文章编号：1000－7598－(2008) 08－2126－05

铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用

张强勇[1]，李术才[1]，郭小红[2]，李 勇[1]，王汉鹏[1]

（1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心，济南 250061；2. 中交第二公路勘测设计研究院，武汉 430071）

摘 要：根据地质力学模型试验的相似原理，经过大量力学试验，研制出一种新型铁晶砂胶结岩土相似材料。该材料由铁矿粉、重晶石粉、石英砂、石膏粉和松香酒精溶液按规定配比均匀拌和压实而成，其中铁矿粉、重晶石粉和石英砂作为主料，松香酒精溶液作为胶结剂，石膏粉作为调节剂。材料力学参数测试表明：该材料具有重度高、力学参数变化范围广、性能稳定、价格低廉、干燥快速、制作工艺简单、无毒无害等显著优点，可用来模拟从软岩到硬岩的大部分岩体材料。将铁晶砂胶结岩土相似材料应用于沪－蓉－西高速公路大型分岔隧道三维地质力学模型试验研究，有效地揭示了分岔隧道围岩的力学变形特性。

关 键 词：相似原理；新型岩土相似材料；材料力学试验；大型分岔隧道三维试验模型

中图分类号：O 375.3 **文献标识码**：A

Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application

ZHANG Qiang-yong[1], LI Shu-cai[1], GUO Xiao-hong[2], Li Yong[1], WANG Han-peng[1]

(1. Research Center of Geotechnical and Structure Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Chinese Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute, Wuhan 430052, China)

Abstract: According to similarity principle of geomechanical model test, a new type cementitious geotechnical similar material called iron crystal sand is developed through a lot of material mechanics test. This similar material is evenly mixed with iron ore powder, blanc fix, quartz sand, gypsum powder，rosin and alcohol in certain proportion and pressed together. Iron ore powder, blanc fix and quartz sand are main materials, the solution of rosin alcohol is cementing agent, gypsum powder is regulator. Specimen mechanical tests show that the new-type similar material has many remarkable advantages as follows: high volume-weight, wide variable mechanical parameters, stable performance, low price, easy dryness, easy processing and without any toxicity and side effects. It can be used to simulate most of rockmass material from soft to hard ones. The new typed material has been used in 3D geomecanicl model test of bifurcation tunnel of Sanghai-Chendu-Xichang expressway and mechanical deformation properties of rockmass surrounding bifurcation tunnel have been effectively revealed under excavation state.

Key words: similarity principle; new type geotechnical similar material; mechanical test of material; 3D test model of large-scale bifurcation tunnel

1 前 言

开发三峡、南水北调、西气东输、西电东送、青藏铁路等大型工程项目将面临大量的岩土开挖，涉及许多岩土强度破坏、变形失稳和加固处理等问题。对这些复杂问题，一方面要借助理论和数值分析去研究；另一方面更多地要借助岩土地质力学模型试验手段来解决。地质力学模型是真实物理实体的再现，在满足相似原理的条件下能够真实反映岩土介质的基本物理力学特性[1−6]。

要进行地质力学模型试验，必须有与岩土介质物理力学特性保持相似的相似材料，目前有关岩土相似材料的研究现状如下：文献[7]结合反倾岩层边坡失稳破坏机制的相似模型研究，采用石英砂、石膏和水泥来模拟灰岩，研究了相似材料中骨料与胶结物的配比、胶结物中胶结材料的配比及不同的养

收稿日期：200 6-10-09
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.40772173）；山东省自然科学基金资助项目（No.Y2007F52）。
作者简介：张强勇，男，1967 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事岩土与结构工程教学与科研。E-mail: qiangyongz@sdu.edu.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

护方式对试块强度的影响规律。该材料采用石膏作为胶结剂，但石膏是水溶性材料，其性能易受温度和湿度影响，且干燥缓慢。文献[8]介绍了一种由重晶石粉、胶膜铁粉和松香酒精溶液搅拌混合而成的相似材料（简称 MIB 材料），该材料弹性模量可根据胶膜厚度进行有效调整，其缺点是作为铁粉胶粘剂的氯丁胶含有甲苯，对人体的毒副作用较大。文献[9]介绍选用水泥石膏作为岩石模拟材料，通过大量的水泥石膏室内试验，对水泥石膏相似材料的物理力学性能进行了研究。此类材料的特点是价格低廉、易于加工制作，但模型干燥慢、养护时间长。李仲奎等研制出一种 NIOS 地质力学模型材料[10]，它由磁铁矿精矿粉、河砂、粘结剂石膏或水泥、拌和用水及添加剂组成，该材料的特点是重度大、价格低廉、性能稳定，但模型干燥慢、养护时间长。

上述岩土相似材料普遍存在的不足：相似材料重度低、干燥时间慢、力学参数变化范围窄。本次根据相似理论的基本原理，经过大量材料力学参数试验，研制出一种新型铁晶砂胶结岩土相似材料。

2　地质力学模型试验的相似原理

模型试验的相似原理是指模型上重现的物理现象应与原型相似，即要求模型材料、模型形状和荷载等均须遵循一定的规律。把原型（P）和模型（M）之间具有相同量纲的物理量之比称为相似比尺，用字母 C 代替。定义 L 为长度，r 为重度，δ 为位移，E 为弹性模量，σ 为应力，ε 为应变，σ^{t} 为抗拉强度，σ^{c} 为抗压强度，c 为凝聚力，ϕ 为摩擦角，μ 为泊松比，f 为摩擦系数。

根据原型和模型的平衡方程、几何方程、物理方程、应力边界条件和位移边界条件可推导出地质力学模型试验如下相似关系[3]：

（1）应力相似比尺 C_{σ}、容重相似比尺 C_{r} 和几何相似比尺 C_{L} 之间的相似关系为

$$C_{\sigma}=C_{r}C_{L} \tag{1}$$

（2）位移相似比尺 C_{δ}、几何相似比尺 C_{L} 和应变相似比尺 C_{ε} 之间的相似关系为

$$C_{\delta}=C_{\varepsilon}C_{L} \tag{2}$$

（3）应力相似比尺 C_{σ}、弹性模量相似比尺 C_{E} 和应变相似比尺 C_{ε} 之间的相似关系为

$$C_{\sigma}=C_{\varepsilon}C_{E} \tag{3}$$

（4）地质力学模型试验要求所有无量纲物理量（如应变、内摩擦角、摩擦系数、泊松比等）的相似比尺等于 1，相同量纲物理量的相似比尺相等，即

$$C_{\varepsilon}=1，\ C_{f}=1，\ C_{\varphi}=1，\ C_{\mu}=1 \tag{4}$$

$$C_{\sigma}=C_{E}=C_{c}=C_{\sigma_{c}}=C_{\sigma_{t}} \tag{5}$$

3　新型岩土相似材料的研制

地质力学模型试验是根据一定的相似原理对特定工程地质问题进行缩尺研究的一种方法，其中模型材料的选择对地质力学模型试验的成功与否起着至关重要的作用。在岩土工程地质力学模型试验中，作为模拟岩土力学特性的相似材料必须具备高重度、低强度、低变形模量和可变化的内摩擦角等基本特点，而满足这些要求的材料在自然界是不存在的，必须用人工方法进行组合得到。

根据模型试验相似原理和相似材料的研究原则，经过 300 多组、近 1 000 多个材料试件的力学参数试验，研制出了一种新型岩土相似材料，它是由铁矿粉、重晶石粉、石英砂、石膏粉和松香酒精溶液按规定的配比均匀拌合压实而成的一种复合材料，称为铁晶砂胶结岩土相似材料，铁晶砂胶结岩土相似材料及其制备方法目前已获得国家发明专利[11]。

3.1　新型岩土相似材料的力学试验

选择铁晶砂胶结岩土材料其中铁矿粉、重晶石粉和石英砂作主骨料，松香与酒精配制的溶液作胶结剂，石膏粉作调节剂。由于铁矿粉、重晶石粉太细，为了优化级配和调节材料的力学特性，在材料中加入石英砂作粗骨料。

材料试件的制作工艺过程是：先把铁矿粉、重晶石粉、石英砂和少量石膏粉按规定配比称量后倒入搅拌机内充分搅拌均匀，然后加入松香酒精溶液进一步拌和，将拌和好的混合料，倒入钢制模具内，并以一定的压力将混合料压实，最后将模具拆开、取出压制成型的试件，在试件表面贴上标签，放置在常温下干燥 2~3 d。材料力学试验包括材料抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比和抗剪强度等参数的测试。图 1~3 为材料力学试验的部分照片。

图 4 和图 5 为不同组分对材料力学特性的影响。由图 4 可知，调整松香酒精溶液胶结剂的摩尔浓度可以调节材料的抗压强度、弹性模量和凝聚力，胶结剂的摩尔浓度越高，相似材料的抗压强度、弹性模量和和凝聚力就越高。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



图 1 材料抗压试验
Fig.1 Compressive test of material

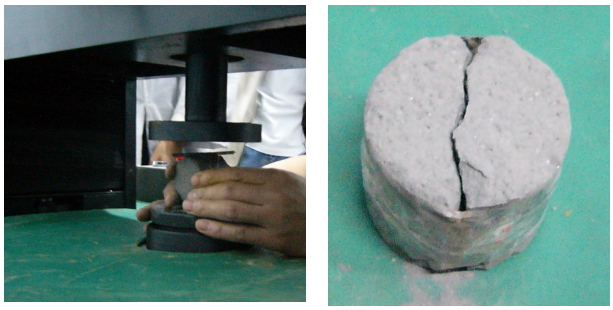


图 2 材料劈裂试验
Fig.2 Splitting test of material



图 3 材料三轴试验
Fig.3 Triaxial shearing test of material

由图 5 可知，石英砂目数对材料凝聚力和内摩擦角有影响，石英砂目数越大，材料凝聚力越大，但内摩擦角越小。

3.2 新型岩土相似材料的力学特性

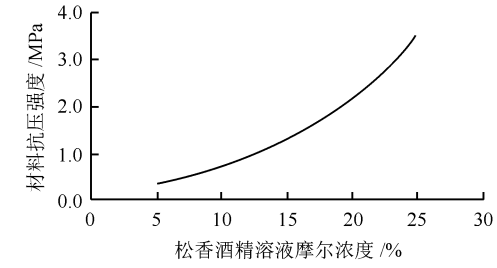
大量材料配比和力学参数测试表明铁晶砂胶结新型岩土相似材料具有如下显著的特点：

（1）材料力学参数变化范围较广，只要调整其中各组成部分的配比，即可适应不同种类岩体介质的相似要求，大大简化了模型试验研究工作的难度。

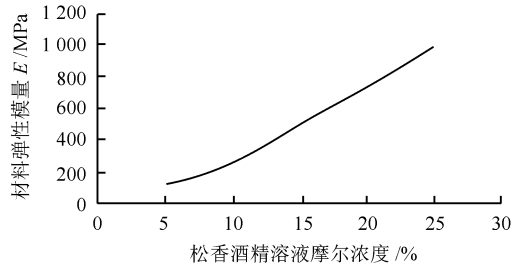
（2）材料不生锈，具有很高的绝缘性，可在模型块上贴片而无须采取其他保护措施。

（3）所使用的主要原料均为市场或工厂定型产品，价廉易得，可大幅降低模型试验成本。

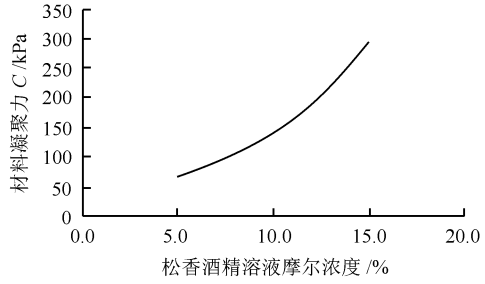
（4）材料制作工艺简单，砌块成型脱模后，在室温下通风 3 d 即可全部干燥投入使用，大大缩短了模型制作周期。



（a）

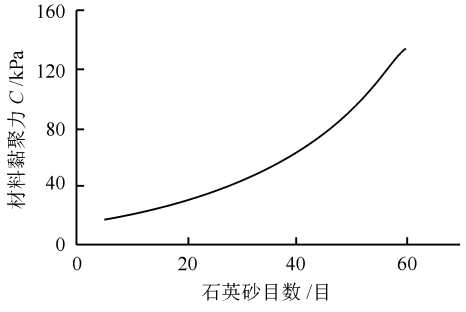


（b）

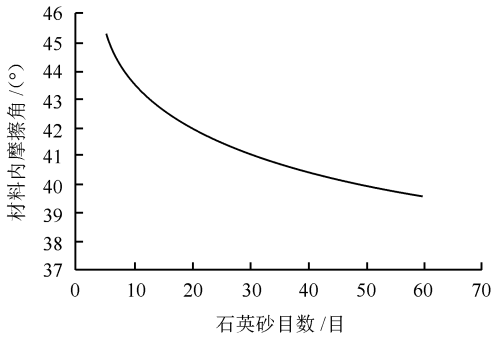


（c）

图 4 松香酒精溶液摩尔浓度对材料力学特性的影响
Fig.4 Influence of molar concentration for rosin alcohol solution on mechanical properties of material



（a）



（b）

图 5 石英砂目数对材料凝聚力和内摩擦角的影响
Fig.5 Influence of mesh of quartz sand on cohesive force and internal friction angle of material

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（5）材料没有任何毒副作用，不会对人体造成伤害。

（6）压制成型的材料砌块易于切割，便于各种形状模型的加工制作，砌块接缝可用本身材料进行粘接，砌缝不影响模型整体性能。

（7）材料物理力学性能稳定，不受温度和湿度的影响。

4　工程应用

4.1　工程概况

沪－蓉－西高速公路八字岭隧道位于湖北宜昌市长阳县及恩施土家族苗族自治州巴东县境内，隧道进口位于宜昌市长阳县榔坪镇八字岭村，出口位于恩施州巴东县野三关镇栗子园村四渡河东岸。由于地形条件的限制，设计为分岔式隧道，进口为分离式，与八字岭特大桥西桥台相连；出口为联拱式，与四渡河特大桥东桥台间距仅 20~30 m。该隧道在出口处由两条隧道逐渐的靠近，经过小间距段、连拱段，合并成大拱段，最终成为一条隧道。试验主要对靠近隧道出口的分岔段进行了三维地质力学模型试验研究。

4.2　模型尺寸

分岔隧道原型模拟尺寸（长×高×厚）为 15 m×（113~200）m × 85 m，其中长是垂直隧道轴线方向 *X* 向，高是沿高程方向 *Y* 向，厚是平行隧道轴线方向 *Z* 向。隧道底板以下深度按 3 倍最大洞跨来考虑，山体表面高低不平，按实际地形加以模拟。

地质力学模型试验的几何相似比尺取为 1/50，据此可得到分岔隧道模型的模拟尺寸（长×高×厚）为：3.0 m×（2.25~4.0）m×1.7 m，模型的连拱段长 84.4 cm、小间距段长 85.6 cm。图 6 为分岔隧道三维试验模型设计图。

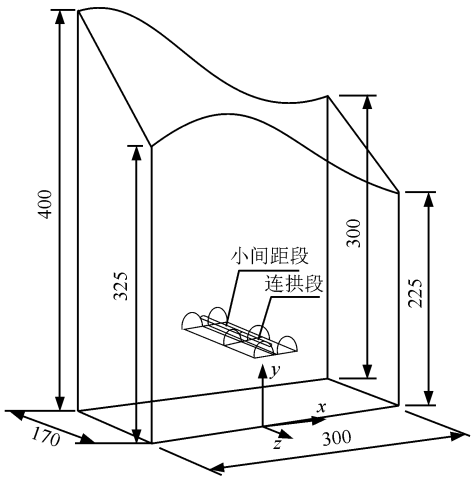


图 6　分岔隧道三维试验模型设计图（单位：cm）
Fig.6　Design diagram of 3D test model (unit: cm)

4.3　工程相似材料的配比

根据工程地质报告，八字岭分岔隧道围岩为微风化新鲜灰岩，岩溶不发育，岩体结构完整，岩体呈大块砌体结构，属Ⅳ类岩体。根据现场岩体力学试验结果，原岩和模型材料的物理力学参数取值见表 1。

表 1　原型和模型材料物理力学参数
Table 1　Physical mechanical parameters of prototype and model material

材料类型	重度 /kN·m^{-3}	变形模量 /MPa	凝聚力 /MPa	内摩擦系数	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比
原岩	27.8	6 000	1.3	1.11	30.0	0.9	0.25
模型	27.8	120	0.026	1.11	0.6	0.018	0.25

根据分岔隧道模型材料的物理力学参数，通过调整铁晶砂胶结岩土相似材料的配比，得到八字岭分岔隧道模型的相似材料配比，见表 2。

表 2　分岔隧道模型材料的配比
Table 2　Proportion of bifurcation tunnel model material

I：B：S	石膏占材料总重的百分比 /%	松香酒精溶液的摩尔浓度 /%	松香酒精溶液占材料总重的百分比 /%
1：0.67：0.29	2.5	7.5	5.0

注：I 表示铁矿粉含量（采用重量单位），B 表示重晶石粉含量（采用重量单位），S 表示石英砂含量（采用重量单位）。

4.4　三维模型制作与开挖及测试技术

模型采用夯实填筑法制作，基本流程如下：按确定的材料配比大规模称量材料→用搅拌机均匀搅拌材料→在试验台架装置内由下往上分层摊铺、夯实材料→按设计标高在隧道洞周分层埋设测试仪器，包括应变砖、微型多点位移计和光纤光栅测试元件。模型制作工艺过程包括材料称重、配料拌合、锤击夯实、放线定位、埋设测量元件和接线调试等。

图 7 为制作完成的分岔隧道三维试验模型照片。由于模型材料与原型材料的重度相似比尺等于 1，因此试验中原岩自重应力场将由重度与原岩一致的相似材料自动产生，而原岩水平构造应力则通过模型侧面施加的边界梯度荷载予以产生。隧洞采用人工钻凿方式、上下台阶法左右主洞交替进行开挖。

模型内部测试包括：洞周应变测试、位移测试和部分锚杆受力测试，其中应变测试采用粘贴有应变片的应变砖和 XL2101G 高速静态电阻应变仪采集分析系统进行测试；洞周和岩体内部位移采用模

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

型用微型多点位移计进行测试，锚杆受力采用应变片进行测试。



图 7 分岔隧道三维试验模型照片

Fig.7 Photo of 3D test model of bifurcation tunnel

5 结 论

模型试验测试分析的主要结果如下：

（1）隧道开挖后，因开挖卸荷，洞周变形朝向洞内。开挖后，洞周最大变形未超过 10 mm，隧道洞周变形值与现场实际监测值较为吻合，隧道总体变形是满足安全要求的。

（2）隧道开挖后洞周径向应力释放，切向应力增加，围岩内部应力以压应力分布为主，最大压应力远小于岩体抗压强度。另外，由于开挖卸荷影响，在隧道拱脚、拱肩和中隔墙部位出现部分应力集中。

（3）分岔隧道开挖过程中，其左右隧洞之间存在明显的相互影响，即左洞开挖会对右洞产生影响，右洞开挖会对左洞产生影响，因此隧洞开挖过程中应合理控制左右洞之间的开挖循环进尺，以尽可能减少（或降低）左右隧洞因交替开挖造成的相互影响。

（4）开挖对掌子面前方的扰动影响大约为 3~5 倍的洞径范围，影响程度沿开挖方向向前逐渐减弱，同时掌子面对其后方已开挖隧洞的洞周变形具有约束作用，约束效应沿远离掌子面的后方方向逐渐减弱，隧洞施工中应充分利用这一特点，为增加围岩稳定，在隧道开挖后应及时对围岩进行初期喷锚网支护。

（5）隧洞开挖后洞周锚杆的承载能力普遍未得到充分发挥，因此分岔隧道的锚杆支护设计可以进一步优化，洞周锚杆支护长度可以适当减短，锚杆间距可以适当加大。

（6）通过超载状态下对隧道洞周围岩变形、应力变化规律和破坏机制的分析，得到八字岭分岔隧道的设计承载安全度为 4.0、极限承载安全度为 7.0，表明八字岭分岔隧道的设计是安全可靠的，其围岩整体是安全稳定的。

参 考 文 献

[1] FUMAGALLI E. Statical and Geomechanical Model[M]. New York: Springer, Wien, 1973.

[2] KIM S H, BURD H J. Model testing of closely spaced tunnels in clay[J].**Geotechnique**, 1998, 48(3): 375－388.

[3] 张强勇，李术才，焦玉勇. 岩体数值分析方法与地质力学模型试验原理及工程应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.

[4] 沈泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报，2001，18（5）：32－36.
SHEN Tai. Development of geomechanic model experiment techniques[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2001, 18(5): 32－36.

[5] 杜应吉. 地质力学模型试验的研究现状与发展趋势[J]. 西北水资源与水工程，1996，（2）：64－67.
DU Ying-ji. Research status and development trend of geomechanical model test[J]. **Chinese Journal of Water Resources & Water Engineering**, 1996, (2): 64－67.

[6] 陈兴华. 脆性材料结构模型试验[M]. 北京：水利电力出版社，1983.

[7] 左保成，陈从新，刘才华. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学，2004，25（11）：1 805－1 808.
ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua. Research on similar material experiment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1 805－1 808.

[8] 韩伯鲤，陈霞龄，宋一乐. 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.
HAN Bo-li, CHEN Xia-ling, SONG Yi-le. Research on similar material of rockmass[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering**, 1997, 30(2): 6－9.

[9] 彭海明，彭振斌，韩金田. 岩土相似材料研究[J]. 广东土木与建筑，2002，12（12）：13－17.
PENG Hai-ming, PENG Zhen-bin, HAN Jin-tian. Research on similar material of geotechnical engineering[J]. **Journal of Guangdong Civil Construction**, 2002, 12(12): 13－17.

[10] 马芳平，李仲奎，罗光福. NIOS 模型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）：48－52.
MA Fang-ping, LI Zhong-kui, LUO Guang-fu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, 23(1): 48－52.

[11] 张强勇，李术才，朱维申，等. 铁晶砂胶结岩土相似材料及其制备方法：ZL200510104581.4[P]. 北京：中华人民共和国知识产权局，2005.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net