DOI: 10.7672/sgjs2025110001

层状围岩深埋引水隧洞开挖变形特征模型试验研究*

万启洲[1],周泽沛[1],蒋　楠[2],李鹏宇[1],杨玉民[2]
(1. 中国水利电力对外有限公司,北京　100011; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北　武汉　430074)

[摘要] 高地应力作用下层状围岩大变形是隧道开挖施工安全控制的关键问题。依托圣加旺引水隧洞工程,根据围岩参数及试验条件设计相似比和相似材料配合比,利用模型试验研究不同地应力条件下的围岩变形特征。研究结果表明,隧洞断面不同位置的围岩应变与应力呈正线性相关关系,随着应力的增加,左拱腰及左拱肩的围岩自稳性首先会受到破坏,拱底围岩稳定性最好,最不易发生破坏行为。

[关键词] 引水隧洞;层状岩体;地应力;模型试验;变形
[中图分类号] U45　　[文献标识码] A　　[文章编号] 2097-0897(2025)11-0001-06

Experimental Study on Excavation Deformation Characteristics Model of Deep Buried Diversion Tunnel in Layered Surrounding Rock

WAN Qizhou[1], ZHOU Zepei[1], JIANG Nan[2], LI Pengyu[1], YANG Yumin[2]
(1. *China International Water & Electric Co., Ltd., Beijing*　100011, *China*;
2. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei*　430074, *China*)

Abstract: The large deformation of layered surrounding rock under the action of high ground stress is the key problem of tunnel excavation construction safety control. Based on the San Gabán Diversion Tunnel Project, the similarity ratio and similar material ratio were designed according to the surrounding rock parameters and test conditions. And the deformation characteristics of surrounding rock under different in-situ stress conditions were studied by model test. The results indicate that there is a positive linear correlation between the strain and stress of the surrounding rock at different positions of the tunnel section. With the increase in stress, the self-stability of the surrounding rock of the left haunch and the left spandrel will first be damaged. The stability of the surrounding rock at the bottom of the arch is the best, and the failure behavior is the least.

Keywords: diversion tunnel; layered rock mass; ground stress; model test; deformation

0　引言

随着水电站工程的大规模建设,其配套结构引水隧洞的开挖深度不断增加,隧洞开挖过程中的地质条件也愈加复杂,特别是围岩应力[1]。岩体在历史沉淀中慢慢演变为稳定结构,当隧道开挖导致岩体局部区域发生瞬态卸荷,高地应力的存在有可能会导致岩爆、岩体大变形等问题[2],这一现象在完整性较差的层状岩体中表现得更加严重[3]。因此,确保地应力作用下层状岩体稳定性是隧道工程安全施工的关键问题。

针对地应力下的围岩变形问题,已有学者展开相关研究并取得了一定成果[4-6]。吴顺川等[7]基于全位移理论,针对隧洞开挖过程不同阶段的全位移变形提出了不同的计算方法,为后续隧洞开挖期间的围岩变形控制提供了理论依据。柳彦军等[8]通过数值模拟及现场试验提出利用迂回导坑缓解高地应力对隧道围岩的影响,从而减小隧道变形。张沛远等[9]基于莲花隧道地质条件、岩性特征及隧道变形情况,通过经验法及半理论-半经验法对隧道大变形特征进行预测。岩体完整性对围岩力学特性影响较大,针对富含节理裂隙的层状岩体稳定性研究陆续展开[10-11]。王亚琼等[12]采用 3DEC 软件分析不同岩层厚度、地应力及侧压力系数下隧道断面围岩变形特征。孟陆波等[13]收集了 200 个层状岩

*国家自然科学基金(41920104007)
[作者简介] 万启洲,高级工程师,E-mail: 473229127@qq.com
[通信作者] 蒋　楠,副教授,硕士生导师,E-mail: jiangnan@cug.edu.cn
[收稿日期] 2024-12-22

体隧道变形案例,采用关联规则法提出层状软岩隧洞大变形分级判别方法。由于试验条件等因素限制,针对地应力条件下层状岩体隧道围岩变形特征研究多集中在数值模拟以及理论解析上,缺乏试验研究。

本文基于秘鲁圣加旺引水隧洞工程,采用相似比理论设计相似比,以水泥、砂、重晶石粉及水进行配合比试验,通过正交试验分析不同配合比下相似材料物理力学性质指标,得到满足要求的相似材料配合比。最后通过模型试验分析不同地应力条件下隧道断面层状围岩变形特征,利用应力-应变关系推导隧洞易破坏位置,为现场安全施工提供参考。

1 工程概况

圣加旺引水隧洞地处秘鲁,为马蹄形断面,全长 16.12km,尺寸为 5.7m×5.7m(长×宽),采用钻爆法及 TBM 法结合的方式进行开挖。隧道周边岩体主要为石英绢云母片岩,存在明显的节理特征,呈 45°倾斜。水压致裂法测得工程现场的局部围岩地应力如表 1 所示。

表 1 地应力监测结果

Table 1 Monitoring results of ground stress

试验段	深度/m	垂直应力/MPa	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	侧应力系数
Ⅰ	212.2	5.19	8.51	5.19	1.12
Ⅱ	290.5	7.26	12.46	6.92	0.91
Ⅲ	329.8	8.30	15.07	7.79	0.87

2 相似材料力学参数

2.1 相似比

在试验设计时,主要考虑工程现场岩体与所采用相似材料的力学参数、物理模型试验所采用的模型形状与尺寸、现场岩体周边的地应力与模型加载系统设计加载值等因素。

基于相似理论,上述相似条件可从几何学、力学平衡方程、胡克定律及边界条件等方面导出。相似比确定需考虑包含几何尺寸、位移、应变、密度、地应力和抗压强度在内的 6 个参数,其相似常量定义如下:

$$\begin{cases} C_L = L_1/L_2 & C_X = X_1/X_2 \\ C_\varepsilon = \varepsilon_1/\varepsilon_2 & C_\rho = \rho_1/\rho_2 \\ C_F = F_1/F_2 & C_\sigma = \sigma_1/\sigma_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中:C_L,C_X,C_ε,C_ρ,C_F 及 C_σ 分别代表几何尺寸、位移、应变、密度、地应力和抗压强度的相似常量;L,X,ε,ρ,F 及 σ 分别代表几何尺寸、位移、应变、密度、地应力和抗压强度的参数,工程原型参数标注下标 1,物理模型参数标注下标 2。这些参量需满足以下相似准则:

$$\begin{cases} \dfrac{C_\sigma}{C_\rho C_L} = 1 & \dfrac{C_X}{C_\varepsilon C_L} = 1 \\ C_\sigma = C_F & C_\varepsilon = C_\rho \end{cases} \tag{2}$$

本文在模型试验中主要研究隧道周边层状围岩的静力变形特征,因此优先考虑加载尺寸与隧道实际尺寸,确定最优几何相似系数,再依据相似比理论与工程现场岩体力学参数确定模型的对应参数。模型箱尺寸为 130cm×110cm,根据围岩影响圈与模型加载系统尺寸确定几何相似系数 $C_L=10$,确定模型试验中隧洞尺寸为 57cm×57cm。根据模型最大荷载集度与工程岩体参数确定应力相似系数 $C_F=10$,其他几个参量的相似系数 $C_X=C_\sigma=10$,$C_\varepsilon=C_\rho=1$,由此确定模型试验中的岩体密度为 2.824g/cm^3,岩体抗压强度为 9.191MPa,而实际工程中的岩体密度为 2.824g/cm^3,岩体抗压强度为 91.91MPa。

2.2 相似材料配合比

为了快捷有效地研制试验所需的岩体相似材料,对相似材料单轴抗压强度进行测定。采用水泥、砂、重晶石粉和水进行配合比试验,通过正交试验分析不同配合比下相似材料物理力学性质指标,进而优化试验配合比方案,得到满足试验要求的最佳相似材料配合比。主要以水灰比、胶砂比、重晶石粉 3 个影响因素进行正交试验分析,并在每个因素下设置 3 个水平,如表 2 所示。

表 2 正交试验因素及水平

Table 2 Orthogonal test factors and levels

配合比	水灰比	胶砂比	重晶石粉:骨料/%
Ⅰ	0.80	1:4	0
Ⅱ	0.85	1:5	10
Ⅲ	0.90	1:6	20

3 试件制备与影响因素分析

采用 7cm×7cm×7cm 的标准立方体试件,如图 1 所示。选用的砂粒径为 0.5~1mm,满足试件标准要求。同一配合比和养护条件下的试件加工数量为 3 个,材料均为人工配制,在室温 35℃ 条件下进行养护。在本试验中,选取基准骨料 2 000g,按照相似材料配合比方案进行计算,准备其他原材料的质量,速凝剂取水泥质量的 4%左右,具体参数如表 3 所示。

试件制备步骤如图 2 所示。采用人工捣密的方法密实试件,待试件成型后,将试件静放 24h,之后进行脱模、编号。将拆模后的试件置于自然环境下养护 7d,取出后进行物理力学性质测定。

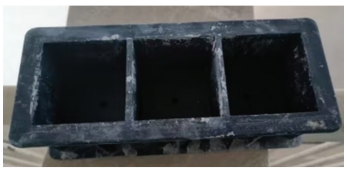


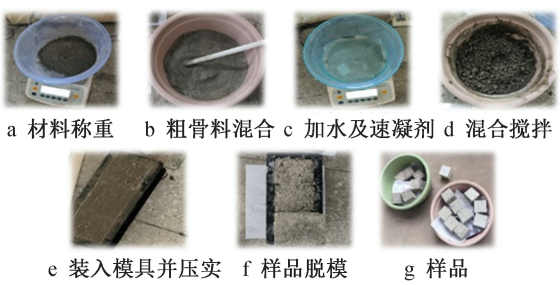
图 1　标准立方体试件模具

Fig. 1　Standard cube specimen mold

表 3　相似材料配合比方案及原料质量

Table 3　Similar material proportioning scheme and raw material quality

试验编号	相似材料配合比方案			原料质量				
	水灰比	胶砂比	重晶石粉:骨料/%	水/g	水泥/g	砂/g	重晶石粉/g	速凝剂/g
1	0.80	1:4	0	400	500	2 000	0	20.00
2	0.80	1:5	20	256	320	1 600	400	12.80
3	0.80	1:6	10	240	300	1 800	200	12.00
4	0.85	1:4	20	340	400	1 800	200	16.00
5	0.85	1:5	10	306	360	1 600	400	14.40
6	0.85	1:6	0	283	333	2 000	0	13.33
7	0.90	1:4	10	405	450	1 800	200	18.00
8	0.90	1:5	0	360	400	2 000	0	16.00
9	0.90	1:6	20	240	267	1 600	400	10.67



a 材料称重　b 粗骨料混合　c 加水及速凝剂　d 混合搅拌

e 装入模具并压实　f 样品脱模　g 样品

图 2　样品制备过程

Fig. 2　Sample preparation process

根据模型试验参数要求,需测得试件密度及抗压强度。抗压强度测试采用 YAW-300D 型全自动水泥抗折抗压一体机,该仪器采用高精度数字微小流量阀,能实现等负荷速率加荷或等应力速率加荷,控制精度高、可靠性好。各样品密度及抗压强度如表 4 所示。

为进一步分析水灰比、胶砂比、重晶石粉 3 个因素对相似材料密度及抗压强度的影响,根据正交试验结果,统计相似材料密度及抗压强度,对结果进行直观性极差分析,如表 5 所示,各影响因素对相似材料密度以及抗压强度的边际平均值统计如图 3 所示。

根据表 5 中各因素极差值 R 可知,各因素对相似材料密度以及抗压强度敏感性满足水灰比>重晶石粉:骨料>胶砂比,其中水灰比对相似材料密度以及抗压强度的影响最为显著,而胶砂比对相似材料密度以及抗压强度的影响最不显著。此外,由 k 值的变化特征可知,水灰比与相似材料密度呈负线性

表 4　样品密度及抗压强度测试结果

Table 4　Measurement results of density and compressive strength of samples

编号	密度/(g·cm^{-3})				抗压强度/MPa			
	1	2	3	平均	1	2	3	平均
1	2.144	2.156	2.114	2.138	12.8	13.2	12.4	12.8
2	2.321	2.351	2.321	2.331	18.2	15.1	13.9	15.7
3	2.286	2.273	2.268	2.276	15.1	15.2	15.1	15.1
4	2.215	2.201	2.201	2.206	14.4	16.7	12.7	14.6
5	2.172	2.157	2.157	2.162	13.4	13.2	13.2	13.3
6	1.968	2.041	2.012	2.007	9.9	7.2	9.5	8.9
7	2.114	2.114	2.099	2.109	7.0	7.1	7.8	7.3
8	2.012	2.012	2.026	2.017	6.5	7.0	7.1	6.9
9	1.997	1.983	1.983	1.987	7.7	7.4	6.9	7.3

表 5　极差分析

Table 5　Range analysis

指标	特征参数	水灰比	胶砂比	重晶石粉:骨料
密度/(g·cm^{-3})	K_1	6.745	6.453	6.161
	K_2	6.375	6.510	6.547
	K_3	6.113	6.270	6.525
	k_1	2.248	2.151	2.054
	k_2	2.125	2.170	2.182
	k_3	2.038	2.090	2.175
	R	0.211	0.080	0.129
抗压强度/MPa	K_1	43.667	34.700	28.533
	K_2	36.733	35.867	35.700
	K_3	21.500	31.333	37.667
	k_1	14.556	11.567	9.511
	k_2	12.244	11.956	11.900
	k_3	7.167	10.444	12.556
	R	7.389	1.511	3.044

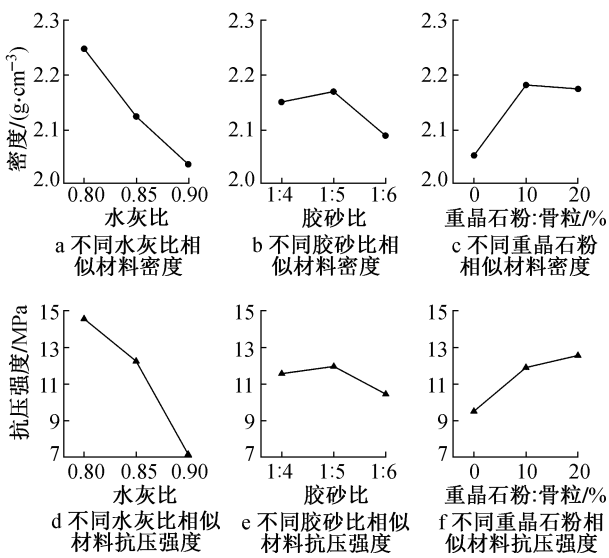


图 3　各参量边际平均值分布

Fig. 3　Distribution of marginal means for each covariate

相关,而重晶石粉:骨料及胶砂比与相似材料密度没有明显的线性相关关系;水灰比与相似材料抗压强度呈负线性相关,胶砂比与相似材料抗压强度呈正线性相关,而重晶石粉:骨料与相似材料抗压强度没有明显的线性相关关系。根据本试验对相似材料密度以及抗压强度的要求,选取第 6 组试验配合比作为本次模型试验相似材料的配合比,即水灰比为 0.85,胶砂比为 1∶6,不添加重晶石粉。

4 模型试验

4.1 试验概况

模型试验装置共包含 4 块铁片和 1 个反力架,如图 4 所示,其中 2 块铁片长 130cm,2 块铁片长 110cm,反力架可给地应力模拟环境提供支撑反力。4 块铁片中,3 块为可活动铁片,可用于施加地应力荷载并传递给围岩,起到模拟地应力环境的作用,剩下的 1 块铁片固定不动。

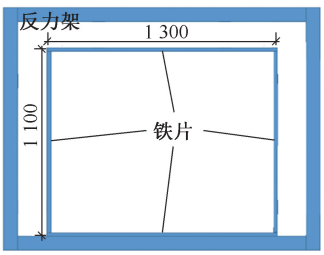


图 4 模型试验装置

Fig. 4 Model test device

模型试验装置搭建和围岩相似材料浇筑步骤如图 5 所示,浇筑工作共分 2 次进行,时间间隔 1d。浇筑完成后室温养护 14d,以确保达到预期强度。

a 隧道断面模具准备　b 搭建模型试验装置　c 材料配制　d 围岩浇筑

图 5 试验流程

Fig. 5 Test procedures

本次试验监测以围岩应变为主,布置情况如图 6 所示。使用的应变片为双轴应变花,分别布置在拱顶、左右两侧拱肩、左右两侧拱腰、左右两侧拱脚以及拱底。使用前用磨砂纸反复摩擦围岩,保证围岩表面平整,在应变片背面及围岩表面分别涂上 502 胶水,然后将应变片粘贴在围岩表面,同时使用黑胶布固定应变片的引线,尽可能减小外界环境对应变片的扰动。监测仪器全部布置完成后,整理引线位置,保证其不会在试验过程中随意摇晃,以免影响试验结果的准确性。

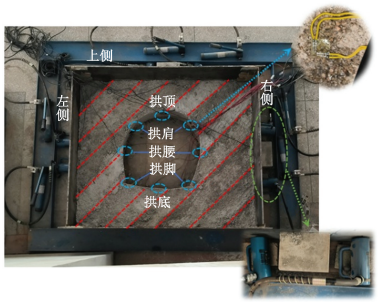


图 6 模型试验及监测点布置

Fig. 6 Model test and monitoring points arrangement

4.2 地应力环境模拟

本次试验通过液压千斤顶模拟地应力环境,在模型试验装置左侧、上侧、右侧分别布置 2 个千斤顶,其中左右两侧模拟的是侧向地应力,上侧模拟的是围岩自重应力。在布置千斤顶时,通过垫砖块使千斤顶的施力点位于围岩高度的中部,然后按压液压千斤顶,使千斤顶正好固定在铁片与反力架之间,使其不会摇晃移动。同时设置 0.2,0.4,0.6,0.8MPa 应力工况,分别记为工况 1~4,进而分析不同压力条件下围岩相似材料应变变化特征。

5 试验结果分析

5.1 环向应变

不同工况下隧道断面不同位置的环向应变如图 7 所示。隧道断面不同位置的环向应变相差较大,其中左拱肩、左拱腰、左拱脚、右拱脚、右拱肩处的环向应变较大,而拱顶、拱底以及右拱腰处的环向应变较小,环向应变大小顺序为左拱腰>左拱肩>左拱脚>右拱脚>右拱肩>拱顶>右拱腰>拱底。随着应力的增大,各位置的环向应变也不断增加,各工况下的最大环向微应变均出现在左拱腰处,最小环向应变均出现在拱底处。

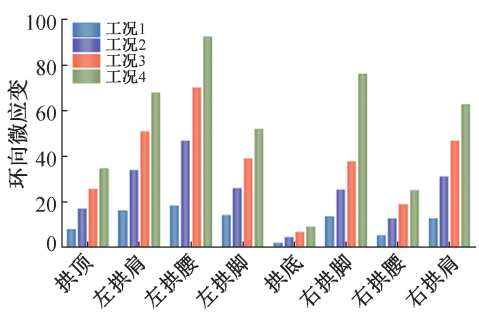


图 7 不同工况及不同位置下的隧道环向应变

Fig. 7 Circumferential strain of the tunnel under different working conditions and different positions

为了进一步分析隧道断面不同位置在不同应力条件下的环向应变变化特征,对应力-环向应变进行线性分析,拟合结果如表 6 和图 8 所示。应力与

应变符合正线性相关关系,且拟合得到的相关性系数较高。从各函数的斜率结果可以看出,左拱腰环向应变不仅最高,增长速度也最快,说明随着应力不断增大,该处的围岩自稳性将首先发生破坏。此外,尽管在试验过程中右拱脚环向应变并不大,但拟合得到的斜率却较大,说明其应变增加速率较大,随着应力的增大,很有可能会先于其他位置发生破坏。而拱底处线性拟合函数斜率仅为 118.034,且该处受到的应变最小,说明拱底相对于其他位置来说,围岩稳定性最好,最不易发生破坏行为。隧道断面各处的应变增长速度顺序为左拱腰>右拱脚>左拱肩>右拱肩>左拱脚>拱顶>右拱腰>拱底。

表 6　隧道不同位置应力与环向应变的关系

Table 6　Relationship between stress and circumferential strain at different locations in the tunnel

应变片位置	应力 σ 与环向应变 τ 关系	相关性系数 R^2
拱顶	$\tau=441.770\sigma-0.644$	0.999
左拱肩	$\tau=860.075\sigma-0.638$	0.999
左拱腰	$\tau=1\,225.050\sigma-4.220$	0.995
左拱脚	$\tau=632.610\sigma+1.350$	0.999
拱底	$\tau=118.034\sigma-0.135$	0.999
右拱脚	$\tau=998.265\sigma-11.611$	0.858
右拱腰	$\tau=329.440\sigma-0.839$	0.996
右拱肩	$\tau=827.675\sigma-2.923$	0.998

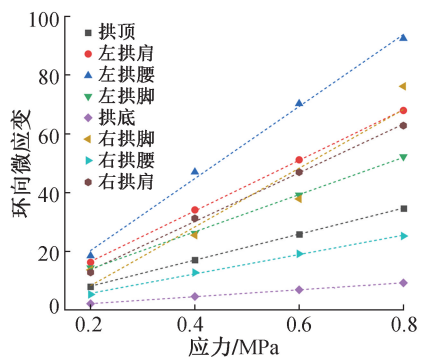


图 8　应力与环向应变线性拟合

Fig. 8　Linear fitting of stress and circumferential strain

5.2　轴向应变

对不同工况下隧道断面不同位置的轴向应变数据进行统计,如图 9 所示。隧道断面不同位置的轴向应变相差较大,其中拱顶、左拱肩、右拱腰、右拱肩处的轴向应变较大,而左拱腰、左拱脚、拱底以及右拱脚处的轴向应变较小,顺序为右拱腰>左拱肩>拱顶>右拱肩>左拱腰>右拱脚>左拱脚>拱底。随着围岩压力的增大,各位置的轴向应变也不断增加,各工况下的最大轴向应变所处位置也有所不同,其中工况 1 出现在右拱腰处,为 33.705,工况 2 出现在右拱肩处,为 74.458,工况 3 和工况 4 均出现在右拱肩处,分别为 111.64 和 148.82,各工况下的最小轴向应变均出现在拱底处。

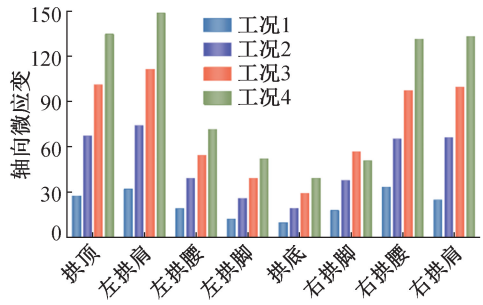


图 9　不同工况及不同位置下的隧道轴向应变

Fig. 9　Axial strain of the tunnel under different working conditions and different positions

为了进一步分析隧道断面不同位置在不同应力条件下的应变变化,对应力-轴向应变进行线性拟合,结果如表 7 和图 10 所示,可知轴向应力与应变符合正线性相关关系,且拟合得到的相关性系数较高。由图 10 可知,左拱肩轴向应变最大,增长速度也最快,说明随着地应力变大,左拱肩围岩自稳性将首先发生破坏。而拱底得到的斜率仅为 488.970,同时拱底环向应变最小,说明拱底相对于其他位置来说,围岩稳定性最好,最不易发生破坏。隧道断面各处的应变增长速度顺序为拱肩>右拱肩>拱顶>右拱腰>左拱腰>左拱脚>右拱脚>拱底。

表 7　隧道不同位置应力与轴向应变的关系

Table 7　Relationship between stress and axial strain at different locations in the tunnel

应变片位置	应力 σ 与轴向应变 τ' 关系	相关性系数 R^2
拱顶	$\tau'=1\,772.195\sigma-5.708$	0.997
左拱肩	$\tau'=1\,934.355\sigma-4.924$	0.998
左拱腰	$\tau'=862.630\sigma-3.218$	0.995
左拱脚	$\tau'=664.490\sigma-0.602$	0.999
拱底	$\tau'=488.970\sigma+0.175$	0.999
右拱脚	$\tau'=589.120\sigma+11.649$	0.669
右拱腰	$\tau'=1\,629.910\sigma-0.648$	0.999
右拱肩	$\tau'=1\,788.175\sigma-8.244$	0.995

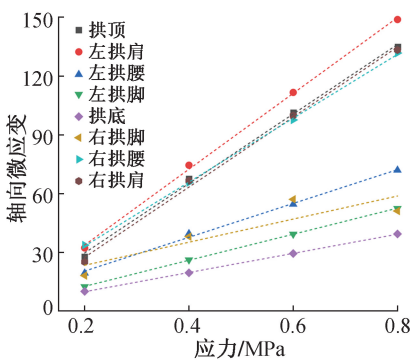


图 10　应力与轴向应变线性拟合

Fig. 10　Linear fitting of stress and axial strain

6 结语

1)各因素对相似材料密度以及抗压强度敏感性的大小均满足水灰比>重晶石粉:骨料>胶砂比的规律,水灰比与相似材料密度及抗压强度呈负线性相关的关系,胶砂比与相似材料抗压强度呈正线性相关的关系。

2)隧洞断面不同位置的围岩环向应变与应力呈正线性相关关系。左拱腰围岩稳定性最差,拱底围岩稳定性最好。

3)隧洞断面不同位置的围岩轴向应变与应力呈现正线性相关关系,左拱肩轴向应变增长速率最大,拱底最小。

参考文献:

[1] 陈璐,周子龙,高山,等. 高应力隧道爆破研究现状与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):849-865.
CHEN L, ZHOU Z L, GAO S, et al. Research status and prospects of blasting excavation of tunnel under high stress condition[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2023, 54(3): 849-865.

[2] 郭红斌, 孙卫涛, 张子明. 高应力隧道爆破研究现状与展望[J]. 施工技术, 2021, 50(4): 49-52,64.
GUO H B, SUN W T, ZHANG Z M. Simulation research on construction method of gushing large-span bifurcation tunnel[J]. Construction technology, 2021, 50(4): 49-52,64.

[3] 邹翀,潘岳,王华. 山岭隧道层状岩体岩爆机理与防控技术研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(18):90-95.
ZOU C, PAN Y, WANG H. Mechanism and prevention-control technology of rock burst in layered rock mass of mountain tunnel [J]. Construction technology, 2022, 51(18): 90-95.

[4] 李松峰,陈军锋. 高地应力巷道围岩变形控制方法[J]. 煤炭技术,2022,41(10):33-35.
LI S F, CHEN J F. Deformation control method of surrounding rock in high ground stress roadway[J]. Coal technology, 2022, 41(10): 33-35.

[5] 袁飞,包崇超,王猛,等. 红层软岩隧洞大变形特征及控制措施研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 332-340,349.
YUAN F, BAO C C, WANG M, et al. Study on large deformation characteristics and control measures of red-bed soft rock tunnel[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022, 18(S1): 332-340,349.

[6] 秦玉宾. 浅埋偏压小净距隧道施工方案优化[J]. 施工技术(中英文),2023,52(10):70-76,82.
QIN Y B. Construction scheme optimization of shallow buried, bias and small clear distance tunnel [J]. Construction technology, 2023, 52(10): 70-74,82.

[7] 吴顺川,胡中亮,耿晓杰,等. 基于全位移理论的引水隧洞围岩变形全过程研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(11):181-191.
WU S C, HU Z L, GENG X J, et al. Research method for whole process of surrounding rock deformation of diversion tunnel based on full displacement theory[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2023,50(11):181-191.

[8] 柳彦军,刘家奇,徐继保,等. 高地应力富水软岩铁路隧道变形机理及施工控制措施[J]. 科学技术与工程,2022,22(21): 9364-9371.
LIU Y J, LIU J Q, XU J B, et al. Deformation mechanism and control measures for railway tunnels under high ground stress and water-rich soft rock[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(21): 9364-9371.

[9] 张沛远,张晓平,张晗,等. 莲花隧道软弱围岩大变形预测方法适用性评价研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1689-1702.
ZHANG P Y, ZHANG X P, ZHANG H, et al. Applicability evaluation of prediction method for large deformation of soft surrounding rock in Lianhua Tunnel[J]. Journal of engineering geology, 2022, 30(5): 1689-1702.

[10] 荀其迅. 大埋深引水隧洞穿越断裂带围岩变形规律研究[J]. 力学与实践,2024,46(2):298-315.
XUN Q X. Study on surrounding rock deformation law of large buried diversion tunnel through fault zone[J]. Mechanics in engineering,2024,46(2):298-315.

[11] 陈子全,何川,吴迪,等. 高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J]. 西南交通大学学报,2018,53(6):1237-1244.
CHEN Z Q, HE C, WU D, et al. Study of large deformation classification criterion for layered soft rock tunnels under high geostress[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1237-1244.

[12] 王亚琼,杨强,潘红伟,等. 基于3DEC模拟的高地应力水平层状隧道围岩变形破坏特征分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(4):127-136,146.
WANG Y Q, YANG Q, PAN H W, et al. Analysis on deformation and failure characteristics of surrounding rock in horizontal layered tunnels under high crustal stress based on 3DEC simulation[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(4): 127-136,146.

[13] 孟陆波,黄意霖,李天斌,等. 高地应力层状软岩隧道非对称挤压大变形分级修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(1):147-156.
MENG L B, HUANG Y L, LI T B, et al. An improved classification method of asymmetrical squeezing large deformation of layered soft rock tunnels under high geo-stresses[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2022, 41(1): 147-156.