

## 傾斜コア型フィルダムにおける間隙水圧挙動予測の事例

## CASE STUDY ON FORECAST OF PORE WATER PRESSURE IN INCLINED CORE FILL-TYPE DAM

藤井 弘章\* (Hiroaki Fujii)  
 成田 睦也\*\* (Mutsuya Narita)  
 島田 清\*\*\* (Kiyoshi Shimada)  
 西村 伸一\*\*\*\* (Shinichi Nishimura)

本研究は、湛水過程における実際の傾斜コア型フィルダムのコア内間隙水圧挙動を、比貯留係数 ( $S_s$ ) を考慮した飽和・不飽和浸透流解析法を用いて、精度良く予測することを目的とした。

$S_s$  は、コア材料の変形特性より推定したが、良好な予測結果は得られなかった。次に、湛水初期 (60日間) の実測間隙水圧データより、みかけの比貯留係数 ( $S_s'$ ) を推定した。推定方法は、まず数種類の  $S_s'$  を仮定し、これらの  $S_s'$  による解析値と実測値との相関係数 ( $r$ ) を算出した後、仮定した  $S_s'$  の中から  $r$  を指標として推定値を選び出す方法を用いた。推定値は、 $S_s' = 2.0 \times 10^{-2}/m$  を得た。これは、コア材料の変形特性から推定した  $S_s$  の12.5倍である。この  $S_s'$  を用いて、実測データが得られている約4年間の間隙水圧挙動を予測した結果、予測精度  $\pm 10\%$  以内と実測挙動を良好に予測することができた。

また、本推定方法では試験湛水における貯水位変動パターンが重要な要素であることを示し、Kダムの試験湛水方法が推定に有効であることを確認した。

キーワード：間隙圧，事例，浸透，ダム，不飽和土，飽和，飽和土 E7/H4

## 1. まえがき

フィルダム堤体内の間隙水圧は、堤体内の有効応力分布を変化させ、堤体の安定に大きな影響を及ぼす。この間隙水圧の挙動を予測することは、堤体の安定解析上重要かつ有用である。築堤中に生じたコア内部の過剰間隙水圧は、時間の経過とともに減少する。しかし、一般に過剰間隙水圧が完全に消散する前に湛水が開始されることが多く、地山からの湧水の影響も加わって、堤体の変形と浸透流との影響下で間隙水圧は複雑な挙動を示す。

本研究では、湛水試験の完了した傾斜コア型フィルダムについて飽和・不飽和浸透流解析<sup>1)</sup>を行い、湛水初期に得られた実測間隙水圧データを用いて、パラメータを推定し、その後の間隙水圧挙動を予測しようとした。

飽和・不飽和浸透流解析には数々の優れた研究があるが、実際のフィルダムに適用した事例<sup>2), 3), 4)</sup>は少ない。筆者等は、いくつかの農業用フィルダムについて、間隙水圧の測定事例を得てきた。本論では、その内のKダムについて飽和・不飽和浸透流解析を適用した。

2. 研究対象ならびに実測間隙水圧の挙動<sup>5)</sup>

## 2.1 対象ダムと試験経過の概要

研究対象は、かんがい用のKダムであり、1980年着工、1986年2月に築堤完了し、1987年2月から湛水を開始した。ダム概要を表-1、図-1に示した。堤体には現在、土圧計9個、間隙水圧計15個が埋設されている。計測は、貯水当初1時間おき、その後12時間おきに行われている。ただし、1988年3月、落雷により、間隙水圧計5個、土圧計4個が故障した。間隙水圧計はひずみゲージ型で、その配置は図-1に●印で示したように、基礎岩盤内に2個、コアゾーン内に9個、トランジションゾーン内に4個である。図中の数字は計器番号であり、各計器の埋設標高は表-2に示した。

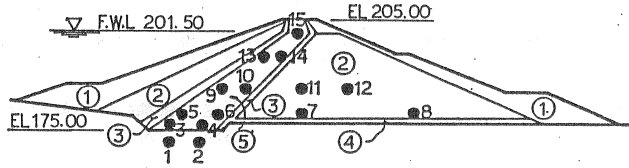
\* 農博 岡山大学農学部 (農業造構学) 教授, \*\* 岡山大学大学院自然科学研究科  
 \*\*\* 農博 岡山大学農学部 (農業造構学) 助教授, \*\*\*\* 岡山大学農学部 (農業造構学) 助手

表-1 Kダムの概要

ダム型式	傾斜コ字型ロックフィルダム
堤頂高	30m
堤頂長	197m
堤体積	202,000m <sup>3</sup>
総貯水量	640,000m <sup>3</sup>

表-2 間隙水圧計埋設標高

P-1, 2	EL172.50
P-3, 4	EL176.50
P-5, 6, 7, 8	EL180.00
P-9, 10, 11, 12	EL187.50
P-13, 14	EL195.00
P-15	EL201.30



- ① ロックゾーン
- ② トランジションゾーン
- ③ フィルター
- ④ ドレイン
- ⑤ コアゾーン

図-1 Kダム堤体標準断面及び間隙水圧計位置図

試験湛水中、貯水位の調整は5孔ある斜樋孔で行った。貯水位は、一定水位でしばらく放置し、異常の有無を確かめて、次の水位に上昇させた。満水（洪水吐クレスト標高）後、一度落水させ再び満水させた。貯水位の推移を図-2に示す。貯水位変動期間を、表-3のように貯水位に応じて6期に分ける。

表-3 貯水位変動期間区分

区分	期間	摘要	
I期	1987. 2. 25~1987. 7. 14	仮排水トンネル閉塞	
II期	a	1987. 7. 14~1987. 9. 12	斜樋4孔 (EL187.50) 閉鎖
	b	1987. 9. 12~1987. 9. 30	斜樋3孔 (EL191.00) 閉鎖
	c	1987. 9. 30~1987. 12. 20	斜樋2孔 (EL194.50) 閉鎖
	d	1987. 12. 20~1988. 4. 19	斜樋1孔 (EL198.00) 閉鎖
III期	a	1988. 4. 19~1988. 7. 4	満水位 (EL201.50) 到達
	b	1988. 7. 4~1988. 8. 18	斜樋1孔 (EL198.00) 開放
	c	1988. 8. 18~1988. 9. 3	斜樋1孔 (EL198.00) 到達
	d	1988. 9. 3~1989. 2. 11	斜樋1孔 (EL198.00) 閉鎖
	e	1989. 2. 11~1989. 7. 23	満水位 (EL201.50) 到達
	f	1989. 7. 23~1989. 8. 26	斜樋1孔 (EL198.00) 開放
	g	1989. 8. 26~1989. 9. 7	斜樋1孔 (EL198.00) 閉鎖
IV期	1989. 9. 7~1989. 12. 13	放流開始	
V期	1989. 12. 13~1990. 6. 10	貯水再開	
VI期	1990. 6. 10~1990. 11. 20	満水位 (EL201.50) 到達	

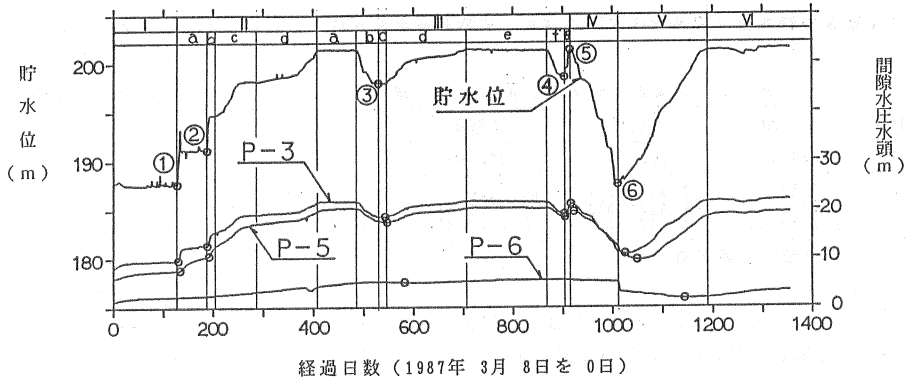
ただし、図-2では1987年3月8日を始点としている。

## 2. 2 貯水に伴う間隙水圧の挙動

15個の間隙水圧計の内、コアと岩盤の境界面にあるP-3、原地盤面標高にあるP-5、6の経時変化を図-2に示した。これらは何れも堤体底部にあるため、湛水の初期から貯水位変動に反応している。同標高のP-5、6では、上流側のP-5の方が大きな値を示している。P-6は、IV期末に零点移動と思われる不連続部分があるが、その前後では定性的に様な傾向を示している。

時間～間隙水圧水頭曲線は、時間～貯水位曲線とほぼ同様な傾向で推移するが、時間遅れを示す。

そこで、両曲線の急変点あるいは極値を示す時点に着目して、両者を比較する。まず、貯水位の急変点あるいは極値を示す時点、①IIa期の始点、②IIb期の始点、③IIIc期の始点、④IIIg期の始点、⑤IV期の始点、⑥V期の始点を選定し、標識点として○印で示す。それぞれの時点の経過日数を表-4に示す。これに対応した標識点を時間～間隙水圧水頭曲線上にも示す。岩盤境界面のP-3及び原地盤面標高上流のP-5の標識点は、貯水



期間区分, I期: 0~128日, II期: 128~408日, III期: 408~914日  
IV期: 914~1011日, V期: 1011~1190日, VI期: 1190~1353日

図-2 貯水位と実測間隙水圧水頭の経時変化

位の標識点に比べ時間遅れはあるものの、対応する6個の標識点全てが現れている。これに対して、原地盤面標高下流のP-6では貯水位の極値を示す標識点③と⑥に対応する2個の標識点が現れているにすぎない。対応する標識点での時間遅れを、同様に表-4に示す。例えば貯水位の①は、128日目であるが、P-3のそれは130日、P-5のそれは133日とそれぞれ2~5日づつ遅れている。この傾向は他の標識点でも同様である。

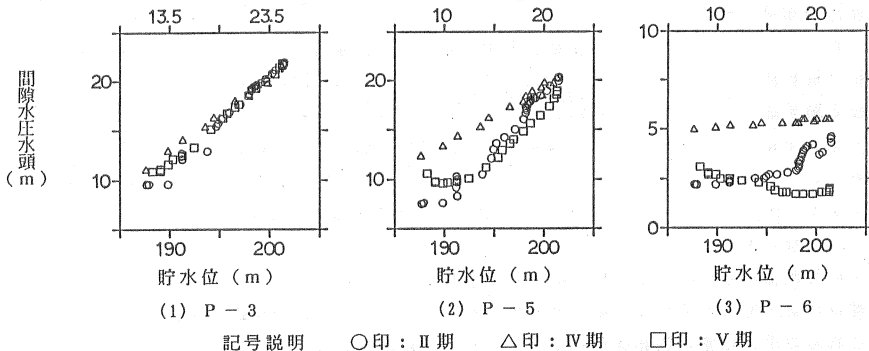
これらによれば、貯水位変動に対する間隙水圧変動の時間遅れは、 $P-3 < P-5 < P-6$ となっている。P-3の遅れに対してP-5, 6の遅れが大きくなっているのは、埋設位置に関係しているものと思われる。すなわち、P-5, 6はドレーンよりも高く、ダム の 湛 水 により初めて浸水したと考えられる。これに対して、P-3はドレーンよりも低いコアトレンチ底部にあることから、築堤中より浸水し、飽

表-4 間隙水圧の時間遅れ

標識点	①	②	③	④	⑤	⑥
日 数	128	188	529	903	914	1011
貯水位	187.70	191.17	197.95	198.49	201.35	187.62
P-3	2	0	1~16	{ 0 }	2	13
P-5	5	3	11~21	{ 0 }	5	38
P-6	-	-	51	-	-	129
						日

和していたものと思われる。

図-3にII, IV, V期の貯水位昇降過程における、貯水位と間隙水圧水頭の関係を示す。同図の上横軸に計器標高と貯水位との差高(m)を示した。P-3の間隙水圧水頭は、貯水位の上昇にあわせて直線状に増加し、下降時はその線上を水位にあわせて減少する。一方、P-5は水位上昇時と下降時は異なった線、つまりヒステリシスを描く。この傾向はP-6でさらに顕著となる。このヒステリシスは上述の時間遅れによって生じる。



記号説明 ○印: II期 △印: IV期 □印: V期

図-3 貯水位と実測間隙水圧水頭の関係

表-5 に I 期末の貯水位と間隙水圧水頭及び III・VI 期の最高貯水位とこれに対応すると考えられる最大間隙水

期間区分	I 期	III 期前	III 期後	VI 期	
貯水位	187.70	201.53	201.46	201.49	m
P-3	9.6(11.2)	21.9(25.03)	21.9(24.96)	22.1(24.99)	m
P-5	7.6(7.7)	20.4(21.53)	20.5(21.46)	19.4(21.49)	m
P-6	2.2(7.7)	5.3(21.53)	5.5(21.46)	3.2(21.49)	m

( ) 内は、貯水位と計器の標高差 (m)。

圧水頭を示した。貯水位は III 期のはじめと後半及び VI 期で最高値に達し、I 期から約 13.8 m 上昇している。このほぼ同標高の最高貯水位に対して、P-3 は 21.9~22.1 m と安定し

た最大値を示す。しかし、P-5, 6 では VI 期で III 期よりも約 1~2 m 低い。P-6 では IV 期末で 5.0 m から 3.1 m へと 1.9 m の不連続部分があり、これが原因と思われる。P-5 にはこのような不連続部分もなく、原因不明である。この他、P-6 の II 期末で局部的な低下期間があり、計器に何等かの異常があったものと考えられる。

### 3. 飽和・不飽和浸透流解析

#### 3.1 基本式

解析に用いた飽和・不飽和浸透流解析プログラム：UNSAF<sup>1)</sup> の基本式は (1) 式である。

$$\text{div } K(\theta) \nabla (\phi + z) = [c(\theta) + \alpha Ss] \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $\theta$  : 体積含水率、 $K(\theta)$  : 透水係数、 $\phi$  : 圧力水頭、 $c(\theta)$  : 比水分容量、 $\alpha$  : 飽和領域で 1、不飽和領域で 0 となる係数、 $Ss$  : 比貯留係数 (=  $dn/d\phi$ ,  $n$  : 間隙率) である。

#### 3.2 一般的な解析法

フィルダムなどの自由水面を有する不圧浸透問題では、通常、比貯留係数を無視した解析が行われている<sup>2), 3), 4)</sup> ので、ここでも同様の手法をとる。

各堤体材料は、それぞれ均質であると仮定する。不飽和浸透特性は、既往の測定例<sup>5)</sup> を基にして決定し、図-4 に示す。飽和透水係数は、施工管理実績を基に図-4 の記述のように決定した。初期間隙水圧分布は、実測値を基に決定した。

図-5 に貯水位と解析値の関係を示す。貯水位と解析値の関係は、P-3, 5 地点でほとんど直線関係となり、P-6 地点でわずかにヒステリシスを示しているに過ぎない。すなわち、

解析値には図-3 の実測値にみられるような時間遅れが現れていない。

これは、次の理由によるものと考えられる。P-3, 5, 6 の地点の解析値が終始正值であるから、解析の時間内において、これらの地点は常に飽和状態となっている。飽和領域では、(1) 式においてもともと  $Ss$  を無視している上、常に  $c(\theta) = 0$  となり、右辺の時間項は 0 となる。つまり間隙水圧変動は、境界条件である貯水

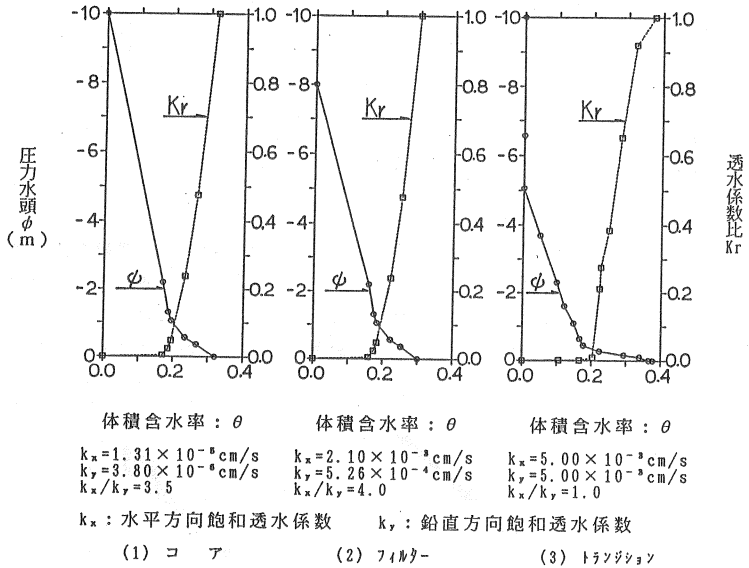
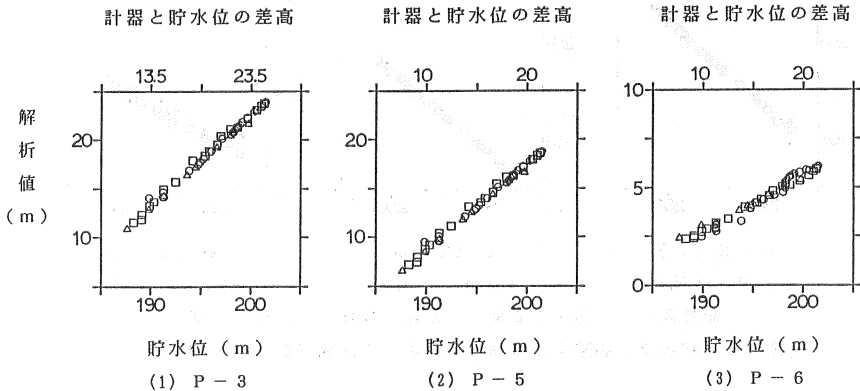


図-4 堤体材料の不飽和浸透特性

位の変動状況にのみ支配されることになり、時間遅れ現象を表現できない。ただし不飽和領域では、比水分容量によって時間遅れ現象をある程度考慮していることになる。



記号説明    ○印：Ⅱ期    △印：Ⅳ期    □印：Ⅴ期

図-5 貯水位と間隙水圧水頭の解析値との関係 (Ss=0)

### 3.3 比貯留係数を考慮した解析

#### (1) 変形特性による比貯留係数の推定及び解析

前節の矛盾を解決するため、(1)式の本来の姿にもどり、比貯留係数を考慮した解析を行う。

ここで、土粒子を非圧縮性と考え、間隙率の変化量は体積ひずみに等しいから、比貯留係数は圧縮率と同義と考えることができる。

すなわち、(1)式は変形の影響をも考慮することが可能である。変形の影響は、圧力水頭： $\phi \geq 0$ で比貯留係数： $S_s$ によって評価できる。等方弾性体を仮定すると圧縮率は体積弾性係数： $K$ の逆数として、ポアソン比： $\nu$ 、弾性係数： $E$ によって(2)式で表される。

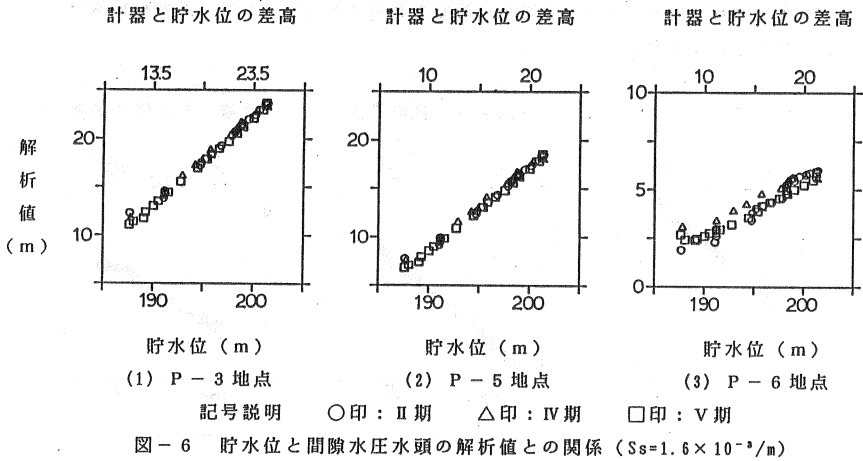
$$\frac{1}{K} = \frac{3 \cdot (1 - 2\nu)}{E} \quad (2)$$

この関係を用いて、既存の諸ダムのコアの変形特性 ( $\nu, E$ ) から圧縮率を求めるとその値の範囲は  $2 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{kgf}$  となる。一方、Kダムのコアの変形係数は、 $E = 73 \text{kgf}/\text{cm}^2$  であり、ポアソン比は  $\nu = 0.3$  であると考えられることから、圧縮率は  $1.6 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{kgf}$  と考えられる。従ってこのような推定方法による場合のKダムのコアの比貯留係数は、 $S_s = 1.6 \times 10^{-2}/\text{m}$  となる。

この比貯留係数を考慮した解析を行う。比貯留係数以外の解析条件は、「3.2」と同様である。比貯留係数は、変形の影響が大きく現れると考えられるコアゾーンのみで考慮する。図-6に貯水位と解析値の関係を示す。P-6地点のヒステリシスは若干大きくなったが、P-3, 5地点では図-5とほとんど変わらない。

#### (2) 湛水初期の実測間隙水圧によるみかけの比貯留係数の推定

前項で述べたように、変形特性から推定した比貯留係数では、堤体内の間隙水圧の挙動を十分に表現できない。この原因として、次のように考えられる。すなわち、本研究で用いた飽和・不飽和浸透流解析法では、不飽和状態として土中の空気が大気と接続している開放不飽和状態を考慮している。しかし中川ら<sup>10)</sup>が指摘するように、フィルダムのコアのような盛土中の空気が大気と接続していない閉鎖(封入)不飽和状態にあるならば、間隙中の水と空気の混合流体は圧縮性流体として挙動するものと思われる。従って、みかけ上の比貯留係数は土の変形と圧縮性流体の変形の影響を包含しているものと考えられる。このみかけ上の比貯留係数： $S_s'$ は、単に土の変形特性から推定される比貯留係数よりは大きくなるものと考えられる。

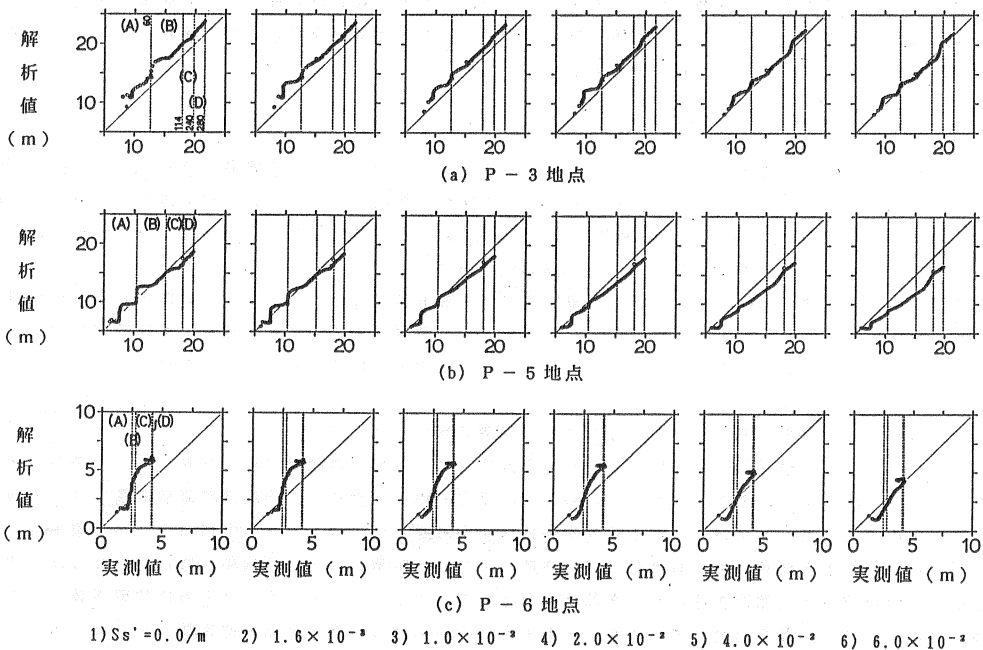


そこで、ここでは  $Ss'$  を推定することを考える。湛水初期に得られた実測間隙水圧データを用いて適切な  $Ss'$  を推定することができれば、間隙水圧計測は、フィルダムの安定性評価の上で極めて有効な方法となる。

湛水初期として、最初の水位上昇期間であるII期中で、(A) II a 期始点から終点までの60日間、(B) II a 期始点から II b 期終点までの 114日間、(C) II a 期始点から II c 期終点までの 240日間、(D) II a 期始点から II d 期終点までの 280日間の4期間を考える。

表-6  $Ss'$  の仮定値

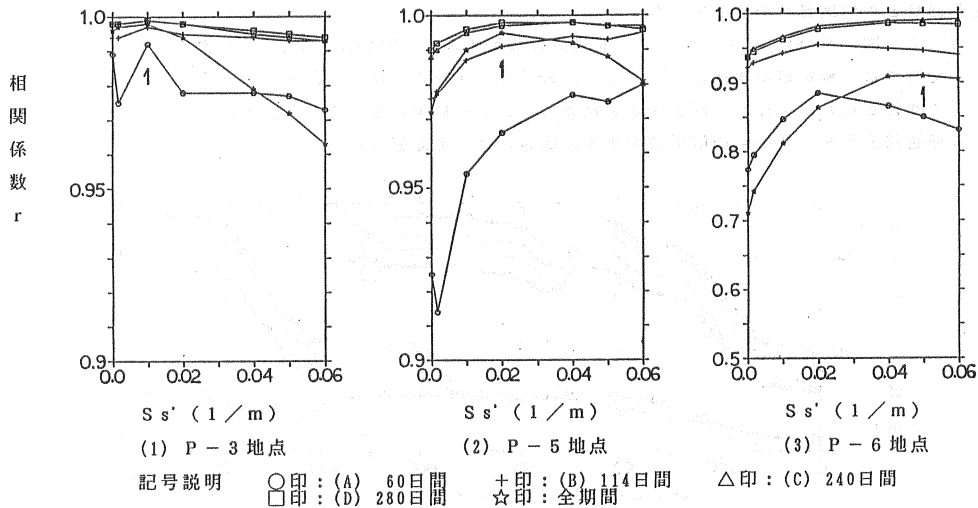
Case No.	1	2	3	4	5	6	7
$Ss' (1/m)$	0.0	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$6.0 \times 10^{-2}$



$Ss'$  は、表-6 に示した  $0 \leq Ss' \leq 6.0 \times 10^{-2}/m$  の7種類を仮定する。Case1は、前述の「3.2」、Case2は「3.3(1)」と同じである。

図-7 に実測値と各ケースの解析値（解析条件は前述と同様）との関係を示す。図中の破線は(A)~(D)の各期間の終点を示している。すなわち、湛水初期として(A)を考えるのならば、左端から最初の破線までの点列で、仮定した  $Ss'$  の妥当性を判断することになる。

図-7(a), (b), (c) では、1)~6) に示したように、 $Ss'$  の値によって点列が階段状や直線状となっている。仮定した  $Ss'$  が良好な解析結果を与えるならば、その解析値と実測値は図中で直線上に並ぶ。従って、図-7の点列が最も直線に近似するところの  $Ss'$  が求める推定値となる。直線への近似度は、相関係数： $r$  で示される。各間隙水圧計地点における(A)~(D)の各期間及び全期間の解析値と実測値との  $r$  を求め、 $Ss'$  との関係を図-8に示す。 $r$  は、(A)~(D)で使用データの期間が長いほど大きくなる傾向を示す。そして最大の  $r$  を示す  $Ss'$  は、図中に矢印で示したように、P-3地点では(A)~(D)のいずれの期間も  $Ss' = 1.0 \times 10^{-2}/m$  と全期間の場合と一致し、P-5, 6地点では、(A)から(D)へと期間が長くなると全期間の場合に一致するようになり、それぞれ  $Ss' = 2.0 \times 10^{-2}/m, 5.0 \times 10^{-2}/m$  となる。



解析の条件として、各堤体材料の均質性を仮定していることから、P-3, 5, 6地点は同一  $Ss'$  でなければならない。そこで、

表-7 相関係数の平均値

Case No.	$Ss'$ (1/m)	(A)	(B)	(C)	(D)	全期間
1	0.0	0.896	0.964	0.975	0.975	0.893
2	$1.6 \times 10^{-2}$	0.895	0.967	0.979	0.978	0.906
3	$1.0 \times 10^{-2}$	0.931	0.976	0.987	0.986	0.933
4	$2.0 \times 10^{-2}$	0.926	0.970	0.992	0.991	0.951
5	$4.0 \times 10^{-2}$	0.940	0.979	0.994	0.993	0.960
6	$5.0 \times 10^{-2}$	0.934	0.977	0.993	0.992	0.957
7	$6.0 \times 10^{-2}$	0.928	0.976	0.994	0.991	0.950

結果を表-7に示す。各期間の最大値を白抜きで示した。参考のため、表には全期間のデータに対する各ケースの  $Ss'$  による相関係数も示している。全期間のデータより推定される  $Ss'$  は、(C), (D)期すなわち湛水開始より240日~280日のデータより推定した  $Ss'$  と一致する。表-7より、(A), (B)期のデータでは  $Ss' = 2.0 \times 10^{-2}/m$ , (C), (D)期及び全期間で  $Ss' = 4.0 \times 10^{-2}/m$  が妥当な  $Ss'$  と判断される。

よって、湛水初期の60日分の実測データより推定される最も妥当な  $Ss'$  は、 $Ss' = 2.0 \times 10^{-2}/m$  となる。

このように、実測間隙水圧から推定したみかけの比貯留係数 ( $Ss' = 2.0 \times 10^{-2}/m$ ) は、「3.3(1)」で変形特性から推定した比貯留係数 ( $Ss = 1.6 \times 10^{-3}/m$ ) の12.5倍である。また、前述した諸ダムの変形特性から推定される比貯留係数の範囲の上限値 ( $Ss = 8.0 \times 10^{-3}/m$ ) に対しても2.5倍となる。

(3) みかけの比貯留係数を考慮した解析

前項で述べた  $Ss'$  を用いて、実測間隙水圧データが得られている約4年間について飽和・不飽和浸透流解析を行う。

図-9に実測値と解析値の経時変化を示す。図-9(a)は、湛水初期60日のデータから最も妥当とされた  $Ss'$  を用いて算定した結果であり、図-9(b)は(C)期のデータ、つまり240日までのデータより推定された  $Ss'$  を用いた結果であり、前述のとおり全期間のデータより求めた  $Ss'$  と一致するものである。図-9(a)において、P-3地点の解析値は全体的に実測挙動を良好に表してはいるものの、III a期の貯水位一定時期に増加傾向を示すなど実測値より若干大き目の時間遅れを生じている。P-5地点の解析値は、全体的に実測挙動を良好に表しているが、IV~V期にかけての極値部分で実測値より小さ目の時間遅れを示している。P-6地点の解析値は、全体的に実測値ほどの時間遅れを表していない。

これに対して、図-9(b)ではP-3, 5, 6地点の解析値の示す時間遅れが(a)より大きくなっている。このためP-3地点では、解析値が実測値より大きいため、II, V期の一部で間隙水圧軸方向のズレが時間軸方向のズレによって改善されたかに見える、解析値が実測値に近似する結果となっている。また、P-5地点のIV~V期にかけての極値部分やP-6地点の解析値が示す時間遅れは、実測値のそれに近づいている。

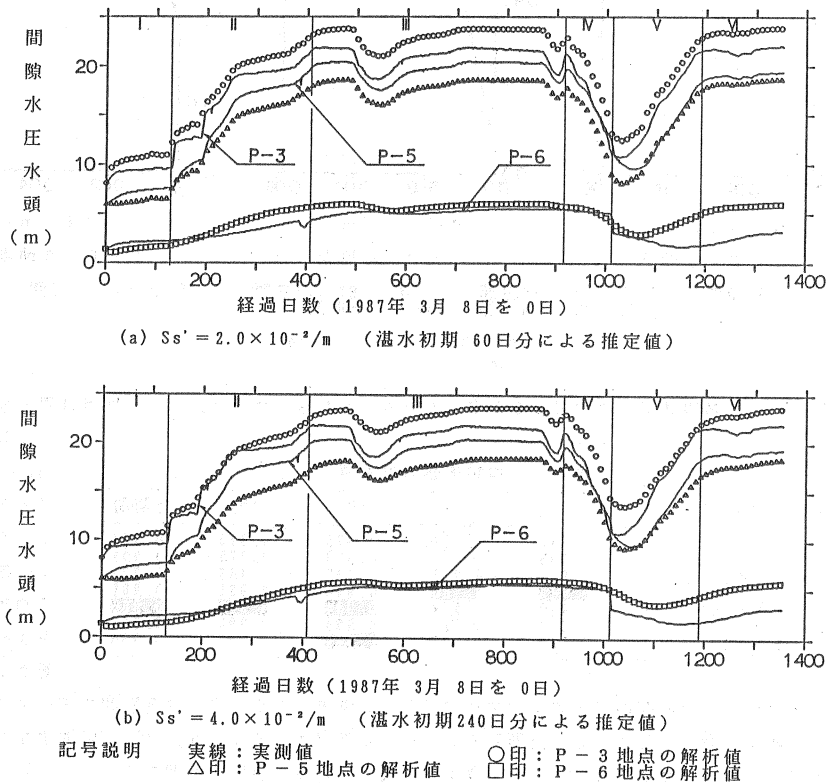


図-9 間隙水圧水頭の実測値と解析値の経時変化



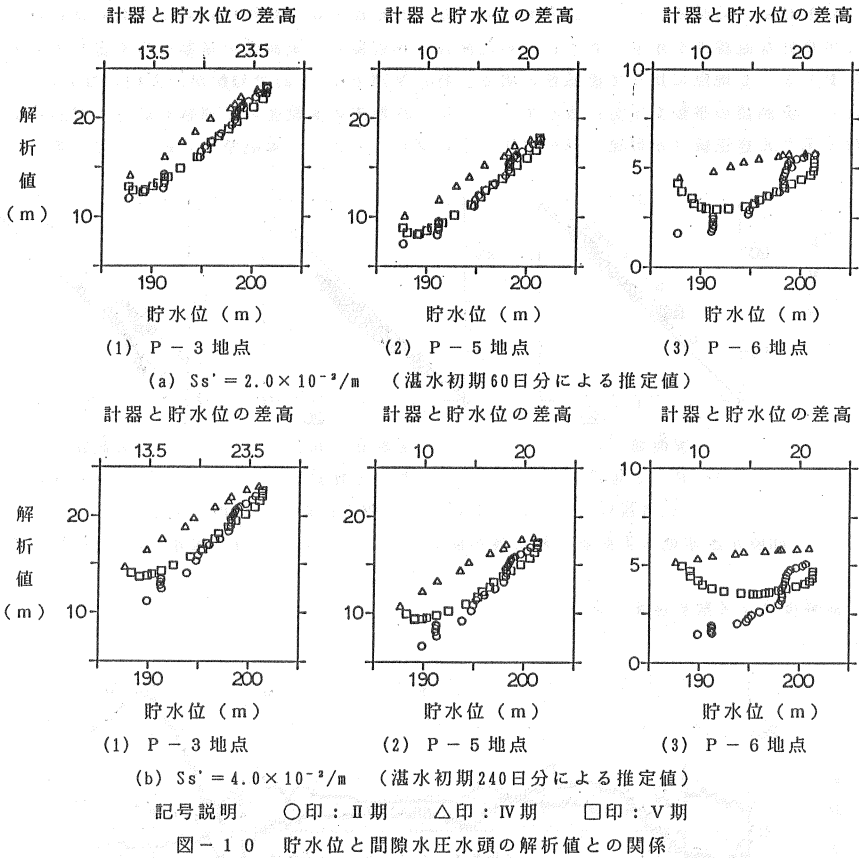


図-10 (a), (b)に貯水位と解析値の関係を示す。P-3地点の解析値は(a), (b)ともに図-3の実測値より大きなヒステリシスを示す。P-5地点の解析値は、(a)で実測値より小さく、(b)で同程度のヒステリシスを示し、この傾向はP-6地点の解析値でも同様である。このように各地点とも貯水位の昇降に対して、程度の差はあるものの実測値の示すようなヒステリシスループを明瞭に表している。

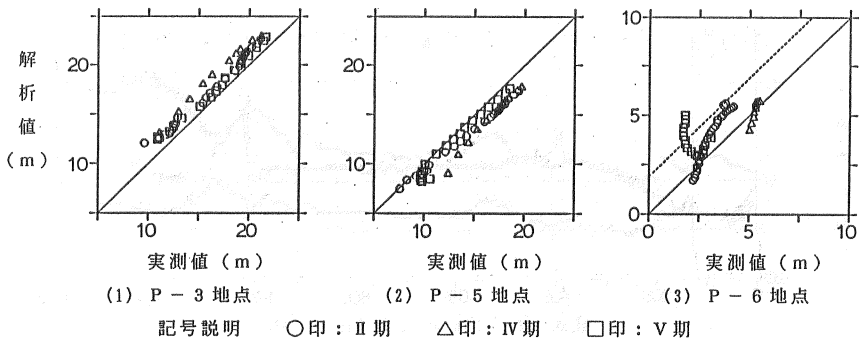


図-11 (a) 間隙水圧水頭の実測値と解析値の関係 ( $Ss' = 2.0 \times 10^{-2}/m$ : 湛水初期60日分による推定値)

図-11 (a), (b)に実測値と図-9 (a), (b)に対応する解析値の関係を示す。実測値と解析値が一致すれば図

中の実線(勾配は1)に乗る。(a), (b)ともにP-3, 5地点では, 解析値に若干の高低はあるもののII, IV, V期を通じて良好な直線性を示す。さらにその勾配は1に近似し, 実測値の挙動を良く表している。一方P-6地点では, P-3, 5地点に比べて直線性に劣る。特にV期では, (a)で勾配が逆方向になり, (b)では著しく折れ曲がるなど, 実測値の挙動を十分に表していないが, IV期末の実測値の不連続を計器の零点移動と考えるならば図中破線で示した修正線(水頭値1.9mの修正)上にプロットされ, 実測挙動に近づいている。

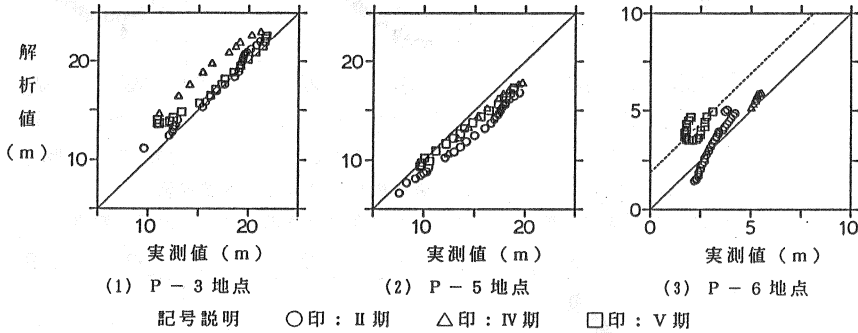
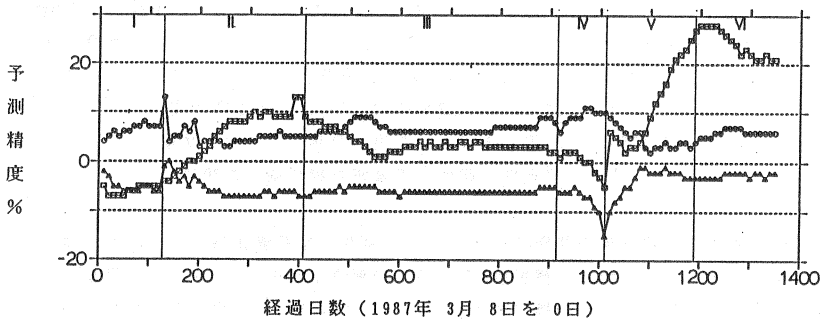
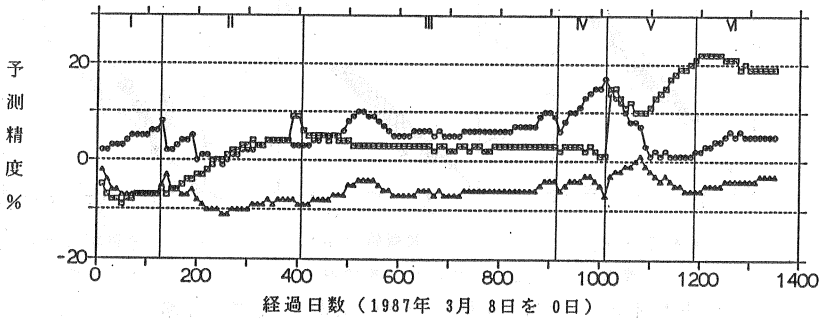


図-1 1 (b) 間隙水圧水頭の実測値と解析値の関係 ( $Ss' = 4.0 \times 10^{-2}/m$ ; 湛水初期240日分による推定値)

(4) 予測精度による解析結果の評価



(a)  $Ss' = 2.0 \times 10^{-2}/m$  (湛水初期 60日分による推定値)



(b)  $Ss' = 4.0 \times 10^{-2}/m$  (湛水初期240日分による推定値)

記号説明    ○印: P-3 地点    △印: P-5 地点    □印: P-6 地点

図-1 2 予測精度の経時変化

解析値を定量的に評価するために、(3)式の予測精度を定義した。

$$A_t = \frac{(Q_t - Q_0) - (P_t - P_0)}{Q_t} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

ここで、 $A_t$ : 時間  $t$  での予測精度、 $Q_t$ : 時間  $t$  での実測値、 $Q_0$ :  $t=0$  での実測値、 $P_t$ : 時間  $t$  での解析値、 $P_0$ :  $t=0$  での解析値であり、 $Q_t$ 、 $Q_0$ 、 $P_t$ 、 $P_0$  は絶対圧で計算する。

全ての時間  $t$  に対して、実測値と解析値各々の初期値 ( $Q_0$ 、 $P_0$ ) に対する変動量が一致する場合に  $A_t=0$  % となり最良である。しかし、予測精度の安定性 (一定値を示すこと) が判断基準として重要である。

図-12に予測精度の経時変化を示す。図-12(a)は、湛水初期60日のデータから推定した  $Ss'$  を用いた結果に対する予測精度の経時変化である。P-3, 5地点の予測精度は、I, IV~V期の一部で若干の変動を示すが、全体的に安定した値を示し、 $\pm 10\%$ 以内となっている。これに対してP-6地点の予測精度は、III期で部分的に安定した期間があるが、変動が大きい。

図-12(b)は、(C)期のデータからの  $Ss'$  を用いた予測精度である。P-3, 5地点の予測精度はほぼ  $\pm 10\%$  以内ではあるが、変動する傾向にある。一方、P-6地点の予測精度はIII~IV期で安定し、IV期末の実測値の不連続を計器の零点移動と考えるならば、全体を通じて  $\pm 10\%$  以内にあると思われる。

これらの結果より、湛水初期の60日分の実測データより推定した  $Ss'$  で、その後の間隙水圧挙動をほぼ  $\pm 10\%$  以内の精度で予測可能であるといえる。そして、240日分のデータがあれば、予測精度の全体的な変動幅が小さくなり、さらに良好な推定ができる。

### 3.4 湛水試験方法について

湛水初期の実測間隙水圧から、その後のフィルダム堤体の間隙水圧挙動を予測しようとするとき、KダムにおいてはP-3, 5, 6地点のような飽和領域におけるデータが重要であった。飽和領域において時間遅れ現象を表現できるパラメータは、これまでみてきたようにみかけの比貯留係数である。

Kダムにおいては、みかけの比貯留係数の推定が、湛水初期の60日間と短時間でできた。これは、図-2に示したように初期の貯水位上昇パターンが、明確な階段状となっていることによる。すなわち、これだと貯水位が一定に保たれている期間においても間隙水圧が増加するという、時間遅れ現象が明瞭に現れるからである。このために、貯水位上昇時に複数段階の貯水位一定期間を設定すると、実測値と解析値の直線性が明確に判定でき、初期の段階で、その後の予測に有効なパラメータを推定できる。

また、貯水位の昇降で異なった傾向を示すことことから、より有効な貯水位変動パターンとして、上昇~一定~降下というサイクルパターンを早い時期に繰り返すことが有効と考えられる。

### 4. おわりに

通常、不圧浸透問題に対しては、比貯留係数を0として変形の影響を無視した解析が行われている。このような解析法をフィルダムの浸透問題に適用すると、終始飽和領域にある観測点でも貯水位変動と間隙水圧変動との間に時間遅れが顕著に現れるような場合には、この時間遅れを再現することが理論上困難となる。そこでみかけの比貯留係数を実測間隙水圧挙動より推定し、その後の間隙水圧挙動を予測しようとした。これらについて検討した結果、次のようなことがいえる。

- ① フィルダムのコアのような盛土構造物の浸透現象を精度良く予測するためには間隙率の変化を考慮する必要がある。比貯留係数を考慮しなければならない。
- ② 比貯留係数は、基本的に圧縮率と同義と考えられるが、実測間隙水圧から推定したみかけの比貯留係数は、Kダムの場合、 $Ss' = 2.0 \times 10^{-2}/m$  となり圧縮率からの推定値の12.5倍となった。
- ③ Kダムの場合、みかけの比貯留係数を推定するのに、湛水初期の60日間のデータで十分であった。
- ④ みかけの比貯留係数を推定するに当たり、間隙水圧水頭の実測値と解析値との相関係数が有効な判断指標となった。
- ⑤ 湛水初期にみかけの比貯留係数を推定するには、試験湛水期間における貯水位変動パターンが重要であり、Kダムのような明確な階段状の変動パターンが有効である。

## 謝辞

筆者等は、冒頭に述べたように、本論文に述べたKダムを始め、十数年来いくつかのフィルダムの間隙水圧の測定を行ってきた。

この間、飽和・不飽和浸透流解析の適用にあたり、当初よりプログラムの提供および数々の御助言をお与えいただいた岡山大学工学部西垣誠助教授に、心からの謝意を表する。

## 記号説明

$A_t$ : 時間 $t$ での予測精度	$c(\theta)$ : 比水分容量
$E$ : 弾性係数	$K$ : 体積弾性係数
$K(\theta)$ : 透水係数	$Kr$ : 飽和透水係数に対する不飽和透水係数の比
$k_x$ : 水平方向飽和透水係数	$k_y$ : 鉛直方向飽和透水係数
$P_0$ : $t = 0$ での解析間隙水圧水頭	$P_t$ : 時間 $t$ での解析間隙水圧水頭
$Q_0$ : $t = 0$ での実測間隙水圧水頭	$Q_t$ : 時間 $t$ での実測間隙水圧水頭
$r$ : 相関係数	$S_s$ : 比貯留係数
$S_s'$ : みかけの比貯留係数	$t$ : 時間
$z$ : 位置水頭	$\alpha$ : 飽和領域で1, 不飽和領域で0となる係数
$\theta$ : 体積含水率	$\nu$ : ボアソン比
$\phi$ : 圧力水頭	

## 参考文献:

- 1) 大西有三, 西垣 誠(1981): 有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析 手法とプログラム解説.
- 2) 駒田広也, 西岡利道, 松尾和俊(1981): 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, 土木学会論文集, 第311号, pp.103~111.
- 3) 杉井 勲(1982): 駒ヶ岳ダムにおける浸透流の解析について, ダム日本, No.436, pp.1~27.
- 4) Hiroaki Fujii, Tadashi Watanabe(1983): PORE PRESSURE OF SMALL FILL DAMS, International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich, pp.875~884.
- 5) 藤井弘章(1988~1990): Kダム堤体埋設計器のデータ解析報告書.
- 6) 島田 清(1988): シリンダーの打込み深さを10cmとしたインタークレート試験について, 農業土木学会論文集, 第136号, pp.9~13.
- 7) 建設省河川局監修(1987): 多目的ダムの建設, 第3巻, pp.308.
- 8) 土質工学会編(1983): フィルダムの調査・設計から施工まで, pp.185~186.
- 9) 農業水利ダム編集委員会(1984): 農業水利ダム集大成, 第1巻, pp.823~919.
- 10) 中川加明一郎, 駒田広也(1982): 地盤の変形と間隙水圧挙動との相互作用の解析法, 電力中央研究所報告, 研究報告 381031.