

公益社団法人 土木学会 平成 28 年度土木学会吉田賞 (論文部門) 受賞

論文名：ダムコンクリートにおける自己収縮ひずみの評価方法に関する研究

出典：[土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.2, 97-108, 2016]



土木事業本部 ダム技術部
佐藤 英明

ご承知の通り、コンクリートダムは巨大なマスコンクリートですので、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れの制御が極めて重要で、種々の対策が行われています。しかし、温度ひび割れの対策がとられているにもかかわらず、温度の影響だけでは十分に説明できないひび割れが発生することがあり、このような発生原因の特定が難しいひび割れについては養生不足などといった施工不良として取り扱われることが多いのが現状でした。

そのような中で、ある委員会に参画しているとき、大型橋梁の基礎で自己収縮と考えられるひび割れが発生した事例からヒントを得て、ダムコンクリートでも同じ現象が起こりえるのではないかと考えました。しかし、当時、ダムコンクリートの自己収縮についての研究は殆どありませんでした。そこで、幾つかのコンクリートダムの施工現場で、ダムコンクリートの自己収縮の研究にとりかかったのが最初（平成10年頃）です。その後、私に関わった7箇所のコンクリートダムの現場で基礎実験を行ってみると、ある種のセメントやある配合条件では非常に大きな自己収縮ひずみが発生することが明らかとなりました。

今回、土木学会吉田賞（論文部門）を受賞した論文は、このような試験結果をとりまとめ、コンクリートダムで発生したひび割れの発生原因の中には、これまで単位セメント量の少ないダムコンクリートでは考えられていなかった自己収縮ひずみの影響があることを示したものです。また、粗骨材の最大寸法が150mmにもなるダムコンクリートの自己収縮の試験方法、小型供試体に

よるフルサイズ骨材の自己収縮特性の推定方法，ならびに設計時における推定式を提案したもので，今後のコンクリートダムにおけるひび割れ制御の設計，施工へ適用できるものです。

なお，土木学会吉田賞は，日本のコンクリート技術の基礎を築いた吉田徳次郎博士の功績を称え，コンクリートおよび鉄筋コンクリートの技術の進歩向上に寄与することを目的として，昭和36年に創設され今回で57回となります。その中で，「論文部門」は，創設当初からの歴史ある賞であり，土木学会の刊行物に発表されたコンクリートに関する単独の論文，報告等で，コンクリート工学の発展に大きく貢献したと求められる論文を対象として授与されています。

これまでの受賞者は，我が国のコンクリート工学を代表する蒼々たる先生方が大半を占めておりますが，このたび2016年4月の土木学会論文集に掲載された投稿論文が高い評価を受け，土木学会吉田賞選考委員会での全委員による決選投票の結果，候補論文4編の中から本論文1編のみが選考され，今回の受賞となりました。

土木学会からご連絡を頂いたときには，全く予想もしていなかった栄誉ですので大変驚きましたが，表彰式まで中々実感が沸きませんでした。平成29年6月9日ホテルメトロポリタンエドモントで開催された土木学会賞の受賞会場で，コンクリート工学の大先生からの祝福を受け，改めて大変な賞を頂いたことを実感した次第です。

今後は，頂きました「吉田賞」に恥じぬように，より一層精進したいと思います。

最後に，社内外から沢山のお祝辞を頂きましたことを，紙面をお借りして改めてお礼申し上げます。

ダムコンクリートにおける自己収縮ひずみの 評価方法に関する研究

佐藤 英明¹・宮澤 伸吾²

¹正会員 株式会社熊谷組 土木事業本部ダム技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町二丁目1番)
E-mail: hsatoh@ku.kumagaigumi.co.jp

²正会員 足利工業大学教授 工学部創生工学科 (〒326-8558 栃木県足利市大前町268-1)
E-mail: smiyazaw@ashitech.ac.jp

コンクリートダムにおける温度ひび割れの制御, すなわち設計・施工段階における温度規制において, ダムコンクリートの自己収縮ひずみの影響については, 貧配合コンクリートであることなどから無視できる程度とされていた. しかし, ダムコンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類や配合の影響については殆ど明らかとなっていない. 本研究では, フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみの試験方法について検討を行うとともに, 幾つかのダム用セメントを用いたダムコンクリートについて自己収縮特性を明らかにした. また, 施工段階での温度ひび割れの検討で用いる自己収縮ひずみの設計値についても提案した.

Key Words : dam concrete, autogenous shrinkage, thermal stress, full-sized aggregate

1. はじめに

コンクリートダムにおいて, セメントの水和に伴う発熱に起因する温度ひび割れの発生を抑制するためには, 予め堤体内部に発生する温度応力を予測することが重要である. 特に, ダムの着岩部や既設のコンクリートへの打継部では, 温度変化に伴う体積変化が外的に大きな拘束 (外部拘束) を受ける. また, ダムは典型的なマスコンクリートであり躯体内部では断熱的に温度が上昇するため, 内部と表面部とでは不均一な温度分布が生じ, 内的にも体積変化が拘束 (内部拘束) されることとなる. 実構造物では, これらの内的, 外的な拘束が複雑に絡み合う現象となるが, 温度変化に伴う体積変化が拘束されてひび割れが生じた場合, ダムの安定性, 耐久性ならびに水密性が損なわれる可能性があるため, 事前に温度ひび割れの発生を制御するための適切な温度規制計画を策定しなければならない.

近年, 一般のマスコンクリートにおける温度ひび割れ制御については, セメントの水和に起因するひび割れ照査として温度変化と自己収縮による体積変化を考慮した3次元有限要素法による温度応力解析に基づき検討されることが標準的となってきた¹⁾. 同様に, 大規模にリフト打設されるコンクリートダムの初期ひび割れの検討に

おいても, コンクリートの配合区分に応じたセメントの水和熱や外気温に伴う温度変化を反映させた有限要素法による温度応力解析が行われる趨勢にある.

しかし, ダムコンクリートは単位セメント量の少ない貧配合のコンクリートであることから, 国内外においてダムコンクリートの自己収縮はほとんど注目されてこなかった. そのため研究事例は極めて少なく, 十分にデータがないため, これまでコンクリートダムの温度応力解析において自己収縮の影響は考慮されていないのが現状である^{2,3)}.

一方, 近年中小規模のコンクリートダムに発生したひび割れの中に, 温度応力や乾燥収縮などの影響だけでは十分に説明できないひび割れが見受けられている⁴⁾. これについて, 筆者らは貧配合のダムコンクリートであっても自己収縮がひび割れ発生の重要な要因となり得るのではないかと考えた.

そこで本研究では, 粗骨材最大寸法の大きい硬練りのダムコンクリートの自己収縮について, 試験方法を検討するとともに, それによって各種セメントを用いたフルサイズ骨材によるダムコンクリートの自己収縮特性について実験的に明らかにした. また, ウェットスクリーニングによる小型供試体の自己収縮試験結果からフルサイズ骨材のコンクリートの自己収縮特性を推定する方法を

示すとともに、各種ダム用セメントを用いたダムコンクリートにおける自己収縮ひずみの設計値についても提案した。

2. 既往の研究

ダムコンクリートの自己収縮に関する研究は、古くは1940年にDavisによって、セメントの種類によっては長期的には 100×10^6 を上回る自己収縮ひずみが生じると報告されている⁵⁾。1969年には、HoukらによってDworshakダムのコンクリートについての試験結果⁶⁾が報告されており、養生温度が高くなると混和材の種類によっては 100×10^6 を超える自己収縮ひずみが生じること、また混和材の中ではフライアッシュを30%置換したセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみが最も小さな値を示すことなどが確認されている。一方、ACI207委員会によれば、フルサイズ骨材での試験結果ではないものの幾つかのダムの試験結果から、貧配合かつ硬練りのダムコンクリートにおける自己収縮ひずみは材齢1年でも数 10×10^6 程度であるという報告⁷⁾がある。

我が国の重力式コンクリートダムでは、一般に部位によって異なるコンクリートの配合が用いられており、単位セメント量が少なく経済性を有する内部コンクリートと水密性や強度、耐久性を有する外部コンクリートに大別することができる。

筆者らは、これらの内部および外部コンクリートについて、セメントの種類および養生温度を変えた場合における自己収縮ひずみについて研究を行っており、ダム用の高炉セメントB種を用いた外部コンクリートでは 100×10^6 を上回る自己収縮ひずみが発生すること、ならびに養生温度によってはさらに大きな収縮ひずみとなることなどを明らかにしている⁸⁾。また、最大骨材寸法150mmのフルサイズの粗骨材を用いた実際のダムコンクリートの自己収縮ひずみは、ウェットスクリーニングしたコンクリートに比べて小さくなることも明らかにしている⁹⁾。

緒方らによっても、大型の横置き角柱供試体を用いたフルサイズ骨材によるダムコンクリートの試験の結果、無視できない自己収縮ひずみが生じることが報告されている¹⁰⁾。

しかし、これらの研究報告では、一部を除きその殆どがウェットスクリーニングしたコンクリートによる試験結果である。また、供試体形状や寸法、測定方法など自己収縮ひずみの試験方法が研究者により異なるため、実験データを単純に比較することができない。

このように、我が国で用いられているダム用セメントによるダムコンクリートの自己収縮特性は明らかにされていないのが現状である。また、ウェットスクリーニ

ングしたコンクリートによる自己収縮ひずみを評価することの妥当性やフルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみの計測方法などについて、これまで十分に検討されていないと考えられる。

3. フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみの試験方法の検討

(1) 従来の試験方法によるダムコンクリートの自己収縮の測定

コンクリートの自己収縮ひずみの測定方法については、JCI-SAS-2によれば粗骨材最大寸法30mm以下の場合には原則として $100 \times 100 \times 400$ mm（または500mm）の角柱供試体を用いて行うものとされている¹¹⁾。また、高流動コンクリートの自己収縮試験方法では、埋込型ひずみ計による方法が示されている¹²⁾。

そこで、粗骨材最大寸法が150mmの実際のダムコンクリートの自己収縮ひずみの研究を行うために、従来の方法を踏襲するとともに粗骨材最大寸法を考慮して $500 \times 500 \times 2000$ mmの角柱大型供試体（写真-1参照）を製作して測定を行った⁹⁾。しかし、この試験方法では、供試体重量が大きいため、供試体の移動が容易ではないことや、底面の水分逸散防止処理が難しい面もあった。また、供試体寸法が大型になるほどセメントの水和熱により内部温度が上昇し大きな温度分布が生じるが、横置き供試体では底面部と上面・側面部の放熱状態を同一の条件にするために支点を設けて供試体を設置する必要がある。その際、若材齢時における自重による曲げ変形などの悪影響を避けるための対策が難しいなどの課題もあった。

(2) 供試体の形状に関する検討

横置き角柱供試体における課題を解決するために、粗骨材寸法の大きなダムコンクリートについては、縦型の供試体として鉛直方向の軸ひずみを測定する方法を考えた。また、供試体内部の不均一な温度分布による曲げひ

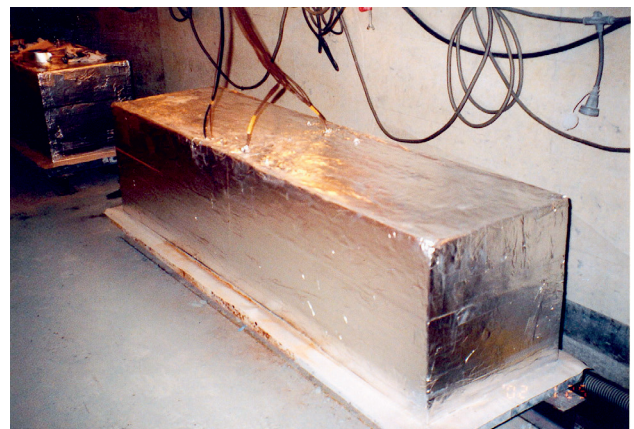


写真-1 500×500×2000mmの角柱大型供試体⁹⁾

ずみが排除できるよう、供試体は側面からの放熱状態が均一となる円柱とすることで、正確な自己収縮ひずみが測定できるものと考えられる。なお、伊代田らはφ100×200mmのサミットモールドを利用したモルタルの自己収縮特性について報告している¹³⁾が、これまで縦型の円柱供試体によるコンクリートの自己収縮試験についての報告はほとんど見られない。

そこで、縦型供試体による試験方法の妥当性を確認するために、角柱横置き供試体との比較試験を行った(写真-2)。比較試験は、簡便のために40mmふるいでウェットスクリーニングしたダムコンクリートを用い、150×150×530mmの角柱供試体およびφ150×530mmの円柱供試体に埋込型ひずみ計(標点距離:L=100mm, 見かけの弾性係数:E≒40N/mm²)を設置して軸ひずみを測定する方法とした¹⁴⁾。

試験に用いたダムコンクリートは、実際のコンクリートダムで用いたダム用の高炉セメントB種(BB55:密度3.00g/cm³, 比表面積4,010cm²/g, 高炉スラグの分量55%(一般の高炉セメントB種では40~45%))による内部および外部コンクリートとした。なお、細骨材は山砂(表乾密度:2.65g/cm³, 吸水率1.03%, 粗粒率2.72)を、150~80mm, 80~40mmおよび40~20mmの粗骨材は硬質砂岩砕石(表乾密度:2.72~2.74g/cm³, 吸水率0.22~0.40%)を用い、20~5mmの粗骨材については山砂利



写真-2 150×150×530mmの角柱供試体用型枠とφ150×530mmの円柱供試体用型枠

(表乾密度:2.64g/cm³, 吸水率0.66%)を用いた。

表-1に、ダムコンクリートの配合を示す。

円柱供試体は、型枠を脱型せずに上面には乾燥防止用のエポキシ系防水剤およびコーキング剤でシールした。角柱供試体については、打設後1日で脱型しアルミ粘着テープを巻き水分の逸散を防止した。円柱および角柱供試体は、各配合ともにそれぞれ2体ずつ作製し恒温恒湿室(20±2°C, RH.80%)にて養生した。なお、型枠による拘束を低減するために、円柱型枠の側面、角柱型枠の底面にはテフロンシート(厚さ1mm)を設置した。

図-1に、それぞれ2体の自己収縮ひずみの平均値について経時変化を示す。一般にコンクリートの自己収縮ひずみは、凝結始発以降のひずみと定義¹¹⁾されており、今回のウェットスクリーニングしたダムコンクリートについても、凝結始発からひずみの測定を行った。なお、セメントの水和熱により供試体は温度変化を生じるので、供試体中心部の温度を測定し温度ひずみを除去した。温度上昇は外部コンクリートで最大5°C程度であり、コンクリートの熱膨張係数については材齢1年後の試験結果(表-5参照)によった。

ここで、凝結始発から材齢約1日までのごく初期材齢で30×10⁶程度の膨張ひずみが測定されたが、収縮ひずみレベルの小さいダムコンクリートでは、膨張ひずみが自己収縮ひずみの評価に及ぼす影響は大きいと言える。しかし、膨張ひずみの発生原因や温度補正のためのごく初期材齢時のコンクリートの熱膨張係数など不明な点も

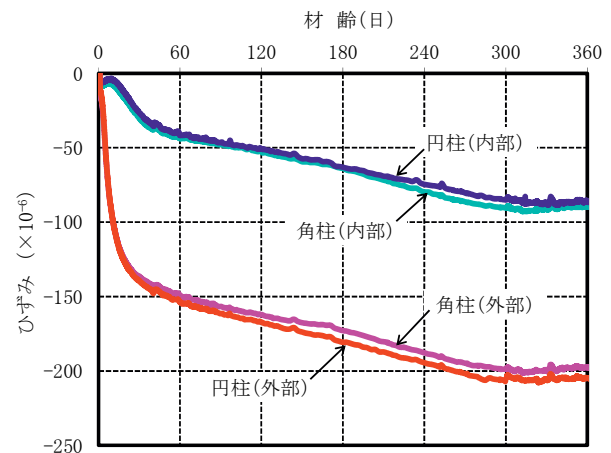


図-1 40mmふるいでウェットスクリーニングしたダムコンクリートの自己収縮ひずみ¹⁴⁾

表-1 ダムコンクリートの配合

配合区分	粗骨材最大寸法(mm)	スランブの範囲(cm)	空気量の範囲(%)	水セメント比W/C(%)	細骨材率s/a(%)	単 位 量 (kg/m ³)								
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G				混和剤 [*]	
									150mm~80mm	80mm~40mm	40mm~20mm	20mm~5mm	Ad-1	Ad-2
内部	150	3±1	3±1	65.4	24	85	130	533	434	520	347	434	0.325	0.016
外部	150	3±1	3±1	45.3	23	86	190	499	428	514	343	428	0.475	0.076

* Ad-1: AE減水剤(リグニン系遅延型), Ad-2: AE助剤(空気連行剤)。

多いのが現状であり、これらの点については今後の研究課題と考えられる。

そこで、本研究では、ダムコンクリートの温度応力の検討において安全側の評価となるよう、最大膨張時以降の収縮ひずみを自己収縮ひずみとして整理した。

図-1 に示すとおり、内部および外部コンクリートともに、一般的な横置き角柱供試体と縦型円柱供試体の試験結果には有意な差異は見られない。これより、いずれの供試体形状によっても自己収縮ひずみは適切に評価できると言える。

(3) 埋込型ひずみ計に関する検討

a) 埋込型ひずみ計の剛性に関する検討

従来、コンクリートに埋め込むひずみ計は、見かけの弾性係数が高いタイプ（例えば、 $E \approx 1,000 \text{N/mm}^2$ ）が用いられているのが一般的であった。その後、若材齢からのコンクリートの内部ひずみを測定する場合に対応するために、低弾性タイプ（例えば、 $E \approx 40 \text{N/mm}^2$ ）の埋込型ひずみ計が開発されてきた。自己収縮ひずみの測定でも、セメントの凝結が始発する初期材齢から測定するため、最近は見かけの弾性係数の小さい低弾性タイプの埋込型ひずみ計が用いられることが多い。筆者らも、ウェットスクリーニングしたダムコンクリートについては、これまで標点距離が 100mm の低弾性タイプのひずみ計を用いてきた。

一方、粗骨材最大寸法が150mmにもなるフルサイズ骨材のダムコンクリートの自己収縮ひずみの測定を行う場合、標点距離の短いひずみ計を使用すると、モルタル分の局所的な収縮ひずみ分布の影響を受け、コンクリート全体としての挙動を正確に把握できない可能性も考えられる。そのため、ひずみ計の標点距離を大きくする必要はあるが、標点距離を大きくしたひずみ計は構造上見かけの弾性係数を小さくすることが難しい。

そこで、見かけの弾性係数が異なる2種類の埋込型ひ

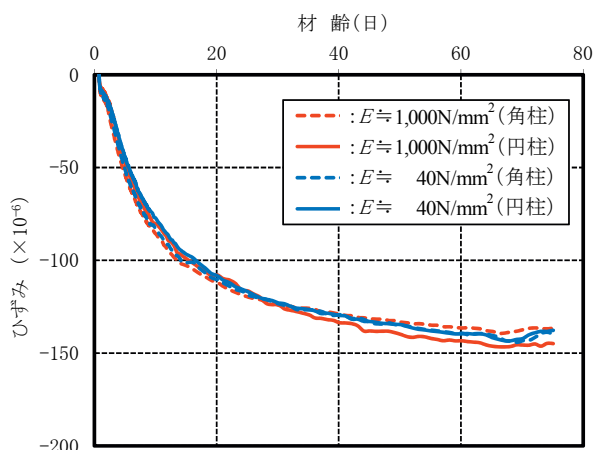


図-2 見かけの弾性係数の異なる埋込型ひずみ計によるダムコンクリートの自己収縮ひずみ

ずみ計による自己収縮ひずみの追従性について、比較試験を行った。試験に用いたダムコンクリートの使用材料は3.(2)と同じとし、配合については自己収縮ひずみが大きい表-1に示した外部コンクリートとして、40mmふるいでウェットスクリーニングして用いた。埋込型ひずみ計は、標点距離が100mmで見かけの弾性係数が異なる2種類 ($E \approx 1,000 \text{N/mm}^2$ および 40N/mm^2) を、それぞれ $150 \times 150 \times 530 \text{mm}$ の角柱供試体および $\phi 150 \times 530 \text{mm}$ の円柱供試体に設置して、コンクリートを打ち込み測定した。

図-2に測定結果を示すが、初期材齢におけるコンクリートの自己収縮ひずみは、いずれの形状の供試体においても埋込型ひずみ計の見かけの弾性係数の違いによらず同等であることが分かる。これより、硬練りのダムコンクリートの自己収縮においては、見かけの弾性係数の高い埋込型ひずみ計でも問題がないことが明らかとなった。

また、一般的な横置き角柱供試体と縦型円柱供試体の試験結果には有意な差異は見られないことから、縦型の円柱供試体による自己収縮ひずみの測定方法は従来の試験方法と同等の結果を得ることができることが確認できた。

b) 埋込型ひずみ計とコンタクトゲージによる自己収縮ひずみの比較

フルサイズ骨材を有するダムコンクリートの自己収縮ひずみの測定については、剛性が高く、標点距離が500mmと粗骨材の最大寸法 ($G_{\text{max}}=150 \text{mm}$) の3倍以上とした埋込型ひずみ計を新たに開発した ($L=500 \text{mm}$, $E \approx 1,000 \text{N/mm}^2$)。

開発した埋込型ひずみ計の信頼性を確認するために、同一供試体においてコンタクトゲージ法 (JIS A 1129-2) との比較試験を行った。試験には前述したダム用の高炉セメントB種によるフルサイズの粗骨材の外部コンクリートを用い、縦型の大型円柱供試体¹⁵⁾ ($\phi 500 \times 1,000 \text{mm}$, 図-3参照) の中央部に鉛直に設置した埋込型ひずみ計の値と供試体表面の円周方向に等間隔に8箇所設置したコ

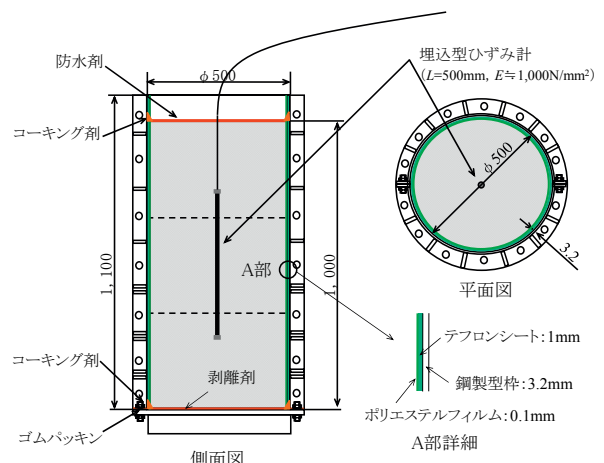


図-3 大型円柱供試体¹⁵⁾

ンタクトゲージ (基長: 300mm, ダイアルゲージの目量: 0.001mm) による鉛直ひずみの平均値を比較した¹⁰⁾。なお, 大型供試体の作製方法は5.(2)に記述するとおりであり, 材齢2日目に脱型して水分の蒸発を防ぐためにアルミ箔粘着シートで全面をシールし, その表面にコンタ



写真3 コンタクトゲージによる鉛直ひずみの測定

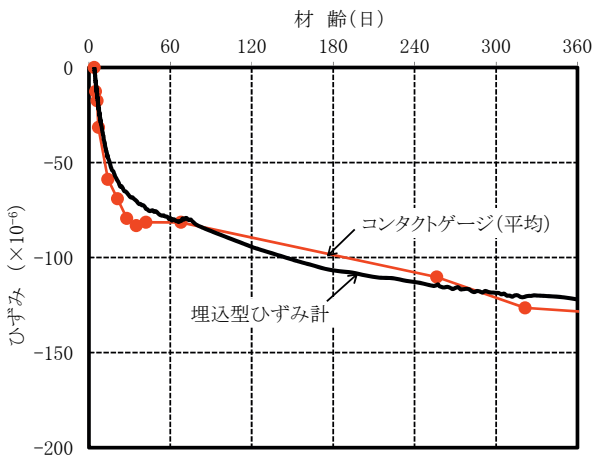


図4 大型円柱供試体における埋込型ひずみ計とコンタクトゲージによる鉛直ひずみとの比較

クトチップを設置した。また, 供試体は20±2℃, R.H.80%の恒温恒湿室で養生し, 約1年間にわたって測定を行った(写真-3参照)。なお, 供試体が大型でありシール作業およびコンタクトチップの設置作業に時間を要したため, コンタクトゲージによる測定は材齢4日から開始した。

図-4に, 材齢4日をひずみの起点として整理した自己収縮ひずみの測定結果を示す。この結果, 両者は良い一致を示しており, 本研究で開発した標点距離500mmの埋込型ひずみ計によりダムコンクリートの自己収縮ひずみを長期間にわたり十分な精度で測定できることが確認できた

4. ダムコンクリートの自己収縮特性

(1) ウェットスクリーニングしたダムコンクリートの自己収縮ひずみ

フルサイズ骨材を用いた大型供試体によるダムコンクリートの自己収縮試験は, 供試体寸法や重量が大きく場所的, 経済的にも頻繁に行えるものではないため, より簡便な試験方法としてウェットスクリーニングしたダムコンクリートを用いて自己収縮特性を把握するのが望ましい。

本研究では, ダムコンクリートの基礎的なデータを把握するために, ELCM (拡張レイヤー工法) で施工された5箇所の重力式コンクリートダムにおいて, ウェットスクリーニングしたダムコンクリートを用いて自己収縮試験を実施した。

表-2に, 各ダムの内部および外部コンクリートの試験結果を示す。使用材料ならびに配合については, 実際のダムコンクリートの仕様に基づくものであり, セメントの種類およびメーカー, 骨材の岩種などは何れも異なる

表-2 各種ダムコンクリートの自己収縮特性

ダム名	セメント		配合区分	粗骨材の最大寸法 (mm)	水結合材比 W/B (%)	単位結合材量 B (kg/m ³)	自己収縮によるひずみ(×10 ⁻⁶)		
	種類 ^{注2)}	メーカー					材齢3日	材齢7日	材齢28日
KN	BB55	A社製	外部	150	51.4	210	-43	-70	-126
KY	BB55	B社製	外部	150	54.8	210	-9	-25	-93
			内部	150	70.6	160	-13	-13	-15
KK	BB55	C社製	外部	150	45.3	190	-24	-51	-100
			内部	150	65.4	130	-13	-15	-29
	M	C社製	外部	150	45.3	190	-17	-29	-53
			内部	150	65.4	130	-3	-6	-26
OT	MF30	D社製	外部	150	46.6	210	-4	-14	-47
			内部	150	72.1	140	-7	-12	-19
KM ^{注3)}	MF30	E社製	外部	80	48.1	210	-10	-12	-25
			内部	80	70.7	150	-2	-3	-6

注1)養生温度は20℃。

注2)BB55:ダム用の高炉セメントB種で, 高炉スラグの分量は55%, M: 中庸熱ポルトランドセメント, MF30: 中庸熱フライアッシュセメントで, フライアッシュの分量は30%。

注3)供試体は, φ150×530mmで実施。

ものとなっている。なお、ここではフルサイズの粗骨材で練り混ぜたダムコンクリートを40mmふるいでウェットスクリーニングし、従来の150×150×530mmの曲げ供試体用の角柱型枠（KM ダムを除く）に打ち込んで、埋込型ひずみ計による試験方法によって長手方向の軸ひずみを測定した。

表-2によれば、中庸熟フライアッシュセメント（MF30）に比べてダム用の高炉セメントB種（BB55）を用いたダムコンクリートは、自己収縮ひずみが大きく、特に外部コンクリートにおいては材齢28日でも 100×10^{-6} を上回る自己収縮ひずみが生じることが明らかとなった。また、40mmふるいでウェットスクリーニングしたBB55によるダムコンクリートの自己収縮ひずみは、内部と外部コンクリートとの間に極めて大きな差異が見られることも分かる。

ただし、一般のコンクリートに用いられているセメントに比べて、ダムコンクリートに用いられているセメントは比表面積が小さく水和反応が緩やかな特性を示すため、ダムコンクリートの自己収縮についてはより長期間にわたって測定を行う必要があると考えられる。

なお、これらの自己収縮ひずみはあくまでもウェットスクリーニングしたコンクリートによるものであるため、実際のダムコンクリートの自己収縮特性についてはフルサイズ骨材を用いた本来の配合で検討する必要があると考えられる。

(2) フルサイズ粗骨材によるダムコンクリートの自己収縮ひずみの推定方法の検討

自己収縮は、セメントの水和に伴う現象でありセメントペースト部分で生じるものであるため、骨材量が増大するほどコンクリートとしての自己収縮は減少することとなる。したがって、ウェットスクリーニングによって粗骨材を除去すると、見かけの配合に占める骨材量が減少するので、自己収縮ひずみは増大するものと推測される。

田澤、宮澤らによれば、コンクリートの自己収縮ひずみはセメントペーストと骨材の二相材料と考えて、直列モデルではそれぞれの体積比から、並列モデルではそれぞれの体積比と弾性係数から複合則によって求められるとしている¹⁷⁾¹⁸⁾。ここで、直列モデルでは、セメントペーストと骨材が直列に配置され、セメントペーストの収縮が骨材の剛性による拘束の影響を受けないと仮定されている。一方、セメントペーストと骨材が並列に配置される並列モデルでは、骨材による拘束効果が考慮されている。これより、セメントペーストの弾性係数に比べて骨材の弾性係数が大きい一般的な場合には、直列モデルによる収縮ひずみの推定値は複合則による推定値としては最大の値となる。したがって、温度応力の検討におい

て考慮する自己収縮ひずみについては、直列モデルを用いれば安全側の評価となると考えられる。

以上より、フルサイズ骨材のコンクリートの自己収縮ひずみを推定する方法としては、本研究ではフルサイズ骨材のダムコンクリートを「ウェットスクリーニングによって骨材を除去したコンクリート」と「除去された骨材」の二相材料と仮定して、直列モデルによる複合則を適用することとした。これより、ウェットスクリーニングによって粗骨材を除去したコンクリートの自己収縮ひずみが分かれば、式(1)、(2)によってフルサイズ骨材のコンクリートの自己収縮ひずみを簡便的に推定できると考えた¹⁴⁾。なお、今回の複合則では、内部乾燥による骨材の収縮の影響はないものと仮定した。

$$\varepsilon'_{as,b}(t) = \beta_g \cdot \varepsilon'_{as,w}(t) \quad (1)$$

$$\beta_g = (1000 - V_{g,r}) / 1000 \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon'_{as,b}(t)$ ：材齢 t までのコンクリートの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 $\varepsilon'_{as,w}(t)$ ：ウェットスクリーニングにより粗骨材を除去したコンクリートの材齢 t までの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 β_g ：骨材体積比に基づく係数、 $V_{g,r}$ ：ウェットスクリーニングによって除去されたコンクリート 1m^3 当たりの骨材量 (l)、である。

ここでは、表-1に示したダム用の高炉セメントB種を用いた内部および外部コンクリートについて、式(1)、(2)の適合性を検討した。

図-5に、フルサイズ骨材を用いた $\phi 500\text{mm}$ の大型円柱供試体の自己収縮ひずみの実測値と、式(1)、(2)による推定値を示す。また、 $\phi 150\text{mm}$ の小型円柱供試体の実測値も併せて示した。なお、フルサイズ骨材を用いたコンクリートの試験方法については、5.(2)の記述のとおりである。

これより、フルサイズ骨材によるコンクリートの推定値と試験結果とは概ね一致することが分かる。なお、内部コンクリートについては、水セメント比が大きくひず

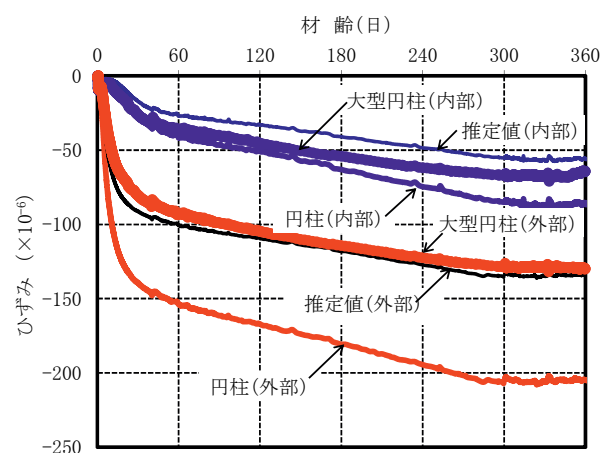


図-5 ダム用の高炉セメントB種を用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみと複合則による推定値¹⁴⁾

みレベルも小さいので実験値と推定値との差が相対的に大きくなっているが、最大でも 10×10^6 程度であった。

5. 各種セメントを用いたフルサイズ骨材によるダムコンクリートの自己収縮特性

(1) 使用材料および配合

4.(1)で記述したように、5箇所コンクリートダムの施工の際に実施した試験結果から、他のセメントに比べてダム用の高炉セメント B 種を用いたダムコンクリートでは自己収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。

本節では、自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響を定量的に評価するために、使用する骨材および混和剤ならびに試験条件を統一して、各種低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたフルサイズ骨材のダムコンクリートの自己収縮特性について検討を行った¹⁵⁾。

試験に使用したダムコンクリートは、表-2に示したKKダムの内部および外部コンクリートの配合を基本とした。比較に用いたセメントは、ダム用の高炉セメント B種 (BB) に加えて、中庸熟ポルトランドセメント (M) , 中庸熟フライアッシュセメント (MF : フライアッシュの分量は30%) , ならびに低発熱・収縮抑制型高炉セメント (LBB)¹⁹⁾にフライアッシュを15%置換したものの (LBB+F) とした。表-3に使用材料を、表-4に比

較試験を行ったコンクリートの配合を示す。単位結合材量は、外部コンクリートで 190kg/m^3 、内部コンクリートで 130kg/m^3 を基本とし、スランプが $3 \pm 1\text{cm}$ となるように、セメントの種類に応じて単位水量を補正した。目標空気量は、 $3 \pm 1\%$ とした。

(2) 試験方法

フルサイズ骨材 ($G_{\text{max}}=150\text{mm}$) を用いたコンクリートの練混ぜには、容量 250 l の傾胴式コンクリートミキサーを用いた。練り上がったコンクリートは、中心部に埋込型ひずみ計 ($L=500\text{mm}$, $E \approx 1,000\text{N/mm}^2$) を設置した大型円柱供試体用型枠 ($\phi 500 \times 1,000\text{mm}$, 図-3) に打ち込み、ダム用高周波バイブレータで締め固めた。

また、式(1), (2)に示した複合則の適応性を確認するためにフルサイズ骨材で練り混ぜたコンクリートを40mmふるいでウェットスクリーニングして、小型円柱供試体 ($\phi 150 \times 530\text{mm}$) を作製し、鉛直方向のひずみを埋込型ひずみ計 ($L=100\text{mm}$, $E \approx 40\text{N/mm}^2$) により測定した。

大型および小型供試体用の型枠は、いずれも鋼製とし、型枠による拘束を軽減するために、型枠内側面にはテフロンシートを設置すると共に、底面は剥離剤を塗布した。コンクリート打込み後、直ちに上面からの乾燥を防ぐ処置を施し、大型供試体は脱型せずに、小型供試体は脱型して全面をアルミ箔粘着テープでシールして、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, RH.80%の恒温恒湿室に設置した。埋込型ひずみ計による自己収縮ひずみの測定は、大型および小型供試体共に材齢1年まで実施した。

供試体は水和熱による温度上昇に伴い温度変化を生じるので、供試体中心部の温度変化の測定値を用いて温度ひずみを除去し、自己収縮ひずみとした。なお、大型供試体中心部と表面部との温度差は、最大でも約 1°C であった。コンクリートの熱膨張係数については、各供試体共に材齢1年後の試験結果の値に基づいて定めた。

なお、ウェットスクリーニングによる小型供試体は、内部および外部コンクリート共に4種類のセメント全て

表-3 使用材料

セメント C	BB	ダム用の高炉セメントB種 (比表面積: $4.01\text{cm}^2/\text{g}$, 密度: $3.00\text{g}/\text{cm}^3$, 高炉スラグ分量: 55%)
	M	中庸熟ポルトランドセメント (比表面積: $3.850\text{cm}^2/\text{g}$, 密度: $3.21\text{g}/\text{cm}^3$)
	MF	中庸熟フライアッシュセメント (比表面積: $3.800\text{cm}^2/\text{g}$, 密度: $2.85\text{g}/\text{cm}^3$, フライアッシュ分量: 30%)
	LBB	低発熱・収縮抑制型高炉セメント (比表面積: $3.450\text{cm}^2/\text{g}$, 密度: $2.98\text{g}/\text{cm}^3$, 高炉スラグ分量: 58%)
混和材 F	フライアッシュII種 (密度: $2.20\text{g}/\text{cm}^3$)	
細骨材 S	山砂 (密: $2.65\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 1.03%, 粗粒率: 2.74)	
粗骨材 G	150~80mm	硬質砂岩砕石 (密度: $2.73\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 0.22%)
	80~40mm	硬質砂岩砕石 (密度: $2.72\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 0.37%)
	40~20mm	硬質砂岩砕石 (密度: $2.74\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 0.40%)
	20~5mm	山砂利 (密度: $2.64\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 0.66%)
混和剤	Ad-1 : AE減水剤 (リグニンスルホン酸化合物, 遅延型) Ad-2 : AE助剤 (空気連行剤)	

表-4 比較試験を行ったダムコンクリートの配合

セメント種類	配合区分	水結合材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)									
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G				混和剤	
								150mm ~80mm	80mm ~40mm	40mm ~20mm	20mm ~5mm	Ad-1	Ad-2
BB	内部	66.9	24	87	130	—	534	436	521	350	421	0.324	0.016
	外部	47.6	23	90	189	—	498	430	514	345	415	0.473	0.076
M	内部	64.6	24	84	130	—	538	438	524	352	424	0.325	0.016
	外部	46.3	23	88	190	—	502	433	517	347	418	0.474	0.076
MF	内部	63.8	24	83	91	39	535	436	522	350	422	0.326	0.052
	外部	46.3	23	88	133	57	497	429	512	344	415	0.474	0.284
LBB+F	内部	58.8	24	77	111	20	538	439	525	352	424	0.328	0.052
	外部	42.4	23	81	162	29	500	432	516	346	417	0.477	0.210

について2体ずつ作製した。

一方、フルサイズ骨材を用いた大型供試体については、水結合材比が小さく自己収縮ひずみの大きい外部コンクリートを対象として4種類のセメント全てについてそれぞれ1体ずつ作製した。なお、フルサイズ骨材を用いた内部コンクリートについては、BBのみ大型供試体を1体作製した。

(3) 試験結果

a) フレッシュコンクリート、凝結特性および熱膨張係数

表-5に、コンクリートのフレッシュ性状、凝結試験(JISA1147)および熱膨張係数の試験結果を示す。なお、表中に示した空気量の試験結果は、ウェットスクリーニングしたコンクリートによる試験結果をフルサイズ骨材を用いた配合に換算したものである。なお、BBを除くフルサイズ骨材を用いた内部コンクリートの熱膨張係数については、外部コンクリートと同じ値とした。

b) フルサイズ骨材を用いたコンクリートの自己収縮

図-6に、大型円柱供試体によるフルサイズ骨材を用いた外部コンクリートの自己収縮ひずみの測定値を示す。なお、フルサイズ骨材用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、ウェットスクリーニングしたコンクリートと同様に最大膨張時以降の収縮ひずみとして整理した。この材齢は、セメントの種類およびコンクリートの配合区分により若干異なるが、概ね材齢1日であった。

外部コンクリートの自己収縮ひずみは、セメントの種類にかかわらず材齢2ヶ月程度まで大きな増加を示し、その後も材齢1年にわたって増大する傾向を示すが、材齢1年で 130×10^6 という大きな自己収縮ひずみを生じるBBに比べて、M、MF、およびLBB+Fを用いた外部コンクリートの自己収縮ひずみは、約1/2~1/5と小さいことが分かる。なお、MおよびMFを用いた場合でも、材齢1年でおおよそ $50 \sim 60 \times 10^6$ の自己収縮ひずみが生じることが分かる。

図-6に示した試験結果によれば、ダムコンクリートであっても使用材料や配合条件によっては、一般のマスコ

ンクリートと同程度の自己収縮ひずみが生じ、さらに長期にわたって増大するセメントもあることが分かる。したがって、コンクリートダムの温度応力の検討においても、今後、自己収縮ひずみを考慮する必要があると考えられる。

(4) 各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮における複合則の適合性

BBを用いたフルサイズ骨材によるコンクリートの自己収縮ひずみについては、ウェットスクリーニングによって粗骨材最大寸法を40mmとしたコンクリートの自己収縮ひずみの測定値と骨材の体積比による複合則とから推定できることを4.(2)で示したが、ここでは他のセメントを用いた場合についても複合則が適応可能か検討を加えた。

図-7に、配合(表-4)および小型円柱供試体の実測値から式(1)、(2)を用いて推定したフルサイズ骨材の外部コンクリートの自己収縮ひずみの推定値を、大型供試体による実測値と併せて示す。

これより、いずれのセメントを用いた外部コンクリートにおいても、推定値と実測値は良い一致を示していることが分かる。

したがって、ウェットスクリーニングしたコンクリートを用いた小型供試体による自己収縮試験を行うことで、複合則の式(1)、(2)を用いればフルサイズ骨材のダムコンクリートの自己収縮ひずみを十分な精度で推定できることが確認できた。

なお、BBを用いたダムコンクリートは、MおよびMFを用いた場合に比べて外部コンクリートの自己収縮ひずみが大きく、一般の高炉セメントB種を用いた普通コンクリートと同程度の自己収縮ひずみが生じることが分かる。一方、発熱および収縮の低減を図った高炉セメントB種であるLBBにフライアッシュを混合した場合(LBB+F)では、自己収縮ひずみが大きく低減できる

表-5 フレッシュ性状、凝結および熱膨張係数試験結果

セメント種類	配合区分	スランプ(cm)	空気量 ^{*1)} (%)	練上がり温度(°C)	凝結時間 ^{*2)} (h-m)		熱膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
					始発	終結	大型	小型
BB	内部	2.0	2.6	16.5	8-55	15-50	9.3	10.5
	外部	3.5	2.9	15.5	11-05	15-00	9.5	10.7
M	内部	4.0	3.0	20.0	8-00	11-00	—	9.3
	外部	4.0	3.2	21.5	9-20	12-15	8.9	10.6
MF	内部	4.0	2.7	20.5	8-30	12-40	—	10.4
	外部	4.0	3.2	22.0	9-15	13-15	9.5	10.2
LBB+F	内部	3.8	2.7	19.6	9-45	16-40	—	10.3
	外部	3.5	2.3	20.1	7-40	13-40	9.7	9.9

*1) 空気量はフルサイズ骨材を用いた配合に換算。

*2) 養生温度は20°C。

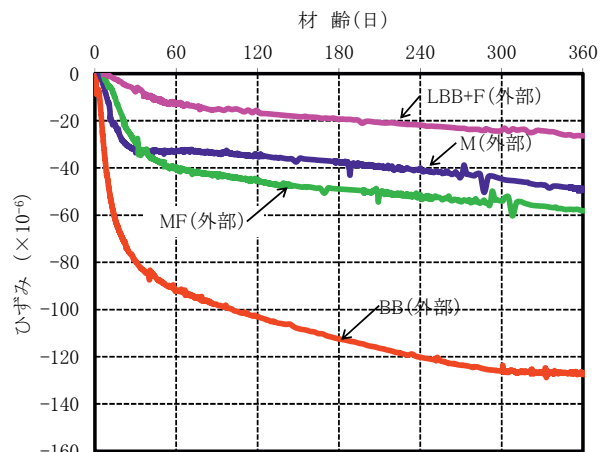


図-6 大型供試体によるフルサイズ骨材を用いた外部コンクリートの自己収縮ひずみ¹⁵⁾

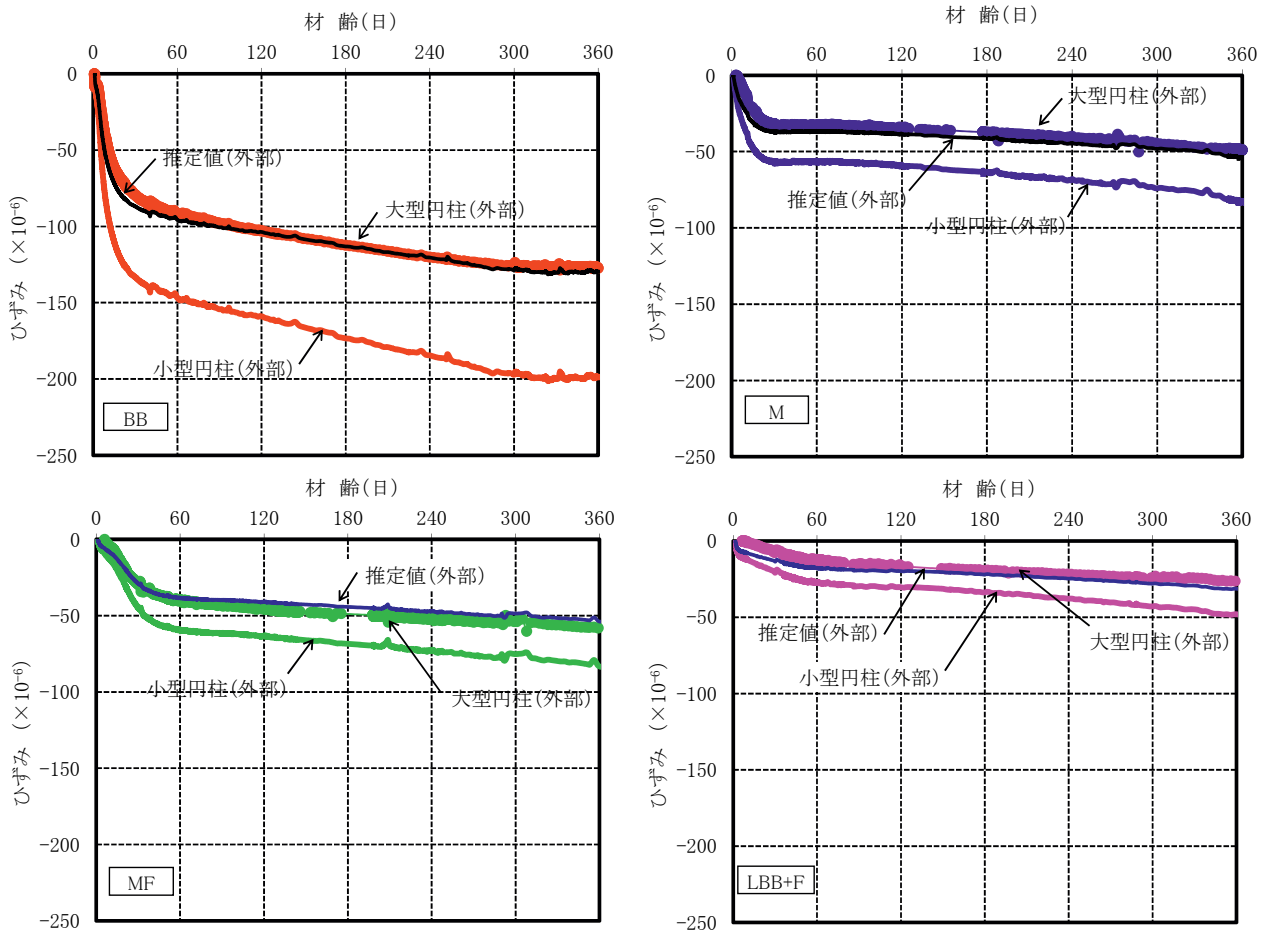


図7 各種セメントを用いた外部コンクリートの自己収縮ひずみの実測値と複合則による推定値との比較

ことが明らかとなった。

6. ダムコンクリートの自己収縮ひずみの設計値の提案

ダムコンクリートの施工段階における温度ひび割れの検討において、FEM 温度応力解析を実施する際に自己収縮の影響を考慮することを想定し、入力値として必要となる自己収縮ひずみの予測式について、5章で記述した実験結果に基づいて検討を行った。

土木学会コンクリート標準示方書の予測式²⁰⁾²¹⁾に基づき、材齢 t (日) における自己収縮によるひずみ $\varepsilon'_{as}(t)$ を式(3)で表すこととする。

$$\varepsilon'_{as}(t) = -\varepsilon'_{as\infty} \cdot \beta(t) \tag{3}$$

$$\varepsilon'_{as\infty} = A \times \exp\{B \times (W/C)\} \tag{4}$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\left\{-a(t - t_s)^b\right\} \tag{5}$$

$$a = \alpha_1 \times \exp\{\beta_1 \times (W/C)\} \tag{6}$$

$$b = \alpha_2 \times \exp\{\beta_2 \times (W/C)\} \tag{7}$$

ここに、 $\varepsilon'_{as\infty}$: 自己収縮ひずみの最終値 ($\times 10^6$) ,

表6 ダムコンクリートにおける自己収縮ひずみの提案式における係数

セメント種類	配合区分	水結合材比 W/C	A	B	a		b	
					α_1	β_1	α_2	β_2
BB	内部	0.669	1,069	-4.4	7.5	-7.0	0.15	2.1
	外部	0.476						
M	内部	0.646	56	-0.1	2.3	-3.8	0.14	1.6
	外部	0.463						
MF	内部	0.638	299	-3.7	0.34	-1.6	0.31	1.0
	外部	0.463						
LBB+F	内部	0.588	94	-2.5	7.5	-9.4	0.31	1.1
	外部	0.424						

注)適用範囲は、W/C:45~70%, Gmax:150mm以下。

$\beta(t)$: 自己収縮ひずみの経時変化を表す関数,
 W/C : 水結合材比, $a, b, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$: 自己収縮の進行速度を表す係数, t_s : 凝結の始発 (日) , である。

ここで、式(4)の係数 A および B については、内部および外部コンクリートの各水結合材比と自己収縮ひずみの最終値とからセメントの種類毎に一義的に求めることができる。なお、自己収縮ひずみの最終値については、小型供試体の試験結果からの複合則によって推定した材齢1年におけるフルサイズ骨材のコンクリートの自己収縮ひずみの値とした。また、自己収縮の進行速度を表す係数 a および b については、式(5)による計算値が複合則による推定値の挙動と概ね一致するようにセメントの種

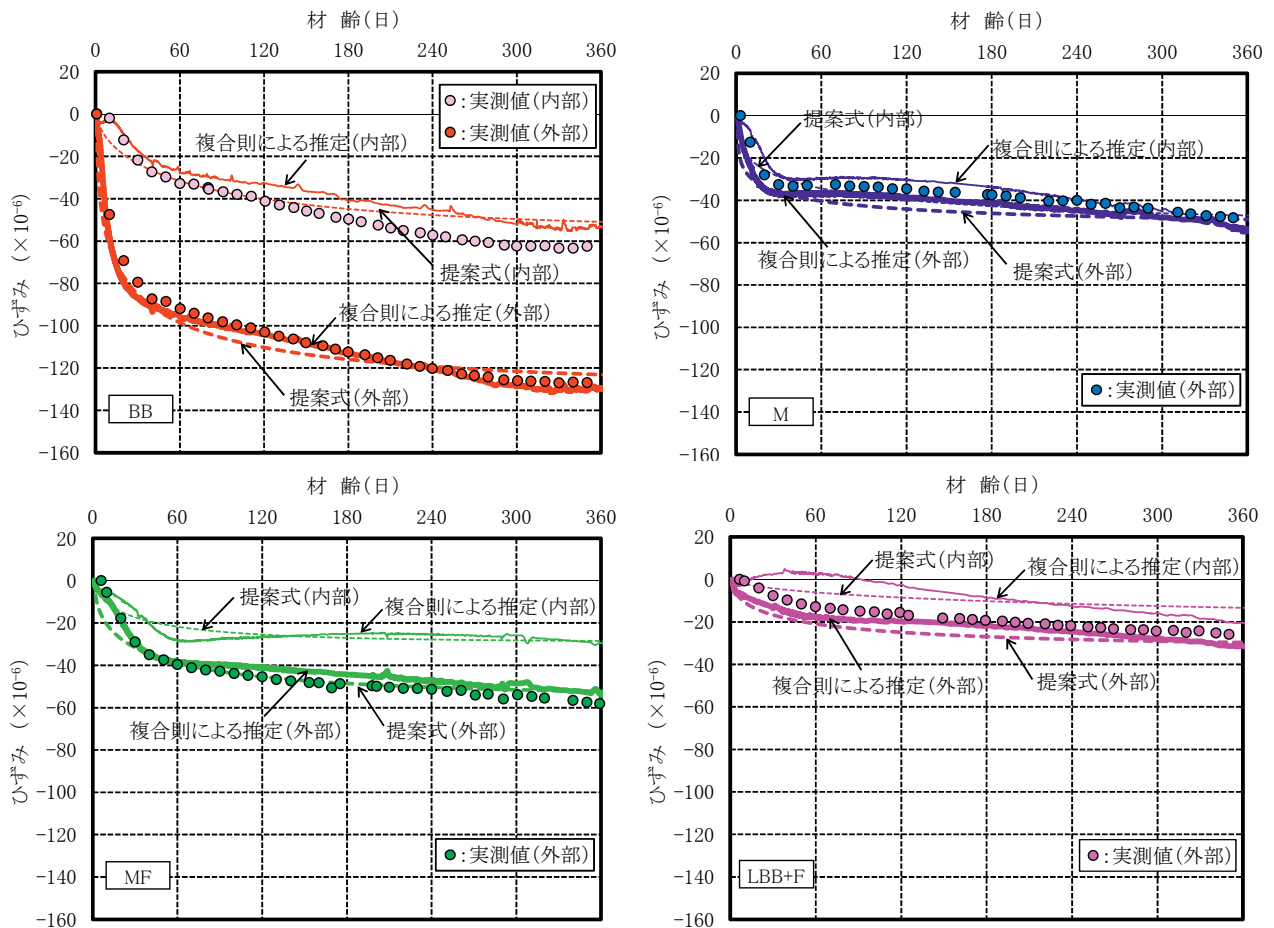


図-8 内部および外部コンクリートの自己収縮ひずみの複合則による推定値，提案式による予測値および実測値

類毎に定めた。なお、式(6)および(7)の $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ および β_2 については、 a および b の値と水結合材比との関係から一義的に求めることができる。

表-6 に、自己収縮ひずみの提案式における各種セメントを用いたダムコンクリートの係数を示す。

図-8 に、フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみについて、小型供試体の試験結果から複合則により求めた内部および外部コンクリートの推定値と提案式(式(3))による予測値、およびフルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの実測値とを併せて示す。いずれのセメントを用いた場合についても、提案式は複合則による推定値や実測値と概ね一致することが分かる。

これより、ダムコンクリートにおいても土木学会のコンクリート標準示方書の予測式を適用し、式(3)~(7)における各係数の値を適切に設定することによって、各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみを概ね推定できるものと考えられる。

なお、今回の試験結果はいずれも 20°C の恒温恒湿室での値であるが、一般のマスコンクリートでは高温下でさらに自己収縮ひずみが大きくなるといわれている¹⁾²⁾。ダムコンクリートでも同様の傾向があることが確認されているが⁹⁾、研究事例は極めて少ない現状にあるので、

今後さらに高温下での特性についてデータの蓄積が必要であると考えられる。

また、内部と外部コンクリートの自己収縮特性を比較すると、特にBBについては収縮ひずみに大きな差異が見られるが、これは両者のコンクリートで水結合材比が大幅に異なるためである。この水結合材比の差異が収縮ひずみに及ぼす影響の程度は、高炉セメントB種を用いた一般のコンクリートの場合と同程度である¹⁵⁾。一方、M、MFおよびLBB+Fについては、ひずみレベルが小さく水結合材比の影響はあまり明確には現れていない。この点については、今後更なる研究が必要であると考えられる。

図-9 に、材齢 28 日および最終値における自己収縮ひずみの実測値と提案式による予測値を示す。なお、材齢 28 日については、表-1 に示した各コンクリートダムにおける実測値も併せて示した。これより、今回の提案式によれば、水結合材比が 45~70% の範囲で粗骨材の最大寸法が 150mm 以下のダムコンクリートにおいて、セメントの種類および水結合材比により自己収縮ひずみを予測することが可能であると言える。

従来、コンクリートダムの温度規制計画では、自己収縮ひずみの影響は温度ひずみに比べて小さいものとして

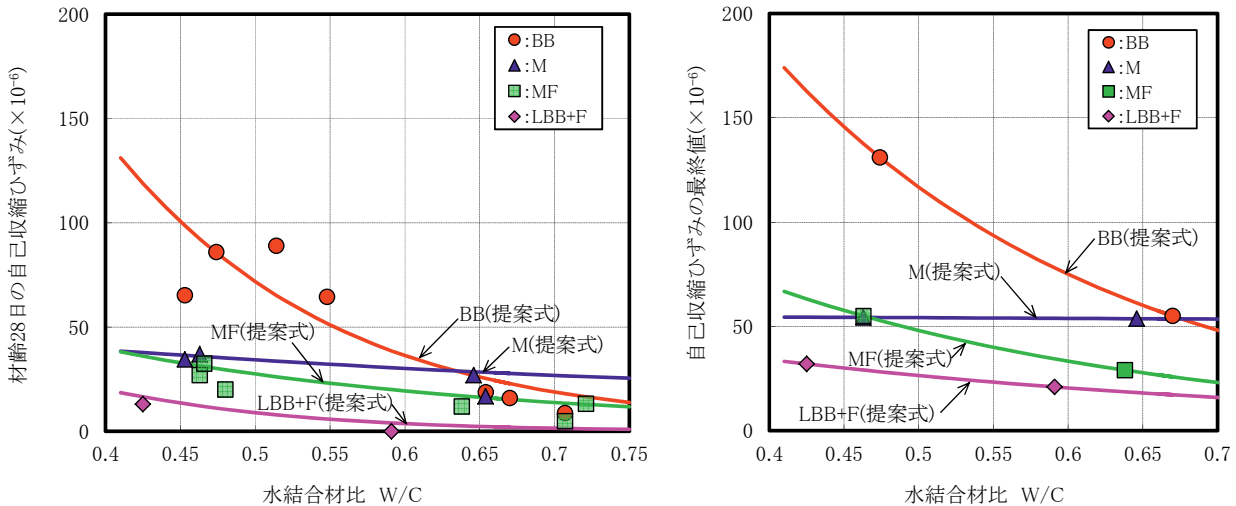


図9 フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみの実測値と提案式による予測値との比較 (材齢 28 日および最終値)

無視されてきたが、本研究によれば配合条件によっては考慮すべき自己収縮ひずみが生じることが明らかとなった。特に、ダム用の高炉セメント B 種では 100×10^6 以上もの自己収縮ひずみを生じることが把握できた。また、ダム特有の異種配合コンクリートの境界（内部と外部コンクリートの接合部）付近では、水結合材比の相違による収縮特性の違いが相互に拘束し合っ内部拘束応力が生じる可能性があることが容易に推測できるので、異種配合の境界ではひび割れ発生に対して十分な検討が必要であると考えられる。

これより、コンクリートダムの施工段階における温度応力の検討において、今後自己収縮ひずみを考慮して評価する必要があると考えられる。

7. 結論

フルサイズの骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみについて、試験方法を検討しその妥当性を確認するとともに、ウェットスクリーニングしたコンクリートによる簡便な試験により推定する方法について検討を行った。また、ダムコンクリートの自己収縮ひずみに及ぼすセメントの種類の影響について、大型供試体によるフルサイズ骨材を用いたコンクリートの試験結果に基づき検討を行った。

本研究で得られた知見をとりまとめて、以下に示す。

- (1) 粗骨材最大寸法が大きいダムコンクリートの試験方法について、縦型円柱供試体を提案し、埋込型ひずみ計の剛性の影響ならびにコンタクトゲージ法との差異は見られないことを確認した。
- (2) 複数の重力式コンクリートダムの施工に際して、40mm ふるいでウェットスクリーニングしたダムコンクリートの自己収縮試験を実施し、ダム用の高

炉セメント B 種を用いた外部コンクリートでは材齢 28 日において 100×10^6 を上回る自己収縮ひずみが生じることを明らかにした。

- (3) フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの試験結果より、ダム用の高炉セメント B 種を用いた外部コンクリートの自己収縮ひずみは材齢 1 年で約 130×10^6 と、内部コンクリートに比べて著しく大きい傾向を示すが、中庸熟ポルトランドセメントおよび中庸熟フライアッシュセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、配合区分によらず 50×10^6 程度以下であることが明らかとなった。
- (4) ダム用の高炉セメント B 種を用いた場合、内部および外部コンクリートでは自己収縮特性に大きな差異が見られることから、異種配合の境界では温度応力のみならず収縮差による内部拘束応力も温度ひび割れ発生の要因として考慮する必要があると考える。
- (5) 低発熱・収縮抑制型高炉セメントにフライアッシュを 15% 置換した場合には、ダムコンクリートの自己収縮は配合区分によらず大幅に低減でき、外部コンクリートにおいても材齢 1 年で約 30×10^6 であった。
- (6) 自己収縮に及ぼす骨材量の影響は複合則により評価可能であり、40mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートによる試験結果に基づいて、フルサイズ骨材のダムコンクリートの自己収縮ひずみを推定できることを示した。
- (7) 各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみは、土木学会コンクリート標準示方書の自己収縮予測式を用い、予測式の諸係数をセメントの種類に応じて適切に設定することによって予測できることを明らかにした。

- (8) コンクリートダムの施工段階における温度応力解析においても、一般のマスコンクリートと同様に自己収縮ひずみを考慮した検討を行う必要があると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、各種実験の実施および測定データのとりまとめなどで多大な協力を頂いた足利工業大学大学院 谷田貝敦氏（現(株)デイ・シイ）をはじめ、足利工業大学工学部の卒業生諸氏に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp. 303-318, 2013.
- 2) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編〕，pp. 38-39, 2013.
- 3) ダム技術センター：多目的ダムの建設—平成17年版第5巻設計II編，pp. 29-77, 2005.
- 4) 日本ダム協会：コンクリートダムの施工，pp. 401-423, 2008.
- 5) Davis, H. E. : Autogenous volume change of concrete, *Proc. ASTM*, Vol. 40, pp. 1103-1110, 1940.
- 6) Houk, I. E. Jr., Borce, O. E. and Houghton, D. L. : Studies of autogenous volume change in concrete for Dworshak Dam, *ACI Journal*, July 1969.
- 7) Guide to Mass Concrete : ACI Committee 207, ACI 207.1R-05, 2006.
- 8) 佐藤英明，平野晃臣：ダム用コンクリートの自己収縮特性における養生温度等の影響，土木学会第53回年次学術講演会概要集，pp. 762-763, 1998.
- 9) 佐藤英明，吉村耕市郎，山本一雄，田中正和，永野康裕：フルサイズの粗骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮特性，土木学会第57回年次学術講演会概要集，pp. 1281-1282, 2002.
- 10) 緒方英彦，服部九二雄，長東勇，朝河哲也，青山威康：フルサイズの粗骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮特性，農業土木学会論文集，No. 246, pp. 103-113, 2006.
- 11) 土木学会：セメントペースト，モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（案），2013年制定コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準および関連規準，pp. 534-536, 2013.
- 12) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（II），1994.
- 13) 伊代田岳史，兼安真司，壇康弘：高炉セメント中のスラグ粉末度と石こう量が水和発熱と自己収縮特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29, No. 1, pp. 99-104, 2007.
- 14) 佐藤英明，宮澤伸吾，谷田貝淳：ダムコンクリートの温度応力に及ぼす自己収縮の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No. 2, pp. 181-186, 2008.
- 15) 佐藤英明，宮澤伸吾，谷田貝敦：各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 1531-1536, 2009.
- 16) 堀口佳紀，宮澤伸吾，佐藤英明：ダムコンクリートの若材齢における体積変化，(社)日本コンクリート工学協会関東支部栃木地区研究発表会，2009.
- 17) 田澤栄一，宮澤伸吾，佐藤剛，小西謙二郎：コンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 1, pp. 561-566, 1992.
- 18) 田澤栄一，宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響，土木学会論文集，No. 502/V-25, pp. 43-52, 1994.
- 19) 宮澤伸吾，大澤友宏，廣島明男，鯉淵清：低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 27, No. 1, pp. 487-492, 2005.
- 20) 田澤栄一，宮澤伸吾：コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究，土木学会論文集，No. 571/V-36, pp. 211-219, 1997.
- 21) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp. 310-312, 2013.
- 22) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，pp. 47-54, 2008.

(2015. 8. 6 受付)

STUDY ON EVALUATION METHOD OF AUTOGENOUS SHRINKAGE STRAIN IN DAM CONCRETE

Hideaki SATOH and Shingo MIYAZAWA

For the control of thermal cracking of concrete gravity dams in the design and construction stages, the effect of autogenous shrinkage of concrete on thermal cracking has been considered to be negligible from such that it is lean mix concrete. On the other hand, the effects of cement type and mix proportion on autogenous shrinkage of dam concrete have not been made clear. In this study, autogenous shrinkage strain of dam concrete using full-sized aggregate was experimentally investigated. Autogenous shrinkage characteristics of dam concrete with several types of cement, which have generally been used in Japan, was also investigated. In addition, the design values of autogenous shrinkage strain to be used for verification of thermal cracking in the construction stage of concrete gravity dams were proposed.