

# 掺砾黏土动力特性研究进展

费康<sup>1,2</sup>, 闻玮<sup>2</sup>, 张永强<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;  
2. 扬州大学岩土工程研究所, 江苏扬州 225127)

**摘要:** 综述了掺砾黏土动力特性的研究现状, 分析了动剪切模量、阻尼比和动强度的影响因素, 提出研究掺砾黏土的动力特性需要考虑材料的细观结构特征, 总结了考虑材料细观结构特征的数值方法及分析理论。指出今后需要在掺砾黏土的细观结构特征及其影响因素、细观结构对材料宏观动力性能的影响机理和基于颗粒增强复合材料理论的细观力学模型等方面作重点研究。

**关键词:** 掺砾黏土; 动力特性; 动剪切模量; 阻尼比; 动强度; 细观结构; 综述

中图分类号: TV443<sup>+</sup>.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2015)04-0112-07

**Advances in research on dynamic characteristics of gravel-mixed clay**//FEI Kang<sup>1,2</sup>, WEN Wei<sup>2</sup>, ZHANG Yongqiang<sup>2</sup>(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** This paper reviews the current status of research on dynamic characteristics of gravel-mixed clay as well as analyzes the influence factors of dynamic shear modulus, damping ratio and dynamic strength. Additionally, it summarizes the numerical method and analytical theory of the materials mesostructure features, as well pointed out that they should be accounted in the research of dynamic characteristics of gravel-mixed clay. Finally, the areas for further research are suggested, i. e., the mesostructure features and influence factors of gravel-mixed clay, the influence mechanism of mesostructure for materials macroscopic dynamic performance, and the micromechanical model based on theory of particle reinforced composite.

**Key words:** gravel-mixed clay; dynamic characteristics; dynamic shear modulus; damping ratio; dynamic strength; mesostructure; review

土质心墙堆石坝投资省、施工简单,对复杂地形、地质条件的适应性好,是目前世界各国高坝建设采用的主流坝型<sup>[1]</sup>。我国目前已建成和正在施工或设计的150 m以上的土石坝有20多座,其中300 m量级的坝都是心墙堆石坝,如314 m的双江口大坝,295 m的两河口大坝,261.5 m的糯扎渡大坝。随着坝高的增加,心墙材料将承受更大的应力,单纯采用黏性土作为心墙防渗土料将无法同时满足强度和压缩性的要求,因此高心墙堆石坝中一般采用掺砾黏土作为防渗材料,以提高心墙材料的强度和刚度。由于我国的高心墙堆石坝大都处于高地震烈度区,为了评价抗震安全性,必须对掺砾黏土心墙料的动力特性有深入的了解。

以往对于掺砾黏土的研究大都集中在防渗特性和静力特性上,对动力特性及其影响因素的研究很

少。这是因为掺砾黏土中存在粒径较大的粗粒料,进行室内动力试验的难度较大,试验数据少。也有观点认为参加粗粒料可提高黏土的强度和刚度,根据纯黏土的动力试验结果进行设计将偏于安全保守,这一观点是否正确尚需进一步论证。就基本构成而言,掺砾黏土是一种粗、细颗粒混杂的复合体,研究该类土的动力特性及影响因素,需要从材料的细观结构入手。本文结合材料细观力学分析方法,对掺砾黏土的动力特性研究现状进行综述,并在此基础上提出今后需进一步研究的问题,以为掺砾黏土的研究提供参考。

## 1 掺砾黏土动力特性的试验研究及影响因素

在岩土工程动力分析中,出于计算可靠性和便利性的考虑,常用等效线性黏弹性模型来模拟土

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20141279);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2012491111);江苏省“青蓝工程”(苏教师[2012]39号)

作者简介:费康(1978—),男,江苏如皋人,副教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:kfei@yzu.edu.cn

体<sup>[2]</sup>,分析中所需的基本动力参数包括动剪切模量、阻尼比、动强度等。

在研究纯黏土或纯粗粒料的动力特性时<sup>[3-5]</sup>,一般采用哈丁双曲线模型、Ramberg-Osgood模型等来反映剪切模量随应变水平的变化,并依据试验结果将最大剪切模量与围压、孔隙比或其他土体状态指标相联系。对于阻尼比,可结合应力应变骨干曲线和曼辛法则得到应力应变滞回圈,进而得到动剪切模量与阻尼比之间的关系;或者根据试验数据,直接建立阻尼比与影响因素之间的经验关系。对于动强度和动孔压,常根据试验结果建立反映土体物理性质、静应力、动应力及循环次数之间关系的拟合公式。掺砾黏土动力特性研究大都参照了以上思路。

### 1.1 动剪切模量

Shafiee等<sup>[6]</sup>对掺杂了粗粒料的高岭土进行了应变控制三轴试验研究,试样直径50mm,高度100mm,掺加的粗粒料为平均粒径1.84mm的砂粒和5.55mm的砾粒,粗粒料体积分数控制为0%、20%、40%和60%。试验结果表明,最大动剪切模量随着含砾量的增加而增加,但含砾量较高试样的剪切模量随应变水平衰减的速度更快,当动剪切应变达到1.5%之后,材料的剪切模量与纯黏土基本一致,与粗粒料含量无关。颗粒粒径对剪切模量的影响与粗粒料含量和动剪应变水平有关,在粗粒料含量较大(60%)且动剪应变幅值较小(0.15%)的情况下,含砾黏土的剪切模量比含砂黏土大10%~15%,其余情况下两种混合土模量的差异不明显。

Meidani等<sup>[7]</sup>对参加了不同含量的圆砾和角砾的黏土进行了应变控制三轴试验研究,试样直径70mm,高度140mm,粗粒料平均粒径7.1mm。研究表明,砾粒质量分数在44.2%~54.3%之间存在一个临界值,当含砾量小于该值时,粗粒料悬浮在黏土中,材料的动力特性由黏土控制,剪切模量与含砾量无关;当含砾量超过临界值后,黏土和粗粒料同时对材料的动力特性起作用,剪切模量随着含砾量的增加而增加,并且颗粒形状的影响也开始凸显,含圆砾黏土的剪切模量要明显大于含角砾黏土。这是由于相同含砾量下含角砾黏土压实后的干密度较低、粗粒料之间的黏土压实程度较差所造成的。对含砾量超过临界值后的掺砾黏土,Meidani等建议最大剪切模量 $G_{max}$ 可用下式确定:

$$G_{max} = bp_a \frac{\rho_d}{\rho_w} \left( \frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^c \quad (1)$$

式中: $p_a$ 为大气压力; $\rho_d$ 为干密度; $\rho_w$ 为水的密度; $\sigma'_3$ 为有效围压; $b$ 和 $c$ 为无量纲参数。式(1)中的干密度 $\rho_d$ 隐含反映了含砾量的影响,颗粒形状的影响

则通过 $b$ 的取值体现,对含角砾黏土, $b=379.4$ ,对含圆砾黏土, $b=530.1$ 。 $c$ 反映了剪切模量与围压之间的关系,与颗粒形状无关,取0.591,一般黏性土在0.5左右,这表明含砾黏土的不排水动剪切模量对围压的依赖程度要高于纯黏土。剪切模量衰减曲线与围压的关系不大,主要受到颗粒形状的影响,可按下式模拟:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\gamma}{\alpha} \right)^\beta} \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为剪应变; $\alpha$ 和 $\beta$ 为无量纲参数,可分圆砾和角砾两种情况建立与含砾量的关系。研究表明,由于圆砾与黏土之间更易滑移,因此含圆砾黏土的剪切模量衰减要快于含角砾黏土。当动剪应变水平为0.1%时,两种材料的动剪切模量比 $G/G_{max}$ 相差约30%。

可见掺砾黏土的动剪切模量与粗粒料含量直接相关,而对黏土-砂混合料的研究也印证了这一点。Yamada等<sup>[8]</sup>对掺砂黏土进行了低围压下的空心扭转剪试验,分析了塑性指数和含砂量对剪切模量的影响。试样外径75mm,内径35mm,高度100mm,所掺砂粒平均粒径0.9mm。试验结果表明,当含砂量(质量分数)小于50%时,混合土的最大剪切模量随着含砂量的增加略有增加;当含砂量超过50%之后,剪切模量随含砂量而增加的速度明显变快,含砂量70%时的最大剪切模量可达纯黏土的3倍。这是由于随着粗粒料含量的增加,其所承担的应力也有所增加,粗粒料颗粒之间发生剪切滑移变得困难,低应变下的剪切模量随之提高;但当剪切应变达到1%之后,粗粒料的影响基本消失,不同含砂量下的剪切模量基本一致,这也就意味着粗粒料含量越大,剪切模量衰减得越快。

研究同时也表明黏性土的塑性指数对最大剪切模量也有影响<sup>[8]</sup>,但根据美国的土工试验标准(ASTM2005)<sup>[9]</sup>,测定塑性指数时粒径大于0.425mm的颗粒将被剔除,这无法反映含砂黏土的真实物理性质。为了反映掺加砂粒后土体塑性指数变化的影响,Yamada等<sup>[8]</sup>建议用以下公式确定最大剪切模量和模量衰减曲线:

$$G_{max} = 4000(I_p R)^{0.7} \sigma'_m \quad (3)$$

$$\frac{G}{G_{max}} = a_G(I_p R) + b_G \quad (4)$$

式中: $I_p$ 为塑性指数; $\sigma'_m$ 为平均有效应力; $R$ 为塑性指数折减因子,体现了含砂量的影响,其定义为 $\frac{P_{ca}}{P_{cb}}$ , $P_{ca}$ 和 $P_{cb}$ 分别为剔除0.425mm和2mm以上颗粒后

土体中粒径小于 0.002 mm 的黏粒质量分数;  $a_c$  和  $b_c$  是试验拟合的参数, 随剪应变大小改变, 与围压无关。由于试验中的固结应力较低(未超过 133.3 kPa), 该公式只适用于低围压的情况。另外值得注意的是, 一般黏性土的最大剪切模量经验公式同时包含了材料的孔隙比和平均应力的影响, 且最大剪切模量与平均应力的 0.5 次方成正比。而 Yamada 等<sup>[8]</sup>认为材料孔隙比与固结压力相关, 故在该公式中孔隙比的影响也用平均应力等体现, 给出的公式中最大剪切模量随平均应力线性变化。

Hassanipour 等<sup>[10]</sup>的共振柱试验结果则表明含砂黏土(砂粒的平均粒径约 3.5 mm)的最大剪切模量随含砂量是非单调变化的。在砂粒的体积分数小于 60% 时, 最大剪切模量随着含砂量的增加而增加, 超过 60% 之后, 模量又有所降低。这是由于含砂量较小时, 材料的孔隙比随着含砂量的增加而降低, 当含砂量较大时, 粗粒料骨架中的孔隙未能被黏土完全填充, 孔隙比增加, 剪切模量下降。综合考虑孔隙比和围压的影响, Hassanipour 等<sup>[10]</sup>建议用下式来确定材料的最大剪切模量:

$$G_{\max} = A \frac{(2.95 - e)^2}{1 + e} \sigma_m'^{0.5} \quad (5)$$

式中:  $e$  为孔隙比;  $A$  为与含砂量有关的参数, 当含砂量  $S_c < 60\%$  时,  $A = 1700S_c + 2000$ , 当  $60\% \leq S_c \leq 80\%$  时,  $A = -2000S_c + 4300$ 。

## 1.2 阻尼比

研究[7]表明, 在黏土中掺加砾粒后, 材料的阻尼比  $D$  会有所变化。在含砾量较低的情况下, 阻尼比随含砾量的增加而增加; 随着含砾量提高到某一临界值后, 粗粒料形成相对较稳定的骨架, 相互滑移变得困难, 阻尼比随之减小, 此时砾粒形状对阻尼比的影响也变得明显。由于颗粒间滑移更容易, 含圆砾黏土的阻尼比要大于含角砾黏土。含砾量和动应变水平越大, 这种区别越明显, 当动剪应变水平为 0.1% 时, 两种材料的阻尼比相差约 20%。Meidani 等<sup>[7]</sup>建议阻尼比可用双曲正切函数模拟:

$$D = r + \operatorname{stanh}\left(w \frac{G}{G_{\max}}\right) \quad (6)$$

式中  $r$ 、 $s$ 、 $w$  为根据试验结果统计的无量纲模型参数, 颗粒形状和含砾量的影响主要通过动模量比  $\frac{G}{G_{\max}}$  反映。

Yamada 等<sup>[8]</sup>则认为阻尼比随着粗颗粒含量的增加而单调增加, 但具体的变化规律与塑性指数有关:

$$D = a_D(I_p R) + b_D \quad (7)$$

式中  $a_D$  和  $b_D$  为试验拟合参数, 与剪应变水平相关, 与围压无关。

Shafiee 等<sup>[11]</sup>同样认为阻尼比随粗粒料含量单调变化, 他们还指出颗粒尺寸对阻尼比也有影响, 尤其是在粗粒料含量较高的情况下, 阻尼比随着粗粒料粒径的增加而增加, 增加的幅度在 10% ~ 15% 之间。由于试验中粗粒料的体积分数最大为 60%, 当粗粒料含量继续增加后, 阻尼比的变化趋势是否会出现改变还需要进一步研究。

## 1.3 动强度

一般认为在黏土中掺加粗粒料能提高材料的静力强度, 但根据文献[6]的试验结果, 同一循环加载次数下, 掺砾黏土中含砾量越高, 动孔压越大, 模量衰减得越明显。当砾粒的体积分数达到 60% 时, 以应变幅值 1.5% 循环加载 50 次后的动孔压比(定义为动孔压  $u_d$  与初始有效围压  $\sigma'_3$  之比)可达 0.8 ~ 0.9, 有液化的可能。而纯黏土的动孔压比仅为 0.3 ~ 0.4。相比含砾量, 粗粒料尺寸对动孔压的影响不大, 这和 Soltani-Jigheh 等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。

Prakasha 等<sup>[13]</sup>对  $K_0$  固结下的含砂海洋黏土进行了应力控制下的常规尺寸动三轴试验研究。试验中的竖向有效应力为 200 kPa, 考虑了 4 组动应力水平, 6 种砂粒质量分数, 所掺加的砂粒平均粒径为 0.22 mm, 曲率系数为 1.0, 不均匀系数为 1.88。试验结果表明, 动应力水平和含砂量越大, 振动荷载产生的动孔压越大, 动强度越低。当动剪应力与初始竖向有效应力之比为 0.147 时, 纯黏土和含砂量(质量分数)为 10%、30%、50% 的土样加载 80 次后的动孔压分别为 15 kPa、24 kPa、40 kPa、65 kPa, 含砂量在 70% 的土样加载 20 次后就已液化破坏。

张文学等<sup>[14]</sup>对云南东川蒋家沟具有代表性的砾石土宽级配土样进行了动三轴试验(大于 0.5 mm 的颗粒质量分数为 57.1%), 他们同样指出混合土有液化的可能, 低围压下试样破坏时的孔压比可超出 0.9。相应的破坏动应力比稍高于一般砂性土, 但低于黏性土心墙料。

另外一些学者则认为动孔压或动强度并不随含砂量的改变而单调变化。Kuwanon 等<sup>[15]</sup>认为当黏粒质量分数超过 40% 时, 掺砂黏土试样的不排水强度与纯黏土的基本一致; Koester<sup>[16]</sup>的研究结果则表明细粒料细颗粒质量分数小于 20% 时, 材料的抗液化强度随着细粒料含量的增加而减小, 但当细粒料质量分数超过 20% 时, 抗液化强度转而开始上升; Troncoso<sup>[17]</sup>比较了小于 0.005 mm 的细粒料质量分数在 0% ~ 30% 的砂土的抗液化强度, 结果表明随着细粒料含量的增加, 抗液化强度反而下降, 这一结

论与 Seed 等<sup>[18]</sup>得到的掺入黏粒将提高材料的抗液化强度的结论不符,这可能是因为试验中的控制条件不一样,Troncoso 在研究中将混合土体的全局孔隙比固定为 0.85,而 Seed 等则基于同一标贯击数进行评价。这也从侧面反映出材料的动强度特性与其细观结构有关,全局孔隙比并不能较好地反映粗粒料之间的骨架作用和黏土的压实程度。

#### 1.4 影响因素分析

综上所述,掺砾黏土的动力性质除了受围压、动应力或动应变水平、循环加载次数等常规因素的影响之外,还受掺砾量、粗粒料的颗粒形状、粒径大小等因素的影响。这些因素将对掺砾黏土的细观结构产生影响,从而改变材料的动力性能。

以掺砾量为例,一般认为当粗粒料含量很低时,粗粒料将悬浮在黏土之中,不会起到骨架作用,掺砾黏土整体将呈悬浮-密实结构,材料的动力特性接近于纯黏土。若含砾量增加到一定程度,粗粒料的颗粒将互相接触,形成较好的传力骨架,骨架之间的空隙由黏土填充,掺砾黏土处于相对密实的状态,整体呈骨架-密实结构,动力特性同时受到砾石和黏土的影响。若含砾量进一步增加,细粒料不足以填充粗粒料中的空隙,掺砾黏土呈骨架-空隙结构,细粒料可较为轻易地在空隙中移动,基本不参与传力链的组成,动力性质主要受到粗粒料的控制。但是需要指出,以上 3 种细观结构形式只是假想中的理想状况,实际上掺砾黏土的细观结构要复杂得多。例如在粗粒料含量较高的情况下,细颗粒黏土有可能存在于粗粒料的孔隙之中,也有可能处于粗粒料的颗粒之间起到连接颗粒形成传力链的作用(图 1),对粗粒料起到一定的“胶结、黏滞”作用,此时黏土的压实程度对材料的动力性能也有较大影响。在粗粒料含量较小的情况下(图 2),如果粗粒料的颗粒相对集聚,粗粒料颗粒之间的骨架作用将对掺砾黏土的动力特性有影响。因而,在研究掺砾黏土的动力特性时,需要较为精细地研究掺砾黏土的细观结构。

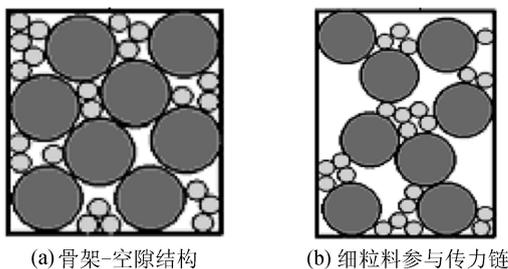
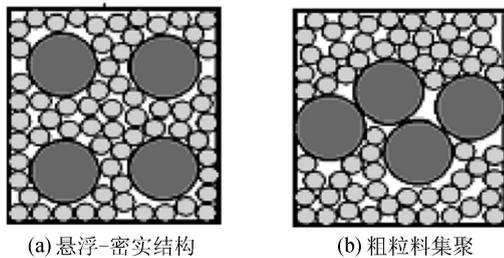


图 1 高含砾量下掺砾黏土细观结构

此外,研究者在研究粗粒料的动力性能时发现,粗粒料的颗粒粒径及级配对材料的动力特性也有较大的影响。孔宪京等<sup>[19]</sup>分析了 13 种不同类型的堆



(a) 悬浮-密实结构 (b) 粗粒料集聚

图 2 低含砾量下掺砾黏土细观结构

石料动力试验结果,并与国内外 8 座堆石坝现场弹性波试验结果进行了综合分析,结果表明,在孔隙比相等的情况下,不同的试验级配会导致不同的相对密实度,其对动剪切模量的影响很明显;Zhang 等<sup>[20]</sup>利用大型扭转共振仪对碎石土的最大剪切模量和模量比、阻尼比变化曲线进行了试验研究,结果表明最大剪切模量随着掺砾粒径的增大而增大,并定义了一个粒径分布曲线参数来反映不同级配的影响;孔宪京等<sup>[21]</sup>根据室内振动台试验结果,指出剪切模量随平均粒径的增大而增加,但粒径增大到一定值时,其增长率趋于平缓。这些研究都表明粗粒料的颗粒尺寸、形状和级配主要影响散体颗粒的骨架结构,进而影响材料的宏观动力特性。在掺砾黏土中,这些因素依然会起作用,但影响程度及规律需要进一步深入研究。

综上所述,掺砾黏土是一种粗、细颗粒混杂的复合体,研究该类土的动力特性及影响因素,需要从材料的细观结构入手,尤其是材料中粗粒料的骨架结构特征、粒间孔隙分布特征和细粒料密实程度。

## 2 掺砾黏土细观结构特征及数值分析

### 2.1 细观结构模型建立方法

为了建立掺砾黏土动力特性与细观结构特征之间的联系,首先必须合理地建立材料的细观结构模型。近年来,岩土材料细观结构模型的建立及分析受到越来越多的重视,其研究方法与研究沥青混合料类似。从细观结构模型的建立方法来看,可分为基于球形或规则多面体的模型建立方法、基于随机形状的模型建立方法和基于数字图像技术的模型建立方法 3 种。这 3 种方法在实际中均有所应用,如田莉等<sup>[22]</sup>以球形单元为基本计算单元,用单个小球单元模拟沥青玛蹄脂,多个球形单元黏结在一起形成不同形状的多面体与混合料中粗集料匹配,从而重构沥青混合料微观结构;丁秀丽等<sup>[23-24]</sup>按照一定的级配要求,随机确定碎石块体的空间位置、大小和形状等信息,进而建立材料模型并划分网格;胡迟春等<sup>[25]</sup>利用 CT 断层扫描技术对沥青混合料内部集料进行三维重构,并通过计算的集料体积信息,验证

了其模拟混合料内部集料级配情况的可行性; Masad 等<sup>[26]</sup>利用 CT 断层扫描技术定量分析了集料角度、级配和孔隙的分布。

上述 3 种方法各有优缺点,第 1 种方法最为简便,但对细观结构特征模拟的准确度最差;第 2 种方法从统计规律上考虑了粗粒料颗粒的形状及分布所带来的影响,模拟的可靠度取决于所采取的分布规律函数;第 3 种方法模拟的细观结构更接近于实际情况,常用来与真实试验结果进行对比验证。

掺砾黏土的细观结构特征研究可借鉴沥青混合料的研究方法,但须注意到,掺砾黏土中黏土的压实程度对材料的动力性能也有较大的影响。因此,在进行掺砾黏土细观结构特征研究时,除了合理重建粗粒料的骨架结构、粒间孔隙分布之外,还需测试评价黏土的压实程度或孔隙率。

## 2.2 细观数值模拟分析方法

材料的细观模型建立之后,可采用数值分析方法对材料宏观动力性能影响参数进行敏感性分析,常用的细观数值分析方法主要有离散元法和有限元法两种。

周健等<sup>[27]</sup>基于颗粒流理论,引入不同的颗粒接触连接本构模型,通过数值模拟重现了砂土和黏土平面应变试验的应力-应变关系,从细观力学角度对砂土和黏土的工程力学特性作了初步的研究;常晓林等<sup>[28]</sup>采用三维离散单元法模拟了常规三轴剪切试验,对颗粒形状及粒间摩擦系数对宏观力学性能的影响进行了研究;许朝阳等<sup>[29]</sup>采用颗粒流方法对桩承式路堤填土中的土拱形成和作用机理进行了分析。研究表明,离散元的计算精度很大程度上取决于颗粒法向刚度、切向刚度、摩擦系数等细观结构参数的确定,实际应用时存在接触本构关系选择及细观参数的标定校核问题。计算程序对颗粒数量也有一定的限制,目前也没有达到真实模拟土体中所有颗粒成分的程度,常需要对土体颗粒的粒径、形状及级配特征进行一定的简化。在将离散元方法应用到黏土时,流固耦合、孔压和排水边界条件等若干细节的处理上目前也还没有成熟的方式,这不利于模拟掺砾黏土在动荷载作用下孔压上升的现象。

有限元法相对较成熟,也可应用于细观数值分析。如丁秀丽等<sup>[23]</sup>将土石混合料中的土和砾石看作为两种材料,分别采用不同的本构模型,利用有限元软件 ABAQUS 对非饱和土石混合体的力学特性进行了二维分析;Yue 等<sup>[30-31]</sup>运用有限元法对香港地区花岗岩进行了非均质力学分析;徐文杰等<sup>[32]</sup>对西南地区一土石混合体边坡的应力场及稳定安全系数进行了有限元细观数值分析。总结前人的研究成

果可以发现,采用有限元法进行细观数值分析的难点在于需要可靠地重建细观结构网格,合理地选择接触模型和确定材料初始状态及参数。

## 3 基于复合材料理论的细观力学模型

掺砾黏土是一种多成分的复合材料,其细观结构特征对动力性能有着重要的影响。单纯地利用室内试验建立细观结构特征与宏观力学性能之间的经验关系并不能在机理上有所突破,精度、可靠性也难以满足要求。尽管目前动三轴试验的试样尺寸已有较大的提高,但一般仍无法对原型级配料进行室内试验,需采用剔除法、等量替代法或相似级配法等方法进行缩尺,颗粒粒径及级配的变化会导致试验结果与真实结果存在差异。因此,从基于复合材料理论的角度进行细观力学模型研究很有必要。

目前细观力学理论模型在岩土工程领域中的研究和应用不多,但可借鉴沥青混合料的研究经验。与掺砾黏土类似,沥青混合料通常认为是由粗集料和沥青胶浆组合而成,也是一种多组分的复合材料。近年来,从沥青混合料的微细观结构入手对混合料的力学行为进行研究,特别是将宏观力学行为与内部结构信息定量结合起来描述混合料的力学特性是道路工程中的研究热点问题。如 Li 等<sup>[33]</sup>将沥青混合料中的沥青看作基体,集料看成夹杂相,单个集料被等效为埋置在沥青混合料等效弹性介质中被沥青胶浆包裹的弹性圆球,这种模型称为双层材料模型。基于集料与胶浆、胶浆与等效介质界面上的应力和位移协调条件,结合已知边界条件的弹性力学解答,可以根据集料及胶浆的性质以及体积比例对沥青混合料的等效模量进行预测。利用这种方法,可以考虑集料尺寸和级配组成对沥青混合料弹性模量的影响。此外,黄晓明等<sup>[34]</sup>根据沥青砂浆基体的黏弹性性能,推导了沥青混合料的黏弹性本构方程。

岩土材料的动力分析中常将土体视为黏弹性体,因此在掺砾黏土的研究中,可以将粗粒料视为夹杂在黏弹性基体材料(黏土)中的颗粒增强体,按照复合材料理论建立细观力学分析模型。但与沥青混合料的研究相比,掺砾黏土的细观力学模型中需考虑两个区别:一是掺砾黏土中存在夹杂体间的粒间孔隙和基体内部的孔隙;二是掺砾黏土中的夹杂体和基体之间不像沥青混合料中那样完美地胶结在一起。

## 4 研究展望

掺砾黏土在自然界中广泛存在,工程中也有较多应用,但目前对其动力性质的研究还不多,影响因素及其机理尚不清楚,根据有限的试验数据得到的规律

还有矛盾的地方,需要在以下几个方面进一步研究:

**a. 掺砾黏土的细观结构特征及其影响因素。**掺砾黏土的动力性能之所以与纯黏土不同,是因为其夹杂了一定含量的粗粒料。粗粒料的存在可能会导致粒间大孔隙的存在,影响细粒料的压实程度,粗粒料的颗粒形成稳定骨架后也将参与力的传递。这些细观结构特征主要与粗粒料的含量、粒径形状、尺寸和级配有关,如何建立这些指标与细观结构特征之间的关系需要进一步研究。

**b. 掺砾黏土的细观结构对材料宏观动力性能的影响机理。**建立掺砾黏土的细观结构模型之后,可结合数值分析和动三轴试验结果,分析材料细观结构特征对材料动力特性的影响。分析中要注重以下几点:一是要准确重构粗粒料、孔隙及细粒料的几何形态及分布;二是要对材料中不同组成材料赋予不同的材料模型,合理设置细粒料的初始状态;三是要合理考虑砾石与黏土之间的接触作用。

**c. 基于颗粒增强复合材料理论的掺砾黏土细观力学理论模型。**掺砾黏土细观力学模型的建立可参照沥青混合料的研究方法,将粗粒料简化为弹性圆球,并夹杂在具有未知力学性能的掺砾黏土有效介质中,用细观力学理论推导出动态模量和阻尼比的理论表达式。但与沥青混合料不同,在建立掺砾黏土的细观力学模型时,需要对孔隙分布和黏土与砾石之间的接触对宏观力学性能的影响做深入分析。

## 参考文献:

[ 1 ] 丰土根,杨贵.高土石坝抗震性能分析与灾害对策研究[J].灾害学,2010,25(3):42-48. (FENG Tugen, YANG Gui. Seismic performance analysis and disaster countermeasures of high earth-rock dams[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(3): 42-48. (in Chinese))

[ 2 ] 刘汉龙.土动力学与土工抗震研究进展综述[J].土木工程学报,2012,45(4):148-164. (LIU Hanlong. A review of recent advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (4): 148-164. (in Chinese))

[ 3 ] 齐剑峰,栾茂田,杨庆,等.饱和黏土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(4):518-523. (QI Jianfeng, LUAN Maotian, YANG Qing. Dynamic shear modulus and damping ratio of saturated clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (4): 518-523. (in Chinese))

[ 4 ] 沈珠江,徐刚.堆石料的动力变形特性[J].水利水运科学学报,1996(2):143-150. (SHEN Zhujiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading [J]. Hydro-Science and Engineering, 1996 (2):

143-150. (in Chinese))

[ 5 ] 刘汉龙,杨贵,陈育民.筑坝反滤料动剪切模量和阻尼比影响因素试验研究[J].岩土力学,2010,31(7):2030-2034. (LIU Hanlong, YANG Gui, CHEN Yumin. Experimental study of factors influencing dynamic shear modulus and damping ratio of dam inverted filler [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (7): 2030-2034. (in Chinese))

[ 6 ] SHAFIEE A, JAFARI M K, JALALI N. Cyclic behavior of composite clays [C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: International Association for Earthquake Engineering, 2004:1-13.

[ 7 ] MEIDANI M, SHAFIEE A, HABIBAGAHI G, et al. Granule shape effect on the shear modulus and damping ratio of mixed gravel and clay [J]. Iranian Journal of Science and Technology: Transaction B, Engineering, 2008, 32(5): 501-518.

[ 8 ] YAMADA S, HYODO M, ORENSE R P, et al. Initial shear modulus of remolded sand-clay mixtures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(7): 960-971.

[ 9 ] ASTM D4318-05 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils [S].

[ 10 ] HASSANIPOUR A, SHAFIEE A, JAFARI M K. Low-amplitude dynamic properties for compacted sand-clay mixtures [J]. International Journal of Civil Engineering, 2011, 9(4): 255-264.

[ 11 ] SHAFIEE A, GHATE R. Shear modulus and damping ratio in aggregate-clay mixtures: an experimental study versus ANNs prediction [J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8 (18): 3068-3082.

[ 12 ] SOLTANI-JIGHEH H, SOROUSH A. Cyclic behavior of mixed clayey soils [J]. International Journal of Civil Engineering, 2010, 8(2): 99-106.

[ 13 ] PRAKASHA K S, CHANDRASEKARAN V S. Behavior of marine sand-clay mixtures under static and cyclic triaxial shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 213-222.

[ 14 ] 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):66-68. (ZHANG Wenju, HE Changrong. Experimental investigation on dynamic strength of mud-rock flow gravel soil with spreading gradation [J]. Sichuan Water Power, 2003, 22 (1): 66-68. (in Chinese))

[ 15 ] KUWANO J, IMURA H, TAKAHARA K, et al. Undrained cyclic and monotonic shear behavior of sand-kaolin mixed [C]//Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 165-170.

[ 16 ] KOESTER J P. Effects of fines type and content on liquefaction potential of low-to medium plasticity fine-

- grained soils [ C ]//Proceeding of National Earthquake Conference. Memphis: Central United States Earthquake Consortium, 1993: 67-75.
- [17] TRONCOSO J H. Failure risks of abandoned tailings dams [ C ]//Proceeding of International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams. Paris: International Commission on Large Dams, 1990: 82-89.
- [18] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations [ J ]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(12): 1425-1445.
- [19] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比 [ J ]. 水利学报, 2001, 33(8): 20-25. ( KONG Xianjing, LOU Shulian, ZOU Degao. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of rockfill material for dam [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 33(8): 20-25. ( in Chinese ) )
- [20] ZHANG J, ANDRUS R D, JUANG C H. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships [ J ]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(4): 453-464.
- [21] 孔宪京, 韩国城, 林皋. 粒径对动剪切模量的影响 [ J ]. 东北水力发电学报, 1988, 4(4): 9-15. ( KONG Xianjing, HAN Guocheng, LIN Gao. Effects of particle size on the dynamic shear modulus [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1988, 4(4): 9-15. ( in Chinese ) )
- [22] 田莉, 刘玉, 王秉纲. 沥青混合料三维离散元模型及其重构技术 [ J ]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(4): 23-27. ( TIAN Li, LIU Yu, WANG Binggang. 3D DEM model and digital restructure technique for asphalt mixture simulation [ J ]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(4): 23-27. ( in Chinese ) )
- [23] 丁秀丽, 张宏明, 黄书岭, 等. 基于细观数值试验的非饱和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. 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] 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 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477-484. ( DING Xiuli, LI Yaoxu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 477-484. ( in Chinese ) )
- [25] 胡迟春, 王端宜, GIBSON N, 等. 基于 CT 技术沥青混合料集料的识别与分离 [ J ]. 公路交通科技, 2011, 28(1): 13-18. ( HU Chichun, WANG Duanyi, GIBSON N. Identification and separation of aggregates in asphalt mixture based on computed tomography [ J ]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(1): 13-18. ( in Chinese ) )
- [26] MASAD E, JANDHYALA V K, DASGUPTA N, et al. Characterization of air void distribution in asphalt mixes using X-ray computed tomography [ J ]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(2): 122-129.
- [27] 周健, 苏燕, 池永颀. 粒流模拟土的工程特性 [ J ]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 390-396. ( ZHOU Jian, SU Yan, CHI Yong. Simulation of soil properties by particle flow code [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 390-396. ( in Chinese ) )
- [28] 常晓林, 马刚, 周伟, 等. 颗粒形状及粒间摩擦角对堆石体宏观力学行为的影响 [ J ]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 646-653. ( CHANG Xiaolin, MA Gang, ZHOU Wei. Influences of particle shape and inter-particle friction angle on macroscopic response of rockfill [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 646-653. ( in Chinese ) )
- [29] 许朝阳, 周健, 完绍金. 桩承式路堤承载特性的颗粒流模拟 [ J ]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 501-507. ( XU Chaoyang, ZHOU Jian, WAN Shaojin. Simulation of bearing characteristics of pile-supported embankments by particle flow code [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup1): 501-507. ( in Chinese ) )
- [30] 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.
- [31] CHEN S, YUE Z Q, THAM L G. Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure [ J ]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(6): 939-957.
- [32] 徐文杰, 王玉杰, 陈祖煜, 等. 基于数字图像技术的土石混合体边坡稳定性分析 [ J ]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 341-346. ( XU Wenjie, WANG Yujie, CHEN Zuyu. Stability analysis of soil-rock mixed slope based on digital image technology [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1): 341-346. ( in Chinese ) )
- [33] LI G, LI Y, METCALF J B, et al. Elastic modulus prediction of asphalt concrete [ J ]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3): 236-241.
- [34] 黄晓明, 李汉光, 张裕卿. 考虑粗集料和空隙的沥青混合料黏弹性细观力学分析 [ J ]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(7): 31-36. ( HUANG Xiaoming, LI Hanguang, ZHANG Yuqin. Micromechanics analysis of viscoelasticity for asphalt mixtures considering influences of coarse aggregates and voids [ J ]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(7): 31-36. ( in Chinese ) )

(收稿日期: 2014-04-10 编辑: 熊水斌)