

纳米硅水泥土本构模型研究

王立峰¹,朱向荣^{2,3},王陈捷⁴,王文军³

(1. 浙江科技学院 土木工程学系,浙江 杭州 310023; 2. 浙江大学 岩土工程研究所,浙江 杭州 310027;
3. 浙江大学 宁波理工学院,浙江 宁波 315005; 4. 浙江省省直机关后勤房地产开发有限公司,浙江 杭州 310007)

摘要:在试验的基础上,以塑性理论为指导,采用相关联的流动法则,假定塑性功硬化规则,推导出纳米硅水泥土材料的弹塑性本构关系;给出了硬化模量的一般形式,可结合试验资料,方便地求出硬化模量。

关键词:纳米硅;水泥土;屈服准则;子午面

中图分类号: TU472.5; TU317.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2004)04-0259-06

本构模型是一种采用数学手段揭示土体应力应变特性的方法。在实际工程中,土体的应力-应变关系十分复杂,具有非线性、弹塑性、黏塑性和各向异性等性状。因此,欲建立一个反映上述各种性状,并与实际相符的本构模型十分不易,一般只能抓住材料的主要性质,利用试验中有限的数据点,采用简化的方法,应用简洁的数学公式,利用尽可能少的具有明确物理意义的参数去描述和刻画材料在试验中反映出来的应力-应变关系特性。建立一个成功的本构关系要注意两点,第一要建立一个能较好地反映土在受力状态下的响应特征函数;第二要充分利用试验结果提供的数据比较容易地确定模型参数。

纳米硅水泥土是把纳米硅粉(作为外加剂)与常规水泥土的各种配料进行均匀搅拌,经一系列物理、化学反应生成的具有一定整体强度和水泥稳定性的混合体系。文献[1~4]对纳米硅水泥土的强度和变形特性进行了深入的分析和探讨。研究表明:纳米硅在增强水泥土强度、改善水泥土工程特性等方面效果显著。王立峰、朱向荣^[2,3]等通过试验研究发现:掺与不掺纳米硅水泥土7 d平均无侧限抗压强度增幅较小,60 d和90 d的增幅在适宜的纳米矿粉掺量下甚至可以成倍增长。并进一步指出,纳米硅增强水泥土存在一合理掺量范围,当纳米硅掺量 $a_n < 2.25\%$,水泥土抗压强度随着纳米硅掺量的增加而增加;当纳米硅掺量 $a_n > 2.25\%$,水泥土强度随着纳米硅掺量的增加而下降。王文军等从微观角度出发,探讨了纳米硅增强水泥土的作用机理^[5]。

近30年来,由于电子计算机技术的飞速发展和日益普及,有限元分析方法的不断完善和丰富,两者强有力的结合为复杂结构的准确分析和合理设计提供了强有力的理论基础和高效的运算手段,因此,针对水泥土材料的非线性、应变软化现象,以试验为基础,运用塑性理论,建立一个准确、合理的水泥土本构关系尤其重要。本文在试验的基础上,应用一定的假设,建立了纳米硅水泥土的弹塑性本构方程,并且在试验室条件下对本构方程进行了检验。

1 理论前提

1.1 屈服准则

纳米硅水泥土的屈服准则根据试验结果,依据一定的假设,可以表示如下(推导过程详见文献[2]):

收稿日期: 2004-06-15

基金项目: 浙江省教育厅科研基金资助项目(20030855)

作者简介: 王立峰(1968—),男,安徽宿州人,博士,讲师,主要从事软黏土地基、岩土工程材料特性和本构关系等方面的理论研究和教学工作。

$$f(\sigma_{ij}) = (2 + k^2)r^2 + 2r^2(1 - k^2)\cos(2\theta + \pi/3) - 3r_i^2 = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \pi/3) \quad (1)$$

式(1)中, $k = \left| \frac{r_t}{r_c} \right|$, r_t 和 r_c 分别为子午面上拉、压曲线在 r 轴上的截距, 由试验确定。对试验结果的整理和分析可知, 拉压曲线分直线形和抛物线形。一般低强度水泥土为直线形, 高强度水泥土为抛物线形, 可由试验结果进行拟合后确定。 r 为 π 平面上极坐标下的向径, θ 为应力与 σ_2 轴在 π 平面上投影轴垂线间的夹角, 即洛德角。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{1}{\sqrt{3}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{-3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{(J_2)^{3/2}} \right) = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{27J_3}{2q^3} \right) \quad (3)$$

式(3)中, J_2, J_3 为应力偏量第二、第三不变量。

k 值的大小反映了水泥土拉、压应力的相对变化情况, 是反映材料特性的重要参数。由等向硬化模型, 后继屈服面可以写成:

$$f(\sigma_{ij}, H_a) = f(\sigma_{ij}) + K = 0 \quad (4)$$

1.2 流动规则

假定在 π 平面上塑性势 $[g(\sigma_{ij}, H_a) = 0]$ 与屈服形状相同, 采用相关联的流动法则, 有

$$g(\sigma_{ij}, H_a) = f(\sigma_{ij}) + K = 0 \quad (5)$$

塑性应变增量可以表示为:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (6)$$

式(6)中, $d\lambda$ 为比例系数, 是塑性功(塑性主应变、塑性体应变等)的函数。

1.3 硬化规律

模型采用塑性功硬化规律

$$K = w^p = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \quad (7)$$

2 本构模型的推导

2.1 弹性应变增量

由广义虎克定律得:

$$d\sigma_{ij} = [D_e] d\epsilon_{ij} \quad (8)$$

$$[D_e] = \frac{E}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & -v & -v & 0 & 0 & 0 \\ -v & 1-v & -v & 0 & 0 & 0 \\ -v & -v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中, $[D_e]$ 为弹性刚度矩阵; E, v 分别为弹性模量和泊松比。

用应力表示应变, 即为

$$d\epsilon_{ij} = [C_e] d\sigma_{ij} \quad (10)$$

$$[C_e] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -v & -v & 0 & 0 & 0 \\ -v & 1 & -v & 0 & 0 & 0 \\ -v & -v & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+v \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中, $[C_e]$ 为弹性柔度矩阵。

2.2 塑性应变

由一致性条件和塑性功硬化规律,对(5)式求微分,结合公式(7)有

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial w^p} dw^p \quad (12)$$

对式(7)两边求微分,把式(6)代入得

$$dK = dw^p = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (13)$$

将式(13)代入到式(12)得

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial w^p} \cdot d\lambda \cdot \sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = 0 \quad (14)$$

$$d\lambda = - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}}{\frac{\partial f}{\partial w^p} \{\sigma_{ij}\}^T \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}} = \frac{1}{A} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \quad (15)$$

$$A = \frac{\partial f}{\partial w^p} \{\sigma_{ij}\}^T \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (16)$$

式中, A 为硬化模量,因此,塑性应变增量为:

$$d\epsilon_{ij}^p = - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}}{\frac{\partial f}{\partial w^p} \sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}} \quad (17)$$

2.3 弹塑性应力 - 应变关系

将 $d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p$ 代入到式(8)中有

$$d\sigma_{ij} = [D_e](d\epsilon_{ij} - d\epsilon_{ij}^p) = [D_e] \left(d\epsilon_{ij} - d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right) \quad (18)$$

将式(18)代入到式(14),有

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} [D_e] d\epsilon_{ij} - \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} [D_e] d\epsilon_{ij}^p + d\lambda \frac{\partial f}{\partial w^p} \sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = 0 \quad (19)$$

再将式(6)、式(7)和式(8)代入到式(19)得:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} [D_e] d\epsilon_{ij} - d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} [D_e] \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} - A d\lambda = 0 \quad (20)$$

整理得:

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} [D_e] d\epsilon_{ij}}{A + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} [D_e] \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}} \quad (21)$$

将式(21)代回到式(18),并写成矩阵形式:

$$\{d\sigma_{ij}\} = \left\{ [D_e] - \frac{[D_e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D_e]}{A + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right\}} \right\} \{d\epsilon\} \quad (22)$$

$$[D_{ep}] = [D_e] - \frac{[D_e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D_e]}{A + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right\}} \quad (23)$$

式(22)即为纳米硅水泥土的弹塑性本构方程, $[D_{ep}]$ 为弹塑性刚度矩阵。

3 屈服函数对应力偏导数的确定

因 $r^2 = 2J_2$, 故式(1)可写成

$$f(\sigma_{ij}) = 2J_2(2 + k^2) + 4J_2(1 - k^2)\cos(2\theta + \pi/3) - 3r_i^2 = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \pi/3) \quad (24)$$

对式(24)两边求导, 有

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial J_2} \frac{\partial J_2}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial J_3} \frac{\partial J_3}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial r_i} \frac{\partial r_i}{\partial \sigma_{ij}} = C_1 \frac{\partial k}{\partial \sigma_{ij}} + C_2 \frac{\partial J_2}{\partial \sigma_{ij}} + C_3 \frac{\partial J_3}{\partial \sigma_{ij}} + C_4 \frac{\partial r_i}{\partial \sigma_{ij}} \quad (25)$$

式(25)中

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 4kJ_2 \left[1 - 2\cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right] \\ C_2 &= 2(2 + k^2) + 4(1 - k^2)\cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right) - 8J_2(1 - k^2)\sin\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right) \frac{\partial \theta}{\partial J_2} \\ C_3 &= -8J_2(1 - K^2)\sin\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right) \frac{\partial \theta}{\partial J_3} \\ C_4 &= -6r_i \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式(26)中

$$\begin{aligned} k &= \frac{a_2\zeta + b_2}{a_1\zeta + b_1} = \frac{a_2\sigma_m + \sqrt{3}b_2}{a_1\sigma_m + \sqrt{3}b_1} \\ \frac{\partial \theta}{\partial J_2} &= \frac{\partial \left[\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \right]}{\partial J_2} = -\frac{3\sqrt{3}}{4\cos(3\theta)} \cdot \frac{1}{J_2^{5/2}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial J_3} &= \frac{\partial \left[\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \right]}{\partial J_3} = -\frac{\sqrt{3}}{2J_3^3 \cos(3\theta)} \end{aligned}$$

3.1 直线形拉、压曲线

$$k = \frac{a_2\zeta + b_2}{a_1\zeta + b_1} = \frac{a_2\sigma_m + \sqrt{3}b_2}{a_1\sigma_m + \sqrt{3}b_1} \quad (27)$$

式(27)中, σ_m 为平均正应力, $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, $\sigma_1\sigma_2\sigma_3$ 为三维空间中正应力的三个分量;

$$\frac{\partial k}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{a_2 - a_1}{3(a_1\sigma_m + \sqrt{3}b_1)^2} [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (28)$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial \sigma_{ij}} = [S_x \quad S_y \quad S_z \quad 2\tau_{yz} \quad 2\tau_{zx} \quad 2\tau_{xy}]^T \quad (29)$$

$$\frac{\partial J_3}{\partial \sigma_{ij}} = \left\{ \begin{array}{l} S_y S_z - \tau_{yz}^2 \\ S_z S_x - \tau_{zx}^2 \\ S_x S_y - \tau_{xy}^2 \\ 2(\tau_{xy}\tau_{xz} - S_x\tau_{yz}) \\ 2(\tau_{yz}\tau_{xy} - S_y\tau_{zx}) \\ 2(\tau_{zx}\tau_{yz} - S_z\tau_{xy}) \end{array} \right\} + \frac{1}{3} J_2 \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \quad (30)$$

$$\frac{\partial r_i}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial(a_2\zeta + b_2)}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{a_2}{3\sqrt{3}} [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (31)$$

式(29)中, S_x, S_y, S_z 为偏应力分量; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为剪应力分量。

3.2 抛物线形拉、压曲线

因

$$k = \left| \frac{r_t}{r_c} \right|$$

两边求导有:

$$\frac{\partial k}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{r_c \frac{\partial r_t}{\partial \sigma_{ij}} - r_t \frac{\partial r_c}{\partial \sigma_{ij}}}{r_c^2} \quad (32)$$

由压曲线方程 $\zeta = a_1 r_c^2 + b_1 r_c + c_1$ 有:

$$\sigma_m = \sqrt{3} (a_1 r_c^2 + b_1 r_c + c_1) \quad (33)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r_c}{\partial \sigma_{ij}} &= \frac{1}{3 \sqrt{3} (2a_1 r_c + b_1)} \\ \frac{\partial r_c}{\partial \sigma_{ij}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} (i=j) \\ (i \neq j) \end{aligned} \quad (34)$$

同理有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r_t}{\partial \sigma_{ij}} &= \frac{1}{3 \sqrt{3} (2a_2 r_c + b_1)} \\ \frac{\partial r_c}{\partial \sigma_{ij}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} (i=j) \\ (i \neq j) \end{aligned} \quad (35)$$

将式(34)和式(35)代入到式(33),并整理得:

$$\frac{\partial r_c}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{3 \sqrt{3} r_c} \left[\frac{1}{2a_2 r_t + b_2} - \frac{r_t}{(2a_1 r_c + b_1) r_c} \right] [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (36)$$

式(36)中, $a_i, b_i (i=1,2,3)$ 为拉压曲线系数, r_t, r_c 为拉压曲线在 r 轴上的截矩。 $\frac{\partial J_2}{\partial \sigma_{ij}}, \frac{\partial J_3}{\partial \sigma_{ij}}$ 由式(29)和式(30)确定。

4 硬化模量 A 的确定

因

$$A = - \frac{\partial f}{\partial w^p} \sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (37)$$

而

$$w^p = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p = \int (\sigma_x d\epsilon_x^p + \sigma_y d\epsilon_y^p + \sigma_z d\epsilon_z^p + \tau_{xy} d\gamma_{xy}^p + \tau_{yz} d\gamma_{yz}^p + \tau_{zx} d\gamma_{zx}^p) \quad (38)$$

常规三轴应力-应变曲线上某点P,分别计算曲线上与P点相对应的屈服函数值 $f(\sigma_{ij})$ 和塑性功 w^p ,作图 $f(\sigma_{ij}) \sim w^p$,拟合曲线后,可求得 $\frac{\partial f}{\partial w^p}$ 。有限元计算过程中,应力状态不同, $\frac{\partial f}{\partial w^p}$ 的数值不同。每加载一步即应力状态发生改变时,先计算总的塑性功 w^p ,代入到 $\frac{\partial f}{\partial w^p}$ 的表达式中,然后求出硬化模量 A ,参加数值计算。

5 解法举例

以配合比号为1-13(60)的水泥土材料为例,拉压曲线在子午面上的图形如图1所示。水泥掺量 $a_w = 15\%$, 纳米硅掺量 $a_n = 0.75\%$, 龄期 $T = 60$ d, 水灰比 $w/c = 0.45$, 应力-应变关系曲线如图2所示,图1中拉压曲线的方程分别为:

$$\text{压曲线为:} \quad r_c = 0.918\zeta + 117.4 \quad (39)$$

$$\text{拉曲线为:} \quad r_t = -0.63\zeta - 84.3 \quad (40)$$

$$k = \left| \frac{r_c}{r_t} \right| = \left| \frac{0.918\zeta + 117.4}{-0.63\zeta - 84.3} \right|$$

而

$$\zeta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sqrt{3}$$

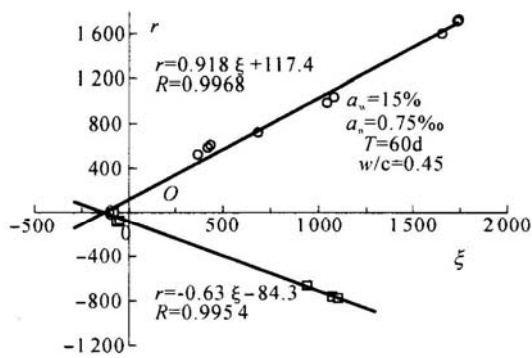


图 1 1-13(60) 子午线图

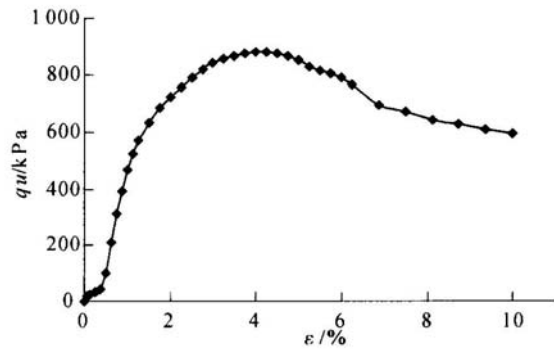


图 2 1-13(60) 水泥土应力-应变关系曲线

所以

$$k = \left| \frac{1.59(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + 117.4}{1.09(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + 84.3} \right| \quad (41)$$

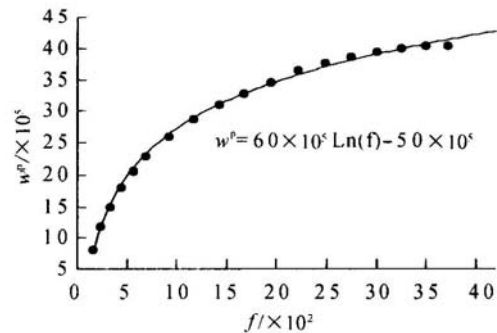
将公式(41)、(2)、(3)和(40)代入到公式(1)中,可以得到屈服函数值 $f(\sigma_{ij})$, 塑性功 w^p 可以由式(38)得到。经计算, $f(\sigma_{ij}) \sim w^p$ 的关系散点如图 3 所示, 图中曲线为散点的拟合曲线, 方程为:

$$w^p = 6\,000\,000 \ln[f(\sigma_{ij})] - 5\,000\,000 \quad (42)$$

因此

$$\frac{\partial f}{\partial w^p} = \frac{1}{6\,000\,000} e^{\frac{w^p + 5\,000\,000}{6\,000\,000}} \quad (43)$$

在某一应力状态下,可先计算 w^p , 代入到上式即可求出 $\frac{\partial f}{\partial w^p}$ 。

图 3 1-13(60) $f(\sigma_{ij}) \sim w^p$ 的关系曲线

6 小 结

(1) 以塑性理论为指导,采用相关联的流动法则,假定塑性功硬化规则,在屈服准则的基础上,推导出纳米硅水泥土材料的弹塑性本构关系。

(2) 给出了硬化模量的一般形式,结合试验资料,推导出纳米硅水泥土材料的 $f(\sigma_{ij}) \sim w^p$ 关系曲线,可方便地求出硬化模量。

参考文献:

- [1] 王立峰,朱向荣. 水泥土损伤模型的试验研究[J]. 科技通报, 2003, 19(2): 136-139.
- [2] 王立峰. 纳米硅水泥土工程特性及本构模型研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2003.
- [3] 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.
- [4] 王立峰,朱向荣,王文军. 单轴受压下纳米水泥土本构模型的试验研究[A]. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 2003. 275-278.
- [5] 王文军,朱向荣. 纳米硅粉水泥土的工程特性及固化机理初探[J]. 地质与勘探, 2003, 9(S0): 101-104.
- [6] 刘西拉,籍孝广. 混凝土本构模型的研究[J]. 土木工程学报, 1989, 22(3): 55-62.
- [7] 刘元雪,郑颖人. 应力洛德角变化影响的研究[J]. 水利学报, 1999, (8): 6-10.
- [8] 鲁祖统,龚晓南. 关于稳定材料屈服条件在 π 平面内的屈服曲线存在内外包络线的证明[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 1-5.
- [9] 钱 春,钱在兹. 混凝土二向应力强度计算及特性分析[J]. 浙江大学学报, 1996, 50(6): 642-651.
- [10] 钱在兹,钱 春. 混凝土复杂受力状态下的统一强度准则[J]. 土木工程学报, 1996, 20(2): 46-55.
- [11] 郑颖人,沈珠江,龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

(下转第 269 页)

(上接第 264 页)

Study on elastic-plasticity constitutive model of soils stabilized with cement and nanometer silicon

WANG Li-feng¹, ZHU Xiang-rong^{2,3}, WANG Chen-jie⁴, WANG Wen-jun³

(1. Dept. of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315005, China;

4. Zhejiang provincial logistics real estate Co., LTD, Hangzhou 310007, China)

Abstract: On the basis of experiments, an elastic-plasticity constitutive model for the NCSS (nanometer silicon and cement-stabilized soil) is deduced by using the yield criterion, related flow rules and plastic work hardening rules. Proposed hardening modulus can be conveniently obtained according to testing data.

Key words: nanometer silicon; cement-stabilized soil; yield criterion; meridian plane