

洞庭湖区掺粉煤灰水泥土性能试验研究

王 崙¹, 黄耀英¹, 方国宝², 黄绪泉¹, 蔡 忍¹, 殷晓慧¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 采用粉煤灰代替部分水泥作为胶凝材料的水泥土桩法, 近年来逐渐在软弱地基的加固处理中得到应用。针对洞庭湖区湖泊相淤泥质软弱地基加固处理问题, 结合该区域某分洪闸地基处理工程, 在室内开展了不同粉煤灰掺量的水泥土试件的无侧限抗压强度、含水率以及中心部位土样溶液 pH 值的测定试验, 然后探讨建立了不同粉煤灰掺量的水泥土无侧限抗压强度的组合指数式模型。研究结果表明: 水泥土试件无侧限抗压强度在 60 d 龄期前随着粉煤灰掺量的增加而降低, 但在 90 d 龄期时, 不同粉煤灰掺量的 4 组试件强度值较为接近; 水泥土试件含水率在 28 d 龄期之后随着粉煤灰掺量的增加而增加; 水泥土试件中心部位土样溶液的 pH 值始终随着粉煤灰掺量的增加而降低; 采用组合指数式强度模型能较好地描述粉煤灰掺量和龄期对水泥土无侧限抗压强度增长规律的影响; 通过对不同粉煤灰掺量水泥土桩方案进行比选, 建议洞庭湖区水泥土中粉煤灰掺量应在 20% 左右为宜。

关键词: 水泥土; 粉煤灰掺量; 抗压强度模型; 含水率; pH 值; 水泥土性能; 洞庭湖区

中图分类号: TV41

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0210-07

Experimental study on performances of fly ash cement soil in Dongting Lake area

WANG Yu¹, HUANG Yaoying¹, FANG Guobao², HUANG Xuquan¹, CAI Ren¹, YIN Xiaohui¹

(1. College of Hydraulic & Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The cement soil pile method using fly ash instead of some cement as a cementitious material has been gradually applied in the reinforcement treatment of weak foundations in recent years. Aiming at solving the problem of soft foundation of the Dongting Lake area, the unconfined compressive strength, water content and pH value of soil samples in the central part of the cement – soil specimens with different fly ash contents were tested indoors, by combining the foundation treatment project of a floodgate in the area. And the combined exponential model of the unconfined compressive strength of cement soil with different fly ash content was established. The results showed that the unconfined compressive strength of cement – soil specimens decreased with the increase of fly ash before 60 day age, but the strength values of four specimens are close at 90 day age. The moisture content of the part increased with the increase of fly ash content after 28 day age. the pH value of the soil sample solution in the central part of the cement soil test specimen always decreased with the increase of fly ash content. The ash content cement soil pile scheme is compared and selected. The combined exponential strength model can better describe the influence of fly ash content and age on the unconfined compressive strength growth law of cement soil. Through the comparison of different cement ash mixed cement soil pile schemes, the amount of fly ash in the cement soil of Dongting Lake area should be about 20%.

Key words: cement soil; fly ash content; compressive strength model; moisture content; pH value; performances of fly ash cement soil; Dongting Lake area

收稿日期: 2019-01-06; 修回日期: 2019-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779130)

作者简介: 王 崙(1995-), 男, 青海西宁人, 硕士研究生, 主要从事大坝安全监控方面的研究。

通讯作者: 黄耀英(1977-), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工程长效服役实验、数值计算及调控等方面的教学和科研。

1 研究背景

洞庭湖位于我国湖南省北部,长江荆江河段以南,古称“云梦”。洞庭湖区^[1-2]属于湖相沉积平原区,地形较平坦,其软土属于湖泊相沉积软土。湖区地基条件具有凝聚力小、抗剪强度低等特点,不宜直接作为建筑物的地基。近年来随着洞庭湖区经济的快速发展和大批的水利工程及道路交通工程的实施,洞庭湖区淤泥质地基软弱的问题越来越引起人们的重视,目前常采用水泥土搅拌桩加固的方法来提高地基强度。水泥土搅拌桩具有经济耐久、施工简便等特点^[3]。粉煤灰作为一种常用的矿物外加剂,在混凝土工程中广泛应用,也可将其应用到水泥土地基处理中,可以起到减少水泥用量,降低工程成本的作用。

针对以水泥中掺入粉煤灰作为胶凝材料的水泥土桩法在加固地基工程中表现出的优良特性,目前国内外专家针对掺粉煤灰水泥土开展了一系列研究^[4-7],认为粉煤灰可作为胶凝材料来替代部分水泥,并不影响其最终强度。但上述研究仅限于对水泥土强度的定性认识。而关于掺粉煤灰水泥土无侧限抗压强度模型研究方面,Cheng 等^[8]通过引入粉煤灰水泥掺量的不确定性参数 α 和搅拌过程中不均性参数 β 两个随机变量,建立了掺粉煤灰水泥土的强度预测模型,并且利用试验数据对预测模型进行了验证;周海龙^[9]通过室内试验数据建立了考虑水泥掺入比、粉煤灰掺量、龄期的非线性水泥土强度预测模型,并且进行了验证;Jongpradist 等^[10]通过水泥土室内实验数据,建立了关于水胶比的水泥土无侧限抗压强度预测公式;蒙强等^[11]通过水泥土室内试验,提出了水泥粉煤灰固化土的强度预测经验公式。虽然上述模型可以求解不同龄期、不同粉煤灰掺量下的水泥土无侧限抗压强度,但是模型形式较为复杂,并且拟合效果较为一般。同时,粉煤灰对于水泥土强度的影响与所使用粉煤灰及当地土壤的化学成分有很强的相关性,具有一定的地域性^[12];在对洞庭湖区水泥土的研究中,现有研究多是针对水泥掺入比、水泥标号及含水率等因素对水泥土无侧限抗压强度的影响^[13-14]。为此,本文结合洞庭湖区某分洪闸地基加固工程,选取现场地基土样,首先开展室内试验,

对于不同粉煤灰掺量的水泥土试件进行无侧限抗压强度、含水率及 pH 值的测定,得到洞庭湖区粉煤灰水泥土在不同粉煤灰掺量下的物理特性变化规律。进而参考混凝土抗压强度模型中常用的组合指数式表达式^[15],考虑粉煤灰掺量对粉煤灰水泥土无侧限抗压强度的影响,基于无侧限抗压强度试验数据,建立洞庭湖区考虑不同粉煤灰掺量的水泥土抗压强度组合指数式预测模型。

2 粉煤灰水泥土特性试验设计

2.1 试验材料

本次试验所用土样取自洞庭湖区某分洪闸闸基部位,取土深度约为 3~4 m,土质较为粘稠,颜色为深棕色,有腥味,土的物理力学参数及Ⅱ级粉煤灰的基本化学成分如表 1、2 所示;水泥采用 P. O. 42. 5 石门海螺牌普通硅酸盐水泥;试验用水采用符合国家标准的试验室自来水。

2.2 试验方案

本次试验为了研究洞庭湖区粉煤灰水泥土在不同粉煤灰掺量下的无侧限抗压强度、含水率及 pH 值的变化规律,根据《水泥土配合比试验规程》(JGJ/T 233 - 2011)^[16]及洞庭湖区某分洪闸工程施工现场水泥土搅拌桩所用配合比(水胶比为 0. 7,胶凝材料掺量为 18%),结合室内试验相关设备以及原材料,设计了标准养护状态下 4 种不同粉煤灰掺量水泥土试验组 S1~S4,每种试验组下设计 7、14、28、60、90 d 共计 5 种典型龄期,每个龄期下成型 3 个 7. 07 cm×7. 07 cm×7. 07 cm 试件。当水泥土达到试验龄期时,取出该龄期下所有试件,测定无侧限抗压强度、含水率以及中心部位土样溶液 pH 值,由此得到不同掺量水泥土试验方案如表 3 所示。由《水泥土配合比试验规程》(JGJ/T233 - 2011)^[16]以及设计的水胶比得到 4 组试验的材料配比。

2.3 试验方法

按照 2. 2 节设计方案,进行室内水泥土试件成型,成型后将试件放入恒温恒湿养护箱(养护温度为 20±5℃,养护湿度≥95%)进行养护,待到设计龄期时取出试件,进行水泥土无侧限抗压强度测定、土样含水率测定及土样 pH 值测定。

表 1 试验土样的主要物理力学参数

土样	比重	天然含水率/%	湿密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	压缩系数/MPa ⁻¹	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
淤泥质土	2. 73	45. 3	1. 77	1. 25	1. 24	0. 7	9	3	1. 0×10 ⁻⁴

表 2 试验粉煤灰主要化学成分及含量

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ti ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O
51.92	5.11	16.11	1.79	7.00	2.32	1.59	2.07

表 3 掺粉煤灰水泥土试验方案

编号	水胶比 $m_w/(m_c + m_f)$	水泥 m_c/kg	粉煤灰 m_f/kg	粉煤灰 掺量 $a_f/\%$	水泥掺量 $a_w/\%$	水/ kg	淤泥质 土/kg	养护龄 期/d	测试 项目
S1	0.7	216.2	24.0	10.0	16.2	168.2	1334.5	7、14、 28、60、 90	无侧限抗
S2	0.7	191.9	48.0	20.0	14.4	167.9	1332.4		压强度、
S3	0.7	156.4	67.0	30.0	12.6	156.4	1241.1		含水率、
S4	0.7	240.6	0.0	0.0	18.0	168.4	1336.7		pH 值

2.3.1 水泥土抗压强度测试 待试件养护至设计龄期,即取出该龄期下所有试件,进行水泥土无侧限抗压强度测试,室内试验仪器实物图如图 1(a)所示。



图 1 水泥土抗压强度、含水率及 pH 值测定仪器

2.3.2 土样含水率测定 取已测试件中心部位土体 15 ~ 30 g,按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)^[17]进行测定。首先测定干燥盒质量 m_s ,然后将土样放入的干燥盒中,进行称重,记录湿土与干

燥盒的总质量 m_1 ,之后在干燥箱内进行干燥后再次称重,得到干燥后土样与干燥盒的总质量 m_2 ,计算得到土样含水率 α 如公式(1)所示,仪器实物图如图 1(b)所示。

$$\alpha = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_2 - m_s)} \times 100\% \tag{1}$$

2.3.3 土样 pH 值测定 取已测试件中心部位土体 10 g,碾压至细粒状,在烧杯中配置土水比为 1:5 制备土样溶液。静置 30 min 后,测定其上层清液的 pH 值,仪器实物图如图 1(c)所示。

3 试验结果与分析

根据第 2 节的试验方法,得到 S1 ~ S4 号试件组在设计龄期的的无侧限抗压强度值、含水率及配制土样溶液测定上清液的 pH 值的试验结果如表 4 所示。

表 4 掺粉煤灰水泥土不同龄期试验结果

编号	抗压强度/MPa					含水率/%					pH 值			
	7d	14d	28d	60d	90d	7d	14d	28d	60d	90d	7d	14d	28d	60d
S1	0.96	1.24	1.65	2.18	2.21	39.14	39.71	41.78	37.97	37.11	12.47	12.45	12.40	12.36
S2	0.68	1.18	1.47	2.05	2.29	40.62	39.87	41.80	38.87	37.63	12.44	12.39	12.34	12.11
S3	0.62	0.92	1.25	1.94	2.29	42.57	40.37	42.83	40.91	39.07	12.37	12.36	12.22	12.02
S4	1.01	1.28	1.66	2.09	2.28	40.47	40.57	42.59	40.31	38.80	12.48	12.47	12.35	12.33

注:由于实验室 pH 计损坏,未测定 90d 龄期水泥土试件土样溶液 pH 值。

3.1 掺粉煤灰水泥土无侧限抗压强度试验结果分析 由表 4 所得数据,得到 4 组试验组抗压强度随龄期变化曲线和抗压强度随配合比变化曲线如图 2 所示。

从图 2(a)中可以发现在同一组试验组中,水泥土试件无侧限抗压强度随着龄期增大而增大,但增长速率随龄期逐渐减小;在早龄期(28 d 龄期之

前),4 组试件的无侧限抗压强度随粉煤灰掺量的增大而减小,这是由于 4 组试件组水胶比一致,粉煤灰掺量的提高使得水泥土中的水泥用量相应减少,抗压强度随着水泥用量的减少而降低。

由图 2(b)可知,在 60 d 龄期以前,试件强度随着粉煤灰掺量的增加而降低;但在 90 d 龄期时,4 组试件抗压强度较为接近。这是由于水泥土中的水化

反应已趋近完成,粉煤灰首先改善了土体的颗粒级配,使原本内部较为松散的结构变得更加紧密,其次粉煤灰具有非均质性,在水泥浆体中具有良好的填充作用^[4]。另外,由于粉煤灰的容重只有水泥的2/3左右,掺入粉煤灰能够提高水泥土试块微观结构的密实性,所以适当掺加粉煤灰能够提高水泥土的后期强度。

3.2 掺粉煤灰水泥土含水率试验结果分析

由表4所得试验数据,得到4组试验组含水率随龄期的变化曲线和含水率随配合比变化曲线如图3所示。

从图3(a)中可以发现,在14 d龄期以前,S1、S4号试件组的含水率随龄期的增加而增加,S2、S3号试件组的含水率随龄期的增加而减小;在14~28 d龄期时,4组试件组的含水率随龄期的增加而增加;在28 d龄期以后,4组试件组的含水率随龄期的增加而减小。

由图3(b)中可以发现,在同一龄期下,4组试件的含水率随着粉煤灰掺量的增加而增加,在0~90 d龄期、10%和20%粉煤灰掺量(S1和S2号)试件组含水率始终小于无粉煤灰掺量(S4号)试件组,30%粉煤灰掺量(S3号)试件组含水率始终大于无粉煤灰掺量(S4号)试件组,10%、20%粉煤灰掺量(S1、S2号)试件组由于粉煤灰的掺入,粉煤灰在水泥浆体中发生水化反应,消耗了部分水量,导致10%、20%粉煤灰掺量(S1、S2号)试件组含水量较无粉煤灰掺量(S4号)试件组低;但30%粉煤灰掺量(S3号)试件组由于粉煤灰掺量过高,导致水泥土中有效水胶比上升,在高水胶比的浆体中,由于粉煤灰水化程度有限,消耗的水分较少,所以其含水率较无粉煤灰掺量(S4号)试件组高。

3.3 掺粉煤灰水泥土 pH 值试验结果分析

由表4所得试验数据,得到4组试验组 pH 值随龄期的变化曲线和 pH 值随配合比的变化曲线如图4所示。

从图4(a)中可以发现在同一组试验组中水泥土土样溶液 pH 值随着龄期的增加而降低;这是由于随着龄期的增长,试件内部的水泥被消耗,导致土样溶液的 pH 值随着龄期的增加而降低。4组试件土样溶液的 pH 值均在12以上,处于强碱环境,强碱环境有助于水泥土的强度增长。

由图4(b)可知,同一龄期下,4组试件的 pH 值随粉煤灰掺量的增加而降低,这是由于4组试件组的水胶比一致,粉煤灰掺量的提高会减少水泥用量,

导致同一龄期下,S1~S4号试件组的 pH 值随粉煤灰掺量的增加而减小。

4 考虑粉煤灰掺量的水泥土抗压强度模型

从上述试验结果可以看出,水泥土中粉煤灰掺量以及龄期对其力学性能的发展具有重要影响。目前的水泥土工程中,各种外加剂和新型材料的广泛使用,使得影响水泥土力学性能发展的因素越来越多,水泥土力学性能发展更为多变,现有文献报导的考虑粉煤灰掺量的水泥土抗压强度模型多是采用非线性经验模型,但是此类模型形式较为复杂,并且拟合效果较为一般。为此,本文在混凝土抗压强度模型中常用的组合指数表达式^[15]的基础上,考虑粉煤灰掺量对粉煤灰水泥土无侧限抗压强度影响,建立考虑粉煤灰掺量的水泥土抗压强度模型:

$$\theta_{cs}(\tau, w_{FA}) = \left(\frac{1}{1 - w_{FA}/A} \right)^\lambda \sum [\theta_i (1 - e^{-(1 - w_{FA}/A) m_i \tau})] \quad (2)$$

式中: θ_{cs} 为水泥土抗压强度, MPa; τ 为龄期, d; w_{FA} 为粉煤灰掺量, %; λ 、 m_i 、 A 均为常数。考虑到组合指数式便于进行数学计算,对于常规90 d龄期试验资料,可取2项;对于长龄期试验资料,可取3~4项。考虑到本次试验粉煤灰掺量较大,水泥水化作用延迟,龄期为90 d,故在公式(2)中取2项可满足精度,即:

$$\theta_{cs}(\tau, w_{FA}) = \left(\frac{1}{1 - w_{FA}/A} \right)^\lambda \{ \theta_1 [1 - e^{-(1 - w_{FA}/A) m_1 \tau}] + \theta_2 [1 - e^{-(1 - w_{FA}/A) m_2 \tau}] \} \quad (3)$$

当对考虑粉煤灰掺量的水泥土抗压强度模型参数进行拟合时,模型式(3)中未知参数有6个,分别为 θ_1 、 θ_2 、 m_1 、 m_2 、 λ 、 A ;将各待定参数记为 X , 即 $X = [x_1, x_2, \dots, x_6]^T$, 并且有约束条件 $x_i \geq 0 (i = 1 \sim 6)$ 以试验值和计算值的残差平方和最小作为参数优化估计问题的目标函数,抗压强度优化数学模型为:

$$\begin{cases} F(X) = \sum [\theta_{cs}(\tau) - \theta'_{cs}(\tau)]^2 \rightarrow \min \\ x_i > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\theta_{cs}(\tau)$ 为抗压强度计算值, MPa; $\theta'_{cs}(\tau)$ 为抗压强度试验值, MPa; $F(X)$ 为目标函数; x_i 为待确定参数。

上述属于非线性规划约束极值问题,可用非线性规划的方法求解,如复合形法、序列线性规划法、粒子群法等^[18],由于复合形法适合解决有约束的优化问题^[19],且算法较简单,故本文采用复合形法求

解待确定参数。根据 3.1 节试验数据,采用复合形法的优化算法对考虑不同粉煤灰掺量水泥土无侧限

抗压强度的计算模型进行参数标定,具体参数如表 5 所示。

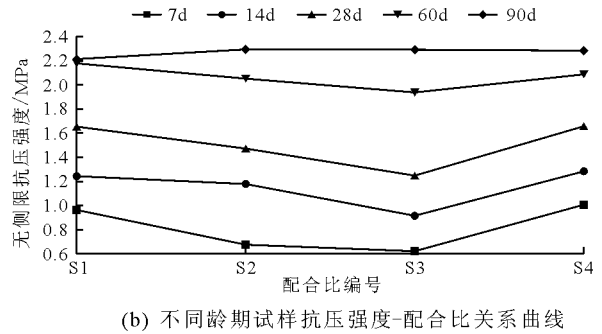
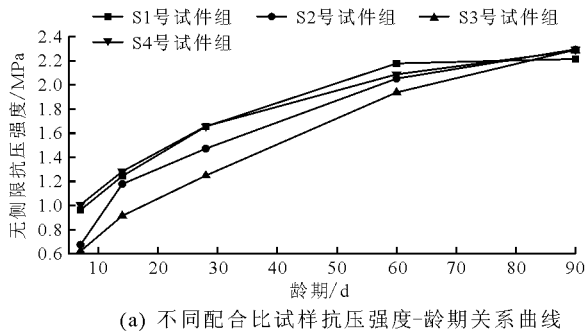


图2 无侧限抗压强度试验结果

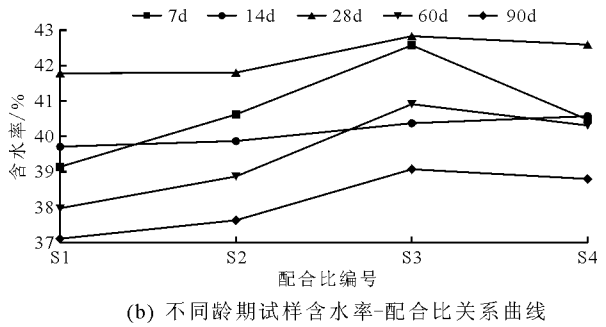
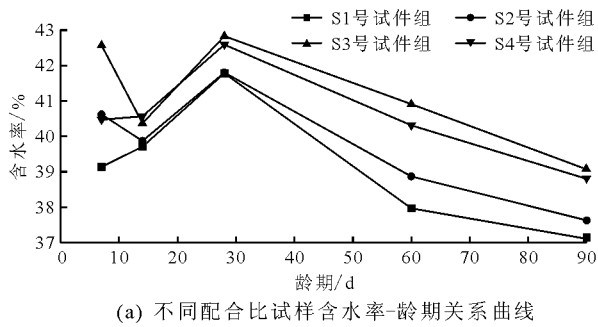


图3 含水率试验结果

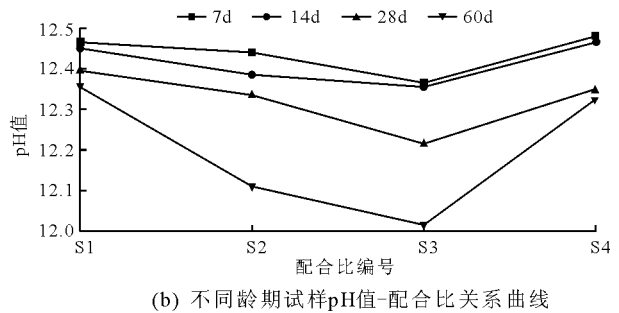
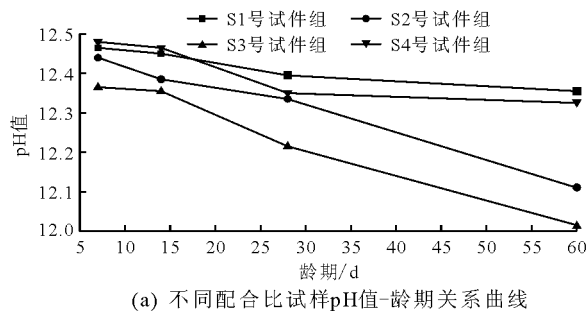


图4 pH 值试验结果

为了验证本文模型的实用性和准确性,在之前试验的基础上,补充一组相同条件下粉煤灰掺量 25% 的试件组,该试件组下设计 3、7、14 d 共计 3 种典型龄期,每个龄期下成型 3 个用于进行无侧限抗压强度试验的水泥土试件。之后结合试验实测数据与模型拟合数据对模型预测效果进行对比分析,具体预测结果如图 5 所示。

表5 考虑粉煤灰掺量的水泥土抗压强度模型参数

θ_1	m_1	θ_2	m_2	λ	A
1.290	0.077	2.609	0.006	8.095	1.568

由图 5 可以看出,建立的水泥土无侧限抗压强度组合指数式模型能较好地描述粉煤灰掺量和龄期对

水泥土强度增长规律的影响,相关系数分别为 0.9993、0.9908、0.9959、0.9884、0.9977;相对误差分别为 12.78%、13.05%、4.85%、11.35%、8.09%。

5 不同粉煤灰掺量方案比选

通过上述试验结果与分析可以发现,不同粉煤灰掺量会导致水泥土试件无侧限抗压强度、含水率及试件中心部位土样溶液 pH 值的不同;同时粉煤灰作为工业固体废料,在水泥土桩工程中作为部分胶凝材料替代物,既做到了废物利用,又可节约施工成本。为此,本节选取水泥土试件无侧限抗压强度、含水率、pH 值以及施工成本 4 项指标,对水泥土不同粉煤灰掺量方案进行综合比选,具体如表 6 所示。

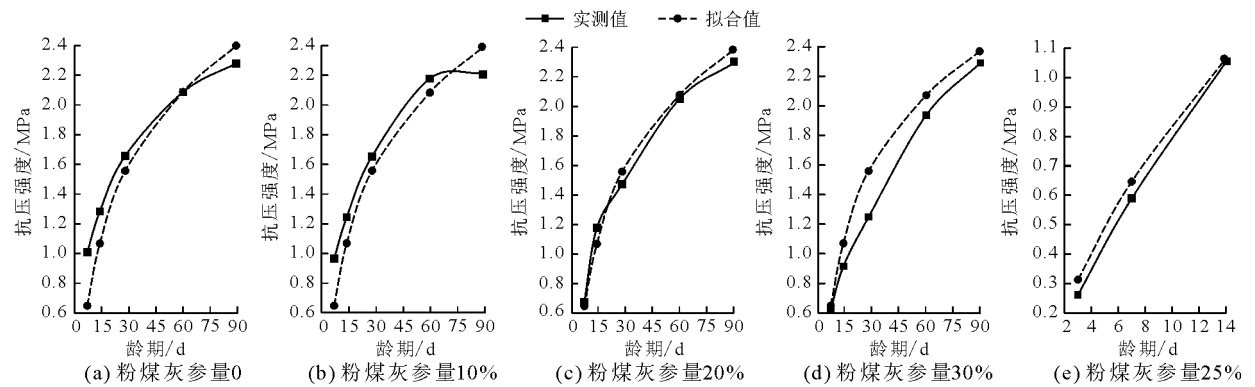


图 5 不同粉煤灰参量抗压强度随龄期变化实测值与模型拟合值对比

表 6 不同粉煤灰掺量方案比选

序号	无侧限抗压强度/MPa		含水率 /%	pH 值	施工成本/ (元·m ⁻³)
	28 d	90 d			
S1	1.65	2.21	37.11	12.36	102.09
S2	1.47	2.29	37.63	12.11	95.96
S3	1.25	2.29	39.07	12.02	83.78
S4	1.66	2.28	38.80	12.33	108.27

注:通过查找资料,常用的 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥均价为:450 元/t,Ⅱ级粉煤灰均价为:200 元/t。

由表 6 可知,从安全性角度来看,20%、30% 粉煤灰掺量(S2、S3 号)试件组,在 90 d 龄期时抗压强度最大,其中 20% 粉煤灰掺量(S2 号)试件组在 28 d 时强度较高;从经济性角度来看,20%、30% 粉煤灰掺量(S2、S3 号)试件组施工成本最低,分别为 95.96、83.78 元/m³;从适用性角度来看,在施工过程中,掺加粉煤灰无需增添其他工序,施工工艺也较为便捷。综合上述分析,建议洞庭湖区水泥土中粉煤灰掺量应在 20% 左右为宜。

6 结 论

结合洞庭湖区某分洪闸淤泥质地基处理工程,首先在室内开展了不同粉煤灰掺量的水泥土试件的无侧限抗压强度、含水率以及中心部位土样溶液 pH 值的测定试验,然后探讨建立了不同粉煤灰掺量的水泥土无侧限抗压强度的组合指数式模型;通过对试验数据以及计算结果的分析得出以下结论:

(1)水泥土试件无侧限抗压强度在 60 d 龄期前,随着粉煤灰掺量的增加而降低;但在 90 d 龄期时,4 组试件强度值较为接近,20% 粉煤灰掺量试件组抗压强度最大;水泥土试件含水率在 28 d 龄期之前规律不明显,28 d 龄期之后,含水率随着粉煤灰掺量的增加而增加;水泥土试件中心部位土样溶液

的 pH 值始终随着粉煤灰掺量的增加而降低。

(2)通过组合指数表达式拟合考虑粉煤灰掺量的水泥土抗压强度模型,并进一步通过复合形优化算法对模型中相关参数进行标定,得到在水胶比为 0.7、粉煤灰掺入比为 0~30% 的水泥土抗压强度模型,模型计算值与实测值拟合精度良好,相对误差均小于 15%,这种研究方法及所得结果可为实际工程设计提供参考。

(3)对于洞庭湖区这类淤泥质土,不宜掺加过多粉煤灰,过多粉煤灰会使水泥土中有效水胶比上升,导致含水率的升高,对水泥土的强度不利,从上述试验结果来看,建议洞庭湖区水泥土中粉煤灰掺量在 20% 左右为宜。

参考文献:

[1] 周国祺,成铁生,赵守勤. 洞庭湖盆的由来和演变[J]. 湖南地质,1984(1):54-65.

[2] 卞鸿翔. 洞庭湖区地貌与环境变迁[J]. 热带地理,1988(3):231-240.

[3] 龚晓南. 复合地基理论及工程运用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[4] 张淑玲,倪静,马蕾,等. 冻融循环作用后水泥土及粉煤灰土的力学性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):196-201.

[5] 邵俐,刘佳,丁勇,等. 水泥固化镍污染土的强度和微观结构特性研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):75-80.

[6] 闫爱军. 水泥改良黄土状土的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):225-228.

[7] 尹瑞淑,艾涛,郝梦凡,等. 用作水泥土搅拌桩的粉煤灰-矿渣地聚合物性能研究[J]. 施工技术,2017,46(S1):126-129.

[8] CHENG Qiangqiang, YAO Kai, LIU Yong. Stress-dependent behavior of marine clay admixed with fly-ash-

- blended cement[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(6):611-616.
- [9] 周海龙. 脱硫石膏-粉煤灰复合水泥土耐久性能与固化机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
- [10] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOUWAI S, et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1):49-58.
- [11] 蒙强, 邵俐, 施倩芸. 粉煤灰水泥土力学特性试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(5):490-496.
- [12] 崔永成, 崔自治, 周健, 等. 银川地区粉煤灰水泥土的力学特性试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(7):105-109+151.
- [13] 阮庆, 阮波, 曾元, 等. 洞庭湖区淤泥质黏土水泥土力学性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(5):106-111.
- [14] 陈启宏, 何杰, 吴有平. 洞庭湖区淤泥质土水泥土强度变化规律试验研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(2):46-47.
- [15] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程:JGJ/T 233-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [17] 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123-1999[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [18] 刘钰, 黄耀英, 唐腾飞, 等. 大坝混凝土分数阶徐变模型探讨[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6):107-110.
- [19] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.

(上接第 209 页)

- [11] 刘华, 牛富俊, 徐志英, 等. 循环冻融条件下安山岩和花岗岩的物理力学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3):557-563.
- [12] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6):1208-1214.
- [13] 许玉娟, 周科平, 李杰林, 等. 冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(10):3001-3006.
- [14] ARGANDOÑA V G R D, REY A R, CLORIO C, et al. Characterization by computed X-Ray tomography of the evolution of the pore structure of a dolomite rock during freeze-thaw cyclic tests[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1999, 24(7):633-637.
- [15] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程:SL 264-2001[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2001.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体试验方法标准:GB/T 50266-2013[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路工程岩石试验规程:JTG E41-2005[S]. 北京:人民交通出版社, 2005.
- [18] 贺晶晶, 师俊平. 冻融循环作用下砂岩三点弯曲断裂性能试验及其破坏形态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12):2917-2925.
- [19] 徐拴海, 李宁, 王晓东, 等. 露天煤矿冻岩边坡饱和砂岩冻融损伤试验与劣化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12):2561-2571.