

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.08.020

不同级配粗颗粒材料动力特性试验研究

傅 华¹, 赵大海², 韩华强¹, 凌 华¹

(1. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 中国电建西北勘测设计院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 级配是粗颗粒材料最基本特征, 根据大量试验结果和长期积累的试验经验, 总结出了试验级配缩制的具体原则, 并基于粗颗粒材料中小于等于 5 mm 粒径含量变化, 分析了级配优劣对其充填关系的影响, 级配越优, 粗颗粒材料的充填关系越好, 粗颗粒材料能达到较大的干密度, 反之则越差, 粗颗粒材料也难以获得较大的干密度。级配的优劣对堆石料动力特性的影响在低围压状态下并不明显, 随着围压的升高, 级配优的堆石料动力特性指标明显变优; 砂砾料由于颗粒浑圆度较好, 级配的优劣对其动力特性的影响逐渐减弱。针对上述级配粗颗粒材料动力特性的影响规律, 对于高土石坝来说有必要采用级配优的粗颗粒材料作为坝体的填筑料, 通过其在高应力条件下力学性能的优势来控制坝体整体变形和提高其抗震性能。

关 键 词: 级配特性; 粗颗粒材料; 动力特性; 影响因素; 试验研究

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 08-2279-06

Experimental study of influence of gradation on dynamic properties of coarse aggregate

FU Hua¹, ZHAO Da-hai², HAN Hua-qiang¹, LING Hua¹

(1. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of Ministry of Water Resources,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 2. Power China Xibei Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Based on a large number of test results and accumulated test experiences, some specific principles of scale of test gradation are summarized. The influence of gradation situations in coarse aggregate on its filling relation is investigated based on the variation of the content of $P_{\leq 5}$, where $P_{\leq 5}$ is the aggregate with diameter ≤ 5 mm. It is shown that the more excellent the gradation is, the better the filling relation of the coarse aggregate is; and the coarse aggregate can reach a larger dry density; otherwise, the worse filling relation of the coarse aggregate makes it difficult to obtain a larger dry density. Under low confining pressure, the influence of gradation situations on dynamic properties of rockfill is not obvious; and with the increase of the confining pressure, the dynamic properties of rockfill with good gradation obviously become satisfactory. Owing to its good roundness of particles, the influence of gradation situations of sandy gravel on its dynamic properties gradually decreases. According to the above rules, for high earth-rock dams, it is necessary to adopt coarse aggregate with good gradation as dam materials; and the advantage of mechanical properties of the coarse aggregate under high stress may be employed to control the integrated deformation of dams and to increase their aseismic performance.

Keywords: gradation; coarse aggregate; dynamic property; influence factor; experimental study

1 引 言

级配是粗颗粒材料最基本特性, 不但影响其压实特性、渗透特性, 也是工程力学特性的主要影响因素之一。除了级配是否优良外, 描述级配还包括最大粒径、细颗粒含量 (小于等于 5 mm 粒径颗粒

含量 $P_{\leq 5}$) 和小于 0.075 mm 颗粒含量等要素, 在实践中控制好上述级配特征值, 粗颗粒材料碾压后一般能达到预想的渗透特性和力学特性。邴能惠^[1]、王继庄^[2]、饶锡保^[3]、傅华^[4-5]等研究了级配粗颗粒材料强度和变形特性的影响。目前认为, 当粗颗粒含量达到 60%~70%时, 粗、细颗粒形成最佳组

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (No. 91215301); 国家自然科学基金重点项目 (No. 51539006); 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 51309161)。

This work was supported by the Major Research Plan of National Natural Science Foundation of China (91215301), the Key Program of National Natural Science Foundation of China (51539006) and the Young Scholars of National Natural Science Foundation of China (51309161).

第一作者简介: 傅华, 男, 1977 年, 博士, 高级工程师, 主要从事粗颗粒土方面的试验研究。E-mail: 1220510567@qq.com

合,各部分强度得到充分发挥,抗剪强度为最大^[6],上述研究成果主要偏向于级配对粗颗粒材料静力特性方面的影响,而对于级配对其动力特性影响的研究目前开展的仍较少。考虑到室内试验由于设备尺寸的限制,需要对原级配进行缩尺,目前国内室内试验最大允许粒径一般均为 60 mm,因此,级配中小于等于 5 mm 粒径颗粒含量的大小对混合料的力学特性指标影响非常大,本文研究级配对粗颗粒材料动力特性影响,主要从分析 $P_{\leq 5}$ 含量的差异对其动力特性指标影响来开展工作。

2 试验级配缩制

目前,筑坝工程中广泛使用的超径粗粒土,如砂卵石、卵漂石、石渣、堆石等,颗粒粒径达 600~800 mm^[6],这样必然要对筑坝材料的现场级配进行缩尺,通过对缩尺后试验用料即替代料的试验来确定实际级配材料的力学性质。室内试验的目的是尽可能模拟粗颗粒材料的原始级配、密度、边界条件以及实际的应力状态,但由于室内试验常用的试样直径为 300 mm,为了使试验成果不受试料粒径大小的影响,试料的最大粒径必须控制在试样直径的 1/5 以下^[7-8],也就是说,允许最大粒径为 60 mm,要远小于实际粗颗粒材料的最大粒径,因此,必须通过缩尺才能得到室内试验模拟级配。这就存在一个问题,到底如何缩尺才能最好地反映现场粗颗粒材料的力学特性。缩尺方法的试验研究起源于 20 世纪 40 年代末期,迄今为止,国内外已有许多学者^[9-15]对缩尺方法问题进行了研究。目前国内现有的规程、规范对级配缩尺宏观上给出了缩制方法,但对于某一条级配曲线具体采用哪种方法并没有给出明确的规定,其实这也是导致不同试验单位结果差异的主要原因。

南京水利科学研究院筑坝材料试验室根据大量试验结果以及长期积累的试验经验,总结出了试验级配缩尺的具体原则:①符合相关规范和规程对级配缩尺的宏观规定。②如全采用相似级配法缩制,缩制后的细颗粒含量偏高,得到的力学指标偏优,但渗透特性会人为地降低;同样全采用等量替代法缩制,缩制后的细颗粒含量偏低,往往室内试验会达不到设计要求的制样密度,导致室内试验结果过于保守,这也是某些试验单位试验结果不合理的原因之一。目前常用的是先采用相似级配法,然后再采用等量替代的混合法进行,对于相似级配法中 n 的取值宏观上需满足级配缩尺后小于等于 5 mm 粒径含量要符合工程设计规范中对每个区域细颗粒含

量的要求。③缩尺后级配能够满足设计干密度的要求。④在符合上述 3 条的基础上,要满足各区料级配缩尺后粗、细的相关性必须与原级配保持一致,这主要是针对原级配力学和水力过渡的要求。

本次试验挑选弱风化二长岩、弱风化英安质凝灰岩以及砂砾料 3 组不同母岩性质的粗颗粒材料,根据上述级配缩尺的原则,缩制后的试验模拟级配见表 1。

表 1 室内试验模拟级配
Table 1 Modeling gradation of lab test

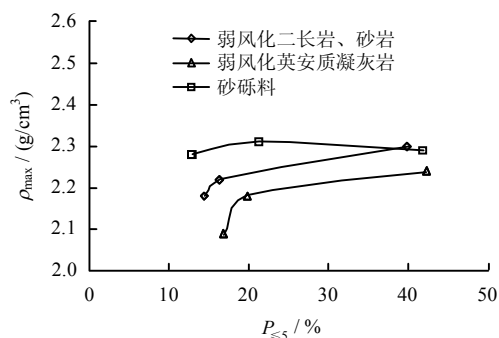
级配号	母岩名称	各粒径范围(mm)颗粒百分含量/%				
		60~40	40~20	20~10	10~5	5~0
级配 1	弱风化 二长岩	14.9	17.8	14.3	13.1	40.0
级配 2		21.5	27.8	20.2	13.9	16.5
级配 3		20.3	29.0	20.3	15.7	14.6
级配 4	弱风化	12.0	19.0	14.0	12.5	42.5
级配 5	英安质	16.4	24.6	22.6	16.4	20.0
级配 6	凝灰岩	25.1	22.9	19.7	15.3	17.0
级配 7	砂砾料	10.4	18.6	16.2	12.8	42.0
级配 8		21.1	26.8	18.2	12.4	21.5
级配 9		21.4	34.4	18.7	12.5	13.0

3 级配特性研究

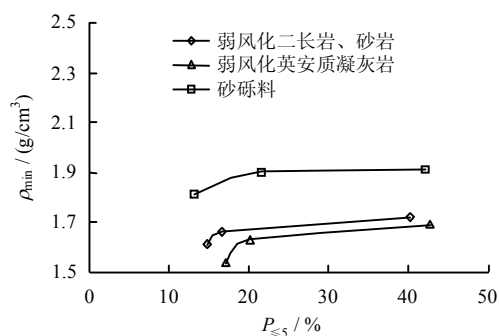
为了分析不同级配的充填关系,首先对同一母岩性质的材料在不同级配状态下进行了最大干密度和最小干密度试验。试验均采用风干料,试样筒尺寸为直径 $\phi 300$ mm,高 360 mm。其中最小干密度试验采用人工法,对于大颗粒用手轻轻放下,不引起对周围颗粒的挤压,细颗粒则用铲靠着试样缓慢、均匀地撒开。最大干密度试验采用表面振动器压实法,试样表面静载为 14 kPa,振动频率为 40 Hz,振动历时为 8 min。试样共分 3 次铺装。试验所得最大、最小干密度值与 $P_{\leq 5}$ 的关系曲线见图 1。

由图可知,随 $P_{\leq 5}$ 含量的增加,粗颗粒材料最小干密度和最大干密度均产生一定的增大,当 $P_{\leq 5} < 20\%$ 时,由于粗颗粒骨架形成的孔隙较大,细颗粒主要起到填充的作用,因此,最小干密度和最大干密度随细颗粒含量的增加幅度较大。随着细料含量超过 20% 以后,细颗粒逐渐参与粗颗粒骨架作用,混合料最大干密度值增加幅度逐渐减缓,当细颗粒含量增加至 40% 左右,粗、细颗粒达到最好咬合关系,干密度值最大,以后随着细料含量的进一步增加,粗颗粒形成的骨架会被细颗粒隔离,整个混合料会逐渐呈现出细料性质,其密度值又会产生一定的降低。图 1 同时显示,对于颗粒形状差异较大的砂砾料和堆石料充填关系宏观上保持一致,但由于

砂砾料颗粒浑圆度较好,颗粒易离析,达到最大干密度时的最佳细料含量较堆石料会产生一定的降低。由此表明,级配越优,粗颗粒材料的充填关系越好,能达到较大的干密度,反之级配越差,粗颗粒材料的充填关系越差,也难以获得较大的干密度。



(a) 最大干密度



(b) 最小干密度

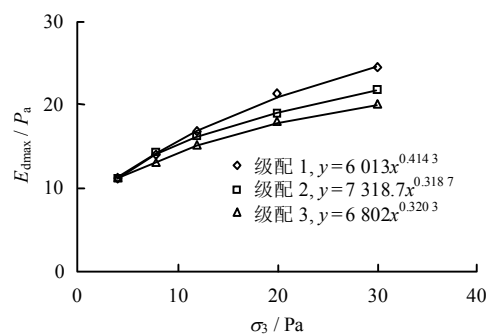
图1 最小、最大干密度值与 $P_{\leq 5}$ 关系曲线Fig.1 Relationships between maximum or minimum dry density and content of $P_{\leq 5}$

4 级配对动力特性影响研究

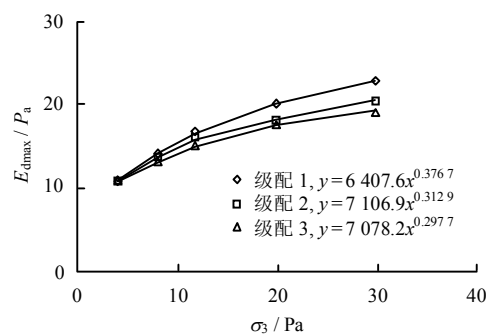
对上述不同母岩性质的粗颗粒材料分别开展其在不同级配条件下的动力特性试验,试验选用大型动力三轴剪切仪,试样尺寸直径×高为 $\phi 300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$,试验围压为 400、800、1 200、2 000 kPa 和 3 000 kPa。试验用试样均处于自然风干状态,按表 1 所给出的 5 种粒径范围进行试样的制备,装样过程中主要控制好 2 点:①试样分 5 层进行铺装,尽量减少试样粗、细颗粒的离析;②采用表面振动器对试样进行分层振动,保证整个试样的密度均匀性。试样制好后采用水头饱和法自下而上对试样进行饱和,然后根据要求开展不同级配条件下的动力特性对比试验研究。

4.1 级配对动弹性模量的影响

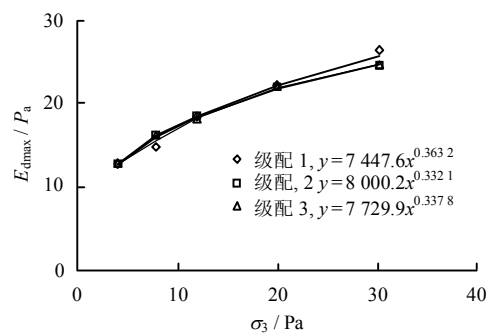
通过试验得出不同围压下最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 值,绘制不同围压下 $E_{d\max}/P_a - \sigma_3/P_a$ 曲线,见图 2,其中, P_a 为标准大气压, σ_3 为围压。



(a) 弱风化二长岩、砂岩



(b) 弱风化英安质凝灰岩



(c) 砂砾料

图2 $E_{d\max}/P_a - \sigma_3/P_a$ 关系曲线Fig.2 Relationships between $E_{d\max}/P_a$ and σ_3/P_a

由图 2(a)可知,对于弱风化二长岩,在围压为 400 kPa 时,级配 2 的最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 略高于级配 3;级配 1 的最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 最低,随着围压提高至 1 200 kPa,级配 1 的最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 最大,级配 2 居中,级配 3 最低,而且这种差值随着围压的增加呈逐渐增大的趋势;由图 2(b)可知,对于弱风化英安质凝灰岩,级配 4 的最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 在低围压下要略低于级配 5 和级配 6,随着围压的增大,级配 4 的最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 逐渐提高并超过级配 5 和级配 6;对于砂砾料同样存在这一现象,但最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 受级配的影响并不是很明显。上述现象产生的主要原因为:粗颗粒材料在动荷载作用下的变形主要以颗粒重新排列及颗粒棱角破碎为主,对于级配差的混合料,

由于粗、细颗粒没有形成较好的咬合效果,因此,混合料以粗颗粒形成的骨架为主。在低围压状态下,由于应力状态较低,颗粒棱角破碎并不明显,因此,混合料的动力变形主要以颗粒重新排列为主,这样就使得级配优的粗颗粒材料在低围压状态下其力学性能的优势并不明显,而且当细料含量一旦达到充满粗颗粒形成的孔隙且参与骨架作用后,其在动荷载作用下的变形反而会产生一定的增加,使得其最大动弹性模量反而产生一定的降低;随着围压的进一步提高,粗颗粒混合料在动荷载作用下的变形则主要以颗粒破碎为主,在高围压状态下,级配差的混合料在动荷载作用下较易产生颗粒破碎,使得粗颗粒混合料最大动弹性模量产生明显的降低,而级配优的混合料由于粗、细颗粒咬合的较好,颗粒破碎量会明显降低,对应于最大动弹性模量则会产生明显的提高。正是由于这一规律,才导致图 2(a)和 2(b)中粗颗粒材料在低围压下级配优但最大动弹性模量略低,在高围压下级配优最大动弹性模量高的现象。

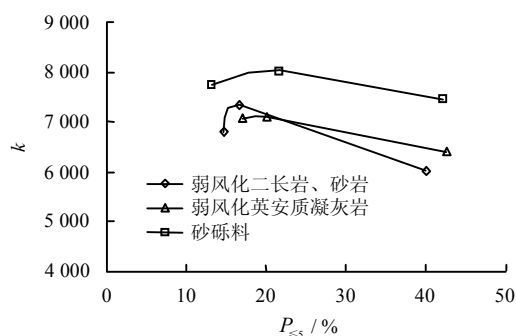
由图 2(c)可知,对于天然砂砾料,由于颗粒浑圆度较好,颗粒破碎率较粗颗粒材料会产生明显的减少,因此,级配对最大动弹性模量的影响要明显低于粗颗粒材料。

$$E_{d\max} = k P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

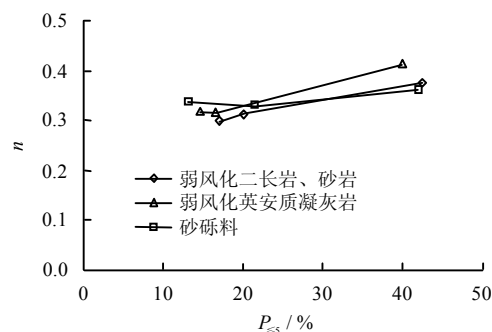
采用式(1)来描述最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 与围压 σ_3 的关系,整理的参数见表 2。由于不同围压下最大动弹性模量随围压和 $P_{\leq 5}$ 规律性的变化,使得整理出最大动弹性模量模型参数 k 和 n 同样发生了规律性变化。图 3 给出了不同材料的动弹性模量系数 k 和指数 n 随 $P_{\leq 5}$ 变化曲线。

表 2 不同级配粗颗粒材料动力变形参数
Table 2 Dynamic deformation parameters of different coarse aggregates under different gradations

级配号	母岩名称	$P_{\leq 5}$ /%	k	n
级配 1		40.0	6 013	0.414
级配 2	弱风化二长岩、砂岩	16.5	7 319	0.319
级配 3		14.6	6 802	0.320
级配 4		42.5	6 408	0.377
级配 5		20.0	7 107	0.313
级配 6	弱风化英安质凝灰岩	17.0	7 078	0.300
级配 7		42.0	7 448	0.362
级配 8		21.5	8 000	0.332
级配 9	砂砾料	13.0	7 730	0.338



(a) 动弹性模量系数 k 随 $P_{\leq 5}$ 的变化



(b) 动弹性模量指数 n 随 $P_{\leq 5}$ 的变化

图 3 最大动弹性模量系数随 $P_{\leq 5}$ 的变化

Fig.3 Variation of maximum dynamic modulus along with content of $P_{\leq 5}$

图形显示,动弹性模量系数 k 随着 $P_{\leq 5}$ 的提高逐渐增加,但当细料含量超过 40%以后,动弹性模量系数 k 值又产生一定的降低,宏观上与“细颗粒含量达到 30%~40%时,粗、细颗粒形成最佳组合,各部分强度得到充分发挥,抗剪强度为最大”^[6]这一理论保持一致。而对于模量指数 n 值则是随着细料含量的增加而逐渐增加。上述现象产生的原因主要是:在低围压状态下,级配的优势没有明显地发挥,随着围压的提高,级配优的粗颗粒材料最大动弹性模量值增加的较明显,表现为拟合参数 k 值则是先提高,达到一定峰值后又产生降低,而对于 n 值则是一直提高。

4.2 级配对动永久变形的影响

级配同样也是影响粗颗粒材料动永久变形特性的重要因素。试验挑选母岩为弱风化二长岩的级配 1 和级配 3 以及母岩为砂砾料的级配 7 和级配 9 四种粗颗粒材料分别开展动永久变形特性试验。其典型动永久变形试验曲线见图 4、5。

不同级配的动永久变形曲线对比显示,在不同颗粒组成情况下粗颗粒材料动永久变形曲线发展规律宏观上保持一致,均随着振次的增加永久变形逐渐增加,其中在动应力施加的前几周内永久变形发展得较快,后期随着振次的增加,永久变形逐渐收

敛,且永久变形量随着围压的增加逐渐增大。

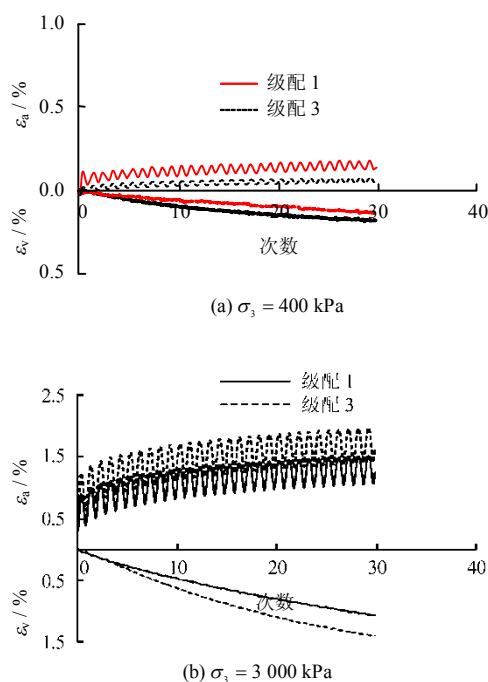


图4 弱风化二长岩、砂岩在不同级配下
动永久变形随振次发展曲线

Fig.4 Dynamic permanent deformation curves of weak weathered monzonite and grit under different gradations along with vibration number

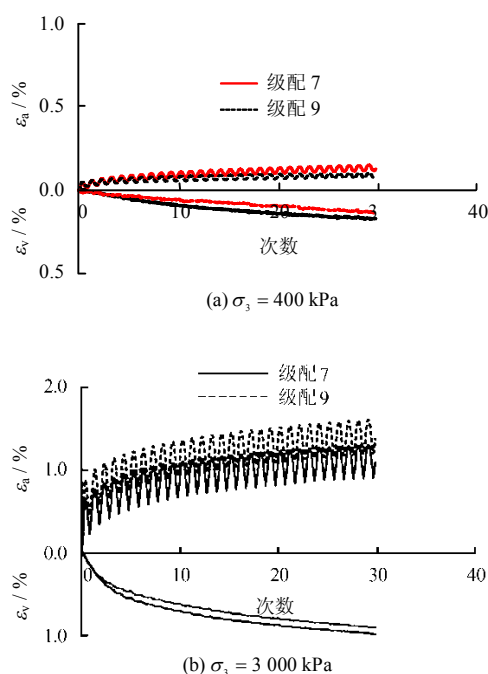


图5 砂砾料在不同级配下动永久变形随振次发展曲线

Fig.5 Dynamic permanent deformation curves of sandy gravels under different gradations along with vibration number

级配的差异主要是造成动永久变形量值的差

异。对于动永久轴向变形 ε_a , 其量值随级配的变化宏观上与最大动弹性模量随 $P_{\leq 5}$ 含量的规律保持一致,即在较低围压和较小轴向动荷载作用下,粗颗粒材料级配优的优势并没有显示出来,并且一旦 $P_{\leq 5}$ 含量超过某一数值,反而在低应力状态下动永久轴向变形量还会略有增大,图 4(a)和图 5(a)均显示了这一特性;随着围压增大至 3 000 kPa,如图 4(b)和图 5(b)显示,母岩为弱风化二长岩的级配 1 的动永久轴向变形要明显小于级配 3;同样母岩为砂砾料的级配 7 的动永久轴向变形要明显小于级配 9,级配优良使得粗颗粒材料在高应力条件下颗粒破碎率明显降低,而颗粒破碎是影响永久变形的主要因素,因此,级配的差异对粗颗粒材料动永久轴向变形量的影响随着围压的提高会变得逐渐明显。

对于动永久体积变形 ε_v ,图 4、5 均表明,随 $P_{\leq 5}$ 的增加,动永久体积变形均呈逐渐减小趋势,且随围压的增大,减小的幅度越明显。

对比图 4、5 可知,宏观显示级配特性对堆石料永久变形的影响要大于砂砾料,其原因同样是由于砂砾料颗粒浑圆度较好,使得级配优劣引起其颗粒破碎率的差异减小,从而对其动永久变形量值的影响逐渐减弱。

5 结 论

(1) 目前国内现有的规程、规范对粗颗粒材料级配缩尺方法并没有给出明确的规定,本文根据大量试验结果以及长期积累的试验经验,总结提出了室内试验级配缩尺的具体原则。

(2) 当 $P_{\leq 5}$ 较低时,堆石混合料最大干密度值随着其含量的增加比较明显;随着 $P_{\leq 5}$ 的增加,细颗粒逐渐参与骨架作用,堆石混合料最大干密度值增幅逐渐减缓;当 $P_{\leq 5}$ 达到 40% 左右时,最大干密度值达到峰值;砂砾石料充填关系同样符合上述规律,但由于其颗粒浑圆度较好,颗粒易离析,达到最大干密度时的最佳细料含量较堆石料会产生一定的降低。

(3) 在低围压状态下,级配的优劣对粗颗粒材料动力特性影响并不明显,而且 $P_{\leq 5}$ 超过某一定值后,还会引起最大动弹性模量值的降低;随着围压的增大,级配优的动力特性指标明显变优;对于砂砾石料,由于颗粒浑圆度较好,使得级配的优劣引起其颗粒破碎率差异性减小,从而使得级配对其动力特性的影响逐渐减弱。

(4) 针对上述级配对粗颗粒材料动力特性的影响规律,对于土石坝来说,特别是高土石坝,有必

要采用级配优的粗颗粒材料作为坝体填筑材料,通过其高应力条件下动力特性的优势来提高其抗震能力。

参考文献

- [1] 酈能惠, 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.
- [2] 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. Characteristic and scale effect of coarse aggregate[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(4): 89—95.
- [3] 饶锡保, 何晓民, 刘鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(1): 21—25.
RAO Xi-bao, HE Xiao-min, LIU Ming. Influence of coarse grained content on engineering properties of gravelly soil[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1999, 16(1): 21—25.
- [4] 傅华, 韩华强, 凌华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645—2649.
FU Hua, HAN Hua-qiang, LING Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(9): 2645—2649.
- [5] 傅华, 李国英. 级配和密度对堆石料强度和变形特性的影响[C]//第24届全国土工测试学术研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 111—116.
FU Hua, LI Guo-ying. Influence of gradation and density to rockfill' strength and doformation[C]//Proceeding of the 24th Chinese Academic Seminar on Geotechnical Soil Testing. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005: 111—116.
- [6] 郭庆国. 粗粒土的工程性质及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
GUO Qing-guo. Engineering property and application of coarse grained soils[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998.
- [7] 酈能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
LI Neng-hui. Recent technology for high concrete face rockfill dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.
- [8] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
The Ministry of Water Resource of the People's Republic of China. SL237—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.
- [9] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill mechanicals[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1972, 98(1): 95—114.
- [10] 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, 24(2): 92—103.
MENG Xian-qi, SHI Yan-wen. Shear strength of sandy-gravels in Shitouhe river dam[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 5(1): 90—101.
- [11] 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): 27—31.
LI Feng-ming, BIAN Fu-zong. Contrast test using two kinds of coarse aggregate[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 1991, (2): 27—31.
- [12] 司洪洋. 堆石缩尺效应研究中的几个问题[C]//第6届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1991: 163—169.
SI Hong-yang. Some problem in the research of rockfill scaling effect[C]//Proceedings of the 6th National Soil Mechanics and Foundation Engineering Academic Conference. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 163—169.
- [13] 高莲士, 蔡昌光, 朱家启. 粗颗粒材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.
- [14] 左永振, 张伟, 潘家军, 等. 粗粒料级配缩尺方法对其最大干密度的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 417—422.
ZUO Yong-zhen, ZHANG Wei, PAN Jia-jun, et al. Effects of gradation scale method on maximum dry density of coarse-grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.1): 417—422.
- [15] 傅华, 凌华, 蔡正银. 心墙砾石土料缩尺效应试验研究[C]//第25届全国土工测试学术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学电子音像出版社, 2008: 361—365.
FU Hua, LING Hua, CAI Zheng-yin. Experiment study on the scale effect of core gravelly soils[C]//Proceeding of the 25th Chinese Academic Seminar on Geotechnical Soil Testing. Hangzhou: Zhejiang University Electronic & Audio-Video Press, 2008: 361—365.