

粗粒料试验缩尺效应的分析研究

武利强¹, 朱 晟², 章晓桦¹, 陈文亮¹

(1. 浙江省水利河口研究院 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江 杭州 310020;

2. 河海大学 水工结构研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 为了对粗粒料缩尺效应有全面的认识, 对粗粒料缩尺效应的表现形式进行了系统地阐述, 可分为密实度缩尺效应和力学特性缩尺效应。以此为准, 整理了前人的研究成果, 并总结了缩尺效应的表现规律。密实度缩尺效应规律为: 最大粒径越大, 则最大或最小干密度越大, 且这种规律与缩尺方法无关。此规律可从级配、颗粒形状及压实功 3 个方面进行解释。力学特性缩尺效应规律为: 同一干密度制样标准下, 抗剪强度和变形模量均随最大粒径增大而减小, 这可从密实度和颗粒强度两个方面进行解释; 但同一相对密度制样标准下, 力学特性缩尺规律不统一, 机制不清晰, 需进行进一步地研究。

关 键 词: 粗粒料; 缩尺效应; 密实度; 力学特性; 制样标准

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 08-2187-11

Analysis of scale effect of coarse-grained materials

WU Li-qiang¹, ZHU Sheng², ZHANG Xiao-hua¹, CHEN Wen-liang¹

(1. Zhejiang Key Laboratory of Hydraulics Disaster Prevention and Mitigation, Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou, Zhejiang 310020, China; 2. Institute of Hydraulic Structures, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: To understand scale effect of coarse-grained materials, the forms of scale effect are systematically clarified. The scale effect is divided into dense degree scale effect and mechanical properties scale effect. We analyze results of previous studies and summarize the performance of the law. The scale effect of dense degree is that the maximum or minimum dry density increases with the growth of the maximum diameter, which is regardless of scale methods. The law can be explained in terms of gradation, particle shape and compaction energy. With regard to the scale effect of mechanical properties, for the specimens with the same dry density, both shear strength and modulus decrease with the increase of the maximum diameter, which is resulted from compaction degree and particle strength. However, under the criterion of the same relative density, the law of scale effect of mechanical properties is unclear, and thus further studies need to be conducted.

Keywords: coarse-grained materials; scale effect; dense degree; mechanical characteristics; sample preparation criteria

1 引 言

现代堆石坝的发展机遇源于重型振动碾的出现, 其不同于早期堆石坝的一个显著特点就是堆石体的密实度大大提高, 使得坝体变形量明显减小, 改善了面板的受力状态, 因而避免了面板裂缝的出现, 使大坝得以正常运行。自 20 世纪 80 年代起, 面板堆石坝得到了迅速发展, 尤其是在我国, 100 m 级、200 m 级高坝相继建成, 并投入运行^[1], 发挥了巨大的效益。

然而, 随着坝高的增加, 原有筑坝技术的局限性逐步体现出来, 尤其是将 100 m 级筑坝技术直接应用到 200 m 级坝时, 大坝在运行中出现了一些新的问题, 典型的有面板水平或斜向裂缝、竖直缝挤压破坏、垫层料裂缝、面板脱空以及渗漏量偏大等。典型案例有我国的天生桥一级面板堆石坝 (最大坝高 178 m) 和墨西哥的阿瓜密尔帕面板堆石坝 (最大坝高 187 m)^[2-4]。周建平^[5]、蒋国澄^[2]、徐泽平^[4]、郇能惠^[6]、马洪琪^[7]、曹克明^[8]等对 200 m 级面板坝筑坝理念进行了阐释, 指出了 200 m 及以上超高坝

收稿日期: 2015-01-27

基金项目: 浙江省水利河口研究院博士后基金 (质检 A15001); 浙江省水利厅科技计划项目 (No. RC1505)。

This work was supported by the Postdoctoral Foundation of Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary (A15001) and the Science and Technology Program of Water Resources Department of Zhejiang Province (RC1505).

第一作者简介: 武利强, 男, 1985 年生, 博士后, 主要从事土石坝工程及工程材料方面的研究工作。E-mail: wuliqiang001@126.com

通讯作者: 朱晟, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土石坝方面的研究工作。E-mail: szhu@hhu.edu.cn

的关键技术在于不同分区的变形协调控制。而缩尺效应是影响坝体变形的一个十分重要的因素。

缩尺效应可定义为：现场原级配筑坝料和室内缩尺试验料之间物理力学性质的差异，表现为物理力学性质的尺寸相关性。缩尺效应是堆石坝中一种无法避免的工程现象，尤其是在高坝中，现场筑坝料最大粒径可达 800~1 000 mm，而室内试验料最大粒径仅 60 mm，二者相差十几倍之多，缩尺效应更加明显，表 1 列出了根据室内力学试验参数计算的坝体沉降值与原型监测值，可见二者差别十分显著。

表 1 已建 200 m 级高面板坝的最大铅直向变形^[9]
Table 1 The maximum vertical deformation of built 200 m rockfill dams^[9]

坝体	基于室内三轴试验的计算值 / cm	原型监测值 / cm
天生桥一级	124.0~205.0	347.0
洪家渡	75.9	142.0
三板溪	80.0	156.0
水布垭	135.0~184.0	244.0

以往虽然有许多研究者对缩尺效应问题进行了研究，但均缺乏系统性，对堆石料缩尺效应的认识仍存在不明确的地方。本文将已有的研究成果进行了整理和分类，并对其规律性进行总结。在此基础上，进一步探讨了缩尺效应研究结论多样化的深层次原因。

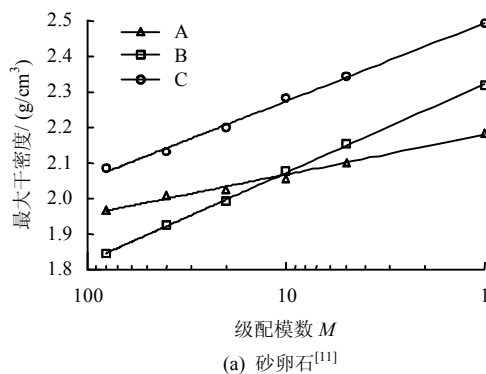
2 密实度缩尺效应表现形式及规律

密实度是堆石坝中的一个重要指标，目前堆石坝设计规范^[10]中明确规定了密实度是堆石坝设计、施工的控制指标。室内试验的制样标准也是通过密实度来控制的，因此，密实度也间接影响了筑坝料的力学性质。所以密实度的缩尺效应是一个不容忽视的问题，本节分别对不同缩尺方法的密实度缩尺效应规律进行研究。

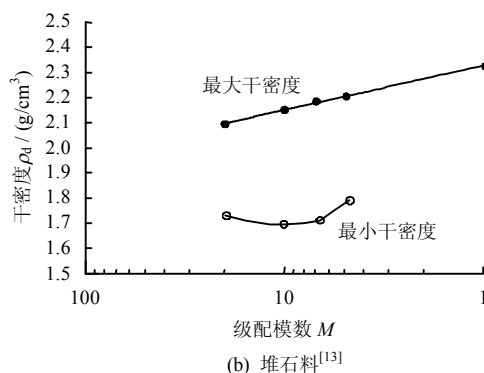
2.1 相似级配法

史彦文^[11-12]以石头河土石坝为工程背景，对砂卵石的密实度缩尺效应进行了研究。A、B、C 分别代表 3 条原级配曲线（最大粒径为 800 mm），采用相似级配法缩尺，缩尺级配最大粒径分别为 5、10、20、40、80 mm。采用振动台法，获得最大干密度，试验结果见图 1(a)（图中级配模数 M 定义为原级配最大粒径与缩尺料最大粒径之比）。研究表明，最大干密度与缩尺级配最大粒径密切相关，二者在半对数坐标系中呈线性关系。冯冠庆等^[13]对某工程堆石

料的干密度缩尺问题进行了研究，采用相似级配法缩尺，振动台法获取最大干密度。得到了与史彦文类似的结论，即最大干密度与最大粒径在半对数坐标系中呈线性关系，见图 1(b)。由此可见，采用相似级配法缩尺时，缩尺料的最大干密度要小于原级配料的最大干密度。



(a) 砂卵石^[11]



(b) 堆石料^[13]

图 1 相似级配法密实度缩尺效应

Fig.1 Scale effect of density with a similar grading method

2.2 剔除法

朱崇辉等^[14]采用剔除法，对超粒径粗粒土最大干密度进行研究。试验用料来自杨凌滨河路路基土（简称杨凌土料）、西安市黑河大坝坝壳料超粒径粗粒土料（简称黑河土料）和新疆下坂底土料（简称下坂底土料），原级配最大粒径分别为 250、300、300 mm，缩尺后最大粒径为 100、80、60、40、20 mm。作者将最大粒径的影响转化为剩余量（即总量减去超径量）的影响，见图 2。由图可见，最大干密度随剩余量增大而增大，而剩余量和最大粒径正相关，因此，最大干密度随最大粒径增大而增大。

2.3 等量替代法

田树玉等^[15]同样以石头河土石坝为工程背景，对砂卵石的密实度缩尺效应进行研究。采用等量替代法进行缩尺。以不同砾石含量 P_5 为代表性级配进

行缩尺, 缩尺料最大粒径分别为 20、40、60、80 mm。采用振动台法获取最大干密度, 结果见图 3。由图可见, 在相同砾石含量 P_5 时, 最大干密度随着最大粒径的增大而增大。

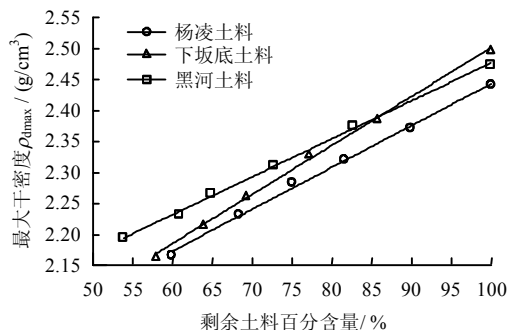


图 2 剔除法密实度缩尺效应^[14]

Fig.2 Scale effect of density with the exclusion method^[14]

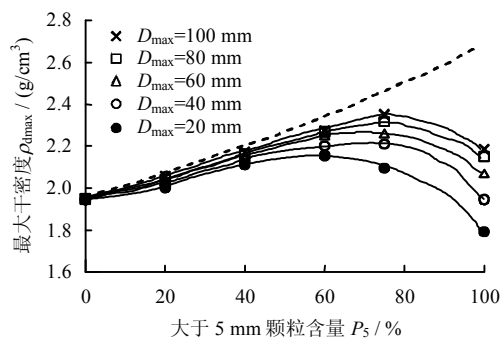


图 3 等量替代法密实度缩尺效应^[15]

Fig.3 Scale effect of density with the equivalent substitution method

2.4 混合法

翁厚洋^[16]对双江口主堆料密实度缩尺效应进行了研究。分别采用剔除法、相似级配法、等量替代法和混合法进行缩尺。缩尺料最大粒径为 60、40、20、10 mm。最大和最小干密度与最大粒径的关系见图 4。由图可见, 基本上密实度与最大粒径呈正相关的关系, 即最大粒径越大, 干密度就越大。

3 力学性质缩尺效应表现形式及规律

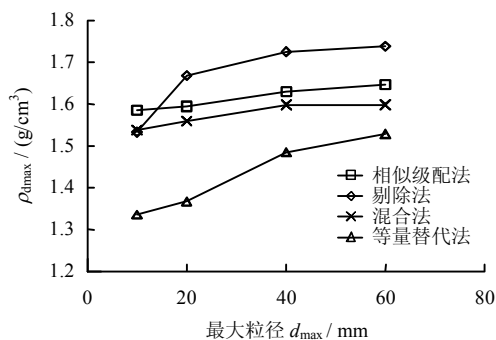
3.1 抗剪强度缩尺效应

3.1.1 同一干密度制样标准

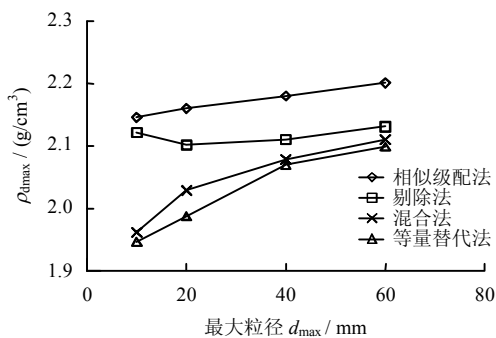
同一干密度制样标准指的是不同试样进行试验时, 制样干密度保持一致。

Marsal^[17]采用超大型三轴仪 ($\phi = 1\ 130\text{ mm}$) 对 EI Infiernillo 坝堆石料进行了研究, 允许的颗粒最大尺寸可达 200 mm。为了研究缩尺效应, 同时进行了小尺寸颗粒试验, 仪器 $\phi = 200\text{ mm}$, 允许最大颗粒尺寸为 40 mm。两个试验材料相同, 级配相

似, 采用相同初始干密度。抗剪强度以强度包线形式表示, 见图 5。可见, 在同一干密度下, 颗粒尺寸越大, 抗剪强度越低。



(a) 最小干密度



(b) 最大干密度

图 4 不同缩尺方法时密实度缩尺效应^[16]

Fig.4 Scale effect of density with different scale methods

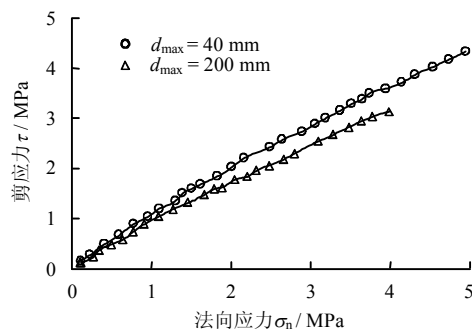


图 5 同一干密度条件下抗剪强度缩尺效应^[17]

Fig.5 Scale effect of shear strength under the same dry density condition^[17]

Marachi 等^[18]采用大型三轴仪对 3 种堆石料分别进行了不同尺寸下的三轴排水剪切试验。仪器尺寸直径分别为 915、305、71 mm, 颗粒最大尺寸分别为 151、51、12 mm, 径径比为 6。级配采用相似级配, 同一干密度制样。峰值内摩擦角见图 6。得出与 Marsal 一致的结论, 即同一干密度下, 颗粒尺寸越大, 峰值内摩擦角越小, 即抗剪强度越低。

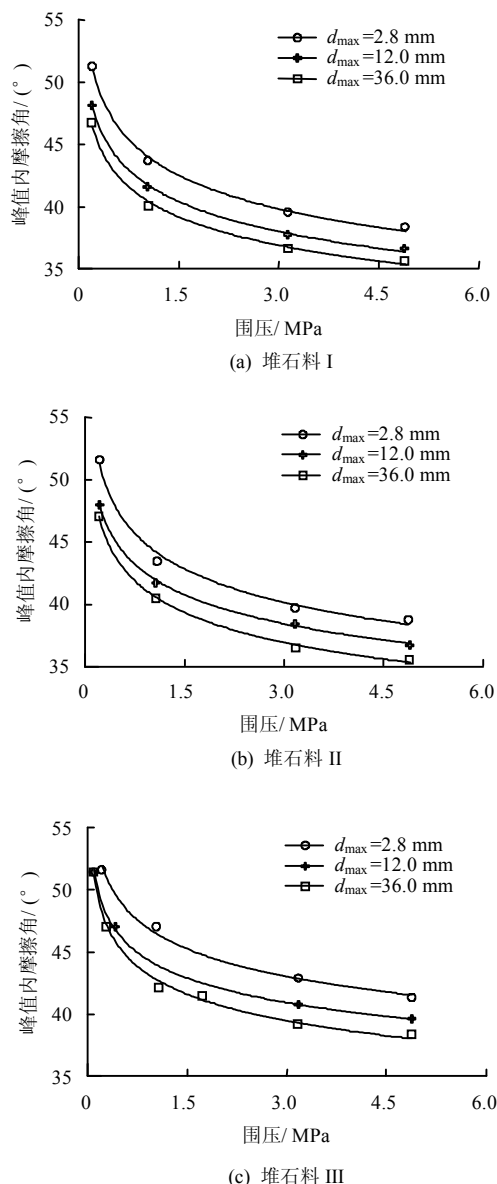


图 6 同一干密度条件下峰值内摩擦角缩尺效应^[18]
Fig.6 Scale effect of the maximum internal friction angle under the same dry density condition^[18]

3.1.2 同一相对密度制样标准

同一相对密度制样标准指的是不同试样试验时保持一致的相对密度, 此时干密度往往就不相同。

邵能惠等^[19]对小浪底过渡料进行了不同尺寸的三轴剪切试验。采用相似级配法缩尺, 三轴试验颗粒最大粒径分别为 120、80、60、40 mm, 制样标准为同一相对密度(通过压实功控制)。各参数与颗粒最大粒径关系见图 7, 图中, SA 代表设计级配上限, SB 为设计级配下限, TC 为平均级配。由图可见, 随着颗粒最大粒径的增大, 抗剪强度增大。

王永明等^[20]采用 DEM 数值模拟手段, 对理想化的圆颗粒, 在不考虑破碎的情况下, 研究了混合级配下的尺寸效应。采用同一相对密度制样。颗粒最大粒径分别为 20、40、60、100、140、180 mm。

结果表明, 随着最大粒径的增大, 内摩擦角也变大, 见图 8。

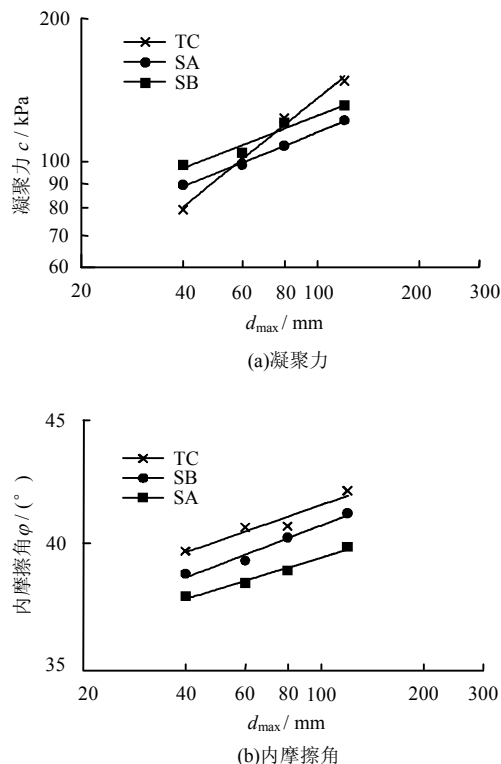


图 7 同一相对密度下小浪底过渡料抗剪强度缩尺效应^[19]
Fig.7 Scale effect of c and ϕ under the same relative density condition^[19]

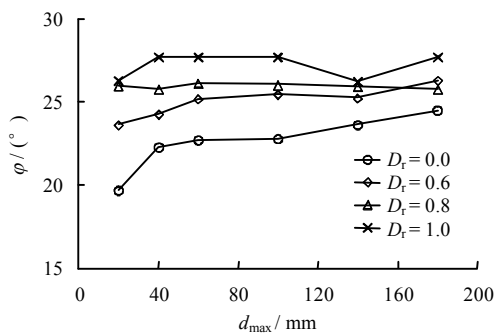


图 8 不破碎情况下内摩擦角缩尺效应^[20]
Fig.8 Scale effect of ϕ without particle breakage

3.1.3 关于抗剪强度缩尺效应的其他观点

除了上述观点外, 关于粗粒料抗剪强度缩尺效应还有下述几个观点, 现进行简要总结分析。

(1) 无论是同一相对密度, 还是同一干密度, 粒径越大, 抗剪强度越高^[21-22]。经过分析发现, 这些文献中不同试样的颗粒最大粒径不变, 改变的仅是加权平均粒径。结论中的粒径指的是加权平均粒径。在最大粒径不变的情况下, 加权平均粒径增大意味着粗粒含量的增多, 细粒含量的减少, 因此,

强度会有增长。

(2) 相比变形, 缩尺效应对抗剪强度影响很小^[23-24]。其中文献[24]中的缩尺效应指的是仪器尺寸效应, 即径径比的影响, 与本文的缩尺效应不同。抗剪强度差别较小的机制目前仍不明确, 可能是密实度、级配特性、颗粒形状、颗粒粗糙度、颗粒破碎等多个因素综合作用的结果。

(3) 同一干密度制样, 最大粒径越大, 强度越大^[25]。持这种观点的很少, 仅在文献[25]中涉及到。分析发现, 不同粒径试样二者的试验条件并不一致, 较大粒径试样的加载速率较大, 径径比较小, 这均可导致抗剪强度偏大, 因此, 结论的可靠性值得商榷。

3.2 变形特性缩尺效应

相比抗剪强度缩尺效应的研究, 堆石料变形缩尺效应的研究比较少。从已发表的文献来看, 规律并不明显且不一致。本节从邓肯本构模型参数和体积压缩模量两个方面进行论述。

3.2.1 邓肯本构模型参数

利用现场大型压缩试验(见表 2、4)和现场承载板试验(见表 3、5)成果, 采用基于免疫遗传算法的位移反分析法(原理见图 9), 以沉降变形作为目标值, 确定现场试验料的邓肯 E-B 模型参数。为了研究缩尺情况, 同时在室内进行常规三轴剪切试

验, 制样标准采用同一干密度控制。现场承载板试验为原级配料, 最大粒径为 800 mm; 现场大型压缩试验料最大粒径为 200 mm, 采用等量替代法缩尺; 室内常规三轴剪切试验料最大粒径为 60 mm, 采用混合法缩尺。限于篇幅, 不再对参数计算过程做详细说明, 仅将结果列于表 2~5 中。

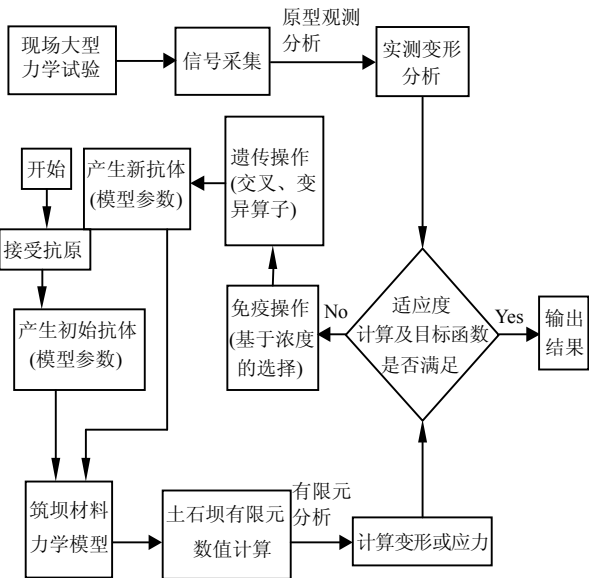


图 9 基于免疫遗传算法的位移反分析法原理
Fig.9 Theory of displacement back-analysis based on IGA

表 2 三板溪筑坝料 E-B 模型参数
Table 2 Parameters of E-B of Sanbanxi rockfills

位置	材料编号	最大粒径 / mm	缩尺方法	干密度 / (g/cm ³)	K	n	K_b	m	破坏比 R_f
上游堆石	八-3	200	等量替代	2.10	1 160	0.38	501	0.07	0.87
	八-4	200	等量替代	2.15	1 361	0.49	428	0.19	0.94
	八-5	200	等量替代	2.18	1 388	0.54	648	0.19	0.93
	室内	60	混合法	2.13	1 095	0.20	182	0.33	0.79
下游堆石	八-2	200	等量替代	2.15	1 200	0.49	480	0.14	0.89
	八-1	200	等量替代	2.05	816	0.41	438	0.04	0.74
	室内	60	混合法	2.15	790	0.58	467	0.09	0.84
	溢洪道	60	混合法	2.13	650	0.36	158	0.33	0.79
	室内	200	等量替代	2.14	1 350	0.48	594	0.07	0.94
	室内	60	混合法	2.13	587	0.42	216	0.24	0.82

注: K 、 n 为初始模量参数; K_b 、 m 为体积模量参数。

表 3 公伯峡 E-B 模型参数^[26]
Table 3 Parameters of E-B of Gongboxia rockfills

试验用料	场地	最大粒径 / mm	缩尺方法	干密度 / (g/cm ³)	K	n	K_b	m	R_f
3BI 爆破料	室内	60	混合法	2.17	620	0.66	250	0.13	0.95
	现场	800	混合法	2.17	453	0.32	207	-0.12	0.78
3BII 砂砾石料	室内	60	混合法	2.34	1 000	0.48	500	0.34	0.86
	现场	800	混合法	2.34	1 698	0.29	675	0.21	0.87

表 4 潘口邓肯 E-B 模型参数^[27]
Table 4 Parameters of E-B of Pankou rockfills

试验编号	岩性	最大粒径 / mm	缩尺方法	孔隙率	K	n	K_b	m	R_f
现场 I	微风化副片岩	200	等量替代	0.18	919	0.35	203	0.03	0.53
室内 I		60	混合法	0.18	553	0.17	244	0.15	0.75
现场 II	弱风化正片岩	200	等量替代	0.22	720	0.34	305	0.17	0.77
室内 II		60	混合法	0.22	426	0.29	242	0.20	0.72
				0.18	693	0.31	336	0.17	0.82
现场 III	微风化硅质灰岩	200	等量替代	0.22	806	0.33	341	0.05	0.75
室内 III		60	混合法	0.22	795	0.24	395	0.06	0.78
				0.21	955	0.24	440	0.11	0.78
现场 IV	微风化硅质岩	200	等量替代	0.21	1 110	0.49	488	0.12	0.79
现场 V		100	相似级配	0.21	910	0.25	383	0.13	0.79
室内 V		60	混合法	0.21	930	0.26	442	0.11	0.82
				0.20	1 050	0.31	497	0.14	0.82

表 5 水布垭堆石料 E-B 模型参数^[9]
Table 5 Parameters of E-B of Shuibuya rockfills

岩性	编号	最大粒径 / mm	缩尺方法	孔隙率	K	n	K_b	m	R_f
茅口组灰岩	m01	800	混合法	0.22	1 161	0.260	606	0.09	0.79
	m02	800		0.20	1 231	0.296	636	0.15	0.77
	室内三轴	60		0.20	1 200	0.300	520	0.08	0.83
栖霞组灰岩	q01	800	混合法	0.20	1 099	0.348	394	0.03	0.76
	q02	800		0.18	1 069	0.339	424	0.02	0.77
	室内三轴	60		0.20	1 010	0.270	420	0.05	0.79

为进一步研究邓肯模型参数的缩尺效应,对现场和室内试验的参数进行了统计分析,见图 10。图中横坐标为室内缩尺试样的模型参数,纵坐标为现场试验的模型参数,虚线为现场和室内参数值相同的临界线。数据点位于临界线左上方,表明现场参数大于室内参数;反之亦然。

由图可以得到以下初步规律:

(1) 参数 K 、 n 的现场试验值大于室内试验值, K 、 n 为反映初始模量 E_i 的参数。说明现场试验料具有较高的初始模量。

(2) K_b 、 m 的现场试验值小于室内值, K_b 、 m 为反映体积模量 B_i 的参数。说明现场试验料的体积模量较低。

(3) R_f 基本分布在临界线附近,即现场试验值和室内试验值基本一致,没有明显的缩尺效应。

另外文献[19]对小浪底过渡料的邓肯 $E-\mu$ 模型参数缩尺效应进行了研究。采用相似级配法缩尺,缩尺试样最大粒径分别为 120、80、60、40 mm,制样标准采取同一压实功控制。研究发现:①大粒径试样的初始模量数 K 较大;②破坏比 R_f 缩尺效应较小;③其他参数规律不明显。

3.2.2 压缩模量

针对现场大型力学试验,也有研究者们将压缩模量作为指标,对缩尺效应进行分析。

高莲士等^[28]进行了现场大型压缩试验,仪器直径分别为 50 cm 和 132 cm,最大粒径分别为 100 mm 和 250 mm,采用相似级配法缩尺,同一孔隙率制样。结果表明,在孔隙率一致条件下,大尺寸试样破坏时的轴向应变比小尺寸大 80%~90%,大尺寸试样的压缩模量比小尺寸小很多。何积树等^[29]进行了现场压缩和室内压缩试验,得到了类似结论,认为同一干密度条件下,室内与现场的压缩模量比为 1.17~1.53。这些结论与 3.2.1 中现场大粒径试样体积模量较小的结论是一致的。然而,文献[19]采用同一压实功制样标准制样,则得到了完全相反的结论,发现随着粒径增大,试样压缩模量也逐渐增大。

4 讨 论

4.1 关于密实度缩尺效应的讨论

密度或压实的形成过程为:某一级配、一定形状的颗粒在一定压实功作用下,达到的密实状态。

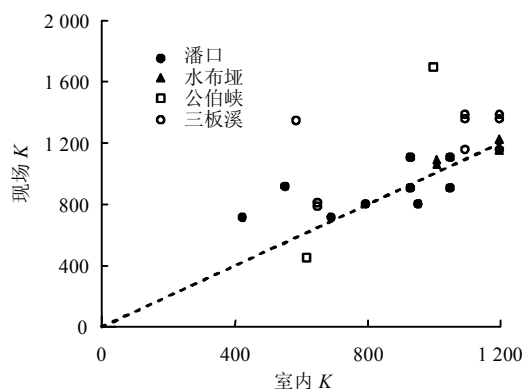
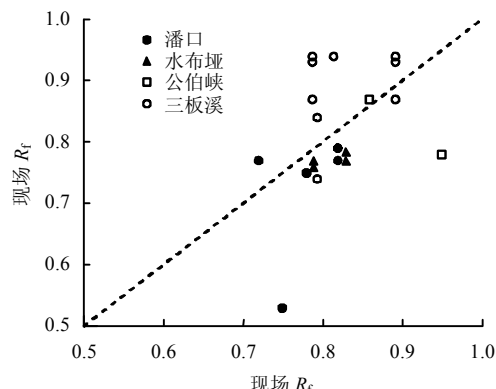
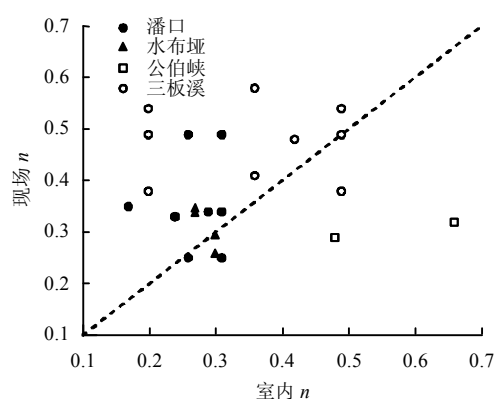
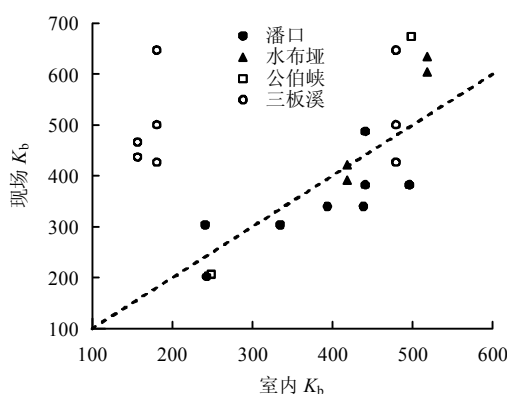
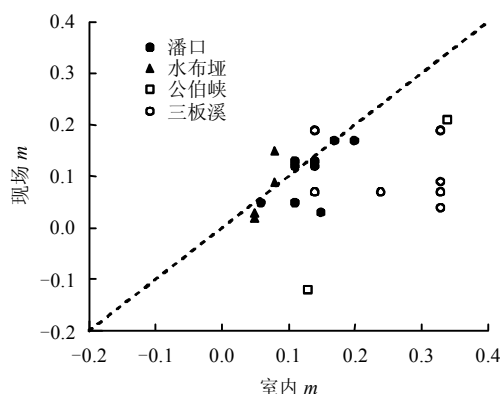
(a) K (e) R_f (b) n (c) K_b (d) m

图 10 E-B 模型参数统计规律

Fig.10 Statistical law of E-B model parameters

由此可见,影响密实度的有 3 个基本要素,为级配、颗粒形状和压实功。

4.1.1 级配

级配即不同粒径颗粒的组合比例,决定着散粒体材料的结构。因此,级配是影响压实度的主要因素。由第 2 节可知,采用规范推荐的 4 种缩尺方法,均表现出随着最大粒径增大,最大或最小干密度也增大的趋势。

相似级配法和剔除法均是全粒径范围内的缩尺。文献[30]已经证明,当级配符合 Talbot 曲线时,剔除法和相似级配法是一致的,均表现出与原型级配几何相似的特征,即不均匀系数和曲率系数一致。实际级配缩尺时,由于级配并不完全符合 Talbot 曲线,因此,剔除法的不均匀系数和曲率系数会有一定的差异。采用这两种缩尺方法时,密实度缩尺效应主要由颗粒形状和压实功决定,详见后文分析。等量替代法和混合法中超径颗粒仅由粗粒部分(粒径大于 5 mm)替代,这样就限制了细粒部分含量,造成缩尺试样不均匀系数减小,颗粒充填关系变差,没有足够的细料去充填粗颗粒形成的空隙,从而使干密度减小。

4.1.2 颗粒形状

对于筑坝料尤其是堆石料,颗粒形状复杂多变,不同料场、不同粒径的颗粒形状均不一致,因此,准确反映颗粒形状是难以完成的任务,但从数理统计角度进行总的趋势分析,图 11 给出了几个典型工程堆石料颗粒形状随粒径变化的情况。类圆度表征的是颗粒形状与圆形的接近程度,1 表示圆颗粒,值越大,则表示形状越不规则。轮廓分维数表征颗粒表面粗糙程度,值越小,说明颗粒表面越

光滑。由图 11 可知,随着粒径的增大,颗粒形状越接近于圆形,表面越光滑。这些均利于颗粒趋于密实状态。

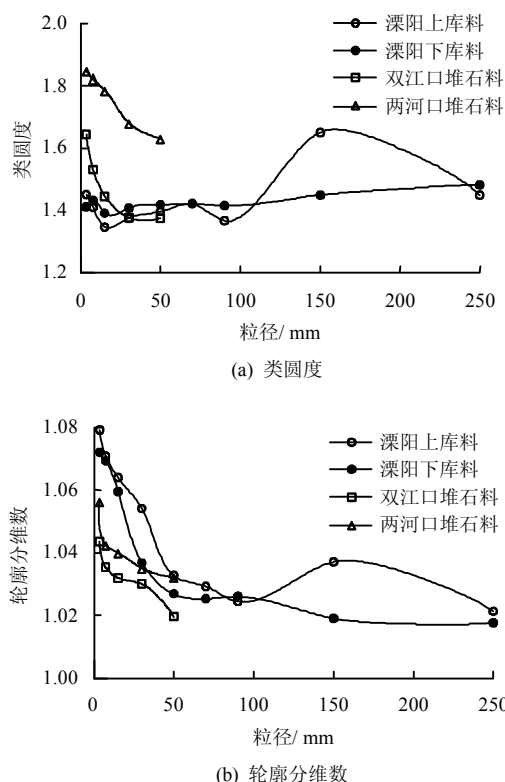


图 11 颗粒形状与粒径关系

Fig.11 Relationships between particle shape and diameter

4.1.3 压实功

级配和颗粒形状决定的是理论最大干密度,而在工程中实际获得的为实际最大干密度。压实过程中,颗粒位置发生重排,需要克服摩擦力等做功,这就需要外界能量的输入,压实功就是外界输入的能量,因此,从一定程度上讲,压实功决定了实际最大干密度的大小。

堆石坝碾压现场采用的是重型振动碾,而室内相对密度试验采用的则是振动台或振动器。二者之间的压实功或压实参数是不一致的。文献[13]表明,压实参数,如振动加速度、振幅、频率、附加荷重等对实际最大干密度有不可忽略的影响。文献[31]统计了不同工程压实能量与实际最大干密度之间的关系,二者近似符合双曲线。这表明压实功对实际最大干密度的影响是不可忽略的,然而目前研究较少,需要针对不同压实方式及不同压实参数的影响做进一步的研究。

4.2 关于力学特性缩尺效应的讨论

4.2.1 抗剪强度

抗剪强度缩尺效应研究较多,观点也不尽一致。

经过分析发现,同一干密度条件下,最大粒径越大,强度越低的观点在较多文献中得以体现。笔者认为,这一结论可从密实度和颗粒破碎两个方面进行解释:①颗粒尺寸越大的试样最大干密度就越大,当干密度一致时,尺寸大的试样相对密度就小,这表明试样比较疏松,必然会产生较小的抗剪强度和较大的变形;②文献[32-33]发现,颗粒尺寸越大,颗粒强度就越小,即越容易破碎,而颗粒破碎会降低抗剪强度。

同一相对密度条件下,强度可能会随着粒径增大而增大,但也可能会出现减小的情况。这主要是因为同一相对密度消除了密实度这一重要因素的影响,此时其他因素的影响就凸现出来,如颗粒形状、表面粗糙度、级配特性、颗粒破碎等,图 12 列出了影响粗粒料抗剪强度的因素,可见任何因素的改变,均可能导致研究结论的不同。目前,对这些因素随颗粒尺寸的变化规律尚不明确,因此,也有研究者得出了抗剪强度缩尺效应不明显的结论,这也是各类观点难以达成共识的根源所在。

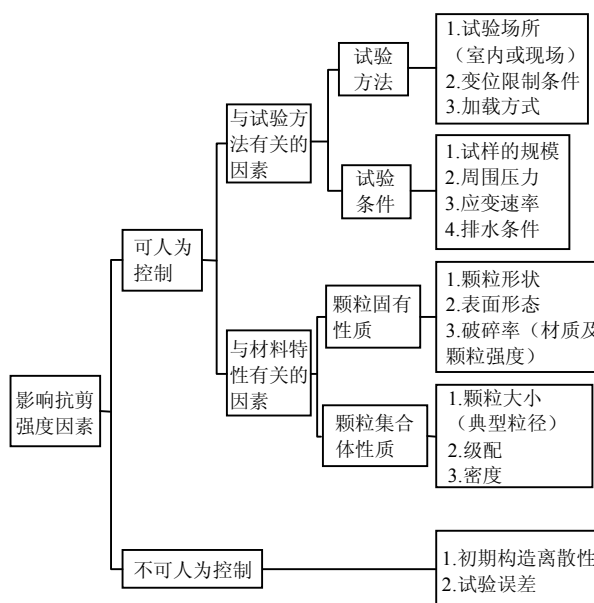


图 12 影响粗粒料抗剪强度的因素^[34]

Fig.12 Factors of shear strength of coarse-grained materials

4.2.2 变形特性

相对于抗剪强度,变形特性缩尺效应研究成果很少。或许是变形参数比较敏感,难以得出稳定、可靠的结论。通过 3.2 节的分析可见,确实存在上述现象,参数规律性较差。但模量数 K 和体积模量(或压缩模量)则表现出了比较明显的规律。文献[35]从细观角度推导了体积模量和剪切模量的表达

式为

$$B = \frac{\bar{m}}{2(1+e)\pi} k_n, G = \frac{\bar{m}}{4(1+e)\pi} (k_n + k_s) \quad (1)$$

式中: B 、 G 分别为体积模量和剪切模量; k_n 、 k_s 分别为颗粒法向和切向刚度; $\bar{m}$ 为配位数, 即一个颗粒周围与之接触的颗粒数; e 为孔隙比。

同一干密度条件(孔隙比 e 相同)下, 体积模量随着粒径增大而减小可以用式(1)进行解释。上文已经分析, 粒径大的试样相对密度较小, 此时试样较松, 周围与之接触的颗粒数必然减少, 即 $\bar{m}$ 较小, 而 k_n 取决于母岩特性, 对于同一料源, 可认为差别不大, 因此, 体积模量减小。而对于同一相对密度条件, 试样的密实程度一致, 可近似认为 $\bar{m}$ 相等, 此时粒径越大, 试样干密度就越大, 孔隙比 e 越小, 这就解释了粒径越大, 压缩模量越大的现象。而模量数 K 的变化规律也可用上述理论近似解释, 但同一干密度条件下, 模量数的变化规律则无法用上式解释, 需要更多的数据对此现象进行进一步的确认及解释。

总之, 变形特性缩尺效应研究成果较少, 得出的相关结论也需要得到进一步的证实。

4.2.3 关于今后缩尺效应研究的建议

影响粗粒料缩尺效应的因素很多, 简单、直接比较不同的研究结论是不合理的, 应明确结论的前提条件, 笔者认为, 以下因素相对重要, 应引起重视: ①制样标准, 包括同一干密度(或孔隙率)、同一相对密度、同一压实功等; ②母岩特性, 颗粒形状、是否易于破碎等; ③级配特性, 缩尺试样采用何种缩尺方法; ④试验条件, 不同粒径试样的径径比、加载速率等是否一致。

另外鉴于粗粒料缩尺效应影响因素的复杂性, 直接从常规的物理力学试验结果难以分辨各影响因素的影响机制, 这也是阻碍缩尺研究进展的一个重要根源。近年来离散元方法逐渐成熟, 并引入到土工领域, 其在粗粒料方面的适用性得到了很好地验证^[36]。利用数值试验可以弥补物理试验的不足, 针对某影响因素开展试验, 同时保持其他因素完全一致。同时试样不受仪器尺寸的限制, 可以进行连续系列尺寸的研究, 从而可以得到更可靠的规律。

5 结 论

(1) 堆石坝中密实度缩尺效应规律比较统一, 即无论采用哪种缩尺方法, 试样最大或最小干密度均表现出随着最大粒径增大而增大的规律。

(2) 同一干密度制样标准时, 抗剪强度和变形模量均随最大粒径增大而减小。这主要是因为相对密度和颗粒强度随着颗粒尺寸增大而减小。

(3) 同一相对密度制样时, 由于消除了密实度的影响, 其他因素的影响就凸现出来。由于因素的不确定性, 缩尺效应结论也不尽相同, 机制也难以解释。

(4) 数值试验可以有效弥补物理试验的不足, 可以作为研究缩尺效应的有效工具。

参 考 文 献

- [1] 杨泽艳, 周建平, 蒋国澄, 等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电, 2011, 37(2): 18—23.
YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping, JIANG Guo-cheng, et al. Development of concrete faced rockfill dam in China[J]. *Water Power*, 2011, 37(2): 18—23.
- [2] 蒋国澄. 特高混凝土面板堆石坝建设的思考[C]//中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会 2007 年学术年会暨高面板技术研讨会. 昆明: [出版者不详], 2007, 9—14.
JIANG Guo-cheng. The thinking on construction of extra-high concrete faced rockfill dams[C]//Professional Committee of Hydrological and Sediment of Chinese Society of Hydroelectric Engineering, 2007's Academic Annual Meeting & Symposium of High Concrete Faced Rockfill Dams. Kunming: [s. n.], 2007, 9—14.
- [3] 马洪琪, 曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[J]. 中国工程科学, 2007, 9(11): 4—10.
MA Hong-qi, CAO Ke-ming. Key technical issues related to super-high concrete slab dam[J]. *Engineering Sciences*, 2007, 9(11): 4—10.
- [4] 徐泽平, 邓刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1226—1234.
XU Ze-ping, DENG Gang. Development of high CFRD and key technologies for building super-high CFRD[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(10): 1226—1234.
- [5] 周建平, 杨泽艳, 陈观福. 我国高坝建设的现状和面临的挑战[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1433—1438.
ZHOU Jian-ping, YANG Ze-yan, CHEN Guan-fu. Status and challenges of high dam constructions in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(12): 1433

- 1438.
- [6] 酆能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1143—1150.
LI Neng-hui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(8): 1143—1150.
- [7] 马洪琪. 300 m 级面板堆石坝适应性及对策研究[J]. 中国工程科学, 2012, 13(12): 4—8.
MA Hong-qi. 300 m grade concrete faced rockfill dam adaptability and counter-measures[J]. **Engineering Sciences**, 2012, 13(12): 4—8.
- [8] 曹克明, 徐建军. 超高面板堆石坝设计原则探讨[J]. 水力发电, 2012, 38(1): 22—26.
CAO Ke-ming, XU Jian-jun. Design principles of very-high concrete face rockfill dam[J]. **Water Power**, 2012, 38(1): 22—26.
- [9] 朱晟, 梁现培, 冯树荣. 基于现场大型承载试验的原级配筑坝堆石料力学参数反演研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1138—1143.
ZHU Sheng, LIANG Xian-pei, FENG Shu-rong. Back analysis of mechanical parameters of naturally graded rockfill materials based on large-scale loading plate tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1138—1143.
- [10] 水电水利规划设计总院. DL/T 5016—2011 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
China Renewable Energy Engineering Institute. DL/T 5016—2011 Design specification for concrete face rockfill dams[S]. Beijing: National Energy Administration, 2011.
- [11] 史彦文. 大粒径砂卵石最大密度的研究[J]. 土木工程学报, 1981, 14(2): 53—58.
SHI Yan-wen. A study on maximum density of large sized sandy gravels[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1981, 14(2): 53—58.
- [12] 史彦文. 大粒径粗粒坝料填筑标准的确定及施工控制[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 78—93.
SHI Yan-wen. Determination of filling criteria of large grain-size coarse materials for dam and construction control[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(4): 78—93.
- [13] 冯冠庆, 杨荫华. 堆石料最大指标密度室内试验方法的研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 37—45.
FENG Guan-qing, YANG Yin-hua. Laboratory test methods for maximum index density of rockfill materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(5): 37—45.
- [14] 朱崇辉, 严宝文, 刘俊民, 等. 超粒径粗粒土最大干密度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4090—4094.
ZHU Chong-hui, YAN Bao-wen, LIU Jun-min, et al. Experimental study on maximum dry density of overdiameter coarse-grained earth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.2): 4090—4094.
- [15] 田树玉, 史彦文. 测定粗粒料最大密度之 HUMPHREY 公式的校正[J]. 水力发电学报, 1994, 13(1): 28—34.
TIAN Shu-yu, SHI Yan-wen. The modification of Humphrey Equation used to measure the maximum density[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 1994, 13(1): 28—34.
- [16] 翁厚洋. 粗粒料缩尺效应试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
WENG Hou-yang. Experimental study on scale effect of coarse-grained materials[D]. Nanjing: Hohai University, 2008.
- [17] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1967, 93(SM2): 1—14.
- [18] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.**, 1972, 97(SM1): 95—114.
- [19] 酆能惠, 朱铁, 米占宽. 小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学, 2001, 19(2): 39—42.
LI Neng-hui, ZHU Tie, MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi dam and scale effect[J]. **Water Resources and Power**, 2001, 19(2): 39—42.
- [20] 王永明, 朱晟, 任金明, 等. 筑坝粗粒料力学特性的缩尺效应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1799—1806, 1823.
WANG Yong-ming, ZHU Sheng, REN Jin-ming, et al. Research on scale effect of coarse-grained materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1799—1806, 1823.
- [21] HANNES R C. гравий косвенных сдвиг тестирование

- почвы[C]. МАТЕРНАДИ СИМПОЗИУМА ЛЮ МЕХАНИКА ГРУНТОВ. [S. l.]: [s. n.], 1953.
- HANNES R C. The strength of gravel indirect shear testing of soils[C]//The Symposium on rock and soil mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1953.
- [22] 孟宪麒, 史彦文. 石头河土石坝砂卵石抗剪强度[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 90—101.
- MENG Xian-lin, SHI Yan-wen. Shear strength of sandy-gravels in shitouhe river dam[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 5(1): 90—101.
- [23] FRASSONI A, HEGG U, ROSSI P P. Large-scale laboratory tests for the mechanical characterization of granular materials for embankment dams[M]. [S. l.]: ISMES, 1982.
- [24] 王继庄. 粗粒料的变形特性和缩尺效应[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 89—95.
- WANG Ji-zhuang. The deformation characteristics and scale effect of coarse-grained materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(4): 89—95.
- [25] 李凤鸣, 卞富宗. 两种粗粒土的比较试验[J]. 勘察科学技术, 1991, (2): 25—29.
- LI Feng-ming, BIAN Fu-zong. The comparison tests of two coarse-grained materials[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 1991, (2): 25—29.
- [26] 朱晟, 王永明, 胡祥群. 免疫遗传算法在土石坝筑坝粗粒料本构模型参数反演中的应用研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 961—966.
- ZHU Sheng, WANG Yong-ming, HU Xiang-qun. Application of immune genetic algorithm to back analysis for parameters in model of rockfill dam coarse grain material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 961—966.
- [27] WEI K M, ZHU S, YU X H. Influence of the scale effect on the mechanical parameters of coarse-grained soils[J]. **Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering**, 2014, 38(1): 75—84.
- [28] 高莲士, 蔡昌光, 朱家启. 堆石料现场侧限压缩试验解耦 K-G 模型参数分析方法及在面板坝中的应用[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6): 26—33.
- GAO Lian-shi, CAI Chang-guang, ZHU Jia-qi. An analysis method for uncoupled K-G model parameters in site confined compression test of rock-fill materials and its application on CFRD[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2006, 25(6): 26—33.
- [29] 何积树, 刘路平, 赵贱清, 等. 堆石料的现场压缩试验[J]. 中南水力发电, 2003, (1): 40—42.
- HE Ji-shu, LIU Lu-ping, ZHAO Jian-qing, et al. The field compaction test of rockfill materials[J]. **Water Power of Mid-South**, 2003, (1): 40—42.
- [30] 尤培波, 武利强, 宋师奇, 等. 缩尺方法的分形解释[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 37—39.
- YOU Pei-bo, WU Li-qiang, SONG Shi-qi, et al. Fractal decription of scale methods[J]. **Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)**, 2013, 35(4): 37—39.
- [31] 朱晟. 粗粒筑坝材料现场压实质量的控制标准研究[J]. 水力发电, 2011, 37(12): 22—26, 30.
- ZHU Sheng. Study on on-site compaction quality control standard of coarse-grained materials[J]. **Water Power**, 2011, 37(12): 22—26, 30.
- [32] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M, et al. One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength[J]. **Soils and Foundations**, 2001, 41(2): 39—51.
- [33] FROSSARD E, HU W, DANO C, et al. Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects[J]. **Geotechnique**, 2012, 62(5): 415—427.
- [34] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
- Japanese Soil Engineering Society. The field compaction of rockfill materials[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999.
- [35] 钟晓雄, 袁建新. 散粒体的微观组构与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(增刊): 39—48.
- ZHONG Xiao-xiong, YUAN Jian-xin. Microfabrics and constitutive relations of granular materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(Supp.): 39—48.
- [36] 王永明, 任金明, 武利强, 等. PFC 模拟筑坝粗粒料力学特性的有效性分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 72—75.
- WANG Yong-ming, REN Jin-ming, WU Li-qiang, et al. Research on effectiveness of PFC used in simulating coarse-grained material properties[J]. **Water Resources and Power**, 2012, 30(10): 72—75.