

云南地区砂化白云岩力学参数取值及相关性

董家兴¹, 李清伟¹, 刘文连², 米健³, 许汉华², 代佩玄¹, 龚欣月¹, 眭素刚²

1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051

3. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021

摘要: 砂化白云岩作为中国西南地区水利、交通工程中所遭遇的一种特殊岩体, 其空间变异性及离散性极强, 传统勘察方法难以快速获取可靠参数, 施工过程中地质灾害频发, 开展砂化白云岩力学参数快速取值研究尤为重要。本研究通过现场试验与数理统计分析, 系统揭示了研究区域砂化白云岩力学参数的随机分布规律与相关性。主要成果如下: (1) 建立了微砂化~弱砂化白云岩单轴抗压强度 (UCS) 与岩体波速 (V_m)、点荷载强度 ($I_{s(50)}$) 的关系式; (2) 提出了强烈~剧烈砂化白云岩 V_m -NPI 关系式; (3) 得到研究区不同地层砂化白云岩不同力学参数的最优分布形态。研究成果可为砂化白云岩岩体分级、分类和力学参数理论估算提供依据。

关键词: 砂化白云岩; 力学参数; 针贯入; 概率分布; 参数相关性

中图分类号: TV 522

收稿日期: 2025-04-08

Study on the Value and Correlation of Mechanical Parameters of Disintegrated Dolomite in Yunnan Region

DONG Jiaying¹, LI Qingwei¹, LIU Wenlian², MI Jian³, XU Hanhua², DAI Peixuan¹, GONG Xinyue¹, SUI Sugang²

1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming 650051, China

3. Yunnan Institute of Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan 650021, China

Abstract: Disintegrated dolomite is a geologically distinctive rock mass commonly encountered in hydraulic and transportation projects in Southwestern China. It exhibits pronounced spatial variability and material heterogeneity, making traditional investigation methods unreliable for quick parameter estimation. Frequent geohazards during construction highlight the need to determine their mechanical properties rapidly. This study combines field tests and statistical analysis to investigate the random distribution patterns and correlations of mechanical parameters in disintegrated dolomite. The results indicate that: (1) Correlations were established between uniaxial compressive strength (UCS), P-wave velocity (V_m), and point load strength ($I_{s(50)}$) for slightly and weakly disintegrated dolomite; (2) A predictive V_m -Needle Penetration Index (NPI) correlation model was developed for severely and completely disintegrated dolomite; (3) Optimal probability distributions were identified for mechanical parameters across different strata. The research results can provide a basis for disintegrated dolomite rock mass classification, categorization, and theoretical estimation of mechanical parameters.

Key words: Disintegrated dolomite; Mechanical parameters; Needle penetration test; Probability distribution; Parameter interrelationships

基金项目: 云南省应用基础研究计划 (202401AT070328); 国家自然科学基金资助项目 (42162026); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目 (YNWR-QNBJ-2020-019)。

This work was supported by Yunnan Applied Basic Research Program (Grant No. 202401AT070328), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42162026) and Young Talents Project of “Xingdian Talent Support Program” in Yunnan Province (Grant No. YNWR-QNBJ-2020-019).

作者简介: 董家兴 (1986-), 男, 博士, 2014 年毕业于中国地质大学地质工程专业, 现任副教授, 主要从事工程地质和岩土力学等方面的教学与研究工作。E-mail: djx-djx001@163.com, ORCID:0000-0003-0125-8532

***通讯作者:** 刘文连 (1964-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 全国工程勘察设计大师, 主要从事岩土工程、工程勘察等方面的生产和科研工作。E-mail: lwel702@sina.com

引言

砂化白云岩是一种经历多期构造运动，在溶蚀与风化共同作用下形成的特殊岩体，其砂化等级受地下水条件、与构造断裂带的距离、岩体矿物成分等多种因素共同影响。砂化白云岩在全球范围内均有分布，国外包括美国、德国、意大利等地区（Vandelli *et al.*, 2019; Maghfouri *et al.*, 2020），国内主要分布在西南片区的吉新隧道、扯纳直隧洞及云南保山某边坡工程等项目（Zhou *et al.*, 2021; 董家兴等, 2023a; 董家兴等, 2024; Liu *et al.*, 2024）。

在地质构造复杂的砂化白云岩地层施工，塌方、突水、涌砂等地质灾害频发，据相关统计，滇中引水工程玉溪段的砂化白云岩地层中灾害频次平均 4.15 次/km（米健等, 2024），成昆复线的吉新隧道中也多次发生突水涌砂。类似的地质灾害严重制约着工程进度，威胁着施工人员的生命财产安全，究其原因主要是由于砂化白云岩结构破碎，空间变异性及离散性极强，前期勘察精度往往难以满足施工的要求，导致对其力学参数的取值不准确、不及时。已有研究中，学者们主要从赋存环境对其力学参数的影响展开研究，专门针对不同地层、不同砂化等级的力学性质试验及参数取值方面的系统研究较少。

岩石力学参数分布形态的确定是可靠性研究的基础，国内外针对某些特定岩石强度及变形特征的分布形态已有一些深入认识，（Qiu Jing Pan *et al.*, 2024）通过收集深圳市 52 个工程勘察报告的数据，建立了深圳市粘土性质数据库，基于数据库提出了 8 个粘土参数的多元概率分布模型，除此之外（Pan *et al.*, 2017; Lo *et al.*, 2017）也在岩土力学参数概率分布方面进行了深入研究。对于岩石物理力学参数的相关性，各学者基于不同的研究对象，在不同领域提出了针对不同岩石的公式，例如（Agustawijaya, 2007; Kohno *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2024）等的研究。岩性是岩石力学性质演化和裂缝发育的物质基础，岩体所处应力环境同样影响岩体力学性质（曹东升等, 2023; 梁劲等, 2023），而针对砂化白云岩力学参

数取值范围及相关性的研究较少。

综上，岩石力学试验及相关统计分析是岩体力学参数取值的主要理论依据，针对砂化白云岩这一特殊岩体，采用传统的取值和分析方法，在试验成本、取样制样难度、研究系统性等方面存在制约。本文以云南省内典型的三叠系及震旦系砂化白云岩为研究对象，通过系列室内、室外试验对力学参数进行测试，并对指标参数的概率分布特征及参数相关性进行研究。研究成果拟为砂化白云岩边坡、地下工程的设计提供参考。

1 研究概况

1.1 研究区概况

本文所分析的砂化白云岩主要取自保山市某边坡工程的三叠系及滇中引水玉溪段的震旦系（图 1）。研究区震旦系地层地质构造复杂，断裂纵横交错，属地质构造及地壳变形强烈地带；研究区三叠系地层 10 km 范围内无活动断裂和发震断裂通过（龚欣月等, 2025）。

按照董家兴等（2023b）的分级方法将研究区域的砂化白云岩分为微砂化、弱砂化、强烈砂化、剧烈砂化四个等级。对研究区域的砂化白云岩取样并进行能谱仪（EDS）测试，结果如图 2 所示，主量元素 O、Ca、Mg、C 的变化规律与龚欣月等（2025）的研究一致，随着砂化程度的增加，Mg 元素不断流失。从地层角度来看，震旦系地层砂化白云岩微量元素 Si、Al、Fe，的含量均高于三叠系地层。

1.2 研究内容及方法

1.2.1 研究内容

本研究以砂化白云岩力学参数取值范围、分布形态及参数间的相关性为核心目标。采用多种与砂化白云岩这一特殊岩体相适应的力学参数测试方法获取其力学参数。并利用模糊-随机统计、K-S 检验、数据拟合等数理统计方法、研究了砂化白云岩不同力学指标的取值范围、均值、变异系数、随机分布形态及参数间的相关性。

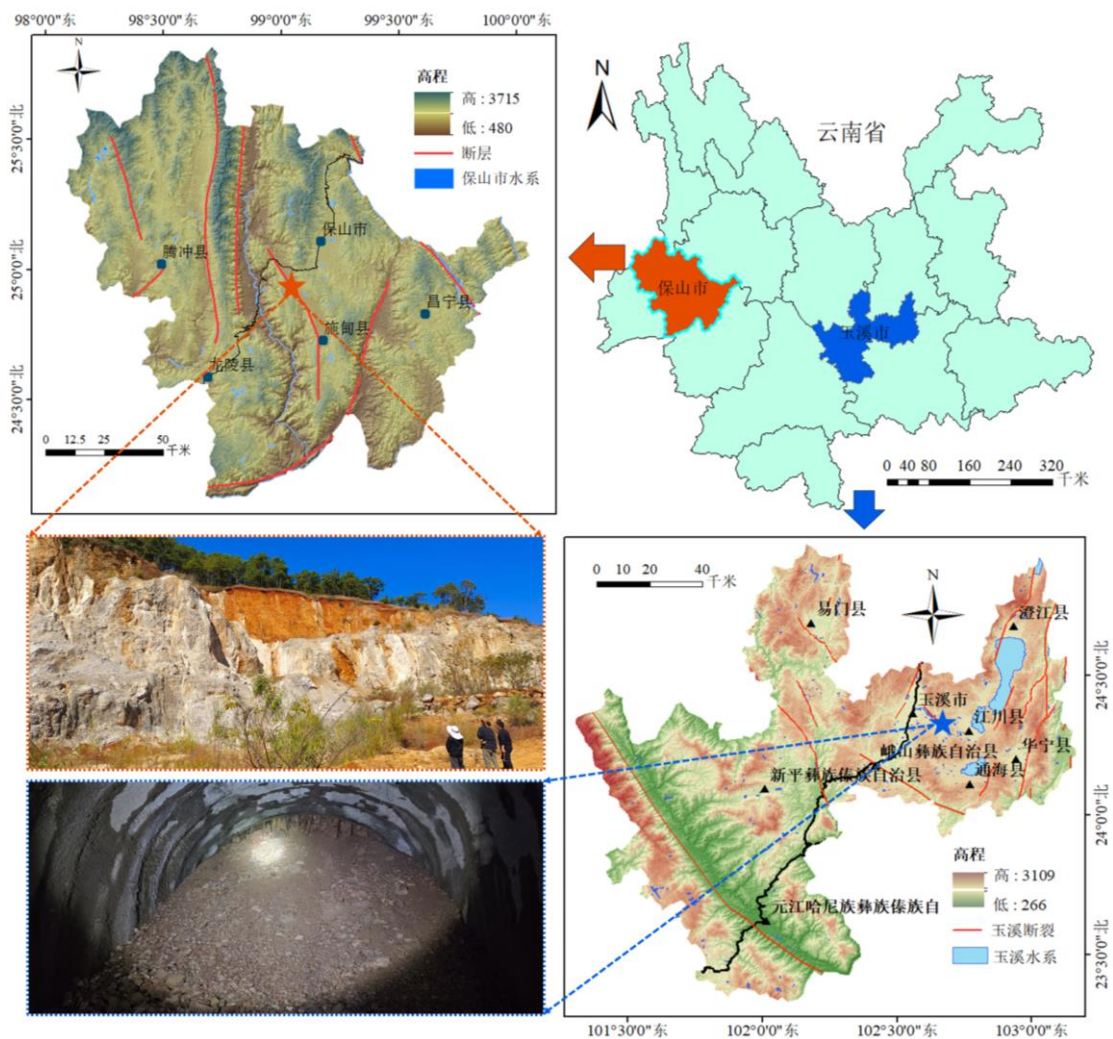


图 1 研究区域
Figure. 1 Study area

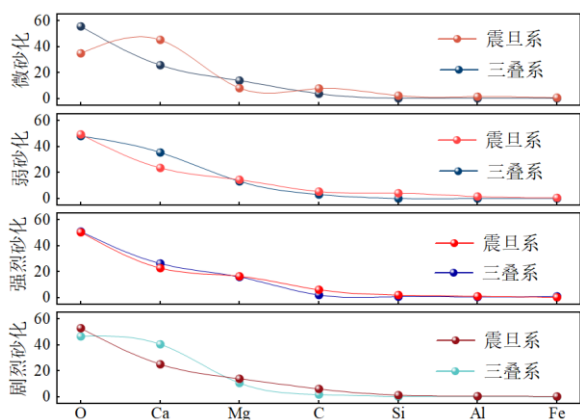


图 2 EDS 能谱统计结果
Fig. 2 Statistical results of EDS energy spectrum

1.2.2 试验方法

对于不同砂化等级白云岩的力学参数测试方法，本文参考董家兴等（2022）、吴荣琴等（2023）的研究结果，试验方法如表 1 所示。

表 1 试验方法简介

Table 1 Brief description of the test method

试验方法	指标	适用岩石	优缺点分析
点荷载	$I_{s(50)}$	微~强烈砂化	设备轻巧便携、试样制备简单。
针贯入	NPI	强烈~剧烈砂化	仪器携带方便、操作简单、测试成本低；仅适用于软岩。
单轴压缩	UCS, E	微~弱砂化	可获得岩石应力应变曲线，试样制备要求严格。
波速测试	V_p, V_s	微~剧烈砂化	现场试验，测量精度高，测试成本高。

1.2.3 数据统计方法

(1) 模糊-随机统计

岩体力学参数统计值是进行工程设计、施工的基础。然而，因岩石的试验数据离散性较大，常规的处理试验数据离散性大的思路主要有两种：①将个别偏离均值大的数据视为异常数据直接剔除，求均值及以均值为中心一定范围来代表试验数据的整体水平，这种方法未充分考虑“孤立”数据本身的

物理意义, 对于砂化白云岩这一特殊岩体明显是不适用的; ②认为每一个试验样本均为有效值, 取所有试验数据求均值, 采用以均值为中心的一定范围来代表整体水平, 该方法会因受少数试验数据的干扰而使均值与实际严重不符。

本文采用随机-模糊统计方法描述试验的样本值, 克服了传统的随机统计仅考虑试样的随机性而没有顾及试样的模糊性的缺点, 可揭示各参数围绕均值的相对波动程度及离散程度。随机-模糊统计方法具体计算公式如式 (1) ~ (3) (邵小曼, 2001)。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \exp[-2(x_i - \bar{x})^2 / (d_{1\max} - d_{1\min})] x_i}{\sum_{i=1}^n \exp[-2(x_i - \bar{x})^2 / (d_{1\max} - d_{1\min})]} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \exp\{-2[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2] / (d_{2\max} - d_{2\min})\} (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n \exp\{-2[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2] / (d_{2\max} - d_{2\min})\}} \quad (2)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

式中: n 为岩石力学参数测试的样本个数;

x_i 为岩石力学参数某测次的具体值;

$\bar{x}$ 为岩石力学参数样本的均值;

σ^2 为岩石力学参数样本的方差;

CV 为变异系数;

$d_{1\max}$ 、 $d_{1\min}$ 为求隶属函数时引入的值, 计算方法如式 (4) ~ (7)。

$$d_{1\max} = \max\{(x_i - \bar{x})^2; i=1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

$$d_{1\min} = \min\{(x_i - \bar{x})^2; i=1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

$$d_{2\max} = \max\{[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2]; i=1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

$$d_{2\min} = \min\{[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2]; i=1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

模糊-随机统计计算参数的过程中需要采用迭代的方法进行计算, 统计过程采用 MATLAB 编程进行计算, 迭代精度为 10^{-4} 。

(2) 概率分布估计

岩体力学参数的概率分布形态是岩体工程进行可靠度分析与设计的基础, 根据已有的研究, 岩体种类不同、研究区域不同、组成岩体的矿物成分含

量不同, 岩体力学参数的分布形态往往呈现出较大的差异。砂化白云岩的力学参数分布形态缺乏系统的研究成果, 本研究选取威布尔分布、对数正态分布、正态分布三种常规的分布函数形式对砂化白云岩的各力学参数指标进行假设检验, 这三种概率分布形式是岩体力学参数最为常见的概率分布形式, 囊括大量非显著不确定性因素和、积运算的概率分布形式, 三种分布的概率密度函数如表 2 所示。

表 2 常见概率分布形式

Table 2 Common probability distribution forms

概率分布形式	概率密度函数	参数说明
正态分布	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ 为均值, σ 为标准差
对数正态分布	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	
威布尔分布	$y = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}$	β 为形状参数, η 为比例参数

概率分布形态假设检验是一种典型的非参数检验, 非参数检验的方法主要有: Z 检验、K-S 检验、卡方检验、F 检验等。其中 K-S 检验具有敏感性好、稳健性强、对数据量要求低等优点, 适用于判断砂化白云岩的各力学参数统计指标的最优分布形态 (Manuel Francisco *et al.*, 2016)。K-S 检验的核心原理是比较样本的累积分布函数与理论分布之间的最大的差距 (D_n)。在给定的显著性水平下, 最大差距小于临界值 ($D_{n,\alpha}$) 则说明数据通过检验, 并且 D_n 值越小, 说明样本分布越接近理论分布, 将 D_n 值最小的分布作为样本的最优分布形式。

2 参数统计分析与假设检验

2.1 点荷载强度

2.1.1 试验结果

点荷载仪可测试微~强烈砂化白云岩的 $I_{s(50)}$, 试验样本按照现场可见岩块等比例选取, 三叠系露头处微砂化白云岩较少, 未测试其点荷载强度。对震旦系、三叠系的弱~强烈化砂白云岩进行了 97 组点荷载试验, 试验方法及步骤参照 (DZ/T 0276.35-2015 第 23 部分岩石点荷载强度试验)。分别对获得不同地层砂化白云岩 $I_{s(50)}$ 的样本数据。试验数据及统计结果如图 3、表 3 所示, 分析可知:

(1) 震旦系地层弱砂化白云岩 $I_{s(50)}$ 值为三叠系地层的 1.8 倍, 这是由于点荷载试验试样破坏以拉

伸破坏形式为主,对岩石表面的溶孔及胶结不均高度敏感。震旦系砂化白云岩相较于三叠系经历了更长期的压实和区域变质作用,岩石矿物颗粒紧密胶结,并且三叠系砂化白云岩受中生代构造活动的影响,岩体易发生脆性破裂。

(2) 两地层强烈砂化白云岩的 $I_{s(50)}$ 值相差不大,这是由于强烈砂化岩体内部结构已受到了严重的破坏,岩石中的矿物质颗粒之间的胶结作用大幅减弱,岩石的强度主要取决于颗粒本身的性质和摩擦作用,而与矿物的结晶程度的关系相对变小,因此两者的 $I_{s(50)}$ 值相差不大。

表 3 点荷载强度指标统计值

Table 3 Statistical values of point load strength indicators

地 层	砂化等级	组 数	$I_{s(50)}/\text{MPa}$			变异 系数
			范围	平均值	标准差	
震 旦 系	弱砂化	40	0.85~4.80	1.70	0.75	0.44
	强烈砂化	17	0.13~0.87	0.51	0.16	0.32
三 叠 系	弱砂化	17	0.67~1.39	0.94	0.17	0.19
	强烈砂化	23	0.11~0.69	0.49	0.14	0.29

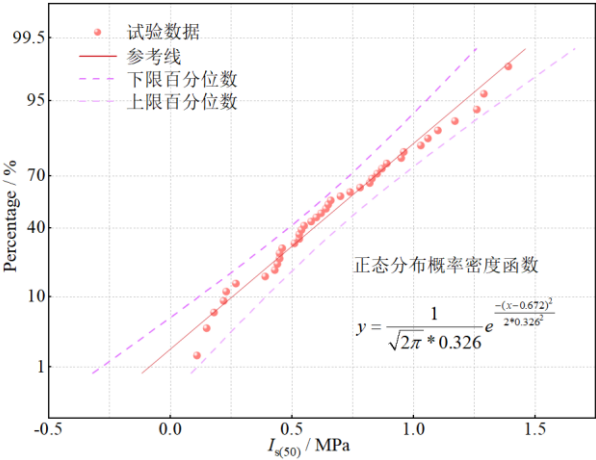


图 4 三叠系砂化白云岩 $I_{s(50)}$ 正态分布图

Fig. 4 Triassic disintegrated dolomite $I_{s(50)}$ normal distribution plot

2.2 针贯入比

2.2.1 试验结果

使用日本生产的 SH-70 型针贯入仪测试强烈、剧烈砂化白云岩的 NPI 值, NPI 值主要反映了岩土体的软硬程度及颗粒间胶结程度。共开展针贯入测试 354 组, NPI 数据统计结果如图 6、表 4 所示。

(1) 震旦系强烈、剧烈砂化白云岩的 NPI 均值分别为三叠系的 1.53 倍、1.58 倍。这主要是由于进行测试的震旦系砂化白云岩埋深大于三叠系, 岩体

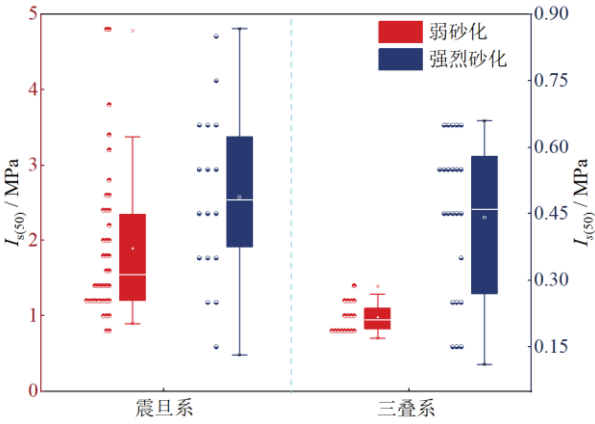


图 3 砂化白云岩点荷载强度指标统计

Fig. 3 Statistics of point load strength index of disintegrated dolomite

2.1.2 分布形态

采用 K-S 检验法判断点荷载强度指标对于三种常见分布形态的拟合优良程度, 拟合在置信水平为 95% 的条件下, 三叠系砂化白云岩 $I_{s(50)}$ 最优分布形式为正态分布, 概率分布如图 4 所示。震旦系砂化白云岩 $I_{s(50)}$ 最优分布形式为威布尔分布, 概率分布如图 5 所示。由此可见, 即便是同一岩石, 在不同地层中, 其点荷载强度分布形态也可能不同。

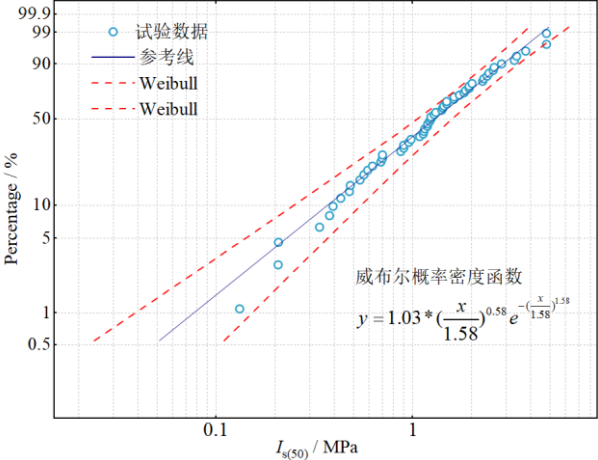


图 5 震旦系砂化白云岩 $I_{s(50)}$ Weibull 分布图

Fig. 5 Distribution of the Aurignacian disintegrated dolomite $I_{s(50)}$

结构更加致密; 同时, 据图 2 可知, 震旦系地层强烈、剧烈砂化白云岩微量元素 Si、Al、Fe 的含量均高于三叠系地层, 可见震旦系砂化白云岩矿物颗粒间的硅质、铁质胶结物及石英含量更多, 因此抗贯入能力更强。

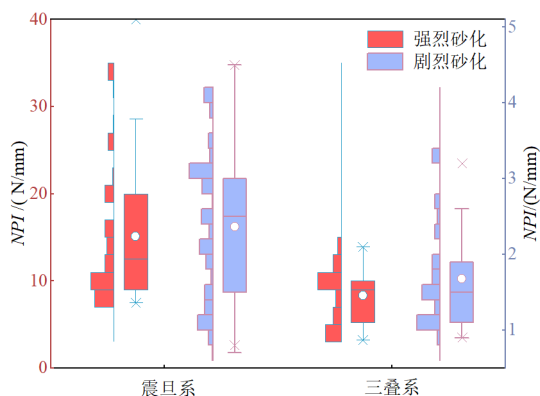


图6 砂化白云岩针贯入比统计

Fig. 6 Needle penetration ratio statistics for disintegrated dolomite

(2) 相同地层中, 强烈砂化白云岩 NPI 的变异系数均大于 $I_{s(50)}$, 这主要是由于强烈砂化白云岩中存在“砂包石, 石夹砂”的现象, 且节理、裂隙空间变异性强, 而针贯入比测试对这些因素较为敏感 (Aydan, 2016), 导致试验结果离散性较大。

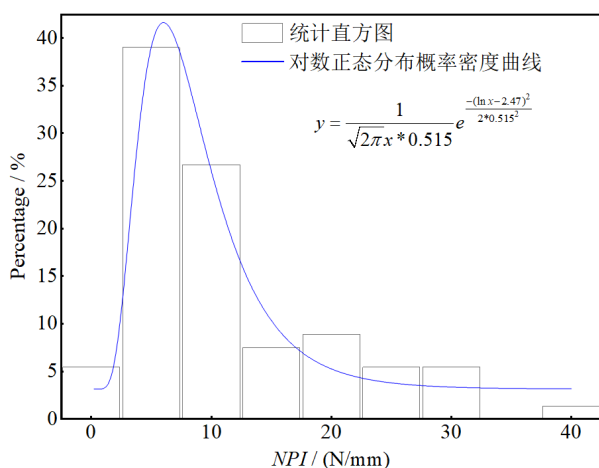


图7 强烈砂化 NPI 分布形态

Fig. 7 NPI Distribution pattern of strongly disintegrated

2.3 单轴抗压强度

2.3.1 试验结果

单轴抗压强度是岩体工程分类、破坏机理分析及工程设计的重要参数。依据 SL/T 264 - 2020《水利水电工程岩石试验规范》, 对微砂化、弱砂化白云岩开展了一系列单轴压缩试验。分别获取了烘干、饱和两种不同状态下共计 103 组试验数据, 部分试验结果如表 5 所示, 由表可知, 不同地层的砂化白云岩 UCS 差异较大; 即便是同一地层, 不同区域的 UCS 也存在较大差异。

表5 部分样品单轴抗压强度

表4 砂化白云岩 NPI 统计值

Table 4 Statistical values of NPI for disintegrated dolomite

地 层	砂化等 级	组 数	NPI/(N/mm)			变异 系数
			范围	平均值	标准差	
震 旦 系	强烈	113	7.51~40.0	13.53	6.84	0.51
	剧烈	175	0.70~5.00	2.34	0.94	0.40
三 叠 系	强烈	33	3.22~13.90	8.85	2.76	0.31
	剧烈	33	0.91~3.22	1.48	0.53	0.36

2.2.2 分布形态

采用 K-S 检验法确定剧烈砂化与强烈砂化白云岩 NPI 最优分布形态, 检验结果如图 7~图 8 所示。剧烈砂化白云岩的 NPI 值最优分布形式为正态分布。强烈砂化白云岩 NPI 值最优分布形态为对数正态分布 (图 7)。两者的最优分布形态存在差异, 这主要是由于其具有不同的岩体结构, 剧烈砂化白云岩为散体结构, 对比强烈砂化白云岩其均质性较强, 分布形态为正态分布 (图 8)。

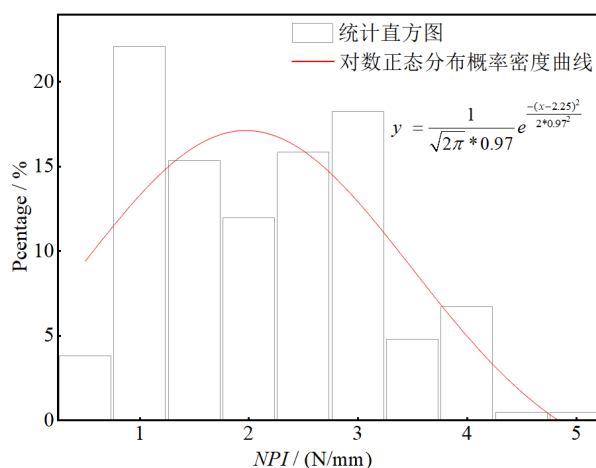


图8 剧烈砂化 NPI 分布形态

Fig. 8 NPI Distribution pattern of intensely disintegrated

Table 5 Partial samples' uniaxial compressive strength.

地 层	取 样 位 置	砂 化 等 级	UCS/Mpa	
			烘干	饱和
震 旦 系	扯纳直隧洞	微	82.4	61.2
	大塘子隧洞	弱	60.0	38.6
	小扑隧洞	弱	47.1	19.7
	老尖山隧洞	微	136.0	82.6
三 叠 系	保山某边坡	弱	\	49.2
			\	19.1

对砂化白云岩的 UCS 值进行统计分析, 结果如表 6 所示, 由表可知:

(1)三叠系与震旦系弱砂化白云岩的饱和 UCS 均值基本一致，这与 $I_{s(50)}$ 规律存在差异，是由于两种试验的加载方式、岩体破坏模式及岩体结构不同所导致。点荷载试验通过点接触施加集中载荷，易引发局部拉应力集中，对溶蚀裂隙、孔隙等缺陷极为敏感，而单轴压缩试验施加均匀轴向压力，试件整体受力，溶孔等局部缺陷的影响被均质化。三叠系砂化白云岩的溶孔较震旦系更为发育(龚欣月等，2025)，因此其单轴抗压强度基本一致，而点荷载强度差异较大。

(2)总体来看，震旦系弱砂化白云岩的 UCS 均值为 29.01 MPa (饱和)，软化系数 0.58，完整性系数 0.44，是一种较破碎的较软岩；微砂化的 UCS 均值为 63.59 MPa (饱和)，软化系数 0.72，完整性系数 0.77，是一种完整的坚硬岩。

表 6 砂化白云岩单轴抗压强度统计值
Table 6 Statistical value of uniaxial compressive strength of disintegrated dolomite

地 层	等 级	状 态	组 数	UCS/MPa			变异 系数
				范围	平均值	标准差	
震 旦 系	微 砂 化	烘 干	13	69.7~154.0	92.60	20.30	0.22
		饱 和	15	23.8~108.0	63.59	14.26	0.22
	弱 砂 化	烘 干	31	34.5~85.5	52.73	10.47	0.20
		饱 和	31	17.0~61.7	29.01	8.33	0.29
三 叠 系	弱 砂 化	饱 和	13	15.6~49.2	29.02	9.44	0.33

2.3.2 分布形态

弱砂化、微砂化白云岩的单轴抗压强度的 K-S 检验结果见表 7 所示，统计直方图如图 9 所示。

表 7 砂化白云岩 UCS 分布形态假设检验
Table 7 Hypothesis testing of UCS distribution patterns in disintegrated dolomites

岩 石	状 态	分 布 形式	D_n	$D_{n,\alpha}$	概率密度函数
微 砂 化	干 燥	对数 正态	0.10	0.38	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.515} e^{\frac{-(\ln x - 4.561)^2}{2 \times 0.247^2}}$
	饱 和	正态	0.15	0.35	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 19.514} e^{\frac{-(x - 64.82)^2}{2 \times 19.514^2}}$
弱 砂 化	干 燥	对数 正态	0.08	0.24	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.227} e^{\frac{-(\ln x - 3.973)^2}{2 \times 0.227^2}}$
	饱 和	对数 正态	0.10	0.24	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.307} e^{\frac{-(\ln x - 3.398)^2}{2 \times 0.307^2}}$

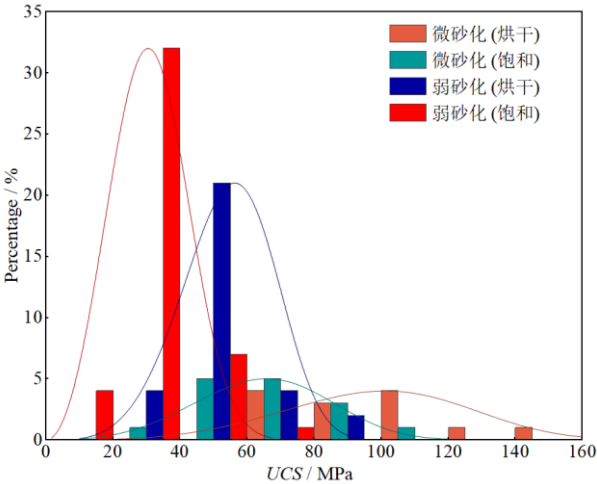


图 9 微砂化、弱砂化白云岩 UCS 分布形态
Fig. 9 Distribution pattern of UCS in slightly and weakly disintegrated dolomite

检验结果表明：微砂化白云岩干燥状态下的单轴抗压强度的最优分布形式为对数正态分布；饱和状态下同时满足对数正态分布与正态分布，其最优分布形式为正态分布。弱砂化白云岩干燥、饱和状态下的单轴抗压强度最优分布形式均为对数正态分布。如果要用单一分布形式描述砂化白云岩单轴抗压强度分布特征建议采用对数正态分布。

2.4 声波测试

声波测试作为一种常规的无损型岩体力学参数原位测试方法具有众多优点，根据波的类型可分为横波波速与纵波波速，按测试对象的不同可以分为岩体声波测试与岩块声波测试。

2.4.1 岩体横波波速试验

岩体横波速度 (V_s) 是指地层中一定空间范围岩体的横波传播速度。针对三叠系地层浅埋的砂化白云岩，开展了三个钻孔的钻孔横波波速测试，采用模糊-随机方法所统计的测试结果如表 8 所示，研究区域内不同砂化程度的白云岩横波波速差异明显，随着砂化程度增加，横波波速显著减小，剧烈砂化白云岩的横波速度仅为 290 m/s，略微大于当地红黏土的横波速度。

表 8 砂化白云岩横波波速
Table 8 Shear wave velocity of disintegrated dolomite

砂化等级	组 数	横波波速 V_s / (m/s)			变异 系数
		范围	均值	标准差	
弱砂化	7	865~1342	1033	138	0.13
强烈砂化	9	516~660	549	45	0.08
剧烈砂化	1	/	290	/	/

2.4.2 岩体纵波波速测试

针对深埋的震旦系砂化白云岩,开展了 203 组钻孔纵波波速 (V_m) 测试,采用模糊-随机方法统计的岩体纵波波速如表 9 所示。

表 9 砂化白云岩纵波波速

砂化等级	组数	纵波波速 V_m / (m/s)			变异系数
		范围	均值	标准差	
微砂化	12	4202~5602	4718	304	0.06
弱砂化	57	1420~4150	2647	628.1	0.23
强烈砂化	65	761~2890	1240	428.5	0.35
剧烈砂化	69	372~1099	739	162.5	0.22

由统计结果分析可得:

(1) 随着砂化程度增加,纵波波速减小,不同砂化程度的纵波波速均值差异较大,弱砂化的仅为微砂化的一半,强烈砂化的仅为微砂化的四分之一,而剧烈砂化的仅为微砂化的八分之一,这与其强度随砂化程度的变化规律一致。

(2) 微砂化白云岩纵波波速的变异系数为 0.12,离散程度较小,对应其岩体结构均匀;弱砂化~剧烈白云岩的离散程度较大,其中强烈砂化白云岩的变异系数最大达到 0.35,对应表现为强烈砂化白云岩的结构面发育最为复杂。

(3) 综上,岩体纵波波速通过均值、范围及离散特征,能够系统反映砂化白云岩的结构完整性和岩体质量差异,是评价砂化等级及岩体工程性质的关键参数。

表 10 砂化白云岩纵波波速分布形态

砂化等级	分布形式	D_n	$D_{n,\alpha}$	概率密度函数
微砂化	正态分布	0.13	0.39	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 722} e^{\frac{-(x-5426)^2}{2*722^2}}$
弱砂化	正态分布	0.06	0.18	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 717} e^{\frac{-(x-2719)^2}{2*717^2}}$
强烈砂化	对数分布	0.15	0.17	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * x0.33} e^{\frac{-(\ln x - 7.15)^2}{2*0.33^2}}$
剧烈砂化	正态分布	0.09	0.16	$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 195} e^{\frac{-(x-692)^2}{2*195^2}}$

进一步采用 K-S 检验确定其最优概率分布形式。检验结果如表 10 所示。根据检验结果可知,微砂化、弱砂化、剧烈砂化白云岩纵波波速的最优分

布形式为正态分布;强烈砂化白云岩同时符合正态分布与对数正态分布,最优分布形式为对数正态分布。综上,可选用正态分布来描述不同砂化等级白云岩的纵波波速分布形态。

2.4.3 岩块纵波波速试验

岩石纵波速度 (V_r) 是指完整岩石试件的纵波速度。强烈、剧烈砂化白云岩受扰动后岩芯常呈散体状,因此仅测试了微~弱砂化白云岩的岩块纵波波速,所测试的岩芯均处于干燥状态,统计结果如表 11 所示。

表 11 微~弱砂化白云岩(岩块)纵波波速统计表

砂化等级	组数	纵波波速 V_r / (m/s)			变异系数
		范围	均值	标准差	
微砂化	12	4170~6450	5365	637	0.19
弱砂化	100	2390~6190	4577	864	0.19

由表 11 可知,弱砂化白云岩块纵波波速的变异系数为 0.19,小于同等级的砂化岩体,这是由于岩体所处的应力环境、含水情况更为复杂所导致。通过 K-S 检验可知,弱砂化岩块纵波波速最优分布形态为正态分布,如图 10 所示。

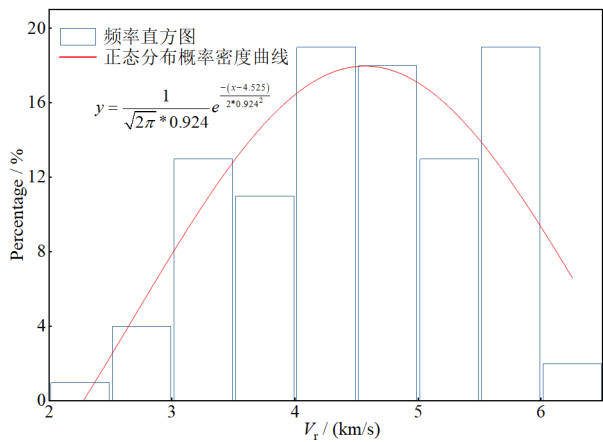


图 10 弱砂化白云岩(岩块)纵波波速分布图

Fig. 10 Longitudinal wave velocity distribution of weakly disintegrated dolomite (clasts)

3 砂化白云岩参数相关性分析

岩石的各物理力学参数之间具有显著的相关性,通过建立参数间的相互关系,采用简便的测试手段获取岩石的力学参数可为工程设计、施工带来极大的便利。众多研究表明,不同岩性的力学参数间的相互关系是不同的,而针对砂化白云岩力学参数间相关性研究较少,本研究基于上述试验成果,分析砂化白云岩各力学指标间的函数关系。

3.1 岩块与岩体纵波波速关系

岩体完整性系数是描述自然界岩体与岩石关系的指标，大量的工程岩体质量评价方法中均包含这一重要指标，岩体完整性系数 K_v 一般按照式（8）进行计算。通过计算，震旦系微砂化白云岩的完整性系数为 0.77，而弱砂化白云岩仅为 0.44，下降幅度较大，可见在微砂化~弱砂化的过程中，砂化白云岩中裂隙、节理显著增多。

$$K_v = \left(\frac{V_m}{V_r}\right)^2 \tag{8}$$

通过分析，砂化白云岩的 V_m 、 V_r 值具有显著的函数关系，如图 11 所示。通过数据处理及拟合，两者的关系如式（9）所示，此时校正决定系数为 0.99，原始数据绝大部分落在 95% 预测带内，说明拟合效果较好，该拟合公式是可信的。

$$V_r = 1.84 * V_m - 0.12 * V_m^2 \tag{9}$$

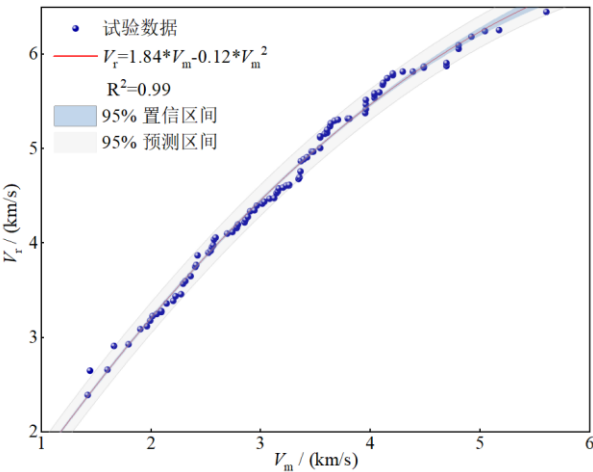


图 11 V_r - V_m 关系拟合曲线
Fig. 11 Fitted curve of V_r - V_m relationship

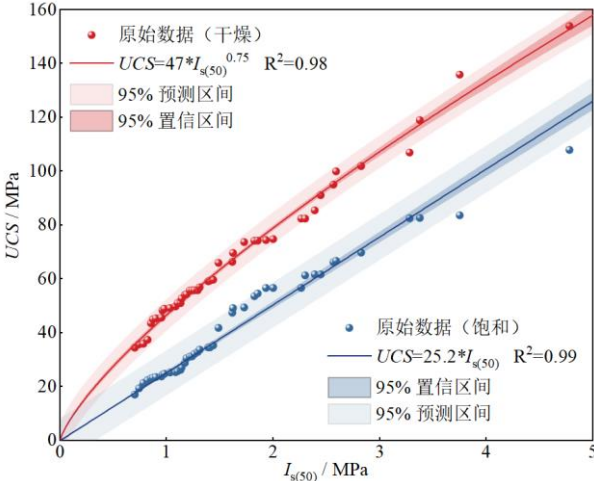


图 12 UCS - $I_{s(50)}$ 关系拟合曲线
Fig. 12 Fitted curve of UCS - $I_{s(50)}$ relationship

3.2 点荷载强度与单轴抗压强度关系

由于砂化作用，弱砂化白云岩制样过程中受扰动后节理、裂隙将进一步发育，导致试验结果误差较大，因此在工程现场常采用点荷载试验来间接估算砂化白云岩的单轴抗压强度。

现行规范及研究中，主要用幂函数形式、线性函数形式来描述点荷载强度与单轴抗压强度的关系，如表 12 所示。由于研究对象的不同，导致这些公式都有其特定的适用对象及条件。因此，本研究以震旦系、三叠系中微砂化与弱砂化白云岩的单轴压缩及点荷载试验的数据（单轴压缩试验共 88 组，烘干、饱和各 44 组）为基础，采用幂函数及零截距线性函数分别拟合砂化白云岩点荷载强度与饱和、烘干状态下的单轴抗压强度间的关系。干燥状态下最优拟合关系为幂函数，饱和状态下最优拟合关系为零截距线性函数，拟合曲线如图 12 所示。

表 12 砂化白云岩 UCS - $I_{s(50)}$ 经验公式
Table 12 Empirical equations for UCS - $I_{s(50)}$ for disintegrated dolomite

公式出处	Equation expressing a relation
GB/T 50218-2014 (2014)	$UCS = 22.82 I_{s(50)}^{0.75}$
Agustawijaya (2007)	$UCS = 13.4 I_{s(50)}$
Kohno and Maeda. (2012)	$UCS = 16.4 I_{s(50)}$

拟合所得到的计算式如式（10）、（11）所示。其中式（10）为干燥状态下的拟合公式，与经验公式均存在显著的差异，采用其余经验公式计算干燥状态下的砂化白云岩 UCS 值误差较大，建议采用式（10）。式（12）为饱和状态下的拟合公式，该式与公路工程岩石试验规程中经验公式系数为上限值时十分接近，说明微~弱砂化岩体结构较为完整，采用点荷载试验确定其力学参数是可行的。

$$UCS = 47 * I_{s(50)} \tag{10}$$

$$UCS = 25.2 * I_{s(50)} \tag{11}$$

3.3 针贯入比与岩体波速关系

董家兴等 (2022) 探究了砂化白云岩单轴抗压强度与针贯入比的联系, 验证了针贯入仪在砂化白云岩中的适用性。采用三叠系与震旦系强烈、剧列砂化白云岩的针贯入测试及纵波波速测试结果来建立针贯入比与岩体的波速关系, 拟合结果如图 13 所示。

Aydan (2012) 建立了软岩纵波速与针贯入比的经验公式 (12), 并给出了其上下限。如图 13 所示, 强烈、剧列砂化白云岩的试验数据绝大多数位于 Aydan 所给范围内, 验证了试验数据的有效性。式 (12) 当 NPI 值小于 5 时在砂化白云岩中有较好的适用性, 而当 NPI 值大于 5 时, 经验公式明显偏离

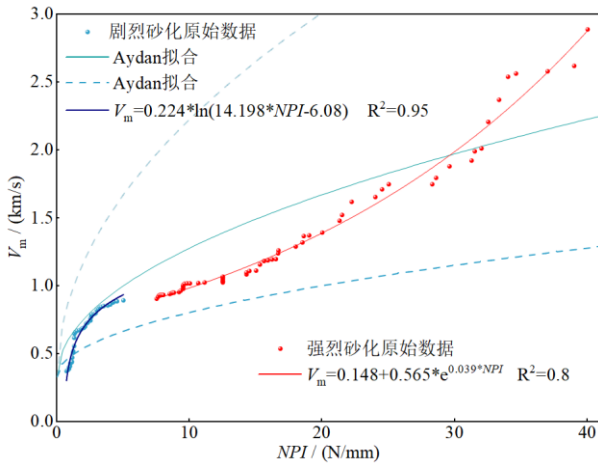


图 13 V_m -NPI 关系拟合曲线

Fig. 13 Fitted curve of V_m -NPI relationship

3.4 岩石波速与单轴抗压强度关系

已有研究表明, 岩石的声波波速与其力学性质存在着较好的相关性 (Regnt, et al., 2015)。采用上述波速测试及单轴压缩试验的数据, 分别对烘干及饱和状态下砂化白云岩的单轴抗压强度与岩石波速间的关系进行拟合。如图 14 所示, 岩石纵波波速与岩石单轴抗压强度之间存在显著的指数函数关系, 通过最小二乘法拟合得到的函数关系如式 (14)、(15) 所示。式 (14) 为岩石烘干状态下 UCS- V_r 的关系, 式 (15) 为岩石饱和状态下 UCS- V_r 的关系, 两者的校正决定系数分别为 0.98、0.97, 说明所拟合的计算公式能够较好的描述两参数间的关系。

$$UCS = 38.03 + 0.154 * e^{1.02 * V_r} \quad (14)$$

$$UCS = 15.40 + 0.29 * e^{0.89 * V_r} \quad (15)$$

联立式 (9) 与式 (14)、(15) 得到砂化白云岩

试验数据。分析实验数据可知, NPI 小于 5 时对应剧烈砂化白云岩, 而 NPI 大于 5 时对应强烈砂化白云岩, 针对不同砂化程度的白云岩, 分别建立 V_m -NPI 拟合公式, 结果如式 (13) 所示。工程现场进行针贯入测试后, 按照式 (13) 即可计算出岩体波速, 实现岩体质量快速评估, 为工程稳定性分析提供理论支撑。

$$V_m = 0.33 + 0.3 * NPI^{0.5} \quad (12)$$

$$V_m = \begin{cases} 0.224 * \ln(14.198 * NPI - 6.08) \dots (NPI \leq 5) \\ 0.148 + 0.565 * e^{0.039 * NPI} \dots \dots \dots (NPI > 5) \end{cases} \quad (13)$$

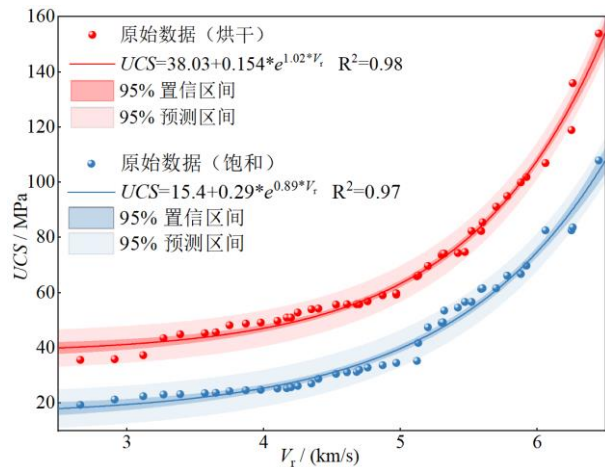


图 14 UCS- V_r 关系拟合曲线

Fig. 14 Fitted curve of UCS- V_r relationship

的岩体波速与单轴抗压强度的关系式 (16)、(17)。需要说明的是该式由式 (9) 推导而来, V_r 为岩块纵波速度, 因此, 式 (16)、(17) 仅适用于微砂化与弱砂化白云岩。

$$UCS = 38.03 + 0.154 * e^{1.02 * (1.05 V_m + 1.2)} \quad (16)$$

$$UCS = 15.40 + 0.29 * e^{0.89 * (1.05 V_m + 1.2)} \quad (17)$$

将现场原位测试得到的砂化白云岩岩体纵波波速代入式 (16)、(17) 所得结果如表 13 所示。对比由岩体波速所预测的 UCS 值与试验直接获取的 UCS 值, 可以发现:

(1) 基于推导公式预测的 UCS 在不同砂化等级下呈现差异化误差特征: 对于微砂化岩体, 预测值的均值及最小值大于实测值, 误差在 24% 以内, 对最大值的预测较为准确, 误差 3% 以内; 对于弱砂化岩体, 整体误差均在 15% 以内, 均值误差 2% 以

内,可见该式对于弱砂化岩体 UCS 值的预测较为准确。

(2) 通过岩体波速预测的 UCS 值大多数大于试验测试值。这主要是由于取样过程中岩石样品受到扰动,导致实验室所测试的 UCS 值往往是小于原位真实值的,而岩体波速测试作为一种原位测试,未扰动岩体且不改变赋存环境,故预测值在一定程度上较室内实验值较大是合理的。

表 13 岩体波速计算 UCS 值
Table 13 Calculated UCS values for rock wave velocity

岩石	预测的岩石单轴抗压		误差%			
	强度 UCS/MPa		(预测-测试)/测试			
	范围	均值	最小值	最大值	均值	
微砂化	烘干	85.2~159.8	112.8	22%	3%	22%
	饱和	58.24~113.3	79.1	15%	1%	24%
弱砂化	烘干	39.8~83.2	51.6	15%	-2%	-2%
	饱和	17.8~56.6	29.3	4%	8%	0.3%

4 结论

(1) 测试结果表明:震旦系地层弱砂化白云岩的 $I_{s(50)}$ 均值为三叠系的 1.8 倍,而强烈砂化白云岩两者 $I_{s(50)}$ 相差不大;震旦系地层强烈、剧烈砂化白云岩的 NPI 值分别为三叠系的 1.53 与 1.58 倍;震旦系地层 UCS (饱和) 为 29.01 Mpa,三叠系地层为 29.02 Mpa。不同测试方法所获取的测试结果存在差异,这主要是由于测试原理的不同,以及不同地层砂化白云岩的成因、矿物成分含量不同所导致,砂化白云岩的参数的取值需结合多种测试方法综合判定。

(2) 得到了砂化白云岩关键指标的最优概率分布形态:三叠系与震旦系 $I_{s(50)}$ 分别服从正态分布与威布尔分布;剧烈砂化与强烈砂化 NPI 值最优分布为正态分布与对数正态分布;UCS 与 V_m 建议分别采用对数正态分布与正态分布。上述模型为参数不确定性量化及可靠性设计奠定了理论基础。

(3) 揭示了参数间非线性关联规律。微~弱砂化岩体:建立 UCS 与 V_m 、 $I_{s(50)}$ 的关系式,可基于波速试验或点荷载试验快速估算 UCS 值,大大简化了岩体强度测试流程,降低了测试成本。强烈~剧烈

砂化岩体:提出 V_m -NPI 拟合模型,通过针贯入试验可快速获取岩体纵波波速,判定岩体类(级)别,为支护参数动态调整提供直接依据。提出的分布模型及经验公式显著提升砂化白云岩地质灾害防控效率。

References

Aydan., 2012. The Inference of Physico-mechanical Properties of Soft Rocks and The Evaluation of The Effect of Water Content and Weathering on Their Mechanical Properties From Needle Penetration Tests. *US Rock Mechanics Symposium*, 46th.

Agustawijaya, D.S., 2007. The Uniaxial Compressive Strength of Soft Rock. *Civil Eng Dimension*, 9(1): 9–14.

Cao, D.S., Zeng, L.B., Huang, C., et al., 2023. Control of Multi-Scale Mechanical Stratigraphy on Development of Faults and Fractures. *Earth Science*, 48(07): 2535-2556 (in Chinese with English abstrct).

Dong, J.X., Zhou, Z.Q., Wang,Z.R., et al., 2022. Application of Fuzzy AHP Method to Classification of DolomiteSandification Level.*Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 39(12): 21-25 (in Chinese with English abstract).

Dong, J.X., Shen,Z.L., Cao,L., et al., 2023(a). Water-Sand Inrush Risk Assessment Method of Sandy Dolomite Tunnel and Its Application in The Chenaju tunnel Southwest of China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1): 2196369.doi: 10.1080/19475705.2023.2196369

Dong, J.X., Zhang, S.W., Cheng, J., et al., 2023(b). Application of Fuzzy Hierarchical Analysis in The Classification of Dolomite Sanding. *Journal of Changjiang Academy of Sciences*, 40(02): 109-114+123 (in Chinese with English abstract).

Dong, J.X., Gong, X.Y., Mi, J., 2024. Structure and Application of SHF Classification Method for Surrounding Rock of Sandy Dolomite Tunnel. *Earth Science*, 49(08): 2813-2825 (in Chinese with English abstract).

Dias, D., Pan, Q.J., 2017. Probabilistic Evaluation of Tunnel Face Stability in Spatially Random Soils Using Sparse Polynomial Chaos Expansion with Global Sensitivity Analysis. *Acta Geotechnica*, 2(6): 1415-1429. doi: 10.1007/s11440-017-0541-5

Gong, X.Y., Dong, J.X., Liu, W.L., et al., 2025.Study on The Spatial Distribution Characteristics and Macro Formation Mechanism of T_2h Sandy Dolomite in Western Yunnan. *Journal of Engineering Geology*, 1-12[2025-05-16] (in Chinese with English abstract).

Kohnno, M., Maeda, H., 2012. Relationship Between Point Load Strength Index and Uniaxial Compressive Strength of Hydrothermally Altered Soft Rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining*

- Sciences*, 50: 147-157. doi: 10.1016/j.jrmms.2012.01.011
- Liu, W.L., Gong, X.Y., Dong, J.X., et al., 2024. Classification and Rating of Disintegrated Dolomite Strata for Slope Stability Analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(7): 2552-2562. doi: 10.1016/j.jrmge.2023.09.041
- Lo, M.K., Leung, Y.F., 2017. Probabilistic Analyses of Slopes and Footings with Spatially Variable Soils Considering Cross-Correlation and Conditioned Random Field. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 143(9).
- Liang, J., Wang, Q., Hu, X.L., et al., 2023. Experimental Study on Mechanics and Permeability Characteristics of Jurassic Red Sandstone Under Hydro-mechanical Coupling. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(01): 52-61 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.Y., Xu, D.P., Li, S.J., et al., 2024. Estimating the Mechanical Properties of Rocks and Rock Masses Based on Mineral Micromechanics Testing. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 57(7): 1-12. doi: 10.1007/s00603-024-03796-8
- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M.R., Lentz, D.R., 2020. Geological and Geochemical Constraints on The Farahabad Vent-proximal Sub-seafloor Replacement SEDEX-type Deposit, Southern Yazd Basin, Iran. *J Geochem Explor.* doi: 10.1016/j.gexplo.2019.106436
- Manuel, Francisco, P., Lu é, A., Cristina, G., 2016. Provenance of Holocene Beach Sand in The Western Iberian Margin: The Use of The Kolmogorov-Smirnov Test for The Deciphering of Sediment Recycling in A Modern Coastal System. *Sedimentology*, 63(5): 1149-1167. doi: 10.1111/sed.12254
- Mi, J., Tang, J., Dai, C.R., et al., 2024. Study on Risk Classification of Geological Hazards in Sandy Dolomite Tunnel. *Yangtze River*, 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development, 2014. People's Republic of China. GB/T 50218-2014 *Engineering rock grading standard*.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2020. Rock Test Specification for Water Conservancy and Hydropower Engineering:: SL/T 264-2020 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Q.J., Wu, H.T., Su, D., 2024. Multivariate Probability Distributions for Index and Mechanical Clay Parameters in Shenzhen. *Computers and Geotechnics*, 165: 105934. doi: 10.1016/j.compgeo.2023.105934
- Regnet, J.B., Robion, P., David, C., et al., 2015. Acoustic and Reservoir Properties of Microporous Carbonate Rocks: Implication of Micrite Particle Size and Morphology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(2): 790-811. doi: 10.1002/2014JB011313
- Shao, X.M., 2001. Stochastic-fuzzy Analysis of Rock Compressive Strength. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, S1: 1776-1779 (in Chinese with English abstract).
- Vandelli, V., Ghinai, A., Marchetti, M., 2019. Discovery and Dating of Pre-LGM Deposits in A High Catchment of The Dolomites (Italy): New Insights on Climate-related Geomorphological Processes During the Late Pleistocene. *Geomorphology*, 332, 22-32. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.02.004
- Wen, L., Luo, Z.Q., Yang, S.J., 2019. Correlation of Geo-Mechanics Parameters with Uniaxial Compressive Strength and P-Wave Velocity on Sandy dolomite Using a Statistical Method. *geotechnical and geological engineering*, 37(2): 1079-1094. doi: 10.1007/s10706-018-0665-x
- Wu, R.Q., Dong, J.X., Zhang, S.W., et al., 2023. A Method for Determining The Uniaxial Compressive Strength of Different Grades of Disintegrated Dolomite Based on In-situ Testing: 202211586535[P]. (in Chinese with English abstract).
- Zhou, P., Jiang, Y.F., Zhou, F.W., 2022. Disaster Mechanism of Tunnel Face with Large Section in Sandy Dolomite Stratum. *Eng Fail Anal*, 131. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105905

附中文参考文献

- 曹东升, 曾联波, 黄诚, 等 2023. 多尺度岩石力学层对断层和裂缝发育的控制作用[J]. 地球科学, 48(07): 2535-2556.
- 董家兴, 周志强, 王志荣, 等, 2022. Hoek-Brown 强度准则在强烈砂化白云岩力学参数估算中的应用[J]. 长江科学院院报, 39(12): 21-25.
- 董家兴, 张晟玮, 程娟, 等, 2023(b). 模糊层次分析法在白云岩砂化等级划分中的应用. 长江科学院院报, 40(2): 109-114, 123.
- 董家兴, 龚欣月, 米健, 等 2024. 砂化白云岩隧洞围岩分类方法 SHF 构建及应用[J]. 地球科学, 49(08): 2813-2825.
- 龚欣月, 董家兴, 刘文连, 等, 2025. 滇西 T2h 砂化白云岩空间分布特征及宏观形成机理研究[J/OL]. 工程地质学报, 1-12[2025-05-16].
- 梁劲, 王强, 胡新丽, 等, 2023. 渗流-应力耦合下侏罗系红砂岩力学及渗透特性试验研究[J]. 地质科技通报, 42(01): 52-61.
- 米健, 唐俊, 代崇锐, 等, 2025. 砂化白云岩隧洞地质灾害风险分级研究. 人民长江, 2025, 56(03): 134-139+145.
- 邵小曼, 2001. 岩石抗压强度的随机-模糊分析. 岩石力学与工程学报, 2001, (S1): 1776-1779.
- 吴荣琴, 董家兴, 张晟玮, 等, 2023. 一种基于原位测试获取不同等级的砂化白云岩单轴抗压强度方法: 202211586535[P].
- 中华人民共和国水利部, 2020. 水利水电工程岩石试验规程:: SL/T 264-2020.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218-2014[S]. 中国计划出版社, 2014.