

台州淤泥质土固化特性研究

徐日庆^{1,2†}, 文嘉毅¹, 王旭^{1,2}, 董梅¹, 朱兵见^{2,3}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;

2. 浙江加州国际纳米技术研究院 台州分院, 浙江 台州 318000; 3. 台州学院 建筑工程学院, 浙江 台州 318000)

摘要: 为了研究以二灰为主固化剂、TZ-01为添加剂的固化方案在台州淤泥质土中的加固效果以及不同因素对于固化土强度的影响, 对台州淤泥质土的固化特性进行试验研究. 通过试验对淤泥质土的含水量、有机质含量、主固化剂掺量、添加剂掺入比以及龄期这5个因素进行分析. 试验结果表明淤泥质土的含水量会阻碍固化土强度的增长, 主固化和龄期的增长能够有效地增强固化土的强度, 有机质含量和添加剂掺入比存在一个最佳掺量. 通过对固化土无侧限压缩试验得到的应力应变曲线进行分析, 提出了固化土在单轴压缩下的4个阶段. 通过数据处理与分析, 引入水灰比, 并综合考虑有机质含量、添加剂掺入比和龄期的影响, 建立了固化土强度预测模型.

关键词: 淤泥质土; 二灰; 水灰比; 强度预测模型

中图分类号: TU447

文献标志码: A

Study on Curing Properties of Taizhou Sludge Soil

XU Riqing^{1,2†}, WEN Jiayi¹, WANG Xu^{1,2}, DONG Mei¹, ZHU Bingjian^{2,3}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Taizhou Branch, Zhejiang-California International Nano Systems Institute, Taizhou 318000, China;

3. School of Civil Engineering & Architecture, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: In order to figure out the effect of curing agent in sludge soil with the fly ash and lime as the main curing agent and TZ-01 as the additive, a series of experiments were conducted to study the strength characteristics of solidified soil and the influencing factors on the strength of solidified soil. Through experiments, the initial water content, organic matter content, main curing agent content, additive incorporation ratio, and age of solidified soil were analyzed. The results showed that the initial water content of the sludge soil hindered the growth of the solidified soil. The main curing agent and age growth can effectively enhance the strength of the solidified soil, and there was an optimum blending ratio of organic matter content and additive incorporation ratio. Based on the analysis of the stress-strain curve obtained from the unconstrained compression test of solidified soil, four stages of solidified soil under uniaxial compression were proposed. By processing and analyzing data, the water-cement ratio β was introduced, the effects of organic matter content, additive incorporation ratio and age were comprehensively considered, and the solidified soil strength prediction model was established.

Key words: sludge soil; fly ash-lime; water-cement ratio; strength prediction model

* 收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672264), National Natural Science Foundation of China(41672264)

作者简介: 徐日庆(1962—), 男, 浙江大学教授, 博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: xurq@zju.edu.cn

滨海地区存在着大量的淤泥质土,淤泥质土具有含水量高、强度低、压缩性大的特点,是工程处理上的一个难点.在对淤泥质土进行施工前,往往需要对于淤泥质土进行预处理,使得在淤泥质土的表层形成一个硬壳层,从而能够满足工程机械的进场施工的条件.杨福麟等^[1]针对某工地新吹填软土真空预压加固工程,采用浅层加固超软土技术加固浅表层,取得了良好的效果.闫澍旺等^[2]在天津滨海新区的围海造陆工程中,采用在吹填土上吹填细砂形成硬壳层,提高地基承载力,满足真空预压施工中插板机的进场条件.自 20 世纪 90 年代以来,淤泥质土的浅层改良技术在日本得到了快速的发展,应运而生了淤泥上履带行走式稳定土拌合法(SLM 工法)^[3].

国内外都开展过适用于淤泥质土加固的固化剂研究.综合考虑加固效果与经济效益,一般采用工业废料对于高含水量的淤泥质土进行加固^[4-7].针对淤泥质土的固化特性研究,一般是通过室内无侧限压缩试验、常规三轴剪切试验^[8]等强度试验以及扫描电镜^[9]、XRD^[10]等测试手段对固化土的固化机理进行研究分析.

本课题组针对台州淤泥质土的浅层加固研发了一套固化方案.本方案是以粉煤灰与生石灰作为主固化剂,TZ-01 作为添加剂.本文以固化土的无侧限抗压强度作为强度指标,综合考虑影响软土固化的“内因”和“外因”^[11],以含水量、有机质含量、主固化剂掺量、添加剂掺入比以及龄期这 5 个因素作为变量,对台州淤泥质土的固化特性进行研究.

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所采用的淤泥质土取自台州椒江地区,基本参数见表 1.

表 1 淤泥土基本参数

Tab. 1 Parameters of sludge soil

含水量 /%	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	相对 密度	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	有机质 含量/%
50	16.01	2.7	2.42	42.3	24	3.9

所选用的粉煤灰是取自浙江某热电厂的一级粉煤灰,主要化学成分如表 2 所示.

所选用的生石灰是工业生石灰,其中 CaO 与 MgO 的总质量分数大于 80%.

表 2 粉煤灰的主要化学成分

Tab. 2 Chemical composition of fly ash

组分	质量分数/%
SiO ₂	58
Al ₂ O ₃	30
Fe ₂ O ₃	4.3
CaO	1.5
MgO	2.8
Na ₂ O	3.2

添加剂 TZ-01 是由本课题研制的适用于激发二灰加固土活性的添加剂,主要成分是:硅酸钠、硫酸钙、氯化钙,其质量比例为 55:31:14.

向土体中添加的有机质是由南京化学试剂有限公司生产的腐殖酸.

1.2 试样制备及养护

为了控制土样的各部分性质均匀,在试样制作之前,将原状土放入烘箱,控制温度为 105~110 ℃,烘干时间不少于 12 h.烘干后,将土样用碎土机粉碎,过 2 mm 筛去除杂质,得到性质均匀的土粉,用塑料箱密封保存^[12].

试验制作时,称取一定质量的干土,并按设计的含水量加水搅拌均匀;再按照试验设计的比例依次加入腐殖酸、主固化剂以及添加剂 TZ-01,搅拌均匀后进行装样.制样所用模具尺寸为标准的三轴试样尺寸,即直径 39.1 mm,高度 80 mm.制样时,将搅拌均匀的土样分 5~8 层填入模具中,每填入一层都使用击锤击实,观察土样无明显空隙后,然后使用土工刀将击实后的土样表面刮毛,再填入下一层.制样完成后,固化土连同模具在室温下养护 24 h 后进行拆模,然后用塑料膜将固化土密封保存后放置于恒温恒湿养护室中进行进一步养护,温度控制在 20±5 ℃,直至试验设计的龄期.

1.3 试验设计

为了更好地表示本试验中的各个变量,以 m 表示淤泥质土的质量,以 m_s 表示淤泥质土中土粒的质量, m_w 表示淤泥质土中水的质量, m_o 表示淤泥质土有机质的质量, m_c 表示固化土中掺入的二灰的质量, m_{TZ} 表示固化土中掺入添加剂 TZ-01 的质量, T 表示固化土的龄期, w 表示淤泥质土的含水量, w_o 表示淤泥质土中的有机质含量, c 表示固化土中二灰的掺量, w_{TZ} 表示固化土中添加剂的掺入比.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (1)$$

$$w_o = \frac{m_o}{m} = \frac{m_o}{m_s + m_w} \quad (2)$$

$$c = \frac{m_c}{m} = \frac{m_c}{m_s + m_w} \quad (3)$$

$$w_{TZ} = \frac{m_{TZ}}{m_c} = \frac{m_{TZ}}{m \cdot c} = \frac{m_{TZ}}{(m_s + m_w)c} \quad (4)$$

为了综合分析各种因素对于淤泥质土固化效果的影响,以淤泥质土含水量 w 、有机质含量 w_o 、二灰掺量 c 、添加剂掺入比 w_{TZ} 、龄期 T 为变量进行试验,试验设计分组及变量取值如表 3 所示. 本次试验以淤泥质土含水量 w 为 60%, 有机质含量 w_o 为 2%, 二灰掺量 c 为 20%, 添加剂掺入比 w_{TZ} 为 10%, 龄期 T 为 7 d 作为基准试验,并令其强度为 q_0 .

表 3 实验设计参数及分组

试样编号	影响因素	因素值
A	含水量 $w/\%$	40, 50, 60, 70, 80
B	有机质含量 $w_o/\%$	0, 1, 2, 3, 4
C	二灰掺量 $c/\%$	10, 15, 20, 25, 30
D	添加剂掺入比 $w_{TZ}/\%$	0, 5, 10, 15, 20
E	龄期 T/d	3, 7, 14, 28, 60
P	基准掺量	$w = 60\%, w_o = 2\%, c = 20\%$ $w_{TZ} = 10\%, T = 7 d$

试验过程中,每个小组只在 P 组基准掺量上改变一个因素,例如, A 组试样中, 5 个试样只改变含水量的水平,其余参数与基准掺量保持一致,每个试样都做 3 组平行样以减少误差.

1.4 试验方法

本次试验测量无侧限抗压强度所用仪器是 WDW-T50 微机控制电子式万能试验机.

试验前,需测量并计算出试样平均初始截面积 A_0 . 在系统中设置好试样初始参数后,以 1 mm/min 的速度对试样施加压应力,万能试验机可自动采集并记录应力应变数据曲线. 在应力达到峰值后再进行 3%~5% 的轴向变形即可停止加压,将上加压板升起,取出试样,并拍照记录破坏后的形状. 如果试样的应力应变曲线无峰值,则试验应进行到轴向应变达到 20% 为止.

以轴向应变为横坐标,轴向应力为纵坐标,绘制出试样的应力应变曲线,取曲线上轴向应力的峰值作为所测试样的无侧限抗压强度 q_u ,若无峰值,则取

轴向应变为 20% 所对应的轴向应力为无侧限抗压强度. 测得 3 个平行试样的强度平均值作为该组固化土的无侧限抗压强度. 在同一组试验中,如果只有其中一个试样的强度与中值的偏差超过 15%,则取中值为测定值;若有两个试样的强度与中值的偏差超过 15%,则该组试验结果无效,应重新制样.

2 试验结果分析

2.1 试验结果

通过无侧限压缩试验,得到不同组别的试验结果,如表 4 所示.

表 4 无侧限压缩试验结果

组别		试验结果				
含水量/ $\%$		40	50	60	70	80
A 组	无侧限抗压强度 /kPa	287.14	238.24	177.60	116.96	56.56
	有机质含量/ $\%$	0	1	2	3	4
B 组	无侧限抗压强度 /kPa	145.75	167.2	177.60	156.12	109.85
	二灰掺量/ $\%$	10	15	20	25	30
C 组	无侧限抗压强度 /kPa	45.68	127.5	177.60	195.00	211.30
	添加剂掺入比/ $\%$	0	5	10	15	20
D 组	无侧限抗压强度 /kPa	47.86	121.00	177.60	202.13	159.70
	龄期/d	3	7	14	28	60
E 组	无侧限抗压强度 /kPa	118.40	177.60	312.35	387.02	496.20

为了能够更加直观地看出不同因素对于固化土强度的影响,将含水量、有机质含量、二灰掺量、添加剂掺入比等 4 个变量归一化, $w_\eta, w_{o\eta}, c_\eta, w_{TZ\eta}$ 分别为 4 个变量所对应的基准掺量. 定义 A_w, A_o, A_c, A_{TZ} 4 个参数,其与固化土无侧限抗压强度的关系如图 1 所示.

$$A_w = w/w_\eta, w_\eta = 62\% \quad (5)$$

$$A_o = w_o/w_{o\eta}, w_{o\eta} = 2\% \quad (6)$$

$$A_c = c/c_\eta, c_\eta = 20\% \quad (7)$$

$$A_{TZ} = w_{TZ}/w_{TZ\eta}, w_{TZ\eta} = 10\% \quad (8)$$

从图 1 中可以看出不同影响因素对于固化土强度的作用效果不同. 含水量的增加,会使固化土的强度降低. 二灰掺量的增加,会使固化土的强度提高. 而随着有机质含量、添加剂掺入比的增加,固化土的

强度呈现先提高后降低的规律。

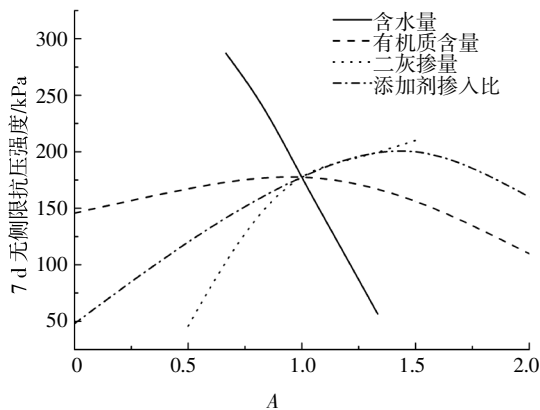


图 1 不同因素对于固化土强度的影响

Fig.1 Effect of different factors on the strength of the solidified soil

2.2 含水量的影响

由图 1 可知,随着含水量的增加,固化土的无侧限抗压强度线性递减,二者的关系如式(9)所示。

$$q_{7d} = -349.46A_w + 524.76, R^2 = 0.9984 \quad (9)$$

图 1 表明,含水量所对应的曲线斜率最大,即含水量的变化对固化土强度的影响最大。土体中水的存在一方面增大了土体的流动性,使得土骨架不能有效地承受荷载,另一方面过量的水分使得固化反应环境中各离子浓度降低,固化反应减弱,从而使得固化土强度降低^[11]。

当固化土的 7 d 强度达到 200 kPa 以上时,认为在淤泥质土的表层上可以形成具有足够强度的硬壳层,能够满足进一步的地基加固施工。此时,通过计算,保持其他因素在基准值,淤泥质土的含水量应小于 55.76%,当淤泥质土的含水量大于该值时,就需要采取其他措施来提高固化土的强度,例如增加主固化剂的掺量等等。

2.3 有机质含量的影响

土体中存在的有机质的主要成分是腐殖物质,腐殖物质是经过微生物的作用后,在土体中形成的一种特殊类型的高分子有机化合物,而腐殖酸又是腐殖物质的主要成分^[13]。本试验中所采用的就是腐殖酸作为土体中的有机质成分。有机质含量与固化土强度之间的关系如式(10)所示。

$$q_{7d} = -47.81A_o^2 + 79.04A_o + 143.98, R^2 = 0.9890 \quad (10)$$

从图 1 及式(10)可看出,当有机质含量较少时,固化土的强度随着有机质含量的增加会有小幅度的增长,当有机质含量超过 2%后,固化土的强度随着

有机质含量的增加而减少。出现这种现象的原因可能是,有机质较少时,有机质会吸收一部分游离的水分,降低了固化土中的水的含量,间接地提高了固化剂的浓度^[14]。当有机质的含量逐渐增多,有机质会吸附于固化材料及土颗粒表面,延缓水化产物生成,进而减弱水化物与土颗粒间的作用,固化土的强度就随之减小了^[15]。

2.4 二灰掺量的影响

本固化方案中,二灰作为主固化剂,其组分中的粉煤灰与生石灰在淤泥质土中水的作用下会发生火山灰反应。粉煤灰中的玻璃体 SiO_2 与 Al_2O_3 等在碱性条件下反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝性物质。随着反应的进行,土体中的自由水减少,水化产物的生成起到了粘结土粒以及作为土骨架的作用,从而使得固化土的强度提高。二灰掺量与固化土强度的关系近似成对数函数,如式(11)所示。说明随着二灰掺量的增加,固化土强度也随之增加,但是强度增长的幅度却越来越小。

$$q_{7d} = 150.89 \ln A_c - 290.24, R^2 = 0.9643 \quad (11)$$

Uddin^[16]将水泥固化土中水泥掺入量分成 3 个阶段:非反应区、反应区和惰性区,同理可以将本试验中固化土的主固化剂的掺量也分为这 3 个阶段。当二灰掺量小于 10%时,7 d 固化土强度仅为 50 kPa,可见由于含水量较高,固化剂的掺入并不能够有效地提高淤泥质土的强度,可以将 10%以下归为非反应区;当二灰掺量介于 10%~25%之间时,固化土的强度随二灰掺量增加大致呈直线增长,因此将这段分为反应区;当二灰掺量大于 25%之后,固化土的强度增长随二灰掺量的增长逐渐变得缓慢,这个阶段二灰的过量掺入使得固化反应并不能完全进行,因此将 25%以后归为惰性区。进入惰性区后,随着主固化剂的增加,进入二灰-土相互作用区,由于水分的减少,使得反应较缓^[17]。

在实际的工程应用中,应控制主固化剂的掺量在反应区内,这样才能够充分发挥主固化剂的作用,同时也兼顾了经济性。

2.5 添加剂掺入比的影响

本试验所采用的添加剂 TZ-01 是由本课题组通过试验研究得到的适用于二灰加固淤泥质土的添加剂。添加剂中成分的主要作用是为了激发二灰的反应活性。固态硅酸钠的掺入会与淤泥土中的水分发生反应,硅酸钠溶解之后为粉煤灰的火山灰反应提供了 SiO_3^{2-} ,加速了火山灰反应。同时硅酸钠溶液呈

碱性,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 CaSiO_3 与碱性更强的 NaOH ,在一定程度上也能够使得反应加速^[18].同时水玻璃还有一定的凝结和填充孔隙的作用,从而使得土体的强度和承载力提高.石膏能够起到早强作用的原因主要是两点,首先是石膏自身会水化生成二水石膏,水化产物具有一定的强度;其次由于石膏的存在,可以和火山灰反应生成的水化铝酸钙进一步反应生成钙矾石($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$)^[19].石膏自身的早凝作用以及反应催化作用,使得石膏对于二灰固化土的早期强度的提高有较好的作用.氯化钙的加入使体系中 Ca^{2+} 浓度提高,水化铝酸四钙形成可提前.氯化钙溶于水后电离出来的 Ca^{2+} 和 Cl^- 扩散能力较强,能够穿透粉煤灰颗粒表面的水化层^[20],与内部的活性硅铝酸盐反应,并可以稳定钙矾石的形成,并且能够加速粉煤灰水化生成更多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^[21].

添加剂TZ-01的掺入比对于固化土强度增长的影响从图1中可以看出,当 A_{TZ} 超过1.5,即添加剂掺入比大于15%时,固化土的强度开始下降,说明过量的添加剂对于固化土的强度增长反而起到抑制作用.

因此综合考虑强度与经济性,添加剂TZ-01的掺入比存在一个最优值,当添加剂TZ-01的掺入比小于最优值时,添加剂的掺入比与固化土的7d无侧限抗压强度之间的关系近似呈线性关系,如式(12)所示.

$$q_{7d} = 102.80A_{\text{TZ}} + 59.26, R^2 = 0.9538 \quad (12)$$

在实际应用中,应控制添加剂的掺入比,使得固化土的强度与固化材料成本能够达到最优.

2.6 龄期对固化土强度的影响

通过曲线回归拟合,得到龄期与固化土强度的关系式,如式(13)所示.固化土在60d时强度达到500kPa,而在14d时,固化土的强度就已经能够达到300kPa.从图2可以直观地看出固化土早期的强度增长较快,当龄期大于14d后,固化土强度的增长就开始变缓.固化土强度与龄期的关系主要是与主固化剂的固化反应相关,早期主固化剂在添加剂的激发下,固化反应较为显著,使得固化土的强度得以快速地提高,随着龄期的增长,固化剂逐渐反应消耗,反应原材料的减少使得固化反应减慢,从而固化土的强度增长减弱.

$$q = 130.31 \ln T - 43.89, R^2 = 0.9860 \quad (13)$$

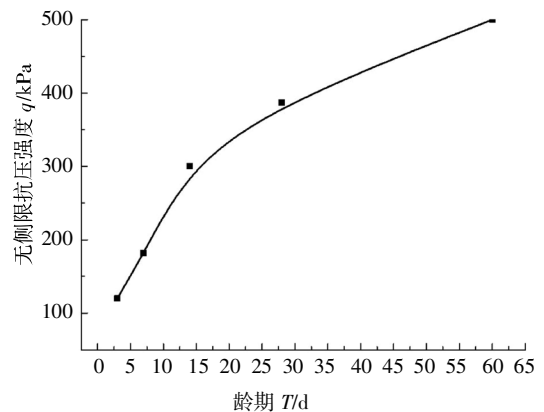


图2 固化土强度随龄期变化曲线

Fig.2 Solidified soil strength curve with age

3 固化土强度预测模型

3.1 应力应变关系

为了更好地研究固化土在单轴受压条件下的应力应变关系,对E组试验所得的结果进行分析处理,得到不同龄期下固化土应力应变关系曲线如图3所示.从图3中可以看出,固化土在无侧限压缩条件下,应力应变曲线可以分为4个阶段.

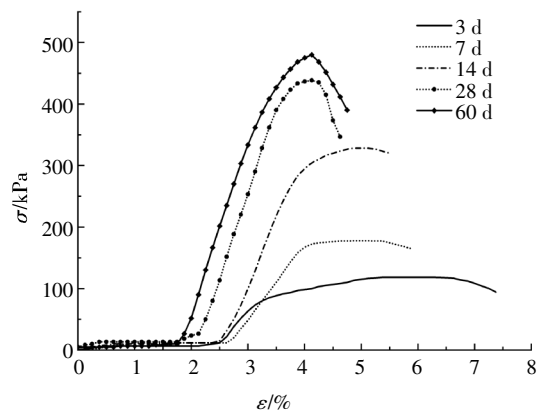


图3 不同龄期下固化土应力应变关系曲线

Fig.3 Stress-strain curve of solidified soil under different ages

第1个阶段:孔隙压缩阶段.在固化土受压初期,随着应变的增加,应力保持在一个较低的值基本不变,这是由于固化土的孔隙较多,只有固化土中的大孔隙压缩完毕,固化土中的土骨架才会起到作用,固化土的应力才会开始增加^[17].在孔隙压缩阶段,无论龄期是多少,应力值都保持在10kPa左右.不同龄期下,孔隙压缩阶段的应变范围在0~2.5%,随着龄期的增加最大应变值会减小,当60d龄期时,孔隙压缩阶段的最大应变为1.8%左右.

第2个阶段:均匀受压阶段.在经过孔隙压缩阶

段后,固化土的应力应变近似呈直线关系,在此阶段,固化土中土颗粒骨架均匀受压,颗粒骨架均未发生破坏,变形都保持在弹性范围内.定义直线阶段到曲线阶段的应力临界值为 σ_c , 临界应变值为 ε_c .从图中可以看出, σ_c 随着龄期的增长不断变大,而除了 3 d 龄期,其他龄期下差别不大.

第 3 个阶段:强度屈服阶段.在经过均匀受压阶段后,应力应变曲线偏离直线,进入非线性上升段.固化土中的颗粒以及形成的土骨架发生破坏,颗粒间的孔隙不断被压密,此时土体的压密作用对强度的增大较结构破损对强度的减小占优势,但是土颗粒及骨架的变形不再可恢复,表现出塑性变形^[17].参考在金属材料拉伸或压缩过程中存在的屈服阶段,将该阶段命名为强度屈服阶段.在该阶段的主要特征是应力值变化很小,但是应变值却持续增加,应力的最大值 σ_m 也出现在该阶段.从图 3 中可以看出,随着龄期的增长,屈服阶段的应变增长会随之减少,当龄期为 3 d 时,屈服阶段从应变值为 3.2%一直持续到 6.7%,当龄期为 60 d 时,屈服阶段变得不明显.

第 4 个阶段:应力衰减阶段.当应力达到最大值之后,通过一定的屈服阶段,应力值开始下降.此时固化土试样的裂缝不断延伸、扩展,沿着最薄弱方向形成宏观裂缝,并逐渐贯通全截面,最后整个试样发生剪切破坏,如图 4 所示.随着加载的继续,固化土产生较大的塑性变形,应力急剧下降,直到整个试样完全破坏.



图 4 固化土破坏形式
Fig.4 Solidified soil destruction

3.2 等效水灰比

经过上述分析,我们可以得到,在影响固化土强度的因素中,淤泥质土的含水量和主固化剂的掺量是对固化土强度影响最为显著的两个因素,因此参

考水泥反应中的水灰比,在固化土研究中也引入水灰比.

根据水灰比的定义可以得到水灰比 β_0 :

$$\beta_0 = \frac{m_w}{m_c} \quad (14)$$

考虑到淤泥质土中含有的土粒也会与土体中的水分发生作用,因此在计算水灰比中减掉塑限所对应的水的质量,可以得到等效水灰比 β_1 :

$$\beta_1 = \frac{m_w - w_p m_s}{m_c} = \frac{m_s \cdot w - w_p m_s}{(m_s + m_w)c} \quad (15)$$

结合 A 组及 C 组试验结果,通过计算得到 β_1 与 7 d 无侧限抗压强度 q_{7d} 之间的关系,如图 5 所示.通过曲线拟合,得到式(16),说明 β_1 并不能直观地表示出 7 d 无侧限抗压强度 q_{7d} .

$$q_{7d} = -146.52\beta_1 + 339.14, R^2 = 0.8498 \quad (16)$$

综合考虑固化土中反应的时候土粒中的部分成分也会参与反应,因此引入修正系数 α ,表征的是在固化反应中土粒成分的参与程度, α 的取值与土粒的组成成分以及土粒与固化材料之间的反应相关.因此,可以得到修正的等效水灰比 β_2, β_2 可以由式(17)计算得到.

$$\beta_2 = \frac{m_w - w_p m_s}{m_c + \alpha m_s} = \frac{m_s \cdot w - w_p m_s}{(m_s + m_w)c + \alpha m_s} = \frac{w - w_p}{(1+w)c + \alpha} \quad (17)$$

通过曲线拟合,得到不同 β 与固化土 7 d 时无侧限抗压强度之间的关系,如图 5 所示.

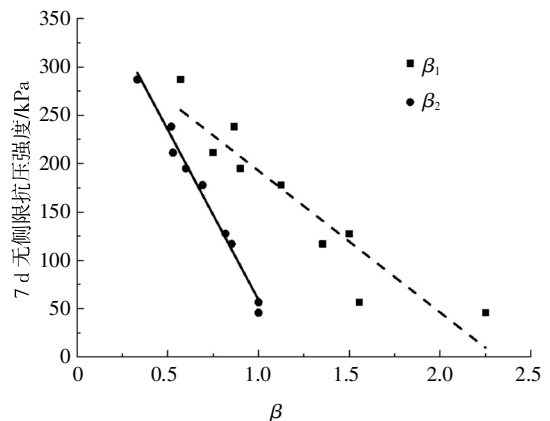


图 5 不同 β 与 7 d 无侧限抗压强度的关系
Fig.5 Relationship between different β and 7 days unconfined compressive strength

通过计算得到,当 α 取 0.2 的时候,固化土 7 d 时无侧限抗压强度与 β_2 的拟合曲线成线性关系,且 $R^2 = 0.9832$,说明该曲线拟合得很好,即可以用 β_2 来预测计算固化土的强度,如式(18)所示.

$$q_{7d} = -352.41\beta_2 + 411.36, R^2 = 0.9832 \quad (18)$$

3.3 综合强度预测模型

式(18)成立的条件为淤泥质土中有机质含量为2%, 添加剂掺入比为10%, 龄期为7 d. 考虑到有机质含量与添加剂掺入比对于固化土强度的影响, 需要对式(18)进行完善, 以考虑有机质含量和添加剂掺量对于固化土强度的影响. 令 a_0 、 a_{TZ} 分别表示有机质和添加剂对于固化土强度的影响系数. q_0 为7 d 基准强度, 由表4可知, $q_0 = 177.60$ kPa.

$$a_0 = \frac{q_{7d} - q_0}{q_0} = -0.27A_o^2 + 0.45A_o - 0.19 \quad (19)$$

$$a_{TZ} = \frac{q_{7d} - q_0}{q_0} = 0.58A_{TZ} - 0.67 \quad (20)$$

将式(19)(20)代入式(18)可以得到:

$$q_{7d} = (-352.41\beta_2 + 411.36)(1 + a_0 + a_{TZ}) \quad (21)$$

考虑龄期对于固化土强度的影响, 根据式(13)可以得到不同龄期下固化土强度与7 d 基准强度 q_0 的比值.

$$\frac{q}{q_0} = 0.73\ln T - 0.25 \quad (22)$$

根据式(21)(22)得到:

$$q = (0.73\ln T - 0.25)(1 + a_0 + a_{TZ})(-352.41\beta_2 + 411.36) \quad (23)$$

将 a_0 、 a_{TZ} 、 β_2 等参数代入后, 得到综合考虑龄期与其他影响因素的固化土强度模型如式(24)所示:

$$q = \left(\frac{(257.25\ln T - 88.1)(w_p - w)}{(1+w)^c + 0.2} \right) + 300.3\ln T - 102.9(0.14 - 675w_0^2 + 22.5w_0 + 5.8w_{TZ}) \quad (24)$$

该模型在已知淤泥质土的含水量、塑限以及有机质含量的情况下, 可以计算出不同龄期、二灰掺量、添加剂掺入比下固化土无侧限抗压强度的变化情况.

3.4 强度模型应用分析

在工程实际应用中, 现场取样并通过室内土工试验得到淤泥质土的基本参数, 如含水量、液塑限、有机质含量等, 之后根据式(24)可以计算出添加不同比例的主固化剂以及添加剂下不同龄期的固化土强度, 并通过与固化材料的经济方程进行联立, 即可计算得到最优的固化方案.

为了验证本强度模型的准确性, 通过14 d 以及28 d 龄期下不同含水量与主固化剂掺量的固化土进行试验, 通过实测得到无侧限抗压强度值. 同时, 将对应的试验参数代入式(24)计算出预测值.

将预测值与实测值进行比较, 如图6所示, 可见

预测的结果与实测结果较为接近, 从而验证了本强度模型具有较好的适用性.

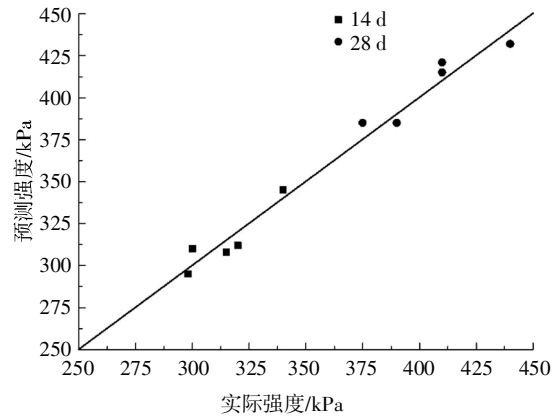


图6 固化土实际强度与预测强度的对比

Fig.6 Comparison of actual strength and predicted strength of solidified soil

4 结论

1) 固化土的无侧限抗压强度与淤泥质土的含水量、有机质含量、主固化剂的掺量、添加剂的掺入比以及龄期都有一定的关系. 其中含水量的增加会导致固化土的强度降低; 龄期的增加可以使固化土强度不断提高, 但提高的速度逐渐减缓; 随着有机质含量、添加剂掺入比的增加, 固化土的强度先提高后降低, 存在最佳掺量; 固化土的强度会随着主固化剂的掺量增加而提高, 但该掺量存在惰性区, 超过25%以后反应速度增加不明显.

2) 固化土的单轴压缩曲线可以分为4个阶段, 在不同龄期下都可以很好地适用. 通过引入修正的等效水灰比, 建立与固化土强度的关系, 并在此基础上建立了综合考虑淤泥质土的含水量、有机质含量、主固化剂掺量、添加剂掺入比以及龄期等因素的强度预测模型, 并通过试验验证了该模型有较好的适用性.

参考文献

- [1] 杨福麟, 周治江, 刘永林. 浅层加固超软土技术的应用与研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(2): 13-17.
YANG F L, ZHOU Z J, LIU Y L. Application and research of improvement technology of shallow ultra-soft soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(2): 13-17. (In Chinese)
- [2] 闫澍旺, 郭炳川, 孙立强, 等. 硬壳层在吹填土真空预压中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1497-1503.
YAN S W, GUO B C, SUN L Q, et al. Application of crust layer to

- vacuum preloading dredge fill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1497—1503. (In Chinese)
- [3] 邵杰. 上覆固土层淤泥地基承载力分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(S1): 828—832.
SHAO J. Analysis on the bearing capacity of the firming layer overlying silt foundation[J]. Building Structure, 2016, 46(S1): 828—832. (In Chinese)
- [4] BROOKS R, UDOEYO F F, TAKKALAPPELLI K V. Geotechnical properties of problem soils stabilized with fly ash and limestone dust in Philadelphia[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 23(5): 711—716.
- [5] TASTAN E O, EDIL T B, BENSON C H, *et al.* Stabilization of organic soils with fly ash [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(9): 819—833.
- [6] JAMES J, PANDIAN P K. Soil stabilization as an avenue for reuse of solid wastes: a review[J]. Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture, 2015, 58(1): 50—76.
- [7] 杨爱武, 王韬, 许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 996—1004.
YANG A W, WANG T, XU Z L. Experimental study on lime and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 996—1004. (In Chinese)
- [8] 吴旻炯. 滩涂淤泥固化及其影响因素的试验研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学建筑工程学院, 2015: 12—14.
WU M J. Experimental study on the solidification and influence factors of beach clay [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, 2015: 12—14. (In Chinese)
- [9] 杨青, 罗小花, 邱欣, 等. 离子土壤固化剂固化土的微观结构特征及固化机理研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 33—40.
YANG Q, LUO X H, QIU X, *et al.* Analysis of microstructure characteristics and stabilization mechanism of ionic soil stabilizer treated clay [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 33—40. (In Chinese)
- [10] 栾晓风, 潘志华, 王冬冬. 粉煤灰水泥体系中粉煤灰活性的化学激发[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(4): 757—761.
LUAN X F, PAN Z H, WANG D D. Study on the chemical activation of fly ash in fly ash blended portland cement system [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(4): 757—761. (In Chinese)
- [11] 畅帅. 杭州软土固化优化研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2014: 37—50.
CHANG S. Optimization research for soft soil stabilization in Hangzhou[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2014: 37—50. (In Chinese)
- [12] 徐日庆, 郭印, 刘增永. 人工制备有机质固化土力学特性试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 109—113.
XU R Q, GUO Y, LIU Z Y. Experimental study on mechanical properties of stabilized artificial organic soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(1): 109—113. (In Chinese)
- [13] 曾卫东, 唐雪云, 何泌洲. 深层搅拌法在处理泥炭质土中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(2): 67—69.
ZENG W D, TANG X Y, HE M Z. Application of deep mixing method in treating peat soil [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(2): 67—69. (In Chinese)
- [14] 李雪刚, 徐日庆, 王兴陈, 等. 杭州地区海、湖相软土的工程特性评价[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(8): 1346—1352.
LI X G, XU R Q, WANG X C, *et al.* Assessment of engineering properties for marine and lacustrine soft soil in Hangzhou[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(8): 1346—1352. (In Chinese)
- [15] 李雪刚, 徐日庆, 畅帅, 等. 响应面法优化有机质软土复合固化剂配方[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(5): 843—849.
LI X G, XU R Q, CHANG S, *et al.* Application of response surface methodology on optimizing mixture ratio of composite curing agent used to improve organic matter soil stabilization [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(5): 843—849. (In Chinese)
- [16] UDDIN K. Engineering behavior of cement-treated Bangkok soft clay[J]. Geotechnical Engineering, 1996, 28: 89—119.
- [17] HORPIBULSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. Géotechnique, 2003, 53(4): 439—444.
- [18] XU G, SHI X. Exploratory investigation into a chemically activated fly ash binder for mortars [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(11): 06017018.
- [19] KISHAR E A, AHMED D A, MOHAMMED M R, *et al.* Effect of calcium chloride on the hydration characteristics of ground clay bricks cement pastes [J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2013, 2(1): 20—30.
- [20] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2007: 23—40.
GUO Y. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2007: 23—40. (In Chinese)
- [21] 徐日庆, 李俊虎, 蔡承晟, 等. 用固化剂 GX08 加固杭州海湖相软土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1528—1533.
XU R Q, LI J H, CAI C S, *et al.* Study of strength characteristics of stabilized soil by using stabilizing agent GX08 treating marine and lacustrine soft soil in Hangzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1528—1533. (In Chinese)