

加筋尾矿砂的连续增强区

王凤江¹

王来贵²

(1. 秦皇岛冶金设计研究总院, 河北秦皇岛 066001) (2. 辽宁工程技术大学, 辽宁阜新 123000)

【摘要】 为研究土工织物增强尾矿砂结构的变形、破坏机理, 室内进行了不同铺设层数下的三轴剪切试验。试验结果表明: 当仅铺设一层土工织物时, 试件的变形、破坏特征和纯尾矿砂相似; 随着土工织物铺设层数的增加, 试件中均出现数个水平连续增强区域, 抑制剪切变形的进一步发展。试件达到峰值强度后, 仍有较高的承载能力。最后探讨了连续增强区对加筋土结构强度增长的影响。

【关键词】 土工织物; 尾矿砂; 三轴试验; 连续增强区

【中图分类号】 TU 472

Sequentially Reinforced Section of Tailings

Sand Reinforced with Geotextile

Wang Fengjiang¹

Wang Laigui²

(1. QERIM of MCC, Hebei Qinhuangdao 066001; 2. Liaoning Technical University, Liaoning Fuxin 123000 China)

【Abstract】 Triaxial compression tests are used to study the deformation and failure mechanism of tailings sand reinforced with geotextile under different layer. The results show there are same behavior of deformation and failure between tailings sand reinforced with one layer geotextile and single tailings sand. With the increase in layer number of geotextile, there are many sequentially reinforced sections born in the sample which are parallel to the plane of geotextile and control the development of shear deformation. The samples represent some higher bearing capacity after strength point. The influence come from sequentially reinforced section to the increase of reinforced soil has been discussed lastly.

【Key Words】 geotextile; tailings sand; triaxial compression test; sequentially reinforced section

0 引言

利用三轴剪切试验方法研究加筋土结构力学性质的文献报道^[1~3]很多。试验及理论研究均表明了加筋的主要作用在于提高了材料的“内聚力”数值, 内摩擦角基本不变的事实。在对试件变形、破坏特征的描述上普遍欠缺。文献^[4]利用数值模拟方法发现土工格栅加筋试验体的破坏首先从加筋材之间的中间侧面强度较弱的领域开始, 有局部渐进性破坏诱发整体结构的破坏的特征。得出了当加筋层数较多时, 不易发生局部渐进性破坏的结论。

1999年, 首钢矿业公司孟家冲尾矿库因争地问题难于扩容改造, 曾采用尾矿库中的尾矿砂作为填料, 修筑了坡比 1:0.7, 高 12 m 的加筋尾矿砂坝体。设计采用加筋土理论方法对结构的稳定性进行了分析, 但未对土工织物加筋尾矿砂结构的变形、强度特征以及不同尾矿材料的增强效果进行研究, 其实践

本身说明了理论研究的不充分, 制约了进一步的推广应用。考虑尾矿工程的特殊性, 在已有试验^[5]的基础上, 室内对不同增强层数条件下尾矿砂的变形、破坏机理进行更为深入的研究, 以指导加筋尾矿砂结构的设计。

1 试验装置及试验方法

由于加筋土结构对水的作用相当敏感, 正常工作条件下应处于非饱和状态, 故试验过程采用了天然含水量条件下的固结快剪试验。三轴压缩试样直径为 61.8 mm, 高度为 125 mm, 体积 375 000 mm³。土工织物采用聚丙烯机织物, 抗拉强度为 10 kN/m。试验前, 将土工织物剪成直径为 61.8 mm 的圆盘形状, 按等间距 ΔH 水平铺设在砂样中间。装样后按实际固结条件对试样进行 4 h 的预固结。加载速率为 1 mm/min。剪切到主应力差峰值出现且轴向应变达到 15%~20%时, 试验结束。试验共分三层加筋进行模拟,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374042)

作者简介: 王凤江, 1968年生, 男, 汉族, 河北昌黎人, 博士, 高级工程师。主要从事地质灾害的防治与环境岩石力学研究工作。

E-mail: erimzll@263.net。

分取加筋层数为 1, 2, 4。尾矿砂试样取自首钢矿业公司大石河尾矿库, 筛分后分别定名为尾中砂和尾细砂。其不均匀系数分别为 4.1 和 3.7。含水量为 7%~10%, 以模拟现场的实际工作条件。对应的装样密度分别为 $1\ 770\ \text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1\ 590\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。有关土工织物的布置情况见图 1。

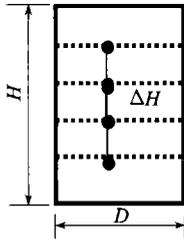


图 1 土工织物的布置

2 变形破坏特征

2.1 土工织物作用发挥的时效性

在轴向荷载施加之初, 对应较小围压, 尾矿砂呈逐渐压密趋势, 尾矿砂和土工织物的接触也渐趋紧密。对尾矿砂来讲, 其变形呈弹性状态。由于试验采用的筋片为柔性材料, 延展率比较大, 当砂体收缩时, 筋材也随之缩短。在试样剪切初期, 筋材随土体的剪胀而缓慢的伸长, 在其伸长至剪切前的状态时, 筋材的作用并未发挥。即轴向荷载作用初期, 加筋尾矿砂试样处于内部结构调整状态, 试样内的应力分布比较均匀, 应力应变曲线和纯尾矿砂的变形规律相似。随着轴向应变的不断增大, 当轴向应变大于 2% 时, 尾矿砂颗粒的嵌固作用增强, 在压实后相对的变位困难, 相对延缓了变形的进程, 土工织物对试样侧向变形的约束作用开始显现。

2.2 加筋层数少时的变形破坏特征

试验过程发现, 对应一层土工织物, 其破坏过程和纯尾矿砂非常相似。在轴向应变达到 6%~8% 时, 强度峰值出现, 试样斜上方出现了剪切破坏缝。随变形的发展, 在轴向应变达到 10% 以后, 强度开始减小, 试样中部横向斜交剪切带形成, 试样产生了剪切破坏现象(见图 2), 残余强度趋于稳定。



图 2 剪切破坏特征

2.3 高密度加筋时的变形破坏特征

当土工织物的铺设层数不少于两层时, 试样的破坏表现为渐进性破坏特征: 相邻两筋片之间的尾矿砂首先在边缘处发生局部破坏, 筋材及其附近的尾矿砂无明显变形。大致在轴向应变达到 5%~8% 以后, 轴向应变开始出现波动现象, 表明局部筋材已出现变形或断裂破坏, 沿着试样的边缘区域, 出现了较大的渐进性局部破坏, 试样呈“鼓”状变形特征, 且强度逐渐增加。在试样的中部区域, 由于筋片的约束作用较大, 相应的局部剪应变数值较小, 形成了几个剪切强度较大的连续增强区(见图 3), 并抑制剪切变形的进一步发展。在轴向应变达到 16% 以后, 强度增加速率开始缓慢减小, 并趋于稳定。



图 3 连续增强区

随变形的进一步发展, 土工织物出现不均匀性破坏特征, 即首先由某一部位开始断裂, 进而失去对尾矿砂变形的约束作用, 导致试样出现偏心受力特征(见图 4)。上述现象一直延续到轴向应变达到 20%, 且未出现强度峰值。



图 4 偏心变形

水平连续增强区的存在, 有效地约束了附近土体的剪切变形, 延缓了破坏的进程, 进而提高了加筋结构的承载力。试验发现, 即使达到破坏应变, 试件仍具有相当高的承载能力。其不同铺设层数下残余强度和峰值强度的比值见表 1。

表1 残余强度与峰值强度的比值

尾矿类型	土工织物铺设层数		
	1	2	4
尾细砂	0.877	0.827	0.661
尾中砂	0.851	0.818	0.726

3 强度的增长特征

3.1 表观内聚力

根据 Mohr-Coulomb 强度准则,从宏观上可将由于土工织物加筋作用产生的强度增长解释为提高材料的粘聚力,而内摩擦角 φ 基本不随土工织物的铺设层数改变或改变很小^[6]。而微观上是否如此则无理论或试验证实。根据本文的试验,由于应力条件和土工织物断裂破坏的局部性影响,试样上各水平连续增强区的变形是不均匀的,因此可推测其强度增长的速率不一定相同,即试件宏观上的粘聚力不等于各连续增强区“粘聚力”数值的简单叠加,写成公式可表示为:

$$c \neq c_1 + c_2 + c_3 + \dots$$

式中: c_1, c_2, c_3 等分别代表不同增强区对应的“内聚力”数值。理论研究表明,由于加筋作用产生的粘聚力数值和筋材的铺设密度、抗拉强度以及填料的抗剪强度特性、围压增量大小等因素有关,并因筋材的变形模量不同而有差异^[7]。考虑筋材变形与不考虑筋材变形时粘聚力的计算公式分别为式(1)和式(2)。

$$c = \frac{R_T \tan \alpha}{2\Delta H} \quad (1)$$

$$c = \frac{\Delta \sigma_1 \sigma_3}{2\sigma_1} \tan \alpha \quad (2)$$

式中: σ_1, σ_3 分别表示轴向应力和围压, kPa; ΔH 为筋材的垂直间距, m; R_T 为加筋土结构破坏时筋材的单宽拉力, kN/m; $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 为破裂角; $\Delta \sigma_1$ 是由于加筋产生的轴向应力增量。为分析理论计算结果和试验测试结果的差异,图5和图6给出了考虑土工织物大变形和不考虑变形条件下理论计算的粘聚力值和实测数值的对比结果。

分析图5和图6可以发现,理论计算的由于加筋产生的粘聚力在不考虑土工织物变形时小于试验数值;当考虑土工织物的大变形作用时,则大于试验值。理论计算结果的平均值和试验值比较接近。由于实际工程中土工织物的变形是难免的,所以由理论分析结果对强度的增长效果进行评价时可能得出过高的估计。从另一方面说明,土工织物的变形应

控制在上述两个极端变形的范围之内。由于现行加筋土结构的设计中多采用不考虑筋材变形的计算方法,使加筋土结构的实际工作性能好于设计预期的结果。因此,加筋土结构的设计应从微观角度出发,根据结构可能发生的局部变形采取相应的设计理念。通俗地讲,结构的局部变形破坏是难免的,关键是如何采取措施控制其变形演化方向。另外,土工织物的拉伸试验已经表明,随着变形的增大,其抗拉强度有逐渐增长的趋势,从而影响强度增长效果。因此,要真正认清加筋土结构的实际工作状况,就必须考虑并允许结构变形。

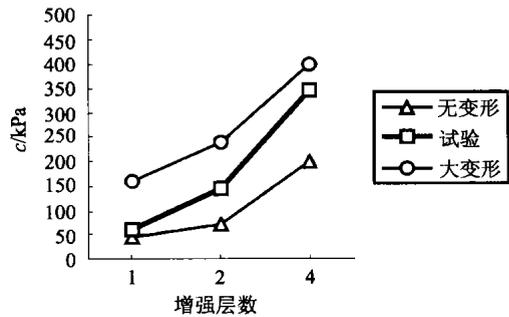


图5 尾细砂的表观内聚力对比

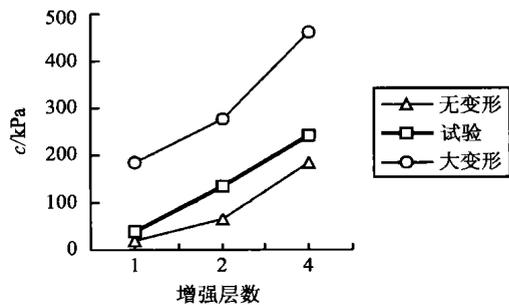


图6 尾中砂的表观内聚力对比

3.2 内摩擦角

不同铺设层数下土工织物加筋尾矿砂结构的内摩擦角变化情况见表2。

表2 尾矿砂的内摩擦角 φ (°)

尾矿类型	土工织物铺设层数			
	0	1	2	4
尾细砂	37	37.4	36.3	36.4
尾中砂	43	40.8	37.3	37.2

由强度试验结果可知,加筋尾矿砂的内摩擦角随土工织物铺设层数的增多是逐渐变化的,并存在逐渐减小的趋势。尽管内摩擦角变化的幅度较小,但上述现象表明,加筋尾矿砂的强度增长受界面抗剪强度的影响,变形过程中内聚力和摩擦角均有不

(下转第143页)

性阶段,硬壳层具有类似于扩展基础分布荷载的能力,能将上部荷载传递到较大的范围,从而降低软弱下卧层顶面的附加应力值。因此直接用公式 $P_{zi} + \sum P_{zi} \leq f_{az}$ 验算有相邻基础影响的软弱下卧层时太保守,很不经济,会使设计的基础尺寸过大,甚至出现无论怎样调整,也不能满足规范要求的情况。根据经验,当相邻基础距离较近,按规范计算的软弱下卧层顶面处附加应力产生重叠时,可以将相邻基础压力扩散后的净面积作为计算软弱下卧层顶面处附加应力分布的面积^[6](见图2)。在式(1)的验算中:

$$P_z = \sum (P_{0i} \times A_i) / \sum A_{i\text{净}}$$

$$\sum A_{i\text{净}} = A_1 + A_2 - A_{12}$$

式中: A_1 为基础1对应的扩散面积, A_2 为基础2对应的扩散面积, A_{12} 为两基础产生的应力重叠面积, P_0 为基底附加压力,实践表明,效果颇佳。

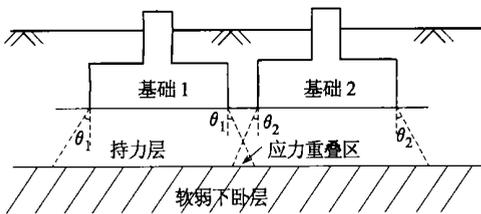


图2 软弱下卧层顶部应力叠加

5 结论

关于软弱下卧层的验算,工程实践中碰到的问题往往比较复杂,比较具体,而现行规范中又没有作明确规定,因此在设计过程中,需要设计人员正确理解规范,掌握有关的知识,做正确的判断,选用较为合理的计算方法就很重要了,根据多年的实践经验,本文所述的方法可在设计中采用。

参考文献

- 1 梁静. 软弱下卧层地基评价的几个问题. 土工基础. 2001, 12(4): 43~45
- 2 GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范
- 3 赵明华. 土力学与基础工程. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003
- 4 姬深堂, 胡向奎. 地基软弱下卧层强度验算的讨论. 煤碳工程. 2001(7): 59~60
- 5 郑敏杰, 张殿竹. 软弱下卧层验算中应注意的问题. 安徽建筑. 1998(4): 52~53
- 6 刘之春, 蒋永生. 软弱下卧层地基承载力验算应注意的问题. 建筑技术. 2002, 12(33): 921~922

收移日期: 2004-04-02

(上接第140页)

同程度的变化,但损失了部分纯摩擦性能。从试件剪切变形中的局部破坏特征分析,以上变化很可能是由于土工织物局部断裂引起的。只是由于连续增强区的存在,表现不突出而已。

4 结论

本文用三轴剪切试验证实了加筋尾矿砂变形过程中存在水平连续增强区域,得出了和文献[4]一致的研究结果,即在土工织物的铺设层数较多的条件下,试件变形过程中产生数个连续增强带。连续增强区的存在有效地抑制了剪切变形的进一步发展,使加筋土结构的宏观强度增长特征有所改变。研究连续增强区出现的应变特征点及发展规律对弄清加筋土结构的变形、破坏机理相当重要。

参考文献

- 1 吴雄志, 赵乃茹. 加筋土强度模型与应力-应变特性研

- 究. 岩土工程学报, 1992, 14(增2): 80~87
- 2 保华富, 等. 土工格栅加筋碎石土试验研究. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 217~221
- 3 吴景海, 王德群, 陈环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 199~204
- 4 Siddiquee M S A, et al. Numerical simulation of bearing capacity characteristics of strip footing on sand. Soil and Foundations, 2000, 39(4): 93~109
- 5 王凤江. 加筋尾矿砂的三轴试验研究. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(5): 618~620
- 6 黄晓明, 朱湘. 公路土工合成材料应用原理. 北京: 人民交通出版社, 2001, 31~37
- 7 陈忠达. 公路挡土墙设计. 北京: 人民交通出版社, 2000. 129~132

收稿日期: 2004-03-08