

文章编号: 1008 - 2786 - (2012) 4 - 497 - 05

# 大型振动台试验相似材料研究

邹威<sup>1,2</sup>, 许强<sup>2</sup>, 刘汉香<sup>2</sup>

(1. 中铁二院成都地勘岩土工程有限责任公司, 四川 成都 610031;

2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 在分析总结近几年岩土工程物理模拟试验中常用的岩质相似材料研究现状的基础上, 采用重晶石粉、石英砂、石膏、甘油配制振动台模型试验相似材料, 通过不同配比的材料力学试验, 考虑相似材料的含水率, 分析研究了各种材料含量以及含水率变化对相似材料物理力学性质的影响规律, 发现含水率对材料的抗压强度、粘聚力、弹性模量、摩擦角有较大影响。根据试验结果最终确定了振动台试验相似材料配比。试验结果证明, 该相似材料力学指标稳定, 能很好地满足相似材料的选材要求, 便于一次性浇注较大尺寸规模的模型试件, 适用于大型振动台等物理模拟试验。

**关键词:** 振动台; 物理模拟; 相似材料; 含水率

中图分类号: P642

文献标识码: A

在岩质边坡动力响应、边坡破坏模式的研究方法中, 大型振动台物理模拟试验是一种行之有效的办法, 它能输入再现各种地震波, 模拟地震现象的主震、余震的全过程, 了解试验结构在相应各个阶段的力学性能动力特征, 可以直观的观测在地震力作用下边坡的变形和破坏, 验证分析数值分析的一些研究成果。许多工程和研究中的地震边坡问题都需要求助于相似模拟试验来探索、研究和预测。由于试验条件的限制, 我们的振动台试验往往都是采用缩尺试验, 将原型等比例缩小, 因此在进行大型振动台试验的过程中首先要对边坡模型进行相似关系设计, 使模型和原型结构的几何尺寸、材料性能保持一定比例<sup>[1]</sup>, 而正确的模拟原型的难点和关键所在是合理的选择相似材料, 所以有必要对模型的相似材料进行研究。

国内外许多学者对相似材料的研制进行了大量的研究工作, 取得了很多的研究成果, 但是对振动台试验相似材料进行研究的试验较少, 没有专门针对

振动台试验相似材料的研究, 梁庆国等<sup>[2]</sup>采用重晶石粉、石膏、沙子按一定配比制块模拟层状边坡振动台试验中的硬质岩石, 李育枢等<sup>[3]</sup>采用重晶石、石英砂、石膏、甘油水配置模拟振动台试验中的隧道围岩, 蒋树屏等<sup>[4]</sup>采用  $Fe_3O_4$  粉末、石膏和石英砂模拟隧道振动台试验中隧道围岩, 另外王汉鹏<sup>[5]</sup>等采用铁精粉、重晶石粉、石英砂作为骨料, 松香、酒精作为胶结剂, 石膏作为调节剂制成一种新型地质力学模型材料<sup>[5]</sup>, 左保成等用石英砂、石膏、和水泥来模拟岩石介质, 并研究了养护方式等对相似材料物理力学性质的影响规律<sup>[6]</sup>。但是多数岩质相似材料的研究都是风干或烘干后进行试验, 没有考虑相似材料的含水率问题, 但是在实际情况下岩石是具有一定含水率的, 含水率也会影响相似材料物理力学性质, 并且大型的模拟试验中相似模型很难干燥。本文在考虑岩质相似材料天然含水率的条件下, 分析讨论了骨料、胶结剂含量以及含水率对相似材料的物理力学性质的影响, 确定了大型振动台试验岩石

收稿日期( Received date): 2011 - 08 - 11; 改回日期( Accepted): 2012 - 01 - 09。

基金项目( Foundation item): 国家重点基础研究发展计划, 编号 2008CB425800。 [ Supported by Sichuan Province Outstanding Youth Fund project, NO. 07JQ0065. ]

作者简介( Biography): 邹威 ( 1985 - ) 男, 助理工程师, 地质工程专业, 主要从事铁路工程勘察、地质灾害治理工作。 [ Zou Wei ( 1985 - ), male, assistant engineer, major in geological engineering, engaged in railway engineering investigation and geological hazard control. ] E-mail: zouweidut@qq.com

相似材料配比。

## 2 模型试验相似材料的研制

### 2.1 相似材料原料的选择

根据前人多年的实践研究成果,总结出在研制岩质相似材料时应满足以下几项原则<sup>[5-6]</sup>: 1. 要求原料安全、对人体无害; 2. 原料选择时尽量选择普通易于购买,价格尽量低廉的材料; 3. 原料化学、力学、物理性质稳定,尽量不受时间、湿度、温度等外界条件的影响; 4. 相似材料制作工艺要求尽量简单易行,方便操作; 5. 相似材料制成后要有较高的绝缘性; 6. 材料具有可塑性、方便碾压制块,且易于成型,凝固时间短; 7. 调整材料的配比可以较大范围改变材料的力学性质。

### 2.2 相似材料原料的选择

为了配置需要的相似材料,需要使用不同种类和性能的相似材料原料,通常用骨料、胶结材料、外加料、外加剂组成。参考模型试验常用的几种相似材料,及各种配比相应的力学性能指标,根据振动台试验的特点,我们采用重晶石粉、石英砂、石膏、甘油和水作为相似材料的原材料,各种原材料的特性详见表 1。

表 1 原材料名称及性能

Table 1 Names and properties of raw materials

类别	名称	性能作用
骨料	石英砂	作为粗骨料,改变材料内摩擦角
外加料	重晶石粉	高重量,调节材料重量,作为填充材料,具有一定粘聚力
外加剂	甘油	保湿、降低力学性能
胶结料	水、石膏	不同配比可模拟不同的参数,胶结作用

### 2.3 相似材料标准试件制作与试验

本试验所采用两种形式试件,外形尺寸分别为高 80 mm,直径 40 mm 的圆柱体标准试件(I 型试件),采用制作标准试件的模具压制而成,以及环刀制成的高 20 mm,直径 61.8 mm 标准试样(II 型试件),图 1 为制模工具及部分制作的试件。试件具体制作步骤如下: 首先将各种所需试验材料准备好,将各种配制材料按预先设计方案设定材料配比均匀混合,加入规定用量的水搅拌均匀,充分搅拌,然后根据模具体积及设计相似材料密度计算出的材料质量,取设计质量的混合材料,将混合材料分层灌入模

具中按照设计的密度振动压实,静置一段时间后拆模即可成型。根据试验,将试样在自然条件下养护 15 d,试样能够完全固结达到其固结强度,在养护过程中定时喷水使试件保持设计的含水率。

本试验对每个试件进行单轴抗压强度试验和直剪实验,试验仪器采用南京土壤仪器厂生产的 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪以及国家电力公司南京电力自动化设备总厂生产的四联等应变直剪仪(图 1、图 2)。

## 3 试验结果分析

### 3.1 试样的材料性质及破坏特征

本次制作的相似材料试件在单轴抗压实验过程中的破坏过程及形态特征与岩石单轴抗压实验破坏过程及形态特征十分相似,如图 3 所示,试件破坏过程中形成的 45° 破裂面、基本竖直破裂面以及人字形破裂面。通过对单轴抗压实验数据结果分析,取相似材料试验的应力应变曲线如图 4 所示,相似材料在变形破坏过程中,首先经历弹性变形阶段(OA 段),该阶段的  $\sigma - \varepsilon_L$  曲线呈近似直线关系,相似材料试件主要产生可恢复的弹性变形,变形随应力成比例增加; 然后进入弹塑性变形阶段(AB 段),试件微破裂稳定发展,试件内开始出现新的微破裂,并随应力增加而逐渐发展,当荷载保持不变时,微破裂也停止发展,变形主要表现为塑性变形; 接着进入脆性破坏阶段(BC 段),轴向应变和体积应变速率迅速增大。试件承载能力达到最大,试件发生破坏; 最后进入破坏后阶段(CD),到本阶段,裂隙快速发展、交叉且相互联合形成宏观断裂面。此后,岩块变形主要表现为沿宏观断裂面的块体滑移,这些特征与典型岩石的破坏特征基本相同。因而确定用石英砂、石膏粉、重晶石粉、甘油、水为原材料来制作岩石的相似材料是合适的。

### 3.2 不同材料对比对试样物理力学性质的影响

通过对大量不同配比的相似材料试件的物理力学试验,获取大量实验数据,对实验数据进行归纳总结,从而分析研究各种材料的含量变化及含水率变化对相似材料力学物理性质的影响,主要得出以下结论:

1. 通过调整骨料石英砂的含量,发现改变骨料含量可以较大范围的调节相似材料的摩擦角以及抗压强度,从图 5、图 6 可以看出,在一定范围内材料

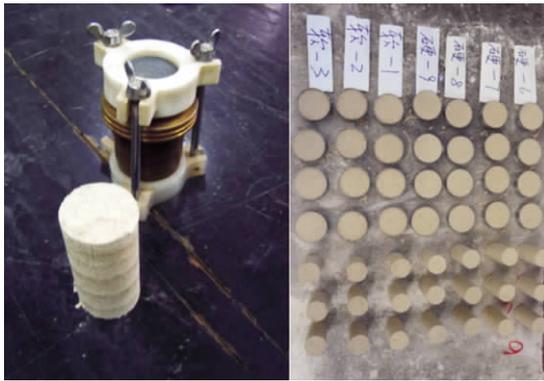


图 1 制模模具及部分试件

Fig.1 Pattern making dies and some specimens

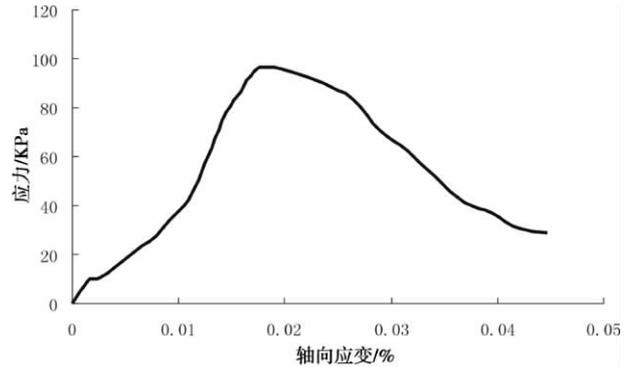


图 4 试件的应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of specimen



图 2 实验仪器

Fig.2 Experimental apparatus



图 3 试件单轴破坏形态

Fig.3 Uniaxial failure form of specimen

的摩擦角和抗压强度与骨料含量增长呈正相关变化。

2. 调整胶结剂石膏的含量,可以发现胶结剂主要作用是调节弹模和粘聚力,对抗压强度增大也有贡献,调节胶结剂的含量可以较大范围的调节材料

的弹模和粘聚力,从图 7,图 8 可以看出在一定范围内提高胶结剂的含量,材料的弹模和粘聚力随之增大。

3. 通过对不同含水率试件的物理力学性质测试,改变材料的含水率可以调整试件的弹模、粘聚力、摩擦角以及抗压强度。在一定范围内提高材料的含水率,材料的弹性模量和粘聚力随着含水率提高而下降,摩擦角也呈下降趋势但变化较小,随着含水率上升材料的抗压强度先升高后下降,含水率在 5.5% 时材料的抗压强度最大(图 9 ~ 12)。

### 4 结论

在总结分析了国内外近年来岩土工程物理模拟试验中常用的岩质相似材料的研究现状、了解了各种材料优缺点的基础上,通过试验测定不同胶砂比、石英砂、重晶石粉含量时,相似材料的重度、抗压强度、弹性模量和摩擦角等物理力学性能的变化情况,总结出材料物理力学参数随胶砂比、石英砂、重晶石粉含量以及含水率调整的变化规律,并最终确定了本次振动台试验岩石相似材料配比见表 2。试验结果证明,该相似材料力学指标稳定,能很好地满足相似材料的选材要求,便于一次性浇注较大尺寸规模的模型试件,适用于大型振动台等物理模拟试验。最终振动台试验结果也证明相似材料的配置是成功的,值得在其他边坡振动模型试验中推广,将该岩土相似材料应用于强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究,有效地揭示了强震作用下斜坡变形破坏机理,为合理解释汶川地震诱发次生地质灾害众多奇特现象提供理论支持,给岩质边坡的工程抗震提供了设计参考依据。

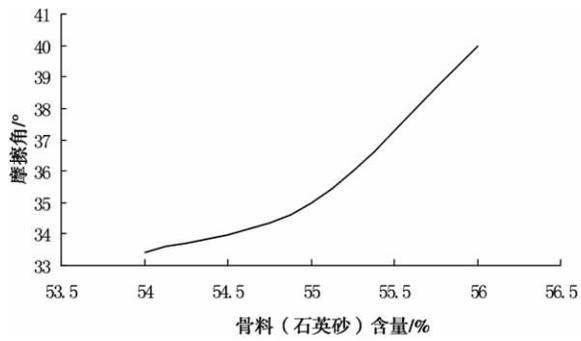


图5 石骨料含量与摩擦角的关系

Fig.5 Relationship between aggregate content and friction angle

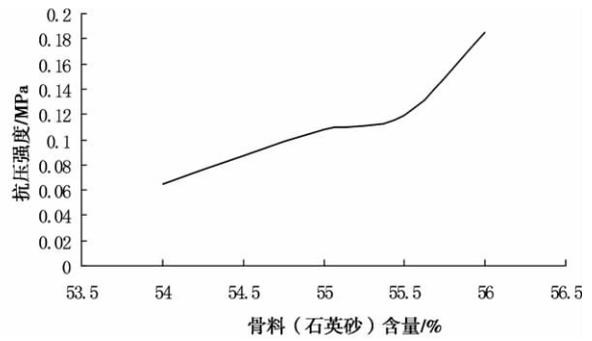


图6 骨料含量与抗压强度的关系

Fig.6 Relationship between aggregate content and compressive strength

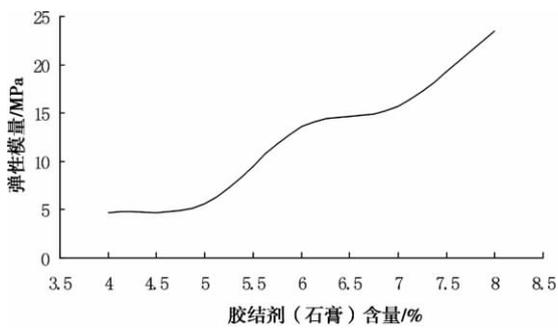


图7 胶结剂含量对弹性模量的影响

Fig.7 Influence of cementing agent content to elastic modulus

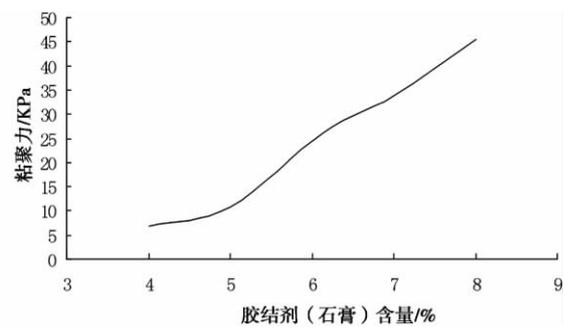


图8 胶结剂含量对粘聚力的影响

Fig.8 Influence of cementing agent content to cohesion

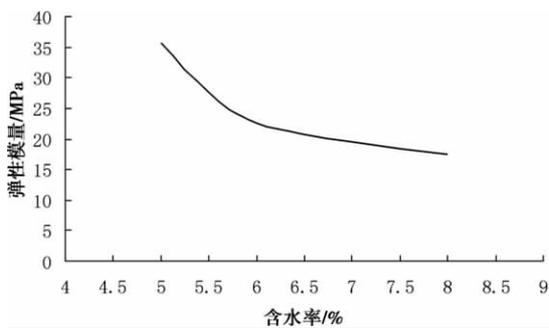


图9 含水率对弹性模量的影响

Fig.9 Influence of water content to elastic modulus

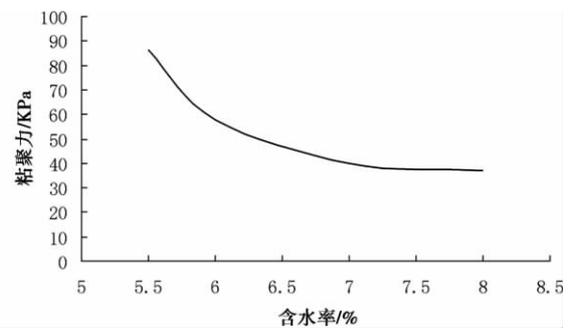


图10 含水率对粘聚力的影响

Fig.10 Influence of water content to cohesion

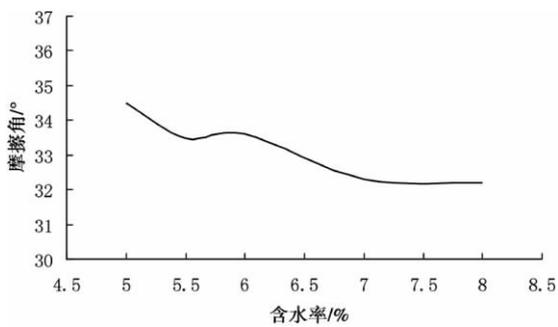


图11 含水率对摩擦角的影响

Fig.11 Influence of water content to friction angle

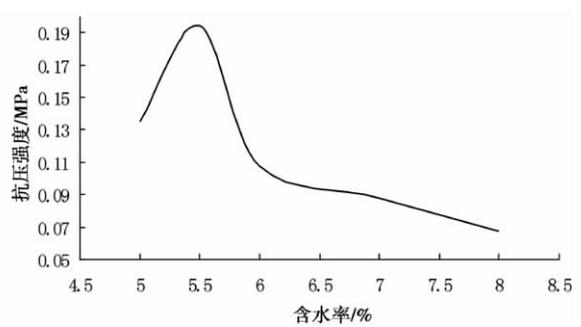


图12 含水率对抗压强度的影响

Fig.12 Influence of water content to compressive strength

表2 大型振动台模型试验相似材料配比及物理参数

Table 2 Similar material proportions and physical parameters of Large-scale shaking table model tests

岩性	重晶石粉/%	石英砂/%	石膏/%	水/%	甘油/%	重度/(g/cm <sup>3</sup> )	C/(kPa)	$\Phi$ /°	E/MPa	抗压强度/MPa
软岩	32	56	6	7	1	2.48	39.9	32.2	13.46	0.088
硬岩	32	54	8	5.5	1	2.7	74	33.4	50.06	0.25

## 参考文献(References)

- [1] Chen Guoxing. Geotechnical Earthquake engineering [M]. Beijing: Science Press 2007 [陈国兴. 2007 岩土地震工程学[M]. 北京: 科技出版社]
- [2] Liang Qingguo, Han Wenfeng, Ma Runyong, Physical simulation study on dynamic failures of layered rock masses under strong ground motion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1307 - 1311 [梁庆国, 韩文峰, 马润勇, 等. 强地震动作用下层状岩体破坏的物理模拟研究[J]. 岩土力学 2005 26(8): 1307 - 1311]
- [3] Li Yushu, Li Tianbing, Wang Dong et al, Plan design of model test on large vibrator for portal section of mountain tunnel under biased pressure [J]. Railway Engineering, 2009, (8): 61 - 65 [李育枢, 李天斌, 王栋, 等. 山岭偏压隧道洞口段大型振动台模型试验方案设计[J]. 铁道建筑 2009 (8): 61 - 65]
- [4] Jiang Shuping. Design test scheme of large-scale shaking table model for tunnel outlet highway tunnel in seismic region with strong motion [J]. Highway, 2009, 10: 245 - 249 [蒋树屏. 高烈度地震区公路隧道洞口段大型振动台模型试验方案设计[J]. 公路 2009, 10: 245 - 249]
- [5] Wang Hanpeng. Development of anew geomechanical similar material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, 25(9): 1842 - 1847 [王汉鹏. 新型地质力学模型试验相似材料的岩质[J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(9): 1842 - 1847]
- [6] Zuo Baocheng et al, Research on similar material of slope simulation experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805 - 1808 [左保成. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004 25(11): 1805 - 1808]

## Similar Materials in Large-scale Shaking Table Model Test

ZOU Wei<sup>1,2</sup>, XU Qiang<sup>2</sup>, LIU Hanxiang<sup>2</sup>

(1. Chengdu Geological Prospecting and Geotechnical Engineering Co. Ltd of CREEC, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing and summarizing the research status of similar materials of rock which were usually used in physical simulation experiments of geological engineering in recent years, using the similar materials of shaking table model tests compounded by barite powder, quartz sand, gypsum and glycerol, through mechanical test of different proportion of materials, and considering the water content of similar materials, the contents of all kinds of materials and the regularity of the influence of the water content changing on the physical and mechanical properties of similar materials were studied and analyzed. It was found that water content had great influence on the compressive strength, cohesion, elastic modulus and friction angle of materials. According to the result, the proportion of similar material in shaking table model test was fixed finally. It was proved by the test that the mechanical index of this kind of material was stable, could meet the needs of the choice requirements of similar materials, convenient for pouring relatively large-scale model specimen once only. It applies to physical simulation experiments like large-scale shaking table model test.

**Key words:** shaking table model test; physical simulation; similar material; water content