

1 ま え が き

ダム基礎岩盤の弾性的性質について、設計上必要な数値はおもにヤング率であるため、単に弾性係数という場合はヤング率をさす習慣になつてゐる。従つてこの場合もその習慣に従つて弾性係数とはヤング率のことをさし、それがジャツキによる加圧によつて測定せられたものは静弾性係数 E_S とし、衝撃による弾性波の伝播速度から求められたものは動弾性係数 E_D とする。

ダム基礎岩盤の弾性係数は、それがとくにアーチダムの場合は設計上不可欠な基本数値であるために、必ず測定が行なわれている。ところがその測定には前述のように原理的に全く異なる二方法があり、それぞれについて測定が行なわれているのであるが、方法は異れど同じヤング率である筈の実測値がかなり相異しているのも、その根拠あるいは解釈について増田(1960)・南雲(1961)らによつて種々議論が行なわれてきた。両者の関係についての理論的説明は地球物理学者にまかせ、ここでは両方法によつてこれ迄実測せられたデータがかなりその数を増してきたので、それらは真に無関係でばらばらなのか、あるいは何らかの関係または傾向がみつけれられないものか、という考えの下に実測値を統計学的に処理してみることにした。使用したデータは全部で107コであるが、このうち49コは増田(1960)の発表したものであり、他は全部当社で測定したものである。なお、 E_D は E_S を測定したその地点での測定値であることはいうまでもない。

2 静弾性係数値 E_S

岩盤に掘削せられた横坑内を清掃して岩盤を出し、その上にブラストンまたはセメントペーストを打設して加圧板をおき、さらにその上にオイルジャツキや円筒を重ねて他の岩盤面を支圧面とする。そのように重ねたジャツキにオイルポンプで油を送り加圧板に圧力をかけていく、その加圧に伴う加圧板の変位をダイヤルゲージで読み次式で E_S を計算する。

$$E_S = \frac{P(1-\nu^2)}{2aw} \dots\dots\dots (1)$$

P : 加圧板に加えられた圧力 Kg 、 ν : ボアソン比、 a : 加圧板の半径 cm 、 W : P に対する沈下量 cm

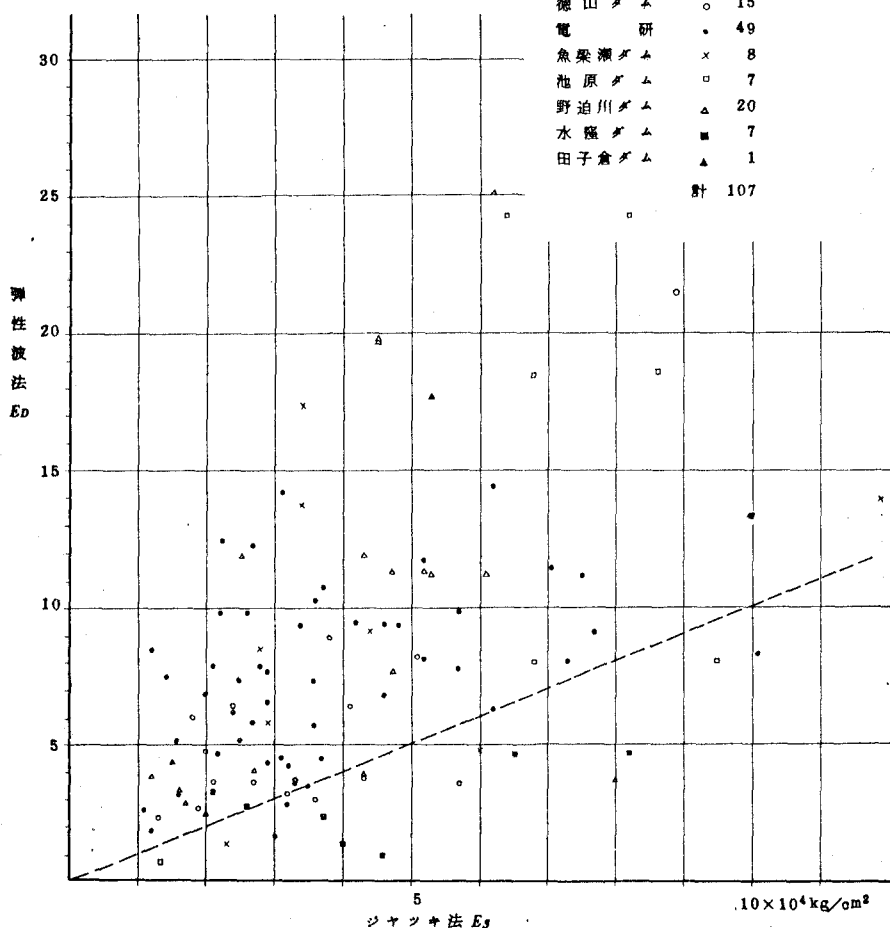
この場合ボアソン比は実測困難のため0.25と仮定する。このようにして測定せられる E_S も、同一場所であつても試験方法や計算方法のわずかの相異によつて求める E_S の値がかなり変動する。すなわち、試験方法としては岩盤面のフエーシングに使用する材料、加圧板の半径、加圧の速度、加圧減圧の繰返しの工程などが考えられる。計算方法としては加圧減圧の工程中どの工程のカーブを使用するかということ、またある工程のカーブを決めてもそのカーブのどの部分をとつて P とするかあるいは w とするかということ、さらにボアソン比は0.25と仮定するが実際の岩石についての値は $0.08 < \nu < 0.34$ である(特別の0.91のものが1コある)ことが飯田(1941)の実験によつて判明している。

このように種々の要素によつて変動のある値であるに拘らず、ともかくそのようにして求められた値が実際アーチダムの設計に用いられているのが実状であるので、ここにとりあげた実測値はそのような試験または計算方法についての吟味は行なわず、そのような変動要素や問題を内蔵した値である。

3 動 弾 性 係 数 E_D

横坑内のある一点に感震器をおき、他の一点を震動源（ダイナマイトを爆発させる）とすれば、その二点間を伝播する弾性波の所要時間は

$$\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$



第 1 図 ジャッキ法と弾性波法
との弾性係数の比較

電磁オシロスコープあるいは走時計数式装置によつて観測せられる。二点間の距離より速度を求め次式によつて E_D が計算せられる。

$$E_D = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \dots\dots\dots (2)$$

V : 縦波伝播速度、 ρ : 密度、 ν : ポアソン比

この場合の単位は $C G S$ 単位であるからこのまゝの形では使用に不便なので、ポアソン比を 0.25 密度を 2.6 と仮定して E_D を Kg/cm^2 、 V を Km/sec の単位で (2) 式を書きかえると

$$E_D = 2.21 \times 10^4 \times V^2 \dots \dots \dots (3)$$

となり、使用に極めて便利な形となる。この式を用いる場合ポアソン比を0.25、密度を2.6と仮定することに問題がある。しかしある長さをもった2点間の岩盤のそれらの物理常数は厳密には測定不可能なことであり、たとえある試料について測定を行なつたとしても、結局は仮定をおき推定を加えなければその数値は使用できないものである。従つて密度が2.6よりもかなり相異すると思われる場合を除いては上の(3)式を用いることが許されるのではあるまいか。増田(1961)は弾性波伝播速度より E_D を求める場合最大15%程度の誤差を伴うことを論じている。増田のデータはポアソン比や密度をどのように扱つたかは明らかでないが、当社のデータは走時計数装置によつて速度を求め、上の(3)式によつて E_D を計算したものである。

4 実測値の統計学的処理

こゝにとりあげた $E_S \cdot E_D$ の実測値は上記の通り試験を行なつた人、試験の方法または計算方法、あるいは地質などがそれぞれ異つた多くのデータを集めたものである。従つて多くの変動要素や問題を内蔵した実測値である。これらの実測値を $E_S - E_D$ 図にプロットしたのが第1図である。これらのうち池原ダムと水窪ダムのデータはなお検討を要するので以下の計算には採用しない。従つて標本の大きさは $n = 93$ となる。

(a) 両対数方眼にプロット

第1図に示したそれぞれの値について E_S を x とし、 E_D/E_S^3 を y として両対数方眼にプロットしたのが第2図である。この図をみるとプロットしたそれぞれの

点はほぼ直線関係になつてゐる。従つてこれらの点を代表する回帰直線を求めることにする。以下計算の便のため y について $E_D/E_S^3 \times 10^4$ の対数を取り、 x については $E_S \times 10^{-4}$ の対数をとることにする。なお、

$$SSD_x = \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/n = 4.608$$

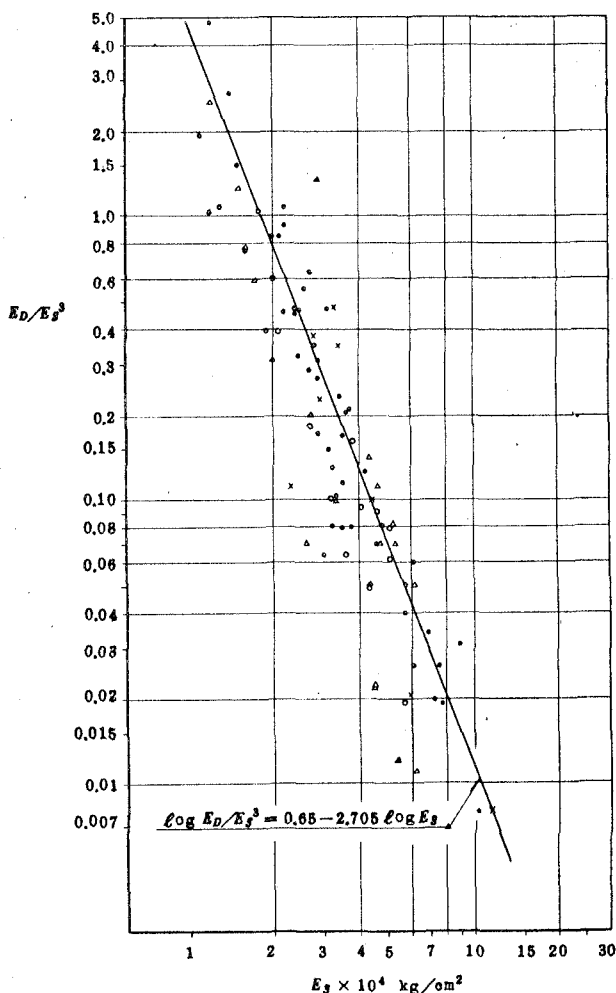
$$SSD_y = \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2/n = 32.329$$

$$SPD_{xy} = \Sigma xy - \Sigma x \Sigma y/n = -11.016$$

である。

(b) 確率楕円による不良データの棄却

楕円の原点は



第2図 $E_D/E_S^3 - E_S$ 関係

$$\Sigma x/n = 0.487 \quad \Sigma y/n = 3.24$$

楕円の x 軸の勾配は

$$\tan 2\alpha = \frac{2 \cdot SPD_{xy}}{SSD_x \cdot SSD_y} = 0.795 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{故に } \alpha = 19^\circ 15'$$

軸の半分の長さは $x/\sqrt{a}$ 、 $y/\sqrt{b}$ であり、 a 、 b の値は

$$a, b = \frac{n}{2} \cdot$$

$$\frac{SSD_x + SSD_y + \sqrt{(SSD_x - SSD_y)^2 + 4 \cdot SPD_{xy}^2}}{SSD_x \cdot SSD_y - SPD_{xy}^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。自由度 $f = 2$ 、危険率 5% における χ^2 分布表より $\chi^2 = 5.991$ であるので、 $x/\sqrt{a} = 1.527$ 、 $y/\sqrt{b} = 0.222$ となり、結局楕円の方程式は $\Sigma x/n$ 、 $\Sigma y/n$ を原点とし、 $\alpha = 19^\circ 15'$ の勾配をもつ次式で表わされる。

$$2.57x^2 + 121.8y^2 = 5.991 \quad \dots\dots\dots (6)$$

この楕円は第 3 図の如くなる。これにもう一度全データをプロットしてみると 93 コのうち 4 コが楕円の外に出るので、これらを不良データとして棄却する。従つて以下標本の大きさは $n = 89$ 、 $SSD_x = 3.523$ 、 $SSD_y = 27.642$ 、 $SPD_{xy} = -9.529$ である。

(c) 相関係数

$$r = \frac{SPD_{xy}}{\sqrt{SSD_x} \sqrt{SSD_y}} = -0.966 \quad \dots\dots\dots (7)$$

Fisher の Z 変換により、 $Z =$

2.02、母相関係数を ρ とすると

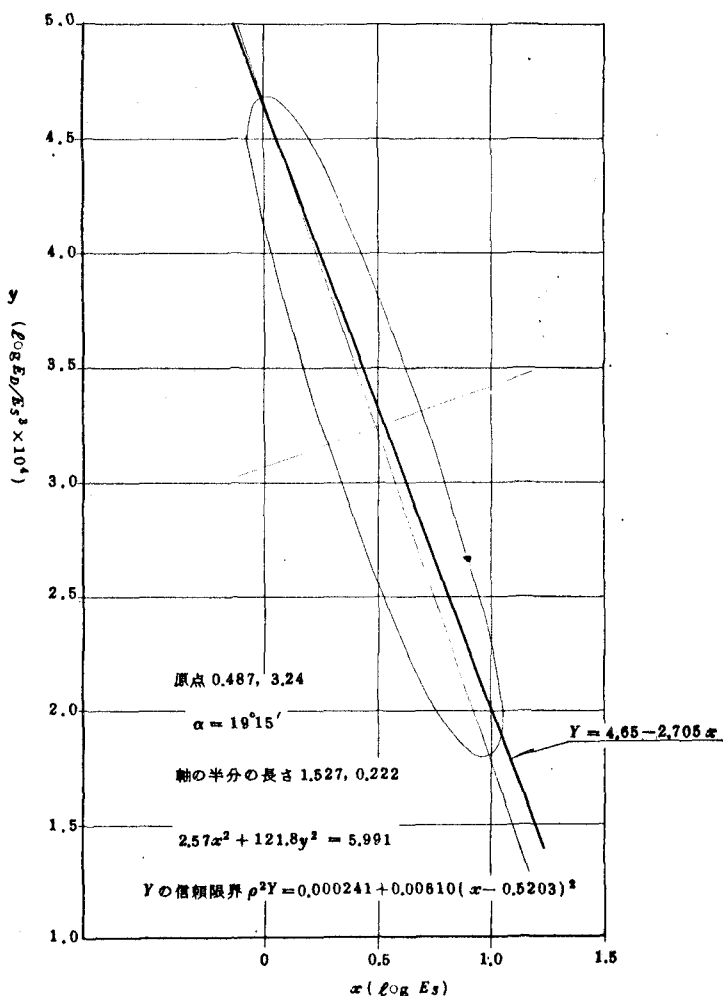
$$t = \frac{Z - Z_\rho}{\frac{1}{\sqrt{n-3}}} = (Z - Z_\rho)\sqrt{n-3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

であるので $\rho = 0$ とすると $t = 18.8$ 、危険係数 5% の場合の t の値は 2.00 であるので高度に有意となり $\rho = 0$ という帰無仮設はすてゝよい。

(d) 回帰方程式の決定

標本回帰方程式を $Y = a + bX$ とすれば、回帰線は次のようになる。

$$Y = \Sigma y/n + \frac{SPD_{xy}}{SSD_x} (x - \Sigma x/n) \quad \dots\dots\dots (9)$$



第 3 図 確率楕円

$$= 4.65 - 2.705x \dots\dots\dots (9)$$

こゝにはじめ計算の便のため $y = E_D/E_S^3 \times 10^4$ としたので

$$y' = 0.65 - 2.705x \dots\dots\dots (10)$$

となる。つぎに y' の信頼限界は $\rho_a^2 = \rho^2/n$, $\rho_b^2 = \rho^2/SSD_x$, さらに

$$\rho^2 = \frac{SSD_y - SPD_x^2 y' / SSD_x}{f} \dots\dots\dots (11)$$

であるので次のごとくなる。

$$\rho^2 y' = 0.000241 + 0.00610 (x - 0.5203)^2 \dots\dots\dots (12)$$

(10) 式より結局次の (13) 式が導かれる。

$$\log E_D/E_S^3 = 0.65 - 2.705 \log E_S \dots\dots\dots (13)$$

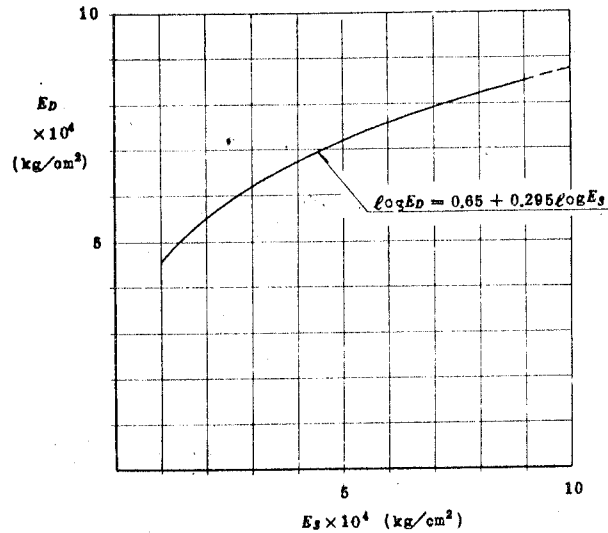
これを展開すると

$$\log E_D = 0.65 - 0.295 \log E_S \dots\dots\dots (14)$$

となり図示すると第 4 図のごとくなる。

5 結果の解釈と今後の問題

$r = -0.966$ という相関係数は E_S を x とし E_D/E_S^3 を y とした場合の相関係数であつて



第 4 図 $E_S - E_D$ 関係

E_S と E_D の相関係数ではない。ところが相関度 0 なるものはどのような操作を加えたとしても第 2 図のようにほぼ直線の関係とはならない筈である。従つてこれら (13)・(14) 式をもつて $E_S - E_D$ の関係式とするには未だ早いのが、大体の傾向を示すものとはいへよう。

さきにも述べたように、こゝに使用した $E_S \cdot E_D$ の実測値はいろいろの変動要素や問題を内蔵したものであるので、今後これらの変動要素や問題が検討せられるならば、より信頼度の高い関係が導かれるものと思われ、両者の関係についてはどうにもならないというものではなさそうである。従つてまず $E_S \cdot E_D$ の測定方法の統一が強く望まれる。

従来 E_D は E_S の 2 倍であるとか 3 倍であるとか、あるいはイタリアーでは弾性波法とジャツキ法と水圧法とは 10:2:1 になつていているとかいうことを S. A. D. E. の Ing. Indri 氏の談話として田中 (1959) が述べているが、さきに示したようにそのようなことはとてもいへそうにない。

増田 (1961) は動弾性係数から設計に用いる弾性係数を導く次の式を提唱した。

$$E_R' = \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{V}}{V_m} \cdot E_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}^2 \cdot \frac{\bar{V}}{V_m} \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \dots\dots\dots (15)$$

E_R' : 設計に用いるヤング率、 $\bar{V}$: 平均速度法によつて求めた速度、 V_m : 超音波により試料について求めた速度、 E_V : 平均速度法によつて求めた速度によるヤング率、 ρ : 密度、 ν : ポアソン比

この (15) 式はジャツキ法によつて求めた E_S が設計に用いられているのが現状であるので、弾性波法による E_D とジャツキ法

による E_S との関係式とも解釈される。今後 $E_S \cdot E_D$ の測定に関する種々の問題が検討せられ精度の高い値が求まるようになれば、統計学的処理によつて導かれる式も (13)・(14) 式とはちがつたものになるであろうが、この増田の提唱した式と実測値から統計学的に導かれる式との間に何らかの関連が見出せることが望まれる。

吉田 (1961) は弾性波速度測定を行なつた地点で透水試験を行ない、平均透水量が増大すれば弾性波速度が低下することを示している。平均透水量は岩盤の間隙率・間隙の状態などの函数であるが、間隙率が最も大きな要素であることを説いている。従つて同一岩石についての弾性波速度の変化は間隙率の大小が一つの大きな要素ではあるまいか。一方増田の提唱した (15) 式のうち $\bar{V}/V_m$ はほぼ間隙率を示すものとも考えられるので、こゝで扱つた E_D の値に $\bar{V}/V_m$ による補正を加えた値をとりあげればどうなるであろうかということが今後の問題であり、 E_D の実測点について V_m をも測定し、その補正值について E_S との関係をもう一度検討してみたいと考えている。

6 お わ り に

いろいろ御教示いただいた当社広田技術顧問、地質課長桐谷博士、中山設計課長代理に厚く御

礼申上げる。また懇切なる助言と御教示をいただいた当社吉田勝英博士と計算進行にあたつて協力していただいた五の井保氏に深謝する次第である。

参 考 文 献

- 増田 秀夫 (1960) : ダム基礎の地球物理学的調査、物理探鉱、第 13 巻 1 号、PP.25 - 35
- 南雲昭三郎 (1961) : 静的動的ヤング率の差についての一考察、物理探鉱、第 14 巻 3 号、PP.138 - 141
- 増田 秀夫 (1961) : わが国におけるコンクリートダム基礎岩盤の弾性波速度に関する応用地球物理学的研究、技術研究所報告 (土木・61006)
- 飯田 汲 事 (1941) : 振動方法による岩石の弾性率測定、地震、第 13 巻 10 号、PP.1 - 16
- 田中 治 雄 (1959) : ダム基礎の地質とその掘削工法、トンネルと掘削工法 (土木学会編)、PP.177 - 198
- 吉田 勝 英 (1961) : ダムの基礎岩盤グラウト施工基準の定め方に関する一提案、土木学会論文集、第 77 号、PP.1 - 27