

# 土工格栅-黏性土界面特性的拉拔试验分析

肖成志<sup>1</sup>, 冯晓静<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心 天津 300132;  
2. 大连交通大学 交通运输工程学院 辽宁 大连 116028)

**摘要:**筋-土界面特性是影响加筋土结构性能的重要因素之一,利用中型拉拔模型试验分析了界面正应力和黏性土含水量对格栅-黏性土界面相互作用特性的影响,试验结果表明黏性土含水量对格栅极限抗拔力、界面黏聚力和摩擦系数影响明显。不同界面正应力下格栅极限抗拔力在含水量较小时差别显著,随着黏性土含水量增加,格栅极限抗拔力和界面摩擦系数呈现减少趋势,而筋-土界面间黏聚力先增大后减小,且当含水量达到塑限含水量时,三者均趋于稳定。格栅抗拔力-位移曲线均经历线性和非线性增加以及拉拔极限阶段,并随含水量增加,抗拔力-位移曲线由线性增长向极限状态发展的中间阶段逐渐缩短。在拉拔最大载荷下持续一段时间后卸载,发现格栅的横肋应变有增大的趋势,而纵肋应变呈现减小的趋势。

**关键词:**土工格栅;筋-土界面特性;拉拔试验;黏性土

中图分类号:TU476 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)03-0047-05

## Pullout-test Analysis on Properties of Interface between Geogrid and Clay

XIAO Chengzhi<sup>1</sup>, FENG Xiaojing<sup>2</sup>

(1. Technology and Research Center of Civil Engineering, Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, P. R. China;  
2. Traffic & Transportation school, Dalian JiaoTong University, Dalian 116028, P. R. China)

**Abstract:** The interface interaction between geogrid and soil is one of the key issues on geosynthetic-reinforced soil structures. Comparative analysis of properties of geogrid-clay interface under the different normal stresses and water contents of clay were conducted by medium-sized pullout tests. The results show that ultimate pullout force of geogrid, interfacial cohesion and frictional coefficient are significantly affected by water content of clay. Ultimate pullout force of geogrid tends to be remarkably different when subjected to different normal stresses at a lower water content. And frictional coefficient of interface decreases with the increase of water content, and interfacial cohesion has a tendency to increase followed by decrease with the increase of water content. Moreover, aforementioned three parameters can keep constant when water content is close to value at plasticity limit. The curves of load and displacement possess three stages: linear increase, non-linear increase and ultimate pullout. As water content increases, the interval nonlinear changing stage is not conspicuous. Furthermore, it is found that geogrid strains in transversal ribs tend to increase but to reduce in longitudinal ribs when last level load is kept for given hours and then followed by unloading pullout force.

**Key words:** geogrid; geogrid-soil interface properties; pullout-test; clay

收稿日期:2010-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50909032);河北省自然科学基金资助项目(E2009000054);中国博士后基金资助项目(20070420807);河北省科技厅科技攻关项目(072156130)

作者简介:肖成志(1976-),男,博士,副教授,主要从事土工合成材料及其加筋结构特性方面的研究,(E-mail) xiaocheng-zhi2@sina.com。

筋-土界面相互作用特性研究一直是加筋土领域内的热点之一。研究人员借助直剪或拉拔试验对具有较大内摩擦角和良好排水性能的粒状土与筋材间的界面作用机理进行了研究。如 Schlosser 等<sup>[1]</sup>首先采用三轴直剪试验研究金属条加筋砂土。随后,国内外针对筋材-填料的界面作用特性的试验研究主要涉及的为砂土和碎石土,筋材主要是土工织物或土工格栅<sup>[2-5]</sup>,这些试验结果表明筋材抗拔阻力主要由筋-土界面摩阻力和土对格栅横肋的阻力构成,且筋材变形较小时界面摩擦力即达到峰值,进而随格栅变形的增大,其横肋阻力逐渐增加并最终承担大部分格栅加筋承载拉力。近些年来,随着加筋结构广泛用于公路软基处理、港口岸墙和堤坝等加固结构中,而且一些实际工程受地域条件限制,采用黏性土作为回填料的加筋土结构工程日益增多。因此,研究筋材与黏性土之间的界面相互作用特性就显得尤为重要。Bergado<sup>[6]</sup>试验指出钢制格栅在风化黏土中的抗拔性能主要受筋材的横肋影响。Colin<sup>[7]</sup>现场试验指出当黏性土中含水量变大时,筋-土界面黏结效果明显下降。Mohiuddin<sup>[8]</sup>通过室内和现场拉拔试验分析了筋材在黏性土体中的抗拔机理,筋材抗拔力受界面法向荷载力与筋材长度的影响明显。Murad 等<sup>[9]</sup>基于室内、外拉拔试验得出适当控制黏性土回填料的含水量时,黏性土与筋材之间也能提供合适的抗拔阻力。张波<sup>[10]</sup>、冯晓静<sup>[11]</sup>基于拉拔试验指出,采用黏性土为填料时筋-土剪切性能不良且水稳定性较差,当采用高液限黏性土为回填料时,应降低接触面设计强度指标。本文拟通过中型拉拔仪详细分析黏性土含水量和界面法向应力对格栅-黏性土界面相互作用的影响。

## 1 格栅-黏性土界面特性的拉拔试验

### 1.1 拉拔试验仪

图 1 所示的格栅-黏性土界面特性的拉拔仪采用中型直剪设备改装而成,该装置主要由模型槽和应变控制式水平加载系统组成。模型槽的长、宽和高分别为 100、40、50 cm,采用厚 1 cm 的钢板焊接而成,四周用三角钢进行加固,且靠近加载端的挡板上预留宽和高分别为 20、1 cm 的槽口。模型槽上部有反力架,筋-土界面正应力通过安放在刚性钢板上的千斤顶施加,并通过压力传感器获取压力值。千斤顶加载能力为 10 t。另外,应变控制式水平加载拉伸系统由传力齿轮组、滑道、水平加载杆与夹具等构成。格栅水平纵向的拉拔力通过恒定的齿轮转速提供,并在水平加载杆上安装了高灵敏度拉力传感器

来读取瞬时拉拔力大小。

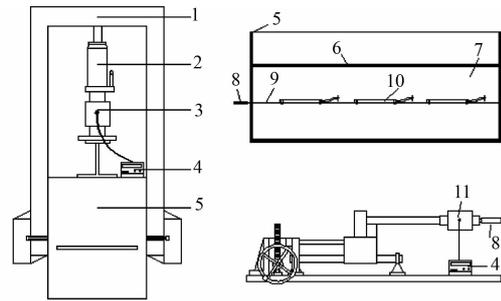


图 1 筋-土界面拉拔试仪

### 1.2 拉拔试验中格栅夹具

为了避免拉拔试验中夹具与格栅之间产生滑移,采用专门制作防滑且方便的夹具与格栅连接,如图 2 所示。为了防止因夹具刚度过大而对土工格栅材料产生严重地损害,试验时需要在格栅与夹具之间放置一层柔性橡胶。

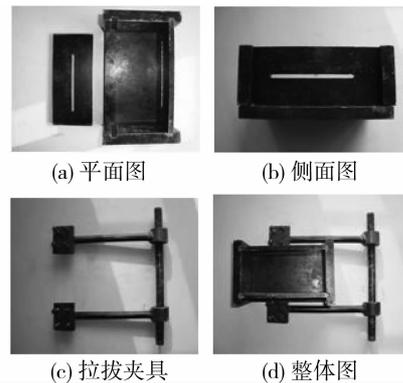


图 2 拉拔试验中格栅夹具图

### 1.3 黏性土工程特性

试验采用的黏性土经烘干、碾散后进行筛分处理,其黏性土的物理性质指标如表 1 所示。此外,为了研究黏性土的抗剪强度随含水量的变化,针对试验所用的黏性土进行了不固结不排水试验,获得了不同含水量时填土的抗剪强度指标,如图 3 所示。

表 1 黏性土物理性质指标

| 土质 | 液限<br>$W_L/\%$ | 塑限<br>$W_P/\%$ | 最佳含水<br>率 $W/\%$ | 最大干密<br>度/ $(g \cdot cm^{-3})$ |
|----|----------------|----------------|------------------|--------------------------------|
| 黏土 | 69.4           | 30.8           | 34.1             | 1.45                           |

由图 3 可知,黏性土的内摩擦角和黏聚力受含水量变化的影响明显,而格栅加筋结构内部稳定性主要依靠筋-土界面相互作用,因此,有必要进行格栅-黏性土界面作用特性的试验研究。

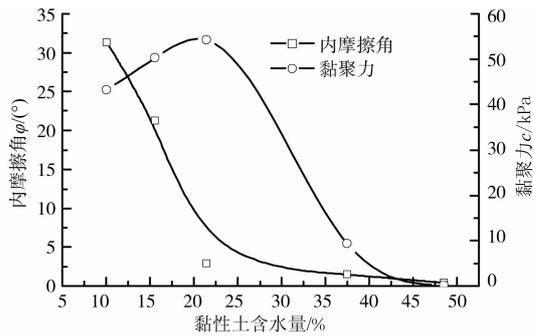


图3 黏性土抗剪强度指标随含水量的变化关系

#### 1.4 土工格栅材料性质及其应变测试

试验筋材采用HDPE材质的EG90R单向土工格栅,其单位面积质量为 $0.60 \text{ kg/m}^2$ ,抗拉强度 $F_u$ 为 $88 \text{ kN/m}$ ,格栅在应变为2%和5%时所对应的抗拉力分别为 $23.7$ 、 $45.2 \text{ kN/m}$ 。格栅长度为 $110 \text{ cm}$ ,其中 $90 \text{ cm}$ 长度的格栅埋置填料内,加载端伸出槽外的部分 $20 \text{ cm}$ 。格栅宽度约 $13.4 \text{ cm}$ ,包含6根纵肋,如图4所示。格栅两根横向肋条之间分别埋设3个相对位移计和3个应变计,测试拉拔试验中筋-土间的相对位移及格栅的应变值,三个测试点距离模型槽加载端面板距离 $D$ 分别约为 $25$ 、 $50$ 、 $75 \text{ cm}$ 。

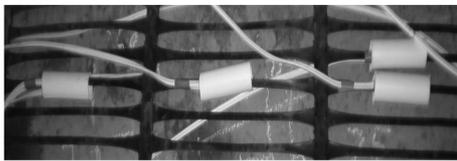


图4 格栅变形测试图

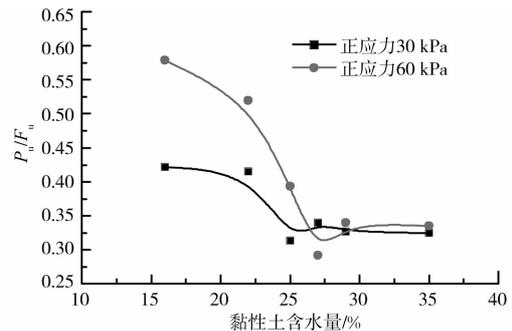
#### 1.5 格栅-黏性土界面特性试验

为了对比分析黏性土含水量对筋-土界面特性的影响,试验采用的界面正应力分别为 $30$ 、 $60 \text{ kPa}$ 时,试验分析了黏性土含水量分别为 $16\%$ 、 $22\%$ 、 $25\%$ 、 $27\%$ 、 $29\%$ 和 $35\%$ 时格栅-黏性土界面特性。为了获得不同含水量的黏性土,将计算所需要水量通过喷壶逐步加入到土中,并在喷水过程中均匀地翻动土体,使土样的含水量均匀。每次配制好一组试验的填料后,用塑料薄膜盖上并将填料置于温室下放置 $24$ 小时后分层回填压实,直到预定铺设格栅层的高度。为了确保获得准确的回填料含水量,需要在铺设层附近取土进行含水量测试,然后铺设带有贴好应变片的格栅,并将导线引出以便测试。随后将格栅上铺设土体并压实,上层覆土厚为 $30 \text{ cm}$ 。界面正应力通过千斤顶置于顶层的钢板进行加载获得,匀速加载速度约为 $1 \text{ mm/min}$ 。

## 2 格栅-黏性土界面拉拔试验结果

### 2.1 黏性土含水量对筋材极限抗拔力 $P_u$ 的影响

图5所示为两种界面正应力作用下格栅极限抗拔力 $P_u$ 与抗拉强度 $F_u$ 比值随黏性土含水量的变化趋势图。由图可知,总体上格栅极限抗拔力随黏性土含水量增加而呈现逐渐减少的趋势,并最终趋于平稳,且当含水量相对较低时(如低于 $25\%$ ),极限抗拔力随界面正应力的增加而明显增大,当含水量在该范围内持续增加时,筋材极限抗拔力显著减小,并且界面正应力较大时,极限抗拔力下降幅度越明显。当含水量大于 $25\%$ 而小于黏土塑限值时,格栅极限抗拔力随含水量增加呈现一定波动,但总体变化趋于缓和,且随着含水量增加并接近黏性土塑限值含水量时,二者之间格栅极限抗拔力趋于平稳且大致相同,表明当含水量增加到一定程度后,筋材极限抗拔力受界面正应力影响不明显。

图5  $P_u/F_u$  随黏性土含水量的变化曲线

### 2.2 黏性土含水量对筋-土界面摩擦特性的影响

筋土界面拉拔系数是反映加筋效果和工程设计的重要参数,而目前规范涉及回填料材料通常为颗粒料如砂性土等,对筋材与黏性土界面的摩擦系数涉及极少。当前,国内公路土工合成材料应用技术规范针对筋-土界面摩擦系数的表达形式为<sup>[12]</sup>

$$K_{po} = \frac{\tan \varphi_{sg}}{\tan \varphi_s} \quad (1)$$

式中: $\varphi_{sg}$ 为格栅与填料间界面摩擦角( $^\circ$ ); $\varphi_s$ 为填料的内摩擦角( $^\circ$ ); $K_{po}$ 为筋-土界面的摩擦系数。

另外,反映界面抗剪强度的 $\tau_{sg}$ 公式为

$$\tau_{sg} = c_{sg} + \sigma_n \tan \varphi_{sg} \quad (2)$$

式中: $c_{sg}$ 为筋-土界面的黏聚力, $\text{kPa}$ ;  $\sigma_n$ 为界面间的正压力, $\text{kPa}$ ;其它符号与上同。

结合式(1)和式(2),针对在不同筋-土界面法向荷载作用下,格栅极限抗拔力受黏性土含水量的影响,进而得到不同黏性土含水量下拉拔试验中界面的抗剪强度参数值,并整理得界面间摩擦系数和内

摩擦角随黏性土含水量变化的影响,如图 6 所示。由图可知,随着黏性土含水量的增加,筋-土界面摩擦系数  $K_{po}$  (或内摩擦角  $\varphi_{sg}$ ) 出现先减少,随后出现略微增大的趋势,且在含水量趋于黏性土塑限含水量时达到稳定;而界面间黏聚力  $c_{sg}$  随着黏性土含水量的增加先增大后减小,在黏性土达到最佳含水量附近时达到峰值。

结合图 5 和图 6 可知,格栅极限抗拔力、界面摩擦系数  $K_{po}$  和黏聚力  $c_{sg}$  在黏性土含水量达到塑限值后均趋于稳定,且界面拉拔系数  $K_{po}$  几乎为零。因此,界面抗剪强度主要由界面黏聚力  $c_{sg}$  提供。且界面摩擦系数在黏性土接近最佳含水量时最小,此时格栅抗拔力主要由筋-土界面间的黏聚力提供。

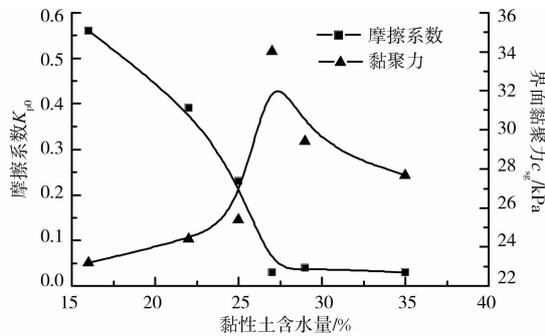


图 6 黏土含水量对界面抗剪强度参数的影响

### 2.3 格栅抗拔力-位移关系曲线

图 7 所示为格栅抗拔力与位移之间的关系曲线。由图可知,不同黏性土含水量时,拉拔位移和抗拔力曲线均表现出拉拔位移随着拉拔力增加而增大,总体上抗拔力-位移曲线主要呈现 3 个变形阶段:第 1 阶段为线性增加阶段,该阶段拉拔位移较小,各个含水量阶段的抗拔力-位移曲线几乎重合,且主要是加载初期的格栅-土体相互咬合阶段。此外,随着黏性土含水量增加,曲线斜率略有下降,表面界面刚度系数随含水量增加呈下降趋势;第 2 阶段呈现非线性增加趋势,随着荷载增加,界面土体开始由加载端向后逐渐传递荷载,且部分界面土体屈服导致该阶段内筋材拉拔力的增长速度逐渐降低,并随着界面位移达到一定变形量后,格栅抗拔力趋于稳定。随着荷载持续增加,格栅抗拔力由稳定阶段会达到某一极限值,随后会出现界面失效,位移突然增加,即抗拔力达到极限的第 3 个阶段。

由图 7 可知,随着黏性土含水量变化,荷载-位移曲线在各个阶段上略有不同,当含水量增加到一定程度后,曲线上非线性增加阶段持续时间缩短,表明含水量增加软化了界面间作用效果,使筋材在较

短时间内达到了拉拔极限荷载。总体上不同含水量下格栅极限抗拔力约为其抗拉强度的 40%~60%。

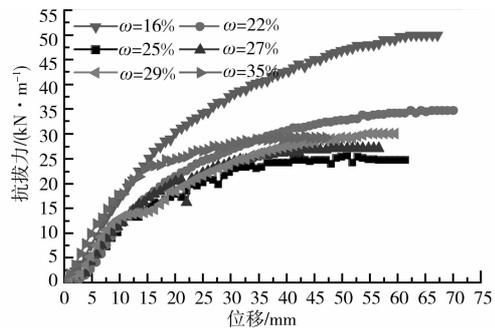


图 7 格栅抗拔力与位移关系曲线

### 2.4 拉拔试验中格栅的荷载-应变曲线

图 8 和图 9 分别给出了 2 种含水量(16%和 29%)下考虑格栅纵向和横向肋条上距离加载端面板不同距离点的荷载-应变曲线。

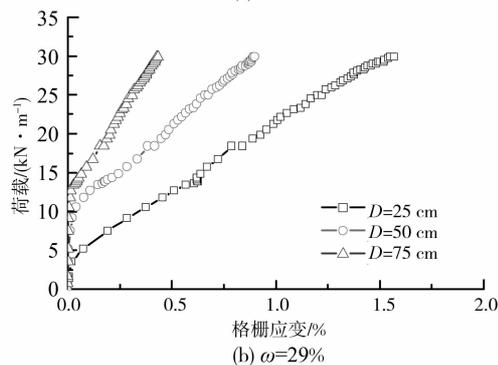
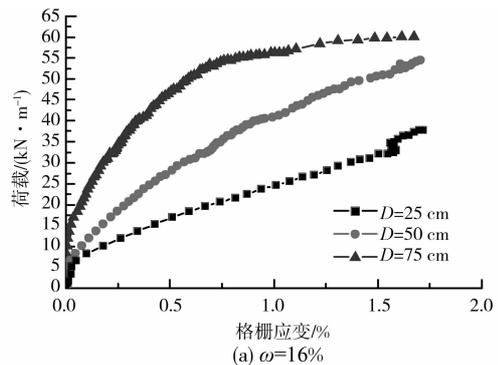


图 8 格栅纵肋的荷载-应变关系  
( $D$  为距加载端面板的距离)

由图 8 和 9 可知:

- 1) 不同黏性土含水量时格栅横肋和纵肋的荷载-应变曲线具有基本相同的变化趋势,格栅横肋与纵肋测点应变非常接近,表明随着含水率的增加,格栅与纵横肋的摩擦作用减弱,致使在加载端力逐渐向后传递,而纵肋应力变化并不大。
- 2) 相同条件下距离加载端面板距离越近,格栅应变越大,格栅应变随着距离加载端面板距离的增

加而逐渐减少,表明格栅沿长度方向受力不均匀。

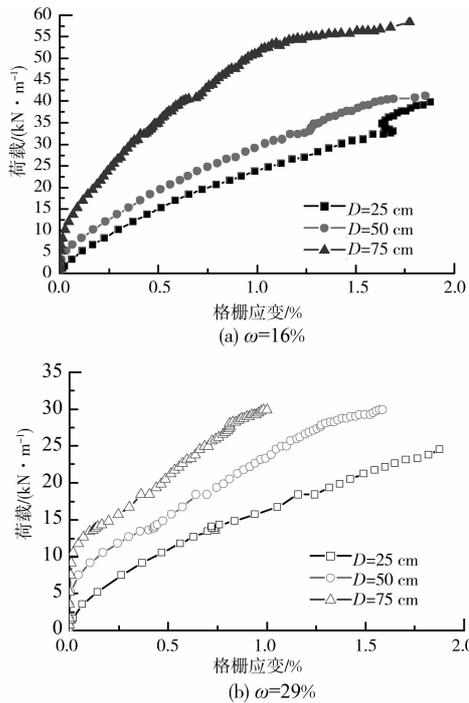


图9 格栅横肋的载荷-应变关系曲线  
( $D$ 为距面板的距离)

## 2.5 土体中格栅应变随时间的变化

为了分析土体中格栅应变随时间的变化,当施加拉拔力并使格栅应变达到约2%时,停止加载,对格栅进行约100 hr的持续观测,其格栅应变随时间(对数坐标)变化关系如图10所示。由图可知:卸载

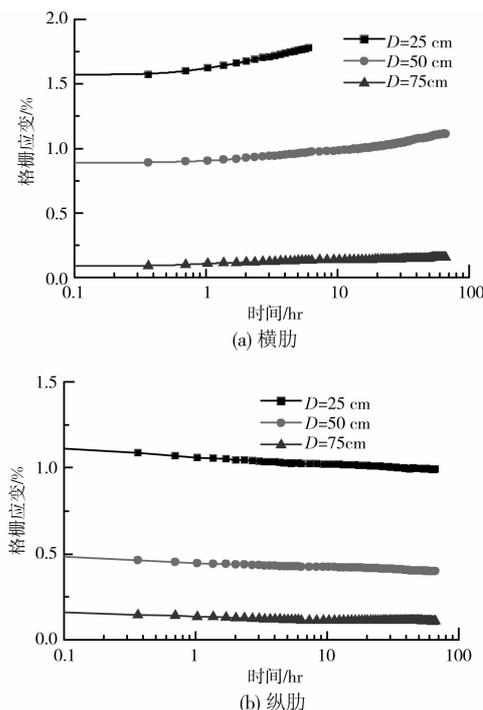


图10 土体中格栅应变随时间的变化

后格栅横肋应变随时间有增大趋势,而格栅的纵向肋条应变呈现减小的趋势。出现这种现象的原因在于当格栅处于拉拔状态时,格栅网孔内土体短时间内无法完成应力重新分布,导致格栅横肋此时所受阻力相比较,从而引起横肋应变增加。

## 3 结论

利用中型拉拔仪对格栅-黏性土界面特性进行了试验研究,并分析了界面正应力和黏性土含水量等因素对格栅-黏土界面特性的影响。

1)不同界面应力作用下格栅极限抗拔力随黏性土含水量增加而逐渐减少,且格栅极限拉拔力在黏性土含水量较小时相差很大。而当黏性土含水量达到塑限值时,极限抗拔力趋于稳定。

2)格栅-黏性土界面上的黏聚力和摩擦系数随土体含水量变化差异明显,黏聚力随含水量增加出现先增大后减小的趋势,而摩擦系数随着含水量的增加呈现先减小后,随后略微增大的趋势并最终在含水量趋于黏性土塑限含水量时达到稳定。

3)格栅抗拔力-位移曲线变化总体上相同,均呈线性增加、非线性变化阶段和拉拔极限阶段,但随着黏性土含水量的增加,二者关系曲线中从线性增长向极限状态发展的中间阶段逐渐不明显。

4)持续加载达到一定应变后卸载,由于界面处应力重新分布的滞后性,格栅横向方向肋条的应变有增大的趋势,而格栅纵肋应变呈现减小的趋势。

## 参考文献:

- [1] 王钊. 国外土工合成材料的应用研究[M]. 香港: 现代知识出版社, 2002.
  - [2] Holtz R D. Laboratory studies of reinforced earth using a woven polyester fabrics [C]//Proceeding International Conference On the Use of Fabrics in Geotechnics. Paris, 1977: 113-117.
  - [3] Myles B. Assessment of soil fabric friction by means of shear [C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Geosynthetics. Las Vegas, USA, 1982: 787-792.
  - [4] 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): 89-94.
- WU Jinghai, CHEN Huan, WANG Lingjuan, etc. Study on soil interaction characteristics of geosynthetics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 89-94.

- algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming [J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 215 (2): 470-480.
- [5] Warren L T, Egbelu P J, Sarker B R, et al. Metaheuristics for project and construction management: A state-of-the-art review [J]. *Automation in Construction*, 2011, 20(5): 491-505.
- [6] Marzouk M M, Omar O A, Abdel H M S, et al. An optimization algorithm for simulation-based planning of low-income housing projects [J]. *Journal of Advanced Research*, 2010, 1(4): 291-300.
- [7] WU I C, Borrmann A, Ert U, et al. Bridge construction schedule generation with pattern-based construction methods and constraint-based simulation [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2010, 24(4): 379-388.
- [8] Navon R, Goldschmidt E, Shpatnisky Y. A concept proving prototype of automated earthmoving control [J]. *Automation in Construction*, 2004, 13(2): 225-239.
- [9] Van T Anthony A, Abourizk S M. Simulation modeling decision support through belief networks [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2006, 14 (5): 614-640.
- [10] HONG Z. Multi-objective simulation-optimization for earthmoving operations [J]. *Automation in Construction*, 2008, 18(1): 79-86.
- [11] Jensen K. Coloured petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use-Volume 2: basic concepts [M]. Springer-Verlag. 1997.
- [12] Vander A W M P. The application of Petri nets to workflow management [J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 1998, 8(1): 21-66.
- [13] Zimmermann H J. 模糊集合论及其应用[M]: 4版. 北京: 世界图书出版公司, 2011.

(编辑 胡玲)

(上接第51页)

- [5] 闫澍旺, BEN BARR. 土工格栅与土相互作用的有限元分析[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(6): 56-61.  
YAN Shuwang, BEN Barr. Finite element modelling of soil-geogrid interaction with application to interpret the pullout behaviour of geogrids [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(6): 56-61.
- [6] Bergado D T, Hardiyatimo H C, Cisneros C B, et al. Pullout resistance of steel geogrids with weathered clay as backfill material [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1992, 15(1): 33-46.
- [7] Collin J G. Earth wall design [D]. Berkeley: Dissertation of University of California, USA, 1986.
- [8] Mohiuddin A. An analysis of laboratory and field pull-out tests of geosynthetics in clayed soils [D]. Baton: Louisiana State University, USA, 2003.
- [9] Murad Y A, Farrag K, Izzaldin A, et al. Evaluation of interaction between geosynthetics and marginal cohesive soils from pullout tests [C]//Geo Jordan 2004. Jordan, 2004, ASCE Geotechnical Special Publication, 299-309.
- [10] 张波, 石名磊. 粘土与筋带直剪试验与拉拔试验对比分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(5): 61-64.  
ZHANG Bo, SHI Minglei. Research on direct shear test and pullout test between clay and geotextile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(5): 61-64.
- [11] 冯晓静. 格栅加筋黏土结构的试验研究及稳定性分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ/T019—98 公路土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

(编辑 胡玲)