

文章编号: 1000-7598-(2006)10-1767-05

纳米硅水泥土破坏准则研究

王立峰^{1,2}, 夏建中², 朱向荣^{1,3}

(1. 浙江大学 宁波理工学院, 宁波 315104; 2. 浙江科技学院 土木系, 杭州 310012; 3. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027)

摘 要: 首次把纳米硅基氧化物作为水泥土的外掺剂, 在大量三轴试验的基础上研究了纳米硅水泥土在三维应力空间上及子午面的破坏迹线及其特征, 建立了一种 5 参数水泥土的破坏准则。与实测破坏曲面(线)相比, 结果表明该模型基本上反映了水泥土在各种应力下的几何破坏特性。

关 键 词: 纳米; 水泥土; 抗压强度; 破坏准则

中图分类号: TU 471.8

文献标识码: A

Research on failure criterion of nanometer silicon and cement-stabilized soils

WANG Li-feng^{1,2}, XIA Jian-zhong², ZHU Xiang-rong^{1,3}

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315005, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310012, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: On the base of abundant triaxial experiments and nanometer SiO_{2-x} powder first stabilized as agent of cement-stabilized soil (NCS), a general three-dimensional failure criterion for nanometer SiO_{2-x} and cement-stabilized soils (NCS) is proposed; and it includes five parameters. From the result of this comparison, it can be seen that the criterion may be applied throughout the stress range from tensile stresses to high compressive stresses.

Key words: nanometer; cement-stabilized soils; compressive strength; failure criterion

1 引 言

纳米科学是近年来新兴的材料科学。处在纳米尺度($10^{-9} \sim 10^{-7} \text{m}$)的纳米粒子在光学、热学、力学和电学等领域内具有奇特的性质, 如把少许的 Al_2O_3 放进陶瓷中, 其强度已与钢材不相上下。笔者选取了纳米硅基氧化物 SiO_{2-x} , 首次把纳米粉用作作为水泥土的外加剂进行了大量三轴试验, 初步探讨了纳米硅水泥土的变形和破坏特征, 提出了一种三向应力状态下水泥土的破坏准则, 该准则可以表示为应力不变量的函数, 包含 5 个参数, 将其与试验数据的比较, 表明该准则能很好地描述纳米硅水泥土在各种受力状态下的破坏特性。

2 纳米硅水泥土的工程特性

图 1 为纳米硅掺量与不同龄期水泥土抗压强度的关系。由图可见, 纳米硅掺量 a_n 为 $0 \sim 1.5\%$ 时, 水泥土抗压强度随着纳米硅掺量的增加而增长; 掺

量大于 2.2% 时, 水泥土抗压强度随着纳米硅掺量的增加反而降低; 掺量在 $1.5\% \sim 2.2\%$ 之间水泥土抗压强度达到最佳值, 可见以纳米硅作为水泥土的外加剂存在一合理的掺量范围。不同龄期纳米硅对水泥土抗压强度的增强作用十分显著, 经计算, 纳米硅掺量为 $0 \sim 1.5\%$ 时, 每增加一个百分点, 7 d 强度增加了 806 kPa, 提高了 168%; 28 d 强度增加了 1246 kPa, 提高了 173%; 60 d 强度增加了 1 854 kPa, 提高了 270% 左右, 图 1 表明水泥土抗压强度增加最快(即曲率最大)区间在 $0 \sim 0.75\%$ 之间。随着水泥掺量的增加, 各种龄期水泥土的抗压强度 q_u 也增加, 二者基本上呈线性关系(图 2), $q_u = k(a_w - a_{w0})$, 其中 k 和 a_{w0} 为方程的回归系数; a_w 为水泥掺量。以 28 d 为例, 经回归, 系数分别为: $k = 1.8 \times 10^4 \text{ kPa}$, $a_{w0} = 2\%$ (检验值 $F = 213.6 \geq F_{0.01}(1, 14) = 8.9$)。

含水率 ω 对水泥土抗压强度也有明显的影响, 不同龄期水泥土抗压强度 q_u 随着土中含水率的增

收稿日期: 2005-04-11

修改稿收到日期: 2005-07-13

作者简介: 王立峰, 男, 1968 年生, 在读博士后, 讲师, 主要从事软黏土地基处理、岩土工程材料性质和本构理论方面的教学和科研工作。

E-mail: yxgwlf@sohu.com

加而降低(图3)。当含水率小于65%时曲线平缓,超过65%以后曲线变陡,这表明纳米硅水泥土存在某一含水率,当含水率超过该值,纳米硅对水泥土的增强作用削弱,因此实际应用中应尽量避免大于这个值,如28 d时,含水率为55%水泥土的强度的仅比含水率为45%时低5.2%,而含水率为75%的水泥土强度比65%下降了21.3%,7 d和60 d的纳米硅水泥土也存在类似的现象。

纳米硅水泥土抗压强度随着龄期的增加而提高(图4),但在不同时期增加的幅度不同,龄期短,增加的幅度小;龄期长,增加的幅度大,如掺($a_n=0.075\%$)与不掺纳米硅的水泥土的7 d的平均强度分别为291 kPa和275 kPa,仅增幅5.6%,而90 d的平均强度分别为685 kPa和500 kPa,增幅达27%之多。

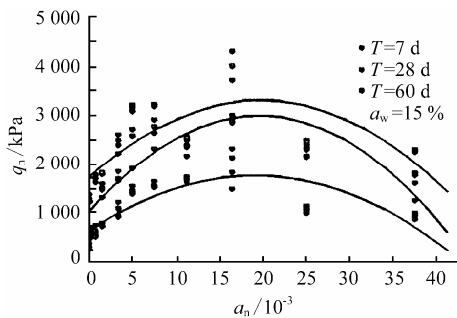


图1 纳米硅掺量对抗压强度的影响
Fig.1 Effect of nanometer silicon content

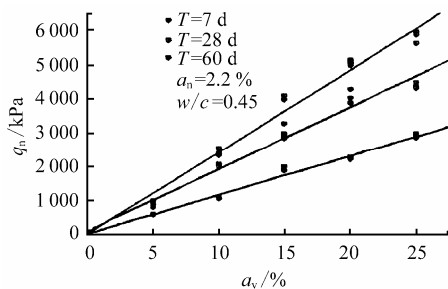


图2 水泥掺量对抗压强度影响
Fig.2 Effect of cement content

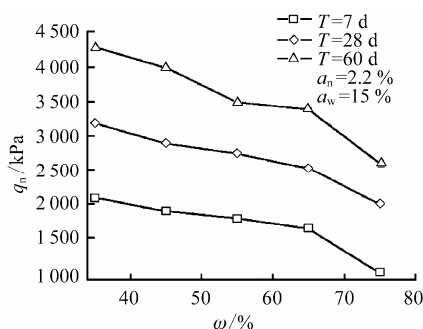


图3 含水率对抗压强度的影响
Fig.3 Effect of moisture content

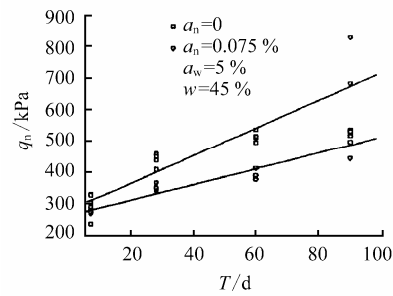


图4 龄期对抗压强度的影响
Fig.4 Effect of curing time

本次试验中纳米硅水泥土的试块共计282个,实测曲线的统计结果表明各种配合比的纳米硅水泥土应力-应变关系呈应变软化型,如图5所示。随着应力的变化,应变发展基本上经历了三个阶段,即弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。

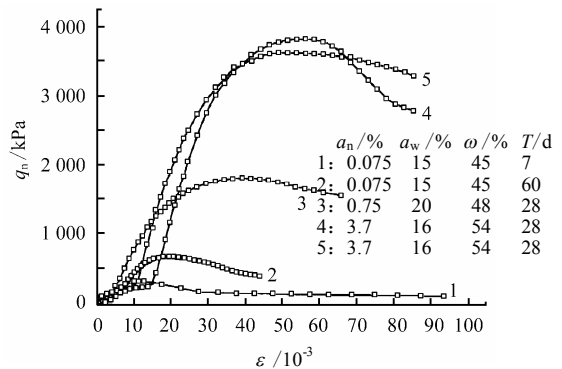


图5 不同配合比水泥土的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curve of various cement-stabilized soils

破坏应变 ε_f 是水泥土应力-应变关系中与 q_u 对应的应变值,它的大小是衡量材料脆性或韧性的重要指标,在工程中具有十分重要的意义。破坏应变有随着抗压强度的增大而减小的趋势,绝大多数集中在0.8%~2.4%之间,见图6。由于纳米硅水泥土应力-应变关系的非线性,使得其模量和泊松比均不是一个常数,而是在应力范围内变化。极限变形模量定义为 σ 从零变化至 q_u 的割线斜率,水泥土的极限变形模量随着 q_u 的提高线性增加,二者的相关性特别显著(图7),无侧限条件下纳米硅水泥土的极限变形模量可近似取 $E_{su}=87q_u$ 。刘焕存^[2]从普通水泥土的试验得出 $E_{su}=75q_u$,可见在相同抗压强度下纳米硅水泥土的极限变形模量高出普通水泥土16%左右,这对以变形控制沉降的地基处理中具有十分重要的意义。对极限变形模量的统计结果表明,极限变形模量随着围压的增加而下降,当 $\sigma_3=0$ 时,平均极限变形模量为43.7 MPa,而 $\sigma_3 \neq 0$ 时,平均极限变形模量为29.9 MPa。

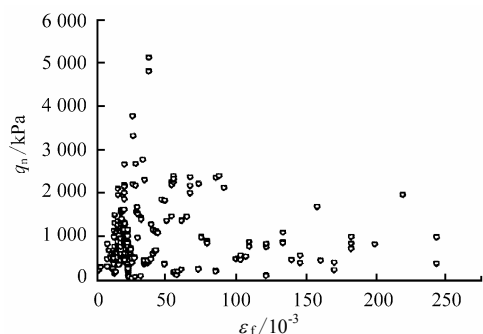


图 6 破坏应变与抗压强度的关系

Fig.6 Relation between failure strain and compressive strength

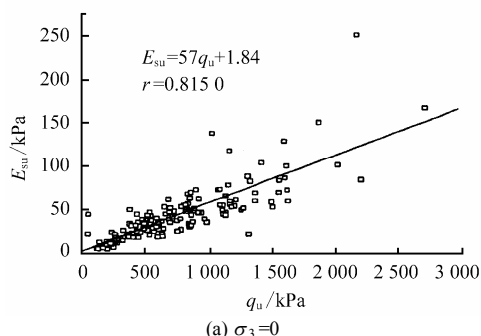
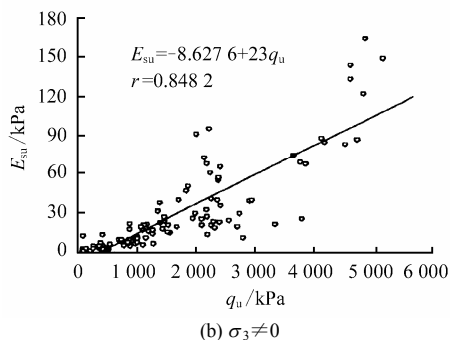
(a) $\sigma_3 = 0$ (b) $\sigma_3 \neq 0$

图 7 抗压强度与极限变形模量的关系

Fig.7 Relation between compressive strength and limit deformation modulus

3 纳米硅水泥土破坏准则的建立

分析纳米硅水泥土三轴试验资料的结果表明, 纳米硅水泥土的破坏曲面有以下特点: (1) 曲面方程与 3 个应力不变量都有关; (2) 曲面外凸性, 如在子午面上为外凸曲线, 如图 8 所示; (3) 曲面(曲线)光滑; (4) 纳米硅水泥土单轴拉压强度不同, 282 个数据的统计资料为 $f_t = 0.2f_c$, 其中 f_t 为水泥土单轴抗压强度值, f_c 为单轴抗压强度值; (5) 子午面上随着正应力的无限增长, 水泥土的拉压强度趋向相等。为拟合纳米硅水泥土的破坏特征, 采用过镇海等提出的幂函数数学模型作为破坏准则, 期望得到理想的效果, 表达式为

$$\tau_0 = a \left(\frac{b - \sigma_0}{c - \sigma_0} \right)^d \quad (1)$$

$$c = c_t (\cos 1.5\theta)^m + c_c (\sin 1.5\theta)^n \quad (2)$$

式中

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{\text{oct}}}{f_c} = \frac{1}{3f_c} (\sigma_{1f} + \sigma_{2f} + \sigma_{3f}) \quad (3)$$

$$\tau_0 = \frac{\tau_{\text{oct}}}{f_c} = \frac{1}{3f_c} \sqrt{(\sigma_{1f} - \sigma_{2f})^2 + (\sigma_{2f} - \sigma_{3f})^2 + (\sigma_{3f} - \sigma_{1f})^2} \quad (4)$$

对以上式中的参数说明如下: 当 $\tau_0 = 0$ 时, $\sigma_0 = b$, 即子午线在静水压力轴上的交点, 所以 b 值为水泥土材料三轴等拉强度与单轴抗压强度的比值: $b = f_{tt} / f_c$ 。偏平面上, 令

$$\left. \begin{aligned} \theta = 0^\circ, c = c_t, f_t = \tau_0 &= a \left(\frac{b - \sigma_0}{c_t - \sigma_0} \right)^d; \\ \theta = 60^\circ, c = c_c, f_c = \tau_0 &= a \left(\frac{b - \sigma_0}{c_c - \sigma_0} \right)^d \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

故 $\frac{f_t}{f_c} = a \left(\frac{c_c - \sigma_0}{c_t - \sigma_0} \right)^d$, 令 $\sigma_0 \rightarrow -\infty$, 则 $f_t / f_c \rightarrow 1$,

则有 $f_t = f_c = \tau_0|_{\sigma_0 \rightarrow -\infty} = a$ 。表明在应力空间中, 随着正(压)应力的无限增大, 水泥土的抗压强度相等, 破坏包络面趋向于半径为 a 的圆柱面; 子午面上, 拉压子午线与静水压力轴平行且距离相等, 这与性状式(5)的特征基本相吻合。

对式(1)中 σ_0 求导, 有

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial \sigma_0} = \frac{ad(b-c)}{(c-\sigma_0)^{d+1}(b-\sigma_0)^{d-1}} \quad (6)$$

当 $0 < d < 1$ 时, $\frac{\partial \tau_0}{\partial \sigma_0} \Big|_{\sigma_0=b} = \infty$, 即曲线在 $\sigma_0 = b$

处的切线垂直静水压力轴, 拉压子午线在该处连续, 应力空间中破坏包络面在顶点处光滑、外凸。

对式(1)中 θ 求导, 有

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial \theta} = -\frac{ad(b-\sigma_0)^{d-1}}{(c-\sigma_0)^{d+1}} \left[nc_c (\sin 1.5\theta)^{n-1} \cos(1.5\theta) - mc_t (\cos 1.5\theta)^{m-1} \sin(1.5\theta) \right] \quad (7)$$

注意到, $\frac{\partial \tau_0}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = \frac{\partial \tau_0}{\partial \theta} \Big|_{\theta=60} = 0$, 因此偏平面上破坏线也是光滑连续的曲线。当 $\theta = 0^\circ$, $c = c_t$, 得如式(5)的拉子午线; $\theta = 60^\circ$, $c = c_c$, 得如式(5)的压子午线。

以上的参数可以满足水泥土破坏包络曲面的主要几何特征, m 和 n 取值为 1.5~2.0, 用以调整偏

平面上包络线的饱满程度。

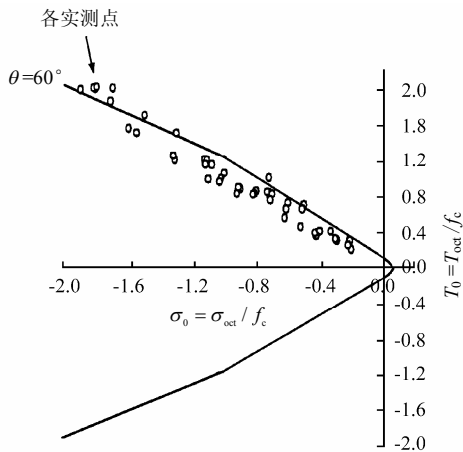


图 8 子午面上的破坏曲线
Fig.8 Failure curves of meridian plane

4 参数确定

纳米硅水泥土破坏准则的 5 个参数, 可以由破坏曲面或拉压子午线上任意的 5 个特征强度确定。令下面各式中水泥土的单轴无侧限抗压强度 f_c 为一个单位, 根据现有的试验数据有,

单轴压缩试验:

$$\theta = 60^\circ, \sigma_0 = -1/3, \tau_0 = \sqrt{2/3} \quad (8)$$

单轴拉伸试验:

$$\theta = 0^\circ, f_c = 0.2f_t, \sigma_0 = 0.2/3, \tau_0 = 0.2 \times \sqrt{2/3} \quad (9)$$

三轴受压:

$$\left. \begin{aligned} \theta = 60^\circ, \sigma_0 = -1.71, \tau_0 = 1.85; \\ \theta = 60^\circ, \sigma_0 = -1.81, \tau_0 = 1.99; \\ \theta = 60^\circ, \sigma_0 = -1.85, \tau_0 = 2.10 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式(8)中 σ_0 、 τ_0 代入到式(1)和式(2), 用迭代法进行数值计算, 解得参数值, 得到纳米水泥土破坏准则为

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 = 8.0 \left(\frac{0.07 - \sigma_0}{c - \sigma_0} \right)^{0.9} \\ c = 13.0 (\cos 1.5\theta)^{1.5} + 7.5 (\sin 1.5\theta)^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)即可画出子午线上的破坏曲线和偏平面上材料的破坏轨迹线, 如图 9 和图 10 所示。在子午平面上, 将理论破坏曲线与实测曲线相比较, 发现二者吻合较好(图 9)。由式(5)可以得到拉、压子午线的八面体应力比值为

$$\frac{\tau_{拉}}{\tau_{压}} = \left(\frac{7.5 - \sigma_0}{13 - \sigma_0} \right)^{0.9} \quad (12)$$

式(12)反映了偏平面上包络线的形状随 σ_0 值的变化情况, 如图 11 所示。当 σ_0 的绝对值由小到大时, 水泥土的拉压强度之比由小到大, 图 11 中的曲线逐渐过渡到圆形, 在三维空间中逐渐演变为半径为 a 的圆柱体。

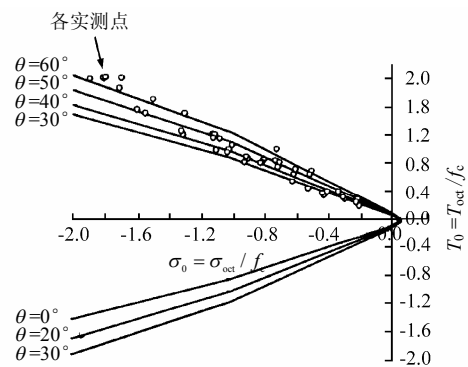


图 9 子午面上不同 θ 角下材料的破坏曲线 (理论与实测)
Fig.9 Various θ failure curves of meridian plane

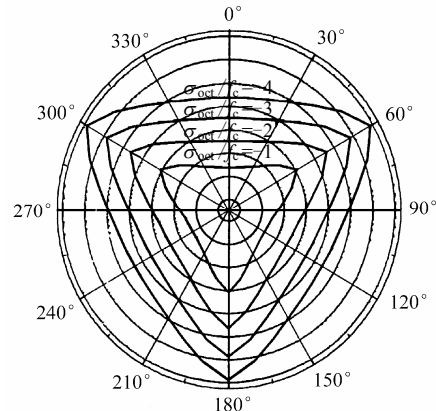


图 10 偏平面上不同静水压力下材料的破坏轨迹线
Fig.10 Failure curves of various hydrostatic pressures

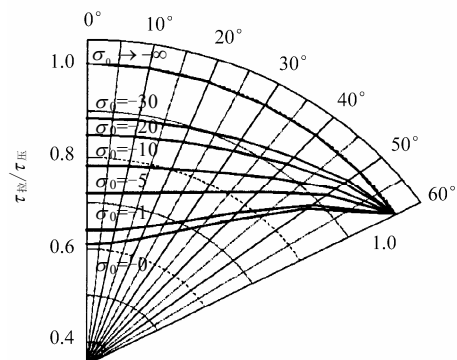


图 11 偏平面上包络线的相对图形
Fig.11 Relative figure of envelope line

5 结 论

建立在试验基础之上的 5 参数破坏模型对于纳米硅水泥土的破坏准具有普通意义, 有以下特点:

(1) 将纳米硅掺入到水泥土中可以显著提高水泥土的强度, 不过纳米硅掺量有一个合理的掺量范围, 超过该含量会降低水泥土强度。

(2) 纳米硅水泥土强度随着龄期增加而增加, 早期增加的幅度小, 后期增加的幅度较大, 随着含水率的增加强度降低。

(3) 5 参数破坏准则基本上符合纳米硅水泥土破坏的空间几何特征, 参数具有明确的物理意义, 计算简单, 便于确定。

(4) 从给出的模型中可以方便地预计各种不同应力组合对材料的影响和破坏情况。

参 考 文 献

- [1] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 朱向荣, 王立峰, 丁同福. 纳米硅水泥土工程特性的实验研究[J]. 岩土工程技术, 2003, (4): 187—192.
ZHU Xiang-rong, WANG Li-feng, DING Tong-fu. Study on engineering properties of nanometer silica and cement-stabilized soil[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2003, (4): 187—192.
- [3] 刘焕存. 夯实水泥土变形特性试验研究[J]. 岩土工程技术, 1997, (1): 20—25.

上接第 1762 页

(3) 改进的动参数法是在频率法的基础上提出来的, 没有频率-初速法的各种因素的影响, 测试精度较高, 值得应用。

参 考 文 献

- [1] 吴世明, 徐攸在. 土力学现状与发展[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 125—131.
WU Shi-ming, XU You-zai. The actuality and development of soil mechanics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(3): 125—131.
- [2] 徐攸在. 动测地基承载力方法中参数的确定[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 15—19.
XU You-zai. Determination of parameters in dynamic testing for foundation bearing capacity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(1): 15—19.
- [3] 王贻荪. 弹性半空间波动理论在土木工程中的若干应用问题及地基承载力的动测法[A]. 基桩与场地检测技术[C]. 刘明贵, 蔡忠理, 余诗刚编. 武汉: 湖北科技

LIU Huan-cun. Experimental study on deformation properties of compacted soil-cement[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 1997, (1): 20—25.

- [4] 王立峰, 朱向荣, 张学文, 等. 纳米硅水泥土屈服特性分析[J]. 科技通报, 2005, (21)3: 327—331.
WANG Li-feng, ZHU Xiang-rong, ZHANG Xue-wen, et al. Experimental analysis of yielding criterion of nanometer silicon and cement soil[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2005, (21)3: 327—331.
- [5] 过镇海. 混凝土的强度和变形—试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [6] 王立峰, 朱向荣, 王陈捷, 等. 纳米硅水泥土本构模型研究[J]. 浙江科技学院学报, 2004, 16(4): 259—264.
WANG Li-feng, ZHU Xiang-rong, WANG Chen-jie, et al. Study on constitutive model of nanometer silicon and cement-stabilized soils[J]. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, 2004, 16(4): 259—264.
- [7] 郑颖人, 沈珠江. 广义塑性理论—岩土塑性力学原理[M]. 重庆: 中国人民解放军后勤工程学院出版社, 1998.
- [8] 张远高, 陆明万. 混凝土的三参数破坏准则[J]. 上海交通大学学报, 1990, 24: 82—88.
ZHANG Yuan-gao, LU Ming-wan. Three-parameters failure criterion for plain concrete[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1990, 24: 82—88.
- [9] Drucker D C, Prager. Soil mechanics and plastic analysis or limit design[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1952, 10: 157—165.
- [10] 梁文选. 动力-参数(频率-初速)法检测碎石桩复合地基承载力的应用[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 79—85.
- [11] 地基及基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 422—429.
- [12] 王锡康, 张华南, 段士伟. 非均匀地基动力影响深度和参振土质量的研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(12): 22—28.
WANG Xi-kang, ZHANG Hua-nan, DUAN Shi-wei. On study of influence depth and inertia of soil for inhomogeneous soils[J]. *The Industrial Construction*, 1999, 29(12): 22—28.
- [13] 尹尚先, 王尚旭. 弹性模量、波速和应力的关系及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 24(增刊): 597—601.
YIN Shang-xian, WANG Shang-xu. Relation of stresses with elastic modulus and wave velocities and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 24(Supp.): 597—601.
- [14] 邵义军, 朱珊. 黏性土的应力应变关系的归一化弹性模量及其应用[J]. 鞍山钢铁学院学报, 1997, 20(4): 42—45.