

平成 22年 5月 21日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560462

研究課題名（和文） 既設ダムコンクリートの力学的特性と内部応力の推定

研究課題名（英文） Study on the estimation method of the mechanical characteristics and internal stresses of existing dam concrete

研究代表者

遠藤 孝夫 (ENDO TAKAO)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：90265182

研究成果の概要（和文）：第二次世界大戦後、日本では水力発電のため多くのコンクリートダムが建設された。これらのダムは建設後すでに40年が経過している。これらのダムの適切なメンテナンスのためには、ダムの現状を反映した安全性評価法の確立が望まれる。安全評価法の構築には、コンクリートの力学的特性を精度よく評価し、内部応力の算定精度を高めることが必要と考えられる。このような背景を基に、ここでは、ダムコンクリートのヤング係数を複合理論によりセメントペーストと骨材のヤング係数より推定する手法を提示した。また、重力式ダムのシミュレーションより、コンクリートの自己収縮を考慮すると表面コンクリートのひび割れ発生確率が上昇することが明らかにされた。

研究成果の概要（英文）： Many concrete dams were constructed for hydroelectric power generation in Japan to meet the growing electric power energy demand after World War II. More than 40 years have passed already since the construction of these dams. For their appropriate maintenance, it is necessary to establish a safety evaluation method for dams based on their present conditions. That is, to verify the long-term safety of an existing dam, the mechanical properties of concrete that composes the dam must be accurately evaluated and the upgrade of the prediction method of an internal stress of the dam concrete is also necessary. As a result, it was proposed the method to estimate a Young's modulus of dam concrete from the Young's modulus of the cement paste and the aggregate based on the composite theory. In addition, as a result of simulation of the gravity-type dam it was clarified that the probability of cracking of surface concrete increased when self-shrinkage was considered.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2009年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物のメンテナンスは今後のコンクリート工学の中で最も重要な位置を占めるものと思われる。中でもコンクリートダムは重要構造物のため、常にその安全性の確認が求められ、場合によっては寿命延伸や嵩上げして利用価値を拡大する方策も考えられる。

一方、最近のおよそ20年から30年の間に起こった地震においては非常に大きな地震動最大加速度が観測されている。その始まりは、1971年2月9日に起こったSan Fernando地震で、震源近傍にあるPacoima Damの左岸アバットメントにおいて水平1.25G、鉛直0.75Gの最大加速度が観測された。その後日本でも地震計の改良が進み観測される地震動の強さは年々増大してきており、1993年1月15日に起こった釧路沖地震では水平922gal、鉛直467galの最大加速度が観測された。このように、地震動における最大加速度はかつて構造物が構築された時点で想定されたより大きくなっていることは間違いなく、これをふまえ既設のあらゆる構造物が現在の時点でいかなる安全性を有しているか、あるいはどのくらいの地震荷重に耐えられるかを明らかにする必要性が出てきた。これはダムの分野においても例外ではなく、1995年1月17日に起こった兵庫県南部地震においてダムはほとんど無傷であったが、ダムがどのような地震動にまで耐えられるかという問題は依然残ったままとなっている。その後、マグニチュード8クラスの地震が直下で起こった場合を想定し、重力式コンクリートダムとアーチダムの安全性を解析的に検討した例では、既設のダムが現時点でもかなりの耐震性を有することを示しているが、これをさらに精査するためには建設当時のダムの材料をもとにした正確な物性値の情報が不可欠との結論に達している。また、これらの材料特性を十分に考慮して解析できる解析コードが求められている。

### 2. 研究の目的

上記背景をふまえ、既設コンクリートダムの安全性評価法の標準化に向けて必要なコンクリートの経年劣化を考慮した力学的特性の合理的評価法の確立とこれを基にした常時荷重下のコンクリート内部応力の予測手法の高度化を検討するものである。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、以下の項目を実施する。

(1) コンクリートダム建設にかかわる資料収集とコンクリート特性の把握

既設コンクリートダムを対象に資料を収集・分析し、ダムコンクリートの経時的力学特性の推定法を提示するものである。

①資料収集

②既設ダムコンクリートの経時的力学的特性の推定

(2) ダムコンクリートの使用時（常時荷重下）の内部応力の検討

ダム建設時から将来に至る種々の条件を考慮し、数値シミュレーションによって経年的な常時荷重下のダムコンクリートの内部応力を推定し、ダムの長期挙動の推定に影響を及ぼす要因の特定と影響度を明確にするものである。

①日射による入熱の合理的算定法

②コンクリートの力学的特性の内部応力に及ぼす影響と内部応力

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下の分類に従って整理する。

(1) 既設ダムコンクリートに関する資料収集

(2) 既設ダムコンクリートの経時的力学的特性の推定

(3) 日射による入熱の合理的算定法

(4) コンクリートの力学的特性の内部応力に及ぼす影響評価

以下それぞれの項目について記述する。

(1) 既設ダムコンクリートに関する資料収集

既設コンクリートダム建設時の各種実験や建設方法に関する報告書を収集できた。また、既設ダムに設置した各種計器の観測結果も収集できた。これらより、幾つかのダムについては建設当時の材料や施工方法、コンクリートの諸特性、建設後のダムの性状に関する情報が得られ、今後のダム挙動解析のデータを得ることができた。

(2) 既設ダムコンクリートの経時的力学的特性の推定法の検討

常時荷重下のダムコンクリートの応力算定では、クリープ特性やヤング係数の経時変化が重要な力学的特性となる。クリープ特性については多くの実験データがあるが、ヤング係数についてはほとんど研究されていない。ここでは、ヤング係数の合理的な算定法を導いた。

①基本的考え方

既設ダムコンクリートのヤング係数を求める際、セメントペーストについては既往の実験結果があることを念頭に、コンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料と仮定した。セメントペーストのヤング係数は河角の方法で、骨材のヤング係数は骨材の吸水率に基づく方法で求めることとした。

②具体的手順

まずコンクリートに用いたセメントペーストの水セメント比、材齢より動ヤング係数を算定する。次に、動ヤング係数と静ヤング係数の対応式（実験式）により、セメントペーストの静ヤング係数が求められる。

続いて、細骨材と粗骨材の吸水率を基にそれぞれのヤング係数を求めるものとした。

最後に、コンクリートのヤング係数を、コンクリートが二相モデルで表されるという仮定に基づいて得られた複合理論式のうち、Hashin-Hansen の式にモルタルと骨材の界面に生じるマイクロクラックおよび骨材の境界層の影響に対し、見かけ上骨材のヤング係数が低下すると考え、補正係数を導入した式を用いることにより求めるものとした。

③適用性

中庸熱ポルトランドセメントを用いた既設のアーチダムである黒部ダム、殿山ダム、大美谷ダムおよび奥新冠ダムのコンクリートを選び、セメントペーストと骨材のヤング係数より算定したコンクリートのヤング係数と実測値とを比較し、ここで述べた手法の適用性を検討した。その結果、大美谷ダムではヤング係数の経時変化が他のダムと異なるとともに計算値と実測値の間に若干の相違が見られるが、その他はヤング係数の計算値と実測値がほぼ近似していることが示され（図-1）。

この方法によって、コンクリートの内部応力解析に必要なコンクリートのヤング係数を打設初期より経年的に算定できることになった。

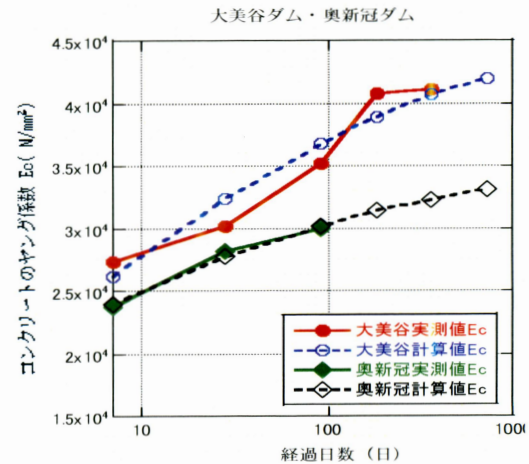
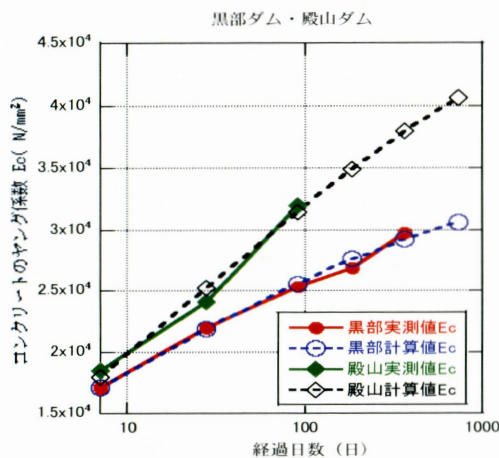


図-1 コンクリートのヤング係数の比較

(3) 密封養生したセメントペーストの弾性波速度の検討

ダムコンクリートに用いられる中庸熱ポルトランドセメントペーストで密封養生した硬化体の超音波速度の実験結果を基に、評価式を示した。これにより、水中養生・密封養生の養生条件によるセメントペースト硬化体のヤング係数の評価が可能となり、(2)の手法を用いることによりダムコンクリートヤング係数の算定が可能となった。

(4) 日射による入熱の合理的算定法の検討

研究代表者らが以前発表した日射による入熱の算定方法を再検討し、直達日射量と天空日射量の算定に必要な定数について検討を加えた。これにより、有限要素法の入力データとして取り入れやすく、信頼できる精度で太陽熱入熱を評価できる方法を導いた。これによって、従来から行ってきた外気温の評価に加え新たに太陽熱による入熱の考慮が可能となった。

(5) コンクリートの力学的特性の内部応力に及ぼす影響と内部応力の検討

①概要

コンクリートの力学的特性が内部応力にどのような影響を及ぼすか、また内部応力を検討するため、ここでは東北地方に建設される予定のTダムを対象としてシミュレーションを行った。予定では、Tダムは、2010年6月より堤体コンクリートの河床部の打込みを開始する予定である。

一般に、重力式コンクリートダムの堤体は、基本三角形が一体であることを前提として設計されている。しかし、ダム堤体はマスコンクリートであるうえ、上下流方向のブロック長さが大きいことによって岩盤による変

位拘束が大きいと、温度応力によってダム軸に平行な方向のひび割れが発生しやすい。したがって、縦継目を設けない面状工法により堤体を構築するにあたっては、堤体の構造上問題となるようなひび割れ（基本三角形を損なう方向のひび割れ）を防止できるよう、検討を行う必要がある。これらの温度ひび割れを防止するためには、その温度応力の大きさ、発生時期、発生要因等を把握し、施工時に適切な対策を施す必要がある。

## ②検討の方法

堤体の解析は、最大断面とした。最大断面の検討では、2次元モデルを使用し、ひび割れ発生危険度の評価を行った。堤体の最大断面となる断面（非越流部の標準断面）を、岩盤を含めてモデル化し、有限要素法で温度および温度応力の解析を行った。堤体のブロック幅はブロック長さ比べて小さいため、ブロックのダム軸方向のひずみに対する拘束は小さいと考えられることから、平面応力状態として扱った。温度応力の計算には、非線形構造解析プログラム”ASTEAMACS for Windows” Ver. 5を使用した。温度応力に関する諸条件は、現時点で判明しているものはそのまま用いることとし、不明であるものは、土木学会コンクリート標準示方書施工編等に基づいて仮定した。解析結果は、温度・主応力・ひずみ・ひび割れ指数等について、適切な着目時期における分布図等として出力した。これらの図から、ひび割れの危険度や傾向について考察した。

ここではTダムに関する標準案参考資料に示されているリフトスケジュールや物性値等を用いて解析を実施したものである。堤体については、設計上の配合区分を反映させた。モデルに含める岩盤の領域は、深さ方向には堤体高さ相当分、水平方向には堤体着岩長の3倍程度とした。温度解析における境界条件の位置と種類では、モデル上の岩盤の底面に、固定温度境界としてダムの最終安定温度9.7℃を与えた。モデル上の岩盤の側面を断熱境界とした。岩盤上面およびコンクリートの大気に接する面は熱伝達境界とし、熱伝達率と外気温を与えるものとした。

応力解析における境界条件としては、モデル上の岩盤の底面で鉛直方向の変位を固定し、モデル上の岩盤の側面で、水平方向の変位を固定するものとした。コンクリートの打込み温度は、打設時の外気温に大きく影響される。そこで、まず外気温を定式化し、それに基づいて各リフトの打込み温度を設定した。外気温については、ダム建設地点における平成16年の実測値（日平均気温）を基に、正弦曲線による近似式を設定した。外気温は、温度解析の熱伝達境界に与える条件値となる。本検討では、現時点で得られている外気温の実測値はそのまま使用し、それ以降は上

記近似式による推定値を使用した。また、年平均気温（9.7℃）は、温度解析の固定温度境界に与える条件値とした。コンクリートの打込み温度は、打設日の日平均気温に等しいものとして設定した。それぞれの設定の根拠については、標準案参考資料を参考としたが、外部コンクリートの断熱温度上昇量などは、得られている物性値より推定した。解析ケースとして、コンクリートの自己収縮を考慮しない場合を「標準A」とし、自己収縮を考慮した場合を「標準B」とした。この際、コンクリートのクリープは有効弾性係数でいずれの場合でも考慮し、自己収縮はJCIの実験式を用いた。なお、ここで凝結の始発は全てのセメントで0.3日とした。

## ③解析結果

解析より、コンクリートの最高温度はいずれの場合も52℃程度に達し、打設後1日～2日の間に生じている。また、最大主応力は自己収縮を考慮した場合に大きくなり2.85N/mm<sup>2</sup>ほどの引張応力が生じている。また主応力方向の最大ひずみは292 $\mu$ に達している。最小ひび割れ指数は、「標準A」で最小値1.39、「標準B」で最小値0.85となりいずれも外部コンクリートが打設された表面部で生じている。

## ④まとめ

内部コンクリートに比べ外部コンクリートには大きな引張応力が作用し、特に下流側表面のコンクリートでは顕著となる。これはひずみも同様であり、これらの部分でひび割れ指数が最小となる。

コンクリートのひび割れ指数は、コンクリートで自己収縮を考えた場合、そうでない場合に比較しかなり小さくなることが明らかとされた。従って、ダムコンクリートの自己収縮を精度よく求め、解析に組み込み、ひび割れを生じさせないようにあらかじめ検討する必要性のあることが明らかとなった。

また、コンクリート内に大きな引張応力を生じさせないためには、冬季養生にも十分注意が必要であることがわかった。

以上のように、重力式コンクリートダムの実施工でコンクリートのクリープと自己収縮を考慮した場合についてシミュレーションを行い、特に自己収縮を考慮すると内部の貧配合コンクリートではひび割れ発生の危険性はさほど増大しないが、富配合となる表面コンクリートではひび割れ発生が生じやすくなることが示された。これより、実施工やメンテナンスで注意を払う項目や、場所が明らかとなった。

今後は、自己収縮の値を精査し、日射や外気温をなどの影響も詳細に検討し、既設ダムの常時荷重下の内部応力の算定精度を向上させたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1) 遠藤孝夫, 李 相勲, 熊谷 崇之: セメントペーストの水和度に基づくダムコンクリートのヤング係数推定法の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 32, 2010, 査読あり (掲載決定)

2) T. Endo, M. Ishikawa, M. Kawasumi : Determination of the static elastic constant of concrete derived from the elastic constant of cement paste, Proceedings of the eighth international conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures, ISE-SHIMA, JAPAN, 30 Sep.-2 Oct. 2008, pp. 97-102, 査読あり

[学会発表] (計4件)

1) 遠藤孝夫, 李 相勲: 中庸熟ポルトランドセメントペースト硬化体の弾性波速度の推定, 第64回セメント技術大会講演要旨, 2010.5 (東京) (発表予定)

2) 小笠原匠, 渡邊克樹, 遠藤孝夫, 李 相勲: コンクリートダムの打設シミュレーションとひび割れ係数の検討, 平成21年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-38, 2010.3 (日本大学工学部)

3) 渡邊克樹, 小笠原匠, 遠藤孝夫, 李 相勲: ダムコンクリートのヤング係数推定法の提案, 平成21年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-37, 2010.3 (日本大学工学部)

4) Endo, T., Kagaya, M., Nakazawa, M., Lee, S. H. : Determination of the Static Young's Modulus of Concrete from the Young's Modulus of Cement Paste, 韓国防災学会2008年学術発表大会論文集, pp. 101-104, 2009.2

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遠藤 孝夫 (ENDO TAKAO)  
東北学院大学・工学部・教授  
研究者番号: 90265182

### (2) 研究分担者

石川 雅美 (MASAMI ISHIKAWA)  
東北学院大学・工学部・教授  
研究者番号: 60347896