研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering
引用格式:李葱葱, 谢朋, 李昭捷, 等. 透明软土相似材料最优配比量化设计方法 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(1): 98−107.
Citation: LI Congcong, XIE Peng, LI Zhaojie, et al. Quantitative design method of optimal ratio of transparent soft soil similar materials[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(1): 98−107.
Open Access

透明软土相似材料最优配比量化设计方法

李葱葱, 谢　朋✉, 李昭捷, 耿希鹏
(海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘　要: 为研究透明软土相似材料兼具透明度和相似性的要求, 基于正交试验, 采用熔融石英砂、纳米白炭黑、正十二烷和 15#白油为原材料配制透明胶结土, 并通过环刀试验和固结快剪试验测定其物理力学参数(重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c), 结合多元线性回归分析和支持向量机评价模型构成了透明相似材料的最优配合比一体化设计方法。结果表明: 所配制透明胶结土的物理力学参数可以较好地反映天然软土的物理力学参数特点和压缩特性; 基于正交试验数据拟合和机器学习得到的多元线性回归方程组及 SVR 模型搭建了最优配合比和几何相似常数的一个一体化设计方法。

关键词: 透明胶结土; 最优配合比; 线性回归分析; 支持向量机; 量化设计方法
中图分类号: TU447　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)01-0098-10
DOI: 10.65658/j.hndk.2025021903　　CSTR: 32403.14.hndk.2025021903

Quantitative design method of optimal ratio of transparent soft soil similar materials

LI Congcong, XIE Peng✉, LI Zhaojie, GENG Xipeng
(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to study the transparency and similarity requirements of transparent soft soil simulants, transparent cemented soil was synthesized using fused quartz sand, nano-silica, n-dodecane, and 15# white oil as base materials, guided by an orthogonal experimental test. Key physical and mechanical parameters (unit weight γ, internal friction angle φ and cohesion c) were quantified through ring knife tests and consolidated fast shear test. Combined with multiple linear regression analysis and support vector machine evaluation model, the optimal mix ratio integrated design method of transparent similar materials was developed. The results show that the synthesized transparent cemented soil replicates the physical-mechanical properties and compression behavior of natural soft soil. Based on the multivariate linear regression equations and support vector regression model obtained by orthogonal test data fitting and machine learning, an integrated design method of optimal mixture ratio and geometric similarity constant is established.

Keywords: transparent cemented soil; the optimal mixture ratio; linear regression analysis; support vector regression; quantitative design method

Received: 2025−02−19; **Revised:** 2025−03−11; **Accepted:** 2025−03−12; **Available online:** 2025−05−16
✉ **Corresponding author(s):** XIE Peng, E-mail: Peng_xie@hainanu.edu.cn

0 引 言

软土地层在中国分布广泛，以长江中下游、珠江三角洲地区和沿海平原地区最具代表性。由于软土具有承载力低、压缩性高等特性[1−2]，在受到外部自然环境变化及人为活动开展等因素的影响时，极易产生包括建筑地基不均匀沉降、软土隧道围岩失稳破坏、深基坑失稳等一系列工程问题[3−4]。通过透明化的模型试验，厘清软土地层在差异化环境下的应力和变形特征，是制定科学的防护措施的依据，也是消减甚至杜绝不良工程问题的关键。

在现有的试验研究中，天然土体常被选用作为试验材料，能较好地反映工程实际情况[5]。但天然土体内部的不透明性限制了对其内部发展规律的直接观察，而这些规律往往是探究相关问题的核心所在。为了解决测量试验中土体内部不可视化的问题，诸多学者开始探索使用透明材料来模拟土体内部结构[6−7]。具有稳定性质的材料是透明化的模型试验取得科学结果的根本，需要同时满足透明度和相似性2个方面的要求[8]。从保证材料透明度的角度出发，以熔融石英砂为骨料、纳米白炭黑为胶结剂和正十二烷混合15#白油复配体系为孔隙液，所配制的透明胶结土材料，完成对力学和变形特征的讨论[9]。近年来，学者们在软弱黏土模拟方面取得新进展，采用NaOH+U10粉末、AVC共聚物以及沉淀白炭黑等新型材料构建土体[10−12]。同时，在孔隙液替代研究方面，蔗糖溶液和盐溶液等水基体系逐步取代传统矿物油，为透明土材料的环保性与经济性提供了新的解决方案[13−15]。在提升材料的物理力学指标参数方面，最优配合比是关键，基于正交试验积累的数据集，引入包括多元非线性回归、支持向量机（support vector regression, SVR）、神经网络（artificial neural network, ANN）和随机森林（random forest, RF）等多种数理统计和线性回归方法，进行配合比的确定与优化[16−18]。其中，SVR具有良好的非线性建模能力、可以有效提高材料配合比的可行性和可解释性。

综上所述，现阶段透明软土相似材料在满足透明度要求方面效果良好，而物理力学参数相似性未得到充分考虑。因此，本文基于正交试验建立物理力学指标参数数据集，将线性回归分析方法和SVR方法相结合，搭建软土地层透明相似材料最优配合比量化设计方法，以期为软土地层相关可视化模型试验的顺利开展提供理论支撑。

1 构建思路

引入数据的线性回归分析方法和SVR机器学习方法，基于正交试验数据的统计分析，研发一种新型的软土透明相似材料最优配合比量化设计方法，具体的研究思路如图1。

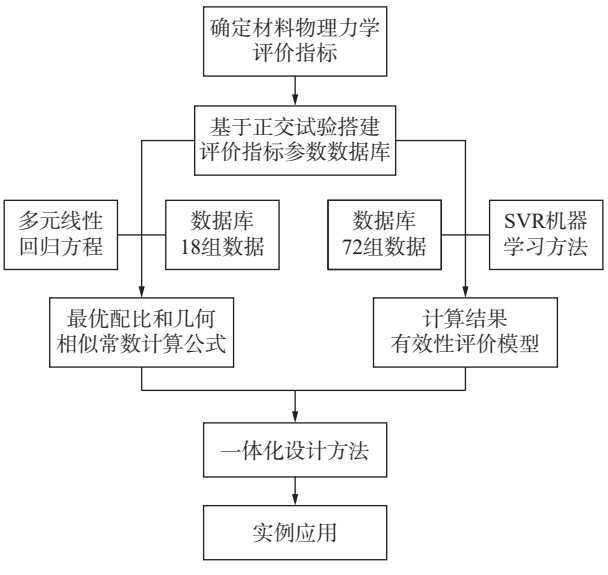


图1 研究思路

2 材料的配制及参数检验

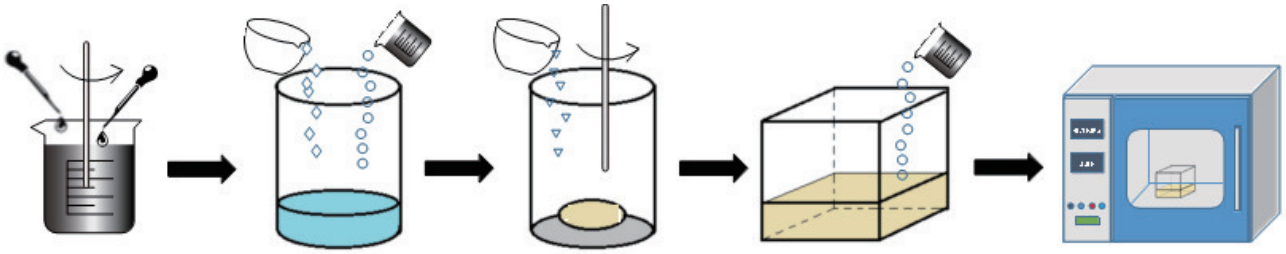
采用正交试验的方式进行材料的配制和相关物理力学参数的测定。考虑土体颗粒表面形貌特征直接影响接触面的摩擦效应，土体密实程度则决定了颗粒间的接触状态和应力传递机制。在细观尺度上，颗粒间的相互作用力主要来源于胶结物质产生的黏结效应以及颗粒表面电荷引起的静电引力作用[19]。基于上述机理，选用石英砂粒径和胶石比2个影响因素，试验的组合设计方案如表1所示。

以现有的研究成果为参考，试验选用熔融石英砂作为骨料，纳米级白炭黑作为胶结剂，正十二烷与15#白油混合液作为孔隙液体，以此完成相似材料的配制。同时，试样制作分为5个步骤，如图2所示：（1）混合油配制（正十二烷与15#白油）；（2）胶结剂润湿；（3）混合物搅拌；（4）模型填筑；（5）抽气饱和。综合考虑岩土体自身的固有属性和强度特征2个方面，

最终确定重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 为衡量指标,采用环刀试验和固结快剪试验测定的评价指标参数,如表2所示(其完整数据见附录)。

表1 透明相似材料正交设计组合方案

试验号	石英砂粒径/mm	胶石比/%	空列	空列
1	3.0 ~ 5.0	10	1	1
2	3.0 ~ 5.0	15	2	2
3	3.0 ~ 5.0	20	3	3
4	1.0 ~ 2.0	10	2	3
5	1.0 ~ 2.0	15	3	1
6	1.0 ~ 2.0	20	1	2
7	0.5 ~ 1.0	10	3	2
8	0.5 ~ 1.0	15	1	3
9	0.5 ~ 1.0	20	2	1



a 混合油配制 b 胶结剂润湿 c 混合物搅拌 d 模型填筑 e 抽气饱和

图2 试样的制作流程

表2 透明胶结土配比正交试验结果

试验号	重度γ/(kN·m^{-3})	内摩擦角φ/(°)	黏聚力c/kPa
1	15.78	26.26	30.0
2	15.48	18.70	14.2
3	14.53	18.69	8.0
4	14.36	20.86	20.0
⋮	⋮	⋮	⋮
87	14.21	17.22	5.1
88	15.12	25.16	12.0
89	16.11	22.11	6.8
90	13.54	16.21	2.8

为了分析所配制透明相似材料对于天然软土地层模拟的可行性,搜集了广东省典型地区的天然土体指标参数数据[20]。以材料的物理力学特性作为切入点,将试验结果与广东省典型地区天然软土分布的实测数据进行了对比分析,如图3所示。

从图3可以看出,透明胶结土重度 γ 基本覆盖<2-5>层和<4-2B>层天然软土重度 γ 的取值范围,部分覆盖<2-1B>层天然软土重度 γ 的取值范围;内摩擦角 φ 绝大多数覆盖<2-1B>层、<2-5>层和<4-2B>层天然软土内摩擦角 φ 的取值范围;黏聚力 c 完全覆盖了<2-1B>层、<2-5>层和<4-2B>层天然软土黏聚力 c 的取值范围。其中,透明胶结土固结快剪试验曲线如图4所示,透明胶结土和天然软土归一化剪切应力−剪切位移曲线的比较如图5所示。从图4和图5可以看出,透明胶结土试样在初始剪切阶段(0~1 mm位移区间)呈现出显著的剪应力增长特征,随后其应力增长速率随剪切位移的增加而逐渐减缓,最终达到稳定状态并发生破坏。该曲线表现出典型的应变硬化特性,与天然软土应力应变曲线的力学特征具有高度相似

性。这一对比结果表明，透明胶结土材料在强度特性方面能够有效模拟天然软土地层的力学行为。

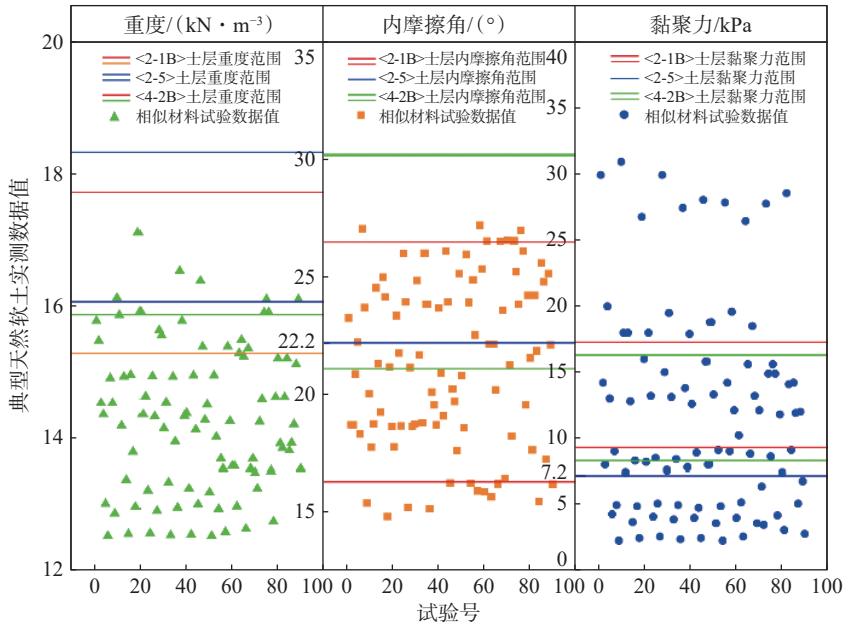


图 3　透明胶结土物理力学参数散点图

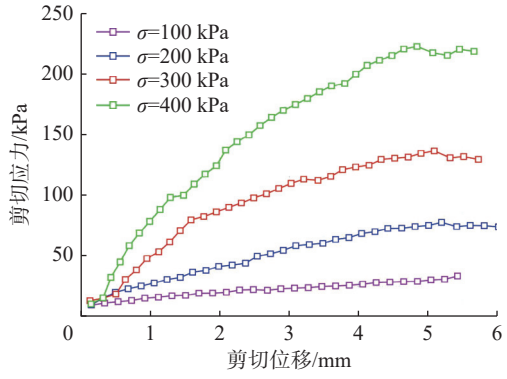


图 4　透明胶结土固结快剪试验曲线

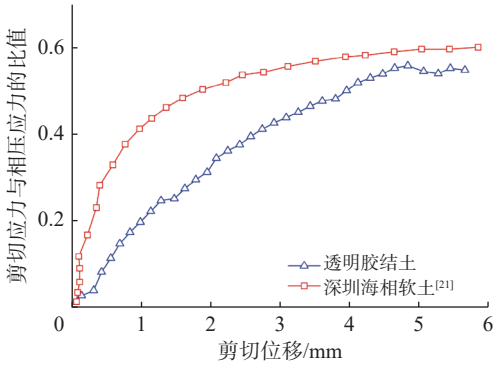


图 5　透明胶结土和深圳海相软土归一化剪切应力–剪切位移曲线的比较

3　最优配合比量化设计方法

3.1　最优配合比计算方程　为建立岩土体物理力学参数(重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c)与其影响因素(石英砂粒径和胶石比)之间的定量关系模型，设定含有常数项和一次方项线性回归方程，构建如下数学模型[21]：

$$Y_i = a_1X_1 + a_2X_2 + \cdots + a_nX_n + C \tag{1}$$

其中，Y_i 为岩土体物理力学参数，其中 Y_1 表示重度，Y_2 表示内摩擦角，Y_3 表示黏聚力；X_1 为石英砂粒径，X_2 为胶石比；a_n(n=1, 2, 3, 4, 5)为系数，C 为回归系数。通过将离散型影响因素转化为连续变量，便于建立精确的数学回归模型。

基于 R 语言平台，采用多元线性回归分析方法，建立了岩土体物理力学参数(重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c)与主要影响因素(石英砂粒径和胶石比)之间的定量关系模型，其数学表达式如下：

$$Y_1 = 0.651X_1 - 4.003\ 7X_2 + 27.952\ 8 \tag{2}$$

$$Y_2 = -0.024X_1 - 1.424\ 5X_2 + 17.200\ 6 \tag{3}$$

$$Y_3 = -5.605X_1 - 6.856\,7X_2 + 36.565\,6 \tag{4}$$

拟合优度 R^2 是评价多元线性回归模型对数据拟合程度的重要指标,R^2 越接近 1,说明模型对数据的拟合效果越好。使用 Excel 对数据集进行数据分析,可得到重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 相对应的 R^2 分别为 0.942 0、0.963 9 和 0.988 7,表明石英砂粒径和胶石比对重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 极其相关,均达到了极显著水平。

对研究对象的实际工况而言,岩土体的重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 已知。为保证透明相似材料与天然软土物理力学性质相似,设定重度 $\gamma(Y_1)$ 和内摩擦角 $\varphi(Y_2)$ 的相似比为 1,据此确定相似材料的基本力学参数[22]。基于已建立的数学模型,通过联立式(2)和(3)可获得石英砂粒径 X_1 和胶石比 X_2 的优化参数,然后将 X_1 和 X_2 代入式(4)即可确定黏聚力 $c(Y_3)$,通过计算 Y_3 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,所形成的量化设计方法如图 6 所示。在方程联立求解过程中,需注意:

(1)参数 X_1 和 X_2 的求解范围应控制在 [0,4] 的实数区间内。

(2)为保证石英砂粒径的单一性,避免级配效应,X_1 应优先取整数值。

(3)X_2 的确定需采用插值法,例如当计算值为 1.4 时,对应的实际胶石比可取 7%。

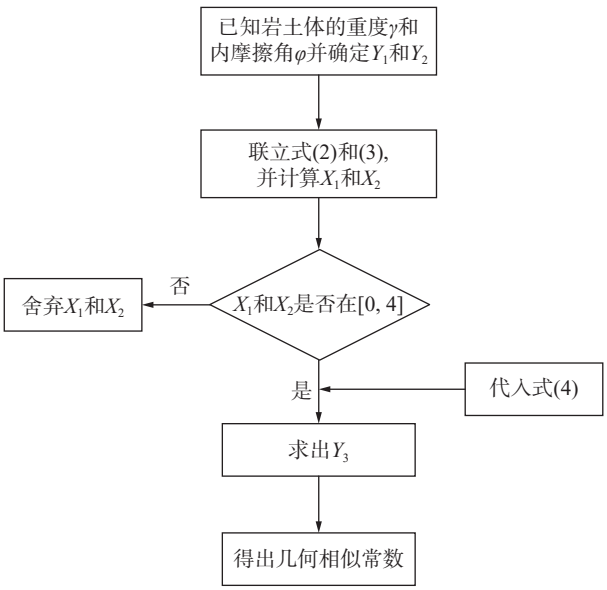


图 6 量化设计方法

3.2 最优配合比有效性评价模型 SVR 的基本思想是通过非线性映射将数据映射到高维特征空间,找到最优拟合超平面,将最优拟合超平面方程设为

$$f(x) = \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}x + b \tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{w}$ 为法向量,b 为超平面截距,若使得真实风险最小,构建目标函数:

$$\min \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{i=1}^{p}(\xi_i + \xi_i^*) \tag{6}$$

约束条件:

$$f(x_i) - y_i \leqslant \varepsilon + \xi_i \tag{7}$$

$$y_i - f(x_i) \leqslant \varepsilon + \xi_i^* \tag{8}$$

$$\xi_i \geqslant 0, \xi_i^* \geqslant 0, \quad i = 1,2,\cdots,p \tag{9}$$

其中,$\frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2$ 是正则化项,代表模型复杂程度,这使模型尽量避免过度拟合;C 为惩罚因子;ξ_i 和 ξ_i^* 为松弛变量;ε 为通过允许误差宽度。SVR 原理图如图 7 所示。

在式(7)~(9)中引入拉格朗日乘子,构建相应的拉格朗日函数,进而将其转化为对偶问题进行求解。经优化计算,可获得式(7)~(9)的最优解集,为 $a=[a_1,a_2,\cdots,a_l]$,$a^*=[a_1^*,a_2^*,\cdots,a_l^*]$。所以,回归方程转换为

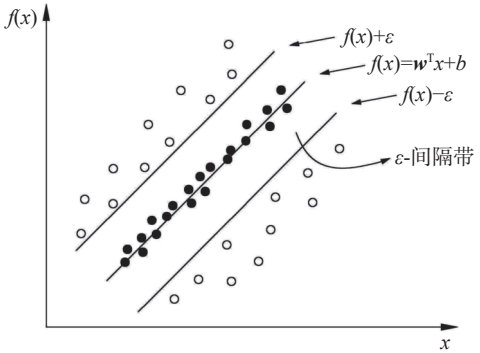


图 7 SVR 原理图

$$L(x)=\boldsymbol{w}^{*\mathrm{T}}x+b^{*}=\sum_{i=1}^{p}(a_p-a_p^{*})K(x_i,x)+b^{*} \tag{10}$$

从试验数据库中取 72 组的数据进行建立 SVR 评价模型，分别采用重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 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，重度 γ、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 为输出变量。SVR 结构模型示意图如图 8 所示，该模型通过将输入样本集$\{x_1,x_2\}$映射到高维特征空间，并在中间层进行非线性组合运算，最终输出回归预测值 $L(x)$，从而获得具有良好泛化能力的回归预测模型。

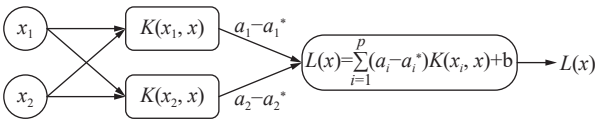


图 8 SVR 结构模型示意图

4 实例应用

4.1 工程概况 土体参数选用上海市《地基基础设计规范》[23] 中典型的上海各土层的力学参数指标。已知土层重度为 15.876 kN·m^{-3}，内摩擦角为 25°，黏聚力为 14 kPa。

4.2 最优配合比的确定 材料配合比确定方法，透明胶结土材料重度 γ=15.876 kN·m^{-3}，内摩擦角 φ=25°，则 Y_1=15.876，Y_2=25.000。联立式(2)和(3)，使用 Matlab 求解得 X_1=1.071 8，X_2=0.911 8。分别将表 1 中的石英砂粒径和胶石比分别量化成 3 个等级，可以得到 X_1=1.071 8 对应石英砂粒径可取 0.5~1.0 mm，X_2=0.911 8 通过插值法求得对应胶石比为 4.559%。将 X_1 和 X_2 代入式(4)，得 Y_3=24.306 2，即材料预期黏聚力为 24.306 2 kPa。

4.3 最优配合比的有效性检验 将求得的石英砂粒径和胶石比代入已建立的多元线性回归模型中，得到预测结果重度 γ 为 15.875 91 kN·m^{-3}，内摩擦角 φ 为 25.000 09°，黏聚力 c 为 24.306 21 kPa，预测结果与原状土参数高度一致。

5 结 论

本文围绕透明软土相似材料的最优配比量化设计方法展开研究，解决了透明相似材料在物理力学特性上与天然软土的相似性问题，并建立配比的优化方法，得到以下结论：

(1)实验结果表明，所制备的透明胶结土材料重度 γ 的变化区间为(12.53 ~ 16.13) kN·m^{-3}，内摩擦角 φ 的变化区间为 14.82° ~ 27.07°，黏聚力 c 的变化区间为(2.3 ~ 31.0) kPa，可以较好地反映天然软土的物理力学参数特点和压缩特性。此外，通过归一化处理的剪切应力−剪切位移曲线呈现出显著的应变硬化特征，与天然软土保持一致性。

(2)基于正交试验的 18 组数据构建的多元线性回归分析得到的方程组，不仅能够反映影响因素单独及交互作用对评价指标参数的影响。同时，可以完成最优配合比及几何相似常数的量化计算。另外，基于正交试验剩余的 72 组数据构建的 SVR 模型可以用于最优配合比和几何相似常数的有效性检验。

(3)分别基于正交试验数据拟合和机器学习得到的多元线性回归方程组及 SVR 模型搭建了最优配合比和几何相似常数的一个一体化设计方法。此外，多元线性回归方程组及 SVR 模型的非线性与材料本身的性质相一致，两者形成的基础数据集相互独立，保证了最终计算结果的客观性和准确性。

参考文献：

[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 B M. 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] 黄炳德，王卫东，邸国恩. 上海软土地层中 TRD 水泥土搅拌墙强度检测与分析 [J]. 土木工程学报，2015, 48(S2)：108−112.

HUANG B D, WANG W D, DI G E. Test and analysis of strength of cement-soil wall constructed by TRD method in soft soil of Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 108−112.

[3] 黄昌富, 龙文, 宋棋龙, 等. 加固范围对软土浅埋超大直径盾构掘进地表沉降的影响 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 76−79.

HUANG C F, LONG W, SONG Q L, et al. Influence of reinforcement range on ground settlement of shallow-buried super-large-diameter shield tunneling in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 76−79.

[4] 杨兵明, 刘保国. 地铁列车循环荷载下软土地区盾构隧道长期沉降分析 [J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 61−67.

YANG B M, LIU B G. Analysis of long-term settlement of shield tunnel in soft soil area under cyclic loading of subway train[J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 61−67.

[5] 符洪涛, 王晓峰, 温作佳, 等. 含粉砂层软土地基真空预压密封性及现场试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2581−2589.

FU H T, WANG X F, WEN Z J, et al. Vacuum preloading sealing performance and field test of soft soil foundations with silty sand layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 2581−2589.

[6] 王橐橦, 陈盟, 唐莹影, 等. 透明土试验技术在滑坡降雨入渗中的研究与应用 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3051−3062.

WANG X T, CHEN M, TANG Y Y, et al. Research and application of transparent soil test technology in rainfall infiltration of landslide[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3051−3062.

[7] 谢朋, 李葱葱, 段虎辰, 等. 隧道围岩透明相似材料强度特征与配合比研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 219−227.

XIE P, LI C C, DUAN H C, et al. Study on the strength characteristics and the mix proportion design method of similar materials of transparent cemented soil in tunnel surrounding rock[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(1): 219−227.

[8] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用 [J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2126−2130.

ZHANG Q Y, LI S C, GUO X H, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2126−2130.

[9] 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.

MA S K, WEI R K, SHAO Y, 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.

[10] 孔纲强, 周杨, 刘汉龙, 等. 新型透明黏土制配及其物理力学特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2208−2214.

KONG G Q, ZHOU Y, LIU H L, 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] 雷华阳, 刘英男, 翟塞北, 等. 透明黏土可视度及物理力学特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S2): 53−56.

LEI H Y, LIU Y N, ZHAI S B, et al. Visibility and mechanical properties of transparent clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 53−56.

[12] 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(S1): 141−145.

WU Y D, CHEN M J, ZHOU Y F, et al. Distribution and basic characteristics of new transparent clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 141−145.

[13] 程坦, 郭保华, 孙杰豪, 等. 非规则砂岩节理剪切变形本构关系试验研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 51−64.

CHENG T, GUO B H, SUN J H, et al. Establishment of constitutive relation of shear deformation for irregular joints in sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 51−64.

[14] 周航, 袁井荣, 刘汉龙, 等. 基于球形硅微粉的新型透明黏土基本力学特性试验 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(9): 172−180.

ZHOU H, YUAN J R, LIU H L, et al. Basic mechanical properties of transparent clay made from spherical silica powder: an

experimental study[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 172−180.

[15] 魏静, 鲍宁, 魏平, 等. 透明砂土力学性质三轴试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2018, 35(11): 14−19.
WEI J, BAO N, WEI P, et al. Research on the mechanical properties of transparent sand based on triaxial test[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(11): 14−19.

[16] 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(S1): 452−457.
WANG L F, ZHAI H Y. 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.

[17] 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 X, WANG S M, LU L, et al. Development on machine learning for durability prediction of concrete materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8): 2062−2073.

[18] 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(S1): 278−288.
LI D H, WEI L B, ZHU X S, 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.

[19] TURNER J, KING K. Geotechnical Engineering: the Mechanics of Soils and Foundations[M]. London: Auris Reference Ltd, 2014.

[20] 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(S2): 645−653,659.
TANG J P, HE G D, FU X, 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.

[21] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
LI Y Y, HU C R. Experiment Design and Data Processing[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.

[22] BERTHOZ N, BRANQUE D, WONG H, et al. TBM soft ground interaction: experimental study on a 1 g reduced-scale EPBS model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72: 189−209.

[23] 上海市城市建设局革命委员会. 上海市地基基础设计规范 [M]. 上海: 上海人民出版社, 1975.

作者贡献声明

本声明旨在清晰界定每位作者在本文研究及成稿过程中的具体贡献, 以遵循学术规范并保障署名的公正性。各作者贡献如下:

李葱葱负责本研究的研究构思与设计, 主导数据收集与处理、数据分析与解释等工作, 撰写论文初稿并完成内容的修订与文本的润色; 谢朋参与研究构思与设计, 负责提供研究经费与相关资源支持, 全程提供学术指导、监督及研究方向把握, 对论文初稿进行评审并提出关键修改意见; 李昭捷参与数据收集与处理、数据分析与解释工作, 参与论文的修改工作; 耿希鹏参与数据收集与处理工作和论文的修改工作。

利益冲突声明

作者声明, 不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用: 本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025021903。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到以下基金项目支持:国家自然科学基金项目(42207190);海南省高层次人才项目(422RC599);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)。

This work was supported by the following funding projects: National Natural Science Foundation of China (42207190); High-level Talent Project of Hainan Province (422RC599); Open Fund of the State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures (KF2022-03).

作者简介

李葱葱(1998—),男,安徽阜阳人,海南大学材料与化工专业2022级硕士研究生,E-mail:22220856000053@hainanu.edu.cn

谢 朋(1986—),男,河北承德人,讲师,博士,研究方向:岩土工程、隧道工程与地下工程等,E-mail:Peng_xie@hainanu.edu.cn

(责任编辑:高 喆,英文校对:张海滨)

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.

附录:

表 S1 透明胶结土配比正交试验结果

试验号	重度γ/(kN·m^{-3})	内摩擦角φ/(°)	黏聚力c/kPa	试验号	重度γ/(kN·m^{-3})	内摩擦角φ/(°)	黏聚力c/kPa
1	15.78	23.26	30.0	46	16.39	20.22	28.1
2	15.48	18.70	14.2	47	15.39	19.69	15.8
3	14.53	18.69	8.0	48	14.28	17.59	8.0
4	14.36	20.86	20.0	49	14.51	25.16	18.8
5	13.02	22.22	13.0	50	13.19	20.80	13.3
6	12.53	18.30	4.3	51	12.53	18.56	3.6
7	14.91	27.07	9.0	52	14.95	25.98	9.1
8	14.53	23.71	5.0	53	14.02	23.92	4.9
9	12.87	15.40	2.3	54	12.94	16.24	2.3
10	16.13	20.03	31.0	55	13.69	24.89	27.9
11	15.87	17.74	18.0	56	13.54	22.53	14.2
12	14.19	18.73	7.4	57	12.59	15.92	9.0
13	14.93	24.55	18.0	58	15.39	27.22	19.6
14	13.38	21.30	12.8	59	14.26	25.36	12.1
15	12.56	19.23	3.7	60	13.58	15.89	4.0
16	14.96	25.01	8.3	61	13.58	26.55	10.2
17	13.79	24.17	4.9	62	12.98	22.14	5.2
18	12.97	14.82	2.5	63	15.29	15.66	2.6
19	17.12	21.16	26.8	64	15.49	22.15	26.5
20	15.92	18.62	16.0	65	15.24	20.19	15.6
21	14.36	17.75	8.2	66	12.64	16.22	8.8
22	14.63	23.36	18.0	67	15.36	26.54	18.5
23	13.22	21.76	13.2	68	13.54	23.59	13.2
24	12.57	18.65	4.1	69	13.69	16.44	3.6
25	14.94	26.01	8.5	70	13.48	26.58	12.1
26	14.33	23.95	5.1	71	13.25	21.25	6.4
27	12.91	15.22	2.6	72	14.25	18.22	3.5
28	15.64	21.14	28.4	73	14.59	26.56	27.8
29	15.56	18.63	15.0	74	15.91	25.24	14.9
30	14.15	18.72	7.6	75	16.11	23.85	8.6
31	14.54	24.86	19.5	76	15.91	27.01	15.6
32	13.34	21.68	13.1	77	13.51	26.11	14.9
33	12.54	18.77	3.9	78	12.75	19.54	4.2
34	14.93	26.03	8.4	79	14.62	24.23	11.8
35	13.95	23.85	5.0	80	15.21	21.55	7.4
36	12.96	15.16	2.4	81	13.92	17.62	3.1
37	16.54	20.09	27.5	82	13.85	24.23	28.6
38	15.78	19.54	13.8	83	14.62	21.85	14.1
39	14.34	18.69	7.8	84	15.21	15.46	9.1
40	14.38	23.68	17.9	85	13.81	25.62	14.2
41	13.25	20.89	12.6	86	13.93	24.81	11.9
42	12.55	19.08	4.0	87	14.21	17.22	5.1
43	14.95	26.12	8.9	88	15.12	25.16	12.0
44	14.13	23.94	4.8	89	16.11	22.11	6.8
45	13.01	16.26	2.5	90	13.54	16.21	2.8