

総合講演・報告 4 「『断層の活動性と工学的なリスク評価』調査専門委員会活動報告」

断層変位に対する工学的なリスク評価 (2)断層変位のハザード評価

Risk evaluation method for fault displacements by engineering approach

(2) Hazard analysis for fault displacements

*谷 和夫¹¹ 東京海洋大学, 調査専門委員会委員

1. はじめに

本稿では、報告(1)の図 4 で提示した断層変位に対する全体評価手順のうち、原子力施設直下の断層変位の影響評価を実施するにあたり必要となる断層変位のハザード評価について述べる。

2. 検討対象とする断層変位について

検討対象とする断層変位は、震源断層の活動に伴って生じるものと、震源断層の活動以外を成因とするものに大別される。前者の断層変位は震源断層のずれの規模が大きい場合は、地表地震断層として地表に出現し、主要な地表の痕跡（変位・変形）は、活断層として認識される。地表地震断層には、震源断層の地表延長部と認識される「主断層」および「分岐断層」と、その周辺で地盤の応力場の変化等により副次的に形成される「副断層」がある。

活断層（主断層および分岐断層）は、構造運動に伴い繰り返し活動しており、国内の活断層について、その活動間隔を調査した結果によれば、平均活動間隔は平均的には数千年、短いものでは数百年、長いものでは数万年である。よって、最近の地質年代である後期更新世以降（約 12 万～13 万年前以降）に最低でも 1 回は活動していると考えられる。

一方、後者すなわち震源断層の活動以外を成因とする断層については様々なものがあるが、その成因が将来起こり得るものについては、検討対象としている。本稿では前者を対象に述べる。

3. 断層変位ハザードの評価手順

断層変位ハザードの評価手順の概要を図 1 に示す。まず、施設が立地する位置を含む敷地周辺の地形・地質・地盤調査を実施し、断層の分布や活動性等に関する評価を行う。

次に、断層変位ハザードの検討に進むことになるが、

確定論的な検討に用いる断層変位量（以下「検討用の断層変位量」と、確率論的な検討で用いる断層変位ハザード曲線の双方を扱う。

4. 地形・地質・地盤調査

施設の設置地盤に存在する断層が施設に及ぼす影響について検討するため、地形・地質・地盤調査により断層の分布・性状並びに後期更新世以降の活動を評価する必要がある。

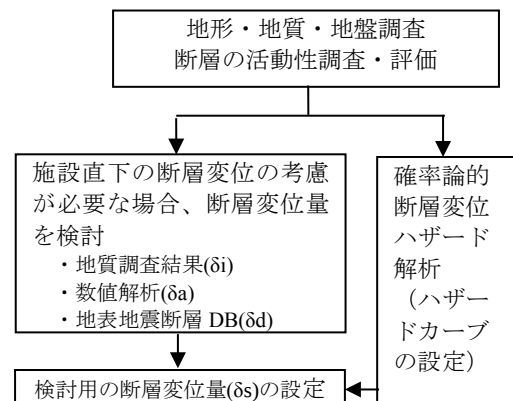


図 1 評価フロー

* Kazuo Tani¹¹ Tokyo University of Marine Science and Technology, Member of the Committee

図 2 に断層調査の基本的な流れを示す。文献調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等を適宜組み合わせ、施設設置位置、敷地および敷地周辺の地質・地質構造を把握し、断層の分布、規模、性状、活動時期等を明らかにする。

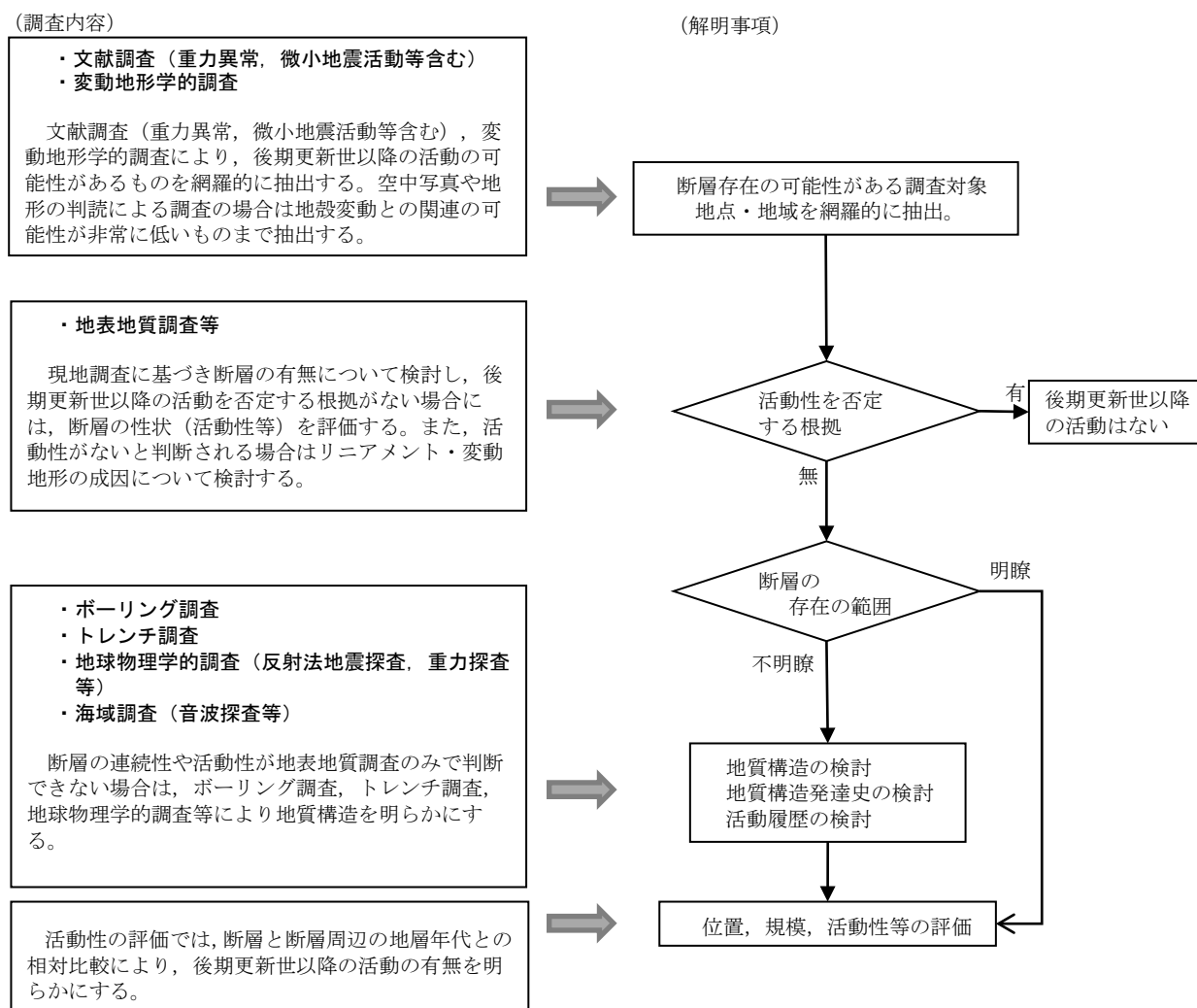


図 2 断層調査の基本的流れ

4-1. 断層の活動性の調査・評価

断層の活動性評価にあたっては、地形・地質と断層の形成順序から活動年代を決める手法（上載地層法）の適用を基本とするが、後期更新世以降の地層が欠如するなど適用が困難な場合には、12 万～13 万年以前の岩脈・鉱脈等との接触関係（切断脈法）、接触変成との関係、断層破碎物質の性状等の観点から総合的に判断する。これらの手法により断層の最新活動年代を評価する場合には、周辺の地質構造発達史等を踏まえた総合的な評価を行うことが重要であり、断層の連続性や変位・変形の分布や性状、応力場の観点を考慮して、調査結果が整合的であることを慎重に検討することが必要である。

4-2. 断層変位量の調査・評価

後期更新世以降の活動を否定できない断層等については、断層変位地形の調査、断層露頭の観察、トレンチ調査、ボーリング調査を適宜組み合わせることで断層の活動年代を把握し、そのイベント年代に対応する変位基準から 1 回あたりの変位量を推定する。例えば、累積変位と活動回数から 1 回あたりの平均変位量を求めたり、各回のイベントに対する変位量が分かる場合にはばらつきも含めて評価する。

断層変位の痕跡は、時間経過に伴って侵食・堆積などの作用を受けて徐々に失われていくため、断層の分布や変位が全長にわたって確認できることは期待できず、地層に被覆されて断層運動の痕跡が地層中に残っている地点のみで調査することになる。このような制約の中において、取得された変位データから変位量を評価する上では、そのサンプルの代表性や変位分布の固有性などを検討しておくことも重要である。

4-3. 断層変位量を評価するための地盤調査

後述する数値解析による設置地盤の変位・変形量を評価する際の地盤モデルには、地盤の構造や力学特性を適切に反映する必要があるため、ボーリング調査、トレンチ調査、弾性波探査等を実施するとともに、原位置試験および室内試験を適切に選択して実施する。

5. 断層変位ハザードの評価

後期更新世以降の活動を否定できない断層が施設基礎面にあると判断された場合、当該断層の変位量を評価する。検討用の断層変位量は、地質調査結果、数値解析および地表地震断層データベースに基づいて設定するものであり、具体的な検討方法について、以下に順に述べる。

5-1. 地質調査結果に基づく変位量 δi の検討

敷地におけるボーリング調査、トレンチ調査、試掘坑調査などの調査結果から得られた 1 回あたりの変位量がある場合は、最大限これを活用することとし、これに不確かさを適切に考慮して δi を設定する。

具体的には、敷地における 1 回あたりの変位量の分布状況から推定した施設位置での変位量をそのまま δi とするのではなく、敷地の地質調査結果から不確かさの度合いが把握できる場合はそれを活用し、把握できない場合は後述する地表地震断層データベースに基づく不確かさを考慮した上で δi を設定する。

5-2. 数値解析に基づく変位量 δa の検討

数値解析による設置地盤の変位・変形量の評価にあたっては、敷地内で地質調査によって推定された変位の再現性を確認することにより、評価に用いる解析手法（解析モデル、計算方法等）が適切かどうか確認する。その後、不確か性を考慮したパラメータスタディを実施した上で設置地盤の変位・変形量を評価する。

(1) 解析手法

数値解析手法は地殻の半無限地盤モデルの食い違い理論による弾性解を用いる手法（以下「食い違いの弾性論」という）および設置地盤の詳細モデルの有限要素法解析（以下「詳細 FEM モデル」という）を基本とする。

食い違いの弾性論により、評価対象となる断層変位に関連する震源断層の破壊によるすべり量を断層面に静的な変位として与え、半無限地盤中の変位分布の弾性解を得ることができる。断層活動に伴う地殻変動による観測変位が弾性理論でもある程度説明

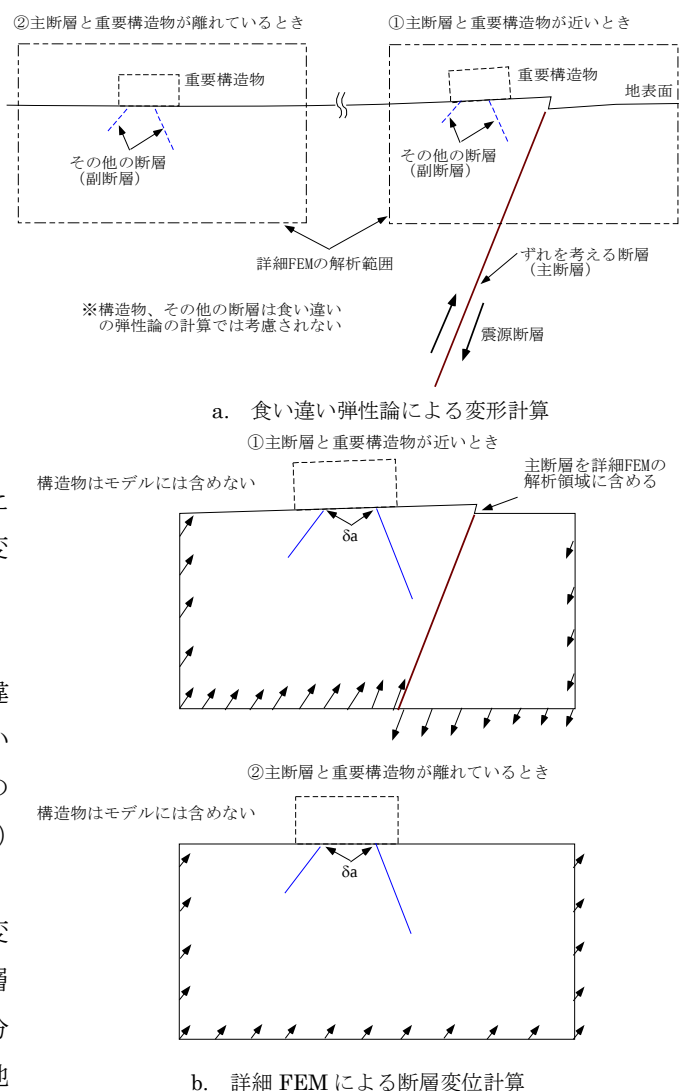


図 3 数値解析による変位・変形量の評価

できることから、この手法により広域的な地殻変動を求める（図3のa）。

次に、評価対象施設の設置地盤の変位・変形量を求めるために、詳細 FEM モデルによる静的弾塑性解析を実施する。食い違いの弾性論により詳細 FEM モデル境界での変位量を算出し、それを変位あるいは換算した地殻応力として境界条件として与える（図3のb）。有限要素法解析による設置地盤の変位・変形量評価においては、地形・地質・地盤調査の結果に基づき、設置地盤のモデル化を適切に行う。このとき、構造物はモデル化しない。また、評価対象となる断層変位に関連する震源断層の延長部である主断層が構造物に近い場合、主断層が含まれるように解析領域を設定し、そのずれを考慮する。

横ずれや斜めずれ断層の場合や、分岐断層や副断層が存在する場合には、必要に応じて詳細 FEM モデルを3次元とすることが望ましい。

食い違いの弾性論や静的 FEM 解析以外の手法として、様々な計算手法を利用した動力的シミュレーションを必要に応じて検討に用いる。また、有限要素法に代わり粒状体モデルを用いた解析手法を用いることも考えられる。個別要素法、粒子法等の粒状体解析手法では、多様な破壊形態を表現することが可能である。

(2) 設置地盤における変位量の検討

設置地盤における変位量 δa は構造物と地盤との境界で評価して設定する。検討用の変位量の評価に当たっては不確かさを適切に考慮する必要があるため、詳細 FEM モデルの断層や岩盤の構造や力学特性等について合理的に変動範囲を定め（例えば、平均値＋標準偏差）、それぞれの因子を組み合わせるパラメータスタディを行うことにより考慮する。

5-3. 地表地震断層データベースに基づく変位量 δd の検討

既に構築された主断層および副断層の変位量に関するデータベースや、独自に構築または追加したデータベースに基づき、評価対象断層とデータベースにおける断層を比較し、断層のタイプ・規模・活動履歴、周辺の地形・地質・地盤等の類似性から、 δd を設定する。

δd の設定にあたっては、断層長さ（または地震規模）と断層変位量との関係式や、副断層についての原子力安全推進協会(2013)¹⁾のデータベース等が活用できる。 δd の設定にあたっては、地表地震断層データベースを踏まえて不確かさを適切に考慮する。

5-4. 検討用の断層変位量 δs の設定

地質調査結果に基づく δi 、数値解析に基づく δa 、地表地震断層データベースに基づく δd を総合的に勘案して、構造物と地盤の境界に与える検討用の断層変位量 δs を設定する。その際、評価対象断層の1回あたりの変位量のデータがあるか、または推定可能かどうか、その変位の原因となった地震に関するデータがあるかどうか踏まえて十分に吟味した上で δs を設定する。 δs の設定にあたっては、確率論的断層変位ハザード解析（PFDHA）の結果を

表1 検討用の断層変位量 δs の設定方法例

項目	地質調査結果に基づく δi	数値解析結果に基づく δa	地表地震断層データベースに基づく δd
平均値	敷地内の1回あたりの変位量	数値解析（この場合、再現計算は平均値という位置づけ）	データベースから求めた平均値
不確かさ	方法 1：敷地内のデータから求めたばらつき（例えば、標準偏差） 方法 2：地表地震断層データベースから求めたばらつき（例えば、標準偏差）	数値解析によるパラメータスタディ	データベースから求めたばらつき（例えば、標準偏差）
設定値	敷地内の1回あたりの変位量＋ばらつき（方法1または2）	パラメータスタディ結果	データベースから求めた平均値＋データベースから求めたばらつき
δs	・ δi 、 δa および δd を総合的に勘案して、構造物と地盤の境界に与える変位量を設定 ・ 1回あたりの変位量のデータがあるか、または推定可能かどうか、変位の原因となった地震に関するデータがあるかどうかの判断結果を踏まえ、 δi 、 δa および δd を十分に吟味した上で δs を設定 ・ δs の設定にあたっては、PFDHA の結果を参照する		

参照することができる。参照にあたっては、 δs の年超過頻度が地震動や津波の確率論的ハザード評価において適用されている目安値と同程度あるいはそれ以下であることを確認することなどが考えられる。

施設基礎面に後期更新世以降の活動を否定できない断層が複数分布する場合は、施設に与えるリスクを考慮して選定した断層に δs を与えることが必要になる。選定にあたっては、活動の可能性、断層のずれの方向、断層破碎部の幅、硬さおよび固結の度合い、断層条線等から得た断層運動像、断層の空間的な広がり等を考慮することが重要であり、必要に応じて複数の断層を選定する。

5-5. 確率論的断層変位ハザード解析

前節までに示した確定論的な評価に用いる δs の評価と並行して、 δs 設定時の参照用および確率論的な評価に用いるため、PFDHAを実施する。PFDHA の実施に際しては、Youngs et al. (2003)²⁾、Petersen et al. (2011)³⁾、高尾ら(2013、2014)^{4) 5)}などに示された方法および評価式（経験式）を用い、考えられる認識論的な不確かさを可能な限りロジックツリーに反映して評価地点における1年あたりの変位一超過頻度関係を算出する。実施例を図4に示す。

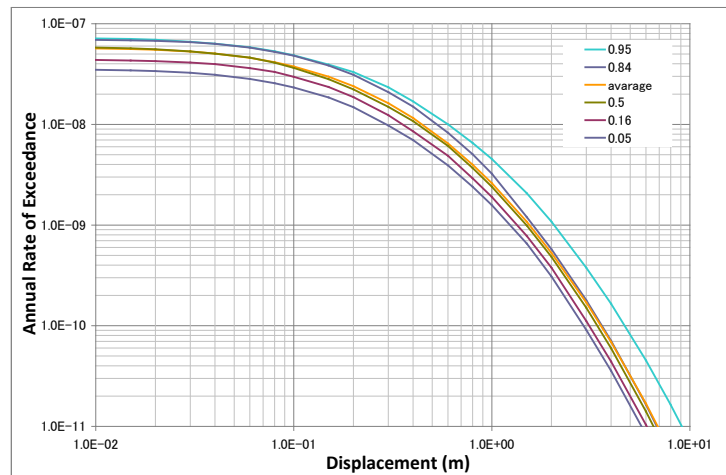


図4 PFDHA の実施例⁵⁾

PFDHAで得られる変位量は、 δs と同様に、構造物と地盤の境界位置において定義され

るものであり、当該構造物が設置されていない状態での変位量である。施設の影響評価にあたっては、構造物が設置されていない状態での変位量を再現できるようにFEM等の解析モデルの境界条件を設定した上で、構造物が設置されている状態での変位量を計算する必要がある。

6. まとめ

本稿では、断層変位のハザード評価に関して、これまでに関連分野で得られている知見を最大限活用し、不確実性も考慮した適用可能な方法として取りまとめた。今後とも知見の蓄積を継続し、関連する学術分野間での連携・協調を深化させながら、より一層信頼性の高いものにしていく努力が必要である。

参考文献

- 1) 原子力安全推進協会：原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書、2013年、<http://www.genanshin.jp/archive/sitefault/>
- 2) Youngs, R.R., et al. : A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), Earthquake Spectra, Vol.19, No.1, 2003, pp.191-219.
- 3) Petersen, M.D., et al. : Fault displacement hazard for strike-slip faults, Bull. Seismol. Soc. Am. 101, 2011, pp.805-825
- 4) 高尾誠、土山滋郎、安中正、栗田哲史：確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用、日本地震工学会論文集、第13巻、2013年、pp.17-36.
- 5) 高尾誠、上田圭一、安中正、栗田哲史、中瀬仁、京谷孝史、加藤準治：確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上、日本地震工学会論文集、第14巻、第2号、2014年、pp.16-36.