

DOI: 10.11779/CJGE20240808

## 区域土特征函数：差异性

卢坤玉<sup>1,2</sup>, 袁晓铭<sup>\*2</sup>

(1. 铜陵学院, 安徽 铜陵 244000; 2. 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)

**摘要:** 作为区域土理论和方法的核心内容之一, 开展了区域土  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性实证分析及评价方法研究。针对世界上目前拥有的实测  $N\text{-}v_s$  特征函数, 提出了差异性定量评价结果, 并建立了不同地区  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性评价方法。收集整理了 13 个国家 42 个不同地区砂土  $N\text{-}v_s$  特征函数和 22 个不同地区黏土  $N\text{-}v_s$  特征函数, 以此构成了 1092 组对比工况, 通过分析揭示了不同地区实测  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性的统计学特征及一般规律。结果表明, 全球不同地区实测  $N\text{-}v_s$  特征函数大多具有显著及以上差异, 其中极显著差异约占 1/3 以上, 工程意义上无差异不超过 10%。以 41 组  $N\text{-}v_s$  函数关系为样本, 构建了不同地区砂土和黏土  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性概率与差异性等级计算公式, 并通过了既有全部数据的检验。研究结果从实证角度支持了  $N\text{-}v_s$  函数关系可以作为区域土一种特征函数的概念, 并在实证角度使土性质具有区域特征的认识从感性上升到理性, 同时也为解析不同地区土性质的差异性提供了技术手段。

**关键词:**  $N\text{-}v_s$  特征函数; 世界各地区差异性现状; 差异性评价方法

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)12-2498-09

作者简介: 卢坤玉(1995—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土动力学、土工测试技术方面的研究工作。E-mail: kunyulu@163.com。

## Characteristic functions of regional soils: difference

LU Kunyu<sup>1,2</sup>, YUAN Xiaoming<sup>2</sup>

(1. Tongling University, Tongling 244000, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration; Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** As one of the core contents of regional soil theory and methods, empirical analysis and evaluation method research on the differences in  $N\text{-}v_s$  characteristic functions of regional soils are conducted. The quantitative evaluation results of the measured differences in  $N\text{-}v_s$  characteristic functions currently available in the world are proposed, and evaluation methods for the differences in  $N\text{-}v_s$  characteristic functions in different regions are established in this paper. The  $N\text{-}v_s$  characteristic functions of sandy soils from 42 different regions in 13 countries and the  $N\text{-}v_s$  characteristic functions of clay soils from 22 different regions are collected and organized, forming 1092 sets of comparative working conditions. Through analysis, the statistical characteristics and general rules of the differences in the measured  $N\text{-}v_s$  characteristic functions in different regions are revealed. The results show that the measured  $N\text{-}v_s$  characteristic functions in different regions of the world mostly have significant or above differences, with extremely significant differences accounting for more than about 1/3, and no difference in engineering significance does not exceed 10%. Using 41 sets of  $N\text{-}v_s$  function relationships as samples, formulas for calculating the probability and level of differences in  $N\text{-}v_s$  characteristic functions of sand and clay in different regions are constructed, and all existing data are verified. The results of this study empirically support the concept that the  $N\text{-}v_s$  function relationship can be used as a characteristic function of regional soil, and elevate the understanding of soil properties with regional characteristics from sensibility to rationality. At the same time, it also provides technical means for analyzing the differences in soil properties across different regions.

**Key words:**  $N\text{-}v_s$  characteristic functions; current status of regional differences around the world; method for evaluating differences

基金项目: 黑龙江省自然科学基金重点项目 (ZD2019E009); 铜陵学院校级科研计划项目 (2024tlxykjZD04) This work was supported by Key Project of Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (Grant No. ZD2019E009), and Tongling University University-level Scientific Research Plan Project (Grant No. 2024tlxykjZD04).

收稿日期(Received): 2024-08-12 修回日期(Revised): 2024-12-30 接受日期(Accepted): 2025-01-07 网络出版日期(Online): 2025-01-08

\*通信作者 (E-mail: yxniem@163.com)

## 0 引言

无论是从科研人员还是工程师的角度, 目前都已经认识到土的工程和力学性质具有区域性特征, 认为研究土壤工程和力学区域特性具有重要价值, 是未来重点研究方向。同时, 性态设计已经是当前岩土工程的发展趋势, 而考虑土的区域特征的岩土工程个性化设计就成为其中一个必须考虑的问题。

从土力学和岩土工程的一般性角度, 目前对区域土还没有定义。袁晓铭等<sup>[1]</sup>将区域土定义为一个地区内相同或相似沉积条件下力学与工程性质具有同一性的土壤, 即该区域内同类别的土壤在组成和结构等属性方面有相似的特征, 并具有趋于一致的力学与工程特性。同时, 袁晓铭等<sup>[1]</sup>提出了区域土特征参数和特征函数的一般性概念、原理和准则。针对如何以常规和原位的土的力学或工程参数, 定量表征和刻画土的工程和力学性能的区域性特征这一核心问题, 袁晓铭提出了  $N\text{-}v_s$  关系曲线可以作为一种表征区域土力学和工程特性的特征函数(也可以看作是描述区域土特性广义本构关系)的思想, 给出了构建方法, 阐明了其原理, 并与袁晓铭等<sup>[2]</sup>一起采用全球实测数据的随机分析, 针对常见的砂土和黏土, 论证了  $N\text{-}v_s$  特征函数的稳定性和收敛性。

对区域土  $N\text{-}v_s$  特征函数进行差异性分析, 也应是区域土理论研究的核心内容之一。一方面, 需掌握目前拥有的全球各地区  $N\text{-}v_s$  特征函数的差异性, 从统计学角度定量回答这些地区的  $N\text{-}v_s$  特征函数是否存在差异以及差异的程度, 这既是区域土  $N\text{-}v_s$  特征函数的重要性质之一, 也是提出的区域土特征函数的思想和原理成立的实证基础之一。另一方面, 要提出任意两地区  $N\text{-}v_s$  特征函数的差异性评价方法, 以便定量评定两个地区  $N\text{-}v_s$  特征函数是否存在差异及差异程度, 为

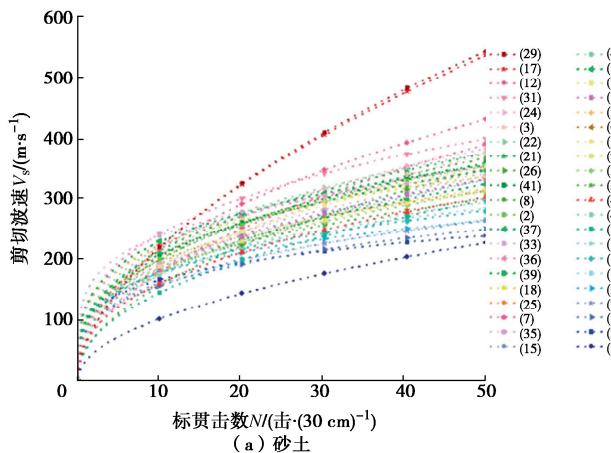


图 1 世界不同地区不同土类的  $N\text{-}v_s$  特征函数曲线  
(a) 砂土

未来  $N\text{-}v_s$  特征函数的工程应用提供基础。也就是说, 无论是从理论上的完整性还是工程上的可应用性角度, 都需要进一步研究  $N\text{-}v_s$  特征函数的差异性问题, 但这方面以往没有成果发表, 而这正是本文的研究内容。

## 1 全球各地区 $N\text{-}v_s$ 特征函数差异性分析

### 1.1 基础数据

文献[1]分析表明, 在全球不同地区的固定土类(砂土和黏土)下不同地区的  $N\text{-}v_s$  函数关系, 具有统计学意义上的科学特征。

将收集到的来自全球 42 个不同地区砂土的  $N\text{-}v_s$  特征函数示于表 1 和图 1 (a), 来自 22 个不同地区黏土的  $N\text{-}v_s$  特征函数示于表 2 和图 1 (b)<sup>[3-4]</sup>。表 1, 2, 构成了定量回答世界各国既有  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性分析的数据基础。

### 1.2 差异性等级划分

从表 1, 2 看出, 无论是砂土还是黏土的  $N\text{-}v_s$  特征函数, 都可用  $v_s = aN^b$  表达。对于砂土, 系数  $a$  介于 32~142.59, 系数  $b$  介于 0.222~0.57; 对于黏土, 系数  $a$  介于 44~132, 系数  $b$  介于 0.252~0.60。从特征函数的系数, 结合图 1, 定性可见世界各国的  $N\text{-}v_s$  特征函数有很多存在很大差异, 也有二者很接近的情况。

为定量表征世界各国的  $N\text{-}v_s$  特征函数的差异性, 本文采用统计学理论进行分析。具体来说, 针对同一类土, 从每个地区  $N\text{-}v_s$  函数关系中, 取  $N$  为 1~50, 得到总计 50 对  $N\text{-}v_s$  数组。以任意两个地区的  $N\text{-}v_s$  数组为一组, 采用统计学经典的  $t$  检验, 分析二者的差异性。 $t$  检验是用  $t$  分布理论来推论差异发生的概率, 从而比较两个平均数的差异是否显著<sup>[5-6]</sup>。 $t$  检验的适

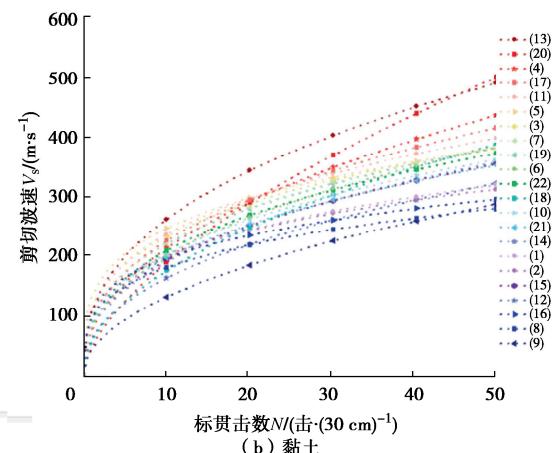


图 1 世界不同地区不同土类的  $N\text{-}v_s$  特征函数曲线  
(b) 黏土

Fig. 1 Existing  $N\text{-}v_s$  characteristic function curves of different soil types in different regions of the world

表 1 世界不同地区砂土既有  $N-v_s$  关系曲线的基本信息Table 1 Basic information of existing  $N-v_s$  relationship curves of sand in different regions of the world

序号	研究者	国家(地区)	公式	序号	研究者	国家(地区)	公式
1	Shibata (1970 年)	日本 (*)	$v_s = 32N^{0.50}$	22	Kirar 等(2016 年)	印度(洛克)	$v_s = 100.3N^{0.34}$
2	Ohta 等(1972 年)	日本 (*)	$v_s = 87N^{0.36}$	23	Gautam(2016 年)	尼泊尔(加德满都谷地)	$v_s = 78.7N^{0.35}$
3	Ohsaki 等(1973 年)	日本 (*)	$v_s = 59.4N^{0.47}$	24	Jhinkwan 等(2016 年)	印度(中央邦)	$v_s = 84.3N^{0.39}$
4	Imai (1977 年)	日本 (*)	$v_s = 80.6N^{0.33}$	25	Pérez-Santisteban 等(2016 年)	西班牙(马德里)	$v_s = 98.7N^{0.32}$
5	Imai 等(1982 年)	日本 (*)	$v_s = 87.8N^{0.31}$	26	Rahman 等(2018 年)	孟加拉国(达卡)	$v_s = 82N^{0.38}$
6	Sykora 等(1983 年)	美国(加利福尼亚)	$v_s = 100.5N^{0.29}$	27	孙东风等(2018 年)	中国(如东)	$v_s = 100.2N^{0.25}$
7	Lee (1990 年)	中国(台湾)	$v_s = 57.4N^{0.49}$	28	刘福兴等(2018 年)	中国(黄河三角洲)	$v_s = 79.7N^{0.31}$
8	Kalteziotis 等(1992 年)	希腊 (*)	$v_s = 49.1N^{0.50}$	29	Kumar 等(2018 年)	印度(古瓦哈提)	$v_s = 58.7N^{0.57}$
9	郑灿堂等(1999 年)	中国(山东)	$v_s = 80N^{0.35}$	30	Lu 等(2019 年)	中国(台湾)	$v_s = 80.1N^{0.29}$
10	李存志等(2006 年)	中国(昆明盆地)	$v_s = 103.5N^{0.28}$	31	袁晓铭等(2020 年)	中国(哈尔滨)	$v_s = 116.6N^{0.31}$
11	Hasancebi 等(2007 年)	土耳其(耶尼谢希尔)	$v_s = 90.8N^{0.32}$	32	Ashikuzzaman 等(2021 年)	孟加拉国(拉杰沙希)	$v_s = 74.4N^{0.40}$
12	Hanumantharao 等(2008 年)	印度(新德里)	$v_s = 79N^{0.43}$	33	Alhuay-León 等(2021 年)	秘鲁(奥尔莫斯)	$v_s = 142.6N^{0.22}$
13	Dikmen(2009 年)	土耳其(埃斯基谢希尔)	$v_s = 73N^{0.33}$	34	Hossain 等(2021 年)	孟加拉国(迪纳杰布尔)	$v_s = 75.8N^{0.38}$
14	Maheswari 等(2010 年)	印度(钦奈)	$v_s = 100.5N^{0.27}$	35	—	中国(北京)	$v_s = 85.9N^{0.35}$
15	Tsiambaos 等(2011 年)	希腊 (*)	$v_s = 79.7N^{0.37}$	36	—	中国(秦皇岛)	$v_s = 114.8N^{0.29}$
16	Thaker 等(2011 年)	印度(苏拉特)	$v_s = 51.2N^{0.45}$	37	—	中国(烟台)	$v_s = 120.8N^{0.28}$
17	Anbazhagan 等(2013 年)	印度(勒克瑙)	$v_s = 60.2N^{0.56}$	38	—	中国(唐山)	$v_s = 92.1N^{0.28}$
18	刘斌等(2013 年)	中国(毛乌素沙漠)	$v_s = 118.3N^{0.27}$	39	—	中国(南京)	$v_s = 99N^{0.32}$
19	Sun 等(2013 年)	韩国 (*)	$v_s = 75.8N^{0.37}$	40	—	中国(下辽河平原)	$v_s = 69.1N^{0.40}$
20	王梦龙(2016 年)	中国(巴楚)	$v_s = 98.8N^{0.22}$	41	—	中国(武汉)	$v_s = 91N^{0.35}$
21	Khan 等(2016 年)	阿联酋(沙迦)	$v_s = 94.7N^{0.35}$	42	卢坤玉	中国(邢台)	$v_s = 64N^{0.40}$

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。

表 2 世界不同地区黏土既有  $N-v_s$  关系曲线的基本信息Table 2 Basic information of existing  $N-v_s$  relationship curves of clay in different regions of the world

序号	研究者	国家(地区)	公式	序号	研究者	国家(地区)	公式
1	Imai (1977 年)	日本 (*)	$v_s = 102N^{0.29}$	12	Thaker 等(2011)	印度(苏拉特)	$v_s = 62.4N^{0.42}$
2	Imai 等(1982 年)	日本 (*)	$v_s = 107N^{0.27}$	13	Anbazhagan 等(2013)	印度(勒克瑙)	$v_s = 106.6N^{0.39}$
3	Lee (1990 年)	中国(台湾)	$v_s = 114N^{0.31}$	14	Chatterjee 等(2013)	印度(加尔各答)	$v_s = 77.1N^{0.39}$
4	Kalteziotis 等(1992 年)	希腊 (*)	$v_s = 76.6N^{0.45}$	15	Naik 等(2014)	印度(坎普尔)	$v_s = 81.2N^{0.38}$
5	Pitilakis 等(1999 年)	希腊(米格顿盆地)	$v_s = 132N^{0.27}$	16	Fabbrocino 等(2015)	意大利(莫利塞)	$v_s = 110.5N^{0.25}$
6	郑灿堂等(1999 年)	中国(山东)	$v_s = 80N^{0.40}$	17	Kirar 等(2016)	印度(洛克)	$v_s = 94.4N^{0.38}$
7	李存志等(2006 年)	中国(昆明盆地)	$v_s = 101.5N^{0.34}$	18	Jhinkwan 等(2016)	印度(中央邦)	$v_s = 57.1N^{0.49}$
8	Hasancebi 等(2007 年)	土耳其(耶尼谢希尔)	$v_s = 97.9N^{0.27}$	19	Rahman 等(2018)	孟加拉国(达卡)	$v_s = 100.6N^{0.34}$
9	Dikmen (2009 年)	土耳其(埃斯基谢希尔)	$v_s = 44N^{0.48}$	20	Kumar 等(2018)	印度(古瓦哈提)	$v_s = 47.8N^{0.60}$
10	Maheswari 等(2010 年)	印度(钦奈)	$v_s = 89.3N^{0.36}$	21	Ashikuzzaman 等(2021)	孟加拉国(拉杰沙希)	$v_s = 85.6N^{0.36}$
11	Tsiambaos 等(2011 年)	希腊 (*)	$v_s = 112.2N^{0.32}$	22	Hossain 等(2021)	孟加拉国(迪纳杰布尔)	$v_s = 91.6N^{0.36}$

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。

用条件包括各样本相互独立, 样本均数和标准差可得以及样本符合正态分布或近似正态分布<sup>[6]</sup>, 本文数据符合上述适用条件。

参考统计学理论<sup>[5-7]</sup>定义差异性概率  $P$  值, 即一组数据的均值在另一组数据的均值所代表的总体中出现的概率。 $P$  值越小, 两者差异越显著, 详见表 3。当计算得到的概率  $P$  值小于 0.001, 代表两个比较对象之间具有极其显著差异; 概率  $P$  值在 0.001~0.01, 代表二者之间具有很显著差异; 概率  $P$  值在 0.01~0.05, 代表二者之间具有显著差异; 概率  $P$  值在 0.05~0.65, 代表二者之间无显著差异; 概率  $P$  值大于 0.65, 代表二者在工程范围内无差异。

表 3 差异性等级划分标准

Table 3 Criterial for classification of difference levels

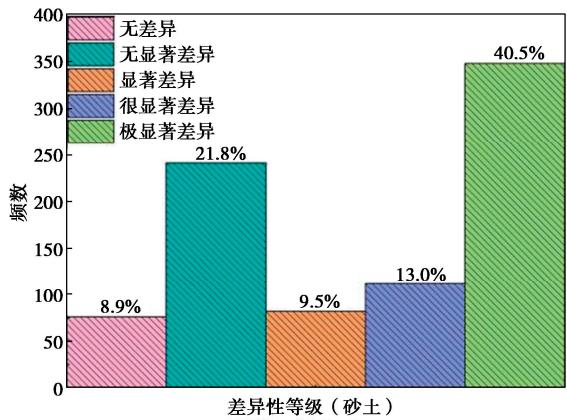
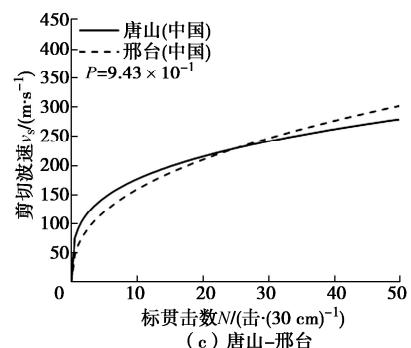
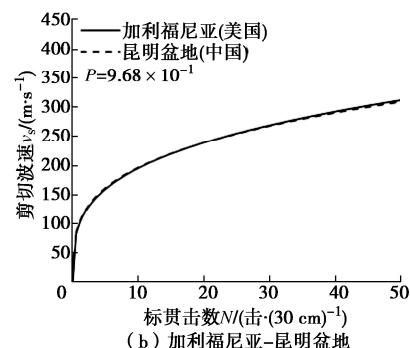
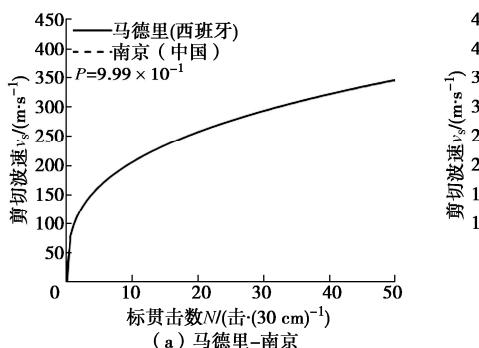
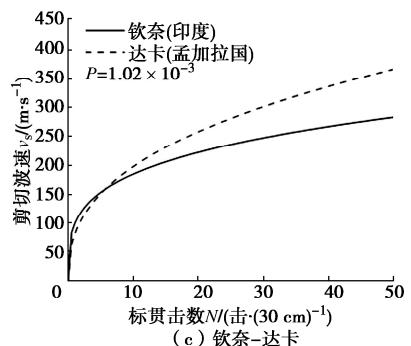
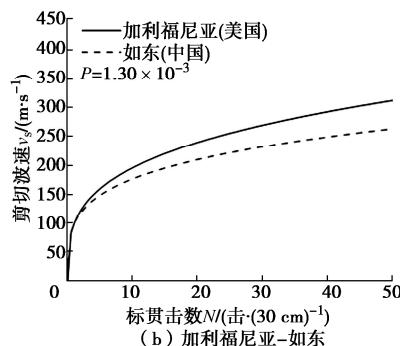
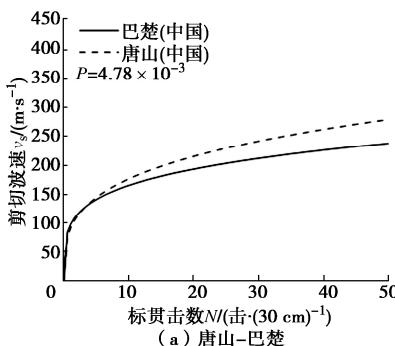
$P$ 值	$>0.65$	$0.05\sim0.65$	$0.01\sim0.05$	$0.001\sim0.01$	$<0.001$
差异性等级	无差异	无显著差异	显著	很显著	极显著
		差异	差异	差异	差异

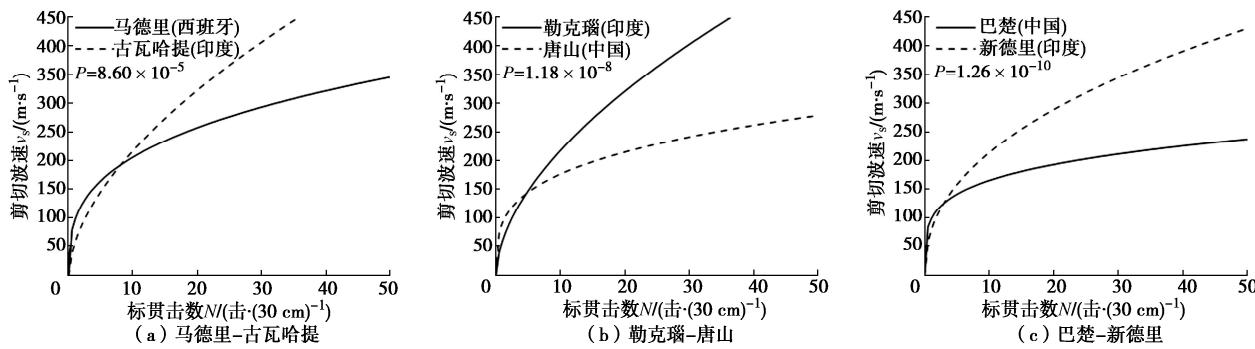
### 1.3 各地区砂土 $N$ - $v_s$ 特征函数差异性分析

采用 IBM SPSS Statistics 23 软件, 对表 1 中来自 42 个不同地区砂土, 以任意两个地区的  $N$ - $v_s$  为一组, 得到总计 861 组计算工况, 进而分析得到的不同地区  $N$ - $v_s$  函数关系的差异性结果如图 2 所示。从图 2 可见, 861 组工况中有 543 组工况具有显著差异及以上, 占总数的 63.0%, 其中, 具有极显著差异的有 349 组,

占总数的 40.5%; 有 318 组无显著差异及以下, 占比 37.0%, 其中无差异的占比 8.9%。

进一步, 将无差异、很显著差异、极显著差异的典型实例分别示于图 3~5。由图中可见, 国内外各地区之间砂土的  $N$ - $v_s$  特征函数关系既存在极显著差异情况, 如图 5 中的勒克瑙和唐山等, 也存在工程范围内无差异情况, 如图 3 中的唐山和邢台等。需要指出的是, 来自不同国家不同地区的砂土  $N$ - $v_s$  函数关系是由不同研究人员独立完成的, 因此上述不同地区砂土  $N$ - $v_s$  函数差异性的表现具有客观性。

图 2 不同地区砂土  $N$ - $v_s$  特征函数差异性Fig. 2 Difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of sand in different regions图 3 两个地区砂土  $N$ - $v_s$  特征函数无差异实例Fig. 3 Typical examples of the non-difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of sand between two regions图 4 两个地区砂土  $N$ - $v_s$  特征函数有很显著差异实例Fig. 4 Typical examples of very significant difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of sand between two regions

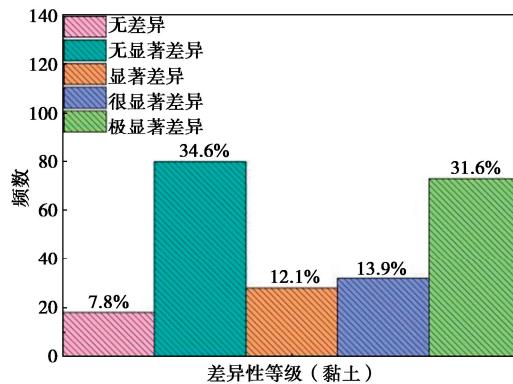
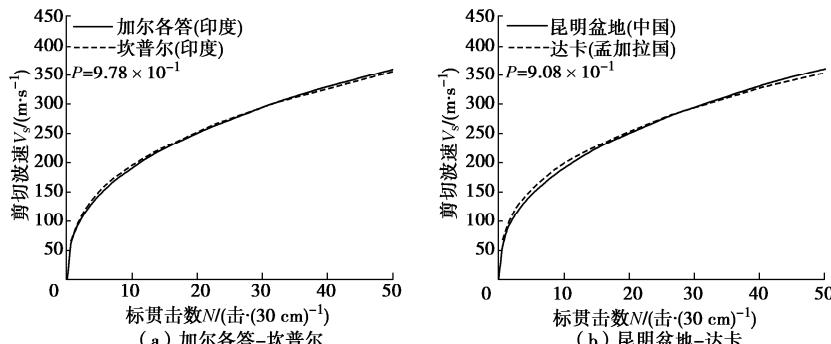
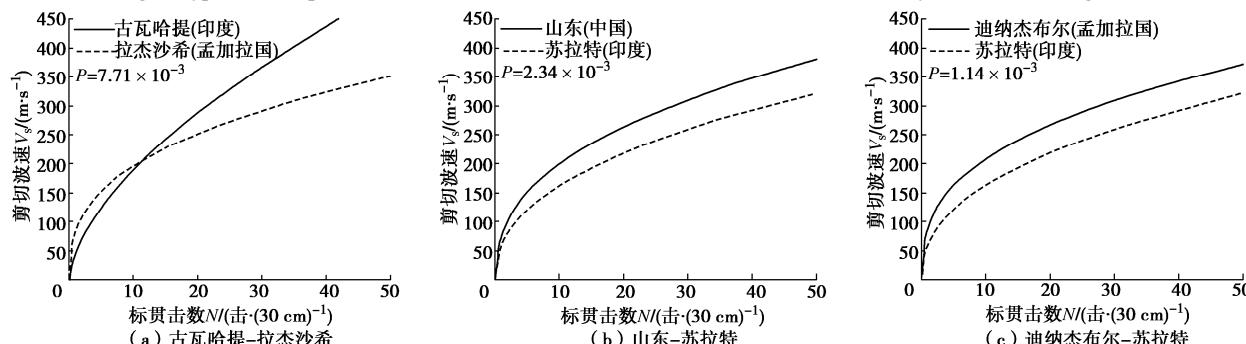
图 5 两个地区砂土  $N$ - $v_s$  特征函数有极显著差异实例Fig. 5 Typical examples of extremely significant difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of sand between two regions

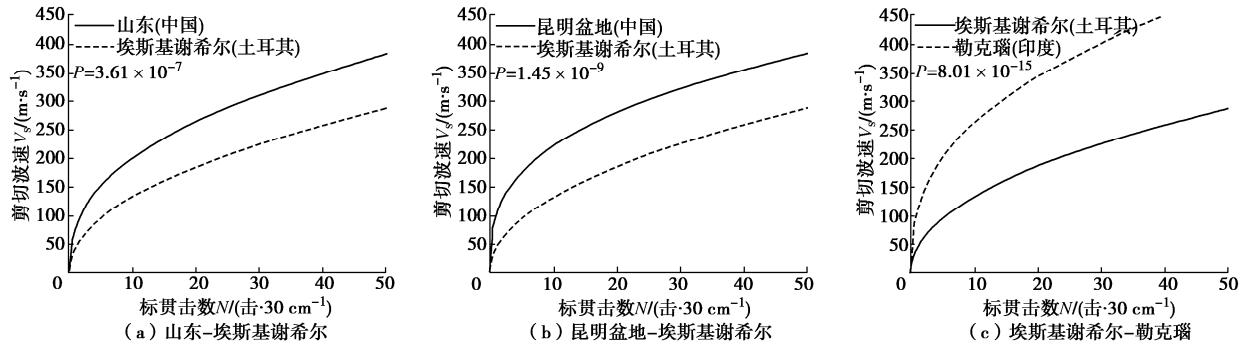
另外,从图3中可见,中国唐山地区和邢台地区 $N$ - $v_s$ 函数工程意义上为无差异,而由图4中可见,唐山地区和巴楚地区 $N$ - $v_s$ 函数工程意义上具有很显著的差异。这两种表现,恰好与以1976年唐山地震液化数据为主的现行规范液化判别公式对巴楚地区和邢台地区的适用性分析结果,形成了很好的对应关系。研究表明<sup>[8]</sup>,现行规范对2003年新疆地震中巴楚地区液化场地明显不适用,而对1966年邢台地震中邢台地区液化场地适用性良好。这可以解释为,同一个地质单元上的唐山地区和邢台地区, $N$ - $v_s$ 函数关系相近,砂土的工程性质和抗液化能力相近;位于不同地质单元上的唐山地区和巴楚地区, $N$ - $v_s$ 函数关系相差很大,砂土的工程性质和抗液化能力差距很大。

#### 1.4 各地区黏土 $N$ - $v_s$ 特征函数差异性分析

对表2中来自22个不同地区黏土,以任意两个地

区的 $N$ - $v_s$ 为一组,得到总计231组计算工况,对计算工况分析得到 $N$ - $v_s$ 函数关系的差异性结果如图6所示。

图 6 不同地区黏土  $N$ - $v_s$  函数差异性Fig. 6 Difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of clay in different regions图 7 两个地区黏土  $N$ - $v_s$  特征函数无差异实例Fig. 7 Typical examples of the non-difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of clay between two regions图 8 两个地区黏土  $N$ - $v_s$  特征函数有很显著差异实例Fig. 8 Typical examples of very significant difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of clay between two regions

图9 两个地区黏土  $N$ - $v_s$  特征函数有极显著差异实例Fig. 9 Typical examples of extremely significant difference of  $N$ - $v_s$  characteristic functions of clay between two regions

对于黏土, 从图6可见, 231组工况中有133组工况具有显著差异及以上, 为总数的57.6%, 其中, 具有极显著差异的占比31.6%; 而有98组无显著差异及以下, 占比42.4%, 其中工程范围内无差异的占比7.8%。

进一步, 将无差异、很显著差异、极显著差异的典型实例分别示于图7~9。从图中可见, 国内外各地区之间黏土的  $N$ - $v_s$  特征函数关系既存在极显著差异情况, 如图9中的昆明盆地和埃斯基谢希尔, 也存在工程范围内无差异情况, 如图7中的山东和钦奈。需要指出的是, 来自不同国家不同地区的黏土  $N$ - $v_s$  特征函数关系也是由不同研究人员独立完成的, 因此这里黏土  $N$ - $v_s$  特征函数差异性也具有客观性。

总之, 无论是文献[1]  $N$ - $v_s$  函数系数分布特征的分析结果, 还是本文  $N$ - $v_s$  函数关系的差异性分析结果, 都表明固定土类(砂土和黏土)下不同地区的  $N$ - $v_s$  函数关系分布具有统计学意义上的科学特征, 同时其差异性也不与既有认识相悖, 具备了科学意义上的存在性。因此, 对于砂土和黏土, 不同地区的  $N$ - $v_s$  函数关系可以成为区域土的特征函数。

## 2 差异性评价公式

### 2.1 评价公式的建立

为了定量衡量不同地区  $N$ - $v_s$  函数关系差异性, 本文提出一种相应的评价方法。从前文中可以看出, 不同地区的  $N$ - $v_s$  函数曲线大部分不存在非常明显的交叉。在这种情况下, 不同地区的  $N$ - $v_s$  函数关系差异性可以用  $x$  轴、 $y$  轴以及函数曲线所包围区域的相对差异来表示。如果两个地区的  $N$ - $v_s$  函数关系差异较大, 则相对面积差也较大, 反之亦然。如图10所示,  $A$  区域的  $N$ - $v_s$  函数关系与  $x$  轴、 $y$  轴形成的面积为  $S_A$ ,  $B$  区域的  $N$ - $v_s$  函数关系与  $x$  轴、 $y$  轴形成的面积为  $S_B$ 。

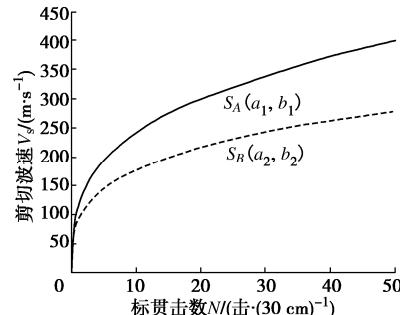
当标贯击数  $N$  在0~50内, 则两个地区  $N$ - $v_s$  函数的相对面积差可以表示为

$$\Delta_S = \frac{|S_A - S_B|}{S_A + S_B} = \frac{\left| \int_0^{50} a_1 N^{b_1} dN - \int_0^{50} a_2 N^{b_2} dN \right|}{\int_0^{50} a_1 N^{b_1} dN + \int_0^{50} a_2 N^{b_2} dN} \quad (1)$$

推导后得到:

$$\Delta_S = \frac{\left| \frac{a_1}{b_1 + 1} 50^{b_1 + 1} - \frac{a_2}{b_2 + 1} 50^{b_2 + 1} \right|}{\frac{a_1}{b_1 + 1} 50^{b_1 + 1} + \frac{a_2}{b_2 + 1} 50^{b_2 + 1}} \quad (2)$$

对已知  $N$ - $v_s$  函数任意两地区, 根据式(2)可以得到其  $N$ - $v_s$  函数的相对面积差。

图10 两个地区  $N$ - $v_s$  函数关系相对面积差计算示意图Fig. 10 Calculation diagram of relative area difference of  $N$ - $v_s$ 

relationship between two regions

为建立任意两个地区  $N$ - $v_s$  函数的相对面积差与差异性概率  $P$  值及差异性等级的关系, 抽取前文中41组  $N$ - $v_s$  函数关系, 包括22组砂土, 19组黏土, 形成  $N$ - $v_s$  特征函数差异性评价公式的样本, 见表4<sup>[9-16]</sup>。

分别针对砂土和黏土, 根据式(2)计算出任意两个地区  $N$ - $v_s$  函数的相对面积差  $\Delta_S$ , 再通过拟合回归建立其与  $P$  值的相关关系, 结果如图11所示, 其中砂土有231组数据, 黏土有171组数据。数据回归得到的差异性概率  $P$  值的计算公式分别为

$$P = e^{(-69.53\Delta_S)} \quad (\text{砂土}) \quad (3)$$

$$P = e^{(-62.4\Delta_S)} \quad (\text{黏土}) \quad (4)$$

需注意的是, 式(3)、(4)的相关系数  $R$  分别为

表 4 构建  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性评价公式的样本Table 4 Samples for constructing formula for evaluating differences of  $N\text{-}v_s$  characteristic functions

序号	研究者	国家(地区)	土类	公式	R	序号	研究者	国家(地区)	土类	公式	R
1	Imai 等 (1982 年)	日本 (*)	黏土	$v_s = 107N^{0.27}$	0.72	22	Chatterjee 等 (2013 年)	印度 (加尔各答)	黏土	$v_s = 77.1N^{0.39}$	0.96
2	Sykora 等 (1983 年)	美国 (加利福尼亚)	砂土	$v_s = 100.5N^{0.29}$	0.84	23	Naik 等 (2014 年)	印度 (坎普尔)	黏土	$v_s = 81.2N^{0.38}$	0.96
3	Kalteziotis 等 (1992 年)	希腊 (*)	砂土	$v_s = 49.1N^{0.50}$	0.74	24	王梦龙 (2016 年)	中国 (巴楚)	砂土	$v_s = 98.8N^{0.22}$	0.90
4			黏土	$v_s = 76.6N^{0.45}$	0.89	25	Khan 等 (2016 年)	阿联酋 (沙迦)	砂土	$v_s = 94.7N^{0.35}$	0.83
5	Pitilakis 等 (1999)	希腊 (米格顿盆地)	黏土	$v_s = 132N^{0.27}$	0.75	26	Kirar 等 (2016 年)	印度 (洛克)	砂土	$v_s = 100.3N^{0.34}$	0.91
6	郑灿堂等 (1999 年)	中国 (山东)	砂土	$v_s = 80N^{0.35}$	0.98	27	Jhinkwan 等 (2016 年)	印度 (中央邦)	黏土	$v_s = 94.4N^{0.38}$	0.85
7			黏土	$v_s = 80N^{0.40}$	0.98	28	Rahman 等 (2018 年)	孟加拉国 (达卡)	黏土	$v_s = 84.2N^{0.39}$	0.71
8	李存志等 (2006 年)	中国 (昆明盆地)	砂土	$v_s = 103.5N^{0.28}$	0.81	29	刘福兴等 (2018 年)	中国 (黄河 三角洲)	砂土	$v_s = 57.1N^{0.49}$	0.88
9			黏土	$v_s = 101.5N^{0.34}$	0.75	30	Ashikuzzaman 等 (2021 年)	孟加拉国 (拉杰沙希)	黏土	$v_s = 100.6N^{0.34}$	0.73
10	Hasancebi 等 (2007)	土耳其 (耶尼谢希尔)	黏土	$v_s = 97.9N^{0.27}$	0.75	31	Hossain 等 (2021 年)	孟加拉国 (迪纳杰布尔)	砂土	$v_s = 79.7N^{0.31}$	0.96
11	Hanumantharao 等 (2008 年)	印度 (新德里)	砂土	$v_s = 79N^{0.43}$	0.99	32	Kumar 等 (2018 年)	印度 (古瓦哈提)	砂土	$v_s = 58.7N^{0.57}$	0.89
12	Dikmen	土耳其	砂土	$v_s = 73N^{0.33}$	0.72	33	袁晓铭等 (2020 年)	中国 (哈尔滨)	黏土	$v_s = 47.8N^{0.60}$	0.87
13	(2009 年)	(埃斯基谢希尔)	黏土	$v_s = 44N^{0.48}$	0.82	34	Ashikuzzaman 等 (2021 年)	孟加拉国 (孟加拉沙希)	砂土	$v_s = 116.6N^{0.31}$	0.85
14	Maheswari 等 (2010 年)	印度 (钦奈)	砂土	$v_s = 100.5N^{0.27}$	0.92	35	Hossain 等 (2021 年)	孟加拉国 (拉杰沙希)	黏土	$v_s = 85.6N^{0.36}$	0.84
15			黏土	$v_s = 89.3N^{0.36}$	0.96	36	—	孟加拉国 (迪纳杰布尔)	砂土	$v_s = 75.8N^{0.38}$	0.82
16	Tsiambaos 等 (2011 年)	希腊 (*)	砂土	$v_s = 79.7N^{0.37}$	0.79	37	—	中国 (北京)	黏土	$v_s = 91.6N^{0.36}$	0.86
17			黏土	$v_s = 112.2N^{0.32}$	0.78	38	—	中国 (烟台)	砂土	$v_s = 85.9N^{0.35}$	0.99
18	Thaker 等 (2011 年)	印度 (苏拉特)	砂土	$v_s = 51.2N^{0.45}$	0.88	39	—	中国 (下辽河 平原)	砂土	$v_s = 120.8N^{0.28}$	0.80
19			黏土	$v_s = 62.4N^{0.42}$	0.88	40	—	中国 (邢台)	砂土	$v_s = 69.1N^{0.4}$	0.80
20	Anbazhagan 等 (2013 年)	印度 (勒克瑙)	砂土	$v_s = 60.2N^{0.56}$	0.93	41	卢坤玉	中国 (邢台)	砂土	$v_s = 64N^{0.40}$	0.71
21			黏土	$v_s = 106.6N^{0.39}$	0.86						

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。

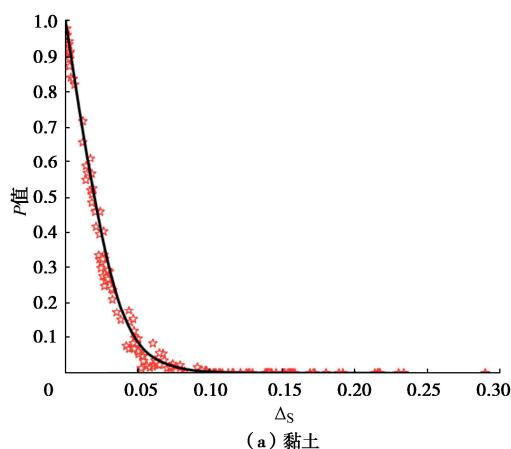
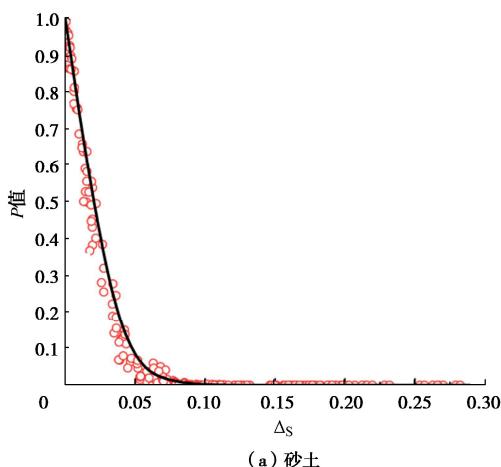
图 11  $N\text{-}v_s$  函数差异性概率  $P$  值与相对面积差  $\Delta_s$  的关系

Fig. 11 Relationship between the difference probability  $P$ -value of  $N\text{-}v_s$  function and the relative area difference  $\Delta_s$

0.94 和 0.90, 具有可靠性。

对于两个地区的  $N\text{-}v_s$  函数相互没有交叉或交叉不大的一般情况, 只要将两个地区  $N\text{-}v_s$  函数中的系数代入式(2), 进而由式(3), (4)就可以得到两个地区砂土和黏土  $N\text{-}v_s$  函数的差异性概率  $P$  值, 并由表 3 确定差异性等级。但如果两个地区  $N\text{-}v_s$  函数交叉很大,  $N\text{-}v_s$  函数差异性则需要单独研究。

## 2.2 评价公式的检验

采用 1.3, 1.4 节中全部的 861 组砂土工况和 231 组黏土工况, 分别对给出的差异性计算式(3), (4)进行检验。

检验结果表明, 对于砂土, 无差异、无显著差异、显著差异、很显著差异和极显著差异各等级的检验成功率分别为 60%, 78%, 79%, 82% 和 82%。其中, 公式计算和实际计算差异性, 虽有差异但等级没有跨档的占 79%, 等级相差一档的占比为 21%, 同时没有相差两档的情况出现。对于黏土, 无差异、无显著差异、显著差异、很显著差异和极显著差异各等级的检验成功率分别为 83%, 86%, 82%, 84% 和 73%。其中, 公式计算和实际计算差异性, 虽有差异但等级没有跨档的占 81%, 等级相差一档的占比为 19%, 同时没有相差两档的情况出现。

也就是说, 本文给出的差异性评价公式(3), (4), 其计算结果与实际结果会有差距, 但差距不会跨档的把握性为 80% 左右, 且其余均为等级相差在一档以内。这样的结果, 已经可以用于任意两地区砂土和黏土的  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性的一般性评价, 但对于具有特殊区间要求的  $N\text{-}v_s$  特征函数以及考虑区域土特征的重大工程设计问题, 式(3), (4)只能作为初步评价, 还需要根据具体问题进行更详细的分析。

## 3 结 论

(1) 统计结果表明, 目前世界各地区拥有的砂土和黏土的  $N\text{-}v_s$  特征函数, 具有显著差异及以上的约占 60%, 其中极显著差异分别约占 40% 和 30%, 而无显著差异及以下的约占 40%, 其中工程范围内无差异的约为 8%。

(2) 本文得到的世界不同地区的  $N\text{-}v_s$  特征函数的差异性定量分析结果, 与土的工程和力学性质会存在区域性特征的既有定性认识相符, 同时也是不同地区  $N\text{-}v_s$  函数关系可以作为区域土一种特征函数这一概念成立的支持。

(3) 本文提出的不同地区  $N\text{-}v_s$  特征函数差异显著性概率与等级的计算公式, 经检验表明可以用于不同地区  $N\text{-}v_s$  特征函数差异性的一般评价, 但该公式不

适用于两个地区  $N\text{-}v_s$  特征函数存在明显交叉的情况及需要特殊设计的工程, 此时需另行考虑。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 卢坤玉完成文献调研、数据收集与分析、主导论文撰写; 袁晓铭提供研究指导与资源支持、参与设计研究框架。所有作者参与论文的审阅与修改, 并对最终稿件内容达成一致。LU Kunyu completed literature research, data collection and analysis, and led the writing of this paper. YUAN Xiaoming provided research guidance and resource support, and participated in the design of research framework. All authors participated in the review and revision of the paper and agreed on the content of the final version.

## 参考文献:

- [1] 袁晓铭, 卢坤玉, 汪云龙, 等. 区域土特征函数: 概念与原理[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12): 2429-2437. (YUAN Xiaoming, LU Kunyu, WANG Yunlong, et al. Characteristic functions of regional soils: concepts and principles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2429-2437. (in Chinese))
- [2] 袁晓铭, 卢坤玉, 李兆焱, 等. 区域土特征函数: 收敛性[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 26-34. (YUAN Xiaoming, LU Kunyu, LI Zhaoyan, et al. Characteristic functions of regional soils: convergence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 26-34. (in Chinese))
- [3] XIAO S H, ZHANG J, YE J M, et al. Establishing region-specific  $N\text{-}V_s$  relationships through hierarchical Bayesian modeling[J]. Engineering Geology, 2021, 287: 106105.
- [4] 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.
- [5] 尹希果. 计量经济学: 原理与操作[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009. (YIN Xiguo. Econometrics: Principle and Operation[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009. (in Chinese))
- [6] 陈银梦, 詹倩. 运用双样本  $t$  检验的若干误区与正确条件[J]. 统计与管理, 2019, 34(2): 40-42. (CHEN Yinmeng, ZHAN Qian. Some misunderstandings and correct conditions of using double-sample  $t$ -test[J]. Statistics and Management, 2019, 34(2): 40-42. (in Chinese))

- [7] FISHER R A. The Design of Experiments[M]. New York: Hafner Press, 1935.
- [8] 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. Applicability of standard penetration method to liquefaction site of Bachu earthquake and analysis of misjudgment causes[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(S1): 282-286. (in Chinese))
- [9] 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 Regionalization Revision of National Standard Liquefaction Discrimination Method[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016. (in Chinese))
- [10] KHAN Z, AHMED A, HAJI BISMILLAH N. Variation of shear wave velocity with SPT-N values for Sharjah, UAE[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 10(1): 46-51.
- [11] 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))
- [12] KIRAR B, MAHESHWARI B K, MULEY P. Correlation between shear wave velocity ( $v_s$ ) and SPT resistance ( $N$ ) for roorkee region[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2016, 2(1): 9.
- [13] JHINKWAN H, JAIN P K. Prediction of shear wave velocity using SPT- $N$  value[J]. Int J, Engine Res, 2016, 3(7): 2393-8374.
- [14] RAHMAN M Z, KAMAL A S M M, SIDDIQUA S. Near-surface shear wave velocity estimation and  $v_s^{30}$  mapping for Dhaka City, Bangladesh[J]. Natural Hazards, 2018, 92(3): 1687-1715.
- [15] 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.
- [16] HOSSAIN M B, RAHMAN M M, HAQUE M R. Empirical correlation between shear wave velocity ( $v_s$ ) and uncorrected standard penetration resistance (SPT- $N$ ) for dinajpur district, Bangladesh[J]. Journal of Nature, Science and Technology, 2021, 1(3): 25-29.