

# 論文 ダムコンクリートの温度応力に及ぼす自己収縮の影響

佐藤 英明\*1・宮澤 伸吾\*2・谷田貝 敦\*3

**要旨：**本研究は、コンクリートダムの温度規制における自己収縮の影響について、フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの断熱温度上昇特性および長期材齢における自己収縮特性を把握するとともに、重力式コンクリートダムの三次元モデルにて温度応力解析を行った。検討の結果、貧配合のダムコンクリートにおいても内部と外部コンクリートとの間には自己収縮ひずみに大きな相違があること、ならびに着岩部や外部コンクリートには自己収縮ひずみによる拘束引張応力が発生することを明らかにした。これより、コンクリートダムの温度規制においては、温度応力だけでなく自己収縮による拘束応力を考慮する必要があると考える。  
**キーワード：**ダム, 自己収縮, ひび割れ, 拘束応力, コンクリート, 温度規制, 温度応力

## 1. はじめに

セメントの凝結硬化過程における特性のひとつに、水和反応に起因する体積変化（膨張・収縮）があるが、マスコンクリート構造物の設計、施工において特に問題となるのは温度応力による体積収縮と自己収縮である。このうち、温度応力については、古くからコンクリートダムにおける温度規制など、マスコンクリート特有の問題としてその制御方法について多くの研究が行われてきた。自己収縮については、近年の高流動コンクリートや高強度コンクリートなど、単位結合材量の多い富配合のコンクリートにおける問題として特に注目され研究が進められている。

一方、筆者らの研究によれば、単位結合材量の少ない貧配合のダムコンクリートにおいても、配合、セメントの種類、ならびに養生温度などによっては、ひび割れの発生要因となり得るような比較的大きな自己収縮ひずみを生じることが明らかとなっている<sup>1),2),3)</sup>。

本研究では、コンクリートダムにおける実際のフルサイズの粗骨材を用いたダムコンクリートについて、内部および外部コンクリートの諸特性、とりわけ長期材齢における自己収縮特性を室内試験により明らかにすると共に、堤高 60m の中規模の重力式コンクリートダムを対象として三次元モデルによる温度応力解析を行い、温度応力に及ぼす自己収縮の影響について検討を行った。

## 2. ダムコンクリートの長期自己収縮試験

### 2.1 試験概要

#### (1) 使用材料および示方配合

試験は、ELCM（拡張レヤー工法）によるコンクリートダムの内部と外部コンクリートについて実施した。セメントには、同一配合では自己収縮ひずみが大きい傾向を示す<sup>1)</sup>高炉セメントB種（BB55：密度 3.00g/cm<sup>3</sup>，比表面積 4,010cm<sup>2</sup>/g，高炉スラグの分量 55%）を用いた。細骨材は山砂（表乾密度：2.65g/cm<sup>3</sup>，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/cm<sup>3</sup>，吸水率 0.22～0.40%）を用い、20～5mm の粗骨材については砕石と山砂利（表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>，吸水率 0.66%）との混合とした。

表-1 に、試験に用いたダムコンクリートの示方配合を示す。

#### (2) 試験方法

ダムコンクリートにおける自己収縮特性については、その研究報告事例も少なく、とりわけ粗骨材最大寸法が 40mm を超える実際のフルサイズの粗骨材を用いたダムコンクリートの長期自己収縮特性については、その試験方法も含め未だ明らかとはなっていない。

そこで、今回フルサイズ（Gmax=150mm）の粗骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮試験について、縦型

表-1 ダムコンクリートの示方配合

配合区分	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (%)	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 <sup>3</sup> )								
						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）。

\*1 (株)熊谷組 土木事業本部 ダム技術部 (正会員)

\*2 足利工業大学 工学部都市環境工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 日本コンクリート技術(株) 工修 (正会員)

の大型円柱供試体（φ500×1,000mm）を製作し、内部に埋設型ひずみ計（KM-500S：特注品 L=500mm，東京測器研究所社製）を埋め込んで長手（鉛直）方向のひずみを測定する方法で試験を行った。

一般に自己収縮試験は横置き角柱供試体で行われているが、供試体寸法が大型になると移設が容易ではないため、特に底面部の水分逸散防止処理が難しい。また、供試体が大型になるほど内部の温度分布が大きくなるが、横置き角柱供試体では恒温恒湿室内においても底面部を他の3面と同じ放熱状態とするのが難しく、内部の温度分布によっては曲げ応力が発生し、軸ひずみの測定に影響が生じることも考えられる。

一方、縦型の円柱供試体によれば、側面放熱状態が均一で軸ひずみに曲げ成分が生じないため、自己収縮ひずみの正確な測定が行えるものと考えられる。そこで、縦型供試体による試験結果の妥当性を確認するために、40mm 篩いにてウェットスクリーニングしたコンクリートについて、150×150×530mm の角柱供試体およびφ150×530mm の円柱供試体に埋設型ひずみ計（KM-100B）を設置し軸ひずみを測定して比較検討を行った。

また、円柱供試体については、型枠を脱型せずに上面に乾燥防止用のエポキシ系防水剤およびコーキング剤にてシールした。150×150×530mmの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。何れの供試体も恒温恒湿室（20±2℃）にて養生し、自己収縮ひずみの経時変化を1年にわたって測定した。

自己収縮試験に併せて、凝結時間試験（JIS A 1147）、40mm 篩いによってウェットスクリーニングしたコンクリートによる圧縮強度試験（JIS A 1108）、引張強度試験（JIS A 1113）および静弾性係数試験（JIS A 1149）、ならびにフルサイズ骨材を用いたコンクリートにて断熱温度上昇試験（試料容量：400）を実施した。

## 2.2 試験結果

### (1) フレッシュコンクリートおよび凝結時間

表-2 に、フレッシュコンクリートおよび凝結時間の試験結果を示す。

### (2) 力学的性質

図-1 に、内部および外部コンクリートの材齢1年までの圧縮強度を、積算温度  $M$  (°C・h) による近似関数と

表-2 フレッシュコンクリートおよび凝結時間

配合区分	フレッシュコンクリート			凝結時間 <sup>*2)</sup>	
	スランプ (cm)	空気量 <sup>*1)</sup> (%)	温度 (°C)	始発	終結
内部	3.5	3.1	15.5	8-55	15-50
外部	2.0	2.7	16.5	11-05	15-00

\*1) 空気量はフルサイズ換算。

\*2) 養生温度は20°C。

併せて示す。また図-2 および図-3 に、圧縮強度と引張強度およびヤング係数との関係を示す。

### (3) 断熱温度上昇特性

図-4 に、フルサイズ骨材のコンクリートを用いて実施した断熱温度上昇試験の結果を示す。外部と内部コンクリートとでは単位セメント量の違いにより、終局温度上昇量がおおよそ10°C程度異なることが分かる。

なお、試験設備の関係で約1ヶ月弱の期間で測定を打ち切ったが、内部および外部コンクリート共にまだ明らかに温度上昇傾向が見られることから、貧配合のダムコ

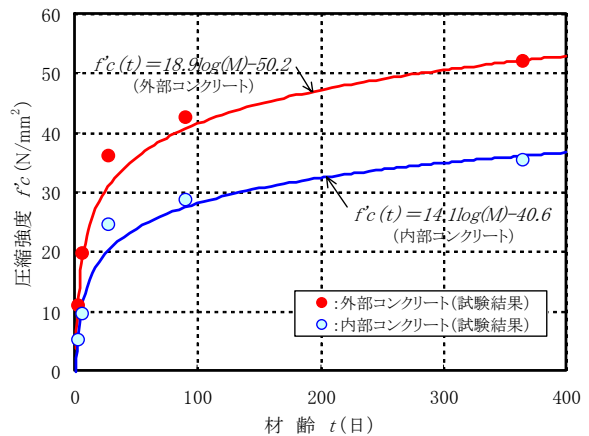


図-1 圧縮強度試験結果

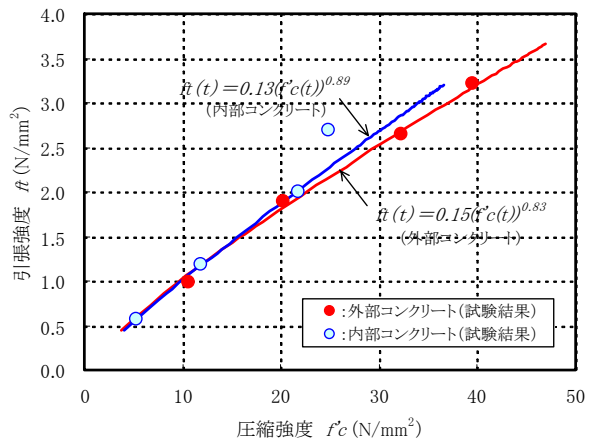


図-2 圧縮強度と引張強度との関係

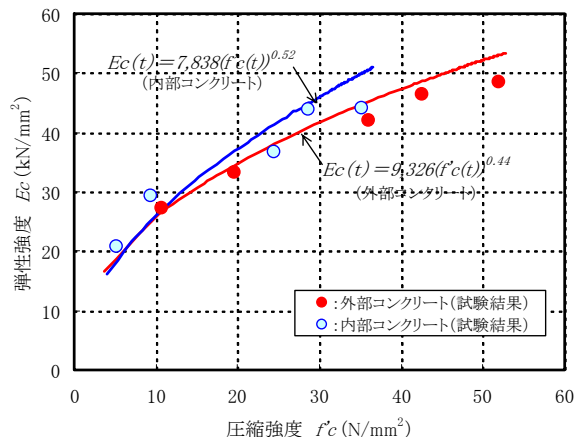


図-3 圧縮強度とヤング係数との関係

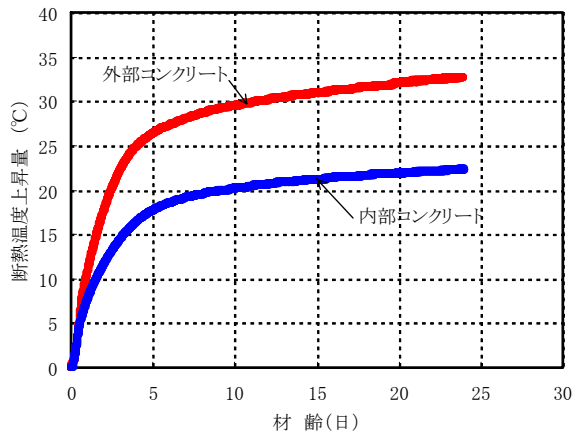


図-4 断熱温度上昇試験結果

ンクリートの断熱温度上昇特性を的確に把握するためには、より長期間にわたって試験を行う必要があることが分かる。

#### (4) 自己収縮特性

自己収縮試験結果は、最大膨張ひずみからの収縮ひずみとして整理した。

図-5 に、ウェットスクリーニングにより最大骨材寸法を 40mm とした内部および外部コンクリートの円柱および角柱供試体の自己収縮ひずみの長期材齢に関する試験結果について、それぞれ各 2 体の平均値の経時変化を示す。これより、貧配合のダムコンクリートであっても、外部コンクリートについては一般のコンクリートと同様<sup>4)</sup>の大きな自己収縮ひずみを示すことが分かる。これは、ウェットスクリーニングした外部コンクリートの単位セメント量を換算すると 289kg/m<sup>3</sup> となり、一般的なコンクリートと同程度となっていることに加えて、スラグの分量が 55% と多い高炉セメント B 種を用いていること、ならびに水セメント比が 45.3% と小さいことによるものと考えられる。

一方、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試験方法は適切であると考えられる。

図-6 に、内部および外部コンクリートのフルサイズ骨材を用いた φ500mm の大型円柱供試体の自己収縮ひずみを、φ150mm の円柱供試体の平均値と併せて示す。

これより、150mm のフルサイズ骨材に比べて骨材寸法を 40mm 以下としたコンクリートはモルタル分が多いため、自己収縮ひずみは大きい値を示すことが分かる<sup>2)</sup>。

ここで、ウェットスクリーニングによって骨材寸法を 40mm としたコンクリートの自己収縮ひずみは、基本的にフルサイズ骨材のコンクリートから除去した骨材容積分だけ見かけ上大きくなると考えられる。そこで、式(1)、(2)に示すように、ウェットスクリーニングによって

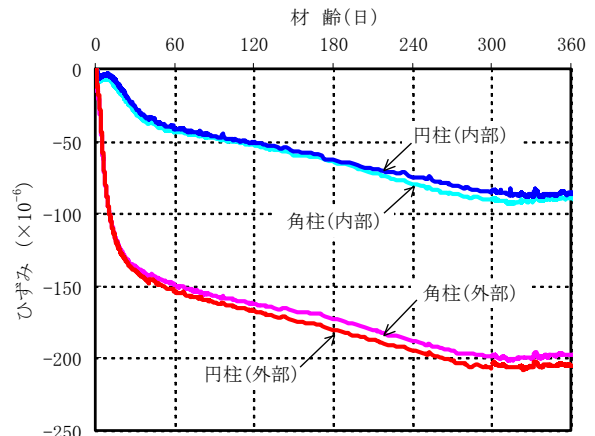


図-5 供試体形状の相違による最大骨材寸法 40mm のダムコンクリートの自己収縮

除去したコンクリートの自己収縮ひずみが分かれば、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することができると思う。

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

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

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 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\beta_g$  : 除去骨材容積比に基づく係数、 $V_{g,r}$  : 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 1 m<sup>3</sup> 当たりの骨材容積 ( $\ell$ )、である。

式(1)、(2)に基づき、骨材寸法を 40mm 以下としたコンクリートの自己収縮ひずみの試験結果からフルサイズ骨材の内部および外部コンクリートにおける自己収縮ひずみを推定した結果を、図-6 に併せて示した。

これより、推定値とフルサイズ骨材によるコンクリートの試験結果とは概ね良く一致することが分かる。

したがって、ウェットスクリーニングしたコンクリートの自己収縮試験を行うことで、式(1)、(2)に示す複合則によりフルサイズ骨材による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、ひずみレベルの小さい内部コンクリートでは最大十数  $\mu$  ほどの誤差が見られるため、今後初期の最大膨張を収縮の起点としたデータ整理方法などについての検討を含め、より多くのデータの蓄積を図っていく必要があると考える。

なお、材齢 1 年の長期にわたる自己収縮ひずみの増大傾向は、40mm 以下とした骨材によるコンクリートとフルサイズ骨材を用いたコンクリートは共に同様であるが、高炉セメント B 種を用いたダムコンクリートは、内部コンクリートでは材齢約 1 年で  $70 \times 10^{-6}$ 、外部コンクリートにおいては約  $130 \times 10^{-6}$  という大きな自己収縮ひずみが生じることが分かる。

すなわち、貧配合のダムコンクリートにおいても、温

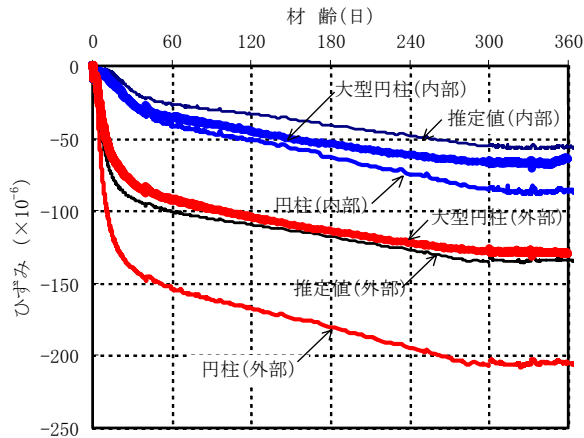


図-6 最大骨材寸法の相違によるダムコンクリートの自己収縮ひずみと複合側による推定値

度収縮と相まって、ひび割れの発生原因として無視できない大きさの自己収縮が生じること、および外部・内部コンクリートの自己収縮ひずみに大きな差異があることが明らかとなった。

### 3. 自己収縮によって生じる内部応力がコンクリートダムの温度応力に及ぼす影響

#### 3.1 温度応力解析

##### (1) 解析概要

自己収縮によるコンクリートの自由な変形ひずみが拘束されると内部に拘束応力が生じるが、とりわけコンクリートダムでは外的な拘束だけでなく、単位セメント量の異なる異種配合を同時に施工するため、配合の違いによる自己収縮ひずみの相違によって内部拘束応力が生じることとなる。これが、コンクリートの温度応力と

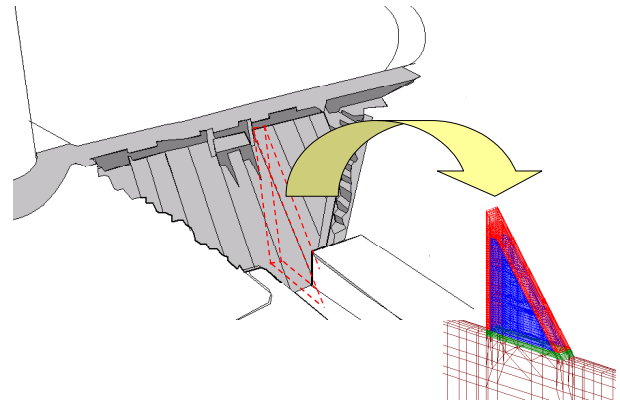


図-7 コンクリートダムのモデル化

相まって大きな引張応力が生じ、ひいてはひび割れ発生の原因となる可能性があると考えられる。

そこで、本研究では、異種配合を有するコンクリートダムについて、自己収縮ひずみと温度ひずみとが同時に作用した場合について解析的に検討を行った。

##### (2) 解析モデル

検討対象は、ELCMによる堤高60mの中規模の重力式コンクリートダムを想定した(図-7)。

解析モデルは、図-8に示すようにブロック幅15mの半断面の三次元解析モデルとし、打設リフト高さは0.75m(ハーフリフト)を基準とした。

また、着岩コンクリートはハーフリフトで4リフトとし、堤体上下流面における外部コンクリートは厚さ3mとした。

##### (3) 解析手法

解析は三次元有限要素法とし、温度解析については非定常熱伝導解析によって、応力解析については有効弾性係数による線形弾性解析の重ね合わせ法によった。なお、

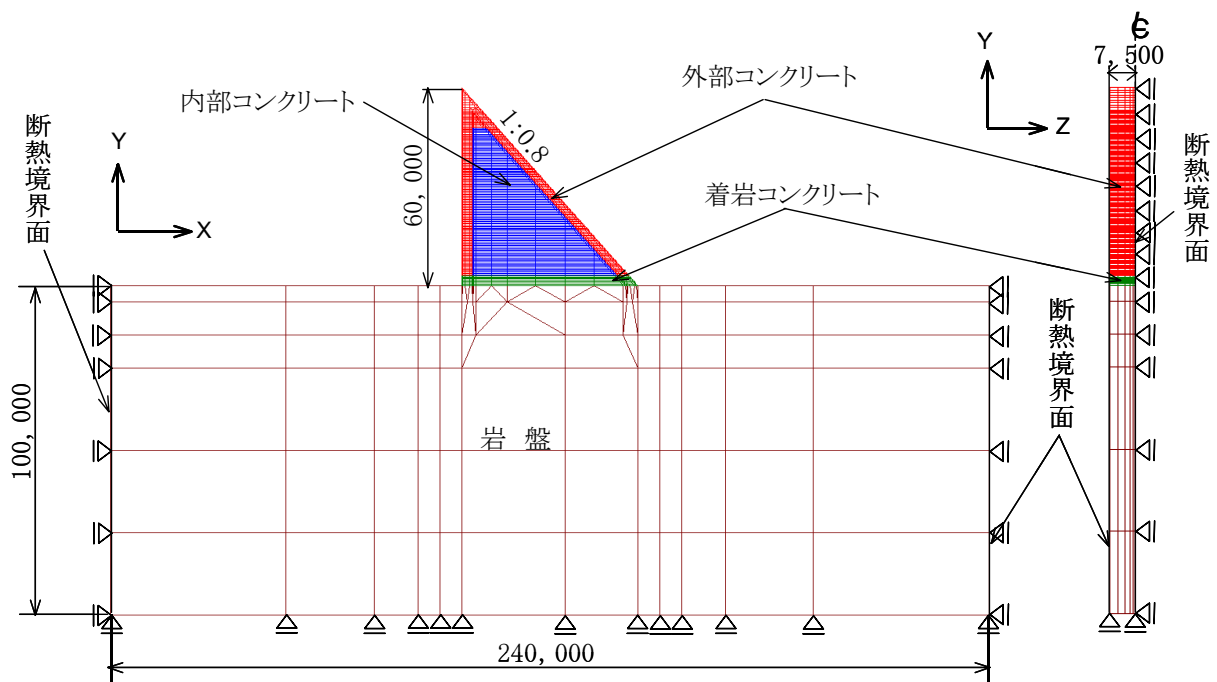


図-8 三次元 FEM 温度応力解析モデル

表-3 温度応力解析条件

区分	項目	単位	堤体コンクリート		基礎岩盤	
			内部	外部(着岩)		
温度解析	熱的性質	比熱	0.871		0.790	
		熱伝導率	2.88		3.45	
		密度	2,483	2,488	2,650	
	断熱温度上昇特性	試験結果(図-4)に基づく				
	初期条件	初期温度(打込み温度)	外気温+2°C			表面は着岩部打設時の外気温
境界条件	熱伝達率	14(上下流面、水平打継ぎ面)			14(露出面)	
	外気温	$T_{air}=12.34+12.40\sin\{2\pi(t+154/365)\}$			同左	
応力解析	力学的性質	圧縮強度	$f_c(t)=14.1\log(M)-40.6$	$f_c(t)=18.9\log(M)-50.2$	-	
		引張強度	$f_t(t)=0.13(f_c(t))^{0.89}$	$f_t(t)=0.15(f_c(t))^{0.83}$	-	
		ヤング係数	$E_c(t)=7,838(f_c(t))^{0.52}$	$E_c(t)=9,326(f_c(t))^{0.44}$	6,000	
		クリープ係数 <sup>5)</sup>	材齢2日まで $\phi=0.42$ 材齢3日以降 $\phi=0.65$ (材齢2~3日までは直線補間)			-
		自己収縮ひずみ	大型供試体の試験結果(図-6)に基づく			-
		熱膨張係数	10			10

今回の解析では、各リフトの材齢に応じた自己収縮ひずみを求め、温度ひずみに重ね合わせる方法とした。

(4) 解析条件

堤体コンクリートの諸物性(断熱温度上昇特性、圧縮強度、引張強度、ヤング率および自己収縮特性)については、試験結果に基づき定めた。なお、着岩コンクリートの物性値は、外部コンクリートと同様とした。着岩コンクリートの打設開始は10月1日とし、リフトスケジュールについては5日サイクルとして等間隔で打ち継ぐものとした。

解析に用いた外気温は、夏期最高気温および冬期最低気温をそれぞれ24.8°Cおよび-0.1°Cとしてsin関数で設定し、コンクリートの打込み温度については施工状況を考慮して外気温+2°Cのsin関数としたが、冬期および夏期における打込み温度についてはコンクリート標準示方書等を参考に5°Cおよび25°Cに制限した。

表-3に、温度解析および応力解析の解析条件をとりまとめて示す。なお、解析は、自己収縮ひずみを考慮しない場合と考慮した場合の2ケースについて実施した。

3.2 解析結果

(1) 着岩部における上下流方向の温度応力

図-9に、堤体ブロック上下流方向の中央部における着岩近傍コンクリートの上下流方向応力度 $\sigma_x$ の経時変化について、自己収縮ひずみを考慮した場合と考慮しない場合(温度応力のみ)の解析結果を併せて示す。これより、着岩コンクリートである第1、第3リフトについては、自己収縮ひずみを考慮することによって外部拘束による引張応力度が大幅に増大することが分かる。一方、内部コンクリート(第5リフト)については、自己収縮ひずみの有無にかかわらず発生引張応力度はほぼ同程度である。

図-10は、第1リフト打設後90日後におけるブロック中央部の着岩部近傍の上下流方向に発生する水平応力度 $\sigma_x$ の鉛直分布を、同材齢における引張強度と併せて示す。この結果、自己収縮ひずみを考慮することによって、上下流方向に発生する引張応力度は引張強度を上

回ることで、ならびに引張応力度が増大する高さは、着岩面から高さ3m、すなわち着岩コンクリートの範囲だけであることが分かる。

これより、着岩コンクリートの自己収縮ひずみが、コンクリートダム止水性・安定性に影響を及ぼす着岩部のコンクリートにおけるブロック(上下流)分断ひび割れに対し、外部拘束による温度応力と併せて発生要因となり得ることが明らかとなった。

(2) 堤体上下流面近傍におけるダム軸方向の温度応力

図-11に、岩盤拘束の影響がない堤体中標高部(第46リフト:高さ34.5m)の打設後約30日における堤体上流面および下流面のそれぞれブロック幅(15m)中央部に発生するダム軸方向応力度 $\sigma_z$ の深さ分布を示す。

図-11より、単位セメント量の異なるコンクリートが同時に打設される堤体上下流面近傍においては、外部コンクリートの引張応力度が自己収縮ひずみの影響によって一様に増加する傾向が、逆に内部コンクリートにおいては圧縮側に移行する傾向があることが分かる。また、上下流面から深さ1.5mの位置におけるひび割れ指数は、自己収縮ひずみを考慮することによって、上流面では

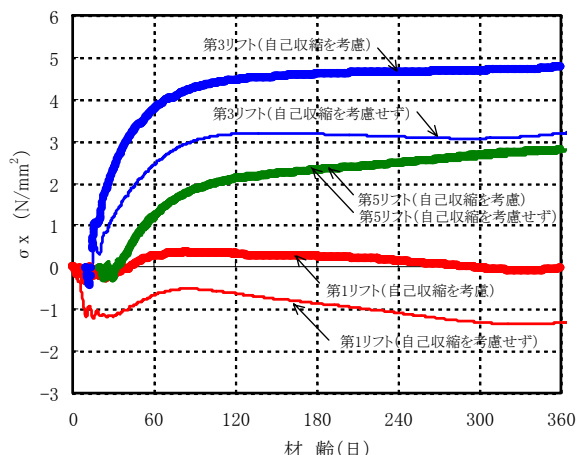


図-9 ブロック上下流中央部の着岩部近傍の上下流方向発生応力度 $\sigma_x$ の経時変化

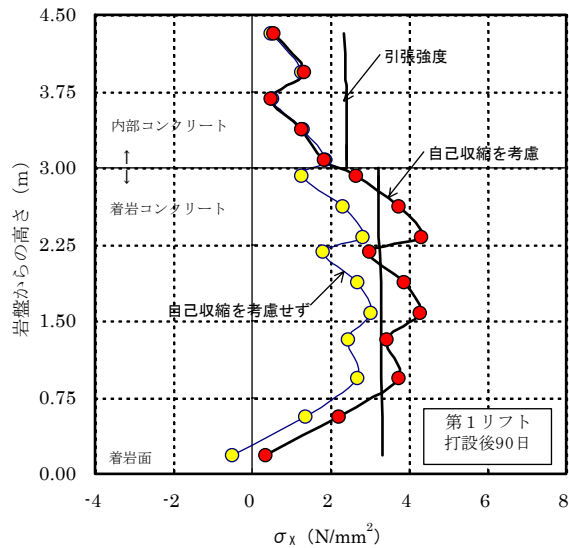


図-10 ブロック上下流中央部の着岩部近傍の上下流方向発生応力度 $\sigma_x$ 鉛直分布

1.91から1.21,下流面では2.11から1.16と小さくなった。これより,自己収縮ひずみの大きさが異なる異種配合のコンクリート近傍においては,両者の差異による内部拘束応力が発生し,コンクリートダム止水性・耐久性に影響を及ぼすブロック(左右岸)分断ひび割れの発生に対して,大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

#### 4. 結論

高炉セメント B 種を用いたダムコンクリートに関し,長期材齢における自己収縮ひずみを把握すると共に,三次元非定常温度応力解析によってコンクリートダムにおける自己収縮による拘束応力の影響を検討した。

本研究で得られた結果をとりまとめて,以下に示す。

- (1) ダムコンクリートの自己収縮試験として,縦型円柱供試体による方法を考案し,横型角柱供試体との比較試験を行うことでその妥当性を確認した。
- (2) 高炉セメント B 種を用いたフルサイズの粗骨材によるダムコンクリートについて,長期間にわたり自己収縮試験を実施した結果,自己収縮ひずみはおよそ材齢1年まで増加することが明らかとなった。
- (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は,ウェットスクリーニングした小型供試体による試験結果,および式(1), (2)に示す複合則によって十分な精度で推定できることを明らかにした。
- (4) 自己収縮ひずみとしては,外部コンクリートでおよそ $130 \times 10^{-6}$ とひび割れ発生原因として無視できない大きさとなることも明らかとなった。
- (5) 中規模の重力式コンクリートダムを対象とした三次元モデルによる温度応力解析の結果,自己収縮ひずみを考慮することによって,着岩部の上下流方向に発生する外部拘束による引張応力度が大幅に増大す

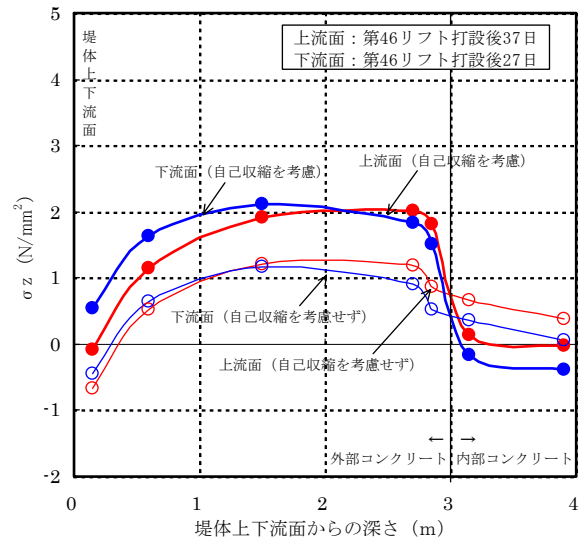


図-11 ブロック左右岸中央部の上下流面近傍のダム軸方向発生応力度 $\sigma_z$ 深さ分布

ること,ならびにその範囲は着岩コンクリートだけであることを示した。

- (6) 異種配合のコンクリートが同時施工される堤体上下流面近傍においては,自己収縮ひずみの相違による内部拘束応力によって引張応力度が増大すること,およびその影響範囲は外部コンクリートのみであることを明らかにした。
- (7) 単位セメント量の少ないダムコンクリートにおいても自己収縮ひずみが有害なひび割れの発生原因となり得ることが明らかとなったことから,今後のコンクリートダムの温度規制において,自己収縮ひずみについても十分な検討が必要であると考える。

#### 参考文献

- 1) 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, 1998.10
- 2) 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, 2002.9
- 3) 大井川智, 谷田貝敦, 宮澤伸吾, 佐藤英明: 高炉セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮, 第33回土木学会関東支部技術研究発表会, 2006.3
- 4) 久保征則, 青木 茂, 新村 亮, 原田 暁: 高炉セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.763-768, 1997.6
- 5) マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会, pp.149-155, 2006.6