

人工制备易破碎颗粒材料的力学特性

王 帅¹, 邰 彬¹, 覃燕林², 刘恩龙²

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 随着应力水平的提高, 颗粒破碎现象越来越明显, 为了研究颗粒破碎机理以及破碎对粒状材料力学特性的影响, 采用人工制备的水泥土球形颗粒模拟易破碎材料, 进行固结排水和固结不排水三轴剪切试验, 探讨了不同围压作用下颗粒材料的力学特性。固结排水试验采用的围压分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa, 固结不排水试验采用的围压分别为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。并基于颗粒流数值模拟方法, 对固结排水(CD)试验结果进行了数值模拟。研究结果表明: 采用人工制备的水泥球颗粒集合体试样可以进行探讨颗粒材料的颗粒破碎过程及机理; 固结围压越大, 试验结束时颗粒破碎越明显, 且强度包线呈非线性; 颗粒流数值模拟方法可模拟人工制备易破碎粒状材料在固结排水(CD)试验时的应力-应变和体积变形特性。

关键词: 粒状材料; 颗粒破碎; 三轴试验; 数值模拟

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0881-08

Mechanical properties of artificially prepared crushing granular materials

WANG Shuai¹, ZHI Bin¹, QIN Yanlin², LIU Enlong²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the increase of stress level, the phenomenon of particle crushing becomes more and more obvious, in order to study the mechanism of particle crushing and the impact of crushing on the mechanical properties of granular materials. The artificial cemented sphere particles were employed to simulate the crushing grains, on which CD and CU triaxial tests were conducted to explore the breakage properties of crushing materials. For the samples tested on consolidation drain conditions (CD), the confining pressures applied were 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa and 400 kPa and, for the samples tested on consolidation undrain conditions (CU), the confining pressures applied were 100kPa, 200kPa and 300kPa. Furthermore, the tested results were simulated based on the discrete element method of particle flow method. Results demonstrate that the samples composed of the artificial cemented sphere particles could be used to investigate the crushing process and mechanisms of granular materials; with the increase of confining pressures, there are more breakage of particles at the end of test and the strength envelope is nonlinear; the particle flow method could be used to simulate the stress-strain and volumetric deformation properties of artificially prepared crushing materials tested under consolidation drain conditions.

Key words: Granular materials; particle crushing; triaxial test; numerical simulation

颗粒材料的应力-应变关系及强度特性一直是岩土力学的研究热点和难点。为了探讨岩土材料的变形机理和强度特性, 国内外学者进行了大量的室内外试验, 并建立了相应的数学模型对岩土材料的破坏过程进行描述^[1]。研究所用材料为刚度很大的模型材料, 主要研究颗粒的滑移和滚动变形机理, 并建立了相应的数学模型来描述这些微观的变形机

理^[2-3]。但是, 随着应力水平的提高, 在岩土工程中常常遇到颗粒破碎现象^[4-8], 尤其是高土石坝工程。为了研究颗粒材料的微观变形机理, 我们对石膏棒颗粒集合体试样进行了双轴压缩试验研究, 初步探讨了颗粒转动、滑移及破碎对试样的宏观力学性质的影响^[9-10]。近年来, DEM 和颗粒流方法也被广泛应用于探讨粒状材料的微观变形机理^[11], 且建立了

收稿日期: 2019-12-30

修改稿日期: 2020-11-16

基金项目: 陕西省科学技术一般基金资助项目(2020SF-431)

第一作者: 王 帅(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事土的结构性方面的研究。E-mail: 1285525009@qq.com

通信作者: 邰 彬(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事黄土结构性、地基处理等方面的科研和教学工作。E-mail: xianzhbin@163.com

一些本构模型来考虑颗粒破碎的影响^[12-15]。

为了深入研究颗粒的破碎机理以及破碎对粒状材料本身的强度和变形特性的影响,本文利用人工制备的水泥土球形颗粒模拟易破碎材料,并进行排水条件和不排水条件下的三轴试验,来探讨颗粒破碎对粒状材料的变形和强度特性的影响。

1 易破碎粒状材料的人工制备方法

1.1 制样用料

试验所用土料为成都地区粉质黏土,原状土呈块状,稍湿。制备试样前将土烘干、碾碎并过0.5 mm筛,比重为2.684,级配曲线如图1所示。液限含水率 w_L 为33%,塑限含水率 w_P 为21%,塑性指数12%。试验所用水泥为32.5R复合硅酸盐水泥,水泥的比重为3.142。

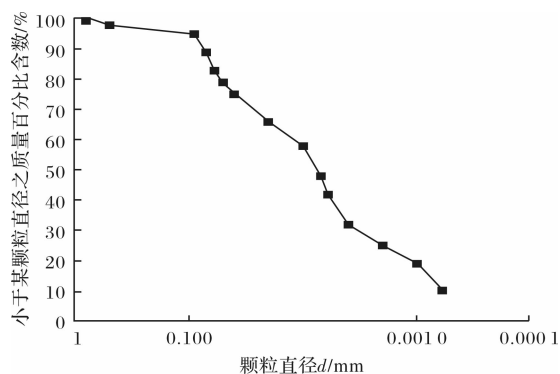


图1 级配曲线

Fig. 1 The grading curve

1.2 易破碎粒状材料的制备

参考已有研究成果^[16],本文制备的易破碎粒状材料为直径20 mm的水泥土球形颗粒,通过粘土、水泥和水混合而成。通过不同的质量比(粘土、水泥和水质量之比)可以得到不同强度的水泥颗粒,此处采用的粘土、水泥和水质量之比为1:4:2。水泥颗粒的具体制备过程如下:(1)首先我们按照质量比称量水泥、粘土和水,在盘子中将水泥和粘土均匀搅拌,然后加水拌合得到水泥浆;(2)用刷子将机油均匀地涂抹到有机玻璃面板和凹槽上,以便颗粒成型后拆样。然后用手将水泥浆捏成短轴略大20 mm、长轴大于20 mm的椭圆形颗粒如图2(a)所示,然后放入有机玻璃板的圆形凹槽中;(3)将其水平放置震动台上震动8 min,静置一段时间使其呈塑性,随后往模具对角处插入插销,另一块玻璃面板对准插销向下推入,多余的水泥浆由缝隙挤出,如图2(b)所示。挤紧之后用C型夹具固定夹紧,如图2(c)所示。(4)将水泥颗粒于标准养护室养护24 h成型,拆模取出水泥颗粒放置于密封的塑料保鲜袋中如图2(d),喷水养护。

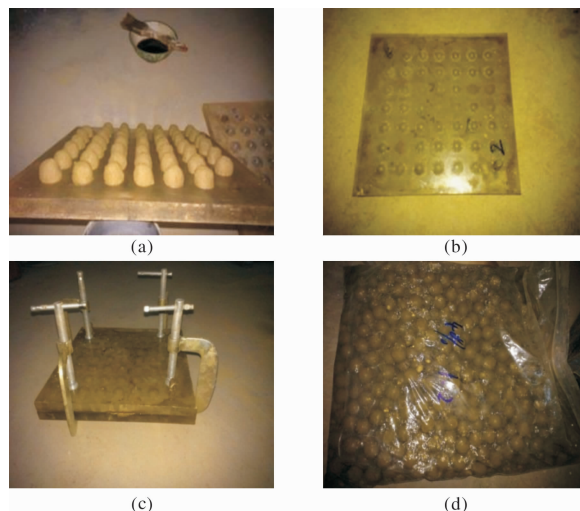


图2 制备试样

Fig. 2 Preparation of the specimen

在制备过程中应注意的问题如下:(1)水泥和土料在加水之前应均匀拌和,否则会造成局部水泥含量过高颗粒强度差别增大;(2)椭圆形水泥颗粒不宜过大也不宜过小,过小制成的颗粒不成球形,有缺陷,而过大会造成水泥浆过量不能完全由两板之间的缝隙挤出影响成型质量;(3)拌合好之后的水泥浆尽快捏制成型,防止水泥初凝影响水泥颗粒成型质量;(4)两块有机玻璃面板挤合过程中插好固定插销,避免两者错动使得水泥球中部产生薄弱面;(5)拆样时注意轻拆轻拿轻放,成型的水泥球强度很低,拆样时很容易从中间断开。

在养护时必须保证同样的环境条件,包括温度、湿度、养护时间。养护时间为30 d,30 d后取出颗粒球,一天之后装样进行试验。

1.3 水泥球材料的力学参数

为了检验水泥制品的均匀性和完整性,随机抽取20个颗粒,称重计算得到平均密度为 1.313 g/cm^3 。抽取的水泥土球形颗粒的质量误差百分比都在1%左右。

采用经过改装之后的小三轴仪进行了单个颗粒的劈裂试验。试验为应变控制,加载速率为 0.016 mm/min 。劈裂试验的应力-应变结果如图3所示,破裂形式如图4所示,可以看到水泥颗粒的破裂情况基本有两种情况:(1)从中间呈一字劈裂;(2)从中间呈十字劈裂。破裂的情况表明颗粒球内部强度较均一,不存在薄弱节理和局部缺陷。

2 易破碎颗粒材料试验结果及分析

2.1 试验方法

考虑到已有学者^[16]开展了三轴固结排水条件

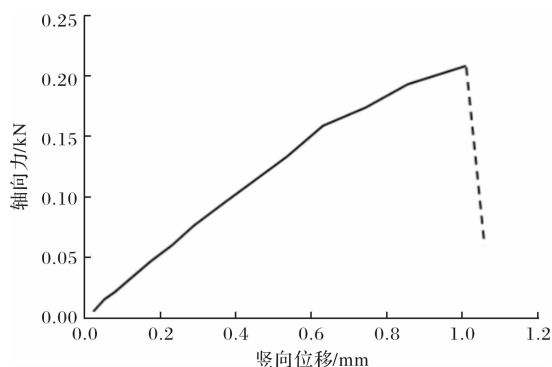


图3 劈裂试验结果

Fig. 3 Results of splitting test

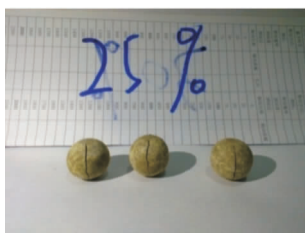


图4 破裂型式



图5 装样图

Fig. 4 Splitting pattern Fig. 5 Assembling the sample

下的易破碎颗粒材料的力学性质的初步研究, 为了进行对比, 本文对人工制备的易破碎水泥球颗粒进行了固结排水和固结不排水三轴试验, 试样的直径为 10.1 cm, 高为 20 cm, 每个试样均由 200 个等粒直径为 20 mm 的水泥颗粒组成。采用的剪切速率分别为: CD 试验为 0.166 mm/min, CU 试验为 0.828 mm/min。CD 试验的围压为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa, CU 试验的围压为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。

具体的装样过程如下: (1) 提前一天取出盛放于密封袋中的水泥颗粒晾干便于装样, 然后准确数出 200 个颗粒球。(2) 首先在底座上放置透水板, 然后绑上厚度为 0.3 mm 的橡皮膜, 在橡皮膜外侧套上塑料套筒, 底座上放入 1 到 2 张滤纸。由于颗粒球直径较大膜嵌入效应显著, 故要在膜内侧放入厚度为 1 mm 的橡胶垫, 共分四块拼接如图 5 所示。(3) 为了避免装样的差异性, 200 个颗粒球分 5 次撒入, 每一次装入后用木棒敲击固定次数, 敲击力度适中防止装样过程中颗粒破碎的发生。所得到的试样的孔隙比为 $e_0 = 0.875$ 。(4) 颗粒全部放入之后在试样上表面依次放上滤纸、透水板和试样帽, 调整试样使试样帽上表面水平, 最后绑好橡皮膜、抽真空使试样保持站立。(5) 将压力室固定于底座上, 对准加载杆, 装上量力环和百分表, 然后缓慢上升底座, 开始时粗调, 接近顶部量力环时改为细调, 使加载杆刚好接触量力环(以量力环变形

百分表指针开始跳动为准), 然后往围压室里注水。(6) 连接上下排水, 打开上排水阀门, 对试样进行饱和。由于试样孔隙率较大透水性强, 饱和时间较短, 一般在 10~15 min, 以上排水均匀出水为准。(7) 对试样施加设定的围压进行固结, 固结过程中打开上下排水阀门, 固结时间为一个小时, 固结完成后记录排水量和试样的竖向变形。然后根据试验要求进行排水和不排水剪切试验。

2.2 试验结果

图 6 为固结排水剪切试验的应力-应变和体变-应变关系曲线, 最终的轴向应变为 25%。从图 6 中可以看到, 其应力-应变关系都呈应变硬化型, 偏应力随着轴向应变的增大而增大, 开始时候增长较快, 之后增加的速率逐渐减小直至试验结束, 应变硬化十分显著, 只有在 100 kPa 的低围压下曲线呈塑性流动。并且试样的终止偏应力随着围压的增大而增大, 在应变较小时(3%以内)应力应变曲线呈线弹性且围压越大曲线的斜率越大, 即模量越大; 应变较大时曲线有波动的现象, 这是因为偏应力较小时水泥颗粒几乎没有破碎, 试样内部颗粒主要以滑移、转动为主, 而当应力较大时颗粒破碎显著, 破碎形成的次一级粒径填充孔隙形成新的骨架共同承担应力, 导致了试样内部应力重调整, 这个现象伴随颗粒破碎发生的整个过程。同一水泥含量下围压越大塑性破坏提前。从体变曲线可以看到曲线成剪缩型, 体变随着轴向应变的增大而增大, 围压大的体变曲线处于下方; 围压越大试样最终的体缩越大, 围压 400 kPa 时体缩甚至达到 13.67%, 围压对水泥颗粒试样的体变影响十分显著。在曲线的起始段轴向应变较小时体变增长较慢, 之后体变增长速度先快后慢。这是因为轴向应变较小时几乎没有颗粒破碎发生, 试样体积变化主要是颗粒之间错动、挤紧密实引起。当轴向应变增大颗粒破碎加剧, 细粒填充孔隙体缩现象明显, 之后破碎逐渐趋于稳定, 体变收缩减缓。

图 7 为固结不排水剪切试验的应力-应变和孔压-应变关系曲线, 从图中我们看到三个围压下应力应变曲线都呈不同程度的应变软化(100 kPa 围压时近于塑性流动)。在轴向应变较小时(3%以内)偏应力随着轴向应变的增大快速增长, 之后增长趋势减缓直至达到峰值强度, 到达峰值强度后曲线呈塑性流动状态, 围压越大峰值强度越大。这是因为不排水试验下试样内部颗粒接触点的应力水平较低, 破碎程度大大降低, 在轴向应变不大的时候颗粒破碎就趋于稳定, 随着轴向应

变得增大试样内部主要发生的是原有颗粒和破碎后产生的次一级颗粒形成骨架的滑移和错动。从孔压-应变曲线可以看到,轴向应变较小时孔压随着轴向应变得增大迅速增长,在轴向应变7%左右是达到峰值。

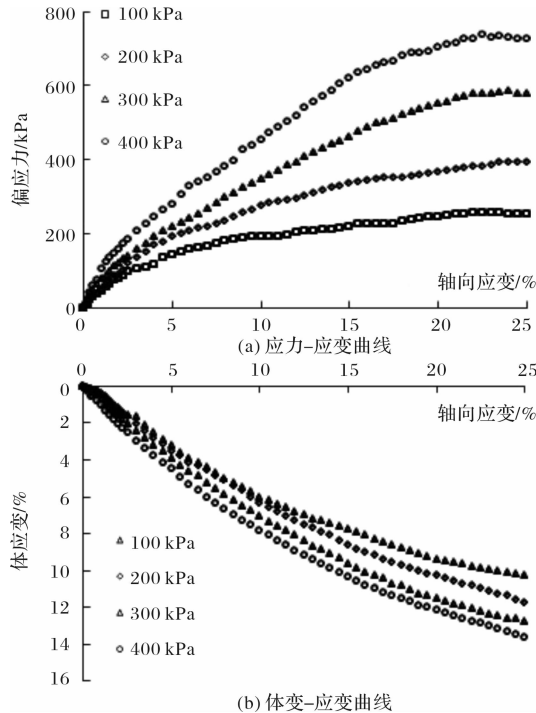


图6 CD试验的应力-应变、体变-轴应变曲线

Fig. 6 The relationship curves of stress-strain and volumetric strain-axial strain of CD tests

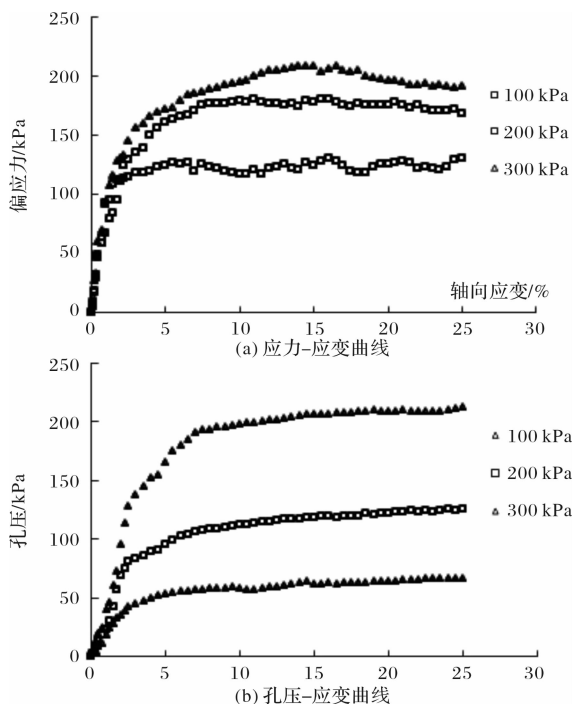


图7 CU试验的应力-应变、孔压-应变曲线

Fig. 7 The relationship curves of stress-strain and pore pressure-axial strain of CD tests

2.3 颗粒破碎对级配曲线的影响

由于本文试验所采用的颗粒粒径单一,根据试验筛分后的情况得到小于0.01 cm的颗粒质量含量不足0.1%,所以筛分最小粒径为0.01 cm。图8为围压为400 kPa时CD试验的颗粒破碎形态。

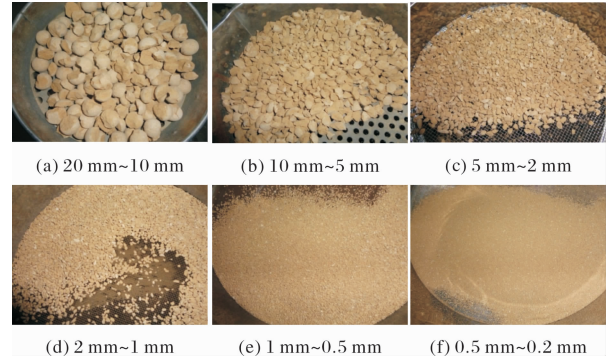


图8 破碎形态

Fig. 8 Breakage pattern

从颗粒破碎后的形态得到本次人工模拟易破碎材料的三轴试验的破碎主要分为三种类型:破裂,原有水泥土球形颗粒破碎后形成多块粒径相近的颗粒;破碎,原有的颗粒破碎后形成一颗稍小的颗粒和好几块更小的颗粒;研磨,原有颗粒保持大致形态不变,表面研磨成微小颗粒。如图9所示。

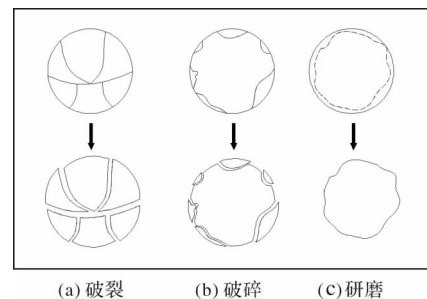


图9 颗粒破碎形式

Fig. 9 Breakage pattern of single particle

图10(a)和(b)分别为不同围压下固结排水和固结不排水试验后颗粒的级配分布,从图10中我们看到围压越大曲线靠上,中间级细粒含量增加。表1和表2为对应的筛分试验数据,随着围压的增大试样完整颗粒数减小,各粒组含量增加。采用Marsal提出的颗粒破碎率^[4]作为颗粒破碎指标得到表3数据,由表3中数据分析得到:对于固结排水和固结不排水试验,围压对颗粒破碎的影响较大。

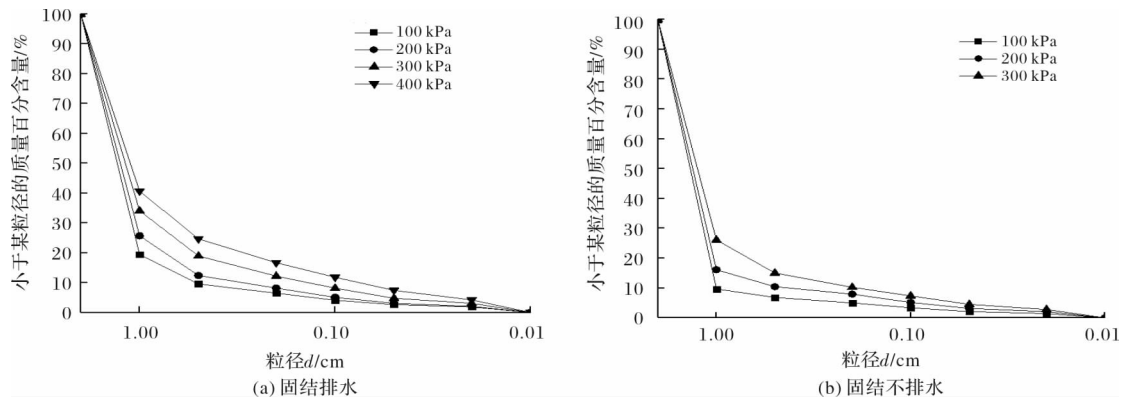


图 10 级配曲线
Fig. 10 Grade size curve

表 1 各粒组含量(CD)

Tab. 1 Contents of particle size(CD)

粒径区间/cm	占总质量质量百分数/ %				区间最大粒径/cm	小于该粒径的质量百分含量/ %			
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa		100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
完整颗粒	36. 49	28. 20	18. 56	9. 39	2	100	100	100	100
2~1	44. 05	46. 09	47. 35	49. 96	1	19. 45	25. 70	34. 08	40. 65
1~0. 5	9. 88	13. 30	15. 14	15. 96	0. 5	9. 57	12. 40	18. 93	24. 68
0. 5~0. 2	3. 08	4. 21	6. 74	8. 01	0. 2	6. 49	8. 19	12. 19	16. 67
0. 2~0. 1	2. 40	3. 12	4. 03	4. 86	0. 1	4. 09	5. 07	8. 16	11. 81
0. 1~0. 05	1. 45	1. 99	3. 42	4. 39	0. 05	2. 64	3. 08	4. 75	7. 42
0. 05~0. 02	0. 76	1. 01	1. 65	3. 21	0. 02	1. 88	2. 07	3. 09	4. 22
0. 02~0. 01	1. 88	2. 06	3. 09	4. 22	0. 01	0	0	0	0

表 2 各粒组含量(CU)

Tab. 2 Contents of particle sets(CU)

粒径区间/cm	占总质量质量百分数/ %			区间最大粒径/cm	小于该粒径的质量百分含量/ %		
	100 kPa	200 kPa	300 kPa		100 kPa	200 kPa	300 kPa
完整颗粒	50. 50	38. 89	25. 25	2	100	100	100
2~1	41. 14	45. 63	48. 62	1	9. 68	16. 14	26. 12
1~0. 5	2. 82	5. 71	11. 08	0. 5	6. 86	10. 43	15. 03
0. 5~0. 2	1. 85	2. 47	4. 81	0. 2	5. 01	7. 96	10. 23
0. 2~0. 1	1. 62	2. 81	2. 87	0. 1	3. 39	5. 15	7. 36
0. 1~0. 05	1. 31	1. 98	2. 84	0. 05	2. 08	3. 16	4. 52
0. 05~0. 02	0. 65	1. 07	1. 72	0. 02	1. 43	2. 09	2. 80
0. 02~0. 01	1. 43	2. 09	2. 80	0. 01	0	0	0

表 3 破碎率

Tab. 3 Breakage ratio

B_r / %	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
CD	63. 51	71. 80	81. 4	90. 61
CU	50. 83	67. 78	74. 75	—

2. 4 颗粒破碎对应力路径的影响

根据试验得到的数据在 q - p' 应力平面上绘制出试样的有效应力路径. 图 11 为试样在不同围压下的有效应力路径. 从图 11 我们可以看到, 随着围压的增大强度包络线偏离有效应力路径, 这是因为

围压较低的时候颗粒破碎程度较低,颗粒之间存在咬合作用,导致内摩擦角偏大.图 11 中显示三个围压下的不排水应力路径都从 100 kPa 围压下的排水应力路径的左侧达到了强度包线.且我们看到不排水试验的应力路径穿过了图中虚线所示的直线强度包线,在 100 kPa 的低围压下尤为明显.从级配筛分的数据中得到 CD 试验在 100 kPa 围压下的破碎率为 63.51%,而不排水试验的三个围压下的破碎率分别为 50.83%、61.78%、74.75%,原因是不排水试验的孔隙水压力为正值,所以相同围压作用下 CU 试验的试样的有效围压偏小.

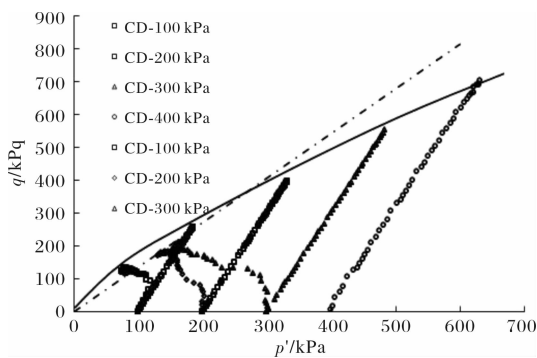


图 11 应力路径

Fig. 11 Stress path

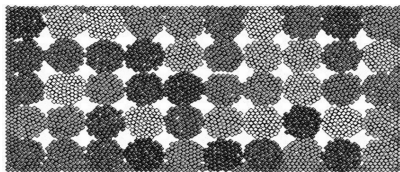


图 12 试样模型

Fig. 12 Specimen model

3 数值模拟

针对以上的常规三轴固结排水试验结果,采用二维颗粒程序对其进行了数值模拟.试样尺寸为 20 cm×10 cm(长×宽)如图 12 所示,为了便于观察颗粒团的破裂情况,每个颗粒团我们给予不同颜色标记.试样颗粒数约为 3 762 个,粒径范围 1~1.5 mm,一共五十个颗粒团,每个颗粒团约为 75 个颗粒.颗粒法向与切向刚度均为 500 MPa,颗粒密度 2 500 kg/m³,边墙刚度为 50 MPa,试验初始孔隙比为 0.782.

为了使模型试样更接近与室内试样,我们需要保证颗粒团的力学性质尽可能接近水泥土球形颗粒且为三轴试验参数设定提供依据.故我们利用颗粒程序模拟了单个颗粒团的劈裂试验,如图 13 所示,颗粒胶结采用的是平行胶结,计算参数见表 4.

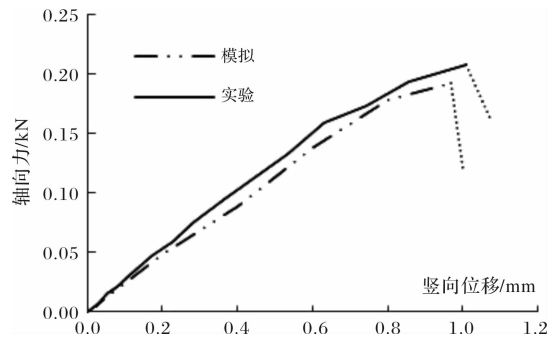


图 13 单个颗粒计算与试验结果

Fig. 13 Numerical and tested results of a single particle

表 4 模拟参数

Tab. 4 Simulation parameters

pb_kn/MPa (胶结键法向刚度)	pb_ks/MPa (胶结键切向刚度)	pb_nstren/kPa (胶结键法向强度)	pb_sstren/kPa (胶结键切向强度)	pb_rad (胶结半径比)	fric (摩擦系数)
200	200	200	200	0.5	0.45

数值模拟得到的应力应变关系如图 14 所示,我们看到模拟试验的应力应变曲线和室内试验吻合较好,都呈应变硬化型.模拟试验围压越大偏应力越高,终止偏应力增大.模拟曲线有明显的跳动现象,这是因为模拟过程中伴随着胶结键的破坏颗粒之间的作用由胶结元向摩擦元过度,之间伴随着应力重调整造成应力曲线波动.模拟曲线起始段胶结

键破坏很少波动小也证明这一点.图 15 为模拟和试验得到的体变-轴向应变关系曲线,从图中我们看到体变曲线与实际室内试验规律一致,体变呈剪缩型,体变随着围压的增大而增大随着水泥含量的增大而减小.模拟得到的体变数值与室内试验结果稍有减小,这是由于采用二维边界条件模拟试样模型所导致的偏差.可见采用颗粒程序可以探讨粒

状材料的颗粒破碎过程。

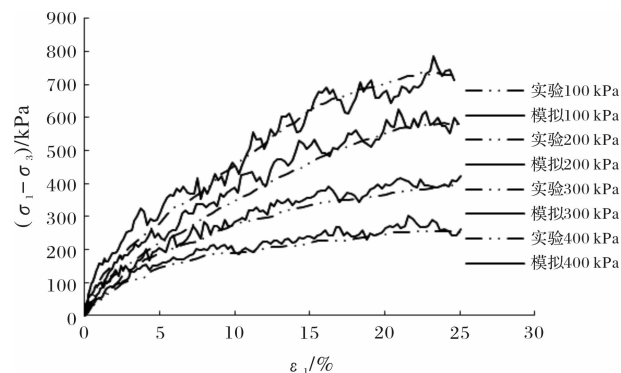


图 14 模拟和试验的应力-应变关系

Fig. 14 Stress-strain relationship of simulation and tested

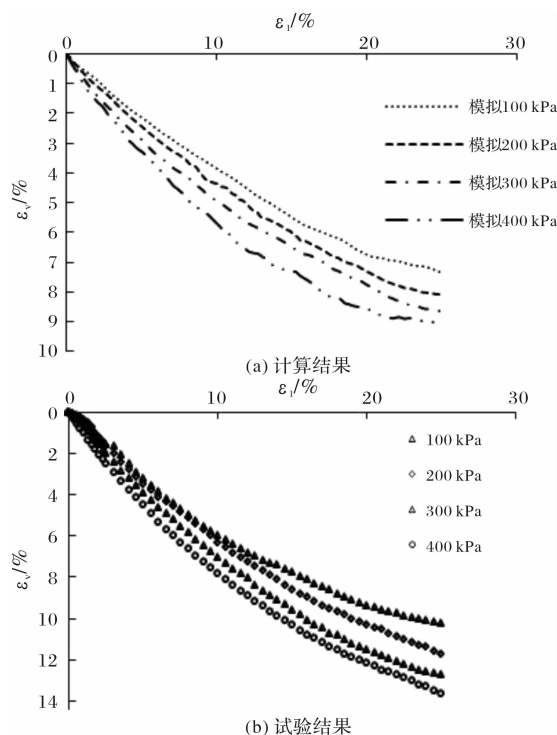


图 15 模拟和试验的应力-应变关系

Fig. 15 Simulation and test stress-strain relationship

4 结论

(1) 不同围压作用下固结排水试验时试样均呈应变硬化型、体积收缩, 而固结不排水试验时略有软化、产生正的孔隙水压力; 围压越高, 试样破坏时颗粒破碎越明显。

(2) 试样的内摩擦角会随着颗粒破碎逐渐降低并呈现非线性关系, 有效应力路径显示直线型强度包线不再适用于易破碎材料。

(3) 颗粒流模拟方法能很好的再现易破碎材料的破碎过程, 应力应变曲线吻合较好, 体变曲线规律正确, 但在轴向应变较大的时数值稍有

偏差。

参考文献 References

- [1] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
SHEN Zhujiang. Theoretical soil mechanics [M]. Beijing: Waterpub Press, 2000.
- [2] ODA J, Konishi S, NEMAT N. Experimental micro-mechanical evaluation of strength of granular materials: effects of particle rolling [J]. Mechanics of Materials, 1982, 1: 269-283.
- [3] BESUELLE P, DESRUES J, RAYNAUD S. Experimental characterization of the localization phenomenon inside a vosges sandstone in a triaxial cell [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000(37): 1223-1237.
- [4] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill [A]// Embankment-dam engineering. New York: John Wiley & Sons, 1973.
- [5] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562-566.
LIU Hanlong, QIN Hongyu, GAO Yufeng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 562-566.
- [6] NAKATA Y, HYDE A F L, HYODO M et al. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test [J]. Geotechnique, 1999, 49 (5): 567-583.
- [7] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand [J]. Geotechnique, 2004, 54 (3): 157-163.
- [8] 刘恩龙, 覃燕林, 陈生水, 等. 堆石料的临界状态探讨[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 505-511.
LIU Enlong, QIN Yanlin, CHEN Shengshui, et al. Investigation on critical state of rockfill materials [J]. 2012, 43(5): 505-511.
- [9] LIU Enlong. Breakage and deformational mechanism of crushable granular materials [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(5): 723-730.
- [10] 刘恩龙, 沈珠江, 陈铁林. 棒状结构体试件破损过程的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (12): 2003-2008.
LIU Enlong, SHEN Zhujiang, CHEN Tielin. Experimental study on breaking process of bar-like structural

- bodies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 2003-2008.
- [11] 毕忠伟, 孙其诚, 刘建国, 等. 双轴压缩下颗粒物质剪切带的形成与发展[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 376-385.
- BI Zhongwei, SUN Qicheng, LIU Jianguo, et al. Development of shear band in a granular material in biaxial tests[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 63(3): 376-385.
- [12] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 循环荷载作用下考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1972-1978.
- LIU Enlong, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Constitutive model of rockfill considering particle breakage under cyclic loading[J]. Geotechnical mechanics, 2012, 33(7): 1972-1978.
- [13] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007(55): 1274-1297.
- [14] 迟世春, 贾宇峰. 土颗粒破碎耗能对罗维剪胀模型的修正[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1266-1269.
- CHI Shichun, JIA Yufeng. Rowe's stress-dilatancy model modified for energy dissipation of particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1266-1269.
- [15] 王乃东, 姚仰平. 粒状材料颗粒破碎的力学特性描述[J]. 工业建筑, 2008, 38(8): 17-20.
- WANG Naidong, YAO Yangping. Mechanical description for granular materials exhibiting particle crushing[J]. Industrial Construction, 2008, 38(8): 17-20.
- [16] 孔德志, 张丙寅, 孙逊. 人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 464-469.
- KONG Dezhi, ZHANG Bingyin, SUN Xun. Triaxial tests on particle breakage strain of artificial rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 464-469.
- (编辑 吴海西 沈 波)
-
- (上接第 872 页)
- [6] 刘莹, 王清. 水泥与生石灰处理吹填土对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(3): 424-429.
- LIU Ying, WANG Qing. Laboratory model tests on consolidation of hydraulic fills treated with lime or cement additives[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(3): 424-429.
- [7] 谢海澜, 王清. 粉煤灰加固处理吹填泥浆的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 24(10): 1811-1816.
- XIE Hailan, WANG Qing. Experimental study on consolidation of dredger fill slurry with fly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 24(10): 1811-1816.
- [8] JO A N, HAFEZ M A, NORBAYA S. Study of bearing capacity of lime-cement columns with pulverized fuel ash for soil stabilization using laboratory model[J]. Electr J Geotech Eng, 2011, 16: 1595-1605.
- [9] 李海龙, 刘科, 沈扬, 等. 水泥-生石灰固化吹填土路用特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 51-57.
- LI Hailong, LIU Ke, SHEN Yang, et al. Experimental research on road-used performance of dredger fill with cement-lime curing[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(2): 51-57.
- [10] 刘科, 沈扬, 刘汉龙. 水泥-生石灰固化吹填土无侧限抗压强度试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 94-98.
- LIU Ke, SHEN Yang, LIU Hanlong. Experimental study on unconfined compressive strength of hydraulic fill consolidated by adding cement and lime[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(3): 94-98.
- (编辑 桂智刚)