

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.019

掺粉煤灰和二灰上海软土的力学特性*

牛 恒, 孙德安, 阮坤林

(上海大学土木工程系, 上海 200444)

摘要: 粉煤灰和二灰(粉煤灰与石灰的混合料)均为改良软土地基的添加材料。以掺粉煤灰和二灰的上海软土为研究对象,进行次固结试验和直剪试验,研究了掺入率和养护龄期对掺粉煤灰和二灰上海软土的次固结特性和强度特性的影响。次固结试验结果表明,掺粉煤灰和二灰上海软土的次固结系数随着粉煤灰和二灰掺入量的增加而大幅减小,且在相同掺入率条件下,二灰的掺入对其次固结系数影响较大。直剪试验结果表明,粉煤灰和二灰的掺入均能提高上海软土的抗剪强度,与纯上海软土相比,其抗剪强度随着养护龄期的增长而显著增大,最后均会在某一养护龄期趋于稳定。掺粉煤灰的上海软土抗剪强度随粉煤灰掺入率基本成线性增长,最佳养护龄期建议为56 d,二灰的掺入率在10%即可有效提高上海软土的抗剪强度,其最佳养护龄期建议为28 d。上述试验结论可为科学和经济的处理软土地基提供参考。

关键词: 粉煤灰; 二灰; 养护龄期; 抗剪强度; 次固结系数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0992-09

Mechanical Properties of Shanghai Soft Clay Mixed with Fly-ash and Lime Fly-ash

NIU Heng, SUN De'an, RUAN Kunlin

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Fly-ash and lime fly-ash are commonly used for improving soft soil behavior. To investigate the improvement effects of the content and curing time of fly-ash and lime fly-ash on the mechanical behavior of Shanghai soft clay, secondary consolidation tests and direct shear tests were conducted. It was found that the coefficient of secondary consolidation of disturbed soft clay decreases obviously with increasing fly-ash or lime fly-ash content. Under the same condition, the content of lime fly-ash has a greater influence on the secondary consolidation coefficient. The mixture of fly-ash or lime fly-ash in Shanghai clay can improve the shear strength of the soft clay. With the prolonging of the curing time, the shear strength of the soft clay with different contents of fly-ash or lime fly-ash increases first sharply and then smoothly, and finally it tends to be stable at a certain curing time. The shear strength of Shanghai soft soil mixed with fly ash increases linearly with the content and the best curing age is 56 days. Adding 10% of lime and fly-ash can effectively improve the shear strength, and the best curing age is 28 days. These conclusions can provide a useful reference for soft soil improvement.

Keywords: fly-ash; lime fly-ash; curing time; shear strength; coefficient of secondary consolidation

* 收稿日期:2018-10-20;修回日期:2018-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(11672172)资助

第一作者:牛 恒(1989-),男,硕士。主要从事软土地基方面的研究。Email:15065196211@163.com

通讯作者:孙德安(1962-),男,教授,博导,博士。主要从事土力学方面的研究。Email:sundean@shu.edu.cn

引言

我国东南沿海地区分布着大量的淤泥质黏土,如典型的上海软土。此类软土具有含水率高、孔隙比大、结构性强、流变变形显著等特点,故天然软土层不宜直接作为房屋建筑的地基以及各级公路和铁路的路基^[1-4],为满足地基和路基强度和变形的要求,必须对这类天然软土层进行加固处理。因此研究固化剂及其掺入量对软土地基力学和变形特性的影响具有很大的工程应用价值^[5-6]。如何既科学又经济的解决这个问题,国内外已有不少学者做了大量工作,如徐红等^[7]对不同掺入率粉煤灰加固后的淤泥质黏土进行了力学和变形特性试验研究,指出粉煤灰的掺入能够改善淤泥质黏土的工程性质;林彤等^[8]通过室内试验测定了利用粉煤灰与生石灰固化处理杭州软土在不同龄期条件下的无侧限抗压强度;王梅等^[9]通过对比和分析压汞试验和扫描电镜的结果,从微观层面上解释了生石灰与粉煤灰桩加固软土的机理;A.Senol等^[10]通过一系列现场试验研究了软土路基掺粉煤灰后的工程性质,指出掺粉煤灰后可显著提高软土地基的无侧限抗压强度和耐久性;M.A.Ozdemir等^[11]研究了龄期及粉煤灰掺量对软土力学性质的影响,得到加州承载比随着掺入量和龄期的增加而增大。

上述研究多基于粉煤灰等固化剂的掺入率或者养护龄期对其力学和变形特性做了对比分析,没有给出最优掺入率和最佳养护龄期。因此有必要通过试验给出粉煤灰和二灰处理软土地基的最优掺入率和最佳养护龄期。本文以典型的上海软土为研究对象,利用直剪仪和固结仪研究了粉煤灰和二灰的不同掺入率以及养护龄期对混合后的上海软土力学特性和流变特性的影响,最后给出粉煤灰和二灰处理上海软土地基的最优掺入率和最佳养护龄期,为科学和经济的处理上海软土地基提供基础性的试验数据。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验用土为典型的淤泥质黏土,取自上海浦东地区某建筑基坑,其深度约为8~9 m,上海软土的基本物理指标见表1。处理软土选用的两种固化剂为粉煤灰(FA)和二灰(FC),粉煤灰取自上海浦东

外高桥发电厂,主要成分是SiO₂、Al₂O₃、FeO、Fe₂O₃、CaO等,其基本物理指标见表2;二灰是粉煤灰和生石灰按照质量比为2:1混合而成,其中生石灰属于钙质生石灰,比重为3.31,氧化钙含量大于85%。

表1 上海软土的基本物理指标

指标	初始含水率 $w/\%$	比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p
取值	38~45	2.71	42.7	22.5	20.2

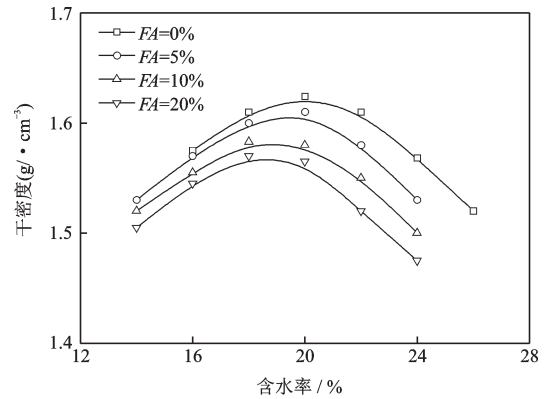
表2 粉煤灰的基本物理指标

指标	比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p
取值	2.16	44.3	39.6	4.7

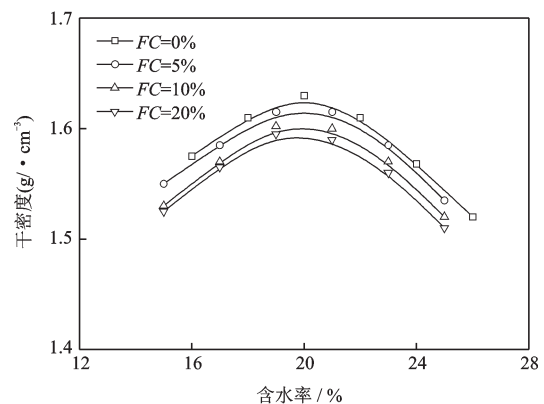
1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

图1为上海软土掺粉煤灰和二灰的击实曲线,



(a) 掺粉煤灰试样



(b) 掺二灰试样

图1 混合土试样的击实曲线

Fig.1 Compaction curve of mixtures

由图可知,各掺入率的粉煤灰和二灰混合土样最优含水率大致相同,均在20%左右。由于实际工程中常采用压实度作为地基和路基的压实指标,因此试验所用的试样采用压实度0.98和含水率20%控制其初始状态。

首先把土烘干、碾碎、磨细、过筛,再掺入不同比例的粉煤灰和二灰。将配置好目标含水率的土样放入密闭保鲜袋静置24 h,以保证土样内部水分均匀分布,接着取直剪试验环刀(直径为5 cm、高度为2 cm)和流变试验环刀(直径为6.18 cm、高度为2 cm)放入制样模具中,按照计算的干密度称取定量的土样装入其中,用千斤顶压实成样。最后,将制好的试样放入密闭的乐扣盒中并置于恒温室内进行养护。

1.2.2 直剪试验

直剪试验试样的养护龄期为1、7、14、28、56和112 d。将养护后的试样在竖向压力100、200、400 kPa条件下进行固结快剪试验,等固结稳定(即每小时试样竖向变形不超过0.01 mm)后以0.8 mm/min的剪切速率进行直剪试验。试验所用的仪器为美国Humboldt公司生产HM-2560A.3F型直剪仪。直剪试验方案见表3。

表3 试验方案
Table 3 Test program

掺入率/%	直剪试验用试样龄期/d							流变试验用试样龄期/d
	1	7	14	28	56	112		
FA	5	1	7	14	28	56	112	28
	10	1	7	14	28	56	112	28
	20	1	7	14	28	56	112	28
FC	5	1	7	14	28	56	112	28
	10	1	7	14	28	56	112	28
	20	1	7	14	28	56	112	28

1.2.3 流变试验

流变试验的养护龄期为28 d,将制备好的试样连同环刀,装入固结容器中进行流变试验,流变试验竖向压力分别为200、400、800、1 200 kPa,在每级荷载作用下分别按1、4、6、9、16 min……方式记录竖向位移,此期间一直保持荷载不变,并根据一定的时间间隔读取竖向位移值。流变试验方案见表3。

2 试验结果与分析

2.1 粉煤灰和二灰对上海软土抗剪强度的影响

2.1.1 粉煤灰对上海软土抗剪强度的影响

图2为粉煤灰掺入率5%、10%、20%上海软土压实样在不同养护龄期时的抗剪强度。由图可知,

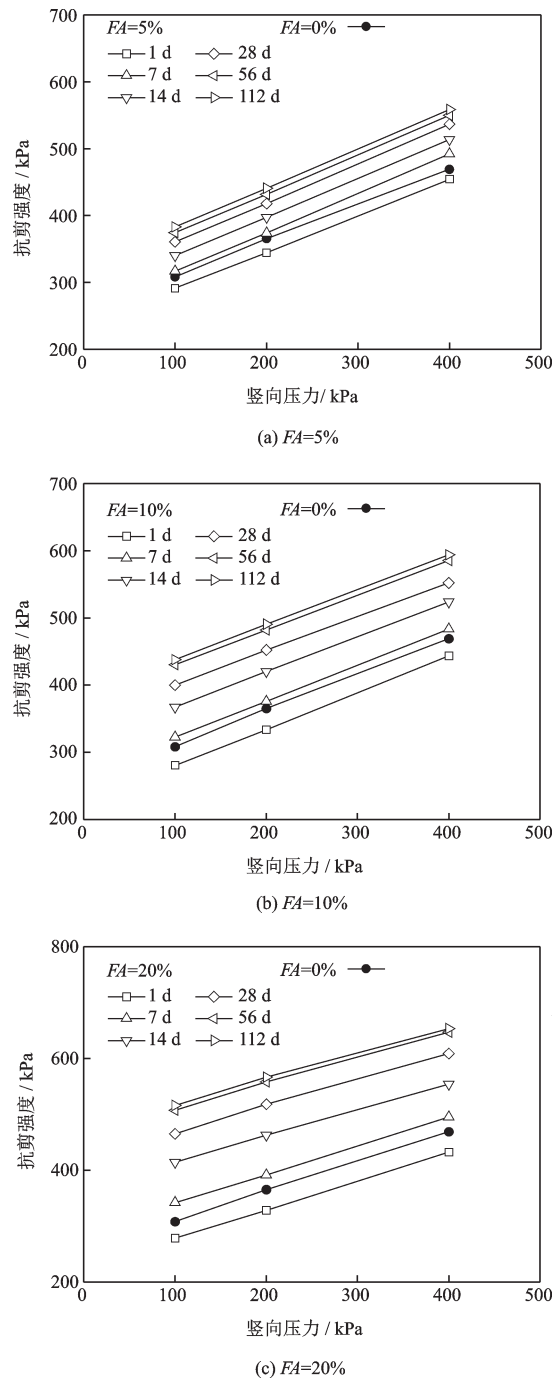


图2 不同粉煤灰掺比试样各龄期的抗剪强度

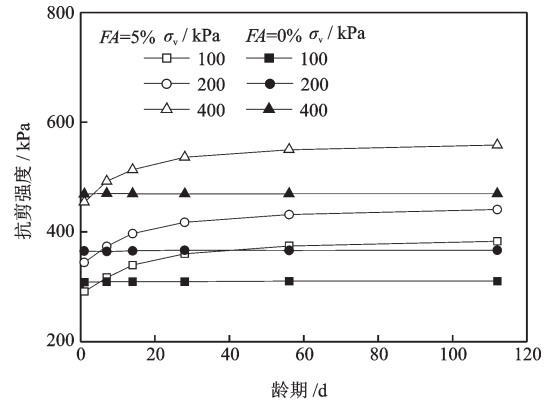
Fig.2 Shear strength at different curing times with different mixing ratio of FA

粉煤灰掺入后会降低混合土试样的早期强度,这是由于粉煤灰本身是一种细颗粒材料,养护龄期较短时,只有少量的粉煤灰参与反应,未参与反应的粉煤灰只是充当填充物,跟本身具有黏性的上海软土相比,黏结力更小,即未参与反应的粉煤灰会降低混合土试样的抗剪强度,但是随着养护龄期的增加,更多的粉煤灰会参与反应,其抗剪强度会大幅增加。在相同竖向压力下,混合土试样的强度随着掺入率的增加而增大。此外,不同掺入率和不同养护龄期压实样的内摩擦角基本相同,黏聚力随着养护龄期的延长而增大,具体指标见表4。

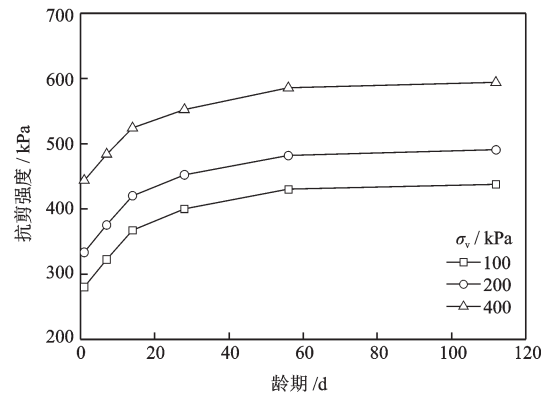
表4 粉煤灰掺入后上海软土的抗剪强度指标
Table 4 Shear strength indexes of Shanghai soft soil mixed with fly ash

掺入率/%	养护龄期/d	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
0	1	28.1	256.2
	1	28.6	236.1
	7	30.4	257.3
5	14	30.1	281.6
	28	30.4	301.2
	56	30.4	315.2
	112	30.4	324.0
10	1	28.6	225.6
	7	28.2	268.9
	14	27.6	315.5
	28	26.8	350.3
	56	27.4	378.4
20	112	27.5	386.1
	1	27.2	226.4
	7	27.1	290.4
	14	26.9	368.7
	28	26.5	419.6
	56	26.8	462.7
	112	26.5	472.6

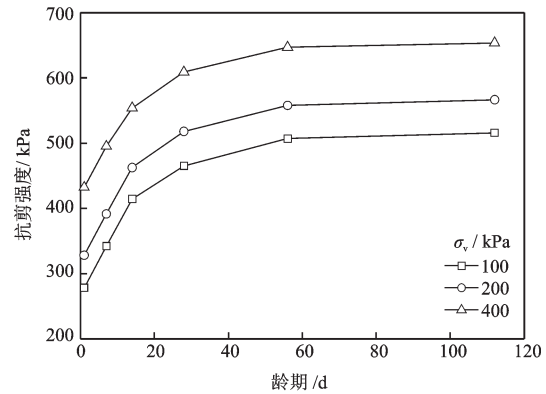
图3表示在相同竖向压力条件下粉煤灰掺入率5%、10%、20%的软土压实样抗剪强度随养护龄期的变化。由图可知,软土的抗剪强度随龄期增加几乎不变化,可以龄期为1d时的强度为基准。在相同掺入率和相同竖向压力条件下,试样在养护的前期,其剪切强度随着龄期的延长而明显增大;随着龄期的进一步增加,其抗剪强度的增量明显变小。混合土试样在龄期约大于56d左右,其抗剪强度基



(a) FA=5%



(b) FA=10%



(c) FA=20%

图3 不同粉煤灰掺比试样抗剪强度随龄期的变化

Fig.3 Change of shear strength with curing time for different FA content

本趋于稳定。因此,对于粉煤灰处理上海软土的养护龄期建议为56d左右。混合土试样在养护龄期56d时其抗剪强度与粉煤灰掺入率的关系如图4所示。由图可知,试样的抗剪强度几乎随着粉煤灰掺入率成线性增长。抗剪强度与掺入率的线性表达式可以表示为

$$\tau_f = 960.82FA + 0.5083\sigma_v + 271.67 \quad (1)$$

式中, τ_f 为抗剪强度,kPa;FA为粉煤灰掺入率; σ_v 为

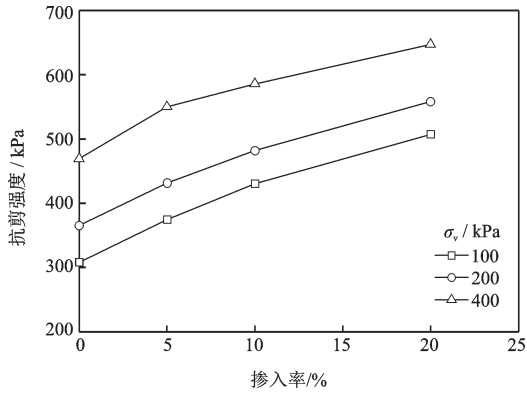


图4 龄期56 d抗剪强度随掺入率的变化

Fig.4 Change of shear strength with FA at the 56th day

竖向压力, kPa。

对于工程中粉煤灰掺入率的选用可以根据现实工程中抗剪强度的需要利用式(1)计算获取。

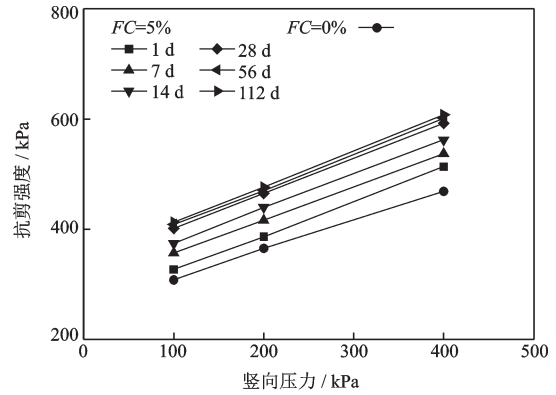
2.1.2 二灰对上海软土抗剪强度的影响

图5分别为二灰掺入率5%、10%、20%和不同养护龄期条件下混合土压实样的抗剪强度。试验结果表明,掺入二灰后试样各养护龄期的抗剪强度均高于上海软土,这是由于二灰中的生石灰与水反应速度较快,其中的主要成分CaO能够减少土颗粒之间的含水量并产生钙质胶结作用,使得掺入二灰后的混合土样早期强度较高,且随着养护龄期的延长,其抗剪强度提高显著。

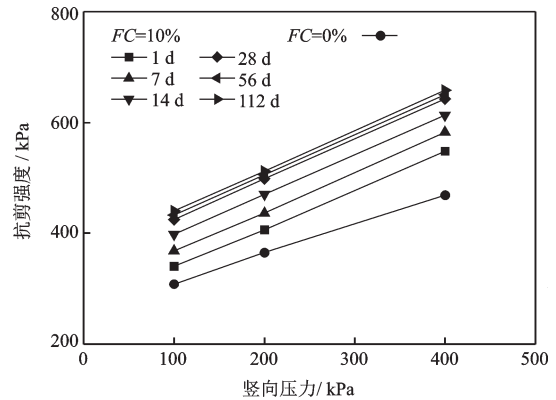
表5为掺入二灰后混合土试样的抗剪强度指标。由表可知,同一掺入率条件下,试样的内摩擦角随养护龄期的延长变化不大,黏聚力则显著增加。相同养护龄期和不同掺入率条件下,其内摩擦角随二灰掺入率的增加而增大。

在相同竖向压力条件下二灰掺入的混合土试样抗剪强度随龄期的变化如图6所示。由图可知,在同一掺入率和相同竖向压力条件下,二灰掺入试样在养护的前期(小于14 d),其抗剪强度随养护龄期的延长而显著增大,随着龄期的继续增加,其抗剪强度增量明显减小,养护龄期在28 d以后,其抗剪强度基本不随龄期的延长而变化。因此,对于二灰加固上海软土的养护龄期建议在28 d左右。

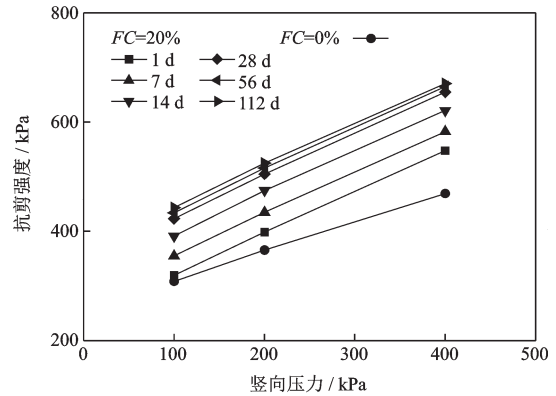
图7为养护龄期28 d时与二灰掺入率与其抗剪强度的关系。由图可知,二灰的掺入率在10%以前,抗剪强度随二灰掺入率的提高显著增大,在掺入率10~20%时变化不明显。这是由于当二灰掺入较多时,其中的生石灰在早期消耗了大量的水分,导致粉煤灰后期的作用不明显。因此二灰的掺



(a) FC=5%



(b) FC=10%



(c) FC=20%

图5 不同二灰掺比试样各龄期的抗剪强度

Fig.5 Shear strength at different curing times after mixing with FC

量并不是越多越好,掺入率在10%左右范围内即可有效地提高上海软土的抗剪强度。

2.1.3 粉煤灰和二灰对上海软土强度影响的比较

图8和9分别为在龄期56 d时改良土样的内摩擦角和黏聚力随粉煤灰和二灰掺入率的变化。由图8可知,掺入粉煤灰后内摩擦角和纯上海软土的大致相同,掺入二灰后的上海软土内摩擦角随掺入量的增加而增大。相同掺入率条件下,二灰改良土

表5 二灰掺入后上海软土的抗剪强度指标

Table 5 Shear strength indexes of Shanghai soft soil mixed with lime fly ash

掺入率/%	养护龄期/d	内摩擦角 φ /(°)	黏聚力 c /kPa
0	1	28.1	256.2
	1	31.9	263.6
	7	31.0	296.7
	14	32.1	312.6
	28	32.4	338.0
	56	32.8	342.9
5	112	33.0	347.3
	1	34.8	269.4
	7	35.6	295.6
10	14	35.6	326.5
	28	36.0	352.8
	56	35.9	360.8
	112	35.5	367.2
	1	37.2	244.8
20	7	37.1	281.0
	14	37.3	317.7
	28	37.6	347.9
	56	37.4	359.4
	112	37.1	369.9

样的内摩擦角较大,从这个角度分析,二灰改良效果较好。

根据图9所示的结果分析,上海软土的黏聚力随粉煤灰掺入量的增加大致呈线性增大。二灰掺入量的增加对上海软土黏聚力的影响不明显,但小掺入率(5%)即可有效提高其黏聚力。单从黏聚力这个角度分析,小掺入率(5%)时,二灰对上海软土的改良效果好,掺入率在10%以上时,粉煤灰的改良效果更好。

因此,对于实际工程中粉煤灰和二灰的选用给出如下建议,掺入率在10%以内,优先选用二灰,掺入量大于10%的情况时,优先选用粉煤灰。

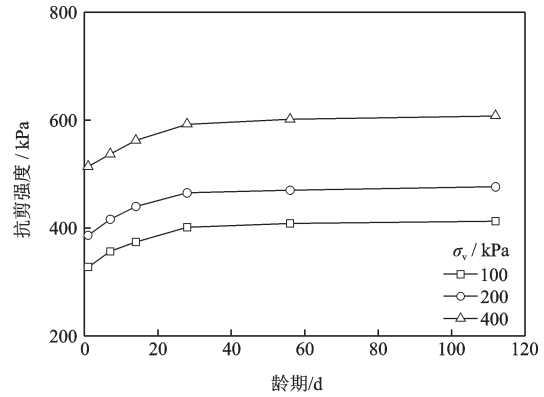
2.2 掺粉煤灰和二灰上海软土的流变特性

2.2.1 竖向压力对重塑改良软土流变特性的影响

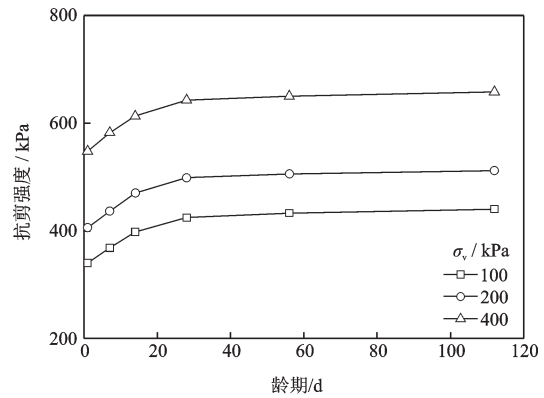
本文根据各级荷载下的流变曲线采用下式计算次固结系数:

$$C_a = \frac{\Delta e}{\log t_2/t_1} \quad (2)$$

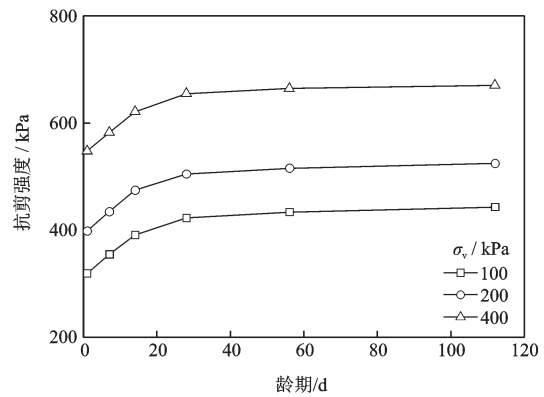
式中, C_a 次固结系数; Δe 次固结压缩阶段的孔隙比变化; t_1 主固结完成时刻; t_2 压缩量计算时刻。



(a) FC=5%



(b) FC=10%



(c) FC=20%

图6 不同二灰掺比试样抗剪强度随龄期的变化

Fig.6 Change of shear strength with curing time after mixing with FC

根据式(2)计算的结果,将龄期为28 d时掺粉煤灰和二灰上海软土的次固结系数与竖向压力的关系分别整理成图10和11,对于次固结系数与固结压力之间的关系,孙德安等^[2]发现重塑上海软土的次固结系数与压力基本无关,考虑到试验过程中的误差可认为是常数。由图可知,掺入粉煤灰和二灰后的上海软土在不同竖向压力下其次固结系数变化很小,同样可认为掺粉煤灰和二灰后的重塑改良

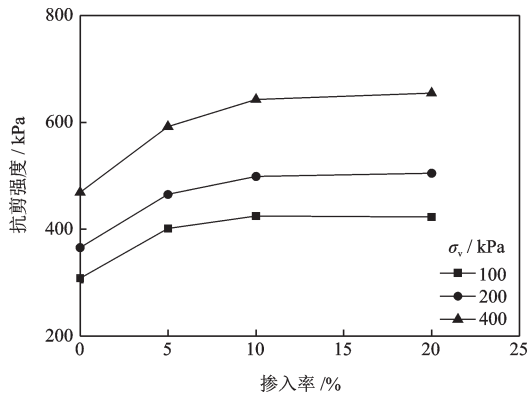


图7 龄期28 d时试样抗剪强度随掺入率的变化
Fig.7 Change of shear strength with FC at the 28th day

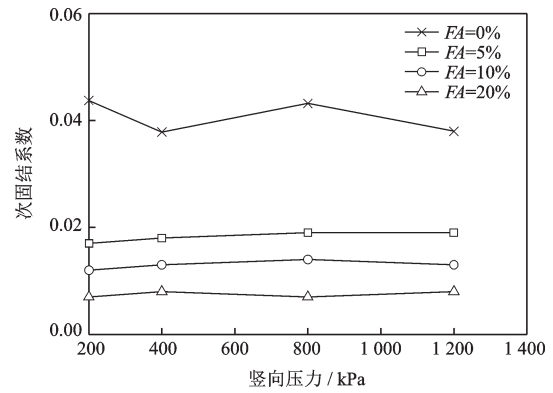


图10 龄期28 d时掺FA试样的C_s与p关系
Fig.10 Relationship of C_s and p at the 28th day after mixing with FA

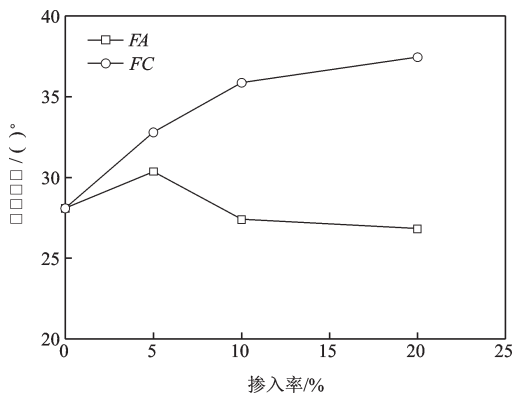


图8 内摩擦角随粉煤灰和二灰掺入率的变化
Fig.8 Change of internal friction angle with FA and FC

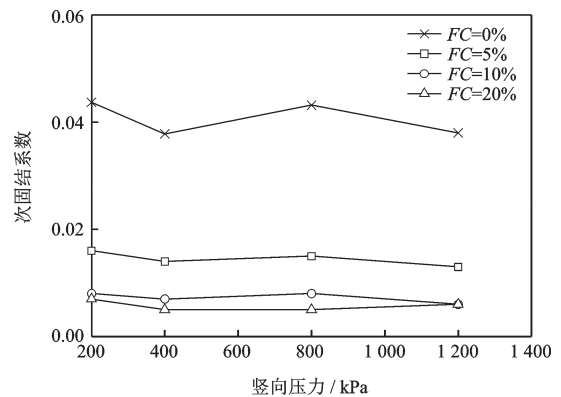


图11 龄期28 d时掺FC试样C_s与p关系
Fig.11 Relationship of C_s and p at the 28th day after mixing with FC

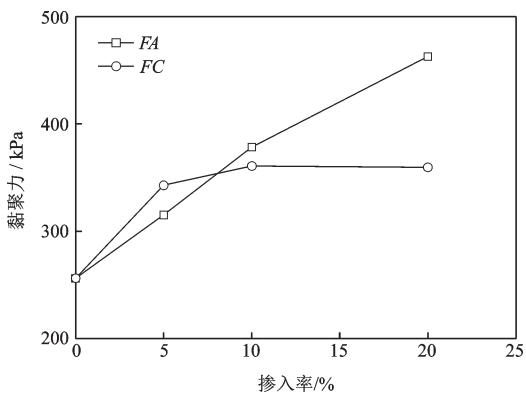


图9 试样黏聚力随粉煤灰和二灰掺入率的变化
Fig.9 Change of cohesion with FA and FC

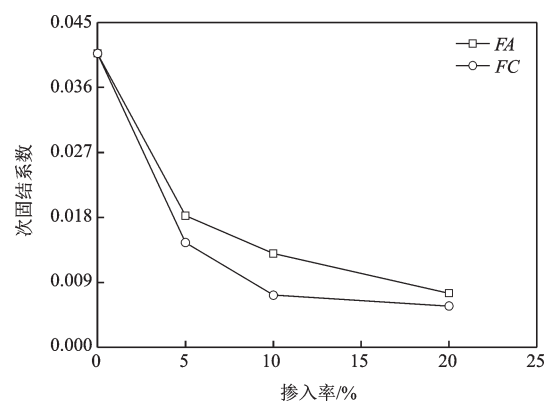


图12 龄期28 d时次固结系数比较
Fig.12 Comparison of coefficient of secondary consolidations at the 28th days

土在掺入率一定的情况下其次固结系数为常数。

2.2.2 粉煤灰和二灰掺入率对软土流变的影响

考虑到重塑土样的次固结系数与竖向压力无关,取试样在同一掺入率条件下各级压力次固结系数的平均值作为该掺量时试样的次固结系数,次固结系数随粉煤灰和二灰掺入率的变化曲线如图12所示。

结果表明,掺粉煤灰后试样的次固结系数随着粉煤灰掺入率的增加大幅减小,由图可知,在5%~20%粉煤灰掺入率范围内混合样的次固结系数随掺入率基本上呈线性减小,因此,次固结系数与粉煤灰掺入率的线性表达式可表示为:

$$C_a = -0.07FA + 0.021 \quad (3)$$

式中, C_a 为次固结系数; FA 粉煤灰掺入率。

对于工程中不同粉煤灰掺入率混合样次固结系数的估算可参考式(3)计算获取。

由图 12 可知, 混合样的次固结系数随二灰掺入率的增加而减小。二灰掺入较少时(掺入率 5%), 即可有效减小软土的次固结系数, 随着二灰掺入率的提高, 软土的次固结系数变化越来越小, 但二灰掺入率在 10%~20% 时次固结系数基本不随掺入率的增加而变化。

对比粉煤灰和二灰对上海软土流变性质的影响可知, 二灰的掺入对上海软土的次固结系数影响较大。同一掺入率条件下, 掺入率较小时(5%~10%), 二灰的掺入对其次固结系数减小幅度更大, 随着掺入率的提高, 两种固化材料的掺入对其次固结系数的影响区别越来越小。

2.3 粉煤灰和二灰改良上海软土的机理

2.3.1 抗剪强度

粉煤灰是一种活性工业废弃物, 其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 CaO 等, 遇到软土中的水会发生水解和水化反应, 其游离出的 SiO_2 、 Al_2O_3 与土中的 Ca 相结合生成各种水化硅酸钙和水化铝酸钙, 它们均为水硬性化合物, 包裹在粉煤灰玻璃体表面并逐渐形成晶体和胶体, 起到胶结的作用。另外, 粉煤灰中活性 CaO 与土中的水相互作用将形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 这些 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会与水中中和空气中的 CO_2 发生碳酸化反应生成不溶于水的 CaCO_3 , 使混合土样的强度逐渐增大。

软土中含量最多的 SiO_2 与土中的水形成硅酸胶体, 其表面带有 Na^+ 或 K^+ 和粉煤灰颗粒表面携带的高价 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 等进行当量吸附交换, 从而改变了黏土胶粒的带电状态。根据双电层原理可知, 阳离子交换作用将使粘土胶粒周围所携带的结合水膜变薄, 土粒发生凝聚和团粒增大, 较小的土颗粒团聚成为较大的团粒结构。从而使混合土样的强度进一步提高。

二灰中的生石灰主要成分为 CaO , 与软土混合后会减少土颗粒间的水含量, 土颗粒会形成胶结团聚而使颗粒之间滑动摩擦及咬合摩擦增大, 使二灰改良土样的内摩擦角变大。

2.3.2 流变变形

粉煤灰和二灰的掺入可以改良上海软土的颗

粒级配, 固结后上海软土的结构更为致密, 越来越难被压缩。这是混合土样次固结系数减小的原因之一。随着龄期的增长, 固化材料与软土之间发生一系列水化、硬凝、碳化等化学反应并生成越来越多的胶结物质, 使得改良后的上海软土的结构性增强, 也会导致次固结系数显著减小。

3 结 论

(1) 粉煤灰和二灰的掺入均能提高上海软土的抗剪强度, 并且其抗剪强度随着养护龄期的增加而显著增大, 最后均会在某一养护龄期趋于稳定。建议粉煤灰和二灰处理上海软土地基的养护时间分别为 56 d 和 28 d 左右。

(2) 上海软土掺入粉煤灰后, 其抗剪强度随着粉煤灰掺入率基本上成线性增长。二灰的掺量并不是越多效果越好, 掺入率在 10% 左右范围内即可有效地提高上海软土的抗剪强度。

(3) 综合对比粉煤灰和二灰对上海软土的改良效果, 对于实际工程中粉煤灰和二灰的选用建议如下: 掺入率在 10% 以内, 优先选用二灰, 掺入量大于 10%, 优先选用粉煤灰。

(4) 重塑粉煤灰和二灰改良软土的次固结系数与竖向压力无关, 可认为其次固结系数为常数。次固结系数随着粉煤灰和二灰掺入率的增加而大幅减小, 且同一掺入率条件下, 二灰对次固结系数的减小幅度更大。粉煤灰掺入后的次固结系数随着粉煤灰掺入率(5%~20%)基本成线性减小。二灰掺入较少时即可有效减小软土的次固结系数, 随着掺入率的提高, 其减小幅度越来越小。

参考文献:

- [1] 周 科, 孙德安. 重塑上海软土的压缩特性试验[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2009, 15(1):99-104.
Zhou K, Sun D A. Experiments on compression characteristics of remoulded soft clay in Shanghai[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2009, 15(1):99-104. (in Chinese)
- [2] 孙德安, 申海娥. 上海软土的流变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3):74-78.
Sun D A, Shen H E. Experimental study on rheology behaviour of Shanghai soft clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3):74-78. (in Chinese)

- [3] 徐安军, 李耀良. 上海软土地区深基坑工程的施工控制要点[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增1):1395-1397.
Xu A J, Li Y L. Construction control of deep pit engineering in Shanghai soft-soil areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Sup 1): 1395-1397. (in Chinese)
- [4] 刘汉龙, 顾湘生. 城际快速铁路软土路基沉降控制新技术[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增1):181-186.
Liu H L, Gu X Sh. New technology for settlement control of soft soil subgrade of intercity express railway [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Sup1):181-186. (in Chinese)
- [5] 冯海宁, 杨有海, 龚晓南. 粉煤灰工程特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5):579-582.
Feng H N, Yang Y H, Gong X N. Test research on engineering characteristic of flyash [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5):579-582. (in Chinese)
- [6] 陈云勇, 高亮, 李丽民. 粉煤灰在软土地基路堤填筑中的应用研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2017(5):20-22.
Chen Y Y, Gao L, Li L M. Application study on fly ash in soft foundation embankment construction [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2017(5):20-22. (in Chinese)
- [7] 徐红, 罗国焯. 粉煤灰处理软土地基的试验研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3):286-290.
Xu H, Luo G Y. Test and study on the consolidation of soft soil foundation with powdered fly ash [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3):286-290. (in Chinese)
- [8] 林彤, 刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6):1049-1052.
Lin T, Liu Z D. Study on indoor tests of fly ash and quick lime improving soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6):1049-1052. (in Chinese)
- [9] 王梅, 白晓红, 梁仁旺, 等. 生石灰与粉煤灰桩加固软土地基的微观分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(1):67-70.
Wang M, Bai X H, Ling R W, et al. Microstudy on soft foundations reinforcement with lime-fly ash piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1):67-70. (in Chinese)
- [10] Senol A, Edil T B, Bin-Shafique M S, et al. Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes[J]. Resources Conservation & Recycling, 2006, 46(4):365-376.
- [11] Ozdemir M A. Improvement in bearing capacity of a soft soil by addition of fly ash [J]. Procedia Engineering, 2016, 143:498-505.

(本文责编:赵霞)