

冰川非均匀变形研究

——人工冰洞研究之三

黄茂桓 王仲祥

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

1983年在天山乌鲁木齐河源1号冰川人工冰洞内曾对冰内过程进行多项目的系统观测研究^[1、2]。其中,应力和应变的研究是在假定变形发生在一个主平面上和假定观测部分冰的变形为均匀变形这样两个前提下进行的^[2]。为了验证均匀变形假定的可靠性,1984年在原有观测断面上,专门作了非均匀变形的观测研究。结果表明,均匀变形假定的误差甚小,一般小于10%,可以广泛采用。这对于冰川动力学研究,无疑有重要贡献。

现场观测

图1为1984年冰洞纵剖面,剖面上设A、D两观测断面,其位置大致与上一年度的相同。由于冰面和洞口消融,其至冰面和至洞口的距离均小于上一年度的距离。A断面设A_左和A_右两个观测圆,分别位于冰洞左、右侧。D断面设D₁、D₂、D₃、D₄和D₅

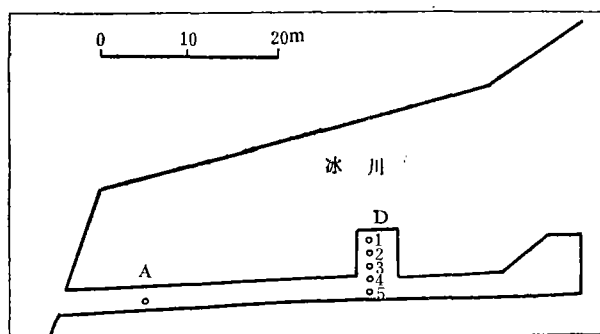


图1 冰洞纵剖面及观测圆位置

Fig.1 Longitudinal section of the artificial tunnel, the location of observed circles is also shown

个观测圆,均设在冰洞右侧,即靠近冰川主流线一侧,也即与去年进行观测的同一侧。各观测圆的圆心至冰洞口、冰面及洞底的距离列于表1。

每一观测圆由17个观测桩组成,一个桩为圆心,有8个桩排列在直径约为400mm的圆周上,另8个桩排列在直径约为600mm(A断面)或700mm(D断面)的圆周上。同一圆周上各桩的方位差约45°。

本文于1985年7月20日收到,1986年3月10日改回。

表 1 各观测圆的位置

Table 1 Location of observed circles

断 面	A		D				
	A _右	A _左	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
至洞口距离 (m)	9.9	9.9	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7
至冰面距离 (m)	13.95	13.95	13.35	14.85	16.35	17.85	19.35
至洞底距离 (m)	0.55	0.53	6.95	5.45	3.95	2.45	0.95

元月18日观测圆布置完毕并量测各桩的初始位置。其后,于7月17日和11月13日两次量测变形后的各观测桩的位置。观测用极坐标法,量测圆周上各桩相对圆心的方位角和距离。用钢尺量距离;用大型量角规测角(相对于水平线),分别准确到1mm和0.5°。观测结果刊于《天山冰川站年报》第3号。

计 算 方 法

上一年度采用过的变形发生在一个主平面上的假定仍采用,即假定进行变形观测的冰洞壁为该处冰川变形的一个主平面。将观测所得数据作平面变形处理。在此前提下,采用了三组计算模式,如图2所示。

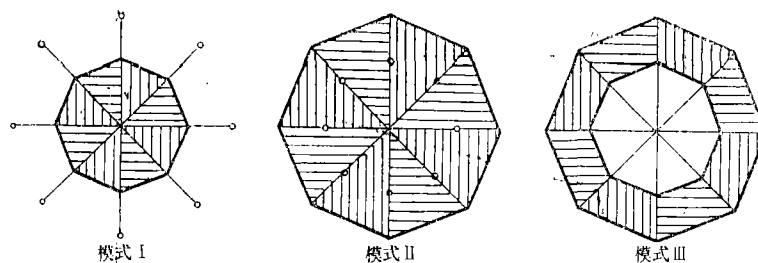


图 2 三组计算模式

Fig.2 The sketch showing three kinds of calculated model

模式 I: 用内圆圆周上相邻两点和圆心构成一个三角形,总共构成8个三角形,假定每个三角形范围内发生的变形为均匀变形,按平面均匀有限变形进行计算。

模式 II: 用外圆圆周上相邻两点和圆心构成一个三角形,总共构成另8个三角形,假定每个三角形范围内发生的变形为均匀变形,按平面均匀有限变形进行计算。

模式 III: 用相邻方位线上内圆、外圆上四个点构成一梯形,总共构成8个梯形,假定每个梯形范围内发生的变形为均匀变形,按平面均匀有限变形进行计算。

对于平面非均匀有限变形,通常都是将平面图形分成若干微元体。对于一微元体,

近似地认为具有均匀变形特性来求解^[3]。求解平面均匀有限变形, 采用拉格朗日法。微元体内任一点起始位置 $P(x, y)$, 变形后运动至 $P'(x', y')$, 则有

$$\begin{aligned} x' &= ax + by, \\ y' &= cx + dy. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 变形系数 a 、 b 、 c 和 d 为常数。

对于模式 I、II 那样的三角形, 有一个顶点为坐标原点, 只要另两个顶点变形前后的坐标为已知, 代入式(1), 便可求得 a 、 b 、 c 和 d 四个变形系数, 从而决定三角形的平面变形特征, 用变形椭圆表示^[2, 3]

对于模式 III 那样的梯形, 可以任取三个顶点构成一个三角形, 共可得四个三角形。对每个三角形, 用同上的办法处理得到一组变形系数, 共得四组, 将四组变形系数加以平均, 以其平均值表示梯形的平面变形特征。

将元月18日量得各点的坐标(相对原点)为初始位置, 将7月17日和11月13日量得各点的坐标为变形后位置, 这样分别求得两组各微元体的变形系数, 分别除以相应的时间间隔, 得出两组以年为单位的变形率系数, 然后加以平均, 用来表示以年为单位的变形率特征。

为形象起见, 图3给出A右观测圆一例。它给出16个变形椭圆, 分别代表16个微元

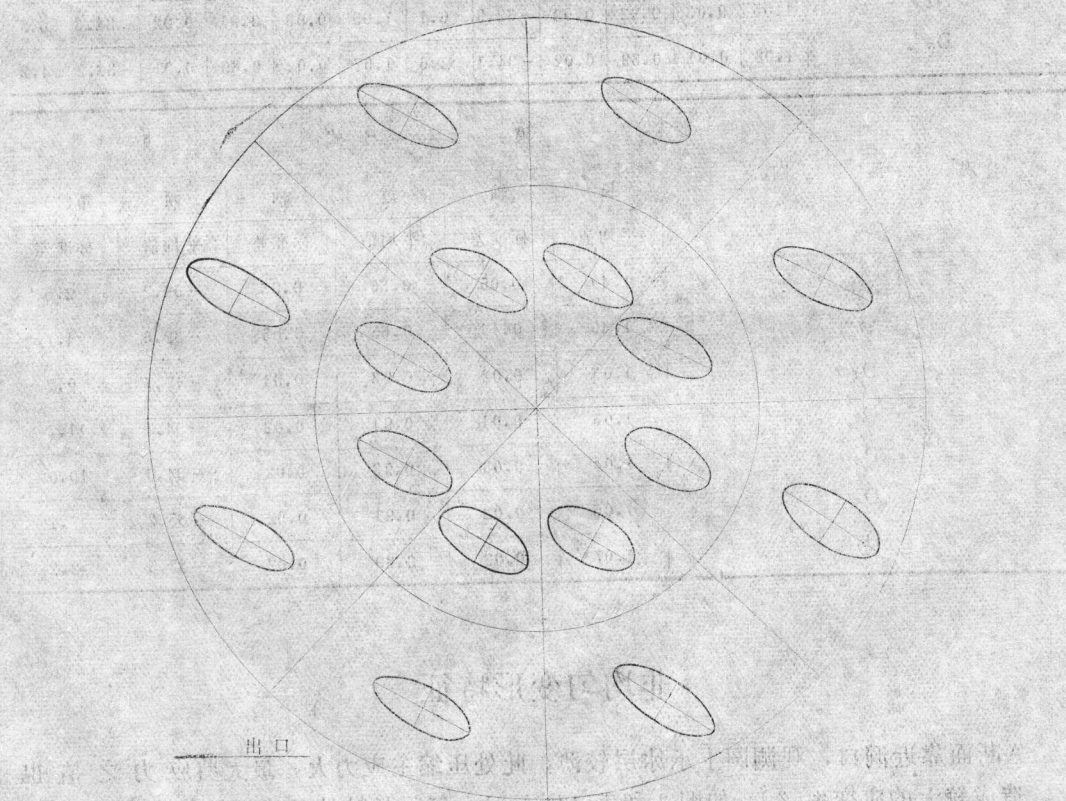


图3 以A右观测圆为例的非均匀变形特征

Fig. 2 A figure showing inhomogeneous deformation measured at Circle A (right)

体的变形特征。内圈为模式 I，外圈为模式 II 的计算结果，均为相当于历时一年的变形椭圆。

为查明不均匀变形特性，就每一计算模式所得 8 组结果加以统计，求变形椭圆长轴短轴及其倾角的平均值和标准差，所得结果列于表 2。

表 2 不均匀变形统计

Table 2 Statistical table of inhomogeneous deformation

观 测 圆	模 式 I						模 式 II					
	长 轴		短 轴		倾 角(°)		长 轴		短 轴		倾 角(°)	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
A _右	1.38	0.06	0.63	0.04	-59.3	2.1	1.46	0.04	0.60	0.05	-59.2	2.4
A _左	1.36	0.08	0.68	0.05	-37.7	2.2	1.39	0.10	0.66	0.06	-33.6	0.9
D ₁	1.02	0.02	0.93	0.01	-46.4	9.4	1.03	0.02	0.93	0.01	-47.0	10.6
D ₂	1.04	0.02	0.94	0.02	-36.8	9.0	1.03	0.01	0.94	0.02	-34.6	8.3
D ₃	1.05	0.01	0.92	0.02	-29.6	3.2	1.04	0.03	0.93	0.02	-32.1	9.3
D ₄	1.05	0.03	0.92	0.02	-32.9	6.1	1.05	0.03	0.91	0.02	-34.3	6.5
D ₅	1.08	0.01	0.89	0.02	-34.1	2.6	1.07	0.02	0.89	0.01	-33.2	4.2

观 测 圆	模 式 II					
	长 轴		短 轴		倾 角(°)	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
A _右	1.49	0.05	0.60	0.03	-59.2	2.5
A _左	1.40	0.13	0.65	0.05	-32.6	4.7
D ₁	1.03	0.02	0.93	0.01	-47.7	9.7
D ₂	1.03	0.01	0.94	0.02	-34.1	11.7
D ₃	1.04	0.03	0.93	0.02	-34.0	10.0
D ₄	1.06	0.02	0.91	0.02	-35.2	7.1
D ₅	1.07	0.02	0.89	0.02	-32.5	2.2

非均匀变形特征

A断面靠近洞口，观测圆上承冰层较薄，此处压缩主应力大，最大剪应力之值也大，造成较大的应变率^[2]。如图 3 和表 2 所示，一年间长轴伸长或短轴缩短近 40%，这个断面上变形的非均匀程度也大。如用表 2 中所列之标准差来衡量，长轴的标准差在 0.04 到 0.13 之间，短轴的标准差在 0.03 到 0.06 之间，主轴角度的标准差在 0.9° 到 47° 之

间。同一断面的 $A_{左}$ 和 $A_{右}$ 的长、短轴及其倾角平均值的差也较大。

D 断面靠近洞口稍远，此处主应力和最大剪应力之值比 A 断面处小，造成较小的应变率^[2]。如表 2 所示，一年间长轴伸长不大于 8%，短轴缩短不超过 11%。断面上变形的非均匀程度也小。同样用标准差来衡量，长轴的标准差在 0.01 到 0.03 之间，短轴的标准差在 0.01 到 0.02 之间，只是主轴角度变化稍大，从 2.2° 到 11.7°。同一断面上各观测圆之间长、短轴平均值也比较接近，但主轴倾角平均值出入稍大。

结 论

除冰川边缘部分可能有效剪应力较大造成应变率较高的区域外，冰川深处应变率较低的区域，变形的非均匀性可以忽略，采用均匀变形假设来进行变形计算其误差在允许范围之内。

材料变形的均匀与非均匀性是材料本身固有的性质，对线性变形材料来说不应与材料的应力状态发生关系。但正如 $\dot{\epsilon} = A\tau^n$ 所反映的冰的流变规律（式中： $\dot{\epsilon}$ 为有效应变率， τ 为有效剪应力， A 和 n 为常数，其中 n 大于 1，常取之为 3），冰不是线性变形材料，故有效剪应力大时，其变形的不均匀性不容忽视。

致谢：尤根祥、宋根海同志参加部分野外观测，谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 王仲祥等，1985，天山乌鲁木齐河源 1 号冰川冰体流变的现场观测与试验研究，冰川冻土，7 卷 2 期，123—132 页。
- [2] 黄茂桓、王仲祥等，1985，天山乌鲁木齐河源 1 号冰川底部应变和应力的观测研究，冰川冻土，7 卷 4 期，305—315 页。
- [3] 韩玉英，有限变形几何学及其在地质学中的应用，36—137 页，地质出版社，1984。

Study of the Inhomogeneous Deformation in a Glacier —— Investigation on the Artificial Tunnel, Part III

Huang Maohuan and Wang Zhongxiang

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

In 1984 the circle for deformation observations was changed to be a dual circle with the same centre. Each circle can be divided into 16 parts. Assuming that the deformation of each part was a plane homogeneous finite deformation, we can obtain the deformation ellipse of each part. The features of the inhomogeneous deformation were examined by means of comparison and statistics of the deformation ellipse parameters of all parts. The result shows that in the inner of a glacier, where the strain rate is small, the inhomogeneous component of deformation is not too significant, except its margins where the shear strain is great. Therefore, the ice deformation can be calculated according to the assumption of the homogeneous deformation, with an error allowable.