

文章编号: 1000-7598-(2006)02-0214-05

黏土的蠕变特性试验研究

李建中¹, 彭芳乐²

(1. 中南大学 地学与环境工程学院, 长沙 410083; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 研究了黏土的未扰动和重塑土样在三轴排水剪切试验条件下的蠕变特性。既进行了初始加载过程中的蠕变试验, 也做了卸载与重复加载过程中的蠕变试验。试验结果表明: (1) 在初始加载过程中, 经过一定时间蠕变后黏土的强度有很大的提高; (2) 在卸载过程中, 随应力值下降黏土的蠕变表现出由正蠕变、中性蠕变到负蠕变的逐渐转化; (3) 在重复加载过程中, 随应力值增加黏土的蠕变表现出由负蠕变、中性蠕变到正蠕变的逐渐转化。

关 键 词: 蠕变; 黏塑性; 土力学

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Experimental research on creep property of clay

LI Jian-zhong, PENG Fang-le

(1. School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Creep property of undisturbed and reconstituted Japanese clay was presented based on drained triaxial compression tests. Creep tests were performed several times during monotonic primary loading, unloading and reloading. Test results show that: (1) the amount of creep deformation during monotonic primary loading depends on strain rate before creep, creep stress level, and creep time; (2) during monotonic primary loading, the stiffness increasing magnificently shortly after creep; (3) the direction of creep will change from positive creep; to neutral creep and negative creep during unloading, while during reloading, it will change from negative, to neutral and positive creep.

Key words: creep; viscoplasticity; soil mechanics

1 引 言

蠕变特性历来是黏土黏塑性研究的重要内容。黏土蠕变特性的研究不但对完善和发展土力学理论有着十分重要的意义, 而且在实际应用中有重大现实意义。研究黏土的衰减性蠕变规律是预测和控制建筑物基础的长期沉降、维护建筑物基础的稳定以确保建筑物长期安全的关键所在。正确认识土的非衰减性蠕变的第三阶段的规律性, 是预测和防治边坡失稳、确保工程施工顺利进行和维护地质环境的基本前提。黏土的蠕变性研究始于 20 世纪 30 年代 Buisman^[1]。此后, 陈宗基^[2], Taylor D.W.^[3], C.C.维亚洛夫^[4], Awtar Singh^[5], Alan.W. Bishop^[6], 黄文熙^[7]和 Bonaparte, R.^[8], Borja, R. I.^[9]和 Kavazanjian, Jr., E.^[10]等先后从不同的角度对黏土的蠕变性进行了研究, 并且取得了不少成果。

然而, 由于黏土蠕变问题本身很复杂, 既涉及到黏土的排水固结(主要是次固结), 又涉及到黏土颗粒(骨架)的蠕变; 另一方面, 由于工程施工要求的不断提高, 给黏土蠕变性研究提出了很多新课题, 出现了很多原有研究成果难以解释的新问题。因此, 有必要对黏土蠕变性进行更深入地研究以满足生产实际的需要。

笔者利用计算机控制的应变式三轴试验仪器, 辅助以精确的 LDT^[11](Local Displacement Transducer)应变测量方法, 通过对两种日本黏土的未扰动土样和重塑土样在三轴试验条件下的蠕变试验结果进行分析, 发现了黏土蠕变的新特性。

2 试验方法

本研究采用两种日本黏土: 纪淡黏土(颗粒比

收稿日期: 2004-09-01 修改稿收到日期: 2004-11-05

基金项目: 日本国际教育交流基金项目。

作者简介: 李建中, 男, 1966 年生, 博士, 副教授, 主要从事土力学与岩土工程方面的研究与教学工作。E-mail: lijianzhong@csu.edu.cn

重 $G_s = 2.69$, 液限 $w_L = 31.9\%$, 塑限 $w_p = 10.3\%$) 和大井町黏土 ($G_s = 2.72$, $w_L = 43.0\%$, $w_p = 23.0\%$)。纪淡黏土的未扰动样是采用薄壁取样管在日本大阪海湾取样, 大井町黏土的未扰动样为从东京湾的东南部开挖的深基坑中取得的块状样^[12]。纪淡与大井町两种黏土的重塑试样都是采用在各自的土粉加入其液限含水量 2 倍的水搅拌成的黏土浆, 并在未扰动土样取样的地层应力(分别为 340, 250 kPa)的条件下, 用直径为 55 mm 的单向固结装置排水固结 7 d 左右得到。

三轴试验仪器是计算机程序控制的应变式三轴仪, 其最小变形精度为 0.01 mm, 压力腔及相关部件如图 1 所示, 图中的 LDT 是用来直接测量土样变形量的传感器。由于三轴仪采用了(位于压力腔内)内置式力传感器以及 LDT, 所以在试验过程中可以很精确地测量压力与位移, 体积应变是通过试样排水量测量的结果计算得到, 试样尺寸(直径×高度)为 50 mm×100 mm。除采用常规的试样上下端滤纸、透水石排水外, 还在试样周围放置滤纸条以增加排水速度。

试验前, 将试样先饱和($B > 95\%$), 然后等向固结到土样各自在未扰动土样取样的地层应力(除大井町黏土的重塑样为 540 kPa 外), 再进行排水剪切试验, 其应力路径见图 2。在剪切的过程中为了得到黏土的黏塑性, 不断改变加载速度, 期间进行了蠕变以及卸载与重复加载试验。本文就其中的蠕变问题进行探讨。关于试验中黏土的黏塑性问题可以参见笔者的相关论文^[13, 14]。

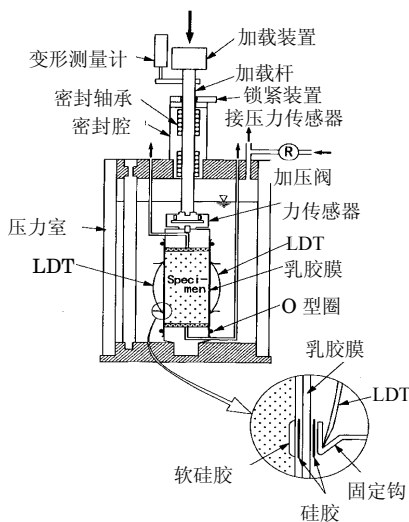


图 1 三轴试验装置

Fig.1 Triaxial test apparatus

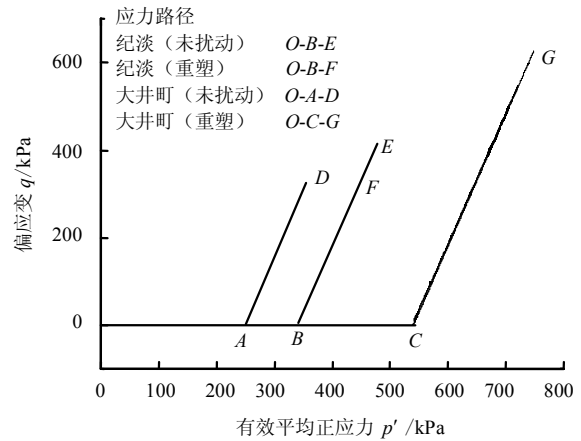


图 2 应力路径

Fig.2 Stress path

3 试验结果分析

图3~5为纪淡黏土与大井町黏土三轴排水剪切试验结果的典型应力-应变曲线(图中应变下标U和R表示卸载与重复加载)。

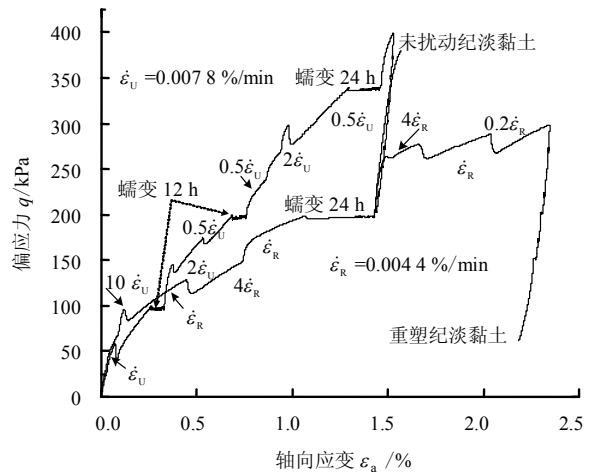


图 3 纪淡黏土轴向应变与偏应力的关系

Fig.3 Stress-strain relation of Kitan clay

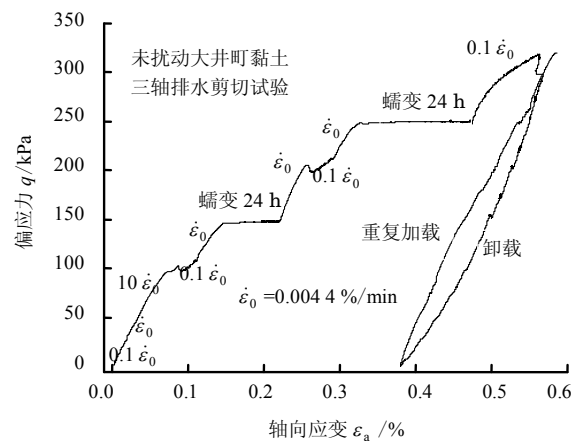


图 4 未扰动大井町黏土轴向应变与偏应力的关系

Fig.4 Stress-strain relation of undisturbed Ohi-machi clay

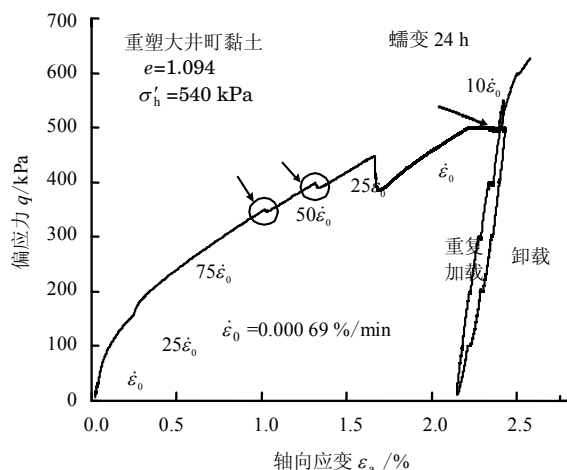


图 5 重塑大井町黏土轴向应变与偏应力的关系
Fig.5 Stress-strain relation of reconstituted Ohi-machi clay

由图3~5可以看出:

(1) 同一种土的土样, 未扰动土样的强度比重塑样的强度要大。无论是未扰动土样, 还是重塑土样, 在排水剪切过程中都表现出一定的黏塑性, 即应力-应变曲线随加载速度改变而改变, 而且这种变化可以用等时模型来描述^[15, 16]。

(2) 两种土都表现出非常明显的蠕变特性, 且蠕变变形量的大小与蠕变时间、蠕变时的应力值大小、蠕变前的应变率以及土样本身特性有关。图3中未扰动纪淡黏土在初始加载过程中的 3 次不同蠕变表明, 蠕变变形量随蠕变持续时间、应力大小增加而增加。对比图3 中未扰动与重塑纪淡黏土的应力-应变曲线可知, 在其它条件相同的情况下, 重塑土样的蠕变变形量要比未扰动土样的大, 且应力-应变曲线还表明: 蠕变前如果应变率小而且持续时间长, 则蠕变变形量小。

(3) 在初始加载阶段每次蠕变变形后进行继续加载时, 应力-应变曲线的斜率明显增大, 即蠕变后黏土的弹性模量增加。从图3的未扰动纪淡黏土的第二次蠕变以及图4的大井町黏土的第二次蠕变可以看出, 蠕变后弹性模量的增大, 只发生在蠕变后继续加载开始的一小段邻域, 随加载继续进行, 这种增大逐步消失, 直至恢复到与蠕变发生前相同应变率的等时曲线。

图 6~9 分别为图 3~5 应力-应变曲线的卸载与重复加载部分的放大, 其中 CL 表示循环加载, 为测量黏土的弹性模量而进行的循环次数为 3, 加卸载幅度为 5~10 kPa 的循环加载; UC 表示卸载过程中的蠕变, 其后面的数字为蠕变的序号; RC 表示重复加载过程中的蠕变, 其后面的数字为蠕变的序号。图中所有蠕变的持续时间均为 2 h。

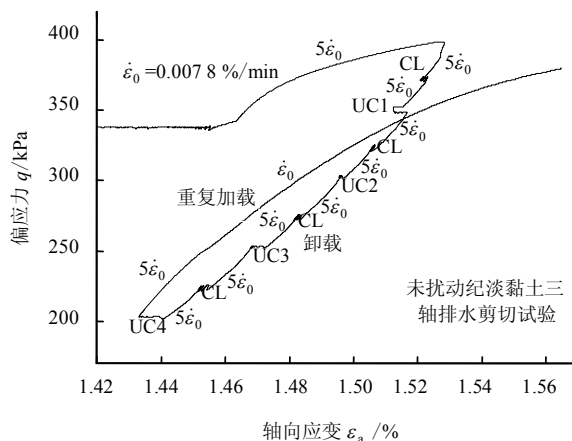


图 6 卸载条件下未扰动纪淡粘土蠕变特性
Fig.6 Creep property of undisturbed Kitan clay during unloading

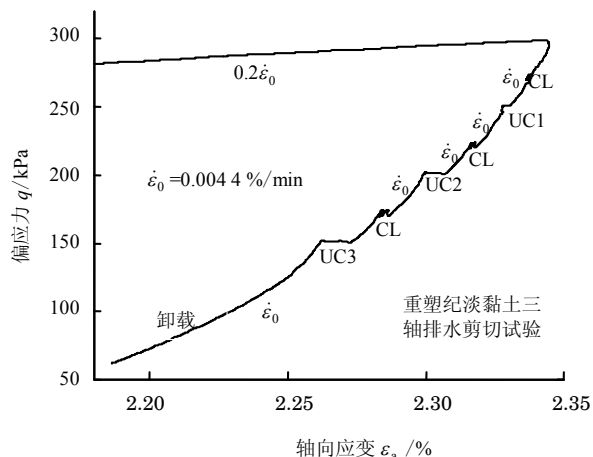


图 7 卸载条件下重塑纪淡黏土蠕变特性
Fig.7 Creep property of reconstituted Kitan clay during unloading

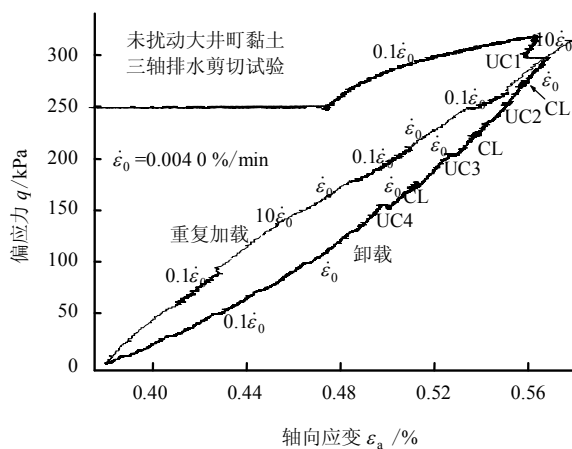


图 8 卸载条件下未扰动大井町黏土蠕变特性
Fig.8 Creep property of undisturbed Ohi-machi clay during unloading

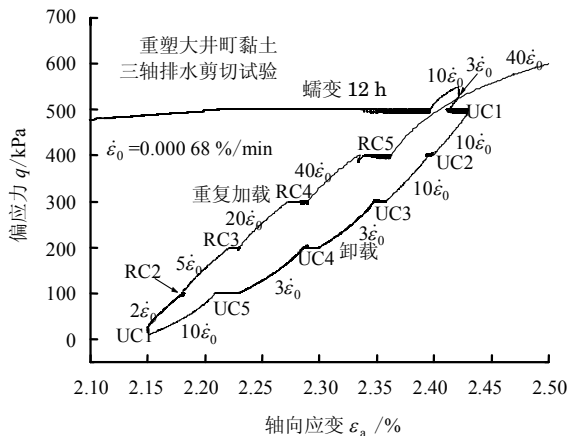


图9 卸载与重复加载条件下未扰动纪淡黏土蠕变特性
Fig. 9 Creep property of reconstituted Ohi-machi clay during unloading and reloading

从图6~9可以看出:

(1) 除图7外,在卸载开始的蠕变如图6~8中的UC1都是正蠕变,即蠕变变形量随时间增加而正向增加即总变形量增加。这说明在卸载开始后的邻域里,黏土保持了原来初始加载时的蠕变特性,即随蠕变时间的增加,蠕变变形量逐步增加。

(2) 随卸载进一步进行,剪切应力下降,蠕变转变为负蠕变,即蠕变变形量随蠕变时间的增加而负向增长即总变形量减少。而且,由正蠕变到负蠕变的转变是逐步进行的,随卸载的不断进行,蠕变的变形量由正值逐步转变为负值,然后负蠕变量逐步增加。这说明在这种蠕变由正到负的转变过程中应该存在蠕变变形量为零的点,即中性蠕变点,在该点蠕变变形量不随蠕变持续时间增加而变化,而是保持为零,即无蠕变发生。图8中卸载时的第二次蠕变(UC2)就非常接近于中性蠕变。

(3) 从图9可以看出,在重复加载阶段的黏土表现出与卸载类似的蠕变方向的转变,只是与卸载相反。在重复加载过程中蠕变由负蠕变,经过中性蠕变(图中的RC2)逐步转变到正蠕变,且蠕变变形不断增加。

图7中没有正蠕变出现,可能是因为卸载后的第一次蠕变时卸载达到的应力值,已经低于该土样在本试验条件下卸载时能够产生正蠕变的应力值,这表明,卸载后是否出现正蠕变与卸载后应力-应变曲线上蠕变点邻域的应力值以及应变率大小有关。在重复加载时,很可能也有相同的规律,但本文所涉及的试验结果还不能证明这一点。

由于测量精度限制,目前还很难用试验验证在卸载与重复加载过程中的蠕变,是否对黏土的弹性模量也产生如同单调加载时进行的蠕变相同或相反

的影响。在这方面的研究还有待于对试验仪器与试验方法进行改进之后进行。

4 结论

通过对两种日本黏土的粘塑性试验结果中的蠕变的分析,对于未扰动和重塑黏土的蠕变特性有以下几点认识:

(1) 黏土的蠕变对其应力-应变曲线有所影响,但这种影响范围仅限于蠕变结束后的较小邻域,对远范围的应力-应变曲线几乎没有影响。

(2) 蠕变对后续邻域的影响主要表现在:蠕变后续邻域的应力-应变曲线的斜率明显增大,即蠕变使黏土在蠕变后续邻域的弹性模量增加。

(3) 卸载与重复加载试验表明,黏土的蠕变不仅存在正蠕变,而且也存在负蠕变;正负蠕变之间的转变是渐进的,即存在蠕变中性点。

(4) 蠕变中性点的蠕变变形量为零,即在蠕变的过程中不产生蠕变变形。这一重要特性决定了蠕变中性点将会作为黏土黏塑性研究的重要参考点。

参考文献

- [1] Buisman, K. Result of long duration settlement tests[A]. *Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*[C]. [s.l.]: [s.n.], 1936. 103—112.
- [2] 陈宗基. 固结及次时间效应的单维问题[J]. *土木工程学报*, 1958, 5(1): 20—25.
TAN Tjong-kie. One dimensional problem of consolidation and secondary time effect[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1958, 5(1): 20—25.
- [3] Talor D W. *Fundamentals of Soil Mechanics*[M]. New York: Wiley, 1948.
- [4] Vyalov S S. Creep and long-term strength of soils subjected to variable load[A]. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics*[C]. Mexico: [s. n.], 1969. 423—431.
- [5] Singh A, Mitchell, J K. General stress-strain-time function for soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, America Society of Civil Engineering*, 1994. 21—46.
- [6] Bishop A W. Creep characteristics of two undisturbed clays[A]. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics*[C]. Mexico: [s. n.] 1969. 523—532.

- [7] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利水电出版社, 1983.
- [8] Bonaparte R. A Time-dependent constitutive model for cohesive soil[D]. Berkeley: University of California, 1981.
- [9] Borja R I, Hseih H S, Kavazanjian Jr E. Double-yield-surface model[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 116(9): 1 402—1 421.
- [10] Kavazanjian Jr E, Mitchell J K. Time-dependent deformation behavior of clays[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1980, 106(6): 611—630.
- [11] Goto S, Tatsuoka F, Shibuya S, Kim Y-S, Sato T. A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory[J]. **Soils and Foundations**, 31(1): 169—180.
- [12] Li J Z, Acosta-Martinez H E, Tatsuoka F. One-dimensional compression tests to evaluate the viscous property of clay[A]. **Proceedings of the 38th Japanese Geotechnical Society Symposium**[C]. Akita: The Japanese Geotechnical Society, 2003. 523—524.
- [13] Li J Z, Tatsuoka F, Nishi T, Komoto N. Viscous stress-strain behaviour of clay under unloaded conditions[A]. **Proceedings of the 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials**[C]. [s.l.]: [s. n.], 2003. 617—625.
- [14] Li J Z, Acosta-Martinez H E, Tatsuoka F, Deng, J L. Viscous property of clay and nonlinear three-component modelling[A]. **International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits**[C]. Osaka: Matsui, Tanaka, 2004. 2—6.
- [15] Tatsuoka F, Uchimura T, Hayano K, Di Benedetto H, Koseki J, Siddiquee M S A. Time-dependent deformation characteristics of stiff geomaterials in engineering practice, the Theme Lecture[A]. **Proceedings of the Second International Conference on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials**[C]. Torino: M. Jamiolowski, R. Lancellotta and D. Lo Presti, 1999. 1 161—1 262.
- [16] Tatsuoka F, Ishihara M, Di Benedetto H, Kuwano R. Time-dependent compression deformation characteristics of geomaterials and their simulation[J]. **Soils and Foundations**, 2002, (2): 103—138.

上接第 213 页

- [8] 欧阳联华, 王家林. 一种高频面波频散函数的快速算法—改进的 Abo-Zena 法[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24(3): 204—208.
OUYANG Lian-hua, WANG Jia-lin. The modified Abo-zena method—a fast algorithm for dispersion calculation of high frequency surface wave[J]. **Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration**, 2002, 24(3): 204—208.
- [9] 曾校丰, 崔伟群, 许维进, 等. 瑞利波频散函数的快速算法[J]. 地球物理学报, 2002, 45(增刊 1): 261—267.
ZENG Xiao-feng, CUI Wei-qun, XU Wei-Jin, et al. Fast algorithm of dispersion function for Rayleigh wave[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2002, 45(Supp.1): 261—267.
- [10] 柴华友. 表面波有效相速度分析方法研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [11] 伊文 W M, 贾戴茨基 W S, 普瑞斯 F. 层状介质中的弹性波[M]. 刘光鼎译. 北京: 科学出版社, 1966.
- [12] Jones R. Surface Wave technique for measuring the elastic properties and thickness of roads: theoretical developments[J]. **Journal of Applied Physics**, 1962, 13: 21—29.
- [13] Wolf J P. Dynamic Soil-structure Interaction[M]. Englewood Cliffs: Prentic-Hall, 1985.
- [14] Kausel E, Roësset J M. Stiffness matrices for layered soils[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1981, 71: 1 743—1 761.
- [15] Kausel E, Peek R. Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1982, 72(5): 1 459—1 481.
- [16] 曹志浩. 矩阵特征值问题[M]. 上海: 上海科学技术出版社(第 1 版), 1980.
- [17] 刘德贵, 费景高, 于泳江, 等. FORTRAN 算法汇编(二)[M]. 北京: 国防工业出版社(第 1 版), 1983.
- [18] Gucunski N, Woods R D. Inversion of Rayleigh wave dispersion curve for SASW test[A]. **5th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering**[C]. Karlsruhe, Germany: Computational Mechanics Publications, 1991. 127—138.