

第5章 二次圧密を含む残留沈下の予測(提案法1)¹⁵⁾

5.1 概説

前章までは主に施工前～施工中期における沈下管理の問題を扱った。それに対して、本章以降では、施工中期～竣工後における沈下管理の問題を扱う。すなわち、この時期においては二次圧密を含む残留沈下の問題が重要である。

二次圧密沈下成分の値は通常、全沈下量の10～20%程度であり、未改良地盤のような一次圧密に長時間を要する場合には、その背後に隠れ実用上あまり問題とならない。しかし、パーティカルドレーンなどで地盤改良を行なったような地盤では、一次圧密が早期に終了するので、二次圧密の沈下量が早い時期に顕著になり無視しえない値となることが多い。また、従来の沈下予測法では沈下観測データに二次圧密成分がどの程度の割合で含まれ、推移しているのか推定できない。そのような場合、一次圧密がほぼ終息していても二次圧密の影響で、あたかも一次圧密が進行中であるかのように見えることもある。そのような沈下を一次圧密沈下として評価して、余盛土を撤去すると、二次圧密が実際には大きく、竣工後の残留沈下として問題になるケースが多い。また、その逆のケースの場合は実際には余盛土を撤去できるのに、判断が遅れることになる。このように、盛土の放置期間の終了時期を判断するために、二次圧密を考慮した沈下予測が重要である。

本章ではまず最初に二次圧密のメカニズムと本論文の立場について考察する。その中で、一次圧密中の二次圧密について2つの仮説(タイプA,タイプB)をたてる。第5章ではそのうちのタイプAの仮説に基づいて、二次圧密の影響を考慮した新しい時間-沈下関係式を誘導する。そして、沈下観測データを用いて、提案する沈下モデル式のパラメータを同定する方法を最尤法を用いて定式化する。また、各現場毎の特性により、万一、提案するモデルが合わない事態がないとは言えない。また、適用するモデルが本

当に将来予測値を保証するものであるかどうか施工中に確認する方法があればなお良い。ところが、従来、観測終了後の沈下データについてどの解析法が一致度が良かったかを検討した報告は多いが、観測途上において、将来の予測精度を確率論により推定したものはほとんどない。そこで、沈下観測中に従来の沈下モデルも含めた多くのモデルの中からその現場の将来の沈下予測精度の最も高いモデルを特定する方法も合わせて提案する。そして、現場施工例にこれら提案する方法を適用し、その適用性を検討する。

5.2 二次圧密のメカニズムと本論文の立場

5.2.1 二次圧密の原因について

一般に、荷重を受けて圧縮する粘性土では、Terzaghiの理論による圧密過程が終了した後もなお二次圧密が継続する。この現象はTaylerとMerchant¹⁾により、はじめて理論的解明がなされた。二次圧密の主要な原因は、粘土粒子間の吸着水層を介した接触部が一定せん断応力の作用下で継続的に粘性流動していくことによると考えられる²⁾。

図-5.1はBjerrum³⁾により示された圧密の概念図である。図-5.1において平行な曲線群は一定期間定荷重を受けた状態で至る間隙比-応力関係を表わしている。土の透水係数が ∞ である場合を想定すると、その時の圧密は図のB→Cの経路を辿り、C点で瞬時圧縮を終了し、以後はC→Dの遅延圧縮過程(荷重の作用に対する骨格の変形遅れ)を辿ることになる。それに対して、現実の土の場合には透水係数が小さいので、図のB→Xの経路を辿り、X点で一次圧密過程(間隙水の排出に関する時間的遅れ)を終了し、以後、一定の有効応力のもとで、X→Dで示される二次圧密過程を辿る。つまり、圧密による間隙水の排出には時間を必要とするが、粘土骨格の変形にはそれ以上に多くの時間を必要とするので、一次圧密終了後も二次圧密が継続することをこの図は示唆していると考えられる。

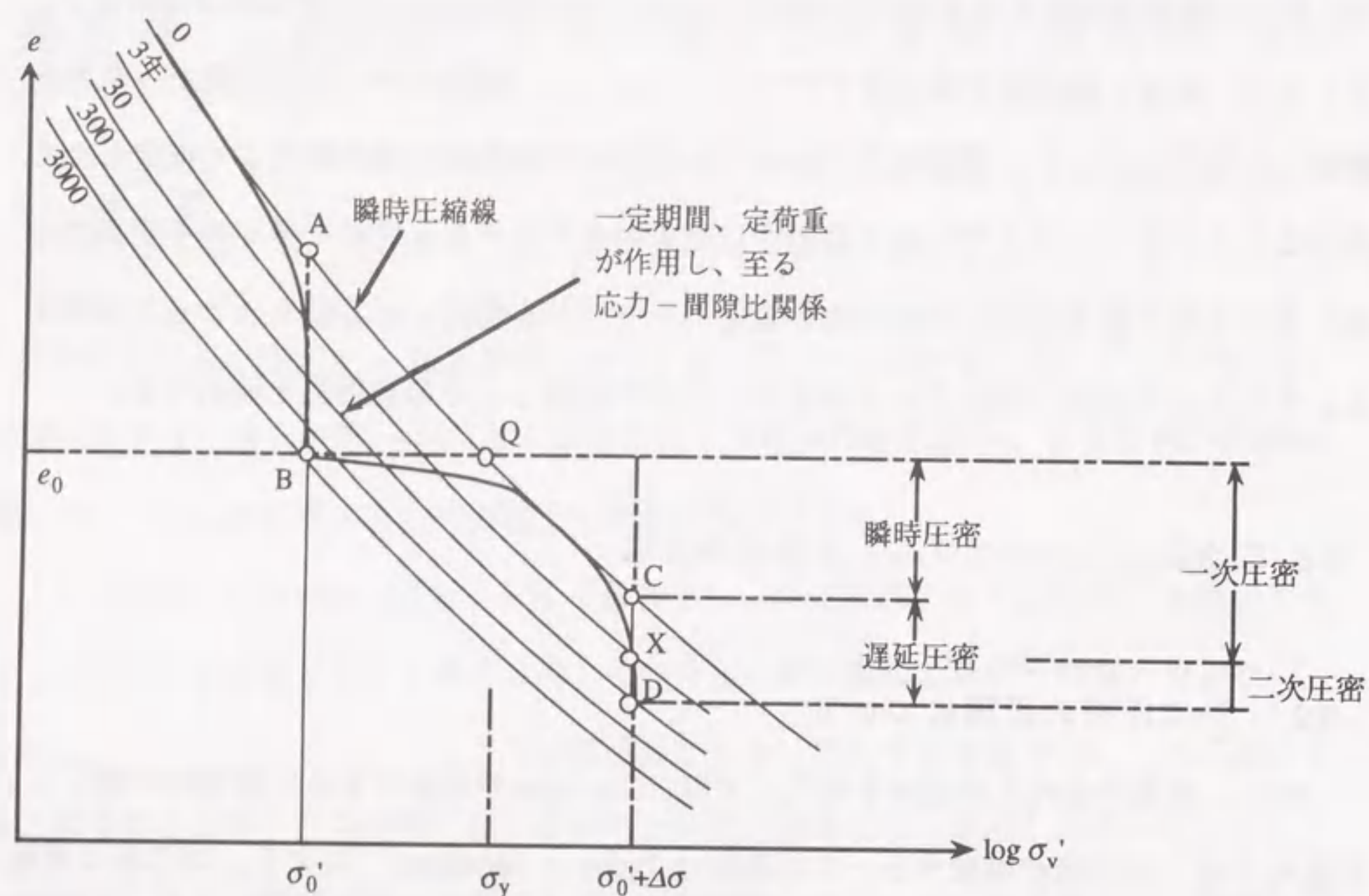


図 - 5.1 Bjerrum³⁾ の圧密モデル

5.2.2 一次圧密中の二次圧密に関する 2 つの概念

二次圧密が一次圧密中にある (以後、「概念 a」と呼ぶ) のか、一次圧密中にはない (以後、「概念 b」と呼ぶ) のか、については長い間議論があり結論が出なかった。

図 - 5.1 に示した Bjerrum の圧密モデルでは、一次圧密中の二次圧密 (遅延圧密) は一次圧密の最初からではなく、図の C 点付近から始まることになる。つまり、一応、概念 a を支持するものではあるが、二次圧密が一次圧密の最初からではなく、その末期に始まるという点において、実用上、「概念 b」に近いものでもあるとも言える。

前述の「概念 a」の立場の代表的な研究として、Leroueil⁴⁾の研究がある。

図 - 5.2 は Leroueil によって示された圧密試験の結果であるが、応力 σ'_v とひずみ ϵ_v の関係はひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ 毎に異なることになる。つまり、一次圧密過程にも二次圧密があり、その間に二次圧密がどの程度進むかによりこのような差が生じていると考えられる。

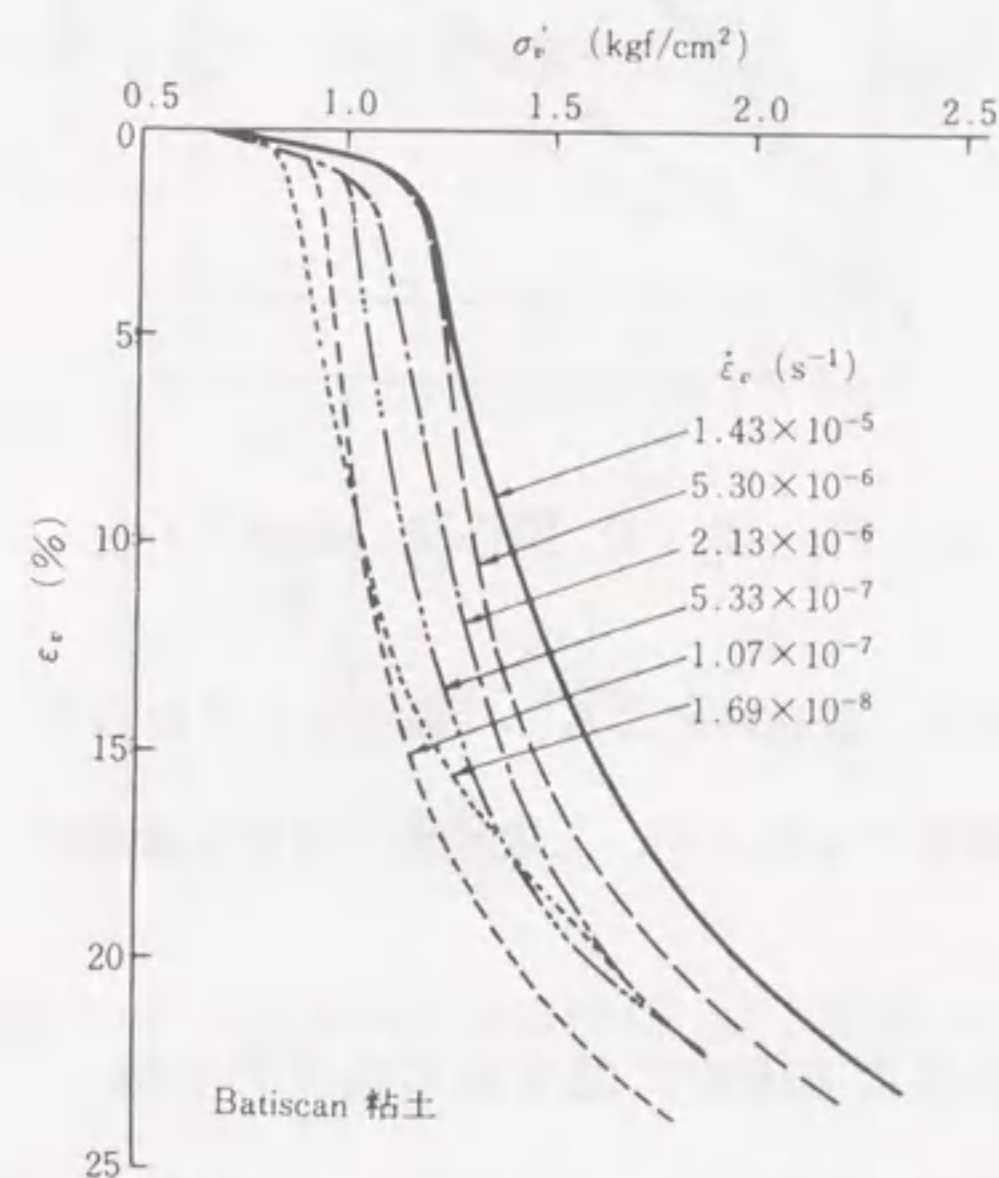


図 - 5.2 Leroueil⁴⁾ の圧密試験 (定ひずみ速度試験) 結果

一方、「概念 b」の立場の代表的な研究として、Mesri⁵⁾の研究がある。その理論は一次圧密中に二次圧密は存在しないという前提に立つものであり、そのことにより、一次圧密時の圧縮指数 C_c と二次圧密の圧縮指数 C_{c2} の関係が一義的に決まるとして、それらの間の関係図などを提案した。図 - 5.3 はその関係図のうちの一つであるが、これらは実務設計において二次圧密を計算により推定する上で便利であるので、現在もしばしば用いられている。

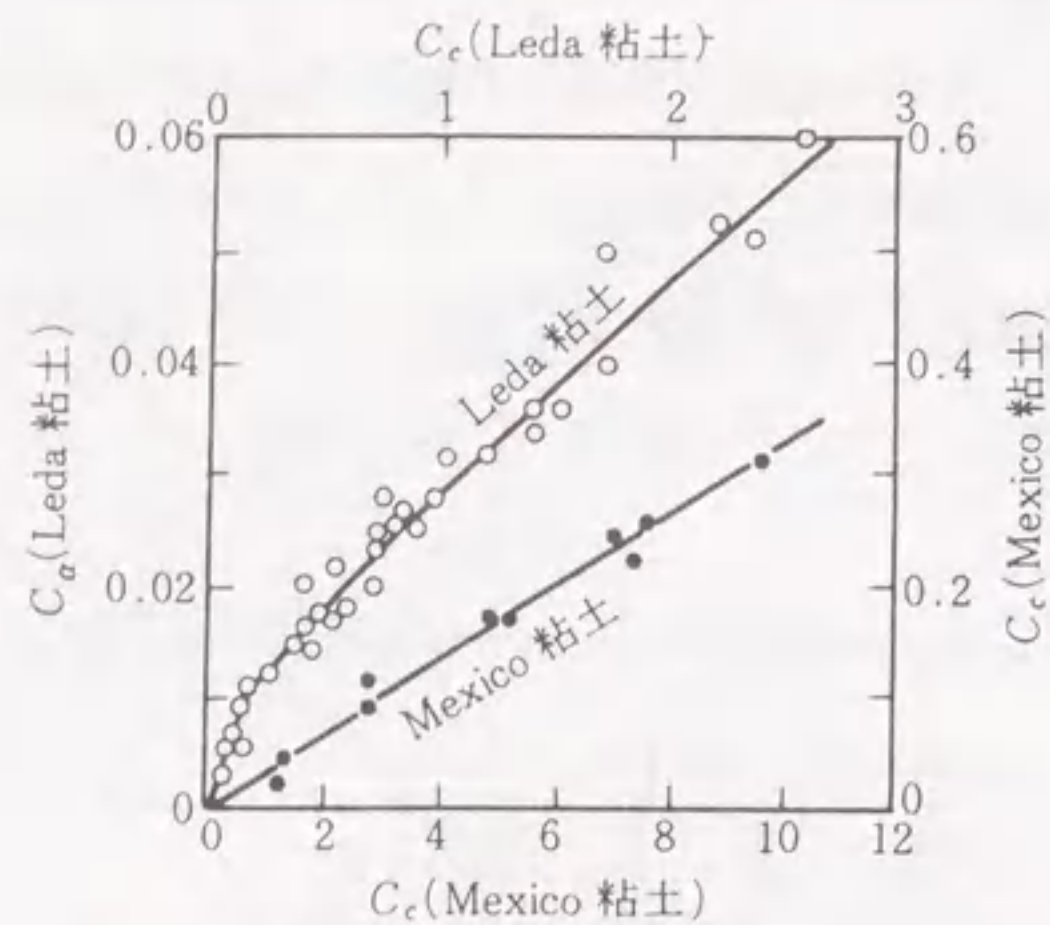


図-5.3 $C_c - C_e$ 関係図 (Mesri⁵⁾)

以上のような議論の結果、現在のところ、「概念 a」すなわち、一次圧密中に二次圧密があるという理論が優勢ではあるが、二次圧密の有無を直接さし示す実験データはない²⁾。

5.2.3 一次圧密中の二次圧密に関する本論文の立場

これに関して、本論文では次のように考えている。すなわち、仮に、「概念 a」が正しいとしても、一次圧密中の二次圧密の二次圧縮指数が最初から最後まで一定値を示すとは考えられない。もしも、その大部分の二次圧縮指数が末期に比べて、小さいものならば、実用上の問題として、「概念 b」に近いものを採用する方が好ましい場合もあると考えられる。

また、圧密試験の供試体(厚さ 2 cm)と圧密沈下する地盤層(厚さ数 10 m)とでは圧密の進み方が異なる。圧密試験では供試体が薄いために、その表面から内部までほぼ一様な圧密度で圧密が進行する。ところが、現実の地盤の場合には、地層が厚いために排水層に近い部分とそこから遠い部分では、圧密の各時点において圧密度が非常に異なると考えられる。

図-5.4 に示すように、圧密試験で得られる時間-沈下曲線の一次圧密と二次圧密の

上で述べた理由により、地盤内の位置によって、圧密がかなり進行している部分もあれば、ほとんど進行していない部分もある。地上で観察される時間-沈下曲線はこのような地盤内の各部分の沈下の合計である。したがって、たとえ地盤内の各部分が圧密試験の供試体のような一次・二次圧密の区分が明確な沈下の特性を示したとしても、地層全体としては、その区分が不明確なものになるざるをえない。つまり、前述の概念 a, b のいずれの概念が正しいとしても、現実の地盤の沈下は一次圧密と二次圧密が混在した挙動を示すと考えられる。

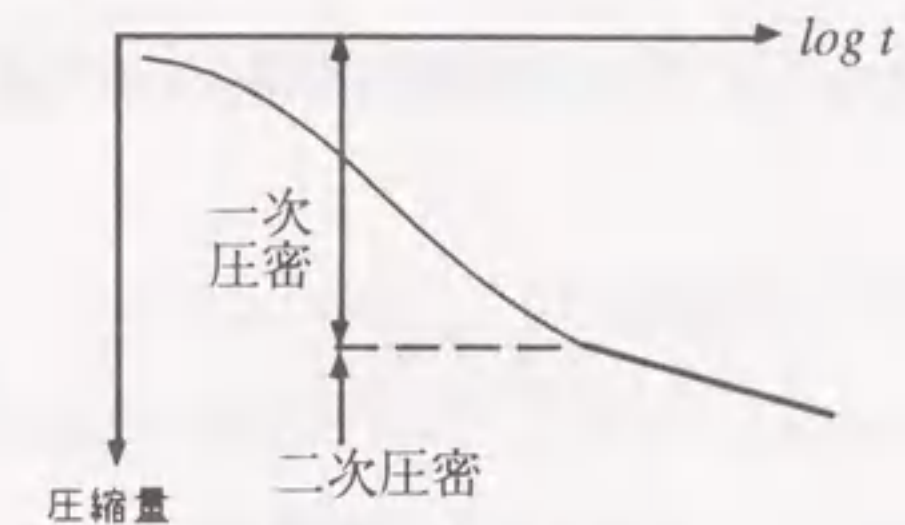


図-5.4 圧密試験による時間-沈下曲線

図-5.5 は地層内の一次・二次圧密領域の割合の経時変化を表す模式図である。図の時間 t_1 において、沈下予測を行なうと、 $t=0 \sim t_1$ の間の大部分が一次圧密状態にある観測データを用いて沈下予測を行なうことになる。それに対して、時間 t_3 において、 $t=t_2 \sim t_3$ の区間の観測データを用いて沈下予測を行なうと、大部分が二次圧密状態にある観測データを用いて沈下予測を行なうことになる。このように、時間 t_1 における予測と時間 t_3 における予測では用いるデータの性格が異なるので、予測結果も異なると考えられる。したがって、このような特性を示すデータを用いて沈下予測を行なう場合、一次・二次圧密の割合がしだいに変化していることを前提に沈下モデルを構成し、沈下予測を行なうのが好ましいと考えられる。

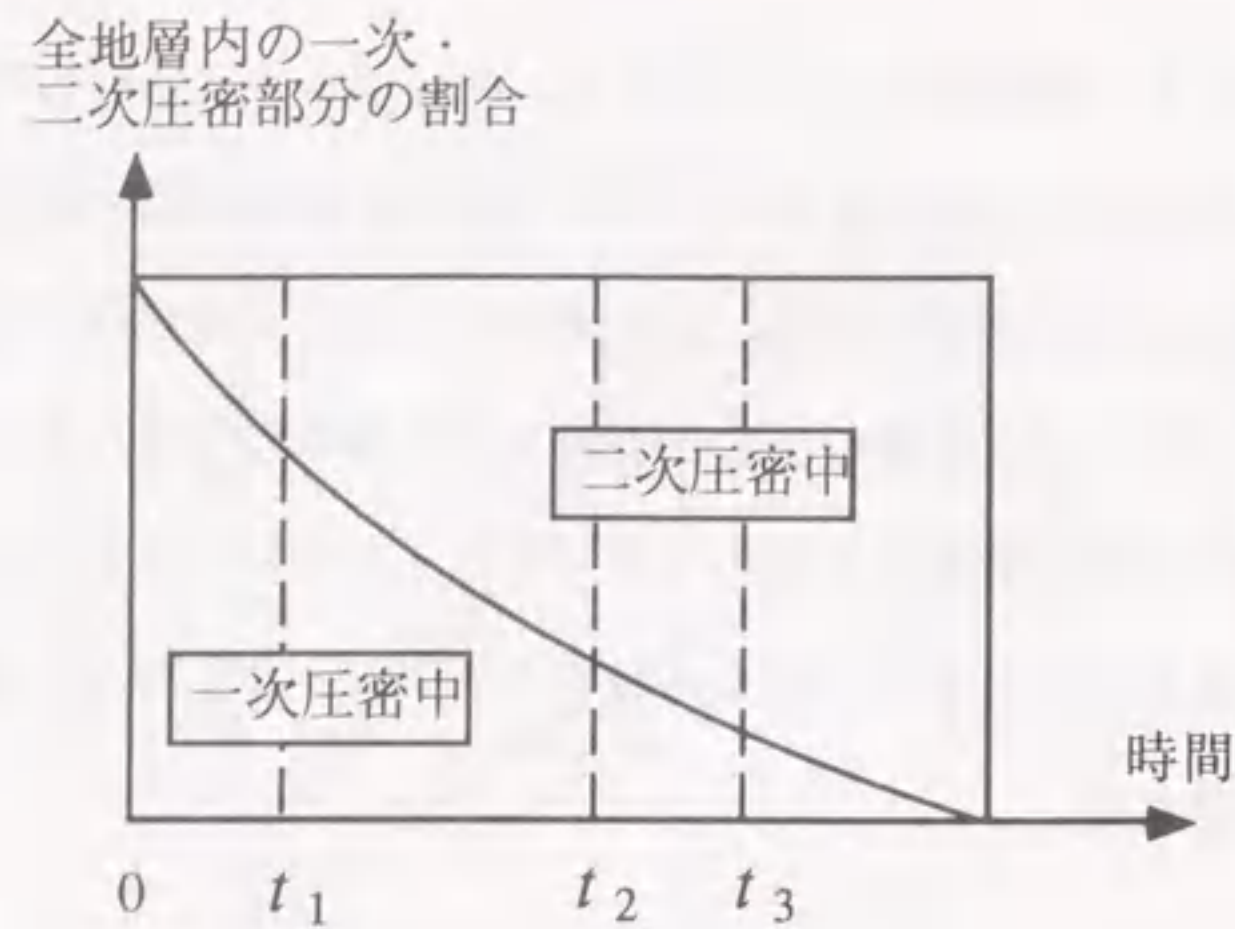


図-5.5 地層内の一次・二次圧密領域の割合の経時変化

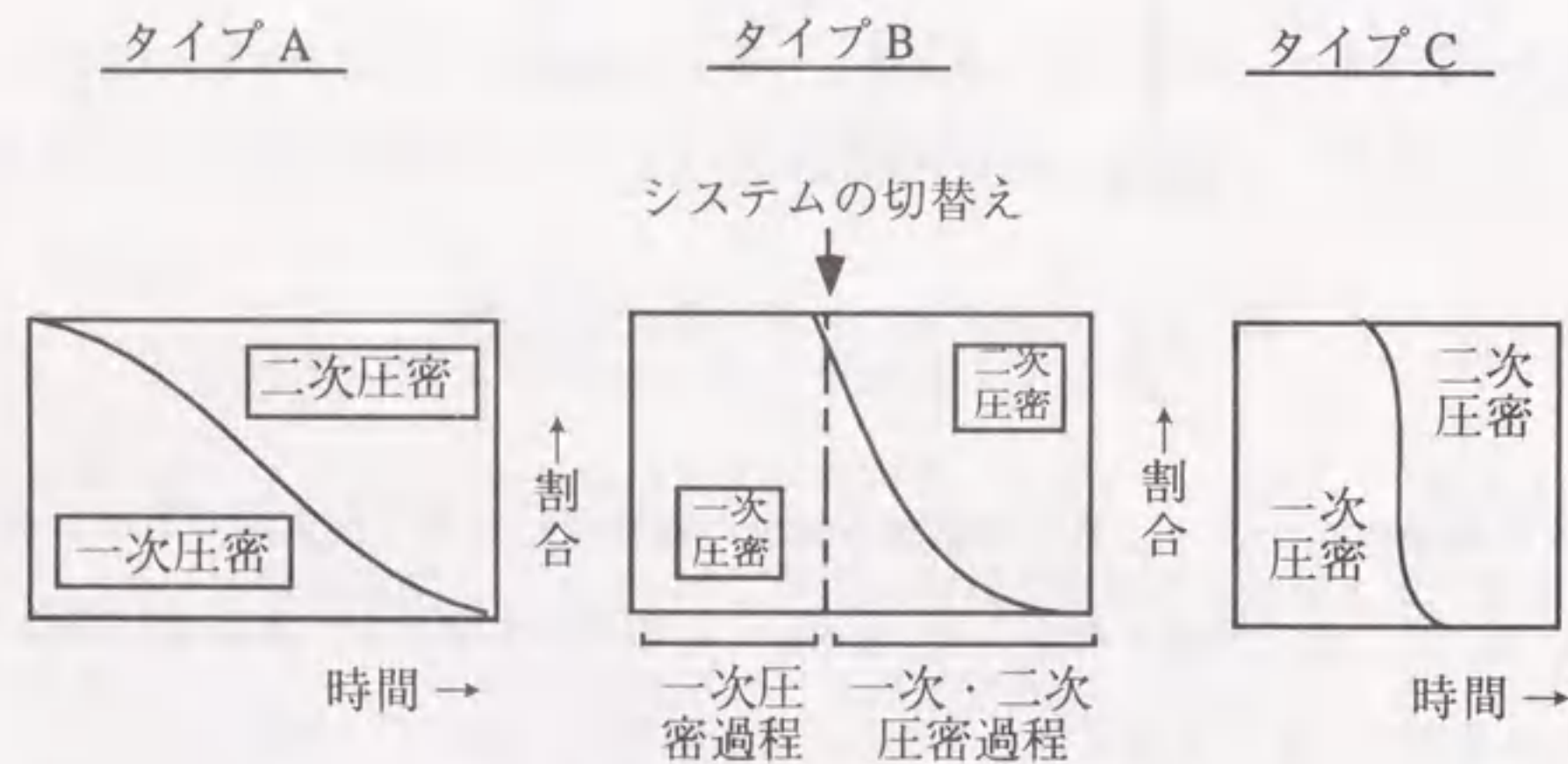


図-5.6 一次・二次圧密の割合の時間的推移に関する3つの型

図-5.6は全地層の全圧密沈下量に占める一次圧密と二次圧密の割合の時間的推移に関して、3つの型のあることを示している。そのうち、タイプCは圧密試験の場合である。この場合は、一次圧密領域から二次圧密の領域への推移はかなり明確である。それに対して、二次圧密が圧密の初期から始まり、その二次圧縮指数も初期から末期まで、ほぼ一定である場合には、現実の地盤の圧密は図のタイプAのような推移を示すと考え

られる。他方、圧密当初は二次圧密成分が存在しないか、存在しても実用上無視できる程度であり、一次圧密が進行したある時点で二次圧密成分が卓越してくるという場合には、図のタイプBのような推移を示すと考えられる。タイプAとタイプBのどちらがより現実の地盤の挙動に近いについては前述したように現在までに明らかにされていない。

5.2.4 一次圧密中の二次圧密の取扱いに関する第5章と第6章の相違

本論文ではタイプAの挙動に対する沈下モデル・予測法を第5章で提案し、タイプBの挙動に対する沈下モデル・予測法を第6章で提案する。そして、第7章で両者の予測精度と適用範囲について検討し、現実の地盤の挙動がタイプA,Bのうちどちらに近いのかについて考察する。

図-5.6に示すように、タイプAの場合、一次圧密過程（一次圧密成分が支配的な沈下挙動）から二次圧密過程への推移が徐々に、なめらかに行われる。それに対して、タイプBの場合には、当初は一次圧密成分のみであり、ある段階から二次圧密成分が生じ、その後卓越する。つまり、ある時期に一次圧密過程から二次圧密過程へ変化する。

第5章ではこのようなタイプAの挙動を予測するための沈下モデルとして、二次圧縮係数が一次・二次圧密の全期間一定な二次圧密成分と一次圧密成分を合わせ持つ沈下モデルを構成している。そして、一次・二次圧密全期間を分割することなく、一つの沈下モデルを用いて最尤法によりシステム同定・沈下予測を行う方法を提案している。

それに対して、第6章ではタイプBの挙動を予測するために、図-5.6に示すように、圧密の全期間を一次圧密が支配的な時期と二次圧密が支配的な時期の2つに分けて取り扱う。すなわち、当初、一次圧密沈下成分が支配的な沈下挙動の観測データに対しては1つのシステム（一次圧密的沈下のみを考慮したシステム）として適応観測器によりシステム同定を行なう。やがて、時間の経過とともに、もはや1つのシステムと扱うには確率的に矛盾が無視しえない状態となった時、別のシステム（一次・二次圧密を考慮したシステム）に切り替えて適応観測器によりシステム同定を行なうものである。

5.3 二次圧密を考慮した沈下 - 時間関係式の誘導

5.3.1 浅岡法の基礎方程式の特性

本章の構成上、従来、沈下解析法として、実務設計で広く用いられている浅岡法の図解法⁶⁾について簡単にふれておく必要があるため、以下に結論のみを示す。

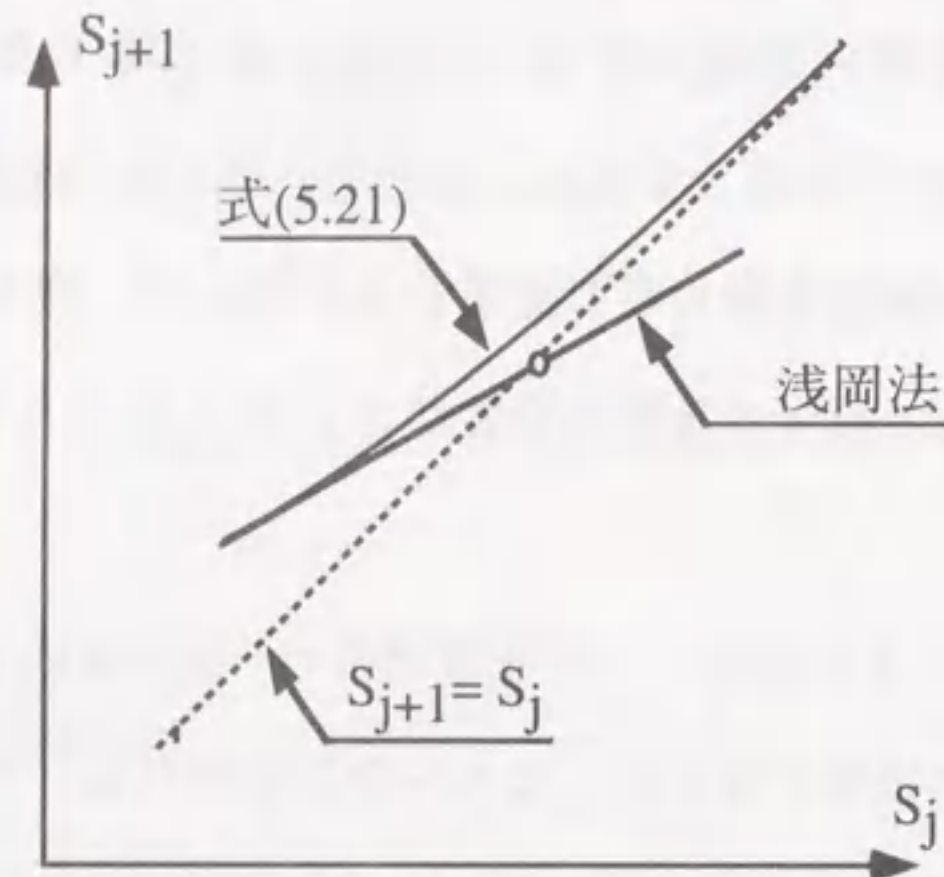


図 - 5.7 提案式と浅岡法図解法¹⁾の比較

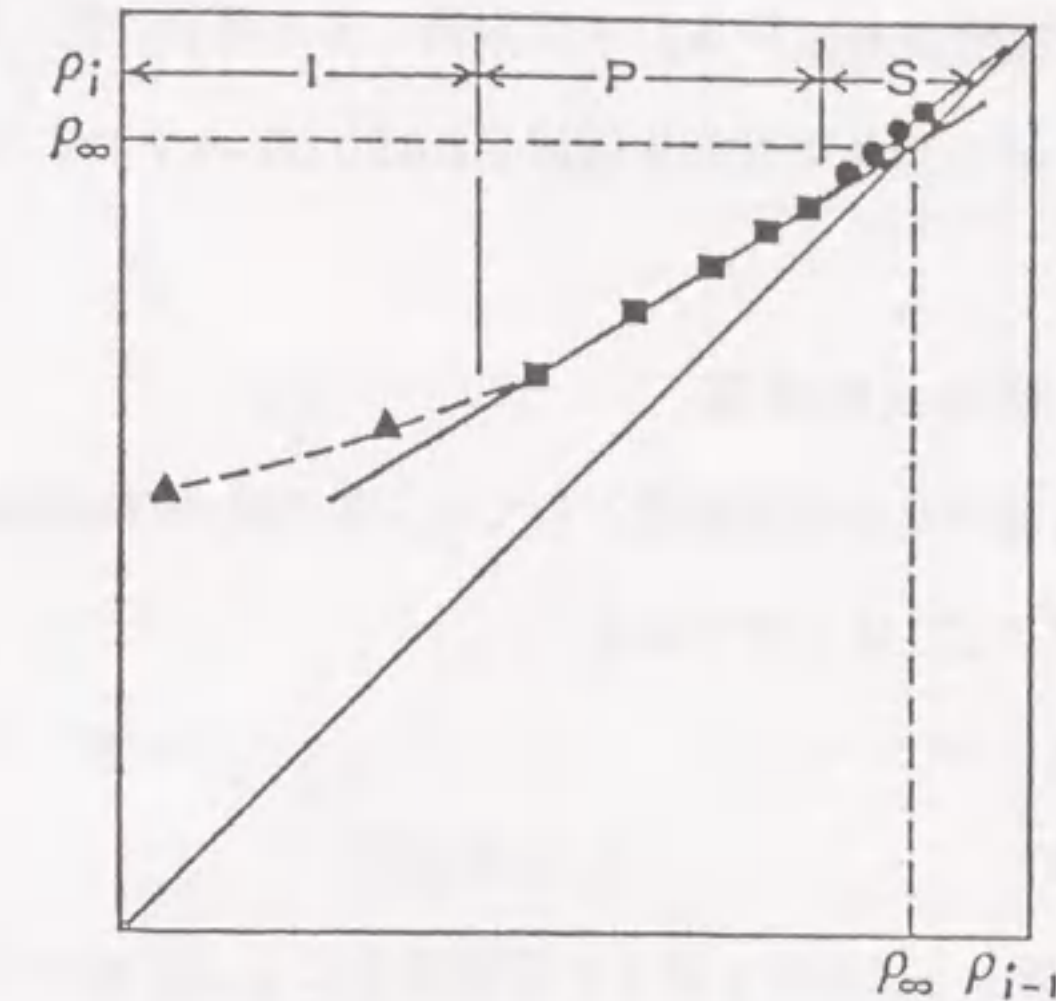
浅岡法の図解法⁶⁾では沈下観測の結果、得られた一連のデータ(観測ピッチ一定)のj番目の沈下量の値を S_j 、(j+1)番目の値を S_{j+1} として、 S_j をX軸に、 S_{j+1} をY軸にとり、両者の関係をプロットする。そして、その関係が直線関係になるとしている。つまり、式で表わせれば、次式である。

$$S_{j+1} = \alpha_p S_j + \beta_p \quad (5.1)$$

ここに、 α_p 、 β_p はパラメータである。そこで、その直線の延長線と $S_{j+1} = S_j$ の直線との交点を最終沈下量として求める。(図 - 5.7 参照)

この図解法は複雑な数値計算を必要としない利点がある。しかし、観測部分でフィットさせた直線が予測部分にもあてはまることを仮定しているが、予測部分では同一の直線とならないか、あるいは曲線となる場合はこの方法では沈下量を過少評価することになる。本論文ではこの最終沈下量に至る過程が観測部分と同一の直線にはのらないと考

え、それを証明すると共に、その主要な原因が二次圧密にあると考え、二次圧密を考慮した時間 - 沈下関係を以下で提案する。



領域	記号	状態
I	▲	圧密の初期状態 (c_u または c_v が減少中)
P	■	一次圧密 (c_u または c_v が一定)
S	●	二次圧密

図 - 5.8 沈下挙動における3領域 (Ladd⁷⁾)

なお、観測値がその最終段階において、図 - 5.8 のP区間の直線からはずれて同図のS区間の曲線のような傾向を示すことがあるとすれば、その場合の原因として二次圧密が考えられることは、Ladd⁷⁾により指摘されている。しかし、彼はそのような現象を実際に観測するには至らなかった(例えば、文献7)。

図 - 5.7 は浅岡法の基礎方程式と提案法の基礎方程式の関係を示すものであり、二次圧密を考慮することにより、曲線の位置と形が浅岡法から提案法の方へ変化することを

表わしている。ただし、提案法は $S_j \sim S_{j+1}$ 関係の作図による沈下予測法ではない。また、以上のような浅岡法の図解法⁶⁾は現在、実務設計で「浅岡法」として、一般に広く用いられているものではあるが、浅岡、野津³⁾のその後の研究によりデータの平滑化を省略した沈下予測法が紹介されている。その方法による場合、図-5.7のような直線が時系列的に得られる。その変化の傾向を解析すれば、図-5.7のような曲線的な変化も予測可能である。

5.3.2 時間 - 沈下関係式の誘導

一次元の弾性理論に基づく圧密方程式としては三笠の式や Terzaghi の式が著名であるが、それらうち、三笠の式⁹⁾は次式である。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \quad (5.2)$$

ここに ε は時間 t , 深さ z における粘土の圧密荷重による圧縮ひずみであり、この式から時間 t における圧密沈下量 $F_s(t)$ は次のように導かれる¹⁰⁾。

$$F_s(t) = S_f - \sum_{i=1}^n b_i \exp(c_i t) \quad (5.3)$$

ここで、 S_f は一次圧密の最終沈下量、 b_i, c_i は係数であるが、 $c_i \cdot t$ は次のように与えられる。

$$c_i \cdot t = -\left(\frac{2i+1}{2}\pi\right)^2 \cdot T \quad (5.4)$$

図-5.9 は時間係数 T の変化に対する式 (5.3) の中の $\exp(c_i t)$ 部分の変動を表わしている。この図によると、時間係数 $T > 0.10$ の領域においては級数部分の第二項以降は無視しても、結果に影響がないことがわかる。しかも、 b_2 は b_1 よりも約 1 オーダー小さく、 b_3 は b_2 よりもさらに小さい。

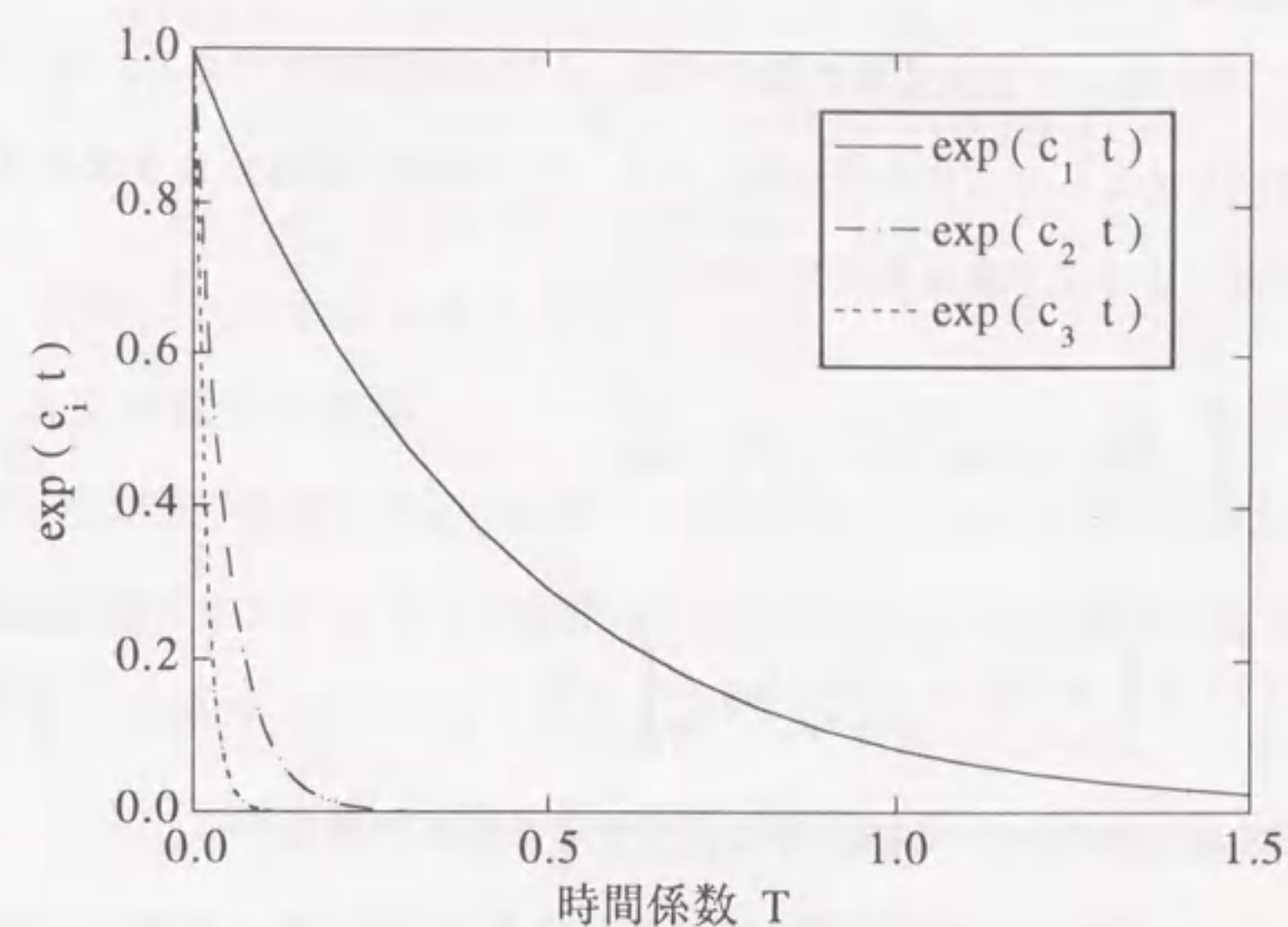


図-5.9 T の変化に対する式 (5.3) の各項の変動

また、実際の工事において、盛土施工が終了して、放置期間が開始する時点の T の値は $T > 0.10$ である場合が多く (後述の実測例でもこの時、 $T=0.20$)、それ以後のデータを用いて予測が行われる。以上のことから式 (5.3) は実用上、次式に書き改めることができる。

$$F_s(t) = S_f - b \exp(ct) \quad (5.5)$$

以上は三笠の式からの誘導である。

一方、Terzaghi の式の場合も 間隙水圧によって記述された式ではあるが、同様に、沈下量と間隙水圧で定義した圧密度が比例すると仮定すれば、式 (5.3) の形に整理できる。なお、以上の沈下式では二次圧密は考慮されていないので、これを以後、一次圧密沈下と呼ぶことにする。

二次圧密による沈下については時間の対数に比例することが一般的に知られており、 $(d\varepsilon/d \log t)$ と二次圧縮指数 (二次圧密係数) C_α との間に次の関係が示されている¹¹⁾。

$$\frac{d\varepsilon}{d \log t} = \frac{C\alpha}{1+e_0} \quad (5.6)$$

ここに、 ε は二次圧密による供試体の軸ひずみ、 e_0 は自然間隙比である。そこで、二次圧密の開始時期を t_0 としてこれを未知数にとり、その時期を逆算により求めることにすれば、二次圧密による沈下量は次式で表わされる。

$$\varepsilon = \int_{t_0}^t \frac{C\alpha}{1+e_0} d(\log t) = \frac{C\alpha}{1+e_0} \log \frac{t}{t_0} \quad (5.7)$$

$$R_s(t) = \int_0^H \varepsilon dD = \frac{C\alpha}{1+e_0} \log \frac{t}{t_0} \int_0^H dD \quad (5.8)$$

ここに、 t は観測開始時からの時間、 H は粘性土層の層厚である。

ここでは、一様な正規圧密状態の飽和粘性土層に一様な盛土をする場合の圧密沈下を対象とする。また、軟弱地盤の全沈下量は一次圧密沈下量と二次圧密沈下量およびその他の沈下量の合計であると考えられるので、式(5.5)、(5.8)より時間-沈下関係の基本型を次のように設定することができる。

$$\text{全沈下量 } S(t) = F_s(t) + R_s(t) + E_s \quad (5.9)$$

$$\text{一次圧密沈下量 } F_s(t) = a - b \exp(ct) \quad (5.10)$$

$$\text{二次圧密沈下量 } R_s(t) = d \log(et) \quad (5.11)$$

ここで、 t は測定開始からの時間であり、 a, b, c, d, e はパラメータであり、土質係数との関係は次のとおり。

$$a = S_f, \quad d = \frac{C\alpha}{1+e_0} D, \quad e = \frac{1}{t_0} \quad (5.12)$$

また、式(5.9)の E_s はその他の沈下量を表わしている。 E_s は盛土が完成して放置期間に入る前までに終了している即時的な沈下量や、沈下測定開始が何等かの理由により遅れた場合の測定開始以前の沈下量に対する補正值などの合計である。

後述する沈下モデルのパラメータの同定ではパラメータの数は極力少なくした方が有利である。したがって、式(5.9)～(5.11)を整理して、パラメータの同定と沈下予測に

用いる沈下モデル式を次のように設定する。

$$\begin{aligned} S(t) &= a - b \exp(ct) + d \log(et) + E_s \\ &= (a + d \log e + E_s) - b \exp(ct) + d \log t \\ &= a' - b \exp(ct) + d \log t \end{aligned} \quad (5.13)$$

5.3.3 提案式と浅岡法の基礎方程式の比較

(1) 一次圧密部分の展開

提案式と浅岡法の基礎方程式の特性の比較のため、式(5.10)の変形を試みる。まず、沈下の観測時間ピッチを Δ として時間 $(j+1)\Delta$ における一次圧密沈下量を F_{j+1} として、式(5.10)を Z 変換すると次のようになる。

$$\begin{aligned} Z\{F_{j+1}\} &= Z[a - b \exp\{c(j+1)\Delta\}] \\ &= z[Z\{a - b \exp(cj\Delta)\} - a + b \exp(c\Delta)] \\ &= \frac{az}{z-1} - \frac{bz \exp(c\Delta)}{z - \exp(c\Delta)} \end{aligned} \quad (5.14)$$

一方、時間 $(j\Delta)$ における一次圧密沈下量を F_j として、式(5.10)を Z 変換すると次のようになる。

$$\begin{aligned} Z\{F_j\} &= Z[a - b \exp(cj\Delta)] \\ &= \frac{az}{z-1} - \frac{bz}{z - \exp(c\Delta)} \end{aligned} \quad (5.15)$$

式(5.15)より、

$$\frac{bz}{z - \exp(c\Delta)} = \frac{az}{z-1} - Z\{F_j\} \quad (5.16)$$

となる。そこで、式(5.16)を式(5.14)に代入して

$$\begin{aligned} Z\{F_{j+1}\} &= -\left[\frac{az}{z-1} - Z\{F_j\}\right] \exp(c\Delta) + \frac{az}{z-1} \\ &= \exp(c\Delta) \cdot Z\{F_j\} + \frac{az}{z-1} \{1 - \exp(c\Delta)\} \end{aligned} \quad (5.17)$$

となる。つぎに、式(5.17)を逆 Z 変換すると、次式を得る。

$$F_{j+1} = \exp(c\Delta) \cdot F_j + a \{1 - \exp(c\Delta)\} \quad (5.18)$$

ここで、上式の右辺の $\exp(c\Delta)$ および $a \{1 - \exp(c\Delta)\}$ は時間の変化に対して、定

数であるので F_{j+1} と F_j の関係は直線式となり、式 (5.18) は浅岡法の基礎方程式である式 (5.1) と同じものであることがわかる。つまり、式 (5.18) は、

$$F_{j+1} = \alpha_p F_j + \beta_p \quad (5.19)$$

と表わすことができる。ここに、 α_p, β_p は定数である。

(2) 二次圧密部分の展開

時間 $(j+1)\Delta$ における二次圧密沈下量 R_{j+1} を時間 $j\Delta$ における沈下量 R_j のまわりに、式 (5.11) をテーラー展開すると次のようになる。(3次以降の項は微小なので無視する。実際、値を入れて計算してみると、3次の項は1次の項の0.01~0.05%)

$$R_s((j+1)\Delta) = R_s(j\Delta) + \left. \frac{dR_s(t)}{dt} \right|_{j\Delta} \cdot \Delta + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2R_s(t)}{dt^2} \right|_{j\Delta} \cdot \Delta^2 = R_j + \frac{d(2j-1)}{2j^2} \quad (5.20)$$

式 (5.20) の第2項は j の変化に対して、直線ではなく、曲線的に変化する。

(3) 浅岡法との比較

式 (5.9), (5.19), (5.20) より、時間 $(j+1)\Delta$ における全沈下量 S_{j+1} は次式で与えられる。

$$S_{j+1} = \alpha_p F_j + \beta_p + R_j + \frac{d(2j-1)}{2j^2} = \alpha_p S_j + \beta_p + (1 - \alpha_p) R_j + \frac{d(2j-1)}{2j^2} \quad (5.21)$$

そこで、浅岡法の式 (5.1) と式 (5.21) を比較すると、式 (5.1) は直線式であるのに対して、式 (5.21) は二次圧密による第3項、第4項の影響で図-5.7に示すような曲線となる。なお、図-5.7で観測データによる直線と $S_{j+1} = S_j$ の直線の交点(。印)が最終沈下量を表わしている。つまり、二次圧密を考慮すると、最終沈下量に至る過程で、 $S_{j+1} \sim S_j$ 関係の勾配はしだいに変化し、最終沈下量は浅岡法で予測する値よりも大きくなる。

5.4 パラメータの同定方法と各モデル式の予測精度比較法の提案

5.4.1 パラメータの同定法

モデルのパラメータの同定に最尤法¹²⁾を用いる。最尤法によれば、パラメータの真値の推定値は尤度関数を最大にすることにより得られる。

そこで、各時間における観測値および測定真値の関係を次のように考える。

$$\text{システム方程式} \quad x(t) = f(t; \theta) + w_s(t) \quad (5.22)$$

$$\text{観測値} \quad y(t) = x(t) + w_o(t) \quad (5.23)$$

ここで、 $x(t)$ は測定真値、 $f(t; \theta)$ は沈下と時間の関係を表わすモデル式、 θ はパラメータ、 $w_s(t)$ はシステムノイズであり、 $N[0, V_s]$ の正規分布に従うとする。また、 $w_o(t)$ は観測ノイズであり、 $N[0, V_o]$ の正規分布に従うとする。

このとき、ベイズの定理より次の関係が成立することを考慮すれば、尤度は次式で表わすことができる。

$$l(x|y) \propto l(y|x) \cdot l(x) \\ l(x|y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{V_s V_o}} \exp\left[-\frac{1}{2}\{x(t) - f(t; \theta)\}^2 V_s^{-1} - \frac{1}{2}\{y(t) - x(t)\}^2 V_o^{-1}\right] \quad (5.24)$$

したがって、その対数尤度関数は N 個の観測値に対して次のようになる。

$$L = \ln \prod_{i=1}^N l(x|y_i) = -\frac{N}{2} \ln(2\pi V_o) - \frac{N}{2} \ln(2\pi V_s) - \frac{1}{2V_s} \sum_{i=1}^N \{(x(t_i) - f(t_i; \theta))\}^2 - \frac{1}{2V_o} \sum_{i=1}^N \{y(t_i) - x(t_i)\}^2 \quad (5.25)$$

ここで、次の平方和についてさらに式を展開する。

$$\sum_{i=1}^N \{x(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2 = \sum_{i=1}^N \{x(t_i) - y(t_i) + y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^N \{x(t_i) - y(t_i)\}^2 + \sum_{i=1}^N \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2 \\
&+ 2 \sum_{i=1}^N \{x(t_i) - y(t_i)\} \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\} \\
&= \sum_{i=1}^N w_o(t_i)^2 + \sum_{i=1}^N \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2 \\
&+ 2 \left\{ \sum_{i=1}^N w_o(t_i)^2 + \sum_{i=1}^N w_o(t_i) \cdot w_s(t_i) \right\} \\
&= 3NV_o + \sum_{i=1}^N \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2 \quad (5.26)
\end{aligned}$$

式(5.26)を式(5.25)に代入して整理すると、尤度関数は次のようになる。

$$\begin{aligned}
L = & -\frac{N}{2} \ln(2\pi V_o) - \frac{N}{2} \ln(2\pi V_s) - \frac{1}{2V_s} [3NV_o \\
& + \sum_{i=1}^N \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2] - \frac{N}{2} \quad (5.27)
\end{aligned}$$

そこで、 $\frac{\partial L}{\partial V_s} = 0$ として、その式を V_s について解いて、その値を式(5.27)に代入すると、次式となる。

$$\begin{aligned}
L = & -\frac{N}{2} \ln(2\pi V_o) - \frac{N}{2} \ln \left[\frac{2\pi}{N} [3NV_o \right. \\
& \left. + \sum_{i=1}^N \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2] \right] - N \quad (5.28)
\end{aligned}$$

ここで、観測ノイズの分散 V_o を与条件であると考えれば、式(5.28)の尤度関数を最大化することは以下の目的関数 J を最小化することと同等である。

$$J = \sum_{i=1}^N \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2 \quad (5.29)$$

つまり、観測ノイズ、システムノイズがパラメータの同定結果に一応影響しないことを意味する。ただし、以上のことはノイズの分散が正規分布にしたがっている場合に限

り成立することである。したがって、現場のトラブル等で観測値に極端な異常値が含まれているような場合には適用できず、異常値の除去処理が必要である。

観測データに含まれる異常値の除去方法として、「ロバスト推定法」¹³⁾を用いることができる。そのうち、最も簡便なものは、残差に重みを付けて、残差がしきい値 $\pm c$ を越える時、重みをゼロとするものである。式(5.29)にこの方法を適用すると、次式となる。

$$J = \sum_{i=1}^N w_i \{y(t_i) - f(t_i; \theta)\}^2 \quad (5.30)$$

ここに、 w_i は重み、 $[y(t_i) - f(t_i; \theta)]$ は残差である。しきい値 $\pm c$ の値は技術者の経験により設定する必要がある。たとえば、観測誤差の $\pm 3\sigma$ (σ は標準偏差)をしきい値として設定するのも一つの方法である。

パラメータ同定法とその手順

- 1) 沈下モデル式を設定する。
- 2) 各パラメータの値の範囲と初期値の範囲を設定する。
- 3) 1), 2)において設定した入力データおよび制約条件を用いて、非線形最適化手法により、式(5.30)の最小化を行い、パラメータの値を同定する。

なお、以上の手順において、1)に関して、後述の表-5.3の3列目は設定された沈下モデル式の一例である。モデル式は不特定である。つまり、システムを支配する法則やメカニズムが不明な場合においても、仮にモデル式の型を設定して、そのパラメータを同定することができる。そして、その式の適合度は後述の検定法によりチェックすることができる。

また、前述の手順3)に関して、非線形最適化のプログラムやそれに関する文献は数多く市販されているので、それらを利用することができる。後述(5.4節)の観測例への適用では、富士通 FACOM 科学サブルーチン・ライブラリー SSL2 の「多変数関数の極小化」(準ニュートン法)を使用した。このサブプログラムの主な入力データは目的関数と各パラメータの初期値であり、出力として目的関数が極小値をとる時の各パラメー

タの値が得られる。ここでの目的関数は式(5.30)である。また、式(5.30)の中の $f(t_i; \theta)$ は沈下モデル式であり、表-5.3の3列目は設定されたモデル式の一列である。解析上、注意を要するのは次の点である。すなわち、各パラメータの初期値としてでたらめな値を設定すると、目的関数が極小値には到達するが、最小値に到達せず、パラメータの最確値が得られない。このような事態を避けるためには、次のような処理が有効であると考えられる。すなわち、土質係数と各パラメータの関係式(たとえば、式(5.12)のような)や過去の解析例より各パラメータの値のとりうる値の範囲は設定できる。そこで、パッケージ・サブプログラムを呼ぶ自己のメインプログラムの方で、各パラメータの値の範囲とそれらの初期値の範囲を指定する。そして、初期値を指定された範囲内で一定の間隔で変えた複数回の計算を行い、その結果、目的関数の残差平方和が最小となるものを採用すればよい。

5.4.2 観測期間中におけるモデル式の予測精度比較法

盛土による地盤の沈下のメカニズムは完全には解明されていない。したがって、土質や施工条件により、合う場合と合わない場合が考えられる。そこで、実際の沈下計測中の予測においては各種モデル式の中からその現場の地盤の挙動予測に最も適するものを計測しながら選ぶことができればより好ましい。以下では、そのような観点から各種モデル式の予測精度推定法について考察する。

(1) ベイズの定理による方法

ある時間 t_i において、各モデル式の予測精度を比較する場合、 t_i 以前の予測精度の実績が仮に表-5.1のように明らかになっているとする。この表は予測時点以前の測定データを用いて、各モデル的中率(そのモデルが他のモデルよりも最も観測値に近い確率)の予測と現実との実績を調べ、作成することができる。

表-5.1 沈下予測に関する条件付確率の例

時間 $t =$ 203 日	条件付き確率 $P(A_j C_k)$			
予測 現実	C_1 : 提案法	C_2 : 浅岡法	C_3 : 双曲線法	C_4 : 星埜法
A_1 : 提案法	0.629	0.483	0.524	0.832
A_2 : 浅岡法	0.113	0.305	0.083	0.054
A_3 : 双曲線法	0.220	0.149	0.325	0.052
A_4 : 星埜法	0.038	0.063	0.068	0.062

表-5.1において、 $P(A_j | C_k)$ は予測が C_k の時現実が A_j であった条件付き確率である。そして、 $P(C_k)$ を現実が不明な時予測される C_k の生起確率(そのモデルが他のモデルよりも最も観測値に近い確率であり、ここでは事前確率に相当する。)である。この時、現実が時間 t_i において A_j の時、次段階 t_{i+1} において C_k が予測される確率 $P(C_k | A_j)$ は次のベイズの定理を利用して求めることができる。

$$P(C_k | A_j) = \frac{P(A_j | C_k) P(C_k)}{\sum_{k=1}^m P(A_j | C_k) P(C_k)} \quad (5.31)$$

任意時間 t_i におけるベイズ法適用手順

- 1) 時間 t_i において、|観測値-モデル値|の最も小さいモデル A_j を見つける。
- 2) A_j の出現を考慮して、 $P(A_j | C_k)$ 、 $P(C_k)$ を再計算する。
- 3) 以上で求めた $P(A_j | C_k)$ 、 $P(C_k)$ の値を用いて式(5.31)により A_j のモデルについて、 $P(C_k | A_j)$ を計算する。
- 4) $k=1 \sim m$ について、 $P(C_k | A_j)$ を比較し、最も大きい $P(C_k | A_j)$ のモデルを次段階の予想モデル C_k とする。
- 5) 以上で求めた $P(C_k | A_j)$ をY軸に、時間をX軸にとってグラフにプロットする。最終段階に近づくにしたがって $P(C_k | A_j)$ が最も高くなるモデルが最適予測モデル

ルと判定できる。(図-5.15 参照)

(2) AICによる方法

もう一つ、モデル式の検定法としてAIC (Akaike's information criterion; 赤池の情報量規準)¹⁴⁾と呼ばれる規準を適用する。これは、複数個のモデルの中から適切なモデルを選択する必要のある時、各モデルの平均対数尤度のデータに関する期待値が大きいほどそのモデルが真の分布に最も近いとする考え方である。この期待値(期待平均対数尤度)の不偏推定量 AICは次式で定義される。

$$AIC = (-2) \cdot (\text{最大対数尤度}) + 2 \cdot (\text{パラメータ数}) \quad (5.32)$$

AICの値の小さい程良いモデルと考えられる。そこで、現場測定データにさまざまなモデル式を適用して、そのパラメータを求めた時、どのモデル式が最も適合度がよいか調べるためには、それぞれのモデル式に対してAICを求め、最小のAICを与えるモデルを最適モデルと判定することができる。

モデル式の最大対数尤度は次式で表わせると考えられる。

$$\begin{aligned} L &= \ln \prod_{i=1}^N P(x) = \ln \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi V_s}} \right)^N \right. \\ &\quad \times \exp \left[-\frac{1}{2 V_s} \sum_{i=1}^N \{ x(t_i) - f(t_i; \theta) \}^2 \right] \\ &= -\frac{1}{2 V_s} \sum_{i=1}^N \{ x(t_i) - f(t_i; \theta) \}^2 - \frac{N}{2} \ln(2\pi V_s) \\ &= -\frac{1}{2 V_s} \left[3 N V_o + \sum_{i=1}^N \{ y(t_i) - f(t_i; \theta) \}^2 \right] - \frac{N}{2} \ln(2\pi V_s) \end{aligned} \quad (5.33)$$

ここで、 $\frac{\partial L}{\partial V_s} = 0$ として、その式を V_s について解くと、次式を得る。

$$V_s = \frac{1}{N} \left[3 N V_o + \sum_{i=1}^N \{ y(t_i) - f(t_i; \theta) \}^2 \right] \quad (5.34)$$

そこで、式(5.34)を式(5.33)へ代入すると、対数尤度は次のようになる。

$$L = -\frac{N}{2} - \frac{N}{2} \ln \left[\frac{2\pi}{N} \left[3 N V_o + \sum_{i=1}^N \{ y(t_i) - f(t_i; \theta) \}^2 \right] \right] \quad (5.35)$$

したがって、式(5.35)で求めた最大対数尤度を式(5.32)に代入することにより、AICを求めることができる。

5.5 現場観測例への適用と二次圧密に関する考察

5.5.1 地盤条件および工事概要

現場観測例に以上で提案した方法を適用し、その適用性と有用性を調べる。ここで、取り上げる実測例は愛知県半田市衣浦埋立地の工場造成現場のものである。

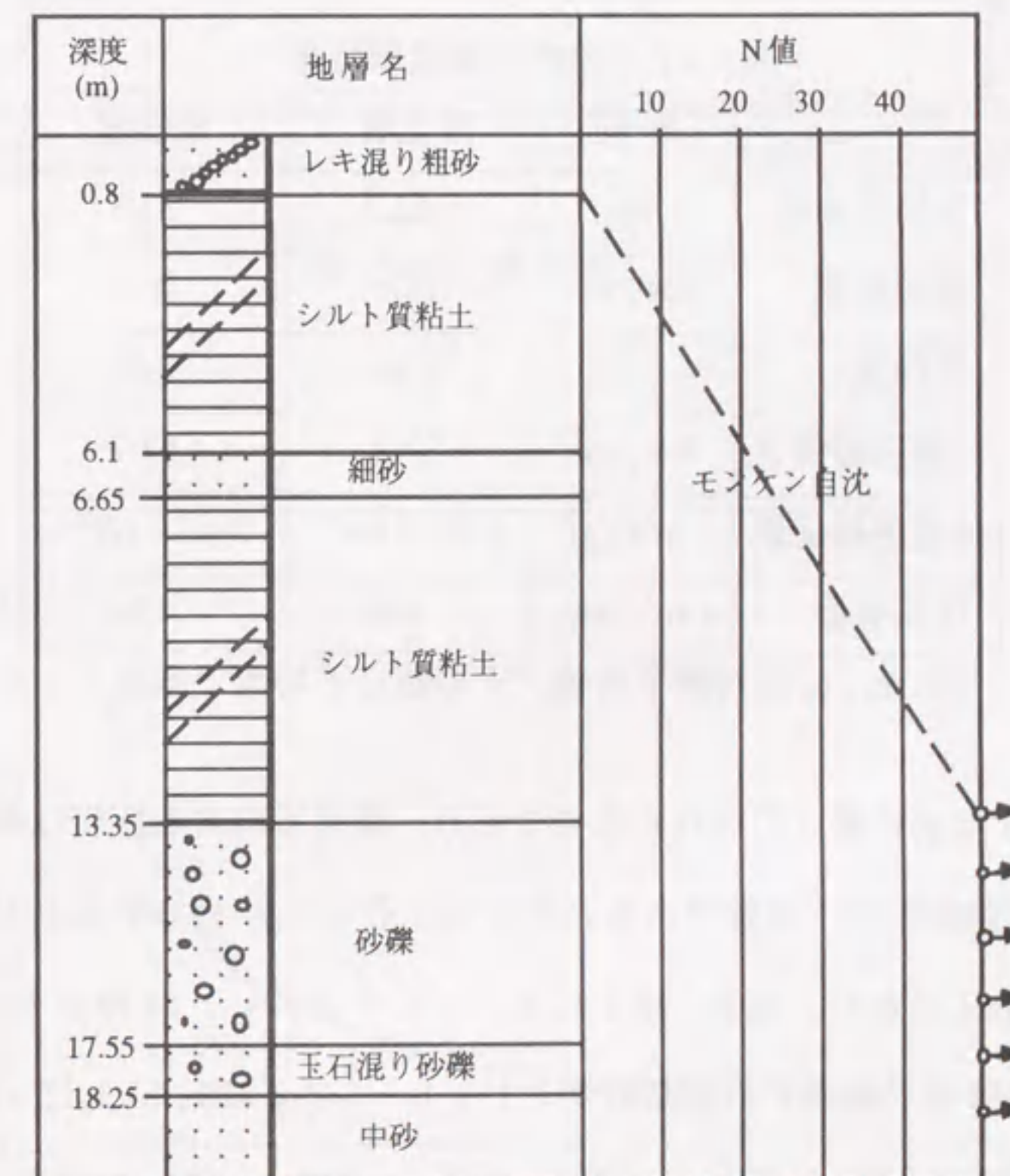


図-5.10 敷地内のボーリング位置における地質柱状図

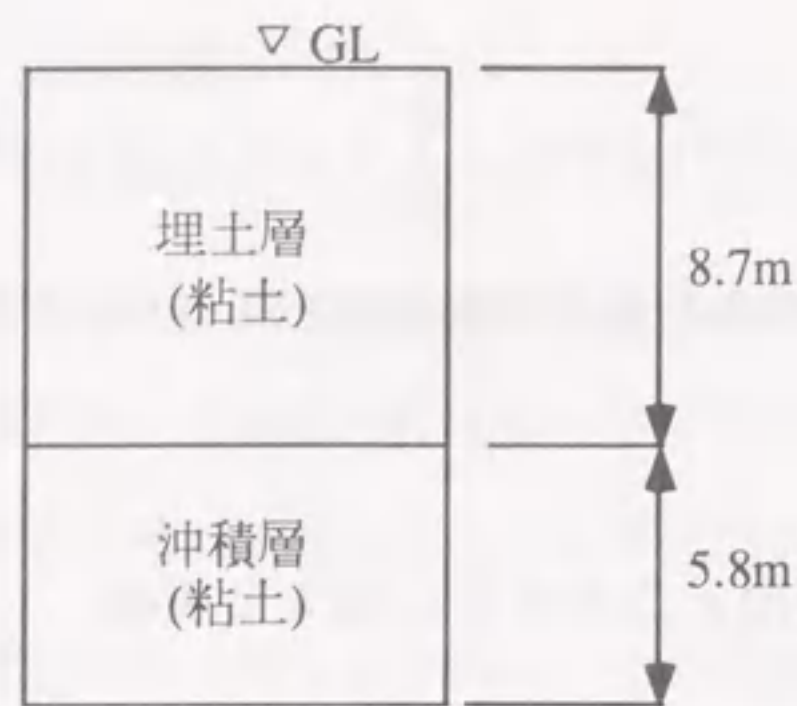


図 - 5.11 解析に用いた沈下観測位置の地層構成の模式図

当地区の地盤は成層状態であり、図 - 5.10 は敷地内のボーリング位置の地質柱状図である。また、図 - 5.11 は沈下観測位置の地層構成の模式図、表 - 5.2 は室内土質試験結果を示している。

表 - 5.2 室内土質試験結果

	単位	埋土層	沖積層
自然含水比	%	62.7	73.3
湿潤密度	kN/m ³	16.4	16.1
間隙比		1.60	1.65
一軸圧縮強さ	kN/m ²	37.8	57.7
体積圧縮係数	c m ² /kgf	1.35 × 10 ⁻¹	7.46 × 10 ⁻²
圧密係数	c m ² /day	116	154

註) m_v , c_v は対数平均値、その他は平均値である。

当地盤は約 25 年前に埋立てされたものであり、埋立てによる圧密は終了しており、正規圧密状態の飽和粘性土地盤である。そして、そこへ約 49,000 m² の広さで高さ平均 4.2 m の盛土が施工された。なお、盛土に先立ってサンドマット(厚さ 80 cm) が敷かれ、その上から洪積層まで到達する袋詰めサンドドレーン(φ 120, 口 1.15 m 正方形配置, $l = 14.5$ m) が施工された。

本現場は盛土範囲が広く、地層もほぼ水平であり、解析に用いた沈下観測データの観測位置は盛土端部からかなり離れた位置で行なわれたので、沈下観測データには含まれ

る局所的な荷重による側方変位の影響はかなり小さいと考えられる(なお、この影響とそれに対する本論文で提案している沈下予測法の適用性については 2.5.3 で検討している)。

盛土は図 - 5.12 に示すように、約 300 日間ほぼ同一の高さ(厚さの意味である。平均厚さ 4.2 m) のままで放置され、その間、沈下板等による計測がなされ、その後、上部 120 cm 分(余盛り)が撤去された。

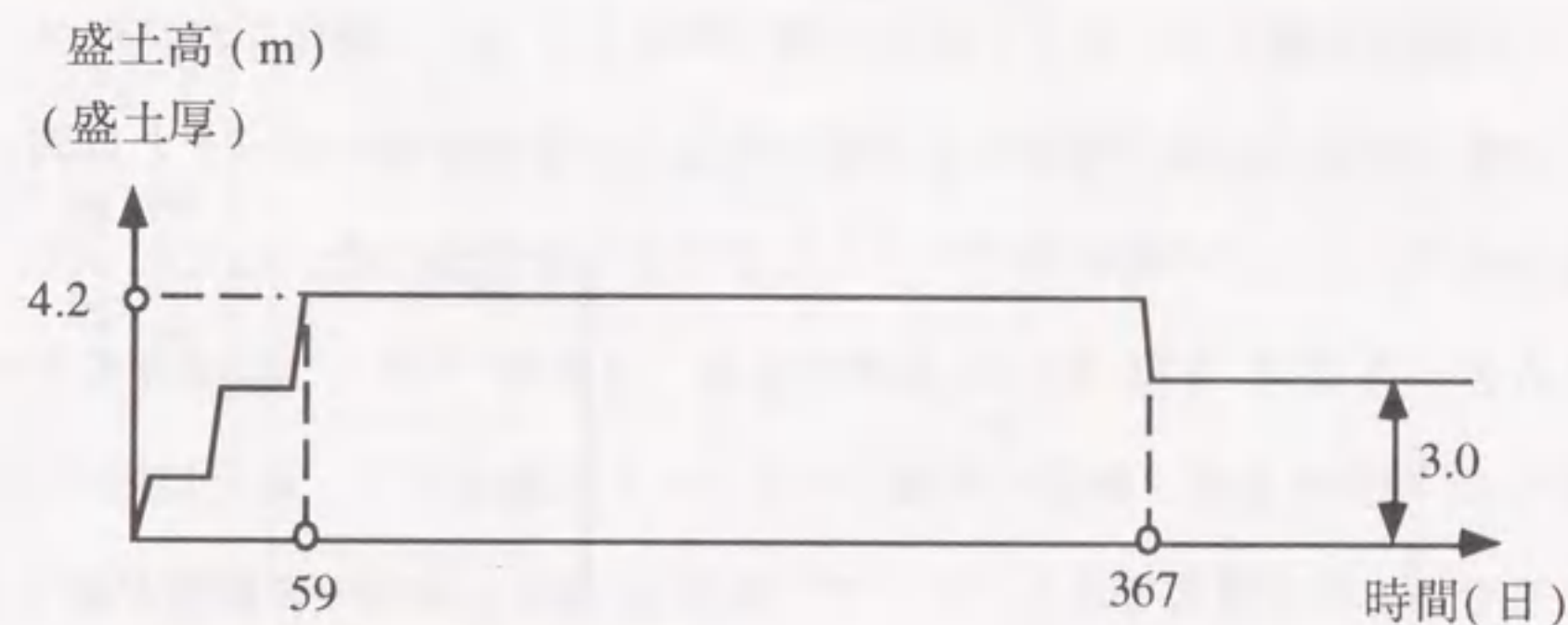


図 - 5.12 盛土施工工程

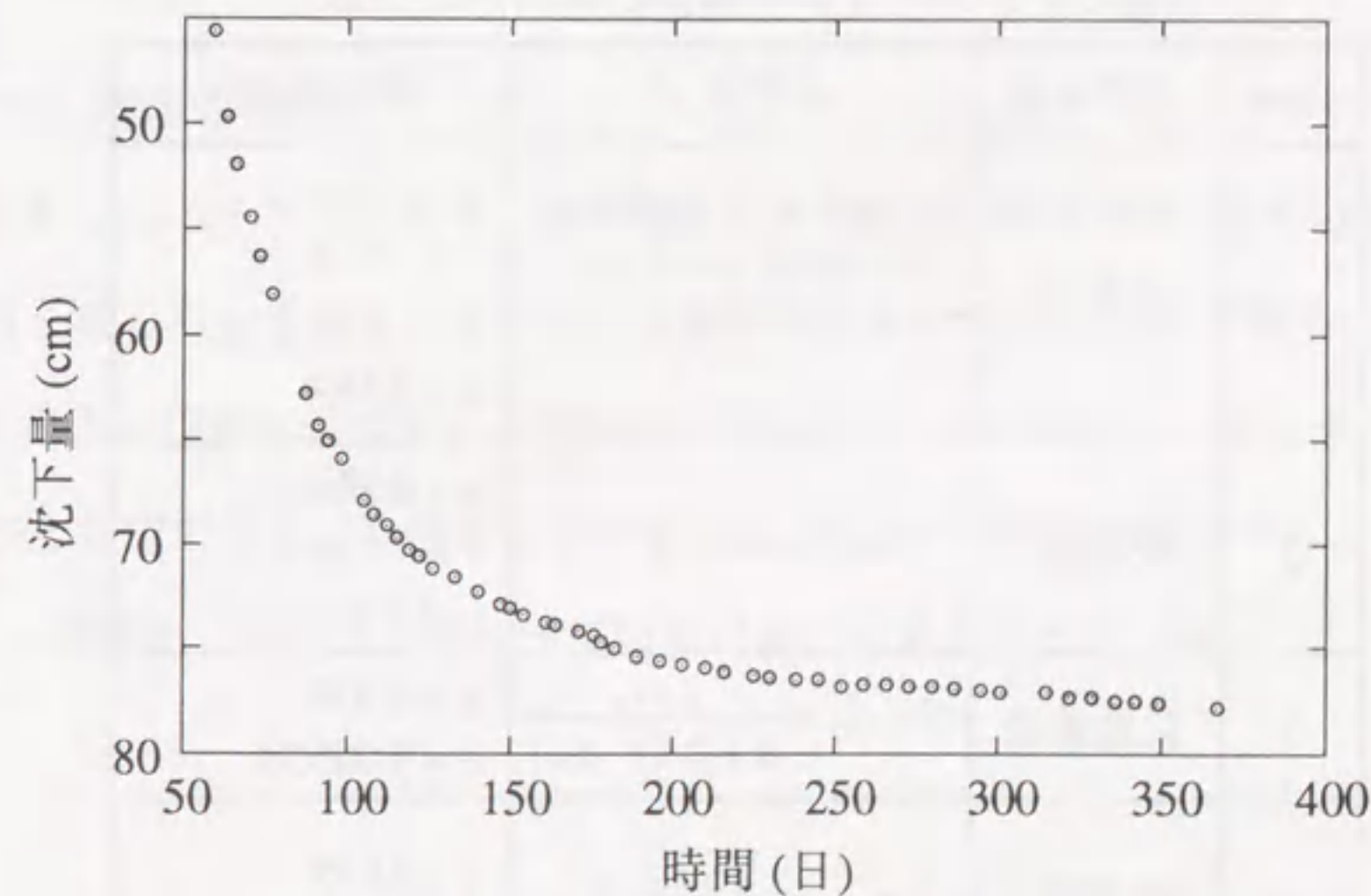


図 - 5.13 沈下観測結果(盛土高一定期間のデータ)

図-5.13は沈下板により観測された沈下曲線(盛土前の地表面レベルの沈下測定結果)を表わしている。

5.5.2 パラメータの同定

ここでは最尤法によりパラメータを同定する沈下モデル式 $f(t; \theta)$ として表-5.3に示すものを取り上げる。しかし、本手法の他の実際問題への適用においてはその都度自由に各種のモデル式を選定してパラメータを同定することができる。

対象とした測点に関して、沈下の観測は盛土開始から367日間行なわれたが、盛土中のデータは盛土荷重の変化の影響により盛土荷重の一定な期間のデータとは同一の扱いができないので、ここでの解析用データとしてはそれを除外した。したがって、解析に使用できるデータは図-5.12, 5.13に示す盛土高一定期間(159~367日)のデータであり、全部で52回分あるが、初期の段階のパラメータ同定により、最終段階の予測がどの程度までできるかが重要である。そこで、前半26回(=52/2)の観測が終了した時点でその後の沈下を予測する場合を想定し、ここで示す解析例では26回(=52/2)のデータを用いる。なお、26回以外の回数の場合も同様な結果となることは確認済みである。

表-5.3 パラメータ同定に用いたモデル式

Case	モデル名	モデル式	同定結果
1	提案法	$S = a - b \exp(ct) + d \log t$	$a = 52.58$ $b = 193.8$ $c = -3.53 \times 10^{-2}$ $d = 9.889$
2	浅岡法	$S_{j+1} = a S_j + b$	$a = 0.8013$ $b = 14.86$ ($\Delta t = 7$ 日)
3	双曲線法	$S = S_0 + \frac{t - t_0}{a + b(t - t_0)}$	$a = 0.8791$ $b = 0.02658$
4	星埜法	$S = S_0 + \frac{ab\sqrt{t-t_0}}{\sqrt{1+b^2(t-t_0)}}$	$a = 51.99$ $b = 0.06571$

パラメータの同定結果を表-5.3、および図-5.14に示す。図-5.14は前半26回の観測データから同定したパラメータを用いた予測式による後半部の予測曲線と実測値とを対比させたものである。

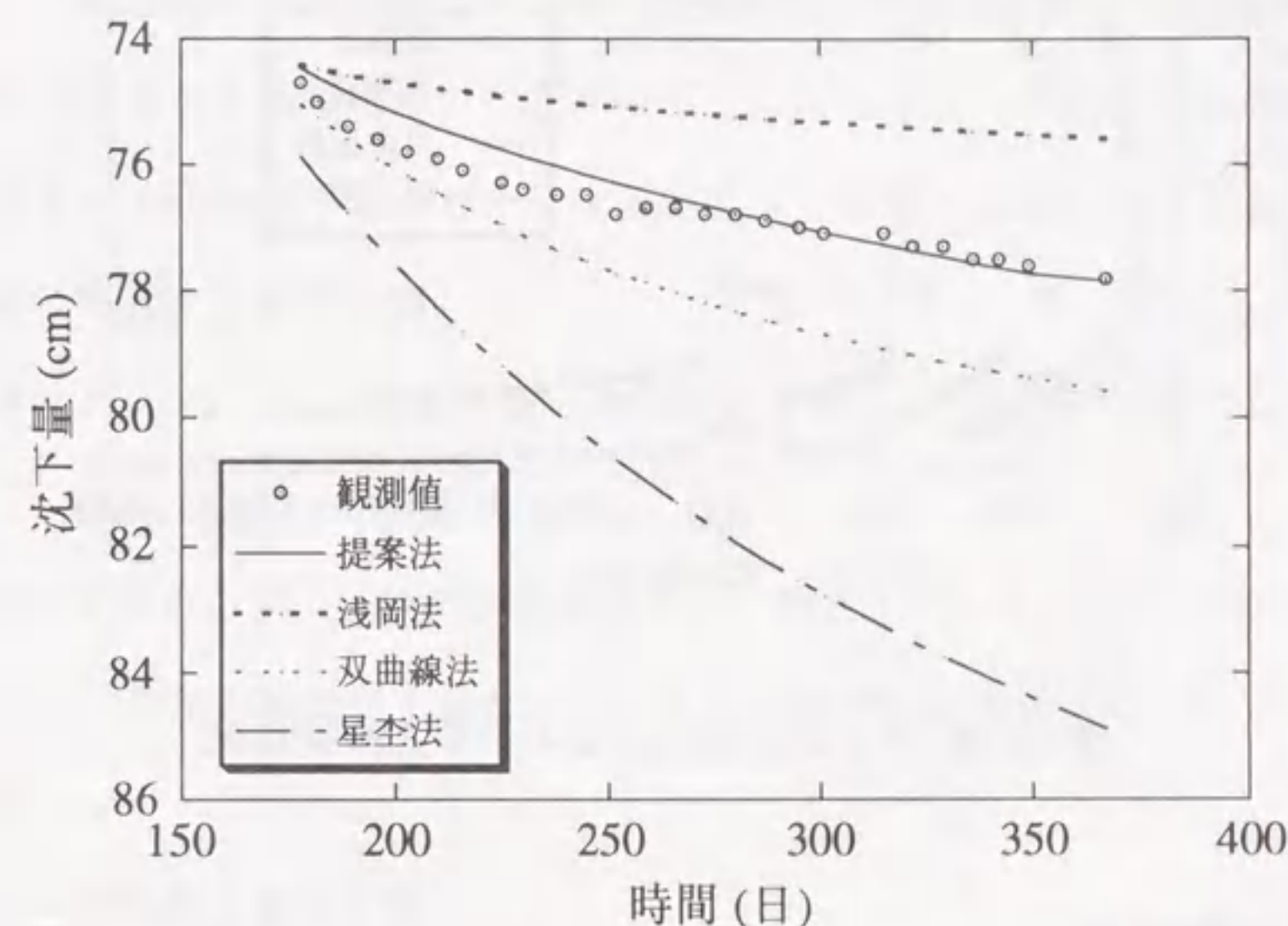


図-5.14 前半部データによる予測値の後半部適合度

5.5.3 ベイズ法の適用

以上で提案したベイズ法により、各時間毎にその時点の出現事象 A_j に応じて $P(C_k | A_j)$ の値を求めて、それをグラフにプロットしたものが図-5.15である。

この図から最終段階に近づくにしたがって $P(C_k | A_j)$ が最も高くなるモデルが最適予測モデルと判定できる。今回の実測例では図-5.15から明らかなように、提案法、双曲線法、浅岡法、星埜法の順に予測精度が高い結果となっている。

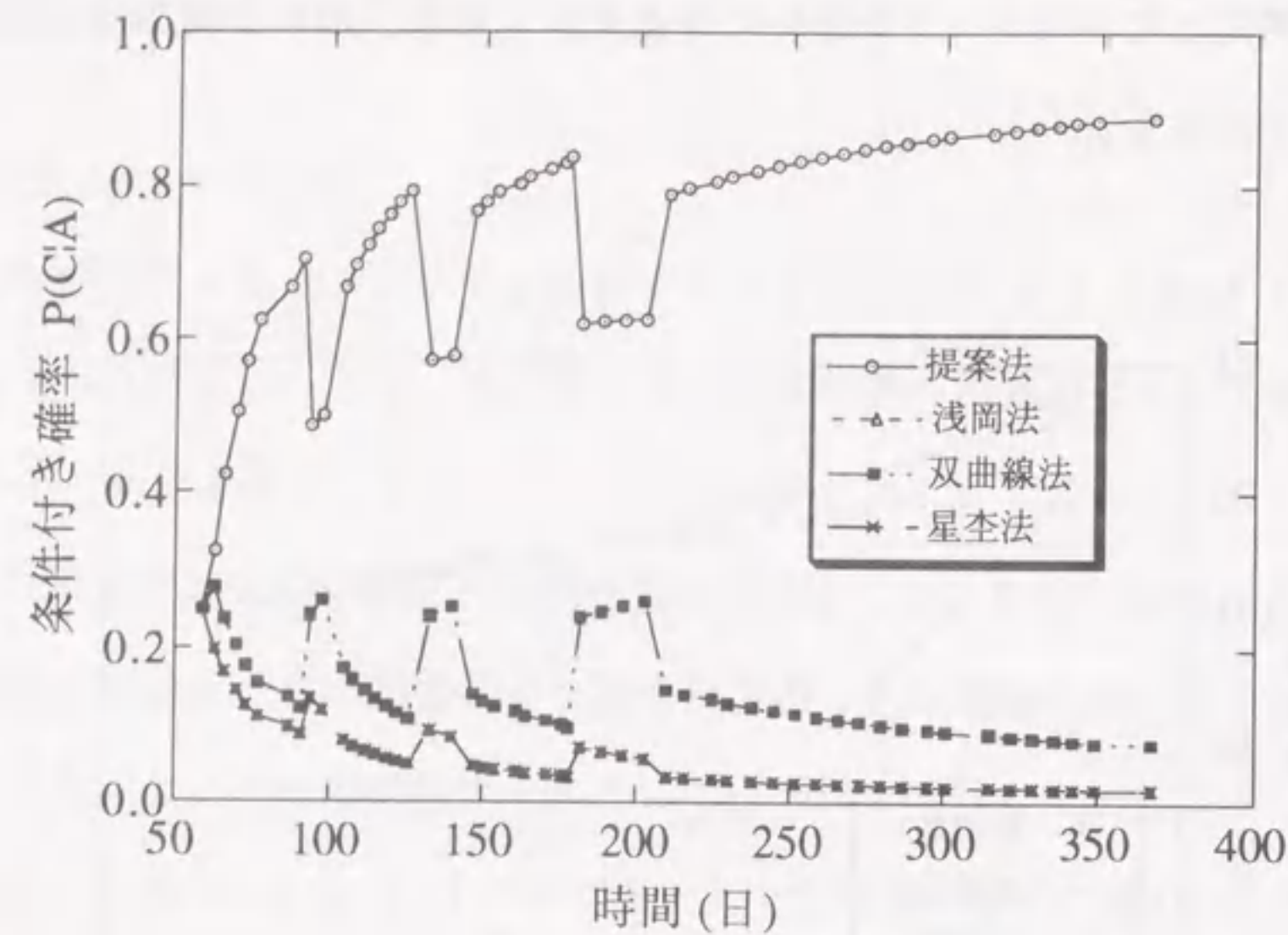


図 - 5.15 ベイズ定理によるモデル式検定結果

5.5.4 AIC 法の適用

前述のAIC法により、観測例についてAICを求めてみると表-5.4のようになる。この結果によると、今回の観測例の場合には、提案法、浅岡法、双曲線法、星笠法の順に適合度が良いことがわかる。ベイズの定理による方法の場合は、提案法、双曲線法、浅岡法、星笠法の順であったので、AIC法の場合は第2位と第3位が入れ替った結果となっている。

表 - 5.4 AIC の計算

	最大対数尤度	パラメータ数	AIC	適合順位
提案法	-1.15	4	10.3	第1位
浅岡法	-5.09	2	14.2	第2位
双曲線法	-13.0	2	30.1	第3位
星笠法	-40.9	2	85.9	第4位

5.5.5 残留沈下量の予測

表-5.3にも示したように、 $t = 176$ 日までの観測データを用いた「提案法」によるパラメータ同定の結果、対象現場データの時間-沈下関係は次のように推定される。

$$S(t) = 52.58 - 193.8 \exp(-0.0353 t) + 9.889 \log t \quad (5.36)$$

式(5.36)の第2項が一次圧密沈下の時間変化を表わす項であり、第3項が二次圧密沈下の時間変化を表わす項である。したがって、これらを用いて任意の時点においてその後の残留する一次圧密沈下および、二次圧密沈下を予測することができる。

一次圧密の残留沈下量の予測

任意の時点 t_1 において、残留する一次圧密沈下量 S_{r1} は次式で予測できる。

$$S_{r1} = 193.8 \exp(-0.0353 t_1) \quad (5.37)$$

これを図示すると、図-5.16のようになる。一例として、 $t_1 = 176$ 日目の時点におけるその後の一次圧密の残留沈下量は $t_1 = 176$ を式(5.37)に代入して、 $S_{r1} = 0.39$ cm と予測できる。

二次圧密の残留沈下量の予測

任意の時間 t_1 から t_2 の間の二次圧密沈下量 S_{r2} は次式により推定できる。

$$S_{r2} = 9.889 \log \frac{t_2}{t_1} \quad (5.38)$$

そこで、一例として上式より $t_1 = 176$ 日目の時点においてその後の残留沈下量を予測すると次のようになる。

$$\text{5年間の沈下量} \quad S_{r2} = 9.889 \times 1.056 = 10.4 \text{ cm}$$

$$\text{10年間の沈下量} \quad S_{r2} = 9.889 \times 1.337 = 13.2 \text{ cm}$$

この関係を図示すると、図-5.17のようになる。

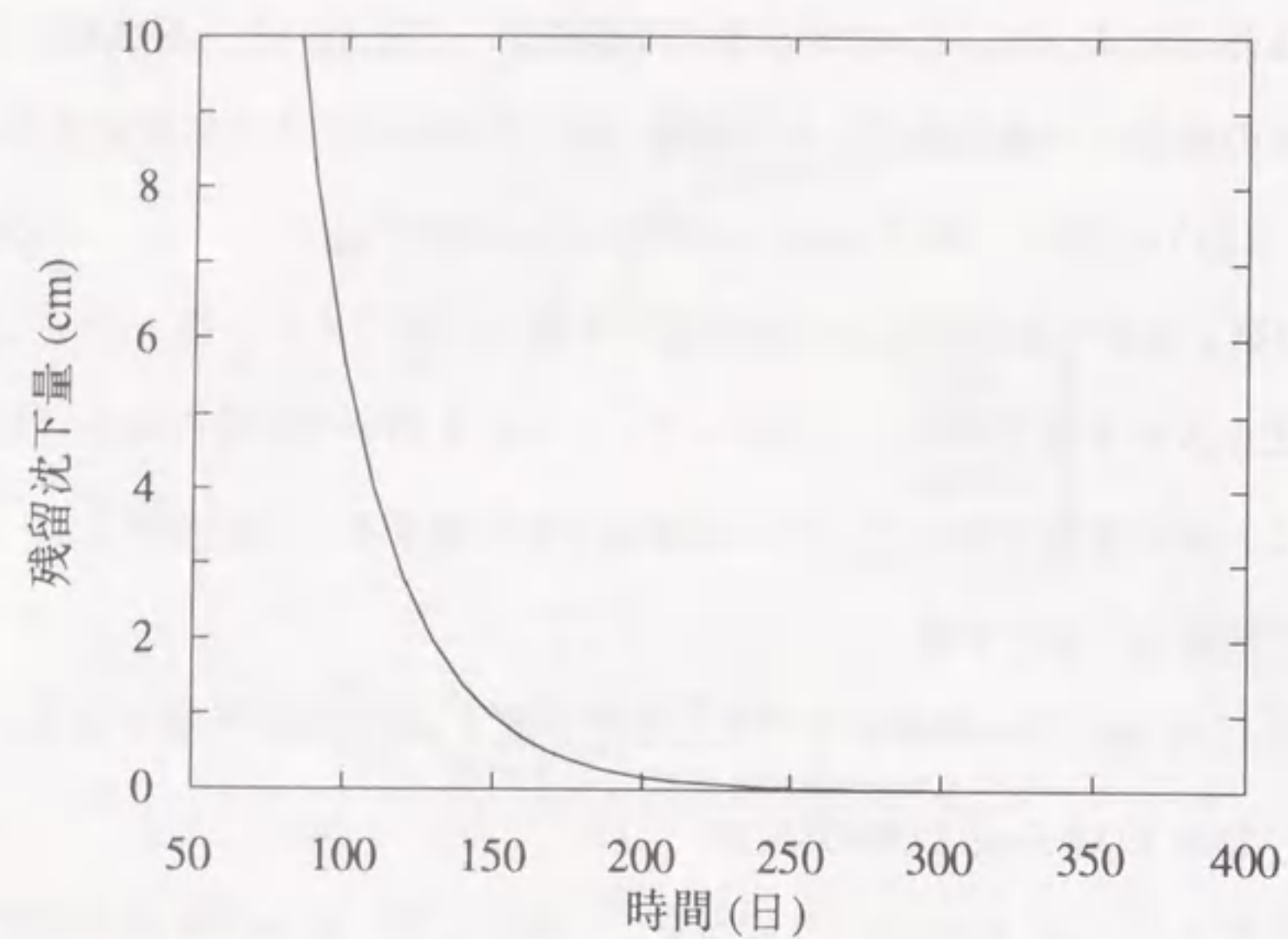


図-5.16 一次圧密の残留沈下量の予測

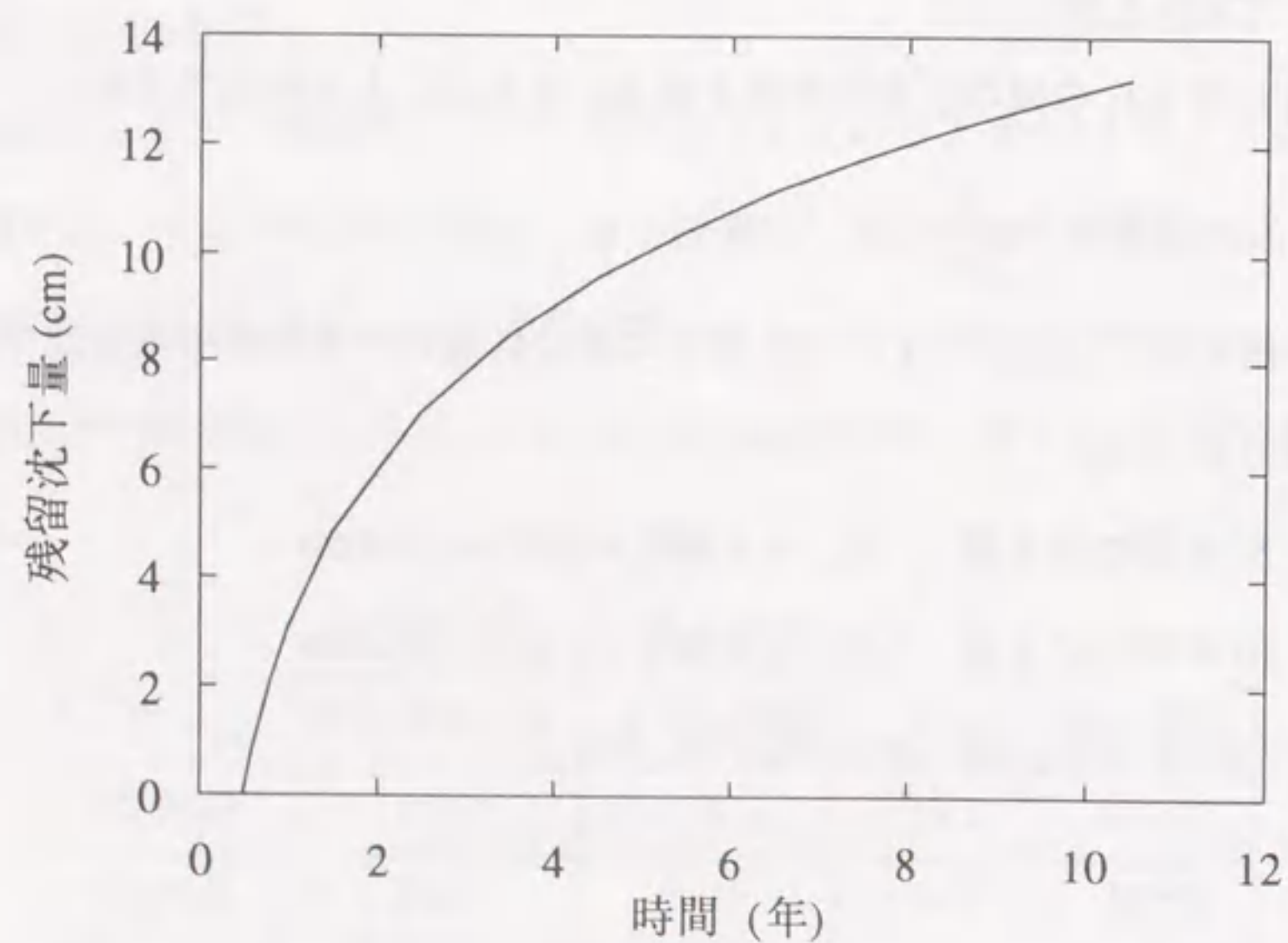


図-5.17 二次圧密の残留沈下量の予測 (t=176日の時点での予測)

二次圧縮指数の推定

一定期間内の二次圧密沈下量は式(5.38)により推定できることを示した。一方、式(5.8)によれば同じものが次式により表わすことができる。

$$S_{r2} = \left(\frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} \right) H \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (5.39)$$

ここで、対象現場の初期間隙比 $e_0 = 1.6$ 、軟弱層厚 $D = 1,500$ cm であるので、それらの値を代入し、式(5.38)と式(5.39)を等しいと置くと、 C_{α} は次のように推定できる。

$$C_{\alpha} = \frac{1 + 1.6}{1500} 9.889 = 0.0171 \quad (5.40)$$

以上で求めた二次圧縮指数 C_{α} の値は通常、室内試験で求められる値の範囲にあり、室内試験と整合性があると思われる。

5.6 結 論

本章で得られた成果を要約すると、次のとおりである。

- 1) 一次圧密中の二次圧密について従来から2つの仮説が対立している。そのいずれが正しいとしても、現実の地層が圧密試験の場合と比べて非常に厚いことを考慮すれば、現実の地盤の沈下は一次圧密と二次圧密が混在した挙動を示すと考えられる。そのことを前提に、本章では一次圧密中の二次圧密に関して新たに2つの仮説(タイプA, タイプB)をたてた。
- 2) 本章ではタイプAの仮説(二次圧密が圧密の初期から始まり、その二次圧縮指数も初期から末期まで、ほぼ一定である)に基づいて、二次圧密の影響を考慮した新しい時間-沈下関係式を提案した。
- 3) 二次圧密の影響を考慮すると、現在の沈下量と1ステップ前の沈下量の関係は浅岡法の図解法⁹⁾のような直線にならないことを示した。
- 4) 提案する沈下モデルや従来からある他の各種の沈下モデルの時間-沈下関係式のパラメータを同定する方法として、観測ノイズ、システムノイズを考慮した最尤法

による定式化を行った。

- 5) 観測しながら各沈下予測法の予測精度を比較する方法として、(a) ベイズの定理による方法と (b) AIC による方法を提案した。
- 6) 同定によって得られた沈下モデル式を用いて、任意の時点において、その後の残留する一次圧密沈下量、および二次圧密沈下量を予測する方法を示した。
- 7) 現場実測例を用いて適用性の検討を行った結果、提案法は従来法よりもいずれも高い予測精度を示し、その有効性が確認された。

参考文献 (第5章)

- 1) Taylor, D.W and W. Merchant : A theory of clay consolidation accounting for secondary compression, Jour. Math. & Phys., Vol.19, pp.167 - 185, 1940.
- 2) 今井五郎 : 粘性土の圧密機構 - 原論 -, わかりやすい土質力学原論, 土質工学会, p.46, 昭和 62 年
- 3) Bjerrum, L. : Engineering Geology of Norwegian Normally - consolidated Marine Clays as Related to Settlement of Buildings. Geotechnique, Vol.17, pp.81 - 118, 1967.
- 4) Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R. : Stress - strain - strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. Geotechnique, Vol.35, No. 2, pp.159 - 180, 1985.
- 5) Mesri, G. and Godlewski, P.M. : Time and Stress - compressibility interrelationship, Jou. Geotech. Engng. Div., A.S.C.E., Vol.103, No.GT5, pp.417 - 430, 1977.
- 6) A. Asaoka : Observational Procedure of Settlement Prediction, Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.87 - 101, 1978.
- 7) M. Jaamiolkowski and Ladd, C.C. : New Developments in Field and Laboratory Testings of Soils, Proc. of the 11th ICSMFE, Vol.1, pp.57 - 155, San Francisco, 1985.
- 8) 浅岡顕, 野津光夫 : 観測的方法による圧密沈下の線形予測, 土と基礎, Vol. 41, No. 2, pp. 5 - 10, 1993.
- 9) 三笠正人 : 軟弱粘土の圧密, 鹿島出版会, 1963.
- 10) 松尾稔 : 地盤工学 - 信頼性設計の理念と実際 -, 技法堂, pp. 354 - 357, 1984.
- 11) 村山朔郎 : 土の力学挙動の理論, 技法堂, pp. 564, 1990.
- 12) R.A. Fisher : Statistical Methods for Research Workers, Hafner, pp.82 - , 1973.
- 13) 中川徹, 小柳義夫 : 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, pp. 163 - 176, 1982.
- 14) Akaike, H. : A new look at the statistical model identification, IEEE, Trans. A. C, 19, pp.716 - 723, 1974.

- 15) 脇田英治：二次圧密を考慮した沈下予測と予測精度推定法，土木学会論文集，No. 457 / Ⅲ - 21，pp. 97 - 105，1992.12.

第6章 二次圧密を含む残留沈下の予測法 (提案法 2)¹¹⁾

6.1 概 説

前章では一次圧密中の二次圧密について、タイプ A の仮説に基づいて、最尤法によるシステム同定・沈下予測法を提案した。それに対して、本章では、タイプ B の仮説に基づいて、前章とは沈下モデルもシステム同定法も異なるもう一つの方法を提案する。すなわち、第 2～4 章では施工前～施工中期における沈下管理のための沈下モデルとして「沈下状態方程式」、システム同定法として「適応観測器」を提案した。それに対して、本章ではそれらを施工中期～竣工後における残留沈下の管理に適用するために、二次圧密を考慮できる形に拡張した方法について述べる。

まず最初に、本章における二次圧密のとらえ方と立場について考察する。そして、従来の二次圧密を考慮した沈下予測法の問題点について考察する。それに対して、二次圧密を考慮した沈下状態方程式の定式化を行ない、そのシステム同定法として適応観測器による方法を提案する。そして、3つの観測例を用いて、二次圧密に関するシステム同定、将来予測を行ない、提案法の有効性について検討する。

6.2 本章における二次圧密のとらえ方と立場

二次圧密に関する本論文の立場については 5.2.3 で前述した。とくに、第 5 章と第 6 章におけるその相違については 5.2.4 で述べた。ここでは、本章における二次圧密のとらえ方と立場について補足する。

圧密沈下のメカニズムが 5.2.4 で述べたタイプ B (一次圧密中の二次圧密が圧密の最初からではなく、その途中から卓越する) に従うとすれば、圧密沈下の観測データを支配するシステム (沈下挙動をする地盤) を沈下の全期間を通じて唯一として扱うのは無

理であると思われる。むしろ、一次圧密沈下成分が支配的な時期と二次圧密沈下成分が支配的な時期の2つに分けて扱った方がシステム同定上は好ましいと考えられる。そこで、当初、一次圧密沈下成分が支配的な沈下挙動の観測データに対しては1つのシステム(一次圧密的沈下のみを考慮したシステム)としてシステム同定を行なう。やがて、時間の経過とともに、もはや1つのシステムと扱うには確率的に矛盾が無視しえない状態となった時、別のシステム(一次・二次圧密を考慮したシステム)に切り替えてシステム同定を行なうものである。このシステム切り替えのための判定のことを本章では「二次圧密発生の判定」と呼んでいる。したがって、本章における二次圧密とは見かけ上の二次圧密である。二次圧密が荷重当初から生じているかどうか、あるいは生じているとしても、初期の割合は実用上は無視できるものであるかなどについては諸論があり、結論が出ていないと思われる。もし、荷重当初から二次圧密が生じ、観測データの中にその成分が含まれているとすれば、本解析法ではその部分は最初のシステムにより扱われ、一次圧密と一緒に処理される。検出される二次圧密成分はシステムを切り替えた後の増加分ということになる。したがって、その場合には、厳密な物理的な意味での全二次圧密成分の定量的な推定が行なわれているとは言えない。しかし、いずれにしても実用的見地からは提案する解析法により二次圧密の定量的同定は可能と言えるし、沈下の予測上は支障とはならないと考えられる。

6.3. 従来の二次圧密を考慮した沈下予測法の問題点

6.3.1 二次圧密の関数型

標準圧密試験を行なうと、ほとんどの土の場合、圧密時間24時間以内で一次圧密は終了し、以後は図-6.1に示すような時間の対数に比例する二次圧密沈下が継続する。

対数関数は時間の経過と共に増加率はしだいに低下するが、無限に増加する関数である。どこまで、この二次圧密の増加が続くのかについては、現在のところ明らかにはなっていない。図-6.2は圧密試験を約63日間継続して行なった例²⁾であるが、二次圧密が

時間の対数に比例して最後まで継続しており、おさまる傾向をみせていない。

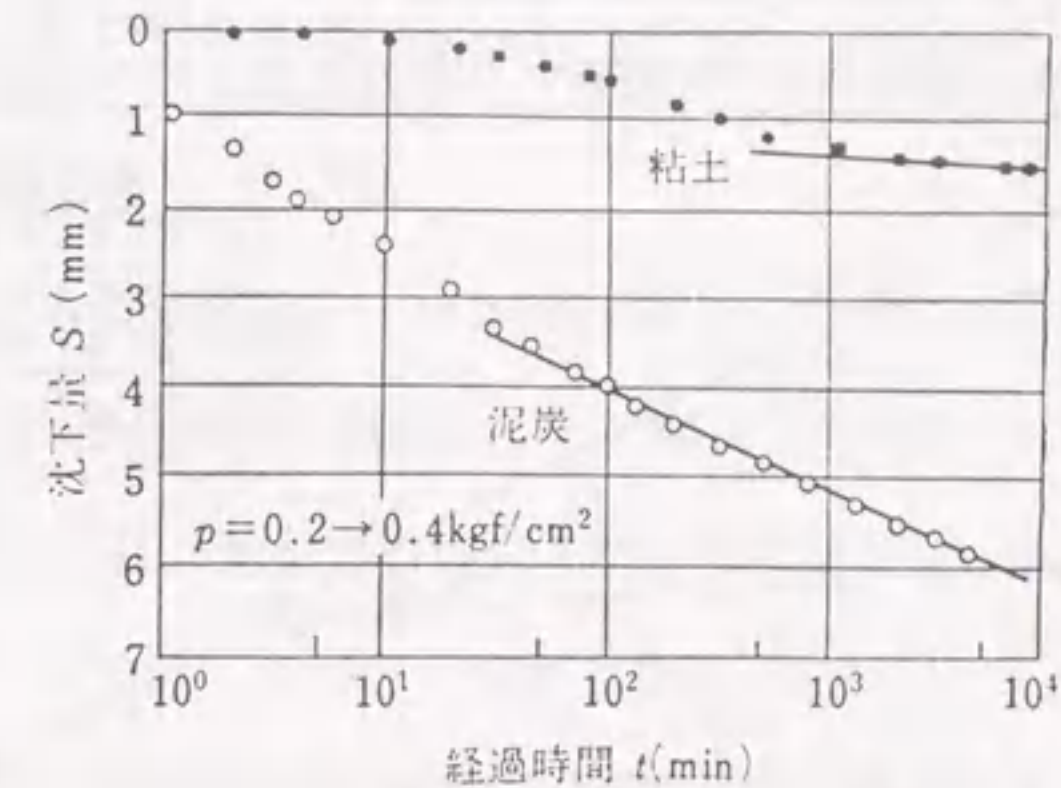


図-6.1 標準圧密試験結果(及川・宮川¹⁾)

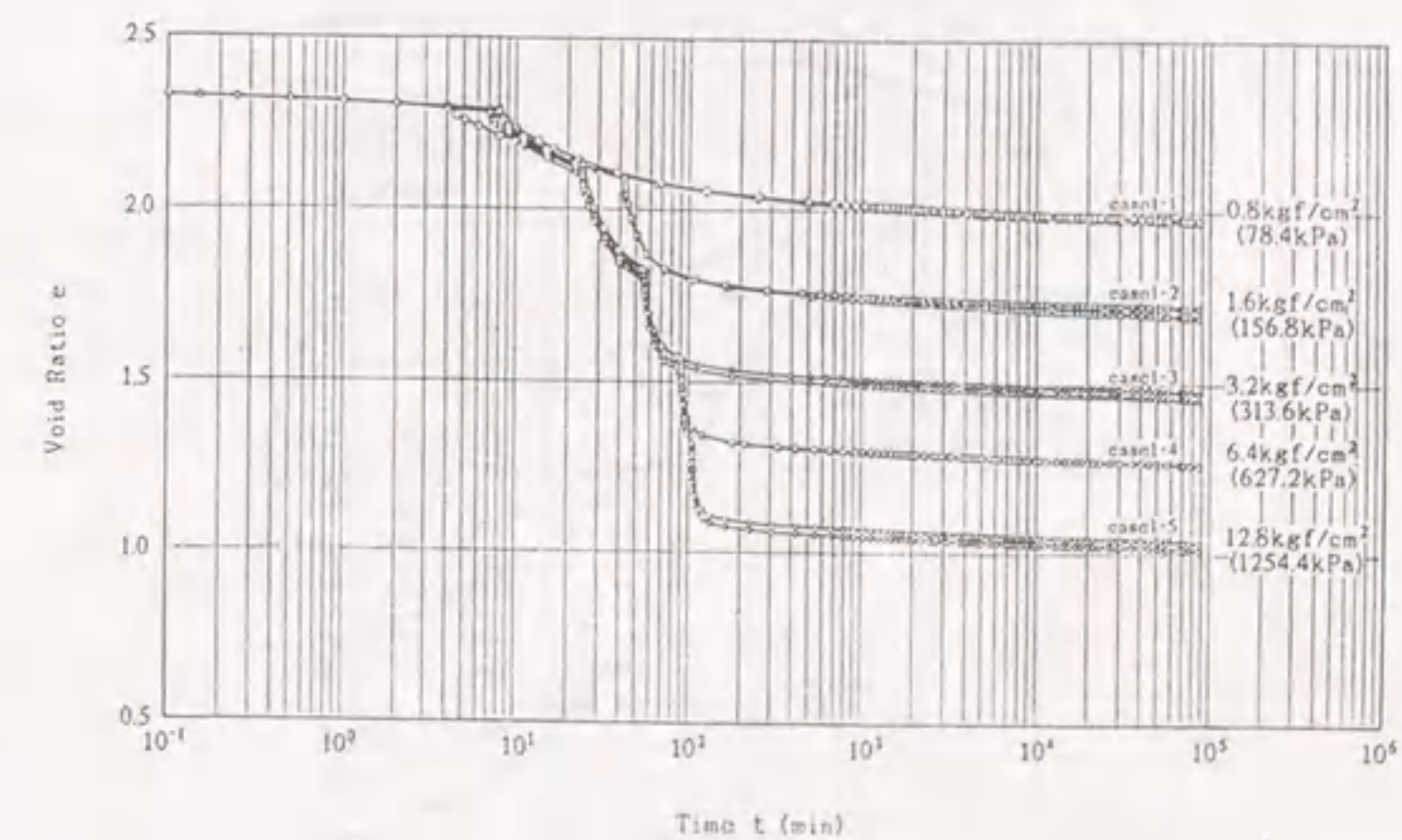


図-6.2 長期間実施された圧密試験の結果(吉国²⁾)

また、図-6.3は各地質時代における堆積物の自然間隙比を調べた例³⁾であるが、これも時間の対数に比例し、1億年もの間変形を続けていることを示している。

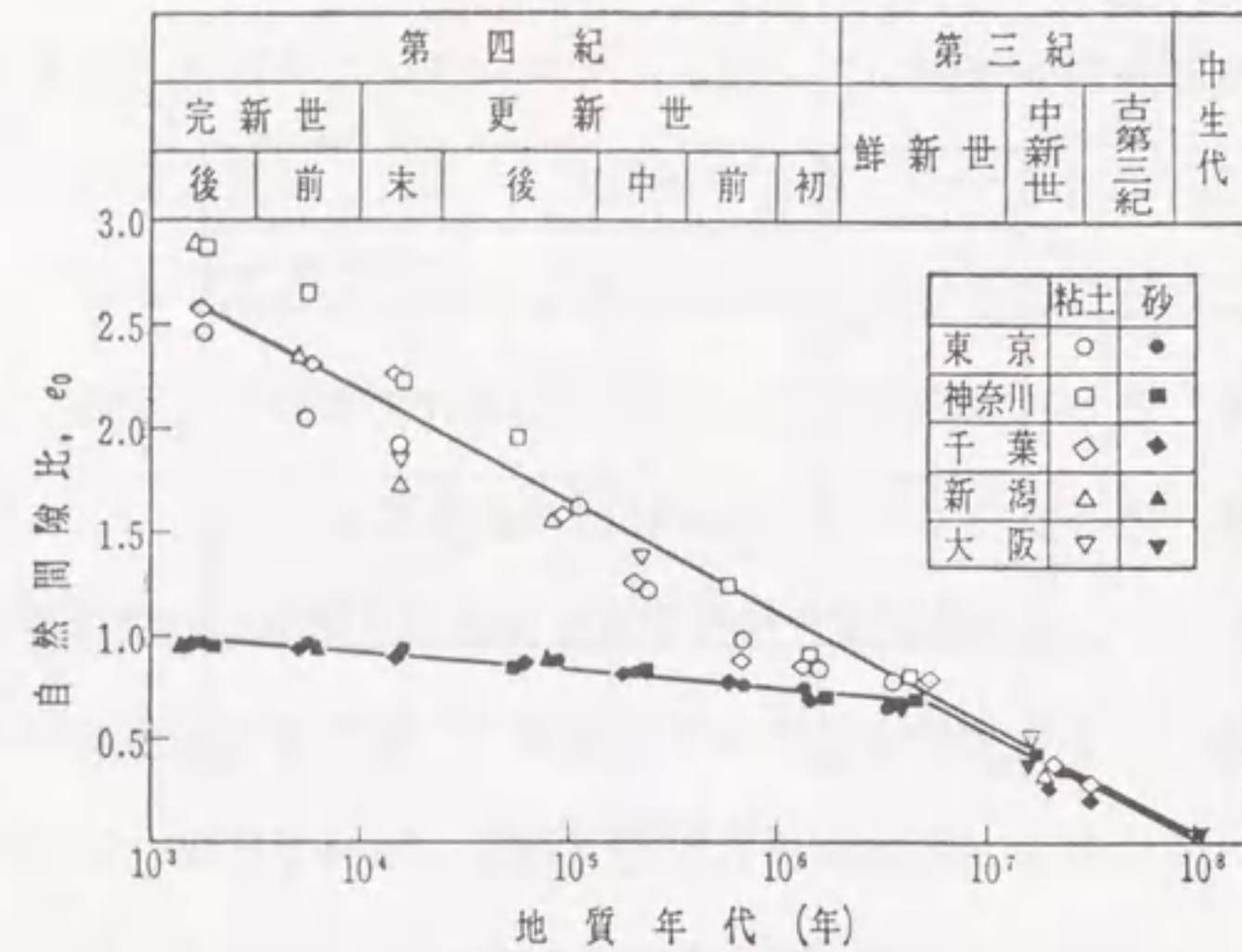


図-6.3 各地質時代における堆積物の自然間隙比(陶野³⁾)

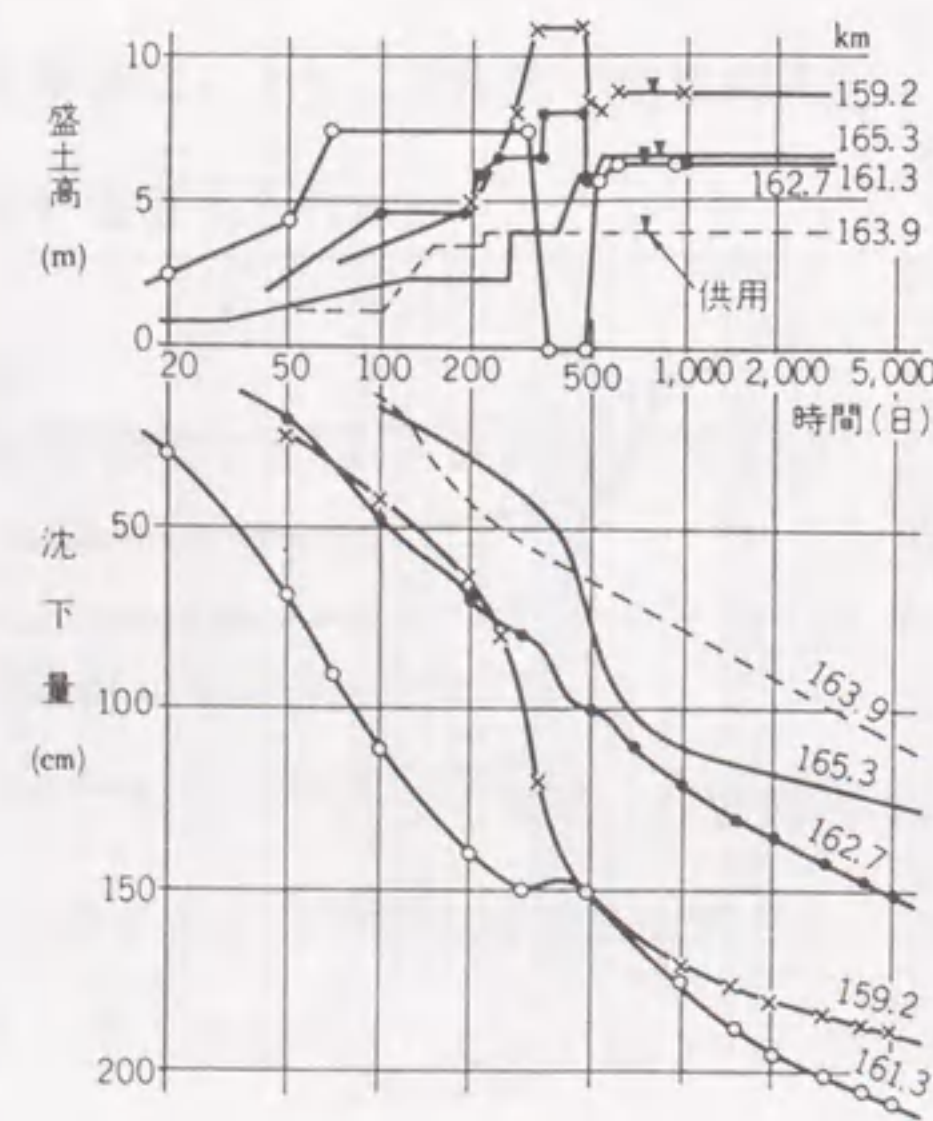


図-6.4 現実の地盤で観測された沈下曲線の例(稲田⁴⁾)

図-6.4は盛土工事を完了し、供用後十数年経過した名神高速道路大垣・安八工区における盛土中央部の沈下を追跡したものである⁴⁾。これによると、一次圧密を終了したと考えられる1500日以後の沈下は、いずれも時間の対数に比例して沈下を続けている⁴⁾。

以上のように、二次圧密による地盤の変形が時間の対数に比例するという観測例は非常に多く、それ以外の関数型を示したという観測例はほとんどない。したがって、本論文においても、二次圧密による地盤の沈下が時間の対数に比例して生じるという前提のもとに以下の考察を進める。

時間の対数に比例する型の関数を「LOG型関数」、時間の指数に比例する型の関数を「EXP型関数」と呼び、両者を比較すると、図-6.5のようになる。つまり、「LOG型関数」は時間の増加に対して、常に上昇を続けるが、「EXP型関数」は時間の増加に対してしだいに安定し、やがて一定値となる。

前述したように、二次圧密は時間の対数に対して、生じると考えられる。したがって、以上のような両関数型の相違点を考慮すれば、二次圧密を表わすには「EXP型関数」ではなく、「LOG型関数」で表わすのが妥当であると考えられる。

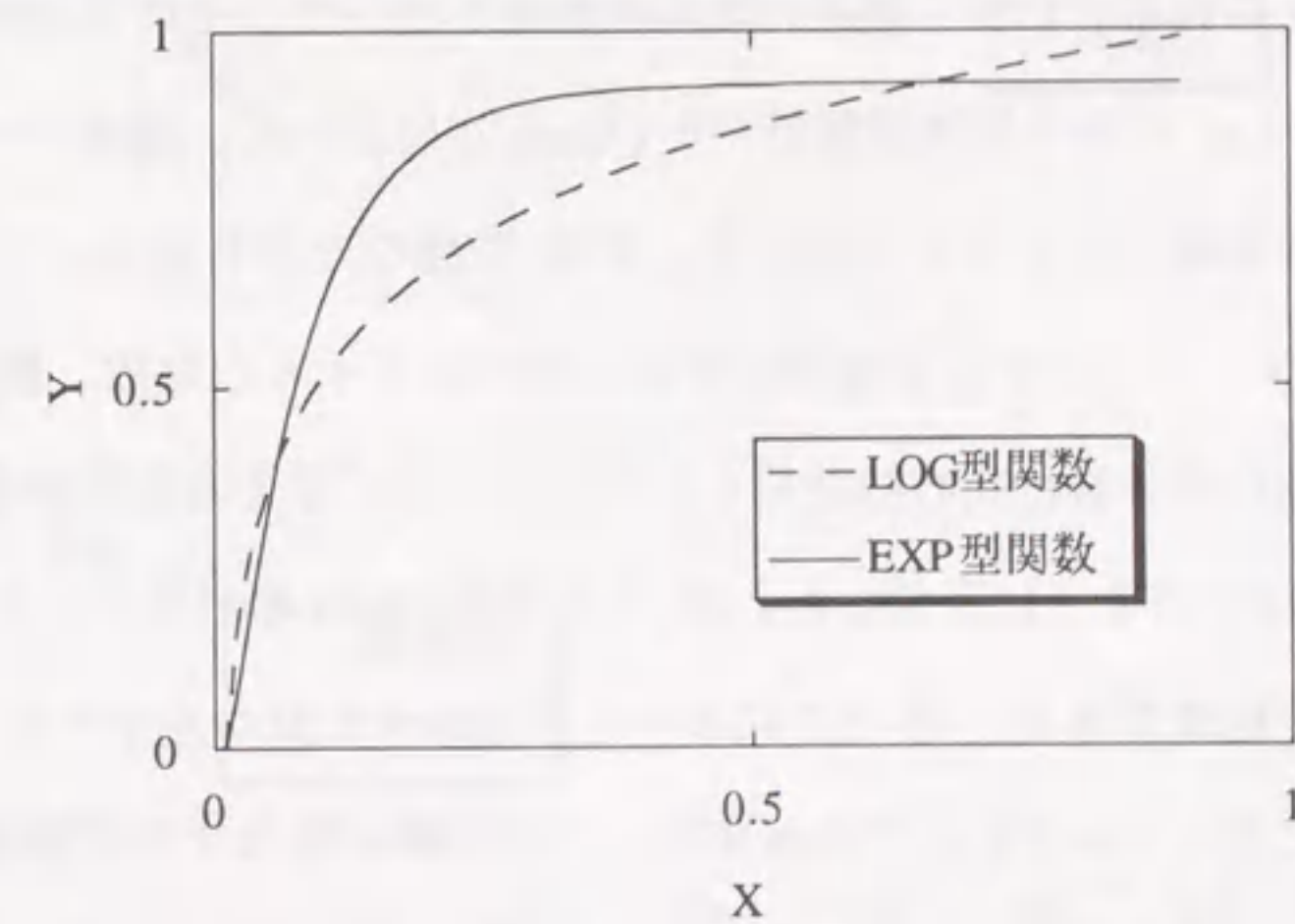


図-6.5 「LOG型関数」と「EXP型関数」

6.3.2 従来の二次圧密を考慮した予測法の問題点

過去に、観測データを用いる二次圧密を考慮した沈下予測法としては次に述べる方法が星谷・斉藤⁵⁾により提案されている。その方法においては二次圧密現象は次式で示される Voigt モデルにより表わされている。

$$\rho_2 + \alpha \dot{\rho}_2 = \beta \quad (6.1)$$

ここに、 ρ_2 : 二次圧密沈下量

α, β : パラメータ

なお、記号の頭の「 \cdot 」(ドット)は時間に関する一回微分を表わす。そこで、一次圧密沈下量を ρ_1 とすると、全沈下量 ($\rho = \rho_1 + \rho_2$) は次の浅岡モデル⁶⁾(次数2のARモデル)に従う。

$$\rho(j) = a \rho(j-1) + b \rho(j-2) + c \quad (6.2)$$

ここに、 $\rho(j)$: 観測データを離散化した時の k 時点の沈下量

$\rho(j-1), \rho(j-2)$: j 時点より過去の $(j-1), (j-2)$ 時点の沈下量

a, b, c : パラメータ

ここで、Voigt モデルは前述した「EXP 型関数」であるので、二次圧密を表現するには適当でないと考えられる。いま、後述の現場観測例を用いて、その不合理な点を示してみる。後述の図-6.14 に示す沈下観測データ (Case 2) において、観測データのうち盛土荷重が一定となった部分のデータを用いて、星谷・斉藤の方法を適用してみた。ここで、式(6.2)のカルマンフィルタによる同定ではシステムノイズの分散、観測ノイズの分散および推定誤差の共分散行列の初期値を計算条件として与える必要があり、それらの値をここでは表-6.1のように設定した。図-6.7は式(6.2)のパラメータのカルマンフィルタによる同定結果である。図-6.7においてパラメータやカルマンゲインは変動し、なかなか収束に至っていない。これは本来、二次圧密に原因する予測誤差を二次圧密として同定するのではなく、観測ノイズとして扱って、無理に同定しようとしているためであると考えられる。 $j = 30$ 付近のパラメータの値はカルマンゲインの収束過程であり、その値を沈下予測に用いるのは本来は不適当であるが、仮にその値を用いて、 j

$= 30$ の時点において沈下予測を行った結果を示したのが、図-6.6である。図-6.6によると、観測データの最後の付近で7.5 cmの予測誤差が生じている。この予測誤差の主な原因は $j = 30$ の時点よりも後の二次圧密によるものであると考えられる。このように、「EXP 型関数」に基づく二次圧密を考慮した沈下予測法ではその適用性に自ら限界があると考えられる。

表-6.1 カルマンフィルタ計算条件

	設定値
状態量	$X = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T$ X_1, X_2, X_3 はそれぞれ式(6.2)の a, b, c
計算式	文献5) pp.131-132
システムノイズの分散	$Q = 0$ とする
観測ノイズの分散	$V_o = 0.01 \text{ cm}^2$ とする
共分散行列の初期値	$P = \begin{bmatrix} 1.0 \times 10^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$ cm ² とする

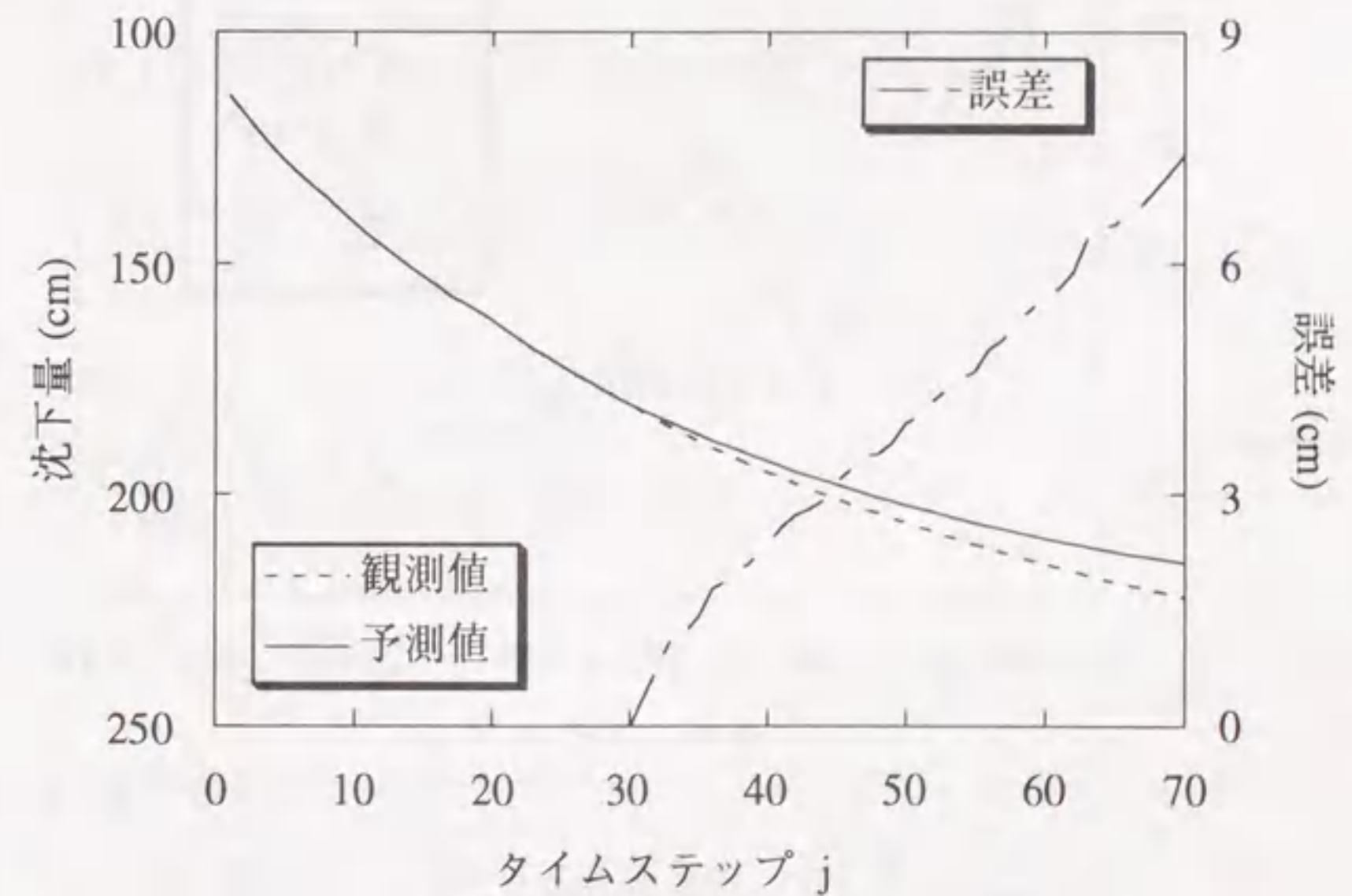


図-6.6 カルマンフィルタによる沈下予測結果

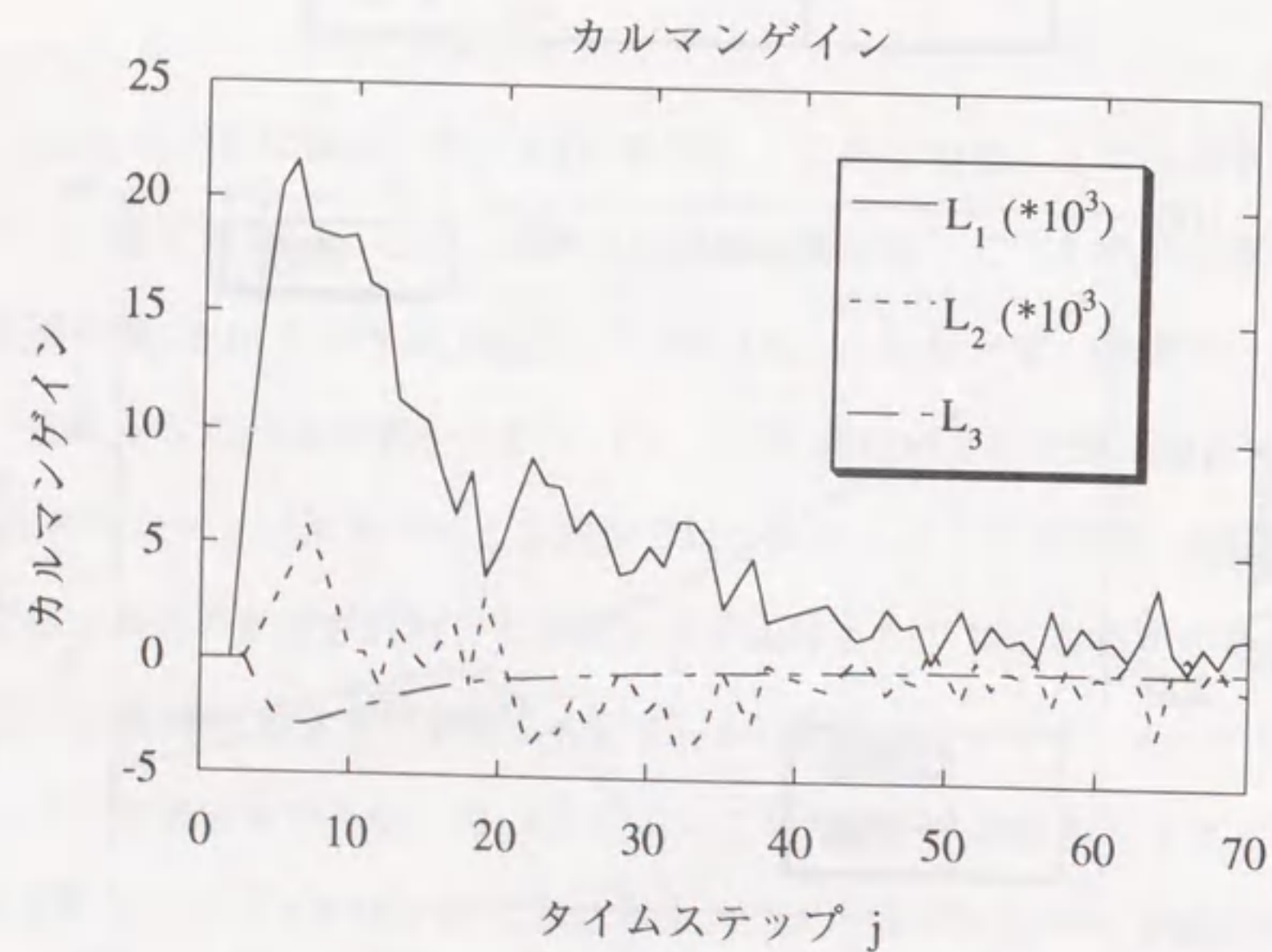
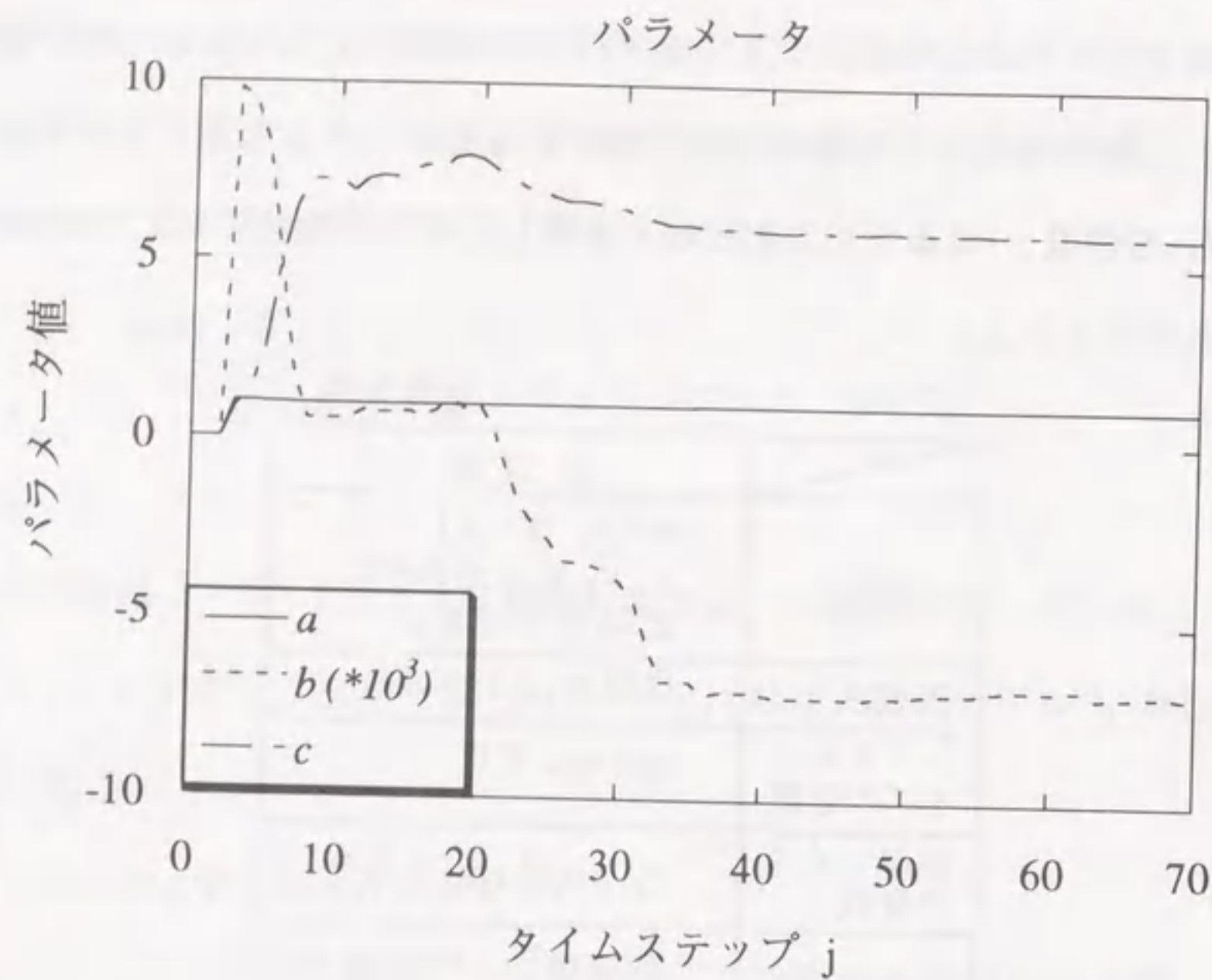


図-6.7 パラメータ収束状況とカルマンゲイン

6.4 二次圧密を考慮した沈下状態方程式の提案

6.4.1 沈下の状態方程式表現について

沈下状態方程式と観測データを用いたそのシステム同定法については第2章で述べたが、ここでは沈下状態方程式の概要のみについて簡単に述べる。

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、その観測を一定時間間隔 Δ で行くと、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を $Y(j)$ と表わす。 j は正の整数で、 $j=1, 2, \dots$ である。そして、沈下の時系列データを自己回帰移動平均モデル (ARMAモデル) で表わすと次のようになる。

$$Y(j) = \sum_{i=1}^k \{a(i) Y(j-i) + b(i) u(j-i)\} \quad (6.3)$$

ここに、 k は次数、 $Y(j-1), Y(j-2), \dots$ は j 番目より以前の $(j-1), (j-2), \dots$ 番目の沈下観測値であり、 $u(j-1), u(j-2), \dots$ は同様に、 j 番目より以前の盛土荷重観測値である。ここで、新たに状態を表わすベクトル $X(j)$ を次のように定義し、それを用いて式 (6.3) を変形する。

$$X(j) = [X_1(j) \quad X_2(j) \quad \dots \quad X_k(j)]^T \quad (6.4)$$

$$X_1(j) = \sum_{i=1}^k \{a(i) Y(j-i) + b(i) u(j-i)\}$$

$$X_2(j) = \sum_{i=2}^k \{a(i) Y(j-i+1) + b(i) u(j-i+1)\}$$

.....

$$X_m(j) = \sum_{i=m}^k \{a(i) Y(j-i+m-1) + b(i) u(j-i+m-1)\} \quad (6.5)$$

ただし、 $m \leq k$ である。

そこで、これらを用いて、システムの状態を表わすと次のようになる。

$$X(j) = A_d X(j-1) + B_d u(j-1) \quad (6.6)$$

$$Y(j) = C_d X(j) \quad (6.7)$$

ここに、 A_d , B_d , C_d は係数行列であり、それぞれ次のような内容である。

$$A_d = \begin{bmatrix} a(1) & 1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ a(2) & 0 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ a(3) & 0 & 0 & 1 & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & & \ddots & 1 \\ a(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$B_d = [b(1) \ b(2) \ \cdots \ \cdots \ b(k)]^T \quad (6.9)$$

$$C_d = [1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ \cdots \ 0] \quad (6.10)$$

以上の離散系沈下状態方程式は次の連続系沈下状態方程式と等価であり、両者間のパラメータの変換も容易に行うことができる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (6.11)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (6.12)$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ \cdots \ x_k]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & & & \\ a_{k1} & \cdots & \cdots & a_{kk} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_k]^T$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ \cdots \ \cdots \ 0]$$

ここで、 \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{u} はそれぞれ沈下の状態量、沈下の観測値、盛土荷重値を表わすベクトルである。

6.4.2 一次圧密沈下成分の状態方程式

式(6.11), (6.12)の型の式は三笠の圧密方程式、およびBiotの圧密理論式から誘導することができる(2.2.1, 2.2.2で前述)。つまり、式(6.11), (6.12)を用いれば、それらの圧密理論に従う時間-沈下曲線を表わすことができると考えられる。また、現場観測

例に式(6.11), (6.12)に基づく沈下予測法を適用し、良く適合することを2.9, 2.10節で示した。そこで、ここでは、式(6.11), (6.12)を一次圧密沈下成分の状態方程式として設定する。

6.4.3 二次圧密沈下成分の状態方程式

6.3.1において述べたように二次圧密沈下成分は「LOG型関数」であるので、その挙動を表わす式として、次式を用いる。

$$\eta = \frac{F'}{t} \quad (6.13)$$

ここに、 t は時間、 F' は定数、 η は二次圧密の沈下成分である。

6.4.4 一次・二次圧密を考慮した沈下状態方程式

以上の点を考慮して、一次・二次圧密を考慮した沈下の状態方程式を次のように設定する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (6.14)$$

$$\eta = \frac{F'}{t} \quad (6.15)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} + \eta \quad (6.16)$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ \cdots \ x_m]^T$$

ここで、 \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} などは式(6.11), (6.12)と同一である。式(6.14)は上述の「EXP型関数」に、式(6.15)は「LOG型関数」に対応するものである。そして、式(6.14)の \mathbf{x} は一次圧密沈下成分、式(6.15)の η は二次圧密沈下成分を表わしており、観測値はそれら両者の和であり、式(6.16)で与えられる。 \mathbf{x} の次数は任意であるが、説明を簡略化するため以後、次数2の場合のモデルについて説明する。次数2の場合、式(6.14)～(6.16)を書き換えると、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{22} \\ \frac{F'}{t} \end{bmatrix} [u] \quad (6.17)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (6.18)$$

$$C = [1 \ 0 \ 1]$$

ここで、 x_1, x_2 は一次圧密成分の沈下状態量、 x_3 は二次圧密成分の沈下状態量である。

次に、式(6.17), (6.18)を離散化すると以下のようなになる。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_{j-1} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \frac{F}{jD+1} \end{bmatrix} [u]_{j-1} \quad (6.19)$$

$$Y(j) = C \ X(j) \quad (6.20)$$

$$C = [1 \ 0 \ 1]$$

ここで、 t_0 は観測データを盛土開始時点から扱う場合には0であるが、ある任意の時間から計算を開始する場合には設定する必要がある。以上、沈下状態方程式をいろいろな形に変形して示したが、それらの関係は図-6.8のようにまとめられる。

すなわち、一次元圧密沈下を表す沈下状態方程式に本章では新たに二次圧密項を追加することにより、二次圧密を考慮できる沈下モデルを構成している。

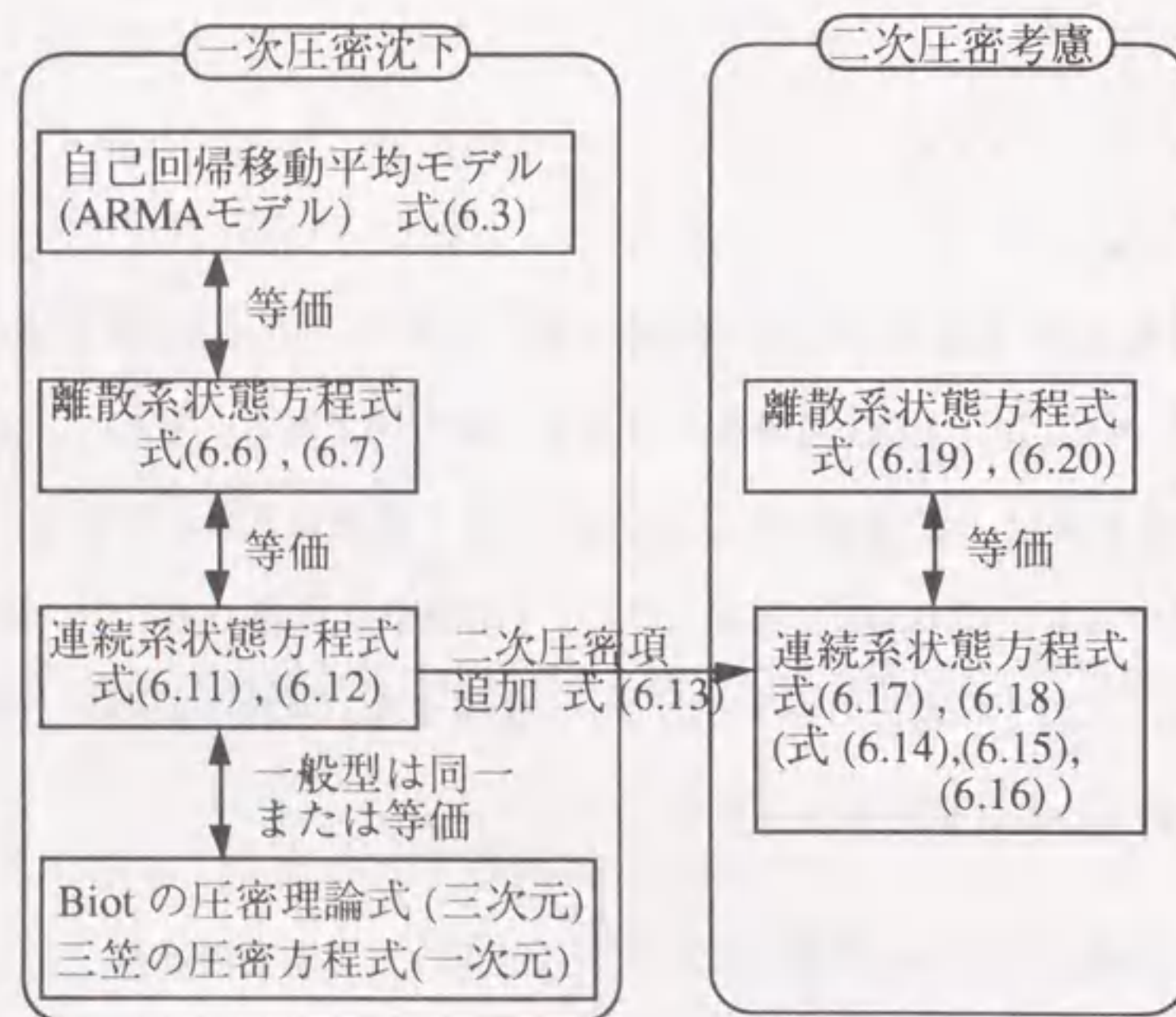


図-6.8 沈下状態方程式間関係

6.5 沈下状態方程式のシステム同定法と沈下予測法

6.5.1 適応観測器とカルマンフィルタ

二次圧密の影響をうける沈下予測問題に式(6.19), (6.20)を適用し、そのパラメータを同定する。その手法として本論文では適応観測器を用いる。適応観測器 (adaptive observer) はシステムのパラメータが未知で、状態変数も測定できない場合に、システムの入出力信号を用いて、パラメータの同定と状態変数の推定を同時に行う方法である。適応観測器と似たシステム同定法にカルマンフィルタがある。そこで、まず最初にそれら両者の相違点について述べる。

カルマンフィルタの定式化は、システムの状態(誤差分散)がガウス分布の定常確率過程に従うという仮定の上に成立しているため、ノイズの統計的性質(平均および共分散)が既知であることが必要である。しかし、あらかじめ、ノイズの統計的性質を精度よく把握しておくことは、一般的に極めて困難である。また、現実のシステムとしての地盤の挙動特性は、施工の状態の変化などにより施工中に変動するものである。これらの変動が小さい間はパラメータやノイズの状態が単一の母集団の変動に従うと近似的に扱えるので、カルマンフィルタによる定式化が有効である。しかし、二次圧密の影響や地盤の弾塑性挙動などにより地盤の挙動特性の変動が大きい時、もはや、システムの状態は終始一定であると考えられることには無理がある。むしろ、システムのパラメータが時間的に変化すると考えるほうが妥当である。このような地盤の沈下問題にカルマンフィルタを適用する場合には自ら限界があると考えられる。

それに対して、適応観測器の場合には、前述したシステムとしての地盤の挙動特性が変動する場合に、その特性変動に応じて、パラメータをオンライン的に変動させて、常にシステムとモデルの挙動特性に関する誤差が少なくなるように保持する構成となっている。これら適応観測器とカルマンフィルタの特徴を比較すると表-6.2のようになる。

表-6.2 パラメータの同定に関する特徴の相違

	カルマンフィルタ	適応観測器
1	確率的同定法である。 観測値も確率変数の一つとして、予測値が真値に $t \rightarrow \infty$ で収束するよう推定される。	確定的同定法である。 各時間ステップの観測値は確定値として扱われる。
2	パラメータの時間変化は式で与えるか、そうでなければ、時間的に定常でなければならない。	パラメータの時間的な変化を考慮できる。
3	パラメータの同定に関して収束が遅い(確率的な取り扱いのため)	パラメータの同定に関して収束が速い(確定的な取り扱いのため)

6.5.2 Kreisselmeier 型適応観測器

二次圧密の影響により、沈下の状態が途中で変化する問題に対しては、表-6.2の適応観測器の特徴2,3は都合が良い。Kreisselmeier 型適応観測器は以下のような構成となっている⁷⁾。システムの状態方程式は次式で表わされる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (6.21)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (6.22)$$

ここで、 \mathbf{x} は状態を表すベクトルであり、その次数を k とすれば、次式で与えられる。

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k]^T \quad (6.23)$$

また、 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \vdots & \mathbf{I}_{k-1} \\ \mathbf{a} & \vdots \ \dots \\ \vdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

$$\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_k]^T \quad (6.25)$$

$$\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_k]^T \quad (6.26)$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (6.27)$$

ここで、 \mathbf{I}_{k-1} は行と列の大きさが $(k-1)$ の単位行列である。ここで、漸近安定な任意の既知の行列 \mathbf{g}, \mathbf{G}_0 を導入する。

$$\mathbf{G}_0 = \begin{bmatrix} \vdots & \mathbf{I}_{k-1} \\ \mathbf{g} & \vdots \ \dots \\ \vdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

$$\mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_k]^T \quad (6.29)$$

式(6.21), (6.22)を変形する。まず、式(6.21)の右辺の $\mathbf{A} \mathbf{x}$ は \mathbf{g} を用いて、次のように変形できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \vdots & \mathbf{I}_{k-1} \\ \mathbf{a} + \mathbf{g} - \mathbf{g} & \vdots \ \dots \\ \vdots & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \mathbf{I}_{k-1} \\ \mathbf{g} & \vdots \ \dots \\ \vdots & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + (\mathbf{a} - \mathbf{g}) x_1 \\ &= \mathbf{G}_0 \mathbf{x} + (\mathbf{a} - \mathbf{g}) y \end{aligned} \quad (6.30)$$

したがって、式(6.30)を式(6.21)に代入して、次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{G}_0 \mathbf{x} + (\mathbf{a} - \mathbf{g}) y + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (6.31)$$

ここで、次のような状態変数フィルタを考える。

$$\dot{\mathbf{F}}_y = \mathbf{G}_0 \mathbf{F}_y + \mathbf{I}_k y \quad (6.32)$$

$$\dot{\mathbf{F}}_u = \mathbf{G}_0 \mathbf{F}_u + \mathbf{I}_k u \quad (6.33)$$

$$\dot{\mathbf{f}}_y = \mathbf{G}_0^T \mathbf{f}_y + \mathbf{C}^T y \quad (6.34)$$

$$\dot{\mathbf{f}}_u = \mathbf{G}_0^T \mathbf{f}_u + \mathbf{C}^T u \quad (6.35)$$

このフィルタの解は次のような性質を持っている。

$$\mathbf{f}_i^T = \mathbf{C} \mathbf{F}_i \quad (i = y, u) \quad (6.36)$$

この時、式(6.31)の解は次式で与えられる。ただし、 $\mathbf{x}(t_0) = 0$ とする。

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{F}_y (\mathbf{a} - \mathbf{g}) + \mathbf{F}_u \mathbf{B} \quad (6.37)$$

この関係が成立することは式(6.37)を式(6.31)に代入することにより、次のように容易に確かめることができる。

$$\text{式(6.31)の右辺} = \mathbf{G}_0 \{ \mathbf{F}_y (\mathbf{a} - \mathbf{g}) + \mathbf{F}_u \mathbf{B} \} + (\mathbf{a} - \mathbf{g}) y + \mathbf{B} u$$

$$\begin{aligned}
&= (\mathbf{G}_o \mathbf{F}_y + \mathbf{I}_k \mathbf{y})(\mathbf{a} - \mathbf{g}) + \mathbf{B}(\mathbf{G}_o \mathbf{F}_u + \mathbf{I}_k \mathbf{u}) \\
&= \hat{\mathbf{F}}_y (\mathbf{a} - \mathbf{g}) + \hat{\mathbf{F}}_u \mathbf{B} \quad (6.38)
\end{aligned}$$

一方、式(6.37)を時間で微分すると、次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{F}}_y (\mathbf{a} - \mathbf{g}) + \hat{\mathbf{F}}_u \mathbf{B} \quad (6.39)$$

このように式(6.38)と式(6.39)は同一となる。

観測値 \mathbf{y} の推定値は式(6.37)を式(6.22)に代入し、式(6.36)の関係を考慮すると、次のように求まる。

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \mathbf{F}_y (\mathbf{a} - \mathbf{g}) + \mathbf{C} \mathbf{F}_u \mathbf{B} \\
&= \mathbf{f}_y^T (\mathbf{a} - \mathbf{g}) + \mathbf{f}_u^T \mathbf{B} \quad (6.40)
\end{aligned}$$

観測値 $\mathbf{y}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ を与えることにより、式(6.34), (6.35)より \mathbf{f}_y , \mathbf{f}_u を求めることができる。そこで、その \mathbf{f}_y , \mathbf{f}_u の値を式(6.40)に代入することにより、 $\hat{\mathbf{y}}$ が求まる。

そこで、観測値 \mathbf{y} とその推定値 $\hat{\mathbf{y}}$ (式(6.40))との誤差 $e(j)$ が $j \rightarrow \infty$ で $e(j) \rightarrow 0$ となるように、パラメータ \mathbf{a} , \mathbf{b} を同定する。そして、その結果を用いて、状態変数の推定値 $\tilde{\mathbf{x}}$ は次式で与えられる。

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{R}_y (\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{g}) + \mathbf{R}_u \hat{\mathbf{b}} \quad (6.41)$$

ここに、 \mathbf{R}_y , \mathbf{R}_u は \mathbf{f}_y , \mathbf{f}_u を用いて次式で与えられる。

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{G}_o \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{G}_o^{k-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i^T \\ \mathbf{f}_i^T \mathbf{G}_o \\ \vdots \\ \mathbf{f}_i^T \mathbf{G}_o^{k-1} \end{bmatrix} \quad (6.42)$$

($i = y, u$)

以上のアルゴリズムにより、観測データを用いて、パラメータと状態変数の値を同定することができる。

6.5.3 提案する適応観測器

(1) 状態推定

ここではKreisselmeier型適応観測器をベースとして、二次圧密沈下を考慮できる適応

観測器を定式化する。まず、システムの状態方程式を式(6.19), (6.20)のように定義する。つまり、次式である。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_{j-1} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \frac{F}{j\Delta + t_o} \end{bmatrix} [u]_{j-1} \quad (6.43)$$

$$Y(j) = \mathbf{C} \mathbf{X}(j) \quad (6.44)$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 1]$$

これは、Kreisselmeier型適応観測器の式(6.21), (6.22)の状態ベクトル \mathbf{x} に二次圧密沈下成分(式(6.43)の X_3)を追加し、それを離散化したものに相当する。次にKreisselmeier型適応観測器における行列 \mathbf{g} に関して、 $g_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k$)とする。これらのことにより、式(6.41), (6.42)に対応する \mathbf{R}_y , \mathbf{R}_u , \mathbf{a} , \mathbf{b} を次のように定義すれば、

Kreisselmeier型適応観測器と等価となる。

$$\mathbf{R}_y(j) = \begin{bmatrix} X_1(j-1) & X_1(j-2) & 0 \\ 0 & X_1(j-1) & 0 \\ 0 & 0 & X_3(j-1) \end{bmatrix} \quad (6.45)$$

$$\mathbf{R}_u(j) = \begin{bmatrix} u(j-1) & u(j-2) & 0 \\ 0 & u(j-1) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u(j-1)}{j\Delta + t_o} \end{bmatrix} \quad (6.46)$$

$$\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ 1]^T \quad (6.47)$$

$$\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ F]^T \quad (6.48)$$

これから、式(6.41)に対応する $\tilde{\mathbf{x}}(j)$ は次式で与えられる。

$$\tilde{\mathbf{x}}(j) = \mathbf{R}_y(j) \mathbf{a} + \mathbf{R}_u(j) \mathbf{b} \quad (6.49)$$

また、式(6.34) ~ (6.35)に対応する状態変数フィルタ $\mathbf{f}_y(j)$, $\mathbf{f}_u(j)$ を次式で定義する。

$$\mathbf{f}_y(j) = [X_1(j-1) \ X_1(j-2) \ X_3(j-1)]^T \quad (6.50)$$

$$\mathbf{f}_u(j) = [u(j-1) \ u(j-2) \ \frac{u(j-1)}{j\Delta + t_o}]^T \quad (6.51)$$

これから式(6.40)に対応する $\hat{Y}(j)$ は次式で与えられる。

$$\hat{Y}(j) = [f_y^T(j), f_u^T(j)] [a^T, b^T]^T \quad (6.52)$$

ただし、式(6.45), (6.50)中の $X_1(j-1), X_1(j-2)$ は次式より求める。

$$X_1(j-1) = Y(j-1) - X_3(j-1) \quad (6.53)$$

$$X_1(j-2) = Y(j-2) - X_3(j-2) \quad (6.54)$$

(2) パラメータの同定

同定誤差は次式で与えられる。

$$\varepsilon(j) = \hat{Y}(j) - Y(j) \quad (6.55)$$

そこで、 $t \rightarrow \infty$ で $\varepsilon(j) \rightarrow 0$ となるように、パラメータ a, b を調整することにより、適応制御の目的が達成できる。このような場合、パラメータの調整法(パラメータ調整則)として、Landau⁸⁾により超安定理論を用いて導かれた次式を用いることができる。

$$\theta(j) = \theta(j-1) - \Gamma(j-1) \zeta(j) \varepsilon(j) \quad (6.56)$$

$$\Gamma(j) = \frac{1}{\lambda_1} [\Gamma(j-1) - \frac{\lambda_2 \Gamma(j-1) \zeta(j) \zeta^T(j) \Gamma(j-1)}{\lambda_1 + \lambda_2 \zeta^T(j) \Gamma(j-1) \zeta(j)}] \quad (6.57)$$

$$\theta^T(j) = [a^T, b^T], \quad \zeta^T(j) = [f_y^T, f_u^T] \quad (6.58)$$

ただし、 $0 < \lambda_1 \leq 1, 0 \leq \lambda_2 < 2, \Gamma(0) > 0$ である。 $\lambda_1, \lambda_2, \Gamma(0)$ は任意の定数であるが、収束の速さに影響し、これらの値を $\lambda_1 = 0.90 \sim 0.99, \lambda_2 = 1.0, \Gamma(0) = sI$ (I は単位行列), $s = 10^2 \sim 10^3$ の範囲で選ぶのが適している。式(6.56)の調整則の実行に当たっては、1ステップ前の $\hat{\theta}(j-1)$ を用いて、次ステップの $\hat{\varepsilon}(j)$ を推定する必要がある。このような場合の $\hat{\varepsilon}(j)$ の推定式として、次式が適している⁹⁾(この式は式(6.52), (6.56)を式(6.55)に代入して、変形することにより、容易に得られる)。

$$\hat{\varepsilon}(j) = \frac{\hat{\theta}^T(j-1) \zeta(j) - Y(j)}{1 + \zeta^T(j) \Gamma(j-1) \zeta(j)} \quad (6.59)$$

そこで、式(6.59)により推定した $\hat{\varepsilon}(j)$ を式(6.56)に代入することにより、次ステップのパラメータ $\hat{\theta}(j)$ を同定することができる。パラメータの調整は原理的には以上のようなものであるが、二次圧密検出前と二次圧密検出後では調整則が若干異なる。また、それ

らの遷移過程においては二次圧密の発生を判定し、調整則を切り替える必要がある。そこで、二次圧密検出前のパラメータ調整用の $\zeta(j)$ に相当するものとして、 $\zeta_p(j)$ を次のように定義する。

$$\zeta_p(j) = [Y(j-1) \ Y(j-2) \ 0 \ u(j-1) \ u(j-2) \ 0]^T \quad (6.60)$$

また、二次圧密検出後のパラメータの調整用の $\zeta_s(j)$ に相当するものとして、 $\zeta_s(j)$ を次のように定義する。

$$\zeta_s(j) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{u(j-1)}{j \Delta + t_0}]^T \quad (6.61)$$

したがって、それらを用いて、各段階のパラメータの調整は次のように行う。

二次圧密検出前

$$\hat{\varepsilon}_p(j) = \frac{\hat{\theta}^T(j-1) \zeta(j) - Y(j)}{1 + \zeta^T(j) \Gamma(j-1) \zeta_p(j)} \quad (6.62)$$

$$\hat{\theta}(j) = \hat{\theta}(j-1) - \Gamma(j-1) \zeta_p(j) \hat{\varepsilon}_p(j) \quad (6.63)$$

二次圧密検出後

$$\hat{\varepsilon}_s(j) = \frac{\hat{\theta}^T(j-1) \zeta(j) - Y(j)}{1 + \zeta^T(j) \Gamma(j-1) \zeta_s(j)} \quad (6.64)$$

$$\hat{\theta}(j) = \hat{\theta}(j-1) - \Gamma(j-1) \zeta_s(j) \hat{\varepsilon}_s(j) \quad (6.65)$$

ただし、式(6.57)では二次圧密検出前後共に $\zeta(j)$ を用いてよい。

(3) 二次圧密発生の判定方法

真に精度の高いシステム同定が実現していれば、同定の結果による推定値と観測値の誤差の分散はガウス分布の定常確率過程に従い、その誤差は時間の変化に対して無相関となる。ところが、時間の経過とともに二次圧密がしだいに顕著になってくると、それまでの観測データの同定で得られたパラメータを使い続けようとする、推定値と観測値の誤差は時間とともにしだいに大きくなっていく(すなわち、時間に対して無相関でなくなる)。このような相関の検定法としてダービン・ワトソン検定¹⁰⁾(Durbin -

Watson)を用いることができる。以下、この方法を応用した判定法について説明する。

各判定時点(j)において、同定によって得られたパラメータを用いて、その後のm点の推定値を求める。そして、それらと観測値との誤差e(i), (i=j, j+1, ..., j+m-1)を求め、次式により判定を行う。

$$d(j) = \frac{\sum_{i=j+1}^{j+m-1} \{e(i) - e(i-1)\}^2}{\sum_{i=j}^{j+m-1} e(i)^2} \quad (6.66)$$

$$w_1 = d_L - d(j) \quad (6.67)$$

ここで、d(j)はダービン・ワトソン比、d_L, d_U(後述)はそれぞれd(j)の信頼区間の下限値、上限値である。なお、データの個数m、説明変数の数(この場合は4)、信頼限界に関して数表が作成されている¹⁰⁾。データ数mは試行の結果や実用上の便宜を考慮すると、m=15が適していると思われる。

二次圧密発生の判定

w₁ < 0の時 : 危険率αでは二次圧密の発生を確認できない。
→ 未発生として処理する。

w₁ ≥ 0の時 : 危険率αで二次圧密の発生確認

ここで、危険率αの値として、ダービン・ワトソン検定では発案者により、α=5%, 2.5%, 1%の値が示されている¹⁰⁾が、最適値については示されていない。実際に適用した結果ではこれにより大きな差は見られないので、後述の適用例では中央値をとり、α=2.5%を採用している。また、以上の方法では、計算開始付近(たとえば、図-6.17のj=3~9)では収束解が得られていないためにダービン・ワトソン比が小さな値となっている。したがって、この部分では二次圧密の判定を行うのは好ましくない。そこで、このような部分を判定対象から除くために、次の判定を行い、解の収束を確認する。そして、収束が確認された後、二次圧密の判定を開始する。

解の収束判定

$$w_2 = d(j) - d_U \quad (6.68)$$

w₂ < 0の時 : 危険率αでは解の収束を確認できない。→未収束として処理する。

w₂ ≥ 0の時 : 危険率αで解の収束確認。

ただし、式(6.66)のd(j)を求めるe(i)として、i=j~(j+m-1)の範囲のデータを利用したが、式(6.68)ではその目的から考えて、d(j)を求めるe(i)として、i=(j-m/2)~(j+m/2-1)の範囲のデータを利用すべきである。

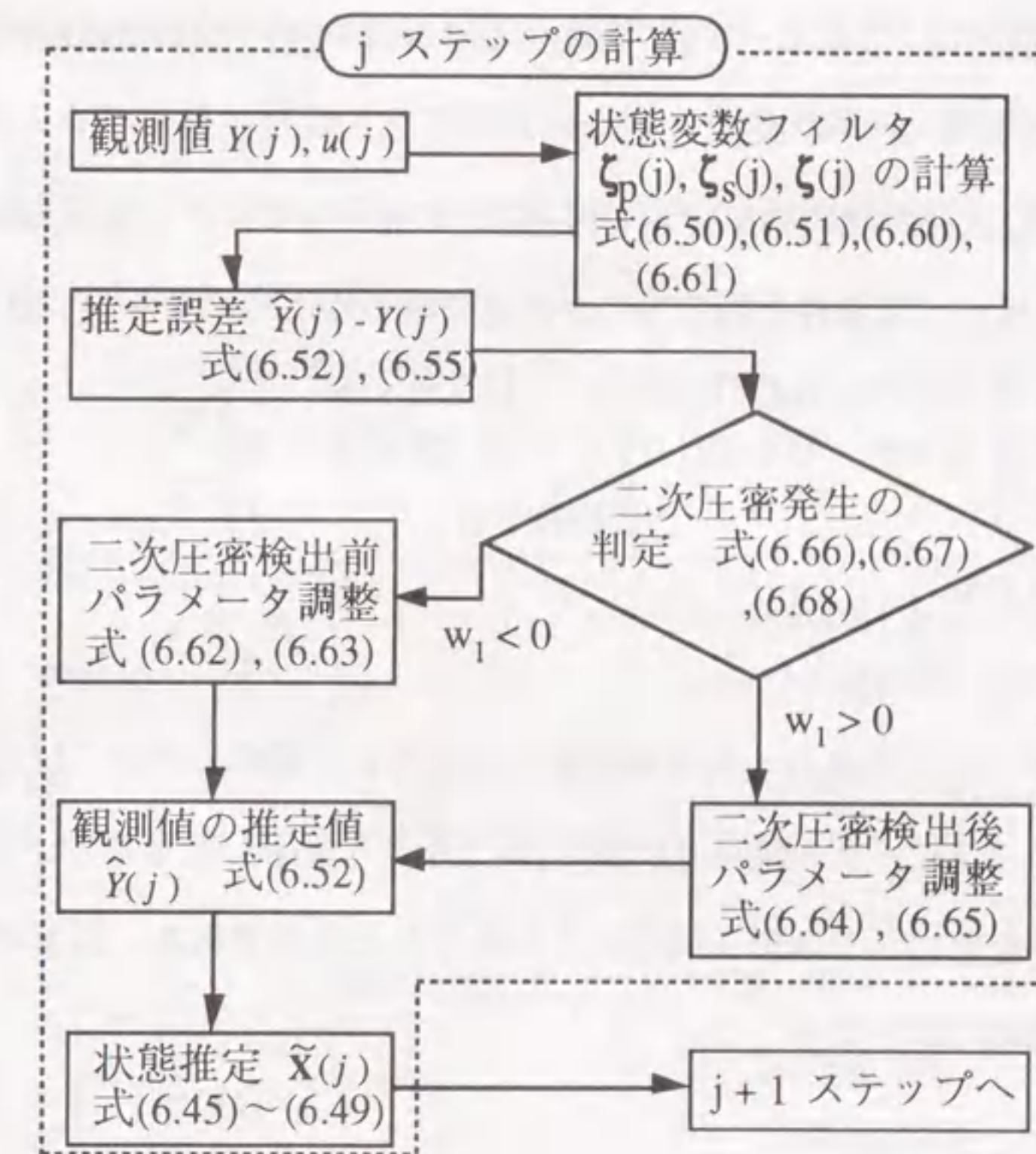


図-6.9 適応観測器のフローチャート

図-6.9は以上の適応観測器のフローチャートである。なお、以上は沈下状態方程式の次数k=2の場合について、説明したが、k>2の場合についても同様である。

(4) 将来沈下の予測

沈下観測中の現場においては、以上の適応観測器により同定したパラメータや状態推定値を用いて、その後の圧密沈下を予測することができる。すなわち、式(6.43)、(6.44)に適応観測器により同定したパラメータの値と状態推定値を代入することにより、以後、次々と将来の沈下を求めることができる。

6.6 解析法適用例

以下で、3つの観測例(Case 1~3)に提案する解析法を適用しその適用性を調べる。

6.6.1 疑似観測データへの適用 (Case 1)

次のような沈下の状態方程式のモデル(式(6.17)に相当)により、沈下観測値を発生させ、その同定を行い、与条件と同じものが同定できるかどうかチェックする。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1389 & 0.4937 & 0 \\ -0.1546 & -0.4706 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3.754 \times 10^{-3} & 0 \\ 1.319 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (6.69)$$

$$y = Cx \quad (6.70)$$

$$C = [1 \ 0 \ 1]$$

ここで、 x_1, x_2 は一次圧密成分の沈下状態量、 x_3 は二次圧密成分の沈下状態量である。また、式(6.69)のパラメータの値は2.9節の表-2.6より引用したもので、実際の現場の沈下観測データを用いたシステム同定により得られたものである。以下の計算条件も同現場の条件を参考に設定する。

計算条件

- 1) 観測誤差の分散を $V_0 = 0.015 \text{ cm}^2$ に設定し、正規乱数により観測誤差を与える。
- 2) 盛土荷重 u_1 は高さ4.2 mの盛土を想定し、 $u_1 = 4.2$ とする。
- 3) 時間の1ステップを $\Delta = 3.5$ 日として、 $j = 1$ から90まで計算する。(つまり、 $3.5 \times 90 = 315$ 日分計算)

- 4) 二次圧密に関する荷重 u_2 は $j = 30$ (つまり、105日) 時点以後与える。(そして、 $j = 1 \sim 29$ では、 $u_2 = 0$ 、 $j = 30 \sim 90$ では $u_2 = 10/j/\Delta$) とする。

図-6.10の上側の図は以上の計算条件の元で式(6.69)、(6.70)により発生させた沈下量の観測データであり、図中、点線はその内の一次圧密成分を表わしており、残りが二次圧密成分である。それに対して、図-6.10の下側の図は提案する適応観測器を用いた同定によって得られたものであるが、両者はほとんど同じ値となっており、良く推定できている。また、図-6.11はその時の式(6.43)のパラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 の同定結果である。同様に、図-6.12は二次圧密の判定に用いたダービン・ワトソン比と式(6.43)のパラメータ F の同定結果を示している。なお、図-6.12によると、 F の同定値がばらついているが、これは与条件の観測ノイズを含んでいるためである。観測ノイズは通常、時間に無相関な正規分布に従い、その平均値は0である。したがって、 F の推定値はこれらばらついた値の平均値として得られる。

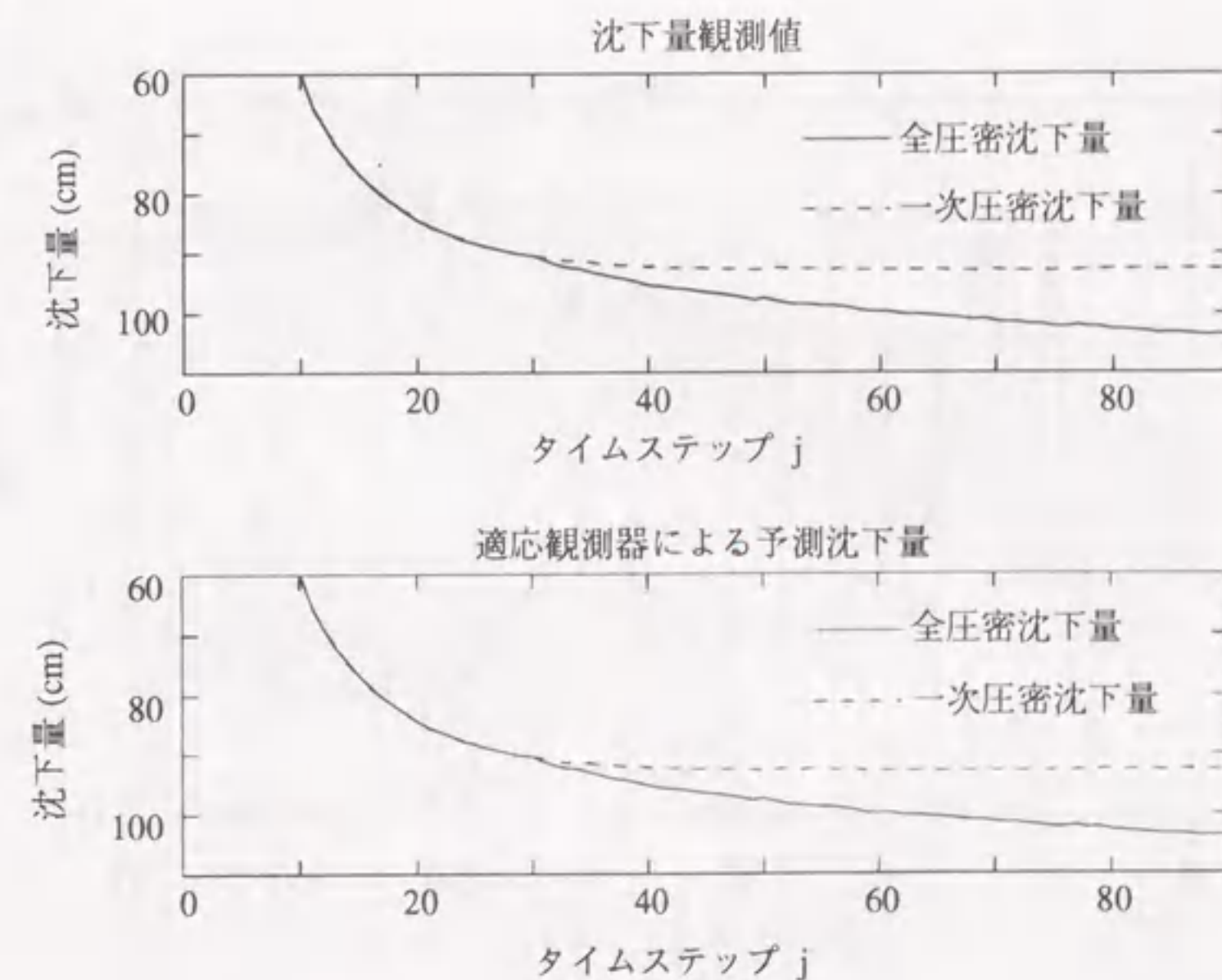


図-6.10 沈下状態量の推定値と観測値 (Case 1)

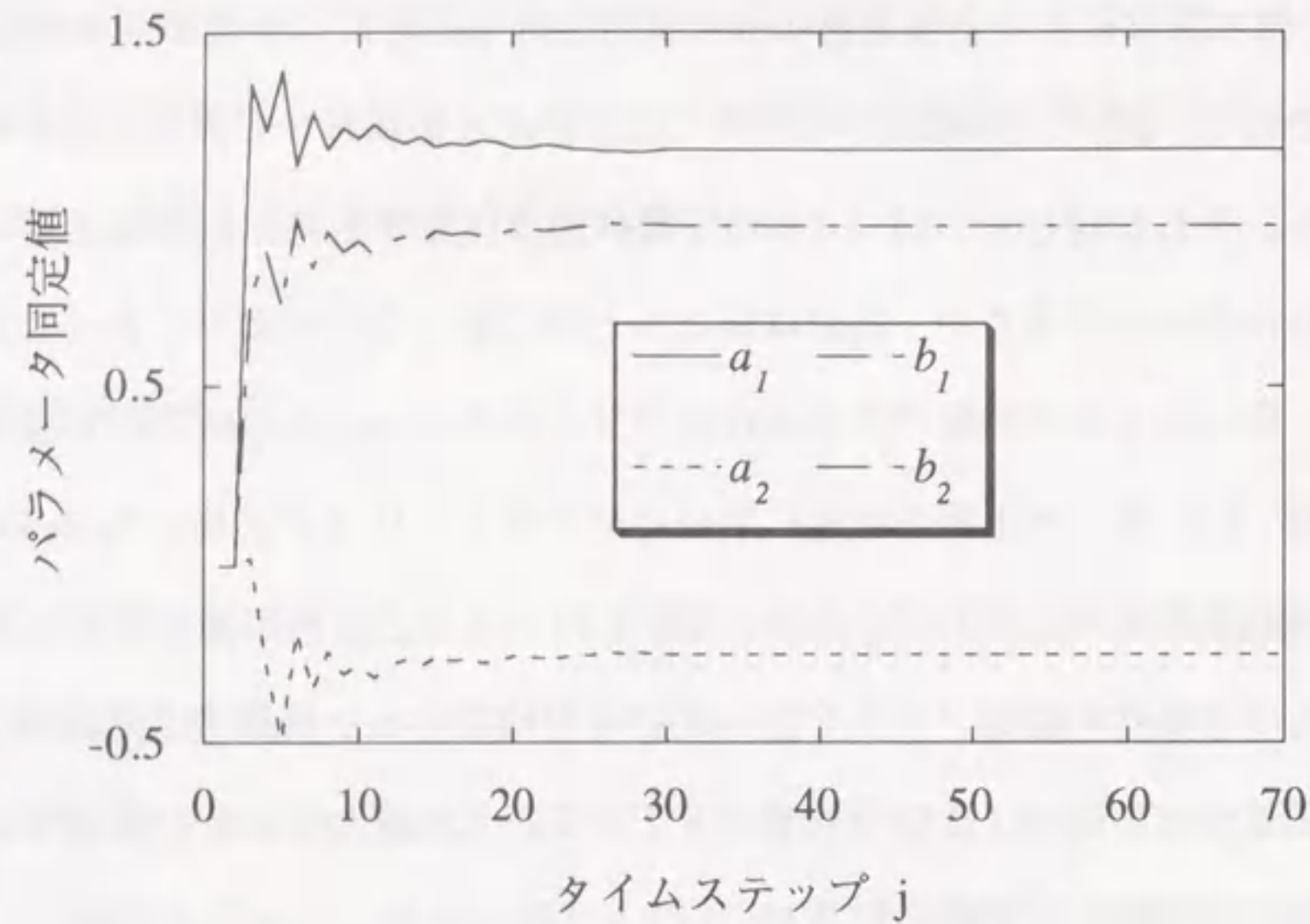


図-6.11 パラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 の同定結果 (Case 1)

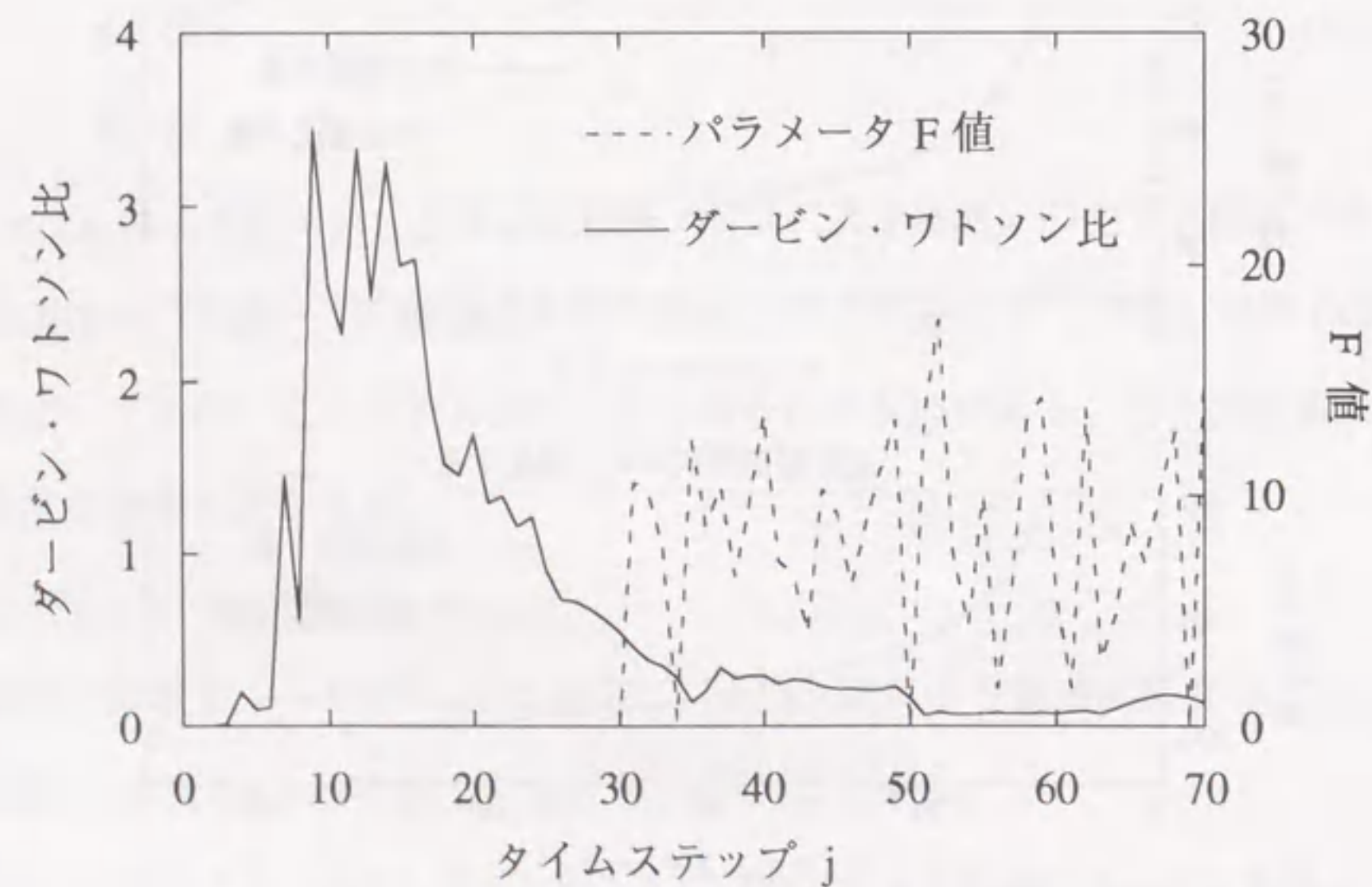


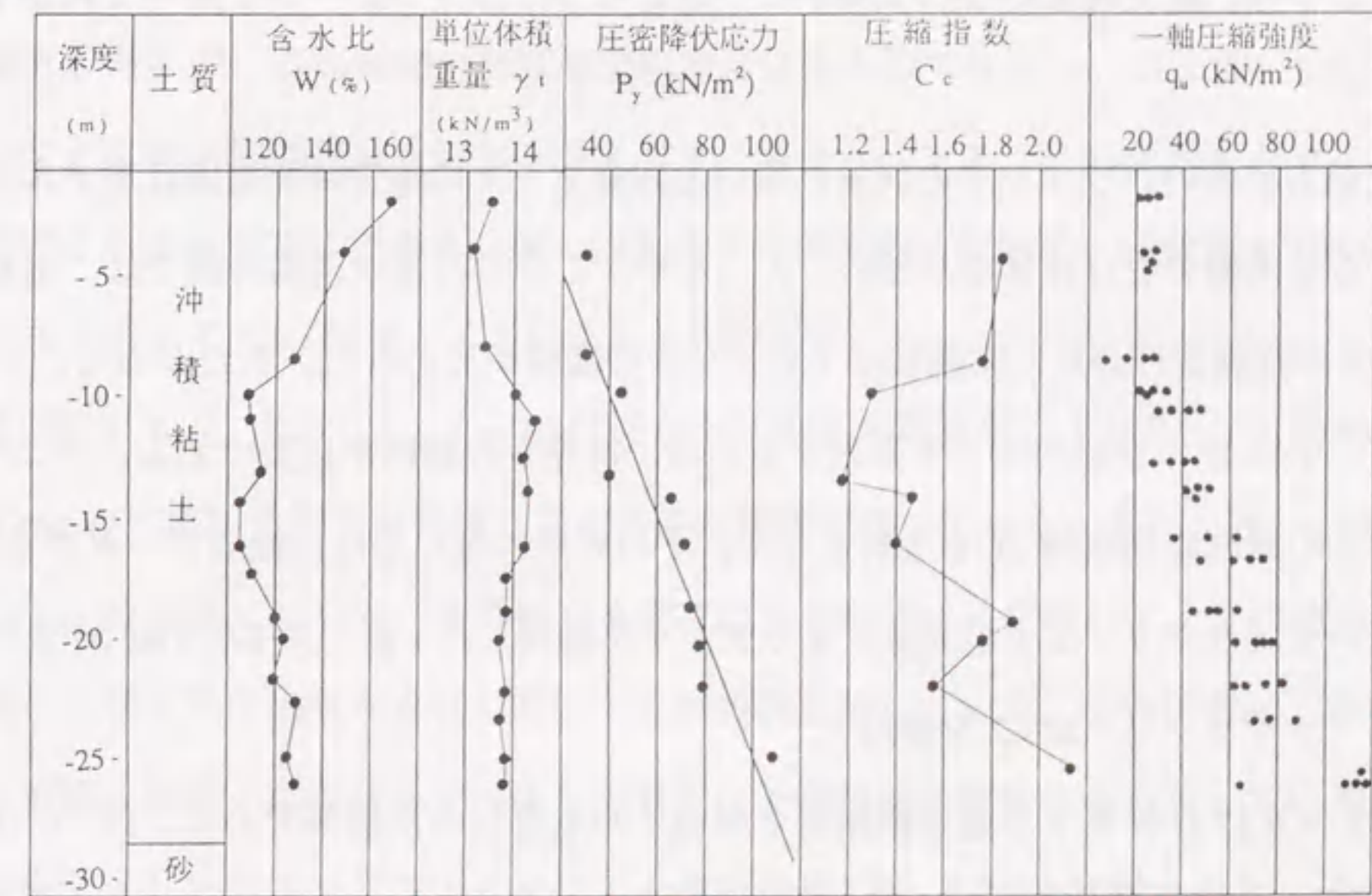
図-6.12 ダービンワトソン比とパラメータ F の同定結果 (Case 1)

6.6.2 現場観測例への適用 (Case 2)

現場観測例について、提案した方法を適用し、その適用性について検討する。ここで、取り上げる実測例は千葉県手賀沼の干拓地の造成現場のものである。当地区の地盤は成層状態であり、地層構成および土質は図-6.13に示すとおりである。

本現場では盛土荷重による圧密沈下を早期に終了させるため、地盤改良が施工された。工事では72m×54mの広さで高さ3.5mの盛土が施工された。工事に先立ってサンドマット(厚さ1.5m)が敷かれ、その上から袋詰めサンドドレーン($\phi 120$, 口1.2m正方形配置, $l = 24$ m)が施工された。図-6.14は盛土の荷重の推移と盛土中央部に設置された沈下板による沈下の観測結果(沈下曲線は盛土前の地表面位置の沈下量)である。

本現場は盛土範囲が比較広く、地層もほぼ水平であり、解析に用いた沈下観測データの観測位置は盛土端部からかなり離れた位置で行なわれたので、沈下観測データには含まれる局所的な荷重による側方変位の影響は比較的小さいと考えられる(なお、この影響とそれに対する本論文で提案している沈下予測法の適用性については2.5.3で検討している。)



圧密降伏応力の項の直線は $P = 4.0 h$ (kN/m^2) を表す。

図-6.13 地層構成および土質

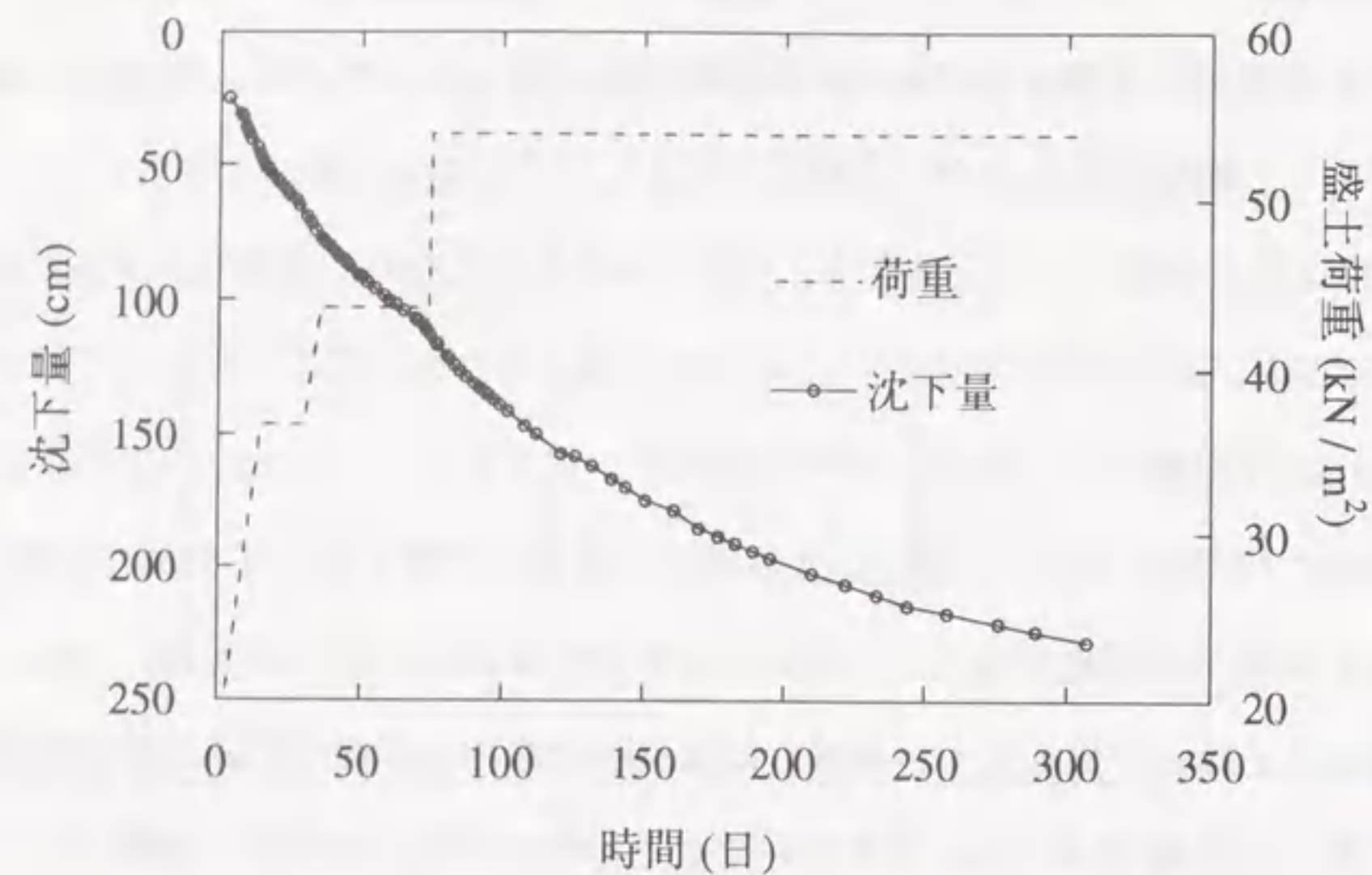


図 - 6.14 計測全期間の盛土荷重と沈下量 (Case 2)

ここでは盛土荷重の影響を除いて、二次圧密の影響だけを考察したいので、図 - 6.14 のデータのうち、盛土荷重が 53.9 kN/m^2 で一定となった部分のデータを用いて同定を行う。

沈下状態方程式のパラメータの同定に用いる観測データの測定時間間隔はモデルの性質上から等間隔でなければならない。ところが、ここでの適用現場の例では、当初は 1 日ピッチの観測が行われ、末期には 7 日ピッチの観測が行われた。したがって、このようなデータに沈下状態方程式を適用するため、何等かの補間が必要である。ここでは、解析上の観測時間間隔 Δ を 3 日として、その周期に当たる日に観測データがない部分についてはラグランジェ補間法によりデータを補間した (富士通 FACOM 科学サブルーチン・ライブラリー SSL2 を使用)。

図 - 6.15 ~ 6.17 は提案する適応観測器を用いて同定を行った結果である。図 - 6.15 は同定の結果得られた沈下量とその内の一次圧密成分を示している。また、両者の差が二次圧密成分に相当するものである。

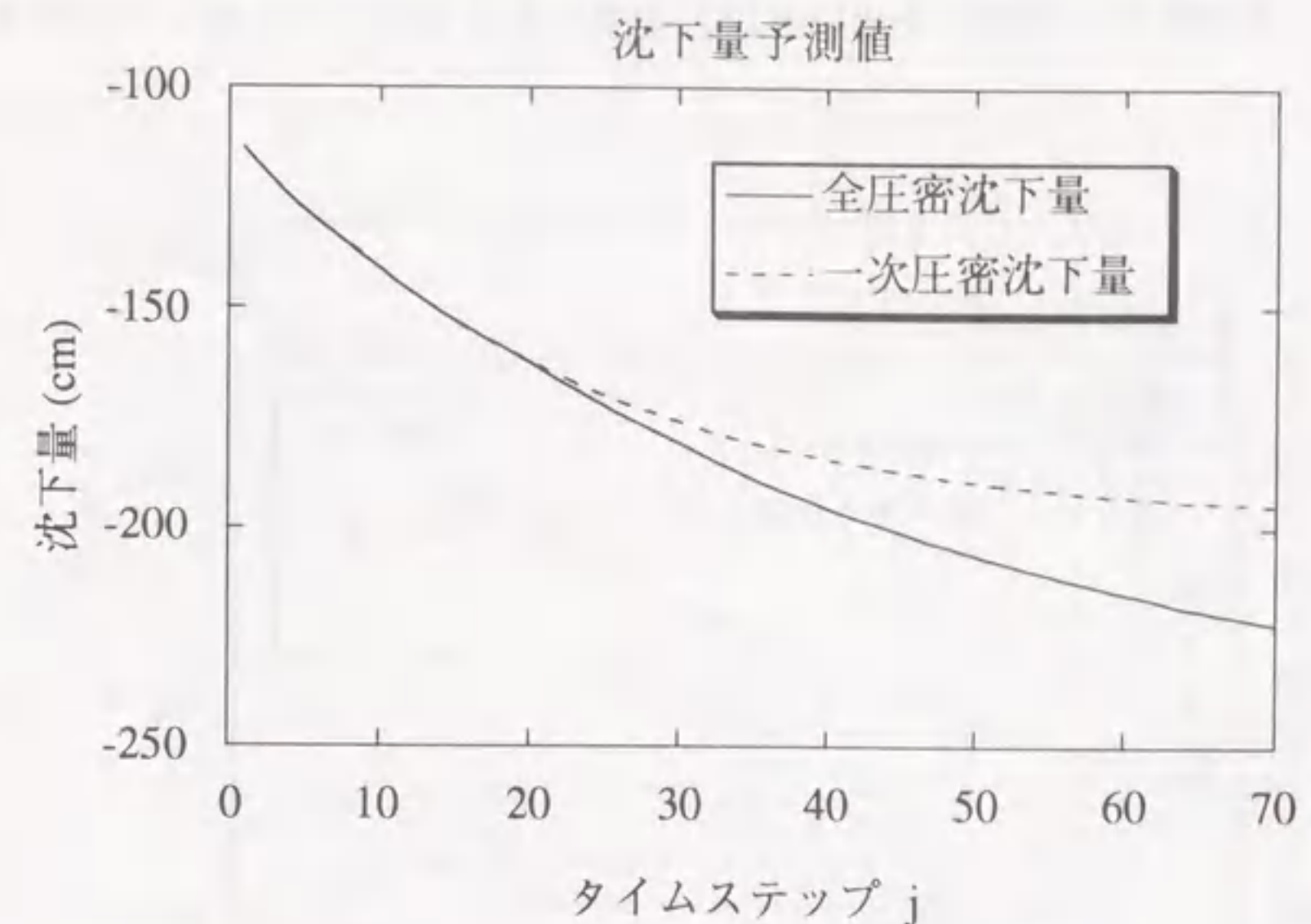


図 - 6.15 沈下状態量の同定結果 (Case 2)

図 - 6.16 は式 (6.32) のパラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 の同定結果である。図 - 6.17 は二次圧密の発生の判定に用いたダービン・ワトソン比と式 (6.43) のパラメータ F の同定結果を示している。図 - 6.17 によると、 F の同定値がほぼ一定になった後、若干右上がりの傾向があるが、これは同定計算の未収束によるものではない。つまり、6.5.1 で前述したように適応観測器はカルマンフィルタと異なり、システムの変動をパラメータ値の変化でとらえる同定法である。図 - 6.17 の F 値の変動はシステムの変動 (平均値の変動、システムノイズ)、観測ノイズによるものである。

図 - 6.15, 6.16 によると、 $j = 20$ 付近から二次圧密が発生しており、 $j = 70$ 時点で 27.5 cm の二次圧密沈下が累積している推定結果となっている。また、図 - 6.18 は観測中の $j = 30$ 時点において、その時点までに得られたデータを用いて、その後の沈下を予測した場合の予測値とそれに対応する観測値を示している。二次圧密沈下を考慮した沈下予測の結果、両者はよく一致しており、予測誤差は相当小さくなっている。この結果を先に示したカルマンフィルタによる解析結果 (図 - 6.7) と比較すると、その差がよくわかる。したがって、二次圧密現象を Voigt モデルで表わすタイプの沈下予測法では

とらえられない予測誤差を提案法を用いれば、考慮できるようになったことがわかる。

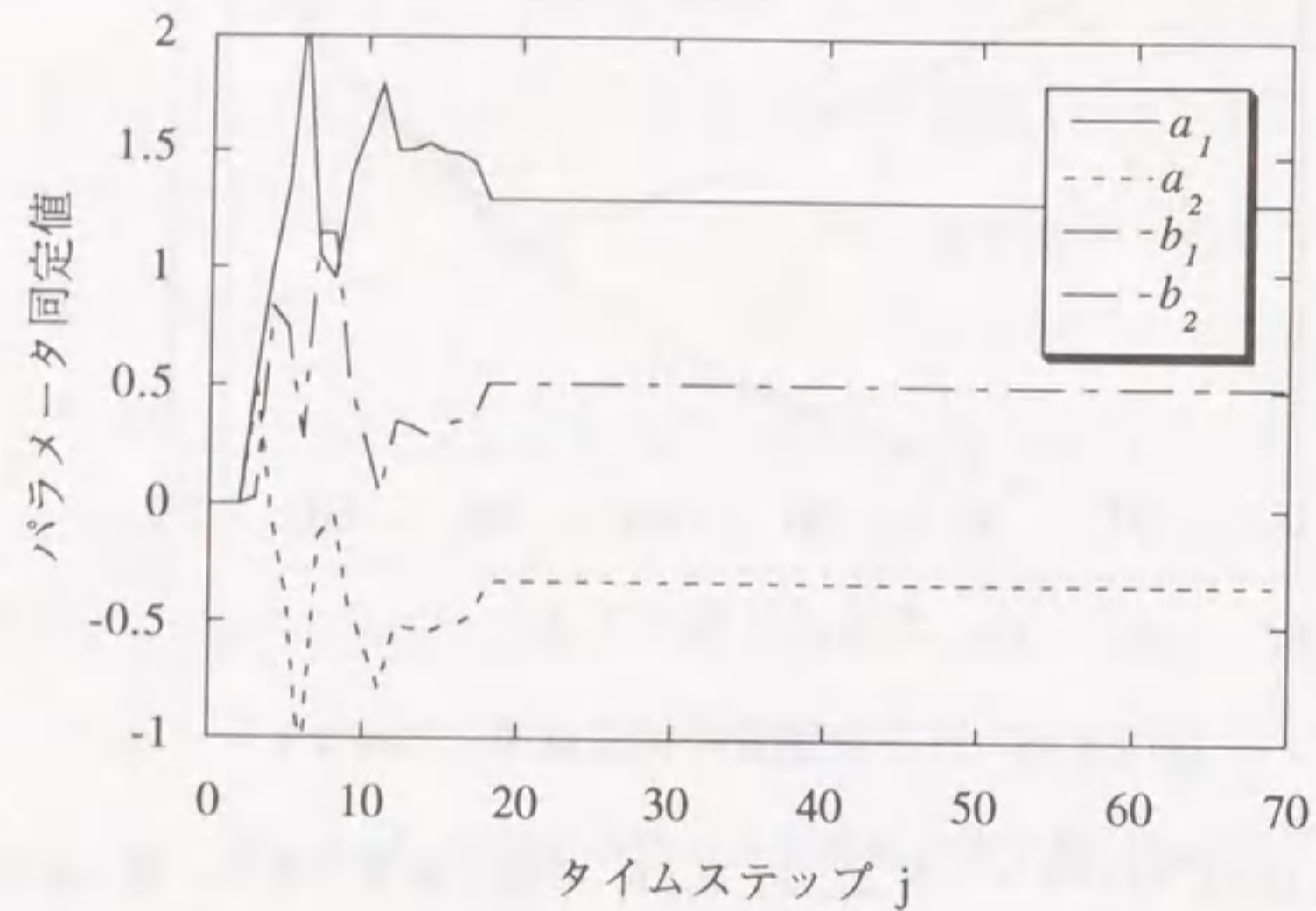


図 - 6.16 パラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 の同定結果 (Case 2)

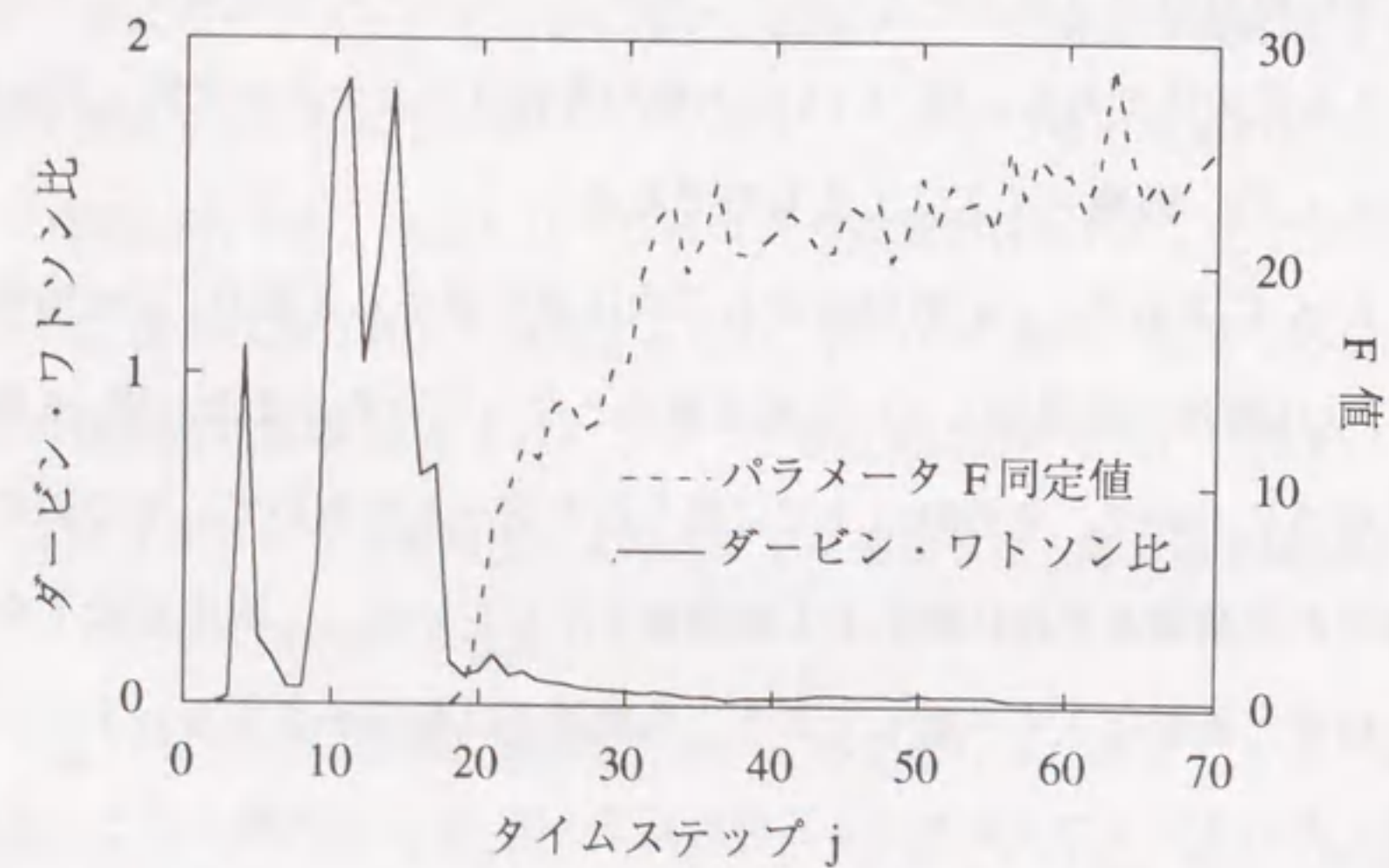


図 - 6.17 ダービン・ワトソン比とパラメータ F の同定結果 (Case 2)

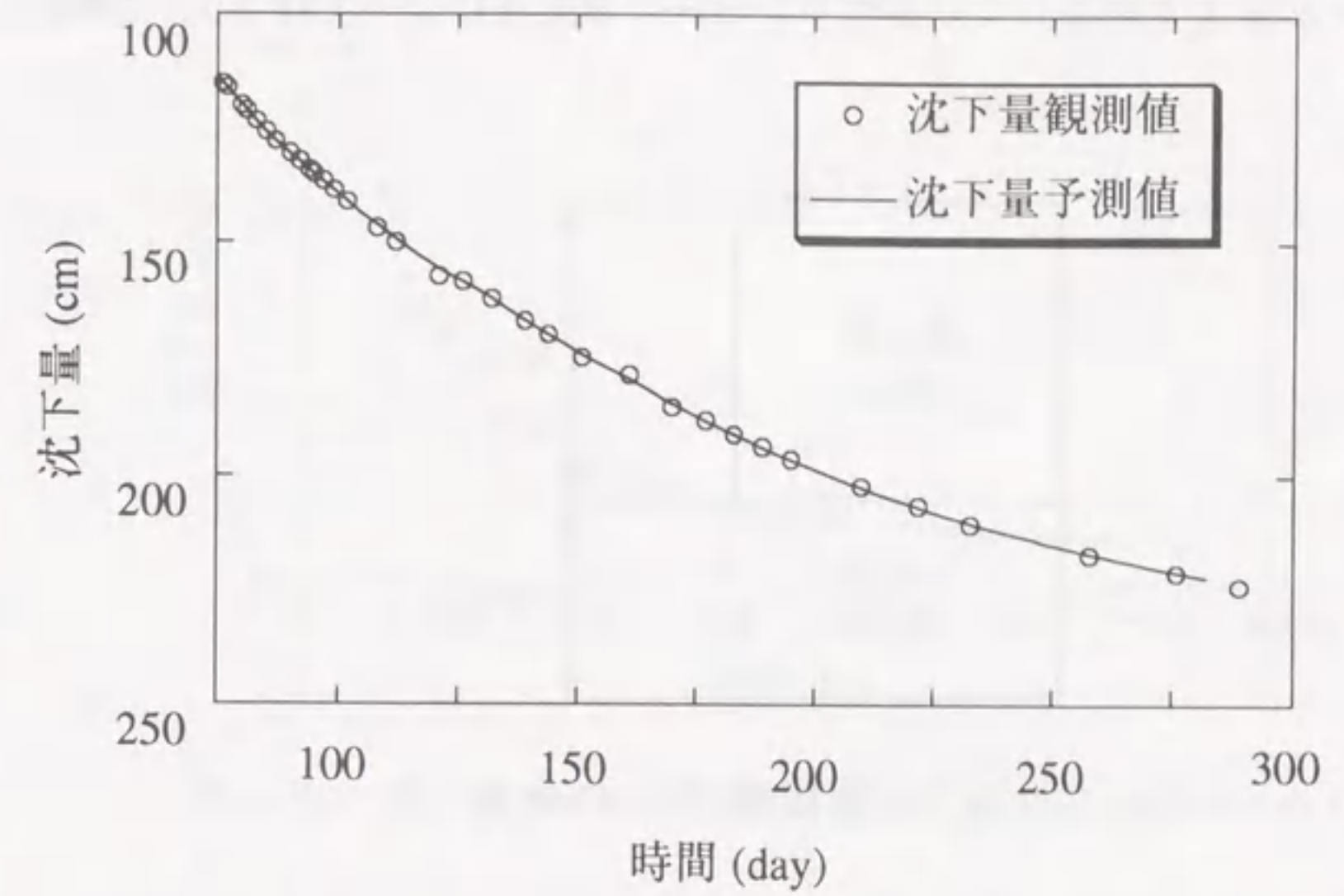


図 - 6.18 $j = 30$ 時点における沈下量予測値と観測値の比較 (Case 2)

6.6.3 現場観測例への適用 (Case 3)

本現場観測例は 5.5 節における解析においても用いたものである。したがって、観測データに関する説明は簡単に概要のみを述べる。現場は愛知県半田市衣浦埋立地の工場造成地である。当地区の地盤は正規圧密状態の飽和粘性土地盤が成層状態を成し、地層構成は図 - 6.19 に示すとおりである。約 $49,000 \text{ m}^2$ の広さで高さ平均 4.2 m の盛土が施工された。地盤が軟弱なため、盛土に先立って地盤改良工法として、袋詰めサンドドレーン ($\phi 120$, 口 1.15 m 正方形配置, $l = 14.5 \text{ m}$) が施工された。図 - 6.20 は盛土の放置期間中の沈下観測データである。本解析においては解析上の観測時間間隔 Δ を 4 日として、その周期に当たる日に観測データがない部分については Case 2 と同様の方法でデータ補間した。

本現場は盛土範囲が広く、地層もほぼ水平であり、解析に用いた沈下観測データの観

測位置は盛土端部からかなり離れた位置で行なわれたので、沈下観測データには含まれる局所的な荷重による側方変位の影響はかなり小さいと考えられる(なお、この影響とそれに対する本論文で提案している沈下予測法の適用性については2.5.3で検討している)。

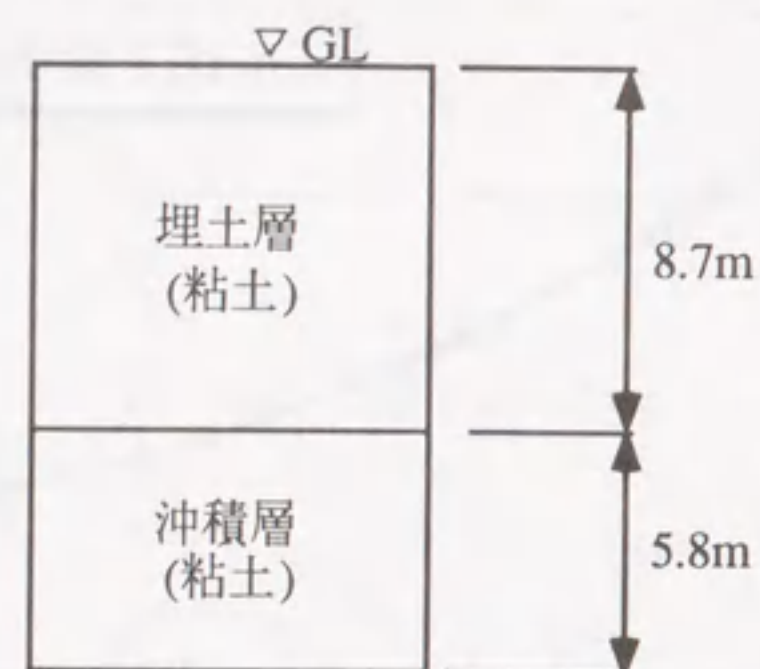


図-6.19 地層構成 (Case 3)

図-6.21～6.23は提案する適応観測器を用いて同定を行った結果である。図-6.21は同定の結果推定された沈下量とその内の一次圧密成分を示している。また、両者の差が二次圧密成分に相当するものである。図-6.22は式(6.43)のパラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 の同定結果である。図-6.23は二次圧密の発生の判定に用いたダービン・ワトソン比と式(6.43)のパラメータ F の同定結果を示している。この例の場合も提案法は有効に機能している様子が観察される。

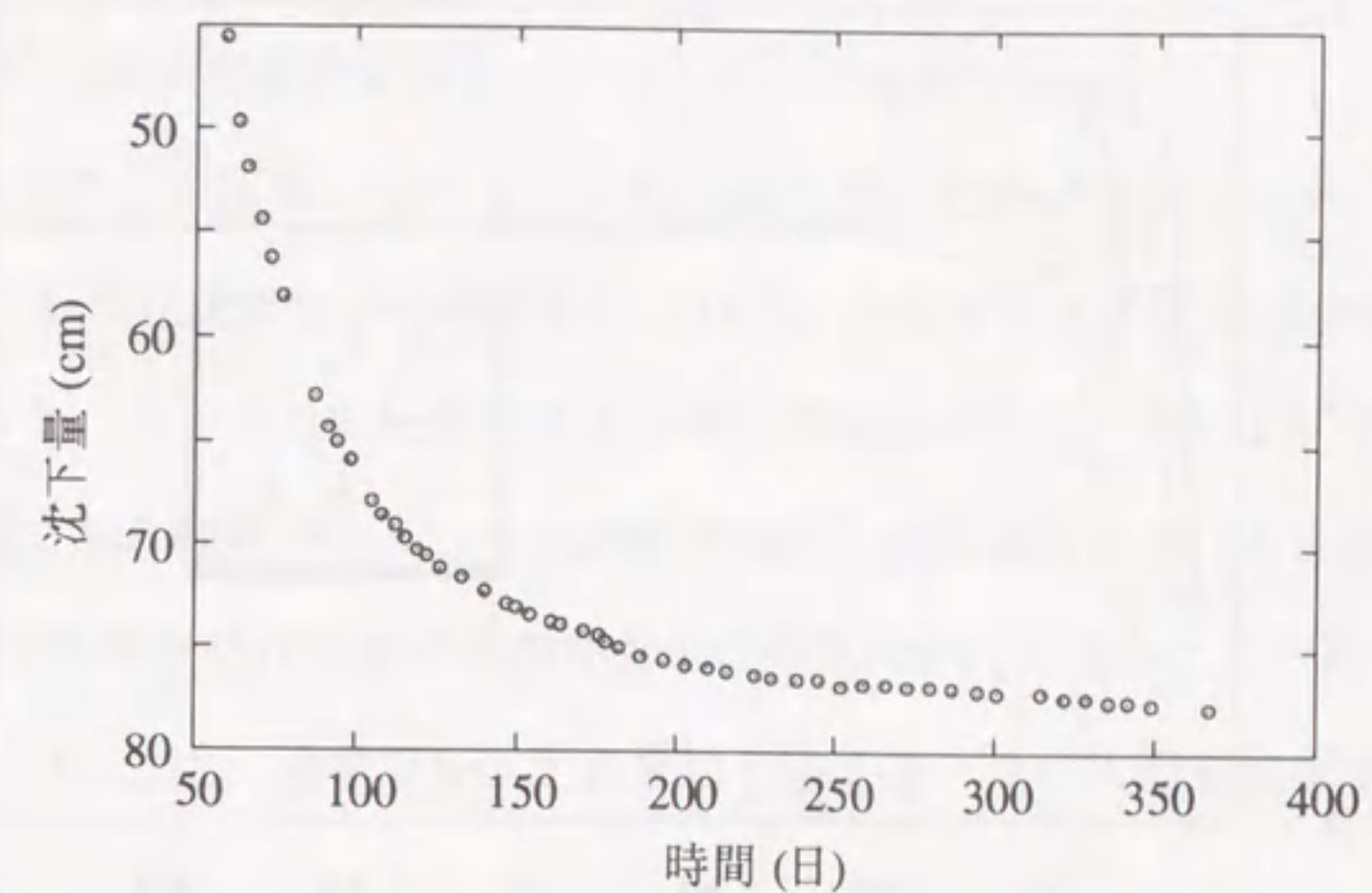


図-6.20 沈下観測データ (Case 3, 盛土高一定期間のデータ)

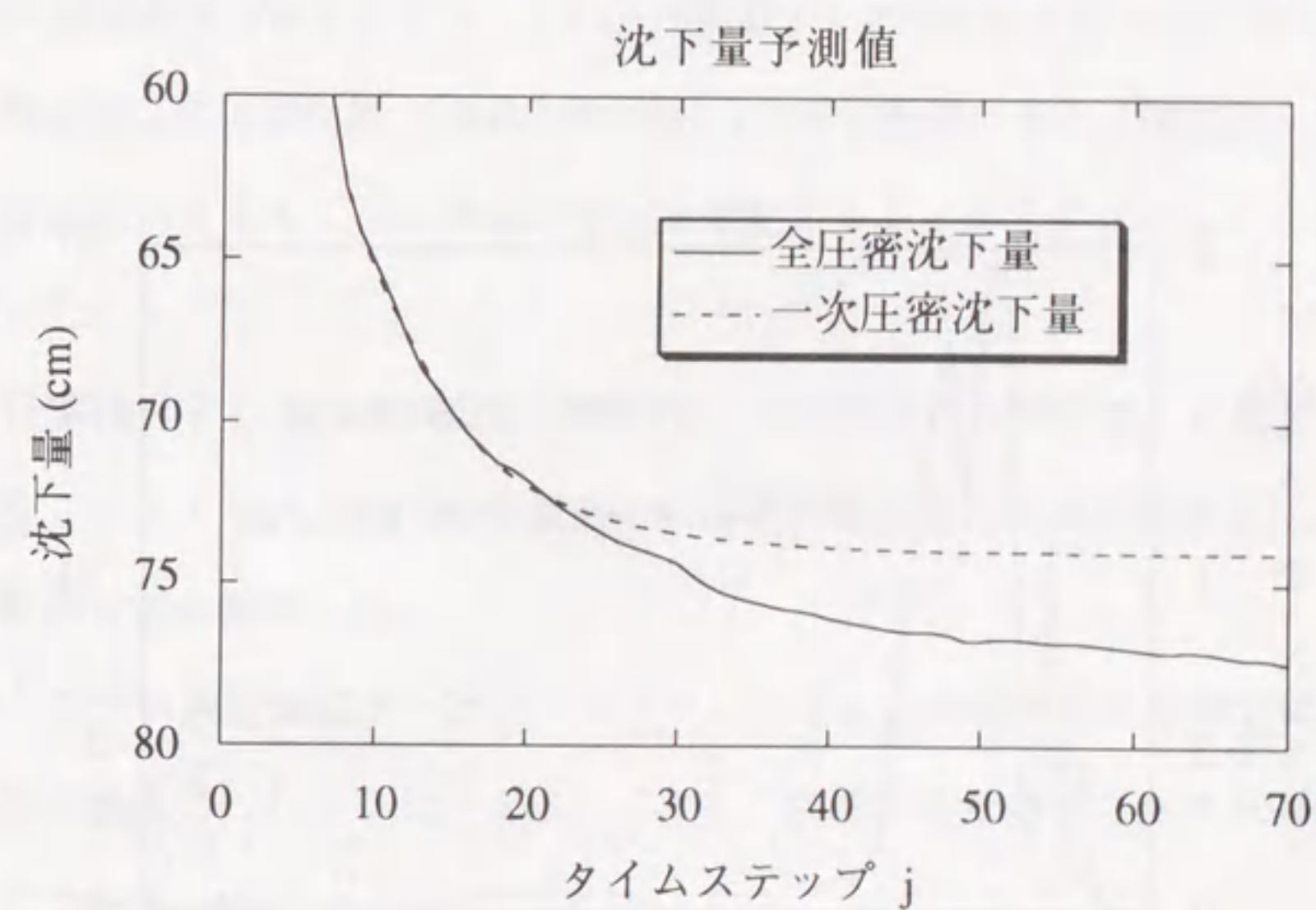


図-6.21 沈下状態量の同定結果 (Case 3)

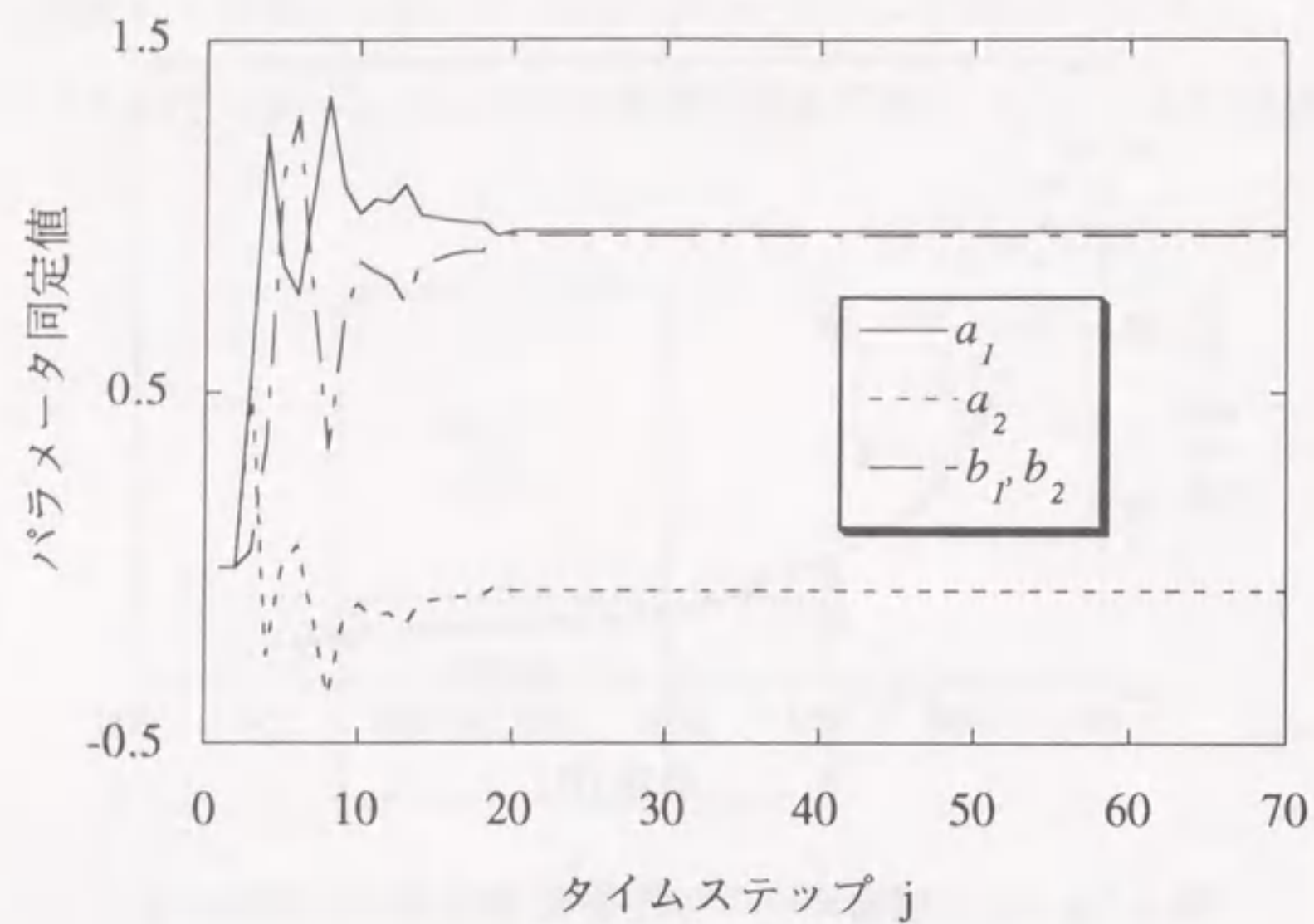


図-6.22 パラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 の同定結果 (Case 3)

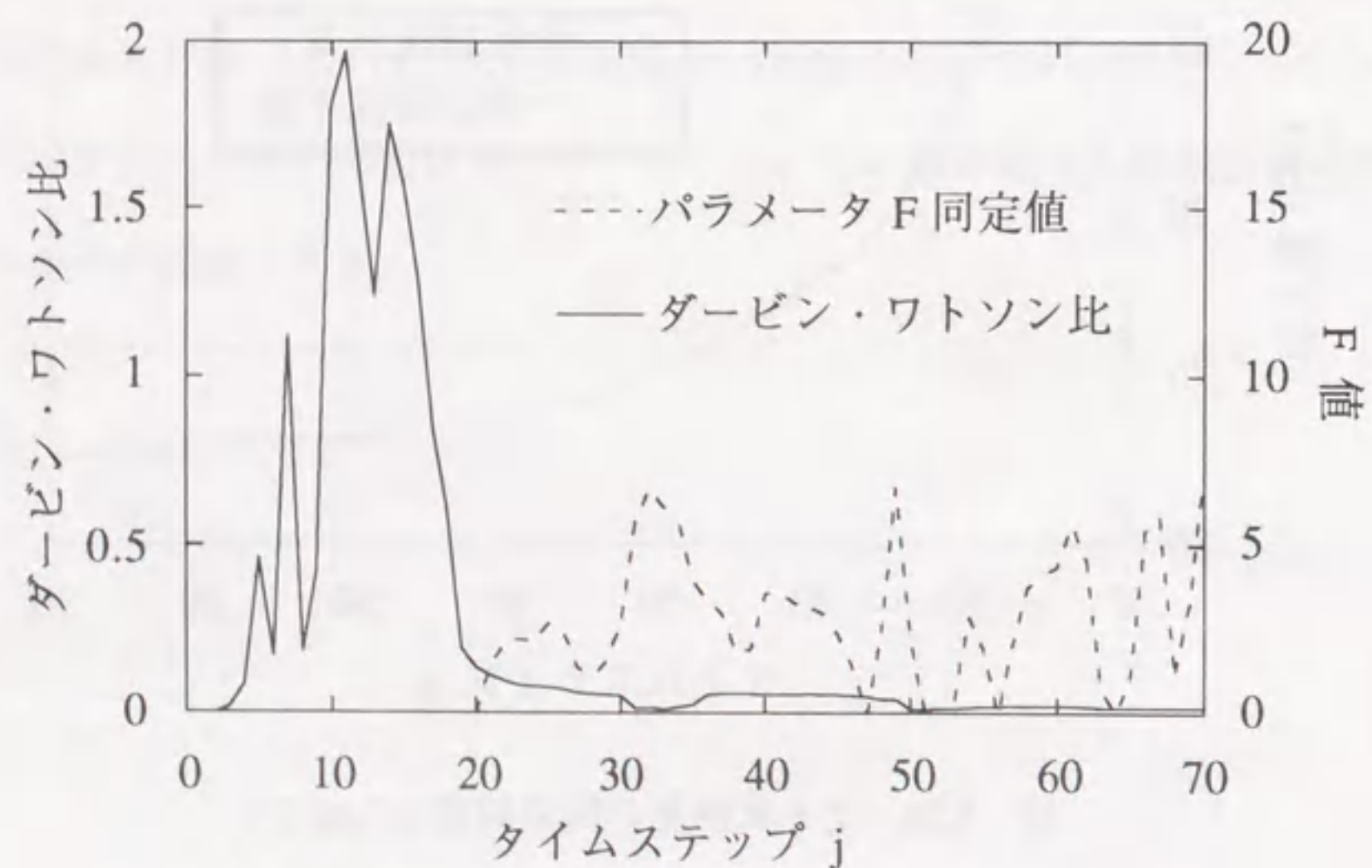


図-6.23 D.W.比とパラメータ F の同定結果 (Case 3)

6.7 結論

本章で得られた成果を要約すると、次のとおりである。

- 1) 一次圧密中の二次圧密について2つの仮説(タイプA, タイプB)をたて、前章ではタイプAの仮説に基づく検討を行ったが、本章ではタイプBの仮説に基づく検討を行った。タイプB(圧密当初は二次圧密成分が存在しないか、存在しても実用上無視できる程度であり、一次圧密が進行したある時点で二次圧密成分が卓越してくる)の場合には圧密の全期間を1つのシステムで扱うことには無理があり、全体を2つに分け、途中でシステムを切り換えるシステム同定法が適すると考えられる。
- 2) 過去のさまざまな事例から判断して、二次圧密の関数型は時間の対数に比例する「LOG型関数」で近似するのが適切であると考えられる。
- 3) 二次圧密現象をVoigtモデル(「EXP型関数」)で表わすタイプの従来の沈下予測法と現実の二次圧密現象(「LOG型関数」)とは、基礎とする「関数型」が異なり、その方法ではうまく二次圧密沈下成分を推定することができないことを実例を用いて示した。
- 4) 一次圧密成分と二次圧密成分を分離して、それぞれの「関数型」に基づいて定式化することにより、二次圧密を考慮した沈下状態方程式と適用観測器によるそのシステム同定法を提案した。
- 5) このシステム同定法はダービン・ワトソン検定を二次圧密発生の判定に用い、二次圧密が検出された後においては、一次・二次圧密を考慮したシステム同定を行なうものである。
- 6) 3つの観測例を用いて提案法の適用性を調べた結果、提案法によれば、二次圧密沈下成分の経時変化を定量的に推定できることが確認された。

参考文献 (第6章)

- 1) 及川洋, 宮川勇: 泥炭の圧密試験方法と結果の一整理方法, 有機質土の試験方法シンポジウム, 土質工学会, pp.85 - 88, 1979.
- 2) 吉国洋: 圧縮と圧密, 第28回土質工学研究発表会 配付資料, p.5, 1993.
- 3) 陶野郁雄: 堆積物の年代と土質力学的特性, 土と基礎, Vol.28, No.7, pp.21 - 28, 1980.
- 4) 稲田倍穂: 軟弱地盤における土質工学 - 調査から設計まで -, 鹿島出版会, pp.185, 昭和57年.
- 5) 星谷勝, 斉藤悦郎: 建設技術者のためのデータ解析, 鹿島出版会, p.129, 1991.
- 6) Asaoka, A: Observational Procedure of Settlement Prediction, Soils and Foundations, Vol. 18, No.4, pp. 87 - 101, 1978.
- 7) G, Kreisselmeier: Adaptive Observers with Exponential Rate of Convergence, IEEE, Trans, AC - 22 - 1, pp. 2 - 8, 1977.
- 8) I.D.Landau, R.Lozano: Unification of Discrete Time Model Reference Adaptive Control Design, Automatica, Vol.17, No.4, pp.593 - 611, 1981.
- 9) 嘉納秀明: 現代制御工学, 日刊工業新聞社, pp. 234, 1984.
- 10) 小林龍一: 相関・回帰分析法入門, 日科技連, 1982.
- 11) 脇田英治: 適応観測器による圧密沈下予測, 土木学会論文集, No. 481 / III - 25, pp. 45 - 55, 1993.12.

第7章

二次圧密を考慮した沈下予測法の精度と適用範囲^{9), 10)}

7.1 概 説

本章では、第5章、第6章で提案した二次圧密を考慮できる2つの沈下予測法(以後、「提案法1」、「提案法2」と呼ぶ)の予測精度と適用範囲および一次圧密中の二次圧密に関して設定した2つの仮説の真偽について検討する。

軟弱地盤上に盛土を施工する場合、竣工後の残留沈下を防止するため、「余盛り工法」や「プレロード工法」が採用されることが多い。これらの工法においては、所定の沈下が進行した段階で、盛土の一部が撤去される。ここでは、まず最初に、「提案法2」を除荷後の残留沈下の推定に拡張して適用し、その適用性について検討する。なお、ここで、「提案法1」を除荷後の残留沈下推定の検討から除外した理由については7.3節の冒頭で述べる。

次に、シミュレーションにより作成した「疑似観測データ」、および現場観測データを用いて、「提案法1」、「提案法2」による同定と沈下予測を行ない、予測精度と適用範囲について考察する。そして、以上で明らかとなった結果を用いて、2つの沈下予測法の予測精度と適用範囲について考察する。

7.2 提案した2つの沈下予測法の概要¹⁰⁾

第5章、第6章で述べた沈下予測法について、その概要を再度、簡単に述べる。

7.2.1 「提案法1」(第5章)の概要

圧密沈下 - 時間関係式を次のように設定する。

$$S(t) = a - b \exp(ct) + d \log t \quad (7.1)$$

ここで、 t は観測開始からの時間であり、 a, b, c, d はパラメータである。

そこで、式(7.1)を沈下の観測データにあてはめ、最尤法によりそのパラメータを同定する。そして、その結果を用いて沈下予測を行う。

7.2.2 「提案法 2」(第 6 章)の概要

一次・二次圧密を考慮した沈下の状態方程式を次のように設定する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (7.2)$$

$$\dot{\eta} = \frac{F}{t} \quad (7.3)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} + \eta \quad (7.4)$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_k]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & & \\ a_{k1} & \dots & \dots & a_{kk} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_k]^T$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

ここで、 \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 、 \mathbf{u} はそれぞれ沈下の状態量、沈下の観測値、盛土荷重値を表わすベクトルである。 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} は係数行列である。なお、記号の頭の「 \cdot 」(ドット)は時間に関する一回微分を表わす。また、式(7.2)のベクトル \mathbf{x} の x_1 成分は一次圧密沈下成分、式(7.3)の η は二次圧密沈下成分を表わしており、観測値はそれら両者の和として、式(7.4)で与えられる。また、二次圧密沈下成分が時間の対数に比例するならば、それを式(7.3)で表わすことは妥当である。式(7.2)～(7.4)を離散化し、次数 $k=2$ の場合について、沈下状態方程式を表わすと次のようになる。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_{j-1} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \frac{F}{\Delta t + t_0} \end{bmatrix} [u]_{j-1} \quad (7.5)$$

$$Y(j) = \mathbf{C} \mathbf{X}(j) \quad (7.6)$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 1]$$

ここで、 F は係数、 Δ は解析上の観測ピッチ、 t_0 は観測データを盛土開始時点から扱う場合は0であるが、ある任意の時間から計算を開始する場合に設定する必要がある値である。式(7.5)、(7.6)の沈下状態方程式のパラメータは施工中の沈下の観測データを用いて適応観測器により同定することができる。そして、同定したパラメータを用いて、施工中の現場においてその後の沈下予測を行うことができる。なお、以下では、説明を簡略にするために、沈下状態方程式の次数を $k=2$ と設定する。 $k>2$ の場合においても同様である。

7.3 「提案法 2」による除荷後の残留沈下の推定⁹⁾

ここでは、「提案法 2」による除荷後の残留沈下の推定法を示し、その適用性について検討する。なお、ここで、「提案法 1」を検討対象から除外したが、その理由は次のとおりである。つまり、除荷後の沈下は除荷荷重が大きければ大きいほど除荷前よりも小さくなる。このように、除荷荷重が除荷後の沈下を支配する大きな要因であるにもかかわらず、「提案法 1」ではその関係式の中に除荷荷重に関するものが含まれていない。したがって、「提案法 1」を除荷後の沈下予測に適用することには無理があるからである。

7.3.1 除荷後の沈下およびリバウンドのメカニズム

圧密が十分に進行していない段階で除荷を行い、しかも除荷量も少ない場合には、図 7.1 (b) に示すように、地盤内の中心付近の過剰間隙水圧は、依然として正の値で残る

が、排水面に近い部分のそれは負の値になる。したがって、除荷直後のわずかなリバウンドのあと、引き続き大きな沈下が継続する。また、その逆に、十分圧密が進んだ段階で除荷を行い、除荷荷重も大きい場合には、図-7.1(a)に示すように、過剰間隙水圧が全体的に負となり、その後も正の過剰間隙水圧は発生しない。したがって、地盤はリバウンドだけを生じ、その後、一次圧密沈下を生じない。このように、除荷時の圧密度と除荷量によって、地盤は除荷後、一時的に膨張現象を起こす場合と、沈下現象を起こす場合がある。

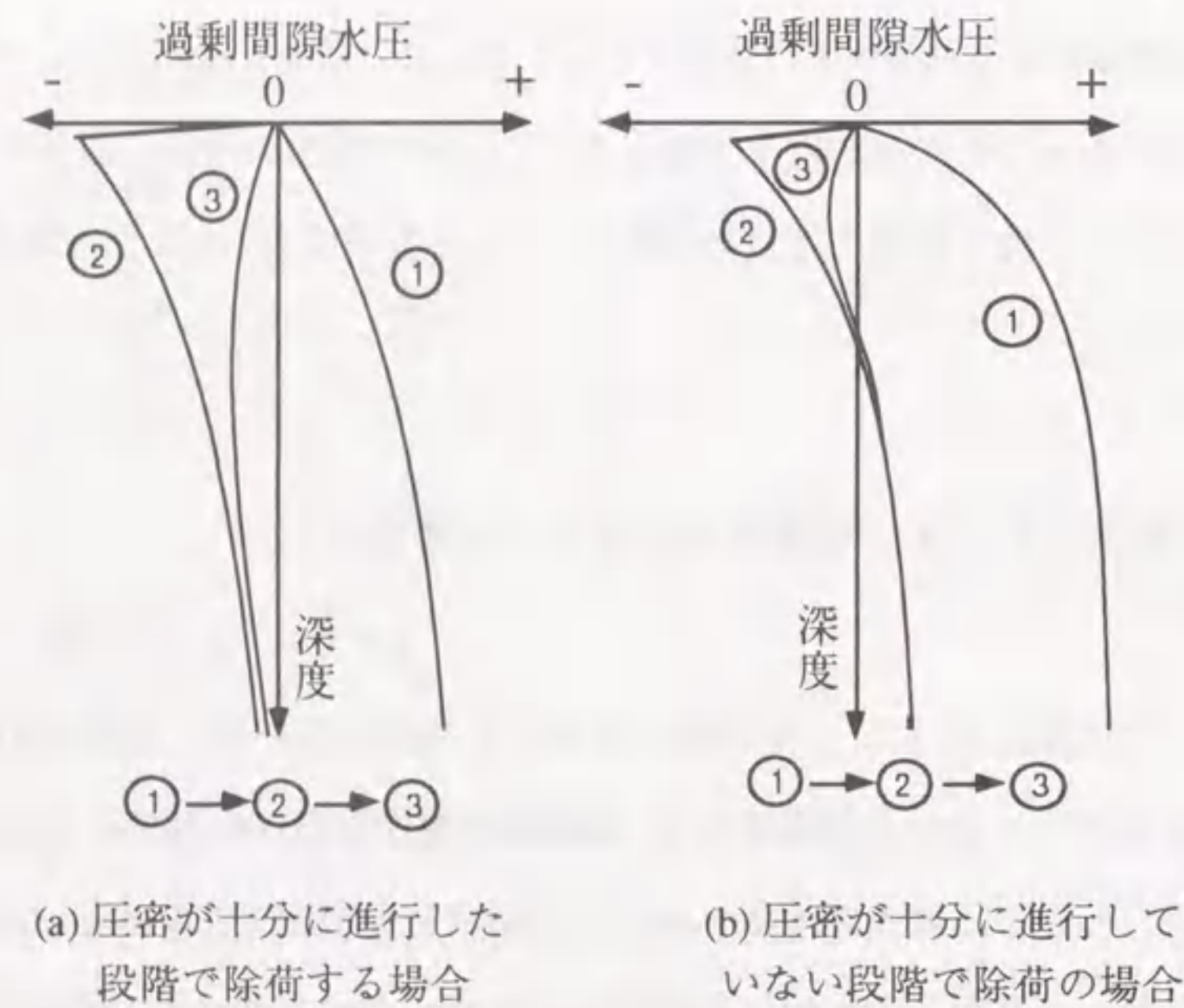


図-7.1 除荷前後の地層内の過剰間隙水圧の分布の推移

7.3.2 除荷後の一次圧密の推定

図-7.1(b)に示す除荷前後の地層内の過剰間隙水圧の分布の推移図において、地層中央付近の過剰間隙水圧プラスの部分を除荷時に残存し、それによる沈下が間隙水圧マイナスの部分の影響によるリバウンドよりも大きい時、地層全体としては除荷後も一次圧

密が継続すると考えられる。したがって、除荷後の一次圧密による残留沈下を防止するためには、除荷前後の地層内の間隙水圧を観測し、この過剰間隙水圧プラスの部分の影響を除荷後、残留しないよう対処できればよい。浅岡, 中野, 松尾¹⁾により除荷直前の地盤において、その過剰間隙水圧分布の中央部分の90%の荷重を撤去することにより、残留沈下は生じないことが明らかにされている。

7.3.3 除荷後の二次圧密の推定

以上のような間隙水圧に関する対策により、除荷後の一次圧密沈下を防止することができるが、それでもなお、二次圧密沈下の防止に対しては不十分である。以下では、このような除荷後の二次圧密の推定法について述べる。

除荷後の二次圧密の予測法の提案 : 式(7.5)から二次圧密に関する項のみ取り出したものが次式である。

$$[X_3]_j = [X_3]_{j-1} + \left[\frac{r}{j\Delta t + t_0} \right] [u]_{j-1} \quad (7.7)$$

ここで、 $[X_3]_j$, $[X_3]_{j-1}$ はタイムステップ j , $(j-1)$ における二次圧密沈下成分、 $[u]_{j-1}$ は同様に盛土荷重である。沈下観測データを用いて、「提案法2」により式(7.5), (7.6)のパラメータの同定を行うことにより、式(7.7)のパラメータの値は確定する。そこで、タイムステップ $(j-1)$ 時点において除荷が行なわれるとすると、次ステップの二次圧密の値は式(7.7)に $[u]_{j-1}$, $[X_3]_{j-1}$ の値を代入することにより得られる。次に、同様に推定された $[u]_j$, $[X_3]_j$ を式(7.7)に代入することにより、次ステップの推定を行なうことができる。このように次々と除荷後の二次圧密沈下の予測値を得ることができる。

図-7.2は6.6.2で示した観測データ(7.4.3で後述のCase 1)にこの方法を適用して得られた結果である。この図は除荷前後の盛土荷重の変化の一例と、それを用いて式(7.7)により計算した二次圧密沈下成分の推移を示している。この図から除荷前後において、二次圧密速度が変化している様子がわかる。このような除荷前後の勾配の比を二次圧縮指数の低減率 α_c と呼び、次節でこの α_c の特性を調べる。

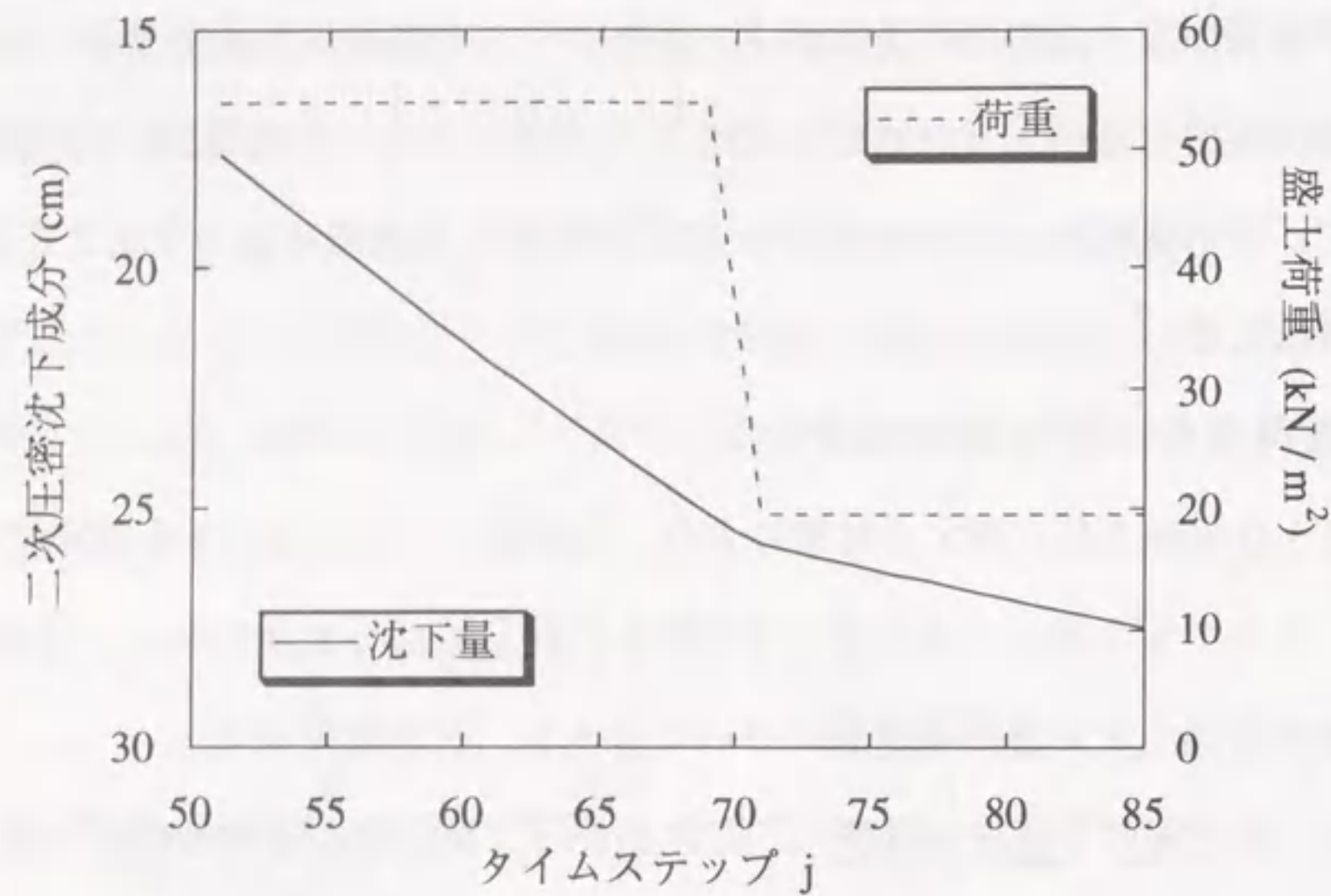


図-7.2 除荷による二次圧密沈下速度の減少

7.4 除荷後の二次圧密推定法の適用性検討⁹⁾

7.4.1 村山の研究について

除荷後の二次圧密のひずみ速度は過圧密領域の二次圧密ひずみ速度に相当するものであると考えられる。そこで、まず、7.4.1で過圧密領域の二次圧密ひずみ速度に関する既往の研究成果について述べ、7.4.2で本論文との関係について考察する。

村山²⁾は過圧密領域の二次圧密ひずみ速度が次式に従うことを示している。

$$\frac{d\varepsilon}{d \log t} = \frac{\sigma_n}{\nu_c B_2 E_{2c}^*} \quad (7.8)$$

ここで、 E_{2c}^* は二次圧密を生じる原因となる土粒子群(N_2 粒子)の変形係数、 B_2 はレオロジー定数、 ν_c は1より小さい係数、 σ_n は圧密圧力である。また、 ν_c は σ_n が先行圧密圧力 σ_{nc} に近づくほど1に近づく係数で、 $(d\varepsilon/d \log t)$ と σ_n の関係は図に表すと図-7.3のようになるとされる²⁾。

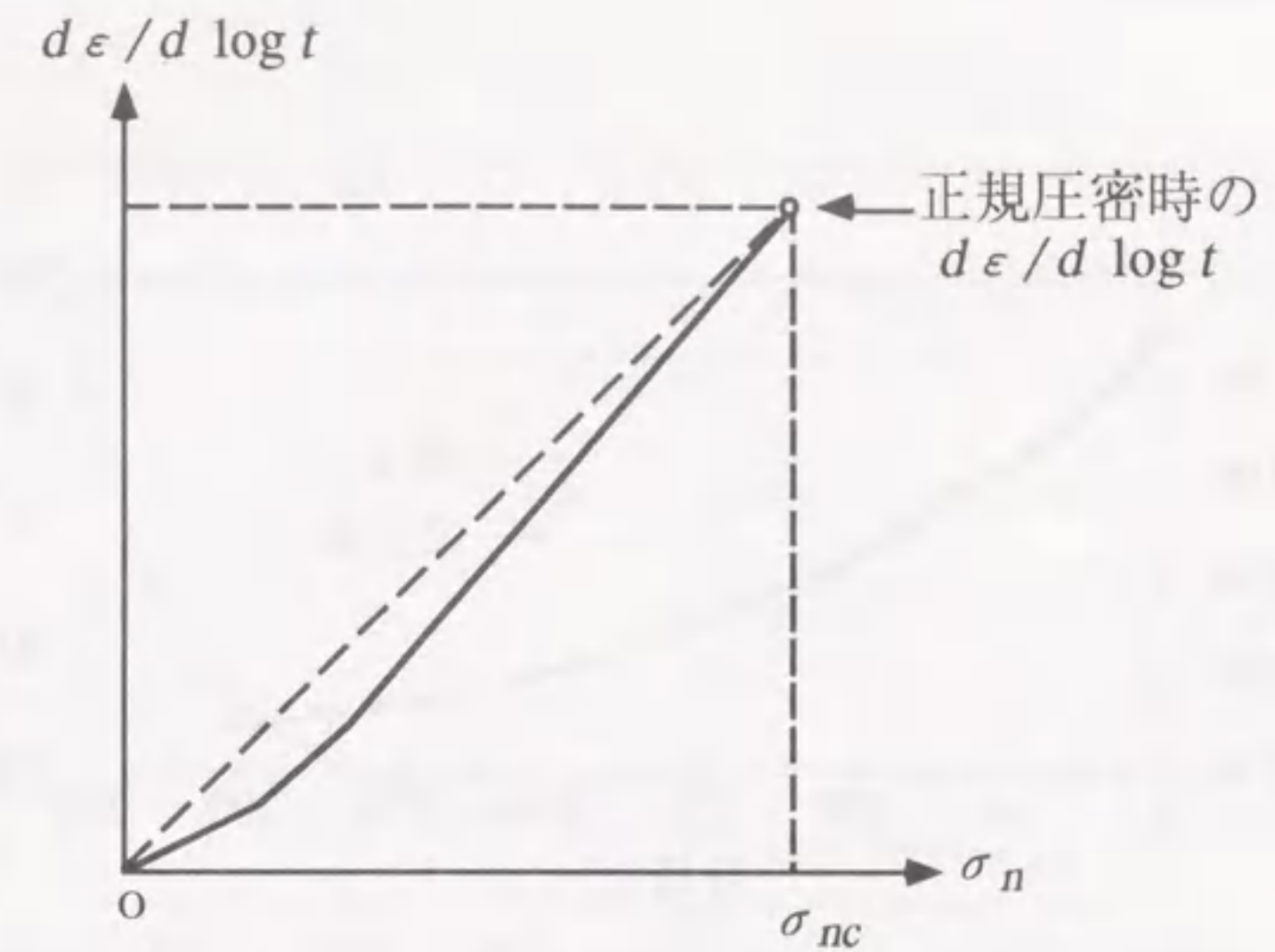


図-7.3 σ_n と $(d\varepsilon/d \log t)$ の関係(村山²⁾)

以上によれば、過圧密領域の二次圧密ひずみ速度はほぼ σ_n に比例して変化することになる。

7.4.2 二次圧縮指数の低減率に関する2つの仮説

式(7.7)は除荷後の二次圧縮指数が盛土荷重の大きさに比例して変化するという仮定の基に成り立っている。ところが、前述したように、式(7.8)が正しいとすれば、除荷後の二次圧縮指数は盛土荷重に比例するのではなく、圧密圧力 σ_n に比例していることになる。このように、式(7.7)は既往の研究(文献2)と矛盾している。そこで、比較のために、式(7.8)と矛盾しない式として、次式も適用し、どちらの仮説が正しいのか、次節で検証する。

$$[X_3]_j = [X_3]_{j-1} + \left[\frac{F}{j\delta + t_0} \right] [\sigma_n]_{j-1} \quad (7.9)$$

7.4.3 過圧密比と二次圧縮指数低減率の関係

6.6.2で示した現場観測例に対する同定結果を利用して、その後、除荷を行った場合の二次圧密沈下の推定を行ない、式(7.7)と式(7.9)の適用性を検討する。

6.6節で示した現場観測例の概要を簡単に再記すると、次のとおりである。

現場観測例 Case 1

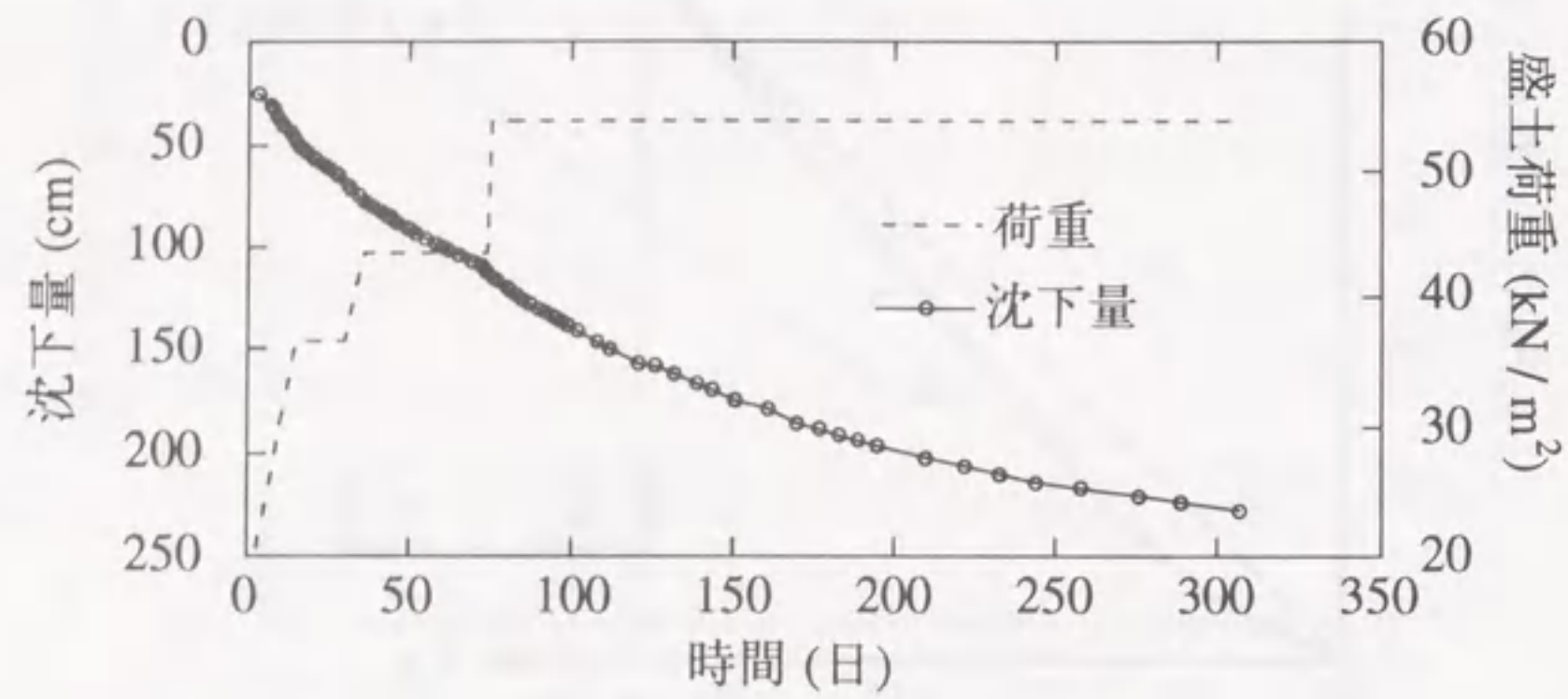


図 - 7.4 沈下観測データ (Case 1)

本現場観測例は千葉県の手賀沼干拓地の造成現場のものである。当地区の地盤は成層状態であり、圧密対象層は正規圧密状態であった(6.6.2で地質柱状図および室内土質試験結果等を示したので、ここでは省略する)。

本現場では盛土荷重による圧密沈下を早期に終了させるため、地盤改良が施工された。工事では72m × 54mの広さで高さ3.5mの盛土が施工された。袋詰めサンドドレーン(φ128, 口1.2m正方形配置, l=24m)による地盤改良が施工された。

現場観測例 Case 2

本現場観測例は愛知県半田市衣浦埋立地の工場造成現場である。当地区の地盤は正規圧密状態の飽和粘性土地盤が成層状態を成していた(5.5.1で地質柱状図および室内土質試験結果等を示したので、ここでは省略する)。約49,000m²の広さで高さ平均4.2mの盛土が施工された。袋詰めサンドドレーン(φ120, 口1.15m正方形配置, l=14.5m)による地盤改良が施工された。

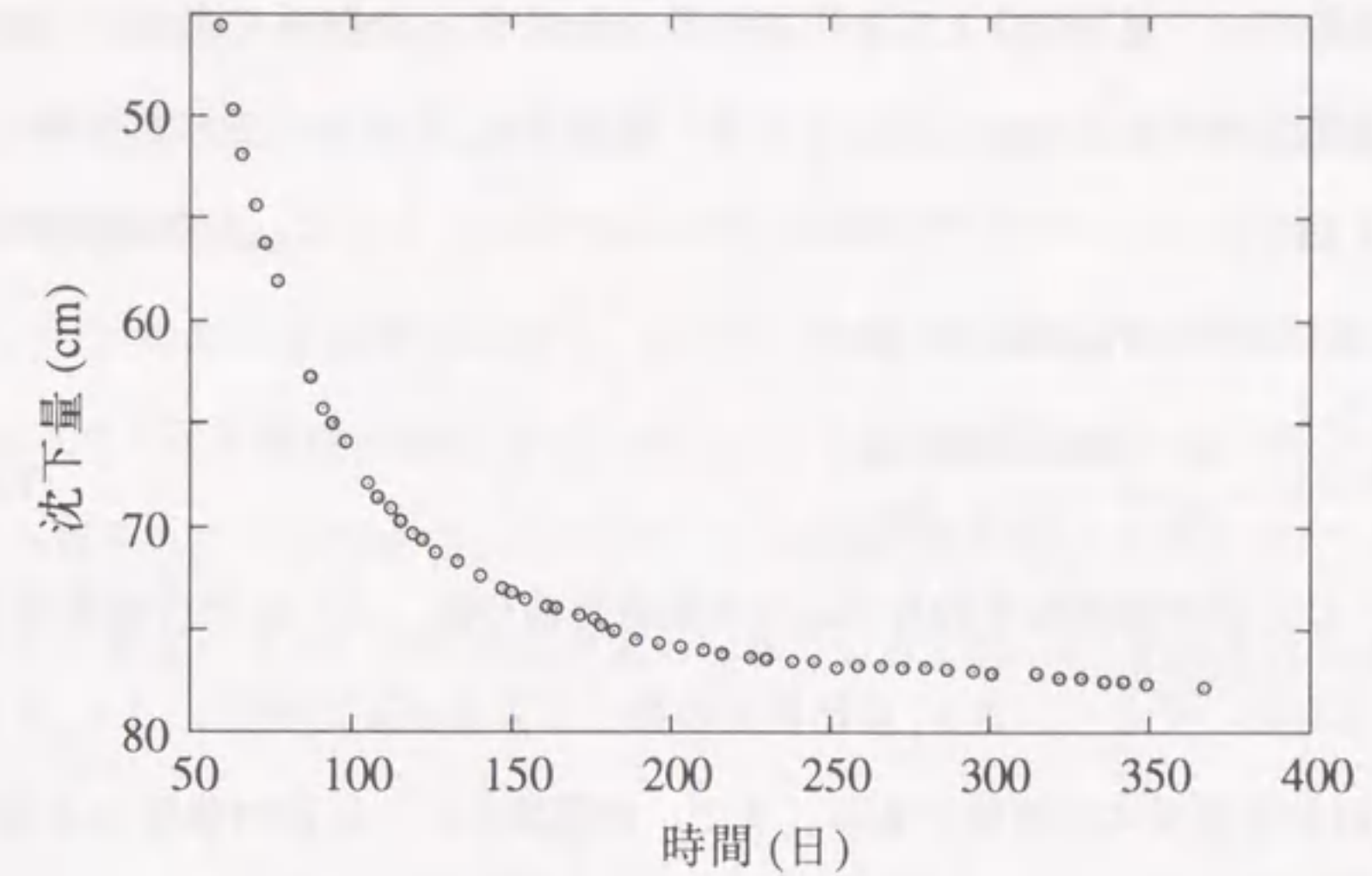


図 - 7.5 沈下観測データ (Case 2, 盛土放置期間中のデータ)

これらの現場の沈下観測データを用いた提案する沈下状態方程式のパラメータの同定については6.6節で述べたのでここでは省略し、その同定結果のみを表-7.1に示す。

表 - 7.1 観測データを用いたシステム同定結果

	Case 1	Case 2
解析上の観測データピッチΔ	3.0日	4.0日
パラメータ a_1	1.2955	0.9599
パラメータ a_2	-0.3237	-0.0666
パラメータ b_1	0.5099	0.9469
パラメータ b_2	0.5099	0.9469
パラメータ F (平均値)	22	3.2

そこで、表-7.1のパラメータの値と式(7.7)、(7.9)を用いて、除荷後の二次圧密沈下の予測値を求めた。この計算を過圧密比を変化させて(すなわち、除荷する盛土高さを変化させて)多数行い、過圧密比と二次圧縮指数の低減率 α_c の関係を調べた。図-7.6はこれらの現場観測例に対して、このようにして低減率 α_c を求め、それをY軸に、有効過圧密比をX軸にとって、グラフに表わしたものである。ここで、有効過圧密比OCRは次式により計算される値である。

$$OCR = \frac{\sigma_p'}{\sigma_f'} = \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_p \cdot U_p}{\sigma_0' + \Delta\sigma_f} \quad (7.10)$$

ここに、 σ_p' は圧密対象層の平均有効応力の除荷直前の値、 σ_f' はその除荷後の値($\sigma_f' < \sigma_p'$)である。そして、 $\Delta\sigma_p$ は除荷前の盛土による全応力増分、 $\Delta\sigma_f$ はその除荷後の値、 U_p は除荷直前の圧密度である。また、両現場共に、圧密対象層は正規圧密状態にあり、室内土質試験結果より圧密降伏応力の分布も明らかになっているので、それらを用いて初期有効応力 σ_0' を推定することができる。

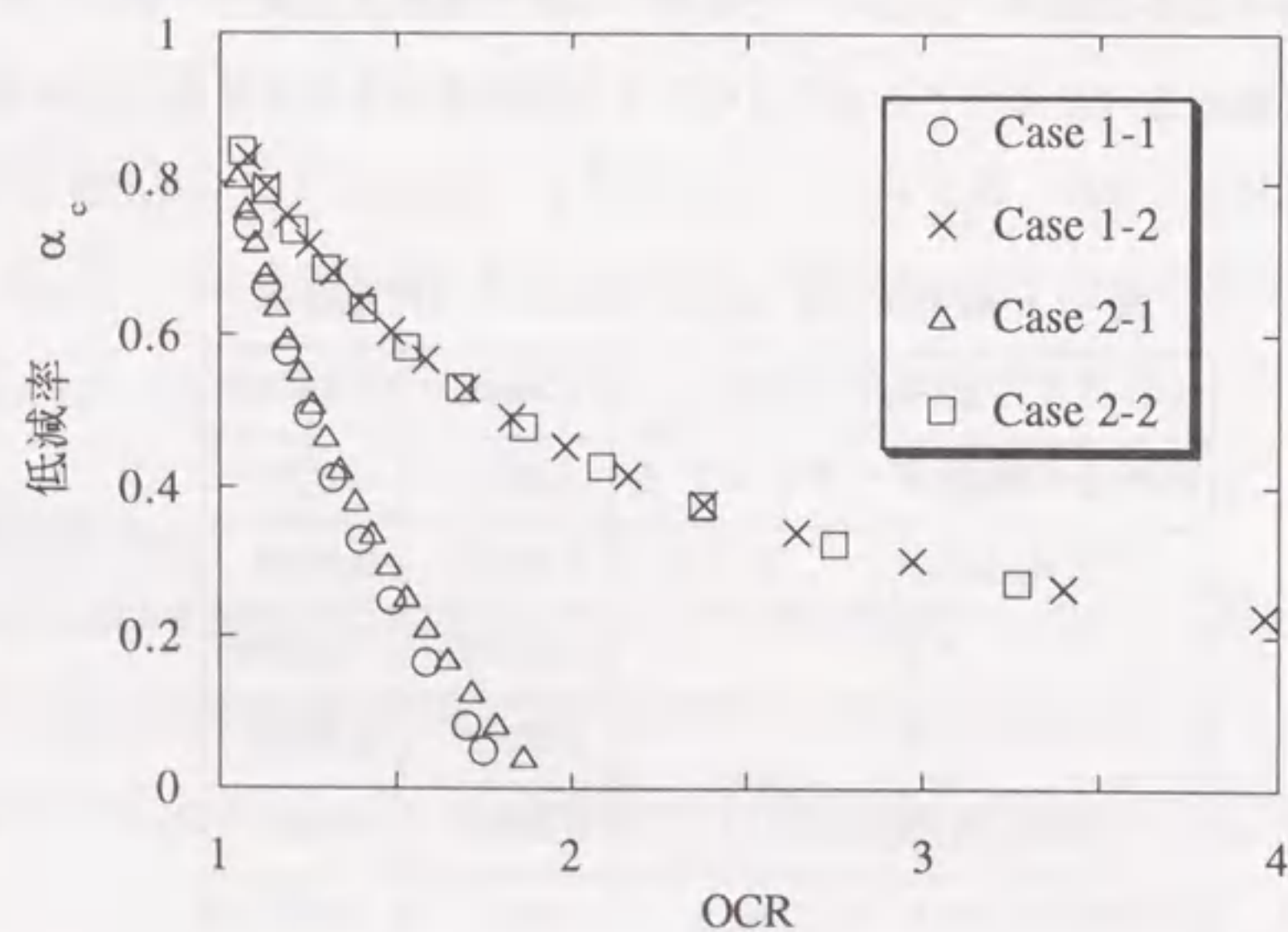


図-7.6 過圧密比と二次圧縮指数の低減率の関係

ここで、Case 1をCase 1-1とCase 1-2の2つに分ける。Case 2についても同様である。図-7.6において、式(7.7)による結果がCase 1-1とCase 2-1であり、式(7.9)による結果がCase 1-2とCase 2-2である。図-7.6によると、式(7.7)による場合は α_c はOCR=2付近でほぼ0に低減するが、式(7.8)による場合はOCR=2付近で α_c は40~50%程度である。

次に、以上の結果を既往の研究(3)、(4)、(5)と比較してみると図-7.7のようになる。なお、図-7.7で示す既往の研究例はいずれも圧密試験装置を用いて行われた除荷の実験結果から得られたものである。したがって、実験の結果はいずれもばらついているが、それぞれの著者により、回帰曲線が求められている。図-7.7ではそれらの回帰曲線を示している。

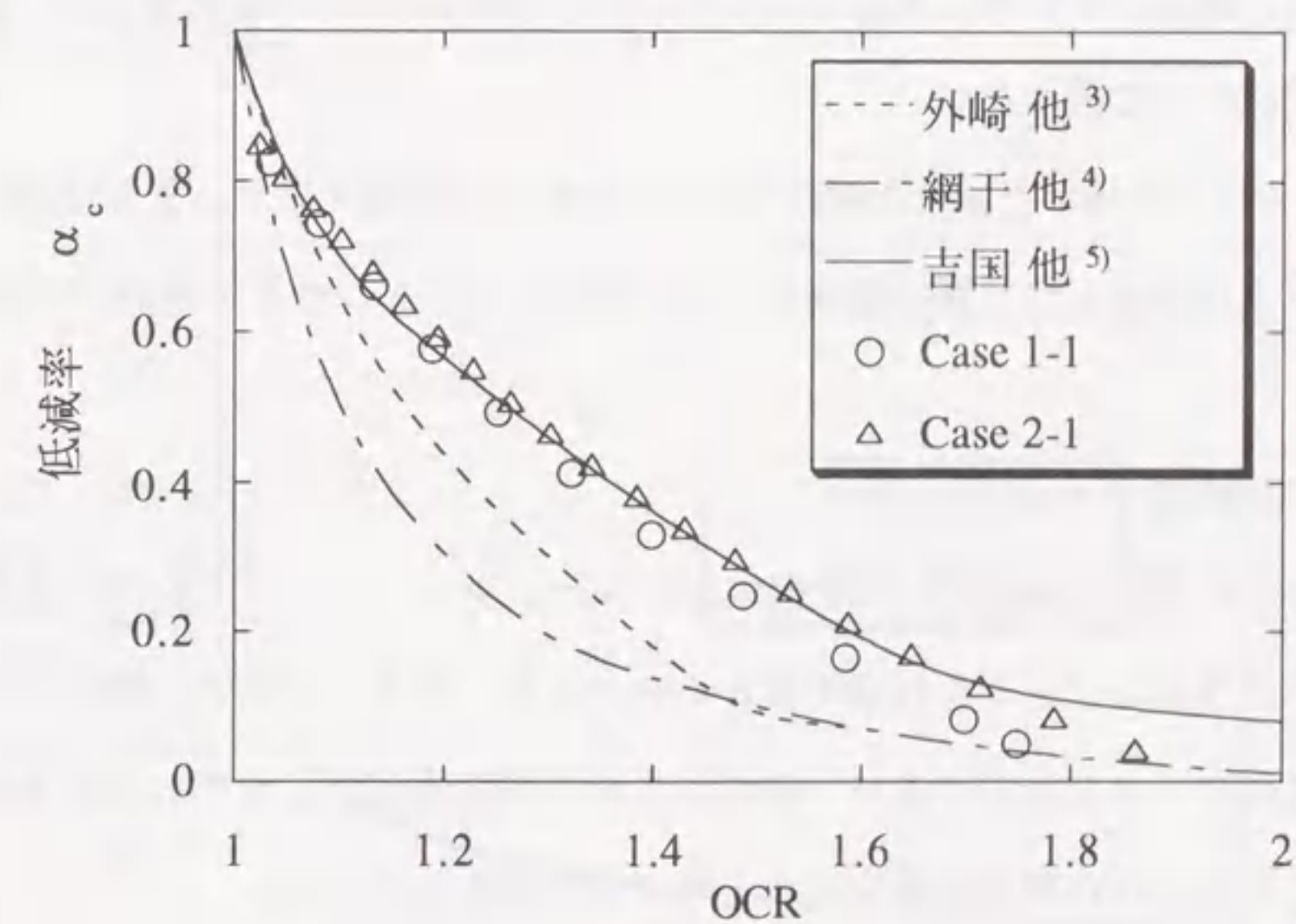


図-7.7 過圧密比と二次圧縮指数の低減率の関係

図-7.7によると、本手法による解析結果のうち、式(7.7)によるCase 1-1とCase 2-1の場合には過圧密比の値が大きくなるほど、二次圧縮指数の低減率は小さくなり、ほぼ既往の研究結果の付近に位置している。しかし、図-7.6に示す式(7.9)による結果の場合

合には、図-7.7上では既往の研究3),4),5)と大きくはずれることになる。

以上のことから、除荷後の二次圧縮指数低減率は圧密圧力 σ_v に比例するのではなく、盛土荷重に比例するのではないかと考えられる。すなわち、式(7.7)による沈下予測法が既往の研究結果とも符号しており、除荷後の二次圧密を推定できる簡便法として、有効な方法ではないかと考えられる。なお、本手法に関しては、今後も実測例への適用例を増やし、その有効性をより確かなものにしたいと考えている。

7.5 観測データを用いた2つの予測法の精度比較(その1)¹⁰⁾

前節では「提案法2」の除荷後の残留沈下推定法への適用性を調べた。本節では、除荷を行わず、盛土がそのまま放置された場合の「提案法1」,「提案法2」による残留沈下推定精度について調べる。

実際の観測データを用いた精度比較については7.6節で後述するが、まず最初にシミュレーションにより作成した「疑似観測データ」を用いて、2つの沈下予測法の精度比較を行なう。

7.5.1 「疑似観測データ」

ここで、あえて実際の観測データを用いず、シミュレーションによるのは、その方がすべての条件が既知なデータを作成できるからである。また、システム同定という点に関しては現実のデータと同じであり、真にシステム同定法がすぐれているならば、この場合においてもすぐれた同定性能を示すと考えられるからである。

式(7.5), (7.6)の沈下状態方程式の具体例として、次式を用いてシミュレーションにより沈下データを発生させる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ b_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

$$y = C x \quad (7.12)$$

$$C = [1 \ 0 \ 1]$$

表-7.2 シミュレーションに用いたパラメータの設定値

記号	パラメータの設定値						荷重 u_2	
	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	b_{11}	b_{22}	$t=0 \sim 105$ 日	$t=105 \sim 600$ 日
値	0.1389	0.4937	-0.1546	-0.4706	3.754 $\times 10^{-3}$	1.319 $\times 10^{-3}$	0	$10/t/\Delta$

ここで、パラメータ a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , b_{11} , b_{22} の設定値を表-7.2に示す。なお、表-7.2のパラメータの値は2.9節の表-2.6より引用したもので、実際の現場の沈下観測データを用いたシステム同定により得られたものである。以下の計算条件も同現場の条件を参考に設定する。

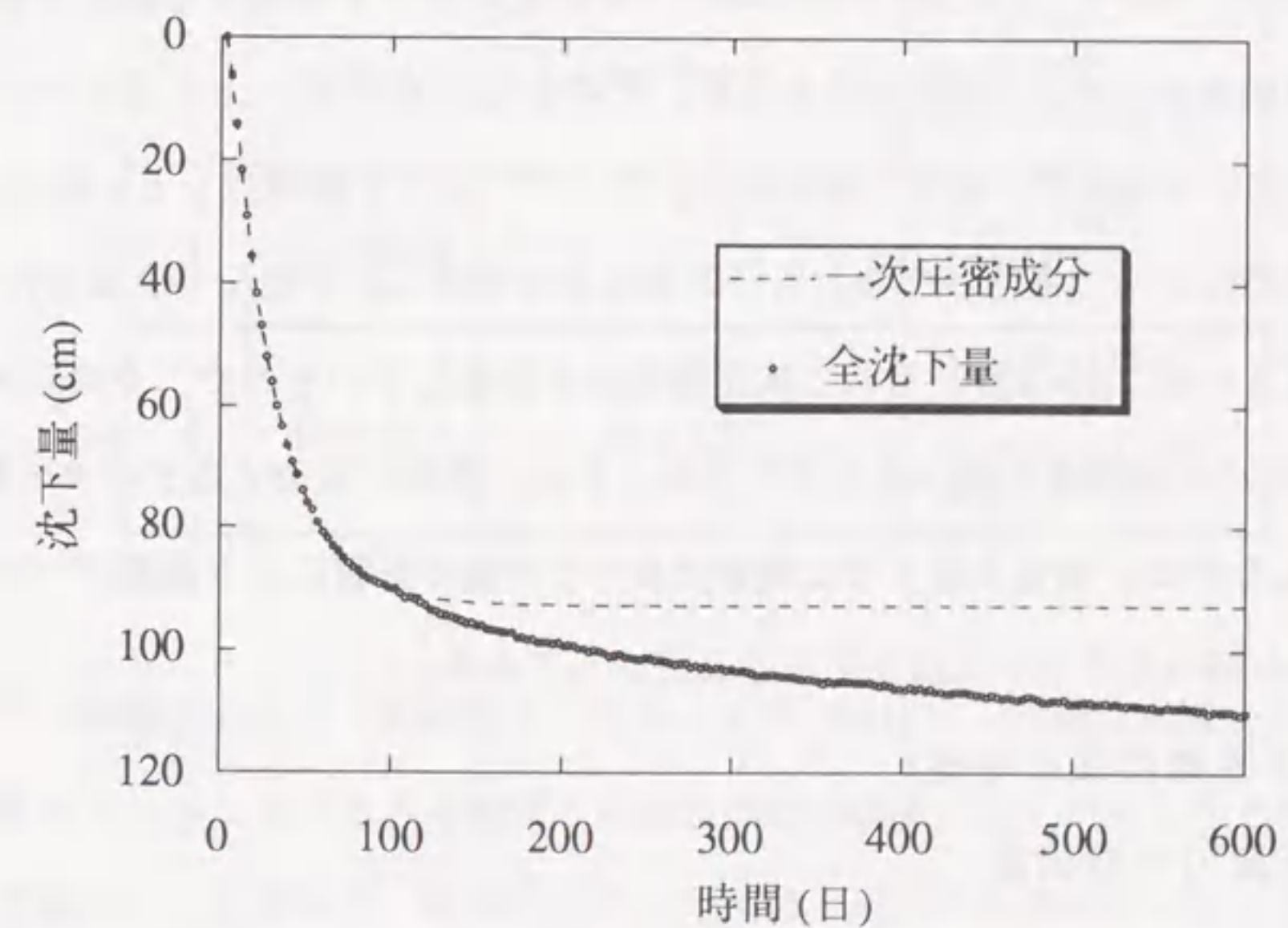


図-7.8 沈下量の「疑似観測データ」

計算条件

- 1) 盛土荷重は高さ 4.2 m の盛土を想定し、 $u_1 = 4.2$ とする。
- 2) 二次圧密の発生時刻を $t = 105$ 日目とし、その時点より、時間の対数に比例する二次圧密沈下成分を発生させる。このような条件に従うように荷重 u_2 を表-7.2 のように与える。
- 3) 時間の一ステップを $\Delta = 3$ 日として、タイムステップ $j = 1$ から 200 まで計算する。
(つまり、 $3 \times 200 = 600$ 日分計算)
- 4) 観測誤差の分散を $V_o = 0.03 \text{ cm}^2$ に設定し、正規乱数により観測誤差を与える。

図-7.8 は以上の計算条件のもとで式(7.11), (7.12)により発生した沈下量の「疑似観測データ」であり、点線はそのうちの一次圧密成分を表わしており、残りが二次圧密成分である。

7.5.2 各予測法による沈下予測

施工中の現場において、 $t = 165$ 日目の時点でその後の沈下を予測する場合を想定する。全「疑似観測データ」は 600 日分あるが、そのうちの $t = 15 \sim 165$ 日のデータを用いて、 $t = 165 \sim 600$ 日の沈下予測を行う。ここで、沈下予測時点を $t = 165$ 日目としたのは次の理由からである。すなわち、二次圧密を考慮した予測をできるだけ早い時期に行えればよいが、 $t = 105$ 日目に二次圧密発生を設定しているため、その二ヶ月後の $t = 165$ 日目の予測精度を調べることにする。また、予測に利用するデータの範囲を 15 日以降としたのは、現実の施工では地盤改良やその他の影響により観測データが $t = 0$ 日目の時点から得られるケースはむしろまれだからである。

7.5.3 沈下予測結果の考察

(1) 全沈下量の予測精度

予測法として、「提案法 1」, 「提案法 2」の他に従来法として、「浅岡法」, 「双曲線法」も比較のために用いる。表-7.3 は沈下予測に用いた各沈下予測法のモデル式と $t = 165$ 日時点におけるパラメータ同定結果である。図-7.9 は $t = 165$ 日時点における同定結果を用いて行なった沈下予測結果である。それによると、一次圧密理論に基づく予

測法である浅岡法の場合は二次圧密が考慮されていないためと思われるが、予測精度は低い結果となっている。それに対して、曲線の持つ特性によるものと思われるが、双曲線法の場合には二次圧密の顕著な地盤の沈下予測では適合しやすいという報告例^{7),8)}の多い手法であり、この場合も浅岡法よりも予測精度は高くなっている。

提案法の場合にはこれらの従来法よりもさらに高い予測精度を示している。このように、「提案法 1」, 「提案法 2」共に二次圧密を考慮した定式化は成功していると考えられる。

表-7.3 パラメータ同定に用いたモデル式と同定結果

Case	モデル名	モデル式	同定結果
1	提案法 1	$S = a - b \exp(ct) + d \log t$	$a = 43.20$ $b = 84.17$ $c = -4.42 \times 10^{-2}$ $d = 24.17$
2	浅岡法	$S_{j+1} = a S_j + b$	$a = 0.9026$ $b = 9.302$ ($\Delta t = 3 \text{ days}$)
3	双曲線法	$S = S_o + \frac{t - t_o}{a + b(t - t_o)}$	$a = 0.3347$ $b = 0.01237$
4	提案法 2	式(7.5)	$a_1 = 0.4235$ $a_2 = 0.4212$ $b_1 = b_2 = 1.709$ $F = 7.2$

与条件の観測データは「提案法 2」に基づく式(7.11)により発生させたものであり、その意味でこの節における各予測法の精度比較は「提案法 2」がもともと他の予測法より有利である。したがって、従来法をここで比較に用いる必要がないという指摘があるが、これについては次のように考えられる。

「提案法 2」の基礎方程式である式(7.5)は Biot の圧密理論をはじめとして既往のほとんどの圧密理論を包括する式であり、極めて普遍性が高いものである。また、二次圧

密沈下成分が時間の対数に比例することは、一般的に認められており、式(7.5)はそのことを表現しただけのものである。そして、式(7.5)に基づくシステム同定法である「提案法2」では、境界条件やモデル化のための設定や仮定は必要とせず、施工中の観測データを用いるシステム同定により、モデルや係数の値が自然に決定されるという特徴がある。

ここでは、このような普遍性のあるモデルに、実際の現場の沈下観測データの同定結果を入力データとして与えて発生させた「疑似観測データ」を用いている。したがって、「提案法2」が有利だとしてもそれと異なるシステム同定法である「提案法1」でも精度の高い予測が実現されており、代表的な従来法である浅岡法、双曲線法でも高い精度予測が実現される可能性はあった。しかし、提案法の方が従来法よりも予測精度の高い結果となり、それにより提案法の有効性が実証された。

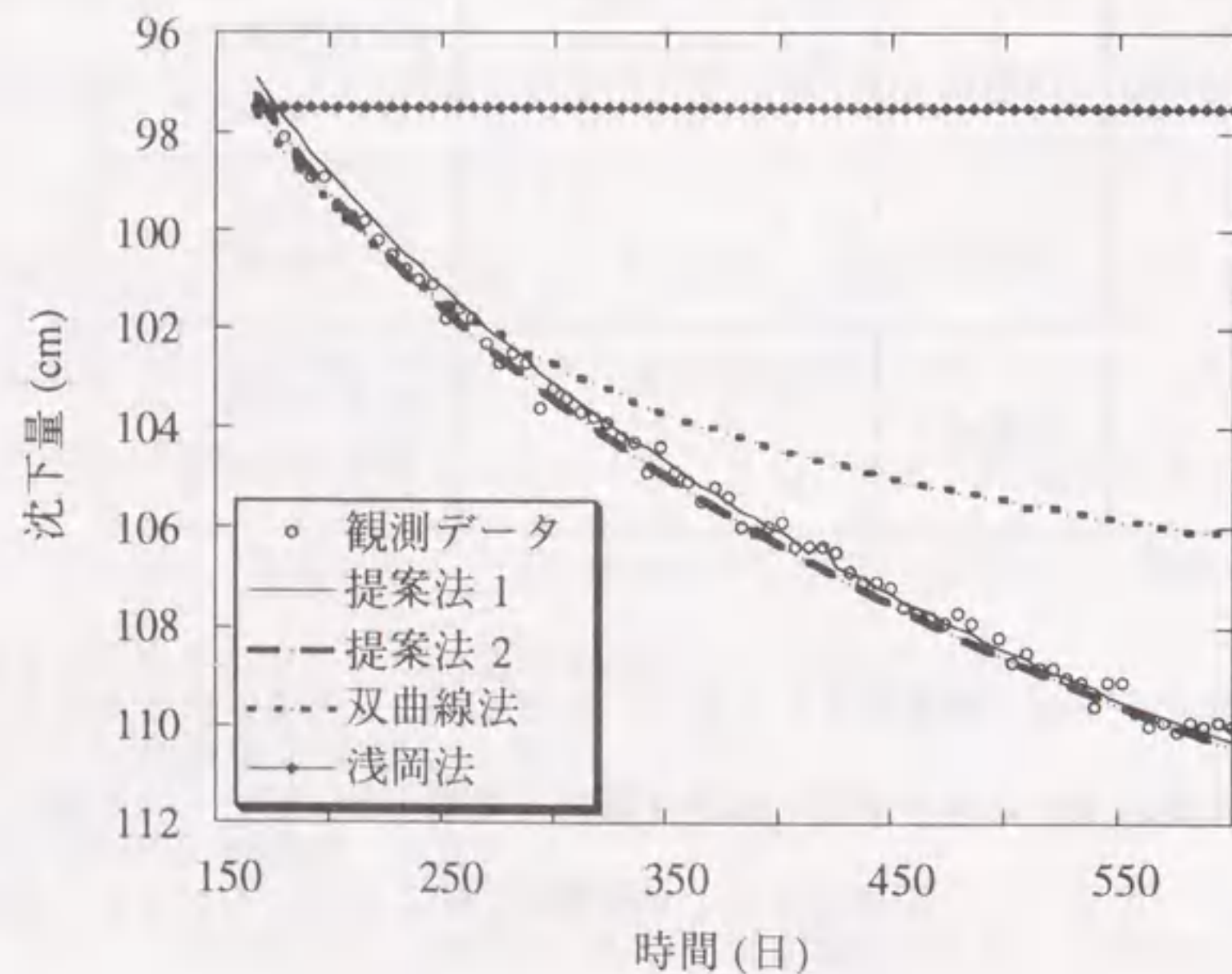


図-7.9 沈下予測結果の比較

(2) 二次圧密沈下成分の推定精度

図-7.10は二次圧密沈下成分の推定値と与条件の値との比較を示している。「提案法2」により同定を行った結果、 $t = 105$ 日($j = 35$)で二次圧密発生が判定され、その後、二次圧密成分が検出された。図-7.10に示すように、「提案法2」による場合、与条件とほぼ同じものが推定されており、二次圧密沈下の同定が精度よく行われている様子がわかる。

一方、「提案法1」はその式の性質上、二次圧密の開始時期とその絶対値の推定に用いることはできない。ただし、任意の時点を基準としてそこからの二次圧密沈下成分の増分の定量的推定には用いることができる。すなわち、式(7.1)の第3項の増分を二次圧密成分の増分と考えるものである(5.5.5参照)。図-7.10の「提案法1」のプロットは二次圧密開始時期については与条件として与えたものを利用して、「提案法1」によりそこからの二次圧密沈下成分の増分を予測したものである。

5.2.3で前述したように、本論文では一次圧密中の二次圧密発生のパターンを2つに分類している。そのうちのタイプAは二次圧密が圧密の初期から始まり、その二次圧縮指数も初期から末期まで、ほぼ一定である場合を想定したものであり、タイプBは圧密当初は二次圧密成分が存在しないか、存在しても実用上無視できる程度であり、一次圧密が進行したある時点で二次圧密成分が卓越してくる場合を想定したものである。そして、タイプAの解析用に「提案法1」、タイプBの解析用に「提案法2」を提案している。

一般に、施工中の一次圧密理論に基づく予測法(双曲線などではなく、浅岡法など)による沈下予測結果よりも、二次圧密によると思われる原因により現実の最終沈下量が大きいという報告例^{(6),(8)}は数多くある(その逆はほとんどない)。つまり、予測時点では二次圧密が存在しないか、微小であるのに、最終沈下に至る過程で二次圧密が新たに生じたことになる。つまり、現実の二次圧密のパターンは上記分類のうちタイプBに近いと考えられる。

ここで解析に用いた「疑似観測データ」はこのタイプBのデータである。「提案法2」

がタイプBの観測データの解析に適するのは当然であるが、図-7.10によると、「提案法1」でもタイプBの観測データに対して高い予測精度を示している。このことから、実用上、「提案法1」、「提案法2」共に、一次圧密中の二次圧密の発生パターンにかかわらず、適用可能ではないかと考えられる。さらに、次節で実測データの解析に適用し、このことについてさらに確認する。

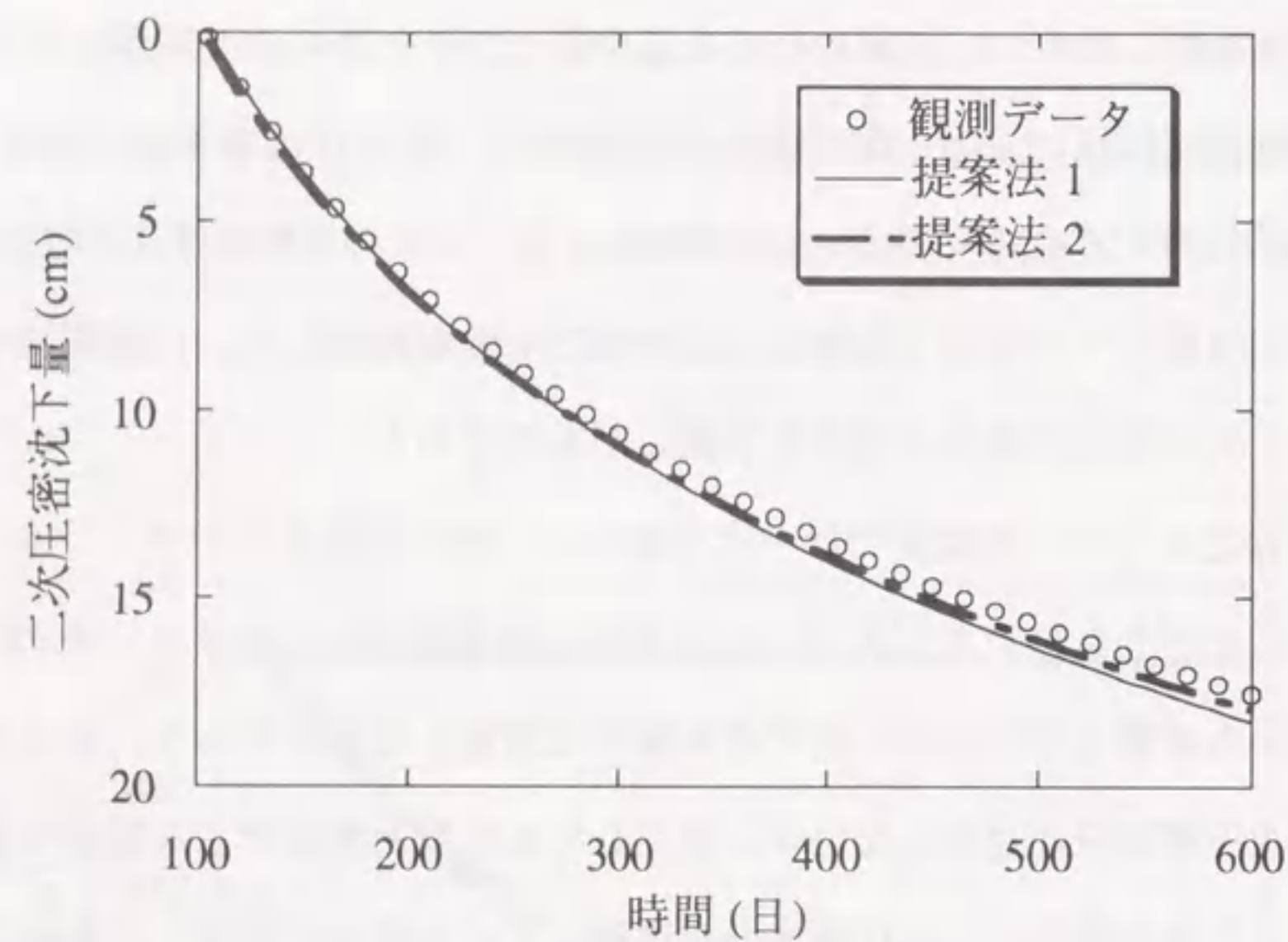


図-7.10 二次圧密沈下成分の同定結果

7.6 観測データを用いた2つの予測法の精度比較(その2)¹⁰⁾

次に、実際の現場観測例を用いて、「提案法1」、「提案法2」の予測精度を検討する。

7.6.1 現場観測データ

ここで用いる現場観測例はすでに第5章～第6章における解析で用いたものである。本章ではそれら各章の結果を比較・考察する。

観測データの概要

本観測データは愛知県半田市衣浦埋立地の工場造成現場のものである。第5章、第6章で地質などについてはすでに記述したので概要のみ述べる。当地区の地盤は正規圧密状態の飽和粘性土地盤が成層状態を成しているそこへ約49,000 m²の広さで高さ平均4.2 mの盛土が施工された。なお、盛土に先立って地盤改良工法として、袋詰めサンドドレーン(φ120, 口1.15 m 正方形配置, l=14.5 m)が施工された。図-7.11は盛土放置期間中の沈下観測データである。

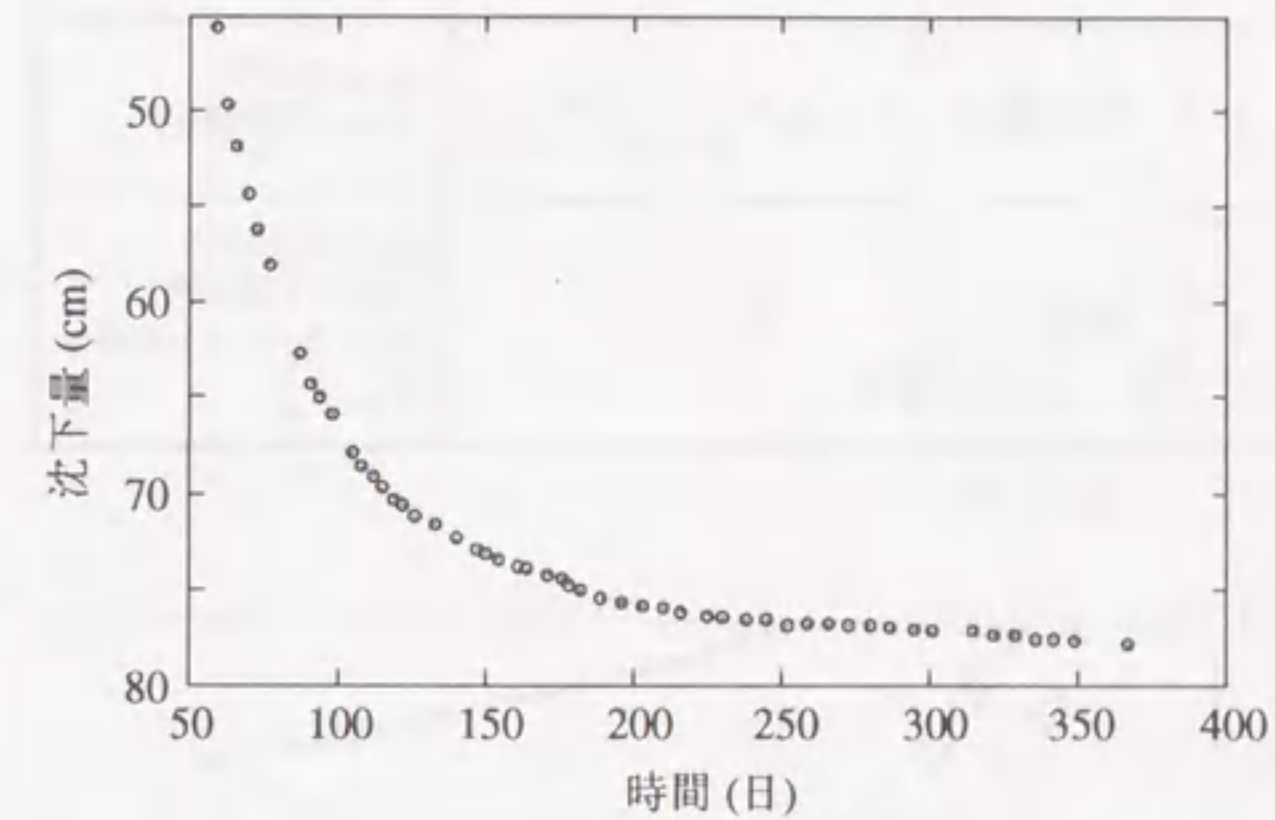


図-7.11 沈下観測データ

7.6.2 各予測法による沈下予測とその結果の考察

(1) 全沈下量の予測精度

表-7.4は沈下予測に用いた各沈下予測法のモデル式と $t=176$ 日時点におけるパラメータ同定結果である。また、図-7.12はその同定結果を用いて行なった沈下予測結果である。浅岡法の場合、「疑似観測データ」の場合と同様、二次圧密が考慮されていないと思われる。そのために沈下を過小に予測する結果になったと考えられる。また、双曲線法の場合は「疑似観測データ」の場合と逆で予測値が実測値を上回っている。このよ

うに、双曲線法は圧密理論に基づくものではないので、予測が不安定であると考えられる。2つの提案法については共に「疑似観測データ」に続いて、実測の観測データについても、従来法よりも高い予測精度が実現されており、解析法の妥当性が確認された。

表-7.4 パラメータ同定に用いたモデル式と同定結果

Case	モデル名	モデル式	同定結果
1	提案法1	$S = a - b \exp(ct) + d \log t$	$a = 52.58$ $b = 193.8$ $c = -3.53 \times 10^{-2}$ $d = 9.889$
2	浅岡法	$S_{j+1} = a S_j + b$	$a = 0.8013$ $b = 14.86$ ($\Delta t = 7 \text{ days}$)
3	双曲線法	$S = S_0 + \frac{t - t_0}{a + b(t - t_0)}$	$a = 0.8791$ $b = 0.02658$
4	提案法2	式(7.5)	$a_1 = 0.9599$ $a_2 = -0.0666$ $b_1 = b_2 = 0.9469$ $\bar{F} = 3.2$

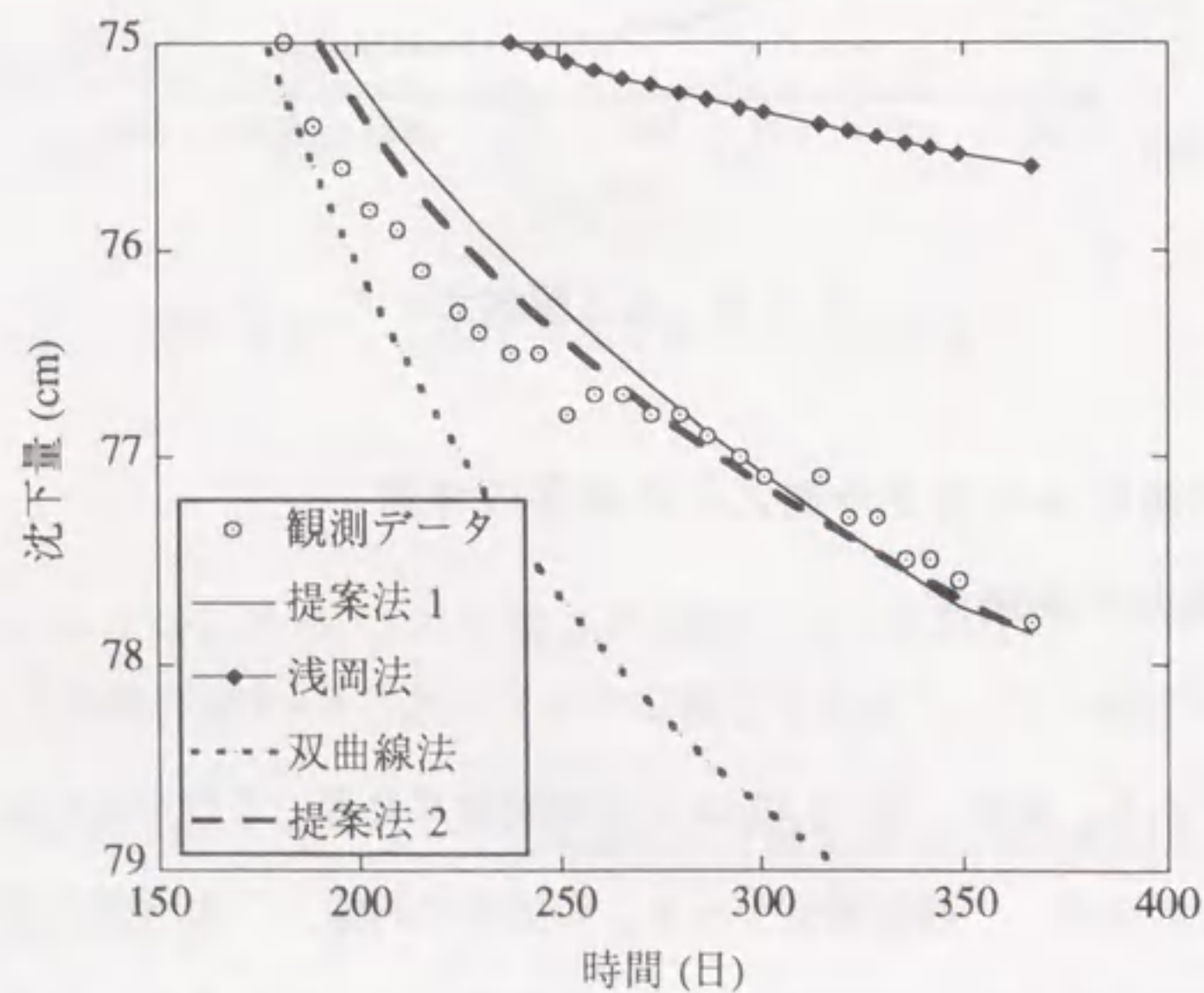


図-7.12 沈下予測結果の比較

(2) 二次圧密沈下成分の推定精度

「提案法2」により同定を行った結果、 $t = 135$ 日 ($j = 20$)で二次圧密発生が判定され、その後、二次圧密成分が検出された。図-7.13はその様子を示している。

一方、前述したように、「提案法1」はその式の性質上、二次圧密の開始時期とその絶対値の推定に用いることはできない。ただし、任意の時点を経験値としてそこから二次圧密沈下成分の増分の定量的推定には用いることができる。そこで、 $t = 176$ 日目を基準として、そこから10年間の二次圧密沈下量の増分を予測すると、図-7.14のようになり、両手法共にほぼ同程度の二次圧密沈下量が予測されている。

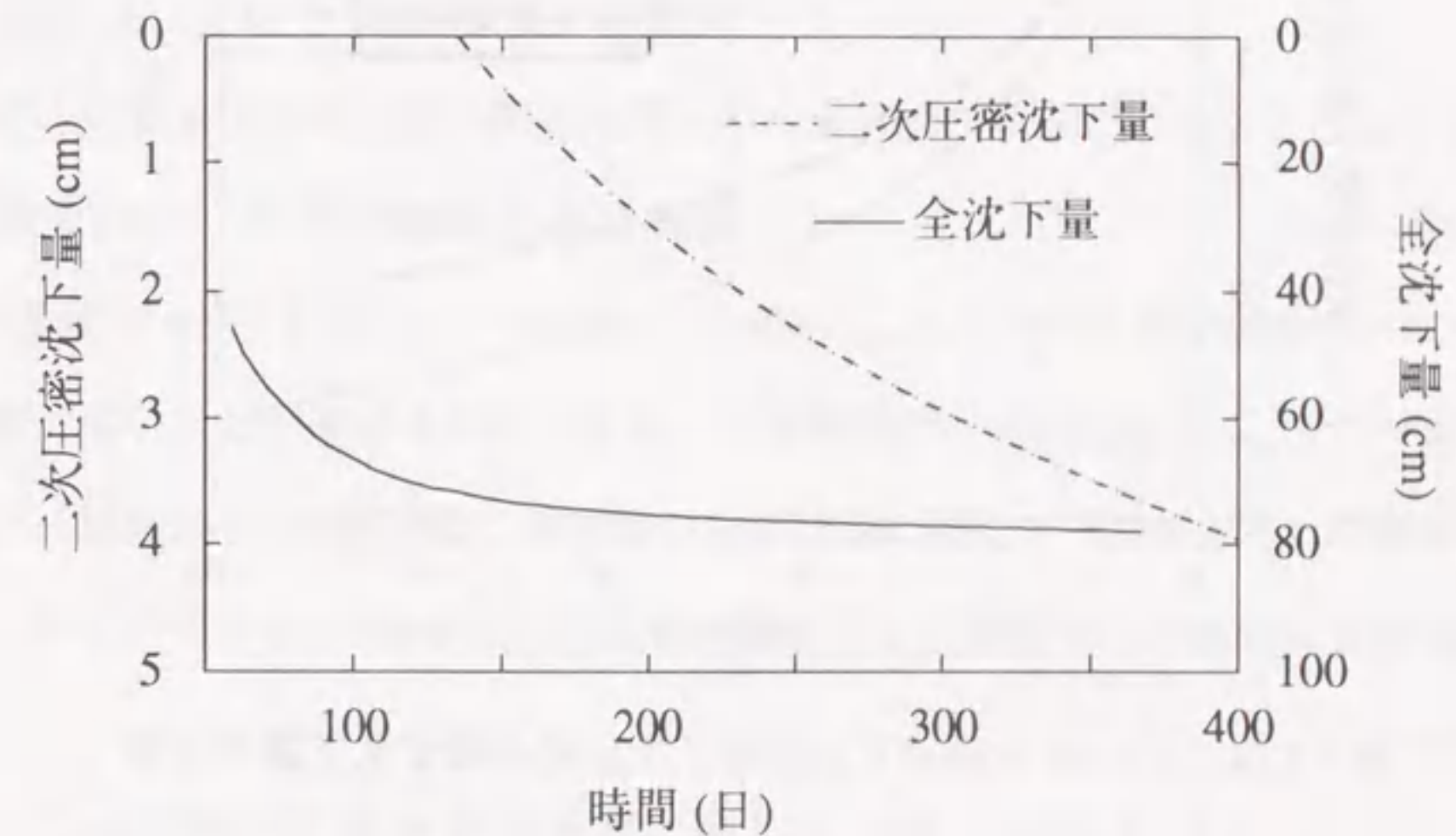


図-7.13 「提案法2」による二次圧密沈下成分の同定結果

図-7.13によると、二次圧密の始まりは一次圧密の圧密度96%の時点である。また、6.6.2の例ではその値は81%である。また、予測された二次圧密の値も異なる仮説(5.2.3で前述)に基づく2つの提案法による値が共に同程度の値となっている。これらのことから、二次圧密の始まる時期に対する2つの仮説のうち、タイプBの仮説の方

が妥当ではないかと考えられる。

すなわち、現実の地盤の沈下の解析上、二次圧縮指数は圧密の初期においては極めて小さいか、実用上0と考えてよく、一次圧密が進行(81~96%程度)したある時点で二次圧密成分が開始し、その後卓越してくると考えられる。また、本章の最初で、「提案法2」により推定される二次圧密は「見かけの二次圧密」として記述したが、図-7.14において、2つの提案法の値がほぼ同程度の値を示しており、このことから、「提案法2」によれば全沈下量に含まれる二次圧密沈下成分の絶対値に近い値が推定できているのではないかと考えられる。

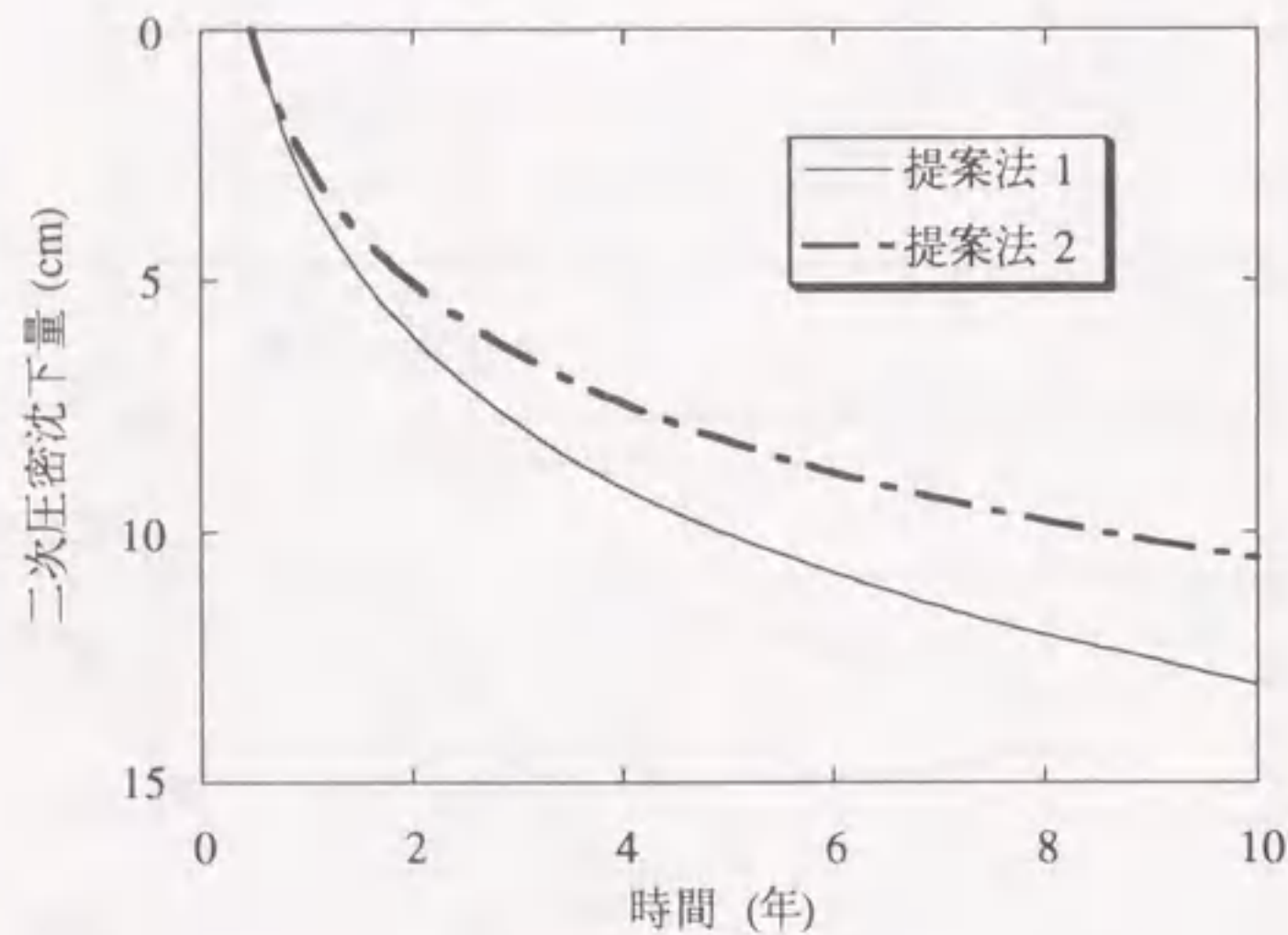


図-7.14 $t = 176$ 日時点における二次圧密の残留沈下量の予測

7.7 予測精度と適用範囲の考察

7.7.1 合計沈下量の予測に関して(図-7.9, 7.12)

(1) 従来法の予測精度と適用範囲

一次圧密理論に基づく予測法である浅岡法の場合は二次圧密が考慮されていないため

と思われるが、沈下を過小評価し、予測精度は低い結果を示した。それに対して、曲線の持つ特性によるものと思われるが、双曲線法の場合には二次圧密の顕著な地盤の沈下予測では適合しやすいという報告例が多い手法である。今回の解析においても浅岡法よりも予測精度は高い値を示した。しかし、この手法は圧密理論に基づくものではないので、今回の解析例に対しても過大な場合と過小な場合があり、予測が不安定である。

(2) 「提案法1」, 「提案法2」の予測精度と適用範囲

提案法の場合には「疑似観測データ」、「実測観測データ」に対して、従来法よりも高い予測精度を示す。また、与条件の観測データとほぼ同じものが同定された。これらのことから、「提案法1」, 「提案法2」共に、二次圧密を考慮した全沈下量の予測に関して精度の高い予測が可能であると考えられる。

7.7.2 二次圧密の絶対値の推定に関して(図-7.10, 7.13)

(1) 「提案法1」の予測精度と適用範囲

その式の性質上、二次圧密の開始時期とその絶対値の推定に用いることはできない。

(2) 「提案法2」の予測精度と適用範囲

「疑似観測データ」に対して、与条件とほぼ同じ二次圧密沈下成分が同定されており、推定精度が高いことが確認された。また、「実観測データ」に対して、2つの提案法(ただし、「提案法1」の解析は二次圧密の開始時期に関して「提案法2」の情報を与えて行なったものである)の値がほぼ同程度の値を示し、推定精度が高いことが確認された。

7.7.3 二次圧密の区間増分の予測に関して(図-7.10, 7.13)

(1) 「提案法1」の予測精度と適用範囲

その式の性質上、任意の時点を基準としてそこから二次圧密沈下成分の増分の定量的推定には用いることができる。しかし、一次圧密の途中から二次圧密が存在する場合を想定したタイプBの解析には本来不向きである。ところが、タイプBの型の「疑似観測データ」に対しても、「提案法2」同様、「提案法1」も高い予測精度を示した。

また、実観測データに対しても「提案法2」の解析結果と類似した結果となった。

このことから、実用上、二次圧密の区間増分の推定に適用可能であると考えられる。

(2) 「提案法 2」の予測精度と適用範囲

「疑似観測データ」に対して、与条件とほぼ同じ二次圧密沈下成分が同定されており、推定精度が高いことが確認された。また、「実観測データ」に対して、2つの提案法の値が類似した結果を示し、推定精度が高いことが確認された。

7.7.4 除荷後の沈下予測 (図 - 7.7)

(1) 「提案法 1」の予測精度と適用範囲

除荷後の沈下は除荷荷重が大きければ大きいほど除荷前よりも小さくなる。このように、除荷荷重が除荷後の沈下を支配する大きな要因であるにもかかわらず、その関係式の中に除荷荷重に関するものが含まれていない。したがって、この方法を除荷後の沈下予測に適用することには無理がある。

(2) 「提案法 2」の予測精度と適用範囲

2つの実測データに対する本提案法による解析の結果は、過圧密比と二次圧縮指数低減率の関係に関する既往の研究結果とも符号しており、除荷後の二次圧密の推定法として有効であると考えられる。

7.7.5 予測精度と適用範囲のまとめ

表 - 7.5 は以上の結果をまとめたものである。

表 - 7.5 提案法の沈下予測精度と適用範囲

項目	提案法 1	提案法 2
1 一次・二次圧密沈下量合計の予測	精度良好	精度良好
2 二次圧密沈下成分の絶対値の定量的同定	予測不可	精度良好
3 二次圧密沈下成分の区間増分の予測	精度良好	精度良好
4 除荷後の沈下予測	予測不可	予測可

7.8 結論

本章で得られた成果をまとめると、次のとおりである。

- 1) 間隙水圧の管理により、除荷後の一次圧密を防止することができるが、それでもなお二次圧密の防止に対しては不十分であると考えられる。施工中の現場の沈下観測データを用いてそのような盛土除荷後の二次圧密を予測する方法を提案した。
- 2) 第 6 章の提案法を拡張して、除荷後の二次圧密沈下の推定法を提案した。しかし、この方法の基本式は、除荷後の二次圧縮指数は盛土荷重にほぼ比例するという概念に基づいている。ところが、村山²⁾の研究によれば、それは盛土荷重ではなく、圧密圧力に比例することになる。このような対立が生じたので、2つの仮説をたて、2つの現場観測データを用いて検証した。その結果、提案法の方が二次圧縮指数低減率と過圧密に関する既往の研究結果(外崎³⁾, 網干⁴⁾, 吉国⁵⁾)と符号し、正当であるという結論に至った。
- 3) 一次圧密中の二次圧密に関する 2つの仮説(タイプ A, タイプ B)のうち、タイプ A に基づく第 5 章の「提案法 1」とタイプ B に基づく第 6 章の「提案法 2」について予測精度と適用範囲の検討を行った。その結果、二次圧密沈下の区間増分の予測、および一次・二次合計沈下量の予測に関しては「提案法 1」, 「提案法 2」共に精度が良好であり、二次圧密沈下成分の絶対値の定量的同定、および除荷後の沈下予測に関しては「提案法 2」は適用可であるが、「提案法 1」は適用不可であることが明らかとなった。
- 4) 実測観測データを用いて「提案法 2」により解析を行った結果、二次圧密の始まりは一次圧密の圧密度 81, および 96% の時点であった。また、予測された二次圧密の値も異なる仮説に基づく 2つの提案法による値が共に同程度の値となった。これらのことから、二次圧密の始まる時期に対する 2つの仮説のうち、タイプ B の仮説の方が妥当ではないかと考えられる。すなわち、現実の地盤の沈下の解析上、二次圧縮指数は圧密の初期においては極めて小さいか、実用上 0 と考えてよく、一

次圧密が進行した(81～96%程度)ある時点で二次圧密成分が開始し、その後卓越してくると考えられる。

参考文献(第7章)

- 1) 浅岡顕, 中野正樹, 松尾稔: 観測的方法による透水係数の推定を組込んだプレロード工の設計, 土木学会論文集, No. 469 / III - 23, pp. 45 - 54, 1983.6
- 2) 村山朔郎: 土の力学挙動の理論, 技法堂, pp. 578 - 580, 1990.
- 3) 外崎明, 赤石勝, 稲田倍穂: 二次圧密に対するプレロード効果, 第19回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 1553 - 1554, 1984.
- 4) 網干寿夫, 松田博: 層別計測による事前圧密工法の基礎的研究, 土木学会論文集, no. 340, pp. 139 - 144, 1983.12
- 5) 吉国洋, 森脇武夫, 叶正興, 長省吾: サーチャージ除荷後の膨張 - 沈下特性, 第25回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 377 - 378, 1990.
- 6) 吉国洋, 井上年行, 住岡宣博, 原久夫: 現場計測法による圧密沈下予測法の特長について, 土と基礎, 29 - 8 (283), pp.7 - 13, 1981.
- 7) 柴田徹: 沈下予測の実際, 土と基礎, 41 - 2 (421), pp.1 - 4, 1993.
- 8) 若槻良行, 永田孝夫, 和泉聡: 現場計測による軟弱地盤上の盛土沈下予測の精度, 日本道路公団試験所報告, Vol.25, pp.27 - 37, 1988.
- 9) 脇田英治, 松尾稔: 軟弱地盤上に施工された盛土の除荷後の残留沈下の推定, 土木学会論文集, No. 493 / III - 27, 1994.6 掲載予定
- 10) 脇田英治, 松尾稔: 二次圧密を考慮した沈下予測法の精度と適用範囲, 土質工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, Vol. 11, No. 1, 1993.12.

第8章 結論および将来の展望

8.1 結論

軟弱地盤上に土構造物やその上に建物を築く場合、経済的に信頼性の高い構造物を完成させ、機能させるためには、沈下を十分に制御・管理する必要がある。本研究はそのための沈下管理システムを確立することを目的とするものである。そこで、この目的を達成するために次の3つの課題を設け、それらについて研究を行なった。

- (1) 施工前設計における設計値の定量的・確率的な設定法
- (2) 施工前期における沈下に関する動学的設計法
- (3) 施工後期における残留沈下の予測法

その結果、以下のような結論が得られた。

第2章における沈下予測の基礎方程式である沈下状態方程式は、既存の一次元圧密理論、および三次元圧密理論を包括する基礎方程式としてそれから誘導することができる。この沈下状態方程式は連続系と離散系があり、相互に変換可能である。そこで、観測データを用いて離散系方程式のパラメータを同定し、それを連続系へ変換し、設計・施工計画の軌道修正に利用することができる。

観測データを用いる沈下状態方程式のシステム同定・沈下予測法として、最小二乗法による方法を示し、適応観測器による方法、カルマンフィルタによる方法を提案した。これらの方法による施工途上における将来沈下の予測にあたっては、沈下観測データに含まれる非線形性を考慮する必要がある。これに関しては、盛土施工中は非線形性が大きく、盛土高さ一定後しだいに線形化する傾向がある。提案法は線形理論に基づくので、非線形性の強い観測データに対してはそのままでは適合しにくい。しかし、沈下の早期予測のためには非線形性のある観測データも利用する必要があり、そのためのアルゴリ

ズムを提案した。このアルゴリズムは(1)過去よりも現在により近い値ほど重視、(2)最大対数尤度による適合性の高い値ほど重視、と言う2つの概念に基づくものである。

そして、弾塑性圧密FEM解析による「疑似観測データ」と2つの現場観測データを用いて、施工中の現場における沈下予測への適用性を検討した。予測精度比較のために用いた沈下予測モデルは(a)沈下状態方程式、(b)浅岡モデル¹⁾、(c)双曲線モデル¹⁷⁾であり、パラメータ同定法は(i)最小二乗法、(ii)適応観測器、(iii)カルマンフィルタである。そして、本論文の提案法、および実務設計で現在広く用いられているという観点から4つのケース[(a)+(ii)、(a)+(iii)、(b)+(i)、(c)+(i)]を選び、解析を行った。その結果、「沈下状態方程式」と「適応観測器」を組み合わせた方法が他の提案法、および従来法の中で、最も予測精度の高い解を早期に与える結果となり、非線形性などの影響によりパラメータの変動するような状況に対しては、この方法が有効であることが確認された。

施工中において観測データを用いて沈下予測を行う場合、解析用のデータは等間隔でなければならないが、周期にあたる時間に観測データのない部分については「ラグランジェ補間法」によりデータ補間を行なうことができる。

また、同定・予測を行なうための沈下状態方程式はいろいろな次数のものが考えられるが、最適次数はFPEを求めることにより判定することができる。実際の現場観測データを用いた最小二乗法による解析の結果によると、次数 $k=4$ の場合が最適となったが、実務への適用においてはその都度FPEを算定してチェックするのが好ましい。

3つの現場観測例に対して提案法を適用し、適用性の検討を行なった。そのうちの1つは盛土施工中の観測データのみを用いて、その後の沈下予測を行なったものである。また、別の1つは一段階目の盛土の観測データを用いて、二段階目以降の沈下予測を行なったものである。そして、他の1つは埋立地における一段階目の埋立て時の観測データを用いて、二段階目以降の沈下予測を行なったものである。予測結果と実測結果は比較的よく適合し、提案法の有効性が確認された。

第3章ではまず、沈下状態方程式のパラメータを圧密方程式のパラメータへ変換する方法を提案した。この方法により、観測データを用いた沈下状態方程式のシステム同定結果より三笠の圧密方程式の圧密係数に相当する値を逆推定することができる。また、観測データを用いたシステム同定結果より最適盛土高の値を逆推定する方法を提案した。この方法により、施工中に所定の工期内に所定の沈下を終了させるための追加盛土の必要性を判定することができる。さらに、追加盛土の必要性が判定された場合、その必要追加盛土高の値を推定する式を提案した。

現場観測例と弾塑性圧密FEM解析を用いて以上の推定式の正当性を検証した結果、推定精度が高いことが確認された。また、施工中の任意の時点においてその時点における圧密度、および最終沈下量を推定する式も合わせて提案した。なお、盛土の破壊については別途、破壊に対する検討を行ない、その結果と本解析法との両方を満足する結果を採用する必要がある。また、除荷時のリバウンドについては、本解析の適用上無視しても大きな誤差の生じないと考えられる。

以上の提案式について検討の結果、提案式は経済的にも最適な解を与えるものであることが明らかとなった。

第4章ではまず、施工前の設計値と施工後の観測値の関係を調べた。その結果、これらの比は沈下量、沈下速度に関して、共に一定の対数正規分布に従うことが明らかとなった。そこで、この分布に基づくモンテカルロ・シミュレーションを次に行った。その結果を判別図に整理したところ、沈下管理法毎に一定の判別関数の存在することが明らかとなった。この判別関数の上側は工期超過確率10%以下、下側は工期超過確率10%以上の領域である。この図を用いることにより、一般の実務設計において、施工前に工期超過の可能性の判定と沈下管理法の選択を行なうことができる。

軟弱地盤上に土構造物を施工する場合の沈下管理法を3つに大別した。その大別した沈下管理法のうち、沈下管理第1法(施工時対処型)は沈下管理第2法(施工前設計対処型)よりもすべてのケースで経済的である。また、沈下管理第3法(試験工区型)は

その適用性を適用性判定図により判定後、採用が可能であるならば、第1法、第2法よりも経済性、信頼性の面で優れている。この沈下管理第3法を採用する場合、複数の試験工区の結果を用いて、本工区の結果を予測する必要がある。ここでは、そのための予測誤差推定式とそれを用いたクリギングによる推定法を提案した。

クリギングは既知の測定点の値を用いて未知の測点の値を確率的に推定する方法である。従来、クリギングでは予測誤差(セミバリオグラム)の推定式を仮定する必要があった。それに関して、本章ではその推定式を理論的に導く方法を提案している。

一次圧密中の二次圧密について、従来から2つの仮説が対立している。そのいずれが正しいとしても、現実の地層が圧密試験の場合と比べて非常に厚いことを考慮すれば、現実の地盤の沈下は一次圧密と二次圧密が混在した挙動を示すと考えられる。そのことを前提に、本章では一次圧密中の二次圧密に関して新たに2つの仮説(タイプA, タイプB)をたてた。

第5章ではそのうちのタイプAの仮説(二次圧密が圧密の初期から始まり、その二次圧縮指数も初期から末期まで、ほぼ一定である)に基づいて、二次圧密の影響を考慮した新しい時間-沈下関係式を提案した。そして、提案する沈下モデルや従来からある他の各種の沈下モデルの時間-沈下関係式のパラメータを同定する方法として、観測ノイズ、システムノイズを考慮した最尤法による定式化を行った。また、観測しながら各沈下予測法の予測精度を比較する方法として、(a)ベイズの定理による方法と(b)AICによる方法を提案した。さらに、同定によって得られた沈下モデル式を用いて、任意の時点において、その後の残留する一次圧密沈下量、および二次圧密沈下量を予測する方法を示した。

現場実測例を用いて適用性の検討を行った結果、提案法は従来法よりもいずれも高い予測精度を示し、その有効性が確認された。

第6章では一次圧密中の二次圧密に関する2つの仮説のうち、タイプBの仮説(圧密当初は二次圧密成分が存在しないか、存在しても実用上無視できる程度であり、一次圧密が進行したある時点で二次圧密成分が卓越してくる)に基づく検討を行った。タイプBの場合には圧密の全期間を1つのシステムで扱うことには無理があり、全体を2つに分け、途中でシステムを切り換えるシステム同定法が適すると考えられる。

また、過去のさまざまな事例から判断して、二次圧密の関数型は時間の対数に比例する「LOG型関数」で近似するのが適切であると考えられる。それに対して、二次圧密現象をVoigtモデル(「EXP型関数」)で表わすタイプの沈下予測法が従来、提案されているが、この方法ではうまく二次圧密沈下成分を推定することができないことを実例を用いて示した。

そして、新たに、一次圧密成分と二次圧密成分を分離して、それぞれの「関数型」に基づいて定式化することにより、二次圧密を考慮した沈下状態方程式と適応観測器によるそのシステム同定法を提案した。このシステム同定法はダービン・ワトソン検定を二次圧密発生の判定に用い、二次圧密が検出された後においては、一次・二次圧密を考慮したシステム同定を行なうものである。

3つの観測例を用いて提案法の適用性を検討した結果、提案法によれば、二次圧密沈下成分の経時変化を定量的に推定できることが確認された。

第7章では、まず、除荷後の沈下予測に対する提案法の適用性について検討を行っている。間隙水圧の管理により、除荷後の一次圧密を防止することができるが、それでもなお二次圧密の防止に対しては不十分であると考えられる。施工中の現場の沈下観測データを用いてそのような盛土除荷後の二次圧密を予測する方法を提案した。そして、第6章における提案法を拡張して、除荷後の二次圧密沈下の推定法を提案した。しかし、この方法の基本式は、除荷後の二次圧縮指数は盛土荷重にはほぼ比例するという概念に基づいている。ところが、既往の研究によれば、それは盛土荷重ではなく、圧密圧力に比例することになる。このような対立が生じたので、2つの仮説をたて、2つの現場観測

データを用いて検証した。その結果、提案法の方が二次圧縮指数低減率と過圧密に関する別の複数の既往の研究結果と符号し、正当であるという結論に至った。

また、前述のように一次圧密中の二次圧密に関して、2つの仮説(タイプA,タイプB)をたて、タイプAに基づいて第5章で、タイプBに基づいて第6章で検討を行った。実測観測データを用いて「提案法2」により解析を行った結果によると、二次圧密の開始時期は一次圧密の圧密度81,および96%の時点であった。また、予測された二次圧密の値も異なる仮説に基づく2つの提案法による値が共に同程度の値となった。これらのことから、二次圧密の始まる時期に対する2つの仮説のうち、タイプBの仮説の方が妥当ではないかと考えられる。すなわち、現実の地盤の沈下の解析上、二次圧縮指数は圧密の初期においては極めて小さいか、実用上0と考えてよく、一次圧密が進行したある時点で二次圧密が始まり、その後卓越してくると考えられる。

また、第5章の「提案法1」と第6章の「提案法2」について予測精度と適用範囲の検討を行った。その結果、二次圧密沈下の区間増分の予測、および一次・二次合計沈下量の予測に関しては「提案法1」,「提案法2」共に精度が良好であり、二次圧密沈下成分の絶対値の定量的同定、および除荷後の沈下予測に関しては「提案法2」は適用可であるが、「提案法1」は適用不可であることが明らかとなった。

8.2 将来の展望

本研究では土構造物の沈下管理に限定して研究成果をまとめた。本研究で提案した沈下解析法や予測法は、土構造物以外の他の構造物の挙動予測にも、機能を拡張することにより応用可能であると考えられる。建築構造物の沈下予測への適用はその一つである。

建築構造物は土構造物と異なり、剛性を有するので、その沈下の検討においては地盤との相互作用を考慮する必要がある。建築構造物の観測的方法による沈下予測は現在のところまだ研究がほとんどなされていない分野であり、実現すれば設計・施工の実務に貢献すると思われる。

その場合の利用法の一つとして、建築工事に先立って行われる造成工事における土構造物の沈下観測データの解析結果より、建築物の将来の沈下挙動を予測し、設計に利用する方法が考えられる。また、建築物施工中の沈下観測データを用いた沈下予測結果に従って、各部の応力コントロールを行うことにより、設計上、最適な状態を達成するなどの利用が考えられる。

以上で述べた建築構造物の沈下管理法については、現在、研究中であり、今後、引き続いて成果を発表する予定である。

謝 辞

本論文は著者が清水建設株式会社大崎研究室に在職中に行なった土構造物の沈下管理に関する約2年間の研究成果を学位論文としてまとめたものです。研究の全課程にわたって終始懇切丁寧なご指導と御鞭撻を賜りました名古屋大学教授・松尾稔先生には深甚なる敬意と感謝の意を捧げます。名古屋大学教授・浅岡顕先生には本研究に関する具体的なご指導、貴重な御助言を多々いただきました。深く感謝の意を表します。また、本論文の推敲に際して、名古屋大学教授・林良嗣先生には、貴重なご教示を賜りました。厚くお礼を申し上げます。

本研究を行うにあたり、清水建設(株)前副社長・大崎順彦博士、ならびに同取締役大崎研究室室長・山原浩博士には過大な研究環境を提供して頂き、終始変わらぬ御厚情と研究に関する貴重な御助言を賜りました。厚くお礼申し上げます。

大崎研究室グループ長・石井清博士には研究・実務の両面にわたり、幅広くご指導を賜りました。また同研究室・鈴木誠博士にも数々の御助言をいただき両氏に深く感謝いたします。また、著者がこのような研究を行うことができたのは、清水建設(株)取締役・井畔瑞人博士が著者を大崎研究室へ移し、研究を始める契機を与えられたことによるものです。その御好意に感謝いたします。最後になりましたが、論文をまとめるにあたりいろいろとお世話になりました大崎研究室の方々、また、絶えず激励をいただいた土木本部、ならびに名古屋支店の方々に厚くお礼申し上げます。

