

# The Strength Properties and Design Criteria of Cement Stabilized Crushed Rock

Zhifeng Song<sup>1</sup>, Yingjun Jiang<sup>2</sup>, Haipeng Liu<sup>1</sup>, Zhejiang Chen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Provincial Communications Construction Group Co., Ltd., Xi'an

<sup>2</sup>Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an

<sup>3</sup>Highway Administration Bureau of Jinhua, Jinhua

Email: [zyj@chd.edu.cn](mailto:zyj@chd.edu.cn)

Received: Mar. 7<sup>th</sup>, 2014; revised: Apr. 15<sup>th</sup>, 2014; accepted: Apr. 24<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

---

## Abstract

Cracking has proven to be the major failure in cement stabilized crushed rock (CSCR) base. The lack of strength and insufficient anti-cracking, which are related to the strength properties and design criteria of CSCR, are two main causes for cracking in CSCR. In order to reduce cracking in CSCR base, the objective of this study is to investigate the influence of cement content, gradation and compaction degree on the strength properties of CSCR with vertical vibration compaction method (VVC) in Laboratory and the load response and fatigue cumulative damage of CSCR base, and then provide a design criterion to control the cracking of CSCR. The results from this study indicate that: 1) the strength of VVC specimens is 0.93 times of core samples strength; 2) when cement content is more than 5%, the strength of CSCR will not increase significantly with cement content, but anti-cracking performance will decrease significantly; 3) with compaction degree rise of 1%, the ultimate strength of CSCR can be increased by 11% ;4) compared with CSCR of suspended-dense type, the ultimate strength of CSCR of dense framework type can be increased by 10%; 5) in order to prevent fatigue cracking of CSCR base under repeated vehicles load during design period, the recommended minimum 7-day unconfined compressive strength of stabilization of crushed limestone is 7.0 MPa. Actual engineering application results show that this production will contribute to alleviating the problem of cracking CSCR base.

## Keywords

Pavement Engineering, Cement Stabilized Crushed Rock, Strength Properties, Strength Criteria, Fatigue Cracking, Vertical Vibration Compaction Method

---

# 水泥稳定碎石强度特性及设计标准

宋志峰<sup>1</sup>, 蒋应军<sup>2</sup>, 刘海鹏<sup>1</sup>, 陈浙江<sup>3</sup>

<sup>1</sup>陕西省交通建设集团, 西安

<sup>2</sup>长安大学教育部特殊地区公路工程重点实验室, 西安

<sup>3</sup>金华市公路管理局, 金华

Email: [ijy@chd.edu.cn](mailto:ijy@chd.edu.cn)

收稿日期: 2014年3月7日; 修回日期: 2014年4月15日; 录用日期: 2014年4月24日

## 摘要

开裂破坏是水泥稳定碎石基层工程实践中最大问题, 而强度特性及强度标准是影响水泥稳定碎石基层开裂关键因素之一。为了缓解水泥稳定碎石开裂破坏, 振动(VVCM)成型试件研究了水泥剂量、级配类型和密度等对水泥稳定碎石强度影响规律, 分析了施工期和运营期基层荷载响应和疲劳累积损伤, 提出了控制开裂破坏的水泥稳定碎石强度设计标准。结果表明: VVCM试件强度测试精度高达93%; 当水泥剂量  $\geq 5\%$ 时, 增加水泥剂量对提高水泥稳定碎石强度效果有限, 且不利于材料抗裂性能; 与悬浮密实级配相比, 采用骨架密实级配可提高强度10%; 压实度提高1%, 水泥稳定碎石强度提高约11%; 为防止设计年限内基层在施工车辆和运营车辆反复作用下产生疲劳断裂, 建议水泥稳定石灰岩碎石7 d无侧限抗压强度不低于7.0 MPa。实体工程应用表明, 本成果能较好地解决水泥稳定碎石基层开裂问题。

## 关键词

路面工程, 水泥稳定碎石, 强度特性, 强度设计标准, 疲劳断裂, 垂直振动试验方法

## 1. 引言

开裂破坏是水泥稳定碎石基层最大工程问题, 包括车辆荷载引起的疲劳断裂(简称荷载型裂缝)和温缩、干缩引起的收缩开裂(简称环境型裂缝)。水泥稳定碎石基层荷载型裂缝与其强度有关, 环境型裂缝与其抗裂性能有关[1]-[3]。因此, 材料设计中应考虑水泥稳定碎石强度和抗裂性能, 要求水泥稳定碎石具有足够的强度以抵抗荷载破坏作用和良好的抗裂性能以抵抗温度湿度破坏作用。

在原材料特定情况下, 强度与抗裂性能取决于水泥稳定碎石组成与结构。水泥稳定碎石组成包括集料级配、水泥剂量, 而结构取决于集料颗粒排列方式、最佳含水量和最大干密度[4] [5]。现场水泥稳定碎石结构与现场碾压方式和压实功有关, 室内水泥稳定碎石试件结构与试验方法有关, 试验方法能否较好模拟现场碾压方式和压实功直接影响试验结果和材料优化设计, 因此, 合适试验方法是材料优化设计的基本保障。众多因素中, 水泥剂量对水泥稳定碎石强度和抗裂性能影响最为显著, 其它因素特定情况下, 水泥剂量越高, 水泥稳定碎石强度越大, 但抗裂性能越差, 反之亦然[4]-[10]。因此, 在材料设计中, 强度标准是关键, 强度标准过低, 则在车辆荷载反复作用下可能出现过早疲劳断裂; 强度标准过高, 尽管可以控制荷载型裂缝, 但易出现水泥剂量过高而产生环境型裂缝。目前水泥稳定碎石设计采用重型击实试验方法(HCM)确定水泥稳定碎石最大干密度和最佳含水量、静压法(QSCM)成型试件测试7 d无侧限抗压强度, 根据7 d无侧限抗压强度大于强度标准设计水泥剂量[11]。已有研究表明[8] [12]-[14]: HCM &

QSCM 法落后与生产实际,其成型的试件工程性质与现场芯样的工程性质相关性不足 40%;强度标准并非基于车辆荷载反复作用下基层疲劳断裂提出,更没体现对抗裂性能要求。这导致工程实践中无法准确掌握水泥稳定碎石强度影响因素,普遍采用高水泥剂量的方法以确保水泥稳定碎石达到强度标准而忽视了对抗裂性能要求,结果水泥稳定碎石基层出现严重早期裂缝问题[1]-[3] [9]。从现场调查来看[1]-[3] [9],出现的早期裂缝更多的是环境型裂缝而非荷载型裂缝,这也间接说明设计水泥剂量较大,尽管解决疲劳荷载裂缝问题,但却出现环境型裂缝。

作者提出了水泥稳定碎石垂直振动试验方法(VVCM),并证明了 VVCM 试件工程性质与现场钻芯试件工程性质的相关性高达 93% [8] [12]-[14]。鉴于此,本文基于 VVCM 研究了水泥剂量、级配和压实度对水泥稳定碎石强度影响规律,分析水泥稳定碎石基层荷载响应与疲劳累积损伤,提出了控制疲劳断裂的水泥稳定碎石最小强度标准。成果有助于工程技术人员更好地认识水泥稳定碎石组成结构与强度之间规律,从而指导水泥稳定碎石设计施工,达到提高基层工程质量的目的。

## 2. 试验用原材料及矿料级配

### 2.1. 原材料

水泥:陕西尧柏牌 P.032.5 缓凝水泥,技术指标略。

集料:山西柳林石料厂的石灰岩,技术指标略。

### 2.2. 矿料级配

采用悬浮密实级配范围中值[11]和骨架密实级配[8] [15],见表 1。

## 3. VVCM 及其与 HCM & QSCM 对比

### 3.1. VVCM 及可靠性

VVCM:基本参数为激振力 7.6 kN、名义振幅 1.2 mm、工作重量为 3 kN、工作频率 30 Hz,确定水泥稳定碎石最大干密度的振动击实时间为 100 s,成型试件的振动时间为 75 s [8] [12]。

为了验证 VVCM 的可靠性,在榆绥高速公路上对比研究了水泥稳定碎石现场芯样和 VVCM 试件与 QSCM 试件的强度,结果见表 2,水泥剂量为 3.5%、骨架密实级配。表中  $R_{cx}$  为芯样强度、 $R_{cz}$  为 VVCM 试件强度和  $R_{cq}$  为 QSCM 试件强度。

由表 2 数据可知,VVCM 试件强度平均为芯样强度的 0.93 倍,QSCM 试件强度平均为芯样强度的 0.39 倍。证明 VVCM 试件用于研究水泥稳定碎石力学性能更具有代表性和可靠性。

### 3.2. 与 HCM & QSCM 对比

#### 1) 最大干密度和最佳含水量

VVCM 和 HCT 确定的水泥稳定碎石最大干密度和最佳含水量见表 3。表中  $P_s$  是指水泥剂量。

**Table 1. Gradation of the mixture**  
**表 1. 水泥稳定碎石级配**

级配类型	通过下列筛孔尺寸/mm 的质量百分率/%						
	31.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
悬浮密实(XM)	100	93.5	67.0	39.0	26.0	15.0	3.5
骨架密实(GM)	100	74.0	47.0	33.0	23.0	14.0	3.0

**Table 2. Strength of specimens with different shaping method**  
**表 2. 不同方式成型的试件强度与芯样强度**

路面 标段	T/d	$R_{cv}/\text{MPa}$	VVCM		QSCM	
			$R_{cv}/\text{MPa}$	$R_{cv}/R_{cx}$	$R_{cj}/\text{MPa}$	$R_{cj}/R_{cx}$
1	7	8.5	7.9	0.93	3.5	0.41
	28	10.3	9.8	0.95	3.4	0.33
	60	11.3	10.6	0.94	3.6	0.32
2	7	7.8	7.6	0.97	3.7	0.47
	28	10.0	9.5	0.95	3.8	0.38
	60	11.4	9.8	0.86	4.1	0.36
3	7	8.6	8.1	0.94	4.0	0.47
	28	9.9	9.8	0.99	4.3	0.44
	60	11.8	10.4	0.88	4.2	0.36
4	7	9.1	7.7	0.84	3.4	0.37
	28	10.3	9.5	0.93	4.1	0.40
	60	10.3	9.9	0.96	4.2	0.41

**Table 3. Maximum dry density and optimum moisture content**  
**表 3. 最大干密度  $\rho_{dmax}$  与最佳含水量  $W_0$**

级配 类型	$P_s/\%$	VVCM		HCT		$\frac{W_{0(VVCM)}}{W_{0(HCT)}}$	$\frac{\rho_{d(VVCM)}}{\rho_{d(HCT)}}$
		$W_0/\%$	$\rho_{imax}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$W_0/\%$	$\rho_{dmax}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		
XM	2.0	4.0	2.426	4.8	2.361	0.83	1.028
	2.5	4.2	2.428	4.8	2.362	0.88	1.028
	3.0	4.2	2.429	5.0	2.365	0.84	1.027
	3.5	4.2	2.431	5.0	2.368	0.84	1.027
	4.0	4.2	2.431	5.1	2.372	0.82	1.025
	4.5	4.2	2.432	5.1	2.374	0.82	1.024
	5.0	4.2	2.433	5.2	2.377	0.81	1.024
	2.0	4.0	2.435	4.7	2.370	0.85	1.027
GM	2.5	4.0	2.436	4.8	2.374	0.83	1.026
	3.0	4.0	2.438	4.9	2.376	0.82	1.026
	3.5	4.2	2.438	4.9	2.379	0.86	1.025
	4.0	4.2	2.440	5.0	2.383	0.84	1.024
	4.5	4.2	2.442	5.0	2.389	0.84	1.022
	5.0	4.2	2.443	5.0	2.394	0.84	1.020

由表 3 中数据可知, VVCM 确定的水泥稳定碎石最佳含水量为 HCM 的 0.81~0.86 倍, 平均为 0.84 倍; 最大干密度显著提高, 为 HCM 的 1.020~1.028 倍, 平均为 1.025 倍。

2) 无侧限抗压强度

水泥稳定碎石 VVCM 试件与 QSCM 试件的无侧限抗压强度比值  $r_c$  与龄期之间关系见图 1。图中 XM、GM 分别是指悬浮密实级配和骨架密实级配(下同)，后面数字是指水泥剂量(%)。图 1 表明，水泥稳定碎石 VVCM 试件的抗压强度比 QSCM 试件的要高，两者比值在早期(28 d 龄期之前)随龄期而不断增大，其中 3 d 龄期为 2.0，7 d 龄期为 2.3，14 d 龄期为 2.4；28 d 龄期之后，两者比值基本稳定，约 2.55。

3) 劈裂强度

水泥稳定碎石 VVCM 试件与 QSCM 试件的劈裂强度比值  $r_i$  见表 4。可见 VVCM 试件劈裂强度平均为 QSCM 试件的 1.90 倍。

4) 无侧限抗压回弹模量

水泥稳定碎石 VVCM 试件与 QSCM 试件的抗压回弹模量比值  $r_E$  见表 5。可见 VVCM 试件的抗压回弹模量平均为 QSCM 试件的 1.6 倍。

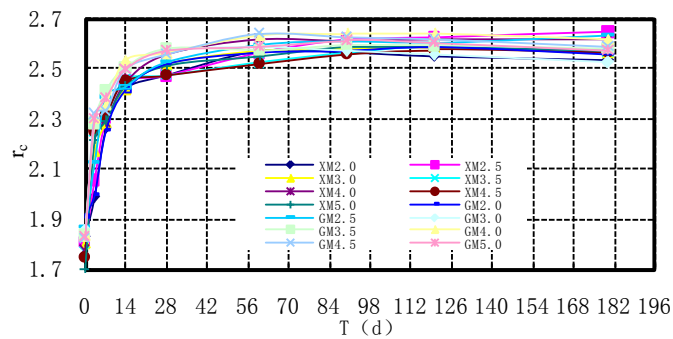


Figure 1. The relationship of  $r_c$  and  $T$   
图 1.  $r_c \sim T$  之间关系

Table 4. Ratio of splitting strength of VVCM and QSCM specimens  
表 4. VVCM 试件与 QSCM 试件劈裂强度比值  $r_i$

级配类型	$P_s/\%$	下列龄期(d)的 $r_i$								$\bar{r}_i$	$C_V/\%$	$r_{i0.95}$
		3	7	14	28	60	90	120	180			
XM	2.0	2.00	2.04	2.03	2.00	2.00	1.98	2.04	2.04	2.01	0.99	1.98
	2.5	1.89	2.10	2.08	2.04	1.98	2.00	2.10	2.13	2.04	3.06	1.94
	3.0	2.00	2.18	1.91	1.88	1.92	1.95	2.00	2.10	1.99	3.88	1.87
	3.5	2.04	2.25	2.04	1.97	1.96	1.96	2.01	2.08	2.04	3.16	1.93
	4.0	2.19	2.24	2.19	2.15	2.09	2.15	2.18	2.20	2.17	1.43	2.12
	4.5	2.37	2.36	2.16	2.14	2.17	2.23	2.22	2.20	2.23	2.96	2.12
	5.0	2.32	2.37	2.19	2.19	2.14	2.18	2.24	2.28	2.24	2.92	2.13
GM	2.0	2.05	1.90	1.88	1.96	1.98	1.95	1.97	1.95	1.95	1.78	1.90
	2.5	2.05	1.94	2.14	2.08	1.88	1.90	1.94	2.03	2.00	4.01	1.86
	3.0	1.91	1.97	1.83	1.88	1.89	1.88	1.90	1.97	1.91	1.87	1.85
	3.5	2.08	2.13	1.98	1.83	1.90	1.96	1.98	2.00	1.98	3.26	1.88
	4.0	2.17	2.18	2.07	2.04	2.05	2.08	2.08	2.06	2.09	2.01	2.02
	4.5	2.27	2.24	2.09	2.00	2.05	2.11	2.10	2.07	2.12	3.26	2.00
	5.0	2.32	2.27	2.12	2.08	2.09	2.14	2.12	2.14	2.16	3.17	2.05

### 4. 基于 VVCM 的水泥稳定碎石强度特性

水泥稳定碎石无侧限抗压强度代表值见表 6。

#### 4.1. 水泥剂量 $P_s$ 对强度的影响

1) 初始强度  $R_{c0}$

Table 5. Ratio of splitting strength of VVCM and QSCM specimens

表 5. VVCM 试件与 QSCM 试件劈裂强度比值  $r_E$

级配类型	龄期/d	下列 $P_s(\%)$ 的 $r_E$							$\bar{r}_E$	$C_V/\%$	$r_{E0.95}$
		2	2.5	3	3.5	4	4.5	5			
GM	28	1.68	1.70	1.68	1.66	1.67	1.67	1.67	1.67	0.94	1.66
	60	1.58	1.61	1.60	1.60	1.61	1.60	1.59	1.60	0.78	1.58
	90	1.59	1.58	1.60	1.61	1.59	1.59	1.58	1.59	0.75	1.58
	120	1.58	1.58	1.60	1.59	1.61	1.63	1.61	1.60	1.06	1.59
	180	1.60	1.61	1.63	1.61	1.63	1.64	1.63	1.62	1.11	1.61
XM	28	1.75	1.73	1.74	1.72	1.71	1.71	1.69	1.72	1.37	1.70
	60	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.62	1.61	1.63	0.66	1.62
	90	1.63	1.63	1.63	1.63	1.61	1.60	1.61	1.62	0.84	1.61
	120	1.62	1.68	1.69	1.65	1.66	1.63	1.63	1.65	1.19	1.63
	180	1.66	1.69	1.67	1.65	1.67	1.63	1.61	1.65	1.28	1.63

Table 6. Representative value of unconfined compressive strength (Guaranteed Rate is 95%)

表 6. 无侧限抗压强度代表值(保证率 95%)

级配类型	$P_s/\%$	下列龄期 $T/d$ 水泥稳定碎石抗压强度/MPa								
		0	3	7	14	28	60	90	120	180
XM	2.0	2.34	4.1	6.3	7.6	8.6	9.8	10.3	10.8	11.2
	2.5	2.37	4.6	7.0	8.3	9.6	11.0	11.7	12.2	12.8
	3.0	2.40	5.2	7.8	9.3	10.9	12.5	13.1	13.6	14.3
	3.5	2.41	5.8	8.5	10.2	11.9	13.5	14.2	14.7	15.3
	4.0	2.43	6.4	9.2	11.2	13.0	14.9	15.7	16.2	16.9
	4.5	2.46	6.8	9.8	12.4	13.9	15.7	16.6	17.1	17.8
	5.0	2.47	7.2	10.3	12.9	14.9	16.8	17.6	18.2	18.8
GM	2.0	2.79	4.4	7.0	8.5	9.6	10.8	11.4	11.9	12.4
	2.5	2.80	5.1	7.9	9.2	10.6	12.2	12.9	13.3	14.1
	3.0	2.85	5.8	8.7	10.6	12.1	13.7	14.4	15.0	15.7
	3.5	2.88	6.3	9.6	11.6	13.3	14.9	15.6	16.1	16.9
	4.0	2.90	6.9	10.2	12.7	14.4	16.4	17.3	17.8	18.5
	4.5	2.92	7.3	10.7	13.5	15.2	17.3	18.3	18.8	19.6
	5.0	2.95	7.6	11.3	14.2	16.3	18.3	19.3	19.8	20.6

初始强度  $R_{c0}$  是指水泥稳定碎石试件压实成型后立即测试所得到强度, 假设此时水泥还没开始凝结硬化。如图 2 所示, 水泥稳定碎石  $R_{c0}$  随水泥剂量增加而呈线性增加; 水泥剂量提高 1%, 水泥稳定碎石  $R_{c0}$  增加 4.3%~5.5%, 即增加水泥剂量对提高水泥稳定碎石初始强度作用不明显。

2) 强度增长规律

假设水泥稳定碎石强度与龄期之间关系如下:

$$R_{cT} = R_{c\infty} - \frac{R_{c\infty} - R_{c0}}{A \cdot T + 1} \quad (1)$$

式中  $T$  为养生龄期(d);  $R_{cT}$ 、 $R_{c0}$ 、 $R_{c\infty}$  分别为养生  $T$  天、0 天、无数天时水泥稳定碎石强度(MPa);  $A$  为回归系数。

根据表 6 中数据拟合得到水泥稳定碎石无侧限抗压强度方程见表 7。表 7 中相关系数  $R^2 > 0.99$ , 表明方程具有非常高的拟合度, 符合水泥稳定碎石强度发展规律。

3) 极限强度  $R_{c\infty}$

极限强度是水泥稳定碎石强度增长曲线的渐近线。定义  $r_{p_s} = \frac{R_{c\infty(p_{s2})} - R_{c\infty(p_{s1})}}{R_{c\infty(p_{s1})} \cdot (p_{s2} - p_{s1})}$ , 式中  $R_{c\infty(p_{s1})}$ 、

$R_{c\infty(p_{s2})}$  分别指水泥剂量  $p_{s1}$ 、 $p_{s2}$  时对应的水泥稳定碎石极限强度。如图 3 所示, 随着  $p_s$  增大,  $r_{p_s}$  减小;  $p_s$  从 2% 增加到 3% 时, 极限强度提高 20%;  $p_s$  从 3% 提高到 4% 时, 极限强度提高不足 15%;  $p_s$  从 4% 提

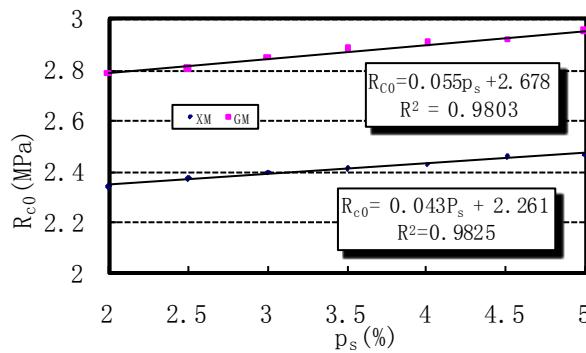


Figure 2. The relationship of  $R_{c0}$  and  $P_s$   
图 2.  $R_{c0} \sim P_s$  之间关系

Table 7. Equation of unconfined compressive strength

表 7. 水泥稳定碎石无侧限抗压强度方程

$P_s/\%$	XM				GM			
	$R_{c0}$	$R_{c\infty}$	$A$	$R^2$	$R_{c0}$	$R_{c\infty}$	$A$	$R^2$
2.0	2.336	11.47	0.09	0.994	2.795	12.64	0.09	0.992
2.5	2.361	12.98	0.09	0.993	2.820	14.29	0.09	0.992
3.0	2.386	14.66	0.09	0.995	2.845	16.13	0.09	0.994
3.5	2.411	15.95	0.09	0.992	2.870	17.57	0.09	0.990
4.0	2.436	17.61	0.09	0.990	2.895	19.37	0.09	0.993
4.5	2.461	18.71	0.09	0.986	2.920	20.51	0.09	0.991
5.0	2.486	19.91	0.09	0.988	2.945	21.70	0.09	0.990

高到 5% 时，极限强度提高 10%；当水泥剂量超过 5% 时，极限强度提高不超过 10%。

#### 4.2. 矿料级配对强度的影响

骨架密实与悬浮密实型水泥稳定碎石强度之比  $r_{cg}$  见表 8。表中数据表明，骨架密实型比悬浮密实型水泥稳定碎石试件的初始强度大 1.19 倍，后期强度平均大 1.10 倍。

#### 4.3. 密度对强度的影响

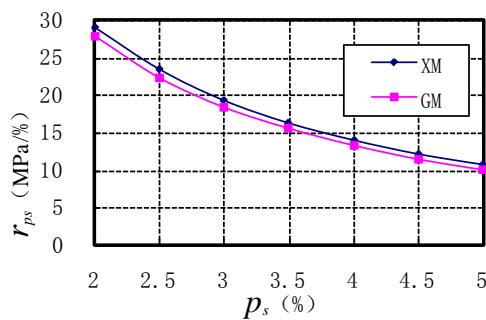
不同密度(压实度)水泥稳定碎石抗压强度代表值见表 9，水泥剂量 3.5%、骨架密实级配。表中数据表明，试件密度(压实度)从 2.340 g/cm<sup>3</sup>(96%)提高到 2.389 g/cm<sup>3</sup>(98%)时，水泥稳定碎石强度可提高 17%~25%，平均提高 22%；试件密度从 2.340 g/cm<sup>3</sup>(96%)提高到 2.438 g/cm<sup>3</sup>(100%)时，水泥稳定碎石强度可提高 43%~50%，平均提高 47%。由此可得，压实度每提高 1%，水泥稳定碎石强度至少可提高 11%。可见，提高基层压实度，对于提高其强度效果显著。

#### 4.4. 养生龄期对强度的影响

由图 4 水泥稳定碎石  $R_{cT}/R_{c\infty} \sim T$  之间关系可看出，水泥稳定碎石强度随龄期而增长，龄期 28 d 之前

**Table 8.** The effect of gradation on the mixture  
**表 8.** 级配水泥稳定碎石强度的影响

T/d	下列 $P_s$ /% 的 $r_{cg}$							$\bar{r}_{cg}$
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	
0	1.19	1.18	1.19	1.20	1.19	1.19	1.19	<b>1.19</b>
3	1.07	1.11	1.12	1.09	1.07	1.08	1.06	
7	1.10	1.13	1.12	1.13	1.10	1.09	1.10	
14	1.12	1.11	1.14	1.13	1.13	1.09	1.10	
28	1.12	1.11	1.11	1.12	1.11	1.10	1.10	
60	1.10	1.11	1.10	1.10	1.10	1.11	1.09	1.10
90	1.10	1.11	1.10	1.10	1.10	1.10	1.09	
120	1.11	1.10	1.10	1.09	1.10	1.10	1.09	
180	1.11	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.09	
$\infty$	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.09	<b>1.10</b>

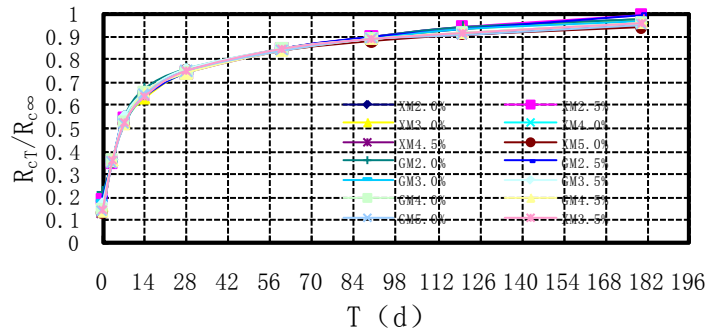


**Figure 3.** The relationship of  $r_{ps}$  and  $P_s$   
**图 3.**  $r_{ps} \sim P_s$  之间关系



**Table 9.** The effect of density (compaction) on the mixture  
**表 9.** 密度(压实度)对抗压强度的影响

密度(压实度)	下列 T/d 水泥稳定碎石 $R_c$ /MPa								下列 T/d 水泥稳定碎石 $R_c$ 与 96% 压实度水泥稳定碎石 $R_c$ 之比							
	3	7	14	28	60	90	120	180	3	7	14	28	60	90	120	180
2.340(96%)	5.4	7.7	9.5	11.1	12.3	12.5	13.1	13.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2.389(98%)	6.3	9.6	11.6	13.3	14.9	15.6	16.1	16.9	1.17	1.25	1.22	1.20	1.21	1.25	1.23	1.25
2.438(100%)	7.7	11.3	13.9	16.2	18.3	18.7	19.3	20.2	1.43	1.47	1.46	1.46	1.49	1.50	1.47	1.50



**Figure 4.** The relationship of  $R_{cT}/R_{c\infty}$  and  $T$   
**图 4.**  $R_{cT}/R_{c\infty} \sim T$  之间关系

强度增长非常显著，14 d 强度达极限强度的 65%，90 d 强度达极限强度的 90% 以上。可见，加强早期尤其是前 14 d 的养生非常重要。

#### 4.5. 基于 VVCM 水泥稳定碎石力学参数[8] [12]-[15]

水泥稳定石灰岩碎石  $E_\infty = 4500$  MPa，而  $E_\infty \cong E_{360}$ ，各龄期水泥稳定碎石模量符合式(2)：

$$E_T = 0.247 \cdot (\ln T)^{0.79} E_\infty \quad (2)$$

各龄期水泥稳定碎石劈裂强度符合式(3)：

$$\begin{cases} R_{iT} = 0.291 \cdot (\ln T)^{0.735} R_{i\infty} \\ R_{i\infty} = 1.67 R_{i14} \end{cases} \quad (3)$$

水泥稳定碎石 7 d 劈裂强度与 7 d 抗压强度之间关系：

$$R_c = 10.73 \cdot R_i \quad (4)$$

水泥稳定碎石弯拉强度  $R_w$  与劈裂强度  $R_i$  之间关系：

$$R_w = 1.4 R_i \quad (5)$$

360 d 龄期水泥稳定碎石疲劳方程[15]：

$$\lg S = -0.0431 \lg N_e \quad (6)$$

### 5. 控制开裂破坏的水泥稳定碎石强度标准[8]

施工期施工车辆不可避免要在已铺筑水泥稳定碎石底基层上通行。若养生龄期过短，底基层未能形成足够的强度，则在施工车辆作用下可能造成底基层极限破坏或疲劳破坏。其次，在施工车辆反复作用下，基层由于材料微结构的局部不均匀，诱发应力集中而出现微损伤；路面投入运营后，在车辆荷载反

复作用下,基层微损伤累积扩大,当损伤累积到一定程度时,就会导致水泥稳定碎石基层疲劳断裂[16]-[18]。因此,水泥稳定碎石强度标准应以防止施工期荷载作用下极限破坏和施工期与运营期荷载反复作用下水泥稳定碎石疲劳破坏为依据。

### 5.1. 控制极限破坏的水泥稳定碎石施工期强度标准

#### 5.1.1. 计算模型与参数

1) 计算模型

计算模型见图 5。计算轴载取 BZZ-100 kN, 层间完全连续。

2) 计算参数

各龄期水泥稳定碎石  $E$ 、 $R_i$  和  $R_w$  见表 10。

#### 5.1.2. 施工车辆作用下底基层层底拉应力

施工车辆作用下水泥稳定碎石底基层层底拉应力  $\sigma_w$  见表 10。由表 10 可知: 1) 随着底基层厚度增大, 施工车辆作用下底基层产生  $\sigma_w$  显著减小。结合工程实际, 建议底基层设计厚度为 20 cm; 2) 龄期越长, 水泥稳定碎石模量和弯拉强度越大; 模量越大, 车辆荷载作用下底基层产生的  $\sigma_w$  也越大。考虑工程进度, 水泥稳定石灰岩底基层养生不得低于 7 d、7 d 抗弯拉强度不低于 0.81 MPa。

#### 5.1.3. 控制极限破坏的水泥稳定碎石施工期强度标准

结合表 10, 为防止 20 cm 厚水泥稳定碎石底基层在施工车辆荷载作用下产生极限破坏, 要求水泥稳定碎石 7 d 弯拉强度  $\geq 0.81$  MPa。考虑 VVCM 成型圆柱体试件较梁式试件更易操作, 且抗压强度已被工程界广为接受, 故根据各强度指标间关系转化得到 7 d 劈裂强度和 7 d 抗压强度标准, 见表 11。

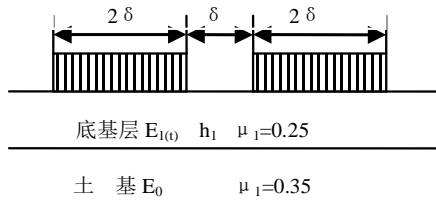


Figure 5. Simplified model of Mechanical calculations  
图 5. 力学计算简化模型

Table 10.  $E$ ,  $R_i$ ,  $R_w$ , and  $\sigma$  of base course with different age

表 10. 各龄期底基层  $E$ 、 $R_i$ 、 $R_w$  和  $\sigma_w$

项目	下列 T/d 水泥稳定碎石力学参数与 $\sigma_w$								
	7	10	13	16	19	22	25	28	
模量 $E$ /MPa	1866	2119	2298	2437	2550	3645	2727	2799	
劈裂强度 $R_i$ /MPa	0.68	0.77	0.83	0.88	0.92	0.95	0.98	1.00	
弯拉强度 $R_w$ /MPa	0.95	1.07	1.16	1.23	1.28	1.33	1.37	1.41	
16	1.02	1.08	1.11	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	
不同底基层厚度/cm	18	0.91	0.96	0.99	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07
层底 $\sigma_w$ /MPa	20	0.81	0.85	0.87	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94
22	0.70	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.80	0.81	

## 5.2. 控制疲劳断裂的水泥稳定碎石强度设计标准

### 5.2.1. 计算模型与参数

#### 1) Miner 疲劳累积损伤理论

假设水泥稳定碎石各龄期疲劳方程符合式(6), 且符合 Miner 理论。该理论认为: 在应力水平  $S$  作用下, 荷载作用  $N$  次时, 将产生完全损伤(即失效),  $S$  作用  $n(n < N)$ 次产生部分损伤为  $n/N$ ; 应力水平  $S_i$  作用  $n_i$ 次下将产生损伤率  $n_i/N_i$ 。当损伤率累积达到 1 时, 即满足式(7)时, 便可预测失效。

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{i-1}} + \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (7)$$

#### 2) 计算模型

各阶段结构层模型见图 6。工况 1~5 为高速、一级公路施工期不同阶段计算模型, 工况 6 为高速、一级公路运营期计算模型, 工况 1、2、7 为二级公路施工期不同阶段计算模型, 工况 8 为二级公路运营期计算模型。 $E_{x(T)}$ 指  $x$  结构层  $T$  龄期模量, 按式(2)计算, 并假设两结构层施工间隔为 15 d。

#### 3) 计算参数

结合现场拌合楼和施工车辆情况, 预计各结构层施工车辆 BZZ-100 kN 轴载累计作用次数见表 12。而运营期轴载累计作用次数为  $2.5 \times 10^7$ 。

水泥稳定碎石  $E_{x(T)}$ 按式(2)计算, 结果见表 13。考虑  $T > 360$  d 后,  $E$  基本不再增长, 故运营阶段模量取  $E_{x(360)}$ 。

### 5.2.2. 运营期车辆作用下基层荷载应力

各工况基层荷载应力计算结果见表 13。由表 13 可知, 随龄期的增长和结构层厚度的增加, 水泥稳定碎石基层层底拉应力急剧下降; 而水泥稳定碎石弯拉强度随龄期的增加而增长。这说明, 在早期(施工期)更易出现水泥稳定碎石弯拉强度低于水泥稳定基层层底拉应力的情况, 即基层更易发生破坏, 因此, 应加强施工期施工运输车辆超载控制。

### 5.2.3. 控制疲劳断裂的水泥稳定碎石强度标准

通过试算, 当 7 d 劈裂强度达到表 13 中数值时, 水泥稳定碎石累积疲劳损伤达到  $0.95 < \sum n_i/N_i \leq 1.0$ ,

**Table 11. Strength standard of period controlling the limit damage**  
**表 11. 控制极限破坏的水泥稳定碎石施工期强度标准**

强度指标	7 d 弯拉强度	7 d 劈裂强度	7 d 抗压强度
施工期标准/MPa	≥0.81	≥0.54	≥5.8

**Table 12. The cumulative action number of BZZ-100**  
**表 12. 施工车辆 BZZ-100 kN 轴载累计作用次数**

公路等级	高速、一级公路					二级公路		
	下基层	上基层	下面层	中面层	上面层	基层	下面层	上面层
累计作用次数	3720	3720	2063	1238	825	2067	586	469

**Table 13. 7 d splitting strength**  
**表 13. 7 d 劈裂强度**

指标	高速、一级公路	二级公路
7 d 劈裂强度/MPa	≥0.70	≥0.68

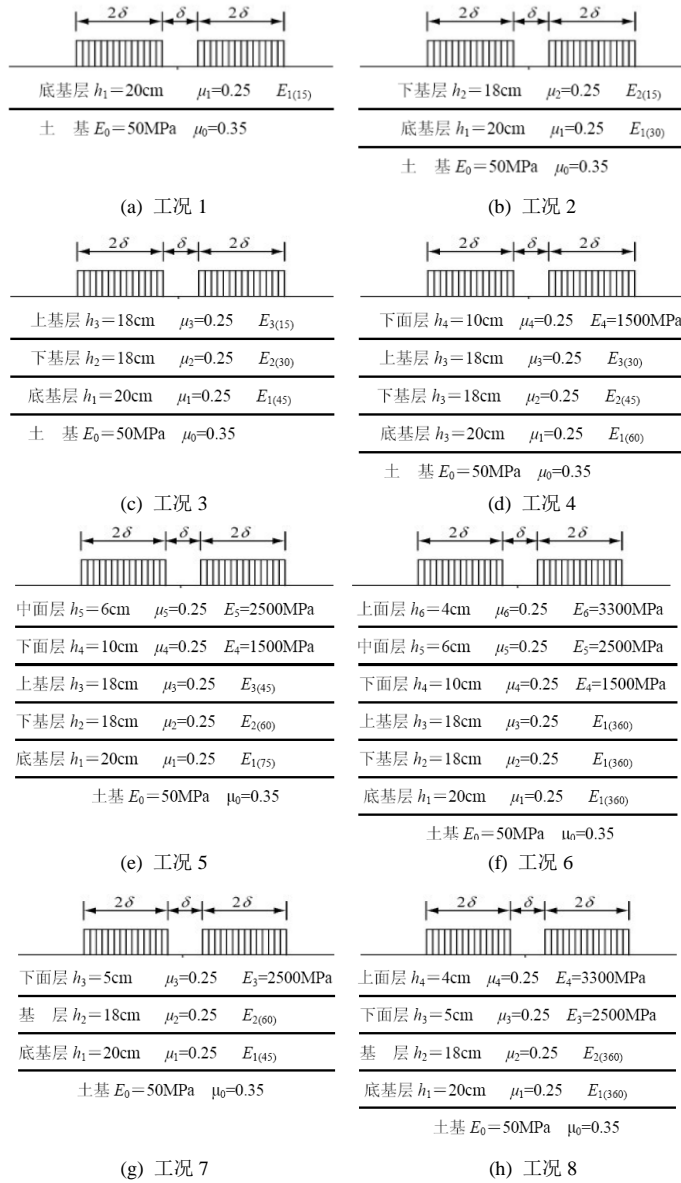


Figure 6. Simplified model of Mechanical calculations  
 图 6. 力学计算简化模型

不仅可防止水泥稳定碎石基层在设计年限内发生疲劳破坏，还兼顾材料抗裂性能的要求，见表 14。

考虑到水泥稳定碎石真实劈裂强度约等于室内标准养生振动成型试件劈裂强度的 0.93 倍，得到水泥稳定碎石 7 d 劈裂强度标准，并转化成 7 d 抗压强度标准，见表 15。

### 5.3. 与现行规范强度标准对比及其应用效果

现行规范规定[11],特重、重和中交通公路的水泥稳定碎石 7 d 抗压强度标准为:基层为 3.0~4.5 MPa、底基层为 2.0~2.5 MPa,该标准适用于 HCM & QSCM.前述研究表明,VVCM 试件 7 d 抗压强度约为 QSCM 试件的 2.3 倍,若转化成 VVCM 试件的强度,则规范 7 d 无侧限抗压强度标准:基层为 6.9~10.35 MPa、底基层为 4.6~5.8 MPa。由表 11 和表 15 可知,现行规范底基层强度标准偏低,极有可能在施工期施工车辆作用下发生断裂破坏;而本文提出的强度标准相当于现行规范基层强度标准下限。

**Table 14. Fatigue damage of the mixture**  
**表 14. 水泥稳定碎石疲劳损伤**

公路等级	工况	T/d	E/MPa	R <sub>f</sub> /MPa	R <sub>w</sub> /MPa	σ <sub>w</sub> /MPa	应力水平	疲劳次数	轴载作用次数	疲劳损伤	$\sum \frac{n_i}{N_i}$
高速、 一级公路	1	15	2252	0.908	1.273	0.892	0.701	3900	3720	9.54E - 01	0.954
	2	30	2696	1.073	1.524	0.375	0.246	1.4E + 14	3720	2.66E - 11	
	3	45	2947	1.166	1.658	0.202	0.122	1.9E + 21	2063	1.07E - 18	
	4	60	3122	1.230	1.767	0.159	0.090	1.9E + 24	1238	6.53E - 22	
	5	75	3255	1.279	1.824	0.135	0.074	2.2E + 26	825	3.68E - 24	
	6	360	4150	1.500	2.345	0.129	0.055	1.8E + 29	2.5E + 07	1.37E - 22	
二级公路	1	15	2252	0.885	1.239	0.892	0.720	2089	2067	9.89E - 01	0.989
	2	30	2696	1.047	1.482	0.375	0.253	7.5E + 13	586	7.83E - 12	
	7	45	2947	1.137	1.618	0.314	0.194	3.6E + 16	469	1.30E - 14	
	8	360	4150	1.463	2.276	0.292	0.128	5.5E + 20	2.5E + 07	4.57E - 14	

**Table 15. Strength design standard of the mixture controlling fatigue failure**  
**表 15. 控制疲劳断裂的水泥稳定碎石强度设计标准**

指标	高速、一级公路	二级公路
7 d 劈裂强度/MPa	≥0.65	≥0.63
7 d 抗压强度/MPa	≥7.0	≥6.8

与传统方法(HCM & QSCM)设计的水泥剂量 4%~6%，采用 VVCM、按控制开裂破坏的强度标准设计的水泥剂量一般为 2.5%~3.5%，这不仅确保了材料有足够的强度抵抗车辆荷载反复作用下不发生疲劳断裂，而且水泥剂量降低显然提高材料抗裂性能，较好地缓解水泥稳定碎石基层开裂破坏的问题。该成果已在柞小高速公路、西商高速公路、十天高速公路、神府高速公路和榆绥高速公路等工程中得到应用，取得了良好的效果。

## 6. 结论

1) 对比研究了水泥稳定碎石 VVCM 试件强度与现场芯样强度。结果表明，VVCM 试件强度平均为芯样强度的 0.93 倍，证明 VVCM 法成型的试件具有代表性和可靠性。

2) 对比研究了 VVCM 法与 HCM & QSCM 法对试验结果的影响。结果表明：VVCM 确定最大干密度平均为 HCM 的 1.025 倍；VVCM 试件的抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量分别是 QSCM 试件的 2.55 倍、1.90 倍和 1.60 倍。

3) 基于 VVCM 研究水泥稳定碎石材料强度特性及影响因素。结果表明：随水泥剂量增加，水泥剂量对提高极限强度作用逐渐减弱且越不利于抗裂性能；当水泥剂量 ≥ 5% 时，极限强度提高不超过 10%；压实度每提高 1%，则水泥稳定碎石强度平均可提高 10%；与悬浮密实级配相比，采用骨架密实级配可提高强度约 11%；14 d 强度达极限强度的 65%，加强早期尤其是前 14 d 的养生非常重要。

4) 研究施工期水泥稳定碎石基层荷载作用下力学响应，结合早期水泥稳定碎石材料特性，提出了防止基层在施工车辆作用下发生断裂破坏的施工强度标准：养生龄期 < 7 d、7 d 无侧限抗压强度 < 6.0 MPa。

5) 结合水泥稳定碎石材料特性, 研究水泥稳定碎石力学响应和疲劳累积损伤, 以水泥稳定碎石累积疲劳损伤达到  $0.95 < \Sigma n_i/N_i \leq 1.0$  为原则提出水泥稳定碎石强度设计标准: 7 d 无侧限抗压强度  $\leq 7.0$  MPa。与现行规范强度标准对比发现: 现行规范中底基层强度标准偏低, 极有可能在施工车辆作用下发生断裂破坏; 本文提出的强度标准为现行规范基层强度标准下限。

## 基金项目

陕西交通科技项目(09-49T); 交通行业联合科技攻关项目(2008 353 313 010, 2008 353 333 200)。

## 参考文献 (References)

- [1] Lippert, D.L. and Schutzbach, A.M. (1989) Crack control of pozzolanic bases. Final Reports.
- [2] Adaska, W.S. and Luhr, D.R. (2004) Control of reflective cracking in cement stabilized pavements. *5th International RILEM Conference*, Limoges, May 2004, 1-8.
- [3] George, P.K. (2002) Minimizing cracking in cement-treated materials for improved performance. Research and Development Bulletin RD123, Portland Cement Association, Skokie.
- [4] 沙爱民, 胡力群 (2008) 半刚性基层的材料特性. *中国公路学报*, **4**, 1-5.
- [5] 沙爱民, 胡力群 (2008) 半刚性基层材料的结构特征. *中国公路学报*, **4**, 1-5.
- [6] Jitsangiam P. and Nikraz H. (2009) Mechanical behaviours of hydrated cement treated crushed rock base as a road base material in Western Australia. *International Journal of Pavement Engineering*, **10**, 39-47.
- [7] Guthrie, W.S., Sebesta, S. and Scullion, T. (2001) Improving long-term performance of cement-treated aggregate base materials. Texas A&M Transportation Institute, College Station.
- [8] 蒋应军 (2012) 垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术. 人民交通出版社, 北京.
- [9] Guthrie, W.S., Sebesta, S. and Scullion, T. (2001) Selecting optimum cement contents for stabilizing aggregate base materials. Technical Reports, September 1998-August 2001 Texas Transportation Institute, College Station.
- [10] Thysell, B. and Oesterland, B. (1976) Vibratory compaction in pre-testing for cement stabilization of gravel roads. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [11] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范.
- [12] Jiang, Y.J. and Zhang, B.Y. (2010) Indoor test research on fatigue performance of cement-stabilized macadam. *Proceedings of International Workshop on Energy and Environment in the Development of Sustainable Asphalt Pavements*, June 2010.
- [13] Jiang, Y.J. and Li, L.W. (2011) Performances of cement-stabilized macadam with multilevel dense built-in grading structure gradation. *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering*, Lushan, 22-24 April 2011, 5250-5254.
- [14] 李明杰, 蒋应军, 张俊杰, 王顺, 戴经梁 (2010) 半刚性基层材料振动试验方法. *交通运输学报*, **1**, 6-12.
- [15] 蒋应军, 李明杰, 张俊杰等 (2010) 水泥稳定碎石强度影响因素. *长安大学学报(自然科学版)*, **4**, 1-7.
- [16] 蒋应军, 王富玉, 刘斌 (2009) 水泥稳定碎石强度特性的试验研究. *武汉理工大学学报*, **15**, 52-57.
- [17] 王艳, 倪富健, 李再新 (2009) 水泥稳定碎石混合料疲劳性能. *交通运输工程学报*, **4**, 10-14.
- [18] 韩丁, 黄晓明 (2009) 水泥稳定碎石疲劳的破坏力学分析. *土木建筑与环境工程*, **3**, 78-82.