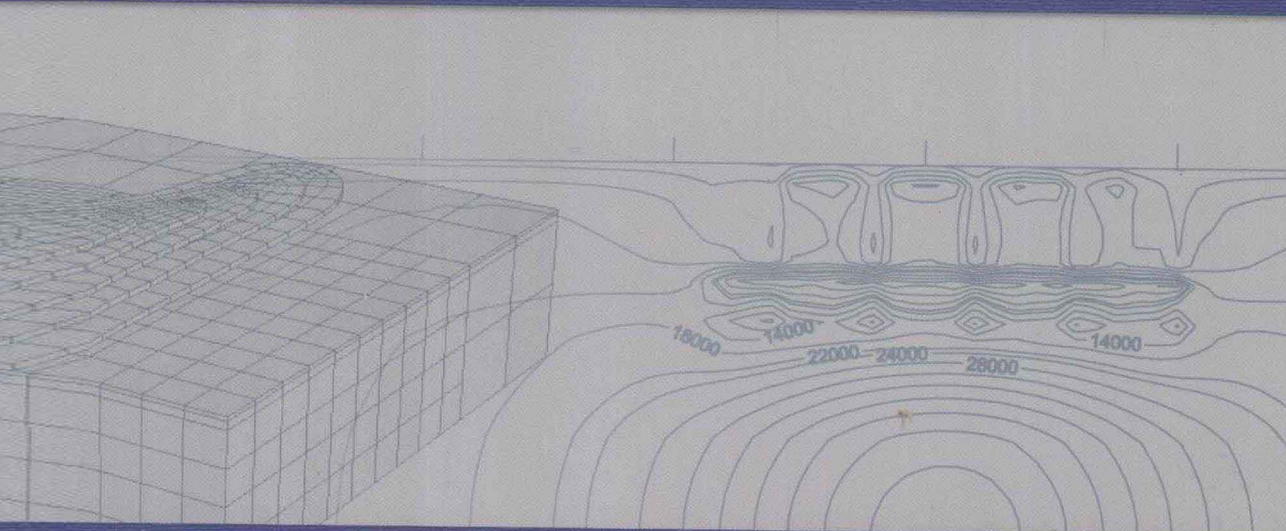


主 编 赵维炳
副主编 陈振建 戴济群 高长胜



工程排水与加固技术 理论与实践

——第八届全国工程排水与加固技术研讨会论文集

Theory and Practice of Drainage and
Reinforcement Engineering

—Proceedings of the 8th Symposium on Drainage and
Reinforcement Engineering



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

南京水利科学研究院出版基金资助

工程排水与加固技术 理论与实践

——第八届全国工程排水与加固技术研讨会论文集

主 编 赵维炳
副主编 陈振建 戴济群 高长胜



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是第八届全国工程排水与加固技术研讨会的论文集，总结和交流了我国近年来在工程排水与加固领域，特别是在大面积围海造陆技术、超软地基加固技术、土工合成材料的应用与发展等方面取得的新进展、新经验和新理念。本书收录论文 39 篇，涉及地基加固的理论研究和数值分析、工程材料的应用与测试、重大工程的设计、施工与现场试验等。

本书内容丰富、实用性强，适合从事地基处理与工程加固领域的科研、设计、施工和管理工作的有关人员阅读和参考。

图书在版编目（C I P）数据

工程排水与加固技术理论与实践：第八届全国工程排水与加固技术研讨会论文集 / 赵维炳主编. -- 北京：中国水利水电出版社，2011. 10
ISBN 978-7-5084-9093-9

I. ①工… II. ①赵… III. ①基础（工程）—排水—学术会议—文集②基础（工程）—地基处理—学术会议—文集 IV. ①TU46-53②TU753. 8-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第212898号

书 名	工程排水与加固技术理论与实践 ——第八届全国工程排水与加固技术研讨会论文集
作 者	主编 赵维炳 副主编 陈振建 戴济群 高长胜
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 17.25 印张 409 千字
版 次	2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	56.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

第八届全国工程排水与加固技术研讨会

会议组织机构

主办单位：中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会

承办单位：福建省建筑科学研究院

协办单位：南京水利科学研究院岩土工程研究所

江苏南水土建工程公司

华侨大学岩土工程研究所

组织委员会

主 任：陈振建

副 主 任：戴济群 方家强 高长胜 杨守华 俞 缙

委 员：李东兵 关云飞 赵剑豪 黄集生 郑也平 杨明昌

唐 勇 章 昕 郭力群 孙菲菲

论文集编委会

主 编：赵维炳

副 主 编：陈振建 戴济群 高长胜

编委会成员：（按姓氏笔画排序）

王 园	王立忠	刘国楠	关云飞	李树奇	杨守华
杨明昌	张留俊	陈文华	陈振建	武良金	郑培成
赵维炳	莫景逸	高长胜	郭耿新	董志良	戴济群

中国土木工程学会港口工程分会 工程排水与加固专业委员会 第七届委员会

顾 问： 刘济舟 刘家豪 盛崇文 王铁儒 叶伯荣 唐 敏
王盛源 白植悌 张 敬 汪肇京 王明华 马时冬

主 任：赵维炳

常务副主任：董志良 李树奇

副 主 任：郑培成 戴济群 王立忠 陈文华 莫景逸 武良金
刘国楠 王 园 张留俊 郭耿新 陈振建

委 员：（按拼音排序）
曹湘波 常 璐 陈楚胜 陈海军 陈永辉 戴雨薇
高长胜 高倚山 顾春光 郭述军 洪振舜 江辉煌
林强有 刘吉福 刘进生 梅国雄 孟宪鹏 潘永和
宋鹏伟 孙伯永 唐晓武 王掌权 谢淑兰 徐大斌
徐 宏 徐继高 徐建国 杨 俐 杨闽中 杨明昌
杨守华 尹利华 俞 缙 俞元洪 袁长宏 张树奎
张亚明 郑新亮

秘 书 长：高长胜

副 秘 书 长：杨守华 陈海军

秘 书：关云飞

P 前言

REFACE

“十二五”时期是全国建设小康社会的关键时期，交通、水利等行业基础设施的建设进入了一个崭新的发展阶段，一系列重大工程的实施对工程排水与加固技术提出了更高的要求。为加强工程排水与加固领域的学术交流，提供新理论、新技术、新理念、新设备的探讨平台，中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会将于2011年11月在福建省福州市举办第八届全国工程排水与加固技术研讨会，会议由福建省建筑科学研究院承办。

来自全国各行业从事工程排水与加固的专家、学者、工程技术人员和有关厂家代表将汇聚一堂，深入探讨工程排水与加固领域的热点和难点问题，交流大面积围海造陆技术、超软地基加固技术、土工合成材料的应用与发展等方面取得的新进展、新经验和新理念，介绍新技术、新材料、新工艺的开发与应用，讨论如何进一步发展和提高我国工程排水与加固的技术水平，更好地为国家经济建设和社会发展服务。

经专家评审，本论文集共收录论文39篇。内容涉及地基加固的理论研究和数值分析、工程排水与加固材料的应用与测试、重大工程的设计、施工与现场试验等。

本次会议论文集的征集和编写得到了学会各委员单位与论文作者的大力支持，参与论文评审的专家对论文进行了细致认真的评阅，在此一并表示感谢！



2011年8月

CONTENTS

目录

前言

加筋土结构设计中存在的问题和解决途径探讨	包承纲 (1)
混凝土芯砂石桩复合地基固结解析解及其应用研究	俞 缙 赵维炳 关云飞 等 (12)
潮差带地区水下真空预压加固软基技术在码头建设工程中的应用 ...	李树奇 刘爱民 (21)
吹填淤泥浅层加固中“土桩”现象的机理分析	陈平山 董志良 张功新 等 (28)
砂井排水固结处理地基水平排水设计的研究	高明显 刘国楠 (37)
真空预压技术处理某变电站地基的效果分析	杨建学 陈振建 (47)
《土工合成材料测试规程》修订中排水带检测内容介绍	杨明昌 郑澄锋 (55)
《土工合成材料测试规程》中塑料排水带(板)通水量等三个试验 方法的修订说明	武良金 李雪宁 (60)
察尔汗盐湖地区盐渍化软土地基处理技术研究	刘军勇 张留俊 张发如 等 (64)
塑料排水板联合堆载预压加固软基工后沉降预测方法研究	陈永辉 陈 龙 郑 宏 等 (74)
F型板与C型板在真空联合堆载预压加固中的效果比较	娄 炎 何 宁 (81)
新近吹填淤泥真空预压加固技术对比试验研究	唐彤芝 黄家青 潘明鸿 等 (89)
纤维改良吹填土试验研究	丁 勇 赵维炳 孙耀南 (97)
土工合成材料联合堆载预压法加固吹填淤泥地基	朱群峰 杨明昌 汪璋淳 等 (103)
吹填淤泥与海相软土在真空压力作用下的固结特性对比分析	关云飞 黄家青 汤勇军 等 (111)
气压劈裂真空预压法加固深厚软土施工技术	韩文君 刘松玉 章定文 (117)
改性真空预压法在大面积吹填超软地基加固中的应用	崔允亮 高明军 刘汉龙 等 (125)
电极布置形式对电渗加固软土效果影响的试验研究 ...	王柳江 刘斯宏 朱 豪 等 (131)
某集装箱码头扩建区潮水位对软土地基稳定性的影响分析	梁月英 刘国楠 江辉煌 (140)
深圳地区海积淤泥固结分析的若干问题	马 驰 刘国楠 (147)
排水固结法在污水处理厂污泥地基处理中的应用	高明显 刘国楠 黄中林 (155)
某省道连接线深厚软土地基综合处治方案研究	张发如 张留俊 王晓谋 等 (163)

潮间带围埝超软地基沉降特性分析·····	寇晓强	刘爱民	陈运涛	等	(170)
整体式塑料排水板的制造新工艺及抗冻处理·····	刘磊	薛正晓	董飞	等	(176)
人工堆山工程山体稳定性的三维数值分析·····	关云飞	仓基俊	储开进	等	(180)
基于 ANSYS 和 ABAQUS 模拟超大深基坑变形·····	周治刚	王艳芳	范明桥		(186)
新近吹填淤泥地基固结特性分析研究·····	李小梅	关云飞	王立鹏	等	(191)
排水混凝土芯砂石桩加固技术及研究进展·····	孙菲菲	唐彤芝	仓基俊	等	(198)
塑料套管混凝土桩处理市政道路深厚软基·····	岳斌	唐彤芝	黄家青	等	(204)
吹填泥面上机械插板工作垫层的现场试验研究·····	陈海波	唐彤芝	盛东升	等	(211)
真空预压法在连云港某海滨陆域形成项目软基处理中的应用 ·····	王海鹏	李赞	袁永生	等	(216)
软土地基加固的施工监控·····	喻志发	赵岩	王闯		(222)
黄骅港某工程流泥加固分析·····			梁爱华		(229)
降水强夯加固法加固地基的实践·····			朱胜利		(234)
危岩类型识别系统的建立及其在工程加固中的应用·····	张伟	陈洪凯			(240)
喇叭溪水电站厂房后边坡稳定性分析及加固设计·····	于立宏	徐增辉	张永辉	等	(247)
薄互层砂岩马头门加固技术研究·····	吕言新	乔卫国	魏烈昌	等	(251)
瑞雷波法在高压旋喷桩加固检测中的应用·····			唐经华		(257)
论高速公路沥青路面裂缝的原因、修补及加固·····			许小敏		(262)



加筋土结构设计中存在的问题和 解决途径探讨

包承纲

(长江科学院, 武汉 430010)

1 加筋土结构在工程中的应用概况

加筋土结构在工程中的应用越来越广泛,因为它不仅有利于边坡的稳定,地基的加固,减少土压力对结构物的作用,而且可以节省地皮,有利于保护环境,在高山峡谷地区更是某些建筑物不可或缺的边坡工程措施。在国外,加筋土边坡已是一种常规的工程措施。在国内虽然发展较晚(主要在20世纪90年代开始发展),但推广的速度很快,至今大小加筋挡墙已难计其数,而且高度越来越大,达到60m级者已不是个别的例子。可以预见,加筋土结构的发展前景将十分广阔。

但是,冷静地观察一下有关的技术水平和当前的设计方法,则不能令人满意。且不说设计理论和方法落后于工程实践,而且有些还不大合理。例如,在边坡工程中,采用加筋的效果十分显著,但按现有方法计算的安全系数仅增加5%,反映不了加固的现实。虽然许多研究者都倾力在探索更合理的方法,但至今还没有一个公认的设计途径。所以本文也只能讨论一些问题,提出一些不成熟的看法,与大家共同研究。

2 当前加筋土结构设计中的一些问题

第一个问题是稳定分析的方法,目前流行的稳定分析方法是用一个摩擦力代替筋材的影响,然后仍沿用原来的常规圆弧滑动法校核边坡的稳定。这种方法存在两大问题:①用一个筋材与土之间的摩擦力代替筋材的作用是否符合加筋的机理?②具有筋材的加筋土体其破坏模式是否仍是圆弧滑动?要回答这两大问题,必须研究加筋土的工作机理。

第二个问题是加筋材料如何选择,那种材料适合那种结构物,对材料的性质有什么要

作者简介:包承纲(1935—),浙江宁波人,教授级高级工程师,现任长江水利委员会科学技术委员会委员,长江科学院科学技术委员会委员等职,同时兼任浙江大学、河海大学等兼职教授和浙江大学宁波理工学院教授,中国土工合成材料工程协会理事长,国际土工合成材料工程学会(IGS)理事,国际土工合成材料工程学会中国委员会主席,主要从事的研究领域有土石坝工程、地基工程、岩土工程可靠度研究,土工合成材料工程技术、非饱和土的性质和工程应用研究,离心模拟技术,岩土环境工程和特殊土的工程性质研究等。

求,其强度等力学指标应如何确定?为此必须了解合成材料的性能以及工程的运用条件。目前我国在工程中多使用 PP 或 HDPE,因为市场上主要供应这些产品,很少主动考虑采用什么母材,或对母材提出什么性能要求。

第三个问题是加筋材料应如何布设,其间距如何确定,其长度如何选择?这是设计中的重要问题,但工程中对这个问题的处理基本上是凭经验,或根据工程的其他具体条件如面板尺寸等设定,未从加筋工作机理出发。这也是个与加筋机理密切相关的问题。

总之,目前我国加筋土结构设计大体上是凭经验,或参考国外的类似工程,从结构的特点或筋材的工作状况出发考虑的较少。

3 加筋机理研究

有关加筋机理的研究成果其实不少,各种刊物上累见报道。但由此与设计方法相联系,并形成一套公认的合理的设计途径,则比较少见。在这里,先介绍一些加筋机理的研究成果,再讨论其他的问题。

2006 年笔者曾对此问题写过一材料,把当时主要的机理研究成果归纳为 5 种理论:摩擦作用理论,约束作用增强理论,张力膜理论,应力扩散作用理论,以及深基础效应。这些理论都有一定的道理,或者有一定的试验基础,但是似乎还不够全面。

笔者以为,加筋土的机理在于筋材的存在改变了整个土体的应力场和应变场,从而改变了整个加筋土的性状。具体说来,筋材的作用主要是通过筋材与填土之间的界面对土体的约束而发生的。但这种影响又不光存在于筋材与土体接触的表面。界面上的摩阻力阻止了土体的过大侧向位移,并改变了整个土体的应力场和应变场,从而改变了土体的破坏模式。筋材的存在阻断了均匀土体中破坏圆弧滑动面的发展,剪切带的形状会发生很大的改变,这些都有助于土体抵抗破坏能力的增强。因此,加筋作用不仅发生在筋材与土的界面上,而且发生在界面两侧一定范围的土体中。为此,笔者提出了加筋的机理为“界面的直接加筋作用和界面两侧一定范围的土体由于应力场的变化而形成的间接影响带,即引起了间接加固作用”的观点。这里再引用近来得到的一些成果,对该加筋机理作进一步的分析。

图 1 是一个很有说服力的试验成果。该试验是在叠环式拉拔试验仪上完成的。当置于

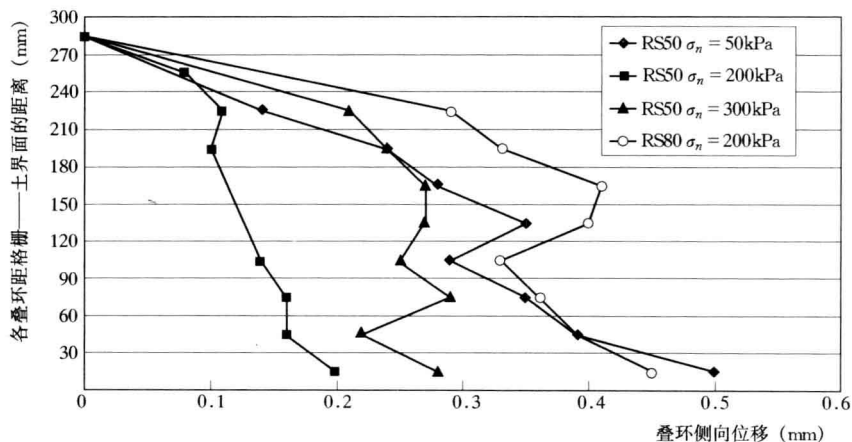


图 1 拉拔试验中各个叠环的侧向位移分布

试样中间的格栅受拉时，界面上下的所有叠环均被带动，而产生一定的位移量。此即表明，筋材周围的土体颗粒也在发生移动、翻滚、错动等变化，不管法向压力是 50kPa 还是 300kPa，它的影响范围都在 30cm（仪器尺寸所限）或者更大一些。为了弄清这个机理，汪明远进行了加筋土体的位移场和应力应变的数值分析，图 2 为拉拔时，格栅位移矢量的分布图。

位移矢量的分布是与应力和应变分布有关的，图 3 系 2 层加筋试样的应变和应力分布，应变的分布与应力的分布对应得很好，而从图 3（c）中更看到主应力矢量的偏转情况，而且其值也增大了。

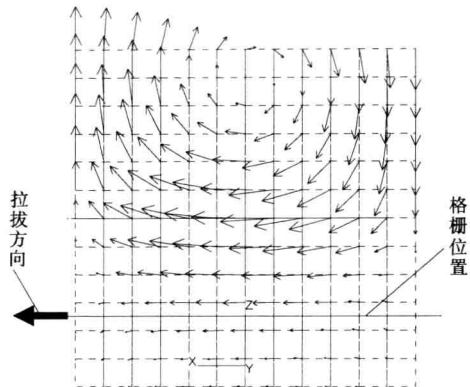


图 2 加筋土位移矢量竖向分布

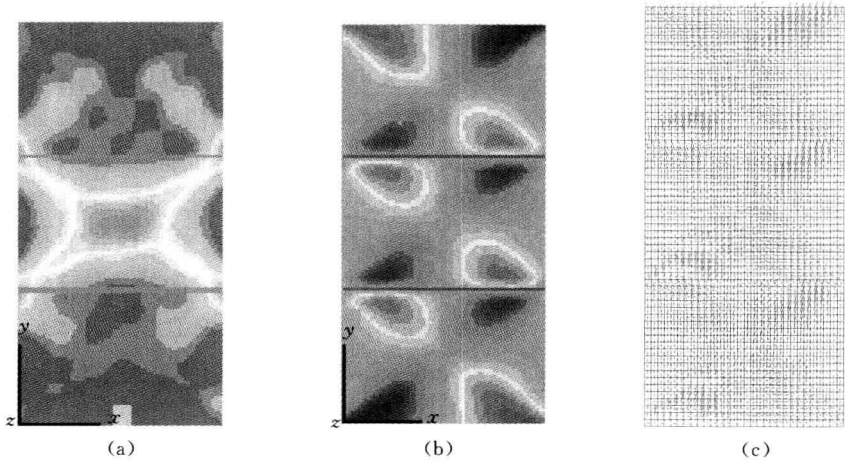


图 3 两层加筋土破坏时的剪应变、剪应力和主应力矢量的分布
(a) 剪应变分布；(b) 剪应力分布；(c) 主应力矢量

还可以看出，在拉拔过程中，土体的剪应力在界面附近集中，改变了土体的应力场，导致破坏模式的变化，并提高了土体的强度。同时，界面摩阻力引起土体中最小主应力增大，使加筋土的强度和承载能力提高，在应力应变曲线上则呈现应变硬化特征。在界面摩阻力发展过程中，因应力状态变化，界面摩阻力历程出现反弯段，且界面屈服后界面摩阻力又再度升高，使加筋土呈硬化特征，如图 4 所示，加筋层数越多，硬化程度越高，但围压越大，加筋对于土体强度提高的效果越不明显。

对于这种影响范围，在经历了许多研究分析后，也有了一些定量概念：加筋对最小应力的影响区域约为 35~40cm；对剪应力的影响区域约为 20~25cm；加筋导致主应力方向偏转的区域约为 20~25cm，对土工格栅加筋膨胀土，加筋对水平位移的影响区域为 40~45cm。

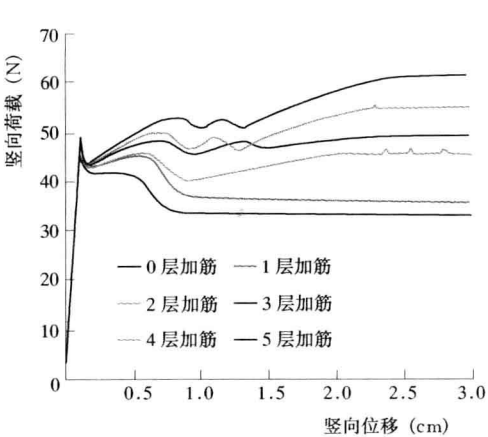


图 4 加筋土的荷载与位移关系曲线

可称为直接加筋作用，而后者可视为对土体的间接加固作用。这些成果进一步验证了笔者上述的在 2006 年提出的对加筋机理的分析。

其实，筋材改变了加筋土的应变场（位移场）的问题，早在 1998 年沈珠江就提出过。他在《土工合成物加强软土地基的极限分析》一文中曾经指出过筋材摩阻力对其应力状态变化的影响。他认为：当筋材具有足够强度，不发生断裂或拔出等情况下，圆弧滑动是不可能出现的，唯一可能的破坏形式是伴随沉降而发生的横向挤出。由于筋材改变了地基剪应力的方向，从而使地基的承载力大幅度提高。但他没有进行具体的论证，并获得实验的支持。

王伟在软基的织物加固机理研究中，强调了加筋明显地改变了地基的位移场，他认为，实质上加筋土体在复合地基中基本上形成了一个“自撑式”的持力体系。

杨锡武等的离心模型试验证实，由于筋材的存在，土体中原有裂缝开展的方向会发生变化（如图 5 所示），以致不可能形成弧形的滑动面（杨锡武，2002），也可说明上述的分析是正确的。

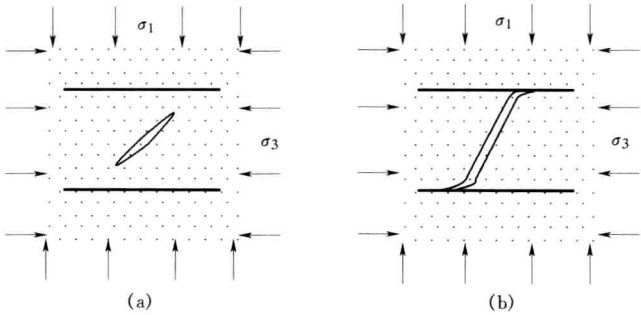


图 5 加筋引起的开裂路径的变化

上述加筋机理的研究将对合理设计方法的建立提供重要的理论基础。

4 加筋土的设计原则和主要特点

加筋土体是由土和筋材两种介质组成的复合体，土与筋材之间的界面可看作一个单独

的相,因为界面的特性是加筋作用的主要因素之一。由于土与筋材是两种性质差别很大的材料,如同钢筋混凝土一样,它们的共同作用就比较复杂,因此,加筋土结构的设计也需要专门研究。与一般工程设计一样,加筋土工程亦需满足极限状态功能和使用状态功能的要求,这就必须考虑结构的极限稳定性和限制其过大的变形,但同时又要使其产生一定的变形量,以便界面的摩阻力能充分发挥。加筋土的设计包括填土的设计与加筋材料的选择和布置,这里主要讨论后者,填土设计不予涉及。

有关加筋土结构设计原则,笔者在《土工合成材料应用原理与工程实践》一书中已有提及:

“加筋土结构,如加筋土挡墙,加筋土陡坡和加筋土地基等,其作用与常规土工结构一样,都是为了支持边坡或开挖面的稳定,或者防止地基破坏和过大变形,以保证结构物正常工作。两者的基本差别在于,常规结构是从土体的外部进行支撑的,如常规挡土结构必须抵抗土体的外向土压力,而加筋土结构则是从土体内部来支撑的,即加筋土结构是维持作为加筋土组合中应力和强度的内部平衡。因此,两者的工作条件或者说力学条件有所不同。”

“从这个视点出发,可以想象,加筋土结构的稳定性必须先保证加筋土体本身是稳定的,然后才能考虑整体结构的稳定。因此,加筋土结构的设计必然包含两部分:内部稳定校核和外部(整体)稳定验算。通过内部稳定性分析,解决筋材的布置和材料的选择等问题,保证加筋土体能形成复合土体参与整个结构的工作。而外部稳定计算则解决加筋土结构的整体稳定、抗滑稳定、倾覆稳定以及基础的承载稳定等问题。”(包承纲,2008)

除了上述的加筋土结构设计原则外,笔者在该书中还提到如下各点:

(1) 加筋土工程的设计原则基本上仍遵循一般土木工程的设计思路,但正如钢筋混凝土中有混凝土和钢筋两种性质不同的材料一样,加筋土中的土和加筋材料不仅基本物理性质不同,而且在材料的刚度、强度、韧度(延性)、应力应变关系、塑性性质、时、温效应等方面也都迥异。由于土与筋材的相互作用(界面效应)使加筋土由散体变成具有一定整体性的“似连续体”材料,其强度和刚度大幅度提高;另一方面,由于有更多的影响因素存在,也给建筑物的安全评价带来更多的未知因素,从而对设计方法和施工工艺提出更高的要求。

(2) 在土力学中,当土体中某一点的抵抗能力发挥到最大时,该点就进入塑性状态。随后,塑性状态的区域不断扩大,直至土体再无力承受外荷时,发生整体性的极限平衡破坏。这个过程在加筋土中表现得尤为复杂。在加荷初期,土体本身承受了绝大部分的外力,以后随着土体变形,应力通过土与筋材的接触界面,逐渐转移到筋材上,使筋材的应力增大,当筋材的应力大到一定程度后,可能发生两种情况:一是筋材的应力超过其极限抗拉强度,筋材被拉断;另一是筋材的作用力达到筋材与土界面上的极限摩阻力,筋材沿土体发生较大的相对位移(滑移),并进而被拔出。为此,要保证加筋土的安全,首先要保证筋材本身有足够的抗拉强度,筋材与土之间有足够的摩阻强度,以及加筋土体本身有足够的自身稳定性,不会发生过大的变形。加筋土工程的设计,就是要解决上述几个问题。

(3) 应当指出,稳定验算都是针对极限状态进行的。但在实际使用的条件下,土体不

一定进入塑性或极限状态,或者仅部分进入塑性状态。同时,要全面了解加筋土的性状和工作机理,则还需研究受力后,加筋土(尤其是加筋材料中)应力和应变变化的全过程,而极限状态分析仅是应力应变发展的最终阶段。由此说明研究加筋土工程应力应变状态全过程的必要性。有了应力应变场的知识,就有可能将不同的加筋结构(如加筋挡墙、加筋边坡和加固地基等)的分析和设计方法统一起来,使其建立在共同的理论基础上。

(4) 在目前绝大多数的文献中,对加筋土体失稳型式以及加固设计仍采用圆弧法或修正的圆弧法。但也有多人对此提出异议,如沈珠江等曾在《土工合成材料加固的软基极限分析》中强调了筋材摩阻力对其应力状态的影响,认为当筋材不发生断裂或拔出的情况下,圆弧滑动是不可能出现的,仅可能发生伴随沉降而产生的横向挤出。这是对的。

但应注意到,在工程中,破裂面的下滑错动量在起始阶段大约也就是几厘米,但是由于这些错动主要出现在与滑动面相交的很小范围内,因此,局部的相对变形仍相当大。这样,筋材在与圆弧面交界处可能发生一定的折皱现象,而圆弧滑动的趋势仍可能存在。因此,仍可用圆弧法来近似判断潜在滑动面的稳定性,所不同的是在滑动面与筋材交接点上应顾及筋材的抗弯刚度。

5 加筋土结构的主要类型和设计中主要考虑的因素

加筋土工程一般可分为:支挡结构、陡坡、堤坝、软基加固、道路路基、建筑工程以及其他加筋土工程,如大型油罐的加筋垫层等。加筋土的出现使以往无法建造的工程或建筑物成为可能。在某些场合,对土体进行加筋,已成为一种不可替代的工程措施。因此,加筋土工程的种类和形式在土木建筑领域中越来越多。按工作性质和设计方法的不同,加筋土工程大体可分为加筋土挡墙、加筋土边坡(陡坡)和加筋土地基。结构形式虽然不同,但从土力学的观点看来,它们都是研究结构物土体进入极限状态时的性状,以及抵抗极限破坏的工程措施,因此极限平衡条件的研究,将是其中的核心问题。现以边坡问题为例进行说明。不难想象,如果把边坡坡度加陡,甚至处于垂直状态,那么边坡课题就逐渐向土压力和挡土墙问题靠拢;而如果将边坡的坡度减缓,甚至达到水平状态,那么就与地基的承载力问题相近了(当然两者还是有一定差别的)。注意这些课题的共性,将使讨论更加清晰。

在加筋土工程中,土工材料种类繁多,土的性质又各异而且多变,因此在考虑实用计算法时,还应注意下列几点:

(1) 设计分析方法应与所选的加筋材料相适应,例如,选用加筋带、有织物或土工格栅等,它们的特性各异,故设计计算也不同,例如土工格栅有摩擦力和咬合力等,而有织物只有摩擦力。

(2) 对于不同的加筋土工程,它们的破坏模式不尽相同,因此应有针对性地进行不同模式的稳定分析,如挡土墙中的加筋土与软基上堤坝的筋材加固的分析内容就有所不同。

(3) 筋材性能的测试,应以符合工程实际条件的试验成果为主,同时,应考虑筋材在工程荷载长期作用下的蠕变、老化和其他物理、化学等因素以及施工因素的影响。

6 加筋土结构物设计的主要内容

加筋土结构的设计也包括“设”和“计”两方面，“设”的内容主要有筋材的选择和筋材在填土中如何布置等；而“计”的部分则主要涉及结构中加筋土内部和外部的稳定，结构的变形问题可根据结构的特点和工程的功能，在有必要时进行。

上面谈到的“设”为后面的“计”提出了许多内容要求。首先，加筋土体的应力场和应变场是必需计算的；其次，要根据可能的破坏形式进行几项核算：如筋材拔出与拉断核算，筋材拉伸应变的分布，两层筋材之间土的剪切带导致的横向挤出的可能性等。关于内部稳定分析中是否要进行滑弧分析的问题是有争论的。笔者以为，土的不均匀垂直压力对筋材的局部剪切作用，导致加筋土中筋材产生集中的拉伸应变（包承纲，2008）。这种局部大应变的连线使在加筋土中形成潜在滑弧面成为可能。因此，滑弧稳定分析仍需进行。

此外，超越加筋范围的整体稳定分析，即外部稳定分析，无疑也是必需的。

上面几项是主要的计算内容，其他可能还有一些，要根据具体情况确定。

7 加筋土的应力应变场计算和稳定分析

7.1 应力场应变场的计算

应力应变分析的计算方法有很多，这里主要介绍汪明远（2009）对加筋土应力、变形计算的研究成果。根据对加筋土机理的认识和以一系列试验成果揭示为基础，汪采用了以下的计算模型。

土工格栅是一种典型的韧性材料，其抗弯刚度较小。大量计算表明，在加筋土工程工作条件以及大部分破坏状态下，填土中土工格栅所受拉力远较其抗拉强度为小，筋材的应变一般在弹性范围内，故将土工格栅模拟为线弹性。另一方面，土工格栅在水平面与填土间发生摩擦剪切作用，而在其法向与填土相互约束，筋土界面满足接触约束条件。根据土工格栅与膨胀土界面特性的拉拔试验，将界面摩阻力—相对位移关系模拟为理想弹塑性。当界面摩阻力小于界面抗剪强度时，界面为弹性黏结状态，界面摩阻力与筋土相对位移间为线弹性关系，二者之比即是界面切向刚度 k ；当界面摩阻力达到其抗剪强度，界面成为摩擦滑动状态。

根据拉拔试验，将界面抗剪强度表达为线性摩尔—库仑模式：

$$\tau_{\max} = c + \sigma_m \tan \phi \quad (1)$$

式中 c ——界面似黏聚力；

ϕ ——界面似摩擦角。

上述土工格栅与膨胀土的界面模型，其参数主要有4个，即：筋材的弹性模量 E （MPa）、界面切向刚度 k （kN/m³）、界面似黏聚力 c （kPa）和界面似摩擦角 ϕ （°）。土工格栅的弹性模量可直接测定，界面的强度常数可根据拉拔试验确定，切向刚度可根据界面平均摩阻力—平均相对位移曲线估算。

填土可采用非线性弹性模型或弹塑性模型模拟。

加筋土中的一个特殊问题是界面的模拟，这是一个接触相互作用的数值模拟问题，包括两个方面：一方面是界面模型，即界面剪应力与正应力传递规律；另一方面是接触算

法, 这里采用传统的界面元方法。设置界面元模拟接触界面的方法, 其实质是通过界面元的变形将非连续变形问题转化为单一系统的方程组求解, 界面元主要包括两节点单元、无厚度单元和薄层单元等。两节点单元是在接触面同一位置的两侧各设一节点, 这两个节点组成一个单元, 由法向和切向弹簧组成, 以法向刚度和切向刚度模拟。当接触面分离, 法向刚度和切向刚度取小值, 模拟接触约束条件; 界面接触时, 法向刚度取大值以模拟法向约束且不嵌入。

无厚度单元是以 Goodman 单元为代表, 为四节点接触面单元。Goodman 单元假定接触面上的法向应力和剪应力间无交叉影响, 应力与相对位移的关系式为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_n \\ w_s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 w_s 、 w_n ——接触面切向和法向相对位移;

k_s 、 k_n ——切向刚度和法向刚度。

薄层单元是以 Desai (1984) 提出的薄层单元为代表, 可避免无厚度单元的接触嵌入问题, 假设单元厚度为 t , 接触面的应力—应变关系表示为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{Bmatrix} = t \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{sn} & k_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中 k_{nn} ——法向劲度系数;

k_{ss} ——切向劲度系数;

k_{ns} 、 k_{sn} ——切向和法向间的耦合系数。

考虑土工格栅与填土界面, 以及拉拔箱前壁与填土界面的特点, 本文均采用界面元的方法进行模拟。界面元附着于实体的表面, 均表达为三节点三角形单元, 两个三角形的界面元可表达任意四边形接触区域。每一时间步均计算法向位移速率和切向相对剪切位移速率, 然后根据界面本构关系计算界面的法向力和剪切力矢量。

当界面处于弹性阶段时, 在计算时步 $t + \Delta t$ 内界面法向力与切向力表达为:

$$F_n^{t+\Delta t} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (4)$$

$$F_{st}^{t+\Delta t} = F_{st}^t + k_s \Delta u_{st}^{t+(1/2)\Delta t} A + \sigma_{st} A \quad (5)$$

式中 $F_n^{t+\Delta t}$ ——该 Δt 时步更新的界面法向力;

$F_{st}^{t+\Delta t}$ ——该 Δt 时步更新的界面切向力;

u_n ——界面法向位移;

Δu_{st} ——切向相对位移增量矢量;

σ_n ——界面初始法向应力;

k_n ——界面法向刚度;

k_s ——界面切向刚度;

σ_{st} ——界面初始切向应力;

A ——与界面元各节点关联区域的接触面积。

界面元的法向应力、切向应力、相对位移可表达为其三个任意节点关联区域的相应值或其均值。界面元各节点关联区域为与该节点相邻的界面元形心连接线所围区域。

界面的非弹性阶段可以两种方式表达: ①对黏结界面, 界面可具有抗剪强度和抗拉强

度。当界面应力未超过界面黏结强度,界面处于弹性阶段。当界面剪应力超过抗剪强度,或界面法向拉应力超过界面法向抗拉强度,界面黏结即失效;②弹性阶段界面应力表达为切向或法向刚度和界面相对位移的函数;界面行为可定义为库仑摩擦,其抗剪强度表达为黏聚力和摩擦角的函数,界面应力达界面强度后可表达为理想塑性或软化特征;对黏结失效或无黏结界面,在界面法向具有不抗拉特性,且当界面无法向应力时其切向也不受力。

界面采用线性莫尔—库仑强度准则,其最大可承受的切向力表达为:

$$F_{s\max} = cA + F_n \tan \phi \quad (6)$$

式中 c ——界面黏聚力;

ϕ ——界面摩擦角;

F_n ——界面法向有效压应力。

当界面切向力达到其最大可承受数值时,界面处接触体间开始滑移,在界面塑性滑移过程中,当切向位移导致法向有效应力增大,可将法向有效应力增量表达为界面剪胀角的函数:

$$\Delta \sigma_n = \frac{|F_s|_o - F_{s\max}}{Ak_s} \tan \psi \times k_n \quad (7)$$

式中 ψ ——界面剪胀角;

$|F_s|_o$ ——修正前的界面剪切力;

$|F_s|_o - F_{s\max}$ ——界面法向有效应力增大导致界面可承受的切向力增大值。

界面节点处计算的法向力和切向力,以大小相等、方向相反的一对作用力与反作用力作用于与该节点相关的区域,以及与该区域接触的另一面。仅以界面节点进行界面接触判断,且仅在界面节点处存在接触力传递。与节点有关的应力状态认为在与该节点相关的区域均匀分布。界面特性与每个节点相关,各节点可有不同的界面特性。

采用上述的模型可以对格栅加筋土的拉拔试验进行数值模拟,计算加筋土体中竖向应力和水平应力分布、界面摩阻力分布、摩阻力的发挥与筋—土相对位移的关系、格栅的应力和变形等。同时,采用数值分析也可对加筋土体的变形和破坏过程进行全过程的模拟,并获得加筋土的破坏模式,上面几节中所引用的有些图表就是数值计算得来的。

无疑,这些成果不仅有助于获得设计所需的资料,而且对认识加筋机理也必不可少。

7.2 加筋土结构的稳定分析

稳定分析的内容包括筋材的稳定(不被拔出或拉断),加筋体本身的稳定和整个加筋体结构的稳定等三方面。第一方面的计算方法前面已经谈到;关于第二方面的分析,可采用基于应力状态的强度折减法;而对于第三方面的整体稳定分析,仍可采用极限平衡法进行,与通常的圆弧分析法大体相同。

所谓基于应力状态的强度折减法,就是首先求得边坡的应力场和位移场,同时按下式折减强度参数: $c' = c/w$, $\tan \phi' = \tan \phi/w$, 其中 w 为折减系数,即安全系数; c' 、 ϕ' 分别为折减后的内聚力与内摩擦角。而边坡失稳的判据,主要以广义塑性应变或称等效塑性应变贯通为准,此外,非线性迭代过程不收敛,或边坡特征点的位移突变等也可作为失稳的附带判据,但据介玉新研究,上述三者以塑性区贯通的安全系数为最小,位移突变次之,计算不收敛为最大,且相互差别较大,因此以塑性应变贯通的准则为宜。

至于整体稳定分析的极限平衡法,可采用考虑条间力的 Morgenstern—Price 法,它与