

## 隧道围岩透明相似材料强度特征与配合比研究

谢朋<sup>1</sup>, 李葱葱<sup>1</sup>, 段虎辰<sup>1†</sup>, 文海家<sup>2</sup>, 李良勇<sup>1</sup>, 李昭捷<sup>1</sup>, 王永卫<sup>1</sup>

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南海口 570228;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**随着透明化物理模型试验在隧道工程力学机制与变形特征研究中发挥越发显著的作用,同时满足透明度和相似原理要求的围岩相似材料成为保证试验结果与实际工程相契合的关键.本文基于正交试验数据的统计分析,总结配置的透明胶结土相似材料的强度特性,探索用于表征隧道围岩特性的相似材料配合比量化设计方法.首先,选取熔融石英砂、纳米级白炭黑、正十二烷混合 15#白油为原材料,设计 2 因素 3 水平的正交试验,完成重度、内摩擦角及黏聚力数据的测定;然后,应用串联法分别拟合表示重度、内摩擦角、黏聚力与石英砂粒径、胶石比(纳米级白炭黑与石英砂质量比)之间相互关系的多元非线性回归方程;最后,通过多元回归方程的联合求解,完成石英砂粒径、胶石比和几何相似常数的确定.试验结果表明:1)所配置的透明胶结土相似材料的重度、内摩擦角和黏聚力数值的变化区间分别为 16.13~12.53 kN/m<sup>3</sup>、27.07°~14.82°和 31~2.3 kPa,剪应力-剪切位移曲线均具有峰后平台型、峰后跌落型的特点;2)T 检验和 F 检验的结果显示拟合得到的三个非线性回归方程自变量对因变量影响极其显著,方程本身真实可靠;3)将重度和内摩擦角的回归方程联立,解算石英砂粒径和胶石比,求得的石英砂粒径和胶石比数值代入黏聚力回归方程完成黏聚力的计算,计算黏聚力与原地层黏聚力的比值,得几何相似常数.构建了一种新型的相似材料配合比和几何相似常数量化设计方法.研究成果以为隧道工程可视化物理模型试验设计提供理论支撑与数据参考.

**关键词:**隧道工程;量化设计方法;多元非线性回归;隧道围岩;透明胶结土

**中图分类号:**U451.5 **文献标志码:**A

## Study on the Strength Characteristics and the Mix Proportion Design Method of Similar Materials of Transparent Cemented Soil in Tunnel Surrounding Rock

XIE Peng<sup>1</sup>, LI Congcong<sup>1</sup>, DUAN Huchen<sup>1†</sup>, WEN Haijia<sup>2</sup>, LI Liangyong<sup>1</sup>,  
LI Zhaojie<sup>1</sup>, WANG Yongwei<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;

\* 收稿日期:2024-04-15

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(42207190, 42002293), National Natural Science Foundation of China(42207190, 42002293); 海南省自然科学基金资助项目(422RC599), Natural Science Foundation of Hainan Province(422RC599); 石家庄铁道大学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资助项目(KF2022-03), The Systematic Project of State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University(KF2022-03); 海南省院士创新平台科研项目(YSPTZX202320), Specific Research Fund of the Innovation Platform for Academicians of Hainan Province(YSPTZX202320); 海南大学科研启动项目[KYQD(2R)1969], Scientific Research Startup Foundation of Hainan University[KYQD(2R)1969]

**作者简介:**谢朋(1986—),男,河北承德人,海南大学讲师,博士

† 通信联系人, E-mail:21220856000146@hainanu.edu.cn

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The visualization physical modeling test plays an increasingly significant role in mechanical mechanism and deformation characteristics of tunnel engineering, and the surrounding rock similar material meeting the transparency and similarity theory is key to ensure the great agreement between the testing results and practical engineering. This paper summarizes the strength property of prepared transparent cemented soil with similar material based on statistical analysis of orthogonal test data, so as to explore the quantitative design method representing the mix proportion of similar material of tunnel surrounding rock. The experiment utilized molten quartz sand, nano-silica, and N-dodecane mixed with 15# white oil as raw materials, designing a 2-factor, 3-level orthogonal test to measure unit weight, internal friction angle, and cohesion. Using the concatenation method, multiple nonlinear regression equations were fitted to describe the relationships between unit weight, internal friction angle, cohesion, and both the particle size of quartz sand and the cement-stone ratio (the mass ratio of nano-silica to quartz sand). The joint solution of these regression equations was then employed to determine the optimal quartz sand particle size, cement-stone ratio, and geometric similarity constant. The test results indicate that: 1) the ranges for unit weight, internal friction angle, and cohesion of the transparent cemented soil are  $16.13\sim 12.53\text{ kN/m}^3$ ,  $27.07^\circ\sim 14.82^\circ$ , and  $31\sim 2.3\text{ kPa}$ , respectively, with shear stress-shear displacement curves displaying both post-peak platform and post-peak drop characteristics; 2) T-tests and F-tests reveal that the independent variables in the fitted nonlinear regression equations significantly influence the dependent variables, and the equations are authentic and reliable; 3) Combining the regression equations for specific gravity and internal friction angle, the optimal particle size and cement-stone ratio of quartz sand are calculated, which are then substituted into the cohesion regression equation to finalize the cohesion calculation. This study establishes a novel quantitative design method for determining similar material mix ratios and geometric similarity constants, providing a theoretical foundation and data reference for designing visual physical model tests in tunnel engineering.

**Key words:** tunnel engineering; quantitative design method; multiple nonlinear regression; tunnel surrounding rock; transparent cemented soil

近年来,随着海南自贸港、粤港澳大湾区、长江经济带及京津冀协调发展等一系列国家发展战略的制定和实施,中国的地下工程进入到了一个高速发展的时期<sup>[1]</sup>.隧道作为地下工程的重要组成部分,在突发性灾害发生时,其结构及内部环境往往产生多灾耦合及连锁事故,给人们的生命和财产带来极大的损害<sup>[2-4]</sup>.于是,明晰隧道失稳破坏的形成机制及演化规律是采取防控措施、减轻甚至避免灾害产生的关键,模型试验则是有效的解决方法.

隧道所处环境相对复杂,会受到包括高地应力、断层破碎带(软弱夹层)、不良地质、高岩溶水头等多种因素的影响<sup>[5]</sup>.对此,清华大学首次设计了三维多助力加载系统用于再现隧道开挖综合荷载释放的全过程<sup>[6]</sup>.此后,真三轴模型试验装置在隧道工程中推

广应用.进一步地,考虑到断层破碎带(软弱夹层)自身具有强度低、易变形和易透水的性质,加之结构的活效应会诱发包括塌陷、突水在内的地质灾害,因此,分别以断层破碎带(软弱夹层)的材料特性、数量、角度等作为切入点进行讨论<sup>[7]</sup>.另外,通过应力场、位移场和渗流场多场耦合作用下的隧道突水试验,揭示了隐伏溶洞尺寸、岩溶管道及地下暗河对隧道突水灾害的影响<sup>[8-10]</sup>.上述试验所采用材料多为石英砂、石膏和水泥等不透明材料,而在整个试验过程,一般采用X射线衍射、CT扫描、核磁共振等无损探测方法处理<sup>[11]</sup>.这些方法不仅价格昂贵、工艺繁琐,更为重要的是无法实现试验过程的可视化.于是,借助可视化的模型试验解锁对无损探测手段的依赖,成为研究工作开展的一个全新思路.起初,以

石英粉或玻璃珠为骨料,配以折射率相同的孔隙液体制作透明土,但存在一定局限性:使用石英粉制作的透明黏土的物理力学性质与天然黏土相似,但使用玻璃珠配置的试样透明度较差且变形特性与天然土壤相差较大.因此,使用二氧化硅为骨料启迪了更多科学工作者<sup>[12]</sup>;随后,以熔融石英砂、纳米级白炭黑、正十二烷混合15#白油等为基础材料配置的透明胶结土材料被引入<sup>[13]</sup>.此外,使用NaOH+U10粉末、无定型硅粉、沉淀白炭黑等新材料模拟软弱黏土的新思路也不断被提出<sup>[14-16]</sup>,采用蔗糖溶液、盐水混合物等代替矿物油作为透明土体孔隙液的试验亦有成果<sup>[17-19]</sup>.

综上所述,国内外学者相关研究已经取得了丰硕成果.不过,现阶段针对胶结土的研究主要集中在满足透明度的要求,缺乏对于物理力学参数相似性的考虑.建立一套透明胶结土相似材料与天然岩土体物理力学性质相对应的完整指标体系,进而更加明确既有透明胶结土相似材料的物理力学性质以及工程应用范围是亟待解决的问题.因此,本文选取熔融石英砂、纳米级白炭黑、正十二烷混合15#白油为原材料,通过正交试验完成包括重度、内摩擦角、黏聚力在内的主要物理力学参数数据的测定.一方面,通过试验数据的统计分析,总结透明胶结土材料的强度特征;另一方面,拟合表示重度、内摩擦角、黏聚力与石英砂粒径、胶石比之间相互关系的多元非线性回归方程,通过回归方程的联合求解探索用于表征隧道围岩特性的相似材料配合比量化设计方法.研究成果以期作为隧道工程可视化物理模型试验设计提供理论支撑与数据参考.

## 1 透明胶结土材料的正交试验

### 1.1 原材料的选取

参照冷先伦等<sup>[20]</sup>的研究,试验选用熔融石英砂(骨料)、纳米级白炭黑(胶结剂)、正十二烷与15#白油混合液(孔隙液体)为原材料(图1)进行透明胶结土的配置.根据透明原理,骨料、胶结料与孔隙液应保证为同一折射率.本试验原材料中,骨料、胶结剂和正十二烷与15#白油混合液的折射率均为1.4585.

### 1.2 正交试验方案设计

在进行正交试验设计时,应根据评价指标,合理确定指标的影响因子与因素水平<sup>[21]</sup>.强度是岩土体破坏的控制界限,而内摩擦角 $\varphi$ 和黏聚力 $c$ 是岩土体



图1 原材料

Fig.1 Raw materials

的强度指标<sup>[22]</sup>,岩土体同时也是隧道结构荷载的来源<sup>[23]</sup>,故选取内摩擦角 $\varphi$ 、重度 $\gamma$ 和黏聚力 $c$ 作为本试验重点考虑的评价指标.另外,颗粒间的摩擦力取决于颗粒表面的粗糙程度、密实度以及颗粒级配等,而颗粒间的黏聚力是由胶结作用和静电引力效应等因素引起<sup>[22]</sup>,因此,共选用石英砂粒径、胶石比2个影响因素.其中,石英砂粒径分别取5~3 mm、2~1 mm、1~0.5 mm三个水平;胶石比分别取10%、15%、20%三个水平,试验具体方案见表1.

表1 透明胶结土正交设计组合方案

Tab.1 Orthogonal design combination scheme of transparent cemented soil

试验号	列号			
	1(粒径)	2(胶石比)	3(空列)	4(空列)
1	1(5~3)	1(10%)	1	1
2	1(5~3)	2(15%)	2	2
3	1(5~3)	3(20%)	3	3
4	2(2~1)	1(10%)	2	3
5	2(2~1)	2(15%)	3	1
6	2(2~1)	3(20%)	1	2
7	3(1~0.5)	1(10%)	3	2
8	3(1~0.5)	2(15%)	1	3
9	3(1~0.5)	3(20%)	2	1

### 1.3 试样的制作与测试

透明胶结土试样分5步配置(图2):①混合油配置(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.

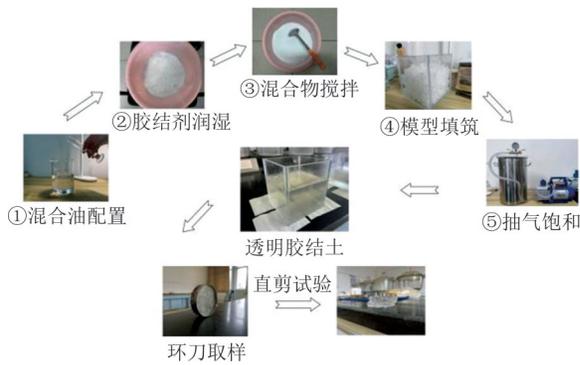


图2 试样的制作与测试

Fig.2 Preparation and test of sample

相关参数的测定应用环刀试验和固结快剪试验结果见表2<sup>[24]</sup>.剪切采用应变控制式直剪仪,试样制备完成后,施加50 kPa先期固结压力进行加压固结,达稳定标准后,分别施加100~400 kPa的法向力,剪切速率为1.2 mm/min,每组配比均设置重复试验.

表2 透明胶结土配比正交试验结果

Tab.2 Orthogonal test results of transparent cemented soil ratio

试验号	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		黏聚力 $c/\text{kPa}$	
	1	2	1	2	1	2
1	15.78	16.13	23.26	20.03	30.00	31.00
2	15.48	15.87	18.70	17.74	14.20	18.00
3	14.53	14.19	18.69	18.73	8.00	7.40
4	14.36	14.93	20.86	24.55	20.00	18.00
5	13.02	13.38	22.22	21.30	13.00	12.80
6	12.53	12.56	18.30	19.23	4.30	3.70
7	14.91	14.96	27.07	25.01	9.00	8.30
8	14.53	13.79	23.71	24.17	5.00	4.90
9	12.87	12.97	15.40	14.82	2.30	2.50

为了保证试验的良好效果,应注意以下几点:

1)经测定,室温在20℃与30℃时,15#白油折射率分别为1.459 9和1.457 5,温度过高会导致原材料折射率小于1.458 5,造成试验失败.因此,应保证室温恒定且低温.另外,当混合液折射率大于1.458 5时,需分次加入正十二烷调整,反之加入15#白油.

2)润湿胶结剂的混合油用量应合理把控.油量过多会导致润湿后胶结剂过稀而没有黏性,油量过少又不能充分浸润白炭黑导致胶结剂结块,应确定最低用量并依胶结剂状态适当增减混合油.

3)试样填筑时应避免按压.按压导致材料内部孔隙填充,孔隙油无法进入,透明胶结土大量气泡无法清除,影响透明度.试样应在饱和后按压,以提高

透明胶结土密实度.本试验试样均按压至无法继续密实,各试件密实度一致.

4)抽气饱和时应分步加入孔隙油.试件含油量过高会导致抽真空时大量混合油被气泡顶出试件,造成试验失败.

### 1.4 强度特征

为了直观表示强度变化特性,图3展示了粒径为1~0.5 mm、胶石比为10%条件下相似材料的剪应力-剪切位移曲线,曲线整体可划分为加载初期、峰前阶段及峰值阶段三部分.

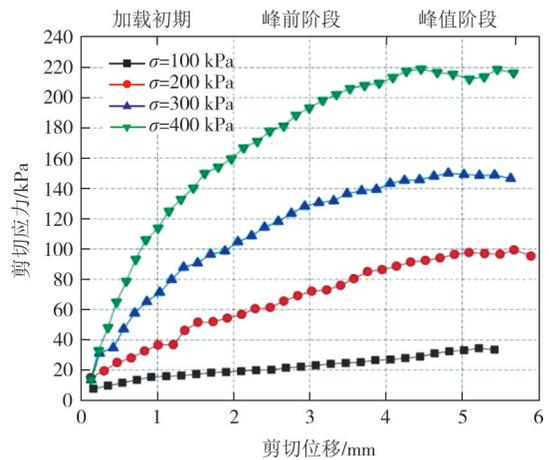


图3 剪切应力-剪切位移曲线

Fig.3 Shear stress-shear displacement curve

1)加载初期,曲线的斜率较小,剪应力增加缓慢而剪应变增加较快.

2)峰前阶段,随着剪切变形增加,材料变形以明显的弹性变形为主,剪应力-剪切位移曲线趋近于直线,在快达到峰值强度时曲线斜率逐渐变缓.

3)峰值阶段,随着剪切变形的继续增加,剪应力出现平台,上下波动.部分图像在峰值阶段剪切变形达到《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[24]</sup>中剪坏的标准后剪应力仍有增加,也有部分图像出现应力回落.

以上剪应力-剪切位移规律与岩石剪切变形本构关系中非规则砂岩、泥岩的剪切应力-剪切位移曲线变形特征近似,均具有峰后平台型、峰后跌落型的变形特点<sup>[25-26]</sup>,可以认为透明胶结土材料与隧道围岩的强度特征类似.

## 2 原始试验数据的回归分析

### 2.1 回归模型的拟合

为了量化表征岩土体不同的物理力学评价指标

(重度  $\gamma$ 、内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ ) 与影响因素(石英砂粒径、胶石比)的对应关系,基于试验数据的回归分析,得到了三个非线性方程<sup>[27]</sup>,方程的一般表达式如式(1):

$$Y_i = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1^2 + a_4 X_2^2 + a_5 X_1 X_2 + C \quad (1)$$

其中: $Y_i$ 为岩土体物理力学评价指标(重度  $Y_1$ 、内摩擦角  $Y_2$  和黏聚力  $Y_3$ ); $X_1$ 为石英砂粒径(将水平 5~3 mm、2~1 mm、1~0.5 mm 分别定量化为 4、3、2); $X_2$ 为胶石比(将水平 20%、15%、10% 分别定量化为 4、3、2); $a_i$ 为方程项系数( $i=1,2,3,4,5$ ); $C$ 为回归系数。

由回归方程拟合原理<sup>[27]</sup>和拟合样本容量建议指标<sup>[28]</sup>可知:本文拟合的非线性方程要求拟合样本量不能低于 6,且建议位于 10~20 适宜区内.本正交试验数据样本量为 18,满足非线性回归方程拟合要求.将表 3 数据代入,拟合得到岩土体物理力学评价指标(重度  $\gamma$ 、内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ )与影响因素(石英砂粒径、胶石比)的对应量化关系如式(2)~式(4)所示:

$$Y_1 = -6.88X_1 - 1.27X_2 + 1.20X_1^2 + 0.10X_1X_2 + 26.11 \quad (2)$$

$$Y_2 = -7.08X_1 - 4.10X_2 - 0.81X_2^2 + 2.00X_1X_2 + 44.16 \quad (3)$$

$$Y_3 = 20.21X_1 - 0.25X_1^2 + 0.83X_2^2 - 4.11X_1X_2 - 17.47 \quad (4)$$

## 2.2 回归模型的有效性检验

### 2.2.1 重度 $\gamma$ 回归模型的有效性

如表 3 所示,方程(2) 4 项(Intercept、 $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_1^2$  项)的 P-value 值小于 0.05,表示方程各项对因变量  $Y_1$  的影响极其显著,可由 Intercept、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_1^2$  和  $X_1X_2$  项线性表达  $Y_1$ ,方程各项相关。

由表 4 可知,方程(2) Multiple  $R=0.969\ 695\ 016$ 、 $R\ Square=0.940\ 308\ 424$ ,表示自变量  $X_1$ 、 $X_2$  与因变量  $Y_1$  极其相关,可由  $X_1$ 、 $X_2$  表达  $Y_1$ . Significance  $F$  在  $10^{-8}$  量级,表示模型真实可靠。

### 2.2.2 内摩擦角 $\varphi$ 回归模型的有效性

如表 5 所示,方程(3) 3 项(Intercept、 $X_1$  和  $X_1X_2$  项)的 P-value 值小于 0.05,表示方程各项对因变量  $Y_1$  的影响极其显著,可由 Intercept、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_2^2$  和  $X_1X_2$  项线性表达  $Y_2$ ,方程各项相关。

由表 6 可知,方程(3) Multiple  $R=0.887\ 668\ 022$ 、 $R\ Square=0.787\ 954\ 518$ ,表示自变量  $X_1$ 、 $X_2$  与因变量  $Y_2$  极其相关,可由  $X_1$ 、 $X_2$  表达  $Y_2$ . Significance  $F$  在  $10^{-4}$

表 3  $X_1$ 、 $X_2$  与  $Y_1$  回归分析表

Tab.3  $X_1$ ,  $X_2$  and  $Y_1$  regression analysis table

	标准误差	t Stat	P-value
Intercept	1.767 259 984	14.776 169 64	1.661 63E-09
$X_1$	1.047 772 745	-6.563 923 365	1.813 94E-05
$X_2$	0.360 481 56	-3.513 818 201	0.003 811 714
$X_1^2$	0.163 968 219	7.343 902 814	5.633E-06
$X_1X_2$	0.115 943 04	0.905 617 105	0.381 616 792
下限 95.0%		上限 95.0%	
Intercept	22.295 400 26	29.931 266 41	
$X_1$	-9.141 075 397	-4.613 924 603	
$X_2$	-2.045 439 73	-0.487 893 603	
$X_1^2$	0.849 934 865	1.558 398 468	
$X_1X_2$	-0.145 479 709	0.355 479 709	

注<sup>[29]</sup>: P-value—假定概率.在回归分析中,若方程各项 P-value 值有半数及以下小于 0.05,认为方程各项与因变量显著,小于 0.01 则为极其显著。

表 4  $X_1$ 、 $X_2$  与  $Y_1$  回归统计表

Tab.4  $X_1$ ,  $X_2$  and  $Y_1$  regression statistics table

Multiple R	R Square	Adjusted R Square
0.969 695 016	0.940 308 424	0.921 941 785
Significance F	标准误差	观测值
7.86E-08	0.327 936 438	18

注<sup>[29]</sup>: Multiple  $R$  为  $X$  与  $Y$  相关系数,其绝对值越靠近 1,相关性越强; $R\ Square$  为  $X$  与  $Y$  相关系数的平方,表达拟合  $Y$  的效果,其绝对值越靠近 1,拟合越好; Significance  $F$  为弃真概率,即模型为假的概率,其值越小越好。

表 5  $X_1$ 、 $X_2$  与  $Y_2$  回归分析表

Tab.5  $X_1$ ,  $X_2$  and  $Y_2$  regression analysis table

	标准误差	t Stat	P-value
Intercept	9.634 784 475	4.583 176 383	0.00 0513 164
$X_1$	1.965 280 813	-3.603 598 675	0.003 209 693
$X_2$	5.712 269 085	-0.717 534 475	0.485 738 814
$X_2^2$	0.893 925 323	-0.907 048 175	0.380 887 354
$X_1X_2$	0.632 100 658	3.162 075 493	0.007 495 343
下限 95.0%		上限 95.0%	
Intercept	23.343 230 27	64.972 603 06	
$X_1$	-11.327 814 4	-2.836 352 265	
$X_2$	-16.439 357 09	8.241 857 088	
$X_2^2$	-2.742 041 583	1.120 374 917	
$X_1X_2$	0.633 179 55	3.364 320 45	

量级,表示模型真实可靠。

### 2.2.3 黏聚力 $c$ 回归模型的有效性

如表 7 所示,方程(4) 4 项(Intercept、 $X_1$ 、 $X_2^2$  和  $X_1X_2$  项)的 P-value 值小于 0.05,表示方程各项对因变

表6  $X_1$ 、 $X_2$ 与 $Y_2$ 回归统计表  
Tab. 6  $X_1$ ,  $X_2$  and  $Y_2$  regression statistics table

Multiple R	R Square	Adjusted R Square
0.887 668 022	0.787 954 518	0.72 270 9754
Significance F	标准误差	观测值
0.000 256 248	1.787 850 647	18

量  $Y_3$  的影响极其显著, 可由 Intercept、 $X_1$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$  和  $X_1X_2$  项线性表达  $Y_3$ , 方程各项相关。

由表 8 可知, 方程(4) Multiple  $R=0.990\ 901\ 132$ 、 $R\ Square=0.981\ 885\ 053$ , 表示自变量  $X_1$ 、 $X_2$  与因变量

表7  $X_1$ 、 $X_2$ 与 $Y_3$ 回归分析表  
Tab. 7  $X_1$ ,  $X_2$  and  $Y_3$  regression analysis table

	标准误差	t Stat	P-value
Intercept	6.154 296 641	-2.837 943 186	0.013 976 24
$X_1$	4.271 678 481	4.732 658 286	0.000 391 466
$X_1^2$	0.672 580 893	-0.371 702 501	0.716 102 471
$X_2^2$	0.231 398 47	3.590 855 069	0.003 288 89
$X_1X_2$	0.448 615 973	-9.163 785 194	4.907 24E-07
下限 95.0%		上限 95.0%	
Intercept	-30.761 093 78	-4.169 994 651	
$X_1$	10.987 994 26	29.444 794 86	
$X_1^2$	-1.703 022 68	1.203 022 68	
$X_2^2$	0.331 012 367	1.330 824 368	
$X_1X_2$	-5.080 196 294	-3.141 844 522	

$Y_3$  极其相关, 可由  $X_1$ 、 $X_2$  表达  $Y_3$ , Significance  $F$  在  $10^{-11}$  量级, 表示模型真实可靠。

表8  $X_1$ 、 $X_2$ 与 $Y_3$ 回归统计表  
Tab. 8  $X_1$ ,  $X_2$  and  $Y_3$  regression statistics table

Multiple R	R Square	Adjusted R Square
0.990 901 132	0.981 885 053	0.976 311 223
Significance F	标准误差	观测值
3.510 99E-11	1.345 161 786	18

### 2.3 配合比设计方法的搭建

可视化隧道工程物理模型试验需要符合透明度和相似性理论的双重要求。相似理论规定原型与模型物理量的比值为相似比, 且无量纲物理量的相似比为 1。为保证材料物理性相似, 取重度和内摩擦角的相似比为 1<sup>[30]</sup>。对研究对象的实际工况, 岩土体的重度  $\gamma$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、黏聚力  $c$  已知。依据相似原理应该初始满足的相似比条件, 所配置相似材料的重度  $\gamma(Y_1)$ 、内摩擦角  $\varphi(Y_2)$  即确定。将  $Y_1$  和  $Y_2$  分别代入方程(2)、方程(3)并联立方程, 可求得参数石英砂粒径  $X_1$ 、胶石比  $X_2$ 。石英砂粒径  $X_1$ 、胶石比  $X_2$  求得后, 将  $X_1$ 、 $X_2$  代入方程(4), 求得黏聚力  $c(Y_3)$ 。将  $Y_3$  与原地层黏聚力作比值, 得几何相似常数, 模型尺寸确定, 所形成的量化设计方法如图 4 所示。

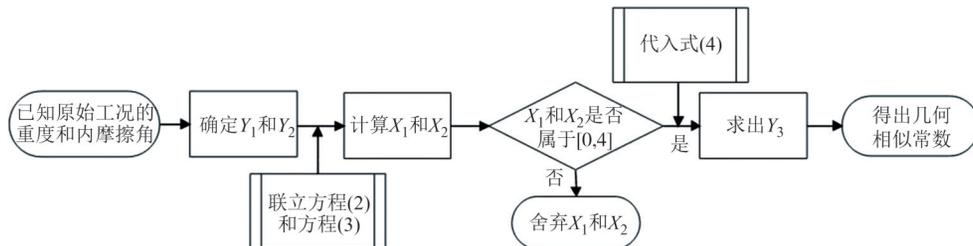


图4 量化设计方法

Fig.4 Quantitative design method

使用量化设计方法时, 应当注意的是:

- 1) 方程联立求参时,  $X_1$ 、 $X_2$  应取满足  $[0, 4]$  区间内的所有实数解;
- 2) 为保证石英砂粒径单一均匀, 避免级配,  $X_1$  尽量取整;
- 3)  $X_2$  通过插值法求取, 如求得  $X_2$  为 1.4, 则对应胶石比可取 7%。

### 2.4 实例应用

根据《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)<sup>[31]</sup>、《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)<sup>[32]</sup> 与王明年等<sup>[33]</sup> 的研究, 以 V 级软弱围岩为模拟对象, 查阅其物理力学参数整体区间, 确

定某 V 级软弱原型围岩物理力学参数如表 9 所示。

表9 某 V 级软弱原型围岩物理力学参数  
Tab.9 Physical and mechanical parameters of weak prototype rock of grade V

围岩级别	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 $c/kPa$
V 级围岩	16	25	200

由实际工况围岩的物理力学参数(表 9)可知, 围岩的重度  $\gamma$  和内摩擦角  $\varphi$  分别为  $16\ kN/m^3$  和  $25^\circ$ 。依据搭建的透明相似材料配合比量化设计方法,  $Y_1$  和  $Y_2$  的取值分别为 16 和 25。联立方程(2)(3), 使用 MATLAB 求解得  $X_1=2.750\ 8$ ,  $X_2=0.266\ 1$ 。对照 2.1 节,

石英砂粒径可取 2~1 mm, 胶石比插值求得为 1.331%。将  $X_1$ 、 $X_2$  代入方程(4), 得  $Y_3=33.282 2$ , 即材料预期黏聚力为 33.282 2 kPa。

为了从定性和定量的角度论证配比方法的工程应用可行性, 按照上述配比配置透明胶结土, 分别进行固结快剪试验和固结不排水剪试验。

由相似材料固结快剪试验的剪应力-剪切位移曲线(图 5)可知: 实例配置的相似材料剪应力-剪切位移曲线可划分为加载初期、峰前阶段及峰值阶段三部分, 与实际工况的非规则砂岩、泥岩的剪切应力-剪切位移曲线变形特征近似, 可以定性认为相似材料与隧道围岩的强度特征类似。

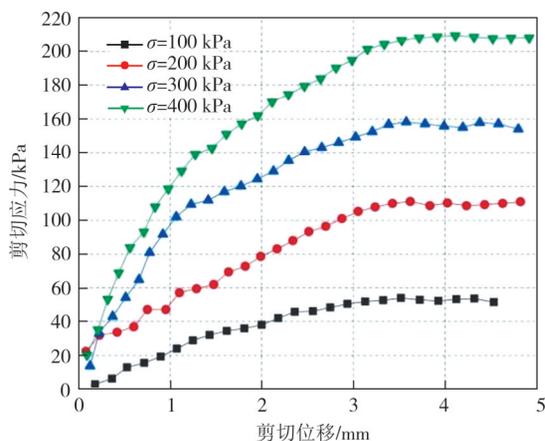
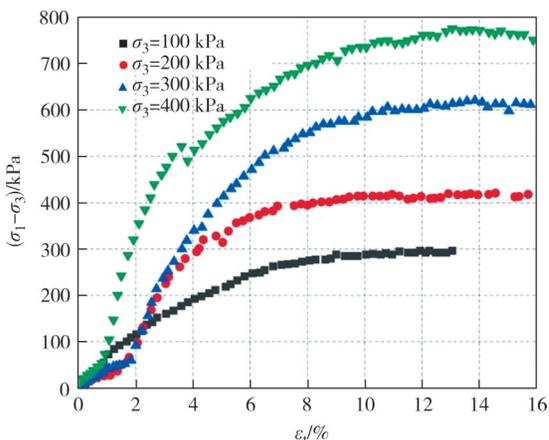


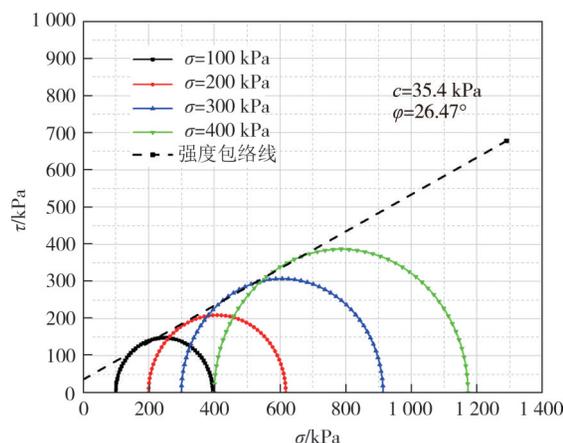
图 5 相似材料剪应力-剪切位移曲线

Fig.5 Shear stress-shear displacement curve of similar material

进一步地, 通过固结不排水剪试验绘制相似材料应力-应变曲线与强度包线(图 6)。相似材料物理力学参数计算值、试验值见表 10。由固结不排水剪试验曲线可知: 工程原型与试验模型材料的重度和内摩擦角相似比为 1, 满足相似准则要求; 试验测定的强度参数与回归方程的计算值接近。从定量角度验证了方程的有效性与配比方法的可行性。



(a) 应力-应变曲线



(b) 固结不排水剪试验强度包线

图 6 相似材料固结不排水剪试验曲线

Fig.6 Consolidated undrained test of similar material

表 10 相似材料物理力学参数计算值和试验值

Tab. 10 Physical and mechanical parameters calculated values and experimental values of similar materials

数据类别	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^\circ$ )	黏聚力 $c$ / kPa
公式计算值	16	25	33.282 2
固结不排水剪试验值	15.57	26.47	35.42

### 3 结论

1) 所配置的透明胶结土材料的重度、内摩擦角和黏聚力数值的变化区间分别为 16.13~12.53  $\text{kN/m}^3$ 、 $27.07^\circ \sim 14.82^\circ$  和 31~2.3 kPa, 并且, 剪应力-剪切位移曲线均具有峰后平台型、峰后跌落型的特点。在参数范围和强度特征两个方面均满足相似原理和透明度条件下, 可以用于模拟 V、VI 级以及部分 IV 级隧道围岩的相似材料。

2) 通过试验数据的串联法拟合, 得到了可以表征重度、内摩擦角、黏聚力与石英砂粒径、胶石比(纳米级白炭黑与石英砂质量比)之间相互关系的多元非线性回归方程。进一步地, F 检验和 T 检验结果显示三个回归方程的 Multiple R 值均大于 0.88, Significance F 值均趋于 0。方程自变量对因变量影响极其显著, 方程本身真实可靠。

3) 构建了相似材料配合比和几何相似常数的量化设计方法。首先以现场工程资料为基础, 将重度和内摩擦角的回归方程联立, 确定石英砂粒径和胶石比; 然后将确定的石英砂粒径和胶石比代入黏聚力的回归方程解算出黏聚力; 最后, 回归方程解算的黏

聚力与原地层黏聚力作比值,得几何相似常数。

## 参考文献

- [1] 陈湘生,徐志豪,包小华,等.中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J].中国公路学报,2020,33(12):1-14.  
CHEN X S, XU Z H, BAO X H, et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 1-14. (in Chinese)
- [2] 张俊儒,吴洁,严丛文,等.中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展[J].中国公路学报,2020,33(1):14-31.  
ZHANG J R, WU J, YAN C W, et al. Construction technology of super-large section of highway tunnels with four or more lanes in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 14-31. (in Chinese)
- [3] 武松,汤华,罗红星,等.浅埋大断面公路隧道渐进破坏规律与安全控制[J].中国公路学报,2019,32(12):205-216.  
WU S, TANG H, LUO H X, et al. Progressive failure law and control criterion for safe construction of shallow buried highway tunnel with different grades of surrounding rock [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 205-216. (in Chinese)
- [4] 禹海涛,袁勇.长大隧道地震响应分析与试验方法新进展[J].中国公路学报,2018,31(10):19-35.  
YU H T, YUAN Y. Review on seismic response analysis and test methods for long and large tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 19-35. (in Chinese)
- [5] 刘博,徐飞,赵维刚,等.隧道工程结构模型试验系统研究综述与展望[J].岩土力学,2022,43(增刊1):452-468.  
LIU B, XU F, ZHAO W G, et al. Review and prospect of model test system for tunnel engineering structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Sup.1): 452-468. (in Chinese)
- [6] 李仲奎,卢达溶,中山元,等.三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1430-1436.  
LI Z K, LU D R, NAKAYAMA H, et al. Development and application of new technology for 3D geo-mechanics model test of large underground houses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1430-1436. (in Chinese)
- [7] ZAHERI M, RANJBARNIA M, DIAS D, et al. Performance of segmental and shotcrete linings in shallow tunnels crossing a transverse strike-slip faulting [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 23: 100333.
- [8] 李利平,李术才,赵勇,等.超大断面隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程三维地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):550-560.  
LI L P, LI S C, ZHAO Y, et al. 3D geomechanical model for progressive failure progress of weak broken surrounding rock in super large section tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 550-560. (in Chinese)
- [9] 李术才,许振浩,黄鑫,等.隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069.  
LI S C, XU Z H, HUANG X, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069. (in Chinese)
- [10] LÜ Y X, JIANG Y J, HU W, et al. A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in Karst areas: current status, challenges, and perspectives [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124891.
- [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(增刊1):141-145.  
WU Y D, CHEN M J, ZHOU Y F, et al. Study on preparation and basic characteristics of new transparent clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup.1): 141-145. (in Chinese)
- [12] CHEN J D, WADA N. Visualization of immiscible displacement in a three-dimensional transparent porous medium [J]. Experiments in Fluids, 1986, 4(6): 336-338.
- [13] 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. (in Chinese)
- [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] 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(增刊2):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(Sup.2): 53-56. (in Chinese)
- [16] 俞东伟,童凯凯,蒋军.沉淀白炭黑配制透明土特性探究[J].低温建筑技术,2018,40(5):123-126.  
YU D W, TONG K K, JIANG J. Geotechnical properties of precipitated-silica-made transparent soil [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(5): 123-126. (in Chinese)
- [17] ZHANG W G, GU X, ZHONG W H, et al. Review of transparent soil model testing technique for underground construction: ground visualization and result digitalization [J]. Underground Space, 2022, 7(4): 702-723.
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 冷先伦, 王川, 盛谦, 等. 基于透明相似模型试验的主控裂隙边坡变形破坏演化机制研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(5): 1283–1294.
- LENG X L, WANG C, SHENG Q, et al. Evolution mechanism of deformation and failure of rock slope with controlling fissure through transparent physical model experiments [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(5): 1283–1294. (in Chinese)
- [21] 汤劲松, 李梓亮, 赵书银, 等. 盾构隧道下穿砌体结构的洞内深孔注浆加固参数分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(2): 421–433.
- TANG J S, LI Z L, ZHAO S Y, et al. Analysis on reinforcement parameters of deep-hole grouting in tunnel for shield tunnel undercrossing masonry structure [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(2): 421–433. (in Chinese)
- [22] 李广信, 张丙印, 于玉贞. *土力学*[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- LI G X, ZHANG B Y, YU Y Z. *Soil mechanics* [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [23] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 盾构隧道与地层相互作用的模型试验设计[J]. *铁道学报*, 2018, 40(6): 127–135.
- HUANG D W, ZHOU S H, FENG Q S, et al. Scaled model test design for interaction between shield tunnel and stratum [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(6): 127–135. (in Chinese)
- [24] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] 张桂民, 李银平, 杨春和, 等. 岩石直剪峰后曲线与抗剪强度参数关系探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增刊1): 2981–2988.
- ZHANG G M, LI Y P, YANG C H, et al. Discussion on relationship between post-peak curves and shear strength parameters of rocks subjected to direct shear tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Sup.1): 2981–2988. (in Chinese)
- [27] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. *概率论与数理统计*[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- SHENG Z, XIE S Q, PAN C Y. *Probability and mathematical statistics* [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [28] GREEN S B. How many subjects does it take to do a regression analysis [J]. *Multivariate Behavioral Research*, 1991, 26(3): 499–510.
- [29] 李云雁, 胡传荣. *试验设计与数据处理*[M]. 3版. 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. (in Chinese)
- [30] BERTHOZ N, BRANQUE D, WONG H, et al. TBM soft ground interaction: experimental study on a 1g reduced-scale EPBS model [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 72: 189–209.
- [31] 公路隧道设计规范 第一册 土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Specifications for design of highway tunnels section 1 civil engineering: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [32] 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- Code for design of railway tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [33] 王明年, 魏龙海, 李海军, 等. 公路隧道围岩亚级物理力学参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2252–2259.
- WANG M N, WEI L H, LI H J, et al. Research on mechanical parameters of subclassification rock mass of highway tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2252–2259. (in Chinese)