



不同含石量下泥岩土石混合体剪切特性及 细观破坏机制

张敏超,刘新荣,王鹏,杜立兵

(重庆大学 土木工程学院;山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要:为探究含石量对泥岩土石混合体剪切特性及细观破坏机制的影响,设计了含石量20%~80%共4组试样,分别在0.2、0.4、0.6、0.8 MPa这4种不同围压下进行室内大型三轴剪切试验,研究不同含石量试样的偏应力、体积应变及抗剪强度参数的变化规律;基于数字图像处理技术生成PFC^{2D}颗粒流数值模型进行一系列数值分析。结果表明:试样抗剪强度随含石量增大而不断增大。与其他类型的土石混合体不同的是,泥岩土石混合体在低围压下呈先剪缩后剪胀的变化规律,且含石量越高,最终剪胀效果越明显;在高围压下始终表现为剪缩,且含石量越低,剪缩效果越强。内摩擦角随含石量增大呈慢-快-慢的“S”型增长趋势,且在20%~80%含石量内增长较快;黏聚力随含石量增大不断降低,但下降速率逐渐减小。数值试验表明:土石混合体在剪切过程中存在拉-剪混合破坏;随含石量增加,土石混合体骨架结构效应越来越显著,剪切带绕过块石,形成多个形状不规则的小剪切带。

关键词:含石量;泥岩土石混合体;颗粒流模型;剪切特性;细观破坏机制

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0017-10

Shear properties and failure meso-mechanism of soil-rock mixture composed of mudstone under different rock block proportions

Zhang Minchao, Liu Xinrong, Wang Peng, Du Libing

(School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To investigate the impact of rock block proportion (RBP) on shear properties and meso-failure mechanism of mudstone soil-rock mixture (SRM). Four groups of sample with RBP ranging from 0% to 80% were prepared for large-scale triaxial tests under three different confining pressures (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 MPa), and the change rules of deviatoric stress, volumetric strain and shear strength of sample with different RBPS. Then, a series of numerical analysis were conducted based on particle flow numerical method PFC2D by digital image processing. It is shown that the shear strength increases with the increase of RBP. Unlike other types of soil-rock mixture, sample shows the law of shearing contraction and then

收稿日期:2019-03-25

基金项目:国家自然科学基金(No. 41772319)

作者简介:张敏超(1993-),男,主要从事岩土工程研究,E-mail: zhangmccqu@163.com.

刘新荣(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: liuxrong@126.com.

Received:2019-03-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41772319)

Author brief: Zhang Minchao(1993-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: zhangmccqu@163.com.

Liu Xinrong(corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: liuxrong@126.com.

dilatation under low confining pressure, and the stronger the final shear dilatation with the higher RBP. The shear contraction decreases under high confining pressure, and the stronger the final shear contraction with lower RBP. With the increase of SRM, the internal friction angle shows slow-fast-slow and “S” growth trend and growth faster between 20%~80% RBP. The cohesion decreases all the time, but the rate of decline is decreasing. Numerical tests indicate that the failure of SRM is tension-shear mixing failure during shear tests. The skeleton-effect of rock blocks becomes more and more obvious with the increase of SRM, the shear zone bypassing the rock blocks and multiple irregular and small shear zone is formed.

Keywords: rock block proportion; mudstone soli-rock mixture; particle flow model; shear properties; meso-failure mechanism

近年来,中国西南地区基础设施建设快速发展,下穿土石混合物(soil-rock mixture,简称SRM)回填区域的隧道工程项目日益增多,例如,重庆轨道交通10号线某段穿越土石回填区,最大填方厚度达62 m。土石混合体的剪切特性是控制隧道开挖变形及稳定性的重要力学参数,研究表明,土石混合体的含石量(rock block proportion,简称RBP)及块石岩性等因素对其剪切特性有显著影响^[1-4]。因此,开展不同含石量下土石混合物剪切特性的研究对控制隧道开挖变形及稳定性具有重要的理论和现实意义。

针对含石量等因素对土石混合物剪切特性的影响,学者们采用原位试验、室内试验及数值模拟等手段展开了一系列研究^[4-9]。Lindquist等^[10]通过大量试验研究得出,含石量对土石混合体的力学特性有显著影响,土石混合物中的块石导致其表现出一定的结构性特征,从而对土石混合体的细观变形破坏机理及宏观力学特性造成显著影响。李晓等^[11]基于现场大型推剪和压剪试验结果,探讨了土石混合体的破坏模式及强度参数在不同含石量、不同尺寸和不同应力状态下的变化规律。Coli等^[12]基于Santa Barbara矿区内的土石混合体现场推剪试验结果,探讨了含石量对土石混合物力学特性及强度参数的影响规律。

为弥补原位试验的不足,大量学者采用室内试验进行研究。Dinc等^[13]、Kalender等^[14]采用室内单轴及三轴压缩试验,研究了含石量对土石混合物单轴抗压强度(UCS)及抗剪强度参数的影响,并通过拟合得到了预测土石混合物强度参数的经验公式。董云^[15]采用改进的新型室内直剪试验系统,研究了土石混合物强度指标的影响因素,结果表明,母岩性质和含石量对土石混合体的强度指标影响较大。金磊等^[16]借助室内大型三轴试验,研究了块石

含量及形状对胶结土石混合物力学特性的影响规律。刘忠强等^[17]基于室内直剪试验结果,探讨了不同块石形状、土体性质、含石量及应力状态下崩积体重塑样的剪应力-应变曲线和抗剪强度参数曲线的变化规律。Afifipour等^[18]采用单轴压缩试验,研究了人工制备的高含石量混杂岩的强度参数。

现阶段相关研究主要有以下3点不足:1)虽然考虑了含石量对土石混合物剪切特性的影响,但由于多数室内试验研究选用的土石混合物试样中块石颗粒粒径较小,相较于实际工程中的土石混合物所含块石粒径差异较大;2)相关室内试验多为单轴压缩试验或直剪试验,较少进行土石混合物在不同围压条件下的大型三轴压缩试验;3)中国西南地区的土石混合物所含块石多以泥岩、砂质泥岩为主,对该类泥岩土石混合物剪切特性的研究较少。该类土石混合物多为非胶结土石混合物,泥岩块石强度较低,导致其力学特性较其他类型的土石混合物有显著差别。

通过上述分析可知,现阶段对于泥岩土石混合物在不同含石量下剪切特性的大型三轴试验研究还不是很全面。因此,本文以重庆市轨道交通10号线下穿土石回填区所取得的土石混合物材料为研究对象,该类土石混合物所含块石主要为泥岩和砂质泥岩,基质土体为粉质黏土。采用该土样制备不同含石量的土石混合物试样,然后,在不同围压下进行室内大型三轴固结排水剪切试验,详细分析了含石量对土石混合物剪切特性的影响。最后,运用数字图像处理生成泥岩土石混合体的二维数值模型,采用PFC颗粒流软件研究了该类土石混合物剪切面的演化规律及含石量对其细观破坏机制的影响。

1 试验方案

1.1 试验仪器及材料

试验所用仪器为四川大学华西岩土研究所研制的YS30-3B型粗粒土应力路径控制大型三轴试验机,该试验机主要由三轴试验机、应力路径控制系统及自动采集系统3部分组成。最大轴向荷载为1500 kN,最大围压为4 MPa,最大轴向行程为

300 mm,试样直径为300 mm,高度为600 mm。

试验材料取自重庆市轨道交通10号线下穿土石回填区域,其块石主要由泥岩和砂质泥岩组成,基质土为粉质黏土。通过相关室内实验测得土样基本物理参数指标如表1所示。从取回的土样中随机抽取4份,烘干后通过筛分试验测得土样的天然级配曲线如图1所示,土样天然含石量约为60.51%。

表1 泥岩土石混合体试样的基本参数

Table 1 Basic parameters of soil-rock mixture sample

试样	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	天然含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	单轴抗压强度 R_c/MPa	弹性模量 E/GPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
粉质粘土	2.07	9.2	1.90	0.35			37.4	13
泥岩	2.45				19.98	3.08		

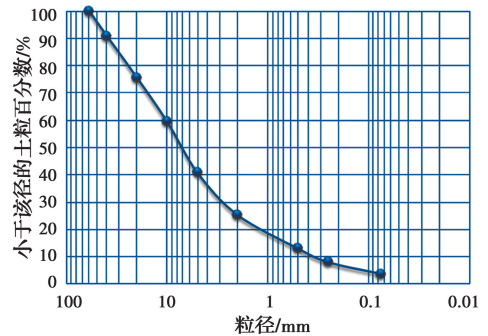


图1 筛分试验样及土样天然级配曲线

Fig. 1 Natural grading curve of soil-rock aggregate

根据前人^[19-22]研究成果,选定5 mm作为土/石阈值;考虑到试样所允许的最大块石粒径应小于试样高度或直径的1/5倍,故取最大粒径为60 mm,剔除所取土样中直径大于60 mm的块石。因此,试验中“块石”表示粒径在5~60 mm的泥岩或砂质泥岩,粒径小于5 mm的部分为“基质土体”。以该土石混合体土样为基础,根据得到的颗粒级配曲线制备了含石量(块石质量占块石与基质土体总质量的百分比)分别为20%、40%、60%和80%的土石混合体试样。图2为制备的各含石量泥岩土石混合体颗粒级配曲线。

1.2 试验步骤

首先,依据图2中不同含石量试样的级配曲线及9.2%的天然含水率,称取各粒组所需质量,然后加入预计质量的水,搅拌使粗细颗粒均匀混合,用防水膜包裹密封,养护24 h,使试样干湿均匀。制样

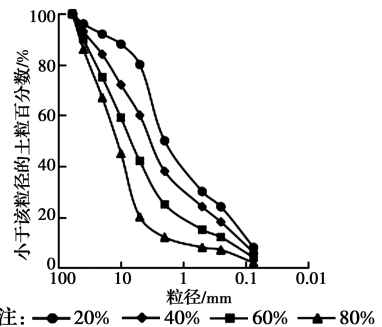


图2 各含石量试样的级配曲线

Fig. 2 Grading curves of samples with different RBP

时,控制试样密度与土样天然密度 $2.07 g/cm^3$ 一致,称取一定质量配置好的土样,分4层装入三轴试样套筒内,每层厚度为150 mm。为保证试样质量,每层土石料入模后,采用静压法压实至预定高度。为避免层间出现预设软弱面,对各层之间接触面进行凿毛处理。试验时,试样采用反压法饱和。然后,

在设计围压下进行固结,最后,保持 0.1 mm/min 的剪切速率开展排水剪切试验,当试样的轴向应变达到 15%时,终止试验。

研究重点是含石量对土石混合体力学特性和抗剪强度参数的影响,因此,选取 4 种代表性含石量,分别在围压 0.2、0.4、0.6、0.8 MPa 下进行固结排水剪切试验。具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案
Table 2 Testing programs

试验组号	含石量 RBP/%	含水率 w /%	围压/MPa
1	20	9.2	0.2、0.4、0.6、0.8
2	40	9.2	0.2、0.4、0.6、0.8
3	60	9.2	0.2、0.4、0.6、0.8
4	80	9.2	0.2、0.4、0.6、0.8

2 试验结果与讨论

2.1 应力-应变特征

图 3 给出了经过大型三轴剪切试验后,20%~80%这 4 种含石量的泥岩土石混合体试样在不同围压条件下偏应力随轴向应变的变化规律。可以看出,相同围压下,不同含石量试样的偏应力-轴向应变曲线形态基本一致,但峰值偏应力随含石量增大而增大。曲线在局部出现波动现象,原因是由于剪切过程中试样局部出现大粒径块石,产生局部应力集中,导致块石破碎,从而引起曲线局部波动。该类土石混合体偏应力-轴向应变曲线可分为 3 个阶段:1)初始阶段曲线大致呈线性变化,该阶段主要为土体压密过程,部分试样的曲线略微呈下凸型,推测可能是由于制样过程中人为因素造成试样土体未达到均匀和密实状态,导致试验初期变形较大;2)随着轴压逐渐增大,曲线的斜率缓慢减小,直到出现峰值偏应力,该阶段块石的滑动、重新排列导致块石之间相互咬合;3)轴压进一步增大,此时试样在低围压和高围压下产生了不同的变形特性:在围压较低(0.2、0.4 MPa)条件下,表现出弱应变软化特性;而在高围压(0.6、0.8 MPa)条件下,则表现出明显的应变硬化特性。

2.2 体应变特性

图 4 给出了不同围压条件下 20%和 80%两种代表性含石量的泥岩土石混合体的体应变-轴向应变关系曲线。可以看出,不同含石量试样在相同围

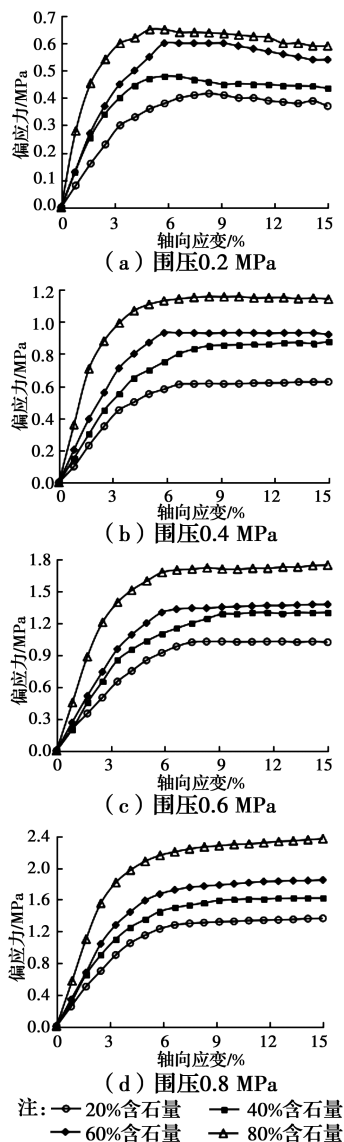


图 3 泥岩土石混合体偏应力-轴向应变关系

Fig. 3 Relationship between deviatoric stress and axial strain of soil-rock mixture

压条件下的体积应变-轴向应变曲线变化规律基本相同,但体变量大小有所差异。

低围压(0.2、0.4 MPa)条件下,各含石量试样在试验初期均表现出一定的剪缩。原因是由于在试验初期,颗粒填充到原来的空隙中并发生压密作用,导致试样高度降低;随着轴向应变逐渐增大,由于围压较小,块石容易发生滑动、翻转及相互错动等现象,导致试样进入剪胀阶段且剪胀幅度快速增大;试验后期,试样体应变逐渐趋于稳定。同时可以看出,相同围压下,含石量越高,试样最终体应变越大,即剪胀作用越显著。以围压 0.2 MPa 为例,20%含石量的试样轴向应变达到 15%时,体应变为 0.85%,且体应变已经趋于稳定;但 80%含石量的试样轴向

应变达到 15% 时,体应变为 1.9%,且体应变有继续增大的趋势。

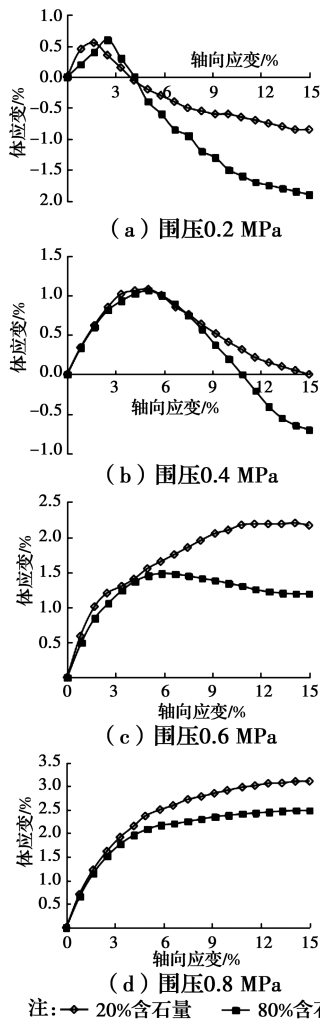


图 4 泥岩土混合体的体应变-轴向应变关系
Fig. 4 Relationship between volumetric strain and axial strain of soil-rock mixture

与低围压条件下的结果显著不同的是,高围压(0.6、0.8 MPa)条件下,各含石量试样随轴向应变增大始终表现为剪缩特征。原因是由于试样经过试验初期压密作用后,在较高围压条件下,颗粒翻转难度较大;且由于块石主要为强度较小的泥岩、砂质泥岩,其受到粒间作用力而破碎,导致细颗粒含量增加,孔隙继续被填充,试件进一步被压密而表现出剪缩特征。此外,还可以看出,相同围压下,含石量越低,试样在剪切过程中体应变越大,即剪缩作用越显著。以围压 0.8 MPa 为例,当轴向应变达到 15% 时,20%和 80%含石量试样的体应变分别为 3.1%和 2.5%。

图 5 给出了 20% 含石量试样在 0.2 MPa 围压

条件下经过三轴试验后的变形破坏特征。可以看出,试样中上部呈现出显著的鼓胀现象。



图 5 试样剪切后变形状况
Fig. 5 Deformation of sample after shearing

2.3 抗剪强度参数

根据相关试验规范^[23],从泥岩土混合体的偏应力-轴向应变关系中取得抗剪强度:该曲线有峰值时取峰值,无峰值时则取轴向应变为 15% 时的值。图 6 所示为不同含石量的泥岩土混合体在不同围压条件下抗剪强度的变化规律。从图中可以看出,抗剪强度大致随含石量增大而逐渐增大。采用摩尔-库伦强度准则对图 6 中的试验数据进行拟合,得到的拟合相关系数均在 0.9 以上,表明在 0.2~0.8 MPa 围压范围内摩尔-库伦强度准则对该泥岩土混合体基本适用。根据该拟合曲线即可获得不同含石量泥岩土混合体的抗剪强度参数值(c 、 φ)。下面将探讨含石量对抗剪强度参数的影响。

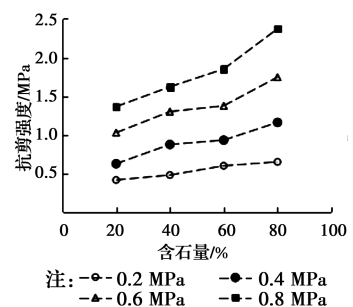


图 6 含石量与抗剪强度关系曲线

Fig. 6 Relationship between shear strength and RBP of soil-rock mixture

2.3.1 内摩擦角与含石量的关系 不同含石量下泥岩土混合体内摩擦角 φ_{SRM} 如图 7 中试验值所示。其中,含石量为 0 时,基质土体内摩擦角 $\varphi_{soil} = 13^\circ$ 。由图 7 可知,含石量对内摩擦角影响显著。

由图 7 可以看出,试验值呈“S”形分布,其变化规律符合 Logistic 函数。借鉴前人研究成果^[13-14],采用 Logistic 函数并考虑边界条件等因素,拟合得

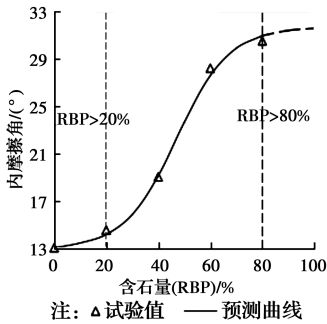


图7 泥岩土石混合体含石量与内摩擦角关系

Fig. 7 Relationship between RBP and internal friction angle of soil-rock mixture

到泥岩土石混合体内摩擦角同含石量之间的经验公式。

$$\varphi_{\text{SRM}} = \varphi_{\text{soil}} \left[\frac{a}{1 + e^{-0.1 \cdot g(\text{RBP}-b)}} \times \frac{\text{RBP}}{\text{RBP} + 1} + 1 \right] \quad (1)$$

式中： φ_{SRM} 和 φ_{soil} 分别为土石混合体内摩擦角和基质土体内摩擦角；RBP为土石混合体含石量（不取百分号）。 a 、 b 为拟合参数。

从图7中可以看出，经验公式与试验值拟合较好，能够很好地反映出泥岩土石混合体内摩擦角随含石量增长的变化规律：即当含石量小于20%时，内摩擦角增长较为缓慢；含石量在20%~80%之间时，内摩擦角则增长较快；含石量大于80%后，内摩擦角逐渐趋于稳定值。对这一变化规律分析如下：

影响土石混合体内摩擦角大小的因素包含颗粒之间的滑动和咬合产生的摩擦力。滑动摩擦力受到构成颗粒的矿物性质及颗粒之间的接触方式等影响；咬合摩擦力则与颗粒的大小、形状及是否形成有效接触等因素相关。从图7中泥岩土石混合体内摩擦角与含石量关系曲线可以看出，当含石量小于20%时，内摩擦角随含石量的增大变化较为缓慢。这是因为当含石量较小时，基质土体中的块石相互之间并未形成有效接触，块石作用微弱，未产生骨架效应，咬合摩擦力较小，此时的土石混合体更多地表现为“土”的特性，因此，内摩擦角增长较为缓慢。而随着含石量继续增大，块石数量进一步增多，并形成有效接触作用，块石之间的闭锁、咬合等作用使得土石混合体内摩擦角快速增大，此时的土石混合体变形与强度特性受到块石与基质土体的共同控制，含石量对其影响较为显著。而当含石量大于80%时，由于块石已经占据了试样内大部分空间，导致咬合

作用进一步发展的空间减小，因此，内摩擦角增长速度也逐渐减小。

为了验证经验公式(1)的适用性并探讨拟合参数 a 、 b 的实际意义。采用该公式对前人^[6,10,15,17]研究数据进行拟合，结果如图8所示。可以看出，式(1)能较好地反映土石混合体内摩擦角同含石量之间的变化规律，具有较强的适用性。此外，通过对不同块石性质、不同基质土体强度的土石混合体内摩擦角-含石量的拟合公式可以总结出以下规律：拟合参数 a 与土石混合体中块石的强度大小有关，块石强度越高（如砂岩），则参数 a 的值越小，块石强度越低（如泥岩），则参数 a 的值越大；拟合参数 b 与土石混合体中“基质土体”的性质有关，对于黏土等软土，参数 b 的值较小，对于砂土则参数 b 的值较大。

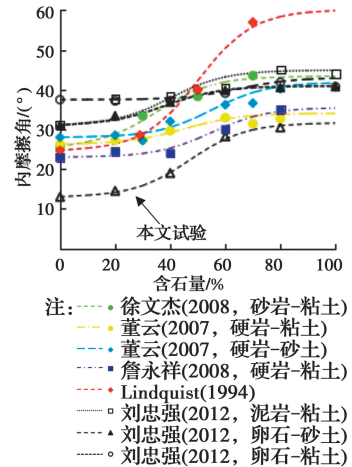


图8 已有文献中内摩擦角与含石量的关系

Fig. 8 Relationship between internal friction angle and RBP in existing literatures

2.3.2 黏聚力与含石量的关系 不同含石量下黏聚力大小如图9中试验值所示。采用幂函数对试验值进行拟合，可得到一个初步预测泥岩土石混合体黏聚力随含石量变化的经验公式。

$$c_{\text{SRM}} = c_{\text{soil}} \cdot e^{-K \cdot \text{RBP}} \quad (2)$$

式中： c_{SRM} 和 c_{soil} 分别为土石混合体和基质土体的黏聚力；RBP为含石量（不取百分号）； K 为拟合参数。

根据前人研究成果^[24]可知，黏聚力主要包括颗粒间胶结力、结合水膜上的静电引力、接触点的化合价键及表观黏聚力等，其中，表观黏聚力包括毛细作用力及颗粒之间的咬合力。从图9中预测曲线可以看出，随着含石量的增大，泥岩土石混合体的黏聚力逐渐降低。在含石量较低范围内，黏聚力下降较为

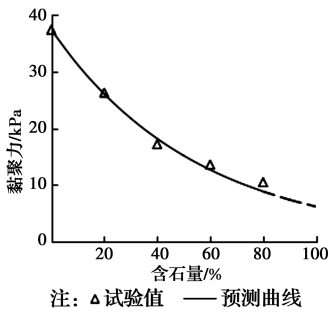


图 9 土石混合体含石量-黏聚力关系

Fig. 9 Relationship between RBP and cohesion

显著。这是由于当含石量较低时,一方面颗粒间咬合力较小,另一方面随着含石量的增大,土体基质逐渐减小,造成颗粒间胶结力不断下降,结合水膜上的静电引力及毛细引力也不断下降,此时土石混合体的黏聚力主要受颗粒间胶结力、结合水膜上的静电引力及毛细力控制,因此,表现为黏聚力的显著下降;而在含石量较高时,颗粒间咬合作用显著增强,由此增加的黏聚力部分抵消了颗粒间胶结力的减小,此时土石混合体的黏聚力受颗粒间咬合力及胶结力等共同控制,因此,表现出黏聚力下降速度变缓并逐渐趋于稳定。由于黏聚力的影响因素较多、随含石量变化规律较为复杂,通过与前人研究对比发现,经验公式(2)较适用于块石为软岩、基质土体为软黏土的土石混合体。

3 基于数字图像处理的 PFC^{2D} 数值模拟

为进一步研究含石量对泥岩土石混合体变形破坏细观力学特征的影响,基于数字图像处理技术,建立不同含石量下的泥岩土石混合体颗粒流模型,采用双轴试验对其进行模拟。

3.1 数值模型的构建

模型生成过程如图 10 所示。首先,拍摄得到不同含石量下的土石混合体照片,利用 MATLAB 软件对图片进行处理,得到相应的二值图像,然后,从二值图像中提取块石位置信息。参照原图长宽比,设置模型试件尺寸为 300 mm×600 mm,按照预定的孔隙比,在模型试件中生成半径在 2.0~3.3 mm 的颗粒,根据上述得到的块石位置信息,将颗粒组合成 cluster 块石,最终生成相应的土石混合体数值模型。模型边界采用 PFC 中的墙体 Wall,并将墙体的切向接触刚度和摩擦力设置为 0,以消除墙体与颗

粒之间的摩擦对模拟结果的影响。

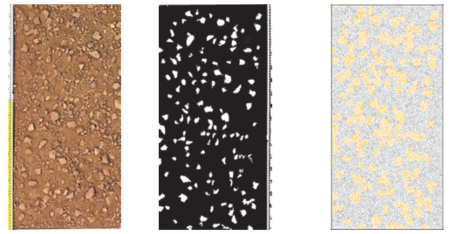


图 10 基于数字图像处理的颗粒流模型

Fig. 10 Particle flow model based on digital image processing

3.2 数值模型细观参数标定

针对土石混合体中颗粒间的接触特性,选用线性刚度模型、滑动模型及接触粘结模型 3 种接触本构模型。土颗粒与块石之间的接触特性对土石混合体性质的影响较大,选用接触粘结模型能够更好地反映土石混合体的力学行为^[2-3]。

模型的细观参数决定了其宏观力学性质,而目前还无法将材料的宏观参数直接转化为颗粒的细观参数,因此,采用“试错法”确定数值模型细观参数。选择含石量 20% 的土石混合体试样,分别在 0.2、0.8 MPa 围压下的室内大型三轴剪切试验得到的偏应力-轴向应变曲线为调整标准,使 20% 含石量数值模型在 0.2、0.8 MPa 围压下所得数值模拟结果与室内三轴试验结果达到最大程度的相近,如图 11 所示。可以看出,模拟结果与试验结果较为接近,表明该模型及相应的细观参数能够较好地反映泥岩土石混合体的力学特性。

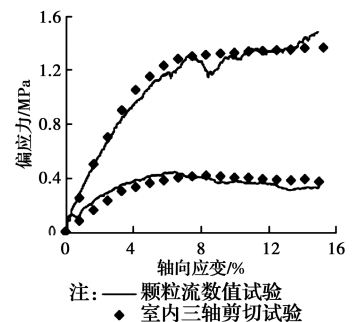


图 11 颗粒流数值模拟与室内三轴剪切试验偏应力-轴向应变关系

Fig. 11 Relationship between deviatoric stress and axial strain obtained from the numerical laboratory tests

按照上述步骤并参考室内三轴剪切试验,设计含石量 20%、40%、60% 和 80% 的试样分别在 0.2、0.4、0.6、0.8 MPa 条件下的数值模型试验。试验过

程中,左右两侧墙体利用数值伺服机制施加恒定应力使其保持固定;模型下边界同样保持固定,对上边界施加 0.1 mm/min 的法向加载速率,当模型试件轴向应变达到 15% 后,停止加载。

3.3 结果分析

3.3.1 剪切面形态及演化特征 图 12 给出了 20% 含石量试样在 0.2 MPa 围压下剪切面发展状况,其中,红色代表拉伸裂纹,蓝色代表剪切裂纹。从图中可以清晰地观察到剪切带从无到有,直至贯通的全过程。

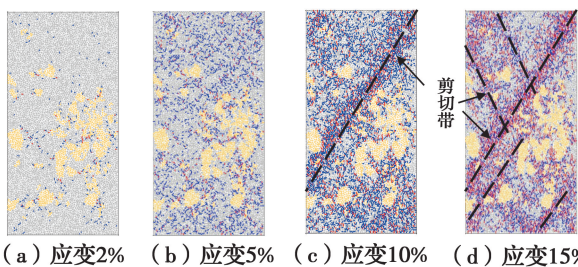


图 12 数值模型试验过程中剪切面的发展

Fig. 12 Developments of shear plane during numerical model tests

不同阶段裂纹发展规律如下:

1) 加载初期 ($\epsilon_a = 2\%$), 微裂纹数很少, 且主要集中在块石附近, 以剪切裂纹为主。这是由于块石与土体的强度差异较大, 初始加载时在土石界面上产生应力集中, 导致块石与土颗粒相互滑动, 形成剪切裂纹。

2) 加载到峰值偏应力 ($\epsilon_a = 5\%$) 之前, 该过程中剪切裂纹开始向土体内部扩展, 这主要是由于土体压密产生了剪切裂纹。

3) 加载到峰值偏应力后, 从图 12 中 $\epsilon_a = 5\% \sim 10\%$ 这一过程可以看出, 随着轴向应变逐渐增大, 剪切裂纹和拉伸裂纹数目均显著增多并逐渐形成剪切带, 这是由于此过程中, 一方面土体继续压密产生剪切裂纹; 另一方面, 块石在荷载作用下翻转、错动导致试样体积膨胀, 产生拉伸裂纹。

4) 加载后期 ($\epsilon_a = 10\% \sim 15\%$), 裂纹绕过块石, 并在块石周围和土体中逐步贯通, 形成多个 X 型剪切带。且裂纹主要以拉伸裂纹为主, 表明此时土体的压密作用已经比较微弱, 而是以块石之间的翻转、错动为主。

3.3.2 含石量对破坏模式的影响 图 13 为不同含石量的泥岩土石混合物分别在低围压 (0.2 MPa) 和高围压 (0.8 MPa) 条件下的最终破坏模式。可以看

出, 在低围压条件下, 试样加载后期以拉伸裂纹为主, 表明此时块石发生一系列翻转、错动等现象, 导致试样体积膨胀产生拉伸裂纹, 这与室内三轴剪切试验体应变结果即剪切后期发生剪胀现象是一致的。此外, 在含石量较低时, 剪切破坏带较规则, 有一个明显的从右上至左下的主剪切带; 而随着含石量的增大, 由于块石的存在导致剪切带变得极不规则, 产生了多个小剪切带。

而在高围压条件下, 试样加载后期以剪切裂纹为主, 这与室内试验体应变结果始终为剪缩现象同样是一致的。对于所含块石强度较低的泥岩土石混合物, 由于高围压的限制, 泥岩块石很难翻转、错动, 更容易产生破碎现象, 因此, 剪切带在高围压条件下更宽。

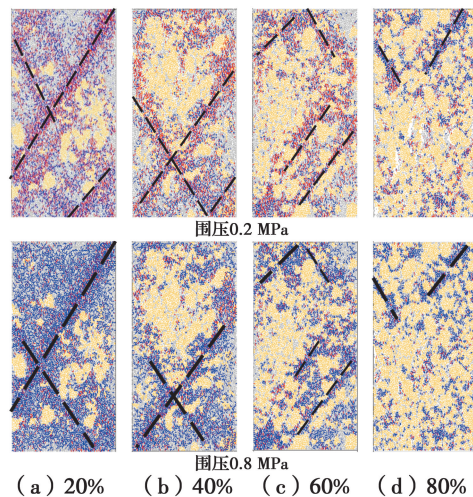


图 13 不同含石量土石混合物最终破坏模式

Fig. 13 Final failure mode of soil-rock mixture under different RBP

4 结论

采用大型三轴剪切试验及基于数字图像处理的 PFC 数值模拟方法, 研究了 $20\% \sim 80\%$ 的 4 种不同含石量的泥岩土石混合物, 分别在 $0.2 \sim 0.8 \text{ MPa}$ 围压条件下的剪切特性:

1) 泥岩土石混合物三轴剪切过程中, 相同围压下, 不同含石量试样的偏应力-轴向应变曲线形态基本一致, 但峰值偏应力有所差异。在低围压 (0.2 MPa) 条件下, 泥岩土石混合物呈现弱应变软化特性; 在高围压 (0.8 MPa) 条件下, 则呈现明显的应变硬化特性。

2) 低围压下泥岩土石混合物在三轴剪切过程中表现为先剪缩后剪胀, 且含石量越大, 试样最终体应

变越大,即剪胀作用越显著;高围压下,试样始终表现为剪缩特征,且含石量越小,试样体应变越大即剪缩作用越显著。

3)泥岩土石混合体的抗剪强度随含石量增大而增大,含石量对其抗剪强度参数影响显著。总体上,内摩擦角随含石量增大呈慢-快-慢的“S”型增长趋势;含石量在20%~80%范围内,内摩擦角增长较快,其他范围增长较为缓慢;黏聚力随着含石量增大不断下降,但降低速率逐渐减小。拟合公式能够较好地反映出泥岩土石混合体的内摩擦角、黏聚力随含石量增长的变化规律,具有较好的适用性。

4)在剪切过程中,微裂纹首先出现在块石附近,随后逐渐向土体中扩展,最终形成一条贯通的剪切带。含石量越高,剪切带形状越不规则,呈现多个小剪切带;低围压条件下,最终破坏模式以拉伸裂纹为主,而高围压条件下,则以剪切裂纹为主。

参考文献:

- [1] 廖秋林, 李晓, 郝钊, 等. 土石混合体的研究现状及研究展望[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 800-807.
LIAO Q L, LI X, HAO Z, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates (RSA) [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 800-807. (in Chinese)
- [2] 杨忠平, 雷晓丹, 王雷, 等. 含石量对土石混合体剪切特性影响的颗粒离散元数值研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1035-1045.
YANG Z P, LEI X D, WANG L, et al. Impact of stone content to shear properties of soil-rock mixture using particle flow code simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1035-1045. (in Chinese)
- [3] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477-484.
DING X L, LI Y X, WANG X. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 477-484. (in Chinese)
- [4] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合体剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 93-102.
TANG J Y, XU D S, LIU H B. Effect of gravel on shear behavior of sand-gravel mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 93-102. (in Chinese)
- [5] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1270-1277.
XU W J, HU R L, TAN R J, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in tiger-leaping gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1270-1277. (in Chinese)
- [6] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996-1007.
XU W J, HU R L, YUE Z Q, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 996-1007. (in Chinese)
- [7] ZHANG Z L, XU W J, XIA W, et al. Large-scale in-situ test for mechanical characterization of soil-rock mixture used in an embankment dam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 317-322.
- [8] 徐文杰, 王识. 基于真实块石形态的土石混合体细观力学三维数值直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2152-2160.
XU W J, WANG S. Meso-mechanics of soil-rock mixture with real shape of rock blocks based on 3D numerical direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2152-2160. (in Chinese)
- [9] 刘新荣, 涂义亮, 王鹏, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1425-1434.
LIU X R, TU Y L, WANG P, et al. Particle breakage of soil-rock aggregate based on large-scale direct shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1425-1434. (in Chinese)
- [10] LINDQUIST E S, GOODMAN R E. Strength and deformation properties of a physical model mélange [C]//Proc. 1st North American Rock Mech. Symp. Austin, Texas: 843-850.
- [11] 李晓, 廖秋林, 赫建明, 等. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2377-2384.

- LI X, LIAO Q L, HE J M, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2377-2384. (in Chinese)
- [12] COLI N, BERRY P, BOLDINI D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1): 95-102.
- [13] DINC O S, SONMEZ H, TUNUSLUOGLU C, et al. A new general empirical approach for the prediction of rock mass strengths of soft to hard rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4): 650-665.
- [14] KALENDER A, SONMEZ H, MEDLEY E, et al. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils [J]. Engineering Geology, 2014, 183: 65-79.
- [15] 董云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1269-1274.
DONG Y. Experimental study of intensity character of rock-soil aggregate mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1269-1274.
- [16] 金磊, 曾亚武, 张森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 141-149.
JIN L, ZENG Y W, ZHANG S. Large scale triaxial tests on effects of rock block proportion and shape on mechanical properties of cemented soil-rock mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 141-149. (in Chinese)
- [17] 刘忠强, 薛亚东, 黄宏伟, 等. 崩积体剪切性能试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2349-2358.
LIU Z Q, XUE Y D, HUANG H W, et al. Experimental research on shear behavior of colluviums [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2349-2358. (in Chinese)
- [18] AFIFIPOUR M, MOAREFVAND P. Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 65: 40-48.
- [19] 赫建明. 三峡库区土石混合体的变形与破坏机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2004.
HE J M. Study on deformation and failure mechanisms of rock-soil aggregate in Three Gorges Reservoir area thesis [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2004. (in Chinese)
- [20] 李维树, 邬爱清, 丁秀丽. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的影响因素研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 56-60.
LI W S, WU A Q, DING X L. Study on influencing factors of shear strength parameters of slide zone clay in Three Gorges Reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 56-60. (in Chinese)
- [21] 李维树, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1338-1342.
LI W S, DING X L, WU A Q, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges Reservoir bank slopes under influence of impounding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1338-1342. (in Chinese)
- [22] 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, 916.
LEI X D, YANG Z P, ZHANG X J, et al. Shear properties and rock block breakage characteristics of soil-rock mixtures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 899-908, 916. (in Chinese)
- [23] 水利水电工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
Code for coarse-grained soil test for hydropower and water conservancy engineering: DL/T 5356-2006 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese)
- [24] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI G X. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)