

土石混合体研究现状及发展趋势

徐文杰,张海洋

(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)

摘要:在总结国内外有关土石混合体方面的研究资料的基础上,分别从土石混合体的细观结构特征、抗剪强度特征、宏观弹性参数特征、渗透性特征、细观结构与强度关系及细观力学数值试验等6个方面,对土石混合体研究成果进行了综述。在此基础上,对目前有关土石混合体物理力学性质研究方面存在的不足进行了总结,分析了其未来的发展趋势,指出综合利用地质学、几何学、计算科学、图像处理技术、形态学等多学科交叉技术对土石混合体的细观结构进行三维重建和随机生成;开发适用于复杂岩土介质的数值结构模型和新型实验设备,从细观结构层面深入研究土石混合体宏观变形与破坏机制并建立其结构化本构模型是未来发展的方向。

关键词:土石混合体;岩土力学;抗剪强度;细观结构;综述

中图分类号:TU43;TU45

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)01-0080-09

Research status and development trend of soil-rock mixture//XU Wenjie, ZHANG Haiyang (State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

Abstract: Based on research data on soil-rock mixtures at home and abroad, the research status of soil-rock mixtures was analyzed in terms of meso-structure properties, shear strength properties, macro-elastic parameters, permeation properties, the relationship between meso-structure properties and shear strength properties, and the numerical tests of meso-mechanics of soil-rock mixtures. The deficiency of studies of physical and mechanical properties of soil-rock mixtures were summarized and its development trend was also analyzed on the basis of the research status of soil-rock mixtures. An interdisciplinary technology integrating geology, geometry, computational science, image processing technology, and morphology was used to three dimensions reconstruct and to randomly generate the meso-structure of the soil-rock mixture. The numerical structural model and new laboratory equipment applicable to the complex geotechnical media should be developed. The macroscopic deformation and failure mechanisms of soil-rock mixture should be studied in-depth at meso-structure level and the trend of development should move toward the establishment of a structural constitutive model.

Key words: soil-rock mixture (S-RM); rock and soil mechanics; shear strength; meso-structure; review

我国是一个地质条件极为复杂的国家,地质灾害在我国的发育不但数量多,而且种类全,崩塌、滑坡、泥石流等浅表生地质灾害异常突出,由此产生的由滑坡堆积、崩塌堆积、残积层、冰碛堆积、坡积层等组成的松散斜坡在我国广泛分布。与一般的土体不同,构成这类地质体的主要物质为土与块石的混合物,其中块石的粒径较大,从几厘米到数米不等,有的甚至超过数十米。由于构成这类岩土介质的“块石”及“土”物理力学性质相差悬殊,使得其细观及宏观力学性质、变形破坏特征较一般的土体或岩体(石)有很大的差异(图1),为区别于其他一般岩土体,

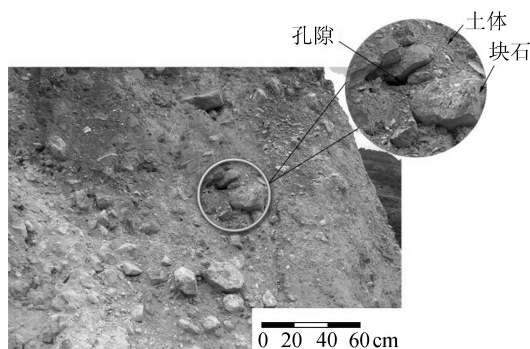


图1 土石混合体组成示意图

Medley 等^[1]将其命名为 Bimsoil (block in matrix

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51109117);清华大学自主科研计划(20111081125);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLGP2011K015,GZ2007-10)

作者简介:徐文杰(1978—),男,山东日照人,讲师,博士,主要从事地质灾害、地质工程学研究。E-mail:wenjiexu@tsinghua.edu.cn

soil),在国内油新华等^[2]将其称之为“土石混合体”(soil-rock mixtures, S-RM)。

土石混合体不但作为一种常见的地质体存在于自然界中,而且由于其具有独特的物理力学性质而被作为一种岩土工程材料广泛应用于多种工程建设中。构成土石混合体的“块石”和“土”在粒径及物质组分上存在明显的差别,且两者在力学性质上呈现“极强”(块石)和“极弱”(土体)两个极端的差异性。这种差异性使土石混合体在物理力学性质上呈现极端的不均质性和极端的非线性特征,其宏观物理力学性质及变形破坏特征不但取决于细粒相(“土”)的物理力学性质,而且在很大程度上还取决于“块石”的含量及其空间分布、形态、粒度组成等细观结构特征。因此,总体上来讲,土石混合体是指第四纪以来形成的,由具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙构成且具有一定含石量的极端不均匀(inhomogeneous)松散岩土介质系统^[3]。

土石混合体是随着各类大规模岩土工程建设及岩土力学的发展而逐渐提出来的,它是当代岩土力学纵深发展的必然。同时由于其物理力学性质的特殊性和复杂性,基于连续介质力学理论的传统岩土力学理论体系难以描述土石混合体的力学行为特性,传统的岩土试验测试方法也面临着挑战。

为了探讨这种复杂岩土介质的物理力学特性,以更好服务于各类工程建设,国内外众多学者逐渐开展了一系列相关研究工作。本文在总结国内外大量相关文献的基础上,对目前土石混合体研究的现状及存在的不足之处进行了分析,对未来的发展趋势进行了探讨。

1 土石混合体细观结构特征研究

国内外众多学者从不同的角度对土石混合体内部块石的分布进行了研究,近年来 Medley^[4-6]基于体视学方法提出了一种利用钻孔岩芯所揭露块石的弦长来估计其内部含石量的方法,并分析了该法获取的含石量值与实际值之间的误差,认为其误差取决于块石形状、含石量、块石排列方向及研究尺度大小等因素,当块石形状近似球形时通过二维断面图像获取的含石量与其实际含石量近似相等^[7]。此外,通过对 Francisca 地区分布的这种混合岩土体内部块石岩性、含石量、块石粒度分布等特征系统研究,Medley^[8]认为其内部块石粒度分布具有良好的自相似性,并提出了其内部土-石阈值等于 $0.05L_c$ (L_c 为特征工程尺度)。徐文杰等^[9-10]利用现场筛分及数字图像处理技术对崩坡积型土石混合体的粒度组成分析表明:其内部粒度组成具有明显的分段

分维特征,“细粒相”与“粗粒相”的粒度分界点(即阈值)为 $0.05 \sim 0.07L_c$;内部块石在形态、空间分布等细观结构特征上呈现明显的自相似性。Coli 等^[11]应用统计学方法通过页岩-石灰岩混杂土石混合体的断面露头图像描述内部块石的形态和空间分布,并建立了土石混合体强度参数与描述块石形态和空间尺寸分布的图像参数间的统计关系。

众所周知,堰塞体的工程地质特征与其内部块体的粒度组成有密切的关系,Casagli 等^[12]综合采用现场量测、现场量测(粗粒)+筛分(细粒)、图像处理3种方法对构成意大利亚平宁北部的42个堰塞体的土石混合体内部块体粒度组成进行了研究,表明由3种方法获得的块体粒度分布较为一致,并且粒度分布呈现明显的双峰特征。

粗、细粒相间的具有明显层状结构的土石混合体层,一直受到相关研究者的关注。Harris 等^[13]在对加拿大 Yukon 区及比利时的这种层状土石混合体研究的基础上,认为两地区的堆积层结构具有明显的相似性,这与外界气候变化引起的冻融作用有关,块石的大小与原岩岩性无关,而在很大程度上取决于原岩的破坏程度。

随着地球物理探测技术的不断发展,目前地球物理探测技术已被用于土石混合体边坡内部结构及基覆面探测方面,并取得了良好的成果。Sass 等^[14]利用雷达探测技术对奥地利阿尔卑斯山区分布的23个崩坡积成因的土石混合体边坡内部结构特征、块石分布、基覆面埋深等进行了分析,表明内部粒度组成具有明显的成层性,其特征取决于基岩面的高差、坡度、形态等参数。

2 土石混合体力学特征研究

2.1 土石混合体抗剪强度特征

土石混合体的内部含石量控制着其相应的变形破坏发展,从而影响着其宏观的力学性能,当含石量超过某一临界值时土石混合体的宏观强度将随着含石量的增加而增加,而“块石”与“土体”之间的接触带是土石混合体中最薄弱的部位。

陈希哲^[15]在多年理论及试验研究的基础上,认为粗粒土受剪切破坏面并非平面,其强度来源也非颗粒表面的内摩擦力,由于剪切面上的粗粒阻挡剪切、相互交错镶嵌产生咬合力,使得粗粒土强度大幅度提高。郭庆国^[16]在对多个地区粗粒土强度特征研究的基础上,指出粗粒土的抗剪强度是由细料本身的强度、粗料的强度共同构成的。指出粗料含量30%及70%(质量分数,下同)是粗粒土的两个特征点,而含泥量10%是反映细料性质对粗粒土工程特

征影响的特征点。

Miller 等^[17-18]通过对黏土和粗砂所构成的混合物的三轴压缩试验探讨了粗颗粒含量对其宏观黏聚力及内摩擦角的影响,表明当粗粒含量增加到 50% ~ 70% 时内摩擦角将迅速增加,而黏聚力则随着粗粒含量的增加而降低。Patwardhan 等^[19]通过对含砾石黏土的大型直剪试验研究了含石量对其宏观抗剪强度的影响,表明当含石量较低时 (<40%) 抗剪强度随着含石量的增加呈现缓慢增加的趋势,而当含石量超过 40% 时其抗剪强度将急剧增加。Shakoor 等^[20]通过对含砾石黏土的大型直剪试验表明随着含石量的增加其无侧限抗压强度将呈降低趋势。Savely^[21]通过大型现场试验研究了卵砾石含量对宏观抗剪强度的影响,认为宏观材料的黏聚力与卵砾石的含量无关,其值近似等于基质材料的黏聚力;而内摩擦角则随着含石量的增加而增加。田永铭等^[22]通过室内三轴试验研究了宏观各向同性混杂岩土体的宏细观力学行为,认为混杂岩土体的黏聚力随着块石体积含量的增加而降低,内摩擦角则呈上升趋势。

Lindquist 等^[23-24]采用水泥土等作为填充材料、块石作为骨料按照一定的含石量及定向性制作试样进行三轴剪切试验研究,以探讨这类岩土介质内部细观结构上的各向异性对其宏观强度及变形特征的影响。Fragaszy 等^[25-26]通过理论及试验研究认为超径颗粒增加了碎石土的孔隙比,进而影响其相对密度,且碎石土的密度是土体及超径颗粒相对密度的函数;通过研究超径颗粒的大小、形状、含石量及粒度分布等对碎石与砂的混合物抗剪强度特征的影响,发现超径颗粒的含量是影响其抗剪强度特征的主要因素。Kim 等^[27]在对 1996—1997 年发生在加利福尼亚 Francisca 地区的土石混合体滑坡运动状态野外调查分析的基础上,基于反分析提出了一种用于评价这类复杂岩土体力学强度参数的反演方法。Vallejo 等^[28-29]研究分析了土石混合体内部含石量对抗剪强度及孔隙比的影响。Bagherzadeh-Khalkhali 等^[30]采用数值和室内直剪试验研究了不同尺度和级配曲线处理方法下的粗粒土力学特征,认为颗粒尺寸对粗粒土抗剪强度有重要影响,随着颗粒尺寸的增大内摩擦角和试样的剪胀现象增加,试样尺度增加使得表观黏聚力减小。Dondi 等^[31]采用三轴试验研究沥青混合物中骨料形状、棱角性和尺寸分布对填充物特征的影响,认为颗粒棱角性增加有助于颗粒间更好地咬合。

在非饱和状态下由于基质吸力的存在使得土石混合体内部抗剪强度大于饱和状态相应的抗剪强

度。Springman 等^[32]通过现场人工降雨试验、现场直剪试验、室内大型三轴试验对 Gruben(瑞典)某冰水堆积体进行了研究,探讨了这类堆积体在降雨条件下的失稳机理。时卫民等^[33-36]采用直剪试验对碎石土的抗剪强度与含石量、含水量等的关系进行了研究。张文举等^[37]通过对泥石流砾石土的抗液化强度的动三轴试验研究,表明饱和度对其动强度有显著的影响,且随着含水量的增加抗液化强度将明显降低。李维树等^[38]基于库区水位涨落引起土石混合体含水率变化的特点,建立了不同含石量下抗剪强度参数随含水率变化的弱化公式。程展林等^[39]认为颗粒间的位置排列和粒间作用对粗粒土的力学性质有重要影响,并且认为许多问题都涉及到粗粒土的组构问题。油新华等^[40]采用野外水平推剪试验对三峡库区分布的土石混合体进行了试验研究。此外,李树武等^[41]采用土石混合体边坡的休止角来近似作为土石混合体内摩擦角。

徐文杰等^[42-47]提出了水下土石混合体野外水平推剪试验及大尺度直剪试验的方法,在大量的试验基础上认为:浸水后由于水流作用将内部细粒组分带走使得其黏聚力急剧降低而内摩擦角略呈增大趋势;土石混合体的抗剪强度在很大程度上取决于其内部含石量特征,随着含石量的增加其内摩擦角呈明显增大趋势,并在含石量 30% ~ 70% 时呈明显的线性增大趋势,而黏聚力随着含石量的增加呈现降低趋势;当含石量一定时其黏聚力主要取决于内部细粒组分;循环荷载作用下由于剪切带附近的块石旋转、定向排列甚至发生破碎,使得其抗剪强度大幅度降低。

2.2 土石混合体本构关系

岩土体的本构模型研究一直是岩土力学研究中比较热门的课题,国内外研究者已提出了多种数学本构模型,但是针对土石混合体的本构模型研究较少,大部分应用于土石混合体的本构模型是在黏土或砂土本构模型基础之上改进的。目前粗粒土计算中应用较为广泛的本构模型有邓肯-张模型(包括 $E-\nu$ 模型和 $E-B$ 模型)、 $K-G$ 模型、椭圆-抛物双屈服面模型等非线性弹性模型和弹塑性模型。由于邓肯-张模型具有参数少、物理意义明确、容易推求并能够反映其非线性特征等优点而在土石坝工程计算中应用最为广泛,但因邓肯-张模型存在不能反映土的剪胀性、软化特性、各向异性及加卸荷判断不明确等不足^[48],在实际计算中常存在较大的误差,国内外研究者对此从不同的方面进行了相应的改进^[49-50]。

2.3 土石混合体宏观弹性参数特征

如何通过材料的细观结构特征来获取其相应的宏观力学行为是材料力学研究者一直以来所探索的

问题。1910 年 Voigt 将复合材料视为一组并联弹簧,提出了复合材料宏观弹性模量的上限表达式;相反地,1929 年 Reuss 将复合材料视为一组串联弹簧,提出了复合材料宏观弹性模量的下限表达式。

Hashin 等^[51]等利用变分原理推导了用于宏观各向同性颗粒加强复合材料的宏观弹性参数,即 H-S 模型。Hill^[52]在假定复合材料内部任一块体的受力状况可以代表材料内部所有块体的受力状况而不考虑块体间相互作用的前提下,推导了多相复合材料的宏观弹性模量参数,即 Self-consistent scheme 法。

由于复合材料的宏观力学特征可以表示为内部块体含量的函数,McLaughlin^[53]根据各向异性材料的相关理论提出了两种颗粒加强复合材料的宏观弹性模量的差分方程。田永铭等^[22]通过对红土-砾石及泥岩-碎石混杂岩土体的室内三轴试验结果分析表明:单轴压缩试验获取的宏观弹性模量值介于 H-S 模式下限值与 Reuss 串联模式之间;通过三轴试验获取的宏观弹性模量则一般介于 McLaughlin 差分模式与 H-S 模式下限值之间;泊松比以 Reuss 串联模式所求值最为符合。Hashin^[54]根据弹性体的最小势能及最小余能理论提出内部含有刚性颗粒的复合材料弹性参数计算公式。为了研究含块石黏土 (clay-rock mixtures) 的弹性参数,Vallejo 等^[55]将 Hashin 的理论成果应用于不饱和含块石黏土的弹性参数获取,并通过大量的室内试验研究及统计分析表明采用 Hashin 法可以较为准确地获取含块石黏土的弹性参数。

此外,国内外有些学者还探讨了颗粒形态特征、密度、试验加载方式等对土石混合体宏观弹性模量的影响。Kokusho 等^[56]认为菱角状人工碎石料在固结压力下,颗粒间接触点容易破碎,形成较强的颗粒构造,其初始剪切模量大于河卵石料。贾革续^[57]认为相同密度下随着试验用料粒径变小初始剪切模量有下降的趋势。

3 土石混合体渗透特征研究

渗透系数是岩土工程渗流分析中非常重要的计算参数,也是用来评价岩土介质性质的一个重要参数。含石量及内部填充“土体”性质是决定土石混合体渗透特征的主要因素。此外,由于土石混合体的高度不均质性造成其抗渗透能力较差,在水流作用下极易发生管涌及流土等渗透破坏。由于对这类介质渗透稳定性特征认识上的不足,常给工程造成极大的影响,如美国 Teton 坝的溃决、Fontenelle 坝的渗透破坏等。土石混合体的渗透稳定性问题是反映土石混合体渗透特征的另一个重要指标,通常采用水力破坏坡降对土体渗透稳定性做出定量的分析。

3.1 土石混合体的渗透系数

对于粗粒土渗透系数特征的研究,西方国家处于领先地位,我国起步相对较晚^[58]。在对多个工程实例分析的基础上,郭庆国^[16]指出当粗粒含量 P_s (粒径大于 5 mm 颗粒的质量分数) < 30% 时,粗颗粒在粗粒土中只起填充作用,粗粒土渗透系数主要取决于细粒物质,渗透系数随着含石量的增加将有所减小,渗流规律符合达西定律;当 $P_s > 75\%$ 时粗粒在粗粒土中起到骨架作用,由于细粒物质填充不满骨架间的孔隙,使得渗透系数突然增加,此时粗粒土的渗透系数主要取决于粗料性质,渗流规律将不再符合达西定律。

Bolton^[59]通过对黏土与砂的混合物 (clay/sand mixture) 渗透性特征的研究表明:该类岩土体的渗透性不但与有效应力有关,而且与土体的固结状态及有效应力是否随着围压 (或孔隙流体压力) 的增大而增大有关。Borgesson 等^[60]研究了用于地下核废料储藏室回填的斑脱土与碎石混合物,认为由于斑脱土与碎石的混合不均匀造成混合填料的膨胀力及渗透性较理论值高。

周中等^[61]采用室内正交试验研究表明,砾石含量越多渗透系数越大,孔隙比越大渗透系数越大,颗粒磨圆度越大渗透系数越小,并给出了土石混合体渗透系数与三者的关系表达式。许建聪等^[62]采用数理统计的方法对碎石土的渗透性进行了分析研究,表明碎块石的含量和以粉粒、黏粒为主的细粒土的含量对碎石土渗透系数影响最为显著,碎石土的渗透系数随土中碎块砾石含量的增加而呈自然指数规律增大,随土中小于 0.1 mm 粒径的细粒土含量的增加而呈自然指数规律降低。魏进兵等^[63]采用双套环法对三峡库区泄滩滑坡区分布的土石混合体饱和渗透系数进行了原位试验,并采用相关经验公式分析了土层孔隙率、颗粒级配等因素对试验参数的影响。

徐文杰^[3]通过对不同含石量、不同粒度组成及不同块石形态的土石混合体渗透性数值试验分析表明,土石混合体的宏观渗透系数位于 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,即

$$k_{up} = k_{S-RM(ME)} = \frac{k_s C_s + k_r C_r \frac{3k_s}{2k_s + k_r}}{C_s + C_r \frac{3k_s}{2k_s + k_r}} \quad (1)$$

$$k_{low} = k_{S-RM(EMT)} \quad (2)$$

式中: k_{up} 、 k_{low} 分别为土石混合体宏观渗透系数上、下限值; k 、 C 分别代表各组分的渗透系数及体积分数,下标 S-RM、S、R 分别代表土石混合体、“土体”及“块石”。 $k_{S-RM(EMT)}$ 通过隐式方程计算求得:

$$C_s \frac{k_s - k_{s-RM(EMT)}}{k_s + 2k_{s-RM(EMT)}} + C_R \frac{k_R - k_{s-RM(EMT)}}{k_R + 2k_{s-RM(EMT)}} = 0 \quad (3)$$

3.2 土石混合体的渗透稳定性

为了研究这类岩土介质的渗透稳定性特征,国内外许多学者在含石量对水力破坏坡降的影响方面进行了大量的试验研究^[64]。郭庆国^[16]认为水力破坏坡降与含石量有着密切的关系,当含石量大于70%时粗粒土的水力破坏坡降显著减小,其渗流破坏形式主要为管涌。朱崇辉等^[65]认为粗粒土的渗透破坏坡降与不同范围内的不均匀系数、曲率系数存在不同形式的相关性,并且对于含有一定细粒组分且级配良好的粗粒土渗透破坏坡降比级配不良的粗粒土渗透破坏坡降普遍要高。

4 土石混合体细观力学数值试验研究

随着现代计算技术、数值分析技术及岩土力学的不断发展,基于数值分析技术的岩土介质细观力学试验作为一门新兴的试验方法深受国内外研究者的青睐,为研究这类复杂介质的细观力学行为及变形破坏机理提供了有力的手段^[66-69]。

Kaneko 等^[70]将离散元及有限元进行耦合建立了用于粒状岩土材料的宏观及细观两种尺度的数值分析方法,并对其相应的整体-局部剪切带发育特征进行了相应的研究。Kristensson 等^[71]基于计算机并行技术对砂土内部含有坚硬块石(stiff gravel)及软黏土(soft clay)两种情况时内部剪切带的发育特征进行了细观力学数值试验研究,认为块石(或黏土颗粒)形状对其宏观力学响应影响不大,但对这两类混合岩土介质(sand-gravel, sand-clay)内部应变局部化发育特征有很大的差异性影响。

油新华^[2]、廖秋林^[72]分别采用规则几何体(圆形、正多边形)对土石混合体的随机结构进行了二维随机生成,并对其力学性质及变形破坏机理进行了相关研究。李世海等^[73]基于离散元数值分析方法对随机生成的土石混合体三维结构模型(颗粒为球形)进行了单向加载试验模拟研究,认为土石混

合体的混合比和岩石块度大小是影响其变形和破坏特性的两个重要因素。

徐文杰等^[3,74-76]采用数字图像处理及随机生成技术分别生成了土石混合体随机细观(图2)及真实结构模型(图3),并进行了一系列的数值试验研究,结果表明:土石混合体内部剪切带的形成很大程度上取决于其内部块石空间分布特征,并在细观层次上呈3种损伤模式(塑性区单向绕石、塑性区分岔并双向绕石及塑性区穿石);土石混合体的宏观弹性模量主要取决于其含石量,并随含石量的增加呈递增趋势;土-石界面特征对土石混合体的宏观力学性能有明显的影响,尤其是在低围压条件下其影响更为显著。

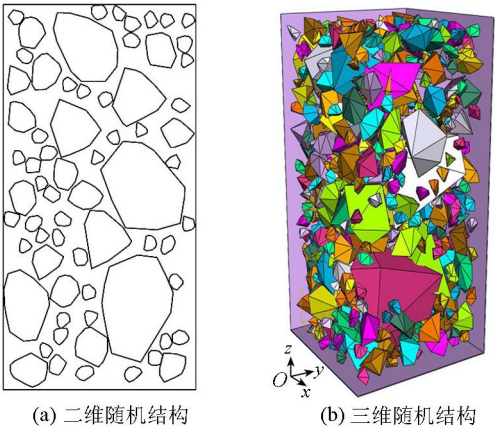


图2 土石混合体随机结构模型(含石量为50%)

Mollon 等^[77]基于傅里叶描述因子和Voronoi棋盘划分法生成了任意形状的颗粒材料二维密实离散模型用于细观力学数值试验研究。Lee 等^[78]采用多面体单元模拟真实颗粒,进行了不同围压和不同初始孔隙率下的三轴压缩数值试验,所得偏差应力曲线和体应变曲线证明了多面体单元应用于数值模拟实验的可行性。

5 土石混合体研究发展趋势

土石混合体是随着当今大规模基础工程建设及岩土力学的纵深发展,而逐渐从传统岩土介质中分离出来的一类复杂岩土介质系统。构成土石混合体

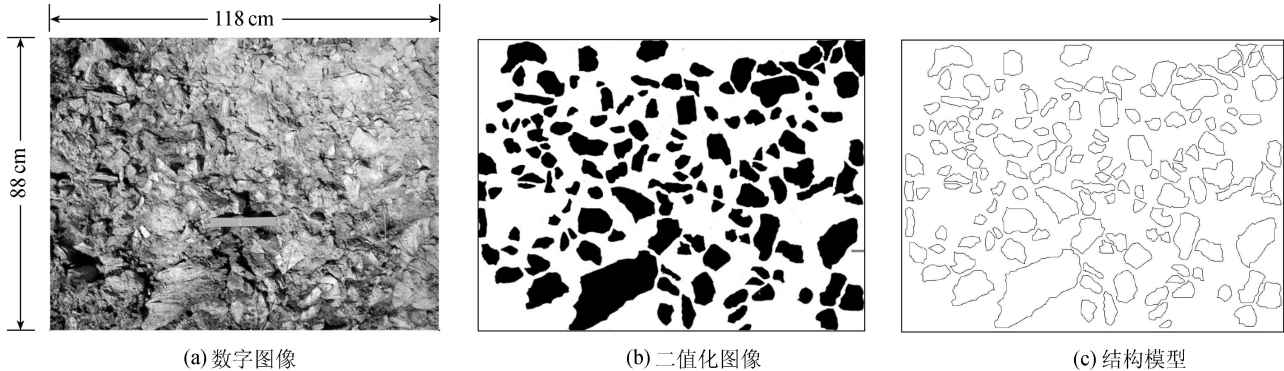


图3 基于数字图像的土石混合体真实结构模型

的细粒相(“土体”)及粗粒相(“块石”)在物理力学性质上具有极端的差异性,从而使得其物理力学性质在细观尺度上具有明显的各向异性,进而影响着其宏观的性质及变形破坏机理。

纵观当今国内外众多学者对土石混合体的研究,虽然取得了一定的成果,但是由于土石混合物是一种复杂的岩土介质,影响其物理力学性质的因素很多,且由于目前技术及测试手段的限制,对这类岩土介质的物理力学性质的研究工作还需不断深化。

a. 由于土石混合物内部含有粒径较大且强度较高的块石,现有试验手段难于满足精确获取物理力学参数的要求,以致常常造成相应工程建设资金浪费,甚至由于参数选择不合理造成工程建设的失败。开发这类复杂岩土介质物理力学参数精确获取的新技术、新方法(室内、野外)及研制相应设备以研究其在复杂环境下(高压、动力及饱和、非饱和等)的物理力学性质,并建立其结构化本构模型是目前亟待解决的问题。

b. 目前随着各类无损探测技术及图像获取技术的不断发展,尤其是CT断层扫描技术的发展并在医学三维重建中得到了广泛的应用,这为土石混合物三维结构特征的研究提供了可靠的技术支持。基于土石混合物CT断层扫描技术的三维结构特征研究、三维几何重建技术、软件系统的研发及相应的细观力学试验研究,将具有广泛的发展前景。

c. 目前对土石混合物物理力学性质的研究大都没有考虑到“块石”的破碎情况,而在实际工程中由于“块石”的强度较低或者外部荷载较高,导致土石混合物在变形破坏过程中不但伴随着块石的转动、咬合等运动,而且还伴有块石的破碎现象,从而导致其力学性质更为复杂,开展相关研究也是土石混合体力学研究的重要方向。

d. 由于土石混合物内部块石形态非常复杂,随着各门学科及各项技术的不断融合发展,充分利用地质学、数学、几何学、计算科学、图像处理技术、体视学、形态学等多学科的交叉技术来实现对土石混合物近似真实结构的随机生成,对于土石混合物细观结构力学的深入研究将具有重要意义。

e. 随着计算力学理论、数值计算技术的发展,基于土石混合物结构模型体系的细观结构力学研究将成为必然,也是深入认识其力学性质及变形破坏机制的重要方法。探索适合土石混合物细观结构乃至跨尺度结构力学分析的有效数值计算方法(如有限元法、离散元法等),同时充分利用现行高速计算分析技术(并行计算、GPU等),开展大规模、多尺度的精细结构力学计算分析具有广阔的发展前景。

f. 土石混合物内部尺度较大的块石在某种程

度上控制着其宏观的变形和破坏,发展高精度探测技术对由土石混合物构成地质体(如边坡、地基等)的细观结构(尤其是巨型块石的形态及空间位置)进行定量分析,对其稳定分析及加固处理技术具有重要的意义。

6 结 语

土石混合物是自然界中广泛存在的也是工程中常见的一类复杂岩土材料,由于这类特殊的岩土介质在空间结构上表现出高度的不均匀性,给土石混合物物理力学性质的研究带来了很大的困难。随着各类大规模工程建设的不断发展,越来越多的工程问题与土石混合体的工程性质密切相关,这将不断促使岩土工程及地质工程研究者开展各种相关研究工作。土石混合物工程地质力学性质的研究,已成为当今工程建设亟待解决的问题,也是当今岩土力学及工程地质学发展的必然。

本文在对近十几年来国内外在土石混合物这类岩土介质方面的研究成果分析的基础上,对土石混合体的细观结构特征、抗剪强度特征、宏观弹性参数特征、渗透性特征、细观结构与强度关系及细观力学数值试验等6个方面的研究成果进行了系统的分析,并对其中存在的问题进行了探讨。最后针对目前对土石混合体的研究现状,并结合现有的技术手段对土石混合物今后几年的研究趋势进行了论述。

参考文献:

- [1] MEDLEY E, GOODMAN R E. Estimationg the block volumetric proportion of mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [C]//Proceeding of the 1st North American Rock Mechanics Conference (NARMS). Rotterdam: Balkema, 1994: 851-858.
- [2] 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.
- [3] 徐文杰. 土石混合物细观结构力学及其边坡稳定性研究 [D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2008.
- [4] MEDLEY E. Using stereological methods to estimate the volumetric proportions of blocks in mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [C]//Proceedings of the 7th Congress of the International Association of Engineering Geology. Rotterdam: Balkema, 1994: 1031-1040.
- [5] MEDLEY E. Uncertainty in estimates of block volumetric proportions in mélange bimrocks [C]//Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment, IAEG. Rotterdam: Balkema, 1997: 267-272.
- [6] MEDLEY E. Estimating block size distributions of mélanges and similar block-in-matrix rocks (Bimrocks) [C]//Proceedings 5th North America Rock Mehcanics

- Symposium (NARMS). Toronto: University of Toronto Press,2002:509-606.
- [7] SONMEZ H, MEDLEY E, NEFESLIOGLU H. Relationships between volumetric block proportions and overall UCS of volcanic bimrock [J]. *Felsbau, Rock and Soil Engineering: Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling*,2004,22(5) , 27-34.
- [8] MEDLEY E. The engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [D]. Berkeley:University of California at Berkeley,1994.
- [9] 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 Wenjie, HU Ruilin. 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))
- [10] 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:自然科学版*,2008,27(1) :51-53. (XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi. 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))
- [11] COLI N, BERRY P, BOLIDINI D, et al. The contribution of geostatistics to the characterization of some bimrock properties [J]. *Engineering Geology*,2012,137/138:53-63.
- [12] CASAGLI N, ERMINI L, ROSATI G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: sampling and processing methods [J]. *Engineering Geology*,2003,69:83-97.
- [13] HARRIS S A, PRICK A. Conditions of formation of stratified screes, slims river valley, Yuken territory: a possible analogue with some deposits from Belgium [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*,2000,25:463-481.
- [14] SASS O, KRAUTBLATTER M. Debris flow-dominated and rockfall-dominated talus slopes: genetic models derived from GPR measurements [J]. *Geomorphology*,2007,86:176-192.
- [15] 陈希哲. 粗粒土的强度与咬合力的试验研究 [J]. *工程力学*,1994,11(4) :56-62. (CHEN Xizhe. Research on the strength of the coarse grained soil and the interlocking force [J]. *Engineering Mechanics*,1994,11(4) :56-62. (in Chinese))
- [16] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用 [M]. 郑州:黄河水利水电出版社,1998.
- [17] MILLER E A, SOWERS G F. The strength characteristics of soil-aggregate mixtures [J]. *Highway Research Board Bulletin*,1957,183:16-23.
- [18] KAWAKAMI H, ABE H. Shear characteristics of saturated gravelly clays [J]. *Transactions of the Japanese Society of Civil Engineers*,1970,2(2) :295-298.
- [19] PATWARDHAN A S, RAO J S, GAIDHANE R B. Interlocking effects and shearing resistance of boulders and large size particles in a matrix of fines on the basis of large scale direct shear tests [C] // *Proc 2nd Southeast Asian Conference on Soil Mechanics*. Singapore: Indian Institute of Technology Kanpur,1970:265-273.
- [20] SHAKOOR A, COOK B D. The effect of stone content, size, and shape on the engineering properties of a compacted silty clay [J]. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*,1990,27:245-253.
- [21] SAVELY J P. Determination of shear strength of conglomerates using a caterpillar D9 ripper and comparison with alternative methods [J]. *International Journal of Mining and Geological Engineering*,1990,8(3) :203-225.
- [22] 田永铭,郭明传,古智君. 宏观各向同性混杂岩力学特性及形状研究 [J]. *岩土工程学报*,2006,28(3) :364-371. (TIAN Yongming, GUO Mingchuan, GU Zhijun. Mechanical properties and behaviors of macroscopically isotropic mélange [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2006,28(3) :364-371. (in Chinese))
- [23] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of mélange [D]. Berkeley: University of California at Berkeley,1994.
- [24] SONMEZ H, TUNCAY E, GOKCEOGLU C. Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara agglomerate [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2004,41:717-729.
- [25] FRAGASZY R J, SU W, SIDDIQI F H. Effects of oversize particles on the density of clean granular soils [J]. *Geotechnical Testing Journal*,1990,13(2) :106-114.
- [26] FRAGASZY R J, SU W, SIDDIQI F H, et al. Modeling strength of sandy gravel [J]. *ASCE J Geotech Eng*,1991,118:920-935.
- [27] KIM C, SNELL C, MEDLEY E. Shear strength of Franciscan complex mélange as calculated from back-analysis of a landslide [C] // *5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. New York: [s. n.],2004:1-8.
- [28] VALLEJO L E, MAWBY R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures [J]. *Engineering Geology*,2000,58:125-136.
- [29] VALLEJO L E. Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*,2001,37:1097-1104.
- [30] BAGHERZADEH-KHALKHALI A, MIRGHASEMI A A. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils [J]. *Particuology*,2009,7(1) :83-91.
- [31] DONDI G, SIMONE A, VIGNALI G, et al. Numerical and experimental study of granular mixes for asphalts [J]. *Power Technology*,2012,232-138:31-40.
- [32] SPRINGMAN S M, JOMM C, TEYSSEIRE R. Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history [J]. *Geotechnique*,2003,53(1) :3-10.
- [33] 时卫民,郑宏录,刘文平,等. 三峡库区碎石土抗剪强度指标的试验研究 [J]. *重庆建筑*,2005,17(2) :30-35.

- (SHI Weimin, ZHENG Honglu, LIU Wenping, et al. Experiment research on shear strength index of gravel-soil in Three Gorges Reservoir Area[J]. Chongqing Architecture, 2005, 17(2): 30-35. (in Chinese))
- [34] 赵川, 石晋旭, 唐红梅. 三峡库区土石比对土体强度参数影响规律的试验研究[J]. 公路, 2006(11): 32-35. (ZHAO Chuan, SHI Jinxu, TANG Hongmei. Test and research on influence law of soil-rock ratio in Three Gorges Reservoir Region on soil strength parameters[J]. Highway, 2006(11): 32-35. (in Chinese))
- [35] 候红林, 赵德安, 蔡小林, 等. 黄河二级阶地洪积碎石土剪胀特性分析[J]. 西部探矿工程, 2006, 119(3): 22-24. (HOU Honglin, ZHAO Dean, CAI Xiaolin, et al. Analysis on the dilatancy of the gravel soil on the secondary alluvial terrace of Yellow River[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 119(3): 22-24. (in Chinese))
- [36] 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 Yun. Experimental study on intensity character of rock-soil aggregate mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1269-1274. (in Chinese))
- [37] 张文举, 何昌荣. 宽级配泥石流砾石土的动强度试验研究[J]. 四川水力发电, 2003, 22(1): 66-69. (ZHANG Wenju, HE Changrong. Tests study on the dynamic strength of the gravel soils formed by debris with wide grading[J]. Sichuan Water Power, 2003, 22(1): 66-69. (in Chinese))
- [38] 李维树, 丁秀丽, 郭爱清, 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 Weishu, DING Xiuli, WU Aiqing, 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))
- [39] 程展林, 丁红顺, 吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1151-1158. (CHENG Zhanlin, DING Hongshun, WU Liangping. Experimental study on mechanical behaviour of granular material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1151-1158. (in Chinese))
- [40] 油新华, 汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1537-1540. (YOU Xinhua, TANG Jinsong. Research on horizontal push-shear in-situ test of soil and rock-mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1537-1540. (in Chinese))
- [41] 李树武, 聂德新, 刘惠军. 大型碎屑堆积体工程特性及稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 4126-4131. (LI Shuwu, NIE Dexin, LIU Huijun. Engineering property of a large-scale clastic accumulation body and its stability evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2): 4126-4131. (in Chinese))
- [42] XU Wenjie, HU Ruilin, TAN Rujiao. Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in the Hutiao Gorge Area, China[J]. Geotechnique, 2007, 57(3): 255-264.
- [43] 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 Wenjie, HU Ruilin, TAN Rujiao, 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))
- [44] 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, 14(4): 496-501. (XU Wenjie, HU Ruilin, ZENG Ruyi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 14(4): 496-501. (in Chinese))
- [45] 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. (XU Wenjie, HU Ruilin. Field horizontal push shear test for mechanical property of soil-rock mixtures under cyclic loading[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 63-69. (in Chinese))
- [46] 徐文杰, 胡瑞林, 岳仲崎, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体含石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 Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, 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))
- [47] XU Wenjie, XU Qiang, HU Ruilin. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1235-1247.
- [48] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [49] COROTIS R B, HASSAN M, KRIZEK R J. Nonlinear stress-strain formulation for soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, 100(9): 993-1008.
- [50] 张嘎, 张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1587-1591. (in Chinese))
- [51] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the theory of elastic behavior of multiphase materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics Solids, 1963, 11: 127-140.
- [52] HILL R. A self-consistent mechanics of composite materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics Solids, 1965, 13: 213-222.
- [53] MCLAUGHLIN R. A study of the differential scheme for composite materials[J]. International Journal of Engineering Science, 1977, 15: 237-244.

- [54] HASHIN Z. The moduli of an elastic solid reinforced by rigid particles [J]. Bulletin Research Council of Israel, 1955(5): 46-59.
- [55] VALLEJO L E, LOBO-GUERRERO S. The elastic moduli of clays with dispersed oversized particles [J]. Engineering Geology, 2005, 78: 163-171.
- [56] KOKUSHO T, ESASHI Y, SAKURAI A. Dynamic properties of deformation and damping of coarse soils for wide strain range [R]. Chiyoda-ku: Central Research Institute of Electric Power Industry, Civil Engineering Laboratory, 1982.
- [57] 贾革续. 粗粒土工程特性的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [58] 刘杰. 土的渗流稳定与渗流控制 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.
- [59] BOLTON A J. Some measurements of permeability and effective stress on a heterogeneous soil mixture: implication for recovery of inelastic strains [J]. Engineering Geology, 2000, 57: 95-104.
- [60] BORGESSON L, JOHANNESSON L E, GUNNARSSON D. Influence of soil structure heterogeneities on the behavior of backfill materials based on mixtures of bentonite and crushed rock [J]. Applied Clay Science, 2003, 23: 121-131.
- [61] 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 Helin, LIU Baochen, et al. Orthogonal tests on permeability of soil-rock-mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1134-1138. (in Chinese))
- [62] 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 Jiancong, SHANG Yuequan. 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))
- [63] 魏进兵, 邓建辉, 谭国焕, 等. 泄滩滑坡碎块石土饱和与非饱和水力学参数的现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 327-330. (WEI Jinbing, DENG Jianhui, TAN Guohuan, et al. Field tests of saturated and unsaturated hydraulic parameters of gravelly soil in Xietan landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 327-330. (in Chinese))
- [64] 计灵民. 粗粒土渗透变形试验的探讨 [J]. 地下水, 2008, 27(4): 254-255. (JI Lingmin. Discuss on the seepage deformation test of the gravel soil [J]. Groundwater, 2008, 27(4): 254-255. (in Chinese))
- [65] 朱崇辉, 王增洪, 刘俊民. 粗粒土的渗透破坏坡降与颗粒级配的关系研究 [J]. 中国农村水利水电, 2006(3): 72-74. (ZHU Chonghui, WANG Zenghong, LIU Junmin. Study on the relation between the permeation damage slope and the grain composition of coarse-grained soil [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(3): 72-74. (in Chinese))
- [66] JIANG M J, LEROUEIL S, KONRAD J M. Insight into shear strength functions of unsaturated granulates by DEM analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31: 473-489.
- [67] SHAMY U E, ZEGHAL M. A micro-mechanical investigation of the dynamic response and liquefaction of saturated granular soils [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 712-729.
- [68] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 1329-1364.
- [69] SITHARAM T G. Discrete element modeling of cyclic behavior of granular materials [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2003, 21: 297-329.
- [70] KANEKO K, TERADA K, KYOYA T, et al. Global-local analysis of granular media in quasi-static equilibrium [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40: 4043-4069.
- [71] KRISTENSSON O, AHADI A. Numerical study of localization in soil systems [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32: 600-612.
- [72] 廖秋林. 土石混合体地质成因、结构模型及力学特性、流固耦合特性研究 [D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2006.
- [73] 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(3): 172-177. (LI Shihai, WANG Yuannian. 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(3): 172-177. (in Chinese))
- [74] 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 PFC^{2D} 模型的自动生成 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 358-362. (XU Wenjie, HU Ruilin, WANG Yanping. PFC^{2D} model for mesostructure of inhomogeneous geomaterial based on digital image processing [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 358-362. (in Chinese))
- [75] 徐文杰, 胡瑞林, 岳仲琦, 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 Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, 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))
- [76] XU Wenjie, YUE Zhongqi, HU Ruilin. Study on the mesostructure and mesomechanical 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.
- [77] MOLLON G, ZHAO Jidong. Fourier-voronoi-baesd generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials [J]. Granular Matter, 2012, 14(5): 621-638.
- [78] LEE S J, HASHASH Y, NEZAMI E G. Simulation of triaxial compression tests with polyhedral discrete elements [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 43: 92-100.

(收稿日期: 2012-04-09 编辑: 熊水斌)