

# 大粒径水稳砾石CSG-50劈裂强度增长规律

李彦红<sup>1</sup>, 彭华瑞<sup>1</sup>, 何树鹏<sup>2</sup>, 彭嫣然<sup>2</sup>, 费瀚翔<sup>3</sup>, 王华涛<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>伊犁交通投资集团有限公司, 新疆 伊宁

<sup>2</sup>山东省路桥集团有限公司, 山东 济南

<sup>3</sup>长安大学公路学院, 陕西 西安

<sup>4</sup>新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐

<sup>5</sup>新疆高寒高海拔山区交通基础设施安全与健康重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年8月31日; 录用日期: 2025年10月28日; 发布日期: 2025年11月5日

## 摘 要

随着公路建设的快速发展, 对路面基层材料的性能要求日益提高。大粒径水稳砾石(CSG-50)因其优异的力学性能和耐久性而受到广泛关注。文章通过垂直振动试验方法(VVTM)研究了CSG-50的劈裂强度增长规律, 与CSG-30作对比分析了养生龄期、水泥剂量和集料级配对其劈裂强度的影响。结果表明: 随着龄期的增长, CSG-50的劈裂强度随水泥掺量的增加呈线性增长趋势; 在试件成型的初期阶段, CSG-50的劈裂强度比CSG-30高出约1.30~1.33倍。在水泥稳定砾石的劈裂强度完全形成后, CSG-50的劈裂强度相比CSG-30高出约1.15~1.17倍。

## 关键词

CSG-50, 劈裂强度, 振动法, 增长规律

# Variation Pattern of Splitting Tensile Strength in Large-Size Cement-Stabilized Gravel CSG-50

Yanhong Li<sup>1</sup>, Huarui Peng<sup>1</sup>, Shupeng He<sup>2</sup>, Yanran Peng<sup>2</sup>, Hanxiang Fei<sup>3</sup>, Huatao Wang<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Yili Transportation Investment Group Co., Ltd., Yining Xinjiang

<sup>2</sup>Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan Shandong

<sup>3</sup>School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Xinjiang Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

<sup>5</sup>Xinjiang Key Laboratory of Transportation Infrastructure Safety and Health in Alpine and High-Altitude Mountainous Areas, Urumqi Xinjiang

文章引用: 李彦红, 彭华瑞, 何树鹏, 彭嫣然, 费瀚翔, 王华涛. 大粒径水稳砾石 CSG-50 劈裂强度增长规律[J]. 交通技术, 2025, 14(6): 703-715. DOI: 10.12677/ojtt.2025.146070

## Abstract

With the rapid development of highway construction, the performance requirements for pavement base materials are increasing. Large grained water stable gravel (CSG-50) has received widespread attention due to its excellent mechanical properties and durability. This article studied the growth law of splitting tensile strength of CSG-50 through vertical vibration test method (VVTM), and compared it with CSG-30 to analyze the effects of curing age, cement dosage, and aggregate grade on its splitting tensile strength. The results showed that as the age increased, the splitting tensile strength showed a linear growth trend with the increase of cement dosage; In the initial stage of specimen formation, the splitting tensile strength of CSG-50 is about 1.3~1.33 times higher than that of CSG-30. After the splitting tensile strength of cement stabilized gravel is fully formed, the splitting tensile strength of CSG-50 is about 1.15~1.17 times higher than that of CSG-30.

## Keywords

CSG-50, Splitting Tensile Strength, Vibration Method, The Law of Growth

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

道路基层材料的性能直接决定了路面的结构稳定性和服役寿命，而传统的半刚性基层材料在早期易出现裂缝等病害。在诸如新疆等西部地区，破碎砾石和砾石因其成本效益和环保的特点，常被用作路面基层材料，然而实际应用中发现，水泥稳定破碎砾石(CSCG)基层常常遭遇早期病害，如开裂等问题[1]。这主要是因为破碎砾石相较于碎石破碎面少、表面光滑、棱角性不足，使得 CSCG 的强度相对较弱，且更易发生离析现象[2] [3]。

近年来，国内外学者针对水泥稳定类基层材料的性能优化开展了广泛研究。国内研究以增强抗裂性与强度提升为核心，王鸿凯[4]通过优化级配设计构建多级嵌挤结构，掺入聚丙烯纤维等聚合物，结合水泥掺量调控及西部环境适配技术，显著改善了材料的早期性能。针对高寒地区低温环境，韩龙等[5]研究提出通过添加剂(如 C 类早强剂)提升早期强度，指出低温环境下水泥稳定材料的冻融损伤问题及防治措施。赵文硕[6]以水泥稳定煤矸石混合料作为研究载体，基于力学性能、抗冻融性能和抗干缩性能建立灰色关联度确定最佳水泥掺量，并分析其路用性能。然而，现有研究存在局限性，诸如多基于碎石材料建立理论模型，忽视破碎砾石因棱角少、表面光滑导致的黏结性能差异，以及试验多关注 28 天短期强度，缺乏长期干湿循环、冻融耦合荷载下的耐久性验证[7]-[9]，Yi Yong 等[10]对于 CTB-50 与 CTB-30 混合料的研究表明，振动压实值(VVTM)与现场钻取芯样的力学强度呈现显著的相关性(相关系数  $>0.90$ )。同时，压实后的级配变异程度较低。

大粒径水稳砾石 CSG-50 凭借其优异的力学性能与抗裂性[11]，为破解上述难题提供了新思路。基于此，本文通过系统室内试验，对 CSG-50 水泥稳定砾石劈裂强度进行探究，研究其强度增长规律，以为工程建设提供科学的理论指导。

2. 材料和方法

2.1. 试验材料

2.1.1. 粗集料

粗集料选用新疆产大粒径破碎砾石，并按粒径范围划分为四个规格：37.5 mm~53 mm、19 mm~37.5 mm、9.5 mm~19 mm 及 5 mm~10 mm，技术性质指标检测结果见表 1。

Table 1. Technical indexes of coarse aggregate  
表 1. 粗集料技术指标

| 技术指标       | 不同粒径(mm)粗集料技术指标检测结果 |         |        |       |
|------------|---------------------|---------|--------|-------|
|            | 37.5~53             | 19~37.5 | 9.5~19 | 5~10  |
| 表观相对密度     | 2.614               | 2.568   | 2.544  | 2.518 |
| 针片状颗粒含量(%) | 1.8                 | 7.6     | 11.7   | 14.5  |
| 吸水率(%)     | 0.39                | 0.69    | 1.54   | 0.87  |
| 压碎值(%)     |                     |         | 15.8   |       |
| 磨耗值(%)     |                     |         | 16.7   |       |
| 坚固性(%)     |                     |         | 3.5    |       |
| 软石含量(%)    |                     |         | 1.3    |       |

2.1.2. 细集料

细集料采用新疆地区生产的破碎砾石，技术指标见表 2。

Table 2. Technical indicators of fine aggregate  
表 2. 细集料技术指标

| 指标                         | 测试值  | 规范值 |
|----------------------------|------|-----|
| 表观相对密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.58 | 2.5 |
| 泥块含量(%)                    | 0    | 1.0 |
| 压碎指标(%)                    | 14   | 20  |

运用  $i$  值法进行计算，得到最佳级配。 $i$  值法是细集料级配优选的一种常用方法，通过评估其填充能力，确定最优级配组合。这种方法能够量化细集料的工程性能，为水泥稳定砾石的配比设计提供科学依据，以确保材料的性能和可靠性，计算公式见式(1)：

$$p_x = (i)^x \times 100\%$$

式中： $i$  为通过百分率的递减率，%；

$x$  为级数， $x = 3.32 \lg \frac{D}{d_x}$ ；

$D$  为最大粒径，mm；

$d_x$  为各档粒径，mm。

结合工程经验以及材料特性， $i$  值选取为 0.55、0.60、0.65、0.70，并基于  $i$  值法计算 CSG-50 细集料

级配,成型细集料级配试件,水泥掺量为 3%,测试试件 7 d 抗压强度和劈裂强度确定  $i$  值,对不同的  $i$  值对应级配 D5 档集料进行成型试件,不同  $i$  值对应的 D5 档集料通过率见表 3,并测试其抗压强度  $R_c$ ,劈裂  $R_i$  试验结果见表 4。

**Table 3.** Pass rate corresponding to different  $i$  values  
**表 3.** 不同  $i$  值对应的通过率

| $i$ 值 | 不同筛孔的通过率(%) |      |      |      |      |      |       |
|-------|-------------|------|------|------|------|------|-------|
|       | 4.75        | 2.36 | 1.18 | 0.6  | 0.3  | 0.15 | 0.075 |
| 0.55  | 100.0       | 54.3 | 32.1 | 17.3 | 8.4  | 4.5  | 3.8   |
| 0.60  | 100.0       | 63.2 | 34.2 | 20.7 | 11.0 | 7.1  | 5.4   |
| 0.65  | 100.0       | 66.5 | 43.5 | 25.3 | 19.3 | 12.1 | 9.3   |
| 0.70  | 100.0       | 72.5 | 49.8 | 34.2 | 24.9 | 17.8 | 12.1  |

**Table 4.** Mechanical strength of different gradations corresponding to different  $i$  values  
**表 4.** 不同  $i$  值对应级配的力学强度

| $i$ 值       | 0.55 | 0.60 | 0.65 | 0.70 |
|-------------|------|------|------|------|
| $R_c$ (MPa) | 1.54 | 2.03 | 2.69 | 1.95 |
| $R_i$ (MPa) | 0.15 | 0.17 | 0.18 | 0.16 |

由表 3 可知, D5 档集料的 7 d 无侧限抗压强度随  $i$  值的增大呈先增大后减小的趋势,并在  $i$  值为 0.65 时达到峰值。其 7 d 劈裂强度随  $i$  值增大也呈现相似规律,同样在  $i$  值为 0.65 时取得最大值。表明当  $i$  值为 0.65 时, D5 档集料具有最佳的力学性能。因此,  $i$  值取 0.65 时 D5 档细集料的级配最优。

**2.1.3. 粗细集料比**

基于不同粗细集料比模拟抗压回弹模量的过程,对优选的集料质量比进行分析,由表 5 可得到不同粗细集料比例下试件的抗压回弹模量,从而确定出集料质量最佳比例。

**Table 5.** Compressive rebound modulus of specimens with different proportions of coarse and fine aggregates  
**表 5.** 不同粗细集料比例下试件的抗压回弹模量

| (D1 + D2 + D3):(D4 + D5) | D4:D5 下试件的抗回弹模量 $E_c$ (MPa) |      |      |      |
|--------------------------|-----------------------------|------|------|------|
|                          | 1:2                         | 1:3  | 1:4  | 1:5  |
| 50:50                    | 896                         | 973  | 1017 | 961  |
| 55:45                    | 964                         | 1007 | 1046 | 995  |
| 60:40                    | 1059                        | 1103 | 1127 | 1096 |
| 65:35                    | 982                         | 1037 | 1059 | 1003 |
| 70:30                    | 939                         | 995  | 1002 | 981  |

通过 PFC 抗压回弹模量选取的比例,与根据力学试验结果选取的集料质量比相同。最终确定(D1 + D2 + D3):(D4 + D5) = 60:40、(D4:D5) = 1:4。

2.1.4. 级配范围

并依据实际的工作经验，本文优化级配确定的 53 mm 筛孔通过率范围在 100%。根据级配扩充方法，得到 CSG-50 级配范围，与 CTB-50 水泥稳定碎石级配作对比，并给出 CSG-50 合成级配，结果见表 6。

Table 6. Comparison of gradation ranges between CSG-50 and CTB-50  
表 6. CSG-50 与 CTB-50 级配范围对比

| 类型     |      | 通过以下筛孔(mm)的质量百分率(%) |      |      |      |      |      |     |       |
|--------|------|---------------------|------|------|------|------|------|-----|-------|
|        |      | 53                  | 37.5 | 19   | 9.5  | 4.75 | 2.36 | 0.6 | 0.075 |
| CSG-50 | 级配上限 | 100                 | 75   | 64   | 45   | 36   | 25   | 11  | 5     |
|        | 级配下限 | 100                 | 67   | 57   | 35   | 28   | 18   | 7   | 2     |
|        | 级配中值 | 100                 | 70.5 | 67.5 | 40   | 32   | 21.5 | 9   | 3.5   |
|        | 合成级配 | 100                 | 73.3 | 65.4 | 41.2 | 33.5 | 23.4 | 8.7 | 3.3   |
| CTB-50 | 级配上限 | 100                 | 75   | 65   | 47   | 35   | 25   | 13  | 6     |
|        | 级配下限 | 100                 | 65   | 55   | 37   | 27   | 17   | 7   | 2     |
|        | 级配中值 | 100                 | 70   | 60   | 42   | 31   | 21   | 9.5 | 4     |

为系统研究级配类型、水泥掺量及养护龄期对水泥稳定砾石力学强度的影响规律，本研究采用 CSG-30 和 CSG-50 两种典型级配，设定水泥掺量(以混合料干质量为基准)为 2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%，并选取 3 d、7 d、14 d、28 d、60 d、90 d、120 d 养护龄期进行试验分析。CSG-30 与 CSG-50 水泥稳定砾石的具体级配参数详见表 7。

Table 7. Mineral gradation  
表 7. 矿料级配

| 级配类型   | 通过下列筛孔尺寸(mm)质量百分数(%) |      |      |    |     |      |      |     |       |
|--------|----------------------|------|------|----|-----|------|------|-----|-------|
|        | 53                   | 37.5 | 31.5 | 19 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 0.6 | 0.075 |
| CSG-30 | 100                  | 100  | 94   | 64 | 42  | 32   | 24   | 12  | 4.5   |
| CSG-50 | 100                  | 73   | 68   | 61 | 40  | 32   | 21   | 9   | 4     |

2.1.5. 水泥

选用新疆地区广泛使用的 42.5 级复合硅酸盐水泥，其技术指标见表 8。

Table 8. Inspection results of technical indicators of cement  
表 8. 水泥技术指标检验结果

| 水泥性能              | 检验结果 | 技术要求 |
|-------------------|------|------|
| 安定性(mm)           | 1.5  | <5   |
| 细度(%) (80 μm 方孔筛) | 3.2  | ≤10  |
| 初凝时间(h)           | 4.5  | >3 h |
| 终凝时间(h)           | 7    | 6~10 |

续表

|              |    |      |             |
|--------------|----|------|-------------|
| 3 d 强度(MPa)  | 抗压 | 20.4 | $\geq 11$   |
|              | 抗折 | 4.6  | $\geq 2.5$  |
| 28 d 强度(MPa) | 抗压 | 49.1 | $\geq 32.5$ |
|              | 抗折 | 8.7  | $\geq 5.5$  |

## 2.2. 试验方法

### 2.2.1. 垂直试验方法

使用垂直振动击实仪进行振动击实试验,具体构造如图 1 所示[12][13]。试验前将待用的集料置于恒温烘箱中进行烘干处理,当其质量不再变化时停止烘干。烘箱温度设置在  $100^{\circ}\text{C}\sim 105^{\circ}\text{C}$  之间,以确保集料中的水分被有效蒸发。



Figure 1. VVTE construction  
图 1. VVTE 构造

试验步骤如下:

- ① 原料准备: 对集料进行烘干,准备 5 至 6 份。
- ② 集料混合: 对干集料充分拌合后,按配比加入水泥继续拌和,直至混合料均匀。
- ③ 拌合: 根据混合料质量计算所需加水量,即  $(m_s + m_j) \times \omega_i$ , 其中  $\omega_i$  为含水率(%). 然后将水加入混合集料中,彻底搅拌至均匀。
- ④ 装模: 将混合料均匀装入试模。
- ⑤ 振动压实: 通过控制系统对试模进行固定,调整振动锤紧贴试件表面,振动时长约 150 s。
- ⑥ 脱模: 振动后,使振动锤上升,取出试模置于脱模机上脱模。试样高度应在  $200\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ 。若高度不符,调整混合集料用量,重复上述步骤制备试样。
- ⑦ 计算干密度: 第  $i$  次试验试样的干密度  $\rho_{di}$ , 计算公式见式(1) [14]。

$$\rho_{di} = \frac{m_i - m_0}{V_i} \times \frac{1}{1 + 0.01w_i} \quad (1)$$

式中:  $\rho_{di}$  为第  $i$  次试验试件的干密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_i$ ——第  $i$  次试验时的试件质量, g;

$m_0$ ——试模的质量, g;

$w_i$ ——第  $i$  次试验时加入混合料中的拌和含水率, %;

$V_i$ ——第  $i$  次试验时的试样体积,  $\text{cm}^3$ 。

⑧ 拌合含水率调整: 以试验前后混合料质量  $m_1$  与  $m_2$  差异为基准, 质量差若  $\leq 50$  g, 下次试验的拌合含水率提高 0.5%; 若差异  $\geq 50$  g, 拌合含水率减少 0.7%。

⑨ 试验重复与曲线绘制: 重复步骤①至⑧约 5 至 6 次, 据此绘制干密度与含水率的关系曲线, 从而确定最大干密度和最佳含水率。

### 2.2.2. 劈裂强度试验

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(补充规范号)中规定的什么方法进行测试, CSG-30 采用规范要求尺寸的劈裂条, 针对 CSG-50 定制了适配  $\Phi 200 \text{ mm} \times h 200 \text{ mm}$  尺寸的劈裂夹具, 具体劈裂试验装置如图 2 所示, 劈裂试验过程如图 3 所示。

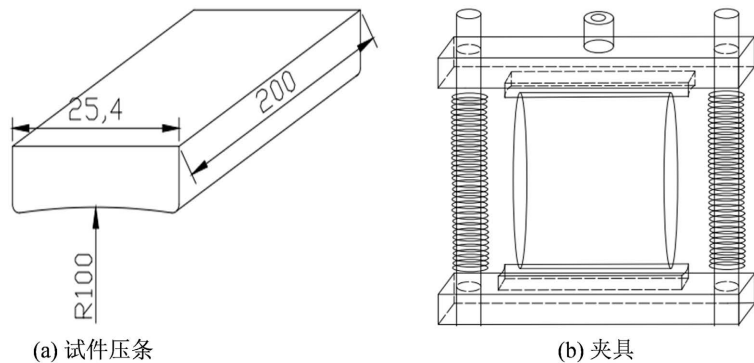


Figure 2. Splitting tensile test apparatus  
图 2. 劈裂试验装置

劈裂强度按式(2)计算[15]:

$$R_t = \frac{2F}{\pi Dh} \left( \sin 2\beta - \frac{b}{D} \right) = \frac{2}{639} \times \frac{F}{h} \quad (2)$$

式中:  $R_t$ ——劈裂强度(MPa);  $D$ ——试件直径(mm);  $h$ ——浸水后试件高度(mm);  $F$ ——最大压力(N);  $b$ ——压条宽度(mm)。



Figure 3. Splitting tensile test diagram  
图 3. 劈裂试验图

3. 试验结果分析

3.1. 劈裂强度演化规律

劈裂强度试验结果见表 9，表中数据均为强度代表值。

Table 9. Split strength  $R_i$  test results

表 9. 劈裂强度  $R_i$  试验结果

| 类型     | 水泥剂量(%) | 下列龄期劈裂强度 $R_i$ (MPa) |      |      |      |      |      |      |
|--------|---------|----------------------|------|------|------|------|------|------|
|        |         | 3                    | 7    | 14   | 28   | 60   | 90   | 120  |
| CSG-50 | 2.0     | 0.49                 | 0.73 | 0.85 | 1.02 | 1.13 | 1.20 | 1.26 |
|        | 2.5     | 0.54                 | 0.86 | 0.98 | 1.13 | 1.24 | 1.33 | 1.42 |
|        | 3.0     | 0.57                 | 0.92 | 1.05 | 1.18 | 1.31 | 1.40 | 1.48 |
|        | 3.5     | 0.64                 | 0.99 | 1.15 | 1.28 | 1.44 | 1.53 | 1.60 |
|        | 4.0     | 0.72                 | 1.06 | 1.24 | 1.40 | 1.58 | 1.67 | 1.75 |
| CSG-30 | 2.0     | 0.36                 | 0.53 | 0.68 | 0.82 | 0.92 | 0.99 | 1.04 |
|        | 2.5     | 0.41                 | 0.61 | 0.77 | 0.95 | 1.04 | 1.13 | 1.21 |
|        | 3.0     | 0.42                 | 0.67 | 0.84 | 0.97 | 1.13 | 1.24 | 1.28 |
|        | 3.5     | 0.49                 | 0.78 | 0.95 | 1.09 | 1.27 | 1.37 | 1.44 |
|        | 4.0     | 0.55                 | 0.87 | 1.05 | 1.20 | 1.40 | 1.49 | 1.58 |

绘制出 CSG-50、CSG-30 劈裂强度随着养生龄期变化的趋势曲线，如图 4 所示，其中两种不同粒径的级配水泥掺量为：2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%。

3.1.1. 随养生龄期增长规律

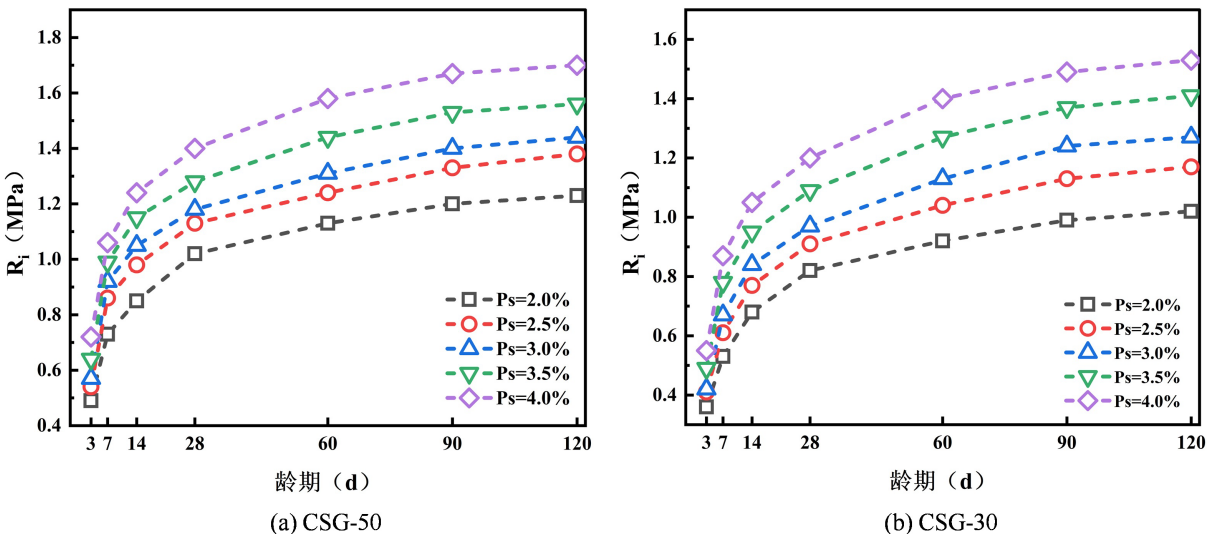


Figure 4. Relationship between  $R_i$  and  $T$  of cement-stabilized gravel

图 4. 水泥稳定砾石  $R_i \sim T$  关系

图4展示了CSG-50与CSG-30两种级配水泥稳定砾石的劈裂强度( $R_t$ )随养生龄期( $T$ )的变化规律,试验涵盖水泥掺量2.0%至4.0%的工况。以3%水泥掺量为例,CSG-50试件劈裂强度由3 d的0.57 MPa增至14 d的1.05 MPa,增幅达84%;CSG-30试件则由0.42 MPa增至0.67 MPa,增幅59%。此阶段水泥水化反应剧烈,生成大量C-S-H凝胶,显著提升界面黏结强度。CSG-50试件强度由1.05 MPa增至1.31 MPa,CSG-30试件由0.84 MPa增至1.13 MPa(增幅34%)。水化反应速率下降,孔隙填充效应主导强度增长。60 d~90 d龄期内,CSG-50与CSG-30试件强度增幅分别降至12%与13%,表明材料性能逐渐趋近极限值。在养护初期阶段( $T < 14$ 天),劈裂强度的增长较为迅速。这一时期内,水泥的水化反应极为剧烈,水化产物持续增加,导致劈裂强度的增长速率加速。28天之后,增长速率开始减缓,至90天后,劈裂强度的增长变得缓慢并逐渐趋于稳定。

### 3.1.2. 随水泥剂量增长规律

不同水泥掺量CSG-50、CSG-30的7 d、28 d龄期的劈裂强度增长曲线如图5所示。

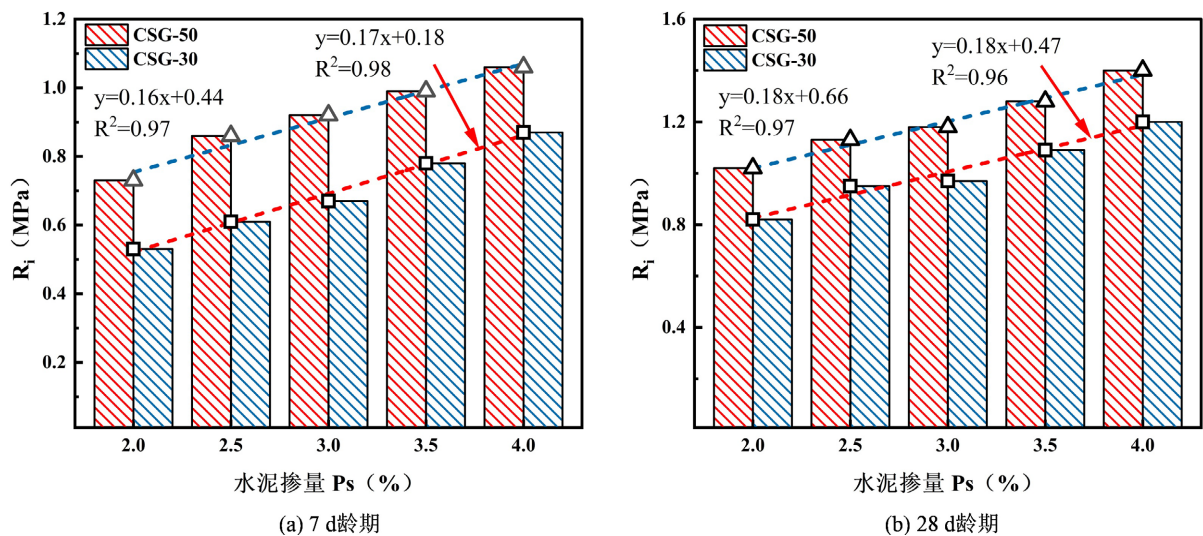


Figure 5.  $R_t$  growth curve at different cement doses

图5. 不同水泥剂量下  $R_t$  增长曲线

劈裂强度随水泥掺量的增加呈线性增长趋势。从图中可以看出,劈裂强度随水泥掺量的增加呈线性增长趋势,并且CSG-50的劈裂强度高于CSG-30,可能是因为粒径大小导致了这种差异,CSG-50试件相较于CSG-30试件,骨料之间形成了更坚实的嵌挤骨架结构,因此具有更高的劈裂强度。

### 3.1.3. 随粒径增大变化规律

绘制强度比平均值散点图,如图6所示。

由图6可知,在试件成型的初期阶段,CSG-50的劈裂强度比CSG-30高出约1.3~1.33倍。在水泥稳定砾石的劈裂强度完全形成后,CSG-50的劈裂强度相比CSG-30高出约1.15~1.17倍。

在水泥稳定砾石试件成型初期(水泥水化反应未发生或仅部分发生阶段),劈裂强度主要由骨料间嵌挤力主导。CSG-50因粒径大于CSG-30,其粗骨料形成的密实骨架嵌挤力更强,使早期劈裂强度提升约30%。随着龄期增长,水泥水化反应逐步完成,劈裂强度由“嵌挤力主导”转变为“嵌挤力-水化胶结协同作用”模式,水化产物对强度的贡献持续增强,而嵌挤力占比逐渐降低。绘制CSG-50、CSG-30的 $R_{7d}$ 与 $P_s$ 关系,如图7所示。

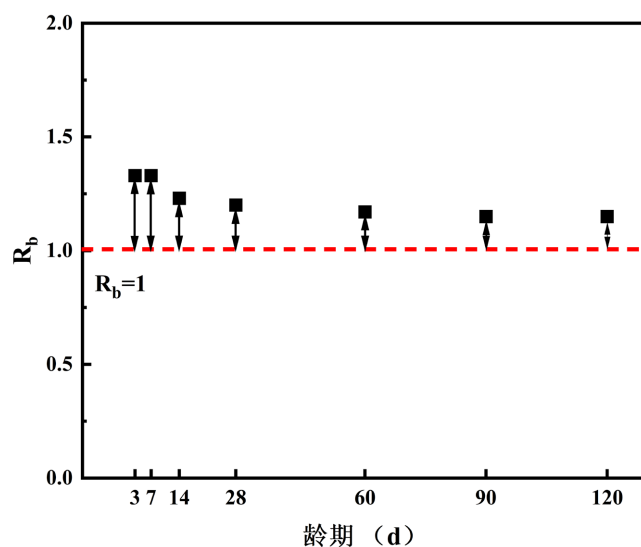


Figure 6. Ratio of splitting tensile strength between CSG-50 and CSG-30  
图 6. CSG-50 与 CSG-30 的劈裂强度之比

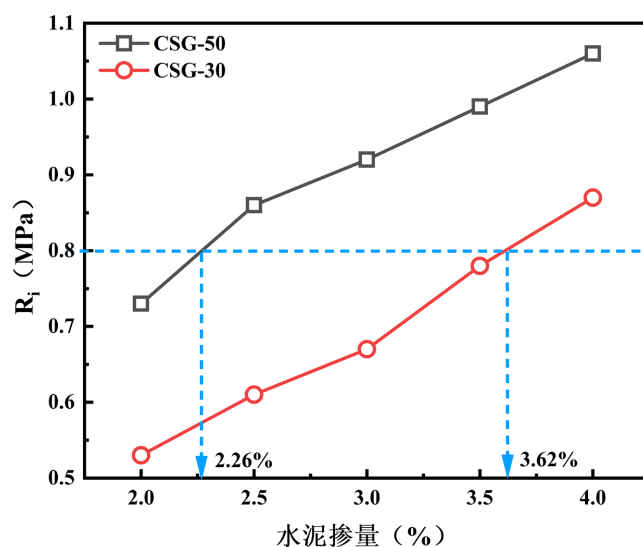


Figure 7. Relationship between fracture strength and cement dosage  
图 7. 劈裂强度与水泥掺量的关系

从图中可以看出,在养生龄期为 7 天时,如果在相同的强度控制指标下调整水泥的掺量,达到相同的劈裂强度,CSG-50 所需的水泥掺量低于 CSG-30。具体来说,若目标是在 7 天养护期内达到 0.8 MPa,CSG-50 的水泥掺量需为 2.26%,而 CSG-30 则需为 3.62%。这表明,在实际的工程应用中,使用 CSG-50 能显著减少水泥用量,带来经济和环境效益。

## 3.2. 劈裂强度增长方程与预测模型

### 3.2.1. 劈裂强度增长方程

#### (1) 极限强度

伴随着养生龄期的增长,可以发现水泥稳定砾石的劈裂强度曲线的斜率逐渐减小,劈裂强度会稳定

在一个极限值  $R_{i\infty}$ 。水泥的水化反应完全结束时，水泥稳定砾石的强度接近极限强度  $R_{i\infty}$ ，即  $T = T_{\infty d}$  时， $R_{iT} = R_{i\infty}$ 。

(2) 增长方程

根据以上研究，劈裂强度的增长具有以下约束条件，见式(3)，CSG-50、CSG-30 劈裂强度增长方程，见式(4)。

$$\begin{cases} R_{i0} < R_{i\infty} \\ R_{iT} = 0 & T = 0 \\ R_{iT} = R_{i\infty} & T = \infty \end{cases} \quad (3)$$

$$R_{iT} = R_{i\infty} - \frac{R_{i\infty} - R_{c0}}{\lambda \cdot T + 1} \quad (4)$$

式中： $T$ ——龄期，d；  
 $R_{iT}$ ——养生  $T$ d 时的强度，MPa；  
 $R_{i\infty}$ ——极限强度，MPa；  
 $R_{i0}$ ——成型时强度，MPa；  
 $\lambda$ ——劈裂强度增长系数。

3.2.2. 劈裂强度增长预测模型

根据表 9 数据计算出水泥稳定砾石  $R_{iT}/R_{i\infty} \sim T$ ，见表 10。

Table 10. Results of  $R_{iT}/R_{i\infty}$  for different age groups

表 10. 不同龄期  $R_{iT}/R_{i\infty}$  结果

| 级配类型   | 水泥剂量(%) | 不同龄期(d) $R_{iT}/R_{i\infty} \sim T$ |      |      |      |      |      |      |
|--------|---------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|        |         | 3                                   | 7    | 14   | 28   | 60   | 90   | 120  |
| CSG-50 | 2.0     | 0.34                                | 0.56 | 0.65 | 0.78 | 0.86 | 0.92 | 0.96 |
|        | 2.5     | 0.37                                | 0.59 | 0.67 | 0.77 | 0.84 | 0.9  | 0.97 |
|        | 3.0     | 0.37                                | 0.59 | 0.68 | 0.76 | 0.85 | 0.9  | 0.95 |
|        | 3.5     | 0.38                                | 0.59 | 0.68 | 0.76 | 0.85 | 0.91 | 0.95 |
|        | 4.0     | 0.39                                | 0.57 | 0.67 | 0.76 | 0.85 | 0.9  | 0.95 |
| CSG-30 | 2.0     | 0.32                                | 0.47 | 0.61 | 0.73 | 0.82 | 0.88 | 0.93 |
|        | 2.5     | 0.32                                | 0.48 | 0.6  | 0.74 | 0.81 | 0.88 | 0.95 |
|        | 3.0     | 0.3                                 | 0.49 | 0.61 | 0.7  | 0.82 | 0.9  | 0.93 |
|        | 3.5     | 0.32                                | 0.5  | 0.61 | 0.7  | 0.82 | 0.88 | 0.93 |
|        | 4.0     | 0.32                                | 0.51 | 0.62 | 0.71 | 0.82 | 0.88 | 0.93 |

考虑不同养护龄期时  $R_{iT}/R_{i\infty}$  与养护时间  $T$  的关系，根据表 10 绘制出图  $R_{iT}/R_{i\infty} \sim T$  曲线，见图 8。

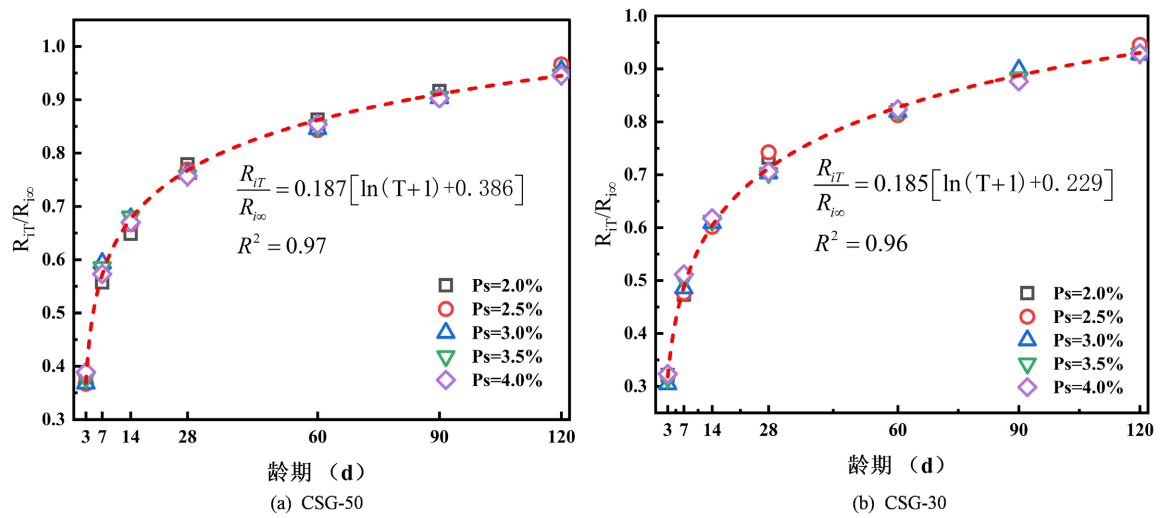


Figure 8. Cement-stabilized gravel  $R_{iT}/R_{i\infty} \sim T$  fitting

图 8. 水泥稳定砾石  $R_{iT}/R_{i\infty} \sim T$  拟合

$R_{iT}/R_{i\infty}$  与  $T$  曲线近似服从幂函数。因此,可假设水泥稳定砾石  $R_{iT}/R_{i\infty} \sim T$  存在幂函数关系。因此建立劈裂强度预测模型, 见式(5)。

$$\frac{R_{iT}}{R_{i\infty}} = g[\ln(T+1)+B] \quad T \leq 120 d \quad (5)$$

式中:  $g$ 、 $B$  为回归系数。

采用式(5)对表 10 数据进行拟合, 回归参数见表 11, 其中  $R^2$  为相关系数。

Table 11.  $R_{iT}/R_{i\infty}$  fitted regression coefficients

表 11.  $R_{iT}/R_{i\infty}$  拟合回归系数

| 类型     | $R_{iT}/R_{i\infty}$ 拟合回归参数 |       |       |
|--------|-----------------------------|-------|-------|
|        | $g$                         | $B$   | $R^2$ |
| CSG-50 | 0.187                       | 0.386 | 0.974 |
| CSG-30 | 0.185                       | 0.229 | 0.963 |

拟合方程相关系数  $R^2$  不小于 0.963, 表明所建立的预测模型可较好地预测 CSG-50、CSG-30 的劈裂强度, 具体预测模型见式(6)。

$$\begin{cases} \text{CSG-50: } \frac{R_{iT}}{R_{i\infty}} = 0.187[\ln(T+1)+0.386] & T \leq 120 d \\ \text{CSG-30: } \frac{R_{iT}}{R_{i\infty}} = 0.185[\ln(T+1)+0.229] & T \leq 120 d \end{cases} \quad (6)$$

为了更好地进行预测强度以及更加充分的运用研究成果, 由表 8 可知, CSG-50、CSG-30 的  $R_{i7}$  与  $R_{i\infty}$  之比的均值分别为 0.58、0.49, 则预测模型式(6)可转换为式(7)。

$$\begin{cases} \text{CSG-50: } R_{iT} = 0.322R_{i7} [\ln(T+1) + 0.386] & T \leq 120 \text{ d} \\ \text{CSG-30: } R_{iT} = 0.377R_{i7} [\ln(T+1) + 0.229] & T \leq 120 \text{ d} \end{cases} \quad (7)$$

#### 4. 结论

本文开展了大粒径水稳砾石 CSG-50 劈裂强度增长规律的研究, 得到如下结论:

(1) CSG-50 与 CSG-30 水泥稳定砾石的劈裂强度演化呈现显著龄期依赖性, 其强度增长过程可分为三个阶段: 0 d~60 d 龄期内, 水泥水化产物(C-S-H 凝胶)的快速生成驱动劈裂强度显著提升(CSG-50 增幅达 84%, CSG-30 为 59%); 60 d~90 d 阶段, 受水化反应扩散机制限制, 强度增速趋缓(增幅降至 12%~13%), 逐渐逼近理论极限值  $R_{i\infty}$ 。

(2) 级配差异性分析表明, CSG-50 因粗骨料(D50 = 19 mm)形成的密实嵌挤骨架结构, 其 7 d 龄期劈裂强度比达 1.30~1.33 倍, 且长期性能( $T > 60 \text{ d}$ )差异收敛至 15%~17%, 反映水泥胶结作用逐步主导强度发展。

(3) 经济性量化结果显示, 劈裂强度与水泥掺量呈线性正相关, CSG-50 在 7 d 龄期达到目标强度  $R_i = 0.8 \text{ MPa}$  时, 水泥掺量(2.26%)较 CSG-30 (3.62%)降低 37.6%, 单位体积水泥节约量达  $15 \text{ kg/m}^3 \sim 20 \text{ kg/m}^3$ 。基于水化动力学模型与级配优化效应, 建议工程中优先采用 CSG-50 级配设计, 在保障结构性能的同时实现资源高效利用与低碳化目标。

#### 基金项目

新疆交通运输厅 2022 年度交通运输行业科技项目, 项目基金编号: 2022-ZD-018; 新疆交通设计院公司科研基金, 基金编号: KY2022042501。

#### 参考文献

- [1] 刘芳. 半刚性基层沥青路面裂缝处治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [2] 钟昆志, 许兵, 方正, 等. 破碎砾石水泥稳定基层收缩性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 630-636.
- [3] 朱建华, 彭辉. 振动击实成型水泥稳定破碎砾石力学特性研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(9): 10-14, 19.
- [4] 王鸿凯. 冻融循环作用下碳-聚丙烯混杂纤维混凝土力学性能及损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
- [5] 韩龙, 张兆华, 李世军. 高寒地区水泥稳定碎石基层性能研究进展[J]. 青海交通科技, 2021, 33(5): 83-89.
- [6] 赵文硕. 季冻区水泥稳定煤矸石路面基层使用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [7] 刘标. 水泥稳定碎石材料的孔隙特性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- [8] 祁运佳. 低温施工对水泥稳定碎石力学性能影响研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- [9] 闫志彬. 高寒高海拔地区水稳填充大粒径碎石基层材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
- [10] Yi, Y., Jiang, Y., Tian, T., Fan, J., Deng, C. and Xue, J. (2022) Mechanical-Strength-Growth Law and Predictive Model for Ultra-Large Size Cement-Stabilized Macadam Based on the Vertical Vibration Compaction Method. *Construction and Building Materials*, 324, Article ID: 126691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126691>
- [11] 崔建卫. 超大粒径水稳破口砾石路面基层混合料改性与配比试验分析[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [12] 方圆. 基于振动成型的水泥稳定碎石混合料力学特性及细观结构分析[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [13] 袁可佳, 蒋应军, 邓长清, 等. 水泥稳定破碎砾石垂直振动成型试验方法评价[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(3): 288-296.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3420-2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.