

20 品質管理

盛土荷重を含めた動態観測による沈下予測

東京土木施工管理技士会

東亜建設工業株式会社

堺 谷 常 廣

1. はじめに

動態観測から得られた圧密沈下データから沈下予測を行う手法であるARMAモデル（自己回帰移動平均モデル）を用いた圧密沈下予測について大規模盛土の適用例について述べる。圧密沈下データから将来の沈下を予測する手法として、双曲線法、浅岡法等などの状態方程式を用いるのが一般的である。これらの予測沈下手法は、盛土完了後、荷重が変わらない状態で放置を行い、その間の沈下量を観測して将来の最終沈下量を予測するものである。本文で報告するARMAモデルは、圧密沈下データと荷重データから将来予測を行うため、盛土高が増加しても将来沈下量を求める事が出来る。短所として、データの離散化、状態方程式の係数をカルマンフィルター等で求める必要がある。本文では、大規模な盛土の事例として平成22年に供用した羽田空港D滑走路の動態観測データを用いて、適用性を確認した。

工事概要

- (1) 工事名：東京国際空港D滑走路建設外工事
- (2) 発注者：国土交通省関東地方整備局
- (3) 工事場所：東京都大田区羽田空港
- (4) 工期：平成19年3月～平成22年8月
(平成29年までの観測結果を使用)

2. 現場における問題点

一般的に軟弱地盤上に盛土を行う場合、事前の沈下計算と併せて、動態観測による沈下データか

ら最終沈下量から予測を行う事が多い。観測された沈下データから沈下予測を行う手法としては、双曲線法、浅岡法、門田法等の観測方程式があり、沈下量の経時変化から最終沈下量を予測するものである。一般的にこれらの観測方程式は、盛土完了後の荷重が一定となった場合や、放置期間を取った場合に用いられる。盛土の施工中の様に、載荷荷重が増加している段階では、例えば、試験盛土を行うなど工期や施工期間に余裕がある場合などを除き用いられることがほぼないものと考えられる。本文では、ARMAモデル¹⁾（自己回帰移動平均モデル）を用いて、荷重項を考慮した沈下予測について、大規模な圧密沈下の動態観測結果から適用性を考察してみた。ARMAモデルは、以降に記すように三笠の一次圧密方程式と等価²⁾であることが示されており、沈下量及び荷重項を含み、動態観測の結果からARMAモデル荷重の増を考慮して、将来の沈下予測が可能である。動態観測の沈下データは離散化したデータが必要であるため、欠損したデータは前後のデータから線形的に求めている。ARMAモデルの各係数の同定はカルマンフィルターを用いて行った。

3. 工夫・改善点と適用結果

(1) ARMAモデルと離散系状態方程式の誘導

ARMAモデルの誘導は、脇田らの論文²⁾を参考した。三笠の一次元圧密方程式は、式(1)と等価であることがAsaokaにより示されている。

$$\rho + c_1 \rho' + c_2 \rho'' + \cdots + c_n \rho^{(n)} + \cdots = u(t) \quad (1)$$

ここで、 ρ は時刻 t における沈下量、 $u(t)$ は荷重項になる。 $c_1, c_2 \dots$ は係数である。式(1)で、係数 c_i は i が大きくなると急速に小さくなるため、式(1)は下式で近似される。

$$\rho + c_1 \rho' + c_2 \rho'' + \dots + c_n \rho^{(n)} = u(t) \quad (2)$$

ここで、状態変数ベクトル $X_m(t)$ を次式で定義する。これから、

$$x_m(t) = [\rho(t) \dot{\rho}(t) \dots \rho^{(n-1)}(t)]^T \quad (3)$$

となり、式(1)～式(4)から式(5)が得られる。

$$\dot{x}_m(t) = [\dot{\rho}(t) \ddot{\rho}(t) \dots \rho^{(n)}(t)]^T \quad (4)$$

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m u(t) \quad (5)$$

式(6)から施工中の盛土の沈下データから係数を同定する。同定のために、式(6)と等価な離散化を行う。沈下量や盛土荷重は本来連続的に変化する量である。しかし、その観測データを一定間隔時間 Δt で行うと離散時間状態量が得られる。その時 j 番目の沈下量の観測値 $q(j-1)$ をそれより以前の $(j-1), (j-2) \dots$ 番目の観測値を用いて、ARMAモデル（自己回帰移動平均モデル）で表すと以下の式³⁾となる。

$$q(j) = \sum_{i=1}^k \{a(i)q(j-1) + b(i)r(j-1)\} \quad (6)$$

ここに k は次数、 $q(j-1), q(j-2) \dots$ は j 番目より以前の沈下観測値であり、 $r(j-1), r(j-2) \dots$ は j 番目より以前の盛土荷重である。式(7)の係数の同定は、カルマンフィルター⁴⁾を使って同定する。

そこで、式(5)の係数の状態変数ベクトルを式(6)として、変換マトリックスを式(7)(8)の様に設定する。

$$\hat{X}_j = [a_1 \dots a_k, b_1 \dots b_k]^T \quad (7)$$

$$M_j = [\hat{Y}_{j-1} \dots \hat{Y}_{j-k}, u_{j-1} \dots u_{j-k}]^T \quad (8)$$

これらを用いて式(5)は次の様に表すことができる。

$$\hat{Y}_j = M_j \hat{X}_j \quad (9)$$

また、カルマンゲインは次のとおりとなる。

$$L_j = P_j M_j^T [M_j P_j M_j^T + R]^{-1} \quad (10)$$

観測値とその推定値との差 e_j は次式で表す。

$$e_j = Y_j - \hat{Y}_j = Y_j - M_j \hat{X}_{j-1} \quad (11)$$

これらの L_j, e_j を用いて係数の同定値は次式で与えられる。

$$\hat{X}_j = \hat{X}_{j-1} + L_j e_j \quad (12)$$

次ステップ用の誤差共分散マトリックスは次式で

求められる。

$$P_{j+1} = (I - L_j M_j) P_j (I - L_j M_j)^T + L_j R L_j^T \quad (13)$$

なお、逆解析の開始時点で観測誤差分散 R 及び誤差共分散行列の初期値 P_0 について計算当初は不適当な値であるため、良い同定値が求められないが計算ステップを続けていくと定常的な値を示すものに至る。

(2) 圧密沈下予測の適用について

ARMAモデルによる圧密沈下予測として、実施工で観測されたデータを使用して適用性について検証を行ってみる。対象とした沈下データは、東京国際空港羽田D滑走路外工事⁵⁾で観測したものである。当該工事は、平成19年から工事を開始して、平成22年に供用開始を行った。その後10年程度観測を行っている。この沈下データと施工中の載荷履歴を使用して検証を行った。

標準断面図を図-1、地層区分を図-2⁵⁾に示す。対象とした工事は、厚く堆積した軟弱地盤上に高盛土を行うものであり、載荷荷重は降伏応力を超えている。沈下量は7mmを超えるものとなっていいる。

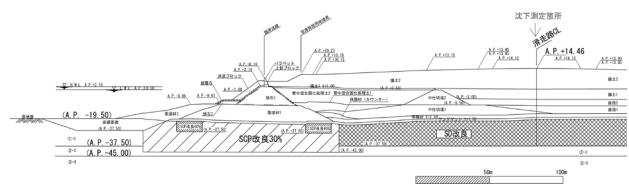


図-1 標準断面

工 程 分 類		小 区 分		
①	堆積土 透水土 透水土 有機物質...部	1-H 1-H	2-H 2-H	3-H 3-H
②	有機物質...部 七号地層(透水土) 七号地層(透水土)	1-1~C-2 1-3 2-3 2-4 3-1~G-4	1-C-2~H-3 1-C-3 2-C-4~H-5 2-C-4	3-C-2 3-C-3 4-C-4
③	七号地層(透水土)~ 八号地層(透水土)	4-H-1 4-H-2 4-H-3 4-H-4 4-H-5	5-S 5-S 5-S 5-S 5-S	6-S 6-S 6-S 6-S 6-S
④	九号地層(透水土、砂質土)~ 江戸川層(透水土)	7-H-1 7-H-2 7-H-3 7-H-4 7-H-5	8-S-1 8-S-2 8-S-3 8-S-4 8-S-5	9-S 9-S 9-S 9-S 9-S
⑤	江戸川層(透水土、砂質土)~ 一號、東京層(透水土)	10-H-1 10-H-2 10-H-3 10-H-4 10-H-5	11-S-1 11-S-2 11-S-3 11-S-4 11-S-5	12-S 12-S 12-S 12-S 12-S

図-2 地層断面

今回の動態観測の解析に用いるのは、図-3の平面図に記載しているE-17及びSK-Nの2か所である。それぞれ、滑走路直下の沈下量を観測してい

た。図-4は、盛土開始から2,500日までの載荷履歴と沈下曲線⁶⁾を現したものである。同図の中には、盛土前の沈下予測値と2,500日後の沈下量から求めた双曲線法による沈下予測結果を記載している。双曲線法は路床完了後から計算を行っている。沈下量と層厚から、式(6)を、カルマンフィルターを用いて同定する事で、係数a1, a2, b1, b2を求めるものである。将来予測は各係数を用いて層厚を変えて計算を行う。係数が将来予測可能なものとなるには、一定値に収束し、将来値との乖離が所定の範囲内に収まる事が必要となる。図-5は、係数と経過日数を現したグラフであるが、水中での埋立時（0～22.4m）から気中での盛土（22.4m～36.5m）で移り変わり、気中の盛土時には係数が増減するような動きをして一定値に収束している。将来予測はこの係数を用いて算出を行った。計算条件として経過日数609日に層厚22.35mで水中への投入から陸上盛土に移行する。この際の係数を使用して将来予測を行ったのが図-6である。係数を求めるために、水中での埋立時の沈下量、層厚から算出した（ $a_1=0.62$, $a_2=0.35$, $b_1=0.03$, $b_2=0.03$ ）。このケースでは、気中から水中に移行する際に係数が大きく変わっている。これは値の変動幅の違いはあるが、新たに盛土を行う際に係数が振れる傾向が見られた。後に記載するE-17では、気中と水中に移行する際係数の変動幅が大きくなかった。そのため、最終沈下量に大きく乖離が見られていない。ARMAモデルでは、層厚など荷重項を考慮した将来予測ができるため精度の高い沈下予測が可能と考えられるが、盛土高が増える際には、係数が変動するために留意が必要である。1,061日で層厚36.5m舗装完了となる（図-9）。陸上盛土の中間での計算として909日の係数を用いて将来計算を行った（図-6・7）。盛土の中間時では、係数が収束傾向にあり最終沈下量は3%程度の乖離が見られた。以降、図-9～13にE-17の結果について記載する、E-17も同様の傾向となつた。SK-Nと比較して係数の変動が小さいため早期の予測精度は高い。

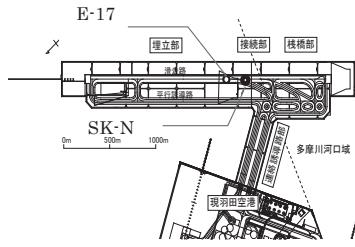


図-3 沈下予測位置平面図

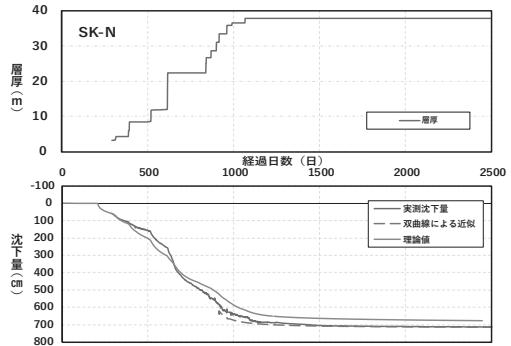


図-4 沈下量・載荷履歴

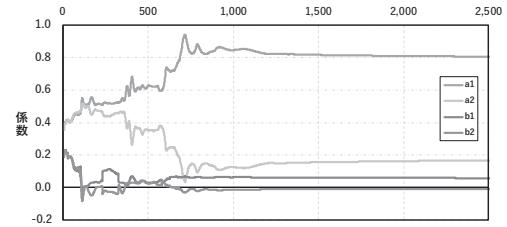


図-5 経過日数と係数変化

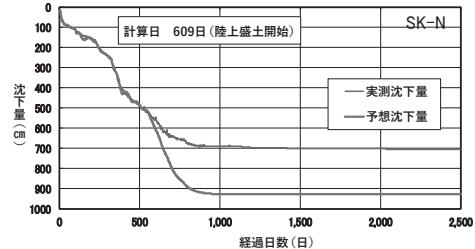


図-6 最終沈下予測（陸上盛土開始時）

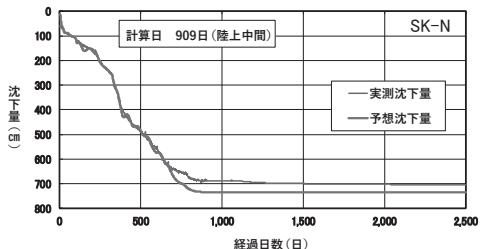


図-7 最終沈下予測（盛土中間時）

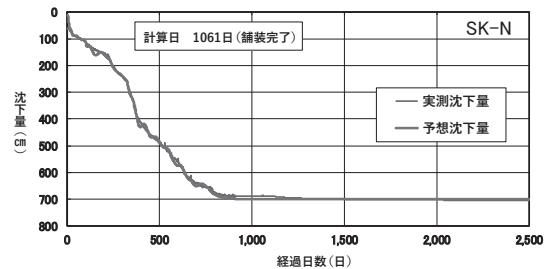


図-8 最終沈下予測（舗装完了時）

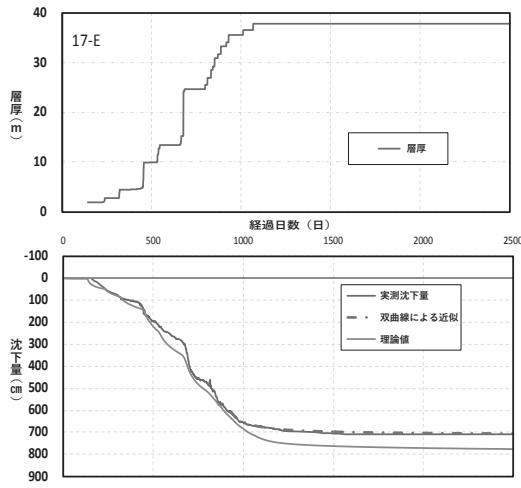


図-9 沈下量・載荷履歴 (E-17)

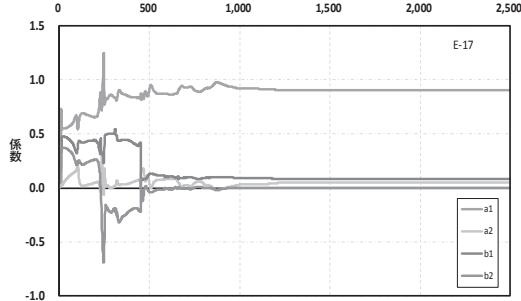


図-10 経過日数と係数変化

4. おわりに

確認を行った。予測に有効であることが確認できたが、短所として計算過程が双曲線法等と比べて計算手順が複雑であることが上げられる。そのため、沈下、荷重データの離散化、モデルに使う係数の同定が一つのパッケージになっている必要がある。双曲線では、統計解析手法が簡易なため、一般的であるが、本手法はカルマンフィルターを用いるなどプログラム化が必要となっており、一般的に用いる事の障害となっていると考えられる。

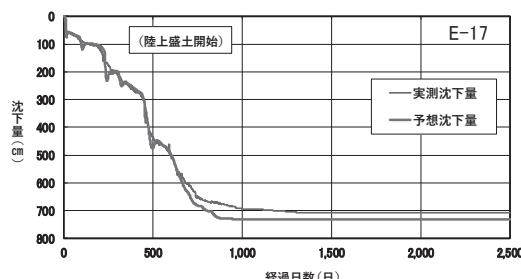


図-11 最終沈下予測 (陸上盛土開始時E-17)

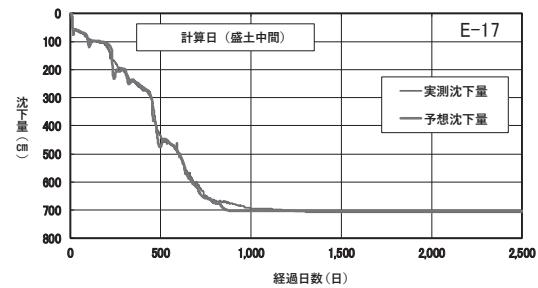


図-12 最終沈下予測 (盛土中間時E-17)

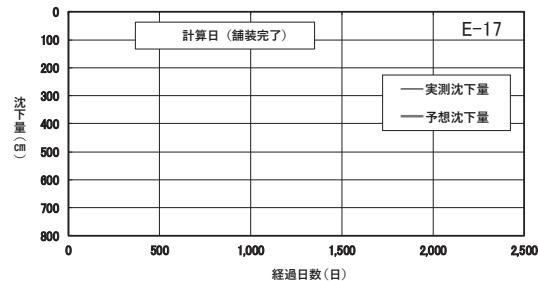


図-13 最終沈下予測 (舗装完了時E-17)

参考文献

- 1) 脇田英治：逆改正の理論と応用, pp.35-38, 技報堂出版, 2000.
- 2) 脇田英治：観測データによる圧密沈下予測と設計へのフィードバック法, 土木学会論文集, No.457/Ⅲ-21, pp.117-126, 1992.
- 3) 脇田英治：逆改正の理論と応用, pp.50-52, 技報堂出版, 2000.
- 4) 野口孝俊, 渡部要一, 鈴木弘之他：羽田空港D滑走路埋立部の施工と維持管理, 土木学会論文集C（地盤工学）, Vol.68, No.2, pp.305-320, 2012.
- 5) 野口孝俊, 田中政典, 渡部要一他：東京国際空港D滑走路建設における地盤の三次元地層推定結果の検証, 地盤工学ジャーナル, Vol. 6, No. 1, pp.69-79, 2011.
- 6) 新原雄二, 平佐健一, 吉原知佳他：羽田空港D滑走路に設置された伸縮装置の供用後10年間の挙動と維持管理, 土木学会論文集B3（海洋開発）, Vol.76, No. 2, pp. I _582- I _587, 2020.