

文章编号:1008-1534(2020)03-0158-09

加筋粗粒土大型拉拔模型试验分析¹

张东东¹, 荣 华²

(1.北京城际通岩土工程有限公司, 河北唐山 063000; 2.唐山市建筑工程质量协会, 河北唐山 063000)

摘 要:为明确加筋砾类粗粒土筋土界面之间相互作用以更好的指导工程实践,在土工格栅加筋粗粒土上采用基于自主设计的可视化大型拉拔设备完成拉拔试验。采用高清数码跟踪技术研究加筋粗粒土拉拔界面的形成演化规律,探讨粗粒土的粗料含量 P_5 、土工格栅嵌入长度以及上覆应力的变化对筋土界面性质的影响。根据本试验数据可得,格栅嵌入长度、粗料含量、上覆应力的增加均可有效提高拉拔力峰值和剩余抗拔力;土工格栅嵌入长度短且含有的粗料含量低的情况下,筋土拉拔界面位移带形成较早;通过加入更多粗料量与缩小嵌入长度,可以让拉拔试样内摩擦角与表面黏聚力提升;上覆应力位于0~50 kPa压力范围中升高,可大幅度降低似摩擦系数,上覆应力超过50 kPa时,似摩擦系数下降趋势保持平缓状态。建议工程实际应用中应该优先考虑提高粗料含量。

关键词:岩土力学;土工格栅;粗粒土;可视化;拉拔试验;筋土界面

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

doi:10.7535/hbgykj.2020yx03

Large scale pull-out model test analysis of reinforced coarse-grained soil

ZHANG Dongdong¹, RONG Hua²

(1. Beijing Chengjitong Geotechnical Engineering Co., Ltd, Tangshan, Hebei 063000, China; 2. Tangshan Construction Engineering Quality Association, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: In order to clarify the interaction between the reinforced gravel coarse-grained soil and the interface to better guide the engineering practice, the self-designed large-scale visual drawing equipment is used to complete the drawing test on the geogrid reinforced coarse-grained soil. The formation and evolution of reinforced coarse-grained soil pull-out interface are studied by using high-definition digital tracking technology, and the influence of coarse-grained soil content P_5 , embedded length of Geogrid and change of overlying stress on the properties of reinforced soil interface is discussed. According to the test data, the increase of embedded length, coarse material content and overlying stress of geogrid can effectively improve the peak value of drawing force and the remaining drawing resistance; when the embedded length of geogrid is short and the content of coarse material is low, the displacement band of the drawing interface of reinforced soil forms earlier; by adding more coarse material and reducing the

收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-03-13; 责任编辑: 张 军

基金项目: 国家自然科学基金(51268003)

第一作者简介: 张东东(1986—), 男, 河南兰考人, 工程师, 硕士, 主要从事边坡、基坑、地基处理等方面的研究。

E-mail: ddong12zhang@163.com

张东东, 荣华. 加筋粗粒土大型拉拔模型试验分析[J]. 河北工业科技, 2020, 37(3):

ZHANG Dongdong, RONG Hua. Large scale pull-out model test analysis of reinforced coarse-grained soil[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2020, 37(3):

embedding The insertion length can increase the internal friction angle and the surface cohesion of the drawing sample; the overlying stress increases in the pressure range of 0kPa to 50kPa, which can significantly reduce the quasi friction coefficient. When the overlying stress exceeds 50kPa, the quasi friction coefficient decreases smoothly. It is suggested that the increase of coarse material content should be given priority in practical application.

Keywords: geotechnical mechanics; geogrid; coarse-grained soil; visualization; pull-out test; reinforced soil interface

加筋土界面作用特性得到国内外众多学者的重视, 针对筋土界面作用开展了广泛而深入的研究, 其中多采用拉拔试验来测定筋土界面参数^[1-6]。

徐超等^[7]通过室内拉拔试验, 分析土工格栅与砂土相互作用机制和格栅横纵肋对拉拔阻力的影响。MORACIA 等^[8]采用多变量分析法和拉拔试验, 对土工格栅抗拔性能进行研究。SIDNEI 等^[9], PALMEIRA^[10]及施有志^[11]初步研究了筋土界面相互作用的机制, 分析了拉拔试验中筋土界面作用的影响因素。周健等^[12]从细观角度分析了土工格栅横肋与砂土的拉拔界面作用机理。刘文白等^[13]通过室内界面试验研究了土工格栅与砂土接触面的强度特性, 张孟喜等^[14]提出立体加筋方法, 分析了条带式带齿加筋界面特性。近几年, 国外大量专家学者开始研究有关加筋土筋土界面特性, 然而当前研究有关加筋砾类粗粒土筋土界面之间相互作用方面的资料与科研成果较少。

笔者针对加筋粗粒土采用大型拉拔试验进行研究, 对筋土界面间的作用机理分析, 与最先进的高清数码跟踪技术相结合, 研究拉拔试验过程中改变 σ_v 上覆应力、 P_5 粗料含量以及 L 嵌入长度等参数后影响界面性质的情况, 揭示界面作用机理。

1 拉拔设备、试验材料和方案

1.1 拉拔设备

图 1 表示拉拔试验设备, 选择拉拔盒长、宽、高分别为 600, 400, 500 mm。位于试验箱前侧嵌有 400 mm×200 mm(长×高)的双层钢化玻璃, 可进行筋土界面图像摄录分析。在模型箱侧面设有可伸缩宽度的开口, 作为各种土工合成材料拉拔试验的进出口。



图 1 试验所采用的设备图

Fig.1 Equipment diagram used in the test

加载系统分为水平与竖向两种加载系统, 其中竖向加载系统中有反力框架与液压千斤顶, 利用液压阀对竖向载荷加载调节。而水平加载系统采用推拉电动机加载水平载荷, 该电动机速率固定, 试验阶段通过拉拔家居与推拉电动机间的压力传感器、位移传感器存具体拉拔位移与剪切力。

1.2 试验土料及加筋材料

所采用的试验土料取自柳州的砾类粗粒土。本粗粒土物理性质指标指的是 d_{30} 中值粒径、 d_{10} 有效粒径、 d_{50} 平均粒径、 C_u 不均匀系数、 d_{60} 限制粒径以及, C_c 曲率系数, 对应值分别为 1.36, 0.58, 2.18, 5.24, 3.06 以及 1.04 mm, 在表 1 中详细记录了砂土颗粒等级与配置。

表 1 试验所采用的土体颗粒的级配表

Tab.1 Grading table of soil particles used in the test

粒径取值/mm	0.25 ~ 0.50	0.50~ 1.00	1.00~ 2.00	2.00 ~5.00	>5.00
颗粒的组成/%	8.00	12.00	28.00	34.00	18.00

试验用的土工格栅为双向土工格栅, 型号为 TGSG-30。土工格栅的实际图和相应指标分别如图 2 和表 2 所示。在具体试验中, 土工格栅的嵌入长度 L 为变量, 分别取 35, 45 和 55 cm。试验时土工格栅通过配套的专用夹具与拉拔测试仪连在一起。



图 2 试验所采用的土工格栅示意图

Fig.2 Schematic diagram of geogrid used in the test

表 2 所使用的土工格栅相应的技术指标

Tab. 2 Corresponding technical indexes of geogrid used

纵向拉伸屈服力/(kN m ⁻¹)	横向拉伸屈服力/(kN m ⁻¹)	纵向屈服伸长率/%	横向屈服伸长率/%	2%的纵向拉伸力/(kN m ⁻¹)	2%的横向拉伸力/(kN m ⁻¹)	5%的纵向拉伸力/(kN m ⁻¹)	5%的横向拉伸力/(kN m ⁻¹)	网孔规格尺寸/mm
32.80	32.50	13.70	11.20	11.50	11.80	22.30	22.90	40.0×30.0

1.3 试验方案

本文由研究现状与工程应用情况分析, 针对 3 种不同粗料含量、栅格嵌入长度以及覆应力等处于各种工况环境下实施加筋粗粒土拉拔试验, 探讨各因素对加筋粗粒土拉拔筋土界面特性的影响。具体的试验方案如表 3 所示, 共进行了 27 组试验。

表 3 具体试验方案表

Tab.3 Specific test scheme

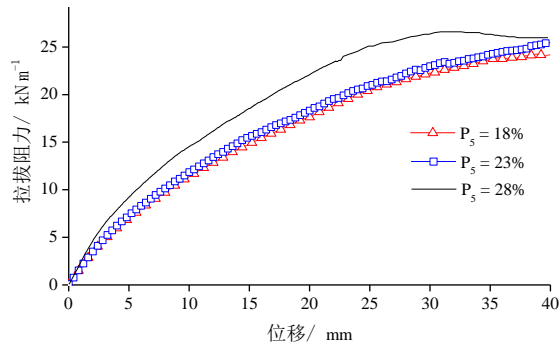
序号	粗料含量 P_5 /%	嵌入长度 L /cm	上覆应力 σ_v /kPa
1	18	35	25, 50, 75
2	18	45	25, 50, 75
3	18	55	25, 50, 75
4	23	35	25, 50, 75
5	23	45	25, 50, 75
6	23	55	25, 50, 75
7	28	35	25, 50, 75
8	28	45	25, 50, 75
9	28	55	25, 50, 75

粗粒土粒径组成结构复杂性强, 应用领域较广, 粗粒土 P_5 粗料的含量直接影响粗粒土工程性质^[15,16], 不同粗粒土的含量下, 界面剪剪切作用差异很大, 当前相关研究与理论较少, 尤其是研究加筋粗粒土拉拔试验的少之又少。本实验依据表 1 显示的颗粒级配粗料含量在 18% 的基础上, 每次递增 5%, 对改变粗料含量后影响筋土界面特性情况分析, 本试验选择的土料中粗料 P_5 的含量分为 3 种, 23%, 18% 及 28%。拉拔试验中所采用的拉拔速度为 1 mm/min。

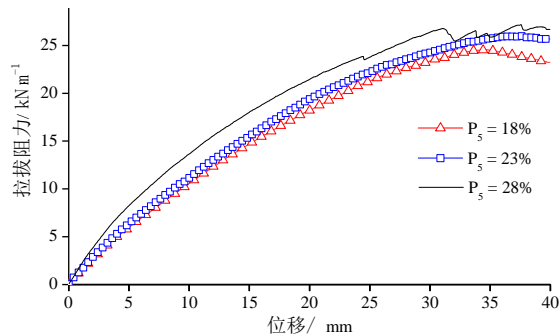
2 试验结果分析

2.1 粗料含量及嵌入长度对筋材拉拔宏观特性的影响

图 3 表示 18%、23% 及 28% 三种不同含量的粗料 P_5 时开展的土工格栅拉拔试验数据曲线图。分析该图可得, 在不同粗料含量时, 拉拔阻力-位移曲线规律基本相同。抗拔阻力峰值与 P_5 含量呈反相关关系。由此得出, P_5 含量增加, 土粒间的咬合性增强, 颗粒承受的阻力加大, 使其难以相互错动与旋转, 试样生成的拉拔位移一致的情况下所承受的拉拔阻力增大。经分析得出, 加大粗料含量后试样拉拔阻力-位移曲线上的拉拔阻力峰值处于上升趋势。



a) 上覆压力 50 kPa



b) 上覆压力 75 kPa

图 3 不同 P_5 含量和上覆压力下拉拔试验结果曲线

Fig.3 Pull-down test result curve of different P_5 content and overlying pressure

通过比较图 3a) 与图 3b) 可知, 试样在粗料含量相同时, 加大上覆应力后对应的曲线上的拉拔阻力峰值强度也随之增大, 上覆应力增大后导致土粒更密咬合更强, 增强了界面位置的嵌固强度与摩擦作用, 因此, 试验生成的拉拔位移相等时所承受的拉拔阻力会显著增大。

改变格栅嵌入长度对试验结果的影响如图 4 所示。图 4 表示 3 种土工格栅嵌入长度与粗粒土拉拔试验图, 该长度分别为 35, 45 及 55 cm。观察图 4 可得: 1) 拉拔试验时选取多种嵌入长度, 拉拔阻力-位移曲线在上覆应力较大时 (如达到 75 kPa 时) 表现出一定软化特性, 拉拔位移的不断延长使得试验拉拔阻力加大, 该阻力上升至最高值时, 拉拔阻力会在某个固定值上保持稳定或者继续降低。2) 拉拔试验时, 延长嵌入长度试验中的拉拔阻力峰值也保持上升趋势。造成该现象的原因在于, 嵌入长度增加, 筋土接触面积加大, 拉拔位移相等时承受的拉拔阻力较大。

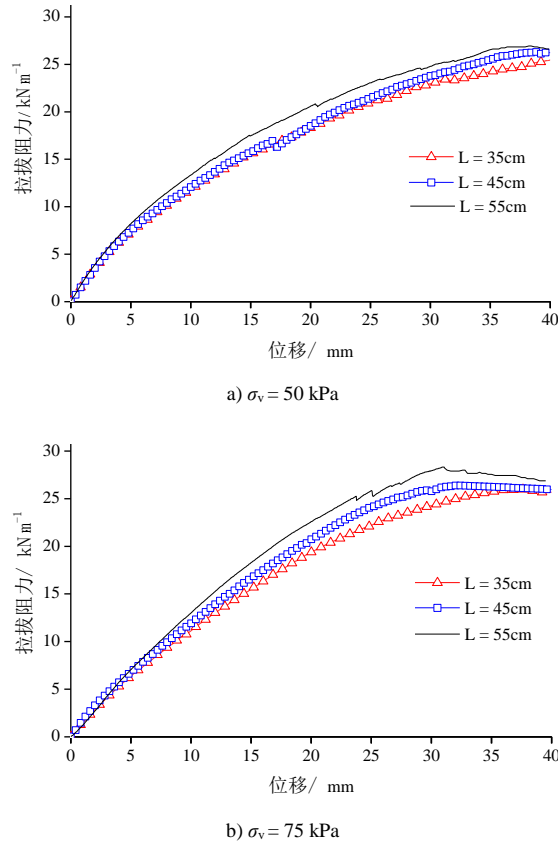


图 4 不同嵌入长度的拉拔试验结果

Fig.4 Pull-out test results of different geogrid embedded length

2.2 粗粒土与土工格栅拉拔界面特性分析

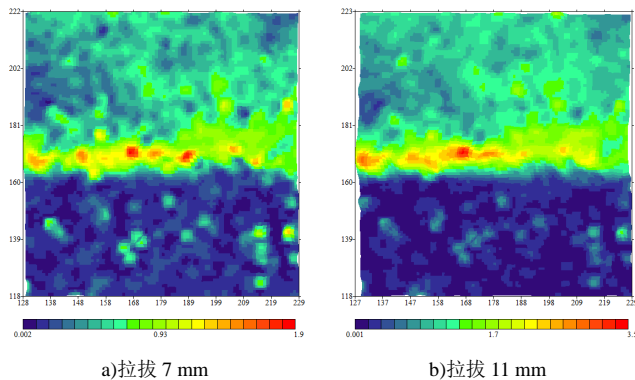
通常试验箱前侧位置嵌入一个钢化玻璃材料的观测窗, 利用该窗口可以摄录筋土界面图像分析, 观察延长拉拔长度后筋土拉拔界面位移场演变^[17]。

图 5 与图 6 表示各种嵌入长度试样筋土接触面位移变化图, 分析该图得出下列基本规律:

1) 拉拔时, 筋土界面上的土粒位移大于界面下的土粒位移, 造成该现象是由于模型箱体具有上覆压力与土体自身重量, 拉拔试验阶段土工格栅下界面上的土体颗粒与上界面对比密实程度更高, 不同颗粒之间接触密切性更大, 试验阶段上界面土体颗粒受到土工格栅驱动下出现较大位移。

2) 拉拔试验时, 格栅拉拔位移的增大, 位于筋土界面周围的土体颗粒位移传递至拉拔方向, 逐渐形成更清晰的位移带临界轮廓。

3) L 的值为 35cm 时, 对应的试样位移大于等于 15 mm, 当 L 的长度为 45 cm 时, 试样取得的拉拔长度大于等于 27 mm, 这时筋土界面保持一个稳定性高的拉拔位移带, 该带厚度并非完全相同, 处于某个恒值位置上下浮动。嵌入长度直接影响构成稳定位移带需要的拉拔位移。



a)拉拔 7 mm

b)拉拔 11 mm

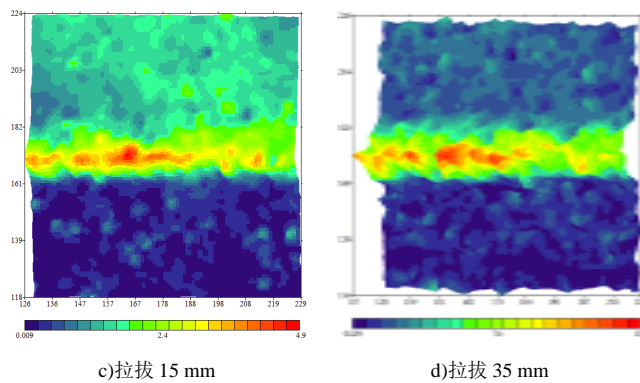


图 5 土工格栅嵌入长度 35 cm 筋土接触面的位移演化图

Fig.5 Displacement change diagram of reinforced soil contact surface with embedded length of Geogrid of 35 cm

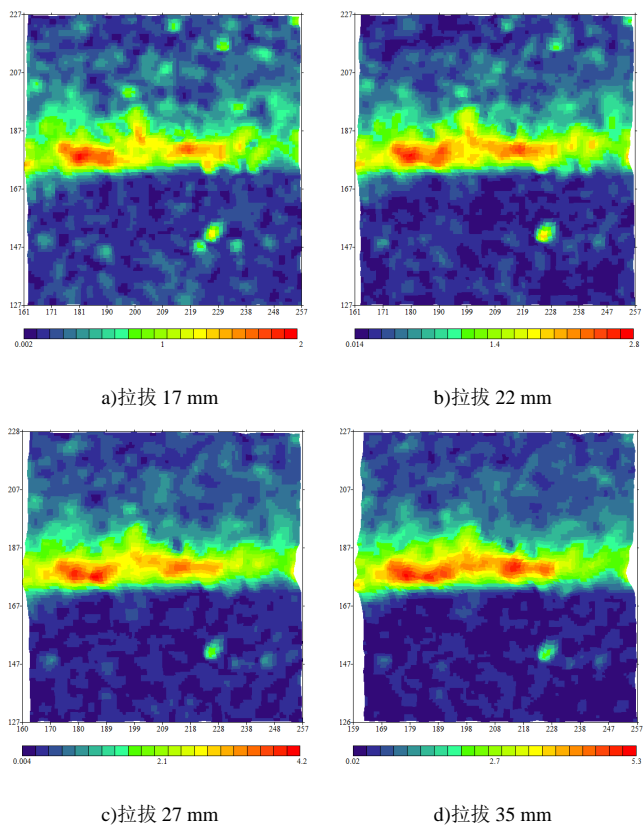


图 6 试样嵌入长度 45 cm 筋土接触面的位移演化图

Fig.6 Displacement change diagram of reinforced soil contact surface with embedded length of Geogrid of 45 cm

图 7 和图 8 分别为不同粗粒含量试样筋土接触面的位移演化图。从图中可以发现：

- 1) 随着拉拔位移的加大，界面位移由土工格栅前端向末端扩展，这时位移带上存在清晰的边界轮廓。
- 2) 试样筋土界面在持续延长拉伸位移后，拉拔位移带逐步保持稳定状态。
- 3) 试样中含有的粗料含量高时，可以更早的形成位移带，相应的试样拉拔位移带厚度增加。导致该现象的因素在于，试样中含有的粗料含量高时，相应的土体平均颗粒粒径大，拉拔试验时土体颗粒出现位移、旋转现象严重，导致筋土界面土体颗粒发生错动。

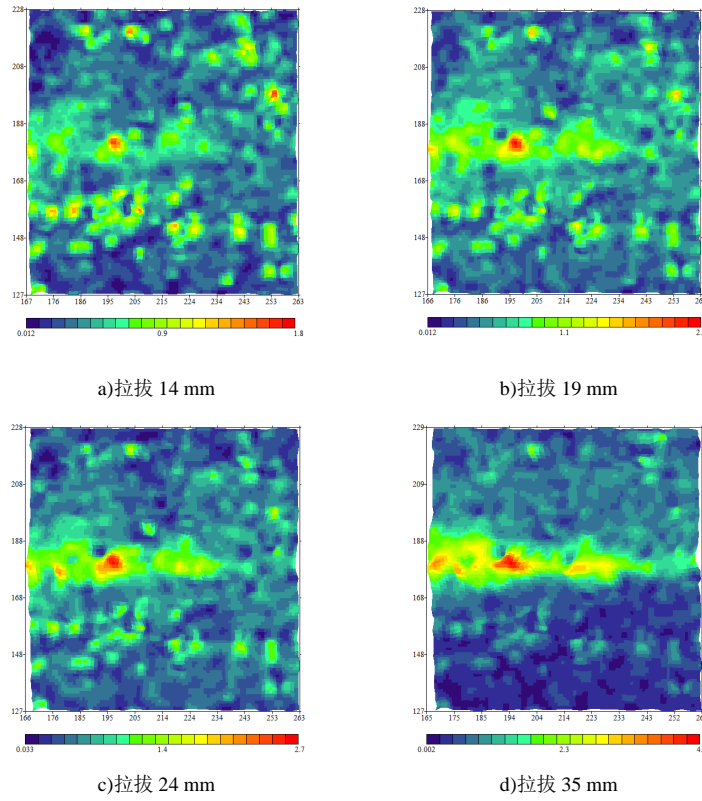


图 7 粗料含量 23%时筋土界面位移演化图

Fig.7 Interface displacement evolution of reinforced soil with 23% coarse material content

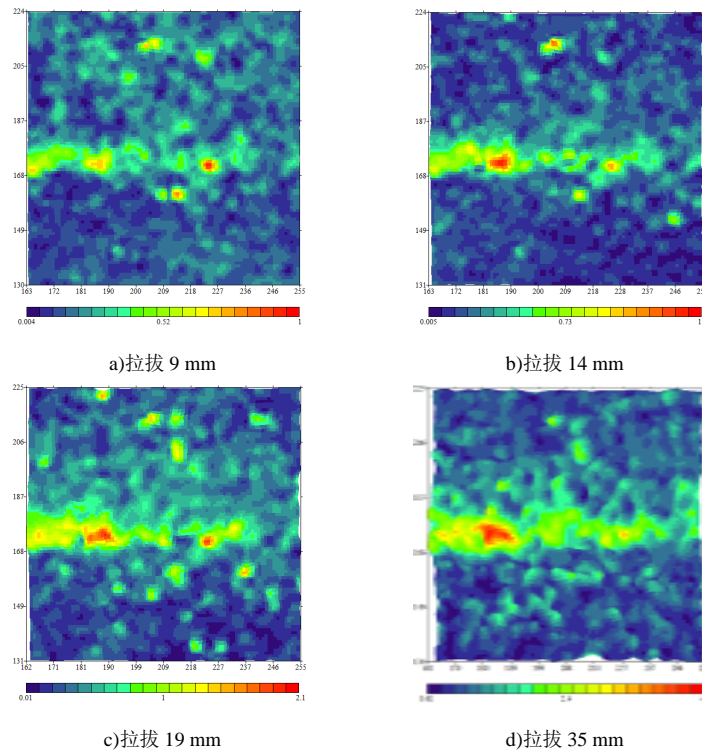


图 8 粗料含量 28%时筋土界面位移演化图

Fig.8 Interface displacement evolution of reinforced soil with 28% coarse material content

2.3 嵌入长度对筋土拉拔界面参数影响

粗粒土与筋材拉拔时, 假设拉拔界面的摩擦力以均匀状态分布, 则由下列公式表示拉拔试验界面上

的拉拔摩擦强度 τ_p 与上覆应力 σ_v :

$$\sigma_v = \frac{P}{A}, \tag{1}$$

$$\tau_p = \frac{T_p}{2LB} \tag{2}$$

式中: P 表示拉拔试验的竖向载荷, kN; T_p 表示拉拔试验峰值水平总拉力, kN; A 、 L 、 B 分别表示拉拔箱水平面积、土工格栅嵌入土体内长度与宽度值。

拉拔试验界面拉拔摩擦系数 f 可表示为

$$f = \frac{\tau_p}{\sigma_v} \tag{3}$$

图 9 为不同嵌入长度试样的剪应力与上覆应力关系曲线。表 4 为不同嵌入长度试样的筋土黏聚力与内摩擦角汇总表。结合图 9 和表 4 可以得知:

- 1) 加筋粗粒土拉拔试样在延长嵌入长度后, 界面黏聚力 c 由最初的 25.92 kPa 降低至 20.43 kPa, 而嵌入长度延长后界面黏聚力下降, 黏聚力与嵌入长度间为反比关系。
- 2) 比较嵌入长度为三种长度时对应的界面摩擦角 φ 值, 试验界面承受的内摩擦角在嵌入长度延长后下降, 而减小嵌入长度试样的内摩擦角增大。
- 3) 嵌入长度对筋土界面参数影响较为显著, 在试验中, 长嵌入长度与短嵌入长度相比, 所得筋土界面参数偏小, 与现场大尺寸加筋工况更加符合。

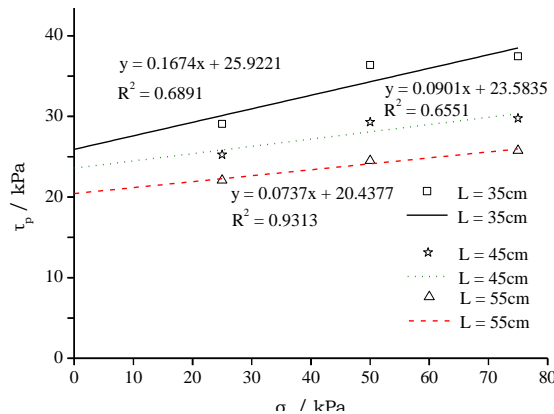


图 9 不同嵌入长度试样剪应力-上覆应力曲线

Fig.9 Change of shear stress with overlying stress under different embedded length

表 4 不同嵌入长度下界面黏聚力与内摩擦角

Tab.4 Interface cohesion and internal friction angle under different embedded length

嵌入长 L/cm	筋土间黏聚力 c/kPa	筋土间内摩擦角的正切值	筋土间内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
35.00	25.92	0.17	9.50
45.00	23.58	0.09	5.15
55.00	20.43	0.07	4.22

根据式 (3) 分别计算各嵌入长度的似摩擦系数 f 值。图 10 为不同嵌入长度试样的似摩擦系数与上覆应力关系曲线。从图 10 可得:

- 1) 增大上覆应力相应的不同土工格栅嵌入长度拉拔试样界面摩擦系数下降, 同时, 上覆应力的增大区间为 0~50 kPa, 取得的摩擦系数改变幅度最大。当上覆应力超过 50 kPa, 对应的似摩擦系数改变幅度小, 逐步保持平稳状态。

2) 延长嵌入长度后, 在上覆应力相等的情况下试样摩擦系数下降。

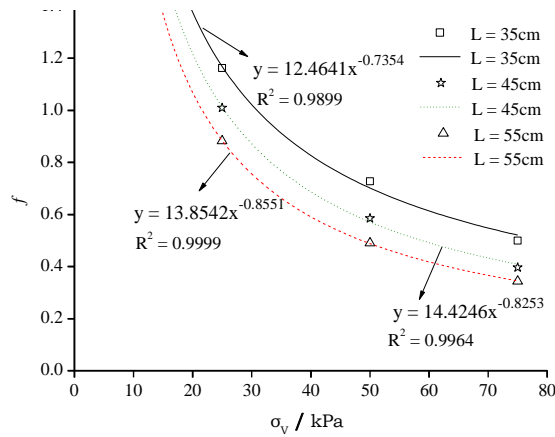


图 10 嵌入长对似摩擦系数与上覆应力关系曲线的影响

Fig.10 Influence of embedment length on the curve of relationship between quasi friction coefficient and overlying stress

2.4 粗料含量对筋土拉拔界面参数影响

图 11 为粗料含量 18%、23% 和 28% 的拉拔试样的剪应力与上覆应力关系曲线。表 5 为各粗料含量拉拔试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值汇总表。结合图 11 和表 5 可以发现:

1) 拉拔试样增大粗料含量后界面黏聚力处于不断上升趋势, 在粗料含量为 18% 的情况下界面黏聚力为 25.295 2 kPa, 增大粗料含量为 28% 对应的界面黏聚力上升至 27.236 7 kPa。

2) 3 种不同含量的粗料对应的界面内摩擦角 φ 值, 拉拔试验过程中增大粗料含量对应的内摩擦角增加, 由此得出增大试样粗料含量, 则内摩擦角 φ 也随之增加。

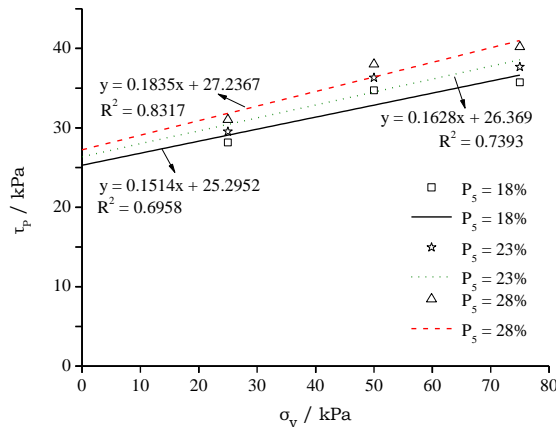


图 11 粗料含量随剪应力与上覆应力关系的影响

Fig.11 Influence of coarse material content on the relationship between shear stress and overlying stress

表 5 不同粗料含量下界面黏聚力与内摩擦角

Tab.5 Interface cohesion and internal friction angle under different coarse material content

粗料的含量/%	筋土间黏聚力 c / kPa	筋土间内摩擦角的正切值	筋土间内摩擦角 φ (°)
18.00	25.30	0.15	8.61
23.00	26.37	0.16	9.25
28.00	27.24	0.18	10.40

图 12 表示各种粗料含量时试样的似摩擦系数-上覆应力曲线, 观察该图可得: 增加上覆应力后不同粗料含量的试验界面摩擦系数下降, 该变化类似于改变嵌入长度。上覆应力相等时, 粗料含量与筋土界面摩擦系数成正比, 改变粗料含量后对似摩擦系数-上覆应力曲线中对应于不同上覆应力的似摩擦系

数值产生影响,但是影响曲线的变化幅度较小。

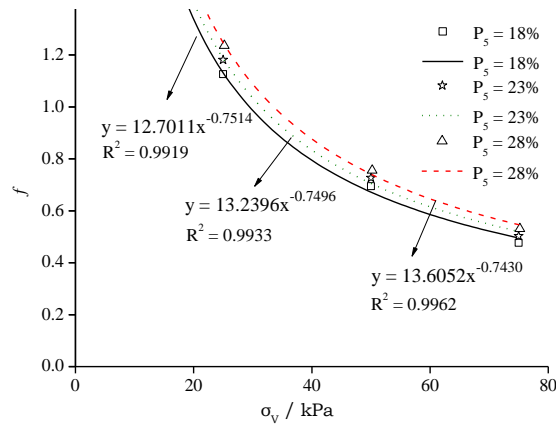


图 12 粗料含量对似摩擦系数和上覆应力曲线关系的影响

Fig.12 Influence of coarse material content on the relationship between the quasi friction coefficient and the overlying stress curve

3 筋土拉拔界面作用机理分析

土工格栅面对网孔土体颗粒产生的嵌固作用、拉拔试验时附近土体颗粒接触面与土工格栅生成的摩擦力是加筋粗粒土试样中生成拉拔阻力的两个重要来源。依据土工格栅筋土界面的发展情况划分加筋粗粒土拉拔试验为以下三个不同时期:

上升期。试验在实施阶段拉拔位移不断增大,土体与土工格栅间开始生成相互错动,由土工格栅前端开始扩展筋土界面应变场与位移场到末端,这时土工格栅界面承受的界面嵌固作用和界面摩擦作用不断加强。

波动期。土工格栅在应变场与位移场的扩展下,嵌入长度缩小,接触土体间的面积缩小导致加筋作用变弱;已经开始形成剪切带与位移带保持稳定状态从而提高加筋作用。经分析两作用共同决定本时期拉拔阻力,因此该数值会产生波动,同时本时期拉拔阻力也到达峰值。

下降期。本时期已经在筋土界面形成稳定的剪切带与位移带,延长拉拔位移,相应的土工格栅嵌入长度缩小,并降低土工格栅嵌固作用与界面摩擦作用。本时期拉拔阻力保持某个恒值或者下降最终到结束实验。

4 结 语

1) 试样中改变嵌入长度、粗料含量及上覆应力后直接影响其宏观特性。在试样拉拔试验阶段,格栅嵌入长度、粗料含量、上覆应力的增加均可有效提高拉拔力峰值,也可以将试样拉拔阻力-位移曲线上剩余的拉拔阻力增大;

2) 拉拔试验时,对比土工格栅上界面与下界面土体颗粒位移,前者远远大于后者,增大位移后筋土界面位移场由土工格栅前端扩展至后端,并向着稳定状态发展,最终形成一个厚度一定的位移带;

3) 试验时改变嵌入长度与粗料含量也影响筋土界面的位移场发展趋势。加入的粗料含量高时,可在早期形成位移带;土工格栅的嵌入长度短时,与嵌入长度长的情况下相比形成位移带所需的时间更短。

4) 加筋粗粒土试样在改变粗料含量与嵌入长度时,直接影响试样内摩擦角与界面黏聚力。通过加大粗料含量与缩小嵌入长度,均可将拉拔试样内摩擦角与界面黏聚力增大。

5) 随着上覆应力的增加,界面似摩擦系数减小,同时上覆应力的增大区间为 0~50 kPa,而似摩擦系数改变幅度更高。上覆应力超过 50 kPa 且持续上升时,似摩擦系数改变幅度保持平缓稳定状态。

6) 上覆应力相等的情况下,试样中延长嵌入长度对应的似摩擦系数下降,上覆应力相同时造成的似摩擦系数改变幅度下降;同样的上覆应力下,增大粗料含量相应的似摩擦系数上升,由此得出,改变粗料含量后对似摩擦系数-上覆应力曲线中不同上覆应力相应的似摩擦系数值产生影响,但是对曲线变

化幅度影响较小。

参考文献/References:

- [1] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究及试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1735-1744.
BAO Chenggang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1735-1744.
- [2] MORACI N, GIOFFRE D. A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(2): 116-128.
- [3] 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 Guangqing, LI Guangxin, ZHANG Baojian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 948-952.
- [4] 董士杰, 刘伟民. 土工格栅加筋边坡地震平均永久位移影响因素分析[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(3): 109-114.
DONG Shijie, LIU Weimin. Analysis on influencing factors to the average permanent displacement of geogrid reinforced soil slope subject to seismic action[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(3): 109-114.
- [5] 赵川, 窦远明, 耿敏. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(1): 88-91.
ZHAO Chuan, DOU Yuanming, GENG Min. Interface friction characteristics of geogrids [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2014, 43(1): 88-91.
- [6] 肖成志, 冯晓静. 土工格栅-黏性土界面特性的拉拔试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(3): 47-51.
XIAO Chengzhi, FENG Xiaojing. Pull-out test analysis on properties of interface between geogrid and clay[J]. Journal of Civil Architecture and environmental Engineering, 2012, 34(3): 47-51.
- [7] 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]. 岩石力学, 2011, 32(2): 423-428.
XU Chao, LIAO Xingyue. Researches on interaction mechanism between geogrid and sand by pull-out tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 423-428.
- [8] MORACI N, RECALCATIB P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(4): 220-242.
- [9] SIDNEI H C T, BENEDITO S B, JORGE G Z. Pullout resistance of individual longitudinal and transverse geogrid ribs[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2007, 133(1): 37-50.
- [10] PALMEIRA E M. Bearing force mobilisation in pullout tests on geogrids[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2004, 22(6): 481-509.
- [11] 施有志, 马时冬. 土工格栅的界面特性试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 22-24.
SHI Youzhi, MA Shidong. Test for interface characteristics of geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 22-24.
- [12] 周健, 唐群艳, 王家全, 等. 土工格栅横肋与砂土接触面的细观试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1128-1134.
ZHOU Jian, TANG Qunyan, WANG Jianquan, et al. Mesoscopic study on interface between transverse rib of geogrid and sand[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(8): 1128-1134.
- [13] 刘文白, 周健. 土工格栅与土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 965-970.
LIU Wenbai, ZHOU Jian. Experimental research on interface friction of geogrids and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 965-970.
- [14] 张孟喜, 张石磊, 黄瑾. 低超载下条带式带齿加筋界面特性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1623-1629.
ZHANG Mengxi, ZHANG Shilei, HUANG Jin. Behavior of interface between denti-strip geosynthetic reinforcements and soil under low surcharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1623-1629.
- [15] 郭庆国. 粗粒土工程性质及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [16] 谢贝贝, 胡幼常. 加筋粗粒土力学性能试验研究[J]. 交通科技, 2017(6): 99-102
XIE Beibei, HU Youchang. Experimental study on mechanical properties of geogrid-reinforced granular soil[J]. Transportation Science & Technology, 2017(6): 99-102
- [17] 胡幼常, 靳少卫, 宋亮, 等. 基于影响带观测的加筋土坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 228-234.
HU You-hang, JIN Shaowei, SONG Liang, et al. Stability analysis of reinforced soil slopes based on observation of reinforcement-effected strip[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 228-234.