

電源開発(株) 正員 平塚昭隆
 龍本純也
 正員○上山邦彦

1. まえがき

近年、フィルダムの耐震性の検討の必要性が認識され、次第に動的解析を行なったフィルダムが増加している。そこで、当社も早くから線形および非線形の動的解析プログラムの開発を行ない、こゝと平行して動的解析に必要なフィルダム材料の動的物性試験を実施している。今回、大型振動三軸試験装置($\phi 30 \times H 60\text{cm}$)を用いてロック材の動的物性試験を行ない、Hardin-Drnevich モデルによる動的弾性係数 E_d の最適表示式を求めたものである。なお、フィルターおよび土質しゃ水壁材料については、別の機会に発表する予定である。

2. 試験装置

大型振動三軸試験装置は、ロック材のよう粗粒材の動的試験を行なうために開発されたもので、その概要を図-1に示している。軸荷重は、電気油圧方式で動的荷重を最大30tonまで与えることができ、周波数で最大10Hzまで駆動できるようになっている。また、側圧はペローフラム式体積変化計を介してコンプレッサーによって最大20kNまで載荷できる。計測は、軸荷重、軸変位、側圧および体積変化を電気的に記録するようになっている。

3. 試料および試験方法

試験に用いた試料は、奥清津発電所カッサダムの石英安山岩である。表-1にロック材の物性試験と三軸圧縮試験による強度定数を示している。試料の粒度は、最大粒径 63.5mm で実ダムの盛立材料と相似になるように調整した。供試体は、乾燥状態の材料を JIS の標準実験工ネルギーで $\phi 30 \times 60\text{cm}$ のモールドの中で実験して作成した。

試験は、所定の正圧で等方圧密を行なった後、側圧を一定にして排水状態で動的応力レベルを種々に変化させて実験した。動的載荷方式は、図-2に示すように静的応力レベル a まで上げ、周波数 1.0, 0.5, 3.0, 5.0 Hz でそれぞれ動的応力レベル b まで 2, 1, 1.1 分間載荷した。オーステップが終了したらオーステップまで同様の載荷方式で行なった。このように 1 本の供試体で種々の応力レベル、周波数で載荷を繰り返したが、データの整理は各ステップの 1 Hz の繰り返し載荷のデータのみを利用した。

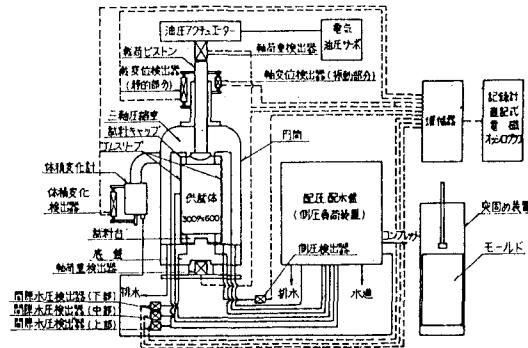


図-1 大型振動三軸試験装置概要図

試 料		ロック
岩 質		石英安山岩
色 調		暗灰色
比 かさ	表乾 +15.9mm	2.59
比 量	絶乾 +15.9mm	2.54
重 見掛け比重	+15.9mm	2.69
	-15.9mm	2.74
吸 水 率 (%)		2.23
安 定 性 (%)		0.30
すりへり減量%	A区分	22.3
	E区分	12.2
粒 度	-63.5mm(%)	100
	-15.9mm(%)	39
	-4.76mm(%)	15
	-0.074mm(%)	3
含 水 比 (%)		2.7
乾 燥 密 度 (t/m^3)		1.92
間 隙 比		0.41
見掛けの粘着力 (kg/cm^2)		1.676
せん断抵抗角		43°06'

表-1 物性試験-観察

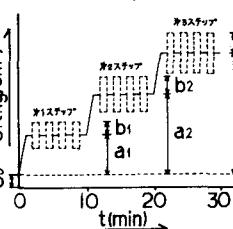


図-2 動的載荷方式

4. 解析方法

解析は、Hardin-Drnevich のモデル式を利用して動的弾性係数についてのみ定式化を行なった。図-3に示すようにヒステリシスループが与えられ、接線弾性係数 μ_t 、割線弾性係数 μ_s が図のように定義されたとき、破壊強度 ϵ_r として規準ひずみ ϵ_r は $\epsilon_r = \frac{\mu_s}{\mu_t}$ なる式で表わされる。Hardin-Drnevichによれば E_d なるひずみに達したとき

$$\frac{\mu_s}{\mu_t} = \frac{1}{1 + E_d/E_r} \quad (1)$$

なる式が成立する。この式を利用して動的弾性係数 E_d を次のように定式化する。

$$\frac{E_d}{E_0} = \frac{1}{1 + \Delta E_1/E_r} \quad (2)$$

ここで (E_d : 動的弾性係数, E_0 : 微小ひずみ時の動的弾性係数,

ΔE_1 : 動的軸ひずみ振幅, ϵ_r : 規準ひずみ)

(2)式を変形して

$$\frac{1}{E_d} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_0 \epsilon_r} \Delta E_1 \quad (3)$$

ここで、 $\frac{1}{E_d} \sim \Delta E_1$ 関係を各平均主応力 σ_m ごとについて求め、最小自乗法を用いて各 σ_m について E_0 および ϵ_r を決定する。一方、微小ひずみ時の動的弾性係数 E_0 は

$$E_0 = K \cdot \sigma_m^n \quad (K, n: \text{定数}) \quad (4)$$

で与えられるので、最小自乗法によって定数 K, n を決定する。次に規準ひずみ ϵ_r を各平均主応力別にプロットすると図-6のようになっているため、各平均主応力に対する平均値として算出した。したがって、定数 K, n, ϵ_r が求まることになる。ここで、(2)式に(4)式を代入して

$$E_d = K \cdot \sigma_m^n \frac{1}{1 + \Delta E_1/\epsilon_r} \quad (5)$$

となり、 E_d を σ_m および ΔE_1 の函数として表わすことができる。さらに静止土圧係数に相当するパラメータ K_0

$$K_0 = \frac{\sigma_3}{\sigma_3 + \alpha} \quad (\alpha: \text{側圧}, \alpha: \text{静的応力レベル}) \quad (6)$$

の影響が認められる場合は、(5)式を K_0 の一式の形で補正することによって

$$E_d = K_0 \sigma_m^n \frac{1}{1 + \Delta E_1/\epsilon_r} (\alpha K_0 + \beta) \quad (\alpha, \beta: \text{定数}) \quad (7)$$

となる。このようにして動的弾性係数 E_d の定式化を行なった。

5. 試験結果

図-4は平均主応力 $\sigma_m = 10.86 \text{ kg/cm}^2$ の場合について $\frac{1}{E_d} \sim \Delta E_1$ 関係を示したもので、図中にその時の E_0, ϵ_r の値を示した。図-5, 6は各平均主応力別に求めた E_0, ϵ_r の値をプロットしたもので、 $E_0 \sim \sigma_m$ の関係から式(4)の定数 K, n は $K = 4078, n = 0.560$ となった。また、 $\epsilon_r \sim \sigma_m$ の関係から平均規準ひずみ ϵ_r は $\epsilon_r = 23.992 \times 10^{-4}$ となつた。したがって、(5)式は

$$E_d = 4078 \cdot \sigma_m^{0.560} \frac{1}{1 + (\Delta E_1 / 23.992 \times 10^{-4})} \quad (5')$$

となる。さらに静止土圧係数に相当するパラメータ K_0 の一式を用いて(5)式を補正すると次のようになる。

$$E_d = 4078 \cdot \sigma_m^{0.560} \frac{1}{1 + (\Delta E_1 / 23.992 \times 10^{-4})} \left\{ 1 - 0.946 (K_0 - 0.295) \right\} \quad (7')$$

図-7は平均主応力 $\sigma_m = 10.86 \text{ kg/cm}^2$ の場合の $E_d \sim \Delta E_1$ の実測値と式(7')による計算値を実線と破線で示したもので、(7')式の計算値と実測値がかなり一致していることが認められる。

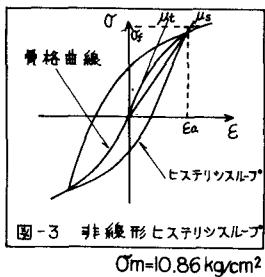


図-3 非線形ヒステリシスループ
 $\sigma_m = 10.86 \text{ kg/cm}^2$

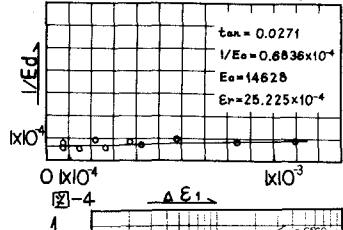


図-4 $\frac{1}{E_d} \sim \Delta E_1$
 $\sigma_m = 10.86 \text{ kg/cm}^2$

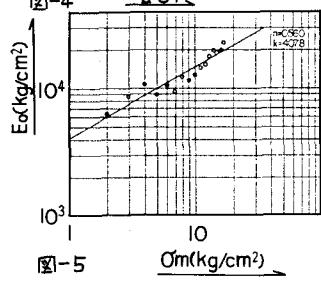


図-5 $E_0 \sim \sigma_m$
 $\sigma_m (\text{kg/cm}^2)$

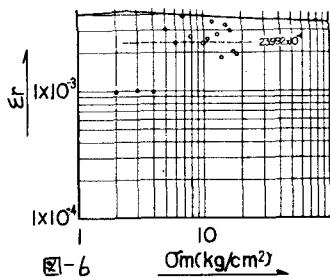


図-6 $\epsilon_r \sim \sigma_m$
 $\sigma_m (\text{kg/cm}^2)$

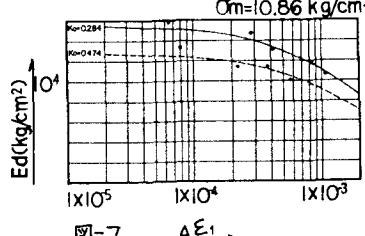


図-7 $E_d \sim \Delta E_1$
 $\sigma_m = 10.86 \text{ kg/cm}^2$

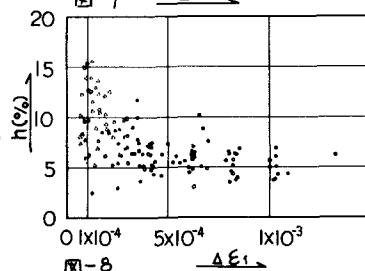


図-8 $E_d \sim \Delta E_1$
 $\sigma_m = 10.86 \text{ kg/cm}^2$