

試験法の違いによる粗粒材料の非線形弾性係数の比較

建設省土木研究所 正会員○豊田光雄 中村昭

1. はじめに

フィルダムの変形解析に用いるパラメータを求める方法としては、大型の三軸圧縮試験やオエドメータ試験などが代表的である。粗粒材料の圧縮や変形は応力の強さだけでなく、応力経路やひずみ履歴に影響されることはよく知られている。このためダム建設過程の応力経路やひずみ履歴を模擬した圧縮試験によって変形モデルを構成し、そのパラメータを決定できれば変形予測の信頼性が高められると考えられる。ロックフィルダムの盛立段階では主応力比（ $\eta = \sigma_3 / \sigma_1$ ）が近似的に一定であることが挙動観測などによって明らかにされている¹⁾。また、拘束圧が大きいダムの内部では側方変位が実質的に抑制されていると考えられることから、側方ひずみを拘束するタイプの圧縮試験（オエドメータ試験）がダム材料の変形試験に適しているとする見方もある。

ここではオエドメータ試験と主応力比を一定に制御する三軸試験（ここでは単に三軸試験と称する）²⁾をとりあげ、両試験から求められる非線形弾性係数を比較考察した。なお、三軸試験では体積ひずみからポアソン比も主応力比の関数として求められるが、本文では紙面の関係上割愛した。

2. 比較試験の概要

オエドメータ試験は原石山から採取された硬質の安山岩を最大粒径 $d_{max} = 37.5\text{mm}$ に調整し、 $\phi 30\text{cm} \times H 20\text{cm}$ の容器内に締固めて行った。載荷重は $\sigma_v = 1, 2, 4, 8, 12\text{kgf/cm}^2$ の5段階とし、各荷重ステップで60分間荷重を持続させた。気乾状態と飽和状態の各ケースにおいて締固め度を3段階に変え、これらの組合せ条件について試験を2回繰返した。粗粒材料を用いているため、供試体上端面の仕上がり状態の違いの影響と推測されるばらつきが最初の荷重ステップのひずみ量にみられ、この初期ひずみが締固め密度と相関性が高いことが分かったので、これを用いて初期ひずみのばらつきをとり除いた。三軸試験は $\phi 10\text{cm} \times H 20\text{cm}$ の供試体で行い d_{max} は 19mm とした。図-1に粒度分布を示す。主応力比の制御は軸圧 σ_1 を逐次検知して σ_3 を調整する方式をとり、 $\sigma_1 = 1.5\text{kgf/cm}^2$ の初期応力を負荷した状態を初期条件とした。試験条件はオエドメータ試験と同様であるが締固め条件は2水準とした。

3. 試験結果

最大主応力 $\sigma_1 \sim$ 軸ひずみ ϵ_1 関係の一例を図-2と図-3に示す。応力 $\sim$ ひずみ（ $\sigma_1 \sim \epsilon_1$ ）関係は類似しており、いずれの試験結果も次式に示すようにべき関数を用いて近似できる。

$$\sigma_1 = a \cdot \epsilon_1^b$$

図-4は a 値と密度との関係を表したものである。試験法の違いや含水条件によって差はあるが、 a 値は密度と密接に関係していることを示している。オエドメータ試験の方が a 値の密度に対する依存性が高い。

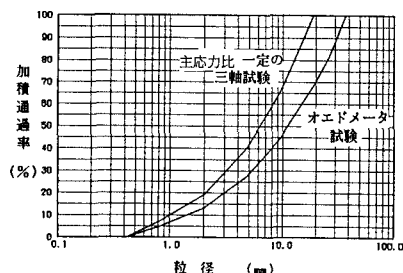


図-1 試験粒度

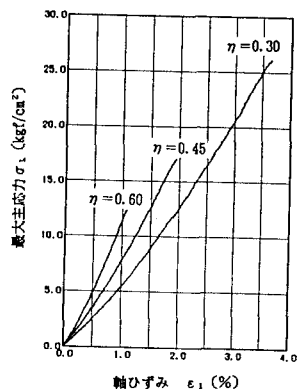


図-2 応力-ひずみ関係の一例（三軸試験）

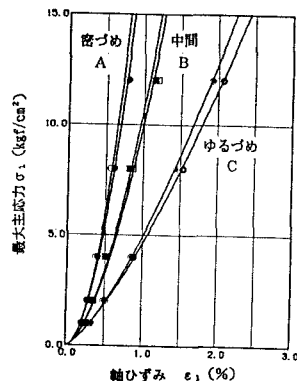


図-3 応力-ひずみ関係の一例（オエドメータ試験）

次にb値と密度との関係を図-5に示す。三軸試験の場合、b値は密度や含水条件によらず一定しており、その値は1.0よりわずかに大きく、 $\sigma_1 \sim \epsilon_1$ 関係は直線に近いことが分かる。一方、オエドメータ試験のb値は密度と正の相関があり、ばらつきはあるが含水条件による差はあまりない。

4. 非線形弾性係数

単調負荷条件下の応力～ひずみ関係を非線形弾性モデルで近似すると弾性係数Eとポアソン比 ν は次式で表される。

$$E = \alpha \cdot \frac{(1+2\eta) \cdot (1-\eta)}{1+2\eta-\eta \cdot \beta} \quad \nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{1+2\eta-\beta}{1+2\eta-\eta \cdot \beta}$$

主応力比一定の三軸試験

$$E = \alpha \cdot \frac{(1+2\eta) \cdot (1-\eta)}{(1+\eta)} \quad \nu = \frac{\eta}{1+\eta}$$

オエドメータによる試験

ここで $\alpha = d\sigma_1 / d\epsilon_1$ 、 $\beta = d\epsilon_v / d\epsilon_1$ である。ここではポアソン比の応力依存性を無視できるものと仮定（ $\nu = 1/3$ とした）し、気乾状態の弾性係数を求めた結果を図-6、図-7に示す。Eと密度との関係は概ね図-4に示したaと密度との関係を反映しているが、三軸試験の結果から今回の材料では主応力比 η のちがいがよるEの変化は小さいことが分かった。試験法によるEの σ_1 に対する依存性のちがいははっきりと認められる。即ち、三軸試験では密度によらずEの応力依存性は比較的弱い、オエドメータ試験では密度が大きくなるにしたがって応力依存性が顕著になっている。

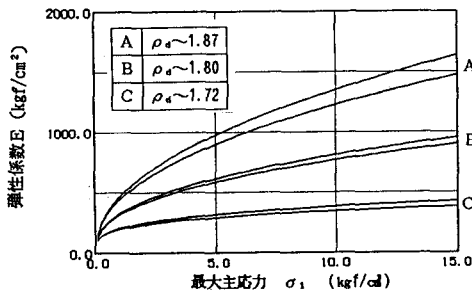


図-6 オエドメータ試験による弾性係数

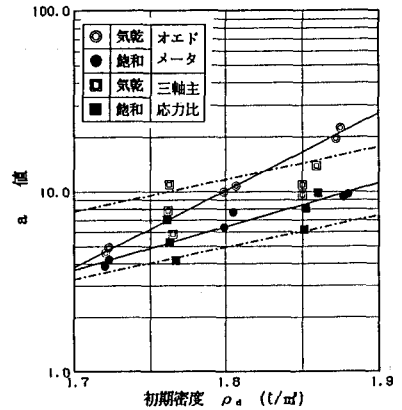


図-4 a値と密度との関係

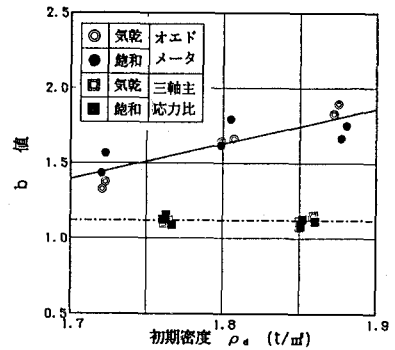


図-5 b値と密度との関係

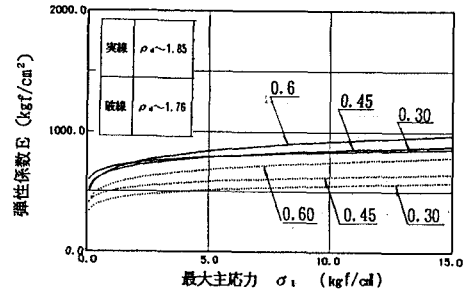


図-7 三軸試験による弾性係数

5. まとめ

今回は試験法による非線形弾性係数の差を考察した。ポアソン比を一定に仮定していること、試料の最大粒径が異なっていること、初期応力に差があることなどにより定性的な評価にとどまるが、主応力比を一定とした三軸試験と側方ひずみを拘束した圧縮試験とでは弾性係数の応力依存性にかなり差が出る事が確認された。したがって、フィルダムの変形解析に用いる材料パラメータを求めるための試験においては、応力経路やひずみの拘束条件の近似度を高めることが重要である。

（参考文献）

- 1) 松本徳久他：盛立時におけるフィルダムの変形特性について、第23回土質工学研究発表会講演集、pp. 167～168、1988。
- 2) 三室高他：主応力比を基本変数とするフィルダム材料の変形特性の評価方法、粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム発表論文集、pp. 25～32、1990。