

DOI: 10.11779/CJGE202104002

# 全局等效线性化土层地震反应分析方法

孙 锐, 袁晓铭\*

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 强非线性下土层地震反应数值模拟方法是国际难题, 等效线性化是该类问题最佳求解方式之一。提出了全局等效剪应变的概念和算法, 编制了新的等效线性化土层地震反应计算程序。研究表明, 以 0.65 倍最大剪应变为等效剪应变的传统方法不适于土层强非线性应变模拟, 采用全局优化, 以可参与性和完整性为原则构建全局等效剪应变。可参与性由有效剪应变门槛值确定, 以峰值超过门槛值的所有剪应变波共同参与计算来实现剪应变信息的完整性, 并采用零交法保证等效剪应变与剪应变时程之间有唯一对应关系。以 KiK-net 井下台阵 46 个场地、地表 PGA 为  $0.04g \sim 1.21g$  的 1963 组实测记录为样本, 对该方法和现有其它方法进行了对比检验, 结果表明所提出的概念和公式正确合理, 可很好地解决模拟强非线性下场地地震放大作用的问题。

**关键词:** 等效线性化; 土层地震反应分析; 强非线性; 全局等效剪应变; 有效剪应变门槛值; SITERESPONSE

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)04-0603-10

作者简介: 孙 锐(1972—), 女, 博士, 研究员, 主要从事土动力学与岩土地震工程等方面的研究。E-mail: iemsr@163.com。

## Holistic equivalent linearization approach for seismic response analysis of soil layers

SUN Rui, YUAN Xiao-ming

(Institute of Engineering Mechanics, Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The limitations of the traditional equivalent linearization approaches are investigated. The concept and algorithm of the holistic equivalent shear strain are proposed, and a new program for calculating seismic response of the equivalent linearized soil is compiled. The research indicates that the traditional approaches for the equivalent shear strain with 0.65 times the maximum shear strain are not suitable for simulating the shear stain of soil layers in strong nonlinear cases. Based on the holistic optimization, the participation and completeness of the holistic equivalent shear strain are constructed. The participation is determined by the effective shear strain threshold. All shear strain waves whose peak values exceed the threshold value are used to participate in the calculation to ensure the integrity of shear strain information, and the zero-crossing method is used to ensure that there is a unique relationship between the effective equivalent shear strain and the shear strain time history. By taking 1963 sets of records in the four types of sites with surface PGA from  $0.04g$  to  $1.21g$  in KiK-net underground arrays as samples to compare the new method with the other existing methods, the results show that the proposed concepts and formulas are correct and reasonable, and they can solve the problem of simulating strong nonlinear seismic amplification.

**Key words:** equivalent linearization; seismic response analysis; strongly nonlinear case; holistic equivalent shear strain; effective shear strain threshold; SITERESPONSE

## 0 引言

大量震害调查表明, 土层放大效应对各类工程地震破坏有十分重要的影响, 因此在工程场地地震安全性评价、重大工程抗震设计和地震区划工作中, 土层地震动计算都是必不可少的环节<sup>[1-4]</sup>, 分析方法的可靠性和合理性不仅决定着工程的地震安全, 也极大地影响着工程造价。其中, 深厚软土场地地震动数值模拟是岩土地震工程亟待解决的问题, 也一直是土动力学

研究中的一个国际难题<sup>[5-6]</sup>。

一维土层地震反应分析方法是土层地震动计算中最主要最基本的方法。等效线性化是进行非线性问题近似计算的常用方法, 具有物理意义清晰、模型简单、

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目  
(2020B03); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2020E019)

收稿日期: 2019-12-13

\*通信作者 (E-mail: yxmiem@163.com)

参数易得、计算效率高及收敛性好的显著优势，在工程实践当中颇受青睐，至今仍是不可替代的主流方法。目前国际上使用最广泛的一维土层等效线性化地震反应分析方法和程序为加州大学伯克利分校研发的 SHAKE 系列<sup>[7-8]</sup>，一直是目前各类动力计算软件可靠性的对比标准。该程序采用最大剪应变的 0.65 倍作为等效剪应变来确定土层剪切模量，国内广泛使用的 LSSRLI-1 原理与此相同。

另一种土层反应分析方法是时域弹塑性方法。虽然时域弹塑性计算方法理论上更符合实际情况，但由于时域动力反应计算涉及到土体的动应力 - 应变本构关系以及计算效率的问题，远没有达到成熟阶段。从工程实用角度，目前一维土层地震反应分析时域非线性弹塑性计算程序典型代表是 DEEPSOIL，为利诺伊大学厄巴纳-香槟分校研发。但是，从目前使用看，实际上并未能取得很好应有效果，强震下软土地带 DEEPSOIL 计算结果反而没有 SHAKE2000 好<sup>[9-11]</sup>。

SHAKE2000 和 DEEPSOIL 最大的问题，是在计算软土地带特别是深厚软土地带时，计算出的反应谱的“矮粗胖”，其中“矮”指的是计算出的地表加速度峰值很低，远低于实测记录，有时甚至比输入加速度峰值还小，实际工程中无法接受<sup>[12-14]</sup>。国外学者<sup>[15-18]</sup>采用大量井下台阵实测记录的对比研究表明，目前实际工程中最需要解决的是所有方法都不能很好地预测高强度输入运动下场地地震动的高频特性的问题，计算出的剪应变过大而地表 PGA 平均意义上比实际小 50%~75%。

针对该问题，中国学者近期研发了 SOILQUAKE 软件<sup>[19]</sup>。它以线性黏弹性波动理论和傅里叶频变换为求解基础。采用频率一致计算方法，解决了软土地带地表加速度峰值计算严重偏小的问题，但经使用发现高频部分反应计算结果偏大。更重要的是，频率一致只是一种数学方法，计算中不含物理意义，难以控制，同时因为是频域方法，目前还难以扩展到二维和三维问题。

近期一些学者针对频域等效线性化计算方法也进行了一些改进尝试<sup>[20-22]</sup>，其改进方式称为 FDM (frequency-dependent method)，即考虑频率相关性的等效剪应变计算方法，但研究表明，这种 FDM 方式，是以土体剪应变与震动速度之间成定值比例关系为基本出发点，这一关系仅在无界域波传播情况存在，对于水平成层场地不成立。即该改进方式存在定性错误，无论效果如何，理论上都不成立<sup>[19]</sup>。

等效线性化土层地震反应计算方法中最核心的问题是等效剪应变的计算方法。本文通过实例分析，研究传统等效剪应变计算方法的不当之处，寻找改进线索，以新的思想确定等效剪应变计算原则，兼顾土层

自身非线性特性和输入荷载两方面因素，以实际样本构造出新的等效剪应变计算公式，最后用实际井下记录初步检验概念和方法的可靠性，同时与现有其它方法进行对比。

## 1 传统方法的问题

在现有一维土层等效线性化分析方法中，采用迭代方法来考虑土的非线性，通常以前一次计算得到的最大剪应变  $\gamma_{\max}$  的 0.65 倍（简称为传统方法，下同）作为等效剪应变来确定下一次计算时土层剪切模量。需注意的是，传统方法 0.65 倍数，源于不规则地震加速度波形转化为 20 次等幅波的经验折减系数，并非源于土体剪应变的对等关系。

传统计算方法，在强非线性下往往过于高估等效剪应变，导致下一次计算中所使用的土层剪切模量被低估，从而造成场地过于软化的假象，无法真实反映场地的地震动放大效应。为说明此问题，现构造一个如图 1 所示的简化计算模型，20 m 范围等效剪切波速为 115 m/s，属于 III 类场地。土性参数如表 1 所示。输入波如图 2，为迁安波和 EL Centro 波，基底输入地震动峰值分别为 0.2g 和 0.25g。

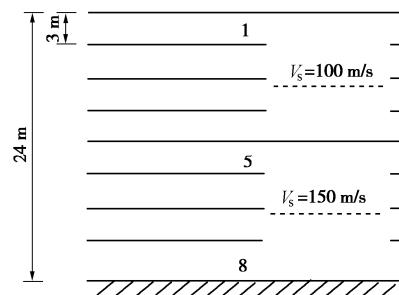


图 1 简化计算模型

Fig. 1 Simplified model

采用 SHAKE2000 计算该场地的地震反应，对两个输入波，计算所得地表加速度峰值分别为 0.25g 和 0.19g，分别为基底输入加速度峰值的 1.12 倍和 0.77 倍，体现不出软土地带放大效应。计算结果明显与实际记录和现有认识不符，这也是软土地带现有计算方法普遍存在的问题。两种波输入下得到的场地第 5 层的剪应变时程示于图 3。迁安波和 EL Centro 输入下，第 5 层的最大剪应变分别为  $1.52 \times 10^{-3}$  和  $1.77 \times 10^{-3}$ ，按传统方法得到的等效剪应变为  $0.98 \times 10^{-3}$  和  $1.15 \times 10^{-3}$ 。由图 3 可知，以传统方法得到的等效剪应变，大于整个剪应变时程中绝大多数的剪应变峰值，显然会高估实际剪应变，不能等效于土体的真实剪应变，以此求解得到的地表加速度响应也表明这种方式已失去了有效性。

表1 简化模型中土层非线性动剪切模量比和阻尼比

Table 1 Nonlinear dynamic shear modulus ratios and damping ratios used in simplified model

剪应变	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
剪切模量比	0.994	0.985	0.927	0.867	0.586	0.427	0.195	0.077
阻尼比	0.026	0.032	0.052	0.087	0.139	0.159	0.195	0.203

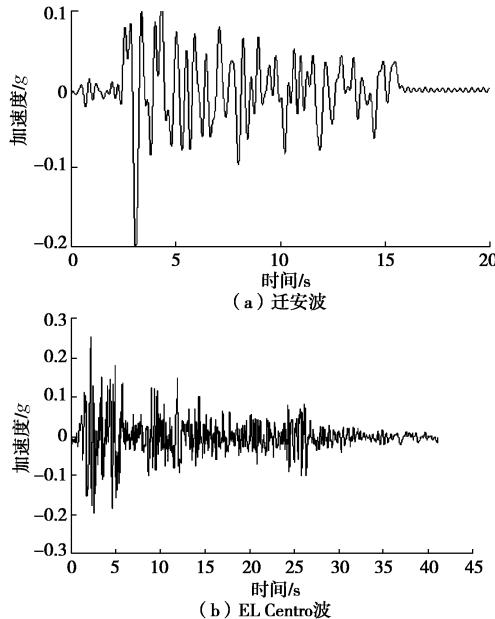


图2 简化计算模型中输入的加速度时程

Fig. 2 Time histories of acceleration in simplified model

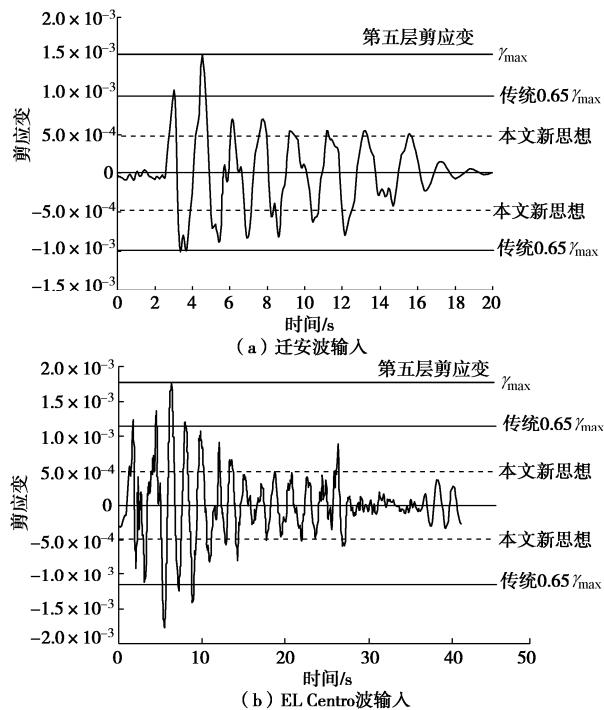


图3 传统方法和本文新思想下等效剪应变的对比

Fig. 3 Comparison of equivalent shear strains between traditional and new thoughts

## 2 全局等效剪应变的概念和计算方法

### 2.1 新思想的线索

鉴于传统方法的问题, 寻找更好的等效剪应变算法就成为关键。针对简化模型1, 先采用一个简单方式说明本文等效剪应变新算法的基本思想。

按现有认识, 实际不规则地震波(包括加速度、应变)中的小峰值波对土层地震动的响应作用不大, 真正起到有效作用的是那些较大幅值波, 因此所谓等效, 应是包括所有这些较大波的等效。鉴于此, 针对模型1, 本文先简单地以剪应变为 $10^{-5}$ 作为门槛值, 将剪应变时程中所有大于门槛值的穿零剪应变峰值的平均值取为新的等效剪应变, 以此得到新的等效剪应变示于图3中。如图所示, 迁安波和EL Centro波输入下, 按本文新思想得到的中间层等效剪应变分别为 $4.18 \times 10^{-4}$ 和 $4.86 \times 10^{-4}$ 。剪应变门槛值的设置, 一方面体现了较大波形对土层地震反应的作用, 另一方面也避免在数量上居多的小幅值波所带来的干扰。按现有研究成果<sup>[20]</sup>, 小应变下线性解不适于地表PGA大于 $0.1g$ 以及地震加速度频率成分大于3 Hz的情况, 即无法给出强地面动下高频运动(含地表峰值加速度)的合理估计。

仍采用等效线性化方式, 以本文新思想, 对于两个输入波, 计算出的地表加速度峰值分别为 $0.4g$ 和 $0.36g$ , 为输入峰值的2.0倍和1.44倍, 明显好于传统方法, 表明了新思想的可行性。

### 2.2 全局等效剪应变的概念和基本内涵

通过以上分析可知, 以0.65传统折减方法计算的等效剪应变往往大于整个剪应变时程中绝大多数波的峰值, 特别是对于冲击型荷载。即使是振动型荷载, 这种折减方法也不能反映出土体的真实的地震动过程, 给土层地震反应分析带来较大误差。

为得到合理可靠的结果, 本文提出了全局等效剪应变(HESS, holistic equivalent shear strain)的概念。这一概念的基本思想为, 采用等效线性化迭代技术在最终结果上逼近一个非线性地震动响应时, 其中等效剪应变的计算要进行全局优化, 做到有效而完备。具体含义包括两部分: 一是可参与性原则, 即通过设定一个对非线性反应有贡献的有效剪应变门槛值(ESST, effective shear strain threshold), 峰值大于该门槛值的剪应变波参加计算, 而峰值小于该门槛值的剪应变波不参与计算; 二是完整性原则, 即对峰值超过剪应变门槛值所有剪应变波都要进入计算, 计算出的等效剪应变不是仅由最大剪应变确定, 而是由峰值

超过剪应变门槛值的所有剪应变波共同决定。

对于全局等效剪应变，笔者认为需要考虑土层自身动力学非线性特性以及输入荷载两个方面的因素。具体需要考虑 3 点：①考虑各土层非线性特征，即对于具有强非线性的土层，需要设定较低的剪应变门槛值，以使更多的剪应变波形参与到等效剪应变的计算中，反之亦然；②考虑输入地震动大小，即对于基岩输入大的地震动，整个土层的剪应变会整体偏大，此时需要设定较低的剪应变门槛值，以纳入更多的剪应变波参与等效剪应变的计算，反之亦然；③考虑地震波形的全部信息。传统 0.65 剪应变计算方法，只与地震波的最大峰值有关，这会导致两个相同峰值而波形差异显著的地震波得到的等效剪应变完全一样，这显然与事实不符。本文的完整性原则要求峰值超过剪应变门槛值的所有剪应变波都应参与等效剪应变的计算，并且力求剪应变波形与等效剪应变之间具有唯一对应关系。

### 2.3 基本模型

针对上述全局等效剪应变计算方法中应考虑的 3 点问题，本文采用如下解决方案：

(1) 采用土层非线性曲线中的参考剪应变作为有效剪应变门槛值的控制指标之一。土体动剪切模量随剪应变幅值衰减归一化关系，是土层地震反应分析中反映土非线性强弱最重要的指标，本文参考剪应变按土动力学中常规做法，取为动剪切模量比衰减为 0.5 时的剪应变。

(2) 以基岩输入加速度峰值作为有效剪应变门槛值的控制指标之二，这一指标是输入地震动强度的标志性指标，能够在宏观上把控整个土层剪应变的大小。

综合以上考虑，土层中有效剪应变门槛值可以表达为

$$\gamma_{th} = C_{th} \cdot \gamma_{max} , \quad (1)$$

式中

$$C_{th} = C_{th}(\gamma_r, \alpha_{max,b}) . \quad (2)$$

式中  $\gamma_{th}$  为有效剪应变门槛值； $C_{th}$  为门槛系数； $\gamma_r$  为参考剪应变，即剪切模量比为 0.5 时所对应的剪应变； $a_{max,b}$  为基岩输入加速度时程的峰值，单位 g； $\gamma_{max}$  为剪应变程中的最大剪应变。

由于土层参考剪应变与基岩输入加速度峰值相互独立，式(2)可以进一步写为

$$C_{th}(\gamma_r, \alpha_{max}) = \alpha(\gamma_r) \cdot \beta(\alpha_{max,b}) , \quad (3)$$

这样，问题的关键转化成  $\alpha$  和  $\beta$  的求解。

(3) 对于全局等效剪应变的完整性，本文取土层剪应变时程中所有大于门槛值的穿零剪应变峰值的平均值，以此作为全局等效剪应变。比较其它一些方法，零交法非常简便，工程易于接受和操作，且没有人为

因素。在给定剪应变门槛值后，峰值超过剪应变门槛值的所有剪应变波都将参与等效剪应变的计算，并且在指定门槛值下，最终得到的等效剪应变与剪应变时程之间存在唯一对应关系。

### 2.4 有效剪应变门槛值计算公式

发展强非线性下土层地震反应分析方法的技术基础是具有地表和地下土层或基岩观测点的井下台阵记录，目前国际上井下台阵强震记录最丰富和最完整的为日本国家地球科学与防灾研究所建立的 KiK-net 强震动观测网<sup>[23]</sup>。本文从 KiK-net 井下台阵中随机选取不同类别的 6 个水平场地 28 组记录作为样本，对其进行试算。不断改变剪应变门槛值，当计算地表加速度与记录平均相对误差大致在 30% 以内，则认为计算的地表加速度与记录基本相符，完成  $\alpha$  和  $\beta$  的求解。本文方法是一种半经验半理论的简化方法，样本主要是用来控制土动力学特性和地震动强度影响的大致趋势并建立一种经验公式，而最重要的工作是与大量实际场地实测记录进行对比，验证所提出的思想和经验公式。

已有研究结果表明，土的参考剪应变基本在  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  之间。因此，本文在对样本进行计算时，将土的非线性特性以参考剪应变  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  和  $10^{-2}$  为指标分为强、中、弱 3 种。同时，在实际拟合中发现，当输入加速度峰值小于  $0.04g$  或大于  $0.1g$  时，剪应变门槛值基本为一常数，基岩地震波输入大小影响较小。这主要是由于输入小于  $0.04g$  时，无论土体的非线性特性如何，剪应变均较小，门槛系数变化不大。输入大于  $0.1g$  时，土体基本均进入大应变阶段，剪应变门槛系数变化也不大。而在  $0.04g \sim 0.1g$  区间内，土体则是处于一个过渡阶段，剪应变大致范围在  $10^{-5} \sim 10^{-3}$ ，非线性曲线变化较大，相应的门槛值也剧烈变化。结合样本的实际输入，将输入地震动强度按加速度峰值分为四级，分别以输入加速度峰值  $0.04g$ ,  $0.05g$ ,  $0.1g$  为分界值，每一级内取相同的门槛系数，再乘以最大剪应变后得到剪应变门槛值。

通过计算，得到了门槛系数与基岩加速度峰值和 3 种土层参考剪应变的关系曲线，如图 4 所示。对于相同基岩加速度峰值的门槛系数进行拟合，可以得到土层任意参考剪应变下  $\alpha$  的拟合曲线，如图 5 所示。

由图 4, 5，有

$$\alpha(\gamma_r) = 0.58 \cdot \lg \gamma_r + 3.3 , \quad (4)$$

$$\beta(\alpha_{max,b}) = 0.045 + \frac{0.245}{1 + e^{(50\alpha_{max,b} - 2)}} , \quad (5)$$

式(4), (5)代入式(1)，则有效剪应变门槛值计算公式为

$$\gamma_{th} = (0.58 \cdot \lg \gamma_r + 3.3) \cdot (0.045 + 0.245 / (1 + e^{(50\alpha_{max,b} - 2)})) \cdot \gamma_{max} . \quad (6)$$

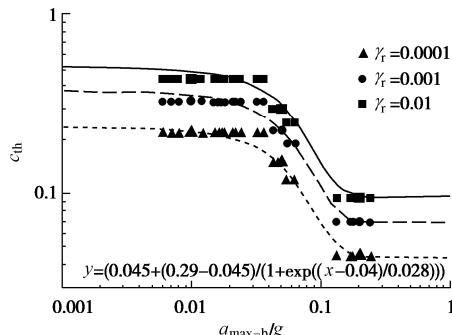


图 4 门槛系数与基岩加速度峰值和土的参考剪应变关系  
Fig. 4 Relationship among threshold coefficient, peak acceleration of bedrock, and three reference shear strains of soil

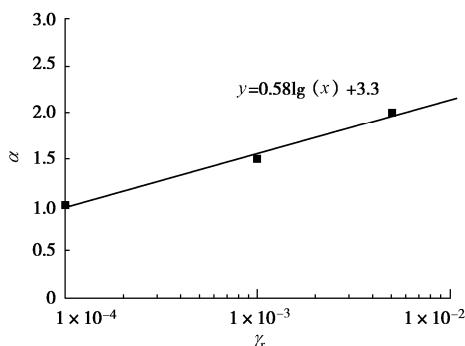


图 5 系数  $\alpha$  与土的参考剪应变关系曲线  
Fig. 5 Relationship between coefficient  $\alpha$  and reference shear strains of soil

采用本文全局等效剪应变代替传统 0.65 折减方法, 以此作为一维等效线性化土层反应分析中的等效剪应变, 形成计算软件 SITERESPONSE。

### 3 巨厚场地上验证

本文将满足《建筑抗震设计规范 GB50011—2010》IV类场地界定条件且覆盖土层厚度超过 140 m 的称为巨厚场地<sup>[24]</sup>。对土层地震动数值模拟方法考验最大的就是巨厚场地, 因而本文首先针对这类场地进行方法对比验证。

日本 KiK-net 强震井下台阵中, 符合水平场地条件的巨厚场地有 3 个, 分别为 NMRH04、AOMH13、和 IBRH10。为方便与已有研究成果对比, 同时保证各种方法在相同已知条件下进行计算, 本文采用 Darendeli 的研究成果<sup>[25]</sup>, 按照文献[11]所给出的土的非线性曲线数据库和选取方法给出 30 组非线性曲线得到计算参数。在地震记录选取时, 为与中国地震动区划图对应<sup>[26]</sup>, 只选择地表峰值加速度 PGA 大于 0.04g 的记录, 3 个场地井下和地表记录共计 165 组。

对 AOMH13、IBRH10 和 NMRH04 井下记录, 分别采用 SHAKE2000(简称 S, 下同)、DEEPSOIL5.0(简称 DP, 下同)、SOILQUAKE16(简称 SQ, 下

同)和本文软件 SITERESPONSE(简称 SR, 下同)进行计算和对比分析。需注意的是, 为保证几种方法已知条件相同, DEEPSOIL5.0 所需计算参数按土的动剪模量比和阻尼比进行转化计算。

#### 3.1 峰值加速度对比

采用 4 种程序对 3 个巨厚场地剖面进行计算, 以实测记录的地表 PGA 进行分区, 计算所有数值模拟结果与实测记录的相对百分误差绝对值的平均值 MAPE (mean absolute percentage error) 和相对误差的平均值  $\mu$ , 其表达分别为

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^n (|y^* - y| / y)}{n}, \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (y^* - y) / y}{n}, \quad (8)$$

式中,  $n$  为样本量,  $y$  为实际值,  $y^*$  为计算值。MAPE 表示整体相对误差的大小, 无法区分计算结果相对于实测记录的偏差方向。 $\mu$  可表示计算结果偏大还偏小, 但易产生正负抵消, 无法真实反映实际相对误差大小。因此需同时观察二者, 才可对计算结果给出正确评价。

对所有巨厚场地工况, 4 种程序计算出的 MAPE 和相对误差的平均值  $\mu$  示于表 2, 表中 3 个 PGA 区间, 即  $0.04g \sim 0.09g$ 、 $0.09g \sim 0.19g$  和  $0.19g$  以上, 按中国烈度划分标准, 分别约代表烈度六度、七度和八度及以上, 本文分别称为较弱、中强和强地震动及以上。

表 2 巨厚场地上地表峰值加速度计算误差

Fig. 2 Relative errors of calculated surface peak accelerations for deep soft sites

PGA 区间/g		DP	S	SQ	本文 SR
0.04~0.09	MAPE	0.13	0.08	0.33	0.11
	$M$	-0.11	0.06	0.33	0.11
0.09~0.19	MAPE	0.33	0.16	0.34	0.09
	$\mu$	-0.33	-0.16	0.34	-0.04
>0.19	MAPE	0.64	0.52	0.40	0.20
	$\mu$	-0.64	-0.52	0.40	-0.15

由表 2 可知: PGA 在  $0.04g \sim 0.09g$  区间时, 4 种程序计算结果相差不大, 但 SQ 结果相对偏大; PGA 在  $0.09g \sim 0.19g$  区间, DP、S 和 SQ 的相对误差较大, 在 15% 以上, 本文 SR 计算的绝对相对误差和平均相对误差均较小, 在 10% 以内; PGA 大于  $0.19g$  时, 本文 SR 计算的绝对相对误差和平均相对误差均在 20% 以内, SQ 的相对误差均为 40%, 而 DP 和 S 相对误差均在 50% 以上。同时可见, DP 和 S 在各区间的平均相对误差值均为负, 说明这两种方法计算结果普遍偏小, 尤其是大于  $0.19g$  时, 所有计算结果均大幅小于实测值; SQ 计算结果则普遍比实测值大, 整体偏大 30% 左右。

### 3.2 加速度反应谱对比

由于较小输入地震波占比很大,本文将  $0.09g$  以下数据按  $0.01g$  为组距,每一组内的计算值做一平均,绘制地表 PGA 的计算和实测关系及拟合曲线,结果如图 6 所示。由图可见,DP 和 S 在中等地震强度时计算 PGA 偏小,在强地震动时计算值偏小现象十分严重,而 SQ 计算值整体偏大。本文 SR 计算结果基本上以实测值为中线,在其两侧均匀分布,整体结果与实测最为接近,克服了前者的弱点。

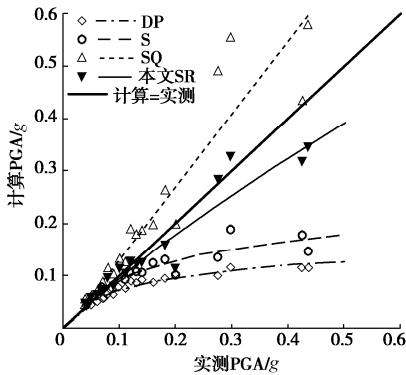


图 6 巨厚场地上计算地表峰值加速度与实测记录拟合曲线  
Fig. 6 Fitting relationship curves between recorded and calculated surface peak accelerations for deep soft sites

图 7 给出了 NMRH04、AOMH13 和 IBRH10 场地在强地震下 4 个程序计算地表加速度反应谱与实测记录对比。图 7 (a) 地表 PGA 记录为  $0.436g$ , S、DP、SQ 和本文方法计算地表 PGA 分别为  $0.148g$ ,  $0.117g$ ,  $0.581g$  和  $0.345g$ , S 和 DP 计算结果明显小于地表实测 PGA 值,甚至小于井下输入峰值加速度,失去了土层的放大作用。SQ 计算与实测结果接近,但放大作用略大。本文 SR 的结果与实测较为接近,但放大作用略小。图 7 (b) 地表记录为  $0.20g$ , S、DP 和 SQ 计算地表 PGA 分别为  $0.101g$ ,  $0.104g$  和  $0.200g$ , 本文 SR 的结果为  $0.114g$ 。SQ 计算出的地表峰值加速度和反应谱与实测值相比较为接近。图 7 (c) 地表 PGA 记录值为  $0.298g$ , S、DP 计算结果分别为  $0.189g$ ,  $0.116g$ , 明显小于地表实测值,本文 SR 的结果为  $0.328g$ , 与实测较为接近,同时与实测加速度谱也较为接近。而 SQ 计算值分别为  $0.556g$ , 整体偏大,特别是在高频部分,远大于实测记录。

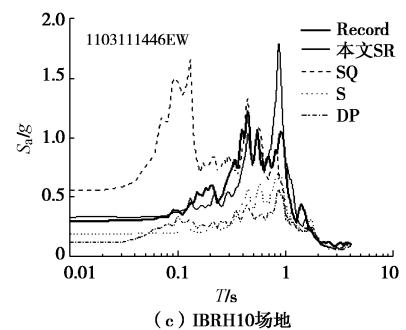
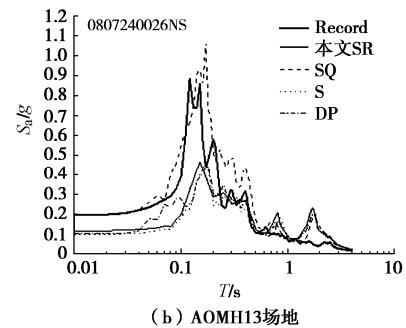
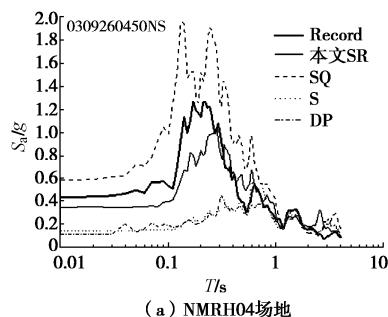


图 7 巨厚场地计算地表加速度反应谱与实测记录对比

Fig. 7 Comparison between measured and calculated response spectra for deep soft site

## 4 不同类别场地的验证

选取 KiK-net 数据库中 43 个不同类别的场地,总计 1798 组,地表加速度范围为  $0.04g\sim1.21g$  的地震记录对本文方法进行验证。

### 4.1 II 类场地对比

用于对比检验的 9 个 II 类场地 934 组记录中,地表加速度峰值分布范围较大,最大达到  $1.06g$ ,大于  $0.19g$  的记录有 54 组。对所有 II 类场地工况,4 种程序计算地表 PGA 的 MAPE 和  $\mu$  示于表 3,计算出的地表 PGA 与实测地表 PGA 的关系如图 8。

由表 3 可知: PGA 在  $0.04g\sim0.09g$  区间时,4 种程序计算结果相差不大,但 DP 结果相对偏大; PGA 在  $0.09g\sim0.19g$  区间,S 和 DP 的计算绝对误差、相对误差和平均相对误差均较大,在 20% 左右,本文 SR 和 SQ 的绝对误差和平均相对误差均较小,在 10% 左右; PGA 在  $0.19g\sim0.38g$  区间,4 个程序的绝对误差、相对误差都很大,在 30% 以上,但 S 和 DP 的平均相对误差较大,在 20% 以上,而 SR 和 SQ 的平均相对误差在 10% 左右; PGA 大于  $0.38g$  时,4 个程序的绝对误差、相对误差都很大,在 40% 以上,但 S 和 DP 的平均相对误差较大,在 20% 左右,而 SR 和 SQ 的平均相对误差均在 10% 以内。

由图 8 可见,4 种方法随地震动强度增加与实测值偏差均呈现增大趋势。较弱地震动下,4 个程序均表现良好。DP 和 S 程序,中强地震强度时表现较好,

在强地震强度时表现欠佳, 计算出的 PGA 偏小, 在超强地震强度计算值偏小严重。对 SQ 和 SR 而言, 计算误差随地震动强度增加呈直线形式变化, 在低烈度到高烈度区均有较好表现, 可反映硬场地强非线性下的放大作用, 克服了 S 和 DP 的弱点。

表 3 II类场地上地表峰值加速度计算误差

Table 3 Relative errors of calculated surface peak accelerations for site of type II

PGA/g	DP	S	SQ	本文 SR
0.04~0.09	MAPE	0.14	0.08	0.05
	$\mu$	-0.14	-0.05	0.01
0.09~0.19	MAPE	0.24	0.17	0.11
	$\mu$	-0.24	-0.17	-0.08
0.19~0.38	MAPE	0.40	0.33	0.37
	$\mu$	-0.27	-0.21	-0.04
>0.38	MAPE	0.41	0.43	0.45
	$\mu$	-0.28	-0.16	0.08

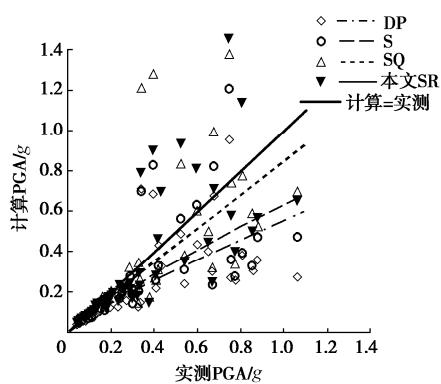


图 8 II类场地上地表峰值加速度与实测记录拟合关系曲线

Fig. 8 Fitting relationship curves between recorded and calculated

surface peak accelerations for site of type II

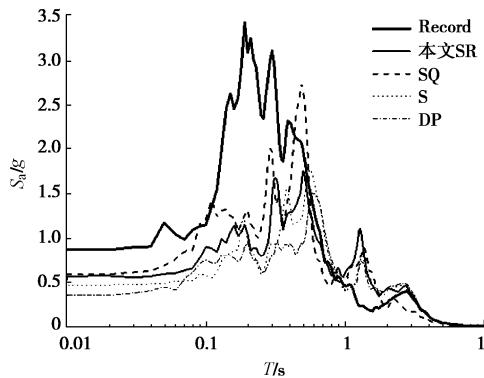


图 9 II类场地上地表加速度反应谱与实测记录对比

Fig. 9 Comparison between measured and calculated response spectra for site of type II

图 9 给出了 II 类场地在极强地震下 4 个程序计算地表加速度反应谱与实测记录对比。井下和地表加速度记录分别为  $0.204g$  和  $0.877g$ 。S、DP 和 SQ 计算地表加速度 PGA 分别为  $0.473g$ ,  $0.359g$  和  $0.529g$ , 本文 SR 的结果为  $0.568g$ 。由此可见, 在某些极强地震

动下, 几种方法的模拟都会出现一定问题, 但与 S 和 DP 相比, SQ 和 SR 计算的 PGA 与更接近实际, 计算的反应谱形状也与实测较为接近。

#### 4.2 III类场地对比

用于对比检验的 29 个 III类场地的 837 组记录中, 地表 PGA 最大为  $1.21g$ , 大于  $0.19g$  的有 42 组。对所有 III类场地方况, 4 种程序计算地表 PGA 的 MAPE 和  $\mu$  示于表 4, 计算出的地表 PGA 与实测地表 PGA 的关系如图 10。由表 4 可知, PGA 小于  $0.19g$  时, 4 种方法的计算误差基本相当, SQ 稍大, 但可接受。PGA 大于  $0.19g$  时, 本文方法计算误差最小。同时对比表 4 中的 MAPE 与平均值  $\mu$  可发现, 大于  $0.19g$  时, S 和 DP 几乎所有计算结果都小于实测, SQ 总体大于实测值, 而本文 SR 结果则围绕实测值上下浮动, 平均误差最小。

表 4 III类场地上地表峰值加速度计算误差

Table 4 Relative errors of calculated surface peak accelerations for site of type III

PGA/g	DP	S	SQ	本文 SR
0.04~0.09	MAPE	0.11	0.05	0.21
	$\mu$	-0.10	0.03	0.21
0.09~0.19	MAPE	0.27	0.12	0.32
	$\mu$	-0.24	-0.07	0.32
0.19~0.38	MAPE	0.45	0.30	0.52
	$\mu$	-0.45	-0.29	0.50
>0.38	MAPE	0.60	0.41	0.50
	$\mu$	-0.60	-0.41	0.43

由图 10 可见, DP、S 和 SQ 的计算结果与实测值偏差均随地震动强度增加呈现增大趋势, 其中 SQ 呈线性增长, DP 和 S 为指数曲线快速增长形式, 而本文 SR 计算结果与实测记录基本一致。

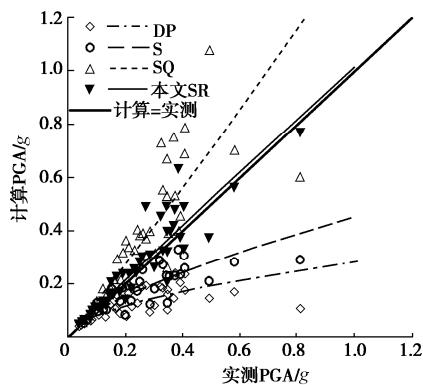


图 10 III类场地上地表峰值加速度与实测记录拟合关系曲线

Fig. 10 Fitting relationship curves between recorded and calculated surface peak accelerations for site of type III

图 11 给出了 III类场地在极强地震下 4 个程序计算地表加速度反应谱与实测记录对比。井下和地表加速度记录分别为  $0.175g$  和  $0.809g$ 。对此, S、DP 和 SQ 计算地表加速度 PGA 分别为  $0.290g$ ,  $0.107g$  和  $0.604g$ ,

本文 SR 的结果为  $0.767g$ 。由此可见，在强地震动下，S 和 DP 计算结果与实测差距较大，计算出的地表 PGA 与井下输入相当，甚至小于井下输入。相比之下，SR 和 SQ 更接近实测。

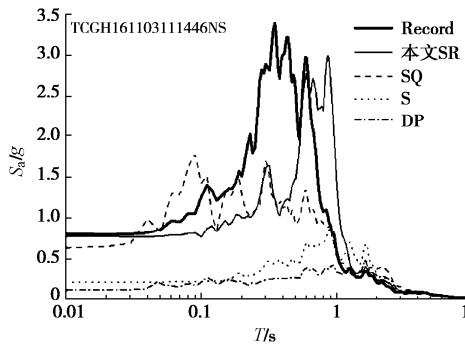


图 11 III类场地计算地表加速度反应谱与实测记录对比

Fig. 11 Comparison between measured and calculated response spectra for site of type III

#### 4.3 IV类场地对比

除去前文所述的 3 个巨厚场地 165 组记录外，本文研究中还包括了 5 个IV类场地的 27 组记录，大于  $0.09g$  的只有一组记录，为  $0.10g$ 。因此整体结果与巨厚场地基本一致，限于篇幅，不再赘述。

## 5 综合评价

地表峰值加速度 PGA 是体现土层放大作用的首要参数。为分析 4 个方法的可靠性，将 4 种程序在不同类别场地中计算的平均相对误差随地震强度变化曲线示于图 12。如果以相对误差  $\pm 20\%$  以内为可忽略的界限，从图 12 可见：对 II 类场地，SQ 和本文 SR 对 PGA 小于  $1.0g$  以内情况均适用，S 和 DP 则分别为 PGA 不超过  $0.20g$  和  $0.12g$ ；对 III类场地，本文 SR 对 PGA 小于  $1.0g$  以内情况均成立，SQ 对 PGA 小于  $0.2g$  内成立，S 和 DP 则分别为 PGA 不超过  $0.18g$  和  $0.10g$ ；对 IV类场地，SQ 和本文 SR 对 PGA 小于  $1.0g$  以内情况均成立，S 和 DP 则分别为 PGA 不超过  $0.12g$  和  $0.08g$ ；对于巨厚场地，本文 SR 对 PGA 小于  $0.5g$  以内情况均成立，SQ 计算结果偏大，S 和 DP 则分别约为 PGA 不超过  $0.10g$  和  $0.05g$ 。

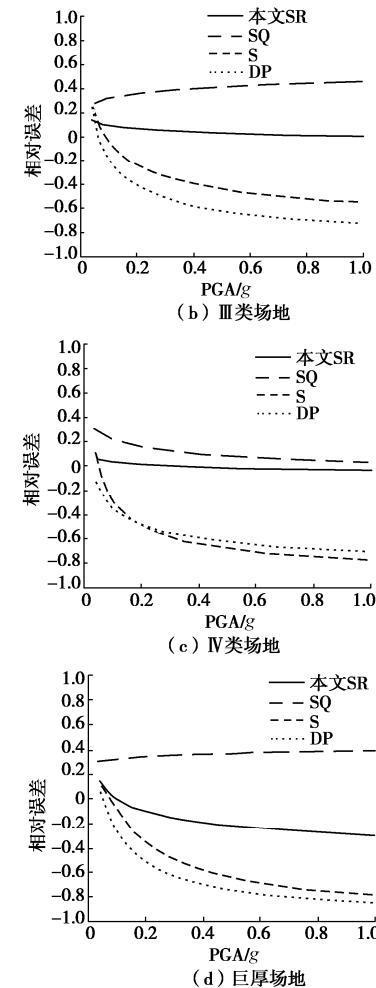
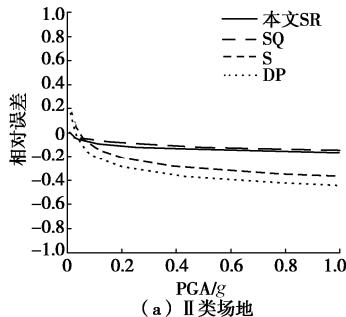


图 12 不同类别场地下 4 种程序计算相对误差平均值随地震强度变化曲线

Fig. 12 Average relative errors calculated by four programs versus seismic intensity for different types of sites

## 6 结 论

为解决等效线性化方法在场地强非线性地震反应分析的难题，本文分析了传统等效线性化方法的局限，提出了全局等效剪应变的概念和算法，编制了新的等效线性化土层地震反应计算程序，采用含有 4 种类别 46 个场地 1963 组实测井下地震记录对本文及其它现有方法的有效性进行了对比检验，主要成果如下：

(1) 以 0.65 倍最大剪应变作为等效剪应变的传统方法，来源于不规则地震加速度波形转化成等幅波的折减方式，此方法在强非线性下往往高估土体动剪应变，从而造成场地过于软化的假象，无法真实反映场地强非线性地震响应。

(2) 提出了全局等效剪应变的概念、思想和算法。等效剪应变按可参与性和完整性原则获得，即设定对非线性反应有贡献的有效剪应变门槛值，等效剪应变则是由峰值超过有效剪应变门槛值的所有剪应变波形

共同决定。

(3) 有效剪应变门槛值由土层非线性特性和输入荷载大小决定。以随机选取的不同强度加速度的不同类别水平场地若干实测记录为样本, 得到有效剪应变门槛值计算模型和参数。

(4) 基于全局等效剪应变算法的等效线性化方法, 比传统等效线性化方法和现有弹塑性方法具有显著优势, 同时克服了频率一致方法在软土地场模拟PGA结果总体偏大的缺点。

(5) 本文方法和 SOILQUAKE16 在不同类别场地下计算 PGA 误差受输入地震动强度影响均不大, 表明这两种方法误差为计算误差; SHAKE2000 和 DEEPSOIL 在不同类别场地下计算 PGA 误差随地震强度增加而快速增大, 表明这两种方法存在不可忽视的方法误差。

(6) 极强地震动下, 本文方法和 SOILQUAKE 较 SHAKE2000 和 DEEPSOIL 有明显改进, 但距实测结果还有较大差距, 需要进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 廖振鹏. 地震小区划(理论与实践)[M]. 北京: 地震出版社, 1989. (LIAO Zhen-peng. Seismic Microzonation (Theory and Practice)[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese))
- [2] 徐扬, 赵晋泉, 李小军, 等. 基于汶川地震远场强震动记录的厚覆盖土层对长周期地震动影响分析[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(4): 345–351. (XU Yang, ZHAO Jin-quan, LI Xiao-jun, et al. Study on effect of thick sedimentary layers on long-period ground motion from far-field strong motion records of Wenchuan earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(4): 345–351. (in Chinese))
- [3] 王海云, 谢礼立. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1631–1638. (WANG Hai-yun, XIE Li-li. Effects of topography on ground motion in the Xishan Park, Zigong city[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7): 1631–1638. (in Chinese))
- [4] 吴志坚, 王兰民, 陈拓, 等. 汶川地震远场黄土地场地地震动场地放大效应机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3736–3740. (WU Zhi-jian, WANG Lan-min, CHEN Tuo, et al. Study of mechanism of site amplification effects on ground motion in far field loess during Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3736–3740. (in Chinese))
- [5] GRIFFITHS S C, COX B R, RATHJE E M. Challenges associated with site response analyses for soft soils subjected to high-intensity input ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 85: 1–10.
- [6] 李晓飞, 孙锐, 袁晓铭. 现有等效线性化分析程序在实际软场地计算结果方面的比较[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 56–62. (LI Xiao-fei, SUN Rui, YUAN Xiao-ming. The Comparison of existing equivalent linear response analysis program for actual soft site in KiK-net Array[J]. Journal of Natural Disaster, 2015, 24(4): 56–62. (in Chinese))
- [7] SCHNABEL P B, LYSMER J, SEED H B. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites[R]. Berkeley: University of California, Earthquake Engineering Research Center, 1972.
- [8] SHAKE2000 User's Manual[M]. Washington: GeoMotions, LLC, 2011.
- [9] 李晓飞, 孙锐, 于啸波, 等. 实际硬场地下现有等效线性化分析程序的对比[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 947–954. (LI Xiao-fei, SUN Rui, YU Xiao-bo, et al. The comparison of existing equivalent linear analysis program under actual stiff site based on KiK-net Array[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 947–954. (in Chinese))
- [10] 李瑞山, 袁晓铭, 李程程. 中硬场地下两种土层地震反应方法与精确解的对比[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 40–46. (LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming, LI Cheng-cheng. A comparison between different seismic response analysis methods and exact solution for medium hard soil sites[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 37(2): 40–46. (in Chinese))
- [11] 王鸾, 袁近远, 汪云龙, 等. 基于软土地场实测记录的三种土层地震反应分析方法可靠性研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 12–19. (WANG Luan, YUAN Jin-yuan, WANG Yun-long, et al. Reliability comparison of three kinds of seismic response analysis methods for soil layers in soft soil site[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 12–19. (in Chinese))
- [12] 李兆焱, 袁晓铭, 王鸾, 等. 巨厚场地三种土层地震反应分析程序对比检验[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 42–50. (LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming, WANG Luan, et al. Verification of three methods for calculating earthquake response of soil layers in deep sites[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 42–50. (in Chinese))

- [13] 杨 洋, 孙 锐, 杨洪搏. 国际上两种典型土层地震反应分析程序对比研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 17 - 23. (YANG Yang, SUN Rui, YANG Hong-bo. Contrasting study between two international typical soil layers seismic response analysis programs[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 17-23. (in Chinese))
- [14] 李瑞山, 袁晓铭, 李程程. 基于黏弹性解的土层地震反应分析程序LSSRLI-1和SHAKE2000的对比[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 17 - 27. (LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming, LI Cheng-cheng. Visco-elastic solution based comparison between the ground response analysis programs LSSRLI-1 and SHAKE2000[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(3): 17 - 27. (in Chinese))
- [15] ZALACHORIS G, RATHJE E M. Evaluation of one-dimensional site response techniques using borehole arrays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2015, 141(12): 53 - 65.
- [16] GRIFFITHS S C, COX B R, RATHJE E M. Challenges associated with site response analyses for soft soils subjected to high-intensity input ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 85: 1 - 10.
- [17] RATHJE E M, KOTTKE A R, TRENT W L. Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis[J]. J Geotech Geoenv Eng, ASCE, 2010, 136: 607 - 619.
- [18] KAKLAMANOS J, BRADLEY B A, THOMPSON E M, et al. Critical parameters affecting bias sand variability in site-response analyses using KiK-net downhole array data[J]. Bull Seism Soc Am, 2013, 103(3): 1733 - 1749.
- [19] 袁晓铭, 李瑞山, 孙 锐. 新一代土层地震反应分析方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 95 - 102. (YUAN Xiao-ming, LI Rui-shan, SUN Rui. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 95 - 102. (in Chinese))
- [20] YOSHIDA N, KOBAYASHI S, SUETOMI I, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(3): 205 - 222.
- [21] ASSINMAKI D, KAUSEL E. An equivalent linear algorithm with frequency and pressure-dependent moduli and damping for the seismic analysis of deep sites[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9/10/11/12): 959 - 965.
- [22] 蒋 通, 邢海灵. 水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 218 - 224. (JIANG Tong, XING Hai-ling. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 218 - 224. (in Chinese))
- [23] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience(NIED) Strong-Motion Seismograph Networks (K-NET,Kik-net)[OL].<http://www.Kyoshin.bosai.go.jp>
- [24] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2010. (Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. 2010. (in Chinese))
- [25] DARENDELI M B. Development of A New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2001.
- [26] 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 2015. (Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB18306—2015[S]. 2015. (in Chinese))