

隧道围岩体相似材料试验研究

董昌周, 曲 晨

(浙江科技学院 建筑工程学院, 杭州 310023)

摘 要: 采用正交试验法得到了模拟围岩的合适相似材料及其配比, 对相似材料中松香酒精溶液质量分数、机油含量、重晶石粉与砂的质量比及胶结剂占总质量比例等方面进行了研究。试验表明, 配制的模型材料能满足Ⅳ级和Ⅴ级原型围岩物理力学参数相似关系, 为以后模型试验研究提供了一定的参考依据。

关键词: 模型试验; 相似材料; 正交试验; 力学特性

中图分类号: U451.2; U454.01

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2011)06-0499-04

Study of similar material in rock mass

DONG Chang-zhou, QU Chen

(School of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The similar materials and their mixture ratio simulated rock mass are obtained by the orthogonal experiment from the following aspects: concentration of rosin-alcohol mixture and engine oil, proportion of aggregate, and concentration of rosin-alcohol mixture among the total quality of similar material. Mechanical tests specimens show that it has some advantages as follows: high density, the Poisson's ratio basically in line with the requirements of soft rock, low compressive strength and modulus of elasticity, stable mechanical performance, reusable material. It can provide reference for the future study.

Key words: model test; similar material; orthogonal experiment; mechanical property

模型试验是根据一定的相似原理对特定工程问题进行缩尺研究的一种方法, 应用模型试验对隧道工程问题进行研究时, 正确模拟工程原型的关键之一是正确选择相似材料, 相似材料的选择、配比对材料的物理力学性质具有很大的影响, 对模型试验的成功与否起着决定性作用^[1-3]。

模型材料通常是用若干天然材料(重晶石粉、细沙、粉煤灰等)做骨料, 用石膏、水泥、酒精松香溶液、机油、洗衣液等做胶结材料配制而成, 因此, 相似材料一般是多种材料的混合物。石膏、水泥、酒精松香溶液等胶结材料适于配制强度较高的模型材料, 机油、洗衣液等适于配制强度较低的材料^[4-9]。从文献[1-9]可以看出, 岩土相似材料存在相似材料重度低、干燥时间慢、力学参数变化范围窄、性质不稳定、容易生锈及成本过高的缺陷。在前人研究的基础上, 本文主要研究对象是Ⅳ级和Ⅴ级围岩, 配制的模型材料的基本力

收稿日期: 2011-03-16

基金项目: 浙江省教育厅科研计划项目(Y201016743)

作者简介: 董昌周(1976—), 男, 浙江省上虞人, 工程师, 硕士, 主要从事实验教学和实验技术研究。

学性质要与原型围岩的性质满足相似关系,性质稳定,材料组配简单,力学参数变化范围大。

1 模型试验相似原理

模型试验是依据相似理论通过一定比例的用相似材料建造的缩尺模型来分析围岩、衬砌结构的受力和变形问题。原形和模型应满足弹性力学的平衡方程、相容方程、物理方程、几何方程和边界条件,可以得到各相似比之间的关系如下:

$$C_{\sigma} = C_L C_{\gamma}, C_{\sigma} = C_{\epsilon} C_E, C_{\epsilon} = 1, C_{\varphi} = 1, C_{\gamma} = 1$$

(1)

式(1)中: C_{σ} 、 C_L 、 C_{γ} 、 C_{ϵ} 、 C_E 、 C_{φ} 分别是应力、几何、重度、应变、弹性模量及内摩擦角的相似比尺。

为了简化模型与实际工程物理参数之间的换算,尤其是更好地体现自重应力场的影响,使模型材料的重度与实际岩体材料的重度相同,通过公式(1)可以得到弹性模量和应力比尺与几何比尺相同。根据《公路隧道设计规范》(JTCD70—2004)和 $C_L=20$,原型围岩与模型材料的物理力学参数要满足相似比见表 1。

表 1 原型围岩与模型材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters between rock mass and similar material

围岩级别	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性抗力系数/($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	变形模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
Ⅳ 原型	20~23	200~500	1.3~6	0.2~0.7	27~39
Ⅳ 模型	22~23	200~500	0.065~0.3	0.01~0.035	27~39
Ⅴ 原型	17~20	100~200	1~2	0.05~0.2	20~27
Ⅴ 模型	17~20	100~200	0.05~0.1	0.002~0.01	20~27

2 模型材料物理力学试验

模拟岩土力学特性的相似材料须具有高重度、低强度、低弹模的性质。根据模型试验相似原理和相似材料的研究原则,采用机油或松香酒精溶液作为胶结材料,骨料选择砂和重晶石粉。

制作试件时首先根据各种配比设计称取所需的材料,其次将称取好的砂、重晶石粉先后放入桶内并搅拌均匀,再加入胶结材料并不断搅拌,使之混合均匀,获得拌和均匀的模型材料。按以下工艺将拌和均匀的模型材料装入试件模具($\Phi 39.5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$):1)将模具拼装成圆筒状,加入适量料后用击实仪夯击 20 次;2)土料表面打毛,使相邻两层土料更好地接触,继续加入适量料,并用击实仪夯击 20 次直至夯实;3)分 5~8 层重复第 2 步直至模具加满为止,抹面(保持试件表面平整);4)脱模、试块成形及贴标签(图 1),一个配比需做 8 个试样。材料压实后放置在室温下干燥,试样干燥后称重,测量高度和直径并计算出重度。随后进行无侧限抗压强度试验和三轴试验,无侧限抗压强度试验主要测模型材料的变形模量、单轴抗压强度,单轴抗压破坏形态见图 2;三轴剪切试验主要测定试件内摩擦角、黏聚力。在三轴剪切试验中,对同一种试件分别加以不同的围压,测得不同的应力—应变关系曲线(图 3)和相应的破坏形态(图 4),绘出各自的极限状态应力圆,这组应力圆公切线就应是莫尔破坏包线,一次确定模型材料的内摩擦角、黏聚力。

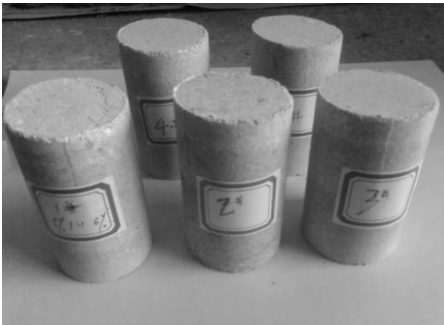


图 1 部分试样

Fig. 1 Similar material specimen



图 2 单轴抗压破坏形态

Fig. 2 Uniaxial compressive test failure forms

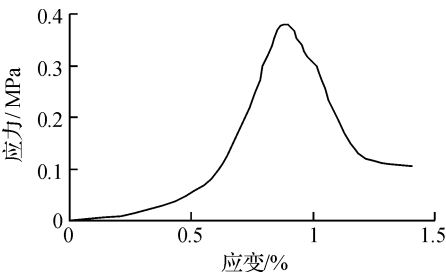


图 3 模型材料试件的应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of specimen



图 4 三轴试验破坏形态

Fig. 4 Triaxial compressive test failure forms

3 试验结果与分析

3.1 以松香酒精溶液作为胶结材料的试验结果分析

试验中采用松香酒精溶液作为胶结材料,骨料为普通细砂和重晶石粉。胶结剂浓度、胶结剂占总材料比例及骨料比例分别取 3 个水平,按 $L_9(3^3)$ 正交表(表 2)进行试验。将表 2 中试验结果与表 1 的力学指标分别代入相似判据,第 2 组为模拟 V 原岩的最合适材料配比,即重晶石粉与细砂的质量之比 $B:S=1:1$,松香占松香酒精溶液的质量分数 $\beta=8\%$,胶结剂占总质量比例 $RA=6\%$ 。

表 2 部分相似材料实验结果

Table 2 Similar material test result

组号	$B:S$	$\beta/\%$	$RA/\%$	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	变形模量/MPa	单轴抗压强度/kPa	黏聚力/kPa	摩擦角/ $(^\circ)$
1	1:1	5	6	19.31	75	181.8	61.1	23
2	1:1	8	6	19.72	85	277.4	90.6	25
3	1:1	8	8	20.91	90	429.5	132.9	28
4	1:1	8	10	21.84	98	649.0	177.8	28.5
5	1:1	15	6	21.72	100	389.5	159.4	29
6	5:2	8	6	23.43	92	334.0	124.8	35
7	5:3	8	6	24.37	90	328.0	103.2	33

从表 2 中可见,各因素对试块抗压强度影响最大的是酒精松香溶液占总材料质量比例,其次是胶结剂的质量分数,最小的是骨料比例。胶结剂的质量分数可以调节试件的变形模量,大致呈线性关系。黏聚力随骨料比例变化成反比,与胶结剂的质量分数和胶结剂占材料总质量比例大致呈线性递增。从图 5 可见,重度主要受骨料密度的影响,随骨料密度的增大而变大。从图 6 可见,重晶石粉与细砂比例的大小对变形模量的影响最大,呈抛物线关系。

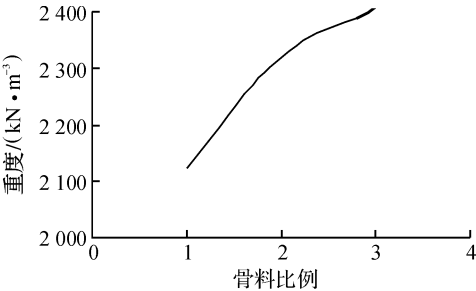


图 5 重度随骨料比例变化关系曲线

Fig. 5 Relation between aggregate proportion and density

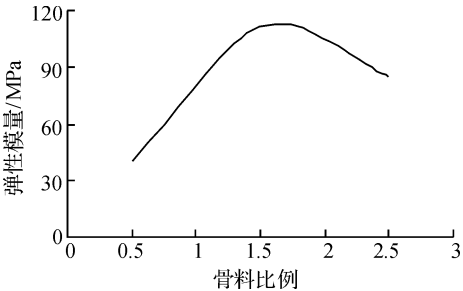


图 6 弹性模量随骨料比例变化关系曲线

Fig. 5 Relation between aggregate proportion and E

3.2 以机油作为胶结材料的试验结果分析

试验所用砂是普通砂与 ISO 标准砂 1 : 1 混合而成,以下简称混合砂,采用机油作为胶结材料,骨料为混合砂和重晶石粉。本试验中重晶石粉与混合砂的质量比、机油含量分别取 3 个水平,按正交试验表进行试验,见表 3。

表 3 部分相似材料实验结果
Table 3 Similar material test result

方案 编号	骨料比例	机油含量/%	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压 强度/kPa	变形模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
No. 1	1 : 1	7.5	24.50	245	32	13	22
No. 2	1 : 1	6.5	24.81	254	45	12	25
No. 3	1 : 1	6.0	24.32	231	52	13	32
No. 4	2 : 1	6.0	25.11	154	35	16	32
No. 5	1 : 2	6.0	22.30	85	28	8	18

根据试验研究结果可见,模型材料物理力学性质随着骨料和机油含量的变化而变化。模型材料的重度达到了Ⅳ级围岩的要求,略高于Ⅴ级围岩,变形模量、单轴抗压强度、内摩擦角等力学指标能够满足Ⅳ级围岩的要求。在拌和过程中发现,方案 No. 1 和 No. 5 拌和料偏软,试件捣实过程中与捣锤粘连较多;方案 No. 4 材料偏干,搅拌难度大。综合材料的物理力学性质和拌和难易情况,方案 No. 3 的配比是模拟Ⅳ原岩的最合适材料配比,即 $m_{\text{重晶石粉}} : m_{\text{标准砂}} : m_{\text{细沙}} = 2 : 1 : 1$,机油含量为骨料的 6%。

4 结 语

1)以重晶石粉、细砂、酒精松香溶液或机油组成的相似材料制作模型工艺简单、材料来源广,通过物理力学性能试验表明是一种理想的相似材料。

2)通过试验得到了原岩的相似材料配比,即以 $m_{\text{重晶石粉}} : m_{\text{标准砂}} : m_{\text{细沙}} = 2 : 1 : 1$ 、机油含量为骨料的 6%配成的相似材料能很好地模拟Ⅳ级围岩体;以 $m_{\text{重晶石粉}} : m_{\text{细沙}} (B : S) = 1 : 1$ 、松香占松香酒精溶液(β)的 8%及胶结剂占总质量(RA)的 6%配成的相似材料能很好地模拟Ⅴ级围岩体。

参考文献:

[1] 罗定伦,高波,申玉生. 关于隧道抗减震模型试验围岩相似材料的研究[J]. 石家庄铁道学院学报,2008,21(3): 70-73.
[2] 陈安敏,顾金才,沈俊,等. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(22):3785-3789.
[3] 彭海明,彭振斌,韩金田,等. 岩性相似材料研究[J]. 广东土木与建筑,2002,12 (12):13-14,17.
[4] 朱书麟. 隧道工程[M]. 台北:中国工程师学会,1970.
[5] 马芳平,李仲奎,罗光福. NIOS 相似材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 48-51.
[6] 左保成,陈从新,刘才华,等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学,2004,25(11): 1805-1808.
[7] 王汉鹏,李术才,张强勇,等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩土力学与工程学报,2006, 25(9): 1842-1847.
[8] 刘宇军,黄戡,张可能,等. 模拟岩石性能的实验研究[J]. 建筑技术开发,2003,30(8):62-63,87.
[9] 韩伯鲤,陈霞龄,宋一乐,等. 岩体相似材料的研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1997,30(2):6-9.