

土工袋技术原理与实践

刘斯宏 著



科学出版社

土工袋技术原理与实践

刘斯宏 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为全面、系统地介绍了土工袋技术的原理与实践应用,集中体现了作者多年来关于土工袋技术的研究理论及成果,并结合多个工程实践,研究了土工袋应用于不同结构物的工作机理及其工程特性。

本书首先对研究土工袋技术的初衷进行了介绍,对比研究了土工袋与常规水平设置加筋材提高基础承载能力的措施,显示了土工袋的加筋效果;然后通过理论分析与室内试验相结合的方式对土工袋的强度变形特性进行了系统的研究。在此基础上,对土工袋减振性能、防冻胀特性、处理地基基础、处理膨胀土渠坡、构筑柔性挡土墙以及在市政工程中的应用进行了较为系统的分析、试验及实践研究。这些内容不仅能够促进土工袋技术及加筋土结构的学术理论发展,而且可以指导工程建设实践。

本书面向土木、水利和交通类从事水利工程和岩土工程相关工作的科研、设计人员和研究生,也可以作为高年级本科生扩展知识面用书。

图书在版编目(CIP)数据

土工袋技术原理与实践/刘斯宏著. —北京:科学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-03-051555-1

I. ①土… II. ①刘… III. ①土建织物-技术-研究 IV. ①TS106.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 014232 号

责任编辑:王 运/责任校对:张小霞

责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年1月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:251 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

将土装入编织袋形成土袋加筋体，并运用于构建临时构筑物，这或许是大多数人对“土工袋”的最基本看法。每到汛期，我们总能在电视屏幕上看到“土工袋”作为一种不说话的“子弟兵”奋战在抗洪抢险的一线。这一现代人不以为意的加筋土结构，流传了四千余年，世代相传，造福于民，尤其在中华治水文明史上留下了灿烂的一笔。

“物竞天择，适者生存”，这一自然法则不仅仅适用于自然界生物间的优胜劣汰，同样适用于人类文明史上出现的各种工法技能。然而，对于古人留下的好东西，我们习惯于延续古人做法，按照常规思路出牌，以至于难以深刻发现其强大的生命力，无奈常常遗憾地与它擦肩而过，成为了“最熟悉的陌生人”。“土工袋”作为一种沿袭了几千年的古老工法，必有其存在的道理，否则早已淹没于历史洪流之中，更难以让今天的我们见到并继续使用。2004年，从日本留学回来的刘斯宏教授向我介绍了“土工袋技术”，经过较为系统的了解后，我对传统“土工袋”有了新的认识，土工袋的确不应该仅仅局限于传统抗洪抢险的用途，它完全可以焕发出新的生命力。通过合作研究，借助国家“十二五”科技支撑项目，我们积极开展试验研究，将土工袋技术用于处理南水北调中线的膨胀土渠坡，并取得了良好的工程效果。

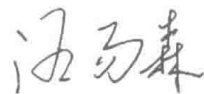
水利工程和岩土工程的实践性和工程应用性很强，为了学以致用，必须以理论为依据，工程为纽带，理论联系实际。这一点刘斯宏教授做得很好，从传统古老的工法中，提炼总结出土工袋的工作原理，研究土工袋的加筋、减振、防冻胀机理，继承传统并加以创新，将形成的理论再次回归到实践中去。传统的“土工袋”逐渐被发展成为一套完整的，集理论、试验、实践为一体的“土工袋技术”。刘教授坚持这项研究将近二十年，回国十余年来，他的课题组也一直围绕“土工袋”技术开展一系列有特色的研究工作，这是十分难能可贵的。

欣闻刘斯宏教授《土工袋技术原理与实践》一书即将出版，我也在第一时间读到了初稿。这本书不仅介绍了土工袋技术的基本知识和原理，而且结合了作者在工程实践中的体会与经验，分析了土工袋技术工程运用，理论与实践相结合。该书是我国有关土工袋技术的第一本内容丰富、系统深入、图文并茂、富有启发性的著作。这对于土工袋技术的科学研究和工程设计都有参考价值。

近年来，国内外越来越多的人认识到土工袋技术的优越性，并开展了与之相关的研究，发表的科技论文也日渐增多，该书的出版将有利于该技术的继承总结与发展创新。

该书的付梓问世，当使广大读者备受启发，可喜可贺，故乐于作序，以上一点文字，谨供参考、指正。

国务院 南水北调办公室 原总工程师
南水北调专家委员会副主任



2016年11月18日于北京

前 言

《山海经》云：“洪水滔天，鲧窃帝之息壤以湮洪水，不待帝命。帝命祝融杀鲧于羽郊。鲧复生禹，帝乃命禹卒布土以定九州。”讲的是鲧未经天帝同意盗取了“息壤”来围堵洪水，触怒天帝，被杀死于羽山近郊，而后天帝命鲧的儿子大禹铺填息壤平治洪水，最终安定了九州。可见鲧禹父子均以“息壤”治水，那么何为“息壤”？晋代郭璞在《山海经注》中解释道：“息壤者，言土自长息无限，故可以塞洪水也。”郭璞将“息壤”解释为因地壳变动而生长出来并能够无限生长的自然神物。童稚小儿读此神话，关注的大多是引人入胜的情节；而水利工程和岩土工程技术人员读罢或许产生疑惑，这“息壤”的实体究竟是什么呢？

李广信先生在其著作《岩土工程 50 讲——岩坛漫话》中，从历史渊源和专业实践的角度阐释了“息壤”是一种古代人民发明的河工技术。在远古称为“息壤”，在秦汉叫做“茨防”，宋代形成“埽”，而现代则发展成为一种水利工程中的土工合成材料综合技术。话说“兵来将挡，水来土掩”，但天然土毕竟是散碎的粒状体，在水流中会被冲散带走，所以如何将土颗粒连接成整体成了古人治水的关键技术。古人在与洪水斗争的过程中发挥了强大的学习智慧，老子在《道德经》中说：“人法地，地法天，天法道，道法自然”。大自然给了远古人以启示，正如李广信先生在《息壤考》中所言，古人一定是见到河狸伐木筑坝而受启发，采用了与之相似的土体加筋与防护措施，使河流泥沙淤积、不断增长，形成所谓的“息壤”，以湮洪水。

远古的治水神物“息壤”经考证可以理解为，人工制造的装载着泥包、沙包和石块用以堵塞洪水的防洪堤坝。可以想象，当年鲧禹治水时砍伐了大量的竹木纤维，编织成蒲包草袋和篾笼，将土石装入并沉入水中作为堤坝的基础，再向上面间隙和两侧叠加石块蒲包草袋，不断将堤坝增高增厚增长。这种“道法自然”的盛土砌堤方法简单有效，至今仍在使用，比如 1998 年长江洪水时使用编织袋装土进行抢筑堤防和治理管涌，小型水利工程中使用土袋围堰进行施工导流。

将土装入袋子形成土袋，这一现代人看来不以为意的举措，流传了四千余年，世代相传，造福于民，并且可以推测其历史前身便是“息壤”的重要组成部分，在中华治水文明史上留下了神秘而光辉的一笔。不过那时的土袋还不能称为一种完善的技术，只是一种“防洪抢险”的远古工法。几千年来，该工法一直沿袭古人做法，并没有什么进展。如果说古人的智慧是“道法自然”，那么今人继承古人智慧，解明古老工法的力学原理，推广创新，使其发挥出更大的功能效益，将

是一件颇具意义的事情。水利工程和岩土工程从来都是实践先于理论，经验先于科学。一些工法发展成为成套的技术需要不断地在实践中积累经验，从经验升华为科学理论，再从科学理论发展出成套的应用技术。

自 1997 年开始，笔者与其在日本名古屋工业大学的博士生导师松岗元（Hajime Matsuoka）教授一起开展了土工袋的相关研究，通过试验研究与理论分析解明了土工袋力学原理及各种工程特性。2004 年回国后，笔者在河海大学水工结构研究所工作，并继续开展这项研究十余年，结合国内现状与工程需求，先后开展了土工袋柔性挡墙工作性状及设计理论、土工袋基础减振隔震技术、土工袋防渠道冻胀技术、“土代石”筑堤技术、土工袋处理膨胀土技术、固体废弃物土工袋及应用等成套技术研究。

本书是作者对该项研究工作的一个阶段性总结，尝试将历来用于抢险和临时工程的土袋用于各类半永久或永久工程，希望将这项古老的工法发展成为一项适应时代发展的，环保、经济、实用的土工袋技术，推广应用于土木和水利工程中。

本书主要包括以下几个方面的内容：第 1 章主要介绍研究土工袋的灵感起源；第 2 章主要介绍土工袋强度及变形特性；第 3 章主要介绍土工袋减振消能性能；第 4 章主要介绍土工袋防冻胀特性；第 5 章主要介绍土工袋处理地基基础；第 6 章主要介绍土工袋处理膨胀土渠坡；第 7 章主要介绍土工袋柔性挡土墙；第 8 章主要介绍在市政工程中的应用。

衷心感谢日本名古屋工业大学的松岗元教授引导作者开展土工袋技术的研究；衷心感谢国务院南水北调工程建设委员会原总工程师及专家委员会副主任汪易森先生多年来对作者的鼓励与支持；感谢南京陆屿工程有限公司胡晓平对土工袋技术推广应用所做的努力。本书的部分研究成果得到了江苏高校优势学科建设工程资助项目（YS11001）以及国家自然科学基金面上项目（批准号：51379066）的资助，在此表示衷心的感谢。本书的撰写过程中，参考了作者所指导的研究生白福青、王艳巧、李卓、高军军、方敏华、薛向华、李玲君等的学位论文，在此谨表谢忱。同时感谢鲁洋、樊科伟、贾凡、许雷等在读研究生在本书的编排、整理和校阅过程中付出的辛勤劳动。感谢王柳江、高娇容、朱克生、浦敏艳、王子健、李栋、宋迎俊、王建磊等其他已毕业或是在读研究生在土工袋技术研究过程中给予的帮助。

限于著者的水平和工作的局限性，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

刘斯宏

2016 年 10 月于河海大学芝纶馆

目 录

序

前言

第 1 章	研究土工袋的缘故	1
第 2 章	土工袋强度及变形特性	11
2.1	土工袋强度特性	11
2.2	土工袋应力应变关系	23
第 3 章	土工袋减振消能性能	27
3.1	土工袋竖向减振试验	27
3.2	土工袋水平循环单剪试验	36
3.3	土工袋小型振动台试验	45
3.4	土工袋现场沟槽减振隔振试验	57
3.5	土工袋减振消能机理	61
第 4 章	土工袋防冻胀特性	76
4.1	土工袋防冻胀机理	76
4.2	冻融循环下土工袋变形特性试验	78
4.3	土工袋处理渠坡防冻胀室内模型试验	85
第 5 章	土工袋处理地基基础	96
5.1	土工编织袋耐久性	96
5.2	房屋基础中的应用	100
5.3	道路工程中的应用	102
5.4	土工袋处理软土地基现场承载力试验	105
第 6 章	土工袋处理膨胀土渠坡	112
6.1	南水北调中线工程膨胀土问题	112
6.2	土工袋处理膨胀土原理	113
6.3	袋装膨胀土室内试验	114
6.4	土工袋处理膨胀土渠坡现场试验	125
6.5	膨胀土渠坡稳定性计算分析与数值模拟	139
第 7 章	土工袋柔性挡土墙	150
7.1	室内静力模型试验	150
7.2	小型振动台试验	158

7.3	土工袋挡土墙设计方法	165
7.4	现场施工例	167
7.5	膨胀土挡墙土工袋缓冲层	170
第 8 章	在市政工程中的应用	177
8.1	沟槽回填	177
8.2	其他应用	186
参考文献		189

第 1 章 研究土工袋的缘由

作者与其导师日本名古屋工业大学的松冈元（Hajime Matsuoka）教授一道于 20 世纪 90 年代开始系统地研究土工袋技术，起初是想探究一种利用土工合成材料进行地基加固的有效方法。为此，进行了一系列的地基承载力室内模型试验^[1]。

承载力模型试验中地基材料选用铝棒堆积体，因为铝棒具有以下优点，能够在二维状态下较好地模拟土颗粒：

- 1) 铝棒的比重 $G_s=2.69$ ，接近一般土颗粒的比重（约 2.65）；
- 2) 铝棒可以直立地堆积成一定的高度，在堆积体的前/后侧面不需要任何支撑，无侧壁摩擦的影响；
- 3) 可以在铝棒堆积体的表面画上标线，用以观察铝棒堆积体在加载过程中的运动轨迹。

图 1.1 为模型试验照片。地基采用直径 1.6mm 和 3mm 的两种长 5cm 的铝棒，以重量比 3 : 2 的比例混合而成的堆积体模拟。装样完成后的铝棒堆积体初始空隙率为 0.23，干密度为 21.6kN/m^3 。

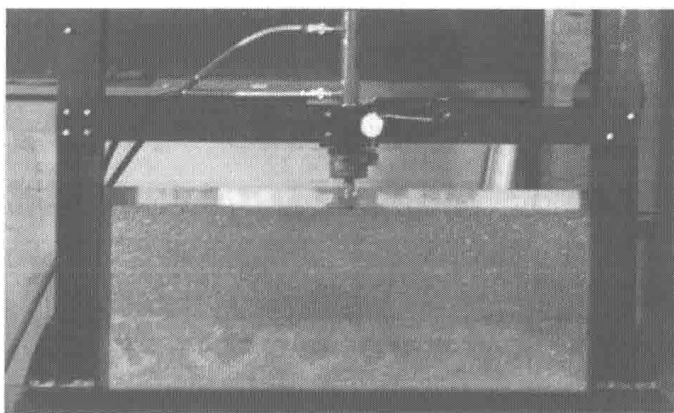


图 1.1 铝棒堆积体地基承载力模型试验

传统的地基加筋方法是把加筋材料（土工织物、网状物、带状物等）水平铺设于地基中。因此，首先对传统的地基加筋方式进行了模型试验，如图 1.2 所示。模型试验中，加筋材料采用硬质纸模拟，硬质纸长为 30cm、宽为 5cm（与铝棒长度相同），允许拉应力为 $33\sim 41\text{N/cm}$ ，单位面积重量为 64g/cm^2 ；加筋纸水平设置在距离铝棒堆积体表面深为 3cm 处。图 1.2 为竖向加载后地基的变形情况。可

见，加载初期铝棒会在加筋纸上方滑动，而后水平埋设在地基中加筋纸随地基一起变形，加筋纸对地基的约束作用不大，因而实测得到的基础承载力增加有限。

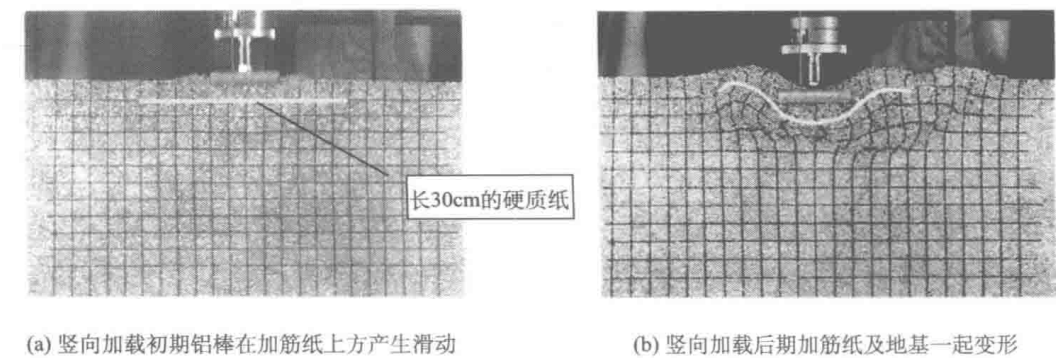


图 1.2 加筋纸水平铺设铝棒模型承载力试验

那么，加筋材料究竟应该如何布置在地基中才能有效地提高地基承载力呢？首先对一个条形基础受到外荷载后半无限地基的应力分布进行了分析。图 1.3 是根据弹性理论计算得到的地基中大、小主应力分布。可见，大主应力 σ_1 在条形基础下方呈放射状分布，与之垂直相交的小主应力 σ_3 则近似呈圆弧状分布。而土体单元在受到大、小主应力作用时，沿大主应力方向为压缩变形，沿小主应力方向则为伸长变形（侧向膨胀）。如果限制了土体单元的侧向变形，则需要施加更大的大主应力才能使土体单元破坏。由于土体单元的侧向变形产生土体单元的小主应变 ϵ_3 或者主拉应变，而其方向基本与小主应力 σ_3 方向一致，因此从理论上考虑，将柔性加筋材料沿着小主应力 σ_3 方向布置，最大限度地抑制地基的拉伸变形，应该是最有效的地基加筋方式。根据图 1.3 所示的弹性理论解，我们将传统水平铺设的加筋材改成半圆形状放置在铝棒堆积体中进行了试验，如图 1.4 所示。但是，

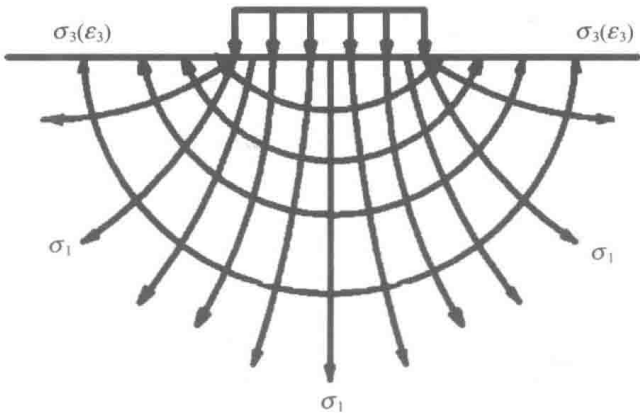


图 1.3 弹性理论计算得到的条形基础下地基主应力分布

由于加载后铝棒可以从条形基础的两侧向外移动，地基承载力提高得并没有预期的那么大，与水平铺设效果相差无几。为了解决这个问题，我们将加筋纸片两头延长，然后回折将基础两边的铝棒给包裹住，也就是说，将铝棒向基础两侧移动的通道封堵，如图 1.5 所示。这时再加载，情况发生了很大的变化：被包裹的地基变成了基础一部分，并在地基下方产生一个大的滑移线，如图 1.6 所示，同时铝棒模型基础的承载力也得到了大幅度提高（参见图 1.7）。



图 1.4 加筋纸半圆形布置情况下铝棒从基础两侧跑出

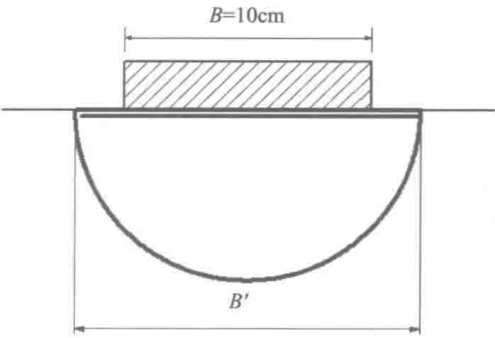


图 1.5 部分地基用加筋材圆弧状包裹

B 为基础宽度， B' 为包裹后原始宽度

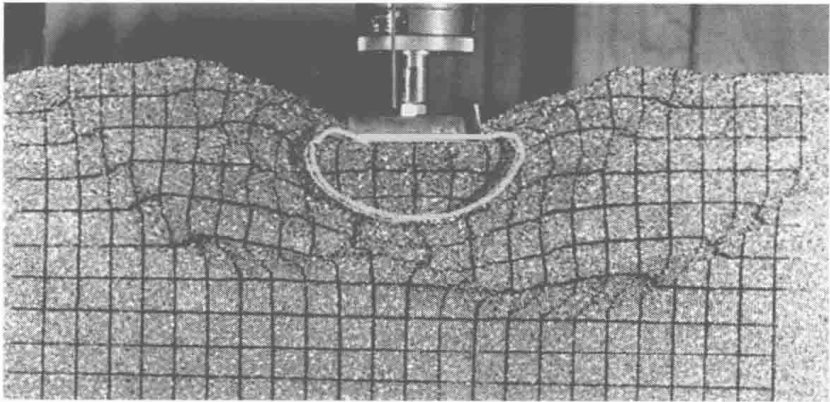


图 1.6 圆弧状包裹铝棒后地基破坏状况

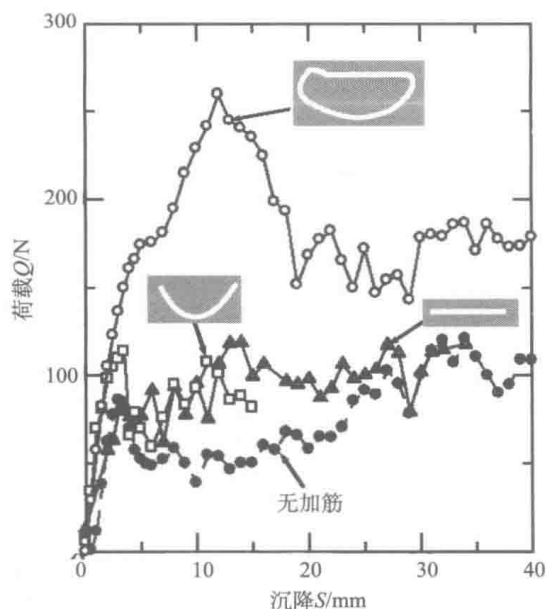


图 1.7 加筋纸三种不同布置形式下基础承载力试验结果

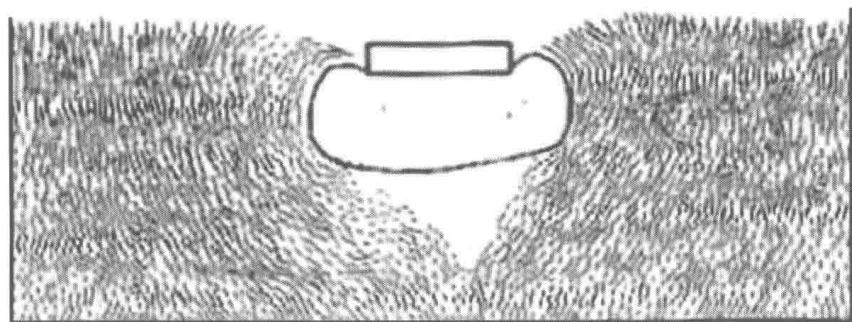
为了进一步探究半圆形包裹后铝棒基础承载力大幅度增大的原因，将半圆形包裹部分放大，如图 1.8 所示。通过仔细观察发现，半圆形包裹部分的宽度比加载前增大了几个厘米，而且包裹体内部铝棒也被挤压得非常紧密，像是被固化一般，和条形基础几乎成为了一个整体。分析其原因为：施加于基础上的外力引起了加筋纸张拉应力，被包裹的颗粒（铝棒）受到加筋纸张拉应力的作用后，导致了颗粒之间法向接触压力 N 的增加，从而导致颗粒间的滑动摩擦力 F 的增加（ $F = \mu N$ ， μ 为颗粒间摩擦系数）。由于土体的抗剪强度本质上为摩擦强度，因此受到外力作用后包裹体内部铝棒的抗剪强度增加，使得它成为基础的一部分，从而大大提高了基础的承载力。值得注意的是，包裹体内部铝棒的抗剪强度增加是



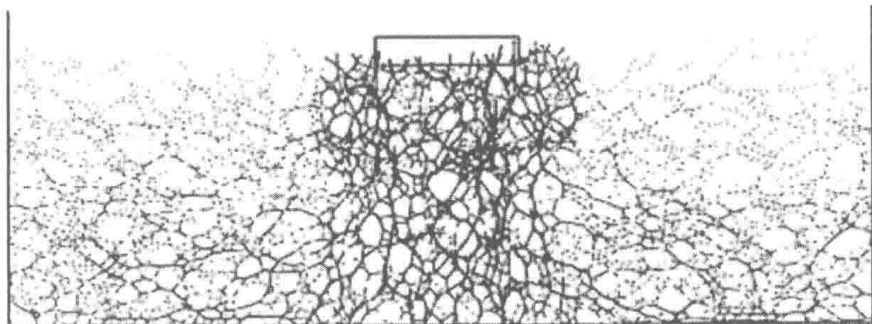
图 1.8 半圆形包裹铝棒受外荷载作用后的放大图

在外力作用下产生的，而外力对地基基础来说通常是“外敌”，因此这里蕴含着一种“以敌制胜”的道理，在土力学中是一件非常有意思的事情。

图 1.9 为包裹式加筋地基承载力试验的离散单元法 (DEM) 数值模拟结果^[2]，其中 (a) 为土体颗粒相对于条形基础的位移分布 (基础的沉降值范围为 18~22.5mm)，(b) 为地基中土颗粒间相互作用力分布。从图 1.9 (a) 可以明显看出，被包裹部分的土颗粒相对于基础几乎没有运动，而且在包裹体的下方形成了一个三角楔形体。也就是说，被包裹的部分其实已经与基础成为一体，变成了基础的一个部分，相当于形成了一个更深、更宽的地基基础。图 1.9 (b) 表示的是包裹体内部的颗粒间的作用力远远高于外部颗粒，即包裹体内颗粒的有效应力比外部的大得多。从此结果不难理解包裹式加筋地基承载力增强的道理。



(a) 相对位移矢量



(b) 颗粒间接触力

图 1.9 包裹式加筋地基承载力试验离散单元数值模拟结果

由太沙基极限承载力公式可知，极限载荷（非承载压力）与基础宽度 B 的二次方成正比，由此可以想象增加包裹体的宽度 B' 将会更有效地提升地基承载力。因此，我们将包裹体的宽度 B' 增加到基础宽度 B 的 3 倍（基础宽度 $B=10\text{cm}$ ）和 5 倍（基础宽度 $B=5\text{cm}$ ）进行了试验。试验结果如图 1.10 所示。相比无加筋状态，

图 1.12 与图 1.13 分别为两种状况下加载后地基内部产生的滑移线，图 1.14 为相应的荷载 Q -基础沉降 S 关系曲线。从图中可以看出，对于将基础底部 $15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 范围的铝棒整体包裹的情况，在竖向加载过程中会在包裹范围内首先出现滑动破坏，基础产生一定的沉降变形，此后继续加载，加筋纸的约束作用逐渐发挥，待包裹体内铝棒被固化成与基础为一体时，荷载继续增大，直至出现峰值后包裹体下方地基内出现另外一条较大、较深的滑动面；而对于分六层包裹的情况，包裹体内的铝棒加载开始阶段就受到了加筋纸的约束，包裹体的侧向膨胀变形较小，加载 Q - S 曲线斜率 (dQ/dS) 比整体包裹情况要陡，在分层包裹体内没有出现滑动面，仅在总体包裹范围底部的铝棒堆积体中出现一个大的滑动面，最后达到的峰值荷载也较大。该对比试验表明，包裹式加筋地基在地基承载力提高方面虽然非常明显，但为了减小基础沉降，一次性包裹范围不能太大，应该采用小范围包裹，然后叠层组合。

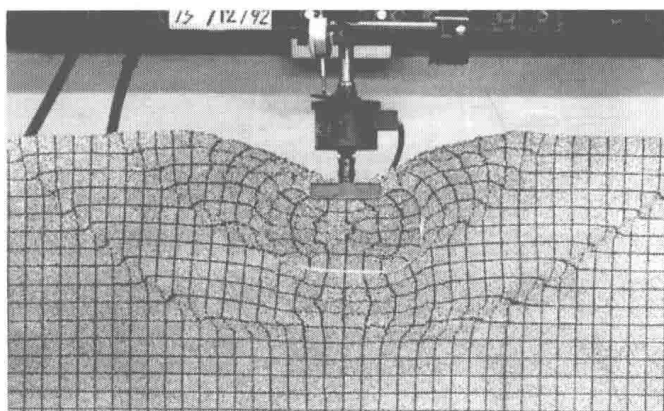


图 1.12 $15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 范围整体包裹地基中出现的双滑移线

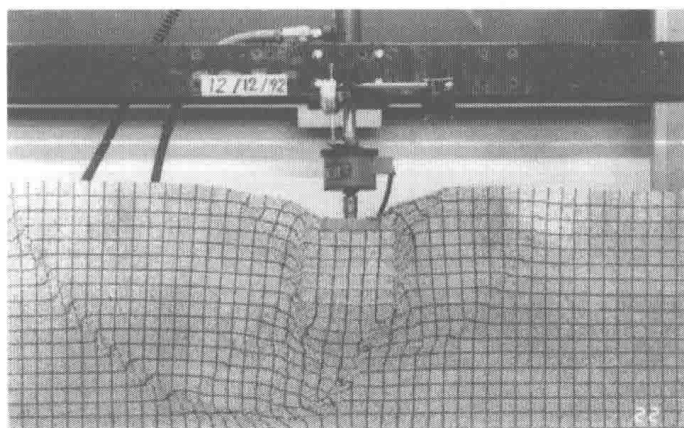


图 1.13 $15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 范围分六层包裹地基中出现的滑移线

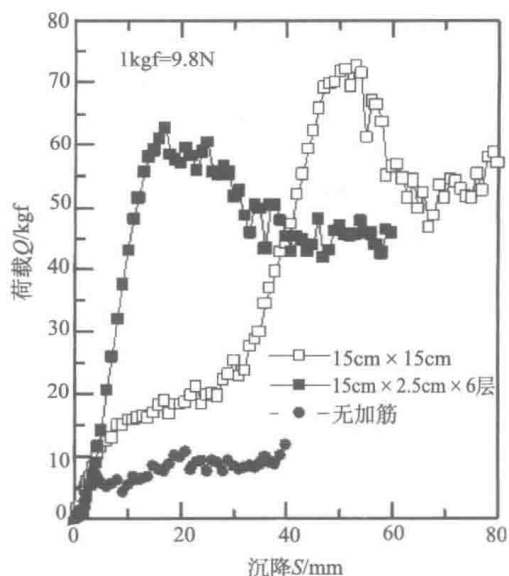


图 1.14 15cm×15cm 范围整体包裹与分 6 层包裹 Q - S 关系曲线的对比

以上试验结果表明,包裹式加筋地基承载力提高效果非常明显,但每个包裹体面积不能过大。为此,我们将同样数目的铝棒用 4cm×1.5cm 的纸包裹并用不同方式堆砌于基础底部(如图 1.15 所示),其对应的承载力模型试验结果示于图 1.16。可以看出,不管小包裹体的排列方式如何,基础的极限荷载随着包裹体的数量的增加而增大。

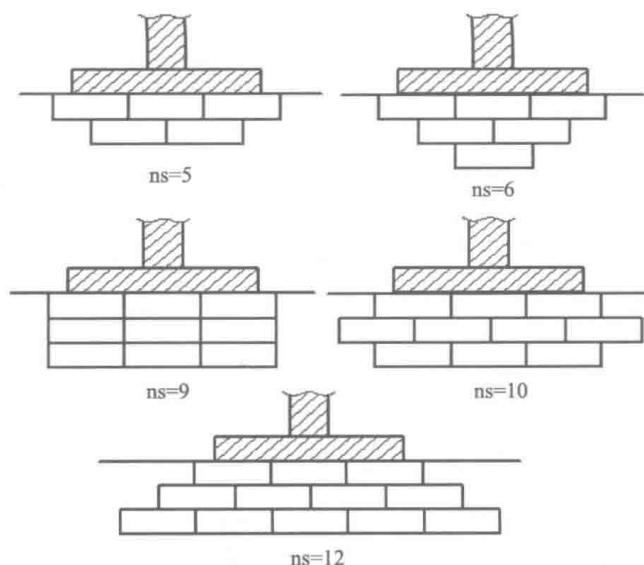


图 1.15 不同数量的小铝棒包裹体在基础底部的排列方式

基础宽 $B=10\text{cm}$, 每个包裹体尺寸 4cm×1.5cm, ns 为包裹体数量