

文章编号: 1000-4750(2017)10-0044-09

土石混合体宏观力学性能研究的 细观等效分析方法

杜修力, 张 佩, 金 浏

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 土石混合体在组成结构、力学性质和变形行为等方面显著区别于均质土体和岩石。结合土石混合体的细观结构特征, 将其看作由块石和土体基质组成的两相复合材料, 提出了土石混合体宏观力学特性分析的细观尺度多步等效化分析方法, 继而对该分析方法中两个核心问题, 即块石粒径阈值及复合材料等效化问题分别进行了研究。该方法的本质思想是: 首先将较小粒径块石与土体基质进行均匀化处理, 获得其各向同性的等效均匀介质; 其次, 将较大粒径的块石投放进等效均匀介质中, 形成新的混合体, 进而再次基于有限元数值方法对新混合体的力学特性及变形规律进行研究。基于该套分析方法对某土石混合体三轴加载排水试验进行了模拟与分析, 发现该文方法获得的结果与试验结果吻合良好, 验证了方法的有效性。

关键词: 土石混合体; 细观尺度; 等效均匀化; 粒径阈值; 力学特性

中图分类号: TU43 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0181

A MESOSCOPIC EQUIVALENT ANALYSIS METHOD FOR THE STUDY ON MACROMECHANICAL PROPERTIES OF SOIL-ROCK MIXTURE

DU Xiu-li, ZHANG Pei, JIN Liu

(Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Soil-rock mixture is significantly different from soil and rock in structure, mechanical properties and deformation behavior. Considering the mesoscopic structure of soil-rock mixture which can be treated as a two-phase composite of rock blocks and soil, a mesoscopic equivalent analysis method for studying the macro-mechanical properties of soil-rock mixture is proposed. Two key problems of the method, mainly about the rock size threshold and equivalent method of soil-rock mixture, are discussed. Firstly, homogenization process is conducted on the “small” stones and soil to obtain the equivalent homogeneous isotropic matrix. Then the new soil-rock mixture is formed by placing the “big” stones in the equivalent matrix, and its mechanical behavior and deformation feature are analyzed using numerical approaches. Based on the method, consolidated drained triaxial tests of soil-rock mixture are simulated. The analysis shows that the results obtained by the mesoscopic equivalent analysis method are in good agreement with those obtained by the tests, thus proves the efficiency of the method.

Key words: soil-rock mixture; microscopic scale; homogenization process; threshold of rock; mechanical properties

土石混合体^[1-6]是由具有一定尺寸、高弹性模量的岩块和低弹性模量的土体构成的极端不均匀

松散岩土介质系统。作为一种特殊的工程地质体, 其在边坡、隧道、桥基及路基等工程地质中广泛分

收稿日期: 2016-03-15; 修改日期: 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51538001); 北京自然科学基金重点项目(8161001)

通讯作者: 杜修力(1962—), 男, 四川人, 教授, 博士, 博导, 主要从事地震工程领域研究(E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn).

作者简介: 张 佩(1988—), 女, 山东人, 博士生, 主要从事隧道与地下工程领域研究(E-mail: zhangpei068@163.com);

金 浏(1985—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 主要从事混凝土及混凝土结构理论研究(E-mail: kinglew2007@163.com).

布。构成土石混合体的块石尺寸、大小随机分布,且常伴随着漂石等大块石,从而在进行工程设计与施工时,难以给出有效的物理力学参数。在获取土石混合体的等效材料参数时,通常采取对土石混合体中的土体进行试验,再乘以一定的折减系数的方式来确定^[7]。它存在较大的随机性,且不能反映土石混合体细观组分与其宏观力学性质间的关系。本质上,土石混合体的力学性质和变形行为由其细观组分的性质及相互作用决定,因此,从细观角度出发对于正确认识土石混合体具有重要的意义。

通过材料的细观结构特征获取其宏观力学性质一直是材料力学研究者所探索的问题,国内外研究者从含石量、块石形状及分布等出发对土石混合体的材料等效属性展开了初步分析。Vallejo 等^[8]采用 Hashin 公式预测了含大粒径块石黏土的弹性参数,通过与试验结果对比,他指出可根据土体基质的强度和 Guth 公式来预测土石混合体强度^[9]。基于细观力学方法, Lee 等^[10]提出了一种弹性损伤模型逐步等效化方法,分层次预测颗粒复合材料的有效弹性参数。在宏观各向同性、应变均匀性假设的基础上,马辉等^[11]采用并联模型推导出椭圆形卵石长轴水平排列时的等效弹性模量计算公式,但忽略了泊松比对材料力学行为的影响。胡敏^[12]等将砂卵石土简化为砂土为基体,卵石为椭圆形夹杂的两相复合材料,采用 Eshelby 张量和 Mori-Tanaka 等效方法,运用替换迭代方式,推导出等效柔度张量一般性计算方程。采用多相球模型, Yang 等^[13]推导了土石混合体在常温及冰冻情况下的弹性模量,与试验结果吻合较好。总的来说,采用理论方法预测土石混合体的力学参数时,计算结果并不是很理想,仍局限在弹性小变形、低含石量范围内。

室内试验及现场试验从统计学的角度分析了不同因素对土石混合体力学特性的影响规律,其本质是基于材料性质平均化的概念,在一定程度上反映出土石混合体的宏观破坏模式。Lindquist^[2]、Simoni^[14]、Xu^[15]、Coli^[16]、Gao^[17]、Wang^[18]等针对含石量对土石混合体抗剪强度的影响进行了分析,结果表明:内摩擦角随含石量的增加而增加,但黏聚力并没有得到统一的变化规律。Simoni^[14]、Wang^[18]、Hamidi^[19]、Mohammad^[20]、范建彬^[21]等开展了不同块石粒径的土石混合体试验,结果表明:块石尺寸对土石混合体抗剪强度具有一定的影响,且土石混合体内部尺寸较大的块石在某种程度

上控制着其宏观的变形和破坏。由于受到试验设备和加载能力的限制,试验中块石的粒径受到很大限制,无法反映真实土石混合体的性质。

随着计算机与图像处理技术的发展,基于数值分析技术的岩土介质细观力学试验,为研究土石混合体的宏观细观力学行为及变形破坏机理提供了有力的手段。油新华^[3]、廖秋林^[7]、Li 等^[22]等采用规则几何体(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规律进行了研究。丁秀丽等^[23]基于土石混合体细观结构模型,分析了土-石界面接触特性及饱和度等因素对非饱和土石混合体宏观力学特性及破坏机制的影响。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。Barbero 等^[24]也对土石混合体开展了单轴与三轴压缩细观数值试验。从土石混合体的细观结构特征出发, Xu 等^[25]开发了土石混合体随机结构模型生成系统 R-SRM^{2D},从含石量、粒度组成、块石空间分布及土石界面等出发,研究了土石混合体细观机制与宏观力学行为的关系,结果表明:土石混合体的变形呈现出绕石发展的现象。Wang 等^[26]采用 CT 扫描技术和细观数值分析,对单轴压缩条件下土石混合体的强度特性和形变损伤发展规律及模式进行了观测和分析,结果表明:微裂缝起始于土石界面处,细观数值方法能够较好地描述土石混合体的强度特性和变形规律。在土石混合体细观数值分析方面已取得一些成果,但由于土石混合体的复杂性,仍局限在强度与变形的影响因素分析,对土石混合体材料的分析方法与应用需要深入的认识。

本文从细观角度出发,将土石混合体视作由块石与土体基质组成的两相结构,建立土石混合体的随机分布模型,提出“融小石,留大石”的土石混合体细观等效分析方法。通过与土石混合体室内试验结果对比分析,验证细观力学等效化方法的合理性与适用性。采用本文方法可将室内试验与细观数值模拟相结合,用于分析含有大尺寸块石的土石混合体试样。

1 土石混合体细观等效分析方法思想

土石混合体是由块石、土体基质及两者间的界面等组成的多相混合材料,如图 1 所示。其宏观力学特性依赖于其细观结构,包括:细观组分子力学性质、块石空间分布以及块石形状等。

构成土石混合体的块石和土在粒径上存在很大的差别,其级配粒径从几毫米到数十厘米不等。因而,从细观角度建立描述所有粒径的土石混合体细观结构模型是非常困难的亦是不经济的(尤其对于三维物理模型)。实际上,土石混合体宏观的变形和破坏更大程度上是由其内部较大的块石来决定。

基于土石混合体细观结构形式,同文献[3,7,22—23,25],将土石混合体看作为土和块石组成的两相复合材料,暂不考虑两者间界面过渡区对其宏观力学行为的影响。图 1(a)即为某土石混合体物理模型的代表性体积单元(RVE),为获得该土石混合体的宏观力学性能及破坏机制,可以采用多尺度多步等效化分析方法——“融小石,留大石”法来对其进行研究。该方法具体的实施分为如下 4 个步骤:

1) 首先将粒径尺寸较小($D_0 < D < D_1$)的块石与均匀的土体基质(颗粒粒径小于 D_0)进行均匀化,获得均匀的各向同性的等效基质体 M_{E1} ,如图 1(b)所示;

2) 将较大尺寸粒径($D_1 < D < D_2$)的块石投放在该等效基质体 M_{E1} 中,形成新的混合体,再次进行均匀化分析获得新的等效基质体 M_{E2} ,如图 1(c)

所示;

3) 类似或重复步骤 2),将更大尺寸粒径($D_i < D < D_j$)的块石投放在等效基质体 M_{Ei} 中,对其均匀等效化获得等效基质体 M_{Ej} ,如图 1(d);

4) 最后,将大石($D > D_j$)放置于等效基质体 M_{Ej} 中,进而对其力学行为,包括宏观力学性能及破坏模式等进行分析,如图 1(e)所示。

需要说明的是,粒径满足 $D_1 < D_2 < D_i < D_j$ 。从该方法具体的实施步骤可以看出,其本质是一种“融小石,留大石”的思想,亦是一种多尺度多步分析方法。“融小石”的目的是将小颗粒与基质体进行均匀化,进而获取其有效力学参数;“留大石”分析的目的是,从细观角度出发,考虑非均质性影响的基础上来分析大块石粒径对土石混合体变形规律及破坏机理的影响。

该分析方法存在或需要解决两个重要问题为:

i) 均匀化分析中块石临界粒径 D 的确定。简言之,即如何对块石的粒径大小进行分类。

ii) 细观尺度等效化或均匀化分析方法的确定。在问题 i) 中确定了块石临界粒径 D ,以及建立对应层次或对应尺度下的细观力学模型的基础上,如何获得其有效力学参数是另一个核心问题。

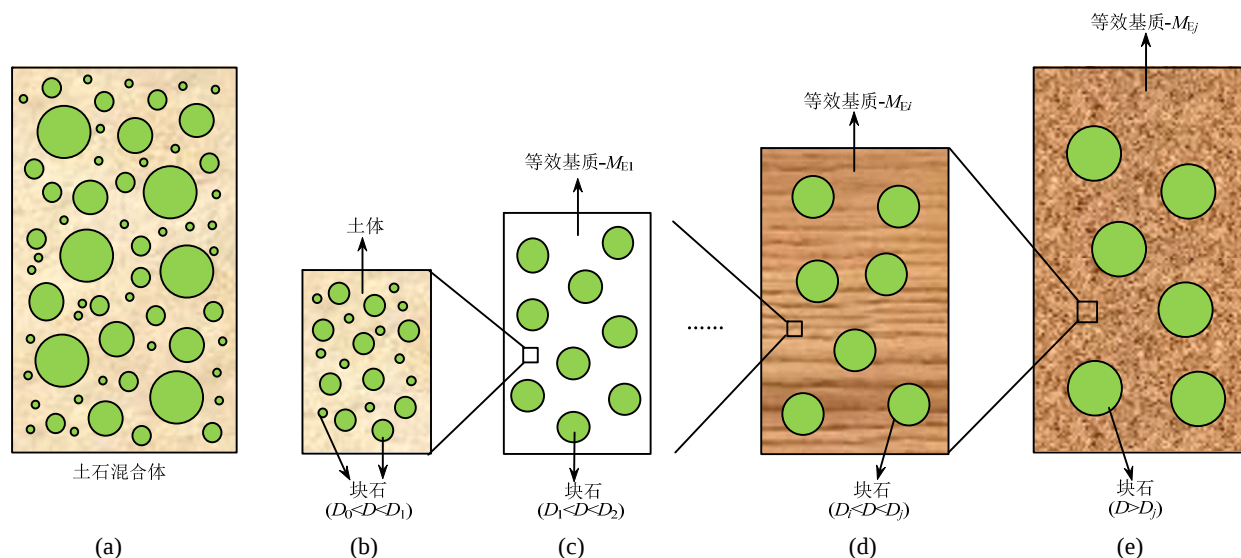


图 1 “融小石,留大石”土石混合体细观等效分析方法思路示意图

Fig.1 Mesoscopic equivalent analysis method of soil-rock mixture

2 块石临界粒径及均匀化方法确定

针对第 1 节提出的关于土石混合体力学性能研究的“融小石,留大石”中需要解决的两个核心问题,本节将对该问题分析进行说明和解答。

2.1 粒径阈值的确定

土石混合体是由粒径较大的块石和粒径较小的土体基质组成的非均质材料。在进行均匀化的过程中,土体/等效基质与块石的界限粒径及可均匀化处理的最大粒径成为该方法的核心问题之一。

土体/等效基质与块石的界限粒径,即确定块石的最小粒径 D_s ,根据土体基质与等效基质体两种情况而定。土体基质,就是通常所说的土。在我国,2 mm 粒径是通用粒组的原定界限值^[27],也是国际普遍采用的标准。研究表明^[28-30],就均匀土的力学性质与其粒径的关系而言,以 2 mm 或以 4.76 mm 为界限并无明显差异。本文取 $D_{s1} = D_0 = 5 \text{ mm}$,小于 D_0 的颗粒组合体被认为是均匀的土体基质,大于 D_0 的颗粒被视为块石。对于等效基质体 M_{Ei} ,当在该基质体进行第 $i+1$ 次块石投放时,块石的最小粒径 $D_{s(i)}$ 应大于等效基质体 M_{Ei-1} 中的最大块石粒径 $D_{l(i-1)}$ 。

块石最大粒径 D_l 指可进行均匀化处理的最大块石粒径。从材料力学性质确定的物理模型来说, D_l 可根据试样的尺寸确定。《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)^[31] 规定,当试样直径小于 100 mm 时,允许最大粒径为试样直径的 1/10;当试样直径大于 100 mm 时,允许最大粒径为试样直径的 1/5。从工程应用角度,Medley^[1]、徐文杰等^[4] 研究表明, $D_l = 0.05L_c$,其中 L_c 为土石混合体的工程特征尺度,对于平面研究区域, L_c 等于研究面积的平方根;对于隧道等结构物, L_c 等于其直径;对于边坡, L_c 等于坡高。

2.2 均匀化分析方法—数值方法

正如前文所述,复合材料有效力学参数分析的均匀化方法有很多,包括:理论解析方法(如串/并联法、M-T 法及自洽法等)和数值分析方法。

理论解析法可对弹性模量及泊松比等弹性力学参数能够很好地表征,而难以对诸如拉/压强度、膨胀角及内摩擦角等物理和力学参数进行评估。数值分析方法,依据复合材料微/细观结构形式进行数值建模,借助有限元/离散元等数值手段,可很好地揭示微/细观结构组分与宏观力学性能参数之间的关系,因而在各类复合材料领域得到广泛应用。

鉴于此,针对土石混合体的均匀化问题,本文拟借助于数值手段,从微/细观角度出发,建立各层次各尺度下的数值分析模型。

需要说明的是,考虑到计算量的限制,下文的数值仅限于二维模型,暂不考虑三维模型的“约束效应”。另外,为简化起见,同文献[3,7,22]的处理,块石采用圆形颗粒,且暂不考虑块石与土体或等效基质之间界面过渡区的影响。在确定块石级配的基础上,借鉴于 Du 等^[32]及 Unger 和 Eckardt^[33]的工作,

采用 Monte-Carlo 法,基于“取-放”(take and place)思想,对块石进行随机投放到土体基质中,建立土石混合体的随机分布物理模型。关于该随机生成方法,可详见文献[32]。

针对块石,由于其拉/压强度较大,假定其在受力过程中不产生破坏,为弹性体。对于土体,同文献[23,26],本文采用经典的 Mohr-Coulomb 弹塑性分析模型来描述其力学行为。

对于土和块石两相介质,分别赋予其独立的本构关系和力学参数;设置边界条件和加载条件后,对土石混合体随机模型进行网格划分,采用 Newton-Raphson 法对土石混合体的宏观非线性力学性能进行数值模拟研究。

3 分析方法有效性验证

为说明本文提出的“融小石,留大石”多尺度多步分析方法的合理性和可靠性,下文对某土石混合体三轴排水试验进行数值模拟。

3.1 土石混合体组分材料参数的确定

基于土石混合体中型三轴排水试验^[21],针对上文提出的细观力学数值试验对等效化方法进行分析和验证。由于该文献[21]试验结果未给出土和块石组分各自的力学性质,需首先反演来确定不同条件下各组分材料参数。

图 2(a)即为该试验的物理模型图,试验试样尺寸为 101 mm×200 mm,上下端部为位移边界条件,剪切过程中试样上端部约束完全光滑。试样的围压分别为 200 kPa、400 kPa 和 800 kPa,试验过程分两步,第 1 步施加等向固结压力;第 2 步进行应变控制加载,与室内试验一致,当位移达到试件高度的 15%时认为试样破坏。试验中,土石混合体三轴试验的颗粒级配如表 1 所示,根据块石与土体基质的划分方法,将粒径小于 5 mm 的颗粒视为土体基质。

根据土石混合体的颗粒级配,选取粒径区间上限,即 20 mm、15 mm、10 mm,作为块石区间 20 mm~16 mm、16 mm~10 mm、10 mm~5 mm 的特征粒径,采用“取-放”方法建立了图 2(b)~图 2(d)所示的颗粒级配 3、级配 2、级配 1 的土石混合体分析模型。该模型中,三组试样中块石的面积分数均为 42%。需要说明的是,采用特征粒径后,级配 1、级配 2 和级配 3 的土石混合体仅含有一种尺寸的块石。

同文献[34]的工作,块石的密度 ρ_r 取值为

2700 kg/m³, 弹性模量 E_r 为 50 GPa, 泊松比 ν_r 为 0.20。另外, 试验所采用的土体为含砂低液限黏土(液限为 29.2%, 塑限为 17.2%), 根据常颜彬等^[35]在低液限黏土三轴剪切试验方面的研究, 可确定土体的密度 ρ_s 为 1900 kg/m³, 泊松比 ν_s 为 0.3, 黏聚力 c 为 17.5 kPa。考虑含砂低液限黏土的剪胀特性, 设定土体的剪胀角 ψ_s 为 5°。需要说明的是, 土体具有压硬性的特点, 弹性模量 E 与平均主应力 P 相关, 不再是常数, 因此, 不同围压下土石混合体的宏观弹性模量各异。

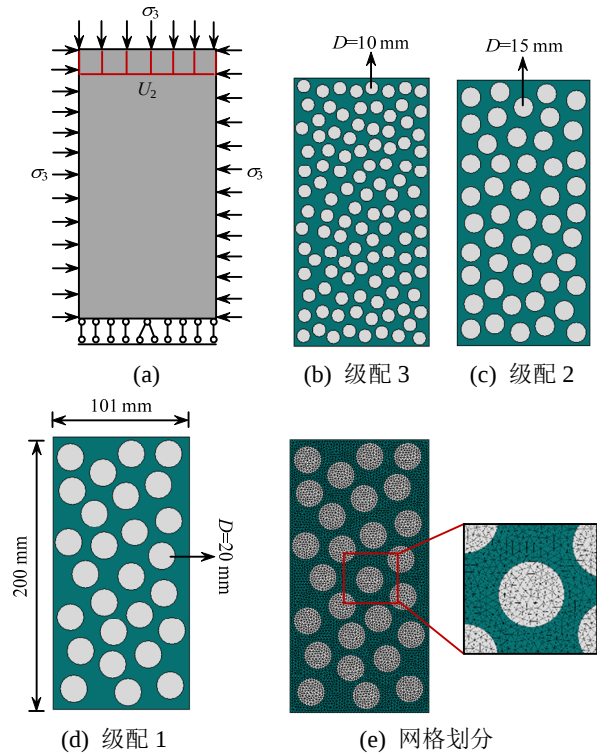


图2 土石混合物随机分布模型

Fig.2 Random distribution model of soil-rock mixture

表 1 土石混合物颗粒级配^[21]

Table 1 Particle size distribution of soil-rock mixture

粒径/mm	级配 1/(%)	级配 2/(%)	级配 3/(%)	级配 4/(%)
20~16	50	—	—	20
16~10	—	50	—	20
10~5	—	—	50	10
1~0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
0.5~0.25	1.3	1.3	1.3	1.3
0.25~0.075	14.1	14.1	14.1	14.1
<0.075	34.0	34.0	34.0	34.0

鉴于此, 基于 2.2 节所提及的细观尺度分析方法, 对图 2 所示的三组土石混合物宏观力学行为进行模拟, 并不断地进行参数试算。经过大量的反复试算, 对于土石混合物在围压 200 kPa、400 kPa 和 800 kPa 下, 发现采用表 2 中给出的物理/力学参数

(其中标示 “*” 为已知参数, 其他为反复试算参数), 获得的土石混合体力学性能的数值模拟结果与试验结果吻合很好, 如图 3 所示。图 3 为试样的偏应力 q 与轴线应变 ε_1 关系曲线, 其中偏应力 q 为轴向应力 σ_1 与围压 σ_3 之差。因此, 在进行土石混合体宏观力学性能的分析时, 可采用表 2 中的材料参数进行细观数值模拟。

表 2 土石混合物组分材料参数
Table 2 Material parameters of soil and rock

名称	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	σ_3/kPa	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$
土体	1900*	200	6	0.3*	17.5*	20	5*
		400	10				
		800	17				
块石	2700*	—	50000*	0.2*	—	—	—

注: “*” 参数为已知, 其他参数为反复试算值。

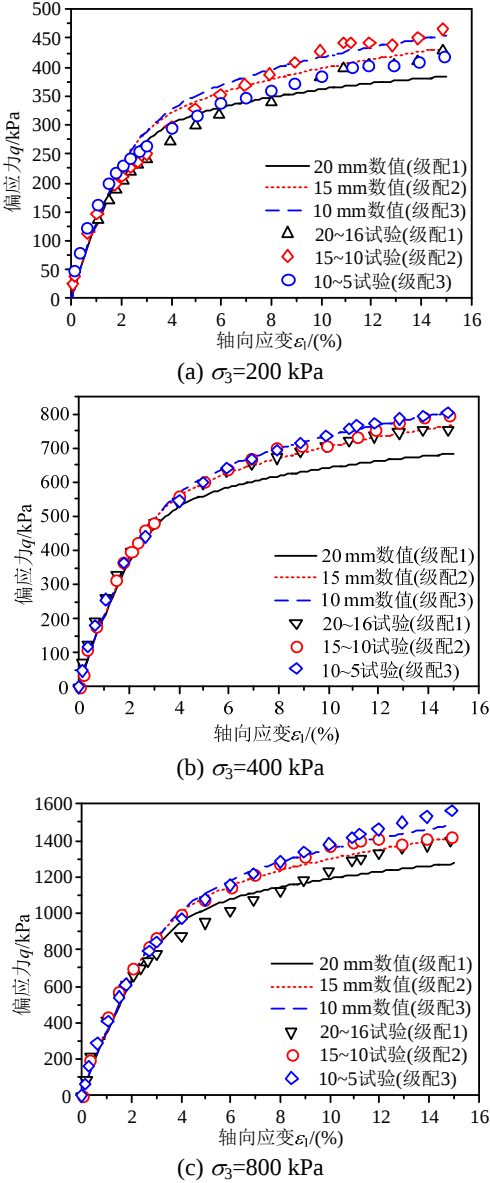


图 3 偏应力与轴向应变关系曲线

Fig.3 Relationship between deviatoric stress and axial strain

3.2 土石混合体宏观力学行为模拟及与试验对比

室内三轴试验^[21]中, 对应于级配 4(即全级配)的土石混合体, 共含有 3 种不同特征尺寸的块石, 块石特征粒径分别为 10 mm、15 mm、20 mm, 如图 4 所示。下文将基于该物理模型, 来验证本文提出的土石混合体细观等效化分析方法的有效性和合理性。具体的操作步骤为:

- 1) 将粒径相对较小的“小石”(10 mm 及 15 mm)与土体基质进行均匀化分析, 获得其均匀的各向同性的等效基质体材料参数;
- 2) 在等效基质的基础上, 分析仅含有“大石”(20 mm)的土石混合体的变形及破坏行为。

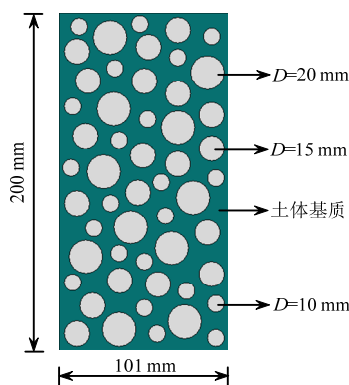


图 4 级配 4 对应的随机分布模型

Fig.4 Random distribution model corresponding to Grade 4

3.2.1 “融小石”-等效基质材料参数确定

对于级配 4 的土石混合体, 将颗粒粒径为 10 mm、15 mm 的块石“融”于土体中, 即将 60% 的块石进行均匀化, 如图 5 所示。此时, “融小石”试样中, 块石的面积分数为 25.2%。双轴压缩试验的围压为 200 kPa、400 kPa 和 800 kPa, 采用应变控制加载, 位移达到试样高度的 15% 时试样破坏, 即应变为 15%。土体与块石均采用表 2 中的土石混合体细观组分材料参数。

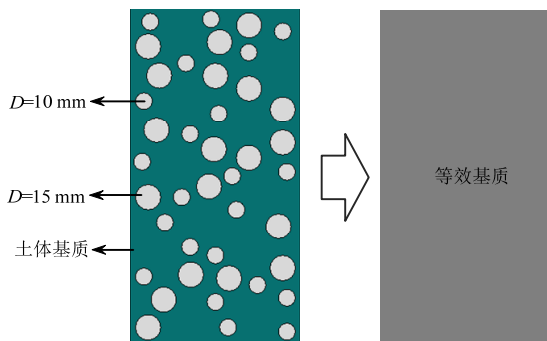


图 5 土石混合体小石均匀化过程

Fig.5 Homogenization process of small stones

图 6 为“融小石”后等效基质的应力-应变关系曲线。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)^[31], 当主应力差无峰值时, 取 15% 轴向应变时的主应力差值作为破坏点。以 $1/2(\sigma_1 + \sigma_3)$ 为横坐标, $1/2(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为纵坐标, 做出 3 种围压下破坏状态时的应力莫尔圆, 则公切线的斜率等于 $\tan \varphi_M$, 其中 φ_M 为等效的内摩擦角; 公切线在纵轴的截距大小为等效基质的等效黏聚力 c_M 。根据应力应变曲线的初始斜率, 确定不同围压下等效基质的初始弹性模量 E_M 。依据块石与土体的面积或体积分数, 进行线性插值, 得等效泊松比 $\nu_M = \nu_r C_r + \nu_s(1 - C_r)$, 等效基质的密度 $\rho_M = \rho_r C_r + \rho_s(1 - C_r)$, 其中 C_r 为块石的面积/体积分数。由于进行等效的块石含量较小, 且土体基质剪胀角较小, 故认为块石对等效基质的剪胀程度不产生影响, 剪胀角保持不变。最终确定的等效基质的材料参数如表 3 所示。

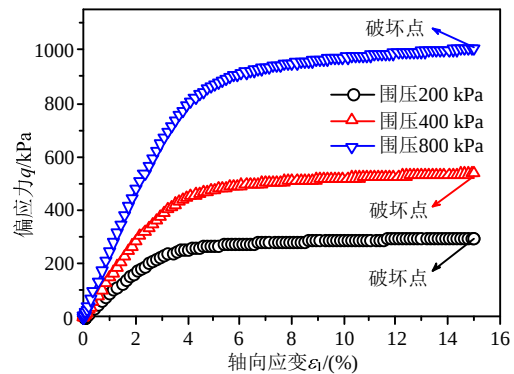


图 6 等效基质的应力-应变关系曲线

Fig.6 Relationship between deviatoric stress and axial strain of equivalent matrix

表 3 等效基质材料参数

Table 3 Material parameters of equivalent matrix

围压/kPa	$\rho_M/(\text{kg/m}^3)$	E_M/MPa	ν_M	c_M/kPa	$\varphi_M/(\circ)$	$\psi_M/(\circ)$
200	—	9.27	—	—	—	—
400	2102	15.08	0.27	21.68	22	5
800	—	25.04	—	—	—	—

在预测复合及混合材料弹性力学特性时, 对于仅有两种细观组分材料, 串联模型^[36]和并联模型^[37]是最为常用的理论模型。在外荷载作用下, 并联模型假定各细观组分的应变相同, 从而得到等效单元的弹性、泊松比与各细观组分间的关系; 而串联模型假定各细观组分的应力相同, 推导等效单元的等效弹性模量和等效泊松比。表 4 为采用串联模型与并联模型得到的“融小石”等效基质弹性模量与泊松比, 并与数值结果进行对比分析。结果表明,

采用串联模型的计算结果与“融小石”等效化的结果是比较接近的，而采用并联模型的计算结果与等效基质结果相差很大。由于本文“融小石”的体积分数相对较小，等效基质的材料性质更接近于土体基质，且土体基质与块石的物理力学性质差异较大，因此，在含石量较小时，采用串联模型进行宏观弹性力学性质的分析比较合理。

表 4 与经典模型的比较

Table 4 Comparison with classical models

围压/kPa	本文方法		串联模型		并联模型	
	E_M/MPa	ν_M	E/MPa	ν	E/MPa	ν
200	9.28	0.27	8.02	0.30	12604	0.20
400	15.08	0.27	13.37	0.30	12607	0.20
800	25.04	0.27	22.73	0.30	12612	0.20

3.2.2 “留大石”-土石混合体力学及变形行为模拟
当等效基质的材料参数确定后，考虑大粒径块石的分布，如图 7 所示，分析“留大石”时土石混合体的力学特性和变形行为。图 8 为不同围压条件下($\sigma_3=200\text{ kPa}$ 、 $\sigma_3=400\text{ kPa}$ 、 $\sigma_3=800\text{ kPa}$)，采用细观等效化分析方法、级配 4 随机分布模型及室内试验获得的土石混合体应力-应变关系图。从图 8 可以看出，细观等效化分析方法与级配 4 试验结果、级配 4 随机分布模型的曲线吻合较好。在围压为 200 kPa，应变为 5% 时，土石混合体试验抗剪强度为 315.8 kPa，等效化分析方法的抗剪强度为 306.8 kPa，与试验结果的误差仅为 2.84%。结果表明：采用“融小石，留大石”的细观等效分析方法能够较好地描述土石混合体的强度特性。

图 9 所示为，在围压为 800 kPa，采用级配 4 随机分布模型与本文等效化方法获得的土石混合体最大应变与位移幅值云图。从最大应变等云图可以看出，两种方法计算得到的主剪切带的位置是一致的，与水平方向的夹角相同。对于级配 4 随机骨料模型，土石界面较多且分布范围较广，因此剪切带分布相对比较分散；对于等效化方法，由于土石界面相对较少，剪切带分布相对比较集中。结果表明：采用“融小石，留大石”的细观等效分析方法能够较准确地描述土石混合体的变形规律和破坏模式。

综上所述，细观等效分析方法能够较好地描述土石混合体的强度特性，且能够较合理地描述土石混合体的变形规律和破坏模式，特别是大块石粒径对变形的影响。因此，可应用于分析土石混合体的宏观力学性能。当土石混合体颗粒粒径范围较大时，可以分层次、分步进行“融小石、留大石”的

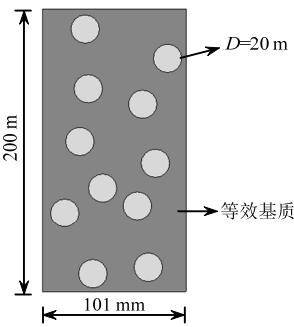
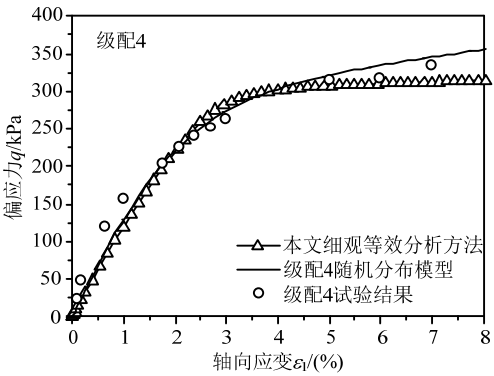
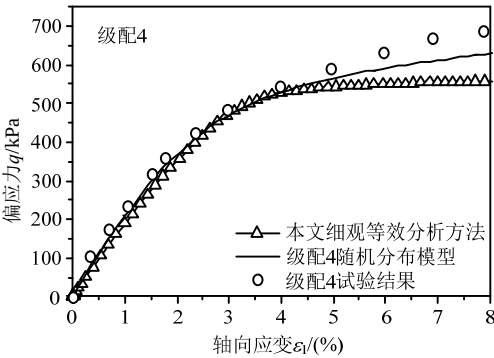


图 7 等效基质考虑大石分布

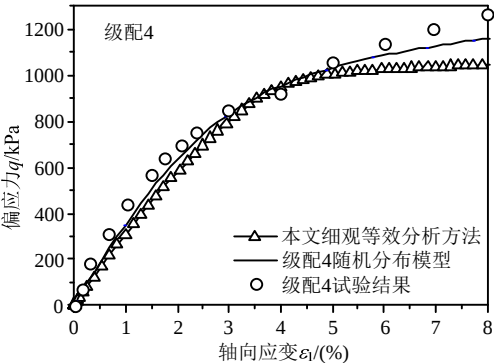
Fig.7 Distribution of “big” stone in equivalent matrix



(a) $\sigma_3=200\text{ kPa}$



(b) $\sigma_3=400\text{ kPa}$



(c) $\sigma_3=800\text{ kPa}$

图 8 偏应力与轴向应变关系曲线

Fig.8 Relationship between deviatoric stress and axial strain for Grade 4

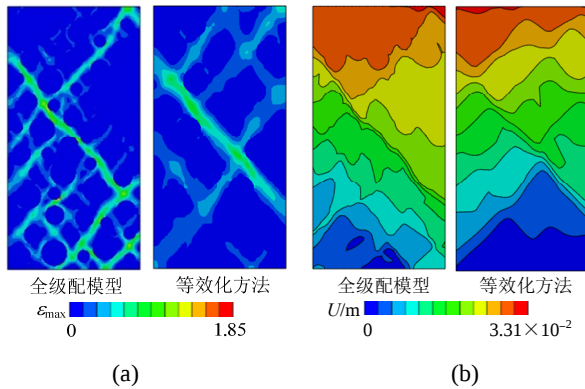


图9 最大应变及位移幅值云图($\sigma_3=800$ kPa)

Fig.9 Contour plot of $E_{\max}$ and U magnitude

细观等效化处理。同时,在进行地下工程设计与施工时,该方法也为材料有效物理力学参数的获取,提供一个新的思路与途径。

4 结论

基于土石混合体的细观结构特征,本文提出了一种土石混合体宏观力学特性分析的多尺度多步等效化分析方法——“融小石、留大石”的细观等效分析方法。该方法从描述土石混合体的细观组分入手,采用 Monte-Carlo 法建立土石混合体的随机分布物理模型,借助于数值手段,将“小”块石与土体基质进行均匀化处理,形成各向同性的均匀等效基质,在等效基质基础上,考虑“大”块石的分布,分析土石混合体的力学特性和变形规律。算例分析表明,采用本文的细观等效分析方法,可以较好地描述土石混合体的强度特性和变形行为,特别是可考虑大粒径块石对变形的影响。

尽管本文的细观等效分析方法对土石混合体宏观力学特性的分析取得了较好的结果,但本文方法只针对土石混合体的平面问题进行了分析,没有将其运用到三维情况。另一方面,本文等效化方法将土石混合体视为由块石和土体组成的两相介质,没有考虑块石与土体之间的相互作用,忽略了土石界面作用的影响。这些将在后续工作中进一步完善。

参考文献:

- [1] Medley E. The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [D]. Berkley: University of California, 1994.
- [2] Lindquist E S. The strength and deformation properties of mélange [D]. Berkley: University of California, 1994.
- [3] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2001.

- You Xinhua. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application [D]. Beijing: Northern Jiaotong University, 2001. (in Chinese)
- [4] 徐文杰, 张海洋. 土石混合体研究现状及发展趋势[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 80—88.
- Xu Wenjie, Zhang Haiyang. Research status and development trend of soil-rock mixture [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 80—88. (in Chinese)
- [5] 王宇, 李晓, 赫建明, 等. 土石混合体细观特性研究现状及展望[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 112—123.
- Wang Yu, Li Xiao, Hao Jianming et al. Research status and prospect of rock and soil aggregate [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 112—123. (in Chinese)
- [6] 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[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(2): 172—181.
- Sun Huafei, Ju Yang, Wang Xiaofei, et al. Review of the study on deformation, failure and the mesomechanisms of rock-soil mixture [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 44(2): 172—181. (in Chinese)
- [7] 廖秋林. 土石混合体地质成因、结构模型及其力学特性、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.
- Liao Qiulin. Study on the geological formation, structure model, mechanical characteristics and fluid-solid interaction [D]. Beijing: Geology and Geophysics Research Institute of Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [8] Vallejo L E, Lobo G S. The elastic moduli of clays with dispersed oversized particles [J]. Engineering Geology, 2005, 78(1): 163—171.
- [9] Vallejo L E, Lobo G S, Seminsky L F. The shear strength of sand-gravel mixtures: laboratory and theoretical analysis [C]. Atlanta, USA. Geo-Congress, 2014: 74—83.
- [10] Lee H K, Pyo S H. Multi-level modeling of effective elastic behavior and progressive weakened interface in particulate composites [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(2): 387—397.
- [11] 马辉, 高明忠, 张建康, 等. 卵石土等效弹性模量理论预测模型初探[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3642—3646.
- Ma Hui, Gao Mingzhong, Zhang Jiankang, et al. Theoretical model developed for equivalent elastic modulus estimation of cobblestone-soil matrix [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3642—3646. (in Chinese)
- [12] 胡敏. 砂卵石土物理力学特性及盾构施工相应的数值模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- Hu Min. Numerical method to study the physical and mechanical characteristics of sandy pebble soil and the response caused by shield tunneling [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] Yang H, Zhou Z, Wang X C et al. Elastic modulus

- calculation model of a soil-rock mixture at normal or freezing temperature based on micromechanics approach [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 1–10.
- [14] Simoni A, Houlsby G T. The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24(3): 523–549.
- [15] Xu W J, Hu R L. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011, 48(8): 1235–1247.
- [16] Coli N, Berry P, Boldini D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterization of a bimrock [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011, 48(1): 95–102.
- [17] Gao W, Hu R L, Ibrahim A O, et al. Geomechanical characterization of Zhangmu soil-rock mixture deposit [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2014, 32(5): 1329–1338.
- [18] Wang Y, Li X. Experimental study on cracking damage characteristics of a soil and rock mixture by UPV testing [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2015, 74(3): 775–788.
- [19] Hamidi A, Salimi N, Yazdanjou V. Shape and size effects of gravel particles on shear strength characteristics of sandy soils [J]. *Geoscience*, 2011, 20(80): 189–196.
- [20] Mohammad A, Parviz M. Failure patterns of geomaterials with block-in-matrix texture: experimental and numerical evaluation [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(7): 2781–2792.
- [21] 范建彬, 洪宝宁, 刘顺青, 刘鑫. 块石尺寸对土石混合体强度特性的影响研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(27): 268–272.
Fan Jianbin, Hong Baoning, Liu Shunqing, Liu Xin. Study on the effect of rock size on strength characteristics of soil-rock mixture [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(27): 268–272. (in Chinese)
- [22] Li X, Liao Q L, He J M. 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): 702–707.
- [23] 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(8): 1553–1566.
Ding Xiuli, Zhang Hongming, Huang Shuling, et al. Research on mechanical characteristics of unsaturated soil-rock mixture based on numerical experiments of mesostructure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(8): 1553–1566. (in Chinese)
- [24] Barbero M, Bonini M, Borri B M. Three-dimensional finite element simulations of compression tests on bimrock [C]. Goa, India: In Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2008: 31–37.
- [25] Xu W J, Yue Z Q, Hu R L. 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 & Mining Sciences*, 2008, 45(5): 749–762.
- [26] Wang Y, Li X, Wu Y. F. Damage evolution analysis of SRM under compression using X-ray tomography and numerical simulation [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2014, 19(4): 400–417.
- [27] GB/T 50145-2007, 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
GB/T 50145-2007, Standard for engineering classification of soil [S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)
- [28] 罗国煜, 李生林. 工程地质学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 1990: 13–14.
Luo Guoyu, Li Shenglin. Basis of engineering geology [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1990: 13–14. (in Chinese)
- [29] Weng M C, Chu B L, Ho Y L. Elastoplastic deformation characteristics of gravelly soils [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(6): 947–955.
- [30] Chang K T, Cheng M C. Estimation of the shear strength of gravel deposits based on field investigated geological factors [J]. *Engineering Geology*, 2014, 171(3): 70–80.
- [31] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
GB/T 50123-1999, Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [32] Du X L, Jin L, Ma G W. Meso-element equivalent method for the simulation of macro mechanical properties of concrete [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2013, 22(5): 617–642.
- [33] Unger J F, Eckardt S. Multiscale modeling of concrete [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2011, 18(3): 341–393.
- [34] 金浏. 细观混凝土分析模型与方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
Jin Liu. Study on meso-scopic model and analysis method of concrete [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [35] 常颜彬, 原斌斌, 侯军, 等. 低液限黏土三轴剪切试验分析[J]. *水利水电施工*, 2012(6): 68–71.
Chang Yanbin, Yuan Binbin, Hou Jun, et al. Triaxial shear test analysis on Low liquid limit clay [J]. *Water Conservancy and Hydropower Construction*, 2012(6): 68–71. (in Chinese)
- [36] Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle [J]. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, 1929, 9: 49–58.
- [37] Voigt W. Über Die Beziehung Zwischen Den Beiden Elastizitätskonstanten Isotroper Körper [J]. *Wied Ann*, 1889, 38: 573–587.