

# 土工合成材料加筋边坡宏细观机理模型试验研究

李 飞<sup>1,2</sup>, 周 健<sup>1,2</sup>, 张 姣<sup>3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 上海城市管理职业技术学院土木工程与交通学院, 上海 200432)

**摘要:** 通过包裹式加筋边坡模型试验对加筋边坡宏观变形模式、宏观力学性状、筋土界面细观作用和剪切破坏带处土颗粒运动进行研究, 分析土工合成材料加筋边坡宏细观机理。砂土加筋边坡由于加筋体的存在, 宏观变形上呈现为类似黏性土边坡的整体滑移破坏模式, 出现圆弧状剪切破坏带; 坡顶上部基础  $p-s$  曲线类似基础整体剪切破坏弹性、弹塑性和塑性破坏三阶段, 曲线各阶段变化与主剪切破坏带整体发展有密切关系; 细观上筋土界面处筋材与土颗粒摩擦和咬合作用提供“似黏聚力”; “主剪切破坏带”内颗粒的滚动摩擦、“过渡区”内颗粒的滚动摩擦和滑动摩擦和“稳定区”内颗粒的咬合作用构成整个剪切破坏带抗滑阻力。筋土界面处筋材与土颗粒相互作用所提供的“似黏聚力”和主剪切破坏带的发展和贯通所提供的滚动摩擦和滑动摩擦是形成加筋砂土边坡整体滑移、改变整个边坡破坏模式的内在原因。

**关键词:** 包裹式加筋边坡; 宏观破坏模式; 细观颗粒运动; 宏细观机理

**中图分类号:** TU47      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)06-1080-08

**作者简介:** 李 飞(1982-), 男, 湖北荆州人, 博士, 主要从事为土体宏细观机理和软土地基处理技术等方面的研究工作。E-mail: lifei1982127@hotmail.com.

## Model tests on macro-mesoscopic mechanism of geosynthetic-reinforced slopes

LI Fei<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiao<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200432, China)

**Abstract:** Model tests on a geosynthetic-reinforced slope in macro- and meso-scale are performed to investigate its deformation models, meso-interaction between geosynthetic and soil particles, particle movement in the shear zone, as well as macro-mesoscopic mechanism. Because of the geosynthetic in the sand slope, a shear zone in arc occurs just like the failure surface mode of clay slope in macro-scale. Three stages can be found in the  $p-s$  curve of foundation: elastic stage, elastic-plastic stage and plastic stage. The transformation of  $p-s$  curve relates to the development of the main shear zone. The “cohesion” in the sand slope is provided by friction and occlusive force in the interface between sand particle and geosynthetic in meso-scale. The whole sliding resistance is composed by the friction in the “main shear zone”, “transitional zone” and “steady zone”. The intrinsic factors which form and change the failure surface of the geosynthetic-reinforced slope are the “cohesion” provided by friction and occlusive force in the interface between sand particle and geosynthetic and the friction force during the development of whole shear zone.

**Key words:** wrap-reinforced slope; macroscopic failure model; mesoscopic particle movement; macro-mesoscopic mechanism

## 0 引言

近年来土工合成材料被广泛应用在路堤、边坡等各种工程领域中, 不同程度改善土体的抗拉强度和变形形态, 形成“加筋土”<sup>[1]</sup>。国内外学者对土工合成材料加筋土做了大量的研究, 包括加筋土工结构研究和筋土界面研究两个方面。

Mohamed 等<sup>[2]</sup>通过 50 组加筋边坡模型试验研究边坡高度、边坡角度、加筋长度和加筋间距对加筋边坡承载性状的影响。朱湘等<sup>[3]</sup>利用室内模型试验结合

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879059)

收稿日期: 2011-07-06

现场试验对软土地基上的土工格栅加筋路堤应力应变响应及加筋地基进行现场监测, 发现土工格栅使得扩散到砂垫层表面的应力减小, 对路堤沉降有明显抑制作用。杨圣春<sup>[4]</sup>以某包裹式加筋挡墙工程为研究背景, 结合室内蠕变和张拉试验对包裹层厚度、反包段长度、最大填土高度、坡率及挡墙变形问题进行研究。

殷宗泽等<sup>[5]</sup>采用“潜望镜”观察接触界面附近土体变形情况, 认为接触面的破坏是由边缘向内部逐步发展的过程, 提出能合理反映接触面及其邻近区域剪切破坏带变形形状的接触面单元。Hryciw 等<sup>[6]</sup>采用剪切颗粒边界方法确定不同时刻土颗粒位置, 测量筋土界面处土颗粒运动。Yamamoto 等<sup>[7]</sup>从微观角度研究加筋低级承载力和变形破坏模式, 提出一个简化的上限解。Hu 等<sup>[8]</sup>利用 CCD 数码相机拍摄界面直剪试验, 根据不同界面粗糙度, 界面有两种不同的破坏模式, 在相对粗糙的界面中发生应变软化和剪胀。

周健等<sup>[9-11]</sup>、Wang 等<sup>[12]</sup>对土与土工格栅界面和加筋边坡进行宏观和细观研究, 利用细观颗粒运动规律揭示筋土界面宏观机理。基于加筋边坡作为桥台承受上部结构荷载问题, 且条形荷载作用下, 加筋边坡比较容易产生滑裂面破坏, 本文主要采用宏细观结合的方法研究加筋边坡在条形荷载作用下的承载力性状和变形破坏模式。从细观角度研究接触界面以及剪切破坏带在荷载传递过程中的细观变化, 将有助于揭示加筋土的宏细观力学机理, 并提升人们对加筋材料与土的相互作用的新认识。

## 1 室内模型试验

### 1.1 试验装置

#### (1) 加筋边坡模型

模型箱为长方体, 尺寸为 90 cm×50 cm×70 cm (长×宽×高)。该模型箱前壁为透明钢化玻璃, 以完成试验中宏观照片拍摄; 模型箱后侧嵌入钢制隔板, 隔板后设置可活动平台, 并在钢板上设置一系列直径为 100 mm 的观测孔, 以完成试验中砂颗粒细观拍摄。如图 1 所示。

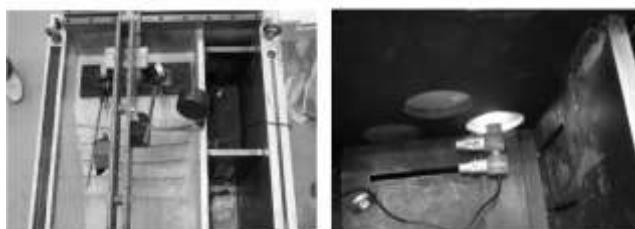


图 1 模型箱示意图

Fig. 1 Sketch of test box

本试验采用干燥标准砂, 边坡表面采用加筋材料外包裹式, 边坡模型尺寸如图 2 所示。地基及加筋体相应位置处布置了染色砂颗粒, 土样制备采用落雨法并小力夯实, 经取样测试, 土样相对密实度  $D_r=0.69>0.67$ , 为密实状态。试样完成后, 静置 12 h 以上, 消除落砂过程中产生的不均匀应力。

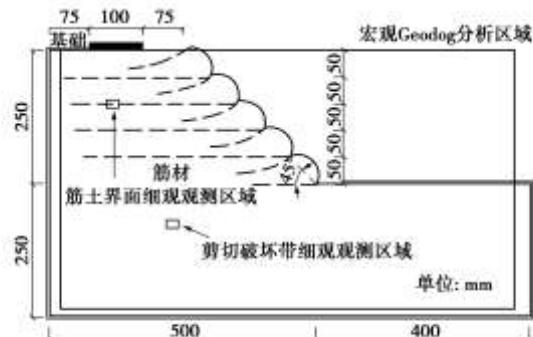


图 2 加筋边坡模型示意图

Fig. 2 Sketch of test model

#### (2) 数据采集装置

数据采集装置由数字图像数据采集、细观图像采集以及静态应变传感器采集三部分组成, 包括高精度数码成像设备、高放大倍数数码摄录设备和静态应变传感器采集设备。

数字图像数据采集采用 Canon350D 数码相机每隔 5 s 拍摄一张模型照片; 细观图片与数据采集采用最大放大倍数为 200 倍 Dino-life Digital Microscope 对局部区域进行细观拍摄; 静态应变采集采用 YE2539 高速静态应变仪采集测量上部加载压力。

#### (3) 加载系统

竖向加载系统采用 5 t 螺旋油压千斤顶。在螺旋千斤顶和反力梁之间设置压力传感器, 用以测量竖向压力。模型基础上设有 2 个量程为 30 mm 的电阻式百分表量测基础的沉降。

### 1.2 试验材料

#### (1) 试验砂样

本试验采用的土样为福建平潭标准砂, 该砂的级

配为：颗粒级配为颗粒直径大于 0.65 mm 的占 3%，0.45~0.65 mm 的占 40%±5%，0.25~0.4 mm 的占 51%±5%，小于 0.25 mm 的占 6%，基本物理性质指标为  $\rho_s=2.643 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{dmax}}=1.74 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{dmin}}=1.43 \text{ g/cm}^3$ ,  $e_{\text{max}}=0.848$ ,  $e_{\text{min}}=0.519$ ,  $d_{50}=0.34 \text{ mm}$ ,  $C_u=1.542$ ,  $C_c=1.104$ 。试验过程中始终保持砂样干燥。

## (2) 加筋材料

根据 (SL/T235—1999)《土工合成材料测试规程》<sup>[13]</sup>选取了以下材料进行单向拉伸性能测试。采用窄条试样法对各材料进行 6 组拉伸试验，材料指标及测试结果如表 1 所示，拉伸试验材料样本如图 3 所示，拉伸试验过程如图 4 所示，拉伸试验结果如图 5 所示。

表 1 材料指标及测试结果

Table 1 Properties and test results of geosynthetic

| 项目                              | 聚丙烯腈纶滤网 |      | 聚酯窗纱 |
|---------------------------------|---------|------|------|
|                                 | A       | B    |      |
| 网孔尺寸/(mm×mm)                    | 1×1     | 1×1  | 2×2  |
| 2%应变对应平均拉力/(N m <sup>-1</sup> ) | 1798    | 1552 | 743  |
| 5%应变对应平均拉力/(N m <sup>-1</sup> ) | 3520    | 2873 | 1544 |

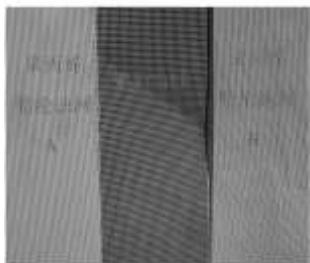


图 3 拉伸试验材料样本

Fig. 3 Sample of pull tests



图 4 拉伸试验过程

Fig. 4 Process of pull tests

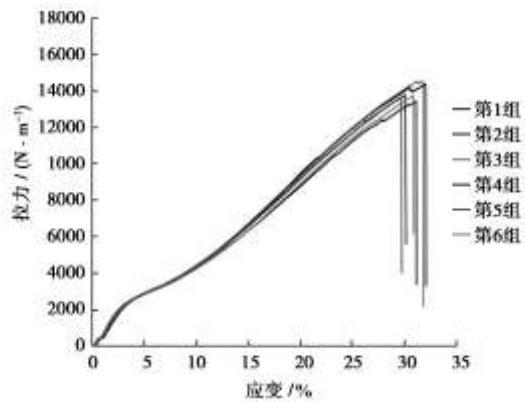


图 5 材料 B 拉力 - 应变曲线

Fig. 5 Pull-strain curves of material B

聚酯窗纱的拉伸强度较小、延伸率偏大，而聚丙烯腈纶滤网 A 比 B 偏“硬”且材料性能具有不稳定性。综合材料强度、延伸率和表面摩擦性质等因素，选择聚丙烯腈纶滤网 B 作为试验加筋材料。

## 2 室内试验结果

### 2.1 加筋边坡宏观破坏变形

利用高倍数码相机对整个试验过程进行了连续拍摄得到一系列高清晰数码照片，边坡破坏最终宏观图如图 6 所示。

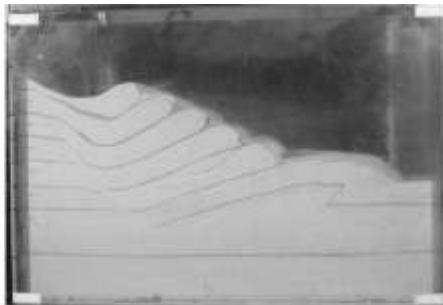


图 6 加筋边坡最终破坏图

Fig. 6 Failure of reinforced slope

运用宏观变形测量软件 Geodog<sup>[14]</sup>进行分析，从边坡在坡顶条形荷载作用下  $x$  方向位移场、 $y$  方向位移场和最大剪应变场的发展规律来研究边坡剪切破坏带以及接触界面的发展及变化过程，加筋砂土边坡  $x$  方向位移场和  $y$  向位移场分别如图 7, 8 所示。

#### (1) 加筋边坡位移场

加筋边坡  $x$  方向位移场发展过程具有以下规律：

- ①加载初期， $x$  方向位移场向边坡面发展，影响范围较为深广；②随着加载进行，边坡  $x$  方向位移场显现出一条分界线，分界线从条形基础左边开始，延伸到第 3 层加筋体的位置，分界线上部土体  $x$  方向位移整体较大，第 2 层和第 3 层加筋体之间土体位移最大；③分界线上部土体  $x$  方向位移随着加载的进行增大，滑移带附近区域颜色进一步加深，坡面及坡底交界处

附近有更大范围的土体出现远离坡面方向的位移; ④由于坡面处筋材反包对边坡土体的约束作用, 整个滑移块体内  $x$  方向位移最大处为滑移块体底部。

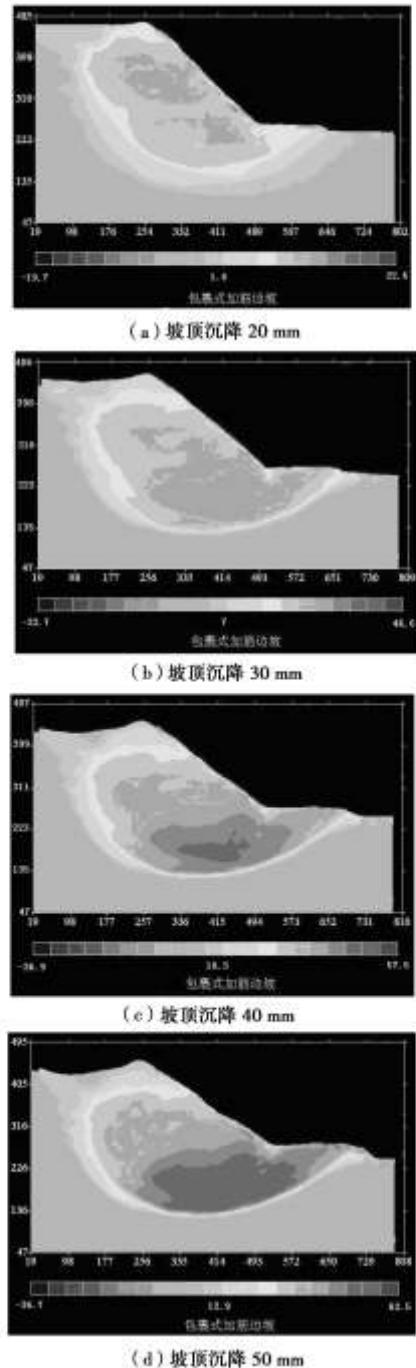


图 7 加筋砂土边坡  $x$  方向位移场

Fig. 7 Displacement of reinforced slope in  $x$ -coordinate

加筋边坡  $y$  方向位移场发展过程具有以下规律:

- ①加载初期,  $y$  方向位移自条形基础传递到边坡深处, 条形基础正下方出现局部变形增大区域, 坡底部分土体出现少量隆起; ②随着加载进行, 条形基础竖向位移增大, 筋材区域和附近土体位移场分界线逐渐清晰; ③ $y$  方向位移场的变化主要体现在其影响深度及坡底隆起范围两方面, 在筋土界面处上部  $y$  方向位移较大

下部较小, 说明由于筋材的存在, 利用自身抗拉强度承担部分竖向基底附加压力, 使得筋土界面上部被压密程度高于界面下部土体。

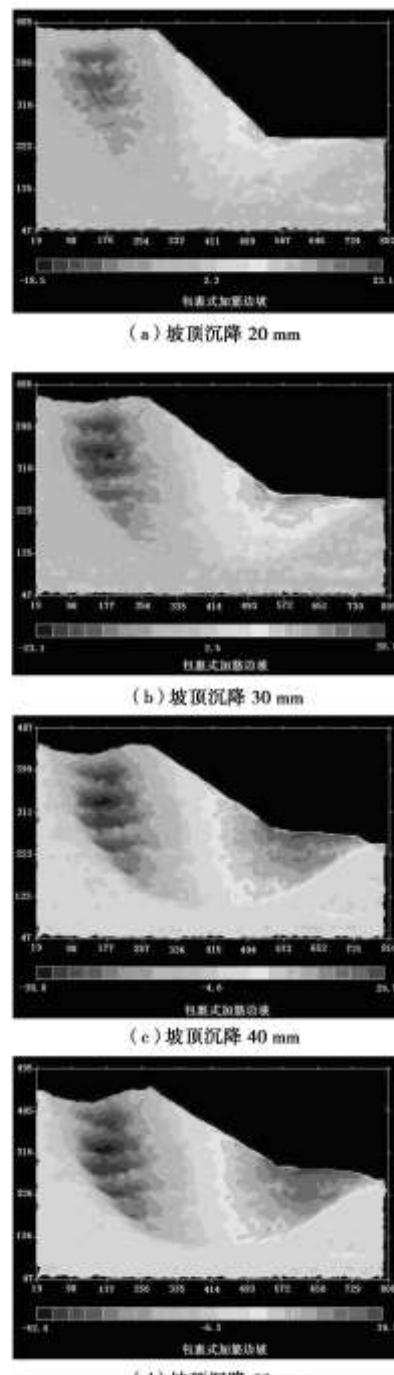


图 8 加筋砂土边坡  $y$  方向位移场

Fig. 8 Displacement of reinforced slope in  $y$ -coordinate

## (2) 加筋边坡剪应变场

通过对加筋边坡宏观照片和位移场的分析, 加筋砂土边坡呈现出类似黏土的圆弧状滑弧整体滑移破坏形式。加筋砂土边坡剪切破坏带发展如图 9 所示, 图 9 中清晰地反映出整个剪切破坏带随坡顶竖向位移从无到有并最终发展连通形成圆弧状滑弧的整个过程。在

边坡整体滑移过程中，除了形成圆弧状主剪切破坏带外，在筋土接触界面靠近主剪切破坏带处形成 4 条副剪切破坏带。副剪切破坏带主要由筋材与砂土颗粒间相互摩擦错动形成。

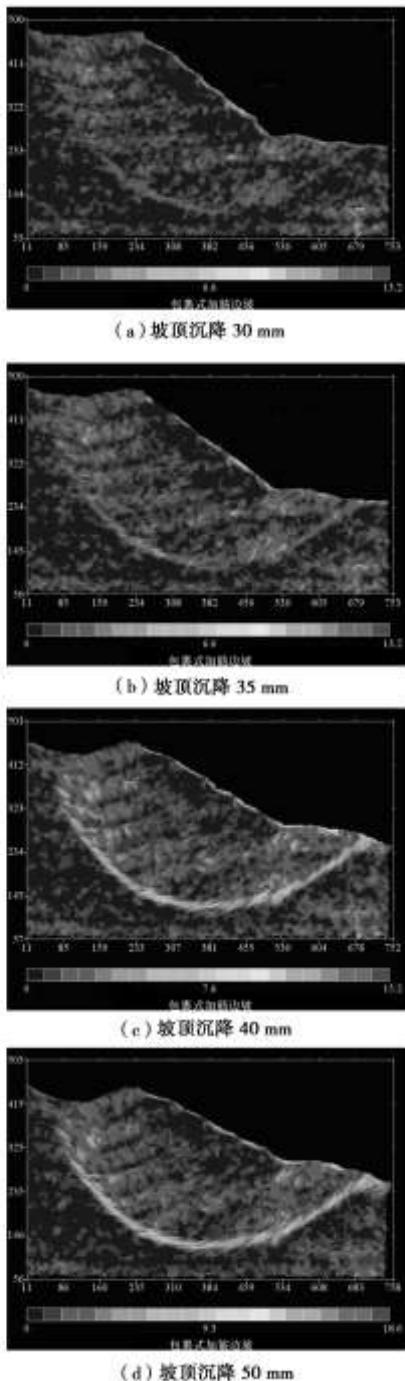


图 9 加筋砂土边坡剪应变场

Fig. 9 Shear strain of reinforced slope

### (3) 坡顶基础 $p - s$ 曲线

坡顶基础基底附加应力和沉降  $p - s$  曲线作为基础下沉过程力学性能研究的主要内容，结合加筋边坡破坏宏观变化，研究加筋边坡破坏机理，具有非常重要的意义。坡顶基础  $p - s$  曲线如图 10 所示。

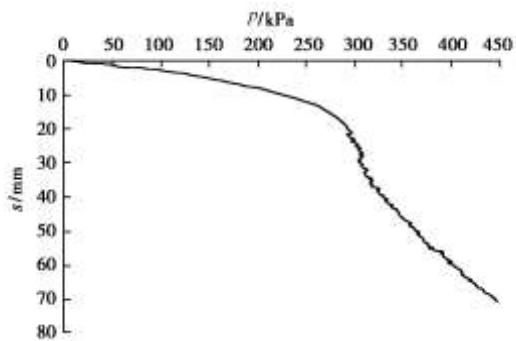


图 10 坡顶基础  $p - s$  曲线

Fig. 10  $p - s$  curve of foundation on slope top

坡顶基础  $p - s$  变化分为 3 个阶段，类似基础整体剪切破坏  $p - s$  曲线：第 1 阶段位移变化范围为 0~19 mm，曲线近似呈现线性变化，但直线斜率较小；第 2 阶段位移变化范围为 19~34 mm，竖向位移随基底压力增大而急剧增大；第 3 阶段位移变化范围为 34 mm~破坏， $p - s$  曲线再次近似呈现线性变化。

### 2.2 加筋边坡细观颗粒运动规律

#### (1) 筋土界面处颗粒运动

通过细观观测设备，对筋土界面处进行细观拍摄，并选取 3 个特征颗粒进行追踪观测，分析加筋边坡受压过程中与砂颗粒之间的相互运动和作用。特征颗粒的选取如图 11 所示，其中<sup>#1</sup> 颗粒代表筋材受力作用后产生横向拉伸和纵向收缩后造成筋材附近砂土颗粒运动影响；<sup>#2</sup> 颗粒代表筋土界面处筋材与砂土颗粒相互咬合摩擦作用；<sup>#3</sup> 颗粒代表筋材下部一定距离范围内颗粒运动，反映加筋影响范围。

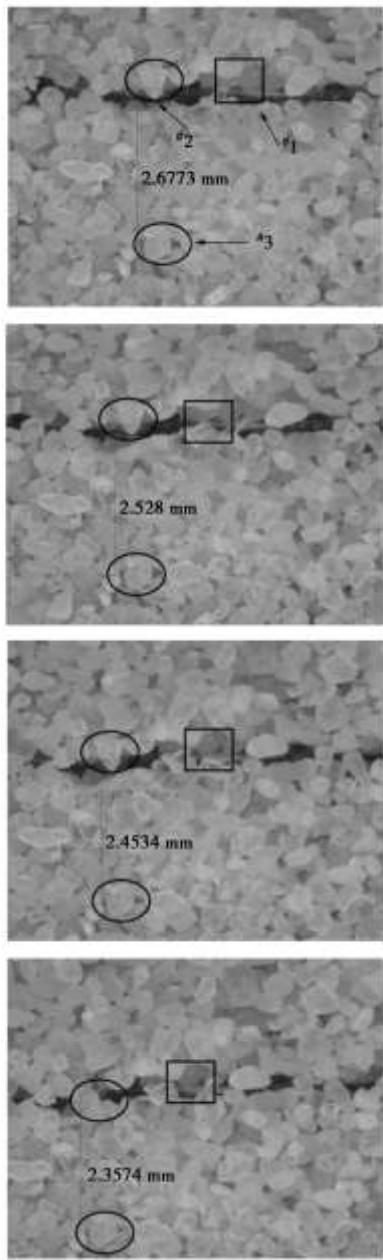


图 11 筋土界面细观颗粒

Fig. 11 Particles in interface between sand and geosynthetic

<sup>#1</sup> 颗粒在图片所示追踪观测过程中, 始终以颗粒棱角处与筋材紧密咬合, 仅与筋材同步位移而未发生任何旋转。<sup>#2</sup> 颗粒和筋材之间的摩擦和横肋咬合两种作用使得筋土界面处砂土颗粒具有一定程度的整体稳定, 是加筋砂土边坡产生“假黏聚力”的主要因素。

<sup>#2</sup> 颗粒位于半模边界处与筋材紧密作用, 基底附加压力和筋材运动使得半模界面处产生孔隙, 使得<sup>#2</sup> 颗粒向下运动并产生一定旋转, 落入下部孔隙中与下部颗粒接触, 与周围颗粒重新排列成相对稳定状态。<sup>#2</sup> 颗粒从初期的与筋材咬合状态过渡到与下部颗粒接触状态。

通过 Dino-Xlite Digital Microscope 软件对<sup>#3</sup> 颗粒与筋材距离进行测量, <sup>#3</sup> 颗粒和筋材相对距离逐渐缩

小, 基本没有发生旋转, 颗粒周围孔隙变小, 筋材下部颗粒被压密, 小颗粒填充到原有孔隙中, 而没有发生颗粒的大范围运动。孔隙率变小、砂土密实度增大、砂土承载力得到有效提高, 因此<sup>#3</sup> 颗粒区域属于加筋效果“间接影响区域”, 所以加筋的影响范围不仅在界面, 而是延伸到界面两侧一定的范围。

试验后期筋土界面颗粒分布如图 12 所示, 整个试验过程中半模边界处筋材与观测玻璃间逐渐产生空隙, 上部颗粒落入半模边界空隙中, 并最终填满空隙, 筋材在细观视图内逐渐消失。筋材的水平位置变化说明当坡顶基础受压, 基底附加压力传递使得筋材在横向产生拉伸作用, 纵向中间下凹、边界产生向内收缩作用, 说明筋土之间相互作用在界面处呈现二维方向性。因此在坡顶条形荷载作用下双向土工格栅作用效果好于单向土工格栅。

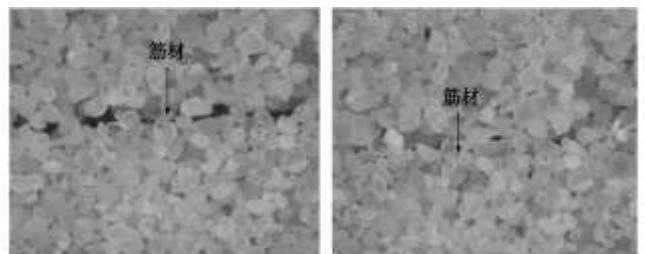


图 12 试验后期筋土界面

Fig. 12 Particles in interface between sand and geosynthetic at the end of tests

## (2) 剪切破坏带处颗粒运动

加筋砂土边坡剪切破坏带呈现圆弧状, 与非加筋砂土边坡有明显区别, 对剪切破坏带处颗粒的研究具有揭示圆弧状剪切破坏带的形成具有重要意义。主剪切破坏带处细观图片如图 13 所示。

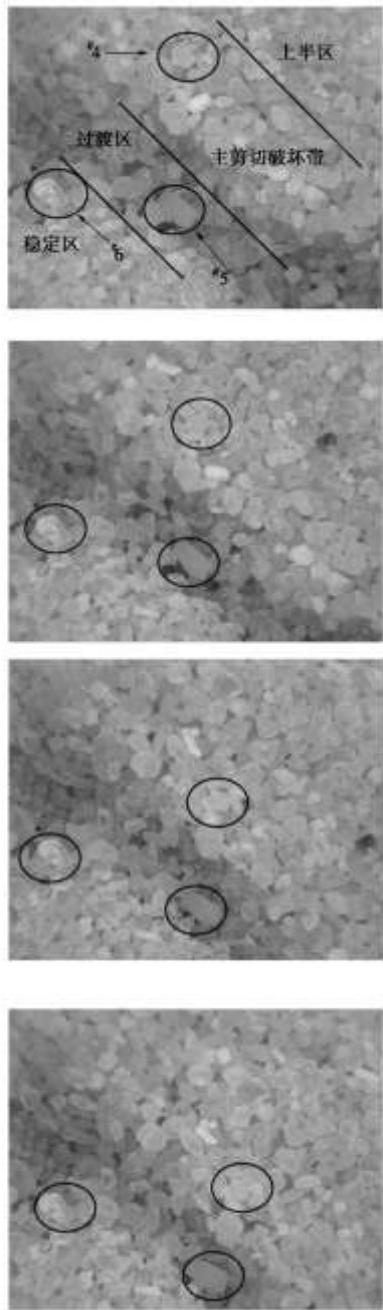


图 13 主剪切破坏带细观颗粒

Fig. 13 Particles in shear zone of reinforced slope

根据颗粒运动激烈程度将上述细观照片划分为上半区、主剪切破坏带、剪切破坏带过渡区和稳定区 4 个部分。上半区由于发生整体滑移，其颗粒运动不具有代表性，故选取位于主剪切破坏带中的<sup>#4</sup>颗粒、位于下半区中的<sup>#5</sup>颗粒和位于稳定区的<sup>#6</sup>颗粒进行跟踪观测。发现<sup>#4</sup>颗粒发生强烈的旋转和下移，颗粒长轴方向随旋转不断发生变化，接触切向变化不明显；<sup>#5</sup>颗粒仅发生下移，颗粒长轴方向和接触切向均未发生明显变化；<sup>#6</sup>在位置、长轴方向和接触切向上均未发生变化。这说明在主剪切破坏带完全贯通后，3 个区域内部颗粒和区域之间的作用发生变化：主剪切破坏带区域内的颗粒相互作用由阻力较大的咬合滑动摩擦

转变为阻力较小的滚动摩擦，过渡区内颗粒存在一定程度的咬合滑动摩擦，稳定区内颗粒仍保持原有的咬合摩擦；主剪切破坏带和过渡带之间由于相对滑动位移较小，产生的滑动摩擦较小，而下半区过渡带和稳定区之间相对滑动位移较大，产生的滑动摩擦较大。

### 3 加筋边坡土与土工合成材料共同作用宏细观机理

加筋砂土边坡整体滑移破坏呈现出类似黏性土边坡滑动破坏的圆弧状滑弧破坏形式，但在破坏机理上与黏性土边坡有所不同。对应边坡位移场云图、主剪切破坏带的形成过程云图、坡顶基础  $p-s$  曲线和细观颗粒变化分析加筋砂土边坡宏细观作用机理如下。

$p-s$  曲线第 1 阶段：宏观上主剪切破坏带局部出现并逐渐连通；细观上主要表现为筋土界面处筋材与土颗粒相互咬合作用和筋材作用范围外土颗粒之间咬合和滑动摩擦作用；因此基底附加压力增大引起坡顶沉降量较小并呈线性变化。

$p-s$  曲线第 2 阶段：宏观上主剪切破坏带基本连通，副剪切破坏带在局部也得到较大程度发展；细观上砂土颗粒从相对稳定的整体移动变为局部区域（尤其非筋土接触界面处主剪切破坏带内）颗粒的强烈滑动旋转，说明颗粒间相互作用由阻力较大的咬合滑动摩擦转变为阻力较小的滚动摩擦；主剪切破坏带的贯通和副剪切破坏带的发展，使得整个加筋边坡抗整体滑动阻力变小，此阶段基底附加压力的增加引起坡顶沉降的急剧增大。

$p-s$  曲线第 3 阶段：宏观上主、副剪切破坏带贯通后继续发展，边坡整体滑移使得坡脚处隆起增加，滑移体重心降低，筋土接触界面处上覆压力增加；细观上筋材向内收缩（如图 12），筋材与土颗粒之间摩擦作用转变为双向，筋土相互作用增大；加筋砂土边坡整个剪切破坏带完全贯通后所提供的抗滑阻力趋于稳定，滑移体重心降低和坡脚隆起量增大使得土体自重抗滑力矩增大，筋土双向相互摩擦作用使得加筋砂土边坡“似黏聚力”增大；自重抗滑力矩和“似黏聚力”的增大形成  $p-s$  曲线第 3 阶段变化。

### 4 结 论

本文利用模型试验研究土工合成材料加筋砂土边坡宏细观机理，通过对加筋边坡宏观位移场、剪应变场、坡顶基础  $p-s$  曲线和局部细观颗粒分析得出以下 6 点结论。

(1) 干燥加筋砂土边坡在宏观位移场上表现为整体滑移破坏模式，剪切破坏带呈现为类似黏性土边坡

滑移的圆弧状滑弧。

(2) 坡顶基础  $p-s$  曲线呈现为类似基础整体剪切破坏  $p-s$  曲线弹性、弹塑性和塑性破坏阶段3阶段,与加筋边坡剪切破坏带的发展和贯通有关。

(3) 对筋土界面处细观研究表明砂土颗粒与筋材之间咬合摩擦和横肋作用限制颗粒运动,使得干燥砂土颗粒之间存在相互“黏结”的“似黏聚力”,整个边坡的表现为圆弧状整体滑移破坏。

(4) 根据砂土颗粒运动方式和激烈程度将剪切破坏带处细观区域划分为上半区、主剪切破坏带、剪切破坏带过渡区和稳定区四部分。主剪切破坏带内颗粒的滚动摩擦、过渡区内颗粒的滚动摩擦和滑动摩擦和稳定区内颗粒的咬合作用构成了整个剪切破坏带区域的抗滑阻力。

(5) 筋土界面处筋材与土颗粒相互作用所提供的“似黏聚力”和主剪切破坏带的发展和贯通所提供的滚动摩擦和滑动摩擦是形成加筋砂土边坡整体滑移、改变整个边坡破坏模式的内在原因。

(6) 模型试验具有边界效应和应力场等方面的一定局限性,为更好地研究土与土工合成材料宏细观机理,今后将重点研究高速离心场下加筋边坡在原型应力场的相互作用,并与模型试验对比。

## 参考文献:

- [1] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (Editorial Board of Geosynthetics Engineering Manual. Geosynthetics engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Industry Press, 2000. (in Chinese))
- [2] EL-NAGGAR M E, KENNEDY J B. New design method for reinforced sloped embankments[J]. Engineering Structures, 1996, **19**(1): 28 – 36.
- [3] 朱湘, 黄晓明. 加筋路堤的室内模拟试验和现场沉降观测[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 386 – 388. (ZHU Xiang, HUANG Xiao-ming. Laboratory simulating test and field settlement observation of reinforced embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 386 – 388. (in Chinese))
- [4] 杨圣春. 包裹式加筋土挡墙关键参数研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (YANG Sheng-chun. Study on key parameters of the wrap-reinforced earth retaining wall[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [5] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 – 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 – 22. (in Chinese))
- [6] HRYCIW R D, RASCHKE S A, DONOHOE G W. Micro deformations in sands by digital image processing and analysis[J]. Transportation Research Board, 1996: 31 – 37.
- [7] YAMAMOTO K, KUSUDA K. Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, **19**: 127 – 162.
- [8] HU Li-ming, PU Jia-liu. Testing and modeling of soil-structure interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(8): 851 – 860.
- [9] 周健, 王家全, 孔祥利, 等. 砂土颗粒与土工合成材料接触界面细观研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 61 – 67. (ZHOU Jian, WANG Jia-quan, KONG Xiang-li. Mesoscopic study of the interface between sandy soil and geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 61 – 67. (in Chinese))
- [10] 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研究[J]. 同济大学学报, 2010, **38**(8): 1128 – 1134. (ZHOU Jian, TANG Qun-yan, WANG Jia-quan. Mesoscopical study on interface between transvers rib of geogrid and sand[J]. Journal of Tongji University, 2010, **38**(8): 1128 – 1134. (in Chinese))
- [11] ZHOU Jian, LI Fei, KONG Xiang-li. Mesoscopic study on the mechanics of geosynthetic reinforced slope[C]// International Symposium on Geomechanics and Geotechnics: From Micro to Macro. Shanghai, 2010: 611 – 617.
- [12] WANG J Q, ZHOU J. Macro-mesoscopic study of the interface between sand and geogrid[C]// Geotechnical Special Publication No.207, GeoShanghai International Conference 2010. ASCE, Shanghai, China, 2010: 361 – 366.
- [13] SL/T235—1999 土工合成材料测试规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL/T235—1999 Geosynthetics Testing procedures[S]. China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [14] 李元海, 靖洪文, 曾庆有. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊2): 3859 – 3866. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZENG Qing-you. Development and application of digital photogrammetry soft ware package for geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3859 – 3866. (in Chinese))



## 勘 误

本刊 2011 年第 33 卷第 9 期“压力分散型预应力锚杆的力学机理研究”(作者: 贾金青, 涂兵雄, 王海涛, 孟 刚, 姚大立)一文中, 图 4, 6, 8, 10, 12, 14 纵坐标量的单位 “kPa” 有误, 更正为 “kN”。特此勘误, 并向广大读者致歉。

《岩土工程学报》编辑部