

DOI: 10.11779/CJGE201511014

地震荷载等效循环周数的预测模型

高广运¹, 石超¹, 陈青生²

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 新加坡国立大学土木与环境工程系, 新加坡 117576)

摘 要: 荷载等效循环周数的计算在分析地震动力响应中有重要作用。目前等效循环周数的计算方法大多是建立在累计损伤理论的基础上, 这些方法一般需要已知地震时程曲线, 而预测分析时并不知道实际的地震时程曲线, 且等效转换处理较麻烦。为了解决以上问题, 统计了涵盖不同震中距级别和震级级别的 296 条水平地震记录, 计算出作用于相对密实度为 45% 的砂土的等效循环周数。基于统计分析的非线性混合效应模型, 建立了单向及双向地震荷载等效循环周数与震级和震中距之间的预测模型。采用回归分析中常用的 p 值检验法及残差分布方法对预测模型进行检验, 结果表明预测误差在合理范围内。通过实测值与预测值比较, 证明了预测模型在统计意义上的可行性与准确性。

关键词: 等效循环周数; 混合效应模型; 地震荷载; 非线性回归分析

中图分类号: TU435; P315.98

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-2040-05

作者简介: 高广运(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 从事土动力学和桩基的研究。E-mail: gaoguangyun@263.net。

A predictive model on equivalent number of strain cycles for earthquake loads

GAO Guang-yun¹, SHI Chao¹, CHEN Qing-sheng²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576)

Abstract: The equivalent number of strain cycles plays an important role in seismic response analyses. The existing calculation methods for the equivalent number of strain cycles are mostly based on accumulated damage theories. However, the time history of an earthquake load is required in the prediction using these methods, which is complicated in the equivalent conversion. In order to address these issues, 296 records of horizontal seismic time-history records, which cover different kinds of the epicenter distance and magnitude, are used in this study. The equivalent number of strain cycles is calculated for the sand with a relative density of 45% subjected to the selected earthquake load. Based on the statistical analysis using the nonlinear mixed-effects model, a predictive model for the equivalent number of strain cycles is proposed for both unidirectional and bi-directional earthquake loads. By examining the p -value and the residual distribution, the results show that the predictive values are reasonable. The proposed predictive model is validated by the measured data.

Key words: equivalent number of strain cycles; mixed-effects model; earthquake load; nonlinear regression analysis

0 引 言

地震是自然界的一种随机事件, 其发生具有明显的不确定性和随机性, 产生的地震波也具有明显的不规则性和不对称性^[1-3]。在处理岩土地震工程中遇到的地震液化及震陷等问题时, 常用的研究方法是循环荷载的室内试验, 或者直接观测人工合成不规则地震波用于分析地震响应^[4-5]。计算与分析时则常将地震的不规则荷载转换为等效循环荷载, 这种等效实际上是一种作用效果上的等效。在此过程中, 等效循环周数的确定有关键作用, 它也是等效程度的关键影响因素^[6]。

对地震等效循环荷载的研究, Seed 等^[7]的成果最具有代表性, 他们基于线性累计损伤模型来评估土体液化势的等效循环周数。该方法简单方便, 在学界及

工程界一直沿用。之后学者们对 Seed 等^[7]的计算方法进行了改进, 均是基于线性累积损伤模型的理论。近年来, 将非线性累积损伤模型用于等效循环荷载的计算具有明显优势, 如 Green 等^[8]和陈青生等^[9]的研究, 表明 Seed 等计算采用的线性累计损伤模型仅为其中的一个特例。

上述等效循环荷载的计算方法在国内外研究和工程设计中具有代表性。然而该方法需要事先给定地震波及其频谱特性, 方可计算相应地震荷载的等效循环周数。事实上地震的发生本身就具有很大的随机性, 对于拟建场地来说, 其未来可能遭受的地震是不确定

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41372271)

收稿日期: 2014-08-20

的, 因而找出地震荷载循环周数与地震特性有关因素之间的内在关系显得十分重要。Liu 等^[10]对此进行了相关的探索和研究, 对历史上 150 次地震的 1664 条地震记录进行了统计分析, 表明等效循环周数与震级、震中距、场地条件等密切相关, 同时给出了相应的计算公式。这种基于统计分析的计算方法可以有效揭示地震特性与等效循环周数之间的关系, 并且可以用概率分析的方法来归纳随机问题的规律性。

本文主要从统计分析角度出发, 采用混合效应回归分析模型, 建立了随机地震荷载下的等效循环周数的预测模型, 并对预测模型进行非线性回归分析, 验证了模型的合理性。

1 混合效应回归分析模型

混合效应模型是近年来逐渐被认可的一种分析随机问题的重要统计模型, 该模型在强随机性和强不确定性问题的应用分析中效果突出。混合效应模型由固定效应和随机效应两部分组成。根据固定效应和随机效应的关系, 可将混合效应模型分为线性混合效应模型 (linear mixed effect) 和非线性混合效应模型 (nonlinear mixed effect)。混合效应模型的固定和随机效应以线性关系出现被称为线性混合效应模型, 非线性混合效应模型是通过考虑回归函数依赖于固定和随机效应的非线性关系而建立。混合效应模型可以在提供多种信息反映个体数据差异的同时反映总体的变化趋势。这种方法在处理不规则、不平衡数据及分析数据的相关性方面有其他模型所不具备的优势, 其在预测精度上较传统回归分析也有很大的提升^[11]。

由于地震动具有很强的随机性, 因此混合效应模型特别适用于随机地震响应分析。该模型既能反映地震事件与地震事件间的不确定性和随机特性, 又能反映同一地震事件中不同地震动间的不确定性和随机性, 且在地震事件之间的不确定分析时, 不会受到各个地震事件所含地震动数据大小的影响。

本文回归分析将采用非线性混合效应模型, 主要考虑地震震级和震中距与地震等效循环荷载周数的关系, 可以采用非线性混合效应模型进行分析。非线性混合效应模型其模型为

$$\begin{cases} y_{ij} = f(\varphi_{ij}, x_{ij}) + e_{ij} \\ \varphi_{ij} = A_{ij}\beta + B_{ij}b_i \\ \varepsilon_{ij} : N(0, \sigma^2), b_i : N(0, \psi_1) \end{cases} \quad (i=1, \dots, M; j=1, \dots, M_i) \quad (1)$$

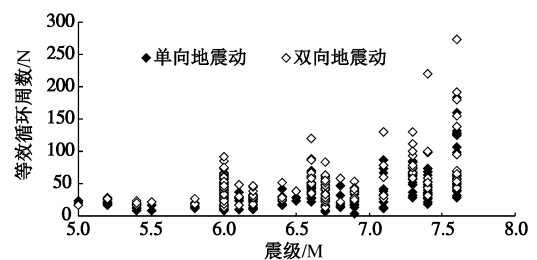
式中 x_{ij} 是第 i 个独立研究对象中第 j 次观测的因变量; M 为研究对象的数量; f 为真实值参量向量 φ_{ij} 和变量向量 x_{ij} 的可微函数; e_{ij} 为服从正态分布的残差; β 为固定效应向量; b_i 为带有方差协方差矩阵 ψ 的随

机效应向量; A_{ij} 和 B_{ij} 为相应的设计矩阵。

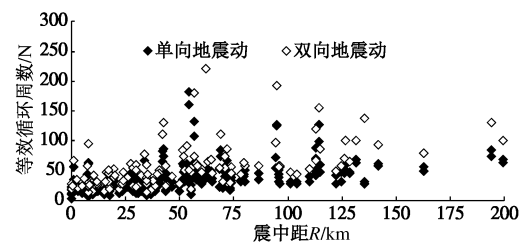
2 等效循环周数预测模型的建立

本文采用 McGuire 等^[12]学者收集和整理的 WUS (Western US) 数据库中基岩上的地震记录。记录的地震动虽跨越不同的区域, 但是本文预测模型中不涉及到地震动特性的相关特性参数, 只考虑地震震级及震中距的影响, 因而在本次模型的建立中忽略不同地区地震动的差异。所选取的地震记录包括中国、美国、日本、土耳其、伊朗等多个地震两个水平方向记录共计 296 条, 其中 5 级以下地震动破坏较小不予考虑, 8 级以上的地震记录太少, 也不予统计。这些地震覆盖了大震、中震、近场、远场及不同土质条件。将所选取的记录按照震级分为 5.0~6.0, 6.0~7.0 和 7.0~8.0 三个级别; 按震中距分成近场 0~50 km、中场 50~100 km 和远场 100~200 km 三个级别。这里选择 50 km 作为近场划分依据, 主要是从地质学角度考虑, 一般认为震中距小于 50 km 的地震为近场地震, 而非研究地震动特性所用的近断层地震动概念, 因此不是传统的 25~30 km 作为区划标准。

然而这些地震记录都是原始的时程曲线, 为了得到循环荷载与地震震级和震中距间的关系, 必须对原始数据进行转换, 并作用于相对密实度为 45% 的砂土上。转换方法为 Seed 等效循环荷载周数的计算方法, 其中对于双向地震荷载作用采用陈青生等^[13]提出的以 0.65 倍 $\sqrt{\gamma_{\max 1} \cdot \gamma_{\max 2}}$ 为等效荷载幅值, 其中 $\gamma_{\max 1}$ 和 $\gamma_{\max 2}$ 分别为水平单向荷载的应变时程峰值。之后同样用 Seed 等效转换原理计算水平双向地震荷载作用的等效循环周数。经计算并统计得到单向与水平双向地震荷载等效循环周数与震级及震中距的关系, 见图 1。



(a) 全震中距范围内等效循环周数与震级的关系趋势



(b) 全震级范围内等效循环周数与震中距的关系趋势

图 1 等效循环周数与震级和震中距的关系趋势

Fig. 1 Relation trends of equivalent number of strain cycles with magnitude and epicentral distance

表 1 等效循环荷载周数预测模型回归分析结果

Table 1 Regression analysis results of predictive model for equivalent number of strain cycles							
地震作用	C_1	C_2	C_3	C_4	τ_{ln}	σ_{ln}	$\sigma_{ln\ total}$
单向	1.6613 (0.000)	-0.0003443 (0.000)	0.0875 (0.000)	0.0033 (0.000)	0.209	0.367	0.422
双向	2.0422 (0.000)	-0.0002951 (0.000)	0.0813 (0.000)	0.0036 (0.000)	0.163	0.346	0.382

注：括号中的值为 p 值。

由图 1 可知，等效循环荷载周数与震级间为指数关系，而与震中距的分布则较为复杂。根据图 1 中数据分布关系，对地震荷载等效循环周数随震级和震中距的变化趋势进行对比分析，采用混合效应模型来设定等效循环周数与震级及震中距的函数关系，通过数据分布图及数据的相关性确立震级及震中距的指数形式并不断修正，使得模型的曲线能够较好地体现数据分布趋势，最终建立等效循环周数与震级和震中距关系：

$$\ln N_{eqr} = C_1 + C_2 R^{1.65} + C_3 R^{0.65} + C^4 M^3 \quad (2)$$

式中 C_1, C_2, C_3, C_4 均为回归系数，可根据回归分析求得； R 为震中距 (km)； M 为震级； N_{eqr} 为地震剪应变荷载等效循环周数。

模型建立后，通过开源的统计分析软件 R-程序^[14]可实现回归分析。

3 非线性分析结果

采用非线性混合效应模型进行回归分析，单向地震荷载作用下和水平双向地震荷载作用下的预测回归分析结果如表 1 所示。回归模型是否可用于实际预测的关键是对回归预测模型的检验和对预测误差的计算。回归方程只有通过各种检验才能将回归方程作为预测模型进行预测。本文采用 p 值方法检验。

p 值是反映结果可靠程度的一种递减指标，通常 $p=0.05$ 是可接受的边界水平，即满足 $p \leq 0.05$ 。从表 1 可知所有回归系数的 p 值均小于 0.05，说明预测模型的各个系数在统计意义上是显著的。

这里还将采用残差分布来分析预测模型的可靠性。所谓残差就是实际值和预测值的差值。单向地震荷载输入情况下残差分布随震中距的关系见图 2，双向地震荷载输入情况下的残差分布随震中距的关系见图 3。由图 2 和图 3 可知，不同震级范围条件下各残差值随震中距的分布基本上对称于残差零轴，且较为集中，进一步说明了回归模型的可靠性。

此外本文分别采用 3 个不同级别地震范围（即 $M=5.0 \sim 6.0, 6.0 \sim 7.0, 7.0 \sim 8.0$ ）实测地震曲线进行等效循环周数的计算。

分别以 $M=5.5, 6.5, 7.5$ 三个震级进行等效循环周数的预测，建立预测值与震中距的曲线，并与实测等效循环周数进行比较，从而分析预测模型的可靠性。单向和双向等效循环周数预测曲线及实测数据分布见图 4, 5。

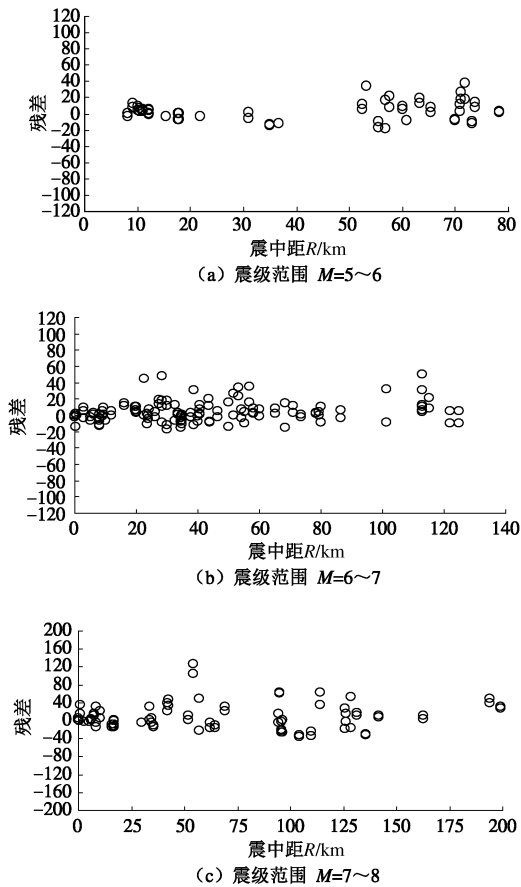
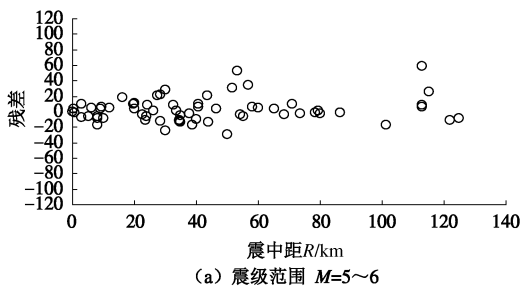


图 2 不同震级残差随震中距的分布（单向）

Fig. 2 Distribution of residuals with epicentral distance on various magnitudes (unidirection)



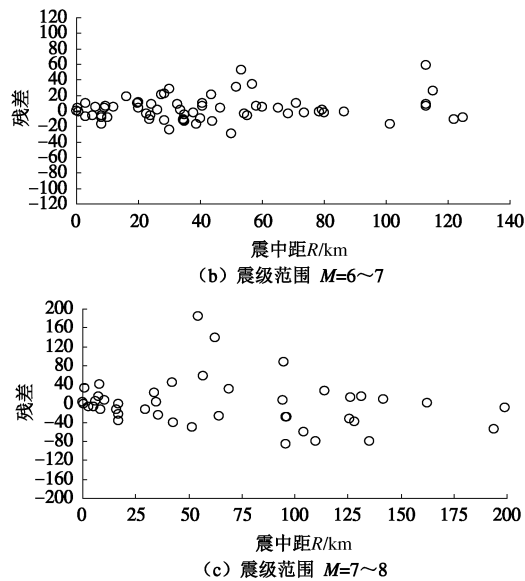


图 3 不同震级残差随震中距的分布 (双向)

Fig. 3 Distribution of residuals with epicentral distance on various magnitudes (bi-direction)

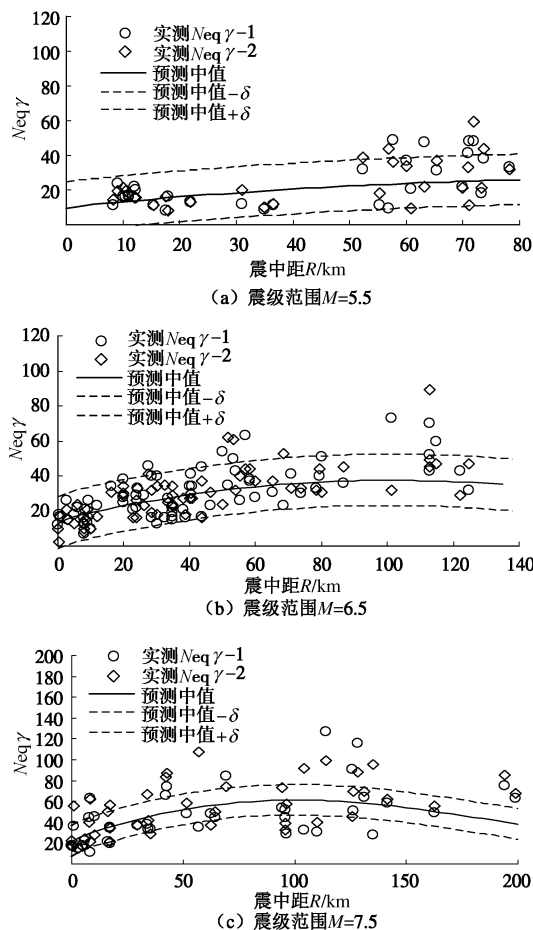


图 4 不同震级等效循环周数预测与实测值随震中距分布 (单向)

Fig. 4 Distribution of predicted equivalent numbers of strain cycles and measured ones on various magnitudes (unidirection)

图 4, 5 中“实测 $N_{eq\gamma-1}$ ”和“实测 $N_{eq\gamma-2}$ ”分别表示各组地震荷载的两个分量方向对应的实测等

效循环周数。预测中值为预测中值, 分别表示 $M=5.5$, 6.5 , 7.5 三个震级对应的等效循环周数值。预测值的标准范围分别以“预测中值 $+\delta$ ”和“预测中值 $-\delta$ ”限定。

从图 4, 5 中可以看出预测值可较好地反映实测值的变化趋势, 70%以上的实测数据均在整体范围标准差范围内。同时可以发现, 不同震级对应的等效循环周数随震中距的变化趋势有一定的差异。震级 $M=5.5$ 时, 等效循环周数随震中距的增大而逐渐增大; 震级 $M=6.5$ 时, 震中距在 $0\sim80\text{ km}$ 范围内, 等效循环周数随震中距的增大而逐渐增大。而当震中距大于 80 km 时, 等效循环周数随震中距的增大而呈现减小的趋势; 这一现象在震级 $M=7.5$ 时表现的更为明显。而且, 单向地震荷载情况下和双向地震荷载情况下等效循环周数随震中距的变化表现出相同的趋势。这一特征与 Stafford 等^[15]的研究结果是一致的, 分析其原因主要是由不同震级和震中距对应的地震频率差异造成的: 大震级地震生成的地震动频率分布广, 而其中高频地震动随距离增大迅速衰减, 从而削弱了对等效循环周数的贡献, 导致大震级对应的地震等效循环周数在较大震中距情况下呈现衰减趋势。

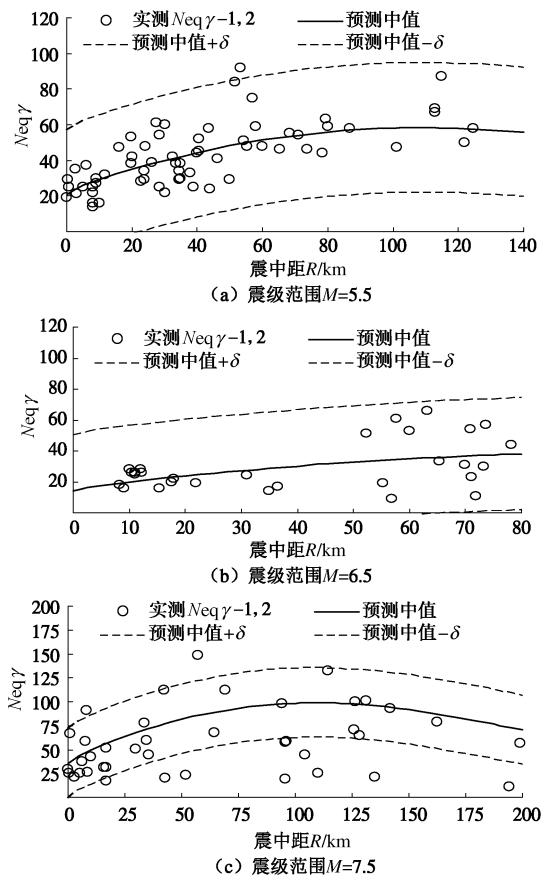


图 5 不同震级等效循环周数预测与实测值随震中距分布 (双向)

Fig. 5 Distribution of predicted equivalent numbers of strain cycles and measured ones on various magnitudes (bi-direction)

4 结 论

(1) 本文基于非线性混合效应模型所提出的地震荷载等效循环周数的预测模型具有较好的预测精度。结果表明预测值可较好地反映实测值的变化趋势。

(2) 不同震级对应的等效循环周数随震中距的变化趋势有一定的差异。当震级较大、震中距逐渐增大时, 其等效循环周数随之呈现减小的趋势。原因是大震级地震生成的地震动频率范围宽, 其中高频地震动随距离的增大迅速衰减, 从而削弱了对等效循环周数的贡献。

(3) 单向地震荷载作用下和双向地震荷载作用下等效循环周数随震中距的变化表现出相同的趋势, 但双向情况下的量值要明显大于单向。

(4) 本文在地震原始数据转换时采用的是相对密度为 45% 的砂土, 分析时仅考虑震级和震中距地震动特性, 因而得出的结果可能有一定的局限性, 有关其它土体参数的影响以及不同土体的等效模型分析将是后续的工作内容。

参考文献:

- [1] CHEN Q S, GAO G Y, YANG J. Dynamic response of deep soft soil deposits under multidirectional earthquake loading[J]. *Engineering Geology*, 2011, **121**(1/2): 55 - 65.
- [2] 陈青生, 高广运, 何俊锋. 地震荷载不规则性对砂土震陷的影响[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(12): 3713 - 3720. (CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, HE Jun-feng. Effect of irregularity of earthquake loading on seismic compression of sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(12): 3713 - 3720. (in Chinese))
- [3] 陈青生, 熊 浩, 高广运. 地震荷载特征及其对砂土震陷影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(8): 1483 - 1489. (CHEN Qing-sheng, XIONG Hao, GAO Guang-yun. Experimental study on properties of seismic loading and their influence on seismic compression in sands[J]. *Chinese Journal Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(8): 1483 - 1489. (in Chinese))
- [4] MARTIN G R, FINN L W D, SEED H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE)*, 1977, **103**(GT6): 549 - 64.
- [5] YOUD T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soil: summary report from the 1996 NCEER and 1998 Geoenvironmental Eng (ASCE) 2001, **127**(4): 297 - 313.
- [6] 孟凡超, 袁晓铭, 孙 锐. 不规则荷载下土体动力响应研究综述[J]. *世界地震工程*, 2011, **27**(2): 154 - 8. (MENG Fan-chao, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Review on soil dynamic response under irregular loads[J]. *World Earthquake Engineering*, 2011, **27**(2): 154 - 8. (in Chinese))
- [7] SEED H B. Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses[R]. California: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, 1975.
- [8] GREEN R A, TERRI G A. Number of equivalent cycles concept for liquefaction evaluations: revisited[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(4): 477 - 88.
- [9] 陈青生, 熊 浩, 高广运. 基于 R-N 非线性疲劳损伤累积模型的砂土震陷计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(12): 2203 - 2211. (CHEN Qing-sheng, XIONG Hao, GAO Guang-yun. Procedure for evaluating seismic compression in sands based on R-N cumulative damage fatigue nonlinear model[J]. *Chinese Journal Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(12): 2203 - 2211. (in Chinese))
- [10] LIU A H, STEWART J P, ABRAHAMSON N A, et al. Equivalent number of uniform stress cycles for soil liquefaction analysis[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, **127**(12): 1017 - 26.
- [11] 李春明. 混合效应模型在森林生长模型中的应用[J]. *林业科学*, 2009, **45**(4): 131 - 8. (LI Chun-ming. Application of mixed effects models in forest growth model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, **45**(4): 131 - 8. (in Chinese))
- [12] MCGUIRE R K, SILVA W J, COSTANTINO C J. Technical basis for revision of regulatory guidance on design ground motions: Hazard-and risk-consistent ground motion spectra guidelines[C]// US Nuclear Regulatory Commission, Washington D C, 2001.
- [13] 陈青生, 高广运, GREEN R A, 等. 砂土震陷分析中多维地震荷载等效循环周数计算[J]. *世界地震工程*, 2010, **26**: 6 - 12. (CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, GREEN R A. Computation of equivalent number of uniform strain cycles for seismic compression of sand subjected to multi-directional earthquake loading[J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, **26**: 6 - 12. (in Chinese))
- [14] Program-R (version 2.5.0). "A language and environment for statistical computing and graphics[CP/OL]. 2012. <http://www.r-project.org/>."
- [15] STAFFORD P J, BOMMER J J. Empirical equations for the prediction of the equivalent number of cycles of earthquake ground motion[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, **29**: 1425 - 1436.