

DOI: 10.11779/CJGE2017S1003

粗粒土强度和变形的级配影响试验研究

凌 华^{1, 2}, 傅 华^{1, 2}, 韩华强^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:开展了不同细粒含量的无黏性和含黏粒粗粒土的共8组大型三轴排水剪切试验,研究了级配对粗粒土强度、变形、剪胀特性和颗粒破碎的影响。试验结果表明细颗粒含量的大小、是否含泥是粗粒土力学特性的重要影响因素;分析了无黏性粗粒土的颗粒破碎率随围压大小、级配的变化;研究了剪切峰值随围压、细颗粒含量的变化规律,讨论了不同围压、不同级配特征情况下粗粒土的剪胀特性。根据含黏粒粗颗粒土的试验结果,分析了含泥量对强度和变形特性的影响,并从机理上分析了细粒含量对无黏性和含黏粒粗粒土的力学特性影响的差异性。试验结果表明对于土石坝工程良好的坝体填筑料级配、严格控制小于0.075 mm颗粒含量,有利于提高坝体的稳定性和减小坝体沉降。

关键词:级配;粗粒土;强度;变形

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0012-05

作者简介:凌 华(1977-),男,江苏盐城人,高级工程师,主要从事粗粒土力学特性研究工作。E-mail: hling@nhri.cn。

Experimental study on effects of gradation on strength and deformation of coarse-grained soil

LING Hua^{1, 2}, FU Hua^{1, 2}, HAN Hua-qiang^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Eight large-scale triaxial tests on coarse-grained soil with different lithologies are carried out. The effects of gradation on strength, deformation, dilatancy and particle breakage characteristics of coarse-grained soil are discussed. The test results show that the grain-size composition is the important factor for the mechanical properties, and the strength and deformation characteristics change with the content of fine particles and the mud content. The particle breakage and the peak value of shear stress with the change of confining pressure and gradation are discussed. For the cohesionless coarse-grained soil with the same density, the strength and the stiffness increase with the increase of the fine-grained contents under high stress. For the cohesive coarse-grained soil, the strength and the stiffness of the materials with high mud content are smaller than those with low mud content. Good gradation and strict control of particle content less than 0.075 mm are propitious to improve the stability of the dam body and reduce the dam settlement for high earth and rockfill dams.

Key words: gradation; coarse-grained soil; strength; deformation

0 引言

粗粒土在土石坝建设中运用非常广泛,其力学特性是坝体设计的关键研究内容之一,其中级配是影响粗粒土强度和变形特性的重要因素^[1-2]。

朱俊高等^[3]、朱晟等^[4]研究了不同缩尺级配粗粒土的密实特性,饶锡保等^[5]研究了粗粒含量对砾质土工程性质影响,酈能惠等^[6]通过三轴试验和压实试验研究试料级配缩制而产生的缩尺效应,Marachi等^[7]研究了不同缩尺级配对堆石料的强度影响。

本文挑选2种无黏性粗粒土和1种含泥粗粒土,开展了8组不同级配的大型三轴排水剪切试验,以研究细颗粒含量、是否含泥等级配要素对粗粒土强度和

变形特性的影响。

1 试验说明

8组大型三轴排水剪切试验试样的母岩特性和试验级配见表1。在土石坝工程中,常用孔隙率作为控制堆石料碾压质量的标准,因此对于每种母岩材料,试验时采用了相同的制样孔隙率或控制干密度,消除密度的影响,以研究由于级配不同所导致的粗粒土强度和变形的差异性。其中1号料的孔隙率为23%、2

基金项目:国家自然科学基金面上项目:基于大型劣化三轴试验的高土石坝长期变形研究(51679149)

收稿日期:2016-11-28

号料的为 21%、3 号料为 21.5%。

1 号和 2 号料的细颗粒 (小于 5 mm 粒径颗粒) 为不含泥的干净石渣; 3 号料细颗粒中含有部分粉土和黏土, 小于 0.075 颗粒含量在细粒中达到了 27.7%。由表 1, 所选试验级配小于 5 mm 粒径颗粒含量均不超过 30%, 本文讨论的规律也在此范围内, 不再赘述。

试验在南京水利科学研究院大型三轴仪上进行, 试样尺寸均为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$, 制样时采用了分层振动, 以保持试样的均匀性和减少颗粒离析。饱和方式采用水头饱和法, 剪切过程中记录轴向变形、轴向荷载及排水量, 试验严格按照《土工试验规程》SL237—1999 进行。

表 1 试样级配与密度

Table 1 Grain-size composition and density

试样 编号	岩性	干密度 $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	小于某粒径颗粒百分含量/%				
			60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm
1-1	变质石		100.0	84.2	57.6	37.0	20.0
1-2	英砂岩	2.18	100.0	80.9	55.5	33.8	16.0
1-3	夹板岩		100.0	79.1	50.4	29.5	12.5
2-1	弱风化 石英二 长岩		100.0	80.3	58.5	37.9	20.7
2-2	2.15		100.0	78.7	47.3	28.4	14.3
3-1	含泥 砾岩料		100.0	91.3	72.7	46.6	28.0
3-2	2.10		100.0	88.6	66.6	41.1	22.8
3-3			100.0	85.6	59.8	35.4	17.6

2 不同级配粗粒土的强度特性

由三轴试验结果整理得到的 1 号岩性粗粒土破坏峰值、线性强度指标 c 、 φ 和非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 见表 2。

表 2 1 号料破坏峰值与强度指标

Table 2 Peak strengths and strength indexes of material No. 1

试样 编号	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/\text{kPa}$				c /kPa	φ $(^\circ)$	φ_0 $(^\circ)$	$\Delta\varphi$ $(^\circ)$
	300 kPa	600 kPa	1000 kPa	1500 kPa				
1-1	1574	2714	4200	5715	143.3	39.3	49.9	7.5
1-2	1654	2873	4188	5703	181.7	38.8	51.7	9.1
1-3	1661	2926	4168	5628	197.5	38.4	52.1	9.5

表 2 表明, 细颗粒含量增加后, 在低围压情况下破坏峰值减少; 围压增大后, 破坏峰值反而提高。这主要是因为, 当围压和剪应力较低时, 细颗粒含量低的粗粒土, 粗颗粒含量高, 大颗粒之间的咬合增强, 能承担更大的荷载; 当应力较大时, 随细颗粒含量提高, 粗粒土级配趋向优良、粗细颗粒咬合更为紧密、

细颗粒能较好地填充于粗颗粒骨架并共同承担荷载, 级配优势得到发挥, 产生的颗粒破碎少, 因此破坏峰值有所提高。而细颗粒含量少的粗粒土, 由于含有较多的较大颗粒, 更易产生颗粒破碎现象, 因此其破坏峰值反而降低。

为验证上述观点, 对 2 号岩性两种级配粗粒土在试验结束后进行了筛分试验, 2 号料的破坏峰值及强大指标见表 3, 筛分试验结果见表 4。

表 3 2 号料破坏峰值与强度指标

Table 3 Peak strengths and strength indexes of material No. 2

试样 编号	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/\text{kPa}$				c /kPa	φ $(^\circ)$	φ_0 $(^\circ)$	$\Delta\varphi$ $(^\circ)$
	300 kPa	600 kPa	900 kPa	1200 kPa				
2-1	1878	3024	4194	5209	180.3	40.6	53.9	10.0
2-2	1887	2985	4006	5086	196.3	39.7	54.5	11.1

表 4 试验前后级配变化与颗粒破碎率

Table 4 Gradation change and particle breakage

编 号	试验状态	60~ 40 mm	40~ 20 mm	20~ 10 mm	10~ 5 mm	<5 mm	B_g /%
		40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	mm	
2-1	试验前	19.7	21.8	20.6	17.2	20.7	—
	0.3 MPa	17.3	19.9	19.5	18.8	24.5	5.4
	0.6 MPa	16.6	18.9	18.2	19.3	27	8.4
	0.9 MPa	14.6	19.2	18.1	19.6	28.5	10.2
2-2	1.2 MPa	13.7	18.3	17.5	20.6	29.9	12.6
	试验前	21.3	31.4	18.9	14.1	14.3	—
	0.3 MPa	17.9	28.9	17.2	16.2	19.8	7.6
	0.6 MPa	16.9	27.9	17.3	16.5	21.4	9.5
2-2	0.9 MPa	15.2	26.7	17.1	17.4	23.6	12.6
	1.2 MPa	13.4	26.2	16.6	18.2	25.6	15.4

Marsal^[8]、Hardin^[9]分别提出了描述颗粒破碎程度的指标参数, 郭熙灵等^[10]、刘汉龙等^[11]、傅华等^[12]、申存科等^[13]对粗粒土的颗粒破碎进行了相关试验研究。Marsal^[8]提出的颗粒破碎率 B_g 为试验前后各粒组颗粒含量之差的正值之和, 即:

$$B_g = \sum |\Delta W_k| / 2 , \quad (1)$$

式中, $\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf}$, W_{ki} 为试验前级配曲线上某级粒组的含量, W_{kf} 为试验后级配曲线上相同粒组的含量。

表 3 表明, 2 号料破坏峰值随围压和级配的变化规律与 1 号料相同, 即在低应力状态下细颗粒含量低的破坏峰值高, 高应力条件下细颗粒含量高的破坏峰值高。

表 4 说明, 随围压和剪应力的增大, 试样产生的颗粒破碎率增大; 同等围压情况下, 相对于细颗粒含

量低的粗粒土, 细颗粒含量高的产生的破碎率较低, 而且随围压的增大, 两者之间的颗粒破碎程度差异有增大的趋势。正是由于孔隙中有较充分的细颗粒填充, 产生的颗粒破碎程度低、导致了高应力条件下细颗粒含量高的破坏峰值高。

破坏峰值随级配和应力的变化, 导致强度指标也发生规律性变化: 随细颗粒含量的增加, c , φ_0 , $\Delta\varphi$ 减小, φ 值提高。其中, $\Delta\varphi$ 不但反映了摩擦角随围压的降低, 其大小也客观一定程度上反映了粗粒土的颗粒破碎程度。

对于含泥的 3 号粗粒土, 其破坏峰值与强度指标见表 5。与 1 号和 2 号料不同, 3 号试样组中细颗粒含量高的 3-1 粗粒土, 在低应力和高应力条件下破坏峰值均降低, 这主要是由于细颗粒含量提高后, 试样整体含泥量也相应增加导致的。相应反映在强度指标上, c , φ_0 , $\Delta\varphi$, φ 均减小。

细颗粒含量影响了强度特性, 粗粒土中是否含泥导致了强度指标 φ 产生了相反的规律。试验人员应充分了解试样的特性, 以免造成对工程用料做出错误的认识和理解, 误导工程施工与设计。另外, 在土石坝施工时应严格控制堆石料小于 0.075 mm 粒径含量, 以提高坝体的稳定性。

表 5 3 号料破坏峰值与强度指标

Table 5 Peak strengths and strength indexes of material No. 3

试样 编号	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/\text{kPa}$			c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\varphi_0/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$
	300 kPa	600 kPa	900 kPa				
3-1	1010	1858	2703	42.1	35.8	40.8	4.2
3-2	1058	1936	2789	49.9	36.2	41.9	4.7
3-3	1119	2016	2883	61.0	36.5	43.2	5.5

3 不同级配粗粒土的变形特性

根据试验结果, 整理得到了 8 组粗粒土的邓肯模型主要参数, 见表 6。

表 6 粗粒土邓肯模型参数

Table 6 Duncan model parameters of coarse-grained soil

编号	K	n	R_f	K_b	m
1-1	723.0	0.29	0.63	233.0	0.27
1-2	810.8	0.25	0.65	265.0	0.20
1-3	916.6	0.22	0.68	330.1	0.09
2-1	1134.5	0.25	0.63	616.2	0.07
2-2	1256.5	0.21	0.74	781.6	0.04
3-1	403.4	0.27	0.80	149.8	0.30
3-2	608.1	0.25	0.86	215.9	0.13
3-3	715.9	0.24	0.87	276.8	0.03

以 1 号岩性粗粒土为例, 分析无黏性粗粒土级配对变形的影响。1-1 与 1-3 号料三轴试验曲线见图 1, $E_i/p_a - \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线见图 2, 其中 E_i 为初始切

线模量, p_a 为大气压。

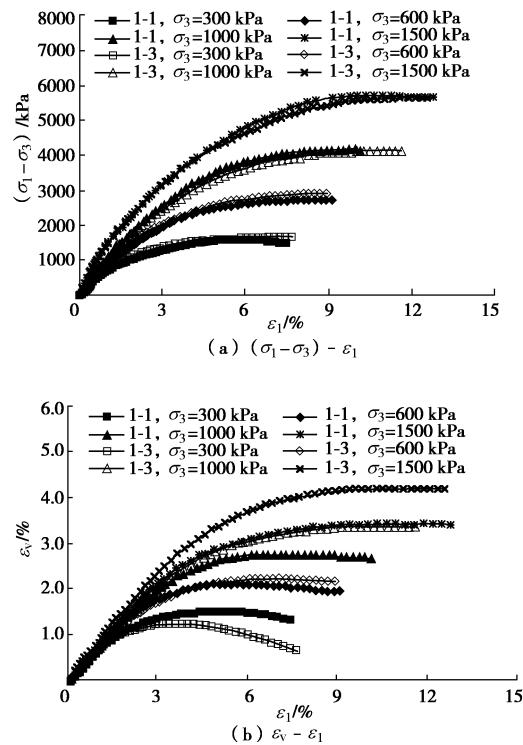


图 1 1-1 料和 1-3 料三轴试验曲线

Fig. 1 Triaxial test curves of materials 1-1 and 1-3

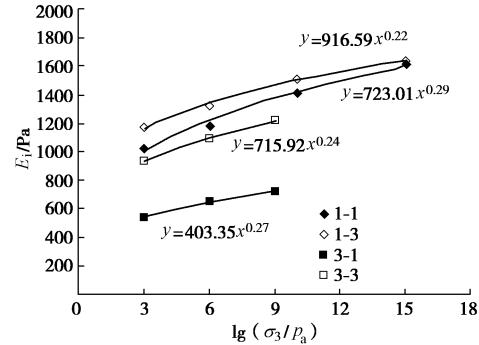


图 2 $E_i/p_a - \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 2 $E_i/p_a - \lg(\sigma_3/p_a)$ curves

1-1 号料与 1-3 号料的应力 - 应变曲线均存在不同程度的应变软化现象, 且随围压的提高向应变硬化趋势发展。对比 1-1 和 1-3 号料应力 - 应变曲线, 当围压较低时, 粗颗粒含量较低的 1-3 号粗粒土, 产生的剪切峰值高, 且达到剪切峰值时的轴向应变小; 当围压提高后, 1-3 号料产生的剪切峰值低, 且出现峰值的应变略大。即相比于粗颗粒含量高的粗粒土, 粗颗粒含量低的在围压较低时切线弹性模量高, 随围压的增大切线弹性模量差距逐渐降低, 甚至会低于细颗粒含量较高的粗粒土, 见图 2。反映在邓肯模型参数上, 同等孔隙率条件下随细颗粒含量的增加, 参数 K 值小, n 值大。

由 1-1 号料与 1-3 号料的体变 - 应变曲线, 试样

在剪切过程中均产生了或多或少的剪胀现象, 且随围压提高体积变形增大, 剪胀现象减弱。对比两组体变曲线, 可发现相对于 1-1 号料, 含量粗颗粒含量低的 1-3 号料, 在围压较低时, 产生的体积变形小; 围压提高后, 产生的体积变形逐渐增大, 并在围压 1000 kPa 时超过 1-1 号料、且剪胀现象更不显著。由于级配对粗粒土体积变形的这种影响, 导致了随细颗粒含量的增加, 邓肯 E-B 参数 K_b 减小而参数 m 增大, 见表 6。2-1 和 2-2 号粗粒土的邓肯模型参数 K , n , G , K_b 和 m 随级配的变化规律与 1 号母岩性质土料相似。

无黏性粗粒土应力 - 应变和体变 - 应变曲线随围压产生的这种变化规律, 主要是由于级配引起的。具体而言, 当围压较低、剪应力较小时, 试样变形主要是由颗粒滑移为主, 试样产生的颗粒破碎不明显, 具有较高粗颗粒含量的粗粒土由于颗粒之间咬合力大, 导致了峰值强度高, 抵御变形能力增强, 同时由于颗粒之间的跨越作用增强, 产生了较为显著的剪胀现象。当围压提高后, 试样的变形由颗粒滑移和颗粒破碎共同主导, 随细颗粒含量提高, 粗细颗粒填充咬合越紧密, 产生的颗粒破碎小, 试样具有更高的破坏峰值、相同剪应力条件下产生的轴向变形小; 而且由于颗粒破碎程度小, 相应产生的体积变形小, 且剪胀现象要更为显著。

对于细粒中含有粉土和黏土的 3 号料, 3-1 和 3-3 号粗粒土应力应变试验曲线见图 3。

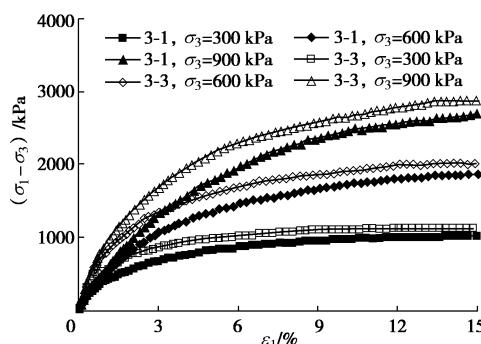


图 3 3-1 与 3-3 料应力 - 应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of materials 3-1 and 3-3

对比图 1 和图 3, 应力应变试验曲线存在较为显著的差别。首先, 孔隙率较低的 3 号料应变硬化特性要更显著, 而且产生破坏峰值时的轴向应变较大, 基本都达到了 15%; 其次, 无论是低应力条件下还是大应力条件下, 相比于细粒较多的 3-1 料, 细粒含量较少的 3-3 料不仅破坏峰值要高、而且在相同剪切应力条件下产生的轴向应变明显要低。

而相对于细粒含量较高的 1-1 料, 1-3 号料在围压较低时峰值要略高、同等剪切应力条件下产生轴向应

变略小, 大围压条件下峰值低、同等剪切应力条件下轴向应变要大。引起 3 号料在强度和变形特性上与 1 号料不同的根本原因是 3 号料中含有部分粉粒和黏粒, 随细颗粒含量增大粉粒和黏粒增加, 因此 3-1 料强度要低于 3-3 号料, 切线模量也显示了同样的规律, 即随细颗粒含量增加, 模量逐渐降低, 见图 2。表 6 表明, 随细颗粒含量的增加, 3 号土料 K 值降低、 n 值增大, K_b 减小而参数 m 增大, 规律与 1 号土料相似, 但形成的原因是试样中所含粉粒和黏粒导致的, 与 1 号无黏性土的级配和颗粒破碎影响机理并不相同。

3 号料三轴强度和变形试验结果表明, 由于含泥量的增加, 会显著导致破坏峰值和初始切线模量的降低。因此, 对于土石坝特别是高土石坝, 坝体内应力大, 应力水平高, 应采用优良级配、严格控制小于 0.075 mm 含量的坝体填筑料, 能有效改善坝体的稳定性和减少坝体沉降。

4 结 论

(1) 级配是粗粒土力学特性的重要因素, 细颗粒含量的改变、是否含泥等影响了强度和变形特性。

(2) 对于岩性一致、密度相同的无黏性土粗粒土, 随细颗粒含量的提高, 强度指标 c 值降低、 φ 值提高, 邓肯模型参数 K 值降低、 n 值增大, 在大应力条件下, 具有更高的强度和切线弹性模量。

(3) 对于岩性一致、密度相同、具有一定含泥量的粗粒土, 细颗粒含量提高后, 强度指标 c 值降低、 φ 值提高, 邓肯模型参数 K 值降低、 n 值增大, 无论何种应力条件下, 强度和刚度都显著降低。

(4) 对于土石坝特别是高土石坝工程, 良好的坝体填筑料级配、严格控制小于 0.075 mm 颗粒含量, 有利于提高坝体的稳定性和减小坝体沉降。

参考文献:

- [1] 蔡正银, 李小梅, 韩林, 等. 考虑级配和颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1357 - 1364. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, HAN Lin, et al. Critical state of rockfill materials considering particle gradation and breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2016, 38(8): 1357 - 1364. (in Chinese))
- [2] 柏树田, 崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报, 1997(3): 21 - 29. (BAI Shu-tian, CUI Yi-hao. The mechanical properties of rockfill[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1997(3): 21 - 29. (in Chinese))
- [3] 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. (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 - 2398. (in Chinese))
- [4] 朱 峰, 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. (in Chinese))
- [5] 饶锡保, 何晓民, 刘 鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. *长江科学院院报*, 1999, **16**(1): 21 - 25. (RAO Xi-bao, HE Xiao-min, LIU Ming. Influence of coarse-grained content on engineering properties of gravelly soil[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1999, **16**(1): 21 - 25. (in Chinese))
- [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): 39 - 42. (LI Neng-hui, ZHU Tie, MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of Xiaolangdi dam and scale effect[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2001, **19**(2): 39 - 42. (in Chinese))
- [7] MARACHI N D, CHAN C K, SEEDH B. Evaluation of properties of rockfill mechanicals[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundations, Division, ASCE*, 1972, **98**(1): 95 - 114.
- [8] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973: 109 - 200.
- [9] HARDIN C S. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers*, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [10] 郭熙灵, 胡 辉, 包承刚. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. *岩土工程学报*, 1997, **19**(3): 83 - 88. (GUO Xi-ling, HU hui, BAO Cheng-gang. Effect of rockfill materials crashing on shear expansion characteristic and shear intensity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, **19**(3): 83 - 88. (in Chinese))
- [11] 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 Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-Feng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(4): 562 - 566. (in Chinese))
- [12] 傅 华, 凌 华, 蔡正银. 粗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, **37**(1): 75 - 79. (FU Hua, LING Hua, CAI Zheng-yin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, **37**(1): 75 - 79. (in Chinese))
- [13] 申存科, 迟世春, 贾宇峰. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土本构关系[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(7): 2111 - 2115. (SHEN Cun-ke, CHI Shi-chun, JIA Yu-feng. A constitutive model for coarse granular soil incorporating particle breakage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(7): 2111 - 2115. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)