加筋砂土地基承载力理论与试验分析研究

梁 波[1]，杨有海[2]

（1. 重庆交通大学土木建筑学院结构工程重点实验室，重庆 400074；2. 兰州交通大学土木学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：加筋地基由于其加筋机理的复杂性，其设计和计算理论的研究还是远远落后于工程实践。依据普朗德尔关于地基的基本假定和分析方法，分析了砂土加筋地基的加筋原理；推导了单层加筋地基极限承载力的近似解；讨论了加筋地基承载力与加筋长度和埋置深度的关系等问题。通过与有关加筋地基的模型试验的对比分析，验证了理论分析的合理性和正确性。

关键词：加筋地基；承载力；理论分析；模型试验

中图分类号：TU472 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－4548(2008)01－0123－05

作者简介：梁 波(1964－)，男，四川人，教授，博士生导师，主要从事岩土与地下工程、路基方面的教学与研究。E-mail: liang_lbaoshi@126.com。

Theory and experiment on bearing capacity of reinforced sandy soil

LIANG Bo[1], YANG You-hai[2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Key Structure Engineering Lab, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Because of the complexity of reinforcing mechanism of reinforced ground, its design and theoretical researches fell far behind the engineering practice. According to the Prandtl's assumption and analytical method of foundation, the principles of reinforced sand were analyzed, the approximate solution of bearing capacity for the single-layer reinforced sand was derived, and the relationship between length, depth of reinforcement and bearing capacity of reinforced sand was discussed. By contrast to the related model test of reinforced sand, the rationality of theoretical analysis were indicated.

Key words: reinforced ground; bearing capacity; theoretical analysis; model test

0 前 言

地基和路基承载力是反映土体结构稳定性的重要指标，同时反映了这一稳定性对强度和变形能力的影响。承载能力越高，其抵抗变形的能力越强。作为与变形密切相关的地基承载力问题已有 Terzaghi 和 Prandtl 等许多分析理论[1-2]。土工格室、土工格栅等刚度、强度较大、延展性较好的土工合成材料广泛应用于路基和地基等诸多领域的加筋、加固工程中。目前，有关加筋地基的破坏机理及承载力分析已有较多的模型试验和分析研究[3-10]，包括极限平衡方法[8]、加筋张力分析方法[9-10]等。这些研究为更好地理解地基的加固原理并指导工程实践都具有一定的参考意义。加筋地基由于其加筋机理的复杂性，其设计和计算理论的研究还远落后于工程实践。本文依据 Prandtl[1-2]关于地基的基本假定和分析方法，分析了砂土加筋地基的加筋原理、地基承载力计算方法等问题，并与相关的砂土加筋地基的模型试验[3-4]进行了对比，以验证了理论分析的合理性和正确性。

1 浅埋基础的地基加筋机理

1.1 加筋土的加筋机理

加筋土作为一个复合体在受力与共同作用过程中，由于加筋与土的变形模量相差很大，土筋之间存在错动趋势，此时土筋之间的剪阻力使填土受到很大的侧向约束力，故而提高了加筋土的整体强度。

土筋之间的剪阻力或称约束效应与填料和筋材性质有关，视不同受力状态和不同材料，需分别考虑拉力破坏（加筋拉断）和黏着破坏（加筋拔出）两种极限平衡状态[10-12]。

1.2 考虑塑性半无限体应力状态条件下的地基加筋机理分析[13]

用土工合成材料处理软弱地基或加固地基，最简单的作法是在垫层或路堤下面铺设一层诸如土工格室、土工格栅一类的土工合成材料。利用土工材料与地基、集料层之间的摩擦力演化为土工材料在平面上

收稿日期：2006－10－09

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的张力或侧向约束力[10-12]来提高地基的承载能力。

本文以塑性半无限体地基发生完全剪切破坏为分析前提，对一层加筋条件下的加筋地基极限压力进行分析，从而阐明加筋机理和加筋作用。图 1 为加筋地基极限平衡法简化计算图式，即在原地基极限平衡法计算图式中考虑了一层加筋的作用。唯一增加的假定为：地基加筋后并不影响地基作为刚塑体达到极限平衡时所引起的滑动情况。

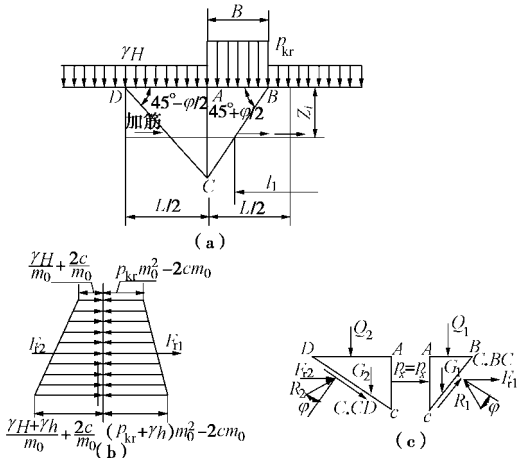


图 1 加筋地基极限平衡法简化计算图式

Fig. 1 Simple computation model of limit equilibrium method for reinforced ground

地基在压力增加到 P_{kr}[1-2]（地基发生完全剪切破坏时的极限压力）时，地基土开始由基底一侧或两侧挤出，形成完全剪切破坏，见图 1。假定地基滑动面通过基底边点 *B*，形成折线形 *BCD* 滑动面。在基底以下三角形 *ABC* 范围内，土体处于主动极限平衡状态（侧向膨胀），则土体受到 P_{kr} 的挤压向左侧滑动，此时加筋产生阻止 *ABC* 楔体的下滑的阻力 F_{r1}。同理三角形 *ACD* 土体在 *ABC* 土体 横向挤压下，顺着滑面 *CD* 向上滑动，土体处于被动极限状态（侧向挤压），此时该侧的加筋也产生了抵抗 *ACD* 上挤的阻力 F_{r2}。可知 *AC* 是主动区与被动区的分界面。当地基处于极限平衡时，作用在 *AC* 面上的两侧推力（P_x，P_x'）应该相等。由主动区与被动区的大小主应力关系可导出：

$$P_x=\frac{B}{m_0}\left[(P_{kr}+\frac{\gamma B}{2m_0})m_0^2-2cm_0\right]-F_{r1} \quad , \quad (1)$$

$$P_x'=\frac{B}{m_0}\left[\frac{\gamma H+\gamma B/2m_0}{m_0^2}+\frac{2c}{m_0}\right]+F_{r2} \quad 。 \quad (2)$$

由图 1（c）的力平衡关系 $P_x=P_x'$，经整理后可得

$$P_{kr}=\frac{2(1+m_0^2)}{m_0^3}c+\frac{1-m_0^4}{2m_0^5}\gamma B+\frac{1}{m_0^4}\gamma H+\frac{1}{m_0 B}(F_{r1}+F_{r2}), \quad (3)$$

式中，$m_0=\tan(45^\circ-\frac{\varphi}{2})$，$\varphi$ 为地基土的内摩擦角，*c* 为地基土的黏聚力，γ 为土的重度，*H* 为浅埋基础深度，*B* 为条形基础或荷载宽度。

式（3）中的加筋抗拔阻力或抗推阻力分两种情况：

（1）加筋的抗拔阻力

a）加筋拉断情况。此时抗拔力超过了加筋材料本身的抗拉能力，加筋断裂，则单宽最大抗拔力

$$F_{r1}=\eta R_T \quad , \quad (4)$$

式中，η 为单位宽度的加筋率，$\eta=b_r/s$，b_r 为筋条宽度，*s* 为加筋间距，R_T 为加筋的抗拉强度。

b）加筋拔出情况。土筋之间的相互作用包括摩擦、咬合等作用，这里主要考虑摩擦作用

$$F_{r1}=2\eta\int_0^{l_1}\sigma_{zi}f\mathrm{d}l \quad , \quad (5)$$

此时，在 $l_1=z_i m_0\sim B$ 段，$\sigma_{zi}=(P_{kr}+\gamma z_i)$，在 $l_1=B\sim L/2$，$\sigma_{zi}=\gamma(z_i+H)$。则

$$F_{r1}=2\eta f\left[(P_{kr}+\gamma z_i)z_i m_0+\gamma(z_i+H)(L/2-B)\right], \quad (6)$$

式中，σ_{zi} 为地基某一深度出的竖向应力，*f* 为土筋之间的摩擦系数，z_i 为加筋的埋置深度，*L* 为加筋长度，其余同上。

（2）加筋的抗推阻力

加筋拉断情况只有在 *BC* 右侧时才可能发生。

筋条从土中挤出情况只有当加筋是诸如较高强度和较高刚度的土工格室、土工格栅时才可能发生，而当为土工织物时则不产生抗推阻力。由于土工格室、土工格栅的延展性较好，加之土筋之间的相互作用较复杂，因此抗推阻力还需修正，令修正系数为 ξ，则

$$F_{r2}=2\xi\eta f\gamma(z_i+H)(L/2-\frac{B/m_0-z_i}{m_0}) \quad 。 \quad (7)$$

将式（4），（7）代入式（3），可得拉力破坏时的加筋地基极限压力：

$$P_{kr}=\frac{2(1+m_0^2)}{m_0^3}c+\frac{1-m_0^4}{2m_0^5}\gamma B+\frac{1}{m_0^4}\gamma H+\frac{1}{m_0 B}\eta R_T+\frac{1}{m_0 B}2\xi\eta f\gamma(z_i+H)(L/2-\frac{B-m_0 z_i}{m_0^2}) \quad 。 \quad (8)$$

同理将式（5），（7）代入式（3），也可得粘着破坏时的加筋地基极限压力公式，这里略。

地基加筋后，原有地基极限压力增加了 $\frac{1}{m_0 B}(F_{r1}+F_{r2})$，加筋显著地提高了地基承载力。此外，从单纯增加地基承载能力而言，土工格室、土工格栅显然比土工布等柔性土工合成材料更为合适。

2 基于普朗德尔基本假定的加筋地基浅平基极限承载力的近似解

2.1 加筋地基浅平基极限承载力近似解的分析推导

采用 Prandtl 的基本假定，应用 Prandtl 原理进行

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

承载力推导。由于 Prandtl 本身就不是精确解，是一近似解，两次假定产生的滑动面与精确解滑动面并不一致[1-2]。加筋后的地基受力状态虽然有所变化，但相对于深厚的地基尺度，薄层加筋不会改变可能的滑动趋势和滑动面，只可能限制和延迟了塑性区域的发展。基于这一前提，本文假定地基加筋后并不影响地基的破坏形态，以此分析加筋地基浅平基承载力的近似解。

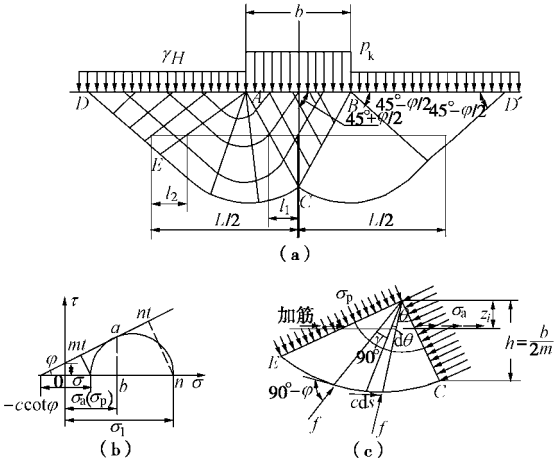


图 2 加筋地基浅平基承载力的计算图式

Fig. 2 Computation model of bearing capacity of reinforced shallow ground

首先，假设$\gamma=0$，则地基无自重。在基底压力 P_{k1} 及过载 q_0 的作用下，形成图 2（a）所示的滑动面。滑动体是对称的，分三个滑动区。在基础下面为三角形主动区Ⅰ，此时 *ABC* 土体处于拉伸状态，向下滑动；基础外侧有三角形被动滑动区Ⅲ，此时 *ADE* 土体处于压缩状态，向上滑动。作为穿过这两个区域的加筋，由于土体的运动趋势，相应于左侧扇形的过渡区Ⅱ，均受到了方向指向对称轴的加筋摩擦约束力 T_{r1} 和 T_{r2}。在滑动区Ⅰ，Ⅲ之间存在扇形的过渡区Ⅱ。由三个区的静力平衡关系，可解出极限压力或承载力 P_{k1}。

考虑到主动区Ⅰ作用在 *AB* 面上的 P_{k1} 为大主应力 σ_1，而被动区Ⅲ作用在顶面上的过载 q_0（即 γH）为小主应力 σ_3。由 Mohr 应力圆可得到作用在 *AC* 及 *AE* 面上的应力 σ_a 和 σ_p 分别为

$$\sigma_a = P_{k1}(1-\sin\varphi) - p_i\sin\varphi \quad , \tag{9}$$

$$\sigma_p = q_0(1+\sin\varphi) + p_i\sin\varphi \quad , \tag{10}$$

式中，$p_i = c\cot\varphi$，φ 为地基土的内摩擦角。

Ⅱ区为一对数螺旋线扇区。令 *A* 为极点，*AC* 为极轴，$AC=r_0$，则任一扇径的表达式为

$$r = r_0\exp(\theta\tan\varphi) \quad 。 \tag{11}$$

作用在扇区体上所有外力都处于平衡状态，它们对于极点 *A* 的力矩方程 $\sum M_A = 0$。它包括主动区 σ_a 的主动力矩、被动区 σ_p 的被动力矩、*EC* 滑弧的黏着力矩及主、被动区的加筋约束力矩。故由扇形土楔的力矩之和为零写出

$$\sum M_A = \frac{1}{2}\sigma_a\overline{AC}^2 - \frac{1}{2}\sigma_p\overline{AE}^2 - \int_0^{\pi/2} cr^2\mathrm{d}\theta - T_{r1}z_i - T_{r2}z_i = 0 \quad , \tag{12}$$

由计算图示可知，$\overline{AC} = r_0 = \frac{b}{2}\sqrt{1+\frac{1}{m_0^2}} = \frac{b}{2m_0}\sqrt{1+m_0^2}$，$\overline{AE} = r_0\exp(\frac{\pi}{2}\tan\varphi)$。这里考虑加筋破坏为拔出破坏，则加筋约束力为

$$T_{r1} = 2\eta f(P_{k1}+\gamma z_i)L_1 = 2\eta f(P_{k1}+\gamma z_i)(\frac{b}{2}-m_0z_i) \quad , \tag{13}$$

$$T_{r2} = 2\eta f(q_0+\gamma z_i)L_2 = 2\eta f(q_0+\gamma z_i)(\frac{L}{2}-\frac{b}{2}-\frac{z_i}{m_0}) \quad 。 \tag{14}$$

将以上代入式（12）展开积分并合并整理可得

$$P_{k1} = \frac{1}{m_0^2}\frac{\exp(\pi\tan\varphi)}{1-f(z_i)}q_0 + \frac{\cot\varphi}{1-f(z_i)}\left[\frac{\exp(\pi\tan\varphi)}{m_0}-1\right]c + \frac{2\eta f}{1-f(z_i)}\frac{\gamma z_i(b-2m_0z_i)z_i}{r_0^2(1-\sin\varphi)} + \frac{2\eta f}{1-f(z_i)}\frac{(q_0+\gamma z_i)}{r_0^2(1-\sin\varphi)}\cdot(L-b-\frac{2z_i}{m_0})z_i \quad , \tag{15}$$

其中，

$$f(z_i) = \frac{2\eta f(bz_i-2m_0z_i^2)}{(1-\sin\varphi)r_0^2} \quad , \tag{16}$$

式中，m_0，η，f，z_i，L 的含义同前，b 为基础或条形荷载宽度。

其次，假定地基无黏聚力，且$\gamma\neq0$，此时，地基的极限压力或承载力取决于地基的自重并与基础宽度成正比，可推出：

$$P_{k2} = \frac{1}{2}\gamma bN_\gamma \quad 。 \tag{17}$$

按经典理论，可用承载力系数表示无量纲的函数式，即 $N_q = \frac{1}{m_0^2}\exp(\pi\tan\varphi)$，$N_c = (N_q-1)\cot\varphi$，$N_\gamma = 2(N_q+1)\tan\varphi$。

将承载力系数代入式（15）和（17），则加筋地基的极限承载力近似解为

$$P_k = P_{k1}+P_{k2} = P_k = \frac{N_q}{1-f(z_i)}q_0 + \frac{N_c}{1-f(z_i)}c + \frac{1}{2}\gamma bN_\gamma + \frac{2\eta f}{1-f(z_i)}\frac{\gamma z_i(b-2m_0z_i)z_i}{r_0^2(1-\sin\varphi)} + \frac{2\eta f}{1-f(z_i)}\frac{(q_0+\gamma z_i)}{r_0^2(1-\sin\varphi)}\cdot(L-b-\frac{2z_i}{m_0})z_i \quad 。 \tag{18}$$

由上式可知，考虑加筋拔出破坏的加筋地基承载力比无加筋地基的承载力要高。

2.2　加筋地基加筋长度和埋置深度的关系讨论

（1）短加筋情况

当加筋长度为短加筋时，即加筋不穿过扇区Ⅲ时，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 计算参数以及一层加筋极限承载力对比

Table 1 Computation parameter and bearing capacity of reinforced one layer sand ground

地基和加筋计算参数						极限承载力/kPa	
重度γ/(kN·m^{-3})	内摩擦角φ/(°)	黏聚力 c/kPa	基础宽度 b/m	加筋长度 L/m	埋置深度 z/m	试验值	理论值
17.74	30	9.6	0.2	0.4	0.1	646.7	634.3

备注：①由于是满铺加筋，因此加筋率η=1.0；②由于缺乏数据，土筋之间的视摩擦系数取 f=tanφ；③表中极限承载力的试验值为一层加筋对应同一沉降量（s=28.9 mm，4 层加筋的最大沉降量）时的数据；④这里 q_0 近似为 0。

则此时的加筋地基极限承载力近似解为

$$P_{\mathrm{k}}=\frac{N_q}{1-f(z_i)}q_0+\frac{N_c}{1-f(z_i)}c+\frac{1}{2}\lambda bN_\gamma+\frac{2\eta f\gamma z_i}{1-f(z_i)}\frac{(b-2m_0z_i)}{r_0^2(1-\sin\varphi)}z_i\text{。}\tag{19}$$

说明即使是短加筋条件下，加筋依然提高了地基的承载能力。

（2）加筋的埋置深度

无论是式（18）还是式（19），其加筋地基极限承载力都与分母 1−$f(z_i)$有关系，当 $f(z_i)$存在极大值时，分母将最小。由式（16）二次微分可得 $\frac{\mathrm{d}^2f}{\mathrm{d}z_i^2}\le 0$，$f(z_i)$有极大值。因此，由 $\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}z_i}=0$，可解出

$$z_i=\frac{b}{4m_0}\text{。}\tag{20}$$

故加筋埋置在距基底 $z_i=\frac{b}{4m_0}$ 深处时，此时分母 1−$f(z_i)$最小，可获得最大加筋效应。在本文假定条件下，这一埋置深度只与基础宽度和砂土内摩擦角有关。

3 与加筋砂土地基模型试验的对比

3.1 短加筋砂土地基承载力的对比分析

文献[3]在 2.0 m×0.8 m×0.33 m 的试验箱进行了土工格栅加筋砂土地基的模型试验，分别研究了不同加筋层数、加筋长度条件下，基地压力（或承载力）与地基沉降的关系。试验结果表明加筋提高了地基的承载力，并减少了地基土的竖向和侧向沉降。

本文利用该文献模型试验的试验参数和试验结果，应用上述理论计算公式进行了对比分析。这里加筋长度 L 为 0.4 m，属于短加筋情况，将相应参数代入式（19）可以计算得到加筋地基极限承载力的理论值。具体计算参数及对比结果见表 1。

表 1 的极限承载力对比计算结果并考虑到模型试验的侧向约束效应，可以看出理论分析结果与模型试验结果具有较好的吻合性。

3.2 加筋埋置深度的对比分析

文献[4]利用 1.38 m（宽）×1.0 m（深）的模型槽，进行了平面应变条件下的土工格室加筋均匀砂土地基的模型试验。模型示意如图 3 所示。

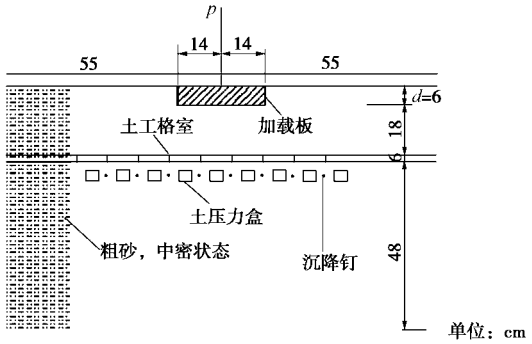


图 3 土工格室加筋砂土地基的模型示意

Fig. 3 Model test of sand reinforced by geocell

本模型进行了单层格室（H_g=2.0 cm，格室厚度）在不同埋深情况下的模型试验。试验中土工格室筋材的展开长度 L=87 cm，加筋埋置深度分别取 6，12，18，30 cm，试验测得结果如图 4 所示。

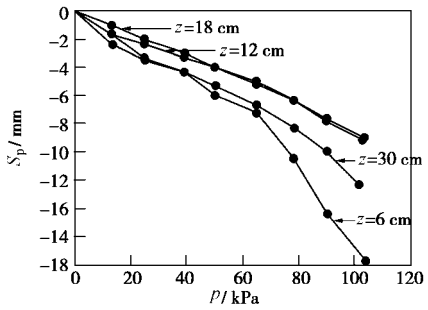


图 4 不同加筋埋置深度下承载力与沉降的关系曲线

Fig. 4 The relationship between bearing capacity and subsidence under different depths of reinforcement

由图 4 可以看出，开始随着加筋深度的增加，承载力相应增大；当深度达到某一界限时，承载力达到最大值，此后若再增加加筋埋置深度，则承载力提高值会逐渐减小。本次试验最优埋置深度在 18 cm 左右，相当于基础宽度 b（即加载板宽）的 0.6 倍左右。

本模型中，基础宽度 b = 28 cm，地基的内摩擦角 φ = 45.4°，利用式（20）可以得到理论最优埋置深度为 17 cm，与试验值 18 cm 吻合较好。

试验和理论分析均表明，加筋埋置深度影响着地基承载力的提高程度，埋置深度不同，加筋效应不同。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合理布置加筋能更好地发挥加筋对地基的加固作用。

4 结　　语

（1）依据 Prandtl 原理进行加筋地基极限承载力分析，推导了单层加筋地基浅平基极限承载力的近似解。分析表明，模型试验结果与理论计算值具有较好的吻合性，验证了本文理论分析的合理性和正确性。

（2）加筋提高了地基的承载力。当应用了较高强度和较高刚度的加筋时，即使在短加筋条件下，加筋依然提高了地基的承载力。

（3）加筋埋置深度影响着地基承载力的加筋效应。合理的埋置深度将会更好地发挥加筋加固作用。同时表明，本文假定条件下，最优埋置深度只与基础宽度和砂土内摩擦角有关。

参考文献：

[1] 梁钟琪. 土力学及路基[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (LIANG Zong-qi. Soil mechanics and subgrade[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))

[2] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))

[3] 杨　庆, 张　克, 栾茂田, 等. 土工格栅加筋砂土地基性能模型试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, **46**(3): 390－394. (YANG Qing, ZHANG Ke, LUAN Mao-tian, et al. Study of model test on performance of soil foundation reinforced by geogrids[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, **46**(3): 390－394. (in Chinese))

[4] 马卓军. 格室加筋土强度特性和格室加筋砂土地基的研究[D]. 兰州: 兰州铁道学院, 1998. (MA Zuo-jun. Strength character of reinforced earth by geocell and research about reinforced sand ground by geocell[D]. Lanzhou: Lanzhou Railway Institute, 1998. (in Chinese))

[5] 王　伟, 王　俭, 薛剑豪, 等. 土工格栅加筋垫层加固软土地基模型试验分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(12): 1885－1891. (WANG Wei, WANG Jian, XUE Jian-hao, et al. Analysis of model tests on soft soil subgrade reinforced by geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 1885－1891. (in Chinese))

[6] 马学宁, 杨有海, 梁　波. 土工格栅砂垫层与碎石桩复合地基承载试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2005, **24**(4): 24－27. (MA Xue-ning, YANG You-hai, LIANG Bo. Bearing capacity model test of geogrid reinforced sand blanket and gravel pile composite foundation[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2005, **24**(4): 24－27. (in Chinese))

[7] 李　驰, 王建华. 加筋风积砂地基承载力试验研究及计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(4): 687－691.(LI Chi, WANG Jian-hua. Model testing study and calculating analysis of bearing capacity on the reinforced aeolian sands ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(4): 687－691. (in Chinese))

[8] 王　钊, 王协群. 加筋地基的极限分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, **41**(6): 112－114. (WANG Zhao, WANG Xie-qun. Limit analysis for reinforced foundations[J]. Journal of Tsinghua University(Sci. & Tech.), 2001, **41**(6): 112－114. (in Chinese))

[9] 黄仙枝, 白晓红. 土工带加筋垫层地基承载力的实用计算方法[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(7): 804－807. (HUANG Xian-zhi, BAI Xiao-hong. Practical calculation of bearing capacity on geobelt reinforced cushion[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(7): 804－807. (in Chinese))

[10] 梁　波, 蔡　英, 罗　强, 等. 土工合成材料在高速铁路桥路过渡段中的应用[J]. 铁道学报, 1999, **21**(4): 64－67. **(**LIANG Bo, CAI Ying, LUO Qiang, et al. Application of Geosynthetics at approach section on bridge of high speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, **21**(4): 64－67. (in Chinese)**)**

[11] 梁　波, 杨有海, 孙遇祺. 加筋粉煤灰的静动强度指标试验与研究[J]. 实验力学, 1998, **13**(1): 85－91. **(**LIANG Bo, YANG You-hai, SUN Yu-qi. Experiment and analysis of static and dynamic strength index for reinforced flyash[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, **13**(1): 85－91. (in Chinese)**)**

[12] 梁　波, 孙遇祺. 加筋土模型试验中的拉力破坏研究[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(2): 83－87. (LIANG Bo, SUN Yu-qi. A study the tensile failure of reinforced earth retaining wall with model test[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(2): 83－87. (in Chinese))

[13] 梁　波. 高速铁路路基的动力特性及土工合成材料的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1998. (LIANG Bo. The dynamic characteristics of high speed railway subgrade and geosynthetics's applications[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1998. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net