

粉煤灰水泥土力学特性试验研究

蒙 强, 邵 俐, 施倩芸

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 针对上海苏州河区域的软土特点, 将粉煤灰和水泥作为固化材料加固饱和软黏土, 研究粉煤灰对水泥土力学特性的影响. 通过无侧限抗压强度试验, 研究了不同粉煤灰掺量、水泥掺量以及不同龄期对水泥土强度和变形特性的影响; 通过 Matlab 数据拟合, 提出了水泥粉煤灰固化土的强度预测方法. 随着龄期的增长和粉煤灰掺量的增加, 固化土的应力应变关系由塑性破坏转变成脆性破坏. 当粉煤灰掺量过高时, 水泥土中易发生耦合反应, 影响固化效果. 因此, 水泥掺量与粉煤灰掺量比例为 1:1, 且粉煤灰最佳掺量为 14%~18%.

关键词: 水泥土; 粉煤灰; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU 47 **文献标志码:** A

Experimental Study on the Mechanical Properties of Fly Ash Cement Soil

MENG Qiang, SHAO Li, SHI Qianyun

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the soft soil characteristics of the Suzhou River in Shanghai, the saturated clay with fly ash and cement as solidified materials was used to research the effect of fly ash on the mechanical characteristics of cement soil. Through unconfined compressive strength tests under different cement dosage, fly ash and curing time, the mixing soil strength properties and deformation characteristics were investigated and a prediction method for the relation between unconfined compressive strength and curing period was proposed through the data fitting by using the Matlab. The results show that the stress-strain relationship of the stabilized soil will be changed from the plastic collapse into brittle failure with the increase of fly ash and the age. When the fly ash dosage is too high, the coupling reaction is likely to occur, which affects the solidified effect. The best content ratio of cement to fly ash is 1:1, and the optimum amount of fly ash is from 14% to 18%.

Keywords: cement soil; fly ash; unconfined compressive strength

水泥土在地基处理中具有少扰动、施工周期短、高强度及低造价等特点, 适合作为加固上海软土地

基的有效方式之一. 粉煤灰是燃煤电厂和供热锅炉所排放的主要固体废弃物, 随着我国电力工业的迅

收稿日期: 2017-02-26

第一作者: 蒙 强(1993-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 软土地基处理. E-mail: 616347579@qq.com

通信作者: 邵 俐(1969-), 女, 副教授. 研究方向: 地基处理. E-mail: shaoli69@163.com

速发展,粉煤灰已成为排放量最大的工业废渣之一.粉煤灰水泥土应用于地基处理,减少了粉煤灰的排放量,利于环保,同时部分替代水泥,降低工程成本. Sawa 等^[1]将粉煤灰作为固化材料加固淤泥,并进行了强度试验,得出了 CaO 和 SO₃ 含量高的粉煤灰对固化土强度提高效果最好,其中,火山灰质水化生成的钙矾石和水化硅酸钙混合物对固化土强度提高起主要作用. Kolias 等^[2]采用粉煤灰和水泥对细粒黏土进行固化,研究表明,随着粉煤灰掺量的增加,固化土塑性降低,抗压强度提高. Jongpradist 等^[3]通过无侧限抗压强度试验分析了粉煤灰对高含水量水泥土的强度、弹性模量等力学参数的影响,提出了粉煤灰是水泥的等效胶凝材料,并且建立了关于水灰比的强度预测公式. 尹利影^[4]将粉煤灰添加到水泥浆中进行软土的固化试验研究,随着粉

煤灰掺量的增加,水泥土干缩变形显著减小. 本文探讨了粉煤灰水泥土的固化机理,通过无侧限抗压强度试验,研究了粉煤灰水泥土应力应变规律、粉煤灰掺量和龄期对强度的影响,并提出强度预测方法.

1 试验方案

1.1 试验材料

土样取自上海苏州河区域,取土深度约 10 m. 软土的物理性质指标如表 1 所示. 水泥采用强度等级为 425 号的普通硅酸盐水泥. 粉煤灰采用 I 级高钙型,基本化学成分如表 2 所示.

1.2 试验方案

试验方案如表 3 所示.

表 1 软土的物理性质指标

Tab.1 Physical properties of the soft soil

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密度 G_s	孔隙比 e	塑限 $W_P/\%$	液限 $W_L/\%$	内摩擦角 $\phi/^\circ$	粘聚力 c/kPa	塑性指数 I_P	含水量 $\omega/\%$
16.9	2.75	1.49	36.5	56	13.2	10	19.5	54.7

表 2 粉煤灰的基本化学成分

Tab.2 Chemical composition of the fly ash

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	烧失量
含量/%	45.73	23.52	16.8	5.21	0.95	0.35	0.82	3.15

表 3 无侧限抗压强度试验方案

Tab.3 Experiment design of unconfined compressive strength test

水泥掺入比 $\alpha_w/\%$	粉煤灰掺入比 $f/\%$	龄期 T/d	含水量 $w/\%$	水灰比 W/C
10,14,18,22	0,6,10,14,18,22, 26,30	7,14,28,60,90	40	0.5

注:水泥掺入比指水泥质量和湿土质量之比,粉煤灰掺入比指粉煤灰质量和湿土质量之比.

1.3 试验方法

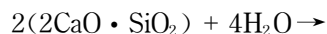
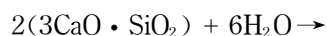
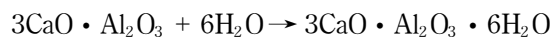
将烘干的土过 2 mm 标准筛,根据试验方案将土、水泥、粉煤灰和水按设计配比放入搅拌器内搅拌至均匀,分 3 层人工捣实,将混合土体装入试模(试模内壁涂刷一层凡士林),放到振动台上振动到没有气泡排出为止,用土工刀刮平表面. 试块尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,成型后放入标准养护箱养护^[5-7]. 养护箱温度为 20±3℃,相对湿度大于等于 90%. 达到设计龄期后,每组取 3 个试样进行无侧限抗压强度试验,取算术平均值作为该组试样的无侧限抗压强度值^[8-9]. 试样压试速率为 1 mm/min.

2 粉煤灰水泥土固化机理

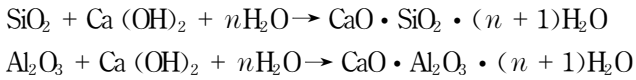
粉煤灰主要化学成分有二氧化硅、氧化钙和氧

化铝等,其三者含量达到 70% 以上. 在水泥土固化过程中,粉煤灰主要表现出 3 种效应^[10]:形态效应、微集料效应、活性效应. 粉煤灰和水泥都含有大量火山灰质,其水化产物主要是 CAH 系和 CSH 系凝胶. 下面是粉煤灰水泥土的化学反应过程^[11].

水泥矿物熟料发生水解和水化反应,释放出游离态 Ca²⁺ 和 OH⁻.



在强碱环境下,粉煤灰中的火山灰质与 Ca(OH)₂ 发生水化反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙等结晶物.



粉煤灰对水泥土的固化过程:首先,粉煤灰以形态效应和微集料效应利用其圆滑、细小等物理特点不断地扩散到水泥土结构中,在孔隙位置不断地挤压累积,细化孔隙;水泥与水接触后,矿物熟料很快与水发生水解和水化反应,形成高浓度的碱性环境,提高粉煤灰玻璃体的解聚能力,促使其 Si-O、Al-O 键的断裂,同时在 OH^- 的作用下, Si-O-Al 网络聚合体的聚合度降低,形成游离的不饱和和活性键,与 Ca^{2+} 反应生成水化硅酸钙和水化硅酸铝等胶凝性产物,提高水泥土前期强度.水泥和粉煤灰的水化物一部分继续硬化,形成水泥石骨料,另一部分通过离子交换和团粒化作用使较小的土颗粒形成较大的土团体,逐渐硬凝

成不溶于水的结晶物,从而提高固化土强度.

3 试验结果与分析

3.1 粉煤灰水泥土的应力应变关系

固化土的应力应变关系如图 1 所示.在开始受力阶段,应力应变可近似为线性增长关系;当外荷载超过极限荷载的 80%~90%之后,表现为缓慢增长.从应力应变曲线变化可知,随着龄期的增长,固化土由塑性破坏逐渐发展为脆性破坏,破坏应力也随之增长.在 7~90 d 过程中,破坏应变约减少 1.5%,这是由于火山灰质的不断反应,生成硅酸钙和铝酸钙等水化胶凝物,在离子交换和团粒化作用下与土颗粒形成土团体,提高了固化土强度,降低了破坏应变.

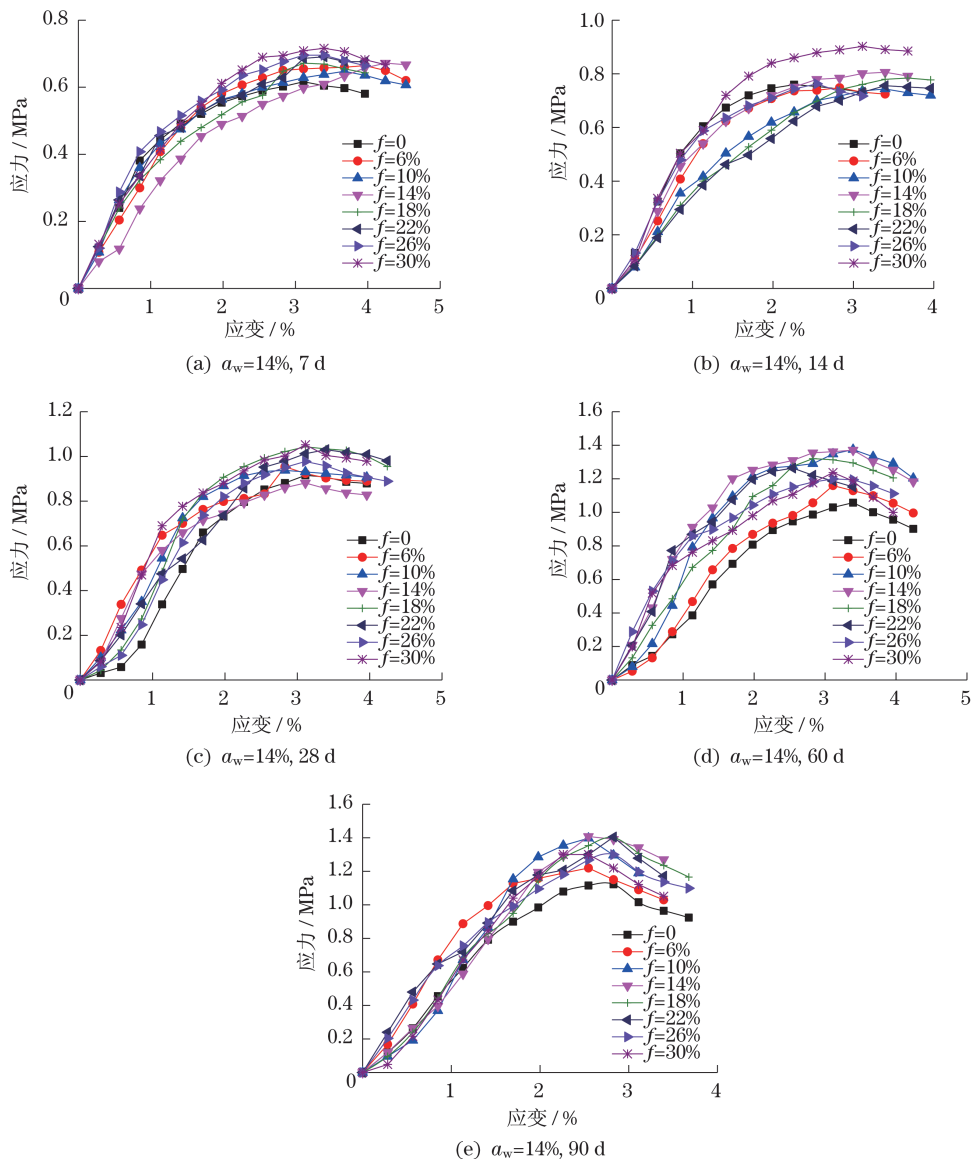


图 1 水泥土应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain relationship of the cement soil

3.2 粉煤灰掺量对强度的影响

由图2可知,固化土的无侧限抗压强度随着水泥掺量的增加而增加,在14~60 d过程中,强度随着粉煤灰、水泥掺量起伏变化明显,这是由于水泥和粉煤灰处于半完全水化反应的状态,即水泥水化反应提高了土体碱性,提高了粉煤灰中火山灰质的水化反应;部分未水化的粉煤灰在水溶作用下形成大团粒结构,包裹水泥矿物颗粒,短暂阻碍了水泥的完全水化,随着团粒消散,水泥熟料进一步水化,则出现了强度起伏波动的情况.水泥掺量为10%和14%时,28 d以后的固化土强度基本上不随着粉煤灰掺量的增加而变化.60 d和90 d时,强度稳定所对应的粉煤灰掺量为

18%和14%,说明粉煤灰属于“惰性材料”,过量掺加粉煤灰对强度提高影响不大,当水泥掺量较低时,过量的粉煤灰反而会使强度下降^[10].

3.3 龄期对强度的影响

由图3(见下页)可知,强度随着龄期的增长而增长,最终趋于稳定,60 d前,强度增长幅度较大,这是水泥和粉煤灰共同反应的阶段,粉煤灰表现为弱碱性,使得土体局部碱性提高,促进粉煤灰水化反应.在未掺加粉煤灰时,水泥土强度始终低于其他掺有粉煤灰的强度,这说明了粉煤灰的胶凝固化作用.当水泥掺量为14%、粉煤灰掺量为14%时,强度在60 d以后一直处于最大值.

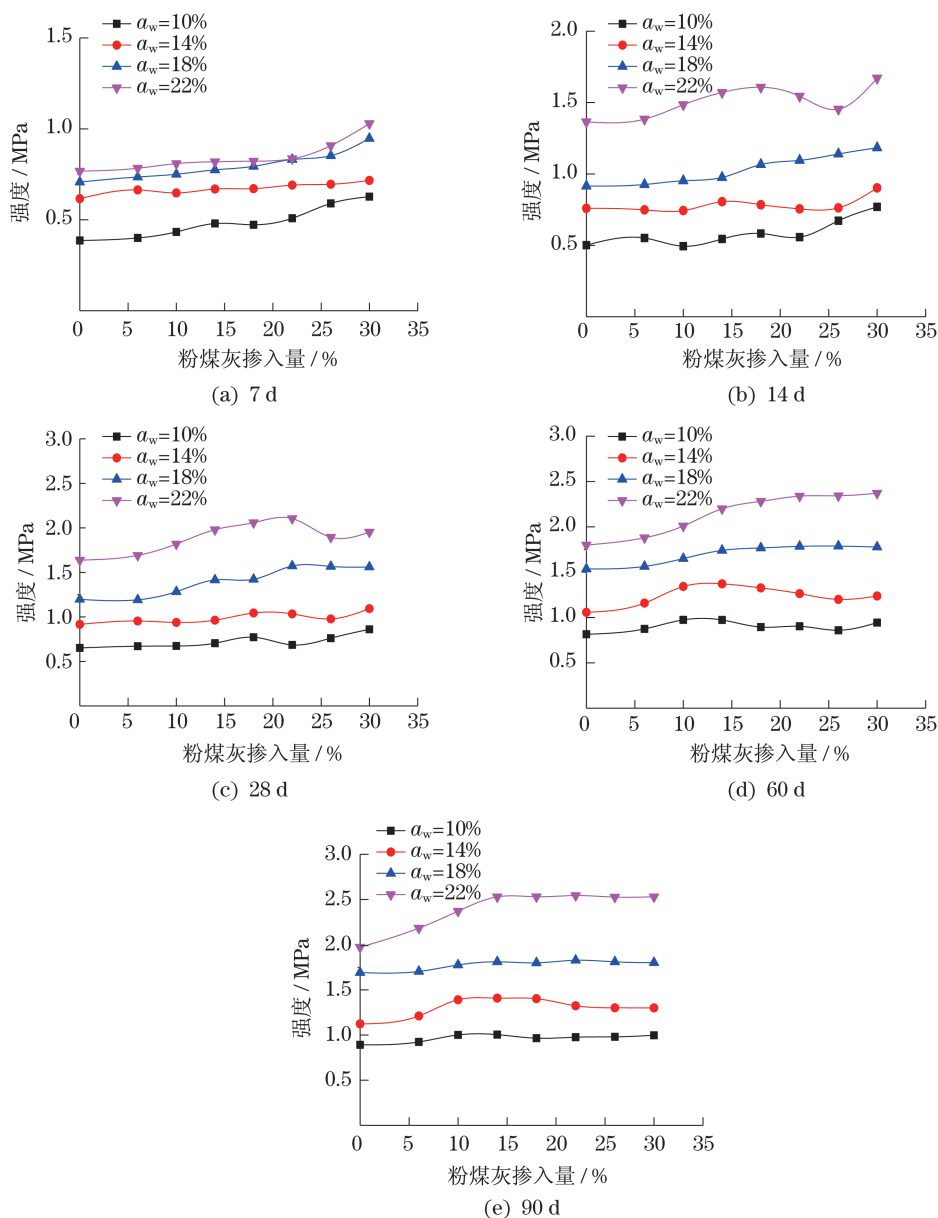


图2 无侧限抗压强度与粉煤灰掺量的关系图

Fig.2 Relationship between the unconfined compressive strength and fly ash

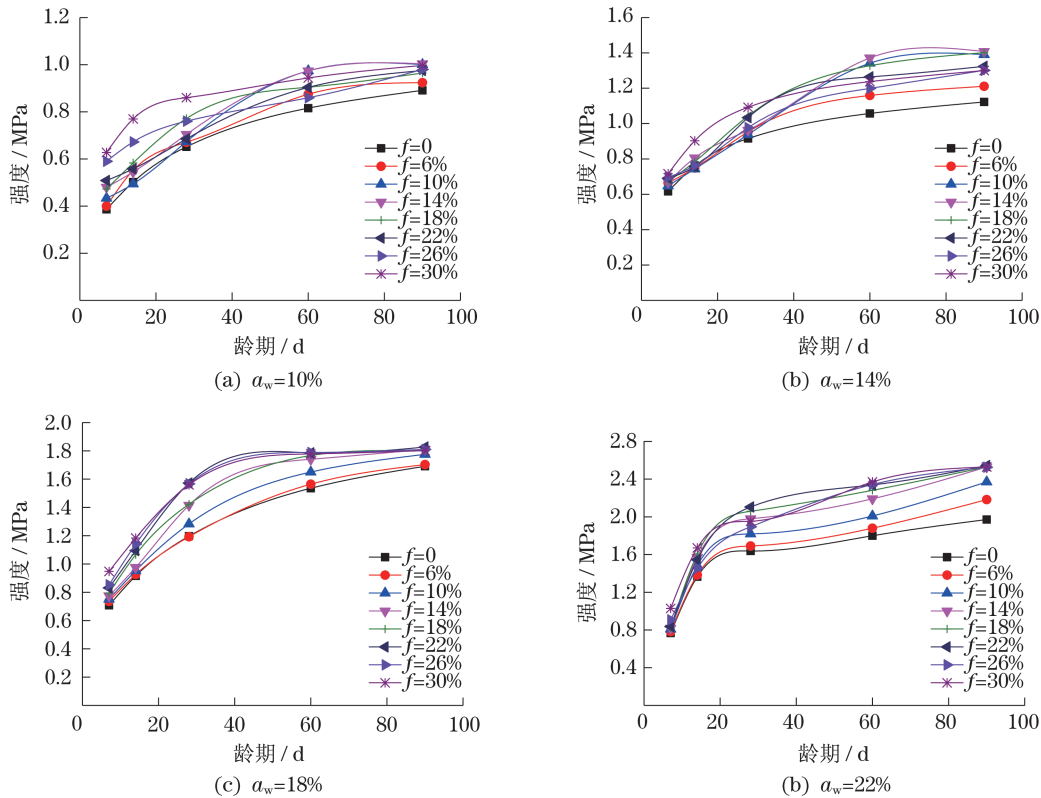


图 3 无侧限抗压强度与龄期的关系图

Fig.3 Relationship between the unconfined compressive strength and curing time

3.4 强度预测方法

在相同条件下,无侧限抗压强度与龄期存在一定的线性关系^[11].通过无量纲分析对粉煤灰水泥土强度与龄期进行拟合^[12],建立预测公式:

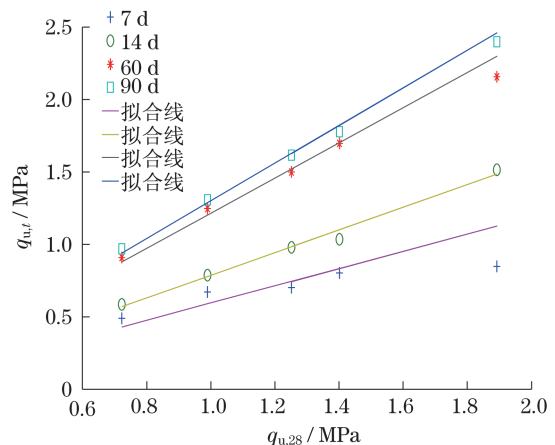
$$q_{u,t} = A_T q_{u,T} \quad (1)$$

式中: $q_{u,t}$ 表示龄期为 t 的待预测的无侧限抗压强度; $q_{u,T}$ 表示龄期为 T 的已知的无侧限抗压强度; A_T 为预测系数.

实测得到的不同龄期的强度值作为 $q_{u,T}$, 分析该龄期强度与其他龄期强度的关系. 同组龄期的强度值取其加权平均值作为强度数值. 图 4 显示了 28 d 强度与其他龄期间的线性关系, 对应的斜率为预测系数 A_T .

同时, 对 $T = 7, 14, 60, 90$ d 龄期的强度也进行了同样的分析, 得到的回归拟合结果如表 4 所示. R^2 为拟合相关系数.

由表 4 可知, 同一龄期 T 的强度预测系数 A_T 随着 t 的增大而增大. 通过 Matlab 软件将不同 t 下的 A_T 值进行散点描图、回归拟合, 得到预测系数 A_T 与龄期 t 的关系图, 如图 5 所示.

图 4 $q_{u,t}$ 与 $q_{u,28}$ 的关系图 (28 天)Fig.4 Relationship between $q_{u,t}$ and $q_{u,28}$ with the curing time of 28 days

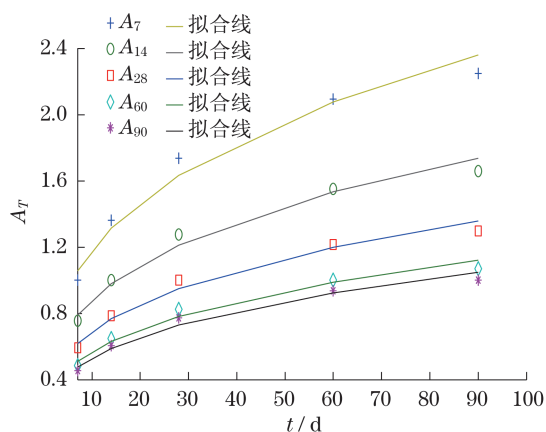
由图 5 可知, A_T 随着 t 的增大而增大, 随着 T 的增大而减小. 通过对比不同的拟合方法, 得到 A_T 与 t 的关系近似于幂函数, 即两者间的变化规律可以通过式 (2) 来表达.

$$A_T = a t^b \quad (2)$$

式中, a, b 分别为拟合参数, 如表 5 所示.

表4 预测系数 A_T 表Tab.4 Relationship between the A_T and curing time

龄期 t/d	$T=7$		$T=14$		$T=28$		$T=60$		$T=90$	
	A_T	R_T^2	A_T	R_{14}^2	A_T	R_{28}^2	A_T	R_{60}^2	A_T	R_{90}^2
7	1.000	1.000 0	0.757	0.999 5	0.593	0.986 7	0.486	0.988 8	0.455	0.994 8
14	1.360	0.991 2	1.000	1.000 0	0.784	0.627 8	0.646	0.862 2	0.603	0.738 9
28	1.736	0.999 0	1.278	0.610 6	1.000	1.000 0	0.825	0.996 6	0.770	0.905 1
60	2.093	0.998 2	1.551	0.851 1	1.214	0.993 7	1.000	1.000 0	0.935	0.962 8
90	2.247	0.999 1	1.659	0.725 6	1.299	0.908 8	1.071	0.961 5	1.000	1.000 0

图5 预测系数 A_T 与龄期 t 的关系图Fig.5 Relationship between the A_T and curing time

由表5可知,随着龄期 T 的增大,拟合参数 b 值变化不大,即不同龄期 T 时,

$$b \approx 0.309 \quad (3)$$

同时,拟合参数 a 与 T 的关系如图6所示,得出 a 与 T 的幂函数关系式为

$$a = 1.0025T^{-0.3095} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2),得到预测系数与龄期的表达式为

$$A_T = 1.0025T^{-0.3095}t^{0.309} \quad (5)$$

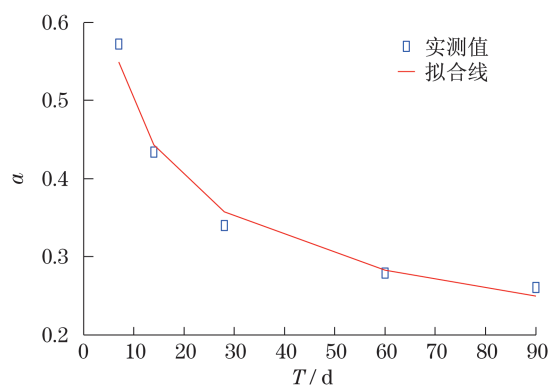
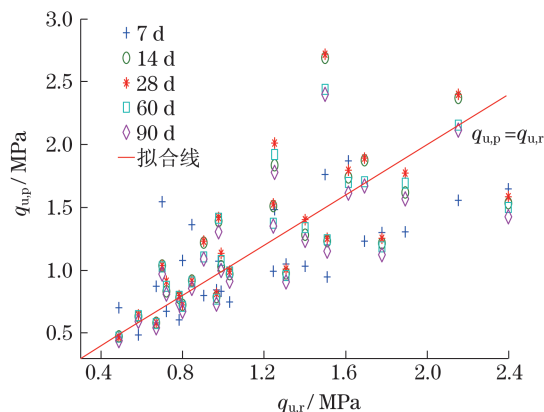
将式(5)代入式(1),得到强度预测公式为

$$q_{u,t} = 1.0025T^{-0.3095}t^{0.309}q_{u,T} \quad (6)$$

表5 A_T 关于 t 的拟合参数表Tab.5 Fitting relationship between the A_T and curing time

龄期/ d	a	b	R^2
7	0.572 3	0.314 8	0.976 6
14	0.433 4	0.308 4	0.982 3
28	0.339 7	0.308 1	0.982 5
60	0.278 4	0.309 6	0.981 2
90	0.260 7	0.308 9	0.981 8

将 $T=7, 14, 28, 60, 90$ d 龄期下的实测强度值作为已知强度值,通过式(6)所预测的其他龄期强度值作为预测值,得到已知强度和预测强度的关系如图7所示.其中, $q_{u,r}$ 为实测强度值, $q_{u,p}$ 为预测强度值.

图6 拟合参数 a 与 T 的关系图Fig.6 Relationship between the fitting parameter a and curing time图7 $q_{u,p}$ 与 $q_{u,r}$ 的关系图Fig.7 Unconfined compressive strength relationship between the predicted values $q_{u,p}$ and the measured values $q_{u,r}$

由图7可知,强度预测值接近实测值.因此,在与本文研究条件相同的情况下,可以通过经验公式(6),由某一龄期的强度预测其他任一龄期下的强度.

4 结 论

a. 粉煤灰水泥土强度大幅增长主要集中在60 d以前,90 d以后强度仍缓慢增长;无侧限受压破坏类型随着龄期的增长由塑性破坏变为脆性破坏,且提高粉煤灰掺量可以使水泥土提前表现出脆性破坏.

b. 通过预测公式 $q_{u,t} = 1.0025T^{-0.3095}t^{0.309}$, $q_{u,T}$ 可由任一龄期的已知强度值预测相同条件下的其他龄期强度值.

c. 粉煤灰属于“惰性材料”,大掺量粉煤灰在水泥土中易发生耦合反应;同时,粉煤灰具有调和作用,避免了固化土干缩开裂问题.

d. 当水泥以4%掺入量递增时,强度约以30%的速率递增;当水泥掺量过低时,对固化土强度提高作用不明显;当水泥掺量在10%~22%的范围内,水泥和粉煤灰的最优掺量比例为1:1;且随着龄期的增长,强度稳定所对应的粉煤灰掺量由18%降为14%.

参考文献:

[1] SAWA K, TOMOHISA S, INAZUMI S, et al. Hardening treatment of muddy soil with coal fly ashes[J]. Journal of the Society of Materials Science, 2000, 49(3): 348-351.

- [2] KOLIAS S, KASSELORI-RIGOPOULOU V, KARAHALIOS A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(2): 301-313.
- [3] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOUWAI S, et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 49-58.
- [4] 尹利影. 矿物掺合料对硬化水泥石干缩变形的影响[D]. 开封: 河南大学, 2012.
- [5] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[2007版][S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [6] 中华人民共和国建设部. JGJ 83-2011 软土地区岩土工程勘察规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [7] 中华人民共和国建设部. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[2009年版][S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [8] 肖仁成, 俞晓. 土力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [9] 王述红, 宁宝宽, 康玉梅, 等. 土力学试验[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2010.
- [10] 邵俐, 刘松玉, 杜广印, 等. 水泥粉煤灰加固有机质土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 408-414.
- [11] 刘松玉, 钱国超, 章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [12] 陈蕾, 刘松玉, 杜延军, 等. 水泥固化含铅污染土无侧限抗压强度预测方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 609-613.

(编辑: 石 璞)