

利用弯曲元测量土体表层剪切波速的初步试验

周燕国, 陈云敏, 黄 博, 社本康广

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 土体剪切波速是土力学研究与岩土工程设计的关键参数之一。根据压电弯曲元波速测量的方向性, 提出了侧向激发与接收的测量模式, 使得弯曲元技术可用于室内和现场土体表层剪切波速的测量。在砂土模型内的初步试验表明, 以激发元和接收元内侧间距为剪切波传播距离, 并采用时域初达波法判别剪切波到达时间, 则侧向激发与接收方式弯曲元的剪切波速测量结果准确可靠, 精度与常规“对向激发与接收”方式相同。该弯曲元测试方法为当前大量涉及的取样扰动评价及地基处理质量控制等重要问题提供了便捷可靠的无损检测手段。

关键词: 剪切波速; 弯曲元; 无损检测; 土样扰动; 地基处理

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)12-1883-05

作者简介: 周燕国(1978-), 男, 浙江富阳人, 讲师, 从事土动力学与地震工程研究。E-mail: qzking@zju.edu.cn。

Preliminary tests of measuring shear wave velocity on soil surface using bender elements

ZHOU Yan-guo, CHEN Yun-min, HUANG Bo, SHAMOTO Yasuhiro

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The shear wave velocity in soils was the main parameter generally used in soil mechanics researches and geotechnical engineering practices. A side-to-side type of source and receiver arrangement for bender element tests was proposed based on its plane directivity, and a new bender element system capable of measuring shear wave velocity on soil surfaces both in the laboratory and in the field was developed. It was shown by preliminary tests performed on sand model that, the travel distance of the proposed arrangement was taken as the distance between the inner edges of the elements, and the travel time of shear waves could be readily determined by the time domain first arrival method. The bender element tests with the side-to-side arrangement gave reliable measurement compared with that of the conventional tip-to-tip type, which offered a nondestructive tool for important themes such as assessment of soil disturbance and quality check of soil improvement.

Key words: shear wave velocity; bender element; nondestructive evaluation; soil disturbance; soil improvement

0 引 言

当前的土力学研究与岩土工程实践大量涉及土体取样扰动评价^[1-3]及地基处理质量控制与监测^[4-6]等重要课题, 需要对各种土体的刚度或强度进行过程监测和定量分析。由于破坏性检测手段并不满足研究与实践对精度及可靠度日益增长的要求, 目前处理上述课题最主要的途径为通过无损测量获得一个控制参数(如弹性波速、电导率、孔隙比等), 并将该参数与直接反映土体扰动程度或地基处理质量的力学量(如无侧限抗压强度)进行关联, 建立评价与控制标准^[7]。因此, 这类课题的关键问题在于如何选取及测量可靠的控制参数^[8]。

大量研究表明^[9-13], 剪切波速(或小应变剪切模量)与土体的密度、应力状态、应力历史以及各种施

工影响等因素密切相关, 是一个能准确反映土体结构性的可靠指标。加上剪切波速可在室内与现场方便测得, 目前很多针对土体扰动或地基处理的监测与评价都是基于剪切波速指标的^[14-15]。以土样扰动评价为例, 在现场通过跨孔法、表面波法等测得土层原位剪切波速后进行取样, 在室内通过试验装置测量并控制土样的剪切波速, 然后进行所需要的静动力试验(如循环液化试验), 从而利用剪切波速指标将原位土体与扰动土样联系起来, 定量评价土样扰动程度对力学特

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973计划)(2007CB714203); 中国博士后科学基金项目(20080432019); 中国地震局地震行业科研专项(200808022)

收稿日期: 2007-10-24

性的影响^[16]。

需要指出的是,在室内外采用不同手段进行剪切波速测量,由于测试设备、波动应变水平以及信号分析方法的不同,会造成室内外波速测量的差异,给试样扰动评价或地基处理质量控制带来影响。若能采用同一种测量手段对某种岩土材料进行室内外协同测量,将大大提高检测和评价的可靠性。近年来发展的压电弯曲元波速技术操作简单、兼具无损检测优点,在室内试验中已获得了很好的应用^[17-18]。而且可以根据不同的平面或空间布置方式进行弯曲元波速测试,研究土体各向异性^[19-20],并进行现场土体处理质量评价^[21]。这些工作为弯曲元在室内外的联合测试应用提供了基础。

本文基于对弯曲元测试平面方向性特征及弹性半空间波动理论的认识,提出了弯曲元侧向激发与接收的测量模式,将弯曲元技术用于土体表层剪切波速的测量。利用砂土模型地基开展了初步试验,验证了弯曲元侧向激发与接收方式的可行性与准确性,为土样及地基的无损检测与评价提供了一种新途径。

1 弯曲元测量表层剪切波速原理

压电弯曲元是一种典型的机电传感器。在测试中,激发元在脉冲电压下产生振动并在土中激发剪切波,该剪切波传至接收元使之振动而产生电信号,这样通过对比激发与接收信号可以得到剪切波的传播时间 t ,结合其传播距离 L 可算得土体的剪切波速 V_s ,即

$$V_s = L/t \quad (1)$$

在弯曲元测试中,由剪切波引起的土体应变变量级在理想弹性范围内($\gamma < 10^{-6}$),因此若知道土体密度 ρ ,则可根据弹性理论得到其小应变剪切模量

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

以往研究表明,弯曲元波速测试存在平面内方向性。Lee 和 Santamarina (2005)^[17]对此做过专门研究,详细考察了接收信号幅值随轴线交角的变化(见图1)。图1(a)中平行轴交角为零度的情况就是目前室内三轴压力室内常规对向激发与接收布置方式,并认为弯曲元端部到端部的距离(L_{tt})即为剪切波传播距离^[22]。若将图1(a)中不同角度布置得到的接收信号峰值绘于图1(b),可以发现,不同布置方式下接收元得到的信号仍然很显著:即使在两者交角为 90° 情况下,接收信号峰值仍有常规对向激发与接收情况的50%左右。这说明在弯曲元测试中,可根据需要选择不同的平面内激发与接收方式实现特定的波速测量。

因此,若能利用图1(a)中弯曲元平行轴 90° 夹角情况,将激发元和接收元都布置在土体表面进行剪

切波速测量,并将表层剪切波速作为控制参数并与所研究的强度指标相关联,将会形成一种新的无损评价方法。实际上,Ziv^[23-24]已通过解析解探讨了弹性半空间表面施加剪力脉冲造成的表面剪切波波动行为,因此这种测量方法具有坚实的物理基础。而且,这种方法的主要优势在于,激发元与接收元的布置不受以往三轴压力室围压约束等条件限制,对相同条件下同一种岩土材料,可在室内和现场获得统一的测试结果,从而实现地基处理前、过程中以及处理后的监测和直接评价^[25]。近期,Asaka 等人^[24]针对水泥土地基处理质量检测开发了表层剪切波速测试系统,建立了水泥土无侧限抗压强度与剪切波速的经验相关性,结合室内外剪切波速测量,将该相关性成功应用于现场水泥土地基质量控制,也在工程实践上证明了土体表层剪切波速测量及无损评价的可行性。

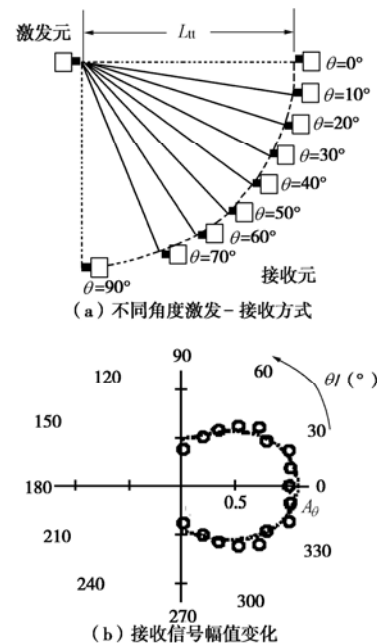


图1 弯曲元测试平面方向性

Fig. 1 Source-receiver directivity of bender element tests

2 侧向激发与接收弯曲元系统

为满足前述各种应用课题的实际要求,侧向激发与接收方式的弯曲元在功能上应可测量不同刚度的土体(从模量较小的软黏土到刚度较大的水泥土),而且可在较大的尺寸范围内调整测量间距(从小尺寸土样到一定面积的处理地基表面)。

在设计上,本测试系统的弯曲元片选用 Piezo System 公司生产的 Q215-A4-303Y 型。测试系统外围电子设备包括:用于产生激发信号的任意函数发生器、用于放大激发信号的压电线性放大器、用于放大接收信号的电荷放大器、用于收集激发和接收信号的数字

式示波器, 以及数据存储分析用微机和各种信号线。整合后的弯曲元测试系统如图 2 所示。

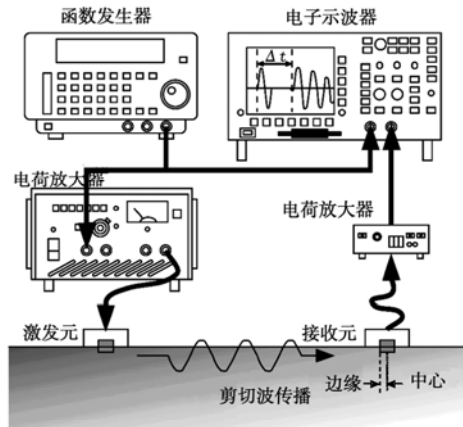


图 2 侧向激发与接收弯曲元系统

Fig. 2 System of “side-to-side” type of bender elements

由图 2 可见, 弯曲元侧向激发与接收布置方式与常规对向激发与接收方式不同, 其激发元到接收元的传播距离无法沿用以以往三轴室内弯曲元端部到端部的经验加以确定。因此, 要获得可靠的侧向激发与接收弯曲元波速测试结果, 需研究剪切波传播距离 (弯曲元片的边缘到边缘距离 L_{ee} 还是中心到中心距离 L_{cc}) 及剪切波到达时间的判别。下文将在砂土模型地基上进行不同布置方式的弯曲元测试对比试验, 以明确侧向激发与接收方式下弯曲元剪切波速测试的关键技术问题。

3 初步试验及分析

试验材料为 #8 硅砂, 是一种粉质细砂 (粒径小于 0.075 mm 的占总质量的 52.1%), $D_{60} = 0.0866$ mm, 不均匀系数 $C_u = 2.83$, 比重 $G_s = 2.645$, 最大孔隙比 $e_{max} = 1.389$, 最小孔隙比 $e_{min} = 0.727$ 。

为减少边界效应对波速测量的影响, 试验采用模型槽长 0.8 m, 宽 0.45 m, 高 0.45 m, 用振动台振密方法获得了高密度均匀砂土地基模型 (相对密度 $D_r = 80\%$)。为与常规测量方式进行比较, 在模型地基内以对向激发与接收方式预埋了一对弯曲元, 其端部到端部的间距为 10 cm。注意到无论是侧向激发方式还是预埋的常规配置弯曲元, 波速测量时其土颗粒运动方向与波传播方向正交且都在水平面内, 因此两者测得的是同一种剪切波速, 即 V_{sh} [26]。

模型制作完成后, 在饱和箱内进行真空饱和。饱和过程中控制进水速度, 保证模型土体不受扰动。饱和完成后, 在常规配置弯曲元深度处清理出测试平面 (见图 3)。首先用常规配置的弯曲元进行剪切波速测试 (激发频率为 1, 2, 4, 8 和 16 kHz), 作为该模型

表层波速的参考值。然后进行侧向激发与接收弯曲元测量, 弯曲元片插入土中深度为 1 cm, 用频率为 2 kHz 的单个正弦波激发, 测试间距分别为 40, 30, 20, 10 cm (递减顺序)。为检验测量的可重复性, 侧向激发与接收方式共做了 A, B 和 C 三组测试。

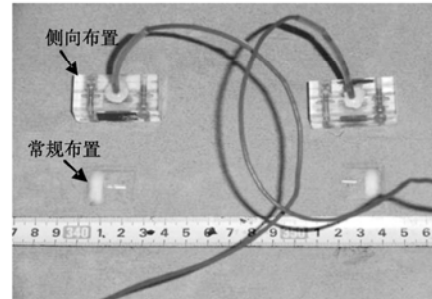


图 3 两种布置方式弯曲元对比测试

Fig. 3 Layout of two types of measurements

图 4 为预埋常规配置弯曲元测试结果, 将不同激发频率接收信号都放在同一坐标轴下。在常规对向激发与接收方式下, 弯曲元接收信号清晰, 用时域初达波法 [27] 很容易判别剪切波到达点, 不存在弥散现象。因此, 根据图 4 确定的波速值作为模型表层剪切波速参考值。

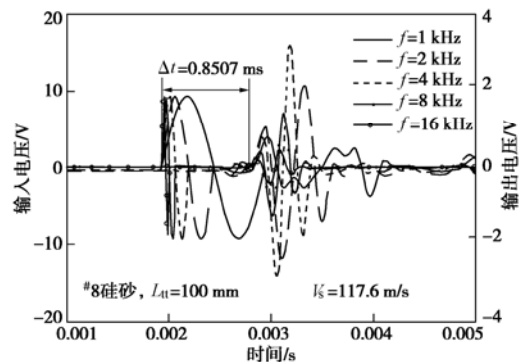


图 4 常规对向激发与接收测试信号

Fig. 4 Signals of conventional tip-to-tip measurement

图 5 给出了 C 序列的测量信号 (序列 A 和 B 的波速信号与 C 类似)。由图 5 可见, 在侧向激发与接收方式下, 根据时域初达波法判别剪切波到达时间点是可行的。而且在不同测量间距下, 各接收波的初达点基本落在一条斜线上, 这说明不同测距下测得的剪切波速基本相同, 表明了土层的均匀性。另外, 随着测试间距的增大, 初达波幅逐渐衰减, 这说明利用侧向激发与接收弯曲元测量表层波速必须选取合理的测量间距以保证清晰的接收信号。

图 6 给出了侧向激发与接收式弯曲元按中心到中心间距 L_{cc} 和边缘到边缘间距 L_{ee} 计算的波速结果, 并与预埋弯曲元常规测试参考值进行比较。由图 6 可见, 按 L_{cc} 间距获得的波速要大于参考值, 尤其在测量间

距较小的情况下误差明显 (高达 12.5%); 而用 L_{ee} 计算, 则波速相当接近参考值 (误差仅有 4%)。而且这种微小的误差可以归因于两种可能的原因: 一是模型本身不均匀性带来的误差, 二是弯曲元插入土层时可能对基座下方土体造成了轻微扰动。

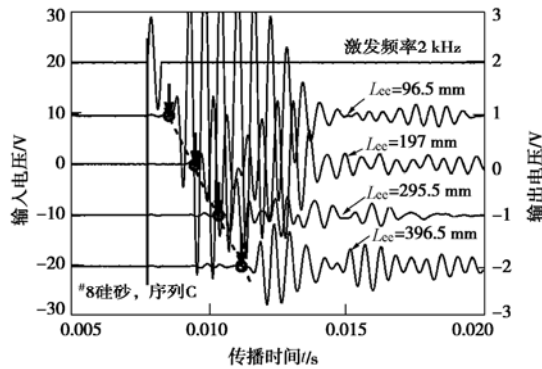


图 5 弯曲元信号 (序列 C)

Fig. 5 Signals of "side-to-side" measurements (Test C)

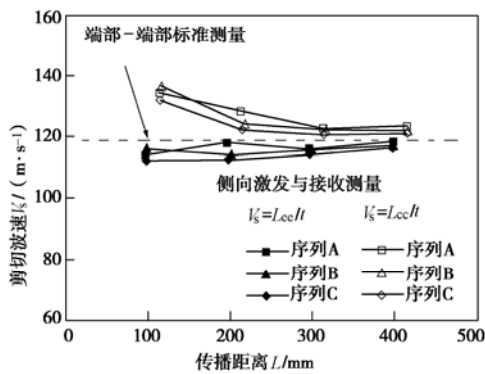


图 6 弯曲元测量结果精度分析

Fig. 6 Accuracy of two types of measurements

上述试验结果验证了通过弯曲元侧向激发与接收布置进行土体表层剪切波速测量的可行性及可靠性。值得指出的是, 利用弯曲元的灵活布置还可进行其它方式的波速测量, 如将激发元和接收元埋入振动台大型模型内部, 进行模型地基不同深度处的剪切波速监测。这些工作正在进一步开展中。

4 结 语

根据弯曲元测试的平面内方向性, 提出侧向激发与接收的测量模式, 使弯曲元剪切波速测量系统可用于室内及现场不同土体表层的波速测量。通过砂土模型表层波速测量表明, 以激发元和接收元内缘间距 L_{ee} 为剪切波传播距离, 并采用时域初达波法判别剪切波到达时间, 侧向激发与接收式弯曲元的测量精度与常规对向激发与接收测试方式基本相同。

侧向激发与接收弯曲元系统具有弯曲元片突出长

度可调节、测试间距可调整等优点, 实现了在室内和现场用同一种设备进行土体剪切波速协同测量的目标, 可为当前土力学研究及岩土工程领域大量涉及的土体取样扰动评价及地基处理质量控制等课题提供便捷可靠的无损检测手段, 具有较大的研究与应用价值。

致谢: 研究得到了日本清水建设技术研究所浅香美治博士和安部透先生的帮助, 同时也得到了美国 Wisconsin-Madison 大学 Dante Fratta 博士的热心指点, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 李 涛, 钱寿易. 土样扰动影响的评价及其先期固结压力的确定[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 21 - 30. (LI Tao, TSIEN S I. Evaluation of soil sample disturbance and determination of its preconsolidation pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(5): 21 - 30. (in Chinese))
- [2] NAGARAJ M, CHUNG S G. Analysis and assessment of sampling disturbance of soft sensitive clays[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 679 - 683.
- [3] LIU Han-long, HONG Zhen-shun. Effect of sample disturbance on unconfined compression strength of natural marine clays[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(3): 407 - 416.
- [4] LIU Song-yu, ROMAN D H. Evaluation and quality control of dry-jet-mixed clay soil-cement columns by standard penetration test[J]. Transportation Research Board, 2003, 1849: 47 - 52.
- [5] HORPILBULSUK S, MIURA N, KOGA H, NAGARAJ T S. Analysis of strength development in deep mixing: a field study[J]. Ground Improvement, 2004, 8(2): 59 - 68.
- [6] ARULRAJAH A, NIKRAZ H, BO M. Assessment of marine clay improvement under reclamation fills by in-situ testing methods[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(2): 219 - 226.
- [7] HIGHT D W, LEROUÉIL S. Characterization of soils for engineering purposes[C]// TAN T S, PHOON K K, HIGHT D, LEROUÉIL S, eds. Proceedings of International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, 2003, 1: 255 - 360.
- [8] GUTHRIE W S, YOUNG T B, BLANKENAGEL B J, COOLEY D A. Early-age strength assessment of cement-treated base material[J]. Transportation Research Record, 2005, 1936: 12 - 19.
- [9] TOKIMATSU K, UCHIDA A. Correlation between

- liquefaction resistance and shear wave velocity[J]. *Soils and Foundations*, 1990, **30**(2): 33 - 42.
- [10] 汪闻韶. 土地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速[J]. *水利学报*, 1994, **3**: 80 - 84. (WANG Wen-shao. An important parameter in geotechnical engineering for earthquake disaster mitigation — shear wave velocity[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, **3**: 80 - 84. (in Chinese))
- [11] 刘小生, 汪闻韶, 常亚屏. 饱和砂土的原位动强度确定方法探讨[J]. *土木工程学报*, 1996, **29**(2): 65 - 74. (LIU Xiao-sheng, WANG Wen-shao, CHANG Ya-ping. Investigation on determination method of in situ cyclic strength of saturated sandy soils[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1996, **29**(2): 65 - 74. (in Chinese))
- [12] 王建华, 程国勇. 饱和砂土的剪切波速与抗液化强度相关性研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(4): 369 - 373. (WANG Jian-hua, CHENG Guo-yong. Study of correlation between the shear wave velocity and the liquefaction resistance of saturated sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(4): 369 - 373. (in Chinese))
- [13] ZHOU Yan-guo, CHEN Yun-min. Laboratory investigation on assessing liquefaction resistance of sandy soils by shear wave velocity[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2007, **133**(8): 959 - 972.
- [14] SASITHARAN S, ROBERTSON P K, SEGO D C, et al. Sample disturbance from shear wave velocity measurements[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(1): 119 - 124.
- [15] 王建华, 程国勇, 张立. 取样扰动引起土层剪切波速变化的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(15): 2604 - 2608. (WANG Jian-hua, CHENG Guo-yong, ZHANG Li. Study on variation of shear wave velocity caused by sampling disturbance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(15): 2604 - 2608. (in Chinese))
- [16] LANDON M M, DEGROOT D J, SHEAHAN T C. Nondestructive sample quality assessment of a soft clay using shear wave velocity[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2007, **133**(4): 424 - 432.
- [17] LEE J S, SANTAMARINA J C. Bender elements: performance and signal interpretation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2005, **131**(9): 1063 - 1070.
- [18] 陈云敏, 周燕国, 黄博. 利用弯曲元测试砂土剪切模量的国际平行试验[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(7): 874 - 880. (CHEN Yun-min, ZHOU Yan-guo, HUANG Bo. International parallel test on the measurement of shear modulus of sand using bender elements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(7): 874 - 880. (in Chinese))
- [19] PENNINGTON D S, NASH D F T, LINGS M L. Horizontally mounted bender elements for measuring anisotropic shear moduli in triaxial clay specimens[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2001, **24**(2): 133 - 144.
- [20] CLAYTON C R I, THERON M, BEST A I. The measurement of vertical shear-wave velocity using side-mounted bender elements in the triaxial apparatus[J]. *Geotechnique*, 2004, **54**(7): 495 - 498.
- [21] ASAKA Y, ABE T, KATSURA Y, et al. Non-destructive technique to inspect the quality of cement-treated ground using bender elements[J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2007, **612**: 103 - 110 (in Japanese).
- [22] VIGGIANI G, ATKINSON J H. Interpretation of bender element tests[J]. *Geotechnique*, 1995, **45**(1): 149 - 154.
- [23] ZIV M. The response of an elastic half-space under a momentary shear line impulse[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003, **27**(3): 207 - 232.
- [24] ZIV M. Source signature and elastic waves in a half-space under a momentary shear line impulse[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003b, **27**(3): 233 - 258.
- [25] NAZARIAN S, YUAN D, ARELLANO M. Quality management of base and subgrade materials with seismic methods[J]. *Transportation Research Record*, 2002, **1786**: 3 - 10.
- [26] ROESLER S K. Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1979, **105**(7): 871 - 880.
- [27] ZHOU Yan-guo, CHEN Yun-min. Influence of seismic cyclic loading history on small strain shear modulus of saturated sands[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, **25**(5): 341 - 353.