

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.135



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于离散元法的水泥稳定碎石微裂细观机理研究

刘子龙, 马士宾, 贺苗, 梁栋, 牛宗岳
(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:为探究水泥稳定碎石微裂细观演化机理,构建了细观非均质水泥稳定碎石数值模型,结合室内无侧限抗压强度试验和单轴压缩数值试验反演出模型细观参数,引入微裂隙网络研究不同裂隙参数对微裂程度的影响,分析不同裂隙数目下系统能量演化规律。结果表明:数值模拟与室内试验结果基本吻合,构建的水泥稳定碎石离散元模型可较为准确地表征材料细观破坏特征;微裂损伤是二次振动加载后裂隙宽度增大和裂隙数目增多共同作用的结果,裂隙密度对水泥稳定碎石微裂程度起决定性作用;裂隙密度增加,材料储存弹性应变能的能力减弱,峰值点水泥稳定碎石材料的输入总能量降低。验证了早期微裂对于降低收缩应力的积极作用,揭示了水泥稳定碎石材料微裂力学特征和细观机理。

关键词:水泥稳定碎石;无侧限抗压强度;离散元法;微裂技术;细观机理

中图分类号:TU521.2;U414 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)01-0196-09

Micro-cracking mechanism of cement stabilized macadam based on discrete element method

LIU Zilong, MA Shibin, HE Miao, LIANG Dong, NIU Zongyue

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: To investigate the micro-cracking evolution mechanism of cement stabilized macadam, a numerical model of mesoscale heterogeneous cement stabilized macadam was established. The microfracture network was introduced into the fine-scale inhomogeneous model and the relevant parameters were obtained using unconfined compressive strength tests. Then, the effect of different microfracture parameters on the micro-cracking degree was explored according to the displacement variation of particles in the model under vibration load. Finally, the energy evolution law of the system with different microfracture numbers was further analyzed. The results indicate that the numerical simulation results are in good agreement with the laboratory test results, the discrete element model of cement stabilized macadam can accurately characterize the mesoscopic failure characteristics of materials. Micro-cracking damage after the secondary vibration load together with the increase of microfracture width and microfracture number as a result. The microfracture density plays a decisive role in the degree of microcrack for cement stabilized macadam. With the increase of the microfracture number, the elastic strain

收稿日期:2022-07-25

基金项目:国家自然科学基金(51978236);天津市交通运输科技发展项目(2022-01)

作者简介:刘子龙(1997-),男,主要从事道路结构和材料研究,E-mail:lzl9706@163.com。

马士宾(通信作者),男,教授,E-mail:marotolo@126.com。

Received: 2022-07-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978236); Tianjin Transportation Science and Technology Development Project (No.2022-01)

Author brief: LIU Zilong (1997-), main research interests: road structure and materials, E-mail: lzl9706@163.com.

MA Shibin (corresponding author), professor, E-mail: marotolo@126.com.

energy storage capacity of the material decreases, and the total energy input of the cement stabilized macadam decreases. This study has proved that the positive effect of early micro-cracking on shrinkage stress reduction. In addition, the mechanical characteristics and fine mechanism of micro-cracking in cement stabilized macadam materials are revealed.

Keywords: cement stabilized macadam; unconfined compression strength; discrete element method; micro-cracking; meso mechanism

水泥稳定碎石是一种由级配碎石、水和水泥等材料遵循嵌挤原理,经压实后形成的道路基层复合材料。作为水泥基材料,因水泥稳定碎石内部温度、水分含量变化,材料早龄期产生的拉应力极易超过抗拉强度而发生干缩温缩开裂^[1]。收缩裂缝出现后,不仅会向上反射导致面层出现横向裂缝,而且将使水分通过裂缝进入路面结构,加快外部侵蚀介质,最终导致路面结构损坏。

微裂技术^[2-4]通过二次振动碾压使水泥稳定碎石基层内部形成微裂纹,从而降低水泥水化带来的不利收缩应力影响,有效预防半刚性基层的收缩开裂。该技术最初由 Litzka 等^[5]提出并将其应用到实际工程中,通过现场检测发现,微裂避免了基层材料自身出现宽大裂缝,同时沥青面层也并未出现较明显反射裂缝。Mitichekettab 等^[6]认为水泥稳定碎石微裂时造成的裂缝是可控的,并用有限元力学软件进行了力学特征分析。Duan 等^[7]利用振动压实法制备了骨架密实结构水泥稳定碎石试件,分析了微裂程度发展过程中材料的力学、干缩以及抗裂性能,并利用 CT 图像对微裂机理进行了初步表征。张静等^[8]全面分析了悬浮密实结构水泥稳定碎石微裂损伤和愈合性能,采用体视显微镜成像对水泥稳定碎石微裂自愈机理进行了量化分析。赵晓康等^[9]将离散元法用于研究具有微裂隙的水泥稳定碎石材料细观开裂行为,发现模型能够很好地表征水泥稳定碎石材料的细观开裂特征。目前,关于水泥稳定碎石微裂技术的研究多限于微裂效果及宏观力学性能变化规律方面,而微裂过程内部细观力学响应及规律无法通过常规室内实验进行揭示。

笔者在室内试验的基础上,运用 PFC2D 离散元程序和随机算法构建细观非均质水泥稳定碎石数值模型,借助单轴压缩试验反演出模型细观参数。引入微裂隙网络研究不同裂隙参数对微裂程度的影响,分析不同裂隙数目下系统能量演化趋势和规律。

1 室内试验

1.1 水泥稳定碎石试件制备

选用的水泥为唐山生产的“玉丰”牌 P·O 42.5

普通硅酸盐水泥,水泥掺量为 5%。粗、细集料取自天津市西青某料场,集料粒径分为 10~20 mm、5~10 mm、0~5 mm 3 档。考虑到集料的尺寸效应精度要求和离散元模型的计算量,采用集料为《公路路面基层施工技术细则》(JTJ/T F20—2015)中推荐的 C-B-2 型水泥稳定级配碎石级配类型,根据筛分结果按各筛孔的用量逐级回配,得到的合成级配如表 1 所示。

表 1 水泥稳定碎石级配

Table 1 Cement stabilized macadam gradation

筛孔规格/mm	碎石级配/%		
	设计级配	级配上限	级配下限
19	100	100	100
16	90.5	93	88
9.5	61.5	72	59
4.75	39.8	45	35
2.36	27.1	31	22
0.6	11.9	15	8
0.075	3.6	5	2

按照重型击实方法计算得到水泥稳定碎石试样最佳含水量为 3.9%,最大干密度为 2.248 g/cm³。采用振动击实仪成型 $\phi 100$ mm \times 100 mm 的圆柱形试件,平行试件为 6 个,将其编号为 I~VI,选用水泥稳定碎石试件振动成型参数为:激振力 6 800 N,静压力 1 900 N,振动频率 28 Hz。经试验验证后选取振动时间为 20 s,振动成型后试件可达到 98% 压实度的要求。

1.2 无侧限抗压强度试验

将成型后的试件脱模后放入标养室养生,养生温度为 (20 \pm 2) $^{\circ}$ C,相对湿度为 95%。在养生期第 2 天取出试件采用万能试验机进行无侧限抗压强度测试,控制压力机加载速率为 1 mm/min,加载直至试件破坏,无侧限抗压强度试验结果如表 2 所示。计算可知,无侧限抗压强度均值为 4.68 MPa,变异系数为 9.35%,满足规范规定要求。

试件的无侧限抗压强度 R_c 按式 (1) 计算。

$$R_c = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: P 为试件破坏时的最大压力, N; D 为试件的直径, mm。

表 2 试件 I~VI 抗压强度试验结果

Table 2 The test results of specimens from I to VI

MPa					
试件 I	试件 II	试件 III	试件 IV	试件 V	试件 VI
4.80	4.62	4.71	4.68	4.52	4.77

2 离散元模型与参数反演

2.1 二维数字试件的生成

水泥稳定碎石试件成型过程中,由于填料的不均匀性以及人工振捣的随机性^[10],导致振动成型后每个试件中粗、细集料的分布状态存在很大差异,且对试件进行切割后,试件将不能再用于单轴压缩试验进行参数标定。因此,首先通过数字图像处理技术获得各档粒径的面积占比,然后结合随机多边形法生成等面积不规则粗集料;接着采用直径 1 mm 的基本颗粒单元 ball 在虚拟试件中规则排列,通过“ball group”命令对颗粒进行圈定分组,多边形内部的颗粒为集料,多边形外部的颗粒为水泥砂浆;由于水泥稳定碎石在最佳含水量时进行压实后一段时间内的湿空隙率在 4% 左右,故按照一定的空隙分布规律随机删除水泥砂浆单元,形成二维空隙相以模拟 4% 的空隙率^[11]。所生成的数字试件计算模型尺寸为 100 mm×100 mm,建立的水泥稳定碎石离散元模型如图 1 所示。

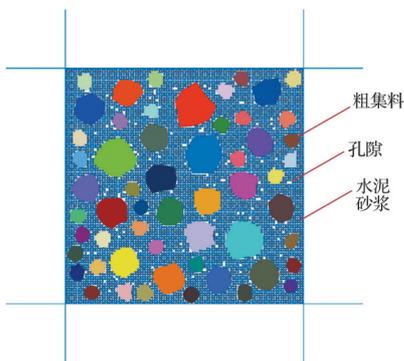


图 1 水泥稳定碎石离散元模型

Fig. 1 DEM model of cement stabilized macadam

2.2 离散裂隙网络

水泥稳定碎石材料采用振动击实成型及微裂时,材料内部产生大量随机裂隙会使其在力学行为上表现为非均匀和各向异性。采用离散裂隙网络 (DFN) 来表征成型初始细观裂隙和微裂隙。参考已有研究^[9],假定裂隙的中心点坐标、裂隙倾角和裂隙长度服从均匀分布,裂隙的长度范围为 1~3 mm,但生成裂隙网络分布在粗骨料和水泥砂浆基体上,而粗骨料上存在裂隙是不合理的,必须剔除该部分裂隙。首先对每个裂隙及球体进行遍历,然后采用“dfn. deletefracture”命令删除集料内部裂隙,

最终得到只存在于水泥砂浆中的裂隙网络。

设置初始裂隙密度 P_{21} (单位面积累计裂隙长度) 为 10 m/m^2 , 表征水泥稳定碎石试样在振动成型过程中生成的裂隙。设定微裂前试件的初始裂隙宽度为 0.1 mm, 通过设定影响范围命令词“dist”来实现。具有裂隙的水泥稳定碎石试样模型如图 2 所示, 其中红色线段为初始裂隙。

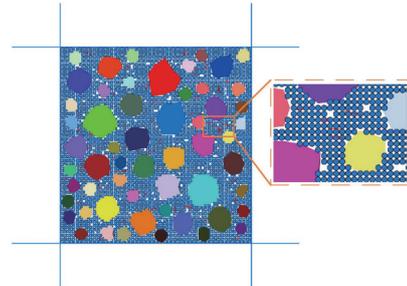


图 2 包含初始裂隙水泥稳定碎石

Fig. 2 Cement stabilized macadam with initial fracture

2.3 细观模型参数标定

在建立水泥稳定碎石二维离散元模型的基础上, 还需选择合适的颗粒接触类型^[12], 并确定模型中各项细观参数。在离散元模型中, 涉及水泥砂浆内部单元、集料内部单元、集料单元与水泥砂浆单元以及砂浆与裂隙间的接触黏结。采用平行黏结模型模拟水泥砂浆内部单元、集料内部单元、集料单元与水泥砂浆单元的接触状态, 采用光滑节理模型表征裂隙与砂浆的接触行为。涉及的主要模型参数为线性接触模量 E_c 、平行黏结模量 \bar{E}_c 、线性接触和平行黏结刚度比 \bar{k}_n/\bar{k}_s 、法向强度 $\bar{\sigma}_c$ 和切向强度 $\bar{\tau}_c$ 。根据虚拟单轴压缩试验进行材料细观参数的确定, 通过虚拟试样的单轴抗压强度和弹性模量, 调整各细观参数, 进而与室内试验的宏观力学特性匹配。

从室内无侧限抗压强度试验结果发现, 试件 IV 无侧限抗压强度值与无侧限抗压强度均值相同, 因此, 以试件 IV 的应力-应变曲线为标定对比曲线。与室内无侧限抗压试验一致, 采用位移加载的方式对试件进行加载。但若将墙体速度设置为 1 mm/min, 受限于计算机运算效率, 加载难以实现。经调试发现, 加载速率小于 0.2 m/s 时, 足以保证试样处于静态加载, 因此, 赋予上下墙体以 0.05 m/s 的速度进行竖向加载。当应力下降到峰值强度后的 70% 时, 停止加载。由于反演结果通常不唯一, 模拟过程中不断调整颗粒细观力学参数, 当标定后的参数组合值所表现出的宏观力学特征与室内试验结果基本吻合时则完成标定。最终得到的模型细观参数如表 3 所示。

表 3 细观力学参数标定结果

Table 3 The calibration results of meso-mechanical parameters

接触模型	线性接触有效模量/Pa	线性接触刚度比	平行粘结有效模量/Pa	平行粘结刚度比	粘结强度/Pa	
集料内部	55×10^9	2.5	55×10^9	2.5	60×10^6	
砂浆内部	平行粘结	0.74×10^8	3.0	0.74×10^8	3.0	2.6×10^6
砂浆-集料	0.74×10^8	3.0	0.74×10^8	3.0	1.74×10^6	
裂隙	光滑节理	0.74×10^8	3.0			
边界	线性接触	55×10^9	2.5			

图 3 为试件宏观破坏与细观模拟破坏对比,可见二者破坏模式基本一致。图 4 为室内试验和数值模拟得到的应力-应变曲线对比图,从图中可以看出:数值模拟的应力-应变曲线接近室内试验的曲线,室内试验测得水泥稳定碎石试件的无侧限抗压强度为 4.68 MPa,数值模拟获得的水泥稳定碎石试件的最大应力为 4.64 MPa,相对误差为 0.9%,构建的水泥稳定碎石离散元模型可用于下一步的数值模拟分析。



图 3 宏观破坏与数值模拟破坏形态对比

Fig. 3 Comparison of macroscopic and mesoscopic damages

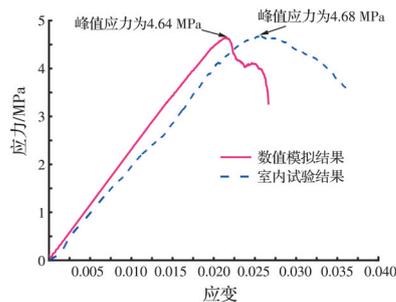


图 4 室内试验与数值模拟试样本构曲线对比

Fig. 4 Comparison of sample structure curves

3 微裂细观数值试验与机理分析

3.1 微裂加载方法及加载参数

以往通过墙体模拟正弦加载这种模式虽然接触力是正弦力,但实际模型中因加载装置自身质量的影响,赋予颗粒集合振动力有一个较长的响应过程,并不能完整体现实际响应过程。笔者基于平行黏结颗粒的振动与墙体施加速度相结合实现持续振动荷载进行微裂,其原因是颗粒块在振动过程中的完整性使整个颗粒块体以较强的粘结力结合在

一起,整个块体相当于刚体,不会在振动荷载作用下发生柔性变形,同样可以实现模拟整个颗粒系统振动加载完整过程。

在成型具有微裂隙的单轴压缩试样的基础上,删除顶面墙体,并在原墙体位置生成颗粒簇“clump”,作为加载装置,如图 5 所示。除此之外,在模拟过程中,赋予两侧墙体以较小围压从而模拟试模对试件的约束作用。

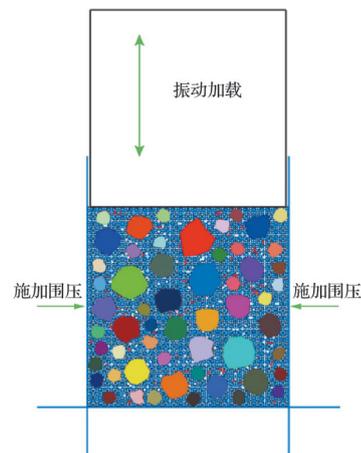


图 5 水泥稳定碎石微裂振动模型

Fig. 5 Micro-cracking model of cement stabilized macadam

3.2 振动荷载下颗粒瞬时状态分析

室内试验对具有初始强度的水泥稳定碎石试件进行二次振动微裂,钢制夯在激振器带动下在试件表面垂直振动,压力波自上而上传播。随着振动时间的延长,水泥砂浆颗粒间自由水分子减少,粘结力逐渐减弱,最终导致水泥砂浆颗粒出现剥落,试件内部产生裂隙。对水泥稳定碎石数值试件施加简谐振动力,在尝试加载 5 个周期后,发现试样并没有发生破坏,主要原因可能包括几个方面^[13-15]:一是持续的激振力逐渐劣化水泥砂浆颗粒单元间的粘结强度及水泥砂浆胶结料与集料的界面粘结强度;二是具有初始强度的水泥稳定碎石试样为密实结构,要完全破坏这种结构使颗粒出现迁移或漫游需要更高的振动强度,甚至已经超出了可用的振动参数范围;另外,上部的加载板一定程度上限制了试样的体积膨胀,对于振动板在下部的试验则没有这样的限制。若延长振动时间对数值模型进行加

载并不会对分析结果产生根本性的变化,而且会使计算时间大大增加。

为此,对水泥稳定碎石模型尝试加载 1/2 周期,将加载过程中颗粒沿深度方向的位移变化情况作为投放微裂隙的依据。加载过程中每 1/8 周期保存一次位移云图,如图 6 所示。从图 6 可见,位移云图出现明显颜色分层现象,加载板下方颗粒的位移量从上到下呈衰减趋势,说明靠近振源的颗粒受到的激发更大,而由于上部传来的能量大部分被颗粒间的碰撞和摩擦作用消耗,试样下部激发逐渐耗尽。加载 1/4 周期,加载力初次达到峰值时,颜色分层最为明显。据此可将振动击实对试件的影响作用分为 3 个区域,即微裂振动荷载对试件上部 0~25 mm 内的颗粒影响最大,该部分颗粒位移均值达到了 $2.65 \times 10^{-4} \text{mm}$;其次是试件中部 25~70 mm 内的颗粒,上部颗粒位移变化量约为中部颗粒的 1.6 倍;试件下部 70~100 mm 内颗粒受影响最小,位移均值仅为上部的 18.87%。

3.3 微裂隙参数对抗压强度的影响

损伤变量是用以描述材料或结构劣化程度的抽象概念^[16],反映材料工程性质劣化的不可逆过程。微裂作为一种特殊的人为引入损伤过程,通过损伤变量亦可对其程度进行描述。将微裂程度定义为无侧限抗压强度下降百分率,保持裂隙的其他参数不变,只改变试件上部和中部的裂隙参数值,分析微裂后水泥稳定碎石材料内部裂隙宽度和裂隙数目与抗压强度的关系。

对水泥稳定碎石进行微裂,初始微裂隙宽度增大的同时也会萌生微裂隙。通过增大初始裂隙宽度和预制新的微裂隙来表征微裂荷载作用下水泥稳定碎石内部的裂隙状态,依据振动击实对试件内部颗粒影响程度,将试件上部增大的裂隙宽度及增加的新裂隙数目取试件中部的 1.6 倍。具体取值如表 4 所示,为了便于分析,将裂隙宽度变量简记为

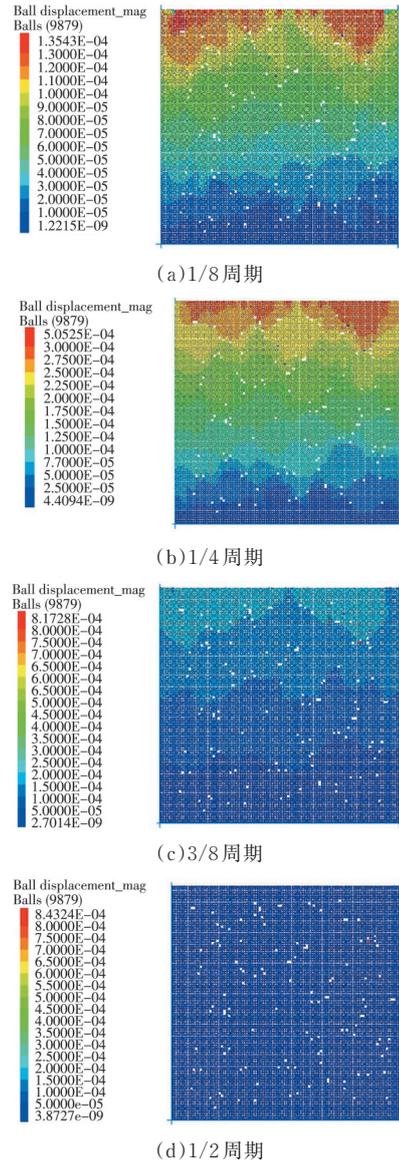


图 6 振动加载过程颗粒位移云图

Fig. 6 Clouds of particle displacement during the vibration loading

X_1 、裂隙数目简记为 X_2 ,将不同高度范围内的裂隙参数初始值记为 X_{1i} 和 X_{2i} 。对水泥稳定碎石细观模型进行单轴加载以观察不同裂隙参数下试件的细观裂隙发展过程。

表 4 微裂隙参数取值

Table 4 Values of microcrack parameters

裂隙参数	试件高度/mm	初值	微裂后裂隙参数					
			A	B	C	D	E	F
宽度 $X_1/10^{-3} \text{m}$	0~25	X_{11}	$1.6 X_{11}$	$2 X_{11}$	$2.4 X_{11}$	$2.8 X_{11}$	$3.2 X_{11}$	$3.6 X_{11}$
	25~70	X_{12}	X_{12}	$1.25 X_{12}$	$1.5 X_{12}$	$1.75 X_{12}$	$2 X_{12}$	$2.25 X_{12}$
数目 X_2	0~25	X_{21}	$X_{21}+16$	$X_{21}+24$	$X_{21}+32$	$X_{21}+40$	$X_{21}+48$	$X_{21}+56$
	25~75	X_{22}	$X_{22}+10$	$X_{22}+15$	$X_{22}+20$	$X_{22}+25$	$X_{22}+30$	$X_{22}+35$

图 7 为不同裂隙宽度和新增裂隙数目下试样单轴压缩应力-应变曲线。对比图 7(a)、(b)可见,微裂后新增裂隙数目比裂隙宽度对抗压强度的影响更

大。随裂隙数目的增多,试样的抗压强度降低,弹性模量减小。A、B 组比未微裂试样的破坏应变大,说明在降低材料强度的同时,增加了材料的破坏允

许形变,C组与未微裂最大应变相同,而D、F组试样最大应变减小,表明过多的微裂隙又同时降低强度和模量。为进一步了解水泥稳定碎石材料微裂后内部裂隙分布情况,提取新生裂隙(见图8)。

由图8(a)可以看出,随着新增裂隙数目的增多,试件上部和中部的裂隙密度差距逐渐变大。试件发生破坏时下部的的新生裂隙减少,上部新生裂隙增多,二次振动微裂时间越长,试件上部由振动产生的新生裂隙数目越多,应力集中区域出现在试件上部。

由图8(b)可以看出,随裂隙宽度的改变,试样开裂路径没有发生大的变化,说明较小宽度裂纹对最终主裂纹的扩展贡献有限。这是由于对于内部细观结构分布一定的材料,其薄弱区域基本确定,裂纹沿着该区域的扩展路径也唯一确定,这与先前的研究结论^[17]较为一致。

总之,微裂作用促使试件内部微裂隙宽度增大、数目增加。微裂后材料无侧限抗压强度的下降是二次振动微裂后裂隙宽度增大和裂隙数目增多共同作用的结果,但对微裂程度大小起决定性作用的是新增裂隙数目,即裂隙密度。

3.4 微裂损伤细观机理分析

物质宏观损伤和破坏均是能量驱动下的微结构损坏与状态失稳现象的外在表现形式。离散元软件通过监测系统内部力和接触情况可以对应变能、胶结能进行追踪和计算;另外,假设在水泥稳定

碎石压缩过程中,整个系统不与外界产生任何热交换以及忽略任何热辐射等能量的释放^[18]。由热力学第一定律,系统的输入总能量 U 全部转化为水泥稳定碎石的弹性应变能 U^e 和损伤耗散能 U^d , U^e 和 U^d 二者之间的关系如式(2)所示,能量密度单位为 J/m^3 。

$$U = U^e + U^d \tag{2}$$

进一步地,由于单轴加载下仅轴向应力做功,单轴压缩试验能量计算公式可以表示为

$$U = \int_0^\epsilon \sigma_1 d\epsilon_1$$

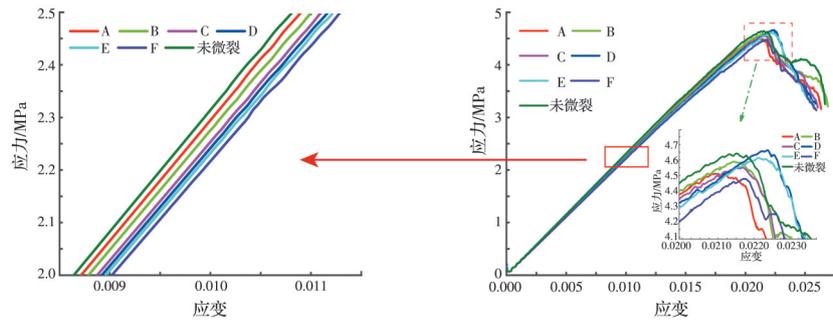
$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1$$

$$U^d = U - U^e = \int_0^\epsilon \sigma_1 d\epsilon_1 - \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1$$

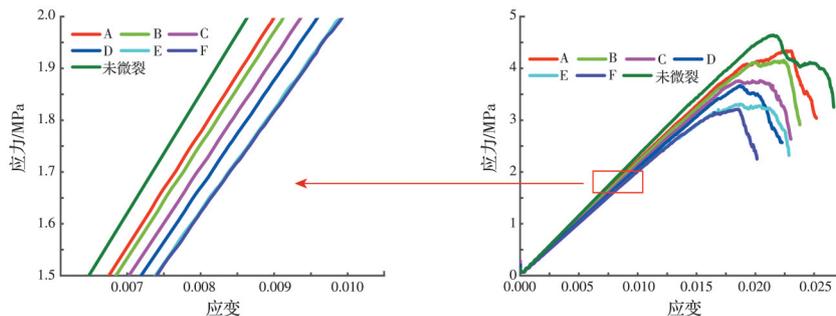
式中: σ_1 、 ϵ_1 分别为应力-应变曲线上各点对应的应力、应变。

裂隙密度的增大是影响水泥稳定碎石微裂程度的主导因素,且当新增裂隙数目为组合A和B时,降低材料强度的同时增加了材料的允许变形。而新增裂隙数目为组合C时最大应变与未微裂试样的最大应变相同,故可将其作为临界点,研究单轴压缩变形破坏过程中的能量演化规律。

由图9可知,加载过程中外界输入边界能逐渐增加,而加载初期试样并不会萌生裂纹,此时材料边界能全部转化成应变能和胶结能,损伤耗散能基本为0,曲线较为平直。在弹性压缩阶段,微裂纹逐



(a) 不同裂隙宽度下试样单轴压缩应力-应变曲线



(b) 不同新增裂隙数目下试样单轴压缩应力-应变曲线

图 7 不同裂隙宽度和新增裂隙数目下试样单轴压缩应力-应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves with different crack widths and numbers

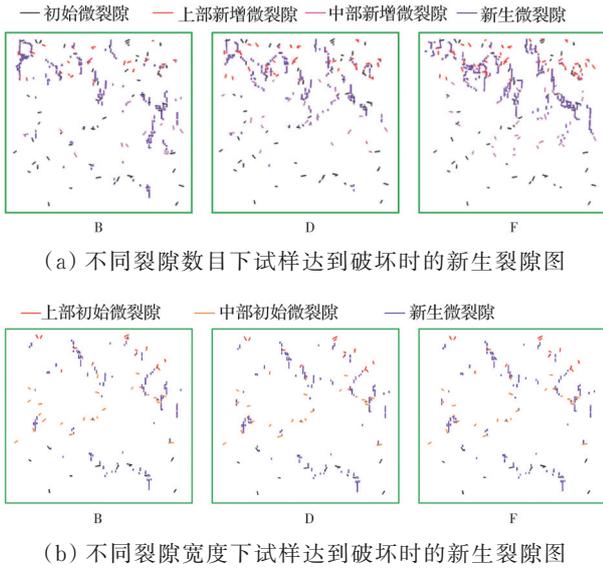


图 8 达到破坏时的新生裂隙图

Fig. 8 Diagrams of new fractures under different crack numbers and widths

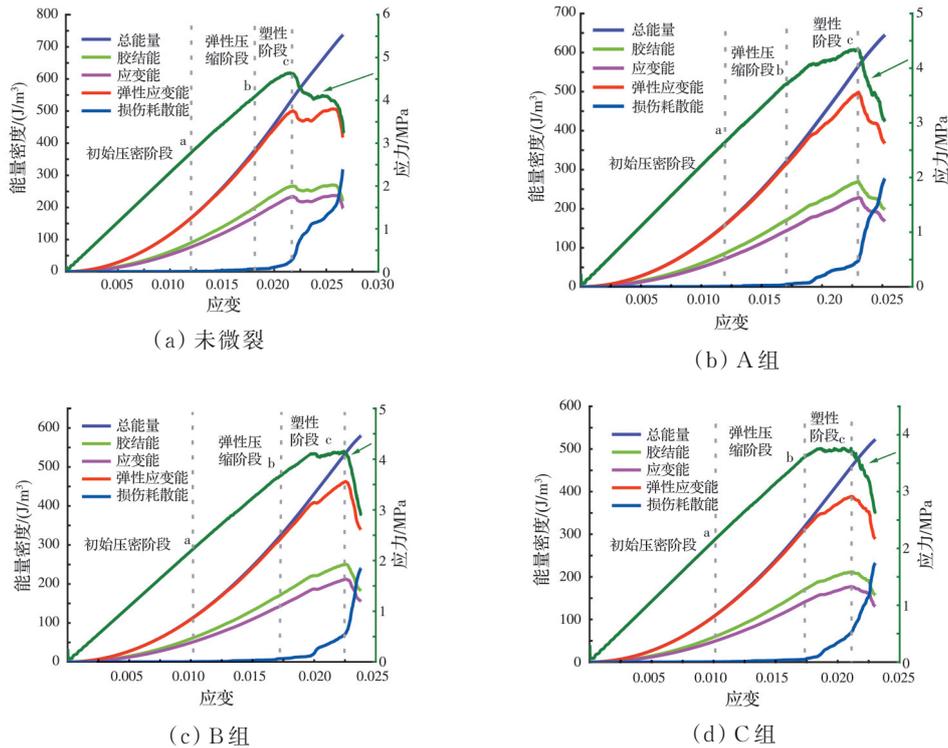


图 9 不同裂隙数目下未微裂、A、B、C 组能量演化曲线

Fig. 9 Energy evolution curves at different crack numbers (unmicro-cracking, A, B and C)

为进一步分析峰值点弹性应变能等指标随裂隙数目的变化规律,统计试样峰值点各能量指标于表 5,可以看出:

1)未微裂试样和不同新增裂隙数目试样峰值点弹性应变能占比分别为 93.37%、88.80%、87.26% 及 85.09%,耗散能占比依次为 6.63%、11.20%、12.74% 及 14.91%。总的来说,峰前输入系统的总能量不断下降,并逐渐转化为水泥稳定碎

石内部的弹性应变能,导致在峰值点的弹性应变能要远高于耗散能。
 渐产生,裂纹扩展所消耗的能量也在逐渐增加。进入峰前塑性阶段后,耗散能急剧增加,微裂纹数量随之快速增长;图 9(a)中未微裂试样在峰后阶段与图 9(b)~(d)能量变化区别明显。A、B、C 组试样轴向应力与总应变能基本同时到达峰值时,试样开始破坏失效。峰后试样裂纹扩展加速,总应变能得以迅速释放,系统耗散能随之持续增加;而未微裂试样在峰后阶段应力-应变曲线则缓慢波动下降,弹性应变能、胶结能和应变能几乎保持直线,说明边界能全部转化为损伤耗散能,使得损伤耗散能的增加也较为快速。试样在加载过程中应力不断增加直至达到峰值点后,储存在裂纹内部的弹性应变能随即达到其储能极限值,继续加载,整个稳定系统中的弹性应变能开始转变,而后以耗散能的形式释放,导致其在应力峰值出现后快速增大,且表现为试样的原始极限应力越大,储能极限就越大,峰值点系统的输入总能量也越大。

石内部的弹性应变能,导致在峰值点的弹性应变能要远高于耗散能。

2)不同新增裂隙数目输入裂隙水泥稳定碎石试样的总能量分别为 563.10、559.75、524.83、456.58 J/m³。不难发现,裂隙数目变化使得试样峰值点处系统输入总能量区别明显。具体趋势表现为不同微裂裂隙数目下系统总能量分别降低 0.60%、6.24% 和 13.00%,即峰值点总能量随裂隙

数目增多而逐渐减小。

表 5 不同裂隙数目试样峰值点能量指标

Table 5 Energy with different crack numbers

组合	弹性应变能		损伤耗散能	
	数值/(J/m ³)	占比/%	数值/(J/m ³)	占比/%
未微裂	525.77	93.37	37.33	6.63
A	497.06	88.80	62.69	11.20
B	457.98	87.26	66.85	12.74
C	388.45	85.09	68.13	14.91

各能量指标随裂隙数目变化情况见图 10。可以看出,试样峰值点弹性应变能和系统总能量变化趋势较为一致,即随着裂隙数目增多,峰值点弹性应变能不断下降,且减小幅度略有增大。不同裂隙数目试样峰值点弹性应变能分别减小了 5.46%、7.86% 和 15.18%。这是由于裂隙数目增加实质上是试样内部缺陷造成的初始损伤增大,而试样储存弹性应变能的能力与内部缺陷密切相关,这使得含裂隙试样峰值点输入总能量逐渐减小。根据能量最低原理^[19],裂隙密度增大,荷载作用下,系统的能量减小,系统趋于更稳定的状态;相似地,水泥稳定碎石受到干缩应力或温缩应力影响时,通过早期微裂使材料内部产生微裂隙,进而释放能量,使水泥稳定碎石基层系统总能量降低,从而能够降低收缩应力,有效防止收缩裂缝的进一步扩展。

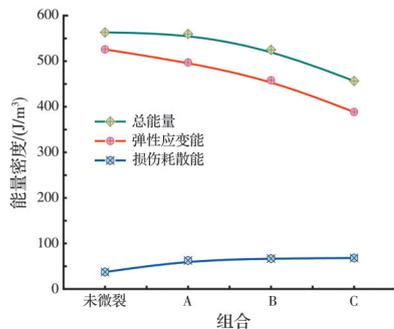


图 10 各能量指标随裂隙数目变化图

Fig. 10 Variation of each energy index with the crack numbers

4 结论

1) 采用离散元和随机算法构建了细观非均质水泥稳定碎石数值模型。结果表明,虚拟试验的应力-应变曲线较接近室内试验的曲线,相对误差仅为 0.9%。

2) 加载板下方颗粒的位移量从上到下呈衰减趋势,据此可将振动荷载对试样的影响分为 3 部分,即对试件上部 0~25 mm 影响最大,中部其次,下部 70~100 mm 颗粒影响最小。

3) 微裂损伤是二次振动后裂隙宽度增大和裂

隙数目增多共同作用的结果,裂隙密度变化对水泥稳定碎石材料微裂程度起决定性作用。

4) 裂隙密度增加,峰值点输入裂隙试样的总能量减小,系统趋于稳定的状态。基于能量演化过程,验证了通过早期微裂对于释放系统总能量,降低收缩应力的可行性,揭示了微裂细观机理。建议水泥稳定碎石基层施工过程中,在养生早期合理选择振动碾压机械参数进行微裂,控制基层裂隙密度进而提高水泥稳定碎石基层的抗裂性能,减少早期收缩裂缝。

参考文献

- [1] 陆清清. 脱硫石膏水泥稳定碎石减缩与增强行为机制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(1): 252-258.
LU Q Q. Strength enhancement and shrinkage reduction mechanism of desulfurized gypsum cement stabilized aggregates [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(1): 252-258. (in Chinese)
- [2] TENG T, FULTON J P. Field evaluation program of cement-treated bases [R]. Research and Development Division, Mississippi State Highway Department, 2004.
- [3] HE M, YU Z, MA S, et al. Autogenous self-healing properties of cement-stabilized macadam after micro-cracking [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121737.
- [4] 高英力, 徐艺坤, 裴甘鹏, 等. 预裂水泥稳定碎石的自愈行为及作用机理[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(2): 261-268, 332.
GAO Y L, XU Y S, PEI G P, et al. Self-healing performance and mechanism of pre-cracking cement-stabilized macadam [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(2): 261-268, 332. (in Chinese)
- [5] LITZKA J, LEHNER WHAS. Cold in-place recycling on low-volume roads in Austria [C]//Transportation Research Board Conference Proceedings, 1995.
- [6] MITICHEKETTAB R, BOULANOUAR A, BALI A. Experimental study of the precracking [C]//7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Springer, Netherlands, 2012: 21-30.
- [7] DUAN K R, GAO Y L, ZHOU W J, et al. Mechanical properties of pre-cracked cement-stabilized crushed stone molded by dynamic and static methods [J]. Materials Reports, 2020, 34(10): 10068-10075.
- [8] 张静, 魏连雨, 王涛. 水泥稳定碎石基层材料微裂技术研究[J]. 公路, 2017, 62(1): 8-13.
ZHANG J, WEI L Y, WANG T. Research on micro-cracking of cement stabilized macadam base [J]. Highway, 2017, 62(1): 8-13. (in Chinese)

- [9] 赵晓康, 董侨, 陈雪琴, 等. 考虑初始缺陷的水泥基复合材料微观开裂研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 230-239.
ZHAO X K, DONG Q, CHEN X Q, et al. Mesoscale cracking of cement-treated composites with initial defects [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 230-239. (in Chinese)
- [10] 李泽闯, 程培峰, 胡志文, 等. 土石路堤压实质量控制与碾压动力响应模拟分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 33-41.
LI Z C, CHENG P F, HU Z W, et al. Compaction quality control and rolling dynamic response simulation analysis of earth-rock embankment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4): 33-41. (in Chinese)
- [11] 吕悦晶, 刘标, 张蕾, 等. 水泥稳定碎石材料孔隙特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(1): 176-183.
LÜ Y J, LIU B, ZHANG L, et al. Study on pore characteristics of cement stabilized macadam [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(1): 176-183. (in Chinese)
- [12] 章懿涛, 方祥位, 胡丰慧, 等. 不同胶结程度MICP固化珊瑚砂的无侧限压缩离散元分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(4): 18-26.
ZHANG Y T, FANG X W, HU F H, et al. Discrete element analysis of MICP solidified coral sand with different cementation degrees under unconfined compression test [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(4): 18-26. (in Chinese)
- [13] 陈柯, 孙芬, 梁爽, 等. 基于振动搅拌技术高寒地区基层抗冻性与抗裂性试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(Sup1): 291-296.
CHEN K, SUN F, LIANG S, et al. Experimental study on frost resistance and crack resistance of bases in cold areas based on vibration mixing technology [J]. Materials Reports, 2021, 35(Sup1): 291-296. (in Chinese)
- [14] 任刚, 韩战涛, 李李佳, 等. 水泥稳定碎石垂直振动压实特性及路用性能研究[J]. 河南科学, 2022, 40(3): 384-389.
REN G, HAN Z T, LI J J, et al. Study on vertical vibration compaction characteristics and road performance of cement stabilized macadam [J]. Henan Science, 2022, 40(3): 384-389. (in Chinese)
- [15] 赵晓康, 董侨, 顾兴宇, 等. 集料粒径与体积分数对水稳碎石材料抗裂性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 138-144.
ZHAO X K, DONG Q, GU X Y, et al. Effect of aggregate size and volume content on crack resistance of cement-stabilized macadam [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(1): 138-144. (in Chinese)
- [16] 邱继生, 周云仙, 王民煌, 等. 冻融循环作用下煤矸石混凝土的损伤特性及本构关系[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 149-157.
QIU J S, ZHOU Y X, WANG M H, et al. Damage characteristics and constitutive relationship of coal gangue concrete under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 149-157. (in Chinese)
- [17] HARTMANN P, CHENG H, THOENI K. Performance study of iterative Bayesian filtering to develop an efficient calibration framework for DEM [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141: 104491.
- [18] 常西亚, 卢爱红, 胡善超, 等. 孔隙率对混凝土力学性能及能量耗散的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(4): 12-15.
CHANG X Y, LU A H, HU S C, et al. Influence of porosity on mechanical properties and energy dissipation of concrete [J]. New Building Materials, 2019, 46(4): 12-15. (in Chinese)
- [19] 张亮, 王桂林, 雷瑞德, 等. 单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 24-34.
ZHANG L, WANG G L, LEI R D, et al. Energy damage evolution mechanism of single jointed rock mass with different lengths under uniaxial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 24-34. (in Chinese)

(编辑 胡玲)