

国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果

砂泥岩颗粒混合料 工程特性研究

王俊杰 方绪顺 邱珍锋 著



科学出版社

国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果

砂泥岩颗粒混合料工程特性研究

王俊杰 方绪顺 邱珍锋 著

本书由“十二五”国家科技支撑计划课题“山区河流渠化河段港口码头建设关键技术研究(编号:2012BAB05B04)”资助出版,部分成果取自国家自然科学基金面上项目“周期性饱水砂泥岩混合料的劣化机理及其演化过程(编号:51479012)”。

科学出版社

北 京

内 容 简 介

就地取材的砂泥岩颗粒混合料在各类填方工程中被广泛用作建筑填料,但对其工程特性的研究远滞后于工程实践。本书以室内试验为主要方法,系统研究砂泥岩颗粒混合料的工程特性,具体包括:砂岩和泥岩的物理力学特性,砂泥岩颗粒混合料的压实特性、单向压缩变形特性、三轴强度变形特性、静止侧压力系数、各向异性渗透特性和固结-渗透耦合特性。

本书适于水利、土木、交通工程领域的研究人员、工程技术人员及研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

砂泥岩颗粒混合料工程特性研究/王俊杰,方绪顺,邱珍锋著. —北京:科学出版社,2016. 1

国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果

ISBN 978-7-03-046564-1

I. ①砂… II. ①王…②方…③邱… III. ①砂岩—配合料—研究
IV. ①TU521

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288537 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:396 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在砂岩和泥岩互层分布地区的工程建设中,采用爆破、机械开挖等施工方法开采的土石料多为砂岩和泥岩的颗粒混合料(本书称之为砂泥岩颗粒混合料),通常很难也没有必要把砂岩颗粒和泥岩颗粒完全分开使用。这种就地取材的砂泥岩颗粒混合料是各类填方工程(比如长江上游地区特别是重庆地区的港口码头、拦河大坝、库岸整治、沿河道路、机场扩建、场地平整等)中常用的建筑填料,有时甚至是唯一的建筑填料。尽管砂泥岩颗粒混合料在工程建设中被大量、广泛地用作建筑填料,但对其工程特性的系统研究仍很不够。

本书在“十二五”国家科技支撑计划课题“山区河流渠化河段港口码头建设关键技术研究(编号:2012BAB05B04)”和国家自然科学基金面上项目“周期性饱水砂泥岩混合料的劣化机理及其演化过程(编号:51479012)”的资助下,采取重庆地区代表性的弱风化砂岩、泥岩块体,人工破碎后配制成砂泥岩颗粒混合料、纯砂岩颗粒料和纯泥岩颗粒料为试验材料,通过大量室内试验,在研究砂岩和泥岩的物理力学特性基础上,系统研究了砂泥岩颗粒混合料的工程特性,包括压实特性、单向压缩变形特性、三轴强度变形特性、静止侧压力系数、各向异性渗透特性和固结-渗透耦合特性。

全书共8章,由重庆交通大学王俊杰教授、南京水利科学研究院方绪顺高级工程师和重庆交通大学博士研究生邱珍锋共同撰写,全书由王俊杰教授统稿。

重庆交通大学刘明维教授、梁越副教授和研究生邓弟平、邓文杰、郝建云、温雨眠等参与了本书的部分研究工作。本书撰写过程中引用了很多学者的科研成果,研究生程玉竹、曹智、张宏伟、吴晓、张均堂等参与了本书的校对、插图绘制等工作,在此一并致以衷心的感谢!

限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 土体压实特性	2
1.2.2 土体压缩变形特性	2
1.2.3 土体强度特性	3
1.2.4 土体静止侧压力系数	3
1.2.5 土体渗透特性	4
1.2.6 土体颗粒破碎	4
1.3 主要研究内容	4
参考文献	5
第2章 砂岩和泥岩的物理力学特性	13
2.1 概述	13
2.2 物理性质	14
2.2.1 试验结果	14
2.2.2 资料搜集分析结果	14
2.3 砂岩的强度变形特性	21
2.3.1 试验原理	21
2.3.2 试验方法	22
2.3.3 试验方案	22
2.3.4 单轴试验结果及分析	23
2.3.5 三轴试验结果及分析	26
2.3.6 工程资料搜集分析	29
2.4 泥岩的强度变形特性	31
2.4.1 试验方案	31
2.4.2 单轴试验结果及分析	31
2.4.3 三轴试验结果及分析	33
2.4.4 工程资料搜集分析	37

2.5 砂岩的崩解特性	39
2.5.1 岩石崩解试验方法	39
2.5.2 砂岩崩解试验结果	40
2.6 泥岩的崩解特性	42
2.6.1 泥岩崩解试验现象	43
2.6.2 崩解物烘干	45
2.6.3 崩解物筛分	47
2.7 崩解指标	48
2.8 本章小结	49
参考文献	49
第3章 压实特性	52
3.1 概述	52
3.2 试验方法及试验方案	53
3.2.1 试验方法	53
3.2.2 试验方案	57
3.3 纯砂岩颗粒料的压实特性及颗粒破碎	58
3.3.1 压实特性	58
3.3.2 颗粒破碎	63
3.4 纯泥岩颗粒料的压实特性及颗粒破碎	71
3.4.1 压实特性	71
3.4.2 颗粒破碎	76
3.5 颗粒级配对压实特性和颗粒破碎的影响	81
3.5.1 压实特性	81
3.5.2 颗粒破碎	86
3.6 泥岩颗粒含量对压实特性及颗粒破碎的影响	90
3.6.1 压实特性	91
3.6.2 颗粒破碎	94
3.7 击实功对压实特性及颗粒破碎的影响	97
3.7.1 压实特性	97
3.7.2 颗粒破碎	99
3.8 本章小结	99
参考文献	100
第4章 单向压缩变形特性	105
4.1 概述	105

4.2 试验方法及试验方案	106
4.2.1 试验方法	106
4.2.2 试验方案	112
4.3 压缩曲线	113
4.3.1 颗粒级配对压缩曲线的影响	114
4.3.2 泥岩颗粒含量对压缩曲线的影响	114
4.3.3 试样密度对压缩曲线的影响	115
4.3.4 试样含水率对压缩曲线的影响	116
4.4 压缩系数	118
4.4.1 颗粒级配的影响	119
4.4.2 泥岩颗粒含量的影响	122
4.4.3 试样干密度的影响	123
4.4.4 试样含水率的影响	123
4.5 压缩模量	124
4.5.1 颗粒级配的影响	126
4.5.2 泥岩颗粒含量的影响	128
4.5.3 试样干密度的影响	129
4.5.4 试样含水率的影响	130
4.6 压缩指数	130
4.6.1 颗粒级配的影响	132
4.6.2 泥岩颗粒含量的影响	135
4.6.3 试样干密度的影响	136
4.6.4 试样含水率的影响	136
4.7 前期固结应力	137
4.7.1 颗粒级配的影响	139
4.7.2 泥岩颗粒含量的影响	142
4.7.3 试样干密度的影响	142
4.7.4 试样含水率的影响	143
4.8 本章小结	144
参考文献	145
第5章 三轴强度变形特性	149
5.1 概述	149
5.2 试验方法及试验方案	149
5.2.1 试验仪器	149

5.2.2	试验方法	150
5.2.3	试验方案	151
5.3	颗粒级配的影响	152
5.3.1	应力-应变关系	153
5.3.2	偏应力峰值	155
5.3.3	线性抗剪强度指标	166
5.3.4	非线性抗剪强度指标	169
5.4	泥岩颗粒含量的影响	176
5.4.1	应力-应变关系	176
5.4.2	线性抗剪强度指标	179
5.4.3	非线性抗剪强度指标	180
5.4.4	颗粒破碎	183
5.5	试样干密度的影响	188
5.5.1	应力-应变关系曲线	189
5.5.2	线性抗剪强度指标	189
5.5.3	非线性抗剪强度指标	190
5.6	试样含水率的影响	193
5.7	本章小结	194
	参考文献	195
第6章	静止侧压力系数	202
6.1	概述	202
6.2	试验方法及试验方案	203
6.2.1	试验方法	203
6.2.2	试验仪器	203
6.2.3	试验步骤	204
6.2.4	试验方案	205
6.3	试验结果	205
6.3.1	方案1试验结果	205
6.3.2	方案2试验结果	206
6.3.3	方案3试验结果	207
6.3.4	方案4试验结果	207
6.4	静止侧压力系数	209
6.4.1	颗粒级配对静止侧压力系数的影响	210
6.4.2	泥岩颗粒含量对静止侧压力系数的影响	213

6.4.3 干密度对静止侧压力系数的影响	213
6.4.4 含水率对静止侧压力系数的影响	213
6.5 本章小结	214
参考文献	215
第7章 各向异性渗透特性	223
7.1 概述	223
7.2 试验仪器	224
7.3 试验方法及试验步骤	225
7.3.1 仪器密封性检查	225
7.3.2 传感器标定	226
7.3.3 制样	226
7.3.4 饱和试样	227
7.3.5 加压	227
7.3.6 数据整理	228
7.4 试验土料及试验方案	230
7.4.1 试验土料	230
7.4.2 试验方案	231
7.5 砂泥岩颗粒混合料水平渗透特性	232
7.5.1 颗粒级配的影响	232
7.5.2 干密度的影响	237
7.5.3 泥岩颗粒含量的影响	242
7.6 砂泥岩颗粒混合料垂直渗透特性	247
7.6.1 颗粒级配的影响	247
7.6.2 干密度的影响	253
7.6.3 泥岩颗粒含量的影响	257
7.7 砂泥岩颗粒混合料渗透系数各向异性	263
7.8 砂泥岩颗粒混合料临界水力梯度各向异性	267
7.9 各向异性渗透特性机理	271
7.9.1 各向异性细观机理	272
7.9.2 各向异性宏观机理	273
7.10 本章小结	276
参考文献	277
第8章 固结-渗透耦合特性	281
8.1 概述	281

8.2 试验方法及试验方案	282
8.2.1 试验土料和试样的特征	282
8.2.2 试验方法	282
8.2.3 试验步骤	282
8.2.4 试验方案	285
8.3 固结对渗透特性的影响	285
8.3.1 颗粒级配试验结果及分析	285
8.3.2 干密度试验结果及分析	290
8.3.3 泥岩颗粒含量试验结果及分析	290
8.3.4 非线性 $e-k$ 模型	292
8.4 渗透对固结特性的影响	295
8.4.1 颗粒级配试验结果及分析	295
8.4.2 干密度试验结果及分析	297
8.4.3 泥岩颗粒含量试验结果及分析	299
8.5 本章小结	302
参考文献	302

第1章 绪 论

砂岩、泥岩互层结构地层的分布很广。以地处长江黄金水道要地、正在建设长江上游航运中心的重庆地区为例,根据《重庆市地质图(比例尺 1 : 500 000)》^[1],形成于三叠系上统、侏罗系和白垩系下统的砂泥岩互层结构地层的总厚度达 2294~6440m。其中,三叠系上统须家河组(T_{3xj})地层厚 250~650m;侏罗系下统珍珠冲组(J_{1z})地层厚 180~320m,自流井组(J_{1zl})地层厚 300~420m;侏罗系中统新田沟组(J_{2x})地层厚 40~490m,沙溪庙组(J_{2s})地层厚 1100~2100m;侏罗系上统遂宁组(J_{3sn})地层厚 200~600m,蓬莱镇组(J_{3p})地层厚 124~1300m;白垩系下统窝头山组(K_{1w})地层厚 100~560m。

对砂岩、泥岩互层结构地层采用爆破、机械开挖施工时,形成的土石料通常为砂岩颗粒和泥岩颗粒的混合料(本书称为砂泥岩颗粒混合料),将其作为建筑填料利用时,很难也没有必要把砂岩颗粒和泥岩颗粒完全分开。在各类填方工程建设中,砂泥岩颗粒混合料是常用的主要建筑填料。以正在扩建的重庆江北机场为例,就地取材的砂泥岩颗粒混合料是最主要的建筑填料,最大填方厚度达百余米;正在建设的重庆南川金佛山大Ⅱ型水库大坝枢纽混凝土面板堆石坝(最大坝高 109.80m)的下游次堆石区坝体也拟利用就地取材的砂泥岩颗粒混合料填筑。

众所周知,砂岩和泥岩是两种力学性质、水理性质均相差较大的沉积岩。由砂岩颗粒和泥岩颗粒混合形成的砂泥岩颗粒混合料,其工程特性必然既有别于纯砂岩颗粒料,也有别于纯泥岩颗粒料。尽管砂泥岩颗粒混合料在各类工程建设中被大量用作建筑填料,但人们对其工程特性并没有开展系统性研究,并不清楚其压实特性、强度特性、变形特性等工程特性如何,有必要对此开展系统深入的研究。

1.1 研究意义

由于砂岩-泥岩互层、砂岩夹泥岩的地质条件在长江上游地区分布很广,加之其良好的工程特性,就地取材的砂泥岩颗粒混合料常被用作交通、建筑、水利、水运等工程建设中的建筑填料。然而,在库岸工程(比如沿岸港口码头工程)及其他涉水工程的建设中,尤其是水下及水位变幅区域的填方工程建设中,砂泥岩颗粒混合料常被设计人员限制使用。主要原因是,砂泥岩颗粒混合料中的泥岩颗粒在库水的长期、周期性浸泡作用下,容易发生软化甚至泥化,使得砂泥岩颗粒混合料的长期强度降低、变形增大,严重时可能导致涉水边坡、沿岸结构物等发生变形、

变位、开裂甚至失稳现象。尽管如此,实际在库岸等涉水工程建设中,大量的砂泥岩颗粒混合料还是被用于水下及水位变幅区域的填方工程建设,因为施工现场及土石料场很难取得不含泥岩颗粒的砂岩填料。

由此可见,由于对砂泥岩颗粒混合料工程特性没有进行系统研究,在工程建设尤其是涉水工程建设中对砂泥岩颗粒混合料的利用存在一定的盲目性、不科学性甚至冒险性。

鉴于此,本书的研究意义主要体现在如下两个方面:

(1) 理论意义:本书通过系列试验研究和理论分析,查明砂泥岩颗粒混合料的压实特性、单向压缩变形特性、三轴强度变形特性、静止侧压力系数及渗透特性等工程特性及其主要影响因素,具有重要的理论意义和学术价值。

(2) 工程价值:紧密围绕砂泥岩颗粒混合料作为建筑填料利用需要开展其工程特性研究,研究成果具有重要的工程实用价值。

1.2 国内外研究现状

虽然土是人类接触最早的建筑材料,但是直到现在,人类对土的工程性质的认识远远不如混凝土、钢筋等人造的工程建筑材料。究其原因,主要是土体工程性质的复杂性,加上土体具有的多相性、自然变异性以及散体性使得它与材料力学中的混凝土以及金属等材料有着本质区别,这就使得土体工程特性要复杂得多。结合本书主要研究内容,对国内外研究现状简要分析如下。

1.2.1 土体压实特性

压实特性是土体的基本特性之一,其受压实功能、土体含水率、压实方法等诸多因素影响^[2~15]。当选用一定的压实方法、压实功能的时候,土体的击实曲线多呈驼峰形,即刚开始土体的干密度随着含水率的增加而增加,当干密度达到某一值后,含水率继续增加干密度反而减小,此最大值即为最大干密度,与之对应的这个含水率即为最优含水率。产生这种现象的原因是土体在含水率较低时,颗粒表面的水膜薄,摩擦力大,不易压实。含水率逐渐增加时,颗粒表面水膜逐渐变厚,水膜之间的润滑作用也增大了,从而也相应地减小了颗粒表面摩擦力,就容易压实。再继续增加含水率,增加的是颗粒间孔隙体积,相应降低的是干密度值。

1.2.2 土体压缩变形特性

压缩变形特性是土体的基本力学特性之一,其受土体类型、含水率、土体结构和密实度等多种因素影响。在室内试验条件下,一维侧限压缩试验^[16~18]是研究土体压缩变形特性的有效手段,因而被很多学者用于研究土体的压缩变形

特性^[19~32]。

非饱和土是工程中最常见的土体类型,是一种三相的多孔松散介质。三相之间不仅具有力学效应复杂多变的收缩膜,还存在固-液-气之间的电化作用与物理作用及它们物理性态变化的影响,因此,非饱和土的力学特性通常比饱和土要复杂得多^[33~37]。邵生俊等^[38]从非饱和土客观存在的固结变形变化及固结变形稳定时固、气、液共同构成的等效骨架承担压缩应力出发,通过压缩、固结试验揭示了非饱和土固结过程的等效骨架相应力与等效流体相压力的变化规律、瞬时压缩变形特性及等效固结系数,将复杂的非饱和土固结问题简化成了较为简单的两相耦合作用问题,在此基础上对非饱和土建立了一种实用的一维等效固结的分析方法。

非饱和土遇水后由于水的作用而发生的附加变形称为湿化变形。湿化变形的概念源于土石坝等水利工程中,指粗粒料在一定应力状态下浸水,由于颗粒之间受水的润滑作用及矿物颗粒遇水会软化等原因从而使颗粒发生相互滑移、破碎与重新排列,从而产生变形,并且使土体中应力出现重分布的现象^[39~42]。土体在湿化作用下,其变形、强度等特性可能会发生显著变化^[43~48]。

1.2.3 土体强度特性

在强度特性方面,前人针对土石混合体的研究较多,相关研究成果^[49~57]对本书研究方法具有一定借鉴意义。相关研究表明,现场水平推剪试验、大型直剪试验和三轴试验等均是有效的试验研究手段。土体的强度特性受土体的类型、含水率、颗粒级配、试验方法等多种因素影响^[58~73],其中湿化作用的影响是近年来研究的热点之一。研究表明^[74~82],在湿化条件下,土体峰值抗剪强度指标不随湿化应力水平而变化且与饱和态值相等;湿化变形仅在高压下随粗粒料干密度的增大而增加,低压下干密度的影响不明显;湿化变形随竖向荷载的增大而增加;在各向等压条件下,湿化体积变形与轴向变形和围压的关系分别可用双曲线与直线表示。

粗粒料经湿化后抗剪强度有所降低。研究表明^[83~86],对于碎石土,从天然状态到饱和状态时内摩擦角可降低 $2^{\circ}\sim 8^{\circ}$;对黏土和粉质黏土,随着饱水时间的增加 c 、 φ 值呈减小变化;对于粉质黏土夹碎石, φ 值衰减比 c 值快。

1.2.4 土体静止侧压力系数

土体的静止侧压力系数^[87]是计算土体水平应力的重要参数,在岩土工程中广泛应用。如何准确确定静止侧压力系数的大小是国内外研究者关注的课题之一,目前已提出的确定方法主要包括经验公式法、室内试验法、现场原位试验法、本构模型法及数值计算法等^[88~96]。经验公式法主要是依土体有效内摩擦角、泊松比、塑性指数及超固结比等物理力学指标与静止侧压力系数的经验关系式计算;室内试验法主要有压缩仪法和三轴仪法两种,是在试验中实现试样侧向位移为零的状

态,通过测量试样竖向应力与水平应力间的关系来确定;现场原位试验法主要有扁铲侧胀试验、原位应力铲试验、旁压试验以及载荷试验等,通过测得的荷载-位移关系间接确定。

由于静止侧压力系数的值受土体类型、土的结构性、应力历史、孔隙水压力、受扰动程度、土骨架流变性等多种因素的影响,因此,时至今日,人们提出的静止侧压力系数确定方法均具有一定的局限性,提出的计算方法也是以经验为主^[97~101]。

1.2.5 土体渗透特性

粗颗粒土体的渗透系数大小与许多因素有关,如颗粒的大小、形状、不均匀系数等,要准确的确定比较困难^[102~104]。渗透分析的常用方法有理论计算及试验方法,其中试验方法有经验法、室内试验和现场原位试验三种^[105,106]。经验法通常是依据土体的颗粒级配特征,依据经验公式计算土体的渗透系数;室内试验又分为常水头试验和变水头试验两种;现场原位试验有注水法、抽水法等。

作为建筑填料利用的土体,由于在填筑施工中通常采用分层压实或夯实的施工工艺,填筑后土体的渗透性可能存在各向异性,也就是平行层面方向的渗透系数要大于垂直层面方向的渗透系数^[107,108]。研究表明^[109,110],天然红土的水平渗透系数是垂直渗透系数的1.93~5.47倍;沉积原状粉煤灰的水平渗透系数是垂直渗透系数的5倍,而击实粉煤灰只有1.5倍。土体的各向异性渗透特性对渗流场、渗流量、浸润线、孔隙水压力等均存在影响^[111~113]。

1.2.6 土体颗粒破碎

粗粒土在受荷过程中,可能发生土颗粒的破碎。土颗粒破碎对土体的强度变形特性有影响^[114~116]。颗粒破碎是指岩土颗粒在外部荷载作用下产生结构的破坏或破损,分裂成粒径相等或不等的多个颗粒的现象,与颗粒粒径、形状、硬度、级配、有效应力状态、有效应力路径、孔隙比及含水率等有关,其最明显的表现是试验前后颗粒级配曲线的变化^[117~120]。由于颗粒破碎对土体的力学、渗透等特性存在影响,因此,有关颗粒破碎的分析方法及其影响因素、颗粒破碎对土体工程特性的影响等问题是近年来的研究热点之一^[121~131]。

1.3 主要研究内容

本书的研究内容如下:

- (1) 砂岩和泥岩的物理力学特性。
- (2) 砂泥岩颗粒混合料的压实特性。

- (3) 砂泥岩颗粒混合料的单向压缩变形特性。
- (4) 砂泥岩颗粒混合料的三轴强度变形特性。
- (5) 砂泥岩颗粒混合料的静止侧压力系数。
- (6) 砂泥岩颗粒混合料的各向异性渗透特性。
- (7) 砂泥岩颗粒混合料的固结-渗透耦合特性。

参 考 文 献

- [1] 重庆市地质矿产勘查开发总公司. 重庆市地质图(比例尺 1:500 000)[M]. 重庆:重庆长江地图印刷厂印制,2002.
- [2] Hamdani I H. Optimum moisture content for compacting soils one-point method[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,1983,109(2):232—237.
- [3] Blotz L R, Benson C H, Boutwell G P. Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,1998,124(9):907—912.
- [4] Rollins K M, Jorgensen S J, Ross T E. Optimum moisture content for dynamic compaction of collapsible soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998,124(8):699—708.
- [5] 中华人民共和国行业标准. 土工试验规程(SL 237—1999)[S]. 中华人民共和国水利部,1999.
- [6] 中华人民共和国国家标准. 土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)[S]. 国家质量技术监督局,中华人民共和国建设部,1999.
- [7] Bera A K, Ghosh A. Compaction characteristics of pond ash[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE,2007,19(4):349—357.
- [8] Saffih K H, Defossez P, Richard G, et al. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density[J]. Soils & Tillage Research,2009,105:96—103.
- [9] Holtz R D, Kovacs W D, Sheahan T C. An Introduction to Geotechnical Engineering[M]. 2nd ed. New Jersey:Prentice Hall, Inc.,2010.
- [10] 邓弟平. 砂泥岩混合颗粒料压实特性及颗粒破碎试验研究(硕士学位论文)[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [11] Wang J J, Zhang H P, Deng D P, et al. Effects of mudstone particle content on compaction behavior and particle crushing of a crushed sandstone-mudstone particle mixture[J]. Engineering Geology,2013,167:1—5.
- [12] Wang J J, Zhang H P, Liu M W, et al. Compaction behaviour and particle crushing of a crushed sandstone particle mixture[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering,2014,18(5):567—583.
- [13] Wang J J, Yang Y, Zhang H P. Effects of particle size distribution on compaction behavior

- and particle crushing of a mudstone particle mixture[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(4): 1159—1164.
- [14] Wang J J, Cheng Y Z, Zhang H P, et al. Effects of particle size on compaction behavior and particle crushing of crushed sandstone-mudstone particle mixture[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 12(73): 8053—8059.
- [15] Wang J J, Zhang H P, Deng D P. Effects of compaction effort on compaction behavior and particle crushing of a crushed sandstone-mudstone particle mixture[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2014, 51(2): 67—71.
- [16] ASTM. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading (ASTM D2435M-11)[S]. West Conshohocken, Pennsylvania, 2011.
- [17] Monkul M M, Önal O. A visual basic program for analyzing oedometer test results and evaluating intergranular void ratio[J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32: 696—703.
- [18] Alexandrou A, Earl R. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 71: 75—80.
- [19] Sánchez-Girón A, Andreu E, Hernanz J L. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, 48: 37—50.
- [20] Fritton D D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 678—684.
- [21] Assouline S. Modeling soil compaction under uniaxial compression[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1784—1787.
- [22] Lim Y, Miller G. Wetting-induced compression of compacted Oklahoma soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2004, 130(10): 1014—1023.
- [23] Gregory A S, Whalley W R, Watts C W, et al. Calculation of the compression index and pre-compression stress from soil compression test data[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 89: 45—57.
- [24] Fritton D D. Fitting uniaxial soil compression using initial dry bulk density, water content, and matric potential[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1262—1271.
- [25] Rucknagel J, Hofmann B, Paul R, et al. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 92: 213—220.
- [26] Cavalieri K M V, Arvidsson J, Silva A P D, et al. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 98: 17—26.
- [27] 朱文君, 张宗亮, 袁友仁, 等. 粗粒料单向压缩湿化变形试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2009(3): 99—102.
- [28] Tang A M, Cui Y J, Eslami J, et al. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils[J]. *Geoderma*, 2009, 148: 282—290.

- [29] Mesri G, Vardhanabhuti B. Compression of granular materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46: 369—392.
- [30] Keller T, Lamandé M, Schjning P, et al. Analysis of soil compression curves from iniaxial confined compression tests[J]. Geoderma, 2011, 163: 13—23.
- [31] Thibodeau S, Alamdari H, Ziegler D P, et al. New insight on the restructuring and breakage of particles during uniaxial confined compression tests on aggregates of petroleum coke[J]. Powder Technology, 2014, 253: 757—768.
- [32] An J, Zhang Y, Yu N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 145: 216—223.
- [33] 郝建云. 砂泥岩混合料压缩变形特性及 K_0 系数试验研究(硕士学位论文)[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [34] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1977, 103(GT5): 447—466.
- [35] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 316—321.
- [36] Fredlund D G, Xing A, Fredlund M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440—448.
- [37] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379—392.
- [38] 邵生俊, 王婷, 于清高. 非饱和土等效固结变形特性与一维固结变形分析方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1037—1045.
- [39] 魏松. 粗粒料浸水湿化变形特性试验及其数值模型研究(博士学位论文)[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [40] 张智. 粗粒料在湿化及等应力比下的特性研究(硕士学位论文)[D]. 成都: 成都科技大学, 1989.
- [41] 罗云华. 砂土路基湿化变形研究(硕士学位论文)[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [42] 王辉. 小浪底堆石料湿化特性及初次蓄水时坝体湿化计算研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 清华大学, 1992.
- [43] 保华富, 屈知炯. 粗粒料的湿化特性研究[J]. 成都科技大学学报, 1989(1): 23—30.
- [44] 王强, 刘仰韶, 傅旭东, 等. 砂土路基湿化变形和稳定性的可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 7—12.
- [45] 刘祖德. 土石坝变形计算的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 1—13.
- [46] 李广信. 堆石料的湿化试验和数学模型[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 58—64.
- [47] 殷宗泽, 赵航. 土坝浸水变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 1—8.
- [48] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 1—14.
- [49] 徐文杰, 胡瑞林. 循环荷载下土石混合体力学特性野外试验研究[J]. 工程地质学报, 2008,