

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.010

一种土工合成材料加筋土界面拉拔行为分析*

杜常博¹, 易富²

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究试验过程中不同位置的筋土界面拉拔行为, 以补充试验测量的不足, 提出了一个能够预测筋材任意位置拉力和位移的界面拉拔公式, 并给出了其具体的应用和分析步骤。首先预测给定筋材长度的最大峰值拉力, 然后在最大峰值拉力范围内预测给定峰值拉力的筋材有效长度, 其次确定界面摩擦系数大小, 最后预测沿筋材任意位置的位移变化关系。同时, 对界面拉拔公式进行了参数影响分析, 并将界面拉拔公式预测结果与试验结果进行对比。研究表明: 界面摩擦系数可以间接验证界面拉拔公式的准确性, 对拉拔试验结果提供一致性解释。界面拉拔公式的预测结果与拉拔试验结果吻合良好, 表明了分析模型的合理性。研究成果对分析和完善筋土界面特性具有重要意义。

关键词: 土工合成材料; 拉拔试验; 界面拉拔公式

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0085-06

An Interface Pull-out Behavior Analysis of Geosynthetics Reinforced Soil

DU Changbo¹, YI Fu²

(1. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To study the pull-out behavior of the reinforcement-soil interface at different locations in the test process and to compensate for the shortcoming of test measurements, an interface pull-out formula is proposed to predict the tension and displacement at any position of the reinforcement. The detailed application and analysis steps of the interface pull-out formula were given. First, the maximum peak tension of the reinforcement with a given length is predicted, and then the effective length of the reinforcement with a given peak tensile force is predicted within the maximum peak tensile force range. After that, the interface friction coefficient is determined, and finally the displacement at any position of the reinforcement is predicted. Meanwhile, a parametric study on the interface pull-out formula is conducted, and the predicted results of interface pull-out formula are compared with experimental results. The results show that the interface friction coefficient can indirectly verify the accuracy of the interface pull-out formula and provide a consistent explanation for the test results. The predicted results of the interface pull-out formula are in good agreement with test results, which indicates the ra-

* 收稿日期: 2019-01-13; 修回日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774163)、辽宁省教育厅科研基金项目(LJYL054)、鞍钢科研项目(2018~科 A19)资助

作者简介: 杜常博(1992—), 男, 讲师, 博士。主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: duchangbo2839@163.com

tionality of the analytical model. The research results are of great significance to the analysis of the interface characteristics between a reinforcement and soil.

Keywords: geosynthetics; pull-out test; interface pull-out formula

引言

拉拔试验作为研究筋土界面特性的常用试验之一,以确定合理的锚固段长度及稳定性分析为目的,进行筋土界面相互作用机理、界面剪应力和相对位移的变化规律研究,已被广泛用于加筋结构的设计与分析中。在加筋结构设计中,为了使填料中产生的拉应力有效传递到筋材上,要求筋材具有足够的抗拉强度,以避免筋土界面的拉出破坏。其中应力和位移是从拉拔端逐渐传递到自由端,因此材料的拉拔行为对这个渐进破坏过程有较大影响^[1-3]。M. L. Lopes等^[4]指出,填料密实度、试样围压及其拉拔位移速率都会影响土工格栅的抗拔强度,并且随着上述影响值的增加而增大;陈榕等^[5]基于拉拔试验探讨了碎石配比含量和竖向应力对土工格栅拉拔阻力特性的影响;徐超等^[6]揭示了格栅横肋和纵肋在拉拔模式下的作用机制和格栅网格对拉拔阻力的影响;汪明元等^[7]对拉拔试验中土工格栅的应力、变形特征和界面摩阻力进行了理论分析,研究了格栅与压实膨胀土界面的拉拔性状;靳静等^[8]认为筋土界面拉拔力由界面摩擦力和横肋端承阻力两部分组成,拉拔位移较小时,拉拔力以界面摩擦力为主,随拉拔位移增大,横肋端承阻力逐渐成为拉拔力主要来源。

由于拉拔试验过程中直接获得筋材不同位置的数据响应十分困难,为此许多学者都基于拉拔试验推导了筋土拉拔界面分析模型^[9-10]。T. Konami等^[11]基于土工合成材料现场拉拔试验,提出了一种简单的条带弹性模型,对拉拔试验结果在屈服前拉拔行为和筋材的有效长度等方面得到了较好的预测;为了分析平面土工合成材料的抗拔性能,M. Abramento^[12]提出了基于剪滞理论的模型;S. Sohbi等^[13]基于刚塑性剪切应力的可伸长筋材,提出了一种界面拉出模型;刘续等^[14]在拉拔条件下推导出了拉力和位移沿筋材分布公式。但目前还没有一个统一的界面拉拔公式分析模型,以用于筋土界面拉拔行为的分析。

本文基于拉拔试验,提出一个统一的筋土界

面拉拔公式,给出界面拉拔公式具体应用和分析步骤,以用于预测和解释拉拔试验结果,对界面拉拔公式进行参数影响分析,并将分析模型预测结果与试验结果进行比较,验证所推导的界面拉拔公式。

1 界面拉拔公式分析

如图1(a)所示为筋材拉拔整体受力情况,试验中,试验槽底部和侧向边界固定,在承压板上可以施加竖向上覆压力。筋材的长度和厚度分别为 L 、 t ,拉伸模量为 E 。

根据文献[13]可知延伸性筋材拉拔界面剪应力峰值 τ_m 与法向应力 σ_n 的关系为:

$$\tau_m = \sigma_n f = (q_s + \gamma h) \tan \varphi_{s/g} \quad (1)$$

式中, $f = \tan \varphi_{s/g}$ 为界面摩擦系数, $\varphi_{s/g}$ 为界面内摩擦角; q_s 为附加应力; γ 为试验填料的容重; h 为加筋以上填料的铺筑高度。

设筋材在 x 处的剪应力为 τ ,在其上取长度为 dx 的微单元体进行分析,如图1(b)所示,宽度取筋材的单位宽度,当筋材剪应力达到峰值时,根据受力平衡可以得出:

$$(T + dT) - T + 2\tau_m(dx + \epsilon dx) = 0 \quad (2)$$

式中, T 为 x 处筋材单位宽度拉力; ϵ 为应变; ϵdx 为微元体单元变形长度。

由式(2)可得:

$$\frac{dT}{dx} + 2\sigma_n f(1 + \epsilon) = 0 \quad (3)$$

假定应变与单位宽度的拉力线性相关^[14],即:

$$T = E_r \epsilon = Et \epsilon \quad (4)$$

式中, $E_r = Et$ 为筋材单位宽度抗拉刚度。

将式(4)代入式(3)可得:

$$\frac{dT}{dx} + \frac{2\sigma_n f}{Et} T + 2\sigma_n f = 0 \quad (5)$$

当筋材即被拉出(达到峰值拉力)时,有边界条件:

$$x = 0, T = T_0 \quad (6)$$

式中, T_0 为筋材拉拔端单宽最大拉拔力,即峰值拉力。

将边界条件式(6)代入式(5)可得:

$$T = (T_0 + Et) \exp\left(-\frac{2\sigma_n f}{Et} x\right) - Et \quad (7)$$

式(7)即为所求界面拉拔公式,由它可知筋材即被拉出时任意位置 x 的拉力大小,可以弥补试验不足,对研究筋土界面摩擦特性具有重要意义。

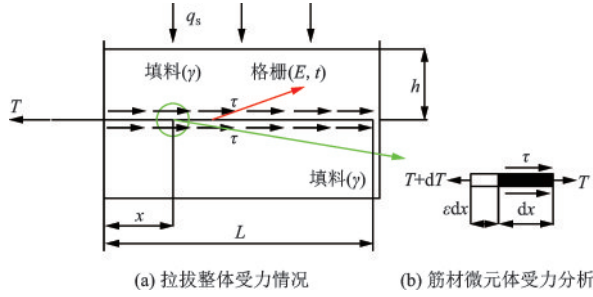


图1 筋土拉拔示意

Fig.1 Illustration of the pull-out of a reinforcement in soil

2 界面拉拔公式应用

在式(7)中若 $x=L, T=0$,则可求得筋材峰值拉力的最大值,也就是即将导致筋材失效的拉力值 T_{0m} :

$$T_{0m} = Et \left[\exp\left(\frac{2\sigma_n f}{Et} L\right) - 1 \right] \quad (8)$$

由式(8)可以得到筋材在拉拔试验时峰值拉力的范围为 $T_0 \leq T_{0m}$ 。

在峰值拉力 $T_0 \leq T_{0m}$ 范围内进行拉拔试验,式(7)中令拉力 $T=0$ 可求得筋材有效长度 l :

$$l = \frac{Et}{2\sigma_n f} \ln \frac{T_0 + Et}{Et} \quad (9)$$

由式(9)可计算筋材的界面摩擦系数 f :

$$f = \frac{Et}{2\sigma_n l} \ln \frac{T_0 + Et}{Et} \quad (10)$$

当 $l=L$ 时,界面摩擦系数 f 为:

$$f = \frac{Et}{2\sigma_n L} \ln \frac{T_0 + Et}{Et} \quad (11)$$

根据应变的定义,在 x 处筋材应变可写为:

$$\varepsilon = -\frac{du}{dx} \quad (12)$$

式中, u 为 x 处筋土相对位移。

结合式(4)和(12)可得筋材位移为:

$$u = \int -\frac{T}{Et} dx \quad (13)$$

将式(7)代入式(13)计算可求得:

$$u = -\frac{1}{Et} \int_l^x \left[(T_0 + Et) \exp\left(-\frac{2\sigma_n f}{Et} x\right) - Et \right] dx \quad (14)$$

由式(14)解得筋材任意位置的位移为:

$$u = \frac{T_0 + Et}{2\sigma_n f} \left[\exp\left(-\frac{2\sigma_n f}{Et} x\right) - \exp\left(-\frac{2\sigma_n f}{Et} l\right) \right] + (x - l) \quad (15)$$

令 $x = \lambda l$,由式(15)和式(9)计算可求得筋材在不同位置的位移表达式为:

$$u = \frac{T_0 + Et}{2\sigma_n f} \left[\left(\frac{Et}{T_0 + Et} \right)^\lambda - \frac{Et}{T_0 + Et} \right] + (\lambda - 1) \frac{Et}{2\sigma_n f} \ln \frac{T_0 + Et}{Et} \quad (16)$$

式中, λ 为筋材有效长度的位置系数, $0 \leq \lambda \leq 1$ 。

当 $x=0$ 时($\lambda=0$),由式(16)可求得筋材拉拔端位移(即拉拔位移)的表达式:

$$u_0 = \frac{T_0}{2\sigma_n f} - \frac{Et}{2\sigma_n f} \ln \left(\frac{T_0 + Et}{Et} \right) \quad (17)$$

由式(17)可以得到筋材拉拔位移与拉力的变化关系。

3 界面公式参数影响分析

3.1 界面拉拔公式分析步骤

由上述分析得到筋土界面拉拔公式,由此可计算筋材最大峰值拉力 T_{0m} 、有效长度 l 、界面摩擦系数 f 和位移 u 的数值大小,以全面分析筋土界面特性。界面拉拔公式的分析步骤如图2所示:①根据式(8)计算出峰值拉力的最大值,得到峰值拉力的范围 $T_0 \leq T_{0m}$;②在峰值拉力范围内由式(9)进行计算得到筋材的有效长度;③按照式(10)计算确定出界面摩擦系数大小,通过界面摩擦系数可对拉拔试验结果通过一致性解释;④由式(16)计算得到筋材任意位置位移的变化关系,可与试验结果进行对比分析,验证界面拉拔公式的可靠性。

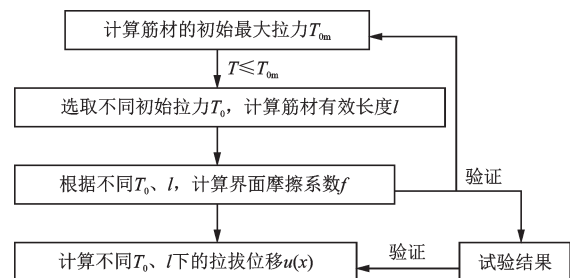


图2 界面拉拔公式分析步骤

Fig.2 Analysis steps of the interface pull-out formula

3.2 拉拔公式参数影响分析

对界面拉拔公式进行参数影响分析,参数基准值见表1。

表1 界面拉拔公式参数基准值
Table 1 Benchmark values of the parameters of the interface pull-out formula

| σ_n/kPa | $f = \tan \varphi_{s/g}$ | E/MPa | t/mm | L/m |
|-----------------------|--------------------------|----------------|---------------|--------------|
| 30 | 0.68 | 400 | 2 | 1 |

3.2.1 筋材峰值拉力

即将导致筋材失效拉力的临界值,即峰值拉力的最大值 T_{0m} :

$$T_{0m} = Et \left[\exp\left(\frac{2\sigma_n f L}{Et}\right) - 1 \right] = 41.86 \text{ kN/m} \quad (18)$$

则筋材在拉拔试验时峰值拉力 $T_0 \leq 41.86 \text{ kN/m}$ 。

图3、4为筋材长度 L 、单宽抗拉刚度 Et 、法向应力 σ_n 和界面摩擦系数 f 对峰值拉力最大值 T_{0m} 的影响规律。由图可知,筋材抗拉刚度对最大峰值拉力的影响很小,随着筋材抗拉刚度的增大,最大峰值拉力几乎不变;而筋材长度、法向应力和界面摩擦系数对峰值拉力最大值的影响显著,随着这三个参数的增大,最大峰值拉力均呈线性增长。

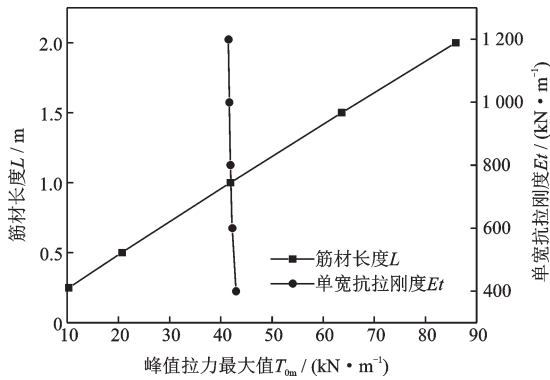


图3 筋材长度和抗拉刚度对最大峰值拉力的影响
Fig.3 Effect of length and tensile stiffness of the reinforcement on the maximum tensile force

3.2.2 筋材有效长度

峰值拉力 T_0 为 10、20、30、40 kN/m 时,由式(9)计算可得筋材有效长度 l 为 0.234 6、0.484 2、0.721 8、0.956 7 m。

图5、6为峰值拉力 T_0 、单宽抗拉刚度 Et 、法向应力 σ_n 和界面摩擦系数 f 对筋材有效长度 l 的影响规

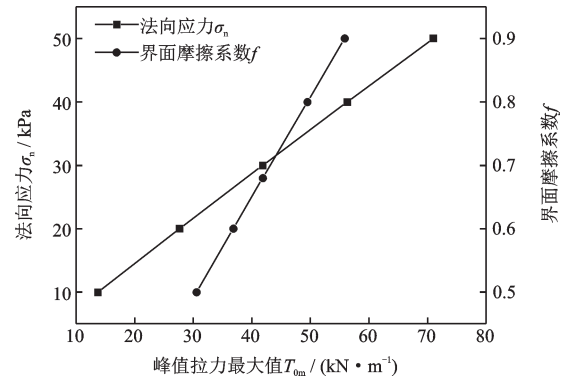


图4 法向应力和界面摩擦系数对最大峰值拉力的影响
Fig.4 Effect of normal stress and interfacial friction coefficient of the reinforcement on the maximum tensile force

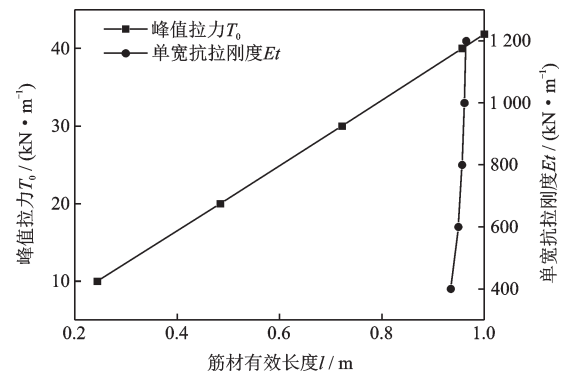


图5 峰值拉力和抗拉刚度对筋材有效长度的影响规律
Fig.5 Effect of length and tensile stiffness of the reinforcement on the effective reinforcement length

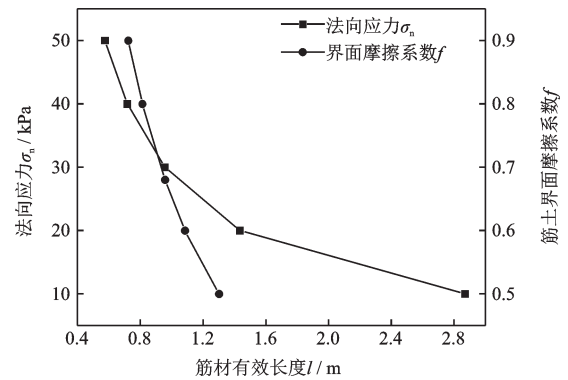


图6 法向应力和界面摩擦系数对筋材有效长度的影响
Fig.6 Effect of length and tensile stiffness of reinforcement on effective length of reinforcement

律。由图可知,抗拉刚度和界面摩擦系数对筋材有效长度的影响很小,这两个参数的增大均对筋材有效长度变化无较明显改变;筋材有效长度随着峰值拉力的增大呈线性增长,这与式(4)的假定相符;法向应力对筋材有效长度的影响较大,随着法向应力的增大,筋材有效长度呈非线性减小,且减小幅度

逐渐变缓。

3.2.3 界面摩擦系数

计算筋材的界面摩擦系数 f 为:

$$f = \frac{Et}{2\sigma_n l} \ln \frac{T_0 + Et}{Et} = 0.68 \quad (19)$$

由此可知,计算求得的界面摩擦系数与最初给定的值相等,能够间接验证界面拉拔公式的准确性,并对拉拔试验结果提供一致性解释。

3.2.4 筋材位移

根据式(17)计算求得筋材拉拔位移的变化关系:

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{T_0}{2\sigma_n f} - \frac{Et}{2\sigma_n f} \ln \left(\frac{T_0 + Et}{Et} \right) \\ &= \frac{T_0}{40.8} - 19.6078 \cdot \ln \left(\frac{T_0 + 800}{800} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

当筋材不在拉拔端,即 $x \neq 0$ 时,求得筋材在其它位置的位移表达式(以 $x=0.25l$ 为例),将 $x=0.25l$ 代入式(16)得:

$$\begin{aligned} u &= \frac{T_0 + Et}{2\sigma_n f} \left[\left(\frac{Et}{T_0 + Et} \right)^{\frac{1}{4}} - \frac{Et}{T_0 + Et} \right] - \\ &\quad \frac{3}{4} \frac{Et}{2\sigma_n f} \ln \frac{T_0 + Et}{Et} = \\ &\quad \frac{T_0 + 800}{40.8} \left[\left(\frac{800}{T_0 + 800} \right)^{\frac{1}{4}} - \frac{800}{T_0 + 800} \right] - \\ &\quad 14.71 \cdot \ln \frac{T_0 + 800}{800} \end{aligned} \quad (21)$$

图7为在4种筋材位置($x=0$ 、 $x=0.25l$ 、 $x=0.5l$ 、 $x=0.75l$)下筋材位移随峰值拉力的变化情况。由图可知,筋材位移随峰值拉力增大呈非线性增大,在峰值拉力达到最大值时,筋材位移达到最大,且筋材位置越靠后,筋材位移的变化范围越小。

以峰值拉力 $T_0=40 \text{ kN/m}$,筋材有效长度 $l=$

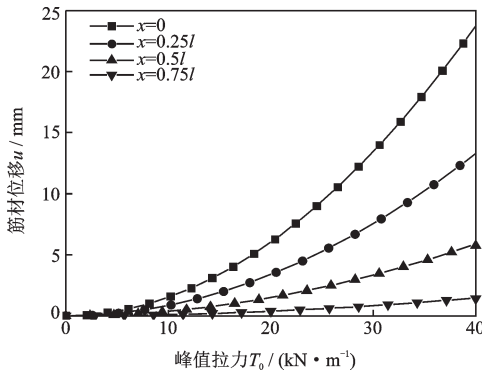


图7 筋材不同位置下位移与峰值拉力的变化关系

Fig.7 Relationship between displacement and peak tensile force at different positions of the reinforcement

0.9567 m为例,由式(15)计算求得筋材不同位置位移的变化关系:

$$\begin{aligned} u &= \frac{T_0 + Et}{2\sigma_n f} \left[\exp\left(-\frac{2\sigma_n f}{Et} x\right) - \exp\left(-\frac{2\sigma_n f}{Et} l\right) \right] + \\ &\quad (x-l) = 20.5882 \cdot (e^{-0.051x} - e^{-0.051l}) + (x-0.9567) \end{aligned} \quad (22)$$

图8为在4种峰值拉力 T_0 和有效长度 l 下筋材任意位置位移的变化情况。由图可知,筋材位移随筋材不同位置呈非线性减小,在初始位置即拉拔端,筋材位移最大,在有效长度位置,筋材位移减小至0。

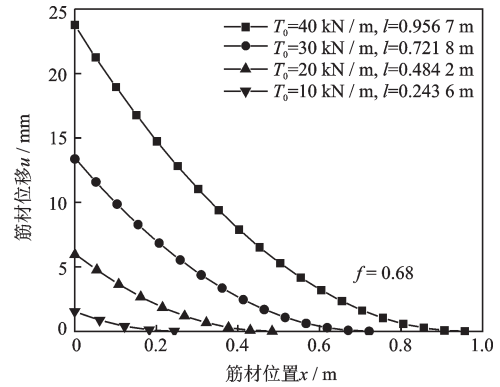


图8 不同峰值拉力下沿筋材长度方向的位移

Fig.8 Displacements along the reinforcement length under different peak tensile force

4 界面拉拔公式验证

由于拉拔试验过程中不容易直接获得筋材内部响应的试验数据,但由式(17)计算可得到拉拔位移与拉力的变化关系,能够反映室内试验时峰值前拉力与位移关系。因此通过式(17)界面拉拔公式预测结果与室内拉拔试验结果^[15]进行比较,初步验证界面拉拔公式的准确性。文献[15]两种尾矿含水率下(1.5%、9.7%)的拉拔试验参数见表2。根据式(10)可计算得到表2中两种含水率下筋-尾矿界面摩擦系数 f ,具体数值见表2。

根据式(17)得到筋材拉拔位移的变化关系为

表2 文献[15]的拉拔试验参数

Table 2 Pull-out test parameters in reference [15]

| 含水率/ % | σ_n/kPa | $Et/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) | L/m | $T_0/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) | f |
|-----------|-----------------------|--|--------------|---|--------|
| 1.5 | 5.62 | 40 | 0.5 | 5.04 | 0.8439 |
| 9.7 | 5.90 | 40 | 0.5 | 5.49 | 0.8725 |

(以含水率为 1.5% 为例):

$$u_0 = \frac{T_0}{2\sigma_n f} - \frac{Et}{2\sigma_n f} \ln\left(\frac{T_0 + Et}{Et}\right)$$

$$= \frac{T_0}{9.4854} - 4.2170 \cdot \ln\left(\frac{T_0 + 40}{40}\right) \quad (23)$$

界面拉拔公式预测结果与室内拉拔试验结果的对比分析如图 9 所示。由图可知,预测结果与试验结果吻合较好,初步验证了界面拉拔公式的准确性,这也说明界面拉拔公式可以较准确的预测试验过程中筋材任意位置数据响应,尤其对于室内试验所用的可延伸性筋材预测效果更好。

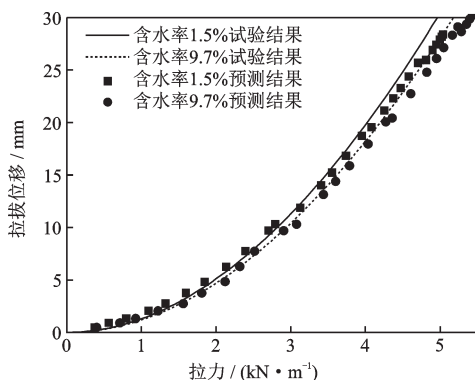


图9 界面拉拔公式预测结果与试验结果对比

Fig.9 Comparison of predicted results of the interface pull-out formula with experimental results

5 结论

(1)在拉拔试验的基础上,推导了能够描述筋材任意位置拉力和位移的界面拉拔公式,对研究筋土界面特性具有重要意义。

(2)给出了筋土界面拉拔公式的具体应用及分析步骤,首先计算峰值拉力的最大值,然后在最大峰值拉力范围内计算给定峰值拉力的筋有效长度,其次确定界面摩擦系数大小,最后预测沿筋材任意位置的位移变化关系;其中,通过界面摩擦系数能够间接验证界面拉拔公式的可靠性,对拉拔试验结果提供一致性解释。

(3)界面拉拔公式预测结果与拉拔试验结果吻合较好,表明了所推导分析模型公式的合理性。

参考文献:

[1] Potts D M, Zdravkovic L. Finite element analysis in geotechnical engineering: application [M]. London: Thomas Telford, 2001.

[2] 杜坤乾,李国祥,李品华,等.钢塑土工格栅在土石混合料中的拉拔试验研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(5):644-650.
Du K Q, Li G X, Li P H, et al. Experimental study on drawing plastic geogrid in soil rock mixture[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015,35(5):644-650. (in Chinese)

[3] 张诚成,朱鸿鹄,唐朝生,等.纤维加筋土界面渐进性破坏模型[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(10):1952-1959.
Zhang Ch Ch, Zhu H H, Tang Ch Sh, et al. Modeling of progressive interface failure of fiber reinforced soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015,49(10):1952-1959. (in Chinese)

[4] Lopes M L, Ladeira M. Influence of the confinement soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14 (10): 543-554.

[5] 陈榕,栾茂田,赵维,等.粉质混合碎石土中土工格栅拉拔阻力特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2008,28(1):49-53,86.
Chen R, Luan M T, Zhao W, et al. Experimental study on the pullout resistance behavior of geogrids in silt mixed with crushed stone [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28 (1) : 49-53,86. (in Chinese)

[6] 徐超,廖星樾.土工格栅与砂土相互作用机制的拉拔试验研究[J].岩土力学,2011,32(2):423-428.
Xu Ch, Liao X Y. Researches on interacton mechanism between geogrid and sand by pull-out tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(2):423-428. (in Chinese)

[7] 汪明元,龚晓南,包承纲,等.土工格栅与压实膨胀土界面的拉拔性状[J].工程力学,2009,26(11):145-151.
Wang M Y, Gong X N, Bao Ch G, et al. Pull-out behavior of the interface between geogrid and compacted expansive soil [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (11):145-151. (in Chinese)

[8] 靳静,杨广庆,刘伟超.横肋间距对土工格栅拉拔特性影响试验研究[J].中国铁道科学,2017,38(5):1-8.
Jin J, Yang G Q, Liu W Ch. Experimental study on effect of transverse rib spacing on geogrid pull-out characteristics [J]. China Railway Science, 2017, 38 (5) : 1-8. (in Chinese)

[9] Wang Z J, Jacobs F, Ziegler M. Experimental and DEM investigation of geogrid-soil interaction under pull-out loads [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44 (3):230-246.

(本文责编:池营营)

(下转第 109 页)