

文章编号: 1000-7598-(2012)09-2581-07

特征含水率对轻量土基本性质的影响规律

侯天顺

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了研究最优含水率、流动上、下限含水率对轻量土性能的影响, 通过密度、无侧限抗压强度试验研究了混合土的工程性质。结果表明: 采用流动性指标 (180 ± 20 mm) 控制混合土的流动性基本可行。混合土处于流动性上、下限含水率时, 无侧限应力-应变关系曲线几乎重合, 流动性上、下限含水率范围内土壤性质较为接近。无侧限抗压强度随含水率增加而衰减, 但流动上、下限含水率对应强度差别不大。不管含水率高低, 强度随龄期增长, 都可以采用双曲线模型进行预测, 并且总结了 7 d、90 d 强度与 28 d 强度之间的经验关系。当含水率为最优含水率时, 混合土基本不收缩; 在流动性上、下限含水率范围内, 线收缩率范围为 1.53%~4.71%, 体积收缩率范围为 4.53%~13.46%, 收缩性受含水率、水泥剂量等因素影响。理想密度模型可以近似预测混合土的湿密度, 高含水率时预测值有一定误差, 误差范围为 3.834%~8.231%。

关 键 词: 轻量土; 含水率; 无侧限抗压强度; 密度; 收缩率

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Influence law of characteristic water content on basic properties of light weight soil

HOU Tian-shun

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To research the influence of water content (optimum water content, flow lower limit water content, flow upper limit water content) on basic properties of light weight soil, engineering properties of mixed soil are investigated by density test and unconfined compressive strength test. The results show liquidity of mixed soil can be controlled feasibly by liquidity indexes (180 ± 20 mm). When water content are on the points of flow lower limit water content and flow upper limit water content, unconfined stress-strain relation curves are almost coincident. So when water content is between flow lower limit water content and flow upper limit water content, engineering properties of mixed soil are approximative. Unconfined compressive strength decreases rapidly with increased water content, but there are no significant differences for the strength on the points of flow lower limit water content and flow upper limit water content. No matter how much the water content is, strength-age relation can be predicted by hyperbolic model. Empirical relations between strength of 7 d and 90 d and strength of 28 d are summarized. When water content is optimum water content, there is only a little shrinkage. When water content is between flow lower limit water content and flow upper limit water content, the range of line shrinkage ratio is [1.53%, 4.71%], and the range of volume shrinkage ratio is [4.53%, 13.46%]. Shrinkage property can be influenced by water content and cement dosage. Wet density of mixed soil can be predicted approximately by ideal density model, there is some error for predictive value, and error range is [3.834%, 8.231%].

Key words: light weight soil; water content; unconfined compressive strength; density; shrinkage ratio

1 引 言

轻量土主要有 EPS (expanded polystyrene)、发泡颗粒混合轻量土、气泡混合轻量土、次生材料混合轻量土等种类。与常规土相比, 其突出特点是密度小、强度高、密度与强度可以根据实际工程进行

调节。每一类轻量土都有其独特之处, 但从社会的可持续发展来看, 发泡颗粒混合轻量土与次生材料混合轻量土可以大规模消纳废物、保护环境, 所以这两类轻量土应该是今后研究与应用的重点。

国外关于轻量土的研究报道较多, 尤其是日本, 其研究及应用都十分广泛, 这种技术引入中国

收稿日期: 2011-04-29

基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (No. 2012JQ7013); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (No. QN2012025); 西北农林科技大学博士点基金项目 (No. 2011BSJJ084)。

作者简介: 侯天顺, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学与地质灾害防治方面的教学与科研工作。E-mail: houtianshunyx@sina.com

不过十年时间,所以有很多问题有待探索。Oh 等^[1]采用下层黏土、上层轻量土模型试验研究了混合土的地基承载力。Yoonz 等^[2]采用无侧限抗压强度试验与三轴试验研究了疏浚泥轻量土的力学特性,并且指出地基改良土强度达到 200 kPa 时的最优配比:EPS 质量比为 3%~4%,疏浚泥初始含水率为 165%~175%。Yajima 等^[3]研究了非饱和轻量土的初始吸力与结构屈服应力,发现这种土的应力路径与破坏准则能够很好地用一个独立有效强度公式来描述。Nagatome 等^[4]利用工业 X 射线 CT 扫描设备研究了海岸工程中海水对轻量土性能的影响,结果表明,对比对吸水性影响显著。国内的董金梅^[5]、姬凤玲^[6]亦做了大量的工作,侯天顺等^[7]在朱伟等^[8]成果的基础上建立了混合土最优含水率模型。

土石方工程中,控制填土密实是非常重要的。由于混合土中含有一些固化剂,所以可以采用碾压法(或夯击法等)施工,也可以采用浇注法施工。前者必须控制含水率在 $w_{op} \pm (2 \sim 3)\%$ 附近,后者

则需要考虑到混合土的和易性。顾欢达等^[9]对河道淤泥的固化与流动化进行了研究。结果表明,流动化处理土渗透系数很小、止水能力强、长期变形小,但没有添加轻质材料,无法知道流动性 EPS 颗粒混合土的性能。另外,流动性轻量土与最优含水率时的轻量土的性能究竟有多大差异,这些问题还不是十分清楚。本文试图通过试验,揭示轻量土在最优含水率、流动性上、下限含水率 3 个特征点附近的性质差异,为工程设计与施工提供参考。

2 试验概况

原料土为东海温州湾灵(昆岛)一霓(屿岛)北堤的典型海相沉积淤泥,其基本物理参数见表 1。为了保证试验精度,以干土质量为标准,将淤泥烘干以后进行粉碎,然后过 0.5 mm 筛,将少量杂质滤出。轻质材料采用 2~3 mm 的 EPS 球粒,其堆积体密度为 0.025 g/cm³,EPS 纯颗粒密度为 0.038 g/cm³。固化剂为华新水泥有限公司制造的华新堡垒牌 C32.5 复合硅酸盐水泥。水为普通自来水。

表 1 试验所用淤泥的基本物理参数
Table 1 Basic physical parameters of test silt

天然密度 ρ /(g/cm ³)	相对密度 G_s	含水率 w /%	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性指数 I_p /%	液性指数 I_L	重度 γ /(kN/m ³)	孔隙比 e	有机质含量 /%
1.451	2.72	99.09	30.26	50.76	20.50	3.36	14.51	2.73	>5

2.1 最优含水率试样制备

按照配比称量好各种原材料,先把水泥加入干土中,用抹刀搅拌 5 min,直到拌匀;然后加水,形成水泥土,搅拌 5 min,直到形成均匀浆体;最后,加入 EPS 颗粒,强制搅拌 10 min,形成均匀的干硬性混合土。用 2 000 g 电子秤称量计算好的轻量土,分 3 层填入高为 8 cm、直径为 3.91 cm 的三瓣模。填料之前,模具内壁套好保鲜膜,用橡皮筋扎牢。每填一层,采用三轴击实仪击实 25 次,锤重 300 g,落距为 30 cm。将带模具的样品送进标准养护箱内养护,养护温度为 20 ± 2 °C,湿度大于 95%,养护 24 h 后脱模,迅速装入保鲜膜密封,再放入养护箱中养护到规定龄期。

2.2 流动性含水率试样制备

先把水泥加入干土中,用抹刀拌匀;然后加水,再次拌匀;最后,加入 EPS 颗粒,搅拌 5 min,直到均匀。静置 5~10 min,再次搅拌均匀。在三瓣模内壁安装保鲜膜,并且固定,然后用小铁勺把流动性混合土装入下端放有玻璃片的模具中,用铁丝轻轻搅拌密实。将样品连同模具送入养护箱,用保

鲜膜覆盖其上部与四周,养护条件同上。养护 7 d 后脱模,迅速装入保鲜膜密封,再放入养护箱中养护到规定龄期。

取样后测定密度,然后采用无侧限压缩仪^[10]测定强度。一切步骤按照规范^[11]要求进行。每个配比各有 3 个样,最后取均值作为测定值。试验方案见表 2, w_{op} 为最优含水率, w_{fmin} 为流动下限含水率, w_{fmax} 为流动上限含水率。

表 2 试验方案
Table 2 Test schemes

EPS 颗粒掺 入比 a_c / %	水泥掺入 比 a_c / %	含水率 w	龄期 T / d
3	10	$w_{op}, w_{fmin}, w_{fmax}$	7、14、28、60、90
3	15	$w_{op}, w_{fmin}, w_{fmax}$	7、14、28、60、90

3 3 种特征含水率的确定

为了研究特定含水率时混合土的性能,首先必须给出 3 个特征含水率。侯天顺的成果^[7]说明,基于最大干密度理论、最大强度理论、最大比强理论 3 种方法确定的最优含水率没有显著差别。所以本

文按照 $\rho_d - w$ 模型^[7]确定最优含水率: $a_c = 3\%$, $a_c = 10\%$, $w_{op} = 38.33\%$; $a_c = 3\%$, $a_c = 15\%$, $w_{op} = 40\%$ 。

轻量土流动化施工, 国内尚无相关规范可循。流动化施工必须综合考虑流动性、黏聚性、保水性。在混合土中添加了轻质材料, 如果含水率过高, EPS 颗粒处于上浮状态, 无法保证材料均匀, 存在流动上限含水率 w_{fmax} ; 如果含水率过低, 混合土无法流动, 也存在流动下限含水率 w_{fmin} 。根据文献[5, 9, 12—13]介绍, 流动性含水率的确定方法: ①在实验桌

上放置一块 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的方形玻璃板, 然后在玻璃板正中央放置直径为 8 cm 、高度为 8 cm 的圆筒; ②用小勺把流动性混合土装入圆筒, 直到与圆筒上端齐平; ③迅速提起圆筒, 测定 1 min 后摊开土饼的最大直径与垂直方向直径, 均值作为流动性指标值, 一般为 $180 \pm 20\text{ mm}$ 。也就是说, 流动值 $d_{fmin} = 160\text{ mm}$ 对应的含水率就是 w_{fmin} ; 流动值 $d_{fmax} = 200\text{ mm}$ 对应的含水率就是 w_{fmax} 。为了得到流动性特征含水率, 按照上述制样方法与流动值测定方法, 做了很多次流动值测定试验, 最终成果见图 1、2。

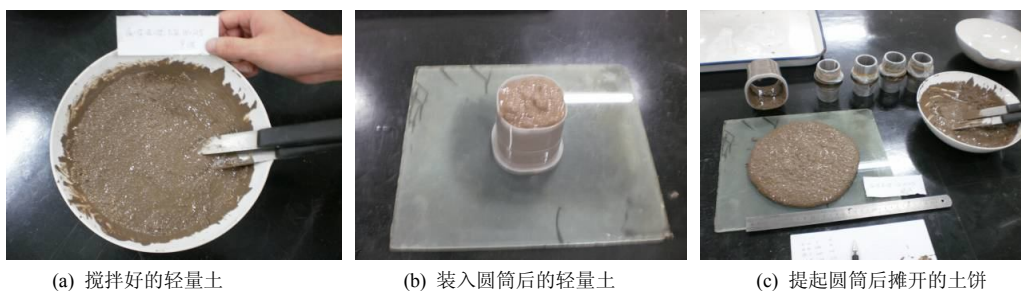


图 1 混合土流动性指标试验($a_c = 3\%$, $a_c = 15\%$, $d_{fmin} = 160\text{ mm}$)

Fig.1 Liquidity indexes test of mixed soil($a_c = 3\%$, $a_c = 15\%$, $d_{fmin} = 160\text{ mm}$)

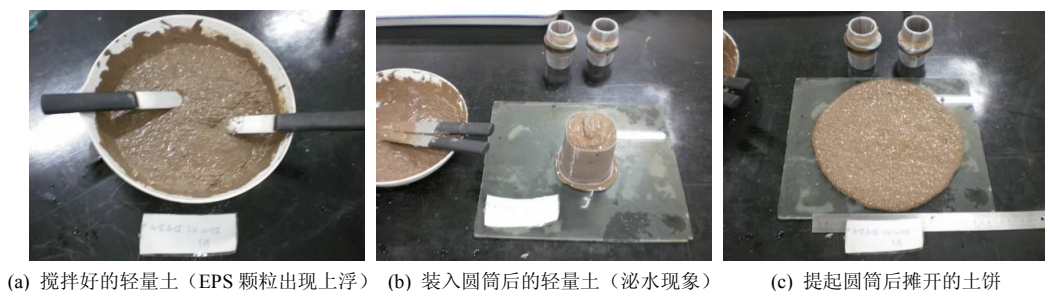


图 2 混合土流动性指标试验($a_c = 3\%$, $a_c = 15\%$, $d_{fmax} = 200\text{ mm}$)

Fig.2 Liquidity indexes test of mixed soil($a_c = 3\%$, $a_c = 15\%$, $d_{fmax} = 200\text{ mm}$)

由试验过程和图 1、2 可知: ①采用日本流动性指标测定方法确定的 $d_f = 180 \pm 20\text{ mm}$, 是基本可行的。②混合土经过流动化处理以后, 含水率越高, 流动性越好, 但图 2(b)中出现了泌水现象, 说明保水性变差了。③当 $d_f = 200\text{ mm}$ 时, $2 \sim 3\text{ mm}$ 的 EPS 颗粒开始出现明显的上浮现象, 每次装料前需要反复搅拌, 说明取 $d_{fmax} = 200\text{ mm}$ 是可信的, 否则轻质材料上浮, 混合土无法均匀。注意: ①笔者使用的圆筒取自废物回收站一个塑料杯, 下口内径为 8 cm , 上口内径为 7.98 cm , 高度为 8 cm , 不是标准圆筒, 测试得到的流动值与真实值略有差异。②混合土的流动值与它在碗中的静置时间有一定关系, 静置时间过短, 材料没有充分吸水, 流动值很大, 反之会减小。③水泥剂量变化很小时, 流动值变化不敏感。

根据击实试验与流动性指标测定试验, 得到了不同配比较轻量土的 3 个特征含水率, 见表 3。

表 3 不同配比较轻量土的 3 个特征含水率
Table 3 Three characteristic water contents of light weight soil with different mixed ratios

配比 / %	$d_f = 0\text{ mm}$ 时 最优含水率	$d_{fmin} = 160\text{ mm}$ 流动下限含水率	$d_{fmax} = 200\text{ mm}$ 流动上限含水率
	$w_{op} / \%$	$w_{fmin} / \%$	$w_{fmax} / \%$
a_c a_c			
3 10	38.33	105	115
3 15	40.00	105	115

4 试验结果与分析

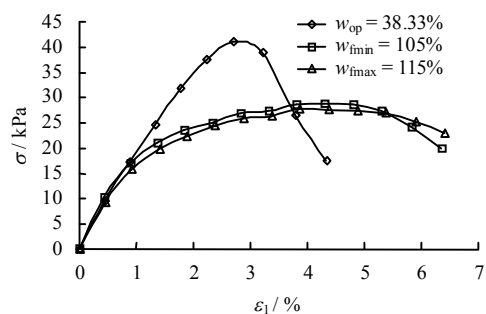
4.1 含水率对无侧限应力-应变关系的影响规律

由图 3、4 可知, ①对于同一配比的轻量土来说, 随着含水率的增加, 变形模量减小, 强度减小, 破

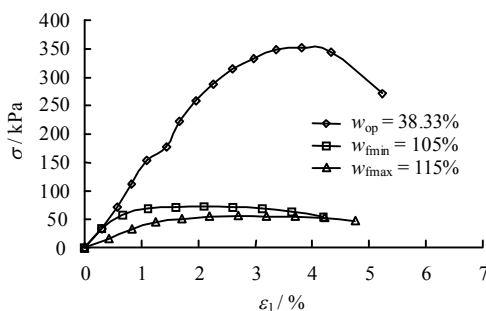
坏应变增大;②相同配比、相同含水率的轻量土,随龄期增长,强度不断增大;③相同条件下,不管含水率高低,水泥剂量增加 5%可以显著改善土壤强度;④流动性指标最大值与最小值之差为 40 mm,但对应的含水率之差仅为 10%,流动上、下限含水率对应的应力-应变关系曲线几乎重合,说明流动性指标采用 $d_f = 180 \pm 20$ mm 是可行的,而没有必要设定一个精确值,施工过程中可以在一定范围内适当调节含水率。

4.2 含水率对强度的影响规律

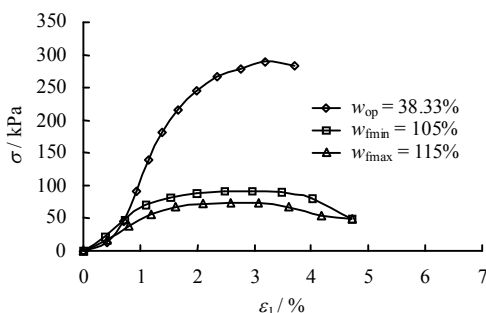
碾压法或夯击法施工,土壤往往处于塑性状态,能够得到很高的强度,减小压缩性与渗透性,获取优良的工程性质。但是处于最优含水率时,混合土难以完全搅拌均匀。把土壤流动化处理以后,采用浇注法施工,便于搅拌与运输,尤其适用于充填窄小空间,然而前期强度很小,影响施工进度。



(a) 养护时间 7 d



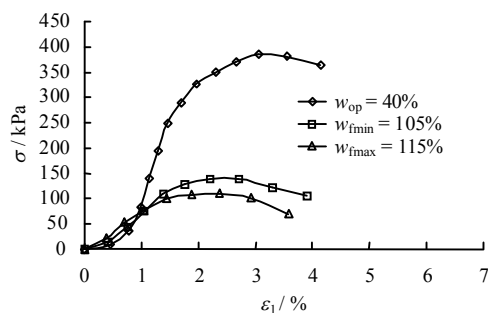
(b) 养护时间 28 d



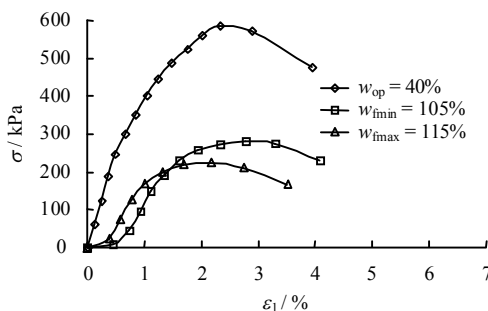
(c) 养护时间 90 d

图 3 不同龄期的应力-应变关系曲线 ($a_c=3\%$, $a_c=10\%$)

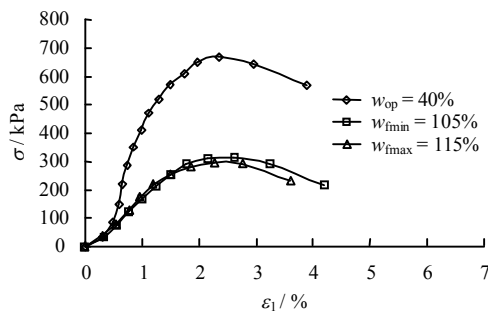
Fig.3 Stress-strain relation curves ($a_c=3\%$, $a_c=10\%$)



(a) 养护时间 7 d



(b) 养护时间 28 d



(c) 养护时间 90 d

图 4 不同龄期的应力-应变关系曲线 ($a_c=3\%$, $a_c=15\%$)

Fig.4 Stress-strain relation curves ($a_c=3\%$, $a_c=15\%$)

由图 5 可知,不同配比的轻量土在相同龄期时,随含水率增加强度减小,而且强度减小趋势受到龄期与水泥掺入比的影响,但流动性上、下限含水率对应强度差别很小。施工过程中,一般非常关注 28 d 时的强度值。通过回归分析,得到:

(1) 当 $a_c=3\%$, $a_c=10\%$ 时,有

$$q_{u28}(w_{fmin} \leq w \leq w_{fmax}) = (17.47\% \sim 18.88\%)q_{u28}(w = w_{op}) \quad (1)$$

(2) 当 $a_c=3\%$, $a_c=15\%$ 时,有

$$q_{u28}(w_{fmin} \leq w \leq w_{fmax}) = (37.53\% \sim 46.27\%)q_{u28}(w = w_{op}) \quad (2)$$

由图 6 可知,不同配比的轻量土,在相同含水率时,强度随龄期增长而增大。通过回归分析可得

$$q_u = \frac{T}{a + bT} \quad (3)$$

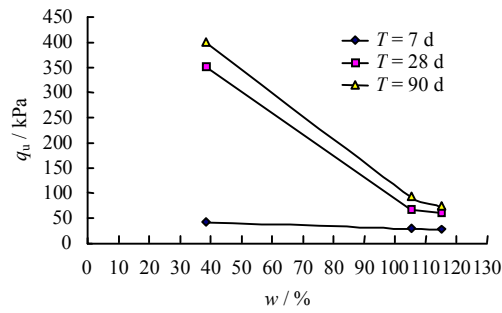
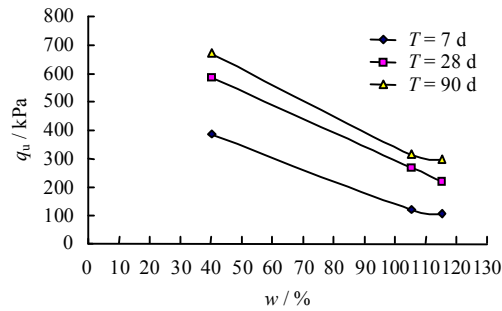
(a) $a_c=3\%$, $a_c=10\%$ (b) $a_c=3\%$, $a_c=15\%$

图5 无侧限抗压强度-含水率关系曲线
Fig.5 Unconfined compressive strength-water content relation curves

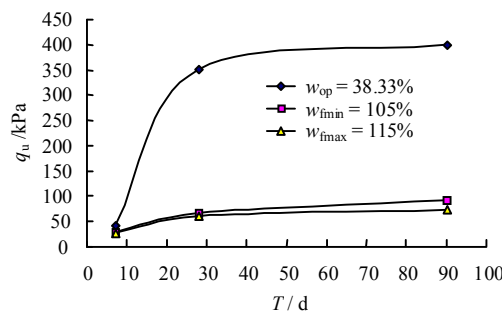
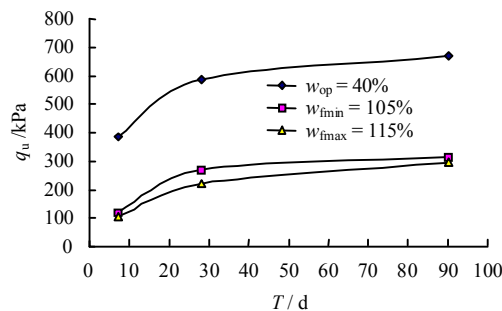
(a) $a_c=3\%$, $a_c=10\%$ (b) $a_c=3\%$, $a_c=15\%$

图6 无侧限抗压强度-龄期关系曲线
Fig.6 Unconfined compressive strength-age relation curves

式中: a 、 b 均为试验常数, 可以采用双曲线模型预测土壤强度增长情况。另外, 任意配比、任意含水率的混凝土, 90 d 与 28 d 强度存在如下经验关系:

$$q_{u90} = (1.14 \sim 1.37)q_{u28} \quad (4)$$

当 $w_{fmin} \leq w \leq w_{fmax}$, 7 d 与 28 d 强度存在经验关系:

$$q_{u7} = (0.44 \sim 0.48)q_{u28} \quad (5)$$

4.3 含水率对变形的影响规律

由图 7、8 知, 对于不同配比的轻量土, 处于最优含水率时, 直径与高度都不随龄期发生变化; 流动化处理以后, 土样的直径与高度都出现了收缩。从图 7 可知, 含水率越高, 土样收缩越严重, 土样在 28 d 以后收缩量很小。无论含水率高低, 土样初始直径都是 3.91 cm, 但流动化处理后的土样的初始高度则是无法精确测定的, 加之高度测定过程中的误差, 所以高度的收缩现象没有直径的明显。

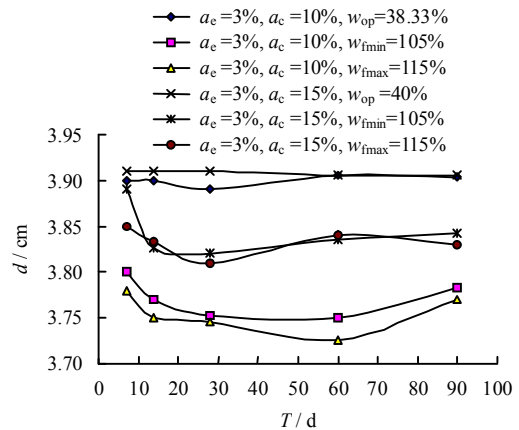


图7 直径-龄期关系曲线
Fig.7 Diameter-age relation curves

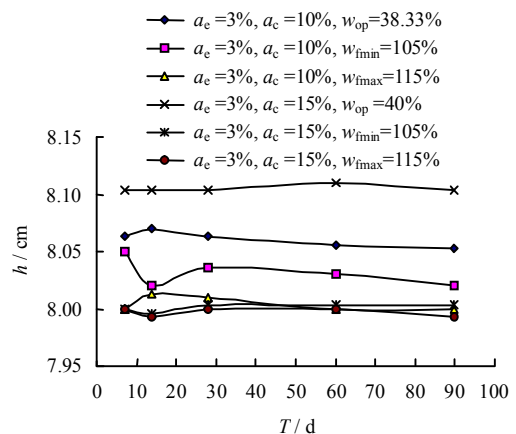


图8 高度-龄期关系曲线
Fig.8 Height-age relation curves

为了描述流动化处理土的收缩现象, 定义线收缩率 $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0} \times 100\%$, Δd 为直径变化量, d_0 为初始直径, 即 3.91 cm; 体积收缩率 $\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \times 100\%$,

ΔV 为体积变化量, V_0 为土样初始体积, 假定按照立方体模型收缩进行计算, 则 $V_0 = d_0^3$ 。由图 9、10 可知, 轻量土在最优含水率条件下, 线收缩率在 0.5% 以内, 体积收缩率在 1.5% 以内, 基本不收缩; 土壤经过流动化处理以后, 线收缩率范围为 1.53%~4.71%, 体积收缩率范围为 4.53%~13.46%, 而且土壤的收缩率受含水率、水泥剂量影响, 含水率越大、水泥剂量越低, 收缩性越强, 反之收缩性越弱。

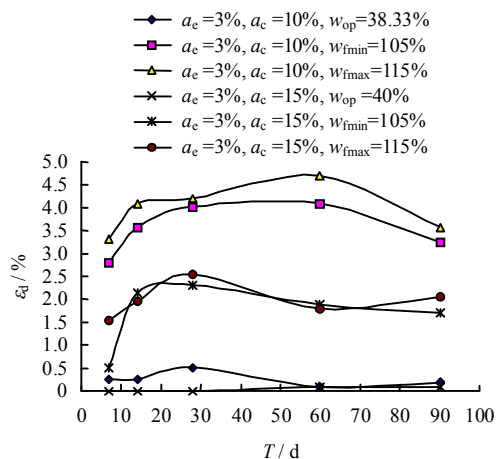


图 9 线收缩率-龄期关系曲线

Fig.9 Line shrinkage ratio-age relation curves

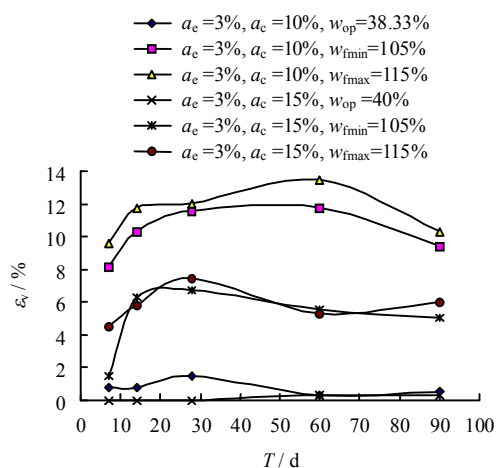


图 10 体积收缩率-龄期关系曲线

Fig.10 Volume shrinkage ratio-age relation curves

4.4 含水率对湿密度的影响规律

由图 11 可知, 轻量土在最优含水率状态时, 湿密度不随龄期变化; 流动化处理后, 土壤的湿密度随龄期逐渐增大, 28 d 以后基本无变化。

混合土的湿密度是工程设计与施工中基本技术指标之一, 通常采用理想密度模型进行预测。理想密度模型为^[10]

$$\rho_{\text{轻}} = \frac{m_s + m_c + m_e + m_w}{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_e}{\rho_e} + \frac{m_w}{\rho_w}} \quad (6)$$

式中: $\rho_{\text{轻}}$ 为轻量土的密度; m_s 为轻量土中土颗粒的质量; ρ_s 为土粒相对密度; m_c 为水泥的质量; ρ_c 为水泥颗粒相对密度; m_e 为 EPS 颗粒的质量; ρ_e 为 EPS 纯颗粒密度; m_w 为水的质量; ρ_w 为常温下水的相对密度。

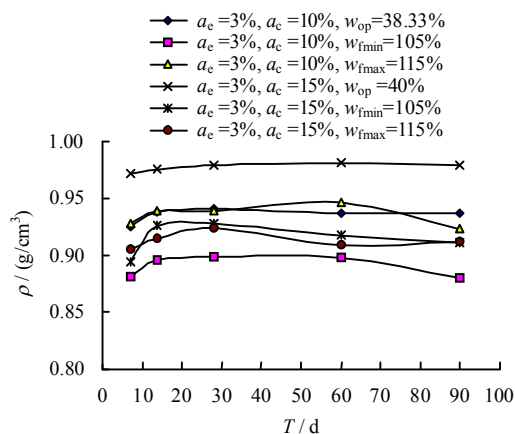


图 11 湿密度-龄期关系曲线

Fig.11 Wet density-age relation curves

为了验证模型的适用性, 把模型计算值与各种配比的轻量土 28 d 时的湿密度做对比。定义: 绝对误差 = |理论密度 - 实测密度|, 相对误差 = 绝对误差 / 实测密度。由表 4 可知, 最优含水率时, 土壤理论密度与实测密度基本一致; 高含水率时, 土壤理论密度的相对误差范围为 3.834%~8.231%。综合分析, 采用理想密度模型基本上可以正确预测不同含水率时混合土的湿密度。

表 4 湿密度理论值与实测值比较表

Table 4 Comparison of predictive values and measured values for wet density theory

a_c / %	a_c / %	w_{op} / %	w_{min} / %	w_{max} / %	T / d	理论密度 / (g/cm ³)	实测密度 / (g/cm ³)	绝对误差 / (g/cm ³)	相对误差 / %
3	10	38.33			28	0.962	0.941	0.021	2.232
3	10		105		28	0.973	0.899	0.074	8.231
3	10			115	28	0.975	0.939	0.036	3.834
3	15	40.00			28	0.984	0.979	0.005	0.511
3	15		105		28	0.988	0.928	0.060	6.466
3	15			115	28	0.989	0.924	0.065	7.035

5 结 论

(1) 采用日本流动性指标 180 ± 20 mm 控制轻量土的流动性, 基本可行。对于一般配比的轻量土(28 d 强度接近普通土), 在不同龄期时, 流动性上、下限含水率时的无侧限应力-应变关系曲线几乎重合, 说明流动性上、下限含水率范围内, 土壤的性能比较接近, 实际施工过程中可以适当调节含水率, 方便施工。

(2) 不同配比的轻量土, 含水率增加, 强度急速衰减, 但流动性上、下限含水率对应强度差别不大。不管含水率高低, 强度随龄期增长, 都可以采用双曲线模型进行预测, 并且总结了 7 d、90 d 强度与 28 d 强度之间的经验关系。

(3) 轻量土在最优含水率时, 收缩性微小, 可以不予考虑; 经过流动化处理以后, 线收缩率范围为 1.53%~4.71%, 体积收缩率范围为 4.53%~13.46%, 收缩性受含水率、水泥剂量等因素影响。

(4) 湿密度计算值与实测值相比较, 最优含水率时, 二者基本一致; 在流动性上、下限含水率范围内, 二者的相对误差范围为 3.834%~8.231%。所以, 可以采用理想密度模型对湿密度进行近似预测。

参 考 文 献

- [1] OH S W, LEE J K, KWON Y C, et al. Bearing capacity of light weight soil using recycled styrofoam beads[C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002: 670—674.
- [2] YOONZ G L, JEON S S, KIM B T. Mechanical characteristics of light-weighted soils using dredged materials[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2004, 22(4): 215—229.
- [3] YAJIMA J, MYDIN S H. Mechanical properties of the unsaturated foam composite light-weight soil[C]//4th International Conference on Unsaturated Soils. [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 2006: 1639—1650.
- [4] NAGATOME T, HASHIMOTO T, OTANI J, et al. Absorption property evaluation of light weight soil with air foam due to different mixing conditions[J]. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 2010, 59(1): 68—73.
- [5] 董金梅. 聚苯乙烯轻质混合土工程特性的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [6] 姬凤玲. 淤泥泡沫塑料颗粒轻量土力学特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [7] 侯天顺, 徐光黎. 轻量土最优含水率模型与检验[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(7): 1129—1134.
- [8] HOU Tian-shun, XU Guang-li. Optimum water content models and tests of light weight soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(7): 1129—1134.
- [9] 朱伟, 李明东, 张春雷, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(1): 21—25.
- [10] ZHU Wei, LI Ming-dong, ZHANG Chun-lei, et al. The optimum moisture content of sand EPS beads mixed lightweight soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(1): 21—25.
- [11] 顾欢达, 陈甦. 河道淤泥的流动化处理及其工程性质的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(1): 108—111.
- [12] GU Huan-da, CHEN Su. Engineering properties of river sludge and its stabilization[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(1): 108—111.
- [13] 侯天顺. 淤泥发泡颗粒混合轻量土力学性质的试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [15] 三木博史. 土の流动化处理工法の各种用途への利用技术[J]. *土木技术资料*, 1995, 37(9): 32—37.
- [16] MIKI H. Flow treatment technology of soil and its applications[J]. *Civil Engineering Technology Data*, 1995, 37(9): 32—37.
- [17] 横田圣哉, 三嶋信雄. 泡沫混合轻量土[J]. 于晓波译. *路基工程*, 1997, (4): 81—86.
- [18] YOKOTA, MISHIMA N. Foam light-weight soil[J]. YU Xiao-bo, translator. *Subgrade Engineering*, 1997, (4): 81—86.