

排水土工格栅的研究进展及工程应用

徐超^{1,2}, 马黄祥², 杨阳^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海市 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海市 200092)

摘要:加筋土结构一般应采用粗粒土作为填料,但在工程实践中有时不得不就地取材,采用细粒含量高的填料,由此引起加筋土结构施工性差、排水不畅、变形过大等问题。为应对这一状况,需要一种具有排水功能的加筋材料,排水土工格栅应运而生。试验研究和工程实践均表明,兼具排水功能的加筋材料能够快速消散细粒土碾压施工时产生的超孔压,加快填土固结;排水土工格栅能有效排水,提高加筋土结构稳定性。该文总结排水加筋材料的研究成果,重点介绍排水土工格栅加筋土结构的设计方法和工程实践,并针对目前仍面临的问题,提出排水土工格栅加筋土结构进一步研究的建议。

关键词:土工合成材料;排水土工格栅;细粒土;加筋土结构;排水

中图分类号: U417.1

文献标志码: A

土工合成材料加筋土结构在交通工程中得到了广泛的应用。粗粒土由于有较好的力学特性及渗透系数,加筋土结构中通常使用细粒含量较少的粗粒土作为加筋土填料,然而在工程实践中,有时不得不就地取材使用细粒含量较高的填料。在使用细粒土作为填料的加筋土结构中,施工碾压或后期加载时可能会产生超孔隙水压力,导致土的抗剪强度降低,土与加筋材料之间的摩阻力减少,从而降低加筋土结构的稳定性,并引起加筋土结构发生过量的变形。Fukuoka^[1]对挡土墙的相关研究表明,当采用细粒土作为填料时,加筋土结构如能及时排水,仍可以保证结构的稳定性,控制加筋土结构变形,可见,提高排水能力十分重要。

加筋土结构中存在的超孔隙水压力大小不仅与施加的荷载有关,还与排水系统的排水能力有关。如果加筋土结构没有相应的排水设施,则会产生较大的超孔隙水压力^[2]。Jones 认为^[3],在加筋土结构中采用具有排水功能的加筋材料,能够提供水平排水层,可以快速消散施工过程中产生的超孔隙水压力,防止加筋土结构内部因产生过量的超孔隙水压力而导致结构的失稳。

Heshmati(1993)^[4]研究了有排水及加筋作用的复合土工合成材料,通过对复合土工合成材料加筋土的三轴试验发现,土工合成材料的排水与加筋作用对加筋土的抗剪强度是同等重要的,两种材料的结合方式会影响其排水作用和加筋作用的发挥。

在早期探索的基础上,一种兼具排水和加筋功能

的复合材料——“排水土工格栅(drainage geogrid)”应运而生(图1)。排水土工格栅实质上为单向格栅,主肋经特殊设计,形成凹形排水槽,排水槽由无纺土工织物覆盖,土工织物发挥反滤作用,避免排水通道淤堵^[5]。



图1 排水土工格栅

1 土—排水土工格栅的相互作用

Zornberg 等^[6-7](2013)研究了排水土工格栅在细粒土中的拉拔特性,并与常规土工格栅进行了对比。两种土工格栅在主肋方向上的极限抗拉强度同为 100 kN/m,极限延伸率为 12%。排水土工格栅在 100 kPa 法向压力下,水力梯度为 1.0 时,导水率为 $1.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。拉拔试验用的填土为低液限黏土,在 13.8 kPa 压力下的渗透系数为 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 。

试验装置如图2所示,将排水土工格栅放置于试验箱中部。孔压传感器分别布置于距土工格栅上下表面 1 cm 高度处,记录上下填土中孔压的变化;位移传感器(LVDT)设置于土工格栅表面,用以监测其拉拔位移。

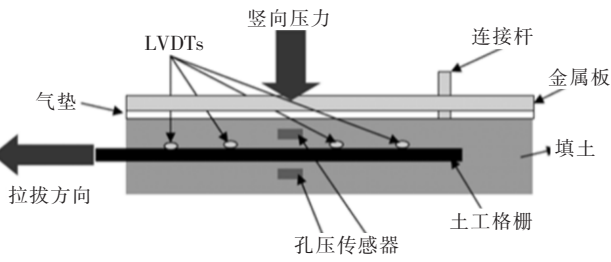


图2 拉拔试验示意图

在法向应力分别为 20、38 和 86 kPa 下,完成排水土工格栅和常规土工格栅在黏性土中的拉拔试验,拉拔速率为 2 mm/min,记录了拉拔位移与拉拔阻力,如图 3 所示。图 4 为法向应力为 38 kPa 时土中孔压随土工格栅拉拔位移的变化情况。

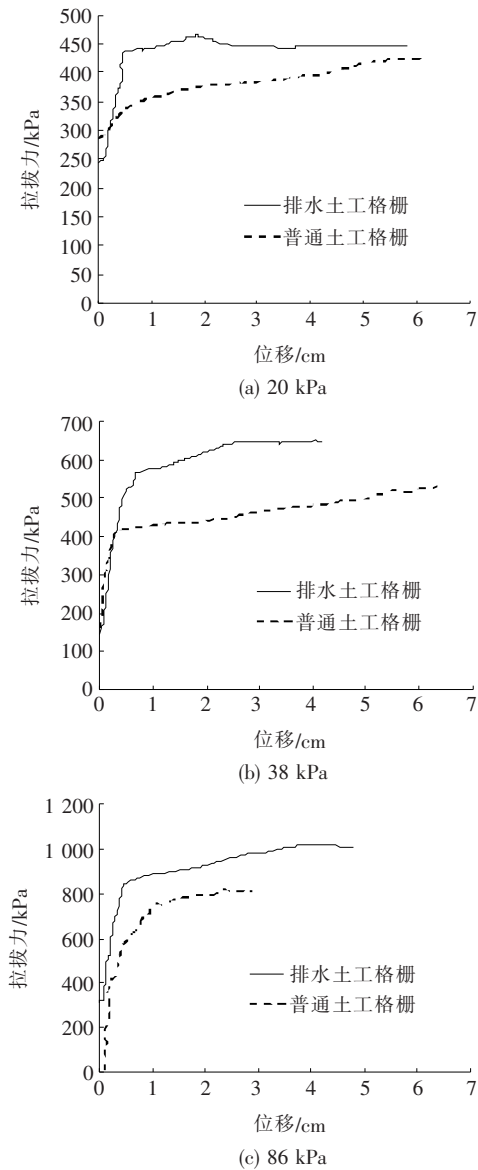


图3 不同竖向压力下拉拔阻力随位移变化

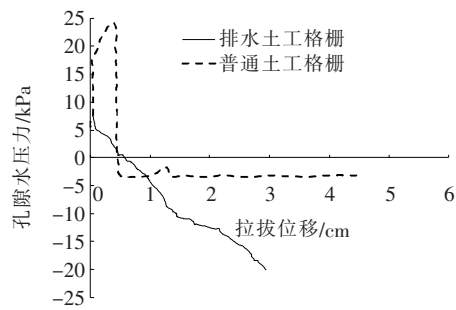


图4 孔隙水压力—拉拔位移变化曲线(法向应力:38 kPa)

试验研究证明:土工格栅在一定法向应力下受拉拔时(类似于加筋土结构中)会产生超孔压,排水土工格栅通过排水消减了孔压峰值,并可持续消散孔隙水压力,而常规土工格栅拉拔时初始孔隙水压力明显增大。正因为此,在相同法向应力下,拉拔位移相同时,排水土工格栅在土中的锚固力均大于普通土工格栅的锚固力(图 3)。

Kelly 等(2008)进行了排水土工格栅和常规土工格栅界面直剪试验的对比研究^[8]。两种土工格栅具有相同的抗拉强度。试验所用土为低液限黏土,最优含水率为 13%,试验时土的含水率控制为 16.5%。

试验中,将土工格栅固定在光滑铝板上,置于下盒,排水土工格栅的纵向排水槽与直剪方向一致,上盒填土。通过上部承载板施加法向应力(111~222 kPa),使填土预固结 18~24 h,然后进行界面剪切试验,剪切速率为 0.25 mm/min。两种格栅在不同法向应力下的抗剪强度如图 5 所示,纵坐标为界面强度与填土强度的比值。

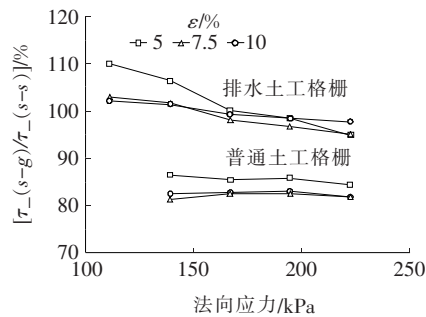


图5 正则化不排水界面剪切阻力

图 5 显示:在一定法向应力下土工格栅—黏性土发生剪切时,有排水功能的土工格栅比常规土工格栅具有更高的界面抗剪强度。排水土工格栅—黏土界面的不排水抗剪强度与黏土接近,而常规土工格栅—黏土的界面抗剪强度只达到了黏土不排水抗剪强度的 82%~85%。

由此可见,无论是拉拔试验还是直剪试验,均证明在法向应力作用下细粒土产生超孔压时,排水土工格栅因具有排水、快速消散孔压的功能,因而比常规土工格栅具有更高的界面强度。

2 排水土工格栅加筋土结构设计

采用具有排水功能的筋材建造加筋土结构,特有的排水设计为加筋土设计的组成部分。Naughton 等^[9](2001)针对排水土工格栅加筋土结构施工碾压过程中产生的超孔隙水压力这一情形,提出了包括排水设计在内的设计方法。设定加筋层间距为 0.5 m,根据土的固结系数计算超孔隙水压力消散时间,依据不同土层的竖向压力和体积压缩系数,计算每层土的沉降量,得到土层的排水量;然后,通过极限平衡法计算边坡的稳定性。在稳定性满足要求的前提下,校验所用排水土工格栅的导水率是否满足工程排水所需的导水率。如果排水土工格栅的容许导水率小于所需导水率,则应进一步调减加筋的层间距,作进一步的分析验算,直到满足要求为止。

Giroud 等(2014)^[10]在 Naughton 设计方法的基础上,建议排水土工格栅加筋长度应等于边坡宽度,通过在墙后设置碎石排水体,使排水路径变短,并防止加筋土结构外侧的水流入渗(图 6)。

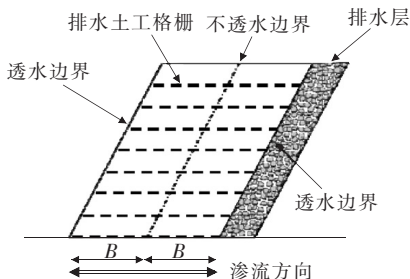


图 6 排水土工格栅加筋边坡渗流方向及排水系统

Rimoldi 等^[11](2018)针对邻近河水位快速变化、墙后地下水入渗、墙顶降雨垂直入渗 3 种渗流条件,提出排水土工格栅加筋土挡墙的设计方法。通过数值模拟方法对比了排水土工格栅和常规土工格栅的加筋效果,发现使用排水土工格栅时,可以减少加筋层数与加筋长度。

纵观现有的设计方法,已经兼顾到了各种重力排水和施工过程中填土产生超孔压的情形。通过对比排水土工格栅的导水率与工程实际导水需求,以满足工程要求。但是,在设计计算中,并未考虑排水土工格栅

上土工织物的淤堵效应,也难以量化排水对填土和界面力学性能的影响。因此目前的设计方法还是初步的,有待进一步研究和完善。

3 工程应用

目前,已有一些工程中利用排水土工格栅作为加筋材料修建加筋土挡墙和加筋土边^[12]。如 2016 年德文郡 Palmerston 公园的加筋土挡墙、2015 年伦敦 BellGreenRetail 公园加筋土挡墙以及 2017 年班伯里市 M40 加筋土隔音堤等都采用了排水土工格栅。在这些工程中,填料均为现场开挖的工程性质较差的土,摩擦角为 $24^{\circ} \sim 26^{\circ}$,渗透系数为 1×10^{-6} m/s 左右。施工产生的孔隙水压力在 24~48 h 内消散了 90%,证明排水土工格栅在渗透性较差的土中仍有较好的排水能力。

图 7 为 2016 年修建的位于英国 Devon 市 Palmerston 公园内加筋土挡墙,墙高 3.3~17.0 m,填料采用的是现场开挖的中低塑性黏土质砂。图 8 为正在施工中的位于英国 East Sussex 加筋土边坡(路基),坡率为 1V:2H,全长 300 m,填料为现场开挖的黏质粉土。从图 8 可以看出:由于土工格栅的排水作用,在每层填土分界面有水渗出,较周围填土颜色更深。



图 7 英国 Palmerston 公园的加筋土挡墙



图 8 英国 East Sussex 路堤(加筋土边坡)

排水土工格栅作为一种新型的兼具排水和加筋功能的复合材料,其工程应用刚刚开始,工程案例还很少。尽管通过采用排水加筋材料,节约了造价,但缺乏长期监测资料和工程经验的积累,目前还难以对其做

出科学的评价。

4 结论

已有研究和工程应用表明:排水土工格栅可以比较快速地消散填土中产生的超孔隙水压力,提高填土的固结度,从而使排水土工格栅有较高的界面强度。使用排水土工格栅作为加筋材料,不仅能够利用现场细粒土作为填料,节约工程投资,而且相对常规土工格栅,可以提高加筋土结构的稳定性,具有很好的经济收益和环境效益。但也需要看到,关于排水土工格栅研究成果仍偏少,设计方法也不完善,工程应用和效果需要进一步验证。基于对现有文献的分析和总结,今后可在以下几个方面做更深入的研究:

(1) 可采用合适的试验装置,在排水土工格栅消散填土超孔压过程中,不仅研究格栅消散孔压的效果,而且考察填土在非饱和状态下格栅是否还具有排水能力。

(2) 在排水土工格栅加筋土结构设计方法和分析计算中,研究如何定量考虑排水对界面强度、加筋作用的影响,并通过大尺寸模型试验或现场试验对设计计算方法进行验证。

(3) 需要关注排水土工格栅上土工织物的淤堵问题。土工织物淤堵将影响排水土工格栅的导水率,进而影响排水土工格栅在加筋土结构中的长期性能。

参考文献:

- [1] FUKUOKA. M. Long-Term Deformation of Reinforced Cohesive Soil Fills and Walls[C]. Proc. 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, 1998, 2: 811—814.
- [2] KOERNER R. M., KOERNER, G. R.. The Importance of Drainage Control for Geosynthetic Reinforced Mechanically Stabilized Earth Walls[J]. Journal of Geoengineering, 2011, 6(1): 3—13.
- [3] JONES C J F P. Geosynthetic-Reinforced Soil Walls and Slopes; European Perspectives[M]. International Perspectives on Soil Reinforcement Applications, 2005: 1—15.

- [4] HESHMATI S. The Action of Geotextiles in Providing Combined Drainage and Reinforcement to Cohesive Soil [D]. Newcastle University, 1993.
- [5] JONES C J F P, Naughton, P. J., Richard Jewell, et al. Construction of Slopes Using Cohesive Fills and a New Innovative Geosynthetic Material[C]. Proceedings of EuroGeo, 2000, 2: 825—828.
- [6] LOPEZ R H, KANG Y, JORGE Zornberg. Geosynthetic with in-Plane Drainage as Reinforcement in Poorly Draining Soil[C]. International American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction IAC-NOCMAT, 2005.
- [7] KANG Y, NAM B H, JORGE Zornberg, et al. Pullout Resistance of Geogrid Reinforcement with in-Plane Drainage Capacity in Cohesive Soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(3): 602—610.
- [8] O'Kelly B. C., NAUGHTON, P. J.. On the Interface Shear Resistance of a Novel Geogrid with in-Plane Drainage Capability[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(4): 357—362.
- [9] NAUGHTON P. J., GIROUD J. P., RIMOLDI P., et al. The Design of Steep Slopes Constructed from Cohesive Fills and a Geogrid. Landmarks in Earth Reinforcement [C]. Proc. of the International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japan, 14—16 November, 2001. Vol. 1. Taylor & Francis US, 2001.
- [10] GIROUD J. P., NAUGHTON, P. J., RIMOLDI P., et al. Design of Reinforced Slopes and Walls with Low-Permeability Fills Using Draining Geogrids[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, 2014: 248.
- [11] PIETRO Rimoldi, MORENO Scotto, et al. Design Methods for Drainage of Reinforced Soil Walls[C]. Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics, 2018: 16—21.
- [12] BRUSA N, NAUGHTON, P. J., MORENO Scotto. Sustainable and Environmentally Friendly Reinforced Soil Slopes and Walls Constructed with Draining Geogrids: Recent UK Experience[C]. Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics, 2018.