

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.006

不同剪切速率下掺砾料大三轴试验

朱俊高^{1,2}, 龚 选^{1,2}, 周建方³, 金 伟⁴, 殷建华⁵

(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. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 丹阳市水利局, 江苏 丹阳 212300;
4. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072; 5. 香港理工大学, 香港九龙)

摘要: 对某心墙堆石坝掺砾心墙料进行三轴固结排水剪切试验, 研究剪切速率对掺砾心墙料的应力-应变关系和强度特性影响。结果表明: 无论剪切速率高低, 掺砾心墙料试样在不同围压条件下应力-应变关系曲线均表现出不同程度的硬化和剪缩现象, 随着剪切速率的增加, 硬化现象逐步增强, 剪缩现象逐渐减小; 随着剪切速率的增加, 偏应力峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 降低越明显, 且强度指标 φ 减小显著; 在试验的剪切速率范围内, 割线弹性模量 E_1 随剪切速率的增加而减小, 体积模量 K_1 随剪切速率的增加呈先增加、后减小的趋势。

关键词: 掺砾心墙料; 剪切速率; 土体强度特性; 大三轴试验; 固结排水剪试验

中图分类号: TV641.4⁺1; TU41 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2014)01-0029-06

Large-scale triaxial tests on behavior of gravelly soil at different shearing rates

ZHU Jungao^{1, 2}, GONG Xuan^{1, 2}, ZHOU Jianfang³, JIN Wei⁴, YIN Jianhua⁵

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Water Resources Bureau of Danyang City, Danyang 212300, China;
4. HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China;
5. The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong)

Abstract: The stress-strain behavior and shear strength of gravelly soil at different shearing rates were investigated through a triaxial consolidated-drained shear test on the gravelly soil of a core rockfill dam. The results show that regardless of the level of the shearing rate, the stress-strain behaviors of the gravelly soil exhibited various degrees of hardening and shear shrinkage under different confining pressures. As the shearing rate increased, the hardening gradually strengthened but the shrinkage weakened. The peak deviatoric stress $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ decreased remarkably with the increase of the shearing rate, and the intensity index φ decreased significantly. In the range of testing shearing rates, the secant modulus E_1 decreased with the increase of the shearing rate, and the bulk modulus K_1 increased initially, and then decreased with the increase of the shearing rate.

Key words: gravelly soil; shearing rate; soil strength behavior; large-scale triaxial test; consolidated-drained shear test

堆石坝具有适用条件广、经济效益好、设计手段较成熟、施工速度较快及抗震性能强等优点^[1], 在大坝选型中备受青睐。近年来, 我国堆石坝建设迅猛发展, 多座 200 m 甚至 300 m 级的高坝正在设计或施工中。

收稿日期: 2013-01-08

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20110094110002); 住房和城乡建设部科学技术计划(2012-K3-9); 高等学校学科创新引智计划(B13024)

作者简介: 朱俊高(1964—), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士, 主要从事土体基本特性及本构关系研究。E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

一般来说,心墙土料中黏粒的含量比较高,心墙料渗透性弱,室内试验时的加载速率不同,意味着排水程度不同,会引起试样的强度和变形不同。另一方面,目前对土石坝进行应力变形分析时需要进行三轴固结排水剪试验,以确定相关模型参数。对高土石坝,为减轻心墙应力拱效应,心墙料一般用掺砾土料以增大其变形模量。心墙料中含砾石,就必须用大型三轴仪进行试验,为了保证试样内的孔压充分消散,加载速率必须很低^[2],固结排水时间很长。理论上,对固结排水剪试验,剪切速率越小则所得结果越合理。但是,实际工程常常因为时间限制,有时采用较大的剪切速率。如果剪切速率太大,会导致试验排水不充分,试样内孔压较大,必然引起试验误差。对这种低渗透性含砾石土料的大三轴试验,如果剪切速率不是足够慢会引起多大的误差,迄今为止相关研究很少。因此,有必要研究剪切速率对掺砾心墙料大型三轴试验的应力-应变-强度特性,从而合理评估试验结果的误差,为设计选用提供参考。

有关剪切速率对三轴试验结果的影响,国内外很多学者曾进行过一些探讨性的工作,但主要集中在不排水剪三轴试验方法下剪切速率对黏土应力-应变-强度特性影响的研究。Crawford^[3]在不排水剪试验中对Leda黏土的研究发现剪切速率对孔压的影响不容忽视;Thomas等^[4]研究了剪切速率对超固结黏土不排水强度的影响,发现当剪切速率较小时,随着固结比的增加,黏土不排水抗剪强度的速率敏感度不断降低;Zhu等^[5]对不同超固结比的香港海相沉积粉质黏土进行不同剪切速率的三轴固结不排水试验,发现剪切速率每提高10倍,三轴压缩试验的偏应力峰值强度平均提高5.5%,三轴伸长试验的偏应力峰值强度则平均提高8.4%;拓勇飞等^[6]以及李作勤^[7]对结构性黏土进行试验研究,发现结构性黏土存在“应变速率软化”现象;蔡羽等^[8]对湛江强结构性黏土进行三轴试验,发现CU剪切强度随剪应变率的增大呈现先减小、后增大的特征,存在临界速率现象;李杭州等^[9]通过不同剪切速率固结不排水三轴试验,发现加载速率对黏土的应力-变形特性有显著的影响。

掺砾土的固结排水剪切试验研究较多^[10-11],但研究剪切速率对土体应力-应变-强度特性影响的相关工作较少。韩胜利等^[10]对两河口砾石土心墙料进行三轴排水剪切试验,发现如下规律:砾石土在小围压下极易发生应变软化现象;对于同一围压不同剪切速率下,剪切强度随剪切速率的增大而增大;随着剪切速率的不断增大,强度参数有逐渐增大的趋势,最终趋于稳定。

笔者对双江口心墙堆石坝掺砾心墙料进行了不同剪切速率的三轴固结排水剪切试验,研究剪切速率对试样应力-应变关系及强度特性的影响。

1 试验土料与试验方案

1.1 土料

试验所用土料为掺砾土,其中黏土为双江口心墙堆石坝掺砾心墙料所用的土料,其液限为33.4%,塑限为19.6%,塑性指数为13.8,相对密度为2.71,按文献[12]定名为CL。掺砾黏土料砾石含量(质量分数,下同)为50%,所掺砾石级配如下:粒径为60~40mm、40~20mm、20~10mm、10~5mm、小于5mm的砾石含量分别为23.75%、33.25%、20.78%、7.22%、5.00%。

1.2 方案

三轴试验试样直径为300mm,高度为600mm。共进行了3组不同剪切速率的试验,每组4个试样,固结压力分别为500kPa、1200kPa、1800kPa、2500kPa。各组试验对应的剪切到应变约15%的时间分别为72h、24h、8h,相应的剪切速率 r' 分别为0.02mm/min、0.0625mm/min、0.1875mm/min。

试样制备完成后采用水头饱和,一般饱和时间至少24h,固结完成以固结曲线不再明显变化为准。

2 剪切速率对试验结果的影响分析

2.1 应力-应变特性

图1~3给出了剪切速率分别为0.02mm/min、0.0625mm/min、0.1875mm/min时掺砾心墙料不同围压下的 $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 和 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 关系曲线,即主应力差~轴向应变和体积应变~轴向应变关系曲线。在此,以剪切速率最小(0.02mm/min)的试验作为基准,分析剪切速率增大后试样应力应变及强度性质的变化。从图1(a)可以看出,当 $r'=0.02\text{mm/min}$ 时,各围压下的 $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 关系曲线呈现应变硬化型,而且应变较大时曲线趋于平缓,呈现典型的双曲线型。

图1(b)显示各围压下的 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 关系表现为剪缩,且非线性明显。

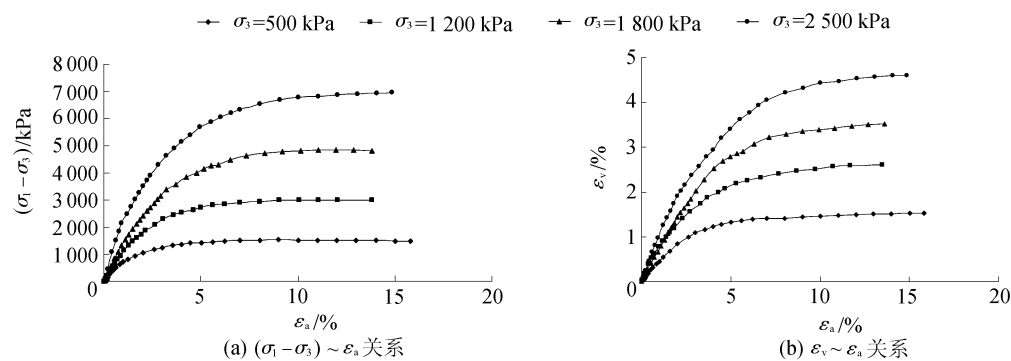


图 1 $r'=0.02\text{ mm/min}$ 时 $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 和 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 关系曲线
Fig. 1 $(\sigma_1-\sigma_3)$ vs. ε_a and ε_v vs. ε_a at $r'=0.02\text{ mm/min}$

对比图 1(a)和图 2(a)、图 3(a),可以看出,随着剪切速率增加, $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 关系曲线硬化现象逐步增强。比较图 1(b)和图 2(b)、图 3(b),不难发现,随剪切速率增加,试样体积变形(剪缩)逐渐减小,且曲线的形态也显著不同。在所试验的剪切速率范围内剪切速率对试样应力应变强度性质影响显著。

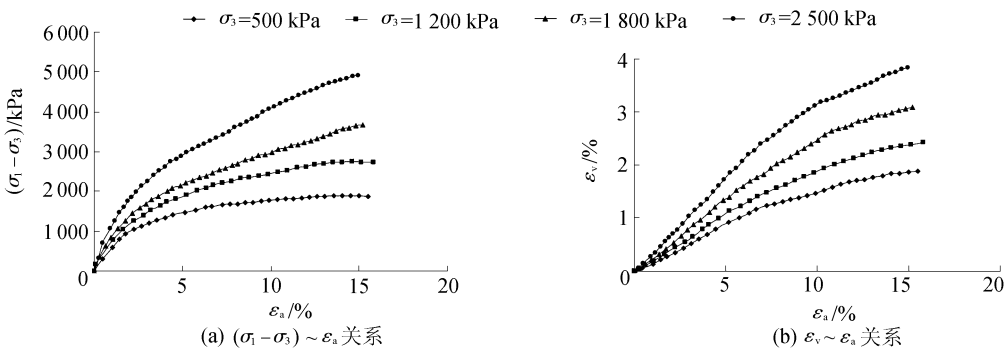


图 2 $r'=0.0625\text{ mm/min}$ 时 $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 和 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 关系曲线
Fig. 2 $(\sigma_1-\sigma_3)$ vs. ε_a and ε_v vs. ε_a at $r'=0.0625\text{ mm/min}$

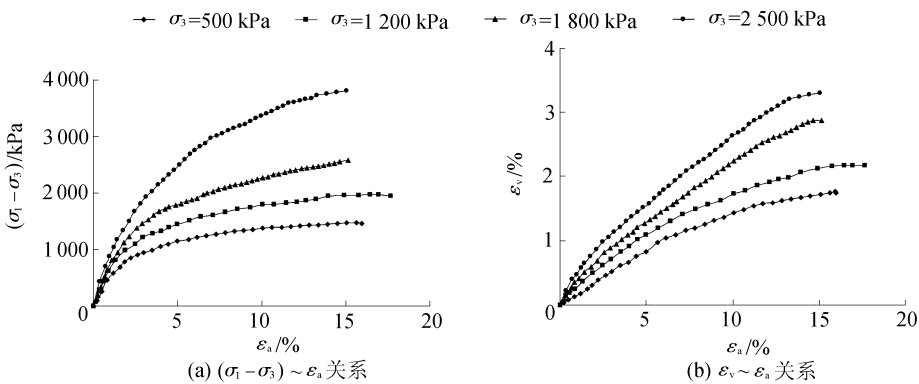


图 3 $r'=0.1875\text{ mm/min}$ 时 $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 和 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 关系曲线
Fig. 3 $(\sigma_1-\sigma_3)$ vs. ε_a and ε_v vs. ε_a at $r'=0.1875\text{ mm/min}$

为了更清楚地分析剪切速率对土料变形性质的影响,根据试验结果整理得同一围压、不同剪切速率下 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 关系曲线如图 4 所示。限于篇幅,这里仅给出了 $\sigma_3=1\,200\text{ kPa}$ 和 $\sigma_3=2\,500\text{ kPa}$ 下的体积应变曲线。可以看出,相同围压不同剪切速率下试样的体积变形差异显著,相比之下 0.0625 mm/min 和 0.1875 mm/min 两种剪切速率下的体积应变比较接近。

为了进一步研究剪切速率增大后试验测定的体积应变的差异,整理了不同围压下各试样对应某轴向应变 ε_a 时的体积应变,如表 1 所示。可以看出,对应相同 σ_3 和 ε_a ,不同剪切速率的体积应变差异较大。以 $\varepsilon_a=10\%$ 和 $\sigma_3=2\,500\text{ kPa}$ 的情况为例, $r'=0.0625\text{ mm/min}$ 速率测得的体积应变比基准情况减小了 28.5% , 0.1875 mm/min 速率测得的体积应变则比基准情况减小了 39.6% 。

为更清楚地看出速率增大后所带来的体积应变测量误差,整理了不同 ε_a 对应不同 σ_3 时的体积应变误差(相对于 $r'=0.02\text{ mm/min}$ 速率试验),如图5所示。可以看出,对应不同 σ_3 和 ε_a ,速率增大所引起的体积应变误差大多在20%~80%范围,不可忽视,一般情况下这是偏于危险的。

表1 不同剪切速率试验测定的试样轴向应变对应的体积应变

Table 1 Volumetric strain subjected to axial strain at different shearing rates for tested samples

$r'/$ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	$\varepsilon_v/\%$											
	$\varepsilon_a=1\%$				$\varepsilon_a=5\%$				$\varepsilon_a=10\%$			
	$\sigma_3=$ 500 kPa	$\sigma_3=$ 1 200 kPa	$\sigma_3=$ 1 800 kPa	$\sigma_3=$ 2 500 kPa	$\sigma_3=$ 500 kPa	$\sigma_3=$ 1 200 kPa	$\sigma_3=$ 1 800 kPa	$\sigma_3=$ 2 500 kPa	$\sigma_3=$ 500 kPa	$\sigma_3=$ 1 200 kPa	$\sigma_3=$ 1 800 kPa	$\sigma_3=$ 2 500 kPa
0.02	0.457	0.813	0.731	1.092	1.329	2.153	2.789	3.382	1.447	2.514	3.375	4.395
0.062 5	0.135	0.171	0.226	0.292	0.875	1.078	1.344	1.766	1.391	1.860	2.438	3.141
0.187 5	0.158	0.278	0.392	0.500	0.836	1.097	1.286	1.548	1.43	1.727	2.246	2.655

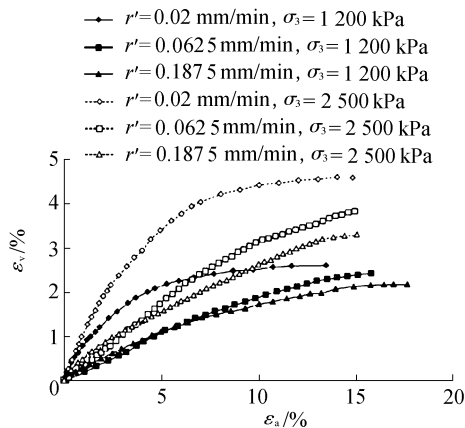


图4 不同剪切速率的 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 关系比较

Fig. 4 ε_v vs. ε_a at various shearing rates

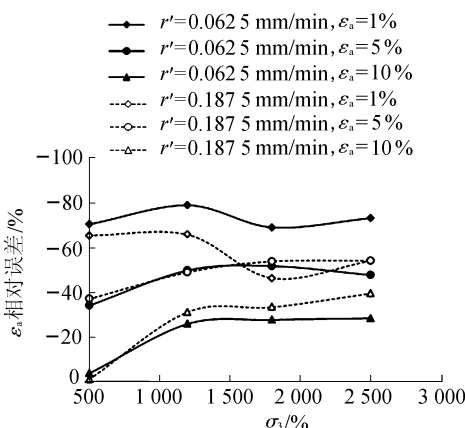


图5 ε_v 相对误差随 σ_3 变化关系

Fig. 5 Variation of relative errors of ε_v with σ_3

2.2 强度特性

对比图1、图2和图3可以清晰看出,随着围压增大,剪切速率对偏应力峰值强度的影响也相应增大;同一围压,剪切速率越大,偏应力峰值强度降低越明显。

为清楚看出剪切速率对偏应力峰值强度的影响,整理了同一围压不同剪切速率下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 关系曲线,如图6所示。可以看出,剪切速率对 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 关系及其峰值影响显著。

为进一步研究剪切速率对峰值强度的影响,整理了各试样不同速率下峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随围压的变化关系,如图7(a)所示。图7(a)显示,相同剪切速率下 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随 σ_3 的增加几乎呈线性增长。当 $\sigma_3 = 500\text{ kPa}$ 时, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随着 r' 的增加呈先增大、后减小变化。在其他围压下, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随着 r' 的增加而减小。

为分析剪切速率加大所引起的强度测定误差,整理了 $r'=0.0625\text{ mm/min}$ 和 $r'=0.1875\text{ mm/min}$ 试验峰值强度相对于 $r'=0.02\text{ mm/min}$ 试验(基准试验)峰值强度的相对误差 δ (负值表示偏小),如图7(b)所示。 $r'=0.0625\text{ mm/min}$ 和 $r'=0.1875\text{ mm/min}$ 两种试验的 δ 随 σ_3 的变化规律相似。总体上, r' 越大,测定的 δ 越大; σ_3 越高, r' 对偏应力峰值强度的影响越大。图7(b)中两条线几乎平行,距离平均23.3%,说明剪切速率提高了3倍,其峰值强度减小了23.3%。

根据试验结果整理得试验土料的强度指标如表2所示。从表2可以看出掺砾料的强度指标 φ 随 r' 的增大整体上呈现减小趋势, c 随 r' 的增加而显著增大,但由于试验数据较少,所表现的规律还难以总结。

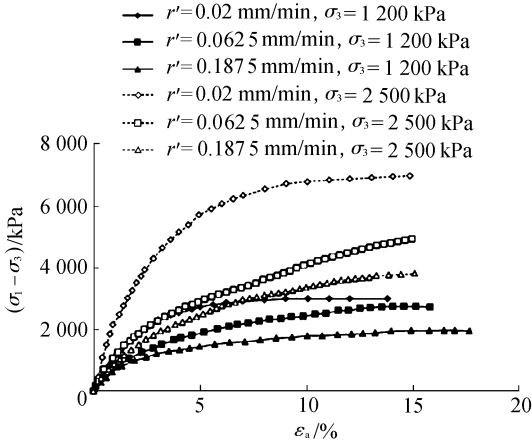


图6 不同剪切速率的 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 关系比较

Fig. 6 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ vs. ε_a at various shearing rates

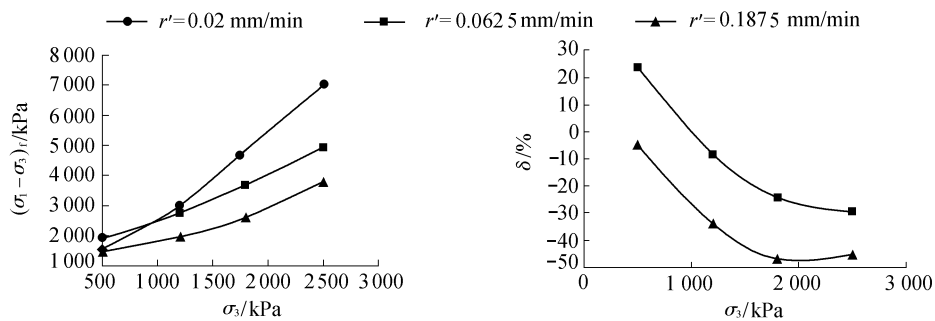


图 7 不同剪切速率下 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f \sim \sigma_3$ 关系及 $\delta \sim \sigma_3$ 关系

Fig. 7 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ vs. σ_3 and δ vs. σ_3 at different shearing rates

将每个试样 4 个围压对应莫尔圆整理出来,并求得每个莫尔圆对应的摩擦角,如表 3 所示。可以看出,总体上,随着 r' 的增大, φ 显著减小。对 4 个围压,当将 r' 从 0.02 mm/min 增大到 0.0625 mm/min 时,其 φ 平均减小 4.6%;当 r' 从 0.0625 mm/min 增大到 0.1875 mm/min 时, φ 平均减小了 11.5%。

表 2 砾石土料强度指标

Table 2 Strength indices of tested soil		
$r' /$ (mm · min ⁻¹)	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa
0.02	34.4	27.2
0.0625	25.5	324.2
0.1875	21.7	235.2

表 3 各试样对应不同围压时的摩擦角

Table 3 Friction angles of tested samples under various confining pressures				
$r' /$ (mm · min ⁻¹)	$\varphi / (^\circ)$			
	$\sigma_3 = 500 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 1\,200 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 1\,800 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 2\,500 \text{ kPa}$
0.02	48.1	38.4	36.1	37.1
0.0625	52.3	44.1	42.1	41.5
0.1875	49.0	45.5	46.8	47.4

2.3 变形特性

为了进一步研究剪切速率对掺砾心墙料变形性质的影响,整理了各试验不同围压下割线模量 E_1 (即对应 1% 轴向应变时的割线模量)随 r' 的变化关系,如图 8 所示。

图 8 显示:不同围压下 E_1 随 σ_3 的增大而增大;相同围压下 E_1 随 r' 的增大而减小,最终趋于稳定。在 500 kPa 围压下, $r' = 0.02 \text{ mm/min}$ 的 E_1 是 $r' = 0.1875 \text{ mm/min}$ 时的 1.4 倍;在 2500 kPa 围压下, $r' = 0.02 \text{ mm/min}$ 的 E_1 是 $r' = 0.1875 \text{ mm/min}$ 时的 2.5 倍。由此可见, r' 增加,掺砾心墙料的 E_1 显著降低,其降低程度随 σ_3 的增加而增加。这种现象说明随着 r' 的不断增大,试样的孔隙水压逐渐增大,使需要试样抵抗变形的能力逐渐降低。

对弹性材料,弹性模量只反映材料变形性质的一个方面,要准确地分析掺砾心墙料的变形性质,还需要研究其体积变形模量或泊松比。这里,笔者拟对所试验的掺砾心墙料的体积模量进行研究。

根据三轴试验应力路径,其对应 $\varepsilon_a = 1\%$ 时的体积模量可以用此时的主应力差和体积应变确定,即, $K_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) / (3\varepsilon_v)$,类似于前面的 E_1 ,称 K_1 为 $\varepsilon_a = 1\%$ 时的割线体积模量。不同围压下 K_1 随 r' 的变化关系如图 9 所示。

图 9 显示,相同围压下, K_1 随 r' 的增加呈先增加、后减小的趋势, $r' = 0.02 \text{ mm/min}$ 、 0.0625 mm/min 、 0.1875 mm/min 的试样在 4 种围压下的 K_1 平均值分别为 0.633 5 MPa、1.371 8 MPa、0.787 3 MPa。不同围压下, r' 为 0.02 mm/min 试样的 K_1 随 σ_3 的增大呈先增大、后减小的趋势,而另外 2 种剪切速率试样的 K_1 随 σ_3 的增大而减小。

3 讨 论

以上分析表明,剪切速率对掺砾心墙料的应力应变及强度性

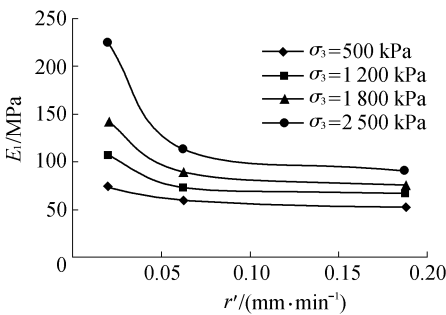


图 8 不同围压下 $E_1 \sim r'$ 的关系

Fig. 8 Relationship between E_1 and r' under various confining pressures

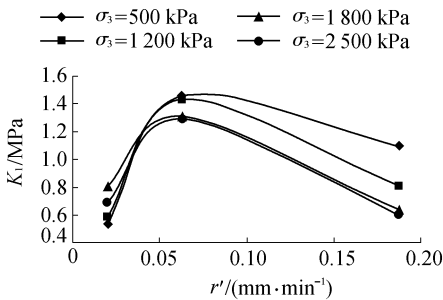


图 9 不同围压下 $K_1 \sim r'$ 的关系

Fig. 9 Relationship between K_1 and r' under various confining pressures

质有较大影响。对渗透性较低土样的大型三轴试验,即使在 24 h 内剪切达到应变 15%,剪切速率仍然太快,测得的强度偏低,体积应变偏小。从工程角度测得的强度偏低是偏安全,但是试验的体积应变偏小则是偏于危险的。因此,对心墙料试样直径为 300 mm 的大型三轴固结排水剪试验,剪切时间应大于 24 h,至于更合理的剪切时间还有待进一步研究。

另外,由于笔者仅对一种掺砾量下的掺砾心墙料进行了试验,还不能研究掺砾量对 E_1 和 K_1 的影响,仅能得出剪切速率对土料变形性质影响的初步结论。

4 结 论

a. 对应不同围压和轴向应变,与剪切速率为 0.02 mm/min 的试验(基准试验)结果相比,速率增大 3 ~ 9 倍引起试验测得的体积应变减小 20% ~ 80%,一般情况下这是偏于危险的;剪切速率增大后,围压越高,偏应力峰值强度减小幅度越大;在低围压下,剪切速率增大后偏应力峰值强度减小幅度较小,甚至会增大;与基准试验相比,速率增大 3 ~ 9 倍后不同围压下偏应力峰值强度减小幅度平均值为 9.6% ~ 32.9%。

b. 掺砾心墙料试样的内摩擦角 φ 随剪切速率增大呈现减小趋势。剪切速率每提高 3 倍,对应每个围压下按照黏聚力为零方法整理的摩擦角减小(约 5%)。黏聚力 c 随剪切速率的增加有不同程度增大,所表现的规律不明显。

c. 在试验的剪切速率范围内,割线弹性模量随剪切速率的增大而减小,最终趋于稳定。体积模量随剪切速率的增大、呈先增大、后减小的趋势。

d. 从笔者的研究结果看,渗透性较低的土样(如掺砾心墙料)的大型三轴试验剪切时间应大于 24 h,对应的剪切速率应大于 0.0625 mm/min,合理的剪切时间还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 高彦斌,汪中为. 应变速率对黏土不排水抗剪强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5779-5783. (GAO Yanbin, WANG Zhongwei. Effect of STRAIN rate on undrained shear strength of clays[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup2): 5779-5783. (in Chinese))
- [3] CRAWFORD C B. The influence of rate of strain on effective stresses in sensitive clay[M]. Ottawa: ASTM Special Technical Publication, 1959, 254: 36-48.
- [4] THOMAS C S, CHARLES C L, JOHN T G. Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(2): 99-108.
- [5] ZHU Jungao, Yin Jianhua. Strain-rate-dependent stress-strain behaviour of overconsolidated Hong Kong marine deposits[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(6): 1272-1282.
- [6] 拓勇飞,孔令伟,郭爱国,等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1879-1884. (TUO Yongfei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Occurrence and engineering properties of structural soft clay in Zhanjiang area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1879-1884. (in Chinese))
- [7] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 34-35. (Li Zuoqin. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 34-35. (in Chinese))
- [8] 蔡羽,孔令伟,郭爱国,等. 剪应变率对湛江强结构性黏土力学性状的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1235-1239. (CAI Yu, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Effects of shear strain rate on mechanical behavior of Zhanjiang strong structured clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1235-1239. (in Chinese))
- [9] 李杭州,廖红建,孔令伟,等. 膨胀性泥岩应力-应变关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 107-110. (LI Hangzhou, LIAO Hongjian, KONG Lingwei, et al. Experimental study on stress-strain relationship of expansive mud-stone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 107-110 (in Chinese)).
- [10] 韩胜利,何昌荣,徐丽丽. 剪切速率对心墙料应力-应变-强度特性影响[J]. 路基工程, 2009(6): 142-143. (HAN Shengli, HE Changrong, XU Lili. Effects of shear strain rate on stress-strain-strength behavior of core soil[J]. Subgrade Engineering, 2009, 6: 142-143. (in Chinese))
- [11] 陈志波,朱俊高. 宽级配砾质土三轴试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2010, 38(6): 704-710. (CHEN Zhibo, ZHU Jungao. Triaxial tests on widely graded gravelly soil[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(6): 704-710. (in Chinese))
- [12] SL 237—1999 土工试验规程[S].