

文章编号: 1000-7598-(2008)07-1943-06

黄河冲(淤)积粉质二灰土的配合比研究

姚占勇¹, 艾贻中², 商庆森¹, 李法增², 杨 光²

(1.山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 2.山东高速集团, 济南 250061)

摘 要: 试验研究了黄河冲(淤)积粉质二灰土的配合比问题。分析了黄河冲(淤)积粉质二灰土的强度标准龄期; 研究了土质、二灰比、二灰含量对二灰土强度的影响规律; 提出了黄河冲(淤)积粉质二灰土配合比设计的新思路。研究认为, 对于黄河冲(淤)积粉质二灰土, 应以 21 d 无侧限抗压强度作为配合比设计的依据; 黄河冲(淤)积平原区土质适宜的二灰比为 1: 3, 适宜的二灰含量在 32 %~40 %之间; 土中<0.005 mm 颗粒含量、土的有机质含量, 以及二灰土的粗细颗粒比 C_f 值对黄河冲(淤)积粉质二灰土的强度具有重要影响, 且呈现规律性变化; 当土中<0.005 mm 颗粒含量在 17 %~27 %之间时, 黄河冲(淤)积粉质二灰土可获得较高的强度。

关 键 词: 黄河; 粉粒; 二灰土; 强度

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Mixture ratio of Yellow River silty soil stabilized with lime-fly ash

YAO Zhan-yong¹, AI Yi-zhong², SHANG Qing-sen¹, LI Fa-zeng², YANG Guang²

(1.School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2.Shandong Expressway Corporation, Jinan 250061, China)

Abstract: Through the experiment, the mixture ratio of Yellow River alleviation (silt) soil stabilized by lime-fly ash is studied. The standard age of strength of Yellow River alleviation (silt) soil stabilized by lime-fly ash is analyzed. The influence law of soil and lime-fly ash ratio and content to the strength of lime-fly ash soil is studied; and the new idea about mix design of Yellow River alleviation (silt) soil stabilized by lime-fly ash is put forward. Research thought that the mix design should be based on the 21 d unconfined compression test of Yellow River alleviation (silt) soil stabilized by lime-fly ash, is put forward. The most suitable lime-fly ash ratio of Yellow River alluvial plain soil is 1: 3, and the most suitable lime-fly ash content is between 30 % and 40 %. The grain content of <0.005 mm and organic matter content and thickness ratio can influence the strength of Yellow River alleviation (silt) soil stabilized by lime-fly ash obviously; and the interrelation among them is regular. When the grain content of <0.005 mm is between 17 % and 27 %, the Yellow River alleviation (silt) soil stabilized by lime-fly ash can obtain higher strength.

Key words: Yellow River; dust particle; lime-fly ash; strength

1 引 言

由黄河高含沙悬浮液的搬运、絮聚、聚沉形成的黄河冲淤积平原土是一种特殊的土质。其颗粒级配差、黏粒含量少、塑性指数低、胶体活性差。石灰稳定该类土, 不仅强度低, 抗水、抗冻性也差^[1, 2]。二灰稳定土因具有较高的后期强度、良好的水稳性、一定的抗冻和抗干缩性能, 故在公路基层中被广泛采用。美国的詹姆斯 F. 迈耶斯等的专著《粉煤灰——一种公路建筑材料》中对石灰粉煤灰粒料在道路基层中的应用进行了较为全面的论述, 但对二灰稳定粉粒土的分析很少, 二灰稳定材料的原理及有关

理论分析涉及更少。其后在二灰稳定土强度规律方面进行了许多研究, 以指导配合比的设计^[3-6]。商庆森等对黄河冲(淤)积粉质二灰土的强度机理和强度增长规律进行了试验研究^[7]。关于二灰土现场施工工艺和检测也开展了大量研究^[8-11]。土的质量、土与粉煤灰的颗粒级配及其特征指标、二灰比和二灰含量, 至关二灰土配合比设计的质量, 对二灰土强度的形成具有重要的影响。但国内外未见有对土、粉煤灰的颗粒特征指标与二灰土强度关系, 以及二灰比、二灰含量对黄河冲淤积粉质二灰土影响规律方面的研究报道。

本文通过室内试验, 分析了黄河冲(淤)积粉

收稿日期: 2007-04-09

基金项目: 山东省交通科技基金资助 (No. 2002A107)。

作者简介: 姚占勇, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 从事路基路面材料研究。E-mail: zhanyong-y@sdu.edu.cn

质二灰土的强度标准龄期；研究了土质、二灰比、二灰含量对二灰土强度的影响规律；提出了黄河冲（淤）积粉质二灰土配合比设计的新思路。

2 试验材料与试验方法

试验执行《公路土工试验规程》^[12] 和《公路工

程无机结合料稳定材料试验规程》^[13]。

试验采用 I 级钙质石灰和高钙粉煤灰，材料质量符合《公路路面基层施工技术规范》^[14] 的要求。粉土取自青-银高速公路德-齐段沿线，为典型的黄河冲（淤）积粉土，土的颗分、液塑限试验结果见表 1 和图 1。

表 1 土的颗分与塑性指数

Table1 Particle size analysis and plasticity indices

土样 编号	颗粒百分含量						限制 粒径 d_{60} / mm	平均 粒径 d_{30} / mm	有效 粒径 d_{10} / mm	不均匀 系数 C_u	曲率 系数 C_c	塑性 指数 I_p
	>0.075 mm	0.075~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	<0.005 mm	<0.002 mm						
T ₁₂₈	0.3	5.6	50.5	15.9	27.7	15.0	0.016	0.012	0.001	16.00	2.250	17.5
T ₂₁₄	0.3	13.8	65.3	7.0	13.6	9.1	0.032	0.026	0.003	10.66	2.667	12.6
T ₃₂₅	0.2	6.4	55.0	13.8	24.7	14.9	0.020	0.015	0.001	20.00	2.450	13.5
T ₄₈	1.7	28.3	57.4	4.5	8.1	3.1	0.043	0.037	0.007	6.143	2.076	11.5
T ₅₁₈	0.4	7.1	61.8	12.8	18.0	9.9	0.025	0.019	0.002	12.50	2.000	12.2
T ₆₃₀	0.3	3.7	47.9	18.2	29.9	17.6	0.014	0.011				15.2

注：土样编号 Txyz，x 表示合同段，yz 表示土中 <0.005 mm 的颗粒含量（%），以下同。

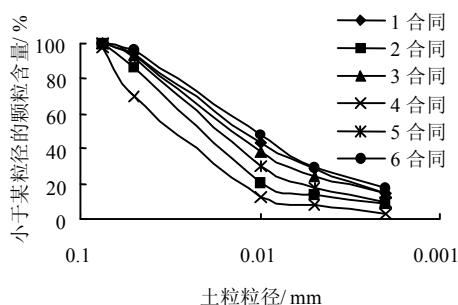


图 1 颗粒分布曲线

Fig.1 The particle size distribution curves

表 1 和图 1 显示，土质类型为低液限黏土，土颗粒级配较好。粉粒含量高，变化在 82.1 %~95.2 % 之间。粉性土塑性指数在 10.9~11.5，粉质黏土塑性指数在 12.2~17.5。

图 2 显示了塑性指数与较细粒级（小于 0.002 mm、0.005 mm）含量的关系。由图可见，<0.005 mm 的颗粒含量对塑性指数的影响，与 <0.002 mm 的颗粒含量的影响表现出相似的规律。这是因为 0.005 mm 颗粒是黏粒与胶粒的过渡粒级，0.005~0.002 mm 的颗粒已具有了薄膜水的吸附作用，也能反应土与水相互作用的性质，在黄河冲（淤）积粉质土的颗粒级配中属于填充粒级，对土的可塑性指标与压实性质影响很大，进而对二灰土的强度与稳定性形成有较大影响。因此，把 <0.005 mm 的颗粒当作黄河冲（淤）积粉质二灰土配合比设计的特征粒级。

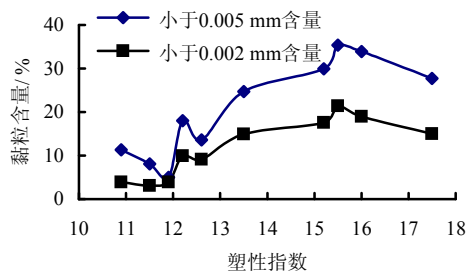


图 2 较细颗粒含量与土的塑性指数的关系

Fig.2 The relation between the content of thinner grain and plasticity indices

3 影响粉质二灰土配合比设计的因素

3.1 黄河冲（淤）积粉质二灰土强度增长的阶段性

图 3 显示了两种不同土质（T₂₁₄、T₃₂₅）、3 种二灰比（1:2，1:3，1:4）、两种二灰含量（32 %，36 %）的粉质二灰土，在不同龄期段（21 d 较 7 d，60 d 较 21 d，90 d 较 60 d，180 d 较 90 d 龄期）强度的增长率。

由图 3 可见，二灰土强度增长是分阶段进行的。初期（前 21 d）强度增长受土质、二灰含量、二灰比的影响大，强度增长率波动大；而后（21~60 d）进入强度快速增长的时期，该时期的养生对抑制干缩至关重要；该时间段过后，强度增长率快速下降，二灰土强度进入稳定增长的阶段。由于初期强度波动大，初期强度高的二灰土，其后期强度未必就高。用 7 d 标准养生龄期的强度作为配合比设计依据与

评价配合比的优劣是不合适的。考虑到二灰含量、二灰比对强度影响的时效性、现场施工的可操作性,黄河冲(淤)积粉质二灰土宜采用 21 d 的龄期作为配合比设计的标准龄期。

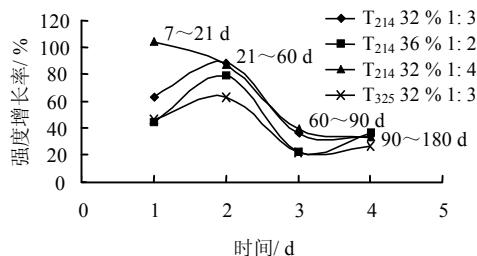


图3 二灰土不同时间段的强度增长率

Fig.3 The strength growth regularity of lime-fly ash of different time intervals

3.2 二灰比对粉质二灰土强度的影响

土采用 T_{214} 、 T_{325} , 二灰含量采用 32%、36%, 二灰比采用 1:2、1:3、1:4 进行配合比设计。采用不同二灰比的强度偏差系数(同一龄期、同一二灰含量,三个不同二灰比的强度均值/均方差)分析二灰比对强度的影响,偏差系数越大,二灰比对强度的影响越大。结果见表2。

表2 不同二灰比的强度偏差系数

Table 2 The strength deviation coefficient of different lime-fly ash ratios

土类	二灰含量 / %	不同龄期的偏差系数 C_v				
		7 d	21 d	60 d	90 d	180 d
T_{214}	32	0.12	0.08	0.05	0.07	0.02
	36	0.06	0.04	0.03	0.01	0.03
T_{325}	32	0.07	0.05	0.04	0.02	0.03
	36	0.04	0.04	0.01	0.04	0.04

表2显示,二灰比主要影响二灰土 60 d 前的早期强度。二灰比对二灰稳定粉性土与稳定黏性土强度的影响是不同的,二灰稳定粉土的早期强度对二灰比更敏感。

图4显示了二灰比 1:3 的二灰土 21 d 强度 $R_{1:3}$ 与二灰比为 1:2 的二灰土强度之比,随二灰含量的变化情况。图4说明,对于二灰稳定粉土,当二灰含量较低时(<35%),低二灰比(1:3)的初期强度较高;当二灰含量高时(>35%),高二灰比(1:2)的初期强度较高。对于二灰稳定粉质黏性土,低的二灰比(1:3)强度较高。由于二灰比主要影响二灰土的初期强度,总体而言,黄河冲(淤)积土适宜的二灰比是 1:3。

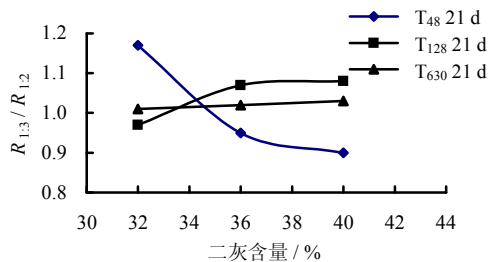


图4 二灰比对不同土质 21 d 龄期的二灰土强度影响

Fig.4 The influence of lime-fly ash ratio on the strength of 21d lime-fly ash

3.3 二灰含量对粉质二灰土强度的影响

图5为二灰含量为 36% 时,不同二灰比的二灰土平均强度 R_{36} ,与二灰含量为 32% 时的强度 R_{32} 之比,随龄期的变化图。

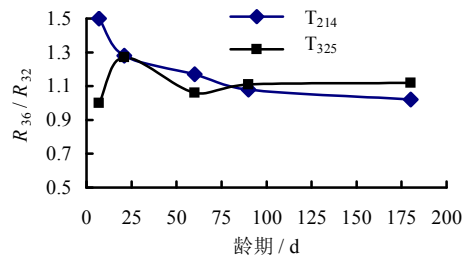


图5 二灰稳定土(T_{214} 、 T_{325})不同二灰含量强度比

Fig.5 The strength ratio of different lime-fly ash of lime-fly ash stabilized soil

图5显示,从整个龄期来看,二灰含量高的二灰稳定黄河冲积粉土、粉质黏土的强度也高。与二灰稳定粉质黏性土相比,提高二灰含量能显著提高二灰稳定粉性土的早期强度;但不能显著提高二灰稳定粉性土的后期强度。由于黄河冲(淤)积土中大量粉粒呈球状颗粒,以过多同样球状粉粒为主的粉煤灰的加入会导致二灰土的压实困难,进而降低二灰土的强度^[15],况且用提高二灰含量来提高二灰稳定粉土的强度也是不经济的。因此,并不是所有的土二灰含量越高越好,存在着合理的经济剂量,这个合理的剂量由二灰土的粗细度、可压实性确定。根据现场压实的试验,对于粉性土,二灰含量采用 32%~36% 是合适的;对于粉质黏土、黏性土,36%~40% 是合适的。

3.4 土质对粉质二灰土强度的影响

3.4.1 有机质含量对二灰土强度的影响

表3列出了 1、4、5、6 合同段二灰土的强度试验结果。

表 3 4 个合同段二灰稳定土无侧限抗压强度试验结果
Table 3 The unconfined compressive strength of lime-fly ash stabilized soil on four contract segments

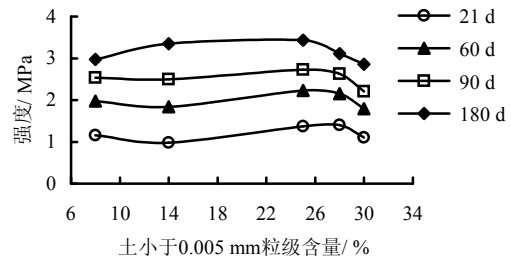
土类	龄期 /d	二灰含量、二灰配比					
		32 %		36 %		40 %	
		1:3	1:2	1:3	1:2	1:3	1:2
T ₄₈	21	1.16	0.99	1.06	1.11	1.14	1.27
	60	1.98	1.85	1.84	1.89	2.11	1.96
	90	2.54	2.33	2.37	2.59	2.76	2.76
	180	2.97	2.89	3.02	3.03	3.33	3.33
T ₅₁₈	21	0.67	0.76	0.78	0.77	0.76	0.84
	60	0.92	1.20	1.07	1.09	1.09	1.21
	90	1.11	1.33	1.19	1.33	1.42	1.49
	180	1.20	1.54	1.48	1.62	1.83	1.68
T ₁₂₈	21	1.40	1.44	1.47	1.38	1.52	1.41
	60	2.15	2.20	2.30	2.16	2.40	2.38
	90	2.63	2.66	2.82	2.83	2.99	2.88
	180	3.11	3.10	3.31	3.39	3.47	3.46
T ₆₃₀	21	1.10	1.09	1.09	1.07	1.19	1.16
	60	1.79	1.68	1.79	1.80	2.16	2.10
	90	2.21	2.17	2.37	2.33	2.73	2.76
	180	2.86	2.82	3.16	3.06	3.72	3.79

由表 3 可见, 尽管 T₅₁₈ 黏粒含量介于 T₄₈ 和 T₁₂₈ 之间, 土颗粒级配良好, 塑性指数也符合规范要求, 但强度明显偏低。检测烧失量发现, 烧失量高达 8.52 %。说明 5 合同土的烧失量偏大, 有机质含量偏高。土中的有机质, 一方面易于与 1, 2, 3 价阳离子形成能溶于水的盐, 消耗了二灰土中的 Ca⁺⁺、Mg⁺⁺ 离子; 另一方面, 能降低二灰土的 pH 值, 也就降低了只有在碱性环境中粉煤灰与土中黏粒硅氧键解离、硅铝组分的溶解的能力, 不利于二灰土初期的离子交换与吸附作用及中后期的火山灰反应的进行, 影响整个龄期内二灰土的强度生成。因此, 5 合同段二灰土强度偏低。

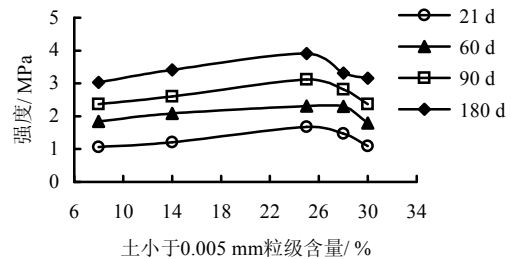
表 3 还显示, 二灰比为 1:2 的二灰土强度高于 1:3 时的强度。这是因为适当提高石灰的用量可以中和有机质的酸性, 有利于二灰土强度的形成。因此, 当土中的有机质含量高时, 宜取高的二灰比。

3.4.2 土的特性对强度影响的显著性分析

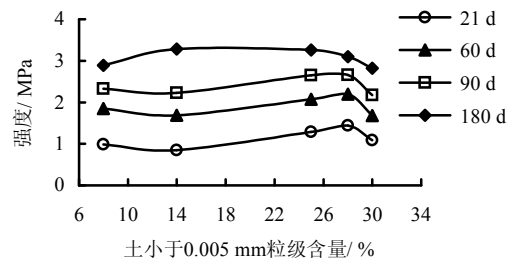
对二灰比为 1:3 的二灰土 (土采用 T₄₈、T₁₂₈、T₆₃₀, 二灰含量为 32 %、36 %、40 %) 的各龄期强度进行双因子方差分析。结果表明, 在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下, 土的特性 (<0.005 mm 的颗粒含量)、二灰含量对二灰土强度均有显著影响。土的特性是影响二灰土早期强度的主要因素。二灰含量是影响二灰土后期强度的主要因素。土中 <0.005 mm 颗粒含量与二灰土强度具有良好的规律性 (图 6)。



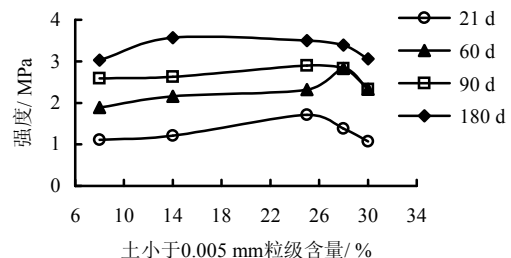
(a) 二灰含量 32 % 二灰比 1:3



(b) 二灰含量 36 % 二灰比 1:3



(c) 二灰含量 32 % 二灰比 1:2



(d) 二灰含量 36 % 二灰比 1:2

图 6 土的 <0.005 mm 含量与二灰土强度的关系

Fig.6 The relationship between the content of soil <0.005 mm and strength of lime-fly ash

不同二灰含量、二灰比和龄期的二灰土, <0.005 mm 颗粒含量在 17 %~27 % 之间, 二灰土的强度较高。这与最大干密度表现出相同的规律^[15]。<0.005 mm 颗粒含量在 17 %~27 % 之间恰好是粉质黏土的特定黏粒含量范围。粉质黏土级配优于粉性土和黏性土, 碾压过程中表现出良好的嵌挤与填充作用。二灰稳定此类土质可得到较大的干密度, 从而获得较高的强度。当土中 <0.005 mm 颗粒含量小于 17 % 时, 要获得良好的二灰稳定土强度, 补充适量的黏土是经济合理的方法。

3.5 土与粉煤灰混合料的级配对粉质二灰土强度的影响

选择颗粒级配差异较大的 T₂₁₄、T₄₈、T₅₁₈ 3 种土、粗细差异的 3 种粉煤灰 (F₁、F₄、F₆)，二灰含量、二灰比选用 36 % 和 1:3，考察 28 d 龄的无侧限抗压强度。

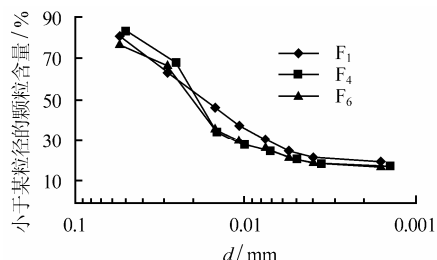


图 7 粉煤灰 F₁、F₄、F₆ 级配曲线
Fig.7 The gradation curves of fly ash (F₁, F₄, F₆)

由于二灰土在筛分过程中的絮凝作用，比重计法无法准确测定混合料的颗粒级配。为了反映二灰土的级配和粉煤灰、土的活性对二灰土强度的影响规律，定义参数粗细颗粒比 C_f ：

$$C_f = \frac{|f_1 - s_1|}{|(f_2 - s_2)f_3|} \quad (1)$$

表 4 粉煤灰和土的级配对二灰土 28 d 强度的影响

Table 4 The influence of fly ash and gradation of soil on the 28d strength of lime-fly ash

土类	T ₂₁₄ F ₁	T ₂₁₄ F ₂	T ₂₁₄ F ₃	T ₄₈ F ₁	T ₄₈ F ₂	T ₄₈ F ₃	T ₅₁₈ F ₁	T ₅₁₈ F ₂	T ₅₁₈ F ₃
粗细颗粒比 C_f	0.017	0.064	0.061	0.024	0.106	0.099	0.011	0.029	0.030
28 d 标养强度/MPa	1.00	2.26	2.40	1.73	2.70	3.15	0.79	1.74	2.26

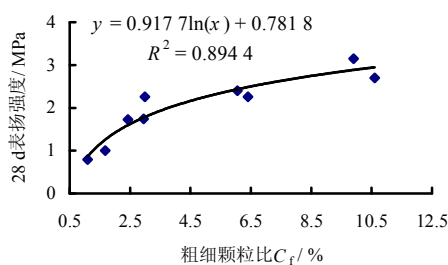


图 8 二灰土的粗细颗粒比 C_f 与二灰土 28 d 强度的关系
Fig.8 The relationship between C_f and 28d strength of lime-fly ash

进一步的研究表明，土中 <0.005 mm 颗粒含量 >27 % 时， C_f 值不能反映级配与强度的优劣。对于一般的黄河冲淤积土，土中 <0.005 mm 颗粒含量 <27 %，当二灰含量在 32 %~36 % 之间， C_f 值大的，二灰土级配优，强度高， C_f 值能反映级配与强度的优劣。

式中： C_f 为二灰土的粗细颗粒比； f_1 为粉煤灰的 >0.001 mm 含量； s_1 为土的 >0.001 mm 含量； f_2 为粉煤灰的 <0.005 mm 含量； s_2 为土的 <0.005 mm 含量； f_3 为粉煤灰中 >0.074 mm 的含量

式 (3) 的物理意义在于：粉煤灰与土的粗颗粒含量差 (| (粉煤灰的 >0.001 mm 含量) - (土的 >0.001 mm 含量) |) 越大，混合料越易形成较好的颗粒级配， C_f 越大，二灰土的强度越高；粉煤灰中的粗颗粒 (粉煤灰中 >0.074 mm 的含量) 越多，粉煤灰的活性越差，二灰土强度越低；因为粉煤灰中小于 0.005 mm 的颗粒含量较稳定，一般在 22 %~26 % 之间，粉煤灰与土的细颗粒含量差 (粉煤灰的 <0.005 mm 含量 - 土的 <0.005 mm 含量) 越大，说明土中 <0.005 mm 的颗粒含量越低，二灰土强度越低。因此，粗细颗粒比 C_f 反映了二灰土的颗粒级配优劣与活性高低，进而反映了二灰土的强度特性， C_f 越大，二灰土的强度越高。

表 4、图 8 反映了二灰土中粗细颗粒比 C_f 与二灰土强度的关系。图 8 表明， C_f 与二灰土强度呈现良好的对数关系， C_f 较好地反映了二灰土的颗粒级配与粉煤灰、土的活性，是个重要的级配与活性参数，是二灰土配合比设计时的一个良好参考指标。

4 结 论

(1) 二灰土稳定黄河冲(淤)积土的强度增长是分阶段进行的，初期 (21 d 前) 强度增长受土质、二灰含量、二灰比影响，波动大；而后 (21~60 d) 进入强度快速增长的时期，该时期的养生对抑制干缩开裂至关重要；60 d 后，二灰土强度进入稳定增长的阶段。因而，用 7 d 标准养生龄期的强度作为配合比设计的依据来评价配合比的优劣是不合适的。考虑到二灰含量、二灰比对强度影响的时效性、现场施工的可操作性，宜采用 21 d 的龄期作为配合比设计的标准龄期。

(2) 对黄河冲淤积平原区的土质，二灰比主要影响二灰土 60 d 前的强度。二灰稳定粉土的早期强度对二灰比更敏感，高二灰含量要求高的二灰比；对二灰稳定黏性土，高二灰含量要求略低的二灰比，

要依据 $<0.005\text{ mm}$ 颗粒含量、粉煤灰质量、有机质含量调整二灰比。二灰比在 $1:2\sim 1:3$,特别是靠近 $1:3$ 是黄河冲淤积平原区土质最适宜的二灰比范围。

(3)二灰含量在 $32\%\sim 40\%$ 之间是黄河冲淤积平原区土质最适宜的二灰含量范围。对于二灰粉性土,二灰含量 $32\%\sim 36\%$ 是适宜的。对于二灰粉质黏土与黏性土,二灰含量 $36\%\sim 40\%$ 是合适的,若粉煤灰充足、土的黏粒含量高时可取上限。

(4)土与粉煤灰的颗粒级配是影响二灰土强度与压实性能的重要因素,二灰土的粗细颗粒比 C_f 、土中 $<0.005\text{ mm}$ 颗粒含量、土的烧失量是二灰土配合比设计的几个重要参数。 $<0.005\text{ mm}$ 颗粒是影响土与二灰土的物理性质、水理性质的敏感性界限颗粒,它的含量直接影响二灰土的强度与稳定性,土中 $<0.005\text{ mm}$ 颗粒含量在 $17\%\sim 27\%$ 之间,二灰土具有较高的强度。粗细颗粒比 C_f 值是反映二灰土颗粒级配优劣与活性大小的重要参考指标,对于黄河冲(淤)积粉土和粉质黏土, C_f 越大,二灰土强度越高。在进行二灰土配合比设计时,当 $<0.005\text{ mm}$ 颗粒含量 $\leq 27\%$ 、二灰含量在 $32\%\sim 36\%$ 之间,可通过级配试验的 C_f 值来判断强度的高低,初定试验配合比。土的有机质含量对二灰稳定土的强度有很大影响,当有机质含量高时,可采用高的二灰比。

参考文献

- [1] 商庆森,姚占勇,刘树堂.黄河三角洲地区道路用土的特性研究[J].公路交通科技,1996,13(3):10-15.
SHANG Qing-sen, YAO Zhan-yong, LIU Shu-tang. Research on the characteristics of soils for road engineering in the Yellow River Delta Region[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 1996, 13(3): 10-15.
- [2] 姚占勇,商庆森,刘树堂,等.生石灰粉稳定黄河冲(淤)积粉土的可行性探讨[J].山东工业大学学报(自然科学版),1999,2:78-80.
YAO Zhan-yong, SHANG Qing-sen, LIU Shu-tang. Inquiry of feasibility to stabilize the Yellow River silt by quick lime powder[J]. *Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition)*, 1999, 2: 78-80.
- [3] 沙爱民,张登良.稳定土火山灰作用的热力学原理及应用研究[J].岩土工程学报,1995,17(3):39-43.
SHA Ai-min, ZHANG Deng-liang. Principle and application of pozzolanic reaction thermodynamics in lime-stabilized soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(3): 39-43.
- [4] 杨锡武.粉煤灰混合料半刚性基层的微结构研究[J].中国公路学报,1994,3:36-40.
YANG Xi-wu. A study of the semi-rigid base micro-structure of fly-ash mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1994, 3: 36-40.
- [5] 张宏,张伯平.养护龄期对二灰土工程特性的影响试验研究[J].人民长江,2004,35(12):25-26.
ZHANG Hong, ZHANG Bo-ping. Test and study of influence of curing time on features of a lime-fly ash soil project[J]. *Yangtze River*, 2004, 35(12): 25-26.
- [6] 张登良,许永明,沙爱民.石灰、粉煤灰稳定土的早强试验研究[J].粉煤灰综合利用,1995,(1):17-24.
ZHANG Deng-liang, XU Yong-ming, SHA Ai-min. Experimental research on early strength of lime and fly ash stabilized soil[J]. *Comprehensive Exploitation of Fly-ash*, 1995, (1): 17-24.
- [7] 商庆森,刘树堂,姚占勇.二灰稳定黄河冲(淤)积粉土的研究[J].公路交通科技,1998,(4):8-11.
SHAN Qing-sen, YAO Zhan-yong, LIU Shu-tang. Reserch on the stabilization of the Yellow River alluvial airts with lime and fly ash[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 1998, (4): 8-11.
- [8] 熊保恒,陆春,郭洪福.高速公路石灰粉煤灰稳定土底基层的机械化施工[J].筑路机械与施工机械化,2001,118(3):46-50.
XIONG Bao-heng, LU Chun, GUO Hong-fu. The mechanical construction of lime-fly-ash stabilize soil subbase course of the highway[J]. *Road Machinery and Construction Mechanization*, 2001, 118(3): 46-50.
- [9] 赵淑敏.二灰土现场试验检测方法探讨[J].公路,2003,(4):123-124.
ZHAO Shu-min. The spot test method inquiring of lime-fly-ash[J]. *Highway*, 2003, (4): 123-124.
- [10] 邱国峰,傅光奇.高速公路二灰土底基层配合比的确定与施工[J].广州大学学报,2004,3(2):168-171.
QIU Guo-feng, FU Guang-qi. The highway mixture ratio determination and construction of lime-fly-ash stabilized soil[J]. *Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition)*, 2004, 3(2): 168-171.
- [11] 龚廉溟,高吉才.粉土用于二灰土底基层施工工艺控制[J].交通科技,2004,(6):49-51.
GONG Lian-min, GAO Ji-cai. Control of workmanship of the lime fly-ash stabilized soil subbase course used powder soil[J]. *Transportation Science and Technology*, 2004, (6): 49-51.
- [12] JTJ051-93 公路土工试验规程[S].
- [13] JTJ057-94 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [14] JTJ034-2000 公路路面基层施工技术规范[S].
- [15] 姚占勇,练继建,艾贻中,等.黄河冲(淤)积粉质二灰土的压实特性研究[J].岩土工程学报,2007,29(5):664-670.
YAO Zhan-yong, LIAN Ji-jian, AI Yi-zhong. Compaction properties on Yellow River silty soil stabilized with lime-flyash[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(5): 664-670.