

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

南岭正弦状山字型构造应力场的初步分析及模拟实验

沈淑敏

(中国地质科学院地质力学所)

李四光教授对构造现象本质的认识,主要是根据区域构造现象之间的相互关系,去了解当地所经过的地壳运动的程式。这一重要概念的形成,是从认识一些个别的、特殊的构造现象开始,而逐步得到深入和发展。二十年代初,欧亚山字型构造的提出,是认识山字型构造的开端,也是认识构造体系的萌芽。随后,在我国的江苏、广西等地,先后肯定了一些山字型构造的存在,并对山字型构造体系的应力分布规律及反映的区域运动方式做了理论上的探讨。

解放后,区域地质调查工作的广泛、深入开展,为各项专业和专题的综合研究打下了基础。由各种不同比例尺构造地质图看出,山字型构造是一普遍存在的构造型式。同时,某些山字型构造还具有定位性,定向性及连续性的展布规律。它们所反映的应力活动方式,对进一步认识大陆区域性构造运动特点,具有十分重要的意义。

中国大陆上,山字型构造作有规律展布的一个重要现象,就是在同一纬度上,弧顶向南突出的山字型构造连续出现,呈正弦曲线排列。南岭一排山字型构造就是较典型的例子。

在北纬 $23^{\circ}-25^{\circ}30'$ 范围内,即南岭纬向构造带上,自西向东有滇南、广西、粤北及粤东等一列山字型构造(图 1)。

滇南山字型构造前弧,主要由三条向南突出的,曲度很大的弧形构造带组成。内弧是下关-通海-宣威弧形构造带。弧顶位于通海西南约 10 公里处。通海县城以南至曲溪一带,西起娥山,东至宜良,有一系列弧形山脉,伴随这些弧形山脉,有数条弧形冲断带,重重叠叠组成一个向南突出的弧形褶皱带。其东翼,在宜良附近受到强大的川滇经向构造带的干扰。至宜良以东,走向东北-西南的褶皱及挤压带继续向东北延伸,经泸西、师宗至宣威一

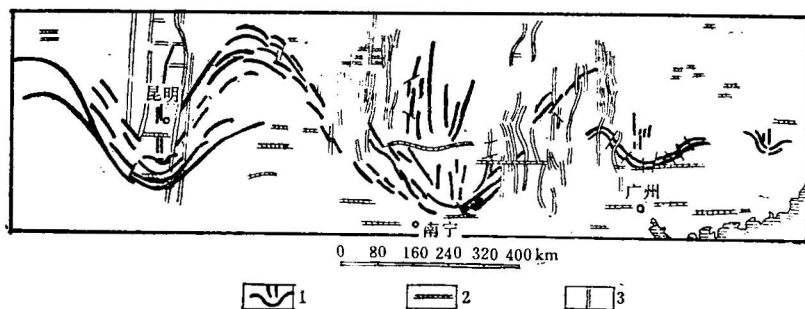


图 1 南岭正弦状山字型构造纲要图

1. 山字型构造; 2. 纬向构造带; 3. 经向构造带。

带,与贵州的“威宁弧”相接。褶皱的西翼,在娥山、易门及广通等地,被滇西经向构造带所截。从娥山、双柏而达楚雄等地,在中生界红层中又有一系列北西向的断断续续的褶皱群和压性断裂,成带伸展,并且逐渐与楚雄以北的北西—北北西向褶皱群相分离。至下关、大理一带,构成向北突出的弧形,即西翼反射弧的外带。

前弧的中带是双柏—石屏—富源构造带。通海以南,越过新生代红层展布地区,在建水、石屏、开远等地,又有一列弧形挤压带出现。都是向南冲复的冲断带,发生在石炭、二叠及三叠系中,有时直接影响着老第三纪红色岩系。弧顶与内弧弧顶重迭而略偏西。这一弧形褶皱的西翼,从石屏向西达到新平、双柏一带。它的东翼,越过南北走向的小江断裂带,直到富源以东,为一组压性、压扭性构造形迹,至盘县以南构成一向北突出的弧形构造带。

前弧最南边一条为礼社江—南盘江弧形构造带。弧顶在红河县以东约 20 公里处。由一些弧形褶皱、断裂及挤压破碎带组成。其东翼经开远大致沿南盘江展布。伸至贵州兴义附近形成一向北突出的弧形褶皱,构成东翼反射弧的内弧。西翼沿元江及礼社江延伸。至南涧附近构成一向北突出的弧形构造带。南涧以南,无量山北端,二叠系至侏罗系中的褶皱、断裂、片理带及布格重力异常带皆成弧形展布,构成滇南山字型西翼反射弧的内弧。川滇经向构造带的两个强带中间,构造形迹相对微弱的地方,北起金沙江,南至玉溪附近,出现的一系列南北向褶皱、断裂等压性构造形迹,构成滇南山字型构造的脊柱。

广西山字型,其分布范围很宽阔,横跨广西全省。前面弧的弧顶位于宾阳县城之南,包括一系列紧密的褶皱和冲断层,自北而南上冲。在前弧弧顶南侧,引张最剧烈的部位,有昆仑关花岗岩出露。

前面弧的东翼以镇龙山、大瑶山大背斜为主体,伴有走向断层。这一褶皱至桂平附近,遇到了强大的南北向构造带的干扰,大瑶山背斜突然呈南北向。同时,荔蒲、平乐一带展布有东西向、北北东向构造带,它们将广西山字型的东翼褶皱切割得十分零碎。该褶皱向东北伸至湘桂边境的灌阳、全县及东安地区。至零陵与道县之间的阳明山地区形成反射弧。

广西山字型的西翼以大明山复背斜为主体。还伴有一系列北西向的压性、压扭性的走向断裂。大明山复背斜在隆山一带倾没,但这一地区的构造主轴仍为西北走向。过都安后,以都阳山脉为主体的西北向褶皱带及与之相伴的冲断层,延至河池与东兰之间。至天峨、法郎一带,轴向转为北北西—南北向,显然受都匀、罗甸一带强大的川黔经向构造带影响所致。法郎附近一部分北西向褶皱局部转为北西西至东西向,但西翼的主要成分还是一直向北西伸展,直至“威宁弧”与滇南山字型相连接。

广西山字型的脊柱,伸展在广西北部的宽阔地带,主干构造以前震旦纪变质岩系为主体,构成一些南北走向的大背斜,如从江之摩天岭大背斜、元宝山大背斜等,伴随有走向南北的冲断带。

广西山字型之东,在广东境内的乐昌、韶关及乳源一线以西,由前泥盆纪或中泥盆纪岩层构成一条南北向延伸的山脊,称做嵛山山脉。这是一个复式背斜构造。往南越过大东山花岗岩体与黄思脑穹窿相连,延长近百公里,同时伴有巨大走向断层。其整体形态,是北宽南窄,构成粤北山字型构造的脊柱。弧顶位于英德西南之连江口。东翼沿潯江经翁源、新丰、连平至粤赣交界区。弧形东翼发育良好,形迹清晰,主要构造型态是反复的褶皱

及冲断带。组成弧形东翼的主干构造为渝源向斜及鸡公咀背斜等,两者呈明显的斜列型式。鸡公咀背斜进入九连山区逐渐由北东转为东西向,与略向北突出的九连山复式背斜、龙虔复式向斜组成东翼反射弧。粤北山字型的西翼,沿连江抵连县之北,主要的西北向褶皱有樟背岭向斜、五点梅花背斜、七拱、白石潭向斜,它们相互交错呈多字型展列。该褶皱带延伸至阳山附近,被新华夏系构造所截,至连县东北又出现西北向的褶皱及冲断层,形成西翼反射弧,弧顶在东陂附近,其纬度位置与东翼反射弧大体相当。

粤东山字型,位于广东梅县地区。前弧位于梅县长沙圩一带,弧顶一部分陷落为盆地。东翼延至西村松口一带,呈北东向。西翼自南口圩以西延至公塘圩、龙虎圩,呈北西向。它的北面以石炭、二叠纪煤系为轴组成的南北向的焦岭向斜,为该山字型构造的脊柱。

从这一列山字型构造的形成时期及型态特征,我们可以看出以下几点极重要的事实:

1. 上述的山字型构造从三叠纪形成后直到现代,部分地区还在活动。
2. 这一列似正弦曲线状的山字型构造,出现在同一纬度上,弧顶一律向南突出。

3. 连续排列的山字型构造,个体和曲度的大小沿纬度方向具有规律性的变化。如最西边的滇南山字型,东西宽 400 公里,南北长 360 公里;中间的粤北山字型东西宽 300 公里,南北长 140 公里;东部的粤东山字型东西宽仅 80 公里,南北长不到 40 公里。假定山字型两个反射弧之间的距离为 a ,脊柱北端到前弧顶点的距离为 b ,以 $\frac{a}{b}$ 来表示山字型

前弧的曲度和脊柱沿长轴伸展的范围,由西向东其比值依次为 1.2, 1.9, 2.1, 2, 说明这一列山字型构造由东向西,不但个体越来越大,前弧曲度和脊柱沿长轴伸展的范围也越来越大。

阴山带和秦岭带与南岭带情况也很类似。阴山带的东段,京东地区的平谷、马兰峪、迁西山字型构造以及渤海海域出现的小型山字型构造,它们也排列成正弦曲线状。在亚洲地区,北纬 35° — 40° 之间,也有一列东西展布的山字型和弧形构造。自西往东有:安纳托里亚山字型、和田弧、祁吕、贺兰山字型和朝辽山字型构造。

这些说明纬向构造带或同一纬度地区,常有正弦状山字型构造体系出现。那么在经向构造带上或同一经度地区,有没有正弦状山字型构造展布呢?看来是有的。中国南部数条经向构造带都有这类现象,如湘桂经向构造带上的祁阳山字型与桂林山字型所组成的正弦状构造。不过它们没有纬向构造带上的发育良好,往往只有向西突出的弧形构造,脊柱不明显。经向构造带与纬向构造带上,出现纵横正弦状山字型构造决非偶然。就其显示的地壳运动方式和方向来说,这一类山字型构造体系应看做是纬向构造带与经向构造带的变种,它们可进一步反映出所在地区的边界条件和体力分布方式。南岭带上一列正弦状山字型构造横跨中国南部地区,且构造形迹显著,规律性强,因此,从它们的形变组合规律所反映的应力活动方式去追索这一地区区域构造运动的方式和方向,具有重要意义。

李四光教授从各种巨型构造体系在地壳上分布和排列的特点,认识到地壳上各种构造型式运动方式的统一性和大规模地壳运动都具有一定的方向性。他指出:由于南北向和东西向发展均衡和不均衡的挤压(或引张)运动而形成的各种构造体系,在地壳的结构形式中占有极为重要的地位,即由现存的地壳结构构造型式所反映的各个时期的地壳运动方向,不是经向就是纬向水平方向的滑动。如果是均匀的滑动,就形成纬向构造带和经

向构造带, 不均匀的滑动就出现各种扭动构造型式。南岭一列正弦状山字型构造是反映了它所在地块内的质点, 受离心惯性力的水平分量这一体力作用, 向赤道方向做不平衡的水平错动。这种不平衡错动的原因, 是由于南岭带上地质体的差异或结构构造上的差异, 形成多个相对稳定的阻体, 作为砥柱阻止地块向赤道均匀滑动的结果。同时就南岭一列正弦状山字型构造沿纬度方向的变化规律来看, 还反映了受东西方向体力的作用, 即沿纬度圈切线方向, 与地球自转加速度方向相反的自东向西的惯性力作用, 其大小与纬度圈半径成正比, 所以愈近低纬度地带愈为显著。但是, 在地块向西滑动时, 由于受到印度地块东缘的阻挡, 使得这一体力的分布, 由东向西逐渐增大, 因此西部东西向的挤压作用比东部强烈; 山字型前弧受挤压的程度和曲度也比东部大。顺便指出, 中国南部地区, 在一定程度上出现的经向构造带, 也具有由东向西挤压作用逐渐增强的趋势。接近印度地块东缘的滇西和川滇经向构造带, 与其他几带相比, 不但规模大, 受挤压的程度也最显著。这一事实, 也支持了上面对体力作用方式的分析。

为了求得对这一问题认识的不断深化, 我们将野外观察到的实际地质构造现象和初步分析, 概括为力学问题, 采用地壳不均匀水平错动的山字型构造理论模型¹⁾, 并根据南岭区域构造特征加以引伸, 建立了正弦状山字型构造的理论模型, 对南岭正弦状山字型构造形成的力学过程进行了数学模拟。

地壳不均匀水平错动的山字型构造理论模型, 是从无穷大平板内座标原点受 y 方向集中力 P 作用时平板内的应力分布公式:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{P \sin \theta}{4\pi r} [1 - \nu - 2(1 + \nu) \cos^2 \theta] \\ \sigma_y &= \frac{P \sin \theta}{4\pi r} [-(3 + \nu) + 2(1 + \nu) \cos^2 \theta] \\ \tau_{xy} &= \frac{-P \cos \theta}{4\pi r} [1 - \nu + 2(1 + \nu) \sin^2 \theta]\end{aligned}$$

ν 为泊松比

推导出无穷大平板中一矩形或圆形区域内有均匀体力作用时的应力表达式。

根据实际的地质资料, 南岭正弦状山字型构造所在地块为一矩形区域 $OABC$, 其边界条件与体力作用方式如图 2 所示。

地块的边界: $OA = 1800$ 公里

$AB = 632$ 公里

地块边界内作用着 y 方向和 x 方向的均布体力, 使地块产生滑动。前面已经提到, 向南和向西的体力主要来自地球自转速率变化时产生的离心惯性力的水平分量 F_b 及沿纬度圈切线方向的惯性力 F_c 。其中:

$$F_b = \frac{\rho \omega^2 R}{2}$$

$$F_c = \rho \bar{\omega} \times \vec{v}$$

R ——地球半径

1) 据石耀林, 地质力学通讯(一)。

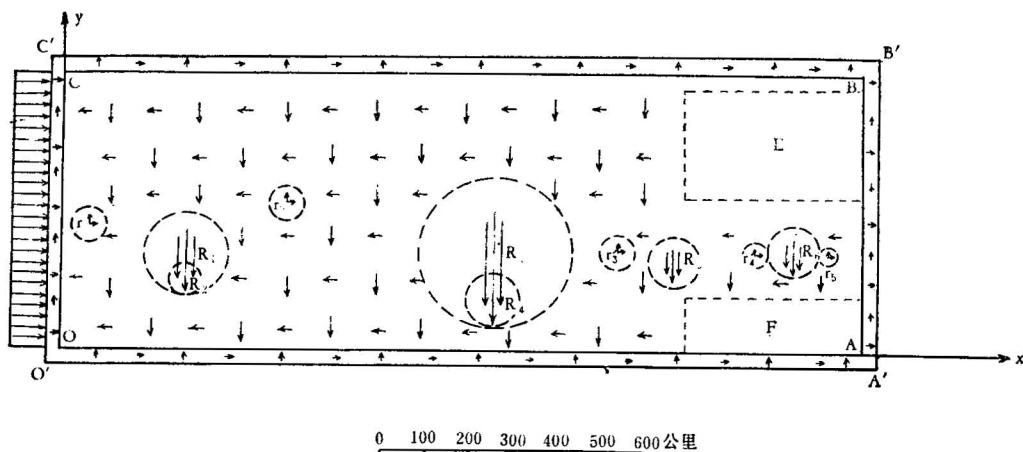


图2 南岭正弦状山字型构造形成的边界条件及体力分布方式示意图

 ρ ——地壳岩石密度 ω ——地球旋转角速度 $\vec{v}$ ——地块移动速度估算的结果: $F_b = 1.677 \times 10^{15}$ 公斤 $F_c = 2293$ 公斤

这一地块与外界是毗连着的, 地块边界外各扩展 40 公里, 形成一矩型 $O'A'B'C'$ 。用由西向东的均布体力模拟南滑地块西侧的刚性抵制。周围毗连地块对南滑地块的抵制, 用由南向北的体力来描述。地块东端两个山字型个体较小, 南北边界过长, 为了不影响脊柱的产生, 划出两个矩型区域, 区内作用着由南向北的均布体力, 其数值与整个矩型地块内由北向南的均布体力相平衡。因此, 这两个方形区域内体力分布的总效果等于零, 但与周围介质保持连续。上述四个矩形区域的力学参数见表 1:

表 1 矩形体力学参数表

参数 矩形体	坐 标 位 置		体 力 大 小 和 方 向	
	$x_0 - x_1$	$y_0 - y_1$	南北	东西
$OABC$	0, 18	0, 6.3	-0.09	-0.06
$O'A'B'C'$	-0.4, 18.4	-0.4, 6.7	0.06	0.036
E	14.0005, 18.0005	3.5005, 6.0005	0.03	
F	14.0005, 18.0005	0.0005, 1.30005	0.03	

南滑地块内分布着 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 五个圆形砥柱, 作用着由南向北及由西向东的均布体力, 以阻止地块向南和向西的均匀滑动。五个砥柱之间, 有 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 六个不同半径的圆形区域, 作为下滑体作用着由北向南的均布体力, 以增加地块向南滑动的不均匀性。砥柱与下滑体的力学参数见表 2、3。不管是圆形区域或矩形区域, x, y 正负方向的体力与力矩应保持平衡。

表 2 砥柱力学参数表

参数 砥柱	坐 标 位 置		砥柱半径	体力大小和方向	
	x	y		南北	东西
r_1	0.56	2.8	0.4	130	0.56
r_2	5	3.4	0.4	366	2
r_3	12.5	2.3	0.4	260	1.7
r_4	15.6	2.3	0.3	200	0.75
r_5	17.1	2.3	0.2	155	0.54

表 3 圆形下滑体力学参数表

参数 圆形下滑体	体力方向	坐 标 位 置		下滑体半径	体力大小
		x	y		
R_1	南北	2.78	2.2	1.0	-30
R_2	南北	2.78	1.6	0.4	-6
R_3	南北	9.7	2.2	1.7	-25
R_4	南北	9.7	1.2	0.6	-20
R_5	南北	13.7	2.1	0.6	-45
R_6	南北	16.4	2.3	0.6	-35

根据地壳不均匀水平错动山字型构造理论模型的应力表达式,并结合南岭区域构造应力场特征,编制了正弦状山字型构造理论模型的运算程序,按该程序的功能填写上述矩形和圆形区域的有关参数,通过电子计算机进行多次试算。其结果表明,按表 1、2、3 所确定的各项力学参数进行计算,上述力学模型的等倾线(图 3)及主应力迹线图(图 4)所表明的正弦状弯曲型态和脊柱的伸展范围,与南岭一列正弦状山字型构造的型态特征是一致的。各点的主应力值(σ_1 、 σ_2),均较好地反映了各个山字型构造应力场以及正弦状山字型区域构造应力场的特征。山字型的前弧、反射弧与脊柱区的压应力较强,向马蹄形盾地区逐渐减弱;在前弧或反射弧顶点的两侧拉应力较强。总体看来,越向西压应力越显著。

根据上述力学模型,我们做了泥板模拟实验,研究南岭一列正弦状山字型的构造应力场及其与变形场的关系。实验是在离心转盘上完成的。用沿圆盘半径方向和与旋转加速度方向相反的离心惯性力模拟 x, y 方向作用的体力。用固定在平板上的橡皮泥模拟砥柱和西侧的刚性地块。实验中选用粘土质粉砂岩粉掺水做成约 1 厘米厚的泥饼,按图 2 给定的边界条件放置在转盘上,上附一张薄纸,目的是容易观察到变形。由实验结果可以看出,泥板模拟实验得到的形变特征,与野外实际的地质构造现象,及不均匀错动理论模型所确定的应力场特征,在总体规律上是吻合的(图版 I、II、III、IV)理论解析和实验的结果,在一定程度上验证了南岭正弦状山字型构造成因的理论推断。

我们所采用的不均匀错动理论模型,是假定地块为理想弹性介质,且不考虑重力对

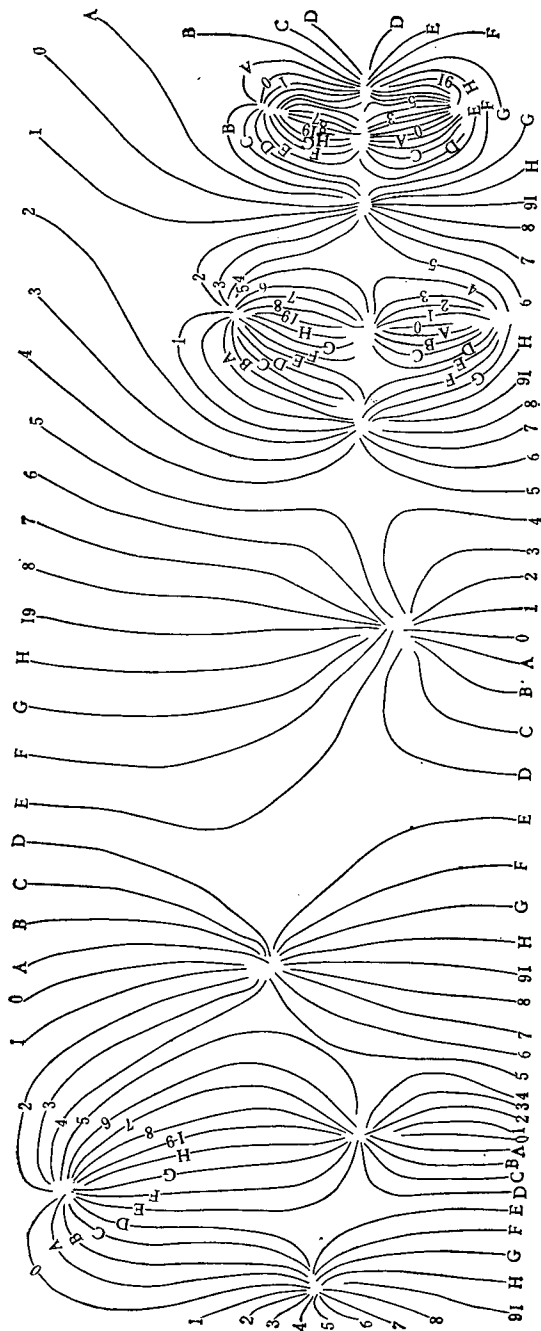


图3 南岭正弦状山字型构造等倾线图

1. $0-9$ 为正 $0^\circ-90^\circ$, 2. A-I 为负 $0^\circ-90^\circ$.

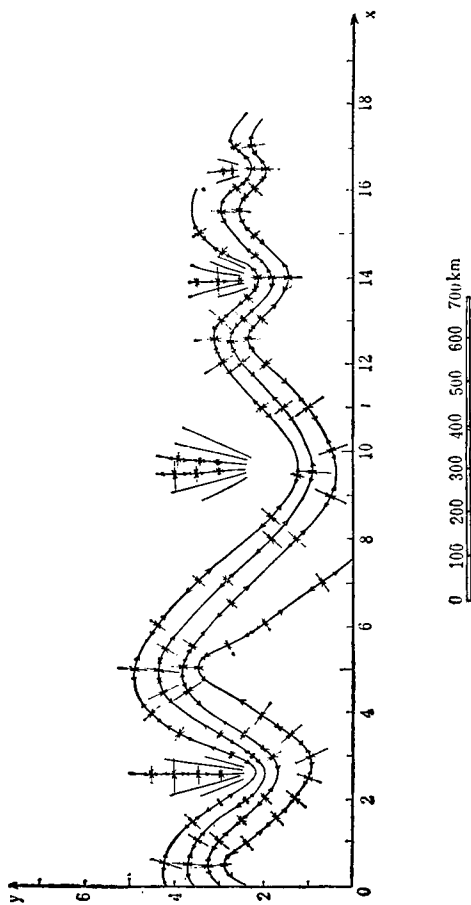


图4 南岭正弦状山字型构造主应力迹线图
(σ_1 为正, σ_2 为负, 箭头长短表示主应力值的大小)

它引起的效应,显然对于问题的解答只能是一种粗略的近似。事实上,地质体很难满足均匀连续的假定,无论从自然界的观察或实验结果,都说明岩石既具有弹性又具有塑性,更重要的是岩石具有蠕变和松弛的特性,说明在考虑岩石变形规律时,地质作用的长期性是不容忽视的。因此,为使我们建立的力学模型更接近地质实际,今后必需从流变介质运动的理论对地质问题做深入的探讨。

另外,在泥板模拟实验中使用泥巴做为实验材料曾受到极大怀疑。如果我们考虑到自然构造体系中岩石展布范围及整个体系成长的漫长地质时间,而现在把它转移到极小的范围上,又用很短的时间来使其完成时,就必须使变形介质有相应的转变。其次,由于泥板实验都是在地球的重力场中进行的,因此按 Фруда 相似标准,此时加速度就是 g ,而有 $\lambda = \tau^2$,即尺度比等于时间比的平方。如果要求试验材料和实际岩石具有相同的密度,就必需使应力比等于距离比。目前我们还根本无法确定应力比,但是如果使实验材料的刚度小于岩石刚度的百分比,等于尺度比,也可满足相似要求,因此使用柔软流动的物质来做实验材料是恰当的。

实际岩石的粘度是 $10^{14}—10^{21}$ 泊,如果采用尺度比为 $10^{-3}—10^{-6}$,时间比为 $10^{-9}—10^{-11}$,则要求粘度比为 $10^{-2}—10^{-7}$,即要求试验材料的粘度为 $10^2—10^4$ 泊,这很接近泥巴的粘度变化范围。

上述分析都说明完全可以使用泥巴来做为实验材料,不过实验必需要以相似理论的要求来布置,否则只是做为恢复野外观察到的构造现象的一种手段,并不能准确、定量地推测和验证这种构造体系的边界条件和外力作用方式。但是,关于岩石和实验材料之间,以及其他因素之间相似律的研究工作,还刚刚开始,本文的实验中也缺乏这方面的实际材料,这显然是一个很大的欠缺。

文章的原稿经陈庆宣教授审阅。计算过程中得到石耀林同志很多帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 李四光,1973,地质力学概论。科学出版社。
- [2] 李四光,1976,地质力学方法。科学出版社。
- [3] 李四光,1974,区域地质构造分析。科学出版社。
- [4] 吴磊伯、沈淑敏,1962,粤北区域构造分析。地质力学论丛,2号。
- [5] 亚洲地质图编制组,1978,亚洲主要构造体系特征。地质学报,第三期。
- [6] 中国主要构造体系图编制组,1979,《中国主要构造体系》,地质出版社。

A PRELIMINARY ANALYSIS AND MODEL EXPERIMENTS OF THE STRESS FIELD OF THE SINUOUS TYPE OF EPSILON STRUCTURES IN THE NANLING REGION

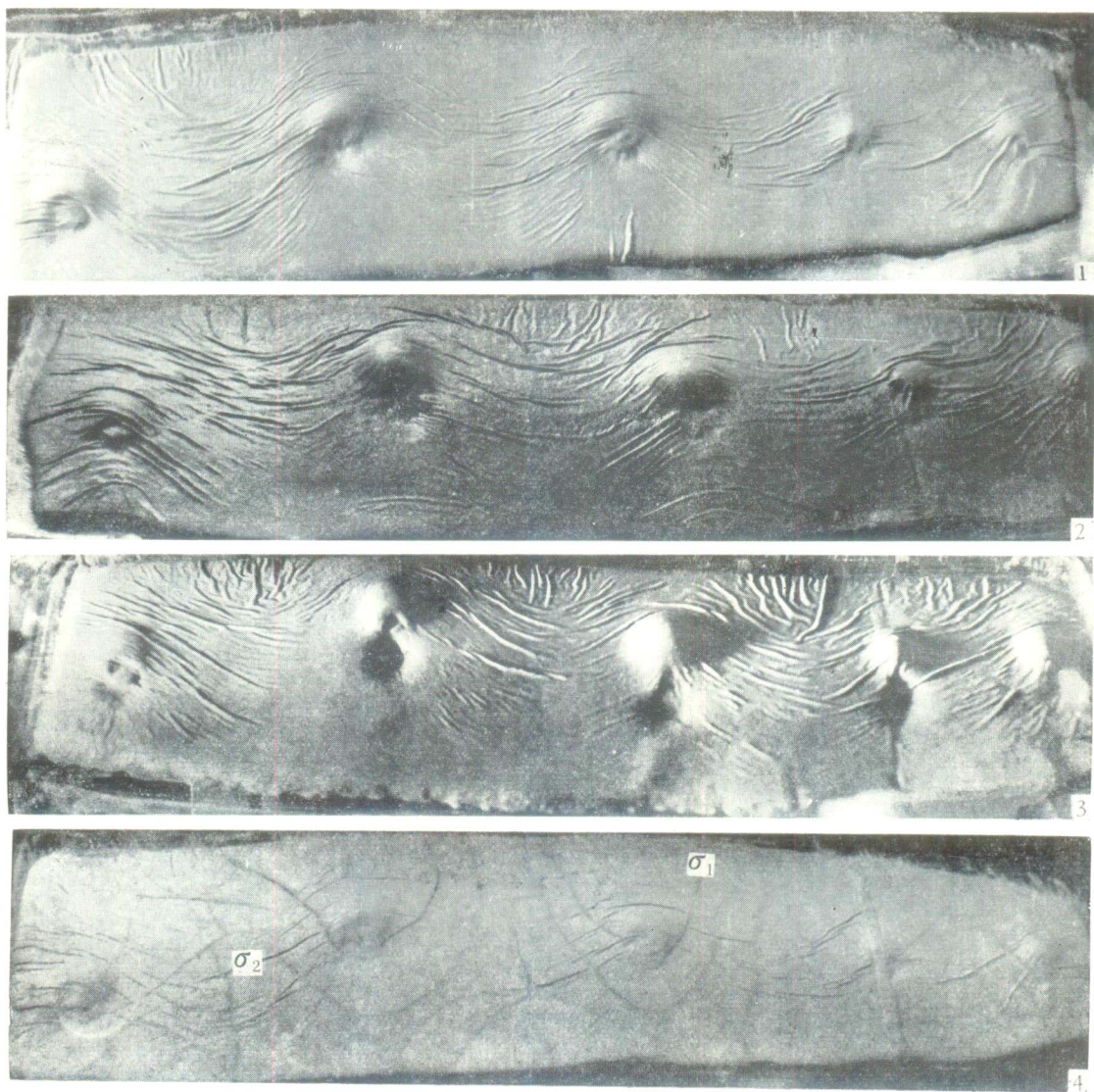
Shen Shumin

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences)

Abstract

On the Chinese continent, an important feature showing regular distribution of the ϵ -type structures is the successive occurrence, on one and the same latitude (or longitude), of the ϵ -type structures with their front projecting to the south (or west) in a sinuous pattern of alignment. Judging from the mode and direction of the crust movement they manifest, such ϵ -type structures should be regarded as a variety of the latitudinal or longitudinal structural belt, the morphological property of their distribution further reflecting the boundary conditions and the manner of action of the body force in the areas of their occurrence.

A series of ϵ -type structures in the Nanling Range region is a typical example of this group of structures. In the present paper, the distribution regularity of the sinuous ϵ -type structures in this region and the mechanical process of their formation are preliminarily analysed and summarized in terms of mechanics. Mathematic deduction and model experiments on mud plates have been performed. The deformational features obtained from the model experiments on mud plates have shown a general coincidence with the field geological observations and the characteristics of the stress field determined from the above mechanical models. Thus, the theoretic interpretation and the results of the experiments have, to some extent, proved the theoretically inferred origin of the sinuous ϵ -type structures in the Nanling region.



在旋转盘上,按图 2 给定的边界条件及体力作用方式进行泥板模拟实验,其挤压带表现为一列正弦状山字型构造 (I)。变形继续进行,脊柱的构造形迹愈来愈显著 (II),而前弧顶部部位,由于张应力加大,弧形挤压带受到了部分破坏 (III)。与挤压带 (σ_2) 相伴随的还有一组张裂面产生 (σ_1),二者互相垂直,它们可与 σ_1 、 σ_2 两组主应力迹线相比拟 (IV)。