

土木研究所資料

第 456 号

ダウエリングの設計法

—矢作ダムTL断層について—

昭和 44 年 3 月

建設省土木研究所

ダウエリングの設計法

— 矢作ダムTL断層について —

ダム構造研究室 柴田 功
河野 大作

1. まえがき

アーチダムの基礎岩盤に滑り易い断層などがある場合に、その内部の数ヶ所をコンクリートで置き換えることによって補強するダウエリングが行なわれる。

このダウエリングの位置、数量をどのようにして設計すれば最も効率がよく、かつ経済的であるかは、これまであまり検討されていない。ちょうど図-1に示すように矢作ダム左岸に存在する川に平行で、ほぼ鉛直なTL断層とこれに約45°の川側に滑り易い角度で交わるHL断層を包絡する面に沿うせん断摩擦安全率が小さく、その補強工法を検討する必要性が生じ、土木研究所ダム構造研究室では矢作ダム工事事務所から依頼を受けたので、これに基づいてダウエリングの一般的な設計法を研究した。

ここではその概要を述べる。

なお、このTL断層はその後の現地調査の結果、当初予想したものより規模がきわめて小さく、所要のせん断摩擦安全率を有することが判明したので、実際にはダウエリングの計画は中止されることになった。

また、岩盤

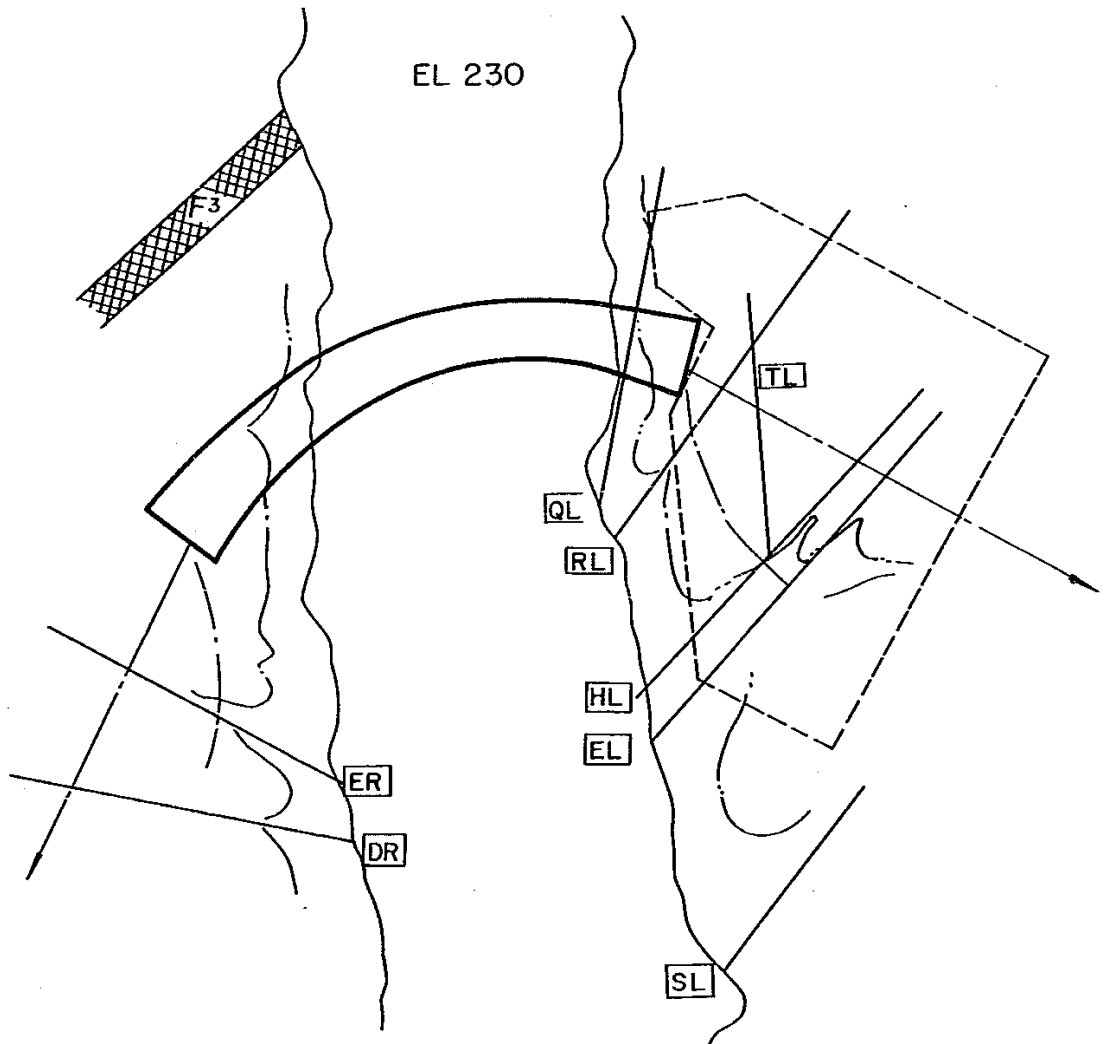


図-1 矢作ダム水平地質断面

内応力の算出には二次元石膏模型による実験、有限要素法による二次元応力計算を行なった。

2. 応力分布

アーチダムの基礎を形成する両岩の岩盤の強さは、三次元的に評価されなければならないことはいうまでもないが、現在の力学では未知の分野であって、その研究が続けられている。そこで便宜的に二次元断面をとり出して応力を求め、強度と対比してその安全度を知る方法がとられるのが普通で、この研究でも水平断面について解析した。しかし、表面形状が複雑で、かつ内部に変形成の異なる材料をもつものの応力を求めることはかなり複雑である。この研究では当初石膏による二次元模型実験を試みたが、グウェリングしない模型では小さな力ですぐ滑り破壊を起した。グウェリングした模型でも大きな荷重をかけることができず、測定できるひずみは 20μ 以下のものが多かった。静的な模型実験では電気抵抗線ひずみ計をはって行なうのが最も小さなひずみを測定できるが、どのように改善しても各ひずみ計個有の誤差として $15\sim 20\mu$ 程度の誤差を生ずるので、得られた結果の信頼度はかなり低いものとなった。しかし、この実験の示している結論は、いま問題にしているように滑り易いと予想した断層沿いの安全度が非常に小さいという点を指摘しているという点で重要な意味をもっているのである。

さて、ちょうどこの実験を始めた頃から我国でも有限要素法による応力計算の研究開発が進み、精度も十分満足すべき段階に達した。即ち、必要に応じて十分にこまかく要素を形成させ、かつ応力が直線分布に近い所ではできるだけ長方形を用いることによって、図-2に示すようにように実用上十分な精度を得ることができる¹⁾。また、扁平な三角形についての精度は図-3に示すように、周囲を扁平な三角形の最大の辺長に相当する要素に分割したときの精度にほぼ相当することが判明した。また、土木研究所ダム構造研究室が開発したプログラムによると上記の精度のほか、きわめて低廉な費用で計算できるようになった。

そこで、この研究に使用する応力分布も有限要素によって算出することにした。しかし、精度が十分満足すべき段階に達したとはいえ、計算部周辺の条件など未だ不明な点も多く、現在別途研究中であるが、この研究では周辺部を固定するという条件で算出した。この問題は岩盤の自重が入らないので影響が少なく、したがって上述の条件で応力を算出しても、上流側の引張応力がやや拡大されるだけで、それほど大きな誤差はないものと判断される。

1) 弾性問題における数値解法：土木技術資料 1～3月号，1969；

飯田 隆 一
小林 茂 敏

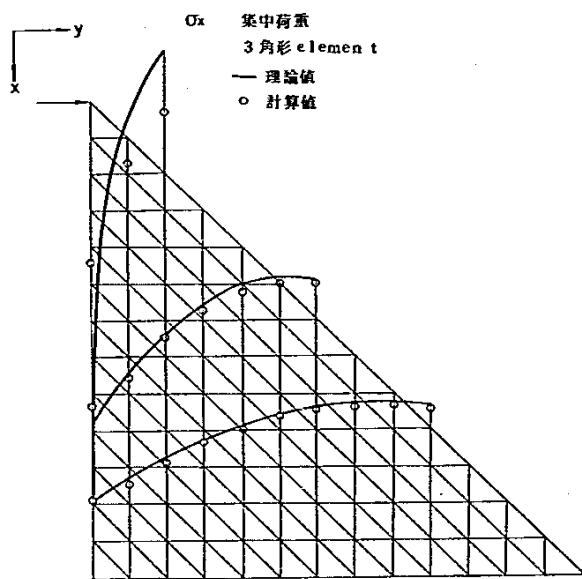


図-2.1 F.E.Mの精度

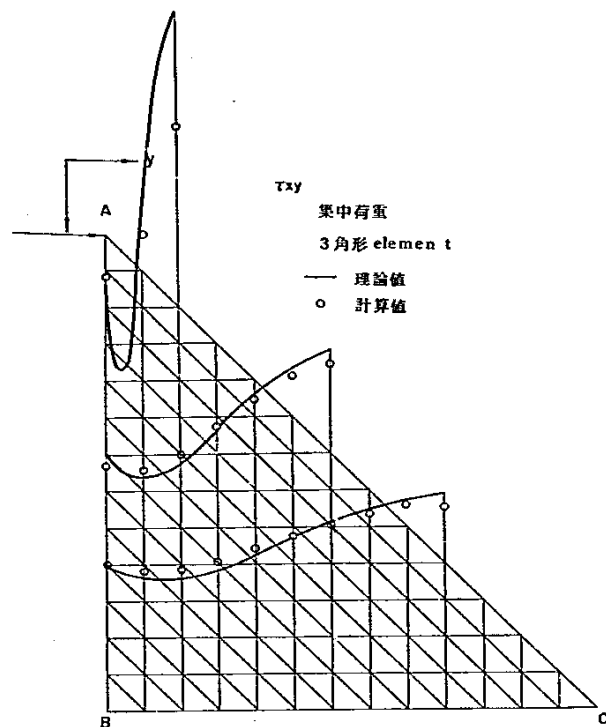


図-2.2 F.E.Mの精度

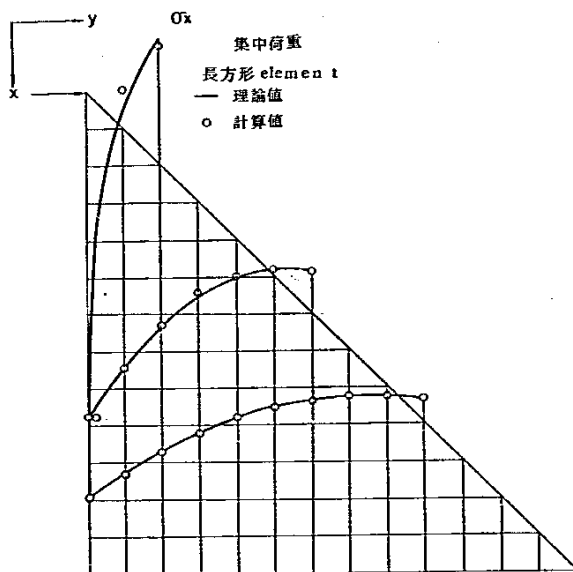


図-2.3 F.E.Mの精度

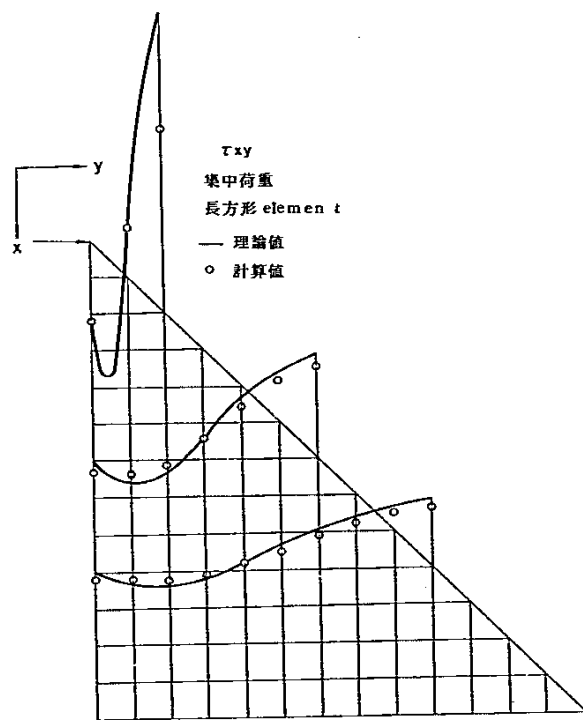


図-2.4 F.E.Mの精度

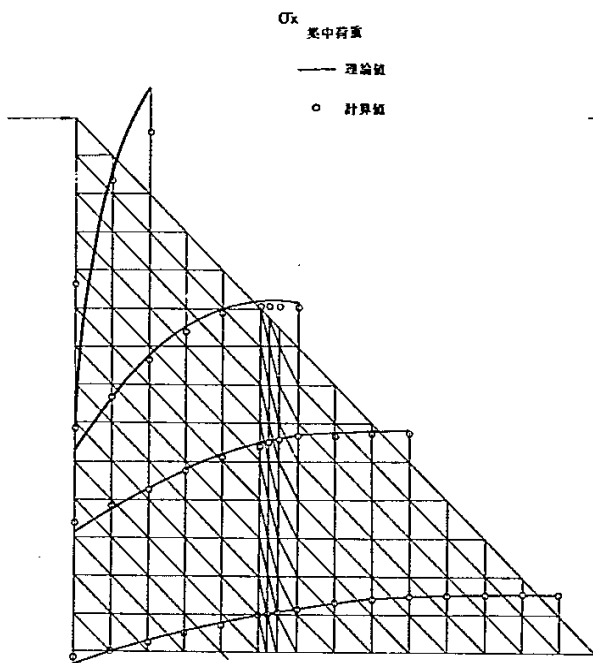


図-3.1 F.E.M計算の精度

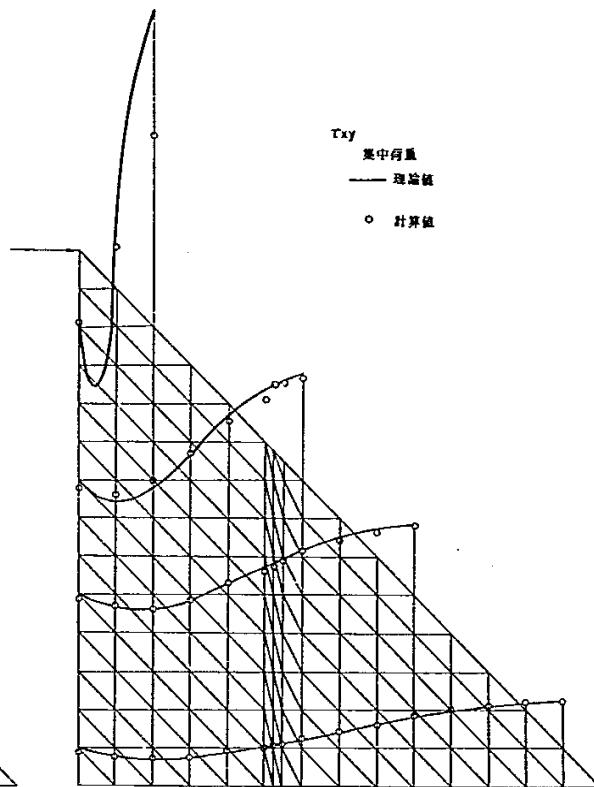


図-3.2 F.E.M計算の精度

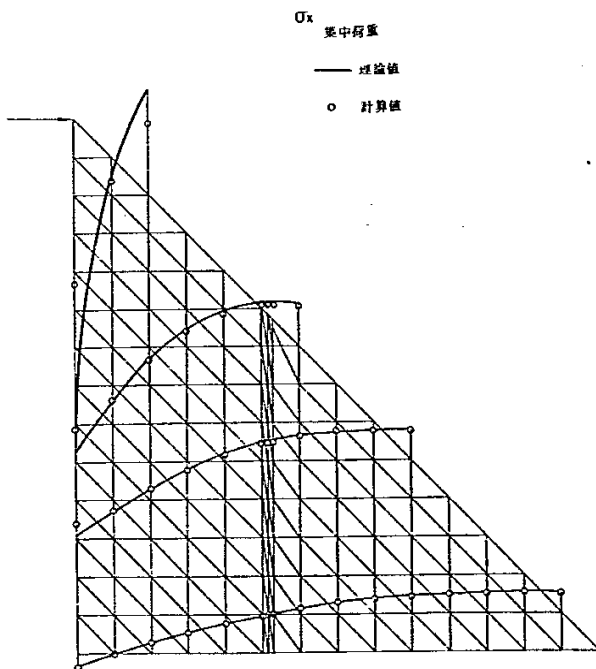


図-3.3 F.E.M計算の精度

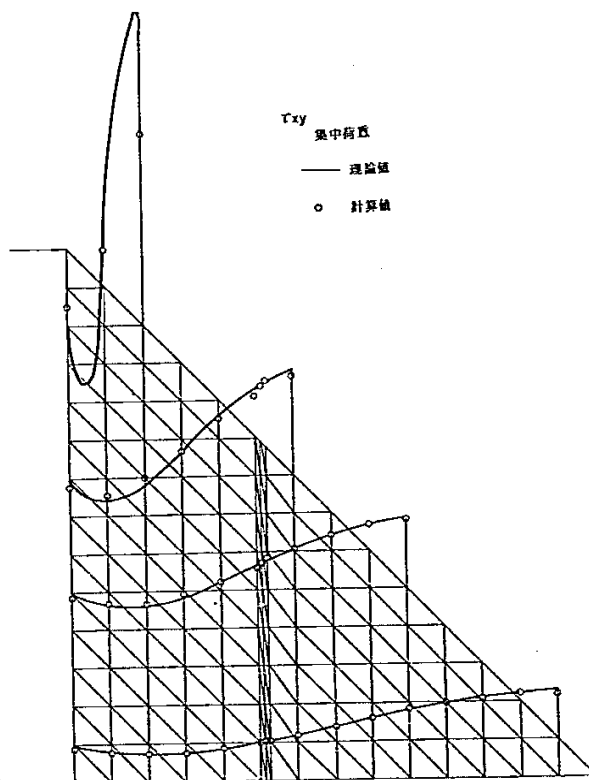


図-3.4 F.E.M計算の精度

計算に際し、TL断層の厚さは1mであるが、少ない要素数で計算精度をあげるため2倍に拡大し、その影響を断層部の弾性係数を2倍にすることによって補なうことにした。これは土木研究所ダム構造研究室が別途行なっている重力ダムにおける断層プラグ設計法の研究によって、断層部の変形量が同じであれば、断層より下流側に伝達される岩盤内の応力はさほど変化しないことが明らかにされていることに基づくものである。

計算に用いた弾性係数はコンクリート $2,000,000 \text{ t/m}^2$ 、堅岩 $500,000 \text{ t/m}^2$ 、断層 $100,000 \text{ t/m}^2$ である。さて、応力計算に際して、ダウエリングしない場合の形状はそのままが良いが、ダウエリングする場合にどのような寸法で、どのように配置するかが問題となる。しかし、これらについての研究の先例がないので、図-4に示すように中心間隔12m毎に長さ3mのダウエリングの配置を考え、下流側からそれぞれ D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 と呼ぶことにした。また、 D_2 と D_3 の間9mを置き換える M_1 、 D_4 より下流側6mを置き換える M_2 も計算することにした。今後はそれぞれの記号で呼ぶことにする。

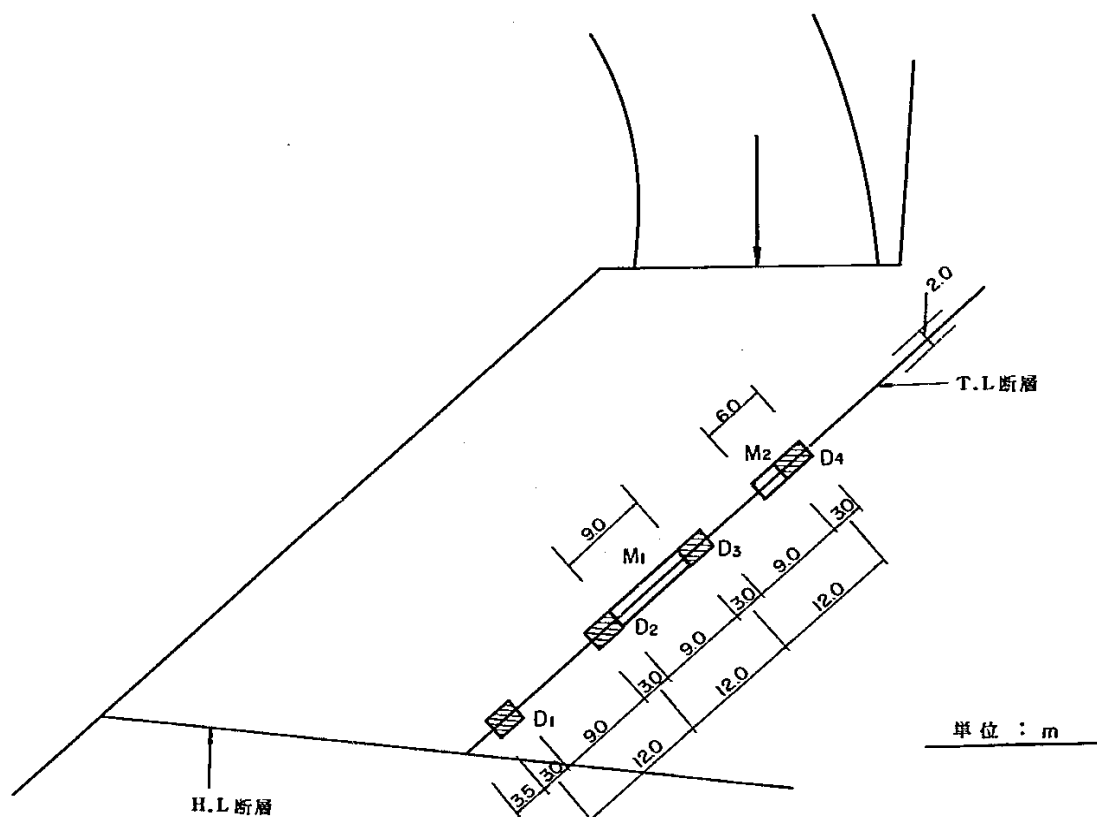
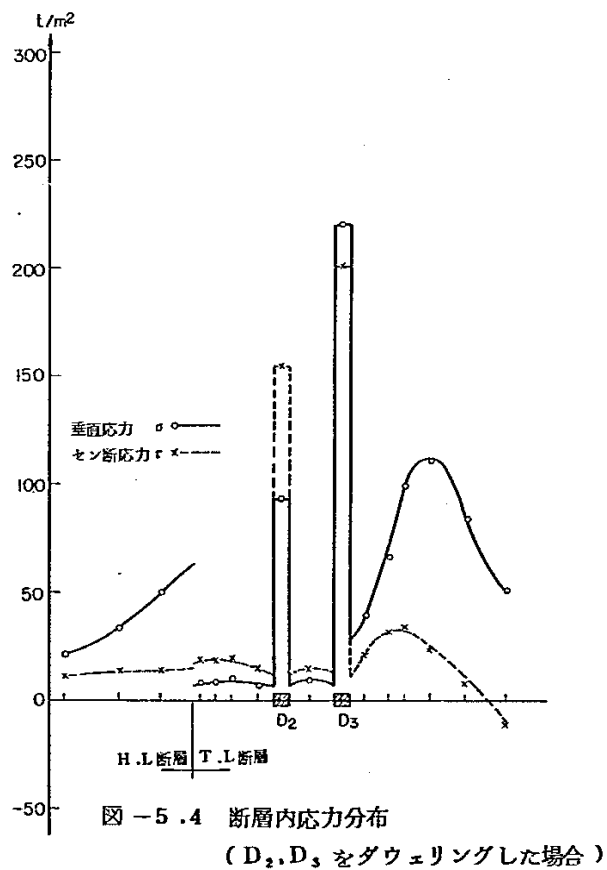
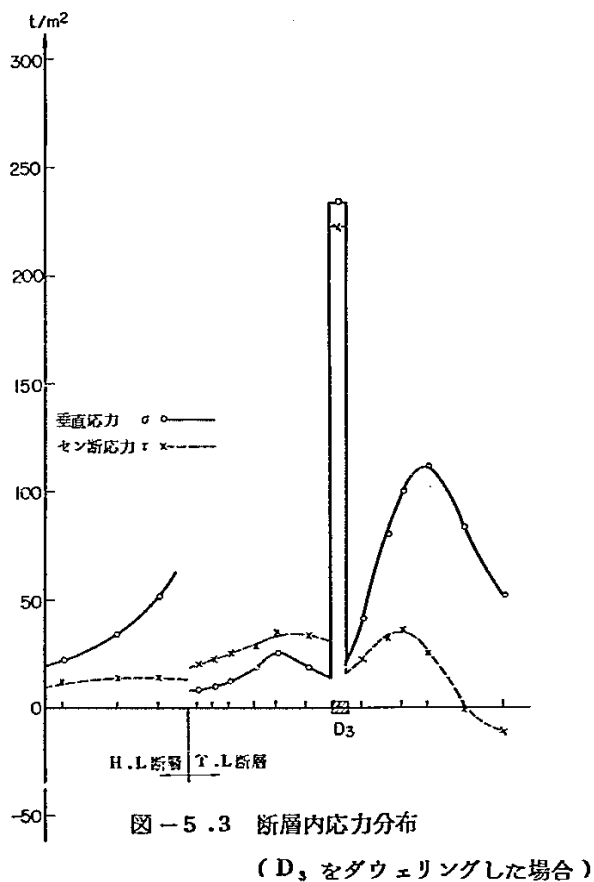
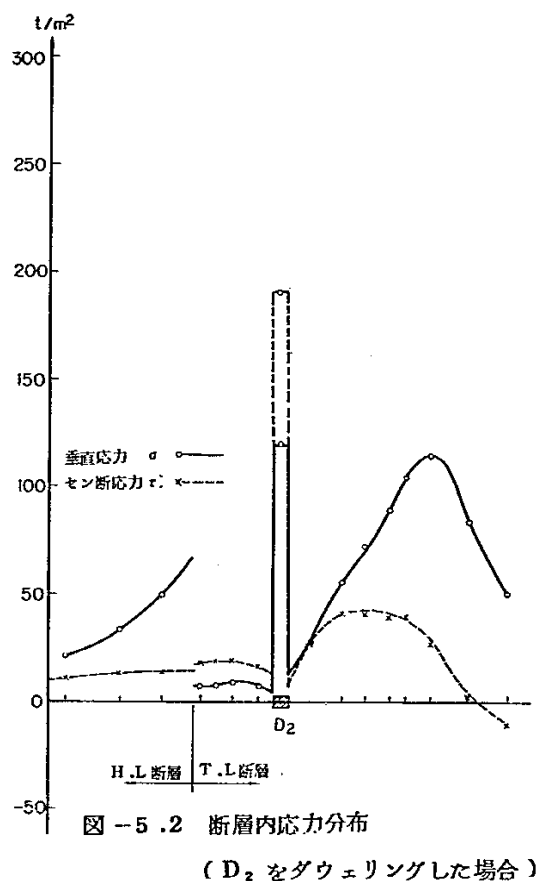
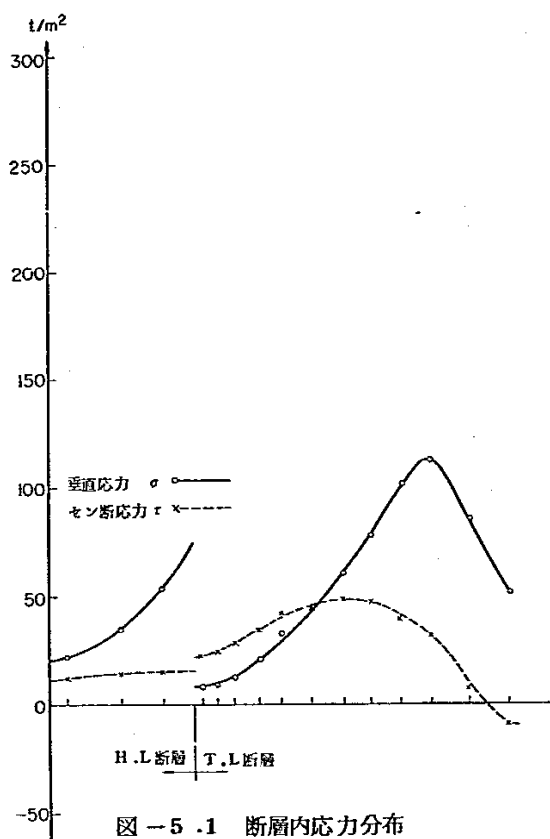


図-4 ダウエリングの配置



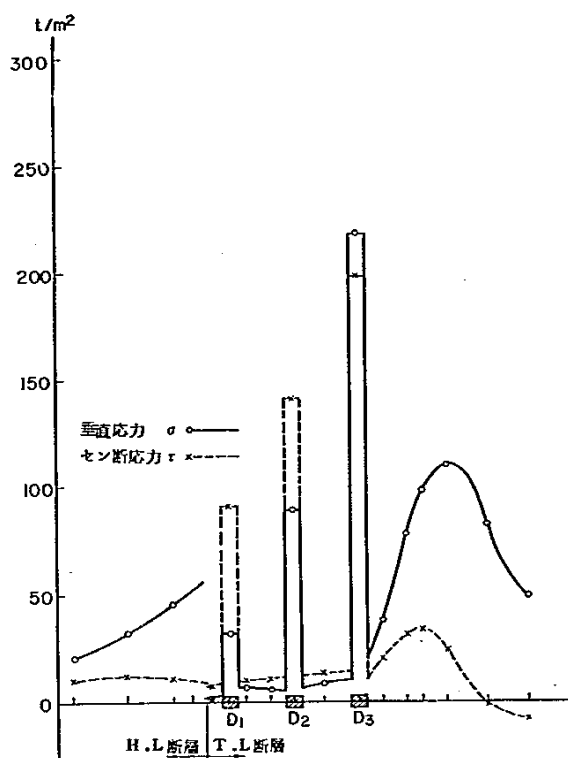


図-5.5 断層内応力分布
(D_1 , D_2 , D_3 をダウエリングした場合)

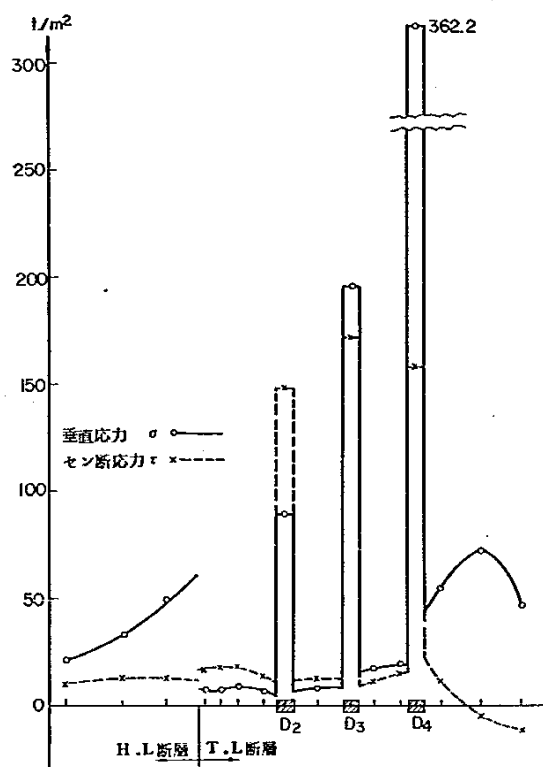


図-5.6 断層内応力分布
(D_2 , D_3 , D_4 をダウエリングした場合)

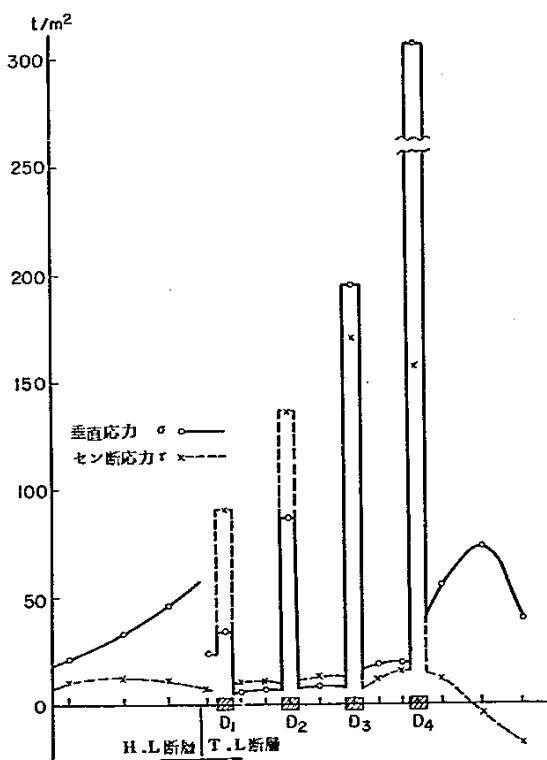


図-5.7 断層内応力分布
(D_1 , D_2 , D_3 , D_4 をダウエリングした場合)

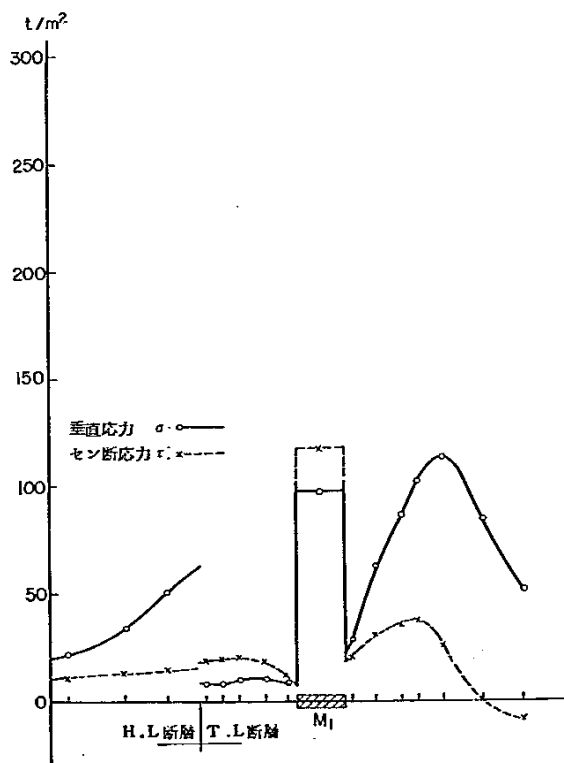


図-5.8 断層内応力分布
(M_1 をダウエリングした場合)

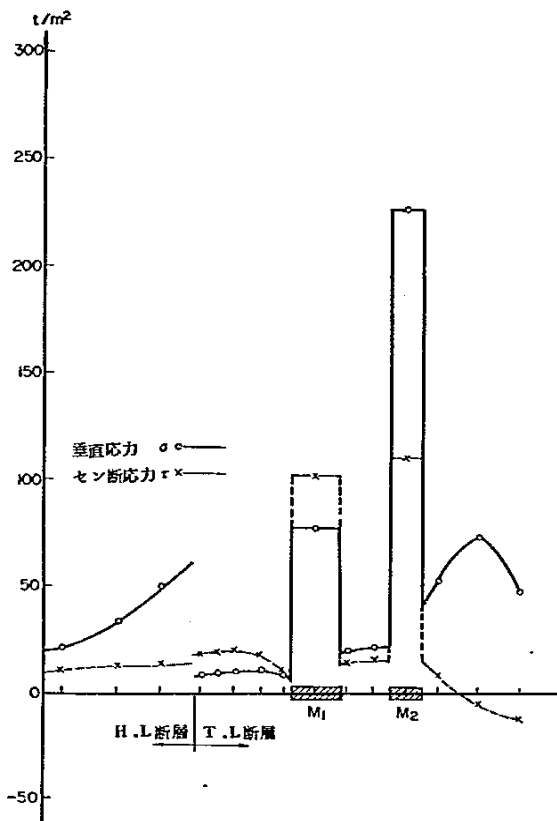


図-5.9 断層内応力分布

(M_1 , M_2 をダウエリングした場合)

算出された応力は、ダウエリングしない場合を図-5.1, D_2 をダウエリングした場合を図-5.2, D_3 をダウエリングした場合を図-5.3, D_2 および D_3 をダウエリングした場合を図-5.4, D_1 , D_2 および D_3 をダウエリングした場合を図-5.5, D_2 , D_3 および D_4 をダウエリングした場合を図-5.6, D_1 , D_2 , D_3 および D_4 をダウエリングした場合を図-5.7, M_1 をダウエリングした場合を図-5.8, M_1 および M_2 をダウエリングした場合を図-5.9に示す。

D_1 , D_2 , D_3 , D_4 の種々の組み合わせについてみると個数が少ない程, またダウエリングしない場合の断層に垂直な応力 σ の大きい部分に近いほど, ダウエルに応力が集中している。また, 長さの異なる D と M をみると 1 個のダウエルの断層沿いの

長さが短い程応力の集中度は高くなっているようである。

3. 安全率

ダムの基礎岩盤の強さの余裕度を示すには普通 Coulomb の内部摩擦説に基づいて, 断面内のせん断力と垂直力で表示する Henny の Shear friction factor が用いられている。これは次の式で表わされる。

$$n = \frac{\tau_0 \ell + fV}{H}$$

式中, n ; セン断摩擦安全率, f ; 岩盤の摩擦係数, τ_0 ; 岩盤のせん断強さ,

H ; 作用するせん断力, V ; 断面に垂直な力, ℓ ; セン断力に抵抗する長さ

現行のダム設計基準では, このようにして求められる安全率 n の値は 4.0 程度とすることが規定されている。したがって, ここで問題にしているアーチダム基盤における断層沿いの滑りでは, すべり面沿いに 4.0 程度のせん断摩擦安全率をとることを設計の条件としなければならない。

現行の設計基準に従う限り, 設計の条件としては上述のものでよいわけであるが, これだけでよいとするには疑問がある。即ち, 前述のせん断摩擦安全率の考え方では, 材料全体が降伏するまで荷重を支えるとした極限設計法と同様な取り扱いをしているのであり, 硬い材料の組み合わせから成

る岩盤のセン断の現象の一つとして予想される逐次破壊が起るとすれば、このような検討だけでは不十分なことになる。事実、基礎岩盤のブロックセン断試験を行なうと大ていの場合に、最大荷重の50～70%程度の荷重でブロックが浮き上がることがよく知られており、鋼材などの降伏とは異なった現象を示す。したがって、このようなことや水工作物としてのダムには大きな荷重力が作用し、さらにその破壊が起れば莫大な被害を及ぼすことなどから、基礎の滑り面の任意の点での強さが、作用する応力に対し破壊しないようにする必要がある。

そこで、点安全率はどのように定義すればよいか問題となるが、Mohrの破壊説に従えば、セン断摩擦安全率と類似の定義をすることができ、次式で表わすことができる。

$$n' = \frac{\tau_0 + f\sigma}{\tau}$$

式中、 n' ；点安全率、 τ_0 ；岩盤のセン断強さ、 f ；岩盤の摩擦係数、

σ ；断面に垂直な応力、 τ ；セン断応力

次に、この安全率 n' をどの程度にとるかが問題となるが、その前に、コンクリートの長期強度は急速試験強度の半分以下になるという事実を思い出す必要がある。これはフロー（クリープ）が100%以上にあることを示すもので、特に弱層を問題としている岩盤では、これ以上のフローを予想すべきであろう。さらに応力や強度の評価の不正確さや、施工時の爆破や空洞によって周辺の岩盤がゆるむことも考慮に入れる必要があり、ここでは一応、点安全率 n' の使用値は2.5と考えることにした。

これから、上述のように滑り面全体としてのセン断摩擦安全率 n を4.0以上、点安全率 n' を2.5以上にすることがダウエリング設計上の基本的な条件である。

さて、前節でのべた各種の組み合わせのダウエリングの応力に対し、点安全率 n' の分布を図示すると図-6.1～6.9のようになる。計算に採用した強度は、断層部分ではセン断強さ $\tau_f = 50\text{t/m}^2$ 、摩擦係数 $f_f = 0.5$ 、コンクリートまたはダウエル接触部岩盤のうちの弱い方の部分ではセン断強さ $\tau_d = 250\text{t/m}^2$ 、摩擦係数 $f_d = 1.0$ である。これらを表示すれば表-1のとおりである。すべり面全体のセン断摩擦安全率 n は図-5.1～5.9の応力図の面積を積分して算出した。

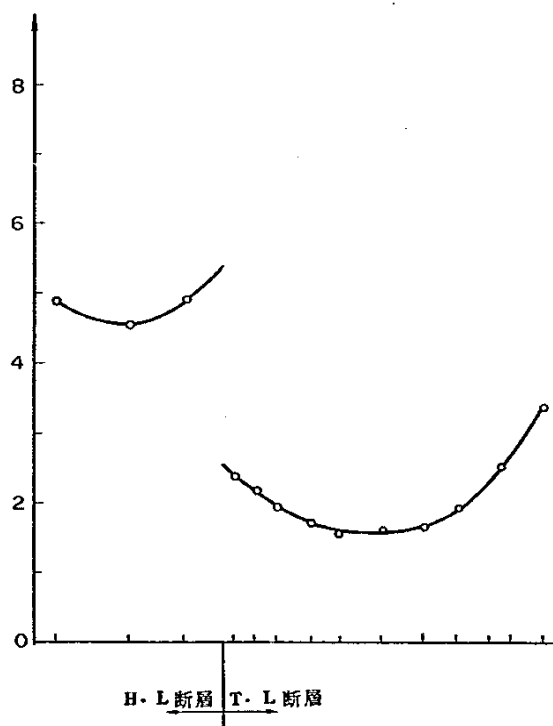


図-6.1 T・L断層のセン断摩擦安全率
(ダウエリングしない場合)

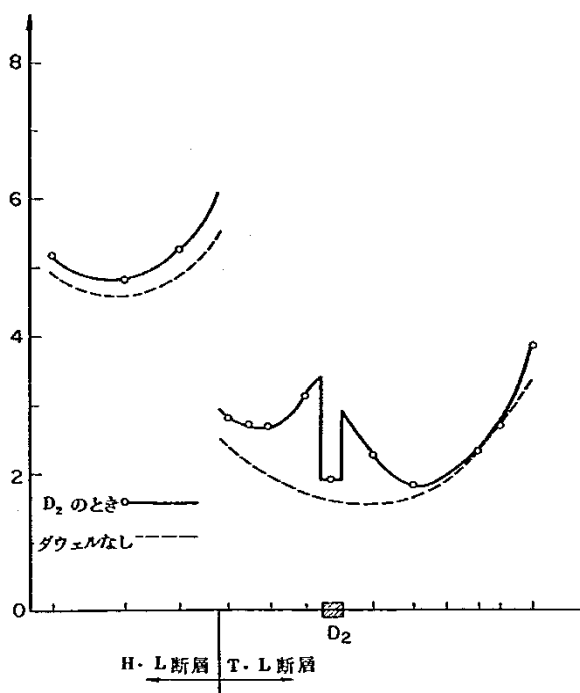


図-6.2 T.L.断層のセン断摩擦安全率 (D_2 をダウエリングした場合)

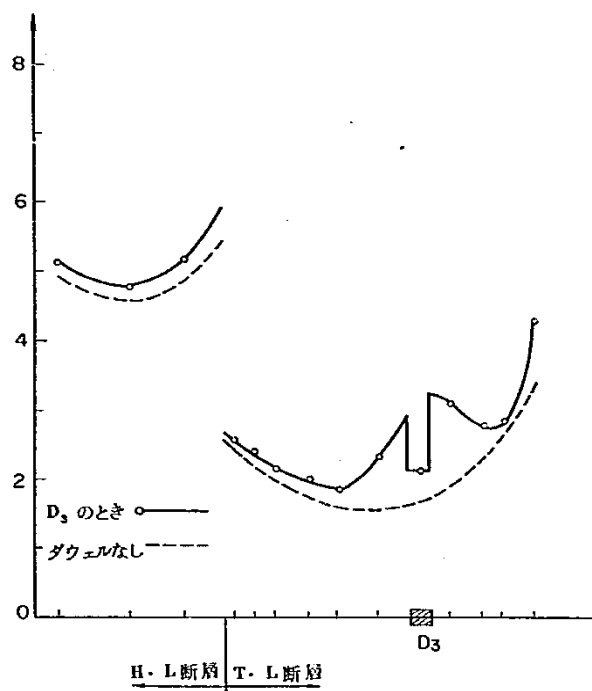


図-6.3 T.L.断層のセン断摩擦安全率 (D_3 をダウエリングした場合)

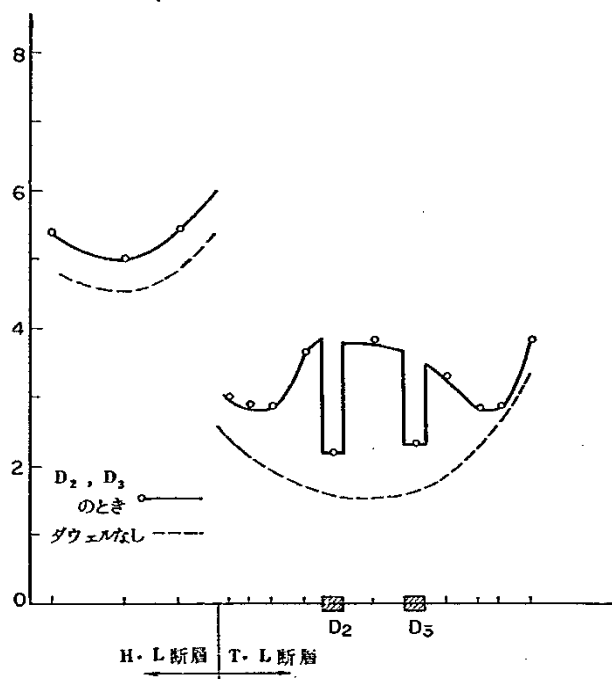


図-6.4 T.L.断層のセン断摩擦安全率 (D_2, D_5 をダウエリングした場合)

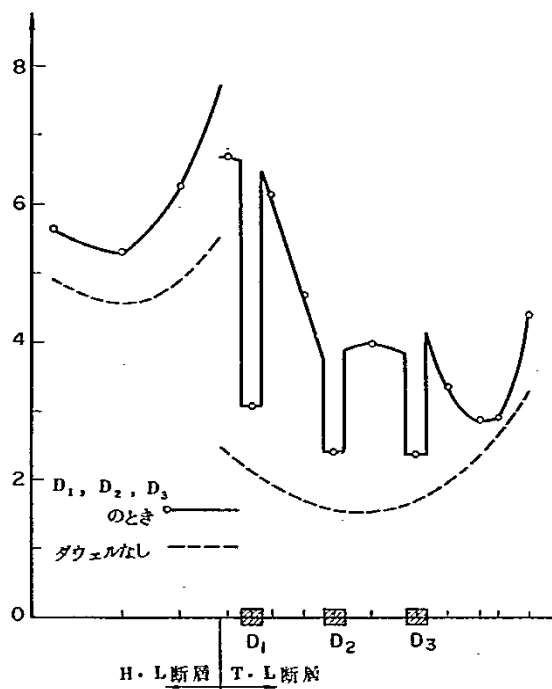


図-6.5 T.L.断層のセン断摩擦安全率 (D_1, D_2, D_3 をダウエリングした場合)

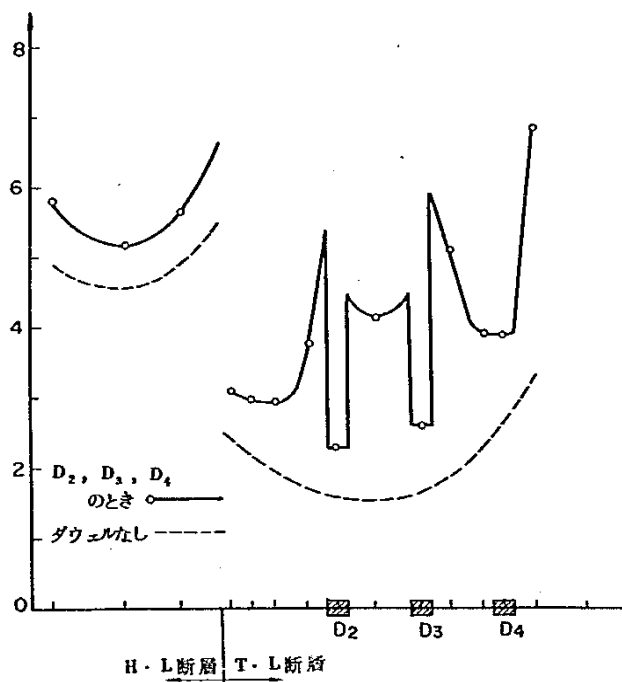


図-6.6 T.L断層のセン断摩擦安全率
(D₂, D₃, D₄ をダウエリングした場合)

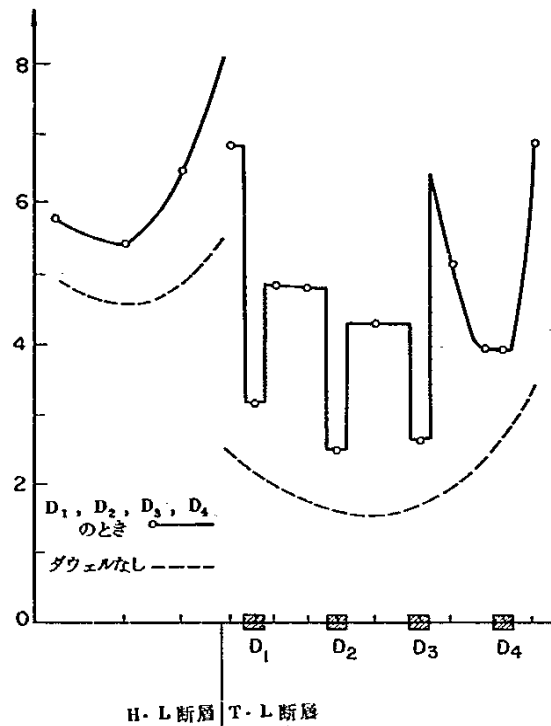


図-6.7 T.L断層のセン断摩擦安全率
(D₁, D₂, D₃, D₄ をダウエリングした場合)

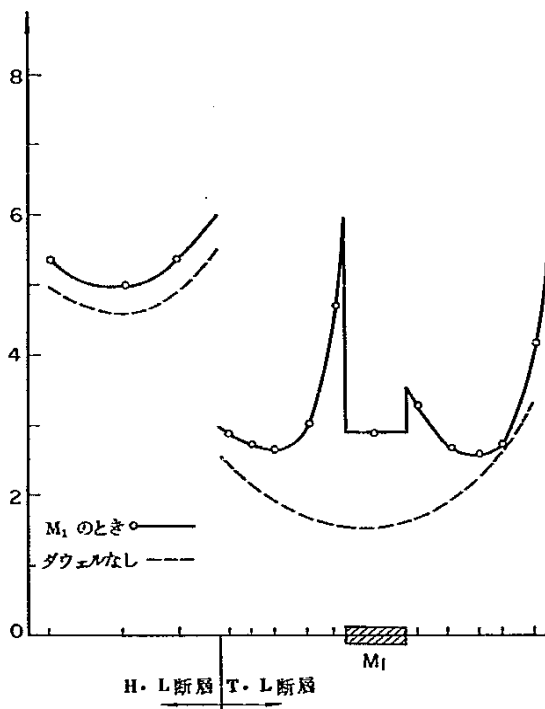


図-6.8 T.L断層のセン断摩擦安全率
(M₁ をダウエリングした場合)

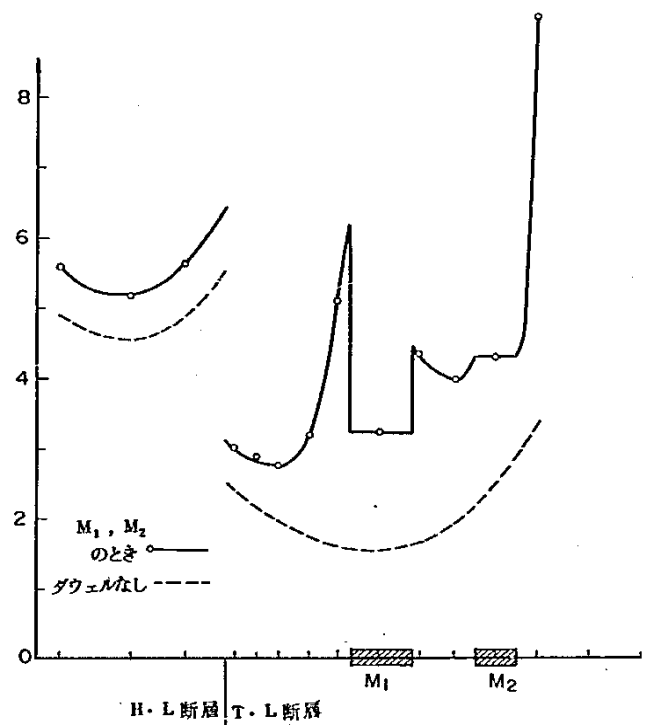


図-6.9 T.L断層のセン断摩擦安全率 (M₁, M₂ をダウエリングした場合)

表 - 1

ダウエルの配置	ダウエルの長さ (m)	堅岩部を含めたダウエルにかかる垂直力 (t)	堅岩部を含めたダウエルにかかる垂直力の割合(%)	滑り面の全体安全率	最小な点安全率
入らない場合	0	67	1.5	2.76	1.57
D ₂	3	433	9.8	3.01	1.85
D ₃	3	780	17.7	3.08	1.90
D ₂ +D ₃	6	1,022	23.2	3.33	2.22
D ₁ +D ₂ +D ₃	9	1,108	25.2	3.51	2.35
D ₂ +D ₃ +D ₄	9	2,026	46.0	3.73	2.29
D ₁ +D ₂ +D ₃ +D ₄	12	2,113	48.0	3.81	2.47
M ₁	9	880	20.0	3.47	2.60
M ₁ +M ₂	15	2,135	48.5	4.05	2.76

これらによると、最小の点安全率 n' は D で示したダウエリングでは、その総延長に応じてほぼ一定の値をとるが、同じ延長でも応力集中度の低い M で示したダウエリングの n' はずっと大きい。滑り面全体としてのせん断摩擦安全率 n はダウエリングの配置によって異なり、ダウエリングしない場合の垂直応力 σ の大きい部分にダウエリングが配置されると n の値が大きくなる。後者をよく観察すれば σ の大きい部分にダウエリングを配置した応力分布をもとにするときは次の関係が成立していることがわかる。即ち、滑り面全体のせん断摩擦安全率 n はダウエリングの延長を x とすれば、前に定義した記号を用いると

$$n = \frac{\tau_F \cdot (\ell - x) + \tau_D \cdot x + f_F \cdot \int_{\ell-x} \sigma d\ell + f_D \cdot \int_x \sigma dx}{\int_{\ell} \tau d\ell}$$

であり、同一の荷重条件では滑り面全体に働く垂直力およびせん断力は一定であることを考慮して前述した強度の諸値を代入すると

$$x \doteq 20 - \frac{1}{400} \int_x \sigma dx$$

が得られる。矢作ダム TL 断層についての σ の大きい部分にダウエリングした場合の $\int_x \sigma dx$ の値は約 2,000 t であり、ダウエリングの所要の長さは 15 m 以上となり、応力計算とよく合致する。

4. ダウエリングの設計法

前節までに述べてきた応力および安全率の分布の研究により、アーチダム基礎岩盤の断層の滑りに対する補強としてのダウエリングの設計法は次のように要約することができる。

- ① 滑り面に沿う応力を計算し、これから点安全率 n' の分布および滑り面全体のセン断摩擦安全率 n を求める。
- ② 点安全率 n' を 2.5 以上になることを条件としたダウエリングの設計を行なう。その場合にはセン断応力が最大の部分に配置するのが効果的である。なお、小さい寸法のダウエリングは応力の集中が大きくなり、さらに施工が繁雑となるので好ましくない。また、点安全率の計算に際しては断層両側の堅岩の強さを考慮し、コンクリートより弱い場合はその強度を採用しなければならない。
- ③ 滑り面全体のセン断摩擦安全率 n が 4.0 に達しない場合は（アーチダムの基礎の滑り易い方向をもつ断層では大部分があてはまる。）上述の②の条件を満足させた後、さらにダウエリングを追加する。その場合には垂直応力が最大の部分に配置するのが効果的である。そのように配置したときは、ダウエリングの所要長さ x は

$$x = C_1 - C_2 \int_x \sigma dx$$

によって目安が与えられる。