

文章编号: 1001-4888(2017)02-0286-09

基于 Box-Behnken 法的合肥湖积软土 固化配方优化的试验研究^{*}

邵艳, 孙本状, 周冬青, 朱保涛

(安徽建筑大学 土木工程系, 合肥 230601)

摘要: 选择 CaO 和纯碱作为激发剂掺入 GGBS(粒化高炉矿渣微粉)制备 GGBS+CaO+纯碱固化合肥湖积软土,通过无侧限抗压强度试验研究固化黏土的强度变化规律。以 GGBS、CaO 和纯碱的掺量作为影响因子,以 7d 和 28d 固化土的无侧限抗压强度作为响应值,基于 Box-Behnken 法确定 3 种外添加剂的最佳配合比。研究表明:GGBS 掺量的变化对强度响应影响最大,且其敏感程度随龄期的增大而增大;而对于 CaO 和纯碱,情况则相反。养护 7d 后,各因素对强度的线性效应和曲面效应均显著,CaO 与纯碱的交互作用显著;养护 28d 后,GGBS 与纯碱的交互作用显著。最终得出:GGBS、CaO 和纯碱三掺量固化黏土最佳配比分分别为 13.08%、4.89%和 1.25%;在最佳配合比下,7d 和 28d 的预测强度分别达到 550.904kPa 和 665.953kPa。最后对实测值与预测值进行了对比分析。研究成果可为在合肥滨湖地区应用矿渣类软土固化剂提供理论依据。

关键词: GGBS; CaO; 纯碱; 无侧限抗压强度; Box-Behnken 法; 最佳配比

中图分类号: TU472.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-197

0 引言

合肥滨湖新区广泛分布着河湖相软土层,以淤泥质黏土为主,具有含水量高、承载力低、沉降变形大等特点,不利于滨湖地区城市建设^[1]。目前工程中主要采用以水泥为主的固化剂对软土进行改良,但处理得到的实际效果往往并不理想,而且成本较高并且污染环境。为此,有不少学者开展了复合固化剂配方的研究^[2,3],李晨等^[4]认为加入粒化高炉矿渣微粉(Ground Granulated Blastfurnace slag, GGBS)可以改变固化土的液塑限,能显著提高固化土的抗压强度。徐日庆等^[5]采用水泥和 GX08 固化剂固化杭州海湖相软土,预测了有机质含量、水泥掺量、固化剂掺量和龄期对固化土强度的影响。畅帅^[6]基于响应面法对生石膏、生石灰、碳酸钠这 3 种外添加剂的配比进行了优化研究。然而,将 CaO 和纯碱作为激发剂掺入 GGBS 制备 GGBS+CaO+纯碱固化软土方面的研究还鲜有报道。

本文以 GGBS、CaO、纯碱 3 种外添加剂作为影响因子,以固化土 7d 和 28d 的无侧限抗压强度作为响应值,通过 Box-Behnken 法确定了 3 种外添加剂 GGBS、CaO 和纯碱的最佳掺量配比,使得响应值达到最优。Box-Behnken 法是一种能够同时考虑多个影响因子来寻求最优目标值的试验设计方法。目前已广泛应用于粮油食品、化学化工、生物工程等方面的工艺配方设计^[7],它不仅建立影响因子与目标值之间的函数关系,还可分析不同影响因子之间的交互作用规律。此次研究率先将 Box-Behnken 法应用于合肥湖积软土固化剂配方的研制,研究成果可为在合肥滨湖地区应用矿渣类软土固化剂提供参考。

^{*} 收稿日期: 2016-10-01; 修回日期: 2016-12-02

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(No. KJ2016A152);安徽省自然科学基金项目(No. 1508085ME76)

通讯作者: 邵艳(1965—),女,教授,主要从事岩土力学和工程地质等方面的教学与科研工作。Email: shaoyan@ahjzu.edu.cn

1 试验方法

1.1 试验材料

本次试验所用土取自合肥滨湖地区某工程地基软土,其物理指标如表 1 所示。GGBS 取自合肥市日月水泥厂,CaO 是取自天津博迪华工股份有限公司生产的化学用氧化钙,纯净度很高,CaO 灼烧后含量不少于 98%。纯碱采用的是西陇化工股份有限公司生产的化工原料,呈白色粉末状, Na_2CO_3 含量不小于 99.8%。

表 1 土样的物理指标
Tab. 1 Physical properties of soil

含水率(%)	密度(g/cm^3)	液限(%)	塑限(%)	液性指数	塑性指数
32.51	1.9	37.40	23.50	0.648	0.139

1.2 试样的制作与养护

将取回的软土放置于 $105\sim 110^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干,取出击碎,过 2mm 筛,去除杂质,置于塑料袋内密封备用。根据课题组已有的单掺试验成果并参考有关研究成果^[8],初步确定掺入 GGBS 为 8%~14%,CaO 为 2%~6%,纯碱为 0.5%~1.5%。将过筛的干土、GGBS、CaO 和纯碱按比例放入搅拌机中搅拌均匀并加入水,制成固化土混合料(直径为 39.1mm,高为 80.0mm)。将三瓣模洗净,内壁上涂满凡士林并放置在塑料膜上防止水分流失,将固化土混合料分层击实,每层的表面凿毛,试样完成后在三瓣模的两端盖上玻璃片以防止水分蒸发,如图 1 所示。将试样静置 24h 后脱模取出放置于不透气的保鲜袋内密封,标记好配比含量以及日期(如图 2 所示),后放于养护器皿中养护,直至养护龄期取出进行试验。



图 1 三瓣膜放置试样
Fig. 1 Three place sample valves



图 2 保鲜膜密封养护
Fig. 2 Cling film sealed curing

1.3 无侧限抗压强度试验

当试样养护到预定的龄期后取出,利用 GDS 进行无侧限抗压强度试验,GDS 三轴试验仪是英国欧美大地生产的高级自动三轴仪,其中的“Unconfined compressive”模块可以进行无侧限抗压强度试验。试验前,调整 GDS 三轴试验仪,将 3 个压力/体积控制器的操作面板上的数据归零,然后在加压室中安装试样,再打开 GDSLAB 软件,进入“Management”操作界面,点击“Unconfined compressive”模块,输入压缩速率 $1.6\text{mm}/\text{min}$,最大试验持续时间为 $1\sim 2\text{min}$,添加并进行试验。试验结果最终会以图形及 EXCEL 的形式保存,重复试验并取平均值作为试验结果记录下来。

1.4 试验设计

Box-Behnken 法是响应面法常用的试验设计方法的一种,该方法将试验得出的结果进行响应面分

析,得到预测模型。该预测模型是连续的,一般是曲面。与正交试验法相比,其优势是:在试验参数优化过程中,可以连续地对各个水平试验参数进行分析,而正交试验法只能对每个孤立的试验点进行分析。

本次 Box-Behnken 试验设计^[9]采用三因素(X_1, X_2, X_3)、三水平($-1, 0, +1$)来安排试验,试验总数为 $2K(K-1)+C_0$, 公式中 K 表示因素的个数, C_0 表示中心试验点的重复次数。自变量 X_i 按下式进行编码变换:

$$X_i = (x_i - x_0) / \Delta x_i \quad (1)$$

式中, X_i 为自变量 x_i 的编码值; x_0 为自变量在中心点的值; Δx_i 为自变量变化步长。利用 Design-Expert 软件模拟影响因素和响应值之间的非线性关系,建立二阶经验模型。模型可以描述为:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (2)$$

式中, Y 为预测响应值; β_0 为截距; β_i 为线性系数; β_{ij} 为交互作用系数; β_{ii} 为平方系数; k 为因子数, 本试验 $k=3$ 。

本次试验中, GGBS 的掺量对应的编码值为 X_1 , CaO 的掺量对应的编码值为 X_2 , 纯碱的掺量对应的编码值为 X_3 。每种因素对应的编码值计算方式分别为 $X_1 = (x_1 - 11\%) / 3\%$, $X_2 = (x_2 - 4\%) / 2\%$, $X_3 = (x_3 - 1\%) / 0.5\%$, 且三种因素的低、中、高三水平分别记作 $-1, 0, 1$, 如表 2 所示。

在 Box-Behnken 试验设计给定的条件下, 本次试验 K 取值为 3, C_0 取值为 5, 采用 Design-Expert 软件建立试验设计方案, 按次序进行试验。各因素试验条件已给出, 所得的响应值分别是: 7d 龄

期的无侧限抗压强度(Y_7)、28d 龄期的无侧限抗压强度(Y_{28}), 具体参见表 3。

表 2 试验因素水平及其编码水平
Tab. 2 Factor level and code level

变量	代码	编码水平		
		-1	0	1
GGBS	X1	8	11	14
CaO	X2	2	4	6
纯碱	X3	0.5	1	1.5

表 3 三因素三水平的 Box-Behnken 试验设计

Tab. 3 Box-Behnken experimental design of three factors and three levels

试验号	因素			响应值 Y_7 (kPa)	响应值 Y_{28} (kPa)
	X_1	X_2	X_3		
1	-1.0(8)	0.0(4)	1.0(1.5)	382	532
2	0.0(11)	0.0(4)	0.0(1)	507	624
3	0.0(11)	0.0(4)	0.0(1)	526	633
4	1.0(14)	1.0(6)	0.0(1)	513	624
5	-1.0(8)	0.0(4)	-1.0(0.5)	379	434
6	0.0(11)	1.0(6)	-1.0(0.5)	398	584
7	0.0(11)	-1.0(2)	-1.0(0.5)	371	521
8	0.0(11)	0.0(4)	0.0(1)	513	631
9	0.0(11)	0.0(4)	0.0(1)	511	629
10	-1.0(8)	-1.0(2)	0.0(1)	332	488
11	0.0(11)	0.0(4)	0.0(1)	519	639
12	0.0(11)	1.0(6)	1.0(1.5)	529	647
13	1.0(14)	-1.0(2)	0.0(1)	415	618
14	1.0(14)	0.0(4)	-1.0(0.5)	478	653
15	-1.0(8)	1.0(6)	0.0(1)	411	486
16	1.0(14)	0.0(4)	1.0(1.5)	512	654
17	0.0(11)	-1.0(2)	1.0(1.5)	416	564

2 试验结果与数据分析

2.1 模型的建立与分析

应用 Design-Expert 软件进行二次多项式回归拟合,可从表 3 试验数据中得到二阶模型方程的各项系数及其方差分析结果,如表 4 所示。

表 4 7d 和 28d 二阶模型方程的方差分析
Tab. 4 Variance analysis of 7d and 28d two order model equation

方差来源	7d			28d		
	F 值	P 值	系数	F 值	P 值	系数
Model	17.72	0.0005	515.20	17.06	0.0006	631.20
X_1	49.19	0.0002	51.75	97.94	<0.0001	76.13
X_2	28.84	0.0010	39.63	5.94	0.0449	18.75
X_3	13.02	0.0086	26.63	11.10	0.0126	25.63
$X_1 X_2$	0.21	0.6628	4.75	0.034	0.8593	2.00
$X_1 X_3$	0.55	0.4819	7.75	4.97	0.0610	-24.25
$X_2 X_3$	4.24	0.0783	21.50	0.21	0.6597	5.00
X_1^2	18.80	0.0034	-44.10	17.20	0.0043	-43.98
X_2^2	27.51	0.0012	-53.35	9.82	0.0165	-33.23
X_3^2	10.75	0.0135	-33.35	3.20	0.1166	-18.98

注:7d 模型 $R^2=0.9580$; 28d 模型 $R^2=0.9564$ 。

为检验方程各项的显著性,采用 F 分布进行方差分析。其中 F 值表示检验的统计量值。在分析过程中,首先给定显著性水平 α 。根据回归分析结果,当 P 值小于 α 值时,即认为该项对应的试验结果差异性显著的;反之,则认为该项不显著,在优化分析中应将不显著项剔除。由表 4 所示,设显著性水平 $\alpha=0.1$,根据 7d 龄期回归分析结果, $X_1 X_2$ 、 $X_1 X_3$ 的 P 值分别为 0.6628, 0.4819,均大于 0.1 水平,故认为这两项不显著,通过 Design-Expert 软件将其剔除。同样,对于 28d 龄期的回归分析结果, $X_1 X_2$ 、 $X_2 X_3$ 、 X_3^2 的 P 值大于 0.1 水平,均剔除。可得出调整后的两个二阶模型如下:

$$Y_7 = 515.20 + 51.75 X_1 + 39.63 X_2 + 26.63 X_3 + 21.50 X_2 X_3 - 44.10 X_1^2 - 53.35 X_2^2 - 33.35 X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_{28} = 631.20 + 76.13 X_1 + 18.75 X_2 + 25.63 X_3 - 24.25 X_1 X_3 - 43.98 X_1^2 - 33.23 X_2^2 \quad (4)$$

由表 4 方差分析可知,7d 龄期的模型显著(P 为 0.0005),该模型的相关系数 $R^2=0.9580$,表明模型与实际情况拟合很好,各因素对强度的线性效应和曲面效应均显著, X_2 与 X_3 的交互作用显著。28d 龄期的模型也显著(P 为 0.0006),该模型的相关系数是 $R^2=0.9564$,表明模型与实际情况拟合也很好, X_1 与 X_3 的交互作用显著。

2.2 单因子效应分析

分别对式(3)与式(4)两个二阶回归模型采用降维法,将其中两个因子固定在 0 水平,即可得到任一单因子在特定条件下的子回归模型。由此可得 X_1 、 X_2 、 X_3 各自单因子变化下 7d 和 28d 的强度响应预测值,整理如表 5 所示。

研究 Y_7 的单因子影响变化幅度可以发现,GGBS 掺量的变化对强度的影响最大, Y_7 的变化范围为 419.4~530.0kPa。而 CaO 和纯碱掺量的变化对强度的影响相对较小, Y_7 的变化范围分别为 422.2~521.7kPa 和 455.2~520.2kPa。同样,在分析 Y_{28} 的单因子影响变幅中可以发现,GGBS 掺量的变化对强度的影响也最大,其次是 CaO 和纯碱的掺量。但与 Y_7 不同的是,当 GGBS 的掺量作单因子变化时,试样强度的变幅有所增大,而当 CaO 和纯碱的掺量作单因子变化时,试样强度的变幅则有所减小。这表明,GGBS 掺量的变化对强度响应影响最大,且其敏感程度随龄期的增大而增大,而对于 CaO 和纯

碱,情况则相反。

表 5 单因子效应的强度响应值分析

Tab. 5 Analysis of strength response based on one-factor effect

因子 编码值	7d(kPa)			28d(kPa)		
	GGBS	CaO	纯碱	GGBS	CaO	纯碱
-1.0	419.4	422.2	455.2	511.2	579.2	605.6
-0.5	478.3	482.0	493.5	582.1	613.5	618.4
0	515.2	515.2	515.2	631.2	631.2	631.2
0.5	530.0	521.7	520.2	658.3	632.3	644.0
1.0	522.9	501.5	508.5	663.4	616.7	656.8

2.3 交互作用与机制分析

为了研究交互作用对强度的影响,利用 Design-Expert 软件对模型进行分析,令三个影响因子中的一个水平因子为零,分别带入式(3)、(4)中,得到相应的响应面 3D 图形以及等值线图。从图 3 和图 4 可以直观地看出 7d 龄期时 $X_2 X_3$ 、28d 龄期时 $X_1 X_3$ 交互作用对目标值 Y 的影响。

2.3.1 7d 龄期时 CaO 和纯碱的交互作用与机制分析

由前面方差分析,7d 龄期时 $X_2 X_3$ 的交互作用显著,故将式(3)中的 X_1 固定在 0 水平,利 Design-Expert 软件,得到 CaO 与纯碱掺量间交互作用对强度的响应面图和等值线图。通过计算分析可知,在此次研究范围内,土体强度均随 CaO 掺量的增大呈现先增大后减小的变化趋势。另一方面,当 $2.00\% \leq x_2 \leq 2.39\%$ 时, Y_7 随着纯碱掺量的增大而增大,而当 $2.39\% \leq x_2 \leq 6.00\%$ 时, Y_7 则随着纯碱掺量的增大呈先增大后减小的变化趋势。这些结论在图 3 中有较为直观的显示。

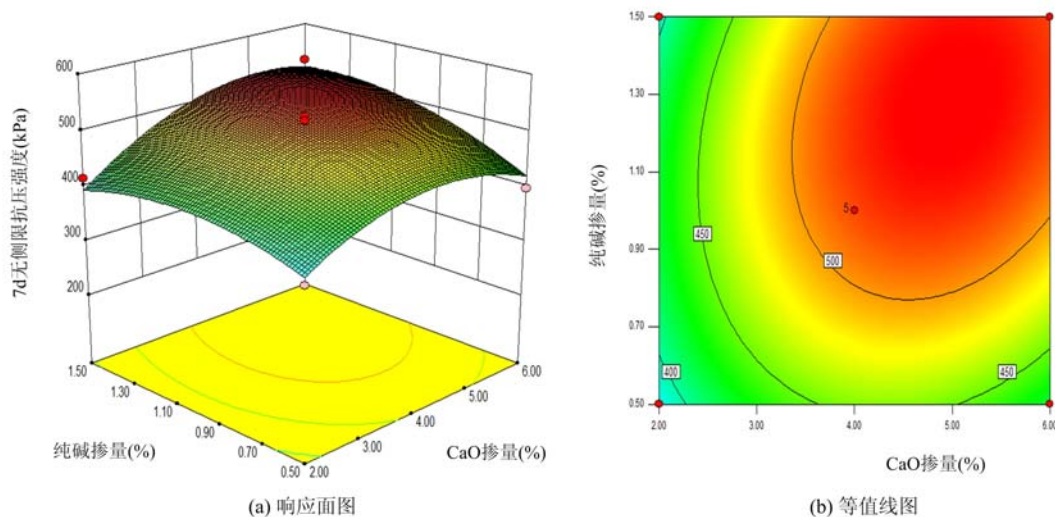
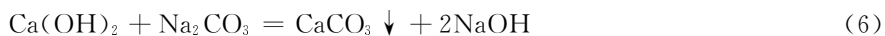


图 3 CaO 和纯碱对 7d 龄期的强度交互作用的响应面和等值线图

Fig. 3 Response surface and contour graph of mutual-influence for CaO and soda ash on 7d strength

CaO 与纯碱的交互作用对于固化土强度明显提升,主要是由于氧化钙水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会与掺入的纯碱发生化学反应,置换出 Na^+ 并且生成 CaCO_3 沉淀。其化学反应如下:



但是,当掺入较少量的 CaO 时,随着式(6)的反应进行, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可以持续得到稳定补给,故此时随着纯碱不断掺入反应,固化土的强度逐渐呈增大趋势。而当掺入的 CaO 量较大时,土体孔隙液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 开始饱和,大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 将对进一步的水化反应起抑制作用。此时,当掺入的纯碱在适当范围内时,反应会使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度降低,从而又进一步促进水化,并且在随后的反应中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也能

得到一定程度的补给;但当掺入的纯碱量过大时,就会使得 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 消耗过大而无法得到补给,因此固化土的强度反而减小。同时,该反应产生的 NaOH 会在一定程度上排挤液相的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,造成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 过饱和而生成沉淀。所以,当 CaO 掺量较大时,固化土强度随着纯碱掺量的提高逐渐呈现先增大后减小的变化趋势。

2.3.2 28d 龄期时 GGBS 和纯碱的交互作用与机制分析

同样地,28d 龄期时 $X_1 X_3$ 的交互作用显著,故将式(4)中的 X_2 固定在 0 水平,得到 GGBS 与纯碱掺量间交互作用对强度的响应面图和等值线图(图 4)。分析图 4 可知,在本次研究范围内,当纯碱的掺量发生变化时,固化土强度均随 GGBS 掺量的提高呈现先增大后减小的变化趋势。另一方面,固化土的强度同样随纯碱掺量的增大呈先增大后减小的变化趋势。

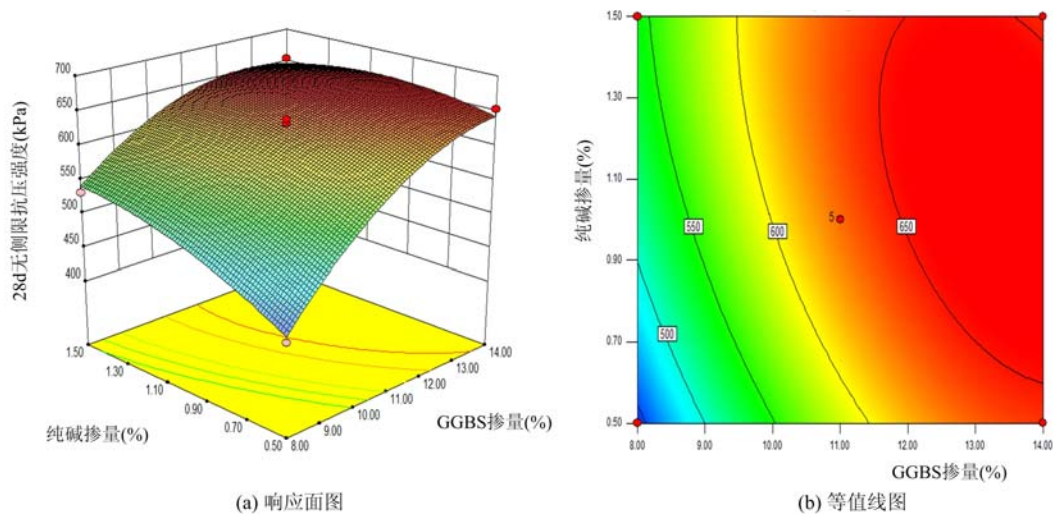


图4 GGBS 和纯碱对 28d 龄期的强度交互作用的响应面和等值线图

Fig. 4 Response surface and contour graph of mutual-influence for GGBS and soda ash on 28d strength

大量的试验研究表明,GGBS 的掺入将有效促进水玻璃生成,这是由于将少量的纯碱作为外添加剂加到粒化高炉矿渣中,纯碱中 CO_3^{2-} 会破坏 GGBS 的网状结构^[13],释放出 Na^+ 、 Si^{2+} 等离子,促进 GGBS 水化,水化产物与纯碱继续发生反应生成 Na_2SiO_3 ,俗称水玻璃,呈纤维状晶体,因吸收土中水分处于膨胀状态,使土固结。由于有水玻璃的生成,使得加固土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 很快转化为了强度更大的 CSH(水化硅酸钙)^[14,15]。通过扫描电镜图像(SEM 图像)观察加固土的微观结构可以发现,养护 28d 后,黏土颗粒完全被 CSH 胶体所包裹,形成较大颗粒。土的形态特征由原始薄片状堆积完全变为颗粒状胶结^[16],土体抗压强度大幅提高,但 GGBS 掺入量存在一个最佳值。这是由于过量的 CSH 胶体生成会引起膨胀效应破坏固化土已有的结构,致使土体强度降低,所以,当纯碱的掺量发生变化时,固化土强度均随 GGBS 掺量的提高呈现先增大后减小的变化趋势。

通过对图 4 的进一步分析可知,随着纯碱掺量的提高,GGBS 的这一最佳掺量逐渐变小。根据式(6),纯碱的掺入除了消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 外,还将生成 CaCO_3 沉淀。由于 CaCO_3 沉淀能够对土体起到填充作用而使土体中的孔隙先前得到细化,进而使得 CSH 对土体的增强作用相对有限,所以,固化土的强度同样随纯碱掺量的增大呈先增大后减小的变化趋势。

2.4 优化分析与模型推广

通过 Design-Expert 软件对 7d 和 28d 龄期的交互作用分析得出,GGBS、 CaO 、纯碱最佳配合比分别为 13.08%、4.89%、1.25%,在此配比下 Y_7 达到 550.904kPa, Y_{28} 达到 665.953kPa。

为了检验模型的实用性,将对应的编码带入方程式(3)、(4)所得的预测值填入表 6,与无侧限抗压强度试验值进行对比。由表 6 可知,预测值与实测值比较接近,从而验证了该模型的工程适用性。

表 6 实测值与预测值对比
Tab. 6 Actual value compared with forecast

7d		28d	
实测值	预测值	实测值	预测值
382	412.63	532	536.72
507	515.20	624	631.20
526	515.20	633	631.20
513	509.13	624	648.87
379	359.37	434	461.21
398	420.00	584	591.09
371	383.74	521	553.59
513	515.20	631	631.20
511	515.20	629	631.20
332	326.37	488	492.34
519	515.20	639	631.20
529	516.26	647	631.60
415	429.87	618	611.37
478	462.87	653	661.97
411	405.63	486	496.61
512	516.13	654	664.73
416	394.00	564	604.85

3 结论

(1) 根据 Box-Behnken 试验设计分析表明:试样养护 7d 后,各因素对强度的线性效应和曲面效应均显著,CaO 与纯碱的交互作用显著;养护 28d 后,GGBS 与纯碱的交互作用显著。

(2) 由单因子效应分析可得,GGBS 掺量的变化对 7d 和 28d 龄期的固化土强度响应影响最大,其次是 CaO 和纯碱。且强度响应对 GGBS 掺量变化的敏感程度随龄期的增大而增大,而对于 CaO 和纯碱,情况则相反。

(3) 根据交互作用与机制分析可知:7d 龄期试样的固化土强度均随 CaO 掺量的增大呈现先增大后减小的变化趋势。且当 $2.00\% \leq x_2 \leq 2.39\%$ 时, Y_7 随着纯碱掺量的增大而增大,而当 $2.39\% \leq x_2 \leq 6.00\%$ 时, Y_7 则随着纯碱掺量的增大呈现先增大后减小的变化趋势。28d 龄期试样的土体强度均随 GGBS 掺量的提高呈现先增大后减小的变化趋势。同样,固化土的强度随纯碱掺量的增大呈先增大后减小的变化趋势。

(4) 通过 Design-Expert 软件对 7d 和 28d 龄期的交互作用分析得出 GGBS、CaO、纯碱最佳配合比分别为 13.08%、4.89%、1.25%,在此配比下 Y_7 达到 550.904kPa, Y_{28} 达到 665.953kPa。验证试验的结果表明,预测值与实测值比较接近。

参考文献:

- [1] 邵艳,王仕传,李长勇.合肥滨湖新区软土物理力学特性相关性分析[J].工业建筑,2013,43(5):86—89 (SHAO Yan, WANG Shichuan, LI Changyong. Correlation analysis of physical and mechanical characteristics indexes of soft soil for the lakeshore new distract in Hefei[J]. Industrial Building, 2013, 43(5):86—89 (in

- Chinese))
- [2] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9):1545—1548 (FANG Xiangwei, SUN Shuguo, CHEN Zhenghan, et al. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9):1545—1548 (in Chinese))
- [3] 孟庆山, 杨超, 雷学文, 等. 武汉东湖淤泥早强固化试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):707—712 (MENG Qingshan, YANG Chao, LEI Xuwen, et al. Experimental study of early solidification of sludge in East Lake, Wuhan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):707—712 (in Chinese))
- [4] 李晨, 孙川, 刘松玉. 粒化高炉矿渣微粉对固化土特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增2):1827—1832 (LI Chen, SUN Chuan, LIU Songyu. Granulated blast furnace slag powder impact study on characteristics of stabilized soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2):1827—1832 (in Chinese))
- [5] 徐日庆, 李俊虎, 蔡承晟. 用固化剂 GX08 加固杭州海湖相软土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6):1528—1533, 1554 (XU Riqing, LI Junhu, CAI Chengsheng. Strengthen the hangzhou with curing agent GX08 sea lake facies soft soil strength characteristics of the study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6):1528—1533 (in Chinese))
- [6] 畅帅. 基于响应面法的淤泥质土固化配方优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1):105—110 (CHANG Shuai. Based on the response surface method of silt soil curing recipe optimization research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1):105—110 (in Chinese))
- [7] 王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3):236—240 (WANG Yongfei, WANG Chengguo. The theory and application of the response surface method[J]. Journal of the CUN (Natural Sciences Edition), 2005, 14(3):236—240 (in Chinese))
- [8] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007 (GUO Yin. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007 (in Chinese))
- [9] Box G E P, Palmer G M. Response surface methodology-revisited[J]. Cereal Food Science, 1976, 21:432—445.
- [10] Wu X, Jiang W, Roy D M. Early activation and properties of slag cement[J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(6):961—974.
- [11] 易耀林, 卿学文, 庄焱, 等. 粒化高炉矿渣微粉在软土固化中的应用及其加固机理[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2):382—384 (YI Yaolin, QING Xuwen, ZHUANG Yan, et al. Utilization of GGBS in stabilization of soft soils and its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):382—384(in Chinese))
- [12] 李振峰. 土壤固化剂无侧限抗压强度试验研究[D]. 吉林大学, 2007 (LI Zhenfeng. The experimental study on unconfined compressive strength of soil stabilizer[D]. Jilin University, 2007 (in Chinese))
- [13] 吴蓬. 粒化高炉矿渣胶凝性能的活化工艺及水化机理研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2013 (WU Peng. Study on activation of cementing properties and hydration mechanism of slag cementitious material [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2013 (in Chinese))
- [14] 吴蓬, 吕宪俊, 胡术刚, 等. 粒化高炉矿渣胶凝性能活化研究进展[J]. 金属矿山, 2012, 10:157—161 (WU Peng, LV Xianggang, HU Shugang, et al. Study progressof the activation of granulated blast furnace slag cementitious material[J]. Metal Mine, 2012, 10:157—161 (in Chinese))
- [15] 吕晓姝, 史可信, 翟玉春. 粒状高炉矿渣的研究和利用进展[J]. 材料导报, 2005, 19:382—384 (SHI Xiaozhu, SHI Kexin, ZHAI Yuchun. Investigation and utilization of ground granulated blast furnace slag[J]. Materials Review, 2005, 19:382—384 (in Chinese))
- [16] 简文彬, 张登, 黄春香. 水泥—水玻璃固化软土的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2):632—637 (JIAN Wenbin, ZHANG Deng, HUANG Chunxiang. Micromechanism of cement-sodium silicate-stabilized soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 632—637 (in Chinese))
- [17] 彭家惠, 楼宗汉. 钙矾石形成机制的研究[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(6):511—515 (PENG Jiahui, LOU Zonghan. Study on the mechanism of ettingite formation[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(6):511—515 (in Chinese))

Experimental Study of formula Optimization for Lacustrine Soft Soil Consolidation in Hefei City based on Box-Behnken method

SHAO Yan, SUN Ben-zhuang, ZHOU Dong-qing, ZHU Bao-tao

(Department of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: Selecting calcium oxide (CaO) and sodium carbonate (soda powder) as activators, mixture made of ground granulated blast-furnace slag (GGBS), CaO and soda powder was prepared to solidify lacustrine soft soil in Hefei city. Unconfined compressive strength experiment was carried out to study the variation of solidified clay strength. Taking the amount of GGBS, CaO and sodium carbonate as impact factor, unconfined compressive strength of 7 days and 28 days solidified soil was used as response value, the optimum proportion of three additive agents was determined based on Box-Behnken method. Experimental results show that the amount of GGBS has maximum influence on strength, its sensitivity increases with the increase of solidication age. However, for CaO and soda powder, the situation is contrary. After curing for 7 days, the linear effect and surface effect of three additives on strength are obvious; the interaction between CaO and sodium carbonate is significant. After curing for 28 days, the interaction between GGBS and sodium carbonate is significant. Finally, it is found that the optimum proportion of GGBS, CaO and soda powder are 13.08%, 4.89% and 1.25% respectively. Under the optimum proportion condition, the prediction strength of solidified soil can reach 550.904kPa and 665.953kPa after 7 days curing and 28 days curing, respectively. Finally, the actual strength values are compared with the prediction strength values. Above results may provide theoretical evidence for GGBS solidifying lacustrine soft soil in lakeside area of Hefei city.

Keywords: ground granulated blast-furnace slag (GGBS); calcium oxide (CaO); sodium carbonate (soda powder); unconfined compressive strength; Box-Behnken method; optimum proportion