

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.016

引用格式:雷丹,杨晚生,李舒.工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石基层材料抗裂性能数值模拟分析[J].公路与汽运,2024,40(5):95-99+128.

Citation:LEI Dan, YANG Wansheng, LI Shu. Numerical simulation analysis of crack resistance performance of large particle size gravel base material stabilized with industrial solid waste powder coal ash/slag powder[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(5): 95-99+128.

# 工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石基层材料 抗裂性能数值模拟分析\*

雷丹<sup>1</sup>, 杨晚生<sup>2</sup>, 李舒<sup>3</sup>

(1.宜春市公路事业发展中心 明月山分中心, 江西 宜春 336000; 2.江西宜春市政交通建设有限公司, 江西 宜春 336000; 3.湖南民道工程检测有限公司, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为消除和减少半刚性基层导致的反射裂缝,采用粉煤灰和矿渣粉替代水泥,设计工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石基层材料,并建立其细观断裂模型,运用 ABAQUS 有限元软件进行抗压及干缩试验数值模拟分析。结果显示,与常规水泥稳定碎石相比,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石基层材料具有较好的抗压能力,且开裂路径多样,其系统总能量较小,具有较好的抗裂性能,可减少反射裂缝,且用粉煤灰和矿渣粉替代水泥具有环保意义。

**关键词:**公路;大粒径碎石;粉煤灰;矿渣粉;抗裂性能;半刚性基层;反射裂缝

中图分类号:U418.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0095-05

水泥稳定碎石基层以其较大的抗拉强度和抗疲劳强度、良好的水稳定性、工程造价较低等优点在道路建设中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。由于水泥对温度和湿度较敏感,水泥稳定碎石基层易出现干缩裂缝和温度收缩裂缝,且在行车荷载和自然环境作用下基层裂缝会逐渐扩展到面层,形成反射裂缝<sup>[2-4]</sup>。

为解决半刚性基层易缩裂的问题,研发了水稳填充大粒径碎石材料,该材料既保留了传统半刚性基层材料与柔性基层材料的优点,还能克服两者的不足,从而减少裂缝。张登良等研究发现二灰集料类基层的抗裂性能最优,同时降低水泥用量可提高基层的抗温缩及干缩能力<sup>[5]</sup>。孙兆辉等提出水泥用量为 5% 左右时,水泥稳定碎石的干缩应变最小,也可使用减水剂来改善水泥稳定碎石的收缩性能<sup>[6]</sup>。赵瑞敏等的研究表明相较于悬浮密实结构和骨架空隙结构,骨架密实结构的抗裂性能、水稳定性及抗冲刷性能较好<sup>[7]</sup>。朱展利用 ABAQUS 有限元软件进行加载数值模拟试验和温缩开裂模拟试验,结果表明水稳填充大粒径碎石基层材料具有优良的抗压、

抗剪力学性能<sup>[8]</sup>。雷力通过试验得到了水稳填充大粒径碎石材料在破坏时的裂缝扩展规律,并采用双线性黏聚带本构模型对裂纹产生、扩展及材料损伤能量的耗散过程进行仿真分析,结果显示,随着粗骨料颗粒尺寸的增大,界面黏结强度提高,材料整体承载力和抗裂性能增强<sup>[9]</sup>。本文用工业固废粉煤灰和矿渣粉替代水泥用于基层,建立工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石细观断裂模型进行干缩试验和抗压试验数值模拟,分析工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石的抗裂性能,研究其抗裂机制。

## 1 基于 ABAQUS 的二维细观断裂模型

ABAQUS 是一款具有很强工程仿真能力的有限元软件,它包含丰富的可模拟任意几何形状的单元库、可模拟典型工程材料性能的单元库,除可求解大量结构性问题外,还可模拟其他工程中诸多问题,对各种类型与形状材料的受力变化也具有很好的模拟效果。靳佩佩等借助 ABAQUS 有限元软件建立三维有限元模型,模拟分析了水泥稳定碎石基层早

\* 基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2022H0010;2023H0025)

期温度场及收缩应变变化规律<sup>[10]</sup>。田建勃等通过对 5 种不同厚度碎石垫层在高应力下的室内模型试验和有限元分析,得出不同厚度碎石垫层荷载与沉降变形、竖向应力与侧向约束力都近似呈线性变化<sup>[11]</sup>。ABAQUS 软件中有一个简单的内聚力模型,可较准确地模拟材料的断裂行为<sup>[12]</sup>。

1.1 二维细观断裂模型的基本原理和假设

目前已有许多关于准脆性材料细观断裂模型的研究<sup>[13-15]</sup>,大多是将混合料作为粗集料和胶凝材料组成的复合材料。本文以此为基础,将工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石当作单一粒径的粗集料和填充料所组成的两相复合材料,通过 ABAQUS 软件将内聚力单元嵌入两者界面处,建立二维平面数值模型。

1.2 二维细观断裂模型的建立方法和参数设定

大粒径碎石大部分为棱角分明的多边形,故将由软件生成的随机多边形视为其平面图。为确定一定尺寸二维平面内各粒径粗集料的数量,同时又不偏离实际情况,将大粒径碎石、填充料体积组成比例视为面积比。根据振实间隙率和堆积间隙率的平均值确定大粒径碎石用量,由表 1 得到工业固废稳定大粒径碎石的体积组成比例为粗集料(大粒径碎石):细集料(填充料)=55:45,即大粒径碎石的面积占比为 0.55。

表 1 大粒径碎石的密度和体积指标

| 检测指标                        | 检测结果 | 检测指标    | 检测结果 |
|-----------------------------|------|---------|------|
| 堆积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )  | 1.36 | 振实间隙率/% | 40.7 |
| 振实密度/(g·cm <sup>-3</sup> )  | 1.59 | 堆积间隙率/% | 49.3 |
| 毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 2.68 |         |      |

参考文献[16]中方法,先按照大粒径碎石的筛分结果(见表 2)统计各粒径的颗粒数,然后测量不规则多边形大粒径碎石的边长最大值和最小值,根据边长测量值将大粒径碎石简化为当量圆计算面积范围。大粒径碎石中各粒径的当量圆面积见表 3。

表 2 大粒径碎石筛分结果

| 筛孔尺寸/mm | 质量通过率/% | 筛孔尺寸/mm | 质量通过率/% |
|---------|---------|---------|---------|
| 73.0    | 100.0   | 31.5    | 5.6     |
| 63.0    | 88.4    | 26.5    | 0.7     |
| 53.0    | 63.2    | 19.0    | 0.0     |
| 37.5    | 13.5    |         |         |

表 3 大粒径碎石中各粒径的当量圆面积

| 粒径范围/mm   | 当量圆面积/mm <sup>2</sup> |       |
|-----------|-----------------------|-------|
|           | 范围                    | 平均值   |
| 63.0~73.0 | 3 117~4 108           | 3 612 |
| 53.0~63.0 | 2 206~3 117           | 2 661 |
| 31.5~53.0 | 1 104~2 206           | 1 655 |

由于大粒径碎石为形状不规则的多面体,直接计算较复杂,以相邻筛孔的面积均值按式(1)计算各粒径范围的集料数量。

$$3\ 612n_1 + 2\ 661n_2 + 1\ 655n_3 = \rho S \quad (1)$$

式中: $n_1$ 为粒径 63.0~73.0 mm 的集料数量; $n_2$ 为粒径 53.0~63.0 mm 的集料数量; $n_3$ 为粒径 31.5~53.0 mm 的集料数量; $\rho$ 为大粒径碎石面积与截面积的比值; $S$ 为试件截面积。

确定一定面积内各粒径范围的集料数量后,按图 1 所示流程将随机生成的粗集料投放至 300 mm×300 mm 试件截面上。

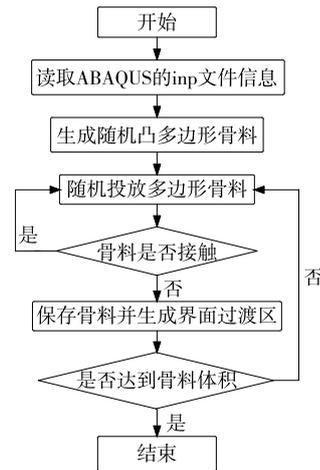


图 1 大粒径碎石随机投放流程

由 ABAQUS 有限元软件生成大粒径碎石和常规水泥稳定碎石数字试件(见图 2)。常规水泥稳定碎石以 31.5~9.5 mm 作为投放集料的控制粒径,级配范围见表 4。

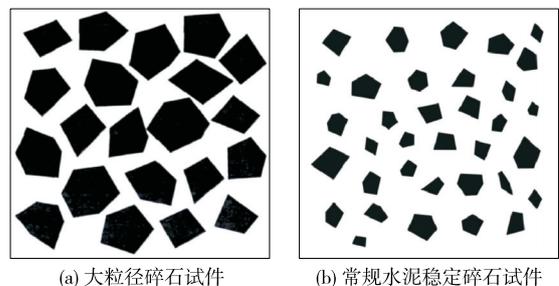


图 2 二维试件

表 4 常规水泥稳定碎石的级配

| 筛孔尺寸/mm | 通过率/% | 级配范围/% | 筛孔尺寸/mm | 通过率/% | 级配范围/% |
|---------|-------|--------|---------|-------|--------|
| 31.500  | 100.0 | 100    | 4.750   | 41.0  | 29~49  |
| 26.500  | 93.2  | 90~100 | 2.360   | 30.0  | 17~35  |
| 19.000  | 85.0  | 72~89  | 0.600   | 12.0  | 8~22   |
| 9.500   | 64.0  | 47~67  | 0.075   | 4.0   | 0~7    |

## 2 数值模拟方法

### 2.1 大粒径碎石试件的几何模型和尺寸

大粒径碎石的最大公称粒径为 73 mm,模型尺寸设为 300 mm×300 mm。建立内聚力模型时,将内聚力界面单元添加到基本单元之间。ABAQUS 软件提供了多种内聚力界面单元以进行裂纹扩展模拟,考虑到内聚力模型方程的兼容性,模型计算过程中沙漏问题,采用四节点内聚力单元(COH2D4)进行二维数值模拟,该单元的每个节点上有两个自由度,可看作在实体模型中加入了预设开裂路径的内聚力层。

### 2.2 抗压试验和干缩试验的边界条件

大粒径碎石材料用作基层时,由于其刚度较小,下卧层的刚度明显大于大粒径碎石基层,会使承受拉应力的层位下移,大粒径碎石基层的受力状态由受拉转变为受压<sup>[8]</sup>。因此,在考虑大粒径碎石材料开裂行为时以受压时开裂为主。

模拟抗压试验时,在模型顶面添加刚性压头、底面添加垫块,压头和垫块均设置为刚体,并在试件底面与垫块接触部分的横向自由度和纵向自由度上设置约束,在顶面压头处设置一个竖直向下的荷载,加载速率为 10 mm/min。模拟加载方式见图 3。

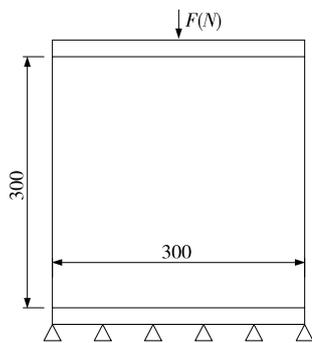


图 3 受压加载示意图(单位:mm)

考虑到干缩和温缩造成的收缩量相同,而 ABAQUS 软件对干缩的湿度无法控制,对干缩试

验的数值模拟通过湿度与温度的换算来进行。模拟干缩试验时,试件尺寸和模拟抗压试件一样,设计温度为 30~-20 ℃,降温时间设为 60 s。在试件左右两边横向和竖向自由度上均设置约束。模拟加载和约束情况见图 4。

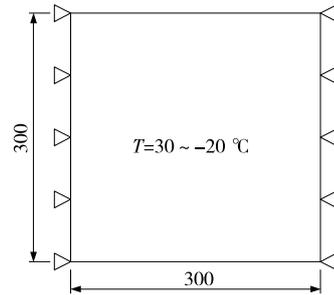


图 4 干缩数值荷载模拟试验的荷载与约束(单位:mm)

### 2.3 材料参数

材料参数参考文献[17-21]中关于内聚力单元与实体单元的材料参数,考虑到文献[17-21]中的材料参数取值是针对水泥混凝土,而水泥混凝土材料的黏结作用强于粉煤灰和矿渣粉材料,在参考文献[17-21]的基础上,对材料参数进行实测,确定模型材料参数(见表 5)。

表 5 模型材料参数

| 参数类型 | 参数名称                          | 材料名称       | 参数值                  |
|------|-------------------------------|------------|----------------------|
| 力学参数 | 弹性模量/MPa                      | 大粒径碎石      | 7 500                |
|      |                               | 填充料        | 2 000                |
|      | 泊松比                           | 大粒径碎石      | 0.25                 |
|      |                               | 填充料        | 0.25                 |
| 热学参数 | 导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ] | 大粒径碎石      | 0.8                  |
|      |                               | 填充料        | 1.1                  |
|      | 比热容/[J·(kg·℃) <sup>-1</sup> ] | 大粒径碎石      | 750                  |
|      |                               | 填充料        | 650                  |
| 变形参数 | 线膨胀系数                         | 大粒径碎石      | 1.0×10 <sup>-5</sup> |
|      |                               | 填充料        | 1.3×10 <sup>-5</sup> |
|      |                               | 大粒径碎石与填充料间 | 0.5×10 <sup>-5</sup> |
| 断裂参数 | 黏结强度/MPa                      | 大粒径碎石与填充料间 | 1.3×10 <sup>-5</sup> |
|      |                               | 填充料与填充料间   | 0.11                 |
|      | 断裂能/(J·m <sup>-2</sup> )      | 大粒径碎石与填充料间 | 30                   |
|      |                               | 填充料与填充料间   |                      |

### 3 抗压试验数值模拟分析

进行工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石试件抗压试验模拟,得到加载位置节点荷载-位移曲线(见图 5)。从图 5 可以看出:荷载-位移曲线大致分为线弹性阶段、应力强化阶段和破坏阶段,断裂峰值荷载为 27 kN,试件破坏时的位移为 0.7 mm。峰值荷载之后,位移从 0.7 mm 增加到 2.5 mm,承载力急剧下降,说明承载能力发生衰减。从断裂荷载峰值来看,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石基层的抗压性能良好,可满足工程使用需要。

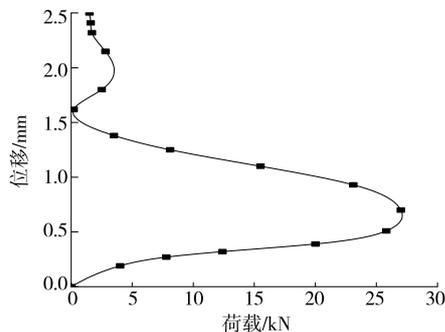


图 5 工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石受压模拟试件荷载-位移曲线

图 6 为工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石试件抗压模拟试验的最终破坏时云图。从图 6 可以看出:开裂路径由试件左边中部开始,沿着大粒径碎石与填充料界面朝右边水平发展,后延伸为 2 条裂缝,最后贯穿整个试件。整体来看,大粒径碎石与填充料界面间的应力较大,大粒径碎石中的应力较小,裂缝不是沿单一方向发展,而是沿着大粒径碎石与填充料界面多路径发展。对常规水泥稳定碎石试件的抗裂模拟结果表明,试件除 1 条斜向主裂缝外,很少有穿越填充料的细裂缝,总体开裂路径较单一。相较于常规水泥稳定碎石基层,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石基层的开裂路径更多样,裂缝发生时,可阻止裂缝向更大化发展,因而可减少基层开裂现象的发生,降低面层发生反射裂缝的概率。

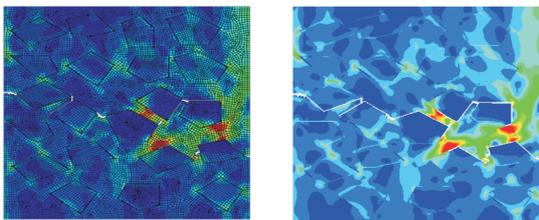


图 6 工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石受压模拟试件完全破坏时云图

大粒径碎石与工业固废粉煤灰/矿渣粉间的黏结力较弱,而大粒径碎石的强度较高,故裂纹易从大粒径碎石与工业固废粉煤灰/矿渣粉间发生;初始裂纹发生后,裂缝的扩展被骨料阻拦,裂缝沿着裂缝的边界扩展,导致裂缝出现在大粒径碎石与工业固废粉煤灰/矿渣粉之间。

综上,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石的断裂峰值荷载达 27 kN,具有良好的抗压性能,且其开裂路径多样,可减少基层开裂现象的发生。

### 4 干缩试验数值模拟分析

对常规水泥稳定碎石进行干缩试验模拟,图 7 为其干缩应力与位移云图。从图 7 可以看出:常规水泥稳定碎石试件 4 个角落的应力最大,由角落向试件中部靠近,应力越来越小,没有约束的上顶面和下底面的应力最小;上顶面和下底面的位移最大,向试件中部靠近,位移越来越小。

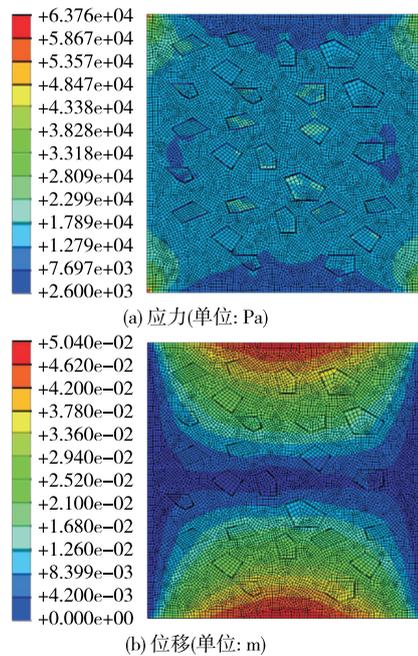


图 7 常规水泥稳定碎石的干缩应力与位移云图

对工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石进行干缩试验模拟,图 8 为其干缩应力与位移云图。从图 8 可以看出:工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石试件四个角落的应力最大,由角落向试件中部靠近,应力越来越小;上顶面和下底面的位移最大,向试件中部靠近,位移越来越小。

对比图 7 和图 8,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石和常规水泥稳定碎石的应力、位移变化规律相同,但前者的应力、位移比后者小。工业固废

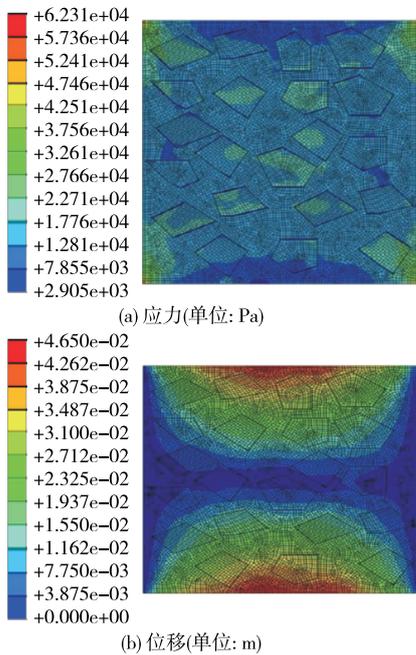


图 8 工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石的干缩应力与位移云图

粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石能更好地释放应力,其抗裂性能优于常规水泥稳定碎石,可有效减少基层反射裂缝的发生。

模型的系统总能量能反映材料的稳定程度,能量越低,材料越稳定。从运算后的历程变量中提取系统总能量,两种基层材料总能量随时间的变化见图 9。从图 9 可以看出:随着时间的增长,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石与常规水泥稳定碎石的系统能量增大,但其系统总能量有所不同,前者的系统总能量在 60 s 时为 16.3 N·m,后者的系统总能量在 60 s 时为 26.7 N·m,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石比常规水泥稳定碎石更稳定。

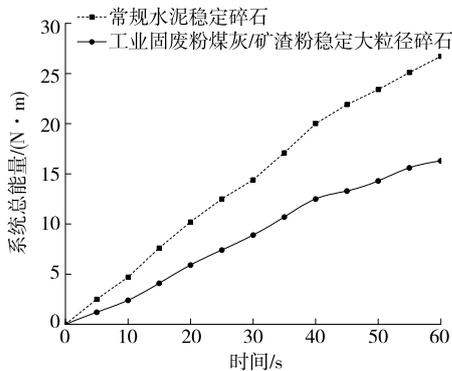


图 9 系统能量变化曲线

综上,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石的应力和位移小于常规水泥稳定碎石,且同一时间

的系统总能量更小,工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石比常规水泥稳定碎石更稳定,且具有优良的抗裂性能。

### 5 结论

(1) 工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石利用粉煤灰和矿渣粉替代水泥,具有环保意义,其抗裂性能良好,整体也更稳定,可降低裂缝发生概率。

(2) 工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石的抗压断裂峰值荷载达 27 kN,具有良好的抗压性能,且其开裂路径多样,可减少基层开裂现象的发生。

(3) 工业固废粉煤灰/矿渣粉稳定大粒径碎石的干缩应力与应变值小于常规水泥稳定碎石,且其系统总能量更小,性能更稳定,具有优良的抗裂性能。

### 参考文献:

- [1] 陈泽生.旧路半刚性基层性能评价[D].南京:东南大学,2015.
- [2] 郑灿伟,杨树人,王文宾.沥青路面唧浆病害诊断与分析[J].公路与汽运,2022(5):62-66.
- [3] ADASKA W S,LUHR D R.Control of reflective cracking in cement-stabilized pavements[C]//5th International RILEM Conference.Limoges,France,May,2004.
- [4] 陈汝筠.粗粒式应力吸收层在半刚性基层沥青路面中的应用研究[J].公路与汽运,2022(4):51-53.
- [5] 张登良,郑南翔.半刚性基层材料收缩抗裂性能研究[J].中国公路学报,1991,4(1):16-22.
- [6] 孙兆辉,许志鸿,吴美发.考虑收缩因素的水泥稳定碎石级配组成设计研究[J].公路交通科技,2006,23(3):15-19.
- [7] 赵瑞敏,刘文俊,杨占云,等.半刚性基层收缩开裂特性研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(9):109-112.
- [8] 朱展.水稳填充大粒径碎石基层材料应用研究[D].南京:东南大学,2017.
- [9] 雷力.大粒径集料嵌锁型材料的防裂扩展机理及应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [10] 靳佩佩,高俊启,安平,等.水泥稳定碎石早期收缩应变有限元分析[J].南京航空航天大学学报,2018,50(6):866-870.
- [11] 田建勃,韩晓雷,于清桦,等.碎石垫层强度与变形特性试验研究和有限元分析[J].岩土力学,2014,35(1):83-89+97.