

1.1 コンクリートダムの物性値分布特性及び動的特性に関する研究

研究年度：令和3年度

研究分野：ダム構造・設計及び施工に関する調査研究

調査研究名：コンクリートダムの物性値分布特性及び動的特性に関する研究

研究者：安田成夫

【要約】

本研究は、重要な社会基盤施設の一つであるコンクリートダムを対象として、堤体構造の物理特性を踏まえた地震時安定性の評価手法を開発するものである。1995年兵庫県南部地震を契機に、「大規模地震に対するダムの耐震性能照査指針（案）」が作成され、ダムの耐震性能評価が試行されている。現在、既設ダムの耐震性能の評価は、当該ダムで記録された地震波を用いて弾性係数・減衰定数といった物理特性を同定して検討するが、当初想定 of 物理特性と乖離している事例が少なからず存在する。耐震性能照査によりダムの安定性を合理的に説明するために、実際の物性値を用いて評価する必要がある。

本研究は、ダム堤体の物理特性をダム堤体で記録された地震動および原位置試験によって把握する手法を開発すること目的としている。なお本研究の成果はマスコンクリートで築造された、ダム以外の大規模構造物にも適用が可能と考える。

【キーワード】

コンクリートダム、弾性係数、動的挙動

【背景・目的】

地球温暖化による気候の極端化現象により、近年我が国は未曾有の水害に見舞われるようになった。行政的にも国土強靱化に向けた施策が発出されているところであり、地震国である我が国は、南関東直下型地震、相模湾を震源とした関東大地震、東南海・南海地震の連動型地震が想定されている。大規模構造物であるダムは一旦変状があれば、ダム下流域住民の人的・経済的被害は甚大となる。したがって、ダムの物理特性を正確に把握することによって様々な事象下におけるダムの耐震安定性を確認しておく必要がある。

①コンクリートダムの堤体材料であるマスコンクリート（以下、コンクリート）の力学特性は、室内試験結果に基づいて設定されている。しかしながら、室内試験体としての寸法効果、あるいは室内一軸試験は原位置の応力状態が再現されていないことから、過小な値として評価される傾向にある。

②大規模なコンクリート構造物の弾性係数は、構造物全体に一様ではなく拘束条件に対応した分布特性を有していると考えられる。室内試験では、試験機器の制約から分布特性を評価することはできない。

以上、実際の応力状態の違いによる弾性係数への影響を明確にすることにより、コンクリートダムの精緻な耐震性能評価が可能となる。本研究は、室内・原位置といった試験法の違いにより得られる物理特性を評価することであり、学術的かつ実務的に意義があると考えられる。

1. コンクリートの弾性係数の拘束圧依存性

本研究は、コンクリートダムの堤体材料であるコンクリート弾性係数の同定方法の明確化を目的としている。そのため、実際の力学特性が明確な既設コンクリートダムの弾性係数を、原位置試験である孔内水平載荷試験、弾性波探査試験によって求める。孔内水平載荷試験のためのボーリングは、ダム堤体天端から鉛直方向に穿孔することになり、計測される弾性係数が深度方向に増加することが予想される。孔内水平載荷試験は、試験機を孔壁に圧着することにより孔壁を拡張させる引張側の弾性係数を深度毎に計測することになる。弾性波探査試験は、ボーリング孔内に受振器を圧着して、起震源からの振動の到達時間を計測することにより、弾性波速度・弾性

係数・ポアソン比を求める。過去に沢田ら（1977）が幾つかのロックフィルダムにおいて、ダム堤体の弾性波速度を求めている。

次に、原位置試験で得られたコンクリートダムの物性値を、ダム堤体-基礎岩盤解析モデルの入力値とし、当該ダムで記録された地震波形による同定・再現解析を通じて設定した入力値の妥当性を検証する。既往の重力式コンクリートダム堤体の動的応答解析では、設計時の物性値が過小評価される傾向にある。

既設コンクリートダムの耐震性能照査では、堤体コンクリートの物理特性を設計時の室内試験結果、あるいは堤体表層部から採取したコンクリートコアを用いた室内試験結果から設定している事例が多い。

本研究は、第一に、コンクリートの物性値を堤体内部において直接計測する手法を確立し、計測値は建設当初に設定した弾性係数値と異なること、第二に、大規模構造物の物性値は深度方向に一様ではなく拘束圧依存性を有することを明らかにすることであり、ここに独自性がある。

原位置試験を実施するダムは地震波形記録が蓄積されていることが前提である。有限要素法によってダムをモデル化して地震時の再現解析を実施する。その同定過程において、原位置試験で直接得られた物性値分布の妥当性を検証することに創造性がある。

震源近傍に位置するコンクリートダムの地震時安定性を有限要素法によって検討する際、堤体の物性値である弾性係数として、設計時の値を用いるのが一般的であるが、固有値解析によって求まる弾性係数値との間に大きな乖離が認められる場合がある。堤体天端/基礎に関する伝達関数が、解析値と実測値では一次固有周波数が一致しない。近年、岩石質材料にセメントと水を混合（CSG : Cemented Sand and Gravel）して堤体を構築する台形 CSG ダムが建設されている。CSG は、コンクリートとロックフィル材の中間的特性を有している。北海道胆振東部地震の震源近傍に位置する台形 CSG ダムで、大きな地震加速度が記録され、地震時再現解析を実施したところ、固有値解析から求めた弾性係数は設計時のその3倍程度大きな値であった。このことから、設計時の弾性係数は室内一軸試験で求めた値で

あるのに対して、実際の構造物内部の応力状態は試験とは異なっており、完成後の構造物の弾性係数は設計時に得られた弾性係数とは大きく異なるのでは、との着想に至ったものである。

ロックフィルダムを構成する岩石質粗粒材料の拘束圧依存性は、沢田ら（1977）、Yasuda and Matsumoto (1994)によって明らかにされている。図-1に示す粗粒材料の弾性係数は、七ヶ宿ダムロック材の繰返し三軸試験結果（図中の○）から求めた。その成果に、コンクリートの弾性係数と拘束圧に関する志知ら(2005)の研究結果(図中の□)と CSG の弾性係数と拘束圧の関係(図中の△)を予想して示した。

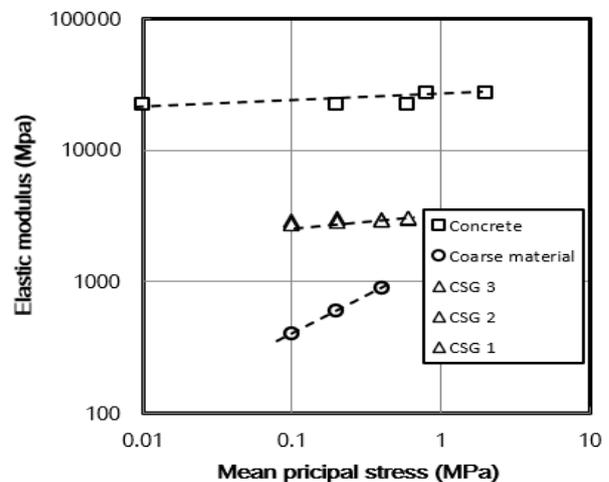


図-1 弾性係数と拘束圧との関係
(コンクリート、CSG、粗粒材料)

岩石質粗粒材料とコンクリートの弾性係数は、室内試験結果を示している。本図には、CSG の弾性係数と拘束圧依存性も模式的に示している。ここで、岩石質粗粒材料、CSG、コンクリートの弾性係数と拘束圧を両対数表示している。コンクリートの弾性係数は、他の材料よりも高い値を示すものの、拘束圧依存性は低い(志知ら,2005)。CSG についてもコンクリートと同様の傾向が確認されているが、弾性係数の拘束圧依存性は高くはないと予想された。一方、岩石質粗粒材料は、粒状体であるため拘束応力の影響を受けやすいと考えられる(Yasuda and Matsumoto, 1994)。実際に、CSG の供試体を作製し室内三軸試験を実施したところ、弾性係数の拘束圧依存性を確認した。

大規模な土木構造物の弾性係数は、構成材料のセメントの有無にかかわらず、深度方向に増加するのではないかとの発想を得た。また、セメント系 CSG の弾性係数について、原位置試験の値と設計時の値が乖離していること、さらに、拘束圧依存性があることが室内試験により明らかになった。このことから、コンクリートの弾性係数についても同様の傾向があり、何らかの方法により確認する必要があるとの着想に至った。

2. 室内試験による CSG の弾性係数の拘束圧依存性

構造材料としてのコンクリートの弾性係数の拘束圧依存性は、志知ら(2005)をはじめ、他の研究者らによって指摘されていたものの、実際の構造物を対象とした試験手法の限界から研究事例が極めて少ないのが現状である。

本研究では、コンクリートの実際の弾性係数を明らかにするとともに、その拘束圧依存性を原位置試験により明確にする。ただし、室内試験での弾性係数の確認は試験機の制約から困難と判断した。

コンクリート構造物から採取したボーリングコアの変形・強度特性は、一軸圧縮試験で求められる。しかしながら、構造物内部の応力状態を再現するためには、高拘束圧下の三軸状態で試験を実施する必要があり、使用する試験機の能力に制限されるため、実際は困難である。また、室内試験の三軸状態は、いわゆる平面応力状態であり、変位拘束となる実際の状況とは異なると考えられる。

図-2 は、実際にダム本体に使用されるセメントで固化した岩石質材料 (CSG) の 91 日材齢の三軸圧縮試験結果である。拘束圧は 0.1、0.2、0.4、0.6 N/mm^2 である。試験は同一供試体を用いて弾性領域内における段階的昇圧試験である。CSG は、コンクリートに比べて弾性係数が低く、拘束圧が上昇するにつれて初期弾性係数が上昇する。

供試体 3 本の室内試験結果を、弾性係数と拘束圧の関係について図-3 に示す。同一物理条件の供試体であり、バラツキがあるものの弾性係数の拘束圧依存性が認められる。

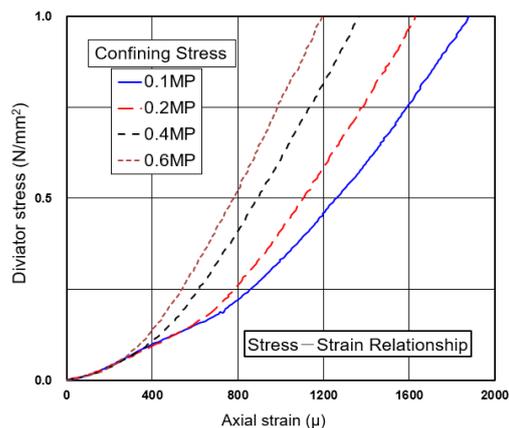


図-2 三軸試験における応力-ひずみ (CSG)

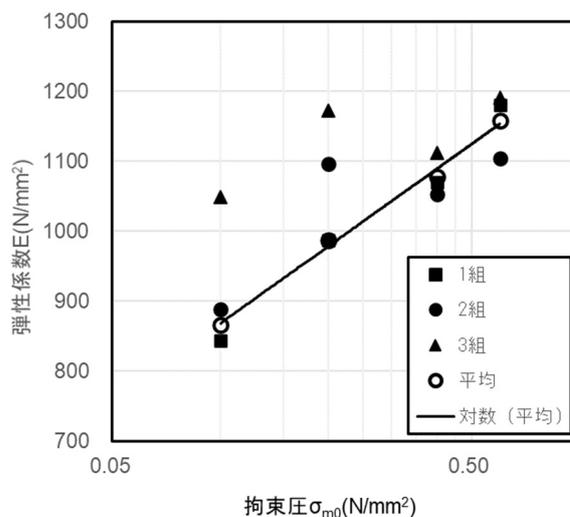


図-3 弾性係数と拘束圧との関係 (CSG)

3. 原位置試験によるコンクリートの拘束圧依存性

本研究では、図-4 に示すように、実際のコンクリートダム天端から穿孔した $\phi 66\text{mm}$ のボーリング孔を活用した孔内水平載荷試験を実施した。図-1 に示した室内試験結果のように、コンクリートの弾性係数も軽微であるものの拘束圧依存性が考えられる。側方変位が拘束された平面ひずみ状態であり、実際の拘束応力状態を再現した変形試験と考えられる。しかも拘束応力状態は深度が深くなるにつれて大きくなり、弾性係数の値もそれに伴い上昇し、その上昇量は、室内試験の場合に比べて高いことが想定される。

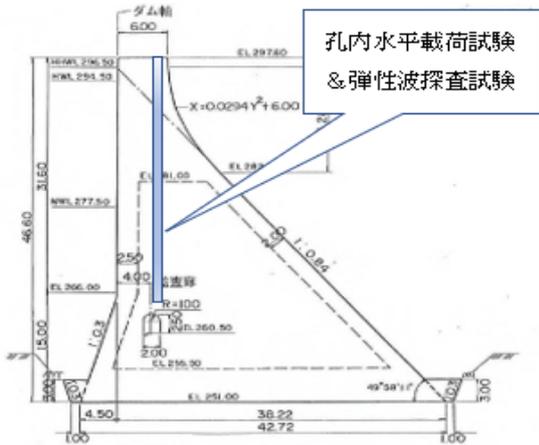


図-4 実ダムでの孔内水平載荷試験

図-5 は、セメント系 CSG で築造されている台形 CSG ダムに、 $\phi 66\text{mm}$ のボーリングを穿孔し孔内水平載荷試験により、深度方向の弾性係数を求めた結果である。弾性係数は、原位置試験によっても、深度方向に増加することが明らかとなった。弾性係数のデータが深度方向に離散的になっているのは、ダム堤体材料である CSG の単位セメント量を発生する応力に応じて変えていることによる。単位セメント量が 60 kg/m^3 から 80 kg/m^3 に増えると弾性係数は急激に増加している。弾性係数が深度方向に増える傾向にあることは、拘束圧の増加に伴い弾性係数が増加することを意味する。

孔内水平載荷試験機は、風袋を孔壁に押しつけて弾性係数を計測する機構であり、引張側の弾性係数を表すことになる。そこで、孔水平載荷試験で利用したボーリング孔を再度用いて弾性波探査試験(図-6 参照)を実施した。この試験は、縦波である P 波と横波である S 波を計測することが可能であり、S 波とコンクリート密度によって弾性係数が、P 波と S 波によってポアソン比が求められる。弾性波探査と孔水平載荷試験の弾性係数を比較することによって検証が可能となる。

以上の考察により、コンクリートの弾性係数の拘束圧依存性を明らかにする原位置試験として、孔内水平載荷試験及び弾性波探査試験が有効であると考えられる。加えて、ボーリング穿孔時に採取したコア自体の強度を、エコーチップ硬さ試験機により明らかにすることによって、原位置試験結果との対比

が可能となる。

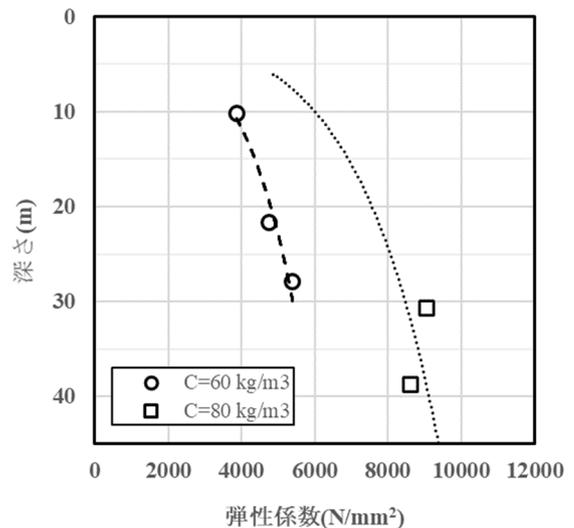


図-5 深さと弾性係数の関係 (GSG)

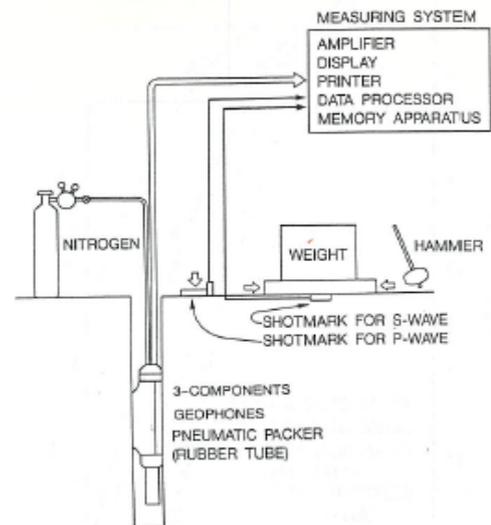


図-6 弾性波探査試験

原位置試験を実施するコンクリートダムは、安全管理用の地震計によって多数の地震波形が記録されていることが基本となる。それらの地震波形記録から、ダム堤体の固有値解析によって固有周波数を求めることにより、堤体の弾性係数を同定することが可能となる。さらに、当該ダムで記録された地震波形を用いて三次元モデルによる動的応答解析を実施し、応答加速度時刻歴の比較を行うことで弾性係数の検証精度を高めることが可能となる。

近年の地球温暖化による気候の極端化現象を踏まえ、既設ダムの再生事業が推進されている。ダム再生では、既設ダムの健全性確認はボーリング調査

によるコア性状の確認、採取コアによる物理・力学試験が実施される。ボーリング孔を利用した原位置試験からも有益な情報が得られると考えられる。

原位置試験で使用する孔内水平載荷試験機、弾性波探査試験機、エコーチップ硬さ試験機は全国的に数量が限られているものの調達が可能である。ただし、ボーリング削孔については既設ダムの健全性調査時期と調整が必要となる。

おわりに

本研究は、令和4年度科学研究費助成事業科研費として独立行政法人日本学術振興会へ申請したものである

【参考文献】

- 1) 沢田義博, 高橋 忠, 櫻井章雄, 矢島 浩(1977), “ロックフィルダムの物性値分布特性および堤体の動的的特性 —弾性波動に基づく考察—”, 電力中研究所, No.377008.
- 2) 志知昌人, 伊藤睦, 水野英二(2005), “三軸圧縮下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化”, 土木学会第60回年次学術講演会, 土木学会, pp.1147-1148.
- 3) Yasuda N. and Matsumoto, N. (1994): "Comparisons of deformation characteristics of rockfill materials using monotonic, cyclic loading and in-situ tests", Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, No.2, pp.162-174. 1994.4