

断層変位評価小委員会
研究報告書

2015 年 7 月

土木学会
原子力土木委員会

Research Report of the Subcommittee on
Fault Displacement Evaluation

July, 2015

The Nuclear Civil Engineering Committee of the JSCE

はじめに

1972 年、カリフォルニア州で制定され、その後改定されたアルキストプリオロ(Alquist-Priolo)地震断層帯法は、断層に沿った地域の科学的調査に基づき、断層を挟む帯状の地域の建設を合理的に規制する法律で、カリフォルニア州ばかりでなく、海外における安全な地域環境構築にこの法律が与えた影響は極めて大きいものでありました。しかし、我が国や台湾などプレートの沈み込み地帯で卓越して認められる逆断層では、カリフォルニア州のような横ずれ断層と異なりその空間構造が複雑で調査や判断が決して容易ではありません。2004 年 10 月 23 日に新潟県中越地方の山間地を襲った地震では低断層崖のわずかな変形としての小平尾（おびろお）断層が現れましたが、地殻変動による大きな水平変位の帯は実はこれより 6~7km ほど西に現れ、この帯に沿って甚大な被害が集中しました。1999 年の台湾集集（ChiChi）地震では、複雑に屈曲し、枝分かれして地表に現れた地震断層の一つが石岡ダムを通過し、ダム堤体は 10m にも及ぶ縦ずれによって大きく被災しました。これらの事例は逆断層に沿った地域で断層の影響を評価することの難しさを改めて印象付けるものとなったように思います。おそらくこのような背景もあって、原子力施設については施設直下の断層破碎帯に関する安全審査が増加するとともに、平成 25 年 7 月に施行された新規制基準では、将来活動する可能性のある断層等の直上への施設の設置を禁止することになりました。

一方で原子力施設を除けば、断層の変位を受けながら持ちこたえた施設の事例をもとに、断層上の既存の施設や、断層を避け得ない施設に対策を施した事例も少なからずあります。1999 年のトルコイズミット(Izmit)地震ではジョルジュク(Golcuk)という街の海軍基地内の堅牢な半地下倉庫群を横切って断層が現れましたが、地盤の破壊面はこれらの倉庫を迂回するように現れ、倉庫は僅かに剛体回転をただけに留まりました。このような観測事例を積み上げ反映させる形で、アメリカカリフォルニア大学バークレー校でヘイワード(Hayward)断層直上にあるメモリアムスタジアムの耐震改修工事が行われています。この工事は先に述べたアルキストプリオロ地震断層法に抵触するものでもあったため、法廷でその是非が争われましたが、カリフォルニアの裁判所はこれが入念に計画されたものであるとし、計画は承認されることとなります。もちろん改修されたスタジアムはまだ断層変位の洗礼を受けていません。実際のところ、私たちの想像を超えたところでどのようなことがおこるのかわかりません。しかしこのような先進的な取り組みは私たちも可能な選択肢の一つとして検討を深めていかなければならないと考えています。

確かに重要構造物である原子力施設の場合、僅かでも動く疑念がある限り、これを避けなければならないとするのは一つの見解です。しかし一方で、新潟県中越地震における山古志のように地上に現れた断層から大きく外れて被害の集中する変形の帯が現われたり、台湾のように複雑に折れ曲がりながら地上に現れた断層の事例を見ると、単に断層線上にあるのかないのかという議論だけでは済まず、変形があった時にどうなるかという議論に踏み込んでおく必要が間違いなくあるように思います。これは単に原子力施設に留まらず周辺地域全体も含めて考える問題でもあります。地震断層や地盤の変形はその突然の変位の危険性という面ばかりではなく、これらの変形の帯に沿って

豊饒な地盤を生み、その上で人がそれに適した農地を広げ、街を広げ、地域社会を発展させてきた面もあるからです。

このような議論があつて、土木学会原子力土木委員会では、上記の問題意識を共有する研究者、実務者に働きかけ「断層変位評価小委員会」を発足させることになりました。その活動の中で、現状の科学技術の知識の中で断層についてどこまでが明らかにされ、どのような問題が未解決のまま残っているのか整理して、科学技術者ができうること、その限界、そして限界を超える場合の対応についてどのような可能性があるのか整理し、社会に提示することを目標に設定しました。そして調査 WG (WG1)、解析 WG (WG2)、活用 WG (WG3) の 3 のワーキンググループを組織し、多くの文献を収集しその検討を進めてきました。

WG1 では断層変位評価のための調査に関わる文献レビューを行い、これらを第Ⅱ編にまとめました。地盤を構成する岩や土が破壊する時に、それが生じる前にどのような応力が潜在的に働いていたのかが必須の情報になるのですが、これは著しく困難な課題です。広域の応力を推定したり、局所的な応力を計測したり様々な試みがなされて、それぞれに重要な進展があるのですが、全体を概観すればジグソーパズルで欠損したピースも少なからずあつて、経験則を踏まえた決定論的、あるいは確率論的な評価だけでは対応できない課題があることが認識されるのです。

これらを補う意味で第Ⅲ編 (WG2) では数値解析と実験による断層変位の想定法の最前線の研究をまとめています。それぞれの数値解析手法や実験手法の特長と限界を示すとともに、実務の適用に向けてこれらがどのように組み合わせられ活用されているのかを明らかにするとともに今後の課題を浮き彫りにしています。

こうした検討結果は地盤上に載るシステムとしての施設に入力されることになります。構造物の損傷評価、 fragility 評価をどのように行うのか、その上で施設全体の安全性を評価し、さらに残余のリスクへの対応をどうするかについて第Ⅳ編 (WG3) でまとめています。

解決しなければならない課題は山積みですが、この報告書はこの分野の専門家が現状で知り得る知識と情報を網羅し、地震の際に地表に現れる断層変位と合理的に向き合う技術の進展への方向性を示したものです。単に関連する分野の方々ばかりでなく、他分野の方々の広範な議論に資するものであれば幸いです。

平成 27 年 7 月
断層変位評価小委員会 委員長
小長井一男

断層変位評価小委員会 委員構成

会務	氏名	所属	WG※
委員長	小長井 一男	横浜国立大学	
副委員長	奥村 晃史	広島大学	1
委員兼 WG1 主査	遠田 晋次	東北大学	1
委員兼 WG2 主査	谷 和夫	国立研究開発法人 防災科学技術研究所	2
委員兼 WG3 主査	中村 晋	日本大学	3
委員	阿部 慶太	(公財)鉄道総合技術研究所	3
委員	入谷 剛	日本原子力発電株式会社	
委員	蛭沢 勝三	(一財)電力中央研究所	1,2,3
委員	木場 正信	(株)エングローブコンサルタント	1,2
委員	高尾 誠	東京電力株式会社	1,2
委員	竹内 渉	東京大学	
委員	佃 榮吉	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	
委員	東畑 郁生	東京大学	
委員	中瀬 仁	東電設計株式会社	2
委員	秦 弘和	中部電力株式会社	1
委員	堀江 正人	関西電力株式会社	
委員	平松 良浩	金沢大学	1
委員兼幹事	菊本 統	横浜国立大学	1,2
元委員	橋詰 正広	中部電力株式会社	1
元委員	原口 和靖	関西電力株式会社	
幹事長	小早川 博亮	(一財)電力中央研究所	
幹事	青柳 恭平	(一財)電力中央研究所	1
幹事	澤田 昌孝	(一財)電力中央研究所	2
幹事	重光 泰宗	関西電力株式会社	2
幹事	中野 修	日本原子力発電株式会社	
幹事	宮川 義範	(一財)電力中央研究所	3
元幹事	中村 大史	関西電力株式会社	
オブザーバー	大島 貴充	東京電力株式会社	
オブザーバー	大島 靖樹	(一財)電力中央研究所	
オブザーバー	大野 裕記	四国電力株式会社	1,2
オブザーバー	岡田 哲実	(一財)電力中央研究所	
オブザーバー	金子 岳夫	東京電力株式会社	
オブザーバー	蒲池 孝夫	日本原燃株式会社	1

オブザーバー	小林 正典	東北電力株式会社	1,2
オブザーバー	五月女 敦	電源開発株式会社	2,3
オブザーバー	櫻庭 孝一	日本原燃株式会社	1
オブザーバー	清水 雄一	中国電力株式会社	1,2
オブザーバー	鈴木 義和	(一財)原子力安全推進協会	1,2,3
オブザーバー	辻 弘一	(一財)原子力安全推進協会	2,3
オブザーバー	当麻 純一	株式会社電力計算センター	
オブザーバー	松村 和雄	北陸電力株式会社	1
オブザーバー	持田 裕之	電源開発株式会社	1
オブザーバー	森 俊朗	日本原子力発電株式会社	2
オブザーバー	和仁 雅明	中部電力株式会社	3

※ 1 : 調査 WG, 2 : 解析 WG, 3 : 活用 WG

目 次

I 委員会の活動の概要

1. 活動の概要（小早川）
2. 断層変位評価のフロー（小早川）

II 断層変位評価のための調査（WG1）

1. 断層評価にかかわる応力場の評価（遠田，平松，松村，蒲池，青柳）
 - 1.1 日本列島の第四紀後期～現在のひずみ場，応力場，断層運動
 - 1.2 発震機構・断層面条線を用いた応力場推定
 - 1.3 誘発地震活動から推定される活断層周辺の応力状態
 - 1.4 浅部応力と浅部断層摩擦特性，副断層の発生
 - 1.5 初期地圧測定手法
2. 断層評価のための地質調査（大野，清水，秦，持田，蒲池）
 - 2.1 断層の分布・性状に関する調査
 - 2.2 活動性調査のための調査
3. 地表地震断層の断層変位調査（青柳，鈴木）
 - 3.1 断層変位地形調査に基づく事例
 - 3.2 ボーリング調査に基づく事例
 - 3.3 トレンチ調査・露頭調査に基づく事例
 - 3.4 特定地点の調査結果から変位量を評価する上での留意点
4. 断層変位の整理（鈴木，高尾，青柳）
 - 4.1 主断層と副断層の区分
 - 4.2 スケーリング則に基づく主断層の断層変位量
 - 4.3 地震に伴って生じた副断層の変位量
 - 4.4 基準化した断層変位量
 - 4.5 副断層の変位量データを拡充するための方法
5. 断層変位の想定方法（鈴木，高尾，小林）
 - 5.1 決定論的な想定方法
 - 5.2 確定論的な方法
6. まとめ（遠田）

III 数値解析・模型実験による断層変位評価(WG2)

1. まえがき (鈴木)
2. 数値解析 (中瀬, 澤田, 木場, 森, 重光, 菊本)
 - 2.1 解析手法の概要
 - 2.2 断層全体をモデル化した数値解析
 - 2.3 表層をモデル化した数値解析
 - 2.4 実務への適用に向けて
3. 模型実験 (菊本, 谷, 澤田)
 - 3.1 重力場での模型実験
 - 3.2 遠心力場での模型実験
4. まとめ (鈴木, 中瀬, 菊本)

IV 断層変位が及ぼす影響評価 (WG3)

1. まえがき (中村)
2. 国内外で生じた構造物の損傷事例 (五月女)
 - 2.1 台湾・集集地震による被害
 - 2.2 トルコ・コジャエリ地震による被害
 - 2.3 トルコ北西部デュズジェ地震による被害
 - 2.4 国内の地震による被害
 - 2.5 地盤変状と構造物損傷との関係
3. 構造物に及ぼす影響の評価事例
 - 3.1 社会基盤施設における評価と対策 (和仁)
 - 3.2 FEM を用いた原子力発電所の評価 (辻)
 - 3.3 DEM や MPM を用いた評価 (阿部)
 - 3.4 梁ばねモデルを用いた地中構造物の損傷確率評価 (宮川)
4. 原子力発電施設に及ぼす影響の考え方および最近の研究動向
 - 4.1 基準類における断層変位影響の扱い (蛭沢)
 - 4.2 最近の研究動向 (蛭沢)
 - 4.3 外国における事例 (中村)
 - 4.4 原子力発電施設に及ぼす影響の考え方 (中村)
5. まとめ (中村)

I 委員会の活動の概要

1. 活動の概要

委員会は、断層変位評価に関する技術の現状を取りまとめること、および断層変位評価に関するメッセージ・提言の発信を主な活動内容とし、平成25年10月から平成27年5月までの2か年間の間に合計6回の委員会を開催した。技術の現状の取りまめにあたっては、1)委員や外部識者からの話題提供、2)調査、解析、活用の3つのWGに分かれた文献調査、3)現状技術を俯瞰できるような断層変位の評価フローに対する小委員会内での議論の3つを実施した。1)の話題提供は広く一般の方も無料で聴講が可能な公開講演会の形式とした。各公開講演会の講演者と講演タイトル、および講演者からの断層変位評価に対するメッセージを表1-1に示す。講演会で講演者が用いた資料は講演会終了後、委員会のホームページ (<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp03/>) に公開した。

表 1-1 公開講演会の概要

第1回 平成25年10月15日 「断層変位評価にかかわる調査と広域応力の評価」	<u>断層変位評価に関する課題</u> 小長井一男 委員長（横浜国立大学） 「個別の断層調査にとどまらず、地形変動データなどの面的な情報を活用・分析し、地震発生が地域システムにどのような影響を与えるのか検討することが求められる。その際に応力場の解明が極めて重要である。」
	<u>敷地内破砕帯調査の現実と課題</u> 奥村晃史 副委員長（広島大学） 「破砕帯調査結果の評価は、知識と経験に基づく第三者の適切な判断に基づいてまとめる必要がある。有識者会合によって行われている破砕帯調査には深い問題がある。正しい科学に基づき、間違っものは排除していく必要がある。」
	<u>誘発地震からみた広域応力場の安定性と均質・不均質性に関する議論</u> 遠田晋次 委員（東北大学） 「断層変位の評価では、応力場の理解が不可欠である。特に、断層が小規模な場合には、応力場の不均質性に影響を受けやすいため、広域応力場だけでなく、評価対象周辺のローカルな応力場の解明に努めねばならない。」
第2回 平成25年12月17日 「主断層・副断層の変位評価」	<u>原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法 -敷地内断層評価手法検討委員会（原安進）報告の概要-</u> 鈴木義和 （（一社）原子力安全推進協会） 「断層の活動性のみに着目した評価を行うのではなく、仮に活動性が否定できない場合においても、その断層変位が重要施設の安全機能に影響するかどうかを科学的・合理的に評価すべきである。」
	<u>確率論的断層変位ハザード解析手法について</u>

	高尾誠 委員（東京電力） 「地震時に発生する可能性のある地表における断層変位量については、確率論的なアプローチで評価することが世界の流れである。日本においても実務への適用を目指して確率論的評価手法の研究・検討を進めていく必要がある。」
第3回 平成26年3月19日 「断層性状の評価に関する事例」	<u>断層性状の評価に関する事例 -大飯発電所の敷地内破碎帯調査について-</u> 原口和靖 委員（関西電力） 「一般に規模が小さい破碎帯は、連続性・活動性ともにそもそも乏しいと考えられ、これら进行评估することは困難を伴う。特に、活動性の評価に関しては、上載地層法が基本とされているが、規模の小さい破碎帯への適用性や上載地層法に代わる断層性状などに基づく評価法等の確立が課題である。 また、規模、活動性が小さい破碎帯については、調査手法の高度化だけでなく、施設への影響評価の観点から、考慮対象要否の判断を行うことも合理的であると考えられる。」 <u>山岳トンネルの地盤変形による被害</u> 野城一栄 （鉄道総研） 「昨今のトンネルの建設技術の進歩により、地質が悪いところでもトンネルを安全に建設できるようになった。また、線形に制約がある高速鉄道においては構造物に占めるトンネルの割合は必然的に高くなる。このため、昨今、山岳トンネルは重要性が増してきているといえる。耐震設計法、対策など、山岳トンネルの耐震性について議論を深めていく必要があると思う。」
第4回 平成26年7月18日 「構造物への影響から見た断層変位評価」	<u>断層変位による建物・構築物（原子炉建屋）の試解析について</u> 辻弘一 （(一社) 原子力安全推進協会） 「今後、いくつかのサイトで、断層変位が作用する重要構造物の解析・評価が実施されるものと考えられる。そのためには、基礎スラブ、地下外壁等の建屋応答評価ならびに面外せん断力の許容限界等の耐力評価についての知見の蓄積だけでなく、断層変位に対する建屋 fragility 評価手法の進展が必要となる。」 <u>断層変位の構造物への影響評価手法開発及び評価基準整備の進め方の提案</u> 蛭澤勝三 委員（(一財) 電力中央研究所） 「断層変位の構造物への影響評価手法の開発及び同評価技術基準の整備は、喫緊の課題であり、国内外の関連機関が積極的に取り組んでいる。講演者は、各機関の取り組みを紹介すると共に、評価手法開発及び評価基準整備の進め方の提案を行った。進行役が提案内容について、参加者にコメント等を求めたところ、異議がなく了解された。」

第 5 回 平成 26 年 10 月 21 日 「断層変位評価の解析技術」	<u>衛星リモートセンシングを用いた広域の地盤変動解析</u> 竹内渉 委員（東京大学） 「リモートセンシング技術の発展に伴い、マイクロ波を用いた干渉 SAR 衛星画像を解析することによって、地盤変動を高精度に、経済的に、広域に把握することが可能となっている。この技術を基軸に、GPS 基準点測量を補完的に用いることにより、断層運動による地表面変動を広域に面的に把握することができる。」 <u>エンジニアリングにおける地圧測定と二～三の例、地圧のばらつきなど</u> 新孝一（(一財)電力中央研究所） 「震源断層のずれに引きずられ、いわば境界条件に規制されて浅部地盤がずれるとき、浅部の地圧の役割は小さいだろう。一方、震源断層がいつ・どれだけずれるか、さらには応力降下量、これらは地圧、物性、そして境界条件で議論しうる事項のはず。境界条件によって、室内載荷実験の最大荷重後も破壊をゆっくりと制御して進行させたり瞬時に破壊させたりできる。研究が進みこのような観点から断層のずれを議論できる日の到来することを期待したい。」 <u>地震発生層より浅い部分から放出される地震動の定量的評価</u> 壇一男（(株)大崎総合研究所） 「原子力発電所から数 km 以内に活断層が存在する場合、従来、地震波の励起が少ないため無視されてきた地震発生層よりも浅い地盤からの地震波の定量的評価が課題となる。今後、摩擦構成則のパラメータスタディや地震記録の再現なども行って、定量的評価法の確立をめざしたい。」
第 6 回 平成 27 年 2 月 17 日	<u>断層変位に対する社会基盤施設の課題</u> 濱田政則（早稲田大学） 「断層変位小委員会での検討結果を是非とも土木学会として社会に広く発信することを希望します。また他の関連学協会との連携を益々強化することを望みます。」 <u>断層問題に対する High Performance Computing の応用</u> 堀宗朗（東京大学） 「断層変位は、事例が少ないとはいえ、甚大被害をもたらす可能性があることは否定しようもない。断層変位量の推定も一筋縄ではいかない。従来の方法に限界があることは明確であり、大規模数値解析を利用するような、断層変位に関するより合理的な評価・対応の方法を研究開発することが望まれる。」

※講演者からのメッセージは、委員会での審議結果を反映したものではありません。

2. 断層変位評価のフロー

本委員会では、断層変位評価のためのフローを図1に示すように整理した。評価対象地点での断層変位はプレート運動によって生じる広域応力に影響を受ける。対象地点での初期応力に加え周辺から運動による応力増分が断層変位を生じさせることになるが、その評価は決定論的に扱う方法と確率論的に扱う方法がある。決定論的に扱う場合には、具体的な断層変位を与えることにより、構造物に生じる損傷の程度を評価し、安全性評価を行う。一方、確率論的に扱う場合には、断層変位量とその変位量を超過する確率との関係（断層変位ハザード曲線）を評価するとともに、断層変位量に対する構造物の損傷確率を評価（ fragility 評価）し、両者の関係に基づくリスク評価を実施することになる。構造物の損傷評価には例えば入力地震動によっては構造物の一部に塑性化が生じて応答特性が変化するなどの事象も生じることがあるため、入力地震動などの初期条件の評価も必要となる。

このフローに関連する技術や知見は多岐にわたるため、断層評価に対する調査、解析およびその活用の3つのWGに分けて現状を調査することとした。調査WGは断層変位に対する地質調査、広域応力の評価とそれに対する調査を対象範囲とした。ただし、プレート運動の評価は対象外とした。解析WGは数値解析による断層変位評価を主な対象とした。この時、実験は、数値解析の検証として重要であることから、断層変位評価に関する実験も調査対象とした。断層変位ハザード評価は、調査の側から見た評価、数値解析や実験による評価の両側面があることから、調査WG、解析WGのどちらも対象として、技術の漏れが無いように考慮した。また構造物の損傷評価および fragility 評価は活用WGの対象とし、入力地震動などの初期条件の評価は調査の対象からは外した。

地震に対する地盤の評価については、地震動による基礎地盤・斜面の安定性に関する高度化されたフローがある。この地震動による評価と断層変位評価との相違は、ひとえに地震で生じた断層変位の例は少ないのに対し、地震動の観測データは数多く取得されていることによると考えられる。これらの観測データに基づき、数多くの安定性評価事例が時間の経過とともに増えることにより、その評価体系は高度化されている。

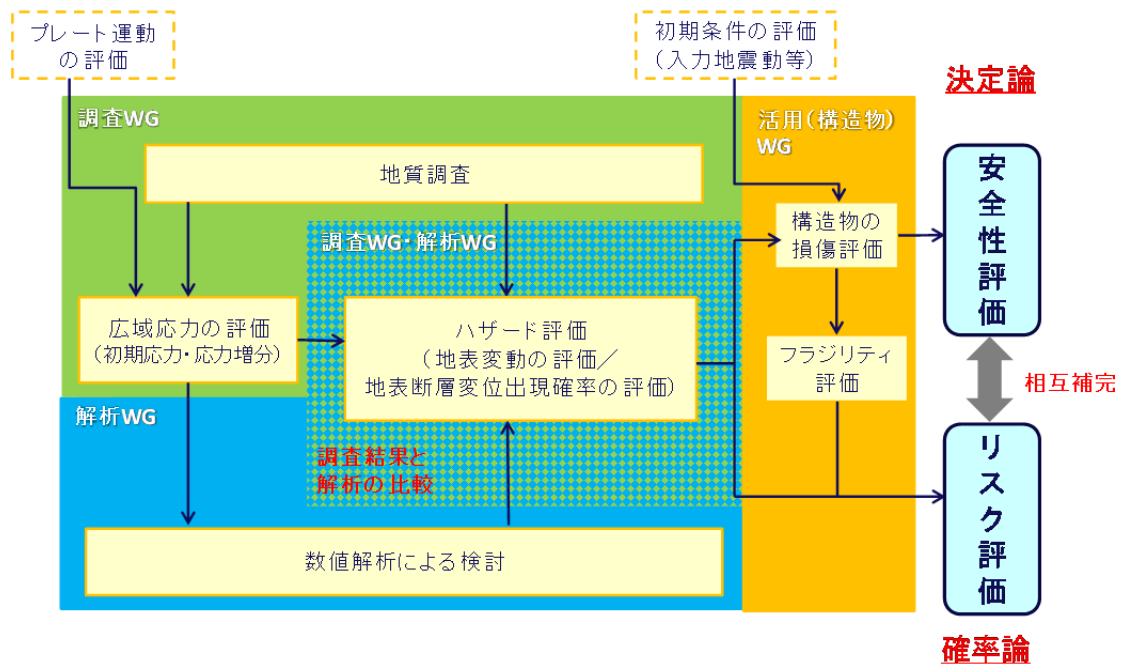


図1 断層変位評価のフロー

Ⅱ．断層変位評価のための調査

目 次

1.	断層変位評価にかかわる応力場の評価・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-1
1.1	日本列島の第四紀後期～現在のひずみ場, 応力場, 断層運動・・・・・・・・	Ⅱ-1
1.2	発震機構・断層面条線を用いた応力場推定・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-2
1.3	誘発地震活動から推定される活断層周辺の応力状態・・・・・・・・	Ⅱ-5
1.4	浅部応力場と浅部断層摩擦特性, 副断層の発生・・・・・・・・	Ⅱ-8
1.5	初期地圧測定手法・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-11
2.	断層評価のための地質調査・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-17
2.1	断層の分布・性状に関わる調査・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-17
2.2	活動性評価のための調査・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-20
3.	地表地震断層の断層変位調査・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-26
3.1	断層変位地形調査に基づく事例・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-26
3.2	ボーリング調査に基づく事例・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-28
3.3	トレンチ調査・露頭調査に基づく事例・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-30
3.4	特定地点の調査結果から変位量を評価する上での留意点・・・・・・・・	Ⅱ-34
4.	断層変位量の整理・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-35
4.1	主断層と副断層の区分・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-35
4.2	スケーリング則に基づく主断層の断層変位量・・・・・・・・	Ⅱ-36
4.3	地震に伴って生じた副断層の変位量・・・・・・・・	Ⅱ-38
4.4	基準化した断層変位量・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-39
4.5	副断層の変位量データを拡充するための方法・・・・・・・・	Ⅱ-40
5.	断層変位の想定方法・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-44
5.1	決定論的な方法・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-44
5.2	確率論的な方法・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-45
6.	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・	Ⅱ-51

1. 断層変位評価にかかわる応力場の評価

1.1 日本列島の第四紀後期～現在のひずみ場、応力場、断層運動

日本列島各地の地質構造をみると、東北日本弧中部や北陸地域など一部の地域では、現在の応力場の片鱗が第三紀鮮新世以降（約 500 万年前以降）から既に始まっていた。しかし、現在と同様の応力場として安定したのは第四紀後期の約 50 万年前以降と考えられる。西南日本では約 50 万年前のいわゆる「六甲変動¹⁾」開始以降、東北日本では 100 万年前以降の東西圧縮応力場による脊梁地域の活断層の活動開始以降^{2),3)}、関東周辺では 100–50 万年前の伊豆半島衝突以降、変動地形および地質構造で確認される活断層の変位センスに変化はみられないことがわかっている。つまり、確認される活断層の諸データをもとにして現在の応力場の推定が可能である。岡田・安藤（1979）⁴⁾は活断層タイプを基本とし、代表的な地震のメカニズム解を援用することによって、地域別の応力場推定の基礎となる活断層区分を提唱した。その後、複数の研究によって変位速度、走向・レイクなどのより詳細な活断層データをもとに第四紀後期～現在の水平最大圧縮応力軸や水平ひずみ速度を求める試みがなされた^{5),6),7)}（図 1-1）。東北地方では、新第三系および第四系下部の地質断面解析から、数%～14%の東西短縮速度（平均 10^{-7} /年オーダー）が求められている⁸⁾（図 1-1）。また、Okada and Ikeda（2012）⁹⁾は反射法地震探査・重力・新第三系以降の地質データをコンパイルしバランス断面法により、東北地方を横断する断面での新第三紀鮮新世-第四紀の短縮量を 10–15 km と求めた。平均すると 10^{-7} /年のひずみ速度となる。

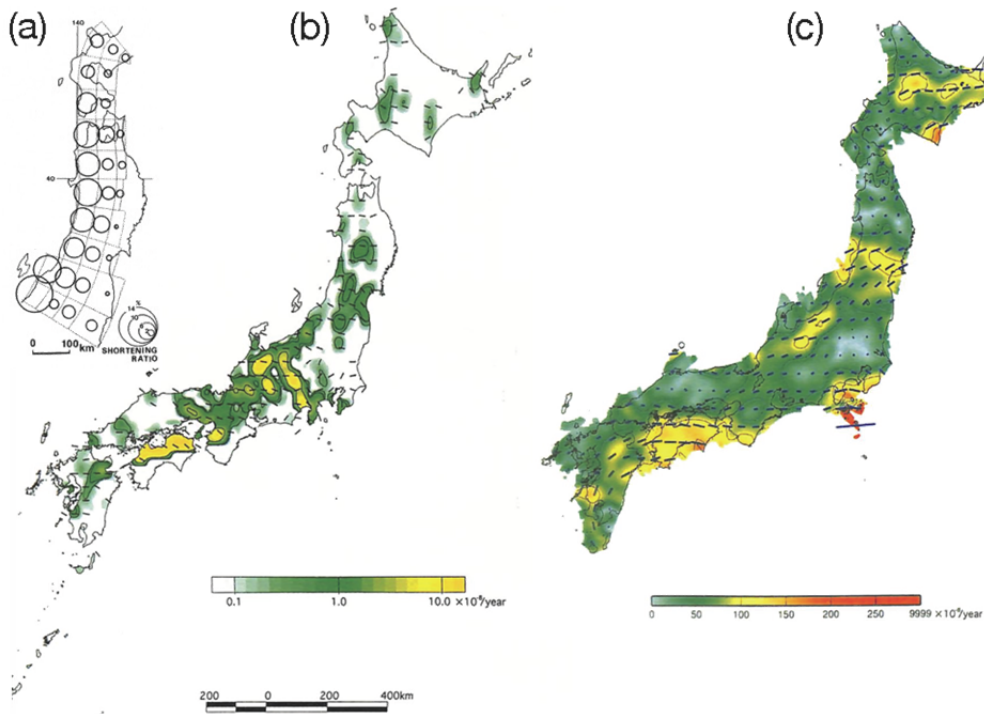


図 1-1 日本列島内陸の地殻ひずみ速度。

a) 新第三系および第四系下部の地質断面解析による水平ひずみ率⁸⁾。 b) 活断層データによって求めた水平ひずみ速度分布⁷⁾。黒線は水平主応力軸の方向を示す。 c) GPS 観測データに基づく水平ひずみ速度^{7)が10)を一部改変}。黒線は最大せん断方向を示す。

一方、測地学的にも日本列島の水平ひずみ速度や面ひずみ速度が検討されてきた。橋本（1990）¹¹⁾および石川・橋本（1999）¹²⁾は明治以来の測量結果を用い三角点間の距離の変化率を求め、北海道・本州・四国・九州の地殻水平ひずみ速度を求めた。また、鷲谷ほか（1999）¹⁰⁾、Sagiya et al.（2000）¹³⁾は1994年以降に整備されたGPS観測網によるデータを用いて水平ひずみ速度を求めた（図1-1）。これらの測地学的水平ひずみ速度は、ひずみの主軸方向や最大せん断ひずみの向きなどは活断層による推定にほぼ一致するが、ひずみ速度は1～2オーダー大きい。また、神戸-新潟ひずみ集中帯¹³⁾に代表されるように、ひずみ速度の速い地域は活断層による推定とは必ずしも一致しない。

上記の地質学的ひずみ速度と測地学的ひずみ速度の矛盾は、前者が数10万～数100万年間、後者が数年～100年間という時間スケールの違いによる可能性が高い。後者には海溝型地震のインターサイスミック（interseismic）な弾性変形を捉えているとの指摘があったが、東北地方では1978年の宮城県沖地震（M7.4）や1994年の三陸はるか沖地震（M7.6）など従来「固有地震」とされた海溝型地震でインターサイスミックな弾性変形は解消されていなかった。結局、2011年東北地方太平洋沖地震がこの矛盾を解消する超巨大地震であった可能性が高く、地質学的短縮速度は内陸活断層変位に生じた超長期間の永久変位のみを考慮して推定されていたことになる。

一方、測地学的に推定されたひずみが弾性的に応力と線形関係にあるとは限らない。地殻が弾性的または非弾性的挙動のどちらを示すかは時空間スケールで異なるが、下部地殻・マントルなどの粘弾性的挙動や一部プレート境界でのスロースリップ、火山活動や大地震後の余効変動など、一時的な非弾性的シグナルも含まれていることが考えられる。

1.2 発震機構・断層面条線を用いた応力場推定

地殻内地震の震源の深さ（数km～十数km）において応力を計測することは、技術・費用両面から非現実的である。そのため、応力場を推定するために地震の発震機構解を用いるのが一般的である。発震機構解を用いた応力推定方法には、1）発震機構解のP軸を直接に最大主圧縮応力軸（ $\sigma_{\max}$ ）とする方法と、2）複数の発震機構解を用いてそれらの発生を同時に起震できる応力テンソルを求める方法（応力テンソル逆解析）がある。前者は2つの節面から45°の方向を主応力の方向とするが、断層面は最大圧縮応力軸から必ずしも45°とはならず、むしろ岩石実験からは30°程度が多いことから、±15°程度の誤差を含んでいる。そのような問題があるとはいえ、信頼できる個々の地震の解を図示することにより応力場の傾向を手軽に捉えることができる利点が大きく、1970年代から応力場推定に使われてきた。一方で、応力テンソル逆解析は、地質学における小断層解析¹⁴⁾などをもとに Gephart and Forsyth（1984）¹⁵⁾や Michael（1984）¹⁶⁾、Michael（1987）¹⁷⁾らによって確立された手法である。3つの主応力軸の方向・ブランチ、それらの応力比が求められる（図1-2）。応力テンソル逆解析は用いるデータ量が鍵となる。その点、年々向上する地震検知能力に加えて、P波初動の押し引きだけでなくS波振幅やCMT解などを利用する手法の発展にともなって大量の発震機構解が利用できるようになり、応力逆解析研究を促進した。例えば、防災科学技術研究所のF-net 発震機構解は1997年以降の日本列島のM2.3程度以上の解を網羅している。

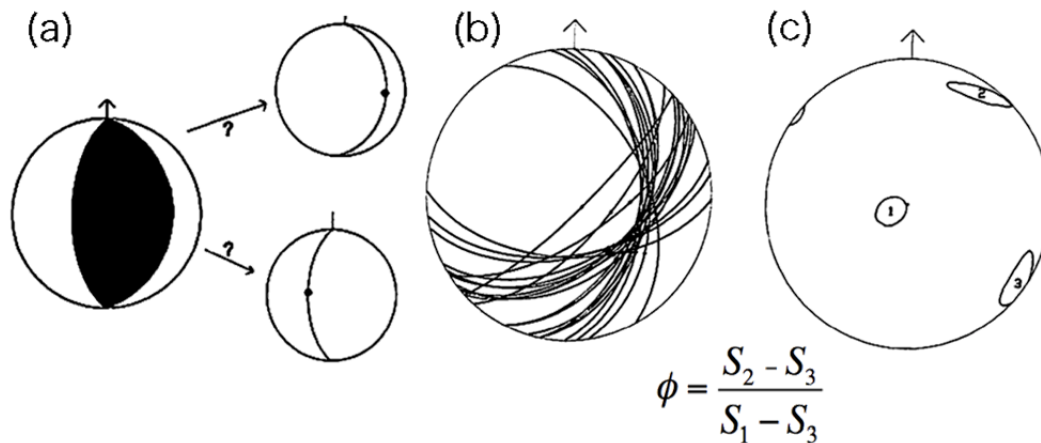


図 1-2 応力テンソル逆解析の仕組み¹⁷⁾

(a) ビーチボールは1つの地震の発震機構解を示し、二つの節面のいずれかが断層面に相当する。(b) あるエリアで発生した多数の地震の節面を下半球投影で重複表示したもの。(c) これらの節面の分布を最もよく説明する主応力軸(楕円は95%信頼区間)が応力逆解析により求められる。

このような地震学的アプローチによって日本列島の地殻応力場^{例えば, 18), 19), 20)}(図 1-3) が推定されている。本州では伊豆半島・関東山地周辺を除いて Shmax 方位はほぼ西北西-東南東で、伊豆半島はフィリピン海プレートの本州への衝突にともなって Shmax は南北となる。関東山地や関東南部、東海地域では、このフィリピン海プレートの本州側への衝突や沈み込みの影響がみられる。

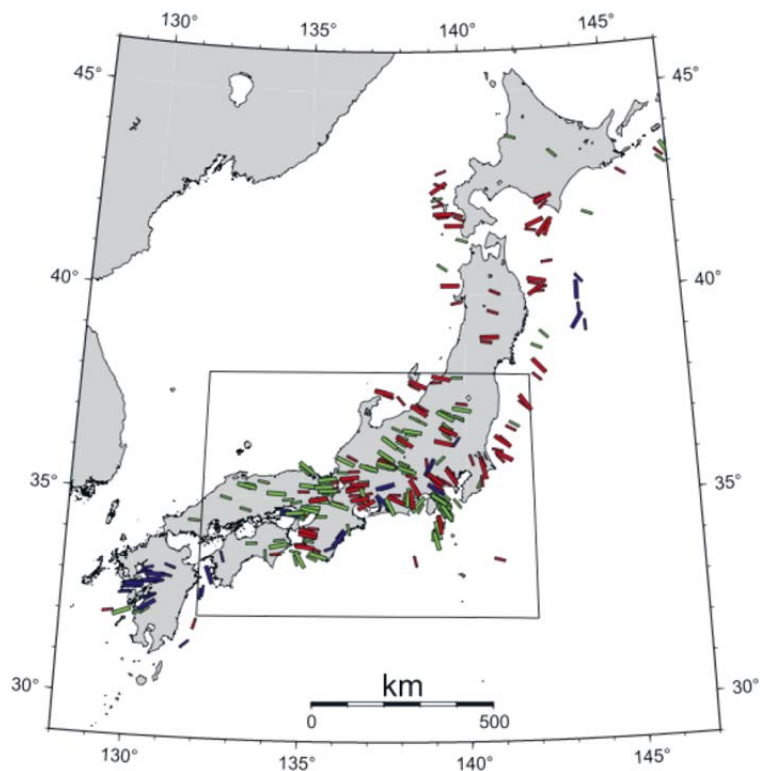


図 1-3 35km 以浅の発震機構解を用いて求めた最大水平圧縮応力軸²⁰⁾

正断層解は青、横ずれ断層解は緑、逆断層解は赤で示す。四角の枠は、元文献での検討範囲。

一方で、応力テンソル逆解析による応力場推定には次の2つの問題点がある。

1つは、発震機構解のサンプル範囲内で応力場を均一とする仮定である。サンプリングは時空間を区切って行われるが、この間に応力場が不変という仮定が必要となる。つまり、サンプリング時空間内の短波長の変動や不均質は無視され、領域全体で平均化されたものを推定することになる。

もう1つの問題点は、応力テンソル逆解析の根幹となる仮定の妥当性である。これをWallace-Bott 仮説といい、「断層はせん断応力を最大とする向きに変位する」という前提に立っている。しかし、実際の断層変位は必ずしもせん断応力最大の向きに生じるわけではない。顕著な例外事象として、slip partitioning 現象が挙げられる(図1-4)。斜め滑りを起こす断層では、様々なスケールでその先端部分が横ずれと純粋な逆断層に分岐して現れることがあり、多数の報告例がある(例えば、21), 22), 23)。

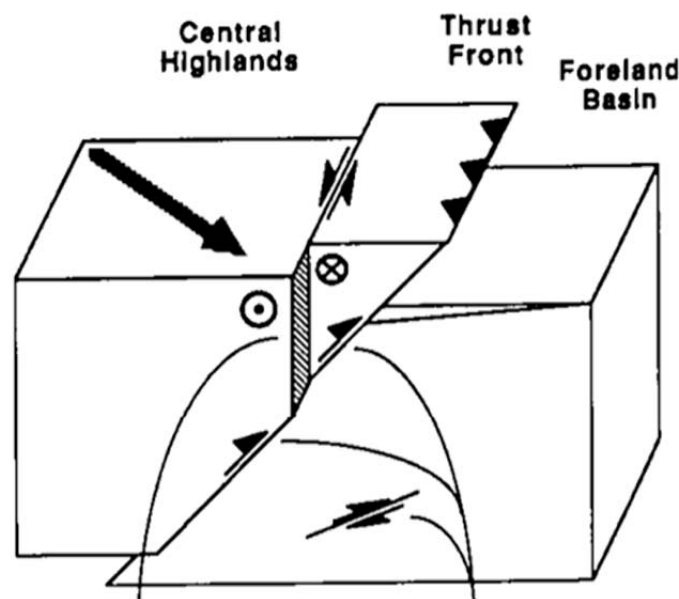


図1-4 Slip partitioning の模式図.

地下深部の断層運動は斜めすべりでも、地表近傍で横ずれ断層と逆断層の組み合わせに変化する²¹⁾。

応力場推定に関する最近の進展として、地震のモーメントテンソル解(CMT)を直接用いる方法が提案されている。Terakawa and Matsu'ura (2010)²⁴⁾は、赤池-ベイズ情報基準量(ABIC)を用いてCMT データからテクトニック応力の3次元パターンを推定する方法を開発した。それによると、防災科学技術研究所の12,500の小・中規模地震(M<5)を用いて求められた応力場(図1-5)は、これまで示されてきた日本列島の広域からローカールスケールでの応力場とほぼ一致した。千島海溝-日本海溝-南海トラフ沿いは基本的に東西圧縮、琉球・伊豆ボニン背弧域は海溝に垂直な向きの引張軸が卓越する。千島前弧スリバー、伊豆弧の衝突、別府島原地溝帯に対応するローカールスケールの構造も捉えられた。

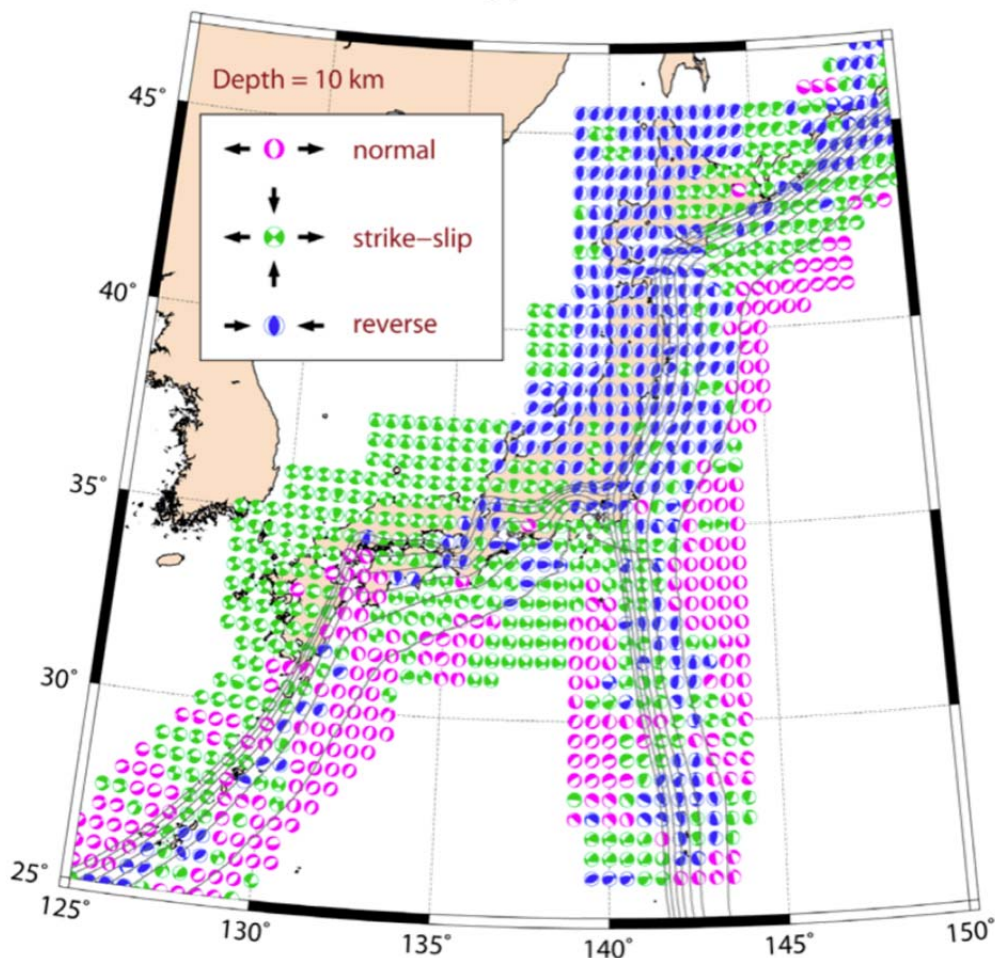


図 1-5 赤池-ベイズ情報基準量 (ABIC) を用いて CMT データから推定された日本列島とその周辺のテクトニック応力²⁴⁾.

1.3 誘発地震活動から推定される活断層周辺の応力状態

1.2 節で示した手法以外に、活断層周辺の応力場を推定するために、大地震前後での発震機構解の変化を利用する方法がある²⁵⁾ (図 1-6). 大地震の余震活動による主応力軸の方位・プランジを応力テンソル逆解析によって求め、大地震前の定常的な地震活動の主応力軸の方位・プランジと比較し、応力軸の回転の程度を調べるものである. 本震による応力変化は、震源断層でのすべり分布モデルによっておおよそ推定できるので、回転の大きさは地殻内の差応力に対する地震時応力降下の比で決まる. すなわち、主応力軸の回転の程度を調べることで、大地震直前の活断層周辺の差応力状態を推定できる. 実際、東北地方太平洋沖地震後には震源域周辺²⁶⁾だけではなく内陸日本海側の地域²⁷⁾まで主応力軸が有意に回転したとの報告がある (図 1-7). また、主応力軸が大地震時によって有意に回転するのであれば、その震源断層の次の地震までの間に主軸の方向は再び元に戻る. つまり、地震履歴のわからない活断層周辺の常時地震活動の応力解析から地震サイクルの時間的位置付けを推定できる、という指摘もある²⁵⁾.

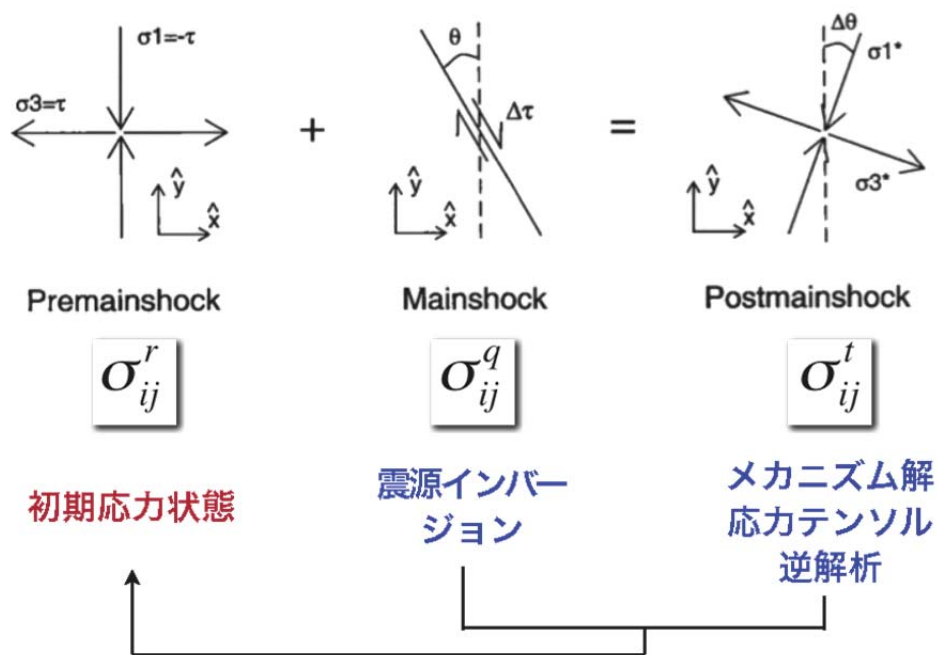


図 1-6 大地震の震源過程と余震の発震機構解を用いて、震源断層沿いの初期応力状態を推定する手法の概念図²⁵⁾。

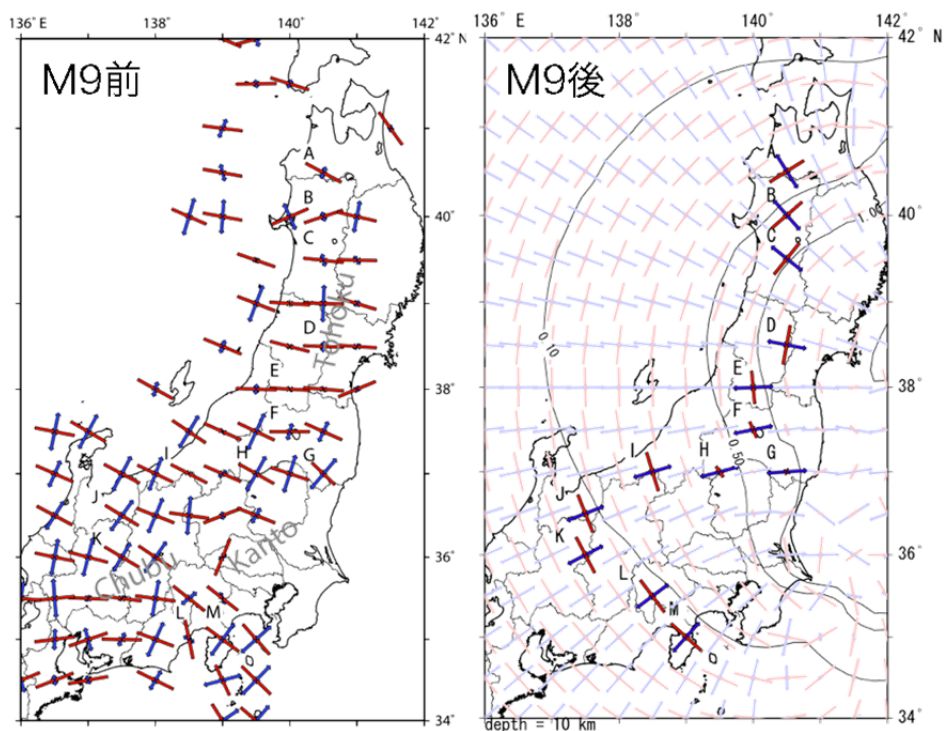


図 1-7 応力テンソル逆解析を用いて求めた 2011 年東北地方太平洋沖地震前後の主応力軸（赤：最大主応力軸，青：最小主応力軸）の変化²⁷⁾。

本震後についての半透明表示は東北地方太平洋沖地震による応力変化を考慮して、主応力軸を計算によって求めたものの。

一方で、このような主応力軸の回転は見かけのものとする反論がある。例えば、東北地方太平洋沖地震による東北地方内陸部や日本海側での差応力変化量は1MPa以下であり、主応力軸を有意に回転させるほど大きくない。その程度の差応力のみによって断層変位が生じる程に内陸活断層の強度が弱いのではなく、むしろ多様な断層群の一部が東北地方太平洋沖地震によって選択的に誘発されたともいえる。応力場や構造は数 km オーダーの短波長で変化しているとの考えもある²⁸⁾。同様の指摘は、東北地方太平洋沖地震の1ヵ月後に正断層型地震が誘発された福島県浜通りの地震(M7.0)についてもなされている。浜通り地域では、東北地方太平洋沖地震によって東西圧縮場から東西引張場に応力場が転換されたわけではなく、東北地方太平洋沖地震前にも地殻浅部で複数の正断層型の地震が既に発生していた²⁹⁾ (図1-8)。このような議論を鑑みると、大地震前後での主応力軸の回転から地殻応力状態を推定する手法には検討すべき課題が残されていると言えよう。

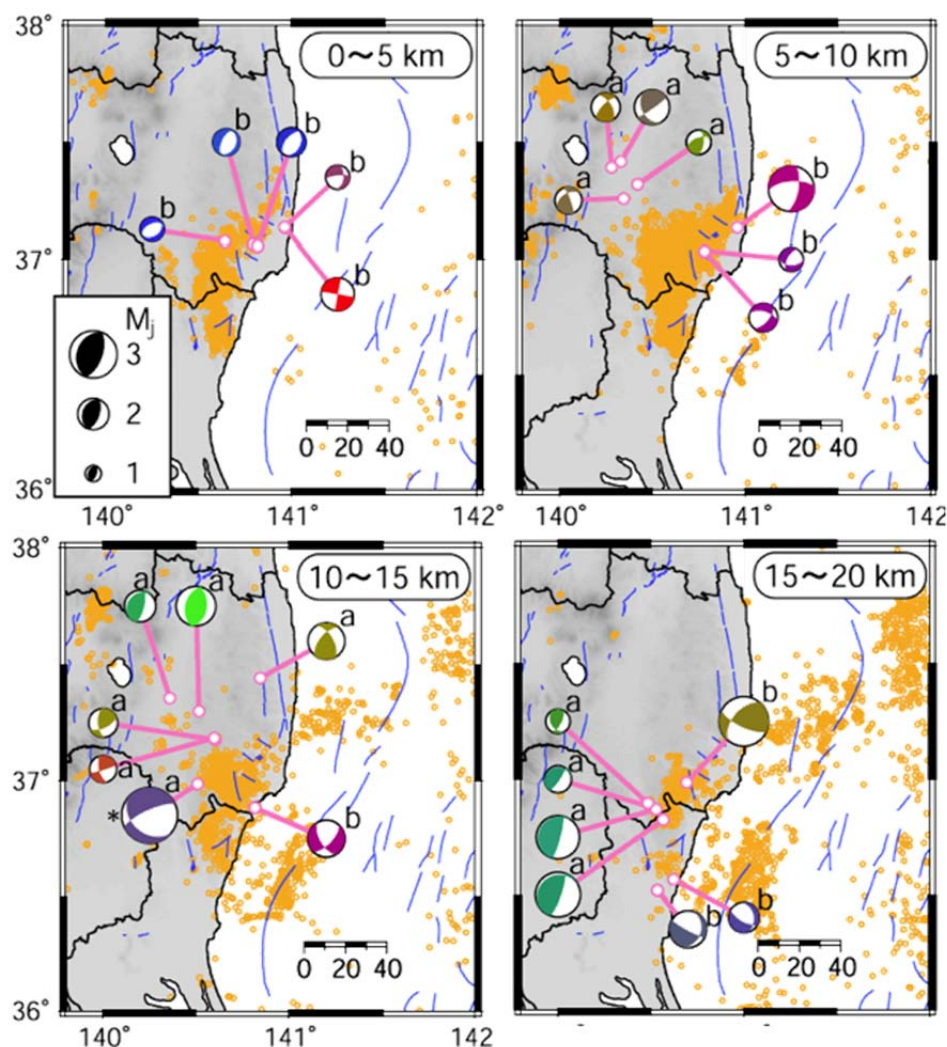


図1-8 2011年東北地方太平洋沖地震前に発生していた福島県浜通地域の地震のメカニズム解の深さ別分布²⁹⁾。

本震後の誘発地震（橙色の点）が多発したエリアで元々発生していた地震（図中のb）の大半が正断層型である。

1.4 浅部応力場と浅部断層摩擦特性, 副断層の発生

地表地震断層（以下、地震断層）の位置と変位センス・量を決める主因は、地下の震源断層の形態や規模、動きである。しかし、断層変位は震源から地表へ伝播することから、最終的に地震断層は地下浅部の応力状態と断層の摩擦特性、地質構造、岩盤強度分布等にも左右される。

一般に地震発生層上限付近では、断層面沿いの性状（断層内物質）はカタクレースイトから断層ガウジに移り変わる³⁰⁾。物性と封圧変化にともない、すべりとともに摩擦強度が低下して固着滑り（地震のような高速滑り、stick-slip）を起こす状況から、すべりとともに摩擦強度が増加しクリープや断層運動の停止を起こすような状況に変化するとみられている。必ずしも震源断層の変位量が直接地表に出現するわけではない。状況に応じてオーバーシュート（過剰変位）やテーパリング（変位減衰）が起こる^{31), 32), 33)}。武村（1998）³⁴⁾は $M=6.5$ と 6.8 の間で地震断層出現率が急激に変化することを明らかにし、その理由の1つとして、断層が地表面を突き抜けた場合に平均すべり量が増加する可能性を指摘している。

一方で、震源断層上端が地表に達しない状態（伏在断層, blind fault）では、変形量は小さいとはいえ、地表変位予測は簡単ではない。断層変位が地下で止まることで、断層上端から地表へ向かってせん断ひずみ増加域が帯状に広がる（図1-9）。例えば、2000年鳥取県西部地震では地震後の調査で1km前後のゾーン内に並走する2～3条の短い地震断層が報告された³⁵⁾（図1-10）。このような地震断層は、伏在断層運動によって表層付近に広がった高ひずみ域内にある弱線（地質断層）が変位したとみることもできる³⁶⁾。ただし、トレンチ調査の結果、これらの小断層には同地震に先行する後期更新世の活動が認められ³⁵⁾、全くでたらめに変位するわけでもないらしい。このような変形の地表分散傾向は、基盤断層上に未固結被覆層が存在する場合に顕著に表れる。未固結被覆層の変形に関しては上田（1993）³⁷⁾等に詳細に示されている。

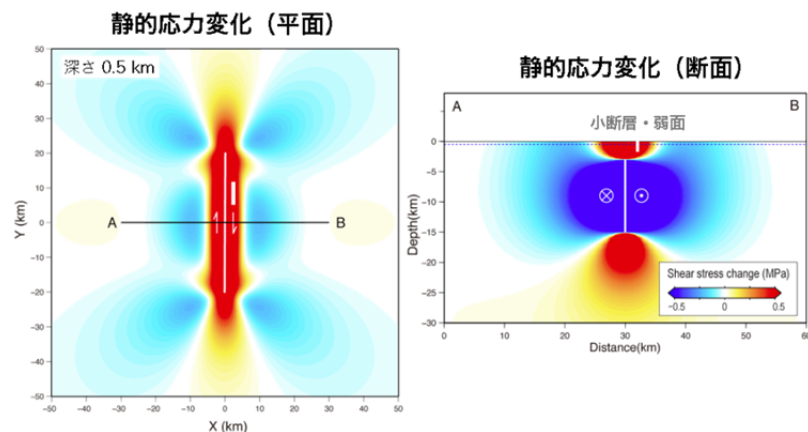


図1-9 伏在横ずれ断層による地表近傍でのせん断応力増加域の広がり。

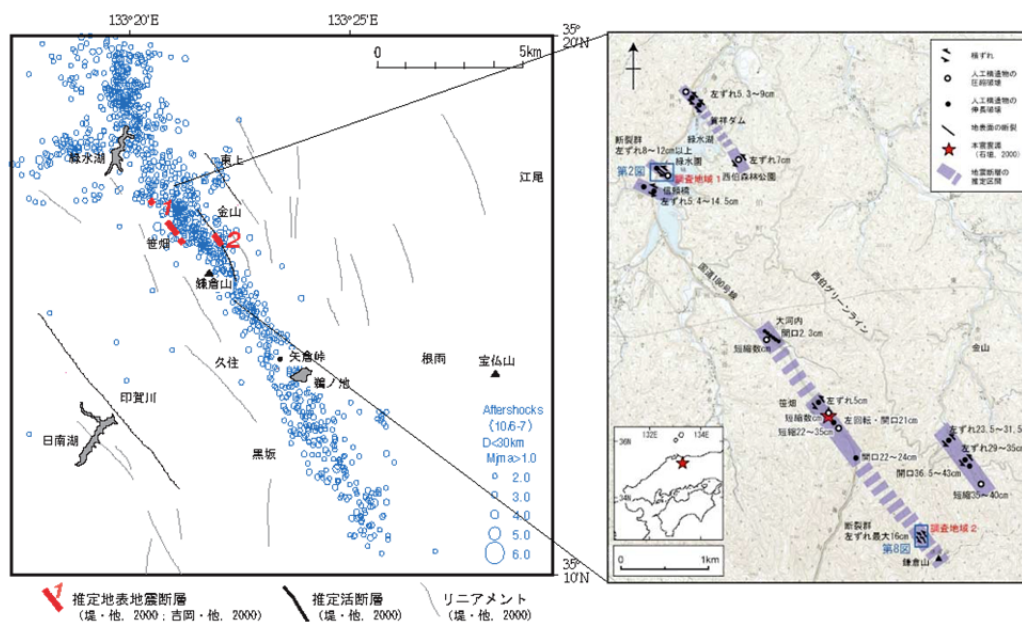


図 1-10 2000 年鳥取県西部地震によって出現した地震断層 35)と余震分布 36)。

活断層の分布形状による応力不均質も断層変位に影響を与える。活断層は数 m～数 km の様々なスケールで不連続 (step) や屈曲 (bend) などの分布形態を示す。これによって、横ずれ断層であっても、主断層の配置と変位センスの組み合わせによって局所的に逆断層を生成する圧縮場、正断層を生成する引張場が付随する (図 1-11)。これらの局所応力場は広域応力場と異なる場合が多く、不連続や屈曲の規模によっては広域応力に非調和なタイプの断層がキロメートルオーダーで広がる。また、地表下数 m 程度、特に未固結被覆層内には、横ずれ断層運動にともなう花卉状構造 (flower structure) が観察される。これは被覆層内に限らず、封圧の低い風化表層基盤でも希に見られることもある。花卉状構造は表層付近での主応力軸の回転と最適せん断面との関係で説明されている 38) (図 1-12)。

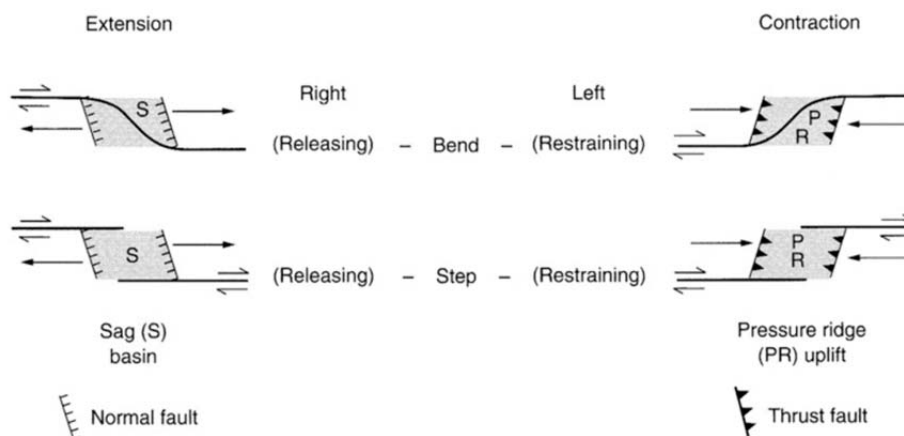


図 1-11 横ずれ断層における屈曲 (bend) と不連続 (step)。主断層の配置と変位センスの組み合わせによって引張場 (extension) と圧縮場 (contraction) が生じる 39)。

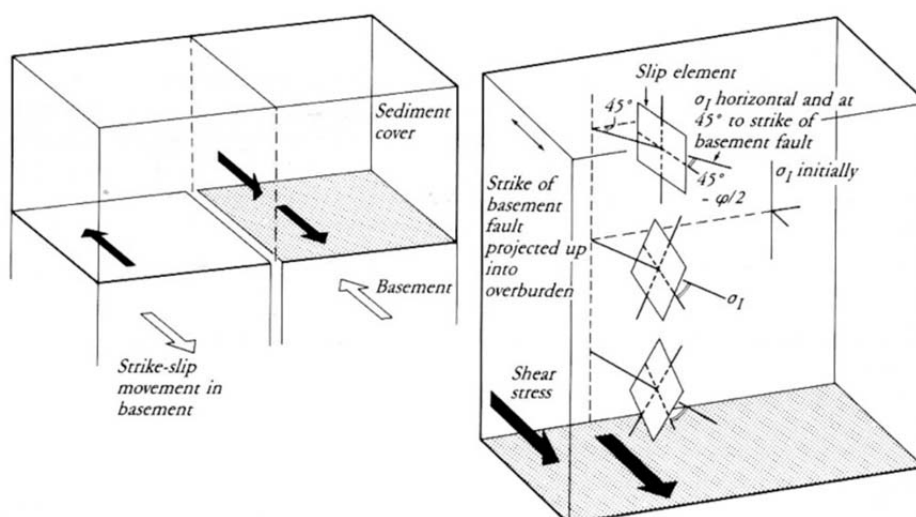


図 1-12 基盤の横ずれ断層運動に伴って生じる断層面の捻れを説明する概念図³⁸⁾。

また、逆断層においても、末端部に横ずれ断層が付随する場合や、逆断層に直交する胴切り断層などが見られる場合もある（例えば、2008 年岩手・宮城内陸地震の地震断層⁴⁰⁾）。

地形による表層応力場も断層形状や出現位置に影響を与える。逆断層の地表付近での低角化や、それにもなう出現位置の堆積盆地側への移動（front-fault migration^{例えば、41)}）は断層直上の被覆層層厚の増大や山地側の侵食など、地形効果による地表近傍での主応力軸の回転によるとみられる（図 1-13）。

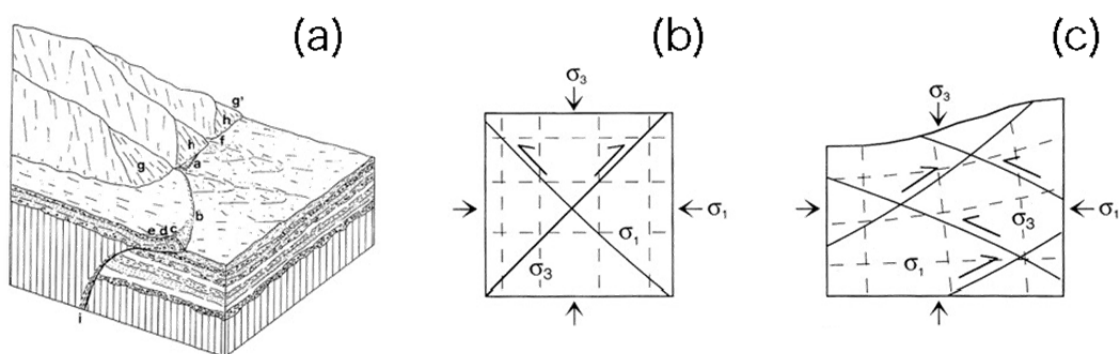


図 1-13 逆断層の断層傾斜の浅部低角化。

a) 逆断層にともなう典型的な活断層地形と地質断面⁴²⁾ (a.低断層崖, b. 撓曲崖, c.バレッジ, d.逆向き低断層崖, e. 断層凹地, f.未変位の極新期扇状地, g-g'.断層崖, h.三角末端面, i.断層および断層破碎帯). b) 平坦地形での逆断層運動を励起する応力場と断層面（断面図）²¹⁾. 破線は主応力軸の軌道を示す, c) 斜面における逆断層面. 斜面平行に σ_1 が、斜面に直交して σ_3 が回転し、断層面が地表に向かって低角化する²¹⁾.

断層変位量も地形の影響を受ける。例えば、Toda and Tsutsumi (2013)⁴³⁾やNissen et al. (2014)⁴⁴⁾ は 2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震で出現した井戸沢断層沿いの上下変位量を詳細にマッピングし、尾根部では変位量が小さく、谷部で大きい傾向を報告している。わずか 1 km 区間の地震断層沿いで、波長 100m-200m の谷・尾根の繰り返しに合わせて変位量が 30cm-160cm の範囲で変動する。

その原因として、尾根部での重力作用による変位の分散、もしくは、地表付近への変位量の急激な先細り (tapering) などが考えられている。地形変化の激しい山間部での変位量予測の難しさを示唆する。

非地震性の地表断層変位も浅部応力場を検討する上で示唆に富む。非地震性の断層すべり (aseismic slip) は日本列島周辺をはじめ沈み込み帯では「ゆっくり地震」として頻繁に観測されているが、陸上でも国外ではサンアンドレアス断層などでクリープ断層運動として認識されている。これらのクリープ断層では周辺の大地震に反応して、誘発滑りが頻繁に観測されている^(例えば、45), 46)。誘発された断層変位は最大で 3 cm に達する。震源断層から 100km 以上も離れた断層沿いでも誘発された断層変位が観測され、大地震による静的応力が影響する範囲を大きく超えており、断層極浅部のせん断ひずみを解消する断層すべりが地震動によって誘発されるメカニズムが提案されている。我が国でも、2007 年中越沖地震によって震央から約 10km 南東の西山丘陵 (小木ノ城背斜) が数 cm 隆起もしくは東に変位したことが干渉 SAR 解析によって捉えられた⁴⁷⁾。長さ 9.9km, 幅 1.8km, 傾斜 41° の逆断層が 10cm 変位したことで説明される。西山丘陵直下に余震は認められないことから、非地震性の誘発すべりが地表付近で生じたと考えられている。

1.5 初期地圧測定手法

地殻応力を測定する手法は、鉱山やトンネル・空洞掘削などに伴う土木の分野で発達してきた。当該分野では、地球科学分野における「地殻応力」とほぼ同じ意味で「初期地圧」という用語が用いられる。本節では、我が国における初期地圧測定についてレビューした横山 (2013)⁴⁸⁾、長ほか (2009)⁴⁹⁾に基づいて、主な手法の特徴と測定結果に基づく初期地圧の一般的な傾向について概説する。

1.5.1 主な測定手法とその特徴・留意点

初期地圧測定法は、原位置測定法と室内試験法に大別される。ここでは横山 (2013)⁴⁸⁾に基づいて、実績の豊富な原位置測定法である、岩盤の破碎を利用する方法と応力解放法について主に紹介する。また、室内試験法である岩石コアを利用する方法についても、その特徴を簡単に述べる。

(1) 岩盤の破碎を利用する方法 (Borehole fracturing)

Borehole fracturing で代表的な水圧破碎法は、ボアホールのある区間に水圧を加え、岩盤に引張破壊を生じさせる技術を応用して、ボアホール壁面に発生した引張亀裂の方向から最大主応力の方向を、亀裂の再開口時と閉口時の圧力から最大、最小主応力を求める方法である (図 1-14(a))。この方法の長所は、鉛直下向きの 1000m 以上のボアホールでも測定できることにある。また、地圧を評価するとき岩盤の弾性定数を必要としないこともこの方法の特徴である。

このほかにも、ウレタンチューブを介して油圧で孔壁を加圧するスリーブフラクチャリング法 (図 1-14(b))、一対のボアホールジャッキで載荷する乾式破碎法 (図 1-14(c)) がある。これらの手

法では、亀裂が発生しても亀裂に流体が注入しないので、水圧破碎法のように圧力が低下することはないという特徴がある。

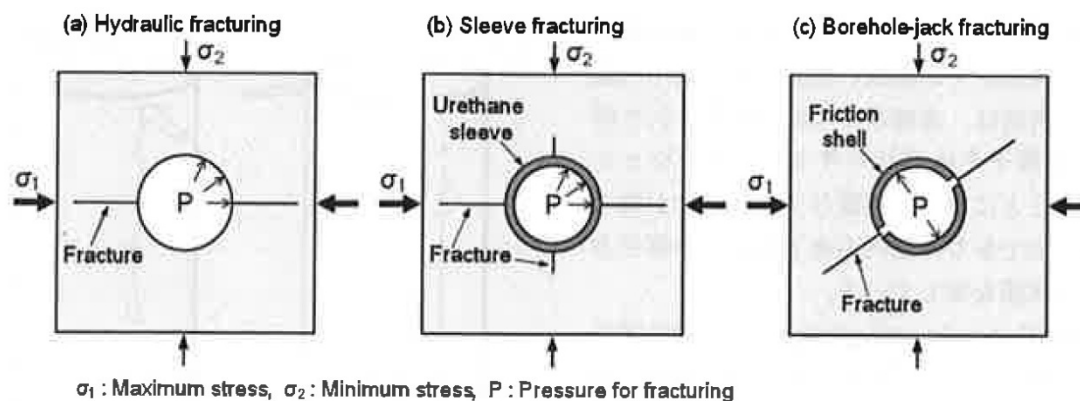


図 1-14 岩盤の破碎を利用する方法の模式図 ⁴⁸⁾

(2) 応力解放法

この手法は、応力の作用している岩盤から岩石サンプルを切り離すときの応力解放過程で生じる岩石のひずみや変位を計測し、弾性論に基づき地圧を測定するものである。応力を解放させる作業にはボーリングを用い、このときの作業を「オーバーコアリング」と呼ぶことから、オーバーコアリング法ともいう。応力解放法は、我が国の鉱山や土木分野における初期地圧測定法として最も実績の多い手法である。この手法の大きな特徴は、弾性論を基礎とする岩石の応力-ひずみ関係から地圧を測定するところにあり、観測方程式が明快で3次元での初期地圧を求めることができる。しかし一方では、弾性論を基礎にしていることから、割れ目や不均質性などにより岩盤が非弾性的挙動を示すときには、応力の測定結果に少なからぬ誤差を生じる。また、測定できる深度は、ひずみ計や変位系をボアホール内に確実に設置する作業上の制約から、通常ボアホールの孔口から 50m 程度が限界である。

現在よく用いられている応力解放法は、ひずみや変位の測定を行う位置の違いにより、円錐孔底ひずみ法 (図 1-15(a))、埋設ひずみ法 (図 1-15(b))、孔壁ひずみ法 (図 1-15(c))、孔径変化法 (図 1-15(d)) の 4 つに分けられる。

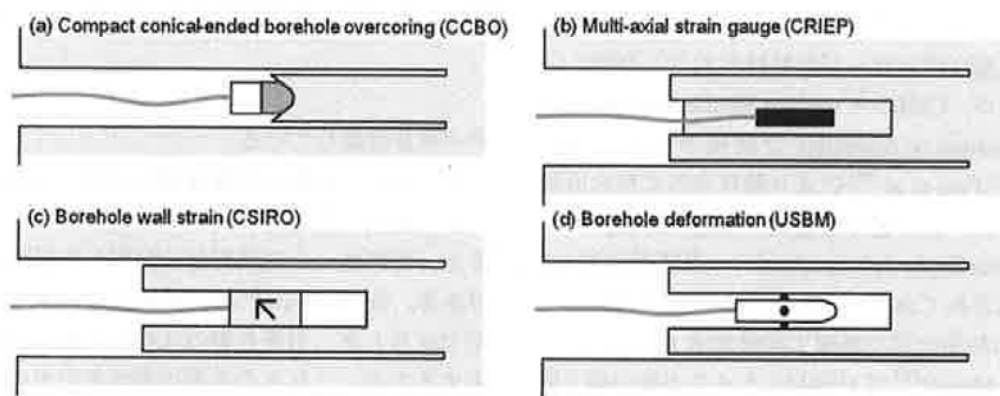


図 1-15 応力解放法の模式図 ⁴⁸⁾

我が国において、これら二つの手法（水圧破碎法、応力解放法）は初期地圧測定法として適用される頻度が高く、特に測定結果に高い品質が求められるときには、いずれかの方法が適用される。この二つの方法の使い分けは、地表から深い場所での初期地圧を知る必要があるとき、調査坑道などが建設されていない段階においては水圧破碎法が適用される。一方、初期地圧を知りたい箇所の近くまで調査坑道や空洞がすでに建設されているときには、応力解放法が適用される。

a. 岩石コアを利用する方法

1970年代から、室内で岩石供試体を用いて原位置の地圧を測定する方法が提案されている。これらの方法は、原位置での方法に比べ測定作業が容易であり、定方位の供試体さえ採取できれば適用深度に限りがない点が大きな特徴である。現在、実用的に用いられている主な測定法には、AE(Acoustic Emission)法、DRA(Deformation Rate Analysis)法、DSCA(Differential Strain Curve Analysis)法、ASR(Anelastic Strain Recovery)法の4つがある。

(3) 孔壁や岩石コアの破壊現象を利用する方法

岩盤にボアホールを削孔したとき、ボアホールの孔壁やボーリングコアに破壊現象が現れることがある。この破壊現象を観察することにより地圧を推定する方法があり、現在「ボアホールブレイクアウト」、「ドリリングインデュースドフラクチャリング」、「コアディスキング」から推定する方法が提案されている（図 1-16）。

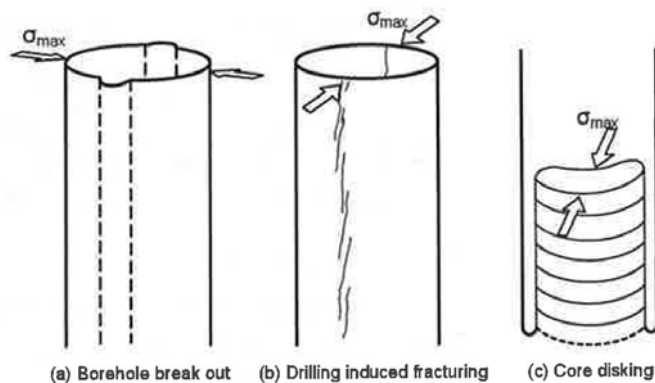


図 1-16 孔壁や岩石コアの破壊現象を利用する方法の概念図⁴⁸⁾

1.5.2 測定された初期地圧の一般的な傾向

長ほか（2009）⁴⁹⁾は、応力解放法による実測データが示された計 75 編の論文から初期地圧測定に関する情報を収集し、我が国における地下岩盤内の初期地圧状態を整理した。ここでは、その概要を紹介する。

(1) 応力と被り深さとの関係

岩盤中の点は、岩盤の密度に応じた被り圧を受けるため、一般に鉛直応力は被り深さに比例して増加する。また、水平最大主応力も深さとともに増大する場合が多い。ここでは長ほか（2009）⁴⁹⁾が整理したデータの中から、鉛直応力 σ_v 、水平最大主応力 σ_{Hmax} 、および最大側圧比 σ_{Hmax}/σ_v と被り深さ h との関係を紹介する（図 1-17）。図中の実線は、岩盤の単位体積重量を 26kN/m^3 とした場合の被り圧に相当する。この被り圧の 0.5 倍、1.5 倍、2 倍、3 倍の値が、それぞれ破線、一点鎖線、二点鎖線、点線で示されている。

鉛直応力 σ_v は岩石区分による大きな相違は認められず、被り圧程度（被り圧の約 0.5～1.5 倍）の値となっている。一方、水平最大主応力 σ_{Hmax} は岩石による相違が見られ、火成岩では被り圧の約 1～3 倍、堆積岩では同約 1～1.5 倍、変成岩では同約 0.5～1.5 倍の値となっている。最大側圧比 σ_{Hmax}/σ_v は、火成岩では 0.7～6.3 の範囲になっており、ばらつきが大きい。最大側圧比が 2 以上と大きい測定地点は、ほとんどが火成岩であり、被り深さの増加に伴い側圧比の最大値が低下する傾向が認められる。堆積岩、変成岩での最大側圧比はそれぞれ 0.7～2.3、0.6～1.8 の範囲であり、被り深さ依存性は認められない。

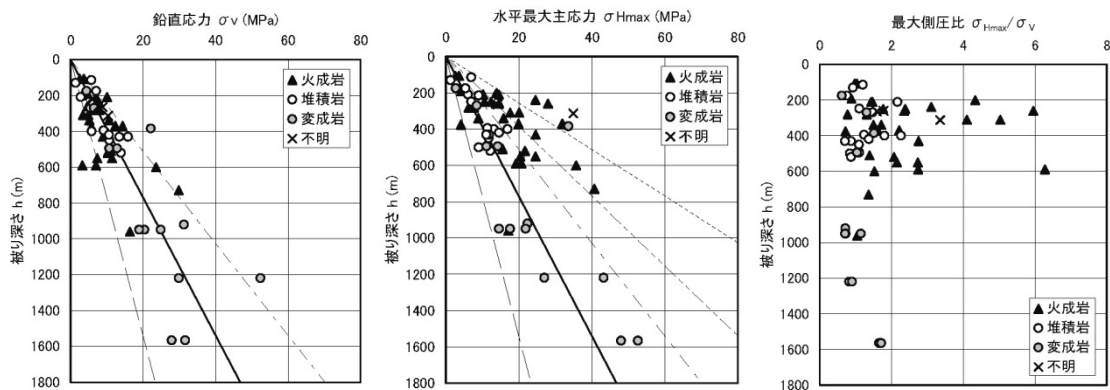


図 1-17 応力 σ と被り深さ h との関係 ⁴⁹⁾

(2) 地形の影響

初期地圧の発生要因の一つは、被り深さに対応した岩盤の自重である。自重荷重のみを与えた場合の応力場の数値計算結果では、上層部での最大主応力の方向が地形斜面の傾斜方向に傾くと報告されている。図 1-18 図は、Kanagawa et al.(1986)⁵⁰⁾に示されている地形効果が大きかった測定例である。図には、3次元最大主応力方向の地形断面と測定結果が示されている。3次元最大主応力は、地形斜面に沿った方向に生じている。

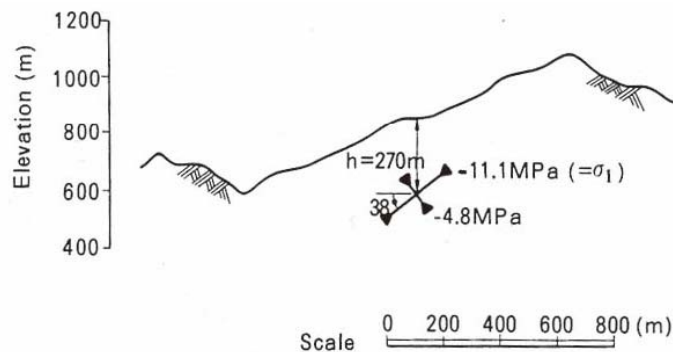


図 1-18 地形効果を受けた測定事例 ⁵⁰⁾

(3) 岩盤の不均質性の影響

岩盤の地質的な不均質性が岩盤内の初期地圧に影響するとの報告がいくつか見られる。図 1-19 は不均質な岩盤で測定された初期地圧の例である ⁵¹⁾。表中の E' はひずみ感度係数と呼ばれるもので、測定箇所の岩盤の剛性が反映されている。これらの表と図から、岩盤の剛性が大きくなるほど初期地圧も大きくなっていることが分かる。不均質な岩盤内の応力分布は一様ではなく、軟らかい岩盤部よりも堅硬な岩盤部でより大きな圧縮応力が生じていると報告されている。

Table 2. Data used for the determination and magnitudes of the determined principal stresses.

Case and Symbol	Data (Bored hole number)	$\bar{E}'$ (GPa)	Magnitude of principal stress (MPa)			
			σ_1	σ_2	σ_3	$(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
1 ■	1	6.3	6.6	9.4	11.7	9.2
2 ▲	1, 3	5.8	5.5	7.3	9.9	7.5
3 ●	1, 3, 5	4.9	4.6	6.2	9.0	6.6

Data: Data used to determine the stress state. Bored hole numbers in which data were obtained are shown in the table.

$\bar{E}'$: Average of strain sensitivity coefficients of the hollow inclusion gauges used to determine the stress state.

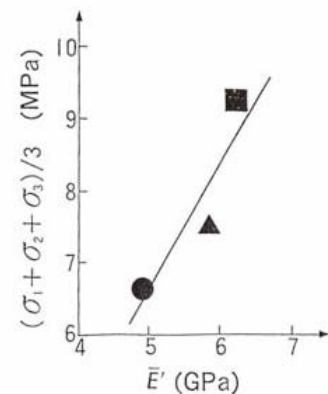


Fig. 6. Relation between the mean normal stress $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ and the average of the strain sensitivity coefficients $\bar{E}'$ shown in Table 2.

図 1-19 岩盤の不均質性の影響事例 51)

1.5.3 断層変位評価上の留意点

初期地圧の水平最大主応力の方向と地殻水平ひずみの圧縮軸の方向を比較すると、両者は必ずしも一致しない⁴⁹⁾。評価対象の空間的・時間的スケールが異なるために議論は単純ではないが、断層変位を評価する上では、局所応力場が広域応力場と異なる可能性についても検討しておくことが望ましい。

初期地圧測定手法は応力場の方向や大きさを直接計測できる唯一の方法であり、評価対象となる断層や構造物が地表付近（～地下数 100m 以浅）にある場合には、その周辺の応力状態を把握する上で最も確実な手法である。ただし、初期地圧は上述のように地形、岩盤の不均質性などの影響を受けて局所的にも変化しているため、その点に留意した測定箇所の選定と、測定結果の評価が重要である。

一方、初期地圧測定手法は、基本的にボーリング孔を利用するために、現時点では地下 3km 以深の測定実績がほとんどない。そのため、地震発生層の応力評価を目的とする場合には、前節で述べたような他のアプローチが必要になる。

2. 断層評価のための地質調査

2.1 断層の分布・性状に関わる調査^{52), 53)}

耐震設計における活断層評価の目的は、活断層の位置、長さ、形状、活動性等を把握し、基準地震動の策定に必要な震源断層モデルを評価することである。

断層調査の基本的な流れは次の通りである（図 2-1）。敷地周辺において、①敷地からの距離に応じて活断層が存在する可能性のある調査対象地点を網羅的に抽出し、②震源として考慮する「活断層」か否かを判定した上で、③活断層の位置・規模・活動性等を評価する。各段階で、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が適宜実施される。

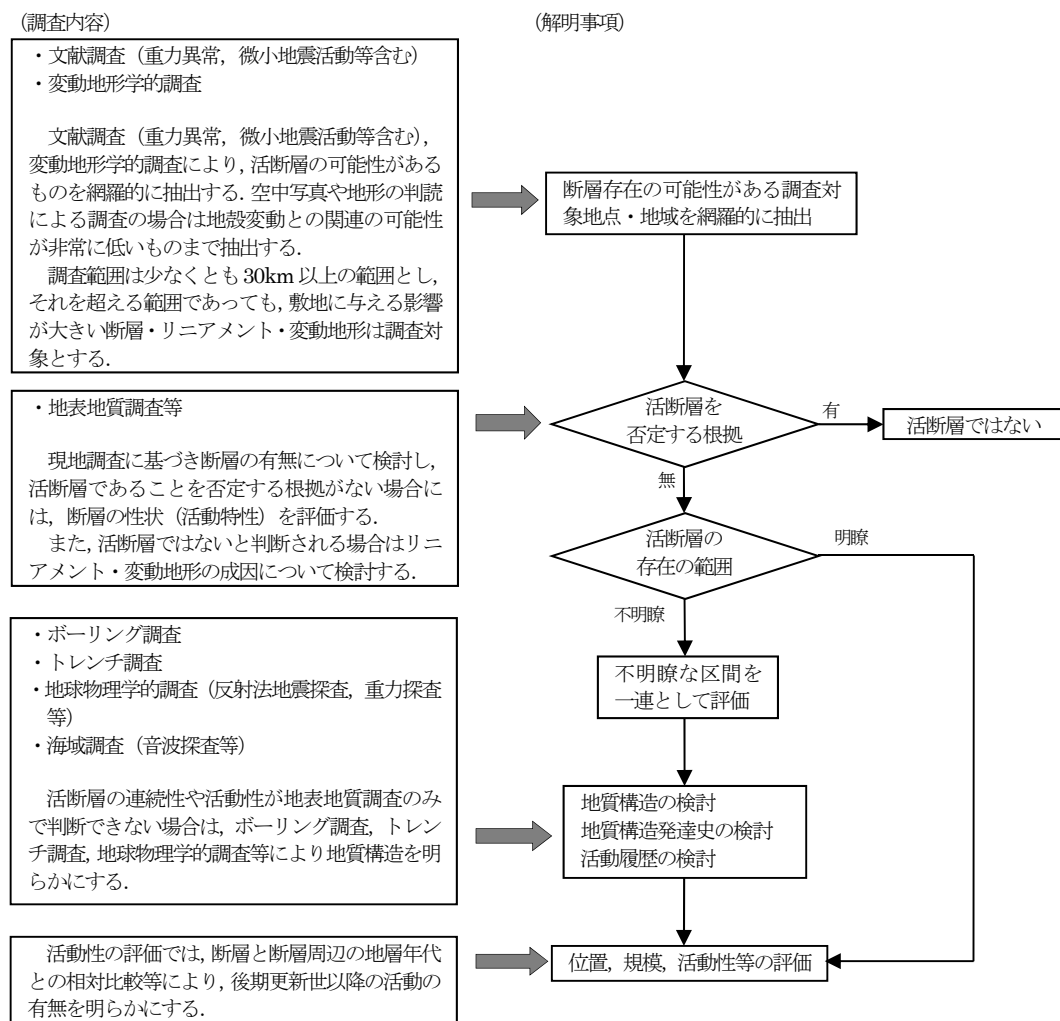


図 2-1 断層調査の流れ⁵⁴⁾を一部改訂

2.1.1 文献調査

文献調査は、敷地周辺及び敷地近傍の地形、地質・地質構造及び地震活動の状況又はテクトニク

的背景を明らかにし、引き続き実施される変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査及び海域調査において検討対象とする活構造（活断層、活褶曲、活撓曲）の存在、活動履歴、地震発生様式等を抽出することを目的とする。

調査範囲は、敷地中心から概ね 100km 以内を対象とするが、遠方の長大活断層又は規模の大きな地震等による敷地への影響が考えられる場合には、それらを含む地域についても文献調査の対象とする。

収集対象とする文献は、地形（特に、変動地形）、地質・地質構造（特に、活断層等）、過去の地震（歴史地震及び微小地震活動の状況）、津波、GPS 等の測地資料、地球物理学的調査研究（重力、磁気等）に関する資料とし、個々の内容に応じて整理する。

2.1.2 変動地形学的調査

変動地形学的調査は、変動地形学的視点により、断層の変位・変形によって形成された可能性がある地形を抽出することと、抽出した断層の活動性等について検討することを主な目的とする。

調査範囲は、敷地周辺 30km 程度、敷地近傍 5km 程度を目安として設定する。調査手法については、断層の活動時期の検討に用いる段丘等の地形を抽出・分類するとともに、断層の変位・変形によって形成された可能性がある地形を抽出するために空中写真や地形図等を用いて判読を行うのが一般的である。また、空中写真判読等だけでは認定の難しい微地形については、必要に応じて、現地測量や航空レーザー測量等の最新技術を用いることが望まれる。

2.1.3 地表地質調査

地表地質調査は、概査により調査範囲内の地質・地質構造を把握し、精査により文献調査や変動地形学的調査による活断層の疑いのある地形・地質構造について、断層・撓曲の存否、位置、性状及び活動性を明らかにすることを目的とする。

地表地質調査においては、特に断層露頭や地層が変形している露頭の発見と、その露頭観察による断層活動時期の特定が重要であり、露頭と活断層の疑いのある地形・地質構造との位置関係、断層破碎帯の性状、地層の変位・変形構造を詳細に把握する。地表地質調査により断層の分布が確認できない場合、あるいは、断層の活動履歴が明確でない場合には、より詳細な情報を得るために、ボーリング調査、トレンチ調査等を追加実施し、断層の存否及び活動性の解明に努める。

2.1.4 ボーリング調査

ボーリング調査は、周辺の変動地形学的調査・地表地質調査や地球物理学的調査等によって推定される断層位置付近で実施するものであり、第四紀層下に伏在している断層の位置と断層近傍の地質構造を把握することを主な目的とする。ボーリング調査は本来一次元的な地質情報であるため、三次元的な断層運動を解明するには相当数のボーリング調査（群列ボーリング、グリッドボーリングなど）を実施するか、後述する地球物理学的調査により孔間の情報を補完する必要がある。

ボーリング調査により断層活動を解読する方法は基本的に 2 つある。1 つは、従来より実施されて

いるように、直接断層近傍で断層を挟んで両側の地層の対比や基盤岩の落差・破碎構造等により活動履歴を解読する方法であり、もう1つは、間接的ではあるが、近傍の断層運動により生じた大地震からもたらされた堆積物の記録を解読する方法である。後者は、近年その試みが盛んに行われてきているが、洪水等の突発的な堆積物との区別が難しい上に、実際に動いた活断層の特定が困難であるといった問題点を有している。

ボーリング掘削箇所は、想定された断層通過位置の両側にそれぞれ1箇所以上配置する。数m程度のトレンチ掘削では基盤岩の断層を確認することができないような第四紀層の厚い地域では、地球物理学的調査結果を特に重視する。この際、トレンチ調査で基盤岩を確認することが不可能であるため、掘削孔において、できるだけ基盤岩を確認する必要がある。また、両孔における基盤岩の破碎の程度も詳細に観察し、破碎帯の幅を推定するうえでの重要なデータとする。この際に、ボアホールカメラを利用して地層の走向傾斜等を計測することも有効である。

2.1.5 トレンチ調査

トレンチ調査は、対象とする断層を横切るように調査溝（トレンチ）を人工的に掘削して、そこでの壁面や底面の観察を通して、断層周辺の地層の変形や堆積状態等から過去の断層運動を解読する方法である。断層の分布規模、性状、活動時期を明らかにすることが目的であり、断層変位・変形がある地層、断層変位・変形がない地層の年代が詳しくわかれば、複数の活動履歴・活動間隔が明らかにできる。ただし、自然露頭と同様にトレンチ地点の特性に左右され、必ずしもその断層の活動全てが保存されているとは限らず、活動時期も狭い年代範囲を特定できない場合が多いことに注意が必要である。

トレンチ掘削位置は、地形判読、地表地質調査、ボーリング調査、地球物理学的調査等によって確認された断層直上を基本とし、そのなかでもなるべく断層活動履歴記録の保存の良いサイトを選択するのが望ましい。つまり、年代測定試料が得やすい新しい時代の細粒堆積物が連続して堆積しており、侵食や人工擾乱を受けてない場所を掘削することが望ましい。一般的には、トレンチは予想される断層の走向にほぼ直角に掘削するのが効果的である。トレンチ個数、掘削形状、掘削長等は、用地事情にもよるが、ボーリング調査、地球物理学的調査結果等による既往情報からの断層の形態、変位量等に留意し、それらに見合ったトレンチを掘削する必要がある。

また、掘削すべきトレンチの深さは、原則的には基盤岩中の断層まで確認することが望ましいが、第四紀層が10m程度以上に厚い場合、数万年前の地層が確認できるように設定するのが適切である。

2.1.6 地球物理学的調査

地球物理学的調査は、断層の地下構造及び褶曲等の広域的な地下構造を明らかにすることを目的とする。前述の通り、基盤岩の断層を確認することができないような第四紀層の厚い地域では、地球物理学的調査結果が特に重視される。

調査範囲は、基本的に敷地中心から半径30kmの範囲とし、敷地への影響が大きい活断層が想定される場合は、半径30km以遠も対象とする。

平野等において、新しい時代の堆積物の変形を明らかにして活断層の存否を確認する必要がある場合には、主に浅部構造探査を行い、深部の断層形状や褶曲構造を解明する必要がある場合には、主に深部構造探査を行う。

地球物理学的調査には、反射法地震探査、屈折法地震探査、重力探査、電気探査、電磁探査等の手法があり、調査対象とする地域の地質・地質構造、調査目的、現地状況等を踏まえて、適切な手法を選択して実施する。

なお、他機関のデータが利用可能な場合は、必要に応じてデータの入手、再解析を行い、その上で、調査者独自の地球物理学的調査の必要性を検討する。

地球物理学的調査の結果については、変動地形学的調査、地表地質調査等によって想定される地表の活断層や地表付近の地質構造の特徴と、相互に矛盾なく合理的に説明できることを確認することが重要である。

2.1.7 海域調査

海域調査は、敷地周辺海域の海底地形、地質層序、地層分布、地質構造等を解明し、活断層の位置、形状、活動性等を明らかにすることを目的とする。

海域調査は、既往の文献や音波探査記録等を参照し、調査対象海域の地形、地質・地質構造等を踏まえ、音源及び測定方法の仕様、測線の配置等を適切に策定し、海底地形調査、海上音波探査等を実施する。また、必要に応じて、海上ボーリング等によって試料採取を行い、海底の地層を直接確認するとともに、堆積年代を把握する。

2.2 活動性評価のための調査

2.2.1 活動履歴の解明

一般的に、ある地域での将来考えられる断層活動を評価するには、過去の活動履歴を解読し、その傾向から今後を予測しなければならない。つまり、対象とする断層の最近数万年の活動時期、規模、広がり（分布）を精度良く解読することが重要である。

現在までの多くの調査・研究実績から、断層の過去の活動履歴の解明には、ボーリング調査、トレンチ調査、地球物理学的調査が有効な手法とされている。しかし、それぞれの手法には調査・検討できることとできないことがあり、かつ、個々に誤差や手法の原理に起因する不確実性を有している。そのため、これらの手法を有機的に結び付け、補完しながら、系統的・総合的評価を行うことが望ましい。例えば、ボーリング調査結果は一次元的な地質情報であるが、それらを地球物理学的調査により二次元的に補完することにより断層近傍の地質構造を把握するとともに、層厚やその落差等に注目して断層運動を推定することができる。

また、複数のセグメントからなる断層系では、個々のセグメントの評価に加え、断層系全体としての評価が求められる場合もある。

2.2.2 活動年代の評価

震源として考慮する「活断層」であるか否かを判断する基準は、後期更新世以降の活動の有無であり、これを明らかにするためには、調査の対象となった断層の活動年代あるいは活動履歴を明らかにすることが必要である。断層の活動年代を明らかにする手法は、一般の年代測定同様、その原理から、相対年代測定手法と絶対(数値)年代測定手法に大別される(表 2-1)。一方、年代測定の対象から見ると、断層周辺の地層を使う方法と断層沿いに分布する断層内物質を使う手法とに分けられる。ただし、前者については相対年代測定手法しかない。また、後者の場合は、結果として断層内物質ではない(節理に沿って形成された変質帯等)という結論が得られることもある。

断層の活動年代を明らかにする手法として、相対年代測定手法が一般的に用いられている。絶対年代測定については、様々な問題点があり、今後の進展が期待される。

表 2-1 最新活動年代評価法一覧

	種 別	評価法	評価対象	内 容	主な手法	備 考
①	地形・地層と断層の形成順序から相対的な活動年代を決める手法	断層上載地層法	上載地層	断層の最新活動後の基盤岩を覆う地層や段丘における変位・変形の有無(切り切れ関係)及び形成年代で評価	C ¹⁴ 年代 テフラ層序等	上載層が分布する場合に適用 (信頼性高い)
②	断層内物質の構造と断層の形成順序から相対的な活動年代を決める手法	岩石・断層内物質の変形構造による温度・圧力場の推定	岩石 断層内物質	形成深度と隆起・沈降史を組み合わせ形成年代を推定	研磨片・薄片 鑑定 X線CT等	上載層が分布しない場合に有効 (複数の評価法の組合せによる信頼性向上が重要)
		断層内物質中の生成鉱物による化学的環境や温度条件の推定	断層内物質 岩石	隆起速度と地温勾配の関係により続成作用の年代を大まかに指定。絶対年代測定や地史により熱水変質作用の年代を推定	薄片鑑定 X線回折 絶対年代測定等	
		断層の変位センスと応力場の推定	断層内物質 断層面	条線や複合面構造による変位センスで復元した断層運動が生じる応力状態と、地史(応力場変遷)により推定	研磨片・薄片 鑑定 X線CT等	
		最新活動面の鉱物の形状や成長程度による推定	断層内物質 (粘土鉱物等)	断層の最新活動面上の鉱物の形状や成長度合い、変形・破壊の有無により推定	走査型電子顕微鏡等	
		石英粒子表面構造解析法	断層内物質 (石英粒子)	断層内物質中の石英粒子表面の構造が溶食により形態変化することを利用して推定	走査型電子顕微鏡等	約90万年前以前に活動した断層が対象(精度・信頼性向上の課題あり)
③	断層内物質を用いた絶対(数値)年代測定手法	電子スピン共鳴(ESR)法 熱ルミネッセンス(TL)法 光ルミネッセンス(OSL)法	断層内物質 (石英粒子)	断層内物質中の石英粒子に蓄積された格子欠陥量から見積られる被曝線量により、最新活動年代を推定		ESRとTLは実断層でのゼロセットの問題あり、OSLは今後の進展に期待
		フィッシュトラック(FT)法 カリウム-アルゴン(K-Ar)法 ウラン系列(U-Pb)法	断層内物質	断層内物質中の黒雲母、角閃石、イライト、ジルコン等を用いて、絶対年代を測定		今後の進展に期待

① 地形・地層と断層の形成順序から相対的な活動年代を決める手法(断層上載地層法)

断層の最新活動の後に、断層を含む基盤岩を新しい地層が覆ったり、基盤岩を土台として段丘が

形成されれば、覆っている地層あるいは段丘の形成年代をもって、断層の活動年代は相対的に絞り込まれる。逆に、基盤岩を覆う新しい地層や段丘が断層によって変位・変形を被っていれば、最新活動は、基盤岩を覆う地層あるいは段丘の形成年代以降と評価される。もちろん、断層に切られた地層と断層を覆う地層が同時にわかる場合には、活動年代がより絞り込まれる。また、一つの露頭で複数の活動履歴を読み取ることができることもある。断層の活動履歴の調査では、このような基本原理に沿った手法が最も広く使われており、信頼性も高い。なお、この手法は一般的に「断層上載地層法」と呼ばれている。

ここで、震源として考慮する「活断層」の認定にあたっては、後期更新世以降の活動の有無という基準に準拠し、地形・地層と断層の形成順序に相対的なながらも具体的な数値を与える必要があるため、地形面・地層の年代測定が必要である。細かな年代手法の解説は他書^{53),55)}に譲るとして、活断層調査では、 C^{14} 年代測定法とテフラ層序が最も多く使われるが、後期更新世という時代の議論をする場合には、最終間氷期のテフラ層序に頼るところが大きい。

例えば、洞爺 (Toya)、三瓶木次 (SK)、阿多 (Ata)、御岳第1 (On-Pm1)、鬼界葛原 (K-Tz)、阿蘇4 (Aso-4) 等の最終間氷期に降下した広域火山灰や、南関東に分布する下末吉、小原台、三崎等の中位段丘面に対比される段丘面やその構成層は、最終間氷期を示す基準面や地層として利用することができる。広域テフラと第四紀海成層の層序・編年図の例を図 2-2 に示す。

なお、断層の活動性をこの手法によって評価する場合には、下記の点に留意する必要がある。

- ・断層直上の変動地形の有無だけではなく、段丘面等に現れている傾動等の広域的な変形についても確認し、当該断層の活動性評価を行う必要がある。
- ・断層直上の段丘面等の地形に変位・変形が確認されない場合であっても、断層と上載地層の関係を直接的に確認し、当該断層の活動性評価を行うことが望ましい。
- ・断層評価の上載地層の認定に当たっては、火山灰の再堆積 (rework) に注意する必要がある。

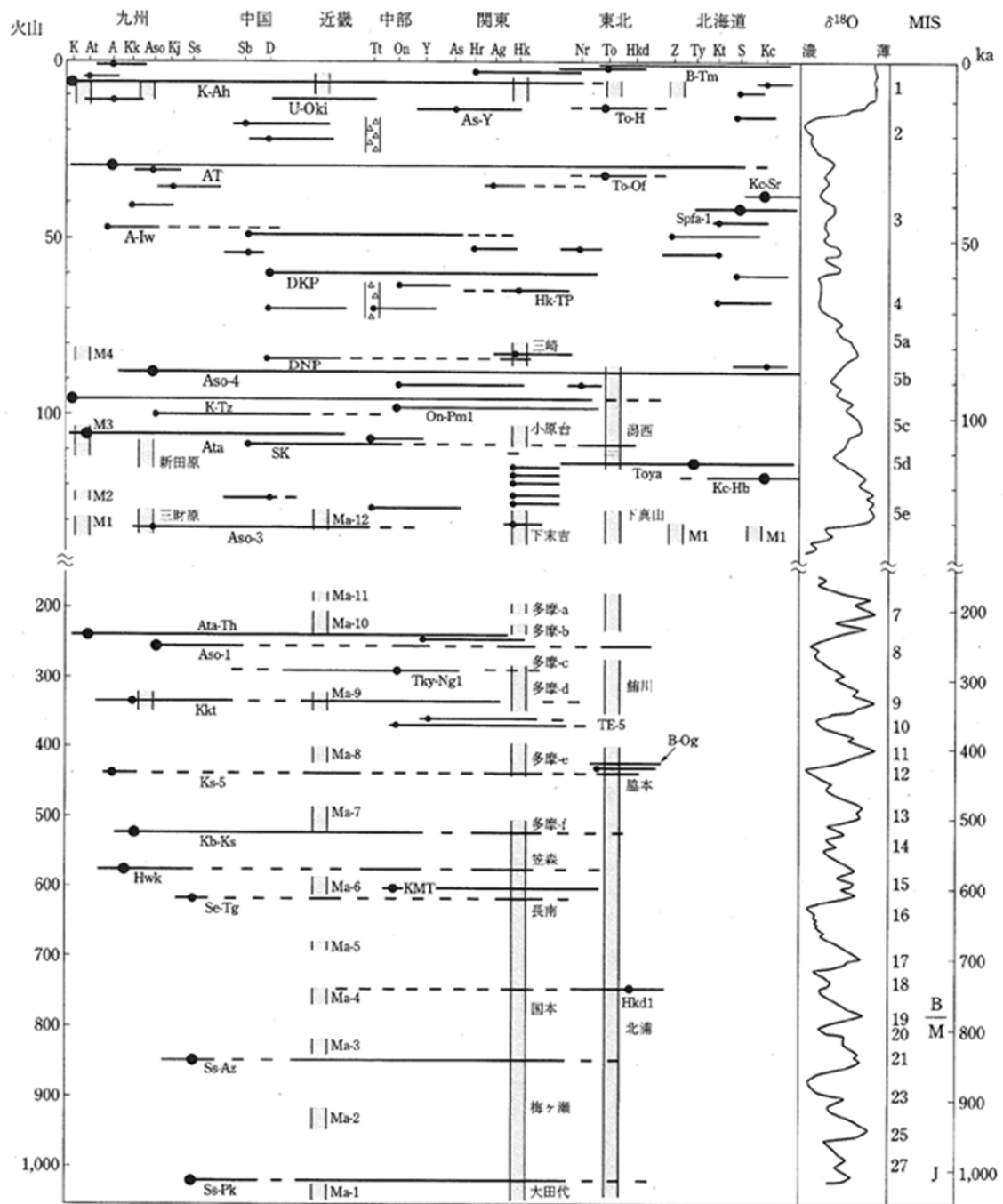


図10 過去約100万年間の日本地域的主要な広域テフラと第四紀海成層の層序・編年図。[Machida (1999) を補訂]

テフラ略号は第II編参照。網掛けのコラムは海成層と海成段丘、△印の入るコラムは氷成層。

火山名：K 鬼界、At 阿多、A 姶良、Kk 加久藤・霧島、Aso 阿蘇、Kj 九重、Ss 猪牟田、Sb 三瓶、D 大山、Tt 立山、On 御嶽、Y 八ヶ岳、As 浅間、Hr 榛名、Ag 赤城、Hk 箱根、Nr 鳴子、To 十和田、Hkd 八甲田、Z 銭亀、Ty 洞爺、Kt クッタラ、S 支笏、Kc クッチャロ。

B/M ブリュンヌ・マツヤマ地磁気境界、J ハラミヨサブクロン。

図2-2 広域テフラと第四紀海成層の層序・編年図の例（新編火山灰アトラス 56）

② 断層内物質の構造と断層の形成順序から相対的な活動年代を決める手法

この手法は、基本的には、断層内物質から読み取った構造(変形・変質)を地史に位置づけること

により断層の形成年代を推定するものである。①の手法と比較すると、検討する対象（構造）が異なることや、対象（構造）の形成年代を地史に求めるといった違いはあるが、形成順序の検討という基本原理は同じである。以下にいくつか例を挙げる。

岩石あるいは断層の変形構造には、延性的なものから脆性的なものまで様々なものがある。一般に、封圧が小さい地表付近では岩石の破壊様式は脆性的であるが、温度と封圧が高い地下深部での変形は延性的になる。また、地表付近であっても、固結した地層・岩石の破壊は脆性的であるが、未固結の地層には延性的な変形が生じる。このように、変形様式は断層が形成された深度・断層の活動様式・岩石物性等の条件に支配されるため、断層付近の岩石や断層内物質の組織からその場を推定できることがある。このような温度・圧力場が見積もれば、例えば、形成深度と隆起・沈降史を組合せることで、断層の形成年代を推定できる。

断層活動後の続成作用さらには熱水変質作用等により、断層が活動した後に断層内物質中に鉱物が生成・成長することがあり、これらの種類により、その破碎帯が形成された場の化学的環境や温度条件を推定することが出来る。続成作用については、隆起速度や地温勾配等の情報を用いることによって、大まかな年代に読み替えることができる。熱水変質作用については、絶対年代測定により熱水活動の年代を推定するか、地史にその形成時期を求める。

断層内物質の中に発達した条線・複合面構造等を読み取ることにより、断層の変位センスが分けることがある。調査地域を含む広域的な応力場の変遷が既知であれば、復元された断層運動が生じる応力状態がどの時期にあったかを検討することにより、活動時期を推定できる。

さらには、活断層と最新活動時期が古い断層の最新活動面を電子顕微鏡等で観察・比較すると、粘土鉱物の形状や成長程度等の観点から差別化が行える可能性がある。例えば、活断層の鏡肌や条線上は平滑で団子様物質の報告が多数認められる^{例えば、57)}のに対し、最新活動時期が古い断層面には粘土鉱物が晶出し、その形状が壊れていないといった報告があり、鉱物生成後に断層活動が無いことが示唆される。そのため、これら鉱物を生成した変質作用等の年代が分かれば、最新活動時期が十分に古い断層か活断層かといった判断には有効である。

このように、一つ一つの手法で推定された活動時期は、誤差あるいは不確実性を含むことは否めないものの、大まかな活動時期の推定には有効である。①の手法との最も大きな違いは、対象（構造）の形成年代決定の精度・信頼性であり、複数の手法を組み合わせる等により、年代決定に係わる精度・信頼性向上を図ることができる。

なお、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、地表付近に存在する活断層に関する詳細な調査はもとより、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る。

一方、上記とはやや異なる原理を持つ手法として、石英粒子の表面構造の解析がある。これは断層活動による破碎によって新たに生じた断層内物質中の石英粒子表面の構造が、溶食によって、時間を経るに従い形態が変化することを利用して、約90万年以前に活動した断層について、最新活動年代を大まかに推定する手法である^{58), 59)}。石英粒子表面の構造の客観化、石英粒子の採取範囲、得られた結果の評価、といった問題、あるいは、環境による溶食作用の仕方の違いの影響評価等、

精度・信頼性向上の課題は残されている。

③ 断層内物質を用いた絶対(数値)年代測定手法^{53), 60)}

地層中の放射性物質や宇宙線により、鉱物中には格子欠陥が蓄積する。これらは、電子スピン共鳴(ESR)、熱ルミネッセンス(TL)、光ルミネッセンス(OSL)等によって定量化することができ、それから求められる被曝線量と、化学分析等により別途求められる単位時間当たりの線量から地質年代を求める研究が進められてきた。そして、断層活動時に断層面付近での破壊作用や摩擦熱により、断層内物質に含まれる鉱物中の格子欠陥がいったん解消(ゼロセット)され、新たに蓄積が始まると考え、蓄積された格子欠陥量から見積もられる被曝線量から断層の最新活動年代を求める試みがなされてきた。しかし、地表付近で活動したと考えられる断層については、断層面近傍において、実験的に求められたゼロセットの条件が満たされる可能性が低く、ESRやTLについては適用が難しいと考えられる。OSLについては近年検討が始まったものであり、今後の進展が期待される。

その他にも、フィッショントラック(FT)法、カリウム-アルゴン(K-Ar)法、ウラン系列法等の年代測定手法を応用した断層内物質の絶対年代検討事例があるが、これらも今後の進展が期待される。

表 2-2 主な断層内物質を用いた断層活動年代評価法・測定法⁵³⁾

手法	評価対象	得られる結果	適用範囲	主な問題点	摘要
断層の破壊様式の検討	破壊構造	定性的	第四紀か否か	—	一般には、構造発達史等を参考にして総合的に判断する
統成作用の検討	生成鉱物、固結度など	定性的	第四紀か否か	—	一般には、構造発達史等を参考にして総合的に判断する
粒度組成・表面積の検討	断層ガウジ 断層角礫	定性的	—	1) 試料採取の範囲 2) 環境の違いによる影響の評価	活動時期の識別をした例はあるが、年代推定例なし
石英粒子表面構造解析法	石英粒子	定性的	約90万年以前	1) 試料採取の範囲 2) 解析結果の評価 3) 環境の違いによる影響の評価	ESR年代と対比が試みられている
K-Ar法 (Potassium-Argon)	黒雲母 角閃石	絶対年代	100万年以前	地表付近の断層運動では鉱物中のアルゴンのゼロセットは期待されない	1) ピーク比較法により測定範囲が2万年〜まで広がる可能性あり 2) 結果は活動年代の下限を与える
	イライト	相対年代	100万年以前	測定対象がいつ生成したかを見積もる必要がある	—
Uシリーズ法 (Uranium series)	2次生成鉱物； 炭酸塩、シリカ	相対年代	1〜30万年	測定対象がいつ生成したかを見積もる必要がある	—
FT法 (Fission Track)	ジルコン ガラス	絶対年代	数万年〜数億年	地表付近の断層運動ではトラックのゼロセットは生じない	1) 閉鎖系内の現象という点で信頼性が高い 2) 結果は活動年代の下限を与える
ESR法 (Electron Spin Resonance)	石英粒子	絶対年代	数万年〜100万年	1) ゼロセットの認定と試料採取の範囲 2) 総被曝線量、年間線量率の見積り	1) 熱によるゼロセットの認定は可能 2) ESR信号のゼロセットが完全でない場合には、結果は活動年代の下限を与える 3) 断層活動時に発生する信号によりゼロセットを考慮せずに年代測定ができる可能性もある
TL法 (Thermoluminescence)	石英粒子	絶対年代	数千年〜100万年	1) ゼロセットの認定と試料採取の範囲 2) 総被曝線量、年間線量率の見積り 3) 採用すべきルミネッセンスの選択	1) 温度履歴の復元の研究例がある 2) TLのゼロセットが完全でない場合には、結果は活動年代の下限を与える

3. 地表地震断層の断層変位調査

断層変位に対する設計や評価を行うためには、まず、過去の地震において発生した地表地震断層の変位量について詳しく調査し、その調査結果に基づき、将来発生する可能性がある変位量を予測することが必要となる。

以下に、地表地震断層の断層変位を調査する方法および結果について述べる。

3.1 断層変位地形調査に基づく事例

断層変位地形調査は、断層を挟んで本来連続していたはずの地形要素が、断層運動によって現在までに被った累積変位量を評価するのに有効である。このような地形要素は変位基準と呼ばれ、同一の断層沿いでは、古い変位基準ほど累積変位量が大きくなる。最近の活動を示す上下変位の基準となるものとしては、段丘面・沖積面がある。横ずれ変位の基準となるものとしては、段丘崖がある。また、歴史地震については古墳や田んぼの畝が用いられている例がある。

断層変位地形調査のみから単位変位量を求めることは難しいが、露頭観察やトレンチ調査を併用して断層の活動年代が確認された場合には、そのイベント年代に対応する変位基準から単位変位量を推定することが可能である。また、地震時に観察される断層沿いの変位量分布が、累積変位量の分布と似た傾向を示すことがしばしば報告されている。

図 3-1 は、我が国で最も有名な断層変位地形の一つである阿寺断層の例である。この地域では、木曽川沿いに数段の河成段丘面が発達しており、それらを北西－南東方向に断層が横断している。河成段丘面は断層を挟んだ北東側が相対的に上昇しながら左横ずれしている。上位の段丘面ほど累積変位量が大きくなっており、たとえば、西方寺上位面では鉛直 4.7m、水平 14m 強、その上位の坂下下位面では鉛直約 10m、水平 56.6m と評価されている⁶¹⁾。また、段丘面の形成年代から得られる平均変位速度は、左ずれ成分が 3～5m/千年、相対的隆起成分が 0.6～1m/千年と見積もられている⁶²⁾。

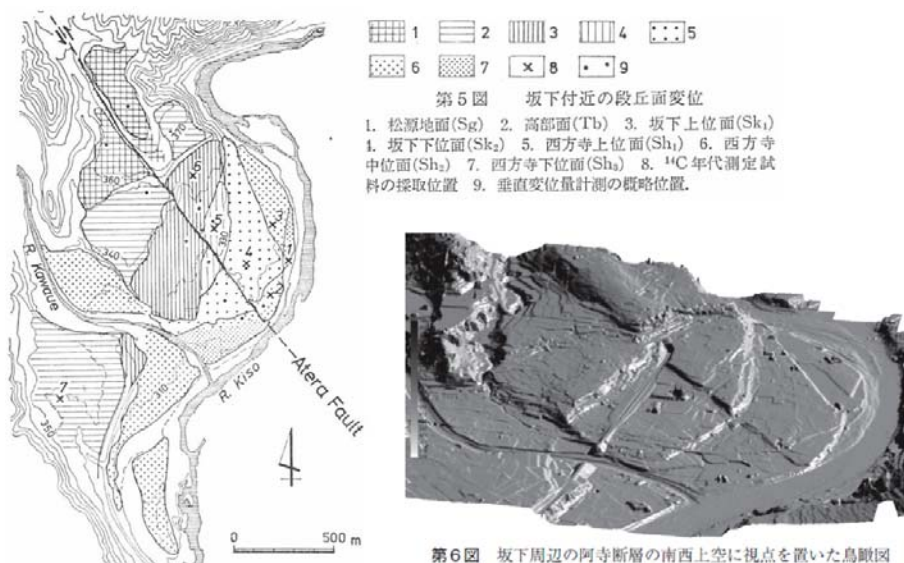


図 3-1 阿寺断層による河成段丘面の変位^{61), 63)}

東郷(2000)⁴²⁾は、琵琶湖西岸活断層系の^{あいばの}饗庭野断層による低位段丘面(上位より L_{2-1} , L_{2-2} , L_{2-3} , L_{2-4} 面)の変位量を詳細に調べた。この結果, L_{2-3} 面と L_{2-4} 面の変位量が約 0.8m, L_{2-2} 面の変位量が約 1.4m, L_{2-1} 面の変位量は L_{2-2} 面の変位量よりも大きいことを明らかにした。このことから, L_{2-1} 面形成後 L_{2-2} 面形成前, L_{2-2} 面形成後 L_{2-3} 面形成前, L_{2-4} 面形成後に, 少なくともそれぞれ 1 回活動した経歴をもつと推定し, L_{2-4} 面の形成年代から最新活動を 7 世紀中葉以降としている(図 3-2)。この場合, 断層運動が概ね同規模の変位が生じることを前提としている。

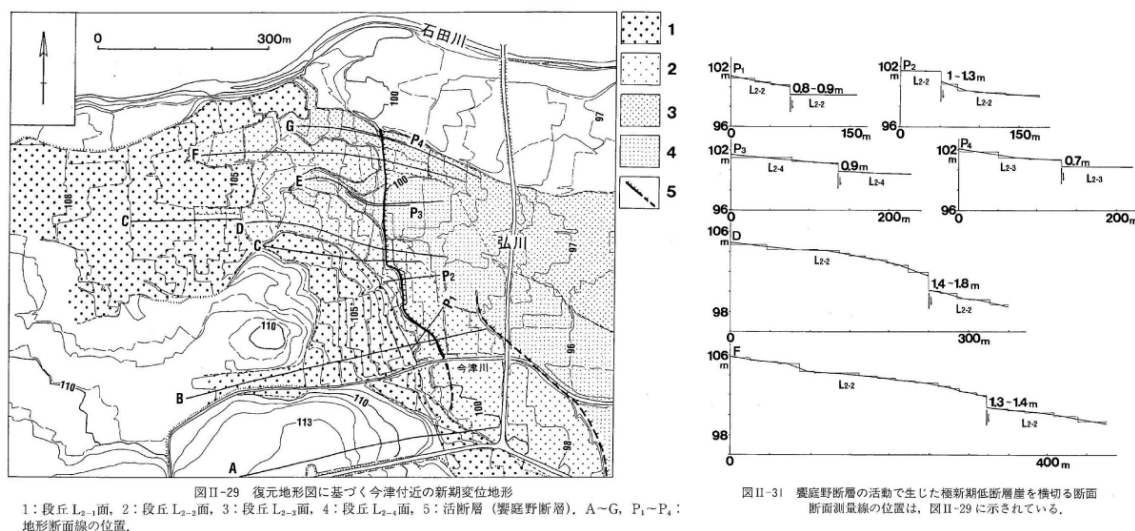
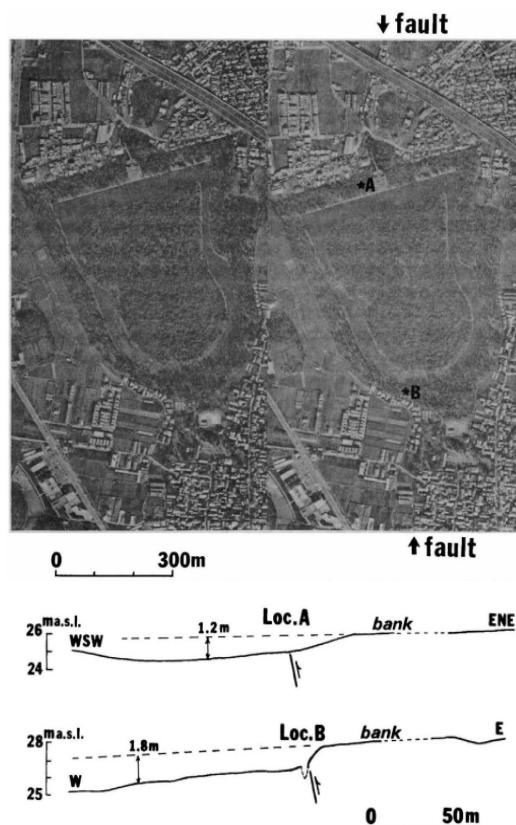


図 3-2 饗庭野断層地形断面図⁴²⁾

寒川(1986)⁶⁴⁾は、大阪平野南東部の
^{こんだやま}菅田山古墳と周辺の段丘面を変位させている菅田断層について詳細に調べた。菅田山古墳は断層によって西下がりの変位を受け, 約 1.8m の高度差が認められる(図 3-3)。古墳の築造時期は 4 世紀末葉から 5 世紀初頭で, 現在まで約 1500 年が経過している。段丘面の形成年代から断層の平均変位速度は 0.25~0.4m/千年と見積もられ, この活動度で再来周期が 1600 年以内になるとは考えづらいことから, 1 回の地震による変位と推定している。

図 3-3 菅田山古墳地形断面図⁶⁴⁾

上図: 菅田山古墳と断層崖のステレオ写真。
下図: 上図の A, B 地点を横断する地形断面。



3.2 ボーリング調査に基づく事例

ボーリング調査は、対象となる断層の鉛直変位量を評価するために有効である。断層を挟む両側で2箇所以上のボーリング掘削を行うことにより、その両側に見られる地層境界やテフラなど鍵層の高度差をその地層が形成されて以降の累積的な鉛直変位量として推定できる。その高度差が断層変位によるものであることを確認するためには、高密度のラインボーリングにより地質断面図を推定し、地層の連続性を丹念に追うことが重要である。また、より面的なグリッドボーリング調査により、段丘堆積物基底面や段丘崖の横ずれを含めた変位を確認できる場合もある。その断層が繰り返し変位している場合には、深部の古い地層ほど大きな変位量が認められる。各地層の年代を特定できれば、断層の活動履歴を評価することも可能である。

図 3-4 は、2011 年福島県浜通りの地震で井戸沢断層沿いに生じた地震断層を挟むボーリング掘削の事例である⁶⁵⁾。この地点では、近接する二条の正断層を挟んで、階段状に西側が低下したことが確認されている。F1 断層より西側の最上位層である F2 層は 2011 年の地震後に沈降域を埋めるように堆積した地層で、地震前の地表面は F1 層の上面である。地震に伴って、F1 層上面深度は西側が約 1.7m 低下している。また、より深部の B 層上面では 2.5m、A 層上面では 3.4m の落差が認められ、過去にも同様の断層活動が生じていると推定されている。

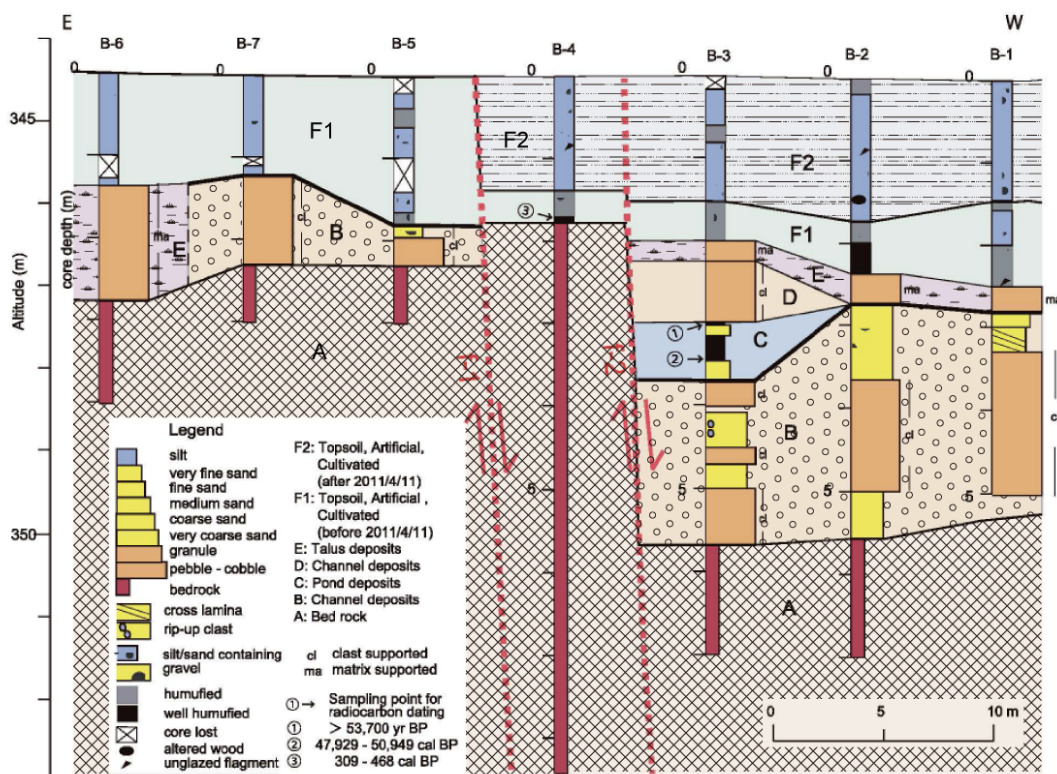
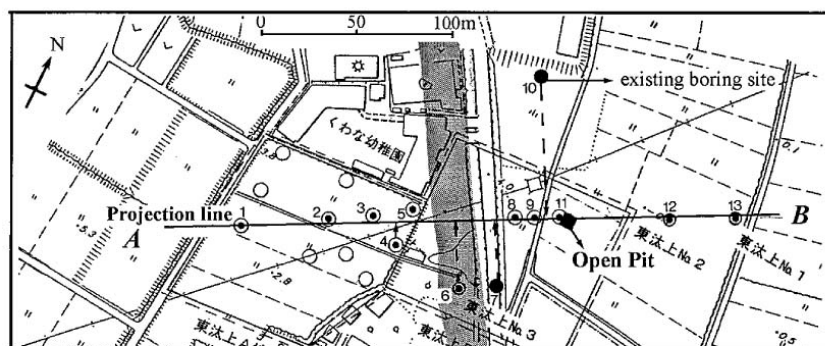


図 3-4 井戸沢断層を横断するボーリング調査により推定された地質断面図⁶⁵⁾ (一部加筆)

須貝ほか(1998)⁶⁶⁾は、桑名断層を横断して群列ボーリングを実施し、対比される地層の高低差から、最近の活動に伴う鉛直変位量を明らかにした。最新の活動が最上部泥層 TM 堆積後でその変位量が約 3.5m とされ、その一つ前の活動は US2a 層を US2b 層が不整合に覆うことから、US2a 層堆積後、US2b 層堆積前でその変位量も約 3.5m と推定されている (図 3-5)。



第3図 汰上地区の群列ボーリングと層序ピットの位置図。

汰上地区の位置は第2図参照。○：第4図の断面図に用いたボーリング，○：同断面には用いなかったボーリング，●：第4図の断面図に用いた既存のボーリング。

Fig. 3 Location map of boring sites and an open pit at Yuriage. See Fig. 2 for the location.

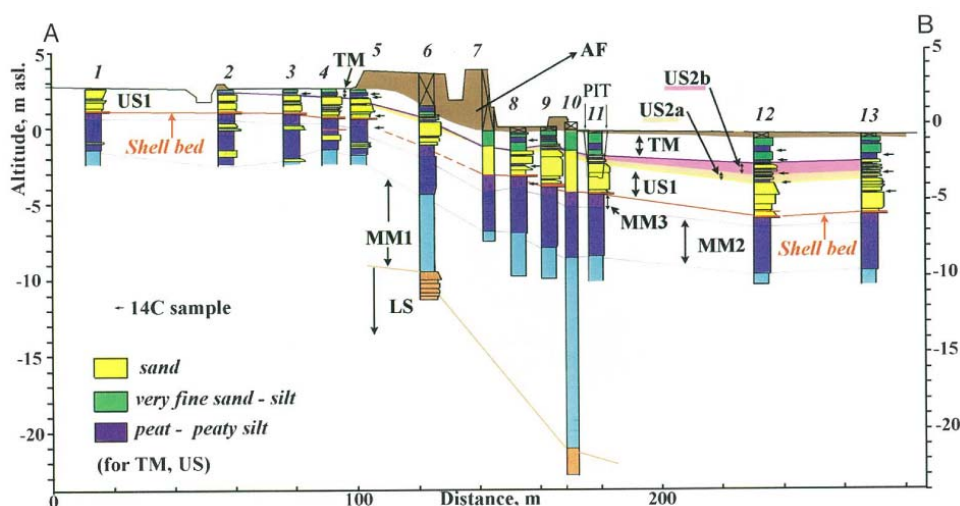


図 3-5 ボーリング調査による鉛直変位量の検討例⁶⁶⁾

上段：群列ボーリングと層序ピットの位置図。下段：A—Bを横断する地質断面図。

福島県 (1999)⁶⁷⁾は、双葉断層北部の活動性と変位量について、トレンチ調査とグリッドボーリング調査を合わせて評価している。調査地点は、丘陵と河成段丘 L₂ 面との境界部付近であり、トレンチ調査から段丘礫層に相当する I 層に変位が認められている (図 3-6 左)。段丘崖の基部付近で断層を挟んだグリッドボーリングを実施した結果、I 層の南限 (山側の分布限界) が断層を挟んで 2.8m 左横ずれし、鉛直方向に約 1.1m 変位していることが確認されている (図 3-6 右)。トレンチ調査の結果から、この変位は 2 回の活動の累積変位と見られ、横ずれ量を含めた単位変位量は、最新及びその一回前の 2 回の活動の平均で、約 1.5m と算出されている。

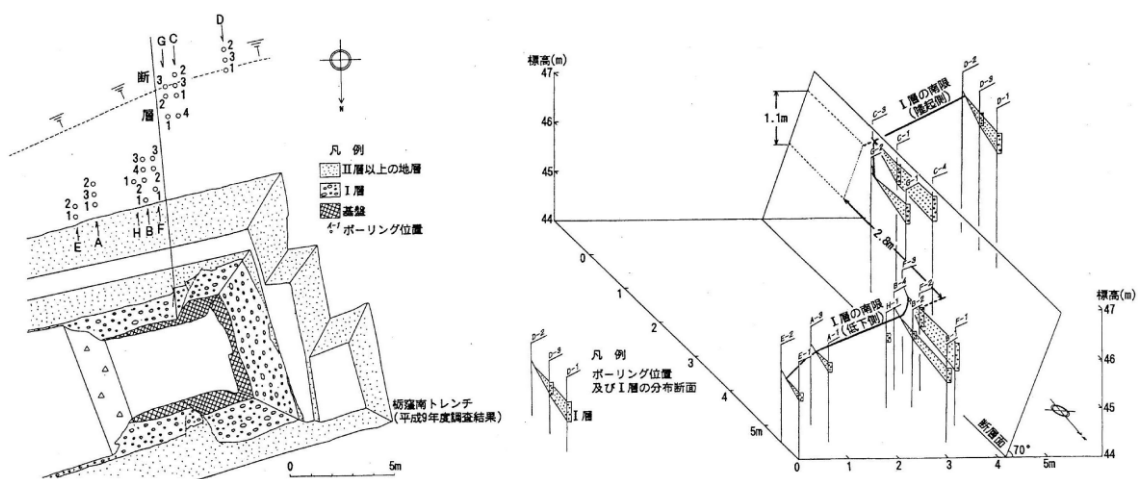


図 3-6 ボーリング調査による横ずれ変位量の検討例⁶⁷⁾

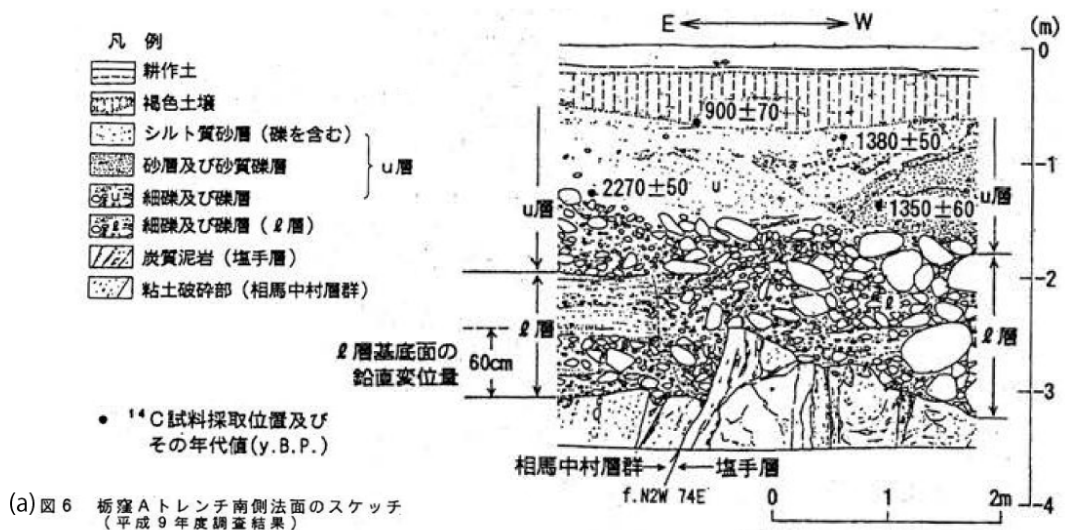
左図：グリッド・ボーリング調査位置。右図：グリッド・ボーリング調査結果による横ずれ量の検討。

3.3 トレンチ調査・露頭調査に基づく事例

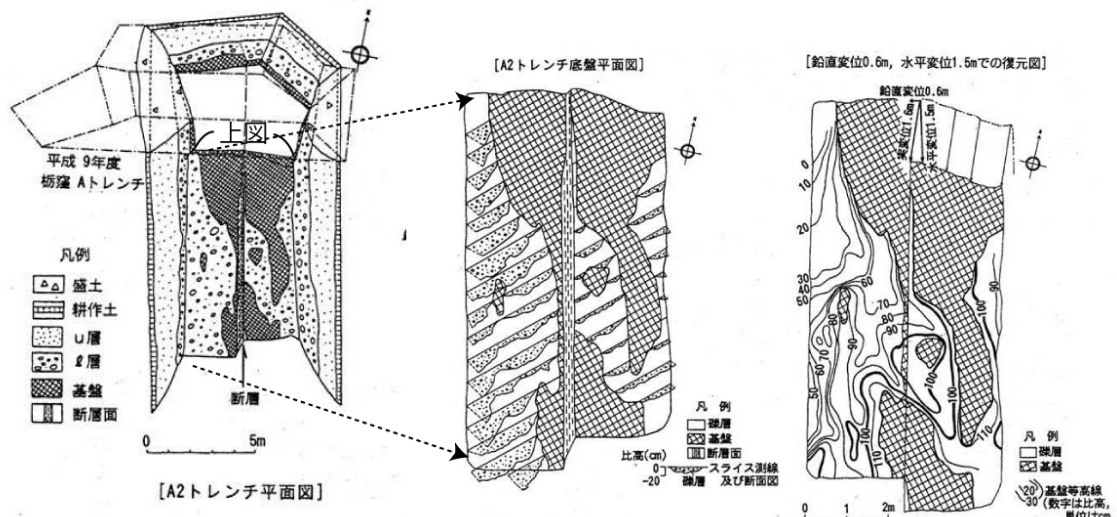
トレンチ調査は、対象となる断層の変位量を直接的に評価するのに有効である。断層両側に見られる地層境界やテフラなど鍵層の高度差をその地層が形成されて以降の累積的な鉛直変位量として推定できる。対象深度はボーリング調査よりも浅くなるが、地層の連続性を目視で確認できるために、比較的最近の断層変位をより高い空間分解能で認識できることが特長である。さらに、複数のトレンチを隣接して掘り拓げることによって、地層の鉛直方向の分布だけでなく、水平方向の分布も確認することができる。このような三次元トレンチでは、旧流路等を復元することができるため、断層の水平変位量を評価することも可能になる。

福島県（1998）⁶⁷⁾は、双葉断層の前述したボーリング調査地点の数 100m 北方でもトレンチ調査を行い、最新活動における鉛直方向の単位変位量が約 0.6m であることを確認している（図 3-7a）。さらに、拡張したトレンチの底盤において、基盤上面を削り込む旧流路が認められ、この流路が断層により左横ずれ変位を受けていることを示した（図 3-7b）。底盤をスライスして旧流路の形状を詳細に観察した結果（図 3-7c 左）、最新活動における鉛直変位量を 0.6m、左横ずれの水平変位量を 1.5m として復元すると、断層の隆起側及び低下側で旧流路が連続することが明らかにされている（図 3-7c 右）。これらの観察事実から、最新活動における鉛直変位量は約 0.6m、左横ずれの水平変位量は約 1.5m と判断され、実変位量は約 1.6m と算出されたとした。

同様に、旧流路に着目した三次元的なトレンチ調査に基づき、横ずれ変位量まで求めたものとして、次に述べる丹那断層の事例⁶⁸⁾のほか、牛伏寺断層の事例⁶⁹⁾などがある。



(a) 図6 枋窪 A トレンチ南側法面のスケッチ (平成9年度調査結果)



(b) 図5 枋窪 A 地点におけるトレンチ位置

(c) 図7 枋窪 A2 トレンチ底盤における横ずれ量の復元

図 3-7 トレンチ調査による変位量検討例⁶⁷⁾ (一部加筆)

図 3-8 は、丹那断層を対象として田代盆地西縁で行われた 3D トレンチの例である⁶⁸⁾。1930 年の北伊豆地震では、田代盆地南西縁の火雷神社において鳥居と石段の左ずれ変位約 1.5m があったほか、調査地点付近の水田で左横ずれ 60cm の変位が記録されている。予想される断層通過位置に断層の走向に直交する 4 つのトレンチのほか、横ずれ変位基準の有無を確認するため、走向に平行なトレンチが複数掘削された。見出された断層には変位の累積性が認められ、下位の地層ほど大きく変位している (図 3-8(a))。上部に位置する第 2b 層は特徴的な層相を示すチャネル堆積物で、最近 1 回の変位だけを受けている。その平面分布からかつてのチャネルは E3 壁面北端付近から南西に流下したと考えられる (図 3-8(b))。第 2b 層の右岸側の端は、A-A' 区間で明瞭に食い違っており、その変位量は左横ずれ 50cm、西側低下の縦ずれ変位量が 15~20cm であることが確認された。こ

の値は 1930 年の地震当時に地表で確認された変位量とよく対応している。また、より下位のチャネル堆積物である第 2d 層の分布縁の変位量を計測し、先行イベントからの 2 回分の累積横ずれ変位量が 60~80cm であることを示している。

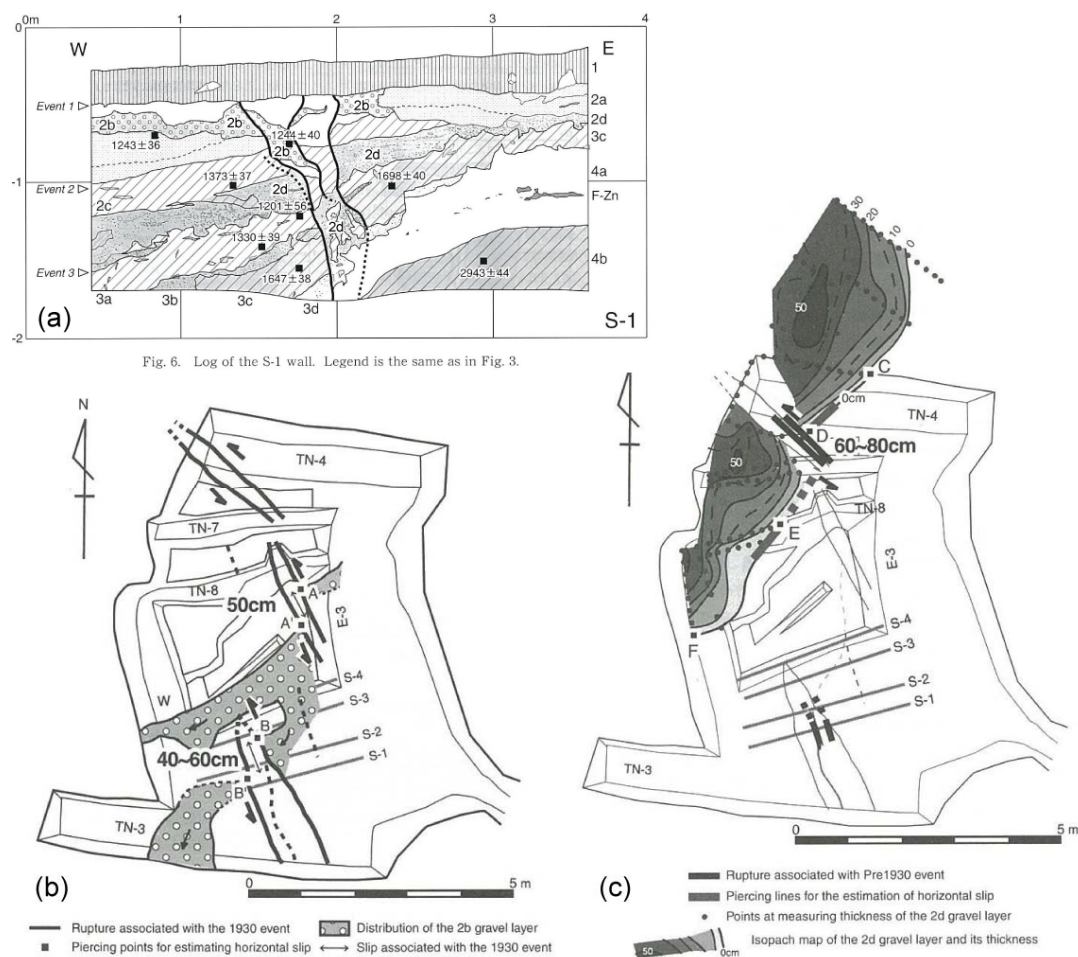


図 3-8 丹那断層における 3D トレンチ⁶⁸⁾ (一部加筆)

図 3-9 は、2004 年新潟県中越地震の際に生じた地表地震断層のトレンチ結果⁷⁰⁾である。この地震は西傾斜の逆断層によるもので、新第三紀層が厚く堆積している地域であるために、震源断層は基本的に伏在している。しかし、六日町盆地西縁断層帯の北方延長にあたる小平尾地区において、最大約 20cm の地表地震断層が 1km 以上にわたって生じた。トレンチ箇所には、この地表地震断層につながる低角な逆断層が明瞭に見出された。断層を挟んだ地層の食い違いから、2004 年の地震に先行して 2 回のイベントが推定されている。これらの変位量は第 7 層下面の食い違い、第 11 層上面の食い違いから、いずれも最低 1.5m 程度と見積もられた。これらの変位量は 2004 年の地震時の変位量よりも明らかに大きいため、2004 年の地震はこの断層の固有変位とは異なっていた可能性が指摘されている。

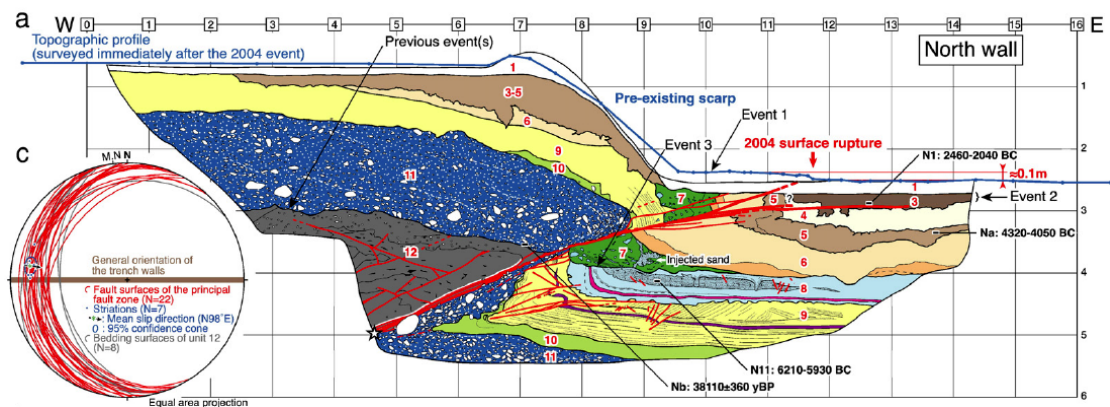


図 3-9 新潟県中越地震の地震断層を対象にしたトレンチ調査⁷⁰⁾

トレンチ調査を実施しなくても、適切な露頭が見つければ、断層変位を評価できる場合がある。狩野ほか(1984)⁷¹⁾は、丹沢南部に見られる平山断層の露頭を調査し、その活動履歴と鉛直変位量を明らかにした(図 3-10)。この露頭では、地層の年代指標となる示準テフラが多数認められ、その切断関係などから、活動時期が高い分解能で評価されている。平山断層は 2.15 万年前から 1 万年までの間に少なくとも 6 回の活動があり、それらの累積鉛直変位量は 7m あまりになるとされる(図 3-10 右)。一方で、約 2400 年前頃に小変位があったのを除けば、1 万年前以降の活動はほとんど静止しているとされた。ただし、平山断層は地層のずれと断層条線の観察から、左横すべり成分をもつ逆断層(縦:横=1:1)とされ、ネットスリップはより大きい可能性がある。

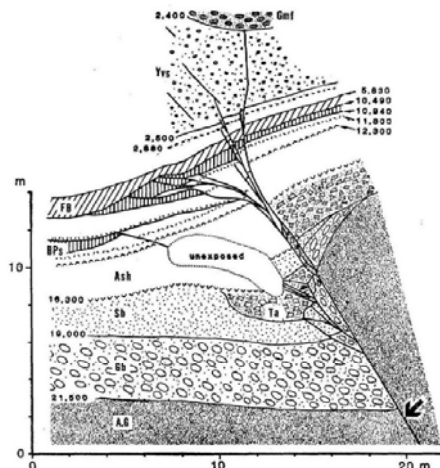


図 3 平山断層露頭スケッチ(位置は図 1 の B)(伊藤ほか(1982)を一部修正)。A.G: 足柄層群, Gb: 河岸段丘礫層, Sb: 砂層, Ta: 崖錐堆積層, Ash: 示準テフラをはさむ火山灰層, BPs: 黒色古土壌層, FB: 富士黒土層, Yvs: 山北火山砂礫層, Gmf: 御殿場泥流。図中の数字は推定堆積年代(B.P.)。層序の詳細については別途公表予定。図右下の矢印の部分の断層面の走向・傾斜は N30°E-60°W, 断層条線のピッチは 50°N。

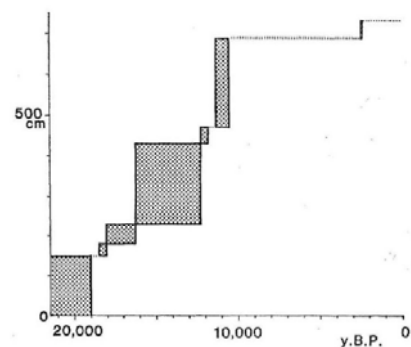


図 4 21,500 年以降の平山断層の変位累積過程(伊藤ほか(1982)を一部修正)。タテ軸は累積垂直変位量。累積線は砂目内をとる。変位量算定方法については別途公表予定。

図 3-10 露頭調査による鉛直変位量の検討例⁷¹⁾

3.4 特定地点の調査結果から変位量を評価する上での留意点

断層変位地形は時間経過に伴って、侵食・堆積などの作用を受けるため、徐々に失われていく。そのため、過去に活動した断層を調査する場合でも、その全長が確認できるとは限らず、原地形をとどめた特定地点で調査せざるを得ない。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将来的な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。

Hemphill-Haley and Weldon(1999)⁷²⁾は、地表地震断層の全長のうち 10%程度の区間で、5~10 サンプル位の変位量データが取得できれば、変位分布のばらつきによる不確実性が低減され、見積もられた平均変位量から過去の地震規模を正しく評価できることを統計的に示した。これはあくまでも地震規模評価を前提とした条件ではあるが、変位分布が局所的に変化する可能性を考慮すれば、平均変位量を正しく見積もることは重要であり、データ取得の上で留意しておくことが望ましい。

また、Manighetti et al.(2005)³²⁾は、多くの地表地震断層で実測された変位分布、震源インバージョンなどで推定された震源断層面上のすべり分布を多数の地震について検討した。一見、複雑に見える変位プロファイルでも、最大変位量と地震断層の全長で正規化して多くの地震について重ね合わせた場合、また、単一の断層でも長期間にわたる重ね合わせ（累積変位）で見た場合には、いずれもある 1 つの大きなピークを持った非対称な三角形になる場合が多いことを示した。そのような分布は、個別事象で生じる偶発的な変化が排除された、断層の本質的な物理特性を示しているとされる。このような変位分布の固有性が本質的に成り立っているとすれば、特定地点の変位量の評価において、必ずしも平均変位量を求める必要はないのかもしれない。ただし、その場合でも、長期的な累積変位の傾向を把握した上で、4.2 節で後述するようなスケーリング則の観点も加えて、個別データの妥当性を検討することが重要である。

4. 断層変位量の整理

前節では地表地震断層の調査から直接断層変位量を把握できることを示した。本章では前章で示した地表地震断層を主断層と副断層に区分する考えを示す(4.1 節)。前章で示した調査結果は全て主断層に関する結果である。次に、断層変位を別の観点から推定する手法を紹介する。即ち、地震の規模(各種マグニチュード)を推定するために断層のパラメータ(長さ L や変位量 D など)との関係($M-L$ 関係式、 $M-D$ 関係式、スケーリング則と言う場合がある)を検討した研究成果から断層変位量を推定する方法を示す。

4.1 主断層と副断層の区分

断層に関連する用語は、原子力安全推進協会がまとめた報告書「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」⁷³⁾に詳しく述べられているので、ここでは断層変位問題を扱う上で必要と考えられるものを紹介する。

震源断層とは、地震を発生させた地下の断層を指し、地表に現れたか否かは問わない。主断層とは、一般的には震源断層と同じ意味で使われることが多く、分岐断層も含まれる。一方、副断層とは、震源断層と地質構造上の関連性が認められないが地震に伴って副次的に形成された断層を指す(図4-1 参照)。

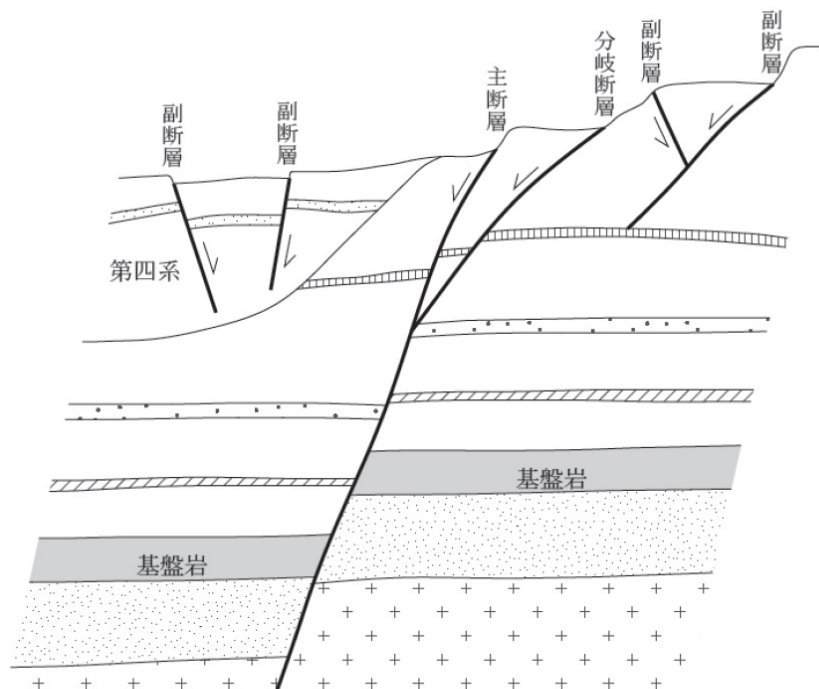


図4-1 主断層と副断層の区分⁷³⁾

主断層及び副断層の認定にあたっては、①ある1回の地震に限定して、その地震の震源断層と地表地震断層との関係性の有無に基づいて区分するという方法⁷⁴⁾と、②①の分析を行った後、変動地形が判読される場所で発生した副断層、すなわち繰り返し活動している断層を①の副断層から除外

するという方法⁷³⁾がある。①は一般論構築にあたって重要であり、②は詳細な変動地形調査を実施する場合に重要と言える。

断層変位の調査は、地表または浅部で実施されることがほとんどであり、現実的には主断層と副断層を明確に区分することは難しい場合が多い。そのような場合は、Vermilye and Scholz (1998)⁷⁵⁾によって提案されたプロセスゾーンという考え方を導入し、震源断層の地表延長部に分布する地表地震断層だけを主断層とするのではなく、地表延長部を含めて、断層長のおよそ1%の幅に入っている断層は震源断層と関係する主断層とみなして、それ以外の地表地震断層を副断層とみなす考え方があり、高尾ほか(2013)⁷⁴⁾もこれに倣っている。なお、プロセスゾーンという考え方は、ある地震で発生した地表地震断層を主断層と副断層に区分するひとつの方法であり、プロセスゾーン内に存在する断層が将来活動する可能性のある断層と言っているのではないことに注意が必要である。

4.2 スケーリング則に基づく主断層の断層変位量

断層長と1回当たりの変位量との関係を整理した代表的な例として松田(1975)⁷⁶⁾、Wells and Coppersmith(1994)⁷⁷⁾及び武村(1998)³⁴⁾の関係式を以下に示す。また、産総研の活断層データベースにおける断層変位量の整理結果について紹介する。

ここで、松田(1975)⁷⁶⁾の断層長 L には地震の際に地表に表れた地表地震断層の長さとして地震学的・測地学的データから推定された断層の長さが含まれている。Wells and Coppersmith(1994)⁷⁷⁾及び武村(1998)³⁴⁾の関係式の L は現地調査だけでなく、震源断層モデルに基づく震源断層面の長さとしている。以下では断層変位量を推定するために $M-L$ 関係式、 $M-D$ 関係式から $D-L$ 関係式で表現して、断層長から断層変位量を算出する関係式として示す。なお、断層変位量には平均値と最大値の両者があり、原著論文で明確な場合には極力その表記を採用した。松田(1975)⁷⁶⁾に関しては武村(1998)³⁴⁾の考察に基づき平均変位量の記載とした。

① 松田(1975)⁷⁶⁾：日本の14地震

$$\log L = 0.6M - 2.9$$

$$\log D = 0.6M - 4.0$$

から、

$$\log D = \log L - 1.1$$

ここで、 L ：断層の長さ (km), D ：平均変位量 (m), M ：気象庁マグニチュード

② Wells and Coppersmith(1994)⁷⁷⁾：世界の内陸地震244地震

$$\log D_{\max} = 1.02 \log L - 1.38$$

$$\log D_{\text{ave}} = 0.88 \log L - 1.43$$

ここで、 L ：断層長 (Surface Rupture Length, km) $D_{\max}$ ：最大変位量 (Maximum Displacement, m), D_{ave} ：平均変位量 (Average Displacement, m)

③ 武村(1998)³⁴⁾：日本の 27 地震

$$\log L = 1/2 \log M_o - 11.82 \quad (M_o \geq M_{ot})$$

$$\log D_{ave} = 1/2 \log M_o - 10.77 \quad (M_o \geq M_{ot})$$

$$\log L = 1/3 \log M_o - 5.98 \quad (M_o < M_{ot})$$

$$\log D_{ave} = 1/3 \log M_o - 6.74 \quad (M_o < M_{ot})$$

から,

$$\log D_{ave} = \log L + 1.05 \quad (M_o \geq M_{ot})$$

$$\log D_{ave} = \log L + 0.54 \quad (M_o < M_{ot})$$

ここで, L : 断層長 (km), M_o : 地震モーメント(dyne・cm), D_{ave} : 震源断層の平均変位量 (cm). $M_{ot} = 7.5 \times 10^{25}$ (dyne・cm) であり, スケーリングが不連続になる地震モーメントを表す⁷⁸⁾.

武村(1998)³⁴⁾は Wells and Coppersmith(1994)⁷⁷⁾が求めた断層パラメータ間の関係は日本列島の地殻内地震には適用できないようであるとしている. また, 気象庁マグニチュード M が 6 ないし 6.5 以上の比較的大きい地震で松田(1975)⁷⁶⁾と 武村(1998)³⁴⁾は $L-M$ 式, $L-D$ 式共に良く整合しているとしている.

④ 産総研の活断層データベース：

このデータベースでは, トレンチ等で確認された変位量を採用するほか, 平均変位速度/平均活動間隔で単位変位量を算出したり, 活動セグメント長を基に栗田(1999)⁷⁹⁾の経験式を用いて単位変位量を算出している.

栗田(1999)⁷⁹⁾は, 日本の内陸地震 15 例に伴う地震断層について地震セグメントの長さ L_{e-seg} (km)及び活動セグメントの長さ L_{b-seg} (km)と最大変位量 D_{max} (m)との関係を以下のように示している. ここで, 地震セグメントとは一つの地震に伴って活動した断層のことをいう. 活動セグメントとは活断層を, 過去の活動時期, 平均変位速度, 平均活動間隔, 変位の向きなどに基づいて区分した断層区間のことをいう.

$$L_{e-seg} = 9.0 D_{max}$$

$$L_{b-seg} = 4.9 D_{max}$$

$$L_{e-seg} = 1.8 L_{b-seg}$$

また, 栗田(1999)⁷⁹⁾はセグメントの最大変位量 D_{max} (m)と最頻値 D_{mode} (m)の比は

$$D_{max} = (3/2 \sim 2) \times D_{mode}$$

としている.

さらに, Wells and Coppersmith(1994)⁷⁷⁾が求めている世界の地震断層の D_{max} と L_{e-seg} との関係と比較し, 日本の地震断層に比べて世界の地震断層の方が 2~3 倍長いことがわかるとしている.

上述したように日本国内の地震に関する断層変位量として、震源断層の平均変位量を推定するためには松田(1975)⁷⁶⁾、武村(1998)³⁴⁾の関係式が活用できる。地表に断層変位が生じるような比較的大きな地震では両者は整合することが分かっている。

また、地表地震断層の変位量に関しては、産総研のデータベースで採用している栗田(1999)⁷⁹⁾の関係式がある。なお、地震調査研究推進本部における活断層の長期評価において将来の地表地震断層の変位量の推定に当たり、松田(1975)⁷⁶⁾を長く使ってきたが、平成 25 年からは下記の松田ほか(1980)⁸⁰⁾の関係式を採用している。

$$D = 10^{-1} L$$

ここで、 L : 断層長 (km) D : 最大変位量(m)

栗田(1999)⁷⁹⁾の最大変位量を与える関係式と松田(1980)⁸⁰⁾の関係式は係数に大きな差は無く、整合的であると言える。

4.3 地震に伴って生じた副断層の変位量

地表地震断層の調査結果に基づき断層長と断層変位が整理されているのは主断層に関するものであり、副断層に関する変位量は従来着目されてこなかったこともあり、主断層の断層長と副断層の変位量との関係式は提案されていない。ただし、次項で述べる確率論的断層変位ハザード解析(PFDHA)⁷⁴⁾では副断層の変位を抽出し、主断層変位量(最大値または平均値)で基準化して解析に用いている。従って、主断層の変位量を介して副断層の変位量を算出することが可能である。

副断層の変位を変動地形に対応する断層変位と定義して、日本国内、約 120 年間の地表地震断層の調査記録から副断層の変位量を抽出した結果が原子力安全推進協会(2013)⁷³⁾に示されている(4.1 項②の方法)。ここでは特に岩盤上の変位に着目している(図 4-2)。これによれば岩盤における副断層の変位量は概ね 30cm 以下であるとしている。

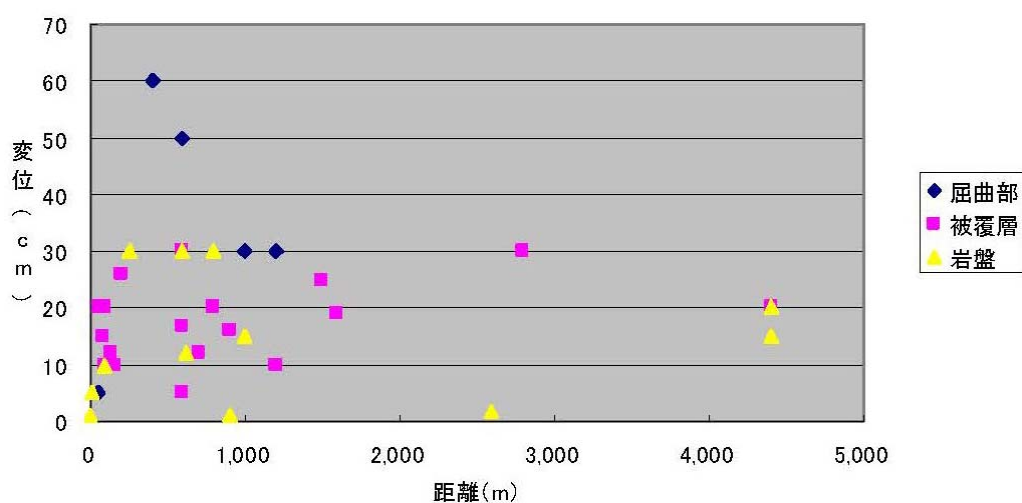


図 4-2 主断層からの距離と副断層の変位量⁷³⁾

4.4 基準化した断層変位量

第5章で説明する確率論的断層変位ハザード解析 (Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis, PFDHA) では、主断層、副断層ともに、断層変位量を基準化して取り扱うのが一般的である。すなわち、主断層の変位量については「主断層の変位量÷主断層の変位量の最大値（または平均値）」によって、副断層の変位量については「副断層の変位量÷主断層の変位量の最大値（または平均値）」によって表現する（図4-3、図4-4参照）。

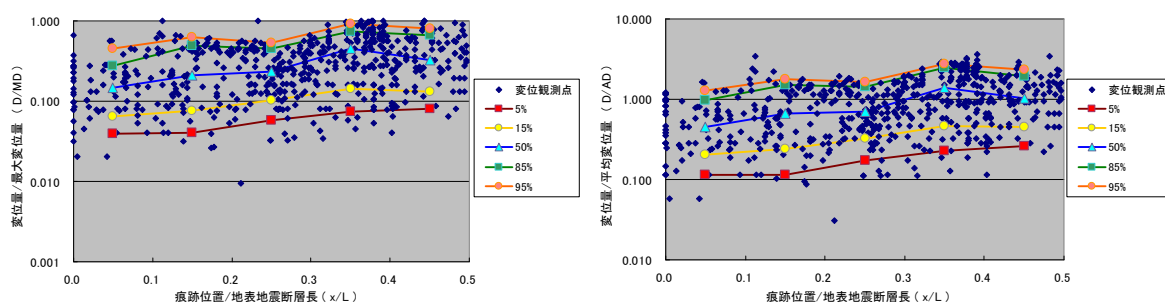


図4-3 基準化した断層変位量（主断層）⁷⁴⁾

長さ10km以上の場合。図中の折れ線は、変位観測点の非超過百分率を表す。

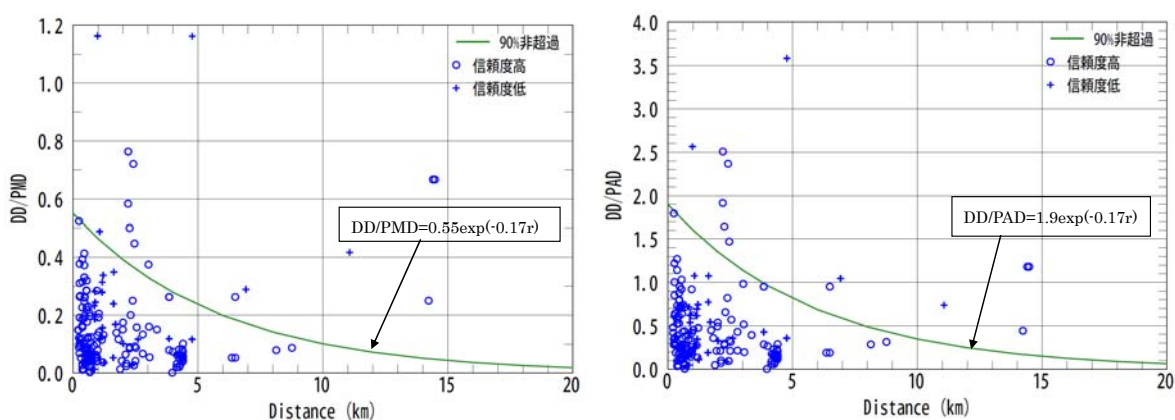


図4-4 基準化した断層変位量（副断層）⁷⁴⁾

縦軸は、主断層の最大変位量PMDで基準化した副断層による断層変位量DD。

地表地震断層が出現した地震が豊富に存在する場合は、このように基準化せずに、地震のマグニチュードに応じて断層変位量を直接整理することも可能であろう。しかし、実際には限られた数のデータしか存在しないので、異なるマグニチュードのデータを同一の枠組みで整理できるように、基準化（無次元化）して定式化する場合が多く、PFDHAの分野ではYoungs et al.(2003)⁸¹⁾や高尾他(2013)⁷⁴⁾も基準化して定式化している。

基準化する際、主断層の変位量の最大値または平均値を用いることになるため、地震のマグニチュードと主断層の変位量の最大値または平均値との関係式が必要になる。その関係式として、

Youngs et al.(2003)⁸¹⁾は Wells and Coppersmith(1994)⁷⁷⁾を，高尾他(2013)⁷⁴⁾は Wells and Coppersmith(1994)⁷⁷⁾を基に切片を補正した式を適用しているが，松田(1975)⁷⁶⁾などの他の関係式を用いることも可能である。

上述した図 4-4 から分かりますとおり，副断層の変位量に関するデータは，主断層から離れるにしたがって減少する．震源断層の影響が距離に応じて小さくなるのが主な理由であろうが，主断層から離れているために地表地震断層の現地調査が実施されなかったこともその理由として考えられる．次節では，副断層の変位量データを拡充するための方法および取り組みの例を紹介する．

4.5 副断層の変位量データを拡充するための方法

4.5.1 模型実験・数値計算

高尾ほか(2014)⁸²⁾は，副断層の変位量データを拡充するための試みとして，乾燥砂を用いた模型実験や，個別要素法（DEM）を用いた数値計算を実施している．図 4-5 はその実施結果を示しているが，図中の赤色の印は模型実験結果，青色は数値計算結果，点線は現地調査結果に基づいて策定した距離減衰式，実線は模型実験および数値計算結果を加えて策定した距離減衰式である．模型実験で用いた材料および数値計算で採用した要素が均一であり実現現象を再現できていない可能性があることなど，今後さらなる議論が必要ではあるものの，ここでは一つの試みとして紹介する．

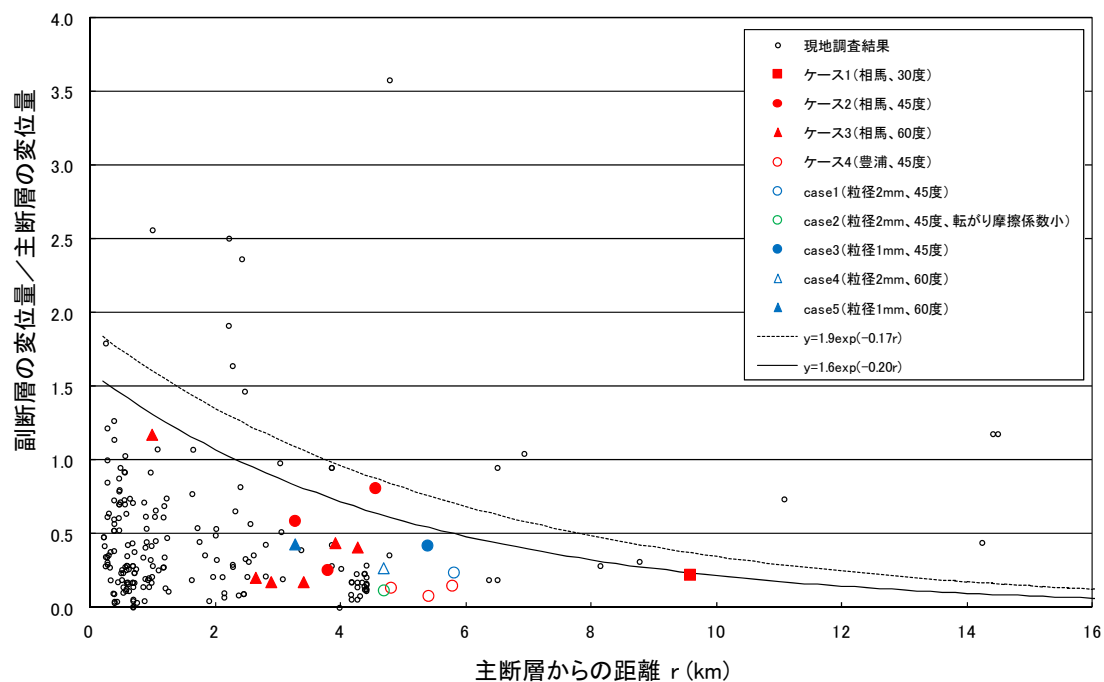


図 4-5 模型実験及び数値計算を用いた副断層データ補充の試み⁸²⁾

解析結果と実験結果・現地調査結果を比較したもの。

4.5.2 リモートセンシング技術を活用した調査

前述したとおり、主断層から離れるほど副断層のデータが少なくなるのは、地表地震断層に関する現地調査が実施されなかったことがその理由の一つとして挙げられる。ここでは、主断層から離れた場所において副断層変位に関する調査を実施するかどうかの判断材料として、以下に示すリモートセンシング技術が活用できるのではないかと観点で、同技術を紹介する。

(1) 航空レーザー計測 (Airborne LiDAR)

航空レーザー計測は、航空機から下方にパルス状にレーザーを照射しながら飛行することで、地表の詳細な三次元座標を計測する手法である。複数の反射パルスを識別することにより、樹木等の高さと地面の高さを区別できる。樹木の隙間を通過して地表面に達した最終反射パルスを使用し、さらに人工構造物などの除去処理を加えて作成された地形モデルを DEM (Digital Elevation Model : 数値標高モデル) と呼ぶ。このように作成される DEM は、0.5~2m 程度のグリッド間隔の場合が多く、樹木に覆われた山間部での詳細な断層変位地形の抽出に有効である。また、傾斜量、起伏量、開度等の地形量を解析的に求めることにより、対象地域の地形的特徴を定量的に評価することも特長である。

我が国では近年、航空レーザー計測による DEM が精力的に作成され、2013 年までに国土の 60% 以上をカバーするまでに至っている⁸³⁾。それに伴い、DEM が存在する地域で地殻内地震が発生するケースも増加している。このような場合には、地震後に航空レーザー計測を改めて実施することにより、地震前後の DEM を比較することで、地殻変動や断層変位を詳細に評価することが可能になる。ただし、地表地震断層の鉛直変位量分布を把握するためには、単純に地震前後の数値標高モデルの差分を得るだけでは不十分であり、水平移動量を考慮する必要がある。こうした水平移動量の影響を避けるために、野原ほか (2007)⁸⁴⁾は、平坦な道路の中央部でのみ差分量をとるという工夫を施して、2007 年能登半島地震の鉛直変位量を求めた。また、Mukoyama(2011)⁸⁵⁾は、単位領域のピクセルマッチング技法により地震前後の三次元的な移動量を求め、2008 年岩手宮城内陸地震の断層変位量を三次元的に求めている。同様の手法により品川ほか (2013)⁸⁶⁾は、2011 年福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層沿いの詳細な鉛直変位量、および水平変位ベクトルを明らかにした (図 4-6)。

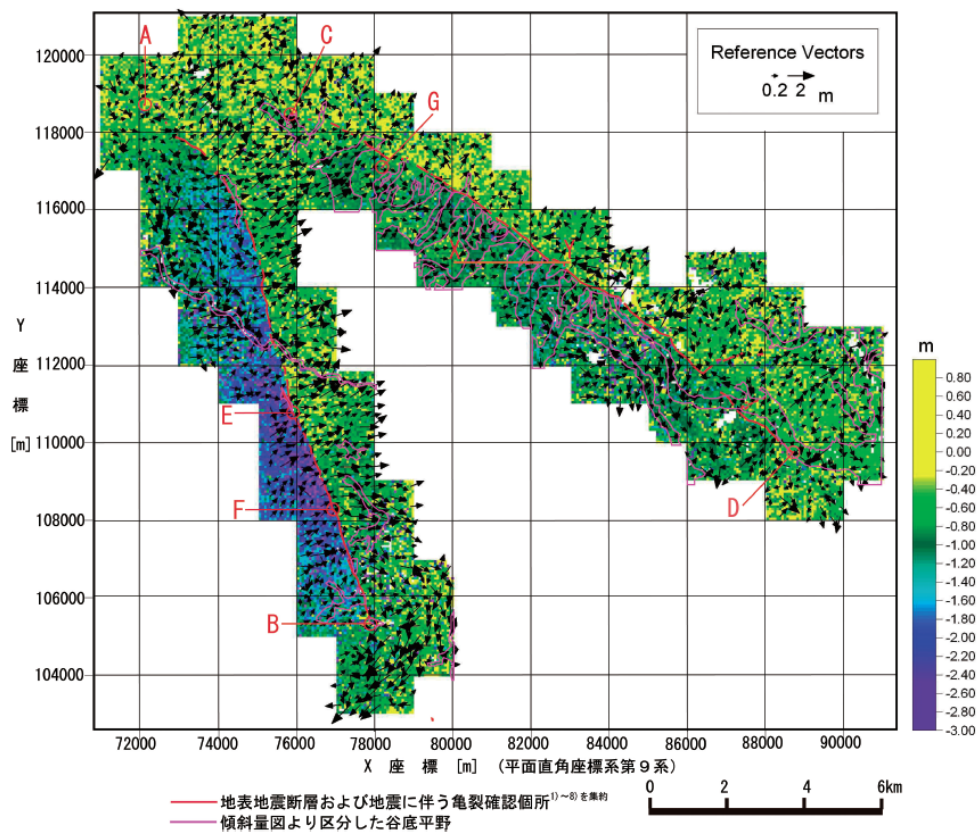


図 4-6. 地震前後の LiDAR-DEM 解析による断層変位の例 ⁸⁶⁾

背景色は鉛直変位を、矢印は水平変位ベクトルを示す。

(b) SAR 干渉解析 (InSAR)

InSAR とは、2つの合成開口レーダー (SAR) 画像を用いて、干渉処理により地形の標高や変動量を求める技術である。特に、ここでは、人工衛星に搭載された SAR が地震前後にほぼ同一の軌道から震源域を観測した2つの画像を用いて、地震に伴う地殻変動を差分干渉処理により求める技術を指す。欧米や日本では、1990年代から SAR センサを搭載した人工衛星が継続的に運用されている。このため、それ以降に発生した世界中の多くの内陸地震について、それに伴う地殻変動が InSAR により解明され、断層モデルの構築などに活用されている ⁸⁷⁾。

InSAR の最大の特長は、数 10km 四方の地殻変動を面的に (連続的に) 捉えられる点である。空間分解能は、新しい衛星ほど向上しており、2014 年から運用されている PALSAR-2 では、スポット観測をした場合の空間分解能が 1~3m である。また、InSAR で捉えられる差分量は、照射されるマイクロ波の波長に応じて異なるが、条件が良ければ数 cm オーダーの地表変位を捉えうる。こうした特長は、地表地質調査では見出しにくい微小な変位、あるいは主断層から離れた副断層の変位を抽出するために有効と思われる。

Fukushima et al.(2012)⁸⁸⁾は、2011 年福島県浜通り地震 (M7.0) に伴う詳細な地殻変動を InSAR によって明らかにした (図 4-7)。この地震では、井戸沢断層 (西トレース ; 図 4-7 の Ia)、湯ノ岳断層 (図 4-7 の Yb) に沿って明瞭な地震断層が現地踏査によって確認されており ⁴³⁾、この解析で

得られた変位分布は現地踏査で得られたものと調和的とされている。また、それらと並走する Ib や Ya 沿いに連続的な地表変位が認められる。さらに、これら主断層とは離れた複数の地点でも、干渉縞の不連続に基づいて、副断層の出現を示唆するような地表変位が推定されている（たとえば北緯 37.05 度，東経 140.6 度付近）。

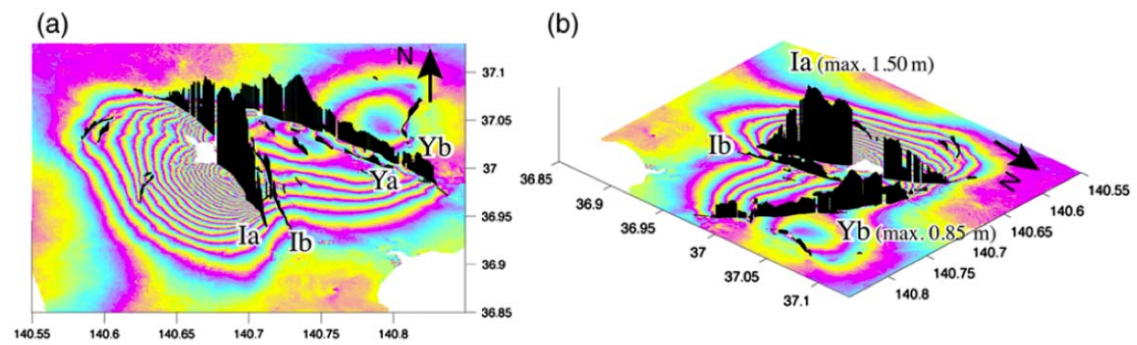


図 4-7 InSAR 解析による福島県浜通り地震の断層変位量分布 ⁸⁸⁾

5. 断層変位の想定方法

5.1 決定論的な方法

対象地点に検討すべき断層が認められる場合には、前述のとおり地質調査によってその活動性及び断層長などが調査・評価される。「活動性が認められる場合」の根拠として変位履歴を把握できれば、その情報から将来の変位を想定することが可能である。また、当該断層の活動性が認められても、変位履歴が明らかでない場合には4.2節で紹介した断層長と変位量との関係から、震源断層の平均変位量または地表地震断層の最大変位量を想定することが可能である。

明確な活動性は認められないが、「活動性が否定できない断層」(将来変位する可能性のある断層)について、このような断層が施設の設置位置に認められる場合の断層変位の想定方法を検討する。この場合の断層は、活動性が明確な、震源として考慮する「活断層」ではないが、活動性を完全に否定できないといった断層が該当する。

一般構造物の耐震設計では対象地点の周辺に関して詳細な地質調査を実施することは稀なため、その耐震設計に用いる設計用地震力(動的解析の場合には地震動)の震源までを考慮することはないが、原子力施設の場合には計画時点から詳細な地質調査を実施して震源として考慮する「活断層」を認定する。通常は原子力発電所の重要構造物の設置地盤に震源として考慮する「活断層」が存在することはなく、設置地盤に認められる断層は副断層として区分され、その断層が震源として考慮する「活断層」(主断層)が活動した影響で変位を生ずるか否かを数値シミュレーションによって検討することができる。なお、主断層の変位量は4.2節で示した関係式以外にも地震動評価のための断層モデルに採用される変位量などを参考とすることができる。一般構造物に関しても周辺の既往調査結果に基づき同様の検討が可能である。

主断層の活動に伴う副断層の活動を数値シミュレーションによって検討して、解析的に求まる変位量によって施設の安全性を検討することが可能である。例えば、第IV編で後述するように震源断層の平均変位量を食い違い弾性論の入力条件とすることによって、施設・地盤・副断層を模擬した詳細モデルで副断層の変位による施設に対する影響を検討することができる。

原子力安全推進協会(2013)⁷³⁾では、副断層の変位による施設に対する影響を検討するために二種類の検討用変位を提案している。一つは上記のように求めた変位量を「安全検討用変位 δa 」と称して、他の外部自然事象(地震、津波など)の設計基準(Design basis)と同程度の年超過頻度(10^{-4} ～ 10^{-5})であることを参照し、この変位量に対しては他の自然事象の設計基準(例えば基準地震動)と同様に施設の安全機能に大きな影響がないことを確認することとし、影響が考えられる場合には安全性向上策を講じることとしている。二つ目の検討用変位は設計基準を超える状況を想定して「限界検討用変位 δb 」を提案し、それによる施設の安全性を検討する手順を提案している。限界検討用変位 δb の例として、30cm を試計算の入力条件の断層変位量としている。これは4.3節の地表地震断層の整理結果に基づくもので、この数値以下でも以上でも良いが、具体的な検討を行う際の目安の断層変位量と位置付けている。この変位量は設計基準超えの検討に用いる変位量であるので、安全性評価にあたってはアクシデントマネジメントも考慮した検討を行うこととしている。なお、

限界検討用変位に対する安全性を検討する概念は、土木学会特定テーマ委員会の提言⁸⁹⁾に述べられている「危機耐性」の確保と同様の概念と言える。

本節では複雑な地質現象を調査、整理して、主断層および副断層の変位量の決定論的な想定方法を示した。想定した変位量には不確実性が含まれることを認識して検討を行う必要があることは言うまでもない。具体的な不確実さの考慮方法は、今後の課題である。

5.2 確率論的な方法

5.2.1 地表地震断層の調査結果を用いた想定方法

主断層及び副断層の変位量がある値を超える1年あたりの超過頻度は以下のとおり計算することができる。

①主断層による断層変位の年超過頻度

次に示す頻度または確率の積として評価される。

主断層による断層変位の年超過頻度 = $\nu_0 \times P_{1p} \times P_{2p} \times P_{3p}$

ν_0 : 活断層が活動する1年あたりの頻度

P_{1p} : 活断層が活動したときに主断層の断層変位が地表で発生する確率

P_{2p} : 主断層による断層変位が地表で発生した場合にその断層変位が評価地点で発生する確率

P_{3p} : 主断層による断層変位が評価地点で発生した場合にその断層変位がある値を超過する確率

②副断層による断層変位の年超過頻度

次に示す頻度または確率の積として評価される。

副断層による断層変位の年超過頻度 = $\nu_0 \times P_{1p} \times P_{2d} \times P_{3d}$

ν_0 : 活断層が活動する1年あたりの頻度

P_{1p} : 活断層が活動したときに主断層の断層変位が地表で発生する確率

P_{2d} : 主断層による断層変位が地表で発生した場合に活断層から離れた評価地点で副断層の断層変位が地表で発生する確率

P_{3d} : 副断層の断層変位が評価地点で発生した場合にその断層変位がある値を超過する確率

上記評価式を用いて実施した副断層に関する PFDHA の解析例を図 5-1 に示す。このように、PFDHA を適用すれば、副断層の断層変位量がある値を超過する1年あたりの頻度をハザード曲線という形で示すことができる。解析条件等については、高尾他(2013)⁷⁴⁾に詳しく説明されているので、参照されたい。

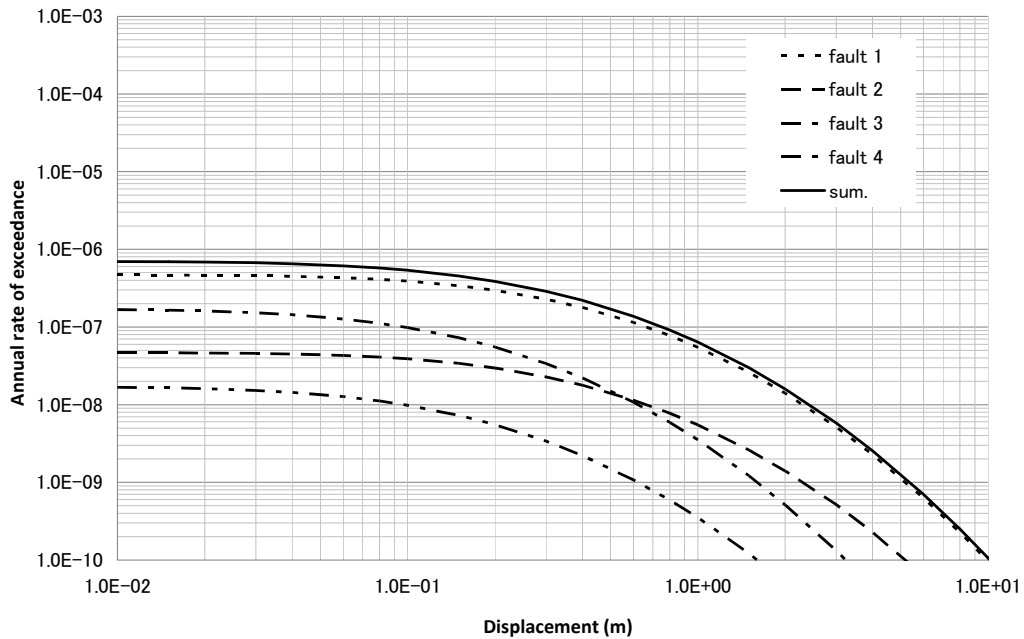


図 5-1 PFDHA の試計算例⁷⁴⁾

ここで、PFDHA を実施する上で非常に重要となる‘格子寸法依存性’について説明する。上述した図 5-1 は、高尾ほか(2013)⁷⁴⁾に示された評価式を用いて解析した結果である。格子寸法に依存するのは、副断層の発生確率 P_{2d} であるが、高尾ほか(2013)⁷⁴⁾は、Youngs et al.(2003)⁸¹⁾に倣って 500m × 500m の格子を用い、主断層から副断層までの距離および地震のマグニチュード(M_w)を説明変数として P_{2d} 評価式を策定した。その後、高尾ほか(2014)⁸²⁾は、格子寸法依存性に着目し、分析に用いた格子寸法に応じて 4 種類の P_{2d} 評価式を再提案した。その際、 M_w を説明変数から外しているが、 M_w の違いが P_{2d} に与える影響は、格子寸法が P_{2d} に与える影響より小さいからである。

格子寸法依存性が生じる理由などの詳細については高尾ほか(2014)⁸²⁾に譲るが、図 5-2 から分かるとおり、格子寸法を小さくすれば副断層の発生確率 P_{2d} は小さくなるため、適切な格子寸法による P_{2d} 評価式を用いて PFDHA を実施することが重要となる。すなわち、PFDHA の対象となる構造物の大きさと、 P_{2d} 評価式の基となっている格子寸法をできるだけ整合させることが必要である。

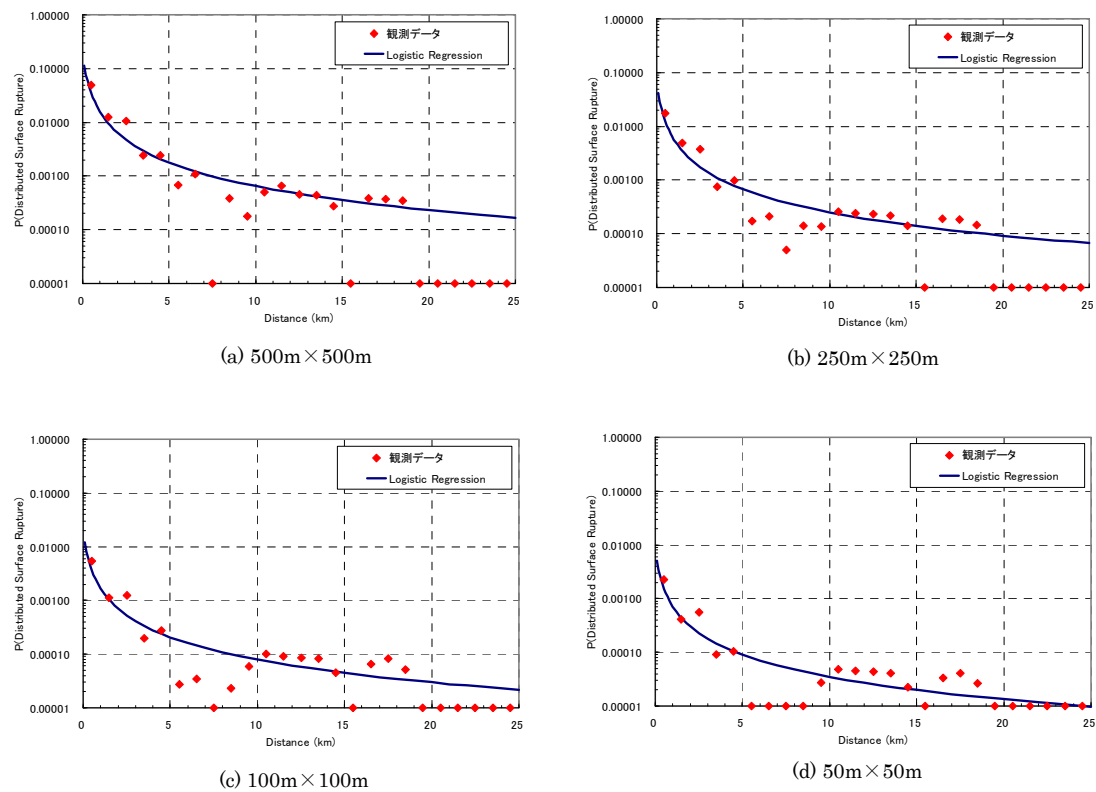


図 5-2 格子寸法依存性の分析結果⁸²⁾

次に、経験やデータ不足が原因で見解が複数存在する場合、すなわち、認識論的不確実性が存在する場合の取り扱いについて述べる。認識論的不確実性は、地震動や津波のハザード解析と同様に、ロジックツリー手法を用いて処理することが可能である。

認識論的不確実性を考慮した PFDHA の解析例は、高尾他(2014)⁸²⁾で紹介されている。ロジックツリーの例を図 5-3 に示す。このように、意見が複数存在する場合は、それらの意見全てを分岐という形で採用し、それぞれの分岐に重みを付けることによって、各分岐の正しさの可能性を表現することができる。解析結果は、図 5-4 のようにフラクタイルハザード曲線として表現されることが一般的である。認識論的不確実性の考慮方法の詳細については、高尾ほか(2014)⁸²⁾を参照されたい。

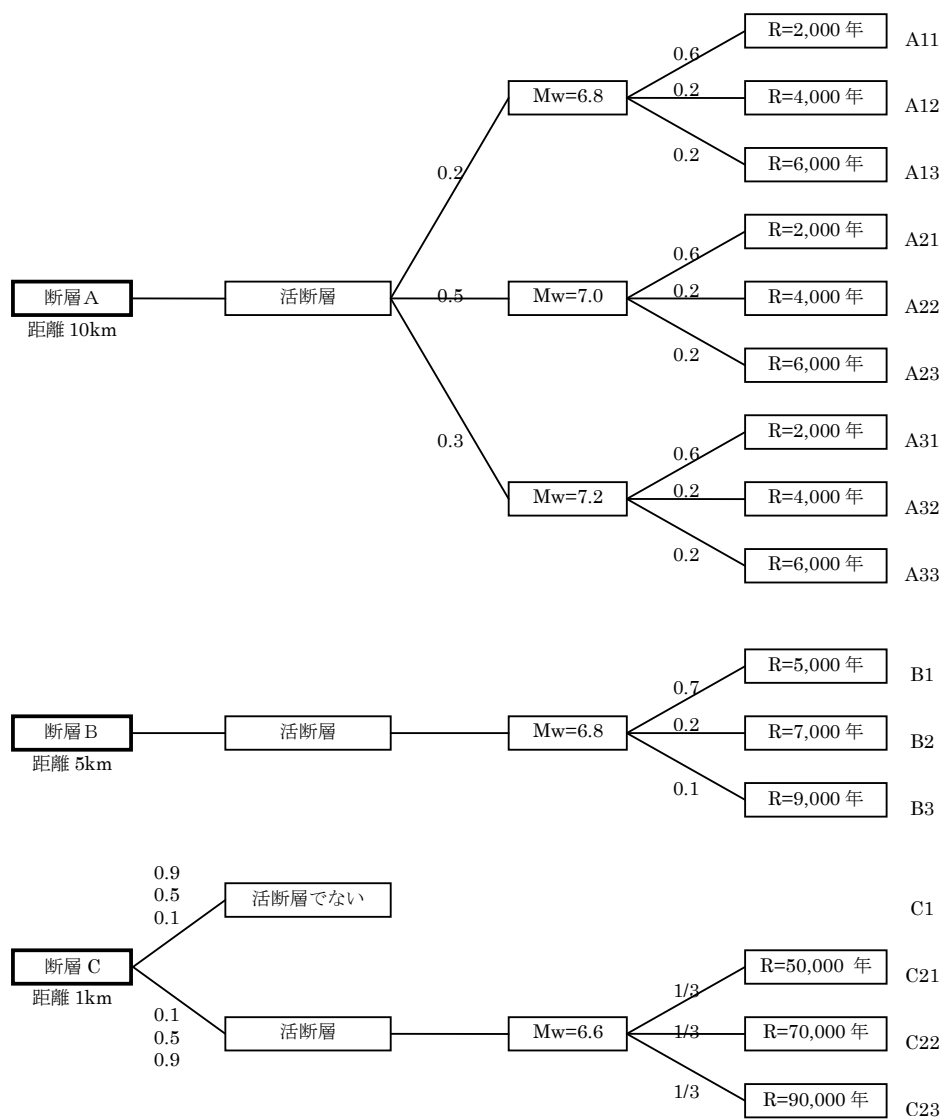


図 5-3 ロジックツリーおよび重みの例⁸²⁾

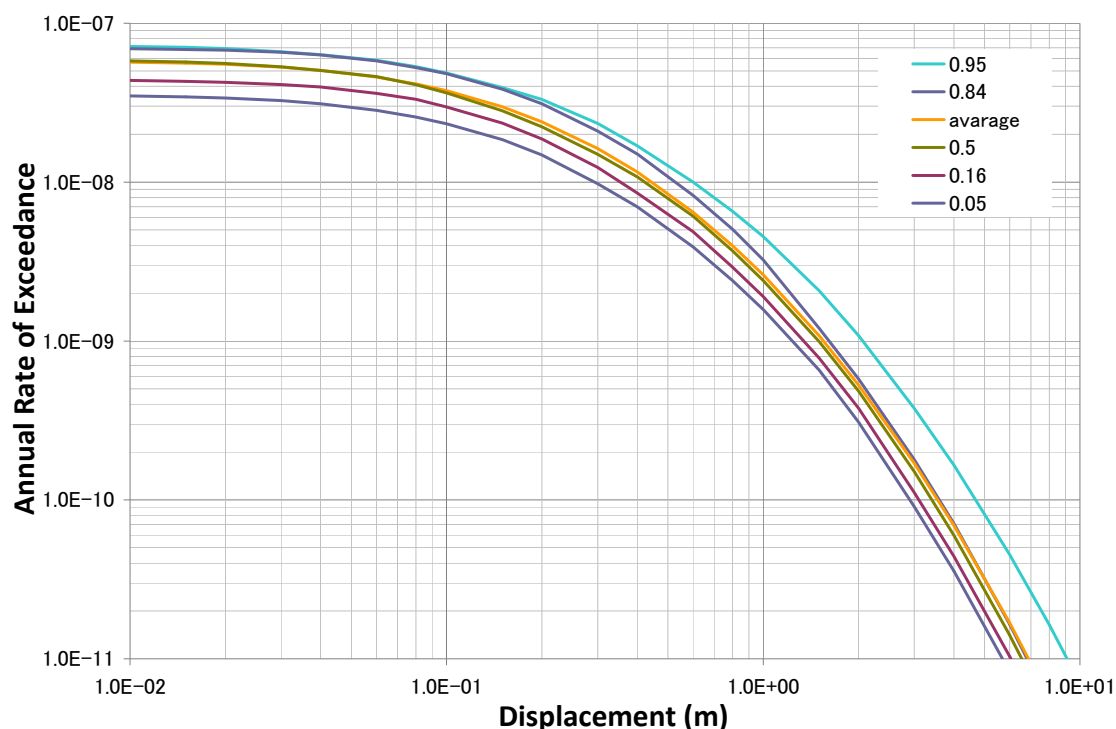


図 5-4 フラクタイルハザード曲線の例⁸²⁾

図 5-3 における断層 C の重みが、非活断層 0.9, 活断層 0.1 の場合. 凡例の 0.95 は 0.95 フラクタイルハザード曲線を意味する. 0.95 とは、ロジックツリーの全組み合わせハザード曲線の集合に対して、各ハザード曲線が持つ重みの累積が 0.95 となる年超過頻度を連ねた曲線のことをいう.

4 章で述べたとおり、①の P_{3p} 及び②の P_{3d} の計算にあたって、PFDHA では基準化した断層変位量を用いて定式化を行っている. データが豊富に存在するならば、マグニチュードの大きさに応じて、断層変位量を長さの次元をもったまま定式化することは理論的には可能であるが、より多くのデータに基づき確率密度分布を仮定して超過確率を計算するべきとの確率論における基本的考えに従えば、基準化して定式化する方法は現時点ではベターな選択肢と言えよう. 今後、確率密度分布や、主断層から副断層までの距離に応じて副断層の断層変位量が減衰する様子（距離減衰）に関して、地震のマグニチュードに依存することが分かってくれば、その時点で定式化の方法を見直す、すなわち、基準化せずに定式化する必要があるだろう.

5.2.2 個別地点の調査結果を用いた想定方法

主断層及び副断層の変位量がある値を超える 1 年あたりの超過頻度は、5.2.1 で示したとおり計算することができるが、個別地点の調査結果が充実している場合、すなわち、ある特定の断層の再来期間（活動間隔）がボーリング調査、トレンチ調査、トンネル調査などの詳細な地質調査で明らかになっている場合は、①については $v_0 \times P_{1p} \times P_{2p}$ の代わりに、②については $v_0 \times P_{1p} \times P_{2d}$ の代わりに、ある特定の断層の再来期間の逆数を用いれば、5.2.1 と同様に超過頻度を計算することができる. すなわち、次式のとおりである.

主断層による断層変位の年超過頻度 $= \lambda_p \times P_{3p}$

副断層による断層変位の年超過頻度 $= \lambda_d \times P_{3d}$

λ_p : その断層が主断層である場合, その断層の再来期間の逆数

λ_d : その断層が副断層である場合, その断層の再来期間の逆数

なお, 再来期間が判明していない場合は, λ_p または λ_d を「平均変位速度 $\div$ 1 回あたりの平均変位量」によって計算する方法もある。また, 個別地点における断層変位データが豊富に存在する場合は, P_{3p} を個別地点で算出することも理論上可能である。

6. まとめ

第Ⅱ編は、断層変位評価のための調査法と予測にあたっての評価方法をまとめたものである。まず、第1章では、断層運動の駆動力となる日本列島の広域応力場について概説し、地殻応力の直接計測法・推定法について紹介した。活断層周辺の応力状態は概ね広域スケールの応力場で内挿できるが、個々の活断層評価にあたってはローカルな構造・応力不均質の重要性も指摘されている。同様に、断層形状や封圧、地形効果など、地震発生深度から地表付近への応力場へのダウンスケーリング時の注意点も示した。第2章では、実施する段階的な断層評価の流れと一般的な調査手法を概説し、第3章では断層の地表変位の検出と予測に特化した調査方法と国内の調査事例をとりまとめた。特に、地震時変位量の検出やその反復性評価のために、詳細な断層変位地形の解析と群列ボーリング、三次元トレンチなどが有効であることを示した。第4章では、第2章・第3章の活断層調査とは別に、過去に発生した地震のマグニチュードと地震断層長、断層変位量についての各種経験則を取り上げた。これらは第3章で紹介した調査結果を評価するための基準となる。従来の変位量予測との違いは、副断層を意識して評価した点にある。「明確な活動性は認められないが活動性が否定できない断層」の評価も含まれる。第4章では、確率論的断層変位ハザード評価につなげるため、主断層と副断層の変位量について過去の地震断層データをコンパイルし定式化した研究を紹介した。また、今後、模型実験・数値解析やリモートセンシング技術によって副断層データの拡充が期待されることにも触れた。最後に、第5章では、断層変位を想定するにあたり、決定論的評価法と確率論的評価法の2つを示した。

以上のように、第Ⅱ編では対象構造物の敷地内および周辺域での地質調査、およびその評価基準となる地震断層による変位データの経験則をとりまとめ、断層変位の予測に関する取り組みを紹介した。しかし、内陸地殻内地震が発生しても既知の活断層や近傍の副断層で変位が確認されることは多くはなく、予測と事実を比較・検証できる事例は限られる。また、活動性評価にあたって断層上載地層法が適用できない場合は多い。活動性が曖昧なまま安全サイドの観点から断層変位を想定せざるを得ない状況も考えられる。つまり、経験則を踏まえた決定論的・確率論的評価だけでは対応できず、第Ⅲ編で示される数値解析と実験による断層変位の想定も重要となる。解析・実験にあたっては、これらの調査データ・経験則を踏まえて物理パラメータの抽出を行い、活動性が否定できない断層等にも適用して変位量想定を行うという流れが理想である。その過程で、調査データの量や精度限界による認識論的不確実性、断層運動本来の不確実性を十分考慮した計算・実験が求められる。このような調査と解析の両面での比較・検討から断層変位ハザードの評価向上を図り、第Ⅳ編で示される構造物の安全性評価・リスク評価へ繋げる必要がある。

参考文献

< 1 章 >

- 1) 藤田和夫: 六甲変動, その発生前後-西南日本の交差構造と第四紀地殻運動-, 第四紀研究, 7, pp. 248-260, 1968.
- 2) Sato, H.: The relationship between Late Cenozoic tectonic events and stress-field and basin development in northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, 99, pp. 22261-22274, 1994.
- 3) 栗田泰夫: 東北日本弧中部内帯の短縮変動と太平洋プレートの運動, 月刊地球, 10, pp. 586-591, 1988.
- 4) 岡田篤正・安藤雅孝: 日本の活断層と地震, 科学, 49, pp. 158-169, 1979.
- 5) Wesnousky, S.G., Scholz, C.H., and Shimazaki, K.: Deformation of an island arc: rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and Quaternary fault data. *J. Geophys. Res.*, 87, pp. 6829-6852, 1982.
- 6) Kaizuka, S., and Imaizumi, T.: Horizontal strain rates of the Japanese islands estimated from Quaternary fault data. *Geogra. Rep. Tokyo Metro. Univ.*, 19, pp. 43-65, 1984.
- 7) 野原 壯・郡谷順英・今泉俊文: 活断層 GIS データを用いた地殻の歪速度の推定, 活断層研究, 19, pp. 23-32, 2000.
- 8) 佐藤比呂志: 東北本州弧における後期新生界の変形度について, 地質学論集, 32, pp. 257-268, 1989.
- 9) Okada, S., and Ikeda, Y.: Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, B01404, doi:10.1029/2011JB008355, 2012.
- 10) 鷲谷 威・宮崎真一・多田 堯: GPS で見た日本列島の変形, 月刊地球, 21, pp. 236-245, 1999.
- 11) 橋本 学: 測地測量により求められた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I): 本州・四国・九州, 地震 2, 43, pp. 13-26, 1990.
- 12) 石川典彦・橋本 学: 測地測量により求められた日本の地震間の平均的な地殻水平ひずみ速度 (II), 地震 2, 52, pp. 299-315, 1999.
- 13) Sagiya, T., Miyazaki, S., and T. Tada: Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure and Applied Geophysics*, 157, pp. 2302-2322, 2000.
- 14) Angelier, J.: Determination of the mean principal directions of stresses for a give fault population, *Tectonophysics*, 56, T17-T26, 1979.
- 15) Gephart, J. W., and Forsyth, D. H.: An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence, *J. Geophys. Res.*, 89, pp. 9305-9320, 1984.
- 16) Michael, A.: Determination of stress from slip data: Faults and folds, *J. Geophys. Res.*, 89, pp. 11517-11526, 1984.

- 17) Michael, A. J. : Use of focal mechanisms to determine stress: A control study, *J. Geophys. Res.*, 92, pp. 357-368, 1987.
- 18) 塚原弘昭・小林洋二: 中・西部日本の地殻応力, *地震* 2, pp. 221-231, 1991.
- 19) 塚原弘昭・池田隆司: 本州中央部の地殻応力方位分-応力区とその成因-, *地質学雑誌*, 97, pp. 461-474, 1991.
- 20) Townend, J. and Zoback, M. D. : Stress, strain, and mountain building in central Japan. *J. Geophys. Res.*, 111, B03411, doi:10.1029/2005JB003759, 2006.
- 21) Yeats, R. S., Sieh, K. E., and Allen, C. H. : *The Geology of Earthquakes*, Oxford Univ. Press, 568p, 1996.
- 22) Bowman, D., King, G., Tapponnier, P. : Slip partitioning by elastoplastic propagation of oblique slip at depth, *Science*, 300, pp. 1121-1123, 2003.
- 23) King, G., Klinger, Y., Bowman, D., and Tapponnier, P. : Slip-partioned surface breaks for the Mw 7.8 2001 Kokoxili earthquake, China, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 95, pp. 731-738, doi:10.1785/0120040101, 2005.
- 24) Terakawa, T. and Matsu'ura, M. : The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events. *Tectonics*, 29, TC6008, doi:10.1029/2009TC002626, 2010.
- 25) Hardebeck, J. L., and Hauksson, E. : Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics, *J. Geophys. Res.*, 106, pp. 21859-21882, 2001.
- 26) Hasegawa, A., Yoshida, K. and Yoshida, T. : Nearly complete stress drop in the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp. 703-707, 2011.
- 27) Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T., Iinuma, T., Ito, Y., and Asano, Y. : Stress before and after the 2011 Great Tohoku-Oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L03302, 2012.
- 28) Smith, D. E. and Heaton, T. H. : Models of stochastic, spatially varying stress in the crust compatible with focal-mechanism data, and how stress inversions can be biased toward the stress rate, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 101, pp. 1396-1421, 2011.
- 29) Imanishi, K., Ando, R., and Kuwahara, Y. : Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L09306, 2012.
- 30) Scholz, C. H. : *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 1st ed., Cambridge Univ. Press, New York, 1990.
- 31) Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A. : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismol. Res. Lett.*, 70, pp. 59-80, 1999.

- 32) Manighetti, I., Campillo, M., Sammis, C., Mai, P. M., and King, G.: Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes: Implications for earthquake and fault mechanics, *J. Geophys. Res.*, 110, B05302, doi:10.1029/2004JB003174, 2005.
- 33) Mai, P. M., and Thingbaijam, K. K. S.: SRCMOD: An online database of finite fault rupture models, *Seismol. Res. Lett.*, 85, pp.1-10, 2014.
- 34) 武村雅之: 日本列島における地殻内地震のスケーリング則-地震断層の影響および地震被害との関連-, 地震 2, 51, pp.211-228, 1998.
- 35) 伏島祐一郎・井村隆介・森野道夫・杉山雄一・水野清秀: 2000 年鳥取県西部地震断層のトレンチ掘削調査, 活断層・古地震研究報告, 2, pp.183-208, 2002.
- 36) 遠田晋次: 2000 年鳥取県西部地震の”地変”についての考察-境界要素法による表層誘発すべりの可能性の検討-, 活断層研究, 21, pp.93-98, 2002.
- 37) 上田圭一: 基盤の断層変位にともなう第四紀層及び地表の変形状況の検討-地震断層・活断層の現地調査-, 電力中央研究所報告, U93007, 50p, 1993.
- 38) Mandl, G.: *Mechanics of Tectonic Faulting: Models and Basic Concepts (Developments in Structural Geology)*, Elsevier Science, 408p, 1988.
- 39) Burbank, D. W. and R. S. Anderson: *Tectonic Geomorphology, 2nd edition*, Wiley-Blackwell, 472p, 2011.
- 40) 遠田晋次・丸山 正・吉見雅行・金田平太郎・栗田泰夫・吉岡敏和・安藤亮輔: 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層-震源過程および活断層評価への示唆-, 地震, 2, 62, pp.153-178, 2010.
- 41) Ikeda, Y.: Thrust-front migration and its mechanism: evolution of intraplate thrust fault systems.” *Bull. Dept. Geogr., Univ. Tokyo*, 15, pp.125-159, 1983.
- 42) 東郷正美: 微小地形による活断層判読, 古今書院, 206p., 2000.
- 43) Toda, S. and Tsutsumi, H.: Simultaneous reactivation of two, subparallel, inland normal faults during the Mw 6.6 11 April 2011 Iwaki earthquake triggered by the Mw 9.0 Tohoku-oki, Japan, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 103, pp.1584-1602, doi:10.1785/0120120281, 2013.
- 44) Nissen, E., Maruyama, T., Arrowsmith, R. J., Elliott, J. R., Krishnan, A. K., Oskin, M. E., and Saripalli, S.: Coseismic fault zone deformation revealed with differential lidar: Examples from Japanese Mw ~7 intraplate earthquakes, *Earth Planetary Science Letters*, 405, pp.244-256, 2014.
- 45) Rymer, M. J., Boatwright, J., Seekins, L. C., Yule, J. D., and Liu, J.: Triggered surface slips in the Salton Trough associated with the 1999 Hector Mine, California, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 92, pp.1300-1317, 2002.
- 46) Wei, M., Sandwell, D., Fialko, Y., and Bilham, R.: Slip on faults in the Imperial Valley triggered by the 4 April 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake revealed by InSAR, *Geophys.*

Res. Lett., 38, L01308, doi:10.1029/2010GL045235, 2011.

- 47) Nishimura, T., Tobita, M., Yagai, H., Amagai, T., Fujiwara, M., Une, H. and Koarai, M.: Episodic growth of fault-related fold in northern Japan observed by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13301, doi:10.1029/2008GL034337, 2008.
- 48) 横山幸也: わが国で開発・改良された初期地圧測定法の基準化と国際化, *Journal of MMIJ*, Vol. 129, pp. 683-693, 2013.
- 49) 長 秋雄・国松 直・金川 忠・藤井真希・横山幸也・小川浩司・田仲正弘: 我が国における地下岩盤内の初期地圧状態 ―応力解放法による実測データに基づく―, 地質調査研究報告, 第60巻, 第7/8号, pp. 413-447, 2009.
- 50) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: Japan islands: Over-coring results from a multi-elements gauge used at 23 sites, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, 23, pp. 29-39, 1986.
- 51) 石田毅・金川忠: 地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響, 地震, 2, 40, pp. 329-339, 1987.

< 2章 >

- 52) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会: 東日本大震災合同調査報告 土木編 5 原子力施設の被害とその影響, 81p, 2013.
- 53) 社団法人 土木学会 原子力土木委員会: 原子力発電所の立地多様化技術 付属編-1 断層活動性評価技術, 110p, 1996.
- 54) 社団法人 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-2008), 235p, 2008.
- 55) 公益社団法人 土木学会 原子力土木委員会 活断層評価部会: 原子力発電所の耐震設計における最近の検討事例に見る活断層調査・評価技術, http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/JSCE_AFreview2012.pdf (2015年4月17日参照), 2012.
- 56) 町田洋・新井房夫: 新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺], 336p, 2011.
- 57) 西脇隆文・安藤淳一・廣瀬丈洋・鍵裕之・大藤弘明: 鏡肌の微細構造とその断層運動へ与える影響, 日本地質学会第120年学術大会講演要旨, R13-0-7, 2013.
- 58) 金折裕司・宮腰勝義・角田隆彦・佐竹義典: 断層粘土中の石英粒子の表面構造, 電力中央研究所報告, 377011, 21p, 1978.
- 59) 金折裕司: 断層粘土中の石英の表面構造(その2) ―実在断層における石英粒子の表面構造の特性―, 電力中央研究所報告, 381007, 35p, 1981.
- 60) 幡谷竜太・伊藤久敏, 田中和広・井上大榮: 断層最終活動年代の測定法とその適用性に関する文献調査, 電力中央研究所, U92010, 48p, 1992.

< 3章 >

- 61) 平野信一・中田高: 阿寺断層に沿う第四紀後期の断層変位から推定した地震活動, 地理学評論, 54, pp. 231-246, 1981.

- 62) 松田時彦・岡田篤正: 活断層, 第四紀研究, 7, pp. 188-199, 1968.
 - 63) 中田高・隈元崇・奥村晃史・後藤秀昭・熊原康博・野原壯・里優・岩永昇二: 空中レーザー計測による活断層変位地形の把握と変位量復元の試み, 活断層研究, 29, pp. 1-13, 2008.
 - 64) 寒川旭: 菅田山古墳の断層変位と地震, 地震, 39, pp. 15-24, 1986.
 - 65) 丹羽雄一・遠田晋次・小俣雅志・森良樹: 井戸沢断層の 2011 年福島県浜通りの地震に先行する断層活動: 福島県いわき市塩ノ平地区におけるボーリング調査, 活断層研究, No. 39, pp. 1-8, 2013.
 - 66) 須貝俊彦・栗田泰夫・下川浩一: 桑名断層・四日市断層の活動履歴調査, 活断層・古地震研究調査概要報告書, no. EQ/98/1, pp. 75-90, 1998.
 - 67) 福島県生活環境部消防防災課: 双葉断層に関する調査, 第 3 回活断層調査成果報告会予稿集, 科学技術庁, pp. 49-58, 1999.
 - 68) 近藤久雄・遠田晋次・今泉俊文・堤浩之・杉下一郎・中田高・奥村晃史・島崎邦彦・高田圭太・池田哲哉・原口強: 丹那断層の過去 3,000 年間の活動履歴と単位変位量 一田代地区における 3D トレンチ・Geoslicer 調査一, 地震 2, 55, pp. 407-424, 2003.
 - 69) 宮腰勝義・上田圭一・幡谷竜太・阿部信太郎・三浦大助・濱田崇臣・青柳恭平・井上大栄: 地震規模評価のための活断層調査法・活動性評価法, 電力中央研究所報告, U46, 189p, 2004.
 - 70) Maruyama, T., Iemura, K., Azuma, T., Yoshioka, T., Sato, M. and Miyawaki, R.: Paleoseismological evidence for non-characteristic behavior of surface rupture associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, central Japan, *Tectonophysics*, 429, pp. 45-60, doi:10.1016/j.tecto.2006.09.008, 2007.
 - 71) 狩野謙一・上杉陽・伊藤谷生・千葉達朗・米澤宏・染野誠: 丹沢南部・大磯丘陵周辺における中期更新世以降の断層活動, 第四紀研究, 23(2), pp. 137-143, 1984.
 - 72) Hemphill-Haley, M. A. and Weldon II, R. J.: Estimating Prehistoric Earthquake Magnitude from Point Measurements of Surface Rupture, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 89, pp. 1264-1279, 1999.
- < 4 章～5 章 >
- 73) 一般社団法人 原子力安全推進協会 敷地内断層評価手法検討委員会: 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, <http://www.genanshin.jp/archive/sitefault/> (2015 年 4 月 17 日参照), 2013.
 - 74) 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, 第 1 号, pp. 17-36, 2013.
 - 75) Vermilye, J. M. and Scholz, C. H.: The process zone: A microstructural view of fault growth, *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, No. B6, pp. 12223-12237, 1998.
 - 76) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 28, pp. 269-283, 1975.
 - 77) Wells, D. L. and Coppersmith, K. J.: New empirical relationships among magnitude, rupture, length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*,

- 84, pp.974-1002, 1994.
- 78) Shimazaki, K.: Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, Earthquake Source Mechanics, *Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr.*, 37, pp. 209-216, 1986.
- 79) 栗田泰夫: 日本の地震断層におけるセグメント構造とカスケード地震モデル (試案), 活断層・古地震研究調査概要報告書, no.EQ/99/3, pp. 275-284, 1999.
- 80) 松田時彦・山崎晴雄・中田高・今泉俊文: 1986 年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, Vol. 55, pp. 795-855, 1980.
- 81) Youngs, R. R., et al.: A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), *Earthquake Spectra*, Vol.19, No.1, pp. 191-219, 2003.
- 82) 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, pp. 16-36, 2014.
- 83) Mukoyama, S.: Development of new method for measurement of surface displacement, using the Geomorphic Image Analysis of Differential LiDAR DEM, *Abstract of HOKUDAN International Symposium on Active Faulting*, pp.51-52, 2015.
- 84) 野原幸嗣・野口猛雄・穴田文浩・浜田昌明・小野田敏・沼田洋一・山野芳樹・鈴木雄介・佐藤比呂志: 航空レーザ計測による 2007 年能登半島地震の地殻変動, 地震研究所彙報, Vol. 82, pp. 321-331, 2007.
- 85) Mukoyama, S.: Estimation of Ground Deformation Caused by the Earthquake (M7.2) in Japan, 2008, from the Geomorphic Image Analysis of High Resolution LiDAR DEMs, *J. Mt. Sci.*, 8, pp. 239-245, 2011.
- 86) 品川俊介・阿南修司・佐々木靖人・向山栄・本間信一: 2 時期の航空レーザ測量による地表地震断層周辺の変位量分布の推定 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に伴う事例, 応用地質, 第 53 巻, 第 6 号, pp. 271-281, 2013.
- 87) Ferreira, A. M., Weston, J., and Funning, G. J.: Global compilation of interferometric synthetic aperture radar earthquake source models: 2. Effects of 3-D Earth structure, *J. Geophys. Res.*, 116, B08409, doi:10.1029/2010JB008132, 2011.
- 88) Fukushima, Y., Takada, Y., and Hashimoto, M.: Complex Ruptures of the 11 April 2011 Mw 6.6 Iwaki Earthquake Triggered by the 11 March 2011 Mw 9.0, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103, 2B, pp. 1572-1583, May 2013, doi: 10.1785/0120120140, 2013.
- 89) 公益財団法人 土木学会 東日本大震災フォローアップ委員会・原子力安全土木技術特定テーマ委員会: 「原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言 (土木工学からの視点) (案)」のとりまとめ, 13p,
http://committees.jsce.or.jp/2011quake/system/files/teigen_0.pdf (2015 年 4 月 17 日参照), 2013.

Ⅲ. 数値解析・模型実験による断層変位評価

目 次

1. まえがき	Ⅲ-1
2. 数値解析	Ⅲ-1
2.1 解析手法の概要	Ⅲ-1
2.2 断層全体をモデル化した数値解析	Ⅲ-5
2.3 表層をモデル化した数値解析	Ⅲ-12
2.4 実務への適用に向けて	Ⅲ-14
3. 模型実験	Ⅲ-16
3.1 重力場での模型実験	Ⅲ-16
3.2 遠心力場での模型実験	Ⅲ-18
4. まとめ	Ⅲ-19

III 数値解析・模型実験による断層変位評価

1. まえがき

原子力発電所の重要な建物・構築物及び機器・配管系に対する断層変位の影響を評価する上で、数値解析を活用することが重要となっている。また、数値解析を検証する手法として模型実験との比較が挙げられる。

本章では原子力に限らず幅広く現状の断層変位及びその施設への影響を評価するための数値解析及び模型実験に関する文献を調査して、現状の技術レベルが断層変位による原子力施設への影響を評価すなわち実務へ適用できるレベルに至っているかどうか、また、実務への適用にあたっての課題・留意事項を整理する。

断層変位を評価するための数値解析手法には震源を含む深部までをモデル化するもの（断層全体モデル）と表層のみをモデル化するもの（表層モデル）に分類・整理する。複雑な自然現象をモデル化するのであるから、継続した研究開発が必要なことは言うまでもなく、数値解析手法には既に実用的に利用されている手法から最先端の研究成果までそのレベルは様々である。模型実験に関しても断層全体と表層を対象としたものがあり、本章では重力場におけるものと遠心力場によるものとに分類・整理する。

また、調査を行った個々の文献について、その文献で使われた解析手法・実験手法、得られた重要な成果等を表として整理し、本章末尾に添付した。

2. 数値解析

2.1 解析手法の概要

まず、断層全体モデルで用いられる数値解析手法、断層の構成式等について概観する。

静的な解析である食い違いの弾性論では、等方媒質中における面 Σ 上の食い違いによる静的な変位場を、Steketee (1958) ¹⁾による以下の Volterra 型方程式で表すことを基本としている。

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (1)$$

ここで、

δ_{ij} : Kronecker のデルタ, F : 断層のずれと等価な点力源

λ, μ : ラメ定数, v_k : Σ の法線方向余弦

u_i^j : (ξ_1, ξ_2, ξ_3) で j 方向に働く大きさ F の点力源により (x_1, x_2, x_3) に生じる変位の i 方向成分

である。現在用いられる食い違いの弾性論の式は、この式を直接解析可能な形式まで展開したものである。断層変位に等価な力と変位場の関係を解くため、変位場とひずみを求める際に必要な地盤

物性値はラメ定数間の関係から求まるポアソン比のみとなる。

動的な解析では、断層上のすべり量や対象領域での地震動・地盤変形の計算を行う。断層周辺の地盤については弾性体として解析を行う場合がほとんどである。弾性体の動的挙動は以下の運動方程式（波動方程式）で表される。

$$\lambda u_{k,kj} \delta_{ij} + \mu(u_{i,jj} + u_{j,ii}) = \rho \ddot{u}_i \quad (2)$$

ここで、 u は変位、 ρ は密度を表す。

式(2)の解析解はある限定的な境界条件でしか得られないため、差分法 (FDM)、有限要素法 (FEM) 等の数値解析手法が用いられる。例えば、有限要素法では、以下のようなマトリクス形式での運動方程式が得られる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (3)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ は減衰マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクスである。

食い違いの弾性論等では半無限体を仮定するが、差分法や有限要素法による動力学シミュレーションではある有限の解析領域を設定することになり、境界条件を設定する必要がある。地表面は自由表面とするが、底面や側面については地震波を吸収し反射させないようにする粘性境界等が用いられる。断層のすべり挙動の表現には、断層上でのずれ変位が表現可能なように分離可能な二重節点あるいはインターフェース要素が用いられる。

境界積分方程式法 (BIEM) も無限媒質中における弾性体の運動方程式に立脚するが、断層面上の任意の位置の変形を、断層面上のすべりとグリーン関数の時空間での積分の形で表した積分方程式を解くことにより求める²⁾。

$$\begin{aligned} T(\mathbf{x}, t) &= n_k(\mathbf{x}) t_l(\mathbf{x}) \sigma_{kl}(\mathbf{x}, t) \\ &= T^0(\mathbf{x}) - \int_{\Gamma} dS(\xi) \int_0^t d\tau \Delta u_i(\xi, \tau) c_{ijpq} c_{klrs} n_k(\mathbf{x}) t_l(\mathbf{x}) n_j(\xi) \frac{\partial^2}{\partial x_q \partial x_s} G_{rp}(\mathbf{x}, t - \tau; \xi, 0) \\ &\quad (\mathbf{x} \in \Gamma) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

$T(\mathbf{x}, t)$: 位置 $\mathbf{x}$ 、時間 t におけるせん断応力 (トラクション)、 Γ : 断層面、 c : 弾性定数、 G : グリーン関数、 n : 断層面に垂直なベクトル、 Δu : 断層面上のすべり量、

$$T^0(\mathbf{x}) = n_k(\mathbf{x}) t_l(\mathbf{x}) \sigma_{kl}^0 : \text{初期応力に起因するトラクション}$$

である。

積分方程式に対しグリーン関数の発散を回避する等の工夫を加えることにより最終的に、離散化された積分核(カーネル関数)を用いて数値計算への適用を可能としている。断層面上の要素は、波速と距離からみた影響範囲に存在する断層の活動履歴の影響を受ける。図 2-1 はそれを模式的に示したもので、 $(\xi 1, \xi 2)$ 面が断層面を、 t 軸が時間を表している。離散化した断層要素のうち、位置 (i, j) の要素に生じる応力は自分自身及び周囲の断層要素の過去の運動により規定されるが、より遠方の断層要素による応力は到達するまでに時間がかかる。したがって、この断層要素に時刻 k に生

じている応力を知るためには、円錐状に表現した時空間的影響範囲の断層要素の運動を考慮すればよいことになる。積分核は、断層の変位速度と断層上の任意の位置に生じる応力の関係を位置関係と時間差ごとに表したものであり、時間発展の計算に先立って解くことができる。この結果、BIEMでは境界（断層）上のみで式を解けばよく、媒質中における波動の伝播過程を逐次解く必要がないため、他の動的な数値解析手法に比較して計算所要時間は短い。定式化は2次元のモードⅡ（面内せん断）、モードⅢ（面外せん断）及び3次元の断層に対して行われている。断層形状の自由度は高く、直線(平面)だけでなく屈曲や曲線（局面）形状への拡張も行われている。積分方程式と摩擦構成則を組み合わせることにより、数値的に解析可能となる。

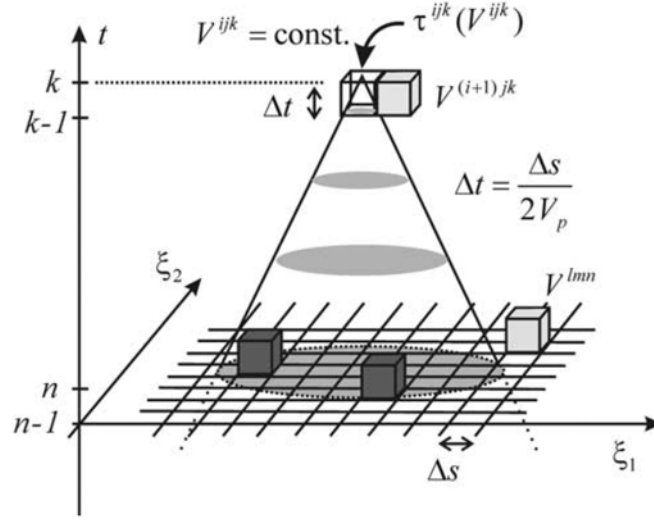


図 2-1 BIEM の時空間的離散化と影響範囲の概念³⁾

構成則として断層上の摩擦挙動を定義する必要があるが、最もよく用いられるのは図 2-2 に示すすべり弱化摩擦則である。すなわち、すべり変位 d の進行とともに摩擦係数が静止摩擦係数 μ_s から動摩擦係数 μ_d まで低減する。図 2-2 中の d_0 は臨界すべり変位量と呼ばれる。Dieterich (1979)⁵⁾は、摩擦係数がすべり速度の影響を強く受けることを見出し、速度状態依存摩擦則を提案した。近年では、種々の速度状態依存摩擦則が提案され、それらを用いた解析も実施されている。例えば、Dunham et al. (2011)⁶⁾等が以下のようなあるすべり速度を超えると急激に摩擦が弱くなるモデルを提案している。

$$\tau = \sigma \left(a \operatorname{arcsinh} \left[\frac{V}{2V_0} \exp \frac{\Theta}{a} \right] \right) \quad (3)$$

ここで、 a は正の定数、 V はすべり速度、 V_0 は参照すべり速度、 Θ は状態変数である。状態変数は以下のような発展則に従う。

$$\dot{\Theta} = -\frac{V}{L} \left(\Theta - a \ln \left[\frac{2V_0}{V} \sinh \left\{ \frac{\mu_{ss}}{a} \right\} \right] \right) \quad (4)$$

ここで、 L は特徴的なすべりスケールである。安定時 ($\dot{\Theta} = 0$) の摩擦係数 μ_{ss} は以下の式で表され

る。

$$\mu_{ss}(V) = \mu_s + \frac{\mu_0 - (b-a) \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) - \mu_w}{\left[1 + \left\{\frac{V}{V_w}\right\}^8\right]^{1/8}} \quad (5)$$

ここで、 μ_s は静止摩擦係数、 μ_0 は参考摩擦係数、 V_w は弱化速度スケール、 μ_w は弱化後の摩擦係数、 b は正の定数である。

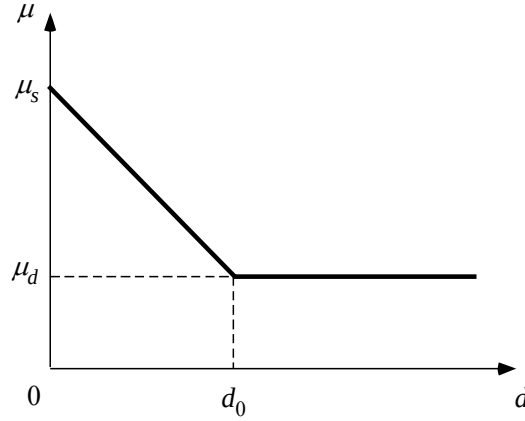


図 2-2 すべり弱化摩擦則

表層の問題に対する解析手法としては、先述した有限要素法が最も良く用いられてきた。表層での断層、破碎帯、あるいはそれらの発生・進展の表し方としては、ジョイント要素（インターフェース要素）として表す場合とひずみの集中帯として表す場合がある。

また、近年、粒子法（個別要素法も含む）がこの表層の断層問題に適用されるようになってきた。SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）、MPS（Moving Particle Semi-implicit）、MPM（Material Point Method）等の粒子法は有限要素法と同様にラグランジュ型の解析手法である。有限要素法が、解析領域をメッシュで区切り、メッシュの節点に物理量を持たせるのに対して、粒子法は、解析領域を粒子で充填しこの粒子の中心に物理量を持たせる手法である。有限要素法は節点の位置関係を固定するのに対して、粒子法は粒子の位置関係を固定しないので大変形の解析ができる。粒子法は、影響半径と呼ばれる範囲にある周辺の粒子の位置関係の変化から、着目する粒子に作用する力を求めて、時間積分により次の粒子の位置を計算する手法である。この影響半径に入る粒子が更新されるとその情報に基づいて応力ひずみ関係が計算されるので、この点で有限要素法において大変形を解くためリメッシュ（節点の位置関係をゼロクリア）する解法に似ている。一般的な粒子法は、この作用力を連続体理論に基づく支配方程式を解くことにより求める手法であるのに対して、個別要素法は、粒子間の距離の増減、および相対速度に比例するデバイスすなわちばねとダッシュポッドを介して粒子間力を直接求める手法である。

2.2 断層全体をモデル化した数値解析

2.2.1 静的な解析

(1) 食い違いの弾性論

食い違いの弾性論 (elasticity theory of dislocation) は、断層運動に対する地盤の変位、ひずみ・応力変化量を求める手法として、現在最も広く用いられる手法である。適切な断層モデルのもとで、地震に伴う広域的な地表の最終変位分布をかなりよく再現できることが知られており、津波の初期波形の計算や、断層間の力学的相互作用の解析におけるクーロン破壊関数変化量 (ΔCFF) の計算等に適用されている。

基本的な理論は、Steketee (1958)¹⁾により展開された。地盤を弾性体と仮定し、力と食い違いの等価性に基づき、断層のずれと等価な単位点力源と任意の位置での変位を関係づける。さらに点力源を断層面上に与えることにより、変位場を求める積分方程式が得られる。食い違いの弾性論の解析式を与える文献は複数存在するが、いずれも矩形断層を仮定することによりこの積分方程式を利用可能な形式まで展開したものである。その代表的なものである Okada (1985, 1992)^{7,8)}の式は、任意のポアソン比に対する横ずれ断層、縦ずれ断層に加え、割れ目噴火に対応する開口断層 (図 2-3) による変位、ひずみ、傾斜の式を与えている。このうち Okada (1985)⁷⁾は地表面に対する式であるが、Okada (1992)⁸⁾は地中まで拡張したものである。

食い違いの弾性論により得られる変位等は解析解であるため、計算に要する時間が一般的な数値解法に比較して短く、計算格子間隔に依存しない唯一の解が任意の位置で得られる。断層のすべり量と地盤の変位等に線形の関係があるため、断層面上のすべり量の不均質性は、断層面をすべり量の異なる複数の矩形に分割することにより容易に考慮できる。こうした理由から、断層形状や活動様式の不確かさを想定した多数の計算を実施し、地盤変位やひずみの分布に与える影響を考慮する必要がある場面では、実務上の利点がある。その一方で、半無限均質地盤を仮定しているため、地盤物性の不均質性や地形は考慮されない。また、断層のすべり量と地盤変位の関係に非線形性が強く働く条件では、誤差が大きくなる可能性がある。

Wang et al. (2003)⁹⁾は、鉛直方向の地盤物性値の変化を考慮した半無限水平成層地盤における解析式と、それを解くための数値解法を提示している。この手法では、まず点力源と地盤内に配置したグリッド点位置における変位の関係 (グリーン関数) を数値的に求めておき、点力源を断層面上に分布させたとき変位場を得るための積分を数値的に行う。グリーン関数を解く際には、変位場を波数 (波長) 成分に変換している。半無限均質地盤では考慮されない地盤物性の成層構造を反映することができるが、数値解法であるため、解析解を直接求める手法に比較すると多くの解析時間を要する。また、グリーン関数を配置するグリッドの密度、変位場の波数分解能、断層面の分解能によって得られる解が変化する。さらに、断層面が地表に到達して断層両側にシャープな食い違いが生じるような変位場は、波数分解能の限界により表現できない場合がある。利用にあたっては、この点に留意が必要である。

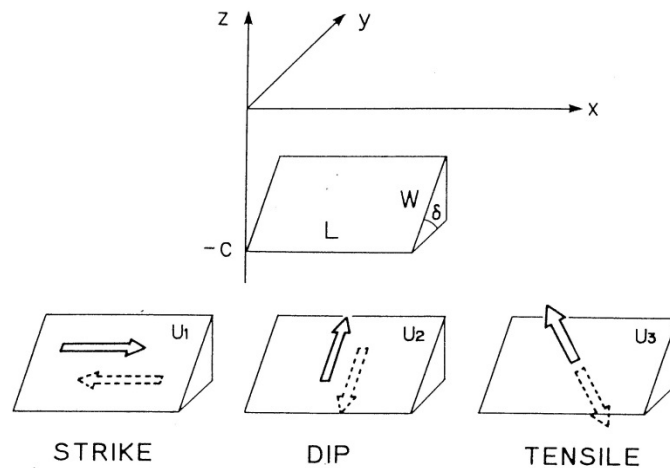


FIG. 3. Geometry of three different finite rectangular sources, whose internal deformation fields are listed in Tables 6 through 9. See text as to sign convention for the slip vectors.

図 2-3 横ずれ断層，縦ずれ断層，開口断層の概念 (Okada, 1992) ⁸⁾

(2) 有限要素法

有限要素法は後述するように動的な断層破壊解析でも用いられるが，静的な解析としてプレートテクトニクスに伴う地形生成過程の計算を実施した例がある。例えば，Albertz ら ¹⁰⁾¹¹⁾はプレートテクトニクスに伴う縦ずれの大規模な地形生成過程を対象に，リメッシュのアルゴリズムをもつ FEM プログラムを用いて再現計算を行っている。構成関係は修正カムクレイモデルである。彼らは，断層の角度，拘束圧等の境界条件のパラメータにして 14 の人工的な堆積モデルを設定した。図 2-4 に解析モデルおよび解析条件を図 2-5 に代表的な解析結果を示す。脆性的な砂岩においては，明瞭なすべり面が次々に現れては消えまた復活する，泥岩は主断層先端からすべり面が散乱する，互相では主断層の延長上で泥岩部が収縮し，砂岩層が膨張する特徴的な地層変形メカニズムが二次元解析とは言えそれぞれ精緻に再現されている。

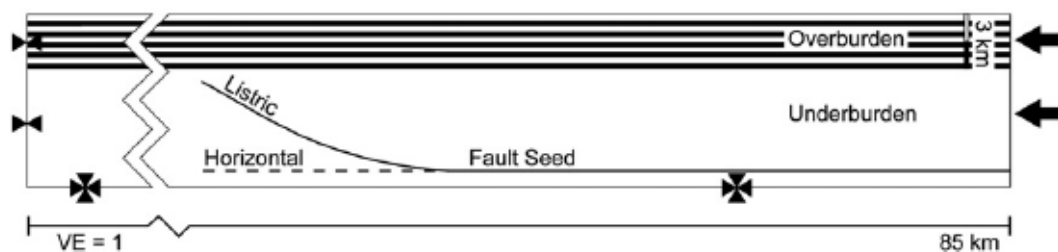


図 2-4 解析モデルおよび解析条件 ¹⁰⁾

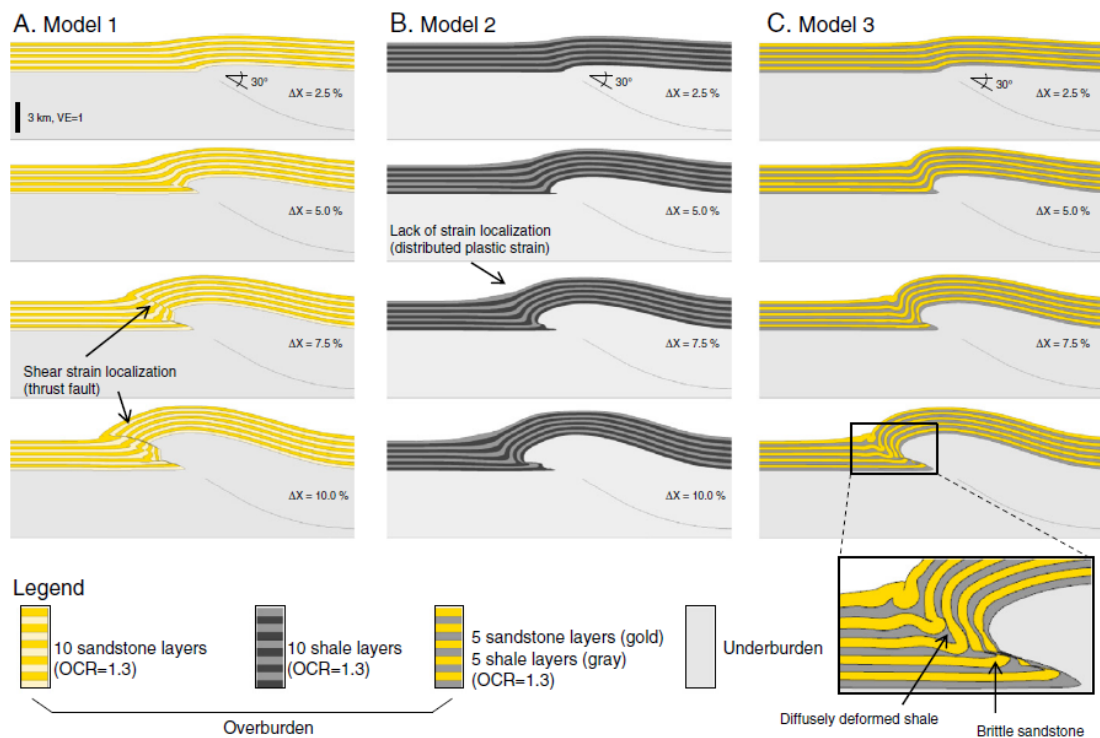


図 2-5 代表的な解析結果，モデル 1：表層部砂岩，モデル 2：表層部泥岩，モデル 3：表層部砂岩と泥岩の互相¹⁰⁾

2.2.2 動的な解析

(1) 有限差分法 (FDM)

差分法 (FDM) は微分演算に対しテイラー展開を適用することで差分に置き換えて、対象とする偏微分方程式そのものを離散化近似する方法である。一般に計算時間は、同じ領域型の解法である有限要素法と比べて短いとされており、大規模解析となる断層の動学的破壊進展解析に適している。地盤や断層の不均質性も考慮することが可能である。しかし、規則的あるいは等間隔の格子すなわち構造格子の使用を前提としているため、複雑な形状には適用が難しいということが解析の制限となる。断層の動学的破壊進展解析では、境界要素法と並んで最もよく用いられてきた解析手法であり、ここでは 8 件の文献について調査した結果を記す。

Day (1982)¹²⁾は、一様な初期せん断応力を与えることが多かった動学的シミュレーションにおいて、非一様な初期せん断力（せん断応力の大きい領域と小さい領域を設ける）を与え、その影響を調べた。非一様な初期せん断応力を導入することで平均破壊進展速度は S 波速度を超えなくなったが、局所的には S 波速度を超える場合もあり、実際の大地震と一致することを示した。

Harris and Day (1993)¹³⁾は、二次元差分法により、端部が近接する 2 つの横ずれ断層においてステップ（断層が途切れているが端部が近接している箇所）の離隔が 5km 以上の場合は破壊が起こりにくいという観察結果と一致した結果を得た。また、動学的な破壊進展では圧縮ステップ、引張りステップともに破壊が乗り移る可能性があることを示した。

Kase and Kuge (2001)¹⁴⁾は2つの同一平面上にない断層（平行もしくは直交する極端なモデル）間の破壊の乗り移りが生じる要因について検討を行った。また、加瀬（2002）¹⁵⁾は初期応力について一様分布と深度依存の2条件を設定し、2つの断層間の破壊の乗り移りの検討を行った。深度依存条件では、一様分布で見られなかった比較的深い位置での破壊の乗り移りが発生することを示した。

壇ら（2007）¹⁶⁾は断層の連動破壊が生じやすい条件について動力的なシミュレーションによって調べた。断層の長さ、断層間の離隔距離、断層間の走向差（屈曲）、断層間のステップ等についてパラスタを実施した。図2-6はその結果の一例である。

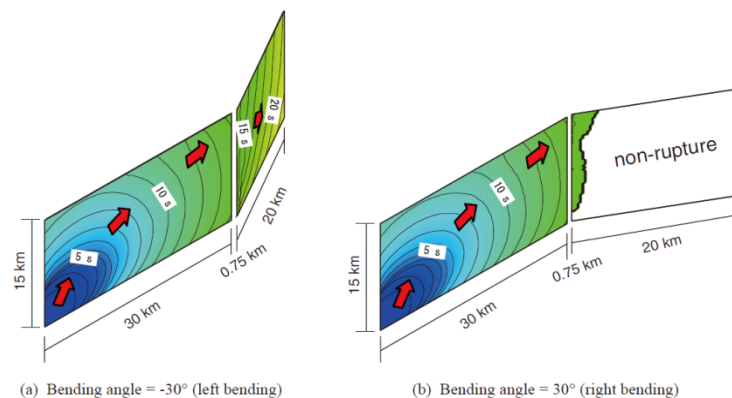


図2-6 走向差が連動破壊に与える影響¹⁶⁾

入江ら（2010）¹⁷⁾は、従来の強震動予測のための震源モデルを改良することを目的とし、地中震源断層と地表地震断層を記述する断層パラメータ間の理論的關係式と経験的關係式を拘束条件とした動力的断層破壊モデルの構築方法を提案した。地表の最大すべり量に対する松田式等を拘束条件として付与している。

断層上の不均一性に関する検討も行われており、例えば Andrews and Barall (2010)¹⁸⁾は応力降下量が断層上で非一様に分布する条件で動的破壊進展解析を実施すると現実的な地表地震動の計算ができるとし、解析結果として目標のマグニチュードが得られるように初期応力の設定する方法について示した。

一方、Urata et al. (2012)¹⁹⁾は温度、地下水の移動を考慮した解析を行い、thermal pressurization（地震の際に断層面に摩擦熱が発生し、地層中の水が加熱・膨張することによってさらにすべりを起こしやすくする現象）の影響により、断層上の非一様性（初期応力、摩擦特性）や深度依存初期応力を考慮することなく、深部での断層間の破壊の乗り移りが起こることを示した。

以上のように、差分法を用いた断層の動力的破壊シミュレーションでは、断層間の破壊の乗り移りに関して複数の研究グループが検討を行っており、初期応力の深度依存性や断層上の応力降下量の非一様性の影響についての検討も実施されている。断層の破壊の乗り移りの有無や地表地震動を対象とした解析がほとんどであるが、入江ら（2010）¹⁷⁾のように地表変位に着目した研究も開始

されている。

(2) 境界積分方程式法 (BIEM), 境界要素法 (BEM)

境界積分方程式法 (Boundary Integral Equation Method ; BIEM) または境界要素法 (Boundary Element Method ; BEM) と呼ばれる手法 (以下, 「BIEM」) は, 断層面上の自発的破壊伝播や分岐断層における動的破壊選択問題等を対象とした数値解法として, 1990 年代終盤以降に発展してきた。BIEM は弾性体理論に立脚し, 均質な無限媒質中の断層面上のある位置での変位と他の位置に生じる変位の関係を, グリーン関数を含む時空間的な積分方程式で表現する²³⁾。

分岐断層の経路選択問題への適用例としては, Kame et al. (2003)⁴⁾が実施した二次元の数値実験がある。図 2-7 に示すように, 初期応力の方向, 破壊伝播速度, 分岐断層の角度の条件と破壊経路の関係を分析し, カリフォルニアや南海トラフで過去に発生した地震での破壊経路と調和的であるとしている。三次元モデルについても, 摩擦構成則による破壊伝播過程への影響を分析した例²⁰⁾, Y 字型に分岐した断層の破壊範囲と初期応力の関係を分析した例³⁾, 1891 年濃尾地震の破壊の再現に適用した例²¹⁾, 1992 年ランダース地震の際のすべり量分布や地震動の再現に適用した例²²⁾等がある。近年は自由表面を含めた半無限媒質への適用もなされている。Hok and Fukuyama (2010)²³⁾では模式化した問題における地震動や永久変位について離散化波数法や食い違いの弾性論と調和的な結果が得られることを確認したうえで, 2008 年岩手・宮城内陸地震に適用し, 応力降下量等を与える自由表面の効果を評価している。このように, 断層形状の設定に高い自由度をもつ動的破壊進展の解析モデルとして, 適用範囲を拡大している。

BIEM を発展させて, 亀裂先端の進展経路の形成自体を対象とした問題に拡張した例²⁴⁾²⁵⁾がある。さらに, 不均質媒質への拡張も試みられている。均質媒質とみなして解いた BIEM の解を媒質界面で接続することにより成層媒質に拡張した Extended BIEM (XBIEM)²⁶⁾や, 媒質の不均質性に起因する散乱項を解くための FEM と組合せることにより半無限成層地盤への適用を図った Goto et al. (2011) の研究²⁷⁾等がその例である。

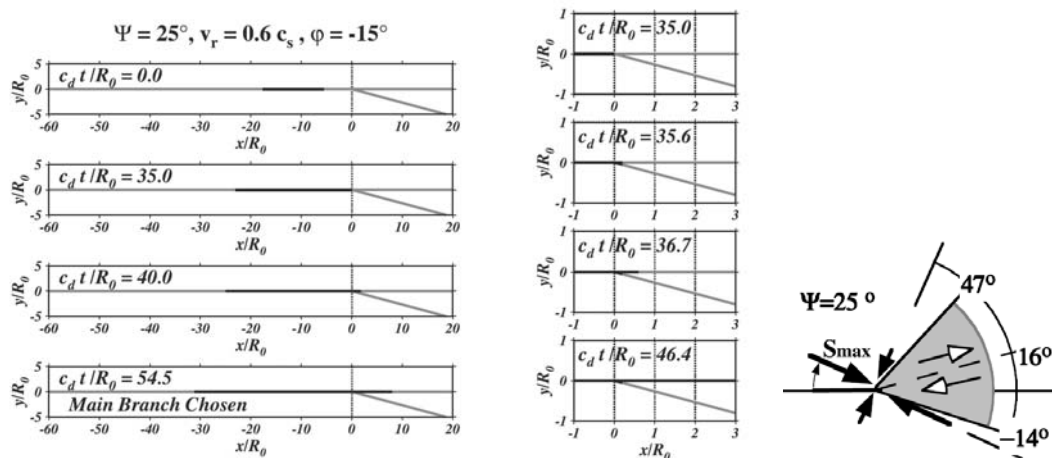


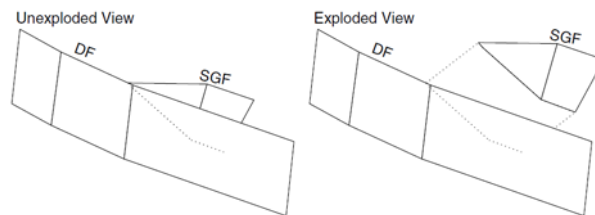
図 2-7 分岐断層の経路選択問題への適用例⁴⁾

(3) 有限要素法 (FEM)

有限要素法 (FEM) は地盤の数値解析において最も汎用性があり、一般的に用いられる解析手法である。FEM では、構成式、材料物性を要素毎に与えることが可能であり、地形や地層境界等が複雑な場合でもモデル化することができる。また、ジョイント要素を用いて不連続面の挙動を表現することもできる。一方、有限差分法 (FDM) と比較すると離散化の手続きが複雑であり、計算時間が長い。そのため、大規模解析となる震源を含む動力学的シミュレーションでは不利になる。ここでは 8 件の文献について調査した結果を記す。

Aagaard ら²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾は FEM による三次元断層破壊解析プログラムを開発し、多くの問題に適用している。解析領域を四面体要素によって分割するため、複雑な形状や地層分布をモデル化することができる。また、初期応力、弾性波速度、密度の深度分布等を考慮して解析を実施している。実際の地震断層への適用事例としては図 2-8 に示す Susitna 氷河断層 (逆断層) と Denali 断層 (横ずれ断層) がほぼ同時に破壊した Denali 断層地震 (2002.11.3, Mw7.9) がある²⁸⁾。走向傾斜の異なる断層間での破壊の乗り移りの検討や、地表部の断層変位の方角についても検討している。同様のシミュレーションにより南カリフォルニアの横ずれ・逆断層系の相互作用について検討している²⁹⁾。その他にも断層破壊の性状が震源近傍の地震動へ与える影響について検討している³⁰⁾³¹⁾。Barall (2009)³²⁾は断層の自発的な動的破壊進展解析を精度を落とすことなく、計算機資源を抑えて実施するための有限要素法として二重グリッド法を提案した (有限要素法ソフト FaultMod)。この手法では、非適合な要素を用いているため、小さい要素の薄層を大きい要素の領域に導入するための補間法が用いられる。断層周辺の狭い層で小さい要素を設定し、モデル領域の残りの部分については大きな要素で分割される。DeDontey et al. (2012)³³⁾は主断層から第二断層が枝分かれしている場合の破壊挙動を検討している。周辺の地盤には弾性体および弾塑性体を適用し、それによる結果への影響を議論している。

国内に目を向けると、水本ら (2005)³⁴⁾が三次元 FEM を用いて断層の破壊過程、食い違い量、地表の残留変位の解析および断層近傍における地震動のシミュレーションをパラメトリックに行っている。和田・後藤 (2010)³⁵⁾は拡張有限要素法 (XFEM) を平面状の断層での自発的な破壊進展の問題に適用した。XFEM ではメッシュ分割は断層面に一致させる必要がなく、変位の不連続は要素内で解析される。この特徴は複数の断層・不連続面が複雑に配置する場合のメッシュ作成を容易にする。



(a) 断層面の形状・分布 (DF : Denali 断層, SGF : Susitna 氷河断層)

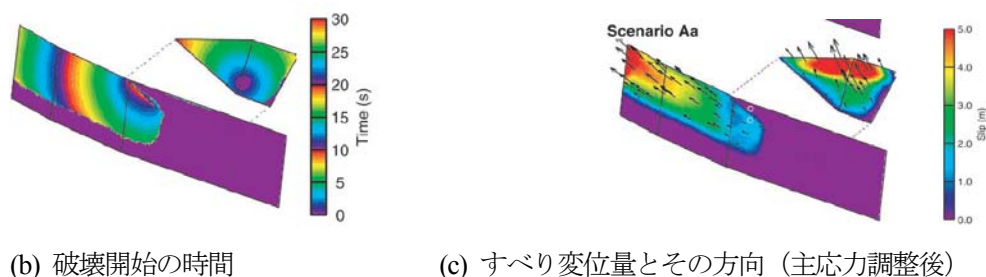


図 2-8 2002 年 Denali 断層地震の解析²⁸⁾

(4) その他の手法

FDM, BEM, FEM と異なる手法を用いたもの、包括的な内容のものについては、ここで調査結果をまとめる (7 件)。

粘弾性層状半無限地盤において静的・動的グリーン関数から変位および応力を効率よく計算するための解析法が Hisada (1994)³⁶⁾により提案されている。この方法では、静的変位 (永久変位) に加えて地震動による変位履歴を求めることができる。

Dalguer et al. (2003)³⁷⁾は、せん断すべりは既存の断層のみで発生し、その動的プロセスの結果として引張り応力により新たな内部き裂が周辺地盤に発生するという仮定のもとで、三次元動的断層破壊シミュレーションを実施した。この問題を解くにあたり、内部引張りき裂を導入できることから不連続要素法 (Discrete Element Method, DEM) を用いた。Dalguer et al. (2008)³⁸⁾は、すべり弱摩擦モデルと単純なアスペリティモデルの枠組みにおいて、過去の地震の統計的な観測データを拘束条件として、動的破壊モデルのキャリブレーション (地表地震断層を伴う地震と伴わない地震) を行った。キャリブレーションした動的モデルを用いて SGSN (Staggered-Grid Split-Nodes) 法により震源近傍の地盤の揺れをシミュレートし、地表地震断層を伴わない地震は伴う地震よりも高周波の強震動を励起するという観測と一致した結果を得た。

Pelties et al. (2012)³⁹⁾⁴⁰⁾は任意高次導関数 (ADER : Arbitrarily high-order DERivatives) 時間積分法を用いた高次不連続ガラキン法 (DG : Discrete Galerkin) による三次元動的破壊問題の解析法を提案した。ADER-DG 法は空間・時間における高精度計算、非構造メッシュによる離散化を可能とする。四面体要素を用いることで三次元の複雑な形状をモデル化することができ、メッシュサイズの変化に伴う数値的な波の反射 (偽反射) が少ないことにより断層に近い領域のメッシュを細かくすることを可能とする。これにより必要な箇所に計算機資源を集中できる。手法の検証解析に加えて、1992 年ランダース地震を対象とした地震シナリオ (曲がった断層、断層分岐、地表地形を伴う) のシミュレーションを示した。

Fälth et al. (2010)⁴¹⁾は放射性廃棄物の地層処分での断層変位の影響を検討するため、震源から等速度で破壊フロントが断層面上を進行するという仮定のもと、断層周辺の地下 500m を中心に分布する破碎帯の変位量予測を行っている (図 2-9)。使用した解析手法はブロック体の個別要素法 (DEM) である。ブロックについては剛体だけでなく内部を格子分割し FDM で解くこともできる。地表と地下の違いはあるものの重要構造物の近傍に位置する破碎帯における変位を対象としている

点で原子力発電所の敷地内断層の問題と類似している。

南カリフォルニア地震センター (SCEC) と米国地質調査所 (USGS) が中心になり、断層の動力学的破壊進展解析のベンチマークテストが行われており、Harris et al. (2009)⁴²⁾にその内容が紹介されている。

http://sceccdata.usc.edu/cvws/benchmark_descriptions.html

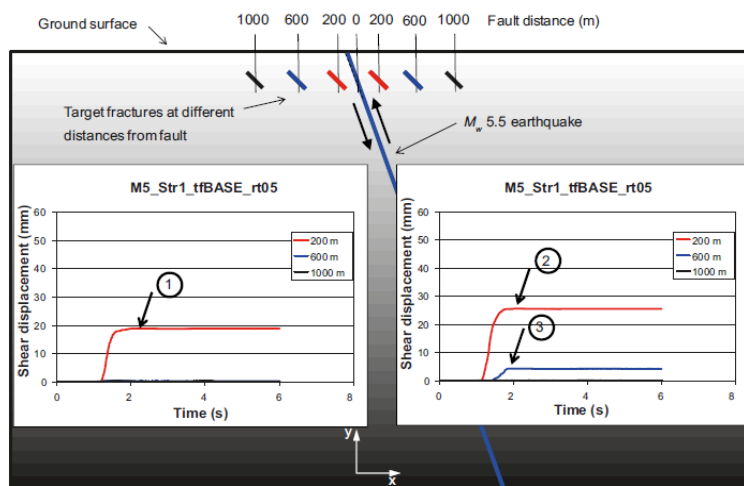


図 2-9 ブロック体 DEM による断層両側に位置する破碎帯での変位評価⁴¹⁾

2.3 表層をモデル化した数値解析

ここで調査した文献は、表層モデルの「表層」としては第四紀層を示すものがほとんどであった。地震応答解析を実施する際の「地震基盤面」あるいは「工学的基盤面」より上の層という意味も含めて「表層」と言うことにする。

2.3.1 FEM による検討

文献⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾は断層を予めジョイント要素でモデル化しておく手法であり、それ以外はジョイント要素を用いずに断層の進展を再現している。文献⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾は逆断層、文献⁴⁶⁾は正断層、逆断層、横ずれ断層、文献⁴⁷⁾⁴⁸⁾⁴⁹⁾は正断層上の構造物、文献⁵⁰⁾は正断層、逆断層、横ずれ断層上の構造物、文献⁵¹⁾は正断層を対象としている。

谷 (1994)⁴³⁾は、ジョイント要素を用いた二次元 FEM と破壊までの変形を全く考慮しない剛完全塑性理論を効果的に組み合わせることによって、逆断層の室内模型実験に現れる「せん断断層連続帯」、地表面に見られる「断層崖」、上盤側の膨らみや下盤側の引きずりといった「撓曲地形」を再現した。

宮坂ら (2002)⁴⁴⁾⁴⁵⁾は、断層の傾斜角度の違いによる粒度の効果を検討しており、粒度の影響は、発達するせん断断層の厚さの影響に置き換えている。予めジョイントで断層をモデル化し、モデル境界に強制変位を入力する手法である。

中川・堀 (2011) ⁴⁶⁾は、分岐を伴う変形局所化現象、特にリーデル線の形成を再現した。幾何形状のパラメータの誤差は最大 10%としている。さらに、実際の地表地震断層として、斜めずれの野島断層と逆断層の車籠埔断層を対象とし、雁行状断層や逆断層の形成過程を再現した。

欧州では QUAKER プロジェクトにおいて、地表地震断層による被害の現地調査、遠心力模型実験とともに FEM を用いた断層変位による地盤の破壊・変形の数値解析の研究が実施されている。Anastasopoulos and Gazetas (2007) ⁴⁷⁾は、まず、単純なフーチングをモデル化した遠心模型実験を対象に計算プログラムの検証を行った後、様々なタイプの構造物が断層から受ける影響を解析的に調べた。Anastasopoulos et al. (2008) ⁴⁸⁾では、同様にフーチングの荷重によってどのような変化があるかを調べた。また、Anastasopoulos et al. (2013) ⁴⁹⁾では、杭基礎とべた基礎の得失について解析的検討が行われた。

Faccioli et al. (2008) ⁵⁰⁾も、実験との比較によるプログラムの検証を行った後、基礎と地盤条件による被害程度の差異について解析的な検討を行った。

Loukidis et al. (2009) ⁵¹⁾は、野外観測事実に対する数値計算法の検証を行った後、砂の密度や粘土等の材料、断層傾斜角、表層の厚さについて、パラメトリックスタディを行った。

2.3.2 粒子法 (DEM を含む) による検討

流体解析で萌芽した粒子法を、地盤の大変形問題に適用する検討が近年盛んに行われている。地盤材料を、円や球または多角形の集合体で表す個別要素法 (DEM) も粒子法の一つとする考え方もある。DEM は、通常、接触する要素間のみ相互作用を考慮する二体間の物理を基本とし、イメージ的には実際に岩塊や砂粒子そのものをモデル化する手法であるが、SPH, MPS, MPM 等の粒子法はある影響範囲にある要素すべてに対して相互作用を考慮することにより、基本的には連続体をモデル化する手法である。

DEM は、もともと離散モデルであり、粒子間で任意の方向に滑り、剥離を自由に生じうるので、連続体では表現しにくい現象を簡単に再現できることから、古くから断層の形成を再現する検討が行われている。文献 ⁵²⁾⁵³⁾は、縦ずれ断層を再現した。当時は計算時間の関係から二次元解析しかできないので、縦ずれを対象とせざるをえない事情もあった。文献 ⁵³⁾は、厳密には AEM (Applied Element Method) という手法で、要素間の相互作用を表すため 10 本のばねを用いる手法である。文献 ⁵⁴⁾⁵⁵⁾も、縦ずれ断層を対象としている。砂箱実験と共に数値実験結果として確率論的断層変位ハザード解析の副断層出現位置のデータベースを補完するため実施された。主断層の進展、副断層の形成が再現されている。文献 ⁵⁶⁾⁵⁷⁾は、三次元 DEM による横ずれ断層解析である。リーデルせん断帯の形成が再現された。

文献 ⁵⁸⁾⁵⁹⁾の LPFDM (Lagrangian Particle Finite Difference Method) は MPM と同様、マテリアルポイントと呼ばれる物質の情報の運ぶ粒子を用いる。解析領域に固定されたオイラー格子上にマッピングされ、格子の計算点で運動方程式を逐次解いて、その情報は再び粒子に運ばれて行く。LPFDM はこの格子を差分格子として利用する手法である。文献 ⁵⁹⁾は、震源を含む深部までの動力学的モデルである。変形が大きく FEM や FDM では誤差が大きくなってしまう断層近傍を LPFDM、その周

辺を通常の FDM でモデル化し、集集地震を対象に通常の FDM のみの解析に比べて、再現性が改善されたとしている。

文献⁶⁰⁾は、MPS を扱っている。本研究は、基本的なモデルの理論との比較と、2 次元斜面の地震応答解析における FEM 結果との比較で、MPS の検証であると言える。

2.4 実務への適用に向けて

断層が動いた時の周辺地盤の応答をシミュレーションする解析は静的に行われる場合と動的に行われる場合がある。実務的には、静的解析として食い違いの弾性論が用いられ、断層上の変位を与えることにより周辺地盤（半無限弾性体）の変位分布が求められてきた。

食い違いの弾性論については、地震の発生に伴う地殻変動が弾性理論でもある程度説明できることが観測変位によって確認されている⁶¹⁾。原子炉建屋基礎地盤の詳細 FEM モデルの境界に食い違いの弾性論によって得られる変位を境界条件として与え、モデル内の岩盤・断層（副断層）の破壊について評価する方法が発電用原子炉施設の耐震安全性に関する審査やバックチェックの評価において用いられてきた^{62,63)}。このような静力学的な解析を用いる場合の課題として、地殻変動と地震動の重量の影響および断層の破壊進展過程での周辺への影響の評価が挙げられる⁶²⁾。

この課題解決に向けて動的解析である断層の動力学的破壊シミュレーションの適用が考えられる。本手法は主に強震動の予測・評価などの地震動シミュレーション手法として開発・発展してきた方法である。地震動に加えて、近接する断層間での破壊の乗り移りの検討にも用いられている。深度依存の初期応力、不均一な周辺岩盤、縦ずれ・横ずれ断層が共存する断層配置での破壊の乗り移り等の複雑な解析条件にも適用されている^{例えば 15)}。

一方、地表断層変位に着目した解析は少ないが、マグニチュードと地表断層変位（主断層）の関係をデータにより求めた松田式を制約条件として解析パラメータを設定することで、これまでの観測データと整合的な地表断層変位を得る方法が提案されている¹⁷⁾。

ここで、図 2-10 に示すような主断層に一回地震が発生したときの既存の敷地内断層のずれ量を、三次元モデルを用いて動的に評価するための手順や方法について考えてみる。

検討の大きな流れとしては、現在、基礎地盤安定解析で実施されているように、建屋近傍に至る地震波を求め、建屋を含む表層モデルに入射して応答を数値解析するという二段階のステップを踏む手順が現実的である。主断層が敷地に近い場合、断層の破壊進展過程の影響評価のため、境界の入射は多点入力とする必要がある。この地震波を求めるためには、断層の動力学破壊シミュレーションで用いられる手法等を用いることができる。

表層モデルについては、砂箱の模型実験のせん断帯の発生・進展を再現する解析ができることが示されている⁴³⁻⁵⁰⁾。敷地内断層の所在がはっきりしていて、有限個の亀裂として表現できるという条件であれば、図 2-11 に示すように FEM のジョイント要素を用いて、地表における食い違い量を、現状の技術レベルで計算することはできると考えられる。

地震波を求めかつ対象構造物近傍の応答を求める先進的な手法としては、Quinay- et al. (2013)⁶⁴⁾がある。彼らは、東大・地震研の堀らが開発したマクロ・マイクロ解析コードを用い、京スーパーコ

ンピュータ上で実施した震源から原子炉建屋までの一体解析について報告している。

表層モデルの応答を求める数値解析手法としては、このように従来基礎地盤安定解析で用いてきた FEM 解析手法を利用することができる。計算時間や作業の手間、あるいは用いるプログラムによっては新たに付加しなければならない機能がある等の労力がかかり、実際にはこれを実施することが困難である場合がある。この様な時、FEM の代替手法として、粒子法、個別要素法、差分法等の解析手法を用いることもできる。

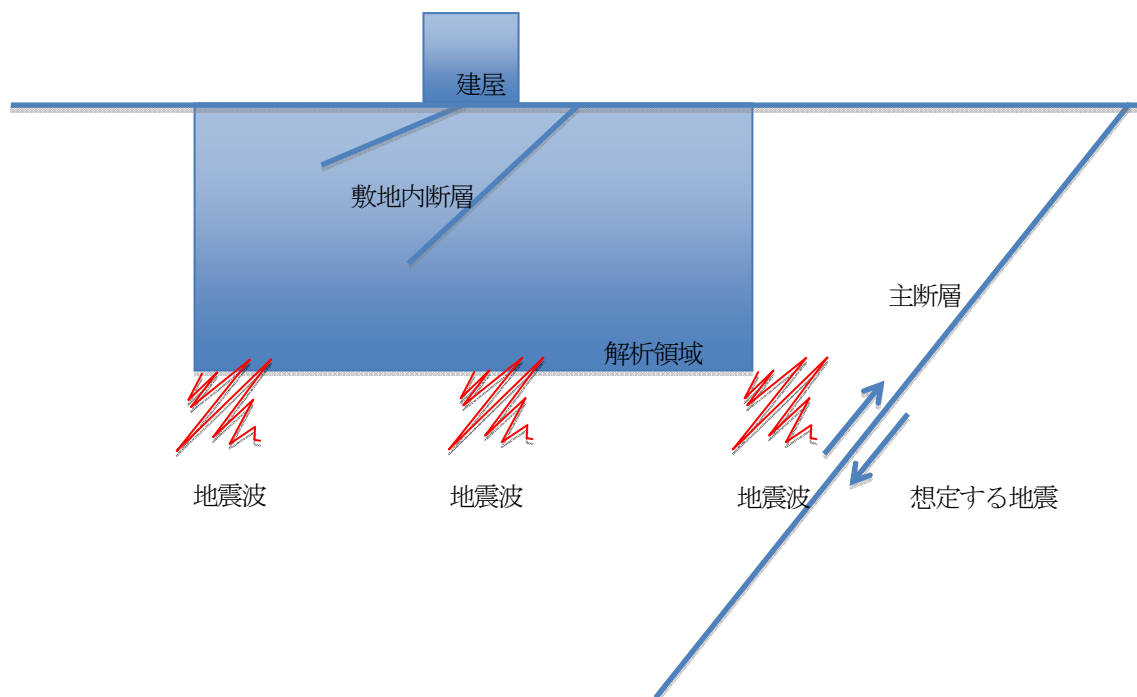
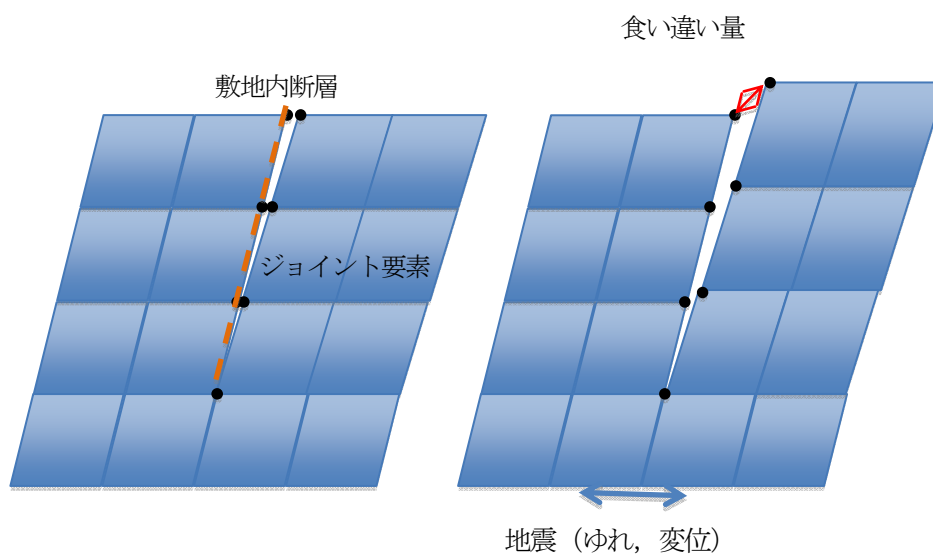


図 2-10 主断層に地震が発生した際の敷地内断層の変位を求める解析



解析領域を弾性体とし、敷地内断層を表す亀裂をジョイント要素で表す

図 2-11 単純な敷地内断層のモデル化

粒子法によれば、地盤モデルの作成等の作業は FEM に比べて容易であり、並列計算に向いていることから計算時間の節約も可能である。MPS 等の粒子法は連続体解析であり、弾性体の挙動は、精度が若干落ちるものの理論解や FEM と同程度の解を得ることができる⁶⁰⁾。また、種々の力学構成モデルを取り込むことが可能である。しかし、粒子法は現在のところ一般にはなじみがないので、単純なモデルの動的計算や FEM 解析との比較や、実験結果との比較等の妥当性の検証が求められる。特に、敷地内断層のモデル化（FEM におけるジョイント要素に対応する部分）を検討する必要がある。

個別要素法を利用する場合も、作業の手間と計算時間を節約できるが、粒子は基本的に剛体であり、粒子間のばね定数により弾性挙動を表現するなど近似的な計算になる。単純なモデルの動的計算や FEM 解析との比較、実験結果との比較等の妥当性の検証が必要である。また、敷地内断層のモデル化（FEM におけるジョイント要素に対応する部分）を検討する必要がある。

3. 模型実験

3.1 重力場での模型実験

調査対象の文献 23 件の全てが表層モデルを対象としており、断層全体モデルを対象としたものはなかった。その中でも、地殻上部（厚さ 3km の新第三紀層）を対象としたものは上田（2011）⁶⁵⁾の 1 件のみで、他の 22 件⁶⁶⁻⁸⁷⁾は未固結被覆層（土質地盤）と呼ばれる表層地盤を対象としている。岩盤のモデル化が困難であることと、重力場の模型実験では応力レベルが低く特に粘着性の地盤材料では相似性が低くなることが原因である。

しかし、対象を層厚が薄い表層地盤に限定したとしても、模型地盤の最大厚さは 2.0m であり（上田・谷，1999a⁶⁶⁾；Tani et al., 1996⁶⁷⁾），厚さが数メートル以上の実地盤と比較すれば応力レベルは相対的に小さい。そのため、模型地盤には非粘着性の地盤材料として乾燥砂を用いた研究が多い。低拘束圧下の力学特性に基づいて実験結果を解釈すれば定量的な評価が可能だからである。例外は、軟弱な粘性土を用いた Bray et al. (1993⁶⁸⁾, 1994b⁷⁰⁾），間隙水圧の影響を調べるために湿潤砂を用いた Johansson & Konagai (2006⁷¹⁾, 2007⁷²⁾），二次元 DEM 解析の検証のためにアルミ棒を用いた鬼塚ら（1999⁷³⁾, 2000⁷⁴⁾, 2002⁷⁵⁾, 2003⁷⁶⁾, 2004⁷⁷⁾）である。相似性の観点から実地盤との対応は不明瞭となり、実験結果の解釈は定性的なものに限定される。

検討の対象は、ほとんどが基盤上の表層地盤の変形状（主にせん断帯の発達）であり、断層変位対策を対象としたものは Moosavi et al. (2010)⁷⁸⁾のみである。基盤（土槽の底面）も地表面も水平で、模型地盤は均質・一様な一層モデルである。基盤の断層変位の増加に伴い表層地盤の中を地表面に向かって発達するせん断帯の形状と地表面への到達位置や、その周囲の撓曲の性状等を調べている。

断層の種類としては、多くの文献（18 件）が二次元の平面ひずみ条件となる縦ずれ断層（正断層・逆断層）を対象としている。この縦ずれ断層については、基盤の断層の角度と表層地盤内部に発達するせん断帯の形状・位置や発達過程の関係が詳細に調べられている。ほとんどの実験では、矩形

の土槽の二分割した底盤の片方を準静的に断層面に沿ってスライドさせ、アクリルないしガラスで製作した側面を通して地盤内部に発達するせん断帯の性状や地盤内部のひずみ分布を観察・計測している。やや特殊な土槽の構造や制御として、Johansson & Konagai (2006⁷¹⁾, 2007⁷²⁾ は、漏水防止と側壁面の摩擦除去のために円盤引抜き方式(曲面の鉛直断層)を採用し、太田・アイダン (2004)⁷⁹⁾ は、落とし戸方式(鉛直断層)を採用して動的な(加速度の)影響を調べた。また、鬼塚ら (1999⁷³⁾, 2000⁷⁴⁾, 2002⁷⁵⁾, 2003⁷⁶⁾, 2004⁷⁷⁾ は、土槽の底面に設置した土圧計で基盤面上の応力分布を比較した。

一方、横ずれ・斜めずれ断層を対象とする実験に関する文献は6件と少ない。表層地盤の内部に発達する三次元の変形性状が複雑で、観察も困難だからである。上田・谷 (1994b)⁸⁰⁾ と谷・小山 (2004)⁸¹⁾ は、X線CTを用いて表層地盤内部のせん断帯の発達過程を調べているが、観測装置の制約から小規模な実験(層厚0.2mまで)に限定される。また小山・谷 (2003)⁸²⁾ は、層厚0.4mまでの実験を行って地表面に発達する網目状のせん断帯を検討している。

主な知見を以下に述べる。

砂質土を用いた模型実験では、せん断帯の発達が支配的な現象であり、粒径効果が大きいことが特徴である(Tani et al., 1996⁶⁷⁾; Lee & Hamada, 2005⁸³⁾)。せん断帯の幅が地盤材料の粒度に依存するためである。せん断帯の大局的な形状については、模型地盤の層厚と地盤材料の平均粒径の比の影響を余り受けないことが示されている。しかし、その詳細な形状(分岐等の複雑さの程度)や地表にせん断帯が到達するのに必要な基盤の断層変位と層厚の比については、小規模な模型実験では粒径効果が大きく実地盤との対応がつかない。そのため、大規模な実験を行った電中研の結果(上田・谷, 1999ab^{66,80)}) が最も精度と信頼性が高い。一方、拘束圧の影響もダイレイタンス特性の観点から重要であり、重力場と遠心場の実験を比較した研究も行われている(Stone & Wood, 1992⁸⁴⁾; Lee & Hamada, 2005⁸³⁾)。

粘性土を用いた模型実験では、上述したように、相似性が低いので知見は定性的なものに限定される。Bray et al. (1993⁶⁸⁾, 1994b⁷⁰⁾) は、粘性土の破壊ひずみが表層地盤の変形性状に及ぼす影響が大きいことが指摘している。

今後の課題を以下に論じる。

堆積軟岩を対象とした上田 (2011)⁶⁵⁾ を除いて、既往の研究は均質・一様な土質地盤を対象としていたが、原子力施設は原則として岩盤に設置されている。しかし、岩盤では、有効な粘着力(固結力)を有するので重力場の実験では相似性が問題となることと、力学挙動にとって支配的な不連続面のモデル化が困難であることに留意する必要がある。岩盤の不連続性を考慮すると、縦ずれ断層であっても表層の変形性状は三次元となるので境界条件の設定や計測・観測も容易ではない。模型地盤の作製、载荷装置、計測等を考慮すると、相似性を満足する模型実験を重力場で実施することは極めて困難であろう。代替となる検討方法としては、遠心载荷実験も考えられるが、重力場では部分実験を工夫することも考えられる。岩盤内部の一定の応力場ないし変形場にあるマスとしての領域を想定した試験体に対して、せん断変位を与える大規模な载荷実験である。この実験を対象に検証された数値モデルを用いて、表層モデルの数値実験を行うという方針である。

構造物の影響や対策に関する検討も少なく、基礎の影響を調べた 1 件 (Moosavi et al., 2010)⁷⁸⁾ しかない。原子力施設は大規模かつ剛な構造物が多く、不連続面の密度や分布によっては表層の岩盤の変形性が相対的に高くなり、構造物の影響が無視できない場合もあると推測される。重力場の模型実験は、相似則の観点からは遠心場の模型実験に劣るが、容易に実施可能であることから、定性的な傾向を調べるためには有利であろう。特に、構造物の特性、地盤への設置の状況、構造物と断層の位置関係等によって構造物への影響(損傷の程度等)は非常に多様となると想定されるので、これらの特性を適切に工夫してモデル化した実験は対策工法の技術開発に重要である。免変位や制変位等の多様な対策技術について、その効果やメカニズムの検討が進むことを期待したい。

3.2 遠心力場での模型実験

遠心力模型実験を行う意義の一つは、実物と等価な自重応力状態を再現できることである。重力場 (1G 場) で小型断層模型実験を行う場合、実スケールでの自重応力を再現できないことが問題となる。地盤材料のせん断強度特性 (粘着力とせん断抵抗角) の観点から見ると、同じサイズの模型実験において、1G 場では粘着力が支配的になり、100G の遠心力場ではせん断抵抗角が支配的になる傾向がある。以上のような観点から、遠心力場での断層模型実験が行われてきた。ここでは、合計 10 件の関連する論文を調査した。

Roth et al. (1998)⁸⁸⁾は遠心力場での断層模型実験に関する先駆的な研究を行った。逆断層上の沖積層の破壊形態に対して、断層変位速度と表層地盤の力学特性の影響について検討している。Lee and Hamada (2005)⁸³⁾は 1G 場および遠心力場において縦ずれ断層上の砂地盤の破壊形態を検討している。Anastasopoulos et al. (2007)⁴⁷⁾は、欧州 QUAKER プロジェクトにおいて、地表地震断層による被害の現地調査、遠心力模型実験、FEM による数値解析により、地盤の断層による破壊と構造物の相互作用に関する研究を実施した。模型実験において、地盤のみのモデルと基礎を配置したモデルを共に実施し、その影響を調べた。模型実験は英国 Dundee 大学の遠心力载荷装置を用い、正・逆断層の二次元平面ひずみ実験を実施している。実験結果は数値解析手法の検証に用いられた。一連の検討により、地表地震断層の破壊経路はその上に存在する構造物の影響を強く受けることが示された。連続した剛な基礎を持つ重い構造物の場合、破壊は方向転換し、その構造物の直下を避ける。その結果、基礎の回転が発生するが、多くの場合構造は健全である。一方で、フーチングや杭基礎の場合は、破壊の方向転換はあまり起こらず、フーチングや杭頭基礎に地表断層が現れる可能性が高い。Bransby et al. (2008a, 2008b)⁸⁹⁾⁹⁰⁾は、図 2-12 に示す上記の QUAKER プロジェクトで実施された正断層および逆断層の模型実験 (浅部基礎との相互作用を含む) の詳細について報告している。Loli et al. (2012)⁹¹⁾は正断層と剛なケーソン基礎の相互作用メカニズムについて、実験と数値解析両方を用いた総合的な検討を実施した。Ng et al. (2012)⁹²⁾は、地盤の固結と断層変位以前からの不連続面の存在に着目した。未固結粘土および固結粘土地盤 (既存破壊面の有・無) での正断層の破壊進展について検討した。遠心力断層模型実験では地表面の変形を測定しており、数値解析手法の検証のためにも用いられている。地表面変位量についても検証された数値解析手法であれば実際の問題にも適用できると考えられる。ただし、原子力施設の場合は基本的に岩盤上に建設され

ており、既存の不連続面の影響が大きい、実験条件は比較的未固結な地盤に限定されている。地盤の固結度や既存不連続面に着目した事例⁹²⁾もあったがまだ少数である。また、調べた範囲では基盤の断層は縦ずれ断層に限定されている。

地表面の断層変位とは異なりより大きなスケールとなるが、褶曲構造、衝上断層の形成について遠心力模型実験で検討されている⁹³⁾⁹⁴⁾⁹⁵⁾。

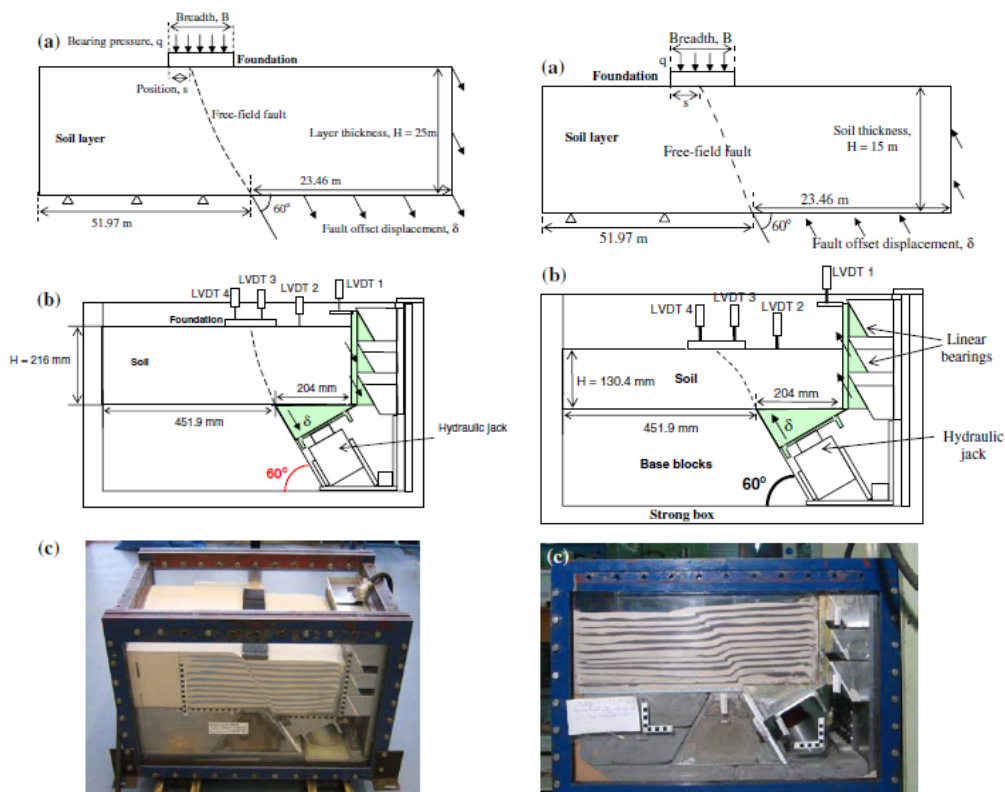


図 2-12 遠心模型実験（左：正断層⁸⁹⁾，右：逆断層⁹⁰⁾）

4. まとめ

現状の技術レベルが断層変位による原子力施設への影響を評価、すなわち実務へ適用できるレベルに至っているかどうかという視点で、原子力に限らず幅広く現状の断層変位及びその施設への影響を評価するための数値解析及び模型実験に関する文献を調査した。

既設発電所の重要施設の直下にある断層に関しては、新規規制基準の施行前から問題となっている敷地内断層に関して、断層自らが活動して地震を起こす「活断層」である可能性は限りなく低いと判断されるが、周辺の活断層が活動し地震動や地殻変動を引き起こすことによって、着目する断層が受動的に変位する可能性については、従来実施されている地震動によって断層等の弱面を含む地盤の支持機能に影響が生じるかどうかの検討・評価技術をベースとして、変位を大きめに見積もるように保守的にモデル化し、有効な解析手法を用いることで、断層の変位量を評価することや、断

層の変位による施設への影響を評価することが可能となる場合が十分ありうると考えられる。

また、一般施設に関しては断層の分布・性状などが十分な精度では把握されていないこともあるが、原子力施設では計画段階から綿密な地質・地質構造調査が実施され重要な施設の直下及び敷地内外の断層等を含めた地盤の状況が一般施設に比べて高精度で把握されている特徴がある。さらに、旧耐震設計審査指針に基づいて設計された耐震重要施設は岩盤に設置されていることも大きな特徴である。このように、境界条件や地盤条件が明確になっているという点も解析結果の信頼性を高める上で、重要なポイントであると言える。

地震動によって断層等の弱面を含む地盤の評価検討においても、弱面の強度は周辺岩盤に比して低いことから大きな地震動によって容易に破壊する可能性がある。このような観点からすれば、例えば文献⁶²⁾のような方法で、断層変位量と重要施設に及ぼす影響の関係を調べておくことは重要であると考えられる。

断層変位を模擬した模型実験は、明確な境界条件と材料特性のもとで断層挙動をシミュレートできる利点があり、重力場および遠心場で幾つもの実施例があった。重力場の実験はすべて縮小模型を用いて実施されており、実地盤に比べて応力レベルがかなり低く、せん断帯の発達過程の監察や構造物への影響の把握など定性的な検討に用いられることがほとんどで、数値解析との比較はほとんど行われていなかった。一方、遠心模型実験は実地盤の拘束応力を再現できるため、数値解析の妥当性の検証に用いられた事例が幾つか示された。しかし、模型実験では、岩盤の不連続性や強度特性、実地盤の不均一性を精緻にモデル化した検討は難しい。一方、実地震による地表断層や地盤変形は、実地盤の不均質性や岩盤・断層の力学特性、境界条件を反映した結果である。現地調査で得られる情報は限られるが、数値解析を実施し比較することができる。

調査した数値解析手法の中には、従来法より格段に前進しているものも多い。このような手法を用いればより高度な検討が可能であろう。こういった解析手法を実務に適用するにあたっては、数値解析結果と理論解の比較による検証（Verification）、模型実験及び実地震における地表地震断層等の観測結果との比較による妥当性検討（Validation）が重要である。地震時の断層および周辺地盤の挙動に対する数値解析技術の信頼性を高めるには、模型実験や実地盤（地表地震断層）のいずれかを対象とした単発的な比較検証では必ずしも十分でなく、数値解析と模型実験、現地計測が三位一体となった総合的な比較検証が肝要である。地表地震断層はいつ発生するか分からないので、予め詳細に調査した岩盤においてせん断破壊現象を大規模な現場載荷実験により人工的に発生させて、数値解析の妥当性を検証することも考えられる。どのような境界条件や載荷の形態とするか、コストの問題も含めて課題は多いが、一考に値する。小寸法の供試体を用いた岩石あるいは大寸法の供試体を用いた岩の変形・破壊挙動を詳細に観察できる三軸試験や平面ひずみ試験等の室内試験と構成関係の比較することで検証を行うことも考えられる。

参考文献

- 1) Stekette, J.A.: On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, *Can. J. Phys.*, Vol.36, No.2, pp.192-205, 1958.
- 2) Tada, T.: Boundary integral equation method for earthquake rupture dynamics, Fault-zone properties and earthquake rupture dynamics, E. Fukuyama, ed., Elsevier Academic, Burlington, MA, pp. 217–267, 2009.
- 3) Aochi, H., Fukuyama, E. and Madariaga, R.: Effect of normal stress during rupture propagation along nonplanar faults, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, No.B2, pp. ESE 5-1–ESE 5-10, 2002.
- 4) Kame, N., Rice, J. R. and Dmowska, R.: Effects of prestress state and rupture velocity on dynamic fault branching, *J. Geophys. Res.*, Vol.108, No.B5, 2265, doi:10.1029/2002JB002189, 2003.
- 5) Dieterich, J.: Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equation, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No.B5, pp.2161-2168, 1979.
- 6) Dunham, E. M., Belanger, D., Cong, L. and Kozdon, J. E.: Earthquake ruptures with strongly rate-weakening friction and off-fault plasticity, Part 1: planar faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.101, pp.2296-2307, 2011.
- 7) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 8) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992.
- 9) Wang, R., Martin, F. L. and Roth, F.: Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust – FORTRAN programs, *Computer & Geosciences*, Vol.29, pp.195-207, 2003.
- 10) Albertz, M. and Lingrey, S.: Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part1. Structural analysis, *Tectonophysics*, Vol.576-577, pp.133-149, 2012.
- 11) Albertz, M. and Sanz, P. F.: Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part 2. Mechanical analysis, *Tectonophysics*, Vol.576-577, pp.150-170, 2012.
- 12) Day, S. M.: Three-dimensional simulation of spontaneous rupture: the effect of nonuniform prestress, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 6, pp. 1881-1902, 1982
- 13) Harris, R. A. and Day, S. M.: Dynamics of Fault Interaction: Parallel Strike-Slip Faults, *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, No. B3, pp. 4461-4472, March 10, 1993.
- 14) Kase, Y. and Kuge, K.: Rupture propagation beyond fault discontinuities: significance of fault strike and location, *Geophys. J. Int.*, Vol.147, pp.330-342, 2001.
- 15) 加瀬祐子: 断層間での破壊の乗り移り 応力が深さに依存する場合についての考察, 地学雑誌, Vol.111, pp.287-297, 2002.
- 16) 壇一男, 武藤真奈美, 鳥田晴彦, 大橋泰裕, 加瀬祐子: 動力学的シミュレーションによる断層の連動破壊に関する基礎的研究, 活断層・古地震研究報告, No.7, pp.259-271, 2007.
- 17) 入江紀嘉, 壇一男, 生玉真也, 入倉孝次郎: 地中地震断層と地表地震断層の断層パラメータ間の経験的關係を拘束条件とした動力学的断層破壊モデルの構築—強震動予測のための運動学的断

- 層モデルの高度化を目指して一, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.657, pp.1965-1974, 2010.
- 18) Andrews, D. J. and Barall, M.: Specifying initial stress for dynamic heterogeneous earthquake source models, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 101, No. 5, pp. 2408–2417, 2011.
 - 19) Urata, Y., Kuge, K. and Kase, Y.: Spontaneous dynamic rupture propagation beyond fault discontinuities: Effect of thermal pressurization, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 102, No. 1, pp. 53-63, 2012.
 - 20) Fukuyama, E. and Madariaga, R.: Rupture dynamics of a planar fault in a 3D elastic medium: Rate- and slip-weakening friction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.88, No.1, pp.1-17, 1998.
 - 21) Fukuyama, E. and Mikumo, T.: Dynamic rupture propagation during the 1891 Nobi, Central Japan Earthquake: a possible extension to the branched faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.96, No.4A, pp.1257-1266, 2006.
 - 22) Aochi, H. and Fukuyama, E.: Three-dimensional nonplanar simulation of the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, No.B2, doi:10.1029/2000JB000061, 2002.
 - 23) Hok, S. and E. Fukuyama: A new BIEM for rupture dynamics in half-space and its application to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Geophys. J. Int.*, Vol.184, Issue 1, pp.301–324, 2010.
 - 24) Kame, N. and T. Yamashita: Simulation of the spontaneous growth of a dynamic crack without constraints on the crack tip path, *Geophys. J. Int.*, Vol.139, pp.345-358, 1999.
 - 25) Kame, N., and Yamashita, T.: Dynamic branching, arresting of rupture and the seismic wave radiation in self-chosen crack path modeling, *Geophys. J. Int.*, Vol.155, pp.1042-1050, 2003.
 - 26) Kame, N. and Kusakabe, T.: Proposal of extended boundary integral equation method for rupture dynamics interacting with medium interfaces, *J. Appl. Mech.*, Vol.79, pp.031017-1 – 031017-8, 2013.
 - 27) Goto, H., L. Ramírez-Guzmán and J. Bielak: Simulation of spontaneous rupture based on a combined boundary integral equation method and finite element method approach: SH and P-SV cases, *Geophys. J. Int.*, Vol.183, pp.975–1004, 2010.
 - 28) Aagaard, B. T., Anderson, G. and Hudnut, K. W.: Dynamic rupture modeling of the transition from thrust to strike-slip motion in the 2002 Denali Fault Earthquake, Alaska, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.94, No.6B, pp.S190-S201, 2004.
 - 29) Anderson, G., Aagaard, B. and Hudnut, K.: Fault interactions and large complex earthquakes in the Los Angeles area, *Science*, Vol.302, pp.1946-1949, 2003.
 - 30) Aagaard, B. T., Hall, J. F. and Heaton, T. H.: Effects of fault dip and slip rake angles on near-source ground motions: why rupture directivity was minimal in the 1999 Chi-Chi, Taiwan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.94, No.1, pp.155-170, 2004.
 - 31) Aagaard, B. T. and Heaton, T. H.: Near-source ground motions from simulations of sustained intersonic and supersonic fault ruptures, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.94, No.6, pp.2064-2078, 2004.
 - 32) Barall, M.: A grid-doubling finite-element technique for calculating dynamic three-dimensional spontaneous rupture on an earthquake fault, *Geophys. J. Int.*, Vol.178, pp.845-859, 2009.
 - 33) DeDontey, N., Rice, J. R. and Dmowska, R.: Finite element modeling of branched ruptures including

- off-fault plasticity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.102, No.2, pp.541-562, 2012.
- 34) 水本学千, 坪井利弘, 三浦房紀: 3次元FEMによる断層モデルの解析に関する基礎検討, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.27-40, 2005.
- 35) 和田一範, 後藤浩之: 拡張有限要素法(X-FEM)を用いた自発的な断層破壊の数値解析手法の開発, 応用力学論文集, Vol.13, pp.667-674, 2010.
- 36) Hisada, Y.: An efficient method for computing Green's Functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.1456-1472, 1994.
- 37) Dalguer, L. A., Irikura, K. and Riera, J.: Simulation of tensile crack generation by 3D dynamic shear rupture propagation during an earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol.108, no.B3, 2144, doi:10.1029/2001JB001738, 2003.
- 38) Dalguer, L. A., Miyake, H., Day, S. M. and Irikura, K.: Surface rupturing and buried dynamic-rupture models calibrated with statistical observations of past earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.98, No.3, pp.1147-1161, 2008.
- 39) Pelties, C., de la Puente, J., Ampuero, J.-P. Brietzke, G. B. and Käser, M.: Three-dimensional dynamic rupture simulation with a high-order discontinuous Galerkin method on unstructured tetrahedral meshes, *J. Geophys. Res.*, Vol.117, doi:10.1029/2011JB008857, 2012.
- 40) Pelties, C., Gabriel, A.-A. and Ampuero, J.-P.: Verification of an ADER-DG method for complex dynamic rupture problems, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, Vol.6, pp.5981-6034, 2013.
- 41) Fäth, B., Hökmark, H. and Munier, R.: Effects of large earthquake on a KBS-3 repository, Evaluation of modeling results and their implications for layout and design, SKB Technical Report, TR-08-11, 2010.
- 42) Harris, R. A., Barall, M., Archuleta, R., Dunham, E., Aagaard, B., Ampuero, J. R., Bhat, H., Cruz-Atienza, V., Dalguer, L., Dawson, P., Day, S., Duan, B., Ely, G., Kaneko, Y., Kase, Y., Lapusta, N., Liu, Y., Ma, S., Oglesby, D., Olsen, K., Pitarka, A., Song, S. and Templeton, E.: The SCEC/USGS dynamic earthquake rupture code verification exercise, *Seism. Resear. Let.*, Vol.80, pp.119-126, 2009.
- 43) 谷和夫: ジョイント要素を用いたFEMによる逆断層の模型実験のシミュレーション, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.77-87, 1994.
- 44) 宮坂淳, 大波正行, 谷和夫: 基盤の正・逆断層運動による砂層表面の変形に及ぼす粒径の影響に関するFEM解析による検討, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.941-946, 2002.
- 45) 宮坂淳, 大波正行, 谷和夫: 基盤の縦ずれ断層運動による砂層表面の変形に及ぼす粒径の影響に関するFEM解析による検討, 第47回地盤工学シンポジウム, pp.193-200, 2002.
- 46) 中川英則, 堀宗朗: 非線形スペクトル確率有限要素法を用いた地表地震断層のシミュレーション, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.225-241, 2011.
- 47) Anastopoulos, I., Gazetas, G.: Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories, *Bull. Earthquake Eng.*, Vol.5, pp.277-301, 2007.
- 48) Anastopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., El Nahas, A., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., Pecker, A., Rossignol, E.: Numerical analyses of fault-foundation interaction, *Bull.*

- Earthquake Eng.*, DOI 10.1007/s10518-008-9078-1, 2008.
- 49) Anastasopoulos, I., Kourkoulis, R., Gazetas, G. and Tsatsis, A.: Interaction of piled foundation with a rupturing normal fault, *Géotechnique*, Vol.63, No.12, pp.1042–1059, 2013.
- 50) Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Calliero, A., Paolucci, R.: Fault rapture-foundatiopn interaction: selected case histories, *Bull. Earthquake Eng.*, DOI 10.1007/s10518-008-9089-y, 2008.
- 51) Loukidis, D., Bouckovalas, G. D., Papadimitriou, A. G.: Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.29, pp.1389–1404, 2009.
- 52) Saltzer, S. D. and Pollard, D. D.: Distinct element modeling of structures formed in sedimentary overburden by extensional reactivation of basement normal faults, *Tectonics*, Vol.11, No.1, pp.165-174, 1992.
- 53) Kumar, R. P. and Meguro, K.: Applied element simulation of non-linear behavior of dip-slip faults for studying ground surface deformation, in *A Workshop on Seismic Fault – Induced Failures*, pp.109-114, 2001.
- 54) 新井夏海, 高尾誠, 中瀬仁, 京谷孝史, 寺田賢二郎, 加藤準治: 個別要素法を用いた地震時における副断層の出現解析, 第 62 回理論応用力学講演会, OS10-12, 2013.
- 55) 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, Vol.14, No.2, pp.16-36, 2014.
- 56) 竿本英貴, 吉見雅行, 国松直: 横ずれ断層運動に伴うせん断帯発達過程に関する DEM シミュレーション, 土木学会地震工学論文集, 2005.
- 57) 谷山尚: 横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯—DEM による解析—, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.485-494, 2008.
- 58) Konagai, K. and Johansson, J.: Lagrangian particles for modeling large deformations, in *A Workshop on Seismic Fault – Induced Failures*, pp.101-108, 2001.
- 59) 清野純史, 本田武史: 断層近傍の大変形を考慮した差分法による地震動評価, 土木学会地震工学論文集, 2003.
- 60) 吉田郁政, 石丸真: MPS 法を用いた地震応答解析のための基礎検討, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.206-218, 2010.
- 61) Tani, K.: Design consideration of surface ground deformation due to fault displacement in foundation engineering, *Proceedings of International Symposium on Recent and Future Technologies in Coastal Development*, 2010.
- 62) 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, JANSI-FDE-01 rev.1, 2013.
- 63) 井上大榮, 伊藤洋: 活断層の調査と評価, エネルギーレビュー, Vol.34, No.2, pp.9-12, 2014.
- 64) Quinay, P. E. B., Ichimura, T., Hori, M., Nishida, A. and Yoshimura, S.: Seismic structural response estimates of a fault-structure system model with fine resolution using multiscale analysis with parallel simulation of seismic-wave propagation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.103, No.3, pp.2094-2110, 2013.
- 65) 上田圭一: 模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程の検討, 電力中央研究所 研究報告, N10049, 2011.

- 66) 上田圭一, 谷和夫: 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討 (その2) —正断層, 逆断層模型実験—, 電力中央研究所 研究報告, U98048, 1999a.
- 67) Tani, K., Ueta, K. and Onizuka, N.: Discussion on “Earthquake fault rupture propagation through soil” by J.D. Bray, R. B. Seed, L. S. Cluff and H. B. Seed, *J. Geotech. Eng., ASCE*, Vol.122, No.1, pp.80-82, 1996.
- 68) Bray, J. D., Seed, R. B. and Seed, H. B.: 1g small-scale modeling of saturated cohesive soils, *Geotech. Testing J.*, Vol.16, No.1, pp.46-53, 1993.
- 69) Bray, J. D., Seed, R. B., Cluff, L. S. and Seed, H. B.: Earthquake fault rupture propagation through soil, *ASCE*, Vol.120, No.GT3, pp.543-561, 1994a.
- 70) Bray, J. D., Seed, R. B. and Seed, H. B.: Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil, *ASCE*, Vol.120, No.GT3, pp.562-580, 1994b.
- 71) Johansson, J. and Konagai, K.: Fault induced permanent ground deformations – an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.26, pp.45-53, 2006.
- 72) Johansson, J. and Konagai, K.: Fault induced permanent ground deformations: Experimental verification of wet and dry soil, numerical findings’ relation to field observations of tunnel damage and implications for design, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.27, pp.938-956, 2007.
- 73) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 岩下和義, 鈴木崇伸: 基盤の逆断層変位に伴う地盤の変形と応力について, 応用力学論文集, Vol.2, pp.533-542, 1999.
- 74) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 鈴木崇伸, 岩下和義, 堀宗朗: 逆断層運動に伴う表層地盤の変形シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.3, pp.577-584, 2000.
- 75) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 鈴木崇伸, 岩下和義, 堀宗朗: 基盤の縦ずれ断層に伴う表層地盤の破壊伝播に関する模型実験, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.29-38, 2002.
- 76) 鬼塚信弘, 堀宗朗, 佐藤恒明, 金井太一: 逆断層運動模型実験における地盤変動の定量的解析, 応用力学論文集, Vol.6, pp.685-692, 2003.
- 77) 鬼塚信弘, 堀宗朗, 小国健二, 金井太一, 海保大樹, 西村能和: 模型実験における逆断層運動に伴う地中構造物の影響について, 応用力学論文集, Vol.7, pp.875-882, 2004.
- 78) Moosavi, S. M., Jarafi, M. K., Kamalian, M. and Shafiee, A.: Experimental investigation of reverse fault rupture – rigid shallow foundation interaction, *Int. J. Civil Eng.*, Vol.8, No.2, pp.85-98, 2010.
- 79) 太田良巳, アイダン・オメル: 地震断層近傍における地震動および永久変形に関する実験的研究, 「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部, Vol.2, No.3, pp.1-12, 2004.
- 80) 上田圭一, 谷和夫: 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討 (その3) —横ずれ, 斜めずれ断層模型実験—, 電力中央研究所 研究報告, U98049, 1999b.
- 81) 谷和夫, 小山良浩: 横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の内部に発達するせん断帯の構造分析, 土木学会論文集, No.757/III-66, pp.235-246, 2004.
- 82) 小山良浩, 谷和夫: 横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析, 土木学会論文集, No.750/III-65, pp.171-181, 2003.

- 83) Lee, J. W. and Hamada, M.: An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit, *Struct. Eng. Earthquake Eng., JSCE*, Vol.22, pp.1s-13s, 2005.
- 84) Stone, K. J. L. and Wood, D. M.: Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.4, pp.43-57, 1992.
- 85) Cole, D. A. Jr. and Lade, P. V.: Influence zones in alluvium over dip slip faults, *ASCE*, Vol.110, No.GT5, pp.599-615, 1984.
- 86) McLaskey, G and Kilgore, B. D.: Foreshocks during the nucleation of stick-slip instability, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/jgrb.50232, 2013.
- 87) Naylor, M. A., Mandl, G and Sijpestein, C. H. K.: Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress state, *J. Struct. Geol.*, Vol.7, No.8, pp.737-752, 1986.
- 88) Roth, W. H., Scott, R. E. and Austin, I.: Centrifuge modeling of fault propagation through alluvial soils, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.8, pp.561-564, 1981.
- 89) Bransby, M. F., Davies, M. C. R. and El Nahas, A.: Centrifuge modeling of normal fault- foundation interaction, *Bull. Earthquake Eng.*, Vol.6, pp.585-605, 2008a.
- 90) Bransby, M. F., Davies, M. C. R., El Nahas, A. and Nagaoka, S.: Centrifuge modeling of reverse fault- foundation interaction, *Bull. Earthquake Eng.*, Vol.6, pp.607-628, 2008b.
- 91) Loli, M., Bransby, M. F., Anastasopoulos, I. and Gazetas, G.: Interaction of caisson foundations with a seismically rupturing normal fault: Centrifuge testing versus numerical simulation, *Geotechnique*, Vol.62, pp.29-43, 2012.
- 92) Ng, C. W. W., Cai, Q. P. and Hu, P.: Centrifuge and numerical modeling of normal fault-rupture propagation in clay with and without a preexisting fracture, *J. Geotech Geoenv Eng.*, Vol.138, No.12, pp.1492-1502, 2012.
- 93) Dixon, J. M. and Summers, J. M.: Recent developments in centrifuge modeling of tectonic process: equipment, model construction techniques and rheology of model materials, *J. Struct. Geology*, Vol.7, pp.83-102, 1985.
- 94) Noble, T. E. and Dixon, J. M.: Structural evolution of fold-thrust structures in analog models deformed in a large geotechnical centrifuge, *J. Struct. Geology*, Vol.33, pp.62-77, 2011.
- 95) Harris, L. B., Yakymchuk, C. and Godin, L.: Implications of centrifuge simulations of channel flow for opening out or destruction of folds, *Tectonophysics*, Vol.526-529, pp.67-87, 2012.

文献調査の整理表 2.2.1(1) (断層全体モデル、食い違いの弾性論)

No.	著者	年	種別	場の方程式	材料/断層の構成 則	境界条件	数値計算手法	重要な成果	重要な図面
1	Stekette, J.A.	1958	理論解析	つりあい式	線形弾性	断層を想定した変位境界	-	転位論に基づき、地中のある面を境とする変位場を与える解析式を導出し、以後の食い違いの弾性論の理論的基礎を形成した。	
7	Okada, Y.	1985	理論解析	つりあい式	線形弾性	断層を想定した変位境界	-	Stekette (1958)の積分方程式を数学的に展開し、矩形断層による地表面の変位、ひずみ場を直接的に与える解析式を導出した。	式(25)～(41)
8	Okada, Y.	1992	理論解析	つりあい式	線形弾性	断層を想定した変位境界	-	Stekette (1958)の積分方程式を数学的に展開し、矩形断層による地表及び地中の変位、ひずみ場を直接的に与える解析式を導出した。	Table 6～Table 9
9	Wang, R., Martin, F. L and Roth, F.	2003	理論解析	つりあい式	線形弾性 (成層構造)	断層を想定した変位境界	波数積分法	半無限水平成層地盤において、点震源と地表面に分布させた特定点の変位の関係 (グリーン関数) を数値的に解くことにより、層間で変位と応力が連続する条件を満たすための解析式と数値解法を与えた。	Fig. 3. (1999)mit地震の変位場、単層モデルとの比較

文献調査の整理表 2.2.2(1)(断層全体モデル、動的FDM)

No.	著者	年	種別	場	方程式	材料/断層の構成 則	境界条件	数値計算手法	重要な成果	重要な図面
12	Day, S. M.	1982	数値計算	運動方程式		すべり弱化摩擦則	横ずれ断層(傾斜角90°)	有限差分法 有限差分法	有限応力数値シミュレーションは、初期応力のジャーブな変化が亀裂面に作用した際、破壊速度は突然のジャンプを示し、また2次元の1つの亀裂の理論的予測に類似した挙動を示す。均一な初期応力条件下では、スリップ速度関数は、ある一つの一定破壊速度の亀裂におけるおおよそlow-passフィルター版である。不均一な初期応力条件下では、ピークスリップ速度の空間変動は、空間破壊速度変動に大きくつながる。	1(すべり弱化構成摩擦則) 6, 9, 12(比較した初期応力モデル)
13	Harris, R. A. and Day, S. M.	1983	数値計算	運動方程式		すべり弱化摩擦則	横ずれ断層	有限差分法	2次元FDMにより動的破壊に関する断層ステップの影響を検討した。本研究では、普通から巨大な地震の野外調査の相互関係において、5km以上の断層ステップ幅を超えてジャンプしそごうでないことを示す。動的な伝播破壊は、圧縮性および引張性の断層ステップの両方でジャンプ可能であり、また、幅の広い引張性のステップでさえもジャンプすることが可能であることを見出した。引張性のステップは、圧縮性のステップよりも破壊の時間は遅れる傾向にある。	1(横ずれ断層の雁行配列の模式図) 2, 4(引張性ステップの断層配列モデル) 3(すべり弱化摩擦則) 7, 9(バラストの結果)
14	Kase, Y. and Kuge, K.	2001	数値計算	運動方程式		すべり弱化摩擦則	横ずれ断層	有限差分法	平行もしくは直交する断層の2つの極端なモデルの関係について、断層の不連続線を超えて破壊の進展は2つの異なったモデルで劇的に異なることを示す。断層不連続線を超えて破壊が進展する3つの要因として、2つの断層の先端深さ、最初の断層の端部の位置、2つの断層の配置を見出した。これらの要因は、2つの断層への破壊の乗り移りの時間および位置によって決定される。	3(断層の平行配置および直交配置モデル) 4(すべり弱化摩擦則) 5, 6, 7(直行配置および直交配置モデルによる破壊伝播の結果)
15	加瀬祐子	2002	数値解析	運動方程式		弾性体/すべり弱化	横ずれ断層/吸収境界条件	差分法	断層間の破壊乗り移りについて、初期応力として深度依存を考慮することにより、地震観測記録における現象の説明が可能になった。	表1(計算条件) 図1(解析モデル)、図4(破壊伝播の様子)
16	壇一男, 武藤真奈美, 島田晴彦, 大橋泰裕, 加瀬祐子	2007	数値解析	運動方程式		弾性体/すべり弱化	横ずれ断層/	差分法	「①第2断層との距離距離」「②すべり弱化則(強度超過SB)」「③断層間の非活動域(破壊せず応力上昇する区間)」「④第2断層との走向差」「⑤第2断層のステップ」についてバラストを実施し、断層の運動破壊のし易い条件について傾向を把握した。	図3(基本モデル)、図7～13(バラストメージ)
17	入江紀薫, 壇一男, 生玉真也, 入倉孝次郎	2010	数値解析	運動方程式		非線形弾性/すべり弱化	横ずれ断層/	有限差分法	従来の地震動予測のための震源断層モデルを、さらに物理的に整合するモデルに改良することを目的とし、地中震源断層と地表地震断層を記述する各断層パラメータ間の理論的關係式と経験的關係式を拘束条件とした動力学的断層破壊モデルの構築方法を提案した。	図2(パラメータ算定の流れ)、図3(動力学的破壊モデルの形状)
18	Andrews, D. J. and Barall, M.	2011	数値計算	運動方程式		すべり弱化摩擦則	横ずれ断層(傾斜角90°)	有限差分法	初期応力を規定する手順を示す。応力関数は、地震発生領域の基礎的不安定一延性の移行に従って深度方向の次元によって修正される。応力降下の自己相似変化は、本研究において破壊長を決定する長尺応力変化に結び付けられる。不均質応力は、物理的概念をモデルを関連づけるために摩擦の大きさと関係がある。	1(深度方向の初期応力および応力降下の設定)
19	Urata, Y., Kuge, K. and Kase, Y.	2012	数値計算	運動方程式		すべり弱化摩擦則	横ずれ断層	有限差分法	2つの傾斜角90°の断層セグメント間の動的破壊進展に関する温度影響(TPを検討した。TPに応じて幅の広いステップを破壊が乗り移り、また最初の断層のTPは深い位置での破壊の乗り移りを可能にすることを示す。深度依存の応力の下では、TPは深い位置で幅の広いステップオーバーバーで破壊が乗り移ることが可能であることを示す。仮にTPが断層に影響を与えるならば、断層配置のほかに水の拡散係数が、断層不連続での破壊進展の特性を強く制御可能にする。	1(断層の平行配置モデル) 2(すべり弱化摩擦則) 3, 8(TPの有無による断層伝播の結果) 表1(計算条件)
Dalguer, L. A. and Day, S. M.	2007	数値計算	運動方程式			すべり弱化摩擦則	横ずれ断層(傾斜角90°)	有限差分法	任意の破壊シミュレーションのためのtraction-at-split-node法を速度一応力スタックガードグリッドFDMに適用した。結果としてスタックガードグリッドspilt-node法は、破壊時間、最終すべり量およびピークすべり速度メトリックに関する収束割合を有し、部分的なスタックガードsplit-nodeコード(DFM)および境界積分法の両方の一致する割合が極めて類似している。粘着域の中間解が4.4グリッド点である場合、SCSN法は(エラーが標準解における不確かさに匹敵するという意味で)極めて正確な解を与える。他のグリッド形式および他の断層不連続の近似の既往の結果と比較して、SCSNの結果によれば、任意の破壊問題のFDM解での正確さは、主に断層不連続を表現するために用いたスキームによって支配され、また連続体を表現するために用いたグリッド配置には比較的低感であること示している。	1(スタックガード格子の説明) 2(断層モデル) 4, 5, 6, 7, 9(DFMとSCSNの計算結果の比較) 表1(計算条件)

文献調査の整理表

2.2.2(2)(断層全体モデル、動的BEM)

No.	著者	年	種別	場の方程式	材料/断層の構成	境界条件	数値計算手法	重要な成果	重要な図面
2	Tada, T.	2009	数値解析	境界積分方程式	線形弾性/($\nu < 1/2$) 弱化摩擦則	縦ずれ・横ずれ断層/全無限体・半無限体	境界要素法	無限弾性体中の破壊進展問題を解くための境界積分方程式を体系的に提示した。2次元・3次元及び平面・曲面の断層に対する解法を示し、さらに半無限媒質への展開等について示した。	
3	Aochi, H., Madariaga, R. and Fukuyama, E.	2002	数値解析	境界積分方程式	線形弾性/($\nu < 1/2$) 弱化摩擦則	横ずれ断層/全無限体	境界要素法	平面の組合せで構成されたY字型の分岐形状をもつ3次元横ずれ断層上の経路選択と破壊範囲を、初期応力の向き、摩擦係数、断層間の距離に着目して分析した。連続した断層面上の破壊進展には破壊フロンต์のせん断応力が支配的で有るのに対し、不連続な断層間の破壊の遷移には法線応力を含めたクーロン応力が関係することを示した。	Fig.9,12(連続／不連続断層上の破壊進展)
4	Kame, N., Rice, J. R. and Dmowska, R.	2003	数値解析	境界積分方程式	線形弾性/($\nu < 1/2$) 弱化摩擦則	横ずれ断層/全無限体	境界要素法	屈曲・分枝した2次元横ずれ断層上の経路選択と破壊範囲を、初期応力の向き、破壊伝播速度、分枝断層の角度との関係に着目して整理した。カリフォルニアや南海トラフで過去に発生した地震での破壊経路と調和的であった。	Fig.9～13(解析条件と破壊範囲の関係)
20	Fukuyama, E. and Madariaga, R.	1998	数値解析	境界積分方程式	線形弾性/($\nu < 1/2$) 弱化したまたは速度弱化摩擦則	縦ずれ・横ずれ断層/深度非依存応力/全無限体	境界要素法	無限弾性体中に置かれた3次元的不規則な平面断層上における自発的破壊進展問題に対する境界積分方程式を提示し、摩擦構成則による挙動の違いを比較した。	Fig.7&8(摩擦構成則による変位、応力等の比較)
21	Fukuyama, E. and Mikumo, T.	2006	数値解析	境界積分方程式	線形弾性/($\nu < 1/2$) 弱化摩擦則	横ずれ断層/全無限体	境界要素法	3次元境界積分方程式法を1891年高尾地震に適用し、応力場と破壊範囲の関係を考察した。東西圧縮場を仮定すれば、北部の奥尻島断層から連動した破壊は、地殻地震断層を伴った東部の梅原断層だけではなく、伏在断層の存在が提案されている南西部の岐阜——岩手——宮城にも進展することが明らかとなった。	Fig.4(破壊進展のスナップショット)
22	Aochi, H. and Fukuyama, E.	2002	数値解析	境界積分方程式	線形弾性/深度依存応力/($\nu < 1/2$)弱化摩擦則	斜めずれ断層/半無限体	境界要素法	断層配置と応力場を再現し、1992年ランダーズ地震の破壊伝播過程を境界積分方程式法で解析した。破壊範囲やすべり量分布のパターンはよく再現できており、水平方向の不均衡性は重要でないことが示唆された。さらに、断層近傍の地震動を観測と比較したところ、変動パターンは整合的であった。	Fig.5(初期条件の鉛直分布), Fig.6(断層面上の応力変化), Fig.9(地震動の比較)
23	Hok, S. and Fukuyama, E.	2010	数値解析	境界積分方程式	線形弾性/($\nu < 1/2$) 弱化摩擦則	斜めずれ断層/半無限体	境界要素法	3次元境界積分方程式法を半無限体問題に適用するための定式化を示し、2008年岩手・宮城内陸地震に適用した。得られた地震動は離散化数法による結果と整合した。自由表面の効果や考慮しない全無限モデルでは、地表付近の応力降下や破壊エネルギーが過大評価となることがあった。	Table.1(全無限と半無限の応力降下量等の比較)
24	Kame, N. and Yamashita, T.	1999	数値解析	境界積分方程式	線形弾性	横ずれ断層/全無限体	境界要素法	2次元横ずれ問題に対し、あらかじめ断層を設定することなく亀裂の先端が自発的に破壊面を選択するよう、境界積分方程式法を拡張した。均質媒質、一様応力場を仮定しても、亀裂先端部の応力変化により断層が屈曲しながら成長することを示した。	Fig.5(初期条件), Fig.9(亀裂成長のスナップショット)
25	Kame, N., and Yamashita, T.	2003	数値解析	境界積分方程式	線形弾性	横ずれ断層/全無限体	境界要素法	2次元横ずれ問題に対し、あらかじめ断層を設定することなく亀裂の先端が自発的に破壊面を選択するよう、境界積分方程式法を拡張した。摩擦や場の応力の条件に応じ、亀裂の先端は2方向に均等に分岐したり、非対称に成長することを示した。分岐した亀裂のすべり速度は速くないため、分岐を考慮しないモデルとの比較では、得られる地震動の差は大きくないことがわかった。	Fig.4(条件と亀裂成長パターンの関係), Fig.6(分岐を考慮しないモデルとの地震動の比較)
26	Kame, N. and Kusakabe, T.	2012	数値解析	境界積分方程式	線形弾性(成層構造)	縦ずれ断層/半無限体	拡張境界要素法	境界積分方程式を、成層構造をもつ媒質に拡張したExtended BIEM (XBEM)を提案し、境界積分方程式に対する定式化を示した。層間・断層面を設定したときの破壊進展問題に適用し、理論解と整合することを確認した。	Fig.2(例題の設定), Fig.3(理論解との比較)
27	Goto,H., Ramirez-Guzman, L. and Biehak, J.	2010	数値解析	境界積分方程式／運動方程式	非線形弾性(成層構造)	縦ずれ・横ずれ断層/半無限体	境界要素法＋有限要素法	境界積分方程式法＋CFEMを組み合わせることで、不均質媒質への適用を可能とした。BDM(Boundary/Domain Method)を提示し、成層地盤を仮定した例題に適用した。	Fig.8(FDMの概念図)

文献調査の整理表 2.2.2(2)(断層全体モデル、動的FEM)

No.	著者	年	種別	場の方程式	材料/断層の構成則	境界条件	数値計算手法	重要な成果	重要な図面
28	Aagaard, B. T., Anderson, G. and Hudnut, K. W.	2004	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり・すべり速度弱 化摩擦則	横すれ・逆断層/ 深度依存応力/ 粘性境界	有限要素法	Denali断層地震(2002)の数値解析によりSustna河断層(逆断層)からDenali断層(横すれ断層)への破壊の乗り移りを再現した。応力テンソルの調整によりすべり方向のフィードバックを奏した。	4(破壊の進展・乗り移り), 6(主応力方向の影響)
29	Anderson, G., Aagaard, B. and Hudnut, K.	2003	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり・すべり速度弱 化摩擦則	横すれ・逆断層/ 深度依存応力/ 粘性境界	有限要素法	南カリフォルニアの横すれ・逆断層系における断層の相互作用に関して静的(食い違い論)および動的数値解析による検討を実施した。破壊の乗り移りが発生し、大地震が発生する可能性が大きい震源位置について言及している。	2, 3(破壊進展の解析結果)
30	Aagaard, B. T., Hall, J. F. and Heaton, T. H.	2004	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり 量履歴	横すれ・逆断層 -/粘性境界	有限要素法	5種類の断層配置に対して、傾斜角レイク角を種々に組み合わせた解析を実施し、せん断波の指向性が強くなる条件を示した。	16(せん断波の指向性に関するまとめ)
31	Aagaard, B. T. and Heaton, T. H.	2004	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり 量履歴	横すれ-/粘性 境界	有限要素法	横すれ断層でのM7.4の地震時の長周期の震源近傍の地表地震動についてシミュレーションによる検討を実施し、破壊進展速度と指向性との関係を示した。	5, 6, 7(各ケースの解析結果, 地表での最大変位, 最大変位速度)
32	Barall, M.	2009	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり 弱化摩擦則・速度減摩擦則	横すれ・逆断層/ 深度依存応力/- 境界	有限要素法	二重グリッド法を用いた有限要素法により断層破壊シミュレーションを高速に表現する手法を提示した。SCEC USGSの検証問題やHayward断層への適用結果を示した。	1, 2(通常のメッシュと二重グリッド法を用いたメッシュ)
33	De Dontey, N., Rice, J. R. and Dmowska, R.	2012	数値解析	運動方程式	弾塑性/すべり弱 化摩擦則	横すれ/深度非 依存応力/粘性 境界	有限要素法	二次元解析により断層の分岐部の挙動について考察した。弾性地震では開口が発生するのに対して、弾塑性地震では開口は抑制されることを示した。	11(弾性地震と弾塑性地震での分岐部の挙動の違い)
34	水本孝千, 坪井利弘, 三浦勇紀	2005	数値解析	運動方程式	線形弾性/即時応 力降下	横すれ・縦すれ/ 深度依存応力/粘 性境界	有限要素法	三次元解析により、断層の破壊方向の変化による食い違い量、地震波形の違いを調べた。また、三次元、二次元の解析結果の比較を行い、その類似性および違いを検討した。	9(破壊過程の比較), 10(加速度, 速度, 変位波形の比較)
35	和田一範, 後藤浩之	2010	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり 弱化摩擦則	二次元面外すべり/ 深度非依存応力/ 粘性境界	拡張有限要素法	メッシュ分割を断層面に一致させる必要がないという特徴を持つXFEMを用いた断層の動力学シミュレーション手法を開発した。BIEMによる解析の結果と比較し、検証を行った。	6(断層と要素配置), 8(すべり分布の時開発)

文献調査の整理表 2.2.2(2) (断層全体モデル、動的その他)

No.	著者	年	種別	場の方程式	材料/断層の構成則	境界条件	数値計算手法	重要な成果	重要な図面
36	Hisada, Y.	1994	理論解析	-	-	-	-	粘弾性層状半無限地盤において静的・動的グリーン関数から変位および応力を効率よく計算するための解析法を提案した。永久変位に加えて地震動による変位履歴を求めることができる。	
37	Dalguer, L. A., Irikura, K. and Riera, J.	2003	数値解析	運動方程式	弾性・引張破壊/すべり強化摩擦則	横ずれ断層/深さ非依存応力/粘性境界	不連続要素法	内部引張りき裂を導入できることから不連続要素法 (Discrete element method, DEM) を使い、断層周辺に発生する引張りき裂の分布を求めた。断層上部からの花弁状断層などが得られた。	22 (引張りき裂の分布)
38	Dalguer, L. A., Miyake, H., Day, S. M. and Irikura, K.	2008	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり強化摩擦則	横ずれ断層/深さ非依存応力/粘性境界	SGSN法	SGSN法により震源近傍の地盤の揺れをシミュレートし、地下の地震は地表地震断層を伴う地震よりも高周波の強震動を励起するという観測と一致した結果を得た。	13 (地下・地表断層による強震動)
39	Pelties, C., de la Puente, J., Ampuero, J.-P., Bletzke, G. B. and Käser, M.	2012	数値解析	運動方程式	弾完全塑性/連度状態依存摩擦則	横ずれ・逆断層/深度非依存応力/—	AEDR-DG法	複雑な媒体、複雑な断層形状において動的断層破壊や波動伝播をシミュレーションするための正確で効率的な数値解析手法として三次元のAEDR-DG法を開発した。SCEC/USGSの公開するベンチマーク問題や1992年ランドマーク地震を想定した速度分布解析を示した。	8 (ランドマーク地震の解析結果、地表速度分布)
40	Pelties, C., Gabriel, A.-A. and Ampuero, J.-P.	2013	数値解析	運動方程式	線形弾性/すべり強化摩擦則	横ずれ断層/深さ非依存応力/—	AEDR-DG法	AEDR-DG法の検証としてSCEC/USGSの公開するベンチマーク解析に取り組んだ内容を示している。	3など (検証解析での他コードとの比較)
41	Fälth, B., Hökmark, H. and Munier, R.	2010	数値解析	運動方程式	線形弾性/破壊開始後の応力履歴	逆断層/深さ依存応力/粘性境界	個別要素法～差分法の弱連成	震源から等速度で破壊フロントが断層面上を進行するという仮定のもと、断層周辺の地下500mを中心に分布する破壊帯の変位量予測を行った。	S-1 (主断層周辺の破壊帯での変位履歴)
42	Harris, R. A., Barall, M., Archuleta, R., Dunham, E., Aagaard, B., Ampuero, J. R., Bhat, H., Cruz-Atienza, Y., Dalguer, L., Dawson, P., Day, S., Duan, B., Ely, G., Kaneko, Y., Kase, Y., Lapusta, N., Lau, Y., Ma, S., Oglesby, D., Olsen, K., Priatka, A., Song, S. and Templeton, E.	2009	数値解析	-	弾性・弾塑性/すべり強化摩擦則・速度状態摩擦則	横ずれ・正断層/深度依存応力/半無限地盤	種々の手法	断層の動力学的破壊連環解析のベンチマークテストの概要が紹介されている。	2 (ベンチマーク問題の解析条件)

文献調査の整理表 2.3(表欄モデル)

No.	著者	年	種別	場の方程式	材料の構成則	境界条件	数値計算手法	重要な成果	重要な図面	備考
43	谷和夫	1994	数値解析		非線形弾塑性	逆断層を想定した変位境界	有限要素法	既往の歪み模型実験の再現解析により、基礎の断層変位によって生じる第四紀層の変形をミュレーションで再現できることを示した。	写真1(既往実験結果)、図8(変形図)	既往実験(上田1993)
44	宮坂淳、大波正行、谷和夫	2002	数値解析			縦すれ断層を想定した変位境界	有限要素法	基礎の断層変位によって生じる第四紀層の変位と地盤の応答の関係をミュレーションにより示した。	図2(変形図)	
45	宮坂淳、大波正行、谷和夫	2002	数値解析			縦すれ断層を想定した変位境界	有限要素法	基礎の断層変位によって生じる第四紀層の変位と地盤の応答の関係をミュレーションにより示した。	図2(傾斜角90°変形図)、図3(傾斜角75°変形図)	
46	中川英則、堀宗朗	2011	数値解析		ひずみ軟化を考慮した間連流れ則に従うDrucker-Prager	縦すれ及び横すれを考慮した変位境界	有限要素法	実験による再現及び実験断層の再現を行った。	図6,7(2次元実験(縦すれ)の再現)、図9,12(3次元モデル(横すれ)の再現)、図16,27(実地実験断層の再現)	
47	Anastasopoulos, I. and Gazetas, G	2007	数値計算	つりあい式		縦すれ断層を想定した変位境界	有限要素法	断層傾面上の構造物の存在が、破綻の経路に重要な影響を及ぼすものとして、連続した断層の基礎下の重層構造物によって断層破綻は既な経路を変え、また構造物の真下で破綻することを示す。後者は断層構造の応答を受け、その基礎は周辺土との接触領域む、多くの場合、構造物としての機能は喪失。全く自動的に、直立したアーチ状の建物や、以外にも杭基礎は破綻経路の変化はわずかにあり、これはフーチング間や柱頭間で露出するからである。後者は真直な破綻断層分布の影響の比較結果)	1(地盤モデルおよび地盤-構造物モデル)	
48	Anastasopoulos, I., Calero, A., Bamsby, M. F., Davies, M. C. R., ElNahas, A., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., Pecker, A. and Rossignol, E.	2008	数値計算	つりあい式		縦すれ断層を想定した変位境界	有限要素法	数値計算と歪み模型実験結果の比較からは、破綻後の流動する土を考慮する場合、理想的に精緻な土モデルにより信頼できる予測を達成することが可能である。前提条件は、土と構造物の間の摩擦を無効化するインターフェース要素と結合した十分加が大きい非弾性材料である。パラスタ検出の結果は、構造物の追加荷重qの増加が大きな断層破綻経路の変化や、その応力の減少を許容し地盤物の流動化に結びつくことを示す。土の定数は、構造物に働く応力に有益である。土壌の深さH、断層変位hを与えれば、構造物の回転 θ は、 θ とHの断層破綻に相対的な変位、 θ とHの断層変位、および θ とHの土層変位の関数であることを示す。	3, 5, 7(地盤-構造物モデルの比較) 23, 24(構造物モデル配置の比較結果のまとめ)	
49	Anastasopoulos, I., Koutkoulis, R., Gazetas, G. and Tsatsis, A.	2013	数値計算	つりあい式	非線形弾(地盤)、非弾性(杭)	縦すれ断層を想定した変位境界	有限要素法	本論文では速度に密な砂層に埋め込まれた2~40m杭基礎(典型的な高速道路の橋構造物)と破綻の相互作用を調査する。経験的に有効な数値計算および砂の構成則は、非線形弾の杭-土質インターフェースおよび杭の構造的な非弾性を現実にモデル化し、解析に利用する。パラスタの結果は、断層に隣接したグループの正確な位置および地盤変化の大きさ(断層からのオフセット)を関数として異なった破綻メカニズムの成長を確認し説明する。杭基礎は、断層にまたがる構造物の保護において、硬い-粘土基礎より、わずかの顯著な例外を除いて破損に劣っている。	3(地盤-杭基礎モデル) 41(8m杭基礎の形式、断層の分布、地盤の密度の比較結果)	
50	Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Calero, A. and Paolucci, R.	2008	数値計算	つりあい式			有限要素法	本検討は、(a)トルコのMw 7.4 Kocaeli(17日)1999地震、(b)トルコの1994(11/12)Mw 7.1 Düzce-Bolu地震、(c)台湾の1998(9/21)Mw 7.6 Chi-Chi地震および(d)Mount Etnaの地殻断層から破綻と地盤の相互作用の観測事例を選択した。ここに示された事例に則して、companion paperで開発された方法を用いて数値的に分析した。比較的、連続的で硬い基礎に支持された「重い」剛体構造物は、断層破綻によって向きを変えても良いことが示される。このような構造物は十分な構造物の引張強さで制体回転を受け、対照的に、構造的に弾性の地盤、あるいは分離された支持物上の構造物は、十分に損傷の傾向がある。	6(地盤と構造物のモデル化) 8, 10, 16(観測事例を基にした地盤-構造物のモデルによる計算結果)	
51	Loulkdis, D., Bouckovalas, G. D. and Papadimitriou, A. G.	2009	数値計算	つりあい式	弾塑性、応力軟化物質	縦すれ断層を想定した変位境界	有限要素法	本論文では、堅固な岩盤を覆う一層の土層を通じて活断層の破綻の伝播の数値シミュレーションの結果を示す。野方観測事象に対する数値計算法の検証に続き、パラスタ検出として、幾いまたは密な、普通、埋め込まれた土層厚さについて異なった断層傾角(正断層および逆断層)および異なる土層厚さについて行った。土層はモルタル-グーロン破綻基型に従う弾塑性、応力軟化物質としてモデル化した。本研究の目的は、断層破綻によって引き起こされる異なる地表変位が人工基礎構造物の安全性を脅かすことになる。地表面の重大な変位を及ぼす領域の位置や幅のおおよその目安を基準を確立することである。	1(地盤-構造物モデルの説明スケッチ) 5, 6, 7他(断層配置の違いによる計算結果)	
52	Saltzer, S. D. and Pollard, D. D.	1992	数値解析	運動方程式	粒子間接触時間相互作用無	縦すれ断層を想定した変位境界	個別要素法	粒道のばらつきが大きい程、断層がジャンプになる。	4	
53	Kumar, R. P. and Meguro, K.	2001	数値解析	運動方程式	粒子間接触時間相互作用無	縦すれ断層を想定した変位境界	個別要素法	ディップアングルが小さい方が地表面の隆起が大きい。	5, 6	
54	新井夏海、赤尾誠、中瀬仁、京谷孝史、寺田賢二郎、加藤雅治	2013	数値解析	運動方程式	粒子間接触時間相互作用無	縦すれ断層を想定した変位境界	個別要素法	砂箱実験で現れる断層、断層を再現できた		
55	高尾誠、上田圭一、安中正、栗田哲史、中瀬仁、京谷孝史、加藤雅治	2014	数値解析	運動方程式	粒子間接触時間相互作用無	縦すれ断層を想定した変位境界	個別要素法	砂箱実験で現れる断層、断層を再現できた	5との比較	
56	年本英貴、吉見雅行、園部直	2005	数値解析	運動方程式	粒子間接触時間相互作用無	縦すれ断層を想定した変位境界	個別要素法	リーディングせん断層-一次モードの形成再現、一次モード近傍で応力降下、地盤圧縮が観察された。	10,12,13	
57	谷山尚	2008	数値解析	運動方程式	粒子間接触時間相互作用無	縦すれ断層を想定した変位境界	個別要素法	リーディングせん断層-一次モードの形成再現	4	
58	Konagai, K. and Johansson, J.	2001	数値解析	運動方程式	弾塑性、obeying the simple Mohr-Coulomb's yield criterion	縦すれ断層を想定した変位境界	粒子法(LPTDM)	粒子法を用いることにより様々な大変形の表現が可能となった	9	
59	清野純史、本田武史	2003	数値解析	運動方程式	弾性体	底面、側面粘性境界	差分法+LPTDM	FDNのみの解析に比べて、再現性が改善された	16	
60	吉田郁政、石丸真	2010	数値解析	運動方程式、つり合	線形弾性体	底面粘性境界、地盤入力	粒子法(MPS)	単純モデルでは、波動伝播が理論解と一致する。FEM単純モデルとの比較では、ほとんど差がない。	2,3,16	

文献調査の整理表

3.1 実験(重力場)

No.	著者	年	地盤材料	断層	実験	重要な成果	重要な図面
85	Cole, D. A. Jr. and Lade, P. V.	1984	密な砂, 緩い砂	縦ずれ	基礎の縦ずれ断層の傾斜と表層地盤中のせん断帯の形状・位置の関係を, 実験と剛塑性解で示した。	基礎の傾斜とせん断帯の形状・位置の関係を, 実験と剛塑性解で示した。	8(理論解), 9(実験との比較)
69	Bray, J. D, Seed, R. B, Cluff, L. S. and Seed, H. B.	1994a	—	縦ずれ, 横ずれ	既往の実験	表層地盤の変形と断層の傾斜を, 表層地盤の調査と既往の実験の結果に基づいて検討している。表層地盤の変形特性の影響を指摘する。表層地盤と実験の文献値幅がリストアップされている。	6(逆断層), 7(正断層), 8(横ずれ断層)
70	Bray, J. D, Seed, R. B and Seed, H. B.	1994b	粘性土	縦ずれ	既往の実験 (Bray et al, 1993)	FEMにより粘性土の表層地盤について実験と比較し, 変形の上方向への伝達の程度に関して破壊ひずみの大きさの影響が大きいことを示した。	11
87	Naylor, M. A., Mandl, G and Sippesteyn, C. H. K.	1986	乾燥砂	横ずれ	h=10cm	横ずれによるせん断帯の発達過程を示した。表層地盤内の初期応力の影響が, せん断帯の発達の範囲や形状に及ぼす影響が大きいことを示した。	2(地表面の変状), 11-13(地盤内の変状)
66	上田圭一, 谷和夫	1999a	乾燥砂	縦ずれ	h=5-200cm	基礎の縦ずれ断層の傾斜と表層地盤中のせん断帯の形状・位置の関係をせん断帯の発達過程を示した。	表3(まとめ), 15&16(到達位置), 17&18(到達に必要な断層変位)
80	上田圭一, 谷和夫	1999b	乾燥砂	横ずれ, 斜めずれ	h=5-40cm	基礎の横ずれの傾斜と表層地盤中のせん断帯の発達過程を示した。	表3(傾斜角の影響), 8(地盤構成の影響)
65	上田圭一	2011	乾燥砂, シリコンポリマー	縦ずれ(逆)	h=3cm	X線CTを用いて傾斜層(軟岩を含む)内部の逆断層・滑移曲線の発達過程を示した。	12&13&14(寸法効果)
82	小山良博, 谷和夫	2003	乾燥砂	縦ずれ	h=3-40cm	地表面のせん断帯の形状・位置・発達過程を示した。寸法効果の影響が大きいことを示した。	4(せん断帯の分類)
81	谷和夫, 小山良博	2004	乾燥砂	横ずれ	h=3-12cm	X線CTを用いて表層地盤内部のせん断帯の発達過程を示した。寸法効果の影響が大きいことを示した。	9(含水の影響)
71	Johansson, J. and Konagai, K.	2006	乾燥砂, 湿潤砂 (Sr=80%)	縦ずれ(鉛直)	円盤引き抜き, h=40cm	含水が, 変形領域やせん断帯の発達位置に及ぼす影響が大きいことを示した。	2(含水の影響)
72	Johansson, J. and Konagai, K.	2007	乾燥砂, 湿潤砂 (Sr=80%)	縦ずれ(鉛直)	円盤引き抜き, h=40cm	FEMと実験の結果を比較し, 含水の影響を検討した。トンネルへの影響を考察した。	5(断層面内の破壊伝播)
86	McLaskey, G. C. and Kilgore, B. D.	2013	Sierra White Granite	(横)ずれ	断層の部分模型	地盤源成長過程の解明のための断層面近傍の部分模型実験(不連続面の二軸せん断試験)。余震や地震発生の力学現象を計測した。	11(表面基礎とせん断帯の関係)
78	Mousavi, S. M., Janafi, M. K., Kamalian, M. and Shafiee, A.	2010	Firoozkooh sand(No.16)	縦ずれ(逆)	h=20cm	DEMとの比較, 実験は参考文献を引用, 基礎上に作用する応力を計測した。断層変位速度の影響に注目した。	6(基礎上の応力分布), 7(到達に必要な断層変位)
74	鬼塚信弘, 伯野元彦, 堀宗朗, 岩下和義, 鈴木崇伸	2000	アルミ棒	縦ずれ(逆)	h=20-40cm	せん断帯の形状・位置・到達に必要な断層変位量を検討した。基礎上に作用する応力を計測した。	2&3(正・逆断層の形状), 8&9(正・逆断層の基礎上応力)
75	鬼塚信弘, 伯野元彦, 鈴木崇伸, 岩下和義, 堀宗朗	2002	アルミ棒	縦ずれ	h=5-40cm	基礎上に作用する応力と粒子の移動方向を計測した。	—
76	鬼塚信弘, 堀宗朗, 佐藤恒明, 金井太一	2003	アルミ棒	縦ずれ(逆)	h=30cm	傾斜するカルバートの影響を検討した。	—
77	鬼塚信弘, 堀宗朗, 小国健一, 金井太一, 海保大樹, 西村龍和	2004	アルミ棒	縦ずれ(逆)	h=30-40cm	傾斜的でなく基礎の自由落下でそれを再現する。地表面加速度も計測する。	2&3&4(せん断帯, 地表面の変形)
79	太田良巳, アイザン・オメル	2004	乾燥砂	縦ずれ(鉛直)	h=20cm	傾斜斜材土を用いた実験により, 傾斜斜材土中のせん断帯の発達と断層変位と構造成果に依存ことを示した。	2-10(せん断帯)
68	Bray, J. D, Seed, R. B. and Seed, H. B.	1993	飽和粘土	h=20cm	せん断帯の形状・位置・到達に必要な断層変位量を検討した。基礎上に作用する応力を計測した。	7(到達位置), 6(基礎上応力)	
73	鬼塚信弘, 伯野元彦, 岩下和義, 鈴木崇伸	1999	アルミ棒	縦ずれ(逆)	h=5-40cm	直方形で層厚を変えた実験と逆断層実験の結果を比較し, 拘束圧効果の影響を示した。	8(到達位置と到達に必要な断層変位)
83	Lee, J.W. & Hamada, M.	2005	乾燥砂	縦ずれ	h=10-60cm	基礎の縦ずれ断層の傾斜と表層地盤中のせん断帯の形状・位置の関係をせん断帯の発達過程を示した。	13(到達位置), 14(到達に必要な断層変位)
67	Tani, K., Ueta, K. and Onizuka, N.	1996	乾燥砂	縦ずれ	h=5-200cm	基礎の傾斜と表層地盤中のせん断帯の形状・位置の関係をせん断帯の発達過程を示した。	3(傾斜効果)
84	Stone, K.J.L. and Wood, D.M.	1992	乾燥砂	縦ずれ(鉛直)	h=20cm	3種類の粒度の砂について, 遠心載荷実験の結果と比較し, 傾斜効果と拘束圧効果の影響を示した。	3(傾斜効果)

文献調査の整理表

3.2 実験(遠心場)

No.	著者	年	物体力	地盤材料	断層	実験	重要な成果	重要な図面
88	Roth, W. H., Scott, R. E. and Austin, I.	1981	遠心場	密な砂, 軽い砂, 細粒砂質シルト	縦ずれ(正)	h=11.4, 17.8cm 10, 50G	遠心場での断層模型実験に関する先駆的な研究。砂の密結, 変形の速度によって地表段差の発生が異なることを示した。	3(砂模型での結果), 4(粘着土での結果)
83	Lee, J. W. and Hamada, M.	2005	遠心場	珪砂7号	縦ずれ	1G場: h=10-60cm 遠心場: h=5-30cm, 20-50G	1G場では地表破壊の位置が模型厚さによって変化するのに対して, 遠心力場ではモデル厚さによる変化はなくなる傾向を示した。砂のダイレイタンスー挙動の拘束圧依存の影響を考察。	18(1G場でのせん断面), 20(遠心場でのせん断面)
47	Anastasopoulos, I. and Gazetas, G.	2007	遠心場	乾燥砂	縦ずれ	h=22-50cm, 50-115G	欧州QUAKERプロジェクトの成果。模型実験。数値解析による地盤の断層破壊と構造物の相互作用の検討結果を取りまとめた。剛な基礎では, 破壊はその直下を避けることを示した。	12(地表変形のまとめ)
89	Bransby, M. F., Davies, M. C. R. and El Nahas, A.	2008	遠心場	乾燥砂	縦ずれ(正)	h=22cm, 115G	欧州QUAKERプロジェクトでの正断層に対する検討。基礎の幅, 基礎による上載圧, 基礎と断層の位置関係を変えた実験を実施し, 基礎の存在により断層破壊がそれる可能性があり, その結果基礎は重大な食い違い変位から守られることを確かめた。特に上載圧の影響が大きいのを示した。	7(基礎による破壊の変化)
90	Bransby, M. F., Davies, M. C. R. El Nahas, A. and Nagoaka, S.	2008	遠心場	乾燥砂	縦ずれ(逆)	h=22cm, 115G	欧州QUAKERプロジェクトでの逆断層に対する検討。基礎と地盤の応答は基礎の荷重, 位置, 幅, 柔軟性に依存し, 重く剛な基礎は最も断層破壊を基礎からそらせる効果を持つことを示した。	5(基礎による破壊の変化)
91	Loli, M., Bransby, M. F., Anastasopoulos, I. and Gazetas, G.	2012	遠心場	乾燥砂	縦ずれ(正)	h=15cm, 100G	正断層の破壊と剛なケーン/基礎の相互作用メカニズムについて, 実験と数値解析両方を用いた総合的な検討を実施した。ケーンは断層との相対的な位置にもよるが, 基礎なしの地盤での破壊経路を大幅に変える場合があることを示した。	5(基礎無しの実験結果), 6, 9, 12(ケーン基礎配置した場合の実験結果)
92	Ng, C. W. W., Cai, Q. P. and Hu, P.	2012	遠心場	粘土, 粘土(セメント混合)	縦ずれ(正)	h=50cm, 100G	未固結粘土および既存破壊面の有り無しの間結粘土地盤での正断層の破壊進展について検討した。固結粘土では曲げ変形メカニズムが見られ, 断層上部だけでなく地表からの破壊が見られた。	6, 7, 8(各ケースの実験結果)
93	Dixon, J. M. and Summers, J. M.	1985	遠心場	油土, シリコンハネ	広域褶曲	h=5.1cm, 2000-4000G	油土とシリコンハネのマイクロ多層構造は遠心力実験において, 硬い流紋岩と変形しやすい頁岩の互層に対する適切なアナログ地盤であることを示した。	6(結果の一例)
94	Noble, T. E. and Dixon, J. M.	2011	遠心場	粘土, シリコンハネ	広域褶曲	h=6cm, 160G	通常の10倍のスケールで実験を実施した。たぐさんの薄層を置くことができ, それらをひびきマーカーとして, 褶曲一帯上断層系および個々の褶曲一帯上断層構造両方についてひびき分布, 相互作用の精緻な解析を可能とした。	8(変形・破壊の分析)
95	Harris, L. B. Yakymchuk, C. and Godin, L.	2012	遠心場	粘土, シリコンハネ	広域褶曲	h=1.5-2cm, 1000G	小型・高遠心加速度の装置とシリコン材料を用いて地層の褶曲挙動を対象とした遠心力模型実験を実施した。特に褶曲構造の復元に着目して分析している。	3, 4, 5(実験で得られた変形)

IV. 断層変位が及ぼす影響評価

目 次

1. まえがき	IV-1
2. 国内外で生じた構造物の損傷事例.....	IV-2
2.1 台湾・集集地震による被害.....	IV-2
2.2 トルコ・コジャエリ地震による被害.....	IV-4
2.3 トルコ北西部デュズジェ地震による被害	IV-5
2.4 国内の地震による被害	IV-5
2.5 地盤変状と構造物の損傷との関係.....	IV-6
3. 構造物に及ぼす影響の評価事例	IV-8
3.1 社会基盤施設における評価と対策.....	IV-8
3.2 FEM を用いた原子力発電所の評価	IV-14
3.3 DEM や MPM を用いた評価	IV-18
3.4 梁ばねモデルを用いた地中構造物の損傷確率評価	IV-22
4. 原子力発電施設に及ぼす影響の考え方および最近の研究動向.....	IV-29
4.1 基準類における断層変位影響の扱い.....	IV-29
4.2 最近の研究動向.....	IV-29
4.3 外国における事例.....	IV-34
4.4 原子力発電施設に及ぼす影響の考え方	IV-37
5. まとめ	IV-43

IV 断層変位が及ぼす影響評価

1. まえがき

ここでは、震源断層の動きに起因した断層変位も含む原子力発電施設の周辺地盤の変位がそれら施設に及ぼす影響を既往の断層変位評価技術（Ⅱ編）と解析技術（Ⅲ編）を利活用して工学的に評価するための考え方を示す。断層変位が原子力発電施設に及ぼす影響を評価する上では、まず、対象とする地盤の変位や施設や機器の損傷を具体的に設定することが必要であり、安全を損なうシナリオを想定することが必要となる。また、断層変位が建物などの一般構造物に及ぼした影響、特に断層の動きに起因した地盤変位の程度と構造物の損傷との関係を把握することは、断層変位の影響を工学的に評価する上で重要となる。さらに、断層変位が構造物に及ぼす影響を評価する技術の現状として、有限要素法や粒子法などを用いた確定論的評価、さらに断層の動きに起因した地盤変位の不確実性が構造物に及ぼす確率論的評価に関する技術を把握することも重要となる。それらを踏まえた上で、断層変位が原子力発電施設に及ぼす影響の考え方を評価するための最近の研究の動向について外観し、断層変位が原子力発電施設に及ぼす影響の考え方を示すことにする。

そのため、以下の3項目についてのとりまとめを実施した。

- ① 国内外で生じた構造物の損傷事例
- ② 構造物に及ぼす影響の評価事例
- ③ 原子力発電施設に及ぼす影響の考え方と最新の研究動向

ここで、①では、地表近傍に震源断層の動きに起因した地盤変位が生じた地震による構造物の被災状況とその分析事例について報告する。②では、有限要素法や粒子法などを用いて断層変位による構造物の影響の評価事例、断層変位に対する対策事例と効果、さらに断層変位に起因した地中構造物の損傷度曲線の評価事例などを示す。③では、旧原子力安全基盤機構や原子力安全推進協会、さらにスウェーデンにおける最終処分場の安全性評価における断層変位の影響評価事例などを示した後、原子力発電施設に及ぼす影響の考え方を示す。

2. 国内外で生じた構造物の損傷事例

国外においては、主に断層変位により構造物に甚大な被害が生じた 1999 年 8 月 17 日のトルコ・コジャエリ地震、同年 11 月 12 日のトルコ・デュズジェ地震、同年 9 月 21 日の台湾・集々地震での構造物の被害事例を紹介する。

また、国内においては、1891 年の濃尾地震以降、地表に断層が出現した多くの地震を経験しているものの、主要構造物が断層変位直上に位置していなかったことからその被害事例は少ない。ここでは、1930 年北伊豆地震による丹那トンネル水抜坑の被害、1978 年伊豆大島近海地震による伊豆急稲取トンネルの被害及び 1998 年岩手県内陸北部地震による発電所放水路トンネルの被害事例を報告する。

2.1 台湾・集々地震による被害

1999 年 9 月に、台湾中部の南投県集集付近を震源として $M_w=7.6$ の集集地震が発生した。この地震により、車籠埔断層が南北方向に 70km にわたり地表に現れた。主断層は逆断層であり、地表では上下方向に数メートル、最大変位は約 10m であった。

2.1.1 建物の被害¹⁾

この地震により、Fung-Yan City の Chung-Cheng Park の下に逆断層が現れ、いくつかの構造物は崩壊した。しかし、写真 2-1 左に示す 4 階建て RC 構造物は剛基礎で支持しているもので、地盤が 4m 隆起し、 10° 傾いたが、構造的な被害は生じていない。

一方、写真 2-1 右に示す Wu-Fung Hsiang の 5 階建て RC 構造物は柔軟な基礎で支持しているもので、地盤が 3m ほど隆起し、構造的に重大な被害を受けている。



写真 2-1 RC 構造物の被害（左：剛基礎支持，右：柔基礎支持）¹⁾

2.1.2 鉄塔基礎の被害¹⁾

この地震により、Min-Chien City にて剛基礎で支持されている高電圧鉄塔の直下においても逆断層が現れた。しかし、4m 程度地盤が隆起し 14° 傾いたものの、2.1.1 の剛基礎支持の建物と同様に、構造的な被害は目視で確認されていない（写真 2-2）。



写真 2-2 鉄塔基礎の被害¹⁾

2.1.3 ダムの被害^{1), 2), 3)}

石岡ダムは、台中県石岡郷にあり、1977 年、新第三紀鮮新世の泥岩上に建設された提高 25m、提長 357m の重力式コンクリートダムである。

ダムには右岸側から高さ 8m の洪水吐ゲート 18 門、左岸側に高さ 6m の排砂ゲート 2 門設置されており、地震後、写真 2-3 に示すように右岸側から洪水吐 2 門目と 3 門目の間で約 8m の段差が生じ、ダムが決壊している。これは、逆断層の食違い変位により左岸側が約 10m、右岸側が約 2m 隆起したことによっている。



写真 2-3 断層により崩壊した石岡ダムのゲート¹⁾

2.1.4 橋梁の被害^{1), 2), 4), 5)}

Bei-Fung 橋は、石岡ダムの西に位置する 1991 年に建設された 13 径間単純橋である。地震断層が南側の橋台と 3 基の橋脚の間を横切り、橋台及び 2 基の橋脚が 3~4m 隆起すると共に、下流側に 3~4m 移動したため、3 連の桁が落橋している。しかし、断層の影響を受けていない残りの桁は被害が生じていない（写真 2-4）。



写真 2-4 Bei-Fung 橋の崩壊¹⁾

2.2 トルコ・コジャエリ地震による被害

1999年8月に、トルコ西部のコジャエリ県イズミット付近で震源深さ17km, $M_w=7.4$ のコジャエリ地震が発生した。この地震は、トルコをほぼ東西に横切る北アナトリア断層の活動に起因し、主断層は右横ずれであり、地表の最大変位は約4mであった。

2.2.1 建物の被害¹⁾

この地震は横ずれ断層であるが、1つの断層がもう1つの断層に移ったGolcukの西側では、約4kmに渡って正断層が生じている。写真2-5左に示す4階建ての剛基礎建物は、2.3mほど地盤が沈下したが、目に見える被害は生じていない。一方、写真2-5右に示す柔な基礎のモスクは約1.5mの不等変位が生じ、部分的に構造物が崩壊している。



写真2-5 コジャエリ地震による建物の被害状況（左：剛基礎支持，右：柔基礎支持）¹⁾

2.2.2 橋梁の被害^{2), 5), 6)}

Arifiye 橋は、アナトリア高速道路の跨線橋であり橋長104mの4径間単純PC斜橋で、床板は連続していた。地震断層は、北端の橋台と隣の橋脚の間をほぼEW方向に横切り、軸線直交方向に4m程度ずれたことが確認されている。その影響により4径間の橋が落橋に至っている。（写真2-6）。



写真2-6 Arifiye 橋の被害状況²⁾

2.3 トルコ北西部デュズジェ地震による被害

2.3.1 高架橋の被害^{1),5)}

コジャエリ地震(1999年8月17日)からほぼ3ヶ月後の同年11月12日に、デュズジェ地震(Mw=7.1)が発生した。横ずれ断層の活動により、断層がDuzce-Bolu高架橋を通り、橋脚が水平方向に1m強、回転方向4.6°程度変位している。橋桁は1.2m変位したものの、設計段階から地震が頻繁に発生すると共に断層変位が生じる場所であることが知られており、免震構造が用いられたため、桁自体に大きな破壊は生じていない(写真2-7)。

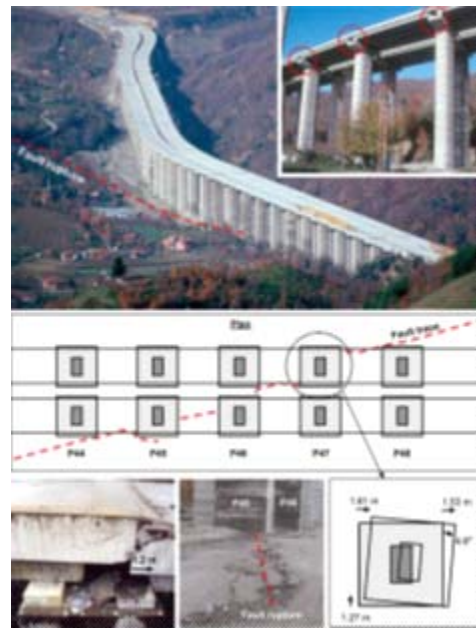


写真2-7 Duzce-Bolu 高架橋の被害¹⁾

2.4 国内の地震による被害

2.4.1 北伊豆地震による丹那トンネル水抜坑の被害²⁾

1930年11月に、丹那盆地を震源としてM=7.3の内陸地震である北伊豆地震が発生した。

丹那トンネルは当時施工中であり、全長7,804mのほぼ中央付近を南北に直交する丹那断層(左横ずれ断層)がトンネル軸上を横切り被害を受けた。トンネルは、西口と東口の両側から掘削されており、西工区は、水抜坑が断層位置に達していたことから写真2-8に示すように切羽に断層鏡肌が現れ、切羽面側が約2.1m相対的に北に変位した。西工区では、切羽より1.5kmの区間で覆工コンクリートの食い違い、亀裂などの被害が発生している。しかし、導坑が断層に達していない東工区では被害が少なかったことが報告されている。



写真2-8 水抜き坑切羽に出現した断層鏡面²⁾

2.4.2 伊豆大島近海地震による伊豆急稲取トンネルの被害²⁾

1978年1月に、伊豆大島西岸沖深さ約15kmを震源としてM=7.0の伊豆大島近海地震が発生した。この地震により、伊豆急行稲取トンネル延長906mの中央付近に位置する稲取一大峰山断層(右横ずれ断層)で、約50cmのずれが発生した。断層位置ではレールが蛇行し、側壁付近の亀裂、天端の圧

縮座屈，インバートコンクリートのせり上がり等の被害が生じている。

2.4.3 岩手県内陸北部地震による発電所放水トンネルの被害^{2),7),8)}

1998年9月に岩手県雫石の近郊でマグニチュードM=6.2の岩手県内陸北部地震が発生した。この地震により，地震断層が地表に現れた葛根田川中流に位置している葛根田第二発電所の導水路及び放水路に被害が見られた。

図2-1及び写真2-9に放水路トンネルの被害状況を示す。被害は発電所に近い約30m区間で生じている。特に側壁やインバート部が崩壊し，礫を含む土砂が流入した7m区間と，小さいものの地震で現れた地表の段差位置が良く対応することから，放水トンネルの被害は，断層の変位により生じたものと考えられる。

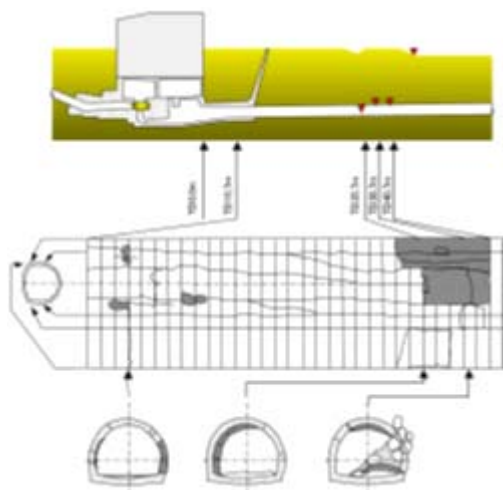


図2-1 放水トンネル内の損傷状況²⁾



写真2-9 放水路トンネル被害状況²⁾

2.5 地盤変状と構造物の損傷との関係

原子力発電所の安全に係わる施設は，格納容器が収容されている建屋から，取水トンネルに至る地表の構造物から地中構造物と多様な構造型式を有し，その基礎地盤も硬質な地盤から相対的に柔らかな地盤まで異なる特性を有している。2.1節～2.4節に示した国内外の地表に断層変位の影響が現れた地震による構造物の被害事例では，原子力発電施設と同様に，地上構造物として建物，鉄塔，橋梁および地中構造物としてトンネルなどの被害事例を示した。断層の動きに起因した断層変位を含む地盤変状が，それら構造物へ及ぼした事象をとりまとめることは，それが原子力発電施設へ及ぼす影響のモデル化を行う上で重要となる。そのような観点から，構造物の被害事例について断層のメカニズムに応じた表層近傍における地盤の剛性と構造物の基礎剛性などとの関係を以下にまとめる。

<縦ずれ断層>

地表近傍が比較的軟らかい地盤：

- ・断層の動きに起因した地盤変状に明瞭な段差は生じず，地盤の湾曲や傾きが生じる
- ・基礎が剛基礎の場合，地盤の隆起 2～4m，また地盤の傾斜 10～14° に対して，構造物に傾斜は生じるが，大きな損傷は生じていない
- ・基礎が柔構造の場合，地盤の隆起 3m 程度，また沈下 1.5m に対して，基礎の損傷に伴い，構造物にも被害が生じる．
- ・地盤の隆起 30cm 程度に対して，放水トンネルの側壁や底版に圧壊が生じた．
地表近傍が硬い地盤：
- ・地盤の食い違いにより生じた段差により，剛性の大きな構造物である重力式ダムの崩壊（段差 8m），橋台の転倒（段差 3～4m）が生じる．他，取水トンネルが切断された事例もある．

＜横ずれ断層＞

- ・周辺が硬質な岩盤のトンネルは、地盤の食い違い 50cm により側壁の圧縮座屈，底版の浮き上がり，食い違い 2.1m 程度に対して覆工コンクリートの切断などが生じた．
- ・4m 程度の地盤の横ずれに対して単純桁の床版は落下，免震支承を有する連続桁橋では橋台でのずれは生じたものの桁の落下は生じていない．

3. 構造物に及ぼす影響の評価事例

3.1 社会基盤施設における評価と対策

断層変位が構造物に与える影響のうち、原子力発電施設以外の社会基盤施設を対象とした解析評価事例について、国内外の文献調査を行った。多くの検討は、断層変位を伴う実被害事例の検証や、断層変位量と構造物損傷の関係の解明を目的に、FEM（梁要素を含む）を用いた評価が実施されている。その結果について、建物、ダム等の構造形式毎に整理して以下に報告する。

3.1.1 一般建物

Faccioli et al.¹⁾ は、1999 年のトルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震などを対象に、地表地震断層が建物基礎直下に現れた被害事例を調査している。そのうちのいくつかについては、数値解析的検討も実施しており、その概要について以下に紹介する。

(1) イタリア Mount Etna の Pernicana 断層（RC+レンガ造 1 階建て建物）の事例¹⁾

図 3-1 に示すように周囲を基礎梁で囲まれたべた基礎直下を断層が走ったが、RC+レンガ造の 1 階建ての構造物は倒壊することなく、間仕切り壁にクラックが入った程度である。ただし、剛体的な回転による変位が残っている。

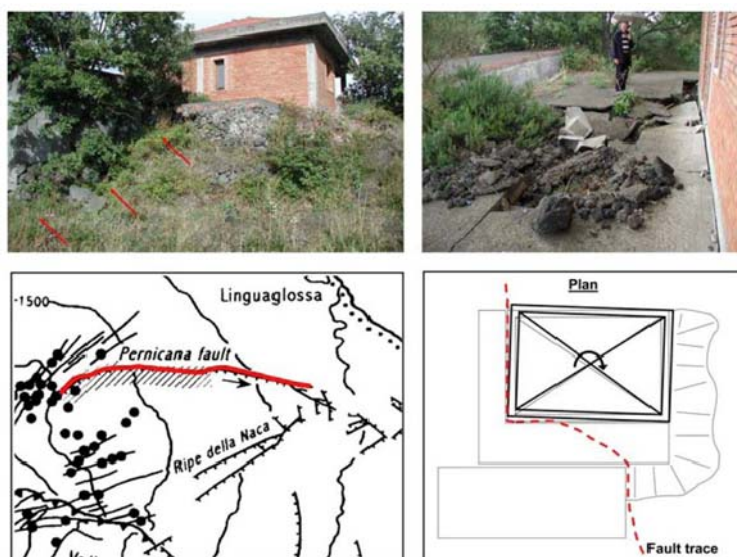


図 3-1 Mount Etna の被害事例¹⁾

この事例について、FEM による地盤－構造物の 3 次元連成解析が行われている。解析はオープンソースコード（Tochnog）[が](#)用いられ、図 3-2(a)に示すように、解析範囲は $80 \times 80 \times 25\text{m}$ 、地盤は 5120 の 6 面体要素で、1 階建ての建屋は梁要素でモデル化されている。断層面に擬似静的に変位を与えた結果の変位分布が図 3-2(b) に示されている。剛基礎の影響により、構造物を避けるように地盤変形が生じており、前図に示した地表断層のトレースと対応している。

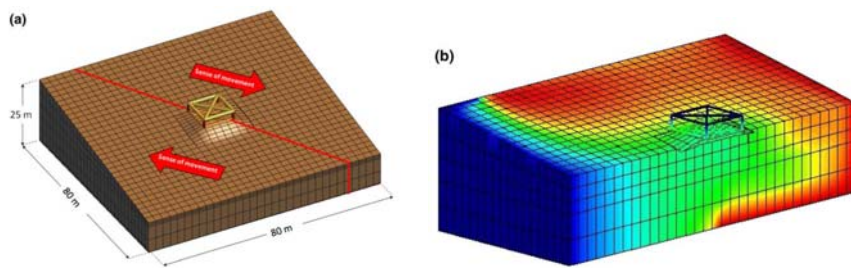


図 3-2 Mount Etna の事例の解析（右は水平変位コンター）¹⁾

(2) 1999 年台湾・集集地震（RC 造 4 階建て建物）の事例¹⁾

2.1.1 に記したように、台湾・集集地震では、剛基礎支持の 4 階建ての RC 造（図 3-3 の円で囲った建物）の被災事例がある。地震の際に、4m に及ぶ地盤隆起を経験したものの、建物全体が 10° 傾いたのみで構造的被害は生じていない。

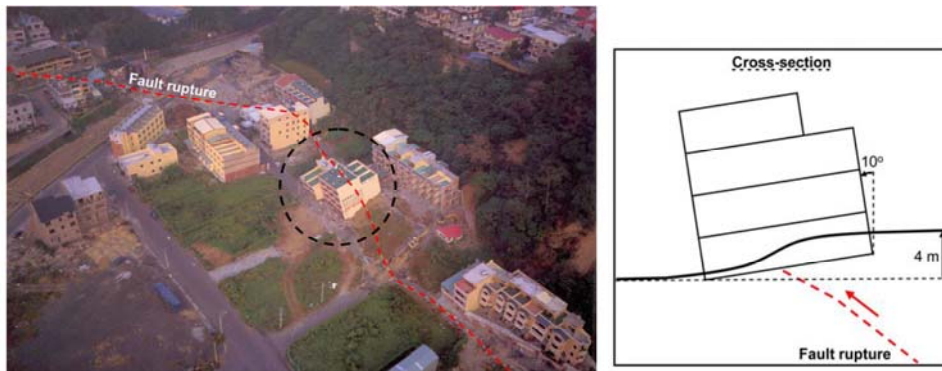


図 3-3 台湾・集集地震における RC 造 4 階建て建物の被害事例¹⁾

この事例について、ABAQUS を用いた 2 次元の FEM 弾塑性解析が行われている。図 3-4 に示すように建屋は梁要素でモデル化し、地盤と基礎の間はギャップ要素を用いている。基盤面に 4m の強制変位を与えた計算結果では、この建物は 9.2° 剛体回転をしており、実際に生じた 10° の傾斜とよく対応している。

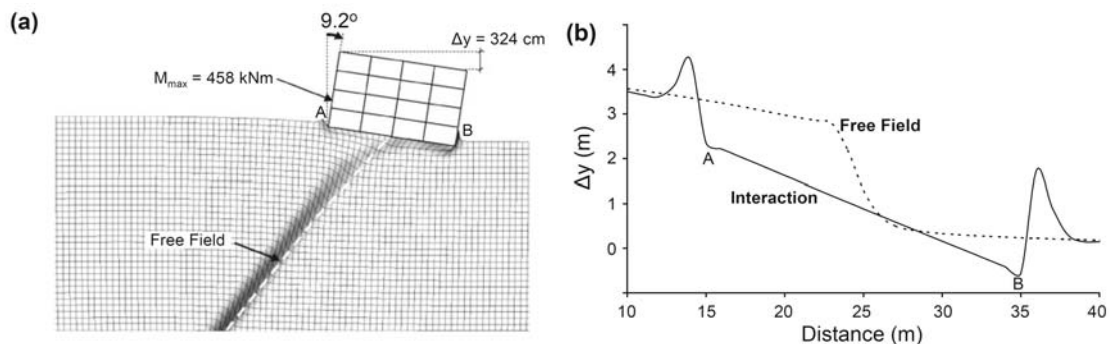


図 3-4 台湾・集集地震における RC 造 4 階建て建物の事例の解析¹⁾

(3) 1999 年トルコ・コジャエリ地震（地上 4 階，地下 1 階建て建物）の事例¹⁾

2.2.1 項のトルコ・コジャエリ地震による建物被災事例についても，ABAQUS を用いた 2 次元の FEM 解析が行われている．この地震では，地上 4 階地下 1 階建ての剛基礎建物において図 3-5 に示すように 2.3m ほど地盤が沈下したものの，目に見える被害は生じていない．

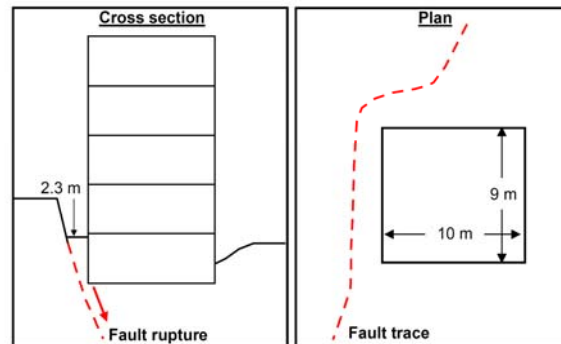


図 3-5 トルコ・コジャエリ地震における建物の被害事例¹⁾

図 3-6 に示すように，基盤に 2m の鉛直方向の強制変位を与えた場合，変形は下盤側で顕著になっており，構造物は鉛直方向に 59 cm ほど沈下する結果が得られている．ここで示した解析結果は，実際には基礎の回転がそれほど顕著でない点を除き，実現象を説明している．

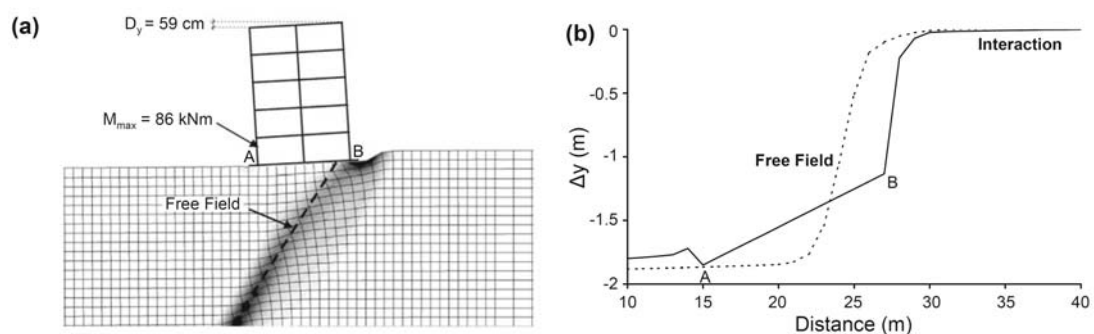


図 3-6 トルコ・コジャエリ地震における建物の事例の解析¹⁾

3.1.2 ダム

有賀^{9),10)} は，1999 年台湾・集集地震で石岡ダムが大規模な断層変位により被災した事例を踏まえ，ダム底面の直下に断層が分布するケースを想定した三次元動的解析手法を提案している（図 3-7）．解析コードは UNIVERSE を用い，ダム直下の断層は三次元接触要素でモデル化されている．断層変位の影響は，断層を挟んだ片側の下端を自由境界とし，反対側の基盤に加速度波を入力することにより考慮されている．鉛直方向に加振したケースでは，ダム堤体中央の最大相対変位は 2.4m となっている．

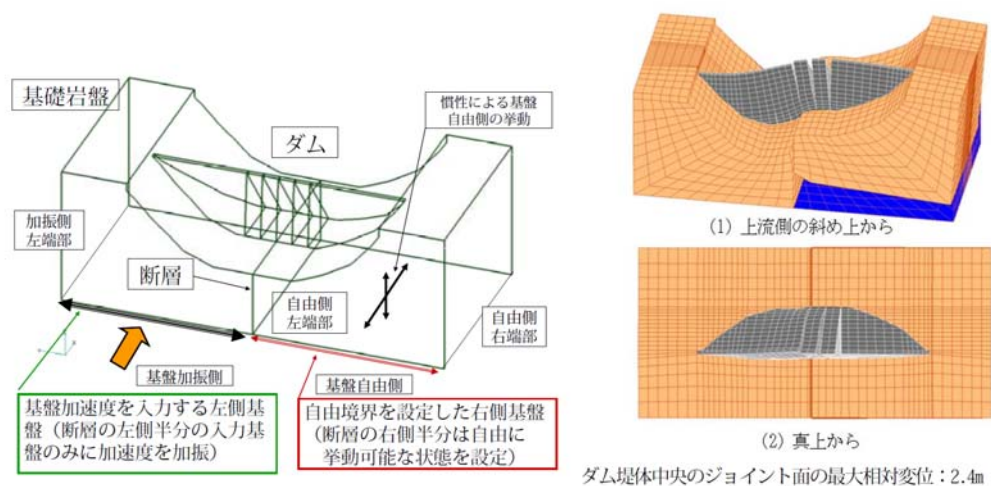


図 3-7 ダムの事例解析^{9),10)}

また、大町ら¹¹⁾は、2000 年鳥取県西部地震の際、震央近くの賀祥ダムにおいて、堤体の損傷はないものの貯水位が地震直後に 6 cm 低下した点等に着目し、ダム直下の伏在断層による地震時の地盤変位とそれによる貯水位変動の影響について解析的アプローチにより検証している。

3.1.3 地中構造物

ガスパイプラインや水道管等の管路や道路トンネルを対象に検討が行われている。

高田ら¹²⁾は、地震断層を横断する地中鋼管路をモデル化し、管路口径や断層変位量等をパラメータとした 3 次元シェル解析を行い、管路の曲げ角度と管路最大ひずみとの関係を簡易的に求めることができる設計式を提案している。

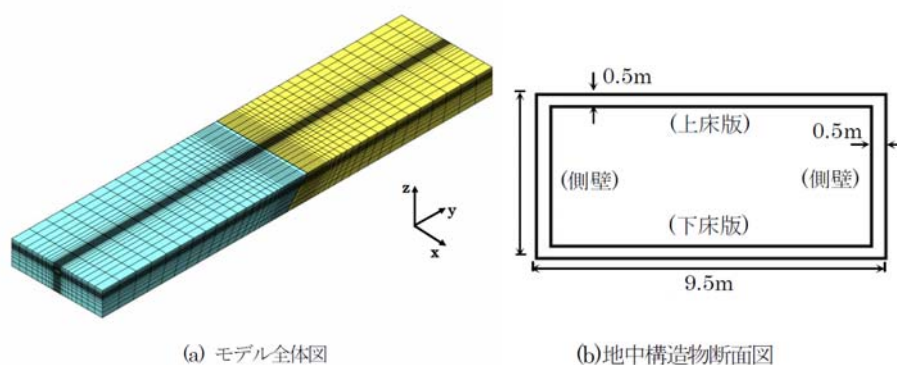


図 3-8 RC 矩形トンネルを対象とした解析¹³⁾

また、大塚ら¹³⁾は、RC 矩形トンネルの断層変位による影響と耐震継手の効果について、地盤—地中構造物—断層系の 3 次元静的 FEM 解析により検討している。図 3-8 に示すように地中構造物は線形シェル要素、地盤は表層地盤を対象に幅 120m、深さ 30m、トンネル軸方向に 1000m の領域を非

線形ソリッド要素でモデル化し、断層変位 0.5m を 200 ステップに分割して漸増変位を与える Pushover 解析を行い、断層面の傾斜角や耐震継手の設置間隔・個数をパラメータとして、構造物の断面力低減効果について考察している。断層傾斜角が 30° と 60° では 60° の方が耐震継手による断面力の低減効果が大きいこと、断層変位量を 0.5m、傾斜角を 60° とした場合には、継手の間隔が狭いほど、また個数が多いほど断面力の低減効果が大きく、結論として、断層変位対策で耐震継手を使用する際は、継手の性能に応じて設置個数や伸縮可能量を検討する必要があると述べている。

3.1.4 橋梁

橋梁の耐震設計は地震動によるものが一般的で、断層変位に対する検討はほとんど行われていないが、台湾・集集地震などの被災事例を踏まえ、断層変位を受ける場合を想定した解析的検討が実施されている。

李ら¹⁴⁾、田中ら¹⁵⁾、角本ら¹⁶⁾、大塚ら¹⁷⁾は、鋼橋やコンクリート橋を対象とした静的解析や動的解析により、断層変位が橋梁の耐震安全性に与える影響を検討している。静的解析では、図 3-9 に示すように構造物を線形および非線形の梁要素、地盤を弾性ばねでモデル化し、橋軸方向・橋軸直角方向・橋軸鉛直方向の各断層変位方向に強制変位を与え、構造物の終局変位や終局耐力により耐震性を評価している。動的解析では、台湾・集集地震で観測された加速度波形を基に作成した変位波形を入力した解析を行っており、従来の静的解析や加速度入力の動的解析では評価が危険側となる可能性があることを考察で述べている。

また、中野ら¹⁸⁾、宮崎ら¹⁹⁾は、断層変位と地震加速度の作用を同時に受ける場合について検討している。地震加速度による慣性力作用時に支持点が移動する場合の運動方程式を定式化し、コンクリート橋の非線形動的解析を実施している。その結果、比較的小規模な断層変位であっても構造物の損傷に及ぼす影響は小さくないこと、断層変位の方により損傷の程度が異なることを述べている。

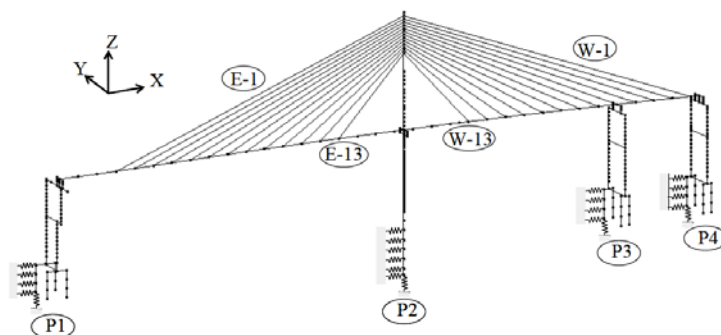


図 3-9 鋼斜張橋を対象とした解析¹⁷⁾

3.1.5 対策の事例

ここまで主に評価の事例について記してきたが、さらに対策まで実施した事例を紹介する。著名なのは、アラスカ横断パイプラインの成功事例^{20), 21)}、ニュージーランドのクライドダム²⁾、

カリフォルニア大学バークレー校メモリアルスタジアムの耐震改修事例²²⁾などである。アラスカ横断パイプラインでは、下にレールを敷き、その上に乗っているパイプラインが横滑りできるような設計がなされた。敷設から30年を経た2002年11月3日のDenali Fault地震(M7.9)において、水平方向に4.2m、鉛直方向に0.75mの変位が生じたが、その仕組みが適切に機能し、石油の流出を免れた²⁰⁾。クライドダムでは、2mの横ずれと1mの傾斜ずれを吸収できるスリットがダム本体に設けられた。また、楔形の栓が設けられ、それが貯水の水圧で押し付けられることにより、スリット部分からの水の流出を防ぐ仕組みになっている²⁾。こちらの事例はまだ断層変位を経験したわけではないが、被害の予防に向けたその工夫は高く評価されている。

3.2 FEM を用いた原子力発電所の評価

原子力発電所の設計では、詳細な調査に基づきその設置位置が決定され、活断層が重要構造物に接して存在することはないため、地震に対する検討はこれまで地震応答解析のみが実施され、断層による地盤の変位、変形（傾斜）に対する建屋構造物の解析検討はほとんど行われてこなかった。

近年、断層変位が原子力施設の安全機能に与える影響が喫緊の課題として注目をされ始めたため、原子力安全推進協会（JANSI）は、敷地内断層に関する総合的なプラント安全性評価手法の枠組みについて検討を行い、その成果を2013年9月にHPに公開した²³⁾。その中でBWRとPWRの両タイプの原子炉建屋直下に断層変位を与えた場合の試解析を行い、建屋への影響評価を実施している。

3.2.1 BWR 型原子炉の建屋の試解析

BWR 型原子炉建屋の試解析では、建屋-地盤一体モデルを用い、建屋のほぼ中央部直下に傾斜角 60° の逆断層による最大 30cm の上下変位を作用させ、鉄筋コンクリート部材の弾塑性および建屋-地盤間の剥離・すべりを考慮した三次元静的 FEM 解析を行っている。解析プログラムとして汎用有限要素コード「Abaqus Standard Ver. 6.12.3」が用いられた。

建屋モデルは、平面 $80\text{m} \times 80\text{m}$ 、基礎スラブ厚 5.5m で、積層シェル要素によりモデル化している。地盤は $250\text{m} \times 250\text{m} \times 150\text{m}$ （深さ）の範囲をソリッド要素でモデル化し（図 3-9）、地盤剛性による応答の変化を把握するためせん断波速度 $V_s=500\text{m/s}$ （軟岩）と $V_s=1500\text{m/s}$ （硬岩）の 2 ケースについて解析を実施している。

断層面のモデル化については、断層面を特定せず地盤境界部に強制変位を与えた場合、建屋の有無により形成される断層面が移動するとの解析結果があるが²⁴⁾、この試解析では、地盤が岩盤のため断層面の移動が少ないことおよび建屋直下の変位が大きめになることから、ずれが生じる断層面をあらかじめ特定して解析している（図 3-10）。

解析結果によると、縦ずれ断層変位を受けた建屋基礎スラブは、断層付近と下盤側建屋外壁付近を支持点とし、その間は浮き上がる単純梁のような状態となっている（図 3-11、3-12）。断層変位による影響が最も大きい部材は基礎スラブであり、特に断層面位置、外壁およびシェル壁位置で大きな応力が発生しており、発生応力と許容限界の関係からみると、曲げモーメントに比べ面外せん断力のほうが厳しい状況となっている。支持地盤の剛性の差による比較では、 $V_s=1500\text{m/s}$ （硬岩）

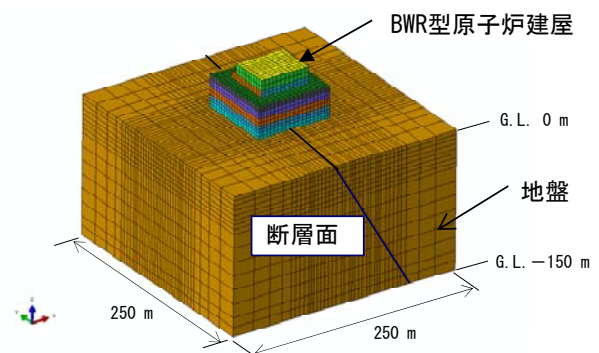


図 3-9 BWR 型原子炉建屋解析モデル

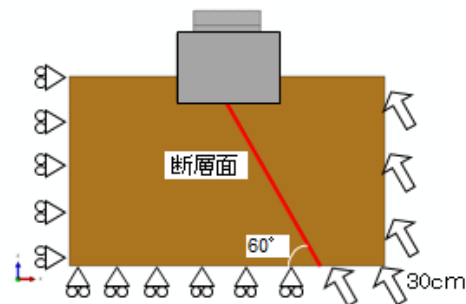


図 3-10 断層面と断層変位の与え方

のケースの方が2～3割大きな面外せん断力が発生していた（図3-13）。

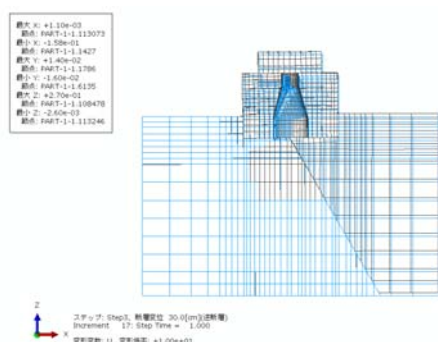


図3-11 建屋・地盤変形図 ($V_s=1500\text{m/s}$)
変形は10倍して表示

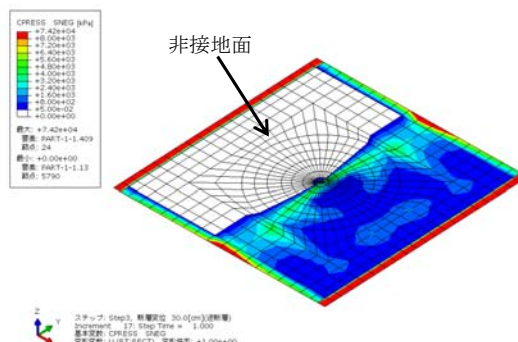
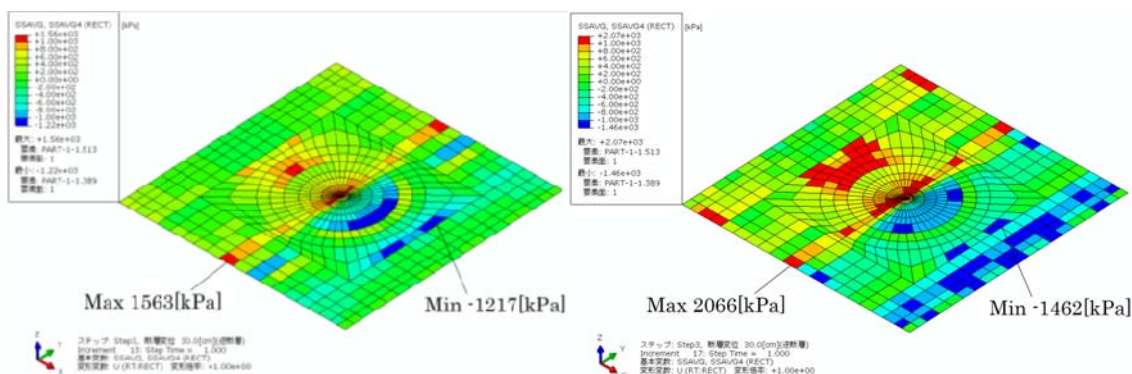


図3-12 地盤の接地圧図 ($V_s=1500\text{m/s}$)



$V_s=500\text{m/s}$ (軟岩)

$V_s=1500\text{m}$ (硬岩)

図3-13 基礎スラブ面外せん断応力図

3.2.2 PWR 型原子炉建屋の試解析

PWR 型原子炉建屋の試解析では、鉄筋コンクリート部材の弾塑性を考慮した三次元静的FEM 解析により建屋構造健全性に対する影響を検討している。解析プログラムはFINAL を使用し、解析対象とした原子炉建屋は平面 $80\text{m} \times 75\text{m}$ 、基礎スラブ厚 8m の規模で、基礎スラブをソリッド要素、原子炉周辺建屋・プレストレストコンクリート製格納容器等の上部建屋を積層シェル要素でモデル化している。支持地盤はせん断波速度 $V_s=1600\text{m/s}$ の岩盤で、BWR の試解析とは異なりウィンクラーばね要素（三方向の離散化ばね）でモデル化し、建屋直下で中心から少し離れた位置の副断層に 30cm の縦ずれ上下変位が生じる

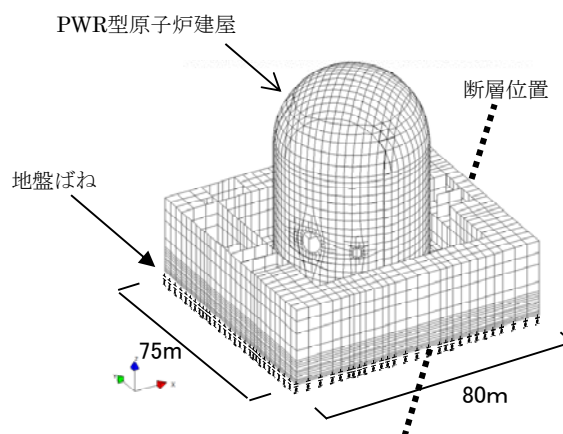


図3-14 PWR 型原子炉建屋解析モデル

ものとしている。基礎スラブと地盤の間には圧縮時のみに剛性を有するジョイント要素を設け、上下方向の変位量を地盤要素下端に与えることで、副断層に変位が生じた場合の影響を考慮している。（図 3-14）

解析結果によると、BWR と同様の変形性状を示し、基礎スラブは副断層線及びその対角上の領域を支持点とした単純梁のような状態に変形している（図 3-15）。発生した曲げモーメントは副断層線と対角上の領域の中間部で大きな値を示していたが、軸ひずみは概ね 1000μ 以下、最も厳しい部位においても 2000μ 以下であり、曲げ応力に対して基礎スラブは許容範囲内であることがわかった。面外せん断力は副断層線近傍とその対角上の支持点近傍で大きな値を示しており、局所的に許容限界を超過する部位が見られた（図 3-16）。また、上部建屋の耐震壁に生じたせん断ひずみは終局限界とされる 4000μ 以下となっていた。

なお、地盤をソリッド要素でモデル化した三次元 FEM 解析も実施し、基礎スラブの応答性状がウインクラーばねでモデル化した解析結果と大差ないことも確認している。

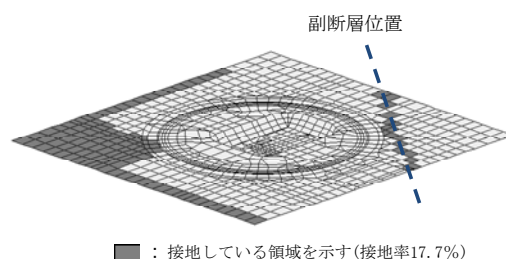


図 3-15 基礎スラブ接地図

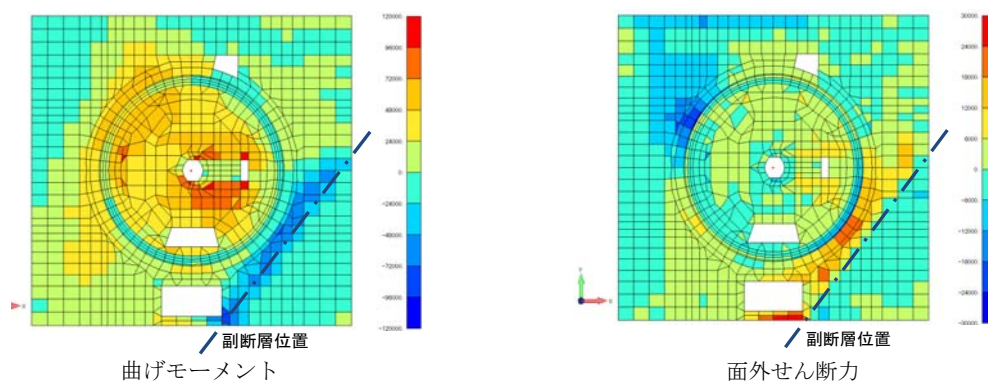


図 3-16 基礎スラブ応力図

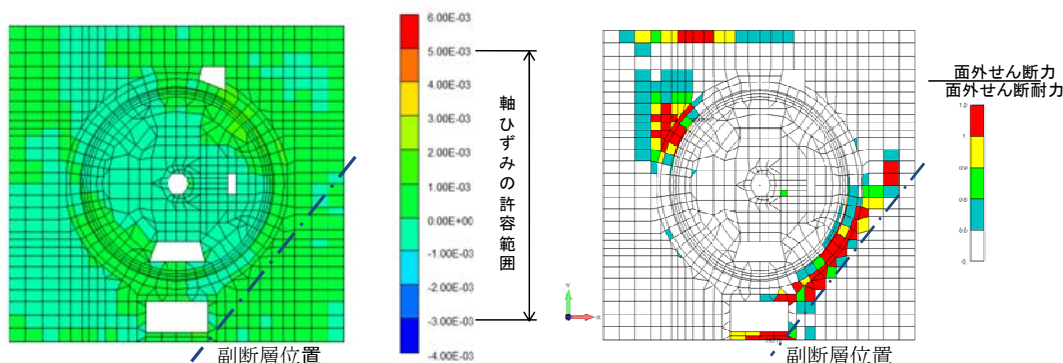


図 3-17 基礎スラブ軸ひずみ図

図 3-18 基礎スラブ面外せん断力検定図

3.2.3 今後の課題

これらの解析により、断層変位が30cm程度であれば、地盤-建屋全体解析は可能であることが確認され、原子炉建屋の基礎スラブや耐震壁等に生じる応力・変形の傾向を把握することができたが、断層変位の大きさ、方向（正断層、逆断層、横ずれ）及び位置、地盤条件ならびに建屋の違い（炉型、基礎スラブの厚さ・形状等、耐震壁の配置等）により建屋に生じる応力・変形が異なる可能性があるとの見解を示している。

今後の課題として、以下を挙げている。

この解析では建物の耐変位安全性評価には建屋-地盤全体モデルによる弾塑性解析（建屋の弾塑性、断層面のすべり、建屋と地盤間の剥離及びすべり）を用いているが、これは従来の手法を組み合わせたものであり、特別な課題は少ないと考えられるが、この手法の発展や詳細化という観点では、地震による変位と揺れによる地震力の加え方や、面外せん断力の評価等について課題が残されており、解析手法の高度化により解析精度の向上を図る必要がある。さらに、局所的なひずみのみでなく、基礎スラブ全体としての破壊の評価手法も確立する必要があると考えられる。

3.3 DEM やMPM を用いた評価

本節では、DEM およびMPM (Material Point Method) を用いた断層解析事例のうち、構造物への影響に着目したものに限定し述べる。断層変位が構造物に与える主な影響としては、地表に出現した変位が地表面上に位置する構造物に被害を及ぼす影響と、断層上に堆積した地盤内に生じたひずみまたは変位がパイプラインやトンネル等の地下構造物に被害を及ぼす影響が考えられる。そこで、ここでは、これらの影響を評価した事例を中心に紹介するものとする。

3.3.1 DEM を用いた評価

断層による地上構造物への影響評価のためには、地表面の変形および変位量の把握が重要である。DEM を用いた地表面変形の評価事例として、古いものとしては、Sarah et al. (1992)²⁵⁾のものがある。この文献では、DEM 解析により、正断層で生じる地表面の変形パターンを表現できることを示している。断層が傾斜している場合についても実際に見られる地表面の変形パターンを表現できることを確認している。

一方、近年のDEM を用いた評価事例としては、Abe et al. (2011)²⁶⁾のものがある。この文献では、粘着力が比較的大きい地盤が断層上に堆積したことを想定したモデルに対しDEM 解析を行ったものである。その際、地盤については、要素試験結果より粘着力と引張力を明確にし、これらを入力パラメータとして解析を行っている。その結果、地表面上のクラックで発生する空洞(図3-19中のA, B, C)を表現し、さらにその発生位置について概ね再現できることを示している。この再現性は、模型実験結果やフィールド調査結果からも実証されており、DEM は断層変形による地表面の変位量評価に有用であることを示している。Sarah et al. (1992)²⁵⁾の文献との大きな違いは、クラックの空洞位置まで詳細に示している点である。これは、多くの粒子数を用いた解析によるところが大きく、近年の計算機器の性能向上が解析精度向上に影響を与えていることを示すものである。

以上の文献は、DEM により断層変形により生じる地表面変位を再現できることを示している。このようにDEM 解析により地表面変位を予測できれば、地表面上に位置する地上構造物に及ぼす被害を評価できることにつながる。DEM 解析から得られた地表面変位の結果を適用した事例としては、

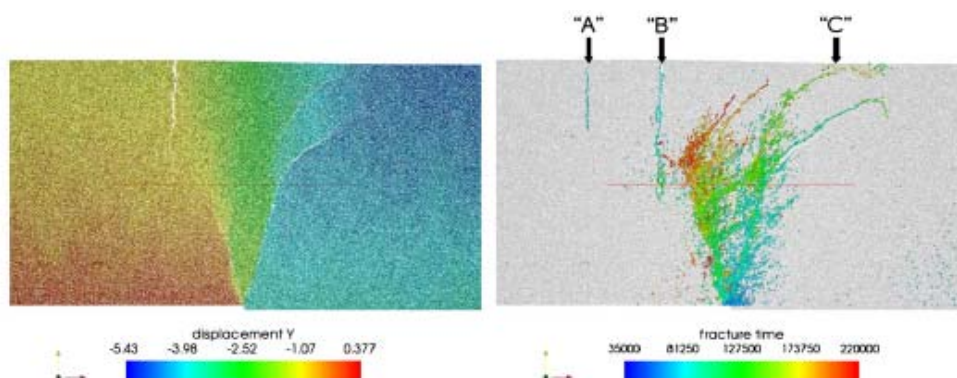


図3-19 DEM 解析による地表面上のクラックで発生する空洞の再現 (文献26)より引用)

高尾ら(2014)²⁷⁾のものがある。この文献では、高尾ら(2013)²⁸⁾が提案した、確率論的断層ハザード解析手法(PFDHA)において必要な副断層の発生確率および変位量の距離減衰式の信頼性向上を目的としている。この距離減衰式の信頼性を向上するためには、副断層の変位量と主断層の変位量の比と主断層からの距離の関係に関するデータを充実化する必要がある。そこで、模型実験に加え、DEMで断層上地盤の変形解析を行うことで、これらのデータの補完を行っている。DEMによる解析結果は、模型実験結果やフィールド調査結果と定量的に遜色ないものであり、補完データとして有効であることを示している。このデータ補完に用いたDEM解析の内容は、新井(2013)²⁹⁾にも示されており、そこでは粒径の細かさと、計算時間および解析精度の関係について議論している。

一方、DEM解析を、地中構造物の被害評価に適用した近年の事例としては、Rahman and Taniyama(2015)³⁰⁾がある。この文献では三次元DEMを用いて、パイプラインが断層により変形する現象に対し解析を行い、パイプラインに生じる力と変位の関係を調べている。このような解析結果が蓄積されれば、地中構造物の耐力設計等に活用できる可能性が考えられる。

その他、DEM解析に準じた評価事例としては、Kumar and Meguro(2001)³¹⁾がある。この文献では、連続体要素をばね要素で連結したApplied element method(AEM)を用いて、断層による地表面の変位を求めている。その際、AEMの特長を生かして、断層上の地盤内に発生する応力分布を計算し、線形解析と非線形解析の場合でその様相が異なることを示している。この手法によれば、地中での応力分布を計算できる可能性があり、断層上の地盤内の地中構造物に働く応力算定に活用できることが考えられる。

3.3.2 MPMを用いた評価

MPMを用いた断層による地盤変形に対する評価事例として、最も古いものはKonagai and Johansson(2001)³²⁾のものである。この文献では、MPMにFDMのスキームを取り入れた、Lagrangian particle finite difference method(LPFDM)を用いて、断層上の地盤の大変形解析を行っている。その際、断層上地盤中に硬い物体を挿入した解析を実施し、地盤が大変形した際の地中構造物への影響を評価できる可能性を示した。

さらに、小長井は文献33)にて、LPFDMを用いて水で飽和した地盤の断層変形解析を実施している。この解析では、断層上の地盤は完全に飽和したものと想定し、間隙水の流れの記述には変形の進行が大きい問題でも適用可能なエルガン式を用いている。解析結果として、表層地盤に食い込む基盤岩盤の角からせん断層が発達していく様子を再現できることを示している。しかしながら、上記の角の部分で非現実的な負圧が生じることを示し、間隙水圧の負圧の上限値の明確化を指摘している。さらには、大変形時での水みちの形成を考慮した間隙水の表現の必要性も指摘している。これらの点は、地盤の大変形時での間隙水の挙動について新たなブレークスルーが必要であることを示している。

Johansson and Konagai(2007)⁷⁾は、上記の断層上の地盤変形に与える間隙水の影響について、ピストンを用いた模型実験と、二相系MPMによる解析で検討している。乾燥砂と湿潤砂を用いて断層変形を模擬した模型実験を行い、その実験結果とMPMによる解析結果を比較し、MPMによる断層変

形解析の有用性を示した。なお、その際、負圧の上限として-100kPa を用い解析を行っている。結果として、乾燥砂の場合ではMPM 解析により実験結果で計測したピストンに作用した圧力を概ね再現できること示している。一方、湿潤砂の場合では、ピストンに作用する圧力を過大評価した。この原因として、負圧を過大評価していることを挙げ、三相系モデルによる解析の必要性を指摘している。一方、断層変形時に生じる断層上地盤内のひずみについて、MPM 解析の結果から、湿潤砂の場合の方が乾燥砂の場合より、ひずみが発生する領域が広くなることを指摘している。この知見は、断層による実際のトンネルの被害においても、水が多い箇所被害が集中していることと定性的に一致していることを指摘し、水が多い箇所での地中構造物の断層による被害について留意するよう指摘している。

以上の文献は、MPM 解析による断層に伴う地中構造物の被害を評価できる可能性を示している。また、MPM 解析により、断層上地盤内の間隙水の影響を考慮できる可能性を示している。

以上の文献は、断層の地中構造物への影響に着目したものであるが、MPM 解析において、断層の地上構造物への影響に着目したものとしては、Sadr et al. (2004)³⁴⁾がある。この文献では、断層上の地盤内に構築した杭基礎群が断層変形により受ける影響についてMPM 解析による検討を行っている。基礎の挙動に着目しているため、地中構造物への影響に着目した文献とも言えるが、断層変形に伴う基礎の回転により上部工の変位にも影響が出ることから、地上構造物への影響に着目したものとしてここでは紹介する。

この文献では、基礎を含んだ解析を実施する前に地盤のみで解析を実施し、断層上地盤内に生じるせん断帯は地盤のダイレイタンス特性に大きく影響を受けることを示している。この点を明確にして、地盤内に杭基礎群のモデルを配置し解析を行っている。なお、その際、杭基礎群は一体として挙動するものとして解析している。解析結果として、杭基礎群の存在の有無が地盤の変位分布

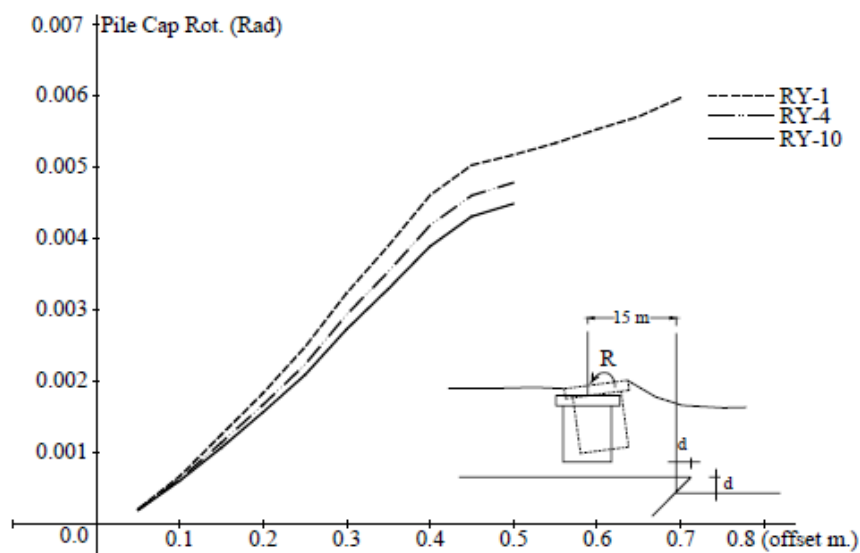


図 3-20 MPM 解析による杭基礎群の杭頭回転量の算定（文献 34）より引用，d は傾斜 45 度の断層変位の鉛直方向成分ないし水平方向成分）

および地表面変位量に影響を与えることを示し、具体的には、水平方向の地表面変位にはほとんどその影響はないが、鉛直方向の地表面変位に対しては、その変位量を小さくする効果があることを示している。さらには、杭基礎の曲げ剛性の大きさが杭頭部の回転量に及ぼす影響も検討している。

(図 3-20) これらのことは、MPM 解析により基礎構造物も含んだ地上構造物の被害について評価できる可能性を示している。

一方、この文献では、異なる物質（例えば、コンクリートと地盤）の境界の取扱に関する MPM の欠点を示している。具体的には、MPM では異なる物質は構成則の違いのみで表現されるため、それら物質間の境界における物理量の不連続が連続化されてしまい、境界間の挙動を明確に表現しにくくなるという点である。この点は、入力パラメータが構成則によるものに限定されるという利点をもたらす一方で、境界の挙動が主となる現象（例えば、基礎と地盤相互作用問題、岩盤と地盤間のせん断変形問題）等では不利となることを示している。

3.3.3 DEM と MPM を用いた評価の違い

以上、DEM と MPM を用いた断層問題への適用事例を構造物への影響という観点から示した。現状での断層変形の構造物への影響評価について限定すると、断層上地盤の大変形による地中構造物および地上構造物への影響評価という点では、DEM 解析、MPM 解析ともに、地表面での変位量の評価を主としながらも大変形解析が可能な領域に達しており、精度と進歩において大きな差はないものと考えられる。

一方、DEM と MPM の解析手法上の違いについて改めて検証すると、前者では、ばね等で粒子を連結するのに対し、後者では連続体を模擬した粒子群でモデル化するという大きな違いがある。このようなモデル化の違いは異なる物質間での境界の表現に影響する。DEM では粒子間の挙動をばねモデル特性等で任意に調整できるため境界を明確に表現しやすい。しかし、MPM では、境界を挟む物質間の材料特性を構成則モデルの違いのみで表現するため、Sadr et al. (2004)³⁴に指摘されるように境界がぼやかされる。一方、DEM では、ばねモデル等の入力パラメータの設定において、解析の安定化のためにキャリブレーションを伴うが、MPM ではそのようなキャリブレーションが基本的に不要となる。

以上のことは、地盤と構造物の相互作用を伴う地盤の大変形問題においては、地盤と構造物間の境界の取扱について熟慮しなければならないことを示している。実際に断層上地盤と構造物の相互作用を取り扱う解析において上記の差異を考慮する場合には、例えば、地盤全体のモデル化は MPM で行い、構造物との相互作用が主となる箇所では DEM を用いる等、各手法の良い点悪い点を考慮した解析が必要であることも考えられる。今後、このようなハイブリッド法の検討も含め、DEM および MPM の特長を生かした、断層変形の構造物への影響評価に向けた検討が必要であると考えられる。

3.4 梁ばねモデルを用いた地中構造物の損傷確率評価

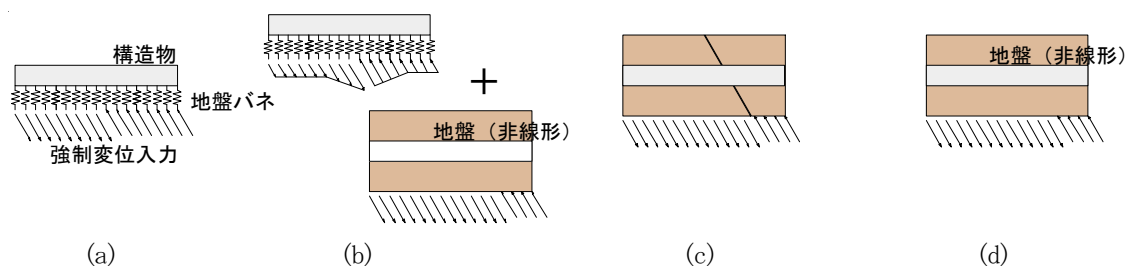


図 3-21 断層変位影響評価のための地中構造物とその周辺地盤のモデリング

地中構造物に対する断層変位の影響を評価するとき、図 3-21 のように、構造物とその周辺地盤に関する幾つかのモデリングを考えることができる。

- (a) 地盤ばねを介して想定変位を構造物に直接入力する。
- (b) 地盤単体に想定変位を入力する非線形解析を行い、そこで得た構造物位置の変位を、地盤ばねを介して入力する。
- (c) 地盤をソリッド要素でモデル化するが、あらかじめ断層位置を縁切りしておく。
- (d) 地盤－構造物連成系の非線形モデルに想定変位を入力する。

ただし、(b)や(d)では地盤の非線形モデルが必須となる。また、図は二次元で描いているが、基本的に断層変位影響は三次元問題である。

定められた条件下において高い精度を求めるという点では(d)が理想的だが、断層変位影響の問題は、解析の入力となる断層変位の発生位置や方向等が十分な信頼性をもって特定されない所に難しさがある。よって、(a)のタイプのモデルを用いてパラメータスタディを行い、少数ケースの(b)～(d)の解析結果と突き合わせながら解を探索するというアプローチが現実的と考えられる。そこで、本節では、鉄筋コンクリート製地中構造物を対象として、自由度の小さい(a)のモデルによる複数条件下での解析の例を示す。

3.4.1 例題の設定

厚さ 0.6m の面部材で構成された 1 層 2 連のボックスカルバートを想定して、図 3-22 のように寸法を設定した。長手方向は、15m 間隔で縁が切られているものとし、3 ブロック分を対象範囲とした。ただし、影響評価の対象としては中央 1 ブロックに着目する。躯体部分の長手方向の鉄筋として、降伏強度 400N/mm^2 の D16 異形鉄筋が 300mm 間隔で各面部材の表裏 2 層に配筋されているものとした。コンクリートの圧縮強度は 30N/mm^2 、引張強度は 2.2N/mm^2 、ヤング係数は 28000N/mm^2 とした。ブロック境界の空きは 10mm とした。なお、以降の記述では、図 3-22 のように XYZ 方向を定める。

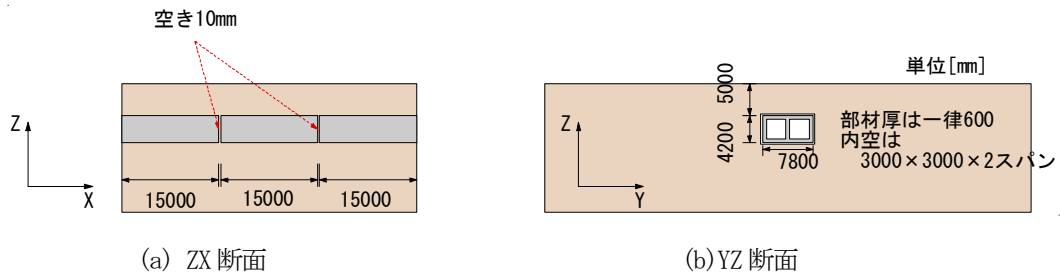


図 3-22 検討対象

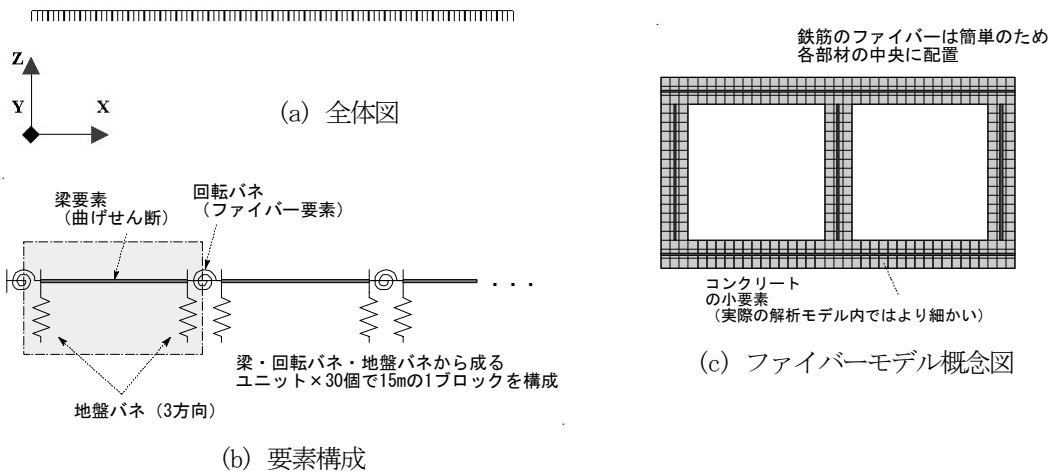


図 3-23 解析モデル

3.4.2 解析モデル

解析モデルは、図 3-23 (a), (b) に示すように、非線形曲げを表現するための回転ばねと、線形弾性梁要素とを交互に配置し、これに地盤ばね（図中の楕状の線群）を付けて構成した。回転ばねは、図 3-23 (c) に概念的に示すように、 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ の小領域で分割するファイバーモデル^{35), 36)}を適用して非線形曲げ挙動を考慮した（ファイバーモデルは軸方向挙動が連成するため、正確には単純な回転ばねではないが、本稿では便宜的に回転ばねと記述する）。2 箇所あるブロック境界の回転ばねと、それ以外の躯体中の回転ばねには別個の特性を与えた。ブロック境界は、初期状態で一定の離間距離（10mm）があると想定し、構成ファイバーは、その離間距離が詰められたときにコンクリートの一軸圧縮特性をもって抵抗し始めるようにした。一方、躯体中の回転ばねでは、コンクリートを表すファイバーと、長手方向に配された鉄筋を表すファイバーを設け、それぞれ一軸の非線形構成則を与えた。躯体の非線形曲げ特性については、梁要素の中で考慮する方法もあるが、後述の特性長さの問題を扱う際に逐一モデル変更（要素長を変える）が必要になってしまうので、検討の便宜を考えて回転ばねとして切り分けた。梁要素では、せん断変形を考慮し、Y 方向（水平かつ管路軸直交方向）のせん断に対しては頂版と底版、Z 方向（鉛直方向）のせん断に対しては 3 つの鉛直壁の断面積を有効とした。

回転ばねの各ファイバーで規定しているのは応力-ひずみ関係なので、曲率を回転角に、ひずみ

を変位に変換する長さ次元のパラメータが必要になる。線部材で構成された鉄筋コンクリート構造物の解析では、これを等価塑性ヒンジ長と称し、部材厚の0.5～1.5倍程度がよく用いられているが、目下の問題で適当な長さは不明であり、これを明らかにするには、実験的な検討が必要と考える。ここでは、暫定的に、躯体中の回転ばねで0.1m（後述の限界値との対応を考慮して鉄筋径の8倍を目安に設定）、ブロック境界の回転ばねで0.3m（小さくすると解析の不安定性が増すため躯体中よりやや大きめに設定）とした。

梁とばねを用いたモデルの妥当性を確認するため、1ブロック分の三次元弾性ソリッドモデル（図3-24(a)）を別途作成した。双方のモデルについて、一端を固定して片持ち梁の状態にし、他端に鉛直下向きの変位を与える静的解析を行った（図3-24(b)）。得られた変位－荷重関係が図3-24(c)であり、初期段階でおおよそ同等の剛性になっていることが確認できる。梁ばねモデルの軌道が変位4mmを超えたところで急落しているのは、固定端近傍に曲げひび割れが発生したことを表している。ボックスカルバートは、一般に長手方向の鉄筋比が小さいため、構造物全体の曲げに対しては、この例が示すように、ひび割れ直後から耐力低下する可能性がある。

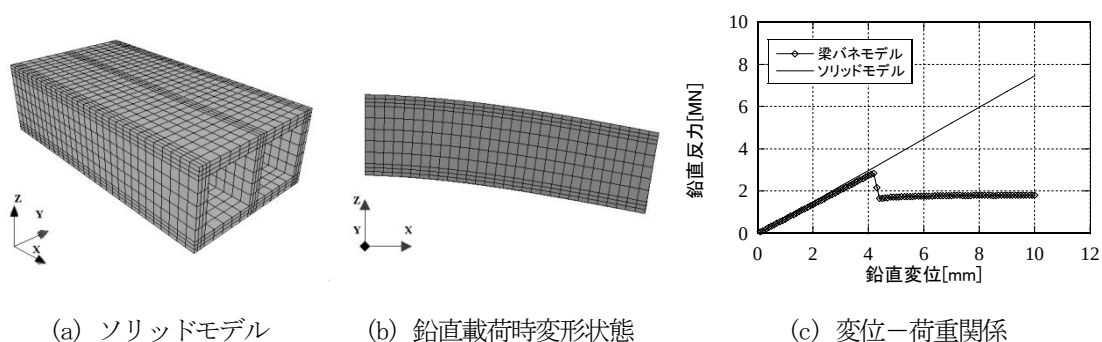


図 3-24 梁ばねモデルとソリッドモデルの基本特性比較

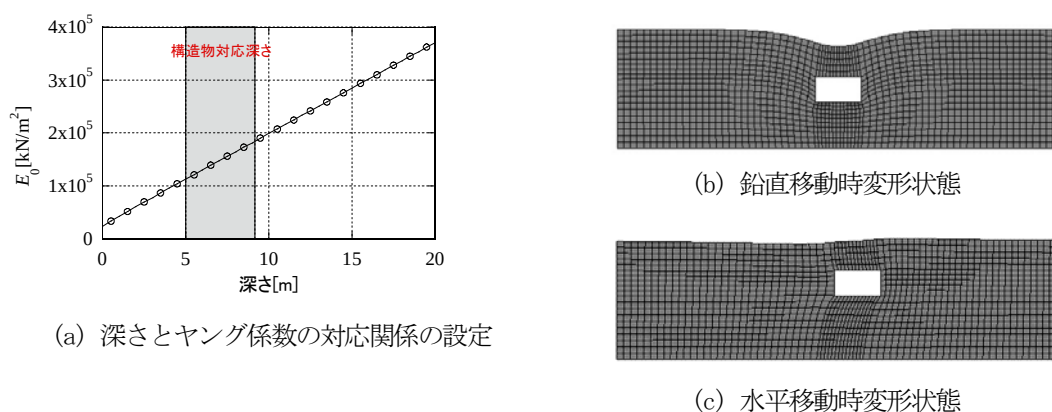


図 3-25 地盤ばね定数設定のための二次元切欠き地盤を用いた予備検討

3方向の地盤ばね定数は、以下の手続きに基づいて定めた。密度 $1.8[t/m^3]$ 、粘着力 $c=10[kN/m^2]$ 、内部摩擦角 $\phi=35[deg]$ 、静止土圧係数 $K_0=0.5$ という条件下で、深さ毎にせん断強度を設定し、それを参照せん断ひずみ $\gamma_r=0.001$ で除してせん断剛性とした。この深さに応じたせん断剛性と、ポアソン比 $\nu=0.4$ の下で、二次元の静的弾性解析を行い、図 3-25 の水平移動（梁ばねモデルの Y 方向移動）に対して $285072[kN/m/m]$ 、鉛直移動（Z 方向移動）に対して $415326[kN/m/m]$ という値を得た。X 方向移動に対するばね定数は、両者の平均の $1/3$ とした。ここでのばね定数の設定方法は暫定的であるし、そもそも対角項のみのマトリクスで相互作用を表現する（Winkler 型）地盤ばねは、本来は構造物の変形モードの仮定が必要であり、こうした断層変位影響の解析への適用性は確認されていない。この側面においても、今後、検証実験が必要である。

3.4.3 その他の解析条件

構造物の両端（左ブロックの左端、右ブロックの右端）は自由端とした。ブロック境界は、管路軸に直交する方向のずれに抵抗しないものとした。管路軸周りのねじりは拘束して発生しないようにした。地盤ばねの端部に $1mm$ / ステップの増分で、 $500mm$ まで変位を入力した。

本解析は、ブロック境界が接触したりしなかったりすること、また、先の図 3-24 で示したように、曲げひび割れ後に曲げ耐力が低下することに起因して、収束性は良くなかった。そこで、解析を安定させるために、以下の措置を取った。

- ・剛性マトリクス作成段階で、コンクリートファイバーに対し、ヤング係数の 1% を下限として設定
- ・剛性マトリクスの 1% を係数マトリクスとする粘性減衰を付与し、時間刻み 1 秒で動的に解析（ただし、このとき質量は与えない[慣性力は発生させない]

3.4.4 不確定因子

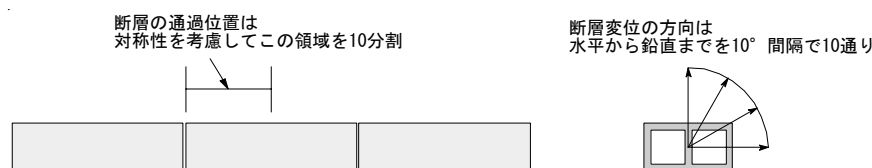


図 3-26 解析ケース群の設定

以下の 2 項目を不確定因子とした。

- ・断層の通過位置
- ・断層変位の方向

断層の通過位置は、図 3-26 に示す領域を等分した 10 通りとした。断層変位の方向は、断層面が管路軸方向に直交しているという仮定を設けた上で、水平方向（ 0° ）から鉛直方向（ 90° ）までの区間を 9 等分して 10 通りとした。結局、今回の解析ケースは、都合 10^2 通りとなっている。

3.4.5 評価項目

以下の7項目を評価する.

- (A) ブロック境界の回転ばね（ファイバー要素）の曲げ引張縁の開き
- (B) ブロック境界の回転ばね（ファイバー要素）において圧縮ひずみが ε_{c0} を超過する領域面積の全断面積に対する比（ ε_{c0} ：コンクリートが圧縮強度を発現するときの軸方向の圧縮ひずみ）
- (C) ブロック境界の管路軸直交方向のずれ
- (D) 躯体中の回転ばね（ファイバー要素）の曲げ引張縁の開き
- (E) 躯体中の回転ばね（ファイバー要素）において圧縮ひずみが ε_{c0} を超過する領域面積の全断面積に対する比
- (F) 梁要素のY方向せん断応力
- (G) 梁要素のZ方向せん断応力

今回のモデルでは、横断面のせん断変形モード、部材の面外曲げによる3ヒンジの破壊モード等は評価できないことに注意する.

限界値の設定について述べる. 以下は、あくまで本稿の評価用に設定したものであって、基準書等で定められているものではない. 鉄筋は、直径の8倍を検長とする単体引張試験において、20%程度の伸びで破断するので、(A) (D) 曲げ引張縁の開きに対して、 $8 \times D16$ 異形鉄筋の直径 $15.9\text{mm} \times 0.2 = 25\text{mm}$ を限界値とした. (B) (E) 圧縮破壊面積比に対しては10%, (C) 境界のずれに対しては100mmを限界値とした. (F) (G) せん断応力に対しては 2N/mm^2 とした. コンクリートのせん断強度は、純せん断であればこの程度の値が期待できるが、曲げを伴って特にせん断スパン比が大きい場合はこれより大幅に低下する^{37), 38)}. 目下の問題では、安全側の値にすると、せん断スパン比が大きくないにもかかわらず、不合理に早い段階で限界に達してしまうので上記のようにした. 主筋（ボックスカルバートの横断面と部材面の交線方向の鉄筋）が構造物全体のせん断に対してはせん断補強の役割を担う可能性もあるので、せん断の限界値については、今後何らかの工夫が必要である.

3.4.6 結果

変形の推移の例として、断層通過位置が中央ブロックの中央、断層変位の方向が鉛直のケースの変形図を図3-27に示す. 図は、中央ブロック近傍を拡大している. 最初は、中央ブロック全体が剛体的に傾斜しているが、途中で断層通過位置寄りに曲げを受けて折れる箇所が発生し、以降はそちらに回転が集中している様子がうかがわれる.

図3-28は、前項に記した7つの項目について、入力変位と、上記限界値の超過ケース数/全ケース数（ $\approx 10^2$ ）比を整理した結果である. 評価項目

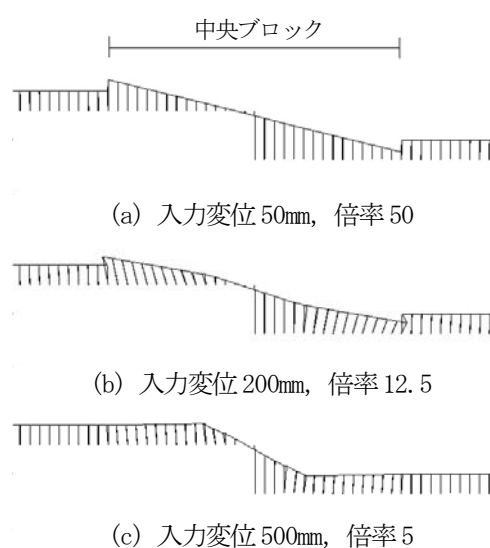


図3-27 変形の推移の例

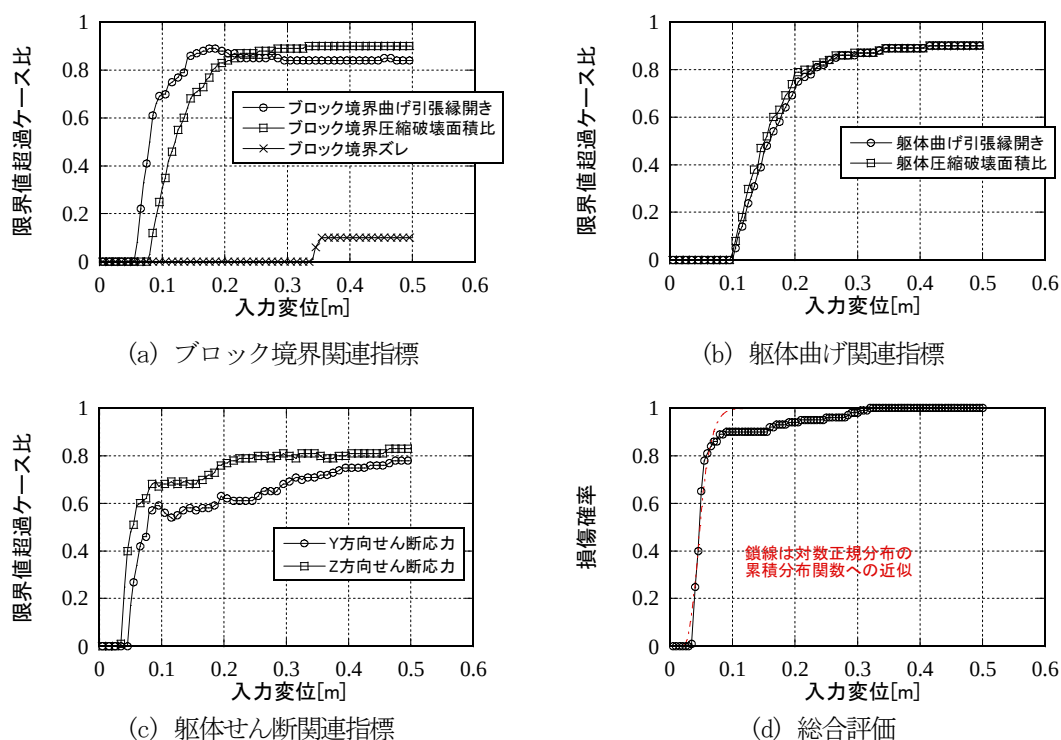


図 3-28 評価結果

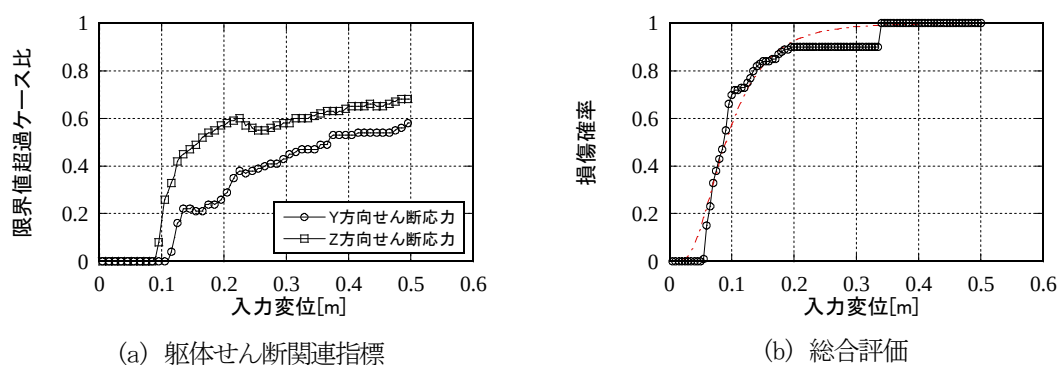


図 3-29 評価結果（地盤ばね定数を 1/3 にした場合）

毎に見た場合、別項目の指標が卓越して着目項目の指標が抑制されるケースがあるので、必ずしも 1 には収束しない。例えば、同図(a)には、境界でのずれが卓越して、回転が増大しないケースが含まれているため（特に、断層の通過位置がブロック境界に近いケースにおいてそういったケースが認められた）、2つの指標が1より手前の0.8～0.9の辺りに収束している。また、鉛直方向に変位を与えたケースでは、水平方向のせん断応力が発生しないので、同図(c)の軌道も1より小さい値に収束する傾向がある。

7つの項目のいずれかが限界値を超えた場合をもって損傷したと定義し、各ケースの重みを1とすると、同図(d)のような損傷確率曲線（フラジリティー）を描くことができる。50mmに満たない変位レベルから立ち上がりが認められるが、これに大きく影響しているのは同図(c)のせん断応力で

ある。すなわち、断層変位入力位置の近傍でのせん断破壊が懸念されるという結果である。ただし、今回の解析では地盤ばねに非線形性を設定しておらず、これを考慮した場合には、断層変位入力位置近傍でのせん断応力が緩和される可能性がある。参考として、3方向の地盤ばね定数を一律1/3に低減して同様の解析を行うと、図3-28(c), (d)に対応する結果として図3-29(a), (b)が得られる。この場合、せん断応力の評価曲線の立ち上がりは右にシフトしている。

3.4.7 今後の課題

鉄筋コンクリート製地中構造物を対象に、断層変位の不確定性を考慮した損傷確率評価の事例を示した。ここで用いた方法は、1ケース当たりの計算時間が短いため、3.4.4項で言及した以外にもより多くの不確定因子を考慮する、あるいは3ブロックに限らず発電所構内のより広範囲のブロックを対象にする、といった方面に計算コストを配分することができる。反面、地盤ばねという理論的に限界のある要素を用いているので、精度は相応であることを念頭に置かなければならない。躯体のせん断破壊、横断面のせん断変形等のモードについては、材料非線形構成則を備えたソリッド要素^{39), 40)}で構造物をモデリングすることによって検討可能と考えられる(計算時間は増大するが、地盤連成系モデルの繰返し計算よりはまた現実的である)。ブロック境界や低鉄筋比断面における特性長さについては、実験的な裏付けが必要と考える。また、局所的に材料の限界値に達していても、要求性能への寄与が小さい場合が想定されるので、要求性能と照らし合わせたより適切な限界値の整備が望まれる。この点は、3.2節末で述べられている「全体としての破壊の評価手法」が必要との見解と同様である。

4. 原子力発電施設に及ぼす影響の考え方および最近の研究動向

4.1 基準類における断層変位影響の扱い

断層の種類については、本報告第II編4.1節に記されている。再度簡潔に記すと、主断層は地震を発生させた断層で、分岐断層を含む。副断層は、主断層から離れた場所で、副次的または従属的に生じた断層を指す。原子力施設は、主断層、分岐断層の可能性のあるところには設置していないと判断される。副断層の原子力施設への影響が課題の対象であり、海外と日本とで扱いが異なっている。

IAEAのサイト評価における地震ハザード評価に係る基準では、対象サイトを新設と既設に分けた上で、後者については次のような内容が記されている⁴¹⁾。断層変位に関して再評価が必要となるような情報が見出される場合も起こり得る。地表若しくは近傍における様々な断層変位に関する年超過確率の推定のために、活用し得る全データを用いて、地震動ハザード評価と類似した、若しくは同様の確率論的手法が用いられるべきである。

一方、我が国の原子力規制委員会の新規規制基準（地震・津波）では、新設、既設を分けずに次のように記述されている⁴²⁾。重要な安全機能を有する施設は、将来活動する可能性のある断層等の露頭が無いことを確認した地盤に設置すること。将来活動する可能性のある断層等とは、震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持基盤を切る地すべり面が含まれる。

4.2 最近の研究動向

国内外では、本委員会の他にも断層変位の構造物脆弱性への影響評価に係る次のような各種活動が行われている。

- ・日本原子力学会地震PRA実施基準改定^{43)~47)}
- ・日本原子力学会断層の活動性と工学的なリスク評価調査専門委員会^{48), 49)}
- ・土木学会原子力土木委員会地盤安定性評価小委員会⁵⁰⁾
- ・電力中央研究所の活動⁵¹⁾
- ・原子力安全推進協会の活動⁵²⁾
- ・資源エネルギー庁公募研究⁵³⁾
- ・国際原子力機関(IAEA)国際耐震安全センター特別拠出金事業⁵⁴⁾

本節では、上記活動の現状等について整理する。

4.2.1 日本原子力学会地震PRA実施基準⁴³⁾

日本原子力学会では、地震PRA実施基準を2007年9月に発行した。同基準は、近く改定版が発行される予定である。改定基準には、図4-1に示すように断層変位ハザード評価、同ハザードに対する脆弱性評価、事故シーケンス評価が追加された^{44), 45)}。

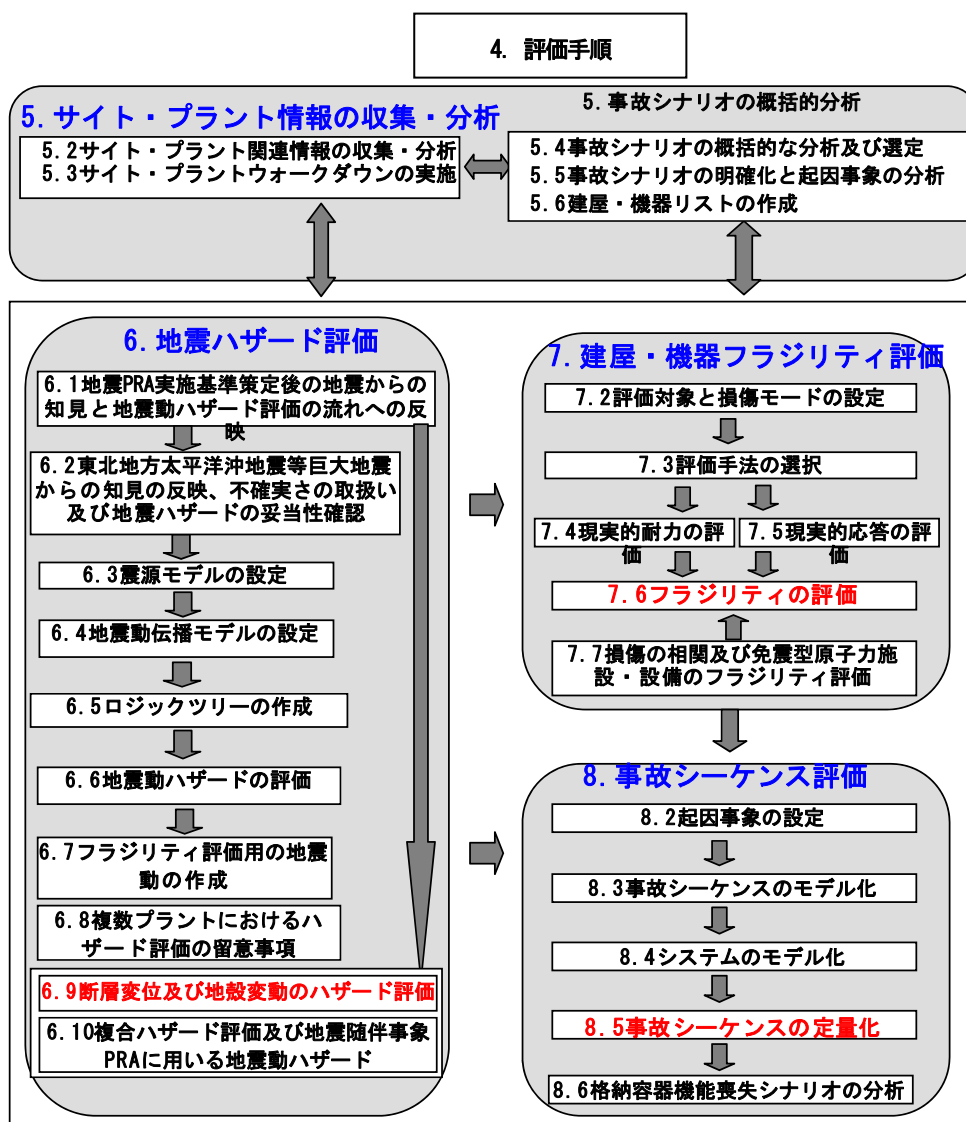


図 4-1 日本原子力学会における改訂地震 PRA の流れ

4.2.2 日本原子力学会の断層の活動性と工学的なリスク評価調査専門委員会の活動⁴⁸⁾

(1) 設立の趣旨

日本原子力学会では、2014 年 10 月に以下の項目を推進することを目的に、多くの学協会に所属する方々の協力を得て、調査専門委員会が立ち上げられた。

- ① 地震、地盤、土木、耐震などの学術分野の専門家はもちろんのこと、アカデミア、原子力工学系の専門家や規制当局、事業者等のステークホルダーを含めた実り多い公開の討論
- ② 現在まで得られた国内外の知見を元に、現時点における最も科学的かつ合理的な判断を選択するための調査検討
- ③ 国際的に蓄積されたデータベースを基に、例えば断層の変位が原子力施設に与える影響と

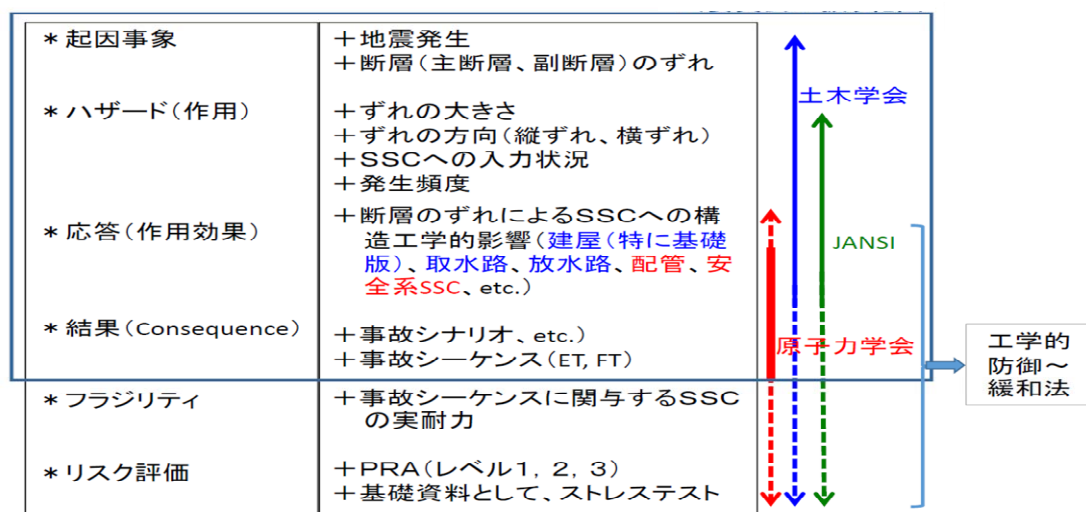


図 4-2 委員会の活動内容

リスク評価、過酷事故防止対策などの知見を集め、標準や規格に反映していくための継続的な議論とそのための努力

(2) 活動内容 (図 4-2)

- ① 断層の変位に伴う原子力施設への影響評価について、科学的・工学的な評価手法の確立とリスク低減に関する基準の策定が望まれる。
- ② 万一、活断層が動いたとしても、副断層の変位と原子炉建屋や屋外土木構造物(取水路・海水管ダクト・トレンチ等)、格納容器、重要な配管・機器・計測制御系などに与える影響を評価する。
- ③ そのトータルリスクについての工学的評価や、過酷事故に発展しないようなアクシデントマネージメントの策定などをあらかじめ検討しておくことが必要である。

原子力発電所のトータルなリスク低減と安全性向上のためには、重要度分類に基づく、科学的合理的な対策が必要である。そこで、断層の活動性と工学的なリスク評価手法開発を多くの学協会に所属する専門家の協力を得て行い、研究成果を国際的に共有する調査研究活動を実施する。

4.2.3 原子力安全推進協会の活動

原子力安全推進協会では、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・検討を行っている⁵²⁾。

(1) 敷地内断層評価手法検討委員会

- ・平成 25 年 3 月～8 月 計 6 回開催

(2) 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

- ・JANSI HP で公開

(3) 敷地内断層評価手法の検討フロー

・図 4-3 に示す。

(4) 評価手法の検討項目

- ① 断層の調査と区分
- ② 断層変位の評価方法
- ③ 荷重の組み合わせと許容限界
- ④ 建物・構造物の耐変位安全性評価
- ⑤ 機器・配管系の耐変位安全性評価

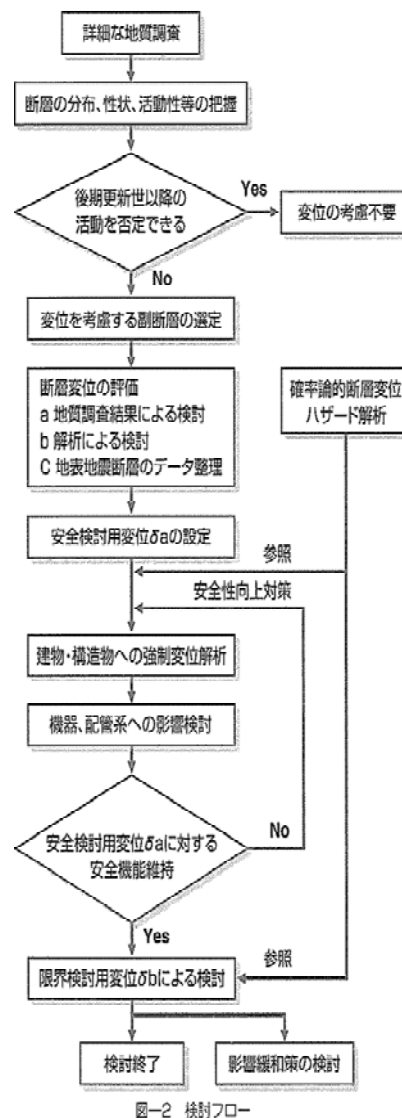


図 4-3 敷地内断層評価手法の検討フロー

4.2.4 資源エネルギー庁公募研究における活動

資源エネルギー庁公募研究では、公募研究の1つの項目として、断層変位と構造物 fragility への影響評価がある（図 4-4）⁵³⁾。

同公募研究の研究計画は、2段階からなり、各段階では構造物への影響評価と確率論的断層変位ハザードの高度化の検討を行う⁵³⁾。この順番としたのは、後者の研究は前者に比して比較的進んでおり、前者を積極的に推進する必要からである。同計画では、断層変位に対する対策工について調査・分析し、検討も行う。

(1) 第1段階

1) 構造物への影響評価

対象構造物は、海水管ダクト等屋外土木構造物、建屋、建屋内設備とする。対象地盤は、硬岩、中硬岩、軟岩とする。断層変位を、例えば 0.01, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0m・・・と強制的に与える解析

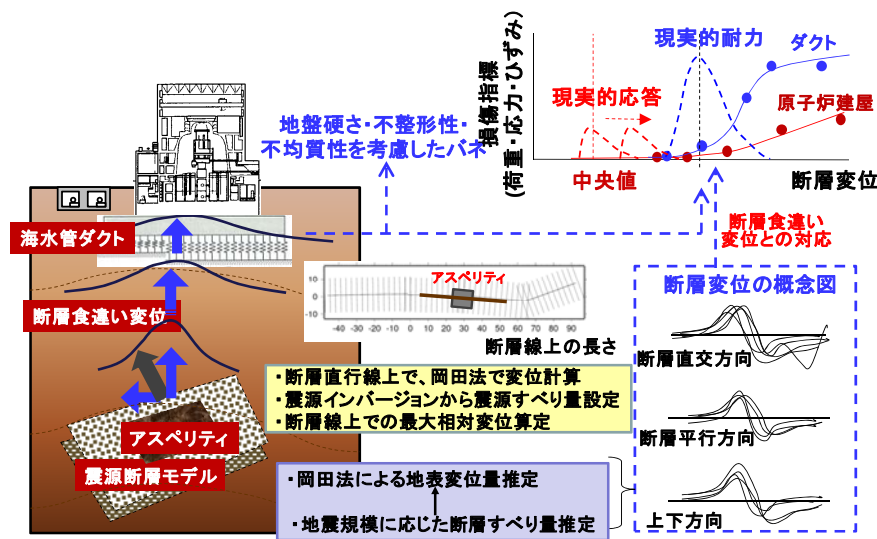


図 4-4 資源エネルギー庁公募研究における断層変位と構造物 fragility への影響評価の概要

を通じて、変位応答及び機能喪失の判定指標に対する影響の大きな重要要因を構造物毎に検討する。また、構造物に影響が現われる断層変位の範囲を概略把握する。

2) 確率論的断層変位ハザードの高度化の検討

確率論的断層変位ハザードの高度化の検討では、既存の評価手法を分析し、重要な不確実さ要因を検討・同定する。

(2) 第 2 段階

1) 構造物への影響評価

第 1 段階で求めた概略的な影響範囲を対象とし、変位応答・機能喪失の重要要因の不確実さを考慮して、fragility を求める。

2) 確率論的断層変位ハザードの高度化の検討

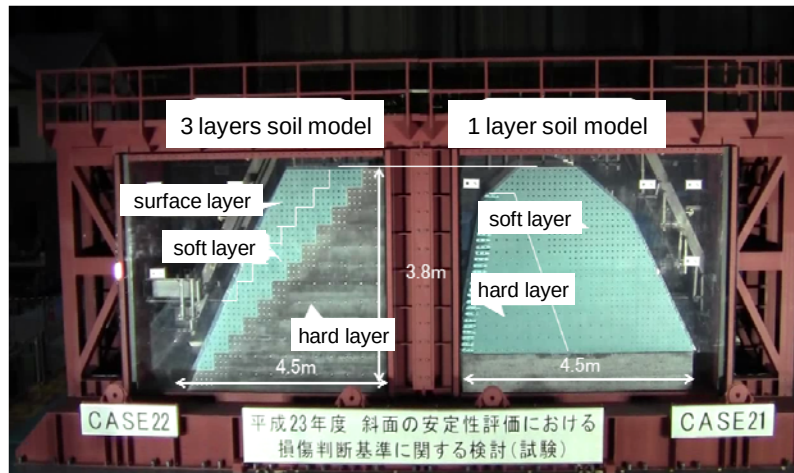
第 1 段階で求めた概略的な影響範囲を対象とし、重要な不確実さ要因の高度化を検討する。

4.2.5 国際原子力機関 (IAEA) 国際耐震安全センター特別拠出金事業における活動

国外では、国際原子力機関 (IAEA: International Atomic Energy Agency) 国際耐震安全センター (ISSC: International Seismic Safety Center) 特別拠出金事業 (EBP: Extra Budget Programme) における断層変位の構造物への影響評価が挙げられる^{53), 54)}。

ISSC では、2014 年 1 月 30 日に、会議の一環として、特別セッション 1 “Evaluation of structural influence induced by slope collapse- Application to fault displacement analytical consideration -” が開催された (図 4-5)。

Large Scale Shaking Table Test Equipment (50m height real slope modeled by centrifuge test)



2 Slopes Model: 4.5m wide, 3.8m height, 2.5m depth

Verification of Computing Analytical Methods in Comparison with Experimental Data

The computer simulation codes based on Discrete Element Method and Particle Method were verified in comparison with experimental data, and the codes will be applied for analytical considerations of slope failure.

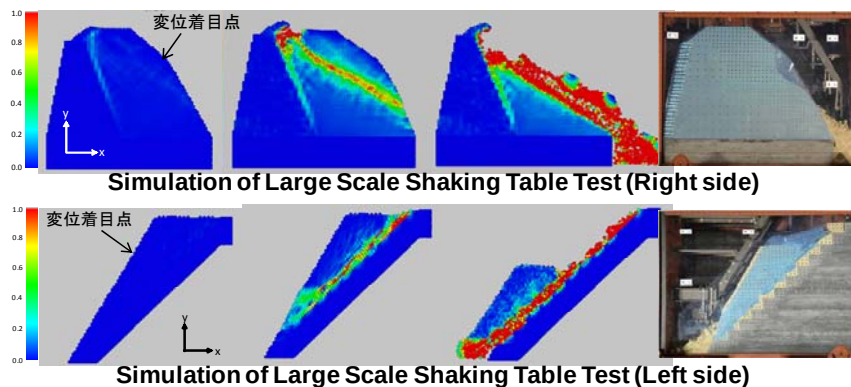


図 4-5 特別セッション 1 における発表

4.3 外国における事例

ここでは、外国における断層変位が原子力施設に及ぼす影響の評価事例として、スウェーデンの核燃料と廃棄物管理会社 (SKB) による断層変位が最終処分場施設KBS-3に及ぼす影響に関する技術報告⁵⁵⁾の概要を示す。

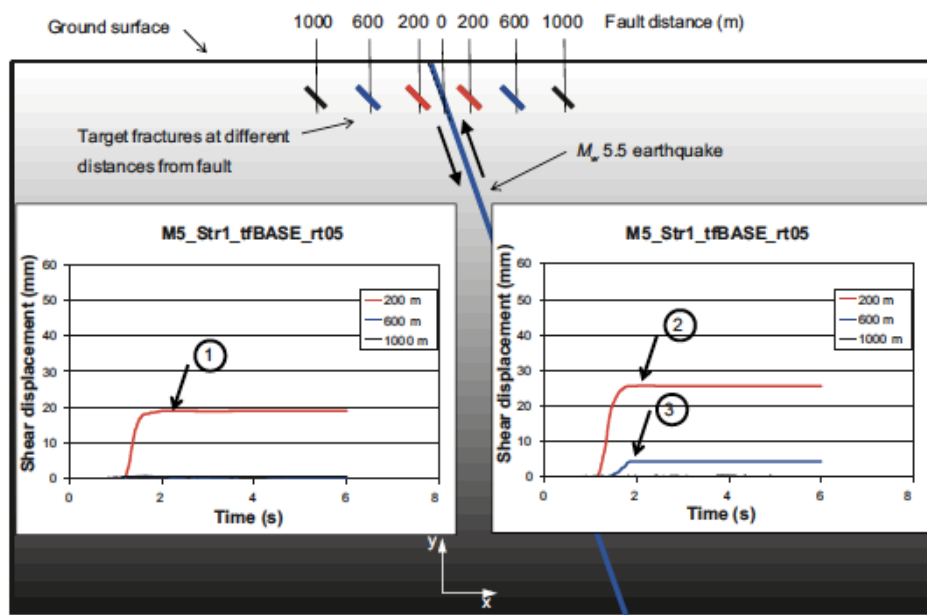
スウェーデンは、地震活動度の低いエリアと考えられており、めったにマグニチュード4を超える地震が発生していない。特に、最終処分場施設の候補者サイトであるForsmarkとLaxemarが位置するスウェーデンの南東の部分は、他地域に比べて地震活動度が低い。しかし、スウェーデンでは、将来の氷河期形成サイクルに起因した地震の発生が及ぼす影響を除外できない。北部スウェーデンに

における氷河期形成サイクルのうち、最後の脱氷河期（10,000年前）には、広範囲にわたり逆断層が形成された。従って、その時期に生成された縦ずれ断層（逆断層）が、将来、最終処分場の安全へ及ぼす影響を潜在的に有していると考えられた。

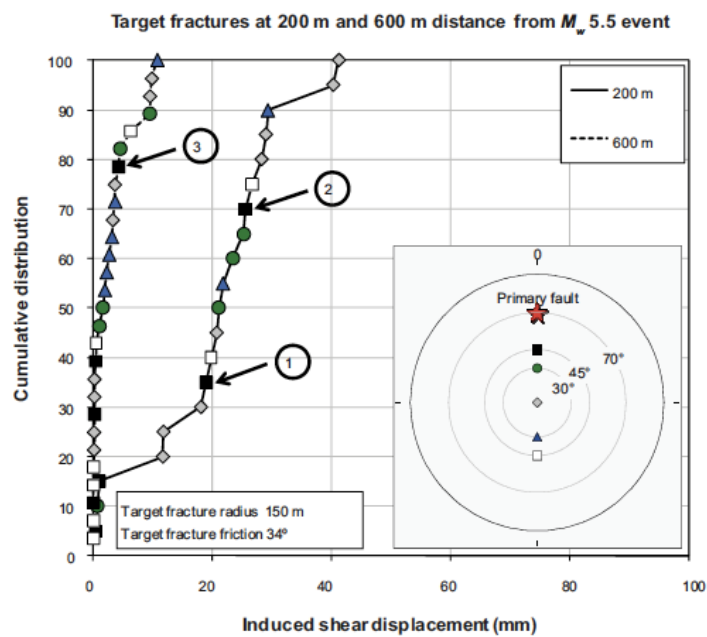
最終処分場の地震リスク要因は、近くの震源断層の影響によって誘発される容器の埋設ホールを横切る弱層に生じる変位である。弱層の変位に沿った変位が大きい場合、岩盤から容器に作用する力は、周辺の緩衝帯（ベントナイト）を介しても容器に損傷を与える可能性がある。そこで、3次元個別要素解析コード(3DEC)によるシミュレーションを通して安全性の評価が行われた。この評価では、容器の埋設ホールに沿った変位が0.05mに達した時点で、容器が損傷すると見なされた。考慮された地震は、北スウェーデンにある既存の後氷期の断層と同様に、逆断層タイプである。このモデルは、前述の候補サイト Forsmark または Laxemar 周辺における断層を再現するためのものではなく、候補サイトの安全性を評価するためのモデルである。そのため、想定される規模の断層を包括的に考慮するべく、マグニチュード、応力降下量、断層傾斜と破壊の伝播速度などの重要な断層パラメータを系統的に変化させて解析が行われた。用いられた最小のマグニチュードは5.5である。解析から得られる主要な結果は、所定の破壊伝播速度を有する断層の動きによって誘発される周辺岩盤の破壊によるせん断変位応答である。図4-6には一例として、断層から200m、600m位置における岩盤の破壊によるせん断変位について、特定の断層モデルに対するせん断変位の時間変化と、全てのパラメータに対する断層モデルより得られたせん断変位のピークの累積値を示している。

予想された様に、断層に近い位置における岩盤の破壊による変位は遠くの位置より大きく、断層からの距離は、すべてのモデルで有意な感度があると分かった。誘発された岩盤の破壊によるせん断変位は、地震パラメータ（モーメントマグニチュード、応力降下量、滑り速度など）と震源の位置や破壊方向に依存し、0～0.112mの間で変化することが分かった。一連の解析結果は、岩盤の破壊による変位に対して地震のマグニチュードの重要度は小さく、断層破壊速度が最も重要なパラメータであることを示している。

容器破壊閾値0.05mを超えるような岩盤の破壊によるせん断変位が生じる現実的な条件を把握するために、非現実的な断層破壊速度を有する地震に対する解析を除くためのチェックが行われた。文献調査から、断層破壊速度の上限が4.5m/sと考えられたことを踏まえ、現実的であると判断された解析結果をとりまとめて断層と破壊中心から0.05mのせん断変位が生じる位置までの距離が限界半径として設定された。そして、その限界半径を踏まえて、容器の埋設ホールを含む最終処分場の設計に関する基本的な考え方が提案された。



a) 岩盤の破壊によるせん断変位の時刻歴



b) 断層から200m, 600m離れた位置における累積滑り変位

図4-6 断層変位による影響の評価事例

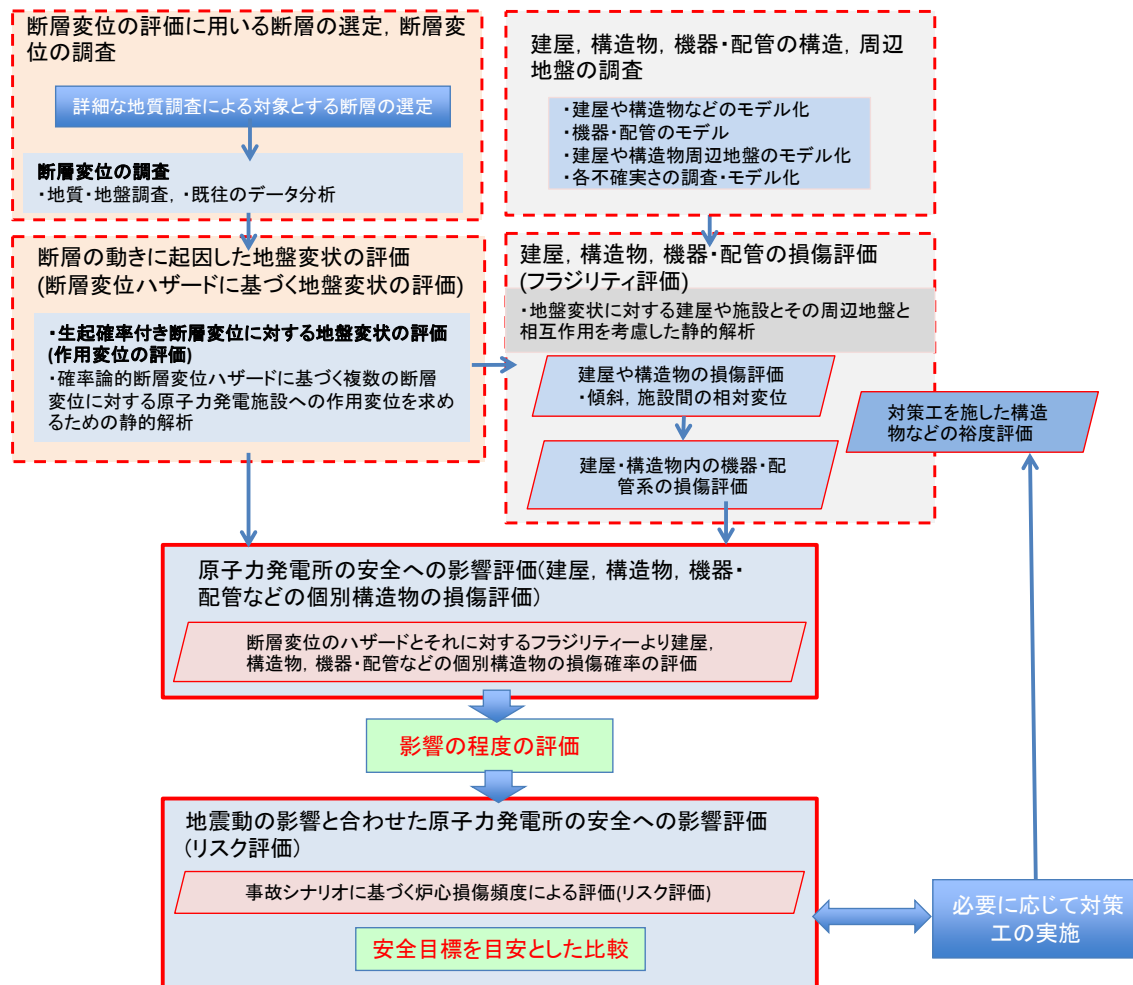


図4-7 断層変位が原子力発電施設に及ぼす影響の検討フロー

4.4 原子力発電施設に及ぼす影響の考え方

断層変位が原子力発電施設の安全性に及ぼす影響を定量的に評価するためには、断層の動きにより生じる施設への作用としての地盤変状分布（断層変位ハザード評価に基づく地盤変状の評価）、それに起因した構造物、機器・配管の損傷の程度（施設、機器・配管の脆弱性評価）、および地盤変状の発生に応じた構造物等の損傷が原子力発電所の安全に及ぼす影響の評価（個別構造物の損傷評価、リスク評価）が必要となる。4.1節から4.3節までに示したように、その評価に向けた検討やガイドラインの整備が実施されている。また、それらを用いた評価例などに関する情報は現時点で多くないが、関連のガイドラインや海外における検討事例を踏まえ、各評価過程の基本的な考え方をまとめ、図4-7に検討フローとして示す。ここで示すフローは、現在の知見に基づく考え方である。従って、関連する知見の蓄積や、各過程で用いる手法の信頼度や精度の向上に応じて手法やフローの見直しを行うことが望ましいと考える。また、このフローは既設の原子力発電所を対象としており、現在保有する各構造物や機器・配管の機能に基づく、原子力発電所の安全性を評価するための流れとなっている。さらに、海外において、断層の影響が懸念される地域における原子力発電所の建設に際して有用な考え方となることもふまえ、保有すべき性能を照査するための考え方

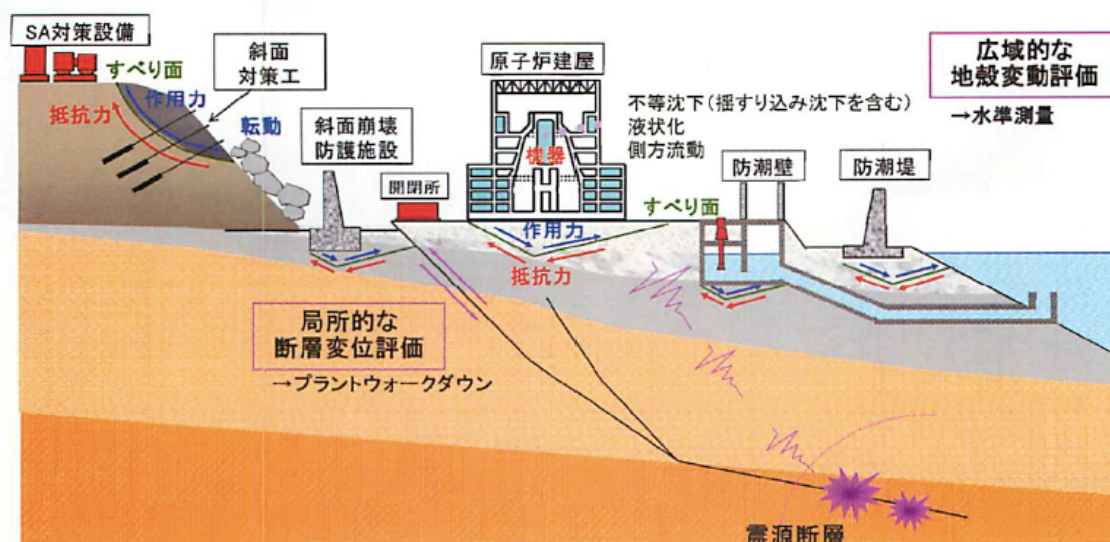


図 4-8 震源断層の動きに起因した断層変位などの地盤変状が
原子力発電施設に及ぼす影響の概要

も合わせた考え方を示すなど、学会としての国際的貢献も望まれる。

4. 4. 1 断層変位に起因した原子力発電施設の損傷のシナリオ

検討フローに基づく評価を適切に実施するためには、断層変位が原子力発電所の安全に影響を及ぼす事故シナリオ、つまり炉心損傷の発生をもたらすシナリオを適切に考慮することが必要となる。

原子力発電所の敷地周辺の震源断層の動きにより生じた地震動や断層変位などに起因した原子力発電施設の安全に及ぼす影響のイメージを図4-8に示す。震源断層の動きにより生じる原子力発電所の安全に係わる施設への作用には、一般的に、地震動による動的な作用と、断層変位による準静的な作用が働くことになる。断層変位が原子力発電施設に及ぼす影響としては、それらの影響の重量を考慮することが必要である。地震動に対する影響は日本原子力学会による地震PRA標準⁴³⁾をはじめ、さまざまなガイドラインなどで原子力発電所の安全に係わる施設の損傷シナリオが示されている。ここでは、断層変位の影響により原子力発電所の安全に係わる施設の機能が喪失に至る事象の例を以下に示す。例1、2は断層の動きに起因した表層地盤の変状による相対変位や傾斜の影響、例3は地表に現れた段差を伴う断層変位の直接的な影響に関する事例を示している。図4-8およびこの事例は、(独)原子力安全基盤機構の技術レポート⁵⁶⁾に基づいている。

- 例 1 断層の動きに起因した地盤変状による、基礎地盤の傾斜や撓みなどにより、建物や施設間の相対変位や取水トンネルの軸方向に相対変位等が生じ、重要な安全機能が喪失
- 例 2 断層変位の影響を受け、基礎地盤の傾斜や撓みなどにより原子炉建屋などが傾斜し、建屋内部の重要な安全機能が喪失
- 例 3 断層変位により、断層直上あるいは近傍の原子炉建屋、開閉所、防潮堤、取水トンネルや、AM 対策の施設や設備、搬入路が直接損傷し、重要な安全機能が喪失

断層変位を含む地盤変状が原子力発電施設に及ぼす直接的な影響以外に、断層変位による原子力発電施設の基礎地盤や周辺斜面の不安定化に起因した基礎地盤の変状や斜面崩壊に対する間接的な影響も考えられる。

原子力発電所の安全に影響を及ぼす施設の事故シナリオは、ここで示した地盤変状がその安全を損なう作用を踏まえ、以下のように考えられる。その際、震源断層の動きにより生じる地表近傍の地盤変状や地震動は、その動きに応じて地表近傍の地盤変状が生じた後に地震動が到達、また両者がほぼ同時に到達することになる。このことから、両者の重畳を考慮することは必要であるものの、両者をそれぞれ評価し、断層変位が及ぼす影響を評価した上で、必要に応じて重畳を直接考慮することが必要と考えられる。このことから、断層変位に起因する地盤変状の影響に関するシナリオ(i, ii, iii)と地震動の影響(i, ii', iii')に関する以下のシナリオを前述の重畳に関する間接評価、および直接評価の考え方に基づいて適宜考慮する。

- i 対象とする主断層又は付随する副断層が活動する。
- ii iの活動により、当該原子炉建屋、熱交換器建屋などの重要建屋及び重要な屋外施設のある領域で地盤変状が発生する。
- iii iiの地盤変状の発生により、安全機能の一部が喪失する。安全機能喪失のメカニズムとしては、次が想定される。
 - ① 建屋直下の地盤変状により建屋が損傷又は崩壊する。
 - ② 建屋の傾きにより建屋内のSSCs (Structures, Systems and Components) が損傷する。
 - ③ 建屋間の変位により渡り配管、ケーブル、タンク等が損傷する。
 - ④ 屋外に設置された配管、ケーブル、機器が損傷する。
 - ⑤ 敷地外の送電鉄塔等の安全に係わる構造物が損傷する。
- ii' iの活動により、地震動が発生する。
- iii' ii'の地震動により、安全機能の一部が喪失する。
- iv iii及びiii'の結果、炉心損傷に至る。

4.4.2 断層の選定と各種調査

フロー中の断層の動きに起因した原子力発電施設周辺の地盤変状の評価について示す。まず、対象とする主断層、または副断層は、2011年東北地方太平洋沖地震後に改訂された原子力発電施設の規制基準・ガイド、またⅡ編で示した方法などに基づいた地質調査によって敷地内の断層分布、性状、活動性を把握し、将来変位する可能性が否定できない断層を選定する。

また、国内外で生じた地震について、断層変位が地表に現れた断層の特性、例えば断層変位、断層機構、地盤、地質などを調査・分析し、発現の可能性のある断層変位量の範囲を推定する。あわせて、対象敷地における解放基盤までの地盤構造や物性に関する詳細な情報を収集する。必要に応じて追加調査を実施することが必要である。

断層変位に関する情報のみならず、原子力発電所の建屋、構造物および機器・配管の構造や物性について、断層変位に対する影響評価を行うための解析モデルの作成に必要な情報を収集する。こ

れについても、必要に応じて追加調査を実施することが必要である。

さらに、敷地内外の地盤や地質、建屋、構造物および機器・配管などの安全性評価に必要な種々の不確実さについても調査を行うことが必要である。

4.4.3 断層変位ハザードに基づく地盤変状の評価

選定された断層を対象として原子力発電所の安全に及ぼす影響評価に用いる地盤変状の評価を行う。

まず、対象とする断層に対して確率論的断層変位ハザード解析を実施し、得られた解放基盤表面における断層変位と超過頻度の関係に基づき、複数の断層変位を既往の断層変位に関する資料を勘案して選定する。評価対象とした断層変位とは、解放基盤表面に現れた地盤の段差量を表す。また、対象断層の動きの超過頻度は、断層変位の発生頻度の評価方法【断層変位ハザードの評価】を用いて評価する。

次に、敷地内の建屋や構造物周辺地盤について、その断層変位に起因した地盤変状を評価するため、それら断層変位が生じうる弱面なども含む基盤上の地盤をモデル化し、3章で示した有限要素法、個別要素法および粒子法などを用いて解放基盤表面に断層変位に起因した段差などを静的に作用させる解析を実施する。地盤のモデル化は、それに係わる種々の不確実さを考慮して適切に行う。ここで、断層変位を含み、その周辺地盤の変位を施設等への影響評価に用いる作用変位と呼ぶ。対象構造物が硬質岩盤上、また中に位置している場合には、解放基盤表面上の段差を地表における段差などの断層変位と等しいとしてもよい。また、対象構造物が比較的軟質な地盤上、また中に位置している場合には、断層変位が構造物へ及ぼす影響は地盤との相互作用を適切に考慮することが必要となる。ここで、断層変位を含む地盤変状の評価に用いる解析手法は、(独)原子力安全基盤機構の技術レポートに示された地盤構造物の破壊挙動に関する実験などの評価解析により、その精度などについての検証が行われたものを用いることが必要である。

4.4.4 原子力発電施設、機器・配管の損傷評価

フロー中の原子力発電所の安全に係わる建屋、構造物、機器・配管の損傷評価について示す。あわせて、断層の動きに起因した原子力発電所の安全に影響を及ぼす施設の基礎地盤に関する安定性の評価を用いて行い、基礎地盤が建物・構造物の支持機能を保持することを確認する。ここで、機器や配管の安全機能喪失のメカニズムとしては、4.4.1項の①～⑤を考慮する。

建屋や構造物の断層変位に対する影響評価にあたって、評価の対象とする建屋や構造物とその周辺地盤は、その構造的な特性などをふまえ、3.2節に示した建屋とその周辺地盤の有限要素モデルのように一体としてモデル化する方法、3.4節に示した地中ダクトとその周辺地盤の梁-バネ系モデルのように建屋や構造物を地盤バネで支持し、前項でもとめた地盤変位を作用する方法のいずれかで2次元ないし3次元のモデル化を行う。それら地盤-構造物系のモデルに前項で得られた複数の断層変位、また構造物周辺地盤の作用変位を静的に与え、建屋や構造物などに生じる傾斜を含む変位や応力等を算出する。3.2節には、地盤変状に対する地盤-建屋系の一体モデルに対する応答解析例が示

されている。その解析を種々の不確実さを考慮して実施することにより、断層変位が建屋や構造物に及ぼす損傷の可能性としてフラジリティ曲線の評価を行う。

断層変位を含む地盤変状に関する1次評価指標と、それに関連する施設の例は以下のとおりである。

- ・地盤の変形に伴う基礎底面の傾斜や撓み：原子炉建屋、開閉所、津波防護施設、取水路、AM
対策に用いる搬入路など
- ・地盤の変形に伴う基礎地盤の相対変位：建屋と周辺施設の接続構造物など
- ・サイトの沈下量：津波防護施設など

こうした地盤変状指標に加え、建屋や施設の傾斜や変位に起因した機器・配管系の損傷を評価するための指標も合わせて適切に選定することが必要となる。

損傷の可能性は、1次評価指標に対する応答値と限界値の比較に基づく間接的な評価、また対象構造物、機器・配管などの応答値とその耐力の比較による直接評価を応答値、また限界値や耐力、それぞれの不確実さを考慮して行う。ここで、地盤の傾きや撓みなどの変形による建屋や構造物の損傷限界を表す値は、機器・配管を含む構造体の損傷限界と分けて、限界値と呼ぶ。機器・配管系の断層変位に対するフラジリティ曲線の評価は、建屋や構造物の形状が全体として保持出来ることを前提とし、断層変位による建屋・構造物の傾斜、変形及び建屋・構造物間の相対変位ならびに、断層変位の評価に用いた複数の地震による地震動に対する慣性力、地震時相対変位および運転時の荷重をそれらの不確実さとともに考慮する。

損傷評価を実施するためには、各評価指標に関する限界値や耐力をその不確実さとともに設定することが必要となる。基礎地盤の変状による建屋や構造物自体の損傷については、構造物自体の断面力や変形に関する耐力値を援用できるが、基礎底面の傾斜などの限界値は、それらと建屋や構造物内の機器・配管の機能低下、また損傷の耐力値のいずれかの限界に達する状態に対応する値として設定することが必要となる。ここで、機器・配管の機能低下、また損傷の耐力値については、それらの損傷の直接評価においても必要となる。配管については、支持物の損傷に起因した損傷とその構造体としての損傷があり、後者に対する耐力値や限界値の評価は関連の技術基準を援用することができる。また、基礎地盤の相対変位については、異種構造物の損傷、また配管やケーブル類の損傷のいずれかの限界で、原子力発電所の安全に支配的な要因に対応する限界の状態に対して限界値を設定することが必要である。サイトの沈下については、津波防護施設のうち、防波堤等については必要な標高を下回る状態に至る沈下量が限界値となり、明確である。このように、断層変位を含む地盤変状に起因した建屋や構造物、機器・配管などの損傷を評価するための限界値には、1次評価指標のような間接指標や、断面力、応力またひずみのような損傷を直接評価する指標がある。建屋や構造物を構成する部材、機器および配管などの損傷については、それらに関連する技術基準類を援用することが可能と考えられるが、その適用性についての専門家間での精査、また3章で述べられるように部材の破壊に伴う構造全体への影響やその挙動を評価する技術の構築が必要と考えられる。さらに、建屋や施設などの傾斜、また傾斜を伴う損傷に起因した機器の損傷、機能低下や

喪失に対する限界値については、明確な値を設定するには至っていないため、関係技術基準の調査分析やそれに係わる専門家間で検討などを実施することが必要と考えられる。

また、原子力発電所の安全に及ぼす影響評価により、対策工が必要とされた構造物などがある場合には、対策工を設けたことによる効果として裕度を評価することが必要となる。

4.4.5 地震動とあわせた原子力発電所の安全に及ぼす影響評価

フロー中の原子力発電所の安全への影響の評価について示す。まず、断層変位の影響を考慮するために選定された断層を対象として、断層変位の評価に用いた複数の生起確率に対する地震に対して地震動の評価を行う。その評価には、断層変位ハザードの評価結果を踏まえ、日本原子力学会の地震 PRA 標準⁴³⁾等⁴³⁾に示された地震ハザードの評価方法を用いる。地震動とあわせた原子力発電所の安全に及ぼす影響評価は、断層変位の評価に大きな不確定性が含まれることを踏まえ、次の2段階の評価のうち最初の評価をまず行う。次に、必要に応じて次の段階の評価を実施する。

最初の段階では、種々の不確実さを考慮して求めた断層変位に対する建屋、構造物および機器・配管の損傷確率の関係であるフラジリティ曲線と断層変位ハザードより、建屋、構造物および機器・配管などの損傷確率を個別に評価する。

次の段階では、建屋、構造物および機器・配管などの損傷確率の評価結果より、炉心損傷に及ぼす影響が大きいと考えられる建屋、構造物および機器・配管がある場合には、地震動との重畳を考慮したリスク評価を行う。ここで、断層変位に対する事故シーケンス評価は、地震動に関する事故シーケンス評価のために作成したシステムモデル（イベントツリー/フォルトツリーなど）を適用するものとする。評価対象断層が動いた場合の条件付き炉心損傷確率は、断層変位のレベルに応じた評価結果と、地震動による構造物、機器・配管の損傷に基づいた既存の地震 PRA 標準⁴³⁾による評価結果とを統合することにより算出する。その際、断層の破壊過程の不確定性などを含む種々の不確定性を、日本原子力学会の地震 PRA 標準を踏まえ、断層変位ハザード、構造物や機器・配管のフラジリティ、システムのイベントツリー/フォルトツリーの中で適切に考慮することが必要である。

得られた炉心損傷頻度が安全目標^{注)}より大きい場合には対策を実施し、その効果を確認する。

注) ここで安全目標とは、旧原子力安全委員会にて決定されていなかった安全目標の検討を原子力規制委員会にて検討をすすめ、平成 25 年の 4 月に委員会の合意に至り、「原子力規制委員会が原子力施設の規制を進めていく上で達成を目指す目標」として示された数値を指す。

5. まとめ

ここでは、既往の断層変位評価技術（Ⅱ編）と解析技術（Ⅲ編）を利活用して、震源断層の動きに起因した断層変位も含む原子力発電施設の周辺地盤の変状が、それら施設に及ぼす影響を工学的に評価するための考え方を示した。2 章では、地表近傍に震源断層の動きに起因した地盤変状が生じた地震による構造物の被災状況とその分析事例について報告した。3 章では、有限要素法や粒子法などを用いて断層変位による構造物の影響の評価事例、断層変位に対する対策事例と効果、さらに断層変位に起因した地中構造物の脆弱性曲線の評価事例などを示した。ここで示した脆弱性曲線はあくまで評価事例であり、2.5 節に示したように構造物周辺地盤の特性と構造物の剛性に応じて構造物の損傷状況が異なることには留意が必要である。4 章では、旧原子力安全基盤機構や原子力安全推進協会、さらにスウェーデンにおける最終処分場の安全性評価における断層変位の影響評価事例などを示した後、原子力発電施設に及ぼす断層変位の影響評価の基本的な考え方を示した。

その考え方では、津波が原子力発電所の安全に及ぼす影響と同様に、地震動との重畳を考慮する。また、地震動との重畳を考慮するにあたっては、断層変位の評価に大きな不確実性が含まれることを踏まえ、次の2段階の評価のうち、最初の実施し、必要に応じて次の段階の評価を実施するという手順で断層変位が原子力発電所の安全に及ぼす影響を評価する。ここで、最初の段階では、断層変位による影響と地震動の影響を別に評価し、断層変位が及ぼす影響を把握することにより、間接的に地震動との重畳を考慮する。

- 種々の不確実性を考慮して断層変位に対する原子力発電所の建屋、構造物および機器・配管の損傷確率の関係である脆弱性曲線の評価する。得られた脆弱性曲線と断層変位ハザードより、施設、機器・配管個別の損傷確率を評価し、地震動に対する施設、機器・配管の損傷確率との比較を行う。
- その評価結果より、炉心損傷に及ぼす影響が大きいと考えられる建屋、構造物および機器・配管がある場合には、リスク評価を行う。得られた炉心損傷頻度が安全目標(4.4.5 の注参照)を目安とし、必要に応じて対策を実施し、その効果を確認する。

断層変位に対する建屋、構造物および機器・配管の損傷を評価するためには、その限界状態、限界状態の評価指標を求めるための方法、さらに断層変位に対する限界状態の条件付き発生確率を求めることが必要であり、それらについての事例や課題を1章、3章に示しているが、今後の課題を整理し、以下に示す。

断層変位に対する建屋や構造物自体の損傷や破壊などを評価する方法として、地震動に対する損傷評価手法として高度化が図られてきた有限要素法の適用事例を示した。しかし、有限要素法は、施設を構成する部材の損傷また破壊についての評価を行うことは可能であるが、1999年台湾集集地震における石岡ダム破壊のような構造体全体が破壊後の全体挙動を定量的評価することは困難である。例えば、建屋や構造物の基礎の損傷後の上部施設、また機器、配管に及ぼす施設の挙動を精

度良く評価することは困難といえる。有限要素法を用いた簡易な推定法、また粒子法などのように弾塑性挙動から破壊後の挙動までシームレスに評価できる手法の適用とその精度向上が必要不可欠と考えられる。さらに、Ⅲ編で示された解析法に対する指摘と同様に、実験などによる妥当性確認と、材料特性や構造のモデル化などの解析モデルに応じた解析結果の安定性を含む結果の検証とあわせて、それらの体系を整備することも必要である。

さらに、建屋や構造物などの傾斜、また傾斜を伴う損傷に起因した機器の損傷、機能低下や喪失に至る限界状態を評価するための指標として、間接評価に用いる指標および直接評価の指標の事例を示した。しかし、それら指標の妥当性およびそれら指標の限界値として関連する技術基準類を援用が可能なものについて精査を行うこと、それ以外の主要な指標について関連する地震被害や実験などの研究事例より限界値を設定するための検討を早急に実施することが必要と考えられる。その検討に際しては、関係技術基準の調査分析やそれに係わる専門家間で検討などを実施することが必要と考えられる。

また、断層変位に対する建屋、構造物および機器・配管が限界状態に至る可能性を表す脆弱性曲線の評価を前述の数値解析法を用いて実施する際、生起確率に応じた断層変位の不確定性を含む種々不確定性を考慮することには計算時間も含めて、多くの困難さを伴う。このことから、断層変位に対する脆弱性曲線を合理的で精度良く評価する方法の構築も急務と考えられる。

最後に、ここで示した考え方は既設の原子力発電所を対象としているが、海外において、断層の影響が懸念される地域における原子力発電所の建設に際して有用な考え方となることもふまえ、保有すべき性能を照査するための考え方と合わせた考え方を示すなど、学会としての国際的貢献も望まれる。

参考文献

- 1) Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Callerio, A. and Paolucci, R. : Fault rupture-foundation interaction: selected case histories, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.6, Issue 4, pp.557-583, 2008.
- 2) 地盤工学会・地震時の断層変位に伴う地盤災害に関する調査委員会：地震時の断層変位に伴う地震災害に関する調査報告書, 2002. 3
- 3) 大町達夫：1999 年台湾集集地震によるダム被害について, *ダム工学*, Vol. 10, No. 2, pp. 138-150, 2000.
- 4) 川島一彦, 庄司学, 岩田秀治：1999 年集集地震（台湾）における卑豊橋・烏溪橋の被害と被災メカニズム, 第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 433-440, 1999.
- 5) Kawashima, K. : Damage of Bridges Resulting from Fault Rupture in the 1999 Kocaeli and Duzce, Turkey Earthquakes and the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake, *Technical Report, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology*, No.63, pp. 1-23, 2001.
- 6) 川島一彦, 橋本隆雄, 鈴木猛康：トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要, 第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 409-416, 1999.
- 7) Johansson, J. and Konagai, K. : Fault induced permanent ground deformations: Experimental verification of wet and dry soil, numerical findings' relation to field observations of tunnel damage and implications for design, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.27, pp. 938-956, 2007.
- 8) 中村晋, 大角恒雄, 福元俊一：岩手県内陸北部地震(1998. 9. 3) で観測された地震記録の特性とそのシミュレーション解析, pp. 555-566, *構造工学論文集*, Vol. 48A, 2002.
- 9) 有賀義明:断層変位に対するコンクリートダムの挙動の解析法に関する基礎的研究, *土木学会地震工学論文集*, Vol. 29, pp. 690-697, 2007. 8
- 10) 有賀義明:地表に現れる断層変位の形態に応じたダムの安全性評価法の検討, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会報告集, Vol. 30, 2009. 5
- 11) 大町達夫, 小島直之, 村上敦：ダムサイト直下の伏在断層による地震時の地盤変位と貯水位変動, *土木学会論文集*, No. 710/I-60, pp. 337-346, 2002. 7
- 12) 高田至郎, Hassani, N., 福田克己:断層を横断する地中管路の設計法の提案, *土木学会論文集*, No. 668/I-54, pp. 187-194, 2001. 1
- 13) 大塚久哲, 相部岳暁, 副島すみれ子：断層変位を受ける地中構造物の耐震継手対策の有効性に関する研究, 第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, 2011. 11
- 14) 李重桓, 小沼恵太郎, 矢葺亘, 大塚久哲：断層変位を受けるケーブル系橋梁の挙動および耐震安全性の考察, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 25, No. 2, pp. 1279-1284, 2003.

- 15) 田中智行, 三井欣二, 北台修一, 大塚久哲: 断層変位を受けるコンクリート連続桁橋の安全性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 1285-1290, 2003.
- 16) 角本周, 手嶋和男, 矢葺亘, 松永昭吾: コンクリートアーチ橋の構造パラメータと断層変位に対する耐震性能に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 1333-1338, 2003.
- 17) 大塚久哲, 中村壮, 古川愛子: 断層変位を受ける鋼斜張橋の耐震安全性に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 593-604, 2009. 3
- 18) 中野友裕, 福島康宏, 藤田亮一: 非線形動的解析に基づく断層変位作用下の RC アーチ橋の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 1033-1038, 2008.
- 19) 宮崎涼太, 中野友裕, 太田良巳: 断層変位を受ける PC ラーメン橋の動的応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 937-942, 2008.
- 20) Nyman, D. J., Hall, W. J. and Szymkowiak, V.: Trans-Alaska pipeline seismic engineering legacy, *Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage, 2014. 7
- 21) 山口勝: 活断層情報を社会に生かすために, 活断層研究, 28 号, pp. 123-131, 2008.
- 22) Sloan, D. and Wells, D.: The Hayward fault, Geological Society of America Field Guide 7, 2006.
- 23) 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, JANSI-FDE-01 rev.1, 2013, <http://www.genanshin.jp/archive/sitefault/index.html>
- 24) Anastasopoulos, I., Gazetas, G.: Foundation-Structure system over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 5, pp. 277-301, 2007.
- 25) Sarah, D., Saltzer, S. D. and Pollard, D. D.: Distinct element modeling of structures formed in sedimentary overburden by extensional reactivation of basement normal faults, *Tectonics*, Vol. 11, No. 1, pp. 165-174, 1992.
- 26) Abe, S., Gent, H. and Urai, J. L.: DEM simulation of normal faults in cohesive materials, *Tectonics*, Vol. 30, pp. 12-21, 2011.
- 27) 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, Vol. 14, No. 2, pp. 16-36, 2014.
- 28) 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, Vol. 13, pp. 17-36, 2013.
- 29) 新井夏海, 高尾誠, 中瀬仁, 京谷孝史, 寺田賢二郎, 加藤準治: 個別要素法を用いた地震時における副断層の出現解析, 第 62 回理論応用力学講演会, OS10-12, 2013.
- 30) Rahman, M. A. and Taniyama, H.: Analysis of a buried pipeline subjected to fault displacement: A DEM and FEM study, *Soils and Foundations*, Vol. 71, pp. 49-62, 2015.
- 31) Kumar, R. P. and Meguro, K.: Applied element simulation of non-linear behavior of dip-slip

- faults for studying ground surface deformation, *in A Workshop on Seismic Fault - Induced Failures*, pp.109-114, 2001.
- 32) Konagai, K. and Johansson, J. : Lagrangian particles for modeling large deformations, *in A Workshop on Seismic Fault - Induced Failures*, pp.101-108, 2001.
- 33) 小長井一男 : 地盤と構造物の地震工学, 東京大学出版会, 2002.
- 34) Sadr, A., Konagai, K., Johansson J. and Yamaguchi, N. : Nonlinear soil-pile group interaction in the vicinity of surface fault ruptures, *13th world conference on earthquake engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No.554, 2004.
- 35) Bazant, Z. P., and Bhat, P. D. : Prediction of hysteresis of reinforced concrete members, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.103, No.ST1, pp.153-167, 1977.1
- 36) 志賀敏男, 柴田明德, 渋谷純一, 飯藤将之 : 二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材のファイバーモデルによる解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.377-378, 1986.8
- 37) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和男, 岡村甫:せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 38) 二羽淳一郎, 前田詔一, 岡村甫 : ディープビーム的な RC 部材の設計方法に関する提案, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.357-360, 1983.
- 39) Maekawa, K., Pimanmas, A., and Okamura, H. : *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003.
- 40) 米澤健次, 長沼一洋, 江戸宏彰:正負繰返し荷重を受ける RC 柱の三次元FEM解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.43-48, 2003.
- 41) IAEA: Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Standards Specific Safety Guide No. SSG-9.
- 42) 原子力規制委員会 : 新規制基準(地震・津波), 2014.6
- 43) 日本原子力学会 : 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施手順(AESJ-SC-P006:2007), 2007.9
- 44) 平野光将 : 地震PRA実施基準の改定一概要一土木学会断層変位小委員会の活動, 日本原子力学会2014年春の年会, 2014.3
- 45) H.Narumiya et al: Revision of the AESJ Standard for Seismic Probabilistic Risk Assessment (1) Overview, PSAM 12, 2014.6.
- 46) 蛭澤勝三 : 地震PRA実施基準の改定一地震ハザード評価一, 日本原子力学会2014年春の年会, 2014.3
- 47) K.Ebisawa et al. : Revision of the AESJ Standard for Seismic Probabilistic Risk Assessment (2) Seismic Hazard Evaluation, PSAM 12, 2014.6
- 48) 奈良林直 : 断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会報告, 日本原子力学会2015年春の年会, 2015.3
- 49) 蛭澤勝三 : 土木学会断層変位小委員会の活動, 日本原子力学会2015年春の年会, 2015.3

- 50) 原子力土木委員会 地盤安定性評価部会公開シンポジウム「地盤・斜面の変形量評価」資料, 2013. 6
- 51) 上田圭一: 模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程の検討, 電力中央研究所報告研究報告 N10049, H23. 6
- 52) 原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会: 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. 9
- 53) 蛭沢勝三: 断層変位の構造物への影響評価手法の開発及び評価基準整備の進め方の提案, 土木学会断層変位評価小委員会講演会, 第4回構造物への影響からみた断層変位評価, 2014. 7
- 54) Nakamura and Mori: 1. Development of Evaluation Method of Rock and Soil Behaviour Induced by Slope Failure on the Facilities in NPP based on Shaking Table in JNES Research Project, IAEA Plenary Meeting of the ISSC' s Program, Special Session 1, 2014.
- 55) Billy Fälth et al., Technical Report TR-08-11: Effect of large earthquake on a KBS-3 - Evaluation of modeling results and their implication for layout and design-, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2010
- 56) (独) 原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-2037 基礎地盤および斜面の安定性に係わる設計・リスク評価手引き, 2014. 2