

考虑颗粒破碎的固化泥粒-砂土混合填料 压缩特性研究

韩超¹, 俞越中¹, 柏彬¹, 徐志豪^{2*}, 张献蒙¹, 刘寅莹¹, 孔硕颖¹

(1. 国网江苏省电力有限公司 建设分公司, 江苏 南京 210000; 2. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 固化泥粒与砂土的混合填料为废弃工程泥浆的资源化处置提供了理想解决方案, 而填方工程的压缩特性与混合填料的强度特性及颗粒破碎特征密切相关。该文通过开展不同颗粒级配的混合填料大尺寸压缩试验, 建立考虑颗粒破碎的固化泥粒-砂土混合填料的侧限压缩试验离散元 (DEM) 模型, 探究了压实过程中混合填料压缩模量变化和固化土颗粒破碎量, 重点分析了固化泥粒掺入比与初始孔隙比等因素对混合填料的压缩特性和应力-应变关系的影响规律, 并论证了混合填料用于填方工程的可行性。结果显示: 密实条件下固化泥粒-砂土混合填料的压缩性与泥粒掺入比呈正相关, 而与泥粒强度呈负相关, 并且一定固化泥粒的掺入可有效降低松砂在低应力水平下的压缩性, 而高应力水平下受泥粒破碎的影响导致混合填料压缩性稍有提升; 混合填料在压缩过程中, 其颗粒破碎度随泥粒掺入比和砂土初始孔隙比的增加而提高, 且在压缩终态破碎率均趋近于80%。

关键词: 混合填料; 大尺寸压缩试验; 离散元模型; 压缩模量; 颗粒破碎特征

中图分类号: U414

文献标志码: A

Study on Compression Characteristics of Solidified Mud-Sand Mixed Fillers Considering Particle Breakage

HAN Chao¹, YU Yuezhong¹, BAI Bin¹, XU Zhihao^{2*}, ZHANG Xianmeng¹, LIU Yinying¹, KONG Shuoying¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Construction Branch, Nanjing, Jiangsu 210000, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The mixed filler of solidified mud and sand provides an ideal solution for the resourceful disposal of wasted engineering mud, and the compression characteristics of filling engineering are closely related to the strength characteristics and particle breakage characteristics of mixed fillers. This study conducted large size compression tests on mixed fillers with different particle gradations and established a discrete element method (DEM) model that incorporated particle breakage for the side-limited compression tests of solidified mud-sand mixed fillers. The changes in the compression modulus of the mixed fillers and the amount of solidified soil particle breakage during compaction were investigated. The study placed a special focus on analyzing the impact of factors such as the solidified mud mixing ratio and the initial void ratio on the compression properties and the stress-strain relationship of the mixed fillers. It also demonstrated the feasibility of using mixed fillers in filling engineering. The results show that under compacted conditions, the compressibility of the solidified mud-sand mixed fillers is positively correlated with the mixing ratio of clay particles, but negatively correlated with the strength of mud particles. The addition of a certain amount of solidified mud particles can effectively reduce the compressibility of loose sand at low stress levels. However, the compressibility of the mixed fillers

收稿日期: 2023-05-05 (修改稿)

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目 (编号: J2020070)

作者简介: 韩超, 男, 博士, 高级工程师. E-mail: hanchaohust@126.com

*通信作者: 徐志豪, 男, 博士. E-mail: xuerman722@hust.edu.cn

slightly improves due to the breakage of mud particles at high stress levels. In the compression process, the degree of particle breakage in the mixed filler increases with the increase in mud mixing ratio and sand initial void ratio, and the final breakage rate tends to approach 80% at the end of compression.

Keywords: mixed filler; large size compression test; discrete element model; compression modulus; particle breakage characteristics

0 引言

各类港口工程、地下工程建设中伴随着巨量废弃工程泥浆的产出,若处置不当极易产生环境污染和资源浪费等问题^[1-2]。目前工程界广泛采用直接固化法对废弃工程泥浆就地进行化学改性处理^[3-7],改性后淤泥可用作填方材料实现就地资源化消纳。然而,当泥浆产出工点周边并无相匹配的填方工程以消纳固化泥填料时,若将泥浆外运进行异地处置,则在其运输过程中存在遗撒污损城市路面的环境风险。因此,如何实现工程泥浆的异地填料化利用成为目前亟待解决的难题。

实际上,如若仅仅只为达到废弃泥浆的高效减量化目的,目前工程界往往采用旋流筛分和板框式压滤等机械脱水技术将大体量泥浆转化为固态泥饼^[8-10],虽然因泥饼的工程性质较差而无法直接利用,但是该方法却极大地方便了后续外运异地处置。鉴于此,为实现工程泥浆的异地资源化处置,结合上述化学固化技术与机械脱水技术,研究团队提出了一体化絮凝调理—压滤脱水—粒化—固化工艺(Combined-Flocculation/Dehydration/Granulation/Solidification,简称C-F/D/G/S工艺),如图1所示。工艺核心原理是:向高含水率泥浆中依次混入环保型固化剂和絮凝剂,然后借助板框压滤机促使经过絮凝调理的泥浆混合物快速脱水,最后借助粒化装置自动将泥饼转化为泥粒,中后期借助固化剂化学反应高效提升经脱水密实化的泥粒的力学特性。该技术可一次性将高含水率泥浆直接高效地改性为高性能散粒填料,不仅可方便被外运至其他填方工程,还可与素土混合作为填方材料加以资源化利用,该类填料化利用途径为废弃工程泥浆的资源化处置提供了理想的解决方案^[11-13]。

众多学者也对泥浆处置技术及其工程特性开展了深入的研究工作。Zhang等^[14-15]提出了新型絮凝—固化联合方法(FSCM)用于超高含水量淤泥

(EHW-MS)的工程处置,相比传统水泥固化法和絮凝调理法,对EHW-MS的固化强度可提高5.7倍,证实了絮凝—固化联合方法的技术优越性^[16]。姬凤玲等^[17]和丁慧等^[18]通过固化技术对淤泥进行土工材料化处理并研究其工程性质,证明淤泥经过固化处理后作为填料的技术可行性。然而值得注意的是,对于絮凝—固化—板框压滤脱水联合处理技术所形成的固化泥粒,当其与素土混合作为填方材料时,在实际应用过程中固化泥粒可能发生开裂、破碎,将影响混合填料的压实性和宏观力学特性^[19-20],进而对填方工程整体的质量与耐久性产生重要影响。

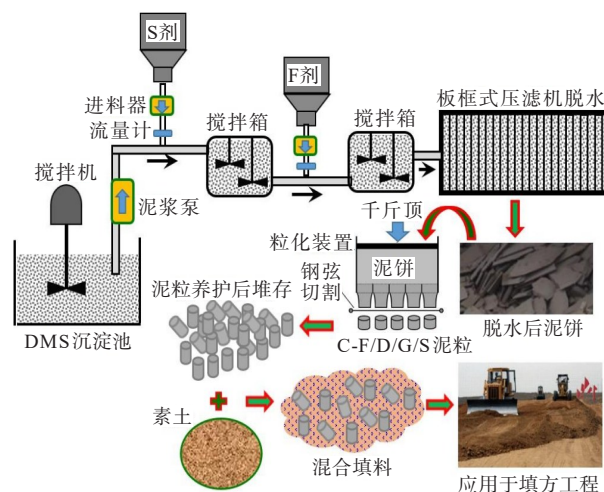


图1 C-F/D/G/S工艺原理图

Figure 1 Schematic of C-F/D/G/S process

传统室内试验受限于量测精度无法直观获得目标颗粒的实际受力状态和颗粒破碎的演化过程。基于非连续介质理论的离散单元法(DEM)已被广泛应用于研究颗粒应力水平、颗粒级配、颗粒形态等因素对破碎率及破碎后土体力学特性的影响^[21-27]。但目前仍尚未见专门针对固化土颗粒破碎行为的文献报道。

基于此,本文通过开展不同颗粒级配的大尺寸压缩试验^[28],揭示C-F/D/G/S工艺所形成的泥粒—砂土混合填料的宏观力学特性,探究压实过程中混

合填料中泥粒破碎程度及级配演化规律;同时,结合离散元数值模拟,建立考虑颗粒破碎的固化泥粒-砂土混合填料的侧限压缩试验离散元(DEM)模型,重点分析固化泥粒掺入比与初始孔隙比等因素对混合填料的压缩特性和应力-应变关系的影响规律,探索C-F/D/G/S工艺应用于淤泥填料化利用工程的实践可行性,为固化泥粒与砂土混合填料应用于填方工程提供理论支撑。

1 混合填料的大尺寸压缩试验

为揭示混合填料的宏观力学特性,探究压实过程混合填料中泥粒破碎程度及压缩性,开展不同颗粒级配的大尺寸压缩试验。为简洁表达,下文将废弃工程泥浆(Waste Mud Slurry)简称WMS,将无侧限抗压强度试验(Unconfined Compressive Strength test)试样简称UCT试样,将一体化絮凝调理-压滤脱水-粒化-固化工序简称C-F/D/G/S工艺,将C-F/D/G/S工艺形成的泥粒和泥饼分别直接简称泥粒和泥饼,将絮凝剂和固化剂分别简称F剂和S剂,将同时添加F剂和S剂的WMS简称F-S WMS。

1.1 试验流程、材料及工况

本试验先通过实验室用小型板框式压滤机对F-S WMS试样进行压滤脱水获得泥饼,然后将泥饼重塑制备成UCT试样及不同直径和不同长径比的泥粒[图2(a)],待养护至目标龄期后,测定其无侧限抗压强度,并立即将泥粒与素土(细砂)按照不同比例混合形成泥粒-素土混合填料[以下简称“混合填料”,见图2(b)];室内压缩试验主要采用ShearTracIII-DSS大型直剪测试系统,首先将混合填料分两层装入试验仪内(试样尺寸:直径300 mm,高120 mm),用击实锤振捣混合填料至预定高度,击实过程中须使击实锤竖直下落以保证击实均匀,在击实过程中随时测量试样高度以避免过分击实,压实至密实状态($e_0=0.584$)后使用压平器抹平试样表面,随后开展大尺寸压缩试验,测定孔隙比随压力水平的变化规律,确定混合填料的压缩模量。

本试验所用WMS参数见表1,细砂为试验用标准砂,天然密度 1.578 g/cm^3 。所用絮凝剂为阴离子型聚丙烯酰胺AN926SH(掺量 0.087%),所用固化剂为GGBS+OPC类型复合固化剂[$42.5^\#$ 普通硅酸盐水泥(OPC)、S95级矿渣粉(GGBS),GGBS:OPC=

1.0,掺量为 $7.5\%\sim 20\%$]。F-S WMS板框压滤脱水过程中压滤压力维持 1.0 MPa 、持续时间维持 40 min 。通过调节复合固化剂掺量,获得不同无侧限抗压强度的C-F/D/G/S泥粒。



(a) 泥饼重塑后的泥粒



(b) 泥粒-素土混合填料

图2 试验材料

Figure 2 Experimental materials

表1 WMS泥浆参数

Table 1 Parameters of waste mud slurry							%
天然含水率	液限	塑限	黏粒含量	粉粒含量	砂粒含量	有机质含量	天然含水率
93	51	24	5.6	79.5	14.9	2.3	93

大尺寸压缩试验工况汇总见表2,试验共考虑两种泥粒强度(250 kPa 和 600 kPa)、两种泥粒和素土掺入比(20% 和 50%)、3种泥粒形态(即: $\phi 3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ 、 $\phi 3\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 和 $\phi 5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$),更多工况将在后续DEM数值模拟中予以考虑。

表2 混合填料大尺寸压缩试验工况

Table 2 Large size compression test of mixed fillers under different conditions

工况	泥粒强度/ kPa	泥粒掺入比/ %	泥粒尺寸/ (cm×cm)
F1	250	20	$\phi 3\times 3$
F2	250	50	$\phi 3\times 3$
F3	600	20	$\phi 3\times 3$
F4	600	50	$\phi 3\times 3$
F5	600	50	$\phi 3\times 6$
F6	600	50	$\phi 5\times 5$

1.2 试验结果分析

图3给出了不同工况的混合填料大尺寸压缩试验结果,并分别对比了不同泥粒掺入比、不同泥粒强度和不同泥粒尺寸下压缩曲线的差异。

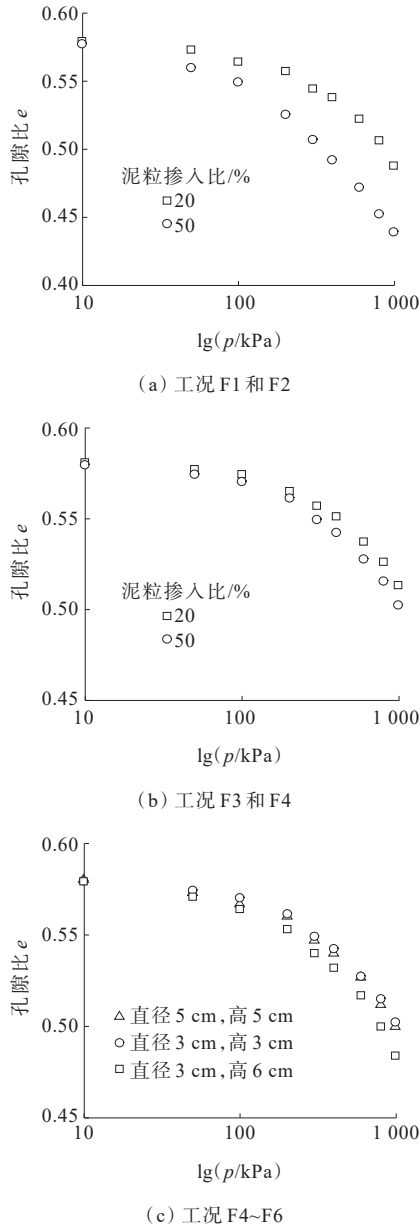


图3 混合填料压缩曲线

Figure 3 Compression curve of mixed fillers

由图3(a)可知:密实条件下,泥粒掺入比越高,混合填料压缩性越大,这可能是由于在压缩过程中较高的泥粒掺入比对固体颗粒的破碎程度具有一定提升作用。此外,对比图3(a)、(b)可以看出:在泥粒掺入比保持一定的前提下,泥粒本身无侧限抗压强度越大,混合填料压缩性越低,表明泥粒强度对混合填料压缩性具有显著影响,需在实际应用中根据工

程需求合理确定泥粒强度。图3(c)对比了不同泥粒尺寸下的压缩曲线变化规律,结果显示:在泥粒掺入比及其自身无侧限抗压强度保持一定的前提下,泥粒本身高径比对混合填料压缩性有一定影响。当高径比大于1.0时,高径比越大,混合填料压缩性越高;当高径比保持在1.0时,泥粒尺寸(直径或高度)对混合填料压缩性影响不大。

2 DEM模型的建立

2.1 固化泥粒细观参数的标定

建立考虑颗粒破碎的固化泥粒DEM模型,需明确试样的破坏模式和宏观应力应变响应。通过无侧限抗压强度试验(UCT试验)以及相应的DEM模拟对固化泥粒的细观参数进行标定。室内UCT试样原料土为苏州常熟市白鹤滩±800 kV换流站工程内废弃底泥(简称为底泥),土粒相对密度为2.69,液限和塑限分别为36.62%和25.97%,有机质含量为4.57%。固化剂由42.5#普通硅酸盐水泥和S95级矿渣粉按1:1配比混合制备,所用絮凝剂为阴离子型聚丙烯酰胺AN926SH(掺量0.087%)。试验设备为应变控制式三轴仪,加载速率为1 mm/min。试样制备如下:

(1) 取定量底泥加水后均匀搅拌5 min制成135%含水率的流态泥浆,按比例依次加入固化剂与絮凝剂,分别搅拌均匀后制成絮凝-固化混合泥浆。

(2) 将混合泥浆分3次沿模具壁缓缓倒入50 mm直径的圆柱模具,每次倒入量为1/3模具容积。为避免混合泥浆气泡影响试样强度,每次倒入后振捣5 min使试样内部气泡从表面破出。试样灌满并振捣后用刮刀将表面刮平并用保鲜膜封盖。

(3) 将试样放置在25℃保温箱内水浴养护14 d后取出脱模,用土工刀切削至100 mm标准高度。

在DEM模拟中,试样尺寸及加载速率均与室内试验保持一致。采用半径2 mm的球形颗粒生成100 mm高、50 mm直径的圆柱试样。考虑到计算效率和精度,DEM模拟过程对固化土颗粒半径进行适当放大,采用均一粒径的球形颗粒成样。为精准反映该土样胶结颗粒的破碎特征,固化土颗粒间的接触采用软黏结接触模型(Soft Bond Contact Model, SBCM)^[29],与常用来模拟胶结材料的平行黏结接触模型(Linear

Parallel Bond Contact Model,LPBCM)^[30]类似,SBCM在黏结状态下可承受拉应力和剪应力,在剪应力达到其破坏强度时黏结断裂。与LPBCM不同的是,SBCM在拉应力达到峰值强度时并不立即破坏,而是经历一段软化阶段后再破坏。为准确反映颗粒间接触状态,模拟过程循环监测SBCM的黏结状态,

将黏结破坏后的SBCM重新定义为线性接触模型(Linear Contact Model,LCM)。考虑到试样颗粒间黏结强度分布的随机性,假定试样颗粒间的黏结强度分布服从正态分布,加载开始前循环遍历各个接触并对其强度参数进行赋值。本文所采用的固化泥粒DEM模型的细观参数见表3。

表3 固化泥粒DEM模型细观参数
Table 3 Meso-parameters of DEM model of solidified mud

密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	有效模量 E^*/kPa	刚度比 k^*	黏结法向强度 σ_c/MPa	黏结切向强度 τ_c/Pa	摩擦系数 μ	软化系数 ζ	强度软化 系数 γ	黏结半径 系数 r
2 350	1.2×10^4	1.5	4.8 ± 0.96	$(5.8\pm 1.16)\times 10^4$	0.45	100	0.8	1

UCT试验与DEM模拟对比如图4所示,DEM模拟结果与室内试验数据吻合较好,对于本文中的高含水率固化淤泥试样,UCT试验中的应力-应变曲线在峰值强度前近似为线性增长,在峰后呈软化趋势,该试样的无侧限抗压强度为250 kPa左右。图5为UCT试样的典型破坏模式,可见DEM模型破坏模式与室内试验基本一致。综合来看,表3所示参数可反映该类固化泥粒的强度特性、破碎行为以及应力应变响应。

2.2 砂土细观参数的标定

为实现固化泥粒-砂土混合填料的DEM模拟,还需进行砂土颗粒的细观参数标定试验。本文以砂土的室内侧限压缩试验为基础建立相应的DEM模型。DEM模型尺寸与室内试验保持一致。砂土颗粒采用球形颗粒模拟,其不规则形状对颗粒间相互作用有重要影响。为模拟颗粒间的嵌固效果,接触模型采用抗滚动线性接触模型(RRLM)^[29]。砂土颗粒的细观参数取值见表4。考虑到计算效率,对砂土颗粒的粒径同样进行放大,控制半径在2.5~4.5 mm之间,服从均匀分布。试样初始空隙率与室内试验相同,压缩过程中引入墙体伺服机制进行分级压缩,为保证计算稳定,取最大伺服速度为0.01 m/s,在竖向荷载达到100 kPa前,每级荷载增量为1 kPa。在竖向荷载达到100 kPa后,每级荷载增量调整为10 kPa。为监测试样空隙率变化,在试样中心布置9个测量球对各个监测值取平均得到试样的平均空隙率。

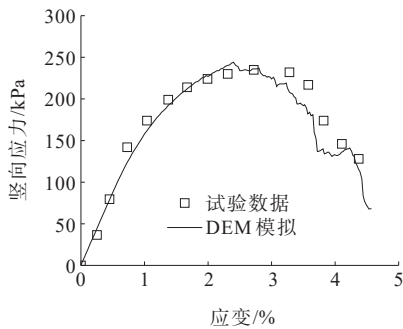


图4 UCT试验结果
Figure 4 Results of UCT test

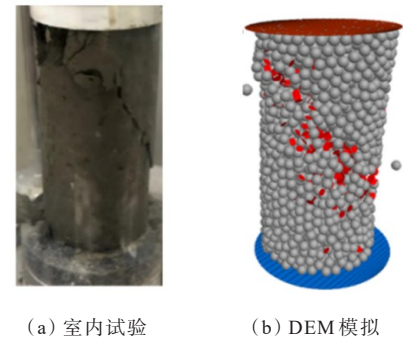


图5 UCT试样破坏模式
Figure 5 Failure mode of UCT sample

表4 砂土DEM模型的细观参数

Table 4 Meso-parameters of DEM model of sand

密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	有效模量 E^*/Pa	刚度比 k^*	摩擦系数 μ	抗滚动摩擦 系数 μ_r
2 800	6.25×10^7	1.2	0.5	0.35

图6、7为砂土的室内侧限压缩试验和DEM模拟结果对比,可见在初始压缩阶段($p<100\text{ kPa}$, $\epsilon<0.06$),试样孔隙比 e 迅速降低,竖向应变 ϵ 迅速增长。由于颗粒半径的放大导致在此阶段内,DEM模型比室内试验表现出更强的可压缩性。随着竖向压力 p 的增加,试样孔隙比呈线性减小,应变 ϵ 呈线性增长。

综合来看,DEM模拟与试验数据基本吻合,且在压缩中后期与室内试验的一致性更好。

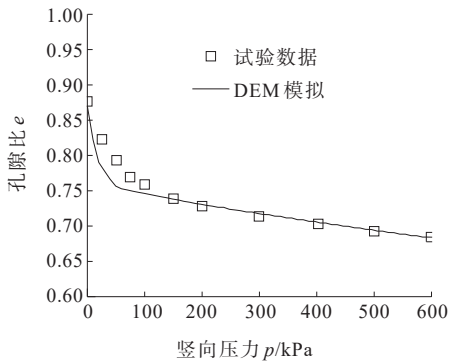


图6 试验和模拟过程中的 $e-p$ 曲线

Figure 6 $e-p$ curves during test and simulation

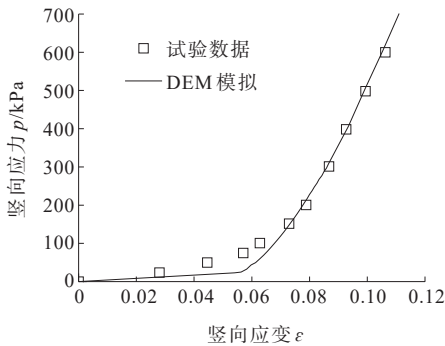


图7 试验和模拟过程中的 $p-\varepsilon$ 曲线

Figure 7 $p-\varepsilon$ curves during test and simulation

2.3 混合填料压缩试验的DEM模拟

可用于填方工程的固化泥粒-砂土混合填料为实现废弃工程泥浆的异地资源化利用提供了新思路,而混合填料的压缩特性对基础工程沉降量具有重要影响,其中压缩模量也是土体沉降计算分析中的重要参数。然而,常规室内试验受限于量测精度无法观测土体内部颗粒破碎特征及孔隙演化,因此基于上述标定试验,进行了固化泥粒-砂土混合填料的侧限压缩DEM模拟试验,如图8所示。各类土体细观参数与上述标定试验一致。为便于工程施工,混合填料中固化泥粒设为高60 mm、直径30 mm的规则圆柱体。考虑到混合填料中固化泥粒呈随机分布,模拟过程以泥粒中心轴和中心点为随机向量,以此实现泥粒随机分布。如图8所示,首先指定随机种子生成向量 \vec{n}_0 和 \vec{n}_r ,根据下式计算得到圆柱体底面中心位置矢量 \vec{n}_b 和中心点距离圆柱表面最大距离 R_c :

$$\vec{n}_b = \vec{n}_0 - \frac{H_c}{2} \vec{n}_r \quad (1)$$

$$R_c = \frac{\sqrt{H_c^2 + D_c^2}}{2} \quad (2)$$

式中: \vec{n}_0 和 \vec{n}_r 分别为圆柱体中心坐标向量和中心轴法向向量; H_c 和 D_c 分别为圆柱体高度和直径。

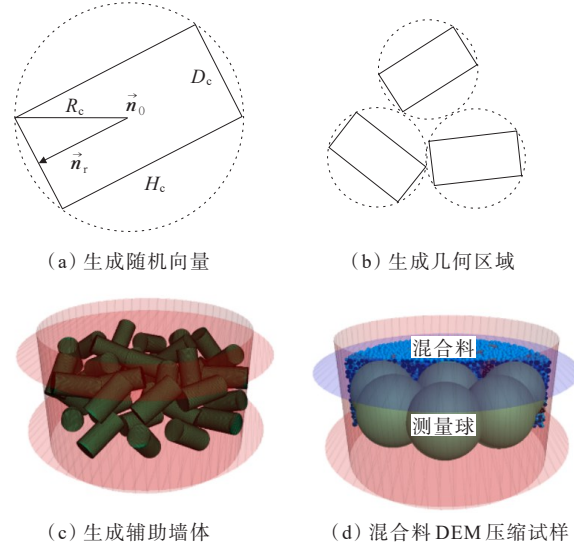


图8 混合填料DEM侧限压缩试样生成过程

Figure 8 Generation process of side-limited compression sample of mixed filler DEM

混合填料压缩试验DEM建模过程简述如下:

(1) 在高120 mm、直径300 mm的圆柱区域内生成目标空隙率的砂土并循环计算至稳定状态。

(2) 以 R_c 和 \vec{n}_b 为判断依据在试样内生成随机分布的几何区域,删除该随机区域内部的颗粒并将这些随机区域用封闭的辅助墙体替换以避免试样生成过程中颗粒逃逸。在这些封闭辅助墙体内部生成固化土颗粒并循环计算至稳定状态。

(3) 对各固化土颗粒参数赋值并布置测量球,如图8(d)所示。当颗粒速度和接触力清零后删除辅助墙体。

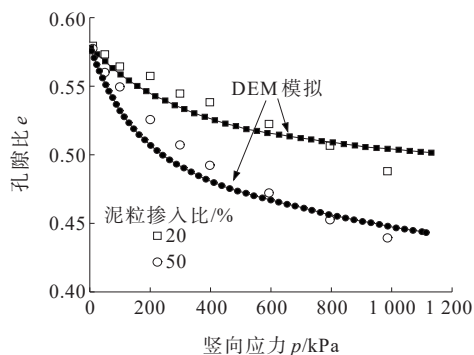
(4) 设置监测参量,引入伺服机制,以1 kPa的竖向应力对试样进行预压缩。

为探究混合填料中固化泥粒掺入比对其压缩特性的影响,以固化泥粒-砂土体积比为控制变量建立了不同泥粒掺入比 C 的混合填料压缩模型。考虑到初始孔隙比 e_0 对混合填料压缩变形有重要影响,分别建立砂土在初始状态为松散状态($e_0=0.852$),稍密状态($e_0=0.748$)和密实状态($e_0=0.584$)下不同固化泥粒-砂土混合填料的试样模型,并进行分析讨论。

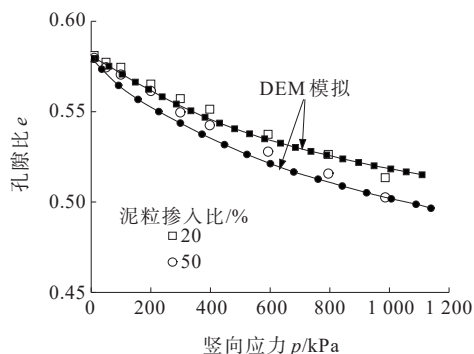
3 结果与分析

3.1 验证 DEM 模型的合理性

图9为不同工况下混合填料大尺寸压缩试验结果和DEM离散元模拟结果对比图。



(a) 工况 F1 和 F2



(b) 工况 F3 和 F4

图9 压缩试验结果和DEM离散元模拟结果对比图

Figure 9 Comparison of compression test results and DEM discrete element simulation results

结果显示:在泥粒掺入比分别为20%和50%的前提下,结合图3工况,混合填料大尺寸压缩试验与DEM模拟针对竖向压力与孔隙比变化曲线研究吻合度较高,表明前述宏观强度指标与细观模型参数之间的近似定量关系具有较强的合理性,可用于混合填料的后续参数分析。

3.2 混合填料的压缩指数与压缩模量

图10为初始孔隙比是0.852的松散砂土与不同泥粒掺入比的混合填料在压缩过程中的 $e-\lg p$ 曲线,其压缩指数 C_c 由 $e-\lg p$ 曲线的割线斜率计算:

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta(\lg p)} \quad (3)$$

土体压缩指数越大,同等竖向压力增量下试样孔隙比变化量越大,即土体压缩性越强。结合图10

可以看出:松散状态下泥粒掺入比 C 为20%的混合填料在初始压缩阶段中的压缩指数最小,而纯砂土压缩指数最大,表明固化泥粒的掺入一定程度降低了混合填料的压缩性。在高应力下(竖向应力达到500 kPa后),固化泥粒之间的黏结逐步达到峰值强度而发生破坏,即泥粒开裂或破碎,混合填料的压缩指数逐渐大于或等于纯砂土的压缩指数。由此可见,在低应力水平下,具有一定无侧限抗压强度的固化泥粒的掺入可降低松砂的压缩指数,而在高应力水平下由于固化泥粒的颗粒破碎导致混合填料的压缩性稍有提升。从混合填料的压缩特征变化来看,适当掺量的固化泥粒-砂土混合填料应用于填方工程具有较高的实践可行性,但在应用中同样需谨慎考虑颗粒破碎的影响并确定合理的固化强度。

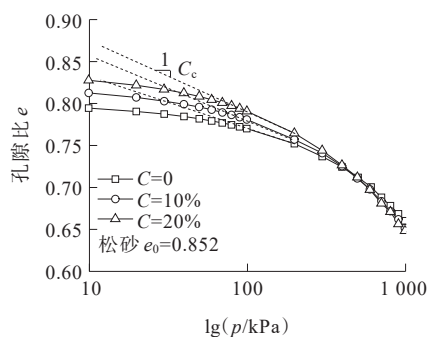


图10 松散砂土与不同含量固化泥粒混合填料 $e-\lg p$ 曲线

Figure 10 $e-\lg p$ compression curves of loose sand mixed with solidified mud-sand at different contents

图11、12分别为稍密砂土($e_0=0.748$)和密实砂土($e_0=0.584$)与固化泥粒混合填料的 $e-\lg p$ 曲线,稍密和密实状态下混合填料的孔隙比变化量总体小于松散试样。可以看出:不含固化泥粒的纯砂土在此状态下的压缩性较低,而当泥粒掺入比 C 提高至10%和20%后,混合填料的孔隙比变化量逐渐提高。图11进一步对比了泥粒掺入比从10%到50%下密实砂土与固化泥粒混合填料的 $e-\lg p$ 曲线。结果显示:掺加密实砂土后混合填料的压缩指数伴随泥粒掺入比 C 的增加而提高,但其整体变化幅度依次弱于掺加稍密砂土和松散砂土的工况。说明固化泥粒的掺入提高了砂土的压缩性,然而伴随试样初始孔隙比 e_0 的减小,混合填料的压缩性逐步降低,且在密实状态下的压缩性最低,固化泥粒的掺入对混合填料压缩特性的影响也最小。

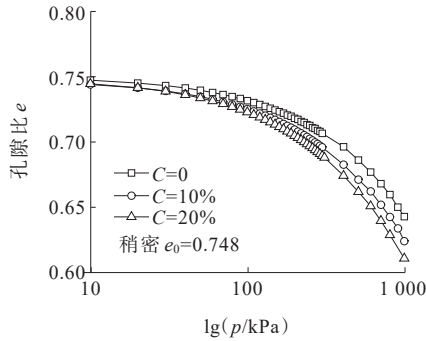


图 11 稍密砂土与不同泥粒掺入比混合填料 e - $\lg p$ 曲线

Figure 11 e - $\lg p$ compression curves of slightly dense sand mixed with solidified fillers at different contents

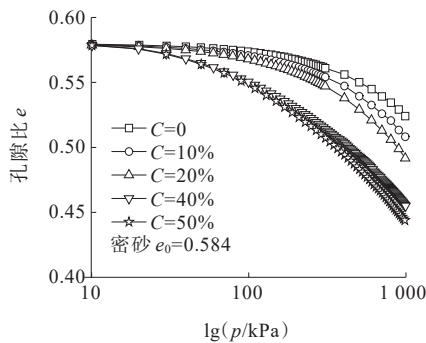


图 12 密实砂土与不同泥粒掺入比混合填料 e - $\lg p$ 曲线

Figure 12 e - $\lg p$ compression curves of dense sand mixed with solidified fillers at different contents

土体的压缩模量 E_s 是表征其压缩特性的另一指标,可由侧限压缩过程中的应力-应变曲线取割线斜率求得:

$$E_s = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon} \quad (4)$$

为方便工程计算,常取竖向压力为 100 kPa 和 200 kPa 之间的割线模量计算土体的压缩模量 E_{1-2} 。图 13 为不同初始孔隙比下的各个试样的应力-应变曲线,可见各组试样在压缩后期均呈线性增长,而在压缩初始阶段中松砂-泥粒混合填料的应变发展较为迅速,且固化泥粒掺入比的影响随试样密实度的增加而逐渐明显。图 14 深入比较了不同泥粒掺入比下密实砂土的应力-应变曲线,可以发现混合填料在压缩初期的应变率随着泥粒掺入比的增加而增大,但在加载后期趋于同一稳定值。这是由于密砂-泥粒混合填料其本身的压缩性较低,而随着泥粒掺入比的增加,受泥粒破碎的影响导致混合填料在压缩初期的应变率大幅提高。

由式(4)计算的各试样的压缩模量见表 5,各组

试样中混合填料的压缩模量 E_{1-2} 均随泥粒掺入比的增加呈递减趋势。基于前述分析,固化泥粒的掺入在松砂-泥粒混合填料的压缩初期一定程度抑制了土体变形,然而当上覆荷载达到 100 kPa 后,根据表 5 中压缩模量 E_{1-2} 计算结果可知此时混合填料的压缩模量却已小于纯砂土的压缩模量。这可以从土体的压缩过程进行解释:土体的压缩实际是土骨架之间的孔隙被压缩,当压缩进行到后期时,土体压缩模量接近材料本身模量。换言之,固化泥粒本身的侧限压缩模量小于密实砂土,而松砂-泥粒混合填料经压缩逐渐转为密实状态,在初始压缩过程中,固化泥粒的孔隙很小,在小应力状态下相当于密实土颗粒。伴随压力增长,砂土颗粒逐渐被挤密,其压缩模量超过混合填料中的固化泥粒,最终使得混合填料整体压缩模量增加。

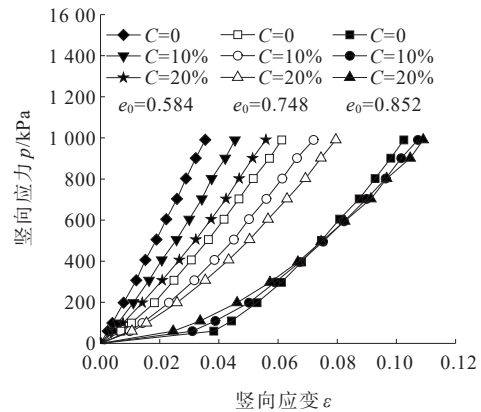


图 13 不同初始孔隙比下各试样的应力-应变曲线

Figure 13 Stress-strain curves of samples at different initial void ratios

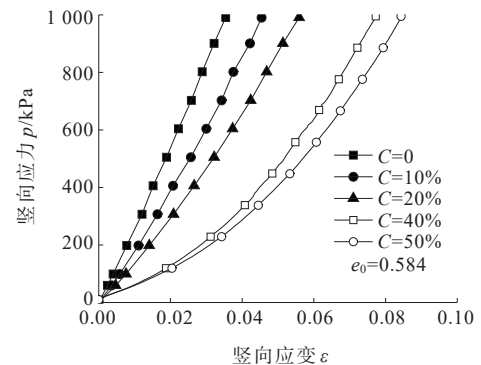


图 14 密实试样的应力-应变曲线

Figure 14 Stress-strain curves of compacted samples

为与前述模型对比,取无侧限抗压强度 q_u 为 600 kPa 的固化泥粒进行混合填料压缩试验,泥粒掺入比

C 分别取 40% 和 50%。图 15 为不同强度泥粒-砂土混合填料的应力-应变曲线。相比混合填料中固化泥粒 $q_u=250$ kPa 的工况而言,混合填料中固化泥粒 $q_u=600$ kPa 的试样其压缩性明显降低,同级竖向荷载下其应变发展速率显著变缓。从图 15 中还可以看出,掺加高强度固化泥粒的砂土混合填料的应力应变发展受泥粒掺入比的影响更小。表 6 给出了 4 种混合填料的压缩模量 E_{1-2} ,可见高强度泥粒能使混合填料压缩模量提升显著。

表 5 各组试样的压缩模量 E_{1-2}

Table 5 Compression modulus E_{1-2} of each sample

初始孔隙比 e_0	泥粒掺入比 $C/\%$	压缩模量 E_{1-2}/MPa
0.748	0	11.60
	10	8.80
	20	8.00
0.852	0	12.90
	10	11.20
	20	9.70
0.584	0	26.60
	10	19.10
	20	15.40
	40	8.16
	50	7.25

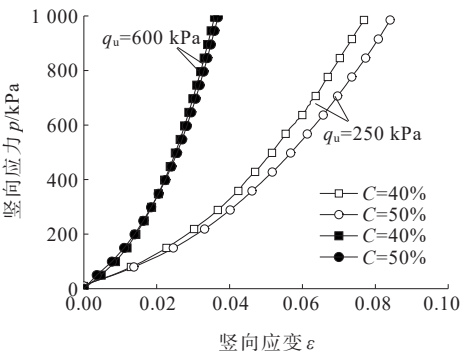


图 15 不同强度固化泥粒的混合填料的应力-应变曲线

Figure 15 Stress-strain curves of mixed fillers with solidified mud of different strengths

表 6 不同强度固化泥粒混合填料的压缩模量 E_{1-2}

Table 6 Compression modulus E_{1-2} of mixed fillers with solidified mud of different strengths

泥粒强度 q_u/kPa	泥粒掺入比 $C/\%$	压缩模量 E_{1-2}/MPa
250	40	8.16
	50	7.25
600	40	17.94
	50	16.09

3.3 压缩过程中固化泥粒破碎量

宏观量测手段无法反映固化泥粒间胶结状态的改变,因此对压缩过程中固化泥粒间的接触黏结破坏量进行了监测与统计分析,以接触黏结破坏量与初始总黏结接触数量之比表征颗粒破碎率 S 。图 16 为各混合填料试样压缩过程中固化泥粒的颗粒破碎率随竖向压力的变化曲线。

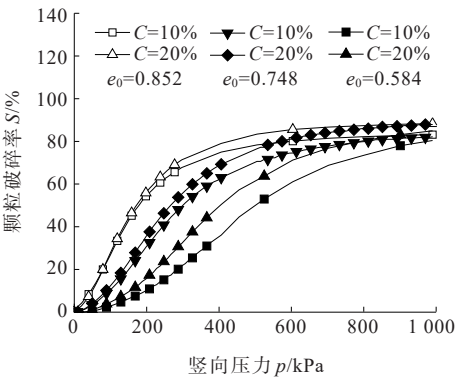


图 16 压缩过程中固化土颗粒破碎率随竖向压力的变化

Figure 16 Change in breakage rate of solidified soil particles with vertical pressure during compression

由图 16 可知:各组试样中颗粒破碎率均随竖向压力的增加呈非线性增长,在 1 000 kPa 终态下颗粒破碎率稳定在 80% 左右。砂土的初始孔隙比也会影响颗粒破碎情况,松散状态下,混合填料中固化泥粒的颗粒破碎率高于其他两组,且在 500 kPa 竖向应力下达到 80% 破碎率的稳定状态。结合图 10 可知,在 500 kPa 竖向应力下不同泥粒掺入比的混合填料试样孔隙比几乎相同,说明泥粒间黏结破坏对试样孔隙比的影响主要在 500 kPa 压力前。此外,在相同初始孔隙比下,颗粒破碎率随泥粒掺入比的增加而增加,且在密实砂土 ($e_0=0.584$) 中增量最大。

4 结论

- (1) 密实条件下,固化泥粒-砂土混合填料的压缩性随泥粒掺入比的增加而提高,随泥粒强度的提升而降低。泥粒高径比大于 1.0 时,混合填料压缩性随高径比的增加而提高;当高径比保持在 1.0 时,泥粒尺寸对混合填料压缩性影响不大。
- (2) 固化泥粒的掺入在一定程度上降低了松散砂土的初始压缩阶段压缩性,且混合填料的压缩模量 E_{1-2} 均随泥粒掺入比的增加呈递减趋势,表明适当

掺量的混合填料应用填方工程是可行的。

(3) 压缩过程中混合填料的颗粒破碎率 S 随泥粒掺入比的增加而提高, 砂土初始孔隙比同样影响固化泥粒的破碎程度, 混合填料中颗粒破碎率 S 随砂土初始孔隙比的增加而增大, 但在压缩终态各试样的破碎率均趋近 80%。

参考文献:

References:

- [1] PATMONT C, LAROSA P, NARAYANAN R, et al. Environmental dredging residual generation and management[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2018, 14(3): 335-343.
- [2] 汪顺才, 张春雷, 黄英豪, 等. 堆场疏浚淤泥含水率分布规律调查研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2823-2828.
WANG Shuncai, ZHANG Chunlei, HUANG Yinghao, et al. Study of diversification of water contents in dredged sediment storage yard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2823-2828.
- [3] 王东星, 陈政光. 氯氧镁水泥固化淤泥力学特性应变速率效应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2634-2646.
WANG Dongxing, CHEN Zhengguang. Strain rate effect on mechanical properties of magnesium oxychloride cement solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2634-2646.
- [4] 王东星, 肖杰, 李丽华, 等. 基于碳化-固化技术的武汉东湖淤泥耐久性演变微观机制[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3045-3053.
WANG Dongxing, XIAO Jie, LI Lihua, et al. Micro-mechanism of durability evolution of sludge dredged from East Lake, Wuhan based on carbonation-solidification technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3045-3053.
- [5] 骆嘉成, 邵吉成, 袁波, 等. 分层加固法对温州淤泥类渣土加固的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3483-3492.
LUO Jiacheng, SHAO Jicheng, YUAN Bo, et al. On-the-spot experimental study on the reinforcement of Wenzhou silt residue by layered reinforcement method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3483-3492.
- [6] 章荣军, 于同生, 郑俊杰. 材料参数空间变异性对水泥固化淤泥填筑路堤稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2078-2086.
- [7] 周恒宇, 王修山, 胡星星, 等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2089-2098.
ZHOU Hengyu, WANG Xiushan, HU Xingxing, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2089-2098.
- [8] 张忠苗, 房凯, 王智杰, 等. 泥浆零排放处理技术及分离土的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1456-1461.
ZHANG Zhongmiao, FANG Kai, WANG Zhijie, et al. Zero discharge treatment technology for slurry and engineering properties of separated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1456-1461.
- [9] 楼春晖, 张忠苗, 房凯. 泥浆压滤处理技术理论分析及试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 57-61.
LOU Chunhui, ZHANG Zhongmiao, FANG Kai. Theoretical and experimental analysis on the pressure filtration technology in slurries treatment[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(6): 57-61.
- [10] 潘卫东, 陈大江. 外加剂对可控水泥浆工作性能的影响[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 371-374.
PAN Weidong, CHEN Dajiang. Influence of admixture on working performance of controllable cement slurry[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 371-374.
- [11] 武博然, 柴晓利. 疏浚底泥固化改性资源化利用技术[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 335-342.
WU Boran, CHAI Xiaoli. Study on solidification/stabilization and reuse of dredged sediments[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 335-342.
- [12] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(10): 1561-1565.
ZHU Wei, ZHANG Chunlei, GAO Yufeng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(10): 1561-1565.

- [13] 郝光普,曹海莹.循环荷载作用下基层再生材料的永久变形研究[J].中外公路,2020,40(6):281-285.
HAO Guangpu, CAO Haiying. Study on Permanent deformation of base course recycled material under cyclic loading[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40 (6):281-285.
- [14] ZHANG R J, ZHENG Y L, ZHENG J J, et al. Flocculation - solidification combined method for treatment of hydraulically dredged mud at extra high water content[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(6): 1685-1698.
- [15] ZHANG R J, DONG C Q, LU Z, et al. Strength characteristics of hydraulically dredged mud slurry treated by flocculation-solidification combined method[J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116742.
- [16] 郑耀林,章荣军,郑俊杰,等.絮凝-固化联合处理超高含水率吹填淤泥浆的试验研究[J].岩土力学,2019,40(8):3107-3114.
ZHENG Yaolin, ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, et al. Experimental study of flocculation-solidification combined treatment of hydraulically dredged mud at extra high-water content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (8): 3107-3114.
- [17] 姬凤玲,朱伟,张春雷.疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J].岩土力学,2004,25(12):1999-2002.
JI Fengling, ZHU Wei, ZHANG Chunlei. Test and discussion on geotechnical treatment technology of dredged sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1999-2002.
- [18] 丁慧,孙秀丽,刘文化,等.固化疏浚淤泥作路基材料工程特性试验研究[J].土木建筑与环境工程,2017,39(2):11-18.
DING Hui, SUN Xiuli, LIU Wenhua, et al. Experimental analysis of engineering properties of solidified sludge as roadbed filling material[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(2): 11-18.
- [19] SHINSHA H, KUMAGAI T. Material properties of solidified soil grains produced from dredged marine clay [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(3): 678-688.
- [20] 孙静,孙琳.土工离心模型试验研究土石混合填料的沉降变形特性[J].中外公路,2019,39(2):14-18.
SUN Jing, SUN Lin. Study on settlement deformation characteristics of soil and rock mixture based on centrifuge model test of geotextile[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 14-18.
- [21] 徐琨,周伟,马刚.颗粒破碎对堆石料填充特性缩尺效应的影响研究[J].岩土工程学报,2020,42(6):1013-1022.
XU Kun, ZHOU Wei, MA Gang. Influence of particle breakage on scale effect of filling characteristics of rockfill material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1013-1022.
- [22] 徐琨,周伟,马刚,等.基于离散元法的颗粒破碎模拟研究进展[J].岩土工程学报,2018,40(5):880-889.
XU Kun, ZHOU Wei, MA Gang, et al. Review of particle breakage simulation based on DEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 880-889.
- [23] FANG C F, GONG J, NIE Z H, et al. DEM study on the microscale and macroscale shear behaviours of granular materials with breakable and irregularly shaped particles [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 137: 104271.
- [24] LUO T, ZHANG C, LIU F, et al. Role of particle breakage in rockfill materials: investigated by using combined SBFEM/DEM with two different breakage models[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(9): 04021171-04021174
- [25] WEI H Z, YIN M, ZHAO T, et al. Effect of particle breakage on the shear strength of calcareous sands[J]. Marine Geophysical Research, 2021, 42(3): 23.
- [26] TONG C X, ZHAI M Y, LI H C, et al. Particle breakage of granular soils: changing critical state line and constitutive modelling[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(3): 755-768.
- [27] 刘晓明,王艺钢,赵明华.岩溶发育区公路路基强夯处治方法研究与应用[J].中外公路,2023,43(2):16-21.
LIU Xiaoming, WANG Yigang, ZHAO Minghua. Research and application of dynamic compaction treatment method for highway subgrade in karst development area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 16-21.
- [28] 杨智慧,李珊花.基于PFC^{2D}的水泥土单轴压缩试验及细观数值模拟[J].中外公路,2023,43(1):189-193.
YANG Zhihui, LI Shanhua. Uniaxial shear test and mesoscopic numerical simulation of cemental soil based on PFC^{2D} method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 189-193.
- [29] JIANG M J, SHEN Z F, WANG J F. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 147-163.
- [30] HOLT R M, KJØLAAS J, LARSEN I, et al. Comparison between controlled laboratory experiments and discrete particle simulations of the mechanical behaviour of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(7/8): 985-995.