

DOI: 10.11779/CJGE201601010

砂土小应变动力特性弯曲-伸缩元联合测试试验研究

孙奇¹, 董全杨¹, 蔡袁强^{1,2}, 王军¹, 胡秀青¹, 蔡瑛¹

(1. 温州大学建筑工程学院, 浙江温州 325035; 2. 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 浙江温州 325035)

摘要:近年来弯曲元在小应变动力特性测试中得到了广泛应用,但对弯曲-伸缩元的联合测试研究较少,国内对弯曲-伸缩元联合测试的研究几近空白。采用弯曲-伸缩元对福建砂进行了剪切波和压缩波联合测试,通过更宽频段激发频率和不同分析方法对剪切波速和压缩波速的确定进行了系统分析,得到了可靠的剪切波和压缩波传播时间确定方法。采用10~20 kHz峰值法和互相关法可较方便准确地确定剪切波传播时间;压缩波初始到达较易判断,激发频率对压缩波速影响较小。利用弯曲-伸缩元联合测试得到剪切模量 G_0 和侧限模量 M_0 ,试验结果表明围压和孔隙比对 G_0 的影响程度均较对 M_0 的影响程度大。通过剪切波速和压缩波速可计算得到泊松比,随密实度和围压的增大泊松比均以线性规律减小。为弯曲-伸缩元的进一步应用提供了有效的方法。

关键词:弯曲元; 伸缩元; 砂土; 小应变动力特性; 剪切模量; 泊松比

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)01-0100-09

作者简介:孙奇(1988-),女,博士,讲师,主要从事土动力学及砂土本构理论等方面的研究。E-mail: sunqi_131@163.com。

Laboratory study on small-strain dynamic properties of sand by bender-extender element

SUN Qi¹, DONG Quan-yang¹, CAI Yuan-qiang^{1,2}, WANG Jun¹, HU Xiu-qing¹, CAI Ying¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. The Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Measurements of small-strain dynamic properties by bender elements are popular in recent years. However, the study of bender-extender elements is less mentioned, and their application in China has rarely been reported. In this study, the S-wave and P-wave velocities of Fujian sand are simultaneously measured by a single pair of bender-extender elements. In order to find the travel time for S-wave and P-wave, wider excitation frequencies and different methods are used, and reliable methods for the determination of the S-wave and P-wave velocities are obtained. The test results show that the peak-peak method and the cross-correlation method using 10~20 kHz excitation frequencies are exact and convenient. The small-strain properties, including shear modulus G_0 , constrained modulus M_0 and Poisson's ratio ν , are determined for specimens by measuring the S-wave and P-wave velocities. G_0 increases faster than M_0 as the soil density and confining pressure increase. The Poisson's ratio decreases linearly with the increasing soil density and confining pressure. The results of this study provide effective methods for the further application of bender-extender elements.

Key words: bender element; extender element; sand; small-strain dynamic property; shear modulus; Poisson's ratio

0 引言

土体的小应变动力参数作为岩土工程分析设计的重要参数,一直以来都是岩土工程领域研究的热点问题。土体的小应变动力参数包括剪切模量 G_0 、杨氏模量 E_0 、体积模量 K_0 、侧限模量 M_0 和泊松比 ν ,对于各向同性材料各参数之间的关系为

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1+\nu)} = \frac{3K_0(1-2\nu)}{2(1+\nu)} = \frac{M_0(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,以上所有小应变动力性状只有两

个参数是独立的。

弯曲元与共振柱试验是最为常用的两种土体小应变动力性状测试手段,弯曲元一般用来测试土体的最大剪切模量,而利用共振柱可以得到不同应变水平

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278383, 51238009, 51478364, 51508417); 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50020); 温州市重点科技创新团队项目(C20120006)

收稿日期: 2014-12-30

*通讯作者

($10^{-6} \sim 10^{-3}$)下的剪切模量和阻尼比。弯曲元技术由于原理简明、操作便捷并且具备无损检测等特点,自1978年Shirley等^[1]首次采用弯曲元测试室内制备高岭土试样的剪切波速以来,被广泛地应用在各种试验设备中进行土样的小应变剪切模量测量研究。尽管如此,如何准确判断弯曲元剪切波在土样中的传播时间仍有很大争议^[2]。

对于剪切波传播时间的主要确定方法有初达波法、峰值法和互相关法,不同研究者对上述方法有不同的认识,柏立懂等^[2]、Lee等^[3]、Leong等^[4]、谷川等^[5]、陈云敏等^[6]认为初达波法能比较可靠地确定剪切波传播时间。而Viggiani等^[7]、吴宏伟等^[8]认为互相关法一定程度上提高了弯曲元试验中确定剪切波速的客观性,建议采用互相关法。Youn等^[9]、柏立懂等^[2]和董全杨等^[10]建议,采用弯曲元与共振柱的对比试验有助于弯曲元剪切波传播时间的准确确定。

以往的研究中,研究者多采用弯曲元进行剪切波速的测量从而计算得到剪切模量这一单一参数,仅有少数研究者在同一试样上对剪切波和压缩波波速进行同时测量^[11-14]。由于弯曲元技术的限制,以往在同一试样上只能采用安装在不同位置上的弯曲元和伸缩元分别进行剪切波速和压缩波速的测试,在这种测试方法中弯曲元和伸缩元的安装较为复杂,且剪切波和压缩波传播路径不同。随着弯曲元技术的发展,Lings等^[15]对弯曲元的接线方式进行了改进,发展了一种可以同时进行剪切波与压缩波测量的弯曲-伸缩元,并对其适用性进行了初步的研究;Leong等^[16]对这种剪切波和压缩波同时测试的弯曲-伸缩元适用的尺寸、激振电压和试验记录等做了详细的研究。

通过弯曲-伸缩元可以测得剪切波速 V_s 和压缩波速 V_p ,剪切波和压缩波具有相同的传播路径。由剪切波速和压缩波速通过下式可以得到土体的剪切模量 G_0 和侧限模量 M_0 ,计算得到土体的泊松比 ν :

$$G_0 = \rho(V_s)^2, \quad (2)$$

$$M_0 = \rho(V_p)^2. \quad (3)$$

由式(1)也可计算得到其它小应变动力特性参数,从而全面衡量土体的动力特性。

$$\nu = \frac{0.5M_0 - G_0}{M_0 - G_0} = \frac{0.5V_p^2 - V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}. \quad (4)$$

弯曲-伸缩元与传统弯曲元一样可方便与其它室内单元体试验仪器或离心机、模型试验进行联合测试,方便在其它试验过程中测试土体小应变动力特性参数的变化。与弯曲元相比可获得更加丰富的土体小应变动力特性参数,与弯曲元和伸缩元分开安装相比,弯曲-伸缩元的安装更加方便,且剪切波与压缩波具有相同的传播路径。

但目前对可进行S波、P波联合测试的弯曲-伸缩元应用研究成果较少,尤其是在国内还没有相关报道。因此,本文利用由GDS公司生产的安装在动三轴仪上的弯曲-伸缩元对福建砂进行了S波、P波联合测试试验研究。对S波、P波波速的确定方法进行了系统的研究。并通过S波、P波波速得到试样的剪切模量 G_0 、侧限模量 M_0 和泊松比 ν 。分析了密实度和围压对剪切模量、侧限模量和泊松比的影响。为弯曲-伸缩元的进一步广泛应用提供了有效的方法。

1 弯曲-伸缩元联合测试原理

弯曲-伸缩元的细部构造如图1所示。其核心部件由两片压电陶瓷片和中间的金属垫片组成。Leong等^[16]指出,对于可进行S波、P波同时测试的弯曲-伸缩元,串音影响(cross-talk)将对接收信号产生较大的影响。为了减小串音影响,采用绝缘的聚四氟乙烯(铁氟龙)层外包铝箔层对压电陶瓷片进行屏蔽防护。同时为了确保弯曲-伸缩元可以在不同的情况下使用,其最外面被封以环氧树脂从而起到防水的作用。

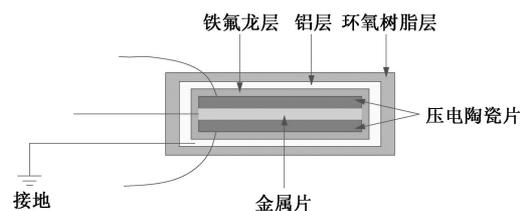


图1 弯曲-伸缩元细部构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a bender-extender element

压电陶瓷片根据极化方向的不同可以分为X型和Y型,如图2所示。当两个压电陶瓷片以相反的极化方向组合时为X型,当两个压电陶瓷片的极化方向相同时为Y型。

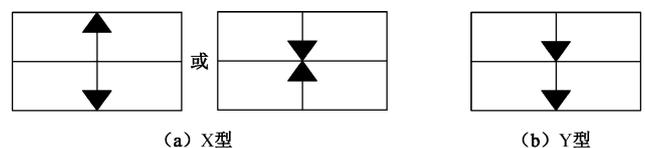


图2 压电陶瓷片组合类型

Fig. 2 Types of piezoceramic elements

根据连接方式不同,压电陶瓷片又可分为串联和并联,分别如图3(a)、(b)所示。在串联方式中,激振电压加在两个压电陶瓷片之间;在并联方式中,激振电压加在两个压电陶瓷片与中间的金属垫片之间。当对两种连接方式的压电陶瓷片施加相同强度的激振电压时,并联的压电陶瓷片产生的位移约为串联时的两倍,当将相同幅值的振动转化为电信号时,串联方式将得到更强的电信号,因此并联压电陶瓷

片更适于作为激发端，串联压电陶瓷片更适于作为接收端^[16]。

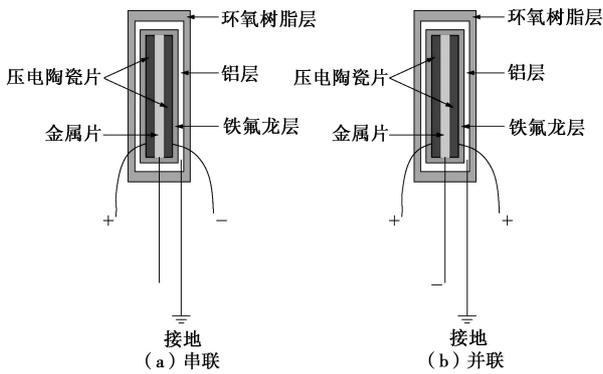


图3 弯曲-伸缩元连接方式示意图

Fig. 3 Wiring configuration of bender-extender elements

本文所用弯曲-伸缩元，顶部为 Y 型压电陶瓷片作为 S 波的激发端和 P 波的接收端，底部为 X 型压电陶瓷片作为 S 波的接收端和 P 波的激发端，如图 4 所示。其 S 波、P 波同时测试的测试原理如图 5 所示。

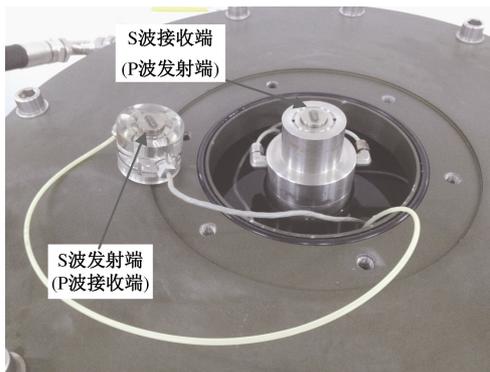


图4 弯曲-伸缩元组成

Fig. 4 Picture of bender-extender element

对于 S 波，发射端的两个压电陶瓷片（Y 型）极化方向相同，采用并联连接，当施加激发信号电压脉冲后，极化方向相同的压电陶瓷片一片伸长，另一片则缩短，产生弯曲运动并在周围土体中产生横向振动，即产生 S 波^[17]。接收端的两个压电陶瓷片（X 型）极化方向相反，采用串联连接，当 S 波通过土体从发射端传播到接收端时，接收端将 S 波振动转化为电信号，与发射信号同时显示和储存在示波器上，通过信号对比得到剪切波传播时间，由传播距离计算得到剪切波速。

对于 P 波，将 X 型压电陶瓷片由串联改为并联，Y 型压电陶瓷片由并联改为串联。当施加激发信号电压脉冲后，极化方向相反的两片压电陶瓷片（X 型）同时伸长或者缩短，在周围土体中产生竖向振动，即产生 P 波。当 P 波通过土体从发射端传播到接收端时，接收端将 P 波振动转化为电信号，与发射信号同时显

示和储存在示波器上，通过信号对比得到压缩波的传播时间，由传播距离计算得到压缩波速。

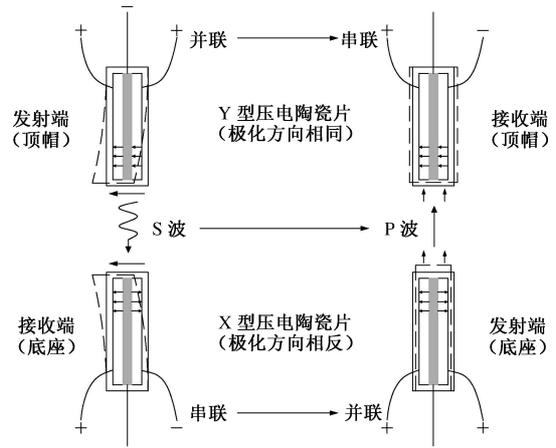


图5 弯曲-伸缩元 S 波、P 波联合测试原理示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of S-wave and P-wave tests

2 试验方案

试验采用国内广泛应用的福建砂，该砂为洁净砂，不含塑性颗粒，其物理性质指标：颗粒比重 $G_s=2.64$ ，平均粒径 $D_{50}=0.34$ mm，不均匀系数 $C_u=1.54$ ，最大孔隙比 $e_{max}=0.848$ ，最小孔隙比 $e_{min}=0.519$ 。颗粒级配曲线见图 6。

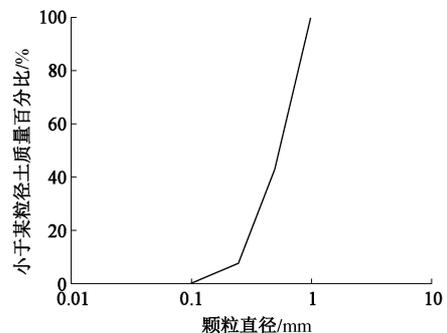


图6 福建砂颗粒级配曲线

Fig. 6 Grain-size distribution curve of Fujian sand

试样直径 $D=5$ cm，高 $H=10$ cm，试样均为干砂样，采用落砂法制成^[10]。试验施加的等压固结围压范围为 100~400 kPa，从小到大依次施加围压，先在一定围压下固结稳定后即进行 S 波 P 波测试，然后进行下一级围压的固结，以此类推。在数据处理分析过程中，考虑固结过程中试样高度变化并对试验结果进行校正，对于剪切波和压缩波传播时间的确定考虑了系统延时的影响。

3 S 波 P 波传播时间影响因素分析

剪切波波速和压缩波波速由剪切波和压缩波的传播距离 d 和传播时间 t 确定，

$$V_s (V_p) = d/t_s (d/t_p) \quad (5)$$

大部分研究者普遍可以接受的传播距离为上下两个弯曲元或伸缩元顶端距离^[3,7]。但对于传播时间的确定不同研究者们并没有统一的方法。不同的激发频率和不同的确定方法均会对波速的确定造成影响。

为获取更为准确的小应变动力特性参数,对频率和不同确定方法的影响进行详细的讨论。

3.1 频率影响

在压电陶瓷片弯曲产生剪切波的同时也会产生压缩波,压缩波在土中的传播速度大于剪切波在土中的传播速度,压缩波将先于剪切波到达,这部分压缩波和反射的剪切波产生与剪切波反相位的信号部分,即近场效应,如图7(虚线圈内区域)所示。在剪切波测试中,近场效应的存在往往对剪切波接收信号初始到达的识别产生巨大的影响^[18-20]。Jovicic等^[18]和Brignoli等^[14]指出增大激发信号的频率将有效地减小近场效应的影响。

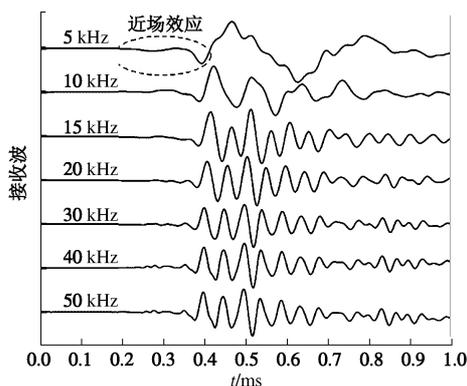


图7 不同激振频率下典型S波接收信号波形图($e = 0.618, \sigma_3' = 100 \text{ kPa}$)

Fig. 7 Typical received signals in S-wave tests under different excitation frequencies ($e = 0.618, \sigma_3' = 100 \text{ kPa}$)

研究者多采用波传播距离与波长的比值对频率的影响进行定量分析。对于一个给定的波速,波长随频率的增大而减小。Sanchez-Salinerio等^[21]认为当 d/λ 大于2时,可忽略近场效应的影响;Arulnathan等^[22]的试验结果发现当 d/λ 大于1时,近场效应将会消失;Arroyo等^[23]建议 d/λ 应大于1.6;Leong等^[16]认为有效减小近场效应影响的 d/λ 至少应大于3.33。然而在以往的研究中,由于弯曲元设备的局限性,激发信号的频率往往小于10 kHz。因此,为了准确地确定传播时间,有必要进行更宽频率区间激发信号的测试。

因此,本文采用比以往研究更宽的激发信号频率区段(2~50 kHz),对频率的影响进行研究。图7为典型的福建砂在不同频率正弦波激发信号下的剪切波接收信号波形。在剪切波主要部分到达之前与剪切波

信号反相位部分(图中虚线圈内区域)即为近场效应影响部分。可见,近场效应的存在将使剪切波初始到达的判断变得困难。从图7中可以看出,近场效应在激发信号频率较低时最显著,随着激发信号频率的增大近场效应显著减弱。但当激发信号频率大于20 kHz时,接收信号波形相似,增大频率对减小近场效应的作用较小。这是由于增大激发频率可减小压缩波的影响,但对反射剪切波的减弱作用较小。

图8为典型的福建砂在不同频率正弦波激发信号下的压缩波接收信号波形。与图7中剪切波接收信号对比可以发现,压缩波接收信号波形在不同激发频率下均较为清晰,可较为容易地确定压缩波的初始到达,从而可以准确地得到压缩波传播时间。

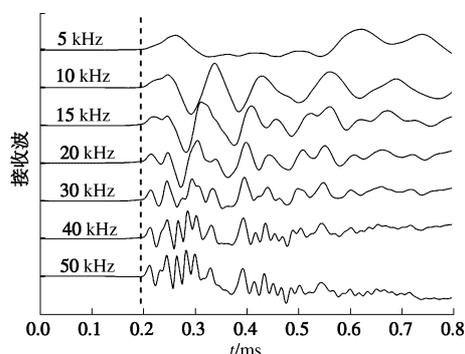


图8 不同激振频率下典型P波接收信号波形图($e = 0.618, \sigma_3' = 100 \text{ kPa}$)

Fig. 8 Typical received signals in P-wave tests under different excitation frequencies ($e = 0.618, \sigma_3' = 100 \text{ kPa}$)

3.2 不同传播时间确定方法影响

由于剪切波传播时间较难确定,为了得到准确的传播时间,采用了3种不同的方法对其进行分析。

(1) 初达波法

采用激发波与接收波起始点之间的时间间隔作为波的传播时间,由于较好理解,国内研究者多采用该方法进行剪切波传播时间的确定^[5-6]。但在剪切波测试中,近场效应的存在往往对剪切波接收信号初始到达的识别产生巨大的影响。依据不同研究者对剪切波接收信号初始到达点的选取,可能的剪切波初始到达点为S1, S2, S3和S4,如图9(a)所示。

(2) 峰值法

采用激发波与接收波第一个波峰之间的时间间隔作为波的传播时间。如图9(a)所示,可能的接收波波峰点为P1, P2。

(3) 互相关法(cross-correlation method)

互相关法是由Viggiani等^[7]提出的,其是通过分析激发信号与接收信号之间的相关程度来确定信号的传播时间。

相关函数的表达式为

$$CC_{xy}(t) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \int_{-T_r}^{T_r} X(T)Y(T+t)dT \quad (6)$$

式中, T_r 为信号的总记录时间, t 为信号之间的相位差。

$$CC_{xy}(t) = \text{IFFT}[G_{xy}(f)] \quad (7)$$

式(6)中 $G_{xy}(f)$ 为互功率谱函数, 是频率的函数,

$$G_{xy}(f) = L_x(f) \cdot L_y^*(f) \quad (8)$$

式中, $L_x(f) = \text{FFT}[X(T)]$, $L_y(f) = \text{FFT}[Y(T)]$, $L_y^*(f)$ 为 $L_y(f)$ 的共轭复数。

在互相关法中将式(6)取峰值时的时间 t 作为波的传播时间。采用互相关法对接收信号的典型分析结果如图9(b)所示, 图中CC1和CC2即为互相关法可能的特征点。

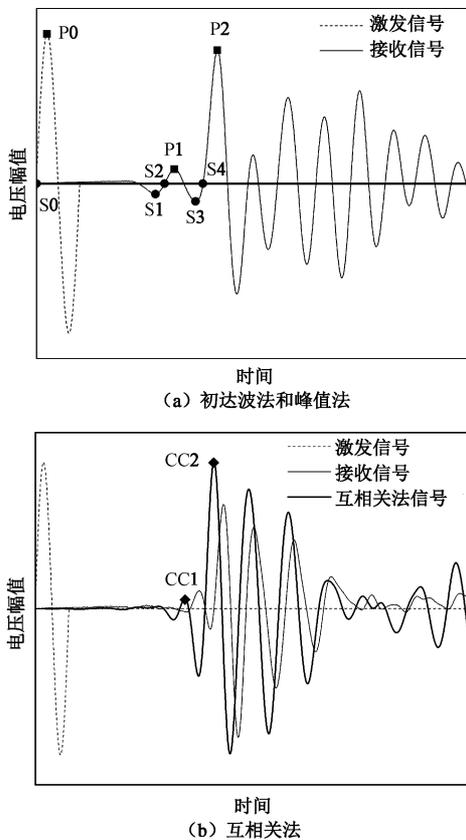


图9 确定传播时间的特征点

Fig. 9 Characteristic points for travel time determination

由3种不同确定方法的所有可能特征点得到的剪切波速如图10所示, 为了准确确定剪切波速也进行了相同试样的共振柱试验, 试验结果如图中所示(部分特征点结果与共振柱试验结果差距较大, 超出图示范围, 图中未表示)。从图中可以看出, 不同确定方法下频率对剪切波速的影响规律相同, 即剪切波速随激发信号的频率增大而略有增加。当激发信号频率小于5 kHz时, 不同方法得到的剪切波速具有较大的离散性; 当激发信号频率为10~20 kHz ($d/\lambda \approx 3 \sim 8$)时, 不同

方法得到的剪切波速结果差别较小, 峰值法、互相关法和S4点初达波法结果相近, 并与共振柱试验得到的剪切波速结果较为一致; 当激发信号频率大于20 kHz时, 不同方法得到的剪切波速又产生了较大的离散性。结合前文激发信号频率对接收信号波形的影响可以看出, 当激发信号频率大于20 kHz时, 增大激发信号频率对减小近场效应作用较小, 并不能得到更为可靠的剪切波速。因此, 针对本文的试验结果, 可以得出: 采用激发信号为10~20 kHz的峰值法和互相关法可以得到较为可靠的剪切波速, 当采用初达波法时应采用第二个零电位点(S4)作为接收剪切波信号的初始到达处。

对于压缩波, 压缩波接收信号在不同频率的激发信号下均较为清晰, 可较为容易地确定压缩波的初始达到, 从而可以准确地得到压缩波传播时间。在试验激发信号频率区间内, 频率对不同方法得到的压缩波速影响较小, 不同方法得到的压缩波速具有较好的一致性。

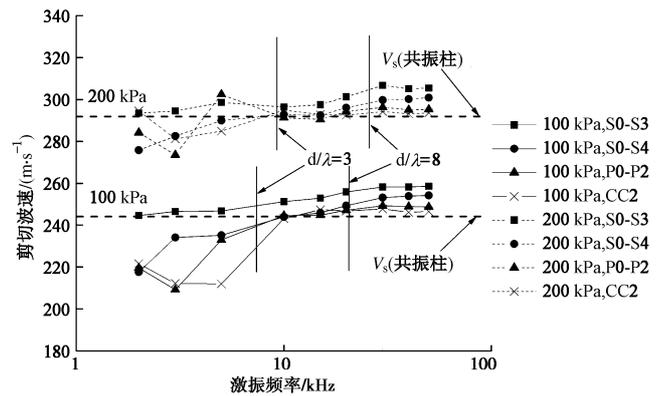


图10 不同确定方法得到的剪切波速

Fig. 10 Comparison among shear wave velocities determined using different methods

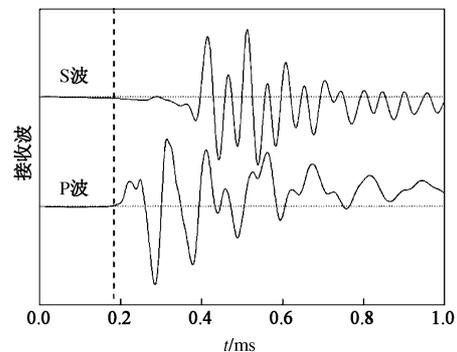


图11 同一条件下典型剪切波与压缩波示意图

Fig. 11 Typical S-wave and P-wave under same condition

同一试样在同一应力状态下通过相同激发信号频率得到的剪切波与压缩波信号如图11所示。从图中可

以看出, 剪切波接收信号由于近场效应产生的反相波形起始点与压缩波初始到达时间相同。由此可见, 采用 S 波、P 波联合测试将有助于 S 波接收信号的分析, 从而可以更加准确地确定剪切波传播时间。

4 小应变动力特性试验结果

由剪切波速和压缩波速可通过式 (2)、(3) 计算得到试样的剪切模量 G_0 和侧限模量 M_0 , 由式 (1) 也可得到杨氏模量 E_0 、体积模量 K_0 , 由于篇幅所限, 以下对试样的剪切模量 G_0 、侧限模量 M_0 和泊松比 ν 进行分析。

不同围压下剪切模量 G_0 、侧限模量 M_0 与孔隙比 e 之间的变化规律如图 12 所示。可见, 在不同围压下, 两种小应变弹性模量 G_0, M_0 均随孔隙比 e 的增大而减小。为了定量分析孔隙比 e 对 G_0, M_0 的影响规律, 采用 Lo 等^[24]提出的公式 $F(e)=e^{-x}$ 对试验曲线进行拟合, 4 种围压情况下对剪切模量 G_0 、侧限模量 M_0 与孔隙比 e 关系的拟合结果如图 12 中虚线所示。从图 12 (a) 中可以看出, 当围压 $\sigma'_3=100$ kPa 时, G_0 和 M_0 的拟合参数 x 值分别为 0.867 和 0.371。拟合参数 x 值表征孔隙比对 G_0 和 M_0 的影响程度, 由此可见, 孔隙比 e 对 G_0 的影响程度大于对 M_0 的影响程度, 即相同围压增量下 G_0 的增长幅度大于 M_0 。从图 12 (b) ~ 12 (d) 中可以看出其他围压下也有类似的规律。

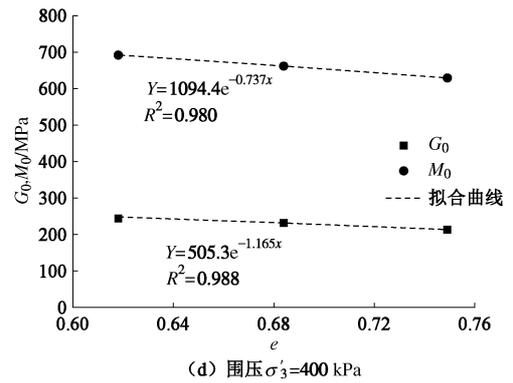
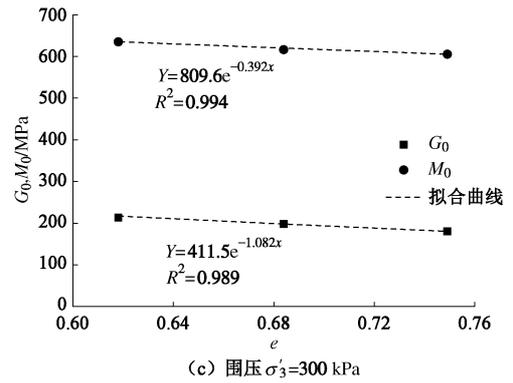
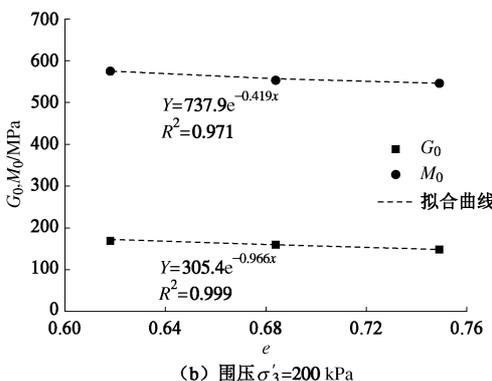
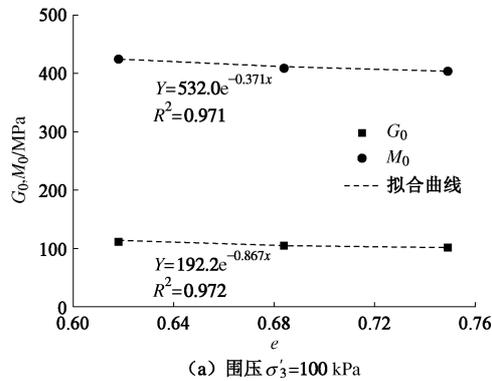


图 12 相同围压下剪切模量和侧限模量与孔隙比关系曲线

Fig. 12 Variation of G_0 and M_0 with void ratio

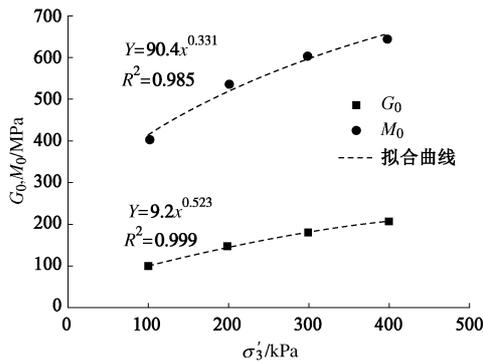
不同孔隙比下剪切模量 G_0 、侧限模量 M_0 与围压 σ'_3 之间的变化规律如图 13 所示。可以看出, 在不同孔隙比的情况下, 两种小应变弹性模量 G_0, M_0 均随围压 σ'_3 的增大而增大。同样为定量分析围压 σ'_3 对 G_0, M_0 的影响规律, 采用 Hardin 等^[25]提出的公式 $G_0(\text{or } M_0)=A F(e)(\sigma'/p_a)^n$ 对试验结果进行拟合, 3 种孔隙比情况下对剪切模量 G_0 、侧限模量 M_0 与围压 σ'_3 关系的拟合结果如图 13 中虚线所示。从图 13 (a) 中可以看出, 对于孔隙比 $e=0.749$, G_0 和 M_0 的拟合参数 x 值分别为 0.523 和 0.331。拟合参数 x 值同样表征孔隙比 e 对 G_0 和 M_0 的影响程度, 由此可见, 围压 σ'_3 对 G_0 的影响程度大于对 M_0 的影响程度, 即相同孔隙比增量下 G_0 的增长幅度大于 M_0 。从图 13 (b) ~ (c) 中可以看出其他孔隙比下也有类似的规律。

如前所述, 由剪切波速和压缩波速可通过式 (4) 计算得到试样的泊松比 ν 。图 14 给出了不同围压下泊松比 ν 随相对密实度的变化规律。从图中可以看出, 在本文试验范围内, 不同围压下泊松比均随密实度的增大而以线性规律减小。当围压 $\sigma'_3=100$ kPa 时, 相对密实度 D_r 从 30% 增加到 70% 时, 泊松比 ν 从 0.333 减小到 0.318, 减小约 4.5%; 当围压 $\sigma'_3=400$ kPa 时, 相对密实度 D_r 从 30% 增加到 70% 时, 泊松比 ν 从 0.248 减小到 0.226, 减小约 8.9%。由此可见, 在相同密实度变化范围内, 围压越大, 泊松比的变化量越大。

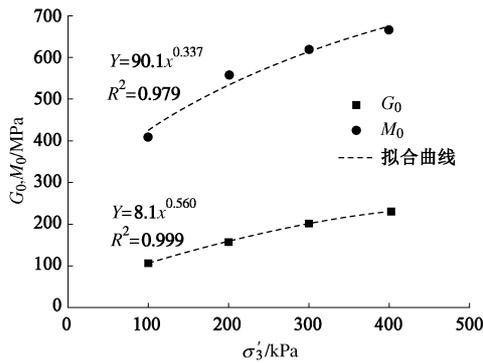
表 1 本文泊松比与以往研究对比

Table 2 Comparison between obtained values of Poisson's ratio and those measured by other researchers

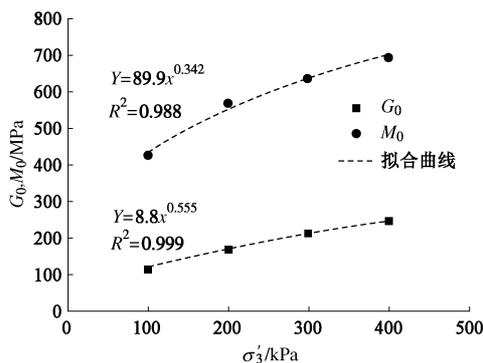
研究者	砂土	试验手段	泊松比取值		
Kumar 等 ^[26]	中粗砂	弯曲-伸缩元	0.212~0.237 (100 kPa)	0.193~0.212 (300 kPa)	0.174~0.195 (500 kPa)
Bates ^[12]	Red Wharf Bay 砂	弯曲元 伸缩元	0.481 (100 kPa)	0.479 (300 kPa)	0.474 (500 kPa)
Nakagawa 等 ^[13]	多种级配砂	脉冲激发系统	0.337~0.396 (79 kPa)	0.328~0.376 (314 kPa)	0.323~0.366 (628 kPa)
本文	福建砂	弯曲-伸缩元	0.318~0.333 (100 kPa)	0.253~0.284 (300 kPa)	0.226~0.248 (400 kPa)



(a) 孔隙比 $e=0.749$



(b) 孔隙比 $e=0.684$



(c) 孔隙比 $e=0.618$

图 13 相同孔隙比下剪切模量和侧限模量与围压关系曲线

Fig. 13 Variation of G_0 and M_0 with confining pressure

图 15 给出了不同密实度下泊松比 ν 随围压 σ'_3 的变化规律。从图中可以看出，在不同密实度下泊松比均随围压的增大呈线性规律减小。当相对密实度 $D_r=30\%$ 时，围压 σ'_3 从 100 kPa 增加到 400 kPa 时，泊松比 ν 从 0.333 减小到 0.248，减小约 25.5%；当相对密

实度 $D_r=70\%$ 时，围压 σ'_3 从 100 kPa 增加到 400 kPa 时，泊松比 ν 从 0.318 减小到 0.226，减小约 28.9%。由此可见，在相同围压变化范围内，密实度越大，泊松比的变化略大。相对于密实度，试验范围内围压变化对泊松比的影响相对较大。

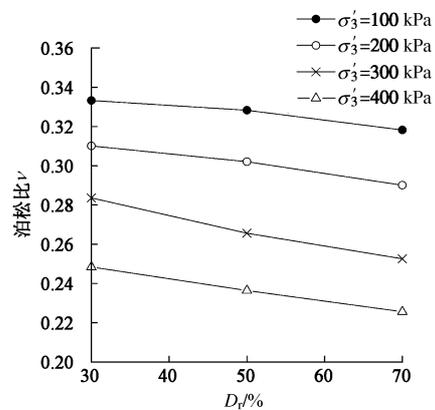


图 14 不同围压下泊松比随相对密实度的变化规律

Fig. 14 Variation of Poisson's ratio with relative density under different effective confining pressures

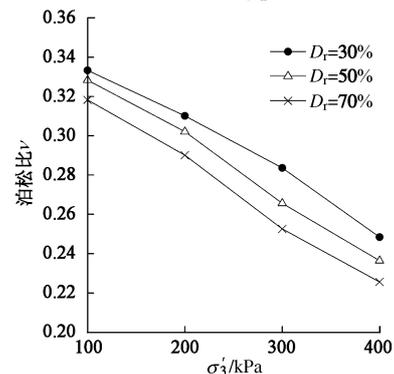


图 15 不同相对密实度下泊松比随有效围压的变化规律

Fig. 15 Variation of Poisson's ratio with effective confining pressures under different relative densities

以往的工程计算及数值模拟中，土体的泊松比参数常常被假设为常数。但通过本文研究可知围压和密实度均对泊松比有一定的影响，因此，将泊松比假定为常数将带来较大的计算误差。

为对本文得到的泊松比试验结果进行校核，将本文的试验结果与以往的研究成果进行对比，如表 1 所示。由对比结果可见，本文得到的泊松比与其他研究

者得到的试验结果相近,泊松比数值在合理范围内,进一步证明本文关于弯曲-伸缩元的试验及分析方法正确。今后有必要利用弯曲-伸缩元对更多砂土进行更全面的试验研究,以期得到其它各因素对土体小应变动力特性的影响规律。

5 结 论

(1)采用更宽区段的激发频率和不同分析方法对剪切波速和压缩波速的确定进行了系统分析,得到了方便可靠的波速传播时间确定方法。采用10~20 kHz峰值法和互相关法可较准确地确定剪切波传播时间。弯曲-伸缩元联合测试有助于更好地分析剪切波接收信号。

(2)利用弯曲-伸缩元联合测试可得到剪切模量 G_0 和侧限模量 M_0 ,试验结果表明围压和孔隙比对 G_0 的影响程度均较对 M_0 的影响程度大。

(3)通过剪切波速和压缩波速可计算得到泊松比 ν ,随密实度和围压的增大泊松比均以线性规律减小。将本文得到的泊松比数值与以往的研究成果进行对比,本文得到的泊松比数值在合理范围内。

参考文献:

- [1] SHIRLEY D J, HAMPTON L D. Shear-wave measurements in laboratory sediments[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1978, **63**(2): 607 - 613.
- [2] 柏立懂, 项伟, SAVIDIS A Stavros, 等. 干砂最大剪切模量的共振柱与弯曲元试验[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 184 - 188. (BAI Li-dong, XIANG Wei, SAVIDIS A Stavros, et al. Resonant column and bender element tests on maximum shear modulus of dry sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 184 - 188. (in Chinese))
- [3] LEE J S, SANTAMARINA J C. Bender elements: performance and signal interpretation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(9): 1063 - 1070.
- [4] LEONG E C, YEO S H, RAHARDJO H. Measuring shear wave velocity using bender elements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(5): 488 - 498.
- [5] 谷川, 蔡袁强, 王军, 等. 循环应力历史对饱和软黏土小应变剪切模量的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1654 - 1660. (GU Chuan, CAI Yuan-qiang, WANG Jun, et al. Effects of loading history on small-strain shear modulus of saturated clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1654 - 1660. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] VIGGIANI G, ATKINSON J H. Interpretation of bender element tests[J]. Géotechnique, 1995, **45**(1): 149 - 154.
- [8] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 利用弯曲元测量上海原状软黏土各向异性剪切模量的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 150 - 156. (NG C W W, LI Qing, LIU Guo-bin. Measurements of small-strain inherent stiffness anisotropy of intact Shanghai soft clay using bender elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 150 - 156. (in Chinese))
- [9] YOUN J U, CHOO Y W, KIM D S. Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(10): 1426 - 1438.
- [10] 董全杨, 蔡袁强, 徐长节, 等. 干砂饱和砂小应变剪切模量共振柱弯曲元对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2283 - 2289. (DONG Quan-yang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element and resonant column tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2283 - 2289. (in Chinese))
- [11] SCHULTHEISS P J. Simultaneous measurements of P and S wave velocities during conventional laboratory soil testing procedures[J]. Mar Geotech, 1981, **4**(4): 343 - 367.
- [12] BATES C R. Dynamic soil property measurements during triaxial testing[J]. Géotechnique, 1989, **39**(4): 721 - 726.
- [13] NAKAGAWA K, SOGA K, MITCHELL J K. Pulse transmission system for measuring wave propagation in soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(4): 302 - 308.
- [14] BRIGNOLI E G M, GOTTI M, STOKOE K H II. Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezo-electric transducers[J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, **19**(4): 384 - 397.
- [15] LINGS M L, GREENING P D. A novel bender/extend element for soil testing[J]. Géotechnique, 2001, **51**(8): 713 - 717.
- [16] LEONG E C, CAHYADI J, RAHARDJO H. Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extend elements[J]. Canadian Geotechnical Journal,

- 2009, **46**(7): 792 - 812.
- [17] 姬美秀, 陈云敏, 黄博. 弯曲元试验高精度测试土样剪切波速方法[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 732 - 736. (JI Mei-xiu, CHEN Yun-min, HUANG Bo. Method for precisely determining shear wave velocity of soil from bender element tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(6): 732 - 736. (in Chinese))
- [18] JOVICIC V, COOP M R, SIMIC M. Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests[J]. Géotechnique, 1996, **46**(2): 357 - 362.
- [19] YANG J, GU X Q. Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size[J]. Géotechnique, 2013, **63**(2): 165 - 179.
- [20] GU X Q, YANG J, HUANG M S. Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element[J]. Soils and Foundations, 2013, **53**(5): 735 - 745.
- [21] SANCHES-SALINERO I. Analytical investigation of seismic methods used for engineering application[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 1987.
- [22] ARULNATHAN R, BOULANGER R W, RIEMER M F. Analysis of bender element tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1998, **21**(2): 120 - 131.
- [23] ARROYO M, WOOD D M, GREENING P D. Source near-field effects and pulse tests in soil samples[J]. Géotechnique, 2003, **53**(3): 337 - 345.
- [24] LO PRESTI D C F, JAMIOLKOWSKI M, PALLARA O, et al. Shear modulus and damping of soils[J]. Géotechnique, 1997, **47**(3): 603 - 617.
- [25] HARDIN B O, RICHART JR F E. Elastic wave velocities in granular soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, **89**(SM1): 39 - 56.
- [26] KUMAR J, MADHUSUDHAN B N. Effect of relative density and confining pressure on Poisson ratio from bender-extender element tests[J]. Géotechnique, 2010, **60**(7): 561 - 567.

(上接 90)

朱万成	庄海洋	陈祥	陈星欣	程国勇	窦林名	冯树荣	柯瀚	刘加才	马永政
王春玲	王涛	韦昌富	薛强	杨光华	杨治林	殷志强	钟阳	白福青	白世伟
白顺果	柏立懂	保华富	边学成	蔡建	曹权	曹振中	陈昌彦	陈国民	陈海军
陈建峰	陈剑平	陈健云	陈锦剑	陈守义	陈颖平	陈正汉	程鉴基	程永辉	戴国亮
党进谦	邓刚	邓学钧	丁浩	丁红岩	丁梧秀	丁勇	董建国	董志良	段建
丰土根	封坤	冯春	冯大阔	冯吉利	高峰	高福平	高彦斌	高永涛	葛孝椿
关宝树	关云飞	桂跃	郭兴文	郭莹	郝冬雪	郝巨涛	何稼	何勇军	胡敏云
胡瑞林	黄春霞	黄生根	黄生文	黄英豪	纪洪广	贾敏才	姜谱男	姜清辉	姜振泉
蒋斌松	蒋冲	蒋军	蒋宇静	金菊良	靳钟铭	孔纲强	雷晓燕	黎春林	李诚宽
李驰	李栋伟	李根	李国英	李胡生	李华	李建桥	李进军	李競生	李立云
李天斌	李文平	李锡夔	李银平	李昀	李志伟	李宗利	连传杰	梁冰	梁越
廖红建	林本海	刘保国	刘保健	刘方成	刘干斌	刘宏	刘华北	刘建坤	刘江平
刘清秉	刘泉声	刘之葵	刘志春	刘中宪	刘兹胜	罗嗣海	骆亚生	马金荣	牛富俊
牛永红	潘一山	彭芳乐	彭劼	蒲毅彬	钱德玲	阮滨	邵龙潭	施维成	时洪斌
侍倩	宋宏伟	宋选民	苏超	孙斌祥	孙冬梅	孙锋	孙建	孙立强	孙强
孙书伟	孙晓明	谭青	谭跃虎	汤雷	唐辉明	唐小松	唐晓武	唐治	田亚护
田振农	涂忠仁	万志军	汪洋	汪亦显	汪自力	王浩然	王军	王立峰	王启智
王秋生	王腾	王卫东	王渭明	王襄禹	王新建	王新泉	王艳	王仲琦	魏焕卫
魏新江	温彦锋	温智	文畅平	吴刚	吴世余	伍法权	伍永平	夏建中	肖大平
肖宏彬	肖明	肖晓春	肖昭然	谢春庆	谢全敏	徐斌	徐长节	徐干成	徐光兴
徐嘉谟	徐平	徐千军	徐松林	徐小丽	徐中华	许四法	薛富春	薛雯鸾	严松宏
言志信	颜荣涛	晏启祥	杨红伟	杨建平	杨俊杰	杨庆	杨维好	杨新安	杨永明
杨育文	尹光志	于广明	余闯	喻文兵	袁聚云	岳建勇	曾庆军	詹良通	詹美礼
张成平	张冬梅	张洪武	张华兴	张建红	张金利	张军辉	张克绪	张力霆	张民庆
张明聚	张奇华	张茹	张献民	张绪涛	张仪萍	张永双	张振华	张智卿	赵洪波
赵奎	赵明阶	赵淑萍	赵晓豹	赵兴东	中国生	钟祖良	周宏伟	周金生	周念清
周小文	周晓敏	朱碧堂	朱川曲	朱大勇	朱逢斌	朱俊高	朱群峰	朱术云	朱维申
朱珍德	宗琦	邹金锋	左建平						