

土工织物加筋结构的研究进展

陈永辉 施建勇 赵维炳 速宝玉

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

摘要 对国内外在土工织物加筋结构的设计计算方法上所取得的研究成果进行了综述,主要包括极限平衡稳定分析方法、工程实用沉降计算方法、有限元分析方法以及其它一些理论分析方法等,同时对设计中所需的试验研究情况也作了介绍。文中指出了存在的一些问题,并提出研究设想,如加筋加固影响范围的确定、复合加筋土体有限元分析、常规方法和有限元法之间的联系等。

关键词 土工织物 加筋 稳定分析 沉降计算 有限元分析 综述

1 极限平衡稳定分析方法

工程中对加筋结构的稳定计算常采用传统的极限平衡分析法。早期出现的分析方法中多采用修正圆弧滑动法,即认为加筋材料在整体的稳定中仅起到提供一个拉力的作用,如 Ingoad 发展的 Bishop 法, Jewell^[1] 的简化分析法等,也包括大家熟知的荷兰法和瑞典法。Jewell^[1] 认为这两种方法在计算时应考虑破坏前土堤将会出现裂缝的情况, Low 等^[2] 也提出了一个加筋堤的简便稳定分析方法,认为加筋力是起到减小滑坡体滑动力矩的作用。这些方法未能考虑加筋所引起的滑动面位置的改变。研究表明^[3]: 加筋堤与无加筋堤相比,其滑动面的位置将靠近堤底中心并向地基深部滑动。Kaniraj 等^[4] 修正了 Low 等所提出的方法,认为滑弧位置应使加筋材料发挥最大的拉力,这在一定程度上考虑了加筋对滑动面的影响。Woods 等^[5] 还认为在不同的圆弧面内加筋材料所发挥的拉力是不同的,并推导出了一个计算填土内加筋材料拉力的数学公式,最危险的滑动面可由此试算而得。

以上所述的方法大多没有考虑加筋材料与土之间的应变协调关系。土工织物所发挥的作用应与其应变有关。还有一些方法考虑了加筋材料与土之间的应变协调关系,如文献[6],它在稳定分析中引入一个“允许相容应变”的概念。在各种报导中较多出现的“位移法”^[7] 也能够考虑土工织物的应变相应关系。Juran^[8] 对这个“位移法”指出了一些不足之处,认为实际上主动滑动区和稳定区之间存在着一个受剪土层,而不是一个简单的平面,并对此作了一些改进。

我国的刘祖德等人还应用弹性力学理论来进行预测和分析加筋陡坡的稳定情况。关于稳定分析方法还有很多,但对此没有统一的评价方法,使得设计人员难以选用,因此制定一套比较普遍适用的标准方法是当务之急。

这种视土工织物在破裂面处被拉断,只是考虑增加一个抗滑力矩作用的极限平衡分析法,往往会低估了工程的安全性。实际上加筋的作用会使得基底压力、附近的应力场和应变场得到重新分布,对孔隙水压力也有一定的影响,但用极限平衡法来考虑这些因素是很困难的,须借助于其它方法和手段。

第一作者简介:陈永辉,男,博士研究生,从事软土特性及地基处理研究。

2 工程实用沉降计算方法

一般认为土工织物的存在能起到控制最大沉降,减小不均匀沉降的作用。目前,加筋土的沉降计算尚无较成熟的方法。现在采用的几种方法,如假设地基为文克尔地基,应用弹性薄膜理论来求解^[9]。文献[10]则介绍了一种水平加筋地基的沉降计算方法,可称之为改进的分层总和法。此法用三轴试验确定织物加固范围内的土体弹性指标,此范围以外的土体仍用原指标,然后进行分层计算,这不失为一种简便的方法,同时,还考虑了加筋引起荷载的扩散作用,但未能给出准确的加筋影响范围。

3 有限元分析方法

加筋结构的有限元分析方法大致可分为两类:一类是将土工织物和土体层层计算,用界面单元将土工织物单元和土体单元联系起来;另一类是将土工织物和土体作为一种复合体即复合土体进行计算,对加固范围内的土体采用复合参数,其它土体仍用原指标。

3.1 层层计算方法

3.1.1 土工织物

土工织物有采用受拉的杆单元,也有看成薄层单元或三维中的薄板单元。对于织物的本构模型,有人认为是线弹性的,也有人认为是非线性的,如双曲线,多项式或幂函数形式^[11]。现在已有不少研究在本构关系中考虑了时间因素^[11]。土工织物的计算参数和强度特性可由拉伸试验来确定。在拉伸试验中,试样宽度、拉伸速率、夹具及其距离等对试验的结果都有很大的影响,对此,国际上目前尚无统一的标准。王钊^[11]和 Giroud^[12]分别提出平面应变拉伸和双向拉伸试验。其中 Giroud 还推导了双向拉伸和单向拉伸之间有关参数间的换算公式。

由于无约束情况的拉伸试验不能很好地模拟土工织物在土中的工程特性,应采用考虑土约束作用的拉伸试验。对此,文献[13]

推导出了这种情况下切线模量的表达式。也有用水压代替土压力来做试验的。也有人用改装的三轴仪来做拉伸试验,并认为这样的试验受试样尺寸的影响较小,实验结果更具有“再现性”^[14]。

3.1.2 界面特性

对于土与织物间的接触面有人认为是变形协调的,不设接触面单元。也有的学者认为应设置接触面单元、薄层单元或 Goodman 单元等。文献[6]等所采用的方法是:在土与织物界面上各设结点,当结点间的剪应力不超过其抗剪强度时,变形是协调的,反之结点之间有错动。还有施建勇^[9]提出了所谓的“影响有限元法”来分析界面特性。

为了了解土与加筋材料之间的界面特性和界面参数,须做界面摩擦试验:直剪试验和拉拔试验。

直剪试验简易快速,应用较广。试验方法基本上都采用类似于常规土工试验的直剪仪方法。直剪仪的下盒既有放木块的,也有填入土料的。一般来说,下盒内填土比较符合实际,但剪切时试样面可能向下挠曲,试验成果可能不稳定。如采用硬木垫块,剪切面虽可水平,但符合实际较差。关于织物试样的固定、土料的饱和、合适的剪切速率等都有待于今后进一步地研究。Mark 等^[15]介绍了一种新型的剪切装置:环剪仪(sotation shear device)。

目前对土工织物拉拔试验的机理、试验设备和试验方法等均尚处于探索阶段。文献[10]对土工织物与土之间的拉拔摩擦性质进行了微观上的机理研究,提出摩擦物理模型,认为它们之间摩阻力的发挥可根据两者相对位移的大小分为三个阶段:弹性、弹塑性硬化和塑性软化阶段。文献[16,17]也对拉拔试验作了定量研究,分析了实验过程中拉伸应力、界面上的正应力和剪应力的发展和分布情况。现在已有许多先进的量测技术应用在拉拔试验中,如光电技术和自控设备。

另外,有人认为拉拔过程中土工织物的

上覆压力是变化的^[16],并用此来解释表观摩擦系数随着填土深度的增加而减少的原因。

对于织物与含水量非常高的泥浆之间的界面特性可按文献[18]所介绍方法来测试。

3.2 复合土体分析法

这种方法需正确评价复合土体的强度特性和变形特性,这可通过研究加筋土的加筋机理和三轴试验来了解。

一般认为土体中加入筋材,宏观上相当于产生一个类似于侧向约束应力的作用,或者增加了一个凝聚力(似凝聚力)。这种把多层加筋土中的筋材作用当成一个附加周围压力的方法是 Yang 首先提出来的^[19],并通过三轴试验得出了附加侧向应力 $\Delta\sigma_3$ 和复合土体凝聚力的表达式^[19,20]。

加筋土的破坏可能由以下几种情况引起:①筋材断裂;②筋材在土体中被拔出;③土体本身的剪破;④有时整个土体还会沿着筋材滑动。要建立一个完整的强度破坏模型应能包括上述几种破坏情况,即应该是一个多模式的强度准则。而前面所提的文献大多只能模拟剪应力较大时发生断裂破坏的情况,此时得出的结论一般是加筋土与未加筋土的摩尔库伦破坏线是平行的,只是增加一个似凝聚力而已。这是符合当轴向应变发展到一定情况后的实验结果。但在轴向应变较小时,筋材的作用没有得到充分的发挥,特别是在多层加筋的情况下可能出现强度下降的现象^[21]。这些模型无法对此进行准确地模拟。许多学者试图把几种破坏状态考虑进去,如文献[22]建立的强度模型。此模型不仅包括了断裂破坏和摩擦破坏两种破坏类型,还给出了它们的判别准则,它的强度包线是折线型的。一种直径 1.6 m,高 2.6 m 超大型的三轴仪,在实验中能测出加筋材料的应变分布情况,这可用于解决前面几种模型中对剪应力分布难以确定的问题^[23]。Garbulewski^[24]对加筋的粘性土也提出了折线型模型,不过它是由改装后的三轴仪进行拉拔试验得出来的。还有采用几种不同的应力

路径进行强度对比的试验^[25],但这类试验还不多见。

由以上方法得到的这些附加应力或似凝聚力可以用来修正无加筋土中的本构关系和强度模型而得到新的加筋复合土的本构关系和强度破坏准则,如文献[10,19]中已得到了加筋土的邓肯计算模型。也可由三轴试验直接推出其模型。

复合土体的分析法比起层层计算方法要来得简便,但复合土体到底应取多大的范围,即加筋的影响范围是多少的问题以及复合土体的强度特性如何等等,仍值得去进一步的研究。

由于有限元计算中含有大量的参数,需要通过很多精确的试验才能取得,所以要成为实际工程人员的常规设计手段还有些困难,而且也需要把它与常规的安全系数设计方法建立直接的联系。

4 其它理论分析方法

4.1 复合材料力学分析法

复合材料力学分析法把复合材料领域的力学理论应用到加筋结构的分析计算中,即把加筋土体看成是一种复合材料,而应用复合材料学科中的弹塑性理论、层压板理论来研究。这种复合材料的理论在 70 年代就开始用于加筋土的应力应变关系的研究。现在国外这方面的报导比较多^[26],但在国内还很少见。

4.2 塑性极限分析法

塑性极限分析法目前仅限于理论上的研究,如用塑性极限理论分析加筋土坡,应用其中的上限定理来求解极限荷载,极限高度的上限解^[26,27]。文献[26]在分析中仅考虑筋材被拉断的破坏形式,而文献[27]仅考虑了土-筋之间的摩擦破坏形式。最近有学者也用同样的方法得到了上限解,而且考虑了断裂破坏和摩擦破坏两种形式。

5 结 语

从上面的论述中可以看到,对加筋结构的

研究正是方兴未艾,许多新技术新方法已被利用,一些问题也得到了不同程度地解决。当然,土工合成材料的研究是一门新兴的学科,而且无论是土体还是土工合成材料都是很复杂的材料,因此对土工织物加筋土的研究仍处于探索阶段,尚无严密的理论和成熟的方法来指导设计和施工,还需要不断地努力,使得这一门新技术得到大量的推广和应用。

参考文献

- Jewell R A. A limit equilibrium design method for reinforced embankments on soft foundations. In: Proc of the 2nd Inter Conf Geotextiles, USA, 1982. 671 ~ 676
- Low B K, et al. Slip circle analysis of reinforced embankments on soft ground. *Geotextiles and Geomembranes*, 1990, 9(2): 165 ~ 181
- 土工合成材料工程应用手册编委. 土工合成材料工程应用手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994
- Kaniraj S R, et al. Reinforcement force in embankment on soft soils. In: Proc of the Inter Sym on Earth Reinforcement Practice, Japan, 1992. 245 ~ 250
- Woods R I, et al. A computer design method for reinforced soil structure. *Geotextiles and Geomembranes*, 1990, 9(3): 233 ~ 260
- Rowe R K, et al. An approximate method for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 220: 392 ~ 398
- Gourc J P, et al. Design of fabric retaining walls: "displacement method". In: Proc of the 3rd Inter Conf on Geotextiles, Austria, 1986. 1067 ~ 1072
- Juran I. Strain compatibility analysis for geosynthetics reinforced soil walls. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1990, 116(2): 312 ~ 329
- 施建勇. 土工织物与土体相互作用机理及其工程设计应用研究: [学位论文]. 上海: 同济大学, 1991
- 龚晓南. 复合地基. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- 王钊. 土工织物的拉伸蠕变特性和预拉力加筋堤. *岩土工程学报*, 1992, 14(2): 12 ~ 20
- Giroud J P. Biaxial textile state of stress on geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 1992, 119(3): 319 ~ 325
- EL-Fermaioui A, et al. Effect of confining pressure on performance of geotextiles in soils. In: Proc of the 2nd Inter Conf Geotextiles, USA, 1982. 799 ~ 840
- Jonathan T H, et al. Cubical and cylindrical tests for measuring in soil load-extension properties of geotextiles. In: Hoedt G D ed. Proc of the 4th Inter Conf Geotextiles Geomembranes & Related Products, Netherland, Published by Balkema, 1990. 785 ~ 785
- Mark D E, et al. Geosynthetic/soil interface friction angles using a rotationshear device. *J Geotech Testing engng, ASTM*, 1995, 18(2): 271 ~ 275
- Abramento M, et al. Analysis of pull-out tests for planar reinforcements in soil. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1995, 121(6): 476 ~ 485
- 肖为民等. 土工织物摩擦力系数和模量估计. 见: 刘宗耀等编. 全国等三届土工合成材料学术会议论文选集. 天津: 天津大学出版社, 1992. 24 ~ 29
- Tan S A, Muhammad No, et al. The role of jute geotextile/slurry interface friction on the bearing capacity of clay slurry. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 1995, 18(2): 157 ~ 167
- 李广信等. 加筋土体的应力变形计算的新途径. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 46 ~ 53
- Gray D H, et al. Behavior of fabric-versus fiber-reinforced sand. *J geotech Engrg, ASCE*, 1986, 112(8): 804 ~ 820
- 王吉力等. 加筋砂应力-应变关系的三轴试验研究. 见: 刘宗耀等编. 全国第三屆土工合成材料学术会议论文集. 天津: 天津大学出版社, 1992. 17 ~ 23
- 吴雄志等. 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): 80 ~ 87
- Futaki M, et al. Super large triaxial compression tests on reinforced sand with high strength geogrid. In: Hoedt G D ed. Proc of the 4th Inter Confer Geotextiles, Geomembranes & Related Products, Netherland. Published by Balkema. 1990. 759 ~ 764
- Garbulewski K. Direct shear and pull out frictional resistance at the geotextile—mud in terface. In: Proc of the 4th Inter confer. Geotextiles, Geomembranes & related Products, Netherland, 1990. 739 ~ 742
- Ling H I, et al. Performance of anisotropic geosynthetic-reinforced cohesive soil mass. *J Geotech engng, ASCE*, 1994, 120(7): 1166 ~ 1184
- Michalavski R L, et al. Continuum versus structural approach to stability of reinforced soil. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1995, 121(2): 152 ~ 162
- 吴雄志等. 土工织物加筋土坡稳定的塑性极限分析. *岩土力学*, 1994, 15(2): 55 ~ 58

(收稿日期: 1996 ~ 04 ~ 17 编辑: 熊水斌)