

(113) 粗粒材料の動的変形特性

飛島建設(株)技術研究所 ○境野 典夫
建設省土木研究所 安田 成夫
建設省土木研究所 松本 徳久

1. まえがき

高さが100mを越えるような大規模なロックフィルダムは、まだ歴史が浅く大地震を受けた経験が少ないが、中には地震活動度の高い地域に建設されるものもあり、その耐震性の向上が重要な課題となるとともに、合理的なダムの耐震設計に対する要請が高まってきている。最近の電子計算機の向上と有限要素法の使用により、地震時におけるフィルダムの挙動解析も、行なうことができるようになった。しかし、これら高度な数値解析手法の発展の反面、その入力物性値についてはいまだに不明な点が多い。特にフィルダム堤体の大部分を占める粗粒材料の動的変形特性については、供試体あるいは試験装置が大がかりになることからその研究例も数少ない。また、土質材料は一般に地震時のような繰返し荷重を受けた時に、その応力～ひずみの関係が強い非線形性を示すことが知られている。したがって、ロックフィルダム堤体材料の繰返し荷重に対する動的物性を広いひずみ範囲で精度よく求めておくことは、より合理的なダムの耐震設計を実施する上で重要である。そこで大型繰返し三軸装置(供試体寸法:直径30cm×高さ60cm)を使って、現在建設中のロックフィルダムのロック材、フィルター材の動的変形特性(剛性率 G , 減衰定数 h)を比較的広範囲なひずみ領域について求めた。そして以下の項目について試験結果の検討を行なった。

- 1) 剛性率 G 及び減衰定数 h に影響をおよぼす幾つかの要因(間隙比、拘束圧、ひずみ依存性、主応力比、粒度)についての検討。
- 2) 微小ひずみ時の剛性率(初期剛性率 G_0)の予測とHardin-Drnevich式の適用性。

2. 試験方法

本試験には、供試体直径30cm高さ60cmの大型繰返し三軸試験装置が用いられた。載荷方式は電気油圧サーボ方式である。また、非接触型変位計及び荷重計が三軸セル内に取り付けられ、供試体近くでの測定が可能となり、精度の向上がはかれた。

試験材料は、現在建設中のロックフィルダムの築堤材料であるロック材(安山岩)とフィルター材(旧河床砂礫)を用いたロック材、フィルター材の物性値は表-1に示す通りで、ロック材は同一材料で均等係数 $U_c=12$ 、最大粒径 $d_{max}=63.5\text{mm}$ (R-12材)と $U_c=7$ 、 $d_{max}=38.1\text{mm}$ (R-7材)の2種類とし、フィルター材は $U_c=36$ 、 $d_{max}=38.1\text{mm}$ (F-36材)とした。粒度分布は通常の静的三軸試験の最大粒径が供試体直径の1/5程度とされていること等を考慮して決定した。図-1に粗粒材料の粒度分布を示した。ロック材は安山岩でほぼ一般的な性質と思われる。フィルター材は旧河床砂礫とされ、いわゆる段丘堆積物であり、やや風化した破碎されやすい円礫が主体で細粒分を比較的多く含む材料である。供試体は重量33Kgf、全負荷打撃回数950打/分の電動ランマーにより全体を6層に分けて篩固めた。供試体の初期設定密度は、上記の電動ランマーを用いた篩固め試験結果から相対密度 $Dr=85\%$ を目標として作製した。

表-1 試験材料の物理的性質

材 料 ・ 岩 質	ロ ッ ク 材 (安 山 岩)		フ ィ ル タ ー 材 (旧 河 床 砂 礫)
試 料 名	R-12	R-7	F-36
均等係数 U_c	12	7	36
最大粒径 $d_{max}(\text{mm})$	63.5	38.1	38.1
最小粒径 $d_{min}(\text{mm})$	0.42	0.84	0.074
合成絶対乾比重 $\bar{\sigma}_s$	2.575	2.579	2.571
吸 水 率 $Q(\%)$	3.48	3.67	4.87
含 水 比 $w(\%)$	2.3	2.4	1.2
最大間隙比 e_{max}	0.735	0.775	0.546
最小間隙比 e_{min}	0.327	0.369	0.283

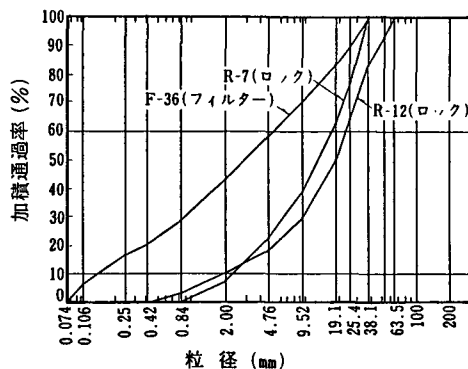


図-1 試験材料の粒度分布

試験方法は、まず所定の拘束圧で圧密（等方または異方）を行なった後、荷重振幅制御によって周波数0.2 Hzの正弦波で軸荷重の繰返し载荷を行ない、10波目のヒステリシスループから剛性率、減衰定数を求めた。拘束圧は1供試体で数種類変化させるため、試験は小さな拘束圧から始め、荷重振幅を徐々に増してゆき、せん断ひずみ $\gamma=10^{-3}$ 近くに達したなら次の拘束圧へ進み、この手順を繰り返し最終拘束圧段階まで行なう。なお材料は全て気乾状態で行ない、圧密及び繰返し载荷を通じて排水（排気）条件で行なった。

3. 試験結果

動的変形特性に影響を与える要因のうち、間隙比、拘束圧、ひずみ、主応力比、粒度分布等の粗粒材料（ロック材、フィルター材）への影響度について以下に述べる。

砂質土の場合、微小ひずみにおける G は間隙比と拘束圧の影響を考慮した幾つかの実験式が次の形で提案されている。

$$G = A \cdot F(e) \cdot (\sigma_m)^m \quad \dots\dots\dots 1)$$

今回の試験では、同一材料に対して1種類の間隙比 e しか設定していないために e の違いによる G の変化を説明するのに十分とは言えない。しかし拘束圧の変化に伴う e の違いがあるため、各材料のそれぞれのせん断ひずみレベル

に対して平均主応力 $\sigma_m=1\text{Kgf/cm}^2$ の G と e の関係で整理したのが図-2である。なお図中の G は $(\sigma_m)^m$ で除して拘束圧の違いによる差を除いてある。フィルター材はロック材に比べ同じひずみでも G が小さい結果が得られている。間隙比が小さく密度が大きいからと言って、必ずしも剛性率が大きいとは限らないことがわかる。従って、 e だけで材料の異なる G を評価するのは困難であり、材料の粒度分布、構成粒子の硬軟、粒子形状の相違等の影響も含めて検討する必要があると考えられる。ロック材、フィルター材の G は、バラツキはあるものの全体として $\gamma=10^{-5} \sim 10^{-3}$ のひずみに対し間隙比の関数 $F(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$ にほぼ比例した関係が得られている。今回の試験での間隙比の変化幅は僅かであるが、粗粒材料の G と e の関係は、砂等による他の研究と同様、密度の増大に伴い G は増加する傾向にあり、ほぼ間隙比の関数で G を表わせるようである。

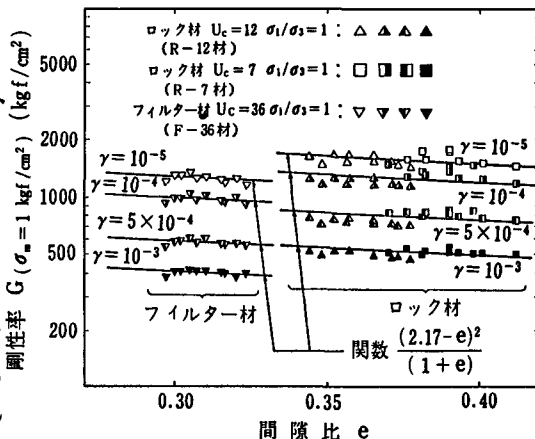


図-2 ロック材・フィルター材の G と e の関係

拘束圧の影響については、平均主応力 σ_m に着目して整理を行なった。図-3, 4はロック材、フィルター材の G と拘束圧の関係をせん断ひずみ γ をパラメータとして両対数グラフに表わしたものである。ここで、縦軸は間隙比の違いによる影響を除くために G を $F(e) = (2.17-e)^2/(1+e)$ で除した値をとっている。多少のバラツキは見られるが、いずれの場合も $\gamma=10^{-5} \sim 10^{-3}$ のひずみ範囲では 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。また、ひずみが大きくなるに従って G は、その絶対値が低下するとともに σ_m に対する勾配が大きくなり、剛性率の拘束圧依存性が明確に

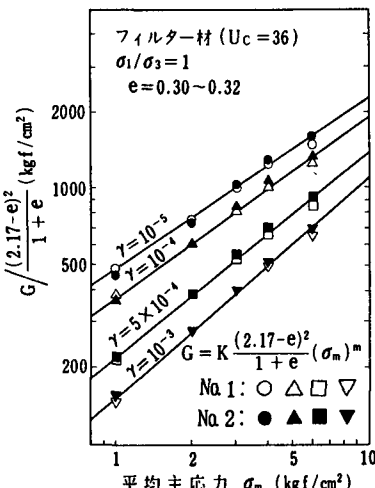
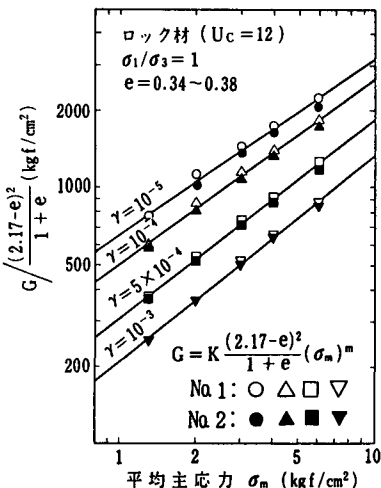


図-3 G と σ_m の関係 (R-12材)

図-4 G と σ_m の関係 (F-36材)

現われている。これらの事は剛性率 G と拘束圧 σ_m が、従来の砂等の研究で述べられているように次式のような

$$G \propto (\sigma_m)^m \quad \dots\dots\dots 2)$$

比例関係で示され、べき乗数 m は図-3、4における直線の勾配で、せん断ひずみ γ の関数であり γ が増すと大きくなることを意味している。べき乗数 m は他の研究と比べてもやや大きい値が得られ、 G の拘束圧依存性が小さなひずみ領域からより顕著に現われている。また、 m はひずみの増加に伴って大きくなる傾向にある。一方、粗粒材料の減衰定数については測定値にバラツキが大きいため、代表的 $h \sim \gamma$ 曲線を決定できなかった。ただし図-5の例のように、各拘束圧で比較的信頼性が明らかになる場合もあるが、剛性率の場合ほど拘束圧の依存性はみられない。

ひずみ依存性については正規化した剛性率について述べる。図-6は今回の試験で外挿可能な最小ひずみ $\gamma = 10^{-5}$ における G （これを $G_{\gamma=10^{-5}}$ ）で G を除し正規化した値とひずみ γ の関係である。図には粗粒材料（ロック材、フィルター材）と豊浦標準砂の結果が記されている。これによればロック材とフィルター材の曲線はほぼ同じような範囲にあり、豊浦砂と比較すると G のひずみ増加に対する低下が早くからみられることがわかった。

次に Hardin-Drnevich式によって初期剛性率 G_0 を推定し、ひずみ依存曲線の数式化を試みた。ロック材の数式曲線と実測値の合致性を調べた例が図-7である。拘束圧は、 $\sigma_m = 3 \text{ Kgf/cm}^2$ の場合を示した。主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ では、 G/G_0 は $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 以上のひずみで Hardin-Drnevich の数式曲線と比較的良く一致していることがわかる。

図-8は減衰定数 h のひずみ依存曲線が拘束圧によって変化する範囲をロック材、フィルター材及び豊浦砂の結果を合わせて同一グラフ上で比較したものである。拘束圧の違いによって $h \sim \gamma$ 曲線はそれぞれある幅を持った帯状の

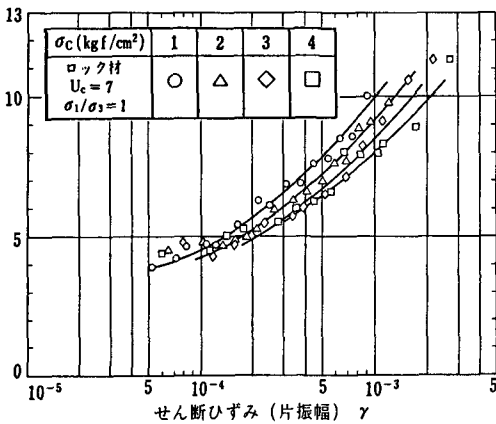


図-5 拘束圧依存性が明確な $h \sim \gamma$ 曲線の例

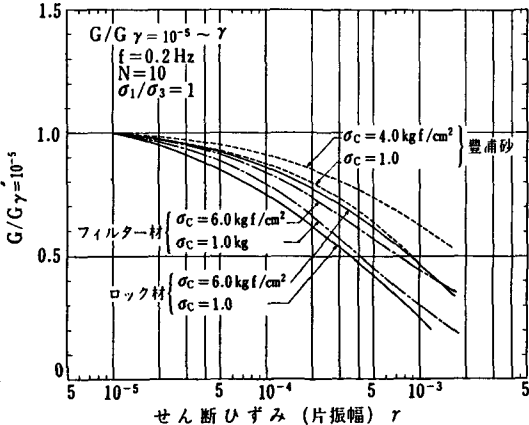


図-6 各材料の $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線の比較

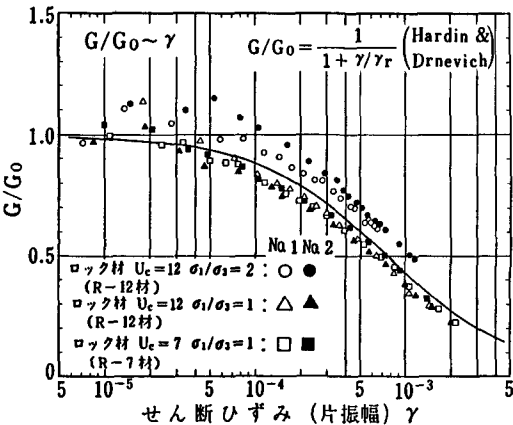


図-7 $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材, $\sigma_m = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$)

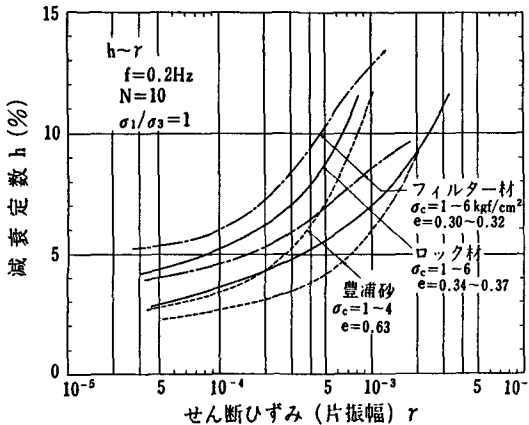


図-8 各材料の $h \sim \gamma$ の関係

範囲に分布しているが、ひずみが $\gamma=5 \times 10^{-4}$ までは h は豊浦砂が最も小さく、次にロック材、フィルター材の順になっている。これ以上のひずみ、特に $\gamma=10^{-3}$ 付近になると h は急激に大きくなるとともに、各材料の分布範囲は近付いてくる傾向にある。

主応力比の影響については、 $U_c=12$ のロック材で、主応力比 σ_1/σ_3 を細かく変えて調べた結果が図-10である。主応力比の範囲は、1.0 ~ 2.0 である。図には各試験の共通ひずみ $\gamma=2 \times 10^{-4}$ における G と σ_1/σ_3 の関係を示してある。なお主応力比 σ_1/σ_3 は、静的な軸圧 σ_1 と側圧 σ_3 の比として定義した。図から明らかなように、 G は主応力比 σ_1/σ_3 が大きくなる程増大することがわかる。従って、平均主応力（拘束圧）が同じでも異方応力状態下であれば、軸圧が大きい程 G は大きいことになる。これは、繰返し荷重が与えられるたびに軸ひずみが圧縮側へ移行し、供試体が締固まり密な状態が形成されるためではないかと考えられる。

次に材料の粒度の違いを均等係数に着目し、 G に及ぼす影響について調べた。図-10では G を σ_m や e の影響を除くため全て $\sigma_m=1 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $e=0.4$ とした時の値に補正してあり、これと均等係数 U_c との関係を示したものである。材料の相違を均等係数だけでとらえるのはやや問題があるが、均等係数が大きくなれば比較的広いひずみ範囲で、剛性率が減少する傾向が見られる。

4. まとめ

- 1) 粗粒材料の剛性率 G は、ひずみ、拘束圧、間隙比、主応力比、粒度の影響を受けるのに対し、減衰定数 h は、ひずみ、拘束圧の影響を受けるが、間隙比、主応力比、粒度の影響は僅かである。
- 2) 粗粒材料の剛性率 G は砂と比べ、より小さなひずみレベルから低下する傾向がみられる。また、ひずみ依存曲線は、 $\gamma > 5 \times 10^{-5}$ より大きなひずみで Hardin-Drnevich式と良く一致した結果が得られた。
- 3) 粒度の相違を均等係数に着目したところ、剛性率 G は均等係数 U_c が大きい程小さくなる傾向がみられたが、これについてはさらに検討を加えたい。

参考文献

- 1) 松本徳久・安田成夫・境野典夫：大型繰返し三軸圧縮試験機を用いた粗粒材料の動的物性試験，土木研究所資料，第2146号，1984. 12.
- 2) 岩崎敏男・龍岡文夫・高木義和：地盤の動的変形特性に関する実験的研究（Ⅱ）—— 広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性 ——，土木研究所報告，第153号，1980. 3.
- 3) 国生剛治・江刺靖行・桜井彰雄：広いひずみ領域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.

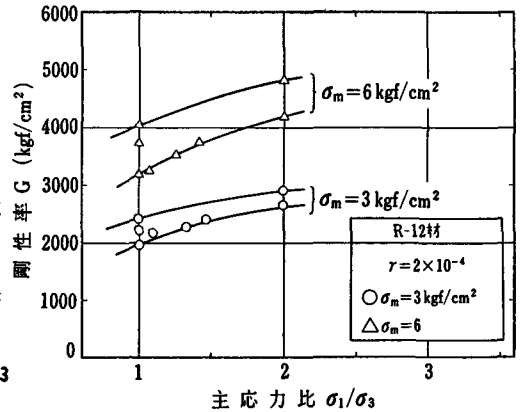


図-9 G に与える主応力比の影響
 $G \sim \sigma_1/\sigma_3$ (R-12材)

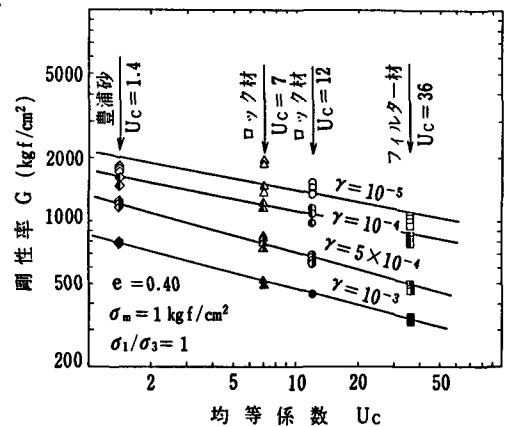


図-10 均等係数と剛性率の関係