

土石混合料室内大型直剪试验的改进研究

董云^{1,2}, 柴贺军²

(1. 淮阴工学院 建筑工程系, 江苏 淮阴 223001; 2. 重庆交通科研设计院, 四川 重庆 400067;)

摘要: 随着土石混合料越来越广泛地被道路、堤坝、基础等工程采用, 快速、准确地确定其抗剪强度指标显得越来越重要, 室内大型直剪试验具有操作简单, 可快速测定混合料的强度指标等特点, 因而在工程中被广泛应用。但由于大型直剪仪自身结构及性能存在许多问题, 使直剪试验及结果与其试验原理的应用条件及混合料的实际强度具有一定的偏差。本文对室内大型直剪试验进行了改进, 研发了新型的土石混合料室内大型直剪试验系统, 克服了常规直剪仪存在的主要问题, 使得试验结果更精确、可靠, 试验分析更完善。

关键词: 土木工程; 土石混合料; 室内; 直剪试验; 改进

中图分类号: TU 415

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)11-1329-05

作者简介: 董云(1974-), 男, 工学硕士, 淮阴工学院教师, 从事道路、岩土工程研究。

Improvement study of lab large-scale direct shear test of rock-soil aggregate mixture

DONG yun^{1,2}, CHAI He-jun²

(1. Civil Engineering Department of Huaiyin Institute of Technology, Huaiyin 223001, China; 2. Chongqing Communication Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: It is more and more important to determine the shear strength of rock-soil aggregate mixture quickly and accurately while the mixture is widely used in roadbeds, dykes, dams and foundations. Lab large-scale direct shear tests are broadly adopted in engineering due to their obvious advantage, even though the test principle is slightly departure from the Mohr-Coulomb law. To avoid this problem, the authors improved the equipment of lab large-scale direct shear tests and developed a special new one which overcame the disadvantages of normal equipment, made the result more accurate and could be used to analyze the shear surface and dilatability of the mixture.

Key words: civil engineering; rock-soil aggregate mixture; lab; shear test; improved

0 引言

土石混合料的抗剪强度与混合料的性质、存在状态、受力情况、测试方法及强度理论等有关。目前, 国内各勘测和研究单位在室内常用的粗粒土抗剪强度试验仪器有大型直接剪切仪和大型高压三轴仪等; 大型三轴试验制样困难, 操作复杂, 相比之下直剪仪构造简单, 试样的厚度薄, 固结快, 试验历时短, 操作方便, 仪器盒的刚度大, 试样没有侧向膨胀的可能, 根据试样的竖向变形量就能直接算出试验过程中的试样体积变化, 虽然有诸多缺点, 至今在工程实践中仍广泛应用, 积累了很多宝贵的经验数据, 给出的抗剪强度值仍然有实用价值。

在试样上加一定的垂直压力, 然后施加水平推力, 使试样在上下盒之间的水平面上发生剪切直至破坏。通过若干个不同垂直压力下的抗剪强度值, 绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线, 并进行线性回归, 直线的倾角为摩擦角, 直线在纵坐标上的截距为粘聚力。

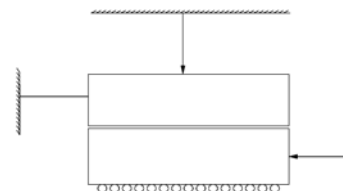


图1 常规直剪试验原理示意图

Fig. 1 Sketch drawing of normal direct shear test

1 直剪试验的原理及方法

室内直剪试验依据摩尔(Mohr)-库仑(Coulomb)强度理论(见图1), 试验时将试样置于上下盒之间,

基金项目: 交通部西部建设科技项目: 土石混填路基修筑技术研究
(200231800034); 淮安市科技计划项目(HAG05051)

收稿日期: 2005-01-11

2 常规大型直剪试验的主要问题

室内大型直剪试验是对料样进行等量替代或等比例缩小等处理后,沿用细粒土直剪试验原理,依据《土工试验规程》(SL237-059-1999),加大剪盒尺寸进行的室内剪切试验。在试验过程中主要表现为:

(1) 试验过程中正应力不恒定

在试验过程中,随着剪切位移的增加,受剪的有效面积在减小,而计算中对于剪切面积的取值是认为剪切面不变,使得计算所得的正应力偏小,而且实际剪切过程中正应力的分布是不均匀的,这与库仑公式的应用条件存在差异。

(2) 试验过程中垂直荷载偏心

在剪切过程中,由于上剪切盒固定,只是下剪切盒发生位移,而垂直荷载的中心始终作用在上盒的中心,导致随着剪切位移的增加,垂直荷载发生偏心,致使应力计算误差加大。

(3) 剪切破坏面固定

在实际中,试样的剪切破坏常常发生在最薄弱面上,而直剪试验的剪切面只能人为地限制在上下盒之间的接触面上,不是沿着剪应力集中带中的薄弱面发生剪切破坏,人为地提高了混合料的抗剪强度。

3 大型直剪试验的改进

3.1 现有的改进综述

针对直剪试验存在的上述问题,许多学者和研究机构对室内大型直剪试验进行了改进。梅英宝、吕凡任^[1]扩大了试样的剪切面积,以此来增大直剪试验中试样的颗粒粒径,取得了良好的效果。韩森、徐鸥明、王彦志等^[2]研制的大型直接剪切仪,剪切盒为由上、中、下 3 个刚性试模组成。周志刚、李文胜、宋勤德^[3]研制开发的大型直接剪切试验仪,每个剪力盒的直径和高度分别为 15.2 cm 和 6.0 cm。周国庆、赵光思、别小勇^[4]研制了 DRS-1 型超高压土直剪试验系统,试样尺寸可达 (51.2~79.8) mm×20 或 30 mm (试样面积 20~50 cm²)。

目前,国内外部分科研院所使用的大型直剪仪的规格及型号见表 1^[5]。

上述学者及研究人员对大型剪切试验的改进,对扩大试验范围,提高试验精度,简化试验操作产生了积极的影响。但多数的改进仅从剪盒的尺寸、试验的操作以及剪切面的调整上进行,未对直剪试验过程中的正应力变化及偏心等问题进行改进。

3.2 改进的室内大型直剪试验系统

围绕上述问题,我们对室内大型直剪试验进行了改进,研制了新型的室内大型直剪试验系统,试验设

备原理如图 2 所示。

表 1 国内外部分大型直剪仪统计资料

Table 1 Summary of large-scale direct shear test system

国家	使用单位或工程	试样尺寸/mm 长×宽×高	最大粒径/cm	径径比
日本	M·Fukudka	1000×1000×600	20	5
日本	土木研究所	2000×1500×2000	30	5
美国	G·F·Swers	1830×1830×457	30	6.1
美国	勒维氏 Smiss 坝	1800×1800×900	30	6
中国	成都勘测设计院	50.5×50.5×45	6	8.33
中国	黄委会勘测规划设计院	1000×800×730	10	8
中国	南京水利科学研究所	1000×1000×500	12	8.3
中国	昆明勘测设计院	1200×1200×600	30	4
中国	陕西石头河工程局	2000×2000×1000	40	5

注:径径比为试样平面最小尺寸与最大颗粒粒径之比。

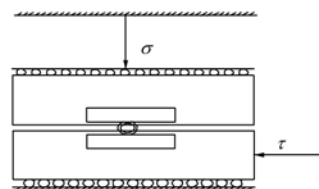


图 2 改进的直剪试验原理

Fig. 2 The principle of improved direct shear test

设备包括主机系统、液压及液压控制系统、量测主系统、数据采集处理系统及吊装辅助系统五个部分。具体分述如下。

(1) 主机系统

主机系统(如图 3)包括以下几个部分:



图 3 大型土石混合料多功能试验系统

Fig. 3 Equipment of lab large-scale direct shear test

a) 垂直荷载加载架与底座:垂直荷载加载架用于向试样施加垂直荷载,机架上横梁内安装内藏式液压作动器(液压油缸),下横梁与底座刚性连接。

b) 剪切盒:为使试样受力均匀,剪切盒为方形设计,大剪盒内可套装小剪盒。剪切盒由上、下剪切盒、上下剪盒间的滚轴排及相应的配套的位移导向机构(见图 4)构成。上下剪盒设锁紧装置,上、下剪切盒之间的开口采用换装刃口条的方式调节开口的宽度。开口宽度从 5~9 cm 可调,通过调节开口的宽度,可有效的扩大剪切带,减小试样的不均匀性及制样的

不均匀性对试样结果的影响。上剪盒顶部和下剪盒底部设有透水板和集水槽, 下剪盒还设有放水孔和放水阀。



图 4 滚轴排及位移导向机构

Fig. 4 Roller and displacement guide system

c) 水平加载架: 水平加载架的作用是通过上、下剪切盒向试样施加剪切力。本系统将其设计成独特的方式, 即加载架的两个承载端直接连接在上下剪切盒上, 不与其它部分相连接, 使水平加载架和剪切盒自成体系 (见图 3), 这样, 既有利于剪切盒推出垂直加载架以方便装卸试样, 又为剪切试验过程中保持正应力始终均匀分布奠定了基础。

(2) 液压及液压控制系统

液压系统由高压泵站、高压硬管、高压软管、高压氮气、高压液压稳压器, 以及阀门、作动器等部件构成。

液压控制系统用于水平荷载和垂直荷载控制。前者控制单元采用开环控制方式, 主要由滤油器、电磁换向阀和精密调速阀组成; 后者控制单元采用闭环反馈控制方式, 主要由反馈信号处理器、电液比例放大器、电液比例减压阀和滤油器等组成。

(3) 量测主系统

量测系统主要对垂直荷载、垂直位移、水平荷载、水平位移进行监测、显示。包括上述各监测的传感器及显示控制系统。

(4) 数据采集处理系统

数据采集处理系统主要是根据设定的时间间隔对上述各监测项目进行记录、回放和处理。数据采集通过数据显示系统传到由计算机控制的 DAQ 数据采集卡, 由配套软件控制。

(5) 吊装及辅助系统

吊装组件采用旋转式变半径悬臂梁葫芦吊设计, 并直接焊接在垂直加载架的立柱上。其它辅助设备包括, 固结桶、小剪切盒 (500 mm×500 mm×400 mm)、量测网等, 主要用于进行固结试验、小试样剪切试验和剪切面起伏形态的量测等。

3.3 改进中的技术攻关

垂直荷载的偏心和正应力的改变, 为本次研发的

主要技术攻关项目。经分析认为突破口在于: 如果垂直荷载位置不变, 则荷载的偏心问题可通过保持剪切面中心位置不变得到解决; 对于剪切试验过程中的正应力的改变可通过随剪切面面积的改变自动调整垂直荷载实现。研发中我们采取了如下技术措施。

(1) 锁定剪切面中心位置

本系统设计中, 不将上、下剪盒之一固定在底座或垂直加载架上, 而是把他们与水平加载架的端承面直接连接。水平加载架与上下剪盒构成一个独立的整体结构, 它可在底座上沿剪切方向整体移动。施加水平荷载时, 水平加载架带动上下剪盒作相对运动。

剪切面中心位置应当锁定在垂直荷载的作用线上, 试验过程中上、下剪盒以此点作对称运动。设计中将一对齿轮对称置于剪盒两边, 使其轴线通过剪切面中心和垂直荷载作用线, 并垂直于剪切位移的方向。齿轮固定在垂直加载架的立柱上, 每个齿轮配两根齿条, 分别安装在上下剪切盒上 (参见图 3, 4)。由于齿轮固定, 只能转动而不能平动, 其轴线位置不变, 上下剪盒在齿轮齿条的限制下作对称运动, 剪切面中心位置被锁定。

(2) 正应力恒定

为了满足试验过程中正应力保持不变的条件, 研发中设计了如图 5 所示的闭环反馈控制回路。

由图中可见, 剪切位移发生后, 可以通过水平位移传感器测量, 传感器获得位移信号经信号处理并调整好初值, 送比例放大器驱动电液比例减压阀, 驱动垂直油缸, 使垂直油路压力随之按相应比例降低, 保证了正应力始终不变。

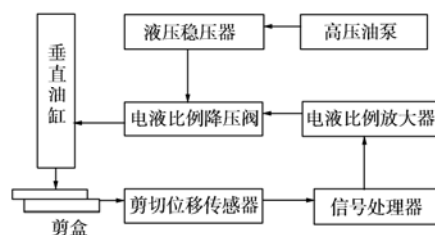


图 5 垂直荷载控制原理框图

Fig. 5 Schematic diagram of vertical load control

3.4 改进后的功能及特点

改进后的大型直剪试验完全克服了垂直荷载在试验过程中不断改变和偏心的问题。另外, 由于垂直荷载通过反力框架固定, 而上下剪切盒都不固定, 故装料时可将剪盒推出反力框架, 装料、卸料方便。

通过应用辅助设备, 扩充了试验项目和内容, 如可根据试样的最大粒径应用不同尺寸 (1000 mm×1000 mm×800 mm 或 500 mm×500 mm×400 mm) 的剪盒进行剪切试验, 可以在剪切破坏卸载后量测剪

切面的起伏特征, 可以进行大型固结试验、渗透试验等。

3.5 试验数据处理分析

改进后的室内大型直剪试验系统, 试验操作简单, 将剪切盒推出垂直加载架, 按规范要求装料制作试样, 安装相应的监测设备后, 即可进行相应的剪切或固结压缩试验。对于剪切试验, 如果是用小剪盒进行的, 在试验结束后, 还可将上剪切盒吊离, 观测剪切面的起伏状况。

试验结束后, 可得到两组数据, 一是人工记录的试验数据, 另一个是通过数据采集卡由计算机自动采集的数据, 以剪切试验为例, 说明数据的处理方法。

(1) 抗剪强度指标的确定

人工记录的数据包括各级垂直荷载对应的最大剪切力及剪切面起伏状况的量测数据。通过计算可得到相应的正应力对应的最大剪应力, 进行线性回归 (如图 6), 可通过图解法获得混合料的抗剪强度指标。

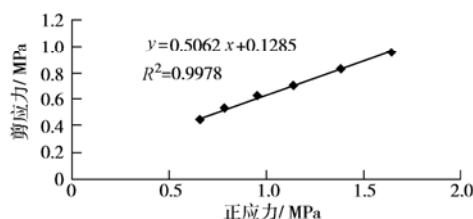


图 6 剪切试验数据处理示例

Fig. 6 Sample of data analyses of shear test

从回归结果可以看出, 试样在各级垂直荷载下的剪切结果相关性很高, 得到的抗剪强度指标相对精确可靠。

(2) 剪切面起伏状况的再现

前已述及剪切面起伏的测量方法, 以网眼尺寸为 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 的钢丝网覆在大剪盒上盒上口, 用吊线法可测得剪切面上各点的相对高程, 可得到剪切面的三维坐标如下表 2。

表 2 剪切面起伏量测结果示例表

Table 2 Data sheet of shear surface

x/cm	y/cm	相对高程/cm
0	0	40.3
2.5	0	41.1
5	0	41.2
0	2.5	40.5
2.5	2.5	40.8
5	2.5	41.1

应用相关的图形处理软件对测量点坐标进行内插加密, 内插间距可调, 示例中以内插至平面坐标相对间隔 $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$, 得到更详细的网点三维坐标值。根据加密的坐标值, 可再现剪切面的起伏状况 (如图

7)。

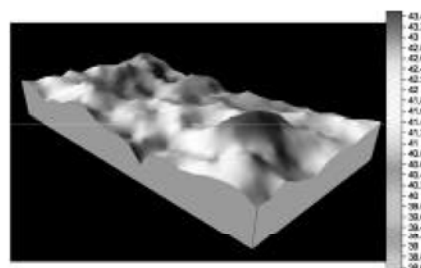


图 7 剪切面起伏特征图

Fig. 7 Fluctuant character of shear surface

(3) 剪切破坏方式分析

在试验过程中计算机自动采集了试样的应力和应变, 由自动采集的试验数据描绘的剪切力与位移的关系曲线如图 8 所示, 图中代表不同垂直荷载下的剪切试验, 按从下到上为正应力增大的顺序排列。

在剪应力较低时, 试样的水平位移随水平推剪力的增加速率一般较低。随着水平推力的增加, 试样的水平位移速率也逐渐增大, 当试样出现裂缝后, 水平位移速率明显加快。总体上, 试样水平位移与剪应力的关系曲线呈向下凹型。试样变形特点表现为存在峰值强度, 在应力 - 应变关系上一般表现为明显的全应力 - 应变曲线。

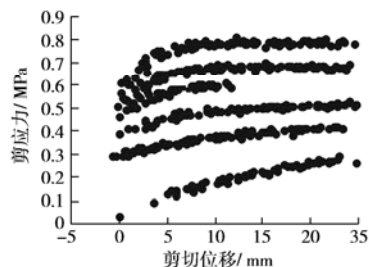


图 8 剪切力 - 位移关系曲线

Fig. 8 Relation curve of $\tau - \delta$

(4) 剪切过程中的剪胀性分析

由图 8 还可以看出: 剪切过程中的剪应力忽大忽小, 仿佛上下跳跃, 从“跳跃”的幅度看, 首先是剪切起始阶段“跳跃”较大; 其次, 小围压和大围压的“跳跃”幅度稍大, 中等围压的“跳跃”幅度相对较小。分析认为, 由于本系统正应力的控制采用了闭环反馈控制系统, 试验过程中的正应力是不会变化的, 实际剪切过程中的变化, 只有一种可能, 那就是剪切面在不断变化, 而剪切面的变化是与颗粒的翻滚、滑移、破碎及重新排列等紧密相关的。剪切起始阶段及小围压时“跳跃”大, 是因为沿剪应力集中带内的薄弱面逐渐形成连续的破坏面, 由于破坏面不是理想的平面, 而包含着颗粒的翻滚及剪切破坏面整体“爬跃”某大颗粒等, 使得剪切起始阶段的“跳跃”幅度增大。

而围压高时“跳跃”大,是由于不断的有颗粒被剪碎造成,通过试验前后颗粒分析试验发现,颗粒破碎率高达 35.5%,试验前后级配曲线如图 9。

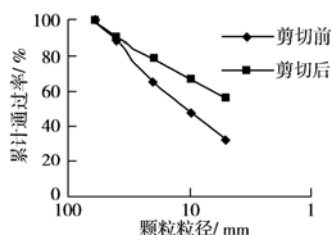


图 9 试验前后的颗粒级配曲线

Fig. 9 Grading curve before and after shear test

其实,这种剪切过程中的“跳跃”正是土石混合料剪胀性的表现。

4 结 论

经过对土石混合料室内大型直剪试验系统的改进并进行初步的试验和分析,我们认为:

(1) 改进的大型室内剪切试验系统克服了常规室内大型直剪仪的主要问题,使得室内大型直剪试验系统很好的满足了其试验原理摩尔-库仑定律的应用条件,提高了试验结果的相关性,使得试验结果更为精确、可靠。

(2) 改进后的室内大型直剪试验系统,操作简单,试验项目更完善,可以根据需要应用不同尺寸的剪切盒进行直剪试验,可以进行室内的大型固结压缩试验等,试验数据采用了的计算机自动采集系统,可以利用自动采集的数据确定强度指标,进行试样的破坏方式、剪胀性等分析,扩大了室内大型直剪试验系统的应用范围。

参考文献:

- [1] 梅英宝, 吕凡任. 路堤回填土中砾石成分对其强度指标的影响[J]. 中南公路工程, 2004, 29(3):55 - 57.
- [2] 韩 森, 徐鸥明, 王彦志, 等. 风化石粒料基层材料抗剪强度变化规律研究[J]. 公路, 2004, (10):143 - 147.
- [3] 周志刚, 李文胜, 宋勤德. 大型直剪仪试验的尺寸效应[J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15(3):47 - 49.
- [4] 周国庆, 赵光思, 别小勇. 超高压直剪试验系统及其初步应用[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(2):118 - 121.
- [5] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1992:162 - 170.
- [6] SL237 - 059 - 1999, 土工试验规程 [S]. 北京:水利水电出版社, 1998:447 - 455.

《建筑科学与工程学报》2006 年征订通知

《建筑科学与工程学报》是由国家新闻出版总署批准, 国家教育部主管, 长安大学主办的学术性期刊。主要刊载建筑学、结构工程、地下建筑与基础工程、建筑环境与设备工程等专业及相关领域的论文, 包括科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结, 同时也刊登建筑材料、桥梁工程、市政工程、防灾减灾、力学等专业中与上述学科交叉的论文, 并就一些热点和难点问题, 开设“专家论坛”和“院士讲座”。主要读者对象为建筑学与土木工程技术领域的科研人员、工程技术人员和大专院校师生。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大 16 开本, 96 页, 欢

迎国内外读者订阅。订阅时可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 每期定价: 10.00 元, 全年定价: 40.00 元。

开户行: 中行西安翠华路支行

账 号: 0104134—34148598091001

账 户: 长安大学杂志社

联系人: 李 艳

地 址: 西安市长安中路 161 号长安大学小寨校区《建筑科学与工程学报》编辑部

邮 编: 710061; E-mail: jzxb@chd.edu.cn; 电话: (029) 82337253