低超载下条带式带齿加筋界面特性

张孟喜，张石磊，黄 瑾
（上海大学土木工程系，上海 200072）

摘 要：在提出立体加筋的基础上，对条带式带齿加筋砂土进行了低超载下大量的拉拔试验来研究筋土的界面特性，分析了带齿筋的条带式加筋对拉拔性能的影响，探讨了不同上层覆压下筋条的拉拔力与水平位移的关系以及似摩擦系数f^*的变化规律。在试验成果分析的基础上，分析了条带式带齿加筋与砂土的相互作用机理，建立了条带式带齿加筋砂土的拉拔力模型。并将试验结果与理论值比较，二者基本吻合。

关键词：条带式带齿加筋；拉拔试验；低超载；界面特性；拉拔力模型
中图分类号：TU441 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)11－1623－07

作者简介：张孟喜(1963－)，男，山西万荣人，教授，博士后，博士生导师，主要从事新型土工加筋技术及环境岩土工程研究。E-mail: mxzhang@staff.shu.edu.cn。

Behavior of interface between denti-strip geosynthetic reinforcements and soil under low surcharge

ZHANG Meng-xi, ZHANG Shi-lei, HUANG Jin
(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In conventional reinforced soil, the reinforcements are often horizontally laid in the soil. A new concept of soil reinforced with denti-strip geosynthetics was proposed. In the proposed denti-strip reinforced soil, besides the conventional horizontal reinforcements, some vertical reinforcing elements were also placed upon the horizontal ones. A series of pullout tests under low surcharge of denti-strip geosynthetics (e.g., plexiglass,) were performed to investigate the interface behavior between sand and denti-strip inclusions in terms of different forms of reinforcements. Comparison was made between surcharge-displacement relationship and pullout resistances of the soil reinforced with horizontal inclusions and with denti-strip. The influences of the height, horizontal space of vertical reinforcing elements on the interface behavior between sand and denti-strip inclusions were discussed. From the test results, the coefficient of apparent pullout friction was evaluated. The interaction mechanism between sand and denti-strip was analyzed, and a new theoretical model was proposed to determine the pullout resistance. The comparison between theoretical values and experimental results was in good agreement.

Key words: denti-strip reinforcement; pullout test; low surcharge; interface behavior; pullout resistance model

0 引 言

筋土界面的相互作用是影响多数加筋结构内部和外部稳定性的主要因素[1-3]，在加筋土结构的设计与计算分析中，研究筋土之间界面拉拔力的发挥过程、拉拔力的大小、界面似摩擦系数的变化规律等问题具有重要意义。近一二十年来，对加筋土界面特性的研究广泛深入、发展迅速，成果丰富：Jewell，Rowe 等探讨了筋土界面的拉拔机理[4-5]；Juran 对土工布与砂土的界面摩擦角进行试验研究[6]；Palmeira 和 Milligan 分析了试验箱边界效应对格栅拉拔试验结果的影响[7]；Irsya 和 Hryciw 通过拉拔试验研究了平面肋式加筋的摩阻力变化规律[8]；Raju 和 Fannin 探讨了格栅循环荷载下的拉拔力规律[9]；Racana 等对波状的土工织物带进行了拉拔试验的研究[10]；Hong 分析了单排和双排土钉的拉拔阻力[11]；张孟喜等提出立体加筋土概念并通过三轴试验研究了其强度特性[12-13]。这些研究成果对加筋土的发展起着积极推动作用。

目前对筋土界面相互作用机理的研究主要集中于条带状筋条（如聚丙烯土工带）和平面状筋条（如土工织物[14]、土工布、土工膜和土工格栅[15-17]等），不管是否有横向肋带，这些研究主要还是停留在传统的布筋形式上。对于片状或带状加筋材料，其界面相互

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50678100）；上海市博士点基金资助项目
收稿日期：2006－10－27

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

作用取决于筋土界面的摩擦特性；对于带肋的平面状筋条（如土工格栅），其拉拔力主要是筋土界面的摩擦力和横向肋带产生的被动阻力[18-19]，横向肋带产生的被动阻力一般按地基承载力的理论计算。条带式带齿加筋是在立体加筋前期研究[12-13]的基础上提出的一种新型的加筋方式，它在水平条带式筋条上布置竖向或空间齿筋，形成组合立体形式加筋。本文进行了大量的拉拔试验，得到了条带式带齿加筋拉拔力与位移以及上层覆压的关系。在此基础上分析条带式带齿加筋砂土的作用机理，并建立拉拔力模型。

1 条带式带齿加筋的分类

条带式带齿加筋是集水平、竖向、空间为一体的三维立体结构。土体中布置条带式带齿加筋后，除了具有传统水平筋与填土摩擦作用，竖向或空间齿筋也提供较大侧阻力，从而约束土体的变形，并在齿筋间将形成“加强土柱”或“加强土楔体”起到加固作用。根据齿筋几何形状及其不同组合并考虑到土体碾压密实性，提出以下三种加筋方案：

（1）方案Ⅰ 等宽条带式带齿加筋

等宽条带式带齿加筋的典型方案如图 1 所示。齿筋形状可采用变厚度的矩形、多面体板或半球体等，其宽度与水平筋相同，二者组合形成立体加筋。其中，水平筋主要发挥其水平方向筋土摩擦作用；受齿筋的侧阻约束作用，齿筋间的土体将形成“挤密区域”。为了保证土体能被碾压密实，使水平筋摩擦作用与齿筋侧阻作用均能充分发挥，齿筋宜只布置在水平筋上侧，二者可正交布置或呈一定角度，形成“倒楔形”齿筋。

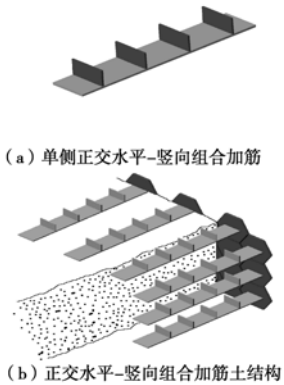


图 1 等宽条带式带齿加筋典型方案示意图

Fig. 1 Typical horizontal-vertical reinforcing elements with the same width

（2）方案Ⅱ 不等宽条带式带齿加筋

不等宽条带式带齿加筋的典型方案如图 2 所示。当条带式水平筋宽度较小时，竖向或空间齿筋通过单根或双根条带式水平筋连接形成齿筋为主的组合体。由于较窄的条带式水平筋主要起连接作用，组合筋周围孔洞容易保证土体在施工过程中被压密，齿筋可在水平筋上、下两侧对称布置或单侧布置，也可在水平筋上单侧布置半球形齿筋。该加筋形式，主要通过齿筋侧阻约束作用，在齿筋间形成土体“挤密区域”。

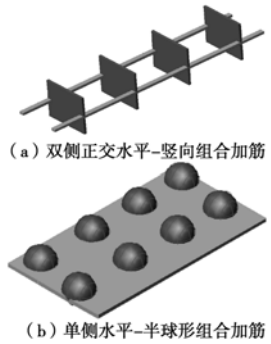


图 2 不等宽条带式带齿加筋典型方案

Fig. 2 Typical horizontal-vertical reinforcing elements with different widths

（3）方案Ⅲ 杆式带齿加筋

杆式带齿加筋的典型方案如图 3 所示。若单根连接的水平筋变为较细的圆柱或棱柱状杆件时，齿筋采用等厚度或变厚度多边形、圆形板，或者在杆式水平筋上间隔布置类似球形齿筋（形成类似于“糖葫芦串”加筋），则成为杆式带齿加筋，其齿筋也可采用“倒楔形”布置。这种形式加筋，以齿筋作用为主，杆式水平筋主要起连接作用。

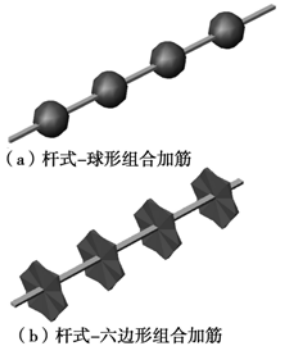


图 3 杆式带齿加筋典型方案

Fig. 3 Typical denti-axial reinforcing elements

2 拉拔试验

2.1 试验装置

试验在用角钢焊接而成的矩形刚性模型箱内进行，尺寸为 0.65 m×0.8 m×1.1 m（长×宽×高）。两侧壁和后壁固定厚 10 mm 的高强度有机玻璃板，并用螺栓固定在角钢上，它们均具有足够的刚度，受力时不变形。前侧面固定加厚的较大刚度木挡板（高 50 cm）于左、右两角钢立柱上，并用角钢设肋加固，以保证拉拔筋条时挡板不会变形。木挡板中间处留一 1.5

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

表 1 砂样颗粒级配

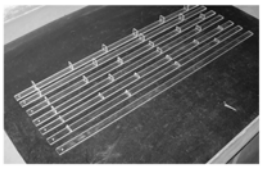
Table 1 Grain-size distribution of sand

颗粒组成/%					不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
10~5 mm	5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm		
3.20	14.85	50.67	24.15	7.13	3.8	0.76

cm×1.5 cm（长×宽）开口，供引出拉筋，紧贴缝壁安置一可上下抽动的板，以调节缝隙大小，防止砂粒漏出。在前壁架设由角钢焊接而成的三角形支架，支架通过螺栓固定在模型槽上，用于给筋条提供拉拔空间和悬挂加荷吊篮。加荷吊篮和筋条通过滑轮用钢丝绳相连。水平拉拔力采用砝码控制。支架上装有数显式千分表，用于测量筋条在拔出时的水平位移。法向荷载用配重块施加。试验装置如图 4（a）所示。



（a）拉拔试验箱



（b）带齿加筋试样

图 4 试验装置

Fig. 4 Layout of pullout tests

2.2 试验材料

（1）筋材：采用有机玻璃等宽条带式加筋，水平筋为 60 cm×1.5 cm×0.3 cm（长×宽×厚）。竖筋与水平筋之间用三氯甲烷黏结组合，试样见图 4（b）。

（2）砂样的制备：砂砾料为纯净的河砂，经过筛分，砂样颗粒分配见表 1，物理性质指标见表 2。

表 2 试验所用砂样的物理特性指标

Table 2 Physical parameters of sand

比重 G_s	重度 γ/(kN • m^{-3})	含水率 w/%	孔隙比 e
2.643	15.99	0.15	0.5855

2.3 试验方案

本文以正交布置的等宽条带式带齿加筋为主要加筋方案，共设计由不同竖筋高度、不同间距组合而成的 7 种工况，见表 3。试验时，在筋条上面上覆 15 cm 砂土后逐级施加超载与水平拉力，在某一级荷载下，当千分表读数持续不稳定或者筋条突然被拔出时，则认为筋带与填料间产生拔出破坏，试验结束。各工况在法向应力 2.5，5.0 以及 7.5 kPa 下进行低超载的拉拔试验，得到拉拔力与法向应力、筋带位移的关系曲线。为了降低试验结果的离散性，对于相同法向应力下同一种工况的试样做 3 组平行试验，然后对比取值，最后汇总得到 21 组试验数据。

表 3 试验工况

Table 3 Experimental cases of denti-strip reinforced sand

工况	加筋类型	竖筋高度 h/cm	竖筋间距 s/cm
A	水平筋	0.0	0
B	条带式带齿	0.5	10
C	条带式带齿	0.5	15
D	条带式带齿	1.0	10
E	条带式带齿	1.0	15
F	条带式带齿	1.5	10
G	条带式带齿	1.5	15

2.4 试验结果

（1）不同法向应力作用下的拉拔力与位移关系曲线

以竖筋间距 s = 10 cm 为例，不同法向应力 σ 作用下的拉拔力 T(N)与水平位移 u(mm)的关系曲线见图 5。

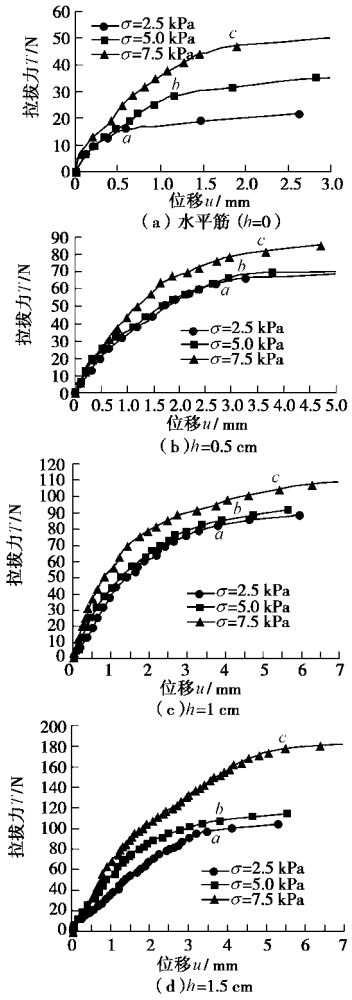


图 5 不同工况下拉拔力与位移关系曲线

Fig. 5 The curves of T versus u in different experimental cases

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

a）由图可知，随法向应力的增加，位移突变点 *a*，*b*，*c* 向坐标的右上方移动，并且其对应的位移也在增加。说明拉拔力由拉力端向埋入端逐渐传递发挥出来的，法向应力越大，达到峰值拉拔力时的过程越长，需产生的位移量也越大。

b）水平筋及竖筋高度 *h* =1.5 cm 的筋条随着法向应力的增加，拉拔力明显提高；对竖筋高度分别为 0.5 cm 和 1 cm 的筋条，其拉拔力与位移的关系曲线在 2.5 kPa 和 5 kPa 时相对比较接近，随法向压力的增加，拉拔力提高的幅度比较小。

（2）不同竖筋高度的拉拔力与位移关系曲线

不同竖筋高度的 $T-u$ 曲线如图 6 中所示，由图可知：

a）在相同法向应力作用下，带齿加筋的拉拔力明显比水平筋高；相同竖筋间距的筋条随着竖筋高度的增加，拉拔力提高效果明显。

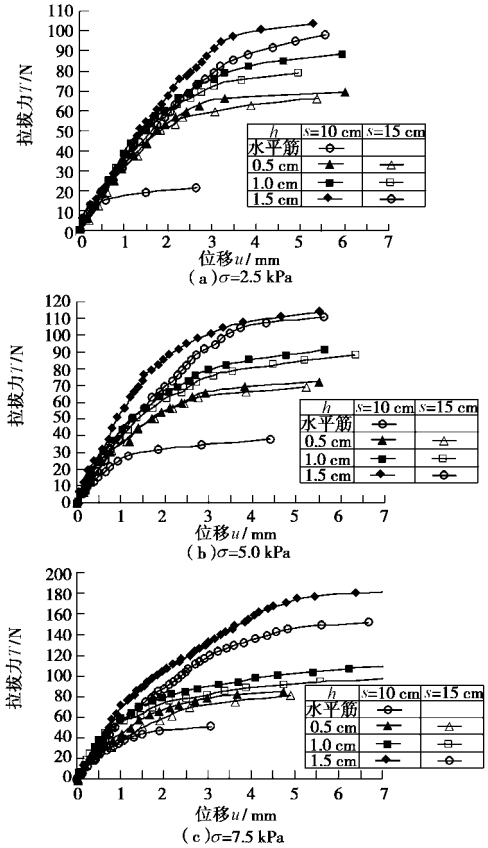


图 6 不同竖筋高度的拉拔力与位移关系曲线

Fig. 6 The curves of *T* versus *u* with different heights of vertical elements

b）在加载初期，位移比较小，各曲线起始段比较接近，随着法向应力的增加产生明显的增幅，可以认为一开始由水平筋发挥作用，随着法向应力的增加，水平筋的摩擦作用减弱，竖筋开始发挥主导作用。

c）条带式带齿加筋在拉拔试验过程中经历 4 个阶段：①水平筋与土体界面摩擦力发展阶段；②竖向筋与土体的端面摩擦力发展阶段；③竖向筋侧阻力发展阶段；④竖筋前端的土体达到塑性破坏阶段。

（3）不同竖筋间距的拉拔力与位移关系曲线

不同竖筋间距的 $T-u$ 曲线如图 7 所示，由图可知，对相同法向应力作用下，相同竖筋高度的筋条随着竖筋间距的增大，峰值拉拔力相应减小。

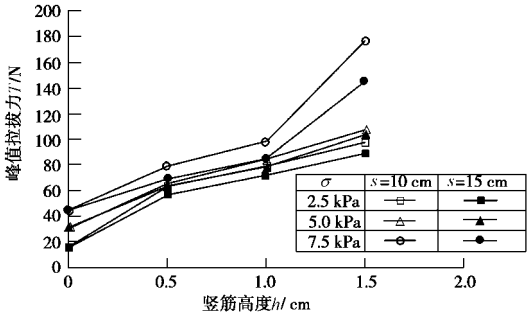


图 7 不同竖筋间距的拉拔力与位移关系曲线

Fig. 7 The curves of *T* versus *u* with different horizontal spaces of vertical elements

2.5 分析与讨论

（1）似摩擦系数 f^*

界面参数指标至关重要，这里引入描述筋土间摩擦特性的定量指标似摩擦系数 f^*。f^*不同于传统意义上的摩擦系数。传统意义上的摩擦系数主要由水平筋与填料的摩擦作用决定，而 f^*反映了筋土界面特性的一个综合参数，除受水平筋、填料、法向应力、边界条件等影响外，也受竖向筋的材料和布置形式的影响。

竖向压力与似摩擦系数的关系曲线如图 8 所示，在法向应力为 5 kPa 时，水平筋的似摩擦系数为 0.35，而竖筋高 1.5 cm 间距 10 cm 的条带式带齿加筋的最大似摩擦系数可达到 1.3，提高了 73%左右；拉拔似摩擦系数随法向应力的增加呈非线性递减，这与前述拉拔力随着位移的增加而增加，达到峰值后拉拔力增幅逐渐减小的现象也相符合。

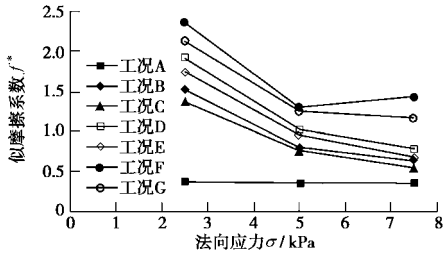


图 8 $f^*-\sigma$关系曲线

Fig. 8 The curves of f^* versus σ

（2）不同工况下条带式带齿加筋效果对比

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

以法向应力为 7.5 kPa 为例，对不同工况，由于设置竖筋，拉拔力明显提高，其极限拉拔力较水平筋提高 36.1%～75.0%，平均可提高 55%左右，如表 4 所示。因此说明条带式加筋是一种理想的加筋方式。

表 4 不同工况下极限拉拔力对比

Table 4 Comparison of ultimate pullout resistance among different experimental cases

工况	加筋类型		峰值抗拔力 T/N	摩擦系数 f^*	峰值抗拔力提高率/%
	竖筋间距 s/cm	竖筋高度 h/cm			
A	0	0.0	44.28	0.36	—
B		0.5	78.90	0.64	43.88
C	10	1.0	69.30	0.56	36.10
D		1.5	97.86	0.79	54.75
E		0.5	85.14	0.69	49.86
F	15	1.0	177.36	1.43	75.03
G		1.5	145.56	1.17	69.58

3　拉拔力模型

3.1　土与带齿加筋间的作用机理分析

受试验条件的限制，本文进行了低超载下的拉拔试验，在低超载情况下所加的水平拉力不是很大。试验所选用筋材具有高强度、低延伸率的特点，所以可假定筋条拔出瞬间，不发生拉伸变形和颈缩，加筋面积不变，筋条的阻力与拉力相平衡。

条带式带齿加筋拉拔力与接触面阻力平衡，接触面的阻力除了包括水平筋提供筋土接触面摩擦阻力 τ_{h1}，τ_{h2} 外，还包括竖向筋提供竖筋顶端与土体的端面摩擦阻力 τ_v 及竖筋侧面的侧阻力 $(E_p - E_a)$，如图 9（b），（c）。在法向应力很小时，筋条的拉拔阻力主要由水平筋与土体的摩擦力提供，随着法向应力的增加，水平筋与土体接触面间的摩擦力所占拉拔阻力的比例有所减少，竖向筋的侧阻力发挥主导作用。

3.2　带齿加筋拉拔力的分析

（1）水平筋拉拔力计算

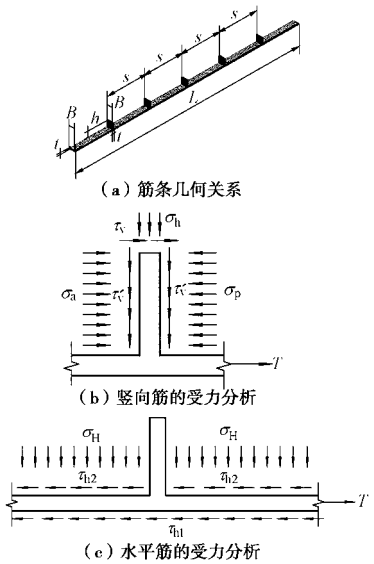
按照莫尔－库仑理论，在极限平衡状态下，传统条带状筋条（水平筋）的拉拔力

$$T_0 = 2A_0(c_0 + \sigma_0 \tan\delta) \quad , \tag{1}$$

式中，T_0 为土与水平筋的接触面摩擦阻力（kN），A_0 为筋条表面面积（m^2），δ 为土与筋条接触面的摩擦角（°），c_0 为筋土接触面黏聚力，σ_0 为法向应力（kPa）。

（2）条带式带齿加筋拉拔力计算

研究等宽条带式带齿加筋的拉拔试验，设有 n 个竖向筋条，$n = \frac{L}{S} - 1$，其中，L 为水平筋长度，s 为竖筋间距，筋条几何关系如图 9（a）所示，施加水平拉力 T(N)，图 9（b），（c）为筋材的受力分析。



（a）筋条几何关系

（b）竖向筋的受力分析

（c）水平筋的受力分析

图 9 筋条受力分析

Fig. 9 Mechanical analysis of reinforcement

若筋材的抗拉强度高于拉拔应力，则不会发生筋材的拉断破坏。根据以上分析，抗拔阻力与砂土与水平筋接触面的摩擦阻力、竖向筋摩擦阻力、竖向筋的侧阻力三者合力相等，即

$$T = T_h + T_v + E_v \quad , \tag{2}$$

式中，T 为筋条的峰值拉拔力，T_h 为砂土与水平筋接触面的摩擦阻力（kN），T_v 为竖向筋摩擦阻力（kN），E_v 为竖向筋的侧阻力（kN）。

a）水平筋摩擦阻力的计算

$$T_h = A_h \sigma_H f_1^* = (A_{h1} + A_{h2})\sigma_H f_1^* \text{。} \tag{3}$$

式中　f_1^* 为水平筋与填料的摩擦系数，A_{h1} 为水平筋顶面承受法向应力面积（m^2），$A_{h1} = B(L - nt)$；A_{h2} 为水平筋底面承受法向应力面积（m^2），$A_{h2} = BL$；A_h 为水平筋承受法向应力面积（m^2），$A_h = A_{h1} + A_{h2}$；$\sigma_H = q + \gamma H$，其中，q 为超载应力（kN/m^2），γ 为填料的平均等效重度（kN/m^3）；H 为砂土地表面到水平筋顶面的距离（m）。

b）单个竖向筋侧阻力的计算

假定竖筋两侧同时达到主动、被动极限平衡，由于竖筋高度h远远小于上覆砂土高度，假定低超载下的主动、被动土压力大小为矩形分布，竖筋的侧阻力可由被动土压力 E_p 与主动土压力 E_a 之差得到，即

$$E_v = E_p - E_a \quad , \tag{4}$$

其中，E_p 和 E_a 分别是被动土压力和主动土压力，

$$E_p = \left(\sigma_H K_p + 2c\sqrt{K_p}\right) A_1 \quad , \tag{5}$$

$$E_a = \left(\sigma_H K_a - 2c\sqrt{K_a}\right) A_1 \quad , \tag{6}$$

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

因此

$$E_v=\left(\sigma_H\left(K_p-K_a\right)+2c\left(\sqrt{K_p}+\sqrt{K_a}\right)\right)A_1 \quad , \quad (7)$$

式中，A_1 为竖向筋侧面承受阻力面积（m^2）；$A_1=Bh$。

c）单个竖向筋上端面摩擦力

竖向筋上端面摩擦阻力

$$T_v=A_v\sigma_h f_2^* \quad 。 \quad (8)$$

式中 A_v 为竖向筋端面承受法向应力面积（m^2），$A_v=Bt$；f_2^* 为竖筋端面与填料的摩擦系数；$\sigma_h=q+\gamma(H-h)$。

将式（3），（7），（8）代入式（1），得到

$$T=\left(2BL-nBt\right)\sigma_H f_1^*+nBt\sigma_h f_2^*+$$
$$nBh\left(\sigma_H\left(K_p-K_a\right)+2c\left(\sqrt{K_p}+\sqrt{K_a}\right)\right)。 \quad (9)$$

式（9）即为带齿加筋拉拔力模型。

4 试验结果与模型计算值的比较

试验砂土，c = 0，其内摩擦角 φ =31.9°，由此计算得到主动、被动土压力系数分别为 K_a = 0.32，K_p = 3.24，水平筋条宽度 B = 0.015 m，有效长度取 L = 0.55 m；竖筋 t = 0.003 m，B = 0.015 m，高度 h 和间距 s 如表 3。将以上数值代入式（9）得到各工况拉拔力计算值，见表 5 和图 10。将试验值与相应计算值对比，可以发现计算值与试验值基本吻合，误差多数在 10%以内，最大误差为 14.3%，表明本文提出拉拔力模型的计算值与试验值基本吻合。

表 5 极限拉拔力的试验值与计算值对比

Table 5 Comparison between experimental and analytical results

法向应力/kPa	竖筋间距 s/cm	竖筋高度 h/cm	$T_{计}$/N	$T_{试}$/N	误差/%
2.5	10	0.5	66.86	63.12	4.16
		1.0	84.68	79.02	6.68
		1.5	105.60	97.38	
	15	0.5	58.57	56.76	3.09
		1.0	72.93	72.66	
		1.5	93.21	88.56	4.98
5.0	10	0.5	71.48	66.30	
		1.0	95.93	85.26	
		1.5	123.70	107.52	
	15	0.5	66.81	63.12	5.52
		1.0	79.86	78.90	
		1.5	113.80	104.34	
7.5	10	0.5	87.42	78.90	
		1.0	114.20	97.86	
		1.5	201.60	177.36	
	15	0.5	74.23	69.30	6.64
		1.0	86.38	85.14	
		1.5	159.60	145.56	

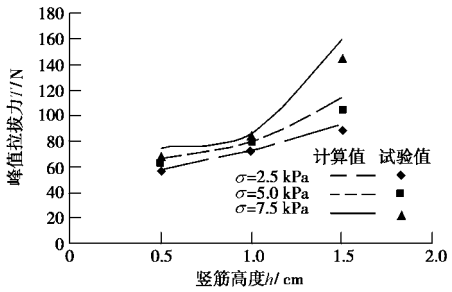


图 10 极限拉拔力的试验值与计算值对比

Fig. 10 Comparison of ultimate pullout resistance between the experimental and analytical results

5 结 论

本文通过拉拔试验和理论分析初步探讨了条带式带齿加筋的界面特性。

（1）研究了带齿加筋的齿筋布置对拉拔性能的影响，得到了似摩擦系数的变化规律。

（2）分析条带式带齿加筋的受力机理，建立拉拔力模型。

（3）根据所建立的拉拔力模型计算条带式带齿加筋的拉拔力理论值，与试验结果对比，表明二者较为接近。

参考文献：

[1] WANG ZHENG G, RICHWIEN W. A study of soil-reinforcement interface friction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(1): 92－94.

[2] WIKSON-FAHMY R F, KOERNER R M, et al. Experimental behavior of polymeric geogrids in pullout[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(4): 661－677.

[3] 吴景海, 陈 环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 89－93. (WU Jing-hai, CHEN Huan, WANG Ling-juan, et al. Study on soil interaction characteristics of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 89－93. (in Chinese))

[4] JEWELL R A, MILLIGAN G W E, SARSBY W, et al. Interaction between soil and geogrids[C]// On Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering. London: Tomas Telford, 1984: 18－29.

[5] ROWE R K, HO S K, FISHER D G. Determination of soil geotextiles interface strength properties[C]// Proceedings of the 2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes, Edmonton, 1985: 25－34.

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

[6] JURAN I, CHEN C L. Soil-geotextile pull-out interaction properties: testing and interpretation[J]. Transportation Research Record, 1988, **1188**:37－47.

[7] PALMEIRA E M, MILLIGAN G W E. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand[J]. Geotechnique, 1989, **39**(3): 511－524.

[8] IRSYAM M, HRYCIW R D. Friction and passive resistance in soil reinforced by plane ribbed inclusions [J]. Geotechnique, 1991, **41**(4): 485－498.

[9] RAJU D M, FANNIN R J. Monotonic and cyclic pill-out resistance of geogrids[J]. Geotechnique, 1997, **47**(2): 331－337.

[10] RACANA N, GRÉDIAC M, GOURVÈS R. Pull-out response of corrugated geotextile strips[J]. Geotextiles and Geomembrances, 2003, **21**(5): 265－288.

[11] HONG yung shan, WU chosen, YANG shang heng. Pullout resistance of single and double nails in a model sand box[J].Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(5): 1039－1047.

[12] ZHANG M X, JAVADI A A, MIN X. Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions[J]. Geotextiles and Geomembrances, 2006, **24**(4): 201－209.

[13] 张孟喜, 闵　兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 931－936. (ZHANG Meng-xi, MIN Xing. Behavior of sand reinforced with one-layer 3D reinforcement by triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 931－936. (in Chinese))

[14] BAKEER R M, ABDEL-RAHMAN A H, NAPOLITANO P J. Geotexile friction mobilization during field pullout test[J]. Geotexiles and Geomenbrances, 1998, **16**(2): 73－85.

[15] 杨广庆, 李广信, 张保俭. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 948－952. (YANG Guang-qing, LI Guang-xin, ZHANG Bao-jian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 948－952. (in Chinese))

[16] SUGIMOTO M, ALAGIYAWANNA A M N, KADOGUCHI K. Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests[J]. Geotextiles and Geomenbrances, 2001, **19**(5): 257－277.

[17] MORACI Nicola, GIOFFRÈ Domenico. A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembrances, 2006, **24**(2): 116－128.

[18] PAL SURAJIT, WATHGALA G W. Disturbed state model for sand-geosynthetic interfaces and application to pull-out tests[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechnics, 1999, **23**(15): 1873－1892.

[19] GURUNG N, IWAO Y, MADHAV M R. Pullout test model for extensible reinforcement[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechnics, 1999, **23**(12): 1337－1348.

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司（原冶金勘察研究总院）主办的学术－技术类双月刊，是中国科技论文统计源期刊，中国地质文摘引用期刊，中国学术期刊（光盘版）、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊，多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富，理论结合实际，适于从事岩土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行，双月刊，大 16 开本，双月 20 日出版。每期定价 5.0 元，全年 30 元。邮发代号 18-153。全国各地邮局均可订阅，也可随时汇款到编辑部订阅。

本刊兼营广告，价格适中，印制精良，注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址：河北省保定市东风中路 1285 号《勘察科学技术》编辑部；邮编：071069；电话：0312-3020877，3094054；传真：0312-3034561；E-mail: kckxjs@126.com；kckxjs@163.com。

（《勘察科学技术》编辑部　供稿）

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