

高墩桥梁抗震时程分析输入地震波选择

王东升¹ 岳茂光² 李晓莉¹ 孙治国¹ 屈浩¹

(1. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁大连 116026;

2. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司, 北京 100020)

摘要: 提出考虑高阶振型影响的输入真实地震波选择方法以满足高墩桥梁抗震时程分析需求。首先在 PEER 强震记录数据库中选择满足震级、距离、加速度峰值及长周期特性的不同场地条件的备选地震波。其次根据场地条件以备选地震波反应谱与设计反应谱在平台段与高墩桥梁前几阶周期点附近(平均)谱值的相对误差最小为双控指标(小于 15%)确定具体的输入地震波以实现时程分析结果与设计反应谱分析统计一致性要求。以某百米高墩桥梁抗震时程分析为例验证建议选波方法的有效性。

关键词: 桥梁工程; 时程分析; 输入地震波; 设计反应谱; 统计一致

中图分类号: U442.5*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2013)S1-0208-06

Selections of real ground motions in seismic history analysis for bridges with high columns

Wang Dongsheng¹ Yue Maoguang² Li Xiaoli¹ Sun Zhiguo¹ Qu Hao¹

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Arup International Consultants Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: The method for selection of real records as input for time history analysis of bridges with high columns is presented. The earthquake records in PEER ground motion database are initially selected considering the earthquake magnitude, distance, PGA and long period characteristic. Then the average relative errors between each record spectrum and the design response spectrum at two period portions, which include the flat part and some lower-order mode periods of the bridge structures, are considered according to the site classification. If the errors are both less than 15% then the record is determined as the input for the dynamic analysis in order to meet the requirement of statistical consensus theory. The seismic analysis of a bridge with columns about 100m is illustrated as an example.

Keywords: bridge engineering; time history analysis; ground motion input; design spectra; statistical consensus theory

E-mail: dswang@dlmu.edu.cn

引 言

近些年在我国西部强地震危险区修建了较多高墩桥梁,以适应山区地形条件及满足高速行车安全需求。墩高百米以上的桥梁已不罕见。原《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—89)要求墩高 30m 以上桥梁需采用时程分析^[1],而新的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)(以下简称“08 细则”)将墩高 30m 以上桥梁划分为非规则桥梁,建议采用时程分析^[2]。输入地震波是时程分析的重要基础,国内外关于输入地震波选择通常要求(多条)地震波的(平均)

反应谱尽量与规范谱相一致,即满足统计一致性要求^[3-6]。“08 细则”建议采用由设计谱合成的人造地震波或选择与桥址设定地震震级、距离大体相近的实际地震波,并通过时域调整以使其谱与设计谱兼容。但在设定地震确定和时域调整方法方面缺少足够的指导。

随着世界范围内大量实际地震波(记录)的获得及公开,利用真实地震波进行结构抗震分析及设计被日益关注。Bommer 等^[5]详细综述了相关研究进展,建议以震级、距离和场地条件初选地震波,再以 FFT 变换或小波分析进行波形调整,以满足与设计谱一致条件。Iervolino 和 Cornell^[7]选择了严格满足震级、距离条件的 3 组地震波和 5 组随机地震波,以基本周期对应反应谱值为调幅指标,基于 SDOF 系统和 SAC 九层钢框架结构非线性反应对比,认为二者的统计特性是一致的,提出没有证据支持选择地震波需满足震级

基金项目: 国家自然科学基金(51178071),中央高校基本科研业务费项目(2011JCO34)

作者简介: 王东升,博士,教授

收稿日期: 2013-01-06

和距离条件的观点。曲哲和叶列平等^[8]对国内外建筑结构时程分析输入地震波选择方法进行了总结及比较,包括基于台站信息(震级、距离、断层特性等)、基于设计谱频段和最不利设计地震动等 3 类方法,涉及美国、新西兰和中国规范或学者研究成果。

本文提出的选波方法是基于台站信息和设计反应谱(频谱)的综合,其以 PEER 强震记录数据库为基础,首先选择获得足够数量的满足可发生工程震害的高质量的地震波。其次在杨涛等^[9]提出的双频段控制选波方法基础上引入了高振型影响,以满足时程分析和反应谱分析统计一致要求。对高墩桥梁抗震分析考虑高振型影响是十分必要的。

1 高墩桥梁抗震分析输入地震波选择方法

1.1 工程抗震分析用小型强震数据库

获得大量的地震波(强震记录)是时程分析选择地震输入的基础。为了促进地震工程研究发展,一些国家或地区都将收集到的地震波实现了网络共享,目前比较常用的是美国太平洋地震工程中心的 PEER/NGA 强震记录数据库,收集了自 1935 年以来的 3500 余强震记录。以此为基础作者们建立了一个小型工程用强震记录数据库,并作为结构抗震分析初选地震波的基础。

数据库中选择地震波的原则如下:①地震震级(Ms)在 6 级以上;②震中距或断层距在 20km ~ 40km 之间;③加速度峰值在 0.15g 以上;④高通滤波截止频率在 0.2Hz 以下。因受地震记录数量限制,少量不完全满足上述条件的地震波也在选择之列。这样做法的目的是:①地震能够使结构发生破坏;②减少震级、震中距和近断层地震动效应影响;③保证长周期反应谱(至少 5s)的计算精度。

该小型数据库场地分为硬土、中硬(软)土和软土三类,对应土层(30m)平均剪切波速为 $V_s = 360 \sim 750\text{m/s}$ 、 $V_s = 180 \sim 360 \text{m/s}$ 和 $V_s < 180\text{m/s}$,对应于美国 USGS 中的 B 类、C 类和 D 类,近似对应“08 细则”的 I(II)类、III类和 IV 类。文献[10]依场地条件给出了选择的地震波情况,每类场地由 10 组双向水平地震波构成(20 条地震波),尽量涵盖了造成大量现代工程结构破坏的 Northridge 地震、Kobe 地震、集集地震等事件,以使震源(断层)特性接近于随机分布。说明一点,汶川地震地震波因缺少场地条件信息而未列入;近断层地震动(脉冲)效应等也不在本文考虑之列。

图 1 ~ 图 3 给出了不同场地类别 20 条地震波的平均反应谱与对应的“08 细则”设计谱(放大系数)的

比较。总体上看:中硬场地和软土场地分别与 III 类、IV 类场地符合很好;硬土场地和 II 类场地符合较好;而 I 类场地设计谱在周期 0.3 ~ 2s 范围内与硬土场地平均谱符合不是很好,后者谱值略高,工程应用看将偏于安全。

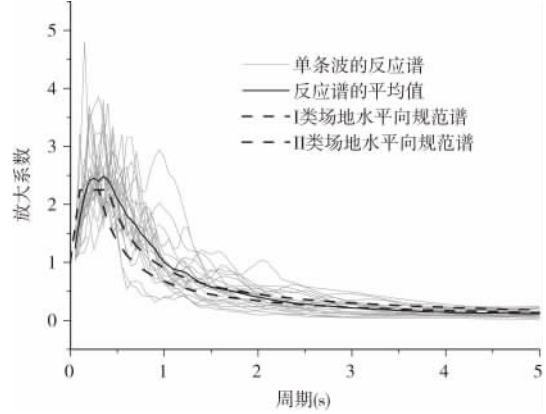


图 1 硬土场地反应谱与 I、II 类场地设计反应谱的比较
Fig. 1 Spectra of selected ground motions and code in hard site

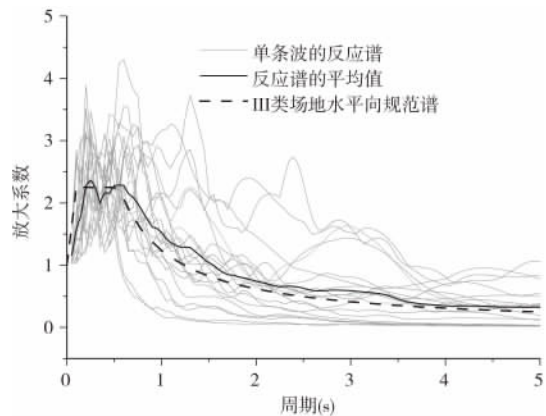


图 2 中硬土场地反应谱与 III 类场地设计反应谱的比较
Fig. 2 Spectra of selected ground motions and code in hard-soft site

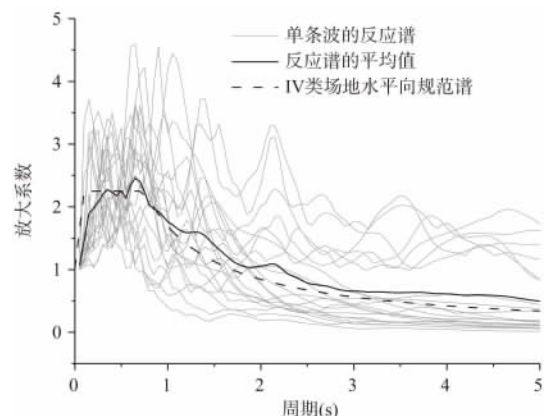


图 3 软土场地反应谱与 IV 类场地设计反应谱的比较
Fig. 3 Spectra of selected ground motion and code in soft site

实际桥梁抗震时程分析时建议:对 I (II) 类场地可从硬土地选择地震波;对 III 类和 IV 类场地可分别从中硬土和软土地中中选择地震波。

1.2 考虑高振型影响的输入地震波选择准则

为使输入地震波下建筑结构地震反应与反应谱分析统计意义上相符 杨溥等^[9]提出了双频段控制选波方法,要求输入地震波反应谱与设计谱的谱值在平

台段和结构基本周期附近相对误差最小。该方法实质上较多考虑了第 1 阶振型贡献,而高阶振型则以平台段涵盖。但高墩桥梁结构第 2、3 阶等振型对其地震反应也有较大贡献,并且其对应周期一般尚未进入到平台段。为此引入高振型影响,建议采用平台段反应谱的均值误差和对桥梁结构影响较大的前几阶周期附近反应谱的均值误差的加权平均进行控制,即:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_w &= (\bar{\beta}_w(T) - \bar{\beta}(T)) / \bar{\beta}(T) \times 100\% , & T &= [0.1, T_g] \\ \varepsilon_T &= \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \varepsilon_{Ti}}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i |\bar{\beta}_{Ti}(T) - \bar{\beta}_i(T)| / \bar{\beta}_i(T)}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \times 100\% , & T &= [T_i - \Delta T_1, T_i + \Delta T_2] \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: ε_w 为反应谱平台段的均值相对误差; ε_T 为结构各阶周期点附近谱值的均值相对误差的加权平均; $\bar{\beta}_w(T)$ 为 $[0.1, T_g]$ 范围内地震波放大系数谱均值; $\bar{\beta}(T)$ 为 $[0.1, T_g]$ 范围内规范放大系数谱平台值; ε_{Ti} 为结构第 i 阶自振周期 T_i 附近谱值均值的相对误差; $\bar{\beta}_{Ti}(T)$ 为结构第 i 阶自振周期 T_i 附近地震波放大系数谱均值; $\bar{\beta}_i(T)$ 为结构第 i 阶自振周期 T_i 附近规范放大系数谱均值; N 为考虑的结构振型数,一般取贡献较大的前几阶振型; λ_i 为结构第 i 阶自振周期 T_i 对应的均值误差的权值,可以用归一化的振型参与系数表示 $[T_i - \Delta T_1, T_i + \Delta T_2]$ 为结构第 i 阶自振周期 T_i 附近的取值范围,取 $\Delta T_1 = 0.2s, \Delta T_2 = 0.5s$ 。 T_g 为反应谱特征周期。

有必要对式(1)中加权系数 λ_i 作适当解释:一般情况下振型参与系数与振型归一化方法相关,其可正、可负且依振型无序排列。为此胡聿贤院士^[11]提出了利用无量纲振型计算的归一化振型参与系数 λ_i^* :

$$\lambda_i^* = M_i^* / \sum_j m_j \quad (2)$$

式中: M_i^* 为由无量纲振型计算的第 i 振型的广义质量, $\sum_j m_j$ 为结构体系总质量。 λ_i^* 的物理意义表述为:若将第 i 振型看做单质点体系,则为体系的广义质量与结构总质量的比。其恒为正且一般依振型增加降序排列,一定程度上反映了各个振型对结构动力反应贡献的相对大小,因此式(1)中加权系数取为 $\lambda_i = \lambda_i^*$ 。

式(2)也是 Sap2000 或 Midas 等工程软件计算振型贡献率的理论依据,在自振特性分析结果文件中可以查到。关于归一化振型参与系数 λ_i^* 的详细推导已超出本文范围,有兴趣的读者可参考文献[11]。文献[12]讨论了振型贡献率,可以证明其与文献[11]仅是说法不同,理论是一致的。

本文方法与原双频段控制选波方法相比主要优点为:引入了高振型的影响且相关参数具有明确的物理意义,并可由常用工程抗震分析软件计算,易于工程实现及和(多)振型分解反应谱法进行比较。此外因为在指定的备选数据库中选择,可保证场地条件类别相近及输入地震波的质量。

2 某百米高墩桥梁抗震时程分析实例

2.1 实例桥梁

某高墩桥梁(主桥)为跨径布置 90m + 170m + 90m 三跨一联的预应力混凝土连续刚构桥。主墩为空心薄壁墩,墩高 126.06m。全桥长 350m。桥址区抗震设防烈度为 7 度(设计基本地震加速度 0.10g),近似 II 类场地。反应谱特征周期 0.30s。

2.2 自振特性分析

利用 Midas 软件建立桥梁抗震分析模型,计算得到的结构自振周期及振型如表 1 所示。该桥基本周期约 3.91s,为横桥向振动。

表 1 实例桥梁自振特性

Table 1 Modes and periods of the bridge

振型	振型描述	周期(s)
1	梁体横桥向一阶对称弯曲,墩横桥向侧弯	3.91
2	梁体纵桥向偏移,墩纵桥向侧弯	2.72
3	梁体横桥向一阶反对称弯曲,墩横桥向反对称侧弯	2.56
4	梁体横桥向对称弯曲	1.55
5	梁体横桥向反对称弯曲	1.08
6	梁体竖向对称弯曲,墩纵桥向侧弯	0.91
7	梁体横桥向对称弯曲,墩横桥向侧弯	0.75
8	墩横桥向反对称弯曲	0.57
9	梁体竖向二阶对称弯曲,墩纵桥向侧弯	0.56
10	梁体横桥向三阶对称弯曲,墩横桥向反对称侧弯	0.55

2.3 抗震分析

分别采用“08 细则”反应谱法和时程分析计算桥梁地震反应并相互比较。作为示例假定按 E2 地震作用考虑,该桥重要性系数为 1.7,则与反应谱法对应的输入加速度峰值为 0.17g。

2.3.1 输入地震波选择

桥梁时程分析时依横桥向和纵桥向分别计算,仅输入水平向地震动。依据前述方法计算出横桥向选波周期控制指标及权系数为: $T_1 = 3.91s$ 和 $\lambda_1 = 62.4\%$; $T_4 = 1.55s$ 和 $\lambda_4 = 5.8\%$; $T_7 = 0.75s$ 和 $\lambda_7 = 2.4\%$; $T_{10} = 0.55s$ 和 $\lambda_{10} = 12.8\%$ 。纵桥向选波周期控制指标及权系数为: $T_2 = 2.72s$ 和 $\lambda_2 = 64.11\%$; $T_9 = 0.56s$ 和 $\lambda_9 = 7.18\%$ 。

依“08 细则”桥梁抗震时程分析时应选择 3 条地震波或 7 条地震波作为输入,前者取分析结果的最大值而后者取分析结果的平均值。国外较多抗震规范也有类似规定^[3]。本文以选择 3 条地震波为例(将有效降低时程分析的工作量),横、纵桥向输入地震波选择如表 2、表 3 所示:横桥向共分 2 组,第 1 组的 ε_w 和

ε_T 误差基本控制在 15%,第 2 组控制在 25% 左右,以相互比较;纵桥向选择地震波与横桥向第 1 组相同,主要原因在于横、纵桥向设计谱相同。图 4 给出了选择的第 1 组地震波的反应谱及与规范设计谱的比较,可以看出 3 条地震波的平均谱与设计谱符合较好。

2.3.2 时程分析和反应谱分析比较

图 5 给出了横桥向第 1 组地震波输入下,桥墩弯矩和剪力沿墩高分布情况。除 Bld090 地震波输入外,弯矩的时程分析结果与反应谱分析结果沿墩高分布基本相近,而剪力分析结果二者变化规律相近,但结果相差较大。横桥向时程分析弯矩结果比反应谱结果最大 28%(位于底部),剪力比反应谱结果最大 50%(位于顶部)。

图 6 给出了纵桥向第 1 组地震波输入下,桥墩弯矩和剪力沿墩高分布情况。弯矩时程计算结果与反应谱计算结果沿墩高分布较为一致,而剪力计算结果二者则相差较大。纵桥向时程分析弯矩结果比反应谱结果最大 30%(位于底部),剪力比反应谱结果最大 40%(位于底部)。

表 2 选择的时程分析地震波(横桥向)

Table 2 Selected real records as the input to the bridge seismic analysis (transverse direction)

分组	序号	台站	地震	断层距(km)	分量	PGA(g)	平台评价 ε_w	周期评价 ε_T
第 1 组	1	1095 Taft	Kern County (52/7/21, Ms7.7)	41	TAF021	0.16	9%	17%
	2	24157 LA-Baldwin	Northridge (94/1/17, Ms6.7)	31	BLD090	0.24	-4%	6%
	3	Tcu095	ChiChi (99/9/20, Ms7.6)	43	TCU095-W	0.38	12%	10%
第 2 组	1	1095 Taft	Kern County (52/7/21, Ms7.7)	41	TAF111	0.18	-0.3%	25%
	2	117 El Centro Array #9	Imperial Valley (40/5/19, Ms7.2)	8	I-ELC270	0.21	1%	29%
	3	Tcu047	ChiChi (99/9/20, Ms7.6)	33	TCU047-W	0.30	-19%	17%

表 3 选择的时程分析地震波(纵桥向)

Table 3 Selected real records as the input to the bridge seismic analysis (longitudinal direction)

分组	序号	台站	地震	断层距(km)	分量	PGA(g)	平台评价 ε_w	周期评价 ε_T
第 1 组	1	1095 Taft	Kern County (52/7/21, Ms7.7)	41	TAF021	0.16	9%	10%
	2	24157 LA-Baldwin	Northridge (94/1/17, Ms6.7)	31	BLD090	0.24	-4%	5%
	3	Tcu095	ChiChi (99/9/20, Ms7.6)	43	TCU095-W	0.38	12%	4%

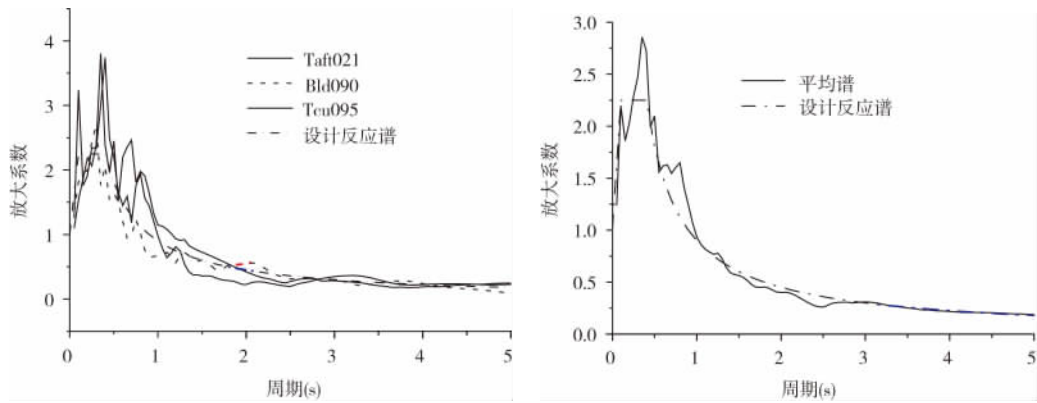


图 4 选择地震波的反应谱和规范谱

Fig. 4 Spectra of selected records and code

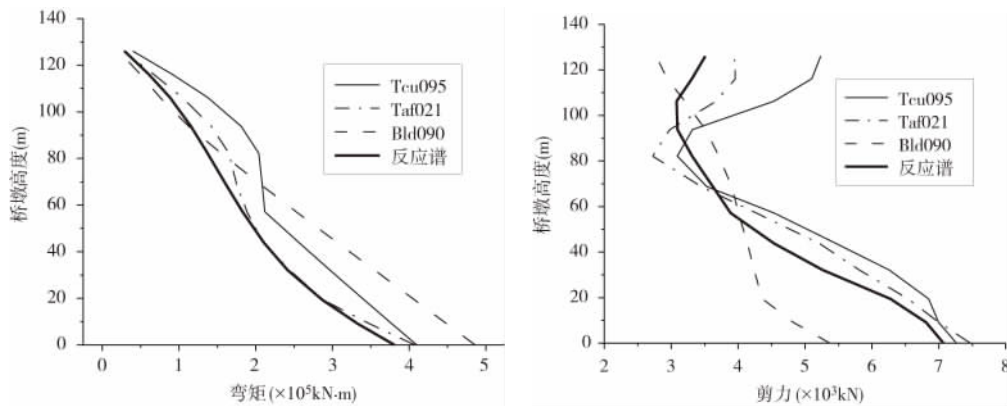


图 5 横桥向时程分析与反应谱分析结果比较(第 1 组)

Fig. 5 Compare between time history analysis and spectra analysis in transverse direction (No. 1 ground motion group)

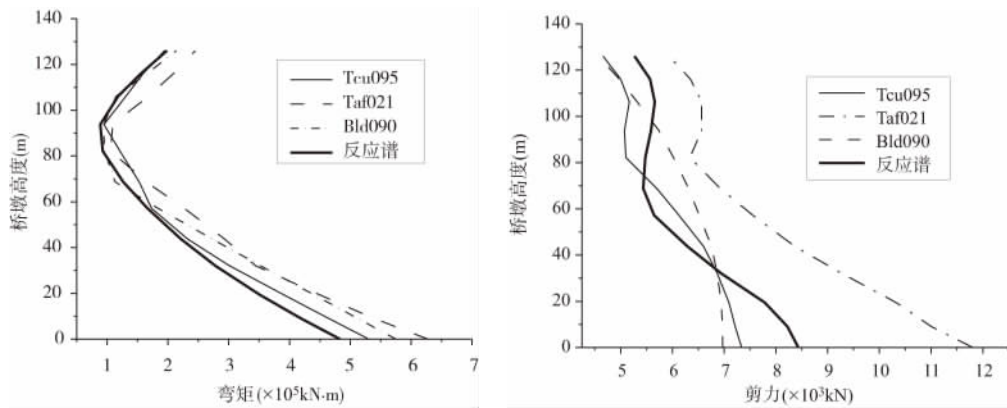


图 6 纵桥向时程分析与反应谱分析结果比较(第 1 组)

Fig. 6 Compare between time history analysis and spectra analysis in longitudinal direction (No. 1 ground motion group)

比较横、纵桥向时程分析结果,其一般大于反应谱分析结果但最大相差控制在 50% 以内,能够被设计接受。同时从安全角度强调对百米高墩桥梁采用抗震时程分析很是必要。

图 7 给出了横桥向第 2 组地震波输入下,桥墩弯矩和剪力沿墩高分布情况。与第 1 组比较可以看出时程分析和反应谱分析相差明显增加,其时程分析中弯矩结果比反应谱结果最大大 85%,剪力比反应谱结果最大大 67%。这种比较再次强调了时程分析输入地

震波选择的重要性,亦说明当 ε_w 和 ε_T 控制在 15% 以内时,本文选波方法是有效的,可以以小样本(如 3 条)实现时程结果与反应谱结果在统计意义上相符的抗震分析要求。

3 结束语

针对高墩桥梁抗震需求提出了时程分析输入真实地震波的选择方法,可满足与(设计)反应谱分析统

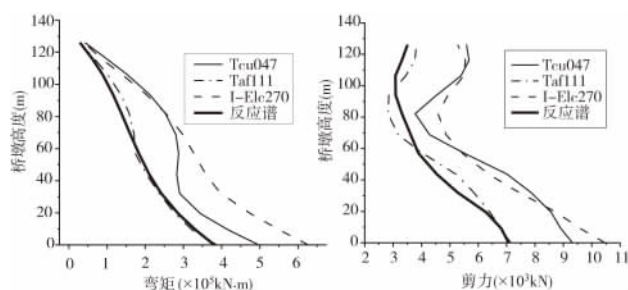


图7 横桥向时程分析与反应谱分析结果比较(第2组)

Fig.7 Compare between time history analysis and spectra analysis in transverse direction (No.2 ground motion group)

计一致性要求。首先在 PEER 强震记录数据库中选择满足震级、距离、加速度峰值及频谱特性的不同场地条件的备选地震波,形成工程用强震记录数据库。其次依场地条件,以备选地震波反应谱与设计反应谱在平台段与高墩桥梁前几阶周期点附近(平均)谱值的相对误差为双控指标,确定时程分析具体输入地震波。

本文选波方法原则可推广应用至大跨度桥梁、超高层建筑等复杂土木工程结构,但仍需在数量及质量上加强备选地震波数据库的建设。还宜进一步讨论上述选波方法在弹塑性时程分析中的必要性及有效性。

参考文献

- [1] JTJ 004—89 公路工程抗震设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1990(JTJ 004—89 Specifications of earthquake resistant design for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press,1990(in Chinese))
- [2] JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2008(JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press,2008(in Chinese))
- [3] Moehle J P. Performance-based seismic design of tall buildings in the U. S. [C]. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008
- [4] 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 and Building Press,2010(in Chinese))

王东升(1974-)男,博士,教授。主要从事桥梁及结构抗震研究。

岳茂光(1979-)男,博士,高级工程师。主要从事建筑结构分析及设计研究。

李晓莉(1977-)女,博士,讲师。主要从事桥梁设计及抗震研究。

孙治国(1980-)男,博士,讲师。主要从事桥梁及结构抗震研究。

屈浩(1986-)男,硕士研究生。主要从事桥梁抗震研究。

- [5] Bommer J J, Acevedo A B. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(S1): 43-91
- [6] 王亚勇. 关于设计反应谱、时程法和能量方法的探讨[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 21-28 (Wang Yayong. A review of seismic response spectra, time history analysis and energy method [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 21-28 (in Chinese))
- [7] Iervolino I, Cornell C A. Record selection for nonlinear seismic analysis of structures [J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(3): 685 - 713
- [8] 曲哲,叶列平,潘鹏. 建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 10-21 (Qu Zhe, Ye Lieping, Pan Peng. Comparative study on methods of selecting earthquake ground motions for nonlinear time history analyses of building structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 10-21 (in Chinese))
- [9] 杨溥,李英民,赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 33-37 (Yang Pu, Li Yingmin, Lai Ming. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33-37 (in Chinese))
- [10] 王东升,李宏男,王国新,等. 弹塑性地震反应谱的长周期特性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 49-55 (Wang Dongsheng, Li Hongnan, Wang Guoxin, et al. Study on characters of long period portion of inelastic spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(2): 49-55 (in Chinese))
- [11] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988: 227-228
- [12] 朱东生,刘世忠,虞庐松. 曲线桥地震反应研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 42-48 (Zhu Dongsheng, Liu Shizhong, Yu Lusong. Research on seismic response of curved girder bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(3): 42-48 (in Chinese))