

超径颗粒粒度效应对基底材料力学特性的影响

汪小刚

(水利水电科学研究院岩土所, 北京, 100044)

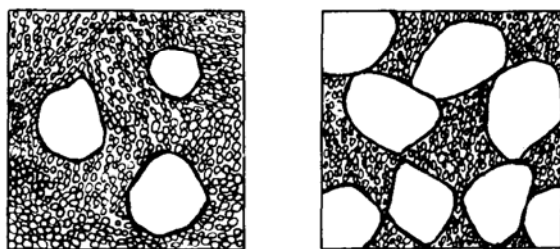
刘祖德 陆士强

(武汉水利电力大学, 430072)

文 摘 本文对“基底型”颗粒材料中超径颗粒含量、颗粒粒径、基底土干容重以及试验围压4个因素对其力学特性的影响进行了大量的室内三轴试验, 获得了各影响因素的定量参数。通过对试验成果的分析, 着重探讨了基底型颗粒材料中超径颗粒粒径和含量两个因素对其强度变形特性的影响规律及其力学机理, 提出了用单位剪切线上的超径颗粒数目这一特征指标来综合反映超径颗粒尺寸和含量对基底材料强度特性的影响效应。并进一步对试验中所观测到的一个重要的物理现象——基底型颗粒材料变形形态的分叉现象, 进行了理论分析。

1. 前 言

关于颗粒材料中超径颗粒粒度效应(含量、尺寸)对其强度和变形特性的影响规律, 国内外不少学者都做过大量的研究工作^[1-5]。但研究结论却存在很大的差异, 甚至是完全相反的^[6]。除了试验条件控制各不相同, 或在文献中没有陈述而难以揣摸其实际情况外, 试图用单个变量(超径颗粒含量或尺寸)来反应超径颗粒粒度效应对材料强度变形特性的影响以及忽视了颗粒材料结构形态本身的差异, 是导致试验结果相悖的重要原因。



(a) 基底式结构

(b) 骨架式结构

图1 颗粒材料的两种结构形态

仔细分析可以看到, 随着颗粒材料中超径颗粒含量的变化, 材料可能形成两种性质完全不同的结构形态, 如图1所示。我们分别称作“基底式结构”和“骨架式结构”。基底式结

构形态, 细粒含量较高, 超径颗粒自身形成不了骨架, 而个别地“悬浮”在基底材料中, 材料的强度和变形特性主要取决于细粒的特征和密度, 但同时也受到其中超径颗粒的影响。而骨架式结构形态, 超径颗粒的含量较高, 自身已形成骨架, 其中的细颗粒只起充填的作用, 材料的强度和变形特性将主要取决于超径颗粒。在这两种情况下, 超径颗粒的影响效应是完全不同的。当然, 对于天然级配的颗粒材料而言, 在上述两种不同的结构形态之间还可能存在着过渡的结构形式, 例如级配曲线整体地十分连续而且平缓(即级配较好), 就很难判断是属于何种结构形成。前述两种结构形态在级配不连续的土石坝坝壳料和长江中下游及类似地区的砂砾地基中是屡见不鲜的, 尤其是以改善土质为目的的掺合料(两料场材料按某一比例掺合)以及冰成漂砾砂(粘)土等则更为典型。

本文主要以基底式结构形态的颗粒材料作为研究对象, 通过室内三轴试验, 对基底型颗粒材料中超径颗粒尺寸和含量两个因素对其强度变形特性的影响规律和力学机制进行了详细的研究。与以往研究方法不同的是, 在试验过程中分别对基底材料中超径颗粒的粒径和含量加以控制, 以避免两个因素之间的相互混杂和干扰。事实上, 这种研究方案适合于等量替代法成果的分析 and 外延, 也适用于漂砾砂(粘)土和人工掺粗粒坝料力学特性的研究, 具有十分重要的意义。

2. 室内三轴试验成果及其分析

试验主要在室内静三轴剪切仪中进行, 试样直径 $D=101\text{mm}$, $H=200\text{mm}$, 属常规排水三轴压缩试验, 同时测定试样的排水体积。所用基底材料为平潭标准砂, 不均匀系数和曲率系数分别为 $C_u=2.09$, $C_c=1.32$ 。超径颗粒选用了较为浑圆的砾石, 比重为2.63, 经筛分后, 各组的粒径范围分别为 $d=4\sim6$; $6\sim8$; $8\sim10$; $10\sim15\text{mm}$ 。试样直径与颗粒最大粒径之比大于6, 已满足《土工试验规程》SD128-84中 $D/d_{\max}>5$ 的要求。

为了形成基底式的结构形态, 在试样的制备过程中, 控制试样中超径颗粒的含量不超过50%, 一般控制在30%以内; 同时为使得基底材料在加入不同含量、不同粒径的超径颗粒后, 其本身的力学特性保持不变, 采取控制基底土干容重基本不变的原则。这样在加入一定量的超径颗粒后, 试样的实际干容重为

$$\gamma'_d = \frac{1}{\frac{p}{G\gamma_w} + \frac{1-p}{\gamma_d}} \quad (1)$$

式中 γ'_d 为基底材料的干容重; p , G 分别为超径颗粒的含量和比重; γ_w 为水的容重。

在试验过程中, 考虑了基底土干容重 γ'_d 、试验围压 σ_3 以及超径颗粒含量 p 和粒径 d 4 个因素的变化。按照 4 个因素不同的水平, 组成了如表 1 所示的 30 多种试验方案。

按照表 1 所列出的试验方案, 各次试验成果均以 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 及 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 的关系曲线来表示。图 2~4 是本次试验中几组典型的试验曲线。

2.1 超径颗粒含量对应力应变特性的影响

图 2 (a)、(b) 分别表示不同围压情况下超径颗粒含量的变化对材料应力应变特性的影响。从中可以看出:

(1) 在小应变阶段($\epsilon_1 < 0.5\% \sim 1.0\%$), 无论超径颗粒含量多少, 应力应变曲线上对

表1

试验方案及其部分试验成果汇总表

基底土干容重 γ_d (kN/m ³)	试验围压 σ_3 (MPa)	超径颗粒含量 p (%)	超径颗粒粒径 d (mm)	试样编号	峰值偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) _p (MPa)	最大剪胀率 ($d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$) _p	破坏应变 ε_{1p} (%)
15.8	10	15	4~6	1-1	30.3	-0.50	2.25
		30	4~6	1-2	33.7	-0.61	2.00
		15	8~10	1-3	29.1	-0.46	3.00
		30	8~10	1-4	30.7	-0.51	2.25
15.8	30	15	4~6	2-1	94.6	-0.49	3.01
		30	4~6	2-2	101.4	-0.55	2.76
		15	6~8	2-3	91.8	-0.46	3.01
		30	6~8	2-4	99.2	-0.53	2.51
		15	8~10	2-5	88.0	-0.43	3.01
		30	8~10	2-6	96.7	-0.51	2.26
		15	10~15	2-7	*	*	*
		30	10~15	2-8	*	*	*
15.8	50	15	4~6	3-1	142.9	-0.42	3.77
		30	4~6	3-2	157.0	-0.48	3.26
		15	8~10	3-3	135.0	-0.37	4.02
		30	8~10	3-4	146.0	-0.44	3.51
16.6	10	15	4~6	4-1	36.2	-0.75	2.00
		30	4~6	4-2	39.6	-0.84	1.75
		15	8~10	4-3	34.9	-0.71	2.76
		30	8~10	4-4	36.6	-0.76	2.00
16.6	30	15	4~6	5-1	102.7	-0.61	3.01
		30	4~6	5-2	111.8	-0.68	2.51
		15	6~8	5-3	98.6	-0.57	2.76
		30	6~8	5-4	109.2	-0.66	2.26
		15	8~10	5-5	96.4	-0.55	2.76
		30	8~10	5-6	106.2	-0.64	2.25
		15	10~15	5-7	*	*	*
		30	10~15	5-8	*	*	*
15.8	10	纯基底材料 (砂)		I	28.1	-0.43	3.26
15.8	30			II	83.0	-0.38	3.77
15.8	50			III	127.9	-0.32	5.03
16.6	10			IV	32.9	-0.66	3.00
16.6	30			V	91.0	-0.54	3.51

注: 由于试样变形形态产生分叉, 其试验结果不能代表试样整体的情况, 在表中用*号表示。

应的初始切线模量基本相同, 表明该阶段基底材料的力学特性起主要作用。

(2) 在应变 $\varepsilon_1 \geq 0.5\% \sim 1.0\%$ 以后, 应力应变曲线明显地发生分叉, 超径颗粒开始起重要作用。当超径材料的粒径不变时, 含量愈多, 附加的抗剪强度也愈大; 与纯基底材料相比,

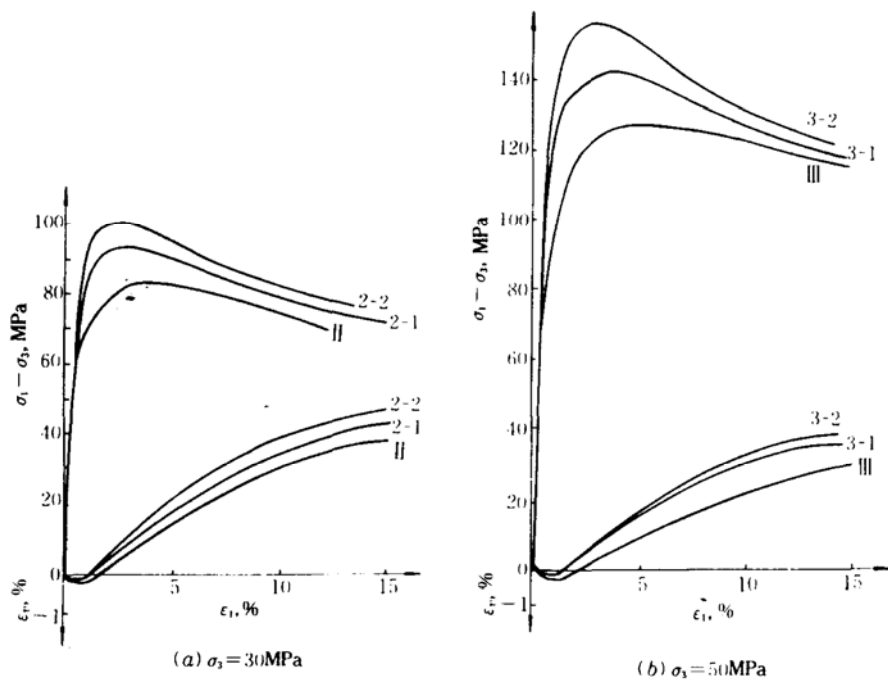


图2 不同含量应力应变曲线的比较
($\gamma_d = 15.8 \text{ kN/m}^3$, $d = 4 \sim 6 \text{ mm}$)

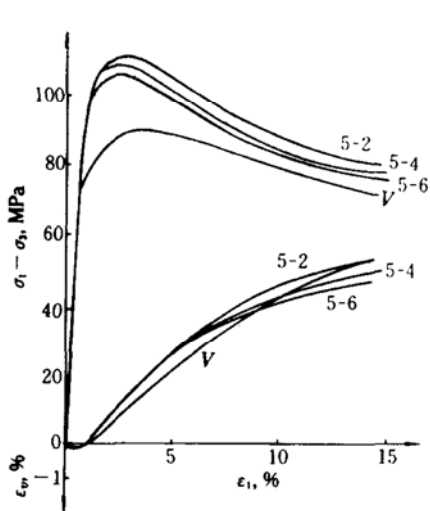


图3 不同粒径应力应变曲线的比较
($\gamma_d = 16.6 \text{ kN/m}^3$, $\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$, $p = 30\%$)

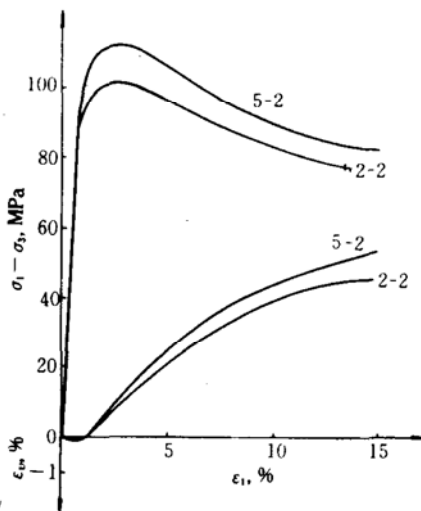


图4 不同密度应力应变曲线的比较
($\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$, $p = 30\%$, $d = 4 \sim 6 \text{ mm}$)

当含量 $p = 30\%$ 时, 可增加25%的强度, 可见在以改善土质为目的的混合坝料中当所掺粗颗粒含量适中时, 材料的力学特性可以得到明显的改善。

(3) 峰值强度点的出现, 约相应于 $\varepsilon_{1p} = 2.0\% \sim 3.0\%$, 而且含量 p 愈大, 相应的 ε_{1p} 愈小。

(4) 峰后强度的降低量也随含量 p 的增大而增大, 终值强度渐趋接近, 表明 $p < 30\%$ 以下的基底式结构材料中, 大变形条件下仍然是基底材料起主要作用, 而超径颗粒只是在一定的

变形阶段内才构成附加的抗剪强度因素。

(5) 含量 p 的增大, 同样也会使颗粒材料的剪胀量也相应的增长, 两者是相互对应的。

(6) 比较图2(a)、(b), 可以看到, 围压 σ_3 的改变, 并不会使上述5点规律发生任何质的变化, 只是 σ_3 增大, 剪胀量有所减小, 而强度的峰值与终值的差距却明显增加。这证明在常规试验中, 围压仍属低压性质, 不足以使坚硬的超径颗粒发生挤碎磨细的现象。 σ_3 的增加, 使超径颗粒对附加抗剪强度的影响更加明显了, 这是由于初始密度 ρ_d 虽一致, 增加 σ_3 后, σ_3 大者 ρ_d 更大, 超径颗粒被基底细粒挤得更紧, 更容易发挥其阻碍剪切变形的“障碍物”作用。

2.2 超径颗粒尺寸对基底材料力学特性的影响

图3表示控制 p 为常数, 其它初始条件也保持不变, 超径颗粒粒径尺寸的变化对基底材料力学特性的影响。从中可知:

(1) 超径材料颗粒愈粗者, 附加的抗剪强度愈小, 而颗粒愈细者, 反而会使附加的抗剪强度增大。

(2) 当含量一定时, 超径颗粒粒径的改变并不会使达到峰值强度时所对应的 ε_{1p} 有任何实质性的变化。

(3) 峰后的应力应变关系几乎是完全平行的, 峰后的强度降低量 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p - (\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 基本上为一常数。

(4) 从 $\varepsilon_1 - \varepsilon_v$ 曲线可知, 基底材料中超径材料的颗粒愈大, 剪胀量反而愈小(虽然变化幅度不甚大, 但趋势却十分明显)。这是因为当含量 p 保持恒定时, 较少颗粒数目的超径材料散布在基底材料中, 每一个颗粒的影响范围是有限的, 不如粒径较小而粒数较多的超径材料所产生的“障碍物”作用明显;

图3中5-2与图2中2-2试验曲线相比较(见图4), 可以看出, 基底材料初始密度的增加, 可使峰值强度增加, 但不会改变其终值强度。这正好证明了众所周知的一条散体材料的力学规律, 即大变形阶段, 土体的抗剪强度不再受材料初始密度的影响。此外, ρ_d 的增加会使土体的剪胀性更早地发挥出来, 最终的剪胀量也将增大。以上两点规律对有无超径颗粒是普遍适用的。

从以上的分析可以看到, 本次试验具有相当高的精度, 4个影响因素的作用能够微妙地、定量地得到明确的反映, 这为研究混合掺料的力学机理和各因素提供的物理分量提供了实践基础。

2.3 不同初始条件下的特征量

由于文章篇幅的限制, 不可能将所有的试验曲线在此一一展示。为便于以后的分析, 在表1中, 列出了不同初始条件下的3个特征量: 峰值强度、最大剪胀率和破坏应变的具体数值。

根据表1中所列出的试验结果还可以得出以下两点结论:

(1) 不论是纯基底材料还是加有超径颗粒的基底材料, 破坏应变均随基底土密度的增加而减小, 并随围压的增加而增加, 这与通常的规律是一致的。相对于纯基底材料(砂)而言, 掺有超径材料后, ε_{1p} 明显减小, 表明了超径颗粒的掺入会导致材料脆性的增加。

(2) 最大剪胀率 $(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_p$ 随 γ_d 和 σ_3 的变化规律在纯砂和掺有超径颗粒两种情况下都是一致的。即最大剪胀率随基底材料密度 ρ_d 的增加而增加, 随 σ_3 的增大而减小。峰值偏应力随超径材料含量 p 和超径材料粒径 d 的变化与最大剪胀率随上述两个因素的变化情况具有相似的规律性, 两者是紧密对应的。

3. 反映超径颗粒含量和尺寸综合影响效应的特征指标

前面我们在分析材料的峰值强度和最大剪胀率随超径颗粒粒径和含量等因素的变化情况时,都是采用正交试验的方法,研究在其它因素固定时某个被观察因素作用的大小。那么,能否用一个特征指标来全面地反映超径材料的粒径和含量这两个因素的综合影响效应呢?

这个指标应具备以下特征:①包含了超径颗粒粒径和含量两个影响因素;②材料的峰值强度和最大剪胀率随超径颗粒粒径和含量的变化与该指标之间存在单一的对对应关系。

经过对试验成果的反复研究,我们发现单位剪切线上的超径颗粒数目 N_i 是一个较为理想的指标,该指标由下式定义:

$$N_i = \frac{6p}{G\gamma_w d \left(\frac{p}{G\gamma_w} + \frac{1-p}{\gamma_d} \right)} \quad (2)$$

图5、图6分别表示当基底土容重 $\gamma_d = 16.6 \text{ kN/m}^3$ 时,峰值偏应力和相应的最大剪胀率在不同的围压情况下随 N_i 的变化规律($\gamma_d = 15.8 \text{ kN/m}^3$ 时具有类似的规律,在此不再给出)。从图中可以看出:

峰值偏应力和相应的剪胀率均随着单位剪切线上超径颗粒数目的增加而单调地增加,具有非常明显的规律。并且峰值偏应力和相应的剪胀率随 N_i 的变化趋势还与试验围压 σ_3 的大小有关。在围压较低($\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$)的情况下,峰值偏应力和最大剪胀率与 N_i 之间呈良好的线性关系,而当围压较高($\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$)时,曲线趋势表明峰值偏应力和最大剪胀率随 N_i 增大而增大的趋势将有所减弱。

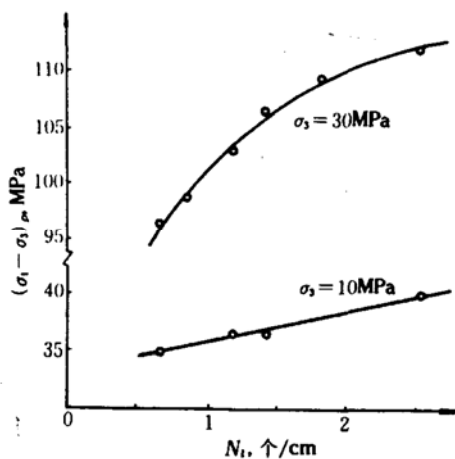


图5 峰值偏应力随 N_i 的变化情况

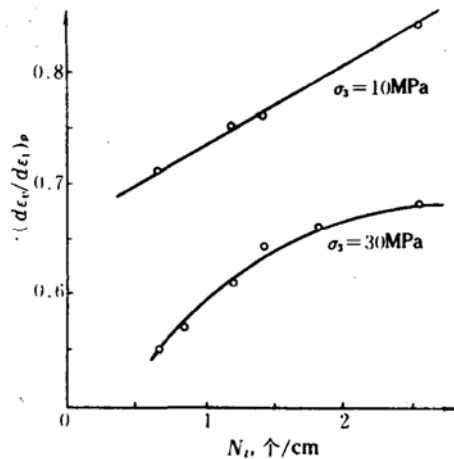


图6 最大剪胀率随 N_i 的变化情况

峰值偏应力和相应的剪胀率与单位剪切线上超径颗粒数目之间存在明确的对应关系,这决不是一件偶然的事情。从物理意义上分析,单位剪切线上的超径颗粒数目在一定程度上反映了剪切面的起伏程度,超径颗粒本身只要不破碎,相对于基底材料来说,犹如“制动块”或“障碍物”一样地工作。 N_i 越大,剪切面的起伏程度越大,因而其表观强度也越大,这

一点是很容易理解的。

4. 超径颗粒对基底材料强度特性影响的力学机制

众多的研究成果表明,颗粒材料的强度主要来源于以下几个方面:①颗粒相对滑动产生的滑动阻力所发挥的强度分量;②颗粒材料在剪切变形过程中,由于体积变化即剪胀效应所发挥的强度分量;③颗粒材料在剪切变形过程中,颗粒的重新排列和定向作用所发挥的强度分量。此外,当围压较高、材质较软时,还需进一步考虑颗粒的挤碎磨细作用所发挥的强度分量。在本次试验中,由于试验围压相对较低、材质较硬(为石英砂岩),在试验过程中颗粒未出现明显的破碎现象,这一分量可不予讨论。为了进一步认识颗粒材料强度特性的本质,把各强度分量从实测的总体强度中分解开来具有十分重要的意义。

在表述颗粒材料强度和剪胀关系的众多理论公式中,罗威的剪胀方程获得了较为广泛的应用。该方程是从颗粒材料的微观变形机理出发,依据最小比能原理建立的,其表达式为^[6]

$$\operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\phi_u}{2}\right) = \frac{\sigma_1}{\sigma_3\left(1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}\right)} \quad (3)$$

式中 ϕ_u 为消除剪胀强度分量后颗粒材料的滑动摩擦角。考虑到颗粒材料在剪切变形过程中的定向排列作用,在实际应用中, ϕ_u 常常用 ϕ_r 来代替, ϕ_r 同时包含了滑动阻力所发挥的强度分量及定向排列所发挥的强度分量。这样实测的表观内摩擦角可用下式表示为

$$\phi = \phi_a + \phi_r \quad (4)$$

式中 ϕ_a 为剪胀效应强度分量。

图7表示不同围压和不同密度情况下,基底型颗粒材料的总体强度指标 ϕ 以及根据本次试验结果由上式计算得到的各强度分量 ϕ_a 和 ϕ_r 随 N_t 的变化规律。图中的虚线代表纯基底材料(砂)的情况,为区别起见,其强度指标分别用 ϕ_0 , ϕ_{a0} 和 ϕ_{r0} 表示。从图中的结果可以看到:基底型颗粒材料的总体强度指标 ϕ 以及相应的各强度分量 ϕ_a 和 ϕ_r 均随着 N_t 的增加而单调地增加,这与前面提到的峰值偏应力和最大剪胀率随 N_t 的变化规律是一致的。相对于纯基底材料而言,超径颗粒加入后,材料的总体强度指标 ϕ 提高较多,并且在不同的基底土容重 γ_d 和

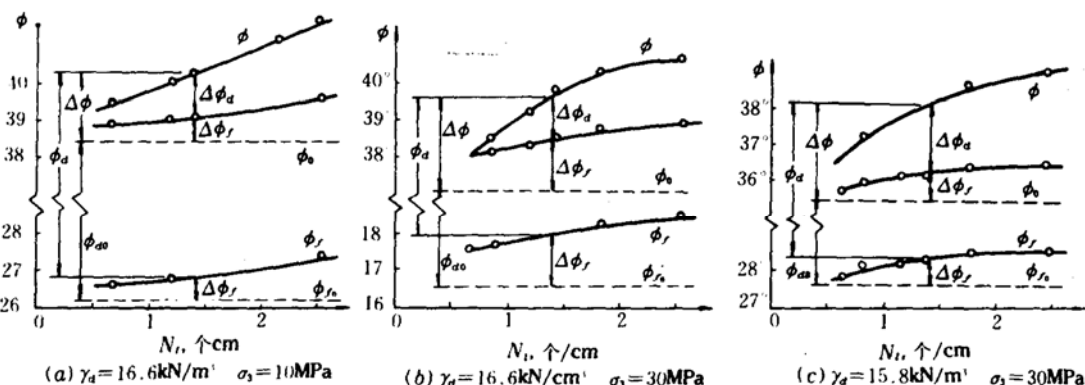


图7 强度指标随 N_t 的变化情况

试验围压 σ_3 的组合情况下, 内摩擦角 ϕ 的绝对增量 $\Delta\phi$ 都随着 N_t 的增加而增加。如果令 $\Delta\phi_a = \phi_a - \phi_{a0}$, $\Delta\phi_r = \phi_r - \phi_{r0}$; 则 $\Delta\phi_a$ 和 $\Delta\phi_r$ 也均随着 N_t 的增加呈增加的趋势。

在总体强度指标 ϕ 的增量 $\Delta\phi$ 中($\Delta\phi = \Delta\phi_a + \Delta\phi_r$), $\Delta\phi_a$ 反映了超径颗粒的掺入会导致材料剪胀特性的增强, 从而提高了材料的剪胀强度分量, 而 $\Delta\phi_r$ 则说明了超径颗粒掺入后会同时增加颗粒材料在剪切变形过程中的定向排列作用, 使得 ϕ_r 有所增加。

进一步分析可以看到, 在不同的基底土密度 γ_a 和围压 σ_3 的组合下, $\Delta\phi_a$ 和 $\Delta\phi_r$ 在 $\Delta\phi$ 中所占的比重是不相同的: 在较小的密度和围压情况下, 超径颗粒的加入所导致的材料总体强度指标的增加主要来源于颗粒材料剪胀效应的增强; 但是, 随着密度和围压的增加, 超径颗粒使基底材料在变形过程中定向排列作用的增强所引起的 ϕ_r 的增加显得越来越重要, 甚至超过了剪胀效应的作用。

由此可见, 基底材料中的超径颗粒不仅构成了变形过程中的“障碍物”, 增加了剪切面的起伏度, 导致了材料剪胀特性的增加; 而且它们在变形过程中还会增强颗粒材料的定向排列作用, 增加变形过程中的摩擦功, 导致非剪胀诱致的峰值偏应力。上述两个因素的共同作用, 是基底材料中加入一定量的超径颗粒后强度特性发生变化的内在原因。

5. 基底型颗粒材料变形形态的分叉

在室内三轴试验过程中, 我们对试样的变形和破坏形态进行了观测, 发现了一个极为重要的物理现象: 在纯基底材料(砂)和基底材料中超径颗粒粒径相对较小时, 试样在变形过程中自始至终都保持了鼓胀型(zone failure)的变形形态; 而在超径颗粒粒径 $d = 10 \sim 15 \text{ mm}$ 时, 试样在变形的初始阶段呈鼓胀型的形态, 但接近破坏时, 试样的变形形态发生了分叉, 在试样的内部出现了明显的局部剪切带。两种破坏形式如图8(a)、(b)所示。

为了进一步验证这一分叉现象的必然性, 我们在原有试验方案的基础上补做了超径颗粒粒径 $d = 15 \sim 20 \text{ mm}$ 的试验。在这种情况下, 剪切带的发展更为完整, 并且试样上下部分的圆锥形剪切带均相互连通了。

仔细分析和比较本次试验中各次试验的情况, 可以看到, 试样的变形破坏形态与单位体积内的超径颗粒数目之间存在着较好的对应关系, 如图9所示。

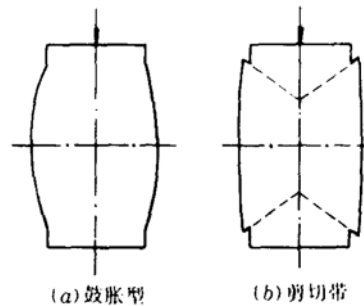


图8 两种不同的破坏形态

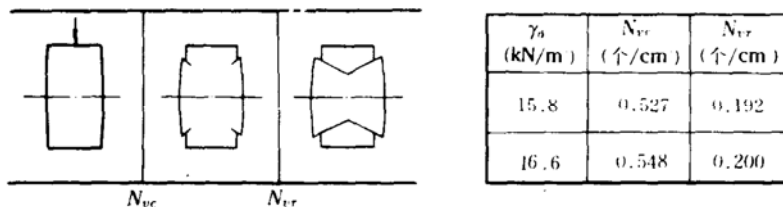


图9 试样破坏形态随 N 的变化情况

图9表明, 单位体积内所含超径颗粒数目越少, 试样变形形态越不均匀, 容易出现剪切带的破坏形式。因此, 纯砂试样的变形要比含粗砾材料的变形均匀, 如果试样两端不受制约,

则试样内各点的变形应当是完全均匀的。

在相同的边界条件下,基底材料中加入超径颗粒后会导致材料性质的不均匀,使得试样变形有向局部区域集中的趋势,这是含超径颗粒的基底型材料试样变形形态发生分叉的根本原因。一般说来,粒径较大的粗颗粒周围是剪切变形相对集中的区域,在变形过程中,局部基底材料被压紧,另一部分则可能变松(如图10所示),这样就形成了局部薄弱区,构成了剪切带开展的发源地。

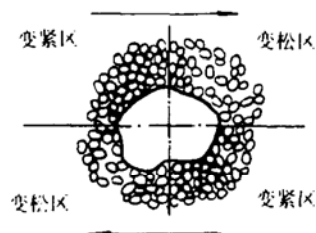


图10 剪切过程中颗粒材料密度变化情况示意图

当试样内所包含的超径颗粒数目相对较多时($N_v > N_{vc}$),试样中局部薄弱区由于受到相邻超径颗粒的限制作用,变形后仍然保持了鼓胀型的形态。但是随着 N_v 的逐渐减小,当达到某一临界状态后($N_v < N_{vr}$),局部薄弱区的变形得以充分发展并相互连通,形成了明显的剪切带。

试样内局部剪切带的出现,会对材料的力学特性产生显著的影响。在超径颗粒粒径 $d = 10 \sim 15 \text{mm}$ 的情况下,我们曾发现应力应变曲线上的峰值偏应力低于纯砂的现象,这正是由于试样的变形形态在峰值前就已出现分叉(前者剪切带破坏,后者鼓胀破坏)而引起的。

为了进一步说明上述问题,我们曾对局部薄弱区所导致的试样变形形态的分叉现象进行了数值计算的模拟验证,得出了与试验现象一致的结论,详细内容将另文发表。

6. 结 论

(1) 基底型颗粒材料中的超径颗粒会对材料的强度变形特性产生显著的影响,影响效应的大小不仅与超径颗粒含量有关而且还与超径颗粒粒径尺寸有关,因此单纯用含量或尺寸中的某一因素来反映这种影响效应是不合理的。

(2) 从力学机理上分析,超径颗粒对基底型颗粒材料强度特性的影响主要表现在两个方面:第一,基底材料中的超径颗粒,构成了材料在剪切变形过程中的障碍物,增加了剪切面的起伏度,从而提高了材料的剪胀强度分量;第二,基底材料中的超径颗粒,除了会增加材料的剪胀分量外,还会增强颗粒材料在剪切变形过程中的定向排列作用,导致摩擦功的增加,产生非剪胀引起的强度分量。并且在不同的密度和围压情况下,两者在总体强度增量中所占的比重是不相同的。

(3) 材料强度特性随超径颗粒含量和尺寸的变化情况,可以用单位剪切线上的超径颗粒数目这一特征指标来综合反映。材料的总体强度和相应的强度分量均随着该指标的增加而增加,两者之间存在着明确、单一的对对应关系。

(4) 基底型颗粒材料中的超径颗粒,增加了材料的局部不均匀性,在一定条件下可能会导致试样变形破坏形态的分叉。单位体积内的超径颗粒数目可以作为试样变形形态是否发生分叉的依据。

参 考 文 献

1. Frost R J. Some Testing Experiences and Characteristics of Boulder Gravel Fills in Earth Dams. ASTM, STPS23, 1973: 207~233.

2. Rathee R K. Design Value of Shear Parameters of Large Size Material. *Indian Geotechnique*, 1980; 56~62.
3. Gole M C. Evaluation of Shear Strength of Coarse Grained Soils. *Indian Geotechnique*, 1979; 77~85.
4. 孟宪麒, 史彦文. 石头河土石坝砂卵石抗剪强度. *岩土工程学报*, 1983, 5(1): 90~101.
5. Marachi N D, Chan C K, Seed H B. Evaluation of Properties of Rockfill Materials. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1972, 98(SM1): 95~112.
6. Rowe P W. The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact. *Proceeding of the Royal Society of London*, 1962, 269: 500~527.

Effect of Gradation of Coarse Grains on the Mechanical Properties of "Based-type" Granular Materials

Wang Xiao-gang

(Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Beijing)

Liu Zu-de Lu Shi-qiang

(Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering)

Abstract A series of triaxial tests have been conducted to study the effect of coarse grain percentage and size, dry density of based soil and confining pressure on the mechanical properties of "based-type" granular materials. The rule and mechanism of the effect of size and contents of coarse grains on the strength and deformation characteristics of field materials are mainly discussed according to the test results. It is put forward that this effect can be reflected comprehensively by the index—the number of coarse grains per unit length on the shear line. Bifurcation of deformation state of test specimens caused by coarse grains is analysed theoretically.