土石混合体变形破坏及细观机理研究的进展

孙华飞^{①*}, 鞠杨^{②③}, 王晓斐^①, 行明旭^①, 张钦刚^①, 杨永明^①

① 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

② 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

③ 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221008

* E-mail: shf@cumt.edu.cn

收稿日期: 2013-02-26; 接受日期: 2013-10-28

国家杰出青年科学基金(批准号: 51125017)、国家自然科学基金(批准号: 51374213)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2010CB226804, 2011CB201201)、科技部国际科技合作专项(批准号: 2012DFA60760-2)和国家自然科学基金国际合作交流(批准号: 51120145001)资助项目

摘要 土石混合体是一种特殊的工程地质材料, 其非均质、非连续和非线性特征决定了土石混合体变形破坏及细观机理的复杂性, 常规岩土力学的试验方法和分析理论难以应用. 目前土石混合体变形破坏研究尚不深入, 特别是对细观机理以及定量描述方法缺乏足够的认知, 未形成系统的实验方法和理论分析体系. 从现场原位试验、室内试验、结构模型和数值分析 4 个方面对国内外近些年来土石混合体研究进展进行综述, 分析了目前研究存在的困难与挑战, 探讨了未来发展方向.

关键词

土石混合体
变形破坏
细观机理
实验方法
结构模型
数值分析

土石混合体是一种特殊的工程地质材料, 是岩土边坡、隧洞围岩、路基工程面对的主要对象. 土石混合体由具有一定尺寸、高弹性模量的岩块和低弹性模量的土体, 经堆积或积压而成, 物理力学性质介于土体与碎裂岩体之间^[1~4]. 因含有数量多、不同尺度和随机分布的砾石或块石, 土石混合体在结构上既有土颗粒之间的细观结构, 也有岩石与土颗粒之间的宏观断续结构. 这种非均质、非连续和非线性特征不仅决定了土石混合体变形破坏和内部细观机理的特殊性, 也决定了其研究方法与传统岩土力学方法的重大差异, 常规岩土力学的试验方法和分析理论很难直接用于这种特殊介质. 近些年来, 随着国民经济快速发展, 我国大型甚至超大型水利水电、交通运输和地下工程设施建设日益增多, 土石混合体边坡和隧洞围岩的稳定性问题十分突出, 亟待建立土石

混合体变形破坏的基础理论和分析方法去指导工程实践、确保工程安全. 因此, 深入研究土石混合体的变形破坏性质及其细观机理, 对于构建土石混合体变形破坏的理论分析体系、科学准确地评判工程地质体的稳定性具有重大的科学研究价值和工程实际意义.

然而, 目前土石混合体变形破坏的研究尚不够深入, 特别是对细观机理以及定量描述方法等缺乏足够的认知, 未形成系统的实验方法和理论分析体系. 土石混合体变形破坏分析的常用方法有: 现场原位试验、室内试验、结构模型和数值分析等. 由于土石混合体组成结构的特殊性, 以及试验仪器的限制和尺寸效应等影响, 常规室内土工试验方法难以准确表达土石混合体真实的变形破坏行为. 野外原位试验虽然在一定程度上能够反映其真实变形破坏特性, 但由于试验数量有限、选点少, 缺乏代表性等问

引用格式: 孙华飞, 鞠杨, 王晓斐, 等. 土石混合体变形破坏及细观机理研究的进展. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 172–181
Sun H F, Ju Y, Wang X F, et al. Review of the study on deformation, failure and the mesomechanisms of rock-soil mixture (RSM) (in Chinese). Sci China Tech Sci (Chin Ver), 2014, 44: 172–181, doi: 10.1360/092013-198

题而难以大范围推广应用. 基于土石混合物现场测量获得的信息建立模型来分析变形破坏行为的结构模型方法虽然具有广阔的应用前景, 但由于参数测量的准确性、可靠性等以及模型适用性等问题, 该方法目前应用程度不高. 数值方法如有限元(FEM)、有限差分(DFM)、离散元(DEM)、颗粒流(PFC)和基于有限元的离散元法(CDEM)等发挥着越来越重要的作用, 但在几何模型建立、材料参数确定和变形破坏准则等方面亟需进一步改进. 本文从现场原位试验、室内试验、结构模型和数值分析 4 个方面阐述了近些年来国内外土石混合物变形破坏及细观机理研究取得的主要进展, 分析了现存的困难与挑战, 探讨了未来的研究方向和新的思路.

1 主要进展

从 1882 年 Heim^[5]描述阿尔卑斯山滑坡开始, 百余年来国内外积累了丰富的滑坡灾害研究成果. 20 世纪 70 年代初, Chandler^[6]提出滑坡体若含有大砾石强度会大幅度提高. 此后, 特别是近十年来, 土石混合物滑坡问题的研究得到了高度重视, 国内外学者开展了大量研究. 由于我国建设大型或超大型水利水电、交通运输和地下工程设施的需要, 中国学者在土石混合体的变形破坏性质及其在地质体滑坡分析、监测和防治中的应用等方面进行了大量研究, 取得了令人瞩目的成果, 并明确提出“土石混合物”的概念^[1~4].

1.1 现场原位试验

土石混合物含有不同大小、不同种类、不同数量的砾石块体, 具有典型的非均质、非连续性, 很难在现场采集到原状样来进行室内试验. 而且, 目前实验室大尺度力学仪器数量少、费用高, 而野外大尺度原位试验可以直接对原位样进行测试, 简单易行、费用低、结果可靠^[2~4], 野外现场原位试验已成为研究土石混合物变形破坏性质的一种有效手段.

现场原位试验主要有推剪、压剪和静荷载等方法, 分别侧重土石混合物不同的变形破坏特性. 例如, 油新华和汤劲松^[7]通过三峡库区白衣庵滑坡残坡积层的野外水平推剪试验, 分析了土石混合体的变形特点和破坏模式, 指出由于抗剪强度不同, 剪切破坏既有直接剪断小石块也有绕过大石块的破坏模式. Lin 等人^[8]现场测试了台湾省车笼埔断层集集地震区土石

混合体的液化特性和剪切波速, 提出了土石混合物液化性的评价方法. 并且从原址提取砾石土样品, 利用循环三轴试验验证并改进了基于压实渗透与剪切波的土石混合物液化性的评价方法. 赫建明^[9]根据三峡库区土石混合体的现场调查资料, 提出将土石混合体的地质成因划分为滑坡堆积、崩塌堆积物、残坡堆积物和冲洪堆积物等 4 类. 徐文杰等人^[10]利用原位水平推剪试验分析了虎跳峡龙蟠右岸土石混合物在天然和浸水条件下的强度与应力-应变响应, 利用三维滑动面分析了土石混合物变形破坏的机制, 提出计算强度参数时应采用平均滑动面和关键粒径的概念, 为土石混合物三维稳定性分析提供了新途径. 李晓等人^[11]针对三峡库区白衣庵岩土体滑坡进行了大尺度土石混合体的原位推剪和压剪试验(见图 1), 获得了不同含石量、不同尺寸和不同应力状态下土石混合体的剪应力-剪切位移曲线、抗剪强度、破坏模式以及相应参数. 结果显示: 含石量是影响土石混合物强度与破坏的重要因素. 含石量较低时, 土石混合体的变形特性主要受土制约和控制, 接近于土的力学特性; 含石量较高时, 变形特性主要受块石和土体的联合控制, 强度显著提高. 他们还发现土石混合物具有典型的尺寸效应, 尺寸较小时, 破裂面发展得较为凌乱, 受块石影响较大; 尺寸加大时, 破裂面发展得相对规则. 吴旻硕等人^[12]分析了三峡库区第四纪松散堆积体的地质成因, 在滑坡现场对土石混合物进行了原位压剪以及推剪试验, 获得了该地区土石混合物原位受剪时的变形与破坏规律. 徐文杰和胡瑞林^[13]利用野外原位水平循环推剪试验分析了循环荷载作用下土石混合体的变形破坏特性, 提出土石混合物水平抗剪强度的计算方法. 发现块石分布很大程度上控制了土石混合物剪切破坏面的形成, 致使滑动面极不规则. Xu 等人^[14]利用直剪试验分析了砾石的大小与含量对土石混合体的变形与断裂机制的影响, 提出土石混合物具有不同于土体与砾石的剪应力-位移曲线. 含石量 25%~70%时, 内摩擦角随砾石含量增加呈线性增加. 与土相比, 土石混合体的凝聚力偏低. 含石量大于 30%时, 随着砾石含量的增加, 土石混合物凝聚力下降(如图 2 所示). 陈子华等人^[15]利用双环注水设备在西南大型水电站现场测试了近坝段土石混合物滑坡的渗透性质, 他们发现土石混合体的渗透系数较大, 接近无黏性粗粒土的渗透系数, 滑体平均渗透系数远高于滑带. 结合室内试验指出滑体中粒径

图1 土石混合体现场原位试验

(a) 推剪试验; (b) 压剪试验^[11]

图2 土石混合体的剪切应力-位移曲线(含石量 30%)和黏聚力变化的规律^[14]

低于 5.0 mm 的细颗粒含量、颗粒棱角性大、结构松散是导致其渗透系数高于滑带的主要原因。

1.2 室内试验

尽管现场原位试验简单易行、费用低,但该方法受到现场环境和仪器设备限制,试验次数少、局限性强,测试结果缺乏代表性和广泛适用性。另一方面,原位试验多以获取土石混合体宏观力学参数为目的,难以深入地揭示土石混合体变形破坏的本质规律、内在机理和决定性因素。因此,室内试验成为揭示土石混合体变形破坏机理与影响因素的重要途径。

室内试验研究目前大多集中在探究土石混合体的组成结构特性如含石量、粒度组成与分布、含水状态等对宏观破坏力学特性的影响,较少涉及土石混合体破坏的内部结构变化与细观物理力学机制。例如,Vallejo 和 Mawby^[16]进行了不同孔隙率土石混合体的直剪试验,发现土石混合体的剪切强度很大程度上取决于石块与土的相对聚集程度。Wang 和

Sassa^[17]试验模拟了降雨诱发的土石混合体滑坡破坏,分析了不同初始干密度、不同粒径颗粒对滑坡孔隙压力和破坏模式的影响。结果表明:砾石大小与土体细粒含量很大程度上影响着降雨诱发的滑坡破坏速度。孔隙压力随着砂砾在土体中的运动而增大,导致滑坡速度增大,细粒土含量较多的土体更容易发生破坏(图 3 所示)。Kuenza 等人^[18]试验研究了土石混合体不排水条件下的剪切破坏行为,发现砾石含量对土石混合体不排水抗剪性能具有双重影响:砾石含量较少时,沙土的相对密度支配着介质强度和变形性质,整体相对密度对剪切行为影响较小;砾石含量超过 40%时,砾石颗粒相互作用并共同影响土石混合体的张拉行为。周中等人^[19,20]利用自行研制的常水头渗透仪,采用室内正交实验方法,研究了砾石含量、孔隙比和颗粒形状对土石混合体渗透性的影响,确定了 3 种因素对土石混合体渗透系数的影响顺序及各因素的显著性水平,提出了土石混合体渗透系数的计算公式,为工程实践中确定土石混合体渗透

图3 土石混合物中砾石转动速度与滑坡速率的关系^[17]

系数提供了简明计算工具. 周志军等人^[21]利用自制的大型击实仪对超粒径土石混合料进行了击实试验, 提出了采用等量替换法来间接求取超粒径土石混合料最大干密度的方法, 为工程应用提供了参考. 徐文杰等人^[22]利用现代数字图像处理技术分析了土石混合体内部块石的形态, 获取了粒度组成及块石含量. 通过大尺度直剪试验研究了土石混合体剪切破坏与块石含量和几何形态之间的关系. 发现块石含量在很大程度上控制着土石混合体的变形破坏机制, 剪应力-位移曲线及垂直位移-水平位移曲线均较常规的土体及岩石有很大的差别. 舒志乐等人^[23]从土石混合体的非线性特性出发, 应用分形理论研究了土石混合体的强度特征. 通过大型三轴试验(见图 4)建立了不同围压下不同粒度分维的土石混合体的应力-应变曲线以及强度包线与抗剪强度的关系. Erguler 和 Ulusay^[24]研究了不同类型黏土岩的单轴压缩强度、拉伸强度及弹性模量和含水量的影响, 发现随含水量增加黏土岩的单轴抗压强度、弹性模量和拉伸强度减少, 提出了含水量黏土岩强度的估算方法. Ghorbani 等人^[25]研究了黏土岩饱和度对弹性波速的影响, 发现饱和度降低时 P 波与 S 波速度增加; 干燥后黏土岩 S 波增加高达 10%, 剪切模量亦增加, 验证了 Biot-Gassmann 模型的适用性. 欧阳振华等人^[26]通过柔性边界条件下的大型剪切实验研究, 发现块石尺寸对土石混合体的抗剪性能影响最大, 含石量次之, 块石

排列影响最小. 曹光栩等人^[27]利用特制的大型侧限固结仪对我国西部山区土石混合料进行了试验, 分析了土石混合料的压缩、蠕变和湿化变形特性. 针对土石混合体破坏的内部细观机理.

本文作者^[28]应用微焦点 CT 扫描技术, 探查和分析了 4 种含石率土石混合体受压变形破坏过程中内部裂隙的生成、演化和贯通机制(图 5 所示), 提出了土石混合体的损伤模式, 揭示了内部损伤与土石混合体受压强度之间的定量关系. 指出土石混合体内部损伤的空间演化与分布与含石量密切相关, 损伤分布具有较明显的各向异性特征. 上述工作为通过试验认知和揭示土石混合体变形破坏特征及细观力学机理、解决工程实际问题创造了有利条件.

1.3 结构模型

组成结构的高度非均质、非连续和非线性是土石混合体的本质属性, 它不仅决定了其特有的既不同于土体也不同于岩体的非连续、非线性变形破坏行为, 也决定了其研究方法与传统岩土力学方法存在重大差异. 现有的岩土力学理论难以准确地描述这类介于均质土体和碎裂岩体之间的特殊工程地质材料的变形破坏行为. 如果不从土石混合体的本质属性出发去构建其变形破坏的力学理论和分析方法, 不仅难以揭示土石混合体变形破坏的内在机理和本质规律, 而且难以准确定量地刻画其非连续、非线性特征与破坏模式, 难以为评判工程地质体的稳定性提供科学依据和有效方法.

为此, 从土石混合体块体结构的几何与分布特征出发, 研究如何构建土石混合体的结构模型来分析其变形破坏性质和细观机理引起人们越来越多的关注和重视. 这种方法目前主要有两类, 第一类是利

图4 土石混合体室内三轴试验仪^[23]

图5 单轴受压时不同加载时期不同含石率的土石混合体内部开裂和损伤的三维 CT 图像

白色部分代表石块、透明的浅灰色部分为均质土体、深黑色部分为受压开裂裂纹。(a)~(f)分别表示未加载、峰值前 40%Pu 时刻、峰值前 70%Pu 时刻、100%Pu 时刻、峰值后 70%Pu 以及峰值后 40%Pu 时刻的内部结构与开裂模式,其中 Pu 表示受压破坏时的峰值荷载。从左至右图像分别为含石率 0%、10%、30%和 50%的土石混合体^[28]

用量测仪器识别并获取土石混合体块体结构的几何、统计分布或拓扑信息,通过图像处理或其他算法程序生成结构模型。例如, Lanaro 和 Tolppanen^[29]利用激光扫描获得块石三维图像,通过傅立叶与几何分析提取砾石块体的具体参数,建立了土石混合体的结构模型。与真实结构相比,结构模型的准确度较高。Yue 和 Chen^[30]基于土石混合体数码照片,利用图像处理方法建立了反映块体非均质、非连续特征的土石混合体平面结构模型。Li 和廖秋林等人^[2,4]基于滑坡现场勘查数据和土石混合体结构特征的统计分析,

运用 Monte Carlo 法模拟生成了土石混合体的块体结构模型(如图 6 所示)。该方法反映了土石混合体细观结构的非均质和非连续特征。廖秋林等人^[31]基于数码成像原理和图像处理技术,利用土石混合体中块石与土体颜色属性的差异,提出了土石混合体结构模型的自动生成方法,详细介绍了块体的空间位置、大小和方位 3 个随机变量的分布函数和生成方法。在此基础上,通过数值模拟分析了土石混合体的力学效应。张亚南等人^[32]提出利用应力波传播特性拾取土石混合体块石结构特征的方法,建立了波动响应与内部结构特征(含石率、块石特征尺寸、土石分布规律)之间的对应关系,为构建土石混合体结构模型提供了一种新思路。第二类是基于随机模拟与生成技术的随机结构模型,即利用土石混合体内部“块石”的空间分布及粒度组成在统计层次上具有自组织性的特点,通过计算机程序随机自动生成块体结构。例如,油新华^[33]在野外地质勘察和现场统计的基础上,分析了土石混合体中砾石块体的分布规律和特点,根据其非均质、非连续性特点提出了土石混合体的随机结构模型,并在此基础上利用数值试验分析了土石混合体在单轴受压和受剪切条件下的变形破坏特征与强度规律。李世海和汪远年^[34]基于 NUBRM 及可变形块体模型,结合现有试验参数,提出了一种土石混合体的随机结构模型,研究了单轴受压情况下土石混合体内部应力场分布与土石配比、岩石块度大小等因素的关系,并进一步给出了土石混合体的应力-应变特性和强度特性。赫建明等人^[35]建立了土石

图6 基于 Monte Carlo 法生成的土石混合体块体结构模型^[2]

混合体的二维颗粒流随机结构模型, 采用 PFC 颗粒流离散元计算程序对所建模型进行了压剪变形破坏的数值试验, 分析了结构效应对土石混合体变形破坏的影响; 徐文杰等人^[36,37]基于土石混合体随机细观结构模型生成技术开发了分析软件 R-SRM^{2D}. 利用 R-SRM^{2D} 分别从土石混合体的含石量、空间分布、粒度组成等细观结构特征出发, 模拟分析了土石混合体的细观渗流场特征、渗透破坏机理及宏观渗透系数与细观结构的定量关系, 得到了土石混合体的宏观渗透系数随含石量、块石长轴与主渗流方向夹角及粒度分维数的增加而减小的趋势. 成国文等人^[38]以 PFC^{3D} 为平台, 通过三维空间随机点生成及颗粒绑定技术, 建立了不同含石率土石混合体颗粒流三维模型, 模拟了双轴应力条件下的变形破坏, 分析了含石率对土石混合体双轴强度的影响. 丁秀丽等人^[39]基于数字图像处理技术, 利用数码图像和 CT 图像直接生成了土石混合体的颗粒流模型, 采用 PFC 程序模拟分析了土石混合体双轴压缩性能, 为土石混合体力学行为的颗粒流模拟提供新的建模方法. 本文作者^[28]基于微焦点 CT 扫描和自行开发的数据提取与三维重构算法, 建立了土石混合体的三维重构模型. 利用该模型定量分析了不同含石率土石混合体受压破坏全过程内部损伤分布特征与演化规律(见图 5).

对比不难发现, 上述两类结构模型各有优缺点. 基于数码图像生成的结构模型可以较准确地反映了土石混合体中块石与土体的实际分布, 模型准确度较高. 而且, 模型分析结果便于与原型结构的实验结果进行对比. 然而, 构建此类模型时获取完备的土石混合体断面图像存在一定困难, 而且断面尺寸常受到设备能力的限制, 不适合大尺度模型的建立. 同时, 后续图像处理存在一定难度且工作量较大. 某些结构特征的识别手段如 CT 扫描等花费较高. 与此相反, 随机结构模型利用土石混合体细观结构在宏观层次上的统计规律性建立相应的结构模型, 便于程序化、过程简单, 能够自定义模型尺寸, 人为干预较小, 花费较少. 但此类模型无法考虑土石混合体中的初始缺陷, 与实际细观结构之间存在一定差距, 只能满足宏观统计的要求. 并且, 目前三维随机结构模型的建立方法尚不成熟, 模型的模拟结果难以与原型土石混合体的实验结果进行对比.

1.4 数值分析

数值分析是研究土石混合体变形破坏的一种重要方法, 它在土石混合体的几何模型或结构模型的基础上, 利用有限元(FEM)、有限差分(DFM)、离散元(DEM)、颗粒流(PFC)或基于连续介质的离散元法(CDEM)等数值算法来分析土石混合体的变形破坏行为, 我国学者在这方面进行了大量卓有成效的探索性工作. 例如, Liu 等人^[40]建立了土石混合体斜坡雨水渗透的有限元模型, 模拟分析了均质和非均质介质中非稳定雨水渗透问题. 结果表明: 土石混合体斜坡中岩石块体可能会加快湿润锋运移. 在其他条件相同的情况下, 降雨强度增加时斜坡将会迅速形成饱和区. 降雨强度一定时, 适当增加土石混合体垂直渗透率可能会加速饱和区的产生. 如果垂直渗透大于降雨强度, 土石混合体斜坡中将难以形成饱和区. Huang 和 Jia^[41]利用有限元和抗剪强度折减法分析了瞬态非饱和渗流土石坡的稳定性, 并与极限平衡法得到的土石坡安全系数进行了对比. 模拟分析了因水库水位波动引起的边坡不稳定性. 结果表明, 结合强度折减技术的有限元法可以有效评估非饱和渗流土石坡稳定性. 丁秀丽等人^[42]基于土石混合体细观结构模型, 利用 ABAQUS 有限元程序模拟分析了土-石界面接触特性、含石量及饱和度等因素对非饱和土石混合体力学特性与破坏机制的影响. 通过与室内试验结果对比, 验证了土石混合体细观结构模型数值分析方法的可行性和合理性. 油新华^[33]采用 FLAC^{3D} 有限差分程序分析了块石形状、分布等特征对土石混合体变形破坏的控制作用, 建立了土石混合体的弹性模量与含石率的关系. 薛雷等人^[43]基于数字图像分析建立了 FLAC^{3D} 模型, 通过开发的 IMAGE-FLAC^{3D} 接口实现了 FLAC^{3D} 快速自动建模. 通过所建立的土石混合体有限差分模型的计算结果与库岸滑坡极限平衡法分析结果的对比, 检验了模型方法的有效性和可行性. Bian 等人^[44]用 FLAC^{3D} 程序模拟了不同温度作用下 Callovo-Oxfordian 土石混合体的形变特性, 分析了不同温度下孔隙水压力、变形和位移等特征, 并对模拟结果进行了试验验证. 结果表明: 在低孔隙率、低渗透率的饱和岩石中, 温度的分布与变化会对过压围岩的液压行为产生扰动进而引起变形; 材料水力机械性能变化不影响土石混合体的温度效应.

尽管如此, 由于土石混合体是一种高度非均质、

非连续材料, 有限元法(FEM)很难准确刻画这种非均质、非连续性以及变形破坏的非连续特征。特别是, 对于土石混合体的裂纹扩展、流-固耦合和大变形等问题, 有限元网格会产生严重畸变, 需要进行网格重构, 这不仅会大幅度增加计算量, 而且会严重影响解算精度, 土石混合体的三维有限元网格生成是极具挑战性的问题。此外, 土石混合体变形破坏是一个由准静态向流态的渐进转化过程, 完全采用连续介质力学的方法很难描述介质由固态向流态转变的演化过程, 也不能从细观上确定块石形态、含石量等因素对渐进破坏过程的影响。而有限差分法(DFM), 由于近似解导数不准确、沿非线性边界难于引入边界条件、复杂几何边界难以精确表达等问题, 有限差分法在解析土石混合体非线性变形时受到很多限制, 甚至难以求解。

近些年来, 离散元法(DEM)越来越多地被应用于土石混合体的变形破坏分析^[32,34], 特别是, 基于离散元理论发展起来的颗粒流法(PFC)显示出应用潜力。PFC 法从散体介质的细观力学特性出发, 通过模拟颗粒介质的运动及相互作用来解析材料的宏观物理力学行为, 在研究颗粒间相互作用和大变形等问题上具有显著的优越性^[36-39]。例如, 赫建明等人^[9,35]利用土石混合体二维颗粒流随机结构模型, 采用 PFC^{3D} 程序模拟分析了土石混合体压剪变形破坏与结构效应的影响。成国文等人^[38]利用 PFC^{3D} 程序建立了土石混合体颗粒流三维模型, 分析了双轴应力条件下的变形破坏及含石率的影响。Hadjigeorgiou 等人^[45]将三维裂隙系统与二维 PFC 模型相结合建立一个集成 3D 裂缝系统的土石混合体 PFC^{3D} 模型, 定量分析了岩土垂直挖掘过程中的稳定性以及结构应力相互作用。胡明鉴等人^[46]采用 PFC^{2D} 程序模拟分析了因降雨松散碎屑物质启动形成泥石流的过程, 揭示了降雨作用下松散碎屑物质启动、加速运动并最终导致崩滑堆积体发生泥石流连锁式破坏的机制。贾学明等人^[47]利用 PFC^{3D} 模拟了土石混合料直剪试验, 分析了不同含石量、不同岩性的土石混合料直剪性能。他们发现, 土石混合料的石料岩性和含石量很大程度上控制了土石混合料的抗剪强度特性。软岩混合料在低正应力下表现为剪胀, 高正应力下表现为剪缩并产生软化现象; 硬岩混合料表现为剪胀和塑性; 软岩土石混合料剪切过程中能量以应变能和动能为主, 而硬岩土石混合料的能量以摩擦能和动能为主。杨冰等

人^[48]利用 PFC^{3D} 模拟研究了有侧限条件下土石混合体填料的抗压性能, 发现不同含石率的土石混合体受力机理不同。含石率低于 40% 时混合体受力类似于土体, 侧限压缩模量随含石率增长相对缓慢; 含石率在 40%~70% 时粗颗粒形成骨架作用, 受力从细颗粒黏土转为主要由粗颗粒块石承担, 试样的侧限压缩模量随含石率增长而迅速增加; 含石率大于 70% 时基本完全由粗颗粒受力, 侧限压缩模量几乎不受含石率影响。

人们在应用中发现, 离散元数值方法能够较好地模拟土石混合体中岩块的接触、滑移、分离和倾翻等非连续、大变形问题, 适用于土石混合体和碎裂岩石边坡的稳定性分析。然而, 与有限元法相比, 此类方法确定时间步长及块体间阻尼系数等参数具有较大的随意性, 对运动学的考虑也不够充分, 常导致数值计算不收敛, 而且计算成本较高^[48-50], 影响土石混合体渐进破坏过程的定量分析。

值得关注的是, 土石混合体这种特殊结构体既有土颗粒之间的细观结构, 也有块石与土颗粒之间的宏观断续结构, 如能将有限元和离散元法相结合, 发挥有限元法解决全局整体变形问题的优势和离散元法处理颗粒集合和界面离析问题的长处, 建立一种连接细观颗粒结构与宏观断续结构的 DEM/FEM 模型, 无疑将会极大地提高数值模型捕捉细观破坏机理和描述宏观物理力学特征的能力, 提高计算效率。目前部分学者在这方面进行了有益的尝试。例如, Fakhimi^[51]应用 DEM/FEM 混合模型模拟研究了岩土材料力学行为, 采用离散并交互作用的球来构建模型, 球体通过接触点键合并承受施加的偏应力, 该模型有利于模拟物理模型试验。中国科学院力学研究所李世海团队^[32,34]在块体离散元的基础上, 发展了基于连续介质的离散元法, 并开发了相应的程序 CDEM 以及基于 GPU 运算的 GDEM, 用于分析土石混合体边坡、土质边坡和岩质边坡的稳定性。他们利用 GDEM 法分析了土石混合体内部结构特征对应力波传播的影响, 建立了波动响应与内部结构特征之间的定量关系。

2 结论与展望

1) 作为一种特殊的工程地质材料, 土石混合体在组成结构和变形破坏性质等方面显著区别于均质土体和岩石块体, 其特殊性和复杂性正逐步被学术

界和工程界所认知和高度关注, 传统的岩土力学理论和分析方法已难以满足工程实际需要, 亟待深入研究和揭示土石混合体变形破坏的内在机理、本质规律, 并从本质属性出发建立土石混合体变形破坏的试验方法和理论分析体系。

2) 近十年来, 土石混合体变形破坏的研究, 在其地质成因、环境效应、组成结构、强度特征、破坏模式、演化规律、本构关系、内禀机制和失效准则等方面取得了一系列进展, 研究方法和手段涵盖了野外原位试验、室内试验、模型分析和数值模拟等。现有研究发现: 含石量、块石与土体的强度比对于土石混合体的强度、变形、应力-应变响应、渗透性、波传播特性、破坏模式和滑坡稳定性的具有关键性影响。含石量较低时, 土石混合体的物理力学性质主要受土体控制, 接近于土的物理力学特性; 含石量较高时, 上述特性受块石与土体的联合控制。上述物理力学性能显著区别于土体及岩石块体。不规则块石的岩性、几何形态、尺度和空间分布等特征以及含水率等因素对土石混合体的物理力学性质也具有不同程度的影响。

3) 现有成果主要集中于土石混合体宏观变形破坏性质, 较少涉及变形破坏的内部细观机制与定量表征。土石混合体的变形破坏不仅与块石的几何特征、岩性和分布规律以及土体的强度和变形性质有关, 还与块石的运动状态(平动或转动)、土石的接触性质、摩擦特性、孔隙压密等因素密切相关。一般来讲, 块石强度远高于土体, 土石混合体受力时块石不易发生破坏, 而块石与土体接触带是薄弱区域, 是应力和介质强度发生突变的区域, 该区域的变形、开裂或离析可能导致块石的移动或转动, 诱发土石混合体破坏。目前缺乏对这种内部细观机制的直观、定量的实验研究和分析方法, 因而难以建立起关联土石细观结构特征的土石混合体变形破坏的定量评述。同时, 这也直接导致土石混合体数值分析中确定界面参数时缺乏科学依据。

4) 水对土石混合体滑坡的影响已被学术界和工程界所认识, 研究表明, 土与块石不完全接触形成裂隙, 水作用下易于发生潜蚀、土体液化, 导致土石混合体结构整体失稳。同时, 水压力作用还直接影响土石混合体的变形破坏行为^[4]。但目前鲜有涉及水-土石混合结构耦合作用的定量研究, 也缺乏相应的实验观测数据, 因而难以准确定量地评价水对土石混合体

力学性质以及滑坡灾害的影响, 并对滑坡灾害进行有效预警。

5) 利用土石混合体结构模型分析和预测土石混合体变形破坏行为的方法具有发展潜力, 但是, 由于缺乏准确、高效、经济的数据采集、识别与建模方法, 土石混合体的结构模型大都是基于宏观统计规律生成的虚拟细观结构模型, 这种随机模型多采用矩形、圆形、三角形、椭圆等规则几何形状来近似块石, 与实际结构之间存在较大差距, 建立在虚拟细观结构模型基础上的分析很难得到材料真实的物理力学性质, 模拟结果难以与原型土石混合体的实验结果进行对比。另一方面, 基于数码图像生成的结构模型可以较准确地反映了土石混合体中块石与土体的实际分布, 准确度较高。然而, 受到采集和识取设备能力的限制, 构建此类模型的难度大、成本高, 不适合大尺度问题。因此, 发展一种能够反映土石混合体真实结构特征、便于建模和程序计算、便于与原型结构实验结果进行对比的建模技术是土石混合体结构模型研究面临的一个重要挑战。

6) 作为土石混合体变形破坏及细观机理研究的一种重要手段, 数值分析方法具有独特的优势。但由于土-石结构的复杂性, 现有的数值模型在处理块石几何形状、块石与土体的界面描述, 确定材料属性、材料本构关系、颗粒单元刚度、单元界面法向/切向刚度、摩擦系数、阻尼系数和失效准则, 以及在开发合理的接触、断裂、离析、运动等算法、提高计算效率等一系列问题上, 缺乏充分的实验依据, 存在较大的随意性。迫切需要开展相关的细观物理力学实验和理论研究解决上述问题, 提高数值分析的准确性与可靠性。

正如前文分析所指出的, 土石混合体的系统研究开始于十年前, 目前尚有诸多问题亟待研究解决, 这些问题是构建土石混合体变形破坏理论分析体系的基础和核心。土石混合体的非均质、非连续和非线性特征从本质上决定了其变形破坏及细观机理研究方法的特殊性, 沿用传统岩土力学的方法难以解决目前研究中存在的问题, 必须在研究思路和分析方法上创新。例如, 目前大尺寸样品的工业 CT 扫描技术日趋成熟, 操作简单、精度高、成本低的 CT 扫描方法为全面认识土石混合体的三维结构特征提供了便利条件, 在野外工程地质调查和统计分析的基础上, 发展基于大尺寸 CT 扫描的加载系统、快捷的结

构模型重构方法以及高效的数值计算方法, 利用大尺寸结构模型定量分析土石混合体变形破坏性能与内部细观机理, 将极大地提高土石混合体变形破坏

问题研究的定量化和准确程度。这是一个值得关注的发展方向, 它将为土石混合体滑坡灾害的定量分析和监测预警提供新的手段和途径。

参考文献

- 1 钟立勋. 意大利瓦依昂水库滑坡事件的启示. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5: 77-83
- 2 Li X, Liao Q L, He J M. In-situ tests and stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges Reservoir area. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, 41: 313-318
- 3 殷跃平. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究. 北京: 地质出版社, 2004.
- 4 廖秋林, 李晓, 郝钊, 等. 土石混合体的研究现状及研究展望. 工程地质学报, 2006, 14: 800-807
- 5 Heim A. Der Bergsturz von Elm. *Zeitschr. Der Dueutsch (in Germany). Geol Ges*, 1882, 34: 74-115
- 6 Chandler R J. The inclination of talus, Arctic talus terraces and other slopes composed of granular materials. *J Geology*, 1973, 81: 1-14
- 7 油新华, 汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究. 岩石力学与工程学报, 2002, 21: 1537-1540
- 8 Lin P S, Chang C W, Chang W J. Characterization of liquefaction resistance in gravelly soil: Large hammer penetration test and shear wave velocity approach. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2004, 24: 675-687
- 9 赫建明. 三峡库区土石混合体的变形与破坏机理研究. 博士学位论文. 北京: 中国矿业大学(北京), 2004
- 10 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. 岩石力学与工程学报, 2006, 25: 1270-1271
- 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. 岩石力学与工程学报, 2007, 26: 2377-2384
- 12 吴旻硕, 李晓, 赫建明. 土石混合体原位水平推剪试验. 岩土工程技术, 2007, 21: 184-189
- 13 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. 工程地质学报, 2008, 16: 63-69
- 14 Xu W J, Xu Q, Hu R L. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2011, 48: 1235-1247
- 15 陈子华, 陈蜀俊, 陈健, 等. 土石混合体渗透性能的双环注水试验研究. 长江科学院院报, 2012, 29: 52-55
- 16 Vallejo L E, Mawby R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures. *Eng Geol*, 2000, 58: 125-136
- 17 Wang G H, Sassa K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Eng Geol*, 2003, 69: 109-125
- 18 Kuenza K, Towhata I, Orense R P, et al. Undrained torsional shear tests on gravelly soils. *Landslides*, 2004, 1: 185-194
- 19 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的试验研究. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33: 25-28
- 20 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的正交试验研究. 岩土工程学报, 2006, 28: 1134-1138
- 21 周志军, 杨荣尚, 马小伟. 超粒径土石混合料最大干密度的试验研究. 公路, 2007, 4: 5-11
- 22 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. 岩石力学与工程学报, 2008, 27: 996-1107
- 23 舒志乐, 刘新荣, 刘保县, 等. 基于分形理论的土石混合体强度特征研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 2651-2656
- 24 Erguler Z A, Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46: 355-370
- 25 Ghorbani A, Zamora M, Cosenza P. Effects of desiccation on the elastic wave velocities of clay-rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46: 1267-1272
- 26 欧阳振华, 李世海, 戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究. 实验力学, 2010, 25: 61-66
- 27 曹光栩, 徐明, 宋二祥. 土石混合料的力学特性. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 31: 115-148
- 28 Sun H F, Yang Z K, Xing M X, et al. CT Investigation of fracture mechanism of soil-rock mixtures. *Appl Mech Mater*, 2012, 204: 67-71
- 29 Lanaro F, Tolppanen P. 3D characterization of coarse aggregate. *Eng Geol*, 2002, 65: 17-30
- 30 Yue Z Q, Chen S. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing. *Comput Geotech*, 2003, 30: 375-397
- 31 廖秋林, 李晓, 朱万成, 等. 基于数码图像土石混合体结构建模及其力学结构效应的数值分析. 岩石力学与工程学报, 2010, 29: 155-162
- 32 张亚南, 冯春, 李世海. 采用波动方法探测土石混合体结构特性的可行性研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30: 1855-1863
- 33 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究. 博士学位论文. 北京: 北方交通大学, 2001
- 34 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. 岩土工程学报, 2004, 26: 172-177
- 35 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. 矿冶工程, 2009, 29: 1-7

- 36 徐文杰, 胡瑞林, 岳中崎, 等. 土石混合体随机细观结构生成系统的研发及其细观结构力学数值试验研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 1652–1665
- 37 徐文杰, 王永刚. 土石混合体细观结构渗流数值试验研究. 岩土工程学报, 2010, 31: 542–550
- 38 成国文, 赫建明, 李晓, 等. 土石混合体双轴压缩颗粒流模拟. 矿冶工程, 2010, 30: 1–5
- 39 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. 岩石力学与工程学报, 2010, 29: 477–484
- 40 Liu Y W, Liu Q Q, Chen H X, et al. Numerical study on rainfall infiltration in rock-soil slop. Sci China Ser-E Tech Sci, 2005, 48: 33–46
- 41 Huang M S, Jia C Q. Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage. Comput Geotech, 2009, 36: 93–101
- 42 丁秀丽, 张宏明, 黄书岭, 等. 基于细观数值试验的非饱和土石混合体力学特性研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31: 1553–1556
- 43 薛雷, 李维朝, 孙强, 等. 基于数字图像像素单元建立三维 FLAC3D 模型. 岩土力学, 2010, 30: 2001–2005
- 44 Bian H B, Jia Y, Armand G, et al. 3D numerical modeling thermo-hydromechanical behavior of underground storages in clay rock. Tunn Undergr Sp Tech, 2012, 30: 93–109
- 45 Hadjigeorgiou J, Esmaili K, Grenon M. Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model. Tunn Undergr Sp Tech, 2009, 24: 296–308
- 46 胡明鉴, 汪稔, 陈中学, 等. 泥石流启动过程 PFC 数值模拟. 岩土力学, 2010, 31: 394–434
- 47 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. 岩土力学, 2010, 31: 2695–2703
- 48 杨冰, 杨军, 常在, 等. 土石混合体压缩性的三维颗粒力学研究. 岩土力学, 2010, 31: 1645–1650
- 49 曾远. 土体破坏细观机理及颗粒流数值模拟. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2006
- 50 姜育松, 苏超. 工程接触问题数值分析方法. 水力发电, 2010, 36: 75–78
- 51 Fakhimi A. A hybrid discrete-finite element model for numerical simulation of geomaterials. Comput Geotech, 2009, 36: 386–395

Review of the study on deformation, failure and the mesomechanisms of rock-soil mixture (RSM)

SUN HuaFei¹, JU Yang^{2, 3}, WANG XiaoFei¹, XING MingXu¹, ZHANG QinGang¹
& YANG YongMing¹

¹ School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

² State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

³ State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China

Rock-soil mixture (RSM) is a unique type of geomaterials with distinct heterogeneity, discontinuity and nonlinearity, causing the complicated behavior and mechanism of deformation and failure. As a result, the testing methods and analytical theories of the conventional geomechanics can barely apply to RSM regarding its complexity. Nowadays, few comprehensive testing methods and analytical theories are available due to the lack of knowledge of the intrinsic mesomechanisms and the characterization of deformation and failure of RSM. This paper reviews the major progresses in the research of RSM from four aspects: in-situ tests, laboratory tests, structural models and numerical analyses. The existing difficulties and challenges, future work and prospective directions of the research are discussed in the paper.

rock-soil mixture, deformation and failure, mesoscopic mechanism, experiment methods, structural model, numerical analysis

doi: 10.1360/092013-198