

基于Box-Behnken法的杭州钱塘江江底软土 固化配方优化研究

丁杨龙

中煤特殊凿井有限责任公司 安徽合肥 230000

中煤矿山建设集团有限责任公司 安徽合肥 230000

摘要: 基于无侧限抗压强度试验, 进行GGBS、CaO和Na₂SiO₃三种添加剂复合固化剂的研究。研究表明: GGBS、CaO和Na₂SiO₃三种添加剂对软土固化效果的线性效应均显著, 且GGBS对软土固化效果最明显, 而CaO和Na₂SiO₃的固化效果则不明显, CaO和Na₂SiO₃在软土固化过程中起到激发GGBS活性的作用。

关键词: 无侧限抗压强度; 复合固化剂; 响应面法; Box-Behnken法

引言:

杭州地铁6号线博览中心站(原博览站)~钱江世纪城站区间联络通道途径钱塘江流域, 其江底广泛分布河湖相淤泥质软土, 具有承载能力低等特点, 不利于施工。软土固化技术通过掺入固化剂的方法进行软土性质的改良, 以期达到满足施工要求的目的^[1]。目前常用的固化剂以水泥为主, 但水泥固化剂不能有效固化富含有机质土等特点, 为此许多学者开展了复合固化剂配方的研究^[2]。邵艳^[3]等通过CaO和纯碱激发GGBS的复合固化剂研究, 得到当GGBS、CaO和纯碱在配比13.08%、4.89%和1.25%软土的固化强度最高, 最高可达665.953kPa。本文将GGBS、CaO和Na₂SiO₃三种添加剂作为影响因子, 并将固化土7d和28d的无侧限抗压强度值作为响应值, 通过Box-Behnken法进行三种添加剂的优化研究, 确保使固化土强度达到最强。

1 试验方法

本次试验原状土取自杭州地铁6号线博览中心站(原博览站)~钱江世纪城站区间联络通的地基软土。GGBS取自淮南田家庵海螺水泥厂, CaO取自天津博迪华工公司生产的工业氧化钙, CaO的烧失量低于2%。Na₂SiO₃取自国药化学试剂有限公司生产的化学硅酸钠, 为白色粉末状, 其水溶液呈弱碱性。

将联络通道的地基软土取回后放于烘箱内烘干后使用。将保鲜袋中的土以及GGBS、CaO和Na₂SiO₃按比例

投放搅拌机中搅拌均匀并用喷壶喷水淋湿, 制备固化土混合料, 然后在三瓣模内制作土样, 再进行无侧限抗压强度试验。

Box-Behnken法是响应面法的一种。当影响因素为三个时, 可通过Box-Behnken法的单因子效果分析以及交互作用效果分析, 得到三因素对试验结果的最优配比结果。试验因素水平及编码水平如表1所示。

表1 Box-Behnken法试验因素及编码水平

变量	编码值	水平		
		-1	0	1
GGBS (%)	X ₁	10	12	14
CaO (%)	X ₂	2	3	4
Na ₂ SiO ₃ (%)	X ₃	4	6	8

在Box-Behnken试验设计给定条件下得到7d龄期的无侧限抗压强度(Y₇)以及28d龄期的无侧限抗压强度(Y₂₈)具体的试验参数如表2所示。

表2 Box-Behnken试验设计

试验号	因素			响应值 Y ₇ (kPa)	响应值 Y ₂₈ (kPa)
	X ₁	X ₂	X ₃		
1	0 (12)	0 (3)	0 (6)	517	639
2	0 (12)	0 (3)	0 (6)	517	639
3	0 (12)	-1 (2)	-1 (4)	383	551
4	-1 (10)	0 (3)	-1 (4)	389	437
5	0 (12)	0 (3)	0 (6)	517	639
6	0 (12)	-1 (2)	1 (8)	422	578
7	0 (12)	0 (3)	0 (6)	517	639
8	-1 (10)	1 (4)	0 (6)	430	503
9	1 (14)	0 (3)	-1 (4)	489	678
10	0 (12)	0 (3)	0 (6)	517	639
11	-1 (10)	-1 (2)	0 (6)	347	501

通讯作者简介: 丁杨龙, 1988年11月, 汉族, 男, 安徽省宿州市, 中煤特殊凿井有限责任公司, 职位: 工程管理部副主任科员, 职称: 中级工程师, 研究方向(市政), 学历: 大学本科, 邮编: 230000, 邮箱: 654632143@qq.com。

试验号	因素			响应值 Y ₇ (kPa)	响应值 Y ₂₈ (kPa)
	X ₁	X ₂	X ₃		
12	1 (14)	1 (4)	0 (6)	527	639
13	1 (14)	-1 (2)	0 (6)	426	629
14	-1 (10)	0 (3)	1 (8)	389	543
15	0 (12)	1 (4)	1 (8)	537	665
16	1 (14)	0 (3)	1 (8)	521	689
27	0 (12)	1 (4)	-1 (4)	403	597

2 试验结果及优化分析

通过 Design-Expert 软件进行二次多项式的回归拟合, 根据表 2 中的试验结果得到模型的结果如表 3 所示。

表 3 28d 二阶模型方程的方差分析

方差来源	7d			28d		
	F 值	P 值	方程系数	F 值	P 值	方程系数
Model	15.55	0.0008	517	15.7	0.0007	639
X ₁	45.84	0.0003	51	98.06	<0.0001	81.38
X ₂	28.02	0.0011	39.87	4.86	0.0632	18.12
X ₃	11.57	0.0114	25.63	10.4	0.0146	26.5
X ₁ X ₂	0.18	0.6854	4.5	0.03	0.8682	2
X ₁ X ₃	0.56	0.4771	8	4.18	0.0803	-23.75
X ₂ X ₃	4.97	0.061	23.75	0.78	0.4071	10.25
X ₁ ²	12.61	0.0093	-36.88	13.1	0.0085	-41
X ₂ ²	21.04	0.0025	-47.63	7.01	0.033	-30
X ₃ ²	10.18	0.0153	-33.12	0.99	0.3537	-11.25
R ²	0.9524			0.9528		

采用 F 分布检验方程的显著性, 分析时首先给定显著性水平 $\alpha=0.1$, 当拟合分析结果中 P 值小于 α 值时, 认为试验结果的显著性较好; 反之, 当 P 值大于 α 值时, 认为该影响因子显著性不明显, 应予剔除。由表 3 所示, 根据 7d 龄期的回归分析结果, X₁X₂、X₁X₃ 的 P 值分别为 0.6854 和 0.4771, 因此认为这两项不显著, 应予剔除。同理, 根据 28d 龄期的回归分析结果, X₁X₂、X₂X₃ 以及 X₃² 的 P 值大于 0.1 水平, 也予以剔除。最终得到调整后的 7d 龄期以及 28d 龄期的二阶模型如下:

$$Y_7=517.00+51.00X_1+39.87X_2+25.63X_3+23.75X_2X_3-36.88X_1^2-47.63X_2^2-33.12X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_{28}=634.26+81.37X_1+18.12X_2+26.50X_3-23.75X_1X_3-41.59X_1^2-30.59X_2^2 \quad (3)$$

根据方差分析结果可知, 7d 龄期的模型的 P 值为 0.0008, 且该模型的相关系数为 R²=0.9524, 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, X₂ 和 X₃ 的交互作用显著。同理, 28d 龄期的回归模型分析结果表明, 该模型的 P 值为 0.0007, R²=0.9528 也表明模型的拟合度很好, X₁ 和 X₃ 的交互作用显著。

分别采用降维法对式 2 和式 3 进行分析, 将其中两个因子固定在 0 水平, 即可得到单因子对试验结果影响的试验模型。由此, 得到 X₁, X₂, X₃ 单因子作用下固化土 7d 和 28d 的强度预测值, 如表 4 所示。

表 4 单因子效应下强度预测值分析

因子编码值	Y ₇ /kPa			Y ₂₈ /kPa		
	GGBS (X ₁)	氧化钙 (X ₂)	硅酸钠 (X ₃)	GGBS (X ₁)	氧化钙 (X ₂)	硅酸钠 (X ₃)
-1	429.12	429.5	458.25	511.3	585.55	607.76
-0.5	482.28	485.1575	495.905	583.1775	617.5525	621.01
0	517	517	517	634.26	634.26	634.26
0.5	533.28	525.0275	521.535	664.5475	635.6725	647.51
1	531.12	509.24	509.51	674.04	621.79	660.76

通过固化土 7d 无侧限抗压强度单因子变化规律的研究可以发现, GGBS 对固化土强度的影响最大, 其 Y₇ 的变化范围由 429.12kPa 至 533.28kPa。相比于 GGBS 对固化土强度的影响, CaO 和 Na₂SiO₃ 单因子影响 Y₇ 的变化范围分别为 429.5kPa ~ 525.03kPa、458.25kPa ~ 521.54kPa, 由此可见固化土强度随着 CaO 和 Na₂SiO₃ 掺量的增加变化不明显。同理, 分析固化土 28d 无侧限抗压强度单因子变化规律的研究可以发现, GGBS 掺量的增加对固化土强度增长的影响依然最大, 其次是 CaO 的掺量, 再次是 Na₂SiO₃ 的掺量。

利用 Design-Expert 软件对 7d 和 28d 固化土强度分析最终得出, GGBS、CaO、Na₂SiO₃ 的配比为 14.00%、3.38%、6.59% 时, 固化土强度达到最大。在此配比下, Y₇ 为 550.50kPa, Y₂₈ 为 683.67kPa。

3 结论

(1) 通过 Box-Behnken 试验设计结果表明, 7d 与 28d 龄期固化土强度试验的线性效应与曲面效应均显著

(2) 单因子效应分析可知, GGBS 掺量对固化土强度影响显著, 且其影响结果随着龄期的增长而增大, 而 CaO 和 Na₂SiO₃ 对固化土的影响则相反。

(3) 利用 Design-Expert 软件对 7d 和 28d 固化土进行单因子效应分析以及交互作用分析最终得出, 当 GGBS、CaO、Na₂SiO₃ 的配比为 14.00%、3.38%、6.59% 时, Y₇ 最大为 550.50kPa, Y₂₈ 最大为 683.67kPa。

参考文献:

- [1] 黄祥祥. 合肥滨湖淤泥质土的固化配方优化及力学特性研究[D]. 安徽建筑大学, 2021.
- [2] 黄银明. GGBS 固化瓦埠湖软土的优化研究[D]. 安徽建筑大学, 2020.
- [3] 邵艳, 孙本状, 周冬青, 朱保涛. 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 (02): 286-294.