

杨进博,李葱葱,文海家,等.软土路基透明相似材料最优配比联合设计方法[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(4):29-38.

YANG Jin-bo, LI Cong-cong, WEN Hai-jia, et al. Integrated design method of optimal mix proportion of transparent similar materials for soft soil subgrade[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(4): 29-38.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.04.003

软土路基透明相似材料最优配比联合设计方法

杨进博^{1,2},李葱葱³,文海家⁴,李良勇³,谢朋³,黄斌³

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710064; 2. 长安大学 基建处,陕西 西安 710064;

3. 海南大学 土木建筑工程学院,海南 海口 570228; 4. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘要:以所配制相似材料试样正交试验数据为基础,将多元线性回归和支持向量回归(SVR)相结合,研发了一种新型软土路基透明相似材料最优配比联合设计方法;选取重度、内摩擦角和黏聚力为材料物理力学性能评价指标,以石英砂粒径和胶石比(纳米级白炭黑与石英砂质量比)为影响因素,设计了二因素三水平正交试验方案;通过环刀试验和固结快剪试验测定了透明胶结土试样的物理力学性能评价指标,以材料物理参数、强度特性和变形特征为切入点,验证了所配制透明相似材料用于模拟天然软土材料的可行性;按照 2:8 的比例随机划分了测定的试验数据,应用其中 20% 的数据进行了多元线性回归方程组拟合,将剩余 80% 的数据用于机器学习,以量化计算最优配比;建立了最优配比有效性检验的 SVR 评价模型,搭建了软土透明相似材料最优配比联合设计方法;以广东省某实际工程为依托,完成了搭建方法的应用,实现了所配制透明相似材料与原状土参数的高度契合。研究表明:透明胶结土的重度、内摩擦角和黏聚力分别为 12.53~16.13 kN/m³、14.82°~27.07°和 2.3~31.0 kPa,归一化强度演化路径与天然软土应力-应变响应应具有本构相似性,所配制的透明胶结土可有效模拟天然软土;石英砂粒径和胶石比对重度、内摩擦角和黏聚力影响显著,重度、内摩擦角和黏聚力的变化均可由石英砂粒径和胶石比进行有效表达;建立的 SVR 评价模型对重度、内摩擦角和黏聚力的拟合优度分别为 0.980 4、0.979 6 和 0.999 7。研究结果可为软土路基相关可视化模型试验设计与实施提供理论支撑。

关键词:路基工程;透明相似材料;最优配比;线性回归分析;支持向量回归;联合设计方法

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2025)04-0029-10

Integrated design method of optimal mix proportion of transparent similar materials for soft soil subgrade

YANG Jin-bo^{1,2}, LI Cong-cong³, WEN Hai-jia⁴, LI Liang-yong³, XIE Peng³, HUANG Bin³

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Capital Construction Department, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;

4. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

收稿日期:2025-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(42207190);海南省高层次人才项目(422RC599);海南省自然科学基金项目(520QN229);

省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室开放课题(KF2022-03)

作者简介:杨进博(1987-),男,陕西西安人,工程师,E-mail:yanglengyan@163.com。

通信作者:谢朋(1986-),男,河北承德人,讲师,工学博士,E-mail:Peng_xie@hainanu.edu.cn。

Abstract: Based on the orthogonal test data of the configured similar material samples, a new integrated design method for the optimal mix proportion of transparent similar materials for soft soil subgrade was developed by combining the multiple linear regression and support vector regression (SVR). The unit weight, internal friction angle and cohesion were selected as the evaluation indexes of physical and mechanical properties of the material. The particle size of quartz sand and ratio of rubber to stone (the mass ratio of nano-silica to quartz sand) were selected as influencing factors. The orthogonal test scheme with two factors and three levels was designed. The evaluation indexes of physical and mechanical properties of transparent cemented soil samples were determined by the ring sampler test and consolidated quick direct shear test. Taking the physical parameters, strength characteristics and deformation characteristics of the material as the entry point, the feasibility of the transparent similar material configured to simulate the natural soft soil material was verified. The test data were randomly divided according to the ratio of 2 : 8, and 20% of the data were used to fit the multiple linear regression equations. The remaining 80% of the data were used for machine learning to quantify the optimal mix proportion. The SVR evaluation model of the optimal mix proportion validity test was constructed, and the integrated design method for the optimal mix proportion of transparent similar materials for soft soil was established. Based on a practical project in Guangdong Province, the application of the established method was completed, and the transparent similar material was highly consistent with the parameters of the undisturbed soil. The research results show that the unit weight, internal friction angle and cohesion of the transparent cemented soil are 12.53-16.13 kN/m³, 14.82°-27.07° and 2.3-31.0 kPa, respectively. The normalized strength evolution path has constitutive similarity with the stress-strain response of natural soft soil. The configured transparent cemented soil can effectively simulate the natural soft soil. The particle size of quartz sand and the ratio of rubber to stone have significant effects on the unit weight, internal friction angle and cohesion. The changes in the unit weight, internal friction angle and cohesion can be effectively expressed by the particle size of quartz sand and the ratio of rubber to stone. The fitting goodnesses of the established SVR evaluation model for the unit weight, internal friction angle and cohesion are 0.980 4, 0.979 6 and 0.999 7, respectively. The research results can provide theoretical supports for the design and implementation of visual model tests related to soft soil subgrade. 9 tabs, 11 figs, 30 refs.

Key words: subgrade engineering; transparent similar material; optimal mix proportion; linear regression analysis; support vector regression; integrated design method

0 引言

近年来,在长江经济带、京津冀协同发展、粤港澳大湾区及海南自贸港等推动下,城市空间加速扩张与功能升级。长江中下游、珠江三角洲地区和沿海平原地区等早期发展区域的代表,其基础设施建设相对完善,而这些地区软土地层分布广泛^[1]。当然,随着地下工程建设的广泛开展,开挖扰动使得既有输水管线产生渗漏,土体受到渗漏水侵蚀作用,致使土体结构发生破坏并形成地下空洞,在施工动荷载与交通循环荷载作用下,该区域地表塌陷风险显

著增大^[2-3],所造成的损失涉及人员伤亡、道路破坏、车辆损害等多方面,对公共安全及财产构成重大威胁,是道路工程面临的主要问题之一。

地下管线渗漏在实际工程中发生时,存在预测难度大、检测难度高、突发性强等特点,无法明晰其对地面塌陷现象的影响过程,因此,物理模型试验被广泛应用于研究地下渗漏诱发地面塌陷的机理中^[4]。戴自立等^[5]通过自制的物理模型试验装置,揭示了管道外渗条件下道路塌陷的机理。施鑫等^[6]通过盾构开挖与管道渗漏模型试验,研究了管线渗漏水的扩散规律、地层沉降的演化规律以及管线应

力应变的变化特征。传统模型试验大多基于相似准则,且限于尺寸效应;监测设备的布设工艺直接影响数据获取的有效性。寻求透明的可替代的相似材料,应用可视化透明模型试验进行分析成为一种新的思路。室内模型试验需要满足可视化和物理力学相似两方面要求。为了满足可视化要求,人们从相似材料配制的原材料入手,目前,最常用的透明固体材料为熔融石英砂(第1类)和无定形二氧化硅(第2类)2种,而孔隙液体则包含混合油及溴化钙溶液等^[7-9]。此外,学者们持续提出利用新材料模拟软黏土和孔隙液体的新方案。孔纲强等^[10]用 Carbopol® Ultrez10 聚合物、NaOH 粉末+纯净水制配了一种新型透明黏土。吴跃东等^[11]提出了一种新型透明黏土——AVC 透明黏土。孔纲强等^[12-13]采用蔗糖溶液作为透明土孔隙液体,取得了较好的试验成果,推动了蔗糖溶液对传统矿物油的替代。在物理力学性质方面,原材料骨料、胶结剂及孔隙液体的组成与相互之间的比例起到了决定性影响^[14-17]。于是,多元非线性回归(multivariate nonlinear regression, MNR)、支持向量回归(support vector regression, SVR)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)及随机森林(random forest, RF)等多种回归分析和机器学习方法被用于配比的确定与优化^[18-24]。

综上所述,国内外学者对相似材料透明度和强度理论等进行了广泛探讨。材料配比设计是实现材料物理力学特性的关键,现阶段透明相似材料的研究大部分都局限于单个配比下与其对应的岩土体,缺少最优配比设计的量化方法。鉴于此,本文以所配制相似材料试样样本的正交试验数据为基础,完成了试样物理力学参数的测定,建立了透明胶结土重度、内摩擦角、黏聚力与石英砂粒径和胶石比的多元线性回归方程,并量化计算了最优配比,在此基础上建立了 SVR 评价模型,完成了最优配比有效性检验,两者共同构成了透明相似材料最优配比联合设计方法。

1 正交试验设计与参数测定

1.1 正交试验设计

开展正交试验设计时,需要基于研究对象的特性及目的评价指标,科学确定关键影响因子及其水平^[25]。重度、内摩擦角和黏聚力是描述软土强度特性的关键参数,其中:重度 γ 反映了土体的密度和自重应力;内摩擦角 φ 是土体抗剪强度的重要组成部

分;黏聚力 c 反映了土体在无侧限条件下的抗剪强度。鉴于此,本文选取重度 γ 、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 作为主要评价指标。另外,软土的力学行为与其微观构造密切相关,颗粒排列、孔隙结构及颗粒间作用力的变化直接影响其力学响应,因此,本文选用石英砂粒径和胶石比作为主要影响因素。分别将石英砂粒径和胶石比设置成3个水平,试验采用L9(3⁴)正交表进行方案设计,如表1所示。

表1 透明胶结土正交试验设计

Table 1 Orthogonal test design of transparent cemented soil

试验号	粒径/mm	胶石比/%	空列	空列
1	1-(3,5)	1(10)	1	1
2	1-(3,5)	2(15)	2	2
3	1-(3,5)	3(20)	3	3
4	2-[1,2)	1(10)	2	3
5	2-[1,2)	2(15)	3	1
6	2-[1,2)	3(20)	1	2
7	3-(0.5,1)	1(10)	3	2
8	3-(0.5,1)	2(15)	1	3
9	3-(0.5,1)	3(20)	2	1

本试验选用江苏万和矿业生产的高纯度熔融石英砂(图1(a))作为骨架材料,配合使用的胶结剂为德国卡博特公司生产的纳米级白炭黑(图1(b))。为确保材料强度并实现与熔融石英砂折射率相同,混合油采用天津科密欧生产的正十二烷与洛生牌的15#白油混合配制(图1(c)、(d))。试样制作(图2)包括:配制作为孔隙流体的混合油,将15#白油与正十二烷按3:100的体积比充分混合均匀,以获得具有所需黏度和折射率的混合油;随后,将选定的透明骨架材料(熔融石英砂)置于搅拌盆中,并缓慢倒入配制好的混合油进行胶结剂润湿,通过混合物搅拌使胶结剂和混合油达到均匀的混合状态,形成乳白色胶状的物体;完成搅拌后,将混合物模型填筑至目标模具中,采用分层填筑法;最后,对填筑好的试样进行抽气饱和。进一步地,采用环刀试验、固结快剪试验及标准固结试验(图3~5)测定指标数据,如表2所示。

1.2 试验结果分析

为了分析所配制透明相似材料对天然软土地层模拟的有效性,搜集典型地区广东省天然软土的指标参数数据(表3)^[26]。以材料的物理力学特性和压缩特征作为切入点,将透明相似材料试验结果与广东省天然软土实测数据进行对比分析。

研究表明:透明胶结土重度基本覆盖2-5层和4-2B层软土重度的取值范围,部分覆盖2-1B层

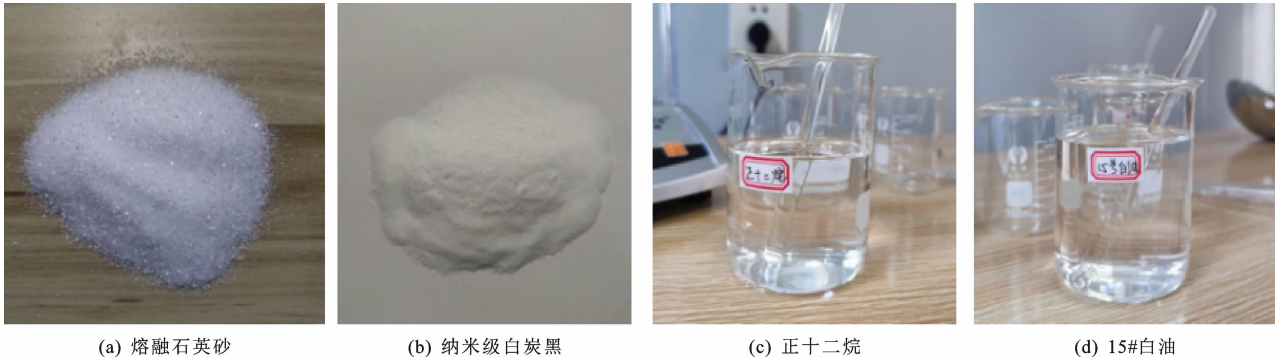


图1 原材料

Fig.1 Raw materials

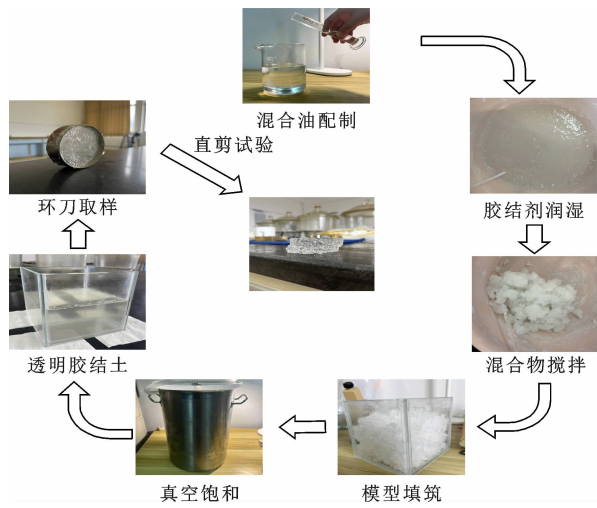


图2 试样制作与测试

Fig.2 Preparation and test of sample



图4 固结快剪试验

Fig.4 Consolidated quick direct shear test



图3 环刀试验

Fig.3 Ring sampler test



图5 标准固结试验

Fig.5 Standard consolidation test

软土重度的取值范围;黏聚力完全覆盖了广东佛山2-1B、2-5、4-2B层软土黏聚力的取值范围;内摩擦角绝大多数覆盖2-1B、2-5、4-2B层软土内摩擦角的取值范围,配制的透明软土相似材料可以较好地表征天然软土的物理力学参数特点。纳米白炭黑的多级

孔隙结构赋予其强吸油特性,结合低密度混合油相的共同作用,致使合成透明软土的表现密度低于天然软土^[27]。

透明胶结土压缩特性主要表征参数的对比结果显示,孔隙比覆盖2-1B、2-5、4-2B层;压缩系数覆盖2-5、4-2B层,基本覆盖2-1B层;压缩模量覆盖2-5层,

表 2 透明胶结土物理力学试验结果

Table 2 Physical and mechanical test results of transparent cemented soil

试验号	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	孔隙比 e_0	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa
1	15.78	26.26	30.0	0.813	0.09	20.15
2	14.48	18.70	14.2	1.023	0.12	16.86
3	12.56	15.69	8.0	1.557	0.29	8.82
4	16.10	23.86	20.0	1.146	0.27	7.95
5	14.02	20.22	13.0	1.784	0.93	2.99
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
86	13.93	22.81	11.9	1.283	0.26	8.78
87	12.51	17.22	5.1	1.478	0.94	2.64
88	15.12	25.16	12.0	1.509	0.62	4.05
89	14.11	22.11	6.8	2.198	0.98	3.26
90	13.54	16.21	2.8	2.388	0.93	3.64

表 3 透明相似材料与天然软土评价指标对比

Table 3 Comparison of evaluation indexes between transparent similar materials and natural soft soils

土层类型	土层序号	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e_0	a_v/MPa^{-1}	E_s/MPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa
淤泥质土	2-1B	15.288~17.738	1.020~1.880	0.56~1.98	1.45~3.60	16.30~26.50	9.3~17.3
淤泥质粉土	2-5	16.072~18.326	0.830~1.310	0.33~0.72	3.10~6.30	22.20	7.2
淤泥质土	4-2B	15.876~17.738	1.020~1.440	0.37~1.02	2.38~5.40	21.10~30.20	8.3~16.3
透明软土		12.530~16.130	0.813~2.414	0.09~1.04	2.64~25.93	14.82~27.07	2.3~31.0

基本覆盖 2-1B、4-2B 层,配制的透明软土相似材料可以较好地表征天然软土的压缩特征。最后,将透明胶结土固结快剪试验曲线和广东深圳软土标准化处理后的剪切应力-剪切位移曲线进行对比,结果分别如图 6、7 所示,其中 σ 为透明胶结土试样在做固结快剪试验时施加的垂直压力^[28]。

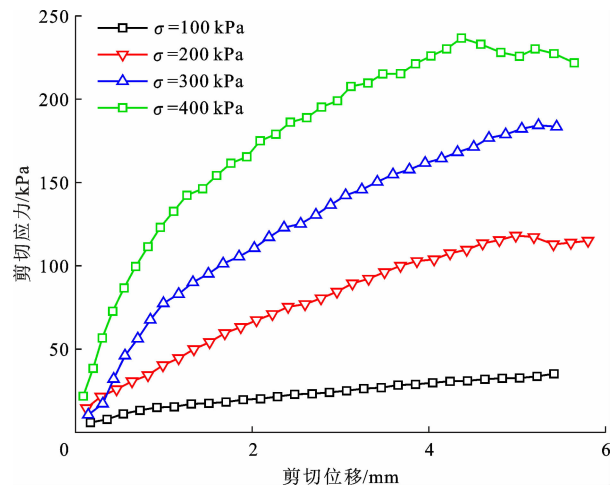


图 6 透明胶结土固结快剪试验曲线

Fig. 6 Consolidation quick direct shear test curves of transparent cemented soil

由图 6、7 显示,透明胶结土剪切应力与法向压力比在初始阶段呈现剪切应力陡升现象,随着剪切位移的增加,透明胶结土的剪切应力增加变缓,最终形成典型类硬化型破坏曲线,其归一化强度演化路

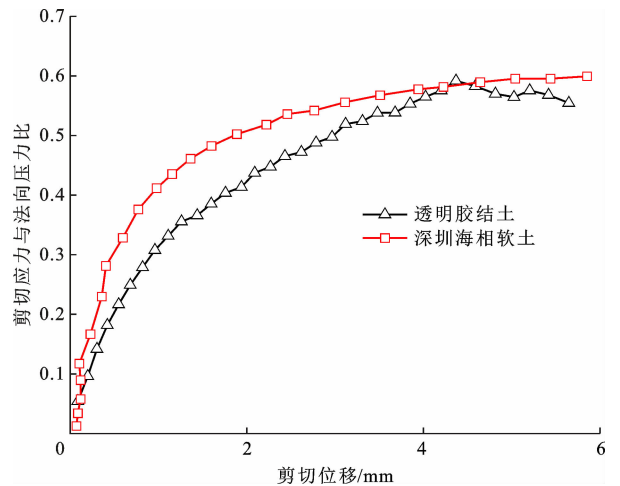


图 7 透明胶结土与深圳海相软土标准化剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 7 Standardized shear stress-shear displacement curves of transparent cemented soil and Shenzhen marine soft soil

径与天然软土应力-应变响应具有本构相似性,可以说明该材料在强度模拟领域可有效表征天然软土地层的力学行为。

2 最优配比联合设计

2.1 最优配比计算方程

在透明胶结土物理力学试验结果的基础上,为揭示透明胶结土的本构关系,量化了透明胶结土物理力学参数重度、内摩擦角与黏聚力,同其主要影响因素(石英砂粒径和胶石比)之间的统计关系,设定含有截

距式和一次方项线性回归方程,其数学模型为

$$Y=aX_1+bX_2+C \tag{1}$$

式中:Y为透明胶结土的物理力学参数(重度、内摩擦角与黏聚力);X₁为石英砂粒径,将石英砂粒径范围(3,5)、[1,2)、(0.5,1) mm水平值分别量化为4、3和2;X₂为胶石比,将胶石比20%、15%和10%水平值分别量化为4、3和2;a、b和C均为回归系数。

本文基于R语言构建逻辑回归模型,最终建立的数学模型为

$$\gamma=0.651X_1-4.004X_2+27.953 \tag{2}$$

$$\varphi=-0.024X_1-1.425X_2+17.201 \tag{3}$$

$$c=-5.605X_1-6.857X_2+36.566 \tag{4}$$

表4 重度回归分析结果

Table 4 Regression analysis result of unit weight

变量	标准误	t	P	95%置信下限	95%置信上限
截距项	0.297 085	62.773 53	3.06×10^{-74}	18.058 57	19.239 540
X ₁	0.068 762	-0.349 03	7.91×10^{-3}	-0.160 67	0.112 671
X ₂	0.068 762	-20.716 50	2.15×10^{-35}	-1.561 17	-1.287 830

统计检验结果见表5,其中:R为自变量与因变量之间的相关系数,其绝对值越靠近1,表明自变量与因变量的线性相关性越强;R²为衡量回归模型对因变量的拟合优度,其值越接近1,表明模型的拟合效果越好;R_a²为调整后拟合优度;F为F检验的显

2.2 回归模型检验分析

2.2.1 重度的统计验证

重度的统计验证结果见表4,其中t为回归分析中用于检验单个回归系数是否显著不等于0的统计量;P为回归分析中用于检验模型各项显著性的重要统计量,当某项P小于显著性水平0.05时,可认为该项对因变量的影响具有统计显著性,若P小于0.01,则表明相关性达到极显著水平^[27]。由表4可知,式(2)中截距项、X₁和X₂项的P均小于0.05,各项对γ的影响均达到显著相关水平,因此,γ能通过截距项、X₁和X₂的线性组合进行表示,并且各变量间存在显著相关性。

表5 重度回归统计结果

Table 5 Regression statistical result of unit weight

统计量	R	R ²	R _a ²	F	S	n
结果	0.911 861 40	0.831 491 21	0.827 617 45	2.28×10^{-34}	0.532 626 18	18

2.2.2 内摩擦角的统计验证

内摩擦角的统计验证结果见表6,可知:式(3)中截距项、X₁和X₂项的P均小于0.05,各项对φ的

影响均达到显著相关水平,因此,φ能通过截距项、X₁和X₂的线性组合进行表示,并且各变量间存在显著相关性。

表6 内摩擦角回归分析结果

Table 6 Regression analysis result of internal friction angle

变量	标准误	t	P	95%置信下限	95%置信上限
截距项	0.882 454	35.475 58	1.61×10^{-53}	29.551 58	33.059 530
X ₁	0.204 248	3.187 30	2.00×10^{-3}	0.245 03	1.056 966
X ₂	0.204 248	-19.602 00	1.14×10^{-33}	-4.409 63	-3.597 700

统计检验结果表明(表7),自变量X₁和X₂与因变量φ之间存在高度显著的相关关系。回归分析显示,φ的变化可由X₁和X₂有效表达。

显著的相关性。

2.2.3 黏聚力的统计验证

黏聚力的统计验证结果见表8,可知,式(4)中截距项、X₁和X₂项的P均小于0.05,各项对c的影响均达到显著相关水平,因此,c能通过截距项、X₁和X₂的线性组合进行表示,并且各变量间存在

统计检验结果表明(表9),自变量X₁和X₂与因变量c之间存在高度显著的相关关系,c的变化可由X₁和X₂有效表达。

2.3 最优配比计算方法搭建

本文针对软土地层特性,建立了透明相似材料物理力学参数设计体系。基于软土已知参数(重度、内摩擦角和黏聚力),采用相似理论确定材料设计准

表 7 内摩擦角回归统计结果

Table 7 Regression statistical result of internal friction angle

统计量	R	R ²	R _a ²	F	S	n
结果	0.905 138 32	0.819 275 38	0.815 120 79	4.79×10 ⁻³³	1.582 101 02	18

表 8 黏聚力回归分析结果

Table 8 Regression analysis result of cohesion

变量	标准误	t	P	95%置信下限	95%置信上限
截距项	1.476 196	33.211 86	3.38×10 ⁻⁵¹	46.093 12	51.961 32
X ₁	0.341 673	-16.404 60	2.32×10 ⁻²⁸	-6.284 11	-4.925 89
X ₂	0.341 673	-20.067 90	2.13×10 ⁻³⁴	-7.535 78	-6.177 55

表 9 黏聚力回归统计结果

Table 9 Regression statistical result of cohesion

统计量	R	R ²	R _a ²	F	S	n
结果	0.940 930 39	0.885 349 99	0.882 714 36	1.21×10 ⁻⁴¹	2.646 588 32	18

则,设定重度和内摩擦角的相似比为 1,据此确定相似材料的基本力学参数。基于已建立的数学模型,通过联立求解式(2)和(3)可获得石英砂粒径和胶石比的优化参数。随后,将 X₁、X₂ 代入式(4)即可确定黏聚力。通过计算 c 与原地层黏聚力的比值即可确定几何相似比,进而确定模型尺寸。所形成的量

化计算方法如图 8 所示。使用量化设计方法时,应当注意:参数 X₁ 和 X₂ 的求解范围应控制在 [0,4] 的实数区间内;为保证石英砂粒径的单一性,避免级配效应,X₁ 应优先取整数;X₂ 的确定需采用插值法,例如当计算值为 2.5 时,对应的实际胶石比可取 12.5%。

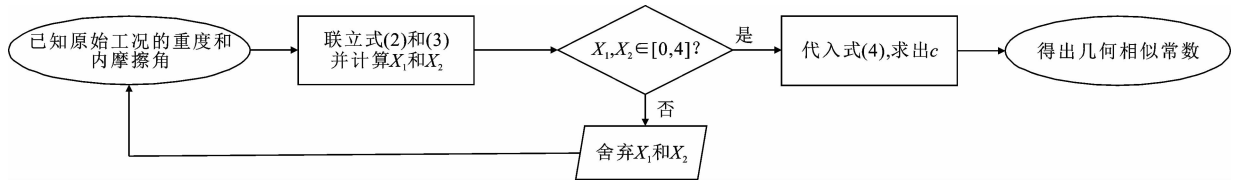


图 8 量化计算方法

Fig. 8 Quantitative calculation method

3 最优配比评价模型

3.1 评价模型构建

从试验数据库中取 80% (72 组) 的数据建立 SVR 评价模型。分别采用重度、内摩擦角和黏聚力作为透明胶结土的评价指标。选取粒径和石胶比作为输入变量,选取重度、内摩擦角和黏聚力为输出对象。如图 9 所示,SVR 模型中,样本数据集作为输入变量 x₁ 和 x₂,经核函数 K(x₁,x) 和 K(x₂,x) 与线性组合运算后,最终输出预测函数 L(x)。其中:x₁ 和 x₂ 为训练样本集;x 为待预测样本;a₁、a₁^{*}、a₂ 和 a₂^{*} 均为拉格朗日乘子;b 为偏置项。

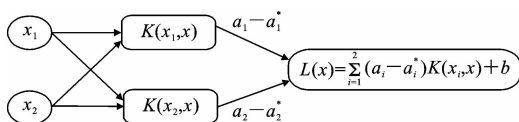


图 9 SVR 模型

Fig. 9 SVR model

3.2 评价结果分析与有效性检验

通过建立 SVR 评价模型,得到重度、内摩擦角和黏聚力的拟合优度 R² 分别为 0.980 4、0.979 6 和 0.999 7,表明评价模型具有较高的准确性。进一步地,双自变量等高线(图 10)显示粒径和石胶比对指标参数的影响显著。

4 实例应用

4.1 工程概况

汕汾高速公路沿线 3~9 m 深度区间发育第四系松散沉积层,其上部全新统海陆交互沉积相以灰至深灰色淤泥、淤泥质细砂为主,常呈互层结构,构成区域性软弱土层主体。已知该土样重度为 14.896 kN/m³,内摩擦角为 19.4°,黏聚力为 12.9 kPa,图 11 为实际断面地质钻孔图^[29-30]。

4.2 最优配比确定

透明胶结土材料重度为 14.896 kN/m³,内摩擦角为 19.4°,联立式(2)、(3),使用 MATLAB 求解得

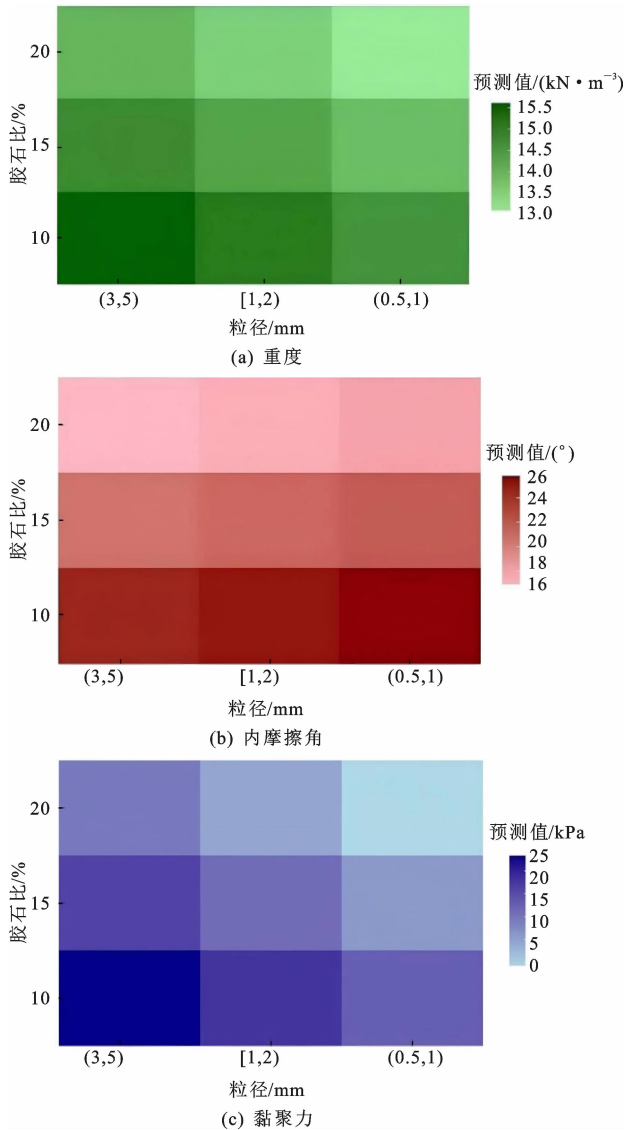


图 10 评价指标双自变量等高线

Fig. 10 Contours of evaluation indexes with double independent variables

$X_1 = 1.3745$, $X_2 = 3.5534$ (舍); $X_1 = 4.0738$, $X_2 = 3.5951$ 。对照 2.1 节, 采用 (3,5) mm 石英砂骨料和 17.976% 胶石比的制备方案。将优化参数代入式(4), 计算得到预期黏聚力为 11.716 kPa。

4.3 最优配比有效性检验

将 4.2 中求得的石英砂粒径和胶石比代入建立的 SVR 模型, 得到预测结果重度为 14.191 kN/m³, 内摩擦角为 18.840°, 黏聚力为 10.302 kPa, 与原状土参数高度一致。

5 结 语

(1) 选取熔融石英砂、混合油和纳米级白炭黑为原材料配制了透明相似材料, 测定了透明胶结土物

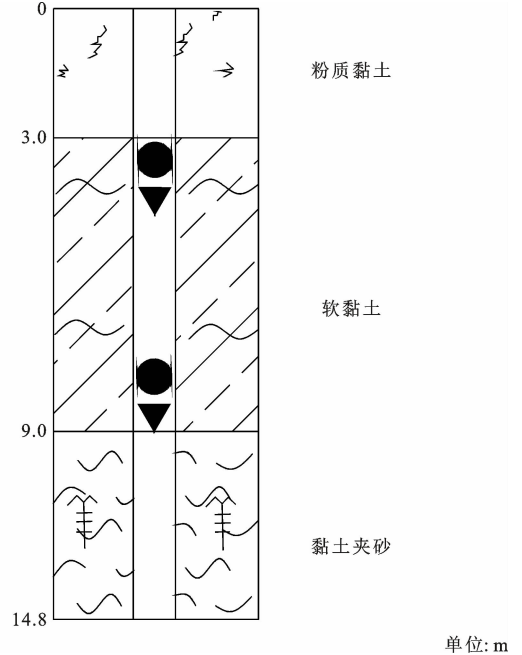


图 11 试验断面土层分布

Fig. 11 Soil layer distribution at test section

理力学参数。结果表明, 归一化强度演化路径与天然软土应力-应变响应具有本构相似性。

(2) 基于正交试验中 20% 的数据拟合得到的多元线性方程组能够反映影响因素的作用, 且形成简单, 精度高, 便于应用, 可量化计算最优配比及几何相似常数。基于正交试验剩余 80% 数据机器学习得到的 SVR 模型评价效果良好。

(3) 分别基于正交试验数据拟合和机器学习得到多元线性方程组及 SVR 模型的组合, 形成了一种新型相似材料最优配比联合设计方法。同时, 也保证了最终计算结果的客观性和准确性。

(4) 本文对透明相似材料的压缩性及液塑限等关键参数有待进一步细化, 且影响因素的多样化和不同影响因素的相互影响有待进一步探讨。

参考文献:

References:

- [1] 杨兵明. 软土地层盾构隧道长期沉降规律及预测研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 87-92.
YANG Bing-ming. Research on the law and prediction of long-term settlement of shield tunnel in soft soil stratum[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(11): 87-92.
- [2] WANG X W, XU Y S. Investigation on the phenomena and influence factors of urban ground collapse in China[J]. Natural Hazards, 2022, 113(1): 1-33.
- [3] WANG K, ZHANG J W, GAO G Q, et al. Causes,

- risk analysis, and countermeasures of urban road collapse in China from 2019 to 2020[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(6): 04022054.
- [4] 田谷雨,刘素嘉,张嘎. 地下渗漏条件下地基与隧洞响应的离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(增1):226-229.
TIAN Gu-yu, LIU Su-jia, ZHANG Ga, et al. Centrifugal model tests on behavior of soil and tunnel under underground water leakage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(S1): 226-229.
- [5] 戴自立,彭凌豪,包扬娟. 地下水力管线外渗引起的道路塌陷机理模型试验[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(10):49-60.
DAI Zi-li, PENG Ling-hao, BAO Yang-juan. Model test investigation on mechanism of road collapse induced by underground hydraulic pipe leakage[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(10): 49-60.
- [6] 施鑫,荣传新,王厚良,等. 管线渗漏影响下盾构引起管-土变形试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2023, 40(5):110-115.
SHI Xin, RONG Chuan-xin, WANG Hou-liang, et al. Experimental research on the pipeline-soil deformation caused by shield under the influence of pipeline leakage[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2023, 40(5): 110-115.
- [7] 马少坤,韦榕宽,邵羽,等. 基于透明土的隧道开挖面稳定性三维可视化模型试验研究及应用[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(10):1798-1806,1958.
MA Shao-kun, WEI Rong-kuan, SHAO Yu, et al. 3D visual model tests on stability of tunnel excavation surface based on transparent soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10): 1798-1806, 1958.
- [8] 冷先伦,王川,庞荣,等. 透明胶结土材料强度特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2059-2068,2077.
LENG Xian-lun, WANG Chuan, PANG Rong, et al. Experimental study on the strength characteristics of a transparent cemented soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2059-2068, 2077.
- [9] WANG B, HOU H J, ZHU Z W, et al. Machine learning-based prediction and performance study of transparent soil properties[J]. *Smart Structures and Systems*, 2021, 28(2): 289-304.
- [10] 孔纲强,周杨,刘汉龙,等. 新型透明黏土制备及其物理力学特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(12): 2208-2214.
KONG Gang-qiang, ZHOU Yang, LIU Han-long, et al. Manufacture of new transparent clay and its physical and mechanical properties [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(12): 2208-2214.
- [11] 吴跃东,陈明建,周云峰,等. 新型透明黏土的配制及其基本特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增1): 141-145.
WU Yue-dong, CHEN Ming-jian, ZHOU Yun-feng, et al. Distribution and basic characteristics of new transparent clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(S1): 141-145.
- [12] 孔纲强,孙学谨,李辉,等. 孔隙液体对玻璃砂透明土强度特性影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(2):377-384.
KONG Gang-qiang, SUN Xue-jin, LI Hui, et al. Effect of pore fluid on strength properties of transparent soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 377-384.
- [13] 孔纲强,孙学谨,刘汉龙,等. 孔隙液体对透明土渗透特性影响对比试验[J]. *水利学报*, 2017, 48(11): 1303-1310.
KONG Gang-qiang, SUN Xue-jin, LIU Han-long, et al. Contrast experiments on permeability of transparent soil influenced by pore fluids [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(11): 1303-1310.
- [14] 齐昌广,范高飞,崔允亮,等. 利用人工合成透明土的岩土物理模拟试验[J]. *岩土力学*, 2015, 36(11): 3157-3163.
QI Chang-guang, FAN Gao-feng, CUI Yun-liang, et al. Geotechnical physical model test using artificial synthetic transparent soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3157-3163.
- [15] 宋宇,刘保国,刘浩,等. 基于变形与脆性特性的类岩石材料配比正交试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8):2675-2684.
SONG Yu, LIU Bao-guo, LIU Hao, et al. Orthogonal test method for determination of the proportion of rock-like material based on properties of deformation and brittleness [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2675-2684.
- [16] 李元海,林志斌,秦先林,等. 透明岩体相似材料物理力学特性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(6): 977-982.
LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin, QIN Xian-lin, et al. Study of development of transparent rock mass for physical similarity experiment and its mechanical properties[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(6): 977-982.
- [17] 李元海,林志斌. 透明岩体相似物理模拟试验新方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(11):2030-2039.

- LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin. Innovative experimental method based on development of transparent rock mass materials for physical tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2030-2039.
- [18] 董金玉,杨继红,杨国香,等.基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):44-49.
- DONG Jin-yu, YANG Ji-hong, YANG Guo-xiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 44-49.
- [19] 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等.基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J].岩土力学,2020,41(6):2009-2020.
- NING Yi-bing, TANG Hui-ming, ZHANG Bo-cheng, et al. Investigation of the rock similar material proportion based on orthogonal design and its application in base friction physical model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2009-2020.
- [20] 李光,马凤山,郭捷,等.大尺寸工程模型试验中的相似材料配比试验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(11):1653-1660.
- LI Guang, MA Feng-shan, GUO Jie, et al. Experimental study on similar materials ratio used in large-scale engineering model test [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(11): 1653-1660.
- [21] 王立峰,翟惠云.纳米硅水泥土抗压强度的正交试验和多元线性回归分析[J].岩土工程学报,2010,32(增1):452-457.
- WANG Li-feng, ZHAI Hui-yun. Orthogonal test and regression analysis of compressive strength of nanometer silicon and cement-stabilized soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 452-457.
- [22] 兰文涛,吴爱祥,王晗明.凝水膨胀充填复合材料的配比优化与形成机制[J].复合材料学报,2019,36(6):1536-1545.
- LAN Wen-tao, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming. Formulation optimization and formation mechanism of condensate expansion and filling composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1536-1545.
- [23] 刘晓,王思迈,卢磊,等.机器学习预测混凝土材料耐久性的研究进展[J].硅酸盐学报,2023,51(8):2062-2073.
- LIU Xiao, WANG Si-mai, LU Lei, et al. Development on machine learning for durability prediction of concrete materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8): 2062-2073.
- [24] 刘凯华,郑佳凯,谢维力,等.基于机器学习的再生混凝土配合比设计方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(9):88-96.
- LIU Kai-hua, ZHENG Jia-kai, XIE Wei-li, et al. Mixture design method of recycled aggregate concrete by machine learning[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(9): 88-96.
- [25] 李大虎,韦鲁滨,朱学帅,等.基于SVR与特征变量选择方法的煤炭发热量预测[J].煤炭学报,2019,44(增1):278-288.
- LI Da-hu, WEI Lu-bin, ZHU Xue-shuai, et al. Prediction of coal calorific value based on SVR and characteristic variables selection method[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 278-288.
- [26] 唐军平,何国东,付旭,等.佛山地基软土物理力学指标间的相关性研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(增2):645-653,659.
- TANG Jun-ping, HE Guo-dong, FU Xu, et al. Study on the relevance between the physico-mechanical parameters of foundation soft clay of Foshan[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 645-653, 659.
- [27] 何晟亚,李亮,李恒一,等.可视化软土隧道模型试验相似材料的配置及其物理力学特性研究[J].现代隧道技术,2024,61(4):202-209.
- HE Sheng-ya, LI Liang, LI Heng-yi, et al. Study on configuration method and physical-mechanical properties of similar materials for visual soft soil tunnel model test [J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(4): 202-209.
- [28] 张长生,高明显,强小俊.深圳前海湾海相淤泥固结系数变化规律研究[J].岩土工程学报,2013,35(增1):247-252.
- ZHANG Chang-sheng, GAO Ming-xian, QIANG Xiao-jun. Variation laws of consolidation coefficient of marine clay in Houhai Bay of Shenzhen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 247-252.
- [29] 李国维,李响,阮玉胜,等.平面变形超固结软黏土蠕变模型研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2307-2315.
- LI Guo-wei, LI Xiang, RUAN Yu-sheng, et al. Creep model of over-consolidated soft clay under plane strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2307-2315.
- [30] 李国维,周洋,阮玉胜,等.平面变形超固结软黏土蠕变特征[J].岩土工程学报,2014,36(6):1028-1035.
- LI Guo-wei, ZHOU Yang, RUAN Yu-sheng, et al. Plane strain tests on creep characteristics of over-consolidated clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1028-1035.