

DOI: 10.11779/CJGE2020S2022

基于 PFC^{2D} 的土石混合料剪切强度数值模拟分析

肖建章¹, 马妍祎², 周杰³, 蔡红¹, 魏迎奇¹, 刘晨⁴

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 北京市城市河湖管理处, 北京 102300;

3. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 4. 北京水利水电学校, 北京 100024)

摘要: 广泛应用于高填方工程中的土石混合料, 具有显著的非均质、非连续特征, 工程特性不仅取决于土和石本身的力学性质, 也与土石相对比例、粒组组成等因素密切相关。结合 PFC^{2D} 离散元数值模拟, 分析不同开缝宽度下缺失中间粒径土石混合料的抗剪强度变化规律, 深入探讨缺失中间粒径土石混合料骨架结构的力传递路径、强度形成机理及混合料变形破坏机制, 结果表明: 上下剪切盒之间开缝宽度对其抗剪强度有重要影响, 土石混合料的峰值强度随开缝宽度的增加而降低, 抗剪强度-水平位移曲线表现为应变软化; 开缝宽度对土石混合料骨架构成也有重要影响, 开缝越大, 构成骨架的颗粒数目就越少, 骨架颗粒分布范围也越小, 剪切带越靠近上剪切盒; 不同开缝宽度情况下, 尽管剪切带分布不同, 骨架上颗粒法向接触力分布基本上是均匀的, 说明骨架上各个颗粒受力是相对均匀的, 骨架颗粒受力与开缝宽度并无明显关系; 不同的开缝宽度下, 剪切面在各剪切阶段均不是一个平面, 随着水平剪切位移的增加, 土骨架上的接触力链和剪切带分布也不断发生变化, 试样内部受力极不均匀; 试样内部脱空现象除与土石混合料骨架组成、颗粒摩擦系数及级配有关外, 开缝宽度对其也有重要影响, 开缝越宽, 剪切过程中试样的脱空现象就越明显。

关键词: 高填方; 土石混合料; 剪切强度; 影响因素

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0123-06

作者简介: 肖建章(1977—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事土石混合料试验与数值分析等方面的科研工作。E-mail: xiaojz@iwhr.com。

Numerical simulation of shear strength of rock-soil mixtures by using PFC^{2D}

XIAO Jian-zhang¹, MA Yan-yi², ZHOU Jie³, CAI Hong¹, WEI Ying-qi¹, LIU Chen⁴

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100048, China; 2. Beijing Municipal Administration of Urban Rivers and Lakes, Beijing 102300, China; 3. School of

Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Beijing Water Conservancy School, Beijing 100024, China)

Abstract: The soil-rock mixture widely used in high-fill projects is characterized by significant heterogeneity and discontinuity. The engineering characteristics of the mixture depend on the mechanical properties of soil and stone and closely relate to the relative proportion of earth and stone, particle composition and other factors. Based on the PFC^{2D} discrete element numerical simulation, the change rules of shear strength of the soil-rock mixture with missing intermediate particle size under different opening widths are analyzed, and the force transfer path, strength formation mechanism and deformation and failure mechanism of the mixture skeleton structure with missing intermediate particle size are deeply discussed. The results show that the width of the opening between the upper and lower shear boxes has an important influence on the shear strength. The peak strength of the earth-rock mixture decreases with the increase of the opening width, and the shear strength-horizontal displacement curve shows strain softening. The opening width also has a significant influence on the skeleton composition of the earth-rock mixture. The larger the opening is, the less the number of the skeleton particles is, the larger the distribution range of skeleton particles is, the closer the shear band is to the upper shear box. Although the distribution of shear band is different under different opening widths, the distribution of normal contact force of particles on the skeleton is basically uniform, which shows that the stress of particles on the skeleton is relatively uniform, and there is no obvious relationship between the stress of particles on the skeleton and the opening width. Under different opening widths, the shear plane is not a plane at each shear stage. With the increase of horizontal shear displacement, the distribution of contact force chain and shear band on the skeleton also changes constantly, and the stress inside the samples is extremely uneven. The phenomenon of void inside the samples is related to the skeleton composition, friction coefficient of particles and

基金项目: 中国水科院基本科研业务费项目 (GE0145B512016)

收稿日期: 2020-08-07

gradation of the earth-rock mixture, and the opening width also has an important influence on them. The wider the opening, the more obvious the void phenomenon of the sample during the shear process.

Key words: high fill; soil-rock mixture; shear strength; influencing factor

0 引言

广泛应用于高填方工程中的土石混合料是第四纪以来形成的介于均质土体和碎裂岩体之间的特殊工程材料,具有显著的非均质、非连续特征。

土石混合料一般由粗颗粒形成骨架,细颗粒填充孔隙,其强度特性不仅取决于土和石本身的力学性质,也与土石相对组成比例、粒组组成、碎石结构形态等因素密切相关。Irfan等^[1]对不同粗颗粒含量土石混合料的直剪试验表明:粗颗粒含量小于20%情况下,强度主要由细颗粒承担;当粗颗粒含量为20%~30%时,抗剪强度开始有少量增加;当粗颗粒含量超过30%时,粗粒料的相互咬合作用增强,抗剪强度迅速增加。Xu等^[2]进行的土石混合料大型直剪试验表明,石块所占的比例对土石混合料的抗剪强度有重要影响。Khoiri等^[3]对卵砾石土开展剪切试验表明,内摩擦角在对数坐标下随小主应力增加而增加。Wang等^[4]模拟不良级配铁路路基碎石直剪试验表明,抗剪峰值角随着接触摩擦系数增大而增大,碎石颗粒剪切过程中与正应力相关。Liu等^[5]通过分析直剪试验中碎石骨料的宏观和微观力学特性,得出在同样法向应力作用下的抗剪强度和压缩位移随着粒径的增大而增大。Vallejo等^[6]研究表明,粗颗粒占到土石混合料75%以上,抗剪强度主要由粗粒料来控制,粗颗粒占比小于40%时,则主要由粗粒材料周围的黏土来控制。黄斌等^[7]开展的含石量对土石混合体强度特性影响的试验表明:泥碎石土的粗料含量小于30%,抗剪强度基本上取决于细料;粗料含量为30%~70%时,抗剪强度取决于粗、细料的共同作用;粗料含量大于70%时,抗剪强度主要取决于粗料。王江营等^[8]开展的大型直剪试验表明,土石混填体抗剪强度主要源于内部石料间的相互嵌入、咬合及摩擦等作用,含石量是影响土石混填体强度的主要因素。

上述研究表明,土石混合料的抗剪强度与材料粒径、级配及细料含量有关,由于土石混合料力学性质和力学行为复杂,剪切试验条件和土石混合料差异导致了以往剪切特性研究难以直观、全面,不同开缝宽度下抗剪强度也有较大差异。因此,有针对性地开展土石混合料剪切模拟分析,对机场高填方边坡稳定及保证建设工期均有重要的现实意义。

基于此,本文结合PFC^{2D}离散元程序,针对典型缺失中间粒径土石混合料开展剪切试验的颗粒流数值

模拟,对试样剪切受力情况进行细观仿真,为土石混合料在高填方工程的施工和设计积累经验。

1 试验设计

进行PFC^{2D}仿真模拟时,高填方土石混合料典型缺失中间粒径,颗分曲线见图1,最大粒径20 mm。

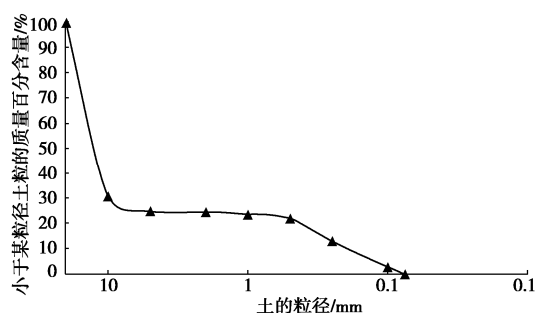


图1 缺失中间粒径土石混合料颗分曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of gap-graded rock-soil mixtures

从微观角度看,土石混合料可视为刚性散粒体,颗粒之间相互嵌挤、摩擦,影响着骨架结构的传力,进而影响抗剪强度^[9]。为分析不同开缝宽度下,缺失中间粒径的土石料在直剪过程中的变形与强度变化规律,探讨缺失中间粒径土石混合料骨架结构中力传递路径、强度形成机理及混合料变形与破坏机制,利用PFC^{2D}离散元程序开展剪切试验的颗粒流数值模拟,模拟流程与室内试验相同,考虑5 mm和30 mm两种开缝宽度,法向压力为100 kPa,选直剪过程中峰前、峰值、峰后和残余等阶段对试样剪切受力情况进行细观仿真分析。

数值剪切盒尺寸与试验室相同,上盒由墙体1, 2, 3, 7, 9, 10组成(见图2),剪切前删除墙体9, 10,以模拟不同的开缝。用伺服加载机制,保持设定法向压力,缓慢推动上盒右移,实现对数值试样剪切,墙体摩擦系数为0,即试验中剪切盒光滑。

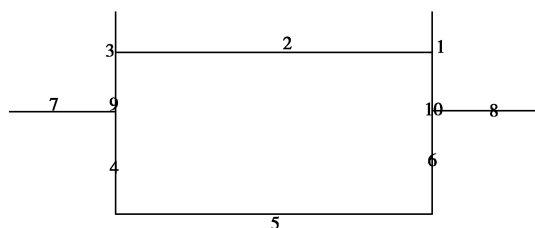


图2 细观模拟剪切盒组成

Fig. 2 Composition of meso-simulation shear box

剪切模拟中对2 mm以下小颗粒用粒径1.5 mm数

值颗粒代替, 根据颗分曲线计算二维数值试样中每组颗粒面积, 进而确定每组颗粒数量。表1为数值试样颗粒几何参数。

表 1 试样颗粒形状及其分布

Table 1 Shape and distribution of particles of samples						
数值试验 粒径/mm	20	17	14	10	5	1.5
颗粒 形状						
数值颗粒 分布数	35	40	36	19	9	3810

由于土石混合料等散体材料的宏观力学响应是由颗粒之间的微观结构演化所决定的, 故离散元数值模拟通过“试错标定法”来对颗粒之间微观参数赋值, 使数值试样与实验室试样呈现类似的宏观力学响应^[10]。颗粒之间的相互作用力可通过线性刚度接触模型来模拟^[11], 表达式如下:

$$F_i^n = K^n U^n n_i = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} U^n n_i \quad , \quad (1)$$

$$\Delta F_i^s = -k^s \Delta U^s = -\frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \Delta U^s \quad 。 \quad (2)$$

式中 K^n 和 k^s 分别为法向和切向接触刚度系数; U^n 为法向位移量 (颗粒 - 颗粒或颗粒 - 墙体的变形重叠量); n_i 为接触法向; ΔU^s 为法向相对位移量。 k_n , k_s 分别为实体 (颗粒或墙体) 法向和切向接触刚度系数, 角标[A]和[B]表示接触的两个实体。

线性刚度接触模型参数包括: 颗粒的法向刚度 k_n^b 和切向刚度 k_s^b , 墙体的法向刚度 k_n^w 和切向刚度 k_s^w 。墙体单元作为模型的边界, 墙体参数对模拟结果影响不大, 只要保证试样内的颗粒不会因为颗粒 - 墙体接触力过大而“穿越”墙体即可。模拟中取墙体刚度与颗粒刚度相同, 即 $k_n^b = k_s^b = k_n^w = k_s^w = 8 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。模拟土石混合料适用于机场填筑料以爆破施工得到的石方为主, 土石混合料中细粒组含量较少的情况。

经调试, 数值模拟取颗粒间摩擦系数为2, 通过增大摩擦系数的方法考虑减维的影响, 以接触力阈值 $F_c \geq 0.25F_{\max}$ ($F_{\max}$ 为最大接触力) 来定义和确定试样剪切过程中的土骨架, 用红色颗粒表示。

1.1 开缝宽度 5 mm 直剪模拟结果

图3为5 mm开缝宽度下试样抗剪强度与水平位移关系, 在剪切位移1.14 cm左右出现峰值114.95 kPa。随着剪切位移增大, 抗剪强度降低明显, 表现出应变软化, 受颗粒组成影响, 峰值过后出现局部波动。

(1) 5 mm开缝宽度峰值阶段计算结果分析

达到峰值后的土骨架如图4中红色颗粒所示, 土骨架上的颗粒和接触力开始转向剪切面方向, 土颗粒内部出现明显重排列。受剪切位移增大的影响, 在下盒

左上方开始出现少量的颗粒溢出。剪切面不是平面, 试样内部受力不均匀, 土石料内部形成主要斜向右下的接触力链。剪切盒内部的土石料在左上角和右下角均受到挤压, 左上土骨架受力最大, 右侧开缝处接触力也开始增大, 接触力链也开始变得密集。

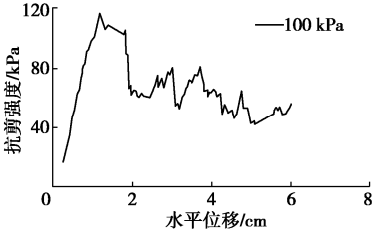


图 3 5 mm 开缝宽度下试样抗剪强度与水平位移关系

Fig. 3 Relationship between shear strength and horizontal displacement of samples with opening size of 5 mm

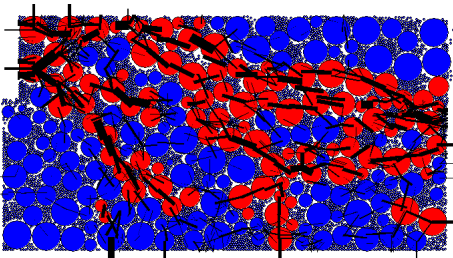


图 4 5 mm 开缝宽度骨架颗粒及力链分布 (峰值阶段)

Fig. 4 Distribution of skeleton particles and force chain under opening size of 5 mm (peak stage)

骨架颗粒接触法向各向异性度和法向接触力统计如图5, 6所示, 峰值阶段试样中的骨架颗粒接触法向也有明显主方向, 在120° ~ 175° 之间接触密度明显较大, 尤其在145° ~ 155° , 图6中各个角度骨架颗粒间法向接触力明显增大, 在85° ~ 115° 范围内骨架颗粒法向接触力最大, 达6.6 kN。

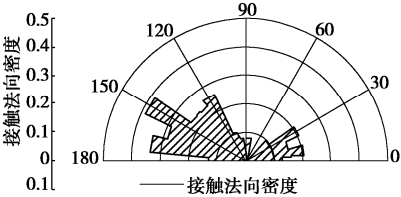


图 5 5 mm 开缝宽度骨架颗粒接触法向密度 (峰值阶段)

Fig. 5 Contact normal densities of skeleton particles with opening size of 5 mm (peak stage)

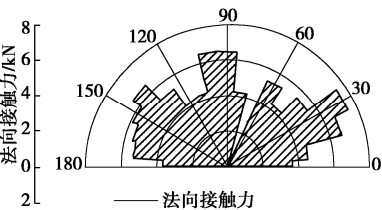


图 6 5 mm 开缝宽度骨架颗粒法向接触力 (峰值阶段)

Fig. 6 Normal contact forces of skeleton particles with opening size of 5 mm (peak stage)

(2) 5 mm开缝宽度残余阶段计算结果分析

水平剪切位移5.91 cm时, 试样进入残余阶段。该阶段试样土骨架如图7中红色颗粒所示, 土骨架同样主要由大颗粒形成, 残余阶段, 大颗粒间的接触力变得更为复杂和不均匀, 土骨架在试样的左下方变得更为密集, 土骨架上颗粒共136个。

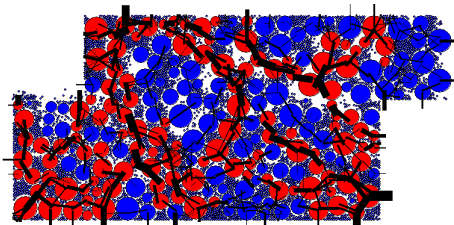


图 7 5 mm 开缝宽度骨架颗粒及力链分布 (残余阶段)

Fig. 7 Distribution of skeleton particles and force chain under opening size of 5 mm(residual stage)

土骨架上颗粒和接触力变得更为分散, 受剪切位移增大的影响, 土石混合料内部剪切面附近开始出现了更多空洞, 内部重排列明显。下盒左上方和上盒右侧出现明显颗粒溢出, 颗粒间接触力链开始转向垂直方向, 剪切带更为宽泛。土石料内部形成了斜向右下以及下盒左侧明显的接触力, 受颗粒之间相互摩擦和嵌入影响, 土石料在上下盒的左侧和下盒右下角均受到挤压。

在5 mm开缝宽度下残余阶段的试样骨架颗粒的接触法向密度统计如图8所示, 骨架颗粒接触法向主方向在170° ~176° 之间接触密度较大。图9中各个角度骨架颗粒间在残余阶段, 法向接触力比峰值也有所减小, 在135° ~145° 范围内骨架颗粒间的法向接触力相对较大, 最大减低为4.2 kN。

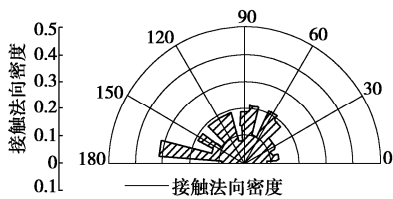


图 8 5 mm 开缝宽度骨架颗粒接触法向密度 (残余阶段)

Fig. 8 Contact normal densities of skeleton particles with opening size of 5 mm (residual stage)

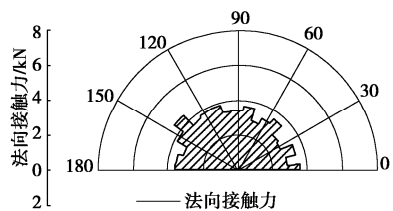


图 9 5 mm 开缝宽度骨架颗粒法向接触力 (残余阶段)

Fig. 9 Normal contact forces of skeleton particles with opening size of 5 mm (residual stage)

表2是在5 mm开缝情况下, 对峰值和残余等剪切状态中土骨架上各粒径颗粒的数目, 土骨架上的颗粒总数依次为111和136个。

表 2 5 mm 开缝宽度试样骨架中颗粒组成及分布

Table 2 Composition and distribution of skeleton particles of samples under opening size of 5 mm

数值试验粒径/mm	20	17	14	10	5	1.5
颗粒形状						
峰值状态颗粒分布数	16	27	21	4	3	48
残余状态颗粒分布数	23	27	21	12	1	57

1.2 开缝宽度 30 mm 直剪模拟结果

图10为30 mm开缝宽度下混合料抗剪强度与水平位移关系曲线, 在17 mm左右出现峰值, 峰值强度大小为89.9 kPa, 说明开缝宽度越大相同条件下峰值强度就越低。与5 mm开缝宽度类似, 试样随剪切位移不断增大抗剪强度也相应降低, 同样表现出了应变软化现象, 这些变化和规律与后文中室内试验趋势一致。

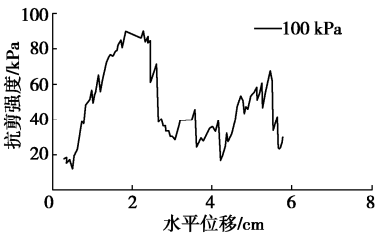


图 10 30 mm 开缝宽度下抗剪强度与水平位移关系

Fig. 10 Relationship between shear strength and horizontal displacement of samples with opening size of 30 mm

(1) 30 mm开缝宽度峰值阶段计算结果分析

开缝宽度30 mm条件下, 试样在剪切位移1.7 cm达到峰值, 土骨架如图11中红色颗粒所示, 土骨架同样主要由大颗粒形成, 抗剪强度也主要由大颗粒间的接触力提供, 方向沿试样的右下方, 试样土骨架上颗粒共计83个。峰值阶段土骨架上的颗粒和接触力开始转向右下方向, 接触力链也开始在右侧开缝处集中, 土颗粒内部出现了明显的重排列。在下盒左上方和下盒右上方出现了少量颗粒溢出。受上盒向右推动的影响土石料内部形成主要斜向右下的接触力链。

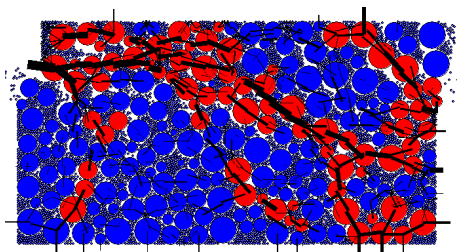


图 11 30 mm 开缝宽度骨架颗粒及力链分布 (峰值阶段)

Fig. 11 Distribution of skeleton particles and force chain under opening size of 30 mm(peak stage)

图12中骨架颗粒的接触法向密度统计可以看出, 峰值阶段试样中的骨架颗粒接触法向也有明显主方向, 为145°~155°、175°~180°及0°~10° 接触密度明显较大。图13中骨架颗粒间法向接触力均明显增大, 在85°~115° 范围内骨架颗粒间的法向接触力最大, 达7.1 kN。

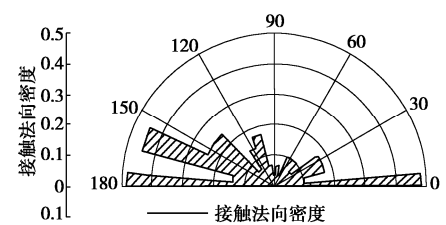


图 12 30 mm 开缝宽度骨架颗粒接触法向密度(峰值阶段)
Fig. 12 Contact normal densities of skeleton particles with opening size of 30 mm (peak stage)

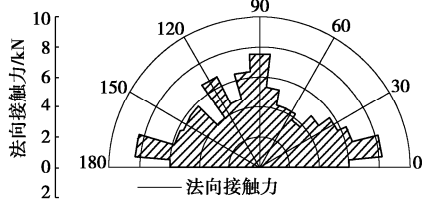


图 13 30 mm 开缝宽度骨架颗粒法向接触力(峰值阶段)
Fig. 13 Normal contact forces of skeleton particles with opening size of 30 mm (peak stage)

(2) 30 mm开缝宽度残余阶段计算结果分析

剪切位移5.70 cm时, 试样进入残余阶段, 土骨架如图14中红色颗粒所示, 残余阶段大颗粒间的接触力变得更为复杂和不均匀, 土骨架在左下方变得密集, 颗粒降为87个。

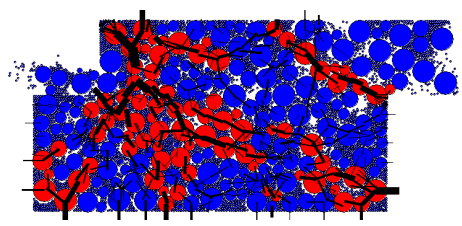


图 14 30 mm 开缝宽度骨架颗粒及力链分布(残余阶段)
Fig. 14 Distribution of skeleton particles and force chain with opening size of 30 mm (residual stage)

骨架上的颗粒主要集中于下盒左侧中间, 剪切面附近开始出现了更多空洞, 土颗粒内部出现了明显重排列, 接触力链转向垂直方向, 内部形成斜向右下以及下盒左侧明显接触力, 土石料在上下盒的左侧和及下盒的右下角均受到挤压。

图15中试样中的骨架颗粒接触法向主方向, 在145°~155° 之间接触密度较大, 在残余阶段, 该方

向相对远离了剪切带, 向右下方倾斜。图16中法向接触力比峰值也有所减小, 受开缝宽度增大的影响, 在75°~85° 的范围内骨架颗粒间法向接触力相对较大, 最大为4.3 kN左右。

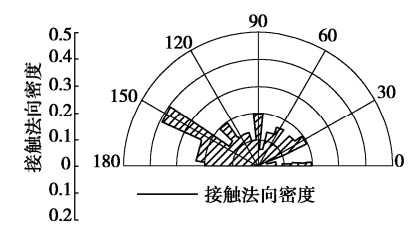


图 15 30 mm 开缝宽度骨架颗粒接触法向密度(残余阶段)
Fig. 15 Contact normal densities of skeleton particles with opening size of 30 mm (residual stage)

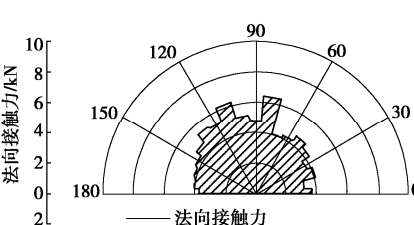


图 16 30 mm 开缝宽度骨架颗粒法向接触力(残余阶段)
Fig. 16 Normal contact forces of skeleton particles with opening size of 30 mm (residual stage)

表3是试样在30 mm开缝情况下峰值及残余等剪切状态中土骨架上各粒径颗粒的数目, 各状态土骨架上的颗粒总数依次为83和87。比开缝宽度5 mm在峰值和残余状态下分别减少28和49个, 说明同等情况下, 开缝宽度对土骨架的颗粒有重要影响, 开缝越宽, 土骨架上颗粒数就越少。

表 3 30 mm 开缝宽度试样骨架中颗粒组成及分布
Table 3 Composition and distribution of skeleton particles of samples under opening size of 30 mm

数值试验粒径/mm	20	17	14	10	5	1.5
颗粒形状						
峰值状态颗粒分布数	19	17	17	4	1	31
残余状态颗粒分布数	15	20	19	2	0	39

1.3 试验验证

为了解直剪试验开缝宽度对不同形态颗分曲线抗剪强度的影响, Cai等^[12]以高填方土石混合填筑料为基础, 探讨了不同开缝条件对土石混合料抗剪强度的影响, 结果见图17。

结果表明上下剪切盒之间开缝宽度对抗剪强度有重要影响, 峰值强度随开缝宽度增加而降低。

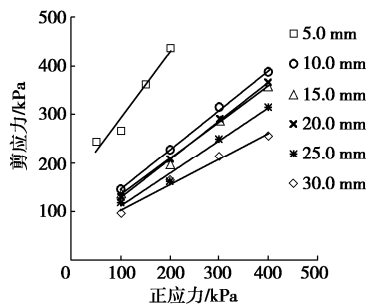


图 17 不同开缝宽度情况下抗剪强度与法向应力关系

Fig. 17 Relationship between shear strength and normal stress under different opening sizes

2 结 论

结合PFC^{2D}离散元数值模拟, 分析不同开缝宽度下缺失中间粒径土石混合料的抗剪强度变化规律, 深入探讨缺失中间粒径土石混合料骨架结构的力传递路径、强度形成机理及混合料变形破坏机制, 结论如下:

(1) 上下剪切盒之间开缝宽度对其抗剪强度有重要影响, 峰值强度随开缝宽度的增加而降低, 抗剪强度-水平位移曲线表现为应变软化。

(2) 开缝宽度对土石混合料骨架构成也有重要影响, 开缝宽度越大, 构成骨架的颗粒数目就越少, 分布范围也越小, 剪切带越靠近上剪切盒。

(3) 不同开缝宽度情况下, 骨架上颗粒法向接触力分布基本上是均匀的, 骨架上颗粒受力相对均匀, 骨架颗粒受力与开缝宽度并无明显关系。

(4) 不同开缝宽度剪切面在各剪切阶段不是平面, 随着水平剪切位移增加, 土骨架上接触力链和剪切带不断发生变化, 试样内部受力极不均匀。

(5) 试样内部脱空现象除与土石混合料骨架组成、颗粒摩擦系数及级配有关外, 开缝宽度对其也有重要影响, 开缝越宽, 脱空现象就越明显。

参考文献:

- [1] IRFAN T Y, TANG K Y. Effect of the Coarse Fractions on the Shear Strength of Colluvium: GEO Rep. No. 23[R]. Hong Kong: Civil Engineering and Development Dept., Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 1993: 48 - 49.
- [2] XU Wen-Jie, XU Qiang, HU Rui-lin. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, **48**: 1235 - 1247.
- [3] KHOIRI M, CHANG Y O, TENG F C. A comprehensive evaluation of strength and modulus parameters of agravelly cobble deposit for deep excavation analysis[J]. Eng Geol,

2014, **174**(1): 61 - 72.

- [4] WANG Z J, JING G Q, YU Q F, et al. Analysis of ballast direct shear tests by discrete element method under different normal stress[J]. Measurement, 2015, **63**: 17 - 24.
- [5] LIU Jian-kun, WANG Peng-cheng, LIU Jing-yu. Macro- and micro-mechanical characteristics of crushed rock aggregate subjected to direct shearing[J]. Transportation Geotechnics, 2015, **2**: 10 - 19.
- [6] VALLEJO L E, MAWBY R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures[J]. Engineering Geology, 2000, **58**: 125 - 136.
- [7] 黄 斌, 曾宪营. 含石量对大浏高速土石混合体强度影响研究[J]. 公路与汽运, 2012, **148**(1): 107 - 109. (HUANG Bin, ZENG Xian-ying. Study on the influence of rock content on the strength of soil-rock mixture of Daliu Expressway[J]. Highways & Automotive Applications, 2012, **148**(1): 107 - 109. (in Chinese))
- [8] 王江营, 曹文贵, 张 超, 等. 基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1849-1856. (WANG Jiang-ying, CAO Wen-gui, ZHANG Chao, et al. Large-scale direct shear tests on soil-rock aggregate mixture under complicated environment based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1849-1856. (in Chinese))
- [9] 黄晚清, 陆 阳, 何昌轩, 等. 基于离散单元法的沥青混合料研究初探[J]. 中南公路工程, 2007, **32**(2): 19 - 25. (HUANG Wan-qing, LU Yang, HE Chang-xuan, et al. Research on asphalt mixture based on discrete element method[J]. Central South Highway Engineering, 2007, **32**(2): 19 - 25. (in Chinese))
- [10] 杨 升, 李晓庆. 基于 3 维离散元颗粒流的土石混合体大型直剪试验模拟分析[J]. 工程科学与技术, 2020, **52**(3): 78 - 85. (YANG Sheng, LI Xiao-qing. Simulation analysis of large direct shear test of soil and rock mixture based on PFC3D[J]. Advanced Engineering Science, 2020, **52**(3): 78 - 85. (in Chinese))
- [11] 王环玲, 沙 聪, 徐卫亚, 等. 考虑孔隙率和不均匀系数的土石混合体颗粒流分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, **47**(3): 251 - 258. (WANG Huan-ling, SHA Cong, XU Wei-ya, et al. Particle follow analysis of soil-rock mixture considering porosity and heterogeneity[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2019, **47**(3): 251 - 258. (in Chinese))
- [12] CAI H, WEI R, XIAO J Z. Direct shear test on coarse gap-graded fill: plate opening size and its effect on measured shear strength[J]. Advances in Civil Engineering, 2020. Article ID 5750438. <https://doi.org/10.1155/2020/5750438>.

(编校: 明经平)