

㈱四国総合研究所 正会員○斎藤章彦
四国電力㈱ 正会員 高橋鉄一
愛媛大学工学部 正会員 八木則男

1. はじめに

ロックフィルダムの地震時における挙動を動的応答解析により把握するためには、堤体材料の動的変形特性(せん断弾性係数, 減衰定数)が必要である。通常, このような動的物性は, 繰返し三軸試験等の室内試験により求めているが, 堤体材料は粒径が大きく, 試験装置も大型のものが必要なため, 研究事例も砂や粘性土ほど多くはない。また, 軟岩のような剛性の高い地盤材料では, 軸変位測定において供試体上下端面とキャップ・ペディスタル間に生じるベディングエラーの影響が無視できないことが指摘されている¹⁾。そこで, 実ダム堤体材料の繰返し変形特性を精度良く求めるために, 後藤ら²⁾が開発した局所軸ひずみ測定装置(LDT)を用いて繰返し三軸試験を行った。また, 試験では供試体に小型加速度計を設置し, S波速度の測定を行った。

2. 試験材料および試験方法

試験材料は, 実ダムで使用されているロック材およびフィルター材(石英片岩, $C_M \sim C_H$ 級, 比重2.72)である。試験粒度は, 実ダム盛立材料に対して供試体径($\phi 100\text{mm}$)を考慮し, 最大粒径を19mmとする相似粒度とした。これら試験材料の粒径加積曲線を図-1に示す。供試体は突固め試験結果に基づき, 所定の密度にランマーで突き固めて作製した。試験は, 所定の拘束圧で等方圧密した後, 側圧一定のもとで周波数0.1Hzの正弦波を12波載荷させ, 10波目の記録からせん断弾性係数および減衰定数を求めた。なお試験は飽和・非排水状態でを行い, B値は0.95以上のものを使用した。

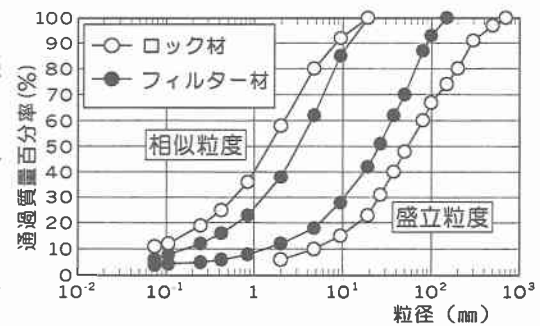


図-1 試験材料の粒径加積曲線

3. 試験結果

(1) 拘束圧依存性

図-2は間隙比の影響を除くため, G を間隙比 e の関数 $f(e)=(2.17 \cdot e)^2/(1+e)$ で除した $G/f(e)$ と有効平均主応力 $\sigma'_m=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$ との関係をせん断ひずみ γ をパラメータとして整理したものである。多少のバラツキは見られるが, G と σ'_m は両対数グラフ上で近似的に直線関係にあることがわかる。ひずみが大きくなるに従って G は小さくなるとともに, σ'_m に対する勾配が大きくなり, せん断弾性係数の拘束圧依存性が明確に現れている。これはせん断弾性係数と平均主応力の関係が砂と同様な次式で表され, べき乗数 m は図-2における直線の勾配で, γ が増加するとともに大きくなっている。

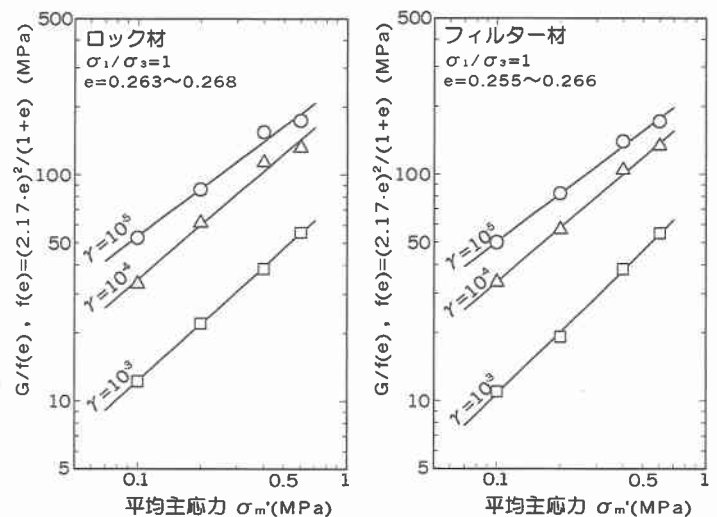


図-2 $G/f(e) \sim \sigma'_m$ の関係

せん断弾性係数 G_{eq} (MPa)

$$G = K(\gamma) f(e) (\sigma'_m)^{m(\gamma)}$$

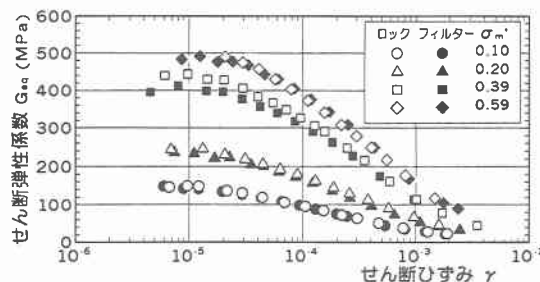


図-3 $G \sim \gamma$ 関係

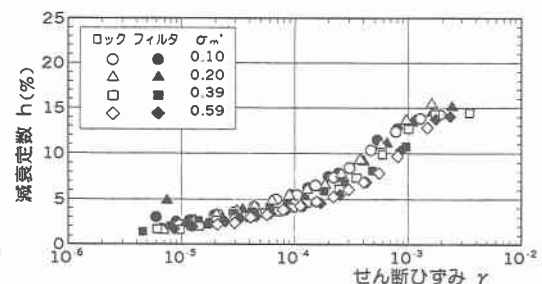


図-4 $h \sim \gamma$ 関係

(2) ひずみ依存性

ロック材とフィル

ター材のせん断弾性係数のひずみ依存曲線を図・3、図・4に示す。Gのひずみ依存性はせん断ひずみが $\gamma < 10^{-5}$ では若干のバラツキが見られるものの、それより大きなひずみではひずみとともに低減する。また、平均主応力の影響も現れており、 σ_m' の増加につれてGも大きくなっている。いずれの材料とも平均主応力やせん断ひずみによる影響が顕著に現れている。特にひずみの増大に伴い非線形性が強く現れせん断弾性係数の低下が著しい。

一方、減衰定数は、せん断弾性係数ほどではないが、拘束圧の影響が現れており、同一のせん断ひずみに対して拘束圧の小さいものほど減衰定数は大きくなる傾向がある。

ひずみ増加に伴うせん断弾性係数の減少程度を調べるために、微小ひずみ ($\gamma=10^{-6}$) におけるせん断弾性係数 G_0 で正規化した G/G_0 と γ の関係を図-5に示す。 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係は、拘束圧によらずほぼ同一線上にプロットされており、図中破線で示したhardin-Drnevich式とよく一致している。図-6、7に既往のデータ³⁾との比較を示す。ロック材およびフィルター材は砂に比べひずみ増加に対する低下が早くから見られる。また、減衰定数は、ひずみが $\gamma < 10^{-3}$ では砂に比べて大きい。

(3)主応力比の影響

図-8はロック材で主応力比 ($K=\sigma_1/\sigma_3$) の影響について調べた結果である。図から明らかなように、Gは主応力比が大きくなるほど増大することがわかる。すなわち、平均主応力(拘束圧)が同じでも異方応力状態下であれば、軸圧が大きいほどGは大きいことになる。これは、繰返し载荷に伴い軸ひずみが圧縮側に移行し、供試体が圧密により締め固まるためと考えられる。しかし、図-5に示す G_0 で正規化した $G/G_0 \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係への主応力比の影響は小さい。ただしこのような結果は最大主応力方向に载荷する三軸試験による特徴とも考えられるため、ねじり試験のような主応力と载荷方向が異なる場合について検討が必要であろう。

4. まとめ

実ダムロックフィル材料を用いた繰返し三軸試験により、各材料の動的変形特性について以下の知見が得られた。

- ①ロック材およびフィルター材のせん断弾性係数は、砂に比べ小さなひずみレベルから低下し、顕著な非線形性を示す。また、ひずみ依存曲線は広いひずみ範囲でHardin-Drnevich式とよく一致した。
- ②減衰定数は、 $\gamma=10^{-3}$ 以下のひずみでは砂に比べて大きい。
- ③Gは主応力比が大きくなるほど増大するが、 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係への影響は小さい。

[参考文献]

1) 董 軍, 中村和之, 龍岡文夫, 小幡行宏: 単調および繰返し载荷による粗粒材料の三軸せん断特性, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用—」に関する国内シンポジウム発表論文集, pp.211-216, 1994
2) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S. & Sato, T.: A Simple Gauge for Local Small Strain Measurements in the Laboratory, Soils & Foundations, Vol.31, No.1, pp.169-180, 1991
3) 国生剛治: 広いひずみ範囲における粗粒材の動的変形特性と減衰特性, 電力中央研究所報告, 380002, 1980

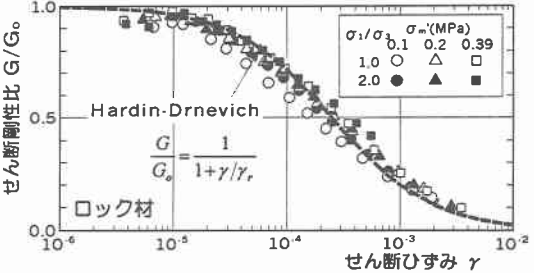


図-5 $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材)

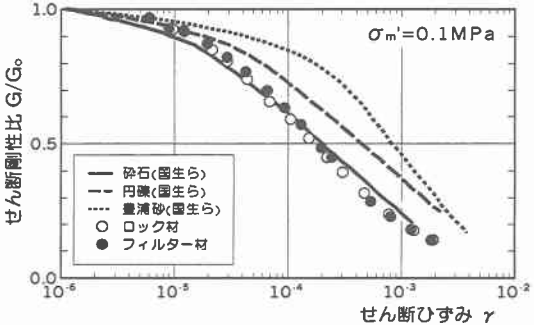


図-6 各材料における $G/G_0 \sim \gamma$ の比較

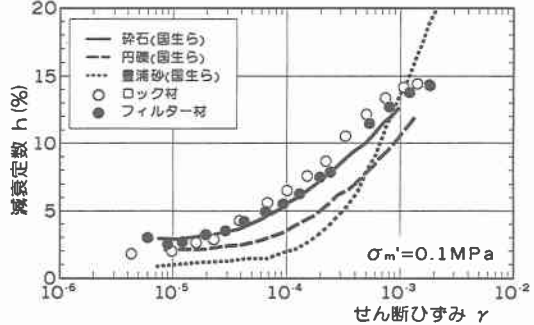


図-7 各材料における $h \sim \gamma$ の比較

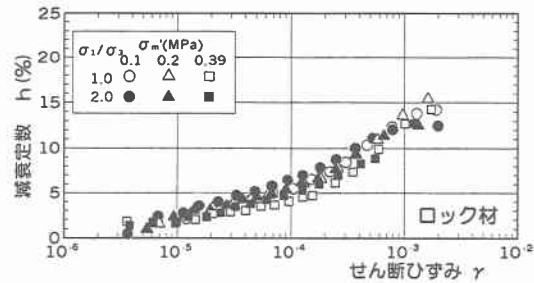
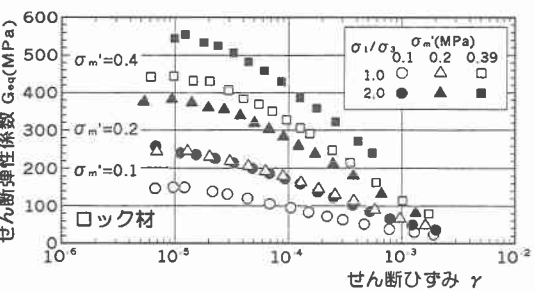


図-8 主応力比の影響(ロック材)