

# Material Design of Cement Stabilized Semi-Rigid Base Course Based on Cracking Resistance

Yuanming Wang<sup>1,2</sup>, Lun Ji<sup>2</sup>, Guanglei Wang<sup>3</sup>, Haiquan Liu<sup>2</sup>, Jun Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Heilongjiang Sanjiang Engineering Construction Administration Bureau, Harbin Heilongjiang

<sup>2</sup>School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

<sup>3</sup>CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing

Email: jilunhit@126.com

Received: Mar. 7<sup>th</sup>, 2018; accepted: Mar. 21<sup>st</sup>, 2018; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In this paper, in order to improve the resistance to deformation of subgrade settlement cracking ability, the concept of stress intensity factor in fracture mechanics is adopted. The unconfined compressive strength, flexural tensile strength, fracture toughness and fracture energy of the specimens were analyzed. Through the multi index analysis, the gradation type and cement dosage of the semi-rigid base with the best crack resistance were obtained. The results show that the cement stabilized grit with skeleton dense type has the best crack resistance. Under the condition of conventional cement dosage, the unconfined compressive strength, bending tensile strength and fracture toughness increase with the increase of the cement dosage, but the fracture energy decreases with it. Based on the comprehensive analysis, it is considered that cement stabilized gravel with a cement content of 4% has high crack resistance in the dense structure of the skeleton.

## Keywords

Semi-Rigid Base, Cement Content, Grading Type, Crack Resistance

---

# 基于抗裂性能的水泥稳定类半刚性基层材料设计

王远明<sup>1,2</sup>, 纪伦<sup>2</sup>, 王广磊<sup>3</sup>, 刘海权<sup>2</sup>, 李俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>黑龙江省三江工程建设管理局, 黑龙江 哈尔滨

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨

<sup>3</sup>中交公路规划设计院有限公司, 北京

Email: jilunhit@126.com

收稿日期: 2018年3月7日; 录用日期: 2018年3月21日; 发布日期: 2018年3月28日

## 摘要

为提高基层抵抗路基沉降变形开裂能力, 本文对水泥稳定类半刚性基层的抗裂性能分析, 采用断裂力学中应力强度因子的概念, 并对其断裂能进行分析, 通过无侧限抗压强度、弯拉强度指标分析, 得到了抗裂性能最优的半刚性基层的级配类型及水泥用量。结果表明, 采用骨架密实型的水泥稳定砂砾的抗裂性能最优; 常规水泥剂量条件下, 随着水泥剂量的增加, 无侧限抗压强度、弯拉强度和断裂韧度增大, 而断裂能则随之递减。综合分析认为, 采用骨架密实型结构, 4%的水泥用量的水泥稳定砂砾具有较高的抗裂性能。

## 关键词

半刚性基层, 水泥用量, 级配类型, 抗裂性能, 材料设计

Copyright © 2018 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

## 1. 引言

半刚性基层在我国普遍应用, 但各种开裂问题[1] [2]长期困扰着道路建设者。由于路基沉降或承载能力低, 半刚性基层层底受到较大的拉应力, 当应力超过其承受能力时, 就会出现开裂。为抵抗路基变形产生的开裂, 目前有两类主要的处理方式, 一类是“吸收”, 即, 通过柔性基层、应力吸收层, 使得应力分散, 不集中, 进而“抗裂”; 另一类, 是真正的“抗裂”, 即提高抵抗弯拉的能力, 进而提高抗开裂性能, 基于半刚性基层材料特点, 该种方式是提高和保证半刚性基层路用性能和使用耐久性的关键。为探究半刚性基层材料的抗弯拉、抗开裂性能, 以水泥稳定砂砾材料为例, 分析影响半刚性基层材料抗拉性能的相关因素, 对水稳砂砾的断裂韧性、抗裂能进行评价, 研究水泥稳定砂砾材料在带裂缝状况下的工作性能, 进而选择抗裂性能优异的级配类型和合理的水泥剂量, 从而实现抗开裂半刚性基层配合比的设计。

## 2. 材料及常规试验

### 2.1. 典型级配及击实试验

依据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)中推荐的水泥稳定碎石的集料级配选取水泥稳定砂砾的集料级配。集料的级配如表 1 所示, 表中 XM 表示悬浮密实型, GM 表示骨架密实型, GK 表示骨架空隙型。

采用普通硅酸盐 42.5 水泥。每个试件的振动击实时间为 3 min。振动击实[3] [4]的方法确定最大干密度与最佳含水量见表 2。

### 2.2. 无侧限抗压强度试验

采用《公路工程无机结合料试验规程》(JTG E51-2009)进行无侧限抗压强度试验, 7 天无侧限抗压强度试验结果如表 3。

**Table 1.** Cement stabilized gravel aggregate gradation table**表 1.** 水泥稳定砂砾集料级配表

筛孔孔径(mm)	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
XM	100.0	93.5	67.0	39.0	26.0	15.0	3.5
GM	100.0	73.6	46.0	26.8	25.8	9.1	0.5
GK	100.0	62.8	26.3	11.2	5.0	2.0	0.0

**Table 2.** Cement stabilized gravel vibration compaction results**表 2.** 水泥稳定砂砾振动击实结果

水泥剂量(%)	3			4			5		
级配类型	GM	XM	GK	GM	XM	GK	GM	XM	GK
最佳含水量(%)	5.25	5.28	5.23	5.32	5.34	5.29	5.38	5.41	5.33
最大干密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.294	2.231	2.173	2.313	2.235	2.201	2.325	2.239	2.225

**Table 3.** The unconfined compressive strength of 7-days cement stabilized gravel specimens**表 3.** 水泥稳定 7 天砂砾试件的无侧限抗压强度

级配类型	GM			XM			GK		
水泥剂量(%)	3	4	5	3	4	5	3	4	5
无侧限抗压强度(MPa)	3.37	4.34	5.94	3.22	4.17	5.94	3.01	3.90	5.29

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006),一级以上公路基层的无侧限抗压强度要求为 3~4 MPa,试验采用的级配与水泥用量制得的试件均满足规范要求。

### 3. 水泥稳定砂砾性能试验分析

#### 3.1. 水泥稳定砂砾抗弯拉强度分析

抗折试验是评价材料抗拉强度的一种常用方法,其试验原理是在简支梁试件跨中以一定的速率进行加载,记录试件破坏时的极限荷载,计算材料的抗折强度。试件的尺寸采用 100 mm × 100 mm × 400 mm。加载时应该保持连续、匀速加载,加载速率为 50 mm/min。弯拉强度按照公式 1 计算:

$$R_s = \frac{PL}{b^2h} \quad (1)$$

式中  $R_s$ ——弯拉强度(MPa);

$b$ ——试件的宽度(mm);

$L$ ——跨距,也就是两个支点之间的水平距离(mm);

$P$ ——试件破坏时的最大压力(N);

$h$ ——试件的高度(mm)。

抗折强度数据如表 4。

分析 28 天抗弯拉强度可知:3% 剂量时,悬浮密实型 > 骨架密实型级配 > 骨架空隙型;4% 剂量时,骨架密实型级配 > 悬浮密实型;5% 剂量时,悬浮密实型与骨架密实型级配相当,显著优于骨架空隙型。可见,4% 水泥剂量,28 天龄期的骨架密实型级配的抗弯拉强度最大,而 5% 剂量时其与悬浮密实抗弯拉强度相当。

**Table 4.** Tensile strength (MPa) of cement stabilized gravel  
**表 4.** 水泥稳定砂砾抗弯拉强度(MPa)

结构类型	龄期(d)	水泥剂量		
		3%	4%	5%
GM	7	0.48	0.94	1.10
	28	1.33	2.08	2.30
GK	7	0.17	0.37	0.43
	28	0.45	0.86	0.99
XM	7	0.53	0.61	1.04
	28	1.37	1.50	2.31

### 3.2. 水泥稳定砂砾抗裂性能弯曲试验分析

#### 3.2.1. 试验方法与荷载 - 跨中挠度曲线

参照水泥混凝土的研究方法,在研究水泥稳定砂砾抗裂性能时,引入断裂韧度与断裂能的概念[5] [6] [7]。试件采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的梁式试件。在标准养生条件下养生 28 天。为保证试件破坏时按照固定位置断裂,试验之前在梁式试件的跨中部分预切缝,切缝的高度与试件高度之比为 0.2。支撑状态为简支,采用 UTM-250 试验机在跨中处加载,加载速度为 1 mm/min,记录荷载 - 跨中挠度曲线。

以图 1、图 2 为例,分析不同水泥用量、不同级配类型对荷载-挠度曲线的影响。

可见,随着水泥剂量的提高,试件的极限荷载迅速增加,水泥剂量每提升 1%,极限荷载的极限荷载大约提高 1 kN。达到极限荷载时跨中的挠度大致相同,但是随着极限荷载的增大,试件完全破坏时的跨中最大挠度却在减小,而低水泥剂量的试件在完全破坏之前能够承受更大的变形,据此可以推断,不能简单的认为水泥剂量越高抗裂性能越好。

可知,相同水泥剂量下,骨架密实型级配的极限荷载最大,骨架空隙型级配的极限荷载次之,悬浮密实型级配的极限荷载最小。达到极限荷载之后骨架密实型级配在完全破坏之前仍然可以承受较大的变形。骨架空隙型级配与悬浮密实型级配试件的最大挠度相差不大。

#### 3.2.2. 断裂韧度分析

借用断裂力学中应力强度因子的概念,应力强度因子用  $K_I$  表示。裂缝尖端附近的应力场与  $K_I$  成正比。当  $K_I$  增加到某一数值时即使荷载不再增加裂缝也会继续扩张下去,直至结构发生脆性破坏。这个极限值称为材料的断裂韧度,用  $K_{IC}$  来表示。

断裂韧度的计算公式如公式 2。

$$K_{IC} = \frac{(P_{V_{max}} + G)L}{4BH^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{H}\right) \quad (2)$$

式中:  $P_{V_{max}}$ ——极限竖向荷载(kN);

$G$ ——加载附件的重量(kN);

$H$ ——试件的高度(m);

$B$ ——试件的宽度(m);

$L$ ——试件的长度(m);

$a$ ——预切裂缝的深度(m)。

$f\left(\frac{a}{H}\right)$  是与  $\frac{a}{H}$  有关的函数,其表达式见公式 3。

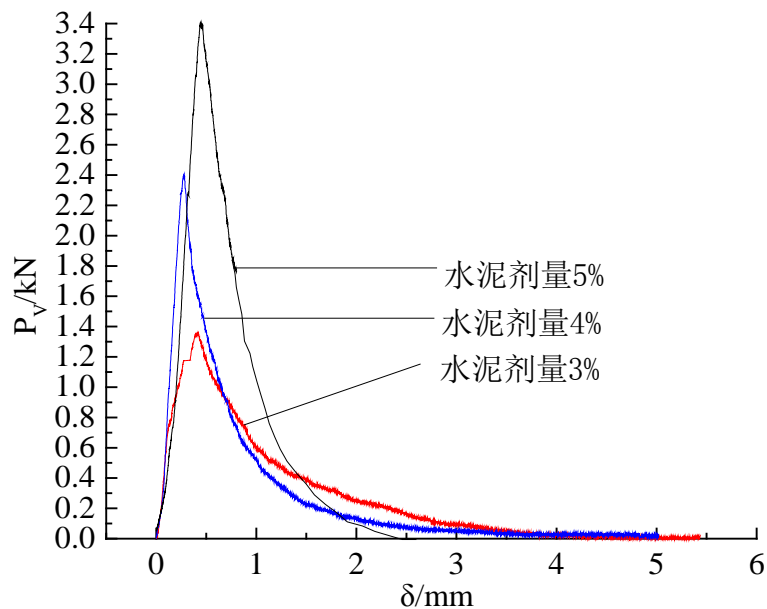


Figure 1. The effect of cement dosage on the load-deflection curve in the solid compact specimen

图 1. 骨架密实型水泥剂量对荷载 - 挠度曲线的影响

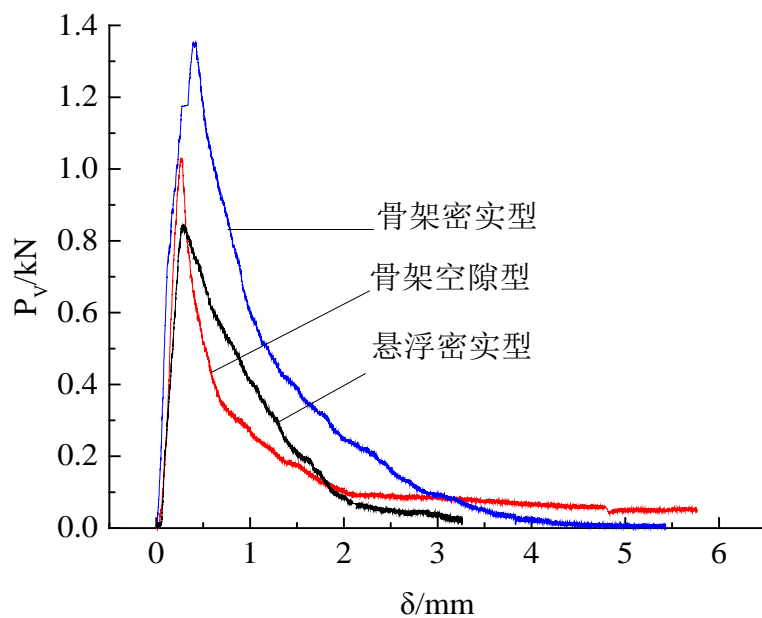


Figure 2. Effect of gradation type on load-deflection curve (cement dosage 3%)

图 2. 级配类型对荷载 - 挠度曲线的影响(水泥剂量 3%)

$$\begin{aligned}
 f\left(\frac{a}{H}\right) &= 2.9 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{1}{2}} - 4.6 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{3}{2}} + 21.8 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{5}{2}} \\
 &= -37.6 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{7}{2}} + 38.7 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{9}{2}}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

根据得到的试验数据，计算水泥稳定砂砾的断裂韧度。结果列于表 5。

分析认为(图 3), 随着水泥剂量的增加, 各级配类型试件的断裂韧度不断增大。当荷载在裂缝处产生的应力强度因子小于材料的断裂韧度时, 材料仍然具备一定的抵抗能力, 裂缝不会继续扩展。

### 3.2.3. 断裂能分析

除了断裂韧度, 另一个用来评价材料抗裂能力的指标是断裂能, 用表示。该参数体现的是材料抵抗裂纹扩展的能力, 其物理意义是材料扩展单位面积所需要的能量, 其数值越大代表裂缝越难扩展。

试验时需要记录水泥稳定砂砾试件跨中处的最大挠度以及荷载随试件挠度变化的曲线。断裂能由公式 4 计算。

$$G_F = \frac{1}{A_{lig}} [W_0 + (m_1 + m_2) g W_{max}] \quad (4)$$

式中  $A_{lig}$  ——试件断裂带面积( $m^2$ );

$W_0$  ——  $P_V \sim W$  曲线下的面积( $N \cdot m$ );

$W_{max}$  ——试件的最大跨中挠度( $m$ );

$g$  ——重力加速度( $m/s^2$ );

$m_1$  ——试件支点之间的梁质量( $kg$ );

$m_2$  ——加载附件的质量( $kg$ );

$a$  ——预切裂缝的深度( $m$ )。

在计算断裂能时需要用到荷载挠度曲线所围成的面积, 为此利用 MATLAB 提取荷载与挠度的数据, 计算二者围成面积的大小, 结果见表 6。

可见, 随着水泥剂量的增加(图 4), 试件的断裂能不断下降, 表明试件阻碍裂缝扩展的能力在不断下降, 这与断裂韧度的变化趋势正好相反。断裂韧度代表抵抗裂缝是否继续扩展的“门槛”, 而断裂能则反映裂缝扩张单位面积所需要的能量, 二者并不矛盾。骨架密实型的断裂能指标最优。以 3% 水泥剂量为例, 骨架密实型与骨架空隙型、悬浮密实型级配断裂能相比, 分别是其 1.36 倍和 1.89 倍。

## 4. 抗裂水泥稳定砂砾的级配和水泥剂量设计

### 4.1. 常规性能

由上述分析可知, 相同级配类型的水泥稳定砂砾材料, 无侧限抗压强度随着水泥剂量的增加显著增

Table 5. Fracture toughness of cement stabilized gravel ( $MPa \cdot m^{1/2}$ )

表 5. 水泥稳定砂砾的断裂韧度 ( $MPa \cdot m^{1/2}$ )

基层类型	断裂韧度 $K_{IC}(MPa \cdot m^{1/2})$	极限竖向荷载 $P_{Vmax}(kN)$	加载重量 $G(kN)$	函数 $f\left(\frac{a}{H}\right)$
3%水泥骨架空隙	38.50	1.03	0.01	1.17
3%水泥骨架密实	50.36	1.35	0.01	1.17
3%水泥悬浮密实	31.66	0.85	0.01	1.17
4%水泥骨架空隙	78.19	2.11	0.01	1.17
4%水泥骨架密实	89.14	2.40	0.01	1.17
4%水泥悬浮密实	66.55	1.79	0.01	1.17
5%水泥骨架空隙	112.59	3.04	0.01	1.17
5%水泥骨架密实	126.34	3.41	0.01	1.17
5%水泥悬浮密实	85.54	2.30	0.01	1.17

大, 相同水泥剂量下骨架密实型级配的无侧限抗压强度最大, 悬浮密实型级配的无侧限抗压强度居中, 骨架空隙型级配的无侧限抗压强度最小; 当水泥剂量超过 4% 时, 无侧限抗压强度呈现出显著增长的趋势。

#### 4.2. 抗弯拉强度

抗弯拉强度随着水泥剂量和龄期的增加而增大。4% 水泥剂量, 28 天龄期的骨架密实型级配的抗弯拉强度最大, 而 5% 剂量时其与悬浮密实抗弯拉强度相当。

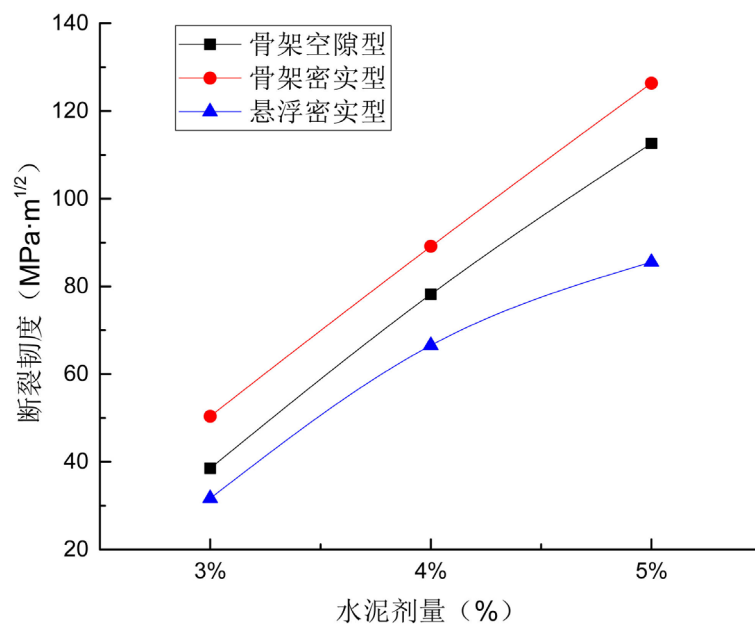
#### 4.3. 抗开裂性能

断裂韧度随着水泥剂量的增大而增大。相同水泥剂量下骨架密实型级配的断裂韧度最大, 例如, 在 4% 的水泥剂量时, 骨架密实型的断裂韧度比悬浮密实型和骨架空隙型提高了 33.9%、14.0%。表明这种

**Table 6.** Fracture energy of cement stabilized gravel (N/m)

**表 6.** 水泥稳定砂砾的断裂能(N/m)

基层类型	断裂带面积 $A_{fig}$ ( $m^2$ )	最大跨中挠度 $W_{max}$ (m)	$P_V \sim W$ 曲线下的面积 $W_0$ (N·m)	断裂能 $G_F$ (N/m)
3% 水泥骨架空隙	0.01	0.01	0.90	179.97
3% 水泥骨架密实	0.01	0.01	1.52	244.32
3% 水泥悬浮密实	0.01	0.00	0.83	129.12
4% 水泥骨架空隙	0.01	0.00	0.81	148.14
4% 水泥骨架密实	0.01	0.01	1.54	195.70
4% 水泥悬浮密实	0.01	0.00	1.60	114.45
5% 水泥骨架空隙	0.01	0.00	0.91	112.35
5% 水泥骨架密实	0.01	0.01	3.44	166.83
5% 水泥悬浮密实	0.01	0.00	2.38	82.90



**Figure 3.** Test results of fracture toughness of cement stabilized gravel

**图 3.** 水泥稳定砂砾的断裂韧度试验结果

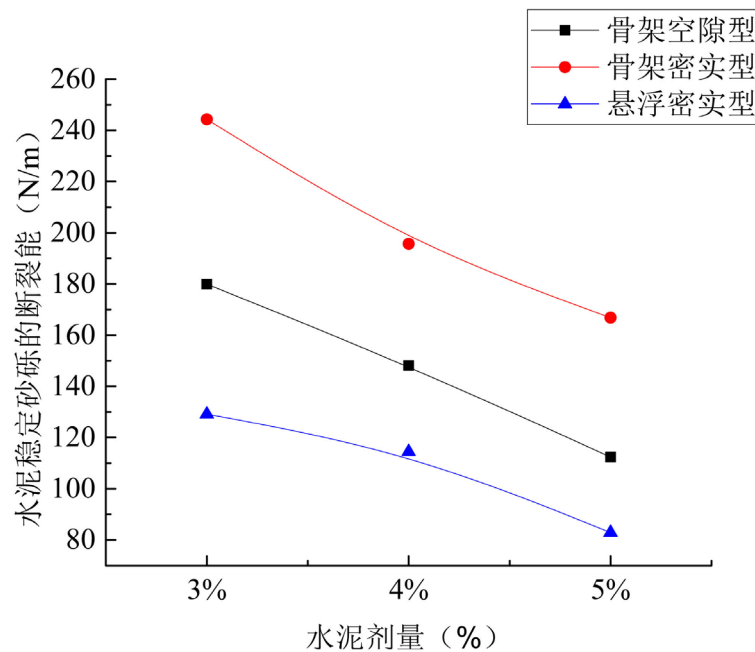


Figure 4. Fracture energy of cement stabilized gravel (N/m)

图 4. 水泥稳定砂砾的断裂能(N/m)

级配的材料抵抗裂缝破坏的能力更强。

断裂能反应裂缝扩张单位面积所需要的能量，而相同水泥剂量下骨架密实型级配的断裂能最大，随着水泥用量的增大，各级配型型的断裂能下降明显，较低剂量时，断裂能大。骨架密实型与骨架空隙型级配剂量 - 断裂能曲线斜率接近，悬浮密实型曲线斜率略缓。可见，在当前剂量水平，随着剂量的增加抗断裂的能力降低，即，不宜通过提高水泥剂量的方式来提高抗开裂性能。

此外，考虑干缩和温缩，水泥剂量不宜过大。

#### 4.4. 级配类型选择和水泥合理剂量的确定

通过对水泥稳定砂砾的常规性能和抗裂性能分析，可以看出，水泥稳定砂砾的无侧限抗压强度、抗弯拉强度、断裂韧度以及断裂能在相同的水泥用量条件下，骨架密实型的水泥稳定砂砾的性能最优。水泥稳定砂砾的无侧限抗压强度、抗弯拉强度、断裂韧度随水泥剂量的增大而增大，而断裂能则相反。

分析可知，同一级配类型，水泥用量在 4% 左右时，既可以保证无侧限抗压强度、抗弯拉强度满足要求，又可以保证较高的水泥稳定砂砾的断裂韧度与断裂能。

## 5. 结论

1) 可采用弯拉强度以及断裂韧度、断裂能指标分析水泥稳定砂砾的抗裂性能，进行抗开裂水泥稳定砂砾的配合比设计。

2) 通过水泥稳定砂砾的无侧限抗压强度、弯拉强度以及断裂韧度、断裂能分析，三种典型级配性能存在显著差异，骨架密实型水泥稳定砂砾的性能最优。

3) 随着水泥剂量的提高，水泥稳定砂砾的无侧限抗压强度、弯拉强度以及断裂韧度均提高，而断裂能随剂量的增加而减小。

4) 在不影响水泥稳定砂砾的其他性能条件下，采用 4% 左右的水泥用量，骨架密实型的结构，可以保证水泥稳定砂砾具备较好的抗裂性能。



## 参考文献

- [1] 张宏君, 王选仓, 李振霞. 水泥稳定碎石断裂性能研究[J]. 公路, 2008(10): 85-90.
- [2] 王宏畅, 黄晓明, 傅智. 半刚性基层材料路用性能的试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 45-49.
- [3] 吴倩. 控制横向开裂率的沥青路面结构组合研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [4] 陈亮亮. 水泥稳定砂砾材料标准击实方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [5] 张晓东, 任旭春. 混凝土开裂过程扩展有限元数值模拟[J]. 公路交通技术, 2010(3): 81-85.
- [6] Elguedj, T., Gravouil, A. and Combescure, A. (2006) Appropriate Extended Functions for X-FEM Simulation of Plastic Fracture Mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **195**, 501-515.  
<https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.02.007>
- [7] 江建鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)