

# 核电厂选址地震安全评价中的 发震构造与能动断层

常向东

(国家环境保护总局核与辐射安全中心, 北京 100088)

**摘要** 根据核安全法规和导则, 对核电厂选址地震安全评价中发震构造与能动断层的关系, 以及发震构造与能动断层鉴定的时代问题进行了分析, 并结合近年来核电厂选址评价中存在的问题, 对发震构造与能动断层的评价方法进行了探讨。

**关键词:** 发震构造 能动断层 核电厂选址

## 前言

发震构造和能动断层是描述震源地质特征的两个专业术语, 其中能动断层的概念是伴随我国核电建设的发展, 在编制核安全法规时借鉴国际相关要求而提出的。尽管在我国现行核安全法规和导则中对发震构造和能动断层都有定义, 但在实际的核电厂选址地震安全性评价中却存在不同的认识, 其中的焦点和关键问题包括: 发震构造和能动断层的关系、发震构造和能动断层鉴定的时代依据, 以及对发震构造和能动断层的评价方法等, 这些问题均与核电厂厂址适宜性评价及工程抗震设计基准的确定密切相关。尽管相关的学者对上述问题作过多次研究, 但在认识上, 乃至实际应用中仍存在一定程度的差异。考虑到该问题的重要性, 本文结合近年来核电厂选址实践, 并根据对核安全法规的理解, 对上述问题进一步进行分析和探讨, 其目的是在我国核电事业快速发展的背景下, 以期对核电厂选址中的地震安全性评价有所裨益。

## 1 发震构造和能动断层的关系

### 1.1 定义与概念

讨论发震构造和能动断层的关系, 首先要明确发震构造和能动断层的定义与概念。我国的核安全法规体系是以国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 的安全

[收稿日期] 2006-07-10

[作者简介] 常向东, 男, 生于1956年。1982年毕业于长春地质学院地震地质专业。现为国家环境保护总局核与辐射安全中心厂址结构室主任, 研究员, 国家地震安全评价委员会委员, 国家环境保护总局核安全与环境专家委员会委员。主要从事核工程地震安全评审及相关的基础研究。E-mail: nscxd01@163.com

系列文件为蓝本编制的。在我国现行核安全导则 HAD101/01《核电厂厂址选择中的地震问题》(国家核安全局, 国家地震局, 1994)中, 将发震构造定义为“显示地震活动性的、或有历史地表破裂的、或古地震活动性影响的在现代构造条件下曾是地震震源的构造。在关心的时期内很可能发生显震(macro-earthquake)的构造考虑为发震构造”, 并且对其中的显震定义为“震级等于或大于 3 级的地震”。该导则是 1994 年由国家核安全局和国家地震局联合批准发布的, 除个别要求进行了适当调整外, 基本上是 IAEA 推荐导则的直译, 其中一些专业名词如“显震”的定位, 在我国缺乏准确对应概念的情况下存在一些争议。2002 年 IAEA 在吸取国际地震安全评价经验的基础上, 再次对原导则进行了修订, 其中对“显震”作了进一步解释, 其定义为:“这种地震活动具有一定级别, 可据此明显判断该地震活动与构造活动密切相关, 或由构造活动直接产生”(IAEA, 2002)。

我国《工程场地地震安全评价技术规范》(GB17741-2005)(国家质量技术监督局, 国家标准化管理委员会, 2005)中对发震构造的定义与核安全导则略有差异。在我国地震地质专业领域通常惯用“地震构造”的概念, 其意为“与孕育和发生破坏性地震有关的构造”。尽管在术语上稍有差异, 但其本质含义是一致的, 只不过 IAEA 导则定义中增加了一些典型的判定标志。

由上述不难看出, 无论是核安全导则中的发震构造还是国标中的地震构造, 都是指与地震活动性相关联并且被视为地震震源的构造。这种关联是通过已发生的地震活动、或地表破裂、或古地震来表现的, 而且被认为在未来关心时期内会继续发生“显震”。对于发震构造的上述 3 种表现形式, 无论出现哪种情况都能够表明该构造为发震构造, 至于定义中的后一条则是要强调该构造在未来关心时期内会继续活动, 这一继续活动的标志则是发生“显震”。显然, 要根据现行 HAD101/01 导则中定义的“显震”(M≥3)来判断该地震活动与构造活动相关的有些问题, 因为在我国地震活动背景条件下, 能够判定地震活动与构造活动明显直接相关的地震震级至少在 5½级以上, 在这一震级之下的地震活动在没有地表断层的地区也广泛分布, 即便其中一些分布在断层带上也不足以说明是断层活动的结果。从这一意义上讲, HAD101/01 导则中提出的“显震”也许选用我国国标规范中的破坏性地震或者是构造地震更为恰当。

关于能动断层, 这一概念并不是我国地震地质专业界固有的, 而是伴随我国核电建设的发展, 在编制核安全法规时借鉴国际相关评价经验和要求而提出的。在我国现行导则中, 能动断层被定义为“在地表或近地表处有可能引起明显错动的断层”。能动断层鉴定的依据包括以下 3 条:

- 表明在晚更新世 Q<sub>3</sub>(约 10 万年)以来有过运动证据, 以致可合理地推论在地表或接近地表处能够再次发生运动。
- 已经证明一个断层与另一已知能动断层有构造联系, 以致于另一个能动断层的运动可能引起这一个断层在地表或接近地表处的运动。
- 与发震构造有关的最大潜在地震的震级足够大和震源位于某一深度, 以致可合理地推论在地表或接近地表处能够发生运动。

根据现行导则, 具备上述条件之一的断层构造被定为能动断层。我国的国标和其他行业标准中能动断层的定义是一致的。

## 1.2 发震构造和能动断层的关系

对于发震构造与能动断层的关系认识不一致主要表现在以下方面: 一种观点是从专业角

度考虑,认为能够造成地表或接近地表处错动的能动断层一定是发震构造;另一种观点则从工程实际评价角度出发,认为发震构造与能动断层是相互独立的概念,并强调能动断层评价仅限于厂址及其附近范围,而对发震构造评价则要扩展至更大的区域范围。实际上这两种观点的焦点并不明确,或者说是从不同侧面强调了对发震构造和能动断层评价的认识,但无论如何,将两者的关系讨论清楚对核电厂选址地震安全评价具有实际意义。

应该说在服务于工程的规范中,包括核安全法规、导则以及其他工程规范,所用的术语与学术研究领域的术语相比具有更加明确的针对性。发震构造和能动断层就是针对核电厂选址地震安全评价中的两个要点,即地震动强度和因断裂活动造成的地表错动对核电厂工程厂址的可能影响而定义的,并在此评价的基础上确定工程抗震的设计基准和厂址的适宜性。显然对发震构造的评价强调的是地震动效应对厂址的影响,而对能动断层的评价除地震动效应之外更强调地表破裂效应对厂址的影响。

为了对地震动和地表破裂这两种不同效应影响进行恰当的评价,美国核管会在新版管理导则 RG1.165《震源鉴别与表征及安全停堆地震动确定》(U.S. NRC, 1999)中,将震源更加明确地分为两类,其一是能动构造源,这类震源是将原来的能动断层进一步扩展,以包含除断层之外其他可能存在的震源构造类型。能动构造源是一种既能产生地震动又能产生地表构造变形(地表断裂或褶皱)的构造;其二是蕴震源,这类震源在发生地震时会产生地震动,但不引起地表位移。能动构造源可通过地表变形(断裂或褶皱)或者是与该构造具有成因联系的地震活动来确定;而非能动的蕴震源形成机理复杂,这种震源包括多种可能性,可从一个明确的构造到一个大范围的弥散地震活动区。美国 RG1.165 的这种划分方法与我国 HAD101/01 导则区域地震构造模型中定义的两类震源类型“发震构造”和“弥散地震”基本相对应。

从 RG1.165 可以得到如下启示和推论,能动断层属于既能产生地震动又能产生地表构造变形的能动构造或发震构造,但发震构造除了能动构造(断裂或褶皱)之外可能还包括一些未来发生地震情况下不产生地表位移的构造。因此可以认为能动断层属于最典型的发震构造类型。在发震构造评价时,如果是通过地表构造形变以及与该构造形变有直接成因联系的地震活动鉴定出的发震构造,都应属于能动构造,如果被鉴定的这类发震构造是断层,则该断层应为能动断层。如果地表构造形变与地震活动的成因联系无法确定,或者是通过地震活动性等标志鉴定出的发震构造,这种发震构造是否为能动断层主要取决于该发震构造的震级上限,如果最终评价出的震级上限高到地震发生时可能产生地表破裂,则该构造具有能动性,否则该发震构造就属于一种只产生地震动效应的蕴震源。

关于发震构造和能动断层的调查评价范围,在考虑地震动效应影响的情况下,区域范围内可能对厂址产生影响发震构造都在评价范围之内。而对于能动断层,除地震动之外,更关心的是地表破裂效应对厂址的影响,显然这一影响范围仅局限于厂址及附近地区,至于远离厂址的发震构造即使地震情况下发生地表破裂也不会影响厂址。所以能动断层的评价主要关注厂址及附近范围。但是,当能动断层属于区域性断层同时又影响到厂址的情况下,调查评价范围要远远超出厂址附近或近区域范围。此外,对于发震构造的地震动影响,通常可以通过提高抗震设计基准方法加以解决,而对于地表破裂可能直接影响到厂址的可接受性。因此,在核安全法规中对能动断层的调查评价规定了更加严格的要求。

## 2 发震构造和能动断层的时限

基于上述发震构造和能动断层的定义及相互关系的分析,本节对发震构造和能动断层的鉴定时代依据做进一步讨论。

### 2.1 发震构造的时限

在我国核电厂地震安全评价实践和相关研究中,发震构造的时限受到关注。其中一种认识认为,可将能动断层鉴定的时限作为鉴定发震构造的时限(时振梁等,2004),该问题具有一定的复杂性。实际上,在我国现行 HAD101/01 导则关于发震构造的定义中并没有明确发震构造的时限。发震构造的时限不仅和不同地区的地震构造环境有关,同时还与对地震发生构造机理的认识有关。

从地震构造环境而言,强地震活动区和弱地震活动区的发震构造特征显著不同,相应的发震构造时限也会有所差异,就像不同国家对能动断层鉴定的时代依据有所差异一样,在地震重现期较短的高活动区,如日本和美国西部地区,这一鉴定年代相对较短,从 1 万年到 5 万年;而在低地震活动区这一鉴定年代相对较长,达到数 10 万年甚至更长。因此,在我国不同地区构造与地震活动性差异较大的条件下,用一个确定的时限作为鉴定发震构造的依据往往会受到构造背景差异特征的限制。

从对地震发生构造机理的认识而言,发震构造具有多种表现形式,有些可以通过地表地质调查直接确定发震构造,但从地震学和深部地球物理研究角度也具有鉴定发震构造的途径和标志,如地震活动与深部构造的相关性,以及小地震活动的成带分布等。这些发震构造标志不一定和最新活动的地表形变相关联,甚至不存在地表形变特征,在这种情况下发震构造的时代依据变得更加复杂。

上述分析表明,发震构造时代的确定取决于区域构造和地震活动的背景,同时也与发震构造标志密切相关。一般说来,在构造活动具有地表形变特征的情况下对应有相对明确的时代判定依据,如能动断层。而作为震源考虑的发震构造存在不同的判定标志,在综合多种相关标志鉴定发震构造时,不确定因素增大,其时限可能与能动断层的时限存在较大的差异。在美国 RG1.165 导则中,对震源的地质调查扩展到第四纪(近 200 万年)以来的断层活动性,从这一意义上讲,利用能动断层鉴定的时限来限定发震构造可能存在较大的局限性。

### 2.2 能动断层的时限

与发震构造有所不同,能动断层在 HAD101/01 导则中具有明确定义,即:“表明在晚更新世  $Q_3$  (约 10 万年) 以来有过运动证据,以致可合理地推论在地表或接近地表处能够再次发生运动的断层”。如前所述,能动断层不是我国地震地质领域的固有术语,该术语是伴随我国核电建设的发展,在编制核安全法规时借鉴国际相关要求而提出的,而且随着我国核电厂选址地震安全评价经验的积累,对能动断层的评价有一个与我国实际逐步融合的过程。

我国的核安全导则源于 IAEA,在 IAEA 推荐给成员国的核电厂地震评价导则中,对能动断层鉴定的年代要求是原则性的,其内容为:“如果断层在这样一个时期内显示出有过活动或者是重复活动(如显著的形变和/或位移)的证据,同时依据发生在这一时期内的活动可合理推断出未来在地表或近地表能够出现这种活动,则认为该断层是能动的。在地震资料和地质资料一致显示出短地震重现间隔的强活动区,将评价能动断层的时期定为数万年也许是适当的,而在低活动区恰当的时期或许应定得更长”。实际上,在国际上的核电发达国家对能动

断层的年代界定存在显著差异。美国核管会提出的导则对能动断层鉴定的年代依据是:“地表或近地表处的变形在过去 50 万年内重复发生,或者在过去约 5 万年内至少发生过一次”;日本仍延续使用活动断层的概念,在核电厂地震安全评价中,对于运行安全地震  $S_1$  考虑 1 万年以来有过活动的 A 级活断层(平均滑移速率  $S \geq 1\text{mm/a}$ );对于极限安全地震  $S_2$  要考虑 5 万年以来有过活动的 B 级活断层( $0.1\text{mm/a} \leq S < 1\text{mm/a}$ )和 C 级活断层( $S < 0.1\text{mm/a}$ ) (常向东, 1993)。

从上述不难看出,IAEA 作为国际机构考虑到各国地震地质背景的差异,对能动断层时代仅给出了鉴定原则,各成员国需要根据自己本国的实际来进一步确定。我国 1987 年版的核安全导则,在当时缺少经验的条件下主要参考了美国的鉴定准则,即“在过去 50 万年内,在地表或近地表处有重复运动的迹象,就可以推论有进一步发生运动的可能性”(国家核安全局,国家地震局,1987)。但随着我国东部沿海地区核电厂选址增多,专家们普遍认为这一鉴定准则与我国东部地区的构造和地震活动背景不十分协调,因而在 1994 年 HAD101/01 导则修订版中,结合我国东部沿海地区核电厂选址地震安全评价实践,将能动断层鉴定的年代依据修订为:晚更新世  $Q_3$  (约 10 万年) 以来有过地表或近地表活动的断层。

对于 IAEA 提出的能动断层鉴定的年代原则国际上普遍接受,但各国在结合本国实际确定具体的年代鉴定准则时,除了考虑构造和地震活动背景特征之外,也含有针对核电工程安全要求的决策因素。经过我国核电厂选址地震安全评价多年实践,无论从科学认识方面还是从工程安全要求的决策方面,对于“晚更新世  $Q_3$  (约 10 万年) 以来有过地表或近地表活动”这一能动断层鉴定时限,基本被我国的学术界和工程界认可和接受。

但是随着近年来我国核电厂选址从东部沿海扩展到内陆地区,不同厂址区域的地震构造环境也进一步复杂化。特别是在一些地震活动性相对较弱地区的选址报告中,作为发震构造的活动断层年代从晚更新世提前到中更新世,甚至延长到第四纪更早的时期。在此种情况下,现行导则中关于能动断层的鉴定时限是否能够覆盖我国的沿海和内陆地区,或者说在我国不同地区构造和地震活动性差异较大的情况下仍采用统一的年代准则是否恰当是一个有待深入研究和探讨的问题。

### 3 对发震构造和能动断层的评价

根据上述对发震构造和能动断层相关性和鉴定时代的分析,本节将结合近年来核电厂选址地震安全评价实践,对评价中存在的问题及评价方法进行讨论。

#### 3.1 关于发震构造与能动断层评价的协调性

由于对发震构造与能动断层的相关性存在认识上的差异,在实际评价中时常将发震构造和能动断层分开进行评价,并且发震构造和能动断层在评价范围、资料依据及评价方法等方面存在明显差异。其中对发震构造的评价范围包括厂址半径 150km 的整个区域,而对能动断层的评价仅限于厂址半径 5km 范围;对发震构造评价依据的资料包括区域和近区域的相关资料,相应的评价方法则采用综合评价,而对于能动断层鉴定则主要依据厂址附近范围地质调查获得的断层分布资料,并通过断层活动性评价来鉴定断层的能动性。

通过发震构造和能动断层相关性分析可以看出,发震构造包含了能动断层,之所以将其分开是由于发震构造对工程厂址的影响具有地震动和地表破裂的双重效应,并从工程应用出发将具有地表破裂效应的能动断层局限在厂址附近范围。实际上,一个发震构造是否具有能动

性取决于该发震构造在未来发生地震情况下是否伴随地表破裂, 而和该构造的分布范围无关。

由于将发震构造与能动断层评价分开进行, 因此在评价中出现了许多不协调的情况: 如在同一区域发震构造可以是中更新世以来活动的断层, 而能动断层则用晚更新世是否活动来进行判别; 发震构造评价依据区域资料分析建立了多种判别标志, 而能动断层鉴定仅考虑地表断层的活动性; 在近区域范围没有发震构造调查结论的情况下, 又用若干篇幅来论证厂址附近范围不存在能动断层等等。实际上对发震构造的评价, 在该构造可能影响厂址时必然会面临能动性鉴定问题, 发震构造评价所依据的资料和方法与能动断层鉴定是密切相关的, 二者应协调一致。此外, 从 HAD101/01 导则内容的排序也可看出, 区域基础资料的调查和区域地震构造模型的建立, 是确定设计基准地震动和断层能动性鉴定的共同基础。因此, 对能动断层的评价, 不应脱离区域构造和地震活动的背景, 不应脱离所鉴定的发震构造, 那种将发震构造和能动断层分开评价的作法是不恰当的。

### 3.2 关于发震构造和能动断层时代的评价

伴随我国核电厂选址从沿海扩展到内陆地区, 厂址区域构造和地震活动背景的差异性增大, 在一些地区选址地震安全性评价中普遍存在发震构造和能动断层在时代鉴定上的差异。其中发震构造的时代随震级上限的降低而延长, 如 7 级以上的发震构造以晚更新世以来活动为标志, 6.5 级和 6 级的发震构造以中更新世或早中更新世为标志, 对应 5.5 级的发震构造则延至第四纪早期的活动构造。而能动断层的时代则限定在晚更新世。

如前节对发震构造和能动断层时限的分析, 由于发震构造标志的多样化或者是从不同评价角度确定发震构造, 可能会出现发震构造与能动断层时限不一致的情况, 但这种不一致仅指那些不会产生地表形变的发震构造, 或者说某一震级的发震构造与地表破裂不存在直接的成因联系。如果某一震级的地震活动和地表断层构造有直接成因联系, 那么该断层就属于能动断层, 该地表断层的活动时代就应包含在能动断层鉴定的时代范围之内。因此, 在确定某一震级发震构造的时代时, 应明确这一震级地震活动和构造处于怎样的相关状态。如果在区域发震构造评价中确定出的某一震级地震活动和中更新世以来活动的断层相关, 而且该震级大到地震发生时可能伴随有地表形变, 那么这一时代的活动断层不仅是发震构造的标志, 同时也是能动断层鉴定的标志。在发震构造和能动断层时代的评价中应合理地把握其中的关联。

### 3.3 关于发震构造标志的合理应用

在发震构造鉴定过程中, 一个重要环节是通过基础资料的综合分析, 找出与强震活动密切相关的构造标志。HAD101/01 导则对这些标志做了原则性的归纳: “发震构造的鉴定要根据地质、地球物理或地震资料提供的、在现代构造条件下已确定为震源构造的直接或间接证据来进行”, 并且在这一鉴定过程中利用“历史和仪器记录地震同地质或地球物理特征的相关(或不相关)判别来鉴定发震构造具有十分重要的作用”。在我国核电厂选址地震安全性评价中, 通过对区域强震与中强地震发生的构造条件分析归纳出了一些更具体的发震构造标志, 这些标志实际上是对法规中规定的发震构造鉴定原则的细化和扩展。从便于应用的角度来看, 这种发震构造标志的细化是有利的, 但要注意所确定的标志应具有普适性, 而且不能超越现有的认识水平, 否则会给发震构造评价带来难以协调的问题。

### 3.4 关于评价中的不确定性

由于地震活动客观上的复杂性和对地震认识上的局限性, 在发震构造评价中存在一定程度的不确定因素。这种不确定因素从技术角度分析往往有一定困难, 但考虑与工程应用相结

合的情况下,可采用适当保守估计的方法覆盖这些不确定因素带来的影响。因此,恰当的利用保守估计在一定程度上可使评价工作得到简化,同时也满足核电厂工程偏保守的核安全要求。

## 4 结束语

发震构造与能动断层的相关性和时限问题在核电厂选址地震安全评价工作中受到关注,本文根据核安全法规,对上述问题以及相关的评价进行了分析和评述,提出的观点仅供从事核电厂选址地震安全评价的工作者和研究者参考。

## 参考文献

- 常向东, 1993. 日本核电厂抗震设计及选址中的活断层评价. 地震地质, 15 (4): 401—407.
- 国家核安全局, 国家地震局, 1987. 核电厂厂址选择中的地震问题 (HAF0101) .
- 国家核安全局, 国家地震局, 1994. 核电厂厂址选择中的地震问题 (HAF0101(1)) . 北京: 法制出版社.
- 国家质量技术监督局, 国家标准化管理委员会, 2005. 工程场地地震安全性评价 (GB 17741-2005) .
- 时振梁等著, 2004. 核电厂地震安全性评价中的地震构造研究. 北京: 中国电力出版社.
- IAEA, 2002. Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants: A Safety Guide, Safety Standards Series No. NS-G-3.3, IAEA, Vienna.
- U.S. NRC, 1999. Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Draft Regulatory Guide RG1.165.

# Seismogenic Structure and Capable Fault in Seismic Safety Evaluation for Candidate Site of Nuclear Power Plant

Chang Xiangdong

(Nuclear and Radiation Safety Centre, State Environmental Protection Administration, Beijing 100088, China)

**Abstract** The relation and age identification about seismogenic structure and capable fault in seismic safety evaluation of NPP sitting are studied with accordance to the nuclear safety code and guidelines. In order to deal with some practical problems in the evaluation of nuclear power plant sitting of the nation in recent years, a conformable assessment technique about seismogenic structure and capable fault is proposed and discussed in this paper.

**Key words:** Seismogenic structure; Capable fault; Nuclear power plant sitting