

施工中の圧密を考慮した盛土の応力・変形解析

成田国朝・奥村哲夫・村田直二・大根義男

Stress-Deformation Analysis of Embankments Considering Consolidation During Construction

Kunitomo NARITA, Tetsuo OKUMURA,
Naoji MURATA and Yoshio OHNE

In the design of earth and rockfill dams, it is of great importance to predict construction pore pressure and deformation behaviors during construction. In the present paper, a conventional practically useful method of estimating pore pressure and deformation of embankments during construction is proposed. The main advantages of the method are to estimate built-up pore pressure from results of ordinary oedometer tests and to pursue pore pressure dissipation by using empirical relations between U (degree of consolidation) and T (time factor) which can be derived from pore pressure measurements in the field.

In the comparison between the calculated and observed results for a typical earth dam, it is recognized that the proposed method is applicable in a sense of practical purpose, though the method has some inherent shortcomings in applying for moving boundary problems.

1. はじめに

アースダムや河川堤防などの粘性土を構築材料とする盛土の施工中の応力・変形挙動や安定性の評価の問題では、従来から非排水条件の試験結果を用いた急速盛土としての解析が進められてきた。これは、従来は比較的小規模の盛土を対象としていたことや、安全側の設計を基本としていたことなどによるものである。しかし、近年のように堤体の規模が大きくなると、施工期間が長期に亘るため施工中にかなりの圧密が進行することが予想され、その効果は決して無視し得ないものとなる。特にダムサイト周辺において良質の材料を採取することが困難な場合は、高含水比、高圧縮性の土を構築材料として用いることも少なくないが、このような場合は施工中に発生する間げき圧を一定限度まで低減させ、また圧密による強度増加を期待して施工速度の調整が行われるのが普通である。このため、この種の盛土を従来の方法で解析すると、非排水条件の設定が実情と合致せず、施工中の変形を過大に評価して堤体の安全性を過度に小さく見積ることが考えられる。また、非排水条件の解析では施工中の間隙圧の消散が考慮されていないので、応力解から推定される間隙圧は盛土完成直後の最大値を与え一般に過大な値を見込むことになる。

盛土内の施工中の間隙圧挙動を追跡する試みは、一次

元圧密論を土台とした Gibson¹⁾や沢田ら²⁾の研究にみられるが、最近では有限要素法を用いて有効応力に基づく応力・変形解析と浸透解析を組み合わせた、いわゆるカップリング問題としての取扱いが幾つか見られている。その多くは Biot の圧密方程式を汎関数を用いて離散化して有限要素解析を行ったものであり、地盤の圧密問題に対する Sandhu ら³⁾, Yokoo ら⁴⁾, Hwang ら⁵⁾の解析が代表的なものとして挙げられる。また、Lewis ら⁶⁾は土粒子骨格の構成関係および透水性に非線形性を考慮した解析も提案している。

フィルダムの間隙圧や変形の問題に対しては、Cavou-nidis ら⁷⁾が飽和盛土を対象とした線形、非線形解析法を示している。また、Duncan ら⁸⁾, 中川ら⁹⁾は締固め土に対して間隙空気の圧縮性を考慮した封入不飽和状態の解析法を提案し、その有効性を確かめている。しかし、これらの連成問題としての取扱いは、解の厳密性を要求しただけ解析手続きや物性値の決定法などが煩雑であり、実際問題への適用を考えた場合、必ずしも有用とは考え難い。この難点を避けた1つの解析法として、Eisenstein ら¹⁰⁾は盛土の段階載荷の各過程のなかで圧密方程式を微小時間ごとに解き、間隙圧の発生・消散と圧密変形を逐次追求する簡便解析法を提案し、実測値との比較において良い対応を得ている。

Eisenstein らの方法は、カップリング問題としての取

扱いに比べてやや厳密性に欠けるが、実用計算法としての意義は小さくないと考えられる。しかし、盛土段階ごとに圧密（熱伝導）方程式を繰返し解くという煩雑さが残っている点は否めない。そこで本研究は、基本的には Eisenstein らの考え方に基づいているが、圧密計算の過程に若干の改良を行い、より実用的で簡便な手法を提案して、その適用性を検討するものである。

2. 解析手法

(1) 解析手順

図-1 a) は Eisenstein らが提案した実用的な計算

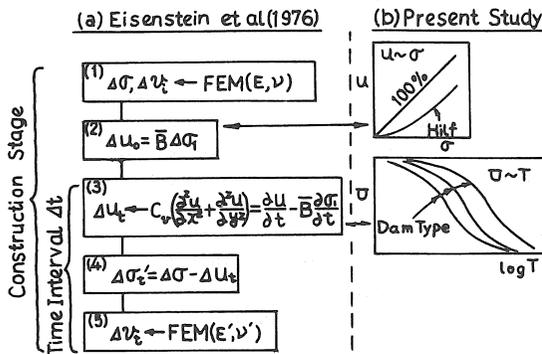


図1 解析手順

法の概略の流れ図である。解析対象の盛土は幾つかの水平層に分けて有限要素分割し、通常の段階載荷解析の手順で盛土過程を表現するものとする。盛土の各段階における計算の流れは以下ようになる。

- 1) 増分荷重（新たな盛土層載荷）に対して全応力解析を行い、全応力増分 $\Delta\sigma$ と非排水変形（瞬時変形） Δv_t を求める。このときの物性値（弾性率 E 、ポアソン比 ν ）には全応力表示の値を用いる。
- 2) 間隙圧係数 \bar{B} を用いて全応力増分より発生間隙圧 Δu_0 を求める。 \bar{B} 値は盛土過程（応力状態や圧密度）の影響を考慮して変化させることができる。
- 3)~5) の繰返しでは、時間間隔 Δt ごとに圧密解析を行って任意時刻の間隙圧 Δu_t (Δu_0 に対する残留分) を求める。1つの盛土段階内では全応力が一定であるとする、任意時点での有効応力の増加は $\Delta\sigma'_t = \Delta\sigma - \Delta u_t$ である。したがって、 $\Delta\sigma'_t$ と等価な荷重に対して有効応力解析を行うことにより圧密による変形 Δv_t が求まる。このときの物性値 (E' , ν) には有効応力表示の値が用いられる。各時刻における盛土の全変形量は Δv_t と Δv_t の和と与えられる。

以上の計算で要求される物性値は、間隙圧係数 \bar{B} 、圧密係数 c_v 、ならびに全応力および有効応力表示の変形係数であるが、これらは中心コア型ダムのコア部のように

側方変形が拘束されている状態を考える限りでは、一次元圧密試験（間隙圧測定を含む）を行って全て決定される。

さて、本研究で提案する解析法も基本的には上記の手順に従うのであるが、圧密解析の部分において図-1 b) のような改良を行って簡略化を試みた。すなわち、上記の2) において間隙圧係数 \bar{B} は通常の圧密試験（間隙圧測定を含まない）の結果を Hilf の提案式に基づいて間隙圧 $u \sim$ 全応力 σ の関係で整理し、その勾配 (σ の関数) をもって与える。また、3) の圧密計算に相当する部分においては、各盛土段階の発生間隙圧 Δu_0 に対して、熱伝導方程式を解く代わりに圧密度 $U \sim$ 時間係数 T 関係の曲線を用いて間隙圧の消散を追跡する。この場合に用いる $U \sim T$ 関係は圧密試験を実施して定めてもよいが、フィルダムのように転圧による異方性やダム型式による排水方法の相違が大きい場合には、室内試験で実際の圧密挙動を表現するのは必ずしも十分でない。そこで、本研究では、実測値に基づいて作成した $U \sim T$ 関係を用いる方法を提案した。以下に、上記2項目の詳細を述べる。

(2) $u \sim \sigma$ 関係¹¹⁾

非排水条件の下で不飽和土が圧縮を受けるときに発生する間隙圧 u の推定式として、Hilf¹²⁾は

$$u = \frac{p_0 \delta}{(v_a + H_e v_w) - \delta} \dots\dots\dots (1)$$

を提案している。ここに、 v_a , v_w は土の単位体積当りに含まれる間隙内の自由空気量 (%) および自由水分量 (%), δ は土の圧縮量, p_0 は大気圧, H_e は Henry の溶解係数 (通常 0.02) である。盛土の締固め状態 (乾燥密度 γ_d , 含水比 w) が与えられれば、 v_a , v_w が決まるから、式(1)は $u \sim \delta$ 関係になる。そこで盛土と同じ締固め状態の供試体に対して圧密試験を行い、有効応力 $\sigma' \sim$ 圧密度 δ の関係 (図-2 a)) を定めておくと、任意の σ に対応

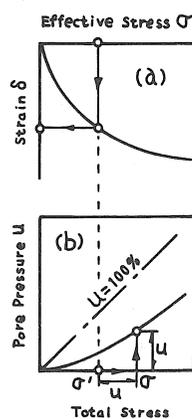


図2 $u \sim \sigma$ 関係

する δ に対して式(1)より u が求まる。これを、全応力 $\sigma = \sigma' + \Delta u$ であることを考慮して整理すると、b) 図の $u \sim \sigma$ 関係が得られる。 $\delta > v_a$ では $v_a = 0$ (飽和) になるので、これ以後の $u \sim \sigma$ 曲線は間隙圧100%線に平行になる。

以上の方法を用いれば間隙圧測定を伴わない通常の圧密試験結果から、 \bar{B} 値が図-2の $u \sim \sigma$ 曲線の勾配として σ の関数で定められる。Hilfの式：式(1)は飽和度が85%以上の土に対しては、きわめて適用性が良いことが確かめられている¹¹⁾。したがって、わが国のように湿潤側施工で、締め固めの飽和度がしばしば90%以上に達する盛土を対象とする限りでは、式(1)を用いて $u \sim \sigma$ 関係を定める方が実用的にも有効な方法と考えられる。なお、解析では段階盛土を考えるので、間隙圧の挙動は図-3のよ

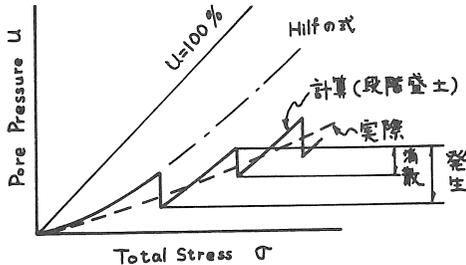


図3 間隙圧の挙動

うに発生・消散が階段状に繰り返されることになる。しかし、これは解析上のことであり、実際の状況は(盛土速度が一定であれば)破線のように滑らかな曲線になると考えるべきである。したがって、この場合は、解析において各消散過程後の $u \sim \sigma$ 関係 (\bar{B} 値) は常に Hilf 式の曲線と平行になると仮定して差支えないと考えられる。施工中に盛土休止期間があり、間隙圧の消散(圧密)が進行すると、土構造の圧縮性の変化により休止前後の $u \sim \sigma$ 関係がかなり異なることが認められている¹³⁾。一般には休止後の \bar{B} 値は低下する傾向にあり、休止期間中の圧密進行が大きいほど低下が著しい。このような盛土休止が考えられる場合は、圧密試験の段階で消散前後の \bar{B} 値の特性を詳細に調べておく必要がある¹⁰⁾。

(3) $U \sim T$ 関係¹¹⁾

間隙圧の実測値に基づいて圧密度 $U \sim$ 時間係数 T 関係を作成する方法をまず説明する。図-4 a) は盛土の進行に伴う間隙圧の変化を模式的に示したものである。施工管理のデータから考察点の直上土かぶり圧 γh が得られれば、これを全応力 σ として図-2の関係から Hilf 式に基づく間隙圧 u_{H1} が定まる。 u_{H1} の値は消散を考慮していないので各時刻における間隙圧の最大値を表す。この図に間隙圧計で観測した実測値 u をプロットすると、 u_{H1} と u の差が消散量であるから、圧密度が $U = (u_{H1} -$

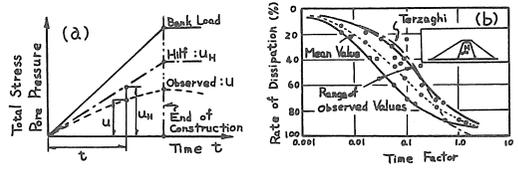


図4 実測値に基づく $U \sim T$ 曲線

$u) / u_{H1}$ で定義される。一方、材料の圧密係数を c_v 、考察点からドレーン部までの(最短)排水路長を H とすると、時刻 t に関して時間係数 $T = c_v t / H^2$ が定まる。このようにして実測データに基づいて中心コア型ダム の $U \sim T$ 関係を整理したものが b) 図である。図で○印は実測値のプロット、実線と破線はそれぞれ実測値のバラツキの範囲および平均値を表わしている。また、一点鎖線は Terzaghi の定荷重に対する理論値である。

図-5 は下図に示す代表的な4つのタイプのダムにつ

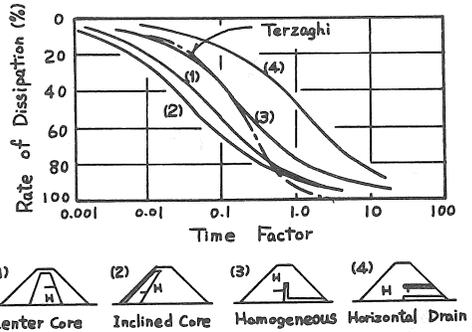


図5 ダムタイプ別の $U \sim T$ 関係

いて実測値を整理し、その平均 $U \sim T$ 曲線を比較したものである。対象としたダムの構築材料は統一分類法で SM, SC から ML に属している。図によると間隙圧の消散が早いのは傾斜コア型、中心コア型、均一型(鉛直ドレーン)、上下排水型の順となっている。また、Terzaghi の理論曲線と比較すると、実測値の $U \sim T$ 関係は全般的になだらかな消散曲線を示し、特に $U > 50\%$ の範囲で理論値の消散傾向との差が著しい。これらダムタイプ別の圧密曲線の相違点は、主に転圧締め固めによる水平、鉛直方向の透水性の相違と、排水方法の相違(両端排水、一端排水のいずれに近い)によるものと考えられる。例えば、上下排水型の圧密が最も遅いのは、室内の圧密試験では表現し難い転圧締め固めによる異方性の影響が大きいためであり、均一型の圧密がコア型のダムより若干遅いのは、排水条件が一端排水に近いとめと考えられる。

さて、図-5の4つの実測曲線は、それぞれある特定のダムについて得られたものであり、また図-4に見られるようにバラツキも大きいことを考えると、一般性があるとは決して言えない。しかし、予備設計の段階など

で概略の議論を行う場合は、類似のダムに対してもある程度の範囲で適用が可能と思われる。この趣旨で、本研究では圧密計算の過程で4つの $U \sim T$ 曲線のいずれかを、解析対象のダムタイプに合わせて使用することを提案する。なお、 $U \sim T$ 曲線を用いて間隙圧の消散を追跡する場合には、図一6に図解したように、各段階の盛土

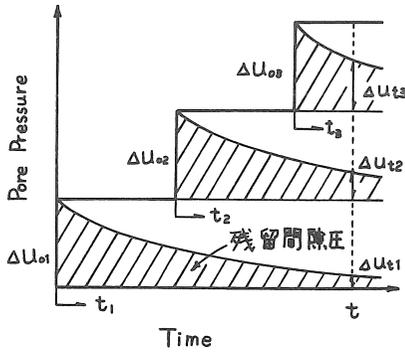
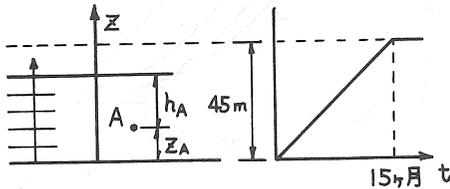


図6 間隙圧の発生と消散

a) 計算モデル



b) 盛土完了時の残留間隙圧分布

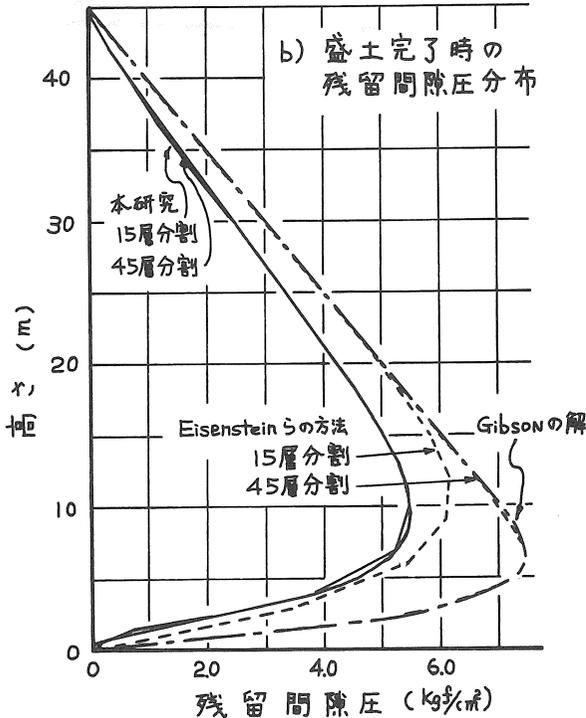


図7 半無限盛土の一次圧密

による発生間隙圧 Δu_{0i} および消散時間 t_i を段階ごとに独立に考え、それぞれに対して $U \sim T$ 関係を用いて消散率を決定する。したがって任意時刻 t における残留間隙圧は、各 Δu_{0i} のその時刻までの残留分 Δu_{ti} の和で与えられる。

3. 理論解との比較

提案した解析手法の妥当性を検証する目的で2つの例について理論解との比較を行った。

(1) 半無限盛土の一次元圧密

図一7 a) に示すように、半無限の広がりをもつ盛土が z 方向に一定速度で盛立てられる場合の間隙圧挙動を考える。盛土は飽和状態を考え、 $\bar{B} = 1$ とする。排水は鉛直方向のみに行われるとし、底面は排水端（したがって両端排水）と考える。盛土材料の物性値として、圧密係数 $c_v = 0.002 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、透水係数 $k = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、体積圧縮係数 $m_v = 0.5 \text{ cm}^2/\text{kgf}$ 、単位体積重量 $\gamma_t = 2 \text{ tf/m}^3$ をあてはめ、15ヶ月で45m盛土される場合の計算を行った。

b) 図は盛土完了時点の残留間隙圧分布を示したものであり、実線は $U \sim T$ 関係に Terzaghi の理論曲線を用いた本法の解、破線は Eisenstein らの方法による解、一点鎖線は一次元圧密方程式を差分法で解いた Gibson の理論解である。前2法においては盛土の分割数（計算段階数）を15層と45層に変えて分割数の影響を調べている。これによると Eisenstein らの方法は分割数の影響が大きい、分割を細かくすれば理論解とはほぼ一致することがわかる。これに対し、本法の解は分割数の影響はほとんどみられないが、理論解と比較した場合、残留間隙圧の値が全般的に小さい（消散が早い）。この例のように境界（地表面）位置が刻々変化し、したがって排水路長も時間とともに変化する問題を移動境界（moving boundary）の問題という。この種の問題に本法を適用する場合、排水路長のとり方は、例えば a) 図の A 点では、地表面までの距離 h_A が z_A より小さい間は h_A とし、 $h_A > z_A$ では z_A をとるのであるが、 $h_A < z_A$ の間は排水路長が刻々と長くなる方向にあるので時間係数 T 、したがって圧密度 U が前段階よりも小さくなる場合が生じ不合理である。それを解消するために図の計算では、図一6で1、2段階の排水路長を $h_1, h_2, (h_2 > h_1)$ としたとき、 $2 \rightarrow 3$ 段階の間の Δu_{01} に関する圧密度は $\Delta U = U(c_v t_1 / h_2^2) - U(c_v t_2 / h_2^2)$ だけ変化するものとして消散量を求めている。しかし、このような計算上の工夫は理論解との差を本質的に解消するものではないので、本法を移動境界の問題に適用する場合は一定の誤差を予め覚悟しておかねばならない。

(2) 漸増盛土による間隙圧上昇

図-8 a) に示すように、両側面が排水端の飽和土層(中心コアの一部を想定)の上面に時間とともに増加する一様荷重 P が載荷される場合の間隙圧挙動を考える。

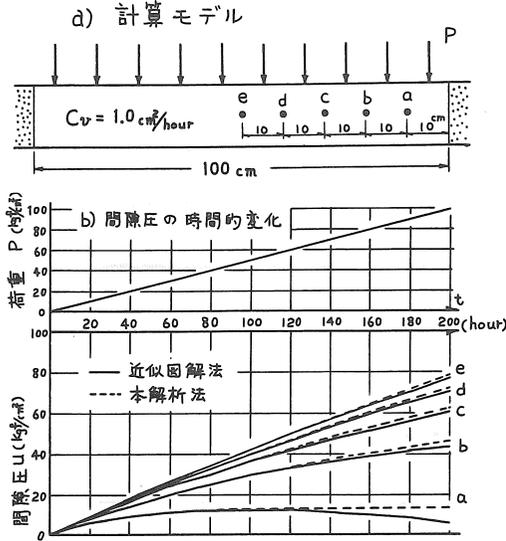


図8 漸増盛土による間隙圧上昇

排水は水平方向のみに行われるとして、Terzaghiの理論曲線を用いた本法の解と、漸増盛土に関する近似図解法による解とを比較してみた。

b)図は、a)図に示すa~eの5点(排水端より10cm間隔)における間隙圧の時間的変化を示したものであり、実線は図解法、破線は本法による解である。これによると排水端近傍を除けば両者の解は良く一致していることがわかる。したがって、コア型ダムや鉛直ドレーンへの排水のように水平への排水が支配的で、盛土の進行にかかわらず排水路長が一定と考えられる場合は、前例のような難点を避けることができ、本解析法が有効に適用できるものと考えられる。

4. 実ダムの解析

図-9は解析対象とした殿川ダムの横断面図であり、●印は循環式間隙圧計の位置を示す¹¹⁾(間隙圧計は電気式的ものが他に幾つか配置されている)。堤高は37m、堤体はほぼ均一の材料で構成されているが、施工期間の制

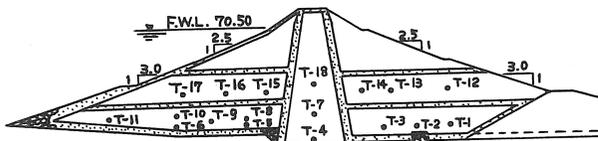


図9 殿川ダム

約から中心部にはほぼ鉛直のドレーン、上下流部に3条の水平ドレーンを設けて盛立てが進められている。図-5の(1)および(4)の $U \sim T$ 曲線は、このダムのコア部および上下流部の実測値に基づいて作成されたものである。そこで今回は、本研究で提案した解析手続きおよび平均 $U \sim T$ 曲線を用いることの妥当性を検討する目的で、データの基となった殿川ダム自体の盛土解析を行い実測値と比較してみた。

図-10 a) は本ダムの概略の施工過程を示したものである。盛立開始から192日でEL. 59m(3段目の水平ド

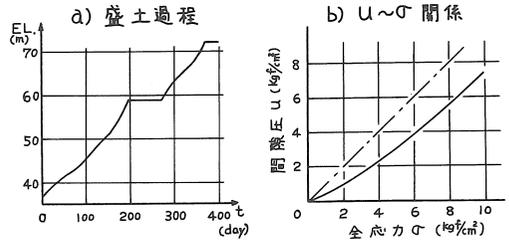


図10 殿川ダムの施工過程と材料の $u \sim \sigma$ 関係

レーン付近)まで盛上げ、75日の休止期間を置いた後、360日目で盛土を完了している。b)図は築堤材料の圧密試験から Hilf 式に基づいて定めた $u \sim \sigma$ 関係である。先に述べたように長期の盛土休止が行われると、その前後の $u \sim \sigma$ 関係 (\bar{B} 値) の特性がかなり変化すると予想されるが、本ダムではこれに関するデータが欠けていることや、休止が開始された時点で盛土が大部分進行していることを考えて、解析では特に上記の点は考慮せず Hilf 式の値をそのまま用いた。計算に当たって横断面は20個の水平層に分割して有限要素モデル化し、コア底面の岩着部は排水端と考えた。また $U \sim T$ 関係については、コア部、上下流部に対して、それぞれ図-5の(1)および(4)の曲線を用いた。他の材料物性として圧密係数 c_v および盛土の単位体積重量 γ_s は、圧密試験および施工管理のデータから平均的な値をとって $c_v = 0.002 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $\gamma_s = 1.96 \text{ tf/m}^3$ とした。

図-11 a) ~ f) はコア部および上下流部の代表的な6点について計算値と実測値の間隙圧挙動を比較したものである。各図で細い実線および一点鎖線は、計算で得られた最大主応力 σ_1 および図-10 b) から推定された発生間隙圧 u_H 、○印は消散(圧密)を考慮した計算値、そして●印は実測値である。これらをみると、コア部、上下流部を問わず総じて盛土休止までは計算値と実測値との対応が良い。しかし、上下流部では休止期間および盛土再開後の挙動において、間隙圧の発生・消散の推移は類似しているものの、絶対量は計算値が実測値を大きく上回っている。この主な理由として次の2点が考えられる。1つは、すでに述べたように盛土休止後は \bar{B} 値が

かなり低下すると予想されるのに対し、計算ではその影響を考慮していないことである。ただし、a), b)図の盛土再開後の間隙圧上昇傾向を見る限りでは、 B 値の低下を無視した影響は本計算であまり大きくないと判断される。第2点は、例えばc)図のT-3のようにコア近傍

の地点では、水平、鉛直方向の透水係数の差を考えればコア両側のドレーンへの排水が支配的と考えられるにもかかわらず、計算上は上下排水のU~T曲線を用いていることである。これはT-9(a)図やT-16(b)図、あるいはT-13(f)図のように、コアから離れた地点

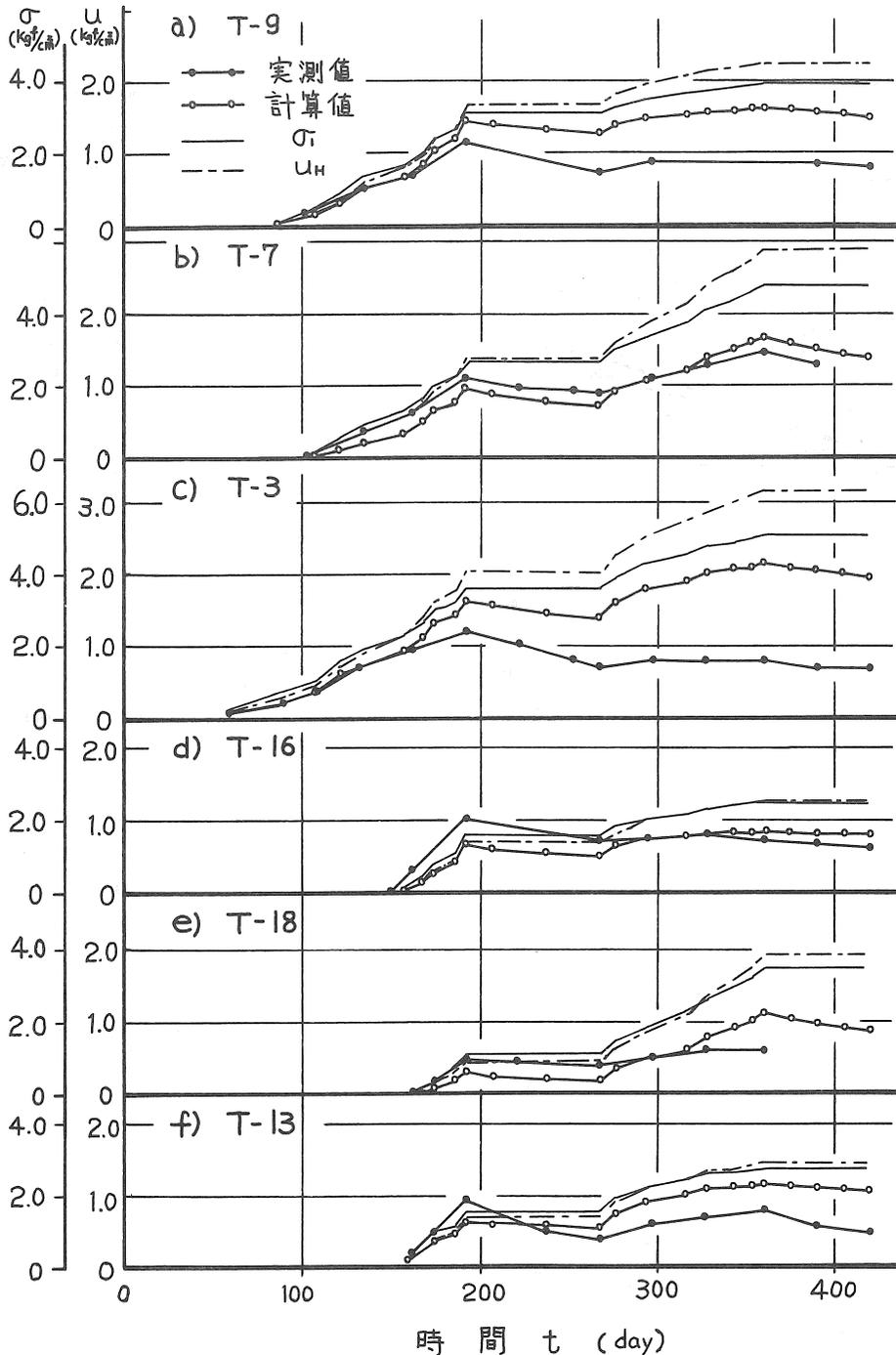


図11 間隙圧の比較(1)

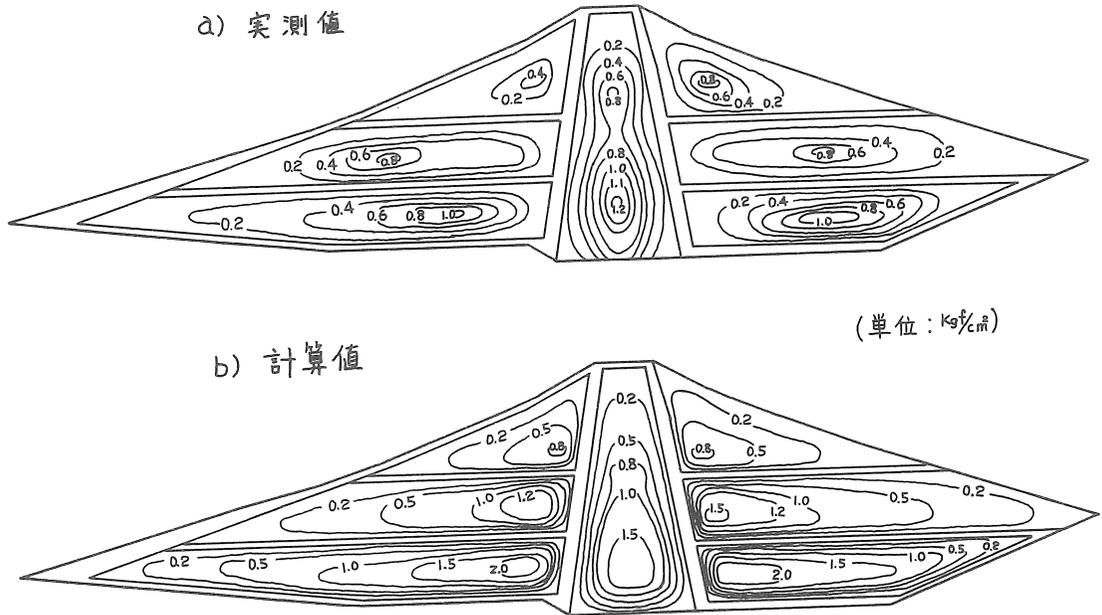


図12 間隙圧の比較(2)

ほど計算値と実測値の差が解消されていることから言えることである。

図一12は盛土完了時点の計算値と実測値の間隙圧分布を比較したものである。図で上下流部のコア近傍では計算値が実測値よりかなり大きく、等値線が集中しているが、これは上記第2点の理由によるものである。コア部では底面を排水端と仮定したことが実際の状況と合致していないが、全体的な分布や間隙圧の値は両者で大巾に異なることはないように思われる。

5. あとがき

本研究では、主としてフィルダムを対象として、施工中の間隙圧や変形挙動を解析するための簡便的な手法を提案した。この方法は最近注目されているカップリング問題としての取扱いのように解の厳密性をねらったものではなく、予備設計の段階などで計算手順としても、また物性値の決定においても、なるべく容易に使用し得る方向で割り切った実用計算法である。したがって、扱う問題によっては、二難点もみられるが、実用の範囲内であれば十分汎用性があるものと考えられる。

本研究で提案した解析手法は、変形まで含めた一連の解析手続きを構成しているが、変形に関する実測データが欠けていたことや、間隙圧の推定を除けば Eisensteinらの方法と変わらないことなどから、今回は間隙圧挙動の議論だけにとどめた。間隙圧の問題に限って言えば、

- 1) 水平・鉛直方向の透水性の相違、
- 2) 各種材料物性の圧密に伴う変化、
- 3) 実測値に基づいて作成した図一

5のU~T関係の信頼性、など本解析法を改良していく上で未解決あるいは資料が不足している部分が少なくない。また本法の適用性をより深く検討していくためには、他の多くのダムについても解析を進めていく必要があると思われる。これらについては今後の課題として漸次取り組んでいきたいと考えている。

参考文献

- 1) Gibson, R. E. : The Progress of Consolidation in a Clay Layer Increasing in Thickness with Time, Geotechnique, Vol.8, No.4, pp.171-182, 1958.
- 2) 沢田敏男・鳥山光司：間隙水圧の消散工法について、土質工学会北陸支部研究発表会講演集, 1967.
- 3) Sandhu, P. S. and Wilson, E. L. : Finite-Element Analysis of Seepage in Elastic Media, Proc. of ASCE, Vol.95 No.EM3, pp.641-652, 1969.
- 4) Yokoo, Y., Yamagata, K. and Nagaoka, H. : Finite Element Method Applied to Biot's Consolidation Theory, Soils and Foundations, Vol.11, No.1, pp.29-46, 1971.
- 5) Hwang, C. T., Morgenstern, N. R. and Murray, D. W. : Application of the Finite Element Method to Consolidation Problems, Applications of Finite Element Method in Geotechnical Engineering, USAEWES, pp.739-764, 1972.
- 6) Lewis, R. W., Roberts, G. K. and Zienkiewicz, O. C. : A Non-linear Flow and Deformation Analysis

- of Consolidated Problems, Proc. of 2nd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.II, pp.1106-1118, 1976.
- 7) Cavounidis, S. and Höeg, k.: Consolidation During Construction of Earth Dams, Proc. of ASCE, Vol.103, GT10, pp.1055-1068, 1977.
- 8) Duncan, J. M.・小澤良夫：アースダム建設中および満水位の間隙水圧の挙動について，第14回土質工学研究発表会，pp.225-228，1979.
- 9) 中川加明一郎・大野正己・井田文雄：フィルダムのシャ水ゾーン内における間げき水圧挙動の解析手法，土木学会第36回年次学術講演会，pp.1658-1659，1981.
- 10) Eisenstein, Z. and Law, S. T. C.: Analysis of Consolidation Behavior of Mica Dam, Proc. of ASCE, Vol.103, GT8, pp.879-895, 1977.
- 11) 山口柏樹・大根義男：フィルダムの設計および施工，技報堂，東京，1975.
- 12) Hilf, J. W.: Estimating Construction Pore Pressures on Rolled Earth Dams, Proc. of 2nd ICSMFE, Vol.3, pp.234-240, 1948.
- 13) Bishop, A. W.: Some Factors Controlling the Pore Pressure Set up during the Construction of Earth Dams, Proc. of 4th ICSMFE, Vol.2, pp.294-300, 1957.

(受理 昭和58年1月16日)