

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.077



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



透明软岩抗剪强度影响因素试验研究

曾有恒^{1a}, 熊珮西^{1b}, 方祥位^{1a}, 譙龙江², 唐光春², 黄晟³

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 本科生院, 重庆 400044; 2. 中国铁路成都局集团有限公司重庆建设指挥部, 重庆, 404100; 3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:透明软岩在岩土工程模型试验中具有重要应用价值,但对透明软岩抗剪强度影响因素和影响规律的研究尚有待深入。选用熔融石英砂、纳米级疏水性二氧化硅粉、15#白油和正十二烷为主要透明胶结材料,首先研究硅粉含量、石英砂粒径和试样干密度三个单一因素对透明软岩抗剪强度的影响;基于此,为探索多因素耦合作用及优化材料配比以满足工程需求,结合工程案例设计正交试验,分析上述因素对透明软岩抗剪强度的综合影响并确定最优配比。结果表明,随着硅粉含量增加,黏聚力呈近似线性增大,而内摩擦角几乎不变;随着细粒径含量增加,内摩擦角呈现先减小后增大的趋势,而对黏聚力的影响不大;随着干密度增大,黏聚力呈现出先快后缓的上升趋势,内摩擦角呈现出先稳定后逐渐上升的趋势。正交试验优化配比为硅粉含量4%、粒径组别D(0.5~1 mm 粒径占比75%)和干密度1.35 g/cm³,与重庆鸡公咀隧道围岩参数匹配度高。

关键词:透明软岩;抗剪强度;岩土工程试验;硅粉含量;粒径;干密度;正交试验

中图分类号:TU411.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Shear strength influencing factors of transparent soft rock

ZENG Youheng^{1a}, XIONG Peixi^{1b}, FANG Xiangwei^{1a}, QIAO Longjiang²,
TANG Guangchun², HUANG Sheng³

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Undergraduate School, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Chongqing Construction Headquarters, China Railway Chengdu Bureau Group Co., Ltd., Chongqing 404100,
P. R. China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Transparent soft rock holds significant application value in geotechnical model testing; however, research concerning the influencing factors and mechanisms governing its shear strength remains incomplete. Fused silica sand, nano-sized hydrophobic silica powder, No. 15 white oil, and n-dodecane were selected as the primary transparent bonding materials. First, the influence of three individual factors-silica powder content, quartz sand particle size, and sample dry density-on the shear strength of transparent soft rock was investigated.

收稿日期:2025-03-18

基金项目:重庆英才创新创业示范团队项目(CSTC2024YCJH-BGZXM0012);上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司科研项目(K2023K124A);中铁二局集团有限公司科研项目(H20241409)

作者简介:曾有恒(2000-),男,主要从事透明土研究,E-mail: zengyouheng2000@163.com。

方祥位(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: fangxiangwei1975@163.com。

Received: 2025-03-18

Foundation items: Chongqing Talent Innovation and Entrepreneurship Demonstration Team Projects (No. cstc2024ycjh-bgzxm0012); Scientific Research Project of Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd. (No. K2023K124A); Scientific Research Project of China Railway Erju Group Corporation (No. H20241409).

Author brief: ZENG Youheng (2000-), main research interest: transparent soil, E-mail: zengyouheng2000@163.com.

FANG Xiangwei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: fangxiangwei1975@163.com.

Based on these findings, orthogonal experiments were designed in conjunction with an engineering case study to explore the interactive effects of multiple factors and to optimize the material mix proportion for engineering applications. This approach analyzed the comprehensive influence of the aforementioned factors on the shear strength of transparent soft rock and identified the optimal formulation. The results demonstrate that as silica powder content increases, cohesion exhibits an approximately linear enhancement, while the internal friction angle remains nearly constant. A higher proportion of fine particles initially reduces and subsequently increases the internal friction angle, with negligible impact on cohesion. Increasing dry density induces a rapid-to-gradual ascending trend in cohesion, whereas the internal friction angle shows initial stability followed by a progressive rise. The optimized ratio derived from orthogonal experiments: 4% silica powder, particle size group D (75% of 0.5-1 mm particles), and a dry density of 1.35 g/cm³, exhibits high compatibility with the geomechanical parameters of the Chongqing Jigongzui Tunnel's surrounding rock.

Keywords: transparent soft rock; shear strength; geotechnical engineering model tests; silica powder content; particle size; dry density; orthogonal experiment

在岩土工程领域,通过室内模型试验观测岩土体的变形、破坏以及渗流现象等是揭示岩土工程灾变演化机制的重要手段。然而,使用传统岩土材料进行模型试验时,难以观测到岩土体内部变形与破坏的演化过程,不利于深入研究灾害的力学机制,基于透明土材料和数字图像处理技术相结合的可视化模型试验技术,为解决传统岩土模型试验的关键难题提供了一套有效、创新的技术手段和解决方案。^[1-6]作为一种模拟天然土体的材料,透明土因独特的透明性,为研究土体内部的变形和渗流等提供了新的视角。

常见的透明相似材料主要有模拟天然砂土的熔融石英砂^[7-8]、玻璃砂^[9]和高分子聚合物^[10]以及用来模拟天然黏土的无定形二氧化硅^[11]等,但由于上述两类合成的透明土存在强度较低(透明黏土)或黏聚力不足(透明砂土)的问题,因此,配制具有一般岩土材料强度的透明土材料对于模型试验的开展具有重要的意义。

透明土的制备涉及多种材料的选择与组合。庞荣等^[12]采用熔融石英砂和纳米级疏水二氧化硅制备出透明土。Wei等^[13]采用玻璃砂为土骨架、二氧化硅粉末为粘结剂、15#白油和正十二烷为孔隙液,配制出了一种透明胶结土。孔纲强等^[14]以 Carbopol Ultrez10 聚合物(简称 U10)、NaOH 粉末和纯净水为原材料,碳纳米材料掺入作为示踪粒子制成散斑场,制配一种新型透明黏土材料。冷先伦等^[15]借鉴 Wei 等的思路并且在孔纲强等制作透明土的基础上,加入一种疏水性二氧化硅作为粘结剂,再结合影响因素试验,分析了石英砂和二氧化硅粉的含量和占比、石英砂的粒径及级配等对透明胶结土强度的影响。

透明土能否在模型试验中真实地模拟实际岩

体,与其抗剪特性有很大的关联,如黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的准确模拟^[16]。马少坤等^[17]的研究表明,透明土模型试验能直观地展示隧道开挖面的变形和破坏过程。透明软岩的变形模量(20~80 MPa)与合成软岩材料^[18]及天然软岩^[19]的参数范围一致,为模型试验提供了可靠依据。这些参数的准确性直接影响到模型试验的可靠性和结果的适用性^[20-21]。透明软岩材料作为一种特殊的透明土材料,其与常规透明土的主要区别在于胶结强度和模拟对象的力学特性不同。传统透明土多用于模拟砂土或黏土(黏聚力一般低于 10 kPa),而透明软岩通过纳米级疏水二氧化硅粉的胶结作用,可模拟黏聚力达数十千帕的软岩介质(如泥岩、粉砂岩等)。现有研究多聚焦于透明砂土或黏土,对软岩级材料的强度调控机制尚缺乏系统性研究。通过对透明软岩材料的强度值区间进行深入研究,可以更好地模拟天然软岩的力学行为,从而提高模型试验的准确性和可靠性。例如,研究发现^[22],透明土的黏聚力和内摩擦角可以通过调整其颗粒材料和孔隙液体的配比来实现与天然土体的匹配。这种优化不仅有助于提高模型试验的精度,还可以为模型试验中材料的选择提供理论依据^[23]。

综上所述,在透明土的配制方面取得了较多的成果,但是成果主要集中于透明砂土和透明黏土,对于透明软岩的研究还有待深入。笔者以熔融石英砂、纳米级疏水性二氧化硅粉、15#白油和正十二烷为主要材料制备透明软岩,首先研究硅粉含量、石英砂粒径和试样干密度对透明软岩抗剪强度的影响;然后根据量纲分析法确定的重庆鸡公咀隧道模型试验所需透明软岩黏聚力和内摩擦角理论值,通过正交试验优化配比,进一步分析上述因素对透明软岩抗剪强度的影响。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

透明软岩由骨架颗粒和折射率匹配的孔隙流体,再加入少量疏水性二氧化硅粉作为胶结剂混合而成。

熔融石英砂具有高化学稳定性、耐高温性及与孔隙流体折射率匹配的特性,被广泛用于透明土中模拟砂土骨架结构^[7,13]。透明软岩的骨架颗粒采用万和矿业熔融石英砂(SiO_2 含量 $\geq 99.9\%$),且通过粗细粒径(1.0~2.0 mm 和 0.5~1.0 mm,如图 1 所示)质量占比调控试样强度参数,使其满足透明软岩的较高强度。根据细粒径 0.5~1.0 mm 质量占两种混合粒径颗粒总质量百分比的不同将骨架颗粒分为 A、B、C、D 和 E 五种,具体见表 1。



(a) 0.5~1.0 mm 粒径石英砂 (b) 1.0~2.0 mm 粒径石英砂

图 1 不同粒径的熔融石英砂

Fig.1 Fused quartz sand with different particle sizes

表 1 熔融石英砂粒径组别表

Table 1 Particle size groups of fused quartz sand

粒径组别	0.5~1.0 mm 粒径颗	1.0~2.0 mm 粒径颗
	粒占比/%	粒占比/%
A	0	100
B	25	75
C	50	50
D	75	25
E	100	0

15#白油具有化学稳定性,正十二烷能调节混合液黏度与流动性,两者协同作用可模拟天然土体孔隙液行为,相关文献验证了此类矿物油混合液的折射率调控能力及其在透明土中的适用性^[14]。透明软岩的孔隙液体由 15#白油和正十二烷混合而成,混合液折射率主要受两种溶液质量比的影响,为了使混合后的透明软岩达到最佳的透明效果,需配制与熔融石英砂相同折射率(1.458 5)的混合液。经过大量室内试验发现,15#白油和正十二烷按 5:1 配制的折射率与熔融石英砂相同,透明度最佳,不同质量比的混合液折射率如表 2 所示,透明情况如图 2 所示(从左到右 15#白油与正十二烷的质量比依次是 4、5 和 6),当质量比为 5 时,透明效果最好。

表 2 15#白油与正十二烷混合液折射率测试结果

Table 2 Refractive index test result of 15# white oil and n-dodecane mixture

15#白油与正十二烷的质量比	混合液的折射率	15#白油与正十二烷的质量比	混合液的折射率
3.0	1.454 2	6.0	1.459 6
3.5	1.455 8	6.5	1.460 3
4.0	1.457 0	7.0	1.460 6
4.5	1.457 7	7.5	1.460 8
5.0	1.458 5	8.0	1.461
5.5	1.459 2	8.5	1.461 6

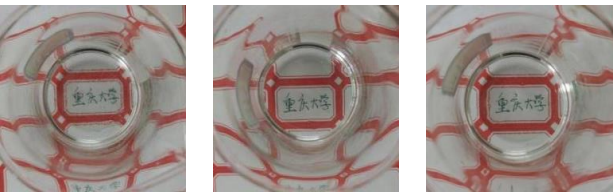


图 2 熔融石英与混合矿物油溶液匹配效果

Fig.2 Refractive index matching effect of fused quartz and mixed mineral oil solution

疏水性二氧化硅粉具有高比表面积($200 \text{ m}^2/\text{g}$)和疏水基团,能通过物理吸附矿物油形成“胶结桥”,赋予材料类似软岩的黏聚力。透明软岩的胶结剂采用上海肴弋合金材料有限公司生产的疏水性二氧化硅粉(图 3,后简称硅粉),其折射率(1.458 5)与石英砂及孔隙流体一致,确保整体透明性。研究表明,疏水二氧化硅粉的掺入显著提升了透明胶结土的黏聚力,且胶结作用不干扰内摩擦角特性^[15]。



图 3 纳米级疏水性二氧化硅粉

Fig.3 Nanoscale hydrophobic silica powder

1.2 材料制备

透明软岩的制备主要分为以下几个步骤:

1)原材料准备。将由 15#白油和正十二烷按 1:5 的质量比混合,使得混合矿物油的折射率为 1.458 5;将熔融石英砂清洗并且烘干,主要目的是去除原来附着在石英砂表面的杂质和残留的水分,保存备用。

2)确定材料配比。根据容器体积,取一定质量的熔融石英砂从而使得试样干密度为 $1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$,纳米级疏水性二氧化硅尽量取 2%~10%(如取太

少,试样不易成型,性质如同砂土且达不到黏土或软岩的性质,如图4所示;如取太多,试样在最终压样时,硅粉和矿物油容易溢出影响试验准确性,如图5所示),混合矿物油的质量 m_{oil} 可通过石英砂的质量 m_{qtz} 和硅粉的质量 m_{slc} 确定^[15]。

$$m_{oil} = 0.05m_{qtz} + 2.5m_{slc}$$

式中: $0.05m_{qtz}$ 的混合矿物油是用于润湿干燥的石英砂所需的最少混合矿物油; $2.5m_{slc}$ 的混合矿物油是使硅粉饱和所需的最少混合矿物油。

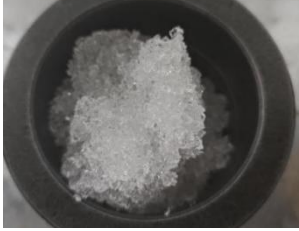


图4 硅粉含量低于2%时透明土试样

Fig.4 Transparent soil specimen when silicon powder content is below 2%



图5 硅粉含量高于10%时试样溢出

Fig.5 Specimen overflow when silicon powder content exceeds 10%

3)拌和。称取一定质量的熔融石英砂,加入0.05倍石英砂质量的矿物油使其湿润,再加入2.5倍硅粉质量的矿物油使得材料之间相互混合均匀,此时材料呈浅白色,外观呈半透明湿润状,如图6所示。其中加入少量矿物油的目的是防止加入硅粉尘过大,如加入太多矿物油则会导致硅粉无法拌

和均匀。



图6 压实前的透明软岩试样

Fig.6 Transparent soft rock specimen before compaction

4)直剪试验制样。将前面制备好的透明土材料按试验所需的质量称好,倒入标准直剪环刀(直径61.8 mm,高度20 mm)制样模具中,将表面整平,最后利用TYS-50型土样压实装置,进行压密(如图7所示)。



图7 直剪试样

图7 Fig. 7 Direct shear test specimen

5)反压饱和。将试样放入真空桶中,先抽气1 h,随后加入适量的混合油,打开空气阀反压饱和23 h,使得透明胶软岩完全饱和,完全饱和后的透明软岩呈无色透明状。

1.3 试验方案

1.3.1 透明软岩抗剪强度影响因素试验

为了研究透明软岩抗剪强度主要影响因素和影响规律,选取疏水性硅粉含量、熔融石英砂粒径和试样干密度这3个因素作为主要研究对象。(见表3)。

表3 影响因素试验方案表

Table 3 Experimental design table for influencing factors

试验组别	硅粉相对石英砂的含量/%	熔融石英砂的粒径组别	干密度/(g/cm ³)
1~5	2、4、6、8、10	粒径组别C	1.35
6~10	6	粒径组别A、B、C、D和E	1.35
11~15	6	粒径组别C	1.25、1.30、1.35、1.40、1.45

其中,硅粉相对石英砂的含量取2%~10%^[14];熔融石英砂粒径分成5种,研究细粒径占比对透明软岩抗剪强度的影响;试样干密度根据预试验结果选取1.25~1.45 g/cm³。具体试验方案如表3所示。

1.3.2 软岩相似材料力学参数的确定和正交试验

为验证所研制透明软岩材料在模拟实际工程

中的适用性,以重庆鸡公咀重叠隧道作为工程案例进行分析,该隧道具有典型的软岩地质特性和复杂的应力条件。基于重庆鸡公咀重叠隧道软岩特性与复杂应力条件,通过量纲分析法确定相似比,再通过相似理论计算分析,得出围岩材料原型和模型的物理力学参数的理论值。在单因素试验基础上,结合该工程案例的需求开展正交试验,确定合适的

配比,进而分析上述因素对透明软岩抗剪强度的影响规律。

1.4 测试方法

利用 ZJ 型应变控制式直剪仪进行抗剪强度的测试。剪切速率为 0.8 mm/min,法向应力分别为 100、200、300、400 kPa,记录剪切位移-剪切应力曲线,取峰值强度作为抗剪强度,最后通过库伦公式拟合黏聚力和内摩擦角。

2 试验结果和分析

2.1 透明软岩抗剪强度影响因素试验

2.1.1 硅粉含量对透明软岩抗剪强度的影响

硅粉作为粘结剂,其含量影响土颗粒间的胶结程度。向透明材料中加入疏水性硅粉,可能会使透明软岩的孔隙结构发生变化。适量增加硅粉,可能使孔隙变小、孔隙率降低,从而使土体结构更加紧密,颗粒间的接触面积增大,有助于抗剪强度的提升。因此研究硅粉含量对透明软岩抗剪强度的影响很有必要。

硅粉含量对透明软岩抗剪强度影响如图 8 所示。由图 8 可知,随着硅粉含量增大,试样的内摩擦角基本保持不变,维持在 30° 左右;而黏聚力呈近似线性增大,变化范围为 3~44 kPa。

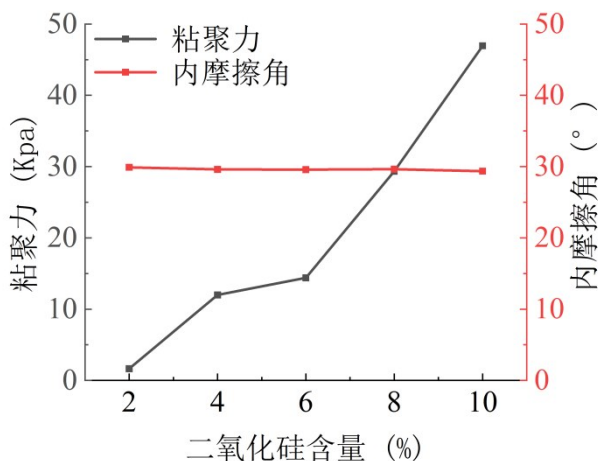


图 8 硅粉含量对透明软岩抗剪强度的影响

Fig.8 Silica powder content effect on shear strength of transparent soft rock

内摩擦角不变可能与使用的硅粉与基体材料的矿物成分相近有关,且粉体粒径($D_{50}=20$ nm)远小于基体颗粒($D_{50}=1$ mm),硅粉的纳米级粒径使其比表面积高达 $200 \text{ m}^2/\text{g}$,通过疏水性基团与矿物油形成物理吸附层,等效于在石英砂颗粒间形成“胶结桥”。根据 Langmuir 单分子层吸附模型,黏聚力(c)与硅粉含量(w_{sil})满足线性关系: $c=3.2+4.1w_{\text{sil}}$ ($R^2=0.98$)

该公式与试验数据高度吻合(如图 8 所示),反映了硅粉通过增加颗粒间有效胶结点数提升黏聚力,而内摩擦角维持在 $30^\circ \pm 1.5^\circ$,符合 Karl 有效应力原理中“胶结作用不改变颗粒间摩擦特性”的经典论断^[24]。

2.1.2 粒径组成对透明软岩剪强度的影响

石英砂粒径对透明软岩抗剪强度的影响如图 9 所示。由图 9 可知,随着细粒径含量的增大,试样的内摩擦角呈现先减小后增大的趋势,而对黏聚力的影响不太显著,上下波动约在 2~3 kPa。

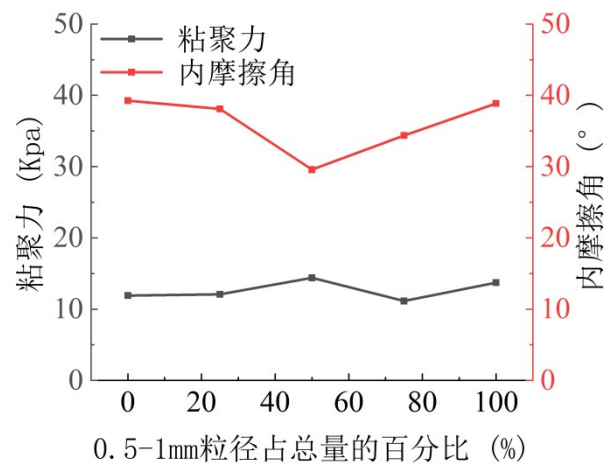


图 9 石英砂粒径对透明软岩抗剪强度的影响

Fig.9 Quartz sand particle size effect on shear strength of transparent soft rock

当熔融石英砂由 0.5~1.0 mm 或 1.0~2.0 mm 单一粒径组成时,试样的内摩擦角最大,约为 40° ;当两种规格的粒径各占 50% 时,内摩擦角最小,约为 30° 。

引入土力学级配指标-不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}$,发现内摩擦角(φ)与 C_u 呈二次函数关系: $\varphi=-0.5C_u^2+8C_u+15$

当 $C_u=2$ (单一粒径,组别 A/E)时,颗粒以点接触为主,咬合效应强,内摩擦角达 40° ;当 $C_u=4$ (50% 混合粒径,组别 C),小颗粒填充大颗粒孔隙,密实度增加导致颗粒滑动摩擦占比上升,内摩擦角降至 30° (图 9)。该规律与 Bjerrum 提出的“颗粒级配通过接触模式影响内摩擦角”理论一致,解释了细粒径含量变化导致的“先减后增”非单调响应^[25]。

2.1.3 试样干密度对透明软岩抗剪强度的影响

透明软岩的抗剪强度受剪切试样的干密度影响也同样显著。在颗粒间摩擦和咬合作用方面,干密度较高的透明软岩中,颗粒间的摩擦和咬合作用增强,这有助于提高土体的黏聚力和内摩擦角,进而提升抗剪强度;在孔隙结构变化方面,干密度的增大会减少孔隙率,使土体结构更加致密,从而提

高土体的整体强度。

试样干密度对透明软岩抗剪强度的影响如图 10 所示。由图 10 可知,当试样干密度从 1.25 g/cm³ 增大到 1.45 g/cm³ 时,黏聚力呈现出先快后缓的上升趋势,这是由于前期干密度的增大有利于颗粒间的摩擦和咬合作用增强,材料内部的黏聚力也在增强,而后期干密度的增大主要增加的是摩擦力,变化范围在 3~22 kPa;而内摩擦角呈现出先稳定后逐渐上升的趋势,变化幅度相对较小,在初始压实阶段,颗粒重排以“滑动摩擦”为主导模式,此时摩擦阻力主要来源于矿物硬度决定的表面粗糙度,故内摩擦角保持稳定,当干密度突破 1.35 g/cm³ 临界值后,对应 Roscoe 临界状态理论中的“密实度-强度拐点”,此时颗粒从滑动摩擦主导转变为几何互锁主导,内摩擦角通过 Logistic 模型呈现“先稳定后上升”趋势,与天然沙土的临界状态行为一致^[26]。

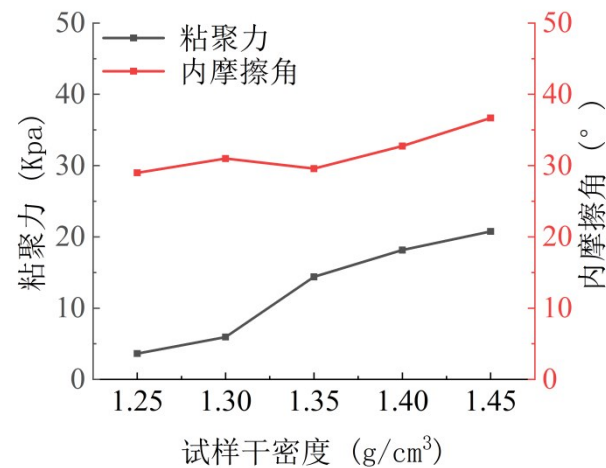


图 10 试样干密度对透明软岩抗剪强度的影响

Fig.10 Dry density effect on shear strength of transparent soft rock

2.2 相似材料力学参数的确定和正交试验

2.2.1 软岩相似材料力学参数的确定

在隧道体系中,其几何条件包括隧道的形状和位置,其主要参数为长度;其物理条件包括地质材料的物理力学性质,其主要参数为重力加速度 g 、密度 ρ 、应力 σ 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ 、变形模量 E 和泊松比 τ 等。用一般函数式表示

$$f(\tau, \rho, g, L, E, C, \varphi, \sigma) = 0$$

用量纲分析法可求得相似准则方程

$$f\left(\frac{\rho g L}{\tau}, \frac{E}{\tau}, \frac{C}{\tau}, \varphi, \frac{\sigma}{E}\right) = 0$$

以重庆鸡公咀隧道工程为例,围岩主要是泥岩夹砂岩(J1z时代土)平均重度为 2.5 g/cm³,摩擦角为 36°,黏聚力为约为 2.16 MPa。根据试验装置的尺寸,取几何相似常数 $C_L=150$ (量纲:L),可以避免

工作量太大或尺寸效应明显,试验中试样的密度约在 1.6 g/cm³ 左右,因此,密度相似常数为 $C_\rho=2.5/1.6=1.563$ (量纲:ML⁻³),重力加速度相似常数为 $C_g=1$ (量纲:LT⁻²)。

将几何相似常数 C_L 、密度相似常数 C_ρ 和重力加速度相似常数 C_g 作为基本物理量。隧道模型试验的常见物理量在 $[L^\alpha T^\beta M^\gamma]$ 和 $[(LT^{-2})^\alpha L^\beta (ML^{-3})^\gamma]$ 量纲系统中的单位见表 4。

表 4 隧道模型试验的常见物理量在 $[L^\alpha T^\beta M^\gamma]$ 和 $[(LT^{-2})^\alpha L^\beta (ML^{-3})^\gamma]$ 量纲系统中的表达形式

Table 4 Representation of common physical quantities in tunnel model tests under $[L^\alpha T^\beta M^\gamma]$ and $[(LT^{-2})^\alpha L^\beta (ML^{-3})^\gamma]$ dimensional systems

物理量	$[L^\alpha T^\beta M^\gamma]$ 量纲系统	$[(LT^{-2})^\alpha L^\beta (ML^{-3})^\gamma]$ 量纲系统
长度[L]	$M^0 L^1 T^0$	L
泊松比[ν]	$M^0 L^0 T^0$	1
内摩擦角[φ]	$M^0 L^0 T^0$	1
密度[ρ]	$M^1 L^{-3} T^0$	(ML^{-3})
应力[σ]	$M^1 L^{-1} T^{-2}$	$(LT^{-2})L(ML^{-3})$
黏聚力[C]	$M^1 L^{-1} T^{-2}$	$(LT^{-2})L(ML^{-3})$
变形模量[E]	$M^1 L^{-1} T^{-2}$	$(LT^{-2})L(ML^{-3})$
时间[t]	$M^0 L^0 T^1$	$(LT^{-2})^{-\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$

根据表 4 可以导出其他基本物理量的相似常数,再结合相似理论求得其他物理量相似常数(长度及密度等)。

$$C_E = C_\sigma = C_C = C_g^{-1} C_L^{-1} C_\rho^{-1} = 150 \times 1.563 = 234.45$$

$$C_\varphi = C_\theta = C_\mu = C_g^0 C_L^0 C_\rho^0 = 1$$

$$C_t = C_g^{-\frac{1}{2}} C_L^{\frac{1}{2}} C_\rho^0 = 12.25$$

根据重庆鸡公咀重叠隧道工程地质情况及量纲分析法,得出各材料原型和模型物理力学参数的理论值,见表 5。

表 5 相似材料原型和模型物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of prototype and model similar materials

材料	几何比尺	密度 ρ / (g/cm ³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
原型材料	150	2.5	2 160	36
模型材料	1	1.6	9.21	36

2.2.2 透明软岩正交试验结果分析

围绕隧道围岩理论值,结合影响因素试验结果确定正交试验因素与水平,如表 6。基于 L27(3³)正交试验设计,通过直剪试验测定了 27 组不同配比试样的黏聚力和内摩擦角,试验结果见表 7。

结合试验结果和极差图(图 11 和图 12),可见各因素对抗剪强度参数的影响呈现显著差异。

表 6 正交试验因素和水平

Table 6 Factors and levels of orthogonal experiment

因素	水平
硅粉相对石英砂的含量(%)	4、6和8
熔融石英砂的粒径	粒径组别 C、D 和 E
试样的干密度(g/cm ³)	1.30、1.35和1.40

表 7 正交试验方案及结果

Table 7 Orthogonal experimental design and results

组别	硅粉含量/%	粒径组别	干密度/(g/cm ³)	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 φ /°
1	4	C	1.30	16.33	33.03
2	4	C	1.35	17.75	33.53
3	4	C	1.40	18.51	34.77
4	4	D	1.30	6.53	35.08
5	4	D	1.35	9.60	36.87
6	4	D	1.40	12.20	37.46
7	4	E	1.30	15.68	34.01
8	4	E	1.35	19.16	34.82
9	4	E	1.40	21.02	35.01
10	6	C	1.30	23.19	30.63
11	6	C	1.35	27.77	31.61
12	6	C	1.40	31.88	32.00
13	6	D	1.30	10.98	34.51
14	6	D	1.35	17.61	36.55
15	6	D	1.40	25.48	37.15
16	6	E	1.30	17.56	34.65
17	6	E	1.35	20.60	35.88
18	6	E	1.40	24.17	36.11
19	8	C	1.30	25.32	36.16
20	8	C	1.35	29.56	37.36
21	8	C	1.40	33.65	38.09
22	8	D	1.30	24.16	36.00
23	8	D	1.35	25.71	36.99
24	8	D	1.40	30.09	37.55
25	8	E	1.30	23.68	36.01
26	8	E	1.35	25.71	36.47
27	8	E	1.40	30.95	37.43

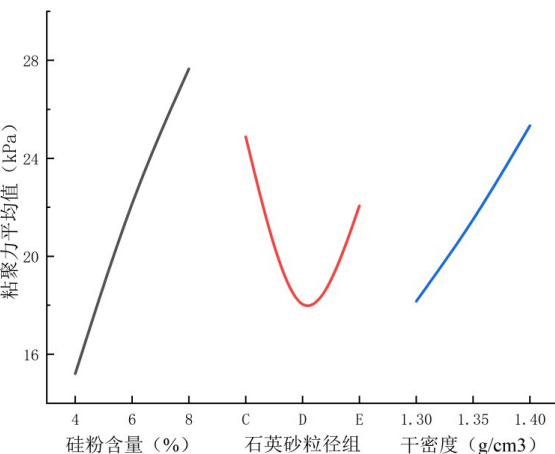


图 11 黏聚力影响因素极差图

Fig.11 Range chart of cohesion influencing factors

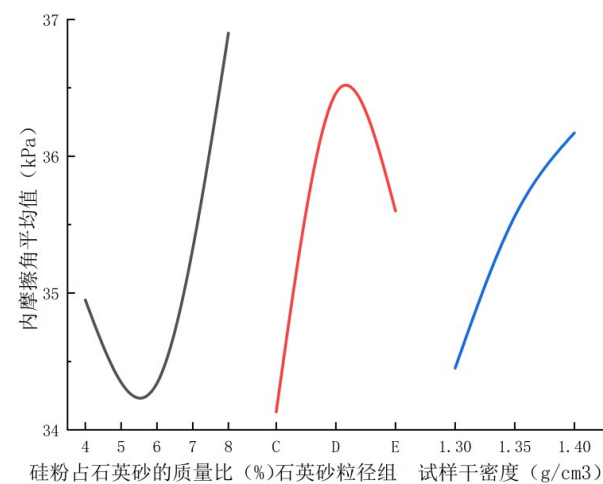


图 12 内摩擦角影响因素极差图

Fig.12 Range chart of internal friction angle influencing factors

当硅粉含量从4%增至8%时,黏聚力显著提升,且随含量增大呈近似线性增长趋势;而内摩擦角波动较小,表明硅粉含量主要通过增强颗粒间胶结作用提高黏聚力,对内摩擦角影响有限。

粒径组别D(0.5~1 mm 粒径占比75%)的试样表现出最优综合性能,其黏聚力(9.60~29.56 kPa)和内摩擦角(33.53°~37.36°)与目标值匹配度最高。粒径组别E(0.5~1 mm 粒径占比100%)因孔隙率过高导致黏聚力分散(6.53~25.32 kPa),而组别C(0.5~1 mm 粒径占比50%)因密实度不足导致内摩擦角偏低(30.63°~37.15°)。

干密度为1.35 g/cm³时,黏聚力(9.60~29.56 kPa)和内摩擦角(33.53°~37.36°)均达到最佳平衡;密度过低(1.30 g/cm³)时黏聚力下降约30%,过高(1.40 g/cm³)时因颗粒过度挤压导致内摩擦角增长趋缓。

通过极差分析发现,硅粉含量对黏聚力的贡献率最大(52%),试样干密度对内摩擦角的影响最显著(48%),而石英砂粒径组通过调控密实度间接影响两者(综合贡献率约30%)。最终优化配比为硅粉含量4%、粒径组别D、干密度1.35 g/cm³,其黏聚力(9.60 kPa)与内摩擦角(36.87°)与重庆鸡公咀隧道Ⅳ~Ⅴ级围岩(原型黏聚力2.16 MPa,内摩擦角36°)高度匹配,原型-模型参数对比见表8。表8显示,优化配比的黏聚力与内摩擦角误差均<5%,满足模型试验相似性要求^[27]。

该透明软岩的强度特性(黏聚力3~44 kPa,内摩擦角30°~38°)可覆盖砂土至软岩的力学范围,尤其适用于模拟低至中等黏聚力的软弱岩体(如泥岩、粉砂岩)及松散砂土,为隧道、边坡等岩土工程模型试验提供可视化材料支持。

表 8 原型-模型参数对比表

Table 8 Comparison of prototype and model parameters

对比项	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
模型理论值	9.21	36
试验最优值	9.60	36.87
匹配误差	4.2%	2.4%

2.3 讨论

在单因素试验中,硅粉含量对黏聚力的影响被高估,例如当硅粉含量为 10% 时,黏聚力达到 44 kPa。然而,正交试验结果显示,硅粉的实际有效范围为 4% 至 8%,这表明多因素交互作用会抑制极端配比的可行性。此外,正交试验还发现,干密度对内摩擦角的影响更为显著,揭示了密实度与粒径级配之间的协同效应。

与冷先伦等^[15]的研究相比,笔者通过正交试验量化了多因素交互作用,得出了硅粉含量与干密度的主导影响,而不仅仅依赖于单因素分析。同时,通过优化配比直接锚定实际工程参数(如黏聚力为 9.60 kPa),弥补了以往研究仅定性匹配的不足。

研究的配比适用于模拟黏聚力 ≤ 50 kPa、内摩擦角 $\leq 40^\circ$ 的软岩及松散土体,尤其适合浅埋隧道和低强度围岩的模型试验。然而,对于高黏聚力岩体(如硬质砂岩)或复杂地质条件(如节理发育岩体),需要调整硅粉含量与级配设计。此外,试验仅针对静态剪切条件,尚未研究动态荷载(如地震波)下的强度特性。未来研究可以引入纳米颗粒表面改性技术,以增强硅粉-石英砂界面的粘结强度,拓宽材料强度上限;同时结合数字图像相关(DIC)技术,实时观测剪切带演化,深化对破坏机理的研究。

3 结论

1) 硅粉含量是调控透明软岩黏聚力的关键因素,其增加通过纳米颗粒的“桥接效应”显著增强颗粒间胶结作用,使黏聚力呈现近似线性增长,但对内摩擦角影响微弱;熔融石英砂粒径组成通过密实度调控内摩擦角变化,单一粒径或双粒径混合的级配差异导致内摩擦角呈现先降后升的非单调趋势;试样干密度的提升通过颗粒互锁与孔隙率降低,同步增强黏聚力与内摩擦角,但两者随密实度变化的响应机制存在差异。

2) 基于正交试验的多因素交互分析,得出材料强度特性可通过组分调整精准匹配低至中等黏聚力岩土体的力学行为,为透明软岩在模型试验中模拟砂土至软岩的强度区间(黏聚力 3~44 kPa,内摩擦角 $30^\circ \sim 38^\circ$)提供了普适性设计依据。

3) 各因素对强度参数的贡献率分析表明,硅粉

含量主导黏聚力变化(贡献率 52%),干密度通过密实度调控内摩擦角(贡献率 48%),而粒径组别通过级配优化间接影响综合强度(贡献率 30%)。这一量化结果为透明软岩的定向设计与性能预测奠定了理论框架

4) 研究突破了传统透明材料强度模拟的局限性,通过多因素协同优化机制,实现了透明软岩强度特性的可控性与可扩展性,结合工程实例为岩土工程模型试验中复杂地质条件的可视化模拟提供了科学支撑。未来可通过界面改性动态荷载研究进一步拓展其应用边界。

参考文献

- [1] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry [J]. *Geotechnique*, 2003, 53 (7): 619-631.
- [2] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2003, 17(2): 88-96.
- [3] SANG Y, ZHAO J L, DUAN F H, et al. A novel automatic device to measure deformation inside transparent soil based on digital image correlation technology [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(3): 035202.
- [4] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Geotechnical properties of transparent silica [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 111-124.
- [5] LIU J Y, ISKANDER M G. Modelling capacity of transparent soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(4): 451-460.
- [6] ISKANDER M, LIU J Y. Spatial deformation measurement using transparent soil [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 33(4): 314-321.
- [7] ZHANG X R, KONG G Q, LIU H L, et al. Experimental and theoretical investigation of transparent sand composing of fused quartz and calcium bromide solution [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2021, 57(9): 1379-1393.
- [8] 魏平, 鲍宁, 魏静, 等. 熔融石英砂动力特性动三轴试验[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(2): 46-54.
WEI P, BAO N, WEI J, et al. Dynamic properties of fused silica sand based on dynamic triaxial test [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(2): 46-54. (in Chinese)
- [9] 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 G Q, SUN X J, LI H, et al. Effect of pore fluid on strength properties of transparent soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 377-384. (in Chinese)
- [10] YAN G X, MA Y, et al. The hydraulic properties of aquabeads considering forchheimer flow and local heterogeneity [J]. Geotechnical Testing Journal, 2022, 45(4): 891-900.
- [11] ISKANDER M G, LIU J Y, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 262-273.
- [12] 庞荣, 胡其志, 冷先伦, 等. 透明土强度特性与细观机制的试验研究[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(4): 47-51, 89.
- PANG R, HU Q Z, LENG X L, et al. Experimental study on strength characteristics and mesostructure mechanism of transparent soil [J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(4): 47-51, 89. (in Chinese)
- [13] WEI L T, XU Q, WANG S Y, et al. Development of transparent cemented soil for geotechnical laboratory modelling [J]. Engineering Geology, 2019, 262: 105354.
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 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 X L, WANG C, PANG R, et al. Experimental study on the strength characteristics of a transparent cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2059-2068, 2077. (in Chinese)
- [16] 严少洋, 焦华喆, 徐平, 等. 人工合成透明土在岩土工程模拟中的研究现状及展望[J]. 建设科技, 2017(22): 116-119.
- YAN S Y, JIAO H Z, XU P, et al. Research status and prospect of synthetic transparent soil in geotechnical engineering simulation [J]. Construction Science and Technology, 2017(22): 116-119. (in Chinese)
- [17] 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 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, 1958. (in Chinese)
- [18] MEI C, FANG Q, LUO H W, et al. A synthetic material to simulate soft rocks and its applications for model studies of socketed piles [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1565438.
- [19] DONG Y C, ZHANG H, WANG M N, et al. Variable model for mechanical parameters of soft rock and elastoplastic solutions for tunnels considering the influence of confining pressure [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1143003.
- [20] 王壮, 李驰, 丁选明. 基于透明土技术土岩边坡滑移机理的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 185-188.
- WANG Z, LI C, DING X M. Model tests on sliding mechanism of soil-rock slopes based on transparent soil technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 2): 185-188.
- [21] 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. (in Chinese)
- [22] 李亮. 透明土合成及物理力学特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LI L. Study on synthesis and physical and mechanical properties of transparent soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [23] 王橧橧, 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. (in Chinese)
- [24] KARL T. Theoretical Soil Mechanics [M]. Wiley, 1943.
- [25] BJERRUM L. Fundamental considerations on the shear strength of soil [J]. Géotechnique, 1951, 2(3): 209-218.
- [26] BEVERLOO W A, LENIGER H A, VAN DE VELDE J. The flow of granular solids through orifices [J]. Chemical Engineering Science, 1961, 15(3/4): 260-269.
- [27] LENG X L, WANG C, PANG R, et al. Material preparation and geotechnical properties of transparent cemented soil for physical modeling [J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 740388.