



確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上

高尾誠¹⁾、上田圭一²⁾、安中正³⁾、栗田哲史⁴⁾、中瀬仁⁵⁾、
京谷孝史⁶⁾、加藤準治⁷⁾

- 1) 正会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻、東京電力株式会社、工修
takao.makoto@tepcoco.jp
- 2) 電力中央研究所、理学博士
ueta@criepi.denken.or.jp
- 3) 正会員 東電設計株式会社、理修
annaka@tepscoco.jp
- 4) 正会員 東電設計株式会社、博士（工学）
kurita@tepscoco.jp
- 5) 正会員 東電設計株式会社、博士（工学）
nakase@tepscoco.jp
- 6) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻教授、工学博士
kyoya@civil.tohoku.ac.jp
- 7) 東北大学災害科学国際研究所助教、Dr.-Ing.
jkato@civil.tohoku.ac.jp

要 約

確率論的断層変位ハザード解析手法は、地表地震断層の変位の量がある値を超過する確率を評価する手法であり、解析にあたっては、主断層および副断層の変位量をそれぞれ確率論的に評価する必要がある。主断層についてはこれまで日本国内で発生した地表地震断層に関する豊富なデータがあるが、副断層については必ずしもデータが十分とは言えない。副断層の出現確率については、分析に用いる格子寸法に依存することが既往研究によって示されているが、日本国内のデータに基づいて整理された例はないため、本論文では、格子寸法依存性の検討を実施することによって評価式の信頼性向上を図った。また、副断層の変位量のデータを補うために、模型実験結果および個別要素法による数値解析結果を用いることにより評価式の信頼性向上を図った。さらに、認識論的不確定性を取り扱う方法としてロジックツリー手法について述べるとともに、その適用例を示した。

キーワード： 断層変位ハザード、PFDHA、模型実験、個別要素法、ロジックツリー

1. はじめに

想定される地震に対して構造物等が大きな被害を受けないようにすることが耐震設計の主な目的である。耐震設計に用いる地震動は、決定論的手法によって設定されることが日本では一般的であるが、近

年、確率論的手法による解析も並行して行われ、その結果も参照される場合がある。

一方、内陸地殻型の地震が発生する際、地震が一定規模以上の場合に、断層による食い違い（以下、断層変位という）が地表に生じることがあり、この断層変位を設計上何らかの形で配慮するという考え方があり（例えば、土木学会(2001)¹⁾の付表 8.6.2-2）。一つは断層変位が生じるような活断層の直上での構造物等の設置を避けるという考え方である。もう一つは、構造物の重要度および発生確率に応じて断層変位を許容するという考え方である。後者の場合、断層変位を確率論的手法に基づいて評価し、評価結果を設計に反映することになるが、断層変位の確率評価にあたっては、Youngs et al.(2003)²⁾が示した手法および高尾ほか(2013)³⁾が提案した評価式に基づいて確率論的断層変位ハザード解析（Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis、以下、PFDHA という）を実施するという方法がある。

PFDHA では、地震時に発生する可能性がある地表における断層変位、すなわち地表地震断層を扱う。このような地表地震断層は大きく 2 種類に分類することができ、一つは震源断層と密接に関係する断層（主断層）であり、もう一つは震源断層と密接に関係しているとは言えないが、主断層の活動に伴ってその主断層から離れた場所で副次的または従属的に生じる断層（副断層）である。PFDHA は、地表地震断層の変位量がある値を超過する確率を評価する手法であり、解析にあたっては、主断層および副断層の変位量をそれぞれ確率論的に評価する必要がある。主断層についてはこれまで日本国内で発生した地表地震断層に関する豊富なデータがあるが、副断層については必ずしもデータが十分とは言えない。そこで、副断層のデータを補うべく模型実験結果および個別要素法を用いた数値解析結果を用いて、既往の調査結果との比較検討を行った。

また、PFDHA における副断層の出現確率は分析に用いる格子寸法に依存することが既往研究によって示されている（Petersen et al.(2011)⁴⁾）が、日本国内のデータに基づいて整理された例はないことから、格子寸法依存性の検討を実施することによっても解析の信頼性向上を試みた。なお、本研究及び高尾ほか(2013)³⁾では、地表地震断層が震源断層と対応しているかどうかの判定にあたっては、Vermilye and Scholz (1998)⁵⁾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 1.0% 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、それ以外の地表地震断層を副断層とみなした。

PFDHA では、偶然的不確定性と認識論的不確定性の 2 種類の不確定性を考慮することができる。高尾ほか(2013)³⁾では、偶然的不確定性については主断層および副断層の各種評価式を策定する際に、確率密度関数という形で考慮したが、認識論的不確定性については別の機会に報告するとしていた。専門家間で意見が分かれている項目、すなわち認識論的不確定性が存在する項目については、ロジックツリーおよびそれに付与する重みによって不確定性を考慮することができる。本論文では、ある断層が活断層であるという意見と活断層ではないという意見に分かれている場合や地震規模等に関して意見が分かれている場合を例に挙げて、その不確定性を取り扱う方法を示すとともに、試算した結果を示す。

2. 確率論的断層変位ハザード解析の概要と信頼性向上検討の位置づけ

PFDHA手法については高尾ほか(2013)³⁾に詳述されているので本論文では概要を示すにとどめるが、必要に応じてAppendixを参照されたい。PFDHAでは主断層および副断層のそれぞれについて、下記a.およびb.に示すとおり、断層変位がある値を超過する1年あたりの頻度を求める。

a. 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。

v_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

b. 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。

v_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

主断層については、過去の地表地震断層に関する豊富なデータがあるが、副断層に関するデータは十分とは言えず、副断層に係る確率 P_{2d} および P_{3d} の評価式は改善の余地がある。本論文では、 P_{2d} の評価の信頼性を向上するために、3.1節に示すとおり、副断層の分析に用いる格子の寸法が発生確率の評価にどの程度依存するのかを検討した。さらに本論文では、 P_{3d} の評価の信頼性を向上するために、3.2節で述べるとおり、模型実験結果および数値解析結果を用いて評価式の検討を行った。

3. PFDHAにおける副断層評価式の信頼性向上

3.1 P_{2d} 評価式の信頼性向上

P_{2d} を評価するためには、既往地震における地表地震断層の出現の有無を調べ、主断層からの距離に応じて整理・分析する必要がある。 P_{2d} の分析にあたって高尾ほか(2013)³⁾は、Youngs et al.(2003)²⁾に倣い500m×500mの格子を適用し、地震規模 M_w および主断層から副断層までの距離を変数としてロジスティック回帰分析を行い、副断層出現確率の距離減衰式を策定した。 P_{2d} については、用いる格子の寸法に依存することがPetersen et al.(2011)⁴⁾によって指摘されているが、日本のデータを用いて整理された例はないため、格子寸法依存性に関して本論文でその検討を行った。

なお、 P_{2d} および後述する P_{3d} の分析にあたって、副断層が発生した位置で変動地形が判読される場合には、そのデータを検討の対象から除外するという考えを採ることもできる。すなわち、構造物を設置する前に変動地形学的調査を実施し、明らかな変動地形が判読される場合は、そのような場所には重要な構造物を設置しないので検討対象外とするとの考えである。ただし、本論文は、特定の構造物を対象とせず、PFDHAの一般論を論じることを目的としていることから、副断層発生位置における変動地形判読の有無を考慮していない。

(1) 格子寸法依存性について

Petersen et al.(2011)⁴⁾は、世界の8つの横ずれ断層を対象にして、主断層および副断層に関する各種評価式を策定しており、副断層の発生確率に関する距離減衰式の策定にあたっては、200m×200m、150m×150m、100m×100m、50m×50m、25m×25mの5種類の格子を用いて整理・分析を行っている。同論文では分析結果は回帰式によってのみ示されており図示されていないが、格子寸法が小さくなるに従って副断層の発生確率が小さくなる、すなわち、副断層の発生確率が格子寸法に依存することが図化すれば容易に確認することができる。

ここで、格子寸法依存性について簡単な解説を加えることにする。図1に示すように、赤線の位置に副断層が発生したとする。まず、(a)に示すように、相対的に大きな格子寸法として500m×500mで分析した場合を想定する。格子数は $2 \times 2 = 4$ 個あり、そのうち2個に副断層が含まれているので、この場合の副断層の発生確率は $2 \div (2 \times 2) = 0.5$ となる。

次に、(b)に示すように、(a)の1/2の格子寸法250m×250mで分析した場合を想定する。(b)の場合は、格子数は $4 \times 4 = 16$ 個あり、そのうち3個に副断層が含まれているので、この場合の副断層の発生確率は $3 \div (4 \times 4) = 0.1875$ となる。

さらに、(c)に示すように、(a)の1/10の格子寸法50m×50mで分析した場合を想定する。(c)の場合は、格子数は $20 \times 20 = 400$ 個あり、そのうち12個に副断層が含まれているので、この場合の副断層の発生確率は $12 \div (20 \times 20) = 0.03$ となる。

このように、副断層の発生確率は分析する格子寸法に依存することから、実際のPFDHAにおいては、断層変位の年超過頻度を評価する対象構造物の大きさと同程度の格子を用いた分析結果を用いる必要がある。

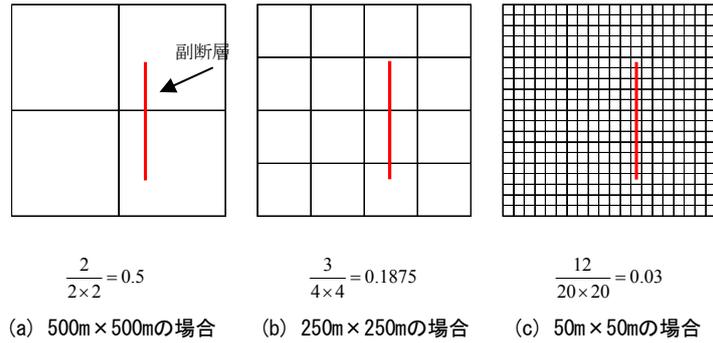


図1 格子寸法依存性の説明図

(2) 日本のデータを用いた分析

既に述べたとおり、高尾ほか(2013)³⁾では、副断層の発生確率の分析にあたって500m×500mの格子を用いて距離減衰式を策定した。言い換えれば、評価する構造物が500m程度の大きさの場合の評価式を策定したことになるが、それより小さい構造物に適用できる評価式は策定されていない。格子寸法依存性については、日本のデータを用いて整理された例はないため、今回その検討を行った。

分析に用いたデータは表1に示すとおりであり、高尾ほか(2013)³⁾が扱ったデータと同じである。また、分析に用いた格子寸法は、500m×500m、250m×250m、100m×100m、50m×50mとした。分析の方法は格子寸法を除き高尾ほか(2013)³⁾と同じであり、各格子に副断層が含まれる場合は1、含まれない場合は0とした上で、主断層から副断層までの距離を説明変数に採用してロジスティック回帰分析を行った。

表1 副断層の発生確率 P_{2d} の策定に用いた地震

地震名	Mj	Mw	主断層のセンス
2008 岩手・宮城内陸地震	7.2	6.9	逆
2004 新潟県中越地震	6.8	6.6	逆
2000 鳥取県西部地震	7.3	6.7	横ずれ
1998 岩手県内陸北部地震	6.2	5.8	逆
1995 兵庫県南部地震	7.3	6.9	横ずれ
1984 長野県西部地震	6.8	6.2	横ずれ
1978 伊豆大島近海地震	7.0	6.6	横ずれ
1974 伊豆半島沖地震	6.9	6.4	横ずれ
1959 弟子屈地震	6.3	6.0	横ずれ
1945 三河地震	6.8	6.7	逆
1943 鳥取地震	7.2	7.0	横ずれ
1939 男鹿地震	6.8	7.0	逆
1938 屈斜路地震	6.1	5.8	横ずれ
1930 北伊豆地震	7.3	6.9	横ずれ
1927 北丹後地震	7.3	7.1	横ずれ
1925 但馬地震	6.8	6.4	横ずれ
1918 大町地震	6.5	6.4	逆
1896 陸羽地震	7.2	6.7	逆
1891 濃尾地震	8.0	7.4	横ずれ

分析結果を図2に、回帰式を式(1)に示す。回帰係数 C_3 については、 C_3 を増加した場合に-2対数尤度は減少する一方、 C_1 及び C_2 の標準誤差は増加するため、-2対数尤度と標準誤差のバランスが良い $C_3=0.2$ が

妥当と判断した。図2には、ロジスティック回帰した曲線とともに、主断層からの距離について1km単位の各区間の「副断層の発生率」をプロットした。前述のとおり、回帰に用いた元データは「1」または「0」であるため、そのままプロットしたのでは回帰曲線がどれくらい適合しているかが分からない。そこで、ロジスティック回帰を行う際に一般的に使う表示方法として、各区間の「1」の総数を各区間の全格子数で除した値、すなわち「副断層の発生率」をプロットした。

$$P_{2d} = \frac{e^z}{1 + e^z}, \quad z = C_1 + C_2 \ln(r + C_3) \quad (1)$$

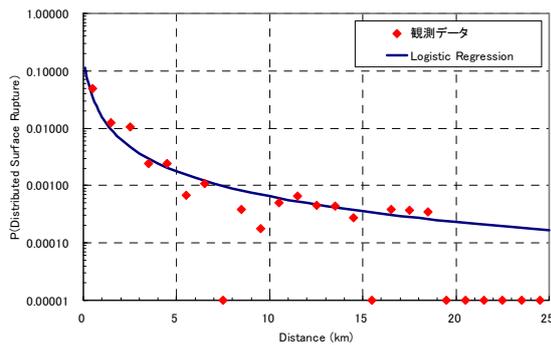
$$500\text{m} \times 500\text{m} : C_1 = -3.859, C_2 = -1.499, C_3 = 0.2$$

$$250\text{m} \times 250\text{m} : C_1 = -4.903, C_2 = -1.459, C_3 = 0.2$$

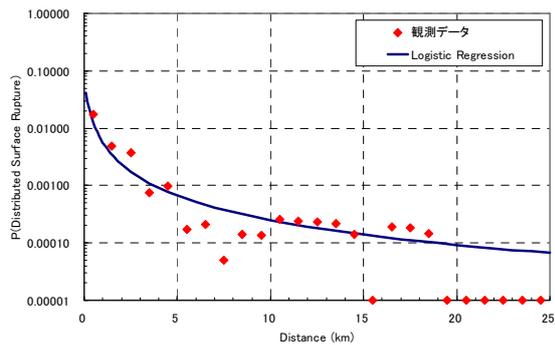
$$100\text{m} \times 100\text{m} : C_1 = -6.135, C_2 = -1.427, C_3 = 0.2$$

$$50\text{m} \times 50\text{m} : C_1 = -6.988, C_2 = -1.410, C_3 = 0.2$$

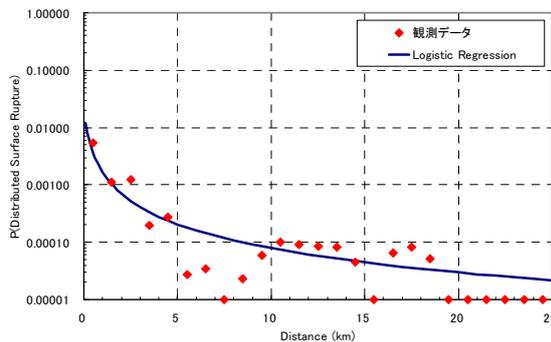
主断層からの距離が5kmの位置を例にとってみると、図2から、500m×500mでは副断層の発生確率は 1.8×10^{-3} であるのに対し、250m×250mでは 6.7×10^{-4} 、100m×100mでは 2.1×10^{-4} 、50m×50mでは 9.0×10^{-5} となっている。このように、分析する格子寸法が小さくなるほど確率が小さく評価され、分析する格子を1/10とすると確率はおよそ1/20となっていることが分かる。また、Petersen et al.(2011)⁴⁾の結果と比較して、同じ格子寸法でも本研究の方が確率は小さい。



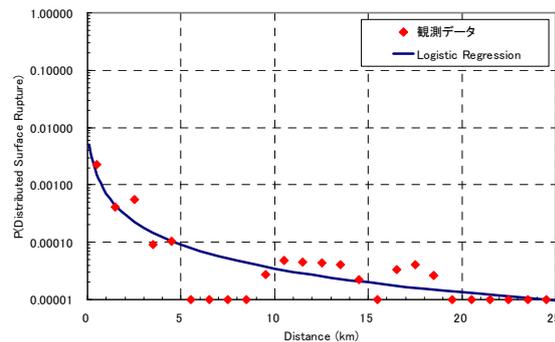
(a) 500m×500m



(b) 250m×250m



(c) 100m×100m



(d) 50m×50m

図2 格子寸法依存性の分析結果（全データ）

なお、回帰にあたっては、主断層の変位センスのタイプ、すなわち主断層が横ずれ断層か逆断層かを分類した分析も行ったが、図3に示すとおり両者の差はあまりなかったことから、横ずれ断層と逆断層を統合した距離減衰式を策定した。また、高尾ほか(2013)³⁾は、地震規模Mwも変数に含めたが、高尾ほか(2013)³⁾の P_{2d} 評価式から得られる副断層の発生確率は、主断層からの距離が5kmの場合を例に計算すると、Mw7.5で 2.7×10^{-3} 、Mw7.0で 2.0×10^{-3} 、Mw6.5で 1.5×10^{-3} であり、実務におけるMwがMw6.5~7で設定されることを想定すると、Mwの影響は上述した格子寸法の影響に比べて小さいことから、新たに提案する式ではMwを変数に含めなかった。

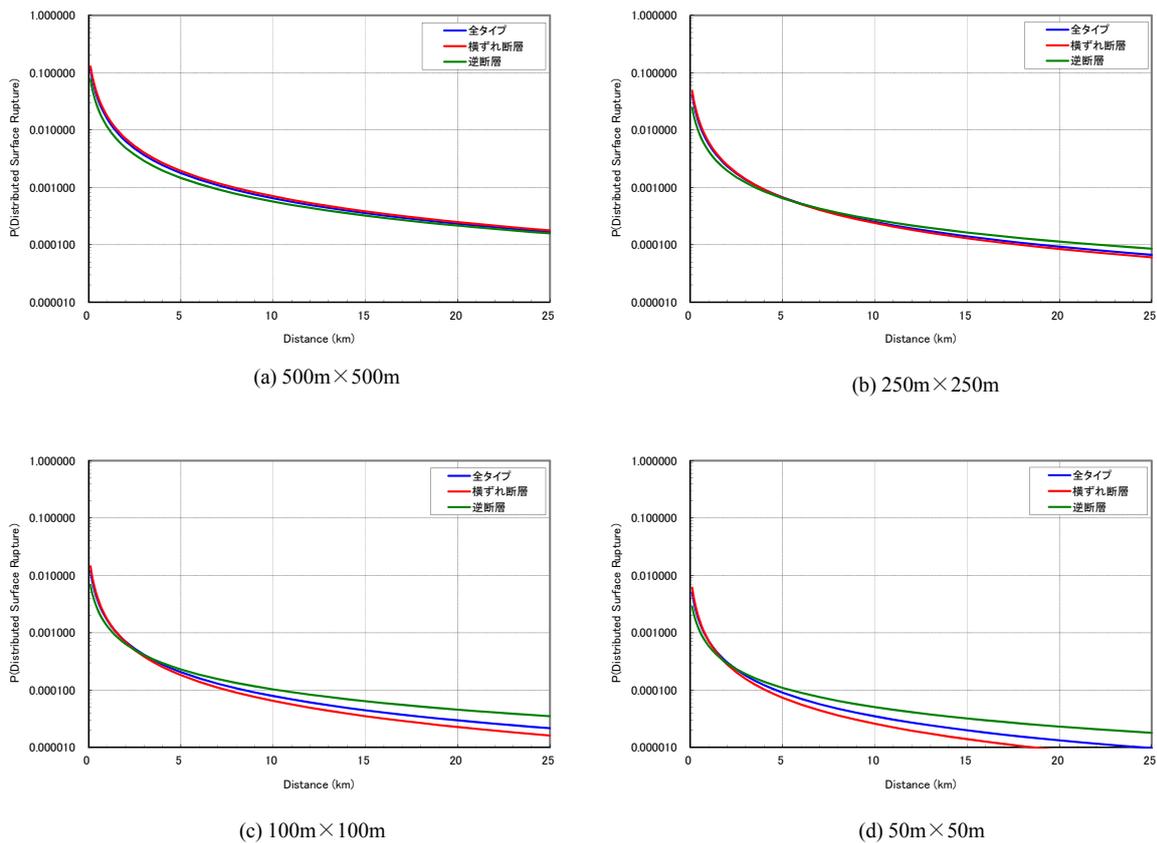


図3 格子寸法依存性の分析結果（断層タイプ別）

3.2 P_{3d} 評価式の信頼性向上

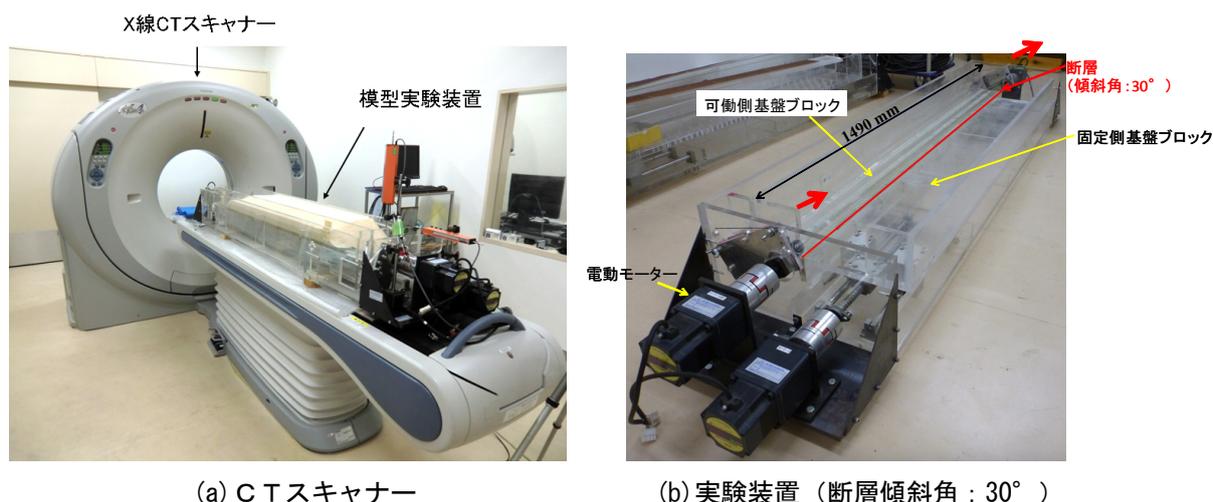
P_{3d} を評価するためには、主断層からの距離と副断層の変位量の関係式を用いる必要がある。高尾ほか(2013)³⁾では、過去の地表地震断層のデータを基に評価式を策定しているが、主断層からの距離が大きくなるほどデータが乏しく、模型実験や数値解析によるデータの補充が必要である旨指摘している。そこで、本論文では、副断層の変位量が主断層との距離の変化に応じてどのように変化するのかに着目して、模型実験結果および個別要素法による数値解析結果を整理した。

3.2.1 模型実験

基盤の断層変位に伴う被覆層の変形過程の解明を目的とした模型実験としては、Cole and Lade (1984)⁶⁾、上田ほか(1999a⁷⁾、1999b⁸⁾)など^{9)~12)}が挙げられる。また、近年においては、Ueta et al. (2000)¹³⁾、上田ほか(2011)¹⁴⁾のように、模型実験における変形過程をCTスキャナーで撮影することにより、その発達過程をより詳細に観察する試みが行われている。本研究においてもCTスキャナーを用いることにより、副断層の変位の発達過程や主断層からの距離に応じて副断層の変位量が減衰する様子を分析した。

(1) 実験装置

被覆層に相当する模型地盤を土槽内に作成後、基盤に変位を与え、模型地盤の変形構造を観察した。模型地盤材料としては乾燥砂を使用した。図4(a)に示す医療用ヘリカルX線CTスキャナー（64列マルチスライスCT、東芝製Aquilion64）による観察を可能とするため土槽はアクリル製とした（図4(b)）。土槽は可動側の基盤ブロックと固定側の基盤ブロックからなり、両者の接触面が基盤岩中の断層に相当する。この基盤ブロック間の断層面の傾斜は、ブロックを取り換えることにより、30°、45°、60°の3通り設定した。電動モータにより可動側の基盤ブロックを一定速度で斜め上方へ変位させた。これにより基盤の逆断層変位を模擬した。土槽の長さは1,490mm、高さは110mmとした。土槽の幅は、断層の傾斜角が30°、45°、60°のケースに応じて、それぞれ350mm、335mm、320mmとした。



(a) CTスキャナー

(b) 実験装置 (断層傾斜角 : 30°)

図4 CTスキャナーおよび実験装置

(2) 模型地盤と相似則

地震発生層上端まで深さは地域ごとに異なるが、本研究では一般的な深さとして約5kmと仮定し、地震発生層上端より浅部には約5kmの層厚の被覆層が分布すると仮定した。模型と実地盤との相似比（長さの相似比）を 1×10^5 と設定したため、模型における被覆層の厚さは50mmである（表2）。また、模型地盤の長さ（基盤中の断層の走向方向）は1,490mmとし、模型地盤の幅（基盤中の断層の走向に直交方向）は断層傾斜角30°の場合350mmとしたので、実地盤ではそれぞれ149km、35kmに相当する。本実験では、被覆層として相馬珪砂8号（比重：Gs=2.653、50%粒径：D₅₀=0.1mm）および豊浦標準砂（比重：Gs=2.633、50%粒径：D₅₀=0.17mm）を使用した。

乾燥砂を用いた断層模型実験は、脆性変形が主体の岩盤（上部地殻）内の断層の形態や発達過程を解明するために数多く行われており（例えばCole and Lade(1984)⁶、Horsfield (1977)¹⁵）、模型砂地盤に発達するせん断帯の形態の特徴や発達過程は、実地盤における断層のそれと良い一致を示すことが実証されている。このような実験で観察されるせん断帯の形態と実地盤の断層形態との対応を保証するために、模型と実地盤との間で相似則が満たされている必要がある（Hubbert(1937)¹⁶、1951¹⁷）。すなわち、実地盤の諸物理量と模型のそれとの比は、両者に共通する断層の形成メカニズムを支配する方程式を満足する必要がある。その支配方程式の代表的なものとして式(2)に示すモール・クーロンの破壊基準が挙げられるが、この破壊基準において、上部地殻の岩石の内部摩擦角と乾燥砂のそれとの間に大きな差がないので、ここでは粘着力について検討する。

$$\tau = \tau_0 + \sigma_n \tan \phi \quad (2)$$

ここに、 τ はせん断応力、 τ_0 は粘着力、 σ_n は垂直応力、 ϕ は内部摩擦角である。

粘着力は応力の次元を持つが、応力を運動方程式によって記述し、模型と実地盤の運動方程式同士の比を取ることににより、式(3)に示す相似則を誘導することができる(例えば垣見ほか(1994)¹⁸⁾)。また、この相似則は、香川(1978)¹⁹⁾に示された“力の比を用いる方法”、すなわち、模型と実地盤の重力の比が模型と実地盤の粘着力の比に等しいと置くことによっても誘導できる。ただし紙面の都合上、誘導の詳細は省略する。

$$\sigma^* = \rho^* g^* L^* \quad (3)$$

ここに、 σ^* は応力に関する相似比、 ρ^* は密度に関する相似比、 g^* は重力加速度の相似比、 L^* は長さの相似比である。

当実験で使用した相馬珪砂8号の湿潤密度は $1,290\text{kg/m}^3$ (上田ほか(1999a)⁷⁾)、一般的な堆積岩の密度は $1,400\sim 2,600\text{kg/m}^3$ であることから、密度の相似比は平均で0.65である。また、 g^* は1.0、 L^* は 1×10^{-5} なので、 σ^* は 6.5×10^{-6} となる。モール・クーロンの破壊基準において、堆積岩の一般的な粘着力50MPa(Byerlee(1978)²⁰⁾)をこの応力の相似比でスケールダウンした値345Paは、室内試験で求められた石英を主体とする乾燥砂の粘着力の値とよく一致する(Kranz(1991)²¹⁾、Schellart(2000)²²⁾)。

同様に、豊浦標準砂の湿潤密度は $1,304\sim 1,463\text{kg/m}^3$ なので密度の相似比は平均で0.69である。また、 g^* は1.0、 L^* は 1×10^{-5} なので、 σ^* は 6.9×10^{-6} となる。

以上のことから、脆性破壊が主体の堆積岩の模擬材料として乾燥砂が適当であると考えられる。乾燥砂地盤のように、モール・クーロンの破壊基準が適用可能な材料の破壊はひずみ速度に依存しない(上田ほか(1999a)⁷⁾、1999b⁸⁾)ことから、本実験では0.01mm/秒とした。

表2 模型実験の条件

	模型地盤(M)	実地盤(P)	相似比(M/P)
層厚	50mm	5km	$L^* = 1.0\times 10^{-5}$
地盤の長さ(走向方向)	1,490mm	149km	
地盤の幅(走向直交方向)	30° : 350mm	30° : 35.0km	
	45° : 335mm	45° : 33.5km	
	60° : 320mm	60° : 32.0km	
重力加速度	9.81m/s^2	9.81m/s^2	$g^* = 1.0$
湿潤密度	相 : $1,290\text{kg/m}^3$	$2,000\text{kg/m}^3$	相 : $\rho^* = 6.5\times 10^{-1}$
	豊 : $1,384\text{kg/m}^3$		豊 : $\rho^* = 6.9\times 10^{-1}$
応力	相 : 325Pa	50MPa	相 : $\sigma^* = 6.5\times 10^{-6}$
	豊 : 345Pa		豊 : $\sigma^* = 6.9\times 10^{-6}$

豊 : 豊浦標準砂、相 : 相馬珪砂8号

(3) 実験ケースおよび計測項目

今回、実験は表3に示す5ケースを実施した。実験中に基盤の水平変位量が1mm増すごとにC T撮影を行い、模型地盤の鉛直断面(基盤中の断層の走向に直交する方向)における変形過程を記録した。また、基盤の断層の延長線上の地表面に現れる主断層の鉛直変位量と、副断層の鉛直変位量および主断層からの水平距離を計測した。

主断層の鉛直変位量と副断層の鉛直変位量については、0.1mmの精度で計測したが、0.5mm以下の場合にはC T画像でせん断帯の発達を確認することが困難であることや整形時から存在する初生的な不陸と変位を区別することが困難であるため、0.5mmを超える変位量を計測した。主断層からの水平距離については、基準点を予め決めておいた上で座標を0.01mmの精度で計測し、結果整理にあたって主断層からの距離に換算した。

表3 実験ケース

	砂の種類	断層傾斜角
ケース1	相馬珪砂	30°
ケース2	相馬珪砂	45°
ケース3	相馬珪砂	60°
ケース4	豊浦標準砂	45°
ケース5	豊浦標準砂	60°

(4) 実験結果

ケース1のCT画像を図5に示す。(a)～(g)のCT画像は、基盤の鉛直変位量が5mmから35mmまでを5mm刻みで示している。砂地盤内部のせん断帯は、ダイレイタンシーにより周辺の地盤に比べ密度が低下するため、CT画像においては周囲より暗く表示される。これらのCT画像から、基盤の変位量が増すにしたがって、砂層内に基盤の断層の延長線上にせん断面（主断層）が進展していき、それが地表に到達した後、せん断面が前傾していく様子が分かる。また、(f)において上盤側の撓曲の頂部付近で主断層とは別のせん断面が発生し、(g)では基盤の断層とは逆傾斜の正断層とそれにアンティセティックな正断層が複数形成されていることが分かる。これら(f)および(g)で確認できる断層を副断層として整理・分析する。

図6はケース2からケース5のCT画像である。(a)は、ケース2における基盤変位量が25mmの時、(b)はケース3における基盤変位量が20mmの時、(c)はケース4における基盤変位量が35mmの時、(d)はケース5における基盤変位量が30mmの時のCT画像である。

次に結果の整理について述べる。上述したとおり、基盤の断層を変位させるにしたがって被覆層内にせん断帯が発達していくが、主断層および副断層のいずれの場合も地表面にずれが認められない限り、変位量はゼロとした。また、実験結果の整理にあたっては、副断層の変位量を主断層の変位量で基準化する必要があるが、模型実験では実際の地震時における断層の単位変位量（現地の1mは模型では0.01mmに相当）は再現できないため、副断層の累積変位量（実験開始からの累積）を主断層の累積変位量（実験開始からの累積）で基準化した。その際、主断層の変位量がゼロの場合は基準化できないため、そのような場合は整理対象から除外した。さらに、主断層のごく近くにおける変位量が主断層の変位量よりも大きく、それ以外のせん断帯の変位量がすべてゼロの場合は、主断層の近くに発生した変位を結果整理から除外した。その理由は、図6の(a)、(b)および(c)において観察されるように、主断層は2条に分岐しており、第1章で述べた定義に照らすと主断層に分類するべきと判断したからである。ただし、この場合においても、その後発達した副断層までの距離の認定にあたっては、最も下盤側の断層による地表部での変位を主断層の変位とみなして距離を計測した。すなわち、距離を長く見積もるように計測したため、距離減衰式の策定上は安全側の配慮になっている。

このようにして実験結果を整理し、主断層の変位量で基準化した副断層の変位量と主断層からの距離の関係を、高尾ほか(2013)³⁾に示された既往地震時における現地調査結果と比較して図7に示した。その際、実験で計測した主断層の変位量は、主断層の長さ方向の平均的な値であると解釈し、比較に用いる現地調査結果としては、副断層の変位量を主断層の平均変位（最大変位ではない）で基準化したデータを適用した。ここで平均変位を用いたことは、実験結果の整理にあたって累積変位量を用いたことと整合している。

図7にはケース1～4の結果を示してあるが、ケース5については上述した整理条件に基づいて検討した結果、プロットできるデータがなかったため図化できなかった。また、同一ケースで複数のプロットがあるケースについては、計測できた副断層が複数発生したものであり、複数回の実験をした結果ではない。

図7を見ると、全体の傾向として、砂箱を用いた実験結果は現地調査結果と概ね整合していることが分かる。また、相馬珪砂を用いたケース1～3について比較すると、基盤の断層の角度が60°、45°、30°と低角度になるほど副断層の発生位置がより遠方になることが分かる。一方、相馬珪砂と豊浦標準砂の

45° 同士（ケース2とケース4）を比較すると、豊浦標準砂のほうが相馬珪砂よりもより遠くに副断層が発生している。平均粒径の影響と思われるが、実験ケースが限られているため深い考察は今後の課題である。

次節の3.2.2では、個別要素法を用いた数値解析によっても同様の整理をしており、高尾ほか(2013)³⁾で示された距離減衰式との関係については、3.2.2でまとめて述べる。

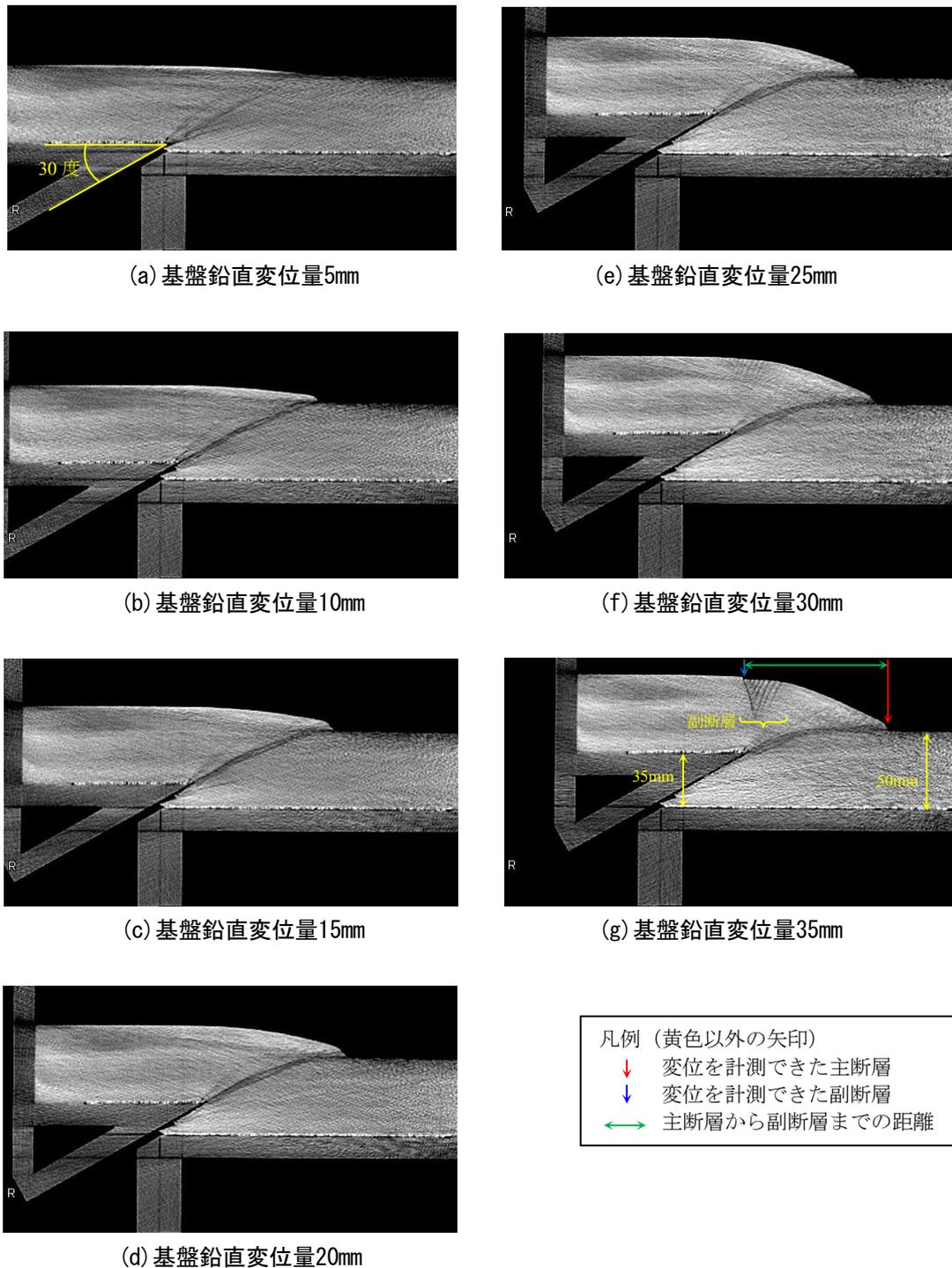


図5 ケース1のCT画像

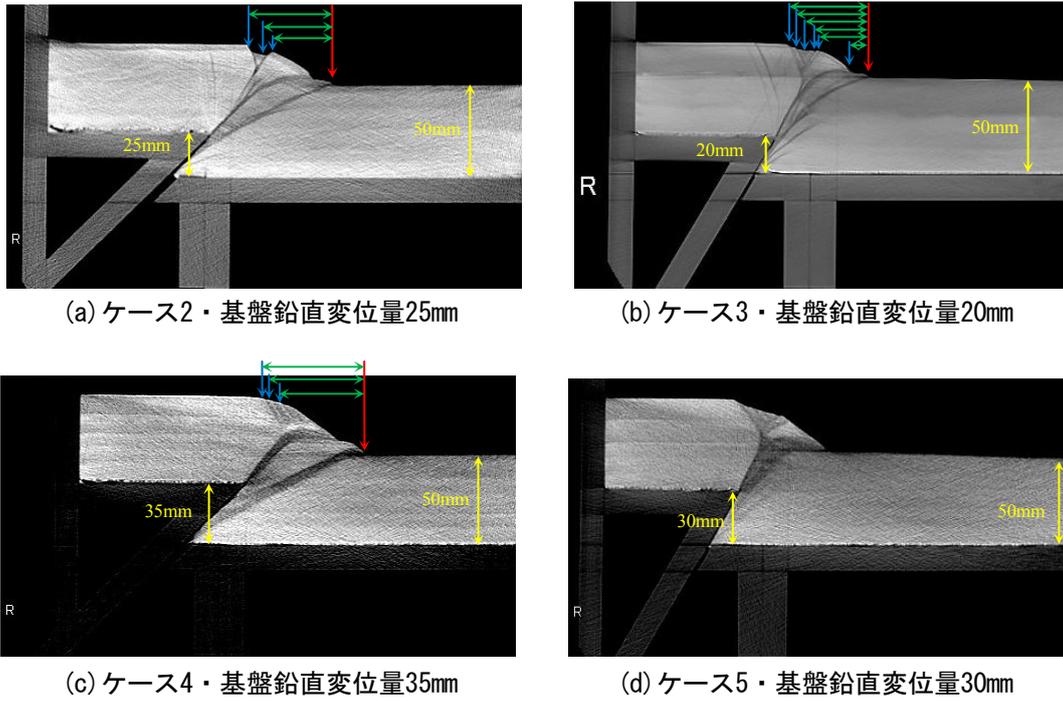


図6 ケース2～ケース5のCT画像
(図の表示方法は図5と同じ)

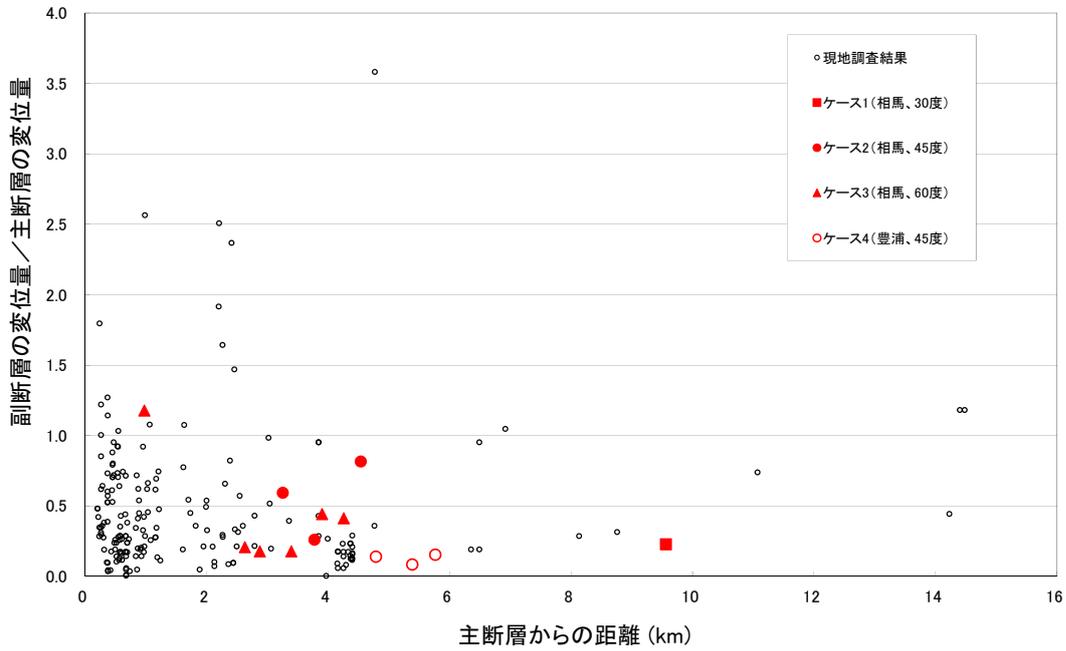


図7 実験結果と現地調査結果の比較

3.2.2 個別要素法による数値解析結果を用いた検討

(1) 解析手法および解析条件

新井(2013)²³⁾および新井ほか(2013)²⁴⁾は、主断層が動いた場合の、主断層から離れた場所における副断層の変位量を定量的に評価することを目的として、3次元個別要素法を用いた数値解析を実施している。解析にあたっては、Cundall(1971)²⁵⁾が提案した手法を基本とし、中瀬(2001)²⁶⁾が示した転がり摩擦を適用して内部摩擦の効果を再現できるようにしている。

解析ケースは表4に示すとおりであり、3.2.1節で示した模型実験の再現という位置付けで、スケール比（長さの相似比）を実験と同様に 1×10^5 と設定している。ただし、解析上の制約から粒径は実験ほど細かくできなかったため、2mmおよび1mmとなっている。境界条件は、解析領域の手前と奥の両面（紙面と平行な面）は摩擦角を考慮しない固定境界であり、左右両面及び底面（紙面と直交する面）は摩擦角を考慮した固定境界である。

表4 解析ケース

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
解析領域の幅 (m)	0.24			0.20	
解析領域の奥行き(m)	0.02				
解析領域の高さ(m)	0.05				
粒径(mm)	2.0		1.0	2.0	1.0
間隙比	0.54		0.55	0.54	0.55
粒子密度(kg/m ³)	2600				
断層の傾斜角(°)	45			60	
時間ステップ(秒)	1.0×10^{-6}		6.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}	6.0×10^{-7}
法線方向のバネ定数(N/m)	2.0×10^5		1.0×10^5	2.0×10^5	1.0×10^5
接線方向のバネ定数(N/m)	2.0×10^5		1.0×10^5	2.0×10^5	1.0×10^5
法線方向の減衰定数(N・sec/m)	7.38×10^{-1}		1.84×10^{-1}	7.38×10^{-1}	1.84×10^{-1}
接線方向の減衰定数(N・sec/m)	7.38×10^{-1}		1.84×10^{-1}	7.38×10^{-1}	1.84×10^{-1}
接線方向の摩擦角(°)	30				
転がり摩擦係数	0.05	0.02		0.05	

(2) 解析結果

まず、DEM解析が模型実験を概ね再現できていることを確認するために、上田ほか(1999a)⁷⁾に示されたW/Hを分析した。W/Hの定義は図8のとおりであり、Wは、せん断帯が最初に地表に到達した時点における、基盤の断層の初期位置から地表部のせん断帯までの水平距離であり、Hは被覆層の厚さである。ただし、DEM解析の場合は、基盤の断層の変位に伴って地表部に生じるせん断ひずみの集中した箇所までの水平距離をWとした。分析結果を表5に示すが、DEM解析結果は模型実験結果とほぼ同等となっていることから、基盤の断層を変位させた時のせん断帯の発達状況を概ね再現できていると言える。

表5 数値計算の再現性の確認結果

断層角度	W/H	
	上田ほか(1999a) ⁷⁾	DEM解析
45°	1.5~1.8	1.38~1.62
60°	1.0~1.3	1.30~1.40

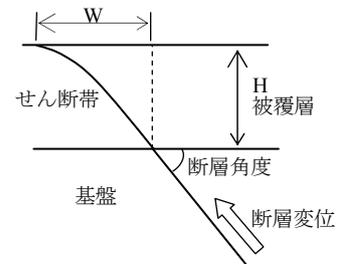


図8 W/Hの定義

次に、DEM解析のうち、case 1における基盤の鉛直変位量が3.5cmに達した時のせん断ひずみ分布図を図9(a)に示す。ただし、せん断ひずみは、偏差ひずみの第二不変量の平方根 ($\sqrt{J_2}$) を5段階で表示しており、副断層発生領域を強調するために、基盤の鉛直変位量が約2.4cmに達した時点からの増分を表示した。 $\sqrt{J_2}$ の色表示は、水色が $0.2s \leq \sqrt{J_2} < 0.4s$ 、緑色が $0.4s \leq \sqrt{J_2} < 0.6s$ 、黄色が $0.6s \leq \sqrt{J_2} < 0.8s$ 、紫色が $0.8s \leq \sqrt{J_2} < s$ 、赤色が $s \leq \sqrt{J_2}$ 、 $s=3.0$ である。なお、副断層発生域内で $\sqrt{J_2}$ の大小が区別できるように、ケースごとにsを変えて考察した。

実験とは粒径が異なるため、全く同じ条件のケースは存在しないが、図6(c)に示したケース4（豊浦標準砂の45°）が最も近いケースである。せん断ひずみ分布からも主断層がある幅を持って発達していること、主断層の上盤側に副断層が発生していることが確認でき、模型実験で観察された状況とよく整合している。

図9(a)の白枠内の拡大図を図9(b)に示す。図9(b)の白線は、初期的に地表面に存在していた要素の変形後の位置であり、この白線に基づき主断層の変位量（累積変位量）を6.2mm、副断層の変位量（累積変位量）を1.5mm、主断層から副断層までの距離を57.93mmと計測した。副断層発生域内のひずみが集中した箇所と白線の段差がよく対応していることが分かる。

DEM解析結果から得られた、主断層から副断層までの距離と副断層の変位量との関係を図10に示す。その際、解析結果についても実験と同様に、実際の地震時における断層の単位変位量は再現できないことから、主断層、副断層ともに、基盤の鉛直変位量が3.5cmに達した時の累積変位量を用いて基準化した。

図10を見ると、模型実験と同様に数値解析結果も現地調査結果と概ね整合していることが分かる。また、case1とcase4、case3とcase5を比較すると、いずれの粒径においても基盤の断層の角度が60°よりも45°のほうが副断層の発生位置がより遠方になっており、この傾向は模型実験結果と整合していることから、数値解析によっても副断層の発生状況を概ね再現できていると判断できる。さらに、case1とcase3、case4とcase5を比較すると、粒径の大きいcase1やcase4のほうがより遠くに副断層が発生している傾向も模型実験結果とよく整合している。

次に、現地調査結果、模型実験結果および数値解析結果を用いて、90%非超過レベルの距離減衰式を策定した。高尾ほか(2013)³⁾では $y=1.9\exp(-0.17r)$ が提案されていたが、新たに得られたデータを用いて再検討したところ、式(4)のとおりとなった。

$$y = 1.6 \exp(-0.20r) \quad (4)$$

ここに、yは副断層の変位量と主断層の変位量の比、rは主断層から副断層までの距離(km)である。

全体の傾向は双方の式で同様であるが、3~5kmの距離のデータが増えたことにより係数が見直され、若干距離減衰の傾向が強くなっている。

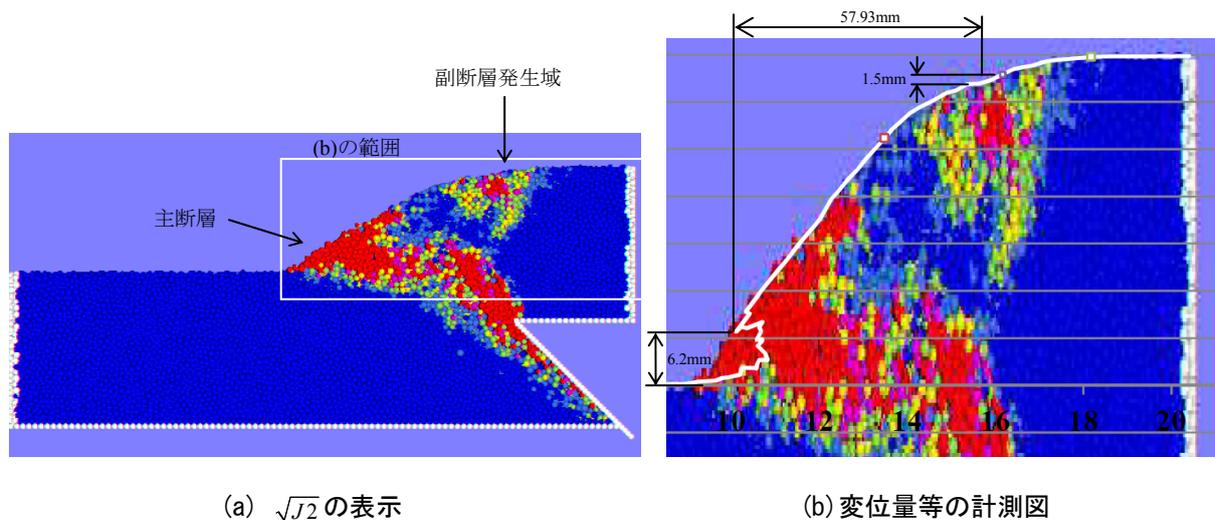


図9 DEM解析結果

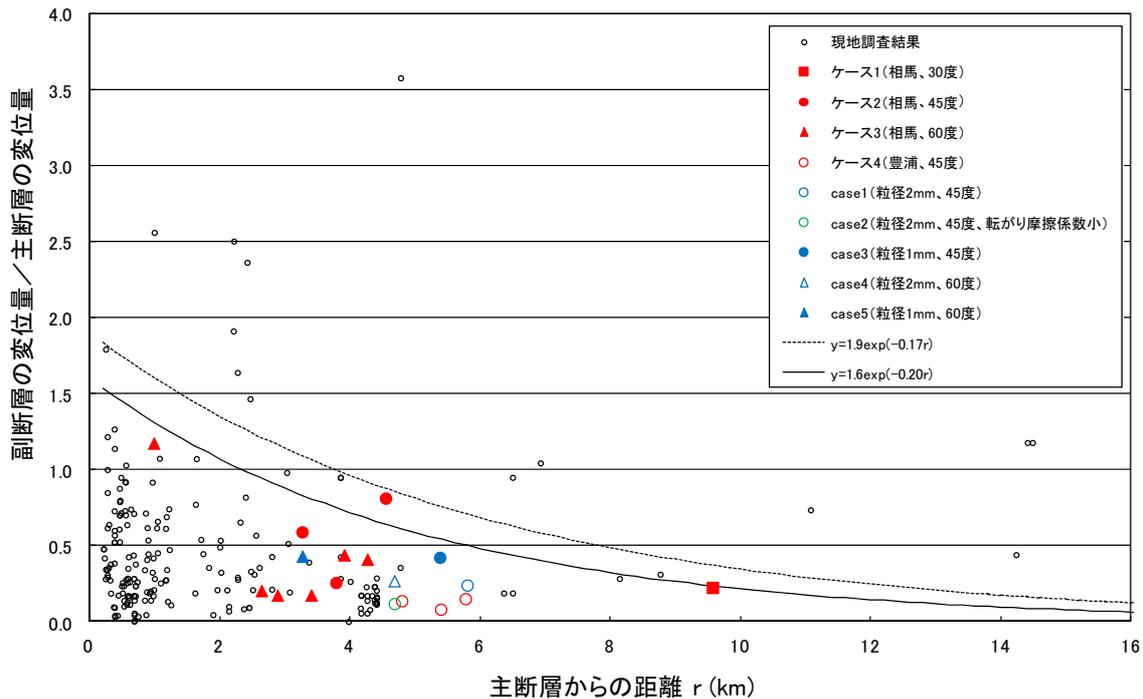


図10 解析結果と実験結果・現地調査結果の比較

4. ロジックツリー手法を用いた認識論的不確定性の考慮

PFDDHAでは、偶然的な不確定性と認識論的不確定性の2つの不確定性を考慮することができる。偶然的な不確定性は、地震動強さのばらつき、津波高さのばらつき、断層変位量のばらつきなどのように、現実には存在しているが現状では予測不可能と考えられるものであり、認識論的不確定性は、活断層であるかないかという問題や、発生するマグニチュードの範囲などのように研究が進展すれば確定できるが現状では予測困難なものである。

偶然的な不確定性は、ハザード解析モデルの中では確率密度関数を用いることにより考慮されるばらつきであり、1本のハザード曲線の計算において考慮される。PFDDHAにおける具体的な考慮方法は高尾ほか(2013)³⁾に詳述されているとおりである。

一方、認識論的不確定性は、ハザード解析モデルのパラメータやモデル化自体に関する不確定性であり、ハザード曲線群のばらつきとして評価される。通常、認識論的不確定性を評価する手法としてロジックツリー手法が用いられており、判断が分かれる事項に関して複数の選択肢(分岐)あるいは連続的な確率分布が設定される。分岐に対しては将来の正しさの可能性に基づき重みが設定される。

認識論的不確定性を考慮するという事は、認識論的不確定性に対応した複数の組み合わせに基づき、重み(確率)を持ったハザード曲線群を作成することである。これを系統的に行うための方法としてロジックツリーの方法があり、その結果は通常フラクタル表示される。フラクタルハザード曲線(パーセントイルハザード曲線)は、ハザード曲線の集合に対して等非超過確率レベルを示すものである。

本論文では、偶然的な不確定性および認識論的不確定性の双方を考慮したPFDDHAの解析例を示す。

4.1 解析条件

評価地点には大きさが100m×100mの構造物が存在し、評価地点周辺に3本の断層が分布すると仮定する。断層の条件は表6に示すとおりであるが、いずれの断層も評価地点の直下には存在しないと仮定したため、副断層による変位がある値を超過する1年あたりの頻度を計算することになる。

断層Aは評価地点から10kmの位置に存在し、専門家間では活断層であるとの意見で一致していると仮定する。地震規模および再来期間については意見が分かれており、地震規模についてはMw6.8、7.0、7.2、再来期間については2,000年、4,000年および6,000年という意見があると仮定する。

断層Bは評価地点から5kmの位置に存在し、専門家間では活断層であるとの意見で一致し、地震規模についてもMw6.8で意見が一致していると仮定する。一方、再来期間については意見が分かれており、5,000年、7,000年および9,000年という意見があると仮定する。

断層Cは、評価地点から1kmの位置に存在し、専門家間では活断層か否かで意見が分かれていると仮定する。地震規模についてはMw6.6で意見が一致しているが、再来期間については意見が分かれており、50,000年、70,000年および90,000年という意見があると仮定する。

意見が分かれている項目については、専門家に対してアンケート調査を行い、その結果に基づいて重みを設定することがよく行われるが、本論文はあくまでも例題という位置付けであることから、図11に示すように設定した。ただし、断層Cの活断層か否かに関する分岐については、重みの感度を確認する目的で、重みを3通り設定した。すなわち、断層Cが活断層であると考えることが正しいとする分岐の重みと、活断層ではないと考えることが正しいとする分岐の重みの比を、0.9対0.1、0.5対0.5および0.1対0.9の3通り設定した。

今回の解析では評価地点の構造物の大きさを100m×100mと想定したため、 P_{2d} の算出にあたっては、3.1(2)で提案した距離減衰式のうち、100m×100mの格子寸法から得られた式を用いた。なお、3.1(1)で述べたとおり、PFDHAにおける P_{2d} は格子寸法に依存することから、評価地点の構造物の大きさに応じた距離減衰式を用いる必要がある。

表6 解析条件

断層名	評価地点からの距離	活断層か否か	地震規模Mw	再来期間
断層A	10km	活断層で意見が一致	意見が分かれている Mw=6.8、7.0、7.2	意見が分かれている R=2,000年、4,000年、6,000年
断層B	5km	活断層で意見が一致	Mw=6.8	意見が分かれている R=5,000年、7,000年、9,000年
断層C	1km	意見が分かれている	Mw=6.6	意見が分かれている R=50,000年、70,000年、90,000年

4.2 解析結果

認識論的不確かさを考慮した解析は次の手順で実施した。

①ロジックツリーの分岐ごとにハザード曲線を計算

断層A：A11～A33の9通り

断層B：B1～B3の3通り

断層C：C1およびC21～C23の4通り

②上記①の全組合せ（9×3×4=108通り）のハザード曲線を計算

③上記②で得られたハザード曲線群からフラクタルハザード曲線および平均ハザード曲線を計算

①の計算方法については、高尾ほか(2013)³⁾に従い、 P_{2d} 及び P_{3d} については本論文で提案した評価式を適用した。また、②および③については、確率論的地震動ハザード解析や津波ハザード手法等を解説した手順書等に記載されている（例えば、土木学会(2011)²⁷⁾）ので、その説明はここでは割愛する。

上記の手順で作成されたハザード曲線を図12に示す。(a)はロジックツリーの分岐ごとのハザード曲線、(b)は全組合せのハザード曲線、(c)は断層Cの活断層か否かに関する重みが非活断層0.9、活断層0.1の場合のフラクタルハザード曲線、(d)は重みの違いによる算術平均ハザード曲線同士の比較を示している。

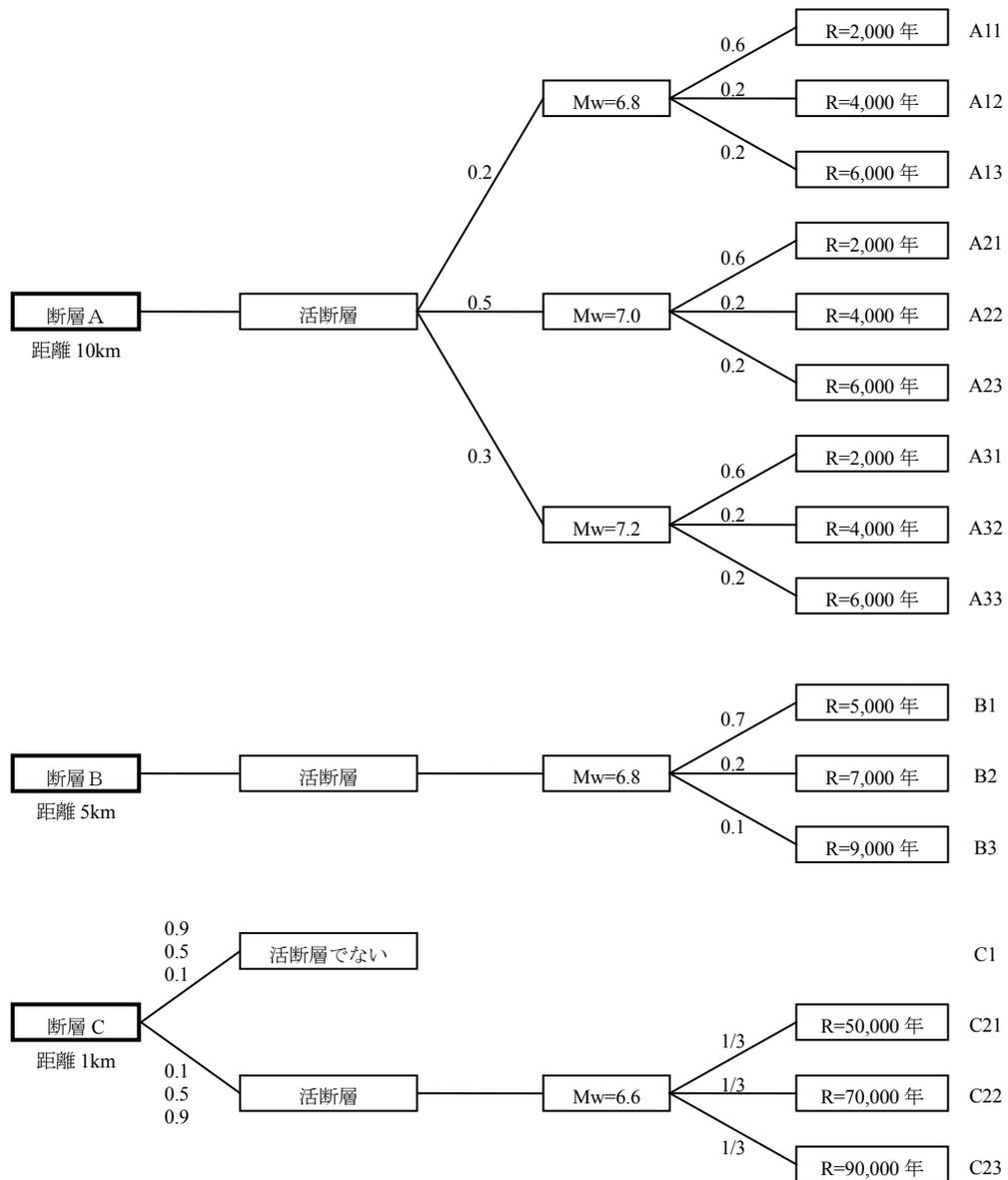


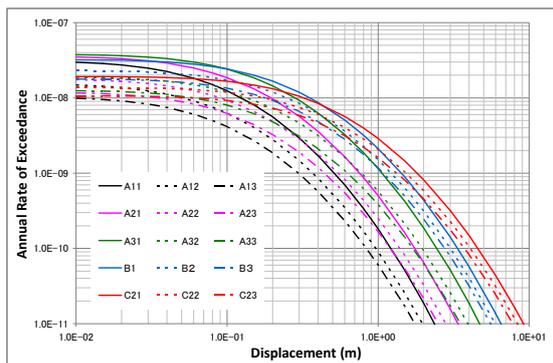
図 11 ロジックツリーおよび重み

(a)の曲線群を見ると、一般的な傾向として、断層から評価地点までの距離が近いほど、また地震規模が大きいくほど、また再来期間が短いほど、ハザード曲線が上に位置していることが分かる。ただし、1本1本を注意深く比較してみると分かるように、断層から評価地点までの距離、地震規模および再来期間がハザード曲線に与える影響はケースバイケースである。例えば、A21とC21を比較すると、2本のハザード曲線は変位量0.1mを少し超えた所で互いに交差・逆転している。地震規模や再来期間から判断するとA21の影響のほうが大きそうであるが、距離が遠くなるにつれて距離減衰の効果が上回るようになるため、逆転が生じるのである。

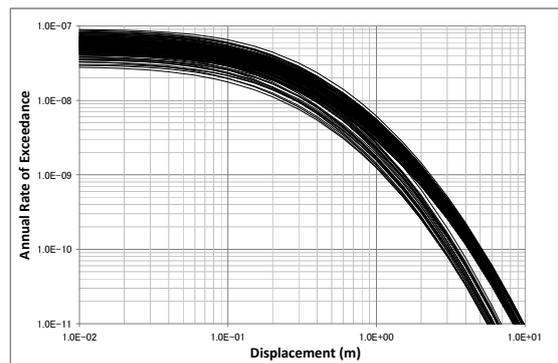
次に(b)および(c)について述べる。(b)には全組合せ108通りのハザード曲線が作図されている。これをフラクタイル表示したものが(c)である。通常、算術平均ハザード曲線(average)または0.5フラクタイルハ

ザード曲線が評価に用いられるが、0.05～0.95の分布範囲も併せて確認しておくことが重要とされている。今回の試解析結果によると、フラクタル曲線群はいずれも変位量0.01m～0.1mの辺りで 10^{-8} のオーダーであり、意見のばらつきを考慮したとしてもその年超過頻度は小さいと言える。

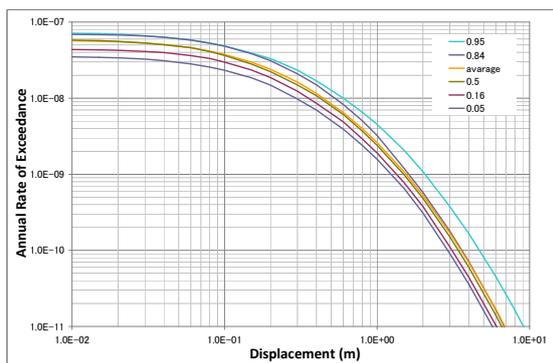
最後に(d)について述べる。図には3本のハザード曲線が描かれている。全て算術平均ハザード(average)であるが、青線は、断層Cの活断層か否かに関する重みが非活断層0.9、活断層0.1の場合((c)のaverageと同じ)であり、赤線は0.5対0.5の場合、黒線は0.1対0.9の場合である。言い換えれば、断層Cが活断層である可能性は、青線、赤線、黒線の順に上がっていくという仮定になっている。活断層か否かという評価は極めて離散的なものであり、決定論的な検討の中では、設計に考慮するか否かという問題に置き換えられると言ってもよい。一方、確率論的な検討においては、活断層と考えることまたは活断層ではないと考えることの正しさを重み(確率)として表現することによって双方の意見を取り込むことにより、1かゼロかの問題ではなく検討を進めることができる。(d)の3本の曲線を比較すると年超過頻度にそれほど違いは見られないものの、青線が一番下に、次に赤線、黒線が一番上に分布していることが分かる。三者に大きな差が見られなかったのは、断層Aおよび断層Bによる影響に薄められたからである。すなわち、フラクタル曲線の元となる全組合せのハザードについては、重みは各重みの積によって求められる一方、年超過頻度は各ハザードの和で計算されるからである。いずれにせよ、活断層か否かのようなこれまで離散的に扱ってきた問題をロジックツリーおよび重みを用いて数値として取り扱うことにより、断層変位量についても地震動や津波高のようにハザード曲線として図化できることを示した意義は大きいと考える。



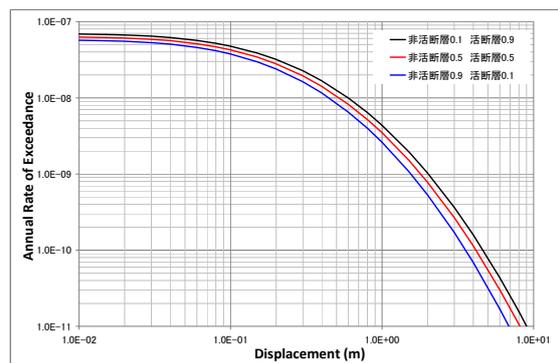
(a) ロジックツリーの分岐ごとのハザード曲線



(b) 全組合せのハザード曲線



(c) フラクタルハザード曲線
(断層Cの重み: 非活断層0.9、活断層0.1)



(d) 断層Cに関する重みの違いによる
算術平均ハザード曲線の比較

図12 解析結果のハザード曲線表示

5. おわりに

本研究では、高尾ほか(2013)³⁾で提案されたPFDHAの各種評価式のうち、副断層の発生確率の距離減衰式および副断層の変位量の距離減衰式の信頼性向上に取り組んだ。

副断層の発生確率の距離減衰式については、分析する格子寸法に依存することから、実際のPFDHAで対象とする構造物の大きさを想定して500m×500m、250m×250m、100m×100m、50m×50mの4種類の式を策定した。その結果、Petersen et al.(2011)⁴⁾と同様に、格子寸法が小さくなるほど副断層の発生確率が小さく評価された。また、Petersen et al.(2011)⁴⁾の結果と比較して同じ格子寸法でも本研究の方が発生確率は小さいことを確認した。さらに、副断層の変位量の距離減衰式については、模型実験結果および数値解析結果を用いてデータを補い、距離減衰式を策定し直した。これらにより、PFDHAにおける副断層に関する評価の信頼性を向上させることができた。

また、本論文では、専門家間で意見が分かれる場合の対処方法として、ロジックツリー手法について述べると共に、提案した各種評価式を用いた解析を実施することにより、PFDHAにおいても他の確率論的評価手法と同様にロジックツリー手法が有効に適用できることを示した。

今後の課題としては、各種評価式の更なる信頼性向上が挙げられる。PFDHA手法については、これを研究対象としている研究者は我が国ではごく少数であり認知度はまだ低い。実務への適用を目指してPFDHAの信頼性を向上していくためには、各種評価式の改良が今後必要と考えるが、そのためにはまずは試行的であれ実際に適用してみる第一である。米国では、Diablo Canyon原子力発電所においてPFDHAを適用して副断層変位の超過確率を評価した例があり、その評価結果は米国の原子力規制委員会(USNRC)によっても審査され、公表されている(NRC(2011)²⁸⁾)。我が国においても、各分野の研究者がPFDHAに取り組み、活発な議論が今後なされることを期待したい。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、東北大学大学院工学研究科の寺田賢二郎教授からご指導をいただきました。模型実験は電力中央研究所の方々に実施していただき、結果の整理にあたっては同研究所の木村治夫博士にご尽力いただきました。また、模型実験に対応した数値解析は、当時東北大学工学部建築社会環境工学科4年生であった新井夏海さんの苦労の結果達成することができました。さらに、論文の作成にあたっては、職場の同僚をはじめ多くの方々から貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物耐震設計ガイドライン（案）－耐震基準作成のための手引き、2001年、<http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/guidline.html>
- 2) Youngs, R.R., et al. : A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), *Earthquake Spectra*, Vol.19, No.1, 2003, pp.191-219.
- 3) 高尾誠、土山滋郎、安中正、栗田哲史：確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用、日本地震工学会論文集、第13巻、2013年、pp.17-36.
- 4) Petersen, M.D., et al. : Fault displacement hazard for strike-slip faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, 2011, pp.805-8257
- 5) Vermilye and Scholz : The process zone: A microstructural view of fault growth, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. B6, 1998, pp.12223-12237
- 6) Cole, D. A., Jr., and P. V. Lade : Influence zones in alluvium over dip-slip faults, *J. Geotech. Engng., ASCE*, 110, 1984, 599-625.
- 7) 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－、電力中央研究所報告、U98048、1999年a
- 8) 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、斜ずれ断層模型実験－、電力中央研究所報告、U98049、1999年b
- 9) Ueta, K., et al. : Computerized X-ray tomography analysis of three-dimensional fault geometries in

basement-induced wrench faulting, *Engineering Geology* 56, 2000, pp.233-246

- 10) 上田圭一：横ずれ断層系の発達過程ならびに変位地形の形成過程－断層模型実験による検討－、電力中央研究所報告、U03021、2003年
- 11) 上田圭一、井上大榮、宮腰勝義、宮川公雄、三浦大助：長大な活断層系における活動性調査法の高精度化－現地調査・模型実験による断層系の発達過程・断層変位地形の形成過程に関する検討－、電力中央研究所報告、U03022、2003年
- 12) 上田圭一、井上大榮、鳥越祐司：2004年新潟県中越地震震源域における上部新生界の変形機構－模型実験による基礎的検討－、地震 第2輯、第58巻、2005年、pp.309-327.
- 13) 上田圭一：横ずれ断層系の変位に伴う岩盤の3次元変形過程－ヘリカルX線CTを用いた断層変位実験による検討－、電力中央研究所報告、N08039、2009年
- 14) 上田圭一：模型実験による逆断層・活褶曲発達過程の検討、電力中央研究所報告、N10049、2011年
- 15) Horsfield, W. T. : An experimental approach to basement controlled faulting, in "Fault Tectonics in NW Europe" ed. by R. T. C. Frost and A. J. Dikkers, *Geologie mijnb.*, 56, 1977, 363-370.
- 16) Hubbert, M. K. : Theory of scale models as applied to the study of geological structures, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 48, 1937, 1459-1520.
- 17) Hubbert, M. K. : Mechanical basis for certain familiar geological structure, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 62, 1951, 355-372.
- 18) 垣見俊弘、加藤碩一：地質構造の解析－理論と実際－、愛智出版、1994年
- 19) 香川崇章：土木構造物の振動模型実験における相似則、土木学会論文報告集、第275号、1978年、69-77
- 20) Byerlee, J.D. : Friction of rock, *Pure Appl. Geophys.*, 116, 1978, 615-626
- 21) Krantz, R. W. : Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures, *Tectonophysics*, 188, 1991, 203-207.
- 22) Schellart, W. P. : Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modeling, *Tectonophysics*, 324, 2000, 1-16.
- 23) 新井夏海：個別要素法を用いた地震時における副断層の出現解析、東北大学卒業論文、2013年
- 24) 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(NCTAM2013)、講演論文集、2013、OS10-12
- 25) Cundall, P.A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, *Proc. Int. Symp. Rock Fracture, Nancy, II-8*, 1971
- 26) 中瀬仁、本田中、西野隆之：個別要素法摩擦パラメータを設定するためのねじりせん断シミュレーション、第36回地盤工学研究発表会、2001年、pp.503-504
- 27) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法、2011年、http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/PTHA20111209_0.pdf
- 28) U.S. Nuclear Regulatory Commission : Confirmatory Analysis of Seismic Hazard at the Diablo Canyon Power Plant from the Shoreline Fault Zone, Research Information Letter 12-01, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1212/ML121230035.pdf>

(受理：2013年8月15日)
(掲載決定：2014年1月27日)

Reliability Improvement of Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis

TAKAO Makoto¹⁾, UETA Keiichi²⁾, ANNAKA Tadashi³⁾, KURITA Tetsushi⁴⁾,
NAKASE Hitoshi⁵⁾, KYOYA Takashi⁶⁾ and KATO Junji⁷⁾

1) Member, Tohoku Univ. Civil Eng., Tokyo Electric Power Co., Inc., M. Eng.

2) Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Sci.

3) Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., M. Sci.

4) Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

5) Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

6) Professor, Tohoku Univ. Civil Eng., Dr. Eng.

7) Assistant Professor, Tohoku Univ. IRIDeS., Dr.-Ing.

ABSTRACT

A probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA) is a methodology that assesses an annual rate/probability of exceedance that an amount of displacement of a surface earthquake fault exceeds a certain quantity. To perform the analysis, displacements due to a principal fault and distributed faults are indispensable to evaluate in a probabilistic manner. For principal faults, an abundance of data are accumulated by making use of the past surface earthquake faults in Japan, while for distributed faults, the data are not necessarily sufficient in reality. Although a past study shows that an occurrence probability of distributed fault depends on a grid size employed in the analysis, no study using the Japanese domestic data for distributed faults has been reported. Taking this into account, the present study tried to improve the reliability of evaluation formula by analyzing the dependency of the grid size. In addition, model experiments and numerical analyses based on the discrete element method were applied to compensate the lack of data of the distributed faults. Furthermore, we adopted a logic tree methodology that can consider epistemic uncertainties and demonstrated its application example.

Key Words: Fault Displacement Hazard, PFDHA, model experiment, distinct element method, logic tree

Appendix PFDHAの補足説明

A1 主断層 (principal faulting)

地表地震断層のうち、震源断層と密接に関係している断層を主断層と定義する。本研究では、それぞれの歴史地震に対して各研究者によって提案されている震源断層モデルとの対応を重視し、断層変位の連続性および変位の大きさを考慮した。評価地点が活断層の直上に立地している場合は、主断層による断層変位の年超過頻度を考慮する必要があるが、評価地点が活断層の直上に立地していない場合は考慮する必要はない。

主断層による断層変位の年超過頻度は、第2章a.で示した4種類の頻度または確率の積として評価される。

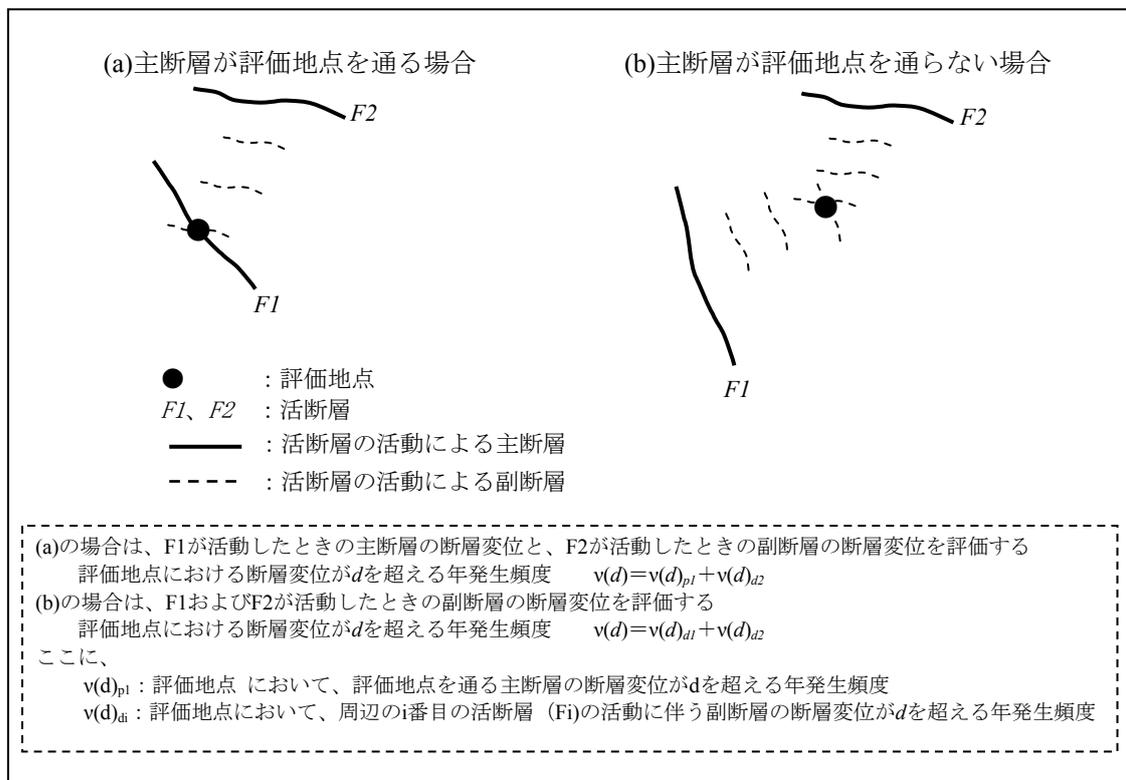
A2 副断層 (distributed faulting)

地表地震断層のうち、震源断層と密接に関係しているとは言えないが、主断層の活動に伴ってその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副断層と定義する。

副断層による断層変位の年超過頻度は、第2章b.で示した4種類の頻度または確率の積として評価される。

なお、副断層を生じさせる活断層が評価地点の周辺に複数存在する場合は、評価地点に影響を及ぼしうる活断層を選定した上で、それらの活断層の活動に伴う副断層による断層変位の年超過頻度の総和を評価する必要がある。

図Aに、主断層が評価地点を通る場合(a)と通らない場合(b)の年超過頻度の評価概念を示す。(a)の場合は、F1断層の活動によって生じる断層直上の断層変位と、F2断層の活動によってそれらの断層から離れた場所で副次的に生じる断層変位を評価する必要がある。一方、(b)の場合は、断層直上の断層変位を評価する必要はなく、F1断層およびF2断層の活動によってそれらの断層から離れた場所で副次的に生じる断層変位を評価すればよい。



図A 断層変位の年超過頻度の評価概念