

张明飞,魏晓刚,孙罗卡,等. 基于弯曲元和SCPTU的剪切波速研究进展与挑战[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 1-7. [ZHANG Mingfei, WEI Xiaogang, SUN Luoka, et al. Research Progress and Challenges of Shear Wave Velocity Based on Bending Element and SCPTU Tests[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(3): 1-7]

基于弯曲元和 SCPTU 的剪切波速研究进展与挑战

张明飞¹, 魏晓刚^{1,2}, 孙罗卡¹, 胡照广¹, 刘 峰¹, 孟 茹¹

(1. 郑州航空工业管理学院土木建筑工程学院, 郑州 450046; 2. 郑州意合达建筑科技研究院, 郑州 450046)

摘要: 随着弯曲元和 SCPTU 试验方法的发展, 剪切波速需要做总结研究的紧迫性进一步凸显。针对剪切波速问题, 通过分析国内外专家学者对剪切波速的计算方法与测试方法的相关研究成果, 系统凝练了抗震场地评测、公式计算分析、波形分析方法及细颗粒微观影响机制与弯曲元和 SCPTU 试验计算剪切波速的核心学术问题, 初步揭示了弯曲元和 SCPTU 测试技术多参数、多影响因素联合分析中迫切需要解决的技术难题, 并呼吁弯曲元和 SCPTU 测试技术分析剪切波速的规范方法, 为剪切波速的分析应用提供参考和借鉴意义。

关键词: 弯曲元; SCPTU; 剪切波速

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)02-0001-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.03.01

Research Progress and Challenges of Shear Wave Velocity Based on Bending Element and SCPTU Tests

ZHANG Mingfei¹, WEI Xiaogang^{1,2}, SUN Luoka¹, HU Zhaoguang¹,
LIU Feng¹, MENG Ru¹

(1. Civil Engineering and Architecture Institute, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 2. Institute of Civil Engineering of Realization in Zhengzhou, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: With the development of bending element and SCPTU test method, it is urgent to summarize the research on shear wave velocity. Aiming at the problem of shear wave velocity, by analyzing the relevant research results of domestic and foreign experts and scholars on the calculation methods and test methods of shear wave velocity, the author systematically summarizes the core academic issues, which includes seismic site evaluation, formula calculation and analysis, waveform analysis method, micro influence mechanism of fine particles and calculation of shear wave velocity by bending element and SCPTU test. The urgent technical problems to be solved in the joint analysis of multi parameter and multi influence factors of bending element and SCPTU testing

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41902266, 5210082429); 河南省科技攻关项目(212102310275, 202102310240, 202102310572, 212102310967, 212102310968); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2021GGJS116)联合资助

作者简介: 张明飞(1989-), 男, 博士, 主要从事地下工程、原位测试、地基处理和边坡等方面的工作。

E-mail: zhangmingfeiyanjiu@163.com

通信作者: 魏晓刚(1984-), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事工程管理, 土木工程等方面的教学与科研工作。

E-mail: 1549996815@qq.com

technology are preliminarily revealed. It also calls for the codes for shear wave velocity analysis by bending element and SCPTU test, which can provide reference for the analysis and application of shear wave velocity.

Keywords: Bending element; SCPTU; Shear wave velocity

0 引言

剪切波速(V_s)是地震工程和岩土工程中广泛应用的参量之一^[1-6]。它已被广泛用于土的动力学参数计算、场地卓越周期确定、场地类别判定、建筑地基的承载力、路基质量检测、评估土体的液化性和场地微振卓越周期的估算^[7-8]。

室外剪切波速测试方法目前主要有钻孔法(单孔法如孔间、下孔、孔口法以及跨孔法)^[9]和面波法(瞬态面波法和稳态面波法)^[7],以及近几年开发出的地震波孔压静力触探(SCPTU)测试法^[2-6]。室内测试的主要方式包括大粒径三轴—剪切波速系统、共振柱和弯曲元等。

针对剪切波速问题,通过分析国内外专家学者对剪切波速的计算方法与测试方法的相关研究成果,分别从液化场地评测方法、剪切波初至的拾取算法、剪切波速影响因素、微观影响机制以及弯曲元、SCPTU的试验方法等方面进行了归纳总结和分析探讨,并在此基础上,对波速在传播中复杂土体赋存环境以及采集过程中的噪音、初至波等波形解析问题,及剪切波速所面临的挑战性进行了展望。

1 方法与影响因素

1.1 方法

目前使用较广泛的土体液化评价方法主要是指 Seed 和 Idriss (1971)^[10]提出的循环应力法(也称为“简化方法”)及其修正推广,例如:基于静力触探(CPT)^[11]、标贯试验(SPT)^[12]和剪切波速(V_s)测试的方法^[13]。上世纪80年代初, Dobry 等^[14]提出以剪切波速 V_s 和地表峰值加速度 PGA 为依据预测砂土液化势的方法。杨洋等^[15]提出了以地表峰值加速度、剪切波速、地下水位、可液化层埋深等参数的土体液化概率计算公式。关于现行抗震规范场地分类方法的改进,陈国兴等^[16]提出新的建议方案:基于等效剪切波速 V_{SE} 和覆盖土层厚度 H (地表至剪切波速 $V_s \geq 500$ m/s 的基岩深度)的双指标场地分类方案及基于 V_{SE} 、 H 和基本周期 T_s 的三

指标场地分类方案。

根据介质中波传播的差异性,剪切波速常用作地层结构和划分场地类别,因为剪切波速和土体埋深的关系变化不大,并可采用指数函数、“幂函数+常数函数”、“幂函数+一次函数”等回归模型^[17]分析,也可以结合江苏近海及潮间带的剪切波速原位测试数据,采用广义回归神经网络(GRNN)方法,建立剪切波速与土体各物理力学指标的非线性映射关系^[18]。

土体剪切波初至的拾取算法,迄今为止最常用的方法主要有以下几种^[19]:互相关法、人工拾取法、相位反向交叉法以及能量变化率法^[20]。

另外,不但可以利用剪切波速方法来评价石料间隙土压实度^[21]和海底沉积物样品质量^[22],为石料间隙土和海洋地层研究提供了指导;还可以采用随机场法对剪切波速进行反演^[23]。

1.2 影响因素

中国、美国、新西兰和日本等不少国家常常使用各种液化敏感性初判标准来判定液化敏感性土^[4],其中剪切波速就是初判标准中的重要参数。

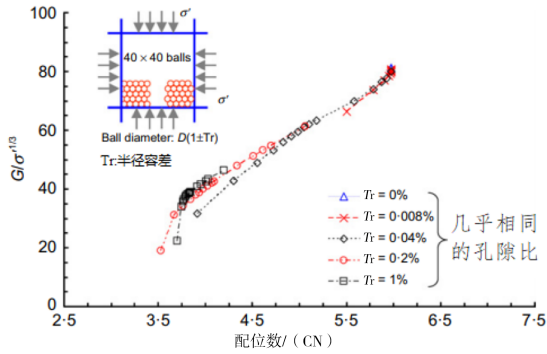
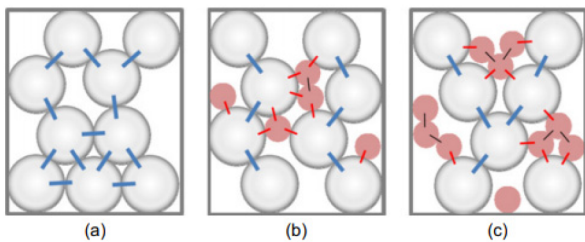
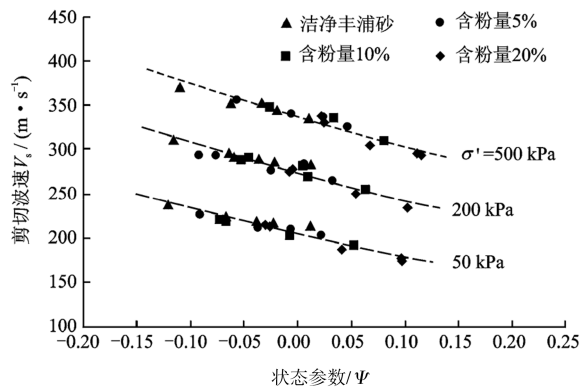
砂土剪切波速 V_s 的影响因素包括土层埋深、颗粒比重、颗粒形状、压缩模量、孔隙比、含水率和密度等,其中土层埋深的影响较大^[24]。而砾性土的 V_s 与含砾量、相对密度、固结应力、应力比呈正相关,其中固结应力是最为显著的影响因素^[25]。

孔隙比和围压对砂土 V_s 的影响可用公式表达^[26]:

$$V_s = \alpha F(e) \cdot \left(\frac{P'}{1kPa} \right)^\beta \quad (1)$$

式(1)中: α (m/s)、 β 为反映土体物理性质的参数; F 为孔隙比函数。

在此基础上, Yang 等^[27]用离散元从微观的角度,研究细颗粒对砂土的剪切波速(V_s)和剪切模量 G_0 的影响:配位数的上升是宏观上观察到的 G_0 增加的微观机制(图1),而配位数随着细颗粒数量的增加而趋于下降(图2),并提出了多参数归一化模型;刘鑫等^[28]将砂土的剪切波速 V_s 与临界状态参数 Ψ 联系起来(图3)。

图1 在恒定孔隙率下剪切模量与配位数的关系^[27]Fig.1 Relationship between shear modulus and coordination number at constant void ratio^[27]图2 在恒定孔隙率下颗粒接触的示意图:(a)纯砂;(b)砂中含少量细颗粒;(c)砂中含大量细颗粒^[27]Fig.2 Schematic diagram of particle contacts at constant void ratio^[27]图3 剪切波速与状态参数关系曲线^[28]Fig.3 Relationship curve between shear wave velocity and state parameter^[28]

王平等^[29]在黄土中用模糊灰关联研究了剪切波速的影响因素:饱和度>土的深度>天然密度>孔隙比;还可以结合含水率共同评价黄土震陷^[30]。

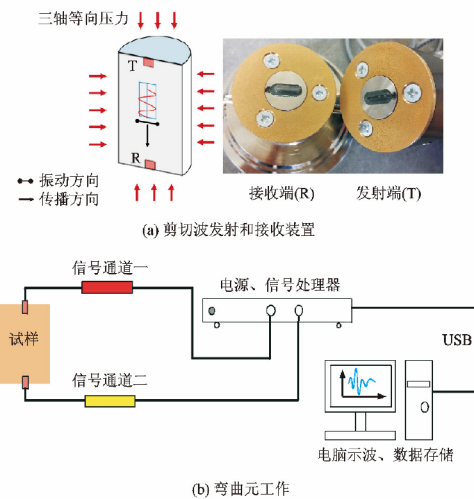
2 测试方法

2.1 弯曲元测试方法

弯曲元测试技术(见图4)由于原理简明、操作

便捷、无损检测等特点,被广泛地应用土体剪切波速 V_s 或小应变剪切模量 G_{\max} 中^[31]。国内外学者围绕如何确定剪切波的室内试验开展了一系列研究,其中以2003—2005年进行的“国际平行试验”最具代表性,此后弯曲元试验逐渐发展。近些年,学者在弯曲元技术主要用于砂土 V_s 测试中,并且与微观尺度的分析和数值模拟对比,同时为了扩展该技术的应用范围,还与其它试验进行联合测试方面的探索。

Salgado等^[32]阐述的细颗粒增加导致砂土 G_{\max} 降低的机制较早得到认可:细颗粒的增加主要通过参与力链传递和填充粒间孔隙,使得剪切波速不能完全通过细颗粒传递,从而降低土体刚度,最终导致 G_{\max} 降低。刘鑫等^[28]采用人工丰浦砂-硅粉的弯曲元试验进行验证,他通过研究激振频率以及含粉量对波形特征的影响(见图5),发现采用初至波方法比较可靠,含粉量与剪切波速呈负相关。

图4 弯曲元测试系统工作原理^[28]Fig.4 Working principle of bending element testing system^[28]

Yang等^[27]用弯曲元试验和共振柱试验对比的方法,验证细颗粒含量对砂土剪切波的影响:细颗粒的存在增加了剪切波的传播时间。黄博^[33]从微观尺度入手,基于球形颗粒接触理论、能量守恒定律、考虑颗粒旋转推导了砂土剪切波速公式,并采用弯曲元试验进行对比。

基于弯曲元技术可以用弯曲-伸缩元联合测试法^[34],对剪切波速和压缩波速的联合测试,进而探讨砂土小应变动力特性;还可以扩展为无黏性土剪切波速与相对密度联合测试方法^[35]。

2.2 SCPTU测试方法

SCPTU(地震波孔压静力触探)可以同时测定包

括剪切波速(V_s)在内的四种参数,学者的研究重点在于建立 V_s 与包括室内试验在内的其它参数之间的相关经验公式,这对日后邻近地区类似工程相关参数的估计具有重要的参考价值。

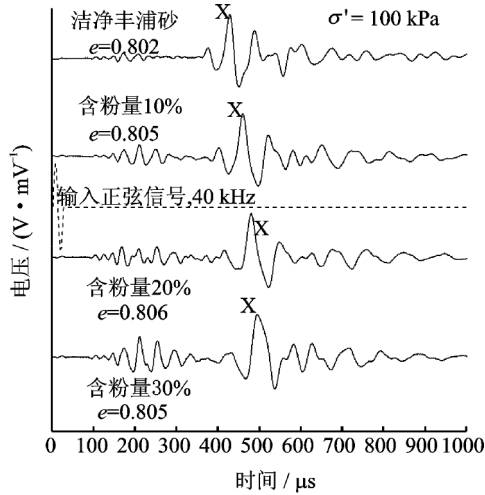


图5 不同细颗粒含量下的剪切波信号^[28]

Fig.5 Shear wave signal under different fine particle content^[28]

孔压静力触探(CPTU)具有连续采集、经济、快速和扰动小等特点^[36],从小应变到大应变水平都能够确定土体性质,使其在准确获取土体原位参数方面展现越来越广阔的应用前景。

而SCPTU可通过检波器量测地表振源产生剪切波(图6),从而测定剪切波速(V_s),与贯入阻力对应的大应变试验不同,结合与小应变剪切模量 G_{max} 的关系,可以反映土体小应变。

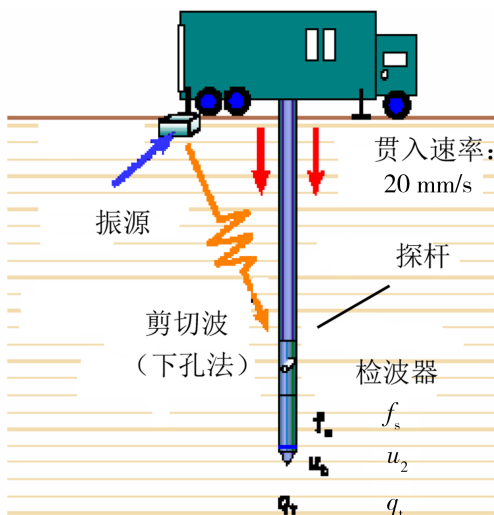


图6 SCPTU 测试示意图^[6]

Fig.6 Schematic diagram of SCPTU test^[6]

针对SCPTU测试技术和 V_s ,国内外进行了大量的研究^[36-42]。Ohta和Goto^[1]最早总结了 V_s 与土体

物理力学参数之间的回归关系,并进行了工程评价和应用。Mayne和Rix^[36]较早总结了静力触探锥尖阻力和剪切波速的相关性。

从本世纪初开始,东南大学引进美国原装进口Vertek-Hogentogler公司产200 kN的地震波孔压静力触探仪(图7),并开展了诸多SCPTU测试技术和 V_s 诸多研究^[37-40]。



图7 多功能数字式车载SCPTU系统照片

Fig.7 Photos of multi-function digital on-board SCPTU system

Duan等^[37]通过 V_s-s_u 关系发现,江苏黏土的 s_u 沿着深度呈现出线性增加的趋势,研究了 V_s 与岩土参数之间的关系,并绘制了基于剪切波速评估岩土参数的流程图(图8)。Zhang等^[38]将粒径累积曲线较早地用于总结和分析CPT- V_s 相关公式中(图9)。

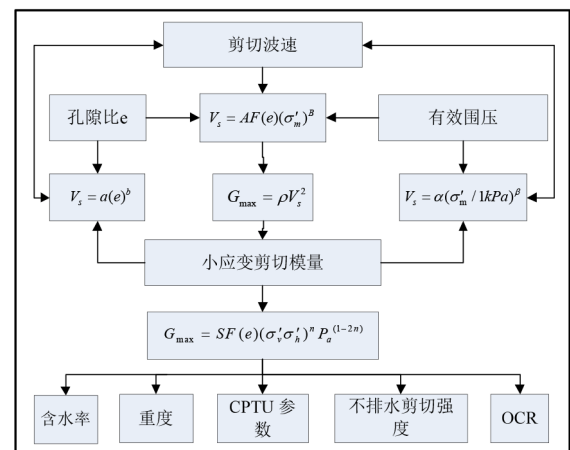


图8 基于剪切波速评估岩土参数的流程图

Fig.8 Flow chart of geotechnical parameters evaluation based on shear wave velocity

基于SCPTU的剪切波速可以建立诸多与压缩模量^[39]、无侧限抗压强度^[37]和锥尖阻力^[41]的关系,例如:

$$E_s = 0.176 V_s^{2.003} \quad (2)$$

式(2)中: E_s 为压缩模量(kPa); V_s 为剪切波速(m/s)

$$s_u = 0.152V_s^{1.141} \quad (3)$$

式(3)中: s_u 为无侧限抗压强度(kPa)

$$V_s = 2.944q_t^{0.613} \quad (4)$$

式(4)中: q_t 为锥尖阻力(kPa)

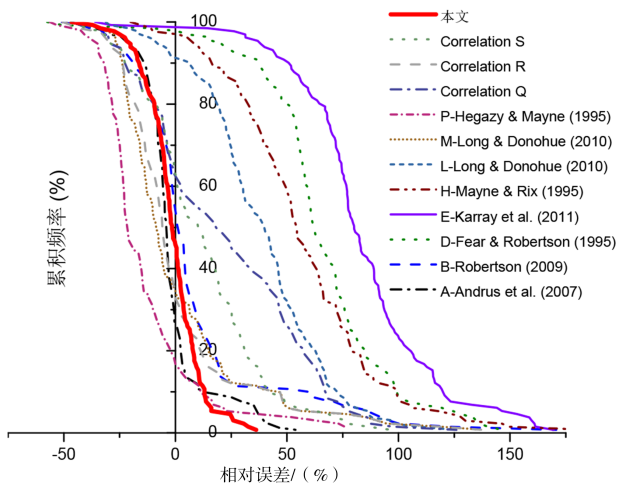


图9 剪切波速相对误差的累积分布曲线

Fig.9 Cumulative distribution curve of relative error of shear wave velocity

3 总结与讨论

目前有关剪切波速的工程应用和室内试验多集中于目前主要有钻孔法和面波法以及共振柱试验,而对于地震波孔压静力触探和弯曲元试验的讨论与解析,国内起步稍晚于国外,研究与应用体系都尚在发展中。具体已开展的研究内容(学术问题)主要包括:

(1)以循环应力法及其修正方法(基于CPT、SPT或 V_s)是评价土体液化广泛使用的方法,但无论是基于 V_s 、PGA的砂土液化势预测方法还是基于 V_{SE} 、 H 或 T_s 的抗震场地分类方法,均为多参数联合评测方法提供了思路。采用指数函数、“幂函数+一次函数”等回归模型或神经网络、模糊数学等数学方法,建立了 V_s 与土体各物理力学指标的关系,并通过随机场法反演了剪切波速。由于剪切波波形的复杂性,剪切波初至的拾取算法也是研究计算方法的一个方向,主要有以下几种:互相关法、人工拾取法、相位反向交叉法以及能量变化率法。

(2)剪切波速就是初判液化敏感性土标准中的重要参数,随着研究的推进,其影响因素往往是复杂的。砂土中土层埋深的影响较大,砾性土中固结应力是影响较为显著,饱和度在黄土中有较大影响,而近海软土的剪切波速则与土的种类、组构状

态、物理力学性质、有效应力状态等诸多因素相关。

(3)由于离散元计算速度的发展,基于孔隙比和围压与砂土 V_s 的关系,从微观的角度,研究了细颗粒对 V_s 和 G_0 的影响,不仅定性表述了配位数的上升是观察到的 G_0 增加的微观机制,还与土体临界状态相关联,建立了多参数归一化模型。基于球形颗粒接触理论、能量守恒定律、考虑颗粒旋转推导了砂土剪切波速公式;并采用弯曲元试验进行对比。

(4)与传统 V_s 测定相比,弯曲元和SCPTU测试技术都因为操作便捷被逐渐应用,国内外学者对这两种试验的研究尚在深入之中,前者对比共振柱试验或离散元,验证了含粉量与剪切波速呈负相关,而细颗粒则相反;还发展出了弯曲-伸缩元联合测试法,剪切波速与相对密度联合测试方法。通过SCPTU测定的 V_s 国内外学者建立了与土体物理力学参数和CPTU获得参数之间的关系,值得提醒的是累积分布曲线用于总结和分析CPT- V_s 公式中。

在充分分析国内外学者关于剪切波速的已有优秀研究成果的基础上发现,因波速在传播过程中均面临非均质各项此异性的土体赋存环境以及采集过程中的噪音、初至波等波形解析问题,要想较好地有关剪切波速研究的核心学术问题,面临以下技术难题及挑战:

(1)以循环应力法为基础,多参数联合评测地震液化或抗震场地分类的方法已有研究,但诸多参数的参与又会降低评测方法的适用性,发展少量参数的适用评测方法可能是研究和发展趋势。采用常规函数、神经网络、模糊数学等数学方法或随机场法,建立了 V_s 与土体各物理力学指标的关系,目前各有优势,尚未形成广泛公认的方法。由于剪切波波形的复杂性,剪切波中的噪音和初至波的拾取算法目前还需进一步研究。

(2)砂土、砾性土、黄土、软土剪切波速的最重要影响因素均不相同,也从侧面反映了研究的必要性和复杂性,定性的解释不同类型不同埋深土体的影响因素以及定量化、归一化表达可能更容易在学者和技术人员之间形成共识。

(3)虽然随着计算速度的进步,离散元在微观领域的应用越来越多,但参数选取、流固耦合以及时长仍旧是制约离散元在剪切波速中应用的因素。微观领域中除了细颗粒外的其它因素,比如孔压、裂缝、颗粒旋转、非圆形颗粒对剪切波速的影响尚

未进行深入研究。土体临界状态是在剪切波速中的应用是一个方面,但它与土体液化的关系以及与离散元计算中的体现,目前仍是难点。

(4)有关CPTU测试技术的研究较多,但对于SCPTU测试技术的研究尚在深入之中,SCPTU测定的 V_s 与土体物理力学参数虽然建立了关系,但不同类型不同埋深土体中多参数的公式化表达及影响排序还需要继续研究。而累积分布曲线在经验公式中的应用也有一定的发展前景。

(5)有关弯曲元研究的成熟度和研究深度比SCPTU更低,弯曲元与伸缩元等的联合测试法较少,与现场试验的对比,以及对砂土粉土外的其他土类的研究尚待推进。

(6)用弯曲元和SCPTU测试技术分析剪切波速的规范方法也是一个亟待解决的问题,这有利于科学研究和工程应用。

参考文献:

- [1] Ohta Y, Goto N. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1978, 6(2): 167-187.
- [2] 童立元,刘激, B Amaty, 等. 岩土工程现代原位测试理论与工程应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2015.
- [3] 刘松玉,蔡国军,童立元. 现代多功能CPTU技术理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 陈国兴,吴琪,孙苏豫,等. 土壤地震液化评价方法研究进展[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 41(4): 1-32. (网络首发) DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2021.04.001.
- [5] 段伟,蔡国军,刘松玉,等. 多功能参数静力触探在地震液化判别方法中的应用进展研究[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(3): 764-776.
- [6] 段伟,蔡国军,刘松玉. 基于CPTU状态参数的无黏性土最大剪切模量评价方法[J]. *西南交通大学学报*, 2019(4): 801-807.
- [7] 何先龙,赵立珍,余天莉. 基于能量变化率法自动拾取场地剪切波速[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 847-853.
- [8] Kayen R, Moss R E S, Thompson E M, et al. Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(3): 407-419.
- [9] C, Kitsunezaki. A new method for shear wave logging[J]. *Geophysics*, 1980, 45(10): 1489-1506.
- [10] Seed B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. *ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [11] Moss R E, Seed R B, Kayen R E, et al. CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(8): 1032-1051.
- [12] Cetin K O, Seed R B, Der Kiureghian A, et al. Standard penetration test-Based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(12): 1314-1340.
- [13] Kayen R, Moss R E S, Thompson E M, et al. Shear-wave velocity - based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(3): 407-419.
- [14] DOBRY R, POWELL D J, YOKEL F Y, et al. Liquefaction potential of saturated sand-the stiffness method[C] // *Proceedings of 7th World Conference on Earthquake Engineering*. New York: American Society of Civil Engineers, 1980: 25-32.
- [15] 杨洋,孙锐,陈卓识,等. 基于土层常规参数的剪切波速液化概率计算公式[J]. *岩土力学*, 2019, 40(07): 292-301.
- [16] 陈国兴,丁杰发,方怡,等. 场地类别分类方案研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3509-3522+3582.
- [17] 荣棉水,吕悦军,蒋其峰,等. 渤海常见土类剪切波速与埋深关系分析[J]. *震灾防御技术*, 2017(2): 288-297.
- [18] 狄圣杰,汪明元,张昆,等. 江苏近海地层原位剪切波速相关特性及预测方法研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(3): 127-133.
- [19] 何先龙,赵立珍,余天莉. 基于能量变化率法自动拾取场地剪切波速[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 36(3): 847-853.
- [20] BAI C, KENNETT BL. Automatic phase-detection and identification by full use of a single three-component broadband seismogram[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(1): 187-198.
- [21] 张宇辉,张献民,程国勇. 土石混合介质中石料间隙土压实度剪切波速评价研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(6): 909-915.
- [22] 杨志勇,王勇,孔令伟,等. 基于剪切波速的海底含气沉积物卸荷扰动与样品质量评价方法[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3687-3694.
- [23] Fabozzi S, Catalano S, Falcone G, et al. Stochastic approach to study the site response in presence of shear wave velocity inversion: application to seismic microzonation studies in Italy[J]. *Engineering Geology*, 2020, 280, DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105914.
- [24] 闫振军. 华北地区剪切波速与深度之间统计关系的通用模型特征研究[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(2): 304-313.
- [25] 李天宁,汪云龙,张瑞滨. 砾性土剪切波速影响因素试

- 验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 166-171.
- [26] Hardin B O, Richart F E. Elastic wave velocities in granular soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1963, 89(1): 39-56.
- [27] Yang J, Liu X. Shear wave velocity and stiffness of sand: the role of non-plastic fines[J]. Géotechnique, 2016, 66(6): 1-15.
- [28] 刘鑫, 杨峻, 张宁. 粉质砂土剪切波速测定的弯曲元试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 279-284.
- [29] 王平, 王强, 王峻, 等. 黄土场地剪切波速影响因素模糊灰关联分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4299-4304.
- [30] 张晴毅, 李明永, 王峻, 等. 剪切波速和含水率双指标评价黄土震陷[J]. 地震工程学报, 2017, 39(2): 329-335.
- [31] Shirley D J, Hampton L D. Shear-wave measurements in laboratory sediments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 63(2): 607-613.
- [32] Salgado R, Bandini P, Karim A. Shear strength and stiffness of silty sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 451-462.
- [33] 黄博. 基于球形颗粒接触理论考虑频率影响的砂土剪切波速研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [34] 孙奇, 董全杨, 蔡袁强, 等. 砂土小应变动力特性弯曲-伸缩元联合测试试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(01): 100-108.
- [35] 汪云龙, 曹振中, 袁晓铭, 等. 基于弯曲元技术的无黏性土剪切波速与相对密度联合测试方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S01): 3418-3423.
- [36] Mayne P W, Rix G J. Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays[J]. Soils & Foundations, 1995, 35(2): 107-110.
- [37] Duan W, Cai G, Liu S, et al. Correlations between Shear Wave Velocity and Geotechnical Parameters for Jiangsu Clays of China[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176: 669-684.
- [38] Zhang M, Tong L. New statistical and graphical assessment of CPT-based empirical correlations for the shear wave velocity of soils[J]. Engineering Geology, 2017, 226: 184-191.
- [39] 杨溢军. 基于CPTU测试的深基坑工程土体设计参数应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [40] Cai, G., Puppala, A. J., Liu, S. Characterization on the correlation between shear wave velocity and piezocone tip resistance of Jiangsu clays[J]. Engineering Geology, 2014(171): 96-103.
- [41] Karray M, Lefebvre G, Ethier Y, et al. Influence of particle size on the correlation between shear wave velocity and cone tip resistance[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(4): 599-615.
- [42] Long M, Donohue S. Characterization of Norwegian marine clays with combined shear wave velocity and piezocone cone penetration test (CPTU) data[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(7): 709-718.