

国家自然科学基金项目 (51109006)
住房和城乡建设部科学技术项目计划 (2015-K2-008)
陕西省工业科技攻关计划 (2015GY149)

土工格室挡墙 破坏机理及评价方法

宋飞 赵健 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土工格室挡墙 破坏机理及评价方法

宋飞 赵健 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书简要介绍了土工格室和土工格室挡墙在工程实践中的应用,采用离心模型试验、有限元数值分析和极限平衡理论相结合的手段研究了土工格室挡墙的破坏机理及其影响因素,发现了土工格室支护结构破坏模式存在类边坡破坏和刚性挡墙破坏两种形态。采用基于极限平衡理论的通用条分法和有限元强度折减法分析评价了土工格室挡墙的破坏模式,初步探索了土工格室加筋土结构的三维数值模拟方法。本书不仅可以让读者了解土工格室挡墙的破坏机理、破坏模式及稳定分析方法的研究新进展,而且还可以了解土工格室挡墙的一些工程应用情况。

本书可供土建、水利、公路、铁路、市政、防灾减灾和工程地质等工程专业的本科生、研究生及教师阅读参考,也可作为相关科研和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

土工格室挡墙破坏机理及评价方法 / 宋飞, 赵健著
— 北京: 中国水利水电出版社, 2019. 1
ISBN 978-7-5170-7369-7

I. ①土… II. ①宋… ②赵… III. ①挡土墙—破坏
机理—评价 IV. ①TU476

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第016699号

书 名	土工格室挡墙破坏机理及评价方法 TUGONG GESHI DANGQIANG POHUAI JILI JI PINGJIA FANGFA
作 者	宋飞 赵健 著
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 (营销中心)
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	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9印张 213千字
版 次	2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	50.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



土工格室是 20 世纪 70 年代末出现的三维网状土工合成材料。由于其特殊的三维立体形状,与土工格栅、土工织物和土工膜等仅靠自身的抗拉强度以及
与土之间的摩擦和咬合来提供加筋效果的平面加筋材料相比,土工格室不仅自身具有抗拉强度、格室片与土之间有相互摩擦作用,还能够对填料提供较强的侧向约束力,加筋性能优异,可用于修建加筋地基、加筋边坡和加筋土挡墙,同时可用作护坡绿化。

随着国家对现有耕地保护力度的不断加大,减少占地已成为工程建设的一个重要指导原则,因此在工程中会尽量放陡边坡的坡率,需要大量使用支挡结构。同时,在保持边坡稳定的前提下,绿化环境和恢复生态,使防护工程与周围环境和自然景观相协调,也是工程师所面临的关键技术问题之一。与浆砌片石挡墙等刚性挡墙相比,土工格室挡墙由于具有结构轻、可就地取材、施工便捷、取消圬工、美化景观和恢复生态等优势,成为适合在工程实践中推广的新型支护结构,应用前景广阔。土工格室挡墙已在公路、机场和变电站等边坡防护的工程实践中应用,但无成熟的设计方法和设计规范,仍然沿用刚性挡墙的设计方法并凭借经验,其中一个关键问题就是对于土工格室挡墙的破坏机理认识仍不清楚,假定土工格室支护的破坏模式与刚性挡墙的破坏模式(滑动破坏和倾覆破坏)相同,仍采用朗肯和库仑土压力理论计算土工格室挡墙的破坏模式,未能真实反映土工格室挡墙的破坏机理,造成计算分析结果误差较大,很难设计出最优的结构截面型式。理论的落后制约了该新型结构的推广和应用,这正是工程界亟待解决的难题。

作者对土工格室及土工格室挡墙的力学性能开展相关研究工作,通过试验研究、理论分析和有限元数值模拟,研究了土工格室挡墙在土工格室的几何尺寸和力学性质变化,填土面局部荷载变化,挡墙断面型式变化,填土中拉筋带的位置、长度和材料变化,二级挡墙的布置方式变化,墙底摩擦强度变化,墙体中的软弱夹层强度变化等不同工况下的安全度和破坏模式,揭示了土工格室挡墙的破坏机理,发现了土工格室支护结构破坏模式存在类边坡破坏和刚性挡墙破坏两种形态,在工程实践中主要表现为边坡剪切破坏模式,基于极限平衡理论通用条分法和有限元强度折减法提出了土工格室支护结构破坏模式评价方法,为土工格室挡墙结构设计和稳定性分析提供了理论依据。

本书是作者对该项研究工作的一个阶段性总结,希望能够加深人们对于土

工格室挡墙力学性能和破坏机理的认识,为编写土工格室挡墙的设计指南提供理论依据,促进该支护结构在工程实践中的推广和应用。

本书主要各章内容如下:第1章简要介绍土工格室和土工格室挡墙以及本书的主要研究内容;第2章主要介绍土工格室挡墙破坏模式离心模型试验研究;第3章主要介绍基于极限平衡理论的加筋边坡稳定分析方法,及其用于土工格室挡墙稳定分析计算;第4章主要介绍基于有限元强度折减法的土工格室挡墙破坏模式二维数值模拟研究;第5章主要介绍作者开发的土工格室弹塑性本构模型、建立的土工格室加筋土结构的三维数值模型,以及基于有限元强度折减法的土工格室挡墙破坏模式二维数值模拟研究;第6章主要介绍研发的变截面土工格室挡墙在延安机场迁建工程高填方边坡加固中的应用。本书前5章由长安大学公路学院宋飞副教授撰写,第6章由中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司赵健高级工程师撰写,全书由宋飞审阅并统稿。

衷心感谢华中科技大学土木工程与力学学院刘华北教授,长安大学公路学院谢永利教授、杨晓华教授对本研究所提出的宝贵意见,感谢中国航空港建设第九工程总队张鲁渝高级工程师在加筋边坡稳定分析程序编写过程中提供的帮助。本书的研究成果得到了国家自然科学基金项目(批准号:51109006)、住房与城乡建设部科学技术项目计划(批准号:2015-K2-008)以及陕西省工业科技攻关计划(批准号:2015GY149)的资助,在此表示衷心的感谢。同时,感谢作者的研究生李永亮、王凯、陈浩、程瑞志、柴海博、陈如意、杨宝强、李玉莹和孟亚会为本书的研究工作、编辑和文字校对付出的辛勤劳动。

作者衷心希望本书能够成为土木、水利、公路、铁路、市政、防灾减灾和工程地质等专业的师生以及相关工程技术人员从事科研、设计和生产的阅读参考书。由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位专家、学者、同行以及工程技术人员的不吝赐教和批评指正。

宋飞

2018年11月于长安大学公路学院

目 录

前言

第1章 土工格室挡墙简介	1
1.1 概述	1
1.2 土工格室简介	2
1.3 格室挡墙简介	3
1.4 主要研究内容	4
参考文献	5
第2章 土工格室挡墙破坏模式离心模型试验研究	9
2.1 概述	9
2.2 试验材料	9
2.2.1 试验用砂	9
2.2.2 模型土工格室	12
2.3 试验步骤及方法	15
2.4 试验结果及讨论	21
2.4.1 极限平衡状态时的离心加速度	21
2.4.2 滑动面发展过程	24
2.4.3 滑动面的位置	29
2.4.4 土工格室破坏模式	34
参考文献	35
第3章 基于极限平衡理论的土工格室挡墙破坏模式分析	38
3.1 概述	38
3.2 筋材力计算方法	39
3.3 加筋边坡稳定分析通用条分法	40
3.4 通用条分法算例	43
3.4.1 边坡计算模型一	43
3.4.2 边坡计算模型二	48
3.5 通用条分法的验证与分析	52
3.5.1 文献算例验证	52
3.5.2 离心模型试验验证	54
3.6 土工格室挡墙离心模型试验极限平衡分析	56
3.6.1 计算模型与参数	56

3.6.2 结果与讨论	59
3.7 土工格室挡墙小比尺模型试验极限平衡分析	63
3.7.1 计算模型与参数	63
3.7.2 结果与讨论	64
参考文献	67
第4章 土工格室挡墙破坏模式二维数值模拟研究	69
4.1 概述	69
4.2 有限元分析方法	69
4.2.1 ABAQUS 简介	69
4.2.2 材料本构模型	70
4.2.3 有限元强度折减法	71
4.3 数值模型标定	72
4.3.1 材料参数	72
4.3.2 边界条件及网格划分	73
4.3.3 计算结果分析	73
4.4 土工格室挡墙破坏模式影响参数分析	77
4.4.1 土工格室加筋土表观黏聚力	78
4.4.2 挡墙底部与基础之间摩擦角	81
4.4.3 地基土强度	83
4.4.4 挡墙中软弱夹层	85
4.4.5 二级挡墙布置方式	87
4.5 土工格室拉筋带优化布置研究	90
4.5.1 拉筋带层数对安全系数的影响研究	90
4.5.2 拉筋带长度对安全系数的影响	94
参考文献	95
第5章 土工格室挡墙破坏模式三维数值模拟研究	97
5.1 概述	97
5.2 离心模型试验三维有限元计算分析	97
5.2.1 材料参数	97
5.2.2 接触关系	98
5.2.3 荷载及边界条件	99
5.2.4 计算结果分析	99
5.2.5 格室层应变分布分析	103
5.3 拉筋带优化三维有限元计算分析	106
5.3.1 材料参数	106
5.3.2 计算结果分析	106
参考文献	107

第 6 章 变截面土工格室挡墙在延安机场迁建工程中的应用 109

6.1 概述 109

6.2 工程概况 109

6.2.1 场区地形地貌条件 109

6.2.2 场区工程地质条件 109

6.2.3 场区水文地质条件 111

6.2.4 场区工程概况 111

6.2.5 变截面土工格室挡墙设计概况 112

6.3 变截面土工格室挡墙施工过程 113

6.3.1 施工进度 113

6.3.2 施工工艺流程及注意事项 114

6.3.3 压实度试验结果 117

6.4 现场监测目的及方案 120

6.4.1 现场监测目的 120

6.4.2 现场监测方案 120

6.5 现场监测数据整理及分析 124

6.5.1 水平位移监测分析 124

6.5.2 沉降监测分析 129

6.5.3 土压力监测分析 132

第1章 土工格室挡墙简介

1.1 概 述

随着我国经济持续、快速、健康发展,公路、铁路、机场和变电站等基础设施也以前所未有的速度快速发展。许多公路、铁路的线路,机场和变电站均处在山岭重丘区,这就不可避免地以高填方的形式填筑,由此也引发了边坡稳定问题。以2014年延安机场迁建工程为例,延安新机场为山地机场,地处典型的湿陷性黄土区,有些地段的填方高达100m以上,湿陷性黄土填方防护和支挡效果对于整个工程具有至关重要的影响。高填方边坡的稳定与安全是工程建设中普遍存在的关键问题之一,该问题解决得好坏,不仅影响着整个工程的建设工期、建设质量、工程造价,而且对运营过程中的安全与社会效益都有很大的影响。同时,路堑开挖和高路堤的填筑必然对沿线的生态环境产生影响。如何做到在保证边坡稳定和工程建设质量的同时,有效地恢复生态,尽量减少对自然生态环境的破坏,使防护工程与周围环境和自然景观相协调,也是工程师所面临的关键技术问题之一。因此,加强边坡支护技术的研究是提高基础设施建设期与服务期效益的重要一环。

随着国家对现有耕地保护力度的不断加大,减少占地已成为公路、铁路、机场和变电站等基础设施建设的一个重要指导原则,这就要求在山岭重丘区修建基础设施时,在保证安全的前提下,尽量放陡边坡的坡率,因此会大量使用支挡结构,以达到减少占地的目的,特别是在山区地形受限制的特殊地段更是如此。

挡土墙作为一种常用的边坡防护措施被广泛应用于土工工程领域的边坡防护中。由于我国一些地区石料来源丰富,就地取材方便,再加上重力式挡墙施工方法简单,因此,在过去很长一段时间内,浆砌片石的重力式挡土墙是我国土木工程中广泛采用的主要支挡结构。重力式挡墙依靠墙身自重保持稳定,但由于其断面尺寸大,墙身较重,对地基承载力要求较高;同时圬工数量多,劳动强度高,施工进度慢,在地形困难、石料缺乏地区应用不便,其使用上的缺点是明显的;特别是圬工墙面无法进行绿化,不仅影响景观的美化,而且不符合环境保护的要求。然而随着社会和经济的发展,对环境和生态的保护日益受到人们的重视,挡土结构不但需要承担稳固边坡的功能,同时也被赋予保护生态、美化环境的要求,因此山区基础设施建设中充分考虑植被绿化、构筑物与自然景观的环境协调正成为全社会的共识和迫切要求。

在边坡支护结构方面,除了重力式挡墙外,目前公路工程中常用的还有加筋土挡墙、预应力锚索桩板墙、锚锭板挡墙等,上述结构在工程实践中的应用取得了大量工程经验,但也存在着施工复杂、自身重力较大、环境破坏较严重、减震消能作用不明显等问题。就路堑边坡防护而言,多采用浆砌片石、片石或混凝土骨架和喷射混凝土等圬工

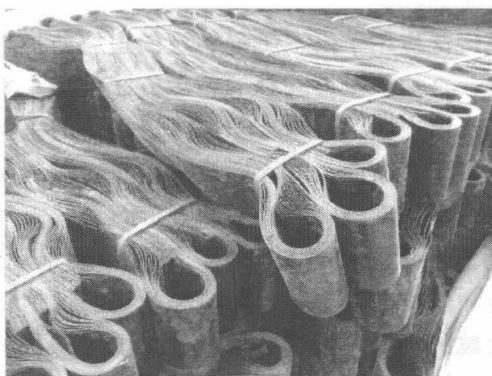


防护措施, 尽管上述防护措施能达到边坡防护目的, 但是存在着工程量大、劳动强度高、生态环境难以恢复和与环境景观不协调等缺陷。而对填方路堤边坡的防护, 除圬工型式外, 大多采用平面土工合成材料(如土工格栅、土工网垫、三维土工网等)结合植草的方法, 尽管上述防护措施在工程实践中取得了一定效果, 但也存在一些不足, 主要表现在平面材料与坡面的摩阻力小, 形成的防护层薄, 抗冲蚀能力低, 在集中水流的作用下, 易产生表面脱落, 导致边坡冲蚀变形, 进而发生溜坍、坍塌等路基病害。

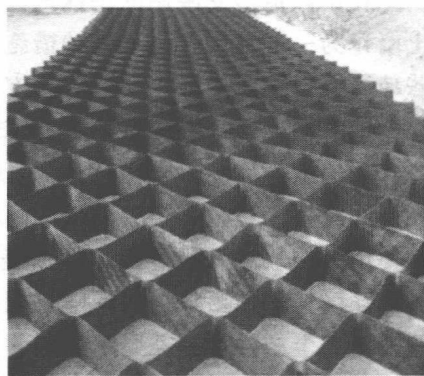
因此, 基础设施修建于山岭重丘区时, 如何做到既能保持高填方边坡的稳定, 确保建设质量, 又能有效地恢复生态, 尽量减少对自然生态环境的破坏, 使防护工程与周围环境和自然景观相协调, 节约工程造价, 是工程界亟待解决的关键技术问题之一。

1.2 土工格室简介

土工格室是由高分子聚合物宽条带(如高密度聚乙烯、聚丙烯和聚酯等高分子材料)经超声波焊接、铆接或插接而形成的三维网状土工合成材料, 如图 1.1 所示。土工格室问世于 20 世纪 70 年代末, 美国陆军工程师团最初用于加固军事场地上级配不良的无黏性土路基, 供军事车辆行驶通过^[1-4]。土工格室伸缩自如, 运输方便, 使用时张开并充填土石或混凝土料, 构成具有强大侧向限制和大刚度的加筋土结构(加筋地基、加筋边坡和加筋挡墙), 广泛应用于土木工程各个领域。由于其特殊的三维立体形状, 与土工格栅、土工织物和土工膜等仅靠自身的抗拉强度以及与土之间的摩擦和咬合来提供加筋效果的平面加筋材料相比, 土工格室不仅自身具有抗拉强度, 格室片与土之间有相互摩擦作用, 还能够对填料提供较强的侧向约束力, 因此使得加筋土的黏聚强度增长较大, 加筋效果优于平面土工合成材料^[5-7]。



(a) 折叠



(b) 张开

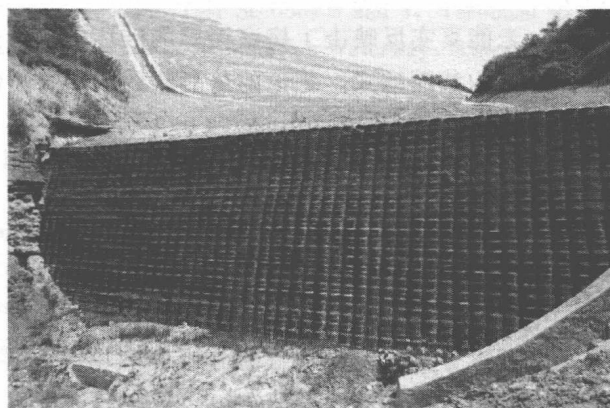
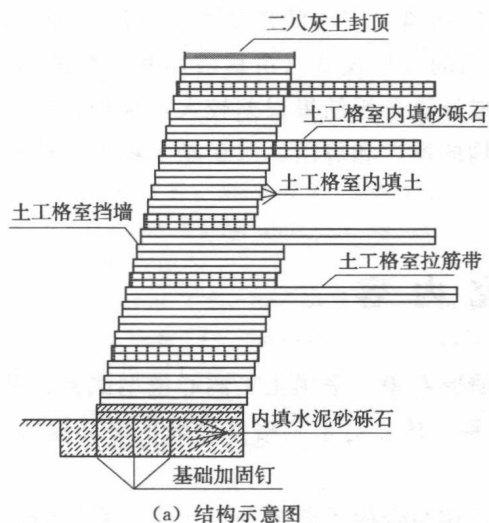
图 1.1 土工格室

很多学者采用模型试验和数值模拟的方法研究了土工格室加筋地基^[3,6,8-10,11-28]、加筋路堤^[29-36]和加筋土挡墙^[37-50]的加固机理, 促进了土工格室加筋土结构在工程实践中的推广和应用。



1.3 格室挡墙简介

采用土工格室修建挡土墙以及进行边坡防护时，一般是将土工格室和充填料组成的结构层按一定坡度层层叠加，层与层之间采用锚钉或钢筋连接，土工格室的铺设从下到上有一定的角度，当墙后填土填筑较高时，通常需要在墙后填土中将土工格室加筋拉筋带加长布置以起到加固边坡的作用，如图 1.2 所示。土工格室挡墙结构是土工格室材料与土体相互作用而形成的一种柔性挡土墙。在保证结构稳定性与工程质量的同时，土工格室挡墙的另一个显著特点是在施工过程中于墙面种植草种，能起到加强防护、绿化墙面的作用。



(a) 结构示意图 (b) 实物照片 (延安机场迁建工程中的土工格室挡墙, 2014)

图 1.2 土工格室挡墙

土工格室挡墙主要优势和特点体现在以下 5 个方面：

(1) 加筋效果优于平面土工合成材料。工程中目前大多采用平面土工合成材料，如土工格栅、土工网垫、土工网等，它们的加筋效果有限，只能提供拉力，没有抗弯刚度；而土工格室则具有大得多的侧向刚度与抗弯能力，加筋效果突出。工程实践迫切需要支护强度高、对基础强度要求低、有利于生态环保的支护材料和结构。

(2) 材料选择范围广。目前的重力式挡墙在地形复杂、石料缺乏地区应用十分不便，石料运输保障难度大。新型土工格室只需在三维网格中填入当地地材，压实即可，实现了就近取材，准备时间较短，更加适合于抢修抢建工程。

(3) 施工工艺快捷方便。土工格室施工特点：①施工方便，工艺简单；②所需设备简单，只需挖掘机、装载机、压路机等通用设备即可；③对施工现场操作人员的技术水平要求不高，有利于战时抢建抢修人员的调配。

(4) 满足绿色环保的要求。边坡支挡结构是机场填方和公路边坡的重要组成部分，除满足稳定性要求外，还要满足绿色环保的要求。坡面土工格室内可种草绿化，具备良好的生态恢复效果。



(5) 经济效益显著。在石料缺乏的地区, 无需另外购置砌筑材料, 可以降低施工成本, 经济效益良好。以延安机场迁建工程中的变截面土工格室挡墙为例, 按照施工当年当地材料工费单价核算, 与浆砌片石挡墙相比, 节约工程造价约 25%, 同比条件可提高施工效率约 20%, 与传统等截面土工格室挡墙相比, 在保持安全系数基本不变的前提下能节约工程造价约 15%。

土工格室挡墙因其既满足结构轻、施工简便和造价低廉的基本要求, 又符合生态保护、墙面绿化和美化景观的和谐需求的特色, 具有独特的优势, 成为适合在工程建设中广泛推广的新型支挡结构, 已有工程应用^[51-56], 其应用前景十分广阔。土工格室挡墙在土压力的作用下墙体自身会发生挠曲变形, 属于柔性挡墙, 其破坏模式也与刚性挡墙有较大差别。土工格室挡墙破坏模式仍无系统研究, 更无成熟的设计方法和设计规范。在工程应用方面, 国内外对土工格室柔性挡墙设计仍然沿用刚性挡墙采用的朗肯及库仑土压力理论, 由于该理论认为土工格室支护的破坏模式与刚性挡墙的破坏模式(滑移破坏和倾覆破坏)相同, 未能真实反映土工格室挡墙的破坏机理, 造成计算分析结果误差较大, 很难设计出最优的结构截面型式。理论的落后制约了该新型结构的推广和应用, 这正是工程界亟待解决的难题。

1.4 主要研究内容

本书以土工格室挡墙的破坏模式和破坏机理为研究对象, 采用土工离心模型试验、极限平衡理论分析、有限元数值分析和现场监测等多种手段, 对土工格室挡墙的破坏模式、影响因素和计算方法展开研究, 主要内容如下:

(1) 采用土工离心模型试验和弹塑性有限元分析相结合的手段揭示了土工格室挡墙的破坏机理。研究了土工格室的几何尺寸(高度和焊距)和力学性质(强度和刚度), 填土面局部荷载的位置, 挡墙断面型式, 填土中拉筋带的位置和长度、拉筋带材料, 二级挡墙的高度比例及台阶宽度, 墙身表观黏聚力、墙底摩擦、挡墙中间的软弱夹层等因素对于支护结构破坏模式的影响, 揭示了土工格室挡墙的破坏机理。

(2) 发现了土工格室支护结构破坏模式存在类边坡破坏和刚性挡墙破坏两种形态, 并找到了这两种形态转化的临界值。纠正了业界普遍认可的挡墙单一破坏模式的误区, 基于极限平衡理论通用条分法和有限元强度折减法提出了土工格室支护结构破坏模式评价方法, 为高边坡支护结构设计和稳定性分析提供了理论依据。

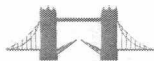
(3) 发明了新型变截面支护结构。基于对传统土工格室支护结构变形规律的研究, 发明了一种力学性能优异、节省造价、施工快捷的新型变截面墙体支护结构, 确定了结构分层、拉筋带位置设置的依据和方法, 为高边坡工程快速支护提供了技术支撑。

(4) 建立了土工格室加筋土结构的三维数值模拟方法。采用膜单元和嵌入技术将土工格室与填土分开模拟并进行参数赋值, 建立三维数值模型, 编写能够反映土工格室拉压力学特性不同并能考虑其屈服极限的弹塑性本构关系; 并编写了相应的用户子程序。



参 考 文 献

- [1] Webster S L, Watkins J E. Investigation of construction techniques for tactical bridge approach roads across soft ground [R]. Technical Report S-77-1, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1977.
- [2] Rea C, Mitchell J K. Sand reinforcement using paper grid cells [C]. Symposium on Earth Reinforcement, ASCE, Pittsburgh, 1978: 644-663.
- [3] Webster S L. Investigation of beach sand trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts [R]. Report 1, Sand Test Sections 1 and 2, Technical Report GL-79-20, Geotechnical Laboratory, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experimentation Station, Vicksburg, 1979.
- [4] Webster S L. Investigation of beach sand trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts [R]. Report 1, Sand Test Sections 3 and 4, Technical Report GL-79-20, Geotechnical Laboratory, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experimentation Station, Vicksburg, 1979.
- [5] Dash S K, Sireesh S, Sitharam T G. Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, 21 (4): 197-219.
- [6] Sitharam T G, Sireesh S. Behaviour of embedded footings supported on grid cell reinforced foundation beds [J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28 (5): 452-463.
- [7] Madhavi Latha G, Somwanshi A. Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footings on sand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27 (6): 409-422.
- [8] Dash S K, Krishnaswamy N R, Rajagopal K. Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19 (4): 235-256.
- [9] Dash S K, Rajagopal K, Krishnaswamy N R. Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19 (8): 529-538.
- [10] Dash S K, Rajagopal K, Krishnaswamy N R. Behaviour of geocell-reinforced sand beds under strip footing [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44 (7): 905-916.
- [11] Madhavi Latha G, Dash S K, Rajagopal K. Equivalent continuum simulations of geocell reinforced sand beds supporting strip footings [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26 (4): 387-398.
- [12] Madhavi Latha G, Somwanshi A. Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footings on sand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27 (6): 409-422.
- [13] Sireesh S, Sitharam T G, Dash S K. Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27 (2): 89-98.
- [14] Pokharel S K, Han J, Leshchinsky D, et al. Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28 (6): 570-578.
- [15] Yang X M, Han J. Analytical model for resilient modulus and permanent deformation of geosynthetic-reinforced unbound granular material [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (9): 1443-1453.
- [16] Hegde A M, Sitharam T G. Effect of infill materials on the performance of geocell reinforced soft clay beds [J]. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 2014, 10



- (3): 1-11.
- [17] Hegde A, Sitharam T G. 3-Dimensional numerical modelling of geocell reinforced sand beds [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43 (2): 171-181.
- [18] Hegde A M, Sitharam T G. Three-dimensional numerical analysis of geocell-reinforced soft clay beds by considering the actual geometry of geocell pockets [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52 (9): 1-12.
- [19] Hegde A, Sitharam T G. Joint strength and wall deformation characteristics of a single-cell geocell subjected to uniaxial compression [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15 (5): 04014080.
- [20] Tafreshi S N M, Shaghaghi T, Mehrjardi G T, et al. A simplified method for predicting the settlement of circular footings on multi-layered geocell-reinforced non-cohesive soils [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43 (4): 332-344.
- [21] Tafreshi S N M, Sharifi P, Dawson A R. Performance of circular footings on sand by use of multiple-geocell or-planar geotextile reinforcing layers [J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56 (6): 984-997.
- [22] Dutta S, Mandal J N. Model studies on geocell-reinforced fly ash bed overlying soft clay [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28 (2): 04015091.
- [23] Ngo N T, Indraratna B, Rujikiatkamjorn C, et al. Experimental and discrete element modeling of geocell-stabilized subballast subjected to cyclic loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142 (4): 04015100.
- [24] Oliaei M, Kouzegaran S. Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45 (2): 11-22.
- [25] Hegde A. Geocell reinforced foundation beds - past findings, present trends and future prospects: A state-of-the-art review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 658-674.
- [26] Satyal S R, Leshchinsky B, Han J, Neupane M. Use of cellular confinement for improved railway performance on soft subgrades [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (2): 190-205.
- [27] Shadmand A, Ghazavi M, Ganjian N. Load-settlement characteristics of large-scale square footing on sand reinforced with opening geocell reinforcement [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (3): 319-226.
- [28] Dash S K, Choudhary A K. Geocell reinforcement for performance improvement of vertical plate anchors in sand [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (2): 214-225.
- [29] Krishnaswamy N R, Rajagopal K, Madhavi Latha G. Model studies on geocell supported embankments constructed over a soft clay foundation [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2000, 23 (2): 45-54.
- [30] Madhavi Latha G, Rajagopal K. Parametric finite element analyses of geocell-supported embankment [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44 (8): 917-927.
- [31] 邹静蓉, 杨忠, 郑国荣, 等. 土工格室加筋路堤边坡离心模型试验研究 [J]. *公路工程*, 2007 (05): 5-9+28.
- [32] Zhang L, Zhao M, Shi C, et al. Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28 (5): 475-482.
- [33] Leshchinsky B Ling H. Effects of geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139 (2): 340-352.
- [34] Leshchinsky B Ling H. Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 36 (1): 33-43.



- [35] Mehdipour I, Ghazavi M, Moayed R Z. Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 37 (2): 23 - 34.
- [36] Mehdipour I, Ghazavi M, Moayed R Z. Stability analysis of geocell - reinforced slopes using the limit equilibrium horizontal slice method [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17 (9): 06017007.
- [37] Bathurst R J, Crowe R E. Recent case histories of flexible geocell retaining walls in North America [M] // . Recent case histories of permanent geosynthetic - reinforced soil retaining walls, Rotterdam, The Netherlands, 1994: 3 - 19.
- [38] 杨晓华, 王陆平, 俞永华. 土工格室生态挡墙工程性状分析 [J]. *公路交通科技*, 2004 (11): 23 - 26.
- [39] Chen R H, Chiu Y M. Model tests of geocell retaining structures [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26 (1): 56 - 70.
- [40] Xie Y L, Yang X H. Characteristics of a new - type geocell flexible retaining wall [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21 (4): 171 - 175.
- [41] Ling H I, Leshchinsky D, Wang J P, et al. Seismic response of geocell retaining walls: experimental studies [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135 (4): 515 - 524.
- [42] Leshchinsky D, Ling H I, Wang J P, et al. Equivalent seismic coefficient in geocell retention systems [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27 (1): 9 - 18.
- [43] 屈战辉, 谢永利, 袁福发, 等. 土工格室柔性挡墙极限主动土压力计算方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10 (1): 24 - 28.
- [44] 匡希龙, 李振, 谢海涛. 土工格室柔性桥台变形特性离心模型试验研究 [J]. *路基工程*, 2010 (04): 53 - 55.
- [45] Chen R H, Wu C P, Huang F C, et al. Numerical analysis of geocell - reinforced retaining structures [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 39 (8): 51 - 62.
- [46] Chen R H, Huang Y W, Huang F C. Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 37 (3): 35 - 44.
- [47] Song F, Xie Y L, Yang Y F, et al. Analysis of failure of flexible geocell - reinforced retaining walls in the centrifuge [J]. *Geosynthetics International*, 2014, 21 (6): 342 - 351.
- [48] Song F, Liu H B, Chai H B, et al. Stability analysis of geocell - reinforced retaining walls [J]. *Geosynthetics International*, 2017, 24 (5): 442 - 450.
- [49] Song F, Liu H B, Hu H B, et al. Centrifuge tests of geocell - reinforced retaining walls at limit equilibrium [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144 (3): 04018005.
- [50] Song F, Liu H B, Ma L Q, et al. Numerical analysis of geocell - reinforced retaining wall failure modes [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (3): 284 - 296.
- [51] Okuyama M, Ajiki T, Yazawa K, et al. Field observation of geocell reinforced retaining walls after the Niigataken Chuetsu - oki earthquake [J]. *Geosynthetics Engineering Journal*, 2007, 22: 239 - 242.
- [52] Kawaguchi T, Nakamura D, Kawajiri S, et al. Freezing and thawing behavior of reinforced soil walls built in a cold region [J]. *Geosynthetics Engineering Journal*, 2014, 29: 147 - 154.
- [53] Song F, Hu H B, Ma L Q, et al. Engineering application of a new type geocell retaining wall with variable cross - section [J]. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2016, 9 (4):



1602-1606.

- [54] 杨晓华. 土工格室工程性状及应用技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [55] 顾良军. 土工格室结构层工程性状试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [56] 傅舰锋. 土工格室柔性结构层力学性状的试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2002.

第 2 章 土工格室挡墙破坏模式 离心模型试验研究

2.1 概 述

土工模型试验包括足尺试验、小比尺模型试验和离心模型试验等。足尺试验虽然可信度高，但其造价昂贵，投资巨大，试验周期较长，风险高，且在一定条件下模型制作也比较困难。小比尺模型试验将土工构筑物的尺寸和土中的应力水平同时按比例缩小，但土的力学特性受应力水平影响较大，因此小比尺模型试验具有一定的局限性^[1,2]。与以上两类模型试验相比，离心模型试验按照一定的离心加速度缩减原型的尺寸，但同时增加模型的重力加速度，可保持模型中土的应力水平与原型相同，因此在模拟边坡、挡墙和地基等岩土工程问题方面具有优势。离心模型试验在岩土各领域得到迅速应用，对岩土工程的进步与发展起到了积极的推动作用，具有重要的意义。我国岩土工程学科的开拓者黄文熙院士称离心模型试验为“土工模型试验发展史上的里程碑”^[3,4]。离心模型试验已被国内外学者用来研究加筋边坡和加筋挡墙的变形和稳定性，取得了若干有创新的成果，证明了该研究手段的有效性^[5-16]。本章采用土工离心模型试验的手段研究了土工格室挡墙在不同工况下的破坏模式和安全系数，揭示了土工格室挡墙的破坏机理，并为极限平衡理论分析方法和有限元强度折减法提供了标定工具。

2.2 试 验 材 料

2.2.1 试验用砂

由于湿砂的假黏聚力很难定量化，Zornberg 等^[8-10]、Nova - Roessig 和 Sitar^[11]、Viswanadham 和 Mahajan^[12]、Viswanadham 和 Konig^[13]、Rajabian 等^[14]、Costa 等^[15]在他们的加筋边坡和加筋挡墙的离心模型试验中均采用干砂作为填料。本研究借鉴以上经验，采用风干的福建标准砂^[17]作为土工格室挡墙的填料，其颗粒级配曲线如图 2.1 所示。地基由黄土制成，厚度为 40mm，分两层填筑压实，每层的厚度为 20mm。福建标准砂和黄土的物理力学性质指标见表 2.1。

表 2.1 土的物理力学参数

物理力学参数	土粒相对密度 G_s	平均粒径 d_{50}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	最大干重度 $\gamma_{d,\max}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	最小干重度 $\gamma_{d,\min}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	含水量 $\omega/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$
填土	2.63	0.63	2.34	0.84	16.4	14.3	0	—	—
地基	2.69	—	—	—	17.2	—	5	27.2	16.1