

文章编号: 1000-4750(2014)10-0056-06

# 桥墩抗震性能评估的适用近场地震动强度参数研究

申彦利<sup>1</sup>, 杜修力<sup>1</sup>, 杨庆山<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 为研究适用于桥墩结构抗震性能评估的近场地震动强度参数, 建立了具有不同周期的 3 个钢筋混凝土墩柱模型, 选取大量实际地震记录组成地震记录库, 利用增量动力分析和统计推论的方法研究了非弹性位移响应谱值作为近场地震动强度参数在评估桥墩抗震性能时的适用性, 研究表明, 相比弹性位移响应谱值, 非弹性位移响应谱值是更适用的近场地震动强度参数, 可以用来进行基于概率的桥墩结构抗震需求分析。研究结果具有一定的学术和工程应用价值。

**关键词:** 近场地震动; 强度参数; 增量动力分析; 非弹性位移响应谱值; 抗震需求分析

**中图分类号:** P315.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0227

## RESEARCH ON APPLICABLE INTENSITY MEASURE OF NEAR-FAULT GROUND MOTION FOR EVALUATING PIER'S ASEISMIC PERFORMANCE

SHEN Yan-li<sup>1</sup>, DU Xiu-li<sup>1</sup>, YANG Qing-shan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To obtain the most applicable intensity measure of a near-fault ground motion for evaluating the aseismic performance of a pier, three pier models with different natural periods were established and a suit of real ground motion records was selected to establish a record base. By using incremental dynamic analysis and statistic inference method, the applicability of an inelastic response-spectrum displacement as the intensity measure of a near-fault ground motion was observed when evaluating the aseismic performance of a pier. The study shows that the inelastic response-spectrum displacement is a more applicable intensity measure than a response-spectrum acceleration and can be used to perform the probabilistic demand analysis of a pier structure. The results has important academic significance and realistic value.

**Key words:** near-fault ground motion; intensity measure; increment dynamic analysis; inelastic response spectrum displacement; probabilistic demand analysis

地震的发生是随机的, 对于建筑结构而言, 强地震作用是一种偶然作用, 地震导致的结构损伤也具有强烈的随机性; 另外, 建筑结构的几何和材料特性也具有随机性, 上述两种随机性使得结构的地

震响应具有明显的随机特征。强震作用下的结构抗震性能的评估本质上具有强烈的概率特性。

美国地震工程学者(Cornell 和 Krawinkler<sup>[1]</sup>; Moehle 和 Deierlein<sup>[2]</sup>)用结构响应关于给定响应水

收稿日期: 2013-03-20; 修改日期: 2013-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378169, 51178008); NSFC-JST 项目(51021140003); 河北省自然基金项目(E2013402072)

通讯作者: 申彦利(1977—), 男, 河北邯郸人, 副教授, 博士, 系主任, 主要从事地震工程方面的研究(E-mail: shenyanli@hebeu.edu.cn).

作者简介: 杜修力(1963—), 男, 四川广安人, 教授, 博士, 院长, 主要从事岩土工程和地震工程研究(E-mail: duxl@jwhr.com);

杨庆山(1968—), 男, 河北晋州人, 教授, 博士, 副院长, 主要从事风工程和地震工程研究(E-mail: qshyang@bjtu.edu.cn).

平  $x$  的年平均超越频率  $\lambda_{EDP}(x)$  来评估结构的抗震性能,  $\lambda_{EDP}(x)$  为使用年限内(如我国通常采用的 50 年)结构的工程需求参数  $EDP$  大于  $x$  的概率。为提高  $\lambda_{EDP}(x)$  的求解效率, Cornell 利用中间变量  $IM$ (也即地震动的强度参数)将场地地震危险性分析和结构非线性动力分析解耦, 以更有效率的方式求得  $\lambda_{EDP}(x)$ , 这种结构抗震性能评估方法被称为基于强度参数  $IM$  的结构概率地震需求分析。

在上述方法中, 强度参数  $IM$  是最重要的一个中间变量, 其选择对结构的概率地震需求分析至关重要<sup>[3]</sup>。Tothong 和 Cornell<sup>[4]</sup>的研究结果表明, 强度参数应具有有效性, 充分性和比例鲁棒性。选择合适的地震动强度参数是做好基于概率的结构抗震性能评估的前提。

已有地震灾害表明, 在近场地区, 建筑物会遭受比远场地震动更强的破坏。在垂直于场滑动的方向上, 近场地震动记录的速度时程中常含有明显的脉冲, 这一特点导致近场地震动作用下结构非线性响应更大<sup>[5-6]</sup>。评估近场地震动作用下的结构非线性地震响应, 进而评估结构的抗震性能具有重要的现实意义, 而选择适用的近场地震动强度参数是基于概率评估近场地震动作用下结构抗震性能的前提。

作者在另一篇文章<sup>[7]</sup>中探讨过非弹性位移响应谱值作为近场地震动(尤其是脉冲型近场地震动)的强度参数预测结构地震响应的可能性, 研究结果表明, 非弹性位移响应谱值在预测结构地震响应方面具有更好的有效性。本文中, 作者将进一步从结构概率地震需求分析的角度研究非弹性位移响应谱值作为近场地震动强度参数的适用性。

本文中, 作者将选择近场地震动记录组成地震记录库并建立 3 个具有不同自振周期的钢筋混凝土墩柱结构模型来研究非弹性位移响应谱值作为近场地震动强度参数的适用性, 也即考察其有效性、充分性和比例调整鲁棒性。

## 1 相关理论

### 1.1 概率地震需求分析(PSDA)

根据基于地震记录强度参数( $IM$ )的概率地震需求分析理论, 给定  $IM$  水平下的工程需求参数  $EDP|IM$  的评估和基于  $IM$  的地震动危险性分析联合起来可以得到超越给定  $EDP$  水平的年平均频率, 如

下式所示<sup>[4]</sup>:

$$\lambda_{EDP}(y) = \int_{IM} G_{EDP|IM}(y|im) \left| \frac{d\lambda_{IM}(im)}{dim} \right| dim \quad (1)$$

式中:  $y$  为给定的  $EDP$  水平, 一般为结构性能极限状态所对应的  $EDP$  水平;  $\lambda_{EDP}(y)$  为  $EDP$  超越  $y$  的年平均频率;  $G_{EDP|IM}(y|im)$  为  $IM=im$  时,  $EDP > y$  的概率, 由增量动力分析得到;  $\lambda_{IM}(im)$  是  $IM$  关于  $im$  的年平均超越频率, 由概率地震危险性分析得到。

### 1.2 增量动力分析法(IDA)

结构的某一功能要求或指定极限状态的年平均超越频率是结构工程师关注的首要问题。当前, 解决此问题比较有效的方法是增量动力分析法(Incremental Dynamic Analysis, 简称 IDA)<sup>[8]</sup>, IDA 通过强度参数对地震动记录进行多次增量调幅来形成增量的地震激励, 在不同强度参数水平下的地震激励作用下对结构进行非线性动力分析, 由此进行能力评估。

## 2 强度参数的适用性研究

作者的先前研究<sup>[7]</sup>发现, 考不考虑刚度退化对响应预测的结果影响不大。本研究在求解非弹性位移响应谱值时采用双线性振子, 屈服后刚度比为 5%, 阻尼比为 5%, 不考虑刚度退化。

非弹性位移响应谱值要作为近场地震动的强度参数应该具有有效性、充分性和比例调整鲁棒性。另外, 依据结构动力学理论, 结构的自振周期从小到大增加时, 结构的地震响应会依次敏感于地震动的加速度、速度和位移。

为研究非弹性位移响应谱值的对应于不同自振周期结构的适用性, 作者构造了具有短周期(对应于加速度敏感区, 以下称 M-1)、中等周期(对应于速度敏感区, 以下称 M-2)、长周期(对应于位移敏感区, 以下称 M-3)这 3 个钢筋混凝土墩柱模型来研究非弹性位移响应谱值作为近场脉冲型地震动强度参数的适用性。

### 2.1 钢筋混凝土墩柱模型

3 根钢筋混凝土墩柱模型的体型和动力特性参数见表 1。材料及非线性本构模型选取见表 2。

以柱顶的最大水平相对位移作为工程需求参数, 该参数可以反映墩柱的抗震延性需求。

表 1 模型的体型和动力特性参数

Table 1 The design parameters of models

模型	参数				
	柱直径/m	柱高度/m	柱顶集中质量/t	基本周期/s	配筋率/(%)
M-1	1	6	100	0.424	3.5
M-2	1	9	100	0.791	3.5
M-3	1	15	150	2.095	2.7

表 2 模型材料和非线性本构模型选取

Table 2 The parameters of material constitutive model

材料	参数		
	标号	屈服强度/MPa	非线性模型
保护层砼	C40	26.8	三线型模型
核芯砼	C40	26.8	常约束砼模型
纵筋	HRB400	360	Monti-Nutti 模型
箍筋	HPB235	235	双线性模型

## 2.2 近场脉冲型地震动

本研究选择了 60 条公认的具有速度脉冲的典型近场地震记录, 这些记录选自美国太平洋地震工程研究中心的 NGA<sup>[9]</sup>(the Next Generation Attenuation)数据库, 所有记录均是经过处理的, 记录均选自硬土或者岩石场地, 记录的震级范围为 5.6~7.6, 场距范围为 0~21km, 具体见表 3。

表 3 近场脉冲型地震记录及其脉冲周期

Table 3 Pulse period and selected components of records

序号	名称	$T_p/s$	选取分量
029	Parkfield	0.67	C02065
033	Parkfield	0.40	TMB205
077	San Fernando	1.34	PUL164
150	Coyote Lake	0.91	G06230
161	Imperial Valley-06	4.80	H-BRA225
170	Imperial Valley-06	3.70	H-ECC092
171	Imperial Valley-06	3.00	H-EMO270
173	Imperial Valley-06	6.10	H-E10050
179	Imperial Valley-06	3.70	H-E04230
180	Imperial Valley-06	3.40	H-E05230
181	Imperial Valley-06	3.30	H-E06230
182	Imperial Valley-06	3.20	H-E07230
183	Imperial Valley-06	4.20	H-E08230
184	Imperial Valley-06	3.70	H-EDA270
192	Imperial Valley-06	4.60	H-WSM090
367	Coalinga-01	1.10	H-PVB045
448	Morgan Hill	0.45	AND250
451	Morgan Hill	0.75	CYC285
459	Morgan Hill	1.15	G06090
461	Morgan Hill	0.84	HVR240
495	Nahanni, Canada	3.40	S1280
496	Nahanni, Canada	0.55	S2240
517	N. Palm Springs	0.42	DSP000
529	N. Palm Springs	0.91	NPS210
540	N. Palm Springs	0.53	WWT180
595	Whittier Narrows-01	0.62	A-JAB207
615	Whittier Narrows-01	0.81	A-DWN180

(续表)

序号	名称	$T_p/s$	选取分量
668	Whittier Narrows-01	0.60	A-NOR360
692	Whittier Narrows-01	0.26	A-EJS048
721	Superstition Hills-02	1.50	B-ICC000
723	Superstition Hills-02	1.90	B-PTS225
763	Loma Prieta	0.39	GIL067
764	Loma Prieta	1.29	GOF160
765	Loma Prieta	0.40	G01000
766	Loma Prieta	1.56	G02090
767	Loma Prieta	0.47	G03090
768	Loma Prieta	1.50	G04000
779	Loma Prieta	0.75	LGP090
802	Loma Prieta	1.69	STG000
803	Loma Prieta	1.15	WVC000
879	Landers	4.50	LCN260
959	Northridge-01	2.05	CNP106
960	Northridge-01	0.67	LOS000
982	Northridge-01	2.90	JEN022
1004	Northridge-01	0.85	0637270
1013	Northridge-01	1.34	LDM064
1044	Northridge-01	1.25	NWH360
1045	Northridge-01	2.30	WPI046
1050	Northridge-01	0.44	PAC175
1052	Northridge-01	1.06	PKC360
1063	Northridge-01	3.00	RRS228
1084	Northridge-01	3.10	SCS052
1085	Northridge-01	2.58	SCE018
1086	Northridge-01	0.85	SYL360
1492	Chi-Chi, Taiwan	6.70	TCU052-E
1503	Chi-Chi, Taiwan	4.50	TCU065-E
1505	Chi-Chi, Taiwan	9.00	TCU068-E
1510	Chi-Chi, Taiwan	4.40	TCU075-E
1511	Chi-Chi, Taiwan	3.20	TCU076-E
1549	Chi-Chi, Taiwan	4.10	TCU129-E

## 2.3 增量动力分析

对表 3 中的每一条记录进行增量动力分析, 相关分析参数如表 4 所示。地震记录的增量动力分析采用非线性有限元计算程序 SeismoStruct<sup>[10]</sup>进行计算, 计算简图如图 1 所示。

表 4 增量动力分析相关参数

Table 4 The parameters used for IDA

分析参数	模型		
	M-1	M-2	M-3
非线性振子屈服位移/m	0.06	0.12	0.207
初始非弹性位移响应谱值/m	0.12	0.24	0.414
位移响应谱值增量/m	0.4	0.4	0.4
终止非弹性位移响应谱值/m	10	10	10

## 2.4 强度参数适用性分析

### 2.4.1 强度参数的有效性

强度参数的有效性要求结构在调幅地震记录作用下有较小的响应标准差, 为此, 将模型响应标准差随强度参数调整值变化的曲线示于图 2, 其中,

标准差分 2 种：一为普通响应的标准差，记为正态分布；一为对数响应的标准差，记为对数正态分布。

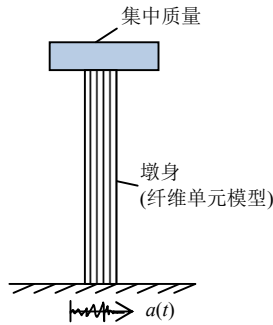
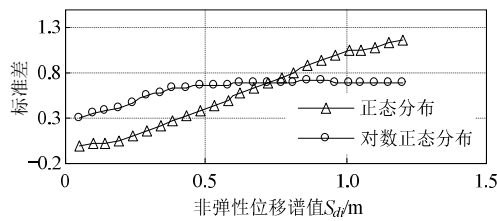
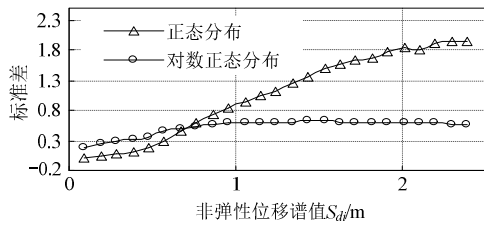


图 1 计算简图

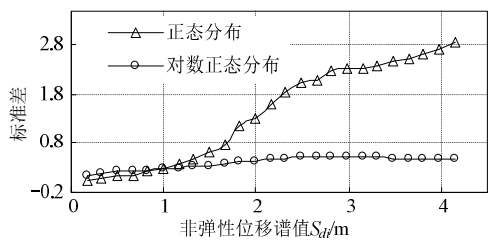
Fig.1 The calculation diagram



(a) M-1 的分析结果



(b) M-2 的分析结果



(c) M-3 的分析结果

图 2 模型响应标准差随非弹性位移响应谱的变化图

Fig.2 Standard deviation of model responses versus  $S_{di}$

由图 2 可见，对 3 个模型而言，正态标准差有明显随非弹性位移响应谱值增大而增大的趋势，且在非弹性位移响应谱较大时，达到一个较大的程度。相比而言，对数响应标准差只在非弹性位移响应谱较小时有轻度随非弹性位移响应谱增大而增大的趋势，在整个强度参数变化区域上，对数响应标准差变化不大。同时，观察图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)可见，模型周期越长，对数响应标准差随非弹性位移响应谱增大的变化越不明显。另外，从图 2 中还发现，

对数响应标准差一般比较小、可接受，这说明了非弹性位移响应谱作为近场脉冲型地震动强度参数的有效性。同时，响应的对数标准差比普通标准差小意味着利用对数正态分布来拟合响应结果比用正态分布拟合有更好的效果。

另外，作者在前边研究中曾经提到，相比弹性位移响应谱值，非弹性位移响应谱值具有较好的对脉冲型地震记录的速度脉冲周期的不敏感性，这意味着非弹性位移响应谱值作为脉冲型近震记录的强度参数比弹性位移响应谱值更充分。

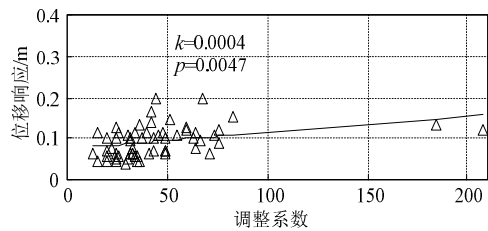
#### 2.4.2 强度参数的比例调整鲁棒性

强度参数的比例调整鲁棒性是检验当各条记录调整到同一强度参数水平时，响应结果的统计关于比例调整因子是否具有无偏性。这里对地震记录分别调整 1.2、5.2 和 8 时的 3 个模型响应进行统计，非弹性位移响应谱调整水平见表 5。标准差随地震记录调整因子的变化图见图 3~图 5。图 3~图 5 中， $k$  和  $p$  分别为线性回归的斜率参数和表示回归参数显著性水平的  $p$  值， $p$  值越小， $k$  值的可信度就越高；图中小三角表示离散数据点，实线表示回归曲线。

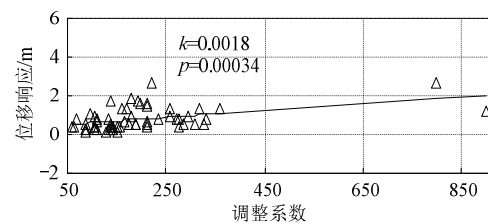
表 5 考察比例调整鲁棒性时的强度参数调整值

Table 5 Values of  $S_{di}$  when observing the scaling robust of

调整因子	$IM$		
	M-1	M-2	M-3
1.2	0.144	0.288	0.497
5.2	0.624	1.248	2.155
8.0	0.960	1.920	3.316



(a)  $S_{di}=0.144m$



(b)  $S_{di}=0.624m$

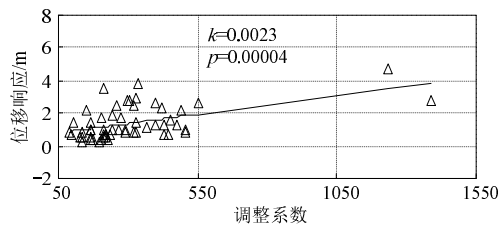
(c)  $S_{di}=0.960\text{m}$ 

图3 M-1的响应关于地震记录调整系数的拟合情况

Fig.3 Fitting curve of M-1's response about the scaling factor of records

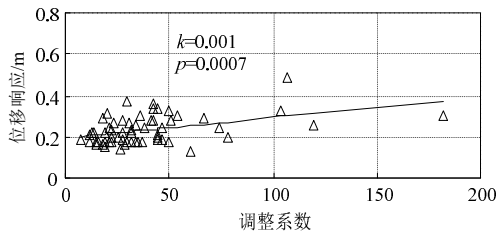
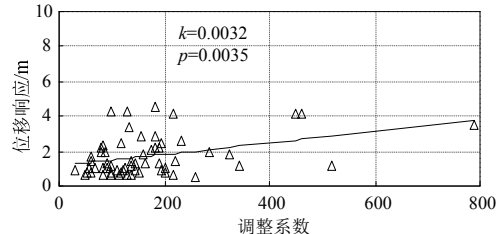
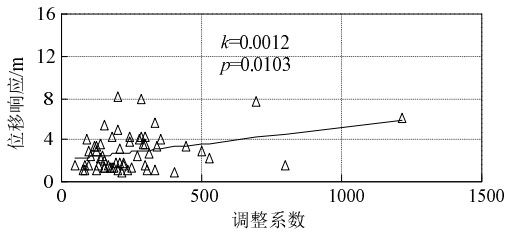
(a)  $S_{di}=0.288\text{m}$ (b)  $S_{di}=1.248\text{m}$ (c)  $S_{di}=1.920\text{m}$ 

图4 M-2的响应关于地震记录调整系数的拟合情况

Fig.4 Fitting curve of M-2's response about the scaling factor of records

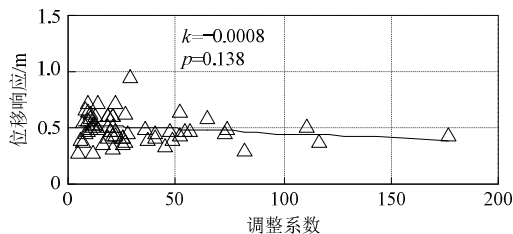
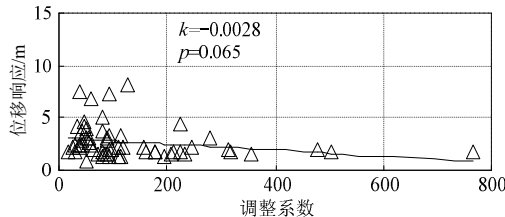
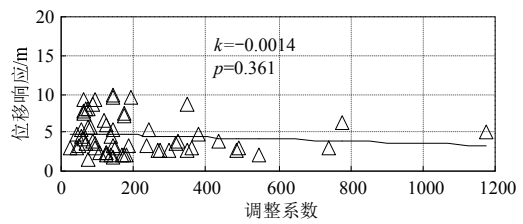
(a)  $S_{di}=0.2497\text{m}$ (b)  $S_{di}=2.155\text{m}$ (c)  $S_{di}=3.316\text{m}$ 

图5 M-3的响应关于地震记录调整系数的拟合情况

Fig.5 Fitting curve of M-3's response about the scaling factor of records

从图3、图4、图5可以看出,中短周期模型响应会随比例调整系数的增加而增加,长周期的响应会随比例调整系数的增大而降低,但3种模型得到的回归曲线的 $k$ 值极小,回归曲线几乎是水平的,这表明地震记录的调整系数对响应的几乎没有影响,也即基于非弹性位移响应谱的记录比例调整是鲁棒的。从图3~图5中还可以看出,除长周期模型之外,短周期模型和中等周期模型的 $p$ 值均小于0.05,说明在中短周期范围内,上述统计结果是具有很高可信度的。长周期模型的 $p$ 值稍大,但从图5数据点的分布来看,随调整系数的增加,数据点在回归曲线两侧分布比较均匀。研究结果可以得出以非弹性位移响应谱作为近场脉冲型地震记录的强度参数具有比例调整鲁棒性的结论。

综上所述,非弹性位移响应谱值作为近场脉冲型地震动的强度参数基本满足强度参数应具有有效性、充分性以及比例调整鲁棒性的适用性要求。非弹性位移响应谱值作为桥墩抗震性能评估的近场地震动强度参数具有较强的适用性。

### 3 结论

为研究用于桥墩抗震性能评估的近场地震动的适用强度参数,构建了3个具有不同自振周期的钢筋混凝土墩柱模型、选择了60条具有典型脉冲的近场地震动记录,通过大量的非线性动力分析,基于概率分析了非弹性位移响应谱值作为近场地震动作用下桥墩抗震性能评估的强度参数的适用性问题。经研究有以下结论:

(1) 非弹性位移响应谱值作为近场脉冲型地震动的强度参数是适用的,强度参数所应具有的有效性、充分性和比例调整鲁棒性在一定程度上均可以满足,尤其相比普通的弹性位移响应谱值(或者说弹性加速度响应谱)具有更好的适用性。

(2) 值得注意的是,本研究采用的是墩式的结

构, 研究结果也只适应于普通钢筋混凝土桥墩的抗震性能评估研究。高耸桥墩的近场地震动强度参数研究是下一步研究的目标。

#### 参考文献:

- [1] Cornell C A, Krawinkler H. Progress and challenges in seismic performance assessment [J]. PEER Center News, 2000, 3(2): 1—4.
- [2] Moehle J P, Deierlein G G. A framework methodology for performance-based earthquake engineering [C]// Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, Vancouver B C, 2004: 1—6.
- [3] 王建民. 基于概率的桥梁结构抗震性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.  
Wang Jianmin. Study on seismic performance of bridge structures based on probabilistic [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [4] Tothong P, Cornell C A. Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, attenuation relationships, and near-fault effects [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2007.
- [5] Malhotra P K. Response of buildings to near-field pulse-like ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(11): 1309—1326.
- [6] Wang G Q, Zhou X Y, Zhang P Z, Igel H. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(1): 73—96.
- [7] 申彦利, 杨庆山. 近场脉冲型地震作用下结构响应预测研究[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 117—123.  
Shen Yanli, Yang Qingshan. Seismic response estimation of structure under pulse-type near-field ground motion [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 117—123. (in Chinese)
- [8] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491—514.
- [9] Pacific Earthquake Engineering Research Center. Next generation attenuation of ground motions (NGA) project [DB]. <http://peer.berkeley.edu/nga/>, 2012.
- [10] SeismoStruct. SeismoStruct-A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures [CP]. <http://www.seissoft.com>, 2012.
- (上接第 55 页)
- [21] 吴帅兵, 张坤, 李典庆. 相关非正态变量变换时相关性变化对可靠度的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(2): 151—155.  
Wu Shuaibing, Zhang Kun, Li Dianqing. Effect of correlation change from transformation of correlated abnormal variables on structural reliability [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(2): 151—155. (in Chinese)
- [22] 吴帅兵, 李典庆, 周创兵. 结构可靠度分析中变量相关时三种变换方法的比较[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 41—48.  
Wu Shuaibing, Li Dianqing, Zhou Chuangbing. Comparison among three transformation methods for structural reliability analysis with correlated variables [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 41—48. (in Chinese)
- [23] 吕大刚. 基于线性化 Nataf 变换的一次可靠度方法[J]. 工程力学, 2007, 24(5): 79—86.
- Lü Dagang. First order reliability method based on linearized Nataf transformation [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(5): 79—86. (in Chinese)
- [24] Low B K, Tang W H. Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(12): 1378—1387.
- [25] Agrawal G, Bhattacharya B. Partial safety factor design of rectangular partially prestressed concrete beams in ultimate flexural limit state [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 3(4): 257—267.
- [26] 李国强, 李继华. 二阶矩阵法关于相关随机向量的结构可靠度计算[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1987, 27(1): 55—67.  
Li Guoqiang, Li Jihua. Method of second moment matrix on the reliability calculation of dependent stochastic vector [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1987, 27(1): 55—67. (in Chinese)