

城市活断层探测技术的发展趋势

汪一鹏

随着二十世纪九十年代后期美国洛杉矶北岭、日本阪神等一系列城市地震的发生,世界各国政府越来越清楚地认识到城市活断层探测与研究的重要性和紧迫性,相继实施了大城市减灾项目,试图通过城市及其邻近地区有潜在发震危险的活断层探测,更合理地进行城市规划和抗震设防,减轻城市可能遭遇的地震损失。

1994 年美国加州洛杉矶北岭地震后,美国政府立即组织在加州及其邻近海域开展大规模的城市活断层探测工作。1999 年 10 月美国加州赫克托迈发生 7.1 级地震后,为了更准确地给出洛杉矶地区的活断层分布图,又在 93 个不同地点实施了人工地震探测,以确定未来可能威胁到洛杉矶市直下型地震的震源位置。

1995 年阪神地震后,日本政府重新审查并修改了原有的防灾对策,加强了内陆活断层的研究,对全国活断层开展地球物理详查和人工探测等工作。为此,日本政府已在原有投入的基础上追加了 67.9 亿日元,作为 1995-2000 年期间活断层详细调查的补偿费用,对日本八个地区主要活断层进行紧急调查研究;并制定了首都圈、大阪、京都等大城市地区隐伏活断层的详细调查研究计划。

1999 年 9 月中国台湾集集大地震发生后,鉴于活断层对地面建筑物的毁坏,台湾"国科会"决定用 5 年左右的时间,投资 15 亿新台币,实施"地震与活断层研究计划",对集集大地震的发震断层以及嘉义—台南、新竹—苗栗等地区 and 台北市的活断层进行探测研究。

1998 年 9 月,国际科学联合会等国际组织启动"特大城市防震减灾行动计划",以加强世界大城市之间减轻地震灾害的能力。目前,该计划确定第三届国际地震与特大城市研讨会将于 2001 年在中国北京召开,表明国际社会已关注到中国经济高速增长过程中可能遭遇的城市地震灾害和中国政府致力于减轻地震灾害的努力。

下面比较详细地以日本为例介绍活断层探测技术的发展动向。

1995 年阪神地震后,日本从政府部门到地学界都受到很大震动,决意推进地震基础研究其中活断层调查与探测成为工作重点之一。他们在以下几个方面展开了新一轮工作:

一、测绘详细活断层图

日本地震学界认为,阪神地震之所以未作预报与对活断层的调查研究不够有关,因此,自 199 年开始,日本开始了新一轮的活断层调查,投资甚巨,规模遍及日本全境。

对每个活断层的位置、错动量(速度少)、错动方向寄信息进行精密地(比例尺 1/5 万或以上的精度)测绘,并绘成详细的活断层图是十分必要的。

在地表断层活动时,位其正上方的房屋或构筑物因断层错动而受到破坏。有了活断层图就可以提供预防破坏的基础资料。为此,日本制定了《活断层法》。此法有在离断层线一定距离的范围内不许建设或建设时必须采取一定对策的规定。但这项规定,是否包括个人住宅还有争议。而对于原子能发电站、大水库等公共性高的建筑物、易被破坏的危险性构筑物,必须依法给以必要的规定和限制。

在活断层图测绘工作基础上,加强对活断层的基础研究,利用活断层调查所取得的实际材料来评价地震规模(震级)及预测地震发生时期。评价断层发生地震规模的指标是地震矩。地震矩即:

$$M_0 = mDS,$$

m 为地壳的剪切模量, D 为一次地震时产生的滑动量, S 为断层破裂范围的面积。

若能知道活断层历史上发生地震的 D 和 S , 则可评价出该断裂未来可能发生的地震规模。一般地用地形、地质学方法直接决定 D 和 S , 进而评价地震规模的方法称为"正攻法地

震规模评价”。应用从历史发生的地震得到的经验法则，同时也经常使用从断层长度 L 推定地震规模，这叫做“经验法地震规模评价”。

预测活断层未来何时活动乃至发生地震所必须的参数是断层的活动间隔和最新的活动时期。要弄清楚这两个参数最有效的方法是用深槽掘削法进行古地震学的调查。

日本活断层研究专家松田时彦将断层最新活动时期 T 和平均活动间隔 R 之比 T/R 称为“地震后过程危险率”。凡这个值达到 0.5 以上的断层，则应视它为未来发生地震概率高的“要注意的断层”。松田做这项研究时，当时还没有槽沟掘削调查的资料，所以，平均活动间隔 R 是根据断层平均错动速度和历史上发生地震断层的资料通过经验法则推定的。另外，最新活动时期 T 是用历史资料来确定的最小值。

日本地质调查所和科技厅在兵库县南部地震后开始的活断层地震危险性评价项目，基本上也是基于这种思路进行的。但是，平均活动间隔 R 和最新活动时期 T 是通过探槽调查资料确定的。在这一点上讲，就是属于所谓的“正攻法地震发生概率评价”。为了进行正攻法的地震发生概率评价，单纯用槽探调查资料还是不够的。鉴于目前现状，今后肯定还要继续应用这种方法进行评价；但要注意量化评价地震发生间隔的误差。

与板缘地震相比较，驱动日本内陆活动地层的机制较复杂。地震发生间隔较分散。今后应着重解决槽探调查的技术性问题和量化评价地震发生间隔问题。

日本通产省地质调查所在 1995 年阪神地震后加强了活动断层的调查，首先对发生阪神地震的野岛断层进行了探测，并在 1998 年 11 月东京召开的第 2 次活断层调查成果报告会上发布了神户地区活断层调查结果，2000 年 1 月又在阪神地震震中区北淡町召开了“新千年活断层研究”的国际学术讨论会，向世界介绍日本活断层研究进展，尤其是野岛断层的研究成果。

在进行活断层探槽的同时，日本开始采用所谓“大地切片机”的新式装备跨过活断层采出几平方米的土层切面，以研究最晚地质时期中活断层运动状况、期次，发现全新世古地震事件，作为与钻探、槽探相配套的技术手段之一。

二、活断层钻探

1995 年阪神地震以后，日本在两条活断层上进行了专门性的钻探，目的不尽相同，技术方式也稍有差异。

富士川断层是组成菲律宾海板块与欧亚板块边界的一条重要活断层。在它的下降盘一侧打了 3 个钻孔，孔深 35~40m 之间，终孔见到火山岩，在钻孔剖面的分析对比中发现了 6000 年间堆积的细粒沉积层中埋伏着 5 层崩积楔，其代表的 5 次古地震事件平均间隔为 1500 年。其中 4 次事件与以前在槽探中发现的古地震事件是一致的。

另一类钻探是布置在发生阪神地震的野岛断层上，为了研究断层运动力学问题，钻孔穿过断层带并连续采样，作 x 线分析、化学、岩矿分析、及显微构造分析，了解断层带的物质组成与构造特征及它们随时间的变化。日本过去这方面工作开展较少，他们计划在其他断层上也要开展此类研究，希望详细了解断层破碎带因地震而破碎，随时间而固结，再次发生地震时又发生变动这样的断层运动的反复过程。

三、深海钻探与俯冲带监测

板块向日本列岛下俯冲，这里地震活动很活跃，影响社会生活，在大地震发生的现场，俯冲是怎样进行的、板块如何变形的，这些尚无定量的结果。为了给出定量结果，必须在现场监控海底下进行中的各种各样的尺度的变化过程。东京大学地震研究所现已在釜石冲海底内铺设了海底地震、海啸观测电缆，进行常时检测。从 1999 年 6 月—8 月，它作为国际深海钻探计划(ODP: Ocean Drilling Program)的一环，通过探海研究钻探在东北近海海底钻探，在地壳中设置观测仪器。这次观测仪器设置以高精度观测的长期持续为目标。

板块运动是怎样进行的?在地震发生的现场情况如何?地震以怎样的间隙性发生的?要回

答这些问题，在板块每年约 10 厘米高速俯冲着的东北近海进行海底钻探，在钻孔内埋设地形变观测站就是这由东京大学、美国卡内基研究所等共同实施这次钻探研究。

在三陆冲，限于北纬 38 度到 41 度之间，在过去 30 年间发生 7 次像三陆远海 7 级地震。沿东经 143 度 20 分，在北纬 39 度的南和北约 50 公里间隔，在日本海沟两侧水深 2600 米和 2250 米两处，从海底向下钻探约 1.2 公里。北侧是经常发生地震的地区，南侧是地震不活跃地区。钻孔内设置应变仪、倾斜仪、地震仪等观测仪。在它们 10 公里正下方处于俯冲板块的边界。

应变仪原理和陆地上的体积应变仪虽然相同，但由于在板块边界附近，希望能捕捉到 3 级以下小震造成的变化。地震仪有宽频带地震仪两台，1998 年设置在东京大学地震研究所的锯山观测所内，目前，正作海底设置的最后准备。

四、首都圈广域地形变观测计划

日本首都圈在 1923 年关东地震后又经历了几十年岁月，一般认为在其间地壳正在积累着能再次引发大地震的应力。邮政省通讯综合研究所基于过去开发的宇宙测地技术和国际实验等成果，围绕首都圈在 4 处配备了精密测位系统，实施广域地形变观测。地下板块构造复杂，而且是人口密集地，观测难度大。目前在首都圈进行"首都圈广域地形变观测计划"，观测系统主要由 VLBI(Very Long Base line Interferometre，即超长基线电波干涉计)和 SLR(Satellite Laser Ranging，卫星激光测距)组成。由于该系统可将高新技术提供给连续观测的实际应用上，在实现观测和数据处理省力化、自动化的同时，还取得高信赖度信息的系统。

VLBI 是在相隔很远的 2 处的电波望远镜(天线)同时接收从类星体等天体发射出的电波，通过测定当时接收信号时差即延迟时间，精密测定连续两天线间的长度变化的技术。这里电波到来方向可由观测到的电源波的顺序求得。

SLR 是搭载特殊的反射镜的测地卫星，通过测量从地上发射的光波脉冲的往返时间和精密测距，决定卫星轨道，以此为基准决定地上 SLR 站的位置。

这样的观测系统在首都圈的 4 处(东京都小金井市、茨城县鹿嶋市、神奈川县三浦市、千叶县馆山市)设置，1995 年已设置成功。

VLBI 是用宇宙发出的电波测定位置，而 SLR 则是利用卫星对光进行测定。另外，VLBI 是一种接收信号的被动型的，而 SLR 是一种发激光的能动型和可对照的技术。但是二者均是极其精密的计测时间的技术，由于它是作为一种标准而使用电波和光的，所以可以同时计测代替光速造成的移动距离的计测。

另外，国土地理院在全国布设的 GPS 观测点中，有 2 点即小金井、鹿嶋观测台院内进行观测值的比较分析。

在这些系统之间进行着精密测量，开始对独立的地形变观测结果进行比较。这样，在推进首都圈精密地形变观测的同时，也进一步为提高技术水平开展必要的研究。

五、日本大城市地区综合地球物理探测计划

在巴西里约热内卢市召开的第 31 届国际地质大会上，见到了东京理工学院衣笠善博教授展板上介绍的该计划要点，现介绍如下。

鉴于 1995 年阪神地震中大城市范围内的重大损失是由地下地质构造造成的，日本政府提出了在主要大城市地区揭示地下地质构造的新计划。该计划的核心问题是得到直达盆地或平原基底的三维 S 波速度结构，所谓地震基底是指 S 波速超过 3km/sec 的刚性岩体。

该计划的第一个 3 年期间将着力于研究确定适用于人口稠密、高地面噪声的大城市地区探测方法的最佳组合。这一期的靶区选中了三地:关东平原、浓尾平原和京都盆地。第一期完成后，还将扩展到日本其他大城市地区。

在前三年中，地震折射调查将用于探明地震基底及深部的 P 波速度，地震反射剖面将揭示沉积盆地本身的 P 波速度结构。在盆地的浅部用地震反射观测得到 S 波速度结构，对

于较深盆地的 S 波速度结构，将采用地脉动台阵技术(microtremor array technique)。

计划还强调了钻孔资料的重要性，地震探测资料要与钻孔资料结合起来作分析。

鉴于大城市地区地震探测受到环境条件的干扰影响严重，近两年，日本地震学家已在京都盆地开展大城市地震探测各种方法的适应性、局限性试验研究，利用不同方法、不同振动源、不同处理技术作探测结果的对比分析，如地震反射、地震折射、垂直地震反射(地震雷达)、声波测井、自相关法和频率一波数法等，来寻找出最佳的探测方法或方法组合。

综上所述，近年来世界上发生的几次破坏性地震给予地震科学界巨大的冲击与推动。其中一个重要的课题是活断层与隐伏活断层的研究，尤其是大城市及其邻近地区，隐伏活断层埋藏着对大城市巨大破坏的潜在威胁，也迫使多地震之国纷纷加大投资，进行多途径、多学科的探测、监测与研究。美国近年来发生的几次破坏性地震并不是沿着圣安德列斯主干断裂发生，而是在它旁侧的一些不被人看重的断裂与隐伏断裂上，这就要求更细致地了解一个区域内的活动构造的整体结构与运动图像，为此他们在洛杉矶盆地及其邻区开展了新一轮的详细地球物理探测。日本阪神地震同样大大推动了日本大城市所在平原、盆地地区兴起新一轮综合地球物理探测计划。世界上的这种发展趋势值得引起我国地震学界的重视，我国许多大中城市位于 VII 以上高烈度区，已知不少城市范围内有晚更新世晚期以来仍在活动的断层或隐伏断层，因此，在中国开展大城市活断层探测与研究是一项十分紧迫的工作，是地震工作者保卫人民生命财产安全与社会可持续发展的一项义不容辞的任务。

城市活断层探测技术设计和技术难点

一、关于项目性质

"大城市活断层探测与地震危险性评价"项目是国家计委基本建设经费投资的国家级工程建设项目，它要求面向社会需求，产生重大社会经济效益，其工程产出必须能直接服务于社会，具实用性和可操作性。这是每一位参与本项目工作的人员必须首先建立的观念。习惯于做科研项目的同志要实现观念的转变，从做工程设计开始就要关注可实现的工程目标、每项投资的可行性与合理性，也要熟悉工程建设项目管理的一整套咨询评估、质量监督、财务审核、工程招标与验收等制度。

二、关于工程总体目标

中央领导人的讲话已经为本项目指明了项目主攻方向。江泽民总书记指出"西部大开发建设地区要注意避开活断层"。要"避开"，就得知道活断层在哪里?怎么分布的?不是一般地知道，而要精确地了解，这样才能制定如何避开的具体方案。温家宝副总理的讲话又把总书记的指示进一步具体化了，他说："从土耳其、台湾地震造成的损失分析来看，科学规划城市建设、保证城市安全、抗御地震灾害迫在眉睫，首先要加强探明城市地下活动断层的分布及其危害性评估工作。"探明地下活断层的分布是基础，是前提，但为了有效抗御地震灾害，必须完成活动断层未来的地震危害性评估。这就点明了这个项目的总体目标。

三、项目的三个科学层次、五个工作阶段

虽然本项目列入工程建设项目，但它又不同于一般的基本建设项目，它含有较多的科学研究与技术攻关的含量。因此，要从科学内涵上对项目所面对的科学问题作一个解析。

本项目包含了下列三个层次的科学问题：

第一，活动断层的空间精确定位与定年：由于大城市往往位于盆地与平原区，城市下的活动断层大多是被第四纪松散沉积物覆盖的隐伏活动断层，就带来了精确定位与定年的难度。活动断层的空间定位是本项目的基本目标，是城市规划与防震减灾首先要了解的问题，是完成整个项目的基础。从科学技术上说，是主要通过地质、地球化学、地球物理途径查明活动断层的静态形态学面貌。活动断层的定年是其精确空间定位的一种转化，这种转化是通过在探测空间定位的同时适当采样测定同位素年龄来完成空间到时间的转换的。所以，先有定位，才有定年，一主一次；不过，定年又很重要，没有定年，活断层就失去了"活"的内涵，其他的工作都是白做的。

第二，活动断层的地震危险性评价：城市下的活动断层一旦发生地震会对城市产生多大的危害，显然跟地震的地点、震级相关，因此作活动断层的危害性评价，必须经过的一个环节是先做活动断层的地震危险性评价。即要回答有关活动断层或断层某段落的未来可能发生地震的震级上限及发震概率。而要作活动断层的地震危险性评价，光知道活动断层的静态形态学特征是不够的，必须了解活动断层的最新地质时期到现今的运动学特征及其地震习性，也就是活动断层的性质、活动方式、速率、古地震事件序列及强震复发间隔、最晚一次强震事件的年代及位移、破裂分段特征等。所有这些数据的获得不太容易，需依靠足够且细致的地质、钻探、槽探、物化探及测年工作。但是，在有的情况下，在有的地区，有了这些还不足以满足地震危险性评价的需要，因为大量研究结果表明，地壳表层的活动断层与震源深度的地壳构造之间存在着各种类型的复杂联系。光把浅表搞清楚了，对深处一片黑暗，仍然不能作出合理的地震危险性评价。因此，深部发震条件的探测就应当给予考虑、安排，是本项目科学技术上很需要的一个环节。当然，深部探测是一项花钱费力、要求条件又高的大工程，在项目具体实施中要从实际出发统筹考虑、恰当安排的。

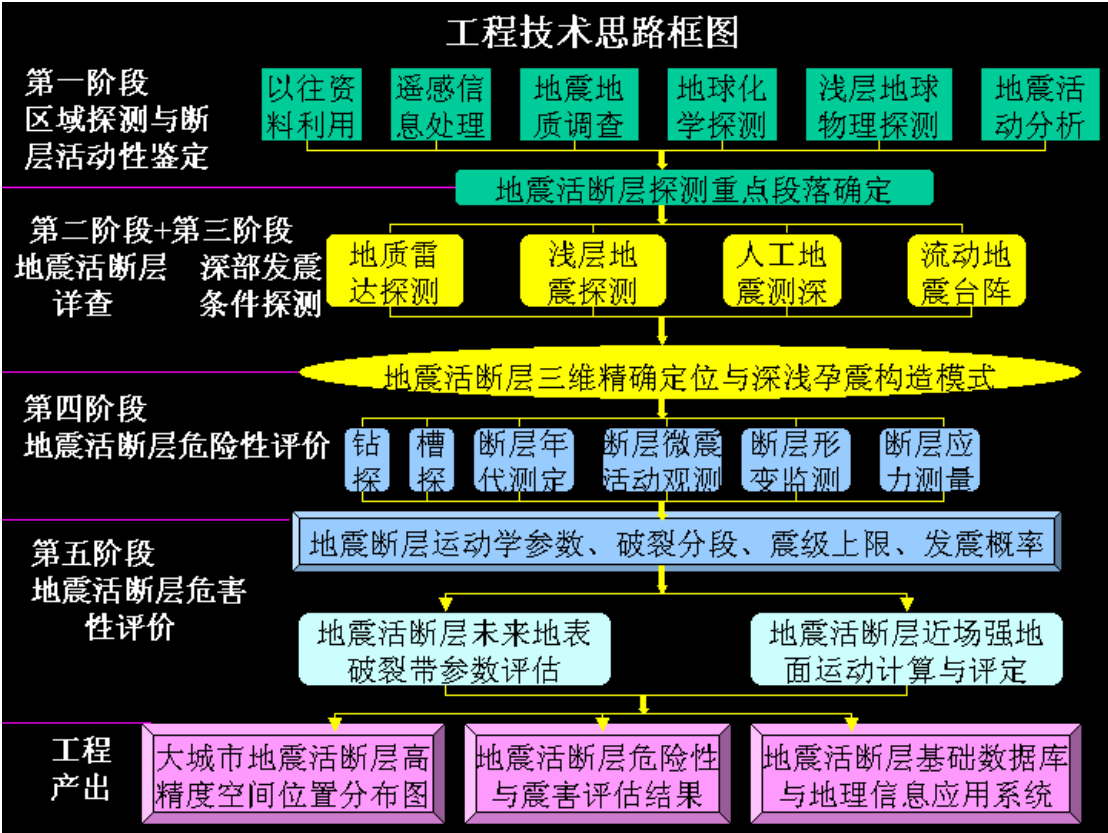
第三，活动断层的地震危害性评价，地震危险性讲的是活动断层本身的地震潜势，是活

动断层的固有属性。危害性则是预测的地震一旦发生的情况下对城市所在地面的破坏程度。这种破坏主要以两种形式表现出来，一种是地震地表破裂带，也可称地面地震断层，所造成的地面变形，当然要有一系列参数来定量地表征它的破坏程度与性质，如地表破裂带长度、宽度、破裂面倾角位移方式与位移量等；另一种破坏来自于地震断层附近特别强的地面运动，在 1999 年台湾 9.21 集集地震中，车笼埔发震断层的上冲盘(东盘)北段曾记录到超过 1g 的地面水平峰值加速度，造成上冲盘断层附近相对被动西盘较强的破坏。至于地震地表破裂带与近断层强地面运动定量参数的求取则可以由经验性的关系式或者建立一定的理论模型去计算。

在实施一个城市地震活断层的探测工程中，是不可能对城市及其周边地域内的活断层或怀疑活断层一律地进行空间精确定位与定年的，这不可能也不必要，经费、人力、时间都不许可，因此，必须有一个从粗到细、由浅入深的筛选过程，通过大面积的较粗糙的探测工作把那些活动时间新、规模大、地震危险性人的活断层或活断层段落挑出来，作为精查的对象，这就很自然地形成了两个工作阶段。深部发震条件的探测是一个相对独立、自成体系的工作环节，所用技术途径也不同于其他环节的工作，因此也构成一个工作阶段。因此，在本项目整个工作流程中，可以划分为以下五个工作阶段：

- ①区域探查与断层活动性初步鉴定；
- ②地震活断层的详细探测；
- ③地震活断层深部发震条件探测；
- ④地震活断层的危险性评价；
- ⑤地震活断层的危害性评价。

现将本项目五个工作阶段的主要工程内容、主要目标及工程产出归纳成以下工程技术思路框图(框图附后)。



四、科学技术难点

大城市地震活断层探测与地震危险性评价是一项全新的工作，没有现成的路子可走，国

外也是在探索、实践之中。值得注意的是，日本大城市地区综合地球物理探测计划的第一期将花3年时间去找到探测城市下活断层的最好的方法组合。他们是充分地注意到了城市地区活断层探测的科学技术上的难度的。实际上，在前面所谈到的三个科学层次、五个工作阶段中包含着许多科学上或技术上的难点，如：

- 隐伏活断层的三维精确定位；
 - 隐伏活断层的准确定年；
 - 活断层深浅孕震模式的建立；
 - 隐伏活断层的破裂分段；
 - 活断层的完整强震序列与强震复发模型的确定；活断层系统运动学参数的获取；
 - 活断层或活断层段震级上限的确定；
 - 活断层未来强震地表再破裂规模的评定；
 - 活断层未来强震中近断层强地面运动的计算；
- 等等。

以上罗列出的问题并非全无办法，这正是目前地震科学中正在开展研究的一些前沿性课题，实际上也摸索出了一些经验、理论、模式与技术路子。但困难在于各个城市地质环境条件千差万别，我们要探索的不单是地表出露的活断层，而大多隐伏地下，这就要求我们在实施探测工程过程中要在科学技术上进行创新与开拓。

困难还来自于城市环境，这对于地球化学探测与地球物理探测带来许多干扰与限制，要研制与引进高信噪比、频带宽、主频高的仪器。要试验不同的探测方案，要研发适用的软件。

城市中建筑物密集，天然地表缺少，可供地质地貌调查、钻槽探工程、物化探的施工地少，这与活断层探测的高精度要求形成一对矛盾。

但是，面对这些困难，我们应该牢记一条历史规律：社会需要是推动科学技术发展的巨大动力。我们正是要在克服各种困难完成本项目的规定目标、服务于社会需要的同时，把地震科学技术也推进到一个新的发展阶段。

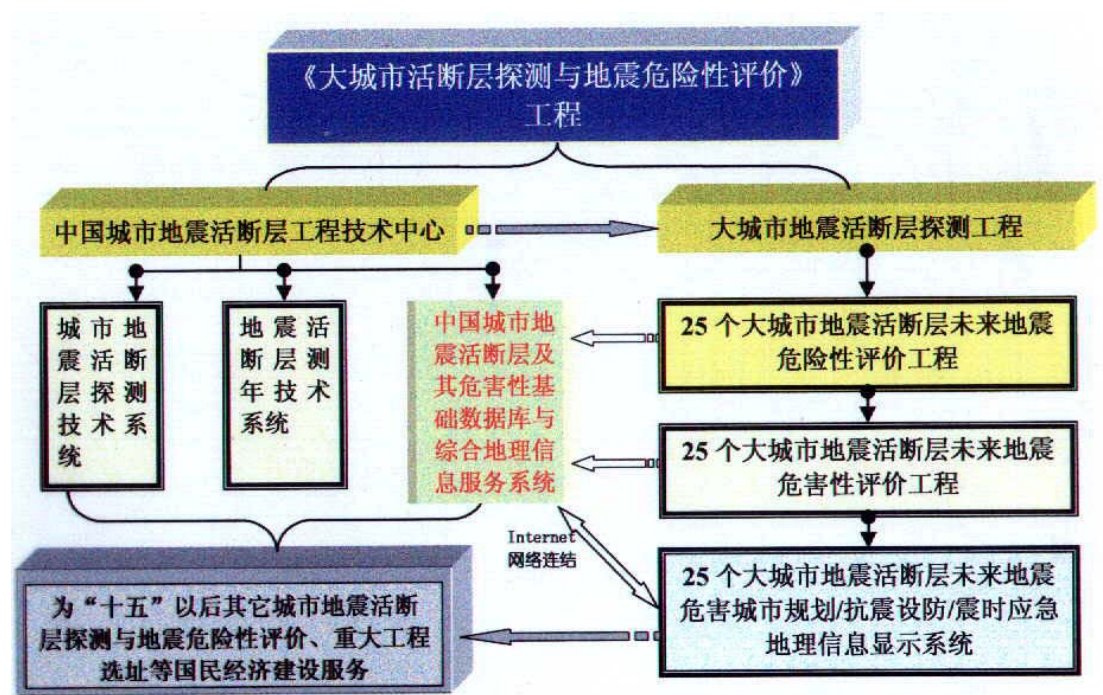
五、几个值得注意的问题

1.硬件、队伍与探测工程：要完成本项目，前提条件必须有人与物，即硬件与队伍。硬件方面，中国地震局及下属各单位有一定基础，但针对本项目特殊的工作条件及工作量，显然是远远不够的，因此，要研制、购进大量真正有效的新设备，主要增强地球物理、地球化学探测系统与测年系统，当然也可以包括钻探、槽探及大地切片机等必要设备。另一方面，也不能各个单位贪大求全、重复购置。要充分发挥地震系统内部，也包括系统外部的探测装备的效能，以全国一盘棋的精神来运筹装备问题，避免给国家造成浪费。

至于队伍，应该强调两点，一是项目要求多学科联合攻关，要有地质、地球物理、地球化学、工程地震、大地测量及计算机技术等各方面人员的参与和相互理解、支持；二是要有中国地震局直属单位、各省、自治区、直辖市地震局与地方政府的密切三结合来实施探测工程。上海市地震局提前开展的上海市隐伏活断层探测项目的实践经验告诉我们，离开地方政府的充分理解与支持、配合，市区的探测工作将寸步难行。

最后，必须实现硬件与队伍的某种形式的结合、这就是建立中国城市地震活断层工程技术中心的问题，这是完成本项目的需要，更是中国地震局长远事业发展的需要，它主要包含两个技术系统，即城市活断层探测技术系统和地震活断层测年技术系统，两个系统下还包括若干子系统。这些技术系统与探测，程及工程产出的关系见下框图。

2.工程产出：本项目的宗旨是面向社会，减轻地震灾害损失。要让探测成果容易为社会与政府理解、接受并使用，这是工程产出首先要考虑的。活断层探测基本上是一个空间问题，因此，地理信息系统的使用应该从头贯穿到尾，借助于现代计算机技术，将探测结果做成基础数据库，将直接可用于城市规划、抗震设防及灾害应急对策的地震危害性评价结果形象鲜明地在与政府有关部门相连接的计算机网络系统上显示出来，这应该是项目追求的目标。当然，除此之外，还应提交常规的成套图件、总结报告等。



《大城市活断层探测与地震危险性评价》工程总体技术构成

3.探测工程与学科建设互动推进：前面强调过本项目所蕴含的科学技术上的难点，这就要项目实施过程中采取一定的措施避免因科学技术难关挡路而使工程“卡壳”，这些措施比如：国外先进经验的借鉴、学习，包括实地国外访问、考察、取经；全项目内部的重点试验、逐步推广；一个城市内选择探测对象的先易后难原则；组织专门难点问题的专题研究；建立项目内部经常性、畅通的科技交流通道，等等。目的是形成探测工程与学科建设良性互动、相互推进的局面。

六、小结与建议

根据以上对“大城市地震活断层探测与地震危险性评价”项目的剖析，可以归纳出这项工程具有以下几条特点，

①它是一项功在当代、利在千秋的安民工程；

②它是一项地质、地球物理、地球化学、工程地震、大地测量、地震学、新仪器研制与计算机技术多学科联合攻关的系统工程；

③它将是“野战军”、“地方军”和地方政府部门三结合队伍一起上的科学技术攻坚工程；

④它又是中国地震局更深入地介入社会生活、壮大自己科学技术储备的发展工程。

为了迎接这项工程的启动与实施，谨向大家提出以下十六个字的建议：

加深认识，

宣传争取，

精心设计，

精心施工。