

利用平行级配法进行粗粒土抗剪强度预测研究

刘勇文¹, 胡畔¹, 马力²

(1. 黄河水利职业技术学院 土木与交通工程学院, 河南 开封 475004; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:该文从公路弃渣场粗粒土抗剪强度难以通过试验获取的问题出发, 尝试采用平行级配法配置小粒径的重制土试样, 并开展不同尺寸的直剪试验, 将试验结果与原始粗粒土的抗剪强度参数进行对比, 分析尺寸效应的影响, 探讨利用平行级配法进行粗粒土抗剪强度预测的可行性。研究表明: 当平行级配重制土试样细粒含量较小(0%~10%)时, 对重制土进行直剪试验可以较好地预测原始粗粒土的抗剪强度, 制样+测试时间缩减为原来的10%左右。当平行级配重制土试样细粒含量较高(>10%)时, 尽管内摩擦角预测效果较好, 但是黏聚力与原始土的偏差较大, 出现上述问题时, 配置4~5组平行级配重制土试样进行直剪试验, 建立黏聚力与细粒含量的Sigmoid函数关系曲线, 再利用关系曲线推算原始土的黏聚力, 可以达到较好的黏聚力预测效果。该方法可为公路建设过程中粗粒土抗剪强度参数的便捷获取提供参考。

关键词:粗粒土; 直剪试验; 平行级配; 内摩擦角; 黏聚力; 细粒含量

中图分类号: U414

文献标志码: A

在公路建设过程中, 换填、开挖、爆破都可能产生大量的粗粒土弃方, 粗粒土的颗粒粒径从几毫米到几十厘米不等。重新利用这些粗粒土作为建筑材料需要掌握其基本的力学参数, 例如抗剪强度参数, 如缺少可靠的经验值, 则需要通过开展直剪或三轴剪切试验来获取抗剪强度参数^[1-2]。然而, 粗粒土中由于大颗粒占比较多, 需要制备大型试样以避免粒径效应造成的试验偏差, 往往需要使用大型直剪或三轴剪切设备进行试验。Ovalle等^[3]使用直径为1 m的三轴设备对最大粒径为160 mm的散粒材料进行试验; Estaire^[4]采用容积为1 m³的直剪箱对最大粒径为100 mm的试样进行试验; 刘文劼^[5]采用高600 mm、直径300 mm的大型三轴仪对粗粒土开展试验。但是尺寸较大的试样意味着制样难度、制样成本、试验周期都有所增加, 而且一般的工程单位都不具备相应的试验条件, 导致直接对粗粒土进行抗剪强度试验的工程可行性不足。目前, 应对上述问题的方法主要有3种: ①利用筛孔直接剔除一定范围以外的大粒径组分; ②利用筛孔剔除一定范围以外的大粒径, 并按照设备所适应的最大粒径, 替换补充同等质量的组分; ③配置平行级配试样, 即将不适合的大粒径组分剔除, 配置出在级配曲线上与原始土级配曲线平行的重制土。方法①比较适合小粒径颗粒对土的性质起决定作用的情况; 方法②争议较多, Tabibnejad^[6]、Zhang等^[7]指出这种

方法会低估土的抗剪强度; 方法③即平行级配方法是目前采用较多的方法, 但该方法可靠性受粒径影响的研究报道较少。该文以湖南省某公路弃渣粗粒土为研究对象, 对方法③进行探讨, 即进行平行级配替换, 重制试样, 并开展直剪试验, 将结果与原始粗粒土的抗剪强度参数进行对比, 研究细粒含量对平行级配方法的影响, 探讨平行级配方法的可行性, 以期对公路建设粗粒土抗剪强度参数的便捷获取提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选择了两种原始弃渣粗粒土作为试验材料, 其中一种粒径范围为0~80 mm, 命名为LA80; 另一种最大粒径可达120 mm, 命名为NG120。LA80的细粒($d \leq 0.075$ mm)^[8]含量很低, 几乎为0, 颗粒棱角较多, 对于LA80制备了两种粒径范围的平行级配试样, 即LA30(0~30 mm)和LA5(0~5 mm)。NG120细粒含量约为4.7%, 颗粒主要为圆形, 对于NG120制备了NG30(0~30 mm)、NG15(0~15 mm)和NG5(0~5 mm)3种平行级配试样。上述各试样的级配曲线如图1所示, 所有平行级配重制土与原始土的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 保持一致, 而相应的物理性质如表1所示。

收稿日期: 2022-06-10(修改稿)

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(编号: 20A560016)

作者简介: 刘勇文, 女, 硕士, 讲师。E-mail: 361987268@qq.com

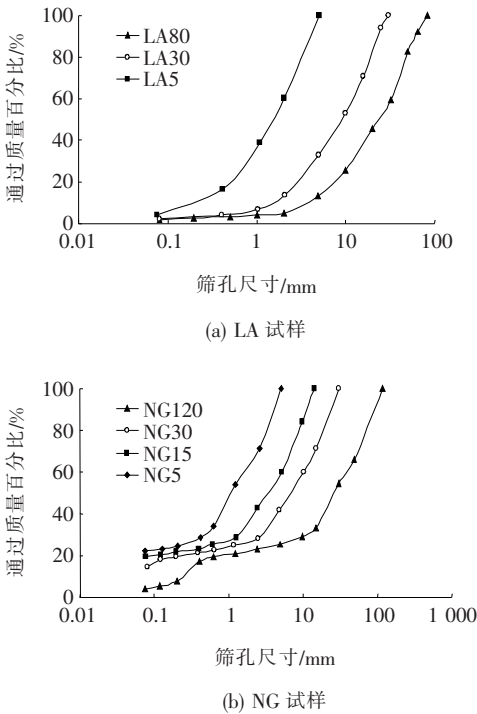


图 1 试样的级配曲线

表 1 平行级配重制土的基本物理性质

试样	细粒含量/%	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	中间粒径 d_{50}/mm	试验设备
NG30	15.0	2.13	8.3	6.6	中型直剪
NG15	19.8	2.06	9.7	3.3	小型直剪
NG5	22.5	1.95	10.4	1.1	小型直剪
LA30	2.5	1.92	—	9.0	中型直剪
LA5	4.0	1.88	—	1.5	小型直剪

1.2 试验过程

将上述土配置至一定含水率后,置于密封塑料袋。对于 NG 系列土,将其含水率控制在最优含水率附近,对于 LA 系列土,原土 LA80 的含水率约为 7%,故在试验中试样的含水率控制为 7%左右,经过事先测定,在该含水率下压实可以较容易地达到指定的干密度。在直剪盒中按照一定的干密度控制进行压实,LA5 和 LA30 的干密度都控制为 1.73 g/cm³ 左右,NG30、NG15、NG5 的干密度都控制为 2.00 g/cm³ 左右。随后将试样进行浸水饱和,饱和后,试样在指定的法向应力下固结,法向应力选择 50 kPa、100 kPa、200 kPa 3 组,以恒定的剪切速率进行排水剪切,其中 LA 剪切速率为 0.08%/min,NG 剪切速率为 0.02%/min,获取试样的剪切应力-相对水平位移曲线,其中相对水平

位移等于试样水平位移除以直剪盒平面边长 L 。

1.3 试验方案

采用 3 种尺寸的直剪盒:大型(30 cm×30 cm×16.5 cm)、中型(15 cm×15 cm×8.8 cm)、小型(6 cm×6 cm×3.5 cm),首先针对 NG5 材料,在不同尺寸的试验仪器下进行试验,探讨直剪试验的尺寸效应,为后续选择合适的试验仪器尺寸提供依据。随后,针对 LA 材料开展试验,探讨平行级配方法是否适用于细粒含量较少的弃渣粗粒土。最后,针对 NG 材料开展试验,探讨平行级配方法是否适用于细粒含量较多的弃渣粗粒土,总的试验方案如表 2 所示。

表 2 总试验方案

试验步骤	试样	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	压实度/ %	法向应力/ kPa
1	NG5	2.00	103	100
	NG5	2.00	103	50、100、200
2	LA30	1.73		50、100、200
	LA5	1.73		50、100、200
	NG30	2.00	94	50、100、200
3	NG15	2.00	97	50、100、200
	NG5	2.00	103	50、100、200

2 试验结果分析

2.1 试样尺寸对试验结果的影响

当法向应力=100 kPa 时,NG5 在大型直剪试验和小型直剪试验中的剪切曲线如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出:在两种情况下的剪切应力都会增加到峰值,然后逐渐减少到一个残余稳定值,在进行小型直剪试验时,峰值和残余值之间的差异更加明显,达到了 26 kPa,而且出现峰值时对应的相对水平位移也更小,仅为 1.3%;而进行大型直剪试验时,峰值和残余值之间差异只有 4 kPa,峰值对应的相对水平位移为 3%左右。从图 2(b)可以看出:NG5 样品表现出剪缩-剪胀行为(以向下为负,向上为正),对于大型直剪试验,当相对位移达到 7%时,试样达到体积不发生变化的临界状态,而对于小型直剪试验,竖向位移一直在增加,表明试样有更大的体积膨胀。

根据上述试验结果,可以看出试验仪器尺寸对试验结果的影响比较明显。以剪切盒长度/中间粒径 (L/d_{50}) 为指标表征试验仪器尺寸与颗粒尺寸的关系

系,采用多组平行级配试样进行试验时,为减小尺寸效应造成的结果离散,应当尽量保持所有试样的 L/d_{50} 接近。因此,在该研究中,保持所有试验的 $L/d_{50} = 10 \sim 13$,依此选择试验仪器尺寸。

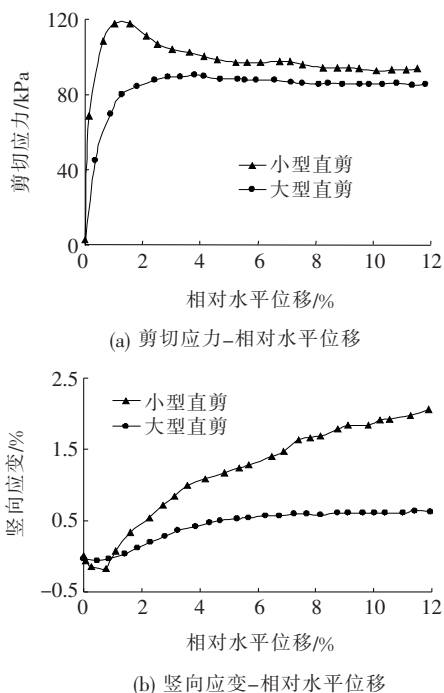


图2 NG5在剪切过程中的尺寸效应

2.2 LA试验结果分析

LA重制土的剪切应力—相对水平位移关系曲线如图3(a)所示。

从图3(a)可以看出:在50 kPa法向应力下,LA5和LA30的曲线比较接近;而在100 kPa和200 kPa的法向应力下,在相对水平位移小于2%时,LA5的剪切应力首先显著增长,然后增长速率放缓直至趋于恒定。LA30的剪切应力具有与之类似的增长规律,但相对水平位移到达8%左右剪切应力即趋于恒定。从图3(b)可以看出:两个试样在50 kPa和100 kPa法向应力下的体积变化曲线均呈剪缩—剪胀型,在50 kPa法向应力下,相比LA30,LA5的剪胀值更高,而在100 kPa法向应力下两者的剪胀值接近,当法向应力为200 kPa时,在相对水平位移达到4%之前LA30一直表现为剪缩行为,随后表现为剪胀,而LA5则全部表现为剪缩。

基于摩尔—库仑破坏准则的LA系列试样破坏包络线如图4所示,由于细粒含量很小,黏聚力几乎为0,可采用内摩擦角作为单一参数用于表征抗剪强度。原始土LA80的内摩擦角为 47.6° ,而LA5和LA30的内摩擦角分别为 48.1° 和 48.5° ,三者比较接近。因

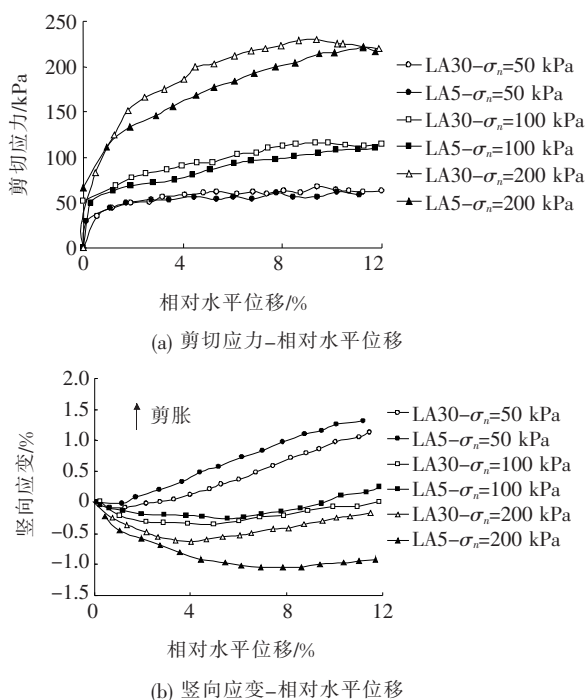


图3 LA重制土的剪切应力和竖向应变

此,当法向应力为50~200 kPa时,采用平行级配重制土,在仅制备较小试样(小型直剪试样和中型直剪试样)的条件下可很好地预测原始粗粒土的抗剪强度,制样+测试时间缩减为原来的10%左右。即从试验结果来看,当细含量较低时,采用平行级配方法是可行的。

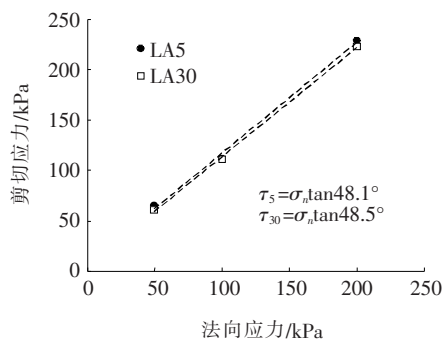


图4 LA重制土的破坏准则

土的性质往往与内部骨架结构密切联系。原始土LA80的内摩擦角主要是由粗颗粒间的相互咬合、嵌固所决定,尽管按平行级配方法重制了LA30和LA5,但两者的细粒含量仅为2.5%和4.0%,细粒的掺入并未导致土的内部骨架结构发生决定性的改变,因此粒径整体减小试样的内摩擦角与原始土的内摩擦角仍较为接近,预测效果较好。

2.3 NG试验结果分析

NG重制土的剪切应力—相对水平位移关系曲线如图5(a)所示,三者的细粒含量分别为15%、19.8%

和 22.5%。可以看出重制土 NG5 的峰值强度出现于相对水平位移 1%~2%，残余强度出现于相对水平位移 6%~8%。与 NG5 相比，NG15 和 NG30 的剪切应力—相对水平位移关系曲线没有出现峰值或峰值不明显，剪切应力增加至最大值后趋于恒定。NG15 的最大剪切应力比较接近 NG5 的峰值强度，在各个法向应力下两者的相对差异不超过 2.3%。而对于 NG30，法向应力越大，NG30 的最大剪切应力越接近 NG5 的峰值强度，两者的相对差异在法向应力为 50 kPa 时为 23.5%，在法向应力为 200 kPa 时仅为 4.2%。从图 5 (b)可知，NG5 的剪胀效果比 NG15 和 NG30 更加明显，而且法向应力越大，剪胀效果的差异也越大。

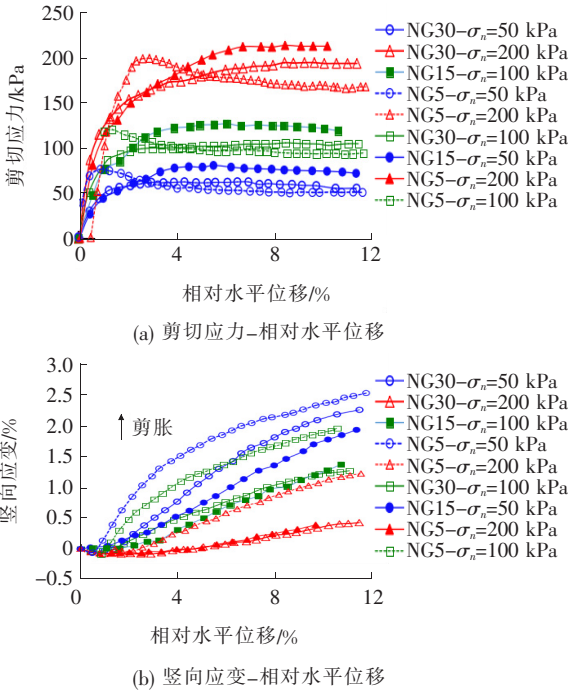


图 5 NG 重制土的剪切应力和竖向应变

基于摩尔—库仑破坏准则的 NG 系列试样破坏包络线如图 6 所示，原始土 NG120 的内摩擦角为 41.0°，黏聚力为 4.5 kPa。可以看出：3 组 NG 重制土试样的内摩擦角都与原始粗粒土接近。由此可见，3 个 NG 重制土试样在相同的干密度(2.00 g/cm³)下进行直剪试验，三者的内摩擦角与原始土的内摩擦角都较为接近，预测效果较好，但是三者的黏聚力都与原始土的黏聚力(4.5 kPa)偏差较大，而且离散性明显，NG5 的黏聚力比 NG30 高出近 1 倍。

3 平行级配试验推广的可行性探讨

根据上述研究，平行级配重制土中的细粒含量都

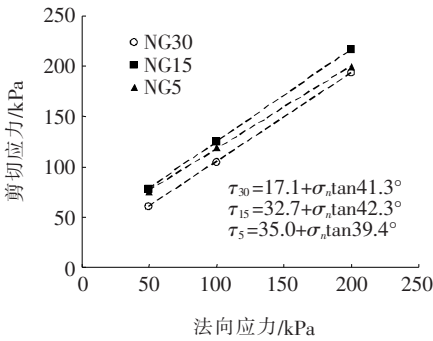


图 6 NG 重制土的破坏包络线(干密度为 2.0 g/cm³)

会高于原始土。对于 LA 系列土而言，平行级配重制土的细粒含量小于 4%，其抗剪强度与原始土较为接近。而对于 NG 系列土而言，平行级配重制土的细粒含量都超过 15%，相对原始土，内部骨架结构已经发生变化，粗颗粒不再完全相互接触，粒径整体减小后重制土试样的黏聚力将高于原始土的黏聚力，从而会对抗剪强度产生过高的估计。

结合该文试验结果以及 Elkady 等^[9-10]对砂—黏土混合物的研究结果，黏聚力变化规律如下：当细粒含量小于 10% 时，黏聚力接近于 0，可以将 0~10% 作为细粒含量较小的范围，此时，对重制土进行直剪试验即可以较好地预测原始粗粒土的抗剪强度；在 10%~40% 细粒含量范围下，黏聚力随黏土含量增加而显著上升；当细粒含量超过 40% 后，黏聚力达到恒定值。因此黏聚力随细粒含量的变化可以用 Sigmoid 函数来表示：

$$\frac{c}{c_{100}} = \frac{1 - e^{-\lambda f}}{1 + e^{-\lambda f}} \tag{1}$$

式中： c 为不同细粒含量(0~100%)下的黏聚力； λ 为模型参数； f 为细粒含量。

图 7 展示了采用式(1)对 Elkady^[9]、Hsiao^[10]试验数据和该文数据的拟合情况，可以看出拟合曲线与数据较为吻合。拟合参数如表 3 所示。

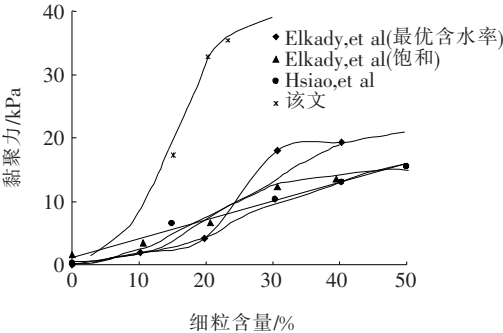


图 7 黏聚力与细粒含量的关系

表3 采用 Sigmoid 函数拟合的参数

试样	c_{100}	λ	数据来源
砂土—黏土(最优含水率)	22	0.12	文献[9]
砂土—黏土(饱和)	15	0.14	文献[9]
粉砂土	18	0.10	文献[10]
NG	40	0.25	该文试验

利用式(1)可以用来估计原始粗粒土的黏聚力。在该文中,原始 LA 试样—LA80 的细粒含量(1.9%)与重制试样 LA30 和 LA5 的细粒含量(分别为 2.5%和 4%)差别不大,而且较低,可以假定 LA80 的黏聚力为零。此外,对于 NG,根据该关系曲线推算,原始土(细粒含量 4.7%左右)的黏聚力预测值为 3.7 kPa 左右,与实际值 4.5 kPa 更加接近。因此,尽管直接采用重制土的黏聚力试验结果预测原始土的黏聚力具有很大的误差,但利用如式(1)的关系曲线进行间接预测,预测效果较好。

4 结论

尝试利用平行级配的方法,重制试验用土,以期达到仅利用较小试样预测粗粒土抗剪强度的目的,得到如下结论:

- (1) 直剪试验结果受试样尺寸影响,进行不同平行级配下的抗剪强度试验时,应根据 L/d_{max} 相似的原则来选择合适的设备,推荐 L/d_{max} 取 10~13。
- (2) 当平行级配重制土试样细粒含量较小时(0~10%),重制土的内摩擦角与原始土较为接近,由于此时黏聚力几乎为 0,对重制土进行直剪试验即可较好地预测原始粗粒土的抗剪强度,制样+测试时间缩减为原来的 10%左右。
- (3) 当平行级配重制土试样细粒含量相对较高时(>10%),尽管内摩擦角预测效果较好,但是黏聚力与原始土的偏差较大,直接采用重制土的抗剪强度试验结果预测原始土的抗剪强度不可行。
- (4) 当出现(3)中所述问题时,配置 4~5 组平行级配重制土试样进行直剪试验,建立黏聚力与细粒含

量的 Sigmoid 函数关系曲线,再利用关系曲线推算原始土的黏聚力,可以达到较好的黏聚力预测效果,并缩减制样+测试时间为原来的 50%左右。

(5) 平行级配方法成立的前提应当是颗粒自身的形状、强度不会随着粒径的改变发生强烈的变化,相关研究工作还有待后续进一步开展。

参考文献:

[1] 金建立. 藏东南地区粗粒土三轴渗透试验研究[J]. 中外公路,2020,40(4):261—263.

[2] 齐善忠,付春梅,曲肇伟. 建筑渣土作为道路填筑材料的改性试验研究[J]. 中外公路,2015,35(1):262—265.

[3] ESTAIRE J, OLALLA C. Analysis of Shear Strength of Armourstone Based on 1 m³ Direct Shear Tests [J]. WIT Transactions on the Built Environment,2005,78:341—350.

[4] OVALLE C, FROSSARD E, DANO C, et al. The Effect of Size on the Strength of Coarse Rock Aggregates and Large Rockfill Samples through Experimental Data[J]. Acta Mechanica,2014,225:211—216.

[5] 刘文劼,冷伍明,蔡德钧. 重载铁路路基粗颗粒土循环振动试验与累积动应变研究[J]. 铁道学报,2015,37(2):92—97.

[6] TABIBNEJAD A, HESHMATI A, SALEHZADEH H, et al. Effect of Gradation Curve and Dry Density on Collapse Deformation Behavior of a Rockfill Material [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2015,19:631—640.

[7] ZHANG H Y, XU W J, YU Y Z. Triaxial Tests of Soil-Rock Mixtures with Different Rock Block Distributions [J]. Soils and Foundations,2016,56(1):44—56.

[8] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.

[9] ELKADY T, SHAKER A, DHOWAIN A. Shear Strengths and Volume Changes of Sand-Attapulgitic Clay Mixtures [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment,2015,74(2):595—609.

[10] HSIAO D H, PHAN V T A, HSIEH Y T, et al. Engineering Behavior and Correlated Parameters from Obtained Results of Sand-Silt Mixtures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2015,77:137—151.