

基于 PPR 建模的固废材料固化戈壁土抗压强度计算模型*

Compressive Strength Calculation Model of Solid Waste Solidified Gobi Soil Based on PPR Modeling

宋紫裕¹, 高鹏展¹, 谢菡科¹, 何季隆¹, 何建新^{1,2}, 王杰¹, 陈昱祥¹

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为实现固废材料在戈壁土固化中的资源利用, 选用工业矿渣粉和粉煤灰组成一种戈壁土固化掺合料, 加入碱激发剂激发活性, 对其固化戈壁土的抗压强度进行试验研究, 采用投影寻踪回归对试验高维数据进行分析, 建立固化戈壁土抗压强度 PPR 计算模型, 验证了模型的精度和稳定性, 最后采用该模型进行仿真计算, 分析各影响因素与固化戈壁土抗压强度的关系。研究表明: 该 PPR 计算模型具有可靠性, 各影响因子对抗压强度贡献权重系数顺序为: 固化剂掺量>龄期>粉煤灰掺量>碱掺量; 仿真计算结果定量描述了各影响因素与固化戈壁土抗压强度的关系; PPR 模型较深入地挖掘了固化戈壁土抗压强度高维数据的内在结构, 为固废材料固化戈壁土的力学性能研究提供参考。

关键词: 固废材料; 固化戈壁土; 抗压强度; PPR 模型

中图分类号: TV41 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0070-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.013

SONG Ziyu¹, GAO Pengzhan¹, XIE Hanke¹, HE Jilong¹, HE Jianxin^{1,2}, WANG Jie¹, CHEN Yuxiang¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Key Laboratory of Safety and Water Disaster Prevention of Xinjiang Water Conservancy Engineering, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to realize the resource utilization of solid waste material in the solidification of Gobi soil, industrial slag powder and fly ash were used to compose a solidifying admixture of Gobi soil, alkali activator was added to stimulate the activity, the compressive strength of solidified Gobi soil was tested and studied, projection pursuit regression was used to analyze the high-dimensional data, a PPR model for calculating compressive strength of solidified Gobi soil was established, the accuracy and stability of the model are verified, Finally, the model is used for simulation calculation, the relationship between the influencing factors and the compressive strength of solidified Gobi soil was analyzed. The results showed that the PPR calculation model is reliable, and the weight coefficients of each influence factor to compressive strength were ranked as the sequence of content of dosage of curing agent>age>flyash mixed>dosage of alkali activator, the simulation results quantitatively describe the relationship between the influencing factors and the compressive strength of solidified Gobi soil; the PPR model excavates the inner structure of high-dimensional compressive strength data of solidified Gobi soil in depth, and provides a reference for the study of mechanical properties of solidified Gobi soil with solid waste materials.

Keywords: solid waste materials; solidify gobi soil; compressive strength; PPR model

* 基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2021D01A100); 新疆农业大学大学生创新训练计划项目 (dxscx2022370)。

作者简介: 宋紫裕 (2003—), 男, 本科, 主要研究方向: 水利水电与水工结构工程。

通信作者: 何建新 (1973—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向: 水利水电工程。

收稿日期: 2023-10-15

0 引言

戈壁土是砂石和土的天然混合料，骨架结构明显，渗水性好，在新疆地区分布范围广泛，占地面积达到 130 万 km^2 ，约占全疆面积 78.3%，是新疆地区公路工程中广泛采用的地基填料^[1-2]。新疆地区地处欧亚大陆腹地，典型的干旱气候，通常干旱缺水、风大沙多，偶有强降雨等异常天气，用戈壁土作为路基填料填筑的路堤边坡，其结构松散、固结性能较差。当边坡在此自然环境条件下，极易发生风蚀破坏和降雨冲蚀破坏，从而影响到边坡的稳定性。因此，在戈壁地区的路堤边坡，应采取有效的加固防护措施，以确保其边坡的稳定性。同时，戈壁土是沙漠的前身，戈壁土在风的侵蚀下易演变成沙漠，土地沙漠化是破坏生态环境的一大根源，遏制戈壁土的劣化就显得尤为重要。

固化剂改良是改善土体工程性能常用的方法之一。土壤固化剂是一种新型绿色建筑材料^[3]，有着工程适应性强、用量少、就地取材、强度高、提高施工效率以及降低工程造价等优点^[4]，可将其添加到土壤中通过物理、化学或生物作用强化连结土壤颗粒，来满足工程的需要，减少资源浪费。许福等^[5]利用碱激发高炉矿渣对土压平衡盾构渣土进行固化，认为碱激发高炉矿渣对土压平衡盾构渣土具有较好的固化能力。黎良元等^[6]从微观角度分析表征了碱激发石膏-矿渣胶凝材料的水化产物，表明在一定量碱激发剂用量时，石膏-矿渣胶凝材料的各项强度和耐水性能最好。何晶等^[7]以矿渣粉为原料，研究了不同掺量下粉煤灰、碱激发剂和烧黏土对碱矿渣粉砂浆抗压强度的影响规律，优选出土体固化剂的配比。闫林等^[8]结合新疆古尔班通古特沙漠环境特性，通过固化沙漠土研究其力学性能和耐久性，为遏制沙漠侵蚀、保护生态资源提供参考。但对固废材料在戈壁土中的应用研究较少，尚未形成系统且完善的研究结论。

为此，本文选取工业矿渣粉为主料、粉煤灰为辅料和碱激发剂（石灰和石膏）作为土壤固化剂用来固化新疆吐鲁番 30 里风区输变电路戈壁土，采用正交试验方法，通过击实试验和无侧限抗压强度试验研究分析固化剂对戈壁土的固化效果，从而为固化掺合料、碱激发剂应用于戈壁土改良的生产实

践提供理论依据。

1 试验方案设计

1.1 试验原材料

本文采用广泛分布于新疆的戈壁土作为土样，在吐鲁番 30 里风区取戈壁土进行筛分试验，选择代表性土样进行后续试验研究，确定代表性土样的最大干密度和最优含水率。戈壁土的物理性质如表 1 所示，经 10 组筛分后绘制颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 戈壁土物理性质
Table 1 Physical properties of Gobi soil

土体比重	最小干密度/ (g/cm^3)	最大干密度/ (g/cm^3)	含水率/%
2.56	1.97	2.25	0.75

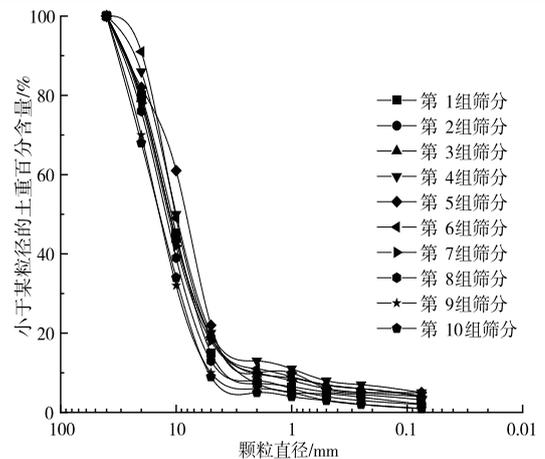


图 1 戈壁土的典型颗粒级配曲线

Fig. 1 Typical grain gradation curve of Gobi soil

由图 1 可知，10 组级配曲线中粒径不大于 2 mm 占比为 5%~10%，粒径 2~60 mm 占比为 90%~95%，不均匀系数 C_u 为 3.0~7.1，曲率系数 C_c 为 0.85~1.77，整体来看该土样为级配不良圆砾土。可以看出，戈壁地区大多数填料中的细颗粒含量少，粒组缺失，级配不良。由于曲线跨度小，取平均级配作为代表性土样进行后续试验研究，颗粒直径 20~40 mm 含量为 19.9%，5~20 mm 含量为 65.1%，0.075~5 mm 含量为 11.8%，小于 0.075 mm 含量为 3.2%。

选择矿渣粉和粉煤灰作为固化掺合料，选用新疆宝新盛源建材有限公司生产的 S75 级矿渣，粉煤灰为新疆奎屯生产的锦江牌 II 级粉煤灰，其技术性能指标见表 2；采用新疆天山水泥厂用于生产水泥的脱硫石膏，表观密度为 $1.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ ；脱硫石膏在 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重再进行试验，以除去表面的附着水；矿渣粉、粉煤灰、石灰和

材料科学

脱硫石膏的化学成分见表 3。

表 2 矿物掺合料技术指标
Table 2 Technical index of mineral admixture

矿物掺合料	细度/ (m ² /kg)	密度 (g/cm ³)	比表面积 (m ² /kg)	需水量 比/%	活性指数/%		烧失量 /%
					7 d	28 d	
矿渣粉	469	2.88	439	101	57	91	0.79
粉煤灰	22.7	2.36	394	91	69	83	3.13

表 3 矿渣粉、粉煤灰、石灰和脱硫石膏的化学成分
Table 3 Chemical composition of slag powder, fly ash, lime and desulfurized gypsum

材料名称	化学成分/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
矿渣粉	37.08	11.36	0.78	39.84	7.1	1.16	0.27	1.04
粉煤灰	61.8	26.4	5.0	1.10	0.40	0.42	0.80	0.45
石灰	1.65	0.62	—	72.64	2.1	1.36	—	—
脱硫石膏	1.85	1.56	0.36	31.38	1.84	39.6	0.12	0.02

1.2 试验方法

将固废材料与天然戈壁土样充分搅拌，按照规范^[9]的要求，进行重型击实试验。根据击实参数配置混合料，并制作抗压强度试件（φ150 mm×150 mm 的圆柱体试件），待试件养护到预定的试验龄期前 1 d 时，按照规范要求从养护室取出浸水泡制 24 h 后对其进行抗压强度试验，测试方法参考 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[10]。

2 试验结果

2.1 击实试验

按矿渣粉与戈壁土质量比计算，根据矿渣粉掺量分别为 3%、6%、9%、12%、15% 时土料的击实性能，得到对应的击实曲线，研究矿渣粉掺量与最大干密度和最优含水率的关系。按最大密实度理论确定出代表性戈壁土料的最优矿渣掺量。试验结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出，随着矿渣粉掺量的增加，测得戈壁土改良试样的最佳含水率分别为 5.9%、6.4%、7.3%、8.0%、8.8%，呈递增趋势；测得改良土样的最大干密度分别为 2.21、2.19、2.16、2.14 和 2.11 g/cm³，呈递减趋势。随着矿渣粉掺量的增加，改良戈壁土的最佳含水量得到提高，但最大干密度降低，原因在于矿渣粉与戈壁土拌合后，矿渣粉的水化反应消耗了一定量的水分，掺量越多，需要的水分越多，导致最佳含水量随矿渣粉掺量的增加而增大。在相同矿渣粉掺量下，含水率越低，土颗粒

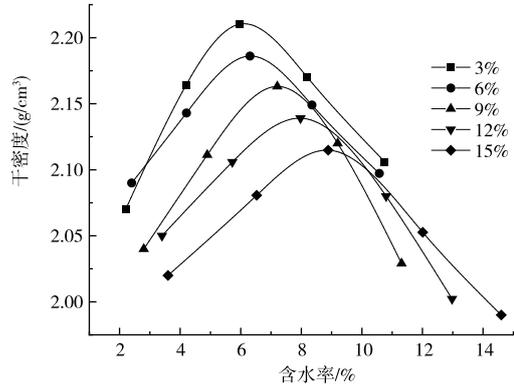


图 2 不同矿渣掺量下击实曲线
Fig. 2 Compaction curves under different slag content

间水膜越薄，摩阻力越大，击实效果越差，干密度较小。当达到最优含水率时，击实效果最好，干密度最大。随着含水率的进一步上升，土中自由含水量增加，自由水吸收击实功的能量，击实效果减弱，干密度减小。

2.2 正交试验

本次试验采用均匀正交的设计方法，充分运用均匀正交试验的两大特点即均衡分散性和整齐可比性。选用 UL₁₆ (4⁵) 均匀正交设计表，共 16 组。采用压样法制样，以 98% 的压实度进行密度控制。考虑到无机结合料稳定材料的离散性，将每个配合比制备 13 个试样，抗压强度的最大值或最小值与平均值之差控制在 15%。为了验证 PPR 模型的稳定性，还预留了 8 组检验样本（试验号 17~24），正交试验及检验样本的试验结果见表 4。

表 4 正交试验方案及试验结果
Table 4 Orthogonal test scheme and test results

试验号	固化剂掺量/%	粉煤灰掺量/%	碱掺量/%	龄期/d	强度/MPa
1	3	0	8	7	0.90
2	3	10	10	14	3.59
3	3	20	6	28	1.10
4	3	30	4	56	1.20
5	6	0	4	7	2.72
6	6	10	6	14	4.96
7	6	20	10	28	3.48
8	6	30	8	56	6.81
9	9	0	10	28	6.12
10	9	10	8	14	5.19
11	9	20	4	56	8.45
12	9	30	6	7	3.70
13	12	0	6	56	8.49
14	12	10	4	7	4.22

续表

试验号	固化剂 掺量/%	粉煤灰 掺量/%	碱掺量/%	龄期 /d	强度 /MPa
15	12	20	8	28	6.25
16	12	30	10	14	5.48
17	6	10	8	7	3.64
18	6	10	8	14	3.80
19	6	10	8	28	5.32
20	6	10	8	56	6.34
21	12	20	6	7	4.37
22	12	20	6	14	5.07
23	12	20	6	28	6.92
24	12	20	6	56	9.31

3 PPR 投影寻踪回归建模及仿真

3.1 PPR 建模

PPR 能够客观分析描述各数据样本的结构特征和规律, 在以每个因素的数据信息基础上不作任何假定, 实现较高精度的仿真计算^[11]。因此, 采用投影寻踪回归 (PPR) 无假定建模探究各影响因素与固化戈壁土抗压强度的关系, 在正交试验结果的基础上, 进行建模分析。选取固化剂掺量、粉煤灰掺量、碱掺量和龄期四因素作为自变量 X , 以无侧限抗压强度为因变量 Y , 除了 16 组建模样本外, 还设计了 8 组检验样本。模型参数以仿真计算结果与试验值的相对误差 $|\delta| \leq 10\%$ 控制其合格率, 调整反应投影灵敏度指标的平滑系数 S 、岭函数个数 M 和最优岭函数个数 Mu , 使之达到极小化准则^[12]。

平滑系数取 $S=0.3$, 投影方向初始值 $M=5$, 最终投影方向 $Mu=3$, 模型的岭函数图如图 3 所示, 还可得到影响因素的权重系数见表 5。从表中可以看出固化剂掺量对抗压强度的影响最大, 龄期次之, 接着是粉煤灰掺量, 最后是碱掺量。对于固化戈壁土抗压强度:

$$\beta = [1.0115 \quad 0.2019 \quad 0.2367]$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.9189 & -0.0037 & 0.3597 & 0.1619 \\ 0.8801 & 0.3659 & -0.2394 & -0.1852 \\ -0.9427 & 0.0393 & -0.3277 & 0.0456 \end{bmatrix}$$

表 5 影响因素相对贡献权重系数
Table 5 Relative contribution weight coefficient of influencing factors

固化剂掺量/%	龄期/d	粉煤灰掺量/%	碱掺量/%
1.000	0.855	0.305	0.221

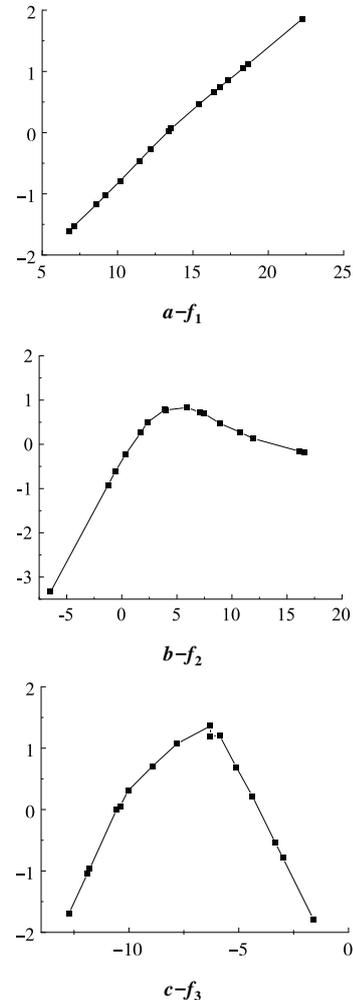


图 3 抗压强度 PPR 模型岭函数

Fig. 3 Ridge function of PPR model for compressive strength

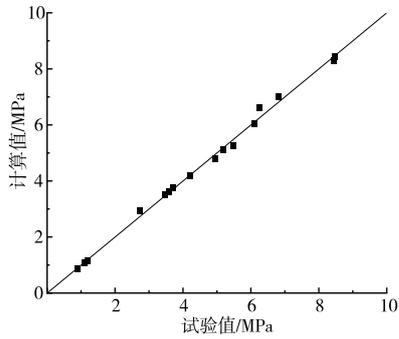
3.2 PPR 模型精度分析

按照上述的建模过程, 得到建模样本和检验样本的计算值, 并与试验值进行比较, 为便于比较, 将建模样本和检验样本的计算值与试验值绘制到图中, 如图 4 所示。图中斜线为相关系数 $Cv=1$ 时的相关线, 表示计算值与试验值相等。由图 4 可知, 建模样本和检验样本的计算值与试验值偏差较小, 建模样本和检验样本的合格率均为 100%, 平均相对误差分别为 2.63% 和 3.69%, 说明建立的模型具有较好的稳定性和较高的精度。

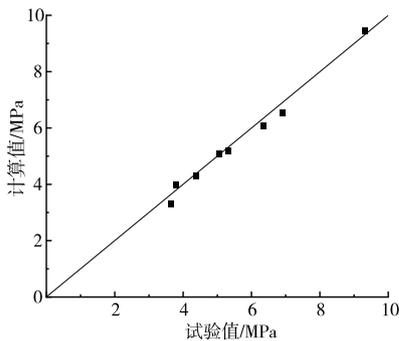
3.3 基于 PPR 模型的抗压强度仿真计算

上述建立的计算模型反映了 4 个影响因素的抗压强度高维数据内在本质结构, 还可仿真计算不同影响因素条件下的抗压强度, 以此分析不同因素对抗压强度的影响。

材料科学



(a) 建模样本

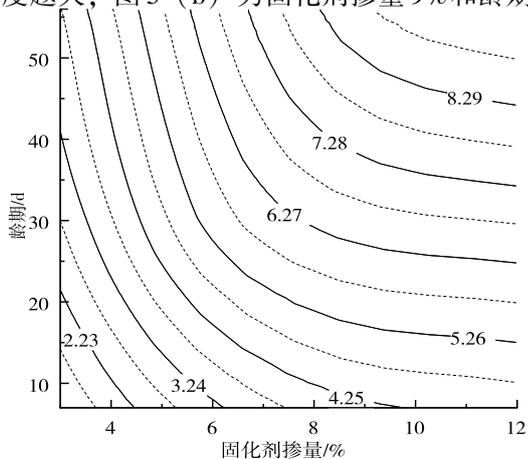


(b) 检验样本

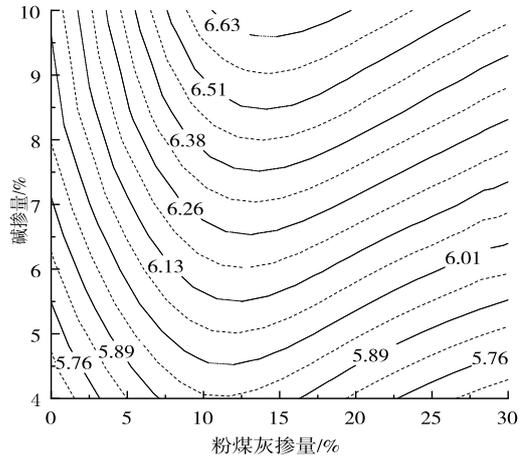
图4 PPR模型回归分析结果

Fig.4 PPR model regression analysis results

图5展示了在其余影响因素一定的情况下，固化戈壁土的抗压强度与固化剂掺量-龄期、碱掺量-粉煤灰掺量之间的关系。图5(a)为碱掺量8%、粉煤灰掺量20%时，固化戈壁土的抗压强度与龄期和固化剂掺量间的关系。可知：当碱掺量和粉煤灰掺量一定时，固化剂掺量越多，龄期越长，戈壁土的抗压强度越大；图5(b)为固化剂掺量9%和龄期28d



(a) 抗压强度与龄期和固化剂掺量的关系



(b) 抗压强度与碱掺量和粉煤灰掺量的关系

图5 固化戈壁土抗压强度等值线图

Fig.5 Contour map of compressive strength of solidified Gobi soil 时，固化戈壁土的抗压强度与粉煤灰掺量和碱掺量间的关系。可知：当固化剂掺量和龄期一定时，戈壁土的抗压强度随碱掺量越多而增大，随粉煤灰掺量的增加，呈先增大再减小的趋势，并在粉煤灰掺量为10%~15%内有峰值出现。

为了更直观地反映各影响因素在不同水平下与固化戈壁土抗压强度的影响关系，采用PPR单因素仿真分析，并绘制各因素在不同水平下的关系曲线。

3.3.1 固化剂掺量和龄期对固化戈壁土抗压强度的影响

以碱掺量为8%，粉煤灰掺量为20%时为例，分析固化剂掺量和龄期对固化戈壁土抗压强度的影响，如图6所示。由图6可知，龄期越长，固化戈壁土的抗压强度越大；某一龄期下，随着固化剂掺量的增加，固化戈壁土的抗压强度随着固化剂掺量的增大呈现先增加后减缓的趋势。当龄期为28d，固化剂掺量为1%~9%时，固化戈壁土的抗压强度随着固化剂掺量的增大而增大，且固化剂掺量每增加2%，抗压强度平均提升107.2%；当固化剂掺量在9%~11%时，随着固化剂掺量的增加，戈壁土的抗压强度增长趋于平缓，每增加2%的掺量，抗压强度平均增长3.9%。由此可知当固化剂掺量为9%时，固化戈壁土有最佳的抗压强度。这与李驰等^[13]的研究成果接近，其固化剂掺量为8%时，固化风沙土的凝聚力最大。

3.3.2 碱掺量对固化戈壁土抗压强度的影响

以粉煤灰掺量为20%，龄期28d，固化剂掺量

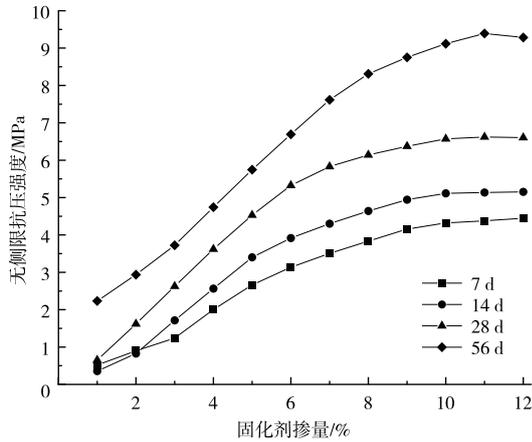


图 6 固化剂掺量和龄期对抗压强度的影响
Fig. 6 Influence of dosage and age of curing agent on compressive strength

为 1% ~ 12% 时为为例，分析碱掺量对固化戈壁土抗压强度的影响，如图 7 所示。

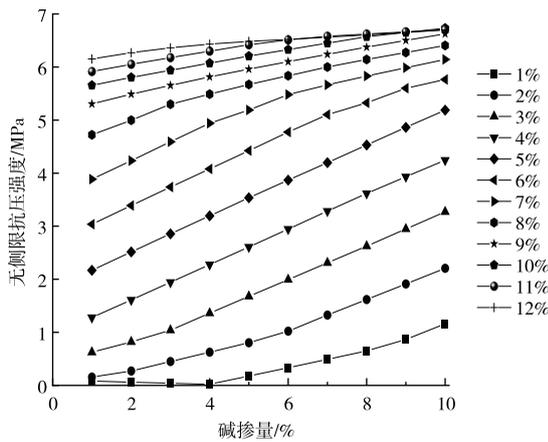


图 7 碱掺量对抗压强度的影响
Fig. 7 Effect of alkali content on compressive strength

由图 7 可知，当其余因素不变时，固化戈壁土的抗压强度随着碱掺量的增加而增加，矿渣粉和粉煤灰材料属于工厂固体废弃物自身活性较低，掺碱的作用在于增强体系的碱性环境，促进了体系的火山灰反应，激发固废的活性从而起到较好的固化效果。在固化剂掺量大于 9% 后，碱掺量从 1% ~ 10%，抗压强度平均增长 16.2%，变化不再明显呈平缓趋势，进一步说明了固化剂掺量为 9% 时最佳。

3.3.3 粉煤灰掺量对固化戈壁土抗压强度的影响

以碱掺量为 8%，固化剂掺量为 2% ~ 12% 和龄期 28d 时为例，分析粉煤灰掺量对固化戈壁土抗压强度的影响，如图 8 所示。

随粉煤灰掺量的增加，固化戈壁土的抗压强度

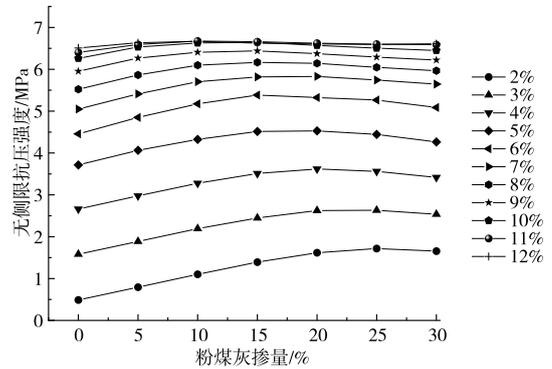


图 8 粉煤灰掺量对抗压强度的影响
Fig. 8 Influence of fly ash content on compressive strength

最初呈现先上升后下降的趋势，当固化剂掺量超过 9% 时，较为稳定浮动趋势不明显，说明固化剂掺量超过 9% 时，粉煤灰掺量对固化戈壁土的抗压强度影响不明显；固化剂掺量为 3% ~ 5% 时，峰值在粉煤灰掺量 20% 时出现，固化剂掺量为 6% ~ 9% 时，在粉煤灰掺量 15% 时出现峰值，粉煤灰生产成本较矿渣粉低，建议粉煤灰掺量为 15% ~ 20%。

4 结语

通过以上试验及分析，本文得到以下结论：

(1) 根据正交试验结果，将 PPR 程序运用于固废胶凝体系固化戈壁土抗压强度高维建模中，能够客观地挖掘固废胶凝体系固化戈壁土 7、14、28 和 56 d 抗压强度高维数据内在本质的本质结构，建立的计算模型稳定可靠，为工程实践提供一定参考。

(2) 由 PPR 仿真计算分析可知：固化戈壁土的最佳固化掺合料掺量为 9%；龄期越长，抗压强度越大；粉煤灰掺量为 20%，龄期 28 d，固化剂掺量为 1% ~ 12% 时，碱激发剂掺量越多，抗压强度越大，只是在固化剂掺量大于 9% 时，增长过于平缓；随粉煤灰掺量增加，碱掺量 8%，28 d 的固化戈壁土抗压强度也就越大，固化剂掺量超过 9% 时，粉煤灰掺量对固化戈壁土的抗压强度影响不明显，考虑粉煤灰生产成本较矿渣粉低，建议粉煤灰掺量为 15% ~ 20%。

参 考 文 献

[1] 陈镭, 侯东升, 郭玲玲, 等. 新疆盐碱地形成特点及改良措施 [J]. 新疆农垦科技, 2009, 32 (5): 56-57.
[2] 董辉, 马一跃, 聂志红, 著. 戈壁土路基后期沉降预测方

材料科学

- 法及误差分析 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2012, 34 (1): 45-53.
- [3] 耿轶君. EN-1 土壤固化剂改良红砂岩的作用机理与路用性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [4] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S2): 1273-1277, 1298.
- [5] 许福, 蒋川梓, 张书经, 等. 碱激发矿渣固化土压平衡盾构渣土的试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (3): 849-859.
- [6] 黎良元, 石宗利, 艾永平. 石膏-矿渣胶凝材料的碱性激发作用 [J]. 硅酸盐学报, 2008 (3): 405-410.
- [7] 何晶, 何建新. 利用碱激发矿渣粉制备的土体固化剂的力学性能研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2016, 39 (5): 414-418.
- [8] 闫林, 何晶, 何建新, 等. 碱矿渣粉固化沙漠土力学性能及耐久性能研究 [J]. 人民黄河, 2019, 41 (5): 86-89.
- [9] GB 50021-2001. 岩土工程勘察规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [10] JTG E51-2009. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [11] 杨海华, 杨武, 刘汉龙, 等. 基于 PPR 数据建模技术的砂砾石料应力应变规律拟合 [J]. 材料导报, 2023, 37 (13): 1-13.
- [12] 郑祖国, 何建新, 宫经伟, 等. 复杂系统的投影寻踪回归无假定建模技术及应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [13] 李驰, 于浩. 固化风沙土强度特性及固化机制试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (S2): 48-52.

(上接第 62 页)

- [2] 吴福飞, 侍克斌, 董双快, 等. 硫酸盐镁盐复合侵蚀后混凝土的微观形貌特征 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (9): 140-146.
- [3] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [4] 姜春萌, 宫经伟, 唐新军. 低热水泥胶凝体系力学及热学综合性能评价 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (5): 116-120.
- [5] 郭随华, 林震, 苏姣华, 等. 高贝利特硅酸盐水泥的水化和浆体结构 [J]. 硅酸盐学报, 2000 (S1): 16-21.
- [6] 彭小平. 低热高性能高贝利特水泥大坝混凝土的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [7] 范磊. 高贝利特水泥高性能混凝土的研究 [D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2003.
- [8] SUI T, FAN L, WEN Z, et al. Study on the properties of high strength concrete using high belite cement [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2 (2): 201-206.
- [9] WANG N, CHENG X, YANG Y. Seawater corrosion resistance of low heat Portland cement concrete [J]. Materials Science Forum, 2015, 814: 207-213.
- [10] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 水泥胶砂干缩试验方法: JCT 603-2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 水泥化学分析方法: GB/T 176-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] NEHDI M, HAYEK M. Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (4): 731-742.
- [13] MA X, ÇOPUROGLU O, SCHLANGEN E, et al. Expansion and degradation of cement paste in sodium sulfate solutions [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 410-422.
- [14] SCHMIDT T, LOTHENBACH B, ROMER M, et al. Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39 (12): 1111-1121.