

論文 各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮

佐藤 英明*1・宮澤 伸吾*2・谷田貝 敦*3

要旨: コンクリートダムにおける温度応力の検討では、一般にコンクリートの自己収縮の影響については考慮されていないが、最近の研究により、貧配合のダムコンクリートにおいても大きな自己収縮を生じ、温度ひび割れの発生に無視できない影響を及ぼす場合があることが報告されている。本研究では、中庸熟ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、中庸熟フライアッシュセメントおよび低発熱・収縮抑制型高炉セメントを対象として、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特性の検討を行うと共に、小型供試体による自己収縮ひずみの推定の妥当性および設計用値の提案についても検討を加えた。

キーワード: ダムコンクリート, 自己収縮, セメント種類, ひび割れ, 温度応力, フルサイズ骨材

1. はじめに

近年、マスコンクリートの温度ひび割れ制御においては、セメントの水和発熱および自己収縮を考慮して温度応力解析を行うことが一般的になっている¹⁾。一方、コンクリートダムにおける温度応力については、リフト打設、配合、セメントの水和発熱や外気温に伴う温度変化を反映させた温度応力解析が行われているが、コンクリートの自己収縮については一般に考慮されていない。

コンクリートの自己収縮に関する研究としては、Davis らにより、ダムコンクリートを対象とした実験的研究の成果²⁾が報告されている。しかし、ダムコンクリートのような貧配合コンクリートでは自己収縮ひずみの値は小さく、その後、1990 年頃に高流動や高強度コンクリートの自己収縮の研究が活発化するまでは、この分野の研究報告はほとんど行われなかった。そのため、ダムコンクリートでは、自己収縮ひずみが温度応力に及ぼす影響は無視できるものと考えられてきた。

しかし、筆者らの最近の研究により、ダムコンクリートのような貧配合コンクリートにおいても、使用するセメントの種類やコンクリート温度によっては、無視できない大きさの自己収縮を生じることを明らかにしてい

る³⁾⁴⁾。また、ELCM (拡張レヤー工法) を想定したフルサイズ骨材を用いたダムコンクリートの自己収縮試験から、高炉セメント B 種を使用した外部コンクリートや着岩コンクリートにおいて、材齢 1 年で約 130×10^{-6} という大きな自己収縮ひずみが認められている⁴⁾。さらに、中規模の重力式コンクリートダムを対象として、自己収縮ひずみの実験値を用いた FEM による三次元温度応力解析を行った結果によれば、自己収縮が拘束応力の発生に影響を及ぼしており、図-1 に示すような温度ひび割れの発生要因となりうることを明らかにしている⁴⁾。

本研究では、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検討することを目的とし、高炉セメント B 種、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外部および内部コンクリートの自己収縮ひずみの測定を行った。また、低発熱・収縮抑制型高炉セメントにフライアッシュを混入した場合についても検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

ELCM (拡張レヤー工法) により施工されるコンクリートダムを想定し、内部コンクリートと外部コンクリートを検討対象とした。セメントとしては、高炉セメント B 種 (BB), 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), ならびに低発熱・収縮抑制型高炉セメント⁵⁾にフライアッシュを 15% 置換したもの (LBB+F) を使用した。表-1 にコンクリートの配合を、表-2 に使用材料を示す。単位結合材量は、外部コンクリートで 190kg/m^3 程度、内部コンクリートで 130kg/m^3 程度一定とし、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。

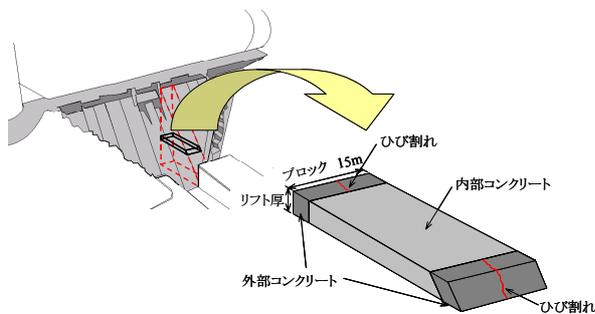


図-1 拘束応力によってコンクリートダムに発生するひび割れの模式図

*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 (株) デイ・シイ セメント事業本部 工修 (正会員)

表-1 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	130	—	535	436	522	350	422	0.326	0.052
	外部	46.3	23	88	190	—	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

2.2 試験方法

フルサイズ骨材 (G_{max}=150mm) を用いたコンクリートの練混ぜには、容量 250ℓ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、図-2 に示すような型枠に打ち込んで大型円柱供試体 (寸法：φ500×1,000mm) を各配合についてそれぞれ 1 体作成した。供試体の中心部には埋込型ひずみ計 (測定長：500mm, 弾性係数：1,000N/mm²) を設置し、鉛直方向のひずみを測定した。また、比較のためにウェットスクリーニングにより G_{max}=40mm としたコンクリートを用いて、小型円柱供試体 (φ150×450mm) を各配合についてそれぞれ 2 体作成し、鉛直方向のひずみを埋込型ひずみ計 (測定長：100mm, 弾性係数：40N/mm²) 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±2℃, R.H.80%の恒温恒湿室に設置した。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。この際、コンクリートの熱膨張係数は 10×10⁻⁶/℃とした。

コンクリートの圧縮強度 (JIS A 1108), 割裂引張強度 (JIS A 1113), およびヤング係数 (JIS A 1149) は、ウェットスクリーニングにより G_{max}=40mm としたコンクリートにて測定した。供試体寸法はφ150×300mm, 養生は 20℃水中養生, 試験材齢は 7 日, 28 日, 91 日, 1 年とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートおよび凝結特性

表-3 に、コンクリートのフレッシュ性状および凝結試験結果 (JIS A 1147) を示す。なお、表-3 に示す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ついて試験した結果をフルサイズ骨材を用いた場合に換算したものである。

3.2 力学的特性

図-3 および図-4 に、それぞれ内部および外部コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

内部および外部コンクリート共に、BB および M を用いたコンクリートに比べてフライアッシュを用いた MF および LBB+F のコンクリート圧縮強度はいずれも小さい傾向を示すが、MF を用いた外部コンクリートについては BB および M を用いたコンクリートとほぼ同程度であった。

図-5 および図-6 に、それぞれ割裂引張強度およびヤング係数の試験結果について、圧縮強度との関係として示した。なお、各図中には、同一配合について別ロットで実施した若材齢時の試験結果も併せて示した。割裂

表-2 使用材料

セメント C	BB	高炉セメント B 種 (比表面積:4,010cm ² /g, 密度:3.00g/cm ³ , 高炉スラグ分)
	M	中庸熟ポルトランドセメント (比表面積:3,850cm ² /g, 密度:3.21g/cm ³)
	MF	中庸熟フライアッシュセメント (比表面積:3,800cm ² /g, 密度:2.85g/cm ³ , フライアッシュ分量)
	LBB	低発熱・収縮抑制型高炉セメント (比表面積:3,450cm ² /g, 密度:2.98g/cm ³ , 高炉スラグ分)
混和材 F	フライアッシュ II 種 (密度:2.20g/cm ³)	
細骨材 S	山砂 (密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:1.03%, 粗粒率:2.74)	
粗骨材 G	150~80mm	硬質砂岩碎石 (密度:2.73g/cm ³ , 吸水率:0.22%)
	80~40mm	硬質砂岩碎石 (密度:2.72g/cm ³ , 吸水率:0.37%)
	40~20mm	硬質砂岩碎石 (密度:2.74g/cm ³ , 吸水率:0.40%)
	20~5mm	硬質砂岩碎石+山砂利 (密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.66%)
混和剤	Ad-1: AE減水剤 (リグニルスルホン酸化合物, 遅延型) Ad-2: AE助剤 (空気連行剤)	

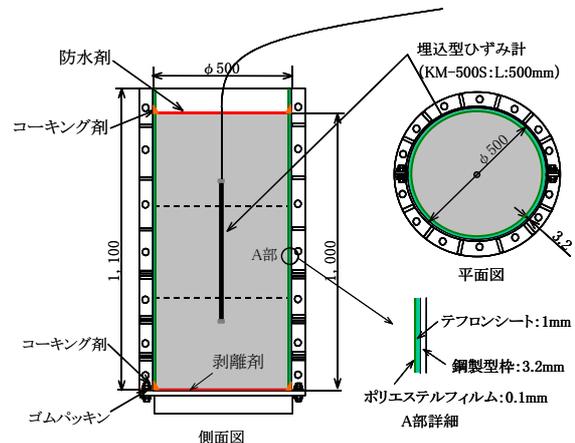


図-2 大型円柱供試体

表-3 フレッシュ性状および凝結試験結果

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)	
					始発	終結
BB	内部	2.0	2.6	16.5	8-55	15-50
	外部	3.5	2.9	15.5	11-05	15-00
M	内部	4.0	3.0	20.0	8-00	11-00
	外部	4.0	3.2	21.5	9-20	12-15
MF	内部	4.0	2.7	20.5	8-30	12-40
	外部	4.0	3.2	22.0	9-15	13-15
LBB+F	内部	3.8	2.7	19.6	9-45	16-40
	外部	3.5	2.3	20.1	7-40	13-40

*1) 空気量はフルサイズ換算。

*2) 養生温度は20°C。

引張強度およびヤング係数は、コンクリートの配合（内部，外部）ならびにセメントの種類によらずに概ね同等の傾向を示すことが分かる。

両者について、圧縮強度との関係として土木学会コンクリート標準示方書の式で近似すると、式(1)および(2)のとおりとなる。

$$f_t(t) = 0.20(f'_c(t))^{0.77} \quad (1)$$

$$E_c(t) = 10,900(f'_c(t))^{0.39} \quad (2)$$

3.3 自己収縮特性

(1) フルサイズ骨材を用いたコンクリートの自己収縮

図-7 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。ここで、自己収縮ひずみは凝結後に生じた膨張ひずみの最大値からの収縮ひずみとして整理したが、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ものの、概ね材齢 1 日であった。なお、大型供試体には弾性係数の大きい (1,000N/mm²) 埋込型ひずみ計を用いたが、弾性係数の異なる埋込型ひずみ計（測定長：100mm，弾性係数：1,000N/mm² および 40N/mm²）を用いた自己収縮試験によれば、最大膨張からの収縮ひずみの測定結果には殆ど差異は認められていない⁶⁾。

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概ね材齢 2 ヶ月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、とりわけ BB を用いた場合は、その増加が著しく、材齢 1 年では 130×10^{-6} という大きな自己収縮ひずみを生じることが分かる。一方、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、BB と比べると約 1/2~1/5 と小さくなっているが、M および MF については材齢 1 年でおおよそ $50 \sim 60 \times 10^{-6}$ の自己収縮ひずみが発生することが分かる。

従来、コンクリートダムでの温度応力の検討においては自己収縮は考慮されていないが、図-7 に示した実験結

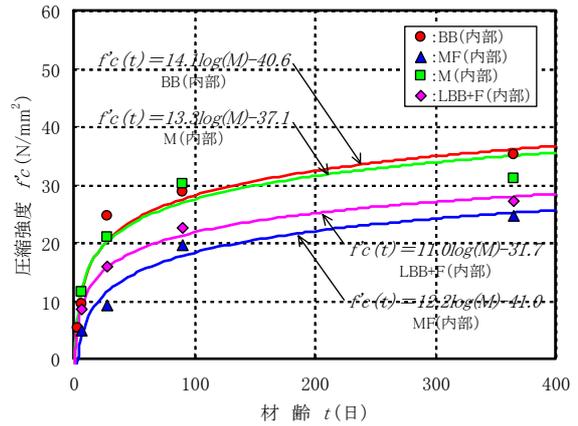


図-3 内部コンクリートの圧縮強度試験結果

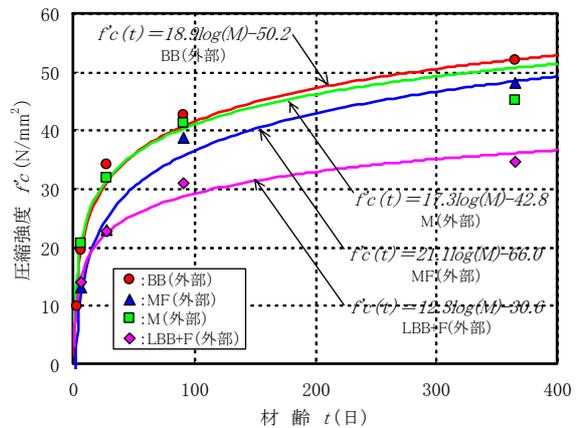


図-4 外部コンクリートの圧縮強度試験結果

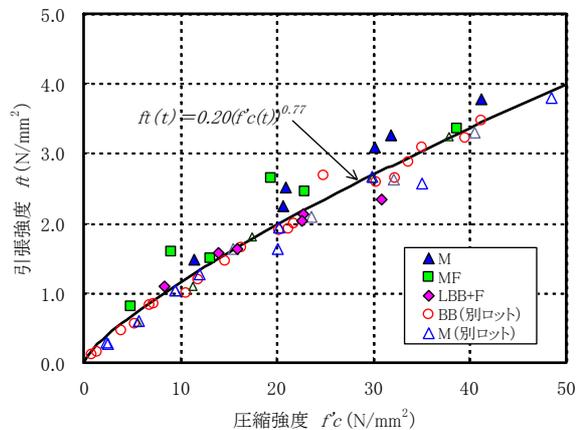


図-5 圧縮強度と割裂引張強度との関係

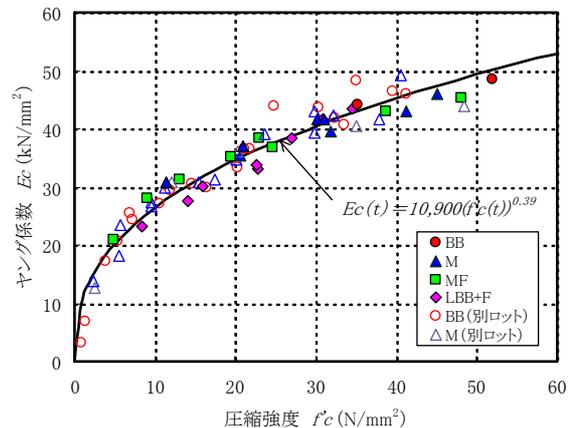


図-6 圧縮強度とヤング係数との関係

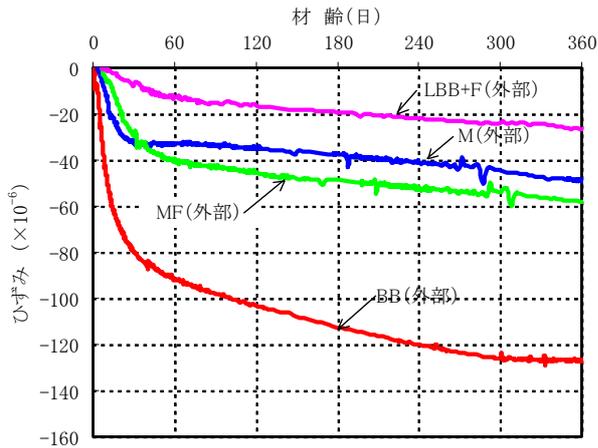


図-7 大型供試体によるフルサイズ骨材を用いた外部コンクリートの自己収縮

果によれば、使用材料によっては、外部コンクリートに無視しえない自己収縮を生じることが分かる。

(2) 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

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、試験規模が大きく場所的、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によってダムコンクリートの自己収縮特性を

把握するのが望ましい。

著者らは、フルサイズ骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみが、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報告している⁷⁾。

$$\varepsilon'_{as,b}(t) = \beta_g \cdot \varepsilon'_{as,w}(t) \quad (3)$$

$$\beta_g = (1000 - V_{g,r}) / 1000 \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon'_{as,b}(t)$: 材齢 t までのフルサイズ粗骨材による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 : 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^3 当たりの骨材容積 (ℓ)、である。

そこで、本研究においても、同様の方法によって、フルサイズ骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみを推定した。図-8 に、小型供試体による実測値から推定したフルサイズ骨材の外部コンクリートの推定値と大型供試体による実測値を併せて示す。これより、いずれのセメントを用いた場合についても、推定値と実測値

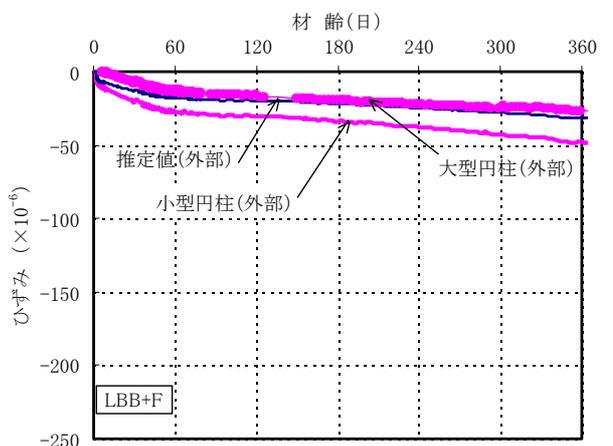
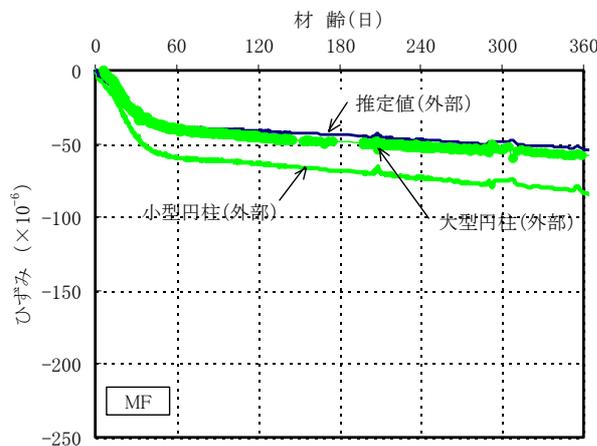
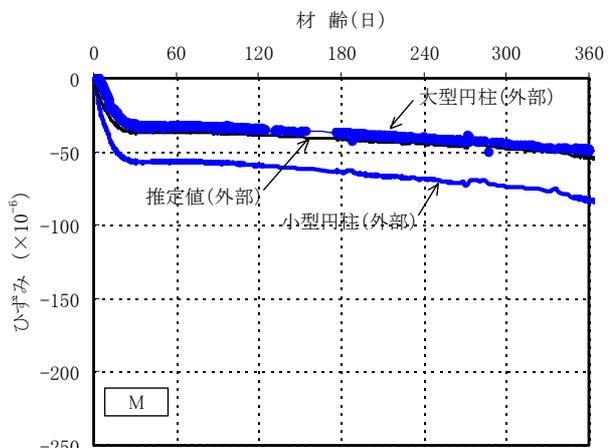
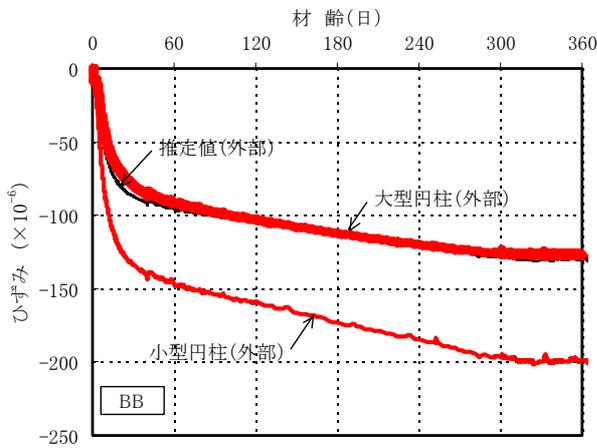


図-8 各種セメントを用いた外部コンクリートの自己収縮ひずみの実測値と複合則による推定との比較

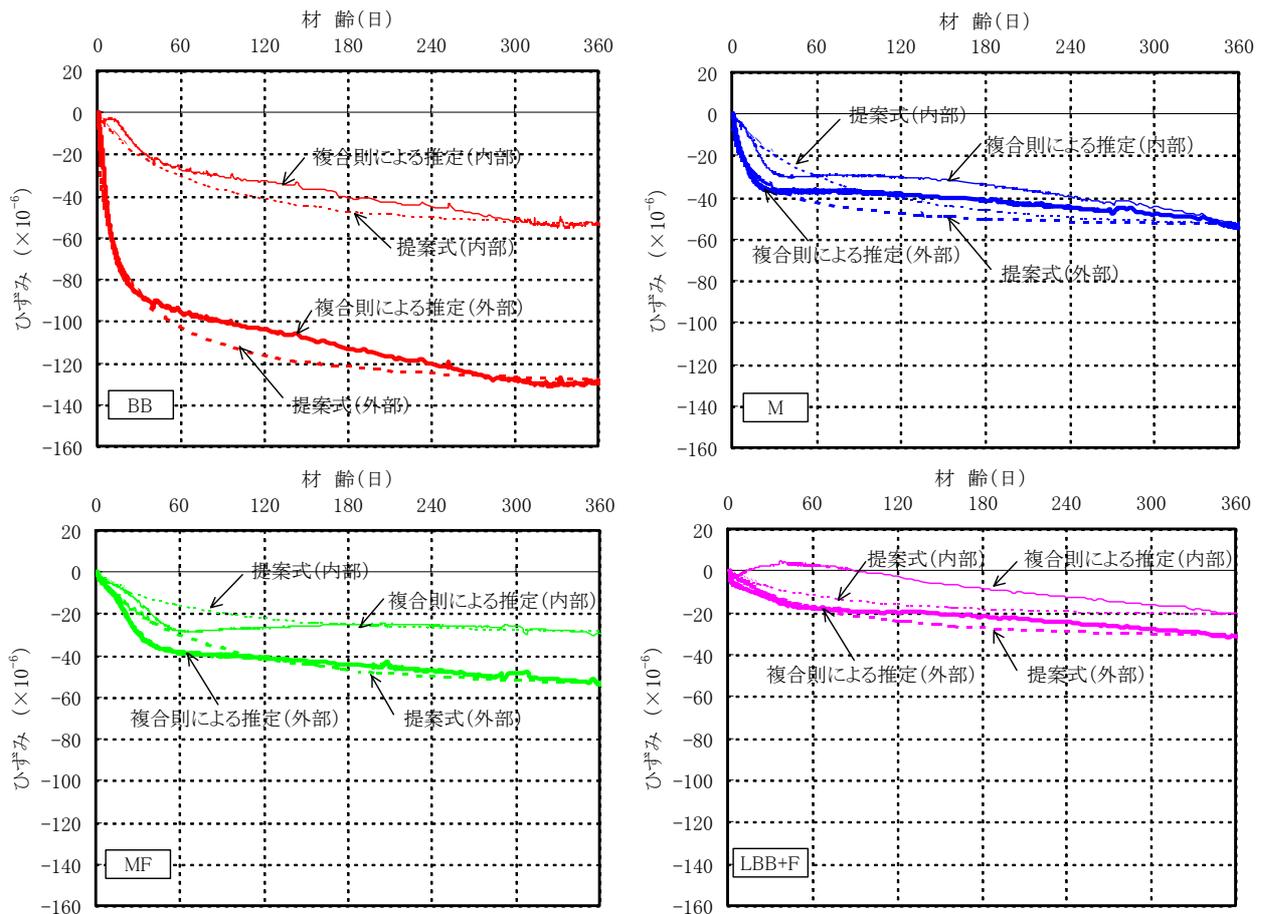


図-9 内部および外部コンクリートの複合則による自己収縮ひずみの経時変化と提案式との比較

は極めて良い一致を示していることから、ウェットスクリーニングしたコンクリートによる測定値を用いて、フルサイズ骨材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と考えられる。

4. ダムコンクリートの自己収縮ひずみの設計用値の提案

ダムコンクリートの自己収縮ひずみの予測式について、土木学会コンクリート標準示方書の推奨式⁸⁾に基づき検討を行った。材齢 t (日) における自己収縮ひずみ $\varepsilon'_{as}(t)$ を式(5)で表すこととする。

$$\varepsilon'_{as}(t) = \varepsilon_{as,\infty} \cdot \beta(t) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{as,\infty} = A \times \exp\{B \times (W/C)\} \quad (6)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\left\{-a(t - t_s)^b\right\} \quad (7)$$

ここに、 $\varepsilon_{as,\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)、 $\beta(t)$: 自己収縮ひずみの経時変化を表す関数、 W/C : 水セメント比、 a 、 b : 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、材齢 1 年における自己収縮ひずみを終局値 $\varepsilon'_{as,\infty}$ と仮定し、本研究で得られた自己収縮ひずみの実測値に基づいて式(6)の係数 A および B を算定した。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、コンクリート標準示方書における $W/C \geq 50\%$ に対応する値である $a=0.03$ および $b=0.80$ を基本とし、自己収縮の進行速度が速い傾向を示した BB および M の外部コンクリートについては、実測値と提案式による算定値が概ね一致するように $a=0.20$ および $b=0.50$ とした。

図-9 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(5))による予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両者は概ね一致することが分かる。よって、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(5)~(7)における各係数の値を適切に設定することによって(表-4)、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。

図-10 は、材齢 1 年における自己収縮ひずみ実測値と提案式による予測値を示したものである。なお、参考のため、図中には、JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針⁹⁾に提示されている普通コンクリートについての設計用値も併せて示した。

表-4 自己収縮ひずみの予測式における係数

セメント種類	配合区分	水結合材比 W/C	A	B	a	b
BB	内部	0.669	1,114	-4.5	0.03	0.8
	外部	0.476			0.20	0.5
M	内部	0.646	54	0	0.03	0.8
	外部	0.463			0.20	0.5
MF	内部	0.638	299	-3.7	0.03	0.8
	外部	0.463			0.03	0.8
LBB+F	内部	0.588	95	-2.6	0.03	0.8
	外部	0.424			0.03	0.8

図-10 より、BB を用いたダムコンクリートでは、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、自己収縮ひずみが著しく低減されることが明らかとなった。なお、M を用いた場合においては、W/C の影響による自己収縮ひずみの変化は殆ど見られなかった。

5. 結論

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。

本研究で得られた結果をとりまとめて、以下に示す。

- ウェットスクリーニングにより $G_{max}=40\text{mm}$ としたダムコンクリートの割裂引張強度およびヤング係数は、コンクリートの配合 (内部, 外部) ならびにセメントの種類によらず、圧縮強度に対してほぼ一定の関係を示すことが把握できた。
- 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、配合によらず 50×10^{-6} 程度以下であることが明らかとなった。
- 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によらず著しく低減され、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。
- 自己収縮に及ぼす骨材量の影響は複合側により評価可能であり、ウェットスクリーニングによって粗骨材の最大寸法を 40mm としたコンクリートによる実験結果に基づいて、フルサイズ骨材のダムコンク

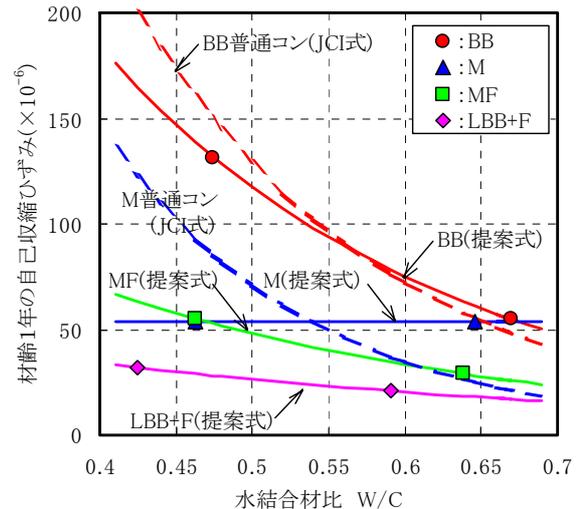


図-10 自己収縮ひずみの実測値と提案式による予測値との比較 (材齢 1 年)

リートの自己収縮ひずみを推定できる。

- 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することができる。

参考文献

- 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, 2008.11
- Davis H.E.: Autogenous volume change of concrete, Proc. ASTM, 40, 1103-1110, 1940
- 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
- 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, 2002.9
- 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, 2005.6
- 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, 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梗概集, 2009.3
- 佐藤英明, 宮澤伸吾, 谷田貝敦：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.20, pp.181-186, 2008.7
- 土木学会：2007 年度制定, コンクリート標準示方書 (設計編), 2007