

(64) ダム基礎岩盤のクリープ変位

豊田高寿 (正) 赤木知元

1. まえがき

岩石のクリープ特性は、試験室内において、一定荷重を試料に載荷し続けることによって比較的容易に調べられる。伊藤¹⁾は花崗岩のほりを切り出し(スパン $l=210\text{cm}$)、中央集中荷重 22kg に対して、10~20年間そのたわみを測定し続け、花崗岩の粘性係数を求めている。一方、岩盤マスのクリープ特性は、通常の平板載荷試験において荷重を一定に保持すべし求められるが、経済的理由により必ずしも長時間測定できるとは限らない。本来、岩の力学特性と、その不連続面を介した集合体である岩盤マスの力学特性は異なり、また短期間の試験結果から長期にわたるクリープ特性を予測することは、目下ほとんど不可能に近い。大島、石川等²⁾は、風化花崗岩盤の原位置クリープ試験を60日間にも及ぼし実施しているが、それでも長期クリープへの外挿は困難であるとしている。原位置において、実際の岩盤マスの長期クリープ特性を調べる別法として、実際の構造物岩盤の挙動を観測し、その結果から逆に岩盤の特性を求める方法がある。横田³⁾は、黒部ダムにおける基礎岩盤の挙動観測結果から岩盤の変形係数を求め、初期の予想値と比較している。しかし、特に岩盤クリープについては融れていない。ダムは、水圧による荷重があまり変動せず長期間にわたって一定に保たれるので、その岩盤変位の観測結果からそのクリープ特性を求めるには都合の良い構造物であると思われる。

本研究では、あるアーチダム(堤高 100m 、堤頂長 320m)の岩盤変位観測データを整理し、ある一定の水位に換算したクリープ変位を9年間について抽出し、岩盤のクリープ特性あるいは粘性係数を算定しようとするものである。本ダムの工事誌⁴⁾によればダム基礎岩盤は、P波速度 $4.5\sim 5.0\text{km/sec}$ の良好な両翼花崗岩で、ジャコビテストによる弾性係数は、平均 $100,000\text{kgf/cm}^2$ ($9,800\text{MPa}$)。シャーテストによるせん断強度(C)は、 $16\sim 80\text{kgf/cm}^2$ ($1.6\sim 7.8\text{MPa}$)、内部摩擦角は 50° 前後である。岩盤分離面は断層、節理、シーム等を含め、方向に顕著なグループが発達しており、 $N50^\circ W$ ($85^\circ N$)、 $N85^\circ W$ ($60^\circ N$)、 $N45^\circ E$ ($75^\circ N$)である。それらに対し、ダムが受けるスラストの方向は $S20^\circ E$ で、分離面に対し概ね直交している。

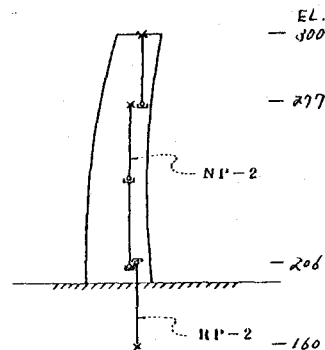


図-1 堤体変位測定ペンデュラム

2. ダム堤体の実測変位

堤体および岩盤の変位は、図-1に示すように配置されたノルマルペンデュラム(NP-2)およびリバースペンデュラム(RP-2)により測定されている。EL. 160を不動点とし、その点に対するEL. 206の相対変位を岩盤変位とする。堤体の変位はEL. 206に対するEL. 277およびEL. 300の変位を採る。下流側を正とし、それら変位の経時変化を、たん水開始から980日目までにつき、水位および気温とともに図-2に示す。

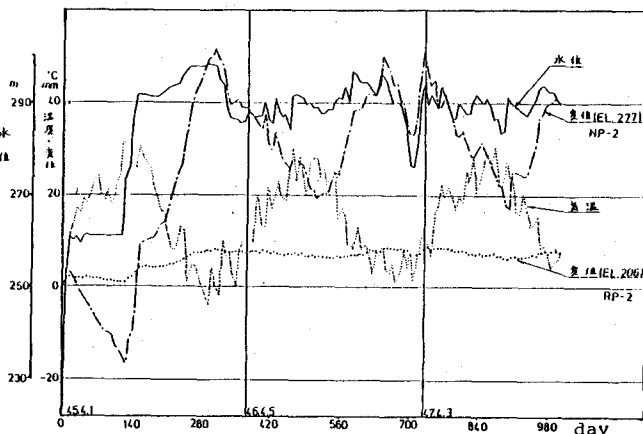


図-2 ダム堤体および岩盤の変位、水位、気温の変化

ん水したところで約100日間水位が一定に保たれているが、その時の堤体変位増分は負となっている。この現象は、湖水の垂直荷重によって湖底が沈下し、結果として堤体が上流側に傾いたものと解釈される。岩盤変位も若干の影響を受けているのがわかる。たん水は、その後40日間かけてEL. 293まで達してからほぼ一定に保たれている。それでも岩盤変位および堤体変位が顕著に増加しているが、それはクリープの効果であろうと推察される。仮に、堤体変位が特に著しく増加しているのは、ちょうど気温低下の時期に一致し、その影響が加わっていることによるものであろう。普通、ダム堤体の平均温度が上昇すると堤体は伸張しようとするが両側を山で拘束されているため上流側に迫り出すことになる。すなわち、温度上昇によって負のたわみが発生し、温度が下がるとそれが元に戻ることになる。

これらのことは、堤体の実測変位を重回帰解析することによって、それぞれ因子別の変位を求めて明らかにすることができ⁵⁾。ここではその回帰式を使って図-3に示したEL. 277の実測変位を、水位によるもの、堤体平均温度によるもの、および、堤体温度勾配によるものに分離し、残りをクリープによるものとして図-3に示す。図から、残には種々他の因子による変位が含まれ、それがノイズとなって現われているが、平均的にば変位が年々増加し、クリープによるものが主体をなしていると考えられる。したがって、これをクリープ曲線と看做解析すれば、ダム堤体を構成するマスコンクリートのクリープ特性が明らかにされよう。

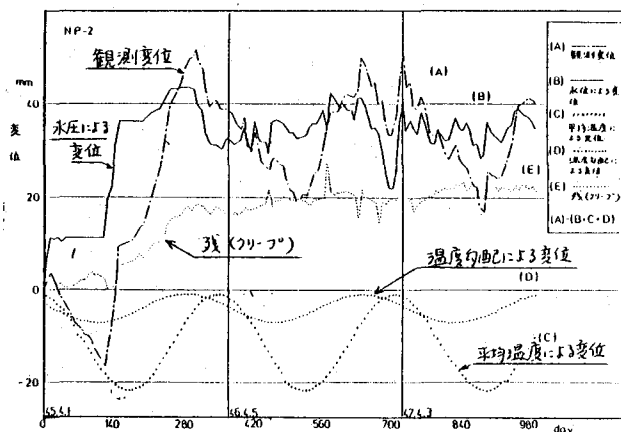


図-3 実測堤体変位の因子別分離

3. ダム基礎岩盤の実測変位

EL. 160とEL. 206の46m間の相対変位が岩盤変位として実測され、その経日変化が980日分について図-4に示されている。岩盤の温度変化は無いものと考え、これら岩盤変位への影響因子は水位によるスラストだけであるとすると、したがって、むしろ仮にダム水位が常に一定であれば、図-4に示した曲線はそのままクリープ曲線となり解析の対象となる。しかし、図-4に示されているように水位はEL. 290近傍でたえず変動しているため、一定のスラストに対する岩盤変位のクリープ曲線を得るには、岩盤変位をある基準の水位に対するものへ補正してやるというのが一つの方法として考えられる。そのような補正を行なうには、基礎岩盤の力学特性である荷重-変位曲線を求めておき、水位に対応する変位量が既知に決まるようにしておかなければならない。もちろん、そのような図は載荷速度すなわち水位の上昇速度によって異なり、したがってクリープの過程に適用できるとは限らない。しかし、そのような特性をも考慮した荷重-変位曲線はこの岩盤について明確にすることは、現時点では困難であるので、今、仮にたん水初期の関係図を便宜的に使用してみることにする。そのような関係曲線を図-4に示す。被圧するダム堤体面は逆三角形形状をしているので、水

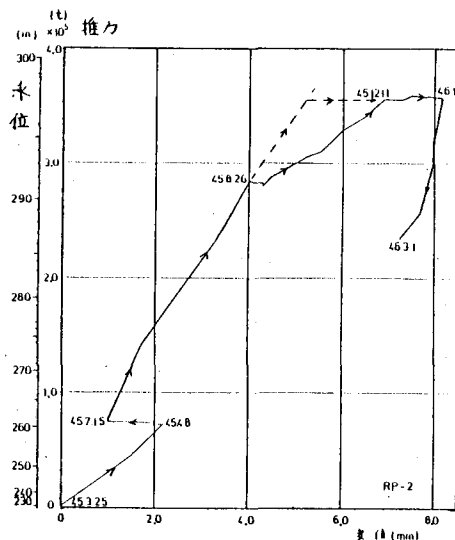


図-4 たん水初期の岩盤変位

にしておかなければならない。もちろん、そのような図は載荷速度すなわち水位の上昇速度によって異なり、したがってクリープの過程に適用できるとは限らない。しかし、そのような特性をも考慮した荷重-変位曲線はこの岩盤について明確にすることは、現時点では困難であるので、今、仮にたん水初期の関係図を便宜的に使用してみることにする。そのような関係曲線を図-4に示す。被圧するダム堤体面は逆三角形形状をしているので、水

値とスラストは比例しない。一方、岩盤を流動させる力はスラストに比例すると考えられるので、図では縦軸にスラストを普通に目盛り、水位をその横に対応させている。

図において、天ん水開始直後の挙動は岩盤のなじみによるものと考え考慮せず、45.7.15からの水位260^m~292^m間の直線を、ここで言う岩盤の基準となる荷重(水位)-変位関係として採用することとする。したがって、水位292^m以上についての挙動は、実際は、水位上昇速度を落としているため、クリープの影響で関係曲線はこの直線の勾配からずれているとしても、もし同じ水位上昇速度であれば、同じ勾配で関係は続くと考え、さらに、45.12.11から保たれると同じ水位297.5^mに達してからクリープ過程に移るとしても、結果として同じ点(45.12.11)に到るものと仮定するのである。このような経路を図-4に破線で示す。こうすることによって、できるだけ多くの基準水位に対するクリープ変位を抽出することができる。

図-4と同様に、その後9年間の水位-変位関係図を図-5(a)、(b)、(c)に示す。まとめてしまうと図が煩雑になるので3図に分けたが、(a)は47.12.18までの850日間、(b)はその後51.1.27すなわち1784日まで、(c)は54.12.3まですなわち3300日までを表わしている。

水位は、270^mから298^mの間を絶えず変動しているが、急激な水位降下あるいは水位上昇時の水位-変位曲線の勾配は、図-4の初期の同曲線の勾配とほぼ一致している。したがって、基準水位に対するクリープ変位を取り出すには、水位上昇過程にあるものを図-4で行なったと同様の手順で基準水位に対する変位へと補正してやればよい。基準水位は比較的長期測定水位を保ち、高水位のものが良いので、45.12.11からの297.86^mとする。

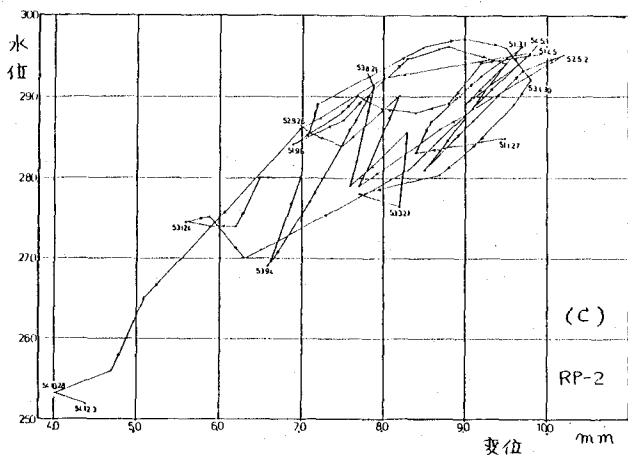
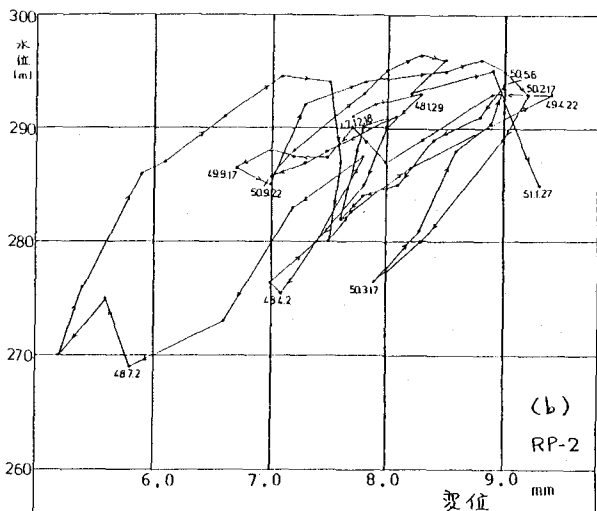
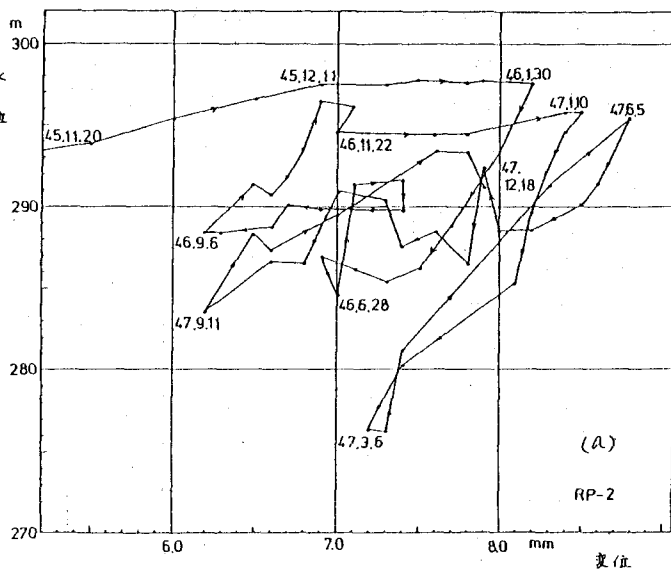


図-5 水位-岩盤変位の関係ループ

4. 岩盤のクリープ変位の抽出と粘性係数の算定

このように、水位 297.86 m に対するものへ補正して得られた変位を時間軸に対してプロットすると、図-6に示すような結果が得られる。図中のドットは、補正值ではあるが全て水位 297.86 m に対する変位である。もし、その基準水位が当初から保たれているならば、それら変位は図中の破線で示したようなクリープ曲線上に分布するであろう。

しかし、途中で水位が低下し除荷がある、その後基準水位までに再載荷されたとしても、元の変位まで戻りにけ相当の時間を要する。そのような過程があるため、図ではほとんどの点がこの曲線の下に位置している。

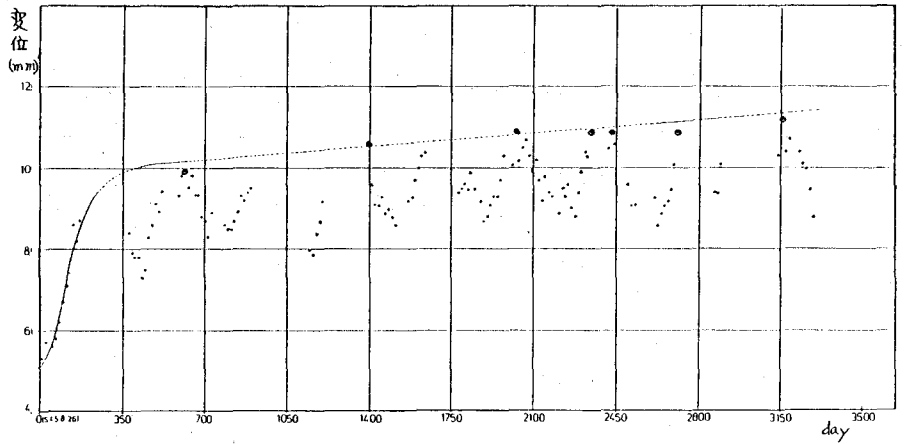


図-6 水位 297.86 m に換算された基礎岩盤のクリープ変位

しかし、一定水位が十分に長く保たれる場合は、クリープ変位が相当量現われ、その最終変位を①で印してあるが、時間の経過とともにその値も更新しているのがわかる。結果として、このようにしてプロットされた点の外側を包むように描いたものが図中の破線である。あるいは、当初から一定水位が保たれた場合に得られるであろうクリープ曲線のような曲線が得られている。いま、この曲線を岩盤のクリープ特性を表わすものとしておおまかに解析すれば、360日程度の遅延時間を持つメカニズムの存在が考えられる。さらに、数10年というオーダーの遅延機構も推測されるが、これらは9年間の結果であるので、それ以降についてはダッシュポットによるモデル化、すなわち、粘性係数を算定することによって処理することとする。

まず、図-6から1400日目と3150日目の間の変位速度を求めると、 $(11.24 - 10.6) \text{ m} / 1750 \text{ 日}$ と得られる。この変位速度は、E.L. 160とE.L. 206の46m離れた点間のずり速度であるから、それをひずみ速度に直すと $\dot{\epsilon} = \dot{\delta} / 46 \text{ m} = 6.4 / (4.6 \times 1.75 \times 2.4 \times 3.6) \times 10^{-12} \text{ (1/sec)}$ となる。これらの流動を起す岩盤内の応力は、およそ $0.5 \text{ MPa} (= 4.9 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2) \sim 2 \text{ MPa}$ と考えられるので、いま仮にそれを 1 MPa とすれば、粘性係数は $\eta = \tau / \dot{\epsilon} = (9.8 \times 10^6 \times 4.6 \times 1.75 \times 2.4 \times 3.6 \times 10^{12} / 6.4) = 1.065 \times 10^{20} \text{ poise}$ と求まる。応力のとりうる範囲を考えると、 $5 \times 10^{19} \sim 2 \times 10^{20} \text{ poise}$ である。

伊藤¹⁾の実験では、10年間(2600日間)の結果から $10^{20} \sim 10^{21} \text{ poise}$ と算定している。わずかオーダー半分の違いである。どちらも両栗田花崗岩であるが、本岩盤は領家帯であり伊藤のは広島型である。岩盤と岩石の違いがもう少し大きく出るであろうと当初は予測したが、このようなわずかな違いとなったことも、本岩盤の流動方向が卓越する分離面にほとんど直交していることを考えると納得しても良いかも知れない。

今後は、様々な仮定によって生ずる誤差の上下限を明らかにし、この種の岩盤の粘性定数を算定したい。そうすることによって、大型土木構造物のより厳密な長期変形予測が可能になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 熊谷、伊藤：花コウ岩大型ビーム長期たわみ実験の最初の10年間の実験結果とその解析、材料、181号、1968。
- 2) 大島、石川他：第5回岩の力学国内シンポジウム、1977年。
- 3) 横田 潤：土木学会論文報告集、No. 241、1975、P. 67。
- 4) 矢作ダム工事誌、中部地建、1971。
- 5) 矢作ダム堤体挙動解析、中部地建、1973。

(64) The Creep Property of Rock mass as an Arch Dam Foundation

Tomoyuki Akagi
Toyota National Technical College
Eisei-cho 2-1, Toyota, Aichi, Japan

It is easy to examine the creep property of rock specimen in a laboratory. Dr. Ito continues to measure the deflection of beam made of granite for two decades and determined the viscosity of the granite¹⁾. On the other hand, it is very difficult to determine the long term creep of rock mass as structural foundations where geological discontinuities are present. Although the creep test for rock mass may be performed by the plate bearing test if the load is sustained, it has not been tried to sustain the constant load during so very long time because of economical reasons. Now it is impossible to predict the long term creep behavior of rock mass being based on the short time property.

It may be good idea to determine the creep of rock mass from the observed displacements of the rock mass as an arch dam foundation. Because an arch dam continues to suffer the water pressure as a constant load for long time. The present paper determines the viscosity of rock mass by means of rearranging the observed data of the arch dam foundation located in Yahagi river. The geology of the dam foundation is granite which has the longitudinal wave velocity of 5.0 km/sec. The average modulus of elasticity is 10000 Mpa according to the plate bearing test. The shearing strength (C) due to block shear test has 5 Mpa as mean value. The angle of shearing resistance is about 50 degree.

Figure 1 illustrates the arrangement of pendulums which measure the displacement of arch dam. The pendulum of RP-2 catches the behavior of rock mass. Figure 2 shows the observed data which are the water level, the air temperature and the displacement of dam body (EL.277) and dam foundation (EL.206). If there are no variation of water level, the curve for EL.206 corresponds to just creep curve of rock mass since the load due to water pressure is constant. In Fig.2, however, it is found that the water level moves up and down EL.290. So it is need to adjust the displacements for each water level to one for fixed water level. Such adjustments are performed using the load-displacement relation of rock mass as showed in Fig. 4 which represents the initial behavior of rock mass when started to reservoir. The behavior of foundation up to after 9 years are showed in Fig. 5.

From these figures we are able to pick up the creep displacements which are suggested by the proceeding displacement in spite of constant water level. In the case of the creep for different water level, it is possible to adjust it to one for prescribed water level. The adjusted creep displacements for the water level of EL.297.86 are plotted in Fig.6. This diagram corresponds to the result due to loading and unloading creep test. So we can get the creep curve for rock mass by drawing the envelope line on these plotted points as indicated in the figure by a dotted line. Since the shear stress in rock mass may be 0.5~2.0 Mpa, if we estimate the strain rate as 0.064cm/1750day, the viscosity of the granite rock mass located in central Japan is determined as $5 \times 10^{19} \sim 2 \times 10^{20}$ poise.