

磁性岩土相似材料物理力学性能试验研究*

阮博, 罗先启

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:地质力学磁力模型试验能够模拟实际工程中的复杂情况,从而确定现场中难以确定的问题。而磁性岩土相似材料与原型材料的力学性能参数是否相似,是地质力学磁力模型试验是否可靠的重要因素,为了保证模型试验结果的可靠性,需要对磁性岩土相似材料进行试验研究。由于岩土中岩体与结构面力学性能相差很大,将岩土相似材料分为岩体相似材料与结构面相似材料分别研究,选取铁粉、石英砂、粘土为岩体磁性相似材料,选取铁粉、重晶石粉、石膏为结构面相似材料。测量相似材料的密度、抗压强度、弹性模量、粘聚力、内摩擦角、泊松比等力学性能参数,研究材料含量与物理力学性能变化之间的规律,为地质力学磁力模型试验提供指导。

关键词:地质力学磁力模型试验;磁性相似材料;物理力学性能试验

中图分类号:TU411

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)01-0045-07

Research on Physico-mechanical Properties of Geotechnical Magnetic Similar Material

Ruan Bo, Luo Xianqi

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P.R. China)

Abstract: The magnetic model test of the geo-mechanical can stimulate complex situation of real project, so as to determine the difficult problems in the field. Whether the magnetic mechanical parameters of geotechnical similar material and prototype materials are similar, it is an important factor in Geo-mechanical Model Test of magnetic. In order to ensure the reliability of model test results, it is highly needed to study magnetic geotechnical similar material. As to the big difference of rock and structural plane, we studied the rock magnetic similar material and the structural plane magnetic similar material separately. Choosing iron powder, quartz sand and clay as the structural plane magnetic similar material and iron powder, barite powder, and gypsum as the rock magnetic similar material, the density, compressive strength, elastic modulus, cohesion, internal friction angle and poisson ratio were measured. We studied effect of different proportions of magnetic similar materials on the physical and mechanical properties, so as to give guidance to the geomechanics model test.

Keywords: Geo-mechanical Model Test of magnetic; magnetic similar material; physico-mechanical property experiments

0 引言

随着科技的进步,建筑物的建造地点的地质条

件也越来越复杂,建筑物对地基变形的影响,以及地下洞室围岩的稳定、高陡边坡的稳定性研究等都是现场施工中难以确定的。而磁力模型试验用磁

* 收稿日期:2018-07-21(修改稿)

作者简介:阮博(1993-),男,硕士,湖北黄冈人,主要从事岩土力学方面的研究工作。Email: jbxh_512@163.com

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB013505);国家自然科学基金(51279100)

性相似材料模拟实际工程中的岩土材料的性质,通过模型试验模拟实际工程的复杂情况,能够解决现场中难以确定的问题,从而为在更复杂的施工环境中施工提供了技术支持。而磁性岩土相似材料与原型材料的力学性能参数是否相似,是地质力学磁力模型试验是否可靠的重要因素,从而研究磁性岩土相似材料的物理力学性能十分必要。

程圣国等^[1]在 2002 年研究了相似材料试验的设计理论以及评价方法,对磁性相似材料的研制提供了理论基础。2009 年,罗先启等^[2]提出了地质力学磁力模型试验的概念,介绍了磁力模型试验的基本原理与理论支持,初步研究了磁性相似材料的特性。

不同于传统的力学模型试验,磁力模型试验中的磁力场更加接近于重力场。磁力模型试验中,磁性相似材料的力学性能参数是否跟实际工程中材料的力学性能相似,是磁力模型试验是否能真实的还原实际情况的关键。

首先要选取合理的相似材料,目前关于相似材料的研究情况如下:武汉大学韩伯鲤等^[3]于 1983 年研制的 MIB 材料,由加膜铁粉、重晶石粉、松香、石蜡和酒精组成。试验结果表明该材料具有容重高(大于 37 kN/m^3)、强度低(单轴抗压强度约为 0.55 MPa)、弹性模量较小(低于 100 MPa)等特点;清华大学马芳平等^[4]于 2004 年研制的 NIOS 相似材料,模拟的容重比较大;山东大学张强勇等^[5]进行的试验表明:IBSCM 相似材料具有容重高、性能稳定、模拟的物理力学指标范围广等显著特点,可用作模型试验的相似材料,模拟大部分的岩体;董金玉(2012)等^[6]进行的试验表明,相似材料的密度随着铁粉的含量的增加而增大,材料的粘聚力、抗压抗拉强度、弹性模量随松香酒精浓度的增加而增大,石膏含量增加,相似材料的密度、抗压抗拉强度和内摩擦角减小;黄星星(2012)等^[7]采用的相似材料价格低廉,材料的抗压强度、弹性模量随水膏比、橡胶粉含量增加而减小,比重随铁粉、重晶石粉含量增加而增大,随水膏比、橡胶粉含量增加而减小。

以上相似材料试验中,加入铁粉并不是为了使材料具有磁性,而是为了调节材料的密度,并且加入的铁粉含量少,材料的磁性不能达到磁力模型试验的要求,因此,有必要加大铁粉的含量,重新研究其力学性能变化规律。

岩土材料中,岩体与脆弱的结构面力学特性相差很大,需要分开研究,所以试验采用两组相似材料来模拟。选用铁粉、重晶石粉、石膏、水等岩体相似材料来模拟边坡中的岩体,选用铁粉、石英砂、粘土、水等结构面相似材料来模拟边坡中的结构面,调整材料各组分的配比,研究其力学特性。

如果利用磁力发生装置使材料的容重 ρ_g 增大 n 倍的,则可以通过调整材料的物理力学参数和模型的几何尺度来达到准确模拟实际工程的目的^[8]。

1 磁性岩土相似材料物理力学试验研究

1.1 磁性岩土相似材料的组成

研究不同组份含量对相似材料的物理力学性能的影响,其中结构面相似材料由铁粉、黏土和石英砂组成,岩体相似材料由铁粉、重晶石粉和石膏组成。其中作为粉体磁性材料及配重材料的铁粉为 325 目的细粒铁粉。石英砂与重晶石粉为骨料,用来调节材料的内摩擦角、强度等指标,石英砂粒径为 14 目,重晶石粉粒径为 600 目。黏土与石膏为相似材料的粘结材料,用来获得相应的粘聚力,保持材料的整体性。本试验所用的粘土为上海静安区第 4 层淤泥质粘土,含水量高、孔隙比大、高压缩性、强度低,石膏则采用工业石膏,强度大、低压缩性,研究结构面相似材料的密度、强度、粘聚力、内摩擦角、弹性模量和岩体相似材料的强度及弹性模量。

1.2 磁性相似材料配比方案

如表 1 所示,石英砂密度小,粘土强度低,用来模拟边坡中脆弱的结构面,而边坡中的岩体强度高、密度大,采用重晶石粉、石膏、铁粉作为相似材料。试验方案如表 2 所示。

结构面相似材料试验控制指标:含水量 10%,养护时间 3 d。1~5 组为固定石英砂与黏土的质量比,改变铁粉的含量;6~10 组固定铁粉与黏土的质量比,改变石英砂的含量;11~15 组为固定铁粉与石英砂的质量比,改变材料中黏土的含量。

岩体相似材料试验控制指标:含水量 10%,养护时间 3 d。1~3 组保持重晶石粉含量不变,调整铁粉与石膏的含量;4~6 组保持铁粉含量不变,调整重晶石粉与石膏的含量;7~9 组保持铁粉含量不变(降低含量),调整重晶石粉与石膏的含量。

表 1 软弱结构面磁性相似材料配比方案
Table 1 Experiment scheme of structural plane magnetic similar material

实验组数	铁粉含量 /%	石英砂含量 /%	粘土含量 /%
1	6	56	28
2	25	44	22
3	40	33	16
4	48	28	14
5	55	23	11
6	50	15	25
7	40	30	20
8	32	42	16
9	27	50	14
10	19	62	10
11	55	27	8
12	52	26	12
13	50	25	15
14	46	23	20
15	44	22	22

表 2 岩体磁性相似材料配比方案
Table 2 Experiment scheme of rock magnetic similar material

实验组数	铁粉含量 /%	重晶石粉含量 /%	石膏含量 /%
1	20	61	19
2	19	62	19
3	17	65	17
4	15	75	10
5	15	78	7
6	14	73	14
7	12	76	12
8	11	79	11
9	11	81	8
10	8	82	10

1.3 试验结果

由于岩体在实际工程中一般不发生滑移等变化,所以只研究岩体磁性相似材料的密度、抗压强度以及弹性模量 3 个力学参数,见表 4。

表 3 结构面磁性相似材料物理力学特性试验结果
Table 3 Experimental results of structural plane magnetic similar material

试验	密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
1	2.38	0.26	38.1	57	15.9	0.41
2	2.47	0.36	102.38	9	41.4	0.33
3	2.61	0.38	124.0	8	29.2	0.36
4	2.73	0.44	83.4	21	61	0.27
5	2.84	0.92	72.50	38	84	0.22
6	2.77	0.53	76.70	24	70	0.27
7	2.61	0.42	122.1	7	29.2	0.39
8	2.55	0.37	119.0	6	38.4	0.35
9	2.47	0.39	108.0	8	41.0	0.33
10	2.44	0.32	81	22.3	37.0	0.35
11	2.83	0.95	72.50	38	82	0.24
12	2.7	0.67	74.00	29	72.3	0.24
13	2.76	0.54	76.70	23	70	0.26
14	2.70	0.42	89.0	17	50	0.27
15	2.62	0.41	108.7	12	47.9	0.33

表 4 岩体磁性相似材料物理力学特性试验结果

Table 4 Experimental results of rock magnetic similar material

试验	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
1	2.78	11.35	800
2	2.76	11.2	800
3	2.74	7.47	700
4	2.7	4.64	350
5	2.72	4.36	100
6	2.69	5.85	600
7	2.66	5.7	500
8	2.64	4.77	450
9	2.64	4.38	140
10	2.62	4.62	350

2 试验结果分析

2.1 结构面相似材料的试验结果分析

2.1.1 铁粉含量与力学性能的关系

铁粉含量小于 25% 时,相似材料的粘聚力与弹性模量不断增大,内摩擦角减小,如图 1,2 所示。当铁粉含量为 6%~55% 时,泊松比的变化范围为 0.23~0.41。

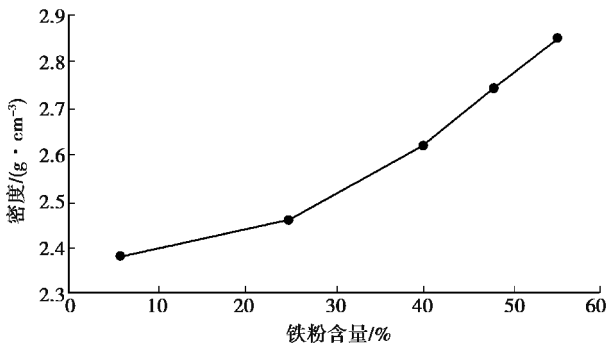


图 1 结构面相似材料铁粉含量与密度的关系

Fig. 1 The relationship between the density and iron content for structural plane similar material

2.1.2 石英砂含量与力学性能的关系

当石英砂含量大于 30% 时,随着石英砂含量的增大,相似材料的粘聚力、泊松比减小,而弹性模量随石英砂含量的增加而增大,如图 3、4 所示;当石英砂含量占试样总质量的 15%~62% 时,材料的内摩擦角变化范围为 $6^\circ \sim 23^\circ$ 。

2.1.3 粘土含量与力学性能的关系

在磁性相似材料中,黏土为粘结材料,随黏土含

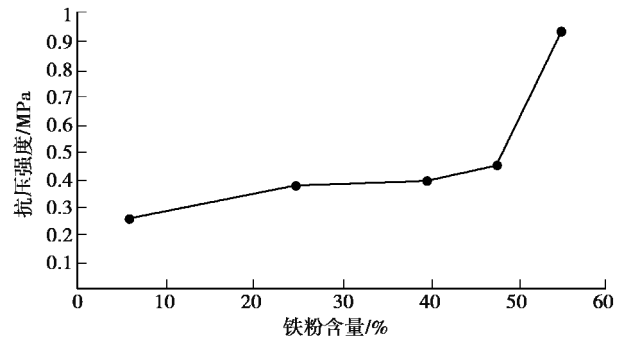


图 2 铁粉含量与抗压强度的关系

Fig. 2 The relationship between the compression strength and iron content

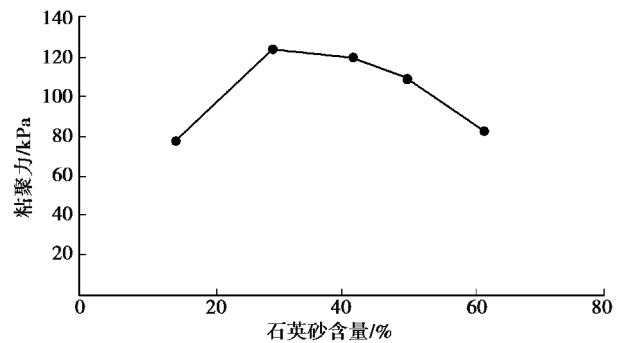


图 3 石英砂含量与粘聚力的关系

Fig. 3 The relationship between the cohesion and sand content

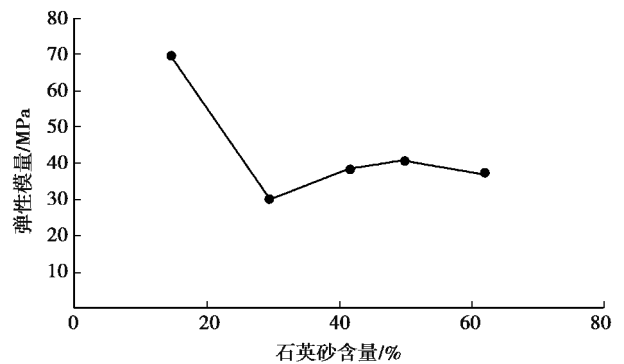


图 4 石英砂含量与弹性模量的关系

Fig. 4 The relationship between the elastic modulus and sand content

量的增加,相似材料的粘聚力增大,当黏土含量为 22% 时,材料的粘聚力为 108.6 kPa,如图 5、6 所示。

2.2 岩体相似材料试验结果分析

2.2.1 铁粉含量与力学性能的关系

相似材料中,逐渐增加铁粉的含量,研究铁粉对磁性相似材料物理力学性能的影响。当铁粉含量为 20% 时,材料的密度和抗压强度分别可达 2.78 g/cm^3 、11.35 MPa,如图 7 所示。试验方案 2 中铁粉与弹性模量没有明显的关联,由于本组试验中采用石膏最为粘结剂,推测石膏为影响弹性模量的主要因素。

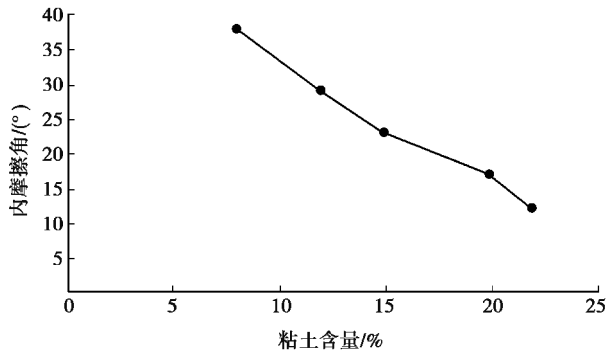


图5 粘土含量与内摩擦角的关系

Fig. 5 The relationship between the internal friction angle and clay content

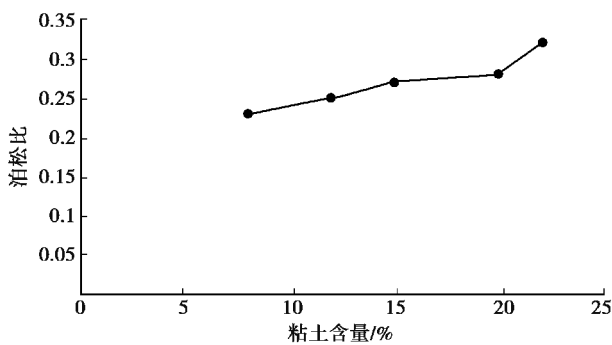


图6 粘土含量与泊松比的关系

Fig. 6 The relationship between Poisson ratio and clay

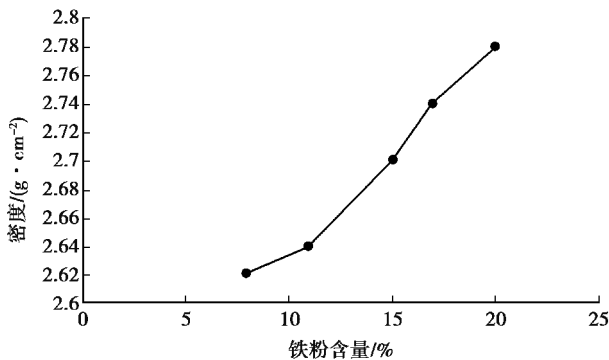


图7 岩体相似材料铁粉含量与密度的关系

Fig. 7 The relationship between the density and iron content for rock similar material

2.2.2 重晶石粉含量与力学性能的关系

重晶石粉含量增加,材料的密度、抗压强度以及弹性模量降低,如图8,这是因为,重晶石粉的性质和石英砂类似,其规律和石英砂类似。

2.2.3 石膏含量与力学性能的关系

当黏土含量为14%时,材料的密度最小,为2.69 g/cm³,如图9所示;同样为粘结材料,石膏对抗压强度与弹性模量的影响与黏土的规律相反,考虑到石膏成型后具有较大的强度与弹性模量,代替

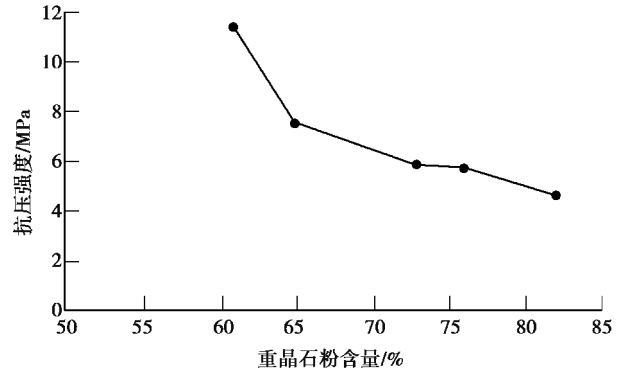


图8 重晶石粉含量与抗压强度的关系

Fig. 8 The relationship between the compression strength and barite content

铁粉成为了主要影响因素;当石膏含量为19%时,抗压强度可达到11.35 MPa。

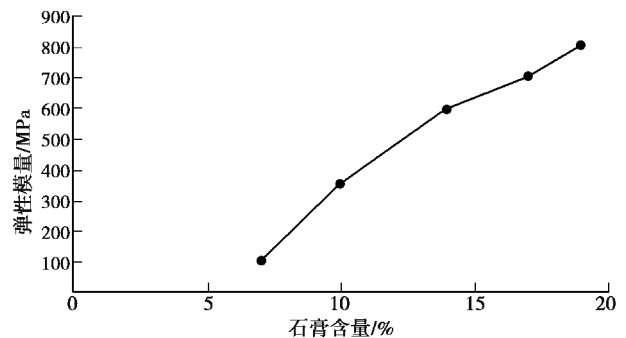


图9 石膏含量与弹性模量的关系

Fig. 9 The relationship between the elastic modulus and gypsum content

2.3 磁性相似材料参数与锦屏一级水电站边坡材料参数对比

锦屏一级水电站位于四川雅砻江中游,该坝址河道顺直而狭窄,两岸基岩裸露,岩壁耸立,岩层间挤压错动,节理裂隙密集,其材料特性具有代表性。同时其具有岩体和结构面,其材料参数能够验证本磁性岩土材料模拟的物理力学性能是否能满足实际工程的要求。锦屏边坡的岩体、断层、软弱结构面的物理力学参数如表5^[9]、6。

表5 岩体力学参数

Table 5 Mechanical parameters of rock masses

岩石质量等级	E_0/GPa	c/MPa	μ
Ⅲ1	9.20~14.60	1.50	0.25
Ⅲ2	6.40~10.20	0.90	0.28
Ⅳ1	2.56~1.64	0.60	—
Ⅳ2	1.40~2.40	0.40	0.30
V	0.37~0.82	0.02	>0.30

表 6 主要断层、软弱结构面的力学参数
Table 6 Mechanical parameters of main faults and weak structural planes

名称	E_0/GPa	c/Mpa
f5 大理岩	0.4	0.02
f5 砂板岩	0.4	0.02
f2	0.4	0.02
F1	0.4	0.02
挤压带	0.4	0.02
SL44~1	2.0	0.10
f42~9	0.4	0.02

锦屏边坡中岩石质量等级从Ⅲ级到Ⅴ级,弹性模量为 0.37~14.6 GPa,岩体磁性相似材料的弹性模量为 0.1~0.8 GPa,其相似比为 18.25;锦屏边坡中断层、软弱结构面,弹性模量范围从 0.4~6.5 GPa,结构面磁性相似材料的弹性模量为 27.40,如表 7。根据毕金锋等^[8]研制的磁力发生装置,能将磁性相似材料的容重提高 20 倍,根据相似判据,模型的几何尺寸可以达到原型的 1/360~1/540。

表 7 原型材料与磁性相似材料对比
Table 7 Comparison of prototype materials and magnetic materials

分类	E_0/GPa		相似比
	原型	模型	
岩体	0.37~14.6	0.1~0.8	18.25
断层、结构面	0.4~2.0	0.016~0.073	27.40

3 结论

试验采用了两组相似材料,分别研究了材料配比与各力学性能之间的关系,结论如下:

(1)铁粉含量增加,试样抗压强度显著增大。黏土含量增加,试样抗压强度减小。石英砂含量增加,试样抗压强度降低。抗压强度范围为 4.36~11.35 MPa;铁粉含量增加,试样弹性模量增大。黏土含量增加,试样弹性模量减小,弹性模量范围 15.9~72.5 MPa;铁粉含量增加,试样粘聚力增大,内摩擦角减小,泊松比呈减小的趋势,其中粘聚力范围 38.1~124.1 kPa,内摩擦角范围 6°~57°,泊松比

范围 0.23~0.41;石英砂含量增加,试样的密度减小,密度范围为 2.38~2.85 g/cm³。

(2)铁粉含量增加,试样抗压强度增大,粘聚力增大,内摩擦角减小,泊松比减小;重晶石粉含量增加,相似材料的抗压强度减小,抗压强度范围为 0.26~0.96 MPa;石膏含量增加,试样抗压强度增大、粘聚力增大、内摩擦角减小、泊松比增大、弹性模量显著增大,弹性模量范围为 100~800 MPa;重晶石粉含量增加,相似材料的密度减小,密度范围为 2.62~2.78 g/cm³。

(3)岩体相似材料与原型的相似比为 18.25,断层、结构面相似材料与原型的相似比为 27.40。根据研制的磁力发生装置,材料容重能提高 20 倍,模型的几何尺寸可以模拟原型的 1/360~1/540。

参考文献 (References)

- [1] 程圣国, 罗先启, 方坤河. 土质滑坡相似材料试验设计理论及评价方法研究[J]. 水力发电, 2002(4): 21-22, 29. (Cheng Shengguo, Luo xianqi, Fang Kunhe. The test and design theory of the similar materials of soil-type landslide and the study on its assessment method[J]. Water Power, 2002(4): 21-22, 29. (in Chinese))
- [2] 罗先启, 葛修润, 程圣国, 等. 地质力学磁力模型试验相似材料磁力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3801-3807. (Luo Xianqi, Ge Xiurun, Cheng Shengguo, et al. Study of magnetic material property of geomechanical model test in electromagnet field[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 28 (Supp. 2): 3801-3807. (in Chinese))
- [3] 韩伯鲤, 张文昌, 杨存奋. 地质力学模型材料(MIB)的研究[J]. 西北水电技术, 1983(3): 49-54. (Han Boli, Zhang Wenchang, Yang Cunfen. Study on material of geomechanical model [J]. Northwest Hydropower, 1983(3): 49-54. (in Chinese))
- [4] 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): 48-51. (Ma Fanpin, Li Zhongkui, Luo Guangfu. NIOS model material and its use in geomechanical similarity model test [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 48-51. (in Chinese))
- [5] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土

- 相似材料的研制及其应用[J].岩土力学, 2008, 29(8): 2126-2130. (Zhang Qiangyong, Li Shucai, Guo Xiaohong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2126-2130. (in Chinese))
- [6] 董金玉, 杨继红, 杨国香, 等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 44-49. (Dong Jinyu, Yang Jihong, Yang Guoxiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 44-49. (in Chinese))
- [7] 黄星星. 锦屏一级水电站岩体相似材料的配比试验及回归分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. (Huang Xingxing. The rock materials ratio test and regression analysis of the first level hydropower station of Jinpin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [8] 毕金锋. 地质力学磁力模型试验理论及其设备研制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. (Bi Jinfeng. Study on experimental theory and equipment development of geo mechanical magnetic model test [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [9] 周维垣, 林鹏, 杨强, 等. 锦屏高边坡稳定三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 893-897. (Zhou Weiyuan, Lin Peng, Yang Qiang, et al. Experimental research on stability of Jinping high slope with three-dimensional geomechanical model [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(5): 893-897. (in Chinese))

(上接第 44 页)

- [6] 刘钟, 杨松, 赵琰飞, 等. 钻喷注一体化扩体锚杆施工方法[P]. 中国专利: CN101260669, 2008-09-10. (Liu Zhong, Yang Song, Zhao Yanfei, et al. Construction method of under-reamed anchor with the integration of drilling, jetting and grouting [P]. CN101260669, 2008-09-10. (in Chinese))
- [7] 胡建林, 张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1615-1619. (Hu Jianlin, Zhang Peiwen. Development of underreamed anchor and experimental study of uplift resistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1615-1619. (in Chinese))
- [8] 程良奎, 范景伦, 韩军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (Cheng Liangkui, Fan Jinglun, Han Jun, et al. Ground anchorage [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 中冶集团建筑研究总院. 岩土锚杆(索)技术规程(CECS 22-2005)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005. (Architectural Research Institute of China Metallurgical. Technical specification for ground anchors (CECS22-2005) [S]. Beijing: China Planning Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高压喷射扩大头锚杆技术规程(JGJ/T282—2012)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for underreamed anchor by jet grouted (JGJ/T282—2012) [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese))
- [11] Hobst L, Zajíc J. 岩层与土体的锚固技术[M]. 王绍基, 译. 北京: 冶金部建筑研究总院, 1986. (Hobst L, Zajíc J. Anchoring in rock and soil [M]. Translated by Wang Shaoji. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction, Ministry of Metallurgical Industry, 1986. (in Chinese))
- [12] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-12, 34. (Cheng Liangkui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7-12, 34. (in Chinese))
- [13] 程良奎, 张培文, 王帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668-682. (Cheng Liangkui, Zhang Peiwen, Wang Fan. Several mechanical concepts for anchored structure in rock and soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 668-682. (in Chinese))