

我国现今地应力状态及有关问题

李方全 刘光勋

(国家地震局地震地质大队)

摘 要

本文主要利用应力解除法及水压致裂法原地应力测量资料,对我国现今地应力状态及有关问题进行了分析讨论。原地应力测量资料表明,应力值随深度增加而增加;水平主应力有着很强的方向性,最大水平主应力的方向具有一定的分布规律,与地质构造和现代地壳运动有着一定的关系。

一、引 言

现今构造应力场研究工作是解决地震成因及地震预测预报的一个重要问题,也是岩石圈动力学研究中的重要课题。但现今构造应力场的研究必须以地应力状态的实际观测资料为基础,否则只能停留在一般理论和实验的推论上。

目前,对现今构造应力场的研究,主要是通过原地应力实际测量、震源机制分析和根据形变测量资料进行推断等途径来进行的。但现在能较确切地给出一个地点的地应力状态(即主应力方向及其绝对值大小),只有原地应力测量方法,其它各种手段都只能给出一个地点或一个地区的主应力的概略方向,而不能给出主应力绝对值的大小。但原地应力测量在观测深度上,目前尚受一定限制,水压致裂法虽然比其它方法要观测得深一些,可目前最深的测量仅达到5000多米^[1]。尽管如此,在目前尚无更好的新方法、新手段的情况下,原地应力测量仍不失为直接了解现今地应力状态和研究现今构造应力场的一种主要手段。

本文不打算利用各种不同手段所取得的资料进行综合分析,因为过去这方面的工作已做过很多,尽管这种分析可能全面一些,但由于不同手段取得资料的精度、条件和意义不同,所以综合分析有可能忽略了某些差异和问题。因此,本文主要以多年来原地应力测量工作所取得的资料和成果,对我国现今应力状态及有关问题进行分析和讨论,然后再适当地与其它资料进行对比。

本文所利用的实际资料,大部分为我队进行的套芯法测量和水压致裂法测量所取得的,也参考了一些其它单位的有关资料(详见附表)。应力解除法(套芯法)测量误差一般在10%左右,方向测量误差一般为 3° — 5° ^[19]。水压致裂法测定最小主应力不依赖岩石的弹性参数,所以测量精度较高,一般为5%—10%;而最大主应力的测量误差较大,最高可达25%^[11]。

1984年8月4日收到,1985年4月25日收到修改稿。

二、我国现今地应力状态的区域特征

瑞典的哈斯特 (N. Hast) 等人根据他们的应力测量成果研究了北欧和冰岛的应力作用方式^[2]。西德的鲁梅尔 (F. Rummel) 利用欧洲的应力测量资料分析了中欧的构造应力场^[3]。海姆森 (B. C. Haimson)^[4]和佐巴克 (M. D. Zoback) 等人^[4]依据地应力测量资料,并结合其它有关资料讨论了美国大陆的应力状态。这些研究都表明在一个相当大的区域内,现今构造应力的方向是相对稳定的,并具有一定的分布规律,与地质构造和现代地壳运动有一定的关系。

1966 年以来,我们先后在华北、东北、华东、中南、西南、西北地区,用应力解除法(套芯法)和水压致裂法进行了原地应力测量工作。其它单位也根据他们的需要和目的,开展了这方面的工作。从目前取得的资料来看,各地的工作程度是不同的,我国东部资料较多,西部较少。虽然这些资料对现今构造应力场的研究来说还是不充分的,但仍可对其现今应力状态有一概括的了解。

华北地区,由于测量资料较多,因此对其地应力状态反映较细致、较准确。但值得注意的,也是与其它资料不同的,就是以太行山为界,东西两个区域有较大的差别(图 1)。太行山以东的华北平原及其周边山区,其主压应力轴方向为近东西向,这与其它手段分析的结果大体一致,同时与日本列岛通过地应力测量反映的近东西向主压应力方向也基本一

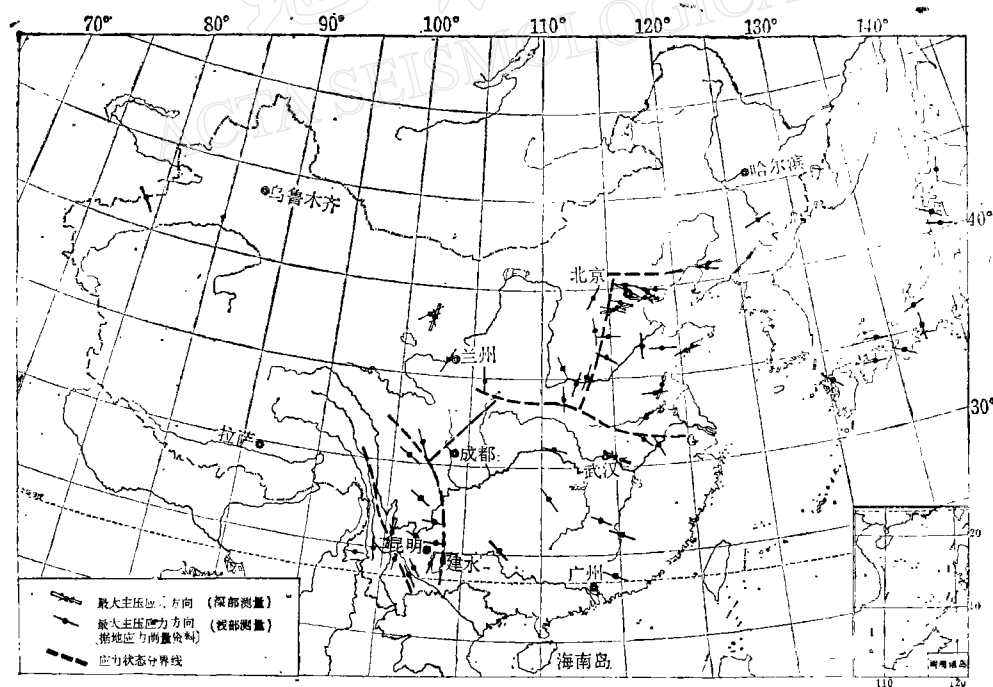


图 1 中国及其邻区现今应力状态分区图

Fig. 1 Distribution of maximum horizontal principal stress directions in China Main land and Japan. (The data of in situ stress measurements in Japan are from Yutaka Tanaka)

致(田中豊岡行俊, 1979)^[5]。太行山以西的山西地堑区, 其主压应力方向则发生了急骤变化, 表现为近南北向。这与 1965 年垣曲 5.5 级地震、1967 年蒲县 5.4 级地震和 1971 年和顺地震的 P 轴(压力轴)方向基本一致^[6]。如 1971 年和顺地震的 P 轴方位为 $N24^{\circ}W$, 而于此地以北不远的平定, 地应力测量得到的主压应力轴为 $N3^{\circ}W$ 。又如山西垣曲地震的 P 轴方位为 $N15^{\circ}E$, 而在其以北的绛县, 地应力测量得到的主压应力轴方向为 $N22^{\circ}W$ 。

太行山以东的平原区显然与太平洋板块向西俯冲有关, 而太行山以西的山西地堑区虽地处华北, 但看来受印度板块向北运动和青藏隆起的影响较大, 可以说是东部与西部地区的过渡地带。太行山构造带, 正是一条在其东西两侧深部地壳结构和组成上有显著差别的构造分界。从地震活动状况分析, 其东西两侧也是不同的, 这一点是今后工作中需要注意的。

秦岭东西构造带以南的华南地区, 其主压应力方向相当一致, 为北西西至北西向, 这与震源机制求得的主压应力轴方向相当吻合^[7]。其分界也是明确的, 就在秦岭东段至大别山一线。如在安徽无为地区地应力测量测得的主压应力方向为 $N63^{\circ}W$, 而在稍北的宿县、定远即为近东西向, 甚至呈北东东向。又如 1973 年安徽霍山和 1973 年湖北丹江口两次地震的 P 轴方位, 分别为 $N30^{\circ}W$ 和 $N81^{\circ}W$, 与其以北的 P 轴方向显然不同^[7]。

东北地区实际测量资料很少, 从少数测点的实际资料, 结合震源机制资料来看, 主压应力轴似乎以北东东向为主。

我国西部地区的地应力测量资料也不很多。沿祁连山构造带以北, 兰州地震研究所和我队曾进行了部分工作, 其主压应力方向以北北东向为主, 个别为近南北向。1975 年至 1980 年为了工程的需要, 我队曾在甘肃金川矿区从地表到井下 480m 深进行了一系列地应力测量工作, 测得主压应力平均方向大约为 $N10^{\circ}W$ 。总之, 这一地区的结果与震源机制求得的主压应力轴方位吻合较好。说明这一地区主要受印度板块向北推挤的影响。

这些年来, 云南省、四川省地震局和我队在南北构造带上进行了地应力测量工作。发现在此带的东侧小江断裂沿线附近, 最大主压应力方向为近东西向。从此线向西, 包括澜沧江断裂以北, 鲜水河断裂以南的断块区, 逐渐转为北西向或北北西向。澜沧江断裂以南地区以北北东或近南北向为主。似乎以此断裂带为界, 南北两地的应力状态有一突然变化。当然, 我国西南地区应力状态与青藏隆起的侧向挤压有关, 但由于其各地块的边界条件不同, 因此其应力状态也显示出较大差异。

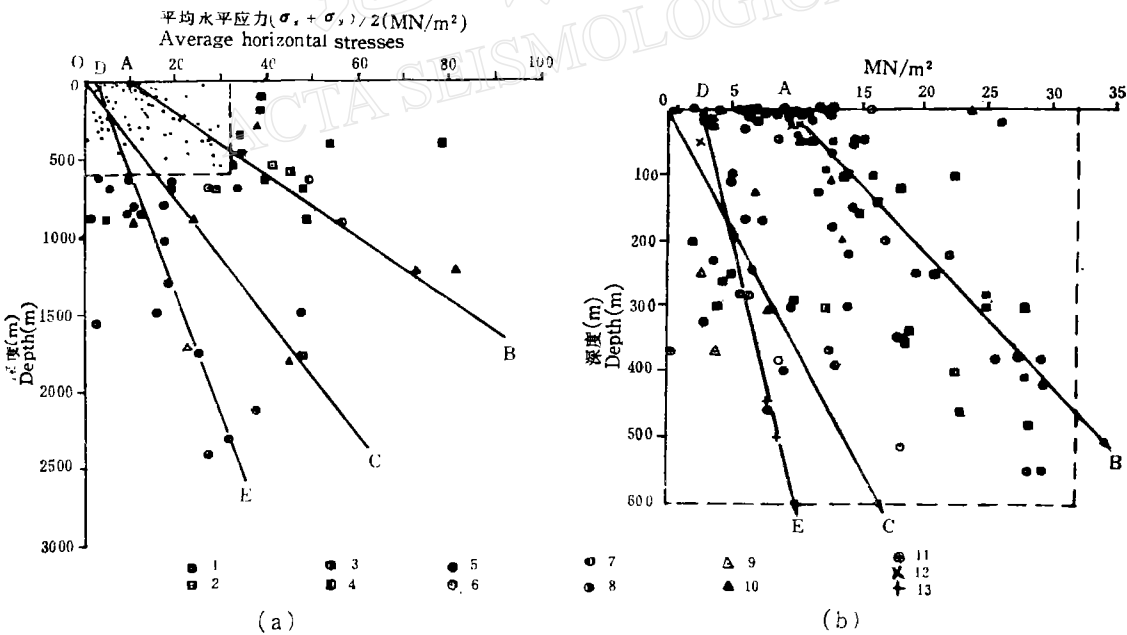
新疆、西藏地区几乎是地应力测量的空白区。仅有我队与新疆地震局于 1982 年曾在新疆西部的乌什地区进行过地应力测量工作, 其主压应力方向为 $N53^{\circ}W$, 这与当地的震源机制解和现代构造运动是一致的。

地应力绝对值在我国东、西部是不相同的。东部偏小, 一般深 300m 处, 最大主应力值多不超过 $100\text{kg}/\text{cm}^2$, 推测在 500m 深时也不超过 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 。如唐山的最大主应力值为 $80\text{kg}/\text{cm}^2$ (300m 深), 推测在 500m 深时约 $110\text{kg}/\text{cm}^2$ 。又如山东新沂在 250m 深时, 最大主应力值为 $110\text{kg}/\text{cm}^2$, 推测在 500m 深时为 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 左右。而西部一般都偏大, 如金川矿区 500m 深时, 最大主应力值超过 $300\text{kg}/\text{cm}^2$, 局部测点测值甚至达到 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 。云南下关近 500m 深时为 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

三、地应力状态随深度的变化

目前原地应力测量资料反映出大部分地区水平应力大于铅直应力，特别是在前震旦纪或前寒武纪结晶岩体，这一特点表现得更为突出。一般两个水平主应力不相等，表现出很强的方向性。最小水平主应力 σ_{Hmin} 与最大水平主应力的比值 ($\sigma_{Hmin}/\sigma_{Hmax}$) 一般介于 0.2 到 0.8 之间。多数情况下两个水平主应力都大于铅直应力，即 $\sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin} > \sigma_V$ 。在有些地区，虽然 σ_{Hmax} 大于 σ_V ，但 $\sigma_V > \sigma_{Hmin}$ 。也有个别地区 σ_V 大于两个水平主应力，即 $\sigma_V > \sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin}$ 。拉纳利 (Ranali 1975) 综合了前人 150 多个地应力测量数据，并按构造条件进行了分类。发现平均水平应力 $[(\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin})/2]$ ，在地盾区和古生代褶皱带，大于覆盖层静压力，其比值约为 2:1 (图 2 中的 AB 线)。在地台的沉积盖层、古生代褶皱带上的断块区和断裂带，大多数平均水平应力小于覆盖层的静压力，其比值为 1:2 (图 2 中的 DE 线)^[8]。总之，一般情况下，最大与最小水平主应力明显不同，而且两个水平主应力也很少与铅直应力相等。因此，可以认为在地壳上部几乎处处都存在着差应力，即构造应力。

根据我国地应力测量资料，可以看出平均水平应力与铅直应力的比值 K ，在浅部即深度小于约 100m 时，其范围是较宽的，可从 0.5 至 4；深度大于 100m 时，比值 K 逐渐集中而



地盾区：1.波罗的海；2.加拿大；3.苏联；4.非洲。古生代褶皱带：5.加里东；6.阿巴拉契亚及美国东部；7.苏联古生代；8.澳大利亚及其它；9.中生代褶皱带；10.新生代褶皱带；11.沉积盖层；12.断裂带(冰岛)；13.其它。

图 2 各种地质环境中平均水平应力随深度的变化

[(b)为(a)图上角的放大图,图中 OC 为铅直应力]

Fig. 2 Variation of average horizontal stress in different environments.
(b) is an enlargement pattern of a part of (a), OC: vertical stress

与深度趋于线性关系,约为从 0.5 至 2 左右(图 3),推测从深 500m 往下至 3000m 左右,可能趋于 1 上下^[9]。这与布朗、霍克 (E. T. Brown, E. Hoek, 1978)^[10] 和加梅森、柯克 (Jamison, Cook, 1980)^[11] 统计世界一些地应力测量数据所得结果,在趋势上大体一致,不过他们的深度较大(图 4 和图 5)。从所测数据来看,绝大多数都显示为两个水平主应力

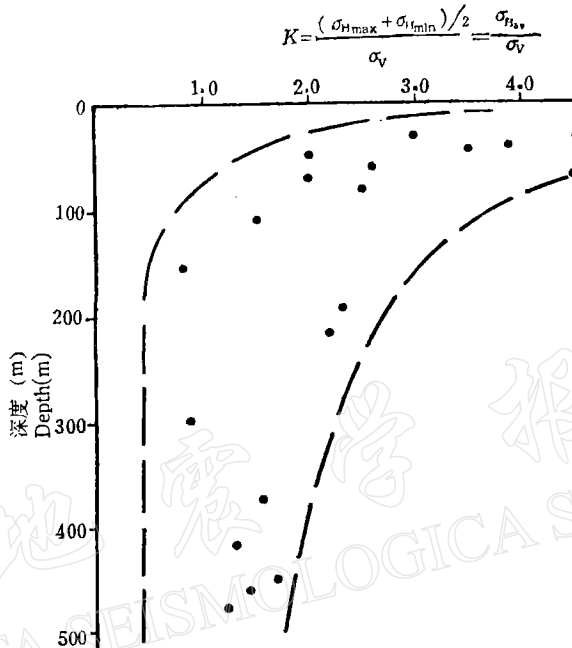


图 3 平均水平应力与铅直应力之比值随深度的变化
(据我国地应力测量资料)
Fig. 3 Variation with depth of the ratio K of the average horizontal stress to the vertical stress (According to measurements in China)

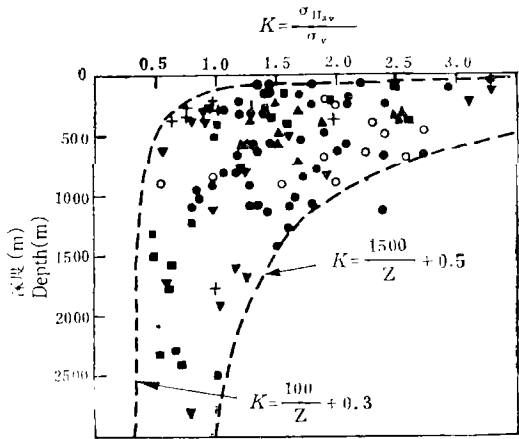


图 4 平均水平应力与铅直应力之比与深度的关系
(据 Brown 和 Hoek)
Fig. 4 Variation of K with depth (After Brown and Hoek)

大于铅直应力(图6)。但不同地区,应力随深度变化的梯度是有差别的。华北地区的测点应力梯度较小[图 7(a)和图 7(b)],而西南及西北地区的测点应力梯度较大[图 7(c)]。

值得注意的是唐山地区的测量结果,它的应力随深度变化比较复杂,即深部与浅部不一致。浅部 150m 以上,两个水平主应力皆大于铅直应力;而 150m 以下,最小水平主应力

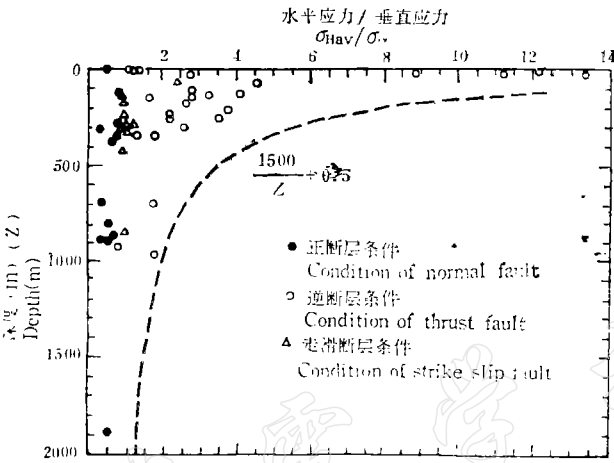


图 5 平均水平应力与铅直应力之比与深度的关系
(据 Jamison 和 Cook)

Fig. 5 Variation of K with depth (After Jamison and Cook)

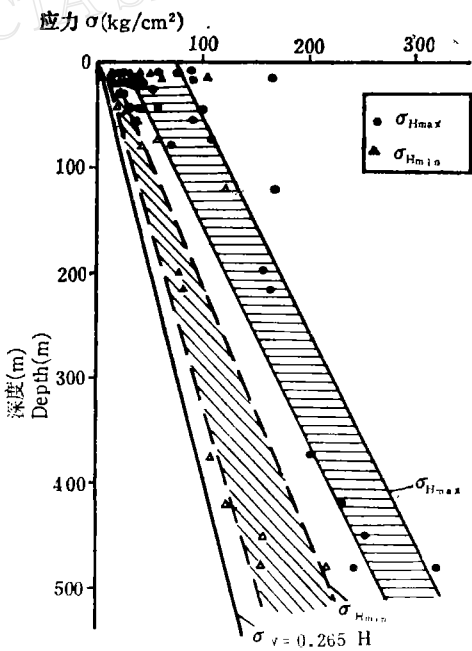


图 6 应力随深度的变化
(据我国测量资料)

Fig. 6 Variation of measured stress with depth (Chinese data)

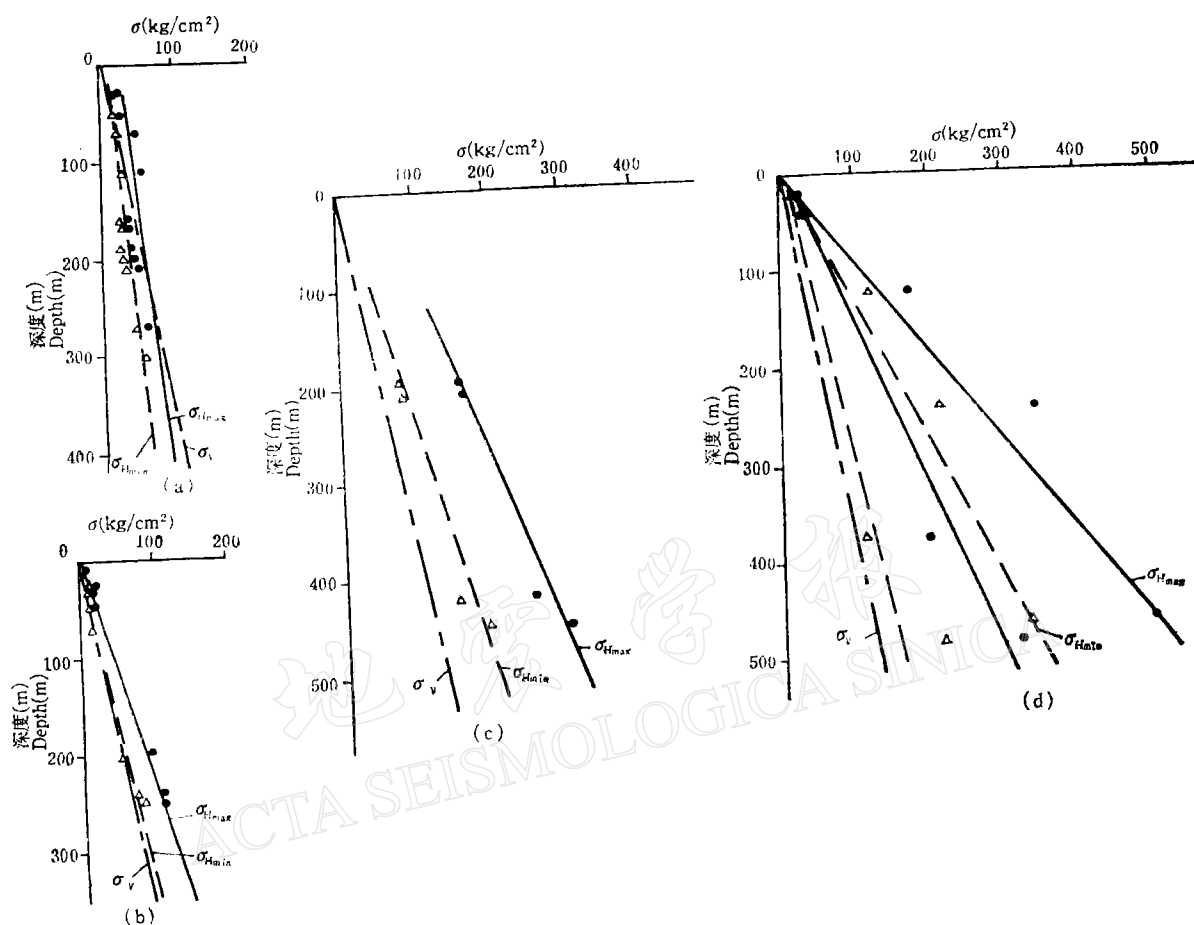


图 7 我国不同测点的地应力随深度的变化

Fig. 7 Variation of measured stress with depth at different sites in China

(a) 唐山 (b) 新沂 (c) 下关 (d) 金川

小于铅直应力,最大水平主应力近于或稍大于铅直应力(图 8)。

如果排除地形等因素的影响,水平主应力的方向随深度变化不大。海姆森(B. C. Haimson, 1980)在美国威斯康星州的沃特卢石英岩中的不同深度进行了水压致裂应力测量,得到了最大主应力方向随深度变化的关系^[12]。发现其深度在 20m 以上最大水平主应力方向在 $N8^{\circ}W$ 至 $N55^{\circ}W$ 范围内,而在更深处(30—240m 深),最大水平主应力方向为 $N26^{\circ}E$ 至 $N79^{\circ}E$,平均为 $N57^{\circ}E$,并且这一方向与威斯康星州的其它测点所观测的结果相一致。所以认为 30m 以下测得的最大水平主应力方向反映了现代区域构造应力活动。拉克鲁斯和雷利(De La Cruz R. V. and Raleigh C. B., 1972)发现在科罗拉多州兰吉里附近的测点上近地表(测量深度仅 2m)的应力方向与根据地震断层面解及现有的节理型式推导出的应力方向是一致的^[13]。斯巴(Sbar. M. L.)和恩格尔德(Engelder)等在加利福尼亚的帕姆代尔(Palmdale)地区也得到同样的测量结果,其测量深度仅 3m^[14]。中欧的大量测量资料表明,许多浅层应力测量所获得的应力方向与根据地震资料所推断出

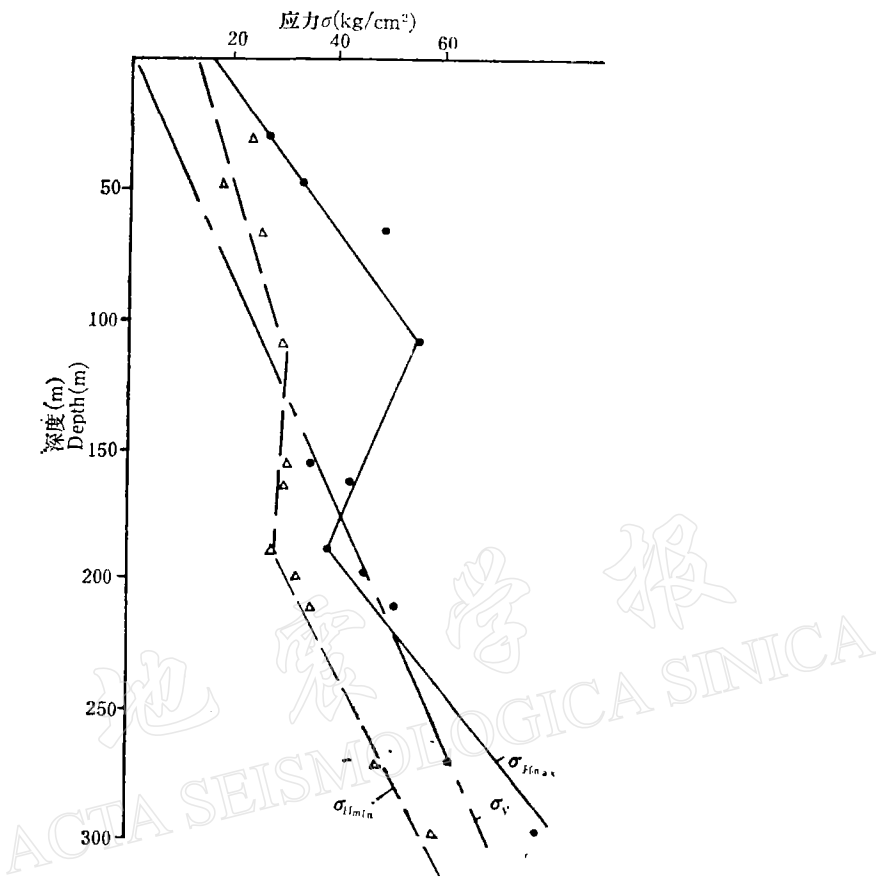
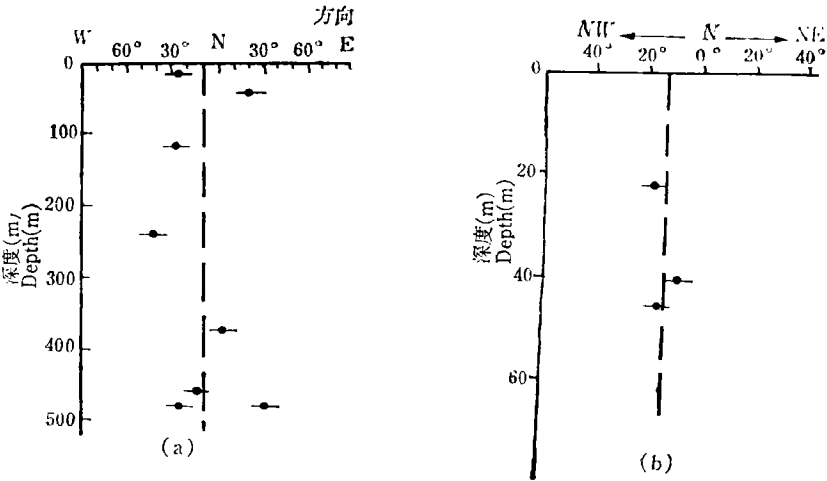


图 8 唐山地区地应力随深度的变化
Fig. 8 Variation of measured stress with depth in Tangshan area.

来的应力方向是一致的^[15]。从我们的测量资料来看，大量的浅部应力测量结果，在一个较大的区域内是相当一致的，基本可以反映区域应力场的图象。



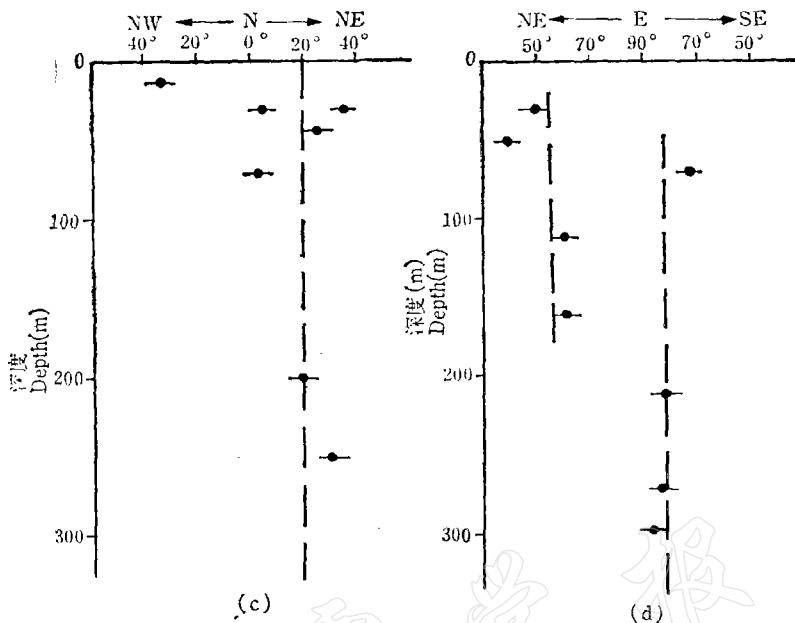


图 9 不同测点最大水平主应力方向随深度的变化

(虚线为最大主应力的平均方向)

Fig. 9 Variation of the maximum horizontal principal stress directions with depth

(Dotted line indicates average direction of maximum principal stress)

(a) 金川 (b) 北京密云 (c) 江苏新沂 (d) 唐山

我们在甘肃金川测量结果,发现应力值虽然随深度线性增加,但主应力方向变化不大,大约在 $N30^{\circ}W$ 至 $N20^{\circ}E$ 之间,始终保持在平均方向 $N10^{\circ}W$ 左右(图 9a)。此外,在滇西下关、江苏新沂、北京密云、河北易县等地不同深度的水压致裂测量中,都得到同样的结果[图 9(b),(c),(d)]。有兴趣的是唐山测点,其浅部与深部不仅应力值变化不同,而且最大水平主应力方向也不同。浅部 150m 以上,平均方向为 $N55^{\circ}E$;而 150m 以下的深部,为 $N82^{\circ}W$ [图 9(d)],而后一方向与 1976 年唐山地震震源机制求得的 P 轴方向更接近一致。

类似的情况海姆森等也曾观测到,认为可能是由于岩石中存在着残余应力的缘故^[16]。然而在唐山地区的其它测点的浅部应力测量结果,最大主应力方向多为近东西向,与本钻孔 150m 以下的测量结果是一致的,所以不能用残余应力来解释。造成这一现象的原因可能是由于 150m 以上的岩层中,北东向的一些构造较为发育所致。

四、断层附近的应力状态

了解断层附近的应力状态,不论对地震的成因和预测,还是对工程建设来说,都是极为重要的问题,尤其是活动断裂与现今构造应力场关系更为密切。不同的应力状态对应不同性质的断层活动。目前地应力测量资料多为浅部的,因此还很难对这一关系作出较具体较深入的结论。不过从少量的较深部测量资料,多数表现为铅直应力小于两个水平主应力来看,似乎应主要产生逆断层活动。但不同地区也不尽相同,如唐山地区较深部就表

现为走滑断层活动的应力状态。金川地区明显表现为 $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_{H_{\min}} > \sigma_V$ ，这与当地主要活动断裂呈现逆断层活动是一致的。此外，新沂、下关等地，虽然表现为 $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_{H_{\min}} > \sigma_V$ ，但 $\sigma_{H_{\min}}$ 与 σ_V 差别不大，如果再考虑更深的环境，很可能也会是 $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_V > \sigma_{H_{\min}}$ ，即走滑断层活动。

为了研究活动断裂附近应力的具体分布状况，佐巴克 (M. D. Zoback, 1980) 等在圣安德列斯断裂中部的两个地区，在垂直于断层的两个剖面上共布置了 7 个钻孔，每个钻孔深约 250m。测量结果表明：水平主应力和最大水平剪应力随离断层距离的增加而增大。以每个钻孔 200m 深度上的测量数据为准，最大剪应力值从距断层 2 km 的 9×10^{-1} MPa 增加到距断层 34km 的 5.3MPa^[17]。

从我们在郯庐断裂带附近的 7 个点的测量资料来看，其最大剪应力值与距断层的距离之间，也呈现类似关系(图 10)，只不过所有剪应力值相对要小一些，这可能与测量深度较浅有关^[18]。

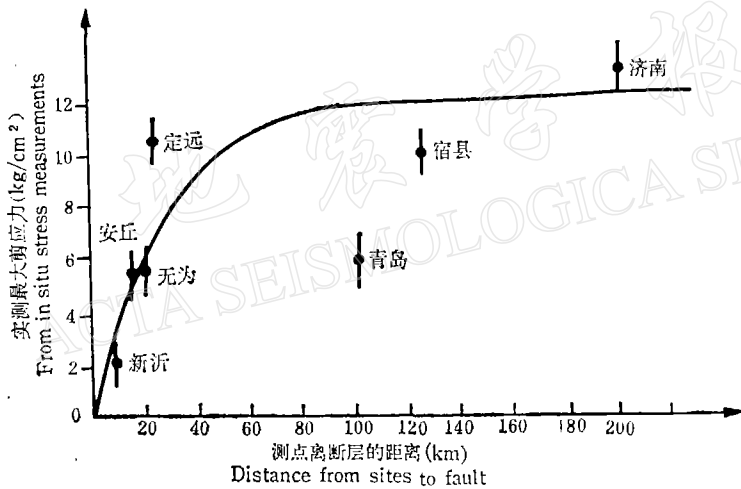


图 10 郯庐断裂带附近最大水平剪应力的分布图

Fig. 10 Distribution of maximum horizontal shear stress near Tan-Cheng-Lu Jiang Fault Zone

五、强震区的应力状态

对强震区地应力状态的研究，特别是对大震区震前、震时及震后应力状态变化的了解，将有助于我们认识地震孕育、发生、发展的整个力学过程。

通过我们对唐山、龙陵、海城等大震区震后的应力测量，发现大震后地震震中区测得的应力值比周围地区的应力值要低，震中外围区的最大主应力测值比震中区高一倍左右[图 11(a)]，离震中较远处测得的最大剪应力值为震中区的 2—3 倍[图 11(b)]^[19]。

田中豊认为：震后震中附近应力值比周围地区应力值低的测量结果，有力地证实了关于应力降的看法。根据资料，海城地震的主震应力降是 4.8×10^{-1} MPa，其前震平均应力降是 7.0MPa，余震应力降是 1.5MPa^[20]。假设图 11 中营口——海城的剪应力差就反映了应力降的话，那么根据应力测量所得出的剪切应力之差，计算出海城地震应力降为

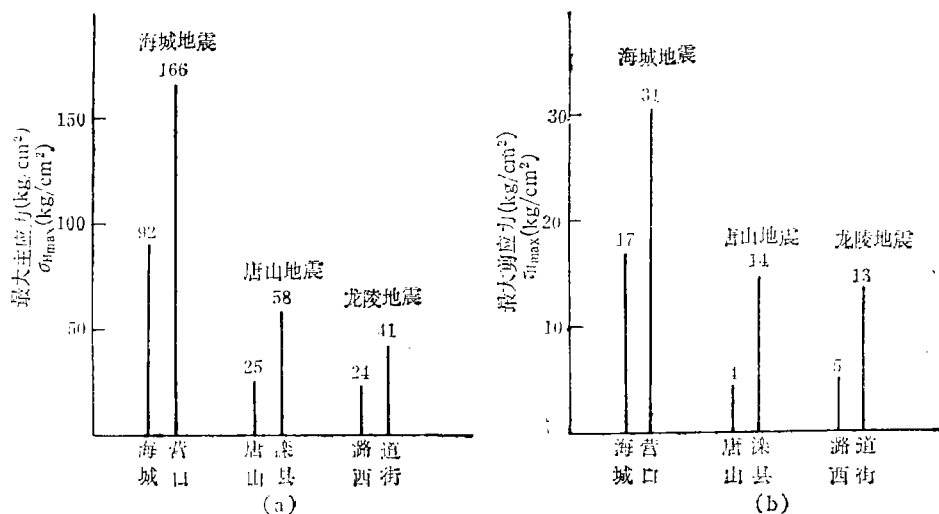


图 11 地震震中区及震中外围地区最大主应力值和最大剪应力值的对比

Fig. 11 Comparison of maximum principal stress magnitude with maximum shear stress magnitude in epicentral areas and surrounding regions

1.4MPa, 可见有比较好的一致性。

在一些大震发生后不久,测得的最大主应力方向与区域构造应力的方向有较大的偏离。经过一段时间后,最大主应力方向又逐渐经过调整,最后又与区域构造应力方向一致起来了。如1976年唐山地震后,在唐山凤凰山测得的最大主应力方向为 $N47^{\circ}W$,与区域构造应力场的方向——北西西到近东西向——有较大的偏离。1978年再次在同一地点测量,最大主应力方向变成了近东西向,为 $N89^{\circ}W$ 。邢台地震也有类似情况,1966年大震后测得的最大主应力方向为 $N54^{\circ}W$,1976年再次测量时最大主应力方向也变成了近东西向,为 $N87^{\circ}E$ 。如果假定这种变化是由于地震的能量释放所引起的,而经过一段时间的恢复和调整,主应力方向又与区域应力场方向趋于一致的话,那么震前震中区的最大主应力方向也应与区域最大主应力方向一致,即东西向;只不过在地震后都顺时针转动了大约 40° 。而在其它非地震区的测点有的也进行过多次重复测量(如北京市顺义县吴雄寺),但其最大主应力方向变化不大^[21]。

这种主应力方向的变化,在其它一些大震中根据不同的资料也有同样的显示。如1976年四川省松潘-平武7.2级地震,通过分析震源机制资料,发现 P 轴在1971—1974年为近东西向,临震前转为近南北向,震后又恢复到近东西向^[22]。

六、现今应力状态研究中有关问题的讨论

区域地壳稳定性直接与地震的形成、分布以及地震活动强弱有关,而现今应力状态是研究和确定区域地壳稳定性的主要因素和标志。

我国现今应力状态的分区和不同构造地区(包括活动断裂周围地区、强震地区)的应力大小、方向之显著不同,为这些地区不同的地震活动特征的成因以及板块运动驱动机制

等现代地球动力学有关问题的研究，提供了重要依据。目前我国不少学者已在这方面研究中取得了可喜的成果。

地应力测量和现今应力状态的研究在工程建设和资源开发中的作用日益受到重视，应用更加广泛。如在四川二滩工程^[23]和甘肃金川矿区^[24]以及一些重要油田地区进行的测量和研究，都在不同方面取得了显著实际效益。如金川矿区，由于进行了较详细的地应力测量，基本掌握了矿区的地应力状态，因此改变了巷道、采场的布设，解决了巷道严重变形和破坏的难题，从而加快了建设速度，取得了明显效益。

我国的地应力测量工作在六十年代初就已开展起来，现在已发展了包括应力解除法和水压致裂法等多种测量手段。但是这些工作大都是在各自的单位独自进行的、缺乏比较，而且至今几乎没有一种方法商品化，给地应力测量工作的开展造成了一定的困难。目前国际上，应力测量方法都在朝着单孔测量全应力，以及向更深的测量深度发展，水压致裂方法也在向轻便化、小型化方面发展。我国虽然在这些方面作了一些工作，但目前还存在着一定的差距。另一方面，目前几乎所有的应力测量方法都需要钻孔，花钱较多。因此，如何与工程和地质勘探结合起来，充分利用已有的钻孔，以及设计更简便、更省钱的应力测量方法是值得研究的。

附表 应力测量资料
Table Data of in-situ stress measurements

测量地点	测量时间 (年·月)	最大水平主应力 (kg/cm ²)	最小水平主应力 (kg/cm ²)	最大水平主 应力方向	资料来源及 测量方法	注
河北隆尧	1966.10	77	42	N54°W	应力解除法 李方全等 ^[21]	
顺义吴雄寺	1973.11	26	4	N73°W	同上	
顺义庞山	1973.11	4	1	N58°W	同上	55m(钻孔)
北京温泉	1974.8	36	22	N65°W	同上	
北京昌平	1974.10	12	8	N75°W	同上	
北京大灰厂	1974.11	21	9	N35°W	同上	
辽宁海城	1975.7	93	59	N87°E	同上	
辽宁营口	1975.10	166	104	N84°W	同上	
河北隆尧	1976.6	32	21	N87°E	同上	
滦县一孔	1976.8	58	30	N84°E	同上	
滦县二孔	1976.9	66	32	N89°W	同上	
顺义吴雄寺	1976.9	36	17	N83°W	同上	
北京温泉	1976.10	54	31	N67°W	同上	
唐山凤凰山	1976.10	25	17	N47°W	同上	
三河孤山	1976.10	21	5	N69°W	同上	
怀柔坟头村	1976.11	41	11	N83°W	同上	
房山歇息岗	1977.5	87	45	N50°E	同上	
河北赤城	1977.7	33	21	N82°E	同上	

续(附表)

测量地点	测量时间 (年·月)	最大水平主应力 (kg/cm ²)	最小水平主应力 (kg/cm ²)	最大水平主 应力方向	资料来源及 测量方法	注
房山歇息岗	1977.9	59	43	N59°E	同上	
唐山凤凰山	1978.4	23	11	N77°E	同上	
唐山凤凰山	1978.5	16	10	N71°W	同上	
河北滦县	1978.7	50	36	N82°W	同上	
山东济南	1979.7	32	6	N5°W	同上	
山东安丘	1979.7	31	20	N84°W	同上	
山东青岛	1979.9	26	14	N74°E	同上	
江苏新沂	1979.10	17	13	N25°W	同上	
安徽定远	1979.10	41	20	N50°E	同上	
安徽宿县	1979.10	47	27	N86°E	同上	
安徽无为	1979.12	11	0.02	N63°W	同上	
河北易县	1980.8	54	43	N66°W	应力解除法 李方全等 ^[23]	65m 方向为平 均值(钻孔)
河北易县	1980.10	72	41	N80°E	水压致裂法 李方全等 ^[23]	85m 方向为平 均值(钻孔)
湖北大冶	1965.8	230	130	N51°W	应力解除法 李方全等 ^[26]	150m(矿井)
湖北宜昌	1978.12	115	57	N73°W	应力解除法 孙世宗等 ^[1]	
云南下关	1976	11.7	8.3	N11°W	应力解除法 旭初等 ^[27]	
云南保山	1976	41	15	N3°W	同上	
云南潞西	1976	24	14	N82°E	同上	
河北潘家口	1980	48	28	N15°E	应力解除法地 震地质大队	
河北潘家口	1980	80	49	N19°E	同上	
河南安阳	1980	24	14	N62°W	同上	
河南焦作	1980	13	7	N18°E	同上	
山西绛县	1980	44	24	N22°W	同上	
山西平定	1980	22	11	N3°W	同上	
山西浑源	1980	15	10	N32°E	同上	
四川二滩	1981	249	132	N18°E	应力解除法 孙世宗等 ^[23]	平均值
甘肃青山堡		29	22	N59°E	应力解除法 ^[2] 廖椿庭等	
甘肃平口峡		84	30	N43°E	同上	
甘肃金川		42	35	N20°E	同上	44m(钻孔)
甘肃金川		198	108	N3°E	同上	375m(矿井)
甘肃金川		245	154	N25°W	同上	480m(矿井)
甘肃金川		500	334	N13°W	同上	460m(矿井)

续(附表)

测量地点	测量时间 (年·月)	最大水平主应力 (kg/cm ²)	最小水平主应力 (kg/cm ²)	最大水平主 应力方向	资料来源及 测量方法	注
甘肃金川		320	206	N32°E	同上	480m(矿井)
四川普格	1977.8	62	47	N54°W	应力解除法 董玉善等 ⁵⁾	
四川冕宁	1977.9	41	-39	N59°W	同上	
四川丹巴	1981.7	53.5	34.5	N24°W	同上	
四川雅江	1981.10	64.8	48.4	N56°W	同上	
四川宝兴	1982.7	87.5	61.3	N61°W	同上	
四川康定	1982.8	65.5	51.5	N86°E	同上	
四川康定	1982.9	61.5	30.6	N82°W	同上	
四川天全	1982.10	46.9	32.9	N69°W	同上	
四川雅安	1982.11	41.3	25.0	N45°W	同上	
云南会泽		122.0	95.8	N81°W	应力解除法 饶凯年等 ⁷⁾	
云南嵩明		90.4	51.3	N88°W	同上	
云南华宁		62.7	39.2	N65°W	同上	
云南弥渡		42.7	28.1	N78°W	应力解除法 饶凯年等 ⁷⁾	
云南新平		106.3	44.6	N31°W	同上	
云南建水		119.2	48.9	N21°E	同上	
云南墨江		123.0	72.9	N44°W	同上	
云南景谷		123.3	85.0	N13°E	同上	
江苏新沂	1981.10	16	15	N26°E	应力解除法 李方全等 ⁶⁾	45m(钻孔)
江苏新沂	1981.10	20	17	N3°E	同上	75m(钻孔)
江苏新沂	1981.11	107	80	N30°E	水压致裂法 李方全等 ⁶⁾	254m(钻孔)
河北唐山	1982.10	78	58	N86°W	水压致裂法 李方全等 ⁷⁾	296m(钻孔)

注：压应力为正，张应力为负。未标明测量深度的均为地表下 30m 以上的浅部应力测量结果。

- 1) 孙世宗、李立球、黄陵背斜及其周围地区构造应力场分析，地震地质参考资料，国家地震局地震地质大队，1979 年，1 期。
- 2) 廖椿庭、施兆贤、李庚辛、朱英枢、曾宪启、张之衡等，金川矿区原岩应力测量及构造应力场的研究，冶金部金川资源综合利用科研项目交流鉴定会议，1981。
- 3) 董玉善执笔，四川地震局地震地质三分队，川西地区地应力测量，四川地震，1983 年第 2 期。
- 4) 饶凯年执笔，根据地应力绝对值测量结果探讨小江断裂带北段应力场，地震地质报告集第一集，云南省地震局综合大队地质队，1980。
- 5) 饶凯年执笔，红河断裂带两侧的浅部地应力测量，地震地质报告集第 2 集，云南省地震局综合大队地质队，1982。
- 6) 李方全、翟青山、毕尚煦、刘鹏、张钧、赵仕广，水压致裂法原地应力测量及其初步成果。
- 7) 李方全、张钧、刘鹏、毕尚煦、毛吉震、赵仕广，唐山地区深部应力测量。

参 考 文 献

- [1] Haimson, B. C., The hydrofracturing stress measuring method and recent field results, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **15**, 167—178, 1978.
- [2] Hast, N., The state of stress in the upper part of the earth's crust, *Tectonophysics*, **8**, 169—211, 1969.
- [3] Rummel, F., H. J. Alheid, Hydraulic fracturing stress measurements in SE-Germany and tectonic stress pattern in central Europe, *proc. Int. Res. Conf. on Intra-Continental Earthquakes*, 33—65, Lake Ohrid, Yugoslavia, 1979.
- [4] Zoback, M. L., M. D. Zoback, State of stress in the conterminous United States, *J. Geophys. Res.* **85**, 6113—6156, 1980.
- [5] Tanaka, Y., Y. Oka, Generation mechanism of rock bursts and waterinduced earthquakes under the tectonic stress field, *Rock Mechanics in Japan*, **3**, 71—73, 1979.
- [6] 李钦祖、靳雅敏、于新昌, 华北地区的震源机制与地壳应力场, *地震学报*, **4**, 55—61, 1982.
- [7] 郗家全、时振梁、汪素云、环文林, 中国及邻区现代构造应力场的区域特征, *地震学报*, **1**, 9—24, 1979.
- [8] Ranalli, G. Geotectonic relevance of rock stress determinations, *Tectonophysics*, **29**, 49—58, 1975.
- [9] 陈家庚、曹新玲、李自强, 水力压裂法测定华北地下深部应力, *地震学报*, **4**, 350—361, 1982.
- [10] Brown, E. T., E. Hoek, Trends in relationships between measured in-situ stress and depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **15**, 211—215, 1979.
- [11] Jamison, D. B., N. G. W. Cook, Note on measured values for the state of stress in the earth's crust, *J. Geophys. Res.* **85**, 1833—1838, 1980.
- [12] Haimson, B. C., Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* **17**, 81—88, 1980.
- [13] De La Cruz, R. V., C. B. Raleigh, Absolute stress measurements at the Rangely anticline, Northwestern Colorado, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **9**, 625—634, 1972.
- [14] Sbar, M. L., T. Engelder, R. Plumb, S. Marshar, stress pattern near the San Andreas fault Paimdale, California from near surface in situ measurements, *J. of Geophys.*, **84**, 156—164, 1979.
- [15] McGarr, A., N. C. Gay, State of stress in the earth crust, *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, **6**, 405—436, 1978.
- [16] Haimson, B. C., A comparative study of deep hydrofracturing and overcoring stress measurements at six locations with particular interest to the Nevada test site, *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, Academic Press, Washington D. C.: 107—118, 1983.
- [17] Zoback, M. D., H. Tsukahara, S. Hikman, Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas fault: implications for the magnitude of shear stress at depth, *J. Geophys. Res.*, **85**, 6157—6173, 1980.
- [18] 李方全、孙世宗、梁海庆, 郯庐断裂带附近应力测量结果的讨论, *地震科学研究*, 1983, 3: 16—19.
- [19] 李方全、王连捷, 华北地区地应力测量, *地球物理学报*, **22**, 1—8, 1979.
- [20] 田中豊、斋藤敏明, 応力解放法による地殻応力の測定, *地球*, **2**, 630—647, 1980.
- [21] 李方全、孙世宗、李立球, 华北及郯庐断裂带地应力测量, *岩石力学与工程学报*, **1**, 73—86, 1982.
- [22] 成尔林、李桂芳、陈和川, 1976年四川省松潘——平武7.2级地震前后主压应力轴的方向特征, *地震学报*, **4**, 136—148, 1982.
- [23] 孙世宗、李立球、李方全, 二滩电站的地应力测量, *水文地质工程地质*, 1984, 2: 7—9.
- [24] 廖椿庭执笔, 矿区之地应力测量与矿山设计, *地质力学文集*, 第三集, 137—147, 地质出版社, 1979.
- [25] 李方全、李延美、王恩福等, 水压致裂法原地应力测量试验, *地应力研究文集*, 9—17, 地震出版社, 1984.
- [26] 李方全、廖椿庭, 地应力测量实例, *地质科技*, 1973, 3: 67—73.
- [27] 丁旭初执笔, 滇西地区地应力绝对值测量及龙陵地震区地应力场初步分析, *地质力学文集*, 第三集, 123—129, 地质出版社, 1979.

THE PRESENT STATE OF STRESS IN CHINA AND RELATED PROBLEMS

LI FANGQUAN AND LIU GUANGXUN

(*Seismogeological Brigade, State Seismological Bureau*)

Abstract

The present state of stress in China and concerned problems are discussed and analysed in this paper based mainly on in situ stress measurements.

1. Regional characteristics of the present state of earth's stress of China

Run through by the Taihangshan mountain North China is separated into two distinct regions: first, east of the mountain, the compressive principal stress is nearly in the E W direction; second, west of the mountain, the direction is about N-S. South China is marked by stress orientation predominately in the N W direction, and the orientation of stress in the Northwest China is in the N-N-E direction. In Southwest China, however, the stress pattern is more complex: the orientations of compressive principal stresses differ from each other in various regions. On the whole, the relative magnitudes of principal stress in China tend to be smaller in the east than the west.

2. Variation of state of earth's stress with depth

In most areas the horizontal principal stress is larger than the vertical, though exceptions to this pattern caused by different tectonism are occasionally seen. The ratio K of average horizontal stress to vertical is somewhat scattered ranging from 0.5 to 4 down to a depth of 100 m., but there exists a linear relation between depth and K of 0.5—2 below the depth of 100 m. Available data taken recently in China all indicate that generally the direction of horizontal principal stress varies little with depth except for the Tangshan region where not only the orientation but the magnitude of the horizontal principal stress is distinctly different above and below the depth of 150 m.

3. The state of stress in the vicinity of faults

As the state of stress is different in different regions, so is the behaviour of active faulting. In Tangshan region the vertical principal stress is moderate (i.e. $\sigma_{H_{max}} > \sigma_v > \sigma_{H_{min}}$), a condition propitious to the development of strike slip faulting; whereas if the vertical stress is the minimum principal stress (i.e. $\sigma_{H_{max}} > \sigma_{H_{min}} > \sigma_v$), it is prone to induce thrust faulting as in the Jinchuan region of Gansu province. The in situ stress measurements carried out at the Tancheng-Lujiang fault show that the nearer to the fault the less is the shear stress.

4. The stress state in regions of strong earthquakes

Following the stress measurements in the regions of strong earthquakes such as Tangshan, Longling, Haicheng and Xingtai etc. all results show that the stress magnitude measured in the epicentral locality immediately after a major earthquake is distinctly less than that measured in surrounding regions and the direction of the maximum principal stress is found to deviate from the orientation of the regional principal stress.

5. The relationship between the state of earth's stress and crustal stability is briefly discussed in the paper as well.