

アーチダム基礎岩盤の安定に関する一考察

九州電力 K.K. 一ツ瀬建設所 〇青木謙三、大久保良司

アーチダムの安定性を論ずる場合、ダム本来の性格上アバットメントにおける基礎岩盤の安定性が当然問題になる。アバットメントにおける安全性は、岩盤の支持力と滑り抵抗の二つの要素に支配されると考えられるが、これらは地形、地質、岩盤の風化の程度、シームや節理の発達の状態、断層の有無および透水性などに関係がある。ここでは、アバットメントの岩盤内に存在する断層などのために弱面がある場合、そこでの滑り抵抗がどのようなになるか、また、断層周辺での応力はどのような傾向を示すかを、現場での実測、2次元平板による実験などから論じて見たい。内容は次の諸項目よりなる。

1. 断層における現場剪断試験の一例
2. 半無限弾性体としての滑り安全率の計算例(近似法)
3. 2次元模型による断層線上の応力の検討
4. 断層処理上の問題点について

§1. 断層における現場剪断試験の一例

1. 試験の方法 試験の方法としては断層面の前面の砂岩を楔状に切出し、このブロックの自重と2個の油圧ジャッキによる水平、鉛直方向加圧(W_H, W_V)で断層面に両方向の合成垂直力を與え、これをもう1個の水平ジャッキにより水平方向に加圧して(W_S)1面剪断試験を行ったものである。ジャッキは300tの能力を有する油圧ジャッキ3台を使用した。試験ブロックの下部には、滑り止めのコンクリートを打設したが、このコンクリートのために底面の抵抗が大きくならないようにルーフィングによる縁切り、油流し込みによる摩擦の減少を図った。

2. 試験の結果 試験における作用荷重ならびに応力を表-1に示した

表-1 第1回および第2回試験における作用荷重および応力

第1回試験 (剪断面積 7.25 m^2)							第2回試験 (剪断面積 8.15 m^2)						
	$W_V(\text{ton})$	$W_H(\text{ton})$	$W_S(\text{ton})$	$\sigma'(\text{t/m}^2)$	$\max. W_V(\text{ton})$	$\tau(\text{t/m}^2)$		$W_V(\text{ton})$	$W_H(\text{ton})$	$W_S(\text{ton})$	$\sigma'(\text{t/m}^2)$	$\max. W_V(\text{ton})$	$\tau(\text{t/m}^2)$
Peak Strength	20	53	68	9.3	61	8.4	Peak Strength	10	39	51	6.3	65	8.0
Ultimate Strength	20	53	68	9.3	59	8.1	Ultimate Strength	10	39	51	6.3	63	7.7
"	40	78	100	13.8	81	11.2	"	30	62	83	10.0	84	10.3
"	60	104	133	18.3	104	14.3	"	80	97.2	141	17.3	108	13.2

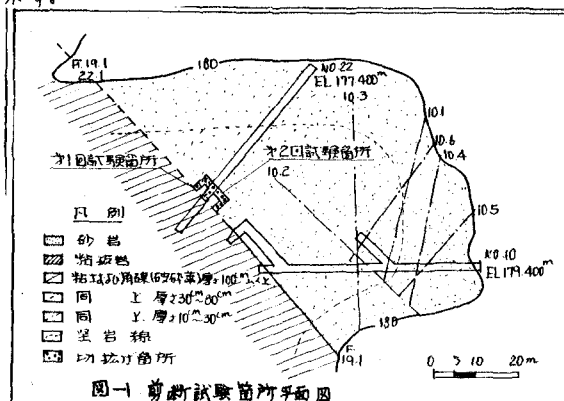
* 剪断変位を測定せず、載荷時間は約10分間で連続的に W_S を加えている。

現場の剪断試験の結果から剪断面の粘着力および内部摩擦角は第1回第2回試験について夫々 $c = 1.6 \text{ t/m}^2, 3.4 \text{ t/m}^2, \phi_u = 35^\circ, 35^\circ$ の値が得られ、剪断面の垂直応力 σ' と剪断応力 τ との関係は次のようになる。第1回試験 $\tau = 0.16 + 0.7\sigma' (\text{kg/cm}^2)$ 第2回試験 $\tau = 0.34 + 0.7\sigma' (\text{kg/cm}^2)$ 室内の3軸圧縮試験における結果からは次のような関係式が得られた。A試料 $\tau = 0.25 + 0.51\sigma' (\text{kg/cm}^2)$ B試料 $\tau = 0.075 + 0.47\sigma' (\text{kg/cm}^2)$ 以上の結果より現場における断層の剪断および粘土の3軸圧縮

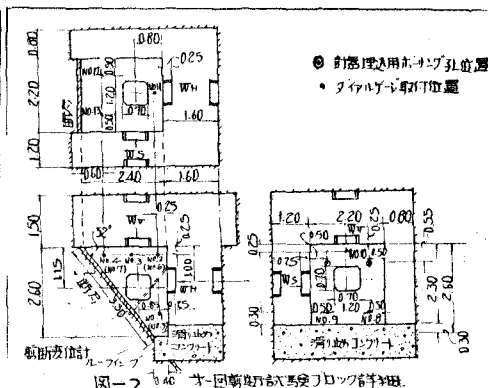
による剪断においては重力応力 σ , 剪断応力 τ の間の関係は次の平均値として求められた。

断層1面剪断 $\tau = 0.25 + 0.7\sigma$ (kg/cm^2) $\phi = 35^\circ$ 粘土試料3軸圧縮 $\tau = 0.16 + 0.49\sigma$ (kg/cm^2) $\phi = 26^\circ$

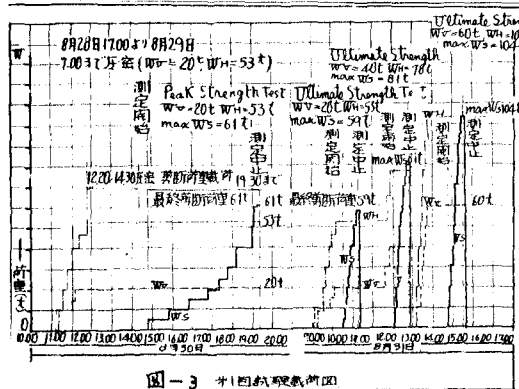
(註) ここで Peak Strength は最初の剪断破壊の強さ, Ultimate Strength は剪断破壊面ができて後の剪断強さを示す。



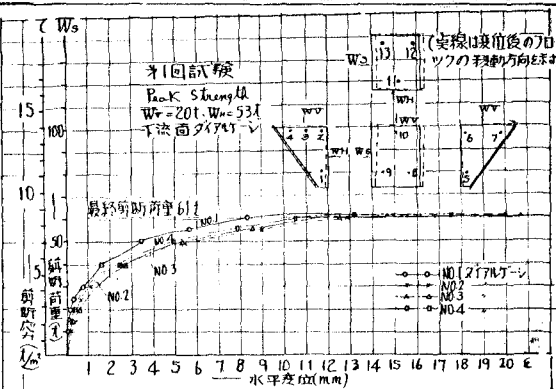
図一 剪断試験箇所平面図



図二 剪断試験箇所試験装置の平面図



図三 第1回試験結果の剪断図



図四 剪断荷重と水平変位の関係 (第1回試験, P, S, W=20t, Wh=53t, グリッド・シフト No. 1, 2, 3, 4)

§2. 半無限弾性体としての滑り安全率の計算例 (近似法)

3成分または1成分調整による水平アーケアバットメントの断面力はモーメント, 推力および剪断力として求められ, これらの諸力は図-6のようにアーケ厚 T の幅に $p = a + by$ の垂直圧縮応力ならびに $\tau/T = \tau$ となる水平剪断応力として分布する。断層の厚さを小さいと仮定すれば, 半無限弾性体としての応力を断層線に沿って算定しても第1次近似としては充分である。

断層線の一点 (y, z) における $\sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}$ から断層線に垂直な応力 σ ならびにこの線に沿う剪断応力 τ が計算できる。 $\sigma = \sigma_y \cos^2 \theta + \sigma_z \sin^2 \theta + 2\tau_{yz} \sin \theta \cos \theta$ $\tau = (\sigma_z - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{yz} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$ 滑動安定性ならびに剪断破壊に対する安全性は断層面に対する垂直力と剪断力の大きさから検討されるわけであるが, 今2次元的に算定した (アーケの厚さ, 単位厚) 断層線に対する $\Sigma \sigma, \Sigma \tau$ の断層傾斜面への成分

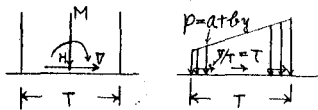


図-6

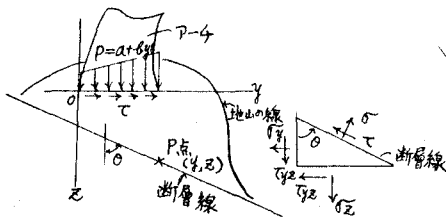


図-7

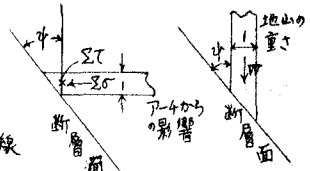


図-8

ならびに地山重量による断層面への影響を求めこれを合成すると滑動の安全性の検査ができる。今単位厚さの水平アーチからの諸力によって断層の位置における鉛直面におよぼす垂直力および剪断力は $\Sigma \sigma$ および $\Sigma \tau$ であるが断層面の鉛直面とのなす角を y とすれば、これらの断層面の単位表面についての成分はそれぞれ、垂直力: $\Sigma \sigma \cos y$, 剪断力: $\Sigma \tau \cos y$ となる。次に単位幅の地山の重量を W とすれば、この断層面の単位表面についての垂直力は $W \sin^2 y$ となる。断層の全長 (L) に亘る安全性を問題にするから、上記の諸力を断層の単位長について求めると、垂直応力ならびに剪断応力はそれぞれ、 $\frac{1}{L} (\Sigma \sigma \cos y + W \sin^2 y)$, $\frac{\Sigma \tau}{L} \cos y$ となる。今断層面の平均垂直応力に対し、実物の断層の剪断試験における σ - τ の直線から得られる τ の値を τ' とすれば $\frac{\tau'}{\Sigma \tau / L \cos y}$ はこの断層面における平均滑動安全率を表わすといえる。(この計算に当って求められた断層面での σ - τ の曲線から剪断破壊安全性も検討されるわけで、局所的な剪断破壊が認められてはじめて平均滑動安全率も成立するといえる)。

§3. 2次元平板による断層線上の応力の検討
アーチアバットを支える岩盤内に断層が存在する場合、その断層はアーチアバットの取付き具合、アバットメント付近の地形断層の角度などにより種々の条件におかれることになる。

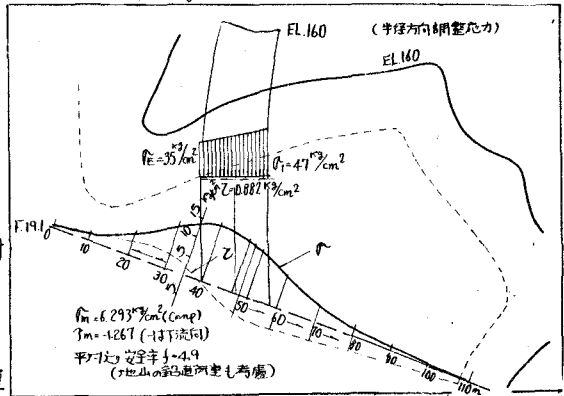


図-9 断層線上の垂直応力ならびに剪断応力(計算例)

筆者はプラスターによる2次元平板を作り、その上面に鉛直力を與えて平板内に想定した($\alpha = 20^\circ, 30^\circ$)断層線に沿う応力を求めて見た。(断層がアバットに近い場合は、実際面においては断層が取除かれることが多いので考えない) 図-11 ~ 図-29 は B を載荷幅に対して種々変化せしめた場合の想定断層線上の垂直応力 (σ_v), 断層線に沿った応力 (σ_H) ならびに剪断応力 (τ) をプロットしたものである。断層面における応力と外力との釣合いを考えると、上記の想定面に実際に断層を介在せしめても、断層面に作用する総

体の力としては変化のある筈はない。ただ断層介在によって応力の分布が変わることが予想される。この点を確かめるため、筆者らは更に $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ の線に厚さ 1mm ~ 1.2mm のゴム板を断層に相当する弱面として挟んで実験し、ゴム板に極めて近い上側の線上で垂直応力 σ_v ならびに剪断応力 τ の分布について調べて見た σ_v については上記の想定線上の応力とはほぼ同様な傾向を示したが、 σ_H については断層介在によ

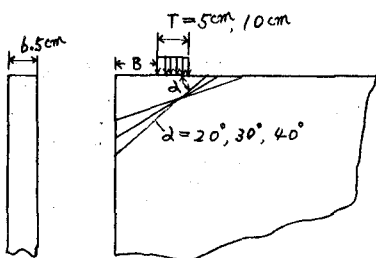
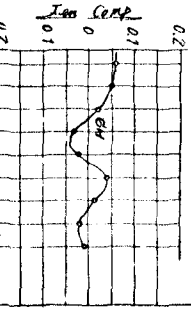
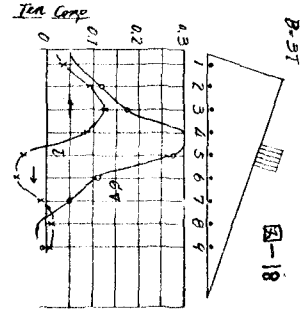
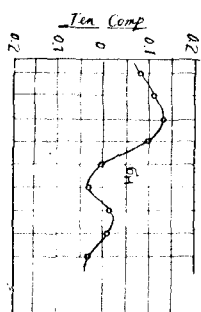
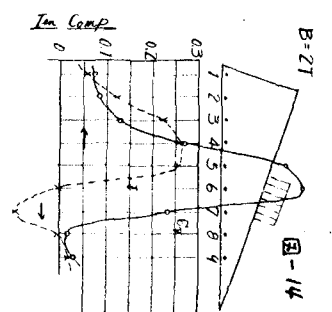
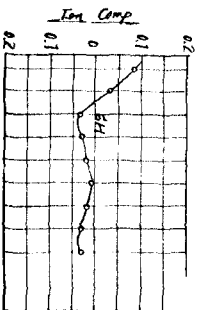
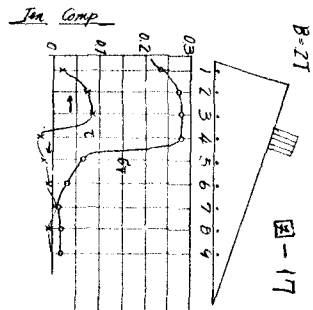
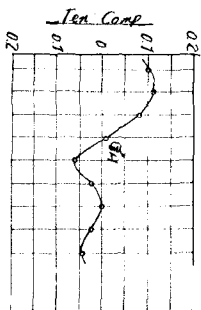
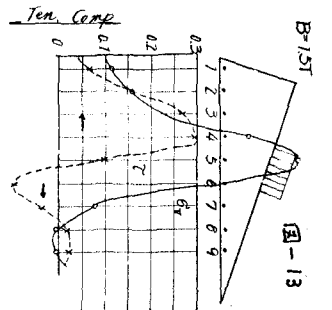
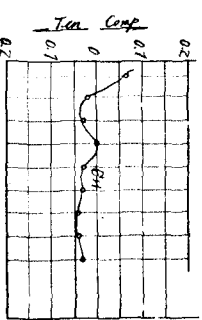
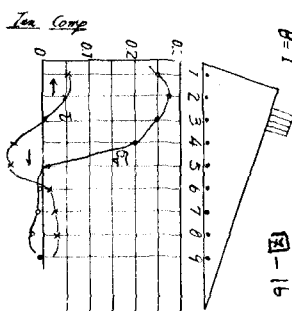
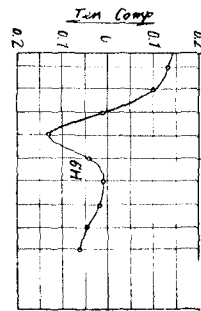
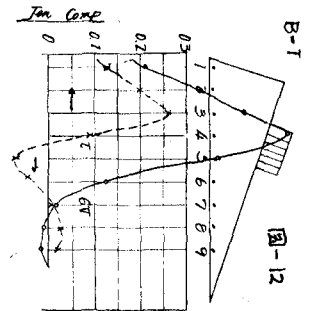
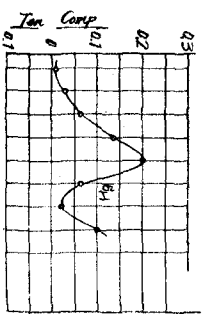
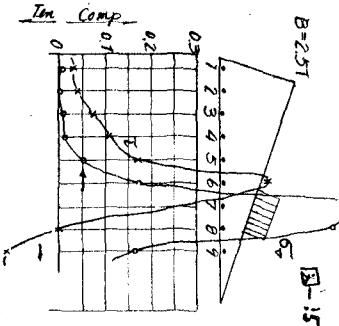
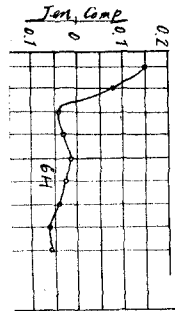
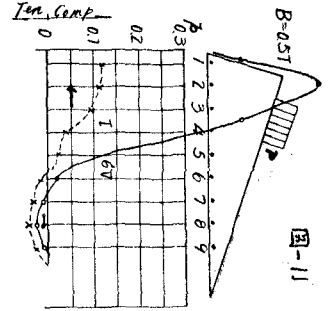
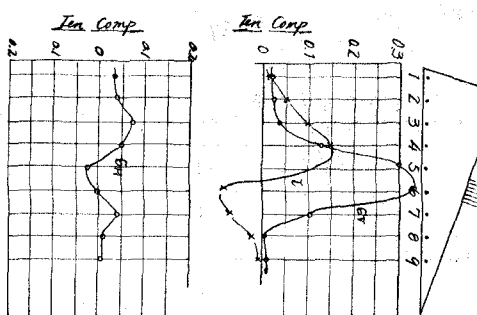


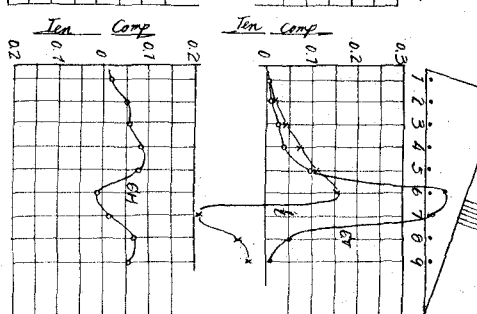
図-10



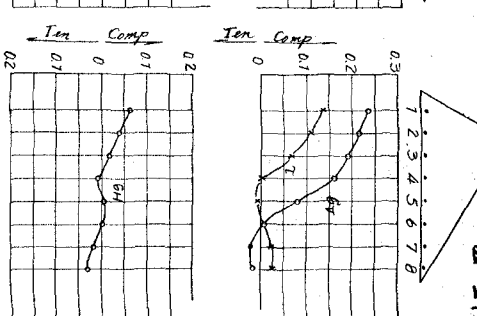
B-47 图-19



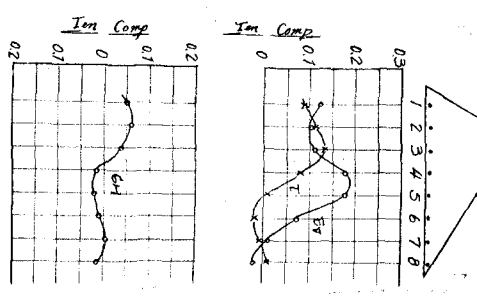
B-51 图-20



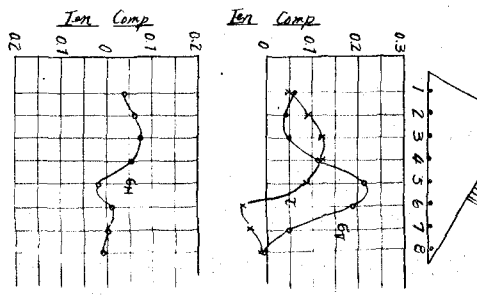
B-1 图-21



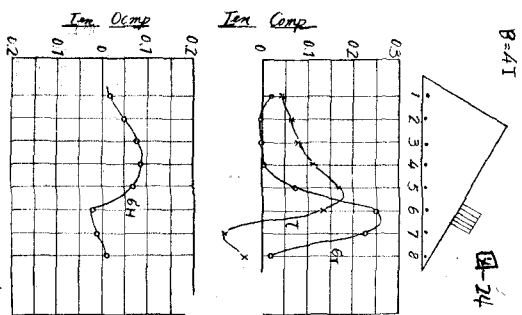
B-21 图-22



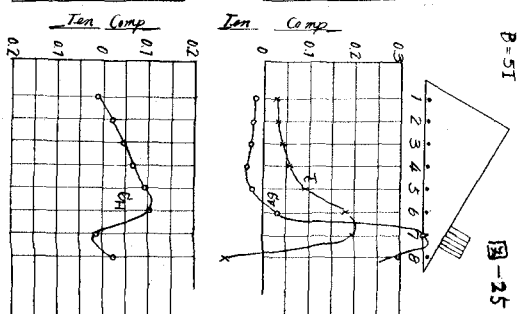
B-31 图-23



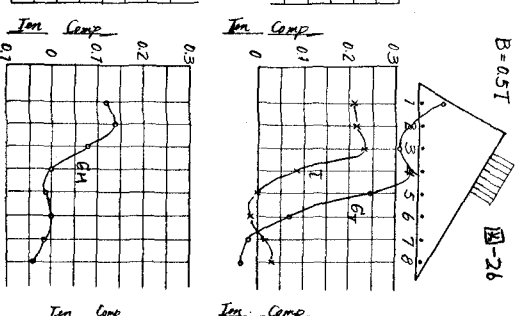
B-41 图-24



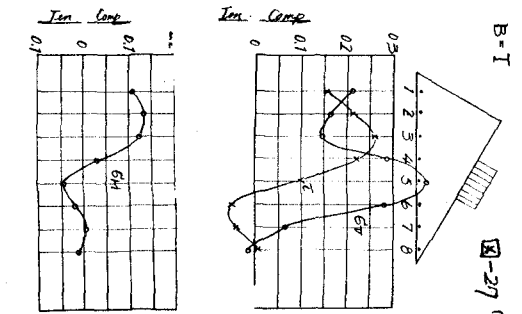
B-51 图-25



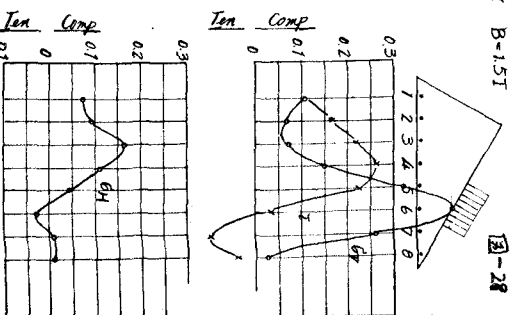
B-051 图-26



B-1 图-27



B-151 图-28



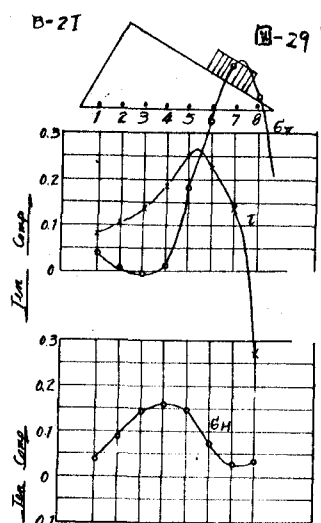


図-29

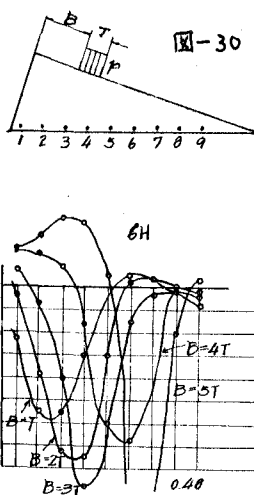


図-30

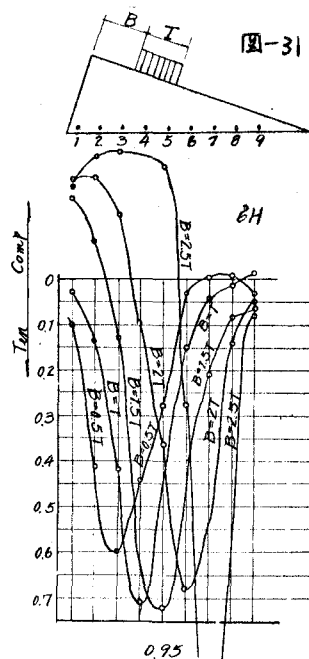


図-31

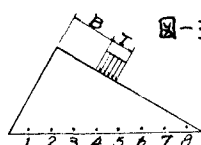


図-32

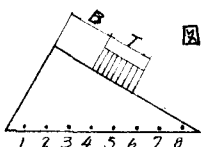


図-33

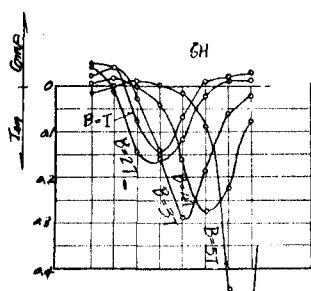


図-34

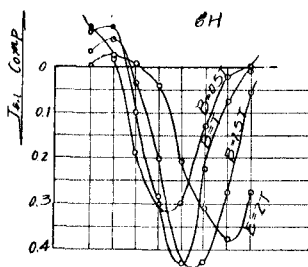


図-35

る場合はかなりの引張応力を示しこの点が注目される。 σ_H の様子は図-30～図-33に示してある。 σ_H はガムの接着の影響を受け、接着しない場合は大きい値を示すことが認められる。ところでこれらの結果から推力による断層線に沿う応力について次のような特徴があることがいえる。

1. Bが小さい間は、 σ_H の値がTの値を上回る傾向を有し、局部的な剪断破壊を考へれば載荷点が端にくることは必ずしも危険な状態とはならない。
2. Bが大きくなると $>\sigma_H$ の領域がアーチアバット中心線の延長と断層線の交点付近から下流側に存在する。
3. σ_H は、断層がなければ小さい引張応力または圧縮応力であるが、断層介在により大きい値を示し、その最大値の点は載荷点直下にある。またその大きさは接着することにより減る傾向にある。
4. 剪断応力は符号反対の2方向の応力により全体として下流向きの剪断力を生ずる。

8.4 断層処理上の問題点について

ダム築造にあたってダム地点の地形、地質は天賦のものであり、ましてや断層の存在などは変えるべくもない。総合的な判断からダム地点が決定された場合、多かれ少なかれ、またその規模の大小こそあれ断層は存在するものと考えてよい。この場合断層をいかに処理するかは、ダム工事費にかなりの影響を及

ばりものであるからダムからの諸力との関連において安定度の検討を行ってその重要度の度合を理解し、それ相当の処理を施すべきであらう。断層について考慮すべき諸点は次の諸点であると思われる。

1. 断層の平面的な角度(アーチの関連において)ならびにその *dip*.
2. 断層の剪断抵抗および圧縮性
3. 滑り安定性ならびに局部的な剪断破壊に対する安全度の検討
4. 断層の透水性

断層の平面的な角度ならびにその *dip* から、アーチからの諸力による断層面におよぼす応力状態を推定できる。したがって断層の剪断抵抗度が解ってあれば、前節に述べたような観点から断層面に沿う滑り安全性、局部的な剪断安全度を検討できる。地山の重量を考慮にいれることは、断層面の *dip* いかんによつては2倍の滑り安全性の増大ともなる。また地山の水平面の剪断抵抗も考慮に入れ得るとすれば問題はもっと安全側にでてくる筈である。ところで弱面の存在しない場合を考えると、アーチアバットの *Shoulder* (前節のB)を小さくすることは、最大剪断応力の大きい領域を地山の端部におくことになり、その点B=3Tにもとれば、その領域を地山に内蔵する形となりかなり安定した形となる。しかしながら地山の剪断抵抗がかなり小さい場合でも数 10 kg/cm^2 程度もあり、(岩石剪断強度では砂岩について九電で実験した $\tau=206 \sim 151 + 1.19\sigma \text{ kg/cm}^2$ $\phi=49^\circ \sim 58^\circ$ なる例がある。) これがグラウトで *Consolidate* されるので、これを断層などの弱面での剪断抵抗が極めて小さい(本文の例では $\tau=0.25+0.7\sigma (\text{kg/cm}^2)$) に比較すると、相当の滑り安全度があるから、BをT程度にとつてもかなりの安全率がとれる。§3の考察から推力のみについて考えると、断層弱面に沿う応力からはBを小さくとつても必ずしも剪断破壊に対する安全度は悪くない。(ダムのアバットは推力外にモーメント剪断力が種々の割合で作用するものであるから、これらを合成してはじめて真の安全度が検討され得る。ダム上部のアーチアバットなどで剪断力およびモーメントの影響の比較的小さいところでは、上述のことがいえる。) 断層の透水性は、その

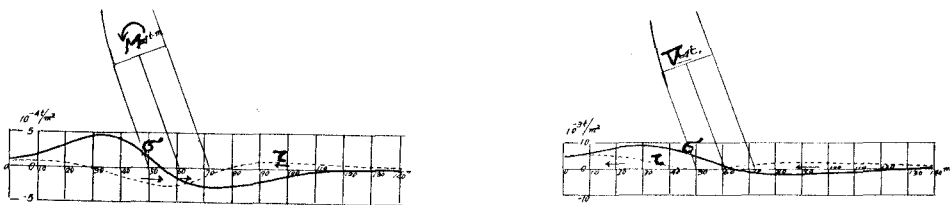


図-34 モーメントおよび剪断力による応力の計算例

剪断抵抗度を小さくするものであるから、断層の不透水性をはかることは極めて重要なことである。この観点からは、アーチアバットをあまり端におけばアーチアバットのすぐ上流まで水の飽和を許す可能性があり、また剪断力の集中ともなるのでアーチアバット下流の断層長を短くすることは不利となる。またグラウトによって断層周辺をグラウトして固めることは(出来ればコンクリート置換え) §3の卵を小さくすることでもあり地山の1体化からも望ましい。アーチアバットを断層との関連においてどの付近におき得るかは難しい問題であり、透断を許さないが断層の処理の程度、遮水グラウトの規模などの点から決定されるべきである。またかなり地山に迫る場合でも、§3.2の剪断応力の大きい領域については、充分な考慮を拂うべきであらう。