

水封式岩盤タンク周辺における孔内地下水位変動の影響要因分析と管理モデル

日本地下石油備蓄(株) 植出和雄 清水建設(株) 本多 眞
 日本地下石油備蓄(株) 岡本明夫 清水建設(株) 長谷川誠
 清水建設(株) 鈴木 誠

1. はじめに

水封式岩盤タンクにおいて水封機能の確保のためには、常に周辺地下水位変動を観測し、水位を維持するための制御を行う必要がある。このためタンク周辺に設置した複数の観測孔において、孔内地下水位の経時的な変動を常時観測している。孔内地下水位の変動は降雨による影響はもとより、気圧変動、地球潮汐などによる自然影響要因により大きく変動する。また、水封水位を一定に保つべく給水による制御を実施しており、給水量変動も孔内水位に影響を及ぼしている。このような変動の中から、地震やその他の要因に伴う構造変化による変動を見いだすことが、水封機能管理において極めて重要となる。このような目的から、本研究では統計的な時系列解析手法を用いて、観測孔地下水位データにおける気圧や潮汐、降雨による影響を分離するとともに維持管理モデルとしての適用性を検証した。

2. 水封式岩盤タンク周辺の地下水位変動要因

図1は、水封式岩盤タンクにおいて一般的に観測される地下水関連データの相互の因果関係を示した概念図である。まず気圧や潮汐変動は、直接孔内水位変動に影響を与えるのに対して、降雨変動の影響は図に示されるように直接受けるものに加えて、水封制御を行うため、給水量や水封水位を変動させるので間接的な影響も受ける。すなわち運用時には水封機能維持のため、水封トンネルの水位(水封水位)を一定に保つように給水量を増減させて制御している。この水封水位は降雨変動に伴い変動しようとするため、結果として給水量変動は降雨変動の影響を受ける。また通常は一定に保たれる水封水位も下限水位を制御しているため、給水量を0としても上昇する場合や、人為的に変動させた場合などには、これらの影響も受けることになる。気圧や潮汐、降雨変動による影響を評価するためには、このような関係をモデル化する必要がある。

3. 気圧・潮汐による影響の除去

本報告では菊岡地下石油備蓄基地において、潮汐の影響を強く受けて変動している孔内地下水位データを用いて検討を実施した。図2は対象期間(約4年間)の現地気圧、潮高、降雨(日雨量)データであり、図3の細線が対象とした孔内水位の観測データである。これらは潮高以外は午前10時に観測された1日毎のデータである。潮高は1日の中でも時間によって大きく異なるため、モデル化の精度が最も良くなる1時間前の午前9時のデータを用いた。

まず状態空間モデルを用いた気圧および潮汐の影響を推定して分離する手法(文献¹⁾の手法から降雨影響モデ

ルを除いた手法)を適用する。孔内地下水位の時系列 y_n ($n=1, \dots, N$) を気圧影響 P_n 、潮汐影響 E_n と他の影響による変動(トレンド) t_n を用いて次式で表されると仮定する。

$$y_n = t_n + P_n + E_n + \varepsilon_n \quad (1)$$

ただし、 ε_n は平均0、分散 σ^2 の観測ノイズである。また気圧、潮汐影響およびトレンドは次式で表されるとする。

$$P_n = \sum_{i=0}^l a_i p_{n-i}, \quad E_n = \sum_{i=0}^m a_i e_{n-i}, \quad t_n = t_{n-1} + v_n \quad (2)$$

なお、 v_n は $N(0, \tau^2)$ に従う白色ノイズである。水位 y_n 、気

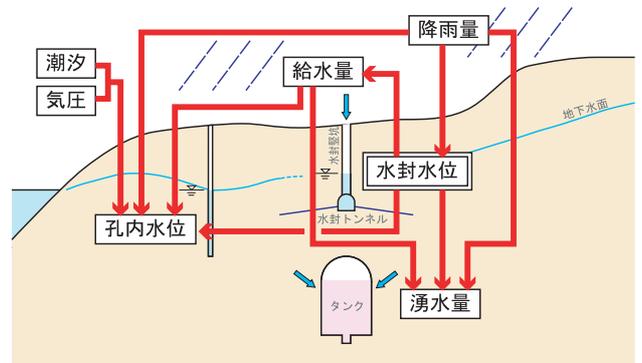


図1 地下水関連データの因果関係概念図

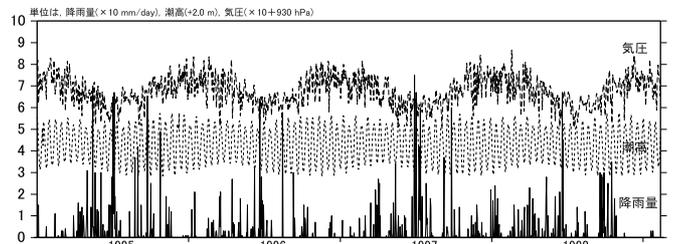


図2 気圧・潮高・降雨量データ

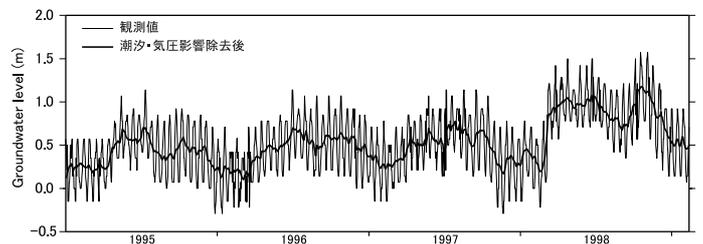


図3 孔内地下水位の観測値と気圧・潮汐影響除去後データ

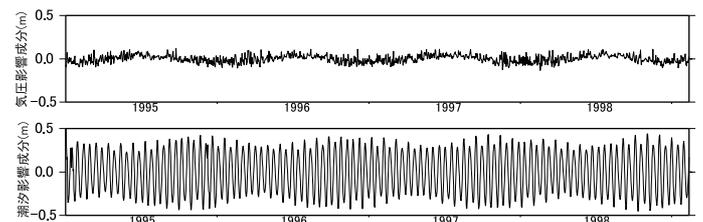


図4 地下水位変動における気圧(上)と潮汐(下)影響成分

表1 気圧影響次数 l , 潮汐影響次数 m と AIC
($l=1, m=5$ のとき AIC 最小)

$l \setminus m$	3	4	5	6	7
1	-2628.0	-2630.3	-2669.8	-2665.8	-2662.2
2	-2616.4	-2618.3	-2658.0	-2654.0	-2649.8
3	-2606.4	-2608.7	-2648.0	-2643.8	-2639.7
4	-2594.9	-2597.2	-2637.2	-2633.1	-2628.6
5	-2583.0	-2585.5	-2625.0	-2620.8	-2616.6

圧 p_n , 潮高 e_n の観測値が与えられるとき, 上記モデルを次の状態空間モデルで表し,

$$x_n = Fx_{n-1} + Gv_n \quad (\text{システムモデル}) \quad (3)$$

$$y_n = H_n x_n + w_n \quad (\text{観測モデル}) \quad (4)$$

$x_n = (t_n, a_0, \dots, a_l, b_0, \dots, b_m)'$ と定義された状態ベクトルの推定値をカルマンフィルタにより求める. 状態ベクトルにはトレンド t_n と気圧係数 a_i , 潮汐係数 b_i が含まれており, これらの推定値が得られることになる. ただし, 気圧, 潮汐モデルの次数 l, m は, いくつかを変化させたモデルの AIC を求めて AIC 最小の最適次数を選択する.

図2,3に示したデータを解析したところ, 気圧, 潮汐モデルの次数は, 表1に示すように $l=1, m=5$ のとき AIC 最小となった. このときのトレンド t_n , すなわち気圧, 潮汐の影響成分を取り除いた後の水位変動を示したものが, 図3の太線である. また気圧, 潮汐の影響成分 P_n, E_n を示した図が図4である. これらから孔内水位変動に占める気圧の影響はあまり大きくないが, 潮汐の影響は最大80cm程度あり, これを精度良く除去でき潮汐変動に隠れていた数10cm程度のわずかな変動が明確になった.

4. 降雨による影響評価と維持管理モデル

著者らは降雨変動の影響を含む地下水位変動に対して制御系多変量自己回帰モデルを用いた管理モデルの提案をしている²⁾. 図1で示したデータ因果関係を次式の変量自己回帰モデルで表す.

$$\begin{pmatrix} y_n \\ Q_n \\ F_n \\ * \\ * \end{pmatrix} = \mathbf{A}(1) \begin{pmatrix} y_{n-1} \\ Q_{n-1} \\ F_{n-1} \\ R_{n-1} \\ H_{n-1} \end{pmatrix} + \mathbf{A}(2) \begin{pmatrix} y_{n-2} \\ Q_{n-2} \\ F_{n-2} \\ R_{n-2} \\ H_{n-2} \end{pmatrix} + \dots + \mathbf{A}(M) \begin{pmatrix} y_{n-M} \\ Q_{n-M} \\ F_{n-M} \\ R_{n-M} \\ H_{n-M} \end{pmatrix} + \varepsilon_n \quad (5)$$

ただし孔内水位 y_n , 給水量 Q_n , 湧水量 F_n , 降雨量 R_n , 水封水位 H_n であり, $\mathbf{A}(k)$ は係数行列, M はモデルの次数, また ε_n はモデル誤差を示す確率変数である. このうち降雨量 R_n は他から影響を受けない変数であり, また水封水位 H_n も通常は人為的に一定に制御されており他から影響を受けない変数である. 一方孔内水位 y_n , 給水量 Q_n , 湧水量 F_n は, 降雨量 R_n , 水封水位 H_n の影響を受ける変数である. 上記モデルを制御系多変量自己回帰モデル³⁾として構築し予測やシミュレーションに用いる際には, 前者の変数は操作変数として常に真値を与え, 後者の変数は被制御変数として次数 M 個分の初期値のみ真値を与えて, 以降は予測値を繰り返しあてはめることになる. 式(5)の左辺の「*」は予測しない変数を意味する.

ここでは3.で気圧・潮汐影響を取り除いた後の孔内水位変動に対して上記モデルを適用し, 降雨影響評価と維持管理モデルとしての可能性の検証を実施した. まず対象期間全体にモデルを適用したところ, 十分な精度が

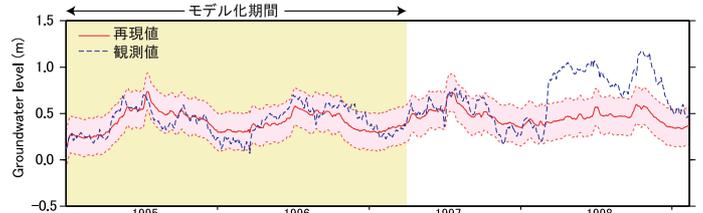


図5 多変量自己回帰モデルによるモデル化結果

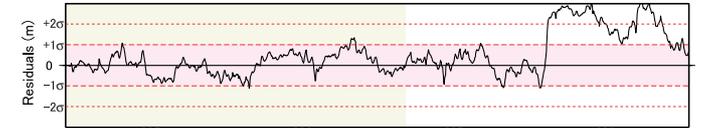


図6 真の水位との残差とモデルの推定誤差

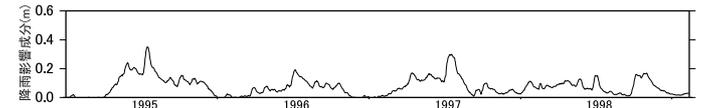


図7 孔内水位変動モデルにおける降雨影響成分

得られなかったため, 最初の約2年(1995.1.1 ~ 1997.3.1)でモデル構築を行い, 対象期間全体を再現したところ, 図5に示すような結果となった. 図の破線が観測値(気圧・潮汐影響除く)で, 実線がモデルによる再現値である. また再現値上下のハッチの範囲が, モデル誤差の $\pm \sigma$ (標準偏差) 範囲である. また図6は観測値と再現値の残差を $\pm 1\sigma, \pm 2\sigma$ の範囲とともに示している. これらを見るとモデル化期間とそれ以降の約1年(1998.2月頃迄)は, 変動を比較的良く捉えられているが, 1998.3月頃の約50cmの上昇を全く捉えることができず, 以降は誤差が $+2\sigma$ 以上となっている. 上昇の原因は調査中だが, この時期を境に何らかの水理構造に変化が生じて水位が上昇したものと考えられる.

また構築されたモデルにおいて, 降雨量 R_n を0, 水封水位 H_n を管理水位値(一定値)を与えて, シミュレーションを実施し, 先の再現値と比較して降雨変動による影響成分を求めた結果が図7である. 降雨量による孔内水位への影響は最大で35cm程度の上昇に寄与しており, 降雨の多い夏季に上昇, 冬季に減少する周期変動をもたらしていることがわかる. なお, 1998.3月以降についてもその傾向に変化は見られず, 1998.3月頃の水位上昇が, 降雨の影響によるものではないことがわかる.

5. おわりに

孔内水位観測データの変動から, 気圧・潮汐・降雨等の自然因子による影響を取り除き, 水理構造変化等による水位変動の検出が可能な手法を提案した. 特に複雑な因果関係で影響を与える降雨の影響を精度良く捉えることができ, 水封機能管理モデルとしての適用性が示された. 今後他の観測孔データ等に適用を試み, さらなる検討を進める予定である.

参考文献

- 1) G.Kitagawa and N. Matsumoto : Detection of coseismic changes of underground water level., Jour.of American Statistical Association, pp.521-528, 1996.
- 2) 本多・鈴木・百田 : 地下水挙動への多変量自己回帰モデルの適用. 土木学会論文集, No.529/III-33, pp.93-102, 1995.
- 3) 赤池・中川 : ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 1972.