

基于正交试验的千枚岩相似材料配比研究^{*}

李恺航, 刘佳诚, 陈发祥

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 基于相似理论与正交设计法, 采用石膏、膨润土、河砂、水作为原材料配制满足千枚岩力学特征要求的相似材料, 通过测试相似材料的弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角, 分析石膏与河砂的质量比、膨润土质量比、含水率对相似材料力学参数的敏感度与显著度, 研究符合千枚岩基本力学性能的相似材料配比。结果表明, 4种配制材料的弹性模量、黏聚力、内摩擦角、泊松比基本在室内物理模型相似材料力学参数的范围内; 石膏与河砂的质量比对相似材料弹性模量、内摩擦角、黏聚力、泊松比的影响较显著, 其中对黏聚力和泊松比的影响最大, 贡献率分别为83.9%、78.0%; 膨润土质量比对相似材料内摩擦角和泊松比的影响仅次于石膏与河砂的质量比, 贡献率分别为31.0%、13.0%; 含水率对相似材料弹性模量和黏聚力的影响仅次于石膏与河砂的质量比, 贡献率分别为32.4%、12.6%; $M(\text{石膏}): M(\text{河砂}): M(\text{膨润土}): M(\text{水}) = 1.00: 0.50: 0.15: 0.25$ 时, 相似材料可以较好地模拟千枚岩的力学性能。

关键词: 隧道; 千枚岩; 相似材料; 配合比; 正交试验; 敏感度分析

中图分类号: U454

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0130-05

千枚岩广泛分布在中国西北地区, 在隧道建设中较常见。千枚岩的岩性差、强度低, 遇水易膨胀崩解, 施工过程中易引起围岩大变形甚至隧道坍塌事故^[1]。对千枚岩隧道围岩稳定性的研究主要采用数值模拟法、现场勘测法、室内物理模型试验法^[2], 其中数值模拟与现场勘测法存在一定局限, 物理模型试验更能直接、真实地反映复杂岩体开挖过程中围岩应力与变形的变化^[3-5]。

相似材料的配合比设计是室内物理模型试验的基础, 相似材料自身力学特性是模型试验能否实现的关键。冯亚松采用黄土、石膏、普通硅酸盐水泥和水配制炭质千枚岩相似材料, 并将其应用于模型试验^[6]。汪波等采用重晶石粉、粉煤灰、河砂、粗细石英砂、凡士林、松香和机油的热熔混合物制作了杜家山千枚岩隧道相似材料^[7]。陈志敏等以兰州粉质黄土和石英砂为主要成分, 添加一定比例的水泥、石膏与纯净水配制千枚岩相似材料, 验证结果表明该材料能较好地模拟炭质千枚岩的力学性能^[8]。张湑以重晶石粉、粉煤灰、河砂、石英砂为基材, 以凡士林、机油为调和剂制作千枚岩相似材料, 试验结果表明该材料能较好地模拟炭质千枚岩的力学特征^[9]。Gao C. L. 等以开元寺隧道为工程背景, 以河砂、水

泥、碳酸钙、铁粉、黏土、氯化石蜡和硅油等作为千枚岩相似材料模拟围岩和断层的力学特性, 分析了不同埋深下穿越相交断层的运营隧道渗水发生机制和演变规律^[10]。谢远以绵九(绵阳—九寨沟)高速公路五里坡隧道为工程背景, 采用重晶石粉、石英砂、凡士林、洗衣液研制普通围岩及断层破碎带相似材料, 研究了隧道在穿越不同厚度、不同倾角、不同倾向断层破碎带时围岩的受力与变形规律^[11]。晏莉等的研究表明以不同相似材料进行模型试验, 得到的隧洞破坏机制不同^[12]。以上研究表明可以通过对不同材料的不同配比模拟不同围岩的力学特性, 但选取的材料较多, 工作量较大。本文采用河砂、石膏、膨润土、水配制千枚岩相似材料, 设计三因素三水平正交试验表 $L_9(3^3)$, 以相似材料的弹性模量和泊松比为主要控制参数、黏聚力和内摩擦角为次要控制参数, 分析石膏与河砂的质量比、膨润土质量比、含水率对相似材料力学参数的影响。

1 相似理论

1.1 通过方程分析法推导相似系数

相似理论是室内模型试验的理论基础, 它根据弹性力学中静力平衡方程、几何方程、应变协调方

^{*} 基金项目: 长沙理工大学重点学科项目(16ZDXK08)

程、物理方程和边界条件,通过方程分析法推导相关物理量之间的相似关系,得到物理量相似常数之间的关系如下:

$$S_{\sigma}=S_L S_{\gamma}=S_E S_{\varepsilon}$$

(1)

$$S_{\varepsilon}=S_{\varphi}=S_{\mu}=1$$

(2)

式中: S_{σ} 为应力相似比; S_L 为几何相似比; S_{γ} 为容重相似比; S_E 为弹性模量相似比; S_{ε} 为应变相似比; S_{φ} 为内摩擦角相似比; S_{μ} 为泊松比相似比。

通过上述关系可推导物理模型试验中相关物理参数之间的关系。

1.2 千枚岩相似参数取值

依据相似理论,取几何相似比 $S_L=30$,容重相似比 $S_{\gamma}=1$,根据式(1)、式(2),得 $S_{\sigma}=S_E=S_{\varepsilon}=30$ (S_{ε} 为黏聚力相似比), $S_{\mu}=S_{\varphi}=S_{\varepsilon}=1$ 。根据已知相似关系,选取主要力学参数,千枚岩原型物理参数与室内模型物理参数对比见表 1。

表 1 千枚岩原型与室内模型相似材料的力学参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
千枚岩原型	1 000.0~2 000.0	0.35~0.45	50.00~200.00	20~30
模型相似材料	33.3~66.7	0.35~0.45	1.66~6.67	20~30

2 相似材料研制

2.1 原材料

采用河砂、膨润土、石膏、水 4 种材料,以石膏为胶结剂、膨润土为调节剂、2 mm 以下细河砂为骨料(1~2 mm 细河砂占骨料总质量的 60%,1 mm 以下细河砂占 40%)配制千枚岩相似材料,上述材料经济实惠、性能稳定且易获得。

2.2 正交试验设计

设计三因素三水平正交设计表($L_9 3^3$),以石膏/河砂(石膏与河砂的质量比)、膨润土质量比(与石膏和河砂总质量的比)、含水率(石膏、河砂、膨润土的总含水率)作为因素,每个因素选取 3 个水平,同时设置误差列进行正交试验(见表 2、表 3)。

表 2 相似材料正交设计表

水平	石膏/河砂	膨润土质量比/%	含水率/%
1	2 : 1	8	12
2	1 : 1	10	15
3	1 : 2	12	18

表 3 各组相似材料的质量

试验组	石膏/g	河砂/g	膨润土/g	水/g
1	600	300	72	116.64
2	600	300	90	148.50
3	600	300	102	180.36
4	300	300	60	79.20
5	300	300	72	100.80
6	300	300	48	116.64
7	150	300	54	60.48
8	150	300	36	72.90
9	150	300	45	89.10

2.3 相似材料试件配制

(1) 将试验材料按表 3 所示质量配比放入试验盆中搅拌均匀后用保鲜膜密封静置 2 h。

(2) 2 h 后撕开保鲜膜,用园艺小铲取出相似材料放置于直径 39.1 mm、高 80 mm 的不锈钢三轴饱和器中,分置 4 层填料,每层击实 40 次,下层与上层之间用刮毛刀进行刮毛处理。将装样完成的饱和器放置于恒温恒湿养护箱中养护 7 d 并记录每个饱和器中材料的质量。

(3) 每一水平制作 4 个试件,控制其质量,使每个试件的密实度相同。试件养护 7 d 后进行正交试验。

2.4 相似材料力学参数测试

使用 TKA-WXY-3F 全自动单轴抗压仪测试试件的弹性模量,采用全自动四联直接剪切仪测量试件的黏聚力和内摩擦角,采用轴承式单杠杆固结仪 DGY-ZH 测试试件的压缩模量,通过弹性模量和压缩模量换算试件的泊松比,结果见表 4。

表 4 相似材料的力学参数

试验组	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
1	171.373	75.30	21.32	0.396
2	39.887	73.00	29.37	0.423
3	30.385	47.60	29.77	0.474
4	46.440	32.40	35.43	0.492
5	20.867	53.10	29.86	0.496
6	26.524	47.46	30.83	0.483
7	15.855	46.80	27.36	0.495
8	16.881	31.60	32.10	0.497
9	11.421	31.00	31.01	0.496

由表 4 可知:相似材料的弹性模量为 11.421~171.373 MPa,黏聚力为 31.00~75.30 kPa,内摩擦角为 21.32°~35.43°,泊松比为 0.396~0.496,基本在千枚岩原型力学参数范围内。考虑到本文是以弹性模量和泊松比作为相似材料的主要控制参数,可以不计黏聚力的影响,第二试验组的力学参数基本在表 1 中室内模型相似材料物理参数范围内。

3 正交试验结果与分析

3.1 弹性模量的敏感度分析

相似材料弹性模量对石膏/河砂、膨润土质量

比、含水率的敏感度分析结果见表 5~6、图 1。

表 5 相似材料弹性模量极差分析结果 单位:MPa

水平	石膏/河砂 (R_1)	膨润土质量 比(R_2)	含水率 (R_3)	误差 (R_4)
\bar{K}_1	80.55	71.59	77.89	67.89
\bar{K}_2	31.28	32.58	25.88	27.42
\bar{K}_3	14.72	22.37	22.78	31.24
R_j	68.83	49.22	55.11	40.47

注: \bar{K}_1 、 \bar{K}_2 、 \bar{K}_3 为试验指标和的平均值; R_j 为极差。

下同。

表 6 相似材料弹性模量方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性	贡献率
石膏/河砂	7 035.33	2	3 517.670	2.350	0.30	* *	0.418
膨润土质量比	4 049.07	2	2 024.537	1.355	0.43	* *	0.240
含水率	5 752.17	2	2 876.090	1.925	0.34	* *	0.342
空白列	2 995.30	2	1 497.650				

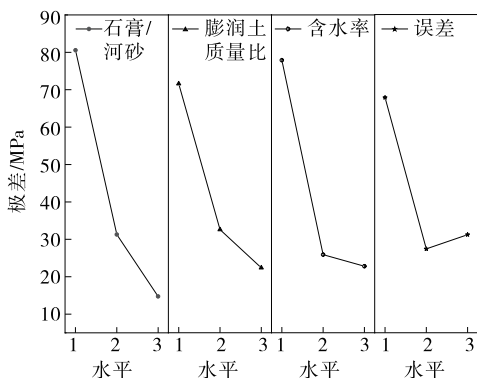


图 1 相似材料弹性模量极差分析

由表 5~6、图 1 可知:石膏/河砂对相似材料弹性模量的影响最大,其次为含水率,膨润土质量比的影响最小;相似材料的弹性模量随着河砂/石膏的减小、膨润土质量比和含水率的增大而降低,说明石膏

减少、膨润土质量比增大、水增多会降低相似材料的弹性模量。

3.2 黏聚力的敏感度分析

相似材料黏聚力对石膏/河砂、膨润土质量比、含水率的敏感度分析结果见表 7~8、图 2。

表 7 相似材料黏聚力极差分析结果 单位:kPa

水平	石膏/河砂 (R_1)	膨润土质量 比(R_2)	含水率 (R_3)	误差 (R_4)
\bar{K}_1	65.30	51.48	51.40	53.15
\bar{K}_2	44.31	45.46	52.58	55.65
\bar{K}_3	36.37	49.04	42.00	37.19
R_j	28.93	6.02	10.58	18.46

表 8 相似材料黏聚力方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性	贡献率
石膏/河砂	1 340.48	2	670.24	2.227	0.31	* *	0.839
膨润土质量比	54.90	2	27.45	0.091	0.92	* *	0.035
含水率	201.56	2	100.78	0.335	0.75	* *	0.126
空白列	601.88	2	300.94				

由表 7~8、图 2 可知:石膏/河砂对相似材料黏聚力的影响最大,其次为含水率,膨润土质量比的影响最小;相似材料的黏聚力随着石膏/河砂的减小而

减小,随着膨润土质量比的增大先减小后增大,随着含水率的增大先增大后减小,说明石膏减少、膨润土质量比增大、水增多会降低相似材料的黏聚力。

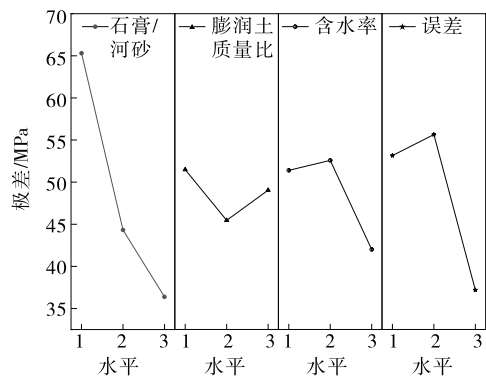


图 2 相似材料黏聚力极差分析

3.3 内摩擦角敏感度分析

相似材料内摩擦角对石膏/河砂、膨润土质量

比、含水率的敏感度分析结果见表 9~10、图 3。

表 9 相似材料内摩擦角极差分析结果 单位: (°)

水平	石膏/河砂 (R_1)	膨润土质量 比(R_2)	含水率 (R_3)	误差 (R_4)
\bar{K}_1	26.82	28.08	28.04	27.40
\bar{K}_2	32.04	31.94	30.44	29.19
\bar{K}_3	30.16	29.00	30.54	32.43
R_j	5.22	3.86	2.50	5.03

由表 9~10、图 3 可知:石膏/河砂对相似材料内摩擦角的影响最大,其次为膨润土质量比,含水率

表 10 相似材料内摩擦角方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性	贡献率
石膏/河砂	41.930	2	20.960	1.072	0.48	* *	0.535
膨润土质量比	24.330	2	12.160	0.622	0.62	* *	0.310
含水率	12.053	2	6.025	0.308	0.76	* *	0.155
空白列	39.110	2	19.556				

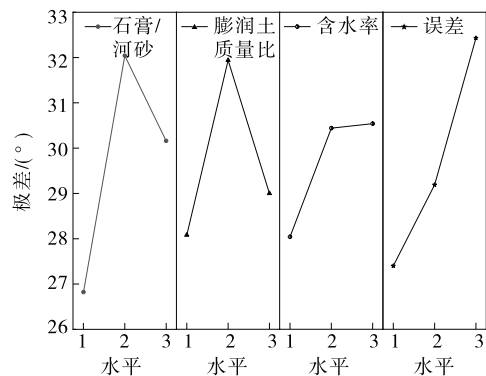


图 3 相似材料内摩擦角极差分析

的影响最小;相似材料的内摩擦角随着石膏/河砂的减小先增大后减小,随着膨润土质量比的增大先增

大后减小,随着含水率的增加而增大,说明石膏减少会减小相似材料的内摩擦角。

3.4 泊松比敏感度分析

相似材料泊松比对石膏/河砂、膨润土质量比、含水率的敏感度分析见表 11~12、图 4。

表 11 相似材料泊松比极差分析结果

水平	石膏/河砂 (R_1)	膨润土质量 比(R_2)	含水率 (R_3)	误差 (R_4)
\bar{K}_1	0.43	0.46	0.46	0.46
\bar{K}_2	0.49	0.47	0.47	0.47
\bar{K}_3	0.50	0.49	0.48	0.49
R_j	0.07	0.03	0.02	0.03

表 12 相似材料泊松比方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性	贡献率
石膏/河砂	0.008 0	2	0.004 00	7.26	0.12	* *	0.78
膨润土质量比	0.001 0	2	0.001 00	1.25	0.44	* *	0.13
含水率	0.000 8	2	0.000 48	0.76	0.57	* *	0.09
空白列	0.001 0	2	0.000 50				

由表 11~12、图 4 可知:石膏/河砂对相似材料泊松比的影响最大,其次为膨润土质量比,含水率的影响最小;相似材料的泊松比随着石膏/河砂的减小

而增大,随着膨润土质量比和含水率的增大而增大,说明石膏减少、膨润土质量比增大、水增多会增大相似材料的泊松比。

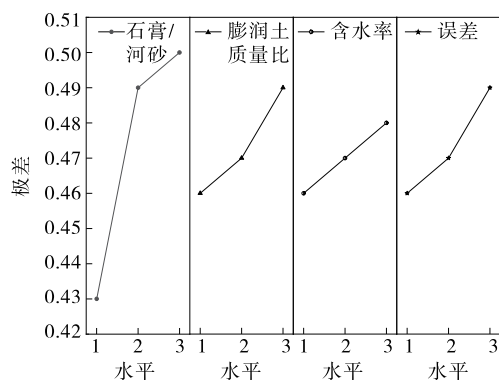


图4 相似材料泊松比极差分析

4 拟合线性回归方程

根据相似材料影响因素极差分析和方差分析结果,利用 Minitab 统计学软件进行拟合线性回归分析。设 y_1 为弹性模量、 y_2 为黏聚力、 y_3 为内摩擦角、 y_4 为泊松比、 x_1 为石膏/河砂、 x_2 为膨润土质量比、 x_3 为含水率,弹性模量的回归方程为:

$$y_1 = 212.3 - 32.9x_1 - 27.6x_2 - 24.6x_3$$

黏聚力的回归方程为:

$$y_2 = 89.4 - 14.47x_1 - 4.7x_2 - 1.22x_3$$

内摩擦角的回归方程为:

$$y_3 = 22.92 + 1.67x_1 + 1.25x_2 + 0.43x_3$$

泊松比的回归方程为:

$$y_4 = 0.3544 + 0.0325x_1 - 0.01167x_2 + 0.01483x_3$$

5 结论

(1) 采用材料质量配比为 $M(\text{石膏}) : M(\text{河砂}) : M(\text{膨润土}) : M(\text{水}) = 1.00 : 0.50 : 0.15 : 0.25$ 的相似材料能较好地模拟千枚岩弹性模量、黏聚力、内摩擦角、泊松比 4 个力学参数,根据试验结果能拟合出千枚岩弹性模量、黏聚力、内摩擦角、泊松比与相似材料原材料质量比的线性回归方程。

(2) 石膏/河砂对相似材料弹性模量、内摩擦角、黏聚力、泊松比的影响最大,石膏增加会增大相似材料的弹性模量、黏聚力、内摩擦角,降低相似材

料的泊松比;膨润土质量比对相似材料内摩擦角、泊松比的贡献度仅次于石膏/河砂;含水率对相似材料弹性模量、黏聚力的影响仅次于石膏/河砂。

参考文献:

- [1] 周艺,何川,邹育麟,等.破碎千枚岩隧道富水区段施工及支护方法[J].公路交通科技,2013,30(5):89-97+117.
- [2] 周朋.深埋隧道软弱围岩稳定性研究及其加固效果分析[D].北京:北京交通大学,2013.
- [3] 李术才,宋曙光,李利平,等.海底隧道流固耦合模型试验系统的研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):883-890.
- [4] 王军祥,崔宁坤,蔺雅娴,等.千枚岩相似材料研制及模型试验初步应用[J].地下空间与工程学报,2021,17(1):87-97.
- [5] SHI L K, ZHOU H, SONG M, et al. Geomechanical model test for analysis of surrounding rock behaviours in composite strata[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(4): 774-786.
- [6] 冯亚松.挤压性炭质千枚岩隧道模型试验及围岩变形特征研究[D].兰州:兰州交通大学,2015.
- [7] 汪波,杨意,何川,等.破碎千枚岩隧道施工期位移安全控制基准研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2287-2297.
- [8] 陈志敏,冯亚松.炭质千枚岩相似材料研制[J].硅酸盐通报,2017,36(12):4234-4241.
- [9] 张涵.炭质千枚岩隧道模型试验及支护结构优化研究:以汶马高速米亚罗 3# 隧道为例[D].成都:成都理工大学,2018.
- [10] GAO C L, ZHOU Z Q, YANG W M, et al. Model test and numerical simulation research of water leakage in operating tunnels passing through intersecting faults[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Research, 2019, 94: 103134.1-103134.13.
- [11] 谢远.断层破碎带段隧道围岩稳定性分析及变形控制研究[D].西安:长安大学,2021.
- [12] 晏莉,喻少华,文胜.隧道压力拱理论及试验进展研究[J].公路与汽运,2021(2):137-142+146.

收稿日期:2023-03-13