

◀ 当今岩土工程热门研究课题 ▶

土石混合体

TU SHI HUN HE TI

主编 油新华

地质出版社

当今岩土工程热门研究课题

土石混合体

主 编：油新华

参编人员：徐文杰 周 中 李世海
李维树 廖秋林 吴旻硕

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书涵盖了土石混合体的概念、分类、模型的自动生成、原位试验、物理模拟试验、分形结构、细观结构等方面的研究,展示了当前土石混合体的最新研究成果。

本书可供从事岩土工程施工建设及相关专业科研、大专院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

土石混合体 / 油新华主编. —北京:地质出版社,
2008.1

ISBN 978 - 7 - 116 - 05561 - 2

I. 土... II. 油... III. 土石 - 地质构造 - 研究 IV. P54

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 199295 号

责任编辑:孙亚芸

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

咨询电话:(010)82324508 (邮购部);(010)82324569(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京长宁印刷有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm 1/16

印 张:9

字 数:219 千字

印 数:1—600 册

版 次:2008 年 1 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:25.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 05561 - 2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

任何一个新概念、新事物的提出和兴起，都必然要经过很多人甚至几代人的共同努力。土石混合体的概念是在 2001 年我的博士论文中首次正式提出的，这是在我的副导师李晓博士和中国科学院地质与地球物理研究所众多专家和教授的指导下，经过几年辛苦努力的结果。随着 2002 年我的几篇论文在国内几家杂志上陆续发表，国内几家著名大学和学术机构相继开始了对土石混合体的研究，2003 年土石混合体更是作为“973 项目”的一个子课题引起了广大岩土工程专业人士的重视。

本书收集了在国内期刊上发表的论文 16 篇，其中油新华等人的论文 6 篇，徐文杰等人的论文 3 篇，周中等人的论文 3 篇，李世海、李维树、廖秋林、吴旻硕的论文各 1 篇。内容涵盖了土石混合体的概念和分类、模型的自动生成、原位试验、物理模拟试验、数值模拟试验、分形结构、细观结构等方面的研究。书后附有相关资料性信息。其目的就是全面展示当前有关土石混合体的最新研究成果，以及目前国内有哪些单位和人员在从事这方面的工作，以利有志于研究土石混合体的科研人员对其有一个全面和清晰的了解，进而找到一个更加明确的研究方向。

本书的出版得益于多年来给予我学术和人生指导的王渭明、张清、乔春生、李晓等各位导师以及和我一起为土石混合体研究付出艰辛努力的赫建明、廖秋林、徐文杰、周中等各位博士。虽然我毕业以后不再从事土石混合体的研究，但看到有那么多的人在我工作的基础上继续着艰苦而卓有成效的研究备感欣慰。

最后我要感谢北京城建集团的各位领导对我的关心和帮助以及我的妻子穆云涛长期以来对我的理解和支持。

油新华

2007 年冬

目 次

前 言

土石混合体的研究现状及今后研究展望	廖秋林 李 晓 王思敬等 (1)
土石混合体的分类建议	油新华 何 刚 李 晓 (10)
土石混合体实测结构模型的自动生成技术	油新华 李 晓 贺长俊 (17)
土石混合体的随机结构模型及其生成技术研究	油新华 李 晓 何 刚 (22)
土石混合体边坡的细观处理技术	油新华 何 刚 李 晓 (29)
土石混合体边坡数值模型的自动生成技术	油新华 王渭明 李 晓 (35)
土石混合体野外水平推剪试验研究	油新华 汤劲松 (39)
土石混合体原位水平推剪试验	吴旻硕 李 晓 赫建明 (44)
虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究	徐文杰 胡瑞林 谭儒蛟等 (53)
土石混合体渗透性能的试验研究	周 中 傅鹤林 刘宝琛等 (65)
土石混合体渗透性能的正交试验研究	周 中 傅鹤林 刘宝琛等 (72)
蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究	李维树 丁秀丽 邬爱清等 (81)
三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟	李世海 汪远年 (89)
虎跳峡龙蟠右岸土石混合体粒度分形特征研究	徐文杰 胡瑞林 (98)
土石混合体细观结构及力学特性数值模拟研究	徐文杰 胡瑞林 岳中琦等 (107)
土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究	周 中 傅鹤林 刘宝琛等 (126)
附录 1 部分与土石混合体有关的学位论文	(136)
附录 2 部分参与土石混合体研究的单位及人员	(137)
附录 3 部分与土石混合体相关的研究课题	(138)
附录 4 部分涉及土石混合体研究的著作	(139)

土石混合体的研究现状及今后研究展望^①

廖秋林 李 晓 王思敬 吴旻硕 赫建明

(中国科学院地质与地球物理研究所工程地质重点力学实验室 北京 100029)

摘 要 土石混合体是不同于岩体与土体的一种地质材料,其物理力学特性的研究越来越受到工程界的关注。本文首先介绍了土石混合体概念的提出,并以土石混合体在我国的广泛分布特点与工程中的诸多实际问题阐述了其研究具有的重要工程价值与理论意义。然后,通过大量与土石混合体相关的文献检索与分析,本文从力学试验、几何结构研究和数值模拟等方面总结了近年来土石混合体研究的成果,指出结构效应是土石混合体重要而又特有的一个特征,其几何结构模型与数值模拟的研究也取得了许多重要而有价值的成果。最后,针对目前土石混合体研究中存在的不足,本文展望并探讨了土石混合体今后的研究方向,提出了地质成因与物质组成结构特征、水与土石混合体的耦合作用、土石混合体三维数值模拟研究以及土石混合体力学参数快速确定方法4个方面的研究内容与研究思路。

关键词 土石混合体 力学试验 结构效应 地质成因 多场耦合

1 土石混合体概念的提出

在广泛的岩土工程与地质工程中,如边坡(滑坡)治理、基坑工程及路基、桥基等工程中,第四纪松散堆积体是广泛存在的是一种土体与块石的混合物,其物质组成以砾石、块石与砂土、粘土等为主,如图1所示。对于这种由于自然变迁所形成的地质体,工程中往往按照特殊土体来对待,如中华人民共和国国家标准岩土工程勘察规范(GB 50021—2001)、《工程地质手册》以及其他规范中将其称之为碎石土^[1,2]。具体来说,就是通过对土石混合体中土体进行试验,再乘以一定的折减系数,从而得到其力学参数。但是,由于折减系数的选取是随意的,故其所得参数也是不可靠的。实际上,这种地质材料是经历一定地质作用形成的,既不同于一般的均质土体,又不同于一般的

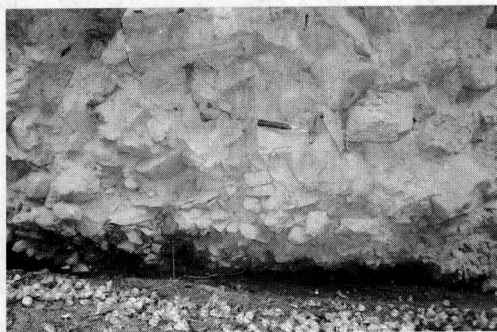


图1 三峡地区一处洪积堆积成因的土石混合体

① 本文原发表于《工程地质学报》2006年第6期。

碎裂岩体,是一种介于均质土体和碎裂岩体之间的特殊工程地质材料。这种地质材料由于含有不同大小、不同数量和不同分布形式的砾石或块石而具有与一般土体迥然不同的性质:①组成颗粒之间物理力学性质差异很大,即岩石和土的差异,而土体中只是不同土颗粒之间的差异;②结构上既有土颗粒之间的细观结构,又有岩石与土颗粒之间的宏观结构;③土力学的常规试验方法和本构模型均很难适用于这种特殊介质。因此,为了突出其物质组成和结构特性,油新华、李晓等将其命名为“土石混合体”^[3,4]。

2 工程价值与理论意义

土石混合体概念的提出使工程地质体从物质结构组成上由以前的土体和岩体两大类进一步细化为土体、岩体和土石混合体。这在学科发展上进一步丰富了岩土工程与地质工程的内涵,那么这一概念的提出及其研究意义何在?本节就从土石混合体分布特点及其工程实践价值与研究的理论意义等方面进行阐述。

2.1 土石混合体分布及其研究的工程价值

土石混合体研究的工程价值集中体现于在广泛的岩土工程与地质工程领域中经常碰到,即土石混合体是一种分布极其广泛而又需要在工程中妥善处理的工程地质材料。长江三峡地区,水库蓄水后长达5000余千米的岸线中,共有欠稳定和不稳定库岸140段,约343km,占岸线总长的6.8%;其中前缘高程低于175m的崩塌体1190处,总面积约135.9km²,相当于水库面积的12.5%左右,体积约 $34 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于总库容的8.7%。正是这些土石混合体构成的岸坡、斜坡为库区人们提供了重要的生产、生活场所^[5~7]。青藏高原土石混合体的分布也相当广泛。据调查,川藏公路沿线八一至然乌段400km发育的7个大型滑坡中就有6个为土石混合体滑坡,仅易贡滑坡形成土石混合体的体积就达 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[8~10];此外,公路沿线还分布有大量土石混合体构成的泥石流、崩塌^[9~11]。这些地质体稳定性极差,灾害频发,其治理与减灾也成为确保公路安全运营的关键问题。攀西地区滑坡与滑坡体岩性的调查统计结果表明,在攀西地区的816个滑坡中,碎石土滑坡500个,占61.3%。我国东南沿海福建、香港等地区花岗岩风化斜坡发育的风化壳,在介质的力学属性上也属土石混合体范畴;而这些地质载体也是当地人们赖以生存的场所。

厚度上,土石混合体的发育深度从十几米到数百米。据调查,三峡地区土石混合体发育厚度大致为40~60m^[5~7],而川藏公路沿线的土石混合体厚度则达200~400m^[8~11]。人类在土石混合体载体上的工程活动大多在此深度之内。

此外,土石混合体在其他领域也广泛存在。例如,土石坝工程中的砾石土、露天矿的废土石边坡、交通工程中土和碎石的混合料路基、建筑工程中的碎石土地基等。

总之,土石混合体这种特殊工程地质材料在全国乃至世界各地均有广泛分布,在纵深上其厚度基本超出了人类一般工程活动的范围;而随着社会的发展,人类的工程活动,如水利、水电、交通、建筑等基础建设,不仅需要继续发展,而且活动强度可能加剧。因此,土石混合体是人类工程活动中,尤其在岩土工程领域更是经常碰到而又必须妥善处理的地质载体。这不仅是该地质材料近几年受到广泛重视的原因,而且也正是土石混合体研

究的巨大工程价值所在。

2.2 土石混合体研究的理论意义

工程实践中,工程师们经常会碰到土石混合体,却由于对这种地质材料研究手段、方法等的匮乏往往只能参照土体进行施工或设计而导致许多工程中不必要的浪费或潜在问题的存在。究其原因,一方面,土石混合体作为有别于土体和岩体的另一种地质体,其物理力学特性(如强度特性、变形与破坏特点、本构关系等)既不同于土体或岩体,也不是土体与岩体物理力学属性的简单叠加;现有的岩土力学理论尚不能对这类介于均质土体和碎裂岩体之间的特殊工程地质材料进行准确的描述和概化;另一方面,受试样中岩块尺寸效应影响,现有土体或岩体的室内试验方法无法表达土石混合体的真实力学特性,而大型原位试验虽能反映其真实力学特性,但也多受试验少、难有代表性以及操作难度大、经费等问题限制而难以推广。此外,从数值模拟分析的角度看,原有土体或岩体的有限元、有限差分 and 离散元等方法在土石混合体模型建立、变形破坏分析等方面也需要改进。

因此,十分有必要对土石混合体的物质结构组成、强度特性以及土石混合体变形破坏机理等力学特性进行有针对性的理论研究,提出一套适用于土石混合体的本构关系、试验、数值分析的方法,直接为相关工程服务。

3 国内外研究现状

正如前文所述,土石混合体是一种不同于土体和岩体的特殊地质材料。然而,在2000年以前的研究与工程实践中,土石混合体都被直接划分为土体的一种,在对其进行计算时也是将其处理为均质连续材料,力学参数的选取则是通过将土的力学参数乘上一定的系数获得。尽管如此,对于这种地质材料中土体与岩石混合所导致的其与土体不一致的特性,工程界和科学界早就有所关注。Chandler在1973年提出当试样中含有异常大砾石的时候,其强度值就会大幅度提高,而这个强度值并不能反映试样材料的真实强度^[12]。之后,针对砾石导致土体强度增加这一特性,土石混合体被广泛地应用于地基、路基等工程中;作为一种天然建筑材料,在其土石比、级配、夯实固结方法及检测等方面的研究取得了许多有价值的成果^[13~15]。此外,围绕这种特殊地质材料的特殊物理性质,开展了一系列的研究工作,包括物质组成颗粒特征统计分析、块石含量对其力学参数及渗透性影响的试验研究、本构关系的探讨等方面。

2000年后随着土石混合体这一概念的提出并逐渐被工程界认同,尤其是针对性试验研究的开展使土石混合体材料的研究有了长足的进展,研究的范围包括土石混合体的几何结构特性及几何模型的建立、力学试验研究(室内与大型原位试验)、力学模型建立及其变形破坏的数值模拟研究等。

3.1 力学试验研究

力学特性的差异是土石混合体有别于土体与岩体的主要方面之一。因此,开展土石混合体的力学试验研究非常必要,也是探索、建立土石混合体理论的重要途径。

一方面,许多室内试验围绕块石在土石混合体中的作用进行了一系列研究。黄广

龙^[13]对散体岩土体的力学试验研究表明,散体岩土体的应力-应变关系为非线性硬化型,体变为剪缩并表现出体变随围压的增加而减小,材料的应力-应变关系比较符合Duncan-Chang模型的双曲线假设。武明^[14]对四组土石混合填料的试件分别在大型和中型三轴剪切仪上进行了抗剪强度试验,并对影响抗剪强度的几个指标如粗颗粒含量、干密度、含水量等各自与抗剪强度的关系进行了分析,指出尽管土石混合料的化学成分、风化程度、级配组成不同,但共同的特征是可以将这类土视为由粗、细两种料组成,其工程性质取决于粗、细料的含量。韩世莲^[16]采用小横梁对刚性承载板施加规定荷载于土和碎石混合料试样,获得了碎石土的无侧限抗压强度;通过压缩蠕变试验得到了碎石土的蠕变规律并且回归得到了材料粘弹性模型的各项参数。赫建明^[17]等自行设计了土石混合体二维平面加载设备(图2)研究土石混合体中不同形状、排列的块石对土石混合体力学特性的影响:

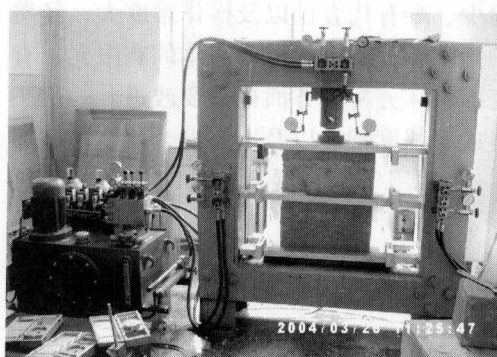


图2 土石混合体二维平面加载设备

①土石混合体应力-应变曲线与均质土体相比产生了较为显著的变化,主要表现在初始弹模增大曲线变陡,所有试样的应力-应变曲线在峰值前后很宽的范围几乎呈水平状发展,这也就意味着该材料既具有很高的承载能力,又具有很大的变形性;②其变形破坏方式表现为材料剪切破坏,土石混合体中块石的排列方式、块石的形状以及块石的数量都会对剪切面的形成产生影响;③块石的数量以及磨圆度对其强度有影响,磨圆度越好强度值相应越低。

值得一提的是,为突破传统土力学试验的局限,许多科研单位还专门研制了用于土石混合体的力学试验设备。图2为中国科学院地质与地球物理研究所研制的土石混合体二维平面加载设备,试样加载通过顶部油缸驱动千斤顶来实现,油压表量程为0~6MPa,加载千斤顶的左右两边分别固定大量程百分表来量测试件沿轴向的应变大小,对试样加压采用手动加载的方式完成;模型的前后采用厚度为2.5cm的有机玻璃板与自行设计的架子进行边界约束、固定。图3为重庆交通科研设计院研制的大型土石混合体多功能力学试验仪,其大、小剪盒尺寸分别为100cm×100cm×80cm与50cm×50cm×40cm,最大垂直荷载1000kN,最大水平荷载1000kN。此外,中国科学院力学研究所还建成了土石混合体柔性边界加载三轴压缩实验机,利用自行研制的超声波测量系统实现了试样柔性边界轴向变形分布的测量,可以更好地从等应力加载的角度研究非均匀、非连续的土石混合体、破碎岩体等材料的力学特性。其主要运行参数为:轴向压力范围0~10MPa,围压压力范围0~5MPa,轴向位移变化范围0~200mm,超声波测量轴向变形的分辨率为0.05mm,光栅测量应变的分辨率为10微应变,应力和位移的测量误差均为1%,最大试样尺寸可达直径300mm,高700mm。

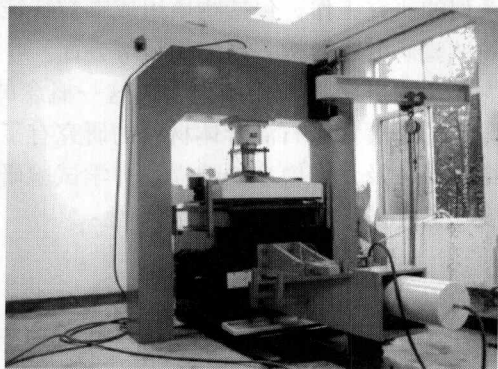


图3 大型土石混合体多功能力学试验仪

另一方面,现场原位试验对于土石混合物材料的研究有着重要的意义,也有相当数量的现场原位试验围绕土石混合体的变形破坏特点等力学特性进行了探索。Li Xiao 等在长江三峡地区进行的土石混合物现场原位推剪试验表明,土石混合体的变形破坏具有材料变形破坏和结构变形破坏两种特性,其试验示意图和试验结果如图 4 和图 5 所示。在土石混合物屈服时,其变形特性仍是土体或块石本身的材料特性,即土体材料首先屈服;但土石混合体的残余强度并无明显降低,即表现出显著的塑性流动特征。这是由于土石混合体的整体结构性尚未丧失,故其承载力没有明显降低。当试件变形过大时,土石混合体的整体结构丧失,试件完全破坏^[3]。

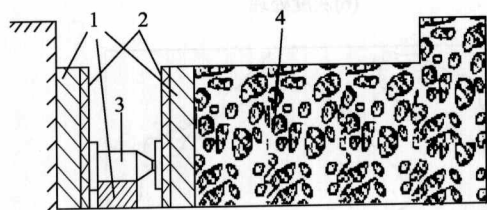


图 4 土石混合物现场推剪试验示意图^[3]

1—枕木;2—钢板;3—千斤顶;4—土石混合物试样

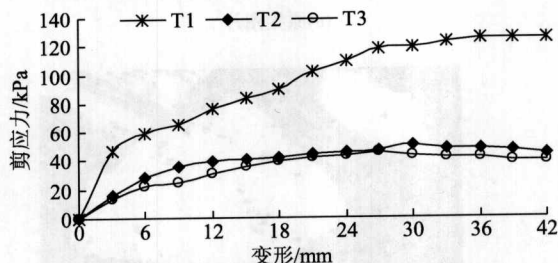


图 5 土石混合物现场试验剪应力-变形曲线^[3]

油新华和赫建明通过野外原位试验也发现作为胶结质或充填物的土体结构在屈服后虽然已基本破坏,但随之土体与岩石之间又形成新的交错结构,土石混合体的整体结构性尚未丧失,故其承载力没有明显降低。他们的试验还表明,含石率作为土石混合体的一个重要指标,其变化对材料的整体力学特性影响较大。推剪试验中发现土石混合物在高含石率的条件下其抗剪强度显著提高;而土石混合体的破坏特点也受含石率控制,即高含石率的剪切破坏面是沿着试件底部以下某个弱面发展,而低含石率的土石混合物剪切破坏面基本沿着试件底部破坏^[17,18]。

3.2 几何结构特性

土石混合体的物理力学特性之所以有别于土体、岩体,其材料结构的差异是主要原因之一。因此,土石混合物几何结构与模型的研究也越来越得到重视。尤其是,随着计算机与图像技术的发展使得这一研究更为可行与完美。

在土石混合物二维几何模型研究中, Li Xiao 等基于野外对土石混合物结构特征的统计分析指出,土石混合物是一种非均质、非连续体,其力学性质的变化主要受控于土体内部结构;并运用 Monte - Carlo 原理模拟块石在土石混合物中的分布特征,包括块石的空间位置、含量、大小、形状和方位等,建立了土石混合体的随机结构模型^[3]。油新华等提出了利用数码摄像、自动图像识别和计算机数值仿真技术,建立土石混合体的精细结构力学模型的方法^[18]。Z. Q. Yue 等则通过对土石混合体的数码照片进行灰度处理、增加对比度和除噪等技术处理,建立了土石混合体的平面几何模型,体现了这一材料的非均质性、细观结构^[19],如图 6 所示^[20]。

对于土石混合物三维结构的探索也有一些有价值的研究成果。F. Lanaro 和 P. Tolppanen 开发出一种全新的方法来获得砾石土中砾石的尺寸、形状以及粗糙度等方面的信息。通过使用激光扫描技术对砾石土进行扫描就可以获得其中砾石的三维图像,并且对扫描结果分别利

用傅立叶以及几何分析方法进行分析而获得了砾石块体的具体参数,这种对砾石尺度的全新分析方法对于砾石的形状以及拓扑参数等能够给出较为可靠的结果^[21]。

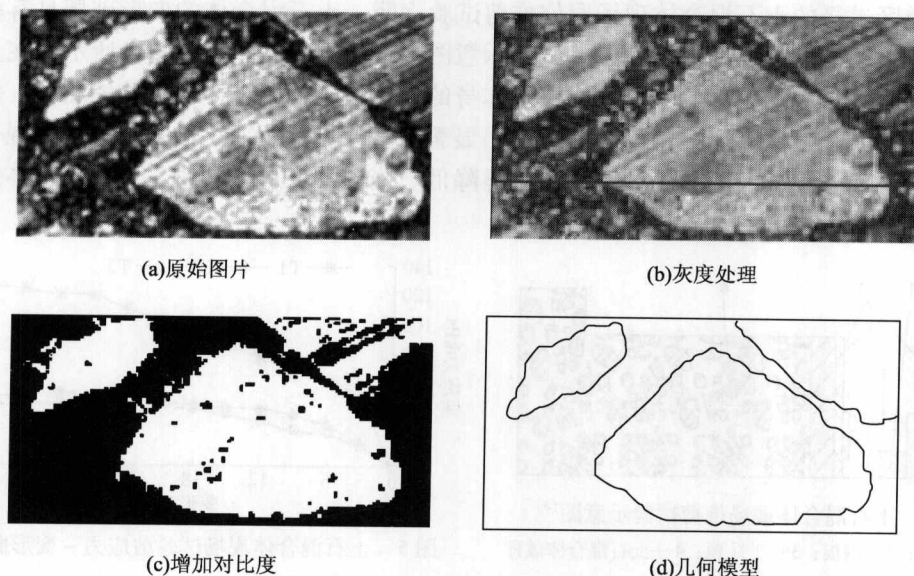


图6 基于土石混合体数码照片的几何结构模型的建立^[20]

3.3 数值模拟研究

数值模拟一直是岩土工程与工程地质中工程实践与研究的一个重要方法。土石混合体由于具有高度非均质、非连续、非线性等特点,其力学试验研究受到一定局限;而随着计算机技术的发展,土石混合体的数值分析可以从不同角度探讨其变形破坏机理、强度特征等力学特性。Z. Q. Yue 利用有限单元的方法对土石混合体的数码照片模拟了经典巴西劈裂试验并与真实试验进行对比,研究发现土石混合体材料的非均质性对试样拉应力的分布有重要影响,这一结果也证实了有限单元分析方法可以很好地反映这种材料的非均质性及其细观结构特性^[20]。油新华采用 FLAC^{3D} 有限差分程序对块石在土石混合体中的力学效应进行了详细分析,指出块石形状、分布对土石混合体的变形破坏起着控制作用;并采用大量随机结构模型的数值模拟回归出了土石混合体的弹性模量和含石率的关系^[18]。Li Xiao 等也采用 FLAC^{3D} 程序对一个土石混合体现场原位推剪试验进行了模拟,指出土石混合体的结构效应导致了其应变强化的出现及弹性模量与强度的增加,还获得了试样破坏过程等许多力学试验无法获取的信息^[3]。赫建明采用颗粒离散单元法 PFC^{3D} 程序对比了不同含石率土石混合体的力学特性,随着含石率的提高,试样的抗剪强度有明显提高,含石率越高,强度的提升幅度越大,即在含石率较低(30%)的情况下波动过程中应力值的提升不明显,提高幅度只能达到剪切强度值的10%左右,基本保持水平。随着含石率的提高(40%, 50%),应力-应变曲线第一个转折点之后应力值提升幅度增大,提高幅度能够达到试样剪切强度的50%左右^[17]。

此外,李世海等提出了三维离散元块体——颗粒模型描述非连续介质,用该模型模拟了土石混合体单轴压缩试验、现场大剪试验,计算结果揭示了土石混合体非均匀、非连续

介质新的力学现象;还给出了三维离散元随机结构面力学模型用于研究土石混合体具有非连通结构面的力学特性^[22]。

3.4 其他方面的研究

土石混合体的研究除了在力学试验、几何结构和数值模拟等方面取得了一定成果外,许多学者还从土石混合体水力学特性、地质成因、本构关系及工程应用等角度进行了一定探索。

刘令瑶等研究了宽级配砾石土的水力劈裂特性,认为宽级配砾石土的水力劈裂特性随含砾量的变化而不同,含砾量是决定宽级配砾石土变形破坏形式的主要因素^[19]。朱建华等对大坝防渗材料——砾石土进行了研究,认为对于以砾石为骨架的宽级配砾石土,细料含量对土的渗透稳定性具有很大的影响,小于0.1mm的细粒含量是砾石土渗透性的主要控制因素^[23]。

赫建明根据对三峡库区土石混合体的现场调查将土石混合体的地质成因分为滑坡堆积、崩塌堆积、残坡堆积和冲洪堆积4类^[17]。油新华根据土石混合体的力学性质研究提出,对于不同土石混合体边坡工程,应结合其工程尺度将边坡材料分别看成均质连续体、等效的均质连续体、非均质不连续体和结构面控制的非连续体4种情况来处理^[24]。

4 小结与今后研究展望

土石混合体在我国尤其在山区广泛分布,而由其构成的山区坡地、平地等是多数山区人们赖以生存的场所。因此,为确保这些场所的建筑与工程的稳定与安全,对这种地质材料工程地质与物理力学特性的基础研究有着重要的工程实践意义和理论价值。近年来,随着对土石混合体与岩土体差异认识的加深,土石混合体作为岩土工程与地质工程中的第三种地质材料的物理力学特性的研究已取得了重要进展,研究范围也涉及了岩土力学的各个方面,包括材料变形破坏及强度特点、材料几何结构、地质成因、本构关系与水理特性等,其研究成果主要体现在以下几方面。

第一,立足于试验仪器设计及力学试验与多种数值模拟对土石混合体力学特性的研究表明,土石混合体力学特性具有典型的结构效应,这一特点对土石混合体研究有着重要意义。一方面,土石混合体的变形破坏过程表现出显著的塑性流动特征。另一方面,砾石含量对土石混合体强度与渗透性的影响显著,且存在明显阈值。当含石量低于25%时,砾石含量在土料中只起填料作用,对土石混合体的抗剪强度与渗透系数影响甚微;当含石量超过25%时,砾石起骨架结构作用而土体起充填作用,土石混合体的抗剪强度与渗透系数随着含石量的增加而急剧地增大,大致成直线关系。因此,砾石含量影响土石混合体抗剪强度与渗透系数的阈值大致是20%~30%。但当含石量超过60%时,砾石起完整骨架作用,土石混合体的性质主要取决于砾石。

第二,基于土石混合体数码图像自动识别与随机结构模型,探索了建立土石混合体的精细结构力学模型方法,逐步探讨了土石混合体数值仿真试验研究的方法。

第三,对土石混合体大量野外工程地质调查和统计分析发现,土石混合体中块石的分布特征是有一定规律的,并对其几何结构特征进行了一定探索,从理论上为深入研究土石

混合体的结构效应奠定了基础。

总之,在短短几年中土石混合体的研究已取得如此重大成果是值得肯定的。但是,土石混合体的研究中仍存在许多问题需要进一步深入研究,本文就对以下几个问题及其研究思路进行阐述。

第一,对土石混合体的地质成因、物质组成结构特点等认识不足。已有关于土石混合体地质成因、结构特点的研究多基于某个工程的统计分析,且大多局限于三峡地区,有片面之嫌。地质成因的认识是研究地质体物理力学特性的根本,因此也非常有必要正确认识土石混合体的地质成因。土石混合体是第四纪以来岩体在以风化、剥蚀、搬运、沉积等地球外动力作用为主的地质过程中在基岩之上形成的地质体,因此其地质成因及物质组成结构具有复杂、多样的特点。鉴于此,笔者认为应该选择不同地质背景下的土石混合体进行调查、统计分析,扩大考察范围,以翔实的调查资料分析土石混合体的地质成因与物质组成结构特点。笔者计划下一步研究将以风化作用、河流作用、冰川作用、滑坡崩塌作用、泥石流堆积作用、地震等不同地质营力为出发点,调查区域(结合文献收集)将包括三峡地区、虎跳峡地区、青藏高原地区、东南沿海花岗岩风化地区、黄河阶地和戈壁滩等。

第二,水对土石混合体力学特性的影响及其耦合作用的研究尚未开展。水对岩体、土体力学特性的影响已被工程界认可,也是多年来岩土力学的研究热点与难题之一^[25]。土石混合体在成因上大多与水有关,且多分布于大江、大河、水库等地区,因此水与土石混合体的相互作用更应被相关研究、工程所重视。据初步分析,土石混合体是一种典型的非连续、材料非均质、结构非均匀介质,一方面,水对土体的软化作用将由于块石的存在而被放大;另一方面,由于土与块石接触不充分形成许多潜在裂隙,有利于潜蚀、土体液化等现象发生,导致土石混合体结构整体失稳。因此,水对土石混合体力学特性的影响应更显著。而对于这一问题的研究,笔者认为应引入针对石油工程与核废料处理等多年研究的多场耦合研究理论,以正确评价水与土石混合体的耦合作用,尤其是水对土石混合体力学特性的影响。

第三,数值模拟是研究土石混合体力学特性的一个重要手段,但已有研究多限于二维问题。实际上,土石混合体由于其内部块石形状在三维方向上差异很大,必然导致其结构效应在三维方向存在较大差异。因此,有必要开展土石混合体三维模型建立、数值分析等研究,以更好掌握土石混合体的变形破坏过程及其强度特性等。受三维模型建立中涉及的几何、拓扑等算法限制,这一研究难度比较大。笔者认为应逐步实现:①将原有二维问题沿 Z 轴方向延伸使之变成简单的三维问题;②开展单个或几个块石在土体中的结构效应研究;③在前两步基础上,进一步建立土石混合体三维复杂模型,初步开展三维问题研究。

第四,基于以上研究以及已有研究,结合实际工程需要,立足于一个或几个工程实例,充分利用现场调查、数码摄像、试验和数值模拟等手段,研究并推广适用于在工程中确定土石混合体力学参数的一套方法。

致谢 本文得到国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702)与国家留学基金委国家公派联合培养博士生项目的资助,特此感谢!

参考文献

- [1] 中华人民共和国建筑部. 岩土工程勘察规范(GB 50021—2001). 北京: 中国建筑工业出版社

社, 2002

- [2] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992
- [3] Li Xiao, Liao Qiulin, He Jianming. In-situ tests and stochastic structural model of Rock and Soil Aggregate in the Three Gorges Reservoir Area. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, 41 (3): 494
- [4] 殷跃平等. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究. 北京: 地质出版社, 2004
- [5] 长江委综合勘测局. 长江三峡工程库区奉节县白衣庵滑坡治理规划阶段工程地质勘察报告, 1999. 12
- [6] 殷跃平, 张加桂, 陈宝荪等. 三峡库区巫山移民新城址松散堆积体成因机制研究. *工程地质学报*, 2000, 8 (3): 265 ~ 271
- [7] 严福章. 水库滑坡复活机理及其发展趋势预测研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2004
- [8] Shang Yanjun, Yang Zhifa, Li Lihui, et al. A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster and origin. *Geomorphology*, 2003, 54 (3 ~ 4): 225 ~ 243
- [9] 尚彦军, 杨志法, 廖秋林等. 雅鲁藏布江大拐弯北段地质灾害分布规律及防治对策. *中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12 (4): 30 ~ 40
- [10] 廖秋林, 李晓, 董艳辉等. 川藏公路林芝—八宿段地质灾害特征及形成机制初探. *地质力学学报*, 2004, 10 (1): 33 ~ 39
- [11] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993
- [12] Chandler RJ. The inclination of talus, Arctic talus terraces, and other slopes composed of granular materials. *Journal of Geology*, 1973, 81: 1 ~ 14
- [13] 黄广龙, 周建, 龚晓南. 矿山排土场散体岩土强度变形特性. *浙江大学学报 (工学版)*, 2000, 34 (1): 54 ~ 58
- [14] 武明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究. *公路*, 1997, (1): 40 ~ 49
- [15] 王龙, 马松林, 徐德兴等. 土石混合料的结构分类. *哈尔滨建筑大学学报*, 2000, 33 (6): 129 ~ 132
- [16] 韩世莲, 周虎鑫, 陈荣生. 土和碎石混合料的蠕变试验研究. *岩土工程学报*, 1999, 21 (3): 196 ~ 199
- [17] 赫建明. 三峡库区土石混合体的变形与破坏机理研究. 中国矿业大学博士学位论文 (北京校区), 2004
- [18] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究. 北方交通大学博士学位论文, 2001
- [19] 刘令瑶, 崔亦昊, 张广文. 宽级配砾石土水力劈裂特性的研究. *岩土工程学报*, 1998, 20 (6): 10 ~ 13
- [20] Yue ZQ and Chen S. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing. *Computers and Geotechnics*, 30 (2003): 375 ~ 397
- [21] Lanaro F. and Tolppanen P. 3D characterization of coarse aggregate. *Engineering Geology*, 65 (2002): 17 ~ 30
- [22] Li Shihai, Zhao Manhong, Wang Yuannian. A new numerical method for DEM-block and particle model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, 41 (3): 436
- [23] 朱建华, 游凡, 杨凯虹. 宽级配砾石土坝料的防渗性及反滤. *岩土工程学报*, 1993, 15 (6): 18 ~ 27
- [24] 油新华, 何刚, 李晓. 土石混合体边坡的细观处理技术. *水文地质工程地质*, 2003 (1): 18 ~ 21
- [25] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响. *工程地质学报*, 1996 (3): 1 ~ 9

土石混合体的分类建议^①

油新华¹ 何刚¹ 李晓²

(1. 北京城建集团地铁工程指挥部 北京 100025)

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘要 在对三峡库区蓄水边坡进行工程地质调查的基础上,正式提出了土石混合体的概念,并据此进行天然地质体的统一工程分类,将地质体分成了岩体、土石混合体、土体三大类。详细介绍了土石混合体分类的方法、指标的确定、优缺点以及与其他方法的比较,最后给出了两个工程实例。

关键词 土石混合体 工程分类

1 土石混合体概念的提出

在对三峡库区白衣庵滑坡的工程地质调查以及对三峡其他滑坡^[1-2]进行资料收集的过程中,遇到了大量由滑坡、崩塌、岩溶等组成的复杂成因的第四纪松散堆积体。这些堆积体,主要由滑坡积物、残坡积物、崩坡积物、冲洪积物、泥石流、碎屑流、强风化物等物质组成,物质成分以土夹碎石或碎块石、碎石或碎块石夹土等土石混合物为主,结构杂乱无章、分选性差、粒间结合力差、透水性强。它既不同于一般的岩体,又不同于一般的土体,而是介于土体与岩体之间的一种特殊的地质体,在此提出了土石混合体的概念^[3]。

土石混合体在边坡工程、水利工程、地基工程中的大量存在,给工程实践和理论研究提出了一个新的课题。为了弄清这些物质的本质以及它们的物理力学性质,必须对它们进行工程地质的定性,即必须在工程地质分类体系中找到它们的位置。但是在以前的分类体系中^[4-6],有的缺失这种物质,有的定义不明显,有的混杂在其他物质中,给研究带来了极大的不便,所以应该制定一种新的分类体系,以便对其进行研究时,制定合理的研究内容、试验项目和方法。

2 土石混合体的工程分类

2.1 分类方法

首先根据物质组成即根据材料中含有的土与石的数量将之分成三大类:土体、土石混

① 本文原发表于《工程地质学报》2002年增刊。

合体、岩体。土体中只含有土 (soil)，土石混合物中既含有土又含有石 (stone or core-stone)，岩体中只含有石 (rock) (石的标准与粒度界定见下文)。然后对于每一大类，再进行次一级的分类。对于岩体或土体，可以参照以前的分类标准，这里不做进一步的探讨。对于土石混合物，则根据其中含石量 (t) 将之分成石质土 ($<25\%$)、混合土 ($25\% \leq t < 70\%$)、土质石 ($\geq 70\%$)。由于影响岩、土材料性质的因素比较多，所以在此基础上还要进行三级划分。对于土石混合物中的土质石、石质土和混合土来说，不但含石量对其性质有很大的影响，而且所含砾石或块石的颗粒形状与级配以及土体的物理特性对其力学性质也将产生极大的影响，例如土石混合体的透水性、渗透稳定性、毛细管性与压实性等都在很大程度上取决于粒度和级配的特征以及所含细粒土体的性质。因此在三级划分中应根据颗粒形状与级配以及所含的砂土、粉土、粘土的成分进行划分。

2.2 分类体系

根据以上的方法，对土石混合物进行了工程分类，分类体系见图 1，图中符号意义见表 1。

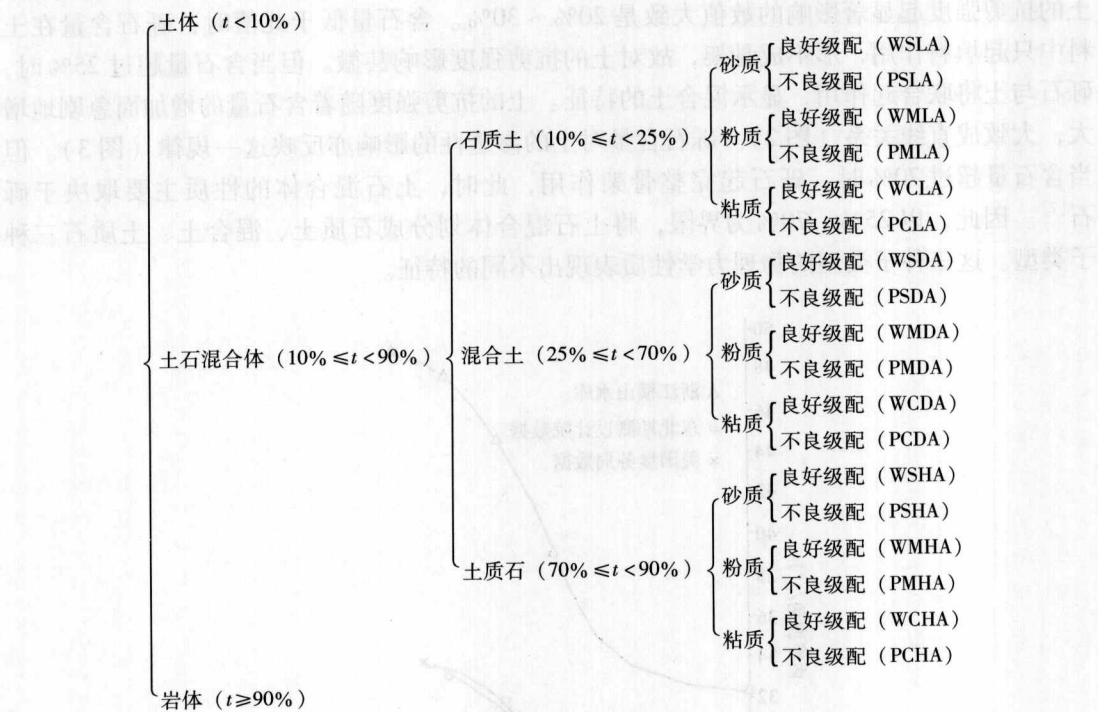


图 1 土石混合物工程分类

表 1 土石混合物工程分类符号

名称	土体	土石 混合物	岩体	砂土	粉土	粘土	含石量			级配特征	
							低	中	高	良好	不好
符号	E	A	R	S	M	C	L	D	H	W	P

注：除土石混合物 (Aggregate)，含石量低 (Low)、中 (Middle)、高 (High) 的符号是由作者自己定义外，其他符号全部按照国际惯例或国家标准 (GBJ145—1994) 确定。

2.3 体系评价

此方法的主要特点是以材料的物质成分为主线、粒度组成为辅线、物理力学性质为补充,较好地符合了岩土工程分类的基本原则,充分体现了来源于实践、服务于实践的指导思想。

2.3.1 指标界定

(1) 土与石粒组界限值的确定:在土石混合体分类中,需要使用砾石的百分含量。在此规定砾石粒径界限值为5mm。主要是因为,虽然2mm是我国传统采用的粒组的原定界限值,也是国际普遍采用的标准,但是国内也有单位采用5mm作为砾石粒径界限的,其最主要的好处是统计比较方便。而且试验证明,对均质土就粒度与力学性质的关系而言,以2mm或以4.76mm为界并无明显差异^[7]。同时根据大量资料与经验,在天然土料中,2~5mm范围内的土粒通常只占百分之几,数量甚微,因此,以2mm或5mm界限值计算砾石粒的含量出入不大。

(2) 石质土、混合土、土质石粒组界限值的确定:许多试验资料表明,砾石含量对土的抗剪强度起显著影响的数值大致是20%~30%。含石量低于此值时,砾石含量在土料中只起填料作用,形不成骨架,故对土的抗剪强度影响甚微。但当含石量超过25%时,砾石与土将联合起作用,显示混合土的特征。土的抗剪强度随着含石量的增加而急剧地增大,大致成直线关系(图2)。砾石含量对土的渗透性的影响亦反映这一规律(图3)。但当含石量超过70%时,砾石起完整骨架作用,此时,土石混合体的性质主要取决于砾石^[7]。因此,以25%、70%为界限,将土石混合体划分成石质土、混合土、土质石三种子类型。这三种子类型的物理力学性质表现出不同的特征。

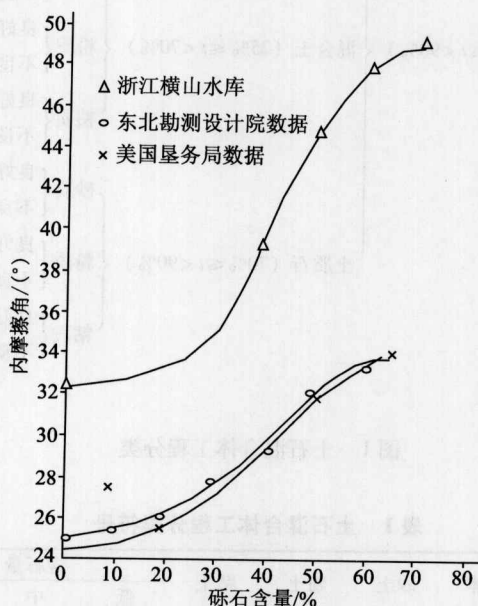


图2 抗剪强度与砾石含量的关系^[7]