

文章编号: 1000-7598-(2013)08-2158-08

概率性分析在黄土场地动力沉降评价中的应用

孙军杰^{1,2,3}, 田文通², 徐舜华^{1,2,3}, 刘琨^{1,2,3}, 王兰民^{1,2,3}, 牛富俊⁴

(1.中国地震局 黄土地震工程重点实验室, 兰州 730000; 2.中国地震局 兰州地震研究所, 兰州 730000;
3.甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 兰州 730000; 4.中国地震局 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要:天然黄土动残余应变研究主要依赖室内动三轴试验, 如何将有限室内试验数据合理地应用于场地动力沉降的定量评价, 是岩土地震工程领域中研究涉足尚少的重要科学问题。应用概率统计与蒙特卡洛模拟等非确定性分析方法, 借助综合考虑固结应力、结构强度、空间体积特性和地震动荷载等动残余应变关键影响参量的估算模型, 提出有效弱化土体物性参量不确定性(离散性与随机性)的场地动力沉降概率性评价的思路与方法。应用结果显示, 利用该方法得出的场地动力沉降的概率分布特征, 能够反映天然黄土动残余应变的基本认知特点, 对明晰地震作用下天然黄土地场精细动力沉降特性以及据此采用适当合理的地基处理方法, 具有理论意义与实用价值。

关键词:黄土场地; 地震动; 残余应变; 室内试验; 动力沉降; 概率性评价

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Application of probability analysis method to quantitative evaluation of dynamic settlements of natural loess field

SUN Jun-jie^{1,2,3}, TIAN Wen-tong², XU Shun-hua^{1,2,3}, LIU Kun^{1,2,3}, WANG Lan-min^{1,2,3}, NIU Fu-jun⁴

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China;

4. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Dynamic triaxial test in laboratory is the main approach to investigate the dynamic residual strain (seismic subsidence) of natural loess under seismic loadings. How to reasonably apply the little test data in laboratory into the quantitative evaluation of dynamic settlement in loess field is one key problem within the practice of geotechnical earthquake engineering. Based on a magnitude estimation model for dynamic residual strain of natural loess, which comprehensively considers the critical influence parameters of the dynamic subsidence, consolidation stress, structure strength, spatial volume property and seismic loadings, the authors propose a probability-based evaluation method for ground settlement of natural loess under seismic loadings by means of theoretical analysis methods of probability statistics and Monte Carlo simulation. For the application of this new probability-based evaluation method, here, we provide one practical case on a typical loess field. The relevant Chi-square test show that frequency features of the four critical parameters influencing dynamic residual strain of natural loess determined by the above-mentioned theoretical model could be described by normal distribution. In order to minimize the uncertainties (scattering and randomness) of physico-mechanical property of the soil, furthermore, Monte Carlo simulation technique is adopted to extend the laboratory data into huge numbers. Then the corresponding huge numbers of dynamic residual strain of natural loess in the case field calculated by the evaluation method could be used to analyze the probability features of dynamic settlement behaviors of the loess ground. According to occurrence probabilities of different magnitude-grades of dynamic settlement, we could acquire the detailed behaviors of dynamic residual strain of natural loess in the target field under seismic loadings. The probability distribution reveals that the quantitative evaluation method reported here can obviously decrease the influence of parameter uncertainty associated with the soil. Meanwhile, those probability characteristics of dynamic settlement in the example field accord with the existing basic-behavior knowledge of dynamic residual strain of natural loess under seismic loadings. These results mean that the probability method could provide a

收稿日期: 2012-06-27

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费资助 (No. 2010A88-6); 冻土工程国家重点实验室开放基金资助 (No. SKLFSE201104); 国家自然科学基金资助 (No. 50978239)。

第一作者简介: 孙军杰, 男, 1979年生, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事岩土工程与地震工程方面的研究工作。E-mail: sunjunj@163.com

better/reasonable reference not only to understand dynamic settlement behaviors of natural loess ground under seismic loadings, but also to select the proper treatment method for the potentially dangerous ground.

Key words: loess field; ground motion; residual strain; laboratory test; dynamic settlement; probability-based evaluation

1 引言

相比土木工程学科的其他研究领域,岩土工程领域中的可靠理论及其成功应用需要更多经验方面的支撑^[1],室内试验、现场测试以及工程实例是获取可靠的土体工程地质性质与力学特性经验认知的主要途径。土体由松散堆积物组成,类型多样、成因复杂,作为科学研究的普遍对象时,具备极其复杂的工程特性。最为直观的表现是物理力学参数具有典型的不确定性(离散性与随机性)。一定程度上,不确定性是造成岩土工程研究领域需要更多经验支撑以校佐认知可靠度的基本内因。

土体对外部条件的形变响应是岩土工程研究领域的基本科学问题。外部动荷载作用下,土体的形变响应特征在岩土工程与地震工程的交叉研究领域内备受关注。随着土力学及岩土工程的发展,在处理一些常规或复杂的工程问题方面积累了丰富的经验,但这些个案经验(或理论)在上升到普遍的理论层面时遇到了几乎难以克服的困难。直接导致针对岩土工程包括岩土地震工程领域的许多问题,仍处于学院式^[2]的认知阶段,土体在外部静载或动载作用下的形变问题亦不例外。

谢定义^[3]认为,理论土力学未来主要研究对象将可能是非饱和土力学和土动力学。作为地基基础主要震害之一,土体动残余应变(震陷)研究在学界受到极大关注。饱和土方面,土体的动残余应变研究工作主要针对软土、黏土和淤泥质土等开展^[4-5]。在非饱和土方面,有学者在黄土动残余应变问题开展了大量研究工作,不过这些研究几乎都以饱和土力学理论作为基本分析方法,如李宁等^[6]所言,对黄土特殊的湿陷变形性质的研究目前大都仍在饱和土的范围做工作,对于工程上常见的非饱和原状黄土力学性质的研究仍处起步阶段。

作为岩土工程基本研究对象,土体自身的复杂性与特殊性,决定了岩土工程领域内的基本科学问题要在理论上取得相应的突破,并非短期可见。因此,如何利用尚能行之有效的经验或经验与理论参半的研究结果,使之在相关理论方法完善之前,尽可能使自身具备的个案价值扩展至有限的普遍意义,是涉及岩土工程理论与应用等研究必须关注的重点所在。这一方面,恰如谢定义^[3]指出,理论土力学在继续从现代数学与现代力学汲取新的活力以

外,以非确定性为基础的理论(概率统计、随机过程、模糊数学等)将在形成更加符合土及类土材料的非确定性力学理论方面起积极作用。

天然黄土是一类第四纪沉积而成的典型非饱和特殊土,与之相关的动残余应变研究工作主要依赖室内动三轴试验开展。本文旨在应用概率统计与蒙特卡洛模拟等非确定性理论分析方法,借助已有的非饱和黄土动残余应变量值估算模型^[7],提出能够有效弱化土体物性参量不确定性(离散性与随机性)的场地动力沉降定量评价方法。应用非确定性分析方法定量评价天然黄土地动力沉降特性,能够明晰地震作用下土体沉降的细节特征,这对据此采用适当合理的地基处理方法,具有理论与应用方面的重要意义。

2 动力沉降概率性评价

2.1 基本思路

地震作用下天然黄土地动力沉降的概率性评价方法涉及三方面内容:(1)理论基础(应力-应变本构关系);(2)方法基础(非确定性分析);

(3)数据基础(试验数据与计算控制参数)。理论基础主要为定量评价提供实施可信计算(试验数据量扩展)的支撑平台。方法基础的主要作用在于通过应用非确定性分析理论,在借助理论基础的前提下,使天然场地土体物性参量的不确定性对动力沉降定量评价的负面影响尽可能得以降低。数据基础以满足理论基础(参量名目)和方法基础(试验数据量)的基本需求为条件,文内在动力沉降定量评价的实例应用中,涉及的参量数据主要利用室内试验方法针对典型天然黄土地而得。

本文提出地震作用下天然黄土地动力沉降概率性定量评价方法的理论基础,借助孙军杰等^[7]建立的非饱和黄土动残余应变的量值估算模型。该模型以非饱和土三相概念为基础,求算过程具备明确的物理含义,通过综合考虑场地固结应力、土体结构强度与空间体积特性以及地震动荷载等动残余应变的关键影响参量(各参量相互独立),可实现同一场地不同深度、不同场地天然黄土在不同强度地震动荷载作用下的土体动残余应变之间的交叉(复合)比较。模型的合理性与适用性,符合本文应用非确定性分析实现天然黄土地动力沉降定量评价时有关理论基础方面的需求。

在方法基础方面, 主要包括两部分内容:

(1) 土体物性参量频度分析; (2) 室内试验数据量扩展。前者以概率统计分析理论为基础, 后者应用蒙特卡洛模拟方法实现。

在数据基础方面, 与概率性定量评价实例应用相关的土体物性参量(室内试验数据)和其他参量(计算控制参数)在章节 3.1 中给出。

2.2 概率性分析理论的应用

孙军杰等^[7]通过理论分析, 给出非饱和黄土动残余应变 ε 与泊松比 ν 、初始孔隙比 e_i 、孔隙比压缩量 ($\Delta e = e_i - e_f$, e_f 为形变后孔隙比) 之间的定量关系:

$$\nu^2 \varepsilon^3 + (2\nu - \nu^2) \varepsilon^2 + (1 - 2\nu) \varepsilon = \frac{\Delta e}{e_i + 1} \quad (1)$$

从广义吸力概念^[8]入手, 将以往分析黄土动残余应变影响因素相关研究关注的含水率、重度、黏性指数、孔隙比等单独参量统一归入土体结构强度的变化中。通过引入应力比, 在分析试验数据的基础上, 提出天然非饱和黄土动残余应变量值估算的半理论-半经验关系^[7]:

$$\varepsilon = \frac{0.009\ 328 \left[(1 + \ln N) \sigma_d / (c + \sigma_c \tan \varphi) \right]^{2.336\ 4}}{e_i + 1} \quad (2)$$

式中: σ_d 为动应力 (kPa); σ_c 为场地土体固结应力 (kPa); N 为室内动三轴试验动应力加载次数; c 为黏聚力 (kPa); φ 为内摩擦角 ($^\circ$)。

为得出任意地表 PGA (地震动峰值加速度) 水平分量作用下非饱和黄土动残余应变的量值估算关系, 采用 Seed 等效循环剪应力法, 式 (2) 的 σ_d 可写为^[7]

$$\sigma_d = 1.3 \gamma z r_d \frac{a_{\max}}{g} \quad (3)$$

式中: $\gamma = \bar{\rho} g$ 为土层重度, $\bar{\rho}$ 为上覆土层加权平均密度 (g/cm^3); g 为重力加速度 (m/s^2); z 为土体所在埋深 (m); r_d 为地震动深度折减系数; $a_{\max}$ 为地表 PGA 水平分量 (m/s^2)。

为分析方便, 将估算某强度地震作用下非饱和黄土动残余应变量值的关系式 (2) 与式 (3) 联合, 简写为

$$\varepsilon = f(c, \varphi, e_i, \gamma, z, a_{\max}, r_d, N) \quad (4)$$

由式 (4) 易知, 定量评价地震作用下天然黄土场地动力沉降特性时, 涉及的参量数据主要包括非饱和黄土物性参量 (c 、 φ 、 e_i 和 γ)、场地土层 z

和地震动荷载 ($a_{\max}$ 、 r_d 和 N) 等三类。土体物性参量通过室内试验获取, 场地土层和地震动荷载等参量根据计算需求选定。室内试验给出的实例评价场地的土体物性参量数据最为可靠与直接, 但试验数据量通常不可能很多。定量评价天然场地动力沉降时, 少量的试验数据很难起到有效弱化场地土体物性参量不确定性的作用, 远不能满足结果可信度的需求, 更不可能由此求得不同动残余应变等级下场地动力沉降实际发生的可能性。

对于特定天然黄土地, 土体物性参量的分布具有较为明确的量值范围^[9]。分析不同物性参量的实测量值范围, 可获得相应的频度分布特征, 据此得出的频度分布函数是利用蒙特卡洛模拟方法扩展试验数据量的基础。利用相应分布函数, 借助蒙特卡罗模拟方法, 能够生成数量庞大的满足场地动力沉降定量评价需求的物性参量 (与室内试验数据具有相同的频度分布特征)。进而由式 (4) 即可算得数量足够的不同强度地震作用下天然黄土地土体动残余应变的量值, 用以定量评价目标场地的动力沉降特性。

根据式 (4), 天然黄土地土体物性参量扩展数量为 N_{total} 的情况下 (c^j 、 φ^j 、 e_i^j 、 γ^j , 其中, $j=1, 2, 3, \dots, N_{\text{total}}$), 动残余应变估算关系相应变为

$$\varepsilon^j = f(c^j, \varphi^j, e_i^j, \gamma^j, z, a_{\max}, r_d, N) \quad (5)$$

依次考虑不同埋深 z^l (由地表至黄土埋深下界 D 按同一层厚 T 连续取值)、不同强度地震动 PGA^m (在关注的地震动强度范围内按一定增量连续取值, $m=1, 2, 3, \dots, m_{\max}$) 和不同动应力加载次数 N^q (在最大加载次数范围内按一定增量连续取值, $q=1, 2, 3, \dots, q_{\max}$), 式 (5) 中动残余应变的求算形式可写为

$$\varepsilon^{j,l,m,q} = f(c^{j,l,m,q}, \varphi^{j,l,m,q}, e_i^{j,l,m,q}, \gamma^{j,l,m,q}, z^{l,m,q}, a_{\max}^{m,q}, r_d^{l,m,q}, N^q) \quad (6)$$

式中: $\varepsilon^{j,l,m,q}$ 为在按某一强度地震动折算成的等效剪应力加载某一次数后某一埋深具有某一组 (4 类) 物性参量的非饱和黄土产生的动残余应变。

参照式 (2)、(3), 式 (6) 的具体形式为

$$\varepsilon^{j,l,m,q} = \frac{0.009\ 328 \left[\frac{1.3 \gamma^{j,l,m,q} z^{l,m,q} a_{\max}^{m,q} r_d^{l,m,q} (1 + \ln N^q)}{g (c^{j,l,m,q} + \gamma^{j,l,m,q} z^{l,m,q} \tan \varphi^{j,l,m,q})} \right]^{2.336\ 4}}{e_i^{j,l,m,q} + 1} \quad (7)$$

在式 (7) 的基础上, 应用下式:

$$P_{(\varepsilon_{k-1} \leq \varepsilon^{j,l,q} < \varepsilon_k)}^m = \frac{Number_{(\varepsilon_{k-1} \leq \varepsilon^{j,l,q} < \varepsilon_k)}^m}{N_{total}^m Round(D/T)} \quad (8)$$

即可求得给定强度地震作用下天然黄土地发生不同程度等级动残余应变的概率。式中: ε_k 、 ε_{k-1} 分别为动残余应变等级划分时参考的上、下限量值 ($k=1,2,3,\dots,n$); $Number$ 为特定条件下动残余应变变量值的数量; $Round$ 为求整运算 (4 舍 5 入)。

应用分层总和法, 由式 (7) 得出的场地动力沉降量值关系:

$$s^{j,m,q} = \sum_{l=1}^{l_{max}} \varepsilon^{j,l,m,q} T^l \quad (9)$$

式中: $s^{j,m,q}$ 为特定条件下场地土体的动力沉降量 (m); l_{max} 为总分层数 ($= Round(D/T)$)。

结合式 (8), 不同沉降等级下的场地土体动力沉降发生概率可写为

$$P_{(s_{k-1} \leq s^{j,m,q} < s_k)}^m = \frac{Number_{(s_{k-1} \leq s^{j,m,q} < s_k)}^m}{N_{total}^m} \quad (10)$$

式中: s_k 、 s_{k-1} 分别为动力沉降等级划分时参考的上、下限量值 ($k=1,2,3,\dots,n$)。

根据研究或应用的实际需求, 利用式 (8)、(10) 即可实现天然黄土地动力沉降的概率性定量评价, 明晰不同强度地震动作用下场地土体动力沉降的精细特征。

2.3 土体物性参量非确定性分析

(1) 频度分析

自然生成的各类土体, 随机性是其物性参量的基本特点。正态分布是定量描述自然科学与行为科学中随机现象的一个方便模型, 笔者针对式 (4) 涉及的天然黄土物性参量的频度分布特征的分析结果表明, 相关目标参量可采用正态分布函数进行合理描述 (详参章节 3.2)。

频度分析时, 采用下式求算天然黄土相关目标物性参量的频度分布特征 (累积分布概率):

$$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (11)$$

式中: $F(x; \mu, \sigma)$ 为随机变量 $X \leq x$ 的概率; μ 为均值; σ 为标准偏差; 积分下限以包含天然黄土目标物性参量试验数据最小值的任意大于 0 的数值替代。

(2) 试验数据量扩展

蒙特卡洛模拟方法是 20 世纪 40 年代中期提出的一种以概率统计理论为基础的数值计算方法。利

用该方法, 能够获得满足给定分布条件的任意数量的计算数据, 这些数据与源试验数据具备相同的频度分布特征。

笔者应用蒙特卡洛模拟方法时, 首先针对相关目标物性参量生成一定数量的随机数 (数值区间为 $[0,1]$), 然后, 利用式 (11) 反算指定平均值和标准偏差 (由试验数据给定) 的满足某累积分布概率 (与生成的某随机数对应) 的随机变量 X (若出现负值的不合理情形时, 取其绝对值)。对于文内实例评价场地涉及的天然黄土物性参量, 应用该方法可获得扩展数量为 $N_{total} = 3\ 000$ 的相应物性参量 (理论而言, 扩展数越多其可信度越好。本文重点在于检验所提思路的可行性, 限于篇幅, 对采用不同数据量时的可信度未作深入对比, 仅结合所用计算机的处理能力, 选用的数据量为 3 000)。

3 实例评价基础数据与可靠性检验

3.1 基础数据

(1) 物性参量试验数据与其他参量取值方法

地震作用下天然黄土地动力沉降定量评价涉及的 3 类参量中, 场地土层 z 和地震动荷载 (a_{max} 、 r_d 和 N) 等参量对应的不同量值 z^l 、 a_{max}^m 、 r_d^l 和 N^q 与人为选取方式有关, 笔者采用的取值约定: ①埋深 z^l 与深度折减系数 r_d^l 相一致, 对于二者, $l_{max} = Round(D/T)$; ②地表 PGA 水平分量 a_{max}^m 在 $(0, 1\ 000)$ 区间内以 100 gal 为递增单位连续取值, $0 \sim 100$ gal 之间额外插值 $a_{max}^l = 50$ gal, 相应地, $m_{max} = 10$; ③动应力加载次数 N^q 在 $0 \sim 60$ 之间每 10 次依序选取, $N^q \neq 0$, 则 $q_{max} = 6$ 。

与上述两类参量不同, 非饱和黄土物性参量受自然生成规律制约, 求算时以室内试验数据为基础, 通过分析量值的频度分布特征, 确定相应物性参量分布函数的类型与计算参数 (试验数据见表 1, a_{max} 由式 (3) 利用文献[7]的相关数据反算得出)。

(2) 概率计算控制参数

利用式 (8) 和式 (10) 求算实例天然黄土地不同动残余应变等级下动力沉降发生概率时, 蒙特卡洛模拟选用的随机数 $N_{total} = 3\ 000$; 埋深 z^l 在目标场地典型黄土层 ($0 \sim 20$ m) 内按层厚 1 m 连续选取, 即 $z^l = 1, 2, 3, \dots, 20$ m ($Round(D/T) = 20$), 折减系数 r_d^l 在深度取值上与 z^l 一致 (相应数据按文献[9]插值得出); 动应力加载次数 $N^q = 10, 20, \dots, 60$; 不同动残余应变等级划分时上、下限参考量值的选取规则为: 在 $1 \leq k \leq n$ 的任意情形下, $\varepsilon_0 = 0$ 、 $\varepsilon_n = 0.015n$, 且 $(\varepsilon_k^{j,l} - \varepsilon_{k-1}^{j,l}) = 0.015$; 对于 n , 当 $\varepsilon_{k-1}^{j,l}$

为 0.015 的倍数时, $n = \varepsilon_{\max}^{j,l} / 0.015$, 反之 $n = 1 + \text{Int}(\varepsilon_{\max}^{j,l} / 0.015)$ (Int 表示取商值的整数部分); 不同动力沉降等级划分时上、下限参考量值的选取规则与动残余应变相似: 在 $1 \leq k \leq n$ 的任意情形下, $s_0 = 0$ 、 $s_n = 0.1n$, 且 $(s_k^j - s_{k-1}^j) = 0.1$; 对于 n , 当 $s_{\max}^j$ 为 0.1 的倍数时, $n = s_{\max}^j / 0.1$, 反之 $n = 1 + \text{Int}(s_{\max}^j / 0.1)$ 。

表 1 土体相关物性参量及试验数据^[7]
Table 1 Relative physical parameters and test data in laboratory of soil^[7]

c / kPa	φ / (°)	e_i	γ / (kN/m ³)	$a_{\max}$ / gal	z / m
62.6	30.7	1.073	14.3	572	4
114.6	32.7	1.008	14.6	425	
101.0	30.7	1.055	14.4	583	
47.1	29.6	1.166	14.0	744	
67.1	29.8	1.008	15.2	244	8
45.2	29.5	1.143	14.2	578	
40.9	29.3	1.088	14.7	388	
48.6	29.7	1.018	14.6	354	
50.7	30.5	1.018	14.9	182	12
42.3	29.2	1.018	14.4	439	
45.7	29.5	1.018	14.3	590	
160.7	34.7	0.971	15.0	603	
72.8	31.2	1.061	14.2	433	16
112.8	32.6	1.000	14.7	195	
53.4	33.2	1.126	13.8	312	
126.0	33.2	0.971	14.9	679	
160.5	34.7	0.901	15.1	568	20
157.1	34.6	0.929	15.1	736	
159.2	34.6	0.916	15.1	357	
150.4	34.3	0.898	15.2	173	

3.2 数据可靠性检验

(1) 正态分布函数描述合理性检验

由表 1 列出的黏聚力、内摩擦角、初始孔隙比和天然重度等 4 类参量, 通过分析各自基本物理概念可知, 黏聚力与内摩擦角用来表征土体结构强度特性, 与初始孔隙比及用以计算场地固结应力和等效循环剪应力的天然重度之间是完全独立的。黏聚力、内摩擦角与结构强度具有相关性, 但二者之间却是完全独立的。因此, 利用蒙特卡洛模拟方法进行 4 类物性参量的试验数据扩展时, 可认为各参量之间彼此独立。

根据表 1 中数据, 利用 χ^2 检验, 对 4 类天然黄土物性参量是否可用正态分布函数描述进行了拟合优度分析, 表 2 为检验结果。

表 2 物性参量频度分布特征拟合优度检验结果
Table 2 Test results of goodness of fit for frequency distribution characteristics of physical parameters

参量	分区范围		实际 频度	理论 频度	χ^2	$\chi^2_{k-3}(\alpha)$	备注
	下限	上限					
黏聚力 / kPa	40	60	8	5.001	9.313	$k = 7$ (1) $\alpha = 0.05$ 9.488 (2) $\alpha = 0.01$ 13.277	接受 正态 分布 假设
	60	80	3	3.115			
	80	100	0	3.450			
	100	120	3	3.170			
	120	140	1	2.415			
	140	160	3	1.526			
内摩 擦角 / (°)	160	180	2	0.800	5.421	$k = 5$ (1) $\alpha = 0.05$ 5.991 (2) $\alpha = 0.01$ 9.210	接受 正态 分布 假设
	30	31	1	1.513			
	31	32	6	3.634			
	32	33	2	5.902			
	33	34	7	5.350			
	34	35	4	2.707			
孔隙比	0.85	0.90	1	1.103	0.766	$k = 7$ (1) $\alpha = 0.05$ 9.488 (2) $\alpha = 0.01$ 13.277	接受 正态 分布 假设
	0.90	0.95	3	2.433			
	0.95	1.00	3	4.425			
	1.00	1.05	6	5.227			
	1.05	1.10	4	4.010			
	1.10	1.15	2	1.999			
重度 / (kN/m ³)	1.15	1.20	1	0.647	5.227	$k = 8$ (1) $\alpha = 0.05$ 11.070 (2) $\alpha = 0.01$ 15.086	接受 正态 分布 假设
	13.6	13.8	1	0.424			
	13.8	14.0	1	0.803			
	14.0	14.2	2	1.676			
	14.2	14.4	4	2.775			
	14.4	14.6	2	3.643			
	14.6	14.8	2	3.794			
	14.8	15.0	3	3.134			
	15.0	15.2	5	2.053			

表 3 对土体物性参量的试验数据和利用蒙特卡洛模拟方法计算的随机数据的均值与标准偏差进行了比较。对于各参量而言, 两类数据之间的整体特征也具有良好的对应关系。

表 3 土体相关物性参量分布函数
Table 3 Frequency distribution function of relative physical parameters of soil

物性 参量	试验//计算		分布 函数
	均值	标准偏差	
c / kPa	90.935 0//91.768 0	45.878 931//44.344 459	正态
φ / (°)	31.715 0//31.710 1	2.065 012//2.057 490	正态
e_i	1.019 3//1.019 2	0.074 719//0.074 665	正态
γ / (kN/m ³)	14.635 0//14.634 3	0.411 430//0.409 316	正态

上述分析结果无疑表明, 作为自然生成的天然黄土, 相关独立物性参量在具有基本随机性特点的同时, 其频度分布特征可用正态分布定量描述。这为采用正态分布函数的合理性提供了依据。

(2) 动残余应变计算数据可信度检验

图 1 对比了由式 (7) 得出的动残余应变计算数

据和室内动三轴试验数据等概率分布的整体特征。将表3中数据、土体物性参量随机数据以及与概率计算控制参数有关的数据等依次代入式(7)~(10)中, 可以获得定量评价实例天然黄土地动力沉降特性的基础分析数据。其中, 式(7)是保证计算结果合理、可信的基础, 不过, 计算过程中土体的基本物性参量均为符合一定整体分布特征的随机参量, 诸多随机参量用于同一理论关系求解时, 所得结果(数据群)的整体特征是否可信, 在进行场地动力沉降特性的定量评价前必须充分论证。由表1可知, 文献[7]利用室内动三轴试验获得天然黄土动残余应变时, 使用的加载 PGA 范围为 $100 \sim 800$ gal。图1显示(数据取自文献[7]), 二者具有极为相近的群体对照关系, 亦即前文应用非确定性理论提出的黄土地动力沉降的概率性评价方法是可靠的。

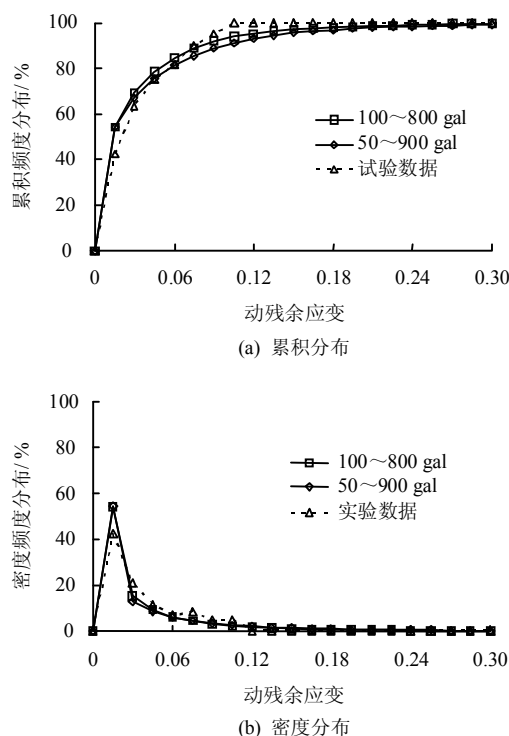


图1 计算数据可信度验证^[7]
Fig.1 Reliability verification of calculation data^[7]

4 概率性评价应用实例

根据章节1.2、1.3中论述提出的场地土体动力沉降概率性评价思路以及章节2.1中给出的定量评价计算所需的各项参量数据和概率计算控制参数, 可以获得用于定量分析实例黄土地动力沉降特性及其量值特征的相关结果。

图2为不同强度地震动作用下场地动力沉降特性(不同等级动残余应变发生概率), 图3为场地动力沉降量值的概率分布特征。

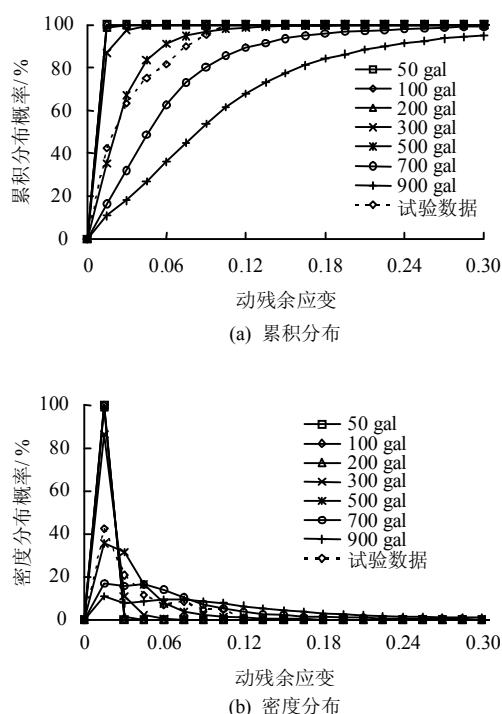


图2 不同地震动作用下黄土地动力沉降特性^[7]
Fig.2 Dynamic settlement characteristics of loess field under different ground motions^[7]

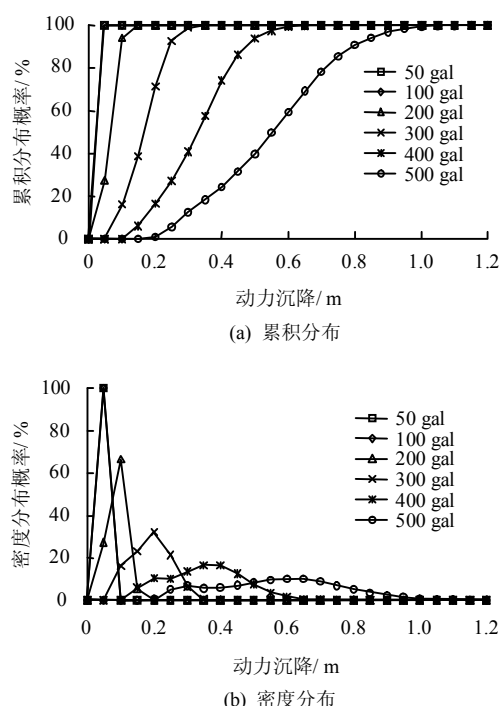


图3 不同地震动作用下黄土地动力沉降发生概率
Fig.3 Dynamic settlement probabilities of loess field under different ground motions

分析图2、3可知, 场地动力沉降概率分布特征在地震动强度较小时(50~100 gal)与较大情形(300~900 gal)差异显著, 中间强度地震动(200 gal)指示二者的过渡分界。累积概率可以反映场地土体可能产生的动力沉降范围, 卓越概率(概率密度分

布曲线波峰位置对应的概率值)则指示动力沉降发生的主体量值。二者相结合,即可分析得出考虑实例黄土场地设防烈度的动力沉降的定量参考特征。

较小强度地震动作用下,场地动力沉降概率分布呈现脉冲式特点(概率约为 100%),表明土体动残余应变并未明显增加,这与非饱和黄土固有的结构强度使其具有一个动残余应变临界动应力^[10]的已有结论相符。中间强度地震动前后场地土体动力沉降特征的变化,暗示对于目标场地而言,该强度地震动可能是应当给予关注的临界动荷载。较大强度地震动情况下,土体动力沉降概率分布范围逐渐变宽、曲线渐缓,应当予以关注的动力沉降等级趋向多样化。当动力沉降等级到达某一上限之后,相应概率分布近似为 0,这与非饱和黄土孔隙体积存在一个压缩极限值^[9]的已知认识一致。

通过分析图 3(b),将发生概率超过 5%的沉降量值进行汇总,可获得该目标评价场地土体动力沉降的细节特征(见表 4),这些数据可以为场地潜在动力沉降的处理提供更具选择性的可靠依据。

表 4 目标评价场地土体动力沉降概率特征
Table 4 Probability characteristics of dynamic settlement of target loess field applied the evolution method

地震动 / gal	沉降量 / m	发生概率 / %
300	≥0.10	98.9
	≥0.15	82.9
	≥0.20	60.0
	≥0.25	21.3
400	≥0.15	93.8
	≥0.20	87.7
	≥0.30	66.9
	≥0.40	36.4
500	≥0.25	90.0
	≥0.30	84.9
	≥0.40	72.6
	≥0.50	59.2
	≥0.60	41.1
	≥0.70	21.2

综上,实例应用天然黄土场地动力沉降的概率分布特征,可以反映非饱和黄土动残余应变的既有认知特点,有助于明晰地震作用下场地土体精细动力沉降特性。笔者认为,本文得出的较高强度地震动作用下目标场地才会发生可观的整体性动力沉降,为王兰民等^[11]观测到的该场地动力沉降原位试验数据与土体动残余应变室内试验数据之间存在较大矛盾,提供了一个可能相对合理的解释。这些结

论,在不引入非不确定性分析方法的条件下,仅依靠纯粹分析数量较少的室内试验数据无法获得。

5 结 语

如何利用尚能行之有效的经验或经验与理论参半的应力-应变本构关系,使之在相关理论方法完善之前,尽可能将其具备的个案价值扩展至有限的普遍意义,是本文应用非不确定性理论方法开展场地土体动力沉降精细特征定量评价研究工作的基本出发点。

此处的天然黄土场地动力沉降概率性评价方法,可以有效弱化土体物性参量的不确定性,得出的场地动力沉降的概率性分布特征,可以明确反映天然黄土动残余应变既有认知特点,有助于明晰场地土体动力沉降的精细特性。

选用土体应力-应变理论关系的关键在于模型的相对合理性与较好实用性。利用非不确定性分析确定土体物性参量试验数据的频度特征时,必须对相应分布函数的适用性进行拟合优度校验。同时,对于求算所得的土体动残余应变的群体数据,需要验证结果本身的合理性,以保证相关定量评价结果的切实可信。

笔者提出的将概率性分析方法应用于定量评价天然黄土场地动力沉降精细特性的思路,具有一定通用性。在应用于其他土类场地时,需将理论关系予以替换,并对非不确定性分析方法和基础数据等视实际需求进行相应调整。

参 考 文 献

- [1] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice(3rd ed.)[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [2] 沈珠江. 非饱和土力学实用化之路探索[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 256—259.
SHEN Zhu-jiang. Exploitation of practical use of unsaturated soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(2): 256—259.
- [3] 谢定义. 21 世纪土力学的思考[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 111—114.
XIE Ding-yi. The thinking of development of soil mechanics in the 21st Century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(4): 111—114.
- [4] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海深厚饱和覆盖土层的动力耦合地震反应分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 411—416.