

## エネルギー-Newmark 法による斜面地震時安定性と滑り変位量の統一的評価

## その4：2018年北海道胆振東部地震での上昇エネルギーの算定例

西日本技術開発株式会社 正会員 ○三笠 真吾・藤川 祥

中央大学名誉教授 正会員 國生 剛治

## 1. はじめに

筆者らはエネルギー収支に基づく地震時斜面流動評価法<sup>1)</sup>を提案しており、その評価には累積上昇エネルギー $E_u$ を決定することが重要である。既往研究<sup>2),3)</sup>では、近年の9強地震の鉛直アレー記録を用いて地盤中のエネルギーフローをSH波の重複反射理論に基づいて分析した結果、想定地震断層からマグニチュード $M$ と震源距離 $R$ から求める地震基盤エネルギー $E_{IP}$ と $E_u$ に相関関係があることが分かっている。

本研究は、この知見に基づき、2018年9月に発生した北海道胆振東部地震（胆振地震）の鉛直アレー実測記録による結果を加え、知見の補完を行った。

## 2. エネルギーフローの計算方法

ある深度を時間 $t=t_1 \sim t_2$ で通過する波動エネルギー累積値 $E$ を式(1)に示す。粒子速度 $\dot{u}$ は、水平成層地盤の水平加速度記録から重複反射理論に基づいて上昇波と下降波を計算しそれを時間積分して算出され、式(1)により上昇エネルギー・下降エネルギーが計算できる。地表の観測記録であれば振幅を1/2にすることで上昇波・下降波の振幅となる。水平面直交2方向のエネルギーを算出し、そのスカラー和を $E_{u,2D}$ とする。

$$E = E_k + E_e = \rho V_s \int_{t_1}^{t_2} \dot{u}^2 dt \cdots \text{式(1)}$$

## 3. 北海道胆振東部地震におけるエネルギー算出

図-1にエネルギー算出地点を示す。200gal以上の地震動が観測された6地点を選定し地表・地中2深度の地震記録や地盤情報をKiK-net<sup>4)</sup>より取得した。エネルギー算出に際し、観測記録から求められる伝達関数に対し一次元重複反射理論における伝達関数が適合するように地盤物性 $(V_s, \text{減衰})$ を同定した。密度は文献等より設定を行い、減衰定数は初期値を2.5%とした。観測波は地中地震計の設置誤差を補正し、地盤モデルは地震計の設置位置を加味して設定を行った。一例として門別東HDKH03を取り上げ、図-2には同定後の伝達関数の計算結果を示す。

図-3は6地点について各層の深度と上昇エネルギーをそれぞれ基盤層の深度と上昇エネルギーにより基準化した。この結果より、層境界でのインピーダンスの大きな変化に伴い表層に近づくほどエネルギーは減少する傾向がみられる。この関係について既往研究<sup>1)</sup>では任意の層の基盤層（鉛直アレー最深部）に対するインピーダンス比 $\alpha$ と対応する2層間のエネルギー比 $\beta$ について式(2)に示す0.7乗のべき関数で表した。

$$(E_{u,2D}) / (E_{u,2D})_{base} = [(\rho_s V_s) / (\rho_s V_s)_{base}]^{0.7} \cdots \text{式(2)}$$

キーワード 地震波動エネルギー、SH波、インピーダンス比、鉛直アレー、北海道胆振東部地震

連絡先 〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1-1-1 西日本技術開発(株)施設開発部 TEL092-781-2890

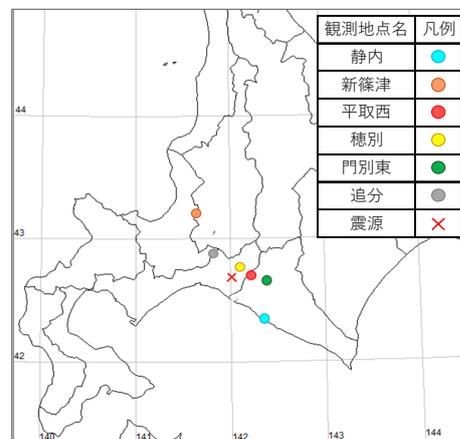
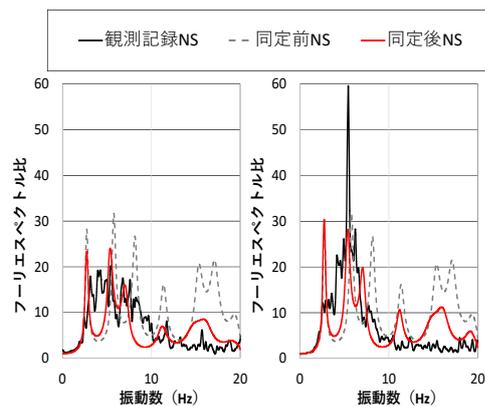
図-1 観測点位置図 (kik-net<sup>4)</sup>)

図-2 同定後の伝達関数（門別東の例）

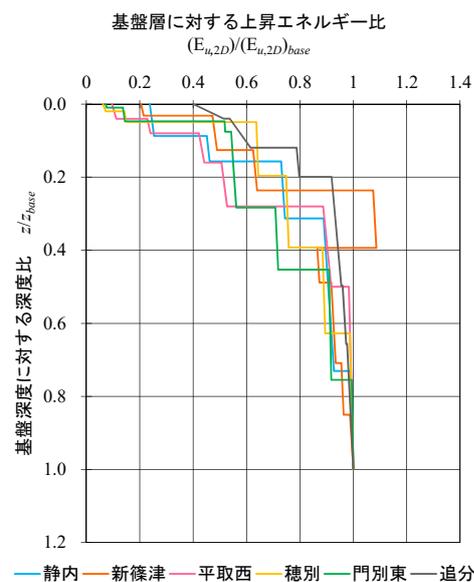


図-3 エネルギーの深度分布

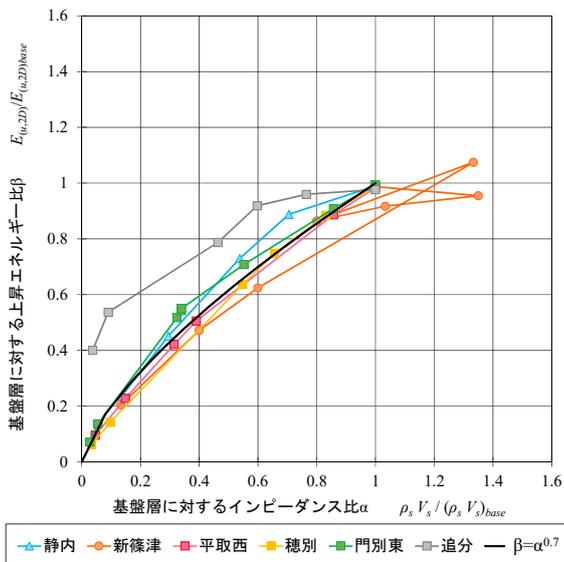
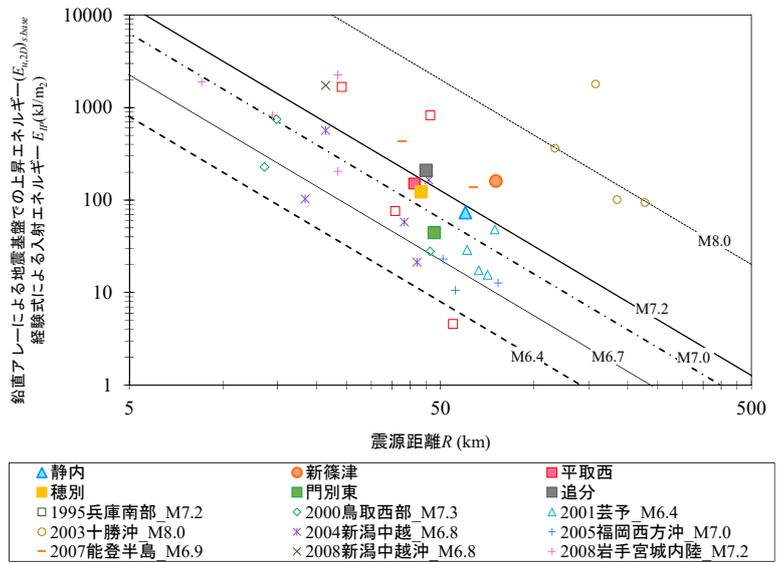
図-4 インピーダンス比  $\alpha$  と上昇エネルギー比  $\beta$  の関係

図-5 上昇エネルギーと震源距離の関係

図-4 に式(2)と今回算出した地点のエネルギー比  $\beta$  とインピーダンス比  $\alpha$  との関係を示す。図-4 より今回検討した胆振地震の観測点において追分地点を除いては式(2)に調和した変化傾向が見られることが確認できる。

#### 4. 地震基盤でのエネルギー推定

鉛直アレー最深部での上昇エネルギー  $E_{u,2Dbase}$  を使い SH 波の重複反射を仮定して地震基盤 (密度:  $\rho_s=2.7 \text{ t/m}^3$ ,  $V_s=3000 \text{ m/s}$ ) での上昇エネルギー  $(E_{u,2D})_{s.base}$  を逆算した結果を震源距離  $R$  に対して図-5 の両対数グラフに色塗した大きなプロットで示している。同図に小さなプロットで示するのは既往研究<sup>9)</sup>において近年の9強地震について同様な方法で得られた結果である。図-5 よりバラツキは大きいものの  $R$  の増加に伴う減少傾向や  $M$  の大きな地震ほどグラフ上方に位置する大まかな変化傾向が認められる。図中の右下がりの斜線は実体波の球面距離減衰式であり、入射エネルギー  $E_{IP}$  を Gutenberg による地震断層からの放出エネルギー  $E_{Total}$  に基づき気象庁マグニチュード  $M$  と震源距離  $R$  から算出している。

$$E_{IP} = E_{total}/4\pi R^2 \quad \log E_{total} = 1.5M + 1.8 \quad \text{式(3)}$$

地震記録から SH 波の重複反射を仮定して算出した  $(E_{u,2D})_{s.base}$  は、バラツキの幅は大きいものの概略の変化傾向は式(3)と整合していることが確認されている。今回の胆振地震 ( $M=6.7$ ) のプロットについても  $M$  や  $R$  による  $E_{IP}$  の変化傾向は整合し、震源から遠ざかるほど急速にエネルギーが減少する傾向が得られた。ただし、今回検討した6観測点については経験式よりも大きな値を示している。これは胆振地震では、 $M6.7$  の規模に比べ震度7<sup>9)</sup>と大きいことが知られており、式(3)では考慮されていないアスペリティやディレクティビティ等の震源メカニズムの影響によることが示唆される。

#### 5. まとめ

- ・胆振地震においても近年の9強地震と同様に地表に近づくほど上昇エネルギーは多くの地点で大幅に減少する。
- ・近年の9強地震と同様に大半の地点で各地層間の上昇エネルギー比はインピーダンス比のほぼ0.7乗に比例する。
- ・入射エネルギーと震源距離の関係において  $M$  と  $R$  の経験式に比べ、胆振地震の6観測点の結果はこれを上回る結果となっており、震源メカニズムの影響を受けていると思われる。

今後は地震波動エネルギーについて震源メカニズムを考慮し、断層と観測点との相対的な位置関係を加えて評価を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 國生剛治:エネルギーNewmark法による地震時斜面滑り発生と滑り変位量の簡易評価,地盤工学会 地盤工学ジャーナル 14(1),1-16,2019.
- 2) 國生剛治,鈴木 拓:強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー,日本地震工学会論文集,第11巻,第1号,2011.
- 3) 國生剛治,鈴木 拓:強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー (補遺),日本地震工学会論文集,第12巻,第7号,2012.
- 4) kik-net(強震観測網):国立研究開発法人防災科学技術研究所,doi:10.17598/NIED.0004.
- 5) 高橋浩晃ら:インタビュー:北海道胆振東部地震における揺れ方と震源の特徴,北海道大学科学技術コミュニケーション 25,61-62,2019.