水　利　学　报

2019年11月　　SHUILI　XUEBAO　　第50卷　第11期

文章编号:0559-9350(2019)11-1374-10

级配特征对筑坝砂砾料填筑标准的影响

杨玉生[1,2]，赵剑明[1,2]，王　龙[1,2]，刘小生[1,2]

（1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京　100038；
2. 水利部水工程建设与安全重点实验室，北京　100048）

摘要：筑坝砂砾料填筑标准具有级配相关性，在砂砾料筑坝施工质量控制中，目前仅以含砾量来表征级配对碾压干密度的影响，未考虑级配形状和最大粒径不同对砂砾料填筑标准的影响。为了研究这种影响，评估目前单一依靠含砾量来表征级配特征对干密度影响的合理性，设计了含砾量相同而级配曲线形状和最大粒径不同的两组级配曲线，结合实际施工振动碾压条件，通过现场密度桶法，研究了含砾量相同时不同级配形状特征和最大粒径对原级配筑坝砂砾料填筑标准的影响。研究表明，控制含砾量相同时，级配曲线形状对砂砾料最大、最大小干密度有一定影响，随级配参数m和b的增大，砂砾料的最大、最小干密度均呈现减小的趋势。在含砾量和级配参数m相同时，不同最大粒径级配的砂砾料的最大、最小干密度也有差异。表明不同级配特征和最大粒径对筑坝砂砾料填筑标准的确定有一定影响，建议结合具体工程进一步对级配特征和最大粒径对筑坝填筑标准影响的敏感性及对施工质量控制带来的影响进行评估。

关键词：级配特征；筑坝砂砾料；填筑标准

中图分类号： TU413　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.13243/j.cnki.slxb.20190547

1　研究背景

我国西北、西南地区河流河床上多有覆盖层发育，砂砾料储量丰富，是一种很好的筑坝材料。相应地，在西北和西南水利水电开发中，砂砾石坝是一种重要坝型。西北、西南地区已建、在建或者规划中的砂砾石坝有不少是坝高超过70 m的高坝，甚至是200 m级的超高坝，工程规模宏大。再者，西部地区地震活动频繁，且强度大、烈度高。水电工程坝址区大多处在强烈地震带影响的范围之内，坝址区地震基本烈度通常比较高，这使得地震荷载往往成为工程可行性的控制工况，坝的变形控制和抗震安全十分重要。在坝址、坝型和坝体填筑分区确定之后，大坝填筑标准的确定在设计层面上是对大坝变形控制最关键的因素，对抗震安全也有重要影响。

砂砾石坝填筑标准以相对密度作为控制指标，采用填筑标准进行砂砾石坝施工填筑质量控制时，以施工填筑检测干密度与填筑标准对应的干密度进行对比，确定填筑密实度是否满足设计填筑标准的要求。填筑标准对应干密度的确定受砂砾料最大、最小干密度的影响，与筑坝砂砾料级配相关，不同的级配，即便相同的填筑标准，其对应的干密度也不同。因此，填筑标准实质上具有级配相关性。筑坝砂砾料最大、最小干密度受砾石含量、级配特征、最大粒径等自身土性参数，含水状态、密度桶尺寸特征等环境因素，以及振动强度、频谱和时间等振动荷载因素的影响。筑坝砂砾料最大、最小干密度的确定方法，以往采用的是室内试验，室内试验存在两个方面的显著问题。(1)室内试验设备较小，现场砂砾料大多在200 mm以上，甚至可达600 mm，进行室内试验时需要进行缩

收稿日期：2019-08-04；网络首发时间：2019-11-25

网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20191125.1450.001.html

基金项目：国家重点研发计划课题(2016YFC0401601，2017YFC0404905)；国家自然科学基金项目(51679264)；中国水科院基本科研业务费项目(GE0145B562017)

作者简介：杨玉生(1980-)，博士，教授级高级工程师，主要从事岩土工程研究。E-mail：yangysh@iwhr.com

尺，已有研究表明，砂砾料最大、最小干密度受级配特征和最大粒径的影响，室内缩尺试验难以准确确定原级配料的干密度[1-2]。虽然一些研究者[1,3-9]也尝试在系列试验的基础上提出经验式，将室内试验缩尺成果外延于原级配砂砾料。但总的来看，外延法公式缺乏普遍适用性，应用时存在较大的误差。(2)室内试验确定干密度，包括表面振动法和振动台法，这两种方法与实际施工振动碾压在受力机制上存在较大差异，不能反映现场的实际情况。砂砾料原有的室内填筑标准确定方法是与当时生产力水准下的施工机械对应的，随着大型施工碾压机械的广泛采用，在实际施工检测中，常出现相对密度大于1的情况，这从力学概念上来说显然是说不通的，说明室内试验确定的干密度并非真实的最大干密度。

随着西部一些高面板(心墙)砂砾石坝的建设，一些研究和施工单位逐步采用现场大型相对密度试验代替室内试验确定筑坝砂砾料的最大、最小干密度。如中国水科院采用大型相对密度试验确定了河南省前坪水库、新疆大石门水库、大石峡水库筑坝砂砾料的最大、最小干密度，作为大坝填筑质量控制的依据。在实际工程应用中，目前的砂砾石坝坝体施工质量检测，主要依据坝体碾压后获得的干密度与设计填筑标准对应的干密度作比较来判断是否满足填筑质量控制要求。具体实施上是根据挖坑检测干密度，并进行试坑砂砾料筛分，确定试坑砂砾料含砾量，根据含砾量确定对应于该含砾量下的施工质量控制干密度。

在现场采用大型相对密度试验确定筑坝原级配砂砾料最大、最小干密度的方法，从影响砂砾料压实特性的几个因素来看，具有以下几个优势：(1)可对原级配风干砂砾料直接开展试验，不需要进行缩尺，能够解决室内试验缩尺带来的缩尺效应的影响问题；(2)采用现场施工振动碾压确定最大干密度的振动荷载特征与实际施工情况一致，能够更好地反映大坝填筑实际施工振动荷载情况。因此，采用现场大型相对密度试验确定砂砾料最大、最小干密度时，影响筑坝砂砾料填筑标准确定的因素主要集中在砂砾料自身特性包括最大粒径和级配特征上。目前广泛接受的共识是，砂砾料的最大、最小干密度具有级配相关性。在实际应用中，这种相关性仅依靠含砾量来反映，难以考虑不均匀系数和曲率系数等级配的整体形状特征。从目前的试验方法来看，在级配包线范围内，从上包线到下包线之间各条级配线是近乎平行的，不同级配的不均匀系数和曲率系数比较接近。而在实际施工中，由于严格控制上坝砂砾料的级配难度较大，且在坝面摊铺碾压时也常存在骨料分离和聚集的情况。因此，坝料级配可能也在包线范围之内，但其变为不良级配，这就需要对相同含砾量，不同级配形状和不同最大粒径时干密度差异的敏感性进行评估。

传统上采用级配曲线描述粗粒土的级配组成，在反映级配的指标上大多采用最大粒径、曲率系数和不均匀系数来表示，并以曲率系数和不均匀系数来评定级配优良或级配不良。但由于缺乏对级配定量描述的指标，粒组含量、最大粒径、曲率系数和不均匀系数之间难以建立定量的描述关系，这使得在研究级配特征对粗粒土物理力学性质影响时，无法在统一的标准下定量表示其对不同参数的影响。已有研究在分析级配对粗粒土物理力学性质影响时，大多是针对某一种筑坝堆石料(砂砾料)原型设计级配，采用一定缩尺方法后，考察不同缩尺方法或不同的缩尺对土石料力学性质带来的影响[9-18]。当在同一粒径尺度上考察级配的影响时，往往只能定性的界定级配的好坏或采用曲率系数或不均匀系数来描述级配的影响。朱俊高等[19-22]提出了一个对连续级配土具有普遍适用性的级配方程，并结合实际土石坝工程，总结了粗粒土级配参数的常见分布范围，给出了采用该级配方程进行级配设计的方法，并结合规范规定的4种缩尺方法，分析了缩尺级配与原级配参数之间的关系。朱俊高等[19-22]的研究使得采用统一的变量在P—d平面上定量描述级配成为可能，并为级配定量设计和定量描述缩尺效应的影响提供了一种可行的分析途径。

本文紧密结合工程实践问题，基于实际施工振动碾压条件，通过现场密度桶法，研究含砾量相同时不同级配形状特征和最大粒径对原级配筑坝砂砾料填筑标准的影响，为砂砾料筑坝填筑标准确定和施工质量检测评估提供依据，评估目前单一依靠含砾量来代表级配特征对干密度的影响的合理性。包括两个方面：(1)在含砾量和最大粒径相同的情况下，考察不同级配特征对最大、最小干密度的影响；(2)在含砾量和特定的级配特征参数相同的情况下，考察最大粒径变化对最大、最小干密度

的影响。

2　试验方案和试验方法

2.1　级配设计　在实际工程应用中，目前的砂砾石坝坝体设计填筑标准以相对密度表示，施工质量检测时，主要依据坝体碾压后获得的干密度值与设计填筑标准对应的干密度值作比较来判断是否满足设计填筑标准要求。具体实施上是根据挖坑检测干密度，并进行试坑砂砾料筛分，确定试坑砂砾料含砾量，依据施工质量检测三因素相关图，确定对应于试坑检测含砾量下的施工质量控制干密度，将挖坑检测干密度与施工质量控制干密度进行比较，判断大坝填筑密实度是否达到设计填筑标准的要求。设计填筑标准对应的干密度通常是依据一定级配砂砾料相对密度试验结果确定的，在设计包线级配特征相近的情况下，现有设计填筑标准对应干密度的确定实际上考虑了含砾量和最大粒径不同对最大、最小干密度的影响，未能考虑不同级配特征的影响。在施工质量检测上，仅以含砾量进行控制确定检测级配对应的设计填筑干密度，实际上既未考虑级配特征的影响，也未考虑最大粒径的影响。为了评估目前单一依靠含砾量来代表级配特征对干密度的影响的合理性，需要在含砾量相同的情况下，考察不同级配特征和最大粒径的级配曲线对填筑标准确定的影响，首先需要进行一定含砾量下的级配设计。

土力学中通常以不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来反映级配的好坏，传统的级配设计方法，无法将级配用连续化的参数定量表示，在进行级配设计时，需要采用插值法反复验算，直至满足 C_u 和 C_c 的要求为止，过程繁琐。朱俊高等[19]提出了描述连续级配土的级配方程：

$$P=\frac{d^{m}}{(1-b)d_{\max}^{m}+bd^{m}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：P 为粒径为 d 的颗粒的通过百分率，%；$d_{\max}$ 为最大粒径；b 和 m 为与曲线形态和倾斜程度有关的参数，且其合理取值范围为 $m>0$，$b<1$。

研究表明，该方程对于各种连续级配的土料都具有较好的适用性[19-22]，这对定量研究及表述土体级配对相关力学性质的影响很有意义，它使得对连续级配土体的级配特征进行定量描述成为可能。

本文拟结合某实际工程上坝砂砾料进行级配设计，首先采用式(1)对设计包线范围内砂砾料级配进行拟合，验证式(1)的适用性。根据设计级配线拟合得到的 b、m 列于表1，设计级配线(实线)与拟合级配线(虚线)的对比见图1所示。由图1可知，虽然料场设计级配线局部变动不规律，但总体上朱俊高等[19]提出的式(1)对设计级配线具有较好的拟合度。因此，基于式(1)进行级配设计是可行的。

由于需要进行一定含砾量下的级配设计，则需要确定能够满足一定含砾量的级配参数。根据式(1)，可得式(2)：

$$b=\frac{P-\left(\dfrac{d}{d_{\max}}\right)^{m}}{P-P\left(\dfrac{d}{d_{\max}}\right)^{m}} \tag{2}$$

为了研究不同级配特征对最大、最小干密度的影响。试验级配的设计上考虑含砾量和最大粒

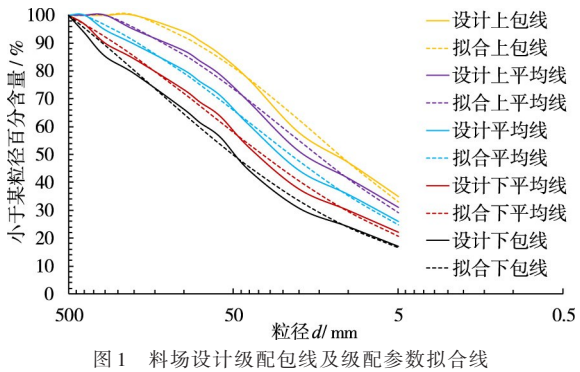


图1　料场设计级配包线及级配参数拟合线

表1　某工程上坝砂砾料级配特征参数

料场级配	上包线	上平均线	平均线	下平均线	下包线
m	0.790	0.715	0.522	0.634	0.604
b	0.883	0.862	0.709	0.781	0.667
d_{max}/mm	200	300	400	500	500

径两个因素，在m和b的合理取值范围内，设计不同形状特征的级配曲线进行最大、最小干密度试验，研究级配特征对最大、最小干密度的影响。(1)设定含砾量和最大粒径相同，通过调整级配方程参数来调整级配形状，考察级配形状变化对最大、最小干密度的影响。(2)设定含砾量相同和级配方程参数m相同，变化最大粒径和b值，考察最大粒径和b值的变化对最大、最小干密度的影响。

由图1和表1可知，料场包线范围内，不同级配曲线的最大粒径在200～500 mm之间，5条级配线的曲率系数和不均匀系数比较接近。在进行级配设计时，以平均线级配为基础，进行不同级配形状影响的试验级配设计。

根据式(2)确定满足P_5=28%及最大粒径d_{max}=400 mm的b和m的关系，可得式(3)：

$$b=\frac{0.28-\left(\frac{1}{80}\right)^m}{0.28-0.28\left(\frac{1}{80}\right)^m} \tag{3}$$

由式(3)，计算可得b和m的关系如表2和图2所示。由图2可知，在b–m平面上，b=1为b–m曲线的水平渐近线。则当m达到1.5时，b值即约等于1。

在考察最大粒径的影响时，以平均线级配为基础，结合料场级配包线范围内最大粒径的变化范围，根据式(2)计算P_5=28%、m=0.522时，不同最大粒径下的b值，见表3和图3所示。在b–d_{max}平面上，当粒径足够大时，b=1为b–d_{max}曲线的水平渐近线。一般的上坝砂砾料最大粒径小于600 mm，b值最大可取0.770。

表2　P_5=28%、d_{max}=400mm时b和m数值对应关系

m	0.01	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
b	−56.40	−3.68	−0.83	0.06	0.46	0.68	0.80	0.87	0.92	0.95	0.97
m	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10
b	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

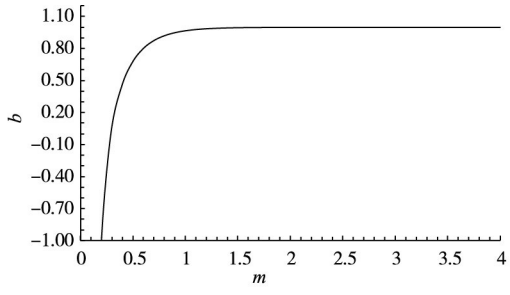


图2　P_5=28%、d_{max}=400mm时b和m的关系

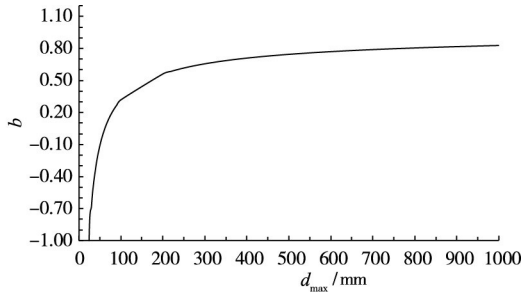


图3　P_5=28%、m=0.522时b和d_{max}的关系

表3　P_5=28%、m=0.522时b和d_{max}数值对应关系

d_{max}/mm	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
b	0.319	0.561	0.656	0.709	0.745	0.770	0.789	0.804	0.817	0.827

2.2　试验方案　考虑不同级配特征对填筑标准(最大、最小干密度)影响的试验方案，可以平均线级配为基础，保证含砾量P_5=28%和最大粒径d_{max}=400 mm相同，根据料场实际级配范围，在m=0.01～1.5之间，根据表2选择如表4所示m和b计算设计级配(1)—(7)，相应级配曲线见图4所示。

考虑最大粒径对填筑标准(最大、最小干密度)影响的试验方案，可以平均线级配为基础，保证含砾量P_5=28%和级配参数m=0.522。根据料场实际最大粒径的分布范围，在d_{max}=200～500 mm之间，根据表3选择如表4所示的d_{max}和b计算设计级配(4)和(8)—(10)，相应级配曲线见图5所示。

2.3　试验方法　现场相对密度试验采用《土石筑坝材料碾压试验规程》(NB/T 35016–2013)规定的密度桶法。密度桶为带底无盖钢桶，壁厚12 mm，内径为120 cm，内高为80 cm。现场相对密度试验流程

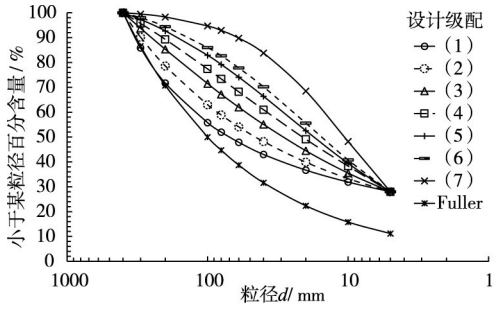


图4　最大粒径和含砾量相同时级配特征影响的试验设计级配

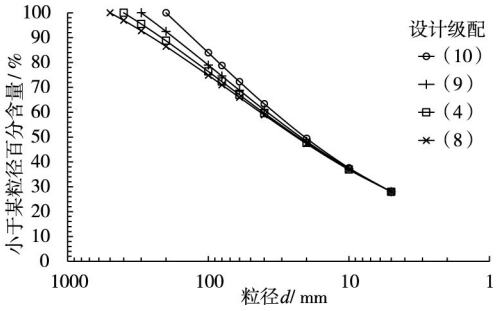


图5　含砾量相同时最大粒径影响的试验设计级配

表4　不同级配特征和最大粒径影响的试验设计级配参数

设计级配	含砾量和最大粒径相同级配特征不同							含砾量相同最大粒径不同		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
d_{max}/mm	400	400	400	400	400	400	400	500	300	200
m	0.010	0.200	0.400	0.522	0.700	0.800	1.200	0.522	0.522	0.522
b	−55.795	−0.835	0.461	0.709	0.874	0.920	0.987	0.745	0.656	0.561
C_u	141.7	95.4	60.6	44.3	34.4	29.2	17.7	48.3	43.2	39.4
C_c	0.5	0.6	0.8	1.0	1.3	1.4	2.1	1.0	1.1	1.2

主要包括密度桶埋置、筛分备料、最小干密度试验和最大干密度试验4个试验环节。首先采用挖掘机开挖沟槽，并振动碾压密实。在桶底碾压体表面均匀铺一层厚度为5 cm左右的细砂，并静压2遍。将5个密度桶找平放置于沟槽中心线上，密度桶桶壁之间的距离为2.5 ~ 3.0 m，并采用砂砾料将密度桶周围填平。进行筛分备料，按不同粒组堆放风干，如图7所示。采用风干砂砾料(含水率为零)，按试验设计级配人工备料，并按照四分法拌料，采用人工松填法开展最小干密度试验，按级配要求将砂砾料均匀松填于密度桶中，装填时防止冲击和振动，如图6所示。将拌好的剩余的试验料人工装填到桶顶并高出桶顶20 cm左右，用类型和级配大致相同的砂砾料围铺密度桶四周，高度与试验料齐平，如图7所示。将选定的振动碾在场外按预定的转速、振幅与频率启动，控制行驶速度2.2 km/h，振动碾压26遍后，在每个密度桶范围内微动进退振动碾压15 min。在碾压过程中，应根据试验料及周边料的沉降情况，及时补充配制好的砂砾料，使振动碾碾磙不与密度桶直接接触。为保证密度桶深度范围内的有效碾压，碾压完成后，应测量超出密度桶桶顶的砂砾料高度，保证其小于10 cm。之后进行桶顶找平，并挖出桶内砂砾料进行称量和筛分。

3　试验结果分析

不同试验设计级配的最小、最大干密度试验结果见表5。

表5　不同试验设计级配的最小、最大干密度试验结果　　(单位：g/cm³)

设计级配	含砾量和最大粒径相同级配特征不同							含砾量相同最大粒径不同		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
最小	2.119	2.112	2.076	2.049	1.988	1.968	1.855	2.049	1.983	2.128
最大	2.454	2.448	2.41	2.401	2.332	2.316	2.255	2.401	2.349	2.387

3.1　级配特征参数m对填筑标准的影响　将最大粒径和含砾量相同时不同试验设计级配的最大、最小干密度与级配参数m和b的关系绘制于图8。在P—d平面上，级配参数m决定颗粒级配曲线主体部分的倾斜程度，在最大粒径和含砾量相同时，随着m的增大，颗粒级配曲线主体部分的倾斜度增大。级配参数b主要决定颗粒级配曲线呈双曲线型还是反S型，随b值的增大，颗粒级配曲线形状从双曲线型逐渐过渡到反S型。由图4可见：在最大粒径和含砾量相同时，随级配参数m从0.01增大到



（a）人工配料　（b）四分法拌料　（c）人工松填　（d）桶顶找平

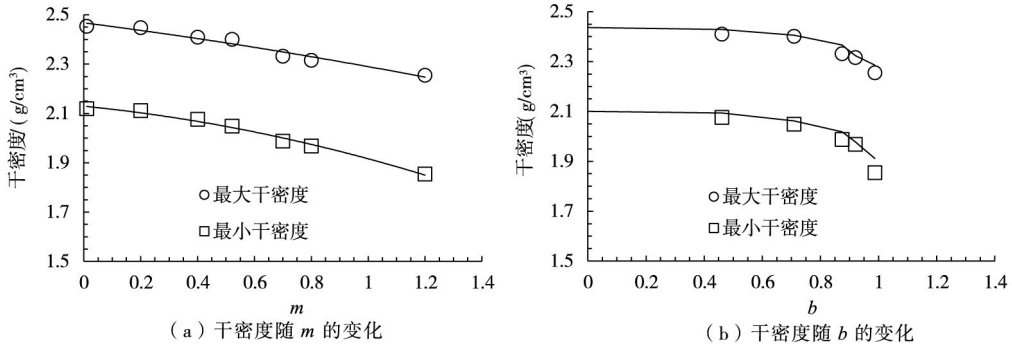
图6　最小干密度试验



（a）余料堆积　（b）振动碾压　（c）桶顶试样高度测量　（d）桶顶找平

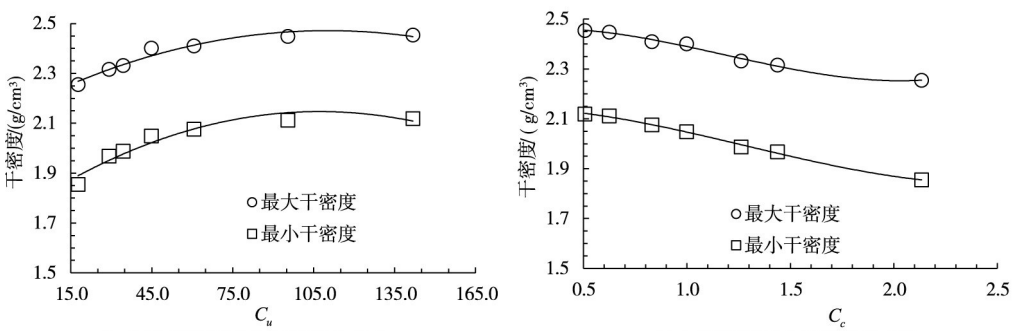
图7　最大干密度试验

1.2和级配参数b从−55.795增大到0.987，级配曲线逐步由双曲线过渡到反S型，级配曲线(4)(m=0.522，b=0.709)为双曲线型和反S型的分界。由表5和图8可见，在含砾量相同时，砂砾料的最大、最小干密度均随m和b的增大而呈现减小的趋势，级配曲线呈现双曲线型(m=0.01 ~ 0.522，b=−55.795~0.709)时砂砾料的压实特性要优于呈现反S型时(m=0.522 ~ 1.2，b=−0.709 ~ 0987)。即在P—d平面上，随颗粒级配曲线倾斜程度的增大，砂砾料压实性变差；随级配参数b的增大，颗粒级配曲线形状从双曲线型逐渐过渡到反S型，砂砾料的压实性变差。



（a）干密度随 m 的变化　（b）干密度随 b 的变化

图8　干密度随级配参数m和b的变化



（a）干密度随不均匀系数的变化　（b）干密度随曲率系数的变化

图9　干密度随不均匀系数C_u和曲率系数C_c的变化

同样，也可以绘出最大、最小干密度随曲率系数和不均匀系数的变化趋势，见图9所示。由图9可知，最大粒径和含砾量相同时，砂砾料的最大、最小干密度随不均匀系数的增大先增大后减小，随曲率系数的增大而减小，逐渐趋于稳定。图10给出了最大粒径和含砾量相同时，砂砾料最大、最小干密度随控制粒径的变化趋势。由图10可见，随控制粒径的增大，砂砾料最大、最小干密度先增大，在控制粒径为100 mm附近达到最大值，之后有所减小。

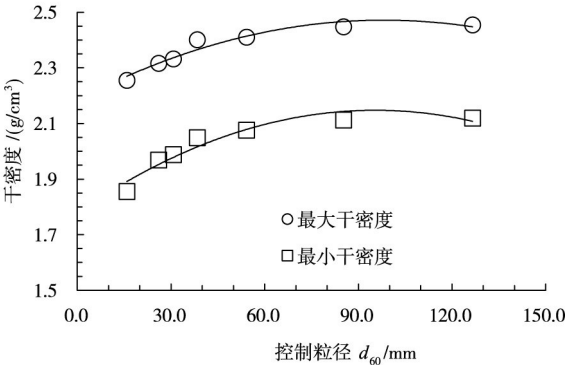


图10　干密度随控制粒径的变化关系

由表4可见，级配(1)—(3)为级配不良砂砾料，级配(4)—(7)为级配良好砂砾料。从一般的理解上，级配良好的砂砾料具有更好的压实性能，但从试验结果来看，传统概念上的级配不良砂砾料具有更好的压实性能。这一点可以采用Fuller等[23]的研究进行解释。

Fuller等[23]根据试验提出颗粒级配曲线越接近式(4)所示的抛物线时，其压实密度越大，式(4)即为最大密度曲线，绘于图4。

$$P=\sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}\times 100\% \tag{4}$$

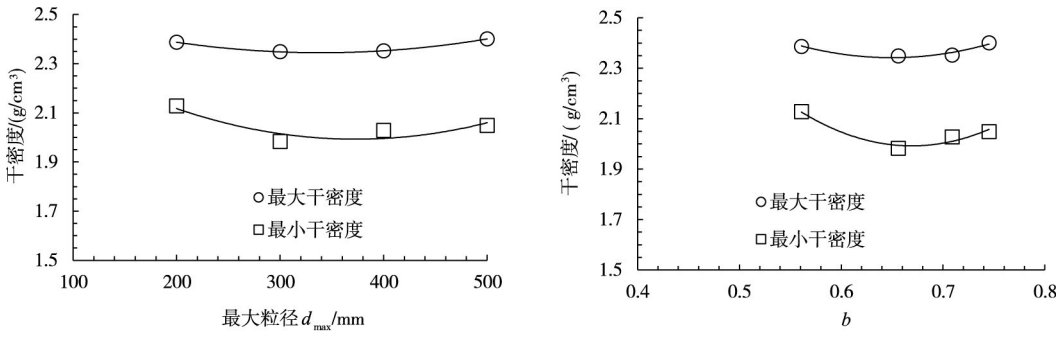
式中：P为粒径d的颗粒百分含量；$d_{\max}$为最大粒径。

由图4可见，级配(1)—(7)距离最大密度曲线越来越远。因此，在含砾量一定的条件下，采用不均匀系数和曲率系数来反映砂砾料的级配优劣存在不足，难以准确反映砂砾料的压实特性。

从这些研究结果看，虽然颗粒级配曲线是土的最基础的物理性质之一，但对颗粒级配曲线的认识，很大程度上仍然是定性的，传统上采用不均匀系数和曲率系数对颗粒级配的描述，是较为粗略的。进一步开展颗粒级配的描述方法研究，采用更为准确的定量化的级配描述方法，进而开展相关的物理力学指标评价是十分必要的，朱俊高等[19-22]的研究具有重要的理论意义和工程实用价值。

3.2　最大粒径对填筑标准的影响　将含砾量相同，不同最大粒径设计级配获得的最大、最小干密度与最大粒径和b的关系绘制于图11。由图11可见，含砾量和级配参数m相同时，随最大粒径$d_{\max}$和级配参数b的增大，砂砾料最大、最小干密度似呈现先减小后增大的趋势。朱俊高等[1]的研究表明，对于同一个原型级配堆石料，采用等量替代法、相似级配法或混合法缩尺后，同一种方法得到的不同最大粒径的缩尺级配料，缩尺后最大、最小干密度随最大粒径的增大呈现增大的趋势。但采用剔除法时，最大、最小干密度随最大粒径的增大似呈现先减小后增大的趋势，这种规律尚需要进一步研究确认。

3.3　讨论　对于级配特征的影响，本文的研究初步表明，即便含砾量和最大粒径相同，不同级配参数(b、m，或C_u、C_c)条件下的级配线的最大干密度可能会有明显的差异，本文设计级配线对应最大干密度的差异最大达到0.199，这种差异足以改变施工质量检测评价的结论。对于最大粒径的影响，



（a）干密度随最大粒径$d_{\max}$的变化　　（b）干密度随级配参数b的变化

图11　干密度随最大粒径$d_{\max}$和级配参数b的变化

本文的研究初步表明，在含砾量相同时，随最大粒径d_{max}的增大，砂砾料最大、最小干密度似呈现先减小后增大的趋势。但应注意的是，现场试验影响因素众多，试验结果往往会有较大的离散性，且本次不同最大粒径之间级配特征差异性不够显著，此次试验虽然最大、最小干密度随最大粒径的不同呈现了一定的差异，但其影响相对较小，仅依靠现有的试验成果，尚不足以确定最大粒径的影响，还需要进一步研究论证。

砂砾料的填筑标准具有级配相关性，在砂砾料筑坝施工质量控制中，目前仅以含砾量来表征级配对碾压干密度的影响，未考虑含砾量相同而级配形状和最大粒径不同对砂砾料填筑标准的影响。而在实际工程中，上坝砂砾料填筑施工碾压时，可能会由于上坝砂砾料不满足设计级配要求或砂砾料摊铺发生粗细分离的情况，相应的在实际的施工质量检测中，可能会出现P_5含量相同，而级配特征不同或最大粒径不同的情形。本文研究表明，在相同含砾量下，包括级配形状、最大粒径等均对砂砾料最大、最小干密度有一定影响。因此，单纯采用含砾量来表征级配特征，进而据此确定相应级配下的最大、最小干密度进行填筑质量检测评估，可能会得出与实际不符的评估结论。在实际施工质量检测中，建议结合级配曲线形状和最大粒径，对采用含砾量确定相应级配条件下的最大、最小干密度的代表性进行判断，相应的在采用现场密度桶法确定级配包线范围内砂砾料最大、最小干密度时，建议适当考察级配特征和最大粒径对试验结果的影响。

传统的对级配好坏的描述采用不均匀系数和曲率系数来表述。对于粒径级配连续的土，不均匀系数C_u越大，曲线越平缓，表示土的粒组变化的范围宽，土中有许多粗细不同的粒组。将C_u大于5的土称为不均匀土，反之则称为均匀土，不均匀土经压实后更容易得出较高的密度和较好的力学性能。土的颗粒级配曲线的斜率是否连续则采用曲率系数来表示，经验表明，当级配连续时，土的曲率系数C_u通常为1～3，当C_u小于1或C_u大于3时，通常表示级配不连续。在相同的压实条件下，级配连续的土往往能够获得较级配不连续的土更大的密度和更好的力学性能。在工程上，常将级配连续(C_c=1～3)的不均匀土(C_u大于5)称为级配良好土，将不能满足上述条件的土称为级配不良土。从表4可知，级配(1)—(3)为级配不良砂砾料，级配(4)—(8)为级配良好砂砾料。按照传统的概念，级配(4)—(7)能够获得更大的压实干密度。但试验结果表明，在含砾量和最大粒径相同，压实条件相同时，传统概念上的级配不良砂砾料获得的压实干密度比级配良好砂砾料更大，级配不良砂砾料表现出了更好的压实性能。初步说明采用不均匀系数和曲率系数对砂砾料级配的描述仅是一种经验性的定性描述方法，既不能实现P—d平面内对不同级配的全覆盖定量描述，也难以据此准确反映砂砾料的压实特性及可能的力学性质指标的好坏。传统的以不均匀系数和曲率系数界定的级配不良或级配良好评价砂砾料压实特性的方法，还需要在压实机理研究基础上，开展更深入的工作论证其合理性。

4　结论

砂砾料的填筑标准具有级配相关性，在砂砾料筑坝施工质量控制中，目前仅以含砾量来表征级配对碾压干密度的影响，未考虑含砾量相同而级配形状和最大粒径不同对砂砾料填筑标准的影响。为了评估目前单一依靠含砾量来代表级配特征对干密度的影响的合理性，本文设计了含砾量相同而级配曲线形状和最大粒径不同的两组级配曲线，并结合实际施工振动碾压条件，通过现场大型密度桶法，研究了含砾量相同时不同级配形状特征和最大粒径对原级配筑坝砂砾料填筑标准的影响。

(1)在含砾量和最大粒径相同时，砂砾料的级配特征对其压实特性有明显的影响。在P—d平面上，从最优级配线起，随级配参数m和b的增大，颗粒级配曲线形状从双曲线型逐渐过渡到反S型，其对应最大、最小干密度均呈现减小的趋势，压实性变差，级配曲线呈现双曲线型(m=0.01～0.522，b=−55.795～0.709)时砂砾料的压实特性要优于呈现反S型时(m=0.522～1.2，b=−0.709～0.987)。

(2)随不均匀系数C_u的增大，砂砾料的最大、最小干密度先增大后减小；随曲率系数的增大，砂

砾料的最大、最小干密度逐渐减小并趋于稳定；随控制粒径的增大，砂砾料最大最小干密度先增大，在控制粒径为100 mm附近达到最大值，之后有所减小。采用不均匀系数和曲率系数反映砂砾料的级配优劣是经验性的定性描述方法，在特定条件下难以准确反映砂砾料的压实特性。

(3)在含砾量相同时，不同级配特征、不同最大粒径的砂砾料的最大、最小干密度是不同的。即级配特征和最大粒径对筑坝砂砾料填筑标准的确定有一定影响。目前在砂砾石坝施工质量检测中，仅以含砾量来表征级配对碾压干密度的影响进行填筑质量检测的方法，未考虑含砾量相同而级配形状和最大粒径不同对砂砾料填筑标准的影响，可能会得出与实际不符的质量检测评估结论。建议在进一步深入研究基础上，结合具体工程，对级配特征和最大粒径对筑坝填筑标准影响的敏感性及对施工质量控制带来的影响进行评估。

参 考 文 献：

[1] 朱俊高，翁厚洋，吴晓铭，等．粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]．岩土力学，2010，31(8)：2394-2398．

[2] 李鹏．宽级配大粒径粗粒土填筑标准的确定方法及应用[D]．西安：西安理工大学，2006．

[3] 何建新，刘亮，张敬东．超径粗粒土现场干密度确定方法[J]．人民黄河，2012，34(2)：121-125．

[4] 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(S2)：4090-4094．

[5] 史彦文，田树玉．大粒径粗粒土极限密度的模型规律及其应用[J]．水资源与水工程学报，2006，17(6)：42-47．

[6] 史彦文．大粒径砂卵石最大密度的研究[J]．土木工程学报，1981，2：53-58．

[7] 田树玉．用渐近线辅助拟合法确定大粒径砂卵石最大干容重[J]．岩土工程学报，1992，14(1)：35-43．

[8] 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．

[9] 胡哲，朱俊高，余挺，等．粗颗粒土级配混合法缩尺后力学性质变化规律研究[J]．能源与环保，2017，39(9)：37-41．

[10] 丁树云，蔡正银，凌华．堆石料的强度与变形特性及临界状态研究[J]．岩土工程学报，2011，32(2)：248-252．

[11] 王俊杰，卢孝志，邱珍锋，等．粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]．水利水运工程学报，2013(6)：16-20．

[12] 李罡，刘映晶，尹振宇，等．粒状材料临界状态的颗粒级配效应[J]．岩土工程学报，2014，36(3)：452-457．

[13] 刘天，朱俊高，薄以霆，等．级配对粗颗粒土休止角影响试验研究[J]．河北工程大学学报(自然科学版)，2017(3)：41-44．

[14] 朱俊高，郭万里，徐佳成，等．级配和密实度对粗粒土三轴试验影响离散元分析[J]．重庆交通大学学报(自然科学版)，2017，36(6)：70-74．

[15] 朱晟，王永明，翁厚洋．粗粒筑坝材料密实度的缩尺效应研究[J]．岩石力学与工程学报，2011，30(2)：348-357．

[16] 朱晟，王京，钟春欣，等．堆石料干密度缩尺效应与制样标准研究[J]．岩石力学与工程学报，2019，38(5)：1073-1080．

[17] 朱晟，张露澄．连续分布超径粗粒土的级配缩尺方法与适用条件[J]．岩石力学与工程学报，2019，38(9)：97-97．

[18] 朱晟，宁志远，钟春欣，等．考虑级配效应的堆石料颗粒破碎与变形特性研究[J]．水利学报，2018，49(7)：849-857．

[19] 朱俊高，郭万里，王元龙，等．连续级配土的级配方程及其适用性研究[J]．岩土工程学报，2015，37(10)：1931-1936．

[20] 郭万里，朱俊高，温彦锋．对粗粒料4种级配缩尺方法的统一解释[J]．岩土工程学报，2016，38(8)：1473-1480．

[21] 郭万里，朱俊高，余挺，等．土的连续级配方程在粗粒料中的应用[J]．岩土力学，2018，39(10)：3661-3667．
[22] 吴二鲁，朱俊高，郭万里，等 ．基于级配方程的粗粒料压实特性试验研究[J/OL]．岩土力学．https://doi.org/10.16285/j.rsm.2018.2358．
[23] FULLER W B，THOMPSON S E．The laws of proportioning concrete[J]．Transactions of the American Society of Civil Engineers，1907，57(2)：67-143．

Influence of gradation characteristics on filling standard of sand gravel material for dam construction

YANG Yusheng[1,2]，ZHAO Jianming[1,2]，WANG Long[1,2]，LIU Xiaosheng[1,2]
(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin，China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing* 100038，*China*；
2. *Key Laboratory on Construction and Security of Water Projects of Ministry of Water Resources，Beijing* 100048，*China*)

Abstract：The filling standard of gravel material has gradation correlation. In the quality control of gravel dam construction，the influence of gradation on dry density of roller compaction is only expressed by gravel content at present，and the influence of gradation shape and maximum particle size on the filling standard of gravel material is not considered. In order to study this effect and evaluate the rationality of using gravel content alone to represent the effect of gradation characteristics on dry density，two groups of gradation curves with the same gravel content but different gradation curve shape and maximum particle size were designed. Combining with the actual construction conditions of vibration rolling，the same gravel content was studied by the density barrel method in situ. The influence of different gradation shape characteristics and maximum particle size on the filling standard of original graded sand gravel for dam construction. The results show that the maximum and minimum dry densities of gravel are affected by the shape of gradation curve and the maximum particle size when the gravel content is the same. The maximum and minimum dry densities of gravel decrease with the increase of gradation parameters m and b. When the gravel content and gradation parameter m are the same，the maximum and minimum dry densities of gravel with different maximum particle size gradations are also different. It shows that different gradation characteristics and maximum particle size have certain influence on the determination of filling standards of dam sand and gravel. It is suggested that the sensitivity of gradation characteristics and maximum particle size to filling standards of dam construction and the impact on construction quality control should be further evaluated in combination with specific projects.

Keywords：gradation characteristics；gravel materials for dam construction；filling standard

（责任编辑：耿庆斋）