

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.03.020

粉土填料细观剪切特性的颗粒离散元数值模拟研究

吴尚杰

(福建建工环海房屋制造集团有限公司,福建福州 350001)

摘要:以厦蓉高速改扩建工程为背景,按现场技术标准配置4组粉土填料试样,开展室内直剪试验,同时在PFC^{2D}离散元平台上模拟试样的直剪试验全过程,探讨粉土填料的细观剪切特性。结果表明:随着剪应变增加,接触黏结破坏区域由剪切面附近点逐渐扩大为具有一定厚度的贯通条状带,使得粉土填料的抗剪强度下降,表现出应变软化特性。从统计结果上看,球颗粒的平均转动量和平均相对位移,均沿试样高度方向大致呈正态分布;对其进行正态曲线拟合,发现剪切带中心并不在设定剪切面位置,而是略微向上发生偏移;同时通过上下一个标准差的定义,可精确计算剪切带宽度。对比不同竖向压力下数值模拟的统计结果,发现剪切带宽度随竖向压力的增大略有减小,但剪切带中心偏移基本不变。

关键词:粉土填料;直剪试验;细观剪切特性;颗粒离散元

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)03-0129-05

The Meso Shear Characteristics of Silt Filling Based on Particle Discrete Element Simulations

WU Shangjie

(Fujian Jiangong Huanhai Housing Prefabs Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350001, China)

Abstract: Based on the Xiarong Expressway expansion project, four groups of test samples are prepared by using the in-situ silt filling with in-situ technical configuration, and then four groups of direct shear tests are conducted. Meanwhile, the direct shear tests are simulated by discrete element method upon the PFC^{2D} platform and the meso shear characteristics of silt filling are well discussed. The results shows that the failure of contact bond develops gradually with the shear strain, from spotted area along shear plane to the stripped area with a certain thickness. The shear strength of silt filling decreases and tends to soften with shear strain. From the viewpoint of statistics, both particle rotation and particle relative displacement tend to distribute normally along elevation. The normal curve fitting shows that the center of shear band offsets slightly up-towards the set shear plane, and the thickness of shear band can be calculated accurately within the range between positive s and negative standard deviations. Based on the comparison of numerical simulations under different vertical pressures, we found that the thickness of shear band decreases slightly with the vertical pressure and the center offset of shear band remains unchanged generally.

Keywords: silt filling; direct shear test; meso shear characteristics; discrete element method

粉土填料广泛应用于路堤、大坝、码头等填筑工程,其强度与变形等力学特性对工程质量有重要影响。工程中常采用室内或现场直剪方法测定各类岩土体的宏观抗剪强度指标,但从科学研究的角度,还

须通过数值模拟手段,对其细观剪切特征展开了深入研究。

洪勇等^[1]采用PFC^{2D}对3种不同粒径砂土的直剪试验进行数值模型,探究了不同粒径砂土在剪切

过程中细观参数的变化规律。杨升等^[2]在 PFC^{3D}平台上建立了砂土直剪试验模型,研究了颗粒的速度场及力链网络演变对砂土宏观细观力学特性的影响。邢炜杰等^[3]在 PFC^{3D}平台上建立黏性土三轴试验模型,探讨了黏性土的孔隙率、黏结强度等要素对宏观力学性质的影响。Wang 等^[4]建立砂土直剪试验的三维离散元数值模型,研究了颗粒间接触力、颗粒位移及转动量等要素对其剪切特性的影响。Cen 等^[5]通过室内直剪试验与离散元数值模拟相结合的方法,研究了尺寸效应与初始应力对岩石抗剪强度的影响。徐永福^[6]基于 PFC^{2D}建立了粗粒土直剪试验数值模型,探讨了颗粒破碎率、颗粒间黏聚力及孔隙率对试样抗剪强度的影响。王雅婷等^[7]采用 PFC^{2D}对不同连接率的断续节理岩体进行了直剪试验的模拟,结果表明断续岩桥的初裂强度和剪切峰值强度与节理连通率成负相关。

另一方面,岩土体剪切过程中,剪切带的形成和演变对其变形和破坏有重要影响,前人根据直剪试验的离散元数值模拟,对剪切带进行相关定义与研究。潘远阳等^[8]利用 PFC 对砂土直剪试验中剪切带的形成和演化机制进行研究,发现力链网络的结构变化与剪切带的形成及演化具有同步性。李爽等^[9]基于试样分条带法,研究砂土剪切过程中颗粒的累积转动量和速度场,发现剪切带变形发育的细观机制。史乃伟等^[10]在 PFC 数值平台上对砂土剪切过程展开离散元数值模拟,从细观角度研究了剪切带的形成与发展,并结合颗粒运动特征,给出剪切带宽度与倾角的定量计算方法。胡成宝等^[11]系统收集了已有文献中砂土的剪切带倾角试验结果,提出了考虑砂土颗粒形状、密实度和有效平均正应力等影响因素的剪切带倾角经验公式。

本文在 PFC 数值平台上,对粉土填料的直剪试验展开颗粒离散元数值模拟,探讨了粉土填料的细观剪切特性。重点关注颗粒的转动量与位移量,提出一种定量计算剪切带宽度与剪切带偏移的方法,并探讨了竖向压力对粉土填料细观剪切特性的影响。

1 粉土填料的直剪试验及 PFC 数值模拟

1.1 室内直剪试验

以厦蓉高速改扩建工程漳州段为背景,其现场粉土填料的天然含水率 $w = 16.85\%$, 压实度 $\lambda_c = 95\%$, 平均湿重度 $\gamma = 19.2 \text{ kN/m}^3$ 。通过界限含水

率试验得到其塑限 $w_p = 20.6\%$, 液限为 $w_L = 28\%$ 。通过击实试验,得到其最大干密度为 $\rho_{dmax} = 1.831 \text{ g/cm}^3$, 最优含水率为 $w_{op} = 17.7\%$ 。通过颗粒筛分试验(分别过 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm 和 0.075 mm 筛)得到其天然级配曲线如图 1 所示。其不均匀系数 $C_u = 4.92$, 曲率系数 $C_c = 8.14$ 。

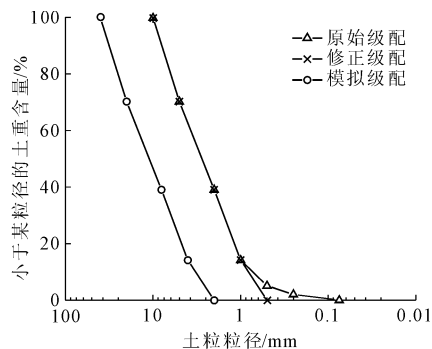


图 1 初始颗粒级配曲线及其修正

以击实试验确定的最优含水率 $w_{op} = 17.7\%$ 、现场技术要求的压实度 $\lambda_c = 95\%$ 为目标,通过体积控制法配制粉土填料试样 4 组,用于开展室内直剪试验。得到竖向压力 σ_v 分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 条件下,粉土填料的剪应变 ε_n 与剪应力 τ 关系曲线,如图 2 所示。进一步依据各曲线的峰值点(A、B、C、D)绘制抗剪强度包线,得到其抗剪强度 τ 与竖向压力 σ 的关系式为: $\tau = 0.33\sigma + 28.76$;从而得到其抗剪强度指标为:内摩擦角 $\varphi = 18.27^\circ$, 黏聚力 $c = 28.76 \text{ kPa}$ 。

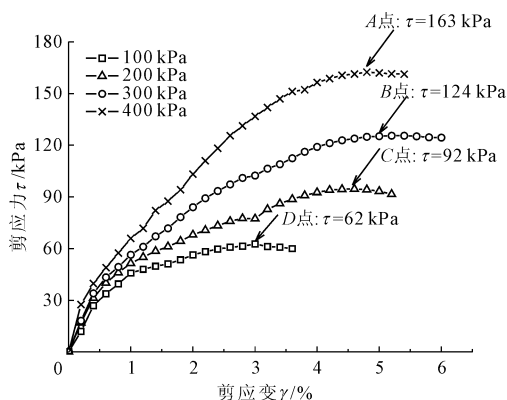


图 2 粉土填料的剪应力 - 剪应变曲线

1.2 数值模型建立

在 PFC 数值平台上,对上述直剪试验展开颗粒离散元数值模拟。剪切盒由上下 2 面墙体与左右 4 面墙体构成,其整体尺寸为 $61.8 \text{ mm} \times 20.0 \text{ mm}$ (与室内直剪试验一致)。为防止剪切过程中颗粒溢出,在两侧生成两面“水平翼墙”,如图 3 所示。

考虑到数值模拟的计算效率^[12],删除粒径小于0.075 mm的细颗粒,并将其土重含量放入上一粒径组,得到修正级配曲线如图1所示。在剪切盒范围内,按照各粒径颗粒的占比,生成粒径为0.075 mm~2 mm的球颗粒共计17 837个。

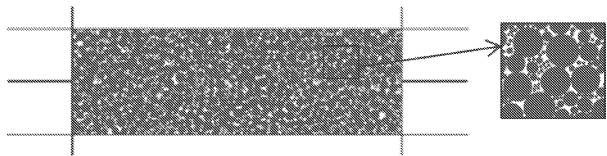


图3 直剪试验数值模型

1.3 细观参数标定

PFC数值平台中常用的接触本构包括线性模型、滑移模型和黏结模型^[13]。粉土填料具有黏结作用且接触多为点接触,故颗粒间接触宜采用黏结接触模型,如图4(a)所示。其中 k_n 和 k_s 分别是颗粒间法向和切向刚度,其值可通过黏结接触有效模量 E_c 和黏结接触刚度比 η_c 求得,如式(1)所示。 T_{\max} 和 S_{\max} 为最大抗拉力和最大抗剪力,其值可通过法向黏结强度 T_c 和切向黏结强度 S_c 求得,如式(2)所示。

$$k_n = 2rE_c, k_s = k_n/\eta_c \quad (1)$$

$$T_{\max} = T_c A, S_{\max} = S_c A \quad (2)$$

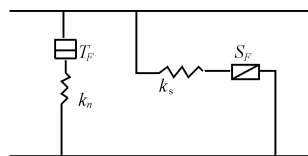
其中: r 为两接触颗粒半径的较小值(由程序自动计算); A 为接触面积。

当颗粒间接触法向力大于 T_{\max} 或者切向力大于 S_{\max} 时,黏结破坏使得颗粒间接触本构蜕化为线性模型,如图4(b)所示。其中 k_n 和 k_s 仍是颗粒间法向和切向刚度,其取值通常与上述黏结模型相同。颗粒间法向接触力 F_n 等于颗粒重叠量 g_n (由程序自动计算)乘以相应的法向刚度;切向接触力 F_s 等于颗粒交错量 g_s (由程序自动计算)乘以相应的切向刚度,但应小于由颗粒摩擦系数 μ_c 确定的上限值,如式(3)所示。

$$F_n = k_n g_n, F_s = k_s g_s \leq \mu_c k_n g_n \quad (3)$$

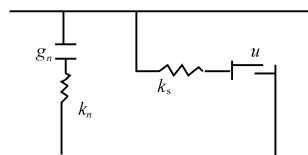
颗粒与墙体之间的接触均为线性模型,其参数的物理意义与之类似,不再赘述。

以室内直剪试验结果为参考,采用逼近法对数值模拟中所需要的细观参数进行标定^[14-15],其结果汇总如表1所示。图5给出了不同竖向压力下,数值模拟所得剪切过程中的剪应力-剪应变曲线,可以认为数值模拟结果与室内直剪试验结果吻合较好。



(a) 接触黏结模型

未黏结时



(b) 线性模型

图4 颗粒间接触模型示意图

表1 颗粒及墙体的细观参数(标定后)

颗粒	黏结接触有效模量 E_c /Pa	4.2×10^7
	黏结接触刚度比 η_c	1.52
	法向黏结强度 T_c /Pa	3.2×10^4
	切向黏结强度 S_c /Pa	8.7×10^4
	颗粒摩擦系数 μ_c	0.67
墙体	墙体接触模量 E_w /GPa	0.2
	墙体接触刚度比 η_w	1.0
	墙体摩擦系数 μ_w	0.0

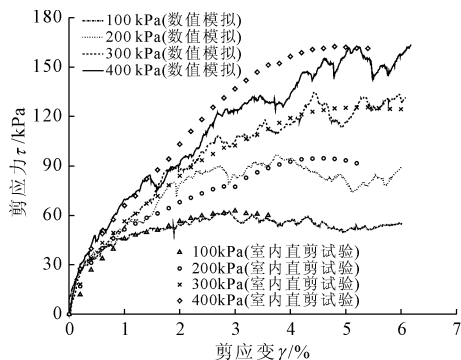


图5 剪应力-剪应变曲线(数值模拟与直剪试验对比)

2 细观剪切特性

2.1 颗粒接触黏结断裂分析

颗粒间接触作用是反映粉土填料细观剪切特性的重要指标。以竖向压力200 kPa下的剪切试验为例,绘制颗粒间接触黏结状态随剪应变发展的分布示意图,如图6所示。为便于观察,图中浅色(灰色)代表接触黏结完整状态;深色(红色和绿色)代表接触黏结剪切破坏状态和拉伸破坏状态,其线段的粗细代表接触力的大小。

当剪应变 $\varepsilon_h = 3.3\%$ 时,黏结剪切破坏主要发生在剪切面附近,形成了一条薄层带(未贯通)。当

剪应变达到 $\varepsilon_h = 6.6\%$ 时,黏结剪切破坏区域在剪切面附近贯通,试样抗剪强度下降,试样呈现弱应变软化的特性。当剪应变达到 $\varepsilon_h = 10.0\%$ 时,黏结剪切破坏在剪切面附近形成具有一定厚度的贯通带。

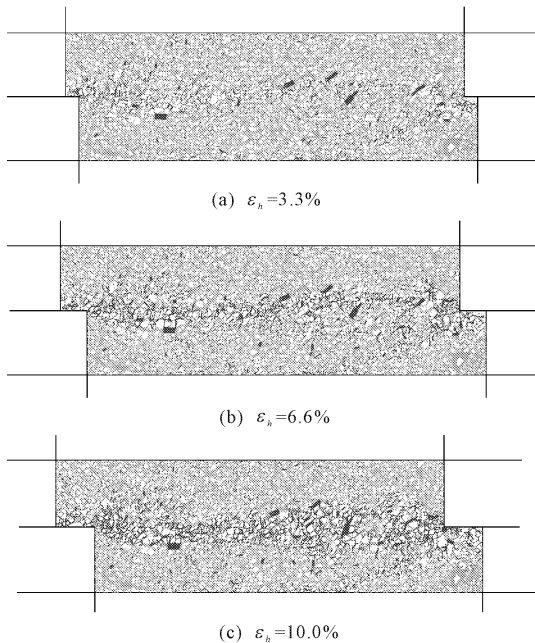


图 6 黏结状态随剪应变的发展 (200 kPa 竖向压力)

2.2 颗粒转动量分析

颗粒转动量可作为直剪试验中剪切带形成过程中重要量化指标。以竖向压力 200 kPa 下的剪切试验为例,剪切完成后各颗粒转动量沿高度方向呈两头小、中部大的对称陀螺状,如图 7 所示。为了更精确的计算剪切带的宽度,以 1 mm 为单位高度,计算该高度范围内各颗粒的平均转动量,如图 8 所示。可以看出,球颗粒平均转动量沿高度方向大致呈正态分布,因此可用正态曲线对其平均转动量进行拟合,如图 8 中虚线所示。

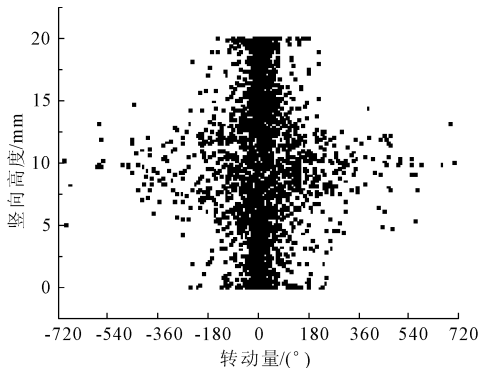


图 7 颗粒转动量沿高度方向分布图

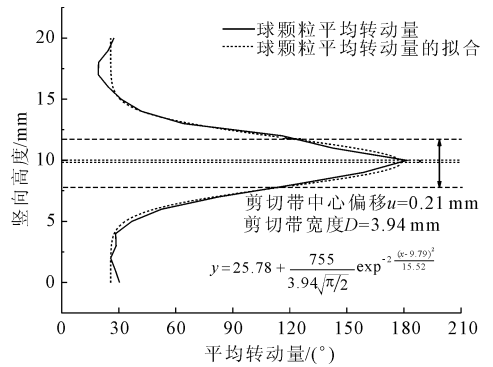


图 8 颗粒平均旋转量分布图

剪切过程中,仅对上剪切盒施加水平位移,因此正态拟合曲线显示的剪切带中心并不在设定剪切面位置,而是向上略微偏移。考虑到诸多自然现象或事物均服从或者近似服从正态分布,且正负标准差范围可大致囊括现象或事物的主要特性^[16],因此本文将剪切带中心上下一个标准差范围定义为剪切带宽度。由此可准确计算上述剪切试验中的剪切带宽度 D 约为 3.94 mm,中心偏移 u 约为 0.21 mm。

对其他不同竖向压力下的数值模拟结果也进行类似统计分析,得到不同竖向压力下粉土填料的剪切带偏移与剪切带宽度,如图 9 所示。由图 9 可知,粉土填料的剪切带宽度 D 随竖向压力的增大略有减小,但剪切带中心偏移 u 基本一致。

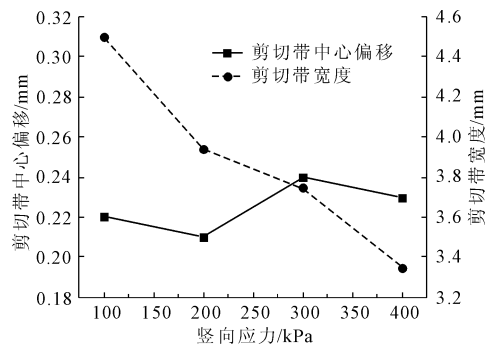


图 9 不同竖向压力下的剪切带宽度和中心偏移 (基于颗粒平均转动量统计)

2.3 颗粒相对位移分析

颗粒相对位移量也是直剪试验中剪切带形成过程中重要量化指标。仍以 200 kPa 竖向压力下的剪切试验为例,剪切完成后各颗粒相对位移(相对于剪切盒而言)沿高度方向的分布如图 10 所示。与颗粒转动量类似,试样中部各颗粒的相对位移远大于上下两端,且大致呈反对称分布形态。

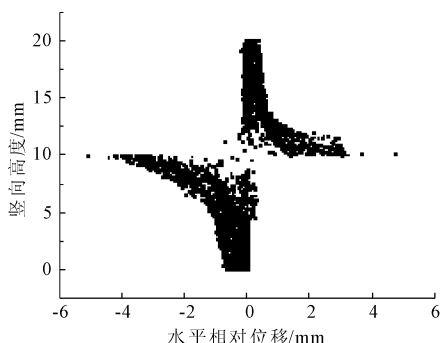


图10 颗粒相对位移沿高度方向分布图

类似地,以1 mm为单位高度,计算该高度范围内各颗粒的平均相对位移(取绝对值),如图11所示。可以看出,各颗粒平均相对位移沿高度方向呈正态分布,因此可用正态曲线对其平均相对位移进行拟合,如图11中虚线所示。同样地,将剪切带中心上下一个标准差范围定义为剪切带宽度,由此可准确计算上述剪切试验中的剪切带宽度 D 约为3.20 mm,剪切带中心偏移 u 约为0.15 mm。

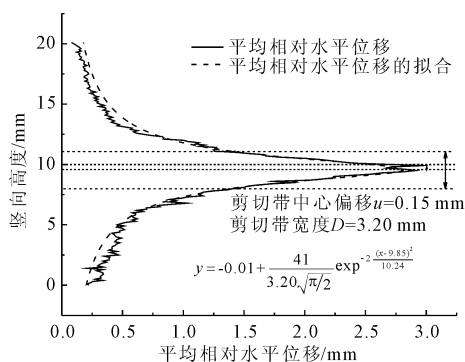
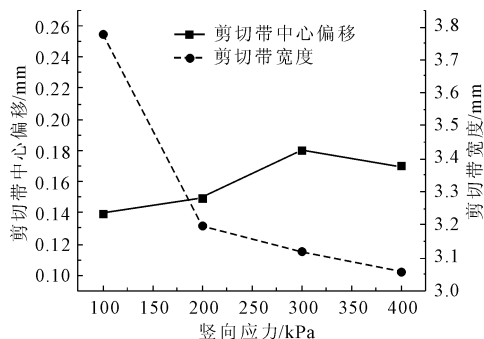


图11 颗粒平均相对位移分布图

对其他不同竖向压力下的数值模拟结果也进行类似的颗粒统计分析,得到不同竖向压力下粉土填料的剪切带偏移量与剪切带宽度,如图12所示。

图12 不同竖向压力下剪切带偏移量和剪切带宽度
(基于颗粒平均相对位移统计)

由图12可知,粉土填料的剪切带宽度 D 随竖向压力的增大略有减小,但剪切带中心偏移 u 基本不变。

另外需要说明的是,基于颗粒平均转动量与基于颗粒平均相对位移,两种统计口径所得结果基本一致,进一步佐证了本文提出定量计算剪切带宽度与剪切带中心偏移方法的合理性。

3 结论

以厦蓉高速改扩建工程漳州段为背景,按现场技术要求配置4组粉土填料试样,开展室内直剪试验;并在PFC^{2D}数值平台上对直剪试验全过程展开细致的数值模拟,分析粉土填料的细观剪切特性。得到主要结论如下:

(1) 粉土填料的接触黏结状态分析表明,随着剪应变的增加,接触黏结破坏区域由剪切面附近点逐渐扩大为剪切面附近贯通的条状带,使得粉土填料的抗剪强度下降,表现出应变软化特性。

(2) 颗粒平均转动量与平均相对位移沿高度方向呈正态分布,其剪切带中心并不在设定剪切面位置,而是略微向上发生偏移;通过剪切带中心上下一个标准差的定义,可精确计算剪切带宽度。无论基于平均转动量或是基于平均相对位移,两种统计口径所得结果(剪切带宽度与剪切带中心偏移)基本一致。

(3) 对不同竖向压力下的数值模拟结果进行类似的颗粒统计分析表明,其剪切带宽度随竖向压力的增大略有减小,但剪切带中心偏移量基本不变。

参考文献:

- [1] 洪勇,李子睿,唐少帅,等. 平均粒径对砂土剪切特性的影响及细观机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(6): 1814-1822.
- [2] 杨升,李晓庆. 基于PFC^{3D}的砂土直剪模拟及宏观分析[J]. 计算力学学报, 2019, 36(6): 777-783.
- [3] 邢杰杰,余湘娟,高磊,等. 基于颗粒流离散元的黏性土三轴剪切试验数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(35): 119-124.
- [4] Wang C, Deng A, Taheri A. Three-dimensional discrete element modeling of direct shear test for granular rubber-sand[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 97: 204-216.
- [5] Gen D F, Huang D, Ren F. Shear deformation and strength of the interphase between the soil-rock mixture and the benched bedrock slope surface [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(2): 15-21.

- 学报,2021,19(5):87-91.
- [2] 赵卫全,周建华,熊基丞,等.松散回填层及深厚淤泥地基联合灌浆加固技术研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(1):10-15,21.
- [3] 密士文,朱自强,彭凌星,等.T梁预应力波纹管压浆密实度超声检测试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2378-2384.
- [4] 滕旭东.固体中微结构缺陷的非线性声学建模及检测研究[D].南京:南京大学,2018.
- [5] Kim J, Song D G, Jhang K Y. A method to estimate the absolute ultrasonic nonlinearity parameter from relative measurements[J]. Ultrasonics, 2017,77:197.
- [6] Punnose S, Mukhopadhyay A, Sarkar R, et al. Characterisation of microstructural damage evolution during tensile deformation of a near- α titanium alloy: Effects of microtexture [J]. Materials Science & Engineering: A, 2014,607(12):476-481.
- [7] 陈 军,尹婷苑,徐 征,等.非线性冲击共振声谱法检测混凝土损伤[J].工业建筑,2016,46(1):95-99.
- [8] Korneev V A, Demcenko A. Possible second - order nonlinear interactions of plane waves in an elastic solid[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(2):591-598.
- [9] 刘剑锋,汪 魁,彭爱红,等.含裂纹砂浆试件的非共线混频超声试验研究[J].建筑材料学报,2022,25(3):221-227.
- [10] 田玉滨,莫青城,杜文森,等.基于非线性超声技术损伤钢筋混凝土无损检测的适用性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(2):192-199.
- [11] 陈 军,王庆冬.嵌入式超声传感器的混凝土损伤非线性检测研究[J].应用声学,2018,37(4):481-487.
- [12] 陈 军,黄 灿,王 豪.超声有限幅度法检测混凝土孔洞缺陷[J].无损检测,2016,38(1):26-29,68.
- [13] 吕文瀚,吴先梅,陈家熠.金属材料疲劳损伤检测的非线性声学方法[J].应用声学,2018,37(6):874-881.
- [14] 朱利勇,尹嘉雯,韩 梦,等.基于非线性声学共振法的CFRP板冲击疲劳损伤检测研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2020,34(5):116-121.
- [15] 刘剑锋.基于混频测试的混凝土非线性声学特性的试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [16] Liu J, Wang K, Zhao M, et al. Research on non - colinear mixing test method of concrete nonlinear ultrasound [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2022,37(2):115-133.
- [17] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.

(上接第133页)

- [6] 徐永福.基于颗粒破碎的粗粒土剪切强度的模拟分析[J].工程地质学报,2018,26(6):1409-1414.
- [7] 王雅婷,崔 精.基于PFC^{2D}的断续岩桥直剪强度特征及能量演化机制研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(5):234-238.
- [8] 潘远阳,魏玉峰,李远征,等.直剪试验下砂土剪切带形成的细观变形机制[J].水利水运工程学报,2020(3):82-91.
- [9] 李 爽,刘 洋,吴可嘉.砂土直剪试验离散元数值模拟与细观变形机理研究[J].长江科学院院报,2017,34(4):104-110.
- [10] 史乃伟,李 飒,刘小龙,等.粗砂直剪试验与离散元细观机理分析[J].科学技术与工程,2019,19(5):261-266.
- [11] 胡成宝,凌道盛,巩师林,等.基于砂土状态和细观特征的剪切带倾角公式[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(11):2068-2076.
- [12] 张 强,汪小刚,赵宇飞,等.土石混合体三维细观结构随机重构及其力学特性颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报,2019,41(1):60-69.
- [13] 关振长,何亚军,高 翔,等.花岗岩残积土中砾石颗粒的二维形状特征及其簇重构[J].水利与建筑工程学报,2021,19(4):1-7.
- [14] 雷晓丹,杨忠平,张晓景,等.土石混合料剪切特性及块石破碎特征[J].岩土力学,2018,39(3):899-908.
- [15] 陈鹏宇,孔 莹,余宏明.岩石单轴压缩PFC^{2D}模型细观参数标定研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1240-1249.
- [16] 杨 鑫,崔宏环,张立群,等.砂土-结构接触面剪切特性大型直剪试验研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(5):1207-1215.