

土工袋加固软土地基现场荷载试验的数值模拟

刘斯宏,王柳江,李 卓,孙 来

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要 为预测土工袋加固后软土地基的变形特性,采用弹塑性有限元法对某一土工袋加固后的软土地基承载力试验进行了模拟,将袋子张力的作用等效为附加应力作用在土骨架上,即在修正 Cam-clay 模型中将土工袋的黏聚力 c_T 转换为土性参数 σ_0 ,从而可以把土工袋加筋土当成素土来计算。计算结果表明,该方法将土工袋加筋原理与有限元算法有机结合,较采用杆单元模拟土工袋的计算方法简单。数值模拟计算值与试验实测值(变形、土压力、孔隙水压力)基本一致,验证了该土工袋数值模拟方法的合理性。

关键词 土工袋;软土地基;地基加固;荷载试验;有限单元法

中图分类号 :TU472 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)01-0078-05

Numerical simulation of in-situ loading tests on a soilbag-reinforced soft foundation//LIU Si-hong, WANG Liu-jiang, LI Zhuo, SUN Lai (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : In order to predict the deformation properties of soilbag-reinforced soft foundations, the numerical simulation of loading tests on a soilbag-reinforced foundation is performed by means of the elasto-plastic FEM. In this method, the action of tension of the soilbag is equivalent to the additional stress on the soil skeleton, that is, the cohesion c_T of the soilbag in the modified Cam-clay model is transformed into soil parameter σ_0 . Thereby, for calculation, the soilbag-reinforced foundation can be regarded as plain soils. The proposed method combines the principles of soilbag reinforcement with the FEM and is simpler than the method for simulating soilbags by means of bar units. The predicted values agree with the observed ones.

Key words : soilbag ; soft foundation ; foundation reinforcement ; loading test ; FEM

土工袋技术已逐渐开始应用于各种工程,如膨胀土边坡治理、船闸及挡土墙修建以及房屋基础防震^[1-6]等。目前,随着国内河道治理及围海工程的迅速开展,疏浚、吹填产生的大量淤泥以及软土地基亟需处理,由于土工袋具有较好的加筋和排水特性,同样可用于软土地基处理。在工程设计中,有必要对加固后的地基变形进行预测,土工编织袋用杆单元进行模拟,在袋子与土体之间设置接触单元^[7-8]。该法的明显不足是土工袋的网格划分需十分密集,多个土工袋模拟时计算量巨大。为此,本文提出了一种简化的有限元计算方法,通过在修正 Cam-clay 模型中将土工袋的黏聚力 c_T 转换为新的土性参数 σ_0 ,建立 σ_0 与土工袋竖向变形之间的关系式,计算时通过不断更新 σ_0 来体现土工袋加筋层在外荷载作用下的力学强度变化,并通过对某一土工袋加固后的软土地基变形进行模拟,验证了该简化方法的

合理性。

1 土工袋模拟方法

1.1 土工袋附加黏聚力计算

土工袋的加筋作用源于土工袋的张力。图 1 为土工袋及袋内土体的受力分析示意图。土工袋在外荷载作用下被压缩,袋子周长通常会伸长,从而在袋子中产生一个张力,进而约束袋内土体,使袋内土体的强度提高。根据图 1, Matsuoka 等^[9]推导得出了当土工袋达到极限破坏状态时,土工袋产生的附加黏聚力 Δc :

$$\Delta c = \frac{T_t}{B \sqrt{K_p}} \left(\frac{B}{H} K_p - 1 \right) \tag{1}$$

式中: H, B 分别为土工袋的高度和宽度; K_p 为被动土压力系数, $K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$; T_t 为袋子单位宽度抗拉

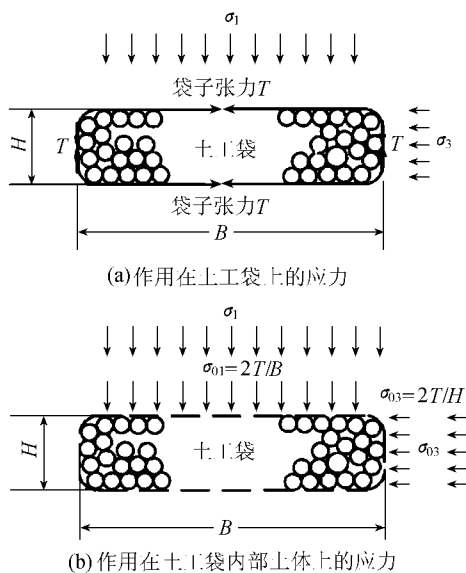


图1 土工袋及袋内土体受力分析

强度。由式(1)可知,附加黏聚力与土工袋的张力、尺寸以及被动土压力系数有关。

由式(1)计算得到的是土工袋破坏状态的附加黏聚力,而实际工程中,单体土工袋强度通常高于整体结构物强度,在结构物发生破坏时土工袋单体均还处于正常状态。因此,建立附加黏聚力与压缩变形之间的关系更具合理性。

由图1可知袋子张力 T 与土工袋的竖向压缩量有关,假设土工袋压缩后体积不变,在竖向荷载与土工袋短轴方向一致的条件下,土工袋压缩后的高度 H 和宽度 B 分别为

$$\begin{cases} H = H_0(1 - \varepsilon_y) \\ B = B_0/(1 - \varepsilon_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: H_0 和 B_0 分别为土工袋的初始高度和宽度; ε_y 为土工袋竖向应变。

根据体积不变假设和式(2)可知压缩后袋子伸长率 ε_T 为

$$\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_y(1 - \varepsilon_y - n)}{(1 + n)(1 - \varepsilon_y)} \quad (3)$$

式中: n 为土工袋初始宽高比, $n = B_0/H_0$ 。根据袋子的拉伸破坏试验可得到袋子张力与拉应变之间基本呈线性关系,则土工袋压缩过程中的张力为

$$T = k \frac{\varepsilon_y(1 - \varepsilon_y - n)}{(1 + n)(1 - \varepsilon_y)} \quad (4)$$

式中: k 为袋子材料的拉伸模量, kN/mo 。

如图1所示,袋内土体所受的大、小主应力为

$$\begin{cases} \sigma_{1m} = \sigma_1 + \frac{2T}{B} \\ \sigma_{3m} = \sigma_3 + \frac{2T}{B} \end{cases} \quad (5)$$

对于袋内土体,主应力比 $K_m = \sigma_{1m}/\sigma_{3m}$ 与大主应变

ε_1 相关,为建立土袋压缩过程中其内部土体的主应力比 K_m 与主应变之间的关系,采用有限元对单个土工袋的压缩试验进行数值模拟。土工袋初始宽度 $B_0 = 40 \text{ cm}$, $H_0 = 10 \text{ cm}$,袋子采用杆单元,袋子与土体之间设置无厚度接触单元,且假设袋子与土体之间无摩擦。土体和袋子分别采用 E - B 和线弹性模型,其中土体参数为: $R_f = 0.7$, $K = 500$, $n = 0.4$, $K_b = 350$, $m = 0.25$, $\varphi = 30^\circ$,袋子拉伸模量 $k = 100 \text{ kN/mo}$ 。土工袋压缩试验通过上表面节点位移约束模拟分级加载,每级竖向位移 0.5 mm ,共 10 级。图2为模拟单个土工袋压缩过程袋内土体的应力-应变结果,土工袋压缩过程中袋内土体主应力比随主应变增大而增大且趋向于被动土压力系数 K_p ,与土工袋双轴压缩试验的结果吻合,该曲线关系可以用指数函数拟合:

$$K_m = \alpha e^{-100\varepsilon_1} + K_p \quad (6)$$

式中 参数 α 与土工袋初始应力有关,当土工袋初始各向等压时, $\alpha = 1 - K_p$ 。

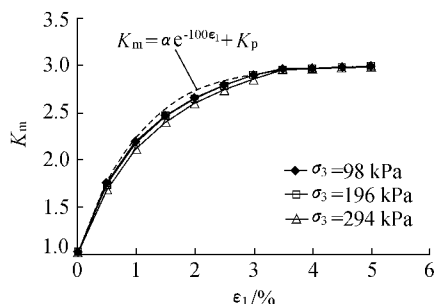


图2 模拟单个土工袋受压的应力-应变结果

由上述推导可得到土工袋压缩过程中的袋子尺寸、张力以及主应力比(式(2),(4)和(6)),将其替换式(1)中的对应变量后,可得土工袋在竖向压缩过程中附加黏聚力的计算式:

$$\Delta c = \frac{k\varepsilon_y(1 - \varepsilon_y - n)}{B_0(1 + n)(1 - \varepsilon_y)} \left(\frac{n \sqrt{\alpha e^{-100\varepsilon_1} + K_p}}{1 - \varepsilon_y} - \frac{1 - \varepsilon_y}{\sqrt{\alpha e^{-100\varepsilon_1} + K_p}} \right) \quad (7)$$

根据式(7)计算得到的附加黏聚力为外力沿着土工袋短轴作用时的情况,而实际工程中外力作用在土工袋上的方向并不固定。试验表明,土工袋的压缩强度随着外力与土工袋短轴之间夹角 δ 的增大而减小,其中附加黏聚力 $\Delta c(\delta)$ 可以采用式(8)预测^[9]:

$$\Delta c(\delta) = \begin{cases} \Delta c \cos 2\delta & 0 \leq \delta < \pi/4 \\ 0 & \pi/4 \leq \delta \leq \pi/2 \end{cases} \quad (8)$$

对于袋装黏土的土工袋,由于土体本身具有黏聚力 c_0 ,则土工袋的黏聚力为

$$c_T = c_0 + \Delta c(\delta) \quad (9)$$

文献[10]中曾采用等效附加应力的方法分析土工格栅加筋土,即在筋土相互作用的单元上施加由格栅张力引起的附加应力。同理,本文可将土工袋视为 $c-\varphi$ 材料。对于该材料可引入新的土性参数 $\sigma_0 = c_T \cot \varphi$ (又称联结应力) 来反映黏聚力对土体强度的影响。

1.2 基于应力空间变换的修正 Cam-clay 模型

本文计算采用修正 Cam-clay 模型,并应用 SMP 破坏准则^[11-13]。对于 $c-\varphi$ 材料的土工袋,引入新的土性参数 $\sigma_0 = c \cot \varphi$ 后,应力张量可以表示为

$$\hat{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} + \delta_{ij} c_T \cot \varphi \quad (10)$$

基于更新后应力张量的 SMP 准则可以表示为

$$\hat{l}_1 \hat{l}_2 / \hat{l}_3 = k' \quad (11)$$

式中: $\hat{l}_1, \hat{l}_2, \hat{l}_3$ 分别为更新后应力张量中的第一、第二和第三应力不变量; k' 为常数。为将 SMP 准则用于修正 Cam-clay 模型中, Matsuoka 等^[13]提出用应力空间变换的方法得到变换应力 $\tilde{\sigma}_{ij}$:

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \hat{p} \delta_{ij} + \frac{l_0}{\sqrt{s_{kl} s_{kl}}} \hat{s}_{ij} \quad (12)$$

其中

$$l_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{2\hat{l}_1}{3\sqrt{(\hat{l}_1 \hat{l}_2 - \hat{l}_3)/(\hat{l}_1 \hat{l}_2 - 9\hat{l}_3)} - 1}$$

式中: $\hat{p}$ 为更新后的平均应力; $\hat{s}_{ij}$ 为更新后的偏应力。

应用变换应力可以得到考虑黏聚力作用且基于 SMP 准则的修正 Cam-clay 模型屈服函数:

$$f = \psi = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left(\ln \frac{\hat{p}}{\hat{p}_0} + \ln \frac{M^2 \hat{p}^2 + \hat{p}^2}{M^2 \hat{p}_0^2} \right) - \epsilon_{vp} = 0 \quad (13)$$

式中: λ, κ 分别为土体初始压缩及回弹曲线的斜率; e_0 为初始孔隙比; M 为临界状态线的斜率; ϵ_{vp} 为塑性体积应变。

2 有限元算法实现

在河海大学自主开发的以 Biot 固结理论为控制方程的计算程序 SDAS 中增加了基于 SMP 准则的修正 Cam-clay 模型计算模块。由于土工袋在压缩过程中产生的附加黏聚力随土工袋的应变而变化,而附加黏聚力的大小又影响土工袋的变形量,因此,每一级荷载作用下的土工袋变形需通过反复迭代进行。下面简要叙述每一荷载步的迭代过程:

第 1 步 首先根据初始条件形成荷载未施加时的初始土工袋单元劲度矩阵 $K^{(0)}$,然后根据荷载 Δp

计算土工袋的应变 $\epsilon_1^{(0)}$ 和 $\epsilon_y^{(0)}$,上标 0 表示第 1 次迭代。

第 2 步 将土工袋的应变 $\epsilon_1^{(i)}$ 和 $\epsilon_y^{(i)}$ 代入式(7)、式(8)得到 $\Delta c^{(i+1)}$,之后形成新的土性参数 $\sigma_0^{(i+1)}$,将其代入式(10)、式(13)形成新的第 $i+1$ 步的劲度矩阵 $K^{(i+1)}$ 。

第 3 步 计算不平衡力 $\Delta \psi^{(i+1)} = K^{(i+1)} u^{(i)} - \Delta p$, $u^{(i)}$ 为第 i 次迭代得到的位移,若不平衡力满足收敛精度,迭代结束,否则进入第 4 步。

第 4 步 根据 $K^{(i+1)} \Delta u^{(i+1)} = -\Delta \psi^{(i+1)}$ 计算 $\Delta u^{(i+1)}$,之后得到 $u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta u^{(i+1)}$,计算 $\epsilon_1^{(i+1)}$ 和 $\epsilon_y^{(i+1)}$,回到第 2 步。

3 算例

3.1 计算条件与参数

在南水北调东线济南市区段进行了土工袋加固软土地基的承载力试验。试验采用 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的载荷板,土工袋加固区域范围为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$,加固深度分别为 20 cm(2 层土工袋)和 40 cm(4 层土工袋),其中单个土工袋大小为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。在地基中埋设了位移计、土压力计和孔隙水压力计等监测仪器,其具体埋设位置如图 3 所示。

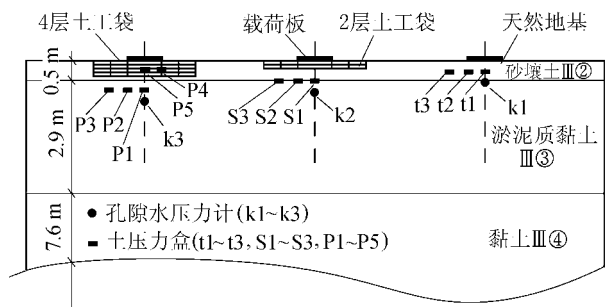


图 3 地基承载力试验监测仪器沿深度布置情况

考虑地基对称性,取地基的 $1/2$ 进行模拟,图 4 为计算采用的网格。地基深度取 6 m,计算水平范围为 6 m,是载荷板长度的 6 倍,表层为排水边界,底面为位移固定及不透水边界,左右两侧为水平向位移约束边界和零流量边界,其中地下水位埋深为地下 0.5 m。总共划分单元 803 个,节点 840 个,其中靠近

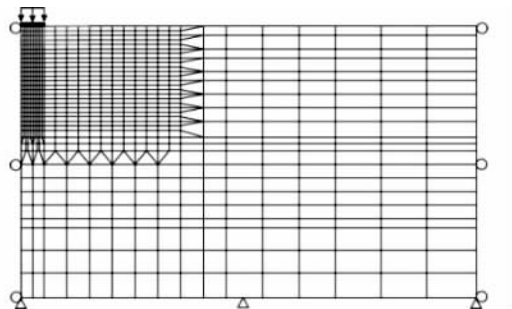


图 4 有限元计算网格

荷载板区域网格进行了加密。土体初始应力取为自重固结应力,初始水头分为两部分 地下水位以上孔压为零,地下水位以下孔压为静水压力。

计算采用修正 Cam-clay 模型,其参数以及渗透系数列于表 1。土工袋的模拟采用上文介绍的方法,袋内所装土体为砂壤土,参数见 III ②,袋子的拉伸模量为 130 kN/m。

表 1 地基土体的计算参数

土层	M	λ	κ	ν	e_0	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$k_v/(10^{-10}\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
III ②	1.33	0.156	0.022	0.30	0.75	30	5.0	100.00
III ③	1.07	0.517	0.020	0.33	1.28	16	8.3	16.50
III ④	1.11	0.268	0.018	0.30	0.79	25	9.0	6.95

3.2 计算结果对比分析

图 5 为天然地基、2 层土工袋加固地基和 4 层土工袋加固地基 3 种情况下承载力试验实测 $p \sim s$ 曲线和计算值的对比。由图 5 可见,计算结果与实测值相当接近,天然地基的地基承载力约为 96 kPa,采用 2 层土工袋加固后地基极限承载力约为 190 kPa,当采用 4 层土工袋加固后地基极限承载力上升至 220 kPa。同时,天然地基在达到极限状态时有明显拐点,而采用土工袋加固后拐点不甚明显,说明土工袋加固后地基的失稳主要是由局部剪切破坏引起,剪切破坏区仅仅被限制在地基内部的某一区域,未形成延伸至地面的连续滑动面。图 6 为不同

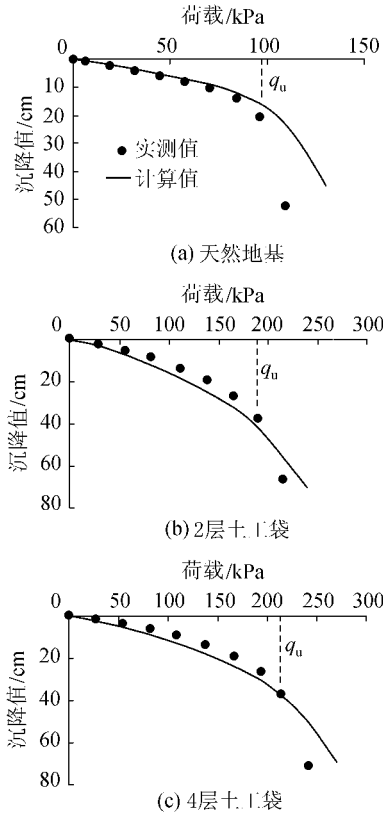


图 5 试验实测 $p \sim s$ 曲线与计算值比较

地基中土压力计算值和实测值的对比,可以看出两者基本一致,进一步说明了本文土工袋简化计算方法的有效性。

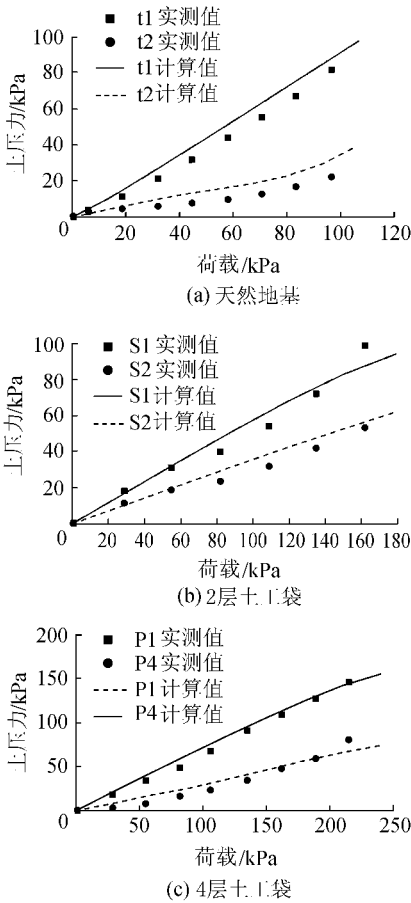


图 6 土压力试验实测值与计算值对比

图 7 为土工袋加固地基承载力试验中在 k2 和 k3 处产生的超静孔压实测值与计算值的对比情况,可见两者比较接近,最大值在 55 kPa 左右。超静孔压基本随荷载的增加而线性增加,同时沿地基深度方向呈抛物线分布(图 8)。这是由于应力的扩散导

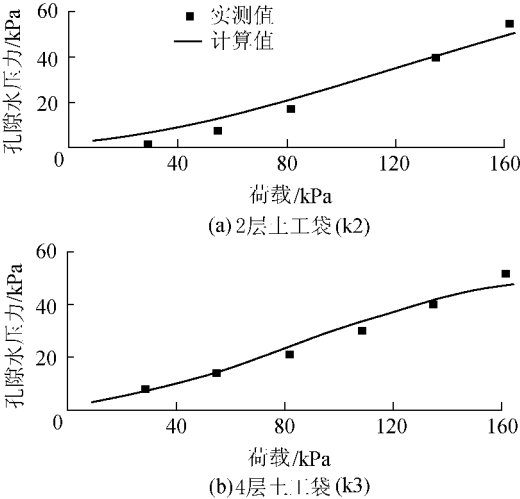


图 7 荷载板中心线下测点超静孔压实测值与计算值对比

致地基中产生的孔压随深度减小,而靠近地表的孔隙水又较容易排出使表层土体的超静孔压减小较快,从而出现了抛物线形的超静孔压分布。图 8 为天然地基、2 层土工袋加固地基和 4 层土工袋加固地基在相同荷载下地基中超静孔压分布的对比情况。由图 8 可知,不同地基中的孔压分布规律在相同荷载作用下基本一致。然而,由土工袋加固后的孔压在相同深度处较天然地基的小,说明了土工袋加固后地基应力扩散角增大,使作用在单位土体上的应力减小从而使产生的超静孔压减小。此外,在实际工程中,土工袋之间存在空隙,地基内产生的孔隙水容易通过空隙排出,从而加快了孔压消散速度。因此,从地基固结速率考虑,采用土工袋加固软土地基能较快地达到提高地基承载力的目的。

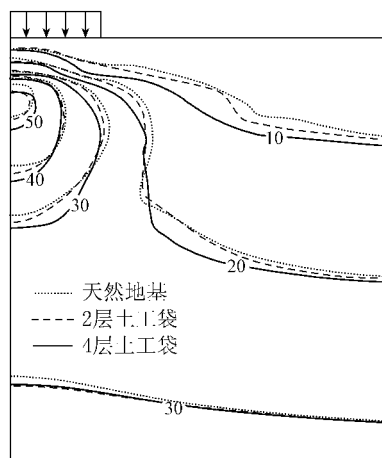


图 8 地基中超静孔压分布(单位 kPa)

4 结 语

本文通过附加黏聚力转换提出了一种土工袋的简化数值计算方法。该方法主要借鉴了复合地基的计算思路,大大简化了采用杆单元模拟土工袋的方法,不仅减小了计算量还降低了问题的复杂性,但该方法将非连续土袋地基层作为连续材料处理,回避了袋子与土体之间的接触问题。利用本文的简化计算方法,对南水北调东线济南市区段的土工袋加固软土地基承载力试验进行了数值模拟计算,计算结果与实测值非常接近,验证了该法的合理性。通过试验和计算对比分析还表明,采用土工袋加固后,软土地基的承载力得到了有效的提高,且由于采用土工袋加固后的软土地基的应力扩散角增大,地基的剪切破坏形式由整体破坏变为局部破坏。此外,在相同的外部荷载作用下,地基内部产生的超静孔隙水压力较小,考虑到土工袋之间空隙的存在可加快袋内土体的排水速度,土工袋加固后地基在荷载作用下的固结周期可明显缩短,从而能较快地达到提高地

基承载力的目的。

参考文献:

- [1] MATSUOKA H, LIU S H. Bearing capacity improvement by wrapping a part of foundation [J]. Japan Society of Civil Engineers, 1999(617/Ⅲ-46): 235-249. (in Japanese)
- [2] 刘斯宏,汪易森.土工袋技术及其应用前景[J].水利学报,2007(增刊1): 644-649.
- [3] 刘斯宏,汪易森,朱克生,等.有荷条件下南阳膨胀土强度试验及其应用[J].水利学报,2010,41(3): 361-367.
- [4] 白福青,浦敏艳,朱克生.膨胀土及袋装膨胀土干湿循环试验研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(4): 20-24.
- [5] 王艳巧,刘斯宏,杨俊杰,等.土工袋加固砂性土质边坡模型试验与上限解[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1): 4006-4013.
- [6] 王艳巧,刘斯宏,李亚军,等.土工袋竖向减振特性试验研究[J].水电能源科学,2011,29(6): 113-115.
- [7] MURAMATSU D, ZHANG F, NAKAI T, et. al. Numerical simulation on bearing capacity of soilbag-reinforced ground considering finite deformation [J]. The Japanese Geotechnical Society, 2007, 2(1): 1-12.
- [8] SENDY F T. The mechanical behavior of a soilbag under vertical compression [D]. Graz, Austria, Monographic Series TU Graz Computation in Engineering and Science, 2008.
- [9] MATSUOKA H, LIU S H. New earth reinforcement method by soilbags ("Donow") [J]. Soils and Foundations, 2003, 43(6): 173-188.
- [10] 介玉新,李广信.加筋数值计算的等效附加应力法[J].岩土工程学报,1999,21(5): 614-616.
- [11] MATSUOKA H, SUN D A. Extension of spatially mobilized plane (SMP) to frictional and cohesive materials and its application to cemented sands [J]. Soils and foundations, 1995, 35(4): 63-72.
- [12] SUN D A, MATSUOKA H, YAO Y P, et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil in three-dimensional stresses [J]. Soils and Foundations, 2000, 40(3): 17-28.
- [13] MATSUOKA H, YAO Y P, SUN D A. The Cam-clay model revised by the SMP criterion [J]. Soils and Foundations, 1999, 39(1): 81-95.

(收稿日期 2011-10-10 编辑 熊水斌)

