

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.013

砂砾石混合物抗剪强度特性试验研究

薛亚东^{a,b}, 刘忠强^{a,b}, 黄宏伟^{a,b}

(同济大学 a. 土木工程学院; b. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:为分析砾石含量及砾石形状对砂砾石混合物抗剪强度的影响,对砂砾石混合物进行了不同应力($\sigma = 50, 100, 150, 200$ kPa)条件下的大型直剪试验。试验中砂砾石混合物为相同砂与圆砾石及角砾石2种不同形状砾石的混合物,砾石含量分别为20%、40%、60%及80%。结果表明砂砾石混合物的剪胀量和抗剪强度随砾石含量以及砾石形状不规则程度的增加而增加,砾石含量对砂砾石混合物抗剪强度的影响大于砾石形状的影响。砂砾石混合物的最小孔隙比可以作为衡量砾石含量和砾石形状与其抗剪强度关系的特征参数。

关键词:砂砾石混合物;直剪试验;剪胀;抗剪强度;孔隙比

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)06-0075-05

Experimental Analysis on Shear Strength Characteristics of Sand-Gravel Mixtures

XUE Yadong^{a,b}, LIU Zhongqiang^{a,b}, HUANG Hongwei^{a,b}

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The effect of gravel content and shape on shear strength of sand-gravel mixtures was investigated through a series of direct shear tests under different stress states ($\sigma = 50, 100, 150$ and 200 kPa) in laboratory. Mixtures were made up of sand with rounded and angular gravels, respectively. The gravel contents of 20%, 40%, 60% and 80% were used in sample preparation. The results indicate that the dilatancy and shear strength of sand-gravel mixture increase with increasing gravel content and irregular degree of gravel shape. The gravel content has a more visible effect on the shear strength rather than that of the gravel shape. The minimum void ratio of the mixture is a characteristic parameter to investigate the relationship between gravel content & shape and the shear strength of sand-gravel mixture.

Key words: sand-gravel mixture; direct shear test; dilatancy; shear strength; void ratio

砂砾石混合物是一种重要的岩土工程介质,其抗剪强度与内部土体与砾石性质、存在状态以及受力情况等有关。在以往的工程实践中,通常取强度较低的土体作为混合物的设计强度^[1],这显然忽略了砾石对混合物力学参数的影响;或者是对混

合物中土体进行试验,再乘以一定的系数而得到,这种方法得到的结果也不能真实反映砾石对混合物强度的影响^[2]。Holtz等^[3]最早通过直剪试验发现砂砾石混合物的抗剪强度随着砾石含量的增加而增加,很多学者^[4-7]在后续的试验中也得出了相似的结果。

收稿日期:2012-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40772179、41072206);交通部西部交通建设科技项目(2006318799107)

作者简介:薛亚东(1971-),男,副教授,主要从事复杂岩土体的本构特性研究,(E-mail)yadongxue@126.com。

黄宏伟(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)huanghw@tongji.edu.cn。

论。Fragaszy 等^[8]引入远场基质密度的概念来考虑砾石对砂砾石混合物静强度及变形特性的影响,将混合物分为与砾石临近的基质以及远离砾石的基质。研究发现当砾石悬浮于土体介质中时,混合物的静强度与变形特性主要由远离砾石的基质决定。Evans 等^[9]证实了上述理论对砂砾石混合物的动强度也是适用的。李振等^[10]通过直剪试验发现砂砾石混合物的抗剪强度随着相对密度的增加而增加。Guo 等^[11]与 Hamidi 等^[12]发现砾石形状在很大程度上影响着砂砾石混合物的物理力学特性。

纵观前人研究,影响砂砾石混合物抗剪强度特性的因素很多,包括砾石含量,砾石尺寸,相对密度,砾石形状以及应力水平等。由于对砾石形状量化比较困难,定量考虑砾石形状对砂砾石混合物抗剪强度影响的研究尚不多见。因此本文考虑 4 种砾石含量水平(20%、40%、60%及 80%)与 2 种定量化的砾石形状(圆与棱角),开展大尺度直剪试验,研究不同应力水平下砾石含量及砾石形状对砂砾石混合物抗剪强度特性的影响规律。

1 试验材料

试验材料分别为同一场地的河床砂、圆砾石和角砾石,砾石的岩性、质地基本一致。采用标准筛分法,对试验材料进行粒度分析,砾石的最大粒径为 40 mm。砂、砾石与砂砾石混合物(砾石含量 20%、40%、60%及 80%)的粒度累计分布曲线及其最大最小孔隙比如图 1 所示。从图 1(b)可以看出,砾石含量小于 60%时,砂砾石混合物的最大与最小孔隙比均随砾石含量的增加而减小;砾石含量超过 60%时,其最大最小孔隙比随砾石含量的增加而增加。这也表明砾石含量 60%是混合物组成结构转变的临界点,在此之前,混合物的主要组成为砂土,“砾石”悬浮于“砂土”颗粒之中;超过 60%以后,混合物主要由砾石构成骨架,砾石颗粒紧密接触,土体填充了砾石之间的孔隙。含圆砾石混合物的最大与最小孔隙比均小于含角砾石混合物,这是由于角砾石形状更不规则,颗粒间架空现象更明显,从而使孔隙更大。

2 种不同形状的砾石颗粒如图 2 所示。砾石颗粒的形状可以用以下 2 个变量来描述:

1)球形度,定义为颗粒最小外接圆半径(S_1)与最大内切圆半径(S_2)的比值^[13]。它反映了颗粒整体外形与标准球形的接近程度及颗粒长宽高尺寸的接近程度。颗粒外形越扁平、狭长,越偏离标准球形状,该值越小,标准球形取理论值 1。

2)磨圆度,定义为颗粒等效椭圆的周长(P_1)与最小外接多边形周长(P_2)之比^[14]。等效椭圆为与颗粒具有相同面积和长宽比的标准椭圆,最小外接多边形周长表征颗粒在排除了表面粗糙度和边界曲线微小起伏影响下的近似边界周长。表面棱角数目越多及突出程度越明显的颗粒, P_2 越大, P_1 越小;反之, P_1 与 P_2 越接近,表面磨圆度越好,其值越接近于 1。

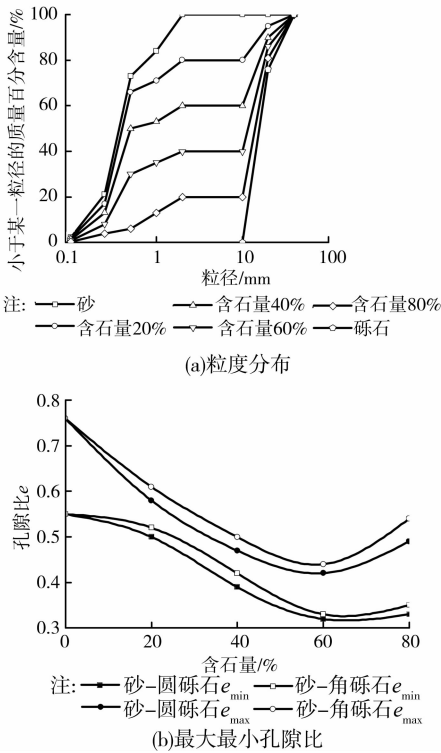


图 1 试验材料粒度分布曲线与最大最小孔隙比

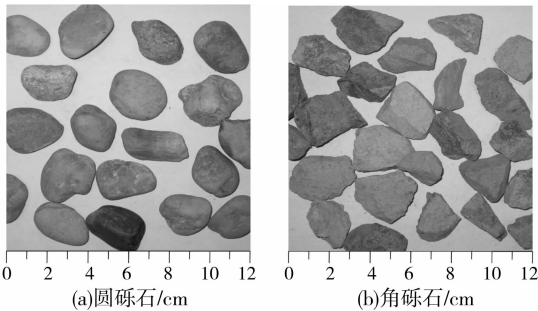


图 2 砾石颗粒照片

利用 ImageJ 图像处理软件^[15]对砾石颗粒形状参数进行量化。随机选取各 50 个圆砾石与角砾石颗粒,得到其球形度与磨圆度,如表 1 所示。为表述方便,引入不规则系数 IR 来描述颗粒整体不规则程度,并将其定义为球形度与磨圆度平均值的倒数。圆砾石与角砾石的不规则系数分别为 1.43 和 2.5。 IR 值越大,说明颗粒不规则程度越高。

表 1 砾石颗粒形状参数

形状参数		砾石	
		圆砾石	角砾石
球形度	均值	0.64	0.38
	方差	0.06	0.06
磨圆度	均值	0.76	0.42
	方差	0.08	0.07

2 抗剪强度分析

2.1 试验方法及过程

试验在同济大学大型多功能界面剪切仪 SJW-200 平台上进行。试样的尺寸与剪切盒内轮廓相同,为(长×宽×高)600 mm × 400 mm × 200 mm。

按图 1(a)各组试样的模型级配进行配料,将称好的试样拌匀后分 3 层装入剪切盒内,并找平。加垂直压力进行压密固结,待垂直变形小于 0.03 mm 时,认为固结稳定。每组试验 4 个试样,垂直荷载分别设定为 50、100、150、200 kPa。保持预定的法向应力不变,启动下剪切盒匀速进行剪切,剪切速率为 2 mm/min,自动记录水平位移、水平荷载与垂直位移等数据。当水平荷载不再增加或者剪切变形急剧增长时,则认为试样已剪切破坏,终止试验。如无以上情况出现,则当剪切变形量达到试样剪切方向尺寸的 1/15(40 mm)时,即认为已剪切破坏,停止试验。

2.2 应力应变与变形特性

根据直剪试验结果,可以得到砂砾石混合物的剪应力-应变关系曲线。图 3 所示为 50 kPa 法向应力下砂-圆砾石与砂-角砾石混合物在不同砾石含量时的剪应力-应变曲线(实心图例)及垂直位移-应变曲线(空心图例)。垂直位移为负代表剪胀,垂直位移为正表示剪缩。

进一步对上述试验结果进行分析,可得出如下认识:

- 1)在同一法向应力下,砾石含量高(60%及 80%)的混合物应变硬化程度明显强于砾石含量低(20%及 40%)的混合物。这是由于含石量较高的混合体剪前初始孔隙比较小,整体密度较大,抵抗剪切破坏的能力较大,因而应变硬化效应更明显。
- 2)随着砾石含量的增加,混合物的剪应力-应变曲线常表现出多个“V”字形跳跃现象,且砾石含量越高,这种现象越明显。砾石含量高(60%与 80%)的砂-圆砾石混合物表现尤为明显(图 3(a))。这表明在剪切过程中,原本处于咬合状态的某些砾石由于相互错动、逾越而使得相互间因咬合而储存的应

变能急剧释放,导致剪应力的急剧降低,而后又逐渐回到原来的应力状态。同时圆砾石形状较规则,挤压的圆砾石在某一瞬间突然发生滑动,应变能释放,圆砾石向两个方向偏离,挤压力瞬间消失,应力骤降。相互错开的圆砾石仍会与其它圆砾石发生接触和挤压,于是应力便恢复到先前水平(图 4(a))。砂-角砾石混合物的剪应力-应变曲线较砂-圆砾石混合物波动性小(图 3(b))。这主要是因为碎石的棱角分明,形状各异,当角砾石受挤压时,其间的接触面积和摩擦比圆砾石大,因此角砾石无法像圆砾石一样发生突然的滑动而引起混合物应力骤变。角砾石之间相互咬合,不断发生转动或旋转,以调整其排列状态(图 4(b))。

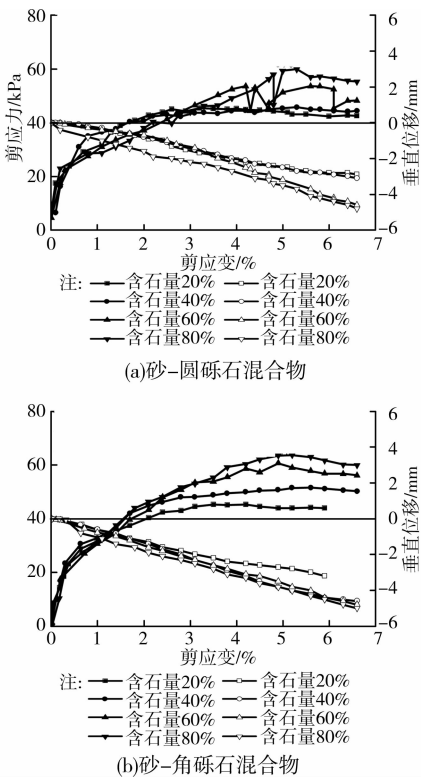


图 3 砂砾石混合物 50 kPa 法向应力下剪应力-应变及垂直位移-应变曲线

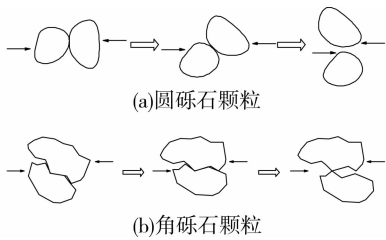


图 4 砾石颗粒受剪运动过程

- 3)砂砾石混合物的剪胀性随着剪应变的增加而增加,且砾石含量越高,剪胀量越大。这是由于砾石

在剪切面的翻转与跳跃增加了混合物的剪胀量。砂-角砾石混合物的最终剪胀量要大于砂-圆砾石混合物(表 2)。

表 2 50 kPa 法向应力下混合物最终剪胀量

混合物	不同含石量情况下剪胀量/mm			
	含石 20%	含石 40%	含石 60%	含石 80%
砂-圆砾石	-2.9	-3.1	-4.6	-4.8
砂-角砾石	-3.2	-4.6	-4.8	-5.0

2.3 砾石含量及形状对抗剪强度的影响

不同法向应力下,砂砾石混合物随砾石含量及砾石形状变化的曲线如图 5 所示(实心图例代表砂-圆砾石混合物,空心图例代表砂-角砾石混合物)。随着法向应力的增加,混合物的抗剪强度逐渐增加;在相同的法向应力下,砂砾石混合物的抗剪强度基本上随着砾石含量的增加而增加。即使是在砾石含量较低,“砾石”悬浮于“砂土”颗粒周围的情况下,砂砾石混合物的抗剪强度也高于砂土的抗剪强度,这主要是由于剪切面砾石的翻转和跳跃而增加的抗力引起的。相同砾石含量情况下,含角砾石混合物的抗剪强度要高于含圆砾石的混合物,也即抗剪强度随砾石形状不规则程度的增加而增加。

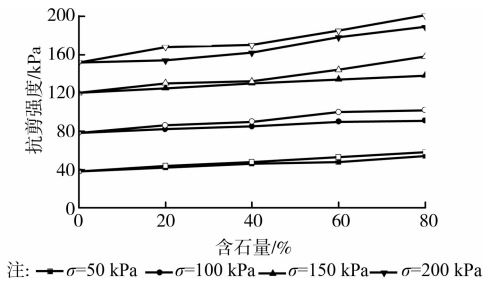


图 5 砾石含量及砾石形状对砂砾石混合物抗剪强度的影响

砾石含量及砾石形状与砂砾石混合物抗剪强度对应关系如图 6 所示。从图中可以发现,各平面与砾石含量坐标轴夹角要大于与砾石形状不规则系数坐标轴夹角,这说明砾石含量对混合物抗剪强度的影响要大于砾石形状的影响。

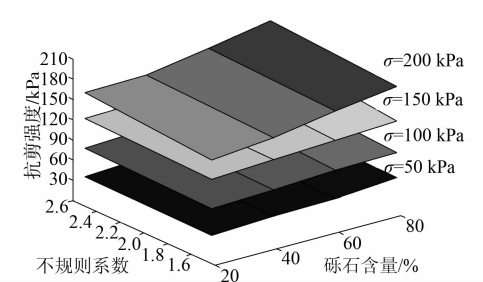


图 6 砾石含量及砾石形状与砂砾石混合物抗剪强度关系

以 200 kPa 法向应力为例,2 因素方差分析结果如表 3 所示。行因素(砾石含量)的 p 值为 0.003,列因素(砾石形状)的 p 值为 0.01,均小于 0.05,可见砾石含量及砾石形状对砂砾石混合物抗剪强度均有显著影响,并且砾石含量的影响程度要大于砾石形状。

表 3 砾石含量与形状因素方差分析表

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F-crit
行	1 424	3	475	73	0.003	9
列	205	1	205	32	0.010	10
误差	19	3	6			
总计	1 648	7				

3 临界状态分析

砂砾石混合物的抗剪强度变化主要与剪胀性、颗粒的重新排列与定向等有关。由图 3 可以看出,砂砾石混合物的剪应力随剪应变增加最终均趋向于同一个稳定值,该状态条件被称为临界状态条件(常体积条件残余状态),通常用临界摩擦角 φ'_{CS} 来表征该条件下砂砾石混合物的抗剪强度。Simoni 等^[16]得出 90 kPa 法向应力下砂砾石混合物临界摩擦角与最小孔隙比的关系:

$$\varphi'_{CS, \text{混合物}} - \varphi'_{CS, \text{砂}} = 18(e_{\min, \text{砂}} - e_{\min, \text{混合物}}) \quad (1)$$

式中: $\varphi'_{CS, \text{混合物}}$ 和 $\varphi'_{CS, \text{砂}}$ 分别代表砂砾石混合物以及砂土的临界摩擦角; $e_{\min, \text{混合物}}$ 和 $e_{\min, \text{砂}}$ 分别为砂砾石混合物以及砂土的最小孔隙比。

图 7 为本试验及 Simoni 等^[16]试验中砂砾石混合物临界摩擦角的变化规律。可以看出,临界摩擦角与最小孔隙比存在线性关系,且其斜率随砾石形状不规则程度的增加而增加。

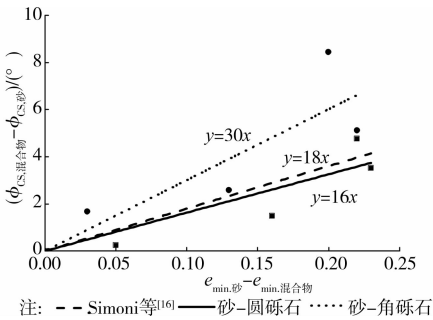


图 7 临界摩擦角与最小孔隙比关系

Simoni 等^[16]所做试验中砾石为圆砾石及角砾石的混合,其球形度及磨圆度近似为圆砾石及角砾石的平均值。由图 7 可知,其试验结果与本试验是较为一致的。对于含不同砾石形状的砂砾石混合

物,其临界摩擦角与最小孔隙比的关系可以由式(2)来表示。

$$\varphi'_{\text{CS,混合物}} - \varphi'_{\text{CS,砂}} = S(e_{\text{min,砂}} - e_{\text{min,混合物}}) \quad (2)$$

式中: S 是与砾石形状不规则程度有关的系数,其值随不规则系数 IR 的增大而增大。对图 7 中 3 条直线斜率与不规则系数进行线性拟合,可以得到如下关系式。趋势线 R^2 值为 0.92,拟合程度较高。

$$\varphi'_{\text{CS,混合物}} - \varphi'_{\text{CS,砂}} = 11IR(e_{\text{min,砂}} - e_{\text{min,混合物}}) \quad (3)$$

4 结 论

通过室内大尺度直剪试验,对不同砾石含量及砾石形状的砂砾石混合物抗剪强度特性进行了分析研究,主要结论有:

1) 砂砾石混合物应变硬化程度随砾石含量以及不规则程度的增加而增大。随着砾石含量的增加,其剪应力-应变曲线出现不同程度的跳跃现象。

2) 砂砾石混合物的剪胀量与抗剪强度随砾石含量以及形状不规则程度的增加而增加。砾石含量对其抗剪强度的影响大于砾石形状的影响。

3) 标准化的砂砾石混合物临界摩擦角与最小孔隙比近似呈线性比例关系,其斜率也近似与砾石形状不规则系数呈线性比例关系。当然,这种比例关系还需要通过更多的试验来进行验证。

(致谢: 本文的取样与试验研究得到了贵州省交通厅科技项目(2010-122-010-3-1)的支持,在此表示感谢!)

参考文献:

- [1] Medley E W, Goodman R E. Estimating the block volumetric proportions of mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [C]//Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium, Rotterdam: A. A. Balkema, 1994: 851-858.
- [2] 欧阳振华,李世海,戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究[J]. 实验力学, 2010, 25 (1): 61-67.
OUYANG Zhenhua, LI Shihai, DAI Zhisheng. On the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25 (1): 61-67.
- [3] Holtz W G, Gibbs H G. Triaxial shear tests on previous gravelly soils [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1956, 82(1): 1-22.
- [4] Kokusho T, Hara T, Hiraka R. Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6): 621-629.
- [5] Kuenza K, Towhata I, Orense R P, et al. Undrained torsional shear tests on gravelly soils [J]. Landslides, 2004, 1(3): 185-194.
- [6] Hamidi A, Alizaden M, Soleimani S M. Effect of particle crushing on shear strength and dilation characteristics of sand-gravel mixtures [J]. Journal of Civil Engineering, 2009, 7(1): 61-71.
- [7] Hamidi A, Yazdanzhou V, Salimi N. Shear strength characteristics of sand-gravel mixtures [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 3(1): 29-38.
- [8] Fragaszy R J, Su W, Siddiqi F H, et al. Modeling strength of sandy gravel [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1992, 118(6): 920-935.
- [9] Evans M D, Zhou S. Liquefaction behavior of sand-gravel composites [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1995, 121(3): 287-298.
- [10] 李振, 刑义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2255-2260.
LI Zhen, XING Yichuan. Effects of dry density and percent fines on shearing strength of sandy cobble and broken stone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (12): 2255-2260.
- [11] Guo P J, Su X B. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(5): 579-591.
- [12] Hamidi A, Salimi S N, Yazdanzhou V. Shape and size effects of gravel grains on the shear behavior of sandy soils [J]. Scientific Quarterly Journal: Geosciences, 2011, 20(8): 189-196.
- [13] Cho G C, Dodds J S, Santamarina J C. Particle shape effect on packing density, stiffness and strength: Natural and crushed sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(5): 591-602.
- [14] 刘清秉, 项伟, Lehane B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 400-410.
LIU Qingbing, XIANG Wei, Lehane B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 400-410.
- [15] Image J. Version 1.45, 2011 [EB/OL]. <http://rsbweb.nih.gov/ij/>.
- [16] 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.