

# 基于PFC<sup>2D</sup>的水泥土单轴压缩试验及细观数值模拟

杨智慧,李珊花

(南宁职业技术学院,广西 南宁 530003)

**摘要:**对不同水泥掺量下的软土稳定土试样分别开展单轴压缩试验,基于测试结果对土样的变形过程进行PFC<sup>2D</sup>离散元颗粒流细观数值模拟,分析破坏后水泥土的力学行为和位移场分布。结果发现:随着水泥掺量增加,固化软土试样的单轴抗剪强度与弹性模量表现出指数函数上升的规律,破坏应变随水泥掺量增加呈二次函数的变化特征;由PFC<sup>2D</sup>离散元颗粒流模拟得到的水泥土试样的力学参数及应力-应变关系曲线与试验实测结果较为接近,离散元模拟结果也显示水泥掺量对土体力学性能有明显影响;随着水泥掺量的增加,固化软土的破坏形式逐渐由压碎破坏向剪切破坏模式过渡;由离散元模拟得到的位移矢量场准确地反映了水泥固化软土在单轴压缩荷载作用下的破坏模式特点。

**关键词:**水泥稳定土;PFC<sup>2D</sup>;单轴压缩试验;力学特性;离散元

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

岩土体的物理力学性质是影响路基工程稳定性的重要因素。软土是一种广泛分布在中国沿海与内陆河滩地区的土体,主要由碎屑矿物和黏土矿物组成,一般具有工程性质不良的特点,是一种特殊土<sup>[1]</sup>。软土具有可压缩性强、含水率大、强度低、孔隙比大、易扰动等特点,在浸水过程中,软土因水入渗发生结构破坏而引起附加变形,使路基的稳定性受到严重影响<sup>[2-4]</sup>。为了改善普通软土作为路基填料的性能,水泥固化法在相关地区的地基处理中得到广泛使用<sup>[5]</sup>。水泥固化软土是由水泥、散状软土与化学外加剂按一定比例混合、搅拌并经过硬化而形成的材料,对软土路基具有显著的稳固作用<sup>[6]</sup>。前人的研究表明:固化软土的性能受水泥掺量的变化影响显著,当水泥掺量不足时,路基可能会出现不均匀沉降和侧向应力增大的现象,对路基工程建设存在一定的安全隐患<sup>[7-9]</sup>。因此为保证路基的稳定性,需对水泥固化软土进行不同掺量下的力学特性测试。

离散元颗粒流细观模拟是一种用于解决不连续介质材料力学与变形的仿真模拟方法。目前,不少学者利用离散元法对水泥改性土的力学性能进行模拟研究,取得了一定成果。例如:关振长等<sup>[10]</sup>对水泥

土试样进行了循环动荷载作用下的离散元计算,预测了水泥土地基的工后沉降量;Van Lysebetten等<sup>[11]</sup>对水泥稳定土进行了三轴剪切试验,并采用PFC<sup>2D</sup>技术对剪切过程开展了数值模拟;李涛等<sup>[12]</sup>对含结构性强度的土体进行离散元模拟,分析了三轴荷载作用下材料细观结构的变化特征。前人的研究成果说明采用离散元颗粒流模拟对水泥稳定土的力学行为进行离散元模拟具有可行性<sup>[13]</sup>,但目前关于水泥含量对稳定土力学响应机理的研究还比较少。该文在前人研究基础上,对不同水泥掺量的软土稳定土试样开展单轴压缩试验和PFC<sup>2D</sup>离散元颗粒流模拟,同时对测试结果与物理机制进行深入分析,旨在为稳定土的力学行为和变形特征提供更深入的认识。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 材料

试验采用的软土为黄河南岸河漫滩的土样,土体的基本物理特性如表1所示。该地区软土呈灰褐色,可塑性、黏性较强,且天然饱和度、液限值较高,是典型的湿润环境下形成的河漫滩沉积型软土。矿

收稿日期:2021-12-15(修改稿)

基金项目:第二批国家级职业教育创新团队研究项目(编号:ZI2021060205,ZI2021060202,ZI2021060203,ZI2021060204)

作者简介:杨智慧,女,硕士,副教授/高级工程师.E-mail:yuzhou5307@163.com

物成分主要由伊利石和高岭石组成的黏土矿物、石英长石和碳酸盐类矿物等。土体颗粒级配曲线如

图 1 所示,从图 1 可以看出:80% 以上的土体颗粒粒径小于 0.1 mm。

表 1 软土的基本物理特性

天然含水率/%	干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	液限/%	塑限/%	相对密度	自由膨胀率/%	主要矿物成分/%					
						高岭石	伊利石	石英	长石	绿泥石	有机质
28.1	1.37	94.1	35.5	2.76	22.3	19.3	28.5	15.9	13.8	1.9	9.6

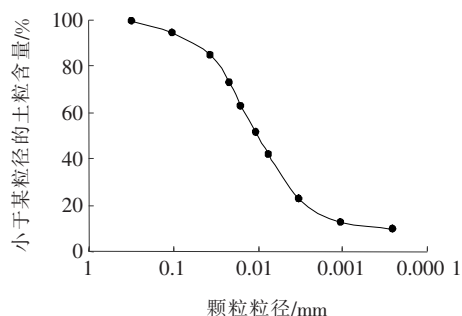


图 1 软土的颗粒级配曲线

## 1.2 试样制备

水泥稳定土试样的具体制样步骤如下:首先,将散土进行晒干和粉碎,然后过 2 mm 细筛;其次,将软土放置于 105 ℃ 的烘箱中烘干 24 h;再向干燥软土颗粒中加入一定质量比例的水泥拌和均匀,然后加水继续搅拌,根据试验计划制备含水率为 20% 的试样;制备完成后将土体用保鲜膜包裹并静置 24 h,使水分均匀分布。最后,将土样装填到套筒内进行压制,每个试样分 3 次装填和压制。水泥稳定土试样形状为圆柱体,尺寸为直径 50 mm、高度 100 mm。

普通软土试样与掺 10% 水泥的固化软土试样的 SEM 微观结构如图 2 所示。从图 2 可以看出:普通软土的颗粒棱角分明,孔隙发育较大;而经过水泥固化作用后的水泥稳定土颗粒之间被水泥凝胶体包裹,孔隙发育程度大幅下降。

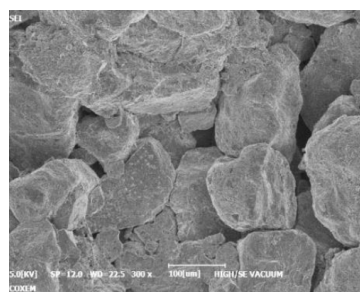
## 1.3 单轴压缩试验

采用液压控制式无侧限压缩仪对水泥稳定土的标准圆柱体开展单轴压缩强度测试。为了保证水泥稳定土强度测试结果的准确性,采用 0.002 MPa/s 的加压速率开展试验,得到土体的应力-应变关系曲线和单轴压缩破坏强度、弹性模量、破坏应变等力学性能指标。

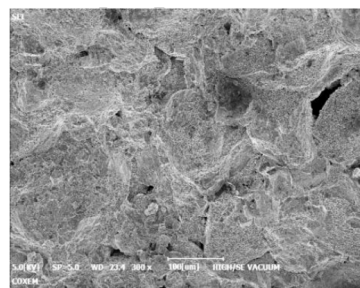
## 1.4 离散元模拟

采用 PFC<sup>2D</sup> 软件对水泥稳定土试样进行压缩试验的离散元颗粒流模拟,在软件中输入稳定土的材料、形状等参数。采用“试错法”重复多次调整材料

参数,使得到的土样应力-应变关系曲线、破坏形式和实测结果的误差尽量小。经过离散元模拟可以获得拟合应力-应变曲线和土体剪切破坏后位移矢量场分布。



(a) 普通软土



(b) 水泥稳定土

图 2 土体的 SEM 微观结构图像

# 2 试验结果

## 2.1 单轴压缩试验结果

分别对不同水泥掺量的水泥稳定土试样开展两组试验(1 和 2),并计算两组试验结果的平均值,由试验得到的力学测试指标包括:抗剪强度  $\sigma_m$ 、弹性模量  $E$  和破坏应变  $\epsilon_p$ ,各指标与水泥掺量曲线结果见图 3。

由图 3 可以看出:水泥稳定土抗剪强度和弹性模量均随水泥掺量增加保持指数函数上升趋势,而破坏应变和水泥掺量保持二次函数关系。并且拟合曲线的确定性系数  $R^2$  均超过了 0.95,表明基于试验结果的拟合曲线可以较准确地对不同水泥掺量下的水泥土强度指标进行描述。

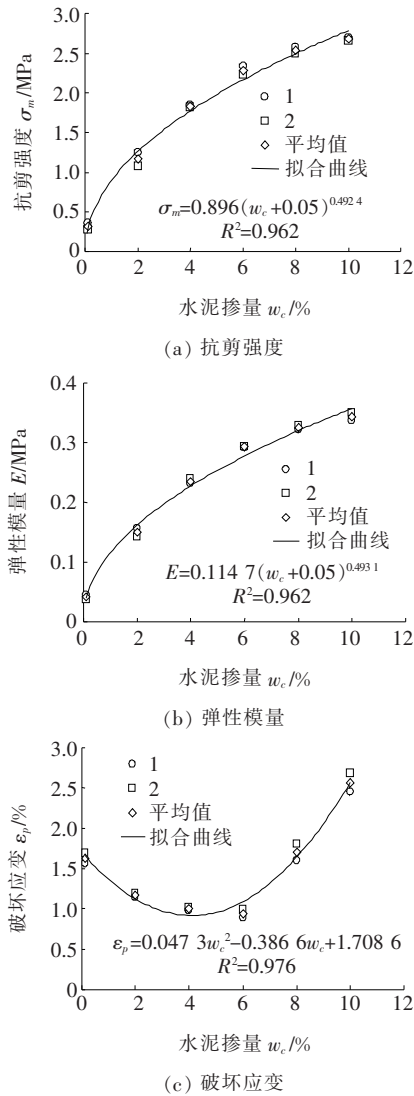


图3 水泥稳定土各力学性能与水泥掺量的关系曲线

2.2 离散元模拟结果

采用的离散元数值模型选用了颗粒之间的平行黏结接触关系模型,以模拟稳定土颗粒间的相互作用,使模型内部可以传递力和力矩。参考Jin等<sup>[14]</sup>的研究,采用试算法确定不同水泥掺量的稳定土试样力学性质的细观模型参数,即初步选定相关参数,结果如表2所示。然后将表2的参数导入软件中得到模拟后颗粒流的分布形式,通过观察实测和离散元模拟试样最终破坏形式以分析模拟结果的合理性。

根据不同水泥含量稳定土的PFC<sup>2D</sup>离散元模拟,得到试样在单轴压缩荷载作用下的拟合应力-应变关系曲线,如图4所示。由图4可以看出:基于离散元模拟得到的拟合结果与试验实测结果具有较好的相似性。特别在起始点至峰值点之间的曲线段相差很小。不同水泥掺量的稳定土在单轴压缩荷载下的应力-应变关系曲线均有明显的应变软化与线弹性屈服特征。然而,在应力-应变曲线的软化阶段,测试数据与模拟结果之间存在一定差距。究其原因可能为,进行离散元数值模拟时,土颗粒间的黏结力在土样发生屈服后无法发挥作用,导致土样的整体应力难以维持。

由离散元模拟的应力-应变关系曲线得到不同水泥掺量水泥稳定土的力学测试指标,即抗剪强度 $\sigma_m$ 、弹性模量 $E$ 和破坏应变 $\epsilon_p$ ,与实测结果的对比如图5所示。

表2 水泥稳定土的离散元性质指标

水泥 掺量/ %	颗粒接触刚度/ ( $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ )		平行黏结刚度/ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )		平行黏结强度/ MPa		平行黏 结半径 因子	摩擦 因数
	切向	法向	切向	法向	切向	法向		
0	2.3	2.3	1.0	1.0	0.5	0.5	1	0.5
2	2.8	2.8	1.2	1.2	0.8	0.8	1	0.5
4	3.1	3.1	1.4	1.4	1.0	1.0	1	0.5
6	3.3	3.3	1.5	1.5	1.2	1.2	1	0.5
8	3.5	3.5	1.6	1.6	1.3	1.3	1	0.5
10	3.6	3.6	1.6	1.6	1.3	1.3	1	0.5

从图5可以看出:由离散元模拟得到的力学测试结果和单轴压缩试验的测试结果比较接近,两者随水泥掺量的变化趋势存在很好的同步性。这也反映了该文采用的离散元模型与材料参数对稳定土试样

的力学行为进行预测是较为准确的。

图6为水泥掺量0%、4%、6%和10%的稳定土试样经过单轴压缩后的破坏图。

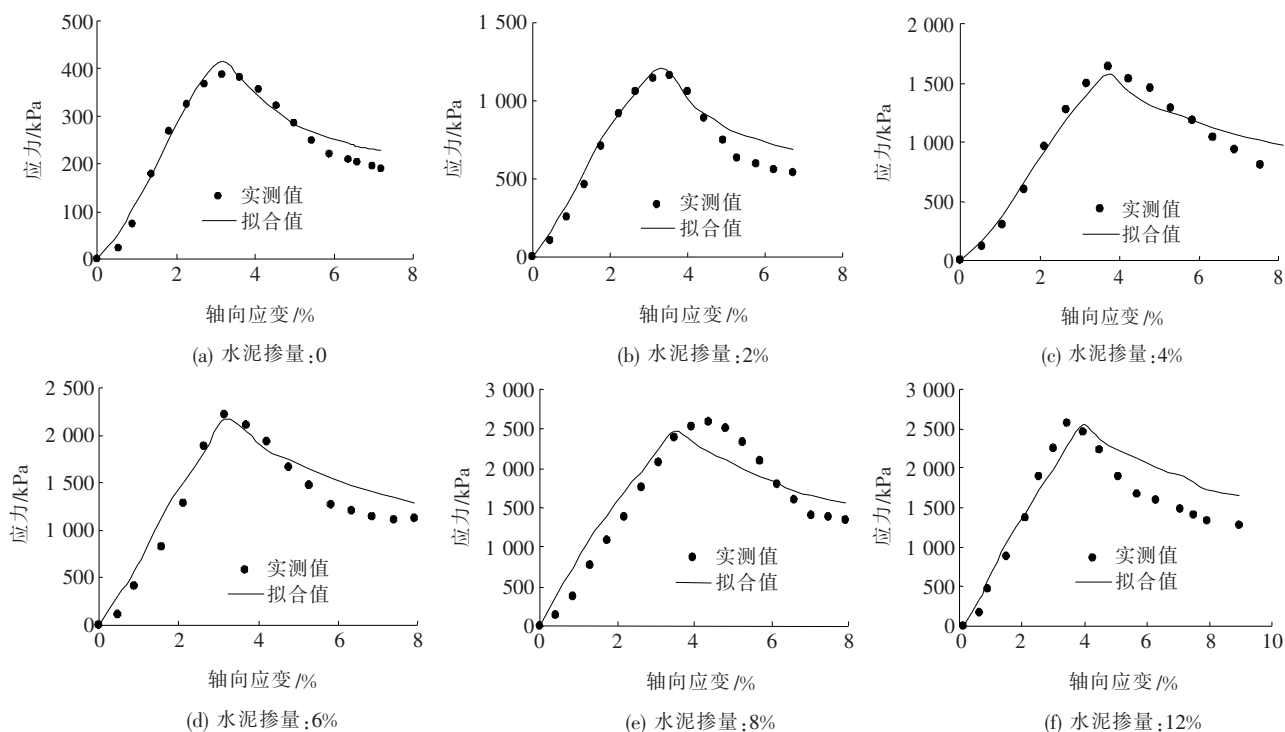


图 4 不同水泥掺量下稳定土的应力-应变关系曲线

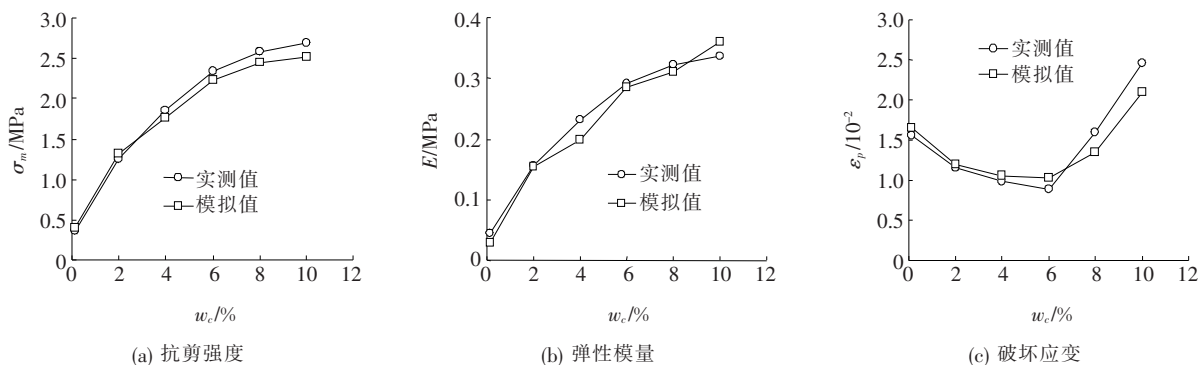


图 5 离散元模拟下稳定土的力学性能指标

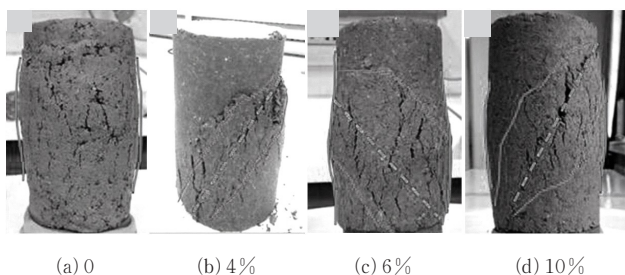


图 6 不同水泥掺量单轴压缩试验的土样破坏模式

从图 6 可以看出:水泥掺量对土样破坏裂纹的产生具有明显影响。当水泥掺量为 0 时,稳定土试样中部发生了破碎,整体呈压碎破坏形式,裂纹沿轴向向下延伸,且裂纹的尺寸较小;当水泥掺量为 4% 和 6% 时,试样中部的破碎程度有所降低,裂纹数量减少但

连通程度有所增加;当水泥掺量为 10% 时,稳定土试样在压缩破坏后只有一条贯通的裂纹,整体破坏形式呈剪切性破坏。

图 7 为不同水泥掺量的稳定土试样的 PFC<sup>2D</sup> 剪切破坏矢量图,图中短线表示土颗粒经过剪切破坏后的位移矢量,箭头为位移矢量的方向。

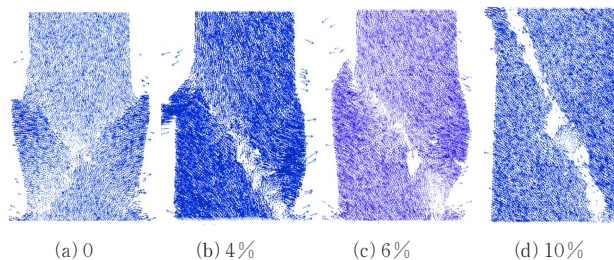


图 7 离散元颗粒流模拟下的土样位移矢量图



由图7可以看出:随着水泥掺量的增加,稳定土试样的裂隙贯通程度越大。水泥掺量较低时,试样偏向于压碎破坏形式;水泥掺量较高时,试样偏向于剪切破坏形式。基于离散元模拟的位移矢量场分布可以反映水泥稳定土的力学响应机制。对于水泥掺量为0的土样,其颗粒间的黏结强度低,很容易出现内部颗粒错动和滑移,因此发生破坏时的裂纹较多。而随着水泥掺量的增加,软土与水泥发生化学反应,土样的密实程度增大,颗粒之间的化学键强度也明显提高。这使得土颗粒的黏结性能增强,经过单轴荷载作用破坏后的试样呈剪切破坏模式。

对比图6、7可以看出:基于PFC<sup>2D</sup>软件的离散元细观模拟可以较好地反映土体真实的破坏形式。离散元模拟和单轴压缩试验均表明水泥掺量对稳定土的破坏模式有较大的影响。在单轴荷载作用下,普通软土试样内部的土颗粒发生大小和方向不同的位移,大量的剪切裂纹在土体内部萌生。而对于胶结良好的水泥稳定土试样,在较大荷载作用下才会发生破坏,此时土体内部颗粒已经被充分压密,土样内部存在明显的剪切滑移面。

### 3 结论

该文对路基工程中不同掺量的水泥稳定软土试样分别进行单轴压缩试验和PFC<sup>2D</sup>离散元颗粒流细观模拟,得到如下结论:

(1) 水泥土的应力-应变关系曲线与水泥掺量存在密切联系,其抗剪强度 $\sigma_m$ 与弹性模量 $E$ 随水泥掺量 $w_c$ 增加表现出指数函数上升的规律;破坏应变 $\epsilon_p$ 随 $w_c$ 增加呈二次函数变化特征。

(2) 由离散元模拟得到的水泥土的应力-应变关系曲线与单轴压缩试验的实测结果较为接近,由模拟得到的抗剪强度 $\sigma_m$ 、弹性模量 $E$ 和破坏应变 $\epsilon_p$ 也和实测值具有较好的相关性。

(3) 离散元模拟结果表明水泥掺量对水泥稳定土在单轴荷载下的破坏模式有明显影响。不含水泥的土样破坏时出现了大量裂纹,为压碎破坏模式;而随着水泥掺量的增加,水泥稳定土的破坏形式逐渐向剪切破坏模式过渡。

(4) 基于PFC<sup>2D</sup>软件的离散元模拟的位移矢量场分布,从细观角度有效地反映了单轴压缩试验后土样的真实破坏形式。

### 参考文献:

- [1] 秦世伟,陆小锋,张国军.水泥土搅拌法加固淤泥质黏土的试验研究[J].中外公路,2019,39(5):256-260.
- [2] 易耀林,李晨,孙川,等.碱激发矿粉固化连云港软土试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1820-1826.
- [3] 黄新,胡同安.水泥-废石膏加固软土的试验研究[J].岩土工程学报,1998,20(5):75-79.
- [4] 宋爱苹,张亚飞.冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性[J].中外公路,2017,37(3):221-223.
- [5] 侯芮,陈四利,马啸,等.铁尾矿砂水泥复合土的力学性能研究[J].中外公路,2019,39(1):206-209.
- [6] XING X, LI T, FU Y. Determination of the related strength parameters of unsaturated loess with conventional triaxial test[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(1):82.
- [7] 杨永亮,王鹏云,王林浩,等.偏高岭土对水泥砂土渗透性的影响研究[J].中外公路,2018,38(6):232-234.
- [8] WU L Z, ZHOU Y, SUN P, et al. Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure[J]. Catena, 2017, 150:1-8.
- [9] 陈维超,杨伟军.水泥改良砂土无侧限抗压强度试验研究[J].中外公路,2019,39(6):188-196.
- [10] 关振长,廖重辉,罗志彬,等.列车循环荷载下水泥土复合地基沉降的颗粒离散元计算[J].铁道建筑,2015,55(12):104-109.
- [11] VAN LYSEBETTEN G, VERVOORT A, MAERTENS J, et al. Discrete element modeling for the study of the effect of soft inclusions on the behavior of soil mix material[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 342-351.
- [12] 李涛,蒋明镜,张鹏.非饱和结构性黄土侧限压缩和湿陷试验三维离散元分析[J].岩土工程学报,2018,40(S1): 39-44.
- [13] 李海滨,青维,盛燕萍.基于CT扫描和离散元的沥青混合料动态模量虚拟仿真[J].中外公路,2016,36(5): 202-207.
- [14] JIN L, ZENG Y, XIA L, et al. Experimental and numerical investigation of mechanical behaviors of cemented soil-rock mixture[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(1):337-354.