

2003年十勝沖地震余震の非線形応答の検討

地震応答 非線形 逆解析

応用地質(株) 正会員 ○山本明夫
北海道大学 笹谷 努

1. はじめに

地表での地震動特性は、断層での震源特性、震源から地震基盤までの伝達特性および地震基盤から地表までのサイト特性に支配される。この中でサイト特性、特に工学的基盤以浅の表層地盤の非線形性については、軟弱地盤での鉛直アレー観測記録に基づいた研究があまり行われておらず、地表地震動に与える非線形性の影響を的確に予測することは、現在でも難しい状況と考えられる。本報では、軟弱地盤が分布している KiK-net 豊頃観測点(TKCH07)の弱震動の記録を用いて、同地点の地盤モデルを同定した後、2003年十勝沖地震($M_j=8.0$)の余震記録を用いて、S波速度の変化を検討した。

2. GAによる地盤モデルの同定

豊頃観測点は、図-1に示すように、十勝川左岸堤防から約450m離れた旧湿地上に位置する。KiK-net 観測点は、一般に山地に位置するが、本地点は、図-2にも示すように、深度38mまで腐植土(Pt)および沖積砂質土(As)が分布している。

地盤モデル同定に用いた地震は、S波の鉛直入射の仮定を満たすために、震源の深さが50km以上で、震央距離が震源深さの2倍以内の22地震とした。この22地震は、2003年十勝沖地震の余震を含む、地表観測最大加速度 40cm/sec^2 以下の弱震動である。

これらの地震の観測波形よりトランスバース成分を抽出し、S波主要部を10秒間切り出した。その波形から地表/地中のフーリエスペクトル比を算出し、相乗平均を求め、地盤モデルの同定に用いた。図-3には、Target (●)として、その相乗平均値を示している。

GA(Genetic Algorithm)を用いたS波速度層構造の同定は、以下の拘束条件を付与した。

$$misfit = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\log R_{obs}(f_i) - \log R_{cal}(f_i)}{f_i^{0.5}} \right] + T_{diff}$$

理論スペクトル比(R_{cal})と観測スペクトル比(R_{obs})の差を $misfit$ として定義した。また、 T_{diff} は仮定した速度モデルから地表までのS波の片道走時が、観測された0.41~0.42秒以外の場合に加算されるペナルティである。図-3にターゲットスペクトル比と同定した地盤モデルから求めた理論スペクトル比の比較結果を示した。両者は第4次ピークまでよく一致している。なお図-3には、豊頃観測点で実施されたPS検層¹⁾による速度層構造を用いた理論スペクトルも示している。図-4に同定したS波速度層構造およびPS検層による速度層構造を比較して示した。



図-1 豊頃観測点(TKCH07)付近の治水地形分類図

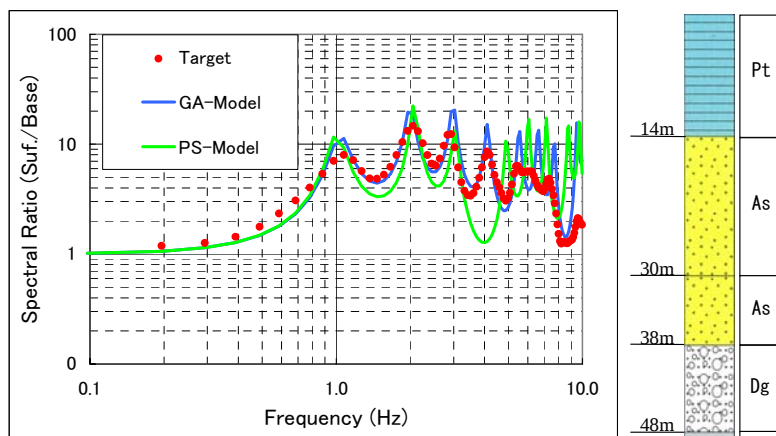


図-3 S波速度層構造の同定結果を基に算出した理論スペクトル比

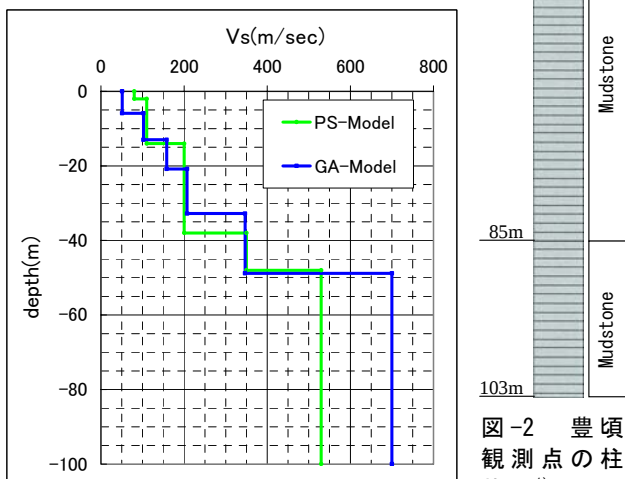


図-4 同定したS波速度層構造

図-2 豊頃観測点の柱状図¹⁾

3. 余震記録を用いた表層 S 波速度の変化

前節で同定した豊頃観測点の S 波層構造を基本として、2003 年十勝沖地震の同観測点の余震記録を用いて、本震後の表層 S 波速度の変化を検討した。

検討対象とした地震は図-5 に示す Eq.01～Eq.16 であり、この中には本震(MS)および最大余震(LAS)が含まれる。これらの地震の孔中地震計(深度 100m)の TR 成分の地震動を入力として、同定地盤モデルで線形地震応答解析を行った。

本震を含む Eq.01～Eq.16 の線形地震応答解析結果を用いて、地表観測最大加速度値と地表計算最大加速度値を比較して図-6 に示した。

この図から、本震(MS)では明らかに地表観測最大加速度が小さくなっており、非線形性が現れたことがわかる。また、最大余震(LAS)でも観測 $PGA=72.3\text{cm/sec}^2$ に対し、計算 $PGA=122.0\text{cm/sec}^2$ となり非線形性が現れたことが推測される。その他の地震では、ほぼ観測 PGA =計算 PGA となり、地震動波形の対応も良好であった。

Eq.02, Eq.03, Eq.04(LAS), Eq.14 および Eq.15 について、前節の GA による方法で S 波速度層構造を同定した。図-7 に Eq.02 について、同定した S 波速度層構造を用いた理論スペクトル比と観測スペクトル比の比較結果を示した。両者の対応は良好で、上記 5 つの地震の初期 S 波速度 (図-4, GA-Model)、GA による同定結果 S 波速度および動的変形特性の周波数依存性を考慮した等価線形地震応答解析(FDMDM)²⁾の最終収束モデルの S 波速度を計算し、本震の FDMDM による最終収束モデル S 波速度 (横軸 $10^{-2}(\text{hour})$)にプロット)とともに図-8 に示した。本震で各層 50%程度低下した S 波速度は、本震約 20 分後の余震(Eq.02)でほぼ初期 S 波速度に戻り、最大余震時に再度低下していることが読み取れる。

4. まとめ

本報では、GA を用いて同定解析を行ったが、Eq.04 と Eq.14 の地表観測最大加速度 (図-8 上段の図) で、Eq.14 の方

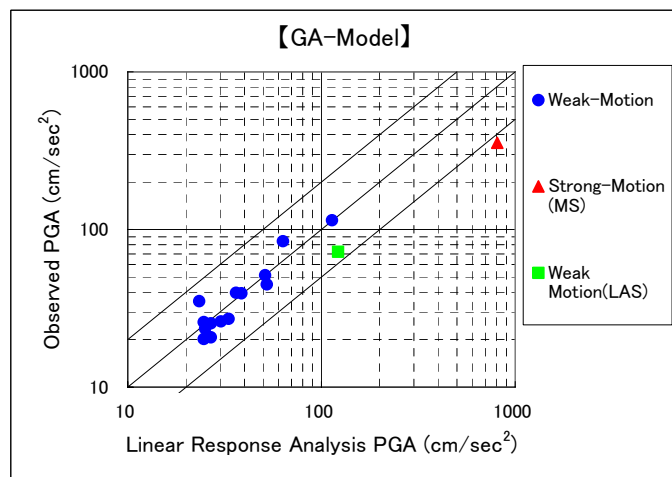


図-6 GA 同定モデルを用いた線形地震応答解析結果

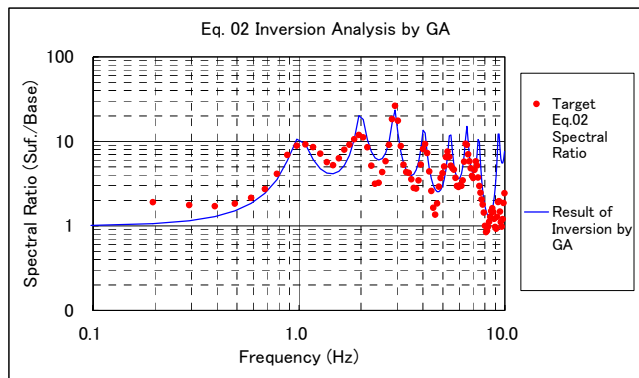


図-7 GA 同定結果を基に算出した理論スペクトル比と観測地震動のスペクトル比の比較 (Eq. 02)

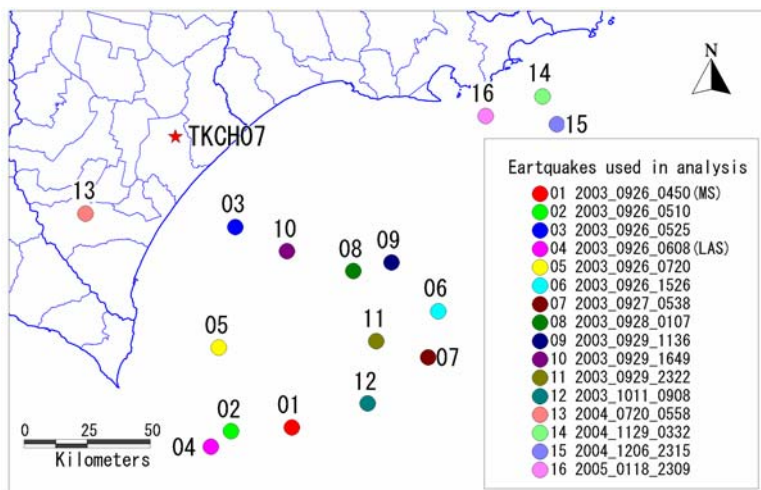


図-5 検討対象地震 (2003 年十勝沖地震本震および余震)

が大きいにもかかわらず、Eq.14 で非線形性が現れていない。これについては、本解析には減衰比(h)の同定解析が含まれておらず、この影響があると考えられる。

<謝辞>本研究で用いた地震記録および地盤構造資料は、防災科学技術研究所によるものを使用させていただいた。記して謝意を示す。また本研究の地震応答解析には、吉田・末富(2003)による DYNEQ³⁾を用いた。

<参考文献>1) 防災科学技術研究所: <http://www.bosai.go.jp/kik/>. 2) 山本明夫, 笹谷 努: 2003 年十勝沖地震における地盤の非線形応答, 日本地震工学論文集特集号, 印刷中. 3) 吉田 望, 末富岩雄: DYNEQ, A computer program for dynamic response analysis of level ground by equivalent linear method, version3.23, 1-107, 2003.

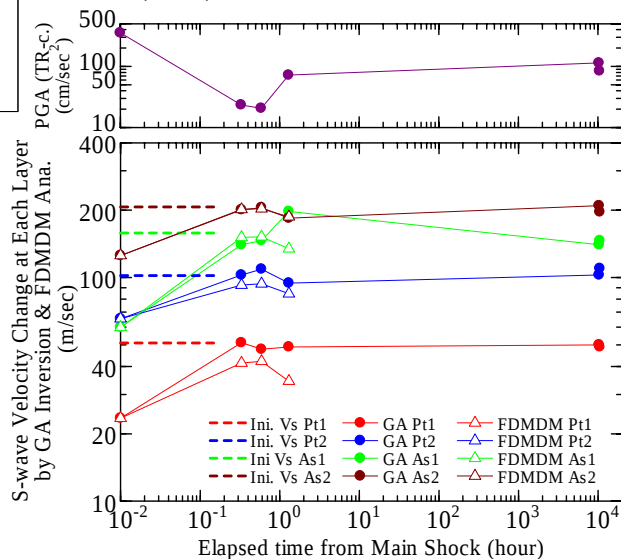


図-8 GA 同定結果と FDMDM による S 波速度の変化