

粗粒料级配缩尺方法对其最大干密度的影响研究

左永振, 张 伟, 潘家军, 赵 娜

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 对某原型级配粗粒料, 按规范要求采用剔除法、等量替代法、相似级配法、混合法等 4 种缩尺方法, 获得 15 条模拟级配, 相应的最大颗粒粒径分别为 60、40、20 mm。在相同振动功能条件下, 对模拟级配进行了最大干密度试验, 研究同一原型级配经不同级配缩尺方法后其最大干密度值的变化规律。分析认为, 最大干密度与缩尺后级配的不均匀系数、曲率系数、最大颗粒粒径、小于 5 mm 粒组含量等参量相关, 提出了修正级配参数方法, 即将最大干密度与级配相关参量归一化。最后进行了试样尺寸直径为 1 m 的原型级配粗粒料的击实试验, 验证了归一化公式的合理性。

关 键 词: 缩尺效应; 级配缩尺方法; 粗粒料; 最大干密度; 级配参数

中图分类号: TU 521.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增 1-0417-06

Effects of gradation scale method on maximum dry density of coarse-grained soil

ZUO Yong-zhen, ZHANG Wei, PAN Jia-jun, ZHAO Na

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: There are about 4 methods, i.e. scalping method, equivalent substitution method, similar gradation method and hybrid method, to model the site gradation of soil materials according to the code. And 15 modeling gradations of coarse-grained materials from an engineering site have been modeled by using these gradation scale methods; by the same token, their equivalent particle diameters are 60, 40, 20 mm. The maximum dry density tests also have been conducted to these modeling gradations in the same vibration energy; and the distributing law of maximum dry density value can be concluded. In conclusion, the maximum dry density value goes together with the nonuniform coefficient, curvature coefficient, maximum particle diameter and lower groups (≤ 5 mm), etc. And a corrected gradation parameter has been put forward to normalize the relationship between maximum dry density and relative parameters of gradation. To justify the rationality of normalized formula, the site coarse-grained materials compaction tests have been conducted with the sample diameter of 1 m.

Keywords: scale effect; gradation scale method; coarse-grained soil; maximum dry density; gradation parameter

1 引 言

目前工程中广泛使用的粗粒料诸如砂卵石、卵石、漂石、块石、碎石、石屑等, 或黏性土中含有大量粗颗粒的混合土^[1], 由于粗粒料粒径大, 有的颗粒粒径达 600~800 mm, 有的甚至达 1 000 mm^[2-3], 其原型级配料的力学特性测定, 现有的试验仪器一般难以解决。目前粗粒料的力学性质测定, 当存在超出仪器允许范围的颗粒时, 大多采用缩小颗粒粒径后的模拟级配料, 用现有的试验仪器进行测定,

依据模拟级配料试验结果推求原型级配料的力学性质。

目前粗粒料级配缩尺模拟的方法一般有剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法^[4], 不论采取哪种缩尺方法, 其模型级配与原型级配相比都有明显的差异, 模型级配料的缩尺使得试验结果与原型级配料的性质存在差异, 称之为缩尺效应^[5-6]。

对粗粒料缩尺效应的研究, 始于 Bishop 和 Henkel (1948 年)^[7], 之后, 国内外的许多学者对缩尺效应进行了研究, 主要集中在两方面 (1) 部分

学者研发大型的试验仪器,其目的是希望通过大型仪器来减小级配缩尺带来的影响,如墨西哥(试样直径 $\phi=1\,130\text{ mm}$,围压 $\sigma_3=2.94\text{ MPa}$)、美国加州($\phi=915\text{ mm}$, $\sigma_3=5.0\text{ MPa}$)、日本($\phi=1\,200\text{ mm}$, $\sigma_3=3.0\text{ MPa}$)等国家研制的特大型仪器,但按照目前《土工试验规程》^[4]规定的试样直径与最大颗粒粒径之比大于5倍关系,试验最大粒径也只能达到240 mm,与原型粗粒料的粒径相比尺寸仍偏小。按粗粒料最大粒径已经达到1 m级,需要的仪器试样直径将超过5 m,如此超大型的试样,在试样制备、加压设备、试验效率等方面均存在诸多问题,显然寄望用超大型的仪器来解决缩尺问题是极其困难的。(2)部分学者致力于缩尺效应规律的研究,希望能采用中大型试样尺寸的试验成果能推算原型级配试样的力学性质,这方面的研究居多^[8-21],取得了许多有益的成果,由于以往研究者们更多的考虑了缩尺效应对粗粒料力学性质的影响,而忽视不同缩尺方法的影响和密实度控制要求的不同,导致试验成果和规律出现差异,有些甚至得出的规律完全相反。

在粗粒料的力学特性试验中,如果给定级配和试验干密度,其力学特性等同于已知,因此在粗粒料缩尺效应的研究中最重要影响因素是确定缩尺后的哪种级配、干密度和原型级配、干密度的物理力学性质最接近。首先遇到的就是缩尺后的级配、密度控制问题,研究不同的缩尺方法下干密度与级配的变化规律。

本文采用一种最大粒径为200 mm的原型级配料,采用不同的缩尺方法得到不同的模拟级配,进行最大干密度试验,研究了缩尺方法对密度的影响规律。

2 级配缩尺方法

常用粗粒料缩尺方法有剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法4种。

(1) 剔除法

将超粒径颗粒剔除,计算公式为

$$P_i = \frac{P_{oi}}{100 - P_{d\max}} \quad (1)$$

式中: P_i 为剔除后某粒组含量(%); P_{oi} 为原级配某粒组含量(%); $P_{d\max}$ 为超粒径颗粒含量(%)。

剔除法简单,使用方便,但因剔除了超粒径颗粒,剩余部分作为整体,再计算各粒组含量,使小于5 mm细粒含量相对增大,改变了大于5 mm颗

粒土的性质。除超径含量极少外,一般不采用此法。

(2) 等量替代法

根据仪器允许的最大粒径和 P_5 含量,按比例等质量替代超粒径颗粒,公式为

$$P_i = \frac{P_{oi}}{P_5 - P_{d\max}} P_5 \quad (2)$$

式中: P_5 为大于5 mm粒径土的含量(%)。

等量替代法优点是代替后的级配仍保持原来的粗粒含量,细料含量和性质不变,但改变了粗粒料级配、不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,存在大粒径缩小,级配范围变小,均匀性增大等缺点,因此适用于超径含量小于40%的土石混合料。

(3) 相似级配法

根据原级配曲线的粒径,按几何相似条件等比例地将原型级配缩小至仪器允许范围。计算公式为

$$P_{dn} = \frac{P_{do}}{n} \quad (3)$$

式中: P_{dn} 为粒径缩小 n 倍后相应的小于某粒径的百分含量(%); P_{do} 为原级配相应的小于某粒径的百分含量(%); n 为粒径缩小倍数,即原级配的最大粒径和设备允许的最大粒径之比。

相似级配法的优点是保持颗粒级配的几何形状相似,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 不变;缺点是全料的粒径皆被缩小,使粗粒含量变小,细粒含量增大,从而性质发生变化,一般认为对材料的工程性质影响较大。该法不宜应用于细粒含量多的粗粒料,可应用于粗粒含量大于50%的卵漂石、堆石。

(4) 混合法

同时采用相似级配法和等量替代法,先用适当的比尺缩小,使小于5 mm粒径土的质量不大于总质量的30%,若仍有超粒径颗粒再用等量替代法缩尺。

混合法融合了相似级配法和等量替代法的优缺点,资料表明,该法所得的最大干密度与现场碾压试验相接近^[4]。

《土工试验规程》^[4]给出了上述4种缩尺方法,具体使用哪种方法,目前规范并没有做出明确的规定。

3 试验土料与试验方法

试验土料选择某种砂砾石料,颗粒浑圆、坚硬不易破碎,土料相对密度为2.73,最大粒径为200 mm,小于5 mm含量为8%,不均匀系数 $C_u=12.2$,曲率系数 $C_c=1.1$,原型级配如图1所示。

对该原型级配按上述缩尺方法进行缩尺,缩尺

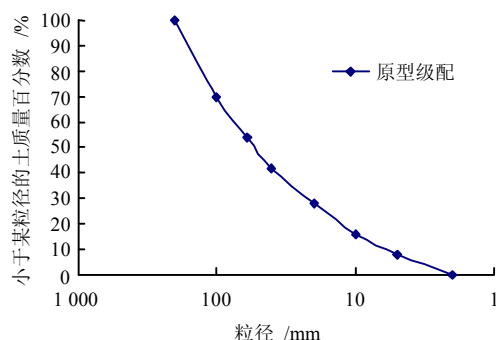


图 1 粗粒料原型级配曲线

Fig.1 The site gradation curve of coarse-grained soil

后的模拟级配按剔除法、等量替代法、相似级配法、混合法依次编号为 TC、DL、XS、HH。模拟级配的最大粒径分别为 60、40、20 mm，并作为编号下标进行区分，如 DL_{60} 代表缩尺方法为等量替代法，缩尺后的最大粒径为 60 mm。在相似级配法和混合法中，缩小倍数 n 可以不同，增加下标以区分，如 XS_{2-40} 代表缩尺方法为相似级配法，缩小倍数 $n=2$ ，缩尺后的最大粒径为 40 mm。

缩尺后的模拟级配见表 1。表中列出了有效粒径 d_{10} 、平均粒径 d_{30} 、控制粒径 d_{60} 、不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 等信息。

最大干密度试验采用振动台法，按土工试验规程进行。台面尺寸 762 mm×762 mm，频率为 40~60 Hz，振幅 0~±2 mm 可调，加重盖板与加重物的总压力为 14 kPa。试验采用干法制样，振动 8 min 后自动停机，因此每个试样的压实功能是相同的，减小人为操作带来的试验误差。

4 缩尺方法对干密度的影响分析

4.1 级配缩尺方法与最大干密度的关系

最大干密度试验成果见表 1，缩尺方法与最大干密度的关系曲线如图 2 所示。图中，实线是不同级配缩尺方法后最大干密度的对比；虚线是均采用混合法缩尺，但是粒径缩小倍数 n 不同的最大干密度的对比。

结合表 1 和图 2 从整体趋势来看，不同缩尺方法得到的最大干密度值呈现出明显的层次。在最大粒径相同条件下，相似级配法的最大干密度值最高，等量替代法得到的最大干密度值最低，剔除法和混合法得到的最大干密度值居中。同时，随最大颗粒粒径的增加，最大干密度增加。

同样采用混合法缩尺得到的最大干密度值，差别也较大，同时呈现出明显的层次，粒径缩小倍数 n 值较小时得到的最大干密度值较低， n 值较大时得到的最大干密度值较高。

本文原型级配料大于 60 mm 的粒组含量为 46%，大于 20 mm 粒组含量为 72%，小于 5 mm 粒组含量为 8%，根据级配缩尺方法的基本要求，剔除法和等量替代法不适用，较好的缩尺方法是相似级配法和混合法。试验结果也证明了这个结论，相似级配法和混合法的最大干密度高于剔除法和等量替代法的最大干密度。

在粗粒料的研究中，一般认为粗料作为骨架料，细料作为空隙填充料，二者在粗粒料组成中所占比例大小直接决定着粗粒料的最大干密度值^[20]。可分

表 1 粗粒料模拟级配与成果

Table 1 The test gradation of coarse-grained soil and tested results

方法	编号	不同粒径(mm)含量 /%					有效粒径 d_{10} /mm	平均粒径 d_{30} /mm	控制粒径 d_{60} /mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	ρ_{dmax} /(g/cm ³)
		60~40	40~20	20~10	10~5	<5						
剔除法	TC ₆₀	22.2	25.9	22.2	14.8	14.8	3.8	10.1	26.0	6.8	1.0	2.143
	TC ₄₀		33.3	28.6	19.0	19.0	3.2	7.8	18.0	5.6	1.1	2.146
	TC ₂₀			42.9	28.6	28.6	2.8	5.2	11.0	3.9	0.9	2.120
等量替代法	DL ₆₀	24.0	28.0	24.0	16.0	8.0	5.7	13.0	27.0	4.7	1.1	2.057
	DL ₄₀		37.9	32.5	21.6	8.0	5.6	10.1	19.5	3.5	0.9	2.024
	DL ₂₀			55.2	36.8	8.0	5.4	7.9	13.0	2.4	0.9	1.909
相似级配法	XS _{3.3-60}	18.0	25.0	19.0	13.0	25.0	1.9	6.8	22.0	11.9	1.1	2.193
	XS ₅₋₄₀		30.0	21.0	17.0	32.0	1.3	4.5	16.0	12.8	1.0	2.203
	XS ₁₀₋₂₀			30.0	22.0	48.0	0.6	2.2	7.5	12.5	1.1	2.197
混合法	HH ₂₋₆₀	20.7	27.5	19.3	16.5	16.0	3.0	9.0	25.0	8.3	1.1	2.135
	HH ₂₋₄₀		36.5	25.6	21.9	16.0	3.1	8.0	19.0	6.1	1.1	2.105
	HH _{3.3-40}			45.2	38.8	16.0	3.5	6.9	12.0	3.4	1.1	2.158
	HH ₂₋₂₀		32.9	25.0	17.1	25.0	1.9	6.4	17.5	9.2	1.2	2.007
	HH _{3.3-20}			44.5	30.5	25.0	1.9	6.0	11.0	5.8	1.7	2.055
	HH ₅₋₂₀			37.6	30.4	32.0	1.3	4.6	9.4	7.2	1.7	2.139

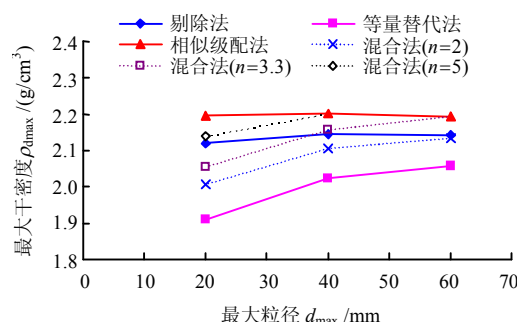


图2 最大干密度与最大颗粒粒径关系

Fig.2 Relationships between maximum dry density and maximum particle size

为3种情况:(1)粗料较多,细料较少,粗料形成骨架,细料较少不能充分填充空隙;(2)粗料与细料比例较好,粗料形成骨架,细料较好的填充空隙,这时材料一般具有较好的力学特性;(3)粗料较少,细料较多,粗料悬浮在细料中间,不能形成骨架。

相似级配法得到的模拟级配,级配连续平滑,不均匀系数最大,同时其小于5 mm 粒组含量是最高的(在相同最大粒径的条件下),试样中粗细料填充性较好,粗料形成骨架,细料较好的填充在骨架空隙中,因此得到的试样孔隙率最小,最大干密度最高。等量替代法的不均匀系数最低,小于5 mm 粒组含量也是最低(8%),因此其填充性最差,最大干密度最低。剔除法与混合法的不均匀系数与小于5 mm 的含量介于中间,得到的最大干密度也分布在中间。

混合法中曲率系数接近,不均匀系数与最大颗粒粒径之间没有规律(见图3),而得到的最大干密度成果却呈现较好的规律(见图2),说明最大干密度的影响因素除曲率系数、不均匀系数、最大颗粒粒径外,还有比较关键的影响因素,针对本次模拟级配,此因素应该是小于5 mm 粒组含量。

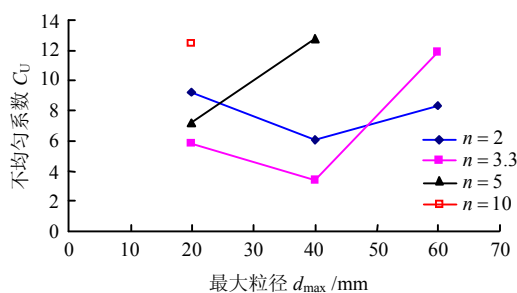


图3 混合法中不均匀系数与最大粒径关系

Fig.3 Relationships between nonuniform coefficient and maximum particle size in mixing scale method

4.2 小于5 mm 含量与最大干密度的关系

根据上述推导,级配缩尺后的最大干密度的影

响因素主要是曲率系数、不均匀系数、最大颗粒粒径、小于5 mm 粒组含量。

朱俊高等^[21]在双江口堆石料的研究中提出了级配参数的概念,表达式为

$$\lambda = C_u / C_c \lg d_{\max} \quad (4)$$

绘制本次试验的最大干密度与级配参数的关系曲线,如图4所示。可见,采用式(4)拟合的规律性不好,离散性较明显,为此,在式(4)中引入小于5 mm 粒组含量(1-P₅),将式(4)修正为

$$\lambda' = C_u / C_c \lg d_{\max} \lg(1 - P_5) \quad (5)$$

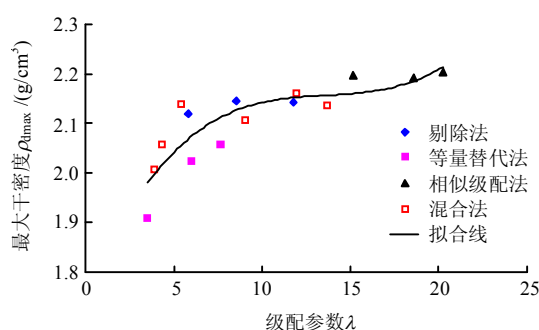


图4 最大干密度与级配参数λ关系

Fig.4 Relationships between maximum dry density and gradation parameters

修正后的最大干密度与修正级配参数的关系曲线如图5所示。从图中可以看出,离散性明显降低,归一化较好。采用3次多项式已经能较好的拟合最大干密度与修正级配参数的关系,表达式为

$$\rho_{d\max} = a(\lambda')^3 + b(\lambda')^2 + c\lambda' + d \quad (6)$$

式中: a、b、c、d 均为拟合系数,无物理意义。本次试验中, $a = 5.25 \times 10^{-5}$, $b = 3.1 \times 10^{-3}$, $c = 0.060$, $d = 1.777$ 。

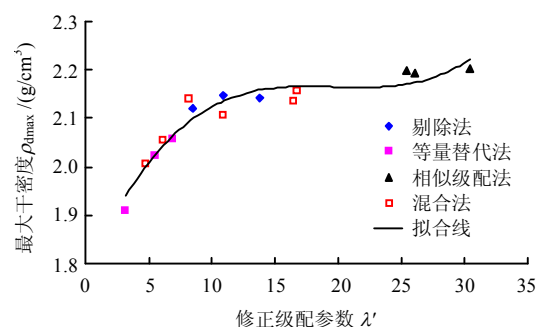


图5 最大干密度与修正级配参数λ'关系

Fig.5 Relationships between maximum dry density and modified gradation parameters

5 原型级配料的密度验证

本次试验的原型级配最大粒径为 200 mm, 不均匀系数 $C_u = 12.2$, 曲率系数 $C_c = 1.1$, P_5 含量为 92%, 计算修正级配参数 $\lambda' = 23.8$, 根据式 (6), 推算原型级配的最大干密度为 2.169 g/cm^3 。

为了验证该级配的最大干密度, 在室内进行了 1 组大型击实试验, 试样筒尺寸 ($\phi \times h$) 为 $1\,000 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$ (见图 6), 试验料采用原型级配料, 采用表面振动法进行试验, 采用相同振动时间 (即击实功能相同) 测量其干密度的方法, 当干密度不再增加或缓慢增加时的干密度确定为该原型级配的最大干密度。

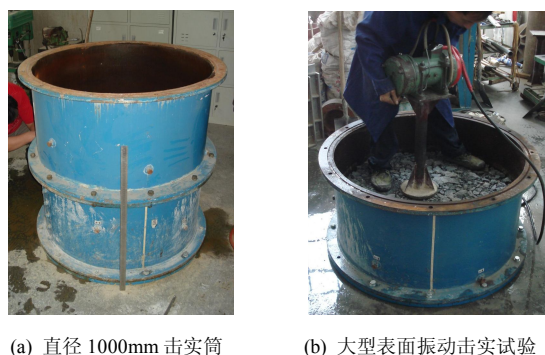


图 6 直径 1 000 mm 大型击实试验
Fig.6 Large scale compaction test with a diameter of 1 000 mm

表面振动器与振动台法的电机功率、振动频率均相同, 表面振动器的静压力与振动台法的配重块的静压力相同。

大型击实试验的结果如图 7 所示。经试验确定该原型级配的最大干密度为 2.180 g/cm^3 , 与式 (6) 推算的密度值非常接近, 因此修正级配参数的建立, 最大干密度与修正级配参数的拟合公式, 具有试验基础, 是一种经验公式, 应该有重要的应用价值。

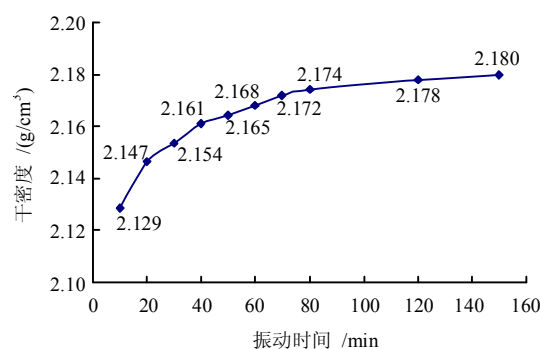


图 7 大型击实试验结果
Fig.7 Results of large scale compaction test

利用修正级配参数的归一性, 建立最大干密度与修正级配参数的关系, 通过一定量的级配缩尺后的最大干密度的试验, 可初步推断原型级配的最大干密度值^[21]。当然, 这还需要现场碾压试验的验证和工程经验的积累。

本次进行的大尺寸试样的击实试验, 因室内表面振动泵的功率相对较小, 试验后期已经出现较明显的分层离析现象, 表面均是大颗粒试样, 细料部分都沉积到底部。为获得真实的数据, 应尽量选择大功率的表面振动器。

6 结 论

(1) 针对本次的原型级配, 不同缩尺方法得到的最大干密度值呈现出明显的层次, 相似级配法的最大干密度值最高, 等量替代法得到的最大干密度值最低, 剔除法和混合法得到的最大干密度值居中。同时, 最大干密度随最大颗粒粒径的增加而增大。

(2) 同一种原型级配, 经过不同的级配缩尺方法, 进行相同条件的最大干密度试验, 得到的最大干密度差别较大, 变化范围在 $1.91 \sim 2.20 \text{ g/cm}^3$ 之间, 差值达到 15%, 可见级配缩尺方法本身对最大干密度有较大的影响。

(3) 均采用混合法进行缩尺, 粒径缩小倍数 n 值不同时, 得到的最大干密度也有明显的差异, 变化范围在 $2.00 \sim 2.20 \text{ g/cm}^3$ 之间, 差值达到 10%。

(4) 模拟级配的最大干密度主要与不均匀系数、曲率系数、最大粒径、小于 5 mm 粒组含量相关。采用修正级配参数能较好的拟合最大干密度与级配相关量的关系。

(5) 级配缩尺时应按照缩尺方法的基本规定, 考虑缩尺后的级配中小于 5 mm 粒组的含量, 使粗细料达到较好的填充状态, 一般可获得较高的最大干密度。

本次只针对一种原型级配进行了试验研究, 当原型级配改变时, 结论 (1) ~ (3) 是否适用, 需要另作研究。

参 考 文 献

- [1] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 酆能惠. 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.
- [4] 南京水利科学研究院. SL 237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

- [5] 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): 40—43.
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): 40—43.
- [6] 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. Deformation behaviour and scale effects of coarse-grained materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(4): 89—95.
- [7] BISHOP A W, HENKEL D J. The measurement of soils properties in the triaxial test[R]. London: Edward Arnold Ltd., 1948.
- [8] 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.
- [9] 翁厚洋, 朱俊高, 余挺, 等. 粗粒料缩尺效应研究现状与趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 425—429.
WENG Hou-yang, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. Status quo and tendency of studies on scale effects of coarse-grained materials[J]. **Journal of Hohai University (Natural Science Edition)**, 2009, 37(4): 425—429.
- [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, 24(2): 92—103.
- [11] 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.
- [12] 梅迎军, 梁乃兴, 李志勇. 尺寸效应对砂砾石变形特性的分析[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(2): 80—82.
MEI Ying-jun, LIANG Nai-xing, LI Zhi-yong. Dimension effect to the deformation characteristic of aggregate[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University**, 2005, 24(2): 80—82.
- [13] 李翀, 何昌荣, 王琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 564—566.
LI Chong, HE Chang-rong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Supp.1): 564—566.
- [14] 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.
ZHU Sheng, WANG Yong-ming, WENG Hou-yang. Study of scale effect of density of coarse-grained dam materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 348—357.
- [15] 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.
- [16] 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. 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.
- [17] 花俊杰, 周伟, 常晓林, 等. 堆石体应力变形的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 328—335.
HUA Jun-jie, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Study of scale effect on stress and deformation of rockfill[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 328—335.
- [18] 杨贵, 刘汉龙, 陈育民, 等. 堆石料动力变形特性的尺寸效应研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 122—126.
YANG Gui, LIU Han-long, CHEN Yu-min, et al. Research on size effect of rockfill materials on dynamic deformation property[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(5): 122—126.
- [19] 王永明, 朱晟, 任金明. 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.
WANG Yong-ming, ZHU Sheng, REN Jin-ming. Research on scale effect of coarse-grained materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1799—1806.
- [20] 张少宏, 康顺祥, 骆亚生. 分段法确定无黏性超粒径粗粒土最大干密度[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 51—53.
ZHANG Shao-hong, KANG Shun-xiang, LUO Ya-sheng. Confirming the maximum dry density of oversized coarse grained soil by using subsection method[J]. **Journal of Water Resources & Water Engineering**, 2005, 16(3): 51—53.
- [21] 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—2399.
ZHU Jun-gao, WENG Hou-yang, WU Xiao-ming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2394—2399.