

# ニューマチック型計器による フィルダムの挙動観測例について

三島史朗 間宮 清  
平田啓一 千葉幸治

## PNEUMATIC INSTRUMENTATION FOR MONITORING BEHAVIOR OF FILL DAM

Shiro MISHIMA, Kiyoshi MAMIYA,  
Keiichi HIRATA and Yukiharu CHIBA

### Abstract

This paper is a report on the first full-scale application of a pneumatic pore pressure meter earth pressure meter, used at a fill type dam in the frigid climate of Hokkaido. Included is an account of observation results and behavior of the dam wall, as determined from this data.

Burying of the instruments began when construction of the dam began in 1978. By the time of the dam's completion in 1981, pore water pressure meters had been buried at 29 locations and earth pressure meters in 6 locations (including triangular earth pressure meters at 4 locations).

Recording of data from all instruments was automated from 1982; recordings from all locations have continued to be received without malfunctions through the present (1983).

The distribution of pore water pressure throughout the dam wall and the foundation well reflect both rise and fall of stored water level and the movements of the resultant seepage flow. Also, it was found that vertical earth pressure distribution with the dam wall showed change as the dam was built up. Horizontal earth pressure distribution well reflected the changes in level of stored water following completion of the dam.

### 1 まえがき

我国におけるフィルダムの間隙水圧および土圧の測定は、通常、受感部に歪ゲージあるいは差動トランスを用

いた電気式計器によって行われることが多い。これは、受感部で受けた圧力を電気信号に変換し、ケーブルを通して伝送、増幅などが容易にできること、および安価であることなどの理由によっている。

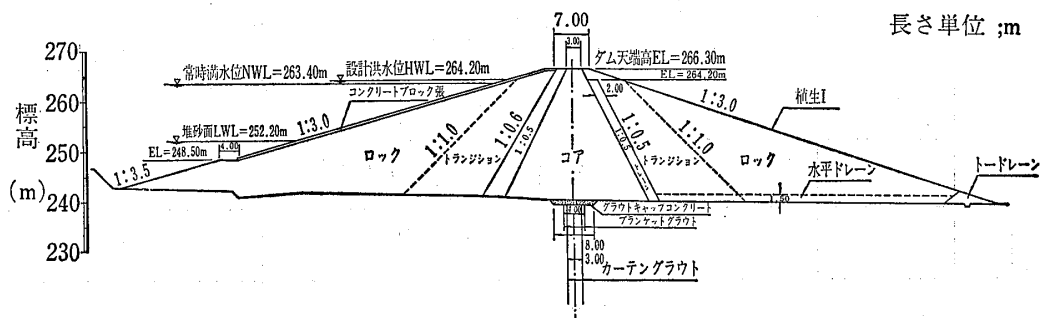


図-1 ダム標準断面

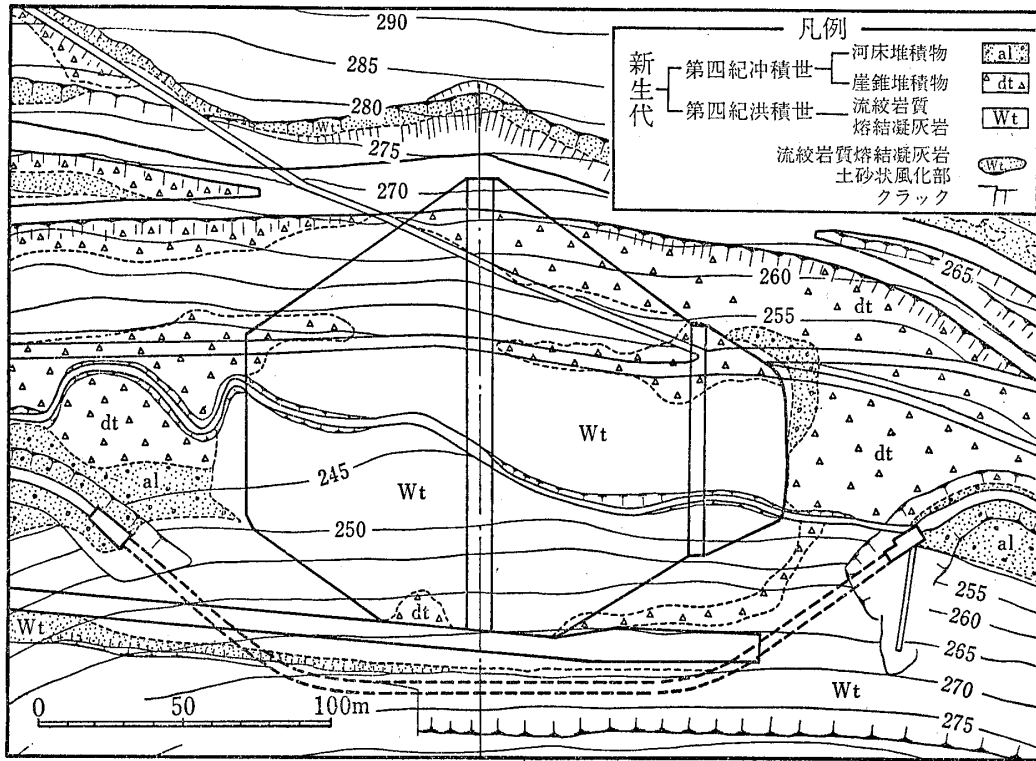
Fig. 1 The standard section of the dam

しかし、電気式計器は、受感部やケーブル部の断線あるいはリークによるトラブルが発生しやすいこと、落雷による被害を受けやすいことなどの理由から、長期観測用計器としては難点がある。

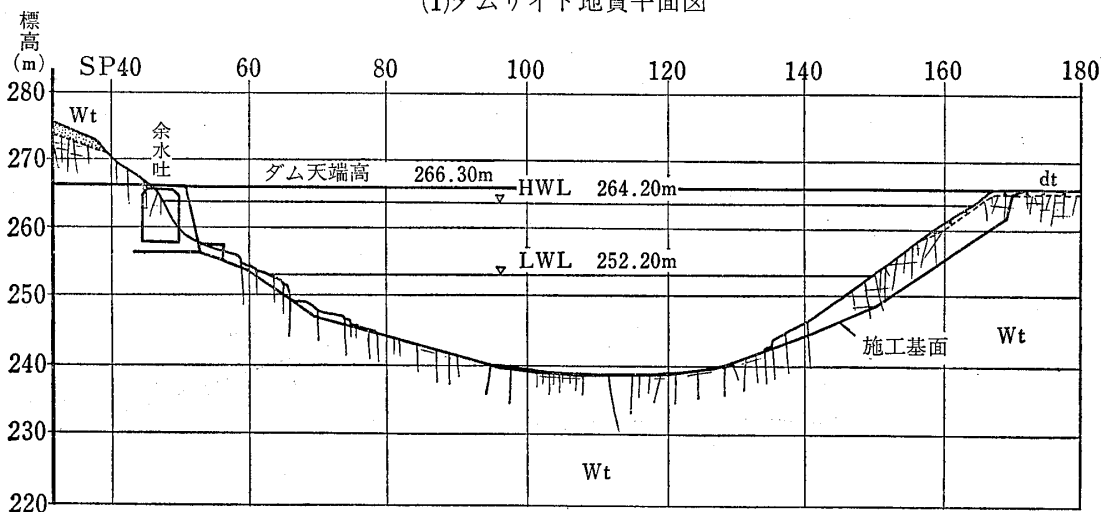
また、ハイドロリック型計器は、受感部が簡素な構造であり、長期的安定性は高いが、冬期間に気温が $-20^{\circ}\text{C}$

以下にまで低下する当該ダム付近の厳しい気象条件下では、チューブ内の水の凍結が問題となる。

このような問題点を検討した結果、当該ダムの間隙水圧および土圧の測定計器として、ニューマチック型計器を採用することとなった。ただし、ニューマチック型計器は、我国においては一般的な測定器でなく、自動化を



(1)ダムサイト地質平面図



(2)ダム軸沿い地質断面図

図-2 ダムサイトの地質

Fig. 2 Geological map and section of dam site

するためには費用がかかるために、使用実績は少なく、フィルダムの挙動観測を目的としたニューマチック型計器の本格的な埋設は、我国では初めてのことである。

### 2 ダムの諸元

当該ダムは、表一に示すような諸元を有する農業利水を目的としたゾーン型フィルダムである。図一はダムの標準断面であり、堤体は、コア部、ロック部、トランジション部、フィルター部およびドレーン部の5部分に分けられ、それぞれ異なった材料で施工されている。そして、それらの部分の透水係数はつぎの通りである。

コア部	$3.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$
ロック部	} $8.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$
トランジション部	
フィルター部	} $3.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$
ドレーン部	

### 3 ダムサイトの地質

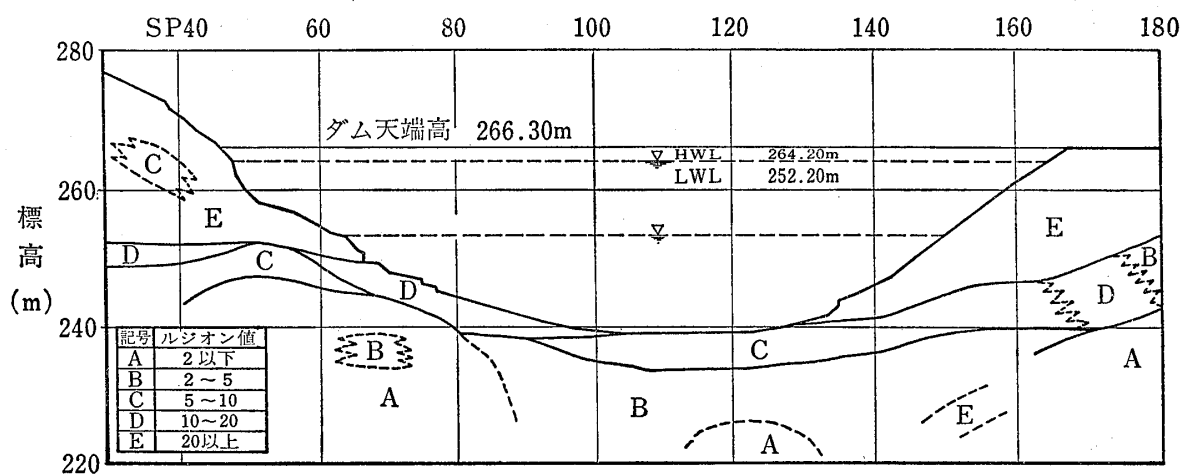
ダムサイトの地質は、図一(1)に示すように、第四紀洪積世の流紋岩質熔結凝灰岩である。この流紋岩質熔結凝灰岩はほぼ均質な岩相を呈し、一軸圧縮強度 $q_u$ は  $250 \text{kg/cm}^2$  程度の値を示し、いわゆる中程度の硬さの岩石といえることができる。したがって、堤高  $26.80\text{m}$  のフィルダムの基礎として、強度的には問題はないと考えられるが、図一(2)に示すように、ほぼ垂直に近い節理の発達が顕著であり、その透水性が問題となった。図一にダム基礎岩盤のルジオンマップを示す。この図から明らか

かなように、深部に至るまで大きなルジオン値を示している。このために、ダム軸沿いにカーテングラウトおよびブランケットグラウトが実施され、ダム軸沿いの基礎岩盤のルジオン値が、 $15\text{m} \sim 20\text{m}$ の深度まで1ルジオン以下になるように改良された(図一4)。

なお、堤体および基礎岩盤の透水性を模式的に示すと図一5のようになる。

表一1 ダムの諸元  
Table 1 Synopsis of the dam

ダム	式	ゾーン型フィルダム
堤高		26.80m
堤頂長		153.00m
堤体積		$151.148\text{m}^3$
ダム天端標高		E.L. 266.30m
貯水池		
集水面積		$3.6\text{km}^2$
湛水面積		5.1ha
総貯水容量		$445,000\text{m}^3$
有効貯水量		$362,000\text{m}^3$
常時満水位		E.L. 263.40m
設計洪水位		E.L. 264.20m
放流設備		
余水吐		側溝流入式
設計洪水流量		$70\text{m}^3/\text{s}$
取水設備		
型式		斜樋
最大取水量		$0.204\text{m}^3/\text{s}$



図一3 ダム基礎のルジオンマップ  
Fig. 3 Lugeon map of foundation before grouting

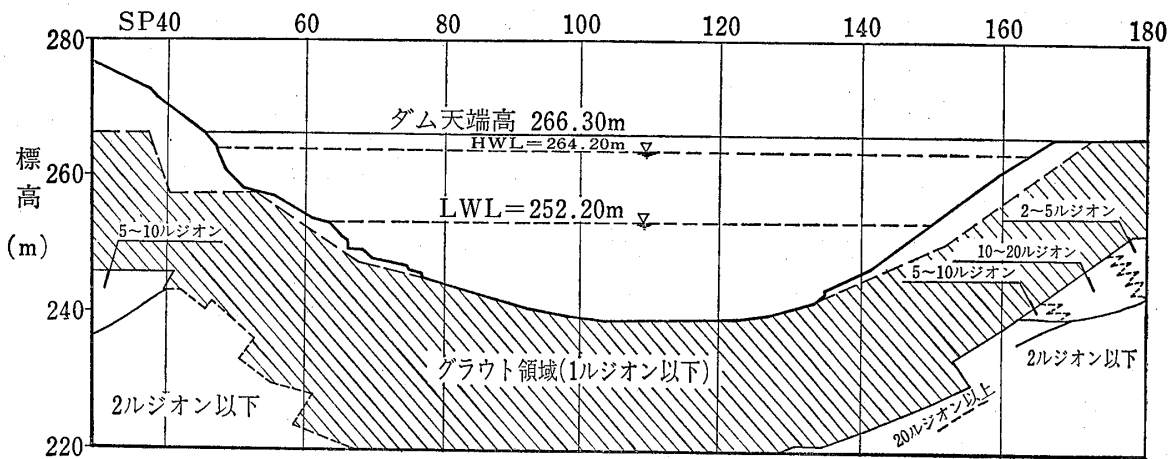


図-4 グラウト後のダム基盤のルジオンマップ  
Fig. 4 Lugeon map of foundation after grouting

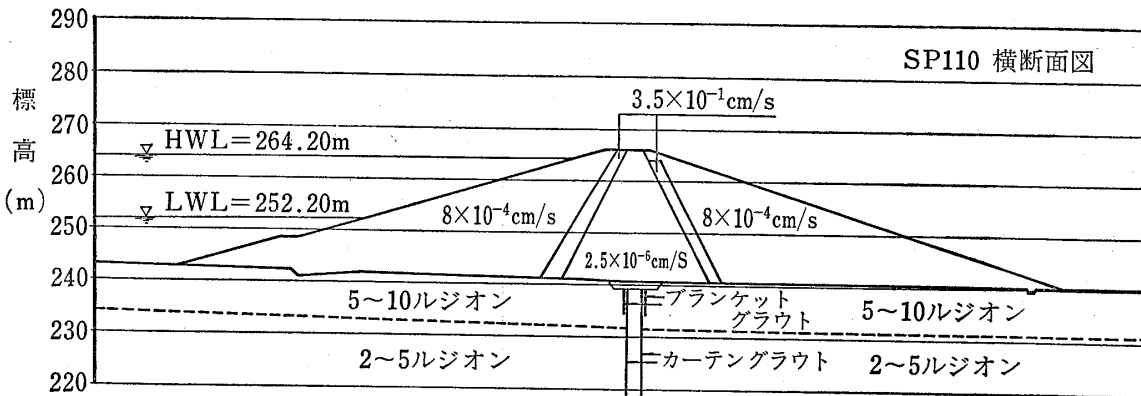


図-5 堤体および基盤の透水性模式図  
Fig. 5 Permeability pattern of dam and foundation

表-2 各種計器の得失比較

Table 2 Comparison of merits and demerits among three instrument type

型式	電気式	ハイドロリック型	ニューマチック型
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>電氣的にピックアップできるので測定が容易</li> <li>自記記録しやすい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フラッシングが容易にでき、長期の測定に対して安心できる構造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測システムが簡単で測定も容易</li> <li>長期測定での安定度が高い</li> <li>凍結の心配がない</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>長期測定の際の再キャリブレーションができない</li> <li>温度特性上の問題がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表部のナイロンチューブ内の水が凍結する恐れがある</li> <li>高精度の圧力計が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度の圧力計が必要</li> </ul>
価格	一般に高い	一般に安い	一般に安い
当該地で使用する場合の問題点	<ul style="list-style-type: none"> <li>長期測定に対する信頼度が低い</li> <li>間隙水圧計の場合、圧力上昇に対する応答は良いが、減圧時の応答が悪い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>主要な問題は凍結で、不凍液を入れることで解決できるが、余り粘性を高めるとフラッシングが困難</li> <li>特殊断面のチューブが必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>欧米での使用例が多く、日本での使用例がない。</li> </ul>

4 測定計器と観測システム

4-1 ニューマチック型計器

フィルダムの間隙水圧および土圧の測定においては、その受感部に電気式計器を使用することが一般的となっているが、受感部を埋設して使用するもので、とくに長期にわたって観測を続けるような場合には、その耐久性に難点があることが指摘されている。また、冬期間には、気温が $-20^{\circ}\text{C}$ 以下にまで低下するという厳しい気象条件にある当地点においては、ハイドロリック型計器を用いる場合、チューブ内の水の凍結が問題となる。これらの欠点を避けるために、ニューマチック型計器を採用することにした。表-2は、これらの3タイプの計器の得失を比較したものである。

測定に使用した計器はSINCO社製のニューマチック型の間隙水圧計および土圧計で、その仕様を表-3に、その構造を図-6に示す。このニューマチック型計

器は、基本的には気体によって圧力測定を行うもので、受感部に電気的なものを使用せず、フレキシブルな弁とセラミックあるいは金属製の容器のみから成っているために、上記のような問題点は避けられるものと判断した。

Model-51401の間隙水圧計は2本チューブであるが、Model-51481の間隙水圧計とModel-51482の土

表-3 間隙水圧計および土圧計の仕様

Table 3 Content of piezometers and an earth pressure cell

計器仕様	間隙水圧計 (Model-51401)	間隙水圧計 (Model-51481)	土圧計 (Model-51482)
寸法	長さ 29.9cm 外径 3.8cm	長さ 24.1cm 外径 3.8cm	外径 22.9cm 厚さ 1.1cm
セル充填液	—	—	オイル
圧力範囲	0 kg/cm <sup>2</sup> ~21kg/cm <sup>2</sup>	0 kg/cm <sup>2</sup> ~21kg/cm <sup>2</sup>	0 kg/cm <sup>2</sup> ~21kg/cm <sup>2</sup>
精度	$\pm 0.014\text{kg/cm}^2$ 以内	$\pm 0.014\text{kg/cm}^2$ 以内	0.1%~0.5%FS

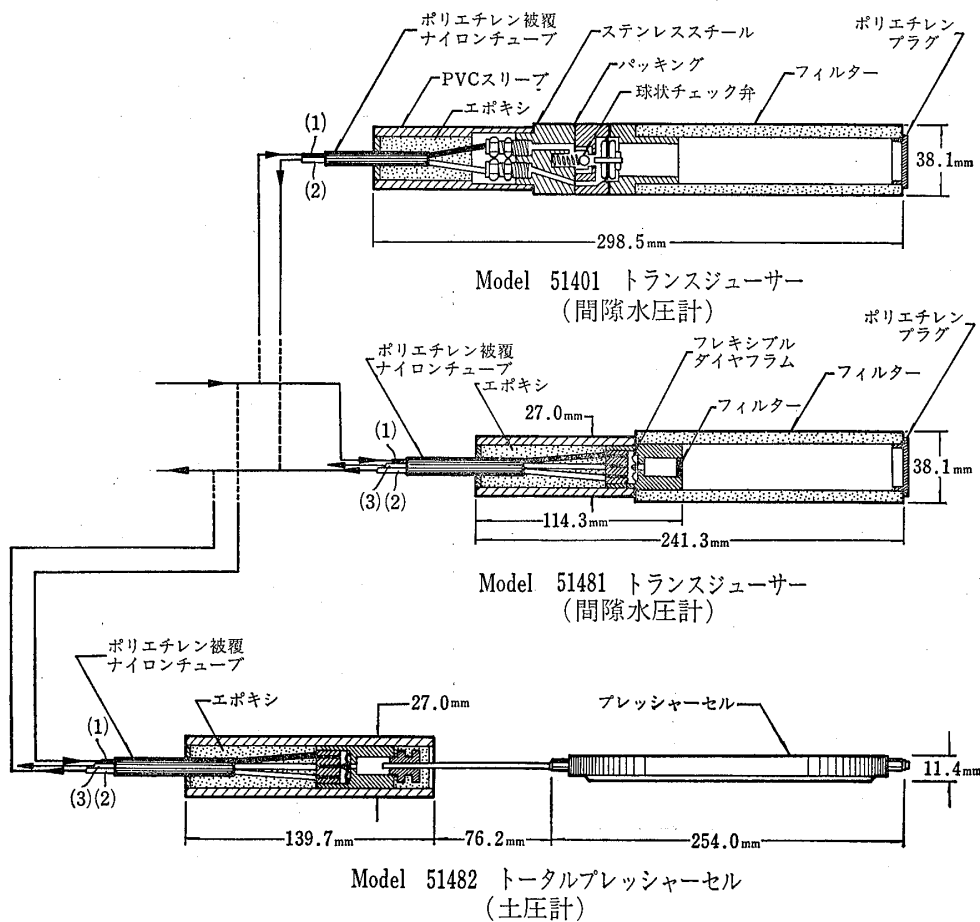


図-6 ニューマチック計器の構造

Fig. 6 The structures of pneumatic type instruments

圧計は3本チューブとなっている。この2本チューブ型と3本チューブ型の相異は、図-6に示すように、測定ポイントのチェック弁の構造に依存している。

2本チューブ型は、1本の入力チューブ(1)、1本の出力チューブ(2)、屈伸性の隔板、球状チェック弁より成っている。ポイントに圧力が加わると、隔板が動き、その動きが球状チェック弁を開ける。入力チューブより入ってきたガスは出力チューブの方にも入る。そして、2本のチューブ内の圧力が、ポイントに加わっている圧力と等しくなるまで、チューブ内の圧力を高める。等しくなると隔板はチェック弁を閉じる。この時点において、出力チューブ内の圧力を測定するものである。連続して測定を行う場合、ポイントに加わる圧力がさらに上昇するときには、再びチェック弁が開き、上記と同様な動作によって、圧力を測定することができる。しかし、ポイントに加わる圧力が下降するときには、チェック弁は作動しないため、チューブ内の圧力は、ポイントに加わる圧力を示さないことになる。したがって、このような場合には、測定前にチューブ内の圧力を十分に下げておくことが必要である。

一方、3本チューブ型では、入力チューブ(1)、出力チ

ューブ(2)のほかに、中央に第3のチューブとして、ガス抜きチューブが加わる。チェック弁は、フレキシブルダイヤフラムに固定された半球状のもので、中央のガス抜きチューブに対する弁となっている。また、入力チューブと出力チューブの両者は、常に開放状態となっている。したがって、ポイントに加わっている圧力が、入力および出力のチューブの圧力より高いときには、ガス抜きチューブは半球状チェック弁によって閉じられる。入力チューブより入ってきたガスは出力チューブにも入り、ポイントに加わっている圧力と等しくなるまで、2本のチューブ内の圧力を高める。チューブ内の圧力が、ポイントに加わっている圧力より大きくなると、半球状チェック弁が開き、入力および出力チューブ内のガスはガス抜きチューブの方に入り、入力および出力チューブ内の圧力が、ポイントに加わっている圧力と等しくなるまで低下すると、半球状チェック弁は再度閉じられる。この時点において、出力チューブ内の圧力が測定される。また、ポイントに加わっている圧力が下降するときには半球状チェック弁が開き、入力および出力チューブ内のガスは、ガス抜きチューブ内に入り、入力および出力チューブ内の圧力が、ポイントに加わっている圧力と等しく

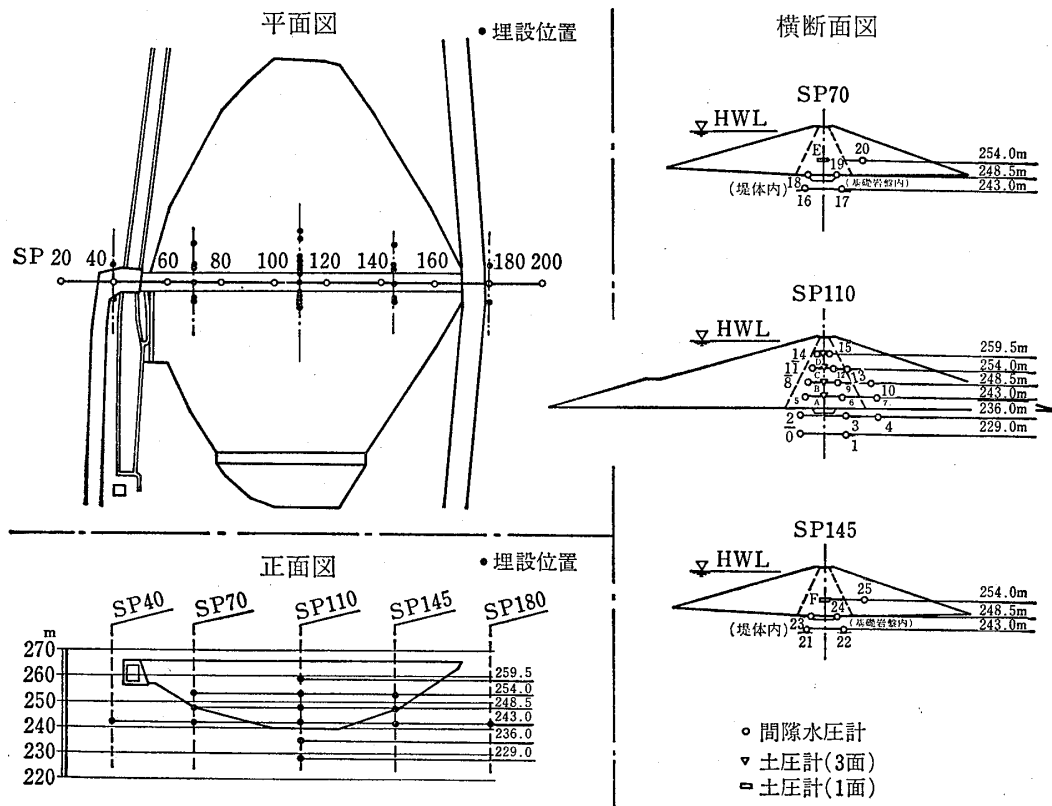


図-7 間隙水圧計および土圧計の埋設位置  
Fig. 7 The buried position of piezometers and pressure cells

なった時に半球状チェック弁は閉じる。すなわち、3本チューブ型では、入力および出力チューブ内の圧力を事前に下げておかなくても連続測定ができることとなる。

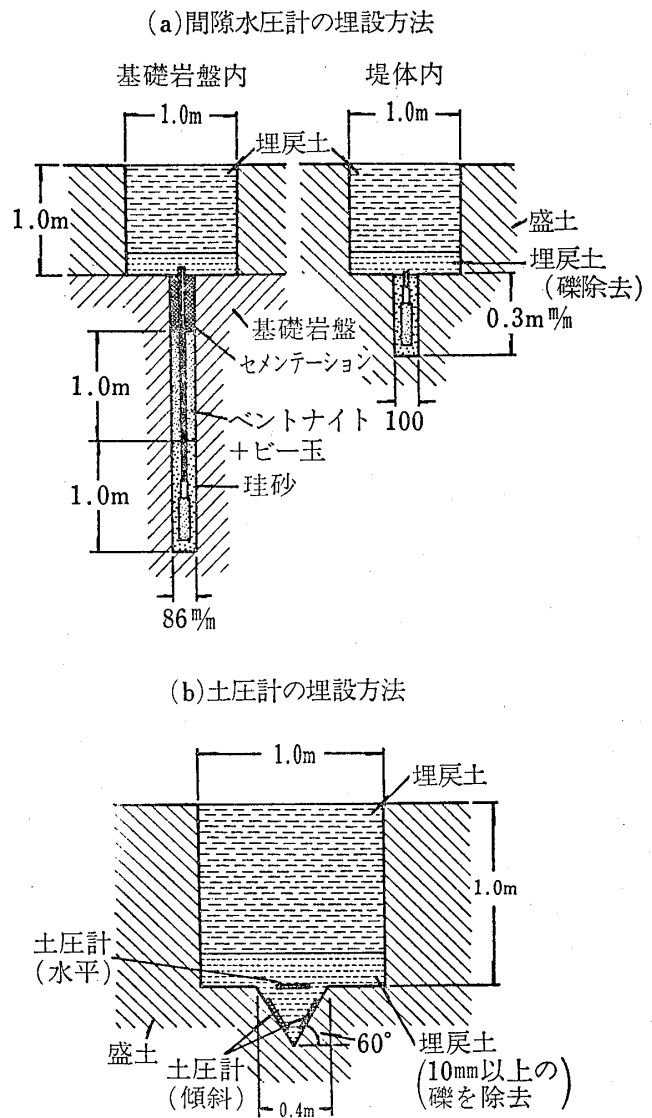
間隙水圧計と土圧計の測定ポイントの構造は全く同じであり、間隙水圧計ではフィルター内の水圧を測定し、土圧計では圧力セル内の流体の圧力を測定するようになっている。

間隙水圧計のフィルターに関しては、岩盤およびコア部に対してはセラミックを、トランジション部およびフィルター部に対してはポーラスメタルを使用した。

#### 4-2 計器の埋設

間隙水圧計および土圧計の埋設に当っては、図一7の平面図に示すように、ダム軸上のSP40, SP70, SP110, SP145およびSP180のところに、ダム軸に直角に測線を設け、横断面図に示す位置にそれぞれの計器を埋設した。SP40断面およびSP180断面においては、EL.243.0mの岩盤内に2個の間隙水圧計を、また、SP70断面およびSP145断面においては、EL.243.0mの岩盤内に2個の間隙水圧計、EL.248.5mのコア部の岩盤内と堤体内にそれぞれ1個の間隙水圧計、EL.254.0mの下流側トランジション部に1個の間隙水圧計、コア部に一面土圧計1個を埋設した。計器の過半数を埋設したSP110断面の岩盤内については、間隙水圧計がEL.229.0mに2個、EL.236.0mに3個埋設され、堤体内については、EL.243.0m、EL.248.5m、EL.254.0mおよびEL.259.5mのコア部のそれぞれに、2個の間隙水圧計と1個の三面土圧計を埋設し、EL.243.0m、EL.248.5mおよびEL.254.0mの下流側トランジション部のそれぞれに1個の間隙水圧計を埋設した。したがって、埋設箇所は、間隙水圧計が29箇所、土圧計が6箇所（うち4箇所は三面土圧計）となる。

間隙水圧計の埋設方法は、図一8(a)に示す通りである。基礎岩盤内の場合は、図一8(a)の左側の図に示すように、あらかじめφ86m/mで掘削したボーリング孔の所定の深度に受感部を挿入し、その周囲に長さ1mにわたって珪砂を詰めて受感部を固定した。そして、受感部がボーリング孔を通して上部の水圧を感知しないように、珪砂を詰めた部分の上部に、約1m程度のベントナイトによる遮水層を作った。このとき、ベントナイト層がよく締まるように、ビー玉を混入してタンピングした。堤体内の場合は、図一8(a)の右側に示すように、計器が充分入る大きさの穴を掘削し、周囲を珪砂で充填した。なお、SP40およびSP180における埋設方法は、図一8(a)の左側の図に示すものと同様であるが、立



図一8 計器の埋設方法  
Fig. 8 The burying method of the instruments

上がるチューブの処理は、前もって設置したパイプ内を通して保護するようにした。

ダム軸中央部 (SP110) の4箇所埋設した三面土圧計の場合には、図一8(b)に示すように、1面は水平にし、他の2面は、それぞれ水平に対して60°および120°の角度になるように設置した。一般に、土圧計の埋設に当っては、土圧計をコンクリートのような構造物に貼り付けることが多いが、この場合には過大な圧力が集中する恐れがあるので、当該ダムにおいては、一辺40cm程度のV字型の溝を掘り、側面の傾斜を60°の平滑な面に仕上げ、その面に土圧計を貼り付けた。傾斜を持った土圧計および水平の土圧計、いずれも上面10cm程度は粒径5mm以下の土を被せ、タンパーによって締固めた。なお、コア材料は熔結凝灰岩の強風化帯の土砂である。

これらの埋設計器のチューブの埋設に当っては、深さ1 m、幅1 mの溝を掘削し、溝の底面はランマーで平滑に仕上げた。そして、堤体の不同沈下によってチューブに引張り応力が作用し、これによる不測の事故を防止するために、チューブを蛇行させて埋設した。埋め戻しに際しては、層厚20cm毎にランマーで締固め、チューブの破損を防ぐために、チューブ直上の一層は、粒径1 cm以上の礫を取り除いた土を用いた。

#### 4-3 観測システム

これらのニューマチック型計器による観測において、マニュアルで測定する場合は、SINCO社製のニューマチック圧力指示計 (Model-51421) (図-9) を使用した。この測定装置の操作は、つぎの3つの段階に分かれている。

1. 供給圧力を調節する。
2. ガス ( $N_2$ ) を直接入力チューブに流すか、あるいは、流量を調節して入力チューブに流す。
3. 出力チューブのガス圧力が一定になった時の圧力を測定する。

以上の操作に要する時間は、計器によって供給ガスの適正流量が異なるため、間隙水圧計では15分程度であるが、土圧計では30分~60分である。

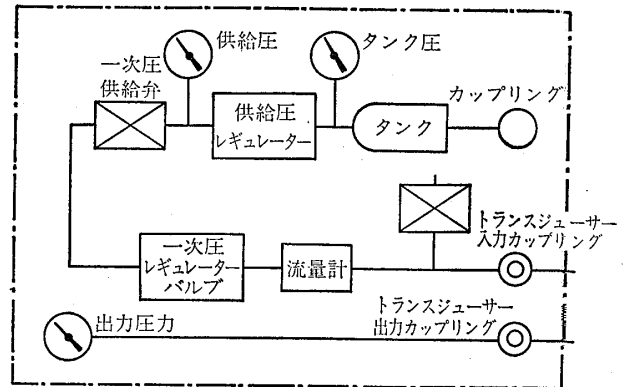


図-9 ニューマチック圧力指示計概念図

Fig. 9 Conceptual pneumatic pressure indication (Model 51421)

このマニュアルでの測定は、ダムが盛立てが始まった昭和53年の8月から、ダムが完成した昭和56年の8月までの間、施工管理作業の一環として行われた。間隙水圧計が29箇所、土圧計が6箇所の全測定をマニュアルで行うと、1日以上のかかった。

ダム完成後は、その維持管理の観点から、これらの観測を継続することになったが、マニュアルでの長期にわたる測定が困難が予想されたため、図-10に示すような自動計測装置 (OYO製ニューマチック自動計測システム)

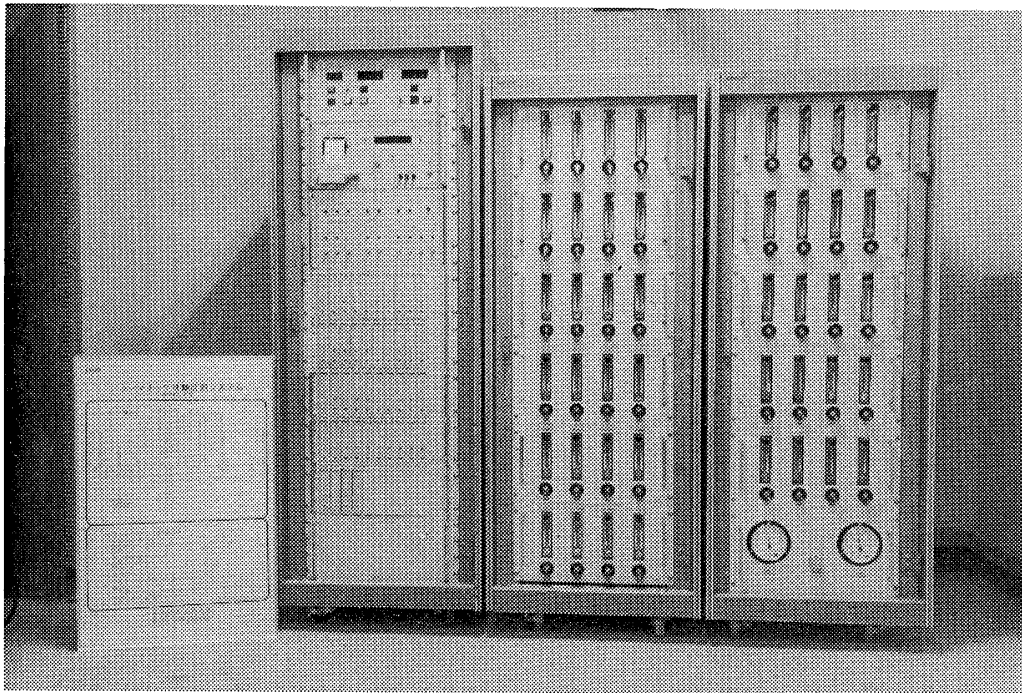


図-10 ニューマチック自動計測システム

Fig. 10 Automatic system of pneumatic type measurement



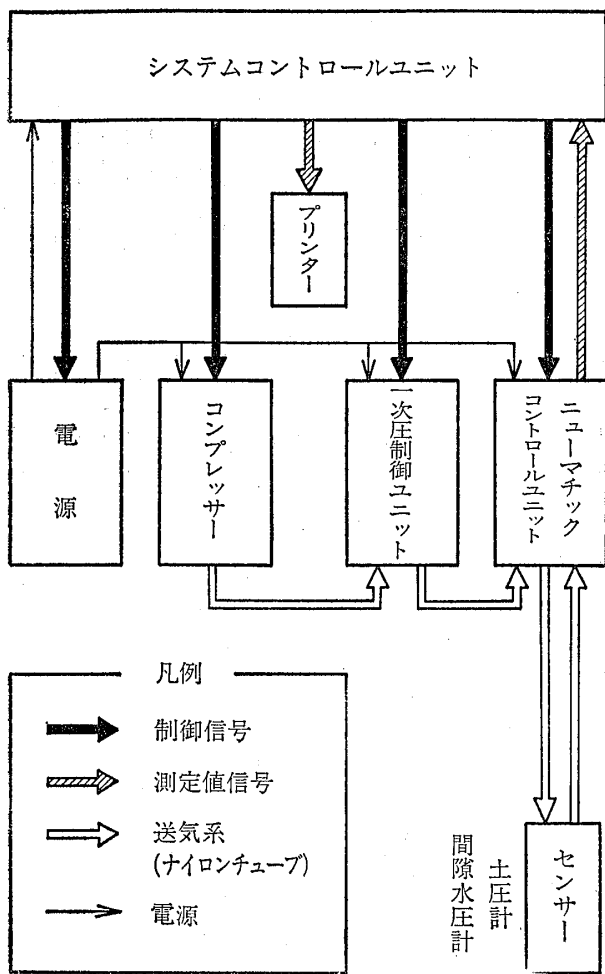


図-11 ニューマチック自動計測システム制御概念図

Fig. 11 Conceptual automatic system of pneumatic type measurement used at this site

ム Model-4520) を導入した。この装置の制御概念は図-11に示す通りで、半導体圧力トランスジューサーによってガス圧を電気信号に変換し、A/Dコンバーターを用いてデジタル化し、プリンターに印字する方式である。この測定システムは、8ビットタイプのマイクロプロセッサによって、図-12に示すようなコントロールを行うようになっている。そして、全測定箇所での1回の測定に要する時間は1時間15分程度である。

5 観測結果

堤体の盛立ては、昭和53年7月から昭和56年7月までの3年間にわたって行われた。図-13は、堤体の盛立高の推移と観測日を示したものである。自動計測装置による測定を開始したのは昭和57年2月からであり、このとき以降は、1日1回の定時(14時)測定が行われているが、それ以前は、ニューマチック圧力指示計を用いての

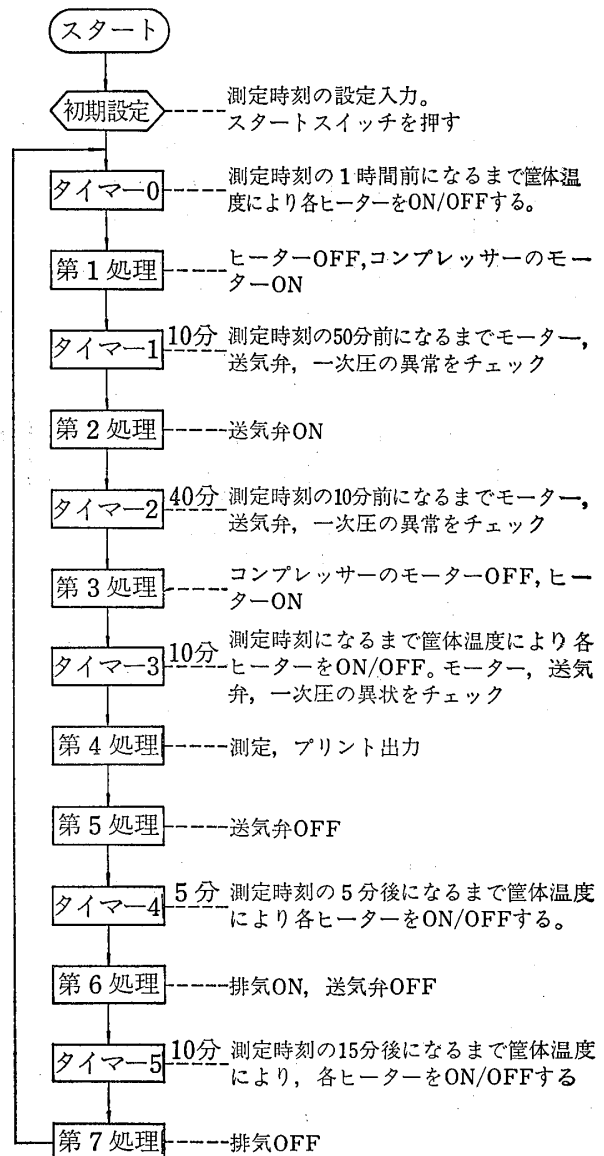


図-12 システムコントローラーのフローチャート

Fig. 12 Flow chart of system controller

マニュアル測定であるため記録は少ない。とくに、昭和55年はほとんど測定されていない。なお、図-13には当該地の降水量を参考までに示してある。降水量は夏期に多くなっているが、その量は少なく、年間降水量は1000mm程度である。

5-1 間隙水圧観測結果

図-14に、SP110断面における間隙水圧観測結果を示す。ただし、昭和55年および56年は観測数が非常に少ないので省いている。

この断面に埋設された間隙水圧計は16個であり、5個は岩盤内に埋設されており、残りの11個は堤体内に埋設

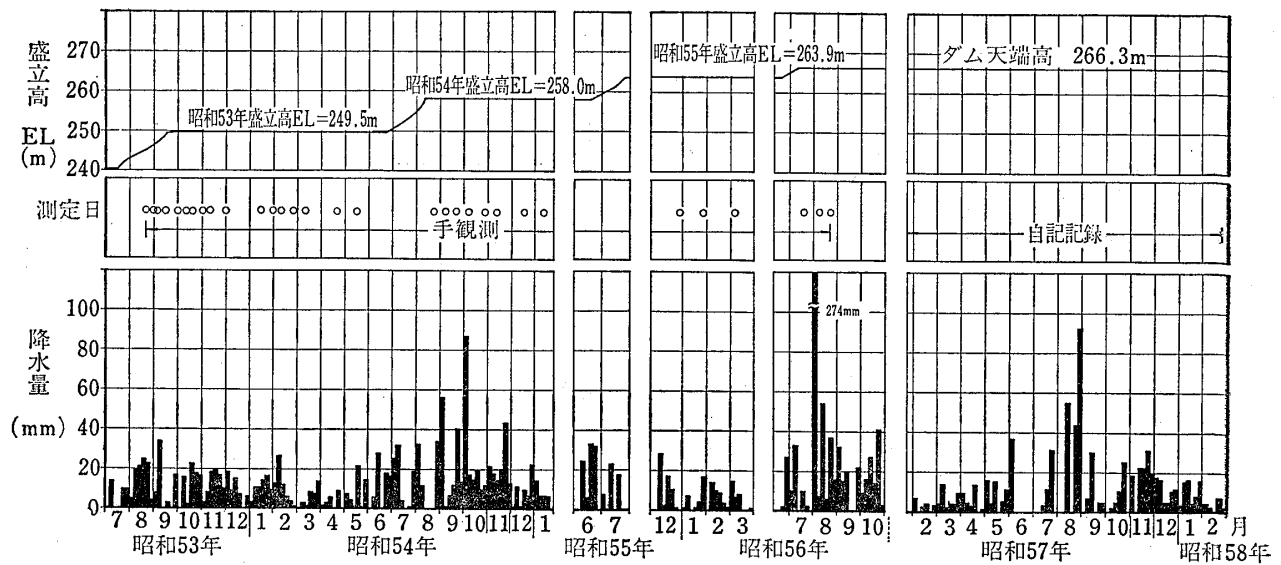


図-13 盛土高の推移と測定日および測定期間の降雨量

Fig. 13 Transition of filling height and measurement days, and precipitation during measurement's period

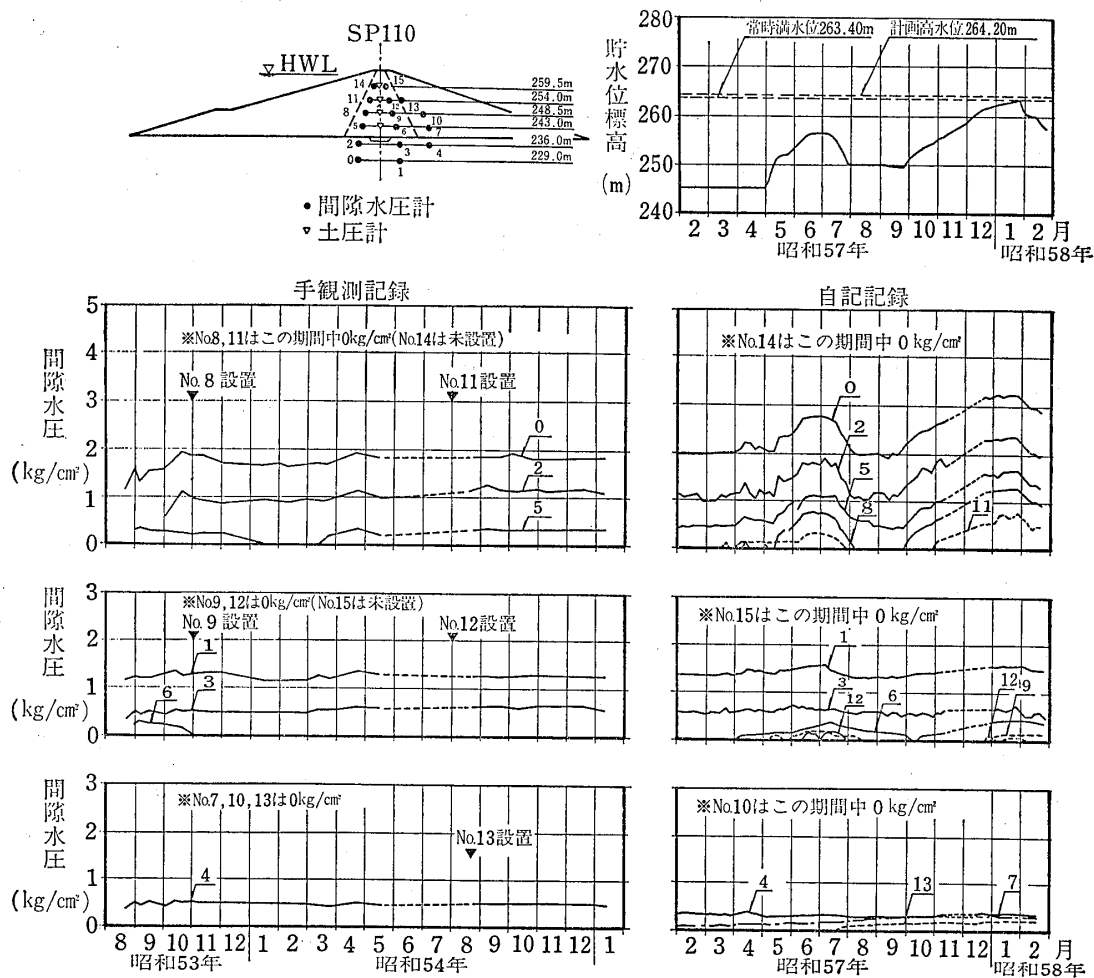


図-14 間隙水圧計記録 (SP110)

Fig. 14 The records of piezometers (SP110)

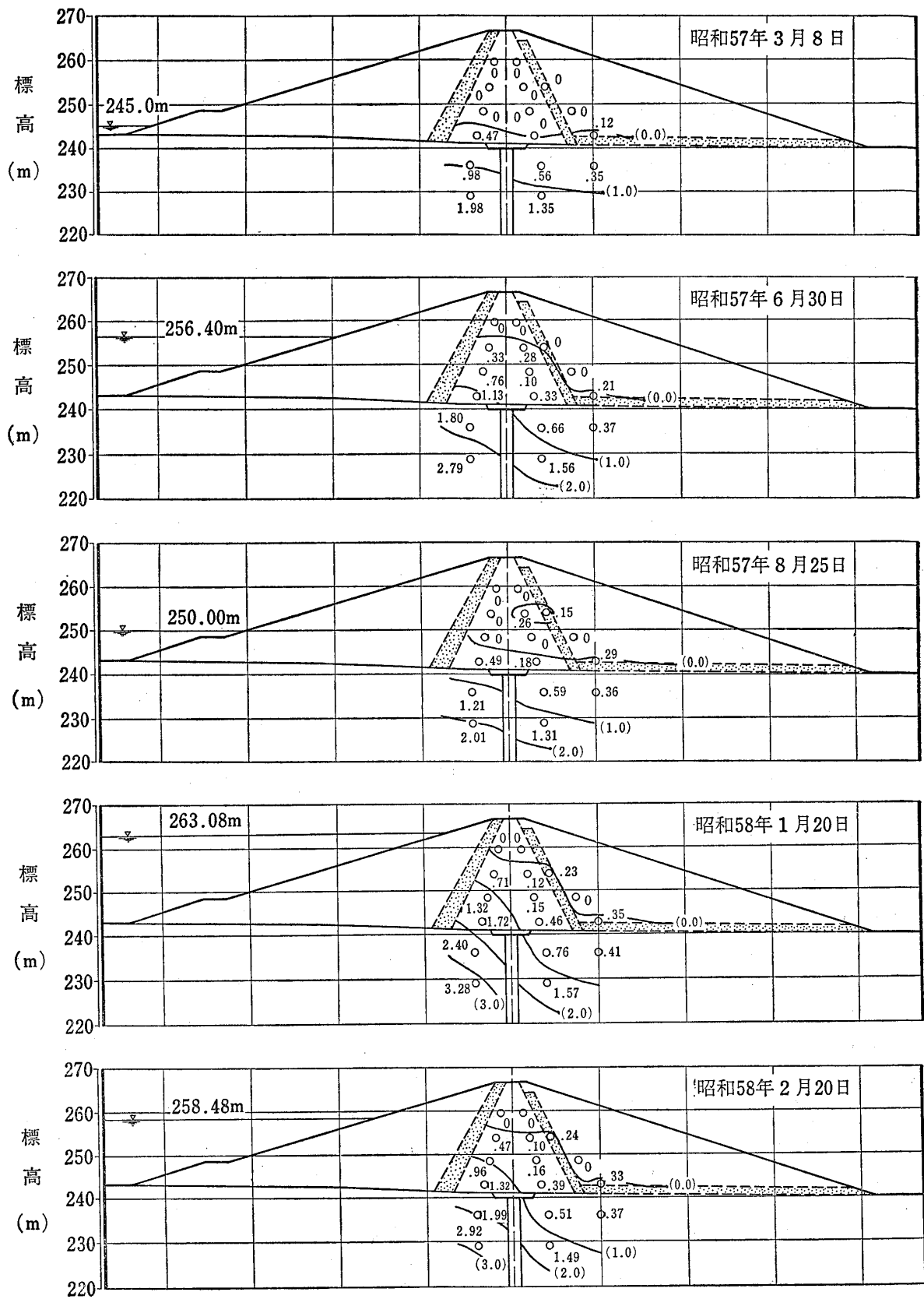


図-15 間隙水圧分布図

Fig. 15 Distribution of pore water pressure

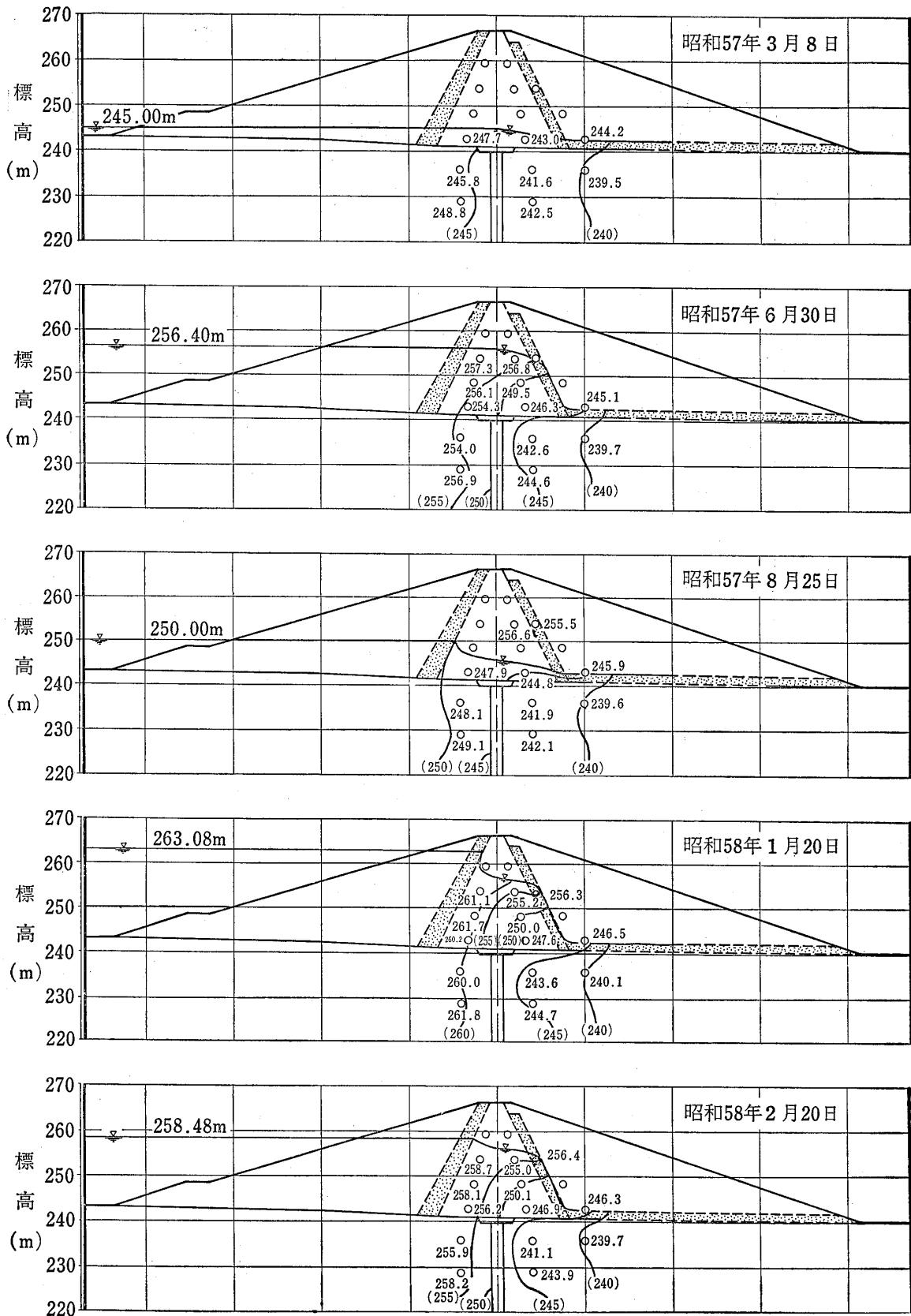


図-16 位置水頭分布図  
Fig. 16 Distribution of pore water head

されている。

湛水開始前における堤体内の間隙水圧は、コア部の最下部 (E.L. 243m) のNo.5およびNo.6の箇所を除いて、すべて (ただし、コア部最上部のNo.14およびNo.15は未埋設) 0 kg/cm<sup>2</sup> を示している。

一方、湛水開始後においては、岩盤内および堤体内にかかわらず、その間隙水圧は、貯水位の変化に応じた動きをみせている。ダム軸より上流側に埋設されているNo.0, No.2, No.5, No.8およびNo.11において、その対応が明瞭に現れている。

つぎに、昭和57年から昭和58年にかけての貯水位の変動をみると (図-14),

- |            |              |
|------------|--------------|
| 1. 湛水初期    | 昭和57年 3月 8日  |
| 2. 春期水位極大時 | 昭和57年 6月 30日 |
| 3. 夏期水位降下時 | 昭和57年 8月 25日 |
| 4. 冬期水位最大時 | 昭和58年 1月 20日 |
| 5. 水位降下過程時 | 昭和58年 2月 20日 |

の5つの時期を設定することができる。そこで、これらの5時期におけるSP110断面の間隙水圧分布を示すと、図-15に示すようになる。この図によれば、コア部で間隙水圧の勾配が大きくなっている。また、コア部より下

流側では、ドレーン直下部付近を除いて間隙水圧を生じていないことがわかる。

図-16は、間隙水圧より求めた等ポテンシャル線図である。この図によれば、堤体内においては、貯水位の上昇に伴って、上流側から下流側へ向っての浸透流が発生していることが認められる。とくにドレーン付近では、流動方向に急勾配をなしている状況が推定される。また、基盤内では、カーテングラウトの施工によって不透水性となっているため、浸透流がカーテングラウト施工部の下側を回り込んでいる様子を伺わせている。

### 5-2 土圧観測結果

図-17に、SP110断面における土圧の観測結果を盛立高記録とともに示す。この図においても、図-14の場合と同様に、昭和55年および56年の観測は省いてある。図-17によれば、盛立ての進行に伴って、鉛直方向の土圧が増加する様子が示されている。また、昭和57年以降の水平方向土圧の変化を、図-14に示した貯水位の昇降と対比すると、よく対応していることがわかる。

図-18は、盛立高 (標高で示す) と各土圧計の鉛直方向土圧の関係を示している。また、図-19は、盛立て完

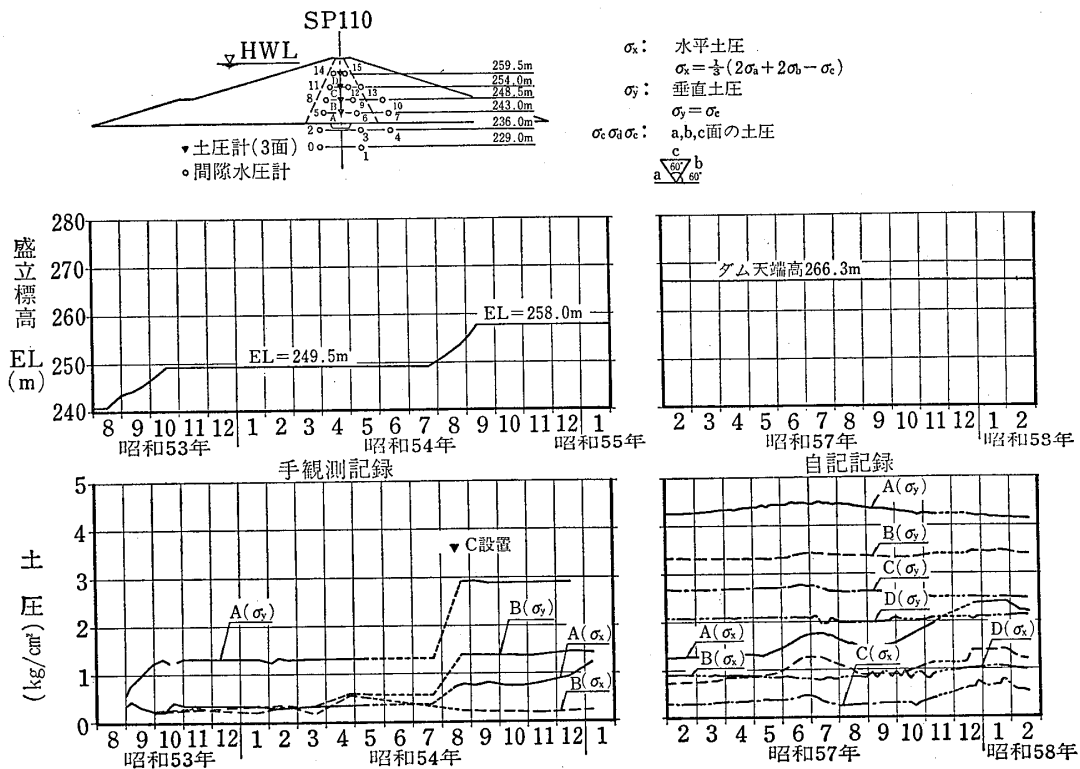


図-17 盛土高と土圧記録 (SP110)

Fig. 17 Transition of filling height and earth pressure records (SP110)

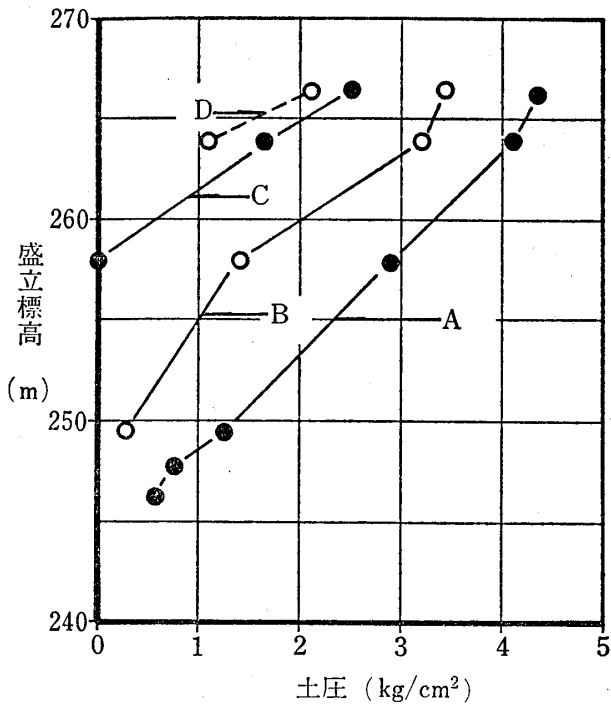


図-18 盛立ての進行に伴う鉛直方向土圧の変化  
Fig. 18 Vertical earth pressure charges by advance of filling

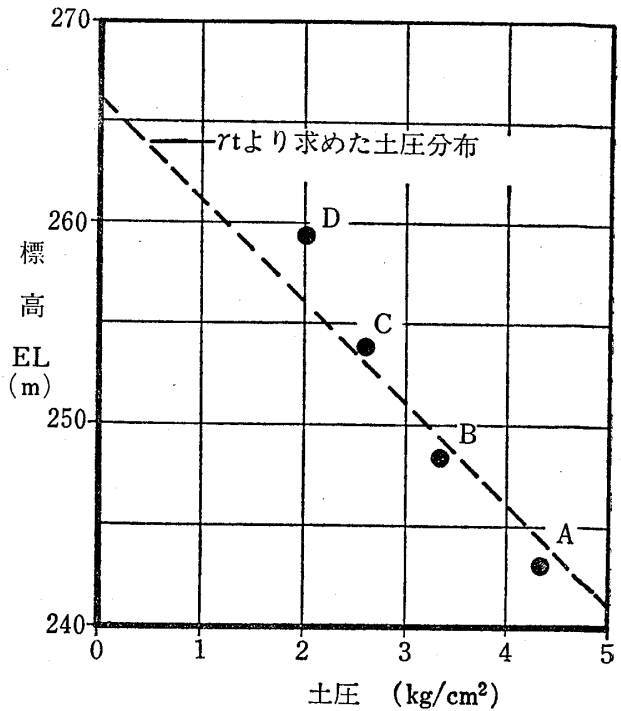


図-19 盛立て完了後の鉛直方向土圧の分布  
Fig. 19 Vertical earth pressure distribution after filling up

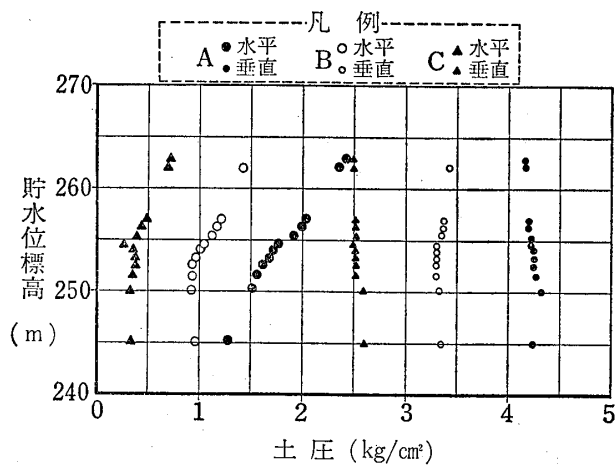


図-20 貯水位と土圧の関係  
Fig. 20 Relation between the ponding water level and the earth pressure

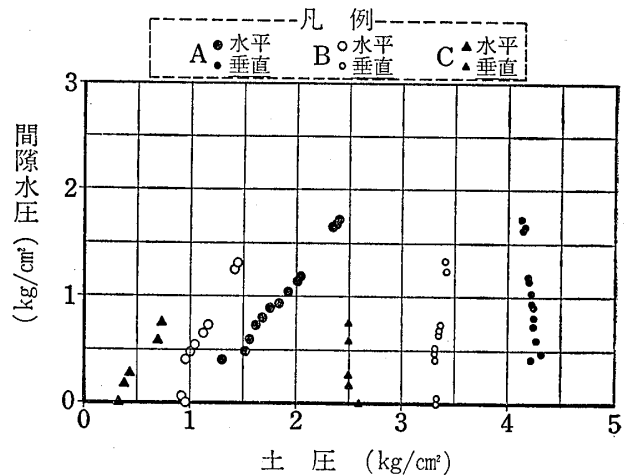


図-21 間隙水圧と土圧の関係  
Fig. 21 Relation between the pore water pressure and the earth pressure

了後のコア内部の鉛直方向土圧の分布を示す。図-19中の破線は、コア部の盛立て材料の単位体積重量 ( $\gamma_t = 2.0 \text{ g/cm}^3$ ) から計算によって求めた鉛直方向の土圧分布を示すものであるが、観測値はこれにほぼ沿った分布を示している。

湛水開始後の昭和57年9月から昭和58年1月までの貯水位が比較的単調に増加している期間 (図-14) について、SP110断面に埋設した土圧計による鉛直方向土圧および水平方向土圧と貯水位との関係を示すと、図-20

のようになり、水平方向土圧は貯水位に比例した動きを示している。また、図-21は、各土圧計と同じ標高で上流側に埋設された間隙水圧計によって測定された間隙水圧と土圧との関係を示したものである。図-20および図-21に示す関係から、堤体内の水平方向土圧は、貯水位の変化に伴って発生する堤体内の間隙水圧の影響を受けて変化することがわかる。

図-22に、貯水位が E L. 250.00m (昭和57年8月25日)、E L. 263.08m (昭和58年1月20日) および E L.

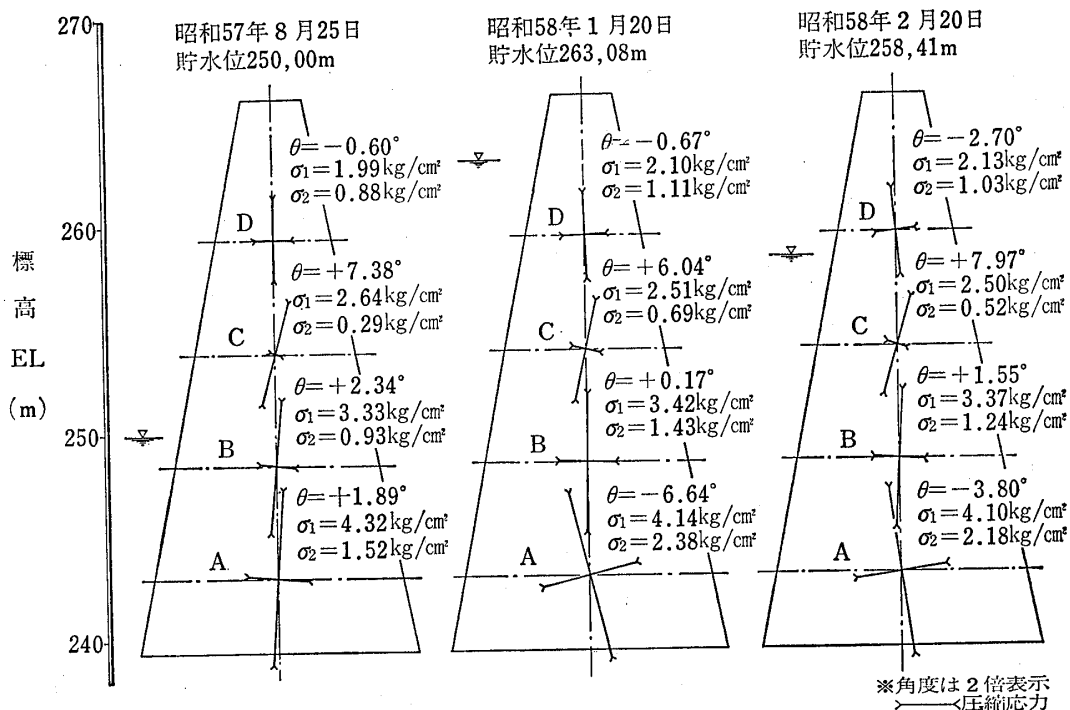


図-22 コア内部の主応力分布  
Fig. 22 Principal stress distribution in core

258.41m (昭和58年2月20日)であったときのコア内部における主応力分布を示す。この図から、つぎのことが認められる。

- (1) コア内部の主応力は、いずれの場合においても、下部ほどその値が大きくなっていて、土被りの荷重を反映している。
- (2) 貯水位の高さに応じて主応力の方向が変化している。とくに、コア部の下部にあるAおよびBにおいては、貯水位が高くなると、主応力の方向が上流側に回転し、低くなると下流側に回転する傾向を示しており、これは貯水の荷重が堤体を下流側に押す力として作用していることをうかがわせている。

## 6 あとがき

当該ダムの建設に際しての間隙水圧および土圧の観測に関して、当地が極めて寒冷地であること、また、観測が長期にわたるために計器の耐久性を必要とすることなどの条件を克服できる計器として、ニューマチック型の計器を採用した。ここに使用したニューマチック型計器は、埋設後の作動状況も良好である。初期に埋設した間隙水圧計では、5年以上を経た現在でも正常な値を示し

ており、ニューマチック型計器の有利性を示しているものといえる。

## 7 謝辞

本報文を作成するにあたっては、北海道農地開発部農業水利課、ならびに、株式会社鯉谷組の関係の方々からひとかたならぬ御協力をいただいた。ここに記して、感謝の意を表す次第である。

