

唐山地震震源应力场的数值 模拟研究—三维有限单元法在计算 震源应力场中的应用

宋惠珍 高维安 孙君秀 蒋 伟

(国家地震局地质研究所)

摘 要

震源机制结果与极震区地裂缝的力学性质[1][2], 都说明唐山地震是以右旋剪切走向滑动为主且兼倾向滑动的主震型大地震。这说明唐山地震是在水平力和垂直力同时作用下产生的。本文利用三维有限单元法, 采用弹性模式对唐山地震震源应力场进行了数值计算, 并考虑了体力与表面力两种受力情况。表面力又分为水平作用应力与垂直作用应力, 水平作用应力随深度变化, 且最大水平压应力等于同一深度上静水压力的3倍, 而最小水平压应力等于同一深度上静水压力。最大水平压应力取北 85° 东, 即与唐山地震震源机制解的最大主压应力轴基本上是一致的。垂直力取其静水压力的1.5倍所得结果与地震实际发生的过程比较一致, 所以, 唐山地震很可能是在水平力与垂直力同时作用下产生的。

一、唐山发震断层特征及其对应力场的影响

我们认为影响唐山地震震源应力场的主要构造是唐山断裂带(图1)而其它断层对震源应力场的影响较小。

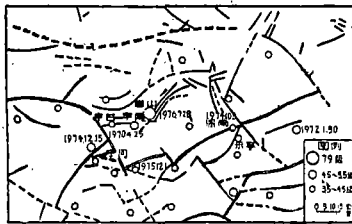


图1 唐山地震区构造与前震图

图1取自魏顺民等研究的结果, 为在构造地质研究的基础上, 进一步确定地震应力场, 将图1进行了结构离散化(图2), 利用SAP5系统程序中的平面应变法程序计算了图2所示的平面构造应力场。为突出主要因素, 在网格化时, 将图1中的陡河断裂与唐山—魏山—长山南坡断裂合并成一条断层, 在结构的边界上施加东西向最大压应力及南北向最小压应力, 其前者等于后者的3倍。计算结果得出场内有三个高应力点, 它们

分别与唐山地震的主震及滦县和宁河的两个余震的震中区重合。更重要的一点,就是每个高应力点主要是由于其邻近的断裂影响所造成的,也就是说唐山震中区的高应力状态主要是由

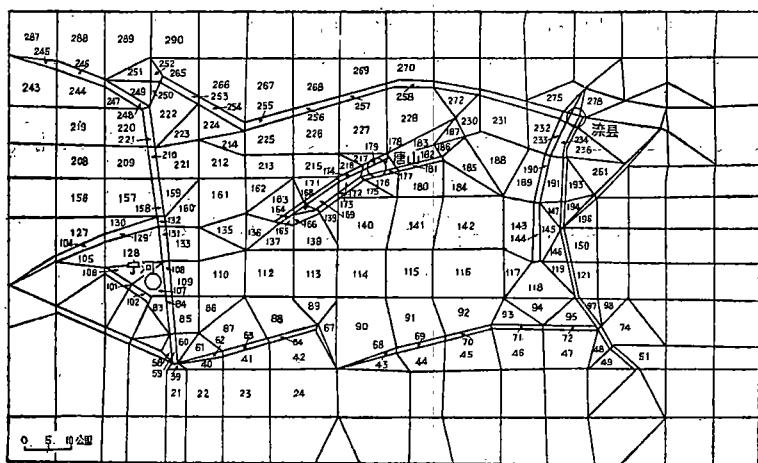


图2 唐山地质构造与有限单元网格图

唐山—古冶断裂和唐山—巍山—长山南坡断裂的影响所造成,而其它较远距离断层的影响很小可略去不考虑。同样,滦县7.1级震中区的高应力状态主要是由滦县—乐亭断裂的影响形成,而宁河6.9级余震的震中高应力区主要是受宁河—昌黎断裂和蓟运河断裂影响形成。这个结果与线弹性断裂力学理论计算结果是一致的〔8〕。如果把地壳介质作为弹性材料处理那么,断层对应力场影响的结论是肯定的,即与断裂力学计算的裂缝对弹性应力场干扰的理论结果是一致的。也就是说在弹性场内高应力点往往发生在断层段的几何间断处,换句话说,在地壳中震源是在不均匀介质条件下形成的。在介质强度大的断层段适宜于应力集中,而介

质强度弱的断层段适宜于应力调整。为此,如果我们不研究地震序列而仅只研究主要的发震条件时,可以只取出发震断层进行数值计算。

唐山发震断层是一个三维构造,因此,震源应力场也是三维的,只有借助三维有限单元法进行数值模拟,才可能得到比较有说服力的结果。图3表示唐山地震发震断层的空间构造*。从图3可看出,唐山断裂的浅部与深部性质是不同的。浅部断裂(为简化起见,把图2中的两条接近平行的唐山断层带合并为一条)向深部延伸到大约8公里左右中断,从15公里左右到20公里左右之间出

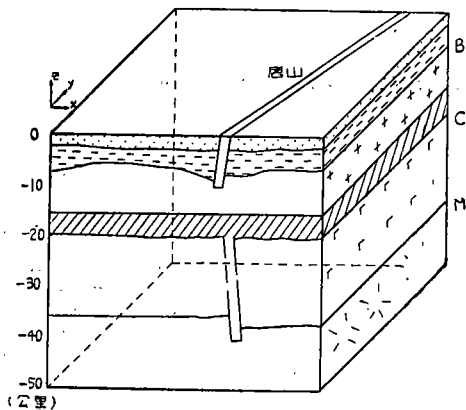


图3 唐山地震发震断层的三维构造

* 引自就顺民、向宏发等著的《华北平原三维构造模型》中的唐山构造部分。

现低速层，在低速层之下又出现断层直到穿透莫霍面为止，且断层的浅部与深部倾向是不一致的。本文中把断层内的介质处理为弱强度的，而把低速层处理为较高流变性物质，其它部分均为高强度介质。由于对地壳介质性质作了这种简化，非线性特征主要只发生在断层周围以及低速层的周围，于是就可以用非均匀线弹性材料模拟地壳体的本构关系。而这样一个弹性模式与唐山震源区构造模式的结合所产生的震源应力场，与郭增建等所提出的震源孕育模式是一致的^{〔4〕}。即介质强度大的地方能积累起巨大的剪切应力（称应力积累单元），在图3中的应力积累单元正是在断层断开处到低速层的上部界面之上，而该区正是唐山地震震源的深度。在那些介质强度弱的地方承受不了多大应力就会产生微裂缝、塑性变形或蠕滑（称应力调整单元）。在图3中的应力调整单元正是在断层内部或低速层内部，它正好处于应力积累单元的上下两端。此外，根据郭增建等同志对应力积累单元与应力调整单元在大震孕育过程中作用的解释，也完全适用于本文所采用的计算模式，即唐山地震的孕育是由应力积累单元及其上下两端的应力调整单元组合而成的。调整单元在地震孕育和发生中的作用是在大震前不承受巨大剪切应力而把此应力转移调整到应力积累单元上去，在积累单元形成应力集中。当大震发生时，应力积累单元发生断层传播（在三维空间，传播性质包括水平方向和垂直方向），一遇到调整单元就趋于停止^{〔5〕}。所以，唐山发震断层的构造特征，对唐山地震震源应力场的影响，用郭增建等提出的大震震源孕育模式解释是很合适的。而本文采用弹性模式对唐山构造应力场进行数值模拟的结果与郭增建等同志的模式解释也是完全一致的。

二、唐山地震是在水平力和垂直力的同时作用下产生的

从目前已发表的唐山地震资料中，可以说明唐山地震是在水平力和垂直力的同时作用下发生的，且水平力是主要的和基本的，但垂直力也是不可忽略的，很可能它起了触发地震的作用。我们通过以下事实说明这个问题。

（1）根据震源机制结果，唐山地震主震为走滑型的，主压应力轴为北东东向，主张应力轴为北北西向，北 30° 东的节面为断层面，断层错动为右旋走向滑动。极震区地裂缝的力学性质显示北东向裂缝有明显的顺时针扭动，对比余震分布的长轴方向和极震区地裂缝分布也可以确定断层面为北东向的。此外，地裂缝的水平扭动最大错距为1.53米，裂缝的垂直断距为0.7—1.5米，破裂带具有右旋剪切兼有垂向倾滑运动性质，这说明唐山地震过程中，水平运动为主，但同时伴随着垂直运动。

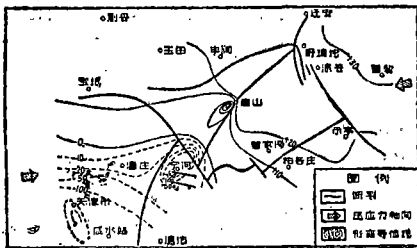


图4 1968—1975年唐山地区垂直形变图（引自向家翠同志的资料）

（2）唐山断裂带是高低两级夷平面的分界线，向南过渡到冲积平原，特别是在大震时震中区及其附近出现大面积下沉，下沉幅度最大可达150厘米，且下沉偏于东南盘，这个事实也说明了唐山地区存在有垂向差异运动。

（3）从水准测量资料看，唐山地震前有长趋势的地形变异常，1968—1975年垂直形变图（图4）反应了唐山一带是形变幅度较大，差异运动较强

的地区,表现为唐山—滦县一带是形变上升区,上升最大幅度为20毫米,年速率约3毫米/年;而唐山到宁河一带则是形变下沉区,下沉最大幅度约60毫米,年速率约8毫米/年,上升与下降分界线大致从唐山—丰南通过,这又说明了以唐山—丰南为分界线的垂直差异运动比较强烈。

上述各种事实与资料,都说明了唐山地震不仅是以右旋剪切水平错动为主的运动过程,并且同时伴随有垂直分量的运动。由此证明,唐山地震是水平力与垂直力同时作用下产生的,而这正是本文进行三维有限单元计算时施加作用应力的依据和出发点。

三、唐山地震震源体上受力情况

根据上面一节的论证,我们认为唐山地震是在水平应力场和垂直应力场同时作用下产生的。于是,当进行数值模拟时,将结构体的边界面上施加水平与垂直两种作用力。图5表示

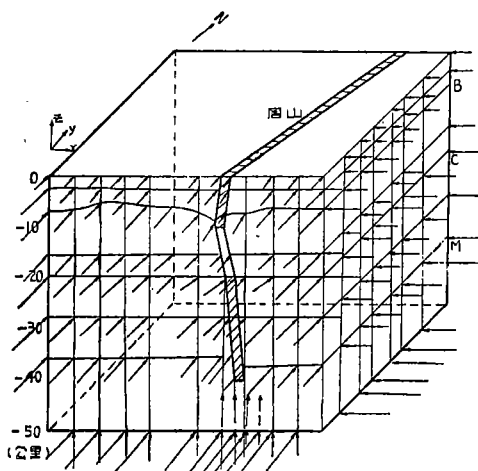


图5 水平作用力与垂直作用力的示意图

的是加力方式的示意图,箭头表示的是加力方向,地表保持自由表面状态,最大水平压应力方向为北 85° 东,其大小等于同一深度上静水压力的3倍,最小水平压应力方向为北 5° 西,其大小等于同一深度上静水压力值,垂直力等于静水压力的1.5倍。这就是说,在50公里的深度上所加的向上垂直作用力等于静水压力的1.5倍时就要产生上升运动,小于这个数值时则产生下沉运动,为此,在图5中作用力的组合是这样的:

设 σ_H 表示静水压力, σ_3 是最大水平压应力, σ_1 表示最小水平压应力, σ_2 表示垂直向上作用力,则它们之间的关系为:

$$\begin{cases} \sigma_3 = 3\sigma_H \\ \sigma_1 = \sigma_H \\ \sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma_3 \quad (\text{对应上升运动}) \\ \sigma_2 = \frac{1}{3}\sigma_3 \quad (\text{对应下沉运动}) \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)是我们在唐山地区计算的经验关系式。除了自由表面,各个面上的分布力都要根据静力等效原则转换成节点力进入方程组中,而所有过程都是由程序自动实现的,不引入人工数据输入。

四、计算结果分析

根据以上分析,我们对于仅包含唐山地震发震断层的三维结构进行的进行了数值计算,总体结构的大小为长150公里,宽70公里,深50公里,离散化为651个单元体,808个节点,图6表示的是网格化图。图中写在节点左上角的数字是节点号码,括号里面的数字是单元号。

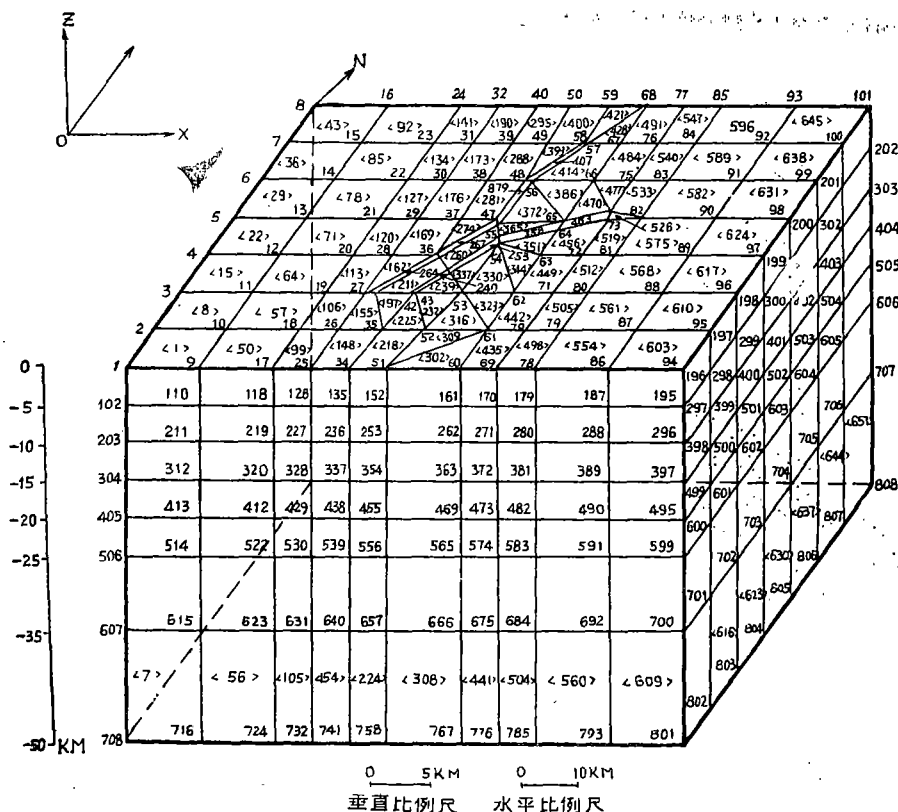


图 6 唐山发震构造三维有限单元网格图

为了重点说明问题,主要取震源及邻区的一些单元应力进行对比。图7表示震源构造的部分单元图,其中断层单元和低速层单元是弱强度单元,且低速层单元还是软介质单元,其它单元都是高强度单元。在水平应力场和垂直应力场的同时作用下,应力分布是不均匀的,在图7中高强度单元的最大剪切应力在1.7千巴到2.5千巴之间,平均应力在-1.5千巴到-2.5千巴之间。断层单元的最大剪切应力在720巴到1.2千巴之间,平均应力在-460巴到-900巴之间。而低阻层单元的最大剪切应力在282巴到760巴之间,平均应力在-153巴到-470巴之间。如果唐山地区的深部结构基本上是正确的活,那么在15公里上下应力强度最大,而这正是唐山地震的震源深度,而从地表延伸到8公里上下的断层内部最大剪应力降低,根据本文计算结果,高强度单元的最大剪切应力比断层单元的要高1倍到2倍,而比震源区下面的低阻层单元的最大剪切应力高2倍到7倍。对三种不同强度的单元,总的平均应力都是压性的。但最大主应力除少数高强度单元外都是张性的。而最小主应力和中主应力是压性的,或者说这些单元的三个主应力轴的性质是类似的。但高应力单元的平均应力要比断层单元的平均应力高1.8倍到2.5倍,而比低阻层单元平均应力高4倍到9倍。这说明了高强度单元的最大剪切应力与平均应力虽然都在增高,但平均应力比最大剪应力增加得快。因此,在水平应力场与垂直应力场的同时作用下,高强度单元并不立刻破裂,相反,弱强度的断层单元及软介质的低速层单元都首先破裂或发生蠕变及塑性变形。根据本文计算的结

果，在图7中的断层单元及低速层单元，它们的最大剪切应力值都高于平均应力绝对值。又由于软弱介质的摩擦系数比较低，所以，由剪破裂准则知道断层单元将首先产生微破裂，而低速层软质单元则首先发生蠕变或塑性变形，并伴随有微破裂，从而它们把应力转换到高强度单元，使高强度单元的应力增加。这就是我们通过弹性模式的有限单元计算。证实了郭增建等同志提出的震源区应力调整单元及应力积累单元的模式对唐山地震是符合得很好的。本文中的应力调整单元，就是图7中的断层单元及低速层单元，而应力积累单元就是图7中的高强度单元。

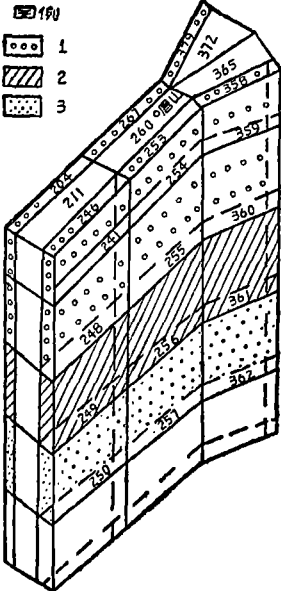


图7 部分应力集中单元与应力调整单元位置图
1.断层单元，2.高强度单元，3.低速层单元

其次，要说明的是应力积累单元的主应力轴方向，从表1中部分应力积累单元的主应力的方向和大小可以归纳以下几个特点：

(1)在水平应力场与垂直应力场作用下多数的应力积累单元出现最大主应力是张性的，因此这些单元的差应力高，它使单元某一面上的正压力减小，从而也减弱了摩擦阻力。另一部分单元虽然主应力都是压性的，但差应力仍很大，这说明唐山震源区垂直应力场作用效果是加速破裂的发生。

(2)最小主应力轴与地面夹角是比较小的(见表1)，其中最大是27°(360号单元)，最小是1°(374号单元)，这与唐山地震以平推为主是一致的。另一方面，从最小主应力轴与X轴和Y轴的夹角看，其在XOY面上投影平均接近东西方向，这与唐山地震的P轴方位是一致的。但个别单元(360号)的最小主应力轴与水平面的夹角还是比较大，且其水平投影为南东方向，与其它单元相比，顺时针转了20°左右。而从图7可以看出，正是在360号单元上的断层段是唐山一

震源区应力积累单元的主要计算结果

表1

单元	最大主应力 σ_1 (千巴)				中主应力 σ_2 (千巴)				最小主应力 σ_3 (千巴)				单元可能破裂面产状	
	σ_1	(σ_1, Z)	(σ_1, y)	(σ_1, X)	σ_2	(σ_2, Z)	(σ_2, y)	(σ_2, X)	σ_3	(σ_3, Z)	(σ_3, y)	(σ_3, X)	走向	倾角
206	.8	-49°	42°	80°	-1.6	43°	55°	69°	-5.9	-80°	-69°	24°	N40°E	80°
213	-4	-51°	40°	80°	-1.3	39°	55°	73°	-5.4	-83°	-72°	19°	N40°E	83°
248	-6	-37°	53°	90°	-1.5	55°	41°	72°	-5.6	-79°	-76°	18°	N50°E	79°
255	-6	39°	-52°	88°	-1.8	56°	43°	67°	-5.6	-74°	-74°	23°	N50°E	74°
262	-2	-36°	55°	86°	-1.3	55°	40°	73°	-4.8	-83°	-74°	17°	N50°E	83°
269	.6	-42°	49°	83°	-1.0	48°	44°	78°	-4.6	-87°	-76°	14°	N50°E	87°
360	.4	39°	-51°	89°	-2.8	65°	56°	44°	-4.3	-63°	-57°	46°	N60°E	63°
367	.9	-30°	61°	87°	-1.7	61°	35°	72°	-3.1	-83°	-73°	18°	N60°E	83°
374	-2	-58°	-33°	84°	.7	32°	-58°	87°	-2.5	89°	83°	7°	N70°E	83°
381	.2	38°	-52°	88°	-7	53°	39°	80°	-3.3	-82°	-83°	11°	N30°E	72°

注：表1中第二行 (σ_1, Z) ， (σ_1, y) ，……， (σ_3, X) 表示相应的主应力轴与相应的坐标轴之间的夹角。即主应力轴的方向角。

古冶断裂东北段，其走向从北 30° 东转为北 50° 东，这说明在断层深处端部的高强度单元应力受到其上面的断层几何展布的控制。且主应力轴方向变化的大小与断层走向变化的度数是基本一致的。所以，唐山地震震源应力场并非完全均匀一致的，它受断层分布控制，震源机制结果代表的是震源应力场的平均性质。

(3)在震源的高强度单元上，它们的最小主应力都是压性的，而一部分单元的最大主应力是张性的。但它们的平均应力都是压性的且比较高，最大剪切应力也比较高，它表明在这些单元上储存的弹性应变能高并且又处于沿着某一面破裂的临界状态。

(4)中主应力轴不垂直，与地面夹角 38° 到 52° 之间，最大主应力与小平面夹角也比较大，在 32° 到 52° 之间，而最小主应力是近东西向的且接近于水平。根据主应力轴的方向计算了高应力单元可能破裂面的几何产状(表1)。从表中可以看出，可能破裂面的走向和倾角与唐山断裂带的产状基本一致，这说明了即使破裂发生在断层端部(沿着走向端部或沿着倾向端部)，但破裂方式仍受原断层的控制。

根据计算所得的三个主应力轴的方向及可能破裂面的几何产状，可以得出在破裂过程中是以右旋斜滑方式错动的。这个结果与唐山地震产生的平推断层兼正断层分量是一致的。

根据以上对唐山地震应力场的计算结果，我们认为，当震源区的构造与区域应力场比较确定的情况下，可以用三维有限单元方法模拟震源应力场，且单元划分越细，对震源情况了解得越清楚。因此，数值模拟方法可以成为研究震源应力场的一个手段之一。

(本文1981年12月27日收到)

参 考 文 献

- [1] 李钦祖等，唐山地震的震源机制，地震地质，Vol. 2，No. 4，1980.
- [2] 魏顺民等，唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论，地质科学，No. 4，1977.
- [3] P. Segall and D. D. Pollard, Mechanics of Discontinuous Faults, J. Geophys. Res.
- [4] 郭增建、秦保燕等，震源孕育模式的初步讨论，地球物理学报，1973.
- [5] 郭增建，秦保燕等，从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的孕育和发生，地球物理学报，Vol. 20，No. 3，1977.
- [6] J. C. Jaeger, Elasticity, Fracture and Flow.

NUMERICAL ANALYSIS OF STRESS FIELD OF TANGSHAN
AREA APPLYING THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD
TO COMPUTE FOCAL STRESS FIELD

Song Hui-zhen Gao We-an Sun Jun-xiu
Jiang Wei

(*Institute of Geology, State Seismological Bureau*)

Abstract

From the Point of view of the focal mechanism and behaviour of ground crack, the component of right-lateral shear strike slip was dominant and at the same time with dip slip during Tangshan earthquake. This showed that the event had occurred by reason of horizontal and vertical force. In this paper the authors use three dimensional finite element method to compute the stress field of Tangshan area. It is believed that there are two kinds of distributive force, body force and surface force. And the latter force may be classified into horizontal direction and vertical direction. Horizontal stress field changes with the depth, and maximum horizontal compressive stress is equal to 3 times of hydrostatic pressure, the depth being equal. Its orientation is $N85^{\circ}E$. The vertical stress is equal to 1.2 times of hydrostatic pressure. Results of computation are in the main consistent with the occurrence of the event. Tangshan earthquake occurred perhaps by reason of both horizontal stress field and vertical stress field, the former being dominant.