

DOI: 10.11779/CJGE2017S1047

粗粒土三轴试样端部约束影响研究

陆晓平¹, 孙明辉^{2,3}, 陈浩峰⁴, 褚福永⁵

(1. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022; 2. 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; 3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 4. 常州市建筑科学研究院股份有限公司, 江苏 常州 213000; 5. 丽水学院工程与设计学院, 浙江 丽水 323000)

摘要: 对两种级配的砾石料, 分别进行了两种中三轴固结排水剪试验, 一种是试样端部采用润滑试样帽法以减轻端部约束对三轴试验的影响; 另一种试样则是常规三轴固结排水剪试验, 即不采取端部减摩措施。对比分析两种试验的结果, 以研究端部约束对三轴试样变形及强度的影响, 分析润滑试样帽法对粗粒土试样的端部减摩效果。结果表明: 试样在剪切过程中均表现出不同程度的剪胀性, 常规三轴试样体积变形比减轻端部约束试样体积变形略小; 当试验围压较低时, 减轻端部约束对试样偏应力峰值($\sigma_1 - \sigma_3$)_f 影响相对显著, 而高围压下, 润滑试样帽法的减摩作用几乎消失; 同样, 内摩擦角 φ , 初始切线模量 E_i , 割线弹性模量 E_1 均比常规三轴试验的小; 随着围压的不断增大, 润滑试样帽法减轻端部约束的效果明显减弱。

关键词: 粗粒土; 三轴试验; 端部约束; 润滑试样帽

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0236-05

作者简介: 陆晓平(1966-), 女, 江苏泰兴人, 高级工程师, 主要从事水利工程方面的研究。E-mail: njlxp302@163.com。

Effects of end restraint in triaxial tests on coarse-grained soil

LU Xiao-ping¹, SUN Ming-hui^{2,3}, CHEN Hao-feng⁴, CHU Fu-yong⁵

(1. Management Division of Qinhuai River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; 3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 4. Changzhou Architectural Research Institute Co., Ltd, Changzhou 213000, China; 5. School of Civil Engineering, Lishui University, Lishui 323000, China)

Abstract: The end restraint can be eliminated by lubrication sample cap to some extent in the conventional triaxial tests. A comparison is made between the conventional triaxial tests and the end friction reduced triaxial tests in order to study the effects of the end restraint on the test results. The results show that different degrees of dilatancy is shown during the tests. The degree of volume deformation of the conventional triaxial test specimen is smaller. The measures to reduce the end friction have marked effects on the peak strength ($\sigma_1 - \sigma_3$)_f under low confining pressure. But with the increase of the confining pressure the effects of the lubrication sample cap method to reduce the end friction become worse. Under the same confining pressure, the internal friction angle φ , the initial Young's modulus E_i and the secant modulus E_1 of the end friction reduced triaxial tests are smaller than those of the conventional triaxial tests.

Key words: coarse-grained soil; triaxial test; end restraint; lubrication sample cap

0 引言

三轴试验是目前性价比最好的用于研究土体应力应变强度性质的试验, 仪器相对简单便宜但又能够实现相对较复杂的应力。因此, 利用三轴试验进行土体力学性质试验的研究很多^[1-3]。理想的三轴试验状态是试样内部应力均匀, 小主应力 σ_3 等于围压, 大主应力 σ_1 等于轴向应力, 但在实际试验中, 这种理想状态很难获得^[4]。试样受压时, 端部受到刚性试样帽(底座)摩擦力的束缚, 不能自由侧向膨胀, 导致试样剪切过程中出现较明显的不均匀变形, 进而影响到试样的应

力应变性质、强度特性和体积变化^[5-6]。

端部约束条件、应力水平、试验土料特性和试样密度等因素影响着端部约束效应, 这些影响在 60 年代便受到了研究者的关注^[7]。不少学者提出了多种方法试图减小端部约束的影响, 例如 Blight^[8]用与试样性质相同的土块作为过渡性垫块, Rowe^[9]则采用润滑试样帽法, 而陈春霖等^[10]认为制备较低密度的试样进行

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY14E080004); 国家自然科学基金项目(51479052); 江苏省六大人才高峰项目(JZ-011)

收稿日期: 2016-11-28

试验也是减轻端部约束的有效途径之一。目前广泛采用的是润滑试样帽法, 润滑试样帽是由橡皮膜隔一层润滑剂覆盖在常规试样帽上构成, 加大橡皮膜和润滑剂的厚度可更有效减少端部约束, 但缺点是可能会造成较大的孔隙比误差^[11]。

研究端部约束对三轴试验的影响对改进三轴试验设备及试验结果的分析应用有重要意义。国内外许多学者曾对砂土或黏土三轴试验的端部约束影响做过大量研究, 王助贫等^[12]采用数字图像测量技术发现试样端部土体径向应变和轴向应变均偏小; 董建军等^[13]发现非饱和压实土三轴试样中部 1/3 区域(认为无端部约束影响)测得的摩擦角比整个试样得到的摩擦角小 1° ~ 3°; 石露等^[14]运用 FLAC^{3D}研究了真三轴试验中端部摩擦对强度的影响。

现有端部约束研究多针对细粒土, 对粗粒土三轴试验端部约束影响研究很少。本文进行了润滑试样帽法减轻端部约束的三轴试验(以下称 EFR 试验), 并和常规三轴试验(以下称 CTT 试验)进行对比分析, 研究端部约束对粗粒土变形及强度特性的影响。

1 试验方案

本文试验在常规中型三轴仪上进行, 按文献[15]规定方法进行。试验土料采用双江口土石坝的坝壳堆石料经剔除法及混合法缩尺后的粗粒土(最大粒径 20 mm), 两种料分别以 T 料及 H 料表示, 级配如表 1。这两种料最大干密度为 2.15 和 2.03 g/cm³, 最小干密度为 1.60 和 1.54 g/cm³。试样直径 101 mm, 高 200 mm, 制样干密度分别为 2.08 和 1.97 g/cm³, 试验固结围压分别为 200, 500, 800, 1200 kPa, 剪切速率 0.004 mm/s, 采用水头法饱和。

表 1 试验土料颗粒级配

Table 1 Grain composition of test soil

颗粒直径/mm	T 料粒组含量/%	H 料粒组含量/%
20~10	35.29	56.64
10~5	29.41	32.36
<5	35.29	11.00

对 T 料和 H 料, 分别进行了不采用减轻端部约束措施的常规三轴固结排水剪试验(CTT)及采用润滑试样帽法减轻端部约束措施的三轴固结排水剪试验(EFR), 对应试验编号分别用 T-CTT、T-EFR、H-CTT 和 H-EFR 表示。润滑试样帽是在试样两端放一磨光且中间带孔(用于排水)的不锈钢片, 在不锈钢片与试样之间放一块一面涂有润滑油(硅脂)的乳胶膜片(厚 0.4 mm), 其周边沿径向剪开, 涂有润滑油的一面贴着不锈钢片, 试样安装如图 1 所示。

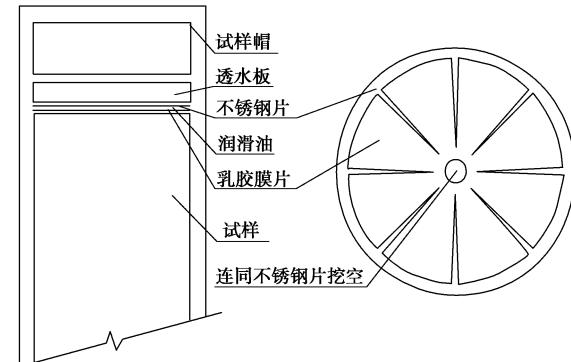


图 1 减轻端部约束的三轴试样示意图

Fig. 1 Sketch of end friction reduced sample

2 试样端部约束影响分析

2.1 应力应变特性对比分析

将 EFR 试验和 CTT 试验得到的结果进行比较。作偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和轴向应变 ε_a 关系曲线以及体积应变 ε_v 和轴向应变 ε_a 关系曲线, 见图 2 和图 3。

从图 2 和图 3 可以看出, 无论 T 料或 H 料, 在不同围压下, EFR 试验和 CTT 试验的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε_a 关系曲线变化趋势相似, 但是, 总体上, EFR 试验试样的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系曲线在上升段的斜率更缓。这种差异说明减轻端部约束对强度及变形有一定影响, 具体影响程度将在第 2.2 节和 2.3 节讨论。

对体积应变, 试样在剪切过程中均表现出不同程度的剪胀性。围压越大, 剪缩变形越大; 围压越小, 剪胀变形越大。对应相同 ε_a , CTT 试验的 ε_v 总体上比 EFR 试验的 ε_v 小。剪切后试样形态也有差异, 即剪切变形后 CTT 试样两端径向变形很小, 中部径向变形大, 呈鼓形; 而 EFR 试样端部径向也有不同程度的鼓胀变形, 呈现的鼓形不明显。这说明端部润滑起到了一定作用, 而 CTT 试验端部约束作用明显。

表 2 给出了两种料在不同围压下剪切破坏(即偏应力达到峰值或轴向应变 15%)时轴向应变(称为破坏应变)。可以看出, 总体来说, 随围压增大, 破坏应变逐渐增大; 在相同围压下, EFR 试样破坏应变比 CTT 试样的大, T 料的破坏应变平均增大 1.9%, H 料的破坏应变平均增大 2.8%。说明端部约束减轻后, 试样柔性增加。

表 2 各试样破坏应变 ε_{af}

Table 2 Axial strains of specimens at failure

类别	应变/%	围压/kPa			
		200	500	800	1200
T 料	ε_{afEFR}	7.26	10.14	12.05	13.01
	ε_{afCTT}	6.30	7.26	10.14	11.10
H 料	ε_{afEFR}	11.94	10.94	10.94	14.94
	ε_{afCTT}	6.80	6.80	12.01	12.01

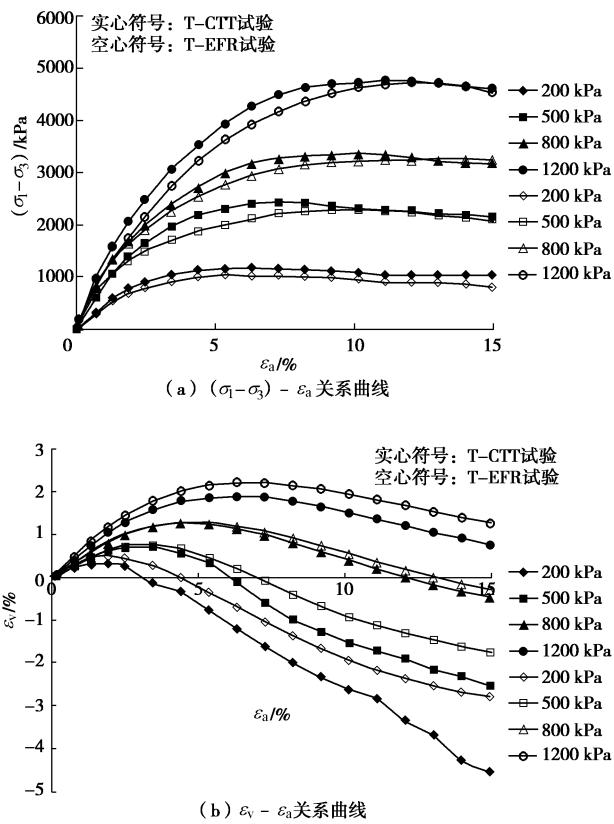


图2 T料应力应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain relation curves of T specimen

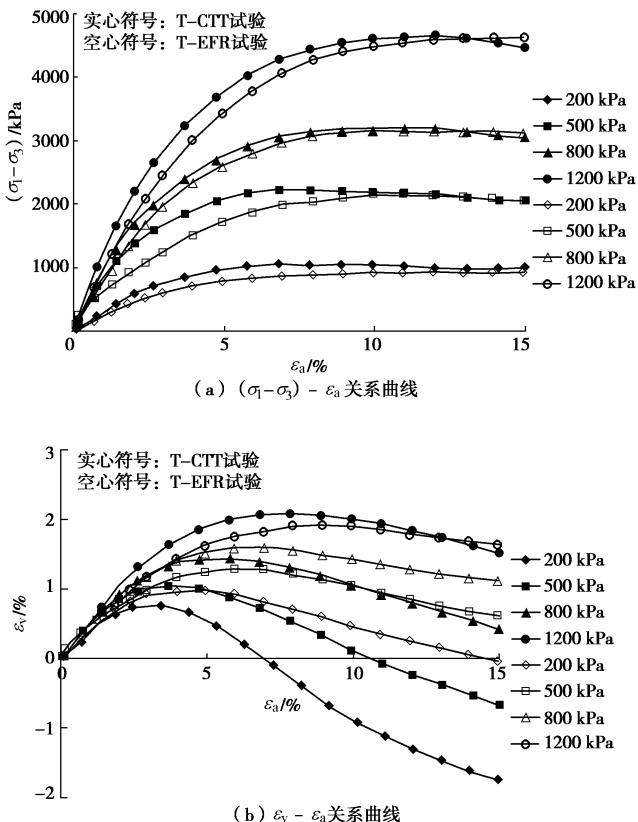


图3 H料应力应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain relation curves of H specimen

2.2 强度特性对比分析

表3列举了不同围压下EFR试验的偏应力峰值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。可以看出,低围压下,试样端部润滑导致 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 减小;而高围压下,两种试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 几乎相等。这是由于高围压下,粗粒土的棱角会刺破试样帽(或底座)与试样间的润滑用橡皮膜,使润滑效果下降。可以认为,随着围压增大,用润滑试样帽法减轻端部约束的效果越来越不明显。

为分析因试样端部约束减轻引起的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 变化,表3给出了两种试样的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 比值,以R表示(即 $R = (\sigma_1 - \sigma_3)_{f,EFR} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f,CTT}$)。可以看出,围压200 kPa下,端部润滑后 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为无润滑情况的88%~89%;而高围压1200 kPa下,达99%。

为进一步研究试样端部润滑后对强度影响,作者根据试验数据求出每个围压下破坏摩尔圆对应内摩擦角 φ 值(即过原点的摩尔圆切线倾角),如表4所示。可以看出,相同围压下,EFR试验的 φ 值比CTT试验的 φ 值小;表中的 $\delta\varphi$ 表明,200 kPa下小 2° ,而1200 kPa时仅小 $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ 。这个结果比董建军等^[13]的研究结果小。当然,由于本文采用的试样端部润滑措施天生不足,其减小摩擦力的效果有限,即使在围压200 kPa情况下,摩擦力也还存在。这说明目前常用的(无减小端部约束)三轴试验得到的粗粒土摩擦角可能偏大2度以上。由于本文试验资料相对较少,要得到更准确结论,还有待深入研究。

表3 试验的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 峰值Table 3 Peak values of $(\sigma_1 - \sigma_3)$ of tests

类别	量值	围压/kPa			
		200	500	800	1200
T 料	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{f,EFR}$ /kPa	1036	2281	3252	4725
	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{f,CTT}$ /kPa	1174	2429	3367	4767
	R/%	88.2	93.9	96.6	99.1
H 料	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{f,EFR}$ /kPa	940	2152	3165	4628
	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{f,CTT}$ /kPa	1057	2227	3206	4658
	R/%	88.9	96.6	98.7	99.4

表4 试验的内摩擦角 φ 值Table 4 Values of internal friction angle φ of tests

类别	内摩擦角	围压/kPa			
		200	500	800	1200
T 料	$\varphi_{EFR}/(^{\circ})$	46.2	44.0	42.1	41.5
	$\varphi_{CTT}/(^{\circ})$	48.2	45.1	42.7	41.7
	$\delta\varphi/(^{\circ})$	2.0	1.1	0.6	0.2
H 料	$\varphi_{EFR}/(^{\circ})$	44.5	43.1	41.6	41.2
	$\varphi_{CTT}/(^{\circ})$	46.5	43.6	41.8	41.3
	$\delta\varphi/(^{\circ})$	2.0	0.5	0.2	0.1

2.3 体积变形特性对比分析

剪胀性的准确描述对建立能合理反映剪胀性的本构模型十分重要。因此,为了进一步研究粗粒土试样在两种不同试验方法下的剪胀性,表 5 列出了试样由剪缩转为剪胀(这里称“相变”,对应时间点称为“相变点”)时的体积应变 ε_{v0} 。

从表 5 可看出,随着围压的增大,两种试验方法得到的相变时的体积应变 ε_{v0} 均逐渐增大。在相同围压下,EFR 试验的 ε_{v0} 比 CTT 试验的 ε_{v0} 大,同样说明试样端部润滑后柔性增加。

表 5 相变点的体积应变值 ε_{v0}

Table 5 Volume strains of samples at phase transformation

类别	应变/%	围压/kPa			
		200	500	800	1200
T 料	$\varepsilon_{v0\text{EFR}}$	0.50	0.76	1.28	2.22
	$\varepsilon_{v0\text{CTT}}$	0.32	0.72	1.25	1.89
H 料	$\varepsilon_{v0\text{EFR}}$	0.97	1.29	1.60	1.92
	$\varepsilon_{v0\text{CTT}}$	0.76	1.04	1.45	2.08

将 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系用双曲线拟合,在 $\varepsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 平面上为直线关系,其截距为 a ,初始切线弹性模量 $E_i = 1/a$ 。对两种料的试验数据进行拟合整理 E_i ,结果列于表 6。可以看出,随围压增大,两种试验得到的 E_i 差异逐渐变小,即围压越大,润滑效果越差。

为进一步研究试样端部润滑对其变形性质的影响,作者又整理了端部润滑试样的初始模量 $E_{i\text{EFR}}$ 占未润滑试样初始模量 $E_{i\text{CTT}}$ 的占比 R_{Ei} ,即 $R_{Ei} = E_{i\text{EFR}} / E_{i\text{CTT}}$,结果亦列于表 6。从总体趋势上来说, R_{Ei} 随围压 σ_3 增大而增大,同样说明随围压增大,润滑试样帽润滑效果变差。对 T 料和 H 料,不同围压下的 R_{Ei} 平均值分别为 89.5%, 87.5%。

表 6 试验的初始弹性模量 E_i 值

Table 6 Values of initial Young's modulus E_i of tests

类别	量值	围压/kPa			
		200	500	800	1200
T 料	$E_{i\text{EFR}}/\text{MPa}$	64.1	106	151	156
	$E_{i\text{CTT}}/\text{MPa}$	76.3	125	158	167
	$R_{Ei}/\%$	84.0	85.1	95.5	93.7
H 料	$E_{i\text{EFR}}/\text{MPa}$	32.5	105	140	156
	$E_{i\text{CTT}}/\text{MPa}$	43.1	119	149	169
	$R_{Ei}/\%$	75.3	88.4	94.1	92.2

对一般土工结构,其应变在 1% 以内,因此,这里对试样轴向应变 1% 时对应的割线模量 E_1 进行研究,计算整理出 E_1 见表 7。表中可见, EFR 试验的 E_1 均比 CTT 常规三轴试验的低。同样说明减轻端部约束后的三轴试样柔性变大,即弹性模量变小。

用 $E_{i\text{EFR}}$ 和 $E_{i\text{CTT}}$ 分别表示减轻端部约束试验和常规三轴试验的割线模量,定义 $R_{Ei} = E_{i\text{EFR}} / E_{i\text{CTT}}$,并整理 R_{Ei} ,如表 7 所示。 R_{Ei} 也随围压 σ_3 增大而增大,T 料和 H 料的 R_{Ei} 平均值分别为 85.9%, 85.9%。

表 7 试验的割线模量 E_1 值

Table 7 Values of secant modulus E_1 of tests

类别	量值	围压/kPa			
		200	500	800	1200
T 料	$E_{i\text{EFR}}/\text{MPa}$	29.3	74.6	111	125
	$E_{i\text{CTT}}/\text{MPa}$	48.1	89.3	114	133
	$R_{Ei}/\%$	61.0	83.6	97.9	93.3
H 料	$E_{i\text{EFR}}/\text{MPa}$	26.1	75.3	100	118
	$E_{i\text{CTT}}/\text{MPa}$	34.5	87.0	109	131
	$R_{Ei}/\%$	75.5	86.5	91.8	90.0

若要更准确分析粗粒土变形性质,仅仅研究弹性模量并不全面,还需要研究其体积变形模量。类似于前面的 E_1 ,这里定义 K_1 为轴向应变等于 1% 时的割线体积模量。并利用三轴试验结果由 $K_1 = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\varepsilon_a=1\%} / (3\varepsilon_v)_{\varepsilon_a=1\%}$ 求得 K_1 ,所得 K_1 值见表 8。同样,定义 $R_{K1} = K_{i\text{EFR}} / K_{i\text{CTT}}$, R_{K1} 的计算结果亦列于表 8。可见,虽然割线体积模量 K_1 与 σ_3 关系离散性相对较大,但 R_{K1} 基本趋势是随围压增大而增大,说明端部约束对割线体积模量也有影响。T 料和 H 料的 R_{K1} 平均值分别为 86.7%, 88.7%, 与 R_{Ei} 和 R_{Ei} 相近。

表 8 试验的割线体积模量 K_1 值

Table 8 Values secant bulk modulus K_1 of tests

类别	量值	围压/kPa			
		200	500	800	1200
T 料	$K_{i\text{EFR}}/\text{MPa}$	41.9	71.7	69.7	59.3
	$K_{i\text{CTT}}/\text{MPa}$	57.9	75.4	72.0	71.8
	$R_{K1}/\%$	72.4	95.0	96.8	82.6
H 料	$K_{i\text{EFR}}/\text{MPa}$	20.7	44.9	53.9	79.1
	$K_{i\text{CTT}}/\text{MPa}$	23.1	54.1	64.4	80.2
	$R_{K1}/\%$	89.6	83.0	83.7	98.6

上述研究表明,润滑试样帽法减轻三轴试样端部约束有一定效果,但随围压增大,效果显著减弱。而且,在低围压下,润滑试样帽法显然不能全部消除端部摩擦力,还有多大的摩擦力(或约束程度)没有消除难以评价。对 200~1200 kPa 围压,减轻端部约束后试样的初始弹性模量、割线弹性模量及割线体积模量均平均减小了 10%~15%;而在围压 200 kPa 时,减轻端部约束后试样弹性模量或体积模量减小了 39%~10%。由此可见,采用常规三轴试验确定的粗粒土的变形模量至少偏大 10%,这很可能是目前有限元计算的高坝变形常常偏小的原因之一。

3 结 论

本文对两种级配粗粒土进行了常规三轴固结排水

剪试验 (CTT) 及减轻端部约束的三轴固结排水剪试验 (EFR), 研究了试样端部约束对三轴试验强度及变形特性的影响, 得出以下结论:

(1) 低围压 (如 200 kPa) 下, 减轻端部约束对试样偏应力峰值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 影响相对显著, 试样端部润滑后 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 降低约 12%; 而高围压下, 润滑试样帽法的减摩作用几乎消失。

(2) 在相同围压下, EFR 试样破坏应变比 CTT 试样的大, 即端部约束减轻后, 试样柔性增加。EFR 试样发生相变时的体积应变也比 CTT 试样的大。

(3) 所采用的润滑试样帽法对粗粒土试样润滑作用有限, 随围压增加, 减轻端部约束作用显著降低。试样帽端部润滑后, 所得土料摩擦角减小 $0.1^\circ \sim 2^\circ$ 。

(4) 和常规三轴试验相比, 试样端部约束减小后, 其初始切线模量 E_i , 割线弹性模量 E_1 , 割线体积模量 K_1 不同围压下的平均值约减小 10%~15%。这说明现有常规三轴试验得到的粗粒土变形模量很可能至少偏大 10%。这有待更多试验资料的验证。

参考文献:

- [1] 朱俊高, MOHAMED A ALsakran, 龚选, 等. 某板岩粗粒料湿化特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 170~174. (ZHU Jun-gao, MOHAMED A ALsakran, GONG Xuan, et al. Triaxial tests on wetting deformation behavior of a slate rockfill material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 170~174. (in Chinese))
- [2] 缪林昌, 崔颖, 陈可君, 等. 非饱和重塑膨胀土的强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 274~276. (MIAO Lin-chang, CUI Ying, CHEN Ke-jun, et al. Test on strength of unsaturated remolded expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 274~276. (in Chinese))
- [3] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 198~201. (ZHAN Liang-tong, NG C W W. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 198~201. (in Chinese))
- [4] 李云龙. 土工三轴试验中端部接触和端部约束影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (LI Yun-long. Research on influence of end contact and end restriction in soil tri-axial tests[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [5] DUNCAN J M, DUNLOP P. The significance of cap and base restraint[J]. J Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, **94**(1): 271~290.
- [6] ZHANG H, GARGA V K. Quasi-steady state: a real behavior[J]. Can Geotech J, 1997, **34**(5): 749~761.
- [7] BISHOP A W, GREEN E G. The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil[J]. Géotechnique, 1965, **15**(3): 243~266.
- [8] BLIGHT G E. Shear stress pore pressures in triaxial testing[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison, ASCE, 1965, **91**(SM6): 25~39.
- [9] ROWE P W. The stress dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Proc Royal Society, 1962(269): 500~527.
- [10] 陈春霖, 张惠明. 饱和砂土三轴试验中的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 659~663. (CHEN Chun-lin, ZHANG Hui-ming. Some problems in triaxial test on saturated sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(6): 659~663. (in Chinese))
- [11] GARGA V K, ZHANG H. Volume changes in undrained triaxial tests on sands[J]. Can Geotech J, 1997, **34**(5): 762~772.
- [12] 王助贫, 邵龙潭. 三轴试验土样的端部影响问题研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(3): 363~368. (WANG Zhu-pin, SHAO Long-tan. Research on influence of end effect of soil specimens in triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(3): 363~368. (in Chinese))
- [13] 董建军, 邵龙潭. 考虑端部效应影响的非饱和压实土三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(9): 1937~1944. (DONG Jian-jun, SHAO Long-tan. Study of unsaturated compacted soil considering influence of end effect by triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1937~1944. (in Chinese))
- [14] 石露, 李小春. 真三轴试验中的端部摩擦效应分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(4): 1159~1164. (SHI Lu, LI Xiao-chun. Analysis of end friction effect in true triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(4): 1159~1164. (in Chinese))
- [15] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)