

粗粒土的工程特性 及应用

CULTUDEGONGCHENG
TEXINGJIYINGYONG

郭庆国 著

黄河水利出版社

粗粒土的工程特性及应用

郭庆国 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是一本全面、系统论述粗粒土工程性质的专著。主要内容包括:粗粒土的工程分类与命名、压实特性及压实方法、抗剪强度特性及其测试方法、应力应变特性及其参数、渗透特性及渗流规律。本书可供水利、电力、铁路、交通、工业与民用建筑等行业的科研、设计和施工人员参考,也可供高等院校有关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

粗粒土的工程性质/郭庆国著. - 郑州:黄河水利出版社, 1999.2 重印

ISBN 7-80621-170-5

I. 粗… II. 郭… III. 土力学, 粗粒土-物理化学性质
IV. TU44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 03409 号

责任编辑:吕洪予

责任校对:王才香

出版发行:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层 邮编:50003

印 刷:郑州文华印刷厂



开 本:850mm×1168mm 1/32

印 张:11.125

版 别:1998 年 8 月 第 1 版

印 数:1201-2201

印 次:1999 年 1 月 郑州第 2 次印刷

字 数:280 千字

定价:25.00 元

前 言

粗粒土在自然界分布广泛、储量丰富。由于它具有压实性能好、透水性强、填筑密度大、抗剪强度高、沉陷变形小、承载力高等工程特性,因此在工程建设中得到了广泛应用。如用于建筑土石坝、铁路路基、桥梁墩台及处理软弱地基的砂石垫层等。随着粗粒土在工程建设中应用范围的逐渐扩大,对这类土的研究工作也逐步深入。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,仍是以天然休止角代替内摩擦角,粗粒土的工程特性不能充分反映出来,设计偏于保守,也不经济。60年代以后,陆续研制了大型直剪仪、大型三轴剪切仪、大型击实仪、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,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,提出了许多有实用价值的成果,并在工程建设中发挥了重要作用。

随着高土石坝、高层建筑物的发展及电子计算机的应用,为适应土工建筑物应力、应变分析的需要,粗粒土应力应变关系成为重点研究的内容。同时,对粗粒土强度特性的研究,也由一般平面问题转入高压状态和复杂应力状态,并出现了大型平面应变仪、大型真三轴仪等试验仪器设备。其研究成果为进行高土石坝应力应变分析发挥了积极作用。

由于大型土石方施工机械的发展、重型振动碾的应用,超径粗粒土在堆石坝中的应用越来越广泛,常规粗粒土试验仪器难以满足需要,研究者通过加大仪器尺寸、原位试验和利用模拟级配料代替原型级配料试验等途径进行研究,取得了许多有益成果。但受

测试方法和模拟理论研究的限制,对超径粗粒土工程特性的认识还有待进一步深入,更好地满足工程建设的需要。

粗粒土作为一种重要的工程材料,正在发挥着愈来愈重要的作用,但目前一些土力学专著和教科书,多是以细粒土为主要研究对象,即使涉及粗粒土的内容,也多限于砂土;虽然也有少量关于粗粒土的著作,但对粗粒土研究这门学科而言,仍缺乏系统、全面论述的专著。鉴于此,作者根据自己多年来从事粗粒土研究的成果和实践经验,吸收一些专家学者的研究成果,撰写成本书,力求较系统、全面地论述粗粒土的工程特性、测试方法和应用技术。由于作者工作条件的限制,本书的写作断断续续,各章具有一定的独立性,难免有重复之处。同时,由于作者学识所限,书中定有不妥甚至错误之处,敬请读者指正。

在本书编写过程中,曾得到刘杰、王正宏、谢定义、刘祖典、周子慎、余才渭、姚尧、吴剑明以及陕西土木建筑学会粗粒土学组、电力工业部西北勘测设计院科研所、黄委会勘测规划设计研究院物探总队等单位有关同志的关心和支持,李丕武提供了“堆石体密度测定的附加质量法”最新研究成果,崔琳对部分章节进行了校阅,郭翠莲描绘了部分插图,在此一并表示感谢。

作 者

1996年12月于黄河小浪底工程工地

目 录

第一章 粗粒土的工程分类与命名	(1)
第一节 粗粒土分类概况	(1)
第二节 影响粗粒土工程特性的主要因素	(10)
第三节 颗粒粒组的划分	(18)
第四节 粗粒土工程分类和命名	(23)
第二章 粗粒土的工程勘察和试验级配	(28)
第一节 粗粒土的工程勘察	(28)
第二节 取样方法	(30)
第三节 试验项目	(31)
第四节 代表性级配的选择	(33)
第五节 超径料的处理	(40)
第三章 粘性粗粒土的压实特性及压实方法	(44)
第一节 粘性粗粒土的特征	(44)
第二节 粘性粗粒土的室内压实方法	(45)
第三节 粘性粗粒土的压实特性	(55)
第四节 粘性粗粒土的现场压实方法和压实参数	(61)
第五节 粘性粗粒土的压实标准	(74)
第六节 粘性粗粒土压实质量控制指标及测定方法	(77)
第四章 无粘性粗粒土的压实特性及压实参数	(84)
第一节 无粘性粗粒土的压实特性及影响因素	(84)
第二节 室内压实方法——相对压实度试验	(95)
第三节 无粘性粗粒土的压实标准及压实质量 控制	(100)

第四节	压实方法与压实原理·····	(115)
第五节	无粘性粗粒土的压实方法和压实参数 实例·····	(121)
第五章	超径粗粒土最大干密度的确定·····	(130)
第一节	概述·····	(130)
第二节	模型级配系列延伸法简介·····	(132)
第三节	确定超径粗粒土最大干密度的渐近线辅助 拟合法·····	(141)
第四节	确定超径粗粒土最大干密度的三点近似测定 方法·····	(148)
第六章	粗粒土抗剪强度的测定方法·····	(161)
第一节	粗粒土的直接剪切试验·····	(162)
第二节	粗粒土的三轴剪切试验·····	(170)
第三节	粗粒土的平面应变试验和真三轴试验·····	(175)
第四节	粗粒土抗剪强度的几种原位测试方法·····	(177)
第五节	粗粒土抗剪强度测定方法简要评述·····	(185)
第七章	粗粒土的抗剪强度特性及其参数·····	(187)
第一节	颗粒性质、组成、含水量等对抗剪强度特性的 影响·····	(187)
第二节	从应力应变规律看粗粒土的抗剪强度 特性·····	(188)
第三节	$\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 关系的变化规律 ·····	(190)
第四节	从 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 和 $\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 对应关系看粗粒土 的抗剪强度特性·····	(191)
第五节	粗粒土的剪胀效应对孔隙压力及有效强度的 影响·····	(194)
第六节	粗粒土颗粒的剪碎性对强度特性的影响·····	(195)
第七节	强度包线的类型·····	(196)

第八节	粗粒土的抗剪强度关系式及其参数·····	(198)
第八章	粗粒土三轴剪切试验的几个技术问题·····	(206)
第一节	粗粒土三轴剪切试验的类型与应用·····	(206)
第二节	粗粒土三轴剪切试验中试样尺寸与试料粒径的 合理关系·····	(214)
第三节	三轴剪切试验中测定饱和土体变方法的分析与 改进·····	(225)
第四节	用一个试样三轴试验测粗粒土抗剪强度的 适用性·····	(232)
第九章	确定粗粒土抗剪强度的推滑平衡分析法·····	(243)
第一节	试验装置与测试方法·····	(243)
第二节	滑动土体分析中的几个问题·····	(245)
第三节	滑动土体的计算与分析·····	(246)
第四节	分析计算实例·····	(250)
第五节	结语·····	(253)
第十章	Duncan $E-\mu$ 模型参数的特点及其改进 ·····	(255)
第一节	Duncan $E-\mu$ 模型参数的特点 ·····	(255)
第二节	Duncan $E-\mu$ 模型的改进 ·····	(261)
第十一章	粗粒土的应力应变特性及其非线性参数·····	(270)
第一节	引言·····	(270)
第二节	$(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 关系的变化规律 ·····	(271)
第三节	$\epsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 关系的变化规律 ·····	(273)
第四节	割线模量 E_s 及其参数 ·····	(276)
第五节	$\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 及 $\epsilon_3 \sim \epsilon_1$ 关系的变化规律 ·····	(279)
第六节	割线泊松比及其参数·····	(282)
第七节	结语·····	(284)
第十二章	粗粒土的渗透特性及其渗流规律·····	(286)
第一节	粗粒土的渗透特性·····	(286)

第二节	粗粒土渗流规律的研究·····	(290)
第三节	粗粒土的渗流规律及渗透参数的确定·····	(301)
第四节	无粘性粗粒土的渗透稳定特性·····	(302)
第十三章	坝体堆石填筑中的加水问题及岩石质量·····	(314)
第一节	坝壳堆石填筑加水要求及有关工程实例·····	(314)
第二节	堆石坝的发展及堆石填筑加水·····	(316)
第三节	小浪底大坝堆石加水与不加水填筑对比 试验·····	(318)
第四节	土体的结构特性与水在土体压实中的 作用·····	(324)
第五节	坝体堆石岩石质量标准·····	(331)
第十四章	粗粒土在高层建筑黄土地基处理中的应用·····	(335)
第一节	某招待所主楼砂石垫层地基工程·····	(335)
第二节	能源中心高层建筑砂石垫层地基工程·····	(341)

第一章 粗粒土的工程分类与命名

随着水利水电工程设计能力、施工技术和材料试验水平的提高,粗粒土已成为土石坝的主要建筑材料,一般占坝体工程量的70%~90%。为了深入研究粗粒土的工程性质,充分利用这种天然材料,本章从当前粗粒土分类概况、影响粗粒土工程性质的主要因素及粒组划分标准等方面着手,研究粗粒土的工程分类和命名。

第一节 粗粒土分类概况

随着粗粒土的广泛应用,在粗粒土研究方面取得了许多优秀成果,也提出了不同的粗粒土分类方法,对粗粒土的评价及其在工程中的应用发挥了积极的作用。由于研究的角度不同,各种分类方法也存在一定的差异。

1. 按地质年代分类和命名

诸如分为第四纪砂卵石、砾石土,第三纪砂卵石、砾石土,以及按全新统(Q_4)、上更新统(Q_3)、中更新统(Q_2)、下更新统(Q_1)区分砾石层、砾石土、砂砾石等。

2. 按粗粒土的成因分类和命名

(1)对冰积而成的,分为冰积碎石土、冰积土石料、冰积角砾石等。

(2)对冲积而成的,分为冲积土石料、冲积砂砾石、冲积砾石土等。

(3)对洪积而成的,分为洪积土石料、洪积砂砾石、洪积砾石土等。

(4)对坡积而成的,分为坡积碎石土、坡积土石料、坡积砾石土等。

(5)对风化而成的,分为风化砂、风化土石料、风化石渣料等。

(6)对人工破碎而成的,分为人工砂、人工碎石料、人工粗骨料、人工细骨料等。

3. 按颗粒形状分类和命名

例如,对浑圆状颗粒,分为圆砾石、卵石、漂石、砾石土、砂卵石等;对棱角状颗粒,分为角砾石、碎石、块石、碎石土等。

4. 按颗粒级配组成情况分类和命名

如分为连续级配砂砾石、缺乏中间粒径砂砾石、优良级配砂砾石、不良级配砂砾石。

5. 按新鲜、软硬程度分类和命名

如分为新鲜石渣料、风化石渣料、坚硬堆石料、软弱岩石料等。

6. 按细粒含量或细粒特性指标分类和命名

(1)原黄委会地质处曾对砂卵石按 $d < 2\text{mm}$ 颗粒含量的多少进行分类和命名,见表 1-1。

表 1-1 砂卵石的分类^①

分类代号	分类名称	$d < 2\text{mm}$ 颗粒含量(%)
a ₁	含少量细粒的砂卵石	< 10
a ₂	含少量细粒的砂卵石	10~20
a ₃	含少量细粒的砂卵石	20~30
b	含中量细粒的砂卵石	30~45
c	含多量细粒的砂卵石	45~50
d	砂 砾	50~90
e	砂 砾	>90

^① 黄委会地质处. 陆浑水库拦河坝砂卵石料渗透变形试验研究, 1965.

(2)长江科学院土工室以粗粒土所含细粒土塑性指数的大小对砾石土进行分类和命名,见表 1-2。

表 1-2 砾石土的分类^①

分类名称	所含细粒土的塑性指数 I_p
粘性砾石土	>17
砂性砾石土	<17

7. 按颗粒组成分类和命名

(1)原水电部昆明勘测设计院科研所对砾质土的分类和命名见图 1-1^②。

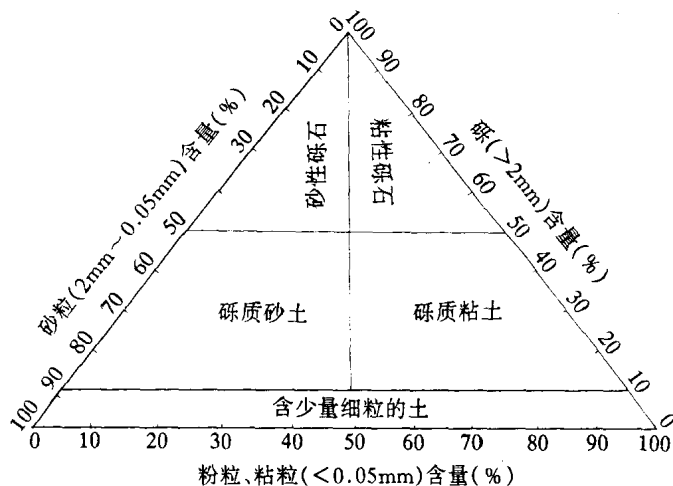


图 1-1 砾质土的分类

(2)郭庆国对粗粒土的分类和命名见表 1-3^[1]。

(3)司洪洋对土石料的分类和命名,见表 1-4^[2]。

① 长江科学院土工室等. 砾石土的试验研究, 1977.

② 水电部昆明勘测设计院科研所. 砾质土的试验研究, 1971.

表 1-3

粗粒土的分类

分类名称		粗料($d > 5\text{mm}$) 含量 P_5 (%)	$d < 0.1\text{mm}$ 颗粒 含量 (%)
类	亚 类		
砾质土	粘性砾质土	$P_5 \leq 30$	> 20
	砂性砾质土	$P_5 \leq 30$	$10 \sim 20$
	砾质砂	$P_5 \leq 30$	< 10
砂砾(碎)石	粘性砂砾(碎)石	$30 < P_5 \leq 70$	> 20
	含泥砂砾石	$30 < P_5 \leq 70$	$10 \sim 20$
	砂砾石	$30 < P_5 \leq 70$	< 10
砾(碎)石	砾石	$P_5 > 70$	

8. 有关规程规范中粗粒土的分类和命名

(1)《土工试验规程》(1962 年)。该规程中除对土石料按粒径分组外,还对粘粒含量小于 3%、粉粒含量小于 20% 的砂土进行了分类和命名,见表 1-5。对土中砾石含量大于 10% 的砾质土有如图 1-2 所示的分类和命名,对砾石的分类见表 1-6。

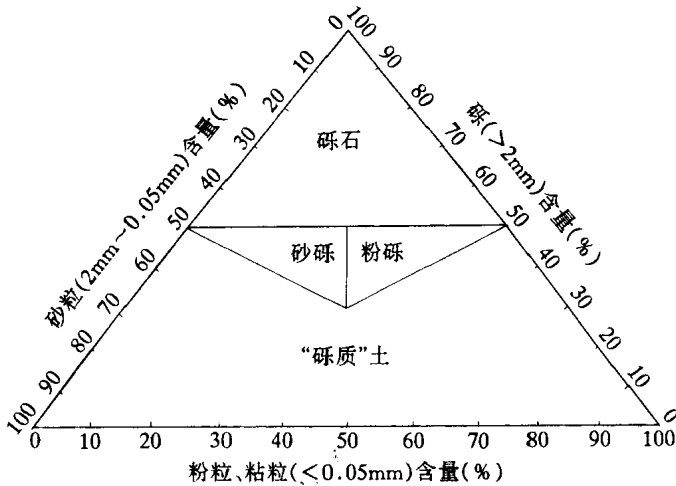


图 1-2 砾质土的分类

土石料的分类

表 1-4

分类标准									
大 类	分 类 符 号	典型名称	颗 粒 组 成 (%)					C_u	C_c
			>300mm	300mm ~ 60mm	<60mm	<5mm	<0.1mm		
石 料 ($d > 60\text{mm}$ 颗粒含量不 小于 50%)	漂石 (块石) ($d > 300\text{mm}$ 颗粒占 优势)	优良级配漂石(块石) 不良级配漂石(块石) 漂石夹□ □质漂石 □质漂石夹□	> 50 > 50 > 50 < 50 < 50		< 60mm < 5mm > 5 < 5 > 5	< 5 < 5 > 5 < 5 > 5		> 5 < 5	1~3 < 1或>3
	卵石 (碎石) (60mm ~ 300mm 颗粒占 优势)	优良级配卵石(碎石) 不良级配卵石(碎石) 卵石夹□ □质卵石 □质卵石夹□	≥ 50 ≥ 50 ≥ 50 < 50 < 50		< 5 < 5 > 5 < 5 > 5	< 5 < 5 > 5 < 5 > 5		> 5 < 5	1~3 < 1或>3
土 料 ($d > 60\text{mm}$ 颗粒 含量小于 50%)	E	"土"			< 5				
	E·B(E·R)· EB(ER) E·B(F·R)·	"土"(无细粒土)夹□ □质"土" "土"(有细粒土)夹□			5~15 15~50 5~50		< 5 < 5 > 5		

注 * 二者差别在于"土"的名称。

表 1-5

砂的分类

土 名	砂粒含量(%)			
	>0.5mm	>0.25mm	>0.1mm	>0.05mm
粗砂	>50			
中砂		>50		
细砂			>75	
极细砂				>75

表 1-6

砾石分类

土 名	砾石含量(%)		
	>20mm	>10mm	>2mm
卵石及碎石	>50		
粗砾		>50	
细砾			>50

(2)《土工试验规程》(SD-128-84)中有关粗粒土的分类和命名如表 1-7 所示。

(3)美国统一粗粒土分类法,为美国陆军工程师兵团、垦务局、材料试验学会和其他部门所采用。这种方法将土划分为两大类,其中将 $d > 0.075\text{mm}$ 颗粒含量大于 50% 的土石料称为粗粒土。此类粗粒土的分类列于表 1-8 内^[3]。

(4)美国公路工作者协会关于粗粒土的分类^[3]。该分类主要是按承载力划分的,其中粒状材料(粗粒土)部分分为 A_1 、 A_2 、 A_3 三类,如表 1-9 所示。

(5)法国道路、堤坝压实规范中有关粗粒土的分类如表 1-10 所示^[3]。

表 1-7

粗粒土的分类和命名

目 测 项 目			分类符号	分类典型名称
砾 占粗粒 一半以上	砾 (不含细粒)	粒径范围广,有相当数量中间粒径 一种粘径占优势,缺乏中间粒径	GW GP	良好级配砾 不良级配砾
	微含细 粒土砾	细粒为粉土,占 5%~15% 细粒为粘土,占 5%~15%	G-M G-C	微含粉质土砾 微含粘质土砾
	含细粒 土砾	细粒为粉土,占 15%~50% 细粒为粘土,占 15%~50%	GM GC	含粉质土砾 含粘质土砾
砂 占粗粒 一半以上	砂 (不含细粒)	粒径范围广,有相当数量中间粒径 一种粒径占优势,缺乏中间粒径	SW SP	良好级配砂、砾质砂 不良级配砂、砾质砂
	微含细 粒土砂	细粒为粉土,占 5%~15% 细粒为粘土,占 5%~15%	S-M S-C	微含粉质土砂 微含粘质土砂
	含细粒 土砂	细粒为粉土,占 15%~50% 细粒为粘土,占 15%~50%	SM SC	含粉质土砂 含粘质土砂

注 ①粗粒土最大粒径为 60mm;②砾指 $d=2\text{mm}\sim 60\text{mm}$ 颗粒;③砂指 $d=0.05\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 颗粒;④粗粒指 $d=0.1\text{mm}\sim 60\text{mm}$ 颗粒;⑤细粒指 $d<0.1\text{mm}$ 颗粒;⑥ $d=0.1\text{mm}\sim 60\text{mm}$ 颗粒含量(质量比)大于 50% 的土石混合料称为粗粒土, $d<0.1\text{mm}$ 颗粒含量大于 50% 的土石混合料为细粒土。

表 1-8 美国统一粗粒土分类法 (USCS)

类 别		符 号	分 类 标 准
砾石 (粗料含量 $\geq 50\%$)	洁净砾石 (不含或含少量细粒)	GW	良好级配砾石, 不含或含少量细粒的砂、砾石混合料
		GP	不良级配砾石, 不含或含少量细粒的砂、砾石混合料
	含细粒砾石	GM	粉质砾石, 不良级配的砾石、砂、粉土混合料
		GC	粘质砾石, 不良级配的砾石、砂、粘土混合料
砂 (粗料含量 $< 50\%$)	洁净砂 (不含或含少量细粒)	SW	良好级配砂, 不含或含少量细粒的含砾砂
		SP	不良级配砂, 不含或含少量细粒的含砾砂
	含细粒砂	SM	粉土质砂, 不良级配砂、粉土混合料
		SC	粘土质砂, 不良级配砂、粘土混合料

注 粗料为 $d > 4.75\text{mm}$ 颗粒; 粗粒为 $d > 0.075\text{mm}$ 颗粒; 细粒为 $d < 0.075\text{mm}$ 颗粒。

表 1-9 美国公路工作者协会粗粒土(粒状料)分类(AASHTO)

分类编号	小于某粒径颗粒含量(%)			主要材料成分
	$< 2\text{mm}$	$< 0.42\text{mm}$	$< 0.075\text{mm}$	
$A_1 - a$	≤ 50	≤ 30	≤ 15	块石、砾石、砂
$A_1 - b$		≤ 50	≤ 25	块石、砾石、砂
A_2			≤ 35	粉粘质砂
A_3		≤ 51	≤ 30	细砂