

聚苯乙烯轻质混合土三轴压缩试验研究

董金梅¹, 刘汉龙¹, 洪振舜², 谭慧明¹, 高玉峰¹

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要 对不同水泥掺入比、不同密度和不同龄期的聚苯乙烯轻质混合土, 进行不固结不排水和固结不排水常规三轴压缩试验, 以研究聚苯乙烯轻质混合土应力应变特性的变化规律和抗剪强度指标的确定方法. 试验结果表明, 水泥掺入比、密度和龄期, 对不固结不排水和固结不排水三轴压缩试验的应力应变特性和抗剪强度指标 c, φ 的大小有不同程度的影响.

关键词 应力应变; 抗剪强度; 围压

中图分类号: TU449 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2005)01-0099-05

近年来, 高等级公路、市政及工业与民用建筑工程, 尤其是高速公路路堤、挡墙后回填、管道沟回填和边坡填土等, 都对土的密度和适应性提出了更高要求. 因此, 开发具有轻量化、快硬性、流动性好等特点的新型轻质填土材料, 在岩土工程领域具有重要意义. 20 世纪 80 年代, 国外已开始了轻质填土材料在岩土工程方面的应用研究. 1988 年, 日本神户首次采用聚苯乙烯轻质混合土减小背面土压, 修复岸壁, 并获得成功; 1989 年, 日本奇玉县久喜市采用聚苯乙烯轻质混合土对正在施工的下水管道(长 359.3 m)进行填埋, 并对施工后的结果进行了观测, 结果轻量混合土的压缩量只有 4 mm, 是总厚度的 0.5%, 满足了工程设计要求^[1]; 1988 年, 伦敦 Dorkland 地区开始修建一个现代化的港口商业中心, 工程总费用 40 亿英镑, 其中部分地区采用气泡轻量混合土进行地基处理, 取得了较好的工程效益^[2]. 我国在这方面的研究起步较晚, 应用尚属空白. 2001 年, 马时冬^[3]对原料土为砂土的聚苯乙烯轻质填土特性进行了试验研究; 2000 年, 张小平等^[4]对由砂土、气泡和水泥等组成的气泡轻量土进行了试验. 这些试验, 原料土均为标准砂, 需要购买, 虽然较易混合, 但会增加混合土的成本. 至于气泡轻量混合土中气泡, 则较难制取, 而且在混合过程中容易产生消泡作用, 降低混合土的密度. 为了解聚苯乙烯轻质混合土的应力应变特性和抗剪强度特性, 笔者对其进行了三轴压缩试验, 而且所选取的淤泥质粉质黏土为现场弃土淤泥, 对工程现场废弃土的处理及环境保护有一定的实际意义.

1 试样制备

原料土取自南京市河西地区地基深处的弃土淤泥, 土质为淤泥质粉质黏土, 其物理力学性质指标如表 1 所示. 水泥为南京宁峰水泥厂生产的标号为 425 的普通硅酸盐水泥, EPS 颗粒粒径为 2~4 mm, 堆积密度为 0.019 g/cm³, 水为自来水.

表 1 土样主要物理力学性质指标

Table 1 Main physical and mechanical indexes of soil samples

含水量/ %	湿密度/ (g·cm ⁻³)	液限/ %	塑限/ %	相对密度 G_s	液性指数 I_L	塑性指数 I_p	压缩系数/ MPa ⁻¹	压缩模量/ MPa	抗压强度/ kPa	孔隙比
38	1.88	36	23	2.72	1.2	13	0.5	3.89	20.9	1.08

试验中, 先在原料土中加入一定比例的水, 对原料土的含水率进行调整, 采用 B10 型搅拌机搅拌均匀, 使之成为泥浆, 然后再加入不同比例的 EPS 颗粒、水泥, 搅拌成均匀的水泥浆体, 最后将浆体装入直径 39.1 mm、高 80 mm 的模具内, 养护 1 d 后脱模, 放入标准养护箱, 养护至规定龄期. 将达到龄期的试样进行抽气饱和, 在水中浸泡 1 d 后进行三轴压缩试验. 试验中混合土含水量为 60%, 密度为 0.8~1.2 g/cm³. 由文献[5]可知, 该

配比的混合土物理力学特性比较稳定。

聚苯乙烯轻质混合土作为一种特殊材料,对其物理力学特性的研究,目前无试验规程可循,故按土工试验规范进行试验^[6]。即将达到龄期的试样,采用应变控制式三轴压缩仪进行 UU 和 CU 三轴压缩试验。其中 UU 试验的应变速率为 0.9 mm/min, CU 试验的应变速率为 0.08 mm/min。三轴压缩试验的围压一般取 50, 100, 200, 300, 400 kPa。

2 不固结不排水三轴压缩试验

2.1 三轴应力状态下的应力应变特征

a. 对密度为 0.845 ~ 0.866 g/cm³(EPS 含量为干土质量的 4%)水泥掺入比 10%、15% 和 20%(水泥掺入比 α_w = 掺入水泥的质量/干土的质量)龄期 t 为 7 d 的聚苯乙烯轻质混合土进行了 UU 三轴压缩试验,试验结果如图 1(a)(b)(c)所示。比较不同水泥掺入比的试样可知,初始模量与围压关系明显,围压越大,初始模量越小,相同主应力差时应变越大;主应力差随围压增大而减小。因为轻质混合土在围压作用下,会发生破

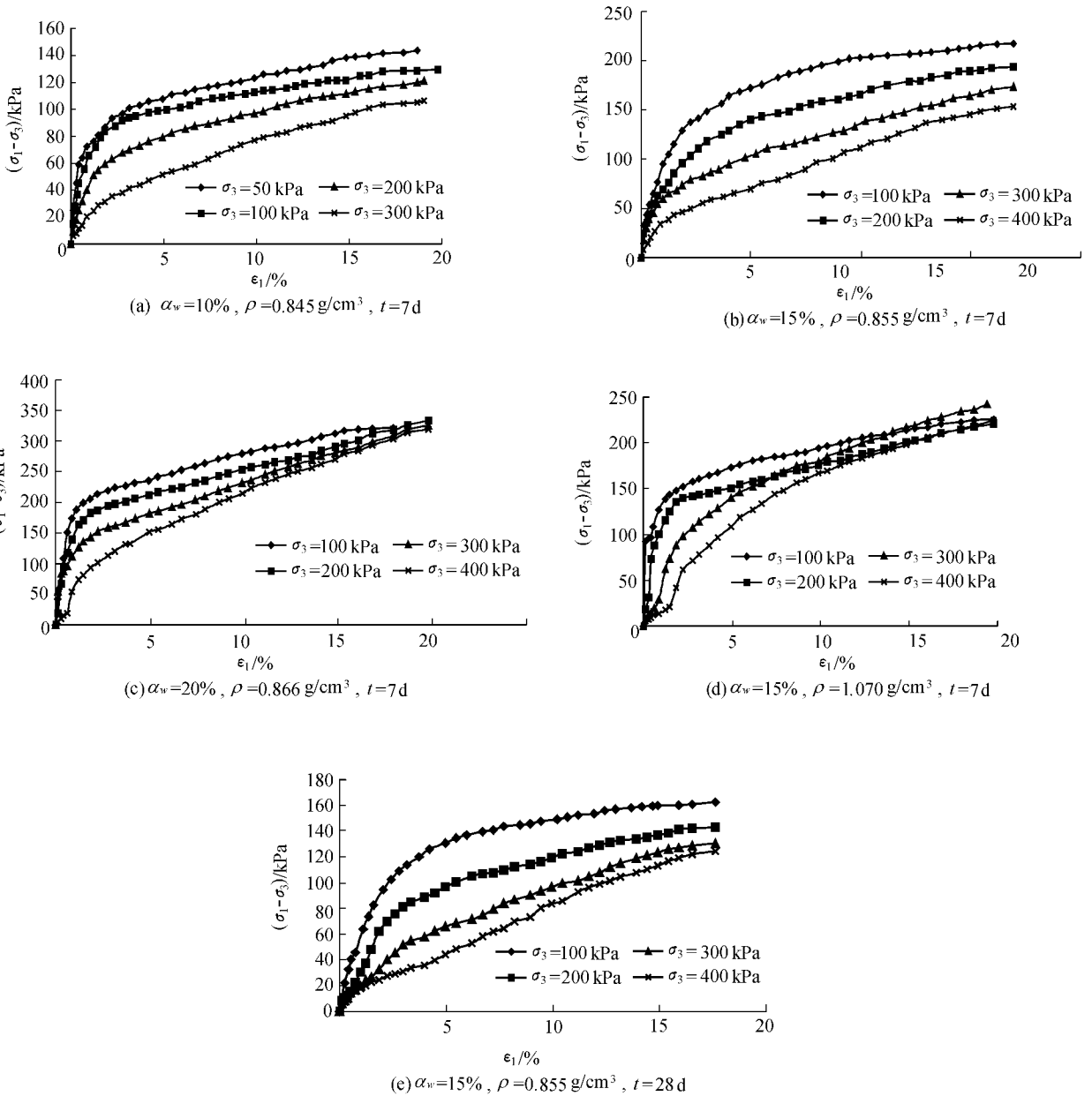


图 1 不固结不排水应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves for unconsolidated-undrained condition

坏,围压越高,破坏程度越大,所以混合土的强度相对越低.据文献 [1] 和 [7],EPS 块体在低围压时的应力应变特性表现为围压增大,试样结构达到破坏时所需的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 减小.笔者对轻质混合土所进行的 UU 压缩试验,也出现了主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 随围压 σ_3 增大而减小的现象.这可能与 EPS 颗粒含量有一定关系.聚苯乙烯轻质混合土初始弹模和主应力差随围压增大而减小的特性,适用于地基浅层土.

b. 为了解密度对应力应变特性的影响,对含水量 60%、密度 ρ 为 1.070 g/cm^3 (EPS 含量为干土质量的 2%) 水泥掺入比为 15%、龄期为 7 d 的聚苯乙烯轻质混合土进行了 UU 应力应变分析,结果如图 1(d) 所示.从图 1(d) 可知,密度增大,初始弹模随围压增大而减小的规律没有改变,应变 15% 左右,密度增大,围压虽然不同,但主应力差却大致相同,围压对最大主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的影响变小.

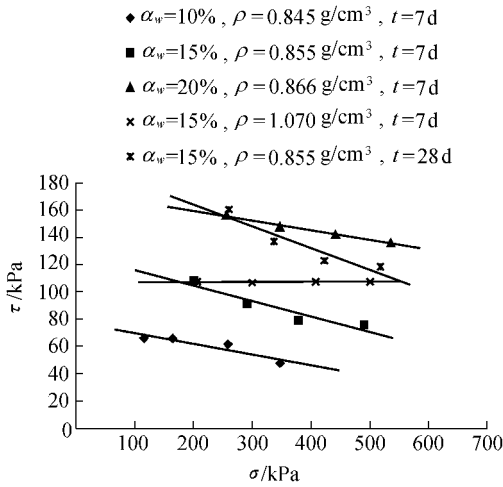


图 2 UU 试验摩尔强度包络线

Fig.2 Mohr strength envelopes of UU test

当密度为 1.070 g/cm^3 时,聚苯乙烯轻质混合土的抗剪强度包络线近似为水平线.由表 2 还可看出,黏聚力随密度增大而变小, φ 随密度的增大由负值变为零.

文献 [1] 也得出了初始弹模和最大主应力差随围压增大而减小的结果,但认为强度包络线不符合摩尔-库仑强度理论^[1].

c. 比较图 1(e) 与图 1(b) 可知,龄期 28 d 的应力应变曲线随围压的变化规律,与龄期 7 d 的应力应变曲线随围压的变化规律一致.可见,随龄期的延长,轻质混合土主应力差随围压的变化规律不明显.

轻质混合土中,当水泥掺入比、密度和龄期有所变化时,初始弹模和主应力差随围压增大而减小的规律却不会改变.这是轻质混合土不同于一般土工材料的一个重要特性.

2.2 抗剪强度分析

不同配比轻质混合土试样抗剪强度包络线如图 2 所示.由图 2 可知,含水量 60%、密度 $0.845 \sim 0.866 \text{ g/cm}^3$ 、龄期 7 d、不同水泥掺入比的聚苯乙烯轻质混合土,在围压 400 kPa 范围内,摩尔强度包络线为直线, φ 为负值.这是由于主应力差随围压增大而减小导致的结果,不符合摩尔-库仑强度理论.

抗剪强度指标 c, φ 的大小见表 2. 分析表 2 可知:水泥掺入比高,黏聚力大;水泥掺入比低,黏聚力小; φ 变化很小.

表 2 抗剪强度指标

Table 2 Parameters of shear strength

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha_w / \%$	t / d	UU 试验		CU 试验	
			c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
1.070	15	7	110.0	0	102.5	7.7
0.845	10	7	77.7	-4.7	46.9	12.5
0.855	15	7	127.2	-6.4	78.5	9.5
0.866	20	7	173.4	-4.1	97.1	9.6
0.855	15	28	91.4	-4.0	79.3	6.0

3 固结不排水三轴压缩试验

在 CU 三轴压缩试验过程中,虽进行过抽气饱和,但饱和度并未达到 85% 以上,孔隙水压力系数 B 在 40% ~ 75% 之间. B 的大小与水泥掺入比有一定的关系,水泥掺入比越高, B 越小.因为试样为非饱和状态,有效应力原理可能不适用,所以只采用了总应力分析法.

3.1 三轴应力状态下的应力-应变特征

对与 UU 三轴压缩试验相同配比的试样进行了 CU 三轴压缩试验,试验结果如图 3 所示.由图 3 可知,不同水泥掺入比、不同密度和不同龄期的试样,其应力应变曲线都具有硬化特性,应变较大时,主应力差随围压增加而增大的趋势比较明显.由图 3(a)(b)(c) 可知,随着围压的不断增大,应力应变曲线初始段线性程度和切线斜率在不断下降,应变小,围压高,初始弹模和主应力差小,与 UU 应力应变曲线的变化趋势相同;应变大,围压高,主应力差增大,硬化趋势增强.对比图 3(b) 与图 3(d) 可知,随着密度的增大,围压对初始弹模的影响变小.密度为 1.070 g/cm^3 的试样,围压对初始弹模的影响不大,应变较小时,主应力差就开始随围压的增加而增大,说明 EPS 颗粒的含量对应力应变特性的影响较为明显.由图 3(c)(e) 可知,龄期对固结不排

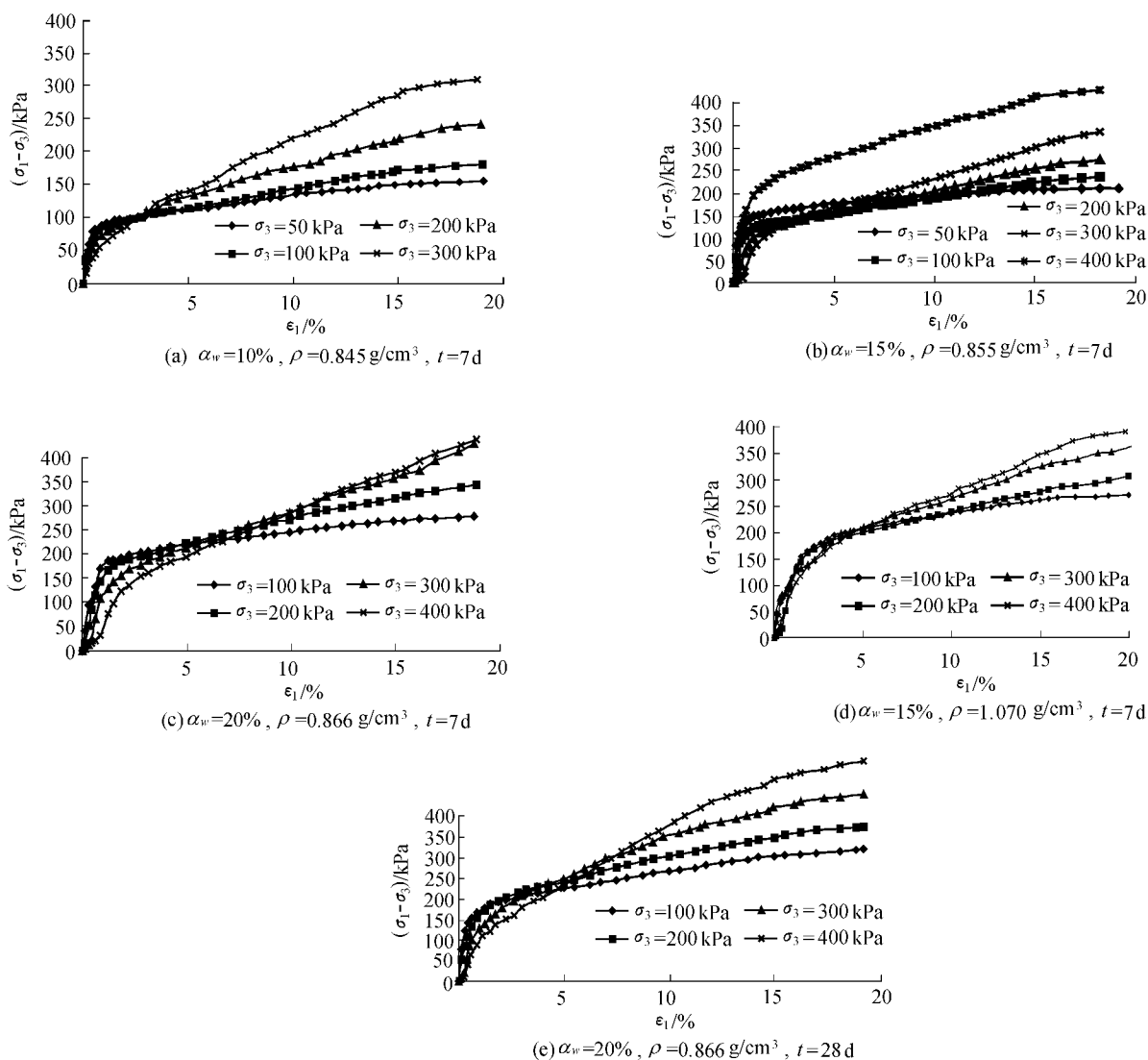


图3 固结不排水应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves for consolidated-undrained condition

水应力应变曲线形态的影响不明显,龄期延长,主应力差和初始弹模随围压变化的规律都没有改变,最主要的表现是主应力差有所增大。值得指出的是,水泥掺入比低于15%的轻质混凝土,在围压400 kPa时,应力应变曲线出现异常(图3(b)),主应力差有明显增大趋势。因为轻质混凝土在水泥掺入比较低时,本身强度小,整体结构在较高围压作用下已经破坏,随着轴向应力的增加,混凝土逐渐被压密,主应力差已经不是原有混凝土的强度,而是压密以后的强度,所以有明显增大趋势^[8]。

3.2 抗剪强度分析

图4所示为与UU三轴压缩试验相同配比的试样所进行的CU三轴压缩试验时的摩尔圆与抗剪强度包络线,该强度包络线近似为一条直线,符合摩尔-库仑强度准则。从表2看出:不同水泥掺入比的抗剪强度指标,水泥掺入比增高,黏聚力 c 变大,但摩擦角 φ 变化很小,抗剪强度指标随密度增大表现为黏聚力变大, φ 变化不大,龄期变化,黏聚力及 φ 均没有变化。因此,工程实际中所采用的抗剪强度指标,应依据配比、龄期而有所不同。

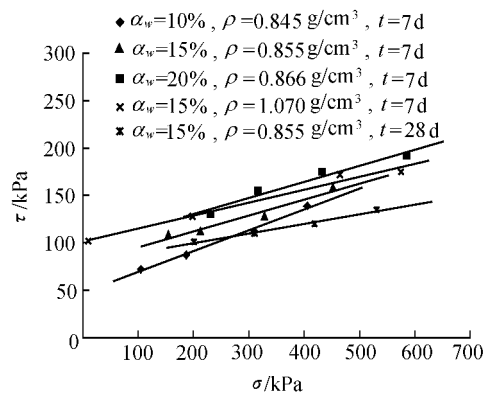


图4 CU试验摩尔强度包络线

Fig.4 Mohr strength envelopes of CU test

4 结 论

a. 聚苯乙烯轻质混合土 UU 三轴压缩试验与一般土体的 UU 压缩试验结果明显不同,即不同水泥掺入比的聚苯乙烯轻质混合土,由于初始弹模和主应力差随围压的增大而减小,故适用于浅层地基。

b. 密度和龄期变化不会影响 UU 应力应变曲线的硬化特性,密度变大,初始弹模仍然随围压的增大而减小,但应变较大时,主应力差随围压增大而逐渐趋于相同,龄期变化,初始弹模和主应力差随围压增大而减小的规律没有变化。

c. CU 三轴压缩试验,水泥掺入比、密度和龄期不同,应力应变曲线的形态随围压的变化不明显;主应力差,应变较小时随围压增大而减小,应变较大时随围压的增大而增大,初始弹模随围压的增大而减小。

d. UU 三轴试验,抗剪强度包络线为直线;在一定的水泥掺入比范围内,抗剪强度包络线为一下降直线;当密度增大到某一值时,包络线变为水平直线, φ 等于零,龄期变化对包络线没有影响。

e. CU 三轴试验的抗剪强度包络线,在一定压力范围内为直线,可用摩尔-库仑理论来描述,基本上不受水泥掺入比、密度和龄期的影响。

参考文献:

- [1] 长坂勇二,山田纯男.发泡ビーズと建设发生土をいた量混合土[J].土と基础,1994(10):25—30.
- [2] Van SIMON D. A review of the Netherlands approach to the use of foam concrete in Holland and at Canary Wharf[J]. Concrete, 1991, 25(5):49—54.
- [3] 马时冬.聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J].岩土力学,2001(3):245—249.
- [4] 张小平,包承纲,李进军.泡沫轻质材料在岩土工程中的应用[J].岩土工程技术,2000(1):58—62.
- [5] 董金梅,刘汉龙,高玉峰.聚苯乙烯轻质混合土抗压强度特性的试验研究[J].岩土力学,2004,25(12):1964—1968.
- [6] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S].
- [7] 张忠坤,殷宗泽,曹正康.聚苯乙烯泡沫塑料路堤填料三轴试验研究[J].河海大学学报,1997,25(5):106—108.
- [8] 刘汉龙,董金梅,周云东.聚苯乙烯轻质混合土应力应变特性分析[J].岩土工程学报,2004,26(5):579—583.

Study on properties of lightweight polystyrene heterogeneous soil with triaxial compression tests

DONG Jin-mei¹, LIU Han-long¹, HONG Zhen-shun², TAN Hui-ming¹, GAO Yu-feng¹

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract: Unconsolidated-undrained and consolidated-undrained triaxial compression tests were conducted on the polystyrene lightweight soil with different cement mixing ratios, densities, and ages under confining pressures for the study of the stress-strain properties of the soil and the method for determination of its shear strength parameters. It is indicated that the cement mixing ratio, density and age of the lightweight soil have different influences on the results of stress-strain properties and shear strength indexes of the soil in triaxial compression tests under unconsolidated-undrained and consolidated-undrained conditions.

Key words: stress-strain; shear strength; confining pressure