

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202009010



运用响应面法的工程废土 综合改性优化

陈荣淋, 周克民

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于响应面法中的 Box-Behnken 试验设计方法,在考虑因素间交互作用的基础上对工程废土进行综合改性优化研究. 构建成型压力、混合料含水率、水泥掺量及细石掺量等因素与改性后工程废土表观密度、抗压强度、导热系数和软化系数等指标间的响应面,探索各因素对响应指标的影响规律. 通过回归模型修正、试验验证获取适用于工程废土综合改性优化指标响应值预测的回归模型方程. 结果表明:考虑工艺成本,工程废土在进行综合改性优化时,成型压力、混合料含水率、水泥掺量和细石掺量的最优取值范围分别为 15~25 MPa, 10.5%~12.5%, 8%~12% 和 3%~6%;各影响因素对改性后工程废土的表观密度、抗压强度、导热系数和软化系数等指标的影响显著程度均不相同,且存在交互作用;修正后的改性工程废土指标响应值回归模型经试验验证,最大偏差值为 6.07%,适用于工程废土改性方案的优化和各指标响应值的预测.

关键词: 响应面法; 工程废土; 改性试验; 性能优化; 预测模型

中图分类号: TU 398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)03-0312-10

Optimization of Construction Waste Soil Comprehensive Modification Using Response Surface Method

CHEN Ronglin, ZHOU Kemin

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the Box-Behnken test design method in the response surface method, the construction waste soil was comprehensively modified and optimized considering the interaction between the influencing factors. The response surfaces considering various factors were established, such as forming pressure, content of mixture moisture, the amount of cement, the amount of fine stones, the apparent density, compressive strength, thermal conductivity coefficient and softening coefficient of the modified construction waste soil, the influence of each factor on the response index was investigated. Through regression model correction and experimental verification, the regression model equation to predict of response value of comprehensive modification optimization index of engineering waste soil was obtained. The results show that, considering the process cost, in process of comprehensive modification and optimization of construction waste soil, the forming pressure, the optimal values of the content of mixture moisture, the amount of cement and the amount of fine stones are 15-25 MPa, 10.5%-12.5%, 8%-12%, and 3%-6% respectively. Each influencing factor effects

收稿日期: 2020-09-03

通信作者: 陈荣淋(1981-),男,高级实验师,博士,主要从事土木工程相关实验技术及计算机辅助仿真设计的研究.
E-mail:501289999@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572131);福建省自然科学基金资助项目(2019H0012);华侨大学科研资助项目(50X19112)

differently on the apparent density, compressive strength, thermal conductivity coefficient and softening coefficient of the modified construction waste soil, and also interacts between the factors. The revised regression model of the modified construction waste soil indexes response value is verified by experiments, the maximum deviation value is 6.07%, which is suitable for the optimization of construction waste soil modification plan and the prediction of the response value of each index.

Keywords: response surface method; construction waste soil; modification test; performance optimization; prediction model

随着经济发展和城镇化进程的推进,国家的工程建设总量不断加大,导致建筑垃圾的产生量也不断增大.特别是在 2000 年以后,因旧城改造、新城建设而产生的建筑垃圾数量激增,仅 2015 年,全国建筑垃圾年产量约 17.01 亿 t,日均产量约 466.1 万 t.在这些建筑垃圾中,工程废土已经成为主力军^[1].近年来,我国城市地下交通建设和地下管廊建设等各类大型地下工程发展迅猛,开挖出来的工程废土也越来越多.由于工程废土量大,清运、堆放、消纳都成为各大城市亟待解决的难题,面对工程废土“围城”的难题,国内学者分别从路基垫层材料、轻质陶粒、烧结砖和低强度混凝土等方面研究工程废土的资源化再利用技术^[2-5],但均存在工程废土回收利用率较低的问题.由实地调研发现,工程废土以原状生土为主,如能将该部分生土基材料改性并开展资源化利用,那么将极大提高工程废土的利用率.

国外许多学者对生土材料的改性进行了大量的试验研究^[6-10],而我国在生土材料改性方面的研究起步较晚.19 世纪 80 年代,为了对传统生土建筑遗址进行保护,大量学者开始对生土材料进行改性研究,以提高抗震、抗裂和耐水等性能^[11-14],并对改性生土用于墙材或墙体进行研究^[15-22].然而,当前作为墙材的改性生土砖或砌块以实心 and 低孔洞率为主,砖体本身的表现密度较大,一般只用于自承重墙体,由此限制了改性生土砖或砌块的应用范围.

响应面法由英国统计学家 Box 和 Wilson 于 1951 年提出^[23],是统计、数学和计算机科学紧密联系和发展的结果.将指标的响应作为一个或多个因素的函数,用解析函数表示这种关系,并以此优化响应.近十多年来,许多学者运用响应面法对包括化学工业、生物学、医学、工程学、生态学及生物制药领域等方面进行研究^[24-28].基于此,本文运用响应面法综合改性优化工程废土.

1 试验方案

1.1 原材料

工程废土土样 X 射线衍射分析结果,如图 1 所示.图 1 中: θ 为度数.通过矿物组成分析,发现该工程废土土样的矿物成分主要为石英,含有少量高岭土、方解石等.采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定分析土样的化学成分,如表 1 所示.表 1 中: w 为质量分数;LOI 为烧失量.由表 1 可知:该工程废土土样中的 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 的总量占土样质量的 85% 以上.

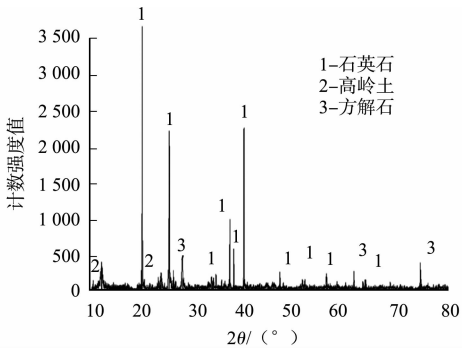


图 1 工程废土土样 X 射线衍射分析结果
Fig. 1 X-ray diffraction analysis results of construction waste soil sample

表 1 工程废土土样化学成分

Tab. 1 Chemical composition of construction waste soil sample											%
$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	$w(\text{Cl})$	$w(\text{LOI})$
65.79	17.16	4.26	6.93	0.06	0.20	1.98	1.32	0.44	0.08	0.19	1.59

普通硅酸盐水泥标号为 P · O 42.5,其 28 d 实测抗折强度和抗压强度分别为 7.4,45.2 MPa;普通花岗岩粒径为 3~5 mm.

1.2 影响因素与取值范围

国内外学者普遍以抗压强度作为评定材料的力学性能指标^[21-26],而表现密度又直接影响到基材的传热性质,因此以抗压强度和表现密度为考察指标,以不同成型压力、混合料含水率、水泥掺量和细石掺量为控制因素,进行工程废土单因素改性试验研究,探索控制因素的影响规律,以确定工程废土多指标

综合改性优化研究中的影响因素和取值范围.

改性工程废土单因素试验参数及结果,如表 2 所示.表 2 中: w (工程废土)为工程废土的质量分数; p 为成型压力; η 为混合料含水率; w (水泥)为水泥掺量; w (细石)为细石掺量; η_r 为实测含水率; ρ 为表观密度; f_c 为抗压强度.每组有 6 个成型尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的试样,试样在标准养护条件下养护 28 d 后,测定其表观密度和抗压强度,表观密度和抗压强度试验结果为每组试验 6 个试样测定后的平均值.

表 2 改性工程废土单因素试验参数及结果

Tab. 2 Test parameters and results of modified construction waste soil with single influencing factor									
试验编号	影响因素	w (工程废土)/%	p /MPa	η /%	w (水泥)/%	w (细石)/%	η_r /%	ρ /kg·m ⁻³	f_c /MPa
F1	p	92	10	11.5	8	—	11.59	1 942.7	11.2
F2		92	15	11.5	8	—	11.56	1 988.5	12.8
F3		92	20	11.5	8	—	11.51	2 030.1	14.2
F4		92	25	11.5	8	—	11.48	2 047.6	15.1
F5		92	30	11.5	8	—	11.50	2 055.4	15.4
W1	η	92	20	9.5	8	—	9.63	1 963.6	12.8
W2		92	20	10.5	8	—	10.46	2 015.7	14.1
W3		92	20	11.5	8	—	11.52	2 034.3	14.7
W4		92	20	12.5	8	—	12.57	2 010.3	13.5
C1	w (水泥)	94	20	11.5	6	—	11.48	2 034.7	12.9
C2		92	20	11.5	8	—	11.54	2 036.3	15.1
C3		90	20	11.5	10	—	11.52	2 036.9	17.5
C4		88	20	11.5	12	—	11.57	2 037.2	19.4
S1	w (细石)	92	20	11.5	8	0	11.53	2 032.5	14.3
S2		89	20	11.5	8	3	11.46	2 041.3	15.9
S3		86	20	11.5	8	6	11.42	2 043.6	16.2
S4		83	20	11.5	8	9	11.54	2 042.7	15.4
S5		80	20	11.5	8	12	11.59	2 044.8	13.4

各控制因素与改性后工程废土抗压强度和表观密度的关系曲线,如图 2~5 所示.由图 2~5 可知:1) 改性工程废土抗压强度和表观密度都随成型压力的增大而增大,但增长率逐步降低,成型压力在改性过程中存在极限取值,是影响改性效果的关键因素之一;2) 不同混合料含水率对改性工程废土抗压强度和表观密度有着显著影响,在混合料配比和成型压力固定的情况下,存在最优混合料含水率;3) 随着水泥掺量的增大,改性工程废土表观密度逐渐增大,增长率很低且逐渐减小,而抗压强度呈线性递增,增长斜率为 1.065,因此水泥掺量对抗压强度的影响显著,但是考虑生产成本,在满足力学性能的前提下,应对水泥掺量进行优化控制;4) 当细石掺量低于 6%时,表观密度随着掺量的增加而逐渐增大,抗压强度也出现相应的增长,当细石掺量超过 9%时,表观密度的增长率趋于平缓,而抗压强度不增反降,因

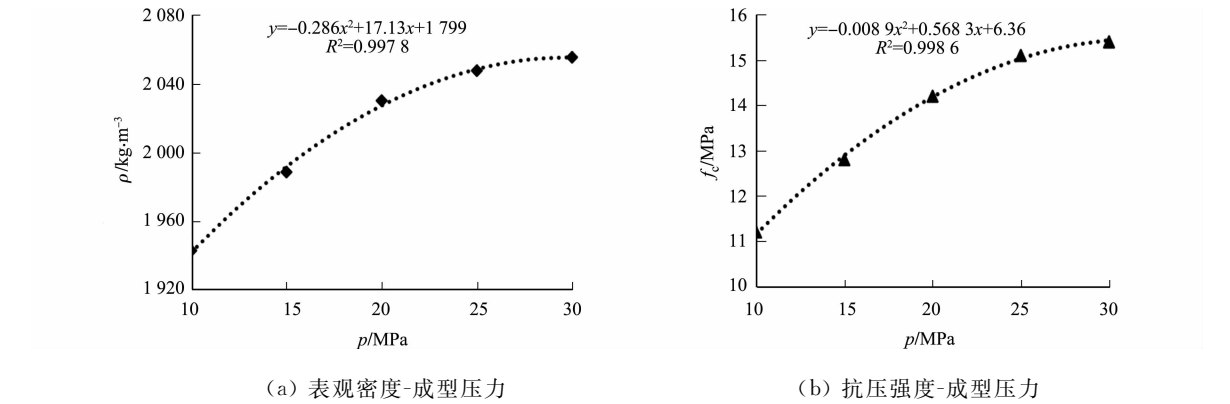
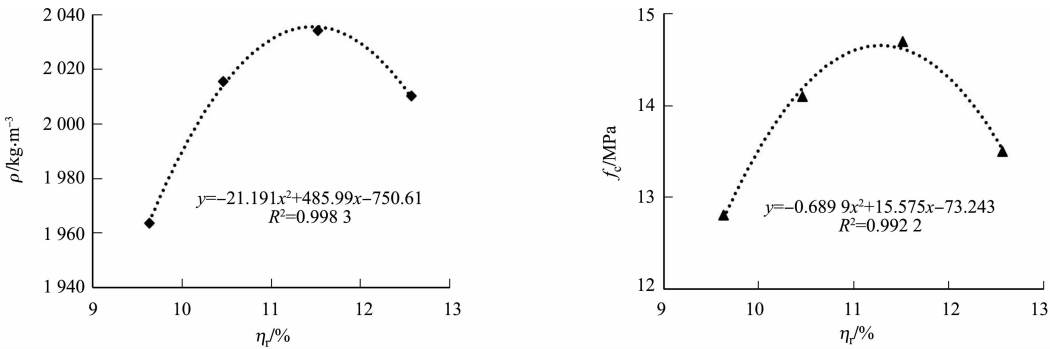


图 2 成型压力与表观密度及抗压强度关系曲线

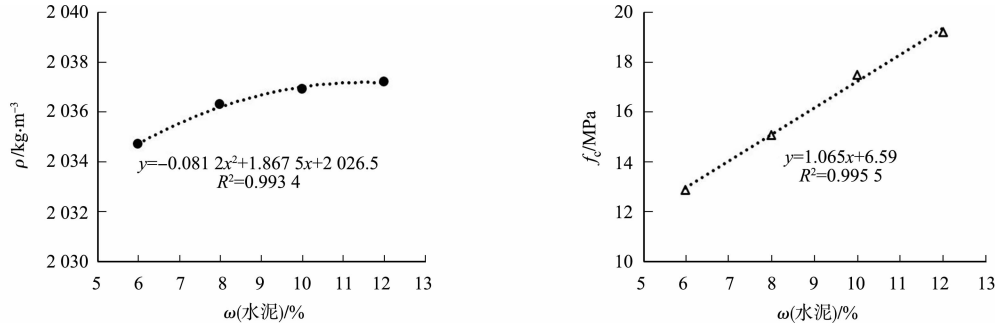
Fig. 2 Relationship curves between forming pressure and apparent density, compressive strength



(a) 表观密度-混合料含水率 (b) 抗压强度-混合料含水率

图 3 混合料含水率与表观密度及抗压强度关系曲线

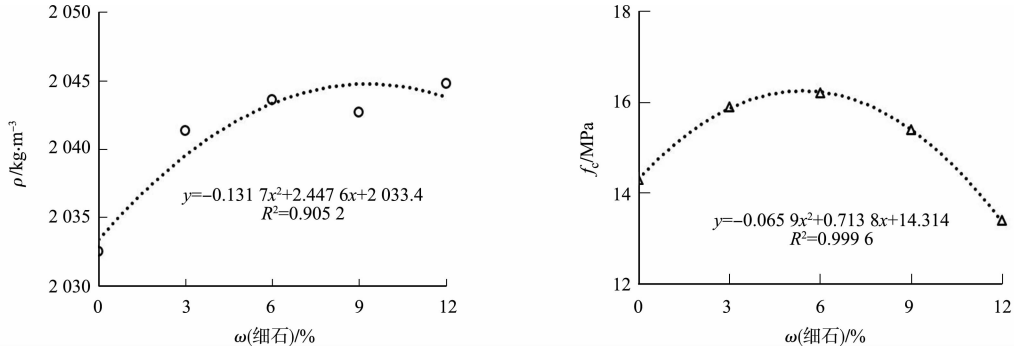
Fig. 3 Relationship curves between mixture moisture and apparent density, compressive strength



(a) 表观密度-水泥掺量 (b) 抗压强度-水泥掺量

图 4 水泥掺量与表观密度及抗压强度关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between cement content and apparent density, compressive strength



(a) 表观密度-细石掺量 (b) 抗压强度-细石掺量

图 5 细石掺量与表观密度及抗压强度关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between fine stone content and parent density, compressive strength

此细石掺量对改性工程废土的表观密度和抗压强度存在掺量最优取值问题。基于单因素试验,综合考虑实际生产工艺和成本,工程废土在综合改性优化时,成型压力、混合料含水率、水泥掺量及细石掺量的优化取值范围分别为 15~25 MPa,10.5%~12.5%,8%~12%和 3%~6%。

1.3 响应面法试验设计与结果

基于响应面法中的 Box-Behnken 试验设计方法,确定成型压力(X_1 ,MPa)、混合料含水率(X_2 ,%)、水泥掺量(X_3 ,%)、细石掺量(X_4 ,%) 4 个影响因素及其水平,如表 3 所示。

根据响应面法中的 Box-Behnken 设计 4 因素 3 水平试验布置方案,共 29 组,共制备用于测定表观密度、抗压强度及软化系数的立方体试样 348 个,每组试验 12 个;用于测定导热系数的圆柱体试样 87 个,每组试验 3 个。

试验布置方案及结果,如表 4 所示。表 4 中:表观密度(Y_1 , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、抗压强度(Y_2 ,MPa)、导热系数(Y_3 , $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)、软化系数(Y_4)为影响因素。

表 3 Box-Behnken 试验因素及水平编码
Tab. 3 Box-Behnken test factors and level coding

水平编码	试验因素			
	X_1	X_2	X_3	X_4
1	15	10.5	8	3.0
0	20	11.5	10	4.5
-1	25	12.5	12	6.0

表 4 Box-Behnken 试验方案及结果
Tab. 4 Experiment scheme and results of Box-Behnken

试验 编号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	25	12.5	10	4.5	2 042.6	15.1	0.843	0.91
2	25	11.5	12	4.5	2 058.9	19.1	0.905	0.96
3	25	11.5	10	6.0	2 062.4	17.6	0.917	0.94
4	25	11.5	10	3.0	2 055.3	17.3	0.914	0.94
5	25	11.5	8	4.5	2 057.8	16.1	0.903	0.93
6	25	10.5	10	4.5	2 041.3	15.9	0.846	0.93
7	20	12.5	12	4.5	2 021.8	15.9	0.760	0.90
8	20	12.5	10	6.0	2 024.3	15.6	0.794	0.89
9	20	12.5	10	3.0	2 019.6	15.1	0.764	0.90
10	20	12.5	8	4.5	2 021.3	13.3	0.771	0.89
11	20	11.5	12	6.0	2 044.6	19.4	0.878	0.94
12	20	11.5	12	3.0	2 038.2	18.9	0.854	0.95
13	20	11.5	10	4.5	2 042.7	17.2	0.857	0.90
14	20	11.5	10	4.5	2 041.9	16.9	0.855	0.92
15	20	11.5	10	4.5	2 042.5	16.9	0.861	0.91
16	20	11.5	10	4.5	2 041.8	16.8	0.854	0.91
17	20	11.5	10	4.5	2 042.5	17.0	0.863	0.91
18	20	11.5	8	6.0	2 041.5	16.4	0.862	0.92
19	20	11.5	8	3.0	2 039.4	15.8	0.834	0.91
20	20	10.5	12	4.5	2 024.4	17.3	0.823	0.93
21	20	10.5	10	6.0	2 024.7	16.3	0.807	0.90
22	20	10.5	10	3.0	2 023.4	15.6	0.802	0.91
23	20	10.5	8	4.5	2 024.2	14.3	0.795	0.90
24	15	12.5	10	4.5	1 976.3	12.1	0.652	0.87
25	15	11.5	12	4.5	1 995.2	15.1	0.734	0.93
26	15	11.5	10	6.0	1 996.7	14.7	0.754	0.90
27	15	11.5	10	3.0	1 993.7	14.3	0.723	0.91
28	15	11.5	8	4.5	1 995.2	12.9	0.736	0.89
29	15	10.5	10	4.5	1 981.1	13.1	0.688	0.87

2 试验结果分析

2.1 二次回归方程及有效性检验

采用多元二次回归方程拟合影响因素与响应值之间的函数关系,二次回归方程式为

$$Y_i = \alpha_i + a_{i,1}X_1 + a_{i,2}X_2 + a_{i,3}X_3 + a_{i,4}X_4 + b_{i,1}X_1X_2 + b_{i,2}X_1X_3 + b_{i,3}X_1X_4 + b_{i,4}X_2X_3 + b_{i,5}X_2X_4 + b_{i,6}X_3X_4 + c_{i,1}X_1^2 + c_{i,2}X_2^2 + c_{i,3}X_3^2 + c_{i,4}X_4^2. \tag{1}$$

式(1)中: Y_i 为各目标响应值; α_i 为截距项; $a_{i,j}$ 为线性系数; $b_{i,j}$ 为交互项系数; $c_{i,j}$ 为二次项系数, i 为 1~4, j 为 1~4.

根据试验数据(表 4)进行回归拟合,获得优化目标响应值方程系数,如表 5 所示.

表 5 优化目标响应值方程系数

Tab. 5 Equation coefficient of optimized target response value

影响因素	a_i	$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	$a_{i,4}$	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	$b_{i,3}$
Y_1	-605.761	24.722	407.958	2.510	-8.157	0.305	0.028 0	0.137 0
Y_2	-238.599	2.070	40.173	0.338	-1.013	0.010	0.020 0	-0.003 0
Y_3	-8.957	0.056	1.535	0.077	-0.028	0.002	0.000 1	-0.000 9
Y_4	-1.733	0.01	0.46	-0.016	-0.023	-0.001	-0.000 3	0.000 3
影响因素	$b_{i,4}$	$b_{i,5}$	$b_{i,6}$	$c_{i,1}$	$c_{i,2}$	$c_{i,3}$	$c_{i,4}$	
Y_1	0.038	0.567	0.358 0	-0.570 0	-18.178	-0.248 0	-0.368	
Y_2	-0.050	-0.033	0.008 0	-0.051 0	-1.747	0.029 0	0.190	
Y_3	-0.005	0.004	-0.000 3	-0.001 0	-0.068	-0.000 9	0.001	
Y_4	-0.003	0.001	-0.002 0	0.000 2	-0.019	0.003 0	0.003	

对回归方程进行方差分析(ANOVA)和显著性检验,二次回归方差分析结果,如表 6 所示.表 6 中: F 为各因素对响应值的影响强度, F 越大,则表明影响作用越强; $P_r(>F)$ 为显著性检验 P 值; R^2_{Adj} 为校正决定系数;C. V. 为变异系数.

表 6 二次回归方差分析结果

Tab. 6 ANOVA results of quadratic regression

影响因素	F	$P_r(>F)$	R^2_{Adj}	C. V. /%	失拟项	模型显著性	失拟项显著性
Y_1	2 454.83	<0.000 1	0.999 2	0.032 9	0.122 5	显著	不显著
Y_2	35.27	<0.000 1	0.978 8	1.650 0	0.105 3	显著	不显著
Y_3	57.94	<0.000 1	0.990 4	0.823 0	0.104 8	显著	不显著
Y_4	21.61	<0.000 1	0.987 4	0.712 0	0.658 0	显著	不显著

由表 6 可知: $P_r(>F)<0.000 1$,失拟项均大于 0.05,失拟不显著,说明回归方程拟合充分、高度显著;C. V. 为 0.032 9%~1.650 0%,说明试验的可靠性高.

2.2 因素影响及交互作用

2.2.1 因素影响显著程度 根据回归方程一次项系数绝对值大小,可以判断各因素对不同响应值的影响程度.各因素对表观密度指标的影响显著程度大小为成型压力>细石掺量>混合料含水率>水泥掺量.其中,成型压力、细石掺量及混合料含水率对指标的影响都极显著,而水泥掺量影响不显著.成型压力和混合料含水率、成型压力和细石掺量、水泥掺量和细石掺量、混合料含水率和细石掺量对改性工程废土表观密度交互作用影响显著.

各因素对抗压强度指标的影响显著程度大小为成型压力>水泥掺量>混合料含水率>细石掺量,且影响都非常显著.不同因素对抗压强度存在一定的交互作用,但影响比较弱.

各因素对改性工程废土导热系数影响都很显著,影响显著程度大小为成型压力>混合料含水率>细石掺量>水泥掺量.成型压力和混合料含水率、混合料含水率和水泥掺量对导热系数的交互作用影响最为显著.

除细石掺量外,成型压力、混合料含水率和水泥掺量都对改性工程废土软化系数影响显著.各个因素对软化系数指标的影响显著程度大小为成型压力>水泥掺量>混合料含水率>细石掺量.

2.2.2 因素交互作用影响分析 通过试验数据处理,获得因素与响应指标间的响应面与等高线.通过分析可知:显著影响改性工程废土表观密度交互作用的因素为成型压力和混合料含水率、成型压力和细石掺量、水泥掺量和细石掺量、混合料含水率和细石掺量.成型压力和混合料含水率交互影响表观密度分析图,如图 6 所示.

将水泥掺量和细石掺量固定在同一水平,可以发现相比于混合料含水率零水平(11.5%,下同),高水平(12.5%,下同)或低水平(10.5%,下同)的表观密度随成型压力增大而增大的增长速率小;当成型压力处于低水平(15 MPa,下同)和成型压力处于高水平(25 MPa,下同)时,表观密度随混合料含水率的改变而发生变化的梯度也不一样,后者比较平缓.因此,成型压力和混合料含水率对表观密度的交互作用影响显著.

4 个因素对改性工程废土抗压强度的交互作用影响都不显著.但是从响应面分析来看,成型压力和

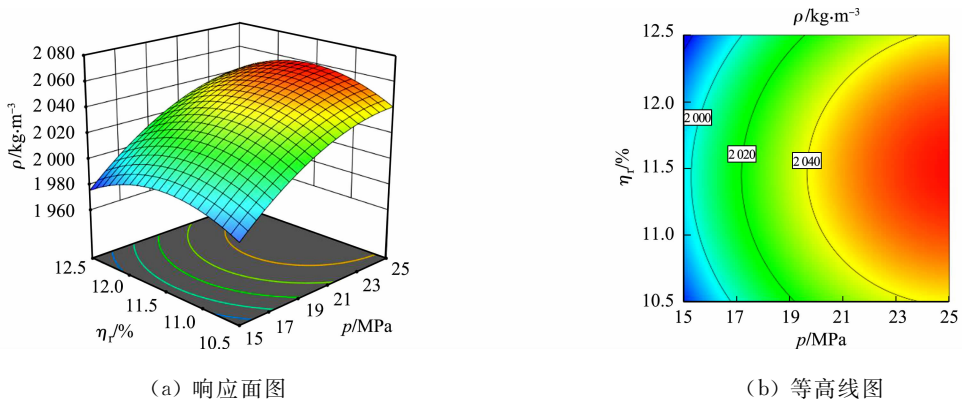


图 6 成型压力和混合料含水率交互影响表观密度分析图

Fig. 6 Interaction effects of forming pressure and mixtures moisture on apparent density

水泥掺量交互影响抗压强度分析图,如图 7 所示.由图 7 可知:当成型压力处于低水平时,随着水泥掺量的增加,抗压强度随之增大,但增长速率不及成型压力处于高水平时的情况.

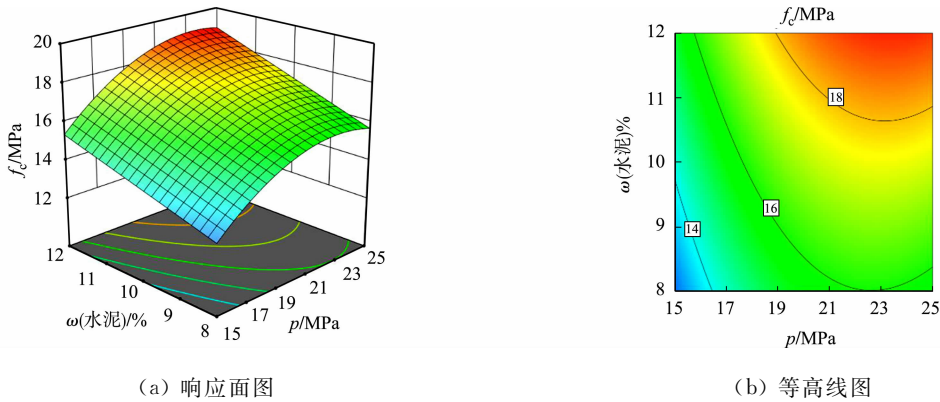


图 7 成型压力和水泥掺量交互影响抗压强度分析图

Fig. 7 Interaction effects of forming pressure and cement content on compressive strength

从因素交互作用显著性检验的分析结果可知:成型压力和混合料含水率、混合料含水率(w (混水料))和水泥掺量对导热系数的交互作用影响最为显著.成型压力和混合料含水率交互影响导热系数分析图,如图 8 所示.

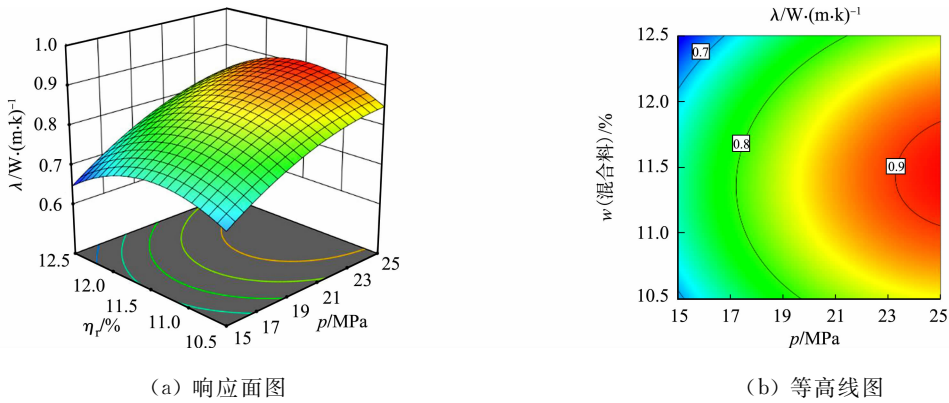


图 8 成型压力和混合料含水率交互影响导热系数分析图

Fig. 8 Interaction effects of forming pressure and mixtures moisture on thermal conductivity

由图 8 可知:将水泥掺量和细石掺量固定在同一水平,当成型压力处于低水平时,混合料含水率在 11.5%~12.5%和 10.5%~11.5%范围内,导热系数随着混合料含水率的增大(或降低)而增大,且梯度变化较大;当成型压力处于高水平时,导热系数随混合料含水率的变化规律基本一致,但是变化梯度变小,这跟成型压力和混合料含水率对表观密度指标的交互作用影响非常类似,说明表观密度跟导热系数之间具有很强的相关性.

所有因素对软化系数指标没有产生显著的交互作用,但是相较而言,成型压力和混合料含水率存在一定的交互作用. 成型压力和混合料含水率交互影响软化系数分析图,如图 9 所示. 由图 9 可知:将水泥掺量和细石掺量固定在同一水平,当混合料含水率处于低水平时,软化系数随着成型压力的增加而快速增大,而随着混合料含水率的增加,软化系数随成型压力的增大而增长的速率逐渐降低.

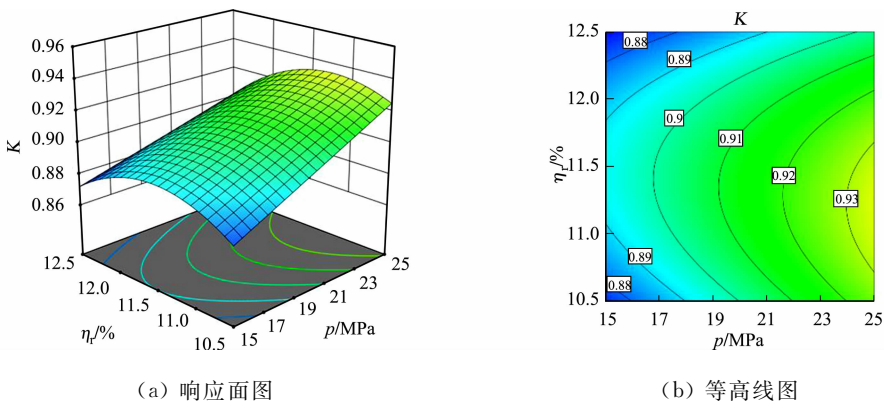


图 9 成型压力和混合料含水率交互影响软化系数分析图

Fig. 9 Interaction effects of forming pressure and mixtures moisture on softening coefficient

2.3 回归模型修正及适应性检验

工程废土改性后的表观密度、抗压强度、导热系数、软化系数等指标与各因素之间存在比较明显的非线性关系,各指标的二次多项式回归模型中有些项对指标响应值的预测不可或缺,而有些不显著的项可通过逐步后退法予以剔除. 结合 Design Expert 软件对回归模型的方程式进行修正,得到修正后适用于工程废土的改性指标预测回归模型的方程式,即

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= -615.57 + 24.997X_1 + 408.333X_2 + 3.492X_3 - 8.157X_4 + 0.305X_1X_2 + 0.137X_1X_4 + \\ &\quad 0.567X_2X_4 + 0.358X_3X_4 - 0.570X_1^2 - 18.178X_2^2 - 0.248X_3^2 - 0.368X_4^2, \\ Y_2 &= -239.016 + 2.205X_1 + 40.227X_2 + 0.304X_3 - 1.459X_4 + 0.020X_1X_3 - \\ &\quad 0.052X_1^2 - 1.769X_2^2 + 0.181X_4^2, \\ Y_3 &= -8.8535 + 0.0562X_1 + 1.5293X_2 + 0.0582X_3 - 0.0225X_4 + 0.0017X_1X_2 - \\ &\quad 0.0009X_1X_4 - 0.0049X_2X_3 + 0.0042X_2X_4 - 0.0013X_1^2 - 0.0673X_2^2, \\ Y_4 &= -1.833 + 0.016X_1 + 0.478X_2 - 0.025X_3 - 0.030X_4 - 0.001X_1X_2 - \\ &\quad 0.003X_2X_3 - 0.019X_2^2 + 0.003X_3^2 + 0.003X_4^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: $X_1 \in [15, 25]$; $X_2 \in [10.5, 12.5]$; $X_3 \in [8, 12]$; $X_4 \in [3, 6]$.

预测模型修正前、后拟合度比较,如表 7 所示. 表 7 中: R^2_{Pre} 为预测决定系数. 由表 7 可知:修正后各预测模型的 R^2_{Adj} 和 R^2_{Pre} 均增大.

表 7 预测模型修正前、后拟合度比较

Tab. 7 Fitness comparison of predictive models before and after revision

状态	表观密度预测模型		抗压强度预测模型		导热系数预测模型		软化系数预测模型	
	R^2_{Adj}	R^2_{Pre}	R^2_{Adj}	R^2_{Pre}	R^2_{Adj}	R^2_{Pre}	R^2_{Adj}	R^2_{Pre}
修正前	0.999 2	0.997 8	0.978 8	0.943 3	0.990 4	0.974 1	0.987 4	0.974 1
修正后	0.999 3	0.998 0	0.982 8	0.967 8	0.990 7	0.980 5	0.991 6	0.981 2

3 修正回归模型的最优方案预测及验证

拟研制的新型生土基保温空心砖尺寸为 240 mm×180 mm×90 mm(长×宽×高),孔洞率≥40%,表观密度≤1 200 kg·m⁻³,抗压强度等级不得低于 MU 5.0,而新型生土基保温砖的基材抗压强度不能低于 10 MPa. 通过计算并考虑实际的生产工艺,确定基于回归模型进行工程废土改性优化的目标为 $\rho \leq 2\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $f_c \geq 10\text{ MPa}$, $K \geq 0.85$,导热系数按 4 个等级范围进行优化.

各指标优化目标计划表及工程废土最优改性方案,如表 8 所示. 表 8 中: λ 为导热系数.

表 8 各指标优化目标计划及工程废土最优改性方案
Tab. 8 Optimization target plans for each indicator and optimal schemes
for construction waste soil modification

编号	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	f_c/MPa	$\lambda/W\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	K	p/MPa	$\eta_m/\%$	$w(\text{水泥})/\%$	$w(\text{细石})/\%$
Opt-1	$\leq 2\ 100$	≥ 10	$0.600\sim 0.700$	≥ 0.85	15.14	11.91	8	3
Opt-2	$\leq 2\ 100$	≥ 10	$0.700\sim 0.800$	≥ 0.85	17.99	11.46	8	3
Opt-3	$\leq 2\ 100$	≥ 10	$0.800\sim 0.900$	≥ 0.85	23.30	11.28	8	3
Opt-4	$\leq 2\ 100$	≥ 10	$0.900\sim 1.000$	≥ 0.85	24.83	11.30	8	3

为验证回归模型求解出的最优改性方案是否有效,结合实际试样成型工艺,对成型压力取整后进行试样制作,并测试其表观密度、抗压强度、导热系数及软化系数.最优方案指标预测值和实测值对比,如表 9 所示.由表 9 可知:试验值与预测值最大相对偏差绝对值为 6.07%,小于 10.00%,可见修正后的模型适用于文中所用工程废土的改性方案优化和指标响应值预测.

表 9 最优方案指标预测值与实测值
Tab. 9 Predictive and actual values of indicators with optimal schemes

优化编号	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$		f_c/MPa		$\lambda/W\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$		K	
	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值
Opt-1	1 991.3	1 985.4	12.7	12.2	0.687	0.661	0.90	0.91
Opt-2	2 024.6	2 029.6	15.1	15.6	0.762	0.781	0.91	0.9
Opt-3	2 052.5	2 023.9	16.1	15.1	0.889	0.835	0.93	0.92
Opt-4	2 054.9	2 065.4	15.9	16.8	0.921	0.952	0.92	0.94
最大偏差	1.39%		5.66%		6.07%		2.17%	

4 结论

通过单因素影响试验确定工程废土改性优化的因素和水平,并基于响应面法中的 Box-Behnken 试验设计对工程废土进行多指标改性综合优化研究.根据试验结果与分析,主要得到以下 4 个结论.

1) 成型压力、混合料含水率、水泥掺量及细石掺量各因素对工程废土的抗压强度和表观密度的影响均存在一定的规律,在综合考虑工艺成本的前提下存在最优取值问题.成型压力、混合料含水率、水泥掺量及细石掺量的优化取值范围分别为 15~25 MPa,10.5%~12.5%,8%~12%和 3%~6%.

2) 各因素影响显著程度分析结果表明:对工程废土表观密度的影响显著程度排序为成型压力>细石掺量>混合料含水率>水泥掺量;对抗压强度和软化系数的影响显著程度排序为成型压力>细石掺量>混合料含水率>水泥掺量;对导热系数的影响显著程度排序为:成型压力>混合料含水率>细石掺量>水泥掺量.

3) 响应面交互作用影响分析结果表明,成型压力和混合料含水率对表观密度的交互作用影响显著;成型压力和混合料含水率、混合料含水率和水泥掺量对导热系数的交互作用影响最为显著;成型压力和水泥掺量对抗压强度有一定交互作用;成型压力和混合料含水率对软化系数存在一定的交互作用.

4) 基于响应面法的工程废土多指标综合改性优化二次回归模型经修正后,通过试验验证表明该模型与试验结果拟合度高,适用于工程废土的改性方案优化和指标响应值预测.

参考文献:

[1] 吴英彪,石津金,刘金艳,等.建筑垃圾资源化利用技术与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
[2] 陈发滨,徐培蓁,刘欣禹.余泥渣土的处理与利用[J].低温建筑技术,2019,41(9):10-12. DOI:10.13905/j.cnki.dwjz.2019.09.003.
[3] 张磊,张鸿飞,荣辉,等.700~900 密度等级渣土陶粒的研制及其性能[J].建筑材料学报,2018,21(5):803-810. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2018.05.017.
[4] 王海良,李超,荣辉,等.渣土对 C30 混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2016,35(9):3030-3035. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2016.09.059.

- [5] 李又云,李哲.建筑渣土在城市道路中的应用研究[J].公路,2013(7):235-240. DOI:10.3969/j.issn.0451-0712.2013.07.053.
- [6] PHILIP Z,TAHA A,AZRA K. The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials[J]. Construction and Building Materials,2016,106:179-188. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031.
- [7] HEJAZI M S,SHEIKHZADEH M,ABTAHI M S. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers[J]. Construction and Building Materials,2012,30:100-116. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045.
- [8] AMOUDI O,KHAN K,KAHTANI N S A. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil[J]. Construction and Building Materials,2010,24(10):1848-1954. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.019.
- [9] HOSSAIN K M A,LACHEMI M,EASA S. Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea[J]. Resources Conservation and Recycling,2007,51(4):711-731. DOI:10.1016/j.resconrec.2006.12.003.
- [10] HEIKKI K. Stabilization of clay with inorganic by-products[J]. Materials in Civil Engineering,2000,12(4):307-309. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(307).
- [11] 李敏.潮湿状态土遗址的斥水—碳化保护研究[D].兰州:兰州大学,2012.
- [12] 刘俊霞,海然,张磊,等.黄河泥沙基生土材料改性及机理研究[J].新型建筑材料,2016,43(6):14-16. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2016.06.004.
- [13] 钱觉时,王琴,贾兴文,等.燃煤电厂脱硫废弃物用于改性生土材料的研究[J].新型建筑材料,2009,36(2):28-31. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2009.02.008.
- [14] 余海燕,程海平,石峻尧,等.改性材料对生土物理力学性能的影响及作用机理[J].硅酸盐通报,2016,35(5):1443-1449. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2016.05.021.
- [15] 王毅红,石丹,仲继清,等.机制生土砖与砂浆法向粘结性能的影响因素[J].土木建筑与环境工程,2018,40(1):78-82. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.011.
- [16] 王毅红,刘瑞元,张坤,等.机制生土砖抗压强度试验方法研究[J].新型建筑材料,2017,44(8):148-151. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2017.08.037.
- [17] 王毅红,丁思远,杨世豪,等.掺入玻璃和竹纤维的生土基材料性能试验研究[J].西安科技大学学报,2016,36(5):640-646. DOI:10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2016.0506.
- [18] 丛欣峰,阿肯江·托呼提,黄斌,等.土坯砌体轴心受压力学性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2015,37(1):95-99. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2015.01.016.
- [19] 卜永红,王毅红,李丽,等.不同夯筑方法的承重夯土墙体抗震性能试验[J].长安大学学报(自然科学版),2011,31(6):72-76. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2011.06.014.
- [20] 刘军,褚俊英,赵金波,等.掺和料对生土墙体材料力学性能的影响[J].建筑材料学报,2010,13(4):446-451. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2010.04.006.
- [21] 陈嘉.改性土体材料及土坯砌体的受压力学性能研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2009.
- [22] 黄金胜,陶忠,陆琨.云南生土结构土坯砌体的力学性能试验研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2008,33(1):60-64. DOI:10.3969/j.issn.1007-855X.2008.01.014.
- [23] 何为,薛卫东,唐斌.优化试验设计方法及数据分析[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [24] 黄惠莉,张秀娟,张育荣,等.响应面法优化章鱼内脏酸性蛋白酶提取条件[J].华侨大学学报(自然科学版),2016,37(6):714-719. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201606011.
- [25] 代翠,孔繁余,董亮,等.基于响应面法的离心泵作透平水力和声学性能优化[J].农业工程学报,2015,31(15):40-47. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.006.
- [26] 蒋水华,祁小辉,曹子君,等.基于随机响应面法的边坡系统可靠度分析[J].岩土力学,2015,36(3):809-818. DOI:10.16285/j.rsm.2015.03.027.
- [27] 牛志睿,刘羽,李大海,等.响应面法优化制备污泥基活性炭[J].环境科学学报,2014,34(12):3022-3029. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2014.0718.
- [28] 葛慧华,林锦霞,张光亚.以响应面法优化短小芽孢杆菌木聚糖酶产酶条件[J].华侨大学学报(自然科学版),2012,33(2):172-175. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2012.02.0172.