

DOI: 10.11779/CJGE20220828

# 区域土特征函数：概念与原理

袁晓铭<sup>1</sup>, 卢坤玉<sup>1</sup>, 汪云龙<sup>1</sup>, 袁近远<sup>2</sup>, 陈龙伟<sup>1</sup>

(1. 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 150800; 2. 黑龙江科技大学, 黑龙江 哈尔滨 150027)

**摘要:** 作为区域土特征理论研究的起点, 以土力学和土动力学经典理论和实际资料为基础, 提出了相应的概念、原理、准则和实证。从土的经典本构模型出发, 提出了双控制参数的概念, 以此作为区域土特征理论的基础。提出了区域土特征函数的概念, 阐明了其定义、内涵和外延, 提出了包括控制性、普适性、完备性、原位性、一致性、可操作性和存在性等属性要求在内的区域土特征函数构建准则。针对常见的砂土和黏土, 提出了采用  $N-v_s$  特征函数表征其区域土力学和工程特性的思想, 给出了构建方法, 阐明了其原理, 通过 17 个国家 77 个地区实际  $N-v_s$  函数关系的分布特征, 论证了砂土和黏土  $N-v_s$  特征函数的存在性。

**关键词:** 土的区域性特征; 双控制参数; 区域土特征函数;  $N-v_s$  特征函数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)12-2429-09

**作者简介:** 袁晓铭(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土地震工程研究。Email: yxmiem@163.com。

## Characteristic functions of regional soils: concepts and principles

YUAN Xiaoming<sup>1</sup>, LU Kunyu<sup>1</sup>, WANG Yunlong<sup>1</sup>, YUAN Jinyuan<sup>2</sup>, CHEN Longwei<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration; Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150027, China)

**Abstract:** As the starting point of the theoretical study on the regional soil characteristics, based on the classical theories of soil mechanics and soil dynamics and the actual data, the related concept, principle, criterion and demonstration are put forward. Based on the classical constitutive model for soils, the concept of dual-control parameter is proposed, which is a basis for the theoretical study on the regional soil characteristics. The concept of regional soil characteristic function is put forward, its definition, connotation and extension are clarified, and the construction criteria including control, universality, completeness, in situ, consistency, operability and existence are put forward. For the conventional sand and clay, the idea of using  $N-v_s$  characteristic function to characterize its regional soil characteristics is proposed, the construction method is given, and its principle is clarified. The existence of  $N-v_s$  characteristic function of sand and clay is proved by analyzing the distribution characteristics of  $N-v_s$  function relations in 77 regions of 17 countries of the world.

**Key words:** regional soil feature; dual-control parameter; regional soil characteristic function;  $N-v_s$  characteristic function

## 0 引言

科研人员和工程师们都认为土的力学与工程性质具有区域性特征。周镜<sup>[1]</sup>指出, 目前中国评价饱和砂液化势的原位测试方法, 主要依据是唐山地震中石英质砂地层液化经验, 不宜简单地用于长江中下游的片状地层。龚晓南<sup>[2]</sup>在《21 世纪岩土工程发展展望》一文中, 将区域土特性研究作为第一个研究方向, 指出土的工程性质具有明显的区域性, 其个性对工程建设影响更为重要。同时, 性态设计已经是当前岩土工程的发展趋势, 而土的区域特征是其中一个必须考虑的问题。

从岩土工程角度, 目前对区域土还没有定义。本文将区域土定义为相同地质条件下一个地区内平均力学与工程性质特征具有同一性的土壤。以何指标参数

和何种函数表征土的工程性质区域性特征, 这是区域土特征理论研究中最根本的问题, 但一直没有解决。以往的研究发现, 采用以 1976 年唐山地震液化数据为主的现行《建筑抗震设计规范》液化判别公式, 对 2003 年新疆地震巴楚地区液化场地进行判别, 出现了明显不适用的现象, 判别结果严重偏于危险<sup>[3]</sup>。而事实上巴楚和唐山两个地区的  $N_{63.5}-v_s$  平均关系曲线相差很显著, 以此为依据可以将现行规范液化判别公式进行修正并形成适于巴楚地区的液化判别公式<sup>[4]</sup>, 为此笔者提出了以各地区  $N_{63.5}-v_s$  (简称  $N-v_s$ ) 平均关系曲线

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 (2021EEV0208); 黑龙江省自然科学基金重点项目 (ZD2019E009)  
收稿日期: 2022-07-04

作为区域土特征函数的设想。

剪切波速和标准贯入锤击数都是表征土壤动力特性的基本参数，并分别用于不同的工程目的。在很多情况下，在一个地区内进行二者的互换将为工程实践带来很大的便利。因此，从 1966 年开始<sup>[5]</sup>，很多学者和工程技术人员都致力于提出本地区  $N-v_s$  平均关系曲线。到目前为止，已有 17 个国家的 77 个地区建立了适用于本区域的  $N-v_s$  平均关系曲线<sup>[6-8]</sup>，其中包括中国的 20 个地区。一些学者<sup>[9-11]</sup>通过对比不同地区的  $N-v_s$  曲线，指出  $N-v_s$  经验相关性是令人信服的，但不能互相代替使用。这些研究仅局限于满足某一地区  $N-v_s$  互换的工程需求，没有进行进一步的拓展。

针对以何指标参数和何种函数表征土工程性质的区域性特征这一问题，将从土力学和土动力学经典本构理论出发，寻找出解决问题的线索，结合区域土特点建立区域土特征函数的概念和构建准则，整理分析世界不同地区实际资料给出实证证明。

## 1 双控制参数的概念

### 1.1 土的经典本构模型

土最基本的特性就是非线性，描述土的非线性特性有很多模型。就土力学来说，目前被广泛应用的是邓肯-张模型，而该模型的基础<sup>[12]</sup>，来自于 1963 年 Kondner 根据大量的三轴试验得到的应力应变关系曲线，即可以用双曲线作为描述土的静力本构模型：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

式中： $\sigma_1 - \sigma_3$  为偏差应力； $\varepsilon$  为土单元的轴向应变； $a$ 、 $b$  为参数。研究表明， $a$  实际上为初始变形模量的倒数， $b$  代表的是双曲线的渐近线所对应的极限偏差应力。

土动力学中，双曲线弹塑性模型和等价非线性黏-弹性模型是两个最典型的代表<sup>[13]</sup>。对双曲线弹塑性模型，动剪应力  $\tau$  与动剪应变  $\gamma$  间关系最终可表示为

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \frac{G_{\max}}{\tau_{\text{ult}}} \gamma} \quad (2)$$

式中： $G_{\max}$  为土的最大（初始）剪切模量； $\tau_{\text{ult}}$  为土的极限剪应力。

双曲线弹塑性模型本构关系  $\tau-\gamma$  的一般形式如图 1 所示， $G_{\max}$  为最大剪切模量， $\tau_{\text{ult}}$  为极限剪应力。

土动力学中，等价非线性黏-弹性模型也是描述非线性土的一种典型模型，广泛应用于场地和土层的动力分析。等价非线性黏-弹性模型中，非线性剪切模量  $G$  与动态剪切应变幅值  $\bar{\gamma}$  的关系为

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3)$$

式中： $\bar{\gamma}_r$  为参考剪应变，

$$\bar{\gamma}_r = \frac{\bar{\tau}_{\text{ult}}}{G_{\max}} \quad (4)$$

其中， $\bar{\tau}_{\text{ult}}$  为当  $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$  时的极限剪应力幅值。等价非线性黏-弹性模型本构关系  $G-\bar{\gamma}$  的一般形式见图 2。

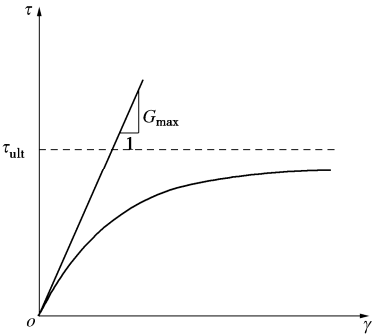


图 1 土的典型弹塑性本构模型

Fig. 1 Typical elastoplastic constitutive model for soils

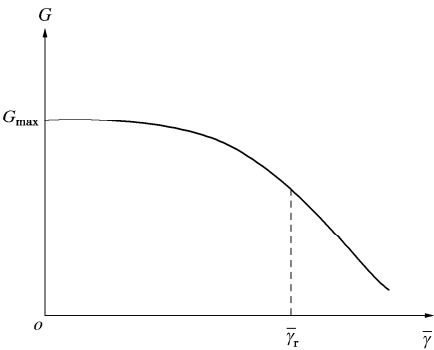


图 2 土的典型等价非线性黏-弹性本构模型

Fig. 2 Typical equivalent nonlinear viscoelastic constitutive model for soils

### 1.2 双控制参数的概念

对于工程场地中的同类土，两个不同土单元如图 3 所示。

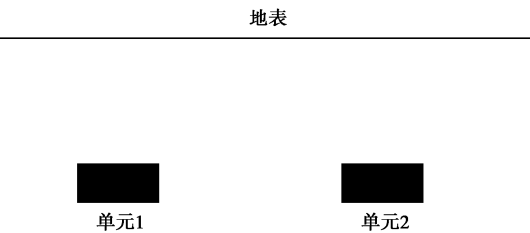


图 3 场地中的两个土单元

Fig. 3 Two soil elements in sites

图 3 中土单元 1 的动力弹塑性本构关系为  $\tau_1-\gamma_1$ ，由  $G_{\max,1}$ 、 $\tau_{\text{ult},1}$  确定；土单元 2 的弹塑性本构关系为  $\tau_2-\gamma_2$ ，由  $G_{\max,2}$ 、 $\tau_{\text{ult},2}$  确定。对于图 3 中的两个土单元，如图 4 所示，二者的弹塑性本构曲线存在 4 种关系：①  $G_{\max,1} \neq G_{\max,2}$  且  $\tau_{\text{ult},1} \neq \tau_{\text{ult},2}$ （图 4（a））；②  $G_{\max,1} \neq G_{\max,2}$  但  $\tau_{\text{ult},1} = \tau_{\text{ult},2}$ （图 4（b））；③  $G_{\max,1} = G_{\max,2}$  但  $\tau_{\text{ult},1} \neq \tau_{\text{ult},2}$ （图 4（c））；④  $G_{\max,1} = G_{\max,2}$  且  $\tau_{\text{ult},1} = \tau_{\text{ult},2}$ （图

4 (d))。按已有的认识, 在图 4 (a), (b), (c) 条件下, 两个土单元弹塑性特性不同, 而在图 4 (d) 条件下, 两个土单元弹塑性特性相同。

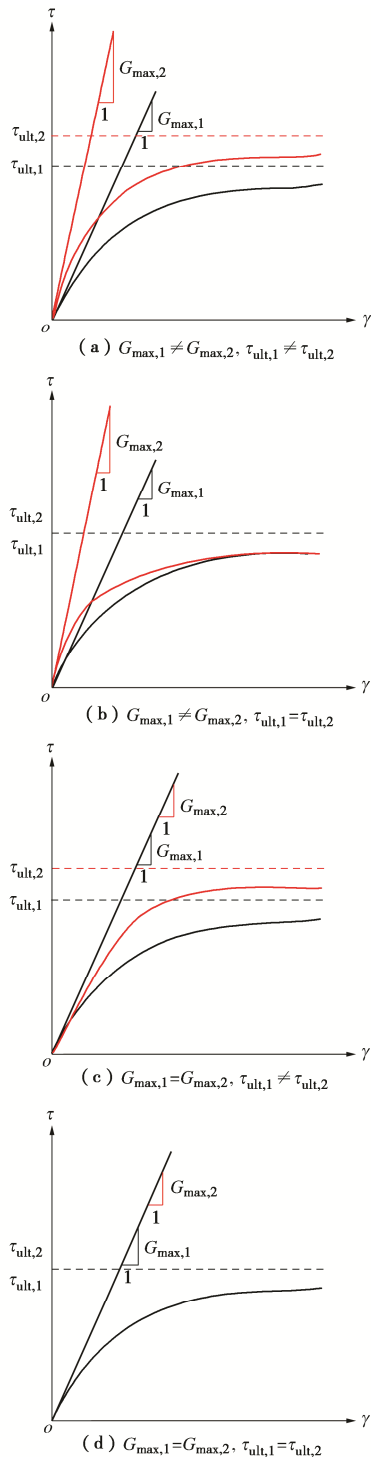


图 4 双参数控制下两个土单元弹塑性本构性质的异同

Fig. 4 Differences and similarities of elastoplastic constitutive relations for two soil elements under dual-parameter control

图 3 中土单元 1 的等价非线性黏-弹性本构关系为  $G_1-\bar{\gamma}_1$ , 由  $G_{\max,1}$  和  $\bar{\gamma}_{r,1}$  确定; 土单元 2 的等价非线性黏-弹性本构关系为  $G_2-\bar{\gamma}_2$ , 由  $G_{\max,2}$  和  $\bar{\gamma}_{r,2}$  确定。对于图 3 中的两个土单元, 如图 5 所示, 二者的等价非线性黏-弹性性能同样存在着 4 种关系: ①  $G_{\max,1} \neq G_{\max,2}$

且  $\bar{\gamma}_{r,1} \neq \bar{\gamma}_{r,2}$  (图 5 (a)); ②  $G_{\max,1} \neq G_{\max,2}$  但  $\bar{\gamma}_{r,1} = \bar{\gamma}_{r,2}$  (图 5 (b)); ③  $G_{\max,1} = G_{\max,2}$  但  $\bar{\gamma}_{r,1} \neq \bar{\gamma}_{r,2}$  (图 5 (c)); ④  $G_{\max,1} = G_{\max,2}$  且  $\bar{\gamma}_{r,1} = \bar{\gamma}_{r,2}$  (图 5 (d))。按已有的认识, 在图 5 (a), (b), (c) 条件下, 两个土单元等价非线性黏-弹性性质不同, 而在图 5 (d) 条件下, 两个土单元等价非线性黏-弹性性质相同。

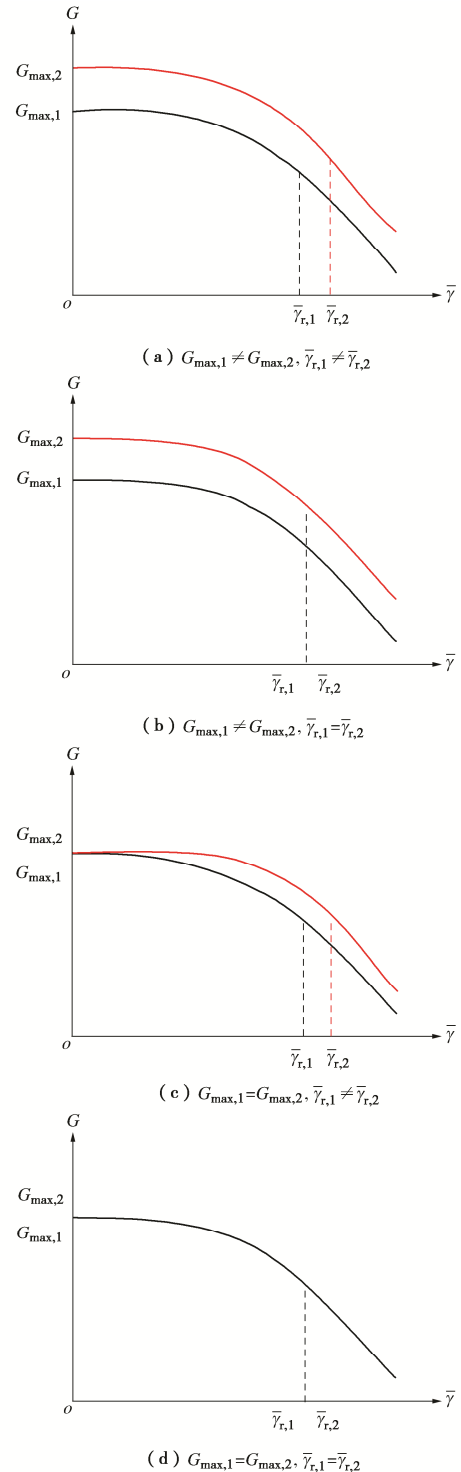


图 5 双参数控制下两个土单元等价非线性黏-弹性本构性质的异同

Fig. 5 Differences and similarities of the equivalent nonlinear viscoelastic constitutive relations for two soil elements under dual parameter control

对于由式(1)表达的土静力学本构模型,两个土单元的两个力学控制参数也同样存在着4种关系,同样会看到两个土单元性质静力学本构关系的异同由两个力学参数的异同决定。

从以上分析看出,从简化和工程实用角度,无论是土的静力学特性还是动力学特性,均可由两个参数控制:①初始模量参数,表示土体在小变形下的性能,代表土体弹性阶段的特性;②大变形下的控制参数,代表土体在强非线性或破坏状态下的特性。对于同一种土类,如果这两个参数相同或相近,则土的本构关系相同或相近,反之亦然。也就是说,对于图3中在一个地区或不同地区的两个同类土的土单元,当两个参数中的任何一个不相等时,两个土单元的力学性能就不相同;当两个参数相同或相近时,两个土单元的力学性能就相同或相近。

鉴于此,笔者提出了土单元双控制参数的概念,其内涵为土单元力学特性可由表征小变形和大变形两个阶段性质的两个参数控制。同时,这一概念的外延为,对不同土单元,两个控制参数的异同决定着不同土单元力学性质的异同。

### 1.3 双控制参数概念的拓展

上述双控制参数概念来自于土单元模型,是两个土单元之间力学性质异同的衡量标准。同时,这一概念可以拓展到两个地区平均意义上土力学性质差异性的衡量中。

如图6所示,以弹塑性本构关系为例,对于同类土,A地区场地中各土单元的初始剪切模量和极限剪应力分别为 $G_{\max,A,1}$ 和 $\tau_{ult,A,1}$ , $G_{\max,A,2}$ 和 $\tau_{ult,A,2}$ , $\dots$ , $G_{\max,A,i}$ 和 $\tau_{ult,A,i}$ , $\dots$ , $G_{\max,A,L}$ 和 $\tau_{ult,A,L}$ ,B地区场地中各土单元的初始剪切模量和极限剪应力分别为 $G_{\max,B,1}$ 和 $\tau_{ult,B,1}$ , $G_{\max,B,2}$ 和 $\tau_{ult,B,2}$ , $\dots$ , $G_{\max,B,j}$ 和 $\tau_{ult,B,j}$ , $\dots$ , $G_{\max,B,M}$ 和 $\tau_{ult,B,M}$ ,分别代表了两个地区双控制参数的集合。

逻辑上讲,对于同类土,如果土的力学性质存在区域性,那么每个地区不同单元 $\tau_{ult}$ - $G_{\max}$ 数组的集合,就可形成统计学意义上的 $G_{\max}=f(\tau_{ult})$ 函数关系,代表着该地区该类土平均的力学性能特征。两个地区的函数关系分别为 $G_{\max,A}=f_A(\tau_{ult,A})$ 和 $G_{\max,B}=f_B(\tau_{ult,B})$ ,若 $f_A$ 和 $f_B$ 相同,则两个地区该类土平均意义上具有相同的力学性质特征,反之则相异; $f_A$ 和 $f_B$ 相差越大,则两个地区该类土力学性质特征平均意义上相差越大。

也就是说,土单元双控制参数概念可以拓展区域土。区域土双控制参数概念的内涵为,区域土平均意义上的力学特性可由表征小变形和大变形两个阶段性质的两个参数控制。其概念的外延为,不同地区由两个控制参数所形成的平均对应关系的差异性决定着不

同地区土力学平均性质的差异性。笔者将该内涵和外延统称为控制性属性,它是土单元自身特性表征以及与其它土单元性质区分的基本属性,也是区域土自身力学性质表征以及与其它地区土力学性质特征区分的基本属性。

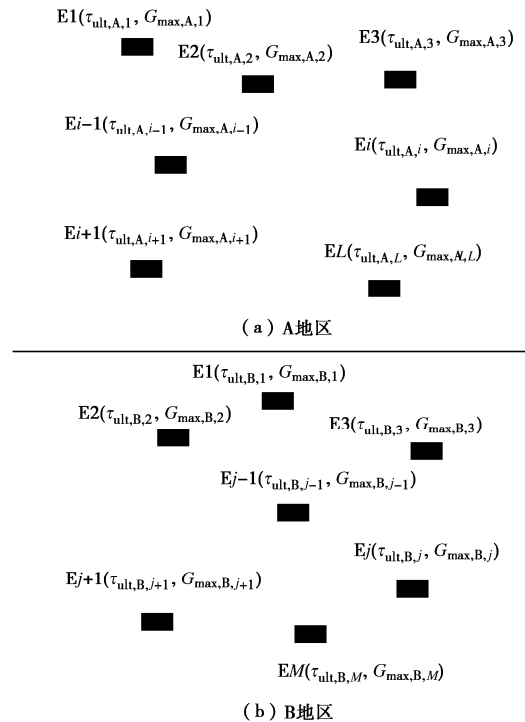


图6 两个地区双控制参数的集合

Fig. 6 A set of dual parameter control in two regions

## 2 区域土特征函数的概念和构建准则

作为上述双控制参数概念的进一步延伸,笔者提出了区域土特征函数的概念,即区域土特征函数为由表征区域土力学或工程特性的特征参数及对应关系组成的函数。这一概念的内涵为特征函数是区域土力学和工程特性的表征量,而该函数由分别表征小变形和大变形阶段性质的两个特征参数及其对应关系表达。这一概念的外延为特征函数的差异性决定了不同地区土壤力学和工程平均性质的差异性。

本文认为,区域土特征函数是该区域土壤力学和工程性能的内在的、平均的和整体性的取向,特征函数需满足以下属性:

(1)所选特征参数分别能表征土壤小变形和大变形阶段性能,即满足非线性的控制性要求。

(2)所选特征参数为不同地区土层共有的属性,即在不同地区具有普适性。

(3)所选特征参数存在于工程感兴趣范围内,存在于不同类型场地及不同埋藏条件,即参数来源具有完备性。

(4)特征参数可从现场测试得到,保持土的结构

性, 即参数来源具有原位性。

(5) 两个特征参数之间具有明确的函数关系, 这种函数的形式对不同地区均相同, 即不同地区的特征函数形式具有一致性。

(6) 特征参数为简单和独立的力学或工程指标, 具备工程上的可操作性。

(7) 不同地区特征函数关系中的系数分布应具有统计学特征, 即需具备科学意义上的存在性。

以上提出的控制性、普适性、完备性、原位性、一致性、可操作性和存在性等属性, 统称为区域土特征函数的构建准则, 是建立区域土力学和工程特性表征方法应遵循的要求。

### 3 砂土和黏土的区域土 $N-v_s$ 特征函数

#### 3.1 构建方法

砂土和黏土是最常见的土类, 本文将对这两类土提出区域土特征函数的构造方法, 给出原理解释, 并证明其存在性。

针对砂土和黏土, 本文将采用区域土  $N-v_s$  特征函数表征其力学和工程的区域特性。所谓区域土  $N-v_s$  特征函数, 是指一个地区中以同一土层标准贯入锤击数实测值  $N$  和剪切波速实测值  $v_s$  为特征参数, 统计得到的平均意义上的  $N-v_s$  函数关系。其构建方法为, 如图 7 所示, 在一个地区内, 取砂土或黏土中土层同位的标贯锤击数  $N$  和剪切波速  $v_s$  为样本, 在一个地区内构造出具有统计意义的  $v_s = aN^b$  形式的  $N-v_s$  平均关系曲线, 以此作为该地区砂土或黏土力学和工程特性的表征量。

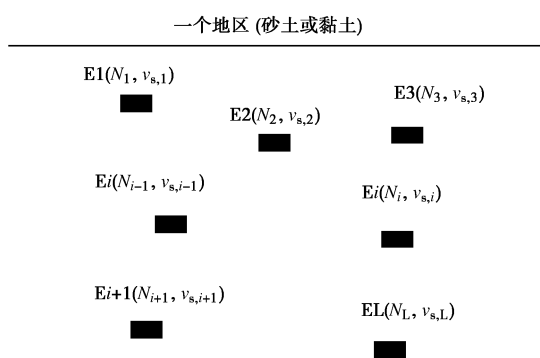


图 7 一个地区内  $N-v_s$  特征函数的样本

Fig. 7 Samples of  $N-v_s$  characteristic function in a region

对区域土特征参数的选择, 土单元双控制参数中的最大(初始)剪切模量  $G_{\max}$  是可以直接借鉴的参数, 而另一个极限剪应力  $\tau_{\text{ult}}$  (或参考剪应变  $\bar{\gamma}_r$ ) 参数则难以采用。如上的构建准则中, 要求区域土特征参数的来源具有完备性, 但对一个地区大量场地要求提供  $\tau_{\text{ult}}$  (或  $\bar{\gamma}_r$ ) 几乎是不可能的。另外, 目前获取  $\tau_{\text{ult}}$  (或  $\bar{\gamma}_r$ )

的方式源于取样室内试验, 也不能满足构建准则中原位性的要求。

对构建准则中的原位性问题, 目前工程上常用原位试验, 包括了剪切波速试验 ( $v_s$ )、标准贯入试验 (SPT) 和静力触探试验 (CPT), 等等, 其中使用最广泛的是 SPT, 土层  $v_s$  试验也逐渐成为主流的原位测试技术, 并且对常规的砂土和黏土地都可以实施, 以往积累的数据也很多, 可以作为备选参数。而目前 CPT 可实际应用的场地类型受到较大限制, 积累的数据也较为有限, 因此暂不予考虑。

#### 3.2 原理

对照第 2 节中区域土特征函数的概念和属性,  $N-v_s$  特征函数成立的原理:

(1)  $V_s$  是土层小应变下土层的力学参数,  $v_s = \sqrt{G_{\max} / \rho}$ , 对于不同地区的同类土体,  $\rho$  相差不大, 与  $G_{\max}$  比较,  $\rho$  对  $v_s$  的影响可忽略, 因此  $v_s$  就直接决定着土层最大(初始)剪切模量。

(2)  $N$  虽然是工程参数而非力学和物理参数, 但近期研究表明,  $N$  与贯入土层的能量密切相关, 可以认为  $N$  代表着贯入土体指定深度 (30 cm) 的贯入能, 而能量为力与运动位移的乘积, 因而  $N$  近似代表指定大变形状态下平均贯入力的大小。

(3) 由 (1) 和 (2) 可知,  $N-v_s$  的关系本质上可反映土层大变形下平均贯入力与土层  $G_{\max}$  的平均关系, 理论上具备了控制性特征。

(4) 不同地区的场地,  $v_s$  和  $N$  两个参数都存在, 是目前国内外不同地区场地共有的参数。

(5) 除含砾量很大的砾性土层外, 任何土层都可具备  $v_s$  和  $N$  两个值, 且目前工程上实际数据量较大, 使  $v_s$  和  $N$  两个参数宏观上都基本上具有完备性。

(6)  $v_s$  和  $N$  两个参数都是原位参数, 且工程上目前都具备可操作性。

(7) 从既有的研究结果看,  $N-v_s$  间可形成统计学意义上的  $v_s = aN^b$  的幂函数形式, 且该函数形式对世界不同地区  $N-v_s$  关系具有一致性。

从上面的分析看, 笔者提出的区域土  $N-v_s$  特征函数的概念, 具备了控制性、普适性、完备性、原位性、一致性和可操作性等属性, 但是否满足构建准则中的存在性要求, 需要进一步对区域土  $N-v_s$  函数的实际资料进行分析。

### 4 不同地区 $N-v_s$ 函数关系的分布特征

#### 4.1 实际区域土 $N-v_s$ 关系曲线

根据工程需求, 以往建立了很多的地区性  $N-v_s$  经验关系。实际工程中, 在预算不足或设备受限时,

无法直接进行剪切波速测试，但可根据土层的标贯锤击数  $N$  估算剪切波速  $v_s$ 。为此，从 1966 年开始，国内外很多学者和工程技术人员都致力于提出本地区  $N$ - $v_s$  关系曲线。并且经过研究，逐渐形成了  $v_s = aN^b$  为最适于表达一个地区  $N$ - $v_s$  平均关系的共识<sup>[14-15]</sup>。

本文收集整理了 17 个国家的 77 个地区的  $N$ - $V_s$  关系曲线，分别示于表 1 和图 8，其中图 8 (a)，(b)，(c) 分别对应的是砂土、黏土和所有土。表中和图中

的砂土曲线来自 42 个地区，黏土曲线来自 22 个地区，所有土曲线来自 53 个地区。对于所有土曲线，较多的文献中并没有给出具体的土类来源和具体构成。

4.2 既有  $N$ - $V_s$  函数系数的分布特征

如表 1 和图 8 所示，已经从较多地区获取了统一形式的  $N$ - $v_s$  函数关系，但不同地区得到具体函数关系不同，函数随地区的变化是否具有科学意义，还需要深入研究。由于  $N$ - $v_s$  函数关系是以  $v_s = aN^b$  表达，不同地区  $N$ - $v_s$  函数是否具有科学性，可以转化为不同地

表 1 世界不同地区既有  $N$ - $v_s$  关系曲线的基本信息

Table 1 Basic information of existing $N$ - $v_s$ relationship curves of soils in different regions of the world									
序号	研究者	国家（地区）	土壤类型	公式	序号	研究者	国家（地区）	土壤类型	公式
1	Kanai(1966 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 18.9N^{0.6}$	60	刘斌等（2013 年）	中国（毛乌素沙漠）	砂土	$v_s = 118.277N^{0.267}$
2	Ohba 和 Toriumi (1970 年)	日本（大阪）	所有土	$v_s = 84N^{0.31}$	61	Sun 等（2013 年）	韩国（*）	所有土	$v_s = 65.64N^{0.407}$
3	Imai 和 Yoshimura (1970 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 76N^{0.33}$	62			砂土	$v_s = 75.76N^{0.371}$
4	Shibata (1970 年)	日本（*）	砂土	$v_s = 32N^{0.5}$	63	Chatterjee 和	印度（加尔各答）	所有土	$v_s = 78.21N^{0.37669}$
5	Fujiwara (1972 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 92.1N^{0.337}$	64	Choudhury (2013 年)		黏土	$v_s = 77.11N^{0.39256}$
6	Ohta 等(1972 年)	日本（*）	砂土	$v_s = 87N^{0.36}$	65	Olapour 和 Emam (2013 年)	伊朗（阿瓦兹）	所有土	$v_s = 276.8N^{0.173}$
7	Ohsaki 和 Iwasaki (1973 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 81.4N^{0.39}$	66	Sil 和 Sitharam (2013 年)	印度（阿加斯塔拉）	所有土	$v_s = 116.4N^{0.272}$
8			砂土	$v_s = 59.4N^{0.47}$	67	陆万海等（2014 年）	中国（澳门）	所有土	$v_s = 139.4N^{0.216}$
9	Imai 等(1975 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 89.9N^{0.341}$	68	Naik 等(2014 年)	印度（坎普尔）	所有土	$v_s = 78.46N^{0.39}$
10	Imai (1977 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 91N^{0.337}$	69			黏土	$v_s = 81.18N^{0.377}$
11			砂土	$v_s = 80.6N^{0.331}$	70	Fauzi 等(2014 年)	印度尼西亚（雅加达）	所有土	$v_s = 105.03N^{0.286}$
12			黏土	$v_s = 102N^{0.292}$	71	Fabbrocino 等 (2015 年)	意大利（莫利塞）	黏土	$v_s = 110.5N^{0.252}$
13	Ohta 和 Goto (1978 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 85.35N^{0.348}$	72	Fatehnia 等(2015 年)	美国（北佛罗里达州）	所有土	$v_s = 77.1N^{0.355}$
14	Seed 等(1983 年)	美国（加利福尼亚）	所有土	$v_s = 56N^{0.5}$	73	王梦龙（2016 年）	中国（巴楚）	砂土	$v_s = 98.787N^{0.22483}$
15	Imai 和 Tonouchi (1982 年)	日本（*）	所有土	$v_s = 96.9N^{0.314}$	74	Khan 等（2016 年）	阿联酋（沙迦）	砂土	$v_s = 94.655N^{0.3512}$
16			砂土	$v_s = 87.8N^{0.314}$	75			所有土	$v_s = 99.5N^{0.345}$
17			黏土	$v_s = 107N^{0.274}$	76	Kirar 等（2016 年）	印度（洛克）	砂土	$v_s = 100.3N^{0.338}$
18	Sykora 和 Stokoe (1983 年)	美国（加利福尼亚）	砂土	$v_s = 100.5N^{0.29}$	77			黏土	$v_s = 94.4N^{0.379}$
19	Lin 等（1984 年）	中国（台北盆地）	所有土	$v_s = 65.58N^{0.502}$	78		印度（班加罗尔）	所有土	$v_s = 65.67N^{0.39}$
20	Yokota 等（1991 年）	日本（*）	所有土	$v_s = 121N^{0.27}$	79	Anbazhagan 等 (2016 年)	印度（钦奈）	所有土	$v_s = 75.916N^{0.3019}$
21	Lee (1990 年)	中国（台湾）	砂土	$v_s = 57.4N^{0.49}$	80		印度（哥印拜陀）	所有土	$v_s = 159.1N^{0.17}$
22			黏土	$v_s = 114N^{0.31}$	81		印度（维扎格）	所有土	$v_s = 36.68N^{0.56}$
23	Kalteziotis 等(1992 年)	希腊（*）	所有土	$v_s = 76.2N^{0.423}$	82	Gautam (2016 年)	尼泊尔（加德满都谷地）	所有土	$v_s = 115.8N^{0.251}$
24			砂土	$v_s = 49.1N^{0.502}$	83			砂土	$v_s = 78.7N^{0.352}$
25			黏土	$v_s = 76.55N^{0.445}$	84			所有土	$v_s = 80.446N^{0.3814}$
26	Athanasopoulos (1994 年)	希腊（*）	所有土	$v_s = 107.6N^{0.36}$	85	Jhinkwan 和 Jain (2016 年)	印度（中央邦）	砂土	$v_s = 84.229N^{0.3875}$
27	Iyisan (1996 年)	土耳其（埃尔津詹）	所有土	$v_s = 51.5N^{0.516}$	86			黏土	$v_s = 57.077N^{0.49}$
28	Pitilakis 等（1999 年）	希腊（米格顿盆地）	黏土	$v_s = 132N^{0.271}$	87	Pérez-Santisteban 等 (2016 年)	西班牙（马德里）	所有土	$v_s = 62.6N^{0.52}$
29	郑灿堂等（1999 年）	中国（山东）	砂土	$v_s = 80N^{0.35}$	88			砂土	$v_s = 98.69N^{0.321}$
30			黏土	$v_s = 80N^{0.4}$	89		所有土	$v_s = 97.3062N^{0.3393}$	
31	Kiku (2001 年)	土耳其（阿达帕扎里）	所有土	$v_s = 68.3N^{0.292}$	90	Rahman 等(2018 年)	孟加拉国（达卡）	砂土	$v_s = 82.01N^{0.3829}$
32	蔡宗文（2003 年）	中国（福建）	所有土	$v_s = 100.7459N^{0.32}$	91			黏土	$v_s = 100.58N^{0.341}$

续表 1

序号	研究者	国家(地区)	土壤类型	公式	序号	研究者	国家(地区)	土壤类型	公式
33	Sun 等 (2005 年)	韩国(首尔)	所有土	$v_s = 65.55N^{0.4}$	92	孙东风等(2018 年)	中国(如东)	砂土	$v_s = 100.2N^{0.247}$
34	Koukis 等 (2005 年)	希腊(帕特雷)	所有土	$v_s = 145N^{0.3}$	93	刘福兴等(2018 年)	中国(黄河三角洲)	砂土	$v_s = 79.68N^{0.305}$
35	李存志等 (2006 年)	中国(昆明盆地)	砂土	$v_s = 103.54N^{0.28}$	94	Kumar 等(2018 年)	印度(古瓦哈提)	所有土	$v_s = 46.56N^{0.62}$
36			黏土	$v_s = 101.49N^{0.34}$	95			砂土	$v_s = 58.66N^{0.57}$
37	Sun 等 (2006 年)	韩国(洪城)	所有土	$v_s = 122.33N^{0.185}$	96			黏土	$v_s = 47.84N^{0.6}$
38	Hasancebi 和 Ulusay (2007 年)	土耳其(耶尼谢希尔)	所有土	$v_s = 90N^{0.308}$	97	Win 等(2019 年)	缅甸(曼德勒)	所有土	$v_s = 100.49N^{0.2801}$
39			砂土	$v_s = 90.82N^{0.319}$	98	Lu 和 Hwang (2019 年)	中国(台湾)	砂土	$v_s = 80.1N^{0.29}$
40			黏土	$v_s = 97.89N^{0.269}$	99	Rao 和 Choudhury (2020 年)	印度(哈里亚纳邦)	所有土	$v_s = 84N^{0.38}$
41	Anbazhagan 和 Sitharam (2008 年)	印度(班加罗尔)	所有土	$v_s = 78N^{0.4}$	100	Rahimi 等(2020 年)	美国(梅尔文-普莱斯)	所有土	$v_s = 94.5N^{0.248}$
42	Hanumantharao 和 Ramana (2008 年)	印度(新德里)	所有土	$v_s = 82.6N^{0.43}$	101		新西兰(克赖斯特彻奇)	所有土	$v_s = 75.79N^{0.278}$
43			砂土	$v_s = 79N^{0.434}$	102	袁晓铭等(2020 年)	中国(哈尔滨)	砂土	$v_s = 116.55N^{0.3149}$
44	Dikmen (2009 年)	土耳其(埃斯基谢希尔)	所有土	$v_s = 58N^{0.39}$	103	Ashikuzzaman 等 (2021 年)	孟加拉国(拉杰沙希)	所有土	$v_s = 72.202N^{0.3779}$
45			砂土	$v_s = 73N^{0.33}$	104			砂土	$v_s = 74.446N^{0.3977}$
46			黏土	$v_s = 44N^{0.48}$	105			黏土	$v_s = 85.558N^{0.362}$
47	Maheswari 等 (2010 年)	印度(钦奈)	所有土	$v_s = 95.64N^{0.301}$	106	Alhuay-León 和 Trejo-Noreña(2021 年)	秘鲁(奥尔莫斯)	砂土	$v_s = 142.59N^{0.222}$
48			砂土	$v_s = 100.53N^{0.265}$	107	Hossain 等(2021 年)	孟加拉国(迪纳杰布尔)	所有土	$v_s = 76.285N^{0.3748}$
49			黏土	$v_s = 89.31N^{0.358}$	108			砂土	$v_s = 75.772N^{0.3768}$
50	Tsiambaos 和 Sabatakakis(2011 年)	希腊(*)	所有土	$v_s = 105.7N^{0.327}$	109			黏土	$v_s = 91.573N^{0.3591}$
51			砂土	$v_s = 79.7N^{0.365}$	110	王梦龙(2016 年)	中国(北京)	砂土	$v_s = 85.9N^{0.349}$
52			黏土	$v_s = 112.2N^{0.324}$	111		中国(秦皇岛)	砂土	$v_s = 114.82N^{0.287}$
53	Thaker 和 Rao(2011 年)	印度(苏拉特)	所有土	$v_s = 59.72N^{0.42}$	112		中国(烟台)	砂土	$v_s = 120.8N^{0.275}$
54			砂土	$v_s = 51.21N^{0.45}$	113	中国(唐山)	中国(唐山)	砂土	$v_s = 92.1N^{0.284}$
55			黏土	$v_s = 62.41N^{0.42}$	114		中国(南京)	砂土	$v_s = 99N^{0.32}$
56	Mhaske 和 Choudhury (2011 年)	印度(孟买)	所有土	$v_s = 72N^{0.4}$	115	中国(下辽河平原)	中国(下辽河平原)	砂土	$v_s = 69.1N^{0.4}$
57	Anbazhagan 等(2013 年)	印度(勒克瑙)	所有土	$v_s = 68.96N^{0.51}$	116		中国(武汉)	砂土	$v_s = 91N^{0.35}$
58			砂土	$v_s = 60.17N^{0.56}$	117	卢坤玉	中国(邢台)	砂土	$v_s = 64.01N^{0.3971}$
59			黏土	$v_s = 106.63N^{0.39}$					

注\*: 多为早期研究工作, 笔者提及数据来源于一个地区, 但没有给出具体名称。

区系数  $a$  和  $b$  的分布特征是否具有科学意义的问题。不同地区  $N$ - $v_s$  函数中系数  $a$  和  $b$  分布特征如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 对于砂土, 系数  $a$  在 32~142.59 变化, 大多数在 70~110, 系数  $b$  在 0.222~0.57 变化, 大多数在 0.25~0.4; 对于黏土, 系数  $a$  在 44~132 变化, 大部分在 80~120, 系数  $b$  在 0.252~0.60 变化, 大部分在 0.25~0.4。

采用统计学方法, 对固定土类(砂土和黏土)以及所有土类  $N$ - $v_s$  函数关系中的系数  $a$ ,  $b$  的分布特征正态性进行检验。检验结果表明, 对于砂土, 使用正态性检验得到的显著性检验  $P$  值, 对  $a$ ,  $b$  分别是 0.200, 0.149; 对于黏土,  $a$ ,  $b$  的  $P$  值分别是 0.200, 0.200, 均大于 0.05, 都符合正态分布。但是, 对所有土的情

况, 使用正态性检验得到的显著性检验  $P$  值, 对  $a$ ,  $b$  分别是 0.001, 0.047, 均小于 0.05, 不符合正态分布, 且对  $a$  的 0.001 已经小于 0.01, 属于很显著不符。特别需注意的是, 系数  $a$ ,  $b$  是否服从正态分布, 实际上代表着  $N$ - $v_s$  函数能否作为不同地区土壤内性质的表征量, 即正态分布下不同地区性质将具有同一性取向, 非正态分布下不同地区性能取向则为非同一性。

也就是说, 固定土类下不同地区  $N$ - $v_s$  函数关系不仅具有统一的函数形式, 而且  $N$ - $v_s$  函数关系对于不同地区具有科学性, 此时  $N$ - $v_s$  函数关系可以成为特征函数。而对于所有土,  $N$ - $v_s$  函数关系仅是具有统一的函数形式, 但对不同地区不具有同一性, 即所有土类下  $N$ - $v_s$  函数关系还难以成为特征函数。考虑到所有土

$N-v_s$  曲线来自于世界 53 个地区, 样本达到一定数量, 因此所有土  $N-v_s$  特征函数不存在的结论应该成立的。

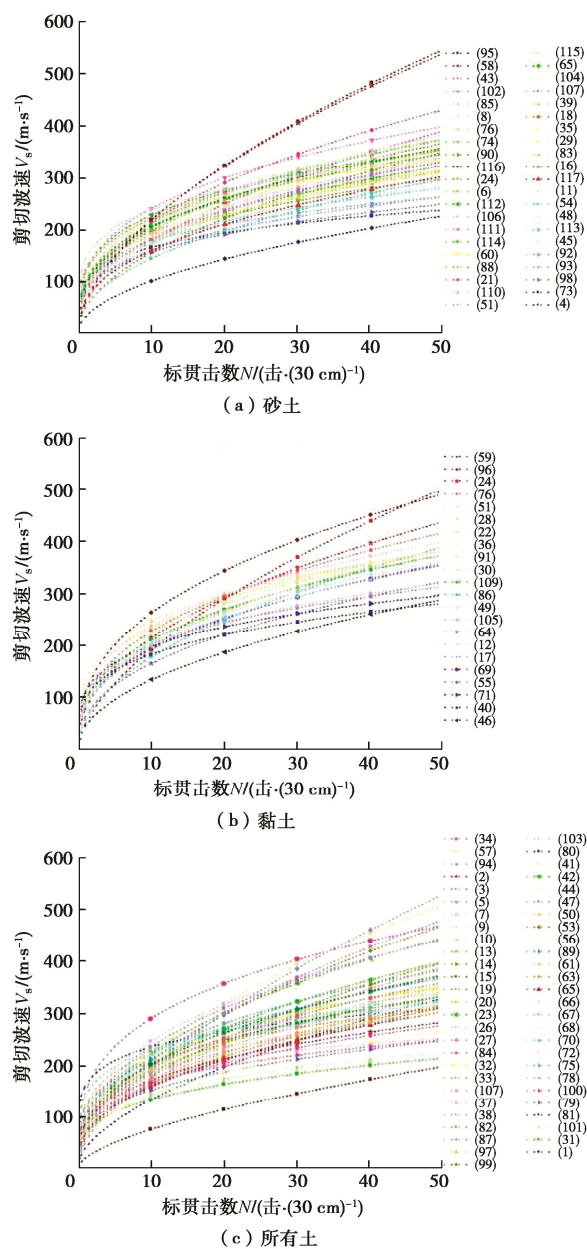


图 8 世界不同地区既有的  $N-v_s$  关系曲线

Fig. 8 Existing  $N-v_s$  relationship curves of soils in different regions of the world

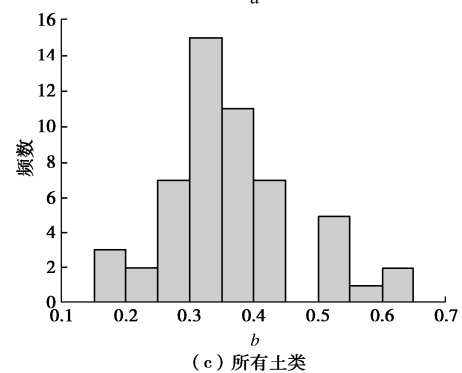
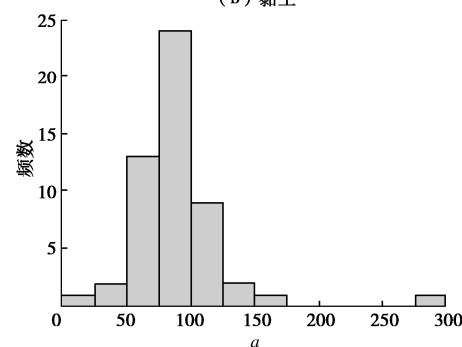
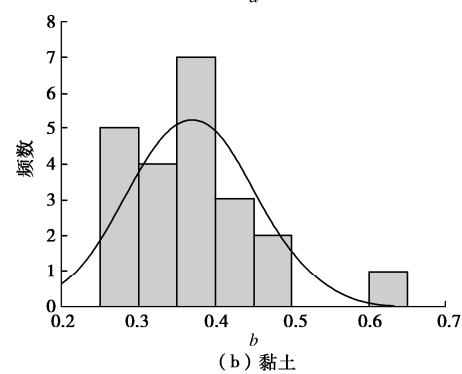
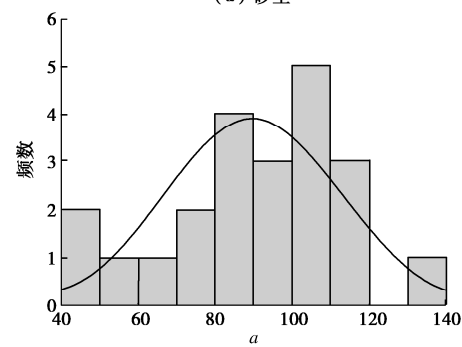
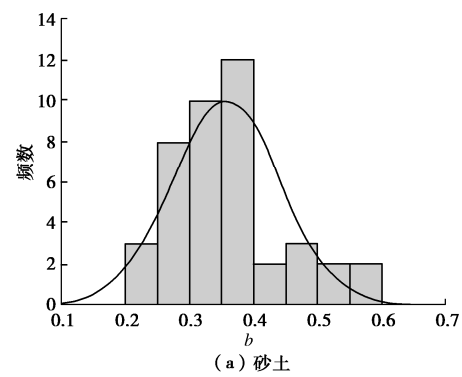
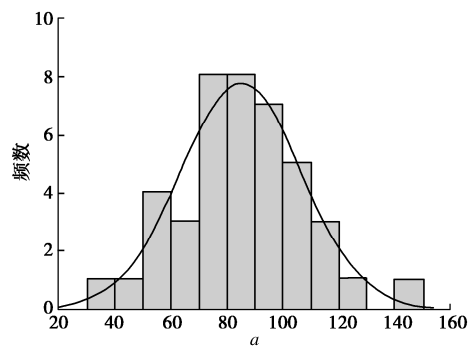


图 9 世界不同地区既有  $N-v_s$  函数关系中两个系数的分布特征  
Fig. 9 Distribution characteristics of two coefficients for existing  $N-v_s$  function relationship of soils in different regions of the world



## 5 结 论

(1) 通过剖析土力学和土动力学经典本构模型, 提出了双控制参数的概念, 其本质为土单元力学性质的异同由两个控制参数的异同决定, 而不同地区由两个控制参数所形成的平均对应关系的差异性决定了不同地区土力学和工程平均性质的差异性。

(2) 提出了区域土特征函数的概念, 本质为不同地区土的平均力学和工程性质的差异性由区域土特征函数的差异性决定, 同时建立了包括控制性、普适性、完备性、原位性、一致性、可操作性和存在性等属性要求在内的区域土特征函数构建准则。

(3) 针对常见的砂土和黏土, 提出了采用  $N-v_s$  特征函数表征其区域土力学和工程特性的思想, 给出了构建方法, 阐明了其原理, 采用世界不同地区实际  $N-v_s$  函数关系, 论证了砂土和黏土的区域土  $N-v_s$  特征函数的存在性。

### 参考文献:

- [1] 周 镜. 岩土工程中的几个问题[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 2-8. (ZHOU Jing. Some cases in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 2-8. (in Chinese))
- [2] 龚晓南. 21 世纪岩土工程发展展望[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 238-242. (GONG Xiaonan. Prospects for the development of geotechnical engineering in the 21th century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 238-242. (in Chinese))
- [3] 李兆焱, 袁晓铭, 曹振中, 等. 标贯法对巴楚地震液化场地适用性及误判原因分析[J]. 世界地震工程, 2010, **26**(增刊 1): 282-286. (LI Zhaoyan, YUAN Xiaoming, CAO Zhenzhong, et al. SPT method's feasibility for liquefaction decision of sites and analysis of its misjudge in Bachu earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2010, **26**(S1): 282-286. (in Chinese))
- [4] 王梦龙. 国家标准液化判别方法区域化修正初探[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016. (WANG Menglong. Preliminary Study on Regional Method of National Standard of Liquefaction Discrimination Formula[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016. (in Chinese))
- [5] KANAI K. Conference on Cone Penetrometer[R]. Ankara: The Ministry of Public Works and Settlement, 1966.
- [6] NAIK S P, PATRA N R, MALIK J N. Spatial distribution of shear wave velocity for late quaternary alluvial soil of Kanpur city, northern India[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, **32**(1): 131-149.
- [7] 陆万海, 李熙烨, 吴玉棠. 澳门土壤剪切波速的相关性分析[J]. 华南地震, 2014, **34**(3): 6-11. (LU Wanhai, LI Xiye, WU Yutang. Correlations analysis of shear wave velocity of Macau soils[J]. South China Journal of Seismology, 2014, **34**(3): 6-11. (in Chinese))
- [8] 袁晓铭, 卢坤玉, 林 颖, 等. 哈尔滨地区砂土层  $N-V$  关系特征曲线及对比研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, **40**(6): 1-15. (YUAN Xiaoming, LU Kunyu, LIN Ying, et al. The  $N-V$  relationship curve of sand layers in Harbin region and its comparison with those in other regions of China[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, **40**(6): 1-15. (in Chinese))
- [9] XIAO S H, ZHANG J, YE J M, et al. Establishing region-specific  $N-V_s$  relationships through hierarchical Bayesian modeling[J]. Engineering Geology, 2021, **287**: 106105.
- [10] HASANCEBI N, ULUSAY R. Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2007, **66**(2): 203-213.
- [11] KUMAR A, HARINARAYAN N H, VERMA V, et al. Seismic site classification and empirical correlation between standard penetration test  $N$  value and shear wave velocity for guwahati based on thorough subsoil investigation data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2018, **175**(8): 2721-2738.
- [12] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [13] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989. (ZHANG Kexu, XIE Junfei. Soil Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese))
- [14] THOKCHOM S, RASTOGI B K, DOGRA N N, et al. Empirical correlation of SPT blow counts versus shear wave velocity for different types of soils in Dholera, Western India[J]. Natural Hazards, 2017, **86**(3): 1291-1306.
- [15] RAHIMI S, WOOD C M, WOTHERSPOON L M. Influence of soil aging on SPT- $V_s$  correlation and seismic site classification[J]. Engineering Geology, 2020, **272**: 105653.