

文章编号: 1000-4750(2011)10-0086-07

地震波的反应谱谱形对 RC 梁桥 结构非线性地震反应的影响

*陈 亮¹, 李建中²

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽, 合肥 230009; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 地震经验表明: 各类结构的震害主要表现为强震地面运动的幅值、频谱特性和持时这 3 个基本要素综合影响的结果。为了将频谱与幅值、持时的影响进行解耦, 采用实际地震波和匹配同一反应谱的人工波, 通过 IDA 分析, 对一座钢筋混凝土连续梁桥进行研究。对比强震地面运动的频谱特性特别是反应谱谱形与结构地震反应的相关性表明: 随着地面运动强度的增加以及桥梁结构非线性程度的提高, 谱形对结构非线性地震反应的影响日益显著。如果在纵桥向、横桥向存在高模态影响, 则高模态效应与谱形的影响会相互耦合, 从而进一步增强对于结构非线性地震反应的影响。对于具有不同动力特性的梁桥结构, 反应谱不同区段的谱形对于结构非线性地震反应的影响差异显著, 并对影响显著的反应谱区段进行了预计。

关键词: 桥梁抗震; 梁桥结构; 强震地面运动; 频谱特性; 反应谱谱形; 非线性地震反应

中图分类号: U442.5⁵ **文献标志码:** A

THE INFLUENCE OF RESPONSE SPECTRAL SHAPE OF EARTHQUAKE GROUND MOTIONS ON NONLINEAR SEISMIC RESPONSES OF REINFORCED CONCRETE GIRDER BRIDGE STRUCTURES

*CHEN Liang¹, LI Jian-zhong²

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in the Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Earthquake experience has shown that the comprehensive influence of key characteristics of earthquake ground motions, namely amplitude, frequency content, duration, on all kinds of structures accounted for their failure and destruction in an earthquake. The incremental dynamic analysis of a six span reinforced concrete continuous girder bridge using real accelerograms and spectral matched artificial accelerograms is performed for decoupling the influence between frequency content and duration or amplitude on structural seismic responses. The comparison of correlation between frequency content of earthquake ground motions, especially response spectral shapes and nonlinear seismic responses of RC girder bridge structures reveal that the spectral shape has more and more important influence on nonlinear seismic responses with the increase of ground motion intensity measures and the extent of nonlinearity of bridge structures. If there is a higher modal effect in the longitudinal or transverse direction of bridges, the interaction of the higher modal effect and spectral shape can enhance the influence of frequency content on nonlinear seismic responses of bridge structures. Furthermore, spectral shapes in various parts of response spectra have significantly different effects on nonlinearity of responses of bridge structures of different dynamic properties and key parts of response spectra of remarkable effects on nonlinear seismic responses of RC girder bridge structures are predicted.

收稿日期: 2010-02-03; 修改日期: 2010-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(90815007)

作者简介: *陈 亮(1980—), 男, 安徽合肥人, 讲师, 博士, 主要从事桥梁抗震、基于性能的地震工程学研究(E-mail: popecl@163.com);

李建中(1963—), 男, 湖北咸丰人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁抗震、车-桥体系振动研究(E-mail: lijianzh@mail.tongji.edu.cn).

Key words: earthquake resistance of bridge; girder bridge structure; earthquake ground motion; frequency content; spectral shape; nonlinear seismic response

影响桥梁结构非线性地震反应的不确定性因素很多,如强地面运动、钢筋、混凝土材料和阻尼等诸多因素的变异性。其中,强地面运动的变异性对桥梁结构非线性地震反应的影响最大^[1]。

对于工程抗震而言,强震地面运动的主要特性可以通过地震动的幅值、频谱特性和持时3个基本要素来表示,地震经验表明,各类结构的震害主要表现为这3个基本要素综合影响的结果^[2-3]。但对于不同的桥梁构件和体系,单个要素的影响程度却并没有系统的研究过。国外少数相关研究主要集中在建筑结构,而建筑结构和桥梁结构在结构形式和动力特性方面差异显著,不能将建筑结构中的结论直接应用于桥梁结构。因此,本文主要探讨在纵桥向、横桥向是否具有高模态效应的不同情况下,频谱特性特别是反应谱谱形对钢筋混凝土梁桥结构非线性地震反应的影响,可以对地面运动强度参数(Intensity Measures, *IM*)和实际地震波的选择以及生成合理的人工波起到指导作用。

1 桥梁结构模型

本文针对在公路和铁路桥梁中广泛使用的连续梁桥,采用某高速公路上一座变墩高的六跨非规则钢筋混凝土连续梁桥作为算例桥梁,见图1。其上部结构为预应力混凝土连续箱梁,跨径组合为 $40+4\times 60+40=320\text{m}$ 。桥墩采用独柱式钢筋混凝土墩身,墩身采用直径为1.8m的圆形实心钢筋混凝土截面。桥墩采用C40混凝土,1号~5号墩的高度分别为8m、10m、15m、10m和8m,固定墩设置在中墩,即3号墩,其余各墩为滑板支座,承台为矩形实体式,下配6根直径1.2m的钻孔灌注桩。桥台为桩柱式轻型桥台,箱式台身,矩形承台,下配双排共6根直径1.2m的钻孔灌注桩。桥台采用耳墙与路基衔接。

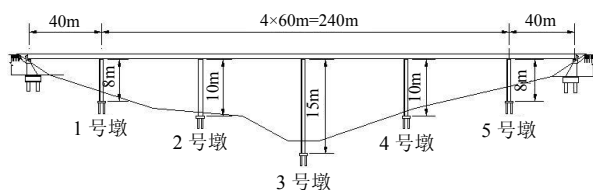


图1 算例桥梁的立面布置图 /m

Fig.1 Elevation of the selected bridge

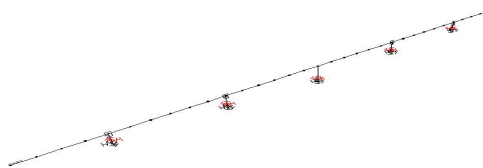


图2 算例桥梁的非线性有限元模型

Fig.2 Nonlinear finite element model of the selected bridge

算例桥梁非线性有限元模型的建立和动力分析均采用美国加州大学伯克利分校开发的有限元分析软件 OpenSEES^[4]来实现。主梁采用弹性梁柱单元进行模拟;采用弹塑性纤维梁柱单元对桥墩进行模拟,考虑了几何非线性($P-\Delta$ 效应)和材料非线性,未约束混凝土的本构关系采用 Kent-Scott-Park 模型^[5],约束混凝土的本构关系采用 Mander 模型^[6],二者均采用 Concrete01 单元模拟,但对于不同的本构其相应的应力、应变值不同;钢筋的本构关系采用 Giuffrè-Menegotto-Pinto 模型^[7],并考虑 Bauschinger 效应,采用 Steel02 单元模拟;纵桥向活动支座采用聚四氟乙烯板式橡胶支座,其恢复力-位移模型为双线性的^[8],采用 zero-Length spring 单元模拟^[9];通过土弹簧考虑土-结构相互作用,采用 zeroLength 单元模拟土弹簧^[9];为了使桥墩地震需求最大化,桥台利用滚动支承模拟^[10]。算例桥梁的非线性有限元模型见图2。

2 算例桥梁的动力特性

算例桥梁结构动力特性见表1,在表1中只列出了纵桥向、横桥向模态质量参与系数占主导地位的几阶模态的周期、频率和质量参与系数。从表1分析可知,由不同的有限元分析软件 SAP2000 和 OpenSEES 计算所得算例桥梁的动力特性基本一致,且纵桥向、横桥向质量参与系数占主导地位的模态振型、周期、频率以及质量参与系数基本一致,说明按照以上材料本构关系和建模原则建立的模型是基本正确的。

对于算例桥梁,在纵桥向只有第一周期的模态质量参与系数占绝对主导地位,达到95%以上。但在横桥向,算例桥梁有2个周期的模态质量参与系数均较大,分别达到67%和21%,其他均小于5%,这说明算例桥梁在横桥向存在着高模态的影响。

表 1 算例桥梁的动力特性

Table 1 Dynamic properties of the selected bridge

模型	振型阶数	周期/s	频率/Hz	振型特征	质量参与系数
SAP2000 模型	1	4.724	0.212	纵向振动	0.961
	2	1.127	0.887	横向振动	0.674
	4	0.511	1.958	横向振动	0.211
OpenSEES 模型	1	4.725	0.212	纵向振动	0.986
	2	1.134	0.882	横向振动	0.672
	7	0.514	1.946	横向振动	0.207

3 工程需求参数(EDP)的选择

在基于性能的地震工程学中,结构的地震需求需要利用结构的地震反应参数来描述,称之为工程需求参数(Engineering Demand Parameters, EDP)。在本文中,对于桥梁结构地震反应依然称之为 EDP。

针对连续梁桥最易损的构件:支座和桥墩,并考虑到落梁震害的问题,选择 4 个工程需求参数作为研究对象。其中,在纵桥向选择梁端和支座的最大位移、墩顶漂移比和桥墩标准化滞回能量(桥墩 NHE),但由于边墩和次边墩均设置了非线性支座,因此固定墩(中墩)的位移和受力要远大于边墩和次边墩,故墩顶漂移比和桥墩标准化滞回能量只考虑中墩。在横桥向只考虑墩顶漂移比和桥墩标准化滞回能量。所选择工程需求参数的具体定义如下。

1) 支座纵桥向最大位移(位移 EDP):纵桥向非线性支座的最大位移。

2) 梁端纵桥向最大位移(位移 EDP):主梁梁端在纵桥向的最大位移,因为梁端位移过大时可能会导致落梁震害。

3) 墩顶漂移比(位移 EDP)^[11]:定义为在整个地震过程中,墩顶的最大绝对位移与桥墩高度之比,反映了桥墩结构在地震作用下的最大变形能力,具

体见下式:

$$d = \frac{|u|_{\max}}{H} \quad (1)$$

其中: $|u|_{\max}$ 为墩顶的最大绝对位移; H 为墩高。

4) 桥墩标准化滞回能量(能量 EDP),桥墩 NHE^[12]:定义为在整个地震过程中,所有反应循环吸收的总滞回能量除以两倍的屈服应变能,表明桥墩结构在整个地震期间所耗散地震能量的大小,反映了桥墩结构抗震性能的好坏,具体见下式:

$$\text{NHE} = \frac{\sum_1^N (\oint_i R_u du)}{R_y \cdot u_y} \quad (2)$$

其中: R_y 为桥墩结构的屈服力; N 为地震波作用下反应循环的次数; R_u 为桥墩结构的地震反应力时程; du 为位移增量; 循环积分 \oint_i 代表在第 i 个反应循环中力-位移曲线所包围的面积; $\sum_1^N (\oint_i R_u du)$ 表示在整个地震期间所有反应循环中吸收的总滞回能量。

4 地面运动的选择

在选择地面运动时,采用 30m 表层土的平均剪切波速 V_{S30} 来量化局部场地土壤条件,共选择 5 条地震波即 Wave1~Wave5。其中, Wave1~Wave3 为实际地震波(所选地震波资料见表 2), Wave4 和 Wave 5 为谱匹配的人工波,5 条地震波调幅后的反应谱见图 3,持时统计分析见表 3。本文所有的人工波均采用美国加州大学伯克利分校开发的人工波生成软件 SIMQKE-1^[13]生成,其具体参数为:震级 $M=6.5$, 距离 $R=30\text{km}$, $V_{S30}=300\text{m/s}$, 自然持时 $=35\text{s}$, 时间间隔 $=0.01\text{s}$ 。

表 2 所选实际地震波资料

Table 2 Selected real earthquake ground motions

实际地震波	地震	站点	文件名	震级	$V_{S30}/(\text{m/s})$	J-B Distance/km	Closest Distance/km	PGA/g
Wave1	Imperial Valley-06	Delta	IMPVALL/H-DLT352	6.53	274.50	22.03	22.03	0.35
Wave2	Chi-Chi, Taiwan	TCU112	CHICHI/TCU112-E	7.62	215.00	27.50	27.50	0.08
Wave3	Imperial Valley-06	Delta	IMPVALL/H-DLT262	6.53	274.50	22.03	22.03	0.24

表 3 所选地震波的持时统计分析

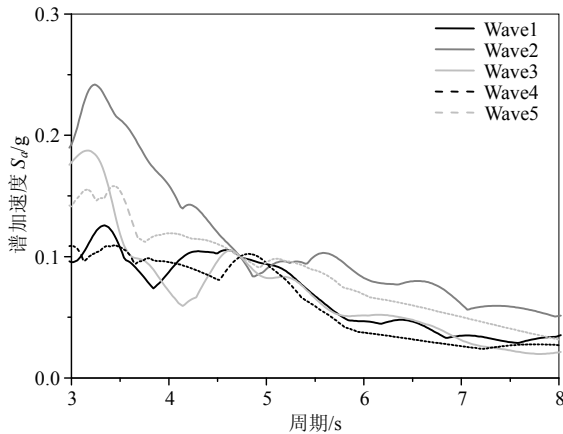
Table 3 Statistical analysis of the duration of selected earthquake ground motions

持时/s	Wave1	Wave2	Wave3	Wave4	Wave5
一致持时	50.00	53.32	62.14	26.41	26.54
括号持时	88.26	64.60	91.08	33.67	33.65
5%~95%显著持时	50.33	49.14	51.05	22.86	22.58
自然持时	99.92	90.00	99.92	35.00	35.00

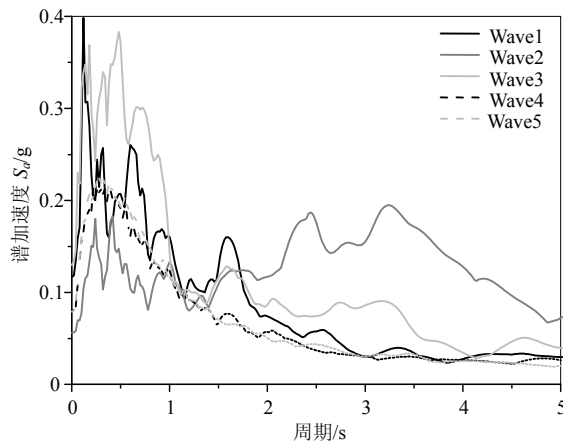
从表 3 分析可知, Wave1~Wave 3 的一致持时、括号持时、5%~95%显著持时以及自然持时均比较接近, Wave4 和 Wave5 的各种持时则基本一致,通过合理地调整幅值,例如将不同地震波反应谱在某一特定周期处的谱值调整到一致,可以将频谱与持时、幅值的耦合影响进行解耦,从而更加明确频谱特性特别是反应谱谱形对于梁桥结构地震需求的

影响，还可以通过增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)^[14-15]研究谱形随着地面运动强度的增大对于梁桥结构非线性地震反应的影响。

分析图 3 可知，在调整幅值后，5 条地震波的反应谱差异较大，且在 T_1 两侧以及 T_2 两侧反应谱区段内的谱形变化规律差异显著。这样可以更加清晰分析谱形对于连续梁桥结构不同构件非线性地震反应的影响。



(a) $T_1=4.7s$



(b) $T_2=1.1s$

图 3 Wave1~Wave5 的加速度反应谱分别在周期 $T_1=4.7s$ 和 $T_2=1.1s$ 处的谱值调整到相同强度(0.1g)

Fig.3 Spectral values of acceleration response spectra of Wave1-Wave5 at the different periods of $T=4.7s$ and $T=1.1s$ are scaled to the same intensity of 0.1g respectively

5 非线性地震反应分析

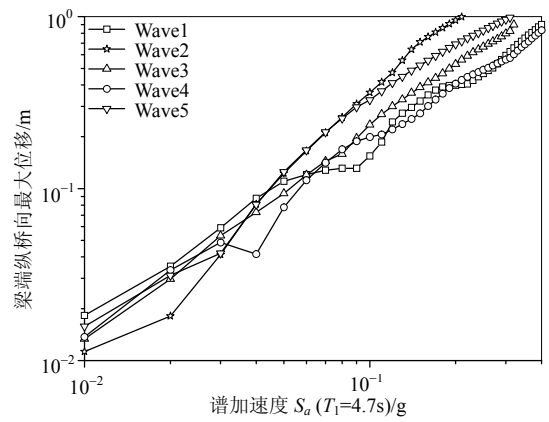
在基于性能的地震工程学中，采用地面运动强度参数(IM)表示工程场地的地震活动性，将工程场地的地面运动危险性进行量化。通常采用地震动的某种幅值作为 IM，如结构某一特定周期的谱幅值

(谱加速度 S_a 、谱速度 S_v 和谱位移 S_d 等)、峰值地面运动加速度(PGA)等。在桥梁抗震领域主要采用谱加速度作为 IM，因为谱加速度可以将地面运动强度水平与结构地震反应水平有效地联系起来，并提高对于结构地震反应的预计精度和计算效率。

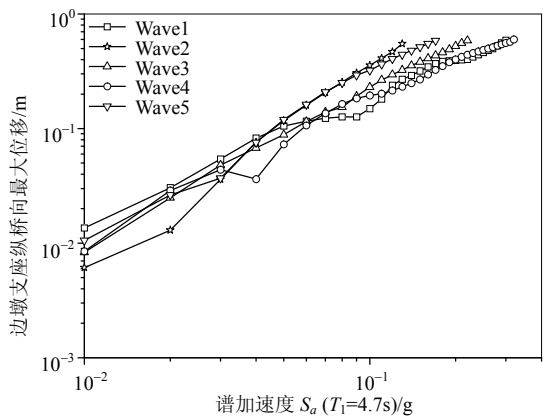
在本文的非线性地震反应分析中，在纵桥向、横桥向分别采用质量参与系数最大的一阶模态周期的弹性谱加速度(5%阻尼比)作为地面运动强度参数(IM)，即在纵桥向、横桥向分别采用 $S_a(T_1=4.7s)$ 和 $S_a(T_2=1.1s)$ 作为 IM，将 5 条地震波在 T_1 和 T_2 周期处的谱加速度分别调整到相同的强度水平，进行纵桥向、横桥向的 IDA 分析。计算结果分析如下。

5.1 纵桥向

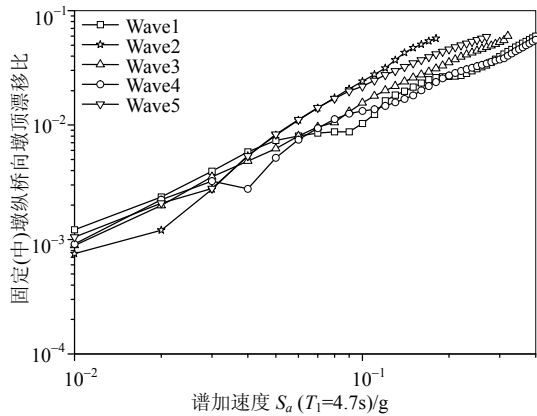
分析图 4(a)~图 4(d)可知，对于纵桥向的(梁端、支座和桥墩)位移 EDP，随着 IM 的增加，同一条地震波计算所得不同构件位移 EDP 的 IDA 曲线整体变化趋势(形状)是比较接近的，这说明频谱特性特别是谱形对于不同构件纵桥向位移 EDP 的影响是基本一致的。因此，对于相同的地震波或地震灾害环境，在纵桥向如果没有高模态的影响，那么只要获得某一个重要构件(如桥墩)的位移 EDP 变化规



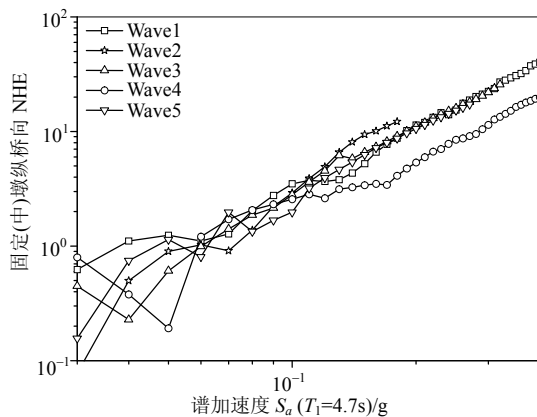
(a)



(b)



(c)



(d)

图4 由 Wave1~Wave5 计算所得算例桥梁纵桥向非线性地震反应的 IDA 曲线(对数坐标系)

Fig.4 IDA curves of nonlinear seismic responses calculated by Wave1-Wave5 in the longitudinal direction of the selected bridge

律,那么也可以大致推导出其他重要构件(如支座和梁端)的位移 EDP 变化规律。因此,以固定墩(中墩)的纵桥向墩顶漂移比和 NHE 为例,分析谱形对于连续梁桥结构纵桥向非线性地震反应的影响。

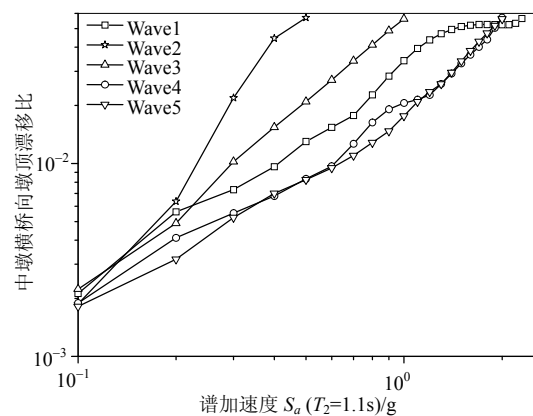
对于纵桥向,分析图 3(a)可知,五条地震波的反应谱在 $T_1=4.7s$ 两侧的变化规律差异显著,在 $T \geq T_1=4.7s$ 范围内谱形的变化规律基本上是 $Wave2 > Wave5 > Wave3 \geq Wave1 \geq Wave4$,只是在 $4.7s \leq T_1 \leq 5.0s$ 的小范围内谱形变化规律有一些差别,即 $Wave4 > Wave1 > Wave5 \geq Wave3 > Wave2$,但谱值之间的差异较小。从图 4(c)分析可知,固定墩的纵桥向墩顶漂移比 IDA 曲线变化规律与 $T \geq T_1$ 范围内谱形变化规律是基本对应的,但与 $T < T_1$ 范围内谱形变化规律有较大差异。例如,在 $0.01g \leq S_a(T_1=4.7s) \leq 0.03g$ (小幅值)范围内即小非线性情况下,固定墩的纵桥向墩顶漂移比 IDA 曲线是比较接近的,其具体大小规律基本上是 $Wave1 \geq Wave4 \geq$

$Wave3 \geq Wave5 \geq Wave2$,这与 $4.7s \leq T_1 \leq 5.0s$ 范围内谱形变化规律是比较接近的。随着 IM 的增加,结构的非线性程度不断提高,固定墩的纵桥向墩顶漂移比 IDA 曲线变化规律与 $T \geq T_1$ 范围内谱形变化规律的对应性也越来越强,基本上是 $Wave2 > Wave5 > Wave3 \geq Wave1 \geq Wave4$ 。分析图 4(d)可知,对于固定墩的纵桥向 NHE,随着 IM 的增加,IDA 曲线的变化规律与 $T \geq T_1$ 范围内谱形变化规律也具有一定的对应性,但较之墩顶漂移比要差一些,这可能主要是因为能量 EDP 受到地震波持时以及结构受力等因素的影响较大。

综上所述,对于梁桥结构体系处于非线性状态下,如果在纵桥向只有一阶模态(周期为 T_h)的质量参与系数占绝对主导地位,那么在 $T < T_h$ 区段内的反应谱谱形对结构非线性地震反应影响甚微,但在 $T \geq T_h$ 区段内反应谱谱形的影响显著。谱形的变化规律与结构非线性地震反应的变化规律密切相关,且这种趋势随着地面运动强度的增大而愈明显。

5.2 横桥向

由于边墩、次边墩和中墩的位移及能量 EDP 的 IDA 曲线变化趋势基本相同,故仅以固定墩的横桥向墩顶漂移比和桥墩 NHE 为例,分析谱形对于连续梁桥结构横桥向非线性地震反应的影响,这也说明随着 IM 的增加,横桥向的情况与纵桥向较为接近,反应谱谱形对于不同桥墩位移和能量 EDP 的影响也是基本一致的。分析图 5 可知,同一条地震波计算所得位移和能量 EDP 的 IDA 曲线整体变化趋势(形状)有一定差异,这主要是因为持时以及结构受力等因素对于能量 EDP 的影响显著而对位移 EDP 的影响甚微。在相同的地震波或地震灾害环境,在横桥向也可只获得某一个重要构件(如中墩)的位移和能量 EDP 变化规律,便可推知其它构件的情况。



(a)

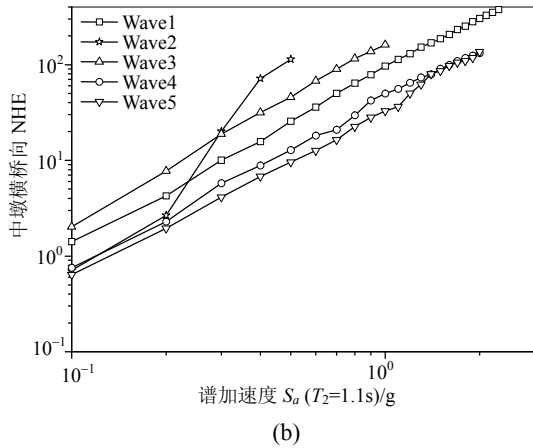


图5 由 Wave1~Wave5 计算所得算例桥梁横桥向非线性地震反应的 IDA 曲线(对数坐标系)

Fig.5 IDA curves of nonlinear seismic responses calculated by Wave1-Wave5 in the transverse direction of the selected bridge

对于横桥向,分析图 3(b)可知,五条地震波的反应谱在 $T_2=1.1s$ 两侧的变化规律差异显著,当 $T \geq T_2=1.1s$ 时 5 条反应谱谱形的具体变化规律是: ① 在 $1.1s \leq T_2 \leq 1.6s$ 范围内基本上是 $Wave1 \geq Wave3 \geq Wave2 > Wave4 \geq Wave5$, 但谱值之间的差异较小; ② 在 $T_2 > 1.6s$ 范围内基本上是 $Wave2 > Wave3 > Wave1 > Wave4 \geq Wave5$, 且在 $T_2 \geq 5.0s$ 时, $Wave1$ 与 $Wave4$ 和 $Wave5$ 的反应谱开始逐渐接近。分析图 5(a)可知,对于固定墩的横桥向墩顶漂移比: ① 在 $0.1g \leq S_a(T_2=1.1s) \leq 0.2g$ 即小非线性情况下, 5 条 IDA 曲线与 $1.1s \leq T_2 \leq 1.6s$ 范围内谱形的变化规律相对应; ② 在 $S_a(T_2=1.1s) > 0.2g$ 时, 5 条 IDA 曲线与 $T_2 > 1.6s$ 范围内谱形的变化规律相对应。而且随着 IM 的增加, IDA 曲线与谱形的变化规律对应性也越来越强。分析图 5(b)可知,对于固定墩的横桥向 NHE, 随着 IM 的增加, IDA 曲线的变化规律与 $T \geq T_2=1.1s$ 范围内谱形变化规律也具有一定的对应性, 但较之墩顶漂移比要差一些, 其原因与纵桥向相同。同时还可以发现, 横桥向地震反应与 $T \geq T_2=1.1s$ 范围内谱形变化规律的对应性要差于纵桥向, 这主要是由于横桥向存在高模态效应, 在 $T \geq T_7=0.5s$ 范围内的反应谱谱形对于横桥向非线性地震反应也有一定影响, 其影响程度与高阶模态的质量参与系数贡献率大小以及谱形差异程度密切相关。

而且,当采用某一特定周期的谱加速度作为 IM 时,在非弹性结构的 IDA 分析中经常出现两种反常的现象: ① IDA 曲线并非是单调增加的, 而是很不

规则的曲线, 甚至有可能出现当地面运动强度水平 $IM_2 > IM_1$ 时, 计算出的工程需求参数 $EDP_2 < EDP_1$; ② 当 $IM_2 > IM_1$ 时, 在 IM_1 水平下计算不收敛, 在 IM_2 水平下却计算收敛。引起这些反常现象的一个重要原因也是反应谱谱形的变化。因为, 结构进入非线性后, 各阶周期不断延长, 当地面运动强度水平 $IM_2 > IM_1$ 时, 在 IM_2 水平下, 结构进入非线性的速度和程度均比 IM_1 要大, 导致实际的 IM_2 随着谱形不断衰减的速度和程度也要大于 IM_1 , 甚至造成实际的 $IM_2 < 实际的 IM_1$, 从而出现了以上的两种反常现象。在弹性结构的 IDA 分析中则不会出现这样的反常现象, 其原因也是在弹性范围内, 结构各阶周期不会发生变化, 当采用某一特定周期的谱加速度作为 IM 时, 影响结构地震反应的主要因素是幅值(谱加速度)的大小, 而整个反应谱的谱形影响甚微。

从以上的分析可知, 在抗震设计和分析中必须要考虑地震波频谱特性特别是反应谱谱形对于结构非线性地震反应的影响, 不能只考虑基本周期 T_1 , 需要考虑在 $T > T_1$ 的一段周期范围内的反应谱。ASCE 7-02 (2002, section 9.5.7.2.1)^[16] 建议采用 $0.2T_1$ 到 $1.5T_1$ 作为感兴趣的周期范围。文献[17]通过研究发现周期范围也可以根据结构的软化程度来确定, 经验上与地震波产生的非线性位移水平(可以用延性系数 μ 来表示)有关, 最低频率 f_μ 应该为 $1/(\mu)^{1/2}$ 乘以结构第一模态频率 f_0 , 见式(3)。UBC1997^[18] 建议对于时程分析所感兴趣的频率范围是 $3/2f_0 \sim 5f_0$, f_0 为结构的基频。本文通过分析建议: 对于梁桥结构, 在地面运动强度不大的情况下, 可以采用 $T_h \sim 2.0T_h$ (T_h 为纵桥向、横桥向质量参与系数贡献显著的一阶模态周期)作为感兴趣的周期范围, 在地面运动强度较大的情况下, 这个范围可以继续延长, 一般可以延长至 $3.0T_h \sim 5.0T_h$ 。

$$f_\mu = 1/(\mu)^{1/2} \cdot f_0 \quad (3)$$

其中: f_μ 为最低频率, 对应于最大周期; μ 为延性系数; f_0 为结构的基频。

对于同一个工程场地, 历史上已经发生过的以及未来可能发生的地震其震级 M 和距离 R 都是不一样的, 即使是具有相同 M 和 R 的地震在同一个工程场地处所产生地震波的频谱特性也差异显著。频谱特性的差异与桥梁结构动力特性(如基本周期等)的差异这二者的耦合作用会对结构地震反应产生巨大影响。而且, 在国际地震工程和结构抗震领

域,对于人工波的正确性存在着很大的争议。因此,为了预计在特定工程场地处,桥梁结构可能会遭受到的峰值反应和破坏规律,就必须要选择具有合理频谱特性的实际地震波作为输入地面运动,进行非线性动力分析,而不仅仅是根据 M 、 R 等来选择实际地震波,这正是桥梁抗震设计、分析以及研究所必须要进行的重要工作。

6 结论

本文主要研究了连续梁桥结构处于非线性状态时,强震地面运动的频谱特性特别是反应谱谱形对于连续梁桥结构非线性地震反应的影响。针对连续梁桥最易损的构件:支座和桥墩,并考虑到落梁震害的问题,选择 4 个工程需求参数(EDP)作为研究对象,即纵桥向支座最大位移、纵桥向梁端最大位移、纵桥向、横桥向墩顶漂移比和桥墩标准化滞回能量,分别代表桥梁结构在地震作用下的位移 EDP 和能量 EDP。通过以上分析,可以得到以下结论:

(1) 当梁桥结构体系处于非线性状态时,如果在纵桥向、横桥向只有一阶模态(周期为 T_h)的质量参与系数占绝对主导地位,那么在 $T < T_h$ 区段的反应谱谱形对结构非线性地震反应几乎没有影响,但在 $T \geq T_h$ 区段的反应谱谱形对结构非线性地震反应影响显著,且这种影响随着地面运动强度水平(幅值)的增大而愈发明显。

(2) 当梁桥结构体系处于非线性状态时,如果纵桥向、横桥向有多阶模态(周期分别为 T_{h1} 、 $T_{h2} \cdots T_{hm} \cdots T_{hn}$,且 $T_{h1} < T_{h2} \cdots < T_{hm} \cdots < T_{hn}$)的质量参与系数贡献显著即存在高模态效应,则在 $T \geq T_{h1}$ 、 \cdots 、 $T \geq T_{hn}$ 区段的反应谱谱形均会对结构非线性地震反应产生影响,且这种影响与高模态效应的程度以及在上述区段内反应谱的差异程度密切相关,但 $T < T_{h1}$ 范围内的谱形对结构非线性地震反应影响甚微。

(3) 通过分析表明在地面运动强度不大即中小非线性的情况下, $1.0T_{hm} \sim 2.0T_{hm}$ (T_{hm} 为质量参与系数贡献显著的一阶模态周期)范围内的反应谱谱形对梁桥结构非线性地震反应影响显著;在地面运动强度较大即大非线性的情况下,这个范围可以延长到 $3.0T_{hm} \sim 5.0T_{hm}$ 。

(4) 地震波的频谱特性特别是反应谱谱形对梁桥结构非线性地震反应的影响显著。对于不同动力特性的梁桥结构,不同频谱的地震波引起的非线性

地震反应差异显著,而且这种差异随着地面运动强度的增大而增大。因此,选择频谱特性合理的地震波,使其能够正确代表工程场地处实际的地面运动危险性水平对于抗震设计和分析是非常关键的。

参考文献:

- [1] Lee T H, Mosalam Khalid M. Probabilistic seismic evaluation of reinforced concrete structural components and systems [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 2006/04.
- [2] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 第 2 版. 北京: 地震出版社, 2006: 150—173.
Hu Yuxian. Introduction to earthquake engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Earthquake Publishing House, 2006: 150—173. (in Chinese)
- [3] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 第 1 版. 北京: 地震出版社, 1992: 46—74.
Li Jie, Li Guoqiang. Introduction to earthquake engineering [M]. 1st ed. Beijing: Earthquake Publishing House, 1992: 46—74. (in Chinese)
- [4] PEER. OpenSEES – The open system for earthquake engineering simulation [OL]. <http://peer.berkeley.edu/products/opensees.html>. 2008.
- [5] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1971, 97(7): 1969—1990.
- [6] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1988, 114(8): 1804—1826.
- [7] Menegotto M, Pinto P E. Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]. Proceedings of the IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures. Lisbon, 1973: 15—22.
- [8] 范立础, 聂利英, 李建中. 地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 30—35.
Fan Lichu, Nie Liying, Li Jianzhong. Elastic-plastic fiber beam-column element and its parametric analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 30—35. (in Chinese)
- [9] Kunnath S K. Application of the PEER PBEE methodology to the I-880 viaduct [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2007.

(参考文献[10]—[18]转第 110 页)

- of catastrophic landslides [J]. *Rock Mechanics*, 1973, 5: 231—236.
- [13] 贺可强, 王胜利, 阳吉宝. 运用遗传算法求解土钉支护结构的整体稳定性系数[J]. *岩土力学*, 2003, 24(3): 355—358.
He Keqiang, Wang Shengli, Yang Jibao. The research of genetic algorithms applied to solving coefficient of integral stability of soil-nail braced structure [J]. *Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3): 355—358. (in Chinese)
- [14] Byrne R J, Cotton D, Porterfield J, Wolschlag C, Uebliacker G. Manual for design and construction monitoring of soil nail walls [M]. FHWA-SA-96-069R, Federal Highway Administration, Washington, DC 1998.
- [15] JGJ120-99, 建筑深基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
JGJ120-99, Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese)

(上接第 92 页)

- [10] Kevin M, Bozidar S. Seismic demands of performance-based design of bridges [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley. PEER Report, 2003/08.
- [11] Kevin M, Bozidar S. Seismic demands of performance-based design of bridges [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley. PEER Report, 2003/8.
- [12] Shome N, Cornell C A, Bazzurro P, Carballo J E. Earthquakes, records and nonlinear responses [J]. *Earthquake Spectral*, 1998, 14(3): 469—500.
- [13] University of California, Berkeley. SIMQKE-1 [OL]. <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Software/SIMQKE1ZIP>. 2008.
- [14] Vamvatsikosa D, Cornell C A. Applied incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2): 523—553.
- [15] Vamvatsikosa D, Cornell C A. The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering [C]. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 479. 2002.
- [16] American Society of Civil Engineers. ASCE standard: Minimum design loads for buildings and other structures [S]. American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE 7-02, Reston, VA. 2002.
- [17] Kennedy R P, Short S A, Mertz K L, Tokarz F Z, Idriss I M, Power M S, Sadigh K. Engineering characterization of ground motion – task I: Effects of characteristics of free-field motion on structural response [R]. NUREG/CR-3805, U.S. nuclear regulatory commission, Washington, D.C., 1984.
- [18] UBC, Structural engineering design provisions [S]. Uniform Building Code, Vol. 2; International Conference of Building Officials, 1997.