

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0360-05

千枚岩残坡积土大型直剪试验研究

谭捍华¹, 孟庆山²

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 土体抗剪强度是边坡稳定性分析的重要力学参数, 而大型直剪试验是确定粗粒土抗剪强度指标较为有效的方法, 但获取所需原状土样较为困难。通过现场挖取边坡残坡积原状土样, 开展原状土样和击实土样的室内常规小型直剪对比试验, 证明在有效控制密度、干密度和含水率条件下采用击实土样获取的直剪强度指标可替代原状土样试验结果。击实土样的大型直剪与原状土样的常规直剪试验结果对比分析表明, 由常规小型直剪试验获得残坡积土的抗剪强度略高于大型直剪试验结果。由于室内常规小型直剪试验获取的抗剪强度指标往往比边坡实际发生滑动时的抗剪强度指标稍大, 建议在边坡稳定性分析中对抗剪强度指标选取时, 采用以大型直剪试验获得的有效控制密度、干密度和含水率条件下击实土样的峰值强度和残余强度, 由此进行的边坡稳定性计算将更为科学合理。

关 键 词: 残坡积土; 剪切特性; 抗剪强度; 原状土样; 击实土样

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

Experimental study of large scale direct shear test of phyllite residual soil

TAN Han-hua¹, MENG Qing-shan²

(1.College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The shear strength of soil is an important mechanical parameter for slope stability analysis. The large scale direct shear test is an effective method to obtain the shear strength index of coarse grain soil; but it is difficult to excavate massive undisturbed soil. The undisturbed sample was excavated in-situ, the laboratory small scale direct shear tests were carried out on undisturbed sample and compacted sample for comparison. It is approved that the shear strength indices of undisturbed sample could be replaced by the test results of compacted sample when the density and water content of compacted soil could be controlled effectually. The results of small scale shear test of undisturbed soil and large scale shear test of compacted soil were comparatively analyzed. The shear strength of residual soil achieved from small scale direct shear test is more slightly high than that of test results from large scale direct shear test under the same pressure. The research results show that the shear strength indices of small scale direct shear test is slightly bigger than that of slope take place slide in-situ. It is suggested that the peak value strength and remaining strength achieved from large scale direct shear test should be selected for slope stability analysis when the density and water content of compacted soil could be controlled effectually; it is more reasonable to calculate slope stability by this method.

Key words: residual soil; shear characteristics; shear strength; undisturbed sample; compacted sample

1 前 言

土质边坡广泛存在于土石坝、水库、路堤、基坑开挖、渠道、堤防等岩土工程中。土体抗剪强度是确定土坝、路堤、边坡等的稳定性的重要指标, 其较为普遍的确定方法有室内直剪试验(快剪、固结快剪、慢剪和排水反复剪)、室内三轴剪切试验和原位直剪试验等^[1]。国内外众多工程设计、施工均

将直剪试验作为测定土体抗剪强度指标的主要手段之一。大型直剪试验因为其试验条件更接近岩土体实际, 目前已在冰碛土、花岗岩残坡积土、膨胀土、垃圾土、砂卵石、砾石土、重塑红黏土、重塑粉土等的研究中得到应用, 研究内容包括不同干密度、不同含水率、不同垂直压力下及不同粒径含量等条件下, 土或土石混合体的剪切应力-变形关系、峰值强度、残余强度特性及其对边坡或构筑物稳定性影

收稿日期: 2010-11-24

第一作者简介: 谭捍华, 男, 1972 年生, 博士研究生, 主要从事公路工程勘察、设计及研究工作。E-mail: thh119@sina.com

响等多方面^[2-6]，涉及到铁路、公路、水利、矿山、建筑等多种行业。由于原状粗粒土样取样较为困难，所以一般采用击实土样，因此，如何让击实土样的试验结果更接近实际，是一个值得研究的问题^[7-8]。

残坡积土是岩石在风化营力作用下已完全风化而未经搬运的土，长期以来，残坡积土被视为一种特殊土。在土质边坡加固设计中，室内试验确定的土体抗剪强度参数积累了丰富的工程经验和资料，也得到了工程界的普遍认可。土质边坡发生滑坡前会先逐渐形成一个滑动面，在这个过程中，滑面土的抗剪强度也由峰值逐渐降低到残余强度，室内直剪试验所得到的抗剪强度参数与实际发生滑坡时滑动面的抗剪强度参数的对应关系，一直是工程界和研究学者们共同关注的问题，对粗粒土而言，采用大型直剪试验所得到的抗剪强度参数更接近实际情况^[3-4,9]。为此，本文通过现场采取原状样，开展原状土样和击实土样的室内常规直剪试验，确定有效控制密度、干密度和含水率，用相应的有效控制密度、干密度和含水率制备击实土样，进行大型直剪试验，并对比分析原状土样常规小型直剪和击实土样大型直剪的应力-变形关系曲线变化规律与抗剪强度指标，从而为边坡稳定性分析提供可靠依据。

2 工程地质概况

湖北十堰至陕西漫川关高速公路是湖北省高速公路网的重要组成部分，沿线地势高峻，岩性复

杂，沟壑纵横。两郧断裂为一区域性大断裂，该断裂由一系列平行断层组成，平面上具有分支复合现象。两郧断裂带独特的地质环境造成了大量的不良地质现象的出现，据不完全统计典型滑坡有 37 处，滑坡规模从几千立方米到几十万立方米。在综合分析气象水文、地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质和不良地质问题的基础上，结合现场施工、设计以及边坡失稳类型和破坏模式，对 35 个土质边坡进行比选，最终确定 701 边坡为典型代表性边坡。该边坡走向为 265°，转 270°，6 级边坡，4~6 级大部分为残坡积 (Q_4^{dl+el})，层较厚，2~4 部分为强风化薄~中~厚层（以中层为主）千枚岩。由于 Q_4^{dl+el} 及强风化层较厚，存在发生较大滑塌的可能。

3 物理力学性质

对现场所采取的边坡原状土样开展常规室内土工物理力学试验，包括含水率、密度、颗粒分析、相对密度、渗透、高压固结和直剪试验（如表 1 所示）。另外，对击实土样进行轻型击实以确定最优含水率和最大干密度，并对击实样进行直剪试验，揭示含水率和干密度对抗剪强度指标的影响。通过原状样和击实样的物性参数和力学特性对比分析，确定大型直剪土样的含水率和干密度，进行击实样大型直剪试验，并与室内常规直剪试验结果进行对比分析，以确定抗剪强度指标，进行土质边坡的稳定性分析。

表 1 边坡土样的物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical indices of soil

颗粒(mm)分析 / %				含水率	密度	相对密度	渗透系数	孔隙比	压缩系数	压缩模量
0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.01	<0.01	/ %	/(g/cm ³)		/(cm/s)		/MPa ⁻¹	/MPa
23.45	47.80	12.45	16.27	5.24	2.03	2.60	3.45×10 ⁻⁶	0.418	0.213	6.645

从表 1 可见，边坡千枚岩残坡积土 2 mm 直径以上颗粒含量超过 50%，从 0.5 mm 粒径以下边坡残坡积土来看，黏粒含量在 12% 左右，而粉粒含量略高，为 17%。按照土的工程分类标准，该边坡残坡积土属粗粒土范畴，其渗透系数为 10⁻⁶ cm/s，渗透性较好，因此，降雨渗透对于边坡的稳定性会产生一定影响，而原状土的孔隙比较小，说明土的密实度较高。通过高压固结试验结果可知，残坡积土具有较高的压缩模量，属于低~中压缩性土。同时开展了室内轻型击实试验，单位体积击实功为 592.2 kJ/m³，分 3 层击实，每层 25 击，采用干法备样进行试验，获取残坡积土的最大干密度和最优含

水率分别为 1.98 g/cm³ 和 9.85%。

4 室内常规直剪试验

为确定边坡土的抗剪强度指标，在边坡现场采取原状土样。鉴于土样的渗透性较好，剪切过程中含水率的影响较小，因而采用应变控制式剪切仪进行固结快剪试验。一类试验是在天然含水率的条件下（土样周围用湿棉球保湿）进行，另一类是抽气饱和后进行固结剪切，以获取降雨条件下原状土在极限饱水时边坡土体的抗剪强度。原状土样在保湿和饱和条件下的剪切试验曲线见图 1，图中保湿、饱和条件下，其垂直压力分别为 50、100、150、200 kPa。

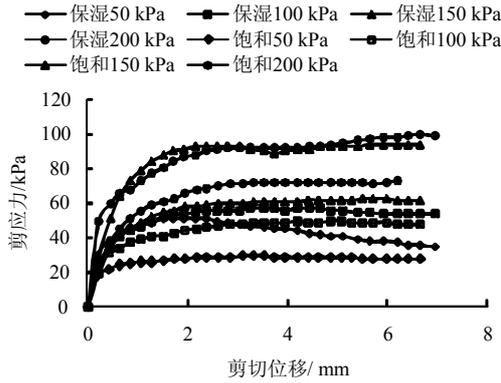


图 1 原状土直剪试验曲线

Fig.1 Curves of direct shear experiment of intact soil

从原状土的直剪试验曲线来看，边坡土样在不同压力下较多表现出应变硬化趋势，而且在相同固结压力下，饱水土样的剪切应力峰值明显小于保湿条件下剪切应力。为进一步了解边坡击实土样的抗剪强度指标变化规律，开展了击实土样的固结快剪试验，击实土典型直剪试验曲线如图 2 所示（含水率为 12.21%的击实土样）。

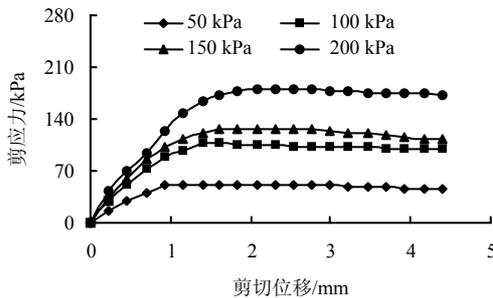


图 2 击实土(含水率 12.21%)直剪试验曲线

Fig.2 Curves of direct shear experiment of compacted soil (water content is 12.21%)

击实土样的剪切应力随剪切位移变化曲线均遵循应变硬化的规律，并且随含水率的增大，黏聚力和内摩擦角增大，而当含水率超过一定值后，随含水率的增大，抗剪强度指标又逐渐减小，击实土样直剪试验成果见表 2，原状土的抗剪强度基本符合击实土样的变化趋势，研究结果证实，在原状土较难获得的情况下，利用扰动土推求边坡原状土的抗剪强度指标是较为有效的手段。

从边坡残坡积土击实土样的黏聚力与含水率关系来看，随着含水率的升高，残坡积土的黏聚力均有明显的增长，较高含水率对应的最大黏聚力是较低含水率是对应的黏聚力的 2.5 倍，可见其黏聚力对含水率的敏感度较强。边坡残坡积土的内摩擦角

与含水率的一致性关系并不明显，其变化情况有一定的波动。

表 2 边坡击实土样直剪试验成果
Table 2 Results of direct shear experiment of compacted soil

边坡编号	含水率 / %	密度 / (g/cm ³)	干密度 / (g/cm ³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
701	8.34	2.11	1.95	15.00	26.57
	9.85	2.17	1.98	25.67	32.21
	12.21	2.20	1.96	28.50	36.13
	14.26	2.15	1.88	36.33	29.68
原状土	5.24	2.03	1.93	29.50	20.10

5 大型直剪试验

试验采用中国科学院武汉岩土力学研究所与香港大学共同研制的应变控制式大型室内及现场两用直剪装置^[9]，剪切盒的净空几何尺寸为：长×宽×高=500 mm×500 mm×410 mm。试验前土样风干过 5mm 筛，本试验仅考虑干密度一致原则，据现场所取原状土样的干密度加水配制成试验用土样（见表 3），限于篇幅，其他影响因素变化未予考虑。拌合均匀装填至剪切盒中，并分多层击实，层间刨毛。试验结束后剪切面上土样测定含水率。根据土工试验规程（SL237-1999）中反复直接剪切的的规定，参照粉质黏土、砂质黏土和黏土需要 3~6 次正向剪切获得残余强度的说明，考虑本研究为残坡积土，因此，确定其反复剪切次数为 4 次，从反复剪切曲线来看，此时抗剪强度已趋平稳，可确定其为残余强度。由于土样的渗透性较好，可以保证在 3.624 mm/min 的剪切速率下达到排水效果，以消除含水率的影响，因而，采用固结快剪试验方法。

表 3 大型直剪试验击实土样配制参数
Table 3 Prepare parameters of compacted soil for large scale direct shear experiment

边坡编号	天然含水率 / %	干密度 / (g/cm ³)	配制含水率 / %	配制干密度 / (g/cm ³)
701	5.24	1.93	13.70	1.93

每组试样分别在垂直压力为 50、100、200 kPa 下进行水平剪切。试验中，每间隔 30 s 记录水平位移和水平剪力，水平位移达 8~9 mm 时停止试验。完成后剪切盒退回至初始位置，以同样的速率和垂直压力反复剪切 4 次。典型直剪试验（100 kPa）曲线如图 3 所示，不同压力下反复剪切试验曲线见图 4（图中 1/50 代表 50 kPa 法向压力下第 1 次剪切）。

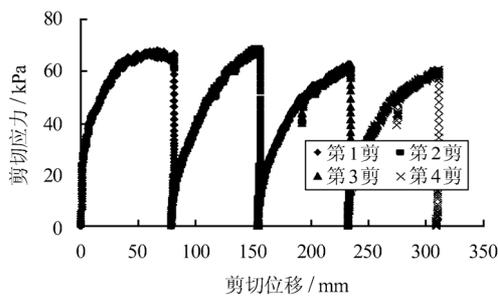


图3 击实土反复直剪试验曲线 (100 kPa)

Fig.3 Curves of repeated direct shear experiment of compacted soil (100 kPa)

◆ 第1次剪切 50 kPa ■ 第1次剪切 100 kPa ▲ 第1次剪切 200 kPa
 × 第4次剪切 50 kPa ● 第4次剪切 100 kPa ○ 第4次剪切 200 kPa

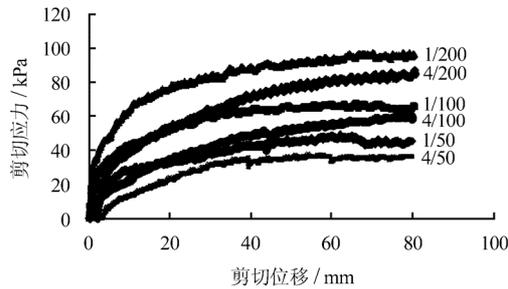


图4 击实土直剪试验曲线

Fig. 4 Curves of direct shear experiment of compacted soil

从不同垂直压力下击实土反复直剪试验曲线可见，每一组大型直剪试验，当进行第1次剪切位移较小时，剪切应力较快达到了应力峰值附近，并在后续的剪切过程中能够得以维持，曲线呈现平刀型峰值，而在第2~4次剪切时，剪切位移基本上达到7 cm左右时，才出现剪切应力峰值，曲线呈现尖刀型峰值（见图3）。

试验曲线在不同剪切阶段均表现出应变硬化现象（见图4）。另外，剪切应力峰值随剪切次数的增加而逐步降低，说明反复剪切后，残坡积土的抗剪切能力是逐渐减弱的。将边坡击实土样大型直剪试验成果整理成表4，可见不同剪切次数中，边坡残坡积土的黏聚力和内摩擦角随着剪切次数的增加而逐渐减小，并且第2次剪切后土的内摩擦角的降幅最大，第3、4次的降幅相对减弱。

将室内原状土样常规小直剪试验结果与击实土样大型直剪试验（第1剪）结果进行对比（见表4），天然密度相同条件下，室内小直剪获得的原状残坡积土的内摩擦角（20.10°）比大型直剪试验（17.83°）所得结果稍大，室内常规小直剪获得的残坡积土的黏聚力（29.5 kPa）小于大型直剪试验（33.64 kPa）的试验结果。综合考虑抗剪强度指标的双重影响，由小直剪获得残坡积土的抗剪强度略高于大型直剪

的试验结果。鉴于尺寸效应和与现场情况的接近程度而言，大尺寸模型试验改善了土体边界受力条件，克服了尺寸效应和边界效应的影响，大型直剪的试验条件更加接近于边坡实际工况，特别是反复剪切过程体现了边坡反复滑动引起抗剪强度降低的效果，因此，大型直剪试验结果对于边坡稳定性分析更具有参考价值，而室内常规直剪试验获取的抗剪强度指标比边坡实际发生滑动时的抗剪强度指标稍大，建议在边坡稳定性分析中的抗剪强度指标选取均采用大型直剪试验结果中的峰值强度和残余强度，由此获得的边坡稳定性验算更为科学合理。

表4 击实土样的大型直剪试验成果

Table 4 Results of large scale direct shear experiment of compacted soil

边坡编号	含水率 / %	干密度 / (g/cm ³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
第1剪			33.64	17.83
第2剪	13.70	1.93	34.71	15.98
第3剪			30.68	15.69
第4剪			29.23	15.38
小直剪试验结果	5.24	1.93	29.50	20.10

注：第4剪较第1剪黏聚力、内摩擦角降幅分别为13.11%、13.74%。

6 结论

(1) 在有效控制密度、干密度和含水率前提下，击实土样可以代替原状土样开展直剪试验，获取的抗剪强度指标与原状土样近似，具有一定的可靠性与合理性。

(2) 综合考虑抗剪强度指标的双重影响，由原状土样小直剪获得残坡积土的抗剪强度略高于在有效控制密度、干密度和含水率前提下击实土样大型直剪的试验结果。

(3) 大型直剪的试验克服了尺寸效应和边界效应的影响，条件更加接近于边坡实际工况，建议在边坡稳定性分析中的抗剪强度指标选取均采用大型直剪试验结果中的峰值强度和残余强度，由此获得的边坡稳定性验算更为科学合理。

参考文献

[1] 贾龙. 边坡残坡积土直剪强度特性试验研究[J]. 土工基础, 2010, 24(2): 68-71.
 [2] JIA Long. Experimental study on direct shear strength of

- [12] FLEMING W G K. The improvement of pile performance by base grouting[J]. **Civil Engineering**, 1993, 97: 88—93.
- [13] BOLOGNESI A J, MORETTO L. Stage grouting preloading of large piles on sand[C]//Proc.8th ICSMFE. Moscow: [s.n.], 1973: 19—25.
- [14] 王向军. 软土地区抗拔桩的承载及变形特性分析[D]. 上海: 同济大学, 2010.
- [15] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 桩侧注浆抗拔桩的试验研究与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 284—289. WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WANG Xiang-jun. Full-scale tests and application of side-grouting uplift piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(S2): 284—289.
- [16] CHU LOKMAN, YIN JIANHUA. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests[J]. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2005, 131(9): 1097—1107.
- [17] 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431—435. HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 431—435.
- [18] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(6): 793—815.

上接第 363 页

- residual soil[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2010, 24(2): 68—71.
- [2] 张玉成, 杨光华, 苏卜坤, 等. 土质边坡土体抗剪强度室内外试验研究[J]. 湖南科技大学学报, 2007, 22(3): 45—49. ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, SU Bu-kun, et al. Laboratory and field testing study on shear strength of soil slopes[J]. **Journal of Hunan University of Science & Technology**, 2007, 22(3): 45—49.
- [3] 冯俊德, 李建国, 汪稔, 等. 云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3205—3210. FENG Jun-de, LI Jian-guo, WANG Ren, et al. Large scale direct shear test on strength behavior of railway moraine soils in Yunnan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3205—3210.
- [4] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48—51, 57. WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behavior of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjia ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 29(1): 48—51, 57.
- [5] 蒋刚, 林鲁生, 刘祖德. 残坡积土应力应变特性及对边坡稳定的影响分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 2002, (4): 13—19. JIANG Gang, LIN Lu-sheng, LIU Zu-de. Analysis of residual soil stress-strain behavior and its effect on slope stability[J]. **Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute**, 2002, (4): 13—19.
- [6] 高文银, 涂帆, 肖朝郅, 等. 填埋场不同深度垃圾土反复直剪实验研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(5): 1171—1176. GAO Wen-yin, TU Fan, XIAO Zhao-yun, et al. Experimental study on repeated direct shear of municipal solid waste from different depths of landfill[J]. **Chinese Journal of Environmental Engineering**, 2010, 4(5): 1171—1176.
- [7] RICHARDSON G, REYNOLDS D. Geo-synthetics considerations in a landfill on compressible clays[C]//Proceedings of Geo-synthetics. St Paul MN: Industrial Fabrics Association International. 1991: 507—516.
- [8] ANDERSON S A, SITAR N. Analysis of rainfall-induced debris flows[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 2001, 127(7): 544—553.
- [9] 闵弘, 刘小丽, 魏进兵, 等. 大型现场室内两用直剪仪研制(I): 结构设计[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 164—168. MIN Hong, LIU Xiao-li, WEI Jin-bing, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(I): Configuration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 16—18.