

ND-CPT 测量非均质地层密度剖面的研究

加 瑞^{1,2}, 张稳军^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 同位素密度静力触探仪 (ND-CPT) 是一种把同位素密度仪并入到静力触探仪的探头中, 同时测量锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力和密度的新型原位测试仪器。根据 ND-CPT 测量的密度为 γ 射线源和检测器之间回转椭球体内土体的平均密度 ρ_c 的原理, 首先建立了可以计算回转椭球体内土体的平均密度 ρ_c 的后向散射模型和平均值模型, 然后调查了 ND-CPT 贯入各种非均质地层时的测量密度 ρ_c 剖面与实际密度 ρ 剖面的区别, 结果表明在地层分界处附近的测量密度 ρ_c 与实际密度 ρ 有较大差别, 最后对 ND-CPT 在实际工程中测量的有明海底泥的测量密度 ρ_c 剖面进行了理解, 得到了海底泥的实际密度 ρ 剖面。研究结果可为利用 ND-CPT 准确划分地层提供依据。

关 键 词: 同位素密度静力触探仪; 非均质地层; 密度剖面; 海底泥

中图分类号: P 204

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增 1-0685-06

Study of density profile of heterogeneous strata measured by ND-CPT

JIA Rui^{1,2}, ZHANG Wen-jun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Nuclear density cone penetrometer(ND-CPT), incorporating the nuclear density probe into the probe of piezocone penetrometer, is a newly developed in-situ testing device that can simultaneously measure cone resistance, sleeve friction, pore water pressure and density. According to the principle that ND-CPT measures the average wet density ρ_c of the soil within a spheroid volume around the central point of the source and the detector, the backscatter and average value models which can calculate the average density ρ_c of soil within a spheroid volume are firstly proposed. Then, assuming ND-CPT is penetrated into various heterogeneous strata, the differences between the average density ρ_c profiles and the actual density ρ profiles are investigated; and the results show that the measured ρ_c values are considerably different from the actual ρ values near the boundaries of strata. Finally, the measured ρ_c profiles of seabed sediments in Ariake Sea, Japan, are interpreted and the actual ρ profiles are deduced. The research results can provide the basis for accurate soil classification using ND-CPT.

Keywords: nuclear density cone penetrometer(ND-CPT); heterogeneous strata; density profile; seabed sediment

1 引 言

孔压静力触探 (CPTU) 已成为目前应用性最广的原位测试技术, 在岩土工程领域已得到广泛应用, 但通过 CPTU 很难获得土的重要指标密度, 而在一些工程实践中准确地确定土的原位密度是非常重要的。放射性同位素技术可以用来测量土的密度, 利用的是 γ 射线源发出的 γ 射线穿过土体时的衰减与土体的密度有关的原理^[1]。起初利用放射性同位

素测密度的仪器的体积较大, 随着技术的发展, 仪器的体积逐渐缩小到可以结合在圆锥触探仪中。日本京都大学将同位素密度仪合并到静力触探仪中形成了同位素密度静力触探仪 (Nuclear density cone penetrometer, ND-CPT), 发现原位测试的密度结果可很好地对比钻孔取样的室内试验结果^[2]。

目前 ND-CPT 已经在一些需要测量地层连续密度剖面的工程中得到了应用, 并获得了可靠的密度剖面。Mimura 等^[3]用 ND-CPT 对自然沉积和人工堆

收稿日期: 2015-03-08

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金 (No. 2015-1098); 国家自然科学基金 (No. 51378342); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20120032120050)。

第一作者简介: 加瑞, 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 主要从事土工试验与原位测试方面的研究工作。E-mail: jiarui@tju.edu.cn

通讯作者: 张稳军, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程施工与设计基础理论方面的研究工作。E-mail: wjzhang@tju.edu.cn

积的砂土层进行了测试, 积累了 ND-CPT 原位测试砂土密度的经验。Umezaki 等^[4]用 ND-CPT 对疏浚吹填土的密度进行了调查, 通过与室内试验的密度测量结果对比证实了 ND-CPT 测试的密度的可靠性。Dasari 等^[5]用 ND-CPT 对极度非均质的块状填土的密度进行了调查发现, 原位测量结果和不扰动土样的室内试验结果相一致, 测量的密度剖面有助于识别块状土体和块状土体之间空隙所占的空间。Jia 等^[6]用 ND-CPT 对日本有明海底泥的密度和不排水抗剪强度进行了调查发现, ND-CPT 测试的密度和不排水抗剪强度与不扰动土样的室内试验结果相符合, 且 ND-CPT 测试的密度具有很好的重复性。

在国内, 上海隧道工程设计院和上海原子核研究所 1994 年合作研制成功了静力触探密度探测仪, 可以连续测定土的密度和比贯入阻力曲线^[7]。中水淮河规划设计研究院有限公司引进日本 SRE 株式会社生产的 ND-CPT 进行了现场测试试验, 根据钻探和静力触探的结果划分了地层^[8]。

由于 ND-CPT 所测的密度为 γ 射线源和检测器之间的回转椭球体内土体的平均密度 ρ_c , 不是土体某点的实际密度 ρ 。本研究首先建立可以计算回转椭球体内土体的平均密度 ρ_c 的模型, 然后调查 ND-CPT 贯入各种非均质地层时的测量平均密度 ρ_c 剖面与实际密度 ρ 剖面的区别, 最后对 ND-CPT 在实际工程中测量的有明海底泥的测量密度 ρ_c 剖面进行理解, 通过反分析得到海底泥的实际密度 ρ 剖面。

2 ND-CPT 和密度测量原理

ND-CPT 包括锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力测量传感器以及测斜仪、 γ 射线源、铅屏蔽、总 γ 射线检测器和自然 γ 射线检测器等装置 (见图 1)。根据中能 γ 射线的康普顿效应, 利用 γ 射线源发出的 γ 射线穿过土体时的衰减和土体的密度有关, 因而 γ 射线检测器检测到的 γ 射线计数率与土体密度有关的原理来测量土体的密度。

ND-CPT 中使用的 γ 射线源通常为放射性同位素铯-137, 它的半衰期大约为 30 年。 γ 射线源的强度大约为 3.7 MBq, 使用者一年的辐射强度小于 1 mSv。 γ 射线检测器通常为一个 NaI (TI) 闪烁计数器和一个光电倍增管。ND-CPT 测量的是 γ 射线源和检测器之间的回转椭球体内土体的平均密度 (见图 1)。图中, $2b$ 为 γ 射线源和检测器之间的距

离, a 与 $2b$ 及周围材料的密度 ρ 有关, 公式^[9]为

$$\frac{a}{2b} = \frac{6.67}{(\rho 2b)^{0.61}} \quad (1)$$

式中: ρ 为密度 (g/cm^3)。本文中 $2b = 26.5 \text{ cm}$, 假设水的密度为 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$, a 的值大约为 24 cm 。

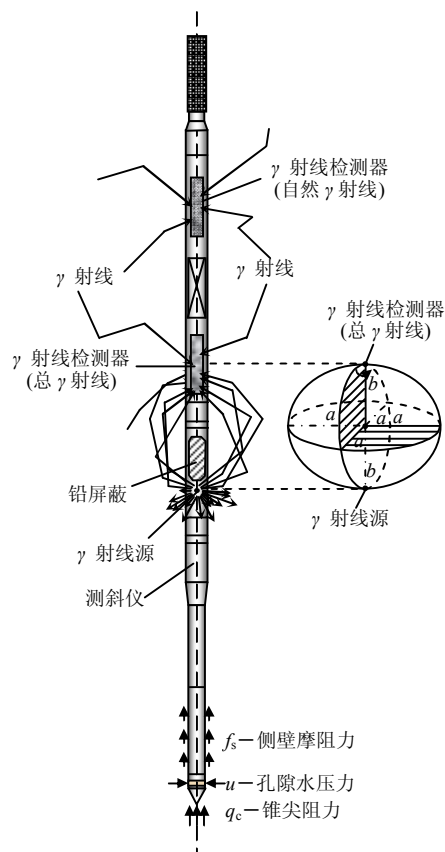


图 1 同位素密度静力触探仪
Fig.1 Nuclear density cone penetrometer

为了考虑放射性同位素的衰变, 检测器得到计数率经过标准计数率正规化的比值 R_p 被用来计算密度, 公式为

$$R_p = \frac{DCR - BCR}{SCR} \quad (2)$$

式中: DCR 为 γ 射线检测器得到的总计数率; BCR 为地层自然 γ 射线的计数率; SCR 为标准计数率。Nobuyama^[10]通过大量的 ND-CPT 原位测试的密度结果与黏土和砂土钻孔取样室内试验测量的密度结果的对比, 得到了 R_p 与 ρ_c 之间的校正公式:

$$R_p = A\rho_c^2 - B\rho_c + C \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 C 为常数, 其大小分别为 0.62 64、4.09 54 和 6.842 2; ρ_c 为 ND-CPT 测量的平均密度, 密度的范围为 $1.0 \sim 2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

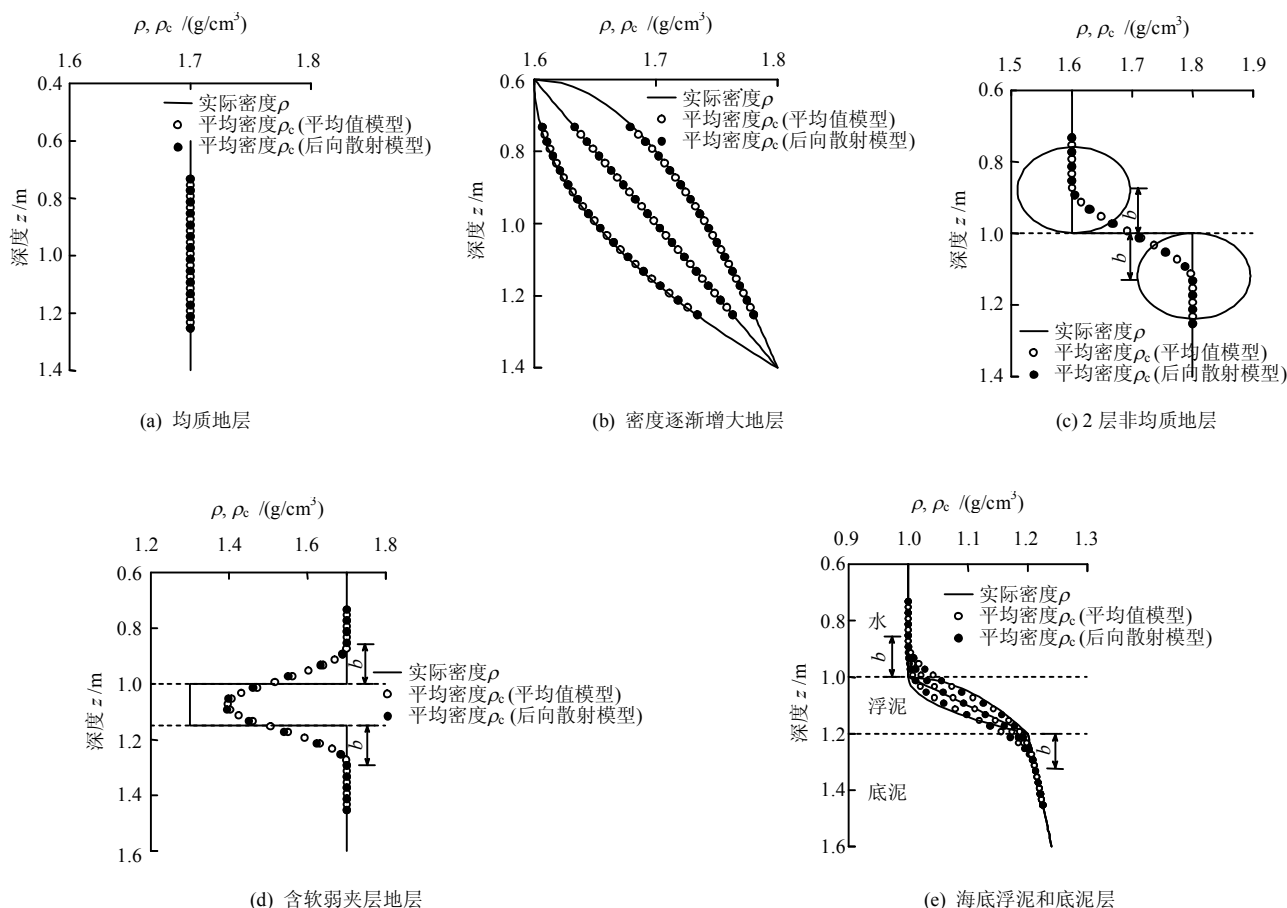


图3 测量平均密度与实际密度的对比
Fig.3 Comparison of measured average and actual density

4.2 测量平均密度与实际密度的区别分析

ND-CPT 测量非均质地层的密度时, 测量的密度 ρ_c 剖面 and 实际密度 ρ 剖面在地层分界处附近不一致的原因见图 3(c)。从图中可见, (1) 当 γ 射线源和检测器都在上一地层时, 测量密度为上一地层的密度; (2) 一旦 γ 射线源进入下一地层时, 测量密度将会发生变化 (上下 2 层的加权平均值), 而 γ 射线源和检测器的中点仍在上一地层, 实际密度仍为上一层密度; (3) 当 γ 射线源和检测器的中点刚进入下一地层时, 实际密度为下一地层的密度, 但因 γ 射线检测器仍在上一地层, 测量密度将仍为上下 2 层的加权平均值 (与下一地层的密度不同); (4) 当 γ 射线检测器也进入下一地层时, 测量密度为下一地层的密度。

测量密度 ρ_c 与实际密度 ρ 不同的范围为 γ 射线源和检测器的距离 $2b$, 由测量平均密度 ρ_c 剖面可直接推算出实际地层的分界处, 即为测量密度 ρ_c 剖面曲线段的中点 (见图 3(c))。当测量海底浮泥层的密度时, 由测量密度 ρ_c 剖面 (见图 3(e)) 可得

到浮泥层顶面为测量密度 ρ_c 剖面上部开始增大处以下 b 的位置, 浮泥层底面为测量密度 ρ_c 剖面下部开始线性增加处以上 b 的位置。浮泥层的密度分布可由反分析的方法得到: 首先假设浮泥层的密度分布, 然后由平均值模型计算平均密度 ρ_c 剖面, 如果计算得到的平均密度 ρ_c 剖面与测量的平均密度 ρ_c 剖面一致, 则假设的浮泥层的密度分布即为正确的。

5 ND-CPT 实测密度结果及对其的理解

5.1 ND-CPT 典型实测结果

利用 ND-CPT 对日本有明海速早湾 4 个地点的海底泥进行了调查, 见图 4。

图 5 为 ND-CPT 在调查地点 A1 的测量结果。图中, q_t 为修正锥尖阻力 (kPa); σ_{v0} 为原位竖向总应力 (kPa); f_s 为侧壁摩阻力 (kPa); u 为测得的孔隙水压力 (kPa); u_0 为静孔隙水压力 (kPa); BCR 为地层自然 γ 射线的计数率 (cps); DCR 为 γ 射线的总计数率; ρ 为湿密度 (g/cm^3); w 为含水率 (%); s_u 为不排水抗剪强度 (kPa)。

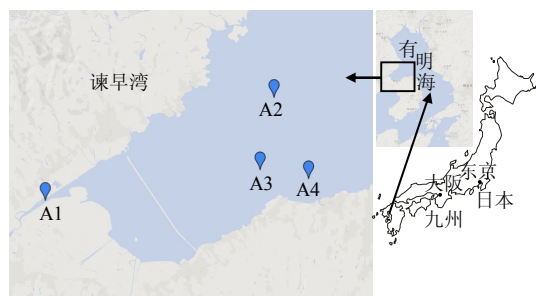


图 4 ND-CPT 调查地点

Fig.4 Investigation locations of ND-CPT

5.2 ND-CPT 实测海底泥密度剖面的理解

由测量密度 ρ_c 剖面首先确定浮泥层顶面位置和底面位置, 即分别为密度 ρ_c 剖面上部开始增大处以下 b 的位置和密度 ρ_c 剖面下部开始线性增加处以上 b 的位置。假设浮泥层的密度分布分别为抛物线函数分布(开始增加较慢, 逐渐加快)、线性分布(线

性增加)和平方根函数分布(开始增加较快, 逐渐减慢), 通过平均值模型计算发现, 当浮泥层的密度分布为平方根函数分布, 即开始增加较快, 逐渐减慢时, 计算密度 ρ_c 和测量密度 ρ_c 剖面一致。所以基于测量的平均密度 ρ_c 剖面, 可以推导出实际密度 ρ 剖面, 如图 6 所示。由图中可以看出, 推导出的实际密度 ρ 剖面在海底浮泥层的顶面以及底面处附近 ($2b$ 范围内, 本文为 26.5 cm) 与测量密度 ρ_c 剖面有较大的差别。这是因为密度分布在浮泥层以上为常数, 在浮泥层以下为常数或略有增加, 而在浮泥层时密度随深度增加很快; 在浮泥层处的密度分布与其上下的密度分布有较大的不同。基于 ND-CPT 测量的密度 ρ_c 剖面反分析得到的实际密度 ρ 剖面有助于准确得到海底浮泥层(密度随深度变化较大的泥层)的堆积厚度等。

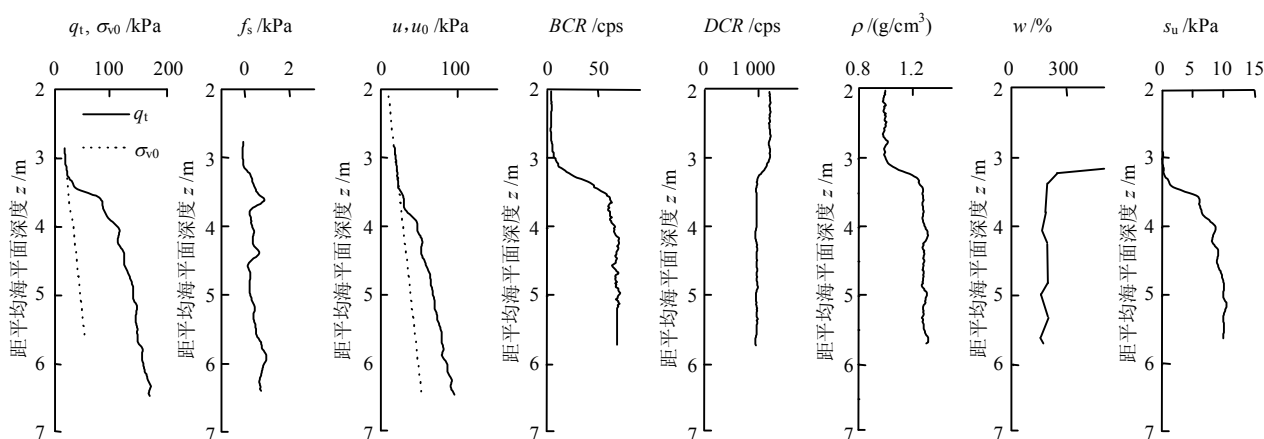


图 5 ND-CPT 测量结果(地点 A1)

Fig.5 Typical test results measured by ND-CPT(A1)

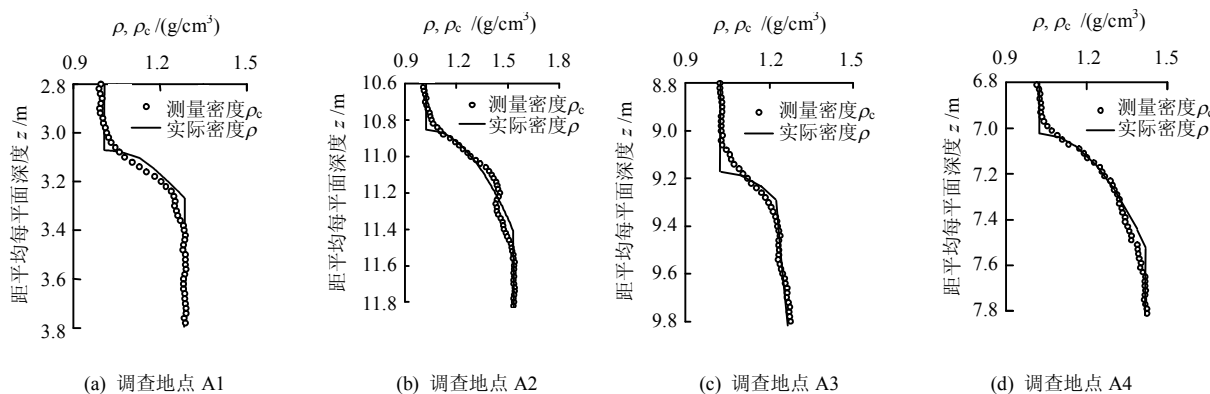


图 6 ND-CPT 实测密度剖面的理解

Fig.6 Interpretation of measured density profile

6 结 论

(1) 根据 ND-CPT 测量密度的原理, 建立了可以计算回转椭球体内土体的平均密度 ρ_c 的后向散射模型和平均值模型。因平均值模型与后向散射模型的计算结果基本相同, 建议采用简单的平均值模型进行计算。

(2) ND-CPT 贯入非均质地层时, 根据各种非均质地层的计算平均密度 ρ_c 剖面与实际密度 ρ 剖面的对比结果明确了在地层分界处附近 $2b$ 范围内(本文为 26.5 cm), 测量平均密度 ρ_c 与实际密度 ρ 有较大的差别。

(3) 基于 ND-CPT 实测有明海底泥的平均密度 ρ_c 剖面, 通过反分析得到了海底泥的实际密度 ρ 剖面, 研究结果可为利用 ND-CPT 准确划分地层提供依据。

参 考 文 献

- [1] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1997.
- [2] SHIBATA T, MIMURA M, SHRIVASTAVA A K. Use of RI cone penetrometer data in foundation engineering[C] // Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi, India: [s.n.], 1994.
- [3] MIMURA M, SHRIVASTAVA A K. RI-cone penetrometers experience in naturally and artificially deposited sand[C]//Proceedings 1st. International Conference on Site Characterization. Atlanta: [s. n.], 1998: 575—580.
- [4] UMEZAKI T, KAWAMURA T, YOSHIMURA M. Evaluation of sediment environments and consolidation properties of disposal pond using RI-density log[J]. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 2006, 54: 13—15.
- [5] DASARI G R, KARTHIKEYAN M, TAN T S, et al. In situ evaluation of radioisotope cone penetrometers in clays[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2006, 29(1): 45—53.
- [6] JIA R, HINO T, HAMADA T, et al. Density and undrained shear strength of bed sediment from ND-CPT[J]. **Ocean Dynamics**, 2013, 63(5): 507—517.
- [7] 郑世俊. 工程地质勘察新手段-静力触探密度探测仪[J]. 地下工程与隧道, 1995, 4(2): 16—21.
ZHENG Shi-jun. The new method for engineering geologic investigation-Nuclear density cone penetrometer[J]. **Underground Engineering and Tunnels**, 1995, 4(2): 16—21.
- [8] 马东亮, 王庆苗, 陈国强, 等. RI 型贯入仪的水分修正系数取值研究[J]. 治淮, 2012, 61(7): 11—13.
MA Dong-liang, WANG Qiang-miao, CHEN Guo-qiang, et al. The value of moisture correction coefficient of RI-cone penetrometer[J]. **Hainessing the Huaible River**, 2012, 61(7): 11—13.
- [9] HOMILIUS J, LORCH S. On the theory of gamma ray scattering in boreholes[J]. **Geophysical Prospecting**, 1958, 6(4): 342—364.
- [10] NOBUYAMA M. The result of the RI cone penetration tests[R]. Japan: Soil and Rock Engineering Co. Ltd., 2000.