

文章编号: 1001-4888(2013)02-0242-05

沥青海砂作为软岩相似材料的实验研究^{*}

王永岩, 李剑光

(青岛科技大学机电工程学院, 山东青岛 266061)

摘要: 为了解决岩石工程相似模型实验中传统相似材料难以模拟深部软岩低强度、大变形和强流变的问题, 本文选用 70 号沥青(产量大、成本低、粘弹性、易成型、易软化等)和海砂作为深部软岩的相似模拟材料。采用连续加压法对其进行了单轴压缩实验, 对不同配比下试件的密度、抗压强度及初始弹性模量进行分析, 得到了该相似材料有关的原始数据和规律。本文初步验证了使用该相似材料模拟深部软岩的可行性, 并针对不足之处给出一些合理改进建议, 为进一步模型模拟实验提供指导。

关键词: 沥青; 海砂; 软岩; 相似材料; 配比

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-030

0 引言

相似模型实验是研究工程岩体稳定性常用的实验^[1], 其费用低、周期短、制作简单, 可以严格控制研究对象的主要参量, 发现研究对象的变形破坏特征和力学本质, 在模拟材料选择和配比上有可以参考的经验数据, 是研究岩体工程变形和破坏问题的有效途径^[2,3]。但是以石膏、水泥为主的传统的模拟材料, 模拟硬岩尚可, 对于软岩则不能完全体现其变形及物理力学特性。显然, 在软岩进一步增多、脆延转化特征明显的深部工程中, 传统的模拟材料很难反映深部岩体变形和破坏的真实状态, 难以形成对工程实践全面正确的指导, 寻求一种适合于软岩的模拟材料成为深部岩体工程研究的必然。

沥青材料作为工业常用的胶结料, 有良好的粘结性、可塑性和黏弹性, 其中, 70 号沥青作为国内主流工业沥青, 其产量大, 价格低, 易获取, 以及低针入度 60~80(0.1mm)、低软化点(45~46℃)等特点, 符合相似模拟材料胶结料的选取原则, 而且与骨料混合易成型, 有流变性, 黏弹性, 且温度敏感, 硬度和强度较小(但随骨料和配比变化范围大), 极其适合软岩模拟, 并能反映真实深部软岩工程变形情况。按照相似理论换算后, 可为工程设计和支护提供及时、准确、有价值的指导。本文以 70 号沥青和海砂(青岛地区)混合物为相似模拟材料, 对深部软岩流变软化的力学行为特性进行了分析和研究, 为深部地下软岩工程提供了参考。

1 相似理论

模拟实验的理论基础是相似原理, 为了实现变形完全相似, 要求模型和原型的某些无因次量相等, 即要求模型和原型的弹性参数相等、应力应变关系曲线相似。推导相似关系的方法有参数法和方程法, 在未知某一物理现象各参数之间的函数关系时, 只能采用参数法。如果已知支配物理现象的函数关系

^{*} 收稿日期: 2012-03-05; 修订日期: 2012-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(50974077)和国家自然科学基金(51074094)资助

通讯作者: 李剑光(1980-), 男, 在读博士, 讲师。主要研究领域: 岩石工程力学, 机械设计及理论。E-mail: qingdaokeda@126.com

方程, 则用方程法是方便的。本文采用方程法分析模型与原型的应力应变曲线的相似性。假设原型用 p , 模型用 m , 相似常数用 α 表示, 则有:

$$E_p = \frac{d\sigma_p}{d\epsilon} \quad (1)$$

$$E_m = \frac{d\sigma_m}{d\epsilon} \quad (2)$$

$$\alpha_E = \frac{E_p}{E_m} = \frac{d\sigma_p/d\epsilon}{d\sigma_m/d\epsilon} \quad (3)$$

令 $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}$, 代入上式得

$$\alpha_E = \frac{d(\alpha_\sigma \sigma_m)}{d\epsilon} \bigg/ \frac{d\sigma_m}{d\epsilon} \quad (4)$$

若 α_σ 为常数, 则 $\alpha_E = \alpha_\sigma$ 为常数, 即满足模型与原型的应力应变关系曲线相似; 若 α_σ 不是常数, 而是 ϵ 的函数, 即应力应变关系不相似, 则 α_E 也就不是常数。

2 沥青海砂相似材料

70# 沥青的针入度较小, 为 60~80(0.1mm), 黏度和延性良好^[5], 适合做胶结料; 海砂表面光滑, 粒径小, 硬度大, 均匀性好, 分布较广, 易获取, 适合做骨料, 但所制成的相似材料强度有限, 综合前人经验, 可在以后的实验中添加其他大粒径的骨料来提高强度^[1]。限于实验条件, 采用人工捣密的方法来对混合料进行成型。初步的级配尝试表明, 沥青与砂子比例小于 1:4 时, 试件粘塑性太大, 不易形成稳定形状, 不符合岩性相似材料模拟的要求, 因此本文主要对 70# 沥青海砂比为 1:5、1:6、1:7、1:8、1:9、1:10、1:11 等 7 种不同配比试件的常规力学性能进行研究, 为后续模型模拟实验积累实验数据。

2.1 模具与试件的制作

为了便于试件制作, 并尽量与岩石材料实验条件接近, 选择相似材料试件为直径 50mm, 高 100mm 的圆柱形, 由专门设计的对开模具来保证成型, 内涂硅油保证脱模, 见图 1(a)。为使实验结果更趋准确并预留一定备份, 每个配比下制作 3 个试件, 常温常压条件下养护 7 天后进行实验。

首先根据设计配比分别称量出所需的沥青及海砂的质量, 置于真空干燥箱加热到 165℃ 之上, 将两者放在台式封闭电炉上加热并搅拌均匀, 然后控制份量分 4 批装入模具中, 每装入一批, 用捣锤捣固 15 次, 直至混合料不能再加入模具为止。使用此方法制作的试件直线性良好, 端面平整度能够达到实验要求, 见图 1(b)。不足之处在于人工捣实的力度把握, 容易形成沿轴线密度不同的情况, 可能对实验结果有较大影响, 误差太大要直接剔除, 理论上可增加装料和捣实的批次数来减小误差, 也可用压力机定量加压, 但同时也依赖于操作人员的经验。

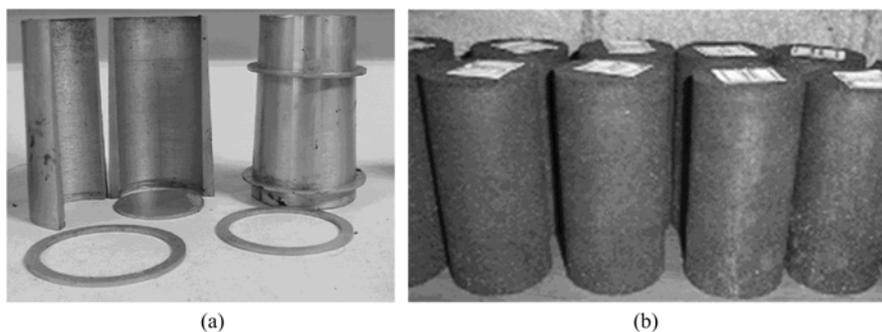


图1 模具与试件

Fig. 1 Dies and samples

2.2 沥青海砂配比实验

实验采用 YDD-1 型多功能材料力学试验机, 连续加压直至试件破坏, 每个配比均选择 3 个试件, 研究相似材料的压缩力学性能, 表 1 列出经过初步整理后的平均实验数据。

表1 沥青海砂相似试件的配比表

Tab.1 Asphalt and sea sand sample data in different match

材料配比 (沥青:海砂)	平均质量 (g)	平均密度 (g/cm ³)	平均弹性模量 (MPa)	平均抗压强度 (MPa)
1:5	360.5	1.763	14.797	0.541
1:6	346	1.717	22.415	0.587
1:7	339	1.693	27.794	0.704
1:8	345.5	1.685	36.852	0.704
1:9	348	1.678	19.699	0.354
1:10	344	1.671	17.604	0.278
1:11	340	1.664	21.657	0.227

2.3 实验结果分析

(1) 不同对比对试件密度的影响

试件的密度与其强度和硬度有一定相关性。实验结果如图2所示。总体上,沥青的含量越高,试件的密度越大,但是整体波动范围不大,在1.66~1.78g/cm³之间,这对于模拟强度大范围变动的软岩是个限制。另一方面,同一个配比的试件密度也有所不同,反映出人工捣实存在一定缺陷,后续分析各参数宜用平均值来表征,而后续模型实验研究应采用更合理的压密方法。

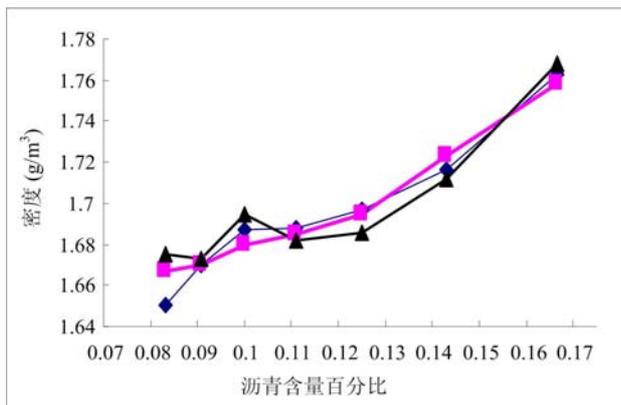


图2 密度与沥青含量的关系曲线

Fig.2 The relationship between density and asphalt percentage

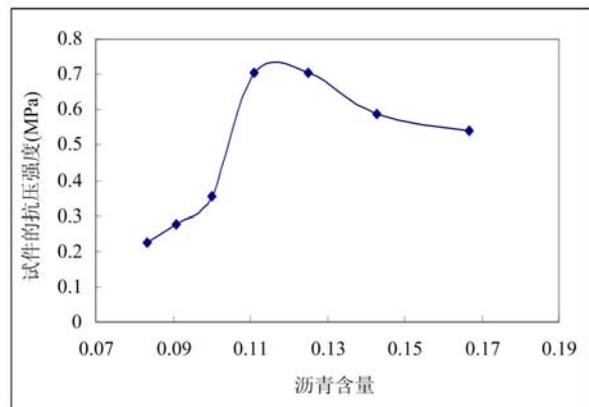


图3 抗压强度与沥青含量的关系曲线

Fig.3 The relationship between compressive strength and asphalt percentage

(2) 不同对比对试件抗压强度的影响

实验结果如图3,可以看出,当沥青含量为11%,即沥青海砂配比为1:8时,试件的抗压强度最大,低于该配比时试件的抗压强度随着沥青含量的增大而提高,这是由于沥青含量过少时,海砂粘结力差。承压时斜截面的剪切应力基本上由粒间内摩擦力承担,且有局部薄弱位置,随着混合料的沥青含量增加,整体共同承压,抗压极限提高;高于1:8的配比时,试件的抗压强度随着沥青所占配比的减小而降低,这是由于在沥青粘结力有效的前提下,沥青含量越多,试件整体粘性越小,塑性越强,剪切极限越低。

(3) 不同对比对试件初始弹性模量的影响

图4为70#沥青海砂试件初始弹性模量与沥青含量的关系曲线,由图可以看出,沥青含量为11%时,即沥青海砂配比为1:8时,曲线有明显的转折。低于此配比,初试弹性量随着沥青含量增大而增大(此处左侧第一个点1:11配比有异常,判断可能为误差,本应增加试件重新验证);而高于此配比,初始弹性模量随着沥青含量增大而减小。由于弹性模量表征材料的抵抗变形特性,而轴向受压构件破坏实

质为剪切破坏,其力学机理应与配对抗压强度的影响相同。

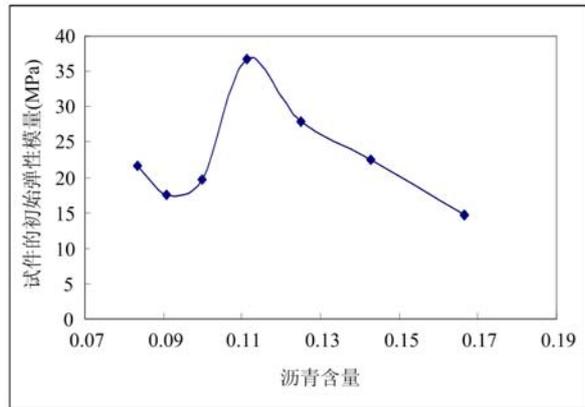


图 4 初始弹性模量与沥青含量的关系曲线
 Fig. 4 The relationship between initial elastic modulus and asphalt percentage

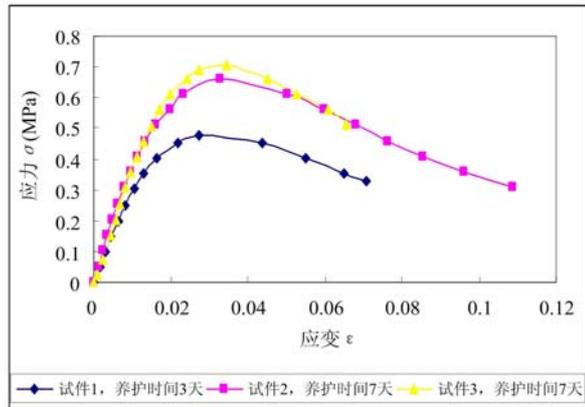


图 5 相同配比不同养护时间的试件应力应变曲线
 Fig. 5 Stress-strain curves of samples in same match and different curing time

(4) 养护时间对试件压缩性能的影响

图 5 为 1 : 8 配比下,养护时间分别为 3 天和 7 天的 3 个试件的压缩全程曲线,可以看出,随着养护时间的增加,试件的强度增大,初始弹性模量也增大,同一养护时间的两个试件,性能基本相同。本文所涉其余实验都是在养护 7 天后进行,所以结果有可比性。

(5) 70# 沥青海砂的全应力应变曲线

图 6 为根据实验数据绘制的配比分别为 1 : 5、1 : 6、1 : 7、1 : 8、1 : 9、1 : 10、1 : 11 的沥青海砂试件压缩破坏的平均全应力应变曲线图。由图可以看出,不同配比下曲线有类似的形状,都经历塑性(压密)、弹性、塑性阶段,最后进入应变软化阶段,有关弹性模量和抗压强度的比较已在之前叙述,此类曲线与峰值前岩石的全程曲线(图 7)形态极其相似,只是在数量级上有差别,显示出明显的黏弹塑性和大变形形态,有传统相似材料不可比拟的模拟优势。事实上,如果在沥青和海砂中再加入其他大密度介质提高强度,同时加密配比,模拟软岩的范围将更为宽泛。

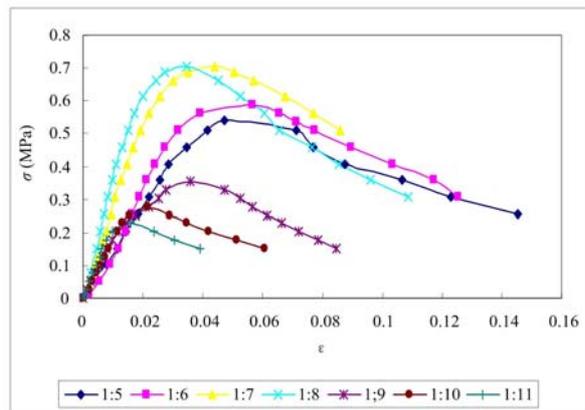


图 6 不同配比相同养护时间的试件应力应变曲线
 Fig. 6 Stress-strain curves of samples in different match and same curing time

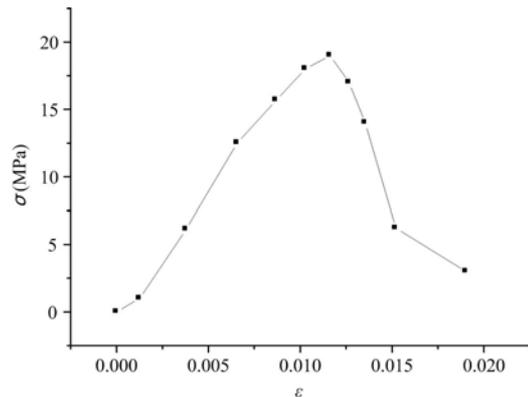


图 7 刚性试验机下砂岩全程曲线
 Fig. 7 Total stress-strain curves of sandstone by rigid testing machine

3 结论

本文对沥青海砂作为模拟材料的基本力学特性,尤其压缩特性进行了大量的实验研究,获得了一定的原始数据,找到了不同配比下模拟材料的抗压强度等变化规律,为后续模型模拟实验积累了一定的

经验,结论和不足如下:

(1)采用沥青海砂作为相似材料,取材方便,成本低廉,工艺简单,成型时间短,变形量大,黏弹塑性特征明显,作为深部软岩的相似模拟材料有可行性,可作为一种快速、简便、准确开展深部软岩工程测试的新途径。

(2)采用单纯沥青海砂制作的相似模拟材料密度和抗压强度范围波动不大,即使按照不同的相似比设计,所能模拟的软岩范围也较为有限。针对这一不足,考虑在今后的实验中添加铁粉、重晶石粉等高容重的材料来增大密度、强度和模拟范围。此外,在相似材料成型方面应尽量采用机械式定量加载压密,保证材料的连续性和均匀性。

(3)采用该相似材料进行相似模型模拟实验时,应充分利用其变形大和黏弹塑性,在局部范围模拟一定层厚的软岩,如泥岩等,其余硬岩部分仍采用传统相似材料。

参考文献:

- [1] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1995 (GU Da-zhao. Equivalent Materials and Similitude Models[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press,1995(in Chinese))
- [2] 王永岩,吕宜美,肖志娟等. 化学腐蚀下砂岩蠕变模型的研究[J]. 煤炭学报,2010,35(7):1095-1098 (WANG Yong-yan, LV Yi-mei, XIAO Zhi-juan, et al. Research on sandstone creep models under chemical corrosion [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7):1095-1098 (in Chinese))
- [3] 王永岩,齐珺,杨彩虹等. 深部岩体非线性蠕变规律研究[J]. 岩土力学,2005,26(1):117-121 (WANG Yong-yan, QI Jun, YANG Cai-hong, et al. A Study of Nonlinear Creep Law in Deep Rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1):117-121(in Chinese))
- [4] 王永岩,张则荣. 振动筛试验模型和原型相似试验研究[J]. 机械工程学报,2011,47(1):101-105 (WANG Yong-yan, ZHANG Ze-rong. Similar Experimental Study of Test Model and Prototype of Vibrating Screen [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1):101-105(in Chinese))
- [5] 彭波,李文瑛,危拥军. 沥青混合料材料组成与特性[M]. 北京:人民交通出版社,2007 (PENG Bo, LI Wen-ying, WEI Yong-jun. Composition and Performance of Asphalt Mixture Material [M]. Beijing: China Communications Press, 2007(in Chinese))
- [6] 周维垣,杨强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京:中国电力出版社,2005 (ZHOU Wei-yuan, YANG Qiang. Numerical Computational Methods for Rock Mechanics [M]. China Electric Power Press, 2005(in Chinese))

Experimental Study of Soft Rock Similar Material by using Mixture of Asphalt and Sea Sand

WANG Yong-yan, LI Jian-guang

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Shandong 266061, China)

Abstract: It's difficult to simulate deep soft rock in rock engineering similar model experiment by using traditional similar materials due to its low strength, large deformation and strong rheology. In order to solve this problem, a mixture of 70 # asphalt (due to its high output, low cost, viscoelasticity, easy molding and softening) and sea sand was adopted as similar simulation materials for deep soft rock. Uniaxial compression experiment was carried out by continuous loading, and some related parameters for similar simulation material with different ingredient ratios, such as density, compressive strength and initial elastic modulus, were analyzed, and original data and basic characteristics were obtained. The feasibility of using this similar material to simulate deep soft rock is validated and reasonable suggestions are proposed in this paper, which can be used as a reference for further model simulation experiment.

Keywords: Asphalt; sea sand; soft rock; similar material; ingredient ratio