

高瀬ダム湛水過程の浸透流に関する実測値と 解析値との比較検討

COMPARISON BETWEEN OBSERVATION AND CALCULATION ON SEEPAGE
FLOW THROUGH TAKASE DAM DURING RESERVOIR FILLING

駒田 広也*・西岡 利道**・松尾 和俊***

By Hiroya KOMADA, Toshimichi NISHIOKA and Kazutoshi MATUO

1. はじめに

高瀬ダムは、信濃川水系高瀬川に建設された高さ 176 m、堤体積 1 160 万 m³ の中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。昭和 53 年 12 月 26 日に湛水を開始し、昭和 54 年 5 月に L.W.L に達して、同 6 月一部運転を開始している。

高瀬ダムには、力学的、水理学的挙動を把握するために、各種の計測器が埋設され、すでに数多くのデータが得られている。フィルダムの安全性に関して、最も重要な初期湛水時には、主として、間隙水圧計、観測孔水位および漏水量のデータをもとに、その挙動監視を行っている。一方、これらの計測データから、堤体の安全性を検証するために、2 次元飽和・不飽和浸透流解析手法¹⁾を用いて、初期湛水時における浸透水の挙動について、実測値と計算値との比較検討を行い、高瀬ダム湛水時の水理的挙動の解明を試みたものである。

2. 飽和・不飽和浸透流解析手法の概要

複雑な構造の地層内に自由水面を有する地下水の挙動の数値シミュレーションには、有限要素法を用いた飽和・不飽和浸透流解析が多く用いられるようになってきた。従来の飽和領域のみを解析対象として、自由水面を 1 つの境界とした解析法では、自由水面が時間の経過とともに変化する非定常浸透流問題に対しては、その適用範囲にかなりの制約を受ける。すなわち、フィルダムの湛水のように自由水面が大きく変化する場合には、解析することが困難である。一方、飽和領域と不飽和領域と

を同格に扱う飽和・不飽和浸透流解析では、不飽和浸透流の現象が把握されにくく、不飽和透水係数等の測定が困難であるが、解析領域の境界を自由水面でなく、堤体表面を境界とすることができるので、自由水面が大きく変化する場合にも解析が容易である。ここでは高瀬ダムの初期湛水過程の浸透流解析に用いる飽和・不飽和浸透流解析手法の概要を述べる²⁾。

不飽和状態の地盤中における浸透水の移動の形態の 1 つに自由水面上の毛管水帯の水のサイホン移動がある。フィルダム内部の不飽和浸透水の移動はおもにこの形態によるものと考えられる。そして、毛管水帯の水のサイホン移動による不飽和浸透流の基本式は、Richards の毛管ポテンシャル理論より、2 次元問題では次式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_x \frac{\partial (h_p + h_e)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_y \frac{\partial (h_p + h_e)}{\partial y} \right\} = C \frac{\partial h_p}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

上式の各係数について以下に述べる。

a) $h_p(r, t)$ ……圧力水頭
(m)

ここに、 r は位置、 t は時刻を示す。

$h_p \geq 0$ では自由水面以下の水圧を示す。 $h_p < 0$ では自由水面以上の土中において、土粒子が水分を保持しているサクション圧であり、毛管ポテンシャルともいわれている。すなわち、不飽和地盤

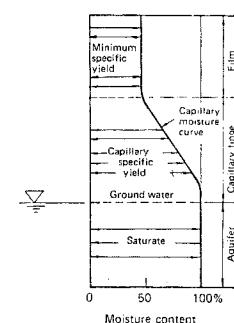


図-1 土中の保水状態

表-1 Keen による理論毛管上昇高

土壤名	細 砂	粗 砂	細 砂	微 砂	細微砂	粘 土
毛管上昇高 (cm)	10	45	225	937	4 500	4 500 以上

* 正会員 工博 電力中央研究所土木技術研究所 地盤耐震部地盤研究室

** 正会員 東京電力(株) 技術部電源計画課

*** 正会員 東京電力(株) 今市水力総建設所

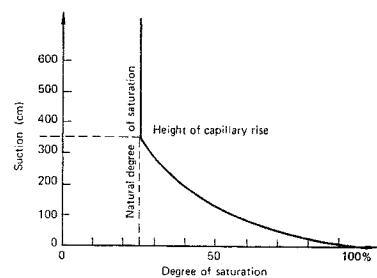


図-2 サクション圧と飽和度の関係の推定

表-2 Polubarnova-Kochinaによる毛管上昇高

土の種類	毛管上昇高(cm)
粗い砂	2~5
砂	12~35
細砂	35~70
シルト	70~150
粘土	200~400以上

の毛管現象や界面作用によつて生ずる負の間隙水圧である。サクション圧と含水比との関係は地盤材料によって大きく異なるので実測するのが望ましい。しかし、図-1に示す地下水面より上部の土中の保水状態の分布を参考にして、今回の解析に用いるロックフィルダムのコア材のサクション圧と含水比との関係を、図-2のように、毛管上昇高と現場飽和度をキーポイントとして、直線と2次曲線である程度推定することができる。なお、毛管上昇高は、表-1³⁾および表-2⁴⁾に示した値を参考にして、土質の種類に応じて推定が可能と思われる。

b) $h_e(r)$ ……位置水頭(m)

式(1)におけるyに相当する。

c) $k_x(r, i, S_r), k_y(r, i, S_r)$ ……透水係数(m/s)

透水係数は動水勾配*i*および飽和度*S_r*の関数として扱われる。特に透水係数は飽和度に大きく影響されるが、図-3に示すように⁵⁾、飽和透水係数に対する不飽和透水係数の比は、土質の種類が異なっても大きな差異がなく、不飽和透水係数を実測しなくとも、図-3よりおおむね推定することが可能である。

d) $C(r, h_p)$ ……比水分容量(1/m)

$C = d\theta/dh_p$ (θ は体積含水率)

で定義される。図-4に示すように、 h_p と θ の関係から h_p と*C*の関係が得られる。飽和状態では $C=0$ となり、式(1)は飽和・不飽和領域の浸透流を支配する方程式と考えることができる。すなわち、飽和領域における浸透流に対

する方程式は、不飽和透水係数、比水分容量、負圧を考慮することにより、不飽和領域にも拡大して成り立つことがわかる。したがって、飽和・不飽和浸透流の支配式である式(1)

を重み付き残差法を利用して数値解析することができる⁶⁾。

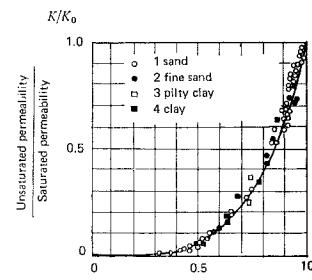


図-3 透水係数と飽和度との関係(ブタコスキイのデータより)

本解析において問題であると思われるは、不飽和領域における透水係数およびサクション圧の扱いが解析の基本概念としては重要であるにもかかわらず、実験等に基づく裏づけがあまりない、という点である。しかしながら、不飽和領域におけるそれらの物性値として、図-3に示した不飽和透水係数ならびに図-2に示したサクション圧と飽和度の関係を用いて、別に湛水池地山内浸透流の実測値と計算値との比較した結果では⁷⁾、非常によい一致が得られている。したがって、以下の計算では、図-3に示した不飽和透水係数ならびに図-2に示したサクション圧の推定法を用いることにした。

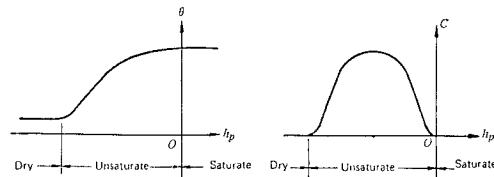


図-4 比水分容量

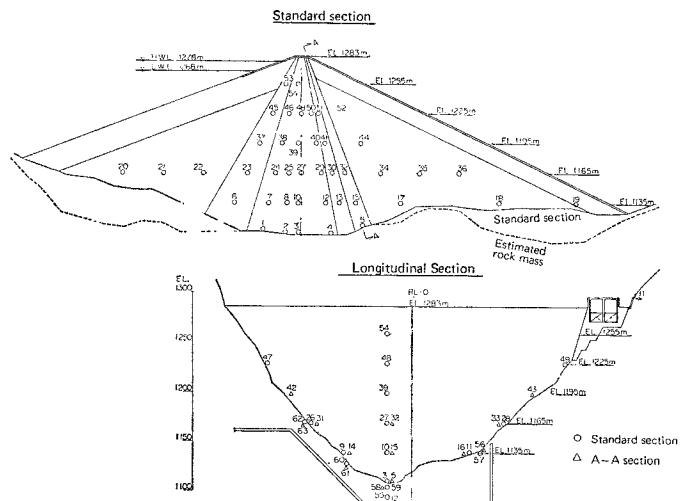


図-5 高瀬ダム計測設備配置図

3. 高瀬ダムの計測設備

高瀬ダムには、盛立時および湛水時の力学的、水理学的挙動を把握するために、変位計、間隙水圧計、土圧計、地震計等の各種の計器が埋設され、数多くのデータが得られている。このうち、フィルダムの安全性に関して最も重要と思われる初期湛水時には、主として間隙水圧計（図-5）、観測孔水位および漏水量のデータをもと

に、その挙動監視を行った。なお、間隙水圧計は差動トランス型であり、埋設前の計器の誤差は 0.3 kg/cm^2 (29.4 kN/m^2) とされている。

4. 高瀬ダムの浸透流解析に関する物性値

高瀬ダムは、図-6 に示すように、中央土質遮水壁のロックフィルダムである。図-6 には、湛水過程の浸透流解析結果に大きく影響すると思われる各ゾーンの透水係数の現場管理試験値も示す。

これらの透水係数は、図-7 に示す堤体各ゾーンの現場管理試験結果のヒストグラム、図-8 に示すコア材料の管理実績、および図-9 に示すダム基礎岩盤のルジオン値から決定した値である⁸⁾。そして、堤体コアゾーンの不飽和領域における不飽和透水係数は図-3 の関係を用い、サクション圧は図-2 の推定法を用いて、図-10 に示す透水係数ならびにサクション圧と含水比の関係を求めた。

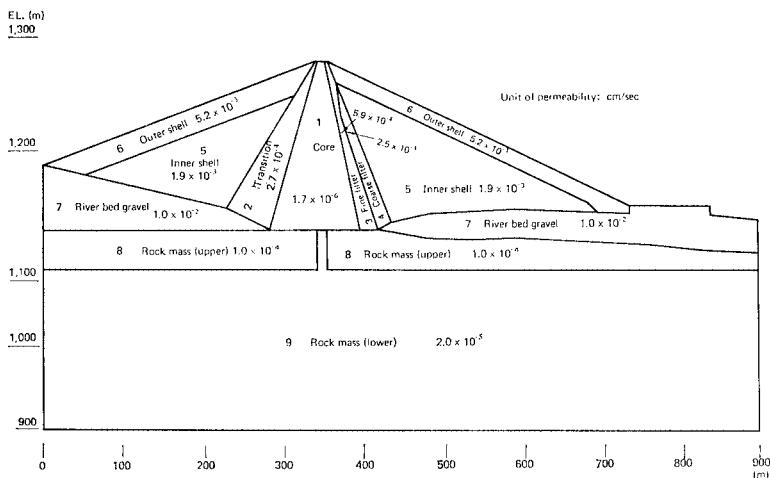


図-6 高瀬ダムの上下流方向断面図と各ゾーンの透水係数

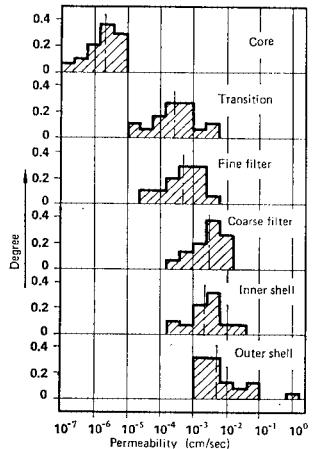


図-7 ゾーン別透水係数
(ヒストグラム)

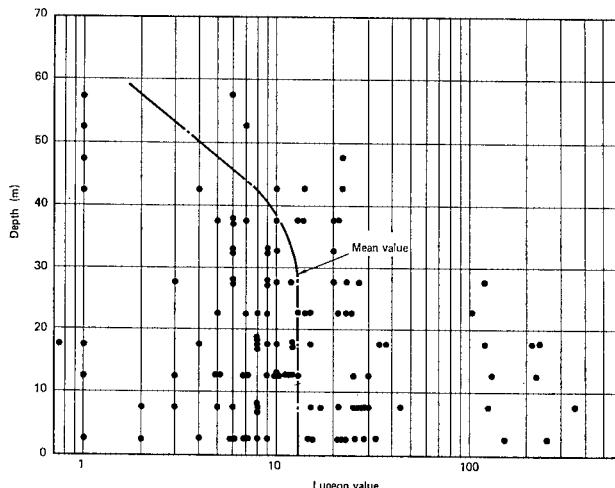


図-9 ダム基礎岩盤のルジオン値

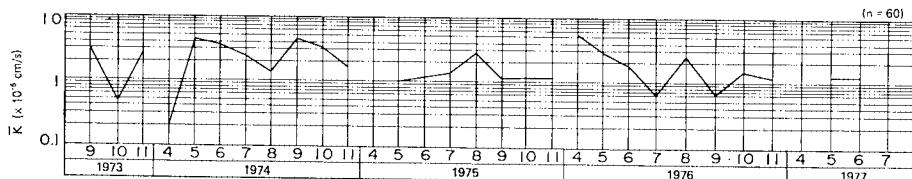


図-8 コア材料の管理実績

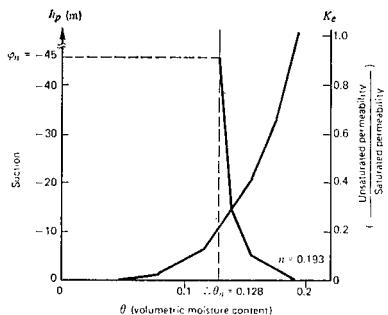


図-10 コアゾーンの不飽和領域における透水係数ならびにサクション圧と含水率の関係

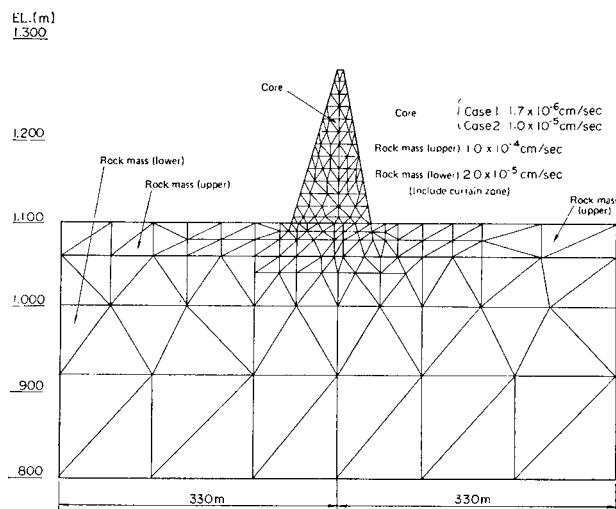


図-11 解析モデル

5. 実測値と計算値の比較検討

初期湛水の実測結果をみると、フィルターおよびシェルゾーンは、コアに比して透水係数が2~3オーダー高いため、コアゾーン内の間隙水圧分布ならびに地下水水面形の経時変化にはほとんど影響を与えていないと考えられる。このことから、初期湛水過程の解析における解析領域は、図-6に示した上下流方向断面図における各ゾーンのうちで、コアおよび岩盤のみとして、図-11に示す解析モデルを用いた。コアの透水係数については、図-6に示した現場管理試験の平均値 $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ のほかに、設計値 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ についても計算を行った。すなわち、Case-1として、 $k = 1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、Case-2として $k = 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ の2種類の解析を行った。なお、岩盤については、深さ40mで上部と下部に分け、上部岩盤のうち、幅10mのカーテングラウトについては、下部岩盤と同一の透水係数とし

た。

(1) 間隙水圧

図-12に間隙水圧の経時変化について、実測値を実線で、計算値のCase-1を一点鎖線、Case-2を破線でそれぞれ示す。ただし、コア底部(EL. 1107m)および岩盤内については、Case-1とCase-2にほとんど差がなかったので、破線のみで示した。この図から以下のことが考察される。

- ① 実測値と計算値との比較では、Case-1($k = 1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$)の計算値よりも、Case-2($k = 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$)の計算値が、一般に実測値によく一致している。

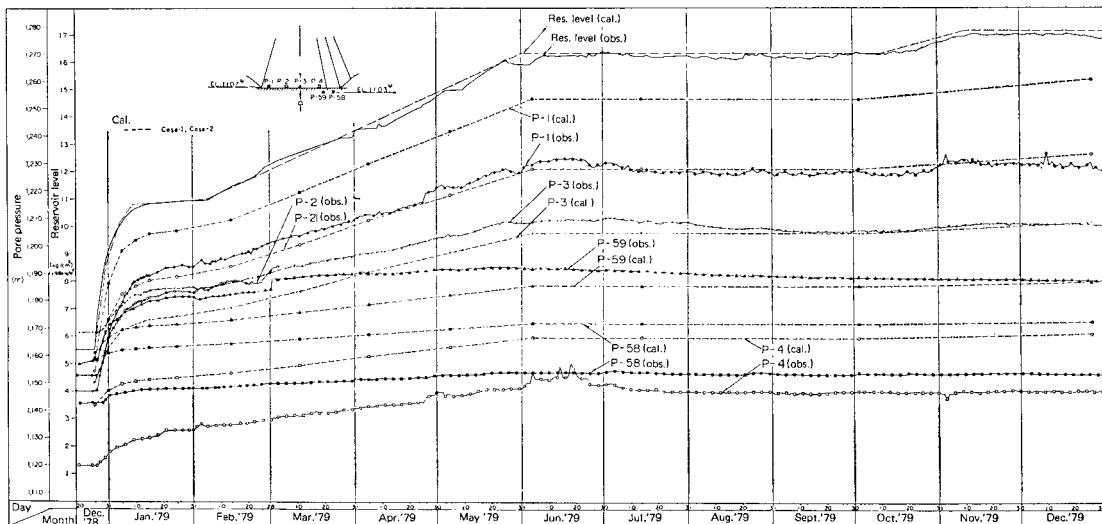


図-12(a) 間隙水圧の経時変化 (EL. 1107 m)

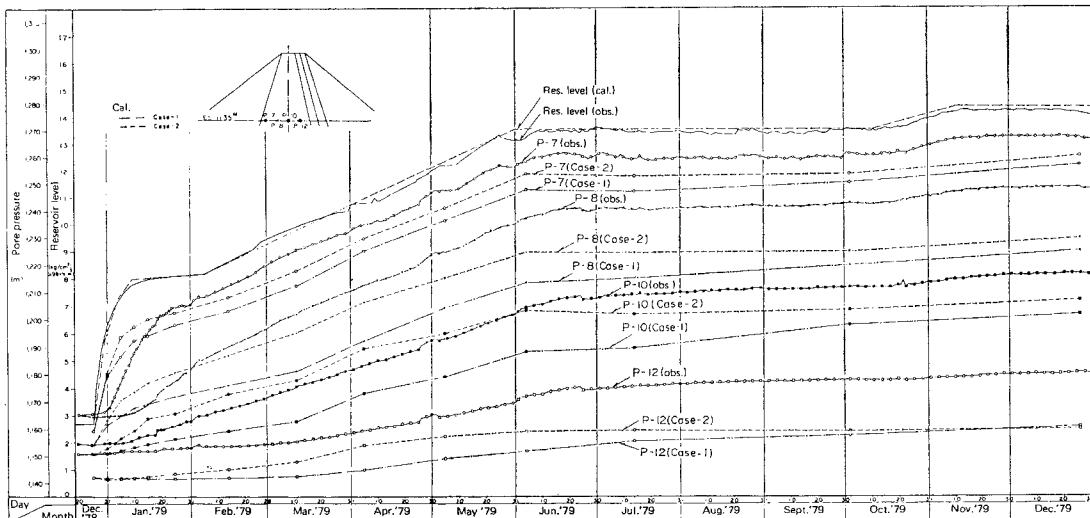


図-12(b) 間隙水圧の経時変化 (EL. 1135 m)

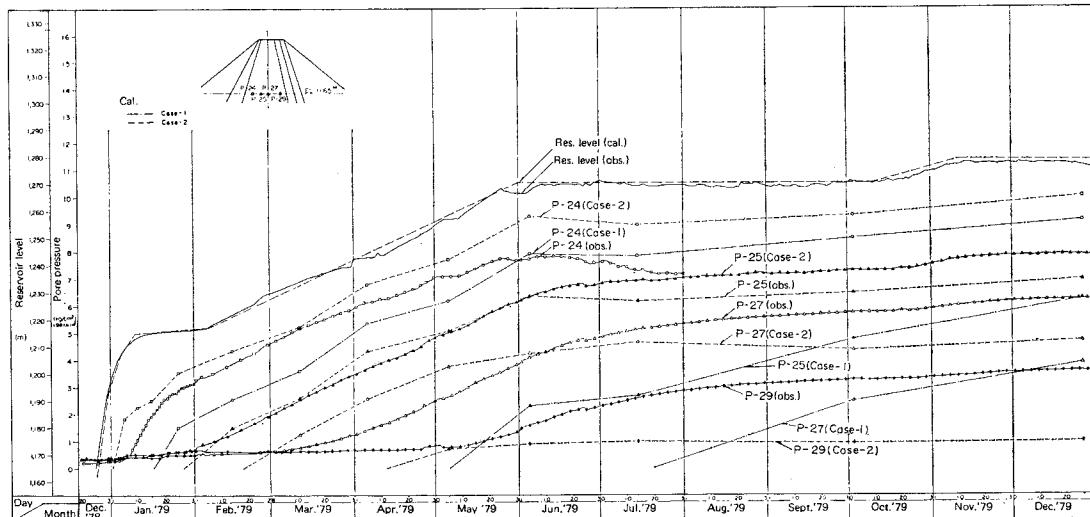


図-12(c) 間隙水圧の経時変化 (EL. 1165 m)

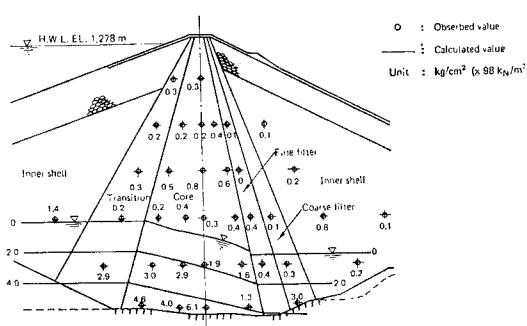


図-13 初期間隙水圧の分布 (53.12.26)

- ② コア底部 (EL. 1107 m) では、Case-1 と Case-2 との計算値の差はほとんど $0.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ($9.8 \text{ kN}/\text{m}^2$) 以内である。これより、コア底部の間隙水圧分

布および非定常な間隙水圧の伝播は、コアの透水係数にはほとんど依存せず、むしろ、コアよりも透水係数の高い基礎岩盤からの浸透流の影響が大きいことがわかる。

- ③ 高瀬ダムのコア材料は他のダムに比べ、間隙水圧の発生は比較的少ないが、それでも 図-13 に示すように、堤体深部を中心にわずかではあるが、過剰間隙水圧が残っている。また計算では、上部基礎岩盤の透水係数を $1 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$ として均一に扱っているが、図-9 にみられるように、実際の透水係数にはかなりのばらつきがあるものと思われる。岩盤内およびコア底部の間隙水圧についての実測値と計算値の差は、これらの理由によるものと思われる。間隙水圧計 P-4 および P-58 における実測値と計算

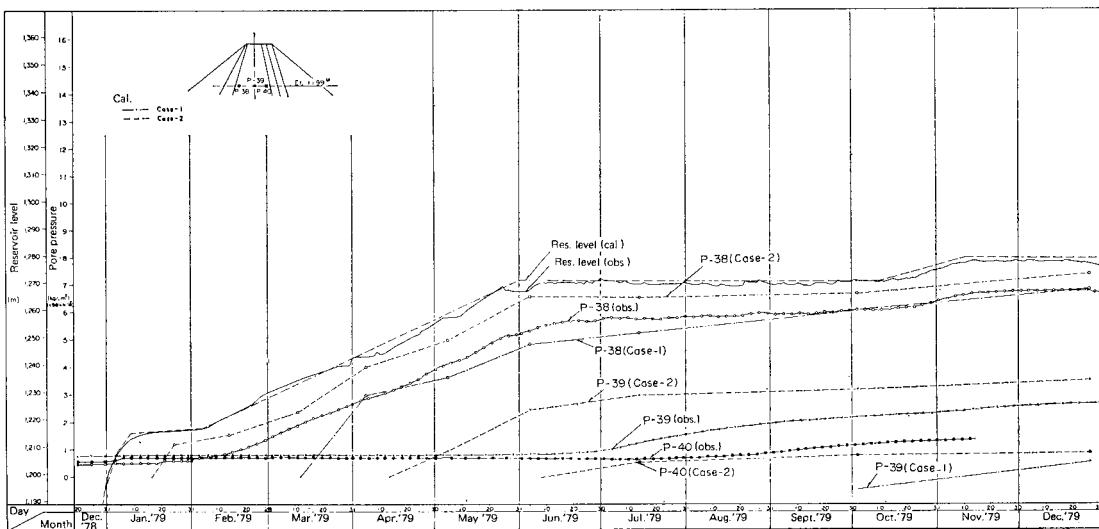


図-12(d) 間隙水圧の経時変化 (EL. 1 199 m)

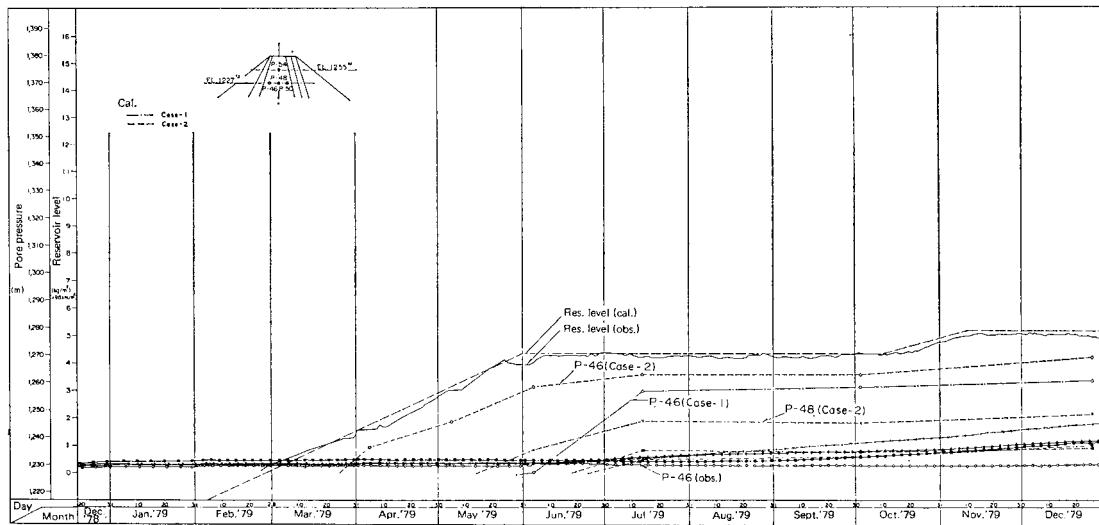


図-12(e) 間隙水圧の経時変化 (EL. 1 255 m)

値の差は初期間隙水圧の違いに起因しており、おののおのの増分量で比較すれば、実測値と計算値はよく一致していることがわかる。

④ 計算では、上流側のトランジション、シェル、および下流側のフィルター、シェルを設けなかったために、これらの領域における間隙水圧の低減効果が無視されたことになる。したがって、コア上流側では、計算値が実測値よりも大きく、コア下流側では小さくなる傾向がある。コア底部上流端の P-1 およびコア下流側の P-12, P-29 にこの影響がみられる。

⑤ 全体的にみて、実測値、計算値とも湛水前に飽和していた（自由水面下にあった）コア底部および岩

盤の間隙水圧は、ほぼ水位上昇に比例して増大するのにに対し、湛水前に不飽和状態であったコア上部の間隙水圧は、その標高に応じ、数か月の時間遅れを生じている。

(2) 自由水面と透水係数

計算 (Case-2) によって求めた自由水面の経時変化を図-14 に示す。一方、自由水面の計測に関しては、下流側シェル内で観測孔水位を用いて、直接測定しているが、コアゾーンの内部では直接測ることができない。さらに、堤体コア内の間隙水圧は、施工時の過剰間隙水圧が存在する領域では、貯水池からの水圧荷重によって、必ずしも自由水面の到達と一致して始動しているわけで

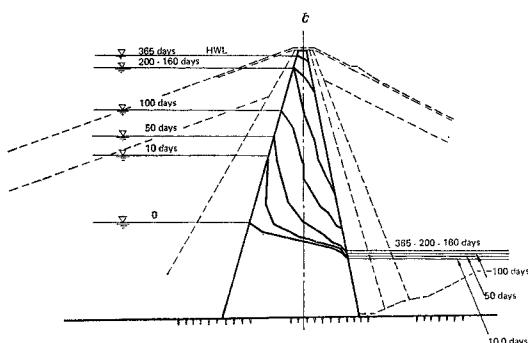


図-14 自由水面の経時変化（計算 Case-2）

表-3 間隙水圧計の始動時期
(湛水開始後の日数で表示)

計 器 No.	設置位置 (標高 EL.) (m)	実測 値 (日)	計 算 値 (日)	
			Case-1 $K(\text{コア}) = 1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$	Case-2 $K(\text{コア}) = 1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$
P-7	1 135	0	0	0
8	"	10	0	0
10	"	10	0	0
12	"	10	0	0
P-24	1 165	10	20~30	5~10
25	"	20~40	130~160	30~50
27	"	70	200~365	50~75
29	"	120~140	365 以上	100~130
P-38	1 199	25~45	75~100	20~30
39	"	200~220	365 以上	100~130
40	"	220~240	"	160~200
P-48	1 227	190~210	365 以上	130~160
50	"	260~280	"	160~200
P-54	1 255	160~180	365 以上	160~200

はない。しかしながら、ここでは間隙水圧計が貯水池からの浸透流によって、顕著に動き出した時点を自由水面の到達とみなした。表-3は、コア内の間隙水圧計の始動時期を湛水開始後の日数で表わし、計算値と比較したものである。表-3からわかるように、自由水面の発達の状況はコアの透水係数と非常に関係があり、透水係数が高いほど始動時期が早くなっている。計算値の Case-2 と実測値を比較すると、EL. 1 165 m まではよく一致しているが、EL. 1 199 m 以上では計算値の始動時期がいくぶん早くなっている。一方、計算値の Case-1 と実測値を比較すると、大幅な差異があり、計算値の始動時期がかなり遅い。そこで高瀬ダムのコアの透水係数を推定するために、コアの透水係数をパラメーターにとって追加計算し、実測値と比較した。すなわち、コアの透水係数をそれぞれ $1.7, 4, 6, 8, 10 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ で均一と

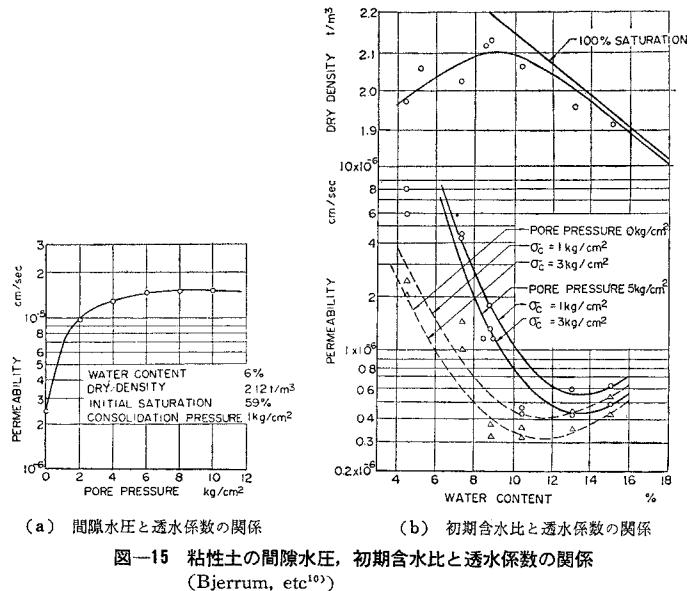
表-4 コアの推定透水係数

計 器 No.	設 置 位 置 (標高) EL. 1 165 m	推 定 透 水 俹 數 (cm/s)	
		各 点	平 均
P-24	EL. 1 165 m	5×10^{-6}	
25	"	9 "	7×10^{-6}
27	"	6 "	
29	"	8 "	
P-38	EL. 1 199 m	3×10^{-6}	
39	"	3 "	4×10^{-6}
40	"	6 "	
P-48	EL. 1 227 m	4×10^{-6}	
50	"	4 "	4×10^{-6}
全 平 均			5×10^{-6}

仮定して計算した結果から、各計器位置での間隙水圧の始動時期を求めた。表-4は、計算値と実測値の間隙水圧の始動時期を比較することにより推定したコアの透水俹数である。この結果によると、高瀬ダムのコアの透水俹数は、EL. 1 165 m 付近で $7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、それより上部では $4 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 程度であり、全体的にみると $5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ と推定される。

一般には、盛立から湛水までの長期間の上載荷重による圧密によって、コアの下部では上部より透水俹数が、わずかではあるが低下すると考えられる⁹⁾。しかしながら、今回の計算値と実測値の比較検討では、むしろコアの下部が上部より透水俹数がやや高いという結果が得られたこと、また、全体的にみて管理実績平均値に比べて透水俹数が高かったことから、その理由を以下のように考えた。

図-15は、アースダム用いた砂質粘土について、Bjerrumらが行った透水試験の結果である¹⁰⁾。図-15



(a) は初期飽和度 59% に締め固められた供試体に対し、間隙水圧を 0 から 10 kg/cm^2 (980 kN/m^2) まで段階的に変化させて、透水試験を行った結果である。これによると間隙水圧が 0 のときは $2.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ であったものが、間隙水圧が大きくなると透水係数は高くなり、間隙水圧が約 8 kg/cm^2 (784 kN/m^2) ではほぼ一定の $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ になっている。図-15 (b) は、種々の含水比で締め固めた供試体に対し、それぞれ間隙水圧を 0 および 5 kg/cm^2 (490 kN/m^2) として透水試験を行った結果である。これによると、最適含水比より 4~5% 含水比が低い場合には、両者には 10 倍近い差があるのに対し、最適含水比より 4~5% 含水比が高い場合には、両者にはほとんど差がなくなる。

高瀬ダムの場合、コア材料の最適含水比 (w_{opt}) は平均 8% であるが、実際の施工では、 $w_{opt} \sim w_{opt} + 2.5\%$ の範囲であり、平均して $w_{opt} + 1\%$ 程度で盛り立てられている。図-15 (b) についてみると $w_{opt} + 1\%$ では、間隙水圧 0 と 5 kg/cm^2 (490 kN/m^2) の差は 2.5 倍程度となっている。通常の現場透水試験は、間隙水圧がほぼ 0 で行われるのに対して、貯水池からの水圧はかなり高いことを考えると、推定透水係数の平均値 ($5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$) が管理実績平均値 ($1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$) の約 3 倍であることは、Bjerrum らの実験結果とおおむね一致している。

また、コアの透水係数は上部より下部がやや高いという計算結果も、コアの下部は上部に比べて水圧が高いことを考慮すれば 図-15 (a) とよく対応している。しかしながら、計算では施工時の残留間隙水圧が考慮されておらず、また不飽和土に関する物性値の裏づけが十分でないことから、この問題は今後の検討すべき課題であると思われる。

(3) 漏水量

一般に、ダム下流側への漏水量の実測値は貯水池からの漏水のほかに、地山の在来地下水、降雨量、測定設備の規模および位置等によって、その絶対値にかなりの差が生じることが考えられる。一方、今回の計算は上下流方向標準 2 次元計算を行っているので、単位幅当たりの漏水量が計算される。したがってダム全体の漏水量を推定することには、かなりの困難があるといえる。図-16 に漏水量の実測値および計算値 (Case-2) を示す。ただし、実測値は l/min で、計算値は $\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ で、それぞれ表わしている。実測値をみると、降雨による一時的な影響はあるが、湛水初期では漏水量は水位にほぼ追随して増大し、貯水位が一定になった後もやや増大している。一方、計算値についてみると、岩盤からの漏水量はほぼ水位に追随し、水位が一定になると、漏水量も一定

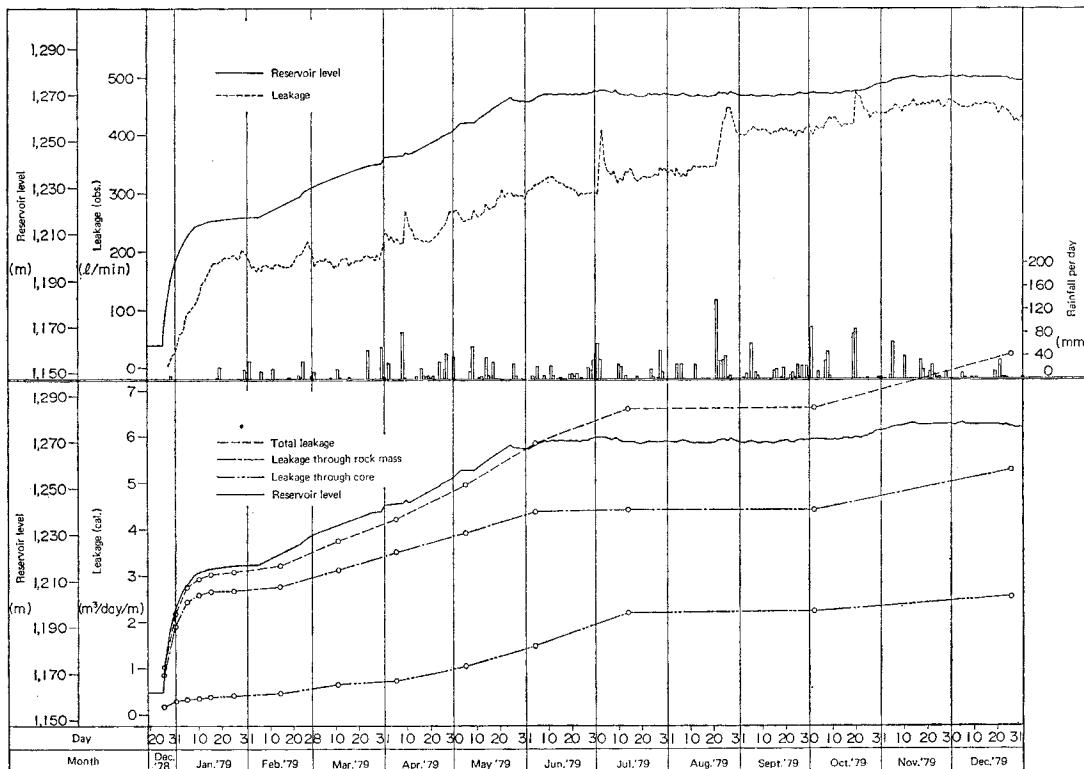


図-16 漏水量の経時変化

になるのに対し、コアの漏水量は下流側の浸出面が広がり始める100日後から浸出面の形成がほぼ終了する200日後まで増大し、その後一定となっている。計算値の合計漏水量を定性的にみれば、実測値とほぼ同様の傾向を示しているといえる。

6. 結 語

フィルダム湛水時の水理的挙動を解析するために、飽和・不飽和浸透流解析プログラムを用いて、高瀬ダムの初期湛水時における2次元非定常浸透流解析を行い、間隙水圧等の実測値との比較検討を行い、以下のような結果が得られた。

(1) 計算値と実測値とを比較すると、間隙水圧の挙動はかなりの一致を得た。なお、コア底部および基礎岩盤における計算値と実測値の差は、施工時の残留間隙水圧および基礎岩盤の透水係数の不均一性によるものと考えられる。

(2) 全体的にみて、実測値、計算値とも湛水前に飽和していた(自由水面下にあった)コアおよび岩盤の間隙水圧は、ほぼ水位上昇に比例して時間遅れなく増大するのに対し、湛水前に不飽和状態であったコア上部の間隙水圧は、その標高に応じ、数か月の時間遅れを生じている。

(3) コアの透水係数を変えた計算結果では、コア底部の間隙水圧は、コアの透水係数の違いによる影響をほとんど受けていない。これに対し、コア内の自由水面の発達状況はコアの透水係数と非常に関係があり、透水係数が高いほど自由水面の発達が早い。

(4) 実測値と計算値との比較ならびにBjerrumらの実験結果に基づけば、高瀬ダムのコアの透水係数は、下部では 7×10^{-6} cm/s、上部では 4×10^{-6} cm/s、平均的にみて 5×10^{-6} cm/s程度と推定される。

(5) 一般に、漏水量の実測値は貯水池からの漏水の

ほかに、地山の在来地下水、降雨量、測定設備の規模および位置等によって、絶対値にかなりの差が生じることが考えられる。一方、今回の計算は上下流方向標準2次元断面の検討であるので、計算値と実測値との比較は困難である。そこで、両者の傾向など定性的な面で比較すると、計算値の漏水量の経時変化は実測値の日変化とよく一致した傾向が得られた。

以上のように、高瀬ダム湛水時における間隙水圧、自由水面、漏水量等の浸透流に関する実測値と計算値との比較を行い、おむねの一致が得られた。したがって、湛水時の堤体の安定性に影響を及ぼすコアの透水係数が当初の設計値以下に保たれ、遮水機能が十分に保持されていることが検証された。

参考文献

- 1) 駒田広也：飽和・不飽和土中の非定常浸透流解析、電力中央研究所報告、No. 377015、昭和53年2月。
- 2) 駒田広也：フィルダムの浸透流に対する安定解析、電力土木、No. 154、pp. 40~49、昭和53年5月。
- 3) 清水英治：技術手帳 pF、土と基礎、Vol. 21、No. 2、pp. 81~82、Feb., 1973.
- 4) Polubarnova-Kochina : The Theory of Ground Water Movement, Translated by J.M. Roger de Wiest, Princeton Univ. Press, p. 19, 1962.
- 5) 八幡敏雄、ほか2名：土壤物理実験、東京大学出版会、p. 97, 1967.
- 6) Neuman, S.P. : Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc. ASCE, Vol. 99, No. HY 2, pp. 2233~2250, Dec., 1973.
- 7) 駒田広也、宮口友延：湛水池地山内浸透流に対する遮水および排水に関する考察、電力土木、No. 170、pp. 109~118、1981年1月。
- 8) 高井亮治：高瀬ダムの堤体と材料、大ダム、No. 82, pp. 1~31, 1977年12月。
- 9) 南一良：南原ダムおよび明神ダムのコア材料、大ダム No. 81, pp. 34~58, 1977年9月。
- 10) Bjerrum, L. and J. Hunder : Measurement of Permeability of Compacted Clays, Proc. Int'l Conf. SMFM, Vol. 1, pp. 6~8, 1957.

(1980.6.13・受付)