

粉煤灰掺石灰混合料的工程性质试验研究

张小平 俞仲泉

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 根据室内试验 ,研究了不同配比的粉煤灰掺石灰混合料的无侧限抗压强度、击实性、渗透性、压缩性及抗剪性 ,确定出最佳配比 ,并分析了粉煤灰掺石灰混合料的强度形成机理 .这种混合料可用作桩材料 ,且因其透水性好还可作为垫层料 ,用粉煤灰混合料垫层可代替砂垫层 .由于这种材料具有较好的工程特性 ,故用其加固地基效果良好 .

关键词 粉煤灰掺石灰混合料 ;工程性质 ;配合比 ;龄期

中图号 TU441

粉煤灰掺石灰混合料是以较少的石灰与较多粉煤灰按一定配比 ,均匀拌和经压实而成的致密混合体(以下简称粉煤灰混合料) ,这种材料经过一定的养护条件 ,石灰与粉煤灰发生水化反应成为硬化体 ,它具有较好的工程性质 ,可作为地基处理中的加固材料 ,对于粉煤灰的开发利用具有重要意义 .

1 试验用原材料的质量要求

由于粉煤灰与石灰要发生化学反应 ,故对粉煤灰与石灰的质量有一定要求 ,要求粉煤灰中的氧化物含量大于 70% ,烧失量含量小于 15% ,石灰中的活性氧化钙含量大于 60% ,应达到国家标准(GBJ—594—79)Ⅱ级钙质消石灰的标准 .本试验采用马鞍山电厂湿排粉煤灰 ,其化学成分见表 1 ,其中 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 的百分含量为 77.51% ,烧失量为 9.43% ,颗粒成分 : $d_{30} = 0.043\text{ mm}$, $d_{60} = 0.097\text{ mm}$, $d_{10} = 0.023\text{ mm}$.所用石灰也是马鞍山产的 ,其化学成分见表 2 ,活性氧化钙的含量 72.99% ,达到国家标准(GBJ—594—79)Ⅱ级钙质消石灰的标准 .为叙述方便 ,粉煤灰混合料的配比指粉煤灰 :石灰 .

表 1 粉煤灰的化学成分及含量

Table 1	Chemical composition and contents of fly ash								
化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	烧失量
含量/%	49.0	24.05	4.44	2.38	0.37	1.26	0.34	0.36	9.43

表 2 石灰的化学成分

Table 2	Chemical composition of lime					
化学成分	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	烧碱
含量/%	72.99	0.75	0.59	1.24	4.47	19.1

2 粉煤灰掺石灰混合料的工程性质^[1]

2.1 击实性

粉煤灰和石灰的配比为 88:12(A 样) 80:20(B 样) ,采用轻形击实标准 ,得击实曲线如图 1 ,由图可见 ,击实曲线较平缓 ,对含水率不是很敏感 .A 样最大干密度 $\rho_d = 0.945\text{ g/cm}^3$,最优含水率 $w = 37\%$,B 样最大干密度 0.978 g/cm^3 ,最优含水率 34% ,可见石灰含量较少的 A 样最大干密度小于石灰含量较多的 B 样 ,这是由于较多的石灰在粉煤灰颗粒之间起润滑作用 ,使得易于击实 ,而过多的石灰则由于其吸水膨胀而不易击实 ,故在一定范围内 ,石灰含量较多有利于干密度的提高 .

表 3 不同干密度粉煤灰混合料的渗透系数

Table 3	Permeability coefficients of fly ash with varied dry density				
干密度/(g·cm ⁻³)	0.80	0.85	0.90	0.95	
渗透系数/(cm·s ⁻¹)	7.96×10^{-4}	4.00×10^{-4}	6.35×10^{-5}	6.44×10^{-5}	

2.2 渗透性

粉煤灰掺石灰混合料的渗透系数 k 在 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$ 之间,渗透系数的大小与粉煤灰混合料的配比、干密度及龄期有关,表3是梁新华^[2]用南55型变水头试验,测得配比为85:15、养护龄期为14d的粉煤灰混合料不同干密度的渗透系数,由表3可见粉煤灰混合料随干密度的增加渗透系数减小.由图2可见,混合料的渗透系数 k 随着龄期 T 的增长有所减小,这是由于粉煤灰的凝硬作用形成的水化物晶体阻碍了水的渗流.

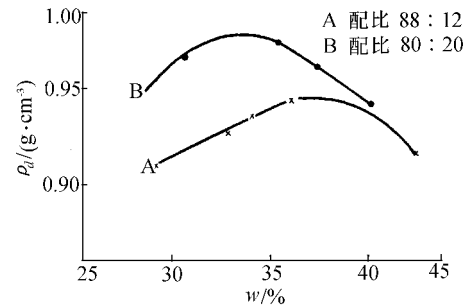


图1 粉煤灰混合料的击实曲线
Fig.1 Compaction curve of fly ash-lime mixture

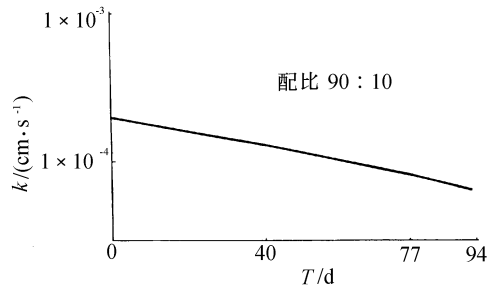


图2 渗透系数随龄期的变化
Fig.2 Permeability coefficient-age curve

2.3 压缩性

按配比分别为75:25 80:20 85:15 90:10制备试样,干密度控制在 $0.9 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$,在饱和砂中养护一个月和两个月,然后做压缩试验,其压缩模量 $E_{s(1-2)}$ 见表4.由表4可见粉煤灰掺石灰混合料的压缩模量 $E_{s(1-2)}$ 随石灰含量的增多、龄期的增长而增大.

粉煤灰掺石灰混合料的压缩本质与土体不同,土的压缩主要是由土中水和气体的排出使孔隙减小的过程.粉煤灰混合料透水性强,具有粉细砂的特性,但砂属松散体,粒间无粘结,而粉煤灰混合料颗粒之间结晶粘结,有一定的粘结强度,则粉煤灰混合料的压缩是未发生水化的颗粒与结晶粘结不牢的水化结晶物在荷载作用下的压密过程.随龄期的增长,结晶连接越牢固,所以压缩性降低;石灰含量较多时,参与水化的粉煤灰颗粒就越多,故压缩模量大.粉煤灰混合料的压缩性还与制备试样的干密度有关,干密度越大,其压缩性越低.在实际工程中,尽量提高粉煤灰混合料的干密度,可适当减少石灰含量.

表4 粉煤灰混合料的压缩模量 $E_{s(1-2)}$

Table 4 Compression modulus $E_{s(1-2)}$ of fly ash mixture with varied ratio and age MPa				
龄期/d	配 比			
	75:25	80:20	85:15	90:10
30	53.33	38.10	26.67	20.00
60	80.00	42.00	32.00	22.86

注:干密度为 1.0g/cm^3 .

2.4 抗剪性

按不同配比制备试样,干密度控制在 $0.9 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$,在饱和砂土中养护两个月后,进行直剪试验,其 $\sigma \sim \tau$ 曲线如图3所示,内聚力 C 、内摩擦角 φ 随配比有较大变化, C 变化范围为 $100 \sim 330 \text{kPa}$, φ 为 $27^\circ \sim 50^\circ$,由图4可见,石灰含量由10%增至20%内聚力逐渐增大,呈直线上升,当石灰含量继续增大时,内聚力开始减小,而内摩擦角则随石灰含量的增大而减小.对于内聚力较强的粉煤灰混合料,决定抗剪强度的主要因素是内聚力,而石灰含量的多少,直接影响着内聚力的大小,当石灰含量较少时,活性氧化钙的浓度不够,粉煤灰颗粒的水化反应不充分,生成颗粒之间的结晶连接较少,因而内聚力就越小,而当石灰含量过多时,由于过量的石灰未经水化反应而成膏泥状,内聚力就降低.内摩擦角之所以随石灰含量的增多而降低,是由于未水化的石灰在粉煤灰颗粒之间起润滑作用,使得颗粒之间的摩擦和咬合作用减弱,则内摩擦角减小.经分析,石灰含量在15%~20%为较佳配比.此外,随龄期的增长,石灰与粉煤灰颗粒之间水化反应越充分,颗粒之间的结晶粘结越多,粉煤灰混合料的内聚力有一定程度的提高(见图5).

2.5 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是衡量材料强度性能的一个重要指标,影响粉煤灰混合料的无侧限抗压强度的因素主要有配合比、干密度、龄期及养护条件,以下分别讨论各种影响因素.

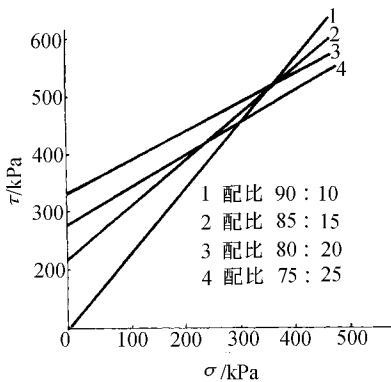


图 3 不同配比粉煤灰混合料直剪试验曲线

Fig.3 Curve of direct shear of fly ash mixture with varied ratio

2.5.1 配合比的影响

表 5 是不同配比、不同干密度 ,龄期为 28 d 时的粉煤灰混合料的无侧限抗压强度 q_u ,分析表 5 ,当干密度相同时 粉煤灰混合料的无侧限抗压强度随石灰含量的增多而增加 ,当石灰含量由 10% 增到 15% 时 ,强度增长 0.2% ~ 2.5% ,由此可见粉煤灰混合料的较佳配比应为 85:15 ~ 80:20 ,继续增加石灰含量 ,强度下降^[2] .

2.5.2 干密度的影响

干密度对粉煤灰混合料的强度影响很大 ,分析表 5 ,同一种配比粉煤灰混合料 ,干密度由 0.8 g/cm³ 增至 0.9 g/cm³ ,强度增长约 100% ,当干密度由 0.9 g/cm³ 增至 1.0 g/cm³ 时 ,强度增长 75% ,因此 ,在配比相同时 ,干密度每增长 0.1 g/cm³ ,混合料的强度增加 75% ~ 100% ;另一方面 ,对于不同配比的情况 ,当干密度为 0.8 g/cm³ 配比 80:20 时 ,粉煤灰混合料的无侧限抗压强度为 920 kPa ,当干密度为 1.0 g/cm³ 配比 90:10 时 ,粉煤灰混合料的无侧限抗压强度为 2786 kPa ,后者是前者的 3 倍 ,可见干密度对粉煤灰混合料强度的影响远较配比显著 .图 6 是无侧限抗压强度与干密度的关系 ,由图可见 ,三条曲线的斜率随着干密度的增大而变陡 ,说明干密度越大强度增长越快 ,故提高干密度是提高粉煤灰混合料强度的关键 .

表 5 不同配比的无侧限抗压强度 q_u

Table 5 Unconfined compression strength q_u with varied dry density and ratio kPa			
配比	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$		
	0.8	0.9	1.0
90:10	768	1 594	2 786
85:15	918	1 771	3 079
80:20	920	1 791	3 156

注 龄期 28 d ,养护条件为有约束的水养 .

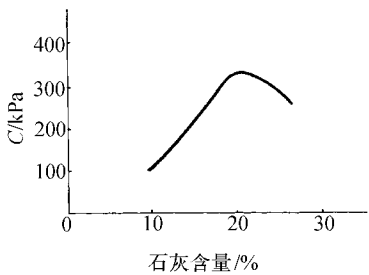


图 4 内聚力随配比的变化

Fig.4 Relation of cohesion with ratio

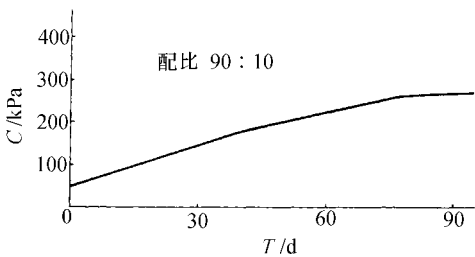


图 5 内聚力随龄期 T 的变化

Fig.5 Relation of cohesion with age T

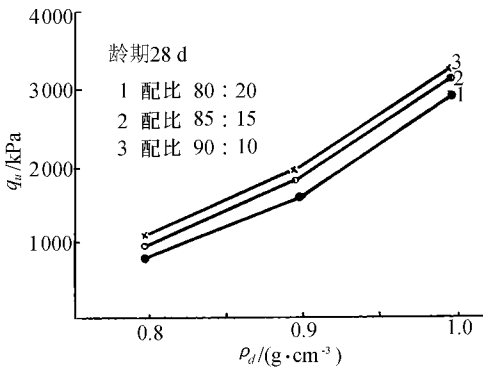


图 6 无侧限抗压强度与干密度的关系

Fig.6 Relation between unconfined compression strength and dry density

2.5.3 龄期的影响

粉煤灰中的氧化物与石灰中的活性氧化钙发生水化反应 ,其形成的结晶物起联接作用 ,从而增加了粉煤灰混合料的强度 .这个水化反应在常温下需要一个缓慢过程 ,强度的发展也随之经历一个过程 .表 6 为不同龄期不同干密度的无侧限抗压强度 .分析表 6 ,无论干密度多大 ,龄期增长 1 倍 ,强度约增长 1.5 倍 ,图 7 表示龄期与无侧限抗压强度的关系 ,在 14 ~ 60 d 内 ,无侧限抗压强度与龄期近似直线关系 ,还可发现干密度不同的三条直线斜率不同 ,当干密度为 1.0 g/cm³ 时 ,直线斜率最大 ,因而可得出结论 ,粉煤灰混合料的密实度越高 ,其早期无侧限抗压强度随龄期增长越快 .

表6 不同龄期的无侧限抗压强度 q_u
Table 6 Unconfined compression strength q_u
with varied age and dry density kPa

龄期/d	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		
	0.8	0.9	1.0
14	300	650	1 240
28	918	1 771	3 079
60	2 136	4 133	7 589

注 配比 85:15, 养护条件为有约束的水养。

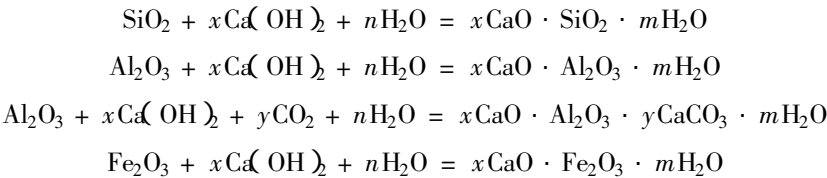
2.5.4 养护条件的影响

温度、湿度和约束条件是粉煤灰混合料强度发展的必要条件, 试验中的养护条件皆为常温下养护以及有无约束的水养(饱和砂中养护)和湿养(潮湿砂中养护)。表 7^[3] 是不同养护条件的粉煤灰混合料的无侧限抗压强度, 表 7 表明, 水养试样的强度较湿养的高。水是粉煤灰混合料发生水化反应的媒介及参与物, 在有约束的条件下, 混合料中的氧化物充分溶解于水, 可加速水化反应速度。若在湿养条件下, 水化反应仅在表面水膜和较细的毛管孔隙中进行, 水化反应速度缓慢。故在其它条件相同时, 同龄期水养的强度较湿养的高。比较表 6 和表 7 发现, 表 6 中的强度明显高于表 7, 表 6 中的试验条件为有约束养护, 而表 7 为无约束养护。因粉煤灰混合料中含有石灰, 石灰遇水易发生膨胀, 有约束养护可避免试样的膨胀崩解, 因此, 若用粉煤灰混合料作为桩料打入地基, 因受桩间土水平方向的挤压力使得桩体有良好的约束, 在有地下水参与条件下, 粉煤灰桩体强度易于形成。

文献[4]认为, 养护温度对粉煤灰混合料的强度影响较大, 温度越高, 强度越大。粉煤灰混合料若作为路基垫层, 应考虑温度变化对强度的影响。若用其作为桩材料打设在地基中, 因地基中的温度变化很小, 故不必考虑温度对强度的影响。

3 粉煤灰混合料的强度形成机理

粉煤灰混合料的强度形成经历一个复杂过程, 从宏观看, 粉煤灰与少量石灰混合以后成为致密的混合结构, 具有一定的初始强度和整体性, 就微观而言, 粉煤灰中的可溶氧化物 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等成分与石灰的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 经过化学反应产生一系列不溶于水的化合物, 其反应式如下:



从反应式可见, 由于石灰消化后, 生成的氢氧化钙扩散到粉煤灰颗粒表面, 逐渐侵蚀玻璃体中的活性氧化钙、氧化铝及氧化铁生成水化硅酸钙($x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)、水化铝酸钙($x\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)、水化炭铝酸钙($x\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{CaCO}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)及水化铁酸钙($x\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)。随着水化反应不断向粉煤灰颗粒内部进行, 生成更多的水化物, 在粉煤灰玻璃体表面及其界面处形成纤维状、针状、蜂窝状及片状晶体, 排列不规则, 联结未完全水化的粉煤灰颗粒, 并冲填其空隙(电镜照片^[4]如图 8(a)~(d)所示), 水化反应一直持续到反应物达到平衡时为止, 整个过程比较缓慢。图 8 中(a)(b)由于石灰含量少, 水化反应不充分, 粉煤灰颗粒之间充满氢氧化钙晶体, 图 8(c)显示粉煤灰颗粒之间由网状水化物充填并联结, 由图 8(d)发现粉煤灰颗粒之间被针状、刺状的水化物胶结。

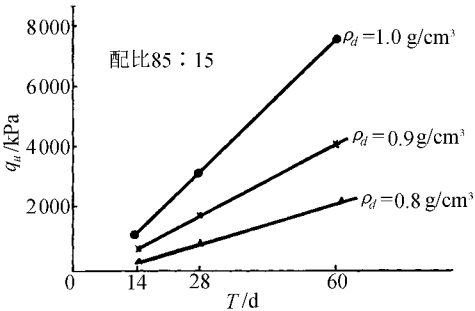


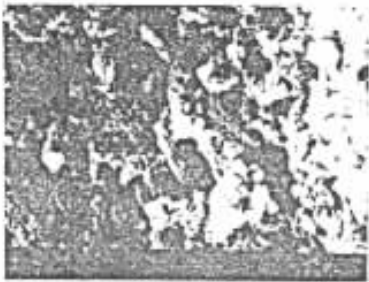
图7 无侧限抗压强度与龄期的关系
Fig.7 Relation of unconfined compression strength with age

表7 不同养护条件的无侧限抗压强度 q_u
Table 7 Unconfined compression strength q_u
with varied curing conditions

龄期/d	养护条件	无侧限抗压强度/kPa
28	湿养	670
	水养	960
60	湿养	1 132
	水养	1 894

注 配比 85:15, 干密度为 1.0 g/cm^3 , 无约束养护。

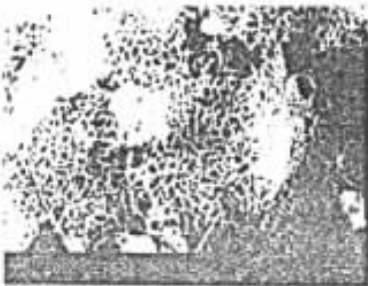
纯粉煤灰颗粒联结作用较弱,其强度主要取决于颗粒之间的摩擦和咬合,即决定于内摩擦角,当掺入石灰后,使得粉煤灰颗粒之间的摩擦和咬合作用减弱,但随着粉煤灰与石灰之间水化反应的发生,形成的水化物晶体联结粉煤灰颗粒,故使粉煤灰混合料的强度逐渐增大.因此,粉煤灰混合料强度主要取决于颗粒之间的水化物强度及水化物与颗粒之间的联结强度.前已述及影响粉煤灰混合料强度的主要因素是干密度,当干密度较大时,颗粒之间接触紧密,在颗粒界面处生成的水化物网状交织,因此连接粉煤灰晶体的水化物强度增大,同时水化物与粉煤灰颗粒之间接触面积增大,因而接触点的强度也增大.



(a)石灰含量 12%



(b)石灰含量 12%



(c)石灰含量 20%



(d)石灰含量 20%

图 8 粉煤灰混合料扫描电镜照片

Fig.8 SEM micrographs of fly ash mixture

当龄期增长时,生成的联结颗粒间的水化物晶体增多,因而粉煤灰混合料的强度是随时间不断增长的量,假定某个时间段线性增长,见图 9 所示,故某个时刻的无侧限抗压强度

$$q_{ut} = q_{u0} + (t - t_0)M_t$$

式中: q_{ut} ——龄期 t 时的无侧限抗压强度 kPa; q_{u0} —— t_0 时无侧限抗压强度 kPa; M_t ——强度增长系数 kPa/d.

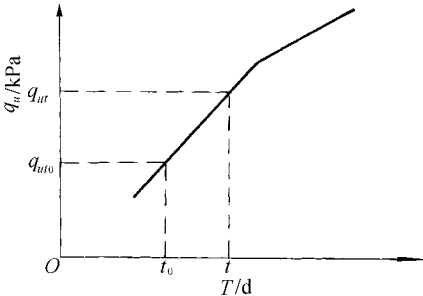


图 9 $q_u \sim T$ 曲线

Fig.9 $q_u - T$ curve

表 8 不同干密度不同时间段的强度增长系数 M_t

Table 8 Strength growing coefficient M_t with varied dry density and time period kPa·d ⁻¹			
干密度/(g·cm ⁻³)	M_t (0~14)	M_t (14~28)	M_t (28~60)
0.8	21	44	38
0.9	46	80	73
1.0	88	131	140

注 配比为 85:15.

M_t 是单位时间强度的增长量,用每天强度增长量来表示, M_t 是个变量,在养护初期,常温下前三个月 M_t 较大,养护中后期,水化反应趋于缓慢,强度增长系数逐渐减小,最终趋于 0, M_t 可根据试验确定,它是一个综合反映强度增长的参数,受配比、干密度、养护条件及龄期的影响.由表 8 可见,不同干密度的粉煤灰混合料在某个相同时段的强度增长系数不同,随干密度的增大 M_t 增加,分析干密度由 0.9 g/cm³ 增至 1.0 g/cm³ 时强度增长尤为显著,因此建议粉煤灰混合料的设计干密度为 0.9~1.0 g/cm³;另一方面,表 8 中同一干密度

的粉煤灰混合料不同时间段的强度增长系数不同,龄期 28 d 前强度增长速度较快,是水化反应剧烈阶段,28 d 后强度增长速度减慢,如图 10 所示,只有干密度为 1.0 g/cm^3 28 d 后 M_t 仍有所增长,之后 M_t 开始减小,图 10 中的虚线为 $M_t \sim t$ 的推测曲线,60 d 后 M_t 逐渐减小,但粉煤灰混合料的强度增长量仍很显著。

综上所述,粉煤灰混合料强度的形成、发展是一个复杂的过程,在工程设计中应考虑强度增长系数。

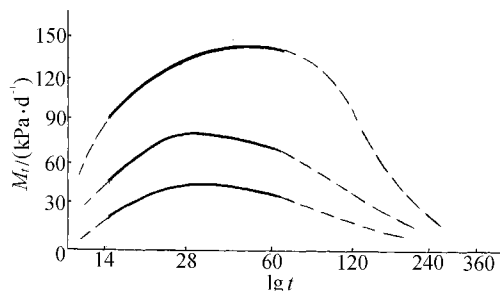


图 10 $M_t \sim \lg t$ 曲线

Fig. 10 $M_t \sim \lg t$ curve

4 结 语

a. 粉煤灰掺石灰混合料具有易击实、压缩性低、渗透性好及强度较高的工程性质,若以粉煤灰混合料作为桩材料形成粉煤灰桩加固软土地基,则由于桩体的透水性可使桩间土排水固结而加固效果显著,具有砂桩或碎石桩的类似性质,但砂桩、碎石桩桩体本身为松散体强度低,与水泥搅拌桩比较,两者桩体强度相近,而水泥搅拌桩对桩间土加固效果差,因此,粉煤灰掺石灰混合料是一种比较理想的柔性材料,粉煤灰混合料还可代替砂垫层,既具有一定的透水性又具有一定的强度。

b. 影响粉煤灰混合料的无侧限抗压强度的因素为配合比、干密度、龄期及养护条件,经分析粉煤灰掺石灰的较佳配比为 80:20 ~ 85:15,根据石灰质量适当调整,干密度对混合料强度影响尤为显著,干密度越高其早期强度增长越快,建议设计干密度为 $0.9 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$,若干密度过高,施工技术难以满足要求,用干密度作为控制施工质量标准,粉煤灰混合料的强度随龄期增长而增高,早期强度增长快,后期强度增长慢,养护条件对强度的影响表现在水养较湿样的强度高,故粉煤灰桩尽量打设在地下水位以下。

c. 粉煤灰混合料的强度形成是由于粉煤灰中的氧化物与石灰的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生水化反应生成一系列的不溶于水的水化产物,联结粉煤灰颗粒并充填孔隙,随着水化反应的深入,生成的水化物晶体也越来越多,则粉煤灰混合料的强度逐渐增大,故设计时应考虑粉煤灰混合料的强度增长系数。

参 考 文 献

- 1 张小平.二灰挤密桩的试验研究[学位论文].南京:河海大学,1995
- 2 梁新华.二灰挤密桩加固软土地基试验研究[学位论文].南京:河海大学,1993
- 3 诸国平.二灰性能及二灰桩复合地基受荷分析[学位论文].南京:河海大学,1994
- 4 孙连进,方开泽.二灰强度的形成机理.见:叶书麟主编.第七届土力学及基础工程学术会议论文集.北京:中国建筑工业出版社,1994.106 ~ 109

Experimental Study on Engineering Properties of Flyash-Lime Mixture

Zhang Xiaoping Yu Zhongquan

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract Based on laboratory tests, the engineering properties of fly ash-lime mixture, including compaction, permeability, compression, shear strength and unconfined compression strength are researched, in addition, the best mixing ratio of the fly ash mixture is determined. The strength development mechanism of the fly ash mixture is analyzed. The mixed material can be used as pile material to reinforce soft foundation, and it can also be used as cushion material due to its permeability, and the fly ash mixture cushion can replace sand cushion. Owing to its better engineering properties, the material is a good one to reinforce soft foundation.

Key words fly ash-lime mixtures; engineering properties; mixture ratio; age