

非基岩场地地震动转换的适用性分析

吴 健¹, 俞言祥^{1*}, 于 沛²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 北京冠亚伟业民用建筑设计有限公司, 北京 100034)

摘 要: 基于 NGA 衰减关系中的场地修正模型, 将剪切波速 V_{s30} 低于 500 m/s 的非基岩场地上的强震记录转换为 $V_{s30}=500$ m/s 的等效基岩记录, 对等效基岩记录与基岩记录进行了统计一致性的分析, 认为这种转换方法在能够保证等效基岩记录和基岩记录的统计一致性的同时, 对于记录数量充足的地震能够有效减小地震动分布的离散, 而对于记录数量较少的地震, 如果有足够数量的等效基岩记录加入, 能够改善其由于基岩记录数量不足或分布不合理所导致的不合理的地震动空间分布。这种方法对于以前限于基岩地震动数量不足或分布不合理而无法进行的研究工作, 提供了一种增加可用地震动记录的可能。而对于这种方法的不足和今后需要完善的几个方面问题, 也进行了初步的讨论。

关键词: 非基岩场地; 基岩场地; 地震动转换方法; NGA

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)03-0457-07

作者简介: 吴 健(1974-), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事地震危险性分析方法、地震动特性、核工程地震安全性评价等研究。E-mail: wujian@cea-igp.ac.cn。

Applicability of transformation of ground motion records from non-rock site

WU Jian¹, YU Yan-xiang¹, YU Pei²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 2. Beijing Guanya Weiye Architecture Design Company, Beijing 100034, China)

Abstract: By applying the site condition correction models of the next generation of attenuation (NGA) relationships, the equivalent rock site ($V_{s30} = 500$ m) ground motion from ground motion records at non-rock site ($V_{s30} < 500$ m/s) is calculated. The obtained equivalent rock site ground motions show consistency with the available true rock site records statistically. It concludes that this transformation method is applicable for calculating the equivalent rock site ground motion from non-rock site records. Furthermore, the obtained equivalent rock site ground motion data can reduce the non-coherency in the data from an earthquake event with abundant records, as well as improve the spatial data distribution in the data from an event with limited true rock site records. The equivalent rock site ground motion data obtained from the ground motion by this transformation method may help overcome the barriers in some researches due to limited data distribution. Finally, the limitations and some factors needing further investigation in this method are also discussed.

Key words: non-rock site; rock site; transformation method of ground motions; NGA

0 引 言

NGA (Next generation attenuation) 强震记录数据库是美国为发展下一代地震动参数衰减关系而建立的强震数据库^[1], 在目前为止是内容最为完备的强震数据库之一, 已经被广泛应用于地震动特性的研究工作中, 包括新的地震动衰减模型的确定工作^[2]。而根据我国目前的衰减关系确定原则, 考虑到地震动在土层和基岩介质中传播特性的明显差异, 实际应用的衰减关系都是基于基岩场地记录基础上的^[3-4], 这就使得实际研究中所使用的记录数量远远少于全部记录的数

量, 并且由于样本数量的不足, 限制了许多基于基岩场地记录的地震动特性研究。以 NGA 数据库为例, 其中场地剪切波速 $V_{s30} \geq 500$ m/s 的基岩加速度记录仅占到所有 3551 条记录的 17.5%, 其随震级和距离的分布情况见图 1。

为有效扩充可用的地震动记录样本的数量, 可以考虑采用适当的方法, 将 $V_{s30} < 500$ m/s 的非基岩场地

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90715020); 研究所基本科研业务专项项目 (DQJB11C18)

收稿日期: 2011-07-29

*通讯作者

上的记录转换为 $V_{s30}=500$ m/s 的等效基岩记录, 将其与基岩记录同时应用于研究工作。这种方法由 Wu and Yu^[5] 提出并应用于相关研究中, 但并未对其进行详细的讨论。如果这种思路可行, 将会使限于基岩记录数量不足或分布不合理而无法进行的研究成为可能, 或者使原来基于基岩记录的研究工作在加入了可接受的等效基岩记录之后, 提高其研究结果的可靠性。

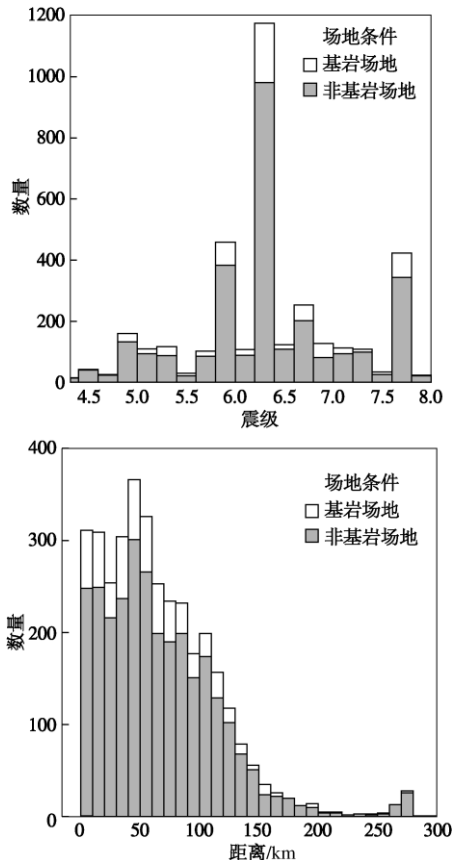


图1 NGA数据库中基岩记录与非基岩记录构成

Fig. 1 Rock site and non-rock site records of NGA database

1 非基岩场地强震记录转换方法

在 NGA 最终确定的 5 个衰减关系模型^[6-10]中, 有 4 个模型给出了将场地 V_{s30} 作为主要变量并考虑地震动幅值的场地条件修正模型, 本文中分别记作 AS08s^[6]、BA08s^[7]、CB08s^[8]和 CY08s^[9]。这 4 种模型中考虑了非基岩场地上不同强度的地震动(峰值加速度和反应谱值)的线性和非线性地震动反应特征, 主要采用了一维土层动力反应模拟的方法获得。本文中分别使用这 4 种场地修正模型, 将非基岩场地上的加速度记录转换为 $V_{s30}=500$ m/s 场地上的等效基岩记录, 然后将根据相同非基岩记录转换来的 4 个不同的等效基岩记录的算术平均值, 作为最终的等效基岩记录, 如下式

$$\hat{Y} = (\hat{Y}_{AS} + \hat{Y}_{BA} + \hat{Y}_{CB} + \hat{Y}_{CY}) / 4, \quad (1)$$

式中, \hat{Y} 为最终得到的等效基岩地震动, \hat{Y}_{AS} , \hat{Y}_{BA} , \hat{Y}_{CB} 和 \hat{Y}_{CY} 为分别根据 AS08s、BA08s、CB08s 和 CY08s 4 种场地条件修正模型, 转换获得的等效基岩地震动。

为验证这种方法的可行性并检验其适用性, 在 NGA 数据库中选取了 6 次震级不同的地震, 选取时主要考虑了以下几条因素:

(1) 加速度记录数量较多, 并且这些记录在距离的分布上较为均匀合理, 其中包含适当数量的基岩场地记录。

(2) 每条加速度记录都需要具备完整的台站信息, 包括剪切波速 V_{s30} 及其获得方式、台站到发震断层破裂面最近距离 (R_{rup})、台站到发震断层破裂面地表投影的最近水平距离 (R_{JB})、剪切波速分别为 1.0 km/s 和 2.5 km/s 的层面埋深、台站-断层连线与断层走向之间的夹角、是否具有断层上盘效应等参数。

(3) 每次地震需要具备震源参数, 包括破裂面宽度、发震断层倾角、断层破裂性质、是否为余震等。

(4) 选中的地震应尽量分布在不同的地区, 避免可能存在的地震动地区性差异对结果的影响; 并且震级不应仅限于一个较小的范围内, 应尽可能包括不同震源机制的主震和余震, 这些因素都是可能影响地震动分布的因素。

根据这些条件, 筛选出来的 6 次地震及其记录情况见下表 1。

表 1 地震主要参数及其加速度记录情况

Table 1 Parameters of earthquakes and their records

编号	地震	震级	震中 纬度	震中 经度*	记录 数量	基岩 记录
EQ0113	1987 年 Whittier Narrows 地震	5.99	34.05	-118.08	116	11
EQ0118	1989 年 Loma Prieta 地震	6.93	37.04	-121.88	83	29
EQ0127	1994 年 Northridge 地震	6.69	34.21	-118.55	160	31
EQ0137	1999 年 Chi-Chi 地震	7.62	23.86	120.80	419	78
EQ0158	1999 年 Hector Mine 地震	7.13	34.57	-116.29	83	11
EQ0174	1999 年 Chi-Chi 地震余震	6.20	23.81	121.08	322	53

注: *经度值为负时表示西经(西半球)。

2 转换结果的初步检验

为检验转换结果的合理性, 针对表 1 中的每一个地震, 将转换后得到的等效基岩记录, 与原有基岩记录一同回归地震动峰值加速度和反应谱值随距离衰减特征, 并与只使用基岩记录的回归结果进行对比。回归模型为

$$\ln Y = a - b \ln(R + R_0) \quad (2)$$

式中, Y 为地震动峰值加速度或反应谱值, R 为台站到发震断层破裂面地表投影的最近水平距离 (R_{JB}), 单位 km, R_0 为地震动近场饱和因子, 由地震动样本回归确定, a, b 为回归系数。回归中, 选择了峰值加速度和 0.2, 1.0 和 4.0 s 加速度反应谱值进行, 能够代表不同频段的地震动特征。对于 EQ0174, 由于其 R_{JB} 值介于 30~190 km 之间, 缺乏近断层记录, 为避免回归结果的异常, 令近场地震动饱和因子 $R_0=0$ 。回归

结果的比较见图 2 及表 2。

根据图 2 中的对比看出, 对于 6 次不同的地震, 将非基岩记录转换为等效基岩记录后与基岩记录一起作为样本进行回归, 其是否对回归结果及离散有所改进, 有以下几种情况:

(1) 对于 EQ0127 和 EQ0137 来说, 通过非基岩记录转换而增加记录样本的方式, 对地震动随距离的衰减特征回归结果影响并不明显, 针对不同反应谱值两条根据不

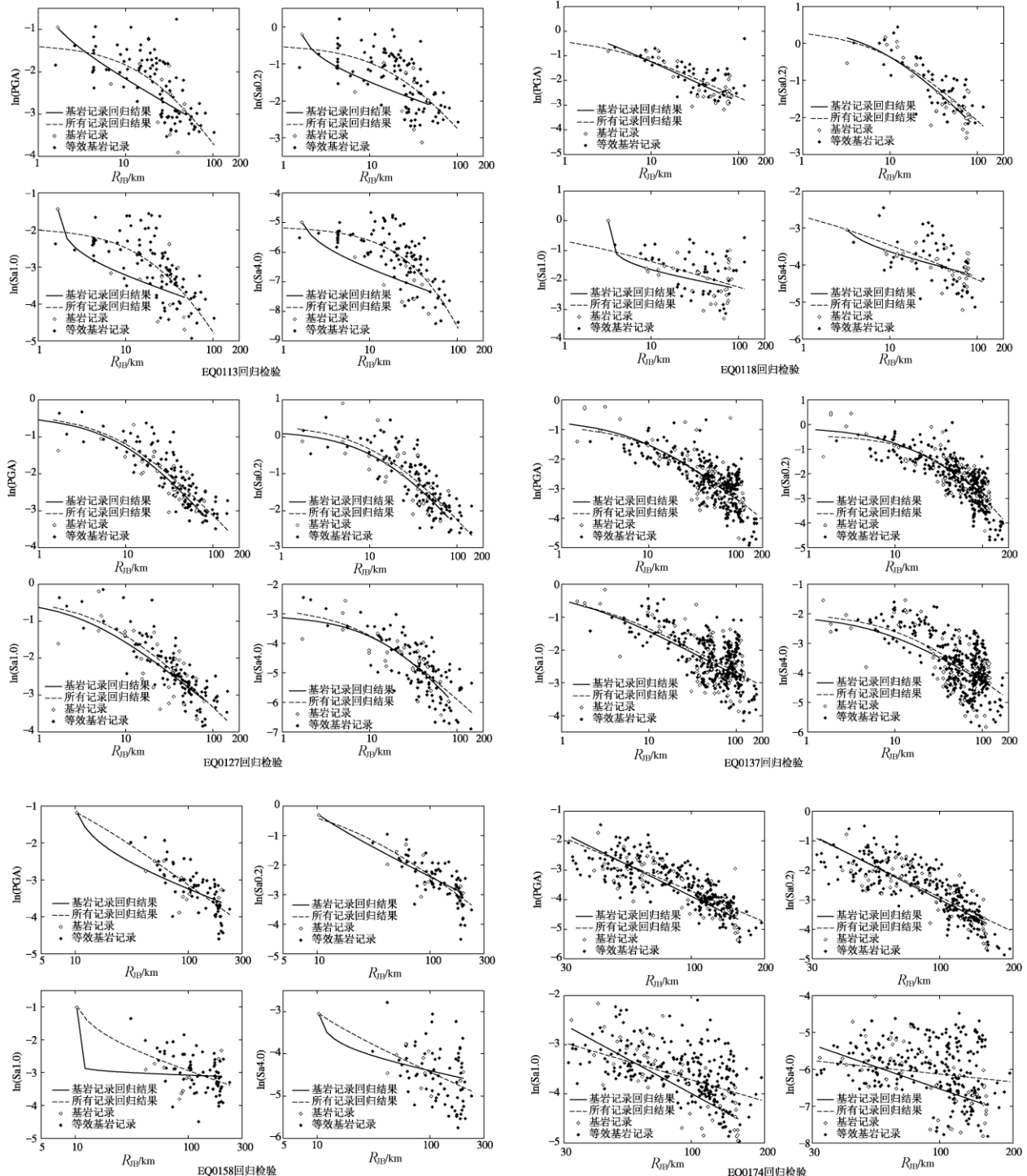


图 2 6 个地震基岩记录与全部记录 (基岩记录+等效基岩记录) 两种方案的回归结果比较

Fig. 2 Comparison between two regression schemes (One is only rock site records used; the other is rock site records and equivalent rock

site records used simultaneously)

表2 回归系数比

Table 2 Comparison of regression coefficients between two regression schemes

地震 编号	反应谱 周期	基岩记录回归结果				全部记录回归结果				标准差 比较*
		<i>a</i>	<i>b</i>	R_0	标准差	<i>a</i>	<i>b</i>	R_0	标准差	
EQ0113	PGA	-1.023	0.514	-0.772	0.590	3.294	1.449	24.607	0.507	0.86
	0.2 s	-0.705	0.364	-1.415	0.636	3.697	1.338	22.717	0.541	0.85
	1.0 s	-2.467	0.354	-1.616	0.673	4.917	1.981	31.914	0.621	0.92
	4.0 s	-5.555	0.460	-1.379	0.526	14.677	4.429	87.598	0.634	1.21
EQ0118	PGA	0.469	0.724	0.646	0.468	0.626	0.714	3.444	0.435	0.93
	0.2 s	2.734	1.076	7.798	0.413	2.549	0.989	9.037	0.430	1.04
	1.0 s	-1.176	0.245	-3.212	0.559	-0.454	0.387	0.817	0.595	1.06
	4.0 s	-3.113	0.259	-2.435	0.341	-2.474	0.417	0.692	0.486	1.43
EQ0127	PGA	2.584	1.272	10.753	0.437	2.054	1.104	8.989	0.408	0.93
	0.2 s	3.748	1.302	15.570	0.488	3.504	1.215	13.501	0.454	0.93
	1.0 s	0.644	0.855	3.368	0.566	1.441	1.022	6.015	0.449	0.79
	4.0 s	1.832	1.669	18.615	0.574	-0.213	1.213	8.267	0.587	1.02
EQ0137	PGA	1.328	1.001	7.286	0.528	1.717	1.074	10.836	0.508	0.96
	0.2 s	3.576	1.338	15.705	0.540	8.758	2.331	51.069	0.544	1.01
	1.0 s	0.065	0.616	1.466	0.622	0.202	0.623	2.183	0.551	0.89
	4.0 s	-0.578	0.793	6.539	0.716	0.449	0.997	11.385	0.677	0.95
EQ 0158	PGA	-0.942	0.510	-8.759	0.357	1.432	0.982	3.980	0.385	1.08
	0.2 s	1.347	0.817	-2.819	0.435	3.995	1.330	17.452	0.457	1.05
	1.0 s	-2.837	0.053	-10.350	0.466	-0.708	0.493	-8.627	0.497	1.07
	4.0 s	-3.291	0.246	-9.972	0.353	-2.038	0.523	-3.483	0.577	1.63
EQ0174	PGA	4.243	1.764	0.000	0.561	3.193	1.500	0.000	0.488	0.87
	0.2 s	5.346	1.811	0.000	0.568	4.933	1.701	0.000	0.537	0.95
	1.0 s	1.370	1.164	0.000	0.486	-0.824	0.627	0.000	0.494	1.02
	4.0 s	-1.953	0.994	0.000	0.762	-4.730	0.304	0.000	0.768	1.01

注: *比较值=全部记录回归标准差/基岩记录回归标准差。

很小,对比表2中不同样本集的标准差,所有记录(基岩记录和等效基岩记录)相对于只使用基岩记录的情况较小或基本相当,说明通过非基岩记录转换来增加样本的方法,对于这种地震动记录较多,并且随距离和场地条件分布较为合理的地震,在基本不改变衰减特征的同时,可以有效的降低离散特征。

(2) 对于EQ0113、EQ0118和EQ0158,在加入等效基岩记录后,地震动峰值加速度及反应谱随距离增加的变化趋势被修正到基本合理的状态,尤其是EQ0113的改善最为明显。而这3个地震在仅使用基岩记录获得的随距离衰减曲线,明显与目前对地震动空间分布的认识不符,基本可以认定是由于基岩记录数量不足并且随距离分布不均匀所造成的。同时对比表2,发现这3个地震加入等效基岩记录后标准差在4.0s谱值时明显增大,但是如果仔细分析可以发现,仅用基岩记录时的回归标准差似乎较经验值偏小,而使用全部记录时的标准差数值相对合理,并且符合随周期变化的趋势,因此可以认为对于这3次地震采用全部记录获得的衰减特征和标准差要比仅用基岩记录合理。

(3) 对于EQ0174,对于峰值加速度和0.2s反应谱值,加入等效基岩记录后的改善情况与EQ0127和EQ0137类似,趋势接近而离散变小。但对于1.0s和

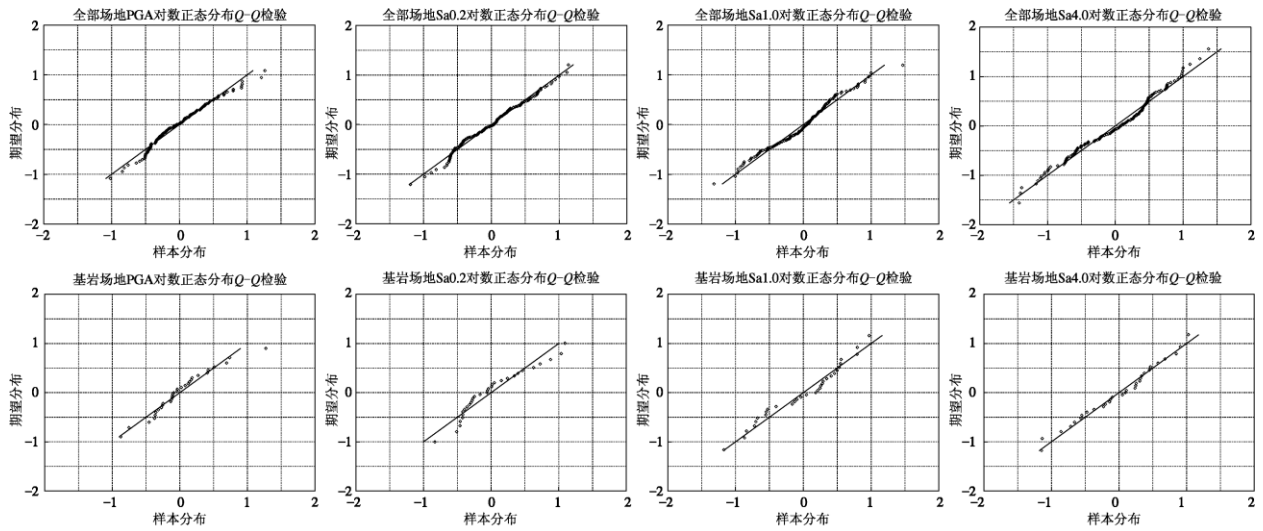
4.0s反应谱值,二者的衰减曲线差别较大,但离散标准差接近。从样本的离散上看,似乎是由于当 R_{JB} 在100km以上的等效基岩记录谱值偏大造成的,尤其是4.0s反应谱值这种情况更加明显。由于此次地震的基岩记录数量并不缺乏,并且在距离分布上也较为合理,因此有可能是距离100km以上的记录台站场地条件存在着某种特殊性,使得本次工作所使用的4种场地条件修正模型并不适用于这次地震。但也不排除本次地震具有某种特殊性导致这个结果,如果是这个原因,则仅使用基岩记录时就会忽略掉这种特征。而这种现象在其他5次地震中并不明显,其深层次的原因还需要进行专门的研究。

3 地震动残差分布形态的检验

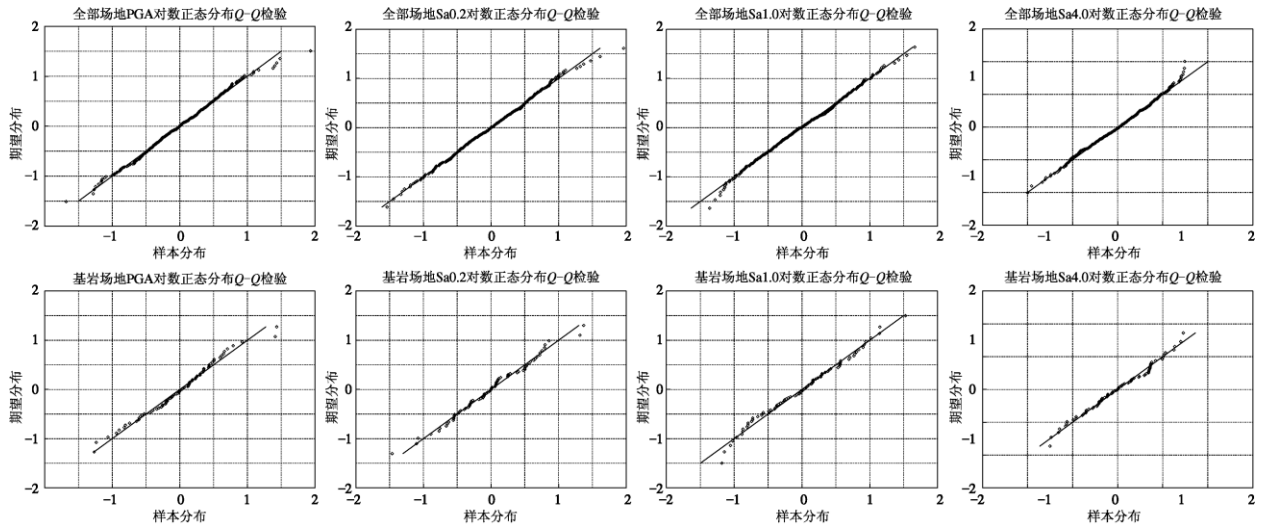
地震动记录相对于衰减关系的残差分布形态,是一项重要的指标,尤其是在概率地震危险性分析方法中进行衰减关系的不确定性校正时,采用的假设是残差符合对数正态分布。上一节的分析认为等效基岩记录的加入,在基本保持平均衰减规律的前提下,可以有效的改善记录丰富地震的离散标准差。下面将对检验加入等效基岩记录后残差分布是否还能够保持对数正态分布的假设。

图3中给出了残差分布的对数正态分布Q-Q检验

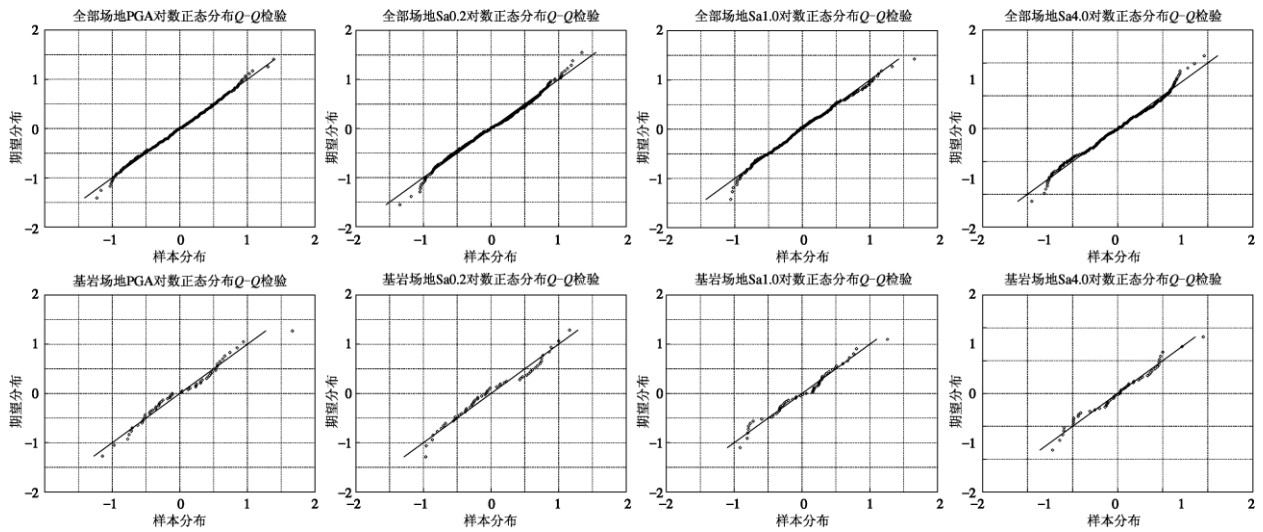
验图。Q-Q检验图中,如果样本分布符合对数正态分



(a) EQ0127全部记录(基岩记录+等效基岩记录)与基岩记录残差分布检验



(b) EQ0137全部记录与基岩记录残差分布检验(图面布局同上图)



(c) EQ0174全部记录与基岩记录残差分布检验(图面布局同上图)

图3 记录较多地震的不同样本集回归残差分布形态对比

Fig. 3 Comparison among distribution forms of regression residuals for earthquakes with enough records

布,则离散点将会分布在图中左下到右上的对角线上。样本分布与对角线符合程度越高,则说明其符合对数

正态分布的程度越好^[11]。上面图中给出了3次地震在加入等效基岩记录前后的回归残差的分布检验对比。

对比后发现, 等效基岩记录的加入并没有改变回归残

差分布的形态, 在有些情况下对残差分布符合对数正

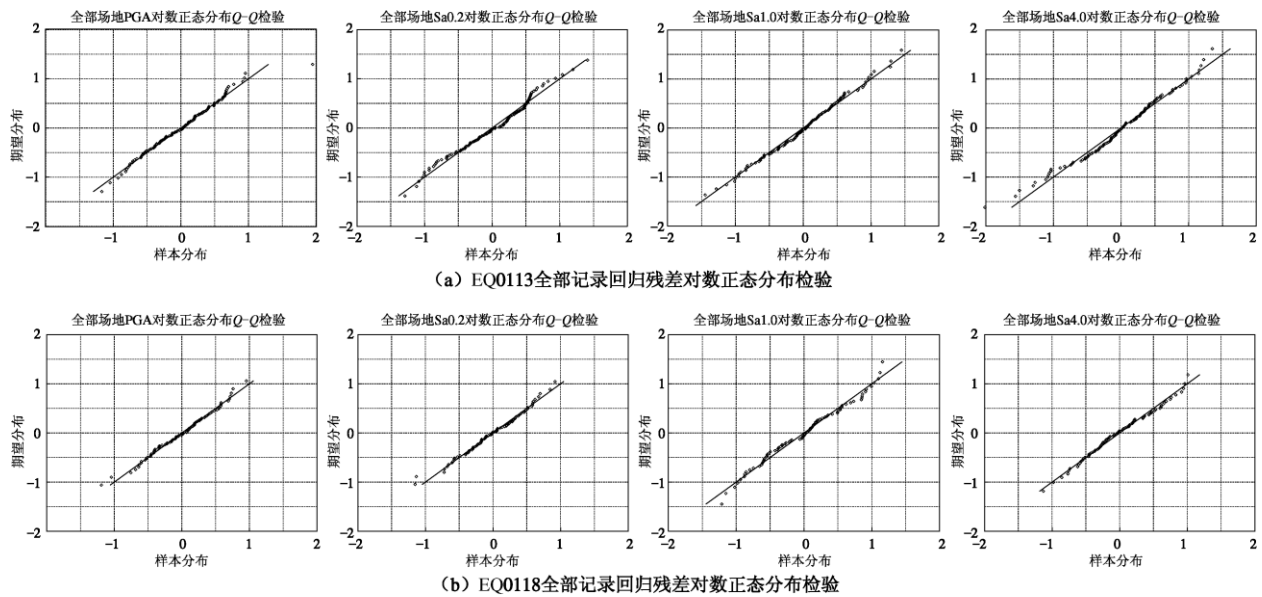


图4 基岩记录较少地震的加入等效基岩记录后衰减关系残差分布检验

Fig. 4 Distribution tests of regression residuals for earthquakes with insufficient rock site records

态分布的程度有所改善, 但由于基岩记录比较完善, 在加入等效基岩记录之前的基岩记录回归残差就已经较好的符合对数正态分布, 因此改善空间有限。

对于其余 3 次地震, 由于其基岩记录相对很少, 因此进行加入等效基岩记录前后的分布形态对比意义不大, 但是有必要对全部记录回归残差的分布形态进行检验, 检验结果见图 4。

对于记录较少的 3 次地震在加入等效基岩记录后, 其样本也非常好的符合对数正态分布, 并且其离散范围与前面 3 次地震(EQ0127、EQ0137 和 EQ0174)基本相当。结合前一节中对其衰减形态和分布标准差的对比分析, 可以认为原本由于基岩记录过少而无法合理确定地震动随距离变化趋势时, 加入由非基岩记录转换得到的等效基岩记录后, 可以在一定程度上改善这个问题。

4 结论与讨论

通过上面的讨论, 可以得到以下几条主要结论:

(1) 根据 NGA 衰减关系中的场地条件修正方法, 将 NGA 数据库中非基岩场地的地震动加速度记录转换为等效基岩记录, 基本不会改变原有基岩地震动合理的空间分布形态和离散形态, 可以与基岩记录一同作为样本进行有关的地震动衰减、离散等使用统计手段开展的地震动特性研究, 大大增加可用的地震动样本数量, 可以开展原来限于基岩记录数量不足或分布不好而无法进行的研究工作。

(2) 对于基岩记录数量较多, 能够基本合理体现地震动空间分布特性的地震, 由于相当数量的等效基

岩记录的加入, 不会明显改变原有的地震动空间分布特征, 但能够在一定程度上降低样本的离散程度, 同时不会改变样本的离散形态; 对于原有基岩记录较少而不能合理表现地震动空间分布形态的地震, 如果有足够数量的等效基岩记录加入, 有可能获得基本合理的地震动空间分布形态。

(3) 算例中 EQ0174 的地震动中长周期部分 (1.0 s 和 4.0 s 反应谱值), 由于 100 km 以上的等效基岩记录样本值偏高, 造成了在加入等效基岩记录后的随距离衰减回归结果与基岩记录回归结果差别较大。因此, 在使用 NGA 场地转换关系进行等效基岩记录的转换时, 需要对转换结果进行必要的检验, 确认转换结果基本合理之后才能够用于后续的研究工作。

本文利用已有的场地条件转换关系将非基岩记录转换为等效基岩记录, 获得了一些初步的成果, 证明了这种方法的可行性。为使得这种方法能够具有充分的科学性和合理性, 以便于为其他的研究工作提供扎实的数据基础, 需要在以下几个方面进行深入的研究和探讨:

(1) 转换方法的确定

本文中所使用的转化方法为已有的场地条件转换关系, 基本是根据数值模拟或统计分析获得的经验关系, 是场地剪切波速和地震动幅值的函数, 是平均意义上的转换关系。为表现特定台站具体的场地条件和不同地震的地震动特性差异, 理论上应该针对每一处记录台站的每一条记录进行场地土层动力反应反演, 以获得所需要层面的地震动时程, 以此作为等效基岩地震动用于其他的研究。但是限于记录台站场地条件

资料的限制,本文中并没有采用这种方法,而是使用了4种最新的地震动场地条件转换关系,取其算术平均值作为等效基岩记录进行分析,在一定程度上消除了单个模型的不确定性。今后的工作应该尽可能收集所使用记录的台站信息,如果有可能则尽量进行有针对性的场地土层动力反应反演,以获得更加能够反应具体场地条件和特定地震的地震动特征的等效基岩记录,提高转换结果的可靠性和可信性。

(2) 等效基岩面的确定

从图2的对比中可以发现,加入等效基岩记录之后得到的衰减曲线在多数情况下要高于基于基岩记录得到的衰减曲线。这有可能是由于本文中将等效基岩记录定义为 $V_{s30}=500$ m/s 场地上的记录,而基岩记录则包含了大量 V_{s30} 远高于500 m/s 场地上的记录,这导致基岩记录+等效基岩记录样本集中场地剪切波速整体上要低于基岩记录,从而造成了回归结果的偏高。因此,等效基岩面的确定也是一个可能影响到转换结果的重要因素,今后如果继续在此方向上开展研究,应探讨是否需要将基于等效基岩记录的空间分布特征与基岩记录的空间分布特征保持尽可能一致,如果需要达到这种一致性,那么就需要专门的分析如何来确定合适的等效基岩场地定义。

(3) 转换结果的合理性检验

由于等效基岩记录的转换过程是根据经验关系,或者根据更有针对性的场地土层动力反应反演,但仍然或多或少的是建立在一定的假设和经验基础之上,并不是真实的基岩记录。将其与真实基岩记录一起进行分析地震动的特性,需要进行充分的工作来论证这个转换结果的合理性,以保证在基岩记录数量或分布不能满足研究所需时,能够作为真实基岩记录的补充。本文中所采用的使用统计手段来验证,只能保证等效基岩记录在统计意义上能够反应地震动的一定特征,这也就限制了这些等效基岩记录也只能应用在对地震动记录进行统计分析的研究中,还不能用于地震动特性的非统计手段研究。因此需要找到其他的检验手段,对等效基岩记录与基岩记录特性的一致性进行验证,这样才能够扩大等效基岩记录的应用范围,或者提高应用于地震动统计研究时可靠性。

参考文献:

- [1] CHIOU B, POWER M, ABRAHAMSON N, et al. An overview of the project of next generation of ground motion attenuation models for shallow crustal earthquakes in active tectonic regions[C]// Proceedings of Fifth National Seismic Conference on Bridges & Highways. San Francisco: 2006.
- [2] 俞言祥. 大震近场地震动衰减关系确定技术研究[R]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2008. (YU Yan-xiang. Report of research on attenuation relationships of near-source ground motions of great magnitude earthquake[R]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2002. (in Chinese))
- [3] 俞言祥. 长周期地震动衰减关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002. (YU Yan-xiang. Study on attenuation relationships of long period ground motions[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2002. (in Chinese))
- [4] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1989. (HUO Jun-rong. Research on the attenuation law of near-source ground movement[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1989. (in Chinese))
- [5] WU J, YU Y. Preliminary research on the method for determination of ground motion parameters of diffuse earthquakes[J]. Earthquake Science, 2010, 23(1): 87 - 94.
- [6] ABRAHAMSON N, SILVA W. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 67-97.
- [7] BOORE D M, ATKINSON G M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 99 - 138.
- [8] CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD, and 5% damped linear elastic response spectra for period ranging from 0.01 to 10 s[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 139 - 171.
- [9] CHIOU B, YOUNGS R. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 173 - 215.
- [10] IDRIS I M. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 217 - 242.
- [11] 杜强, 贾丽艳. SPSS统计分析: 从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009. (DU Qiang, JIA Yan-li. Statistics analysis of SSPS[M]. Beijing: Post and Telecom Press, 2009. (in Chinese))