https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.003

水库型岩质边坡模型试验固－液两相相似材料研制与应用

安彩龙，王亮清*，田建林，张 成，柯 睿，孙自豪，牛奕凯

中国地质大学(武汉)工程学院，湖北武汉 430074

摘 要： 相似材料是水库型岩质边坡模型试验的关键.通过正交试验和大量室内试验研制出一种能同时模拟边坡岩体物理力学性能和渗流作用相似的固－液两相相似材料，该材料以石英砂、铁精粉和重晶石粉为骨料、水泥和石膏为胶结剂、硅油为调节剂.系统研究不同配比对材料力学性质的影响规律，确定各性能的主控组分，并利用多元回归分析建立各参数与材料配比之间的经验方程.最后结合工程案例配制相似模型材料，评价该材料的相似效果，并应用于水库型边坡模型试验过程中破坏模式和渗流场分析.试验结果表明：(1)相似材料各物理力学和水理参数分布范围较广，能满足岩质边坡模型试验对材料物理力学性能和渗流作用相似的需求，是一种理想的固－液两相材料；(2)相似材料各参数主控参量明显，便于通过调节配比模拟不同类型边坡岩体；(3)通过多元回归分析能够高效地配制边坡模型所需的相似材料，相似效果较好，边坡模型发生压剪变形破坏，分析了库水作用下模型试验过程中孔隙水压力变化规律.研究成果为进一步开展水库型岩质边坡模型试验多场演化特征研究提供参考.

关键词： 相似材料；固－液两相；正交设计方法；岩石力学；水库型岩质边坡；模型试验；工程地质.

中图分类号： TU452 **文章编号：** 1000－2383(2025)06－2372－15 **收稿日期：** 2024-08-22

Development and Application of Solid-Liquid Two-Phase Similar Material for Reservoir Rock Slope Model Test

An Cailong, Wang Liangqing*, Tian Jianlin, Zhang Cheng, Ke Rui, Sun Zihao, Niu Yikai

Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, *China*

Abstract: Similar material is the key to the model test of reservoir rock slope. A kind of solid-liquid two-phase similar material which can simulate physical and mechanical properties similar and seepage action similar of slope rock mass at the same time is developed through orthogonal test and a large number of laboratory tests. The material uses quartz sand, iron powder and barite powder as aggregate, cement and gypsum as cementing agent and silicone oil as regulator. The influence of material different ratios on its mechanical properties is systematically studied, and the main control components of each property are determined, and the empirical equation between each parameter and the ratio of materials is established by multiple regression analysis. Finally, the similar materials of model test are prepared in combination with an engineering case, and the similar effect of those materials is evaluated, and the materials are applied to the failure mode and seepage field analysis in the model test of reservoir slope. The test

基金项目： 国家自然科学基金重点项目(No. 41931295)；国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42202316).

作者简介： 安彩龙(1994－)，男，博士研究生，主要从事滑坡灾害演化与防治研究.ORCID：0009-0000-7127-7064. E-mail：acl3832@126.com

* **通讯作者：** 王亮清，教授，博士生导师，主要从事岩土体稳定性与地质灾害防治研究.ORCID：0000-0001-9584-5812. E-mail：wlq027@126.com

引用格式： 安彩龙，王亮清，田建林，张成，柯睿，孙自豪，牛奕凯，2025.水库型岩质边坡模型试验固－液两相相似材料研制与应用.地球科学，50(6)：2372－2386.

Citation: An Cailong, Wang Liangqing, Tian Jianlin, Zhang Cheng, Ke Rui, Sun Zihao, Niu Yikai, 2025. Development and Application of Solid-Liquid Two-Phase Similar Material for Reservoir Rock Slope Model Test. *Earth Science*, 50(6): 2372－2386.

results show follows: (1) Physical, mechanical parameters, and hydro-physical properties of similar materials are widely distributed, which can meet the requirements of physical and mechanical properties similar and seepage action similar of rock slope model test, and it is an ideal solid-liquid two-phase similar material. (2) The main control components of similar materials are obvious, which is convenient to simulate different types of slope rock mass by adjusting the ratio. (3) Multiple regression analysis can efficiently concoct similar materials for slope model test, and the similarity effect is good. The slope model undergoes compression shear deformation and failure, and the variation law of pore water pressure during model testing under the action of reservoir water is analyzed. The research results can provide reference for further research on multi-field evolution characteristics of reservoir rock slope model test.

Key words: similar material; solid-liquid two-phase; orthogonal design method; rock mechanics; reservoir rock slope; model test; engineering geology.

0　引言

水电工程岩体高边坡的变形和失稳是区域水电开发必须面对的重大安全挑战.在库水作用下,库岸水文地质条件易发生变化,进而影响库区内崩滑体的稳定性(Hu *et al.*,2012;李松林等,2020).因此,如何合理地研究库水作用对库岸边坡岩体物理力学性能和渗流作用的影响,是实现边坡多场演化特征及稳定性分析的基础.目前国内外针对水库型边坡多场演化特征的研究方法包括现场监测(Sun *et al.*,2014;原先凡等,2017)、数值分析(Zheng *et al.*,2018;马昊等,2020)和模型试验(贾官伟等,2009;He *et al.*,2018)等.其中模型试验因其可以再现边坡发展演化全过程,试验条件及变量因素易控制等优点,是研究外界因素作用下边坡多场演化特征最常用的手段之一.

可靠的固－液两相相似材料能够使相似模型有效再现实际边坡的地质现象与规律,是水库型边坡模型试验能否成功的关键.目前学者们在固液耦合相似材料方面已经取得了一定成果.黎良杰等(1997)选用砂、碳酸钙、石膏和硼砂制作了采场底板突水模型的相似材料.此后,诸多学者均通过大量多组别配比试验研制了流固耦合模型试验的新型材料(张杰和侯忠杰,2004;胡耀青等,2007;黄庆享等,2010;李树忱等,2010;韩涛等,2011;李术才等,2012),涉及的骨料包括沙、滑石粉、石英砂、膨润土和重晶石粉等,胶结材料包括石蜡、水泥、石膏和凡士林等,调节剂包括液压油、硅油等.在此基础上史小萌等(2015)、周毅等(2015)分别选用砂、碳酸钙、水泥、铁粉、凡士林和硅油以及水泥、石膏和石英砂配制了隧道突水和矿井沉降模型的固液耦合材料;王凯等(2016)研制了断层及围岩流固耦合材料;张杰等(2020)以河沙、水泥、大白粉、石蜡和淀粉研制出了矿井突水模型的相似材料.同时学者们还进一步通过正交试验极差分析或单因素敏感性分析等方法分析了不同配比对材料力学性质的影响规律,主要的物理力学和水理参数包括重度、抗压强度、弹性模量、泊松比、抗拉强度、黏聚力、内摩擦角以及吸水率、软化系数和渗透系数等.但上述成果研制的材料主要用于矿井、隧道、采场或煤层工程中突水、涌水、沉降等问题及隔(含)水层的研究.对于滑坡模型试验,需要同时满足重度、黏聚力、内摩擦角等物理力学性能和黏聚力、内摩擦角软化效果及渗流路径等渗流作用的相似,基于此徐楚等(2018)研制出同时模拟两种性能相似的水库型滑坡相似材料,但其成果主要针对的是三峡库区土质滑坡.岩质边坡模型试验相似材料也需要同时满足物理力学性能和渗流作用相似,以往的材料更注重物理力学性能相似,渗流作用相似考虑不全面,尤其是浸水后黏聚力和内摩擦角取值及其软化效应等易被忽略,边坡模型试验的相似模拟度较低.

综上所述,针对以往固液耦合相似材料服务对象主要是地下工程及渗流作用相似易被忽略等不足,尚缺乏对综合考虑边坡岩体物理力学性能和渗流作用相似的固－液两相相似材料的系统研究,本文基于正交试验设计配比方案,测试并分析了不同配比对材料力学性质的影响规律,建立各参数与材料配比之间的量化方程,最后以水布垭水电站坝址区的岩质边坡为背景,配制了相似模型材料,验证了其合理性,并在该模型试验破坏模式和渗流场变化规律研究中成功应用.

1　相似理论

物理模型试验是一种可直观对岩体介质变形破坏特征和过程进行观测的研究方法(左保成等,

2004),其成功开展的物质基础是具备满足岩体几何相似、边界条件相似和物理力学及水理特征相似的相似材料.边界条件相似主要是使模型与原型在边界接触面上的位移和受力状态一致,减小试验的边界效应;同时满足与原型力学参数相似可以更真实地模拟水、岩之间的耦合效应,提高试验的精度.相似原理可简单表示为:若模型和原型系统相似,则它们的每个物理力学参数和几何特征必然互相成一定比例关系(相似比C),可以通过试验测定原型系统的物理力学参量,再按比例推求模型系统相应的参量.目前相似判据最常用的方法为量纲分析法,通过选取基本量纲,其他物理量均可由基本量纲推导得出.水库型岩质边坡模型试验涉及的主要参数包括长度l、密度ρ、重力加速度g、质量m、力F、位移s、速度v、时间t、应变ε、应力σ、弹性模量E、泊松比μ、黏聚力c、内摩擦角φ、渗透系数k、软化系数k_r和吸水率ω等.假设模型试验采用的密度相似系数$C_\rho=m$,几何相似系数$C_l=n$,采用量纲分析法及弹性力学基本方程并结合流固耦合理论推导相似判据,即通过选取基本量纲系统[M][L][T],无量纲物理参数的相似系数为1,有量纲物理参数通过Buckingham π定理推导,相同量纲物理量的相似比相等,则可推导出以下相似关系:

(1)物理力学参数:

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

$$C_s=C_\varepsilon C_l=n, \tag{2}$$

$$C_\sigma=C_E=C_c=C_\rho C_g C_l=mn, \tag{3}$$

$$C_m=C_F=C_\rho C_l^3=mn^3, \tag{4}$$

$$C_v=C_l^{1/2}C_g^{1/2}=n^{1/2}, \tag{5}$$

$$C_t=C_s/C_v=C_l^{1/2}C_g^{-1/2}=n^{1/2}. \tag{6}$$

(2)水理性质参数:

$$C_{kr}=C_\omega=1, \tag{7}$$

$$C_k=C_l^{1/2}/C_\rho/C_g=n^{1/2}/m, \tag{8}$$

式(1~8)中:相似比C_x表示原型与模型之间具有相同量纲物理量之比,下标x表示相关物理力学参数或水理参数.

2 相似材料研制

2.1 原材料的选择

对于水库型岩质边坡模型试验,相似材料形成的试样应力学性质稳定且具有良好的可调节性;同时还需要有效模拟岩体遇水软化特性以及变形破坏特征,实现边坡模型应力场、位移场、渗流场等多场演化特征的研究.本研究为了保证所制备的相似材料具有适宜的孔隙率和重度,骨料为由粗、细料按照一定级配混合而成的散粒体,主要包括石英砂、铁精粉和重晶石粉,其中石英砂为30~40目粗骨料,主要起骨架作用,调节相似材料的孔隙率;铁精粉和重晶石粉分别为150目和200目细骨料,主要起调节重度的作用.同时参考大量资料选择P·O 32.5普通硅酸盐水泥和1 200目的石膏作为胶结剂,用来调节相似材料的抗压强度、剪切强度及其软化效应.此外,在相似材料制作过程中还添加了硅油、早强剂和减泡剂等作为调节剂,硅油的黏度为1 000 cs,主要起保水作用,保证拌合水与胶结剂充分发生水化反应,从而减少试件的养护时间,降低对养护条件的要求,同时还有助于提高材料的透水性能(黄庆享等,2010;李术才等,2012).所选择的相似材料基本成分见图1.

2.2 正交试验方案设计

正交试验已在模型试验相似材料的研究中得到了广泛应用.在需要考虑多个影响因子时,通过正交设计可以从全部试验中选取分布均匀且具有代表性的组合进行试验,达到降低试验组数的目的,同时也可以高效地分析各因子对试验结果的影响规律(Tian *et al.*,2022).在此次配比试验中,选择4因素(因素A:胶结材料/固体材料;因素B:石膏/胶结材料;因素C:石英砂/骨料;因素D:铁精粉/(重晶石粉+铁精粉))、5水平的正交方案(如表1所示),共设计25组配比试验.

2.3 测试参数选定及试件的制作

水库型岩质边坡通常考虑静水位和水位波动两种水库条件,静水位条件对坡体的影响主要为长期浸泡作用下静水位压力及库水入渗导致的岩体软化和抗剪强度劣化;水位波动条件则不仅要考虑库水位周期性升降导致的岩体力学性能劣化,还需要考虑水位下降引起的向外渗流压力(He *et al.*,2020).因此,对于水库型边坡模型试验,相似材料需要满足重度、抗压强度、黏聚力和内摩擦角等物理力学性能和抗压强度、黏聚力、内摩擦角的软化效果及渗流路径等渗流作用的相似.本文预研制出一种针对岩质边坡模型的满足固-液两相力学性能的材料,选择固相参数:密度ρ、自然状态下的抗压强度σ_c、黏聚力c和内摩擦角φ;液相参数:饱水状态下的抗压强度$\sigma_{c\omega}$、黏聚力c_ω和内摩擦角φ_ω及其相应的软化效应系数($k_{r\sigma}$、k_{rc}和$k_{r\varphi}$)和渗透系数k等物理力

学和水理参数作为研究指标.根据各指标测试设备的不同,共采用两种模具制作试样:内径 ϕ50×h100 mm 和 ϕ50×h50 mm 的圆柱模具.其中 ϕ50×h100 mm 的试样用于密度、抗压强度、剪切强度的测试;ϕ50×h50 mm 的试样用于渗透系数的测试.由于本研究共设计了25组配比试验,每组试验需要分别开展浸水饱和预试验及自然、饱和状态下的单轴压缩试验和直剪试验,其中浸水饱和预试验每组3个试样,单轴压缩试验每组6个试样,直剪试验每组6个试样,共制作了375个 ϕ50×h100 mm 圆柱试样.此外,渗透系数的测试每组3个试样,共制作了75个 ϕ50×h50 mm 圆柱试样,所制备的相似材料部分试样如下图2所示.相似材料的配制工艺为:(1)按正交设计方案称取固体材料并于小型搅拌机中搅拌均匀;(2)加入定量水及硅油、早强剂和减泡剂等调节剂,充分搅拌均匀;(3)将搅拌好的混合料依次装入模具中并震荡密实;(4)脱模,室温下养护7 d后将试样两面磨平,编号待试.

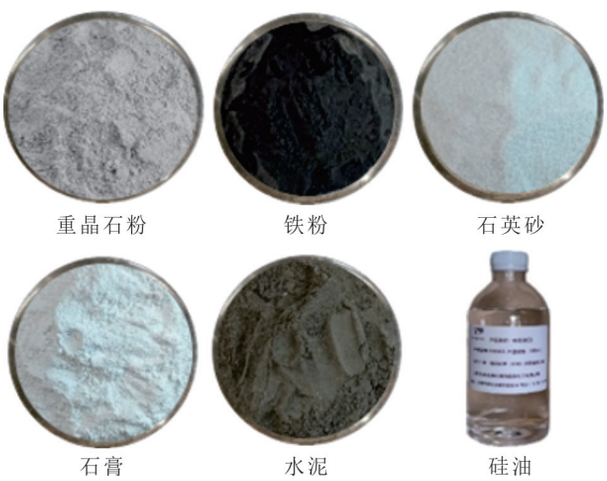

图1　相似材料组成成分

Fig.1　Components of similar material

表1　相似材料配比正交设计

Table 1　Orthogonal design of similar material

水平	因素A(%)	因素B(%)	因素C(%)	因素D(%)
1	2	60	25	15
2	4	70	35	20
3	6	80	45	25
4	8	90	55	30
5	10	100	65	35

注:每组试验设定固体材料、水和硅油质量恒定,分别取600 g、90 g、3.6 g;早强剂和减泡剂质量取胶结材料质量的0.1%.

3　相似材料参数测试及影响因素分析

3.1　相似材料物理力学参数和水理性质测试与结果分析

待试样养护好后,将25组不同配比试样用电子秤称量质量,计算相似材料的密度 ρ.同时将各组试样分别浸泡10 d,以试样吸水后的质量峰值为衡量标准记录各试验组试样浸水饱和所需要的时间,为后续开展饱和力学参数测试奠定基础.将 ϕ50×h100 mm 的圆柱试样采用WDJ-300型微机伺服控制岩石试验仪分别进行单轴压缩试验和直剪试验,测得各配比相似材料试样自然养护状态和饱水后的抗压强度(σ_c、$\sigma_{c\omega}$)和剪切强度参数(c、φ、c_ω、φ_ω),并计算其相应的软化效应系数($k_{r\sigma}$、k_{rc}和$k_{r\varphi}$);利用透水系数测试装置测量各试验组试样的渗透系数 k.相似试样各物理力学和水理参数测试结果如表2所示.其中相似材料密度分布范围为2.20～2.71 g/cm^3;自然状态下单轴抗压强度分布范围为0.19～3.10 MPa,粘聚力为0.15～1.70 MPa,内摩擦角为18.77°～58.51°.需要说明的是No.03、No.04、No.10试验组的试样浸水后短期内未饱和便发生大范围弱化崩解,因此该3组试样饱和状态下的抗压强度、剪切强度及渗透系数均无法测得.在不考虑3种崩解性材料的情况下材料饱水后单轴抗压强度分布

图2　相似材料部分试样

Fig.2　Partial specimens of similar material

表 2 相似材料物理力学参数测试结果

Table 2 Physical and mechanical parameters test results of similar material

试验号	设计配比	ρ(g·cm^{-3})	抗压强度(MPa)		剪切强度				软化效应系数			k(cm·s^{-1})
			σ_c	$\sigma_{c\omega}$	c(MPa)	c_ω(MPa)	φ(°)	φ_ω(°)	$k_{t\sigma}$	k_{tc}	$k_{t\varphi}$	
No.1	$A_1B_1C_1D_1$	2.54	0.19	0.13	0.15	0.11	36.63	19.94	0.69	0.73	0.54	5.05×10^{-6}
No.2	$A_1B_2C_2D_2$	2.52	0.20	0.10	0.19	0.13	38.06	21.71	0.51	0.68	0.57	6.67×10^{-6}
No.3	$A_1B_3C_3D_3$	2.45	0.32	/	0.56	/	45.00	/		/	/	/
No.4	$A_1B_4C_4D_4$	2.40	0.55	/	0.68	/	50.42	/		/	/	/
No.5	$A_1B_5C_5D_5$	2.28	1.18	0.38	1.10	0.59	58.51	33.37	0.32	0.54	0.57	9.63×10^{-5}
No.6	$A_2B_1C_2D_3$	2.53	0.44	0.29	0.28	0.18	34.76	21.42	0.65	0.64	0.62	1.38×10^{-5}
No.7	$A_2B_2C_3D_4$	2.49	0.39	0.20	0.34	0.23	39.41	26.81	0.51	0.68	0.68	2.87×10^{-5}
No.8	$A_2B_3C_4D_5$	2.41	0.68	0.27	0.55	0.33	41.08	28.25	0.39	0.60	0.69	6.21×10^{-5}
No.9	$A_2B_4C_5D_1$	2.20	0.81	0.34	0.97	0.45	46.36	30.78	0.42	0.46	0.66	8.73×10^{-5}
No.10	$A_2B_5C_1D_2$	2.56	1.23	/	0.73	/	32.27	/	/	/	/	/
No.11	$A_3B_1C_3D_5$	2.54	0.76	0.47	0.54	0.28	35.39	26.82	0.62	0.52	0.76	2.65×10^{-5}
No.12	$A_3B_2C_4D_1$	2.46	0.69	0.40	0.55	0.32	40.32	29.75	0.58	0.58	0.74	3.75×10^{-5}
No.13	$A_3B_3C_5D_2$	2.41	0.94	0.43	0.82	0.35	43.10	31.16	0.46	0.43	0.72	5.12×10^{-5}
No.14	$A_3B_4C_1D_3$	2.63	1.29	0.50	0.92	0.68	33.19	20.89	0.39	0.74	0.63	2.12×10^{-6}
No.15	$A_3B_5C_2D_4$	2.65	2.22	0.82	1.23	0.89	31.17	19.10	0.37	0.72	0.61	1.36×10^{-5}
No.16	$A_4B_1C_4D_2$	2.44	1.07	0.63	0.56	0.37	37.12	27.54	0.59	0.66	0.74	2.41×10^{-5}
No.17	$A_4B_2C_5D_3$	2.34	1.06	0.57	0.65	0.36	37.37	26.34	0.54	0.55	0.70	4.61×10^{-5}
No.18	$A_4B_3C_1D_4$	2.66	1.80	0.81	0.98	0.57	21.44	17.90	0.45	0.58	0.83	2.64×10^{-6}
No.19	$A_4B_4C_2D_5$	2.55	1.83	0.99	0.72	0.40	27.26	21.69	0.54	0.56	0.80	1.45×10^{-5}
No.20	$A_4B_5C_3D_1$	2.51	2.69	0.94	1.06	0.61	25.72	20.81	0.35	0.58	0.81	2.61×10^{-5}
No.21	$A_5B_1C_5D_4$	2.37	1.45	1.19	0.81	0.42	40.43	33.10	0.82	0.52	0.82	4.59×10^{-5}
No.22	$A_5B_2C_1D_5$	2.71	2.48	1.07	0.71	0.58	18.77	15.37	0.43	0.82	0.82	3.15×10^{-6}
No.23	$A_5B_3C_2D_1$	2.60	2.33	1.47	1.08	0.59	25.39	19.57	0.63	0.55	0.77	1.26×10^{-5}
No.24	$A_5B_4C_3D_2$	2.52	2.21	1.28	1.24	0.70	25.41	20.46	0.58	0.56	0.81	3.95×10^{-5}
No.25	$A_5B_5C_4D_3$	2.44	3.10	1.30	1.70	0.74	33.56	28.37	0.42	0.44	0.85	5.12×10^{-5}

范围为0.10～1.47 MPa,黏聚力为0.11～0.89 MPa,内摩擦角为15.37°～33.37°;抗压强度的软化系数分布范围为0.32～0.82,黏聚力的软化效应系数为0.43～0.82,内摩擦角的软化效应系数为0.54～0.85,饱和状态下相似材料的抗压强度和剪切强度较天然状态均有不同程度下降;渗透系数的分布范围为2.12×10^{-6}～9.63×10^{-5} cm/s.图3分别为自然和饱水状态下相似试样及灰岩在单轴压缩破坏后的形态,可以看出相似材料具有与岩石类似的破坏形式.相似材料各参数分布范围均较广,破坏形态与岩体类似,能基本满足水库型岩质边坡模型试验对相似材料物理力学性能和渗流作用相似的要求,是一种理想的固－液两相材料.可根据试验需求调整相似材料配比模拟不同类型岩体材料,为后续开展水库型边坡模型试验相似材料的配制提供参考.

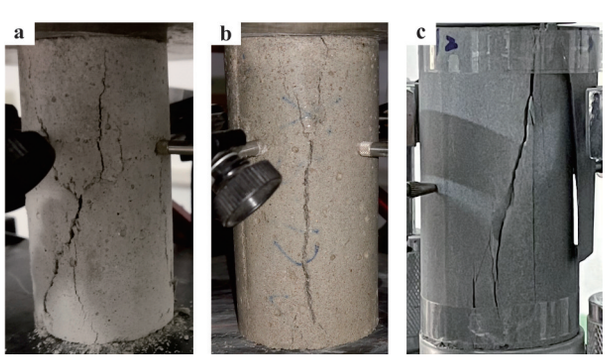

图3 相似试样及灰岩单轴压缩破坏形式

Fig.3 Failure mode of similar samples and limestone under uniaxial compression test

a. 自然状态相似试样;b. 饱和状态相似试样;c. 灰岩原岩

3.2 各因素对相似材料的影响规律

本文通过极差分析法研究A、B、C、D 4个组分因素对材料物理力学参数和水理性质的影响规律.极差通过各影响因素水平下平均值的最大值和最小值的差值求解得到,极差越大,对相似材料性质的影响越大.

3.2.1　相似材料密度影响因素分析　通过正交试验结果,对相似材料密度进行极差分析,计算A～D 4个因素水平下的平均值和极差,绘制如下图4所示的直观图.可以得到各因素对相似材料密度影响大小依次为C(极差:0.300,后文类似情况均为极差且不再赘述)＞A(0.100)＞D(0.052)＞B(0.046),因素C(石英砂/骨料)对相似材料密度起主要控制作用,石英砂含量越少,重晶石粉和铁粉含量越高,相似材料的密度越高,这间接也证明了骨料中添加重晶石粉和铁粉可以有效调节相似材料的重度.

3.2.2　相似材料抗压强度、剪切强度及其软化效应系数影响因素分析　根据各组相似材料测试结果分别计算自然状态与浸水饱和状态下各因素水平抗压强度、黏聚力、内摩擦角及其相应的软化效应系数平均值和极差,绘制如图5～图7所示的直观图.由图5a可知,饱和状态下相似材料的单轴抗压强度较天然状态有显著下降,两种状态下各因素对抗压强度影响大小均依次为A(自然:1.826;饱水:1.086)＞B(1.302;0.306)＞C(0.316;0.182)＞D(0.256;0.102),因素A(胶结材料/固体材料)对材料抗压强度影响最为显著,随着胶结材料含量增加材料的干、湿抗压强度均显著增加.此外,自然状态下通过增加胶结材料中石膏占比可进一步显著提升材料的抗压强度,但浸水状态下由于石膏遇水软化,其占比增加并不会对相似材料饱和抗压强度有明显的影响.由图5b可知,相似材料抗压强度的软化系数受各因素影响大小依次为:B(0.312)＞A(0.146)＞C(0.086)＞D(0.074),由于石膏的软化特性以及水泥的水硬性特征,软化系数随着石膏在胶结材料中占比的增加而显著降低,但又会随着胶结材料含量的增加而逐渐增大.

由图6和图7可知,饱和状态相似材料的剪切强度参数较自然状态均显著下降,自然状态下各因素对黏聚力影响大小依次为B(0.696)＞A(0.572)＞C(0.172)＞D(0.114),饱和状态下依次为B(0.436)＞A(0.329)＞D(0.140)＞C(0.051),两种状态下黏聚力均主要对因素B(石膏/胶结材料)和因素A(胶结材料/固体材料)较为敏感,随着胶结材料占比的增加以及胶结材料中石膏含量的增加,黏聚力显著增大.此外,自然状态下石英砂含量的增加对黏聚力也有一定促进作用.黏聚力的软化效应系数受各因素影响大小依次为:C(0.218)＞B(0.124)＞A(0.075)＞D(0.045),因素C(石英砂/骨料)起主要控制作用,随着石英砂含量的增加其软化效应系数显著降低,同时增大固体材料中胶结材料的含量也可以降低其软化效应.自然状态下各因素对内摩擦角影响大小均依次为A(17.01)＞C(16.69)＞B(2.08)＞D(1.89),因素A(胶结材料/固体材料)和因素C(石英砂/骨料)起主要控制作用,内摩擦角随着胶结材料含量的增加而显著降低,但又会随着石英砂含量的增加而显著增大.而饱和状态下依次为C(12.43)＞A(3.69)＞B(2.31)＞D(1.05),由于试件中的胶结材料浸水劣化,相对于自然状态因素A不再起主要控制作用,内摩擦角主要随着石英砂含量的增加而逐渐增大.材料内摩擦角的软化效应系数受各因素影响大小依次为:A(0.250)＞

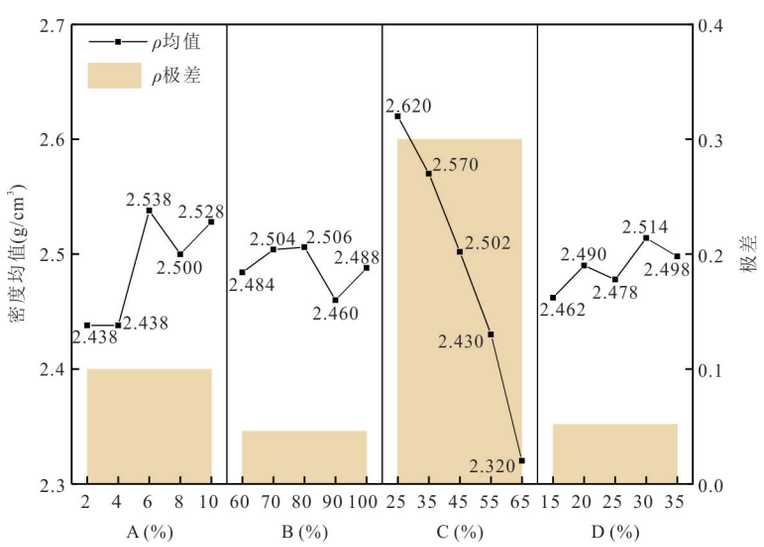

图4　密度敏感性因素分析

Fig.4　Sensitivity factor analysis of density

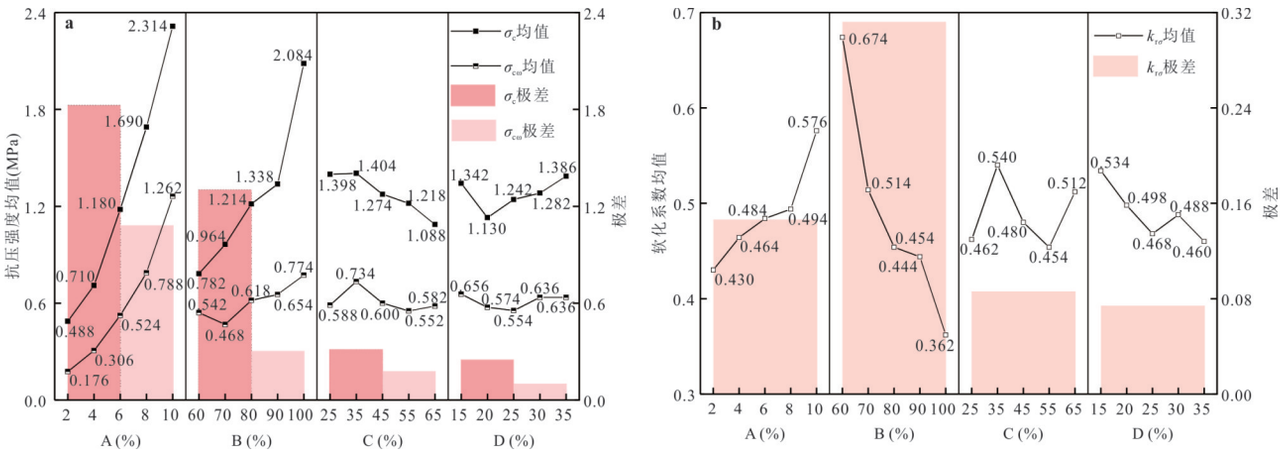

图 5　抗压强度及其软化效应系数敏感性因素分析

Fig.5　Sensitivity factors analysis of compressive strength and its softening effect coefficient

a. 抗压强度分析；b. 软化系数分析

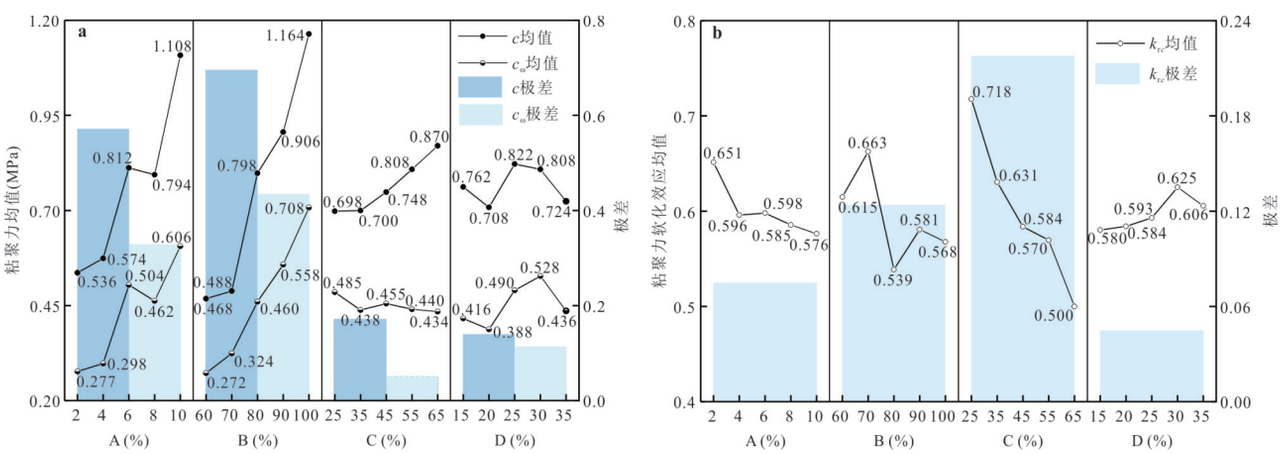

图 6　黏聚力及其软化效应系数敏感性因素分析

Fig.6　Sensitivity factors analysis of cohesion and its softening effect coefficient

a. 黏聚力分析；b. 黏聚力软化效应系数分析

C (0.090)＞B(0.058)＞D(0.038)，因素 A(胶结材料/固体材料)起主要控制作用，随着胶结材料含量的增加其软化效应系数显著提高.

3.2.3　相似材料渗透系数影响因素分析　根据试验结果计算 A～D 4 个因素水平下相似材料渗透系数的平均值和极差，绘制如图 8 所示的直观图.可以得到各因素对相似材料渗透系数影响大小依次为C (62.106×10^{-6}) ＞A (25.277×10^{-6}) ＞B (23.723×10^{-6})＞D(17.813×10^{-6})，因素 C(石英砂/骨料)对材料渗透系数起主要调节作用，石英砂含量越高，相似材料的渗透系数越大，究其原因主要是石英砂在所有骨料中的粒径最大，其含量越高所配制的相似材料孔隙率越大，增强了相似材料的透水能力.此外，随着胶结材料中石膏含量的增加，相似材料的渗透系数也呈增大的趋势，其主要原因并不是石膏对相似材料的渗透性有明显促进作用，而是因为石膏在胶结材料中占比增大时，水泥的含量相应就会减少，而水泥会对相似材料的透水能力有很大的抑制作用，这与李术才等(2012)、王凯等(2016)研究成果所得结论是一致的.本研究各试验组水泥含量均相对较少，因此在配制相似材料时，可以通过调节水泥在胶结材料中的占比，对相似材料的渗透性进行小幅度优化.

3.3　各参数多元回归拟合与试验材料配比获取

本文通过多元回归分析法拟合各物理力学和水理参数与 A、B、C、D 4 个因素成分比例之间的相关关系.其中由于抗压强度和剪切强度的软化效应系数($k_{\tau\sigma}$、$k_{\tau c}$和$k_{\tau\varphi}$)通过分别获取试件饱水状态和自然状态下的强度参数值即可求解，因此本研究不再对上述 3 个参数进行重复性拟合.由前文极差分析

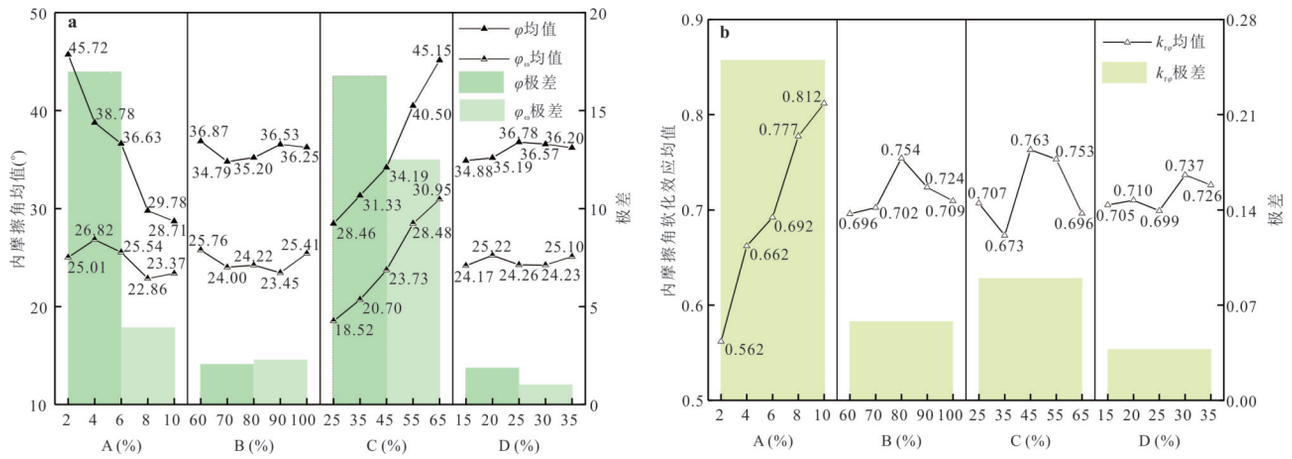

图 7　内摩擦角及其软化效应系数敏感性因素分析

Fig.7　Sensitivity factor analysis of internal friction angle and its softening effect coefficient

a. 内摩擦角分析;b. 内摩擦角软化效应系数分析

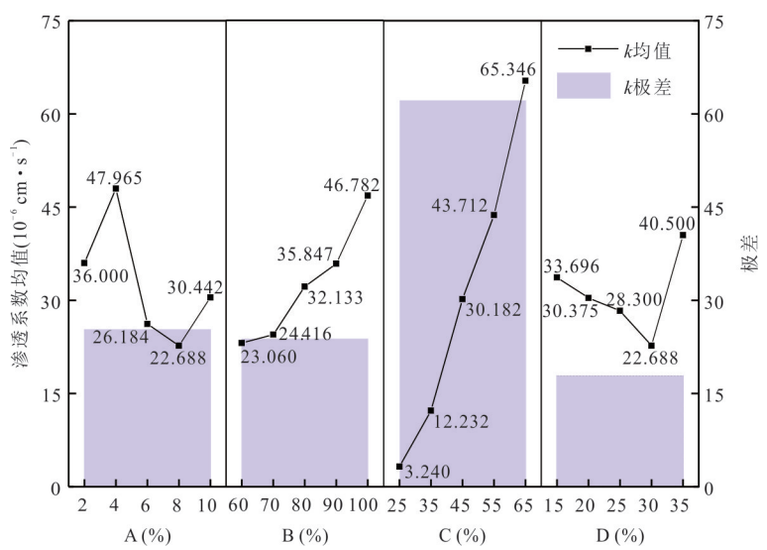

图 8　渗透系数敏感性因素分析

Fig.8　Sensitivity factor analysis of permeability coefficient

可知,A、B、C、D 4个因素对材料各物理力学和水理参数的影响并非全部呈线性关系,因此在拟合过程中选取线性函数(L)、二次函数(Q)、指数函数(E)3种基本函数先对A～D 4个因素与其因素水平下密度、抗压强度、粘聚力、内摩擦角、渗透系数平均值的函数关系进行分析,根据分析结果选取最优函数组合进行相应的非线性拟合以提高对试验结果的预测精度.各个参量拟合的结果见图9.图9中红色点及点画线表示该数据对应No.03、No.04和No.10试验组材料,相应的饱和力学参数难以准确获取,但根据回归分析可以预测其参数结果.各参数通过多元回归分析后的拟合值与试验值之间的决定系数 R_a^2=0.829 0～0.949 0,拟合效果较好.需要说明的是由于各试验组渗透系数变化范围较大,拟合值出现了负值(No01、No22),但与试验结果对比后可以发现拟合值为负值的试验组相似材料渗透系数量级均在 10^{-6} cm/s,考虑到相似试验离散性较大的特点,参数在同一量级上即认为满足精度要求,在试验材料获取配比的过程中,若渗透系数出现负值则认为该材料渗透系数在 10^{-6} cm/s这一量级变化.

此外,为优选出相似材料的最佳配比,根据模型材料的物理力学参数值,结合各因素的多元回归拟合公式和敏感性分析结果,本文采用式(9)计算模型试验中相似材料的最佳配比:

$$u_{ij}=\sum_{n=1}^{8}\left|\frac{x_i-C_i x_i j}{x_i}\right|, \tag{9}$$

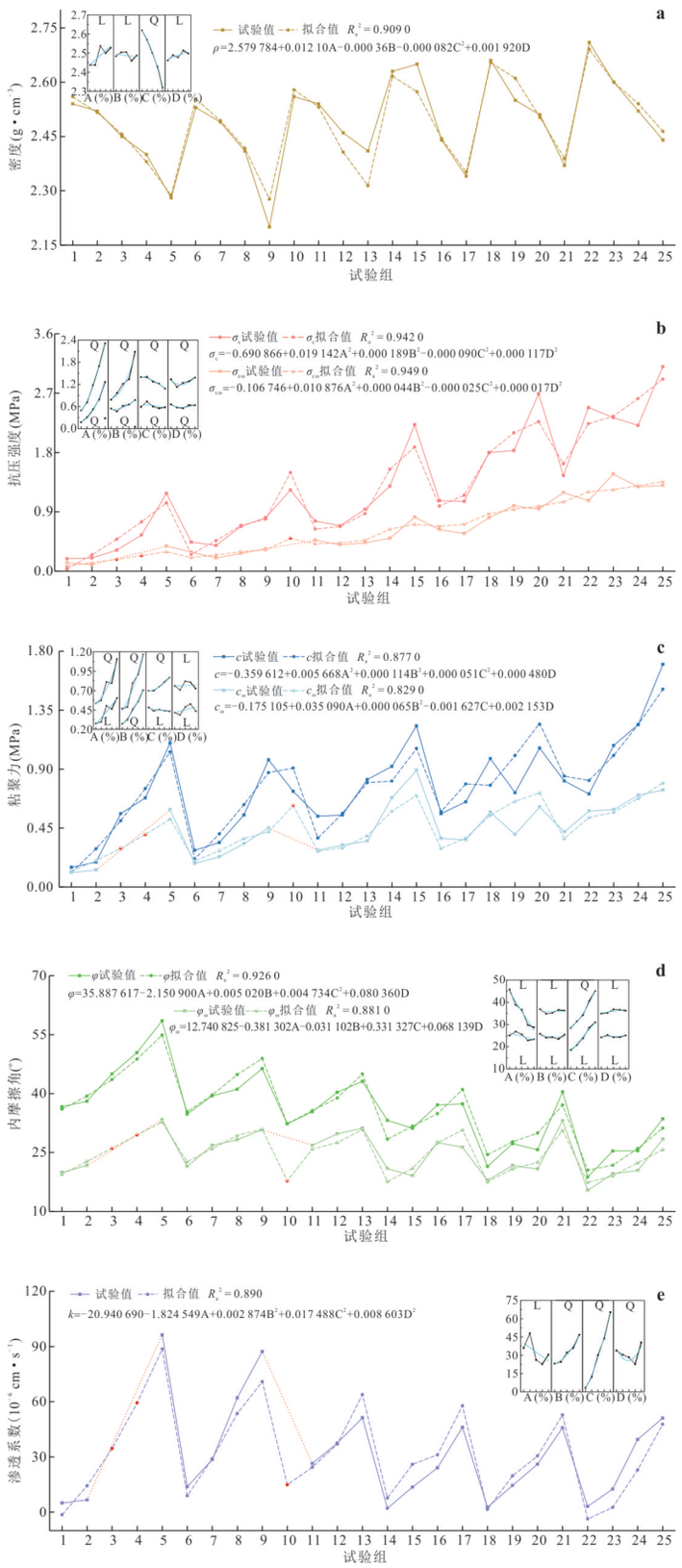

图 9 各参数多元回归拟合结果与试验结果比较

Fig.9 Comparison of fitted and experimental results for physical and mechanical parameters

a. 密度;b. 干、湿抗压强度; c. 干、湿黏聚力; d. 干、湿内摩擦角;e. 渗透系数

式(9)中:x_i为边坡岩体第i个指标值;x_{ij}为第j种相似材料的第i个指标值;C_i为第i个指标的相似系数;u_{ij}为不同配比相似材料拟合值与边坡岩体实际值之间的误差,u_{ij}最小时所对应的组分比例即为相似材料的最佳配比.

4　水库型岩质高边坡模型试验中的应用

4.1　试验概况

为验证本文提出的相似材料配比方案的适用性,选取清江流域水布垭水电站坝址区发育的某软硬相间岩质高边坡为工程背景概化出试验模型开展物理模型试验.边坡所处流域总体为低山－丘陵地貌,两岸呈不对称开阔"V"字形,左岸坡角平均为52°,右岸为35°.区内新构造运动主要表现为地壳整体间歇隆升,层状地貌发育,主要的构造形迹为断层、裂隙和剪切带等.边坡位于左岸三友坪向斜的东翼,经过开挖后坡角为50°～65°,为视顺向坡,地层呈单斜结构,走向320°～340°,倾向SW,倾角10°～25°.由于边坡前缘经历早期清江下切以及水电工程建设过程中不稳定岩体开挖,使现有边坡应力重分布,坡面岩体发生卸荷、松弛变形.加之后期风化、水等对软弱基座岩体的软化和侵蚀作用,抗剪强度大为降低,在坡体中形成了卸荷松动带,卸荷带宽20～25 m,卸荷裂隙发育,在剖面上与坡面接近平行或略为平缓,裂面往往上下贯通,岩体完整性差,危岩体较多.边坡地层岩性主要为二叠系下统栖霞组(P_1q)灰岩和炭泥质灰岩软硬互层,层间发育有剪切弱化带,近坡面区域发育有强卸荷区,为顺向滑移提供了边界条件,主要表现为顺向剪切变形(徐卫亚等,2002).坡体在上覆岩体自重压力下沿下伏软弱面向临空方向产生缓慢的剪切位移,同时部分滑面起伏突出段还会因下伏软岩的压密挤出而直接咬合,从而迫使前缘一定范围内的滑带锁固点或错列点附近因抗阻力的增加而产生压剪应力集中带,逐渐生成并向上扩展为与最大主应力方向趋于一致(近于平行坡面)的拉张裂隙,因此,顺层剪切变形实际上是一种压剪变形过程.被裂隙切割的岩体在自重及外界因素作用下,后缘逐渐形成滑面,并在滑面逐渐贯通后发生沿层面向库区滑动,随位移量的增加,滑移体逐渐拉裂解体,整个变形体趋于不稳定状态.

由于研究区边坡较为复杂,岩体层数较多且层厚各异,本研究在组成部分及空间分布上尽可能地满足实际情况,岩体层数和层厚方面进行了充分简化.模型试验几何相似系数C_l取100,概化的试验模型尺寸(长×宽×高)=1.2 m×0.5 m×1.2 m.模型试验系统由模型箱、水位控制系统、监测系统与数据采集系统等组成,如图10所示.其中,模型箱库水模拟区和边坡堆载区侧面均为透明钢化玻璃制作的可视窗口,可实时观测试验过程中库水位升降状态和边坡变形破坏情况(图10a);水位控制系统主要由水泵、进出水管及水阀、电位调速器等组成,通过调节电位调速器和进出口水阀合理控制水位波动速率.边坡模型采用人工分区分层浇筑,并对模型进行手工修整,以获得设计的形状.为使试验精度较高,采用试验材料间直接接触和分别涂抹云母粉、滑石粉等进行直剪试验来试制结构面相似材料.通过比选,浇筑过程中软硬岩体层理面之间涂抹一层云母粉模拟剪切弱化带,防止材料黏附;卸荷带下界线区域则通过涂抹一层滑石粉模拟上下贯通的卸荷裂面.水位影响区主要位于边坡下部的前缘,为了反映试验工况下边坡内部渗流场响应特征,在模型下部前缘中轴剖面布设5个BWK型孔隙水压力计,孔隙水压力计测量范围为0～10 kPa,精度误差为0.5% F.S,外径×厚度为18 mm×12 mm,以坡内向外水平方向布设,布设方案如图10b所示.

4.2　模型试验相似材料研制应用

本研究根据边坡原岩将模型试验材料简化为硬岩基岩区材料、硬岩卸荷区材料、软岩基岩区材料和软岩卸荷区材料4种类型.根据现场岩体力学试验结果,原岩的物理力学和水理性参数见表3.在进行相似材料配制时,几何相似系数C_l取100,密度相似系数C_ρ取1.07.由于模型试验几何相似系数较大,材料配制过程中难以满足所有参数的相似性(张彦君等,2019;Zhang *et al.*,2023),黏聚力c和c_ω按相似理论换算的值相较于25组测试材料数量级均小很多,且由图5和图6可知材料的抗压强度(σ_c、$\sigma_{c\omega}$)和黏聚力(c、c_ω)主控因素基本相同,当相似材料的c和c_ω取值非常小时抗压强度值也无法满足精度要求,因此本研究在尽可能满足黏聚力软化效应系数相似的基础上将c和c_ω作为优化控制自变量,其他参数按相似理论换算取值,根据各参数多元回归拟合方程,利用Matlab软件中的fmincon函数计算4种模型材料的最佳配比如表4所示.此外,为了验证

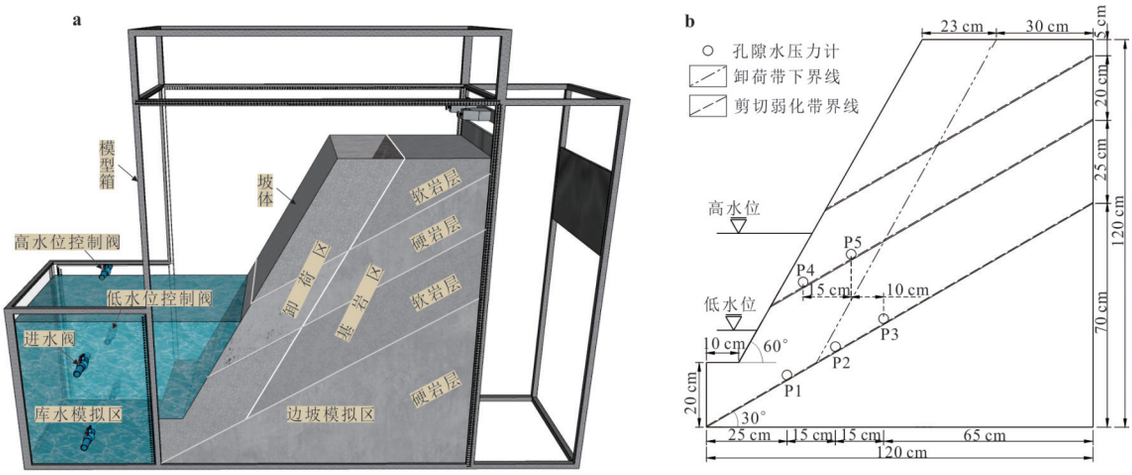

图 10 模型试验系统

Fig.10 Model test system

a. 试验模型结构;b. 模型监测系统布设

表 3 原岩物理力学参数和水理性参数

Table 3 Physical and mechanical parameters and hydro-physical properties of original rock

介质	ρ(g·cm^{-3})	抗压强度(MPa)		剪切强度				软化效应系数			k(cm·s^{-1})
		σ_c	$\sigma_{c\omega}$	c(MPa)	c_ω(MPa)	φ(°)	φ_ω(°)	$k_{r\sigma}$	k_{rc}	$k_{r\varphi}$	
灰岩基岩区(原岩①)	2.70	102.30	65.00	1.00	0.66	45.00	33.30	0.64	0.66	0.74	2.49×10^{-4}
灰岩卸荷区(原岩②)	2.60	81.30	49.50	0.60	0.30	38.66	26.57	0.61	0.50	0.69	2.49×10^{-4}
泥灰岩基岩区(原岩③)	2.70	70.31	40.00	0.60	0.35	38.66	27.06	0.57	0.58	0.70	2.65×10^{-4}
泥灰岩卸荷区(原岩④)	2.60	54.05	30.00	0.48	0.24	30.96	21.80	0.56	0.50	0.70	2.65×10^{-4}

表 4 模型试验相似材料配比

Table 4 Proportion of similar materials in model test

介质	A(%)	B(%)	C(%)	D(%)
模型材料①	7.26	65.27	48.99	27.75
模型材料②	6.33	66.62	50.63	13.36
模型材料③	5.42	68.34	47.52	26.99
模型材料④	4.38	71.18	46.54	23.75

各参数拟合公式的有效性和配制的试验材料的合理性,本研究还进一步开展了选定材料配比试验与测试,4 种模型材料各物理力学和水理参数通过相似理论换算结果、理论计算结果和验证试验结果对比如表 5 所示.对比理论计算结果和验证试验结果可知,4 种模型材料渗透系数的误差范围为 5.99%~32.71%,其他参数的误差范围为 0%~17.65%,考虑到相似材料力学性质的复杂性,同一量级上即认为满足精度要求,通过拟合公式配制的试验材料有效性较好.同时对比相似比换算结果和验证试验结果可知,在不考虑黏聚力的情况下所配制的 4 种模型材料各参数的误差范围为 0%~32.71%,且误差较大的参数主要集中于材料①和材料④的内摩擦角和渗透系数以及材料②和材料④黏聚力的软化效应系数上,其他参数误差均小于 10%,证明了本研究选取的 4 种物理模型试验材料的合理性.

4.3 试验过程与结果分析

为揭示水库型岩质边坡在静止水位条件和库水位升降过程中边坡内部渗流场的响应特征,本研究浇筑了图 11 所示的试验模型.试验开始时首先历时 20 min 控制水位从 0 cm 上升至最高水位 60 cm,并在最高水位保持 160 min 使水分充分渗入坡体内部,研究静止水位条件下边坡内部孔隙水压力变化规律;然后结合库区近 13 年水位波动监测数据,库区上游水位可简化为周期约 1 年的高低水位循环波动,高水位约 400 m,低水位约 370 m,其中 8 月和 9 月为水位上升期,10 月和 11 月为高水位保持期,12 月以及次年 1 月—5 月为水位下降期,6 月和 7 月为低水位保持期.将实际工程中单周期库水位波动时间轴等比例压缩,生成 60 min 试验单周期库水位波动曲线,水位波动范围为 30~60 cm,水位下降历时 30 min,水位上升历时 10 min,最高和最低水位分别保持 10 min,一共循环波动 5 次,研究库水位升降过

表 5　相似材料力学参数相似效果对比

Table 5　Comparison of similar effects of similar materials

介质		ρ (g·cm^{-3})	抗压强度(MPa)		剪切强度				软化效应系数			k(cm·s^{-1})
			σ_c	$\sigma_{c\omega}$	c(MPa)	c_ω(MPa)	φ(°)	φ_ω(°)	$k_{r\sigma}$	k_{rc}	$k_{r\varphi}$	
相似比 C_x	计算结果	1.07	107	107	107	107	1	1	1	1	1	9.35
模型材料①	换算结果	2.52	0.96	0.61	0.009 3	0.006 2	45.00	33.30	0.64	0.66	0.74	2.66×10^{-5}
	拟合结果	2.50	1.00	0.61	0.56	0.34	34.18	26.06	0.61	0.61	0.76	2.66×10^{-5}
	验证试验	2.50	1.02	0.60	0.57	0.40	36.70	26.41	0.59	0.70	0.72	1.79×10^{-5}
模型材料②	换算结果	2.43	0.76	0.46	0.005 6	0.002 8	38.66	26.57	0.61	0.50	0.69	2.66×10^{-5}
	拟合结果	2.45	0.71	0.46	0.51	0.28	35.83	25.94	0.65	0.55	0.72	2.66×10^{-5}
	验证试验	2.49	0.69	0.43	0.50	0.30	37.68	26.06	0.62	0.60	0.69	2.87×10^{-5}
模型材料③	换算结果	2.52	0.66	0.37	0.005 6	0.003 3	38.66	27.06	0.57	0.58	0.70	2.84×10^{-5}
	拟合结果	2.49	0.64	0.37	0.47	0.30	37.44	26.13	0.58	0.64	0.70	2.84×10^{-5}
	验证试验	2.49	0.62	0.36	0.45	0.29	37.14	27.53	0.58	0.64	0.74	3.01×10^{-5}
模型材料④	换算结果	2.43	0.51	0.28	0.004 5	0.002 2	30.96	21.80	0.56	0.50	0.70	2.84×10^{-5}
	拟合结果	2.47	0.51	0.28	0.45	0.28	38.98	25.89	0.56	0.62	0.66	2.84×10^{-5}
	验证试验	2.46	0.50	0.26	0.39	0.25	38.83	26.82	0.52	0.64	0.69	3.18×10^{-5}

图 11　试验模型

Fig.11　Test model of slope

程中边坡内部孔隙水压力变化规律.具体水位试验方案如图 12 所示.同时在库水软化侵蚀作用下,边坡模型卸荷带处裂隙逐渐扩展贯通,为了加快试验模型的破坏进程,在水位方案结束后,在坡顶前缘卸荷区顶部施加一级 1 500 N 的法向荷载,使其短期内便沿着卸荷带和剪切弱化带形成的滑面发生与边坡原型类似的压剪变形破坏,破坏后的试验模型如图 13 所示,可以看出边坡前缘已经被库水软化侵蚀,滑面材料被压密挤出.

图 14 为试验模型蓄水阶段和整个试验过程中孔隙水压力随时间变化规律,其中 t_i 表示水位上升到孔隙水压力相应高程所对应的时间点;t_{Pi} 表示孔隙水压力计开始响应所对应的时间点.从图 14a 可以发现在蓄水阶段各孔隙水压力计响应顺序依次为 P1-P2-P4-P5-P3,所有传感器相较于坡外水位出现了不同程度的滞后响应现象,P1、P2、P3、P4 和 P5 分别在蓄水后约 11.0 min、16.5 min、22.5 min、18.0 min、19.1 min 后才开始增加,响应时间点与水位到达各孔隙水压力计高程位置时间间隔 Δt_i 分别

约 5.3 min、8.2 min、11.2 min、3.0 min、1.1 min. 由图 14b 可知，在高水位静止浸泡作用下各孔隙水压力计逐渐增加到最大值后趋于稳定，边坡内部孔隙水压力的增加表明模型材料逐渐饱和，P3 由于距坡面最远，孔隙水压力计增加到最大值所需的时间最长. 而在库水位 5 次循环波动过程中，坡内孔隙水压力也明显滞后于坡外水位变化，在最低和最高水位保持 10 min 的时间段内孔隙水压力仍在下降或上升，说明坡外水位下降和上升完毕后仍有水不断从坡体渗出或渗入. 此外，在第 5 次水位循环波动结束后，本研究还进一步在高水位静止浸泡 30 min 观测其孔隙水压力变化规律，可以发现各孔隙水压力计相较于蓄水阶段达到峰值的持续时间缩短非常多，在浸泡很短的时间内便增加到最大值后趋于稳定，说明坡内孔隙水压力的变化规律不仅受坡外水位变化的影响，还与坡内岩体的含水率息息相关.

5 结论与讨论

(1)在前人研究的基础上通过正交试验研制出一种由石英砂、重晶石粉、铁精粉、水泥、石膏和硅油等组成的固－液两相材料，通过大量试验测试发现该材料各物理力学和水理参数分布范围较广，单轴压缩破坏形态与岩石类似，能满足岩质边坡模型试验对材料物理力学性能和渗流作用相似的需求.

(2)采用极差分析法研究了各组分对相似材料密度、自然和饱和状态下的抗压强度、粘聚力、内摩擦角及其饱水后相应的软化效应系数、渗透系数等

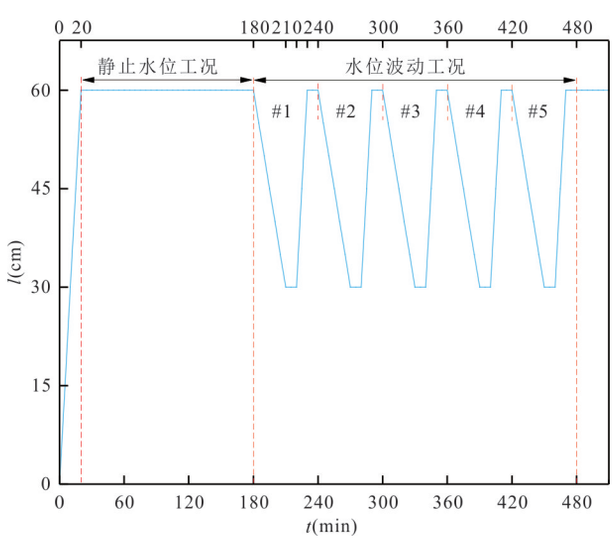

图 12 模型试验水位方案

Fig.12 Water level scheme of model test

图 13 破坏后的试验模型

Fig.13 Test model after destruction

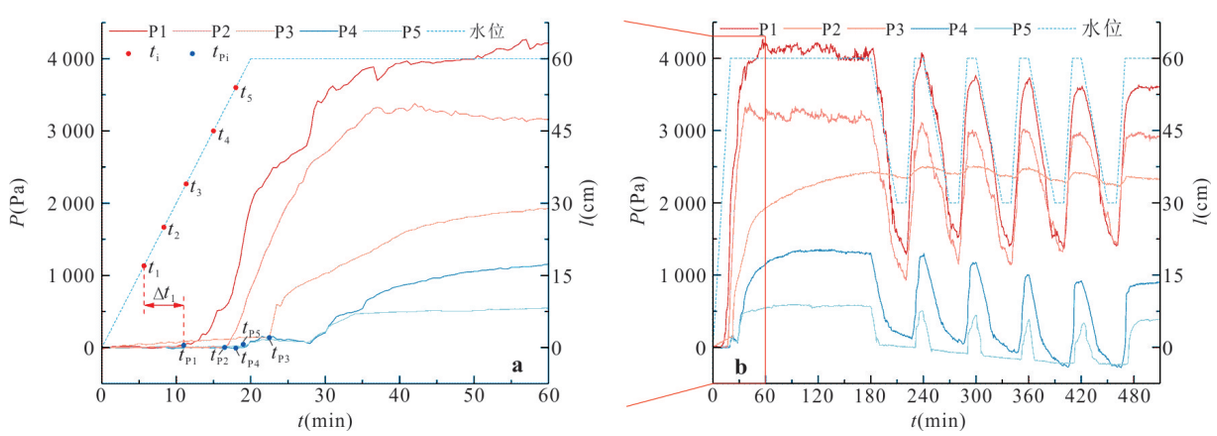

图 14 蓄水阶段和整个试验过程孔隙水压力变化规律

Fig.14 Variation law of pore water pressure during impoundment stage and the whole test process

a. 蓄水阶段；b. 整个试验过程

11个物理力学和水理参数的影响规律,发现各参数主控参量明显,通过调节配比可以模拟不同类型边坡岩体.

(3)综合考虑室内试验和极差分析结果,通过多元回归分析得到除软化效应系数($k_{r\sigma}$、k_{rc}、$k_{r\varphi}$)外的8个参量与材料配比之间的非线性经验方程,结合水布垭水电站坝址区岩质边坡案例发现通过经验方程能够高效地配制边坡模型所需相似效果最佳的材料,并通过开展静止水位和水位升降条件下的模型试验,边坡模型发生压剪变形破坏,揭示了试验过程中孔隙水压力变化规律.

本文主要目标是研制出一种能同时模拟边坡岩体力学性能和渗流作用相似的固－液两相相似材料.为验证相似材料配比方案的适用性,以原型边坡为工程背景概化出试验模型,根据各参量拟合方程,计算4种模型材料的最佳配比,验证了拟合公式的有效性和选取的试验材料的合理性,设计试验方案并分析了边坡模型破坏模式和孔隙水压力变化规律.研究成果对水利、地质等工程领域的固－液耦合模型试验相似材料配制和多场演化规律研究具有一定参考价值.然而,本研究试验模型忽略了原型边坡卸荷区广泛发育的裂隙,导致模型在破坏过程中卸荷区岩体整体沿滑面发生滑动,而非实际边坡的滑移体逐渐拉裂解体.此外本研究关于试验模型结构面相似材料只进行了简单说明,分析结果也难以完全反映模型系统的多场演化规律,在后续研究中可进一步分析结构面相似材料的试制结果和系统的位移、应力和声信号等.同时影响边坡的因素多样,例如岩层倾角、厚度、边坡形态等条件仍需进行研究.

References

Han, T., Yang, W.H., Yang, Z.J., et al., 2011. Development of Similar Material for Porous Medium Solid-Liquid Coupling. *Rock and Soil Mechanics*, 32(5): 1411－1417(in Chinese with English abstract).

He, C.C., Hu, X.L., Liu, D.Z., et al., 2020. Model Tests of the Evolutionary Process and Failure Mechanism of a Pile-Reinforced Landslide under Two Different Reservoir Conditions. *Engineering Geology*, 277: 105811. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105811

He, C.C., Hu, X.L., Tannant, D.D., et al., 2018. Response of a Landslide to Reservoir Impoundment in Model Tests. *Engineering Geology*, 247: 84－93. https://doi. org/10.1016/j.enggeo.2018.10.021

Hu, X. L., Tang, H. M., Li, C. D., et al., 2012. Stability of Huangtupo Riverside Slumping Mass II# under Water Level Fluctuation of Three Gorges Reservoir. *Journal of Earth Science*, 23(3): 326－334. https://doi. org/10.1007/s12583-012-0259-0

Hu, Y.Q., Zhao, Y.S., Yang, D., 2007. Simulation Theory & Method of 3D Solid-Liquid Coupling. *Journal of Liaoning Technical University*, 26(2): 204－206(in Chinese with English abstract).

Huang, Q.X., Zhang, W.Z., Hou, Z.C., 2010. Study of Simulation Materials of Aquifuge for Solid-Liquid Coupling. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(Suppl.1): 2813－2818(in Chinese with English abstract).

Jia, G.W., Zhan, L.T., Chen, Y.M., 2009. Model Test Study of Slope Instability Induced by Rapid Drawdown of Water Level. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(9): 1798－1803(in Chinese with English abstract).

Li, L.J., Qian, M.G., Yin, Y.Q., 1997. Research on the Tests of Water Inrush from Floor Simulated by Similar Materials. *Coal Geology & Exploration*, 25(1): 33－36(in Chinese with English abstract).

Li, S.C., Feng, X.D., Li, S.C., et al., 2010. Research and Development of a New Similar Material for Solid-Fluid Coupling and Its Application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(2): 281－288(in Chinese with English abstract).

Li, S.C., Zhou, Y., Li, L.P., et al., 2012. Development and Application of a New Similar Material for Underground Engineering Fluid-Solid Coupling Model Test. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(6): 1128－1137(in Chinese with English abstract).

Li, S.L., Xu, Q., Tang, M.G., et al., 2020. Study on Spatial Distribution and Key Influencing Factors of Landslides in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 45(1): 341－354(in Chinese with English abstract).

Ma, H., Huang, D., Shi, L., 2020. Numerical Simulation of S-Shaped Failure Evolution of Anti-Dip Slope Based on Statistics of Broken Length and Layer Thickness. *Journal of Engineering Geology*, 28(6): 1160－1171(in Chinese with English abstract).

Shi, X.M., Liu, B.G., Qi, Y., 2015. Applicability of Similar Materials Bonded by Cement and Plaster in Solid-Liquid Coupling Tests. *Rock and Soil Mechanics*, 36(9): 2624－2630, 2638(in Chinese with English abstract).

Sun, Y.J., Zhang, D., Shi, B., et al., 2014. Distributed Acquisition, Characterization and Process Analysis of Multi-Field Information in Slopes. *Engineering Geology*, 182: 49－62. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.025

Tian, J.L., Wang, L.Q., An, C.L., et al., 2022. Development of a Model Material for Dynamic Geotechnical Model Tests. *Applied Sciences*, 12(11): 5344. https://doi. org/

10.3390/app12115344

Wang, K., Li, S.C., Zhang, Q.S., et al., 2016. Development and Application of New Similar Materials of Surrounding Rock for a Fluid-Solid Coupling Model Test. *Rock and Soil Mechanics*, 37(9): 2521－2533(in Chinese with English abstract).

Xu, C., Hu, X.L., He, C.C., et al., 2018. Development and Application of Similar Material for Reservoir Landslide Model Test. *Rock and Soil Mechanics*, 39(11): 4287－4293(in Chinese with English abstract).

Xu, W.Y., Xie, S.Y., Liu, S.J., et al., 2002. Study on Characteristics and Numerical Simulation for Slope Unloading Zonein Shuibuya Hydropower Project Dam Site Area. *Journal of University of Hydraulic and Electric Engineering/Yichang*, 24(2): 101－106(in Chinese with English abstract).

Yuan, X.F., Hu, S., Yang, W., et al., 2017. Stability and Deformation Characteristics of a Certain Reservoir Slope Based on Space-Time Evolution Laws. *Journal of Chongqing Jiaotong University* (*Natural Science*), 36(3): 71－78(in Chinese with English abstract).

Zhang, B.C., Ning, Y.B., Tang, H.M., et al., 2023. Study on the Evolutionary Process of Interbedded Anti-Inclined Slope Block-Flexure Toppling in the Upper Yalong River. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82: 240. https://doi. org/10.1007/s10064-023-03223-2

Zhang, J., Hou, Z.J., 2004. Experimental Study on Simulation Materials for Solid-Liquid Coupling. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(18): 3157－3161 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J., Cai, W.S., Chen, C., et al., 2020. Study on Solid-Liquid Coupled Similar Materials Based on Orthogonal Experiment. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 51(5): 174－182(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y.J., Nian, T.K., Wang, L., et al., 2019. Research on Similar Materials for Physical Model Tests of Rock Slopes. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(1): 55－60, 72(in Chinese with English abstract).

Zheng, Y., Chen, C.X., Liu, T.T., et al., 2018. Slope Failure Mechanisms in Dipping Interbedded Sandstone and Mudstone Revealed by Model Testing and Distinct-Element Analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(1): 49－68. https://doi. org/10.1007/s10064-017-1007-6

Zhou, Y., Li, S.C., Li, L.P., et al., 2015. New Technology for Fluid-Solid Coupling Tests of Underground Engineering and Its Application in Experimental Simulation of Water Inrush in Filled-Type Karst Conduit. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(7): 1232－1240(in Chinese with English abstract).

Zuo, B.C., Chen, C.X., Liu, C.H., et al., 2004. Research on Similar Material of Slope Simulation Experiment. *Rock and Soil Mechanics*, 25(11): 1805－1808(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

韩涛，杨维好，杨志江，等，2011. 多孔介质固液耦合相似材料的研制. 岩土力学，32(5): 1411－1417.

胡耀青，赵阳升，杨栋，2007. 三维固流耦合相似模拟理论与方法. 辽宁工程技术大学学报，26(2): 204－206.

黄庆享，张文忠，侯志成，2010. 固液耦合试验隔水层相似材料的研究. 岩石力学与工程学报，29(增刊 1): 2813－2818.

贾官伟，詹良通，陈云敏，2009. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究. 岩石力学与工程学报，28(9): 1798－1803.

黎良杰，钱鸣高，殷有泉，1997. 采场底板突水相似材料模拟研究. 煤田地质与勘探，25(1): 33－36.

李松林，许强，汤明高，等，2020. 三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因子. 地球科学，45(1): 341－354.

李树忱，冯现大，李术才，等，2010. 新型固流耦合相似材料的研制及其应用. 岩石力学与工程学报，29(2): 281－288.

李术才，周毅，李利平，等，2012. 地下工程流－固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用. 岩石力学与工程学报，31(6): 1128－1137.

马昊，黄达，石林，2020. 基于断距－层厚特征统计的反倾边坡 S 型破坏演化数值模拟. 工程地质学报，28(6): 1160－1171.

史小萌，刘保国，亓轶，2015. 水泥石膏胶结相似材料在固－流耦合试验中的适用性. 岩土力学，36(9): 2624－2630，2638.

徐楚，胡新丽，何春灿，等，2018. 水库型滑坡模型试验相似材料的研制及应用. 岩土力学，39(11): 4287－4293.

徐卫亚，谢守益，刘世君，等，2002. 水布垭坝区岸坡卸荷带特性及数值仿真研究. 三峡大学学报(自然科学版)，24(2): 101－106.

王凯，李术才，张庆松，等，2016. 流－固耦合模型试验用的新型相似材料研制及应用. 岩土力学，37(9): 2521－2533.

原先凡，胡帅，杨威，等，2017. 基于时空演化规律的某水库边坡稳定性及其变形特征分析. 重庆交通大学学报(自然科学版)，36(3): 71－78.

张杰，蔡维山，陈诚，等，2020. 基于正交试验的固液耦合相似材料研究. 水利水电技术，51(5): 174－182.

张杰，侯忠杰，2004. 固－液耦合试验材料的研究. 岩石力学与工程学报，23(18): 3157－3161.

张彦君，年廷凯，王亮，等，2019. 岩质边坡物理模型试验相似材料研究. 西南交通大学学报，54(1): 55－60，72.

周毅，李术才，李利平，等，2015. 地下工程流－固耦合试验新技术及其在充填型岩溶管道突水模型试验中的应用. 岩土工程学报，37(7): 1232－1240.

左保成，陈从新，刘才华，等，2004. 相似材料试验研究. 岩土力学，25(11): 1805－1808.