

考虑格栅流变性的加筋挡土墙格栅等效应力计算

肖成志¹ 栾茂田^{1,2} 杨庆^{1,2}

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

【摘要】 将土工格栅加筋土作为宏观均匀的各向异性材料, 在考虑格栅与土之间变形协调、土为满足 Mohr-Coulomb 破坏准则的理想弹塑性材料及格栅为粘弹性材料的条件下, 假定格栅加筋土宏观应力由土和筋材两种微观应力所组成, 通过引入格栅的流变模型, 建立了筋土复合体中格栅的等效应力计算方法, 并将结果与未考虑流变时的格栅应力法进行了对比分析。

【关键字】 土工格栅; 加筋土; 弹塑性; 粘弹性; 流变模型

【中图分类号】 TU 476.4

Equivalent Stress Calculation Considering Rheology of Geogrids for Reinforced Walls

Xiao Chengzhi¹ Luan Maotian^{1,2} Yang Qing^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

【Abstract】 The geogrid-reinforced soil mass is regarded as a macro-homogeneity and anisotropy materials composed of the elasto-plastic soil and visco-elastic geogrids. The soil in the composite mass is of elasto-plastic behavior and its strength obeys the Mohr-Coulomb's criterion of failure while the creep behavior of geogrids is represented by rheological model with a series of a Kelvin model and an elastic spring. The equivalent stress calculation of geogrids is established on the basis of fundamental of mechanics of composite material. The results considering rheology are compared with results gained by method with non-rheology.

【Key Words】 geogrids; reinforced soil; elasto-plasticity; visco-elasticity; rheological model

0 引言

土工格栅在加筋挡土墙结构与加筋土坡工程中得到了广泛的应用, 通过在土中埋入格栅起到限制土体侧向位移, 增强土体的整体性, 从而提高了土体抗剪强度^[1]。在格栅加筋结构中, 加筋土由格栅与土两部分共同构成, 可以看作为各向异性的均质复合材料。目前在格栅加筋结构工作机理分析和加筋土设计中, 极限平衡分析法和有限元数值分析方法两种方法得到了重视和应用^[2,3]。极限平衡分析方法只能大致地估计筋材所提供的抗力, 在此基础上利用极限平衡原理估算加筋土体的安全系数, 尽管这种方法简便实用, 但无法评价筋材与土各自的应力、应变和结构的变形等。在有限元数值分析方法中, 对于加筋土有两种考虑方式, 一种方式是不考虑筋材与土的相互作用特性, 将加筋土等效为一种复合材料, 并通过一定的试验确定相应的等效参数; 另

一种方式考虑筋材—土的相互作用特性, 对于筋—土界面设置特殊的有限元模式, 通过接触面试验确定其中的参数, 然后采用有限元方法计算土中的应力与变形、筋材中的受力与变形状态、界面的接触、脱离、粘结和滑移特性。尽管这种方法在理论上具有一定的合理性, 但是其中界面特性参数的选择往往具有一定的人为任意性, 数值计算易出现不稳定性。鉴于当前有限元方法在分析加筋挡土墙中所出现的一些问题, 杨(Yang, 1972)最先提出了加筋“等效应力法”的概念^[4], 即把加筋土中筋材的作用等效为分布在筋材长度方向、施加于筋材周边土体上的附加应力, 在有限元计算中, 仅将其作为作用在土体单元上的等效荷载来进行处理, 无需另外模拟筋材本身的特殊单元。但是这种方法的关键问题是合理地确定等效附加应力。对此, 介玉新、李广信等^[5,6]进行过进一步的探索。但目前尚未考虑长期

基金项目: 国家教育部跨世纪优秀人才培养计划研究基金项目资助(教技函[1999]2号)

作者简介: 肖成志, 1976 生, 男, 汉族, 湖北监利人, 岩土工程专业博士研究生, 主要从事土工加筋设计理论、岩土工程数值分析等方面的研究。E-Mail: xiaochengzhi2@sina.com

受力过程中筋材的流变性。因此,本文考虑格栅的流变性,将加筋土体看成宏观上均匀的复合材料,分析了格栅加筋挡土墙的格栅等效应力的计算方法,并分析了土体强度参数及格栅加筋层数的变化对格栅加筋等效应力的影响,结果与未考虑格栅流变性的计算方法对比表明是正确可行的。

1 等效应力计算简单回顾

Yang 在分析多层加筋土的破坏,最先将筋材的作用当成附加周围压力来处理,并利用试验验证土体在加筋前后的内摩擦角几乎相同,只是增加粘聚力 c (见图 1), 加筋前后强度包线相平行,并由此在试验基础上给出三轴试验中破坏时附加围压的增量与粘聚力增量的关系为: $\Delta\sigma_{3f} = 2\Delta c \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 。当筋材水平布置时有 $\Delta c = R_f \sqrt{K_p}/2\Delta h$, 其中 Δh 为格栅加筋层间距, R_f 为筋材破坏时筋材单位宽度上受的力,即拉断强度。

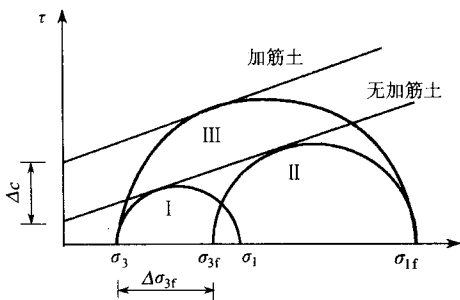


图 1 加筋土试样的极限应力圆

显然由于该方法主要针对加筋土的极限平衡状态,而对于加筋挡土墙结构而言,其本身并未达到极限状态,因而如何将这一概念将以引伸并应用于普通的加筋结构中成为研究的重点。我国学者介玉新、李广信等^[5]在此基础上对其进行引伸,在加筋土的应力应变关系中成功介入筋材等效的附加应力法,并给出模拟筋材所等效的附加应力为:

$$\Delta\sigma = \frac{R}{\Delta h} = \frac{f(|\epsilon_g|)}{\Delta h} = \frac{f(a|\epsilon_g|)}{\Delta h} \quad (1)$$

式中: a 为筋中应变与土单元沿筋方向上应变的比例关系,当 $a=1$ 时,即考虑筋与土的变形协调,否则考虑筋与土之间的相互错动。因此获得附加等效应力的关键是获得筋材在土中的应力应变关系。李广信、陈伦等^[9]人针对土工织物和纤维土进行过相关的试验研究,并获得一些有益的结果。

2 考虑格栅流变的应力应变关系确定

2.1 基本假定

1) 假定加筋土是宏观均匀的各向异性复合材料,加筋土的宏观应力 σ_{ij} 由筋材应力 σ_{ij}^r 与周围土体

应力 σ_{ij}^s 所组成,并保持宏观应力不变(见图 2)。将加筋体中土当作弹塑性材料,为考虑格栅的流变特性,将筋材即土工格栅看作粘弹性材料。

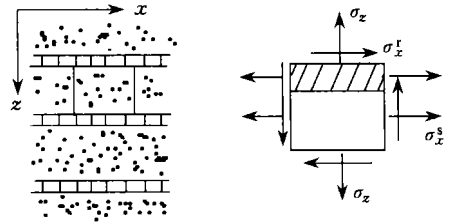


图 2 复合材料宏观与微观应力关系示意图

2) 假定挡土墙极限状态时剪切破坏面与朗肯 (Rankine) 土压力理论中的滑动面相同,即与水平方向之间夹角为 $45^\circ + \varphi/2$;在潜在滑动面内的土体达到了塑性极限平衡状态。

3) 土与格栅之间处于完全粘结状态而没有相对滑动。

2.2 格栅的流变分析

土工格栅作为一种高分子聚合物,在一定温度和受力状态下不可避免的表现出一定的流变特性。实践证明,埋入土体中的格栅温度变化不大,因而在分析格栅加筋挡土墙结构时,主要分析其在受拉状态下的流变性。土工格栅在较低应力下表现出一级和二级衰减的蠕变特性(见图 3)。因此其流变特性可近似地采用弹簧和 Kelvin 体的串联而成的三参数线固体模型来表示^[7]。

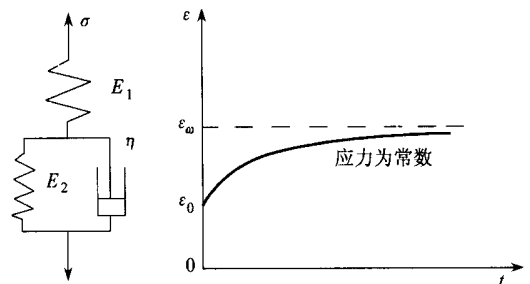


图 3 土工格栅流变的三参数模型及其蠕变曲线

在一维情况下,当采用三参数模型时,土工格栅的粘弹性本构方程为

$$\frac{1}{E_1} \left[\frac{d}{dt} + \frac{E_1 + E_2}{\eta} \right] R = \left[\frac{d}{dt} + \frac{E_2}{\eta} \right] \epsilon \quad (2)$$

式中: R 、 ϵ 分别为土工格栅单向应力(即单位宽度上所受的拉力)及相应的应变; E_1 、 E_2 分别为弹簧的刚度系数; η 为粘性阻尼系数或粘滞系数; t 为蠕变时间。

2.3 加筋土复合材料分析

根据假定,加筋土复合材料宏观应力和微观应

力存在如下关系式

$$\sigma_{ij} = (1-n)\sigma_{ij}^s + n\sigma_{ij}^r \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = (1-n)\varepsilon_{ij}^s + \varepsilon_{ij}^r \quad (4)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^s = \sigma_z^r \quad (5)$$

$$n\sigma_x^r = R/\Delta h \quad (6)$$

式中: $n = e/\Delta h$, n 为加筋土中体积含筋率, 即格栅所占的体积比, e 、 Δh 分别为格栅的厚度和格栅层间距(见图4)。

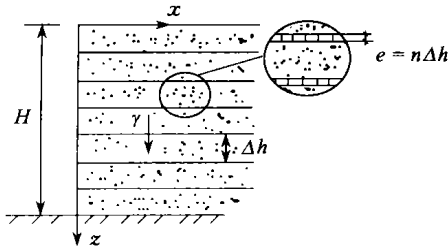


图4 格栅加筋挡土墙示意图

另外在筋材与土处于完全粘结且不考虑格栅在厚度方向的压缩和弯曲变形时, 格栅、周围土与加筋土复合体的宏观应变和微观应变为

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^s = \varepsilon_x^r \quad (7)$$

$$\varepsilon_z \cong \varepsilon_z^s \quad (8)$$

在平面应变条件下, 当土处于弹性阶段而格栅为粘弹性材料时, 根据上述关系, 并利用广义 Hooke 定律, 得到

$$\varepsilon_x^s = \frac{1+\mu_s}{E_s} [(1-\mu_s)\sigma_x^s - \mu_s\sigma_z^s] \quad (9)$$

$$\varepsilon_z^s = \frac{1+\mu_s}{E_s} [(1-\mu_s)\sigma_z^s - \mu_s\sigma_x^s] \quad (10)$$

式中: E_s 与 μ_s 分别为土的弹性模量和泊松比。将式(3)~式(8)代入式(9), 并忽略微量后整理得:

$$\varepsilon_x = \frac{1+\mu_s}{E_s} [(1-\mu_s)\sigma_x - \mu_s\sigma_z] - \frac{(1-\mu_s^2)}{E_s\Delta h} R \quad (11)$$

对于高密度聚乙烯土工格栅, 一般具有较高的强度, 为简化分析, 这里仅考虑格栅单向受力条件下的蠕变特性, 将式(11)代入式(2), 得到

$$\frac{dR}{dt} + kR = p \quad (12)$$

其中

$$k = \frac{E_s + E_2(1 + AE_1)}{\eta(1 + AE_1)}; \quad A = \frac{1 - \mu_s^2}{E_s \Delta h}$$

$$p = \frac{E_1 E_2 (1 + \mu_s)}{\eta E_2 (1 + AE_1)} [(1 - \mu_s)\sigma_x - \mu_s\sigma_z]$$

假定格栅的初始应力为 R_0 , 求解微分方程(12), 得到

$$R = \left[R_0 - \frac{p}{k} \right] \exp(-kt) + \frac{p}{k} \quad (0 < t < T_p) \quad (13)$$

式中: T_p 为土体塑性到达时间, h 。

为了求得土体塑性到达时间, 利用希汉(P. De. Buhan)^[8] 采用的加筋土复合材料破坏的 Mohr-Coulomb 准则, 即

$$[(\sigma_z - \sigma_x^s)^2 + 4\tau^2]^{1/2} \leq (\sigma_z + \sigma_x^s) \sin \varphi \quad (14)$$

当考虑 σ_z 、 σ_x^s 为主应力时, 式(14)可以写成

$$f = (\sigma_z - \sigma_x^s) - (\sigma_z + \sigma_x^s) \sin \varphi \leq 0 \quad (15)$$

即可以得到

$$\sigma_x^s \geq \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_z = \Phi \quad (16)$$

当土体开始进入塑性状态临界状态即土的弹性阶段的结束时, 将式(16)取等式代入式(13)可以解得土开始进入塑性状态所需要的时间 T_p 为

$$T_p = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{1}{R_0 - p/\alpha} \left[(\sigma_x - \Phi) \Delta h - \frac{p}{\alpha} \right] \right\} \quad (17)$$

当土进入塑性阶段时, 利用与破坏条件相关联的流动法则, 并将 Mohr-Coulomb 破坏准则中的破坏函数即式(14)代入流动法则, 可得

$$-[\sigma_z(1 + \sin^2 \varphi) - \sigma_x^s \cos^2 \varphi] d\sigma_x^s + [\sigma_z \cos^2 \varphi - \sigma_x^s(1 + \sin^2 \varphi)] d\sigma_z + 4\tau d\tau = 0 \quad (18)$$

在假定加筋复合材料的宏观应力保持不变时有 $d\sigma_z = d\sigma_x = d\tau = 0$ 成立, 又宏观与微观应力间的关系可得 $d\sigma_x^s = -\frac{dR}{\Delta h}$, 将其代入式(18)可得

$$[\sigma_z(1 + \sin^2 \varphi) - \sigma_x^s \cos^2 \varphi] dR = 0 \quad (19)$$

该式的解答为

$$dR = 0 \text{ 或 } \sigma_z(1 + \sin^2 \varphi) - \sigma_x^s \cos^2 \varphi = 0$$

由上式可知当土体进入塑性阶段后, 格栅的微观应力保持为常数, 即 R 为常数, 由此可以认为当土体进入塑性阶段后, 筋材作用的等效附加应力可以认为是保持不变的。

因此当考虑格栅流变特性时, 根据上面推导, 在计算格栅加筋作用的等效粘聚力时, 格栅加筋的应力应变关系可以用式(13)来进行分析计算。显然, 通过不考虑格栅流变的等效应力的计算式及式(13)可以得到, 格栅加筋的等效应力大小不仅与所用筋材的抗拉强度、加筋层间距和土的内摩擦角有关, 而且还随时间的变化而变化。

3 格栅加筋挡土墙的等效附加应力计算

以格栅加筋挡土墙为例进行分析(见图5), 挡土墙高为 6 m, 加筋土工格栅长 L 为 6 m, 土工格栅的层间距为 0.75 m, 填土的重度为 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, 侧向土压力系数为 $K_0 = 0.4$, 土体的内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ 。按照 Rankine 土压力理论, 理论上滑移面与竖

向之间的倾角 α 为 30° , 利用铁摩辛柯 (Timoshenko) 等^[10] 针对给定问题边界条件及控制方程所提出的复合材料宏观应力计算公式

$$\sigma_z = \gamma z - \frac{K_0 \gamma z}{4c^3} (x-b) \left[z^2 - 2(x-b)^2 + \frac{6}{5} b^2 \right]$$

$$\sigma_x = K_0 \gamma z \left[0.5 - \frac{(x-b)^2}{4b^3} + \frac{3(x-b)}{4b} \right]$$

$$\tau = -\frac{K_0 \gamma x}{4b^3} (2b-x) \left\{ 1.5z^2 - 0.5[(x-b)^2 + 1.6b^2] \right\}$$

式中: $b = 1/2L$ 。

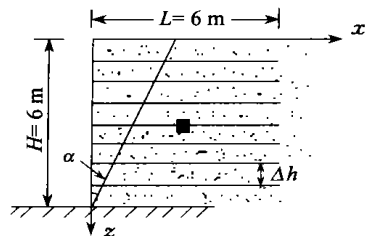


图5 格栅加筋挡土墙示例图

根据上面的式子求出加筋挡土墙后格栅加筋复合体的宏观应力后, 于是可以借助于式(13) 求出格栅加筋复合体中格栅的应力, 进而可以进行考虑格栅流变特性的加筋等效应力计算, 其考虑格栅流变性的加筋等效应力的计算式为

$$\sigma_{eq} = \left\{ \left(R_0 - \frac{p}{k} \right) \exp(-kt) + \frac{p}{k} \right\} \Delta h$$

式中: σ_{eq} 为等效应力, 其它符号与上同。该式适用于格栅—土相互无滑动的情况, 即公式(1)中提到当 $a = 1$ 的考虑筋与土的变形协调时的情形, 而且计算时不必求出应变, 方便计算。

按照上述分析方法对图5中的格栅加筋挡土墙进行了计算, 计算所得到的各层格栅沿其长度方向的等效应力分布见图6。由图6可知, 各层格栅的等效应力沿长度方向具有相同的分布形式与变化趋势, 位于破坏楔体之内的部分格栅中应力较大, 而位于楔体之外的部分格栅中等等效应力沿长度方向近似地呈现为直线分布。在离开墙面约4m左右处, 格栅内应力趋于0, 说明应力未能传递到格栅的末端, 说明格栅发挥作用的有效长度是有限的, 从受力角度看格栅并不是全长发挥其加筋作用。

为了研究分析土的内摩擦角和格栅层间距对格栅加筋挡土墙中格栅等效应力的影响, 以深度为3m处的典型格栅层与土层为例, 分别针对土的内摩擦角 $\varphi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 及格栅层间距为0.25m, 0.5m, 0.75m, 1m等情况进行了分析, 计算结果见图7和图8。由图7和图8可见, 土的内摩擦角

和格栅层间距的变化对土和格栅的等效应力的分布形式几乎不产生影响, 但对等效应力的大小具有显著影响。在宏观应力保持不变的情况下, 随着土的内摩擦角增大, 格栅中的等效应力减少, 而且格栅发挥作用的有效长度也呈现减小趋势, 表明土的抗剪强度在挡土墙稳定性发挥主要作用, 而加筋挡土墙结构中格栅的作用在减弱。图7的计算结果清楚地表明, 当格栅的层间距加大时, 即对于同样高度的加筋挡土墙, 加筋层减少, 为了维持挡土墙的整体稳定性, 势必需要格栅提供更大的拉力。

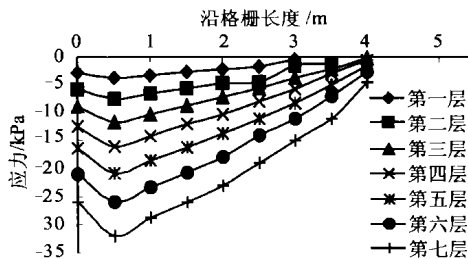


图6 挡土墙不同深度处的格栅中沿长度方向的等效应力分布

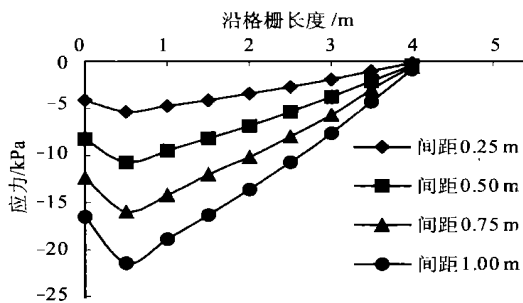


图7 格栅层间距对格栅等效应力分布的影响

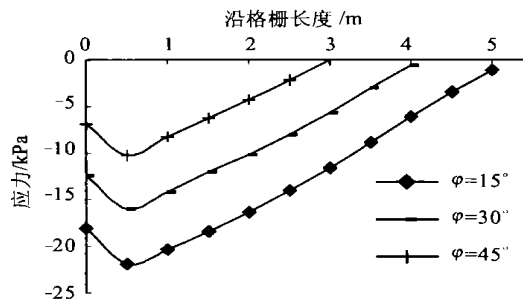


图8 土的内摩擦角对格栅等效应力分布的影响

同时, 为了考察格栅流变性对格栅等效应力分布的影响, 选取深度为3m处的格栅进行对比计算与分析。当不考虑格栅的流变性时, 直接采用李广信等^[6] 所提出的筋材对土的附加等效应力公式 $\sigma = C_0 N e^{0.61}$ 进行计算, 式中: N 为加筋层数, c_0 为加筋土破坏时的应力及应变有关的常数, 这里取 $c_0 = 6.33$ kPa。考虑格栅流变性所得到的等效应力

分布与李广信不考虑格栅流变性基于附加等效应力概念所得到的应力分布进行比较见图9。由图9可见,两种所得到的格栅应力沿长度方向的变化趋势是一致的,尤其在假定的破坏面附近二者所得到的应力计算结果基本上相等,这是由于土在破坏面处达到塑性状态所需要的时间较短,而当土处于塑性状态后格栅中应力基本上保持不变,因而在破坏面附近考虑与不考虑格栅流变性所得到的应力是近似相同的。而在靠近墙面部分,格栅的流变性使挡土墙水平方向发生了较大位移,因此考虑格栅流变性时格栅水平应力比不考虑格栅流变性时要大,而当越过破坏面后,由于向格栅远端传递的应力较小,即格栅所受的拉力呈逐渐减少趋势,格栅的流变性表现不突出,因而格栅应力较不考虑流变性时的要小。

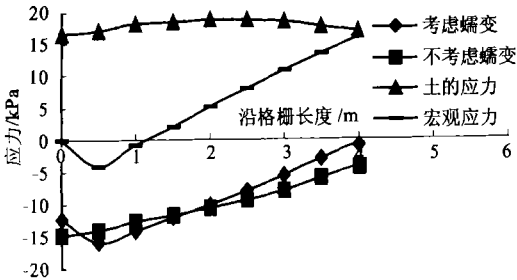


图9 流变性对格栅等效应力分布的影响

4 结论

1) 将格栅加筋土看作一种宏观上均匀的各向异性复合材料,当考虑宏观应力不变和格栅与土体变形相协调时,通过引入格栅三参数流变模型建立了格栅流变性的格栅等效应力计算方法,将计算结果与未考虑的格栅流变时的计算结果进行对比分析表明是正确可行的。

2) 当格栅加筋复合体中土体到达塑性到达时间时,土工格栅应力保持不变,此时格栅主要表现出蠕变特性,并由此认为此后格栅加筋挡土墙的等效应力保持不变的。

3) 格栅加筋挡土墙中各层筋材的等效应力分布基本上相似,且格栅等效应力随土的内摩擦角增加而减少,随层间距的增大而增加,但总体的分布形式基本上不变。

参 考 文 献

- 1 欧阳仲春. 现代土工加筋技术. 北京: 人民交通出版社, 1991. 12~14
- 2 陈永辉, 施建勇, 赵维炳等. 土工织物加筋结构的研究进展. 水利水电科技进展, 1997, 17(3): 25~28
- 3 杨果林. 现代加筋土技术应用与研究进展. 力学与实践, 2001, 24(1): 9~17
- 4 介玉新, 李广信. 加筋土的计算方法. 水利水电技术, 1999, 30(5): 67~69
- 5 介玉新, 李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 614~616
- 6 李广信, 陈轮, 蔡飞. 加筋土体应力变形计算的新途径. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 46~53
- 7 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 19~22
- 8 Buhan P de, Mangiaciacchi R, Nova R, et al. Yield Design of Reinforced Earth Walls by a Homogenization Method. Geotechnique. 1989, 39(2): 189~201
- 9 Sawicki A. Plastic Limit Behaviour of Reinforced Earth. Journal the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1983, 109(7): 1000~1005
- 10 Timoshenko S, Goodier J N. Theory of Elasticity. New York: McGraw-Hill Book Company, 1951. 44~47

收稿日期: 2003-11-04