

文章编号: 1000-7598-(2014)06-1593-08

# 玉龙雪山西麓原状冰碛土 CT 扫描试验研究

吕士展, 汪 稔, 胡明鉴, 阿 颖, 周 斌

(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:** 冰碛土是冰川行进融化过程中漂石、碎石、砂砾、粉土和黏土在毫无分选的条件下快速混杂堆积生成的一种特殊岩土材料, 由其引发的工程问题日益受到岩土工程界关注。砾石颗粒细观组构是冰碛土独特沉积历史的反映, 直接影响土体的岩土力学性质, 但迫于原状冰碛土样极难取得, 岩土工程领域迄今罕有研究。对此, 采用人工精细切削的方式, 成功取得了玉龙雪山西麓原状冰碛土样, 并对取回的 6 块冰碛土原状样进行了 CT 扫描, 首次获得了冰碛土内部真实细观组构图像。借助 Matlab 对 CT 图片进行二值化和消噪处理后, 运用常规统计方法对冰碛土内砾石颗粒的面含石量、颗粒定向以及颗粒形状等剖面组构指标进行了描述。结果表明, 垂直剖面之间的统计数据差异较小, 但垂直剖面与水平剖面之间差异较大。

**关 键 词:** 冰碛土; 原状样; CT 扫描; 细观组构; 统计研究; 玉龙雪山

中图分类号: TU 441+.2

文献标识码: A

## Computerized tomography (CT) scanning test research on intact moraine soil on west side of Yulong snow mountain

Lǚ Shi-zhan, WANG Ren, HU Ming-jian, A Ying, ZHOU Bin

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Moraine soil is a kind of special geotechnical material generated by rapid mixed depositing of boulders, gravel, sand, silt and clay without sorting when quaternary glacier moving and melting. Engineering problems caused by moraine soil have attracted more and more attentions from geotechnical engineering field. Meso-fabric of gravel particles is a reflection of the unique sedimentary history and directly affects the geotechnical properties of moraine soil. However, subjecting to the hardness of obtaining undisturbed moraine soil samples, there is few researches on it. To change this situation, we succeeded in getting undisturbed moraine soil samples from west Yulong Snow Mountain with delicate manual cutting work. Then the 6 pieces of moraine soil samples are scanned by CT instrument and the real meso-fabric images of internal moraine soil are obtained for the first time. After binarization of CT images and de-noising processing with the help of Matlab, section fabric indexes of stone area ratio, grain orientation and particle shape of moraine soil gravel particles are given with conventional statistical methods. The results show that the difference between vertical sections is minor, however the difference between vertical and horizontal sections is significant.

**Key words:** moraine soil; intact samples; CT scanning; meso-fabric; statistical study; Yulong Snow Mountain

## 1 引 言

冰碛土是第四纪冰川行进融化过程中漂石、碎石、砂砾、粉土和黏土在毫无分选的条件下快速混杂堆积的产物<sup>[1]</sup>, 在我国广泛分布于天山、青藏高原及周边等高海拔地区, 其他中高纬度山区时有分布。随着西部大开发的进行, 西南高海拔地区基建及水电项目陆续实施, 由冰碛土引发的工程问题也

日益增多<sup>[2-7]</sup>。但目前冰碛土工程力学特性尚未得到深入研究<sup>[1]</sup>, 国内外在冰碛层上修建建筑物极为慎重, 在建和拟建工程仍以绕避为主, 导致成本大幅增加。

冰碛土是一种特殊的天然土石混合物, 其岩土力学特性直接受到含石量、砾石颗粒的空间形态、排列、定向、接触方式等细观组构指标的影响。Mcgowna 等<sup>[8]</sup>认为, 冰碛土组构特殊, 其强度和变

收稿日期: 2013-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41172286); 广西岩土力学与工程重点实验室资助课题(No. 11-KF-03)。

第一作者简介: 吕士展, 男, 1985 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事土石混合物、海洋(钙质)砂土力学方面的研究工作。E-mail: lvshizhan0402@126.com

形特征比普通的均质土和粗粒土都更复杂。张永双等<sup>[9]</sup>结合野外地质调查和工程实践研究也发现特殊的级配构成和组构特征在冰碛土工程特性中起控制性作用。但迄今专门针对冰碛土组构特征的研究报道极少：细观方面，仅 Lehourg 等<sup>[10]</sup>通过数字图像处理技术研究了冰碛土揭露面内块石的形态及结构特征；微观方面，Sokolov 等<sup>[11]</sup>利用扫描电镜成像技术对冰碛黏土微观孔隙进行了定量分析。

可靠、高效的组构测试技术方法是组构研究的前提，但长期以来，由于缺乏适用的内部组构无损获取技术，从细观组构角度研究冰碛土的工作一直未能有效开展。随着核磁共振和 CT 扫描技术的发展进步，岩土材料内部细观组构信息的无损获取已可实现<sup>[12]</sup>。基于此，本文以云南省玉龙雪山西麓冰碛土为研究对象，尝试开展了原状冰碛土块状试样的 CT 扫描试验，首次获取了原状冰碛土内部的真实细观组构信息并进行了初步的统计分析，在冰碛土岩土工程特性研究方面进行了有益的探索。

## 2 原状冰碛土 CT 扫描试验

### 2.1 试验目的

利用 CT 扫描技术无损获取原状冰碛土内部真实细观组构图像信息。

### 2.2 试验土样

细观组构是冰碛土原状结构性的一种体现，为了获得真实可靠的组构信息，需确保土样的原状结构不受破坏。但迄今罕有针对原状冰碛土的相关研究报道，因此，成功取得原状冰碛土样成为本试验顺利开展的关键所在。

原状土样难以取得的原因在于冰碛土中土石混杂且粉黏粒含量较低，土石之间的胶结脆弱，容易碎散。尽管冰碛土通常含泥量很低且缺乏泥质胶结强度，但仍有一定的区域性差异。经过比较及现场考察，发现玉龙雪山西麓某些沉积区的冰碛土土粉、黏粒含量较高且具备一定的泥质胶结强度，试取样的结果表明，存在取得块状原状冰碛土样的可能，因此，选择该区作为取样地点。综合考虑 CT 的穿透能力和土样的后续利用，确定取样尺寸为  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ （长 $\times$ 宽 $\times$ 高）。为便于分析方向对冰碛土组构及工程力学特性的影响，现场取样时对土样的实际空间方位进行了统一标记，如图 1 所示，X、Y 方向对应于实际水平面内的两个正交方向（长和宽），Z 方向对应于现场的垂直向上方向（高）。

为减少扰动，取样全程由人工完成，经过反复摸索和练习，取样成功率可达到 40% 左右。现场取

样流程为：①准备好内径为  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  的样品盒，盒子先钉牢 5 面；②清除表土，整平坑底，选择没有较大块石出露的地面画出  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的正方形取样区，用切土刀，小铲等工具慢慢竖直向下切土，力求切面平整；③若遇石块，则用小锯锯断，若块石太大或切削过程中出现边棱损坏，则更换位置重新取样；④土样高度切至  $15\text{ cm}$  后继续向下切  $5\text{ cm}$ ，完成后整体修整试样，在试样外包 1~2 层塑料薄膜保持水分，扣上土样盒并压紧；⑤从土样盒开口边缘斜向下小心切割试样四周，使试样逐步与底部土体脱离，翻转试样，削平底面，包上塑料膜并用胶带密封，若试样和盒子之间出现空隙，则取切削掉的泥土予以填充；⑥钉上第 6 块盖板并标记土样实际方向，最后人工装车转运。实际取样过程见图 2。

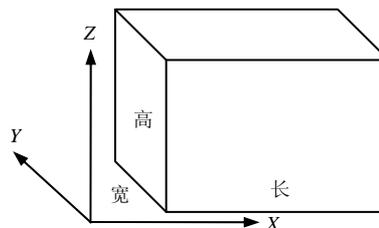


图 1 冰碛土样方向标记示意图

Fig.1 Sketch of directions of moraine soil sample



图 2 冰碛土原状样取样过程

Fig.2 Procedure of intact moraine soil sampling

取样现场可见土体呈浅绿或灰绿色，稍湿，中密至密实，土中含有较多直径为  $1 \sim 1\,000\text{ mm}$  不等的砾石，且砾石多为中风化至弱风化玄武岩。图 3 为取样点周边某冰碛土揭露面，图 4 为土样 CT 扫描之后由常规土工试验方法得到的颗粒分布曲线。由图可知，所取土样粒径分布宽广，粉黏粒含量约 45%，粒径  $\geq 5\text{ mm}$  的粗粒含量约 25%，不均匀系数  $C_u=614.3$ 、曲率系数  $C_c=0.045 \ll 1$ ，为级配不良土。



图 3 取样点附近冰碛土揭露面  
Fig.3 A slope surface of moraine soil near the sampling site

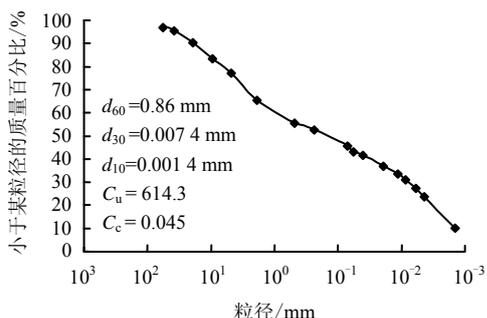


图 4 冰碛土原状样颗粒分布曲线  
Fig.4 Grain size distribution curve of moraine soil samples

### 2.3 试验设备及扫描原理

岩土试验领域通常采用较成熟的医用 CT 进行试样无损扫描观测，本文 CT 扫描试验由长江科学

院水利部岩土力学与工程重点实验室于 2008 年购置并改装的高空间分辨率西门子 40 层医用 CT 机完成，其主要技术参数见表 1。实际 CT 扫描试验过程中 X 射线管电压值为 140 kV，X 射线管电流为 400 mA。

CT 是以测定 X 射线在扫描物体内的衰减系数为基础，采用数学方法，经计算机处理，求解出某剖面上的衰减系数分布矩阵，再转变为灰度分布矩阵，从而实现扫描断面密度分布成像的现代医学成像技术。X 射线的强度衰减规律可表达为<sup>[13-14]</sup>。

$$I_{out} = I_{in} e^{-\mu l} \quad (1)$$

式中： $I_{out}$  为 X 射线透射强度； $I_{in}$  为入射 X 射线强度； $\mu$  为材料吸收系数，由原子序数和电子密度决定； $l$  为扫描材料的厚度。

CT 图像中的不同灰度反映被扫描材料对 X 线的吸收程度，黑影表示低吸区，即低密度区，白影表示高吸收区，即高密度区。实际应用中，不用吸收系数，而换算成 CT 值来说明密度，单位为 Hu（Hounsfield unit）。水的 CT 值定为 0 Hu，人体中密度最高的骨皮质 CT 值定为 +1 000 Hu，空气密度定为 -1 000 Hu。这样，人体各种组织的 CT 值就居于 -1 000~+1 000 Hu 的 2 000 个分度之间。

表 1 CT 机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of CT instrument

技术指标	最大扫描直径 /cm	扫描长度 /cm	扫描层厚 /mm	断层准直 /mm	图像重建矩阵	像素大小 /mm	最高空间分辨率 /mm	HU 标度范围	密度分辨率 /%	图像显示矩阵
技术参数	70	157	0.6	20×0.6	512×512	≥0.29	0.29	-1 024~+3 071	0.3	1 024×1 024

### 2.4 试验结果

本次试验共完成 6 个原状冰碛土样的 CT 扫描，首次获得了冰碛土内部真实细观组构的影像资料。试验中，主扫描层面与垂直于 X 方向的垂直剖面相平行，扫描层间距为 0.6 mm，每个土样约获得 330 张 512 像素×512 像素的主扫描断面图像。根据主扫描断面图像数据，利用 CT 机配套系统中的图像处理程序，可实现冰碛土原状样内部细观组构的三维重建，并可以任意角度剖切土样，查看内部土、石及细观孔隙的分布情况。为便于描述，记主扫描层面对应的垂直剖面为 X 剖面，另记垂直于 Y 轴的垂直剖面为 Y 剖面，垂直于 Z 轴的水平剖面记为 Z 剖面，其中 Y、Z 剖面图均为三维重建后的剖面图。图 5~7 给出了本次试验得到的部分冰碛土内部真实细观组构剖面图，其中图 5 为 1#~6# 土样长度中点处 X 剖面图，图 6 为 1#~6# 土样宽度中点处 Y 剖面图，图 7 为 1#~6# 土样高度中点处 Z 剖面图，X、

Y 剖面图实际大小约为 20 cm×15 cm，Z 剖面图实际大小约为 20 cm×20 cm。

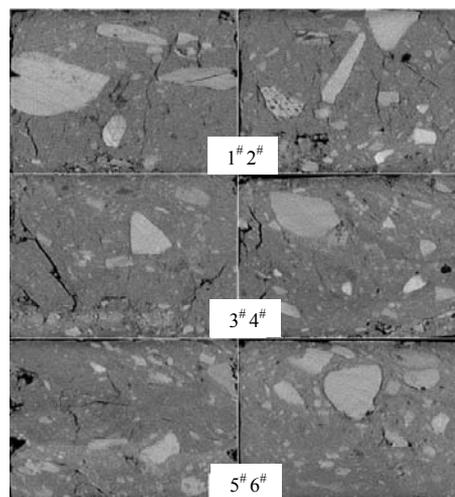


图 5 1#~6# 冰碛土样长度中点处 X 剖面图  
Fig.5 Sections perpendicular to X-axis at the length midpoint

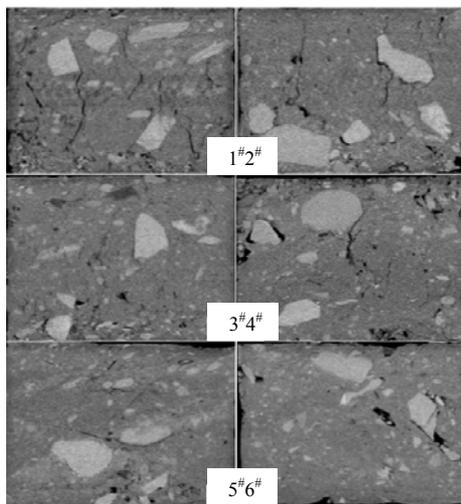


图6 1~6#冰碛土样宽度中点处Y剖面图  
Fig.6 Sections perpendicular to Y-axis at the width midpoint

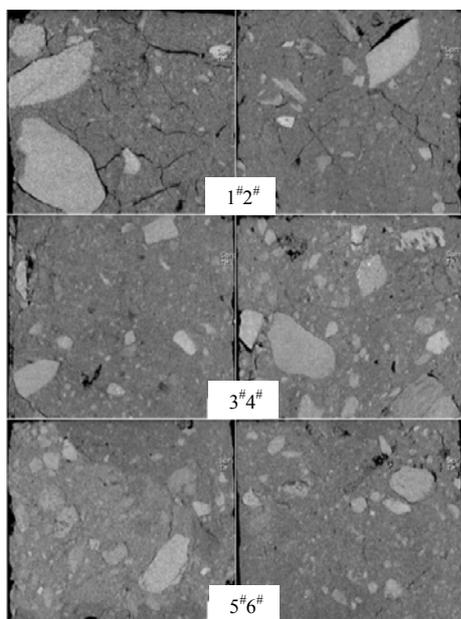


图7 1~6#冰碛土样高度中点处X剖面图  
Fig.7 Horizontal sections at the height midpoint

### 3 试验结果分析

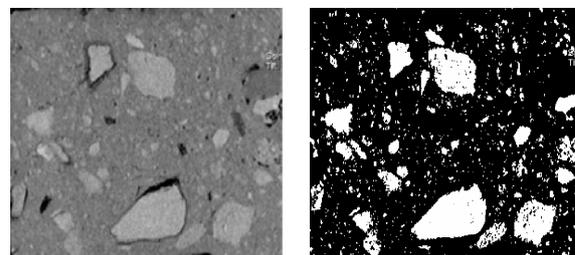
观察试验所获得的CT扫描图片,部分如图5~7所示,玉龙雪山西麓冰碛土原状样细观组构的直观特点归纳如下:①土体主要由砾石和细微的泥质物组成,大小颗粒混杂,缺乏分选性,内部存在细观尺度的裂缝及孔洞;②土样内无明显层理,粗颗粒无显著定向排列,扁平或长条状石块可呈直立状态;③砾石颗粒大部分棱角鲜明且较尖锐,磨圆度不高,形状各异;④砾石颗粒多孤立悬浮于细颗粒土中,少有的接触以点接触为主。

细观尺度层面,冰碛土的组构可由砾石颗粒形

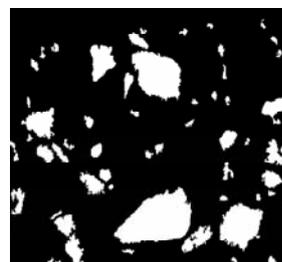
态、颗粒定向和颗粒之间的接触方式来表达。但鉴于CT扫描图片中砾石颗粒多悬浮于细粒土中,很少有直接接触,因此,本文主要针对砾石的颗粒形态和颗粒定向度进行统计分析。

为了便于图片信息的提取和统计分析,先用Matlab软件对图片进行二值化及消噪处理,如图8所示,其中二值化灰度阈值为140,消噪像素阈值为30像素。然后编制Matlab程序从处理后的图片中提取出所需信息,包括各颗粒长轴方向和以像素形式记录的颗粒周长、面积及长轴长度,再通过像素与实际尺寸之间的换算关系将像素值转化为各颗粒的真实周长(mm)、真实面积( $\text{mm}^2$ )及真实长轴值(mm)。实际CT扫描图片中,每个像素代表的真实长度约为0.58 mm,二值化图像消噪阈值30像素对应的实际面积为 $10.1 \text{ mm}^2$ ,即CT图片中面积小于 $10.1 \text{ mm}^2$ 的颗粒将被作为噪音消除掉。

需注意的是,CT图像与常规数码相机拍摄的图像有所区别,主要体现在两方面:一是CT是基于密度分布成像,数码相机则基于光线强度分布成像;二是CT图像为剖面图,数码相机图像则是拍摄对象表面的投影图。



(a) CT扫描图片 (b) 二值化后(灰度阈值140)



(c) 消噪后(阈值30像素)

图8 CT扫描图片二值化  
Fig.8 CT images binarization

#### 3.1 面含石量

为了表达冰碛土CT扫描图片中砾石颗粒所占面积在整个分析区域面积所占的百分比,定义面含石量 $n_w$ 为

$$n_w = \frac{A_w}{A} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $A_w$  为图像中砾石颗粒面积之和； $A$  为分析区域图片总面积。因为图像二值化及消噪过程中去除了面积小于  $10.1 \text{ mm}^2$  的颗粒，所以大致相当于限定研究颗粒尺寸  $>3 \text{ mm}$ 。

运用式 (2) 定义的方法，分别从每个土样长、宽、高 3 个方向等间距选取 10 张 CT 扫描图片，即从 6 个土样中选出 X、Y、Z 剖面图各 60 张进行统计分析。统计结果如图 9 所示，其中，X、Y、Z 3 个剖面的面含石量分别为 16.12%、15.91% 和 15.58%，数据标准差分别为 2.75%、2.64% 和 3.265%。可见 X、Y 两个垂直剖面的面含石量及数据标准差均比较一致，水平剖面面含石量较低，且各剖面之间的面含石量离散度较高。

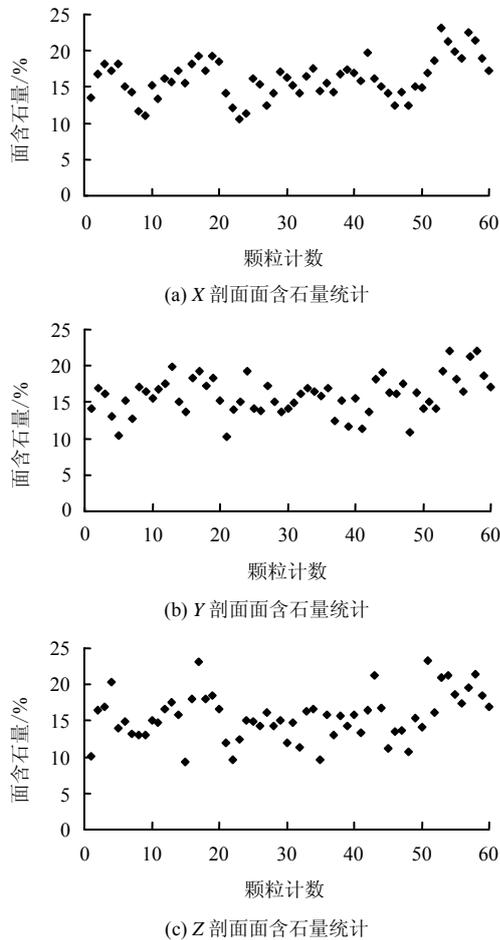


图 9 冰碛土 CT 图片面含石量统计图  
Fig.9 Stone area ratio statistics of moraine soil from CT images

由图 4 可知，筛分试验中  $\geq 3 \text{ mm}$  的颗粒质量约占总质量的 29%，而统计得到的面含石量仅约为 16%，显著低于筛分试验结果。笔者认为，一方面在于面含石量由二维剖面图得到，反应的是二维面

积的数量关系，而筛分试验体现的则是三维体积、密度的数量关系，两者因计算方法的差异可能导致两组数据之间产生一定的系统差异；另一方面，更重要的是因为本文在计算面含石量时仅为基于 CT 扫描图片中“砾石”面积的计算结果，而未考虑石块与细粒土之间的密度差异，若考虑到石块密度约为  $2.9 \text{ g/cm}^3$ ，细粒土的密度值约  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ，则修正后的面含石量计算值约为 23.5%，与筛分试验结果之间的差值大大减小。

### 3.2 颗粒定向性

颗粒的定向性既是土体应力历史的反映，也直接影响土体的工程力学性质<sup>[15]</sup>，目前主要的统计方法包括定向玫瑰图、主定向角、各向异性率<sup>[16-17]</sup>、平均定向方向、定向分布函数以及定向分布直方图等<sup>[18]</sup>。本文主要应用定向玫瑰直方图来初步描述冰碛土 CT 图片的颗粒定向性。

定向玫瑰直方图是将所有参与统计的颗粒长轴方向角按照一定的角度间隔分级，然后统计每个角度间隔内颗粒的个数或频率，最后绘制成图。由于定向方向的对称性，只需要绘制  $0^\circ \sim 180^\circ$  区间内的玫瑰直方图即可。

本文以  $15^\circ$  为区间，将  $0^\circ \sim 180^\circ$  等分为 12 个间隔，其中 X、Y、Z 3 个剖面的  $0^\circ$  方向分别为 Y、X、X 轴正方向。考虑到 CT 图片为剖切面图，为避免同一个较大砾石颗粒被多个剖面剖切而导致重复统计，故在每个试样的长、宽、高 3 个方向上分别等距离取 5 张图片，共计选出 X、Y、Z 剖面图各 30 张进行统计分析，统计结果如图 10 所示。图 10 直观地表明：①X、Y 两个垂直剖面中，冰碛土细观砾石颗粒长轴方向分布规律相似，且因受重力影响长轴多倾向于水平方向，垂直方向附近的频率密度约为水平方向的 50%，表现出一定的定向性；②Z 剖面内颗粒长轴方向分布比较均匀，没有明显的定向性。

### 3.3 颗粒形状统计分析

颗粒形状是描述颗粒几何特征的重要参数，工程上常用式 (3) 定义的颗粒圆形度  $\phi_c$  以及式 (4) 定义的长宽比  $\alpha$  来进行定量描述<sup>[19]</sup>。

$$\phi_c = \frac{l_r}{l} = \frac{\sqrt{4\pi S}}{l} = 3.545 \frac{\sqrt{S}}{l} \quad (3)$$

式中： $l_r$  为与颗粒面积相等的圆的周长； $l$  为颗粒轮廓的长度； $S$  为颗粒面积。

由式(3)可以算出一些典型平面图形的圆形度，如圆形  $\phi_c=1$ ，正方形  $\phi_c=0.886$ ，边长比为 3 的矩形  $\phi_c=0.767$ ，边长比为 10 的矩形  $\phi_c=0.510$ ，等边三

角形  $\phi_c=0.777$ 。

$$\alpha = \frac{L}{W} = \frac{L^2}{S} \quad (4)$$

式中： $L$ 为颗粒最大弦长； $W$ 为与颗粒面积相等且长边为 $L$ 的矩形的短边长度。

应用式(3)、(4)定义的方法，分别从每个土

样长、宽、高3个方向等间距选取10张CT扫描图片，共计选出X、Y、Z剖面图各60张进行统计分析。统计结果见图11和表2，其中垂直和水平剖面平均圆形度分别为0.768和0.782，平均长宽比分别为2.662和2.493，可见冰碛土颗粒形状在水平剖面和垂直剖面之间存在一定差异，且水平剖面形状相比更接近圆形。

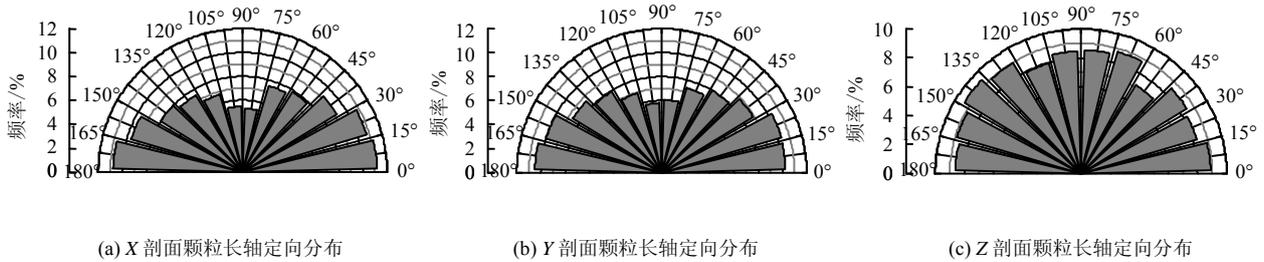


图10 冰碛土CT图片颗粒定向玫瑰直方图  
Fig.10 Rosette histogram of moraine soil orientation from CT images

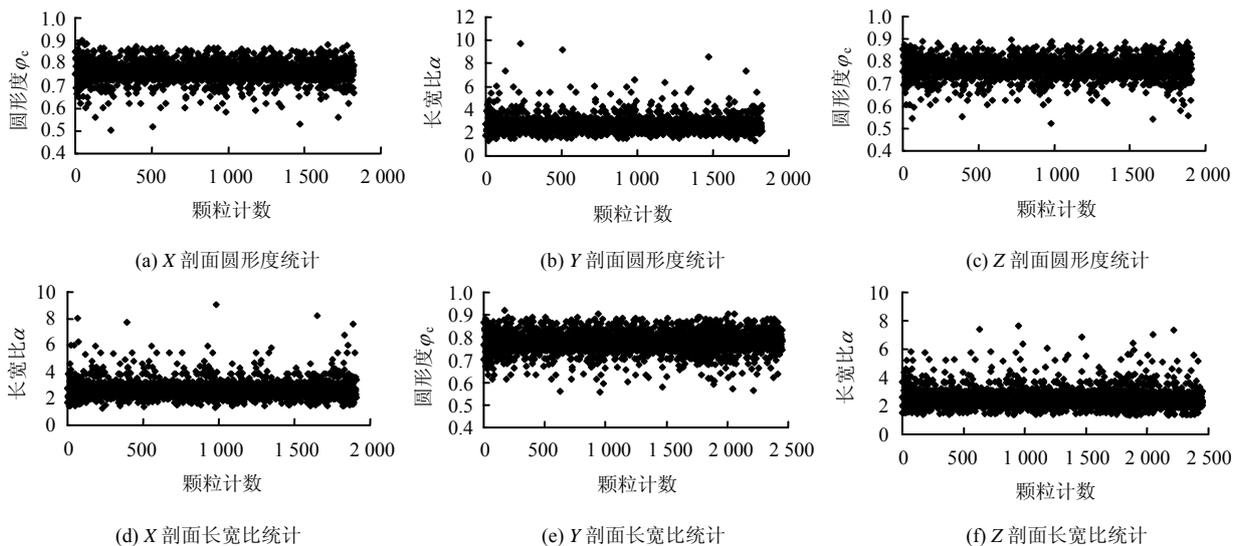


图11 冰碛土CT图片砾石颗粒形状统计  
Fig.11 Gravel particle shape statistics of moraine soil from CT images

表2 颗粒形状统计汇总

Table 2 Summary of gravel particle shape statistics				
剖面	指标	平均	最大值	最小值
X剖面	圆形度 $\phi_c$	0.766	0.901	0.505
	长宽比 $\alpha$	2.657	9.721	1.314
Y剖面	圆形度 $\phi_c$	0.770	0.896	0.521
	长宽比 $\alpha$	2.668	9.068	1.258
Z剖面	圆形度 $\phi_c$	0.782	0.920	0.556
	长宽比 $\alpha$	2.493	7.641	1.353

### 4 结论

(1) 玉龙雪山西麓冰碛土粉黏粒含量较高，具备一定的泥质胶结强度，通过人工精细切削的方式

可以取得冰碛土原状样。

(2) 现行医用CT系统是一种高效可靠的中等尺度(扫描断面20 cm×15 cm)冰碛土内部细观组构信息无损获取途径。

(3) CT剖面图直观地表明：冰碛土内部存在细观尺度的裂缝及孔洞，砾石颗粒大多棱角鲜明，磨圆度不高，形状各异，扁平或长条状石块可呈直立状态，砾石多孤立悬浮于细颗粒土中，砾石之间少有的接触以点接触为主。

(4) 冰碛土CT扫描图片数字图像处理统计结果表明：面含石量约为16%，显著低于同粒径的颗粒分试验结果；垂直剖面内砾石颗粒长轴倾向于水平

方向, 垂直方向附近的频率密度约为水平方向的50%, 而水平剖面内则无明显定向性; 垂直和水平剖面内砾石颗粒平均圆形度分别为 0.768 和 0.782, 平均长宽比分别为 2.662 和 2.493, 水平剖面形状相比而言更接近圆形。

(5) 对比不同剖面的组构指标统计结果, 发现两个垂直剖面内的数据较一致, 而垂直剖面与水平剖面数据差异明显, 表明重力在玉龙雪山西麓冰碛土沉积过程中起到重要作用, 并导致冰碛土细观组构具有一定的横观各向同性特征。

### 参考文献

- [1] 吕士展, 汪稔, 胡明鉴, 等. 冰碛土工程特性研究的现状、问题及展望[J]. 工程地质学报, 2011, 19(Supp.): 298—303.  
LÜ Shi-zhan, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Current status, problems and future trends of the research on engineering properties of moraine soil[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(Supp.): 298—303.
- [2] 邓世学. 太和矿排土场滑坡分析及治理措施[J]. 有色矿冶, 2002, 18(8): 7—9.  
DENG Shi-xue. The slide analysis and synthetic managing method of dump in Taihe iron mine[J]. **Non-ferrous Mining and Metallurgy**, 2002, 18(8): 7—9.
- [3] 李公水, 任剑, 刘宏. 康定机场冰碛土特性及地基处理[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(4): 35—39.  
LI Gong-shui, REN Jian, LIU Hong. Plateau moraine soil characteristics and its reinforcement methods[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2007, 18(4): 35—39.
- [4] 李群善, 邓荣贵, 周霜林. 康定机场高填筑体地基强夯处理可行性研究[J]. 路基工程, 2009, (1): 140—141.  
LI Qun-shan, DENG Rong-gui, ZHOU Shuang-lin. Feasibility study of dynamic compaction on high filling foundation at Kangding Airport[J]. **Subgrade Engineering**, 2009, (1): 140—141.
- [5] 刘昌. 西藏巴河冰碛物的工程特性[J]. 水力发电, 1998, (6): 14—16.  
LIU Chang. Engineering properties of moraine tills in Ba River, Tibet[J]. **Water Power**, 1998, (6): 14—16.
- [6] 袁广祥, 曾庆利, 尚彦军, 等. 川藏公路然乌—鲁朗段冰碛高边坡稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(4): 47—51.  
YUAN Guang-xiang, ZENG Qing-li, SHANG Yan-jun, et al. Stability analysis of high moraine slopes in Ranwu to Lulang section of Sichuan-Tibet highway[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2007, 18(4): 47—51.
- [7] 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.
- [8] MCGOWN A, MCARTHUR A A. Morainic soil deposits and their use in lower cost roads[J]. **Roads and Road Construction**, 1971, 49(587): 388—396.
- [9] 张永双, 曲永新, 王献礼, 等. 中国西南山区第四纪冰川堆积物工程地质分类探讨[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 581—589.  
ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin, WANG Xian-li, et al. On the engineering geological classification of quaternary deposits in southwestern mountain area of China[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(5): 581—589.
- [10] LEHOURG T, RISS J, PIRARD E. Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraine formations on their mechanical behaviour using image and statistical analysis[J]. **Engineering Geology**, 2004, 73: 37—50.
- [11] SOKOLOV V N, RAZGULINA O V, YURKOVETS D I, et al. Quantitative analysis of pore space of moraine clay soils by SEM images[J]. **Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques**, 2007, 1(4): 417—422.
- [12] 程展林, 左永振, 丁红顺. CT 技术在岩土试验中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 33—38.  
CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, DING Hong-shun. Application of CT technology in geotechnical mechanics[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2011, 28(3): 33—38.
- [13] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩土损伤力学宏细观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

- [5] HE J H. Approximate analytical solution for seepage flow with fractional derivatives in porous media[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1998, 167: 57—68.
- [6] DING G P, JIAO J J, ZHANG D X. Modelling study on the impact of deep building foundations on the groundwater system[J]. **Hydrological Processes**, 2008, 22(12): 1857—1865.
- [7] XU Y S, MA L, SHEN S L, et al. Evaluation of land subsidence by considering underground structures penetrated into aquifers in Shanghai[J]. **Hydrogeology Journal**, 2012, 20(8): 1623—1634.
- [8] BUSCH K, SOUKOULIS C M. Transport properties of random media: A new effective medium theory[J]. **Physical Review Letters**, 1995, 75: 3442—3445.
- [9] SIMPSON M J, CLEMENT T P, GALLOP T A. Laboratory and numerical investigation of flow and transport near a seepage-force boundary[J]. **Ground Water**, 2003, 41(5): 690—700.
- [10] 郑品, 许焯霜, 沈水龙. 地下结构对含水层挡水作用的室内试验研究[J]. **地下空间与工程学报**, 2011, 7(2): 253—258.
- ZHENG Pin, XU Ye-shuang, SHEN Shui-long. Laboratory investigation on cutoff effect of underground structure to groundwater seepage of aquifer[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(2): 253—258.
- [11] DESBARATS A J. Spatial averaging of hydraulic conductivity in three-dimensional heterogeneous porous media[J]. **Mathematical Geology**, 1992, 24(3): 249—267.
- [12] ASTM D7263. Standard test methods for laboratory determination of density (unit weight) of soil specimens[M]. US: American Society of Testing and Materials, 2009.
- [13] BEAR J. **Hydraulics of groundwater**[M]. New York: Mc.Graw-Hill, 1979.

---

上接第 1599 页

- [14] 孙星亮, 汪稔, 胡明鉴. 冻土三轴剪切过程中细观损伤演化 CT 动态试验[J]. **岩土力学**, 2005, 26(8): 1298—1303.
- SUN Xing-liang, WANG Ren, HU Ming-jian. A CT-timely experimental study on meso-scope structural damage development of frozen soil under triaxial shearing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1298—1303.
- [15] 王宝军. 基于标准椭圆法 SEM 图像颗粒定向研究原理与方法[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(7): 1082—1087.
- WANG Bao-jun. Theories and methods for soil grain orientation distribution in SEM by standard deviational ellipse[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1082—1087.
- [16] 施斌, 姜洪涛. 粘性土的微观结构分析技术研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2001, 20(6): 864—870.
- SHI Bin, JIANG Hong-tao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(6): 864—870.
- [17] 施斌. 粘性土微观结构简易定量分析法[J]. **水文地质工程地质**, 1997, 24(1): 7—10.
- SHI Bin. A simplified quantitative analysis method for soil microstructure[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1997, 24(1): 7—10.
- [18] 王清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. **成都理工学院学报**, 2001, 28(2): 148—153.
- WANG Qing, WANG Feng-yan, XIAO Shu-fang. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to engineering[J]. **Journal of Chengdu University of Technology**, 2001, 28(2): 148—153.
- [19] 高国瑞. **近代土质学**[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990.