

学位論文題名

フィルダム堤体材料の動的変形・強度特性と
地震時安定解析への適用に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、コンクリートダムの建設に適したサイトが少なくなり、フィルタイプダムの建設割合が高まってきた。一般にロックフィルダムの安定性は、専ら地震時に於ける堤体斜面の安全度に依存しており、その動力学的性質の解明が急がれている。

この様な背景の下で本研究は、ロックフィル材料の動的変形・強度に関する広範な実験的研究を行い、その特性を明らかにするとともに、フィルダムの現行の耐震設計法に基づき、観測された地震動や堤体の応答特性を考慮した新しい耐震設計手法を検討している。すなわち、地震時に堤体に作用する地震力を求める際、動的解析は有力な手段となるが、入力物性値の決定とその妥当性の評価方法は、最初に明確にすべき重要な課題であり、安定性の評価では、ロックフィル材料の繰返し応力の下における強度特性の把握が必須となる。また優れた解析手法の展開に於いても、手法の詳細な吟味とともに、物性値に関わる信頼性の高い情報無しには、その発展は望めない。

そのため本研究では、検討対象を下記のように整理した。

- (1) 動的解析において、堤体材料の動的変形特性は主として大型繰返し三軸試験により求められるが、それらは原位置の応力状態、材料の堆積条件あるいは粒度等の物理的性質を適切に再現して行われているとは言い難い。たとえば室内試験供試体の最大粒径は、現場のそれと大きくかけ離れている。室内試験と原位置試験との関連性を明らかにするとともに、堤体の挙動解析に用いる室内試験結果の適切な評価方法の確立が必要とされる。
- (2) 堤体材料とともに、基礎地盤材料の動的変形特性を明確にする必要がある。近年、河床砂礫を基礎としてフィルダムを建設する場合が増加し、基礎地盤の力学特性を考慮した堤体の動的解析を行う要請が高まっている。一般に自然堆積状態の河床砂礫の相対密度は必ずしも高くなく、ダム基礎としてのこのような材料の動的変形特性の評価法を検討する必要がある。
- (3) フィルダムの耐震性を考えるとき、震度法による円弧すべり安定計算が慣用的に用いられて来た。震動法において、多くの場合、強度については単調載荷試験による静的強度をそのまま用いているが、これは必ずしも地震時の繰返し載荷条件のもとでの土の強度を正しく評価しているとは言えない。さらに土の繰返し載荷に対する動的強度に関しては、飽和砂については液状化強度特性として新潟地震以後急速に研究が進んでいるが、フィルダムの堤体材料である粗粒材料のそれは、まだ研究事例が少なく明らかにされていない点が多い。
- (4) 2次元解析あるいは3次元解析かの選択はあるが、現在広く用いられている2次元動的解析に限れば、逸散減衰の評価も含め、解析結果に及ぼす境界条件設定の影響が大きいにもかかわらず

ず、現在慣用されている解析手法の妥当性が十分に確認されていない。

以上のような現状を踏まえ、本研究ではまず、ロックフィル材料の動的変形特性に及ぼす試験条件の影響を明らかにするとともに、原位置試験結果との対応について考察を加える。次いでフィルダムの基礎地盤である河床砂礫の動的変形特性に及ぼす各種因子の影響を調べ、さらに、試験方法がロックフィル材料の動的強度特性に及ぼす影響を明らかにする。さらに上記の検討結果に基づき、地震時に堤体に作用する地震力の簡易推定法を考究して、その新しい耐震設計法へのアプローチを試みる。

本論文は7章で全体が構成されている。

第1章では、我が国におけるフィルダム建設の歴史を紹介するとともに、その耐震設計方法の変遷について記述した。

第2章では、ロックフィル材料の変形特性に及ぼす室内試験方法の違いの影響を検討した。ロックフィル材料等の粒径の大きな粗粒材料を対象とした室内試験は、供試体および試験装置が大がかりになることから、その試験例が少ないのが現状である。しかし、物性値は原位置に近い応力状態のもとで求められることが望ましいにも拘らず、これらの試験例のほとんどは、直径30～60cm、高さ60～120cm程度の中実円柱供試体を用いた繰返し三軸試験によって行われている。そこで、地震時における原位置の応力状態に近いと考えられる大型繰返しねじり単純せん断試験（供試体寸法：外径80cm、内径40cm、高さ80cm）によりロックフィル材料の動的変形特性を求め、三軸試験結果との関連性を明らかにし、両者の特性を検討した。

第3章では、堆積年代の異なる河床砂礫の動的変形特性を、凍結サンプリング法で採取した不攪乱供試体を用いて求め、変形特性に影響を及ぼす因子を明らかにした。さらに河床砂礫の再構成供試体による試験結果を不攪乱供試体のそれと比較し、長期間の堆積に基づくセメンテーションの影響について検討を加えた。

第4章では、室内試験と原位置試験による盛土の剛性の比較を行った結果について検討している。すなわち、微小ひずみ領域におけるロックフィルダム材料の剛性については、高精度の変位計を用いた単調載荷と繰返し載荷の室内試験より、またロックフィルダムについては、原位置の弾性波探査・PS検層より求め、種々の方法から得られたこれ等剛性の関連性を明らかにするとともに、ロックフィルダムの地震時の挙動解析の立場からその特性に考察を加えた。

第5章では、ロックフィル材料の室内試験によるせん断強度の求め方について整理したうえで、その単調載荷試験と繰返し載荷試験結果を示し、動的強度特性に及ぼす繰返し回数、ひずみレベル、相対密度、初期拘束圧、初期せん断応力、試験方法等の諸要因の影響を調べるとともに、静的強度と動的強度の関連性について検討を加えた。

第6章では、第2章、第4章で明らかにしたロックフィル材料の動的変形特性と在来の多くの地震波記録に基づき、動的解析のための入力物性値評価方法の妥当性を検証した。次いで、フィルダムに作用する地震力評価の指標としてすべり土塊の最大平均加速度に着目し、堤体に作用する地震力分布に与える地震動の周波数特性の影響を動的解析手法を用いて評価するとともに、その簡易推定法を示した。

第7章では、前章までに得られた結論をとりまとめ、今後研究すべき課題について言及した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 岐 祥 介

副 査 教 授 三 田 地 利 之

副 査 教 授 鏡 味 洋 史

副 査 助 教 授 澁 谷 啓

学 位 論 文 題 名

フィルダム堤体材料の動的変形・強度特性と 地震時安定解析への適用に関する研究

近年、国内では長野県西部地震や千葉県東方沖地震、海外ではMexico地震、Loma Prieta地震等において近代的な施工法で築造されたフィルダムの堤頂部で、現行の震度法の設計震度を大きく越える地震動が観測されている。これらのダムサイト近傍で発生した地震に対して、ロックフィルダムの被害は幸いクラックの発生程度で済んだが、このような事例はさらに合理的なダムの耐震設計法の発展を促した。

地震時の安定解析のため堤体に作用する地震力を求める際、動的解析は極めて有効な手段となるが、解析手法および入力するフィルダム堤体材料の物性値の妥当性が課題となる。また、安定性の評価では、材料の繰返し応力に対する強度特性の把握が重要となる。

そこで本論文は、フィルダム堤体材料の動的変形特性および動的強度特性に及ぼす試験条件、供試体の初期条件、試験方法の相違等の影響に検討を加えた他、フィルダムの現行の耐震設計法、観測された地震動記録や堤体の応答特性を考慮した新しい耐震設計手法についても考察を加えている。

本研究は以上の背景の下で行われている。本論文は7章で全体が構成されており、章毎に得られた結果を以下に要約する。

第1章では、我が国におけるフィルダム建設の歴史を紹介するとともに、フィルダムの耐震設計方法がどのように変遷してきたかについて記述している。

第2章では、フィルダムの築堤材料の過半を占める粗粒材料を対象として、原位置における地震時の応力・ひずみ状態を近似的に再現できる繰返しねじり単純せん断試験(CTSS)と繰返し三軸試験(CTX)を実施し、前者の試験結果から砂質土とフィルダム堤体材料の繰返し変形特性を把握すると同時に、両試験結果を比較して試験法の違いがもたらすせん断剛性率 G 、減衰定数 h 等の物性値の相違点を明かにしている。すなわち、CTSSの結果をもとに、フィルダム堤体材料の G 、 h を、それらに影響を及ぼす要因ごとに整理して、各種要因の中でも、せん断ひずみ γ 、拘束圧 σ 、および間隙比 e の影響が大きく、フィルダム堤体材料の G 、 h は、砂質土に準じて拘束圧と間隙比の関数で表現され、また、フィルダム堤体材料の G 、 h はほぼ同じ相対密度の砂質土に比べて大きく、 γ の増加にともなう G 、 h の変化は砂質土よりも小さいひずみから起こり始め、フィルダム堤体材料の h は、一般的に砂質土に比べて大きいとしている。

第3章では、河床砂礫地盤より凍結サンプリング法で採取した不攪乱供試体および再構成供試体についての一連の物理試験、力学試験の結果より、先ず、最大粒径が170~300mm程度の試料についても不攪乱供試体の繰返し変形特性から求めたせん断波速度 V_s と原位置地盤の V_s が一致しており、原位置での変形特性を再現する良質な不攪乱試料が凍結サンプリング法により採取可能なことを確認している。また、室内試験より求めた G が、不攪乱下部砂礫層供試体、不攪乱上部砂礫層供試体、再構成供試体の順に大きいことについては、不攪乱供試体と再構成供試体との間の、堆積年代効果によるセメンテーションや粒子の堆積構造の差異に起因するとしている。さらに、不攪乱供試体と再構成供試体の $G/G_0 \sim \gamma$ 関係は、ほぼ一致しており、原位置の G_0 および再構成供試体による $G \sim \gamma$ 関係を求めることにより、原位置での $G \sim \gamma$ 関係の把握が可能なることを明らかにしている。

第4章では、試験の単純化を目的とした三軸試験装置を用いた単調載荷試験と繰返し載荷試験との関連性についての検討から得た成果を述べている。まず、三軸セル内に高精度のひずみ計を設置し、データの高速サンプリングを行うことにより、 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ の微小ひずみ領域の弾性係数が測定可能なことを示している。次に微小ひずみ領域における変形特性に着目し、豊浦砂およびフィルダム堤体材料についての単調載荷および繰返し載荷試験結果を比較して、両試験で得られた弾性係数はよく一致すること、およびフィルダムにおいては、原位置の弾性波探査から求めた V_s と室内試験から求められた V_s とがほぼ一致することを確認している。これらの知見は、フィルダム堤体材料の微小ひずみ領域における変形係数が、繰返し試験に較べて実施が容易な単調載荷試験により適切に求め得ることを明らかにしている。

第5章では、良く締固めたフィルダム堤体材料の繰返し載荷試験を行い、非排水繰返し載荷試験では、繰返し回数の増加に伴いひずみが増大し、間隙水圧は90%~100% 近くまで急激に上昇するが、液状化型の破壊は発生しないこと、繰返し載荷に対する強度と、相対密度、平均主応力および初期せん断応力との関係は、定性的には密な砂における特性に一致していること等を明らかにしている。一方、繰返しねじり単純せん断試験の結果より、破壊時の繰返し応力比は平均主応力が小さい程大きく、等方圧密条件下での繰返しせん断強度は、異方圧密供試体のそれよりも大きい傾向にあること、および初期せん断応力が供試体の体積膨張を生じる大きさの場合、繰返しせん断強度の増加が認められること等、ロックフィル材料の繰返し強度特性に関する多くの知見を述べている。

第6章では、種々の周波数特性を持つ地震動がフィルダム堤体の地震力に及ぼす影響を、動的解析を用いて評価し、堤体の最大平均加速度 $\overline{a_{m,x}}$ の簡易推定手法について示している。すなわち、計算プログラムQUAD-4におけるRayleigh減衰のパラメーター α の値としては、せん断梁理論による(等価逸散減衰)+(内部減衰)の振動数特性と実測を用いた振動解析による検証から、0.8程度が適当であるとしている。この手法において、入力地震動は水平成分のみとし、堤体応答加速度も水平成分のみを用いて $\overline{a_{m,x}}$ を求めても、入力および応答に水平および鉛直の2成分を考慮したときに比べ、解析結果に及ぼす誤差は10%程度であり、水平成分のみから $\overline{a_{m,x}}$ を求め得ることが示されている。また、 $\overline{a_{m,x}}$ は、対象とするすべり土塊についての等価なモーメントおよび水平力の合力から求める2つの方法があるが、両者の差は最大で5%程度で、計算が簡単な水平合力から $\overline{a_{m,x}}$ が求められることを踏まえ、入力地震動の加速度応答スペクトルが与えられたとき、滑り円弧の深さ y/H の値に応じてある周波数範囲についてのスペクトルの平均値 S_{sm} を求めれば、 $\overline{a_{m,x}}$ を簡易に推定できることを示している。

第7章は本論文の結論で、各章で得られた結果を要約し今後の課題について述べている。

これらの成果の一部は1991年制定の「フィルダムの耐震設計法指針(案)」に反映され、新規および既設フィルダムの耐震安定性の検討に広く活用されている。

以上のように、本論文は動的解析におけるフィルダム堤体材料の物性値が室内試験によっ

て精度良く求められることを先ず明らかにするとともに、これらの成果に基づき、本論文に示す動的解析手法の妥当性を、原位置で観測された地震動記録を用いて検証する等、地震時に堤体に作用する地震力分布を明らかにしており、フィルダムの耐震設計法の発展に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格ある者と認める。