

断层破碎带隧道预注浆模型试验相似材料试验

郑坤隆^{1,2},王剑云^{1*},令狐延²,丁亚特²,张玉军²,王志丰³

(1.西安交通大学 人居环境与建筑工程学院,陕西 西安 710049;2.中建丝路建设投资有限公司,陕西 西安 710065;3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了获得匹配度广、制备方法简便的隧道模型试验相似材料,以满足研究渗透结晶型浆液注浆效果的隧道断层破碎带预注浆模型试验要求,该文选择石膏、水泥、河砂、机制砂等工程材料,通过相似常数计算、材料筛选、性能试验等方法制备围岩、破碎带和隧道衬砌相似材料。结果表明:确定了 $C_1=50$ 、 $C_7=1$ 、 $C_E=50$ 、 $C_Q=2\ 500$ 等相似常数,以优化材料配比和制备工艺为基础开展试验;使用水泥、河砂、石膏等制备其重度、抗压强度、弹性模量变化范围分别为 $16.65\sim 17.58\text{ kN/m}^3$ 、 $0.21\sim 0.93\text{ MPa}$ 和 $29.72\sim 113.74\text{ MPa}$ 的相似材料。当 $m_{\text{河砂}}:m_{\text{石膏}}:m_{\text{水泥}}:m_{\text{水}}=1:0.15:0.03:0.04$ 时,所制备的材料满足试验要求;选择平均粒径约为 0.4 mm 的机制砂作为破碎带相似材料,有效规避粒径效应的同时又能合理模拟岩土体松散破碎的特点;使用石膏、重晶石粉、水泥等制备弹性模量为 $0.38\sim 0.62\text{ GPa}$ 的相似材料,当 $m_{\text{石膏}}:m_{\text{重晶石粉}}:m_{\text{水泥}}:m_{\text{水}}=1:0.09:0.05:1.4$ 时,所制备的材料满足试验要求,并使用自制PVC拼装模具浇注。该研究表明围岩、断层和衬砌的整套隧道相似材料均能满足隧道断层预注浆模型试验的相似关系要求,同时可以通过调整配比,为同类工程模拟提供更多材料选择。

关键词:隧道注浆;模型试验;渗透结晶型浆液;相似材料;试验研究

中图分类号:U455.49

文献标志码:A

Similar Materials for Tunnel Pre-Grouting Model Test in Fault Fracture Zone

ZHENG Kunlong^{1,2}, WANG Jianyun^{1*}, LINGHU Yan², DING Yate², ZHANG Yujun², WANG Zhifeng³

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

2. China State Construction Silk Road Investment Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to obtain similar materials for tunnel model tests with wide matching and simple preparation methods, engineering materials such as gypsum, cement, river sand, and machine-made sand were selected, so as to meet the requirements of pre-grouting model tests for tunnel fault fracture zone that investigate the grouting effect of permeable crystalline slurry. Similar materials for surrounding rock, fracture zone, and tunnel lining were prepared through methods such as similarity constant calculation, material selection, and performance testing. The results show that the similarity constant was determined, such as $C_1=50$, $C_7=1$, $C_E=50$, and $C_Q=2\ 500$. The experiment is conducted based on an optimized material ratio and preparation process. Similar materials with weight, compressive strength, and elastic modulus ranging from 16.65 to 17.58 kN/m^3 , 0.21 to 0.93 MPa , and 29.72 to 113.74 MPa are prepared by using cement, river sand, and gypsum. When $m_{\text{RS}}:m_{\text{G}}:m_{\text{C}}:m_{\text{W}}=1:0.15:0.03:0.04$, the prepared materials meet the test requirements. Selecting machine-made sand with an average particle size of approximately 0.4 mm as a similar material for the fracture zone can effectively avoid particle size effects and reasonably simulate the characteristics of loose and broken rock and soil. Similar materials with an elastic modulus of $0.38\sim 0.62\text{ GPa}$ are prepared by using gypsum, barite powder, and cement. When $m_{\text{G}}:m_{\text{BP}}:m_{\text{C}}:m_{\text{W}}=1:0.09:0.05:1.4$, the prepared materials meet the test requirements, and the self-made polyvinyl chloride (PVC) assembly mould is used for pouring. The results indicate that similar materials of surrounding rock, faults, and lining all meet the similarity relationship requirements of tunnel fault

收稿日期:2024-01-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178310)

作者简介:郑坤隆,男,博士(后),工程师. E-mail:kunlongzheng@163.com

*通信作者:王剑云,女,博士,教授. E-mail:jianyun.wang@xjtu.edu.cn

pre-grouting model tests. At the same time, by adjusting the ratio, the research results can provide more material choices for similar engineering simulations.

Keywords: tunnel grouting; model test; permeable crystalline slurry; similar material; experimental study

0 引言

渗透结晶型材料是一种水泥基类无机防水材料,广泛应用于混凝土结构防渗防水工程中,该材料中的活性物质和催化剂等可以与混凝土中的钙离子、阴离子等反应生成不溶于水的结晶体,从而堵塞结构缝隙,提升结构防渗能力。基于材料的作用机理和效果,将其引入隧道注浆工程中,与传统的水泥等材料结合,制备出渗透结晶型浆液。这种浆液兼顾了水泥基浆液强度高、无污染等特点,具有良好的抗渗防水能力。此浆液仍处于试验研究阶段,尚未在实际工程中应用^[1-2]。当隧道穿过含水或富水断层破碎带时,由于地层复杂多变、稳定性差,容易发生塌方、冒顶和突涌水等病害;而预先向破碎带内注浆,可以在一定程度上提高围岩结构稳定性,减少或杜绝此类问题的发生^[3-7]。因此,为了确定新型渗透结晶型浆液的工程效果,课题组结合现有资源,选择室内相似模型试验,模拟断层破碎带中预注浆的情况,以研究其防治隧道开挖发生水灾类病害的能力^[8-9]。

以相似理论为基础,通过相似判据和相似常数使实际工程原型与模型试验建立合理联系,设计本次试验^[10-11]。本次断层破碎带隧道预注浆模拟试验中所需的相似材料包括:隧道围岩相似材料、断层破碎带和隧道衬砌相似材料。由于试验中涉及富水断层,因此相似材料需要具有一定的流-固耦合特征^[12]。目前土木工程中对单相物理场的相似材料研究已取得了一定成果,但对流-固耦合类围岩相似材料研究仍进展缓慢^[13-14]。现有各类围岩相似材料虽各有优点,但仍存在一定不足,例如:将硅油与凡士林混合作为材料胶结剂使用,可以获得塑性高、强度低的隔水围岩相似材料,但此方法不宜用于强度高的围岩模型;若想获得强度高且遇水稳定、不崩解的围岩相似材料,可以使用石蜡作为胶凝剂,但石蜡对温度控制要求高,使得材料制备过程复杂、周期长,影响试验进度;使用硼砂、碳酸钙和石膏等材料可配制出模拟采场底板突水的围岩材料,但由于石膏吸水软化,需要合理控制石膏含量,避免材料软化速率过快^[15-17]。由此可见,目前围岩、隧道衬砌等相似材料

还存在一些不足。为了确定一种配比合理、制备简便、适用性广的模型相似材料,用于模拟隧道开挖靠近断层,在断层内预注浆等工程,在现有研究基础上,选择水泥、石膏、重晶石粉、砂等材料,设计一套断层破碎带、围岩、隧道衬砌相似材料,用于渗透结晶型浆液注浆效果试验研究,并为同类工程研究提供参考和借鉴^[18]。在下一阶段的试验中,隧道预注浆与模型是研究内容和载体的关系,二者相辅相成,共同确保试验顺利达到预期效果。

1 依托工程

为了使渗透结晶型浆液的工程性能研究更加准确、贴近实际,课题组根据现有资源,以包茂高速公路某隧道为依托工程,进行渗透结晶型浆液室内模型试验设计。此隧道为分离式双洞四车道设计,所在区域部分位置的地层受多次地质运动影响,存在产状、结构各异的褶皱或断层;区域内地表水源补给充分,水源进入沿线不良地质构造中易形成含水或富水破碎带。为了避免隧道穿越断层时发生水灾类病害,一般情况下可以通过技术手段确定破碎带位置,并提前在区域内进行注浆施工,以提高围岩的稳定性和防水性,从而确保隧道的顺利施工。

2 相似关系确定

模型试验研究中,合理确定相似关系和相似常数是保证试验有效反映工程实际的重要前提。本次使用量纲矩阵来确定模型试验的相似关系^[19]。试验中涉及地层、水系、结构等系统,具体物理系统参数包括地质参数、隧道结构参数、渗流和物理场响应参数。对各系统的参数进行整理,可归纳成以下几类:几何尺寸 $l(a_1)$ 、重度 $\gamma(a_2)$ 、黏聚力 $c(a_3)$ 、内摩擦角 $\varphi(a_4)$ 、抗压强度 $p(a_5)$ 、渗透系数 $k(a_6)$ 、泊松比 $\mu(a_7)$ 、弹性模量 $E(a_8)$ 、时间 $T(a_9)$ 、水流量 $Q(a_{10})$ 、应力 $\sigma(a_{11})$ 和应变 $\varepsilon(a_{12})$ 。其中,黏聚力 c 、抗压强度 p 、弹性模量 E 和应力 σ 的量纲均为 $ML^{-1}T^{-2}$,内摩擦角 φ 、泊松比 μ 和应变 ε 均为无量纲。根据相似第二定理,各组物理量整理为一般函数方程由式(1)表示,再改写成判据方程形式,由式(2)表示:

$$f(l, \gamma, C, \varphi, p, k, \mu, E, T, Q, \sigma, \varepsilon) = 0 \quad (1)$$

$$\pi = l^{a_1} \gamma^{a_2} C^{a_3} \varphi^{a_4} p^{a_5} k^{a_6} \mu^{a_7} E^{a_8} T^{a_9} Q^{a_{10}} \sigma^{a_{11}} \varepsilon^{a_{12}} \quad (2)$$

选取质量系统,质量(M)、长度(L)、时间(T)为基本量纲,则各物理量可用基本量纲表示,见表1。

表1 模型试验量纲矩阵

Table 1 Dimensional matrix of model test

参数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
M	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
L	1	-2	-1	0	-1	1	0	-1	0	3	-1	0
T	0	-2	-2	0	-2	-1	0	-2	1	-1	-2	0

根据表1建立指数方程,选取相互独立的几何尺寸 $l(a_1)$ 、重度 $\gamma(a_2)$ 、渗透系数 $k(a_6)$ 作为基本物理量来推导各物理量的相似关系,得到试验的 π 矩阵表,见表2。

表2 π 矩阵表

Table 2 Matrix of π

参数	a_3	a_4	a_5	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_2	a_6	a_1
π_1	1									-1	0	-1
π_2		1								0	0	0
π_3			1							-1	0	-1
π_4				1						0	0	0
π_5					1					-1	0	-1
π_6						1				0	1	-1
π_7							1			0	-1	-2
π_8								1		-1	0	-1
π_9									1	0	0	0

根据 π 矩阵表中内容,得到如下的相似常数关系式:

$$C_c = C_\gamma C_1, C_p = C_\gamma C_1, C_E = C_\gamma C_1, C_T = C_l / C_k, \quad (3)$$

$$C_Q = C_l^2 C_k, C_\sigma = C_\gamma C_1, C_\varphi = C_\mu = C_\varepsilon = 1$$

模型试验箱的长×宽×高为320 cm×65 cm×200 cm,隧道实际开挖平面尺寸为1 238 cm×1 035 cm,衬砌厚度为60 cm。模型试验中,围岩为隧道直径的3~5倍时,认为围岩对隧道的影响情况与实际工程较为相似。考虑模型箱尺寸和实际隧道条件,确定试验中的几何尺寸相似常数为50,重度和渗透系数相似常数均为1,并根据相似判据确定其余物理量的具体相似常数值,如表3所示。

3 隧道围岩相似材料研究

对现有资料进行研究可知,流-固耦合相似材料具备以下特点:材料在遇水或含水时,破坏过程逐渐变化;材料具备一定强度,在产生局部破坏时仍然可

以抵挡一定程度的富水软化作用;材料的相关力学参数要与实际围岩保持相似关系^[4,20-22]。在上述特点的约束下,本次试验中围岩相似材料选择河砂、水泥、石膏和水进行混合制备,并根据相似关系使相似围岩参数尽可能接近理想型,围岩原型与模型相关物理量见表4。相似原材料中,石膏遇水软化,可以使相似材料遇水破坏过程具有渐变特性;水泥作为凝胶剂、河砂作为骨架,共同提升材料力学特性;水可以提升材料胶结性^[21,23]。材料中,河砂为中砂,水泥为“海螺牌”复合硅酸盐水泥P·C32.5R,石膏粉为1 500目95白度,各原材料样式如图1所示。

表3 模型试验中各物理量的相似常数

Table 3 Similarity constants of various physical quantities in model test

物理量	符号	量纲	相似常数关系式	相似常数
几何尺寸	l	[L]	C_l	50
重度	γ	[ML ⁻² T ⁻²]	C_γ	1
渗透系数	k	[LT ⁻¹]	C_k	1
黏聚力	c	[ML ⁻¹ T ⁻²]	$C_c = C_\gamma C_1$	50
内摩擦角	φ	[1]	1	1
抗压强度	p	[ML ⁻¹ T ⁻²]	$C_p = C_\gamma C_1$	50
泊松比	μ	[1]	1	1
弹性模量	E	[ML ⁻¹ T ⁻²]	$C_E = C_\gamma C_1$	50
时间	T	[T]	$C_T = C_l / C_k$	50
流量	Q	[L ³ T ⁻¹]	$C_Q = C_l^2 C_k$	2 500
应力	σ	[ML ⁻¹ T ⁻²]	$C_\sigma = C_\gamma C_1$	50
应变	ε	[1]	1	1

表4 原型与模型相关物理量换算表

Table 4 Physical quantity conversion of prototype and model

物理量	弹性模量/ GPa	重度/ (kN·m ⁻³)	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)
实际围岩	1~2	18.1	1.16×10 ⁻³
换算后相似围岩	0.02~0.04	18.1	1.16×10 ⁻³
相似常数	50	1	1

为了获得应用范围广且制备方法简单的改进型流-固耦合相似材料,本试验以细化材料配比和优化工艺为基础,分别从材料的力学性能和水理性能两个方面进行试验研究,其中,弹性模量和重度侧重于力学性能,而渗透系数侧重于水理性能。在确保材料结构稳定的前提下,使模型的渗透性与实际围岩较为接近,为此,分别对不同配比的试样进行无侧限

抗压强度、重度和渗透系数测定,并根据结果确定各试样的弹性模量、重度和渗透系数,最终筛选出符合模型要求的相似材料。各组试样配比情况见表 5。

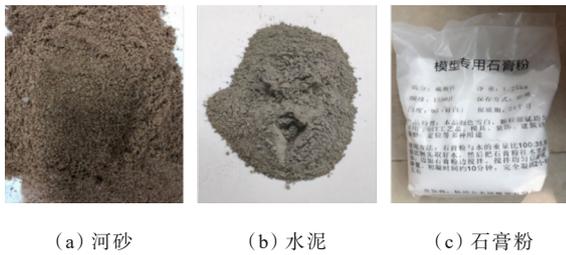


图 1 围岩相似材料试验主要原材料

Figure 1 Main raw materials for similar material test of surrounding rock

表 5 各组围岩相似材料的配比情况

Table 5 Ratio of similar materials for surrounding rock in each group

组号	砂用量/g	灰砂比/%	水砂比/%	膏砂比/%
1	1 500	3	10	15
2	1 500	3	9	15
3	1 500	3	8	15
4	1 500	3	7	15
5	1 500	3	6	15
6	1 500	3	5	15
7	1 500	3	4	15
8	1 500	4	8	15
9	1 500	5	8	15
10	1 500	6	8	15
11	1 500	7	8	15
12	1 500	8	8	15

3.1 围岩相似材料弹性模量测定试验

普通材料弹性变形阶段的应力和应变成正比例关系,比例系数为弹性模量。因此,利用各试样无侧限抗压强度结果,绘制出应力-应变曲线,换算弹性变形区间的斜率,得到材料的弹性模量值。试验中使用尺寸为 $100\text{ mm} \times \phi 50\text{ mm}$ 的自制空芯有底硬塑模具,具体试验过程如图 2 所示,试验结果见表 6。



(a) 原材料准备 (b) 原材料搅拌 (c) 模具装填 (d) 试件抗压试验

图 2 围岩相似材料试验流程图

Figure 2 Flow chart of similar material test for surrounding rock

表 6 各组围岩相似材料的抗压强度试验结果

Table 6 Compressive strength test results of similar materials for surrounding rock in each group

组号	极限破坏荷载/ kN	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa
1	1.08	0.55	91.68
2	0.83	0.42	73.77
3	0.71	0.36	56.48
4	0.42	0.21	56.13
5	0.75	0.38	52.61
6	0.51	0.26	41.28
7	0.37	0.19	29.72
8	1.14	0.58	60.79
9	0.96	0.49	69.81
10	1.83	0.93	85.23
11	0.92	0.47	100.61
12	1.28	0.65	113.74

由表 6 可知:当配比中的灰砂比和水砂比变化时,相似材料的抗压强度与弹性模量分别为 $0.19 \sim 0.93\text{ MPa}$ 和 $29.72 \sim 113.74\text{ MPa}$;再以实际隧道围岩力学参数和相似关系为基础,便可在上述内容中确定较为合理的围岩相似材料配比参数。

3.2 围岩相似材料重度测定试验

对各组试样进行重度测定,试验结果见表 7。

表 7 各组围岩相似材料的重度结果

Table 7 Gravity results of similar materials for surrounding rock in each group

组号	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	组号	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	组号	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	17.58	5	16.95	9	17.31
2	17.36	6	16.69	10	17.38
3	17.28	7	16.65	11	17.44
4	17.12	8	17.26	12	17.53

由表 7 可知:相似材料重度变化不大,范围为 $16.65 \sim 17.58\text{ kN/m}^3$ 。表 3 中重度相似常数为 1,因此相似材料应与实际围岩的重度相近。围岩重度为 18.1 kN/m^3 ,而各组材料中重度最小的为 16.65 kN/m^3 ,仅比其小 8.0% ,较为接近,所以其重度基本满足相似关系的要求。

3.3 围岩相似材料渗透系数测定试验

围岩的透水能力通过渗透系数来表现,采用变水头渗透仪对 12 组试样渗透系数进行测定,试验过程如图 3 所示。

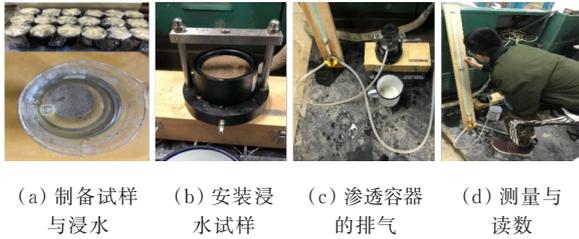


图3 渗透系数的测量过程示意图

Figure 3 Measurement process of permeability coefficient

试件的渗透系数按照式(4)计算,结果如表8所示。

$$k = 2.3 \frac{al}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{H_1}{H_2} \quad (4)$$

式中: k 为材料渗透系数(cm/s); a 为变水头管的断面积(cm^2); l 为渗径,即试样高度(cm); A 为试样的横截面积; H_1 和 H_2 为测量起始与终止水头高度(cm); t_1 、 t_2 为读取水头的起始和终止时间(s),时间差为20 s。

表8 渗透系数测定试验数据与结果

Table 8 Permeability coefficient measurement test data and results

组号	H_1/cm	H_2/cm	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	组号	H_1/cm	H_2/cm	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	组号	H_1/cm	H_2/cm	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	98.3	36.7	1.81×10^{-3}	5	94.4	40.5	1.68×10^{-3}	9	80.8	42.9	1.25×10^{-3}
2	97.6	40.1	1.68×10^{-3}	6	90.6	41.3	1.42×10^{-3}	10	75.5	46.7	9.21×10^{-4}
3	85.2	33.5	1.82×10^{-3}	7	83.7	42.3	1.33×10^{-3}	11	74.1	43.3	1.11×10^{-3}
4	97.4	38.3	1.74×10^{-3}	8	93.3	41.6	1.57×10^{-3}	12	79.3	55.9	6.58×10^{-4}

分析试验结果,当围岩相似材料内的水砂比固定、灰砂比增大时,试样的渗透系数逐渐减小,透水性降低;当材料灰砂比固定、水砂比增大时,材料渗透系数无明显改变。确定围岩相似材料的渗透系数为 $9.21 \times 10^{-4} \sim 1.82 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

结合表4内容,对照各组试样性能参数,发现第7组方案的试样各性能比较符合要求。此时材料的弹性模量为29.72 MPa、抗压强度0.19 MPa、重度 16.65 kN/m^3 、渗透系数 $1.33 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。因此,确定第7组方案作为本次模型试验中围岩相似材料的配比标准,具体为: $m_{\text{河砂}}:m_{\text{石膏}}:m_{\text{水泥}}:m_{\text{水}}=1:0.15:0.03:0.04$ 。

4 断层破碎带相似材料研究

模型试验中土体颗粒的粒径尺寸很难满足几何相似常数关系,无法将原状土颗粒按照要求缩小或放大,这种情况所产生的试验偏差称为粒径效应。学者们通过研究发现,如果结构模型的整体尺寸比土颗粒平均粒径大很多,可以较大程度地规避粒径效应产生的影响。当模型几何尺寸与土颗粒平均粒径的比值至少为20时,可以忽略粒径效应产生的误差;南京水利科学研究院通过大量离心模型试验总结出模型几何尺寸与土颗粒平均粒径之比应大于23^[24]。

实际隧道施工中对右线CK7+570掌子面附近围岩进行取样,发现样品中无完整岩石,多为碎石、

软泥土,且有地下水流出,说明前方断层内岩土体较为松散破碎,含水丰富。因此,从破碎带的强度角度分析,松散泥状材料强度接近0;而从破碎带的渗透性分析,现场测量的渗透系数为6~8 m/d。针对实际断层结构杂乱松散、强度低、透水性强、含水率高等特点,查阅相关资料,对比材料特点,最终选择机制砂作为断层破碎带的相似材料。

机制砂由制砂机破碎石块制得,其颗粒形状各异、棱角分明,这与本试验中断层破碎带岩土体的松散、无规则形状较为相似;同时机制砂堆积时,其颗粒棱角之间会形成空隙,提升了材料的渗透性,当机制砂堆积填筑时测量其渗透系数约为10 m/d、轻微夯实后约为9 m/d,与现场断层渗透系数相比约为1:1,满足渗透系数相似常数。因此,综合考虑各方面因素,确定机制砂为破碎带相似材料。为了消除粒径效应的影响,确定模型尺寸与土颗粒平均粒径之比大于30为标准,使用摇筛机对机制砂进行粒径筛分,绘制粒径分布图,如图4所示,选择中值粒径 d_{50} 表示机制砂颗粒集合体的平均粒径。

从图4可以看出:3组试样的粒径分布曲线走势相似,第1组 $d_{50}=0.38 \text{ mm}$,第2组 $d_{50}=0.41 \text{ mm}$,第3组 $d_{50}=0.41 \text{ mm}$,此机制砂的平均粒径约为0.4 mm。本试验选择模型几何尺寸与土颗粒平均粒径之比大于30,则模型的几何尺寸应大于12 mm,而实际模型箱长宽高的尺寸远大于12 mm,所以此机制砂可用于制备断层相似材料。

通过上述分析确定破碎带相似材料为中值粒径0.4 mm的机制砂。考虑到实际的破碎带所受到重力堆积作用,试验填筑时每隔20 cm进行轻微夯实处理。同时工程实际为富水断层,地表有水源补给,因此在材料填筑后使用自制水箱向断层内注水,达到饱和状态后水箱内仍然存留一定的水,以提供补给与水压力。

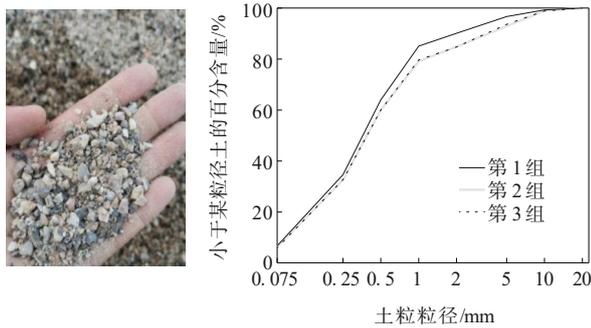


图4 各组机制砂的粒径分布

Figure 4 Particle size distribution of machine-made sand

5 隧道衬砌相似材料研究

现阶段对隧道衬砌相似材料的研究很多,使用的原材料种类广泛,例如重晶石粉、石膏粉、黏土、石英砂、石蜡、钢纤维、水泥、树脂和乳胶等,可以混合制备出满足特定的强度、变形和渗透性等试验要求的相似材料^[25-26]。

5.1 衬砌模型尺寸与性能参数确定

本试验的研究重点并非隧道结构受力分析,因此可将衬砌模型的初支和二衬结构合并成整体进行制备,以衬砌的强度和渗透系数为相似关系衡量标准,满足隧道结构稳定的基础上无水渗漏即可。实际隧道衬砌与理想型衬砌相似材料的性能指标见表9,缩小后得到衬砌模型位置尺寸参数如图5所示。

表9 实际衬砌和理想型相似衬砌结构的主要物理参数

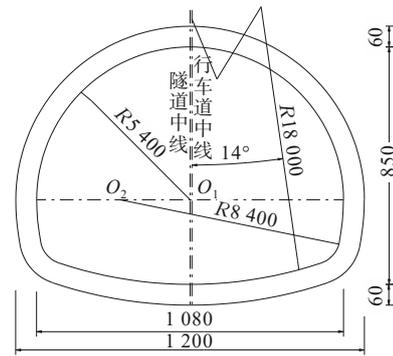
Table 9 Main physical parameters of actual and ideal similar lining structures

项目	厚度/cm	长度/cm	弹性模量/GPa
实际衬砌结构	60.0	2 000	28.00
理想型相似衬砌模型	1.2	40	0.56

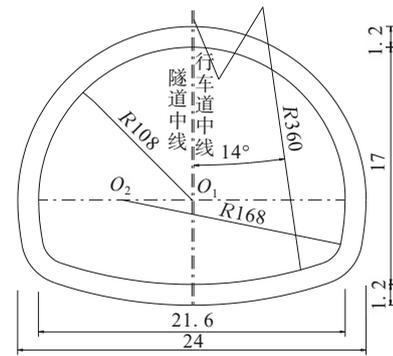
5.2 隧道衬砌相似材料的确定

现有研究中将石膏、重晶石粉和水进行混合,可制备弹性模量300.5 MPa的衬砌结构,其原材料配比为: $m_{\text{石膏}}:m_{\text{重晶石粉}}:m_{\text{水}}=1.0:0.1:1.4$ 。皮映星等^[25]研

究发现,石膏、重晶石粉、水的混合材料中加入少量水泥,可以有效提高材料的强度和弹性模量;而重晶石粉含量增加,会降低弹性模量。因此,为了提升材料弹性模量,添加少量水泥,分别为石膏质量的1%、3%、5%和7%,减少重晶石粉添加量,降至石膏质量的9%,获得4组新的原材料配比方案,并进行弹性模量试验,结果见表10。



(a) 衬砌原型尺寸



(b) 衬砌模型尺寸

图5 隧道衬砌结构的原型与模型尺寸图(单位:cm)

Figure 5 Prototype and model size of tunnel lining structure (unit: cm)

表10 衬砌相似材料配比方案和试验结果

Table 10 Ratio plan and test results of similar materials for lining

组号	$m_{\text{石膏}}:m_{\text{重晶石粉}}:m_{\text{水泥}}:m_{\text{水}}$	极限破坏荷载/kN	弹性模量/MPa
1	1:0.09:0.01:1.4	0.77, 0.78, 0.81	380
2	1:0.09:0.03:1.4	0.88, 0.86, 0.88	460
3	1:0.09:0.05:1.4	1.01, 1.03, 1.04	530
4	1:0.09:0.07:1.4	1.21, 1.22, 1.17	620

由表10可以看出:第3组相似材料弹性模量值530 MPa与理想值560 MPa最为接近。所以确定材料配比为 $m_{\text{石膏}}:m_{\text{重晶石粉}}:m_{\text{水泥}}:m_{\text{水}}=1:0.09:0.05:1.4$ 。

5.3 隧道衬砌模型的制作

试验中衬砌模型使用自制的泡沫成型模具浇筑

而成,模具由多块 2 cm 厚的 PVC 泡沫板和多根 1 m 长的 M6 型丝杠拼装而成。模具分为内模和外模,中间灌注材料,形成衬砌模型。模型浇筑成型后室温下密封养护 48 h 脱模;再使用透明塑料薄膜和防水胶带将模型内外包裹,达到防水效果。模型制作过程如图 6 所示,最终得到长度 400 mm、厚度 12 mm 的隧道衬砌模型。



(a) 雕刻泡沫板 (b) 模具整体样式 (c) 衬砌模型 (d) 防水处理

图 6 隧道衬砌模型制作

Figure 6 Tunnel lining model preparation

6 结论

结合现有研究内容,为了获得满足断层破碎带隧道预注浆模型试验研究的一套配比合理、制备方便、适用性广的相似材料,用于研究渗透结晶型浆液的注浆效果,本文通过相似理论和系统的试验研究,选择几何相似常数 $C_l=50$ 、重度相似常数 $C_\gamma=1$ 和渗透相似常数 $C_k=1$ 作为基础参数,得到了包括断层破碎带、隧道围岩和衬砌在内的整套相似材料,材料物理力学参数变化范围广,可为同类型隧道工程模拟研究提供参考和材料选择。具体结论如下:

(1) 围岩相似材料的弹性模量为 29.72~113.74 MPa,重度为 16.65~17.58 kN/m³,渗透系数为 $9.21 \times 10^{-4} \sim 1.81 \times 10^{-3}$ cm/s;当材料的配比为 $m_{河砂}:m_{石膏}:m_{水泥}:m_{水}=1:0.15:0.03:0.04$ 时,其弹性模量为 29.72 MPa,抗压强度为 0.19 MPa,重度为 16.65 kN/m³,渗透系数为 1.33×10^{-3} cm/s,满足试验需求。

(2) 为了防止粒径效应影响试验准确性,同时尽可能模拟实际工程断层内破碎、松散的结构形式,并满足渗透性要求,选择平均粒径为 0.4 mm 的机制砂作为断层破碎带相似材料的主要成分。在填筑时,每隔 20 cm 进行轻微夯实处理,并设计自制水箱向破碎带内进行水源补给。

(3) 隧道衬砌相似模型的原材料配比为 $m_{石膏}:m_{重晶石粉}:m_{水泥}:m_{水}=1:0.09:0.07:1.4$,其弹性模量为 560 MPa、衬砌厚度 1.2 cm、长度 40 cm,并使用自制模具浇筑成型,达到养护要求后使用防水胶带、保鲜膜缠绕,进行防水处理。

参考文献:

References:

- [1] 孙毅,赵勇,张顶立.隧道工程中水性渗透结晶型防水材料的应用研究[J].铁道学报,2018,40(3):137-145.
SUN Yi, ZHAO Yong, ZHANG Dingli. Research on application of waterborne capillary crystalline waterproof material in tunnel engineering[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 137-145.
- [2] 杨晓华,郑坤隆,徐礼笑.渗透结晶型材料添加剂对水泥浆液性能影响试验[J].中国公路学报,2019,32(7):129-135, 157.
YANG Xiaohua, ZHENG Kunlong, XU Lixiao. Experiment on effect of capillary crystalline material additives on cement slurry performance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(7): 129-135, 157.
- [3] 黄震,李晓昭,李仕杰,等.隧道突水模型试验流固耦合相似材料的研制及应用[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(12):3029-3039.
HUANG Zhen, LI Xiaozhao, LI Shijie, et al. Research and development of similar material for liquid-solid coupling and its application in tunnel water-inrush model test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(12): 3029-3039.
- [4] 路为.隧道岩溶突涌水机理与治理方法及工程应用[D].济南:山东大学,2017.
LU Wei. Study on karst water inrush mechanism and treatment method and its engineering applications in tunnels[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [5] 阎王虎,赵翔,潘慧敏,等.基于胶凝材料颗粒匹配的隧道喷射混凝土配合比优化设计[J].中外公路,2022,42(2):223-227.
YAN Wanghu, ZHAO Xiang, PAN Huimin, et al. Optimal design of tunnel shotcrete mix ratio based on cementitious material particle matching[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 223-227.
- [6] 周毅,李术才,李利平,等.地层条件对超大断面隧道软弱破碎围岩施工影响过程规律的数值模拟分析[J].岩土力学,2011,32(增刊2):673-678.
ZHOU Yi, LI Shucai, LI Liping, et al. Study of influence of formation conditions on construction process rules of ultralarge section and weak broken wall rock tunnel by numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (sup 2): 673-678.
- [7] 崔庆龙.基于分形理论的隧道沿线溶洞注浆量预估方法[J].中外公路,2022,42(6):162-167.
CUI Qinglong. Prediction method of grouting volume for treating karst caves along tunnel based on fractal theory[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 162-167.
- [8] KAMATA H, MASHIMO H. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 205-212.
- [9] 黄跃廷,王崇华,汪慧,等.隧道全断面超前注浆对地层扰动特性研究[J].中外公路,2023,43(6):273-277.

- HUANG Yueting, WANG Chonghua, WANG Hui, et al. Study on disturbance characteristics of ground in full-section tunnel under advance grouting[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6):273-277.
- [10] CHENG W M, SUN L L, WANG G, et al. Experimental research on coal seam similar material proportion and its application[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(5):913-918.
- [11] 贾宝新,苑文雅,马超义,等.白砂岩相似材料配比试验及特性分析[J].地下空间与工程学报, 2022, 18(2):503-512.
- JIA Baoxin, YUAN Wenya, MA Chaoyi, et al. Ratio test and characteristic analysis of similar materials in white sand rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2):503-512.
- [12] 孙文斌,张士川,李杨杨,等.固流耦合相似模拟材料研制及深部突水模拟试验[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1):2665-2670.
- SUN Wenbin, ZHANG Shichuan, LI Yangyang, et al. Development application of solid-fluid coupling similar material for floor strata and simulation test of water inrush in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(sup 1):2665-2670.
- [13] 张振杰,张强勇,向文,等.复杂环境下新型流固耦合相似材料的研制及应用[J].中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11):4168-4180.
- ZHANG Zhenjie, ZHANG Qiangyong, XIANG Wen, et al. Development and application of new-style hydro-mechanical coupling similar materials in complex environment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11):4168-4180.
- [14] SHI Y B, YE Y C, HU N Y, et al. Experiments on material proportions for similar materials with high similarity ratio and low strength in multilayer shale deposits[J]. Applied Sciences, 2021, 11(20):9620.
- [15] MA C Y, ZHU Z G, FANG Z C, et al. Optimal proportion of similar materials and rockburst tendency of white sandstone[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1):1-17.
- [16] 徐伟,吴述彧,杨成龙,等.不同水膏比相似材料配比试验研究[J].粉煤灰综合利用, 2022, 36(4):86-91.
- XU Wei, WU Shuyu, YANG Chenglong, et al. Experimental research on the proportion of similar materials with different water-paster ratio[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2022, 36(4):86-91.
- [17] 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 Fengshan, GUO Jie, et al. Experimental study on similar materials ratio used in largescale engineering model test[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(11):1653-1660.
- [18] LI Y L, HU P, XU Y L, et al. Wind loads on a moving vehicle-bridge deck system by wind-tunnel model test[J]. Wind and Structures, 2014, 19(2):145-167.
- [19] HOU X W, ZHOU X Z, PAN J N. Similar material proportioning and preparation of ductile surrounding rocks for simulating in situ coalbed methane production from tectonically deformed coals[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(9):5377-5392.
- [20] 于海洋.基于物理模拟试验的断层带分层介质注浆扩散及加固机理研究[D].济南:山东大学, 2016.
- YU Haiyang. Research on the theory of grouting diffusion and reinforcement in layered media based in physical simulation test[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [21] 李术才,宋曙光,李利平,等.海底隧道流固耦合模型试验系统的研制及应用[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32(5):883-890.
- LI Shucui, SONG Shuguang, LI Liping, et al. Development on subsea tunnel model test system for solid-fluid coupling and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5):883-890.
- [22] ZHAO B C, MA Y X, GUO Y X, et al. Study and application of similar material ratio in collapsible loess[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1):1-9.
- [23] 金大龙.盾构隧道群下穿既有地铁运营隧道变形机理及控制研究[D].北京:北京交通大学, 2018.
- JIN Dalong. Research on mechanism and control of existing subway tunnel deformation induced by multi-crossing of shield tunnel underneath[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [24] 王德明.泥质断层破碎带隧道突水突泥灾变机理研究及应用[D].济南:山东大学, 2017.
- WANG Deming. Inrush of water and clay disaster mechanism and application research on politic fault fracture zone tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [25] 皮映星,祝方才,左明汉,等.公路隧道衬砌模型材料的研究[J].湖南工业大学学报, 2011, 25(2):39-41.
- PI Yingxing, ZHU Fangcai, ZUO Minghan, et al. Study on the lining model material of highway tunnel[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(2):39-41.
- [26] 陈辉强,杨杰,兰滔.隧道路面单层沥青层铺装层间高强高渗防水黏结材料的制备与性能[J].公路, 2023, 68(1):51-58.
- CHEN Huiqiang, YANG Jie, LAN Tao. Preparation and properties of high strength and high permeability waterproof bonding material between single-layer asphalt pavement of tunnel[J]. Highway, 2023, 68(1):51-58.