

(55) 材質の相異による飽和粗粒材料の動的変形特性への影響

建設省土木研究所 安田 成夫

○荒川 昭治

大久保雅彦

松本 徳久

1. まえがき

近年の電子計算機の向上と解析手法の発展により、地震時におけるロックフィル堤体の非線形の挙動解析を行えるようになった。しかし、これらの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不明な点が多い。特に、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。

従来、ロックフィルダムの動的解析の入力物性値は、室内試験にて決定する場合、不飽和供試体を用いられているが、貯水池側の飽和領域は、不飽和試験結果あるいは過去の経験式から推定している。

しかしながら、飽和した材料の強度、変形特性は、不飽和材料と異なることが過去のロックフィルダムの現場実測例から予想される。これを室内試験において明確にすることは、ロックフィルダムの耐震設計上有益と考えられる。

そこで、試験装置を改良し、飽和粗粒材料を用いた繰返し三軸試験を試み、動的変形特性に影響を及ぼす種々の要因（拘束圧、せん断ひずみ及び主応力比等）について不飽和材料との比較を行った。

また、この相違には、材料の性質によるものも大きく影響すると考えられ、非常に堅硬な材料とやや堅さの劣る材料の二種類をここでは用いて検討を加えている。

2. 試験方法

(1) 試験装置

本飽和試験は、供試体寸法直径30cm、高さ60cmの大型繰返し三軸試験装置を用いた。

今回飽和供試体での試験を可能にするために配管を工夫した。

(2) 飽和供試体の作製

飽和供試体の作製は、重さ33kgf、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、相対密度は85%を目標に締固めた。次に、供試体を三軸室内に入れ、拘束圧0.2 kgf/cm²程度かけ、自立させた状態で、供試体内にCO₂を12～24時間程度通し、その後同様に供試体の下部から上部へ脱気水を約24時間通した。

また、供試体飽和度のチェックは、スケンプトンのB係数（側圧増分に対する間隙水圧増分の比）を用い、供試体はB係数0.96以上で飽和したものと判断した。なお、供試体には2.0 kgf/cm²の背圧を作用させている。

(3) 試験方法

試験方法は、まず所定の拘束圧で圧密（等方又は異方）を行った後、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載荷を行った。

なお、拘束圧は1供試体につき数種類（ $\sigma_m = 1.0, 2.0, 3.0$ 及び4.0 kgf/cm²）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 γ が 5×10^{-4} 近くに達した（この間、荷重振幅を20ステップ程度変化させた）なら、次の拘束圧へ進み、この手順を繰返し、最終拘束圧段階まで行った。ただし、試験は排水条件下で行った。

(4) 試験材料

試験材料は、現在建設省が建設中のロックフィルダムの堤体材料である材料A（斑れい岩）及び材料B（粗粒玄武岩）を使用した。

材料の物理的性質を表-1に示し、粒度分布曲線を図-1に示す。

粒度分布は、通常、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を考慮して、最大粒径 $D_{max}=63.5\text{mm}$ とした。均等係数は、斑れい岩が $U_c=6.1$ 及び粗粒玄武岩が $U_c=12.0$ である。

(5) 試験値の整理

試験値は、パソコンを使用した自動計測システムによって、サンプリング及びAD変換を行い求めた。

試験値の整理については、繰返し荷重に対する供試体の変形特性が定常状態に達した10波目の試験結果に着目し、ポアソン比は、そのときの軸ひずみと体積ひずみから求め、剛性率及びせん断ひずみは、動弾性係数及び軸ひずみから、ポアソン比を介して算出した。

(6) 点載荷試験

材料の性質の違いを把握する目的で、岩石自体の強さを求める点載荷試験を実施した。

点載荷試験は、表一に示した二種類の材料を用い、気乾状態および含水状態にて実施した。なお、試験材料の粒径は、 $63.5\text{mm}\sim 50.8\text{mm}$ とし、試験料数は、各材料ともに30個程度とした。

3. 試験結果

(1) 拘束圧の影響

図一2は、飽和材料の剛性率 G と平均主応力 σ_m 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したものである。

なお、主応力比 σ_1/σ_3 は1.0である。この図より両材料ともに G と σ_m の関係は、不飽和材料の試験結果^{1),2)}と同様にどのひずみレベルにおいても両対数グラフ上で直線関係にあり、剛性率 G の拘束圧 σ_m による影響が明確に表れていることがわかる。

また、せん断ひずみが大きくなるに従って、 G の低下する傾向は不飽和材料と同様に顕著に見られるが、 σ_m に対する勾配の変化は、これに比べてそれほど大きなものではない。

減衰比 h は図一3に示すように、材料A（斑れい岩）については若干バラツキがあるものの、拘束圧 σ_m が大きくなると小さくなる傾向が見られる。材料B（粗粒玄武岩）については拘束圧 σ_m による差はほとんど見られない。このことから、減衰比 h は材料によって若干違いがあるものの σ_m による依存性はあまり無いものと考えられる。また、減衰比 h は材料Aの方が小さな値を示している。なお、不飽和材料についてはバラツキが大きく σ_m の依存性については判断が困難である。

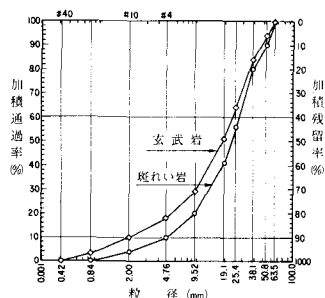
飽和材料のポアソン比 ν は、図一4に代表されるように拘束圧 σ_m による差が明確に表れ、 σ_m が大きくなると小さくなっている。

(2) ひずみ依存性

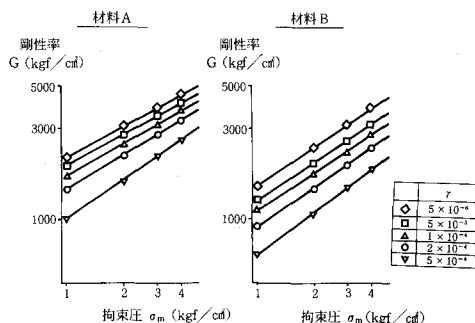
剛性率のひずみ依存曲線を図一5（材料A、 $\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ）に示す。この図より、せん断ひずみ $\gamma < 5 \times 10^{-6}$ の範囲においてバラツキ

表一 材料の物理的性質

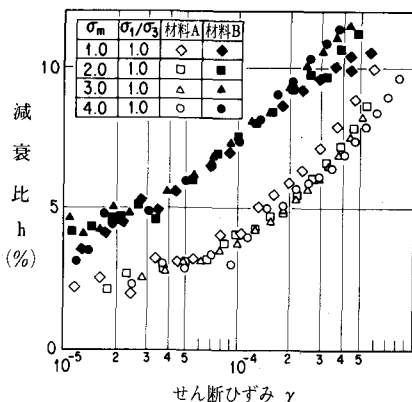
材料名	材料 A	材料 B
岩石名	斑れい岩	粗粒玄武岩
比重	2.951	2.509
吸水量	0.875%	5.214%
破碎率	2.0%	5.0%
最大間隙比	0.691	0.744
最小間隙比	0.349	0.319
最大粒径	63.5mm	63.5mm
最小粒径	0.84mm	0.42mm
均等係数	6.1	12.0
相対密度	85%	85%



図一 材料の粒度分布曲線



図一2 $G \sim \sigma_m$ の関係



図一3 $h \sim \gamma$ の関係

が見られるが、この範囲は測定の限界であり、 G は初期剛性率に漸近し、ほぼ初期剛性率と同程度の値を有するものと考えられる。一方、 r が増加するに従って、 G は低下している。この低下の度合いを知るために、微小ひずみにおける剛性率 G_0 によって G を除し、規準化したものを両材料について示したのが図-6である。この図から、両材料ともに拘束圧の大きい方が低下の度合いは小さいが、拘束圧の違いによる差は大きなものとは思われない。

また、飽和材料の G/G_0 の低下傾向は、不飽和材料と比較すると低下の度合いが、若干小さめである。

なお、材料Bは材料Aに比べ、低下の度合いは若干大きく、やや直線的に低減している。これは、材料Bがやや堅さが劣るために繰返し荷重に対する破砕が起因しているのではないと思われる。

(3) 主応力比の影響

微小ひずみにおける剛性率 G_0 と主応力比 σ_1/σ_3 の関係を図-7に示す。なお、間隙比との影響を除くために G_0 を $F(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$ で除した値を用いた。

材料Aの不飽和材料については、主応力比の増加に伴って剛性率は増加している。また、その傾向は、平均主応力が大きくなると顕著に表れている。しかし、飽和材料については、主応力比が1.0～1.4の範囲内で剛性率の最大値が存在しているようであるが、明確な主応力比による依存性は見られない。

材料Bの不飽和材料については、主応力比の依存性は見られない。一方、飽和材料については、若干ではあるが主応力比の影響を受けているようである。

標準砂による中空供試体を用いたねじり単純せん断試験結果の報告³⁾によると、 $r \leq 1 \times 10^{-4}$ の時、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0 \sim 3.0$ の範囲で、平均主応力が一定ならば、剛性率は、主応力比にあまり依らないとある。

今回、試験方法は異なるが、標準砂と同様に粗粒材料についても剛性率は、主応力比の依存性があるとは考え難い。

(4) 材料の違いについて

材料A（斑れい岩）と材料B（粗粒玄武岩）の違いについては、表-1の物理的性質に見られるように、比重、吸水量及び破砕率から判断して、材料Aの方が堅硬な岩であると判断される。

これを、定量的に確認するために、両材料の点載荷試験を実施した。この結果、圧裂強度を50kgf/cm²ごとに段階分けし、その頻度を調べると図-8に示すとおりである。なお岩石の圧裂強度は、次式⁴⁾にて算出した。

$$\sigma_t = 0.891 \times F/d^2 \quad \text{ここに、} \sigma_t: \text{圧裂強度 (kgf/cm}^2\text{)} \quad F: \text{極限荷重 (kgf)} \quad d: \text{点載荷間隔 (cm)}$$

図-8に示す度数分布の状況を見ると、材料Aの方が材料Bよりも圧裂強度が大きいと判断できよう。ま

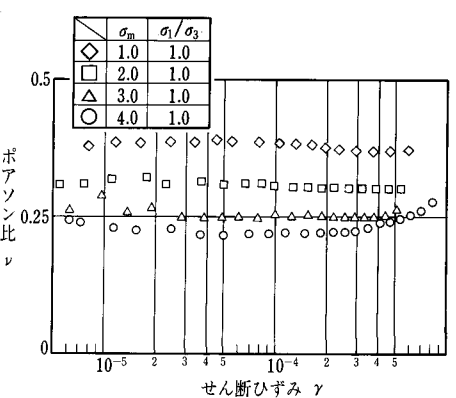


図-4 $\nu \sim r$ の関係

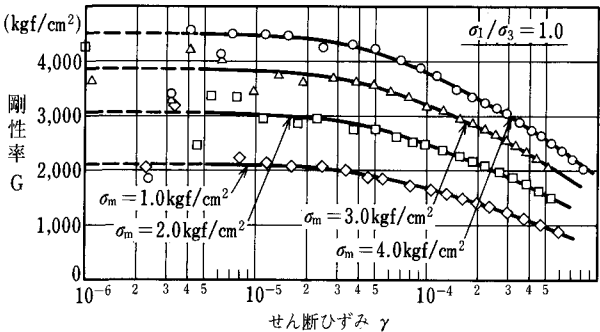


図-5 $G \sim r$ の関係

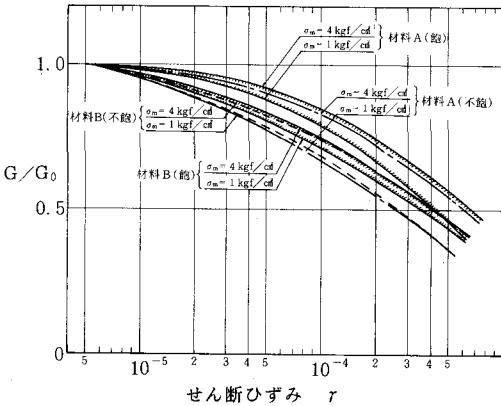


図-6 $G/G_0 \sim r$ の関係

た、飽和による影響は、両材料ともに頻度の最大値が一段階分づつずれることから、強度の低下が認められる。

次に、算術平均により各材料の圧裂強度を求めると、

材料A (気乾) = 146.3 kgf/cm² (飽和) = 133.9 kgf/cm²

材料B (気乾) = 95.1 kgf/cm² (飽和) = 81.9 kgf/cm²

となり、飽和による低下率は、それぞれ8.5%, 13.9%である。

以上から、岩石の強度は、材料Aの方が大きく、飽和による影響は、両材料ともに強度の低下となって表れ、その低下量は材料Bの方が若干大きめであることが把握できた。

次に、微小ひずみ時における剛性率 G_0 と拘束圧 σ_m の関係を、材料A, Bについて不飽和及び飽和の状態別にプロットしたものを図-9に示した。なお、縦軸は間隙比 e の影響を除くために、 $F(e) = (2.17 - e^2)/(1 + e)$ で G_0 を除いたものである。これより、両材料ともに飽和による剛性率の低下が認められた。これは飽和材料の場合、岩石間の接触面に水が浸透し、摩擦力が低下することによって変形しやすくなることが一因と考えられる。

また、拘束圧が大きくなるにつれて飽和による剛性率の低下が小さくなっている。これは、拘束圧の増加に伴い岩石間の接触力が高まり、水の浸透による影響が小さくなり供試体の変形しづらくなるものと考えられる。

ここで、両材料の飽和による剛性率の低下率を $\sigma_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ について算出してみると、材料Aは12.4%, 材料Bは16.7%となり、両者間に、僅かに差が生じた。これより、両材料ともに飽和による剛性率は不飽和材料のその概ね90%程度であると考えられる。

また、材料A, Bの不飽和状態における剛性率の比は、概ね1:0.6~0.7であるのに対し、岩石の強度の比は、ほぼ1:0.65であり、岩石自体の強度が供試体の剛性率に大きく寄与していることが理解される。

4. まとめ

- (1) 飽和粗粒材料の剛性率 G は、材料に関係なく、平均主応力 σ_m に依存し、不飽和材料と同様に $G \propto \sigma_m^m$ なる関係を呈した。
- (2) また、 G はせん断ひずみ γ の増加に従って低下し、その度合いは σ_m に依存しない。しかし、材料による低下の度合いの差が認められた。
- (3) 岩石自体の圧裂強度の違いが、剛性率の差として確認された。
- (4) 飽和材料の剛性率は、不飽和材料のその概ね90%程度であり、両材料において剛性率の低下の度合いに差はなかった。

今後、実際のロックフィルダム数ダムの上下流ロック部に弾性波探査を実施して上記結果を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 境野典夫, 安田成夫, 松本徳久: 粗粒材料の動的変形特性 第18回地震工学研究発表会 1985年
- 2) 安田茂夫, 大久保雅彦, 荒川昭治, 松本徳久: 飽和粗粒材料の動的変形特性 第22回土質工学研究発表会 1987年
- 3) 龍岡文夫, 足立紀尚: 土の力学(Ⅲ)-圧密・せん断動の解析 新体系土木工学18 技報堂出版 (P. 223・224) 1979年
- 4) 平松良雄, 岡行俊, 木山英郎: 非整形試験片による岩石の引張強さの迅速試験 日本鉱業会誌 Vol. 81. No. 932 (P. 1024~1030), 1965年

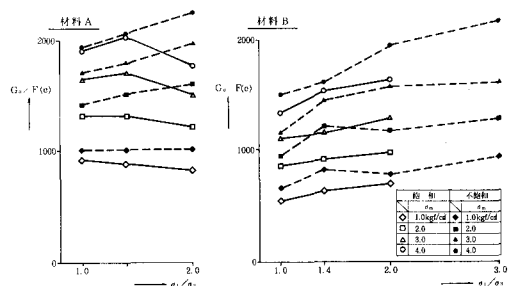


図-7 $G_0/F(e) \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係

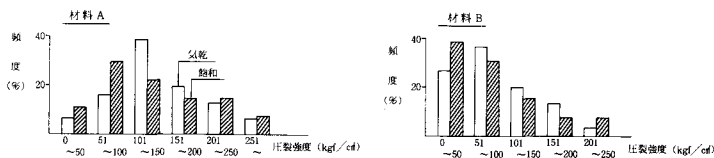


図-8 岩石の圧裂強度の頻度図

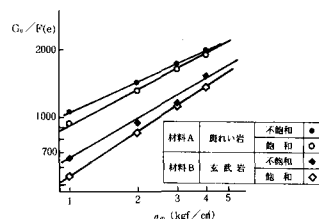


図-9 $G_0/F(e) \sim \sigma_m$ の関係