

# 隧道全风化花岗岩压密特性的室内试验与数学模型研究

余俊<sup>1</sup>, 樊文胜<sup>2</sup>, 王惠雨<sup>3</sup>, 王一达<sup>3</sup>, 翁贤杰<sup>4</sup>

- 江西交通职业技术学院 路桥工程学院, 江西 南昌 330013;
- 江西省交通投资集团项目建设管理公司, 江西 南昌 330003;
- 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580;
- 江西交通咨询有限公司, 江西 南昌 330008)

**摘要:** 选取工程中遇到的典型地层作为实验土样, 在12%~32%含水率条件下分别进行侧限压缩试验, 得到不同含水率条件下的原状土固结时的应力-应变曲线; 借助 Origin 数据分析软件, 使用数据拟合方式建立了可描述全风化花岗岩非线性压密过程的数学模型, 定量研究了全风化花岗岩在常规注浆压力(0~4 MPa)下的压密特性。

**关键词:** 隧道; 全风化花岗岩; 室内试验; 压缩特性; 数学模型

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)04-0321-05

## Laboratory test and mathematical model study on compaction characteristics of fully weathered granite in tunnels

YU Jun<sup>1</sup>, FAN Wensheng<sup>2</sup>, WANG Huiyu<sup>3</sup>, WANG Yida<sup>3</sup>, WENG Xianjie<sup>4</sup>

- School of Road and Bridge Engineering, Jiangxi Vocational and Technical College of Communications, Nanchang 330013, China;
- Project Management Company of Jiangxi Provincial Communications Investment Group Company Limited, Nanchang 330003, China;
- College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
- Jiangxi Transportation Consulting Co., Ltd., Nanchang 330008, China)

**Abstract:** Typical strata encountered in the project were selected as experimental soil samples, and lateral confined compression tests were conducted under conditions of 12% to 32% water content to obtain stress-strain curves for undisturbed soil consolidation under different water content conditions. With the help of the Origin data analysis software, a mathematical model was established using data fitting to describe the nonlinear compaction process of fully weathered granite, and the compression characteristics of fully weathered granite under conventional grouting pressure (0-4 MPa) were quantitatively studied.

**Keywords:** tunnels; fully weathered granite; laboratory experiments; compaction characteristics; mathematical model

地下工程修建过程中常遇全风化花岗岩软弱地层, 施工中极易发生大变形、塌方、突水涌泥等地质灾害。注浆加固技术因其具有地层改造效果好、成本低廉、施工效率高等优势, 已被广泛应用于治理全风化花岗岩地层<sup>[1]</sup>, 相关学者也对其做

了大量的研究。在理论分析方面, 张连震等<sup>[2]</sup>开展了不同尺度的劈裂注浆模拟试验, 研究了一次或多次劈裂浆脉形态特征、注浆扩散过程中地应力场及渗流场的动态演化规律; 赵钰等<sup>[3]</sup>对全风化花岗岩地层进行了注浆室内模拟试验, 提出了

收稿日期: 2024-01-31

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFB2603002); 江西省交通运输厅科技项目(2023H0021)

第一作者简介: 余俊(1973—), 女, 江西南昌人, 教授级高工, 研究方向: 公路工程建设管理与技术研究。

浆液在地层中经历渗透扩散、挤密压缩、劈裂扩展 3 个阶段;杜少华等<sup>[4]</sup>对全风化花岗岩的力学性能及工程特性进行研究,总结了其力学特性;李杰等<sup>[5]</sup>采用数值模拟方法得出花岗岩地层浆液扩散半径的增加幅度随注浆压力的增加呈现逐渐减小的变化趋势。在技术应用方面,李萌萌等<sup>[6]</sup>考虑排水压力对浆液扩散的促进作用和范围的约束作用,提出饱和砂层定向诱导注浆理论,并进行了应用验证;苏兴矩等<sup>[7]</sup>提出了水囊式止浆棒胀顶紧贴袖阀钢管技术,在全风化花岗岩软土层进行高压劈裂分段注浆;祝俊等<sup>[8]</sup>对全风化花岗岩隧道突水水泥灾害特征、诱发机制及防治措施深入研究分析,提出系统的帷幕注浆技术。张健等<sup>[9]</sup>通过分析注浆压力、全风化花岗岩初始含水率及黏土含量三者之间的交互作用,提出全风化花岗岩地层注浆参数设计方法,并做了工程应用验证。

本文依托江西省遂大高速公路穿越全风化花岗岩等软弱地层的五指峰隧道,运用理论分析,通过室内试验,结合数学计算及数值分析等研究方法,建立数学模型,定量地研究全风化花岗岩的压密过程和特性。

## 1 全风化花岗岩压密特性室内试验

通过侧限压缩试验得到不同压力条件下全风化花岗岩压缩变形曲线。地层试样为工程原状地层,基本物性指标为:弹性模量 200 MPa、泊松比 0.268、黏聚力 0.15 MPa、内摩擦角 30°。

### 1.1 试验方法

选取江西省遂大高速公路五指峰隧道工程中典型地层,取得全风化花岗岩土样,土样的含水率为 26%,在此基础上,调整试验土样初始含水率在 12%~32% 之间,依照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)进行试验。

固结试验采用 WG 型单杠杆固结仪(三联高压),在实际注浆工程中,注浆压力区间通常为 0~4 MPa,对土样固结试验的荷载也选取 0~4 MPa,施加荷载的顺序与重量梯为:0、25、50、100、200、300、400、800、1 600、3 200、4 000 kPa。新加一级荷载 1 h 之内,若高压固结仪百分表读数变化不超过 0.005 mm,则可以认定在这一级荷载下,试样稳定不再压缩变形,进行下一步加载。

原状土试样的初始地层含水率调整后分为十一组,每组的初始含水率分别为:12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%、26%、28%、30%、32%。

## 1.2 实验结果分析

以土体所受侧限固结应力为横坐标,土体发生的压缩变形应变为纵坐标建立坐标系,绘制全风化花岗岩的应力-应变曲线。不同地层初始含水率条件下,土样的应力-应变曲线如图 1 所示,由图 1 可知:

(1)在土体的压缩过程中,应变随着施加应力的增加而增加,并且增长过程呈现出明显的非线性特征。在较低的应力范围内(0~1 600 kPa),应变随应力迅速增加,在较高的应力范围内(1 600~4 000 kPa),应变随应力增长而缓慢增加。这说明全风化花岗岩发生压缩变形的难度随着压缩过程的推进而不断增加。当地层初始含水率在较小范围(12%~20%)时,固结应力从 0 到达 1 600 kPa,土样的压缩变形量变化为 0.10 左右,约占整个土层压缩过程总应变(0.14)的 70%。

(2)土体的最终应变与地层初始含水率呈正相关,地层初始含水率为 32% 的土体在 4 000 kPa 压力作用下,最终应变量为 0.211,而地层初始含水率为 12% 的土体,最终应变量为 0.123。

(3)不同初始含水率土体的应变与应力曲线的变化趋势基本一致,均为上凸的抛物线型。

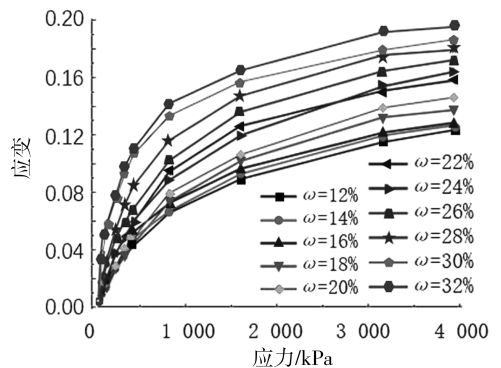


图 1 不同含水率下应力与应变关系

Fig.1 Relationship between stress and strain at different water contents

## 2 压密过程数学模型

基于室内固结压缩试验数据,并对试验数据进行拟合,建立不同地层初始含水率情况下全风化花岗岩压密过程的数学模型。

### 2.1 数学模型建立

根据室内侧限压缩试验,全风化花岗岩的应力-应变曲线如图 2 所示,该应力-应变曲线穿过坐标轴的原点,不施加固结压力时,土体的压缩变

形量为0。在施加固结压力的开始阶段,土体压缩变形量增加较快,当固结应力增长到最大固结压力的一半(2 000 kPa)时,整体变形量达到70%以上,具有十分明显的非线性特性。因此拟合模型选用二次抛物线模型<sup>[10]</sup>,拟合后的全风化花岗岩压缩固结过程如式(1)。

$$\varepsilon = A\sqrt{p+B}+C \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$ 为全风化花岗岩的土层应变; $p$ 为土体所受应力,MPa; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为表征初始含水率等土体特性的待定常数项。

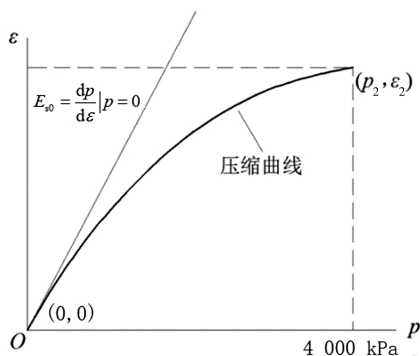


图2 压缩过程数学模型示意图

Fig.2 Mathematical model of compaction process

同时,初始压缩模量 $E_{s0}$ 和最终应变变量 $\varepsilon_2$ 也可用于拟合全风化花岗岩压缩曲线,初始压缩模量 $E_{s0}$ 反映地层初始压缩段的压缩速度,最终应变变量 $\varepsilon_2$ 反映地层的最终压密程度。公式(1)和 $E_{s0}$ 、 $\varepsilon_2$ 中的常数项应满足以下条件:

①  $\varepsilon$ - $p$  曲线通过原点(0,0),即 $0=A\sqrt{B}+C$ ;

②  $E_{s0} = \frac{dp}{d\varepsilon} \Big|_{p=0}$ ;

③ 当 $p = 4\ 000$  kPa时, $\varepsilon = \varepsilon_2$ 。

解方程可得不同地层初始含水率情况下,全风化花岗岩侧限压缩过程的拟合公式,如式(2)。

$$\varepsilon = \varepsilon_2 \sqrt{\frac{p}{p_2 - E_{s0}\varepsilon_2} + \frac{E_{s0}^2 \varepsilon_2^2}{4(p_2 - E_{s0}\varepsilon_2)^2} - \frac{E_{s0}\varepsilon_2^2}{2(p_2 - E_{s0}\varepsilon_2)}} \quad (2)$$

式中, $E_{s0}$ 为初始压缩模量,MPa。

与现有的土体压缩模型相比<sup>[11]</sup>,此公式更适用于全风化花岗岩,能够拟合在注浆压力(0~4 MPa)作用下压缩变形过程中全风化花岗岩的应力-应变关系,并且具有较高的准确度。

## 2.2 模型参数确定

根据前文研究,不同地层初始含水率的全风化花岗岩压密数学模型与最终应变变量 $\varepsilon_2$ 、初始压

缩模量 $E_{s0}$ 以及最大固结压力有关。最终应变变量 $\varepsilon_2$ 可直接从测试数据中获得,压缩模量 $E_{s0}$ 由0~50 kPa的割线压缩模量确定。

当仅考虑初始含水率对全风化花岗岩压密特性的影响时,可以通过拟合实验数据得到最终应变变量 $\varepsilon_2$ 、初始压缩模量 $E_{s0}$ 与初始含水率 $\omega_0$ 之间的定量关系,建立以初始含水率 $\omega_0$ 为变量的数学模型,为研究全风化花岗岩劈裂压密注浆过程以及注浆加固效果评估提供参考。

### 2.2.1 初始压缩模量 $E_{s0}$ 与初始含水率 $\omega_0$ 的拟合关系

以地层初始含水率为横坐标,全风化花岗岩初始压缩模量为纵坐标,建立坐标系,土体初始压缩模量 $E_{s0}$ 在不同地层初始含水率下的变化曲线如图3所示。由图3可知:

(1)在不同的初始含水率下,全风化花岗岩的初始压缩模量均不相同,二者呈现负相关关系。当地层初始含水率为12%时,初始压缩模量最大,达到8.23 MPa;当地层初始含水率增加至32%时,初始压缩模量最小,仅为1.1 MPa。这表明地层初始含水率越大,土体初始压缩模量 $E_{s0}$ 越小,其实际表现为土体疏松,抵抗变形的能力较差。

(2)当地层初始含水率在12%~32%时,全风化花岗岩初始压缩模量近似呈线性变化,因此可以采用线性函数模型对全风化花岗岩初始压缩模量 $E_{s0}$ 与地层初始含水率进行拟合。

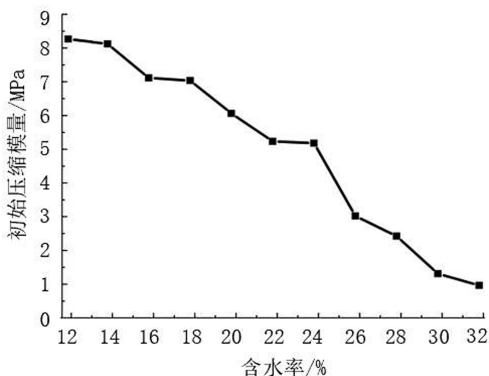


图3 初始压缩模量 $E_{s0}$ 与含水率的关系

Fig.3 Relationship between initial compaction modulus  $E_{s0}$  and water content

采用Origin数据分析软件对不同地层初始含水率 $\omega_0$ 下的全风化花岗岩初始压缩模量 $E_{s0}$ 进行线性数据拟合,土体初始压缩模量 $E_{s0}$ 与地层初始含水率拟合关系如式(3)。

$$E_{s0} = -0.394\ 15\omega_0 + 14.039\ 99 \quad (3)$$

式中,  $\omega_0$  为初始含水率, %。

室内实验所得数据与拟合曲线的对比如图 4 所示。由图 4 可见, 全风化花岗岩初始压缩模量  $E_{s0}$  与地层初始含水率的拟合关系与实际实验数据基本吻合, 拟合优度为 0.996 4, 拟合情况良好。

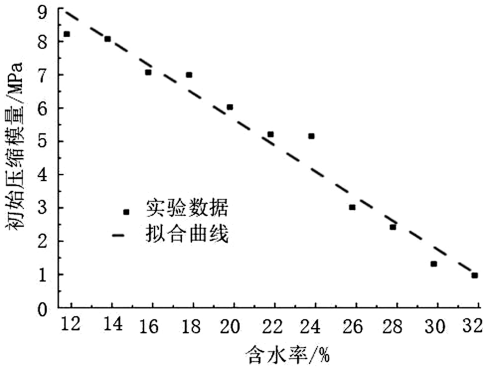


图 4 初始压缩模量  $E_{s0}$  与含水率关系  
试验与拟合曲线

Fig.4 Test data and fitting curve of initial compaction modulus  $E_{s0}$  and water content

### 2.2.2 最终应变变量 $\epsilon_2$ 与初始含水率 $\omega_0$ 的拟合关系

土体在  $p = 4\ 000\ \text{kPa}$  时的最终应变变量  $\epsilon_2$  与地层初始含水率之间的关系, 也会影响土体压密数学模型的参数。以地层初始含水率为横坐标, 土体最终应变变量  $\epsilon_2$  为纵坐标, 最终应变变量  $\epsilon_2$  与地层初始含水率  $\omega_0$  的关系如图 5 所示。由图 5 可知:

(1) 地层最终应变变量随初始含水量的上升而增加, 即地层初始含水率  $\omega_0$  越高, 土体最终压缩应变变量  $\epsilon_2$  越大。当地层初始含水率为 12% 时, 最终应变变量最小, 为 0.135; 随着地层初始含水率  $\omega_0$  增加至 32%, 土体的最终应变变量达到最大值 0.213。这表明随着地层的初始含水率增加, 土体的结构就越疏松, 受到浆液的压力作用后更容易发生压缩变形, 变形量更大。

(2) 在地层初始含水率  $\omega_0$  为 12% ~ 32% 时, 土体最终应变变量基本呈正向线性变化。当地层含水率  $\omega_0$  在 13% ~ 17% 和 21% ~ 27% 时, 最终应变变量  $\epsilon_2$  随地层含水率变化比较缓慢, 而在其他范围内, 最终应变变量  $\epsilon_2$  随地层初始含水率  $\omega_0$  变化相对较大。总体趋势上, 最终应变变量  $\epsilon_2$  随地层初始含水率  $\omega_0$  变化在含水率 12% ~ 32% 范围内呈线性正相关关系, 变化关系基本符合一次线性函数模型。

采用一次线性函数模型对土体最终应变变量

$\epsilon_2$  与地层初始含水率  $\omega_0$  关系进行拟合。拟合得到的方程如式(4)。

$$\epsilon_2 = 0.004\ 08\omega_0 + 0.076\ 13 \quad (4)$$

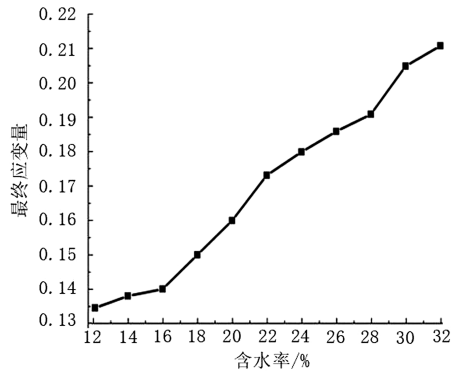


图 5 最终应变变量  $\epsilon_2$  与含水率  $\omega_0$  的关系

Fig.5 Relationship between ultimate strain  $\epsilon_2$  and water content  $\omega_0$

将实验数据与拟合得到的曲线合并, 如图 6 所示。由图 6 可知, 土体最终应变变量  $\epsilon_2$  与地层初始含水率  $\omega_0$  的拟合关系与实际实验数据基本重合, 拟合优度为 0.984 23, 拟合情况良好。

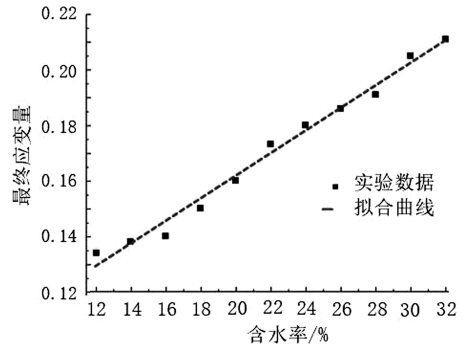


图 6 最终应变变量  $\epsilon_2$  与含水率  $\omega_0$  关系  
试验与拟合曲线

Fig.6 Test data and fitting curve of relationship between final strain  $\epsilon_2$  and water content  $\omega_0$

### 2.3 确立拟合公式

将已经建立的土体压密过程数学模型与最终应变变量  $\epsilon_2$ 、初始压缩模量  $E_{s0}$  的拟合公式相结合, 即可得到完整的全风化花岗岩压密过程拟合公式:

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_2 \sqrt{\frac{p}{p_2 - E_{s0}\epsilon_2} + \frac{E_{s0}^2\epsilon_2^2}{4(p_2 - E_{s0}\epsilon_2)^2}} \\ E_{s0} &= f(\omega_0) \\ \epsilon_2 &= g(\omega_0) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon$  为土体压缩应变变量。公式(5)适用范围:  
①地层初始含水率在 13%~33%;②注浆过程中注浆压力在 0~4 MPa。该公式定量地描述了全风化花岗岩的压密特性与地层含水率  $\omega_0$  之间的关系。

选取典型工况的试验数据(地层初始含水率 18%、22%、26%、30%)与拟合结果进行对比,结果如图 7 所示。

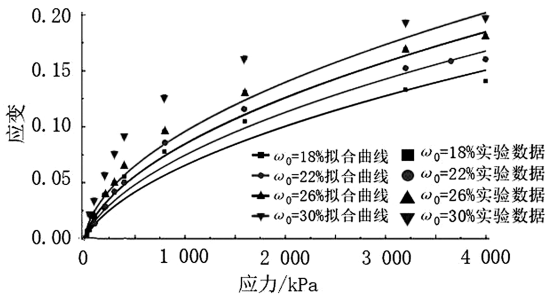


图 7 压密过程拟合结果与试验数据对比

Fig.7 Comparison of fitting results and test data between compaction process and experimental data

拟合得到的曲线与实际试验数据吻合情况良

好。说明该公式可用于预测劈裂压密注浆过程中全风化花岗岩的压密过程。

### 3 结论

1) 本文结合江西省遂大高速公路五指峰隧道施工过程中遇到的典型全风化花岗岩地质,通过室内试验测得了不同初始含水率原状土的应力-应变曲线,总结了全风化花岗岩在含水率为 12%~32% 区间内,应变随应力的变化趋势。

2) 通过数值拟合的方式,获得了全风化花岗岩初始含水率与最终应变变量  $\varepsilon_2$ 、初始压缩模量  $E_{s0}$  之间的定量关系,建立了全风化花岗岩压密数学模型,为全风化花岗岩劈裂压密注浆过程的综合分析及其应用提供参考。

3) 拟合得到的曲线与实际试验数据吻合对应情况良好,说明该公式拟合可靠,贴近工程实际。该公式可用于准确描述全风化花岗岩注浆时的压密过程,为施工过程中可能遇到的地质灾害处理提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] LI P P, SHAO X D, WU S W, et al. Conceptual design and preliminary test of the novel structure of steel inner core-UHPC composite box girder[J]. Engineering Structures, 2024, 300: 117-188.
- [2] 张连震,李志鹏,张庆松,等. 砂层压密特性及其对劈裂-压密注浆扩散过程的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 667-675.
- [3] 赵钰,郑洪,曹函,等. 全风化花岗岩地层中高固相析浆液灌浆机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 78-88.
- [4] 杜少华. 全风化花岗岩力学特性与本构模型及工程应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2022.
- [5] 李杰. 注浆压力对顺层抽采钻孔封孔质量影响研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(3): 136-142.
- [6] 李萌萌,张维,邓洪亮,等. 饱和砂层定向诱导注浆理论及试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 114-119.
- [7] 苏兴矩,丘仁科,邱礼球,等. 富水全风化花岗岩隧道注浆加固技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 788-792, 813.
- [8] 祝俊,梁军林,容洪流,等. 富水全强风化花岗岩隧道突水突泥灾害机制与帷幕注浆技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10918-10926.
- [9] 张健,李召峰,李术才,等. 基于抗崩解特性的全风化花岗岩地层注浆参数设计方法[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 87-95.
- [10] 朱光轩,张庆松,刘人太,等. 基于 PSO-LSSVM 的砂层可注性预测模型及其敏感性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 175-182.
- [11] ZHANG X Q, WEI C M, ZHANG H. Analysis of surrounding rock creep effect on the long-term stability of tunnel secondary lining[J]. Shock and Vibration, 2021: 1-8.

(责任编辑:陈雯)