

两种土样剪切波速测试方法的对比试验研究

程国勇¹, 张立², 王建华³

(1.中国民用航空学院, 天津 300300; 2. 国家粮食储备局 郑州科学研究设计院, 河南 郑州 450053; 3. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 扭剪波传感器是一种刚刚兴起的土样剪切波速测试装置。将扭剪波测试方法与弯曲单元测试方法通过试验进行了对比, 对比结果表明: 无论对于粘性土还是砂性土, 弯曲单元方法测试结果比扭剪型剪切波速传感器测试结果偏低20%左右。然后用理论剪切波速已知的有机玻璃棒对扭剪型剪切波速传感器的测试结果进行了验证, 发现该方法测试结果与理论值相差仅1.2%。这表明用扭剪波测试土样的剪切波速是一种更加可靠的方法。

关键词: 土力学; 土样剪切波速; 弯曲单元法; 扭剪波; 扭剪型剪切波速传感器

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)23 - 4368 - 05

STUDY ON TWO TYPES OF TECHNIQUES OF SHEAR WAVE VELOCITY TEST FOR SOIL SPECIMEN

CHENG Guo-yong¹, ZHANG Li², WANG Jian-hua³

(1. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Zhengzhou Science Research and Design Institute, State Administration of Grain Reserve, Zhengzhou 450053, China; 3. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Torsion shear wave transducer is a newly developed device to test the shear wave velocity of soil specimen which has not been reported before. Parallel shear wave velocity tests are carried out on cohesive and cohesionless soil specimens by using torsion wave transducer and another method, bending element method, separately. The results show that test results by the bending elements are 20 percent lower than that obtained from torsion wave transducer for the same kind of soil specimen under the same consolidation condition. To check which device is more reliable, another test is performed in which the shear wave velocity of plexiglass rod, whose true shear wave velocity is known, is tested with torsion wave transducer, and the test result has only 1.2% relative error to the real value, which means that the torsion wave transducer is a more reliable shear wave velocity test device.

Key words: soil mechanics; shear wave velocity of soil specimen; bending elements method; torsional shear wave; torsion shear wave transducer

1 引言

在室内土工试验中, 土样的弹性剪切模量(初始模量)是一个重要的力学参数。由于仪器精度的原因, 普通土工仪器很难准确测试在极小应变量级下土的剪切模量, 用声波测试方法则可以很好地解决

这一问题。因为声波在土样中传播所产生的应变极小($<10^{-5}$), 而根据下式, 剪切波速 V_s 则直接反应了土样的剪切模量(初始模量):

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

式中: G 为土体剪切模量, ρ 为土体密度。

收稿日期: 2004 - 05 - 17; **修回日期:** 2004 - 08 - 30

基金项目: 天津自然科学基金资助项目(023607511)

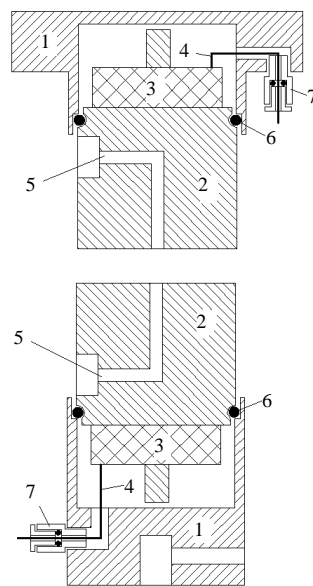
作者简介: 程国勇(1971 -), 男, 博士, 2004年于天津大学建筑工程学院岩土工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩土工程性质、测试与工程应用方面的教学与研究。E-mail: gy_cheng@eyou.com。

正是由于这个原因, 弯曲单元法(bending element method)^[1~3]在土工试验中应用越来越广泛。弯曲单元是近年来新兴的一种室内测试土样剪切波速的仪器, 它可以安装在不同的土工仪器中, 在进行原有试验的同时, 测试土样的剪切波速。但有关研究表明, 弯曲单元测试装置存在一些问题。首先, 弯曲单元需要插入被测试件一定深度(一般为 3 mm 内), 从而造成对插入深度范围内一定的扰动, 也造成了剪切波传播长度的不确定性。文[1]指出, 对于长度为 76 mm 的试件, 仅此一项造成的误差可以达到 16%。其次, 文[1, 2]研究还表明, 近场效应和杂散波的干扰使得剪切波的初至时刻带有较大的主观性, 由此带来的测量误差可以达到 30%。

利用扭剪波进行剪切波速测试具有许多优点。主要表现在: 抗干扰、辐射能量大、波形稳定且无偏振特性, 更重要的是扭剪波在圆柱体中传播时, 只要波的频率满足一定的条件, 就可以消除试件几何尺寸的影响。正是基于以上原因, 在超声工程中一般优先采用扭剪波测试剪切波速^[4~9], 但用扭剪波测试剪切波速的方法在土工试验中尚未有应用的报道。文[10, 11]虽然对利用扭剪波测试土样剪切波速的技术进行了理论上的探讨, 但对其具体应用情况及与现有方法的差异尚缺乏系统的研究。本文将扭剪型剪切波速传感器与弯曲单元方法进行了对比, 并对其可靠性进行了试验验证, 为这种新型土工试验技术的广泛应用提供参考。

2 扭剪型剪切波速测试装置

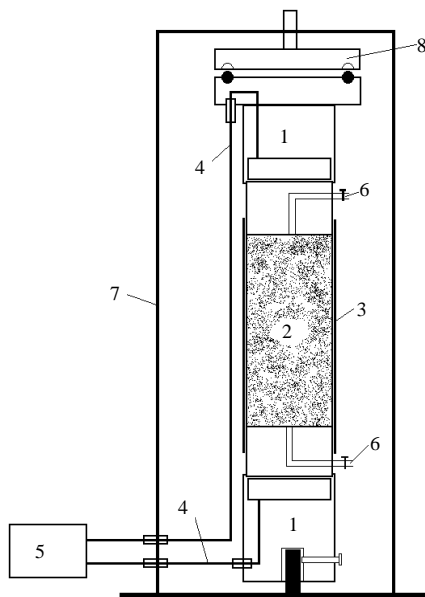
扭剪振子为扭剪型剪切波速传感器的核心部件。当在扭剪振子的上下两面电极间施加交变的电场时, 振子产生扭转振动; 反之, 当扭剪振子接收到扭剪波时, 在振子上下两电极之间会产生电位差。本文根据在三轴压力室内测试剪切波速的实际情况, 制作成如图 1 所示的一对扭剪型剪切波速传感器。该传感器内部空腔用密封胶圈和电缆密封螺丝与压力室完全隔绝。将这样一对传感器安装到三轴压力室时, 下面的波速传感器通过固定孔固定到力传感器的金属柱上, 上部的波速传感器与三轴仪轴向加载装置配合。传感器的信号电缆通过与电缆密封螺丝类似的电缆密封螺丝从压力室的底座引出到压力室外部并与声波测试仪连接。图 2 为安装好的



1—外壳; 2—辐射体; 3—扭剪振子; 4—测量导线; 5—排水管路; 6—密封胶圈; 7—电缆密封螺丝

图 1 扭剪型剪切波速传感器结构

Fig.1 Structure of torsion shear wave velocity transducer



1—扭剪型剪切波速传感器; 2—土样; 3—乳胶膜; 4—引出电缆; 5—声波仪; 6—排水阀; 7—三轴压力室; 8—轴向加载装置

图 2 剪切波速测试装置

Fig.2 Shear wave velocity test device

三轴压力室内剪切波速测试装置。利用该装置可以测试土样在各种应力状态下的剪切波速。当进行波速测试时, 完全按照三轴试验装样的方法, 在试样的端部放置 2 片透水石, 传感器则通过透水石与试件连接。

3 与弯曲单元法的对比试验

选取一种粘性土和一种砂土分别用扭剪型剪切波速传感器和弯曲单元法进行了剪切波速测试的对比试验。

(1) 粘性土测试对比试验

用同种原状粘性土制备 2 个相同的土样，分别用扭剪型剪切波速传感器和弯曲单元测试系统测试其剪切波速。原状粘土的物性指标为：容重 γ 为 18.43 kg/m^3 ，含水量 ω 为 37%。制作土样尺寸为：直径 3.91 cm，高度 8 cm。剪切波速测试都在 25, 50 kPa 两个固结应力下进行。表 1 给出了两者的对比测试结果。

表 1 粘性土的剪切波速对比测试结果

Table 1 Shear wave velocities of clay tested by two devices

固结应力/kPa	$V_{s(1)}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{s(2)}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	相对误差/%
25	85.5	75.6	13.1
50	110.2	92.1	19.7

注： $V_{s(1)}$ 是扭剪型剪切波速传感器测试结果； $V_{s(2)}$ 是弯曲单元法测试结果。

本次试验中，土样在各向等压条件下固结，因此不考虑轴向加载的影响。

(2) 饱和砂土测试对比试验

制备干容重相同的砂土重塑试样，分别用扭剪型剪切波速传感器和弯曲单元法测试在 25, 50, 100, 150, 200 kPa 这 5 个固结应力下的剪切波速，共对两种干容重的试样进行了对比测试，表 2 给出了两种测试方法的对比测试结果。以干容重为 14.43 kN/m^3 、固结应力为 25 kPa 的测试结果为例，图 3, 4 中给出了两种测试方法的波形记录。其中，图 3 为扭剪型剪切波速传感器测试波形，接收信号中的第一个反向点为剪切波到时；图 4 为弯曲单元法测试波形，采用单个正弦波激发，接收信号中竖实线对应的点为剪切波初至点。

通过以上与弯曲单元的剪切波速对比试验表明，扭剪型剪切波速传感器与弯曲单元方法测试结果间存在一定差异。以弯曲单元方法为基准，对于粘性土，扭剪型剪切波速传感器测试结果最大偏高 19.7%；对于砂土，扭剪型剪切波速传感器测试结果

表 2 砂土的剪切波速对比测试结果

Table 2 Shear wave velocities of sand tested by two devices

固结应力 /kPa	干容重 $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$V_{s(1)}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{s(2)}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	相对误差 /%
25	14.43	141.6	119.6	18.4
	16.41	148.9	137.0	8.7
50	14.43	162.6	143.7	13.2
	16.41	183.5	157.8	16.3
100	14.43	197.0	171.2	15.1
	16.41	222.2	186.9	18.9
150	14.43	220.3	193.2	14.0
	16.41	249.2	208.7	19.4
200	14.43	240.2	209.2	14.8
	16.41	269.4	222.3	21.2

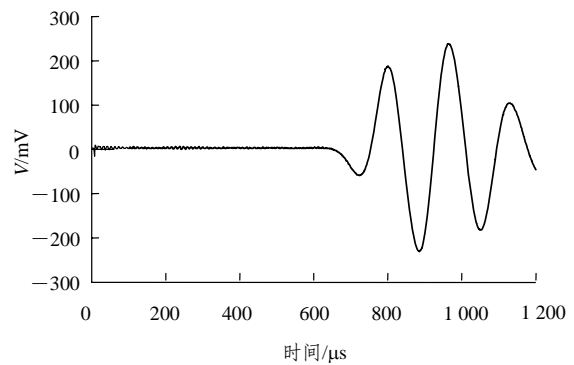


图 3 $\sigma = 25 \text{ kPa}$ 时扭剪型剪切波速传感器的测试结果
Fig.3 Tested wave form of torsion wave transducer when σ equals 25 kPa

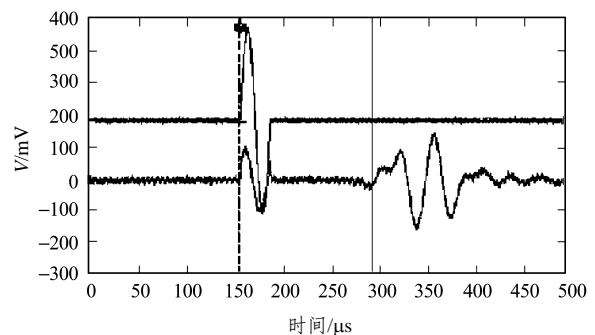


图 4 $\sigma = 25 \text{ kPa}$ 时弯曲单元测试结果
Fig.4 Tested wave form of bending elements when σ equals 25 kPa

最多偏高 21.2%。

4 扭剪型剪切波速传感器测试结果可靠性的检验

既然两种测试方法存在以上差别,而且均为扭剪型剪切波速传感器测试结果偏高,肯定不是偶然因素造成的。为找出差异的原因,用理论剪切波速已知的材料制成的标准试件对两种测试方法进行检验是最直接的方法。这里用有机玻璃棒对扭剪型剪切波速传感器的测试结果进行了验证。

所采用的有机玻璃圆棒长 15.36 cm,直径为 4.03 cm,材料容重为 11.57 kN/m³。首先用纵波传感器测试有机玻璃棒的纵波波速,选用两种不同频率的压缩波传感器进行平行测试,结果见表 3。

表 3 有机玻璃棒纵波测试结果

Table 3 Test results of the longitudinal wave velocity for plexiglass rod

传感器频率 /kHz	测量 时间/ μ s	平均 时间/ μ s	纵波波速 V_p /($m \cdot s^{-1}$)
50	57.9	57.8	2 657.4
100	57.7		

按照无限弹性体中弹性波传播的理论关系式,计算该有机玻璃棒的理论剪切波速,其中,有机玻璃超声泊松比的取值参照文[4]取 $\nu = 0.34$,将 ν 和实测的 V_p 值代入下式:

$$V_s = V_p \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (2)$$

计算得到的有机玻璃棒的理论剪切波速为 1 308.4 m/s。

然后,使用扭剪型剪切波传感器测试有机玻璃棒的剪切波速,测试结果见图 5。图中 S 点为剪切波初至点, S 点对应的测量时间为 188 μ s,扣除系统延时 72 μ s 后,剪切波传播时间为 116 μ s。因此,有机玻璃棒的剪切波速 $V_s = 15.36/0.0116 = 1\,324.1$ m/s。测量结果与理论值的相对误差为 1.2%,表明测试结果与理论值十分吻合。

在这里之所以只对扭剪型剪切波速传感器的测试结果进行检验,是由于该传感器不需插入试件中;而弯曲单元法则需插入到试件中一定深度处才

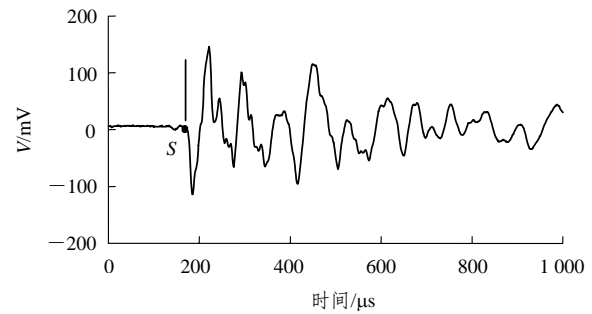


图 5 有机玻璃棒波速测试结果

Fig.5 Shear wave form of plexiglass rod

能测试,对于有机玻璃试件系统,这是不容易实现的。

5 试验结果分析及结论

根据试验结果及以往的研究资料,可得到以下 2 点结论:

(1) 两种测试方法存在差别的原因,主要在于弯曲单元测试方法中对剪切波传播距离的不确定性造成的误差。弯曲单元法测试结果比扭剪波测试方法偏抵 20% 左右。

(2) 用有机玻璃棒对剪切波速测试结果的验证结果表明,扭剪波测试方法是一种可靠的剪切波速测试方法。

参考文献(References):

- [1] Viggiani G, Aatkinson J H. Interpretation of bender element tests[J]. Geotechnique, 1995, 45(1): 149 - 154.
- [2] Jovicic V, Coop M R, Simic M. Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests[J]. Geotechnique, 1996, 46(2): 357 - 362.
- [3] Fioravante V, Roberto C. On the use of multi-directional piezoelectric transducers in triaxial testing[J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, 24(3): 243 - 255.
- [4] 同济大学声学教研室. 超声工业测量技术[M]. 上海: 上海人民出版社, 1977.(The Acoustic Institute of Tongji University. Measuring Technique in Ultrasonic Engineering[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1977.(in Chinese))
- [5] 杨桂通, 张善元. 弹性动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.(Yang Guitong, Zhang Shanyuan. Elastodynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988.(in Chinese))

- [6] 陈桂生. 超声换能器设计[M]. 北京: 海洋出版社, 1984.(Chen Guisheng. The Design of Ultrasonic Transducer[M]. Beijing: Ocean Press, 1984.(in Chinese))
- [7] Lin S Y. Study on the sandwiched piezoelectric ultrasonic torsional transducer[J]. Ultrasonics, 1994, 32(6): 461 - 465.
- [8] 党长久, 杨玉瑞, 李明轩. 一种扭转压电复合材料[J]. 科学通报, 1996, 41(11): 1 044 - 1 046.(Dang Changjiu, Yang Yurui, Li Mingxuan. A torsional piezocomposite material[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(11): 1 044 - 1 046.(in Chinese))
- [9] 党长久, 杨玉瑞, 李明轩. 扭转压电复合材料及其应用[J]. 应用声学, 1995, 16(2): 7 - 13.(Dang Changjiu, Yang Yurui, Li Mingxuan. Torsional piezocomposite materials and their applications[J]. Applied Acoustics, 1995, 16(2): 7 - 13.(in Chinese))
- [10] 程国勇. 饱和砂土剪切波速与抗液化强度相关性的研究[博士学位论文][D]. 天津: 天津大学, 2004.(Cheng Guoyong. Study on correlation between shear wave velocity and liquefaction resistance of saturated sand[Ph. D. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.(in Chinese))
- [11] 程国勇, 张立, 王建华. 用扭转波测试土样剪切波速的新技术[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 358 - 359.(Cheng Guoyong, Zhang Li, Wang Jianhua. A new technique of shear wave velocity measurement of soil samples by torsion wave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 358 - 359.(in Chinese))

2004~2005 年度《岩石力学与工程学报》优秀审稿专家 (排名以姓氏汉语拼音为序)

序号	姓名	序号	姓名
1	白世伟	24	王泳嘉
2	白冰	25	王学潮
3	曹洪	26	王钊
4	陈守义	27	王芝银
5	陈祖煜	28	王志亮
6	陈善雄	29	吴立新
7	陈晓平	30	仵彦卿
8	程良奎	31	席道瑛
9	方祖烈	32	谢定义
10	高大钊	33	尤明庆
11	何满潮	34	杨更社
12	黄润秋	35	杨林德
13	蒋金泉	36	杨志法
14	金丰年	37	杨若琼
15	李宁	38	姚建国
16	李仲奎	39	俞裕泰
17	梁冰	40	俞茂宏
18	刘建军	41	郑颖人
19	卢文波	42	周辉
20	马时冬	43	周维垣
21	钱鸣高	44	朱以文
22	余成学	45	朱维申
23	沈珠江	46	卓家寿