

合肥滨湖新区软土固化最优配比的试验研究

邵 艳, 马士雨

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 选择粒化高炉矿渣微粉 (Ground Granulated Blast Slag, 简称 GGBS) 作为固化剂, MgO 和 Na_2SiO_3 作为激发剂固化合肥滨湖软土。其中影响因子为 GGBS、MgO、 Na_2SiO_3 的掺量, 响应值为养护 7 d 和 28 d 的固化土无侧限抗压强度。通过中心组合试验设计法 (Central Composite Design, 简称 CCD 法) 确定三种外掺剂的最优配合比。研究表明: 经过 7 d 和 28 d 的养护, 三种外掺剂对固化土的无侧限抗压强度的曲面和线性效应均显著; 两两因素之间的交互作用有着一定的区别, 7 d 养护龄期下 GGBS 和 MgO 的交互作用显著, 而 28 d 养护龄期下 GGBS 和 Na_2SiO_3 的交互作用显著。试验得出: GGBS、MgO 与 Na_2SiO_3 三掺量固化软土的最优配合比分别为 12.46%、3.90% 与 6.73%。在最优配合比条件下, 7 d 与 28 d 的预测抗压强度分别为 1 015.04 kPa 与 1 166.48 kPa。最后分别对养护 7 d 和 28 d 固化土的实测抗压强度值与预测抗压强度值进行对比分析后, 得到实测值与预测值相接近, 故此试验研究成果可为实际软土固化工程的矿渣类复合固化剂配方提供参考依据。

关键词: 粒化高炉矿渣微粉; MgO; Na_2SiO_3 ; 中心组合试验设计法; 交互作用; 最优配合比

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2022) 03-018-07

Experiment on Optimum Mixing Ratio for Soft Soil Solidification in Binhu New Area of Hefei

SHAO Yan, MA Shiyu

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

Abstract: To cure the soft soil in Binhu New Area of Hefei, ground granulated blast slag (GGBS) was selected as the curing agent, and MgO and Na_2SiO_3 as the activator. The influencing factors were the amount of GGBS, MgO and Na_2SiO_3 , and the response values were the unconfined compressive strength of the cured soil cured for 7 d and 28 d. The optimum ratio of the three admixtures was determined by the central composite design (CCD) method. The results showed that the surface and linear effects of the three admixtures on unconfined compressive strength of the cured soil were significant after 7 d and 28 d curing. Besides, the interactions between chemicals were different: the interaction between GGBS and MgO under 7 d curing was significant, while the interaction between GGBS and Na_2SiO_3 under 28 d curing was significant. The optimal ratios of GGBS, MgO and Na_2SiO_3 were 12.46%, 3.90% and 6.73%, respectively, and the predicted compressive strengths at 7 d and 28 d with the ratio above were 1 015.04 kPa and 1 166.48 kPa, respectively. The actual and predicted compressive strength values of cured soil at 7 d and 28 d were close. The experimental results can provide reference for the formulation of slag-based composite curing agent in the similar project.

Keywords: ground granulated blast slag; MgO; Na_2SiO_3 ; central composite design; interaction; optimum ratio

收稿日期: 2021-10-29

基金项目: 安徽省高校自然科学研究项目 (NOKJ2016A152)

作者简介: 邵艳 (1965-), 女, 教授, 博士, 研究方向: 软弱土地基处理;

马士雨 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 软土固化。

滨湖新区坐落在巢湖之滨,该区域的地表分布着大量第四纪沉积层,其厚度在 10 m 上下,东部基本无裸露的基岩,全境大部分为中新生代陆相地层。滨湖新区地质特性分析表明^[1],滨湖新区地基土存在大量湖相软土,具有抗压强度低、含水率高等特点,不利于新区城市建设,针对其抗压强度不高的问题,需要对软土进行固化处理。而目前大多数软土固化研究,在滨海相软土固化研究领域比较丰富^[2-4],对内陆湖积软土研究尚少。长期以来,软土固化所使用的固化剂主要是水泥^[5-6],但是用水泥固化软土的经济效益不高且污染环境。为此有学者已开展新型复合固化剂的相关研究,陈金洪等^[7]通过研究粒化高炉矿渣-氧化镁复合固化剂的软土固化试验,以连云港软土为研究对象,对比水泥固化剂的固化效果,认为粒化高炉矿渣-氧化镁复合固化剂通过水化产物的产生能有效减少软土的孔隙体积,从而增强软土的固化强度且高炉矿渣-氧化镁复合固化剂的固化效果比水泥固化剂固化效果更好。王宏伟^[8]通过活性 MgO 激发粉煤灰的水化机理,用 MgO 激发粉煤灰对软土进行固化处理,随着 MgO 掺量的增加,促进了软土中水化产物的产生从而改善软土的强度特性。畅帅^[9]以生石膏、生石灰、碳酸钠作为复合固化剂的组成成分,认为使用复合固化剂对杭州海相软土的固化在一定条件下比水泥更加经济,且此三者掺入比对固化土强度的线性效应显著。然而,将 MgO 和 Na₂SiO₃ 作为 GGBS^[10] 激发剂掺入软土制备复合固化剂,用于固化软土的学术报道还比较有限。

本文以三种掺量作为影响因子,以 7 d 和 28 d 养护龄期的固化土无侧限抗压强度作为响应值进行无侧限抗压强度试验,基于 CCD 法^[11] 研究三种影响因子之间的最优配合比,得到固化土抗压强度的最大值。该方法对合肥滨湖地区应用矿渣类复合固化剂固化软土有一定参考价值。

1 试验方法

1.1 试验材料

本次试验所用软土试样取自滨湖新区某工程基坑土,其基本物理指标如表 1 所示。固化剂 GGBS 取自于南京某建材公司,外观呈灰色粉末状,

可改善软土压实性、强度、耐久性、膨胀性等工程特性,其化学组成如表 2 所示。所使用的 MgO 为化学用活性 MgO,取自天津博迪华工股份有限公司含量不低于 98%,外观呈白色疏松细粉末状,可激发 GGBS 水化活性,提高固化效率。Na₂SiO₃ 取自唐山宏润硅酸钠销售有限公司生产的水玻璃原料,其中 Na₂SiO₃ 含量要求不低于 99.8%。

表 1 土样的物理指标

含水率 (%)	饱和度 (%)	重度 (N/m ³)	塑限 (%)	塑性指数 (%)	液性指数 (%)	比重	孔隙比
32.51	94.40	17.68	22.25	15.23	64.8	2.71	1.14

表 2 固化剂 GGBS 组成成分

化学 组成 (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	SO ₂
比例	39~43	33.5~40.5	6.3~12.1	4~13	0.3~4.3	0.08~1.22	0.01

1.2 试样制作与养护

固化土制样过程如下:(1)将试验所需软土晒干后用球磨机研磨成粉末状,过 2 mm 筛去除杂质,然后在 105~110℃烘箱中烘干,待质量不再发生变化时取出;(2)根据课题组文献参考[12-13],确定 GGBS, MgO, Na₂SiO₃ 的单掺范围:8.642%~15.364%, 0.986%~6.024%, 2.643%~9.357%;(3)用搅拌设备把以上三者根据研究需要的配料搅拌至完全混合,再加入准备好的干土,再次搅拌至均匀,然后注入适当比例的水进行第三次搅拌至均匀且粘稠,最终得到固化土的混合物;(4)将搅拌均匀的固化土混合料分 3 层装入高 80 mm、直径 39.1 mm 且表面涂有一层凡士林的三瓣膜中,分层夯实排除气泡并对其表面凿毛处理;(5)三瓣膜两端用玻璃片夹住,常温下静置 1 d 后脱模处理,做好标记,用密封袋装好放入养护皿中进行养护直到 7 d 与 28 d 的预期时间。经过对应时间的养护后,置于 GDS 三轴仪内做无侧限抗压强度测试,全部测试二十组,详见图 1 和图 2。

1.3 试验设计

本次 CCD 法试验设计^[14] 采用 3 因子(X_1 , X_2 , X_3)、5 水平(-1.682, -1, 0, 1, 1.682)来进行试验,其中, X_1 , X_2 , X_3 为三个自变量因子,分别代表 GGBS, MgO, Na₂SiO₃; -1.682, -1, 0, 1, 1.682 分别代



图 1 三瓣膜放置试样



图 2 GDS 试验操作仪器及数据自动采集图

表试验自变量因子配比从低到高的水平值。CCD 法试验总数为 $2^K + 2K + M_0$, 其中, K 代表试验变量影响因素的总数, M_0 代表中心点处试验次数, K 取 3, M_0 取 6。 x_i 的编码转换值如下:

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

式中 x_i 为自变量; x_0 为不同影响因素在对应取值范围中心点处的值; Δx_i 为自变量 x_i 以中心值 x_0 为原点的变化步长。通过 Design-Expert 软件对所得试验数据进行拟合, 由此建立一个多元二次回归方程的模型, 该方程可模拟出自变量与预测值之间的关系, 并通过下式描述为:

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

式中 Y 为软件模拟的预测值; k 为本试验的影响因子个数; β_0 为模型方程的截距; β_i 为线性系数; β_{ij} 为两个不同因素交互作用系数; β_{ii} 为平方系数。

本次试验中, 自变量分别选为粒化高炉矿渣 GGBS、MgO 和 Na_2SiO_3 , 且三者对应的编码值分别为 X_1, X_2, X_3 对应, 由式 (1) 可得:

$$X_1 = (x_1 - 12\%) / 2\%$$

$$X_2 = (x_2 - 3.5\%) / 1.5\%$$

$$X_3 = (x_3 - 6\%) / 2\%$$

以 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度为因变量, 采用软件多元回归模型对试验数据进行拟合, 且每种因子的水平从左到右按从低到高排列, 见表 3 所示。

表 3 试验因素水平及其编码水平

变量	代码	编码水平				
		-1.682	-1	0	1	1.682
GGBS (%)	X_1	8.64	10	12	14	15.36
MgO (%)	X_2	0.98	2	3.5	5	6.02
Na_2SiO_3 (%)	X_3	2.64	4	6	8	9.36

采用 Design-Expert 软件随机建立的试验设计方案, 依次按顺序进行试验。取影响因素的数量 K 为 3, 中心点处试验次数 M_0 为 6, 分别进行试验, 所有因素的试验条件全部已知, 得到的数据即经过 7 d 与 28 d 养护龄期后的无侧限抗压强度, 分别用 Y_7 和 Y_{28} 表示, 且 Y_7 和 Y_{28} 变化范围分别为 344~993 kPa、485~1 148 kPa。具体结果见表 4 所示。

表 4 三因子五水平的 CCD 法试验设计

试验号	影响因子			响应值 Y_7/kPa	响应值 Y_{28}/kPa
	X_1	X_2	X_3		
1	1 (14.00)	-1 (2.00)	1 (8.00)	405	616
2	0 (12.00)	0 (3.50)	0 (6.00)	974	1148
3	0 (12.00)	0 (3.50)	0 (6.00)	974	1148
4	-1 (10.00)	1 (5.00)	-1 (4.00)	390	646
5	0 (12.00)	0 (3.50)	0 (6.00)	974	1148
6	0 (12.00)	0 (3.50)	0 (6.00)	974	1148
7	-1 (10.00)	1 (5.00)	1 (8.00)	575	672
8	0 (12.00)	0 (3.50)	1.682 (9.36)	993	854
9	1 (14.00)	-1 (2.00)	-1 (4.00)	412	507
10	-1 (10.00)	-1 (2.00)	1 (8.00)	380	485
11	-1 (10.00)	-1 (2.00)	-1 (4.00)	344	532
12	1 (14.00)	1 (5.00)	1 (8.00)	801	1006
13	-1.682 (8.64)	0 (3.50)	0 (6.00)	387	495
14	0 (12.00)	0 (3.50)	0 (6.00)	974	1148
15	0 (12.00)	0 (3.50)	0 (6.00)	974	1148
16	0 (12.00)	1.682 (6.02)	0 (6.00)	583	656
17	0 (12.00)	-1.682 (0.98)	0 (6.00)	397	598
18	1 (14.00)	1 (5.00)	-1 (4.00)	620	693
19	1.682 (15.36)	0 (3.50)	0 (6.00)	622	735
20	0 (12.00)	0 (3.00)	-1.682 (2.64)	638	809

2 试验模型结果与数据分析

2.1 模型的建立与分析

应用 Design-Expert 软件,对试验结果进行二次多项式拟合,求出回归方程的 F 值(F 分布检验的统计量值)、P 值(概率值)和方程的相关系数,具体见表 5 所示。

表 5 7 d 和 28 d 二阶模型方程的方差分析

方差来源	7 d			28 d		
	F 值	P 值	方程系数	F 值	P 值	方程系数
Model	30.04	<0.000 1	976.91	37.70	<0.000 1	1 148.61
X_1	14.54	0.003 4	69.14	15.96	0.002 5	65.21
X_2	21.86	0.000 9	84.78	19.11	0.001 4	71.36
X_3	16.05	0.002 5	72.64	4.57	0.058 2	34.90
X_1X_2	3.67	0.084 4	45.38	2.60	0.138 1	34.38
X_1X_3	0.062	0.809 2	-5.87	6.74	0.026 7	55.38
X_2X_3	3.16	0.105 7	42.13	2.64	0.135 6	34.63
X_{12}	109.84	<0.000 1	-184.98	146.60	<0.000 1	-192.42
X_{22}	116.01	<0.000 1	-190.11	140.21	<0.000 1	-188.17
X_{32}	18.07	0.001 7	-75.02	53.16	<0.000 1	-115.87

本试验采用 F 分布对方差来源进行分析并判断其显著性,其中 F 值为统计量的值^[15]。根据试验结果设定其显著性水平 $\alpha=0.1$ 。若 $P<0.1$ 时,则认定该项试验数据结果差异性对此结果有显著影响,即判定为显著项;若 $P>0.1$ 时,即判定为非显著项,一般去除非显著项,并重新计算。由表 5 可知,根据该试验结果选定 $\alpha=0.1$,在 7 d 养护龄期结果中, X_1X_3 和 X_2X_3 的 P 值分别为 0.809 2 和 0.105 7 均大于 0.1,说明这两项为非显著项,可去除该项。同理,在 28 d 养护龄期结果中, X_1X_2 和 X_2X_3 两者的 P 值分别为 0.138 1 和 0.135 6 均大于 0.1,也应去除这几项。将非显著项去除后,调整后即可得到 7 d 和 28 d 的二次多项式回归方程:

$$Y_7=976.91+69.14X_1+84.78X_2+72.64X_3-45.38X_1X_2-184.98X_1^2-190.11X_2^2-75.02X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_{28}=1148.61+65.21X_1+71.36X_2+34.90X_3-55.38X_1X_3-192.42X_1^2-118.17X_2^2-115.87X_3^2 \quad (4)$$

经计算表明,去除不显著项后,7 d 龄期和 28 d 龄期的模型均显著, $R^2=0.971 4$ 、 $R^2=0.964 3$ 分别为修正前模型的相关系数,经过修正的模型相关系数分别为 $R^2=0.945 6$ 、 $R^2=0.932 2$,因此可以得出结论,模型预测值与试验值相差不大。7 d 养护龄期的所有影响因素对抗压强度的线性与曲面效应均显著, X_1X_2 彼此的交互作用显著;而 28 d 养护龄期的所有影响因素对抗压强度的线性与非线性作用都显著, X_1 和 X_3 彼此的相互作用显著。

2.2 交互作用分析

为了分析三个影响因素彼此交互作用对固化土抗压强度的影响,基于 Design-Expert 软件研究上述模型,将所需研究的两种影响因子之外的第三种水平因子设为 0,分别带入式(3)、式(4)中,即可得到所需研究的两种影响因子对应的等值线和 3D 响应面图形。

2.2.1 7 d 龄期时 GGBS 和 MgO 的交互作用与机制分析

由表 5 方差结果分析,7 d 养护龄期下 X_1X_2 的 P 值为 0.0844,满足小于 $\alpha=0.1$, X_1X_2 交互作用差异显著。运用 Design-Expert 软件,在 X_3 (Na_2SiO_3) 作为第三种水平因子,并将其固定在 0 水平的前提下,可得到 X_1X_2 (GGBS 和 MgO) 的彼此交互作用对固化土强度影响的等值线和 3D 响应面图,具体见图 3 所示。

如图 3 所示,当 GGBS 掺入量在 8.64%~15.36% 之间时,7 d 养护龄期固化土的强度随着 GGBS 掺量的增加,呈现出先增大后减小的趋势;当 MgO 掺入量在 0.98%~3.74% 之间时,7 d 养护龄期固化土的强度随着 MgO 掺量的增加呈增大的趋势;而当 MgO 掺量在 3.74%~6.02% 之间时,7 d 养护龄期固化土的强度随着 MgO 掺量的增加呈现出减小的趋势;当 GGBS 掺入量在 12%,MgO 掺入量在 3.5% 时固化土强度接近峰值。

其原因主要是活性 MgO 粉状物与 H_2O 发生反应生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,为不易溶于水的颗粒物,这些不易溶于水的颗粒物填充在土颗粒表面的缝隙之间,从而使得土体更加密实,同时也为固化土体提供了碱性环境,使得反应体系的 pH 值增大。而 GGBS 在 pH 在 7 左右的碱性环境中与水接触时,会促进 GGBS 的 Al-O 键、Si-O 键等断裂,在 MgO 的激发

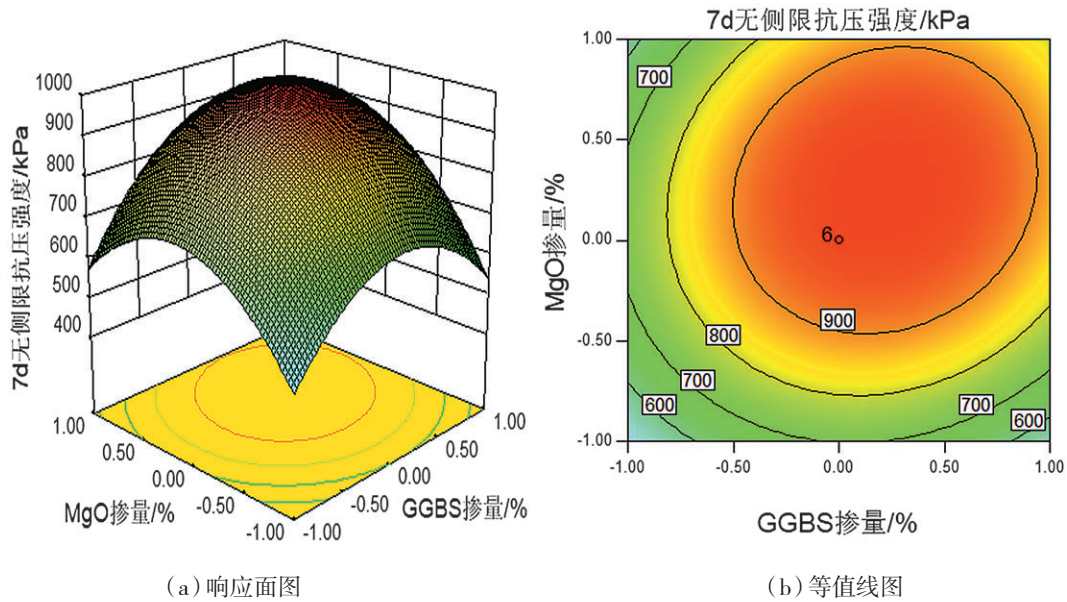
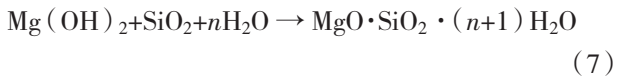
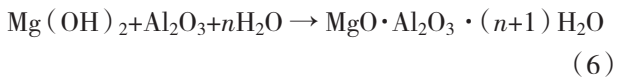


图3 GGBS和MgO对7d龄期的强度交互作用的响应面和等值线图

作用下,生成大量的水化硅酸钙(CSH)和水化铝酸钙(CAH)等胶凝物质。这两种胶凝物质为土体颗粒提供了一层致密的保护膜,同时这些具有胶结凝聚性质的水化产物吸附在土颗粒表面,使得土体连接在一起,增加凝聚性^[16],从而使固化土强度上升。其化学反应方程如下:



而当MgO掺量>3.5%时,MgO掺量过多,活性MgO粉状物与H₂O发生反应生成多余的Mg(OH)₂沉淀物会以结晶的形式析出,使固化土内部出现孔洞^[17],形成松散的结构,不利于固化土强度的产生。随着GGBS掺量的增加,在MgO的激发作用下生成大量的水化硅酸钙(CSH)和水化铝酸钙(CAH)等胶凝物质,减少了化学反应的空间,同时消耗大量的Mg(OH)₂,由于MgO与水反应的速率有限,导致Mg(OH)₂不能及时得到补充,从而导致固化土的强度不升反降。

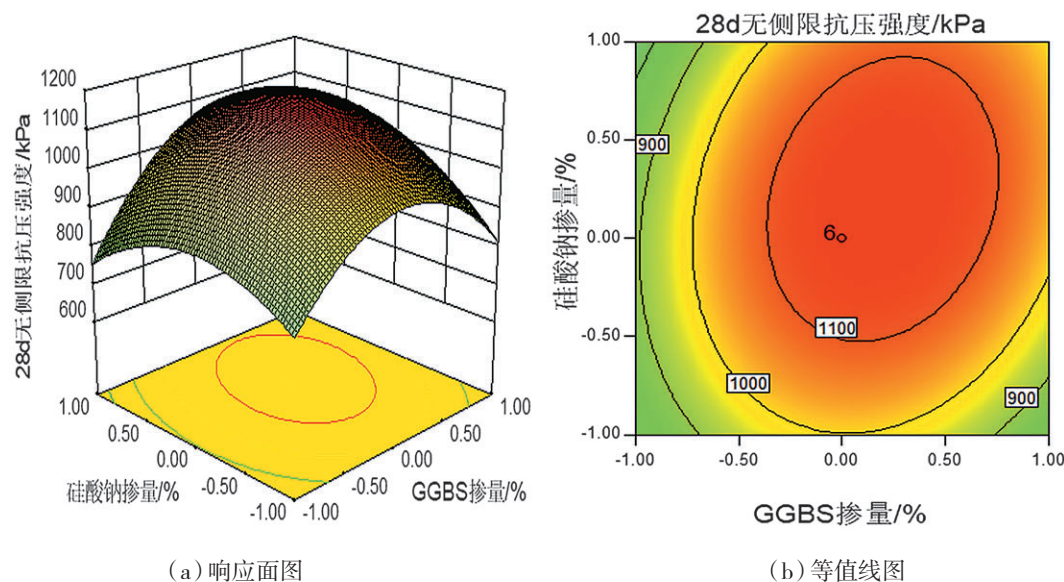
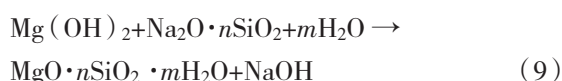
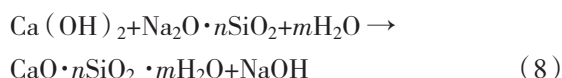
2.2.2 28d龄期时GGBS和Na₂SiO₃的交互作用与机制分析

由表5方差结果分析,28d养护龄期下, X_1X_3

的P值为0.0267,满足小于 $\alpha=0.1$, X_1X_3 交互作用差异显著。运用Design-Expert软件,在 X_2 (MgO)作为第三种水平因子,并将其固定在0水平的前提下,可得到 X_1X_3 (GGBS和Na₂SiO₃)的彼此交互作用对固化土强度影响的等值线和3D响应面图^[18],具体见图4所示。

如图4所示,当GGBS掺入量在8.64%~15.36%之间时,28d养护龄期固化土的强度随着GGBS掺量的增加,呈现出先上升后下降的趋势。当Na₂SiO₃掺量在2.64%~6%之间时,28d养护龄期固化土的强度随着Na₂SiO₃掺量的增加呈上升趋势;而当Na₂SiO₃掺量在6%~9.36%之间时,28d养护龄期固化土的强度随着Na₂SiO₃掺量的增加呈现出减小的趋势;当GGBS掺入量在12%,Na₂SiO₃掺入量在6%时固化土强度接近峰值。

原因主要是在反应初期,由于Mg(OH)₂的产生,使土体内部呈碱性,对GGBS的水化反应起到催化作用。在pH低于9时,有利于Si-O键、Al-O键、Ca-O键以及Mg-O键的破坏,易与Na₂SiO₃在水中电离出的硅酸根离子生成硅酸钙沉淀和硅酸胶凝物质并置换出NaOH,而此时少量的NaOH也可以促进GGBS的水化反应生成胶凝物质,从而使固化土强度提升。其化学反应方程如下:

图4 GGBS 和 Na_2SiO_3 对 28 d 龄期强度交互作用的响应面和等值线图

随着养护时间的延长, Na_2SiO_3 掺量不断加大, 生成过多的 NaOH , 而 NaOH 浓度过高时对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 有一定的排挤作用, 使得 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 以结晶的形式析出, 从而使 Na_2SiO_3 的水化反应逐渐减少, 对固化土强度的提升不利。当 GGBS 的掺量不断加大时, 由于水化硅酸钙 (CSH) 和水化铝酸钙 (CAH) 等胶凝物质的生成, 导致消耗大量的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 且不能及时得到补充, 使固化土强度不断减小。

2.3 最优配比分析与模型检验

通过 Design-Expert 软件对三种外掺剂之间的交互作用分析, 我们可以获取三个影响因素之间的最优配合比: GGBS 为 12.46%, MgO 为 3.90%, Na_2SiO_3 为 6.73%。在最优配合比的状态下, 对于固化土的无侧限抗压强度而言, 养护龄期为 7 d 时该值可以达到 1 015.04 kPa, 养护龄期为 28 d 时该值可以达到 1 166.48 kPa。

为了保证上述模型的可靠度, 将表 4 中相应数值代入式 (3)、式 (4), 求出的预测值与实际值进行比较, 如表 6 所示, 其误差不大, 证明该模型可以进行指导实际工程应用。

表6 实测值与预测值对比

7 d		28 d	
实测值 /kPa	预测值 /kPa	实测值 /kPa	预测值 /kPa
405	657.51	616	843.48
974	976.91	1 148	1 148.61
974	976.91	1 148	1 148.61
390	467.18	646	637.77
974	976.91	1 148	1 148.61
974	976.91	1 148	1 148.61
575	708.46	672	887.59
993	886.85	854	879.501
412	531.90	507	805.49
380	363.88	485	606.85
344	291.12	532	495.55
801	744.24	1 006	838.49
387	337.29	495	494.547
974	976.91	1 148	1 148.61
974	976.91	1 148	1 148.61
583	581.67	656	934.320
397	296.465	598	694.265
620	526.44	693	810.19
622	569.872	735	713.913
638	642.489	809	762.098

3 结论

(1) 根据 CCD 试验设计的研究分析表明: 掺入复合固化剂的固化土经过 7 d 和 28 d 的养护, 三种

影响因子对无侧限抗压强度的曲面和线性效应均显著,两两因素之间的交互作用有着一定的区别。7 d 养护龄期下 GGBS 和 MgO 的交互作用显著;28 d 养护龄期下 GGBS 和 Na_2SiO_3 的交互作用显著。

(2) 根据交互作用和机制分析可知:7 d 龄期的固化土抗压强度均随 GGBS 和 MgO 掺量的增加呈现出先增大再逐渐减小的变化趋势。28 d 龄期 Na_2SiO_3 掺量在 2.64%~6% 之间时,固化土的强度随着 Na_2SiO_3 掺量的增加而不断增大;而当 Na_2SiO_3 掺量在 6%~9.36% 之间时,28 d 养护龄期固化土的强度随着 Na_2SiO_3 掺量的增加呈现出减小的趋势;当 GGBS 掺入量在 8.64%~15.36% 之间时,28 d 养护龄期固化土的强度随着 GGBS 掺量的增加,呈现出先增加后减小的趋势。

(3) 通过 Design-Expert 软件对养护 7 d 和 28 d 龄期的交互作用分析,发现 GGBS、MgO 与 Na_2SiO_3 的最优配比分别为 12.46%、3.90% 与 6.73%。此配比下,7 d 和 28 d 龄期的预估抗压强度分别为 1 015.04 kPa 与 1 166.48 kPa。验证试验的结果表明,预测值与实测值相接近,说明此种复合固化剂的配比方式可以有效改善滨湖新区软土的固化效果。

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.
- [2] 杜东菊,杨爱武,柳艳华,等. 天津滨海新区软土微结构与地基处理新技术研究[J]. 天津科技,2006,33(6):31-32.
- [3] 蔡强. 滨海深厚软土加固变形机理及工程运用[D]. 淮南:安徽理工大学,2018.
- [4] 徐日庆,畅帅,俞元洪,等. 基于响应面法的杭州海相软土固化强度模型[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(11):1941-1946.
- [5] Shi C J, Krivenko P V, Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes[M]. Abingdon, UK: Taylor & Francis, 2006.
- [6] Khandelwal R, Senthilnath J, Omkar S N, et al. A novel multiobjective optimization for cement stabilized soft soil based on artificial bee colony[J]. International Journal of Applied Metaheuristic Computing, 2016, 7(4):1-17.
- [7] 陈金洪,贺瑶瑶,胡亚风. 粒化高炉矿渣-氧化镁固化连云港软土的力学特性试验[J]. 林业工程学报,2019,4(2):133-138.
- [8] 王东星,陈政光. 氯氧镁水泥固化淤泥力学特性及微观机制[J]. 岩土力学,2021,42(1):77-85,92.
- [9] 畅帅. 杭州软土固化优化研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [10] 邵艳,邢维忠,魏源. GGBS 及其激发剂固化合肥湖积软土的试验研究[J]. 实验力学,2015,30(3):367-372.
- [11] Huang M D, Wang B Y, Zhou J. Hot stamping parameters optimization of boron steel using a response surface methodology based on central composite design[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(6):519-526.
- [12] 储田,邵艳. 基于 Box-Behnken 法的合肥滨湖软土固化配比的试验研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版),2020,39(4):305-311.
- [13] 李云雷. 基于响应面法固化合肥湖积软土的配比优化研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2017.
- [14] 黄祥祥,邵艳. 土壤初始状态对固化土优化配方的影响[J]. 兰州工业学院学报,2020,27(5):19-26.
- [15] 孙本状. 合肥湖积软土固化配方优化研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2017.
- [16] 吴蓬,吕宪俊,胡术刚,等. 粒化高炉矿渣成分和细度对活性的影响[J]. 硅酸盐通报,2014,33(10):2572-2577.
- [17] 马聪. 饱和软土高效固化剂及固化土强度特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2017.
- [18] 邵艳,孙本状,周冬青,等. 基于 Box-Behnken 法的合肥湖积软土固化配方优化的试验研究[J]. 实验力学,2017,32(2):286-294.