

# 软土固化增强复合外掺料研究

潘林有

(温州大学建筑与土木工程学院, 浙江温州 325035)

**摘要:** 采用水泥、外加剂和复合外掺料对温州软土进行固化试验, 研究表明, 在水泥中掺适当的工业废料及外加剂做加固土的固化剂, 不仅较显著地增加加固土的强度, 而且可以节约工程造价. 本文从试验及机理两方面对此作了探讨.

**关键词:** 外加剂; 外掺料; 软土; 试验; 强度

**中图分类号:** TU528   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1008-309(2004)04-0064-15

## 一、前言

温州地处东南沿海, 为饱和软粘土地基, 土质主要由淤泥和淤泥质土所组成, 含水量很高, 孔隙比很大, 渗透性很低, 抗剪强度很低, 压缩性很大, 温州目前绝大部分建筑都采用桩基础, 但从发展的角度思考, 几百年甚至几千年之后, 同一地块重复使用的桩基础, 不但给设计施工带来很多难以解决的问题, 而且会产生“地基污染”, 对此, 是否还有其他方法, 是否可以寻找一种固化剂(或复合掺合料)掺入含水土壤中, 让其经过自然养护, 使固化剂、土和水之间产生一系列的物理化学反应, 使混合料与土逐渐硬化成为加固土, 从而在一定程度上提高土的强度, 减少土的压缩性.

本文以水泥为基料, 掺入石膏、外加剂 a(有关数据详见文献[1])、粉煤灰等较廉价的复合掺合料作为固化剂, 研制出适宜固化高含水量软土且能降低固化成本的复合外掺料, 用来加固各种不同性质的软土, 并对其作用机理进行了分析和讨论.

## 二、试验

### (一) 试验用料

#### 1、试验用土

土样取自温州市区解放路某工地, 此处地质情况见表 1, 并取埋深 4.50m 处土样(淤泥)进行化学成分分析, 其分析结果见表 2:

#### 2、水泥

采用普通硅酸盐水泥, 32.5, 其 3、7、28 d 抗压强度分别为 21.9、34.2、48.8MPa. 其他各种指标均达到要求.

#### 3、外加剂 a

#### 4、生石膏粉

收稿日期: 2004-03-18

基金项目: 温州大学科研项目(x03005), 浙江省教育厅科研项目(20030538)

作者简介: 潘林有(1963-), 浙江乐清人, 副教授, 工学硕士、在职博士生, 研究方向: 温州软粘土

SO<sub>3</sub> 含量 42.5%，比表面积 3500cm<sup>2</sup>/g

### 5、粉煤灰

温州东屿电厂电尘粉煤灰

表 1 温州软粘土地质情况一览表

编号	土层名称	土层深度 (m)	土层主要情况描述
1	杂填土	0-0.8	建筑垃圾 (碎石、碎砖)
2	粘土	0.9-1.8	灰黄色硬壳层, 饱和可塑, 中压缩 $\omega=37.2\%$ $\gamma=18.2\text{kPa}$ $e=1.073$
3	淤泥	1.9-18.1	青灰色、灰色、含少量腐植质, 饱和高压缩、高灵敏度 $\omega=74.8\%$ $\gamma=15.4\text{kPa}$ $E_{1-2}=1.1\text{MPa}$ $C=8.3\text{kPa}$ $\phi=4.5^\circ$

表 2 温州淤泥试样化学成分一览表

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	NaO	烧失量	$\Sigma$
含量 (%)	60.16	17.81	7.17	0.81	1.06	2.93	2.76	0.61	6.10	99.41

备注：南京土、萧山土、椒江土 MgO 含量分别为 5.01、3.29、3.76

### (二) 试验方法

为了测定固化土试件的 7 d、28 d 和 90 d 的无侧限抗压强度，试验前将土样于 105℃~110℃烘干。土壤含水量设计为 75%，水泥掺量以湿土为基准，单一外加剂、复合掺合料掺量均以基准配方(见表 3)中的水泥为基准。混合料人工拌和 10 min，采用 7 cm×7 cm×7 cm 试模振动成型，恒温恒湿养护一天脱模，脱模养护 5 d 后浸入水中养护 1 d，测其 7 d、28 d、90 d 无侧限抗压强度。

### (三) 试验结果

#### 1、单一外加剂试验

从激发固化剂本身强度，调节水泥水化环境等因素考虑，选择了石膏、外加剂 a 作为单一外加剂进行强度试验。试验结果见表 3。分析表 3 的结果可以看出：外加剂均有一定的增强作用，外加剂 a 较石膏增强效果好，但单一外加剂的增强作用均不显著。

表 3 单一外加剂试验试验结果一览表

试样编号	外加剂名称	外加剂掺量 (%)	水泥掺量 (%)	抗压强度(MPa)			每 10m <sup>3</sup> 消耗成本对比
				7d	28d	90d	
1(基准配方)			18	0.76	1.29	2.02	100%
2	生石膏	3	14	0.79	1.33	2.08	93%
3		0.81		1.36	2.15	94%	
4		0.84		1.41	2.24	95%	
5	外加剂 a	0.5	13	0.81	1.35	2.12	94%
6		1		0.84	1.41	2.25	95%
7		1.5		0.88	1.52	2.35	96%

备注：表中每试样编号均有 3 个试块做试验，表中数值为 3 个试块的平均值。

#### 2、复合外加剂试验

参考表 3 的试验结果，并对有关掺合量的加固机理(见下)进行了相应的研究，选择石膏、外加剂 a、粉煤灰按一定比例组合而成的复合外加剂(掺合料)为配方进行试验，石膏掺量为 3%~7%，外加剂 a 掺量为 0.5%~1.5%，粉煤灰掺量为 50%~100%(以上掺量均以基准配方中的水泥为基准)，试验

结果见表 4.

表 4 复合外加剂试验结果一览表

试样编号	外加剂 a 掺量 (%)	生石膏掺量 (%)	粉煤灰 掺量 (%)	水泥掺量 (%)	抗压强度(MPa)			每 10m <sup>3</sup> 消耗 成本对比
					7d	28d	90d	
1 (基准配方)				18	0.76	1.29	2.02	100%
2	0.5	3	30	12	0.85	1.52	2.47	94%
3a	0.5	5	50	11	0.92	1.69	2.64	95%
3b	0.5	5	100	11	0.89	1.61	2.58	95%
4a	0.5	7	50	11	0.93	1.09	2.64	96%
4b	0.5	7	100	11	0.90	1.62	2.59	96%
5	1	3	30	12	0.87	1.59	2.51	95%
6a	1	5	50	11	0.94	1.71	2.75	96%
6b	1	5	100	11	0.91	1.65	2.67	96%
7a	1	7	50	11	0.96	1.70	2.75	97%
7b	1	7	100	11	0.91	1.66	2.69	97%
8	1.5	3	30	12	0.89	1.66	2.56	97%
9a	1.5	5	50	11	0.95	1.72	2.77	98%
9b	1.5	5	100	11	0.92	1.66	2.68	98%
10a	1.5	7	50	11	0.98	1.72	2.77	99%
10b	1.5	7	100	11	0.92	1.67	2.71	99%

备注:表中每试样编号均有 3 个试块做试验,其中数值为 3 个试块的平均值.

### 三、试验结果及加固机理讨论

1、由试验结果可知:强度增加最佳的配方(配方 6a)是石膏为 5%,外加剂 a 为 1%,粉煤灰为 50%,水泥掺含量为 11%,该配方与不掺外加剂的基准配方(水泥掺含量 18%)的 7d、28d、90d 抗压强度相比,强度分别提高了 23.7%、32.6%、36.1%,而每 10m<sup>3</sup> 消耗成本反而下降了 4%.

2、从表 4 也可以知道外加剂 a 与生石膏相比影响的因素大,粉煤灰的影响因素居中,但三者复合后综合影响最大,外加剂总量越高强度越大.由于石膏的单位价格只有水泥的 1/10,而温州市区和盘石电厂有大量的粉煤灰资源,利用粉煤灰几乎不需成本,外加剂 a 虽然成本是水泥的 10 倍,但掺量仅为水泥重的 0.5%—1.5%,故表 4 的消耗成本均不超过基准配方.

3、粉煤灰加入对加固土后期强度提高作用较大,生石膏的加入对早期强度的提高较大,但对中、晚期作用不大,外加剂 a 的掺入对早期、中期、晚期强度都有一定的提高.

4、配方 b 虽然粉煤灰含量是配方 a 的 2 倍,但其无侧限抗压强度却比配方 a 略低,这可能是由于粉煤灰具有冲淡和密实双重作用,粉煤灰一方面由于其成分中含有一定量的玻璃质漂珠,掺入水泥土中后会增加和易性,相应减少掺水量,增强密实度,提高强度,但另一方面,过量的粉煤灰会降低水泥的活性,减少其和软土相互反应成为凝胶体的能力.

5、当软土中掺入少量水泥并加水搅拌均匀后,就形成了土、水泥、外加剂和水组成的多相体系.它们之间的相互作用非常复杂,但其加固机理可以作如下分析<sup>[2]</sup>:

a) 水泥和水之间相互作用,形成各种水化产物并对土体产生胶结作用,构成水泥土强度的基本骨架,本文研究的外加剂可促进或参与水化反应.

b) 水泥的水化产物氢氧化钙和土中的二氧化硅及氧化铝之间发生水化反应, 生成水化硅酸钙和铝酸钙等产物. 水泥和外加剂中可溶于水的各种高价离子与土颗粒的吸附离子相互交换, 增加土颗粒间的结合力, 团粒化钙矾石的形成之所以能提高固化土的强度, 主要是因为钙矾石晶体含有较多的结晶水, 能在含水量相同的条件下, 降低固化土的孔隙率, 提高固化土强度, 使土团与水化产物相互联接, 增加了稳定土强度和水稳性, 本文研究的外加剂可促进或参与该反应.

c) 软土的天然孔径大、孔隙多, 只有水化硅酸钙的胶凝作用不能完全改变孔隙和孔径的状况<sup>[3]</sup>. 如果加入以  $\text{CaSO}_4$  为主要成份的石膏, 能与水泥水化物生成大量的钙矾石, 这些钙矾石一方面填充水泥石部分孔隙, 降低了加固土的孔隙量; 另一方面减小了加固土孔隙的平均孔径, 又起到支撑孔隙的作用.

6、粉煤灰是一种比重小、孔隙大、塑性指数低的细颗粒无粘性材料, 其颗粒都比较小、均匀系数  $d_{60}/d_{10}=5\sim 11.5$ . 在电子显微镜下, 颗粒大多数成圆球状, 这有利于它和水泥混合施工. 粉煤灰的主要成分与一般粘土类似, 与粘土相比, 其  $\text{CaO}$  成分较低,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  成分较高, 其化学成分对强度的影响明显比温州淤泥好, 而且粉煤灰的微珠效应, 可改变水泥的流变学性质, 使加固土易于拌匀, 易于密实, 降低加固土孔隙, 减小了孔径; 粉煤灰对水泥熟料的分散作用, 能促进水泥水化反应; 在有粉煤灰存在时, 生石膏作为硫酸盐激发剂, 可促进粉煤灰中活性组份的水化反应, 故粉煤灰的掺入能有机地加强软土的强度.

7、钙矾石的增强作用是有条件的, 它和体系中  $\text{CaO}$  和  $\text{OH}^-$  的浓度密切相关. 当  $\text{CaO}$  和  $\text{OH}^-$  的浓度饱和时, 钙矾石生长使结构强度降低, 如果在加入废石膏(如生石膏或磷石膏)同时加入适量的粉煤灰, 那么, 粉煤灰中的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生反应, 生成水化硅酸钙, 水化铝酸钙. 其作用一方面是降低了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浓度, 使钙矾石生长对强度有利. 另一方面增加生成水化硅酸钙的数量相当于增加了晶体矿物之间的胶凝作用, 水化铝酸钙可进一步与硫酸盐反应生成矾石.

8、温州淤泥除含水量很高、孔隙比特别大外, 其  $\text{MgO}$  含量也是很低, 而  $\text{Mg}^{2+}$  可以和其它化学物质形成胶体, 这或许也是温州软粘土抗剪能力差的一个原因, 为此在这次外加剂 a 中含有盐卤(及氯化镁、矾料), 使其增加土壤中的  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子, 这些离子能和水泥水化及软土中的  $\text{SiO}_2$  发生化学反应生成凝胶体, 增强软土强度.

#### 四、结 语

1、单一外加剂对温州软土有一定的增强作用, 外加剂 a 较石膏增强效果好, 但单一外加剂的增强作用均不显著.

2、粉煤灰和生石膏以及外加剂 a 加入水泥中组合而成的复合掺合料增强温州软土效果明显. 本次研究得到的最佳配方只适用于试验土, 对不同土质要作正变试验才能确定.

#### 参考文献

- [1] 潘林有. 水泥石复合添加剂试验和理论探讨[J]. 山东建材学院学报, 2001, 15(3): 23-25
- [2] 刘顺妮, 林宗寿, 陈云波. 高含水量粘土固化剂的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 72-75
- [3] 荀勇. 含工业废料的水泥系固化剂加固软土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 210-213

## Solidify and Reinforced Soft Soil Research by Complex Additive

PAN Linyou

(College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, China 325035)

**Abstract:** Solidifying experiment, with cement, admixture and complex additive, showed the research that mixing appropriate amount of industrial waste and added-substance into reinforced soil, not only remarkably strengths solidification of reinforced soil, but saves the cost of structural project. This paper discusses on it in two respects: of test and mechanism of reinforced soil.

**Key words:** Admixture; Additive; Soft soil; Experiment; Strength