

土石混合体细观结构渗流数值试验研究

徐文杰^{1, 2}, 王永刚^{3, 4}

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
3. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 由于构成土石混合体的“土体”及“块石”在物理力学性质上具有极端的差异性, 其物理力学性质要较一般的土体或岩体更为复杂。在实际工程中常常因对土石混合体物理力学性质的认识不足, 而给工程建设带来不同程度的问题。尤其是在我国西南地区大型水电工程建设中, 土石混合体通常是构成库区边坡、滑坡及坝基的主要岩土体。渗透性特征是岩土体物理性质研究的一个重要内容, 然而土石混合体的渗透性特征与其内部细观结构具有密切的联系, 如果能建立这两者之间的关系将对于土石混合体的研究具有重要的价值。综合运用统计学、几何学、随机模拟技术等多学科交叉, 开发了基于任意凸多边形及椭圆形块石的土石混合体细观结构随机生成系统—R-SRM^{2D}。基于 R-SRM^{2D} 系统, 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, 运用数值试验的方法研究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, 从理论上取得了一些有意义的成果。

关键词: 土石混合体; 细观结构; 随机模型; 渗透特性; 数值试验

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)04-0542-09

作者简介: 徐文杰(1978-), 男, 讲师, 山东日照人, 中国水利水电科学院在站博士后, 从事复杂岩土体细观结构力学、岩土工程及地质工程等方面的研究工作。E-mail: wenjiexu@mails.tsinghua.edu.cn。

Meso-structural permeability of S-RM based on numerical tests

XU Wen-jie^{1, 2}, WANG Yong-gang^{3, 4}

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For the extreme difference in characteristics between “soil” and “rock” which compose soil-rock mixture (S-RM), the physical and mechanical characteristics of S-RM are more complex than those of the general soil or rock. And for the insufficient recognition of S-RM, different degree problems will be met in many engineering projects. Especially in the southwest of China, with the building of large scale hydropower stations, the S-RM is usually the main geomaterials for slopes, landslides and dam basements in the reservoir area. Permeability is one of the important study contents of the physical characteristics of geomaterials. There is a close relationship between the permeability of S-RM and its meso-structure, and it is of great value to study the S-RM if we can build this relationship. The statistics, geometry, random simulation technique and so on are employed, and a software (R-SRM^{2D}) is developed for the generation of random meso-structure of S-RM based on arbitrary convex polygon blocks and elliptic blocks. Using R-SRM^{2D}, many samples with different rock block proportions, spacial distributions, and rock block size distribution, etc. are generated, and based on the numerical tests, the characteristics of the meso-seepage field, the mechanism of seepage failure and the quantitative relationship between the macro-permeability coefficient of S-RM and its meso-structural characteristics are studied.

Key words: soil-rock mixture (S-RM); meso-structure; random model; permeability characteristic; numerical test

0 引言

土石混合体是工程建设中经常遇到的一种地质体, 不但构成了常见的边坡、滑坡等灾害体, 而且也构成了许多大型工程的地基基础。尤其在我国西南地区, 由于第四纪历史上经历了多次冰川作用和新构造

活动, 第四纪地质作用十分活跃, 山区河床在特定的

基金项目: 第44批中国博士后一等基金项目(20080440047); 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室开放课题; 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(GZ2007-10)

收稿日期: 2009-01-06

地形、地貌条件下发育了深厚的第四纪覆盖层^[1], 其主要组成物质为土石混合体。而这些地区又蕴含着丰富的水利资源, 许多大型水电工程的坝基不可避免的座落在这些深厚覆盖层之上。如, 四川省冶勒水电站土石坝工程地基覆盖层厚度超过 400 m^[2]。对边坡、滑坡及地基而言, 渗透性特征成为制约工程设计、施工乃至安全运营的重要因素。

随着各类大型工程建设的不断推进, 许多学者纷纷展开了对土石混合体物理力学性质的研究工作。其中在土石混合体的渗透性特征研究方面, 周中等人^[3]采用室内正交试验, 利用常水头渗透仪研究了含石量、孔隙比、颗粒形状 3 个因素在不同水平下对土石混合体渗透系数的影响。许建聪等^[4]采用数理统计的方法对碎石土的渗透性进行了分析研究。然而由于土石混合体内部块石一般较大, 使得上述研究具有很大的局限性。

土石混合体的内部结构极其复杂, 相同成因、相同地区的土石混合体在不同空间位置其细观结构可能有很大的差异, 这将最终影响其宏观物理力学性质。因此, 从细观尺度角度出发研究土石混合体渗透特征将对于解决上述问题具有重要的意义。

目前, 数字图像技术被广泛应用于岩土体的细观结构模型建立中, 这种方法尽管考虑了研究对象真实的细观结构特征, 然而难于从统计角度建立其细观结构与宏观物理力学性质的关系。土石混合体内部“块石”的空间分布及粒度组成等特征, 在统计层次上具有良好的自组织性特征^[5-6]。如果能够利用这种宏观层次上的规律性, 建立其相应的细观结构模型, 将对于土石混合体细观结构渗流特性研究具有重要的意义。计算机随机模拟技术, 是伴随着计算机技术及相应理论的飞速发展而逐步兴起的一门边缘科学, 目前已被广泛应用于各行各业^[7-10], 同时也为岩土体细观结构随机模拟技术提供了强大的技术支持。此外, 今年来随着数值计算技术的不断发展, 数值试验被广泛应用于岩土工程领域并取得了可喜的成果^[11-15]。

如果说基于真实结构模型的数值试验分析如同传统的原位试验一样考虑了岩土体的原始结构特征, 那么基于建立在宏观统计层次上的随机结构模型的岩土体细观力学数值试验则应对应于传统的基于重塑样的室内试验方法。建立在宏观统计层次上的土石混合体随机结构模型及与之对应的细观结构数值试验研究, 对于从不同角度研究其物理力学性质具有重要的理论和应用价值。

本文在前人研究的基础上, 运用随机模拟技术开发了适合土石混合体随机细观结构生成的软件系统—R-SRM^{2D}, 并在此基础上运用数值试验的方法对土石

混合体的细观渗流特征进行了深入研究, 建立了其细观结构与宏观渗透特性的关系, 取得了一些有意义的成果。

1 土石混合体细观结构生成

1.1 土石混合体随机结构模型生成的关键问题

利用随机模拟技术生成土石混合体的细观结构模型时, 除了随机数这一基本要素外, 还有另外两个关键问题, 即: “块石”粒度分布及“块石”空间方位, 它们决定了所生成土石混合体是否在统计意义上与所模拟试样具有相似性。

(1) “块石”粒度分布

据文献[5, 6]研究可知土石混合体内部“块石”的粒度分布在双对数坐标上表现出良好线性相关性, 从而也为本文随机生成土石混合体内部块石粒度分布提供了依据。通过现场、室内筛分及基于数字图像处理技术对土石混合体的含石量及块石粒度组成进行统计分析, 建立所要研究的土石混合体内部“块石”粒度分布函数。

根据土石混合内部块石的粒度分维特征及土/石阈值, 从双对数坐标上可以得出块石的最大粒径 d_{\max} :

$$d_{\max} = d_{S/RT} \cdot \left(\frac{100}{100 - R_p} \right)^{\frac{1}{3-Dim_r}} \quad (1)$$

式中 Dim_r 为“块石”粒度分布维数; R_p 为含石量(%), $R_p = 100 - P(d_{S/RT})$; $P(d_{S/RT})$ 粒径小于 $d_{S/RT}$ 的累积百分含量(%); $d_{S/RT}$ 为土/石阈值。

根据土/石阈值 ($d_{S/RT}$) 及块石最大粒径 (d_{\max}), 进行粒组划分。规定在各粒组区间内, 取其上限作为该粒组的粒径, 并且粒组按粒径由大到小的顺序, 即: 第一个粒组的粒径 $d_r(1)=d_{\max}$ ……。则第 i 个粒组块石含量占总试样的百分数为

$$\Delta R_p(i) = 100 \cdot \left[\left(\frac{d_r(1)}{d_r(i)} \right)^{(3-Dim_r)} - \left(\frac{d_r(1)}{d_r(i+1)} \right)^{(3-Dim_r)} \right] \quad (2)$$

式中 $d_r(i)$ 为“块石”第 i 组粒径上限; $\Delta R_p(i)$ 为第 i 个粒组块石含量占总试样的百分数; 其它符号同前。

(2) “块石”空间方位

当单个块石形态确定后, 需要确定块石在试样中的位置及空间方位。该部分主要包括两个部分:

a) 块石质心的位置: 由于土石混合体内部块石质心坐标具有很大的随机性, 很难用相应的数学函数来表达, 为了简化起见, 本文假定其在投放空间内呈随机均匀分布。

b) 块石产状, 即块石的主轴倾向及倾角。由文献

[1]研究可知土石混合体内部块石在总体上具有明显的定向性分布规律,为此本文在程序中通过指定“块石”的主轴在某一角度范围内呈现随机正态分布或均匀分布两种方法来实现。

1.2 “块石”几何形态

自然界中块石的形态多种多样,采用现有的随机生成技术难于模拟其真实的几何形态,因此必须对其进行简化。同时考虑到尽可能反应块石几何形态的多样性和复杂性,本文在研究过程中分别采用凸多边形及椭圆形来模拟块石几何形态。

(1) 凸多边形块石

凸多边形块石的随机生成,首先以要生成块石的粒径大小为直径生成一个圆,然后随机生成该圆的内接三角形,并保证生成三角形的各内角小于 120° 。该三角形是生成凸多边形块体的最基本模型,因此又称之为“基块体”。

然后以该三角形为基础进行随机延拓,其具体做法是:遍历多边形各边,判断其长度是否大于某限定边长 L_{\min} ,如果大于该值则在以该边为直径的圆内进行向外延拓生成新的顶点,依次循环直到每条边长都小于该限定值为止。其中 L_{\min} 可通过下式设定:

$$L_{\min} = \xi \cdot R \quad (3)$$

式中 ξ 为人为指定系数(一般取 $0.2\sim0.8$); R 为“基块体”半径。

为了保证每次随机延拓后块体仍然保持其“凸性”,需利用空间几何算法对延拓后的块体进行凸性判定,若仍为凸多边形则继续进行下一步延拓,否则重新进行延拓。图1显示了三角形“基块体”经过三次随机延拓的生长过程。

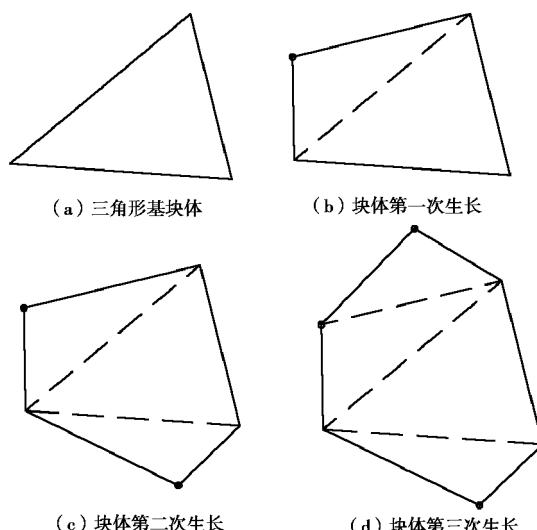


图 1 随机凸多边形块体生长过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of growth process of a stochastic convex polygon block

(2) 椭圆形块体

椭圆(或椭球)作为细观结构力学试验研究中常用的一种几何形态^[20],它不但可以较其它规则几何体能够很好地模拟自然界中存在的颗粒单体,而且椭圆(或椭球)颗粒组成的集合体也可以很好地表征粒状材料的细观结构特征^[1]。

众所周知,椭圆几何方程为高阶二次方程,在进行不同椭圆块体间相交性检测时难度较大而且速度也较慢。为了克服这一难点,许多研究者分别提出了不同检测算法^[20]。其中Wang^[1]提出的将椭圆形态简化为四段圆弧来处理,从而使得不同椭圆间的相交性检测,转化为构成椭圆的相应圆弧间的相交性检测,大大简化了处理的难度。

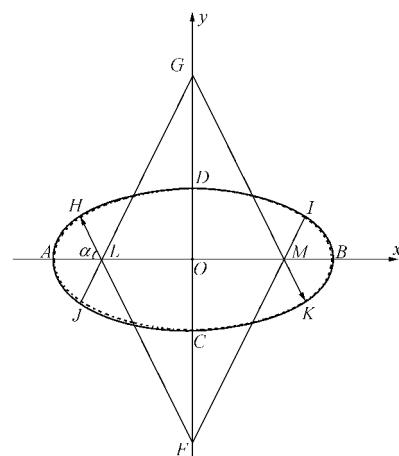


图 2 椭圆简化示意图(虚线为所代表的椭圆)

Fig. 2 Schematic diagram of simplified ellipse

Wang^[1]将椭圆简化为四段圆弧(图2,即:弧KBI, IDH, HAJ, JFK, 其圆心分别为M, F, L, G)。

根据上述简化,由图2所构成的椭圆间的接触关系可以分为3类,即将相邻椭圆间的相交性判定问题转化为构成相邻椭圆的四段圆弧间的相交性判定。

图3而圆弧的接触判定可以通过圆弧圆心间距离

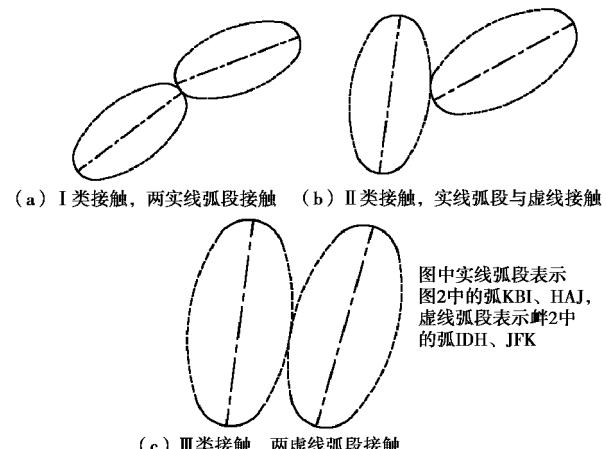


图 3 不同块体间的相交类型

Fig. 3 Intersection types between two elliptic blocks

与两弧段相应半径和间的关系来判断, 使程序很容易实现。

块体与边界的接触类型可分为如图 4 所示的两类, 即: I 类接触, 中间较大的两圆弧(图中虚线弧段)与边界的接触; II 类接触, 两端较小的两弧段(图中实线弧段)与边界的接触。

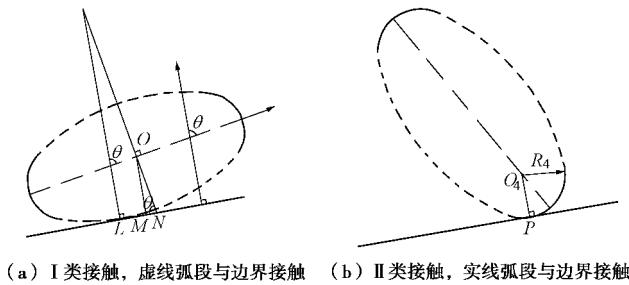


图 4 块体与边界的接触类型

Fig. 4 Intersection types between elliptic block and boundary

1.3 土石混合体随机细观结构生成系统

为生成土石混合体的随机细观结构模型, 单个块体生成后要安装一定的规则将其投放在相应空间范围内, 且需满足投放的块体与已投放的块体不发生相交。

根据上述块体生成算法及投放条件等, 本文在研究过程中开发了基于凸多边形及椭圆形块体的土石混合体二维随机细观结构生成系统—R-SRM^{2D}。图 5 为 R-SRM^{2D} 系统算法设计流程, 其具体实现方法如下:

(1) 生成投放域边界。

(2) 按土石混合体内部块体粒度分布特征, 计算最大粒级及各粒级的百分含量, 并按粒级由大到小进行排列。

(3) 按要投放的粒级大小随机生成“基块体”, 并进行随机延拓生成相应的凸多边形块体。

当生成块体为二维椭圆时, 则根据其长短轴比特征生成相应的椭圆块体。

(4) 随机生成块体的产状信息, 并对块体进行旋转。

(5) 在投放域内随机投放块体, 并进行块体侵入性判定, 如发生侵入继续投放直到超过某一限定次数 $N_{2\max}$, 若循环次数小于 $N_{2\max}$ 则块体投放成功, 进入步骤 (7)。

(6) 如对某一块体的随机投放次数超过某一限定值, 则执行步骤 (4)、(5), 直到超过某一限定次数 $N_{1\max}$, 若循环次数小于 $N_{1\max}$ 则块体投放成功, 进入步骤 (7)。

(7) 判断是否达到该粒级的投放量, 如未达到则继续该粒级投放, 否则进入下一粒级的投放, 执行步骤 (2) ~ (6), 直到所有粒级投放完毕。

(8) 输出各块体的几何信息, 并生成相应的 CAD 文件以便用于数值计算分析所用。

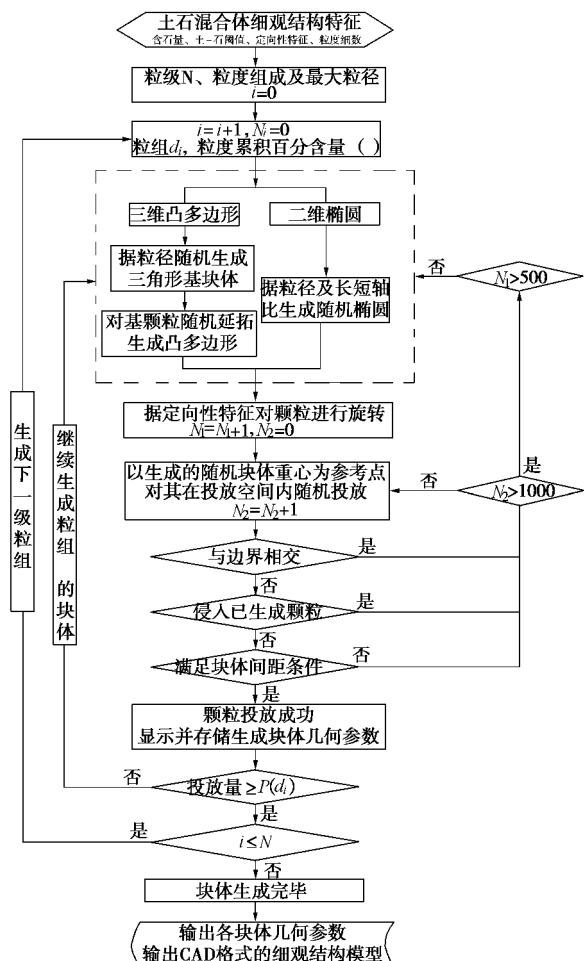


图 5 R-SRM^{2D} 设计流程

Fig. 5 Flow chart of R-SRM^{2D}

2 细观渗透数值试验方案

由于“土体”及“块石”渗透性能极端的差异, 土石混合体内部细观渗流场分布具有极端的不均匀性, 并且受“块石”的含量、形态及空间分布等细观结构特征的影响。渗流场这种细观尺度上的不均匀性, 将在一定程度上决定了土石混合体宏观渗透特征及渗透破坏机理。为探讨土石混合体内部细观结构特征与宏观渗透性特征的关系, 本文运用上述开发的 S-SRM^{2D} 系统, 对随机生成的土石混合体试样分别从含石量、粒度组成及块石空间分布 3 个方面进行一系列的数值试验研究。

表 1 渗流方程与热传导方程参数对比
Table 1 Relationship between permeability equation and heat conduction equation

方程类型	符 号 变 量				
	q	k	Δh	A	L
渗流方程	渗流流量	渗透系数	水头差	断面面积	渗流路径长度
热传导方程	热流量	热传导系数	温度差	断面面积	热传导路径长度

计算采用“土体”渗透系数为 5×10^{-3} m/s, “块石”渗透系数为 1×10^{-9} m/s。计算边界条件为：两侧向边界为不透水边界，试样底部施加 100 kPa 的水压力，试样顶部水压力为 0 kPa。

3 试验结果与分析

渗透系数是用来评价岩土体渗透性特征的一个重要参数，建立土石混合体的细观结构特征与其宏观渗透系数的关系将具有很好的应用价值。

3.1 土石混合体渗流基本模型

众所周知，热传导方程与达西渗流方程在数学表达上是一致的：

$$q = -kA \frac{\Delta h}{L} \quad (4)$$

式(4)所对应的渗流方程及热传导方程中各参数的意义如表 1 所示。因此，在对于岩土介质的渗流问题可以借助相应的热力学中的热传导问题来进行求解。

对于不均质复合材料的宏观热传导系数与细观结构的关系方面，众多学者分别展开了一系列相关研究工作^[21-25]，并建立了不同的结构模型，如：Maxwell-Eucken (ME) 模型^[1]，该模型将不均质材料简化为由许多小球体散布在连续的基质中，且相邻的球体距离足够远以致于在热传导过程中不发生相互作用；等效介质理论 (Effective medium theory, EMT) 模型^[1]，该模型假定材料内部各组分处于完全随机分布状态；此外，WANG J 等人^[24-25]在此基础上又分别发展了多种混合结构模型。根据上述对两相不均质复合材料宏观热传导系数的研究成果，表 2 显示了 4 种不同细观结构模型的土石混合体宏观渗透系数表达式，该表达式同样也适用于其它类似的非均质“两相”岩土介质或其它复合材料。

3.2 含石量与土石混合体宏观渗透系数关系

为研究土石混合体的含石量对宏观渗透性的影响，试验分别选取含石量为 20%，30%，40%，50% 及 60% 五种情况。图 6 显示了数值渗透试验获得的各试样的孔隙水压力场及细观渗流场分布特征。

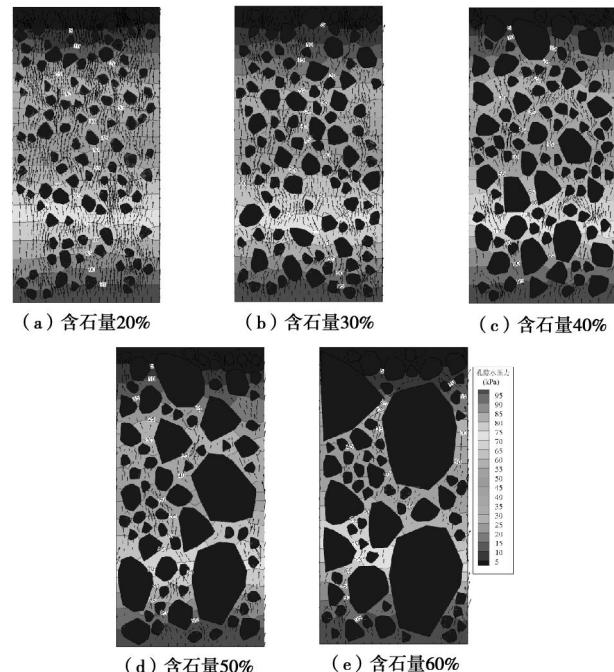


图 6 不同含石量时土石混合体细观渗流场特征

Fig. 6 Meso-seepage fields of S-RM with different rock block proportions

根据数值试验分析成果，以土石混合体的宏观渗透系数与相应土体的渗透系数比值 (k_{S-RM}/k_S) 为纵坐标，绘制其与土石混合体含石量的关系曲线。图 7 显示了通过各细观结构模型预测及数值试验得到的土石混合宏观渗透系数随含石量的变化曲线，可看出：

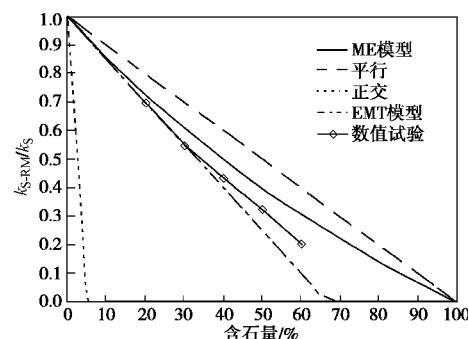


图 7 不同含石量的 S-RM 宏观渗透系数预测值与数值试验值对比

Fig. 7 Comparison between predictive and numerical values of macro-permeability coefficient of S-RM with different rock block proportions

表 2 4 种细观结构模式的土石混合体宏观渗透系数表达式

Table 2 Equations of macro-permeability coefficient of four kinds of meso-structural models of S-RM

模 式	细观结构图示	宏观渗透系数
层状 平行渗流方向		$k_{S-RM(P)} = C_S k_S + C_R k_R$
层状 垂直渗流方向		$k_{S-RM(S)} = \frac{k_S k_R}{C_S k_R + C_R k_S}$
Maxwell-Eucken (M-E) 模型		$k_{S-RM(ME)} = \frac{k_S C_S + k_R C_R \frac{3k_S}{2k_S + k_R}}{C_S + C_R \frac{3k_S}{2k_S + k_R}}$
有效介质理论模 型 (EMT 模型)		$C_S \frac{k_S - k_{S-RM(EMT)}}{k_S + 2k_{S-RM(EMT)}} + C_R \frac{k_R - k_{S-RM(EMT)}}{k_R + 2k_{S-RM(EMT)}} = 0$

注: (1) 图中黑色代表“土体”, 白色代表“块石”; (2) k , C 分别代表渗透系数及各组分的体积百分含量, 下表 S-RM、S、R 分别代表土石混合体、“土体”及“块石”。

(1) 随着含石量的增加, 土石混合体的渗透系数呈逐渐减小趋势。

(2) 表 2 所示 4 种模型得到的不同含石量的土石混合体的渗透系数以层状且平行于主渗流方向模型的预测值 ($k_{S-RM(P)}$) 最大, 其次是 Maxwell-Eucken 模型 ($k_{S-RM(ME)}$)、有效介质理论模型 ($k_{S-RM(EMT)}$) 及层状且垂直于主渗流方向模型 ($k_{S-RM(S)}$)。

(3) 通过数值试验得到的土石混合体宏观渗透系数位于 $k_{S-RM(EMT)}$ 及 $k_{S-RM(ME)}$ 之间, 且随着含石量的增加土石混合体的宏观渗透系数呈现降低趋势。

3.3 空间分布不同

在块石的空间分布对土石混合体细观渗流场影响方面, 本文采用变化块石长轴与主渗流方向的夹角的方式来实现, 其中块石几何形状为椭圆形。

本部分试验选取含石量为 40%, 块石长轴与渗流

方向夹角分别为 0° (平行), 30°, 60° 及 90° (正交) 4 种情况下的土石混合体试样进行了渗透数值试验分析, 图 8 显示了数值试验得到的块石长轴与渗流方向成不同夹角时的土石混合体细观渗流场结果。

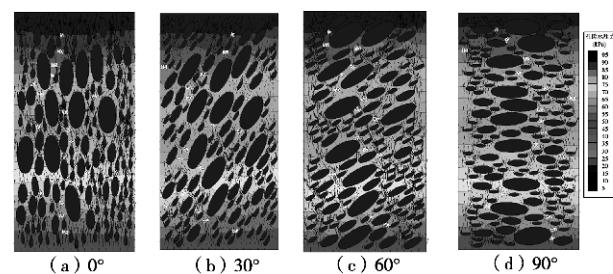


图 8 不同块石空间分布时土石混合体的细观渗流场特征

Fig. 8 Meso-seepage fields of S-RM with different rock block spacial distributions

图 9 显示了含石量为 40%、块石为椭圆形时土石

混合体试样宏观渗透系数随块石长轴与主渗流方向夹角变化曲线。可以看出：

(1) 随着块石长轴与主渗流方向夹角的增大，试样宏观渗透系数逐渐降低。

(2) 当块石长轴与主渗流方向近似平行时土石混合体宏观渗透系数最大，其值与 $k_{S-RM(P)}$ 预测值近似。

(3) 当块石长轴与主渗流方向近似正交时其宏观渗透系数最小，但其值大于有效介质理论模型预测值 ($k_{S-RM(EMT)}$)。

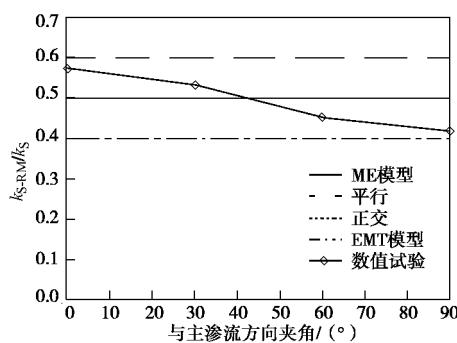


图 9 土石混合体宏观渗透系数随块石长轴与主渗流方向夹角变化关系

Fig. 9 Relationship between macro-permeability coefficient of S-RM and angle between longer axis of rock block and main seepage direction

3.4 粒度组成不同

粒度分维数是用于描述块体的粒度组成的一个常用定量指标，为此在研究粒度组成对土石混合体细观结构影响方面，本文采用含石量不变而通过改变其粒度分维数的方法来实现。

本部分试验选取含石量为 40%，块石粒度分维数分别为 2.74, 2.76, 2.8, 2.82 及 2.84 五种情况下的土石混合体试样进行了渗透试验分析，图 10 显示了数值试验得到的不同粒度分维数时土石混合体试样的细观渗流场分布。

图 11 显示了含石量为 40% 的土石混合体宏观渗透系数随块石粒度维数的变化关系。从中可看出：随着块石粒度维数的增大，土石混合体内部最大粒径的块石也明显增大，这种效应的最终结果使得其宏观渗透系数有所降低，但总体看来其值基本位于 Maxwell-Eucken 模型计算值 ($k_{S-RM(ME)}$) 与有效介质理论模型计算值 ($k_{S-RM(EMT)}$) 之间。

3.5 土石混合体宏观渗透系数上、下限值

在上述对不同细观结构的土石混合体的渗流数值试验研究的基础上，对比采用数值试验计算结果及各种简化模型预测带到的不同细观结构的土石混合体试

样的宏观渗透系数可以看出：除了当块石为椭圆且长轴与主渗流方向近似平行的情况外，其余试样的宏观渗透系数基本位于 Maxwell-Eucken 模型计算值 ($k_{S-RM(ME)}$) 与有效介质理论模型计算值 ($k_{S-RM(EMT)}$) 之间。由于块石为椭圆且长轴与主渗流方向近似平行的情况在自然界中很少存在，土石混合体的宏观渗透系数上限可以定义为

$$k_{up} = k_{S-RM(ME)} \quad , \quad (5)$$

相应的，其下限值为

$$k_{low} = k_{S-RM(EMT)} \quad . \quad (6)$$

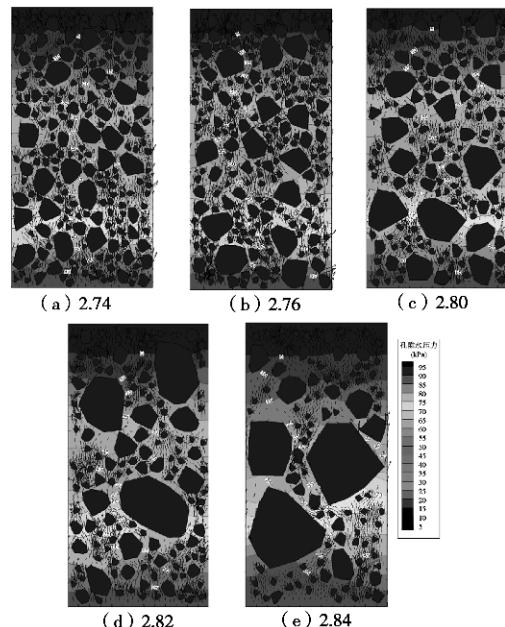


图 10 不同粒度组成是土石混合体的细观渗流场特征

Fig. 10 Meso-seepage fields of S-RM with different rock block size distributions

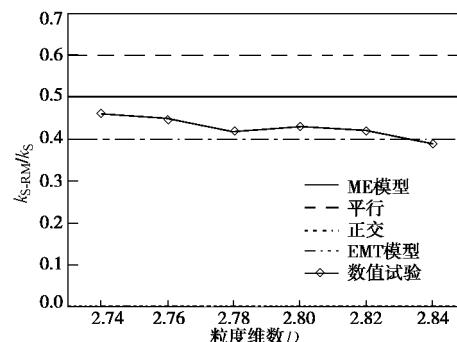


图 11 土石混合体宏观渗透系数随块石粒度维数变化关系

Fig. 11 Relationship between macro-permeability coefficient of S-RM and fraction of rock blocks

因此，可以根据实际土石混合体的内部含石量及相应土体的渗透系数来近似获取其宏观渗透系数特征，从而为实践工程提供了强大的理论及技术支持，也为相应地研究工作带来了便利。

3.6 土石混合体渗透破坏模式

渗透破坏模式是岩土体研究的一个重要内容, 对土石混合体而言更为重要。从图6、图8及图10所示的不同细观结构的土石混合体试样渗流数值试验得到的细观渗流场分布图上可知:

(1) 土石混合体的内部细观结构特征对其渗流场及孔隙水压力场分布具有明显的影响。

(2) 块石之间的狭窄“通道”处孔隙水压力等值线分布较为密集, 表明这些部位孔隙水压力下降较快, 且“通道”越窄等值线越密集、孔隙水压力下降越快。这种集中渗流现象在土石混合体内普遍存在, 从整体上来看潜蚀及最终发展为管道流破坏是土石混合体主要的渗透破坏模式。

4 结 论

由于土石混合体内部“土体”及“块石”渗透性能极端的差异性, 使得其内部渗流场分布呈现极端的不均匀性。为研究土石混合体的细观结构特征与其细观及宏观渗透性特征的关系, 本文综合利用统计学、几何学及现代计算机随机模拟技术等, 开发了一套土石混合体细观结构模型随机生成系统—R-SRM^{2D}。实践表明该系统在研究土石混合体的细观结构及其力学特性方面具有强大的优势, 从而为深入开展相关研究提供了强大的支持。

基于 R-SRM^{2D} 系统, 本文从含石量、粒度组成、块体空间分布等细观结构特征入手, 开展了一系列的土石混合渗流数值试验研究, 在理论上取得了一些有意义的研究成果:

(1) 土石混合体的宏观渗透系数随着含石量、块石长轴与主渗流方向夹角及粒度分维数的增加而呈现减小趋势。

(2) 土石混合体的宏观渗透系数介于 Maxwell-Eucken 模型计算值 ($k_{S-RM(ME)}$) 与有效介质理论模型计算值 ($k_{S-RM(EMT)}$) 之间, 其中前者为其上限值, 而后者为其下限值。

(3) 整体上来看, 流土及最终发展为管道流破坏是土石混合体主要的渗透破坏模式。

参考文献:

- [1] 冯玉勇. 第四纪工程地质学与西南山区河床深厚覆盖层研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1999. (FENG Yu-yong. Quaternary engineering geology and study on deep river bed overburden[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1999. (in Chinese))

- [2] 窦兴旺, 林义兴, 夏颂佑, 等. 深覆盖层上高堆石坝振动台试验与动力数值分析验证研究[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(6): 19–22. (DOU Xing-wang, LIN Yi-xing, XIA Song-you, et al. Shaking-table test and dynamic numerical analysis of high rockfill dams constructed on deep overburdens[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(6): 19-22. (in Chinese))
- [3] 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[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1134–1138. (ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-chen, et al. Orthogonal tests on permeability of soil-rock-mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1134 – 1138. (in Chinese))
- [4] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264–2271. (XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264 – 2271. (in Chinese))
- [5] 徐文杰, 胡瑞林, 岳仲崎. 基于数字图像处理的土石混合体细观结构研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(1): 51–53. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi. Meso-structure character of soil-rock mixtures based on digital image[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(1): 51 – 53. (in Chinese))
- [6] 徐文杰, 胡瑞林. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体粒度分形特征研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 496–501. (XU Wen-jie, HU Rui-lin. Particle size fractal characteristics of the soil -rock mixtures in the right bank slope of Jinsha River at Longpan, Tiger-Leaping Gorge area[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(4): 496 – 501. (in Chinese))
- [7] 冯学敏, 陈胜宏. 含复杂裂隙网络岩体渗流特性研究的复合单元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 918–924. (FENG Xue-min, CHEN Sheng-hong. Composite element method for seepage characteristics study on rock masses with complicated fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 918 – 924. (in Chinese))
- [8] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN C H. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers and Structure, 1999, 70: 533 – 544.
- [9] 张剑, 金南国, 金贤玉, 等. 混凝土多边形骨料分布

- 的数值模拟方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, **38**(5): 581 - 585. (ZHANG Jian, JIN Nan-guo, JIN Xian-yu, et al. Numerical simulation method for polygonal aggregate distribution in concrete[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, **38**(5): 581 - 585. (in Chinese))
- [10] 杜成斌, 孙立国. 任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J]. 水利学报, 2006, **37**(6): 662 - 667. (DU Cheng-bin, SUN Li-guo. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(6): 662 - 667. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 徐文杰, 胡瑞林, 王艳萍. 基于数字图像的非均质岩土材料细观结构 PFC2D 模型的自动生成[J]. 煤炭学报, 2007, **32**(4): 358 - 362. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, WANG Yan-ping. PFC2D model for mesostructure of inhomogeneous geomaterial based on digital image processing[J]. Journal of China Coal Society, 2007, **32**(4): 358 - 362. (in Chinese))
- [13] XU Wen-jie, YUE Zhong-qi, HU Rui-lin. Study on the meso-structure and meso-mechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(5): 749 - 762.
- [14] 徐文杰, 胡瑞林, 岳仲崎, 等. 土石混合体细观结构及力学特性数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(2): 300 - 311. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi, et al. Mesostructural character and numerical simulation of mechanical properties of soil-rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(2): 300 - 311. (in Chinese))
- [15] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(5): 375 - 397.
- [16] PHILIP J, Schneider, DAVID H Eberly. 计算机图形学几何工具算法详解[M]. 周长发, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005. (PHILIP J, Schneider, DAVID H Eberly. Geometric tools for computer graphics[M]. ZHOU Chang-fa, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese))
- [17] ROTHENBURG L, BATHURST R J. Numerical simulation of idealized granular assemblies with plane elliptical particles[J]. Computers and Geotechnics, 1991, **11**(4): 315 - 329.
- [18] TING J M. An robust algorithm for ellipse-based discrete element modelling of granular material[J]. Computers and Geotechnics, 1992, **13**(3): 175 - 186.
- [19] LIN X, NG T T. Contact detection algorithms for three-dimensional ellipsoids in discrete element modelling[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, **19**: 653 - 659.
- [20] WANG C Y, WANG C F, SHENG J. A packing generation scheme for the granular assemblies with 3D ellipsoidal particles[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, **23**: 815 - 828.
- [21] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. third ed. New York: Dover Publications Inc, 1954.
- [22] LANDAUER R. The electrical resistance of binary metallic mixtures [J]. J Appl Phys, 1952, **23**: 779 - 784.
- [23] WANG M, PAN N, WANG K, et al. Mesoscopic simulations of phase distribution effects on the effective thermal conductivity of microgranular porous media[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, **311**: 562 - 570.
- [24] WANG J, CARSON J K, NORTH M F, et al. A new approach to modeling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, **49**: 3075 - 3083.
- [25] WANG J, CARSON J K, NORTH M F, et al. A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, **51**: 2389 - 2397.