

九州電力(株) 総合研究所 正員 赤司六哉

" " " 高田 真

面日本技術開発(株)

" " 〇相場 明

1 まえがき

九州電力ではA場水発電所を計画中であるが、その上部池ダムは、約85m前後のロックフィルダムが予定されており、しかも、ダムサイト付近は、変成岩類と花崗岩類の接触部にあたり、基盤をなす片岩層の中のいたるところにアブライトの貫入がみとめられる。最近では、ロックフィルダムの設計にあたって、ロック材料の経年変化の問題が取扱われるようになり、これに関する研究が各方面で着手されつつあるようである。A地点のロックフィルダムの場合は、北海道などのいわゆる寒冷地に築造されるわけではないので、気温変化から受けるダムの凍結融解の諸条件をシミュレートすることは困難であるが、ダムの本体が700m~800mの標高に矗立てられ、しかも、冬季には -10°C 以下になることも珍しくないもので、ロック材料は、経年変化により相当地に劣化することを覚悟しなければならぬ。そこで、九州電力では、ロック材料の経年変化による劣化現象の一つの表現方法として凍結融解試験結果を採用することになり、すでに、これらに関する一連の室内試験を実施中である。現在における試験の進捗状況からみて、これらの結果をまとめて報告するには時機尚早の感もあるが、本報告では、凍結融解試験機の紹介を兼ねて、ロック材料の破壊および三軸圧縮試験によるセリ断強度係数などを取りあげ、できる限りの範囲での解析と比較検討を試みてみた。なお、試験に使用したロック材料は、ダム地点の調査掘削穴より採取したもので、片岩を主体(アブライトが少量混入)としたCH~CH級(電力中央研究所の判定方式による¹⁾)の岩質である。

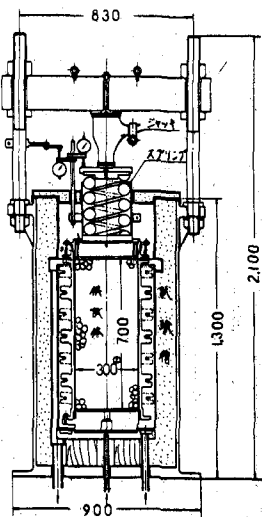
2 凍結融解試験

2.1 試験機の紹介

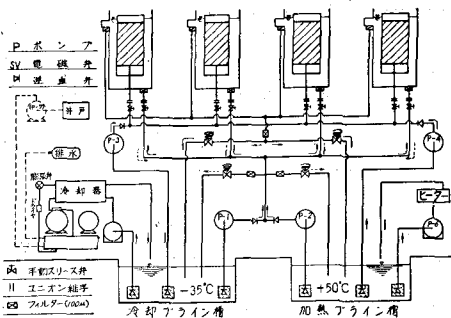
今回製作した凍結融解試験機の大まかな特徴は、i)所定の凍結融解を完了した供試体をそのまま大型三軸圧縮試験機でセリ断できること、ii)凍結融解時に供試体の上部から拘束圧をかけ得ること、iii)凍結融解時の供試体の内部にブライン液(不凍液)を循環できること、の3つである。以下その詳細を記してゐる。当凍結融解試験機は、4連の試験槽をもち、 $\phi 300\text{mm} \times 700\text{mm}$ の大型三軸圧縮試験用の供試体をモールドのまま槽中にセットできるようにしており、さらに、その供試体の上部には、最大荷重15t(2.1t/cm^2)のジャッキとス

プリングを組合わせた載荷装置が取付け可能で、ロックフィルダムの表面および内部の材料劣化を表現するようになっている。

(第1図参照) 供試体の凍結融解は、冷却あるいは加熱されたブライン液を交互に試験槽内に循環させて行ない、凍結および融解の切換えは、供試体内部の岩芯温度を $\pm 4^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ に設定することにより、温度制御装置で自動的に行なうことができる。なお、岩芯温度の測定は、後述の熱電対方式を採用し、自記記録用紙にプロットできるようにしている。第2図は、ブライン液の循環系統をモデル化したものであるが、供試



第1図 凍結融解試験槽



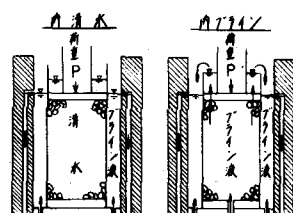
第2図 ブラインの循環系統

体は試験槽の中央に設置され、冷却槽あるいは加熱槽から送り出されたブライン液は供試体の周囲（供試体の中も可）に絶え間なく流入され、オーバーフローした分は外溝を通過して各ブライン槽に還元される。また、熱効率のアップを図るため、上述のように冷却用ブライン槽（Max. -35°C ）と加熱用ブライン槽（Max. $+50^{\circ}\text{C}$ ）もそれぞれ分離させており、凍結時および融解時には、冷却ブラインと加熱ブラインができる限り純粋に循環するように工夫されている。なお、その他の装置としては、設定したサイクル数の自動停止装置および時間を設定した凍結融解試験への自動切換え装置などがある。さらに、通常、凍結と融解の切換えは前述のように岩芯温度の設定によって行っているが、異常事故が発生した場合には、時間設定による試験に自動的に切換わるよう装置されており、これが、危険防止の大きな役割を果たしている。

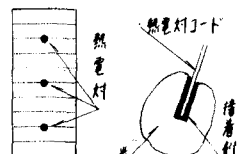
2.2 試験の方法

凍結融解試験を実施するにあたっては、第3図に示すような2つの方法を採用した。第3図の左は、供試体内を清水で満たし、試験槽内にブライン液を循環させて供試体内の間ゲキ水とロック状粒子自体（粒子は飽和されている）の凍結融解を繰返す試験（以下内清水試験とよぶ）であり、第3図の右は、供試体内と試験槽内にブライン液を同時に循環させて、供試体の間ゲキにはブライン液による温度変化のみを生じ、ロック状粒子（粒子は飽和されている）の凍結融解を繰返す試験（以下内ブライン試験とよぶ）である。内ブライン試験は、コンフリードで実施する試験概念からすれば、凍結融解試験とよぶこと自体に問題があるのかも知れないが、ひとまず飽和されたロック状粒子の凍結融解は行なわれているのであるから、劣化試験の一方法として採用しても、その結果は有効に評価できるものと考えられる。

第4図は、熱電対による岩芯温度の測定状況を示したものである。熱電対は、ロック状粒子に埋込まれ、供試体の上部・中部・下部に配置されているが、その埋込み手法の詳細はつぎのとおりである。粒径が63.5mm～50.8mmの良質のロック状粒子を選び、これに中心まで穴をあけて熱電対を差込み、粒子孔と熱電対コードのすき間には熱伝導の低い接着剤を充填し、外部との完全な遮断が保たれるようにした。第1表には、試験方法の違いによるブラインおよび岩芯の設定温度と1サイクルに要する時間が示されているが、内ブライン試験は、その1サイクルの所要時間が内清水試験の約1/8程度で、効率の良い試験ということが出来る。また、第5図は、内清水および内ブライン両試験の温度記録を写したものである。これによると、冷却および加熱ブラインの実測温度は、両試験ともに第1表に示す設定温度にほぼ一致している。岩芯温度は、内ブライン試験ではその設定温度とは



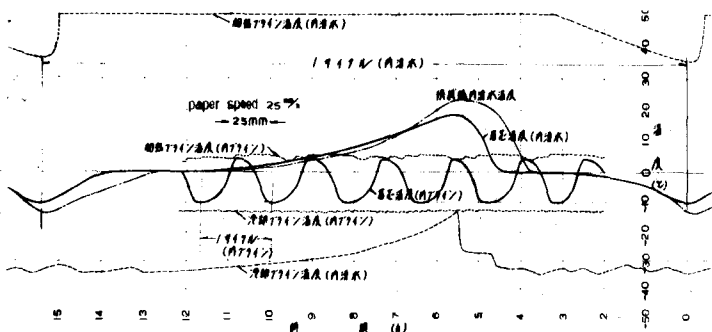
第3図 凍結融解試験の方法



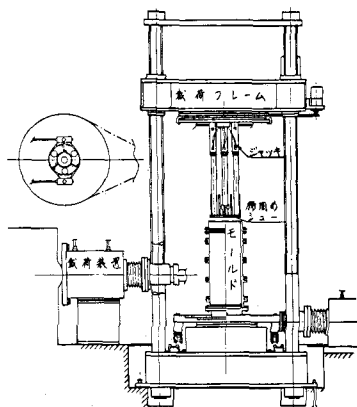
第4図 岩芯温度測定用熱電対

第1表 設定温度と1サイクルの時間

試験方法	771/凍結温度		50/融解温度		1サイクルに要する時間 (分)
	+	-	+	-	
内清水	50	35	4	10	15'20"
内ブライン	6	13	4	10	1'50"



第5図 内清水試験と内ブライン試験の温度記録図の1例



第6図 斜角断面の試験装置

ば一致しているが、内清水試験では凍結および融解のいずれの側においても設定温度を上まわった値を示している。これは、供試体内の間ゲキ水とロック材料との熱容量の差の関係から起る現象であろうと考えられ、内清水試験の場合の岩芯温度設定については再考の余地がある。また、岩芯温度の設定には供試体上部の熱電対を利用しているが、内グライン試験では熱電対の位置(上・中・下)による温度差がほとんどなくて問題ないが、内清水試験ではかなりのバラツキがあって設定温度が必ずしも供試体の平均温度となり得ない場合があるという難点がある。今後の試験による再検討事項の一つであろう。

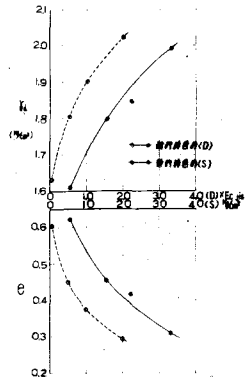
3 三軸圧縮試験結果

3.1 試験の方法について

供試体は、すべて静的に締固めて作成した($\phi 300\text{mm} \times 700\text{mm}$)。静的締固め装置は、第6図に示してあるが、油圧ジャッキにより、4個の締固めシユで供試体を全面加圧するようにになっている。締固めエネルギーは、ジャッキ圧を締固めシユの面積で除した値、すなわちシユ一圧(kg/cm^2)で表示するが、その最大シユ一圧は 60kg/cm^2 である。供試体の締固め方法は、供試体を10層に分け、各層とも所定のシユ一圧を1分間載荷することにした。また、所定の締固めエネルギーを得るためのシユ一圧は、Proctorの方法による締固めエネルギーと対応する供試体の間ゲキ比をパラメーターにして決定した。すなわち、第7図より、 $0.5E_c$ は 16kg/cm^2 、 $1E_c$ は 25kg/cm^2 、 $2E_c$ は 35kg/cm^2 などが求められる。第2表は、6種類の試験についての仕様を一覧にしたものであるが、これらの試験は、内清水試験時の載荷・無載荷の差あるいは内清水と内グラインの差を比較検討することはもちろん、劣化しないロック材の物性との対応を求める意味から、凍結融解後の三軸圧縮に加えて、自然状態の初期間ゲキ比を変化させたものも実施した。この報告で用いる初期間ゲキ比とは、三軸圧縮試験に際しての供試体セット時のものをいう。また三軸圧縮試験の供試体の取扱については、まず気乾状態で材料を締固め、これを24時間浸水させた後、各試験の工程に入った。なお、便宜上6種の試験にA~Fのアルファベット記号をつけ、試験結果の図中表示に用いた。

3.2 試験結果

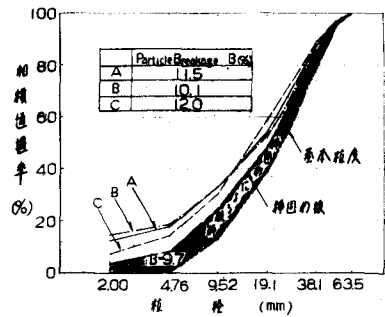
第8図は、凍結融解試験後の粒度曲線の変化を示したものであるが、まず、図中の凍結融解試験のみのParticle Breakage²⁾にはA・B・C3ケースの差をほとんど認めることができない。しかし、粒度曲線でみると、内清水試験(A・B)では比較的小さい粒径での破砕が著しく、内グライン試験(C)は、どの粒径でもほぼ均等に破砕している。これは、内清水あるいは内グラインの場合の凍結融解機構の違いからきたものであろうが、まだロック材粒子の破砕機構を解明できる段階にはいたっていない。つぎに、第9図は、側圧 σ_3 と三軸せん断時のParticle Breakageの関係をプロットしたものであるが、凍結融解作用を受けたグループは、自然状態のグループより大きなParticle Breakageを示し、さらに、 σ_3 の増大にともなうその伸び



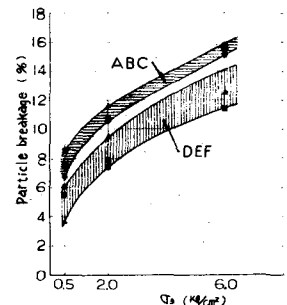
第7図 締固めの試験の比較

第2表 試験仕様の一覧

記号	試験名	試験の 状態	締固め エネルギー (kg/cm ²)	凍結融解 試験 種類	凍結融解 時間 (分)	凍結融解 温度 (℃)	三軸圧縮 試験 条件	三軸圧縮 試験 結果
○	A	自然	16 (0.5)	内清水	50	0	0.51	圧縮 試験
△	B	自然	16 (0.5)	内清水	50	4.2	0.44	
□	C	自然	16 (0.5)	内グライン	300	4.2	0.39	
●	D	自然	16 (0.5)	—	—	—	0.51	
▲	E	自然	25 (1.0)	—	—	—	0.45	
■	F	自然	35 (2.0)	—	—	—	0.40	



第8図 凍結融解による粒度変化



第9図 Particle Breakageと側圧の関係

率も若干大きくなっている。これは、凍結融解作用により岩質自体が劣化しているためであろうと考えられる。また、A・B・C間の差は、ほとんど認められない。第10図には、セ二断時のParticle Breakageと主応力比の関係を示してみたが、A・B・CグループとD・E・Fグループとの明確な相違をつかむことはできなかった。この問題に関しては、今後の究明事項として残したい。第11図は、多少危険性を帯びていると思うが、フィルダム現場における二、三の試験例³⁾などを参考にして、初期間ゲキ比と内部摩擦角(ϕ)、粘着力(C)との関係を直線で表示してみたものである。この図によれば、自然状態と凍結融解との差はもちろん、内清水と内ブラインとの差もはっきり認められるようである。すなわち、まず、 ϕ についてみると、自然に較べて、内清水の場合で約2度、内ブラインで約0.5度の低下があり、しかも、内清水の垂直載荷と無載荷の差もわずかではあるがそれを認めることができる。つぎに、粘着力では ϕ と逆の現象がみられ、凍結融解によるものの方が自然状態に較べて約 0.1 kg/cm^2 程度大きいようである。これらの現象は、第8図に示した粒度分布図からもある程度比較説明(相粒分の含有率など)ができるようである。最後に、第12図は、ヒズミの増加にともなう接線法で求めた変形係数の変化を求めたものである。凍結融解作用を受けたA・B・Cグループは、初期ヒズミの部分では、変形係数は、自然状態(D・E・F)グループに較べてその絶対値は小さいが、その減少カーブはほとんど相似の形を保っている。しかし、ヒズミが2%をこえると、A・B・Cグループは、変形係数の減少カーブの勾配が急に小さくなり、むしろ、D・E・Fグループより大きな値を示すようになる。このことは、各試験の $\sigma \sim \epsilon$ 曲線の形状をよく物語ったものであるといえることができる。

4 むすび

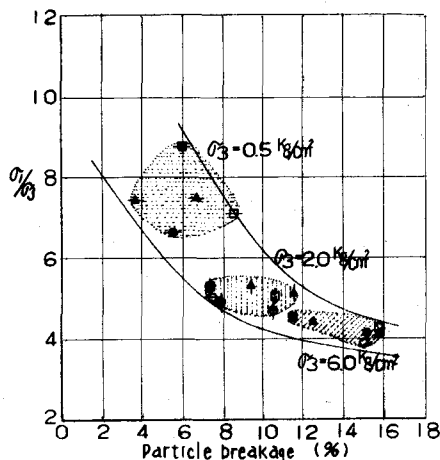
今回の報告では、不備な点も多いが、ロック材料の凍結融解による劣化現象を、Particle Breakage、セ二断強度係数および変形係数によってある程度説明できたと思う。なお、凍結融解試験は引続き実施中であるから、他の劣化試験すなわち、水浸乾燥試験、安定性試験などとの比較検討も加えて、定性的にあるいは定量的に研究を進めていきたい。

(参考文献)

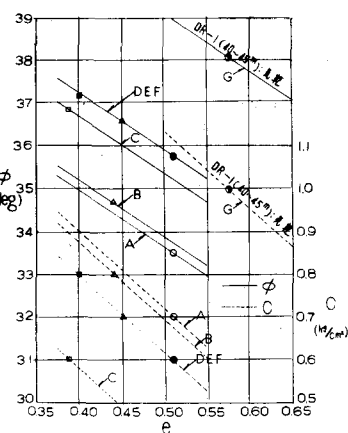
1) 田中清雄著:「土木技術者のための地質学入門」

2) Marsal, R. J. "Large Scale Testing of Rockfill Materials" Proc. A.S.C.E. SM2, 1967

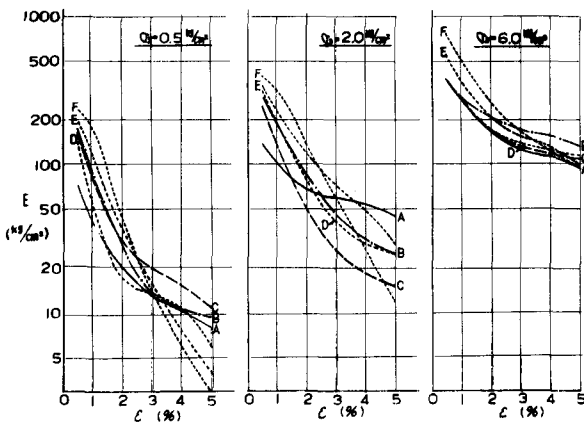
3) 全原又也、加藤繁夫:「粗粒材料の一面セ二断試験」、土と基礎, Vol. 17, No. 2



第10図 Particle Breakageと主応力比の関係



第11図 間ゲキ比と C ・ ϕ の関係



第12図 ヒズミと変形係数の関係