

文章编号:1007-9629(2023)03-0236-08

地质聚合物再生骨料透水混凝土浆体 迁移规律研究

徐 方*, 熊秋阳, 孔繁盛, 李云凡, 林俊涛
(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:通过离散元模拟,利用正弦波模拟振动成型方式,采用分层浆体占比对地质聚合物再生骨料透水混凝土(GRAPC)的浆体内部组成结构进行有效表征,实时分析了 GRAPC 试件内部浆体的迁移运动规律与孔隙结构变化规律,并采用相关室内试验对模拟分析结果进行了验证,分析测试了 GRAPC 试件各层内部浆体占比与裹浆厚度随振动时间的变化规律.结果表明:振动波初始加载后, GRAPC 试件浆体开始向下迁移,并且在振动时间为 0.4 s 时,试件各层浆体分布最为均匀;相比附加用水组,骨料强化组各层浆体占比和孔隙率浮动范围更小,且在振动作用下其内部的各层浆体占比和孔隙结构分布更为均匀,从而有效保证 GRAPC 材料同时具有优异的透水性能与力学性能.

关键词:地质聚合物;再生粗骨料;透水混凝土;离散元模拟;浆体迁移规律

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.003

Study on Slurry Migration Law of Permeable Concrete with Geopolymer Recycled Aggregate

XU Fang*, XIONG Qiuyang, KONG Fansheng, LI Yunfan, LIN Juntao

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Through three-dimensional discrete element simulation and the sine wave simulation vibration molding method, the layered slurry proportion was used to effectively characterize the matrix internal composition structure of geopolymer recycled aggregate permeable concrete (GRAPC). Real-time analysis of the slurry migration movement and pore structure change law were studied. The simulation results were verified by laboratory tests, and the variation of slurry proportion and slurry thickness in GRAPC specimen with vibration time was analyzed and tested. The results show that the slurry of GRAPC specimens migrates downward after the initial vibration wave loading, and the slurry distribution is the most uniform when the vibration time is 0.4 s. Compared with additional water group, the floating range of the slurry proportion and porosity of each layer in the aggregate reinforcement group is smaller, and the distribution of the slurry proportion and pore structure of each layer in the GRAPC specimen is more uniform under vibration, to ensure the reinforcement GRAPC material has excellent waterproof performance and mechanical performance at the same time.

Key words: geopolymer; recycled coarse aggregate; permeable concrete; discrete element simulation; slurry migration law

中国每年产生的废弃混凝土块多达 7.5 亿 t,且主要通过堆放和填埋的方式进行处理,目前建筑垃

收稿日期:2022-03-08; 修订日期:2022-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908522);湖北省交通运输厅科技项目(2020-2-1-10);山东省企业技术创新项目(202160101791);
国家级大学生创新创业训练计划项目(202110491007)

第一作者(通讯作者):徐 方(1982—),男,湖北鄂州人,中国地质大学(武汉)副教授,硕士生导师,博士. E-mail: xufang@cug.edu.cn

圾综合利用率不足5%^[1].利用建筑垃圾生产制备地质聚合物再生粗骨料透水混凝土(GRAPC)路面铺装材料,是减少水泥等高耗建材使用和大幅提升城市路面透水面积的有效途径.

许多学者对再生骨料的性能影响因素和工程应用中的结构形式进行了系统而广泛的研究^[2-4].相关研究认为,再生粗骨料表面裹覆的硬化水泥浆是导致其性能劣化的主要原因^[5].因此,为满足更高的工程应用设计标准,需在使用前对再生粗骨料表面进行强化处理.目前,物理增强是常用的再生粗骨料强化方法^[6].地质聚合物净浆在骨料表层的浆体厚度和成膜能力不同于普通水泥混凝土^[7],Liu等^[8-9]研究表明再生骨料透水混凝土中骨料表面浆体的均匀程度、骨料成分对混凝土力学性能和透水性能有重要影响.浆体在骨料表层的重分布状态影响骨料间空隙结构,进而影响GRAPC力学性能和工作性能.

目前关于再生骨料透水混凝土结构中内部浆体在振动作用下迁移规律的数值模型较少,Juradin等^[10-11]采用室内试验分析了不同振动时间下试件内部浆体的重分布状态对其透水性能和孔隙率的影响.

相关研究在微观上分析了局部浆体在骨料表层的分布状态,但缺少整体评判方法.鉴于此,本文拟建立三维细观模型,以期能更准确、更有效地分析地质聚合物再生骨料透水混凝土中浆体的不同分布状态与孔隙结构变化对其性能的影响规律^[12-13],以及GRAPC振动后浆体整体分布与孔隙结构变化规律;并通过相关室内试验对模拟结果进行有效性验证.本文研究成果可为GRAPC材料的推广应用提供一定理论基础与参考依据.

1 GRAPC三维细观数值模拟

本文建立的GRAPC细观模型主要由骨料、浆体和孔隙组成,模型建立过程见图1.采用再生粗骨料(A1)和强化再生粗骨料(A2),分别建立附加用水组新拌GRAPC混合料(GRAPC-1)及骨料强化组新拌GRAPC混合料(GRAPC-2)的三维虚拟模型,并模拟在振动成型方式下2种模型内部浆体的迁移运动规律及内部孔结构变化规律.与室内试验相对应,在离散元PFC 3D软件中生成的虚拟模具尺寸为100 mm×100 mm×100 mm.

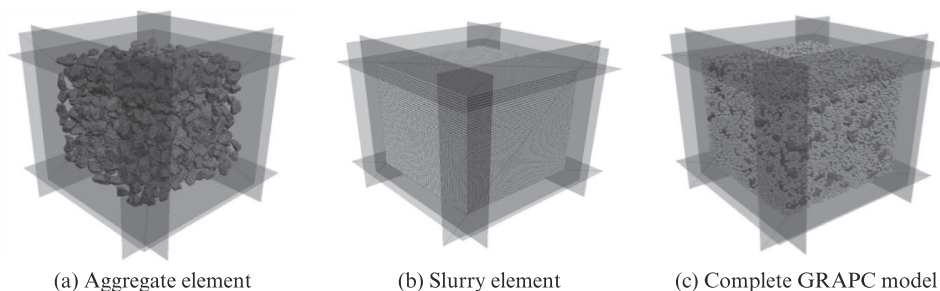


图1 模型建立过程

Fig. 1 model establishment process

1.1 再生骨料形貌数值调控

采用基恩士VK-X100K三维形貌仪进行颗粒表面纹理扫描,测量范围为2 000.0 μm×2 811.5 μm,确定再生粗骨料和强化再生粗骨料这2种粗骨料的表面纹理参数均值,如表1所示.表1中, R_p 表示最大轮廓峰高, R_v 表示最大轮廓谷深, R_z 表示轮廓总高度, R_a 表示轮廓算数平均偏差, R_q 表示轮廓均方根偏差.

1.2 新拌GRAPC混合料本构模型选取和参数标定

考虑再生粗骨料单元间为无黏结接触,故仅用线性接触刚度模型来描述不同骨料颗粒单元间接触本构关系.对于新拌地质聚合物浆体,选用Burger's黏弹性模型来表述地质聚合物净浆的黏弹性特征,选用平行黏结模型来描述迁移过程中颗粒单元之间的力矩传递作用.净浆和骨料颗粒单元之间的接触

表1 2种粗骨料的表面纹理参数均值

Table 1 Average surface texture parameters of two kinds of coarse aggregates

Aggregate	$R_p/\mu\text{m}$	$R_v/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$
A1	79.973	84.541	165.524	31.431	36.933
A2	48.877	61.121	109.998	17.616	21.886

属于界面接触,对其赋予Burger's黏弹性模型和平行黏结模型的组合.

将骨料三维形貌扫描结果与甘新立^[14]文中不同种类岩石的表观扫描图像进行比对,确定强化再生粗骨料与再生粗骨料的弹性模量 E 分别为40、30 GPa,泊松比 ν 分别为0.23、0.20.根据接触模型中细观力学参数的物理意义,建立较为准确的宏观力学参数与细观力学参数之间的关系,从而得到2种再生粗骨料的细观参数,如表2所示.

表 2 2 种再生粗骨料的细观参数
Table 2 Mesoscopic parameters of two recycled coarse aggregates

Aggregate	Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Normal stiffness/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tangential stiffness/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
A1	2 315	1.2×10^8	5.0×10^7
A2	2 390	1.6×10^8	6.5×10^7

经分析比较,选用动态剪切流变仪(DSR)法来测定地质聚合物净浆的宏观参数^[15-16].通过 Burger's 参数拟合,得到新拌地质聚合物净浆 DSR 测试结果,如表 3 所示.

Burger's 模型的宏观拟合参数见表 4.其中 E_1 、 η_1 分别为 Maxwell 模型的弹性模量和黏度系数, E_2 、 η_2 分别为 Kelvin 模型的弹性模量和黏度系数,二者均由室内试验测出相关数据后进行参数拟合得到.根据 Burger's 模型宏观参数与细观参数的相关转换关系^[15-16],将表 4 中数据代入,即可计算得到附加用水组 GRAPC-1 新拌地质聚合物净浆单元之间 Burger's 模型的细观接触参数(表 5),以及 GRAPC1 新拌地质聚合物净浆单元与再生粗骨料单元之间 Burger's 模

表 3 新拌地质聚合物净浆的 DSR 测试结果
Table 3 DSR test results of fresh geopolymer net slurry

Temperature/ ℃	Angular velocity/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	Compound shear modulus/ Pa	Phase angle/ (°)	Elastic modulus/ Pa	Lost modulus/ Pa
25	30	7 160.00	59.21	3 665.15	6 150.79
	50	8 813.20	53.96	5 185.25	7 126.41
	80	9 470.80	49.65	6 131.92	7 217.73
	100	11 750.00	47.11	7 996.97	8 608.77
	120	12 980.40	45.74	9 059.22	9 296.30

表 4 Burger's 模型的宏观拟合参数
Table 4 Burger's model macro fitting parameters

E_1/kPa	$\eta_1/(\text{kPa}\cdot\text{s})$	E_2/kPa	$\eta_2/(\text{kPa}\cdot\text{s})$
200.252	1.795	6.080	0.144

型的细观接触参数(表 6).经拟合发现,骨料强化组和附加用水组的净浆单元间及其与再生粗骨料单元间 Burger's 模型细观接触参数基本完全相同,故其 Burger's 参数取值与表 5、6 相同.

表 5 GRAPC-1 新拌地质聚合物净浆单元之间 Burger's 模型的细观接触参数
Table 5 Burger's model meso-contact parameters among fresh geopolymer net slurry units of GRAPC1

Parameter	Model symbol	Unit	Value
Normal viscosity in Maxwell section	bur_cnm	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	3.590
Normal stiffness in Maxwell section	bur_knm	N/m	400.504
Normal viscosity in Kelvin section	bur_cnk	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	0.288
Normal stiffness in Kelvin section	bur_knk	N/m	12.160
Tangential shear viscosity in Maxwell section	bur_csm	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	1.282
Tangential shear stiffness in Maxwell section	bur_ksm	N/m	143.037
Tangential shear viscosity in Kelvin section	bur_csk	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	0.103
Tangential shear stiffness in Kelvin section	bur_ksk	N/m	4.343

表 6 GRAPC1 新拌地质聚合物净浆单元与再生粗骨料单元之间 Burger's 模型的细观接触参数
Table 6 Burger's model meso-contact parameters between fresh geopolymer net slurry unit and regenerated coarse aggregate unit of GRAPC1

Parameter	Model symbol	Unit	Value
Normal viscosity in Maxwell section	bur_cnm	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	7.180
Normal stiffness in Maxwell section	bur_knm	N/m	801.003
Normal viscosity in Kelvin section	bur_cnk	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	0.576
Normal stiffness in Kelvin section	bur_knk	N/m	24.320
Tangential shear viscosity in Maxwell section	bur_csm	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	2.564
Tangential shear stiffness in Maxwell section	bur_ksm	N/m	286.071
Tangential shear viscosity in Kelvin section	bur_csk	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	0.206
Tangential shear stiffness in Kelvin section	bur_ksk	N/m	8.686

通过对新拌地质聚合物净浆的极限应力测试^[17],建立极限应力与 PFC 3D 软件中平行黏结参数的联系.根据新拌地质聚合物净浆的剪切应力,依据经验

和相关研究成果^[18-19],确定新拌地质聚合物净浆的切向强度为 600 Pa,切向刚度根据法向刚度和泊松比确定.最终确定水胶比¹⁾为 0.30 的新拌地质聚合物净浆

1) 文中涉及的水胶比、筛余量等除特别说明外均为质量比或质量分数.

的平行黏结参数见表7,表7中 L 为相接触的两单元半径之和.根据Xu等^[20]提出的骨料-浆体浸润模型及新拌地质聚合物净浆在2种粗骨料表面的实际接触角,建立骨料-浆体界面黏结参数与二者实际接触角之间

的对应关系.最终确定骨料-浆体接触界面法向黏结参数与新拌地质聚合物净浆相同,切向黏结参数分别按二者与新拌地质聚合物净浆实际接触角的正弦值进行折减.

表7 水胶比为0.30的新拌地质聚合物净浆的平行黏结参数
Table 7 Parallel bond parameters of fresh geopolymer paste with water-binder ratio of 0.30

Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Normal stiffness/($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	Shear stiffness/($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tensile strength/Pa	Cohesion strength/Pa
1 580	982/ L	392/ L	600	600

1.3 振动正弦波加载

由于透水混凝土试件成型不能采用高频振动,一般采用低频平板振动器来进行振实,因此本文用正弦波模拟新拌GRAPC混合料中的低频振动,取振动频率为15 Hz,振动速率为0.05 m/s^[21].新拌GRAPC混合料的振动正弦波加载如图2所示.

2 试验验证

2.1 原材料

粉煤灰采用细度0.045 mm、密度2.24 g/cm³、方孔筛余量10.7%的国家Ⅰ级低钙粉煤灰,产地为湖北武汉;矿粉采用密度2.9 g/cm³的S95粒化高炉矿渣粉,产地为湖北武汉;硅灰采用密度1.8 g/cm³的加密硅灰,产地为湖北武汉;集料采用4.75~9.50 mm单一粒径的再生粗骨料,表观密度2 315 kg/m³,压碎值指标17.5;复合碱激发剂采用水玻璃与NaOH制备复合碱激发剂,模数为1.2;水为自来水.

表8 GRAPC试件的配合比
Table 8 Mix proportions of GRAPC specimens

Group	Coarse aggregate	Fly ash	Mineral powder	Silica fume	Alkali activator	Water	Additional water
GRAPC-1	1 260.00	156.15	234.23	36.26	59.30	97.70	37.17
GRAPC-2	1 308.00	154.11	231.17	35.79	58.53	96.42	0

2.3 试验过程

本次试验使用二次搅拌法.使用强制式单卧轴式搅拌机进行搅拌.GRAPC拌和完成的最优状态是每颗骨料表面有均匀厚度的地质聚合物浆体将其包裹.试件制作时首先将胶凝材料干粉与骨料干拌1 min,然后加入一半的碱激发剂和水湿拌30 s,再加入剩下的碱激发剂和水湿拌1 min,最后采用顶部低频平板振动器按试验设计时间振动成型.试件标准养护24 h后拆模,然后继续在标准养护环境下养护到14 d龄期,进行相关数据测试.

2.4 模型验证

本研究使用HC-CK101型裂缝宽度测试仪来测试透水混凝土的实际裹浆厚度.将试件切分为上、

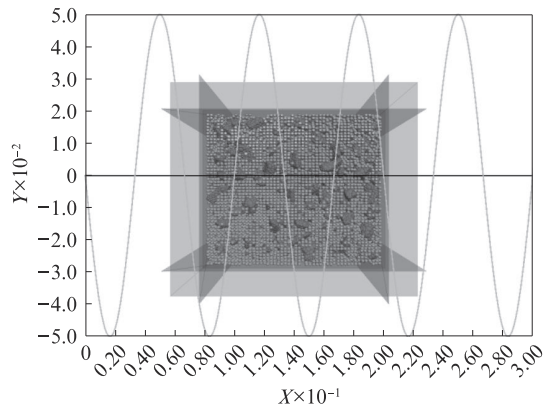


图2 新拌GRAPC混合料的振动正弦波加载
Fig. 2 Vibration sine wave loading of fresh GRAPC mixture

2.2 试验设计

GRAPC试件分为附加用水组GRAPC-1和骨料强化组GRAPC-2,两者设计目标孔隙率(体积分数)均为15%、水胶比均为0.30,其余配合比如表8所示.

中、下3个部分,并在切面上划分经纬线将切面分割为25块边长为20 mm的小正方形,实测裹浆厚度取中间9块的数据平均值^[22].裹浆厚度截面处理及测量方法如图3所示.

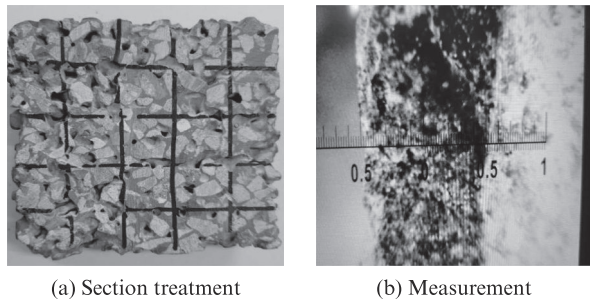
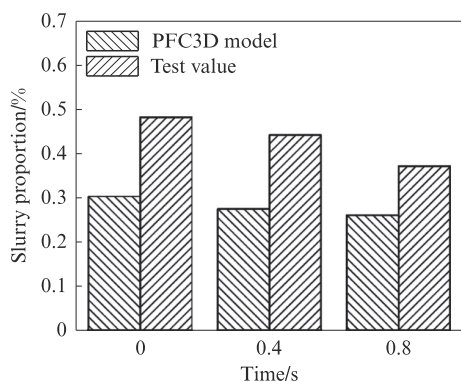
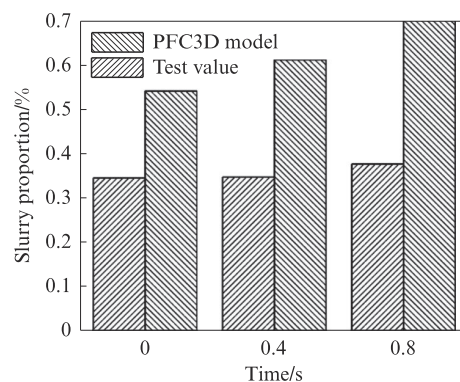


图3 裹浆厚度截面处理及测量方法
Fig. 3 Section treatment and measurement of slurry thickness

附加用水组 GRAPC-1 分层浆体占比如图 4 所示。由图 4 可见,各分层浆体占比的变化幅度一致,初步验证了细观模型的有效性。为进一步验证所建立细观模型的有效性,后续对比分析了试件模拟浆体占比与实测浆体占比的变化规律。



(a) Upper middle part



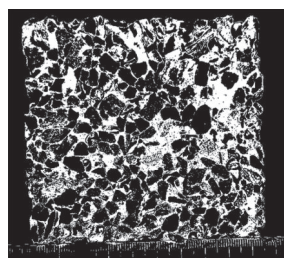
(b) Lower middle part

图 4 附加用水组 GRAPC-1 分层浆占比

Fig. 4 Layered slurry proportion of additional water group GRAPC-1



(a) Original image

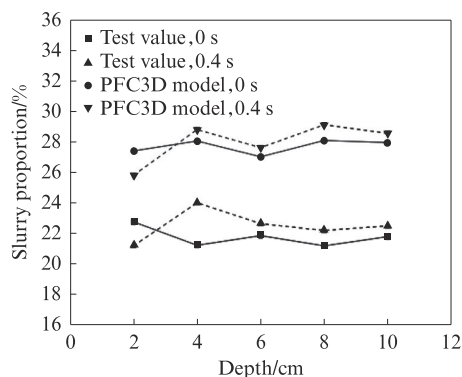


(b) Image after software processing

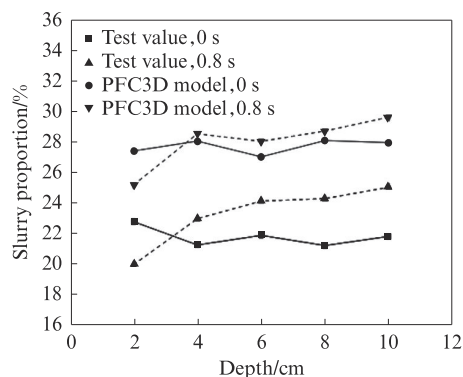
图 5 实测浆体占比图片前处理

Fig. 5 Pre-processing of actual slurry proportion image

图 6 为附加用水组 GRAPC-1 分层浆体占比试



(a) Vibration 0.4 s



(b) Vibration 0.8 s

图 6 附加用水组 GRAPC-1 分层浆体占比试验与模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of layered slurry proportion experiment and simulation results in GRAPC-1 with additional water

3 数据分析

3.1 浆体随振动时间的迁移运动规律

首先将试件按深度每 1 cm 对新拌 GRAPC 混合

实测浆体占比截面的选取与裹浆厚度截面的处理方式类似,取 4 个截面作浆体迁移规律分析。实测浆体占比分析所取截面经过 Image-pro-plus 软件处理后,可获取实测浆体占比数据,如图 5 所示。

与模拟结果对比。由图 6 可见,试验试件底部浆体迁移量明显大于模拟组,试验误差也导致各层浆体占比的模拟值与实测值整体上存在差值。其原因有 2 点:首先,试验采用的是低频平板振动器,然而实际波形并不是模型上加载的标准正弦波,缺乏稳定性,且模型的正弦波加载于模型上墙面,而平板振动器施加于模具上部;其次,模型内部结构排布相较于试验室试件更为规则,小球间存在孔隙,骨料轮廓形貌也与原图中颗粒不完全相似,两者存在误差。

料虚拟试件进行分层,试件共均分为 10 层,附加用水组和骨料强化组虚拟试件分层后的图像输出如图 7、8 所示。

新拌 GRAPC 混合料在振动波加载下各层浆体

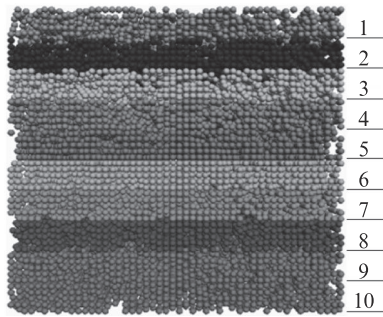


图7 附加用水组虚拟试件浆体分层
Fig. 7 specimen in additional water group

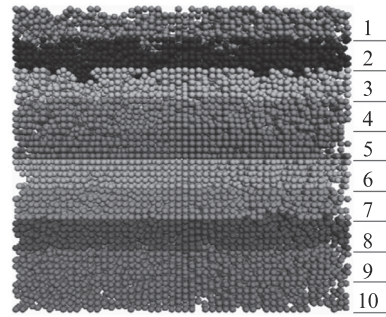
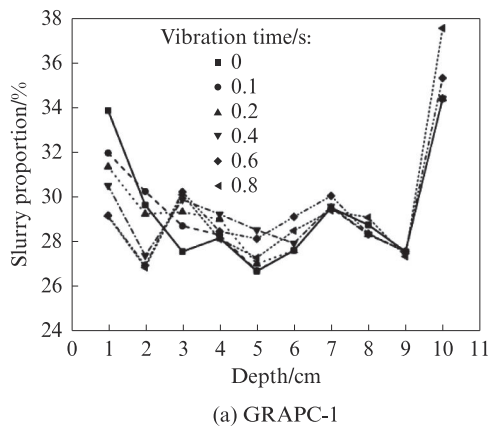


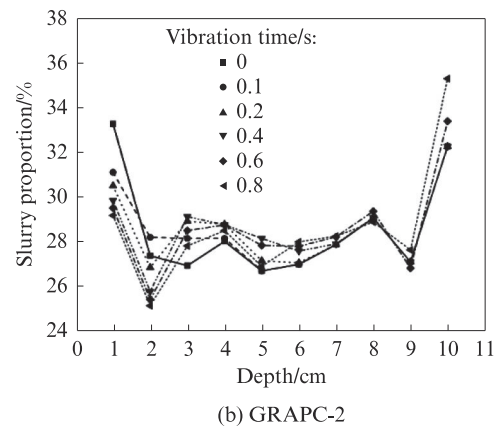
图8 骨料强化组虚拟试件浆体分层
Fig. 8 specimen in aggregate reinforcement group

占比如图9所示.由图9可见:呈黏弹性半流态的地质聚合物浆体因为受到振动波的作用由顶部向下部迁移;在振动波加载下,新拌GRAPC混合料各层浆体占比总体变化趋势相同,但浮动区间变化率有所区别;浆体体积的变化程度在试件的第1、2、10层表现得最为明显;浆体体积变化最开始发生在顶层,是

由于正弦波施加在模型上墙面的缘故,浆体迁移后3~7 cm深度区域内的变化幅度大小更能体现试件内部浆体的均匀分布程度,因此试验验证时选取试件中上部和中下部作为分析对象.由图9还可得,振动0.4 s时第3~7层浆体占比浮动区间变化率最小,浆体呈均匀分布.



(a) GRAPC-1



(b) GRAPC-2

图9 新拌GRAPC混合料在振动正弦波加载下各层浆体占比
Fig. 9 Layered slurry proportion of fresh GRAPC mixture under vibration sine wave loading

由图9还可见:初始状态下骨料强化组浆体整体分布的均匀程度要略大于附加用水组,这与骨料的形貌特征相关,与真实GRAPC混合料相对应,经强化处理后骨料整体粗糙度减小,表面微孔孔径减少,局部浆体吸收较少,因此初始状态下表面粗糙度较小的骨料强化组浆体整体分布特征更为均匀;附加用水组和骨料强化组在0~0.4 s期间顶部浆体迁移到试件中上部,试件中下部浆体迁移量较小;0.4~0.8 s期间,顶部浆体迁移量减小,可能是由于前0.4 s振动波的加载使得2组新拌GRAPC混合料试件中上部浆体处于均匀包裹粗骨料外表面的状态;相比于附加用水组,骨料强化组骨料表面粗糙度较小,顶部浆体更易于向底部迁移.

结合模拟结果及上述分析可知,正弦波传递过程是一个自上而下的过程.随着振动时间的累加,两组试件顶部浆体随正弦波的传递向试件中下部发生

迁移,在最后0.4 s时,试件中下部及底部浆体迁移特征最明显.综上,振动0.4 s时试件整体浆体分布情况最为均匀,容易形成高强度的试件.随着振动波的加载,顶部浆体减少,孔隙增加,面层雨水更容易进入GRAPC内部.骨料强化组内部浆体占比在振动加载的最后0.4 s内浮动范围较小,因此在振动作用下其内部浆体均匀程度要大于附加用水组.

3.2 二维孔隙率随振动时间的变化规律

利用规则排列的球体单元填充整个模型孔隙,将其视为潜在的孔隙单元.在边界条件约束下自动删除重叠的小球,判断结束后仍存在的小球即为孔隙结构.由小球在每层的体积占比可计算得到该层的孔隙率.图10给出了附加用水组和骨料强化组的各层孔隙率.

由图10可见:在振动0~0.4 s期间,顶部浆体发生迁移至试件中上部,顶部孔隙率逐渐增加,因加载

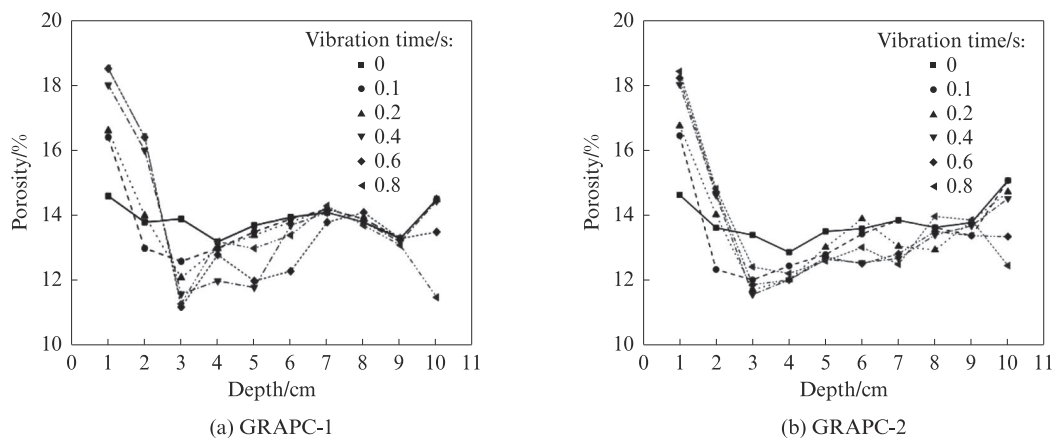


图10 附加用水组和骨料强化组的各层孔隙率

Fig. 10 Porosity of each layer in additional water group and aggregate reinforcement group

时长较短,试件中下部浆体迁移现象不明显,浆体占比略微增大,孔隙率略有减小;振动0.4 s时,附加用水组和骨料强化组虚拟试件的第3~7层平均孔隙率相对于初始平均孔隙率分别降低了6.0%、3.5%;在振动波加载的后0.4 s,振动波产生的能量逐渐贯穿整个试件深度,新拌GRAPC混合料顶部的浆体会沿骨料间孔隙持续向试件下部迁移,同时试件中上部积累的浆体会向试件中下部迁移,并在试件中下部的第8层积累至峰值后继续向试件底部迁移,最终在底层聚集,因此振动0.4~0.8 s期间试件底层的孔隙率持续降低;整体来看,除振动0~0.1 s内第2层发生积累现象外,试件顶部的浆体持续减少,孔隙率持续增加,试件中上部的孔隙率先减小后增大,试件中下部的孔隙率在第8层达到最小值,且最后试件底层孔隙率持续减小。

同时,附加用水组经过前0.2 s振动波的加载,骨料强化组经过前0.4 s的加载,内部浆体在空间上整体的分布情况最为均匀,容易形成强度更高的试件,同时顶部孔隙结构增加,使面层雨水更容易进入GRAPC内部,且试件底层未发生堵孔现象,不会阻碍雨水的排出。整体而言,随着振动时间的延长,骨料强化组内部浆体在整个空间区域内迁移浮动范围较为适中,浆体发生迁移运动后的分布情况更为均匀。对应PFC 3D软件中虚拟试件内部孔隙单元ball的生成命令,浆体分布较为均匀的新拌GRAPC混合料虚拟试件内部孔隙结构不再是大面积形成,而是在平面上更加均匀的分布,因此在振动作用下其内部孔隙结构的均匀程度也大于附加用水组。

4 结论

(1)采用浆体占比作为关键指标,建立地质聚合物再生骨料透水混凝土GRAPC的离散元微观模型,

模拟在振动条件下浆体随试件深度的迁移规律,模拟分析结果与室内试验数据变化趋势一致。说明模拟分析与室内试验测试相结合的研究方法,可以较为直观准确地分析浆体在振动条件下的迁移规律及其分布情况。

(2)将GRAPC虚拟试件分为10层,在振动波加载条件下,GRAPC虚拟试件内部浆体在中上部占比达到峰值后,浆体逐渐向试件中下部迁移。骨料强化组虚拟试件第3~7层浆体占比浮动区间变化率最小,小于附加用水组的浮动区间变化率,说明骨料强化组的浆体分布均匀程度相对较好。

(3)振动0.4 s时,骨料强化组与附加用水组虚拟试件第3~7层的平均孔隙率相对于初始平均孔隙率分别减小了3.5%、6.0%,两组的平均孔隙率总体变化幅度较小,相比较而言,骨料强化组的各层浆体孔隙分布更加均匀。

(4)与附加用水组相比,骨料强化组在振动作用下内部各层浆体占比和孔隙结构分布更为均匀,从而有效保证GRAPC材料同时具有优异的透水性能和力学性能。

参考文献:

- [1] 肖建庄,陈立浩,叶建军,等.混凝土结构拆除技术与绿色化发展[J].建筑科学与工程学报,2019,36(5):1-10.
XIAO Jianzhuang, CHEN Lihao, YE Jianjun, et al. Technology and green development of demolition for concrete structures[J]. Journal of Architectural Science and Engineering, 2019,36(5): 1-10. (in Chinese)
- [2] 陈守开,陈家林,汪伦焰,等.再生骨料透水混凝土关键性能统计及预测分析[J].建筑材料学报,2019,22(2):214-221.
CHEN Shoukai, CHEN Jialin, WANG Lunyan, et al. Key performance statistics of recycled aggregate pervious concrete and prediction analysis[J]. Journal of Building Materials, 2019,22(2):

- 214-221.(in Chinese)
- [3] 蒋正武,孙振平,王培铭.若干因素对多孔透水混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2005,8(5):513-519.
JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Peiming. Effects of some factors on properties of porous pervious concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5):513-519.(in Chinese)
- [4] 孙家瑛,梁山.再生混凝土集料透水性混凝土性能研究及应用[J].建筑材料学报,2012,15(6):747-750.
SUN Jiaying, LIANG Shan. Performance of recycled concrete aggregate porous cement concrete and its application[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6):747-750.(in Chinese)
- [5] ZHAO Z F, COURARD L, MICHEL F, et al. Influence of granular fraction and origin of recycled concrete aggregates on their properties[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22(12):1457-1467.
- [6] ISMAIL S, RAMLI M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44:464-476.
- [7] SATA V, WONGSA A, SOMNA K, et al. Interfacial transition zone of pervious cement and geopolymer concrete containing crushed clay brick[J]. Chiang Mai Journal of Science, 2016, 43(2):402-408.
- [8] LIU T J, WANG Z Z, ZOU D J, et al. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 122:72-82.
- [9] SÁEZ DEL BOSQUE I F, ZHU W, HOWIND T, et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 81:25-34.
- [10] JURADIN S, NETINGER-GRUBESA I, MRAKOVČIC S, et al. Impact of fibre incorporation and compaction method on properties of pervious concrete[J]. Materiales De Construccion, 2021, 71(342).
- [11] JURADIN S, OSTOJIC-SKOMRLJ N, BRNAS I, et al. Influence of binder, aggregate and compaction techniques on the property of single-sized pervious concrete [J]. Advances in Concrete Construction, 2020, 10(3):211-220.
- [12] ZHANG J, MA G D, MING R P, et al. Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging[J]. Construction and Building Materials, 2018, 161:468-478.
- [13] PIERALISI R, CAVALARO S H P, AGUADO A. Discrete element modelling of the fresh state behavior of pervious concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 90:6-18.
- [14] 甘新立.集料与沥青的表面特性分析及黏附性评价[D].西安:长安大学,2017.
GAN Xinli. The surface character analysis of bitumen and aggregates and the evaluation of the adhesion between them[D]. Xi'an:Chang'an University, 2017.(in Chinese)
- [15] 田莉.基于离散元方法的沥青混合料劲度模量虚拟试验研究[D].长安:长安大学,2008.
TIAN Li. Virtual experimental study on stiffness modulus of asphalt mixture based on discrete element method[D].Chang'an: Chang'an University, 2008.(in Chinese)
- [16] 冯浩.基于粘弹性理论的沥青胶浆试验特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
FENG Hao. Study on test characteristics of asphalt mortar based on viscoelastic theory [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2008.(in Chinese)
- [17] 邓志刚.基于三维离散元的沥青混合料数值模拟方法研究[D].广州:华南理工大学,2017.
DENG Zhigang. Study on numerical simulation method of asphalt mixture based on three dimensional discrete element method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.(in Chinese)
- [18] 刘文斌,周慧.化学发泡泡沫混凝土塌模机理研究[J].硅酸盐通报,2016,35(12):4277-4285.
LIU Wenbin, ZHOU Hui. Mechanism of chemical foaming concrete collapse mode [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(12):4277-4285.(in Chinese)
- [19] XIE C, YUAN L J, ZHAO M, et al. Study on failure mechanism of porous concrete based on acoustic emission and discrete element method [J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117409.
- [20] XU F, KONG F S, XIONG Q Y, et al. Internal interfacial interaction analysis of geopolymer-recycled aggregate pervious concrete based on a infiltration model [J]. Construction and Building Materials, 2022, 333:127417.
- [21] 陈俊,张东,黄晓明,等.离散元颗粒流软件(PFC)在道路工程中的应用[M].北京:人民交通出版社,2016:2944.
CHEN Jun, ZHANG Dong, HUANG Xiaoming, et al. Application of particle flow code in road engineering[M]. Beijing: People's Communications Press, 2016:2944.(in Chinese)
- [22] 杨光.透水混凝土裹浆法配合比设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
YANG Guang. Research on paste-coating method mix proportion design of permeable concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.(in Chinese)