

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.013

粗粒料缩尺效应研究现状与趋势

翁厚洋^{1,2},朱俊高¹,余挺³,王观琪³

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2.宏润建设集团股份有限公司,浙江 宁波 315700;
3.中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,四川 成都 610072)

摘要:总结了粗粒料室内试验不同缩尺方法的优缺点、目前粗粒料强度和变形试验常用仪器的优缺点以及这些仪器用于研究粗粒料强度和变形的代表性成果,概括了缩尺效应对粗粒料强度和变形特性影响方面的研究成果,分析了缩尺效应的评价依据,讨论了缩尺效应研究中应考虑和注意的一些问题,如试样密度的控制、缩尺效应的定量化表述等,并指出缩尺效应研究应注意替代级配料和原级配料的密度控制方法。

关键词:粗粒料 抗剪强度 变形 缩尺效应 试验设备
中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)04-0425-05

粗粒料是指由大小岩石(砾石和漂石等)颗粒彼此填充集合而成的粒状散粒体结构材料。颗粒间接触通常以点接触形式存在,且不具黏聚力。从这点来看,粗粒料的性质可能与砂有些相似。实际上,粗粒料的工程性质比砂复杂得多,其颗粒大小、形状、强度、级配、受力情况等因素都对其应力-应变关系有不同程度的影响,尤其是颗粒大小的影响。目前土石坝常用的堆石料最大粒径达数十 cm 到 1 m 的量级,利用现有的大型试验仪器还不能对原型级配土石料进行力学试验。因而,室内试验用料的最大粒径受到限制,需要对超过试验容许最大粒径的土石料进行必要的缩尺处理。通过对缩尺后试验用料(以下称替代级配料或替代料)的试验确定实际级配材料的力学性质,替代级配料与原级配料之间力学性质的差异即一般所指的缩尺效应。研究缩尺效应的目的是希望通过较小尺寸的试验设备对较小粒径粗粒料进行试验的结果推知原型级配料的试验结果。

粗粒料缩尺效应的试验研究始于 20 世纪 40 年代末期,迄今为止,国内外已有许多学者^[1-5]对缩尺效应问题进行了研究。随着应用于实际工程的粗粒料颗粒粒径的增大,一些学者开始致力于大型试验仪器的研究,其目的是通过大型试验仪器来尽量减小试样缩尺所带来的影响。20 世纪 60 年代以来,墨西哥、美国、日本和中国等都研究了一些大型高压三轴试验仪器,最大试样直径达到 120 cm,试料最大粒径达 250 mm。同时,一些学者^[1-4,6-8]致力于缩尺效应规律的研究。

然而,总体上关于缩尺效应的研究较少,并且缩尺效应研究中试验替代级配料与原型级配料的力学特性关系难以定量描述,有的研究结论甚至相反。由此可见,粗粒料缩尺效应的问题仍需要深入研究。就现有的研究成果来看,在粗粒料的缩尺方法、试验方法、缩尺效应评价依据等方面都有一些需要深入研究的问题。

为此,本文总结了现有缩尺方法的优缺点,粗粒料抗剪强度试验仪器的优缺点以及这些仪器用于研究抗剪强度和变形的代表性成果,并指出了缩尺效应研究中应注意的若干问题。

1 粗粒料室内试验试料的缩尺方法

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。文献[9]对超粒径颗粒缩尺方法进行了详细介绍。

剔除法方法简单,使用方便,但因剔除了部分超粒径颗粒,使细粒含量增大,超粒径料由剩余的小于允许最大粒径的全料颗粒所代替。

收稿日期:2008-09-10
基金项目:国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金(50639050) 国家自然科学基金(50579014)
作者简介:翁厚洋(1982—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事粗粒土基本特性研究。

等量替代法按比例等量替换超粒径颗粒,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,但存在大粒径缩小,级配范围变小,均匀性增大等缺点。

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。因此,该法不宜应用于细粒含量多的粗粒料,可应用于粗粒质量分数大于 50% 的卵漂石、堆石。相似级配法虽可保持原始级配不均匀系数及曲率系数不变,但却使得细料含量增大,一般认为对材料的工程性质影响较大。

混合法先用相似级配法按适宜的比尺缩小粒径,使超粒径颗粒质量分数小于 40%,再用等量替代法缩制试样。试验研究表明,该法所得的最大干密度与现场碾压试验结果比较接近。

等量替代法有等质量、等体积、等截面和等表面积替换之分,一般采用等质量替代法。为了测定超粒径粗粒料最大干密度,许多学者对超粒径料的缩尺方法进行了改进。Frost^[10]提出了剔除超粒径料的系列延伸法;史彦文^[11]提出了相似级配系列延伸法,刘贞草^[12]提出了等量替代级配系列延伸法,田树玉^[13]提出了渐近线辅助拟合法,郭庆国^[14]提出了超粒径粗粒料最大干密度的近似测定方法,张少宏等^[15]提出了无黏性超粒径粗粒料最大干密度的确定方法。

超粒径的处理方法(缩尺方法)不同,产生的替代料级配差异会很大,其力学性质差异也必然很大。在缩尺效应的研究中,除了不同缩尺方法引起的力学性质差异需要研究外,缩尺方法本身也是一个值得深入研究的问题。目前,一般认为混合法较合理,但笔者认为相关依据还不够充分,对不同级配的土进行不同最大粒径替代时,可能有不同的最佳替代方法。

2 粗粒料抗剪强度的试验仪器及发展

粗粒料缩尺效应产生的主要原因是试验仪器对试料粒径有一定的范围限制。为了研究粗粒料的力学性质,国内外许多科研单位和大院校先后研制了多种大型土工试验仪器。目前用于测定粗粒料抗剪强度的试验仪器主要有 2 种:大型直剪仪和大型三轴压缩仪。直剪试验可在现场或室内进行。

直剪仪因其结构简单、容易制造、操作方便,适用范围较广。在粗粒料抗剪强度试验中,大型直剪试验是一种开展最早、最为普遍采用的方法。大型直剪仪的平面多数为正方形,也有长方形和圆形的,尺寸大小也不尽相同。目前国外最大的直剪仪在德国的渥赫拉坝工程中使用,剪力盒尺寸为 300 cm × 200 cm × 50 cm。我国最大的直剪仪尺寸是 200 cm × 200 cm × 100 cm,曾在石头河坝工程中使用过。国内外几种大型的直剪仪如表 1 所示。

粗粒料的大型直剪试验大多在施工现场进行。为了防止剪切面上靠近剪力盒的颗粒自身受剪而造成抗剪强度偏大假象发生,试样的最大粒径 $d_{\max}$ 或平均粒径 d_0 不宜过大,通常认为剪力盒的最小平面尺寸与最大粒径比值在 4~10 之间较合适。对砂砾料 $D/d_{\max}$ (D 为试样直径)和不同 D/d_0 的比较试验结果表明,当 $D \geq 8d_{\max}$ 或 $D \geq 25d_0$ 时试样才不受剪力盒约束的影响^[16]。所以,即使使用大型直剪仪,对粒径较大的粗粒料来讲,试验用料仍需缩尺处理。同时,试验时剪力盒的上、下盒之间必须预留一定尺寸的缝隙。如果缝隙尺寸太小,盒壁将制约颗粒的滚动和错动,造成抗剪强度偏高。如果缝隙尺寸太大,上、下盒之间试料就会松弛,剪切过程中试料会挤出,从而有效剪切面积减小,剪切面上土的密度变小,抗剪强度偏低,试验结果也不能反映土料的真实强度特性。

笔者所进行的中粗砂大型直剪试验表明,剪切变形后,试样不均匀现象明显,靠近剪切方向剪切盒内侧试样呈堆积挤压趋势,说明试样内应力分布不均匀,这是由于剪力盒阻止试样颗粒移动引起的。这种应力不均无疑会影响试验精度。

由于大型直剪仪存在上述不足,且一般只能测得粗粒料的抗剪强度指标,不能用来研究试样变形,所以

表 1 国内外几种大型的直剪仪
Table 1 Typical large-size direct shear
apparatuses at home and abroad

国家	使用机构或 工程名称	剪切盒尺寸	粗粒料最大 粒径/cm
中国	石头河工程局	200 cm × 200 cm × 100 cm	40
中国	阿岗坝	120 cm × 120 cm × 60 cm	30
中国	南京水利科学 研究院	100 cm × 100 cm × 50 cm	12
中国	柴河坝	71 cm × 71 cm × 44.5 cm	4~5
中国	清华大学	50 cm × 50 cm × 40 cm	
德国	渥赫拉坝	300 cm × 200 cm × 50 cm	10
美国	福特	280 cm × 280 cm × 90 cm	
日本	水洼坝	200 cm × 200 cm × 55 cm	
日本	新冠坝	80 cm × 80 cm × 30 cm	
日本	渔梁瀨坝	250 cm × 250 cm × 60 cm	

后来逐渐被大型三轴压缩仪所取代。

20 世纪 60 年代以来,国内外先后研制了一批大型三轴压缩仪,如表 2 所示。

大型三轴压缩仪发展至今,在试样尺寸、围压、压力室结构、体积变形量测和数据自动采集与处理等方面均达到了新的水平^[12]。此外,为了更加真实地模拟粗粒料的受力状态,还出现了大型平面应变仪、真三轴仪等仪器。但由于这些仪器较为复杂,用于粗粒料试验难度较大,不少技术还不完备,尚未推广和普及。

尽管试验仪器的尺寸在不断加大,但与实际堆石料的粒径相比尺寸仍偏小,且使用这些大型设备要耗费大量的人力、财力和时间,因此,一些学者^[3,17-18]注重于粗粒料试验仪器合理尺寸的研究,希望找出一种试验结果能基本反映原级配料力学性质的试样尺寸。对直径 30~100 cm 范围内试样的试验研究表明^[8,19],由直径 30 cm 试样测得的内摩擦角 φ 值与由更大直径试样测得的 φ 值差别不大。这说明,过分加大仪器尺寸会大大增加试验的难度和工作量,而不会明显提高试验精度^[20]。由此可知,粗粒料试验采用直径为 30 cm 的试样即可,现在国内外一般都以 30 cm 直径的三轴压缩仪作为粗粒料的常规试验设备。

3 粗粒料缩尺效应的试验研究

粗粒料缩尺效应的早期研究主要是通过试样的峰值强度、轴应变等对缩尺效应影响进行分析,且以 φ 的变化作为评价依据。近年来,随着对粗粒料工程性质研究的进展,一些学者认识到仅研究缩尺效应对粗粒料摩擦角的影响是不够的,同时还应考虑到缩尺效应对其变形特性的影响。

孟宪麒等^[20]在研究石头河土石坝坝壳堆石料抗剪强度时,采用 200 cm×200 cm×100 cm 大型直剪仪和 50 cm×50 cm×40 cm 中型直剪仪进行了大量砂卵石的抗剪强度试验。结果表明,对原级配料采用相似级配法替代的砂卵石料,在同一密度下,小试样比大试样的内摩擦角 φ 大。当试验密度大于“临界密度”^[21]时, φ 随着平均粒径 d_0 (或砾石质量分数)的增大而增大,反之减小。

司洪洋^[1]对小浪底堆石坝的堆石料按相似级配法进行缩尺,并通过直径分别为 6.18 cm,10.1 cm,20 cm,30 cm 的试样研究了土石料最大粒径 $d_{\max}$ 对 φ 的影响。结果表明,在颗粒最大粒径 20~250 mm 范围内, φ 随着最大粒径的增大而减小,并在粒径 60~200 mm 段迅速减小,减小幅度达 2°~3°。

李凤鸣等^[22]对小浪底堆石坝的堆石料按相似级配法进行缩尺后,进行了大型高压固结、三轴剪切试验和离心模型试验。结果表明,粗粒料的颗粒按相似级配法缩尺后,不同程度地改变了原粗粒料的力学性质,试样剪胀性明显增大。同一围压下最大粒径为 60 mm 土料的 φ 大于最大粒径为 10 mm 土石料的 φ 。

王继庄^[8]通过 1 组磨圆度较好的砂砾料及 2 组有代表性的碎石料(花岗岩和灰岩类),分别制成了不同密度的直径为 30 cm,10 cm 的试样并进行了三轴试验。结果表明,缩尺效应及密度对粗粒料卸载时的应力-应变关系影响不大;当试样直径 $D<30$ cm 时,缩尺效应对峰值强度影响不大,但对变形参数有不可忽视的影响,试样尺寸越小,体积模量越小。

董槐三等^[23]在对天生桥一级水电站面板堆石坝筑坝材料进行试验的基础上,研究了堆石料试验的缩尺范围及其对工程性质的影响,即在同一密度控制标准下,用不同缩尺方法及不同尺寸的仪器,研究了堆石料的强度、应力-应变关系及压缩变形等的异同。结果表明,相似级配法缩尺的试料强度较高,等量替代法缩尺的试料强度较低,混合法缩尺的试料强度居中。

郦能惠等^[6]采用相似级配法缩尺的试料(最大粒径分别为 40 mm,60 mm,80 mm 和 120 mm)进行了大量室内对比试验。结果表明,摩擦角随着最大粒径的增大而减小。郦能惠等^[6]还提出了确定实际填筑的原型堆石料的强度和变形特性以及本构模型参数的方法,给出了缩尺效应的修正系数。

高莲士等^[24]对多种堆石料的室内和现场(试样直径为 50 cm 和 132 cm)2 种侧限压缩试验结果进行了分析,认为目前用直径 30 cm 的堆石料试样进行三轴试验所产生的缩尺效应可能使试验得到的堆石料变形模

表 2 国内外典型大型三轴压缩仪
Table 2 Typical triaxial shear apparatuses at home and abroad

国 家	研制机构名称	试样直径/ cm	最大围压/ MPa
墨西哥	墨西哥大学	113	2.5
美 国	加利福尼亚大学	91.5	5.25
日 本		120	
中 国	昆明勘测 设计研究院	70	1.5
中 国	中国水利水电 科学研究院	30	7
中 国	南京水利 科学研究院	50	3

量偏大,导致坝体变形估计不足。

国外也有一些学者对粗粒料的缩尺效应进行了研究。Marachi 等^[2]用剔除法缩尺后的石料进行了试验,认为堆石料的 φ 随着试料的最大粒径的减小而增大。Hennes 曾用最大粒径($d_{\max} = 20\text{ cm}$)相同而加权平均粒径 d_0 不同的 3 组粗粒料,在同一相对密度下进行了强度指标测定。结果表明, φ 随着 d_0 的增大而增大^[20]。

郇能惠^[4]对国内外一些关于粗粒料最大粒径对抗剪强度影响的研究成果进行了比较,发现有的研究结论是随着最大粒径的增大, φ 减小,有的研究结论是最大粒径越大, φ 值越大,还有的研究结论是最大粒径对 φ 值影响不大。由此看来,目前在粗粒料缩尺效应方面的研究还很不成熟。

4 讨 论

4.1 粗粒料缩尺效应研究应注意的问题

a. 缩尺方法. 由于不同缩尺方法缩尺后试料的性质不同,试验时采用何种缩尺方法,应认真考虑。

b. 缩尺比例. 缩尺后最大粒径的大小,对缩尺后试料的性质影响如何,如何推知原型料的强度、变形性质,研究中需要考虑。

c. 试料密度的控制. 由于缩尺后试料级配与原级配不同,不同缩尺方法缩尺后的试料级配也不同。在同样压实功能情况下,这些不同级配试料的密度显然不同。试验时各种替代级配料密度的取值,必然会影响试验结果,从而影响缩尺效应的研究结论。已有的研究,对不同级配料,有的是控制相同密度,有的是控制相同相对密度,有的则是控制相同压实功能。笔者认为,后两者较为合适。

4.2 缩尺效应研究应遵循的原则

a. 预先确定试样密度控制方法,是采用相同密度还是相同击实功或相同相对密度,笔者建议采用后两者之一,因为前者方法制备的不同级配的试样相对密度可能相差较大,导致不同级配试样的试验结果差异较大,使得缩尺效应的影响变大。同时要考虑试样的级配是采用制样前的级配,还是压实或击实制样完成后的级配问题。

b. 用同一种缩尺方法制备替代料,用不同大小尺寸(但级配相同)的试样进行试验,试样控制粒径依据试样尺寸的 $1/5 \sim 1/6$ 标准确定。也可以对不同控制粒径的试样,采用同一尺寸试样(即同一仪器)进行试验,这样,可避免由于设备不同引起的误差。

c. 对同一原型级配料采用不同缩尺方法缩尺得到最大粒径相同的级配料进行试验,研究缩尺方法引起的强度或变形差异。

d. 继续研制更大型的仪器设备,最大限度地使试验替代料级配接近原型料级配。同时,要利用现有设备进行大量的不同土石料的试验研究,并总结规律。

e. 进行试验研究所采用的试样密度控制方法非常重要,它决定了所有试验结果是否具有可比性,因此,应首先考虑试样密度控制方法并对其进行深入研究。

f. 开发研制新型大型设备,如大型环剪仪。大型环剪仪试验时剪切面上应力分布比直剪试验中剪切面上应力分布均匀,用它测试粗粒料的强度指标更准确。

g. 目前缩尺效应研究侧重于定性描述,应进行量化表示的研究。郇能惠^[4]提出了一种较好的对比试验法量化缩尺效应,但还只应用于强度指标,对变形的量化研究需要加强。

5 结 语

本文系统分析了缩尺方法的优缺点以及缩尺效应对粗粒料强度和变形的影响,总结了粗粒料强度和变形的试验仪器以及这些仪器用于研究强度和变形的代表性成果,指出了缩尺效应研究中应注意的一些问题。

目前,缩尺效应的研究大多集中于抗剪强度方面,而对变形的影响研究相对较少,对密度的影响研究更少。定性描述居多,而定量研究偏少。即使在强度方面,目前的研究还很不成熟,不同学者得出的研究结论甚至相反,缩尺效应对强度的影响及其定量表述仍需深入研究。

参考文献:

[1] 司洪洋. 堆石缩尺效应研究中的几个问题[C]//第六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.
- [2] 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.
- [3] 司洪洋. 大型三轴试验的选型问题 [J]. 勘察科学技术, 1988(1) :12-17.
- [4] 郦能惠. 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.
- [5] 翁厚洋. 粗粒料缩尺效应试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [6] 郦能惠, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] SL237—1999, 土工试验规程 [S].
- [10] FROST R J. Some testing experiences and characteristic of bouldas gravel filling earth dam [M] // Evaluation of Relative Density and Its Roll in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, ASTM, Special Technical Publication 523. Los Angeles :ASTM, 1972 :207-233.
- [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(2) :53-58.
- [12] 刘贞草. 大粒径粗粒材料相对密度试验研究 [J]. 土石坝工程, 1987(2) :45-48.
- [13] 田树玉. 用渐近线辅助拟合法确定大粒径砂卵石最大干密度 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1) :37-45.
- [14] 郭庆国. 超径粗粒土最大干密度的近似测定方法 [J]. 水利学报, 1993(8) :70-79.
- [15] 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.
- [16] 陈明致, 金来禧. 堆石坝设计 [M]. 北京: 水利出版社, 1982.
- [17] FRASSONI A, HEGG U, ROSSI P P. Large-scale laboratory tests for the mechanical characterization of granular materials for embankment dams [C] // Proc 14th Int Cong on Large Dams. Rio de Janeiro :[s. n.], 1982 :727-751.
- [18] 刘鳞德. 我国大型和高压土工仪器设备及测试技术综述 [J]. 大坝观测与土工测试, 1988(2) :31-37.
- [19] 冯文生, 郑治. 大粒径填料工程特性的试验和研究 [J]. 公路交通技术, 2004(1) :1-5.
- [20] 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(2) :92-103.
- [21] 高尔西金. 土壤的力学性质 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1954.
- [22] 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.
- [23] 董槐三, 尹承瑶. 天生桥一级水电站面板堆石坝坝填材料性质研究 [J]. 红水河, 1996, 15(4) :7-13.
- [24] 高连士, 蔡昌光, 朱家后. 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.

Status quo and tendency of studies on scale effects of coarse-grained materials

WENG Hou-yang^{1, 2}, ZHU Jun-gao¹, YU Ting³, WANG Guan-qi³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Hongrun Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315700, China ;

3. Chengdu Hydropower Investigation and Design Institute, CHECC, Chengdu 610072, China)

Abstract : The advantages and disadvantages of different scale methods for laboratory tests on coarse-grained materials were summarized. The existing apparatuses for strength and deformation tests on coarse-grained materials as well as the representative achievements were reviewed. The achievements in researches on the scale effects on the strength and deformation properties of coarse-grained materials were discussed. The basis for the evaluation of the scale effects was analyzed. Problems in the studies on scale effects were presented, including density control and quantitative expression of the scale effects. It is pointed out that much attention should be paid to the density control of the substitute and original gradation soils in studies on the scale effects.

Key words : coarse-grained material ; shear strength ; deformation ; scale effect ; test apparatus