

土石混填路基

修筑技术



TUSHI HUNTIAN LUJI XIUZHU JISHU

柴贺军 阎宗岭 贾学明 著



人民交通出版社
China Communications Press

Tushi Huntian Luji Xiuzhu Jishu

土石混填路基修筑技术

柴贺军 阎宗岭 贾学明 著

人民交通出版社

内 容 提 要

全书共分3篇11章,各篇在总结相关领域既有研究成果的基础上,重点介绍了作者的研究进展、成果或取得的认识。第1篇介绍了土石混合料的路用性能,包括结构特性、物理特性、压实特性、强度参数、本构模型和分类方法等;另外,介绍了土石混合料的压实机理及所开发的土石混合料级配自动识别系统。第2篇介绍了土石混填路基变形与稳定,包括土石混填路基的使用现状、路基稳定与变形特性、路基稳定与变形计算方法及土石混填路基边坡防护技术。第3篇在现场试验的基础上,介绍了土石混填路基施工工艺与施工控制,包括土石混合料的现场压实及施工工艺、土石混填路基压实质量的瑞雷波检测技术及土石混填路基压实质量的附加质量法检测技术。

本书可供公路行业设计、施工人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土石混填路基建筑技术 / 柴贺军等著. —北京: 人民交通出版社, 2009.5

ISBN 978-7-114-07679-4

I. 土… II. 柴… III. 路基—填筑—道路工程 IV. U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 041642 号

书 名: 土石混填路基建筑技术

著 作 者: 柴贺军 阎宗岭 贾学明

责任编辑: 丁润铎

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 18.5

字 数: 464千

版 次: 2009年5月 第1版

印 次: 2009年5月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07679-4

定 价: 40.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

西部大开发是我国实现地区平衡发展和可持续发展的重大战略举措。开发西部首先必须解决公路交通等基础设施的建设问题。西部地区多为山岭丘陵区,其地形、地貌、地质、水文条件复杂,修筑公路必然采用山体开挖得到的土石混合料填筑路基。土与石的混合料俗称土石混合料,又称土夹石或混合土,在公路土的分类中定名为粗、巨粒土。由于这种土料在山区普遍存在,因此被广泛用于我国山区高等级公路路基的填筑。与此同时,对这种填方料的筑路技术的开发研究,也引起工程界人士普遍关注。但由于这种填方料颗粒粒度变化大且难以控制,再加之其含水率极不均匀,使得在实际工程中路基施工困难,施工质量得不到有效保证,致使修筑的土石混填路基产生大量的沉陷或坍塌,从而导致路面结构过早破坏,影响公路运输安全及公路使用。因此,解决土石混填路基修筑技术,成为西部山区公路筑路技术的关键问题之一。

土石混填路基修筑面临的技术问题很多,但主要归纳为三个方面:①路基稳定与沉降问题;②土石混填路基施工质量检测与控制问题;③土石混填路基边坡形式及边坡防护问题等。路基的稳定与沉降始终是公路路基要解决的中心问题。由于土石混合料在性质上与其他均质细土料差异大,其稳定与变形性状与均质细土料填方路基有着本质上的不同,目前许多土石混填路基出现的稳定与沉降无不与此有关。因此,搞清土石混填路基稳定与变形性状,做出合理的设计,是确保土石混填路基具有良好的稳定性和较小的沉降的关键。土石混填路基施工质量检测与控制是确保路基稳定的关键,由于土石混合料粒度成分变化大,材料本身极不均匀,采用何种方法进行施工、施工质量如何检测控制已经成为山区公路修筑的技术难题,特别是对土石混合料的压实质量的检测与评价,目前还没有一个可行的办法。众所周知,路基的压实不良是造成路基沉降及不均匀沉降的主要原因,而合适的质量检测评价方法是保证路基良好压实的关键。因此,如何进行土石混填路基压实质量评价已成为保证土石混填路基修筑的核心问题。

基于此,土石混填路基修筑技术研究被原交通部立为2002年交通部西部交通建设科技项目。本书是以此研究成果为基础,以上述问题为研究对象的一部专门性著作。本书以研究土石混填路基施工质量检测与控制 and 路基稳定与变形性状为重点,通过开展土石混合料路用性能、土石混填路基稳定与变形性状、土石混填路基施工质量检测与控制、土石混填路基边坡防护等专题的研究,提出了土石

混合料路用性能评价、土石混填路基设计、施工质量检测与控制 and 工程处治等技术,在解决土石混填路基修筑技术方面进行了有益的探索。

全书共分3篇11章,各篇在总结相关领域既有研究成果的基础上,重点介绍了著作者的研究进展、成果或取得的认识。第1篇介绍了土石混合料的路用性能,包括结构特性、物理特性、压实特性、强度参数、本构模型和分类方法等;另外,介绍了土石混合料的压实机理及所开发的土石混合料级配自动识别系统。第2篇介绍了土石混填路基变形与稳定,包括土石混填路基的使用现状、路基稳定与变形特性、路基稳定与变形计算方法及土石混填路基边坡防护技术。第3篇在现场试验的基础上,介绍了土石混填路基施工工艺与施工控制,包括土石混合料的现场压实及施工工艺、土石混填路基压实质量的瑞雷波检测技术及土石混填路基压实质量的附加质量法检测技术。

本书的主体是交通部西部交通建设科技项目“土石混填路基修筑技术”主要研究成果的总结。项目研究期间、本书的撰写和出版过程中,得到了重庆交通科研设计院、交通运输部科技司、交通运输部西部交通建设科技项目中心、重庆市交委、重庆高速公路建设有限责任公司的全力支持。感谢重庆交通科研设计院道路工程所赖思静博士、陶丽娜副研究员、刘茂光研究员、杨建国博士、唐胜传博士、陈赞副研究员、王俊杰副教授、硕士生董云,四川大学徐进副教授、符文喜博士为本项目所做的部分研究工作。

由于著作者水平有限,加之撰写时间仓促,书中难免存在不少缺点甚至谬误,恳请读者给予批评指正。

作者

2009年1月

目 录

绪论	1
0.1 引言	1
0.2 研究现状概述	2
0.3 本书研究思路	8

第1篇 土石混合料路用性能与评价

第1章 土石混合料工程特性	13
1.1 土石混合料的物理特征	13
1.2 土石混合料的结构特征	14
1.3 土石混合料的压实试验方法	15
1.4 土石混合料的振动击实机理	19
1.5 土石混合料的渗透特性	28
第2章 土石混合料强度特性	33
2.1 土石混合料室内大型三轴剪切试验	33
2.2 土石混合料压缩变形试验	39
2.3 土石混合料现场大型直剪试验	42
2.4 土石混合料室内大型直剪试验	47
2.5 土石混合料室内大型直剪的三维颗粒离散元模拟	53
第3章 土石混合料本构模型	65
3.1 非线性 $E-\mu$ 模型	65
3.2 成都科大简化 $K-G$ 模型	67
3.3 土石混合料散体本构模型	69
第4章 土石混合料的工程分类	91
4.1 第一层次分类	91
4.2 第二层次分类	94
4.3 第三层次分类	95
4.4 土石混合料级配特征自动识别	96
4.5 土石混合料级配特征自动识别系统	101

第2篇 土石混填路基变形与稳定

第5章 土石混填路基现状调查	107
5.1 土石混填路基沉降变形的表现形式	107
5.2 土石混填路基沉降变形模式及成因机制	111
第6章 土石混填路基稳定与变形特性	117
6.1 土石混填路基稳定与变形特性底摩擦试验研究	117

6.2	二维地质力学模型试验	127
6.3	土石混填路基沉降变形离心模型试验研究	137
6.4	土石混填路基沉降变形特性数值模拟	146
6.5	土石混填路基沉降变形现场观测	168
第7章	土石混填路基稳定与变形计算方法	176
7.1	土石混填路基边坡稳定性分析	177
7.2	土石混填路堤沉降变形计算方法研究	188
第8章	土石混填路基边坡生态防护	208
8.1	土石混填路基边坡生态防护的主要形式	208
8.2	PST 抗冲刷剂研制	210
8.3	新型喷播液的研制	214
8.4	土石混填路基新型边坡防护技术应用	217

第3篇 土石混填路基施工工艺与施工控制

第9章	土石混合料的压实机理及施工工艺	223
9.1	土石混合料的开采	223
9.2	土石混合料的现场压实方法	230
9.3	土石混填路基填筑施工工艺	247
第10章	土石混填路基压实质量的瑞雷波检测技术	259
10.1	瑞雷波法检测路基压实质量原理	259
10.2	土石混填路基压实质量瑞雷波法现场测试方法	262
10.3	土石混填路基压实质量评价	266
第11章	土石混填路基压实质量的附加质量法检测技术	270
11.1	附加质量法检测路基压实质量原理	270
11.2	附加质量法的测试仪器设备	274
11.3	现场试验及数据处理	275
11.4	现场试验及结果分析	279
参考文献		282

绪论

0.1 引言

近几年来,随着公路基础建设的大力实施,在西部地区,土石混合料作为路基填料越来越广泛,随之带来了土石混填路基的设计、施工工艺和施工控制等方面的技术问题,这些问题已经引起公路行业内专家和学者的高度重视。但是对于填料的复杂性带来的若干新问题,在工程实践中,设计工程师和检测工程师或者采用传统的保守方法进行设计,或者仍采用不适宜的检测方法进行评价和控制,使设计和施工存在缺陷,出现了因路基质量问题而引起的路面早期破坏,导致公路的服务质量和服务水平下降,甚至存在安全隐患。

土石混填路基修筑面临的技术问题很多,但主要归纳为以下三个方面。

(1)路基稳定与沉降问题

由于西部山区公路地形变化大,出现了大量的高填土石混填路基,高者达到 40~60m,路基的稳定和沉降问题十分突出。对高填土石混填路基的稳定性评价和沉降评估,尚缺乏很好的方法,尤其计算和评价中参数的确定缺乏方便、有效和较为可靠的办法。

(2)土石混填路基施工质量检测与控制问题

路基的稳定与沉降始终是公路路基解决的中心问题。由于土石混合料在性质上与其他均质细土料有很大的不同,其稳定与变形性状与均质细土料填方路基也就有着本质上的不同。事实上,目前许多土石混填路基出现的稳定与沉降问题,无不与此有关。因此,搞清土石混填路基稳定与变形性状,将是十分重要的,也是确保土石混填路基具有良好的稳定性和较小的沉降的关键。土石混填路基施工质量检测与控制是确保路基稳定的关键,由于土石混合料粒度成分变化大,材料本身极不均匀,采用何种方法进行施工、施工质量如何检测控制已经成为山区公路修筑的技术难题。特别是对土石混合料的压实质量的检测与评价,目前还没有一个可行的办法。众所周知,路基的压实不良是造成路基沉降及不均匀沉降的主要原因,而合适的质量检测评价方法是保证路基良好压实的关键。因此,如何对土石混填路基压实质量进行评价,成为保证土石混填路基修筑质量的核心问题。

(3)土石混填路基边坡形式及边坡防护问题

路基边坡防护是确保路基稳定的基本环节,由于土石混合料的材料组成和性质上的特点,使得其抗冲刷能力较弱。工程实践表明,正在施工的土石混填路基在雨季普遍产生边坡岩土被大量雨水冲走的现象,完工的土石混填路基边坡在雨季发生坍塌破坏的概率也远远高于一般的填方路堤。这说明土石混填路基边坡防护应根据其自身的特点进行,不能盲目套用一般填方路基的方法;但究竟采用何种方法和形式,却很少有人进行研究,有待我们进一步研究解决。如此等等充分说明,尽管目前土石混填路基在山区公路修筑中得到较普遍的采用,但很多关键技术问题并没有得到解决,在实际工程实施中具有较大的盲目性和随意性。因此,为了确保工程质量,减少工程失误,延长公路的使用寿命,就必须全面系统地研究其修筑技术。

因此,土石混填路基修筑技术成为西部山区公路筑路技术的关键问题之一,亟待研究解决。为此原交通部 2002 年将“土石混填路基修筑技术研究”列为交通部西部交通建设科技项

目。项目依托重庆~贵州高速公路二期工程、云南昆明~石林高速公路、福建三明~福州高速公路和重庆巫山~湖北建施公路等工程建设中的土石混填路基工程,以土石混填路基施工质量检测与控制、路基稳定与变形性状为重点,开展了土石混合料路用质量分级、土石混填路基稳定与变形性状、土石混填路基施工质量检测与控制、土石混填路基边坡防护等专题的研究,提出了集土石混合料路用性能评价技术、土石混填路基设计技术、施工质量检测与控制技术和工程处治技术为一体的较为实用的技术。

0.2 研究现状概述

0.2.1 土石混合料特性、路用性能分级和质量评价

国内外十分重视土石混合料物理力学特性的研究,并进行了大量的研究工作,其研究成果也比较丰富。从各个行业对土石混合料的研究状况来看,水电工程对其研究站在前缘。20世纪50年代,有许多土石坝工程利用砂砾石、堆石等填筑,但工程设计中采用的稳定分析指标,仍然是以天然休止角代替内摩擦角,粗粒土特有的工程特性不能充分反映出来,设计偏于保守。20世纪60年代以后,专家们陆续研制了大型剪切仪、大型振动密实仪及大型管涌渗透仪等一系列适用于粗粒土的试验仪器,并对粗粒土的压实特性、抗剪强度特性、渗透特性等进行了深入研究,提出了一系列有价值的成果,这些成果在生产中发挥了积极作用。

0.2.1.1 土石混合料工程分类研究

在土的工程分类中,很多分类方法没有将粗粒土和超粒径的土石混合料区分开来,而将土石混合料统称为粗、巨粒土。实际上,水电工程上的粗粒土是粗颗粒土石混合料,包括一般所称的砾石土、砂卵石、石渣和堆石等,与公路土石混合料的范畴是相同的。因此,水电、铁路和机场等粗粒土的研究对象与公路行业的土石混合料的研究对象是相同的,二者的研究成果可以相互借鉴。

近年来,土石混填路基的数量越来越多,在粗粒土研究方面取得了许多优秀的成果。在粗粒土的研究过程中,不同的专家和学者从不同的角度进行考虑,对粗粒土提出了不同的分类方法,如根据粗粒料的成因、压实特性、粒度组成、粗粒土的结构或综合考虑多种因素的分类方法。这些分类方法尽管考虑的角度和考虑的因素不同,但在某些行业为较好地评价粗粒土的工程性质及其在工程中的应用发挥了积极的作用。目前主要的工程分类方法有五类,即按粗粒土的成因分类、美国统一粗粒土分类、以粗粒土压实特性为标准的分类、从结构的角度分类、水电工程粗粒土工程分类和命名。

以上所列举的土石混合料国内外分类方法,各有其特点,在评价和应用土石混合料时都发挥了积极的作用,并为研究提供了有益的资料,但是就目前的情况来看,还存在着以下一些不足之处:

(1)从粗粒土的定义看,目前粗粒土的成因分类仅仅限于最大粒径 $d_{\max} \leq 76.2\text{mm}$ 的土石料。以美国统一分类法(USCS)为例,它对 $d < 0.075\text{mm}$ 的颗粒定义为细粒;对 $d > 0.075\text{mm}$ 的颗粒定义为粗粒;对 $d > 0.075\text{mm}$ 颗粒的含量大于 50%,且最大粒径为 76.2mm 的土石料定义为粗粒土。以同样的道理,粗粒土除了包括 0.075~76.2mm 颗粒的含量大于 50%的土石料外,还应包括 $d < 0.075$ 颗粒含量或 $d > 76.2\text{mm}$ 颗粒含量分别小于 50%的土石混合料或 $d > 76.2\text{mm}$ 颗粒与 $d < 0.075\text{mm}$ 颗粒含量之和小于 50%的土石混合料,故粗粒土的分类应予以补充。

(2)粗粒土现有的分类方法繁多,种类繁多,需要有一个形式简单、使用方便、反映工程特性的、统一的工程分类方法。

对于粗粒土的分类,不同行业的研究人员,从不同的角度出发提出了不同的分类方法,致使分类方法繁多,各方法都有其局限性和片面性。公路建设中的土石混合料分类,应根据土石混合料的工程特性,结合公路的基本特点进行。土石混合料路用性能分类的目的在于采用简单可靠的指标,对土石混合料的可用性进行快速判断决策,判断其基本路用性能和应采取的基本施工工艺、质量检测与控制方式、方法等。这些问题的解决就需要一个分类指标,而这个分类指标的获得方法应简单,易于操作,能够很好地反映土石混合料工程特性。

0.2.1.2 土石混合料的强度和变形研究

随着高土石坝的迅速兴建和粗粒土的广泛应用,以及测试技术的发展,人们在相当大的应力变化范围内对粗粒土抗剪强度进行深入研究时,发现库仑公式有时不能较好地表达这些土的摩尔破坏包线。针对这一问题,国内外学者相继提出了几种抗剪强度公式^[1~3]。

邓肯(Duncan J. M)等人假定无黏性土应力圆的包络线都通过应力圆的坐标原点,得出抗剪强度如下:

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi = \sigma_n \tan \left[\varphi_0 - \Delta \varphi \ln \left(\frac{\sigma_3}{P_n} \right) \right] \quad (0-1)$$

德迈罗(De Mello)提出压实堆石的破坏准则为:

$$\tau_f = A(\sigma_n)^b \quad (0-2)$$

后经人们改进为:

$$\tau_f = AP_n \left(\frac{\sigma_n}{P_n} \right)^b \quad (0-3)$$

式中: A 、 b ——强度参数,无量纲。

郭庆国^[4]提出粗粒土强度包线有四种形式,可用一个通式表示:

$$\tau = c + AP_a (\sigma P_a)^b - \tau = c + AP_a \left(\frac{\sigma}{P_a} \right)^b \quad (0-4)$$

即 $(\tau_f - c)$ 和 σ_n 之间具有幂函数关系。当 $b=1$ 时,该式与库仑公式相同;当 $c=0$ 时,该式与德迈罗公式相同。

司洪洋^[5]研究了无黏性砂卵石与堆石的强度性质,无黏性砂卵石与堆石的抗剪强度,取决于颗粒之间克服咬合作用相对位移时的摩擦阻力。此阻力的大小,除受材料本身性质如颗粒大小、形态、级配、密度等因素的影响外,应力水平的影响也很大,尤其对于堆石更是如此。为此分别研究了通常压力条件,或不计应力水平影响的有效内摩擦角 φ' 随干密度的变化规律和高应力条件下的抗剪强度性质变化规律。无黏性砂卵石与堆石在高应力条件下的强度变化的性质,主要是颗粒破碎、颗粒重新排列的结果,亦即颗粒级配、结构、密度等变化的结果。而颗粒被挤碎则与施加的应力大小,原颗粒的岩质、大小、形状、级配、排列情况有关。试验表明,坚质、浑圆、级配优良的砂卵石,具有很高的抵抗颗粒挤碎的能力,因而在较大的应力条件下的强度包线仍近似为直线。尖角状的堆石则相反,其强度包线较快的出现了弯曲。

Jaroslav Feda^[6,7]、毛守仁,陈伟业^[8]、司洪洋^[5]等同时研究了无黏性砂卵石与堆石的应力应变的性质。大量的试验表明,这两种材料应力应变曲线形状,除其类型外,依其密度、应力水平及试验技术等而异。如果从归一化的观点进行研究,发现这些曲线可以归纳概括为四种类型:①轻度应变软化;②强烈应变软化;③轻度应变硬化;④强烈应变硬化。而在土石混填路基中,较为常见的为①、③两种类型。

通过试验研究发现,这两类材料具有明显的剪胀性质。研究认为剪胀性是剪切过程中克服颗粒咬合状态的结果,因而依产生与发展咬合状态的条件,砂卵石与堆石的强度将有不同的表现。强烈的咬合,较高的密度,较低的围压力,将导致强烈的剪胀,相应的抗剪强度增量迅速增大;相反,疏松的咬合,较高围压力,或颗粒挤碎严重(克服咬合的一种形式)将导致剪缩,相应的强度增量较小。

武明^[9]通过大型剪切仪和中型剪切仪的对比试验表明,构成土石混合料抗剪强度的重要因素之一是粗粒含量,同时压实干密度及含水率也是影响抗剪强度的重要因素。

陈希哲^[10]进行了大量大型三轴压缩试验与现场陡坡试验并经工程实践,证明粗粒土存在着咬合力。他认为粗粒土受剪切的破坏面并非平面,其强度来源也非颗粒表面的内摩擦力,而是由于剪切面上的粗颗粒阻挡剪切,使剪切面形成不规则的曲面或剪切带。粗颗粒相互交错镶嵌形成一种新的力,称咬合力,使粗粒土的强度大幅度提高。他还建议粗粒土强度理论计算公式为:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c \quad (0-5)$$

式中: ϕ ——粗粒土咬合力产生的摩阻角($^\circ$);

c ——粗粒土咬合力产生的结构力(kPa)。

为便于应用,公式与库仑定律形式相似,但含义不同。摩阻角 ϕ 来源于咬合力与内摩擦角 φ 来源于颗粒表面摩擦力不同,与天然休止角差别更大。 ϕ 值与粗粒土的粒径、级配、密度密切相关,密实粗粒土 $\phi > \varphi + 10^\circ$ 。 ϕ 与 c 值需用大型三轴压缩试验精细地实测。

甘霖、袁光国^[1]通过粗粒土的大型三轴试验研究了粗粒土的强度特性。认为无黏性粗粒土的抗剪强度来源于土粒间的摩擦力和咬合力,库仑公式中的 φ 按下式计算:

$$\varphi = \varphi_u + \varphi_d + \varphi_s \quad (0-6)$$

式中: φ ——颗粒土的内摩擦角;

φ_u ——颗粒间的滑动摩擦角;

φ_d ——剪胀效应摩擦角(咬合角);

φ_s ——与挤碎和重新排列作用有关的摩擦角。

三轴试验表明:在 σ_3 使用下,因为颗粒间的接触而形成的滑动摩擦并不引起土体体积的变化。所以滑动摩擦角 φ_u 仅与土样自身性质和试验条件有关,在同一试验中 φ_u 基本无变化。在围压 σ_3 较低时,咬合角 φ_d 的变化对抗剪强度起主导作用,随着 σ_3 的增大,在剪切过程中颗粒会被剪碎和重新排列,体积变化的影响减小,所以就会削弱 φ_d 的效应, φ_s 分量的效应将明显加强。

郭熙灵等^[11]研究了堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响,认为堆石料在力的作用下,容易发生颗粒破碎,破碎程度随颗粒硬度、粒径、颗粒形状以及应力大小而变化。颗粒破碎需要消耗部分能量,这部分能量由剪力增量做功提供。破碎程度将对材料的剪胀性和抗剪强度产生影响。而这正是工程建设中十分引人关注的问题。正是基于对这种现状的考虑,在破碎与抗剪强度理论关系研究的基础上,通过对三峡花岗岩风化石渣的大型三轴试验和平面应变试验,综合分析了颗粒破碎与剪胀性及抗剪强度的变化规律。试验研究中所用的试料最大粒径 $d_{\max} = 50\text{mm}$,最小粒径 $d_{\min} = 0.5\text{mm}$ 。通过试验,研究了颗粒破碎对剪胀性和抗剪强度的影响规律。

通过上述文献研究成果分析,对于粗粒土的抗剪强度目前存在以下几方面的不足:

(1)考虑到大型三轴试验和大型直剪试验的复杂性,很多人研究了试验中的尺寸效应。特

别是由于剪切过程中产生的剪胀(剪缩)、颗粒破碎、颗粒重新排列等作用,在可能的高试验应力范围内,整个强度包络线可能不是一条平滑的曲线,而可能有某种起伏。因而,考虑按应力水平分段描述的方法也许更适合一些。由于试验、仪器条件等限制,上述试验研究还不多,所得的统计关系不完全可靠。

(2)土石混合料尽管化学成分、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,其工程性质主要取决于粗、细料的含量。粗粒含量小于40%时,混合料的各项工程性质基本上取决于细料的性质;当粗粒含量为40%~70%时,粗细料联合起作用显示出混合料特征,随粗粒含量增加而不断向粗料转化;当粗粒含量大于70%后,则各项指标取决于粗料的特性。粗粒含量是粗粒土强度最主要的影响因素,另外粗粒土强度还受到密实度、含水率、细粒含量等因素的影响。人们将粗粒土按粒度组成和细粒的黏性分为无黏性粗粒土、少黏性粗粒土和黏性粗粒土三类,并取样对这三类土进行了大量的室内试验研究,得出了三类土统一的强度公式。通过研究我们虽然有上述认识,但对粗粒料含量在40%~70%时,随着粗粒料的增加,土石混合料的物理力学性质的变化规律尚没有一个定量的描述。

(3)大量的试验表明,粗粒土的抗剪强度的摩擦角由三项组成,颗粒间的滑动摩擦角(φ_u)、剪胀效应摩擦角(咬合角 φ_d)、与挤碎和重新排列作用有关的摩擦角(φ_s)三项组成;但都未对 φ_d 的存在和成因给予很好的解释,忽略了剪切面的起伏度。因此,虽然提出了存在着这一组分,但未通过试验予以量化;对强度包线与纵轴的截距 c 也未给出很好的解释。

(4)粗粒土剪切过程中颗粒的破碎对粗粒土的剪胀性和剪切强度有较大的影响,但剪切破碎的发生应具备一定的条件:粗颗粒较为软弱,剪切时围压和剪切力较高。因此,在土石混填路堤抗剪强度的研究中,是否应当考虑因为剪切破碎而引起的填料粒度组成和抗剪强度的变化,在什么条件下应当考虑其影响,都是应当解决的问题。

公路路基工程中最关心的是路基的稳定与变形。路堤的稳定与变形反映在土的物理力学性质方面则表现为强度参数(如 c 、 φ 值)和变形参数(如弹性模量 E_s)及其变化规律。因此,应针对上述研究中存在的问题,结合土石混填路堤的实际情况对公路中土石混合料的物理力学性质,尤其是土石混合料的抗剪强度及其组成进行更深入的研究。

0.2.2 土石混填路基稳定与变形性状研究

山区修建公路,由于地形、地貌条件的复杂,高填方成为常见的路基结构形式。高填方由于填筑体的堤身较高,填料自重应力引起的填筑体的自身压缩沉降及地基沉降较大,路面常因填筑体的沉降超出了路面结构层的容许范围,导致路面无法正常使用,造成极大的浪费。所以,路基工程的根本问题是路基的稳定与变形(或沉降)问题,故路基的稳定与变形一直是路基工程研究的主题。在高填方路堤设计中,填筑体的沉降计算,是设计、研究人员面临的一个重要课题。因此,国内外对路基的稳定与变形的研究特别重视,其研究文献及研究成果也十分丰富。总结分析有关研究文献及成果,我们可以发现目前的研究有着明显的特点,主要表现在:在路基边坡稳定性和沉降实用分析方面,传统方法的改进和完善,以及分析计算参数的求取,仍是研究的重点;在路基的稳定与变形联合分析及变形破坏机理研究中,数值模拟方法为主流,并辅以模型试验作为验证手段。

由附加应力引起的土基沉降,通常可由分层总和法来计算压缩层范围内的总沉降量,并用太沙基固结理论来计算不同时间的沉降量,但是对于填筑体的自身瞬时压缩变形和不同时间的压缩变形计算,目前还没有通行的方法。国内一些科研机构对此进行了有效的探索,如有的

采用了改进的分层总和法来分析路堤的沉降,有的采用非线性有限元分析填筑体的变形等等^[12]。但不管使用哪种方法来计算填筑体的沉降,都会带来较大的误差;而有限元法计算填筑体的沉降能适应各种边界条件和几何形状的变化,并能处理非均质材料。

值得注意的是,这些研究和计算方法大多针对一般填土(细粒土)路基,很少针对土石混填路基。由于土石混填路基与一般路基具有很大的不同,因此其稳定与变形性状也必然存在较大的差异。如何根据土石混填路基的特点建立其稳定与变形设计计算方法,是一个必须解决的问题。

何兆益、周虎鑫^[13]根据试验室的试验成果,利用八节点六面体进行了不同组成、不同压实度的路基沉降三维有限元计算。计算结果表明:当填筑体的高度为 30m 时,路堤的瞬时沉降量达到了 30~70cm,随着含石量的增加,沉降量变小,说明对于高填方工程使用石料填筑优于土料填筑,有利于减少高填方路堤的总沉降量。计算研究表明:随着填筑体压实度的减少,沉降量增加,采用土石混合填筑路基,保证路床压实度不少于 96% 是必要的。然而,土石混填路基存在着大量的孔隙,从介质本身来说是不连续的,不能满足有限元连续介质条件;再者,路基 30~70cm 的变形是个大变形的问题,而采用基于小变形的有限元分析有其局限性。

通过上述分析可知,路堤沉降计算沿用传统的分层综合法计算压缩层范围内的总沉降量和利用太沙基固结理论来计算不同时刻的沉降量,都是针对细粒土路基;对于无侧限的土石填筑体自身瞬时压缩变形和不同时间的压缩变形计算,研究得很少,目前还没有公认合理的方法。

实际上,对土石混填路基沉降和破坏的研究应采用综合的研究方法,即将模型试验、数值模拟、工程试验和理论分析相结合。通过调查研究了解土石混填路堤的稳定变形特点及存在的问题,了解路堤的主要形式及变形破坏原因;通过物理模拟试验了解和掌握其变形破坏基本现象和客观规律,为变形与稳定设计计算方法的建立奠定基础;利用能够反映土石混合料本构模型的颗粒离散元、大变形有限元及拉格朗日元法进行数值模拟分析,将数值模拟结果和物理模拟成果对比分析,从本质上把握土石混填路基的变形破坏机制和沉降变形规律,并通过工程试验与观测进行验证,从而提出不同土石混填路基稳定与变形发展变化规律,提出不同土石混填路基变形破坏机制,建立土石混填路基稳定与变形设计计算方法。

0.2.3 土石混填路基施工工艺及质量控制技术

土石混合料是由土和石组成的松散体,土的种类不同,石料的含量不同,压实成型后其物理结构和力学特性亦不同。包括压实工艺特性与工程使用性能两方面在内的碎石土的工程性质,取决于由量变(含石量的增加)到质变(组成结构的变化)的内因,随着含石量的增加,土石混合料由密实-悬浮结构转化为骨架-密实结构,最终进入骨架-空隙结构状态。显然,密实-悬浮结构状态下,低含石量时的工程性质取决于土的工程性质;而高含石量时,粗颗粒对土石混合料的工程性质有什么样的影响,是人们所关切的一个问题;同理,当含石量增加到足以形成骨架结构,而土又不能填满空隙时,这部分土处于怎样的密实状态,对土石混合料的工程性质又有何影响更是问题的焦点^[17~21]。

对于无黏性粗粒土的压实标准,多采用相对压实度 D_r 表示,也有用压实度 P 表示的,即要求填筑压实后的干密度 ρ_d 必须满足设计采用的某一相对压实度或某一压实度的要求。这两种标准的定义不同,其数值的大小也不同。如当 $D_r=0.7$ 时, P 约为 0.95。但是,无论采用哪一种标准,都得首先测定出填筑土料的最大干密度 ρ_{dmax} 值,故最大干密度在确定填筑标准和评价填筑质量中至关重要。至于无黏性粗粒土最大干密度的测定方法,各国大体相同,如美

国、中国、原苏联、日本等采用振动台振动法,瑞典、英国等采用振动夯法,即用振动法效果较好。但按目前各国的规范,被测定的土料限制在某一最大粒径范围之内。如美国的 ASTM (D 4253)标准规定仪器允许最大粒径 $d_{\max} \leq 76.2\text{mm}$,我国《土工试验规程》(SL 237—1999)规定 $d_{\max} \leq 60\text{mm}$,瑞典国家标准规定试样筒的内径(D)为 150mm ,若按 $D/d_{\max} = 5$ 计, $d_{\max} = 30\text{mm}$,等等。显然,实际工程中应用的粗粒土的最大粒径超过了目前测得粗粒土最大干密度仪器的允许粒径范围,无法测定最大干密度,也就难以使用相对压实度或压实度标准。因此,在粗粒土的应用范围日益扩大的今天,如何确定超径粗粒土的最大干密度,是有待解决的问题。为了解决无黏性超径粗粒土最大干密度问题,有许多的学者进行过研究。

目前,国内外普遍采用的做法是将原型级配缩小成几组粒径不同的模型级配进行系列试样^[14],以最大粒径为参数外插推算原型最大干密度。这种方法存在的问题是外推偏差较大。为解决此问题,田树玉^[15]提出了用渐近线辅助拟合法确定大粒径砂卵石最大干密度。

冯冠庆、杨荫华^[16]通过采用室内振动台法和表面振动器法,并辅之以少量的现场碾压资料,研究堆石料最大指标密度 $\rho_{d\max}$ 与室内各种试样参数之间的关系,以确定各种试验参数的最优值。他们着重研究了室内测定 $\rho_{d\max}$ 的过程中各试验参数的确定,而对现场碾压试验涉及得比较少。室内测定的 $\rho_{d\max}$ 要想应用到实际工程中,必须详细地了解室内测定的 $\rho_{d\max}$ 与现场碾压密度 ρ_d 之间的关系,特别是应该对它们之间的关系作定量的分析。

刘勇、陆恩施^[17]对无黏性超粒径粗粒土(最大粒径 $100 \sim 800\text{mm}$)最大干密度试验方法进行了探讨。通过表面振动器和振动台两种试验的结果比较,发现由振动台法测得的最大干密度远小于表面振动器法测得的最大干密度,推荐使用表面振动器进行土石混填料最大干密度试验。

长期以来,公路部门对路堤填料的压实特性及质量检测标准的相关设计、施工规范都是建立在细粒土的基础上的。土石混填路基与一般路基的最大不同就在于其填料的不均匀性,由于其填料的不均匀,导致其施工工艺和施工控制困难,特别是施工质量的检测与评价一直未能解决,成为国际上公认的技术难题。对土石混填路基的施工工艺,国内外进行了不少研究工作。土石混填路基的质量检测与评价,是确保路基稳定与质量的关键,不少学者进行过研究,并取得了一定的成果^[16,18]。

欧阳晓英、张镇鑫^[19]在长益公路土石路基施工中,研究了混合填料压实性能影响因素,认为粗颗粒的粒径及均布性、含水率、粗颗粒的含量控制了混填料的压实性能。

黄少雄、郑治^[20]在京珠高速公路粤境内进行了不同层厚的石灰岩填料填石路堤的修筑试验,通过对试验结果的分析总结,提出了填石路堤的压实层厚和施工工艺,认为填石路堤施工质量宜采用施工工艺与质量检测联合控制,在质量检测中推荐采用填石路堤表面的压实沉降差进行检测。

林祖玖^[21]在上海至杭州高速公路的余杭段粗粒土填筑路基过程中,为了探索粗粒土作为路基填筑材料的填筑性能,结合自身的施工方法,针对不同的填料、不同的碾压机具、不同的松铺厚度和不同的碾压遍数与路基压实程度的关系等问题,进行了机械土石方路段的填筑试验。

赵久柄、王正良^[22]进行了西宝高速公路粗粒土路基压实度的试验研究,提出固体体积率法,作为粗粒土路基每层碾压控制的依据。尽管是针对粗粒土的试验研究,但含水率对回弹模量影响的结论和在施工中将固体体积率作为控制指标的方法值得土石混合填筑路基研究借鉴。

马松林、王龙、王哲人等^[23,24]采用上置式振动压实装置对不同含石量的土石混合料进行

了压实研究,土石含量不同,材料的组成结构也不同,而材料的组成结构决定材料的工程性质。

对于土石混填路基填筑质量的检测方法,目前研究的较少,国内有关文献也少。陈谦应、邓卫东^[25]对土石混合非均质填方压实质量检测方法进行了综述研究,根据采用的检测方法和手段,将目前采用的检测方法分为密度检测法、抗力检测法、试验工程法三类,并分析了各类方法的特点、使用条件和存在的问题。

因此在检测方法的选择和标准的制订中应充分考虑解决以下问题:

(1)由于抗力法测定的结构并非被测压实层的整体反映,而是该层及其以下多层填方的综合反映,如何根据这些数据客观地评价被测层的压实状态是必须进行研究解决的问题;土石混填具有非均质性,因此测点的代表性问题最为突出。

(2)如何应用有限点的测试数据来反映、评价整个压实面的压实质量,即以点代面的问题有待研究解决;在制订压实标准时,应研究考虑标准对填方路堤将来性状的控制影响。

对土石混填路基施工质量检测与控制技术,应包括土石混合料压实机理、土石混填路基施工工艺及施工控制关键参数、土石混填路基压实质量检测技术三个部分。土石混填压实机理是质量检测和施工工艺的基础。已有的研究表明,土石混合料的压实机理随着土石比的不同而不同。因此,应采用室内试验、模型试验和数值模拟分析方法,对土石比例不同的土石混填路基压实机理进行分别研究。

0.3 本书研究思路

土石混填路基需要解决的问题很多,但最主要、最核心的问题是:土石混填路基质量评价指标、土石混填路基稳定与变形性状、土石混填压实质量检测与控制 and 土石混填路基防排水。若解决上述问题,就需要围绕着土石混填料本身和路基稳定与变形性状进行系统深入的研究。首先,不同的土石混合料就具有不同的物理力学特性和施工特性,在实际工程中工程技术人员最希望通过简单的试验,就能对其使用性能进行基本判断。为达到这一目的,最捷径的方法是根据其物理力学特性结合公路的特点进行分类。土石混填路基的设计是路基修筑的基础,而路基的设计实际上就是稳定与变形的设计。因此,土石混填路基稳定与变形性状就十分重要。土石混填路基的施工及质量的检测与评价,是路基修筑技术的关键,而路基边坡防护则是保证路基稳定性的重要环节。基于此,也就形成了本书的研究思路。

(1)土石混合料路用性能分级(类)及质量评价技术

已有的文献都将土石混合料作为一个整体进行研究,没有单独研究土、石的性质及其土石比等在混合料中的作用及其影响规律,使研究成果停留在具体试验的解释上,未上升到理论的高度,工程实际不好应用。本书通过对土、石性质及土石混合料性质的试验,建立了土、石、土石比等与土石混合料性质的对应关系,达到只需常规试验设备就能解决以往只能采用大型试验设备才能获得的土石混合料的物理、力学参数的目的,以便工程中推广应用。

(2)土石混填路基稳定与变形性状及设计计算方法

土石混填路基变形与稳定设计计算方法前人研究较少,基本上是个空白。对于土石混填路基变形与稳定设计计算方法应建立在土石混填路基稳定性破坏形式上,确定其破坏模式,采用极限分析理论建立计算方法,并根据数值计算及试验结果进行修正,采用示范工程观测结果进行验证。

为便于工程应用,路堤沉降计算仍然采用对传统方法改进的方案。方法的改进建立在理论分析、数值分析、模型试验和示范工程观测的基础上。

(3) 土石混填路基施工质量检测与控制技术

压实施工工艺必须结合压实机具进行,而压实机具又与施工控制参数密切相关。因此,土石混填路基施工工艺及施工控制关键参数确定的技术路线是:首先要对压实机具进行选择,通过建立施工费用与混合料压实性、施工控制参数等的函数关系,采用最优化理论,结合工程实际确定不同混合料的合理压实机具;再通过重复性试验获取大量资料,在资料分析整理的基础上,提出关键参数和施工工艺。

土石混填路基压实指标采用压实度,通过试验和计算分析采用变形控制和强度控制的方式确定压实指标;在压实质量检测手段上,采用声波法和附加质量法为解决问题的基本方法。通过大量的对比试验建立声波法测试数据与压实度的相关关系,达到检测手段先进,检测速度快,质量评价可靠的目的。

