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(9): 138-146.
- YU M, LÜ J W, JIA H Y, *et al.* Response analysis of high-speed railway bridge-rail system subjected to near-fault pulse-type earthquake[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(9): 138-146. (In Chinese)
- [21] 李宇, 李琛, 赵福志, 等. 长周期地震动的能量反应谱[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 80-92.
- LI Y, LI C, ZHAO F Z, *et al.* Energy response spectra of long-period ground motions[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(5): 80-92. (In Chinese)
- [22] 李宇, 付曜, 李琛. 梁式桥抗震设计的近场地震弹性反应谱[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 78-86.
- LI Y, FU Y, LI C. Elasto-plastic response spectra for seismic design of beam bridge under near-field ground motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 78-86. (In Chinese)