

Contents

● 地震波による地下水圧の振動波形－新たな定式化の完成と今後の展開－ … 1

● 外部委員会活動報告
2012年2月 … 4



地震波による地下水圧の振動波形 －新たな定式化の完成と今後の展開－

北川有一（地震地下水研究チーム）

1. はじめに

2010年2月27日、南米のチリ中部沿岸でMw8.8の大地震が発生しました。震源から遠く離れた日本列島においても、地下水変化が観測されました。観測された代表的な変化は、この大地震の地震波による井戸の地下水位の振動や密閉井戸の地下水圧の振動です。今回は三重県津市の津安濃観測点の観測結果を例に、地震波による地下水圧の特徴を紹介します。観測された地下水圧振動の時系列を示すと共に、地震波による体積歪振動に対して地下水圧振動がどのように応答したのかを示します。この応答は従来の考え方では説明できないような特徴を含んでいました。そこで、多孔質弾性論に基づいて、密閉井戸の地下水圧の挙動を定式化しました。その定式化で地下水圧応答の特徴が説明できることを紹介します。詳しくは Kitagawa et al. [2011] にまとめていますので、興味がありましたら、ご参照ください。

2. 地震波に対する地下水応答の研究の歴史

地震に伴う地下水変化に関して、これまでに様々な現象が報告されてきました。その現象の一つが地震波に対応して発生する井戸の地下水位の振動です。1930年代には地震波形に似た振動を示す地下水位変化が記録されていました [Blanchard and Byerly, 1935]。Cooper et al. [1965] は地震波に対する地下水位の振動が井戸ごとに異なる問題を定量的に扱った最初の研究成果です。彼らは地下水位の応答が井戸の形状・帯水層の水理学的な性質・地震波の特性によって記述できることを示し、地下水位振動の短周期（高周波）側での減衰や帯水層（岩石）内部の間隙水圧振動との共鳴による増幅といった地下水位応答の特徴を説明しています。このような特徴が生じる原因は、井戸の地下水位に変化が現れるためには一定量の地下水が帯水層と井戸との間を流動することが必要だからです。特に短周期（高周波）側での減衰は井戸貯留効果と呼ばれています。

井戸の地下水位測定代わりに、自噴する井戸を密閉して井戸内部の地下水圧を測定することがあります。地下水位測定の場合と異なり、地下水圧測定では帯水層と井戸との間の地下水流動の効果は無視できると仮定されて解釈されてきました。その仮定の下では、密閉した井戸の地下水圧応答は多孔質弾性論に基づく帯水層（岩石）内部の間隙水圧の非排水応答と同じになります。多孔質弾性論とは、内部に空隙がある岩石の変形（応力、歪）に関する理論と岩石の空隙に存在する地下水（流体）



の挙動（間隙水圧，地下水流動）を記述した理論を結合した連成理論です。地下水流動を無視した間隙水圧の非排水応答では間隙水圧変化は岩石の応力変化あるいは体積歪変化に対して単純に比例します。言い換えると，密閉した井戸の地下水圧変化は体積歪変化に対して位相遅れ無しで一定の振幅で応答することになります。この仮定と矛盾しない観測結果もあり，おおよその近似として成り立っています。厳密には，密閉した井戸の地下水圧変化においても少量の地下水流動を必要とします。つまり，体積歪変化に対して，地下水圧変化の振幅が一定ではないことや位相が遅れることが予想されます。そこで，多孔質弾性論に基づいて，密閉井戸の地下水圧変化においても地下水流動を考慮した定式化を行いました。

3. 観測結果

産業技術総合研究所活断層・地震研究センターでは，東海・近畿・四国周辺に約 50 点からなる地下水等総合観測網を持ち，地下水の観測を行っています。約半数の観測点では，ボアホール式歪計によって地殻歪の観測を行っています。今回は三重県津市の津安濃観測点での観測結果を紹介します。津安濃観測点では，自噴する井戸を密閉して地下水圧を測定しています。地下水圧データは 20 Hz サンプリングで収録されています。地下水圧データは，水圧を水の密度と重力加速度で割ることで水柱の高さ（水位）に換算できるので，水位の単位に変換して使用しています。同時に，石井式ボアホール歪計を用いて，20 Hz サンプリングで地殻歪観測を行っています。

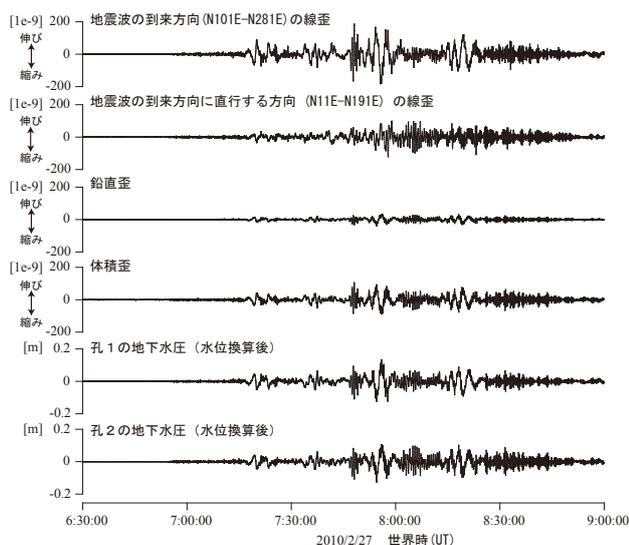


図1 2010年2月27日の津安濃観測点での地殻歪変化と地下水圧変化の測定結果。グラフは0.002-0.1 Hzのバターワース型バンドパスフィルターを掛けた結果を表示しています。

2010年2月27日，南米のチリ中部沿岸でMw8.8の大地震が発生しました。図1は津安濃観測点での地殻歪と地下水圧の観測結果です。津安濃観測点には深さの異なる3本の観測井戸があります。深い観測井戸から順に孔1，孔2，孔3と呼んでいます。津安濃観測点孔1では地殻歪と地下水圧を測定し，孔2では地下水圧を測定しています。チリで発生した大地震の地震波に伴って，地殻歪と地下水圧に振動が発生したことが分かりました。地下水圧変化は，大まかな傾向として，radial（地震波の到来方向）成分の線歪及び体積歪に負の比例，鉛直歪に正の比例でした。

津安濃観測点で観測された体積歪振動に対する地下水圧振動の応答を周波数解析で求めました。孔1の地下水圧の応答は図2(a)に，孔2の地下水圧の応答は図2(b)に示しています。孔1の地下水圧の応答については，短周期（高周波）側で振幅が小さく，かつ位相が遅れる特徴が見られました。孔2の地下水圧の応答については，振幅は一定ですが，短周期（高周波）側で位相が少し遅れる特徴が見られました。

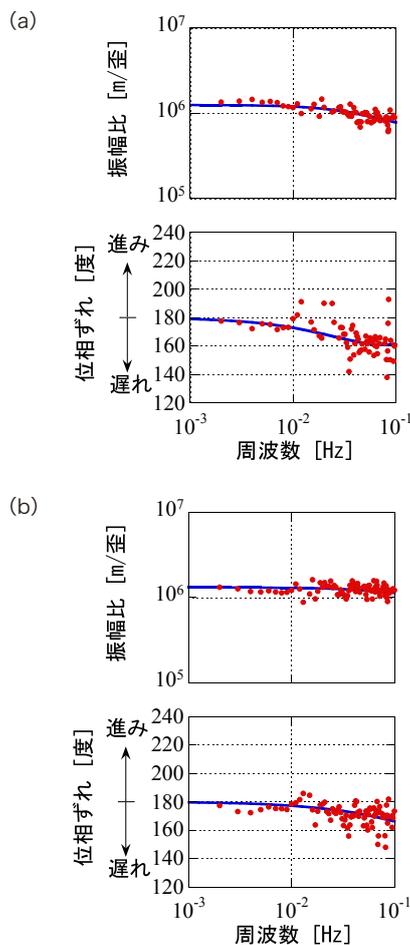


図2 体積歪に対する密閉井戸の地下水圧応答（振幅及び位相）の推定結果。赤色の点は観測データから推定した結果です。青色の曲線は定式化による解です。

4. 体積歪変化に対する密閉井戸の地下水圧応答の定式化

井戸内部の水を、非圧縮流体ではなく、弾性変形する物体として扱うのが肝です。同じ体積歪変化に対しても、帯水層（岩石）の間隙水圧と井戸の地下水圧で応答に差があるため、帯水層と井戸との間で地下水の流動を引き起こします。詳細は省略しますが、これらを考慮して、密閉井戸の地下水圧応答を定式化しました。詳細は Kitagawa et al. [2011] に記載しています。定式化から期待される応答は次のような特徴を持っていることが分かりました。長周期（低周波）側の極限では、その応答は地下水流動の効果を無視できると仮定した時の間隙水圧の非排水応答と等しくなり、位相遅れは生じません。一方、短周期（高周波）側の極限では、その応答は純粋な水の弾性変形による応答と等しくなり、やはり位相遅れは生じません。それらの中間の領域での応答は、周期が短くなるほど振幅は小さくなり、位相遅れは特定の周期で最大になる特徴を持つことが示されました。

図2には、観測から求められた応答と帯水層の物性を適切に推定することで定式化から計算される解とを比較しています。この解は短周期（高周波）側で振幅が小さくなることや位相が遅れることを説明できます。

5. おわりに

2010年チリ大地震の地震波による地殻歪と地下水圧の振動が良好に記録されました。これらの記録から、体積歪に対する密閉井戸の地下水圧応答が周波数に依存することが確かめられました。密閉井戸の地下水圧応答を定式化し、求めた解が観測による応答の特徴を説明できることを確かめました。

大地震の地震波が地熱地帯の微小地震活動やゆっくり地震の一種である深部低周波微動を誘発することは良く知られています。誘発のメカニズムは明らかになっていませんが、地下深部の間隙水の関与が予想されています。間隙水圧が応力（歪）に単純に比例すると仮定して間隙水の影響を考察することが普通に行われています。誘発現象の特徴には、間隙水圧応答が周波数特性を持つと考えることで説明できそうなものがあります。今後、こういった誘発地震の発生メカニズムに間隙水圧がどのように作用しているか考察していきたいと思っています。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）の際にも、地震波による地殻歪と地下水圧の振動が記録されました（図3）。東北地方太

平洋沖地震の場合は、地震の断層変位によって日本列島全域で大きな地殻変動が引き起こされました。津安濃観測点の地殻歪と地下水圧においても、地震波による振動に加えて、断層変位による体積歪の増加（膨張）と地下水圧の低下が生じました。今後の技術的な課題の一つは地震波への応答と断層変位による地殻変動への応答を統一して説明することです。この課題は地下水を含む地殻の変形をより正確に理解することにつながります。こういった取り組みを通じて、地下水観測や地殻歪観測等による地震予測研究を進めています。

参考文献

- Blanchard, F. G., and P. Byerly(1935), A study of a well gauge as a seismograph, Bull. Seismol. Soc. Am., 25, 313-321.
- Cooper, H. H., Jr., J. D. Bredehoeft, I. S. Papadopoulos and R. B. Dennett (1965), The response of well-aquifer systems to seismic wave, J. Geophys. Res., 70, 3915-3926.
- Kitagawa, Y., S. Itaba, N. Matsumoto, and N. Koizumi (2011), Frequency characteristics of the response of water pressure in a closed well to volumetric strain in the high - frequency domain, J. Geophys. Res., 116, B08301, doi:10.1029/2010JB007794.

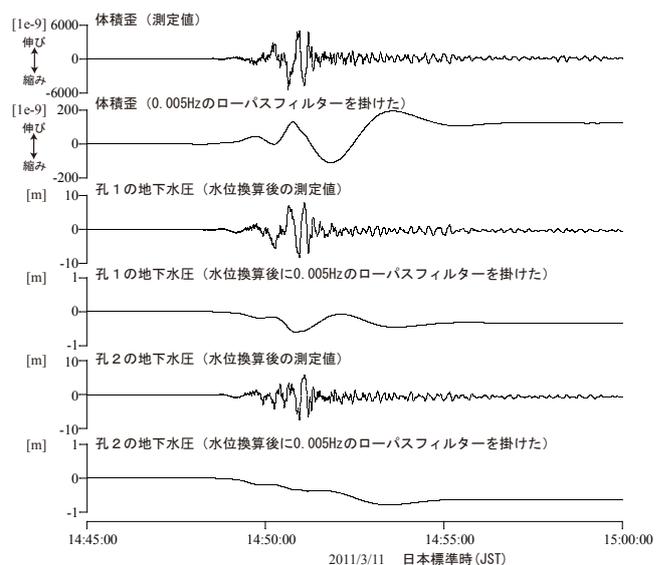


図3 2011年3月11日の津安濃観測点での地殻歪変化と地下水圧変化の測定結果。グラフは測定値および0.005 Hzのバターワース型ローパスフィルターを掛けた結果を表示しています。

外部委員会等 活動報告 (2012 年 2 月)

2012 年 2 月 1 日

地震調査研究推進本部地震調査委員会第 175 回長期評価部会 (吉岡出席 / 東京)

2012 年 2 月 3 日

原子力安全委員会 シビアアクシデント対策に関する意見交換 (岡村出席 / 東京)
想定を越える津波に対する安全確保の基本的考え方について、自然科学の専門家と原子力工学の専門家との意見交換

2012 年 2 月 9 日

地震調査委員会 (岡村出席 / 文科省)
平成 24 年 1 月の地震活動について他

2012 年 2 月 16 日

原子力安全委員会地震・津波関連指針等検討小委員会 (岡村出席 / 東京)
耐震設計審査指針改訂 (案) (地震動評価)
手引き改訂案 (地震動評価、津波評価)
耐震設計審査指針類の見直しにあたっての見解

2012 年 2 月 17 日

地震予知連絡会 (桑原, 小泉, 松本出席 / 東京)
「地殻活動概要」, 重点検討課題「プレート境界に関するわれわれのイメージは正しいか? (その 2) 千島海溝」について議論をおこなった。

2012 年 2 月 26 日

石川県津波想定検討会 (岡村出席 / 金沢)
石川県沿岸域における最大規模の津波の想定について

2012 年 2 月 27 日

地震防災対策強化地域判定会 (小泉, 松本, 板場出席 / 気象庁)
東海地方周辺の最近の 1 ヶ月のデータを持ち寄って検討し, 東海地震発生可能性について協議した。

2012 年 2 月 28 日

原子力安全・保安院 地震・津波に関する意見聴取会 (岡村, 杉山出席 / 東京)
泊原子力発電所前面海域の活断層評価ほか

2012 年 2 月 29 日

地震・津波関連指針等検討小委員会 (岡村出席 / 東京)
耐震設計審査指針及び関連の指針類に反映させるべき事項について他

2012 年 2 月 29 日

地震調査研究推進本部地震調査委員会第 176 回長期評価部会 (吉岡出席 / 東京)