

宁波地区燕山晚期以来地应力场特征及其演化规律探讨

A STUDY ON THE EVOLUTION CHARACTERS OF EARTH STRESS FIELDS IN NING BO AREA SINCE THE LATE YANSHANIAN

吴树仁

孙 叶 叶定衡

(中国地质大学·武汉)

(中国地质科学院562队)

内容提要 本文在构造变形分析的基础上,利用共轭节理、断层擦痕和显微构造分析定量反演宁波地区燕山晚期构造应力场的应力方位,同时利用岩石破坏准则,方解石 σ 双晶和变形石英的位错密度定量估算其差异应力。进而结合现今地应力测量结果分析,采用有限元模拟法,探讨宁波地区燕山晚期以来区域应力场的分布及其演化关系,从而为宁波地区地壳稳定性和区域稳定性研究提供重要依据。

宁波市是我国东部沿海对外开放的重要港口城市之一,随着经济建设的发展,需要地质工作者提供地壳稳定性和工程场地稳定性的评价资料。而地壳稳定性评价的重要依据是燕山晚期以来(包括现今地应力场)的区域应力场研究。本文就是围绕这方面所进行的一系列研究工作的一部分。

一、地 质 分 析

宁波地区位于新华夏系巨型构造体系第二隆起带的中南部,北邻秦岭东西向复杂构造带的东端。其出露地层主要是上侏罗统陆相火山岩系和下白垩统的火山-沉积岩系。另外局部出露有上三叠一下侏罗统的变质岩系(图1)。其构造格架主要为:印支晚期形成的分布在宁波盆地北部的东西向构造带;燕山早期形成的北东向构造带;燕山晚期形成的北北东向断裂带。其中燕山晚期构造运动在宁波地区表现为比较典型的脆性变形,它形成以镇海断裂带为主干的北北东向压扭性破碎带。镇海断裂带是区域上镇海-温州大断裂的北延部分,分布于宁波盆地西侧,是控制宁波盆地形成的主要构造。由于镇海断裂带形成时间晚,且规模大,几何线条和变形特征比较突出,对宁波市及新工业区的地壳稳定性影响较大(新工业区位于镇海以东的沿海地带)。因此,作者在1987—1988年参加宁波市区域稳定性研究时,重点研究镇海断裂带的宏观、微观变形特征,进而定量反演宁波地区燕山晚期构造应力场及其演化特征。利用共轭节理测量、断层擦痕反演和显微构造分析的方法定

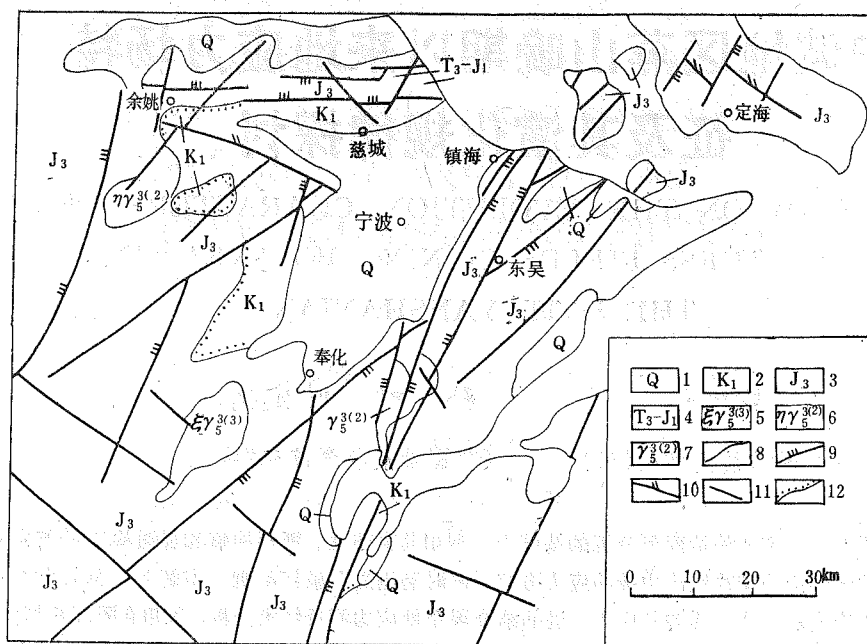


图 1 宁波地区地质构造略图

(据1:100万构造体系图修编)

Fig. Sketch structural map in Ning bo

1—第四系；2—下白垩统；3—上侏罗统；4—上三叠—下侏罗统；5—燕山晚期第三次钾长花岗岩；6—燕山晚期第二次二长花岗岩；7—燕山晚期第二次花岗岩；8—地质界线；9—压性断层；10—张性断层；11—性质不明断层；12—不整合线

量确定宁波地区燕山晚期应力场的主应力方位；同时利用岩石破坏准则、变形矿物的位错密度和方解石 e 双晶估算其差异应力。其中断层擦痕反演方法是根据Etchécopar(1981)的电算辅助技术进行的；岩石破坏准则是根据王维襄(1977)用抛物线厘合莫尔包络线所建立的方程进行演算的；而变形矿物的位错密度则是用透射电镜、扫描电镜和偏光显微镜(腐蚀法)进行观测的。这些方法的演算结果分别列入表1、表2、表3和表4中；而图2和图3则是根据表中的资料所进行的图解。结合宁波地区的变形历史分析，可将其燕山晚期构造应力场，按所发生时间的相对先后关系划分为：燕山晚期第一次、第二次构造应力场。

(1) 宁波地区燕山晚期第一次构造应力场的最大挤压应力 σ_3 近水平，其方位是 $\text{NW}280^\circ\text{—}300^\circ$ 左右，其差异应力是100Mpa—180Mpa(表1、表2和图2)。它形成北东向镇海断裂带，控制宁波盆地的形成和燕山晚期岩体的侵入活动。

(2) 宁波地区燕山晚期第二次构造应力场的最大挤压应力 σ_3 近水平，其方向是 $\text{NW}340^\circ\text{—}350^\circ$ ；中间应力轴 σ_2 近直立；其差异应力值为50—65Mpa(表3、表4和图3)。它使镇海断裂带发生逆时针的近水平扭动。

表 1 宁波地区燕山晚期第一次应力场应力方位

编号	地点	方法	主应力方位		
			σ_1	σ_2	σ_3
1	慈城浮上桥	共轭节理分析	189 $\angle$ 15	46 $\angle$ 66	284 $\angle$ 12
2	慈城车灵桥	共轭节理分析	228 $\angle$ 12	42 $\angle$ 77	138 $\angle$ 1
3	慈城三星地	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
4	余姚	断层擦痕反演	36 $\angle$ 27	200 $\angle$ 62	303 $\angle$ 7
5	藤岭水库	断层擦痕反演	160 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
		Ns _a 显微构造分析	—	—	115 $\angle$ 0
6	鄞江镇	共轭节理分析	35 $\angle$ 11	265 $\angle$ 76	126 $\angle$ 10
7	奉化袁家山尖	共轭节理分析	0 $\angle$ 10	195 $\angle$ 80	97 $\angle$ 2
8	宁海桥头胡	共轭节理分析	230 $\angle$ 6	350 $\angle$ 78	139 $\angle$ 10
9	定海岛西端	共轭节理分析	33 $\angle$ 8	102 $\angle$ 78	298 $\angle$ 26
10	定海洞岙水库	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
11	定海庙头山	断层擦痕反演	36 $\angle$ 27	200 $\angle$ 62	303 $\angle$ 7
12	定海岛东北	共轭节理分析	44 $\angle$ 6	169 $\angle$ 80	312 $\angle$ 8
13	新路水库	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
14	戚家山	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
15	金鸡山	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
		共轭节理分析	10 $\angle$ 6	139 $\angle$ 80	280 $\angle$ 7
		N ₃₀ 显微构造分析	—	—	110 $\angle$ 0
16	乌岭	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
		共轭节理分析	2 $\angle$ 48	194 $\angle$ 42	99 $\angle$ 6
17	白石庙	共轭节理分析	204 $\angle$ 4	15 $\angle$ 76	113 $\angle$ 1
18	宝幢	共轭节理分析	210 $\angle$ 4	320 $\angle$ 78	119 $\angle$ 11
19	莫枝	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
20	陈湾水库	断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
		共轭节理分析	210 $\angle$ 59	12 $\angle$ 30	107 $\angle$ 7
		N ₁₂₁ 显微构造分析	—	—	280 $\angle$ 0
21	横溪水库	共轭节理分析	208 $\angle$ 22	16 $\angle$ 67	117 $\angle$ 4
		断层擦痕反演	161 $\angle$ 81	16 $\angle$ 7	285 $\angle$ 5
23	桐照	断层擦痕反演	36 $\angle$ 27	200 $\angle$ 62	303 $\angle$ 7
		共轭节理分析	13 $\angle$ 110	220 $\angle$ 77	105 $\angle$ 6
23	裘村	共轭节理分析	190 $\angle$ 76	22 $\angle$ 14	291 $\angle$ 2

表 2 宁波地区燕山晚期第一次构造应力场古应力值

编号	地点	方法	应力值(MPa) (压为负)		
			σ_3	σ_1	$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$
1	慈城浮上桥	岩石破坏准则	-153.5	-11.7	141.8
2	慈城车灵桥	岩石破坏准则	-131.7	-9.1	122.6
3	鄞江镇	岩石破坏准则	-212.1	-55.2	156.9
4	奉化袁家山尖	同上	-140.1	-6.9	133.2
5	宁海桥头胡	同上	-153.5	-11.7	141.8
6	定海岛西端	岩石破坏准则	-343.3	-160.8	183.0
7	定海顺河水库	同上	-209.1	-61.8	147.3
8	宝幢	同上	-209.1	-61.8	147.3
9	横溪水库	岩石破坏准则	-343.8	-160.8	183.0
10	白石庙	同上	-343.8	-160.8	183.0
11	桐照	同上	-140.1	-6.9	133.2
12	金鸡山	岩石破坏准则	-140.1	-6.9	133.2
13	金鸡山N ₃₇	透镜下石英位错密度			108.4
14	冒头N ₉₅	同上			94.2
15	莫枝N ₆₈	显微镜下石英位错密度			86.0

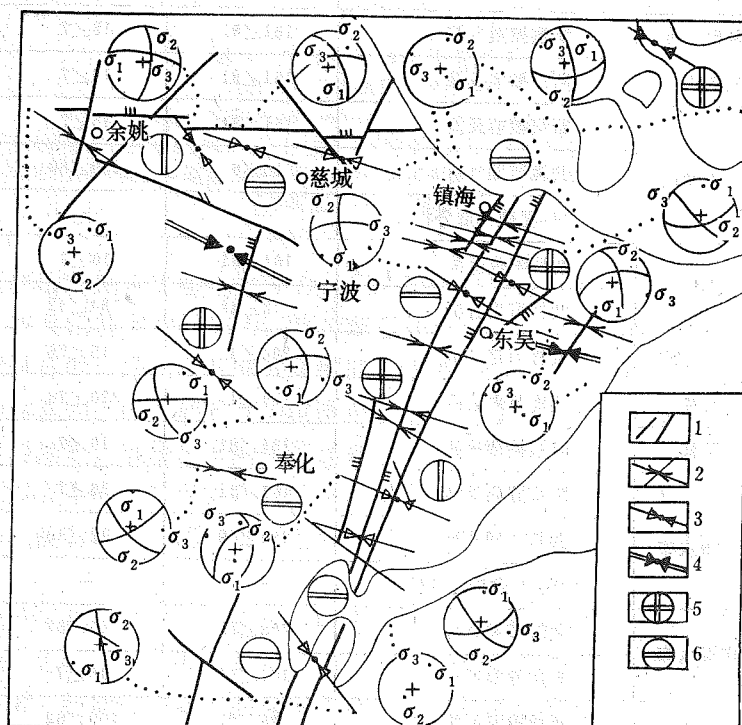


图 2 宁波地区燕山晚期第一次构造应力场特征

1—海陆界线及断层；2—用断层擦痕反演的主应力方位；3—用共轭节理求出的主应力方位；4—用显微构造综合方法求出的主压应力方位；5—差异应力值 $>150\text{MPa}$ ；6—差异应力值 $130\text{--}150\text{MPa}$

表 3 宁波地区燕山晚期第二次应力场主应力方位

编号	地点	方法	主应力方位		
			σ_1	σ_2	σ_3
1	慈城毛力水库	断层擦痕反演	257 $\angle$ 27	105 $\angle$ 60	353 $\angle$ 13
2	慈城三星地	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
		N135显微构造分析	—	—	340 $\angle$ 0
3	慈城五湖小学	共轭节理分析	263 $\angle$ 5	22 $\angle$ 80	172 $\angle$ 9
4	奉化樟村	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
5	奉化南山	同上	257 $\angle$ 27	105 $\angle$ 60	353 $\angle$ 13
6	纯湖	同上	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
7	桐照	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
		N43显微构造分析	—	—	340 $\angle$ 0
8	冒头	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
9	莫枝	N106显微构造分析	—	—	340 $\angle$ 0
10	横溪	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
11	东吴	N53显微构造分析	—	—	342 $\angle$ 11
12	宝幢	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
13	新路水库	同上	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
14	乌岭	同上	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
15	定海武家山	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
16	戚家山	同上	257 $\angle$ 27	105 $\angle$ 60	353 $\angle$ 13
17	城湾水库	同上	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
18	金鸡山	断层擦痕反演	257 $\angle$ 27	105 $\angle$ 60	353 $\angle$ 13
		N11显微构造分析	—	—	332 $\angle$ 0
19	小港折船厂	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11
20	定海岛中部	共轭节理分析	247 $\angle$ 12	133 $\angle$ 60	342 $\angle$ 26
21	宁海桥头胡	断层擦痕反演	79 $\angle$ 14	218 $\angle$ 73	345 $\angle$ 11

表 4 宁波地区燕山晚期第二次应力场差异应力

样品编号	采样地点	方法	差异应力(MPa)
N11	戚家山	方解石 ϵ 双晶	50.0
N13	小巷折船厂	同上	62.5
N37	金鸡山	同上	55.6
N53	东吴	方解石 ϵ 双晶	64.5
N96	冒头	同上	50.0
N131	慈城三星地	同上	47.3
N103	横溪	方解石 ϵ 双晶	66.6
		方解石位错密度	58.6

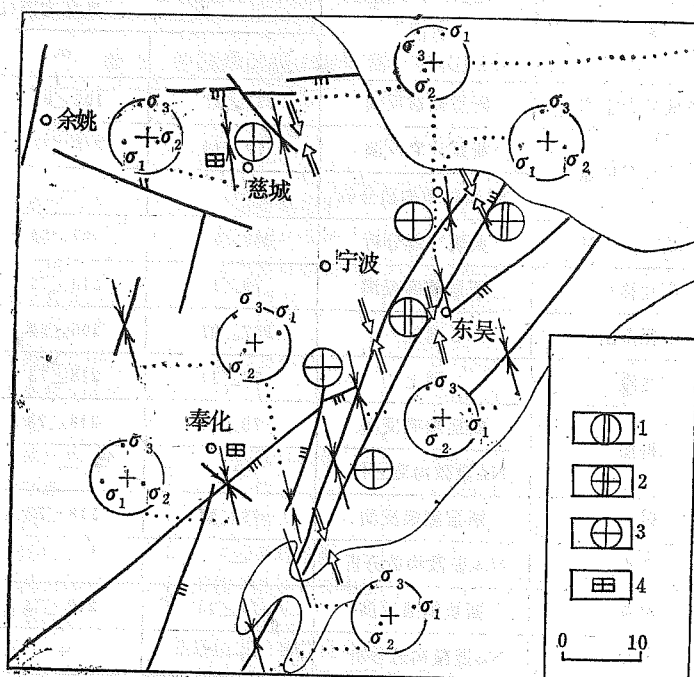


图 3 宁波地区燕山晚期第二次构造应力场特征

1—差异应力值100—130MPa; 2—差异应力值60—70MPa; 3—差异应力值 60—60MPa; 4—现今地应力测量地点 (其它图例同图2)

二、现今地应力测量

根据地质方法分析得知, 宁波地区燕山晚期两次构造应力场的主应力 σ_3 和 σ_1 都接近于水平, 其方向和量级发生了较大变化。为了探讨燕山晚期到现今地应力场的演化关系, 还需要对宁波地区的现今地应力进行半定量一定量的分析。为此562队宁波科研队在地质分析的基础上, 对宁波地区的现今地应力进行了实地测量。分别在东吴、奉化、慈城三处 (图3), 利用压磁电感法进行平面地应力测量。在每个测量地点, 测量钻孔基岩深度8—

表 5 宁波地区现今地应力测量结果

测量地点	测量结果	最大挤压应力 σ_3 方向	应力值(MPa) (压为负)			可信度
			σ_3	σ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$	
东吴		NNE9.99°	-9.41 ± 0.29	-6.99 ± 0.30	2.42 ± 0.59	90%
奉化		NNW1.55°	-4.89 ± 0.40	-2.40 ± 0.32	2.49 ± 0.72	80%
慈城		NNE20.75°	-2.53 ± 0.17	-1.61 ± 0.13	0.92 ± 0.30	90%

11m, 测量数据11—14组, 经计算, 将所得到的宁波地区几个点的现今地应力定量信息列入表5中。从表5分析, 宁波地区现今地应力场的最大挤压应力方向是NNE10°左右, 最大压应力为5—9MPa, 差异应力为2.5MPa左右。

三、有限元模拟计算

前面根据地质分析和现今地应力测量结果,分别获得了宁波地区燕山晚期以来几次应力场的特征及其变化的信息。严格地说,这只是宁波地区不同时期有限地点的地应力定量信息。要真正上升到应力场的角度来分析宁波地区燕山晚期以来应力场的区域分布及其演化关系,单靠地质方法来重点解剖是不够的,而必须以此为基础,进行模拟实验。为此,本文采用目前常用的平面有限元数学模拟方法,来计算宁波地区燕山晚期以来三次应力场的特征。

1. 力学模型的几何特征与物性参数

由于宁波地区燕山晚期的构造变形是典型的脆性变形,故选用平面理想弹性力学模型。并将先存各个方向断裂适当简化,突出燕山晚期形成的北北东向断裂带。为使宁波市及小港工业区在模型的中部,镇海断裂带在中轴位置,几何模型选用正方形块体,面积为 $90 \times 90 = 8100 \text{ km}^2$ 。其纵边界为北北东 10° 方向,近似平行镇海断裂带的走向(图4)。宁波地区的岩石主要是熔结凝灰岩,酸性熔岩和花岗岩,它们都可近似地看作为各向同性体。在有关岩石力学书中查得这些岩石的力学参数相似,故模型中只选用一种介质的力学参数,其弹性模量 $E = 5 \times 10^4 (\text{Mpa})$,泊桑比 $\nu = 0.22$;断层带中平行断裂走向的剪切模量 $k_t = 9 \times 10^3 (\text{Mpa})$,垂直断层走向的剪切模量 $k_n = 8 \times 10^3 (\text{Mpa})$ 。

2. 单元划分及边界力的确定

在划分单元时,主要考虑两条原则:其一应力可能集中的地区单元划密一些,如镇海断裂带;其二构造稳定性评价的重点地区划密一些,如宁波市和小港工业区。断层单独作为节理单元。这样划分的单元总数是403个,其中节理单元95个,节点290个(图4)。

边界力的确定,主要参考用地质方法确定的两期应力场和现今地应力测量结果进行。即在几何模型不变的情况下,改变边界力作用方式、大小和约束条件分别计算宁波地区燕山晚期以来的三次应力场。燕山晚期第一次应力场:外施面力为 $\text{NWW}285^\circ$ 方向的挤压,其量级为 200 Mpa 。计算模型的具体边界载荷及约束条件见图5a;燕山晚期第二次应力场,外施应力为 $\text{NW}345^\circ$ 方向的均匀挤压,其量级为 80 Mpa (图5b);现今地应力场,外施应力为 $\text{NNE}10^\circ$ 方向的均匀挤压,量级为 9 Mpa (图5c)。

3. 计算结果分析

根据上述力学模型,经过计算机多次运算,得到宁波地区燕山晚期以来各期应力场应力分布的各种定量图解。这里只选用了每期应力场的主应力轨迹线和最大剪应力相对等值线图。目的是为了与地质方法求出的主应力方向和差异应力值对比,从而检验计算结果的可靠性。图6A₁是燕山晚期第一次构造应力场主应力轨迹线图,图中黑箭头表示用地质方法实测的主压应力方向。从图中分析,实测应力方向与有限元计算的主应力方向对应较好,其最大偏差角小于 15° 。图6B₁是燕山晚期第一次应力场最大剪应力相对等值线图,与用地质方法求出的差异应力(表2)相对照,其差异应力的分布趋势和数量级大致对应较好(表6)。

图6A₂、B₂分别是燕山晚期第二次应力场主应力轨迹线图和最大剪应力相对等值线

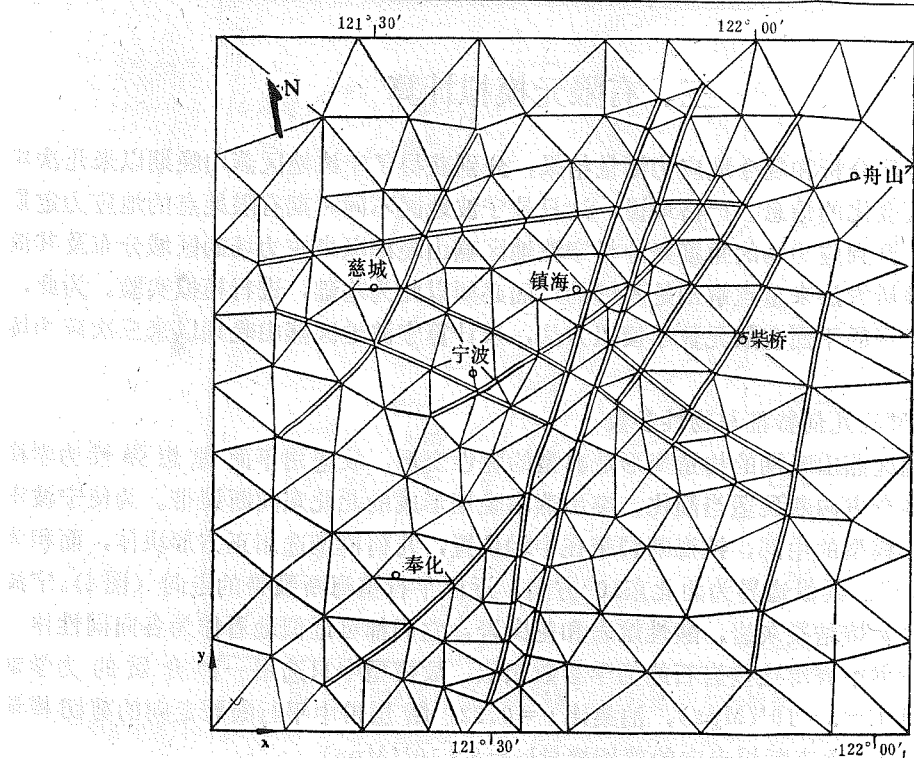


图4 有限元地质模型单元划分

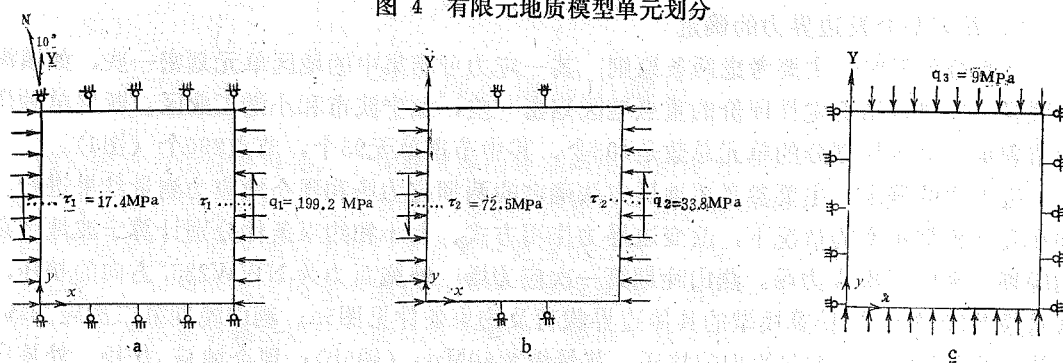


图5 力学模型的边界载荷及约束条件

a—燕山晚期第一次应力场边界载荷及约束情况；b—燕山晚期第二次应力场边界载荷及约束情况；c—现今应力场边界载荷及约束情况

表6 燕山晚期第一次应力场实测与计算差异应力对比

地点	实测差异应力(MPa)	计算差异应力(MPa)
慈城浮上桥	141.8	135.0
奉化袁家山尖	133.2	125.0
金鸡山	133.2	140.0
白石庙	183.0	145.0
宝幢	147.3	124.0
横溪	183.0	135.0
桐照	133.0	180.0
定海顺河水库	147.0	158.0

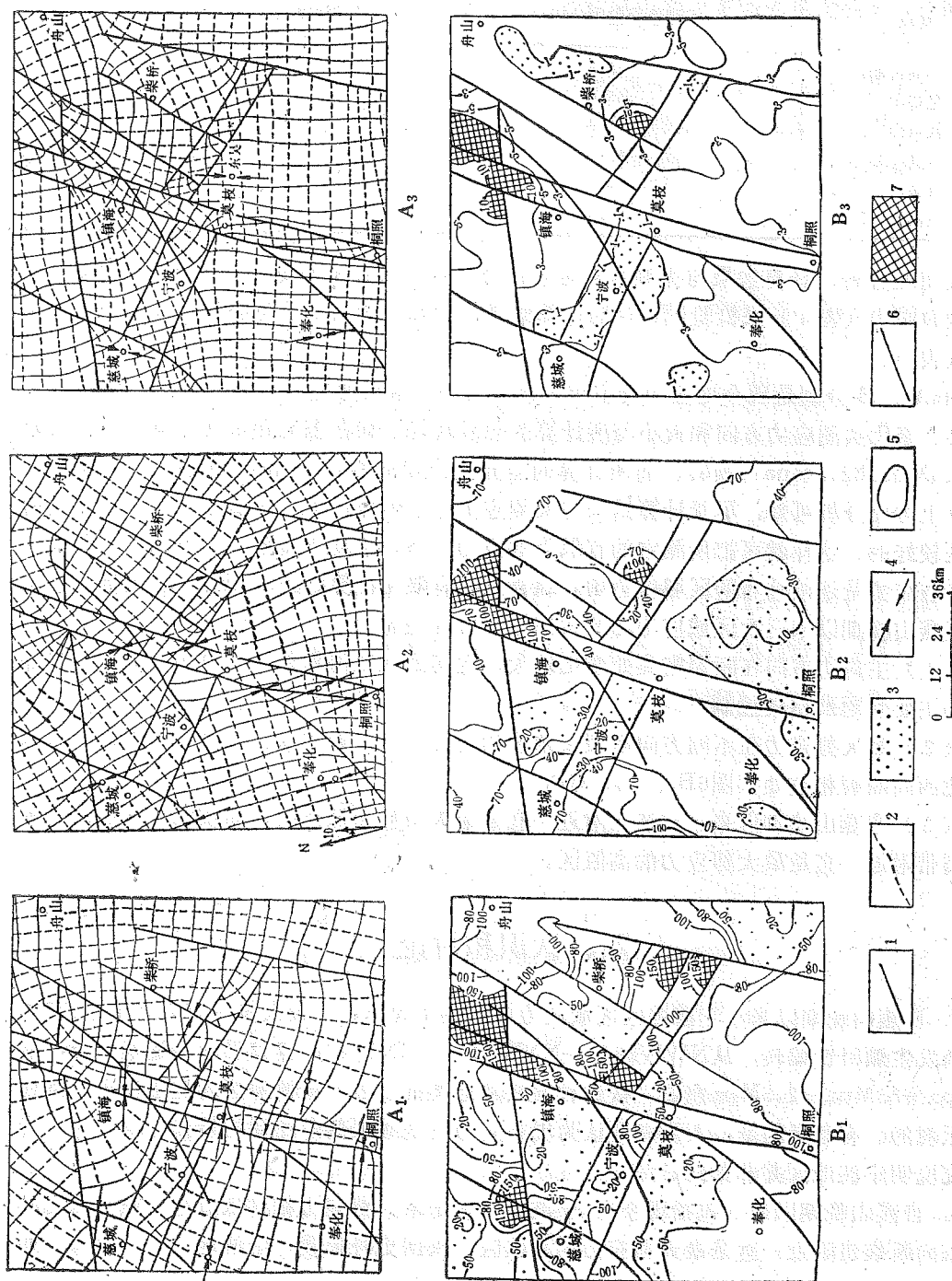


图 6 宁波地区燕山晚期以来应力场有限元模拟计算结果

1—断层；2—最小主应力迹线；3—最大主应力迹线；4—实测主应力方向；5—最大剪应力迹线；6—最大主应力迹线；7—最大剪应力迹线。A₁、A₂、A₃分别为燕山晚期以来应力场第一次、第二次和现今应力场最大剪应力迹线图；B₁、B₂、B₃分别为燕山晚期以来第一次、第二次和现今应力场最大剪应力迹线图。

表 7 燕山晚期第二次应力场实测与计算差异应力对比

地点	实测差异应力(MPa)	计算差异应力(MPa)
小港折船厂	62.5	130.0
金鸡山	55.6	100.0
威家山	50.0	85.0
东吴	64.5	70.0
冒头	50.0	55.0
横溪	66.6	68.0

图。从图A₂分析,计算结果与实测结果对应较好,两者最大偏差角小于20°。用e双晶计算的差异应力(表4)来检验图6B₂的计算结果,则知实测与所计算的差异应力分布对应较好(表7)。

图6A₃、B₃分别是现今地应力场主应力轨迹线图和最大剪应力等值线图。从图中分析,在东吴、奉化实测应力方向和大小与所计算的对应较好。如在东吴和奉化实测差异应力分别为2.4Mpa和2.5Mpa(表5),而所计算的差异应力分别为3Mpa和5.6Mpa。

以上对比分析可知,尽管计算结果与实测应力存在差异,但从区域分布看,其对应情况还是较好的。这样就可把所测定的有限点的应力状态,借助于有限元的方法,近似地上升到各点应力是连续分布的区域应力场。综合三次有限元计算结果(图6),可以推断出宁波地区燕山晚期以来三次区域应力场的共同分布特征主要为:

(1) 主应力方向在断裂密集处变化较大,尤其是在镇海附近。这说明宁波地区局部应力场主要受断裂格架控制。

(2) 最大剪应力在不同方向断裂大角度相交处集中。如北东、北北东向断裂与东西向和北西向断裂相交处(图6B₁、B₂、B₃)。

(3) 自燕山晚期以来,宁波市附近一直是最大剪应力低值区,而镇海以北的北北东向断裂带附近一直是最大剪应力的高值区。

四、认识和讨论

1. 自燕山晚期以来,宁波地区区域应力场的演化规律是:最大挤压应力近水平,其方向逐渐发生顺时针偏转,从NWW285°—NNW345°—NNE10°;其差异应力逐渐下降,从150Mpa—55Mpa—2.5Mpa左右。按这种发展趋势类推下去,宁波地区的构造稳定性条件将是乐观的。有意义的是:人们常常认为现在应力场是继承燕山晚期构造应力场,而作者的研究说明宁波地区并非如此。

2. 自燕山晚期以来(包括现今),宁波市一直是最大剪应力相对低值区,镇海以北的北北东向断裂带附近一直是最大剪应力的高值区。根据史料记载,宁波地区只在镇海(即剪应力的高值区)发生过区内最大震级 $M_s = 4\frac{3}{4}$ 的地震。据此类推,其他地方一般不会发生5级以上地震。因此宁波市可以看作是构造稳定性条件相对较好的地区。

3. 由于未对方解石脉进行同位素年龄值的测定,故应力场在时间上的演化研究未能

定量化。燕山晚期和现今应力场在时间上较确切,但燕山晚期第二次应力场只知道比燕山晚期还晚,到底晚多少,是燕山晚期的另一幕,还是喜山期或更晚的构造活动,在时间上具有不确定性,还有待今后进行进一步研究。

本文在野外工作期间得到562队宁波科研队地质组各位工程师和宁波地质五大队李国祥工程师的指导和协助;现今地应力测量结果由宁波科研队地应力测量小组提供;有限元模拟计算曾得到曾佐勋付教授的指导,并由他提供电算程序,在此一并深表感谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 李四光,地质力学概论,科学出版社,1973。
- 〔2〕 陈庆宣,岩石变形与构造应力场分析中值得引起注意的几个问题,地质力学所所刊,第8号,地质出版社,1986。
- 〔3〕 万天丰,古构造应力场,地质出版社,1988。
- 〔4〕 王维襄、韩玉英,棋盘格式构造的力学分析,地质力学论丛第4号,科学出版社,1977。
- 〔5〕 吴树仁、孙叶,宁波地区镇海断裂带燕山晚期构造应力场研究,地球科学15(6),1990。

A STUDY ON THE EVOLUTION CHARACTERS OF EARTH STRESS FIELDS IN NING BO AREA SINCE THE LATE YANSHANIAN

Wu Shuren

(China University of Geosciences, Wuhan)

Sun Ye Ye Dingheng

(562 Geological Research Party, CAGS)

Abstract

The Late Yanshanian stress directions of the Ningbo area are determined from striation measurement on fault planes, and an analysis of conjugate joints and microstructures. Also the differential stress is estimated using the criterion on rock fracturing, calcite twin lamella and dislocation density in deformed quartz. The present state of stress of the area is obtained by incorporating the results of in-situ stress measurements into finite element modelling. Then a discussion is made on the evolution of the stress field since the Late Yanshanian movement, which provides the basis for assessing the crustal stability of the area.