

无侧限高压实高庙子膨润土非饱和渗透特性

叶为民^{1,2}, 牛文杰¹, 陈宝¹, 陈永贵¹

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092)

摘要: 采用瞬时截面法试验研究了自由膨胀条件下高压实高庙子膨润土的非饱和渗透特性. 结果表明, 自由膨胀状态下, 干密度为 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数在 $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间变化, 且主要集中在 $1.0 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近, 达到饱和状态时渗透系数最大. 与侧限条件相比, 自由膨胀条件下的高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数大于侧限条件下的非饱和渗透系数, 且渗透系数与吸力的变化趋势存在一定差异, 这可能是由于不同侧限条件下其水化膨胀形式不同而造成的.

关键词: 高庙子膨润土; 非饱和渗透系数; 瞬时截面法; 自由膨胀状态

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Unsaturated Hydraulic Conductivity of Densely Compacted Gaomiaozi Bentonite Under Unconfined Conditions

YE Weimin^{1,2}, NIU Wenjie¹, CHEN Bao¹, CHEN Yonggui¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: The unsaturated permeability of compacted Gaomiaozi-bentonite was tested under unconfined conditions on the basis of the instantaneous profile method. Results show that under unconfined conditions, the unsaturated permeability of Gaomiaozi bentonite ranges from 1.0×10^{-12} to $1.0 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and groups around $1.0 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the maximum value reaches when the specimen is saturated. Compared to the confined conditions, the unsaturated permeability under confined conditions is lower than that under unconfined conditions, and the shapes of curves between unsaturated permeability and suction under different confining conditions are different. This may because that the swelling

mechanism is different under different confining conditions.

Key words: GMZ01 bentonite; unsaturated permeability; transient profile method; unconfined swelling conditions

高放废弃物深地质处置库中, 作为缓冲/回填材料的高压实膨润土的设计功能是遇水吸湿导致土体膨胀变形以密封高压实膨润土块体砌置时形成的块体与块体之间和块体与围岩之间的施工缝隙以及围岩中因处置库开挖卸载引起的裂缝, 形成一道完整的人工屏障, 以阻碍围岩中地下水渗入内库引起核素迁移及库内高放废物的辐射扩散. 当填充这些缝隙和裂缝中的膨润土开始水化时, 其所处的膨胀状态即属于自由膨胀. 因此, 自由膨胀状态下高压实膨润土的非饱和渗透特性对于处置库中人工屏障的形成过程与运营性能的研究具有非常重要的理论意义与工程实践价值.

与饱和渗透相比, 非饱和渗透参数的量测方法要复杂得多. 目前常用的非饱和渗透参数的量测方法主要有: ①瞬时截面法^[1-4]; ②稳态法^[5]; ③空气过压法^[6-7]. 基于上述非饱和土渗透方法, 许多学者获得了不少有价值的试验结果. Wind^[8], Daniel^[2]通过试验发现, 渗透性随着吸力的降低而增加, 当吸力为零时, 黏土的渗透系数与饱和状态时一样. Ed 等^[9]研究发现, 土体由饱和进入非饱和状态的开始阶段, 渗透系数基本保持不变, 且与饱和状态时相等, 该阶段的临界值是进气值. 对于高压实膨润土的非饱和渗透试验, Loiseau^[10]通过侧限条件下 Kunigel 粘土和石英砂混和物 (Kunigel 粘土和石英砂的质量分数分别为 70%, 30%) 的非饱和渗透试验发现, 其渗透系数并不是单一地随着吸力的减小而减小, 而是存在一个吸力临界值 (约 23 MPa), 当吸

收稿日期: 2009-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40772180, 40728003); 国防科工委资助项目 (科工计[2007]831 号); 上海市地质工程重点学科资助项目 (B308)

作者简介: 叶为民 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为环境地质、非饱和土力学. E-mail: ye_tju@tongji.edu.cn

力小于临界值时,渗透系数随着吸力的减小而增大.但对于自由膨胀条件下的非饱和渗透实验研究,由于高压实膨润土土体自身具有很高的膨胀性与极低渗透性,对试验过程的控制精度要求较高,目前国际上关于该类非饱和渗透试验的报道甚少.

高庙子膨润土已经被选作我国核废物处置库的缓冲/回填材料.叶为民等^[4]对侧限条件下的高压实高庙子膨润土非饱和渗透特性进行了试验研究,获取了相应的非饱和渗透系数.笔者采用瞬时截面法对高庙子膨润土进行了自由膨胀条件下的非饱和渗透试验,获取了高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数,分析研究了其随吸力的变化关系,并与侧限条件下的非饱和渗透系数进行了对比分析.

1 高庙子膨润土的基本性能

高庙子膨润土产自我国内蒙古高庙子地区,根据其矿床位置、交通条件、矿床储量与开采技术等诸多因素的综合比较,该膨润土矿床被确定为我国高放废物地质处置库缓冲材料的首选矿床^[11].试验所采用的高庙子膨润土的基本性能如下:颜色为灰白色;化学成分为 SiO_2 , Al_2O_3 , H_2O ;密度为 $2.66 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;碱性系数为 1.14; pH 值为 8.68~9.86;液限为 276%;塑限为 37%;塑性指数为 239;吸蓝量为 $1.02 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$;总比表面积为 $570 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;阳离子交换能力为 $0.773 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$;主要交换阳离子为 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , 分别为 0.433 6, 0.291 4, 0.123 3, 0.025 1 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$;主要矿物为蒙脱石、石英、长石、方英石,质量分数分别为 75.4%, 11.7%, 4.3%, 7.3%. 数据显示,高庙子膨润土具有较强的阳离子交换能力、强吸附能力与良好的水化能力.

2 自由膨胀条件下高压实高庙子膨润土非饱和渗透试验

2.1 试验装置

试验采用黑色橡胶膜包裹高压实膨润土土柱,以保证非饱和渗透试验过程中试样吸水膨胀时基本处于自由状态.在试样长度方向上每隔 30 mm 安装 1 只湿度传感器,从进水端开始分别标记为 1~4 号,共 4 只,用以测量试样在非饱和渗透试验过程中的温度与相对湿度变化.温湿传感器的相关技术指标为:温度测量范围 $-30.0 \sim 105.0 \text{ } ^\circ\text{C}$,精度 $\pm 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$;

相对湿度测量范围 $0 \sim 100.0\%$,精度 0.1% .

同时,在试样长度方向安装了 7 只数显百分表,以精确获取高压实膨润土在非饱和渗透水化过程中的膨胀变形值,从而计算出吸力梯度、过水断面面积,以求取最终的非饱和渗透系数.渗透试验装置如图 1 所示.

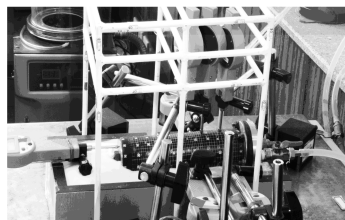


图1 自由膨胀条件下非饱和渗透试验装置

Fig.1 Setup for unsaturated permeability test under unconfined conditions

2.2 样品制备与封装

采用特制模具将高庙子膨润土分层压实至长 150 mm、直径 50 mm、干密度为 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 圆柱形试样,初始含水率为 12.27%. 为了确保高压实膨润土在水化过程中能够自由膨胀,选择具有一定胀缩性能、不易腐蚀、具有隔水隔气功能的黑色橡胶膜密封膨润土土柱,并采用三轴试验的装样钢套筒来封装土样,试样两端各放置一块透水石,一端进水,另一端透气.

2.3 试验原理

采用瞬时截面法测定非饱和土的渗透系数.试验开始后,在圆柱形试样一端施加连续性水流,试验用水为饮用蒸馏水;另一端通过装有植物油的 U 形管与大气相通.试验过程中,通过湿度传感器自动记录试样不同位置上的相对湿度随时间变化值.环境温度控制在常温 $(20.0 \pm 0.4) ^\circ\text{C}$.

根据实测相对湿度随时间变化曲线,结合持水曲线,便可求取试样的非饱和渗透系数.具体步骤是依据相对湿度,采用 Kelvin 定律求取吸力,得出吸力剖面.在 1 个大气压且忽略渗析吸力时,可由吸力(负孔隙水压力)除以水的重度(即 $\rho_w g$, 其中 ρ_w 为水的密度)求取相应的压力水头.由此,试样中某一点 t 时刻的水力梯度(即吸力梯度)就等于水头剖面的坡度.

$$i_w = dh_w/dx \quad (1)$$

式中: i_w 为 t 时刻试样上 w 点的水力梯度; dh_w/dx 为 w 点的水力坡度, x 为试样渗流方向上的位置坐标.

同时,根据实测持水曲线,可求得试样在 t 时刻的含水体积分数,并进一步求取试样上某点的流量 q . 后者数值上等于 Δt 时间内试样上某 2 个确定点间的试样段内发生的水的体积变化. 因此,数值上可将目标试样段的含水体积分数剖面在 Δt 时间段内积分,得

$$q = A \frac{\int_X^L \theta_{t+\Delta t} dx - \int_X^L \theta_t dx}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: A 为断面面积; X, L 为计算试样段的起始与终点坐标; θ 为试样的体积含水量.

根据 Darcy 定律, Δt 时间内的试样的平均非饱和和渗透系数为

$$k_w = -\frac{1}{A} \frac{q}{\frac{1}{2} [i_t + i_{t+\Delta t}]} \quad (3)$$

式中: k_w 为非饱和渗透系数; $i_t, i_{t+\Delta t}$ 分别为 t 和 $t + \Delta t$ 时刻的水力梯度.

在自由膨胀条件下进行非饱和渗透试验过程中,由于膨润土体吸水膨胀,膨润土土柱的形状、湿度传感器的位置和相对距离以及过水断面面积均会随时间不断变化. 根据数显位移计测量结果,可以获得不同时刻传感器的空间位置,通过相对湿度结合土水特征曲线可以求取流量,则可计算非饱和渗透系数.

$$k_j = \frac{q}{A i_{jave}} \quad (4)$$

式中: k_j 为第 j 号传感器处的渗透系数; i_{jave} 是第 j 号传感器处 2 个时刻之间的平均水力梯度. 流量 q 与平均水力梯度 i_{jave} 可参照文献[4]中相应方法求取.

3 试验结果与分析

3.1 自由膨胀条件下高压实膨润土非饱和渗透特性

图 2 为各传感器实测的相对湿度随时间变化曲线. 由图 2 中可以看出,1 号传感器在试验开始的 20 000 min 以内相对湿度快速增加,当饱和度超过 90% 以后,相对湿度的增大速率逐渐减小,在试验进行约 4 000 min 后首先达到饱和;试验进行一段时间后,2 号传感器的相对湿度开始快速增长,但增加速率明显比 1 号传感器小,并在试验进行约 80 000 min 后最终达到饱和状态;3 号和 4 号传感器则在试验进行 20 000 min 以后才开始记录到相对湿度,其值逐渐增大. 从图 2 可以看出,2 号传感器的相对湿

度在试验开始后相对较长的一段时间内保持不变,然后才开始增加,说明水从 1 号传感器渗流到 2 号传感器需要一定的时间;同时,距离进水端越远的湿度传感器记录到的相对湿度随注水时间的曲线斜率逐渐趋缓,即水化过程的速率逐渐降低.

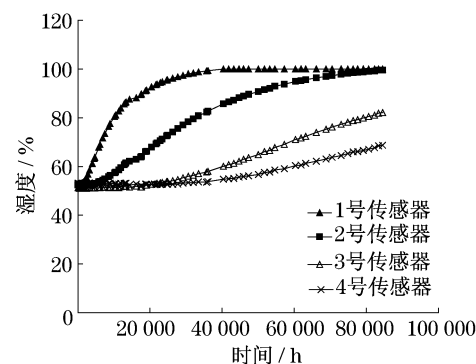


图 2 相对湿度随时间变化曲线

Fig.2 Relative humidity developments with time

非饱和渗透试验在持续约 90 000 min 后结束. 此时,1 号和 2 号传感器均基本达到饱和状态,3 号传感器相对湿度达到 80% 以上,4 号传感器记录到的相对湿度在 60%~70% 之间.

根据 Kelvin 定律,图 2 中的实测相对湿度随时间的变化曲线可以转换成相应测量点上的吸力随注水时间的变化曲线,见图 3.

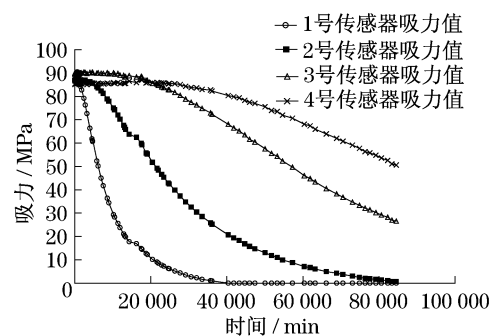


图 3 吸力随时间变化曲线

Fig.3 Suction changes with time

图 3 表明,1 号传感器处的吸力值在试验开始后的 10 000 min 之内随时间迅速减小,10 000 min 之后吸力值的降低速率逐渐减小;2 号传感器处的吸力值在试验开始后出现短暂稳定,之后呈现速率先快后慢的下降特征;3 号和 4 号传感器测得的吸力在试验注水开始到 20 000 min 左右的时间段内降低速率极慢,但在 30 000 min 之后,其吸力降低速率逐渐增大.

试验开始时各传感器处的吸力值均在 80~90

MPa,当试验注水进行到80 000~90 000 min,1号传感器和2号传感器的吸力值减小到零,3号传感器的吸力值减小到20~30 MPa,4号传感器的吸力值减小到50 MPa.这一过程反映出,距离进水端越远的湿度传感器处的吸力随注水时间的曲线斜率逐渐趋缓,即水化过程的速率逐渐降低.

根据式(1)~(4)计算得出试样在不同吸力下的渗透系数,见图4.从图4可以看出,自由膨胀状态下高庙子膨润土的非饱和渗透系数在 $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,主要集中在 $1.0 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近,达到饱和状态时渗透系数最大.

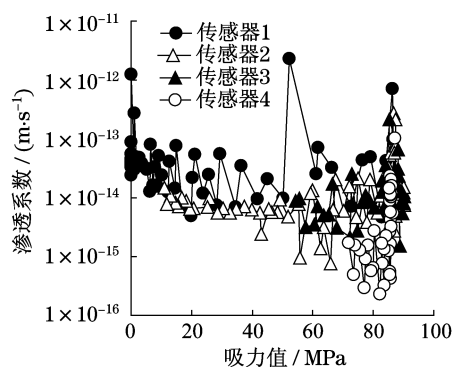


图4 自由膨胀条件下非饱和渗透系数随吸力变化曲线
Fig.4 Unsaturated permeability changes with suction under unconfined conditions

3.2 与侧限条件下非饱和渗透系数的比较

叶为民等人对同样的高庙子膨润土试样进行了侧限条件下的非饱和渗透试验,结果见图5^[4].

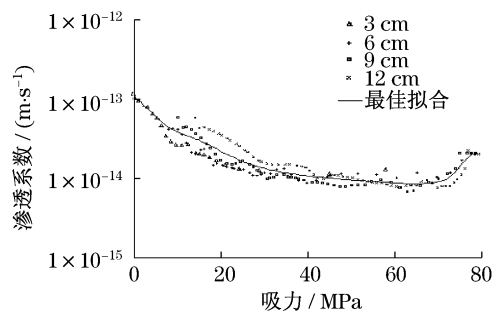


图5 侧限条件下渗透系数随吸力变化曲线
Fig.5 Unsaturated permeability changes with suction under confined conditions

由图5可以看出,侧限条件下高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数约为 $10^{-15} \sim 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.当吸力为65 MPa左右时,渗透系数达到最小;当吸力大于65 MPa时,渗透系数随着吸力的增大而增加;当吸力小于65 MPa时,渗透系数随着吸力的增

加而减小.表明侧限条件下进行非饱和渗透试验时,随着水化过程的进行,试验土样中吸力不断降低,其非饱和渗透系数并不是随着吸力一直减小.叶为民^[4]将这一现象归结为:试验开始阶段高庙子膨润土的饱和度较低,结合水各自呈环状分布,彼此分离;膨润土试样吸水膨胀后,吸力降低,土粒向大孔隙中膨胀,大孔隙逐渐被压缩,孔隙量减少,渗透系数也随之降低;当吸力达到65 MPa左右时,渗透系数达到最小;此后,膨润土试样继续吸水,吸力进一步降低,饱和度不断提高,土粒周围的结合水体积逐步扩展,过水断面的面积也不断增加,所以渗透系数逐渐增大.

对比图4和图5可以发现,相同吸力条件下,自由膨胀条件下的非饱和渗透系数一般高于侧限状态条件下的数值.自由膨胀条件下,高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数随吸力的变化关系除试验刚刚开始阶段有所波动外,渗透系数随吸力升高而降低的趋势不及侧限条件下明显.这可能是由于自由膨胀条件下与侧限条件下的膨润土吸水膨胀过程存在较大差异,侧限条件下的吸水初期大孔隙减少、小孔隙增加的现象不及自由膨胀条件下明显,这一差异造成了2种不同膨胀条件下高压实膨润土表现出了不同的膨胀形式,并最终影响其非饱和渗透特性.

4 结论

采用瞬时截面法获取了自由膨胀条件下高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数.结果表明,自由膨胀条件下干密度为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的高压实高庙子膨润土非饱和渗透系数在 $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,主要集中在 $1.0 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近.

在非饱和渗透试验过程中,距离进水端近的湿度传感器处的吸力值在试验开始后随时间迅速减小,之后降低速率逐渐减小,达到饱和后趋于稳定;距离进水端远的湿度传感器处的吸力随注水时间的增长而降低的速率逐渐趋缓,即水化过程的速率逐渐降低.

与侧限条件下的高压实膨润土非饱和渗透特性相比较,自由膨胀条件下的高庙子膨润土的非饱和渗透系数大于侧限条件下的非饱和渗透系数,且渗透系数随吸力的变化趋势不一样,产生这一差异的原因可能是不同侧限条件下高压实膨润土在水化过程中的膨胀形式不同.

参考文献:

- [1] Daniel D E. Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(6):1125.
- [2] Daniel D E. Permeability test for unsaturated soil [J]. Geotechnical Testing Journal, 1983, 6(2):81.
- [3] Vicol T. Comportement hydraulique et mécanique d'un limon non saturé [D]. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1990.
- [4] 叶为民, 钱丽鑫, 陈宝, 等. 侧限状态下高压实高庙子膨润土非饱和渗透性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1):105. YE Weimin, QIAN Lixin, CHEN Bao, et al. Laboratory test on unsaturated hydraulic conductivity of densely compacted Gaomiaozi Bentonite under confined conditions[J]. Journal of Geotechnique Engineering, 2009, 31(1):105.
- [5] Fleureau J M, Taibi S. Water-air permeability for unsaturated soils[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils UNSAT'95. Paris: A. A. Balkema, Rotterdam, 1995(2):479-484.
- [6] Kunze R J, Kirkham D. Simplified accounting for membrane impedance in capillary conductivity determinations [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1962, 26:421.
- [7] Peck A J. Diffusivity determination by a new outflow method [C]// Symposium of Water in Unsaturated Zone. Wageningen: IASH/AIHS, UNESCO, 1966:191-202.
- [8] Wind G P. Capillary conductivity data estimated by a simple method [C] // Symposium of Water in Unsaturated Zone. Wageningen: IASH/AIHS, UNESCO, 1966:181-191.
- [9] Ed Diny S, Masrouri F, Tisot J P. Détermination de la conductivité hydraulique d'un limon non saturé[J]. Revue Française de Géotechnique, 1993, 62:67.
- [10] Loiseau C. Transferts d'eau et couplages hydromécaniques dans les barrières ouvragées[D]. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Thèse de doctorat, 2001.
- [11] 刘月妙, 徐国庆. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1):44. LIU Yue-miao, XU Guo-qing. Study on compatibility and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository [J]. Uranium Geology, 2001, 17(1):44.

(上接第 1438 页)

(1) 应用逆向工程 CAD 建模技术获取了铁狮子几何模型, 经过数据处理得到了有限元模型并且验证了模型的准确性, 对于其他复杂结构在传统方式无法建模的情况下可以广泛推广。

(2) 风荷载作用下的数值模拟结果可以看出, 风力对铁狮子结构的影响很小。从数值分析的结果以及有限元计算的结果都可以得出右风下的阻力大于左风下的阻力。

(3) 静力计算的结果表明铁狮子本身以及支架的应力都比材料的容许应力小很多, 并且变形最大值也很小, 初步可以判定结构目前处于安全状态。当然这里没有考虑温度、湿度以及腐蚀等长期作用的影响。

(4) 铁狮子作为国家重点保护文物和著名的旅游景点, 现有支架虽不影响安全, 但有碍观瞻。可以考虑将现有支架拆除, 经过计算和分析在铁狮子内部重新设置支架支撑和承托狮子的重量, 使其可以再次“站立”几千年。

参考文献:

- [1] 王世杰. 沧州铁狮子移位保护工程[J]. 古建园林技术, 1998, 3:40. WANG Shijie. The shift protection project of Cangzhou Iron Lion[J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 1998, 3:40.
- [2] 吴坤仪, 李京华, 王敏之. 沧州铁狮的铸造工艺[J]. 文物, 1984, 6:81. WU Kunyi, LI Jinghua, WANG Minzhi. Casting technique of Cangzhou iron lion [J]. Cultural Relics, 1984, 6:81.
- [3] 河北古代建筑保护研究所. 沧州铁狮子力学仿真研究报告[R]. 北京: 北京科技大学, 2001. Protection Institute of Ancient Architecture of Hebei Province. Mechanical simulation report of Cangzhou iron lion[R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2001.
- [4] 吴斌. 大型物体三维形貌数字化测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子学院, 2003. WU Bing. Study on the key technologies of 3D digital measurement of large-scale objects [D]. Tianjin: Tianjin University. College of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering, 2003.