

水圧モニタリングデータの地球潮汐・気圧変動成分の分離解析

Separation analysis of earth tides and atmospheric loading factors from monitoring data of pore pressure

後藤 和幸*、升元 一彦**、向井 圭***、竹内 真司**

Kazuyuki GOTO, Kazuhiko MASUMOTO, Kei MUKAI, Shinji TAKEUTI

Observational results of long-term monitoring of pore pressure include the fluctuation caused by earth tides and atmospheric loading. As the fluctuation disturbs the response of pore pressure to evaluate the connectivity of high permeable zone from the results at hydraulic test or borehole drilling, the fluctuation should be eliminated from the results. On the other hand, it is possible to estimate the hydraulic properties at each monitoring interval from the fluctuation, which is dependent on the hydraulic properties. At this time, the fluctuation caused by earth tides and atmospheric loading was numerically separated from the results of long-term monitoring of pore pressure using 1,000m boreholes drilled in granite. From the results of the analysis, it could be demonstrated to evaluate the connectivity of high permeable zone from the hydraulic response, to estimate the hydraulic properties in each monitoring interval from the fluctuation and to assure quality of observational data by the fluctuation.

Key Words: monitoring, pore pressure, earth tides, granite

1. はじめに

水圧モニタリングによる間隙水圧観測値には地球潮汐や気圧変化等による変動が含まれている。水理試験による圧力応答や周辺試錐孔の掘削応答の観測により水みちの評価をする場合、岩盤の水理特性や試錐孔間距離等によっては圧力応答量が小さいことから地球潮汐等による水圧変動は除去して評価する必要がある。一方、地球潮汐等による水圧変動は測定区間の水理特性に依存しているため、この変動に着目すると測定区間の水理特性の評価が可能になる。今回、花崗岩に掘削した深度 1,000m 級の試錐孔に設置した間隙水圧モニタリングシステムにより得られた結果から、地球潮汐、気圧変化に起因する水圧変動成分の分離解析を行った。この解析により、1) 圧力応答成分に基づく水みちの評価、2) 地球潮汐や気圧変化の変動成分に基づく測定区間の定性的水理特性の把握、3) 地球潮汐や気圧変化の変動成分による観測データの品質の管理、ができることの実例を示す。

2. 地球潮汐・気圧変化に起因する間隙水圧変動成分の分離解析

モニタリングで得られた間隙水圧には、地球潮汐や気圧変動に起因した変動成分と観測装置の分解能に起因したノイズ成分が含まれている。これらの間隙水圧変動成分を分離するため、分離解析プログラムである BAYTAP-G¹⁾を用いて解析を実施した。

* 大成基礎設計株式会社 技術研究所

** 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

*** 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

(1) 解析に使用した BAYTAP-G の概要

BAYTAP-G(Bayesian Tidal Analysis Program Ⅱ Grouping Model)は、地殻変動、潮汐解析に Bayesian Model を組み込んだ総合解析プログラムである。BAYTAP-G では、観測値の時系列を y_i とする時、ABIC(Akaike's Bayesian Information Criteria)が最小になるように選ばれた超パラメーター (hyperparameter) D 、WEIGHT に対して、次の(1)式の値を最小化することによって各係数を決定する。

$$\sum_{i=1}^n \left| y_i - \sum_{m=1}^M \{ \alpha_m C_{mi} + \beta_m S_{mi} \} - d_i - \sum_{k=0}^k b_k X_{i-k} - h z_i \right|^2 + D^2 \sum_{i=1}^n |d_i - 2d_{i-1} + d_{i-2}|^2 + WEIGHT^2 \sum_{m=2}^M \{ (\alpha_m - \alpha_{m-1}) + (\beta_m - \beta_{m-1})^2 \} \quad \text{----- (1)}$$

ここで m は分潮のグループ番号、 C_{mi} 、 S_{mi} は、それぞれ m グループ目の各分潮の $\cos$ 、 $\sin$ パートの和 (理論値)、 α_m β_m は決定すべき潮汐定数である。また、 d_i はドリフト (トレンド)、 X_i は並行観測データ、 b_k はレスポンスウェイト、 h はステップ量である。 z_i はステップのある時点までは 0、それ以降は 1 になる系列データである。これにより、入力データを、潮汐成分、トレンド成分、並行観測データのレスポンス成分、イレギュラー成分の 4 つに分解できる。以下に各成分を抽出する際の本解析プログラムの特徴を記す。

a) 地球潮汐成分、トレンド成分の抽出

地球潮汐成分に関連する超パラメーター WEIGHT は、滑らかな周波数応答関数を表現するための係数である。分潮群数は、今回の解析においては解析期間を考慮し 12 分潮とした。また、トレンド成分抽出に際しては、Bayesian Model を組み込んでいるため、時間を引数とする多項式や周期関数で表現できないトレンドを処理することができる。

b) 気圧応答成分の抽出

気圧応答成分を分離するには、並行観測データとして地表で観測された大気圧変動を設定することになる。本解析では応答の周波数特性も考慮されているため、単純な比例係数だけではなくフーリエ変換することにより位相のずれを求めることができる。

c) イレギュラー成分 (デジタルノイズ) の抽出

イレギュラー値の判定方法に関しては、個々の残差の他に、ドリフトが残差の平均的な値の 4 倍以上になった部分を異常値 (イレギュラー) と判断している。

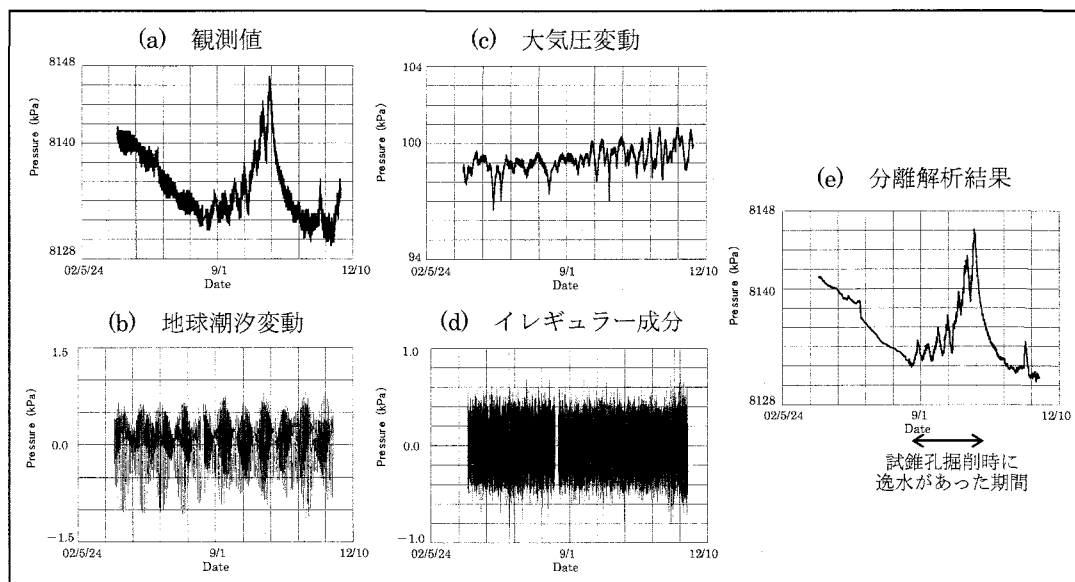


図-1 BAYTAP-G による解析例

(2) 分離解析例

図-1 は、試錐掘削時の圧力応答による水みちの連続性の評価に使用するために間隙水圧成分を分離した実例を示す。この図中の(a)観測値には、試錐掘削時の逸水による圧力応答に地球潮汐成分、大気圧成分およびデジタルノイズであるイレギュラー成分が含まれ、圧力応答のみを正確に読み取ることが困難である。この観測値に対しBAYTAP-Gを用いた解析を行うことで、(b)地球潮汐変動成分、(c)大気圧変動成分、(d)イレギュラー成分、に分離ができ、(e)分離解析結果で示すように試錐掘削時の圧力応答のみを抽出することができた。

3. 水圧モニタリングにおける間隙水圧変動成分の分離解析の適用例

次に、間隙水圧変動成分の分離解析で得られた結果を、

- ・ 圧力応答成分に基づく水みちの評価
- ・ 地球潮汐や大気圧変化の変動成分に基づく測定区間の定性的水理特性の把握
- ・ 地球潮汐や大気圧変化の変動成分による観測データの品質の管理

を目的に適用した例を示す。

(1) 圧力応答成分に基づく水みちの評価

水理試験による圧力応答や周辺試錐孔の掘削応答の観測により水みちの評価をする場合、岩盤の水理特性や試錐孔間距離等によっては圧力応答量が小さいことが考えられる。この時、間隙水圧の観測データから人為的擾乱成分を抽出することによって、岩盤割れ目の連続性（水みち）の評価が可能になる²⁾。

図-2 に、試錐孔において実施した長期揚水試験³⁾時に、その周辺の観測孔で得られた圧力応答観測値を示す。水圧観測モニタリングで得られた観測値には、地球潮汐成分である鋸歯状の変動が含まれることが分かる。BAYTAP-Gを用いて、この観測値から地球潮汐変動、大気圧変動およびトレンド成分を図-1と同様に分離することにより、長期揚水試験期間中の圧力低下値を抽出した（図-2）。この結果、揚水に対する圧力応答開始時間と終了時間を正確に得ることが可能となり、試錐孔間の水理特性を評価することができた。

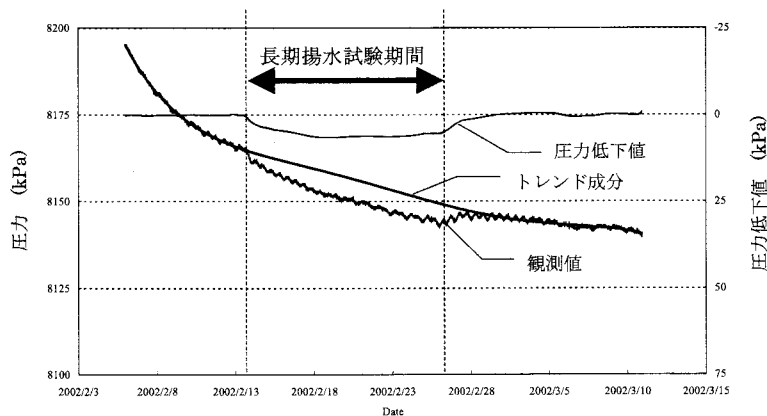


図-2 試錐孔間水理試験における圧力応答観測値と算出された圧力低下値

(2) 地球潮汐や大気圧変化の変動成分に基づく測定区間の定性的水理特性の把握

間隙水圧変動の中に地球潮汐や大気圧変動成分が含まれていることは、以前から知られていた。また、モニタリングを実施している地層によって地球潮汐や大気圧変動成分の変動幅や位相が異なることから、Hsieh et al. (1987)等は、これらの変動から水理定数を算定する方法を導き出している⁴⁾。しかし、この算定に必要な精度で井戸水位の変動を計測することの困難さや、地球潮汐による変動原因となる地球の面積ひずみを高精度に計測することが難

しいことなどの課題が指摘されている。近年の計測技術の進歩に伴い、これらの変動成分に着目した水理特性評価方法の再検討が試みられているが⁵⁾、実測のデータに基づいた評価は今後の課題である。

今回、単一試錐孔に設定した複数の区間の間隙水圧をプローブにより直接計測できる装置を用いて観測した水圧のモニタリング結果を用いて、間隙水圧変動成分の分離解析を実施した。この分離解析結果と観測地盤の水理特性との関連性を求めるために、間隙水圧モニタリング前に実施された現場透水試験で得られた試験結果との比較検討を行った。モニタリングを実施したサイトの地質構造は、花崗岩体を新第三系の堆積岩が不整合で覆っており、花崗岩の上部には水平割れ目が卓越したゾーン（上部割れ目帯）が発達している。また、花崗岩中に遮水性の断層が存在しており、その上下には割れ目帯が発達している。

分離解析結果から、各観測区間に含まれる地球潮汐、大気圧変動成分を代表する値として、地球潮汐に関しては地球潮汐ファクターを、大気圧変動に関しては気圧応答率を算定した。表－１には、水圧モニタリングの観測区間と分離解析で求めた気圧応答率と地球潮汐ファクターを示す。地球潮汐ファクターは、分離解析で求められる(1)式で示される潮汐定数の一部であり、値が大きいほど地球潮汐の影響度が大きいことを示している。また、気圧応答率は、実際に観測された大気圧に対する分離解析で求めた大気圧変動成分の変化量の比率である。また、同じ試錐孔で実施した現場透水試験時の試験区間と透水量係数を表－２にまとめた。透水試験では、断層部を除き比較的透水性が高いことが想定される区間を試験位置として選んでいる。両表から解かるように試験区間と観測区間は一致していない。間隙水圧変動に影響を与えるのは透水試験を実施した比較的透水性の高い部分であると考えられたため、観測区間に試験区間が内包される 7 区間を抽出し表－３にまとめた。これらの表の深度表示は、孔口から試錐孔に沿った長さ（mabh; meter along borehole）で表記している。

図－３に、気圧応答率と透水量係数を深度ごとにプロットした図を示す。透水量係数は遮水性を示す断層部で小さく、その前後の割れ目帯で大きいことが分かる。一方、気圧応答率は深度方向に減少する傾向が見られた。多孔

表－１ 分離解析で求めた気圧応答率と地球潮汐ファクター

モニタリング 区間深度	区間長	分離解析結果		モニタリング 対象地質
		気圧応答率 (%)	地球潮汐ファクター	
mabh	m			
150.9 ～ 213.7	62.8	65.05	0.00583	花崗岩 上部割れ目帯
286.3 ～ 316.2	29.9	60.55	0.00984	
317.1 ～ 412.3	95.2	64.40	0.01332	
413.2 ～ 490.6	77.4	56.55	0.01602	花崗岩 健岩部
491.5 ～ 575.1	83.6	58.40	0.02124	
576.0 ～ 659.8	83.8	61.60	0.01338	
660.7 ～ 667.4	6.7	56.15	0.01554	花崗岩 断層周辺割れ目帯
668.3 ～ 689.1	20.8	52.15	0.01577	断層部
690.0 ～ 753.9	63.9	48.45	0.00835	花崗岩 断層周辺割れ目帯
754.8 ～ 790.0	35.2	52.75	0.01986	

表－２ 現場透水試験結果

透水試験区間深度	試験区間長	水理試験結果	試験対象地質
		透水量係数 (m ² /sec)	
mabh	m		
68.5 ～ 78.0	9.6	2.04E-10	堆積岩
82.5 ～ 88.6	6.1	3.34E-07	
95.0 ～ 134.5	39.4	1.18E-06	風化花崗岩
183.2 ～ 254.2	71.0	3.20E-07	花崗岩 上部割れ目帯
314.9 ～ 317.0	2.0	8.74E-06	
361.6 ～ 424.1	62.5	1.37E-06	花崗岩 健岩部
500.3 ～ 562.8	62.5	1.31E-05	
584.0 ～ 647.1	63.1	7.70E-05	花崗岩 断層周辺割れ目
669.5 ～ 677.0	7.5	5.30E-08	断層部
690.5 ～ 753.0	62.5	2.21E-06	花崗岩 断層周辺割れ目
754.5 ～ 790.0	35.5	2.14E-05	

表－３ 分離解析結果と透水量結果の比較

区間深度(m)	区間中央深度	分離解析結果		水理試験結果	対象地層
		気圧応答率 (%)	地球潮汐 ファクター	透水量係数 (m ² /sec)	
mabh	mabh				
150.9 ～ 213.7	182.3	65.05	0.00583	3.20E-07	花崗岩上部割れ目帯
317.1 ～ 412.3	364.7	64.40	0.01332	1.37E-06	花崗岩健岩部
491.5 ～ 575.1	533.3	58.40	0.02124	1.31E-05	花崗岩健岩部
576.0 ～ 659.8	617.9	61.60	0.01338	5.99E-05	花崗岩 断層周辺割れ目帯
668.3 ～ 689.1	678.7	52.15	0.01577	5.30E-08	断層部
690.0 ～ 753.9	722.0	48.45	0.00835	2.21E-06	花崗岩 断層周辺割れ目帯
754.8 ～ 790.0	772.4	52.75	0.01986	2.14E-05	花崗岩 断層周辺割れ目帯

質弾性論から、気圧応答率は地盤の間隙率が大きいとか体積弾性率が大きい時に小さくなる⁵⁾が、深度方向に気圧応答率が減少する傾向は体積弾性率の増加による影響が大きいことによると考えられる。気圧応答率と透水量係数との関連性は、今回の結果からはあまり明瞭ではなかった。

次に、地球潮汐ファクターと透水量係数の深度ごとのプロットを図-4に示す。この図より地球潮汐ファクターと透水量係数は比較的よい相関を示し、透水量係数が高い区間で地球潮汐ファクターも大きくなることから分かる。断層部で地球潮汐ファクターが大きくなった理由としては、モニタリング区間が透水試験区間に対し広く設定しているため、モニタリングにより透水性の小さい断層部の間隙水圧変動だけでなくその周辺の透水性の大きい割れ目帯の間隙水圧変動を捉えたことによると考えられる。この断層部を除けば、気圧変動成分より潮汐変動成分の方が区間の水理特性を反映しており、地球潮汐ファクターを求めることによって観測地盤の水理特性のうち透水量係数を定量的に判定できる可能性が示された。

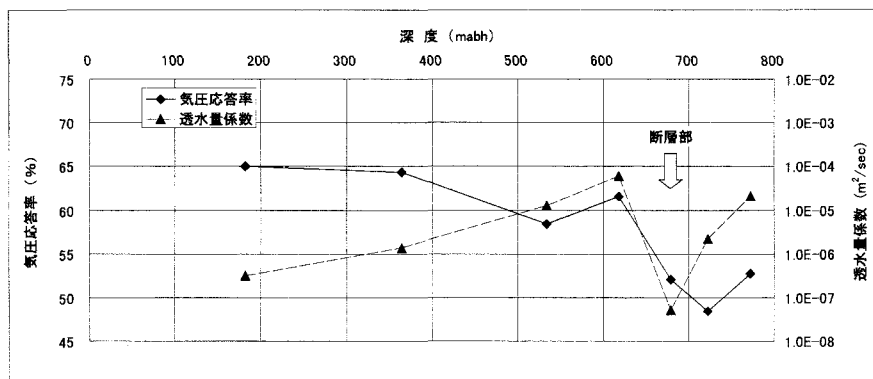


図-3 気圧応答率と透水量係数の比較

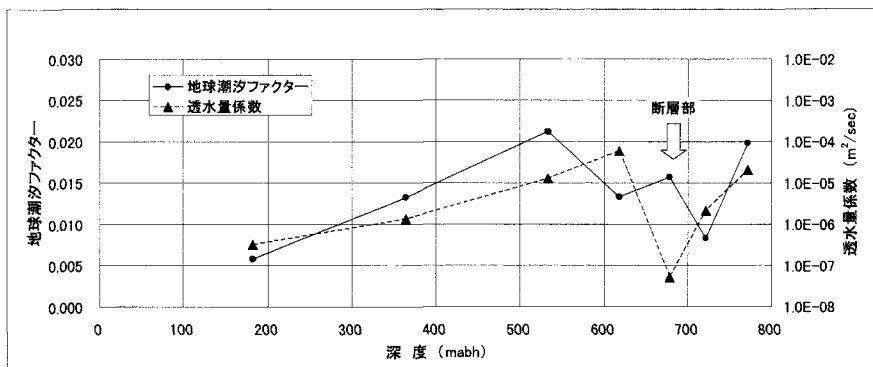


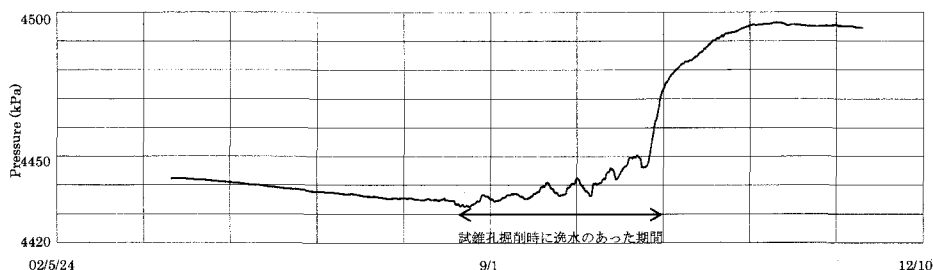
図-4 地球潮汐ファクターと透水量係数の比較

(3) 地球潮汐や大気圧変化の変動成分による観測データの品質の管理

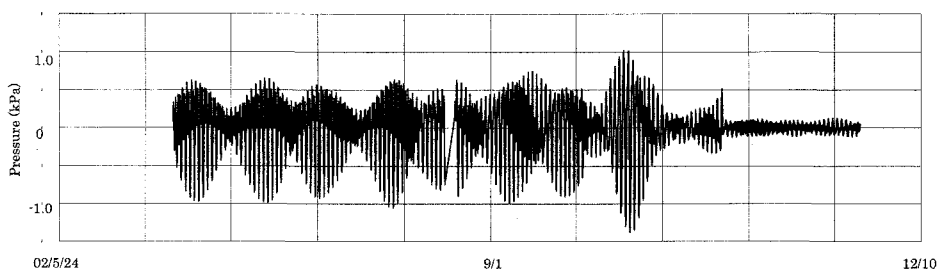
地球潮汐や大気圧変化の変動成分は、b)で述べたように水理特性に変化が生じなければ同じ値を示す。このことから、地球潮汐や大気圧変化の変動成分が大きく変化した観測期間を抽出することで、観測装置に異常が生じたことに起因するデータを特定することが可能である。これまで、ある程度観測を続けなければ判定することが困難であった水圧計と観測区間との連結部の接触不良を、地球潮汐や大気圧変化の変動成分により検出した例を以下に示す。

図-5に間隙水圧の経時変化図を示す。この観測結果は、図-1と同じ期間に観測されたデータであり近傍の試験掘削に伴う逸水の影響により、期間中程において水圧に変化が生じている。この観測結果から地球潮汐成分を分離解析した結果を図-6に示す。この図から、人為的擾乱により間隙水圧が変化しても一定の振幅で変化を続ける

と考えられる地球潮汐変動成分が、期間後半で極端に減少し異常な値を示していることが分かる。地球潮汐変動成分に極端な変化が生じた時期に、この観測区間の水理特性に対してのみ急激な変化を与える要因が存在しなかったため、この区間の観測装置の性能確認を行った。その結果、水圧計と観測区間との連結部の接触不良が生じており、正しい間隙水圧値が計測されていないことが判明した。このように水圧データを分離解析し地球潮汐や大気圧の変動成分の異常を調べることで、観測データの品質が保たれていない期間を抽出することが可能となる。



図－5 観測装置の異常が判明した観測結果例



図－6 観測装置の連結部の接触不良を示す地球潮汐解析結果例

4. おわりに

本報では、水圧モニタリングデータの分離解析手法と分離解析結果の適用事例について示した。今後は、データの品質管理の面からリアルタイムでモニタリングデータを評価する手法と、引き続き地球潮汐ファクターと気圧変動成分を用いた観測区間の定性的な水理特性の把握する手法の検討を実施し、水圧モニタリングデータの分離解析による評価手法の信頼性を向上させていく予定である。

参考文献

- 1) 田村良明：Baytap-G 使用手引書，1981.
- 2) 升元一彦，向井圭，竹内真司：花崗岩地域における大深度長期間隙水圧モニタリング，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2004.（投稿中）
- 3) 竹内真司，下茂道人，西嶋望，後藤和幸：1000m ボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査，第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.296-300，2001.
- 4) Hsieh, P.A., J.D.Bredehoeft, and J.M. Farr : Estimation of aquifer transmissivity from phase analysis of Earth-tide fluctuations of water levels in artesian wells, Water Resources Research, 23, pp.1824-1832, 1987.
- 5) 細谷真一，徳永朋祥：間隙水圧の気圧変動応答，地球潮汐応答を用いた水理特性評価技術の展望，地下水学会誌，Vol.45, No.3, pp.299-318, 2003.