



不同加载方式下土石混合体 抗压强度的规律性研究*

李志刚, 冯 春, 李世海

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 土石混合体的非均匀性决定了其在等应力(柔性)以及等位移(刚性)两种加载方式下的力学性能的不同。基于 CDEM 软件及块石随机生成算法, 分别采用等应力和等位移两种加载方式, 对土石混合体的单轴压缩进行了数值分析, 得到了不同加载方式下土石混合体单轴抗压强度随含石率的变化曲线。结果表明: 1) 土石混合体等应力加载的抗压强度较等位移加载的抗压强度低, 且随着含石率的增加, 两者差异逐渐增大; 2) 两种加载方式下, 土石混合体的单轴抗压强度随着含石率的增加而增加, 且含石率超过 30% 后强度增加速率加快; 3) 随着含石率的增加, 土石混合体的宏观应力应变曲线呈现强化趋势。

关键词: 等应力加载; 等位移加载; 土石混合体; CDEM; 数值模拟

中图分类号: O 39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0010-07

Compressive strength of rock and soil aggregate under different loading conditions

LI Zhi-gang, FENG Chun, LI Shi-hai

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The heterogeneity of soil and rock aggregate(SRM) determines its different mechanical properties under equal stress and equal displacement loading conditions. Based on the software of CDEM and the random generation algorithm of rock block and applying equal displacement and equal stress load conditions respectively, we study the uniaxial compressive strength of soil-rock aggregates and obtain the constitutive curves of aggregate with different rock contents. The results show that: 1) The strength under equal stress load condition is lower than that under equal displacement load condition. And the difference becomes larger with the increase of rock content; 2) With the increase of rock content, the compressive strength of the composite gradually increases. And after the rock content exceeds 30%, the compressive strength increases more quickly; 3) With the increase of rock content, SRM's macroscopic stress-strain curves show gradual strengthening tendency.

Keywords: equal stress load; equal displacement load; rock and soil aggregate; CDEM; numerical simulation

土石混合体作为一种常见的地质体在天然斜坡中有着广泛的分布, 它是由土和块石、孔隙等组成的多相介质, 决定了其非均匀、非连续、非线性的复杂力学特征, 从而具有与一般土体迥然

不同的性质^[1]。土石混合体的力学性质直接影响边坡的整体稳定性, 试验研究及数值模拟是获取其综合强度的有效手段。

试验研究方面, 韩世莲^[2]采用小横梁对刚性

收稿日期: 2014-10-07

*基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB10030303)

作者简介: 李志刚(1990—), 男, 硕士研究生, 从事岩土力学领域数值计算方法的研究工作。

承载板施加规定荷载于土和碎石混合料试样, 获得了碎石土的无侧限抗压强度; 赫建明等^[3]设计了土石混合体二维平面加载设备对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进行了研究; 董云^[4]对不同类别土石混合料在不同影响因素下进行了击实试验和大型直剪试验; 徐文杰^[5]在现场进行了水平推剪试验, 得出天然状态下的全应力应变曲线。然而, 这些研究仅仅针对于等位移(刚性)加载方式, 未能涉及等应力(柔性)加载。孟祥跃等^[6]认为实际的土石混合体内部包含有结构面和节理面等, 它们是非均匀、非连续的, 在外力的作用下其内部的应力分布是不均匀的, 对于这种材料其真正的受力条件是等应力边界条件, 并研制了相应的试验装置。

数值模拟方面, 油新华^[7]采用 FLAC^{3D}有限差分程序分析了块石在土石混合体中的力学效应, 得出块石形状、分布对土石混合体的变形破坏起着控制作用; 赫建明^[3]采用颗粒离散单元法 PFC^{3D}程序对比了不同含石率土石混合体的力学特性, 得出随着含石率的提高, 试样的抗剪强度有明显提高; 李世海等^[8]利用离散元程序对特定的土石混合体试样的单轴压缩进行了数值模拟。总体而言, 国内外学者通过有限元、有限体积、离散元等多种数值方法进行了大量的规律性研究, 但也均以等位移加载方式为主, 并未详细分析等应力加载条件下土石混合体的力学特性。

因此, 本文基于 CDEM 数值分析软件及块石随机生成算法, 进行了两种加载方式下土石混合体力学特性的数值分析, 探讨了不同加载方式对土石混合体单轴抗压强度的影响规律。需要说明的是, 传统应力及应变控制式加载一个是靠加载力控制、一个是靠变形来控制, 严格上讲它们均是等位移(刚性)加载方式, 因为在加载过程中模型顶端产生相同的应变, 而其应力值是不同的; 而本文中所说的等应力加载是使得模型顶端产生均布的应力, 也即柔性加载。

1 基于连续介质的块体离散元程序 CDEM^[9]

CDEM^[10-12]是基于连续介质力学离散元方法(continuum-based discrete element method)的英文缩写。该方法将有限元与离散元进行耦合, 在块体内部进行有限元计算, 在块体边界进行离散元计算, 通过块体内部及块体边界的断裂, 不仅可以模拟材料在连续状态下及非连续状态下的变形、运动特性, 更可以实现材料由连续体到非连续体的渐进破坏过程。CDEM 中的块体及边界见图 1。

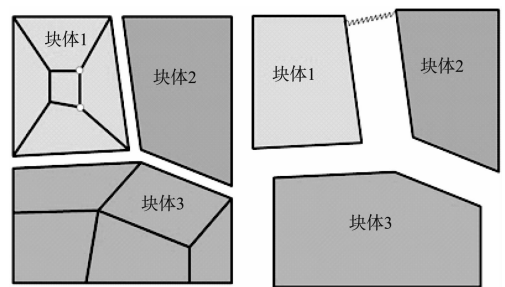


图1 CDEM 中的块体及边界

1.1 CDEM 的求解方法——显式求解法

CDEM 描述块体本构的方法为刚度矩阵法, 根据有限元单元刚度矩阵和节点位移求取单元节点力。不用形成总刚, 通过动态松弛技术, 迭代计算, 达到变形协调。

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{K}_e \times \mathbf{U}_e \quad (1)$$

式中: \mathbf{F}_e 为单元节点力矩阵; \mathbf{K}_e 为单元刚度矩阵; \mathbf{U}_e 为节点位移矩阵。

1.2 CDEM 的计算步骤

CDEM 采用动态松弛法进行求解^[13-14]。动态松弛法是将静力学问题转化为动力学问题进行求解的一种显式方法, 这种方法认为质点受到内力和外力的作用, 其中内力包括块体变形引起的力和阻尼力两部分, 外力包括外边界力和弹簧引起的作用力。质点在上述力共同作用下的运动方程为:

$$\mathbf{M} \times \mathbf{a} + \mathbf{C} \times \mathbf{v} + \mathbf{K} \times \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \mathbf{a} 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{u} 分别为加速度、速度、位移向量; \mathbf{F} 为外力。

其计算流程见图 2。

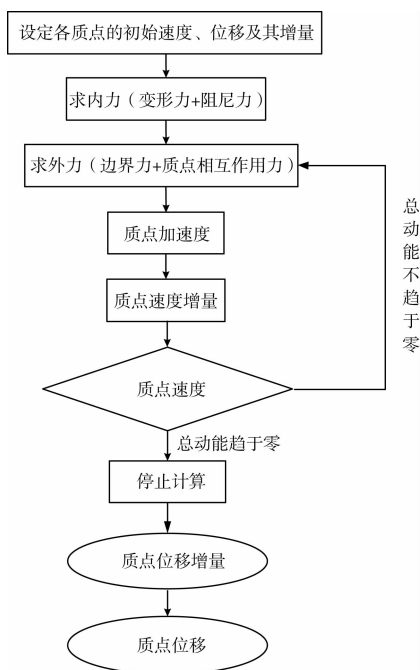


图2 CDEM的计算流程

1.3 Mohr-Coulomb 塑性模型

塑性计算采用的是摩尔库伦准则和抗拉强度准则:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2C \sqrt{N_\varphi} \quad (3)$$

$$f^t = \sigma_3 - \min(T, C/\tan\varphi) \quad (4)$$

$$h = f^t + \alpha^p (\sigma_1 - \sigma^p) \quad (5)$$

式中: σ_1 为最小主应力; σ_3 为最大主应力; C 为粘聚力; φ 为内摩擦角; T 为抗拉强度; N_φ 、 α^p 、 σ^p 为常数^[15]。

2 模型构建

2.1 土石混合体的生成

块石随机生成算法: 需要在土体内部产生粒径分别为 9~12 mm、15~18 mm、21~24 mm 的块石颗粒, 并且块石位置在土体内随机分布, 块石的尺寸在各自粒径范围内均匀分布。

第1步, 建立尺寸为 600 mm × 300 mm 的二维模型并划分网格, 然后在模型内部撒布半径为 $(R_{\max} + R_{\min})/2 + R_{\text{random}}$ 的圆 (R_{\max} 是粒径范围的上限, R_{\min} 是粒径范围的下限, R_{random} 是确保块石尺寸在粒径范围内均匀分布的随机数), 通过设置两个块石圆心的间距大于这两个块石的半径之和的

方式确保块石与块石不会发生重叠; 第2步, 若模型单元的任意节点落入圆内则赋予此单元块石材料属性, 否则赋予该单元土体材料属性。这种方法可以确保块石的边界不会过于圆滑, 从而与实际更加相仿 (图3)。

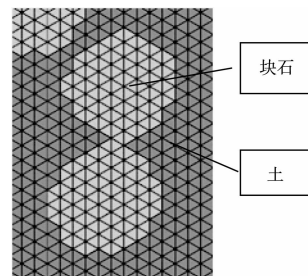


图3 土石混合体网格

2.2 两种加载方式的实现

等位移 (刚性) 加载模型: 土石混合体底端固定, 顶端施加准静态位移荷载。计算模型见图4。

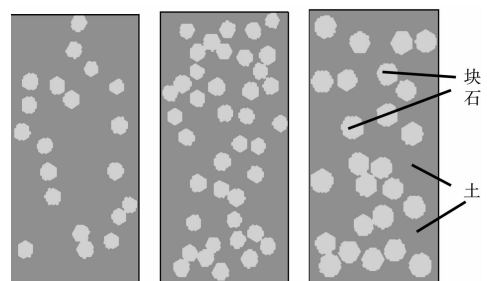
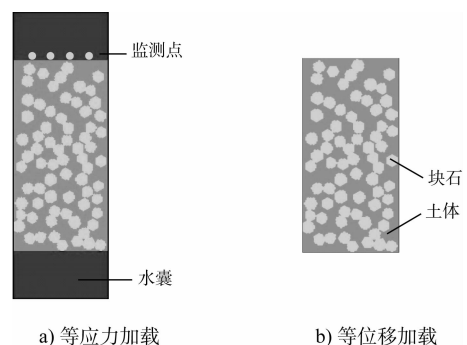


图4 不同含石率及不同块石粒径的土石混合体试样

等应力 (柔性) 加载模型: 在图4所示的试件上下两端分别连接剪切模量为零的材料 (图5), 这种材料具有像水一样的特性, 可以均匀传递应力, 从而使得土石混合体能够受到等应力荷载。并且对土石混合体的顶端进行了监测, 由监测曲线可以看出该模型能够实现等应力加载 (图6)。



a) 等应力加载

b) 等位移加载

图5 等应力加载及等位移加载模型

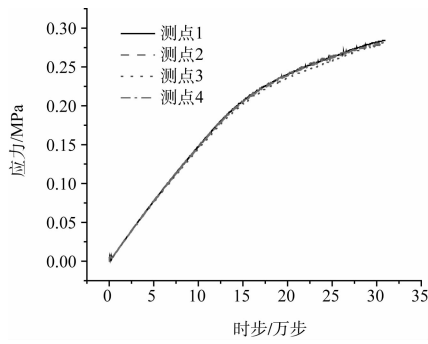


图 6 土石混合体顶端竖向应力的监测曲线

2.3 材料参数

土石混合体由土体和块石组成, 两种材料的参数见表 1。

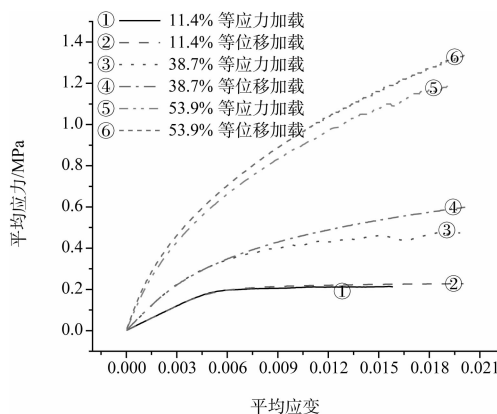
表 1 土体和块石构成两种不同的材料属性

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	内摩擦 角/($^\circ$)
土体	2 000	0.03	0.25	0.05	0.01	30
块石	2 500	30.00	0.25	3.00	1.00	40

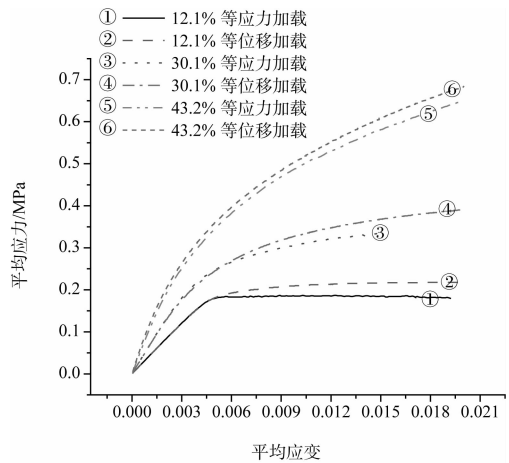
3 结果分析

3.1 本构曲线

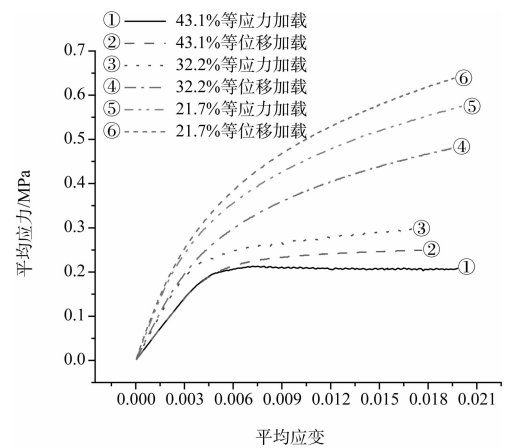
图 7 分别为 3 种粒径范围下土石混合体的平均应力-平均应变曲线, 可以看出: 土石混合体单轴压缩过程可以划分为 3 个阶段: 线弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段。随着含石率的增加, 线弹性阶段弹性模量逐渐增加; 当平均应变达到一定值时土石混合体的抗压强度达到极值, 并且含石率越低平均应力极值所对应的平均应变值越小。这是由于含石量低时, 土体承受主要作用力, 此时土石混合体表现偏于土体的力学性质; 而当含石量逐渐增加时, 块石骨架承担主要作用力, 其弹性模量也必然增加。



a) 粒径范围为 9 ~ 12 mm



b) 粒径范围为 15 ~ 18 mm



c) 粒径范围为 21 ~ 24 mm

图 7 不同粒径的应力应变曲线

3.2 两种加载方式的区别

由于土石混合体在含石率增大到一定阶段时会产生强化现象, 而工程中认为土石混合体的应变达到 1% 时已经进入塑性破坏, 取平均应变在 1% 时的平均应力代表土石混合体的单轴抗压强度。通过统计 3 种块石粒径的土石混合体的抗压强度, 并对两种加载方式进行对比 (图 8), 得出结论: 等应力加载时土石混合体的单轴抗压强度要比等位移加载时低; 并且随着含石率的增加, 两种加载方式下土石混合体的抗压强度差别逐渐增大。这与范永波等^[16]的试验研究结论一致。

另外, 图 9 是块石粒径范围为 21 ~ 24 mm 的土石混合体在不同加载方式下破坏时内部塑性剪应变云图。通过比较两种加载方式的剪切破坏带可以看出: 等位移加载情况下得到的土石体内部破裂带密集、均匀, 而等应力加载产生的破裂带

更为集中，从而解释了土石混合体等应力加载时强度要比等位移加载时略低。这与 Jiang 等^[17]的研究结论相同，从而佐证了数值模拟的结果。

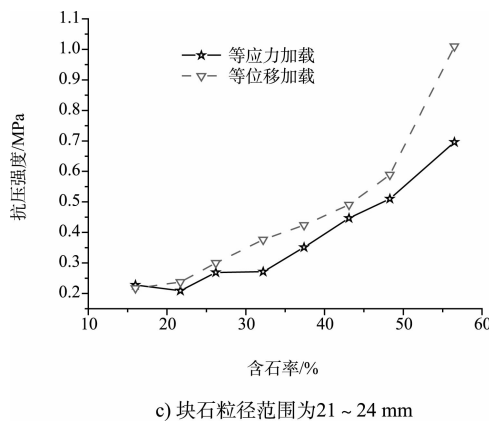
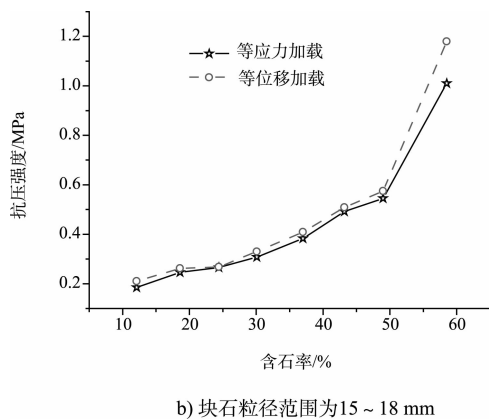
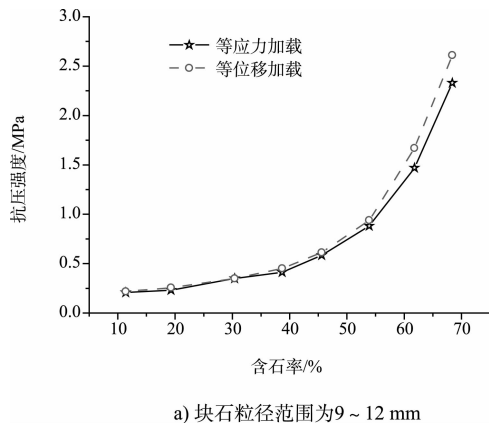


图8 不同粒径土石混合体的强度随含石率的变化曲线

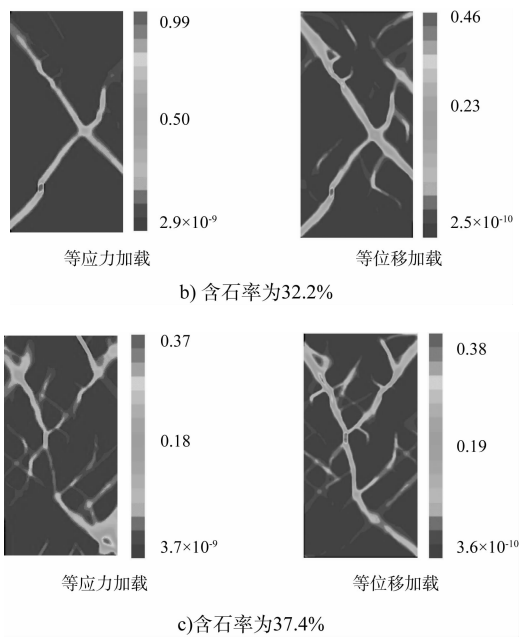
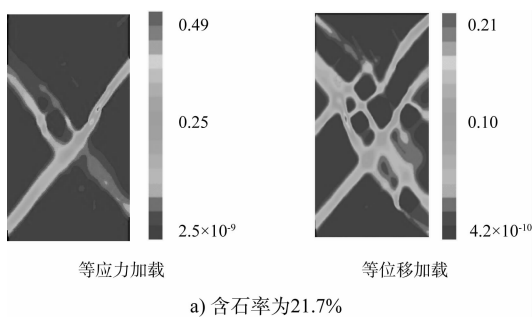


图9 两种加载方式下不同含石率的土石混合体内部的塑性剪应变云图

3.3 含石率对土石混合体强度的影响

图10、11是等应力加载、等位移加载情况下3种粒径范围内的土石混合体单轴抗压强度随含石率的变化。可以看出，随着含石率的增加土石混合体的单轴抗压强度增大，并且含石率大于30%时土石混合体强度的增加速率加快，这与相关试验结果基本吻合^[4]。

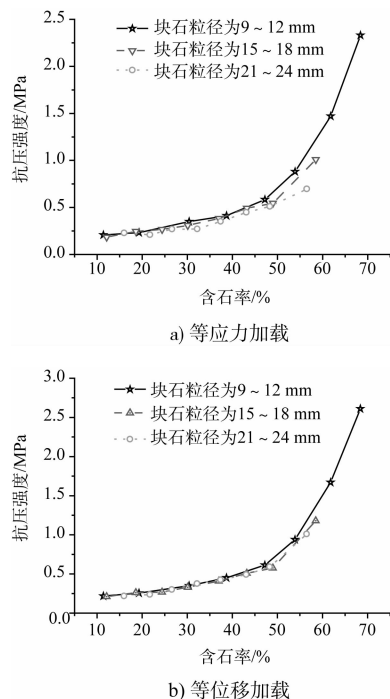


图10 不同加载情况下的含石率与抗压强度关系曲线

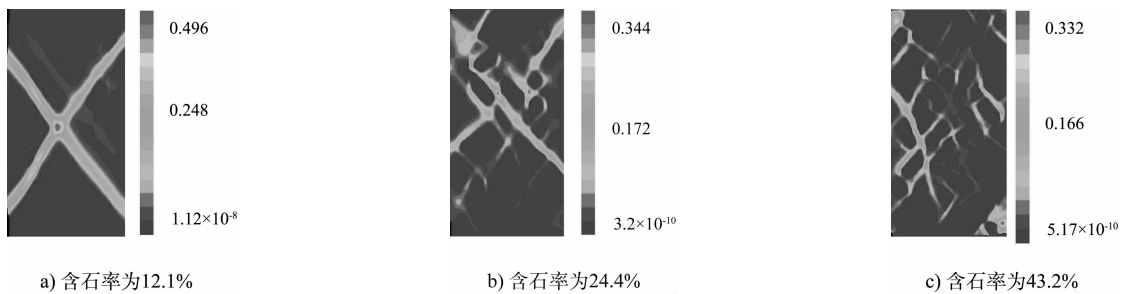


图 11 土石混合体受压时的塑性剪应变云图

另外, 图 11 是等应力加载方式下土石混合体破坏时的塑性剪应变云图。土石混合体的含石率逐渐增加, 可以看出含石率较低时土石体的破坏是标准的整体剪切破坏; 含石率较高时, 土石混合体破坏是小部分土体的脱落, 块石充当骨架作

用。图 12 是等应力加载方式下 21 ~ 24 mm 块石粒径土石混合体破坏时的最小主应力云图。随着土石混合体的含石率逐渐增加, 可以得出含石率高时土石混合体受压传力路径更加清晰, 此时块石承担主要作用力。

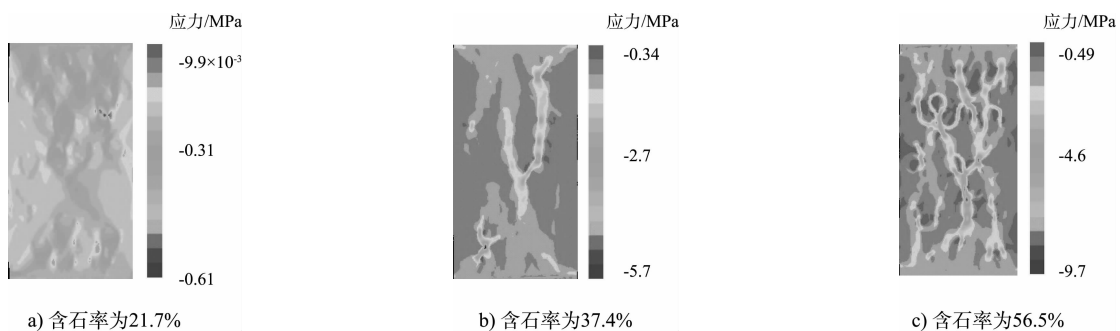


图 12 土石混合体受压时的最小主应力云图

4 结论

土石混合体是天然条件下形成的岩土混合物, 与滑坡、泥石流等地质灾害密切相关。本文采用 CDEM 数值计算软件以及块石随机生成技术, 对比分析了等应力以及等位移加载情况下土石混合体的单轴抗压强度。计算结果表明:

1) 土石混合体等应力加载的强度要比等位移加载的强度低, 且随着含石率的增加, 两者差异逐渐增大。

2) 两种加载方式下, 随着含石率的增加土石混合体的单轴抗压强度不断增加, 且含石率超过 30% 后强度增加速率加快; 含石率较低时土的强度起主要作用, 含石率较高时块石 (作为骨架) 的强度起主要作用。

3) 随着含石率的增加, 土石混合体的宏观应力应变曲线呈现强化趋势。

参考文献:

- [1] 廖秋林, 李晓, 郝钊, 等. 土石混合体的研究现状及展望[J]. 工程地质学报, 2006, 14 (6): 801-807.
- [2] 韩世莲, 周虎鑫, 陈荣生. 土和碎石混合料的蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 196-199.
- [3] 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: 中国矿业大学北京校区, 2004.
- [4] 董云. 土石混合料强度特性的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1 269-1 274.
- [5] 徐文杰, 胡瑞林. 循环荷载下土石混合体力学特性野外试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 63-69.
- [6] 孟祥跃, 李世海, 张均锋. 柔性边界加载试验机研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 760-1 764.
- [7] 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, 2001.
- [8] 李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型

及单向压缩数值模拟[J]. 岩土工程学报 2004, 26(2): 172-177.

[9] 冯春, 李世海, 姚再兴. 基于连续介质力学的块体单元离散弹簧法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2 690-2 704.

[10] Li S H, Zhao M H, Wang Y N, et al. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and failure process [C]//Beijing: WCCM VI in conjunction with APCOM' 04, 2004.

[11] 魏怀鹏, 易大可, 李世海, 等. 基于连续介质模型的高散元方法中弹簧性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 159-1 169.

[12] 田振农, 李世海, 刘晓宇, 等. 三维块体离散元可变形数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2 832-2 840.

[13] 李世海, 刘天萃, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(28): 3 309-3 324.

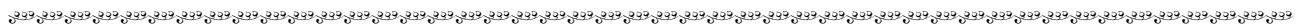
[14] 田振农, 李世海, 刘晓宇. 可变形块体离散元在岩土工程中的研究[C]//中国力学大会 - 2005 论文集. 北京: 中国力学学会, 2005.

[15] Itasca Consulting Group, Inc. Fast Lagrangian Analysis of Continua Theory and Background[M]. Minneapolis USA: Itasca Consulting Group, Inc, 2005.

[16] 范永波, 李世海, 侯岳峰, 等. 不同边界条件下土石混合体破坏机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 48-51.

[17] Jiang M , Ostoja-Starzewski M, Jasiuk I. Scale-dependent bounds on effective elastoplastic response of random composites[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49(3): 655-673.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 9 页)

由以上结果可知, 对于水平管, $K_C = 3 \sim 12$ 时, $C_M = 2.0 \sim 2.5$, C_M 随 K_C 数的变化不大; $K_C = 3 \sim 8$ 时, $C_D = 0.4 \sim 1.0$, 且 C_D 随着 K_C 数的增大而增大; 当 $K_C > 8$ 后, C_D 趋于常数 1.6。

3 结论

设计了一种单根竖直管柱和水平管柱受波浪力的测试装置, 由于采用应变片测力, 试验装置较简单。通过水槽试验测得规则波作用下圆管波浪力随时间的变化过程, 用莫里森方程和最小二乘法确定惯性力系数 C_M 和绕流阻力系数 C_D , 并通过回归分别得到了竖直和水平放置的圆管系数的计算公式, 系数 C_D 和 C_M 与 K_C 的相关系数均达到 0.97, 为导管架浮运稳定性计算中合理确定惯性力系数 C_M 和绕流阻力系数 C_D 提供了技术支持。

参考文献:

[1] 张志明, 胡家顺. 我国大型开敞式码头结构设计与施工技术现状及发展趋势探讨[C]//港口工程分会技术交流文集. 北京: 人民交通出版社, 2005: 91-100.

[2] 李绍武, 夏陆军, 张文忠. 波流作用下导管架码头结构浮运模拟数学模型及验证[J]. 天津大学学报, 2013, 46(5): 401-407.

[3] 俞聿修, 廖莘. 波浪作用于垂直桩柱上的横向力[J]. 海洋学报, 1989, 11(2): 122-135.

[4] 任佐皋, 项菁, 何君. 波浪流谱图与桩柱上波力的计算[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1986(4): 6-14.

[5] 朱照清, 龚维明, 戴国亮. 作用在小直径桩柱结构上的波浪力研究综述[J]. 常州工学院学报, 2008, 21(S1): 222-226.

[6] 韩非非, 张玮, 陈恺. 小直径单立柱上的波浪荷载研究[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 409-414

(本文编辑 武亚庆)