

文章编号:1006-2467(2013)09-1382-08

土石混合体原位试验的颗粒流数值模拟分析

董启朋¹, 卢正¹, 詹永祥¹, 王家强²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 南京 210017)

摘要: 基于颗粒流理论和 PFC 程序, 解决了不规则碎石(clump)的生成、恒定法向荷载施加、剪切面的含石量等问题后, 建立了土石混合体原位试验的颗粒流数值模型, 对不同含石量、法向应力下土石混合体的直剪试验进行模拟, 并与原位直剪试验的结果进行比较. 结果表明: 随着含石量增加, 剪切应力及其峰值增大, 剪切应力峰值对应的剪切位移减小; 在低法向应力条件下, 土石混合体表现为剪胀; 在高法向应力下, 土石混合体表现为先剪缩而后剪胀, 并呈现出压剪破坏特征; 剪切面附近分布的不规则碎石在剪切过程中出现挤压滑动与滚动, 使得剪切破坏面出现凹凸, 而且剪应力、法向位移、应变能随剪切位移增加而出现波动和平缓段; 数值试验所得剪切应力峰值略高于其试验值, 减小模型颗粒半径, 可以有效降低计算的剪切应力峰值.

关键词: 土石混合体; 碎石; 细观力学; 颗粒流; 直剪试验

中图分类号: TU 36 **文献标志码:** A

Particle Flow Modeling of Soil-Rock Mixtures In-situ Tests

DONG Qi-peng¹, LU Zheng¹, ZHAN Yong-xiang¹, WANG Jia-qiang²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Jiangsu Transportation Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210017, China)

Abstract: The numerical simulation of soil-rock mixtures(S/RM) shear test was successfully performed using the particle flow theory based on particle flow code (PFC), by creating irregular clumps, constant normal stress and rock content in shearing surface. Based on the clump of PFC with different stone content, different normal stress of S/RM direct shear test simulation were elaborately discussed. The reliability of the simulation method was verified by comparing calculation results and in-situ shear test. The main research results indicate that with the increase of rock content, the shear stress and the peak shear stress increase, while the shear displacement at the peak shear stress decreases. S/RM samples exhibit shear dilatation characteristics at low normal stress and tend to transform from shear contraction to dilatation at higher stress, with pressure shear failure characteristics. In the near shear plane distributing the irregular rock clump, the shear appears in the process of extrusion sliding and rolling shear failure surface grows concave and convex. With shear displacement increasing, the shear stress and strain energy fluctuate and grow gentle. The peak shear stress obtained from the numerical calculation is higher than that of the in-

收稿日期: 2012-09-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB036405), 国家自然科学基金项目(51209201, 51279198), 西部交通建设科技项目(2011318775680), 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05)资助

作者简介: 董启朋(1986-), 男, 河南省商丘市人, 博士生, 主要从事颗粒材料力学性能研究. E-mail: dongqipeng@sina.com.

卢正(联系人), 男, 副研究员, 电话(Tel.): 027-87198350; E-mail: lzwhrsm@163.com.

situ test. The calculated peak shear stress can be decreased effectively by reducing the particle radius.

Key words: soil-rock mixtures (S/RM); gravel; mesomechanics; particle flow code (PFC); direct shear test

土石混合体是由具有一定工程尺度、较高强度的块石、细粒土体及孔隙构成并具有一定含石量的极端不均匀的松散岩土介质系统^[1-3]。土石混合体的变形力学机制不仅取决于土与碎块石之间的接触、摩擦特性,而且与土、石本身的力学性质、颗粒接触状态及其相对运动密切相关,因此,土石混合体的组成与结构性状及由此而产生的力学特性的差异必然导致其复杂的力学机制^[3]。

国内外众多研究者从不同角度对土石混合体的力学特性及变形破坏机制进行了研究。例如:武明^[4]对4组土石混合填料进行抗剪强度试验,并对影响抗剪强度的指标进行了分析;赫建明^[5]自行设计了土石混合体二维平面加载设备,研究了土石混合体中不同形状、排列的块石对土石混合体力学特性的影响;李晓等^[6]通过野外原位试验发现,含石量对土石混合体的整体力学特性影响较大,土石混合体的变形破坏具有材料变形破坏和结构变形破坏双重特性;徐文杰等^[7-8]通过野外大尺度水平推剪试验,对土石混合体在天然和饱和状态下的抗剪强度进行了研究;Yue等^[9]利用有限元法进行模拟发现,土石混合体材料的非均质性影响其拉应力的分布;李世海和赫建明等^[10-11]利用三维离散元方法模拟了土石混合体的单轴压缩试验和现场直剪试验,发现土石混合体的结构效应导致了其应变强化的出现及弹性模量与强度的增加;丁秀丽等^[12]采用基于图像分析的有限元和颗粒离散元 PFC^{2D} (Particle Flow Code in 2 Dimension)对土石混合体的力学特性进行分析;贾学明等^[13]采用颗粒离散元 PFC^{3D}模拟土石混合体的压剪试验,研究了含石量、岩性对土石混合体力学特性的影响。

以上研究主要基于二维或三维颗粒离散元分析^[9-13],且土石混合体模拟所用的颗粒一般为球形颗粒,而现实中的碎石颗粒大于土颗粒且形状不规则,因而有必要对不同性质、不同形状的土石混合体进行模拟研究。

本文基于颗粒流理论和 PFC 程序,解决了一种含不规则形状碎石(clump)的二维颗粒簇生成、恒定法向荷载的施加、剪切面处的含石量等问题,运用 PFC 模拟了不同含石量、岩性的土石混合料直剪试验,分析了土石混合体的强度特性、剪切变形破坏特

征,并对剪切面附近的破裂裂纹、应变能和 clump 的运动情况进行了探讨。最后,利用工程现场直剪试验,将计算结果与试验结果加以对比分析。

1 直剪试验的数值模型

颗粒离散元 PFC^{2D}为颗粒流程序^[14]中,运用已有的圆盘单元代替土石混合体中的土颗粒,并对不可破裂的碎石块采用 fish 函数编写 clump“聚粒”的模型。

1.1 颗粒和碎石的生成

根据室外直剪试验条件,本文的颗粒离散元模拟的剪切盒尺寸(长×高)为 50 cm×40 cm,上下剪切盒的高度均为 20 cm。根据试验的要求,在试验过程中保持下剪切盒不动,推动上剪切盒,使用伺服加载机制来保持设定的法向应力恒定。

首先,定义墙体,共 8 道,所包围的矩形面积为 50 cm×40 cm,在剪切面附近生成一定的 clump 颗粒簇,剪切盒内剩余空间用颗粒单元和 clump 随机填充。为简化模型的生成过程,颗粒半径取 3 mm,共生成颗粒 6 308 个,其中土颗粒 3 158 个,碎石块 376 个(由 3 510 个颗粒组成),如图 1 所示。其中,将碎石块设置为 clump 颗粒簇,土颗粒设定为圆盘单元,采用 PFC^{2D}中的墙体作为模型边界。

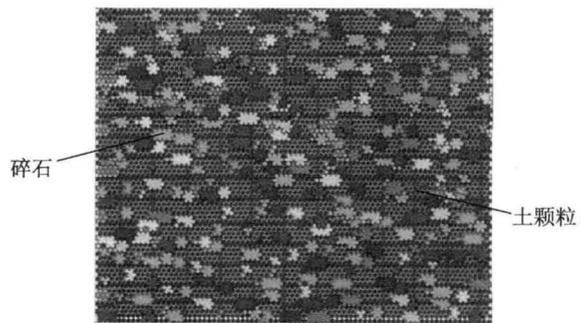


图1 土石混合体颗粒流模型

Fig.1 Particle flow model for soil-rock mixtures

图 2 为试样加载模型。其中:墙体 2#、4#、6# 为加载墙;墙体 1#、3#、5#、7#、8# 的剪切速率 v 均固定为 0。土石混合体的生成步骤:①在剪切面附近生成 6 排颗粒,然后随机选择生成球的 id 号,以此球为基础运用自编 fish 函数生成不规则 clump,其最大粒径为 3 cm。改变 clump 位置存储文件,以在剪

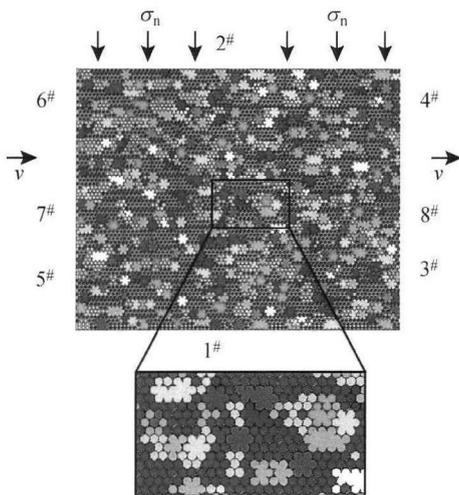


图2 土石混合体直剪试验 PFC 数值模型

Fig. 2 PFC numerical model of soil-rock mixtures for direct shear test

表1 土石颗粒性能参数

Tab. 1 Performance parameters of soil-rock mixtures

土体	球颗粒密度/ (g · cm ⁻³)	接触粘结刚度/(MN · m ⁻¹)		平行粘结刚度/(MN · m ⁻¹)		粘结强度/kN	
		法向	切向	法向	切向	法向	切向
土颗粒	1.90	0.1	0.1	—	—	—	—
碎石块	2.55	—	—	1.2	1.0	1	1
墙体	—	—	—	0.1	0	—	—

1.3 恒定法向荷载的伺服加载

在土石混合体 PFC^{2D} 数值模拟中, 根据实际情况模拟对试样施加不同恒定法向荷载的过程. 由于 PFC^{2D} 中墙体只能施加剪切速率, 所以需基于伺服机制原理, 通过不断调整墙体剪切速率来控制墙体受力^[14]. 数值模拟中, 2# 墙体采用 fish 语言自编译伺服函数对试样施加恒定的法向荷载(见图 2).

首先, 设 2# 墙体上的法向恒定应力为 σ^r . 然后, 获取 2# 墙体上不平衡力的总和并除以试样宽度, 所得 2# 墙体上的实测应力为

$$\sigma^m = \frac{1}{ld} \sum_{N_c} F_w \quad (1)$$

式中: F_w 为与墙接触的颗粒作用于墙上的力; l 为墙的长度; d 为模型厚度; N_c 为与墙接触的所有颗粒数.

为了使得当前墙上的应力接近于目标应力 σ^r , 运行时调用伺服函数, 则 2# 墙体的实际垂直速率应满足:

$$\dot{u}_w = G(\sigma^m - \sigma^r) = G\Delta\sigma \quad (2)$$

$$G = \frac{l d \alpha}{k_n^w N_c \Delta t} \quad (3)$$

式中: k_n^w 为所有与墙接触的颗粒接触刚度的平均值; Δt 为加载时间步; G 为伺服控制参量; α 为松弛

因子, 在数值模拟中, α 取值范围为 0~1, 一般取 0.5, 以满足模型计算过程中稳定性的要求. 将式(3)代入式(2), 则可得到保持恒定法向荷载的 2# 墙体在每一时间步的实际垂直加载速率值.

1.2 模拟试验的细观参数选取

土颗粒与碎石块间的接触特性是影响土石混合体性质的重要因素. 在模型中, 土颗粒的粘结采用接触粘结模型, clump 颗粒簇模拟不可破碎的碎石块, 颗粒簇内颗粒间选用平行粘结模型. 根据原位试验所得土石混合体模型的颗粒性能参数见表 1, 颗粒刚度比(法向/切向)取 1.2; 另外, 通过休止角试验, 选取颗粒摩擦系数为 0.5.

其次, 向试样上剪切盒施加剪切荷载, 令 2#、4#、6# 墙体以相同的较低水平剪切速率水平向右运动. 在本文的计算模型中, 设置水平剪切速率 $v = 0.02 \text{ nm/step}$ 即可达到拟静力加载状态. 另外, 在整个试验过程中, 将 1#、3#、5#、7#、8# 墙体的 x 、 y 轴方向剪切速率设定为 0. 在模拟加载过程中, 试样所受剪切应力为

$$\sigma_s = \frac{2}{hd_i} \sum f_x \quad (4)$$

式中: f_x 为 2#、4#、6# 墙体与颗粒单元间水平方向的接触力; h 为试样高度; d_i 为颗粒的单位厚度.

2 试验结果与分析

采用图 2 的模型进行土石混合体直剪试验模拟, 设定含石量(质量分数计)约为 60%, 法向荷载 $\sigma_n = 200, 400, 600 \text{ kPa}$ 等 3 种不同试验工况.

2.1 宏观力学特性

图 3 为 $\sigma_n = 200, 400, 600 \text{ kPa}$ 时的剪切应力-剪

切位移曲线.可以看出,其剪切应力峰值分别为 325.64、408.91、569.19 kPa,对应的剪切位移分别为 16.14、14.85、14.48 mm.由此可见,随着恒定法向荷载增加,剪切应力峰值增大,剪切应力峰值对应的剪切位移减小.在剪切过程中,剪切应力-剪切位移曲线首先出现线弹性阶段,不同法向荷载下剪切应力-剪切位移曲线的斜率(剪切模量)相近;然后,出现初始屈服和应变硬化阶段;最后,土石混合体被剪断,试样出现不同程度的软化,且法向荷载越大,其软化后的稳定值越高,逐渐呈现出岩石的力学特性.

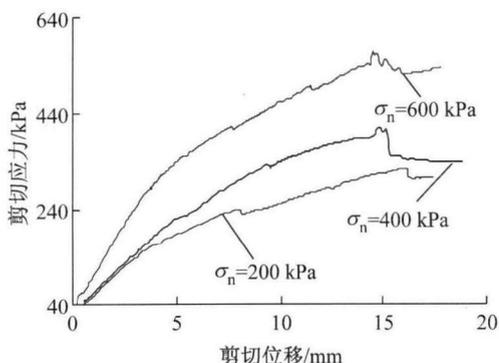


图 3 不同恒定法向荷载下剪切应力-剪切位移曲线
Fig. 3 Shear stress-shear displacement curves under different constant normal stresses

土石混合体的变形不仅包括土颗粒和碎石自身的变形,而且与土体颗粒和碎石间、碎石和碎石间相对位置的变化有关.在不同的恒定法向荷载作用下,2# 墙体数值试验所得法向位移-剪切位移曲线如图 4.可见,在直剪试验开始时,法向位移变化比较小,其方向主要沿 y 轴负方向,表明试样处于压密过程,且恒定法向荷载越大,压密过程持续的时间越长;当试样完成压密过程后,法向位移沿 y 轴正方向发展,即试样发生剪胀效应,且恒定法向荷载越小,法向位移越早到达峰值. $\sigma_n=200, 400, 600$ kPa

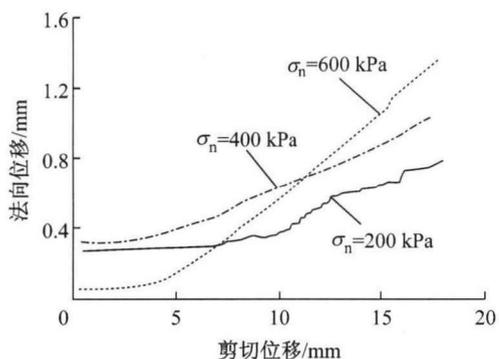


图 4 不同恒定法向荷载下法向位移-剪切位移曲线
Fig. 4 Normal displacement-shear displacement curves under different constant normal stresses

时,法向位移峰值分别为 0.91、1.02、1.34 mm,表明法向荷载越大,剪胀效应越明显.

图 5 所示为 $\sigma_n=400$ kPa 下剪切应力达到峰值后的数值模型破坏情况.可知,模型破坏主要是由于土颗粒与碎石间粘结力被破坏,交界面产生裂纹并逐渐形成贯通裂纹.剪切裂纹主要分布在剪切面附近,由于含有碎石 clump 颗粒簇,剪切面呈现出凹凸起伏形状.在剪切带的左右边缘,颗粒破坏较多,这是由于剪切过程中受刚性边界约束的缘故.

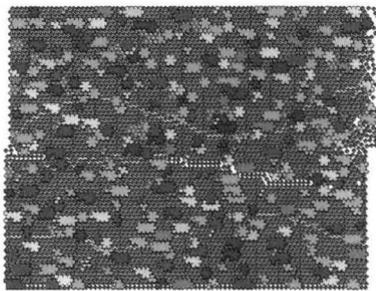


图 5 剪切应力峰值时的模型破坏情况
Fig. 5 Model failure status at peak value of shear stress

2.2 细观力学特性

以不同含石量下的土石混合体试验为例,研究在 $\sigma_n=400$ kPa 下,剪切面上分布不规则 clump 颗粒簇时的剪切应力峰值及其细观力学特性.

图 6(a)为含石量即 clump 颗粒簇含量 $w=50\%, 60\%, 80\%$ 时的剪切应力-剪切位移曲线.可以看出,其剪切应力峰值分别为 350、439.661 kPa,对应的剪切位移分别为 24.18、21.11、20.15 mm.由此可见,随着含石量的增加,剪切应力及剪切应力峰值增大,而对应的剪切位移减小,峰值后软化程度加剧.这是由于增加试样含石量,可使剪切面附近碎石含量增加,从而显著提高了土石混合体的剪切应力峰值.对比图 3,在相同的法向应力下,含石量较高的土石混合体的剪切应力及其峰值较大,试样孔隙比较小,整体密度较大,结构性较好,表现出的应变硬化效应也更明显.

图 6(b)为 $w=50\%, 60\%, 80\%$ 时法向位移-剪切位移曲线.在直剪试验过程中,试样首先出现压密段,然后发生剪胀、结构变松.含石量越大,法向位移峰值越大,剪胀越明显.由于土石混合体中含有碎石,其剪切过程真实的剪切面是图 7 所示的 $S'S'$ 曲面而非 SS 平直面.土石混合体内部颗粒间的咬合作用使得土石颗粒不断地发生推挤滑动与旋转,因此,剪切面 $S'S'$ 在空间上出现了波动起伏.随着含石量增加,波动段增多.可见含有不规则 clump 颗粒簇模型能够更好地模拟直剪试验.

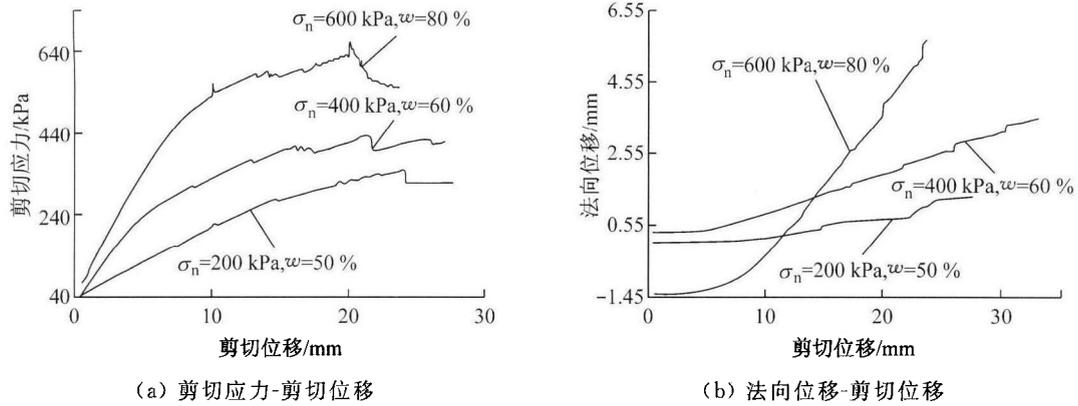


图 6 不同含石量下剪切应力和法向位移与剪切位移的关系

Fig. 6 Shear stress and normal displacement vs. shear displacement curves under different rock content

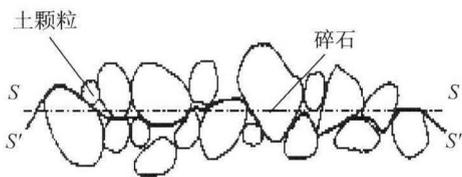


图 7 土石混合体内部剪切面

Fig. 7 Internal shear surface of soil-rock mixtures

图 8 所示为 $\sigma_n = 400$ kPa 下试样在破坏时的剪切面和颗粒接触力的分布. 可见, 当剪切位移为 5 mm 时, 因受水平剪切力的影响, 模型中颗粒间的接触力方向主要沿剪切面分布且在剪切过程中变化很小; 同时, 压应力集中在试样中部, 张拉应力比较小, 6# 墙体作为施力边, 其接触力大于右边界; 在模型下部, 3# 墙体作为约束边界, 其颗粒间接触力大于左侧; 在剪切位移为 10 mm 时, 6# 墙体在剪切面附近出现了剪切裂纹, 4# 墙体在剪切面附近出现张拉裂纹 (图 8(b)); 随着剪切进行, 剪切位移为 15~

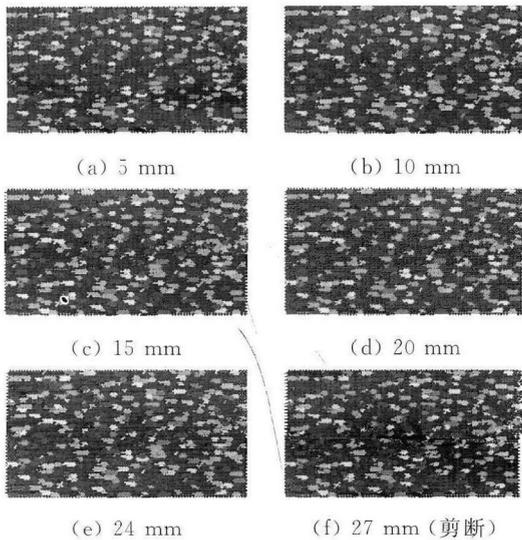


图 8 观测点颗粒间接触力分布

Fig. 8 Contact forces at each observation point

24 mm 时, 剪切裂纹和张拉裂纹逐渐发展 (图 8(c)~(e)), 颗粒间接触力减小, 但剪切裂纹数增速大于张拉裂纹数的增速, 同时, 在 2# 墙体右下方出现了法向荷载作用下的压裂裂纹; 当剪切位移为 27 mm 时, 试样已剪切破坏 (图 8(f)), 在剪切面附近生成沿颗粒边界变化的贯通裂纹, 墙体 2# 右下方的压裂裂纹贯通到墙体 4#, 这与文献[10]中描述的现象相同. 此时, 颗粒间接触力在剪切面附近仍比较大, 且比其他位置的接触力大, 接触力方向开始出现偏转, 与 x 轴夹角变大.

土石混合体在剪切过程中主要克服颗粒之间的变形和滑动摩擦, 试样内部能量主要以应变能变化为主. 图 9 示出了 $\sigma_n = 400$ kPa 下试样应变能-剪切位移曲线. 可见, 在剪切初期, 应变能变化比较小, 主要是颗粒的弹性变形过程, 土石颗粒之间变形较小. 随着剪切过程的发展, 试样变形增大, 应变能逐渐增加, 曲线出现波动起伏和平滑段, 表明土石颗粒发生了滑动和滚动, 在颗粒完全滚动后曲线会出现一个降幅, 土石混合体完全剪断后应变能处于稳定值. 表明在剪切过程中, 原本处于咬合状态的不规则碎石 clump 颗粒簇发生了相互挤压、滑动、滚动, 使得相

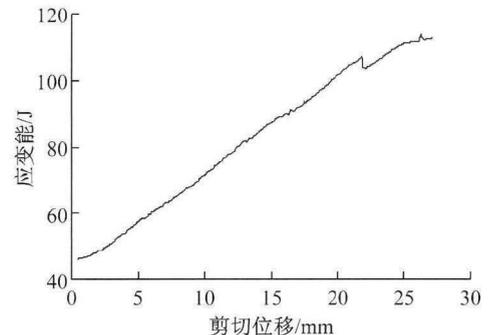


图 9 土石混合体应变能-剪切位移曲线

Fig. 9 Strain energy-shear displacement curves of soil-rock mixtures

互间因咬合而储存的应变能急剧释放,导致剪应力和应变能的急剧降低,而后与其他不规则碎石 clump 发生接触和挤压,又逐渐回到原来的应力状态.这一现象在直剪试验过程中反复出现.

3 现场试验验证

为验证本文提出的土石混合体直剪颗粒流分析方法的可靠性,结合南京市牛首山原位直剪数据,对试验和计算的结果进行对比分析.该地区出露地层主要为侏罗系的火山岩和第4系的坡积物,碎石母岩成分以凝灰岩、火山角砾岩、凝灰岩、低品位铁矿石为主,碎石粒径在0.5~3.0 cm之间,以棱角状和次棱角状为主,颗粒级配不良,颗粒排列基本无规律,充填少量风化岩屑、黏性土,遇水易软化,如图10所示.黏性土重度为1.9 MN/m³,凝灰岩和凝灰质角砾岩的重度分别为2.50、2.45 kN/m³,含石量约40%~80%.在试验点1#、2#进行3组不同恒定法向荷载下的原位直剪试验,试验点1#的3组试验所用含石量均约为60%,试验点2#的3组试验所用含石量约为50%、60%、80%,其剪应力-剪切位移曲线如图11、12所示.颗粒流数值模拟主要是通过改进碎石 clump 颗粒簇的分布而模拟不同的含石量,选取的细观参数相同.



图10 土石混合体压剪试验的现场照片

Fig.10 Photo of press-shear test on soil-rock mixtures

由图11、12可知:由于1#试验点的3组含石量相同而法向恒定荷载不同,其剪应力峰值分别为290、384、550 kPa,对应的剪切位移分别为14.5、15.3、16.1 mm;2#试验点的剪应力峰值分别为350、430、663 kPa,对应的剪切位移分别为24.2、21.2、20.1 mm;随着法向恒定荷载增加,剪应力峰值增大,且对应的剪切位移减小.

试验点1#、2#的相同点:在原位直剪试验中,剪应力-剪切位移曲线到达剪应力峰值前都出现了平缓段,而后剪应力继续增加;随着恒定法向荷载的增加,剪应力峰值增大,且到达剪应力峰值后都会出现软化阶段.试验点1#、2#的不同点:在相同恒定法向荷载下,随着含石量的增加,剪应力

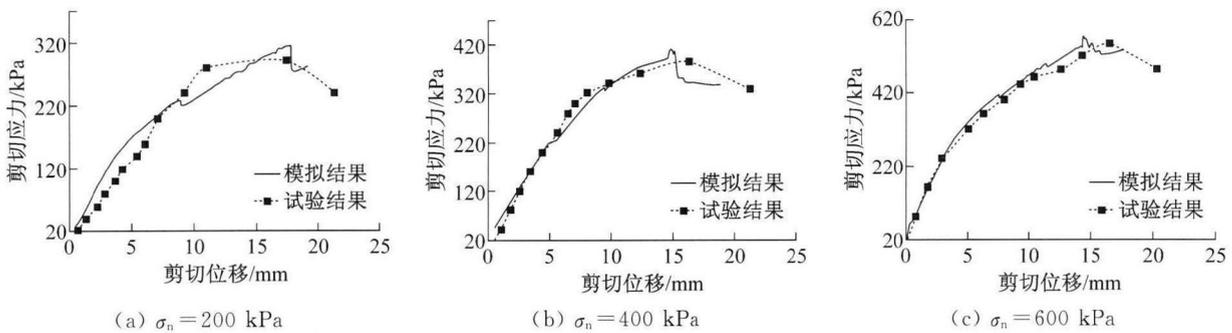


图11 不同法向恒定荷载下试验点1#的剪应力-剪切位移曲线

Fig.11 Shear stress-shear displacement curve of different constant normal stresses in-situ tests 1#

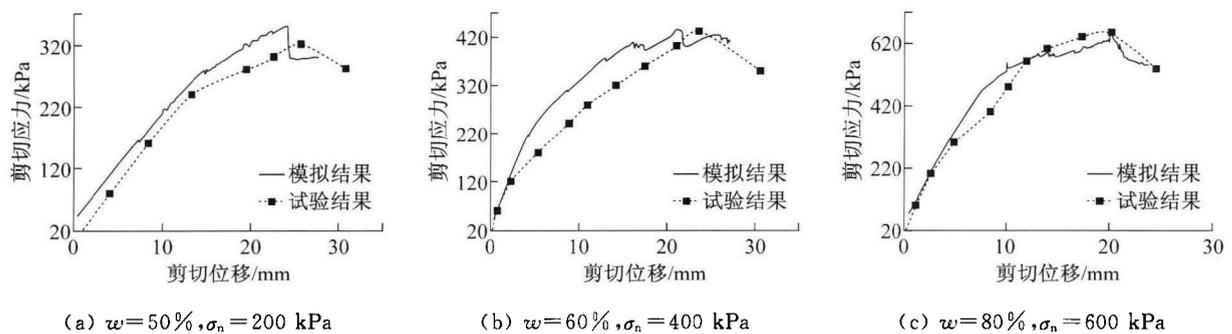


图12 不同含石量下试验点2#的剪应力-剪切位移曲线

Fig.12 Shear stress-shear displacement curve of different constant normal stresses in-situ tests 2#

峰值增大,但所对应的剪切位移的变化不同;在含石量比较小时,土石混合体的孔隙比较大,整体密度较低,呈现出土的力学性质;在含石量较大时,碎石之间可以接触,碎石起到了主要控制作用,在剪切面附近分布的碎石增加,使得剪切过程中出现碎石相互咬合、挤压的情况增多,从而提高了土石混合体的抗剪强度。

2[#] 试验点数值模拟时,在剪切面附近放入不同数目的不规则 clump 颗粒簇,对应于含石量为 50%、60%、80%,分别放入 30、35、44 个不规则 clump 颗粒簇,其剪切应力峰值与原位试验结果分别相差 30、5、13 kPa。1[#] 试验点数值模拟的剪切应力峰值与原位试验结果分别相差 35、25、19 kPa。数值模拟所得应力峰值略大于实验值,这主要是因为颗粒数、土石颗粒尺寸分布和形状等与原位试验稍有差异,且运用 PFC^{2D} 模拟不能完全体现出原位直剪的三维情况,因此,仅模拟了三维中关键破坏面。通过增加颗粒数目和模拟三维的真实土石分布,可以有效降低计算的剪切应力峰值,但其耗时长、效率差。运用不规则 clump 代替碎石计算所得剪切应力-位移曲线与原位试验结果相似,即运用在剪切面附近生成不规则 clump 颗粒簇来代替碎石能够得出与野外直剪试验相同的结果。可见,本文所提出的采用不规则 clump 颗粒簇替代碎石进行直剪试验的方法比圆形大颗粒替代碎石的模拟方法的效果更好。

4 结 论

(1) 随着恒定法向荷载的增加,土石混合体的剪切应力、剪切应力峰值增大,而剪切应力峰值对应的剪切位移减小,试样破坏后出现了不同程度的软化并可达到稳定值。

(2) 土石混合体在低法向应力条件下表现为剪胀;在高法向应力下表现为先剪缩而后剪胀效应。

(3) 由于土石混合体含石量即 clump 的形状和数量的不同,其过程曲线形态不同。随着含石量的增加,剪切应力、剪切应力峰值增大,剪切应力峰值对应的剪切位移减小,剪应力-应变曲线中出现的波动和平缓段增多。

(4) 剪切面上的破坏主要是碎石 clump 颗粒与土颗粒间粘结力的破坏,在达到剪切应力峰值时,粘结颗粒破坏数最多,此时剪切裂纹数大于张拉裂纹数,在高法向应力下出现了压裂面与剪切裂面的共存。随着剪切位移的增大,颗粒间接触力方向逐渐向垂直方向偏转。

(5) 剪切面附近分布的不规则的碎石 clump 颗粒簇和土颗粒,在剪切过程中出现了挤压滑动和滚动,使得剪切破坏面出现凹凸,剪应力、应变能随着剪切位移增加而出现波动和平缓段。

参考文献:

- [1] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京:北方交通大学土木建筑工程学院,2001.
- [2] Li Xiao, Liao Qiu-lin, He Jian-ming. In-situ tests and a stochastic structural model of rock and soil aggregate in the three gorges reservoir area[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 494.
- [3] 徐文杰,胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. *水文地质工程地质*, 2009(4): 50-56.
XU Wen-jie, HU Rui-lin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009(4): 50-56.
- [4] 武明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究[J]. *公路*, 1997, 41(1): 40-42, 49.
WU Ming. Experimental study on mechanical features of the heterogeneous filling of rock and soil aggregate [J]. *Highway*, 1997, 41(1): 40-42, 49.
- [5] 赫建明. 三峡库区土石混合体的变形与破坏机理研究[D]. 北京:中国矿业大学力学与土木建筑学院, 2004.
- [6] 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 Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Jian-ming, 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.
- [7] 徐文杰,胡瑞林,曾如意. 水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(7): 814-818.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, ZENG Ru-yi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 814-818.
- [8] 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 Wen-jie, HU Rui-lin, TAN Ru-jiao, 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.
- [9] Yue Z Q, Chen S. Finite element modeling of geoma-

- terials using digital image processing [J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(5): 375-397.
- [10] 李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(2): 172-177.
LI Shi-hai, WANG Yuan-nian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D-DEM [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 172-177.
- [11] 赫建明, 李晓, 吴剑波, 等. 土石混合体材料的模型构建及其数值试验[J]. **矿冶工程**, 2009, 29(3): 1-5.
HE Jian-ming, LI Xiao, WU Jian-bo, *et al.* Modeling method of the rock-soil aggregate and its numerical test [J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2009, 29(3): 1-5.
- [12] 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 Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. 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.
- [13] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(9): 2695-2703.
JIA Xue-ming, CHAI He-jun, ZHENG Ying-ren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2695-2703.
- [14] Itasca Consulting Group. PFC^{2D} (particle flow code in 2 dimensions) fish in PFC^{2D} [R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, 2008: 20-22, 83-85.

(上接第 1376 页)

- [10] 刘钦, 李地元, 刘志祥, 等. 水平推力作用下抗滑桩间土拱效应影响因素的数值分析[J]. **中南大学学报: 自然科学版**, 2011, 42 (7): 2071-2077.
LIU Qin, LI Di-yuan, LIU Zhi-xiang, *et al.* Numerical analysis of influence factors on soil arching effect between anti-sliding piles under horizontal pushing loads [J]. **Journal of Central South University: Science and Technology**, 2011, 42 (7): 2071-2077.
- [11] 向先超, 张华, 蒋国盛, 等. 基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33 (3): 386-391.
XIANG Xian-chao, ZHANG Hua, JIANG Guo-sheng, *et al.* Soil arching effect of anti-slide piles based on particle flow method [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33 (3): 386-391.
- [12] 张刚, 周健, 姚志雄. 堤坝管涌的室内试验与颗粒流细观模拟研究[J]. **水文地质工程地质**, 2007 (6): 83-86.
ZHANG Gang, ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong. Study on mesomechanical simulation of piping with model tests and PFC^{2D} [J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2007 (6): 83-86.

(上接第 1381 页)

- [7] 蔡春, 张孟喜, 赵岗飞, 等. 带加强肋单向土工格栅的拉拔试验[J]. **岩土力学**, 2012, 33(1): 53-59, 64.
CAI Chun, ZHANG Meng-xi, ZHAO Gang-fei, *et al.* Pull-out test of uniaxial geogrid with strengthening ribs [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 53-59, 64.
- [8] 邱成春, 张孟喜, 魏伟. 面应变条件下网格状带齿加筋砂的强度分析[J]. **岩土力学**, 2011, 32(S2): 313-318.
QIU Cheng-chun, ZHANG Meng-xi, WEI Wei. Strength analysis of frictional failure of sand reinforced with grid-rib reinforcement under plane strain condition [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(S2): 313-318.