

強震観測に基づく福井平野の動的構造の検討

小嶋 啓介¹, 中山 浩明²

¹正会員 工博 福井大学助教授 工学部 建築建設工学科 (〒910-8507 福井市文京 3-9-1)

²正会員 工博 東京工業大学大学院助教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田 4259)

地震被害予測の精度を向上させるためには、対象地域の動的構造を正確に評価することが不可避である。本研究では、福井大学グラウンド鉛直アレイならびに福井平野の東西軸上に地震観測点を展開し、蓄積された多数の強震記録によって地域の地震応答特性を検討する。ついで、従来から提案している、観測地震動および対応する計算応答のフーリエスペクトルの誤差を最小化することによって、地盤のせん断波速度、減衰定数および層厚を推定する逆解析手法を観測記録に適用し、観測点直下の動的特性の推定を行う。さらに、常時微動のインバージョンによるS波速度構造と併せて、福井平野の2次元的な構造の推定を試みた結果を検討する。

Key Words : Earthquake observation, Fukui Plain, Dynamic property, Back-analysis

1. はじめに

PS検層や反射法に代表される地盤の動的構造を求める試験は、経費等の問題から実施地点が限られており、実務で広く用いられるN値などの回帰式を利用する方法は、適用範囲が比較的浅く、信頼性も乏しい。このような状況下では、強震動ならびに常時微動を用いた逆解析的な手法に期待する面も少なくないように思われる。一次元問題を対象とし、鉛直アレイ観測記録と重複反射法による伝達関数の誤差を最小化して、動的パラメータを推定しようとする研究は、ある程度の実績を残しつつあるように思われる¹⁾。先の兵庫県南部地震に際しては、ポートアイランドをはじめとする多くの地震観測アレイで、強震観測記録が得られたため、その記録を利用した逆解析的手法に関する研究も多く公表された(たとえば²⁾)。筆者らも、地震時の観測加速度と動的有限要素法による計算加速度を周波数領域で比較し、両者の誤差自乗和を最小とする動的物性定数を探索する逆解析手法を提案し³⁾、ポートアイランドのアレイ観測点および福井平野に適用した結果を報告している⁴⁾。

山中、瀬尾らは、兵庫県南部地震と同程度の規模で地殻浅部で発生した1948年福井地震に着目し、福井平野での強震動を評価するために、微動アレイ観測および地震観測を実施・継続している⁵⁾。一方福井大学では、鳥海がグラウンドに設置したGL-175mの基盤岩に達する鉛直アレイを運用しており、K-net、計測震

度計も多数整備され、福井平野周辺の地震観測環境は以前に比較して飛躍的に整いつつある。ここでは、強震動観測記録から地盤各層のせん断波速度、減衰定数および層厚を推定する逆解析手法を、福井平野周辺で得られた実地震観測記録に適用し、福井平野の東西方向断面の動的構造を推定した結果を検討する。

2. 福井平野における地震観測

図-1は強震観測点を地形図(越前森田、丸岡)上に示したものである。地震計は福井平野のほぼ中央の丸岡町および春江町内を通る東西方向にアレイ状に配置されており、沖積平野の東側境界に位置する老人施設長寿園(CHJ)から、西方向の沖積層が深くなる方向に、丸岡高校分校(MHS)、丸岡スポーツランド(MSL)、春江小学校(HSH)、春江工業高校(HTC)、ハートピア春江(HPH)の6ヶ所に設置されている。

図-1に示したP波測線およびCC'の地質断面構造を図-2、3にそれぞれ示す。これらは、福井県の福井平野東縁断層帯に関する調査(1998)⁶⁾の一環として実施された弾性波探査からの想定、ならびに福井県の福井県地震被害予測調査(1989)⁷⁾によるものである。P波探査断面はCC'面から北に500m程度離れていることを考慮した場合、反射面Iと沖積層最下面、および反射面IVと第三紀層上面とは調和的であるといえる。これらの図から、CHJからHPHの6ヶ

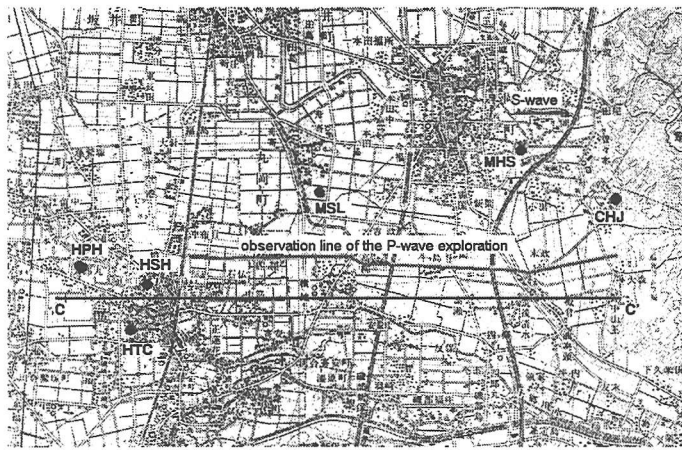


図-1 福井平野に展開した強震観測点

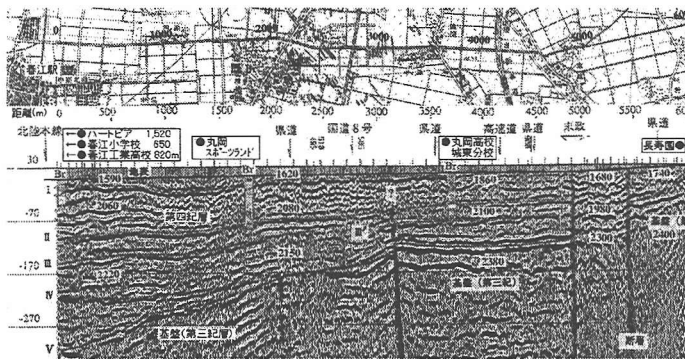


図-2 反射法によるP波速度構造(福井県⁶⁾に加筆)

所の地震観測点は、沖積層厚が0から30m程度、基盤が地表面からGL-250m程度と、マクロに見た場合、比較的単調に西側下がりの地盤条件に立地していることがわかる。しかしながら、互いに100m程度しか離れていない場合でも、各サイトで得られたボーリングデータを個々に検討すると、その成層条件や、標準貫入試験結果はかなり異なっていることが別途確認されており、サイト周辺の地質調査のみから、周辺の強震動を精度良く予測することの困難さが予想される。

図-4は観測地震動ごとのフーリエスペクトル、図-5はH/Vスペクトルの平均値と標準偏差を示している。岩盤露頭に位置していると考えられるCHJでは、0.2~0.3秒付近にピークを有するが比較的平坦な特性を有するのに対し、堆積層がやや厚くなる丸岡の2地点では、0.3~0.9秒の成分が増幅してくることが認められる。さらに、第三紀層が250m以深にある春江の3地点では、0.2秒以下の成分の寄与が少なく、0.5および0.8秒にピークを有する比較的単調な特性が見てとれ、図-2、3で示した地質特性と調和的な傾向が明らかである。

3. 地盤の動的物性定数の逆解析手法

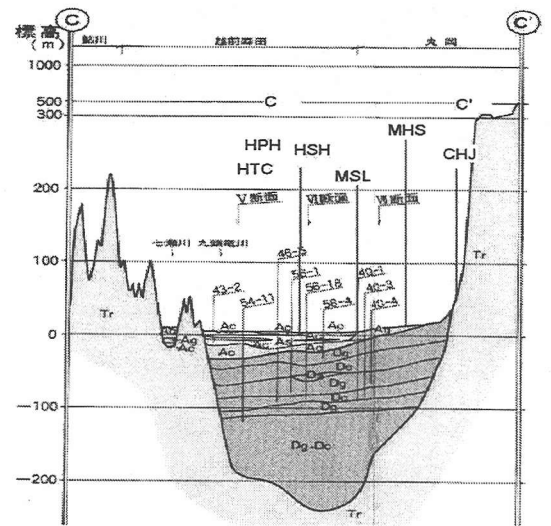


図-3 CC'断面の地質構造(福井県⁷⁾に加筆)

表層の地震応答の算出方法としては、重複反射法を用いる。地表面で数十ガル程度の地震動を対象とし、地盤材料を線形弾性と仮定する場合、入力すべき地盤物性定数としては、地盤各層の層厚 H 、密度 ρ 、せん断波速度 V_s および Q 値が必要となる。先の研究では、せん断波速度および減衰定数を推定対象としていたが、ここでは、福井平野下の幾何学的な形状ならびに減衰定数の構造を推定対象とし、密度およびせん断波速度は事前情報からの推定値に固定した。

逆解析手法は、基本的には沢田らの方法¹⁾に準じて定式化した。すなわち、地表面における観測および計算加速度のフーリエスペクトルの誤差二乗和を最小化するように、式(2)の制約条件の下、式(1)で与えられる対象層 l の層厚および Q 値の修正係数 c_H 、 c_Q を推定する最適化問題として定式化する。

$$H_l = H_l^0 \times c_{Hl} \quad Q_l = Q_l^0 \times c_{Ql} \quad (1)$$

$$c_H^{\min} < c_H < c_H^{\max} \quad c_Q^{\min} < c_Q < c_Q^{\max} \quad (2)$$

なお、最適パラメータの探索には、準Newton法に属するBFGS法を採用し、フーリエスペクトルには、バンド幅0.3HzのParzenウィンドウによる平滑化処理を施した。

4. 観測地震記録への適用結果の検討

図-1に示す6ヶ所の地震観測点が整備されてから多数の地震が観測されているが、すべての地点で記録が得られた1999年11月7日、2000年1月6日、1月12日の3つの地震動を逆解析に使用した。山中らの常時微動に基づくインバージョン結果⁸⁾、福井大学周辺で行なわれたPS検層、福井県による弾性波探査結果⁶⁾ならびに既存のボーリングデータなどを

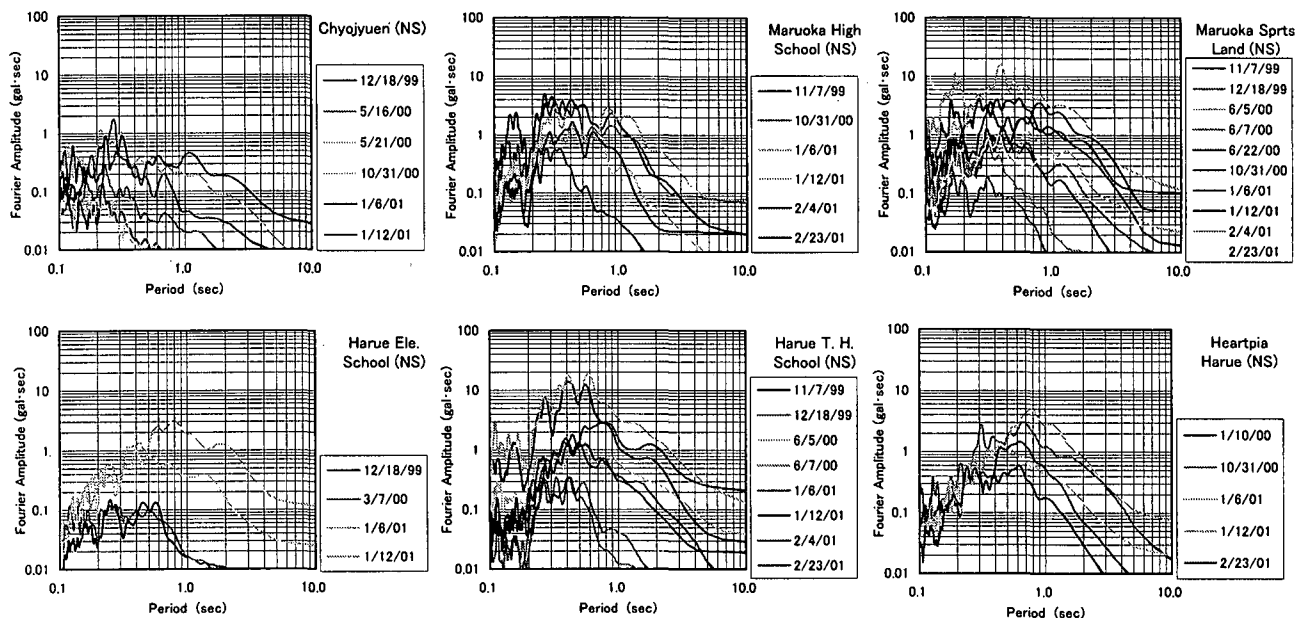


図-4 強震観測点におけるフーリエスペクトルの例

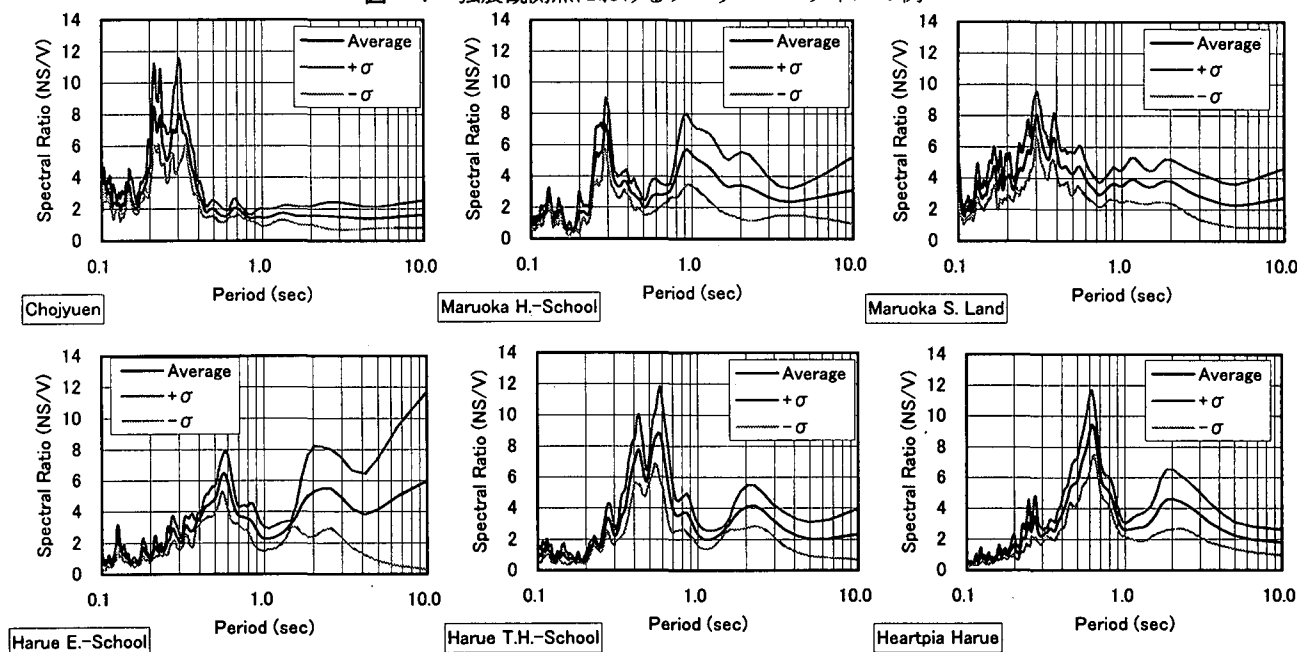


図-5 強震観測点におけるH/Vスペクトルの例

参照して、逆解析の初期条件を次のように設定した。
 逆解析の対象とする層は、沖積層を2層、洪積層を2層の合計4層とし、せん断波速度については、上からそれぞれ150, 250, 500 および 670m/sec に、密度については各々1.7, 1.8, 1.9, 2.0g/cm³ に設定した。逆解析の対象である層厚の初期値は、どの観測サイトに対しても共通して10, 10, 100, 100m, Q値は沖積層で10, 洪積層で20に設定した。
 基盤への入力地震動としては、ほぼ岩盤露頭と考えられるCHJの記録、各地点の鉛直動の補正值、福井大学アレイの基盤記録から算定される堆積層への入力動などを用いる方法も考えられるが、ここでは福井大学鉛直アレイのGL-175mの記録をそのまま用いることとした。なお、福井大学と各観測サイトは、震源

距離が概ね等しく、距離減衰の補正も行っていない。
 図-6 福井大学およびMSL, HTPにおける観測ならびに計算加速度のフーリエスペクトルの比較である。福井大学では、1月6日の地震で6Hz以上の成分が、またHTPでは1月12日の地震における2~4Hzの成分で観測値とはやや異なる部分も認められるが、周波数特性の異なる2つの地震に対し、最適値による計算値は、観測値を精度良く再現していることが明らかである。なお、減衰定数については、すべてのケースで初期値から20%以内の範囲に収束していた。
 図-7は6ヶ所の観測点の逆解析結果から得られた層厚をまとめて示したものである。せん断波速度670m/secまでの堆積層の合計深さについて見ると、MHSの150mから、平野中央部に向かって深くなり、

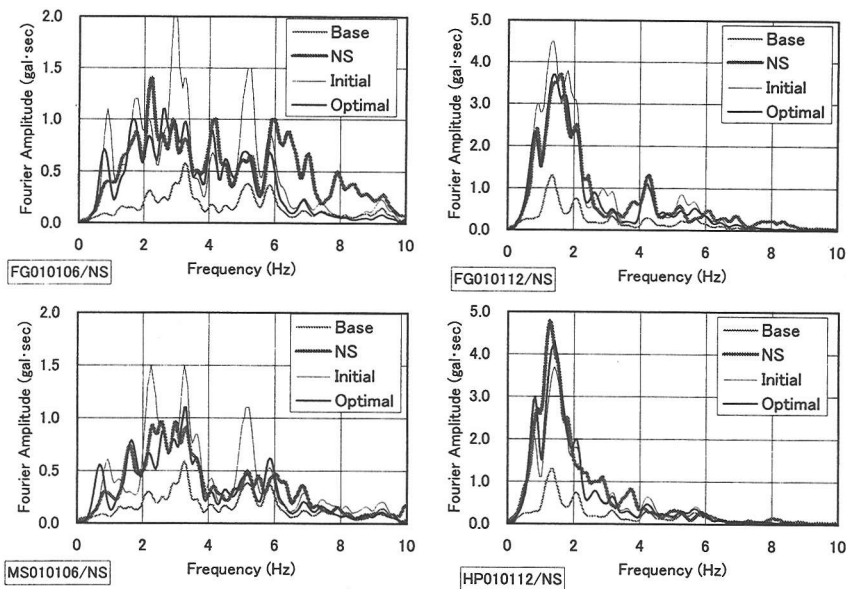


図-6 観測および計算加速度のフーリエスペクトルの比較

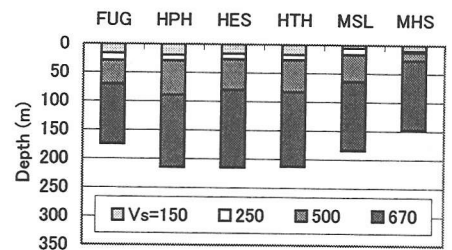


図-7 逆解析による堆積層厚分布

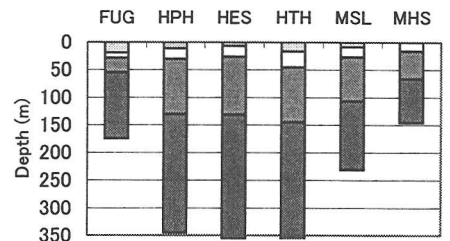


図-8 反射法による堆積層厚分布

春江の3地点では220m前後に推定されている。せん断波速度500m/secの上部洪積層厚と、150m/secの表層軟弱層の厚さは、堆積層合計厚さと調和的で、平野中央部に向かって厚く推定されているのに対し、250m/secの下部沖積層の厚さは、MHSを除いて、10m程度のほぼ一定値に推定されている。

図-2で示したP波速度構造における反射面Ⅲを上部と下部の洪積層の境界、反射面Ⅴを基盤とし、沖積層については周辺のボーリングデータを参考として想定される層厚分布を図-8に示す。逆解析結果は、図-8で認められる沖積層厚のややランダムな分布、ならびに春江の3地点の堆積層厚が350m前後である点などが異なって見えるが、図-3で示した地質断面形態に非常に近い。逆解析手法は、図-2に示した反射面Ⅴではなく、反射面Ⅳを基盤岩境界として推定したと考えられる。また推定された丸岡および春江周辺の堆積層厚さは、山中らが常時微動のインバージョンで示した180~240mという値⁸⁾と調和する。ここで示した構造は、山中らによるS波速度3.2km/secの地震学的な基盤岩層までのマクロな速度構造と併せて、広い周波数領域にわたる精度の高い地震動予測の足掛かりとなるものと考えられる。

5. おわりに

福井平野に展開する強震計の観測記録を用いて、サイト近傍の応答特性を検討するとともに、重複反射法を利用した地盤の動的諸特性を推定する逆解析手法を適用し、福井平野の東西断面の速度構造を推定した。

推定された動的構造によって、観測地震動が比較的

精度良く再現しうることを、推定された福井平野の堆積構造は、既存の資料と矛盾が少ないことなど確認した。以上のことから、ここで示した逆解析手法を、計測震度計などの設置地点に順次適用していくことにより、福井平野の3次元動的構造の概略値が求められる可能性を示しているものと思われる。今後、他の多くの観測地震動、ならびに石川県西部地震の際に実施した余震観測サイトでの適用を累積し、福井平野全体の地震時挙動を普遍的に説明しうる動的地盤構造を検討していく必要があると考えられる。

謝辞：福井県、丸岡町、春江町から、ボーリングデータを提供頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 沢田勉：同定手法を利用した地盤損傷度評価システムの構築、平成9~10年度科研費成果報告書、pp.1-68, 1999.
- 2) K.Satho, T.Kokusyo, M.Matsumoto, H.yamada : Nonlinear seismic response and soil property during strong motion, Special Issue of Soils and Foundations, pp.41-52, 1996.
- 3) 本多秀夫, 小嶋啓介, 荒井克彦 : 実地震加速度記録に基づく地盤の動的物性定数の逆解析, 土木学会論文集, No.517/Ⅲ-31, pp.125-133, 1996.
- 4) 小嶋啓介他：福井平野の地震観測データに基づく地盤の動的物性定数の推定, 第4回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.469-4732, 1999.
- 5) 山中浩明, 栗田勝実, 瀬尾和大他 : 福井平野の地下構造と地震動特性, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.153-154, 1998.
- 6) 福井県 : 福井平野東縁断層帯に関する調査成果報告書, 1998.
- 7) 福井県 : 福井県地震被害想定調査総合報告書, 1989.
- 8) 山中他: 微動アレイ観測による福井平野のS波速度構造の推定, 地震, 2, 第53巻, pp.37-43, 2000.