

# 基盤断層の変位が第四紀地盤上の構造物に与える影響の評価

## Evaluation of structure damages due to active fault displacement

岩下 和義<sup>1\*</sup>、谷山 尚<sup>1</sup>、長田 昌彦<sup>2</sup>、川上 英二<sup>2</sup>、  
Kazuyoshi Iwashita<sup>1</sup>, Hisashi Taniyama<sup>1</sup>, Masahiko Osada<sup>2</sup>, Hideji Kawakami<sup>2</sup>,  
茂木 秀則<sup>1</sup>、斎藤 正人<sup>1</sup>  
Hidenori Mogi<sup>1</sup> and Masato Saito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

<sup>2</sup> 埼玉大学 地圏科学研究センター

Geosphere Research Institute, Saitama University

### Abstract

This article describes the evaluation of ground and structure damages due to active fault displacement. This study was supported by Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES). Three topics are mainly studied, 1. Dynamic properties of granular materials those are the component of soft surface layer, 2. Numerical simulation methods for predicting ground dislocation due to active fault displacement and 3. wave propagation distortion due to existing active fault in soft surface layer.

**Key Words:** Active Fault, quaternary alluvium, structure

### 1. はじめに

本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構 (Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES)) の原子力安全基盤調査提案公募研究として平成 16 年度から 18 年度にわたり実施されたものである。

日本の平地の大半は第四紀層と言われる軟弱な地表層で地表面が覆われており、今後重要な構造物を設計する際には、地表層で覆い隠された活断層の影響をも考慮して設計を行う必要がある。表層地盤の直下で活断層が動く場合、表層の層厚が薄ければ基盤の断層変位（ずれ）が地表にまで達することがあり、1999 年には台湾で断層変位に

よりダム施設に被害が生じている。万が一、直下で断層変位が生じた場合に、地表面及びその上の重要施設が受ける影響を把握し、施設の安全性確保と設計・管理に反映させる必要性が急速に増している。本研究は、軟弱な地表層の直下の基盤に活断層がある一般的な場合を対象として、以下の 3 つの研究を通して、基盤に生じた断層変位が第四紀層上の構造物に与える影響を評価し、今後の原子力施設の安全性確保と設計管理に関する知識基盤に寄与することをめざす。以下に平成 16 年度から 18 年度の 3 年間にわたる研究期間に得られた成果を簡単にまとめる。

---

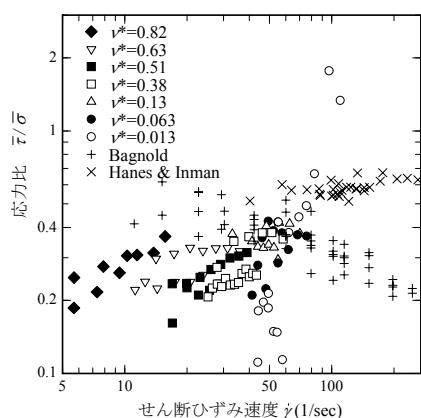
\*〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

電話：048-858-3545 FAX：048-858-7374

Email：iwa@mail.saitama-u.ac.jp

## 2. 地盤材料が急速に大ひずみを受ける際の物性について

地表堆積層に断層変位が伝播する際には、地盤材料は急速に大ひずみを受けるが、従来の土質力学による地盤材料の物性の研究はひずみ速度が遅い場合に限られており、今回問題となるひずみ速度が速い場合での物性挙動は未だ十分に解明されていない。このため高速せん断装置を用いて地盤材料のモデルである粒状体が急速に大ひずみを受ける際の変形機構、具体的には応力-ひずみ関係、摩擦角の変形速度依存性などを測定した。モデル粒子として球体粒子擬似2次元実験と円盤粒子を用いた真の2次元実験、そして数値解析としてDEM (Distinct Element Method) シミュレーションを行った。得られた結果より、せん断変形を受ける際に発生する応力は密度（間隙比）とひずみ速度に応じてひずみ速度の1乗から2乗に比例する関係に変化することと、応力比もしくは残留摩擦角は密度にはあまり依存しないがひずみ速度が速くなるのに従い高くなる、という強いひずみ速度依存性を示す結果（図－1）が確かめられた。従来の土質力学で扱ってきた低ひずみ速度の実験では、応力および破壊基準はひずみ速度依存性をしめさないという結果が得られていたが、変形速度が速くせん断帯の幅が狭い場合には物性が変わることも想定する必要があることが判明した。



図－1 応力比－せん断ひずみ速度関係

この摩擦係数の速度依存性は、Dieterich (1979), Ruina (1983)により提案された摩擦係数の速度依存性の式

$$\mu_d = \frac{\tau}{\sigma} = \mu_0 + (a-b) \ln \left( \frac{V}{V_0} \right)$$

により表現できることを確認した。しかしながら、この定式化では実験を行ったひずみ速度の範囲では、得られた結果を表現できるが、実験範囲外の領域に適用すると物理的にふさわしくない値を出すことも判明した。例えば、今回の実験データから求めた係数を変位速度が低速な場合に適用し摩擦係数を外挿すると値がゼロもしくは負になるという非現実的な状況が生じる。この原因は、粒子間衝突機構が流れの密度と速度により変化しているために、ひとつの関係式で表すことが出来ないためであろうと創造される。今後の数値解析で破壊シミュレーションを行う際には、流れの相に応じたひずみ速度依存性を用いることが重要であると思われる。

## 3. 基盤断層が変位することにより地表層に進展する変形の形状について

横ずれ断層変位によって地表層に生じる変形・すべりの進展と形状について模型実験と個別要素法を用いた数値解析によって検討した。実験・解析（図－2）ともに、まず基盤の断層と斜めに交差するせん断面が形成された後、より低角度で断層と斜交する2次的なせん断面が発達していく様子が認められた。地盤深部においては、浅部よりも、短くまた狭い間隔で最初のせん断面（リーデルせん断）が形成されること、また、地盤深部の方が低角度で断層と交差するせん断面が発達していることを示した。

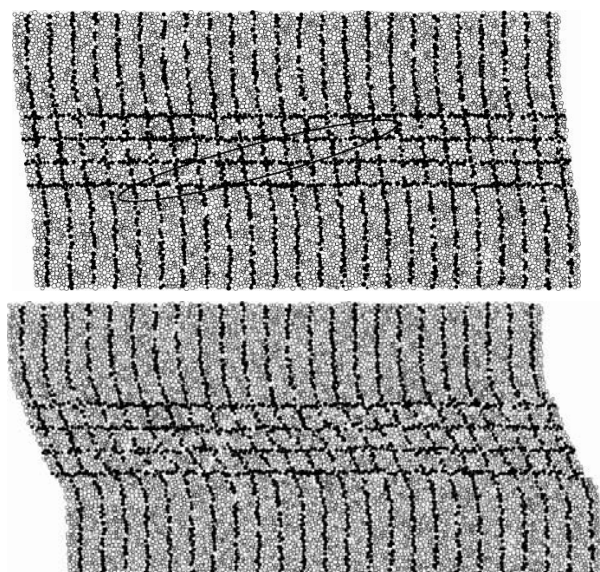


図-2 高さ8cmにおける粒子の分布図。  
上は底面変位2.2cm,下は6.4cmの場合

合わせて、地盤の歪み速度に影響を与える、震源断層のすべり速度について検討するため、2000年鳥取県西部地震の破壊過程を推定した。断層走向方向に作用している応力の変化が主として起きており、断層の中央浅部において最も大きく応力が降下していること、断層深部でも、震源下部を中心に比較的大きく応力が降下している領域があること、応力降下が大きな領域においては、応力はほぼ単調に、1s-1.5s程度かそれよりも短い時間内で降下していることを示した。解析結果から求めた震源断層上端部でのすべり速度は、最大で2m/s程度であった。

実際の地表面変形に関する情報を得るために、断層運動による地盤の変形に関する事例収集を行った。その結果、不連続でブロック的な地盤の挙動は、決して特殊なものではなく、むしろ地表付近では支配的であるため、不連続でブロック的な挙動を陽に表現できる数値解析手法が必要であることを示した。

実際の変位場を推定するために、デジタル立体写真測量とテンプレートマッチング手法の適用性の検討を行った。淡路島富島周辺を対象としたデジタル立体写真測量結果から、断層近傍において直線的な箇所では垂直変位がほぼ断層のみで

生じていることや、断層の雁行部では垂直変位量が小さくなっていることなど詳細な地表面変形が読み取れることを示した。しかし撮影時期のかけ離れた空中写真からせん断変位量の詳細を検討することは困難であった。

不連続でブロック的な地盤の挙動を陽に表現するために、断層運動問題への不連続変形法の適用について検討した。特に、1m/sオーダーの変位速度に対応するために、摩擦係数の速度依存性について検討し、不連続変形法へ組み込むためのアルゴリズムを作成した。

#### 4. 地表面層内の不整形性である断層変位の存在が周囲の地震動に与える影響について

不整形地盤によって生じる複雑な地震応答を検討するために、(1)境界要素法による応答解析と Huygens の原理に基づいた定性的な検討、(2)SH 波動場における境界要素-摂動解法に基づく定量的な散乱波解析、(3)P-SV 波動場における境界要素-摂動解法に基づく定量的な散乱波解析を行った。この結果、(1)不整形地盤の複雑な地震応答は着目する点の周囲から到達する散乱波の干渉によって検討することが可能であること、(2)本研究で新たに展開した境界要素-摂動解法によって得られる級数解が Huygens-Fresnel の定理と類似した形式を有する変位表現であり、また、散乱波の影響を考える上で傾斜係数  $\partial r / \partial n$  が有効な指標となること、(3)谷底の点では(図-3)、向かい合う斜面部分から入射波と同じ極性(正の極性)を持つ散乱波が、また、周囲の谷地形から入射波と逆の極性(負の極性)を持つ散乱波が生じ、どちらも一次散乱波によるものが支配的であること、(4)山頂の点では、この点の属する凸地形の全域から正の極性を持つ非常に強い寄与が生じており、この寄与波形についても一次散乱波が支配的であること、(5)P-SV 波動場においても一次散乱波の性質を近似的に傾斜係数  $\partial r / \partial n$  によって解釈することが可能であることなどが明らかになった。

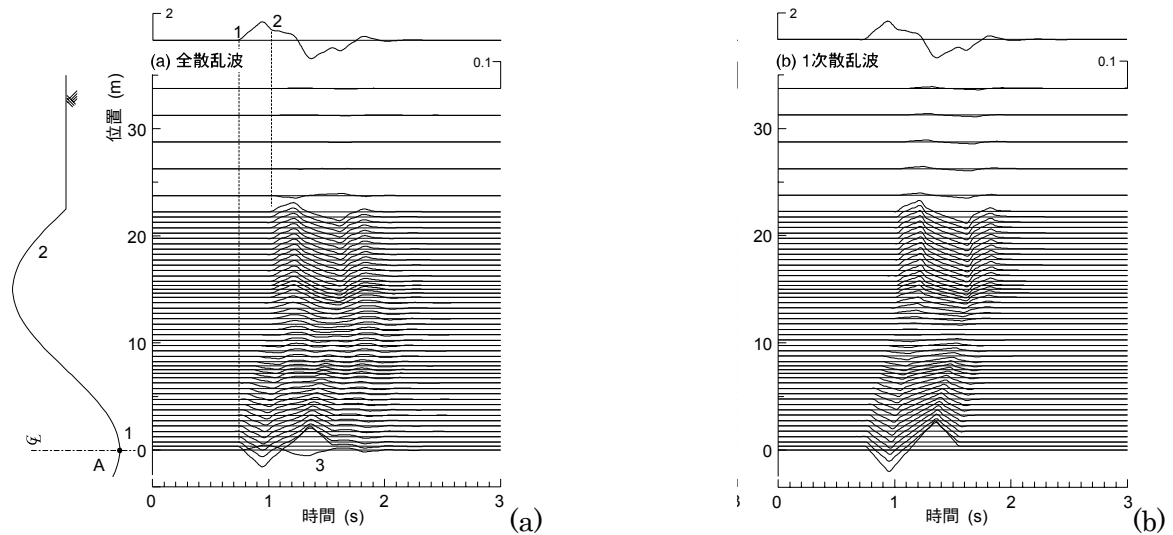


図-3 谷底の点 A に対する散乱波の寄与分布.

(a)全散乱波, (b)一次散乱波.

## 5. まとめ

成果を総括すると以下ようになる。1つめの研究テーマとして高速変形を受ける粒状材料の物性の把握のための実験を行い、応力および摩擦角のせん断ひずみ速度依存性を調べ、求めたひずみ速度依存性を解析に取り入れられる形でモデル化した。2つ目の研究テーマとして、震源断層で生じるひずみ速度を求めた。変形形状を把握する数値解析ツールとなると思われる個別要素法

DEMとDDAの開発を進め、砂での実験結果との比較を行い、解析の有効性を確認した。また研究テーマ1で得られたひずみ速度依存性を数値解析に取り入れる方法を示した。3つ目の研究テーマとして、解析に既に存在する地表層内の断層変位を地盤の不整形性として捉えた場合に、周囲の地震動が受ける影響を解析するための手法を開発し、その有効性を確認した。