

粗粒料三轴湿化颗粒破碎试验研究

魏松^{1,2}, 朱俊高^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程水利部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 颗粒破碎是引起粗粒料湿化变形的重要因素, 有必要对其进行深入研究。利用改进的应力控制三轴仪, 对坝的粗粒料进行不同围压和湿化应力水平下保持应力水平不变的三轴湿化变形试验, 同时对湿化前后的试样进行颗粒分析试验。依据试验结果, 分析湿化颗粒破碎的原因, 得到湿化变形量及 Hardin 的颗粒破碎指标表示的颗粒破碎量。对粗粒料湿化变形和湿化颗粒破碎试验结果的分析表明: 湿化变形与围压及湿化应力水平有关; 湿化引起颗粒破碎, 对颗粒级配曲线有较大的影响, 湿化前后级配曲线的颗粒累积百分比的差值随粒径呈驼峰状分布, 驼峰位于 25% 含量粒径左右; 湿化引起的颗粒破碎使得级配曲线的曲率系数、不均匀系数和 60% 含量粒径减小; 湿化颗粒破碎随着围压和湿化应力水平的增加而增加; 湿化变形与湿化颗粒破碎之间有很好的相关性, 湿化轴变与湿化颗粒破碎近似成线性关系; 湿化变形的基本规律可以根据湿化颗粒破碎规律加以解释。

关键词: 土力学; 粗粒料; 湿化变形; 颗粒破碎; 三轴试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2006)06-1252-07

STUDY ON WETTING BREAKAGE OF COARSE-GRAINED MATERIALS IN TRIAXIAL TEST

WEI Song^{1,2}, ZHU Jungao^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Breakage is an important factor to influence wetting deformation of coarse-grained materials; and farther study is necessary. The wetting triaxial tests under various confining pressures and wetting stress levels are carried out on a coarse-grained material with a new stress-control triaxial apparatus; and the grain grading test is done with the samples before and after wetting. According to the tests, the cause of grain breakage due to wetting is explained; and the wetting deformation and grain breakage value expressed by Hardin index are obtained. The test results indicate that the wetting deformation is related to confining pressures and wetting stress levels; the wetting induces the grain breakage; and the wetting grain breakage has obvious influence upon the grain size distribution curve. The difference of grain size distribution curve before and after wetting is like a hump; and the maximum value is located at about the grain diameter of 25% of the grain size distribution curve. The grain breakage caused by the wetting reduce the coefficient of curvature; the coefficient of uniformity and the special grain diameter of 60% of the grain size distribution curve and the grain breakage value becomes greater with the increase of confining pressure and wetting stress level. The wetting deformation has close correlation with the wetting grain breakage; and the axial wetting deformation is linear to the grain breakage approximately. It is found that the wetting deformation behaviour can be explained from the viewpoint of the wetting grain breakage.

Key words: soil mechanics; coarse-grained materials; wetting deformation; grain breakage; triaxial test

收稿日期: 2005-09-21; **修回日期:** 2005-12-02

作者简介: 魏松(1970-), 男, 1993年毕业于河海大学农田水利工程专业, 现为博士研究生, 主要从事土石坝工程方面的研究工作。E-mail: ddweisong@163.com

1 引言

我国目前土石坝建设出现了前所未有的高潮,多座 200 m 甚至 300 m 级的高坝在规划或设计中。随着我国高土石坝的建设,粗粒料的蓄水湿化变形是急需解决而没有很好解决的重要问题之一。从目前国内外已建成土石坝的监测资料看,土石坝在蓄水后的变形是不可忽视的,也不乏由于湿化变形危害坝体安全甚至溃坝的例子,如委内瑞拉的埃尔伊西罗坝^[1]、墨西哥的英菲尔尼罗坝^[2]、密云水库走马庄付坝^[3]及青海沟后水库^[4]等。目前,大多学者认为,所谓粗粒料的湿化变形^[5~8],是指粗粒料在一定的应力状态下浸水,由于颗粒之间被水润滑以及颗粒矿物浸水软化等原因而使颗粒发生相互滑移、破碎和重新排列,从而发生变形的现象。这种变形是在应力状态不变时,土由干变湿所发生的变形^[9]。从上述定义可以看出,湿化变形的原因是多方面的,要深入研究,有必要对各种因素分别探讨。

虽然人们已认识到在粗粒料湿化过程中,颗粒破碎是一个非常重要的因素,但目前对湿化变形中的颗粒破碎研究甚少^[10]。本文利用改进的应力控制三轴仪进行了不同围压和湿化应力水平下保持应力水平不变的湿化变形试验及对应的颗粒分析试验,研究了粗粒料湿化变形的基本规律,分析了湿化颗粒破碎的原因、对颗粒级配曲线的影响及基本规律,揭示了湿化过程中的颗粒湿化破碎与湿化变形之间的关系。同时利用得到湿化颗粒破碎的规律,从颗粒破碎的角度对湿化变形规律进行了初步解释。

2 试验仪器、材料及方法

2.1 试验仪器

进行湿化变形试验的三轴仪采用了电子万能试验机控制轴向力和位移,能根据试样湿化中的体积变化及时修正施加于试样的外力,从而使湿化前后试样所处的应力状态保持相同。采用了精度较高的 GDS 液压控制器施加试样的围压,同时测得进出压力室的水量即为试样的体变。

2.2 试验材料、试验方案及试验方法

试验所用粗粒料为新鲜和微风化花岗岩,颗粒三轴近似相等,棱角较尖锐。试样直径 101 mm、高

200 mm。根据规范^[11],最大粒径取 20 mm。试样的颗粒级配曲线见图 1,不均匀系数 C_u 为 18.2,曲率系数 C_c 为 1.51。制样干密度为 1.94 g/cm^3 ,相对密度为 0.8。为防止围压作用下乳胶膜被颗粒棱角刺破,试验时先套一层标准乳胶膜(厚约为 0.25 mm),再在外面套一层特制厚为 1.2 mm 乳胶膜包裹试样。

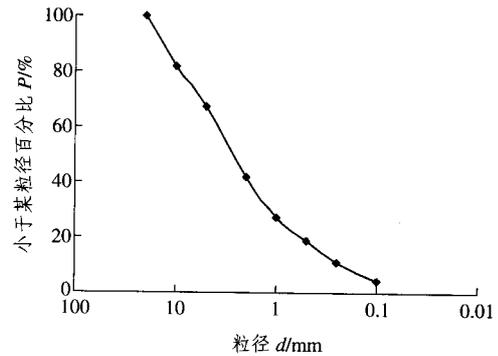


图 1 土料设计级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of sample

为了进行粗粒料三轴湿化颗粒破碎研究,需要得到湿化变形量及湿化变形过程中的颗粒破碎量。为此,本文设计了 4 个围压、每个围压下 9 个三轴剪切试验的试验方案,这样每个围压下可得到从低到高共 4 个湿化应力水平下的湿化变形量和与之对应的湿化破碎量。这里,湿化应力水平是指当试样由干态剪切到某一应力状态后进行浸水饱和湿化时干样的应力水平,用 S_w 表示。具体方案是:试验共分为 4 组,分别对应围压 σ_3 为 300, 600, 900 和 1 200 kPa,每组下进行 9 个三轴试验,如图 2 所示。图 2 中数字 1~9 所标示的点分别为同一围压下所需进行的 9 个三轴试验试验结束时刻的应力-应变点(也代表 9 个试验),表示以下含义:1 表示等压固结后结束试验;2, 3, 4 为干态试样剪切到设计的湿化应力水平 S_w 后结束试验;5 为干态试样剪切到峰值后结束试验;6 为等压固结完成然后进行浸水饱和湿化变形稳定后结束试验;7, 8, 9 为在分别与 2, 3, 4 相同应力水平 S_w 下保持应力状态不变进行浸水饱和湿化直到变形稳定后结束试验。通过以上试验,可得到 4 组围压下与从低到高 4 个湿化应力水平 S_w 对应的浸水湿化前(分别对应点 1~4)及湿化后(分别对应点 6~9)的变形量和颗粒破碎量,从而可以得到湿化变形量和与之相对应的颗粒湿化破碎量。

具体试验时,先把土样风干(此时土样称为“干态”),按上述试验设计级配(图 1)配料,搅拌均匀,分 5 层填入制样筒,振捣至控制密度,并将试样顶

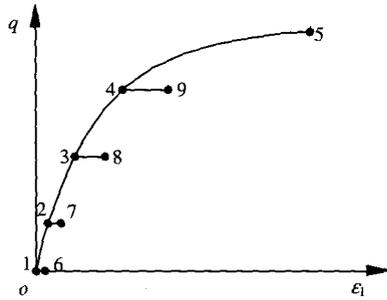


图2 试验方案示意图
Fig.2 Sketch map of test scheme

面整平。为防止细颗粒与大颗粒离析，制样时每层预留少量细土撒于顶面。制样完成后安装试样，在一定的围压下，等向固结至稳定，然后开始进行三轴排气剪切试验，剪切速率为 0.1 mm/min。当各试样在达到设计的湿化应力水平 S_w 时，保持应力状态不变，从试样底部向顶部浸水饱和湿化。浸水后，当轴向变形和体积变形同时达到稳定后认为湿化完成。对于点 1~5 对应的试验不需浸水饱和湿化。试验结束后，对试样再进行风干筛分，得到试验后的颗粒级配。

3 试验成果及分析

3.1 湿化变形

根据以上三轴试验，得到了不同湿化应力水平 S_w 下湿化变形的轴向应变 $\Delta\epsilon_{1w}$ (简称湿化轴变)和体积应变 $\Delta\epsilon_{vw}$ (简称湿化体变)。图 3 所示为湿化应力水平 S_w 与相应的湿化应变量关系图。图 4 所示为围压分别为 600 和 900 kPa 不同湿化应力水平下对应图 2 中点 6~9 的三轴湿化试验的应力 - 应变和体变关系曲线。图 4 中每条曲线上箭头所标示的位置分别为湿化开始点和湿化结束点，中间直线段为由于湿化所产生的变形值。在本文中，轴变以压缩为正、体变以剪缩为正，反之为负。

由图 3, 4 可知，本组湿化三轴试验具有以下规律：(1) 某一围压 σ_3 下，随着湿化时应力水平 S_w 的增加，湿化轴变 $\Delta\epsilon_{1w}$ 也在增大，湿化体变 $\Delta\epsilon_{vw}$ 却随 S_w 的增加而减小。同时可看到当围压低而湿化应力水平较高时，试样湿化产生了湿胀，这与人们常认为的湿缩有所不同；(2) 当围压 σ_3 不同而湿化应力水平 S_w 相近时，湿化轴变 $\Delta\epsilon_{1w}$ 基本上随围压的增大而增大，湿化体变 $\Delta\epsilon_{vw}$ 也随围压的增大而增大。以上湿化变形规律如何从机制上进行解释，是粗粒料

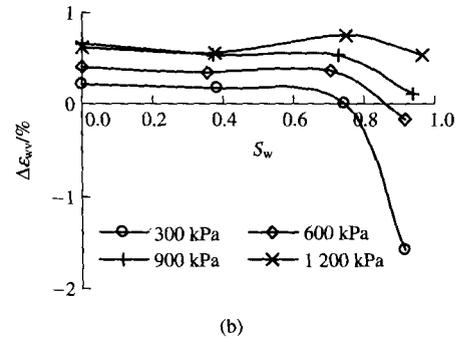
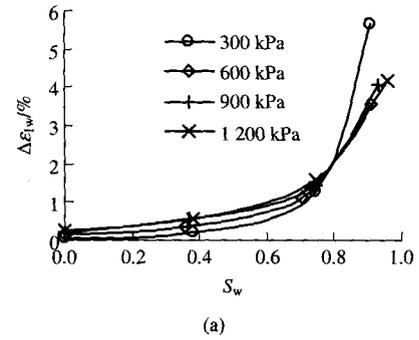


图3 湿化应力水平与湿化应变量关系曲线
Fig.3 Curves of wetting stress level versus wetting deformation

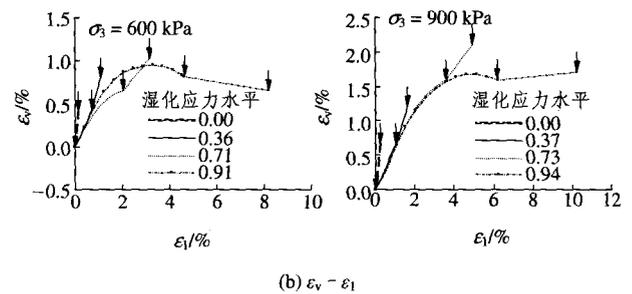
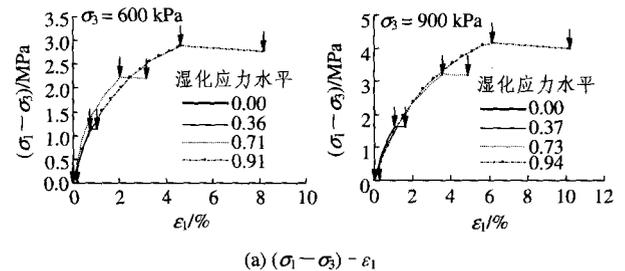


图4 不同围压和湿化应力水平下的应力 - 应变 - 体变关系曲线

Fig.4 Curves of stress-axial strain-volume strain under different confining pressures and wetting stress levels

湿化变形研究的困难所在。本文在以下部分将结合湿化颗粒破碎进行探索性的分析。

3.2 湿化颗粒破碎

3.2.1 湿化颗粒破碎的原因分析

颗粒破碎性是粗粒料的基本特性之一^[12]。与砂

相比,在并不高的围压下粗粒料也会出现破碎现象。在工程实际中,无论是在运输、施工碾压、还是稳定承载或是干湿变化过程中都有颗粒破碎现象。当粗粒料浸水湿化时,由于材料的软化,在相同的应力状态下,各个颗粒接触点所能承受荷载的能力降低,此时只有增加颗粒的接触点数和颗粒的接触面积才能保证内外力的平衡,于是就出现颗粒破碎以维持原有力的平衡,这就是粗粒料湿化破碎的原因。这与干态或饱和态粗粒料由于外荷载的增加而破碎的原因有所不同。因此,湿化变形的大小应该与石料的软化系数等参数有关。

3.2.2 颗粒破碎的量化指标

进行颗粒破碎的研究必须有描述破碎的量化指标,该指标最好能够反映颗粒破碎的真实情况。对于一个试样,存在不同的粒径和颗粒形状的很多颗粒,如果去研究每个颗粒的破碎几乎是不可能的,因此,切实可行的方法是从统计的角度对整个试样不同粒组进行研究。目前,大多数学者^[13~17]所提出的量化颗粒破碎的指标也是从这个角度定义的。现有描述破碎量的指标主要有破碎率 B_g 、 D_{15} 、破碎率 B_r (包括破碎势 B_p 、破碎量 B_i)、比表面积 ΔS 以及 B_{60} 等方法,其中以 Hardin 破碎势方法的物理意义较明确。Hardin 定义为: 筛分曲线与 $d = 0.074 \text{ mm}$ 竖线所围成的上方面积为该土料的颗粒破碎势 B_p ; 试验前后的破碎势差值为破碎量 B_i ; 破碎量与试验前的破碎势(用 B_{pi} 表示)的比值为破碎率 B_r , 即 $B_r = B_i/B_{pi}$ 。本文采用 Hardin 的破碎势方法来进行颗粒破碎的研究。

3.2.3 湿化颗粒破碎对筛分曲线的影响

在粗粒料颗粒破碎时,不仅大颗粒会破碎,小颗粒也会破碎,而且前一级大颗粒破碎时新生成的不同粒径的小颗粒又会继续破碎,这样连环式的破碎造成了土体颗粒级配的改变。粗粒料的工程性质与其级配有密切关系,故有必要考虑颗粒破碎对其工程性能的影响。粗粒料湿化颗粒破碎造成了筛分曲线及对应的曲率系数 C_c 、不均匀系数 C_u 、控制粒径 d_{60} 的变化,目前这点很少有文献涉及。

根据以上三轴湿化试验,可以得到不同围压、不同湿化应力水平 S_w 下由于浸水湿化造成的筛分曲线各粒径累计百分比 P 及对应 C_c 、 C_u 及控制粒径 d_{60} 湿化后(对应图 2 中 6~9 试验结束点)与湿化前(对应图 2 中 1~4 试验结束点)的变化情况,如图 5, 6 所示。图 5, 6 中 ΔP 、 ΔC_c 、 ΔC_u 及 Δd_{60} 表示参数 P 、 C_c 、 C_u 及 d_{60} 由于湿化引起的变化量,是湿化后的值减湿化前的值。

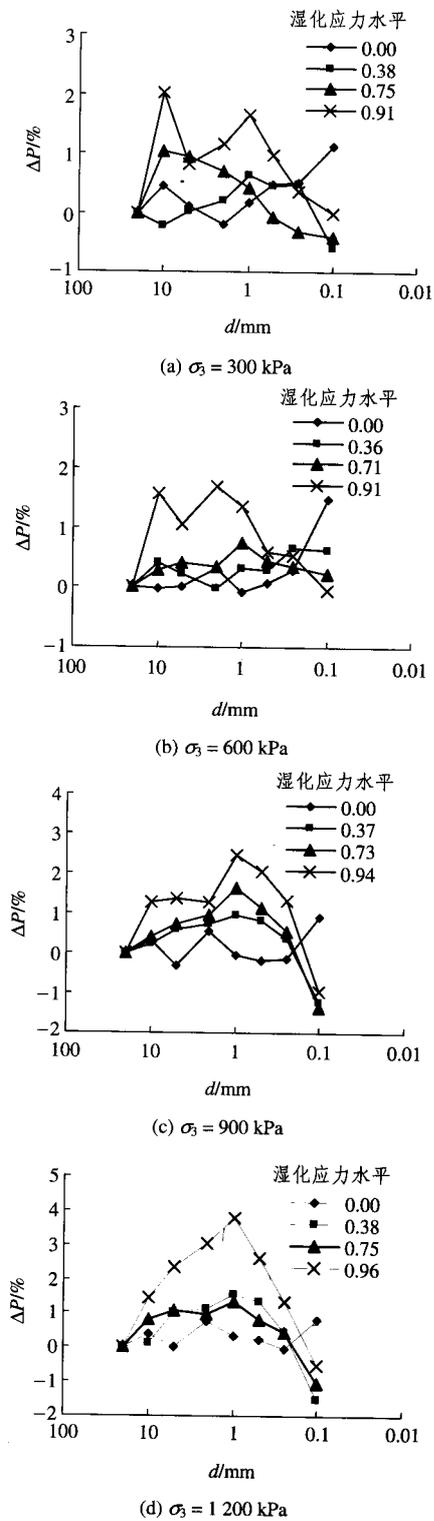


图 5 不同围压和湿化应力水平下筛分累计百分比变化曲线
Fig.5 Various ΔP of grain size distribution curves under different confining pressures and wetting stress levels

应该指出,上述每个湿化颗粒破碎的量值不是用一个试样、而是由两个试样试验得到的,这必定带来一定的误差。同时,对于粗粒料的颗粒破碎分析,由于受到的影响因素很多,如制样振捣、固结、

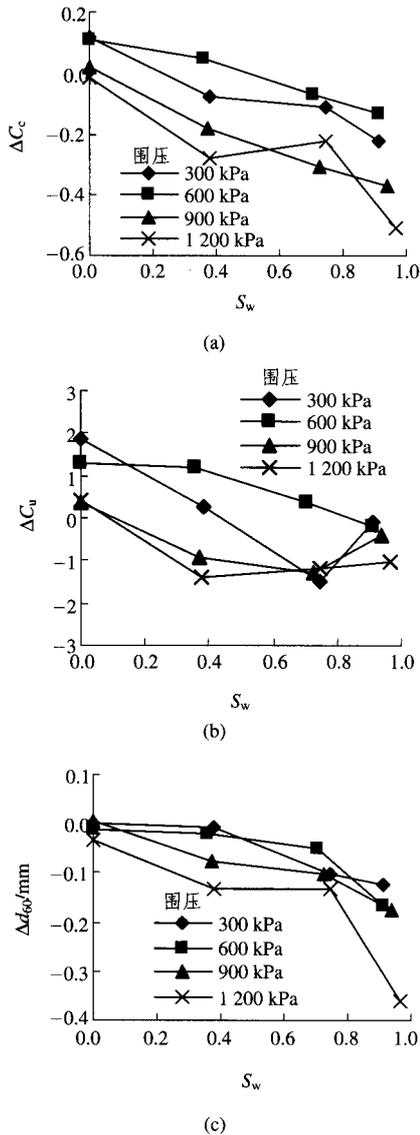


图6 不同围压和湿化应力水平下 ΔC_c , ΔC_u , Δd_{60} 变化曲线
 Fig.6 Various ΔC_c , ΔC_u , Δd_{60} of grain size distribution curves under different confining pressures and wetting stress levels

剪切、湿化、风干、筛分等，试验结果所表现出的规律不是很清晰。但根据图5, 6, 一些趋势还是比较明显的。

当粗粒料由干态经浸水湿化变为湿态时：(1) 在某一围压下，随着湿化应力水平的增加，湿化前后级配曲线的颗粒累积百分比的差值 ΔP 随粒径 d 呈驼峰状分布，先随 d 的减小逐渐达到驼峰，驼峰位于 d_{25} 左右($d = 1$ mm 左右)，后随着 d 的减小，差值逐渐趋近 0，如图 5 所示；(2) 当围压不同而湿化应力水平相近时，围压越大 ΔP 越大；(3) 当围压一定，随着湿化应力水平的增加，湿化后与湿化前颗粒级配曲线特征参数的差值 ΔC_c , ΔC_u , Δd_{60} 都减小。但在湿化应力水平较低时，出现了湿化后的 C_c 和

C_u 值大于湿化前的情况，如图 6 所示。这是否为试验误差还是实际存在的现象，需要进一步研究。但这也说明，在湿化作用下，颗粒破碎是一个复杂的过程。同时也可知，根据围压和应力水平的不同， ΔC_c 的变化幅度约为 0.2~ -0.6， ΔC_u 的浮动范围约为 3.0~-1.5。

通过以上分析可知，浸水湿化对颗粒级配曲线的影响是显而易见的，而这些对于颗粒级配要求较高的土料(如反滤料等)是很重要的。

3.2.4 湿化颗粒破碎的基本规律

根据以上试验，得到了不同围压、不同湿化应力水平 S_w 下湿化前后的颗粒破碎量 ΔB_t 和破碎率 $\Delta B_t/B_{pi}$ ，见表 1。图 7 所示为不同围压下湿化应力水平与湿化破碎率的关系曲线。为了统一标准，在计算破碎率时，采用制样振捣后的颗粒级配破碎势作为基数 B_{pi} 。

表 1 不同围压和湿化应力水平下湿化破碎量和破碎率
 Table 1 Value of breakage and breakage rate in wetting process under different confining pressures and stress levels

300 kPa		600 kPa		900 kPa		1 200 kPa					
S_w	ΔB_t	$\Delta B_t/B_{pi}$	S_w	ΔB_t	$\Delta B_t/B_{pi}$	S_w	ΔB_t	$\Delta B_t/B_{pi}$	S_w	ΔB_t	$\Delta B_t/B_{pi}$
0.00	0.008	1.56	0.00	0.006	2.43	0.00	0.003	3.23	0.00	0.007	9.54
0.38	0.003	1.22	0.36	0.007	9.54	0.37	0.008	1.56	0.38	0.013	5.93
0.75	0.007	5.52	0.71	0.008	9.61	0.73	0.013	3.91	0.75	0.014	4.99
0.91	0.022	1.52	0.91	0.021	8.15	0.94	0.028	4.19	0.96	0.045	3.12

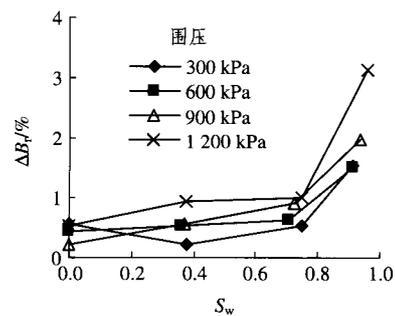


图7 S_w 与 ΔB_t 关系曲线
 Fig.7 Curves of wetting stress level versus breakage rate

如前所述，在进行颗粒破碎试验过程中，影响破碎的因素很多，所以试验结果的离散性较大，可重现性较差。但由表 1 和图 7 中的基本趋势，可以认为湿化破碎有以下规律：(1) 在同一围压下，随着湿化应力水平的增大，由于湿化造成的颗粒破碎量逐渐增大，低湿化应力水平时增大较慢，当湿化应力水平较高时增大速率加快；(2) 在相近湿化应

力水平下,随着围压的增加,颗粒的破碎率也在增加;(3)当湿化应力水平在0.7~0.8左右时,湿化破碎率曲线出现曲率最大点。

以上规律表明,湿化引起的粗粒料颗粒破碎与围压和湿化应力水平有关,与前面的湿化轴向应变的规律相类似,这从侧面也预示着粗粒料的湿化变形与湿化颗粒破碎有一定的内在联系。

3.3 湿化变形与颗粒破碎的关系

为了分析湿化变形与湿化过程中颗粒破碎的关系,图8(a),(b)所示为湿化过程中的颗粒破碎率与湿化轴变体变的关系曲线,同时根据线性拟合得到图8(a)中不同围压下的拟合直线的斜率 K 与围压 σ_3 的关系曲线,见图8(c)。从整体来看,所得试验数

据点有些离散,但基本变化趋势显示湿化过程中的颗粒破碎率与湿化轴变体变之间有一定的相关性。

由图8可知,湿化过程中颗粒破碎率与湿化轴变体变有如下关系:(1)在同一围压下,随着湿化应力水平的增加,颗粒破碎率与湿化轴变量近似呈线性增加(图8(a)中虚线为近似拟合的直线),其斜率 K 随围压的增加而减小,而湿化体变则呈加速减小的趋势,在低围压时会出现湿胀;(2)在相同的湿化破碎率下,湿化轴变随着围压的增加逐渐减小,而湿化体变逐渐增大;在相同的湿化轴变下,颗粒破碎率随围压的增加而增加;同时,在相同的湿化体变下,颗粒破碎率也随围压的增加而增加;(3)根据图8(c)可见不同围压下的拟合直线的斜率 K 与围压 σ_3 的关系曲线基本上成线性关系,相关性很好;(4)虽然湿化体变与湿化颗粒破碎率在湿化应力水平较小时关系曲线规律不太好(图8(b)),但仍可看到,在小围压下,随着湿化颗粒破碎率的增加湿化体变减小速率逐渐加快,而对于高围压,湿化体变随着湿化颗粒破碎率的增加变化比较平缓。这说明,对于高围压下的粗粒料,在不同的湿化应力水平下,虽然湿化造成的颗粒破碎随着 S_w 的增加有较大变化,但湿化体变并不产生较大的变化。

3.4 湿化变形的颗粒破碎分析

根据上述粗粒料湿化破碎规律,对前面湿化试验得到的规律可以从颗粒破碎角度做如下初步解释:(1)在某一围压下,随着湿化应力水平的增大,颗粒由于湿化作用引起的破碎量逐渐增大,从而带来颗粒的重新填充和排列造成湿化轴变量的增大;同时随着应力水平的增大,试样表现为剪胀性(对密实粗粒料试样),故由于颗粒湿化破碎造成的剪缩将随应力水平的增加被剪胀作用部分或全部抵消,湿化体变表现为减小趋势,当湿化应力水平较高时就会出现湿胀(即湿化体变为负);(2)同时,在相近湿化应力水平下,围压越大则颗粒由于湿化作用产生的破碎量越大,因而湿化轴变 $\Delta\epsilon_{1w}$ 和湿化体变 $\Delta\epsilon_{vw}$ 也越大。由上可见,虽然影响湿化变形的因素较多、同时上述解释只是初步的,但是颗粒破碎无疑是其内在、起到重要作用的因素之一。

4 结 语

本文通过对某粗粒料进行的三轴湿化颗粒破碎试验,得到了不同围压不同湿化应力水平下的湿化变形量及颗粒破碎量,经过对试验数据的分析,得

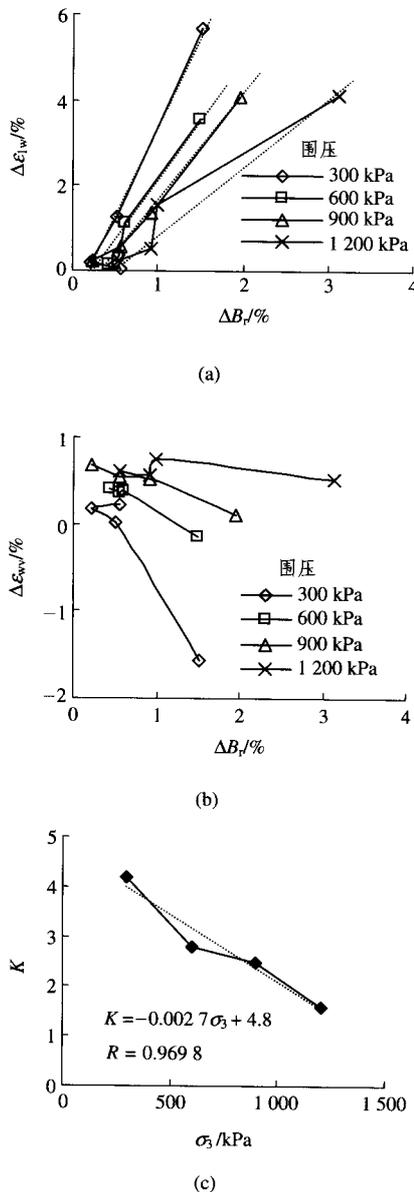


图8 湿化破碎率与湿化变形量关系曲线

Fig.8 Curves of breakage rate versus wetting deformation

到了以下主要结论：(1) 粗粒料的湿化变形与围压及湿化应力水平有关；(2) 浸水湿化影响粗粒料的颗粒级配曲线，湿化前后级配曲线颗粒累积百分比的差值 ΔP 随粒径 d 呈驼峰状分布，驼峰位于 d_{25} 左右($d = 1 \text{ mm}$ 左右)；当围压不同而湿化应力水平相近时，围压越大 ΔP 越大；同时湿化引起的颗粒破碎促使 C_c 、 C_u 及 d_{60} 减小；(3) 湿化引起的颗粒破碎量随着围压的增加和湿化应力水平的增加而增大；(4) 湿化变形与湿化颗粒破碎之间有很好的相关性，湿化轴变与湿化颗粒破碎近似成线性关系；(5) 湿化变形的基本规律可以从湿化颗粒破碎规律的角度加以解释。

由于本文只进行了一种颗粒级配下的湿化颗粒破碎试验，所得结论是否适合其他情况仍有待进一步研究。同时，由于采用平行试验方法得到不同状态下的颗粒破碎量，存在一定的误差，期望能利用CT扫描等先进的试验设备用一个试样来得到需要的颗粒破碎量，这样的湿化颗粒破碎的研究将会取得更大的进步。

参考文献(References):

- [1] 马萨尔 R J. 土石坝工程[M]. 华东水利学院译. 北京: 水利电力出版社, 1978.(Marsal R J. Earth Dam Engineering[M]. Translated by East China University of Hydraulic Resources. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1978.(in Chinese))
- [2] 陈明致, 金来盛. 堆石坝设计[M]. 北京: 水利出版社, 1982.(Chen Mingzhi, Jin Laiyun. Rockfill Dam Design[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1982.(in Chinese))
- [3] 李志烈. 土石坝初次蓄水的湿陷问题研究[硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 1986.(Li Zhilie. Study on Subsidence Problem during the Earth Dam first Pouring[M. S. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 1986.(in Chinese))
- [4] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(Ru Naihua, Niu Yunguang. Embankment Dam · Incidents and Safety of Large Dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(Qian Jiahuan, Yin Zongze. Theory and Calculation Soil Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))
- [6] 保华富, 屈智炯. 粗粒料的湿化特性研究[J]. 成都科技大学学报, 1989, 43(1): 23 - 30.(Bao Huafu, Qu Zhijiong. The study on wetting properties for coarse materials[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1989, 43(1): 23 - 30.(in Chinese))
- [7] 王辉. 小浪底堆石料湿化特性及初次蓄水时坝体湿化计算研究[硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 1992.(Wang Hui. The study on rockfill material wetting properties and wetting deformation during the first pouring of Xiaolangdi dam[M. S. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 1992.(in Chinese))
- [8] 刘祖德. 土石坝变形计算的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 1 - 13.(Liu Zude. Some problems about the calculation deformation of earth-rock dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(1): 1 - 13.(in Chinese))
- [9] 李广信. 堆石料的湿化试验和数学模型[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 198 - 205.(Li Guangxin. The wetting test and mathematic model of rockfill materials[M]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(5): 198 - 205.(in Chinese))
- [10] 魏松, 朱俊高, 王俊杰. 土石坝粗粒料湿化变形研究进展[A]. 见: 土石坝与岩土工程实践及探索——2004年技术研讨会论文集[C]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 203 - 208.(Wei Song, Zhu Jungao, Wang Junjie. Development of study on wetting deformation of coarse-grained materials in earth dam[A]. In: Symposium on Application and Research of Earth Dam and Geotechnical Engineering(2004)[C]. Beijing: China Electrical Power Press, 2004. 203 - 208.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. 土工试验规程(SL237 - 1999)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specification of Soil Test(SL237 - 1999)[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [12] 日本土工学会. 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.(Association of Geotechnique of Japan. In-situ Compaction of Coarse-grained Materials[M]. Translated by Guo Xiling, Wen Dan. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [13] Marsal R J. Mechanical properties of rockfill[A]. In: Embankment Dam Engineering, Casagrand Volume[C]. New York: Wiley, 1973. 109 - 200.
- [14] Lee K L, Farhoomand I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4: 69 - 86.
- [15] Hardin C S. Crushing of soil Particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(10): 1177 - 1192.
- [16] Miura N, O-hara S. Particle crushing of decomposed granite soil under shear stresses[J]. Soils and Foundations, 1979, 19(3): 1 - 14.
- [17] 沈新慧. 天生桥混凝土面板堆石坝坝体材料特性研究[A]. 见: 水利水电科学研究院科学研究论文集(第32集)(结构材料、岩土与抗震工程)[C]. 北京: 水利电力出版社, 1985. 65 - 73.(Shen Xinhui. The rockfill material properties study on Tianshengqiao RFCD[A]. In: Symposium on Science Research Articles of China Institute of Water Resources and Hydropower Research (Vol.32)[C]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1985. 65 - 73.(in Chinese))