

IV-6 省エネルギー型セメントを用いたダムコンクリートの利用技術に関する調査

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口 嘉一、豊田 光雄

金子 裕司、石橋 正義

【要旨】

近年、地球温暖化防止のため、二酸化炭素排出抑制技術の開発が求められている。このため、本研究は、コンクリートダム建設における二酸化炭素（CO₂）排出量の影響因子分析を行うとともに、フライアッシュ、スラグ等の混和材の置換率を高めた省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの諸特性と利用技術について提案するものである。

平成 14 年度は、省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの強度、耐久性試験を実施するとともに、混和材置換による CO₂ 総排出量の削減量を具体的に算出し、最終年度としてのとりまとめを行った。

本研究の成果より、CO₂ 総排出量削減の定量的な評価が可能となったほか、省エネルギー型セメントを用いたダムコンクリートの配合設計が可能となった。

キーワード：ダムコンクリート、混和材、圧縮強度試験、凍結融解試験、CO₂ 削減効果

1. はじめに

近年、地球温暖化防止のための環境の保全・回復のため、二酸化炭素（CO₂）排出抑制技術の開発が求められている。コンクリートダム建設工事において CO₂ 排出量を削減するには、セメント使用量を抑制することが最も効率的である。セメント使用量を抑制する手段の一つとして、セメントの一部を混和材に置換することがあげられる。

そこで、本研究では、まず一般のダムコンクリートで使用されているフライアッシュⅡ種（FAⅡ）のほか、フライアッシュⅠ種（FAⅠ）、フライアッシュⅣ種（FAⅣ）、高炉スラグ微粉末 8000（BF）という 4 種類の混和材料によってセメント置換率を高めた場合のフレッシュ性状や強度出現に与える影響について調査した。その結果から、ダムコンクリートとして必要とされるフレッシュ性状と強度を満たしたうえで、最も単位セメント量を削減できる配合を選定し、その配合を中心として凍結融解試験を実施し耐久性についても検討した。なお、凍結融解試験は、JIS で規定されている試験方法に加えて、ダム堤体の内部コンクリートの環境条件を考慮して、供試体をビニール袋で覆った遮水条件下においた方法で実施した。さらに、ダムコンクリートの所要のフレッシュ性状、強度、耐久性を満足する範囲内で混和材の置換率を高めることにより CO₂ 排出量をどの程

度削減できるかを当チーム所有の解析プログラムに従って算出した。

2. 試験概要

2.1 使用材料及び配合

試験で用いた材料及び基本物性値を表-1 に示す。使用したセメントは中庸熱ポルトランドセメント、混和材として、フライアッシュⅠ種（FAⅠ）、フライアッシュⅡ種（FAⅡ）、フライアッシュⅣ種（FAⅣ）、高炉スラグ微粉末 8000（BF）を用いた。粗骨材は良質な砂岩で、その最大寸法は 40mm とし、粒度分布は図-1 に示すように「コンクリート標準示方書 ダム編」¹⁾の標準粒度範囲内の平均的なものとした。

2.2 試験方法

配合条件を表-2 に、試験ケースを表-3 に示す。FA 置換率は 0～60% の範囲で 15% 刻みに 5 ケース設定し、BF 置換率は 0%、45～90% の範囲で 15% 刻みに 5 ケース設定した。これらの混和材置換率ごとに、結合材水比をそれぞれ 3～5 ケース変化させた。

圧縮強度試験は、材齢 3 日で試験を行った。圧縮試験には、直径 15cm、高さ 30cm の円柱供試体を用い、各配合で 3 本ずつ作製した。供試体は脱型後 20℃ の水中養生を行った。なお、通常の重力式コンクリートダムでは材齢 91 日の強度が問題となることは

一般的でないため、所要の圧縮強度は、型枠の脱型時期を考慮して3日強度 $\sigma_3=3.5\text{N/mm}^2$ とした。

凍結融解試験用供試体の配合は、基本的に所要の3日強度とフレッシュ性状を満たす配合を推定したうえで単位セメント量の低減率が最大となる混和材置換率を採用した。なお、混和材のうち従来ダムコンクリートで使用してきたフライアッシュに相当するFA IIについては、結合材（セメントと混和材の総称）水比を2.0と固定したうえで、FA置換率5ケース全てに対して実施した。BF配合についてはセメント低減率から90%まで検討したが（3章参照）、このような高置換率では粘りが強く配合試験での調整も困難であったことから実用性を考慮し、置換率75%を採用した。

凍結融解試験は、JSCE-G 501に準じて、14日材齢の供試体で実施した。ただし、JSCE規格の試験は、ダム堤体の外部コンクリートの環境条件を考慮したものと考え、この条件のほかにも供試体をビニールで覆うことによって、擬似的にダムの内部コンクリートの環境条件を考慮した試験も実施した。なお、それぞれの試験条件を「水中条件」、「気中条件」と呼ぶ。

表-1 使用材料及び基本物性値

使用材料	種類および物性
セメント	・中庸熟ポルトランドセメント (比重=3.21,比表面積=3,200 cm^2/g)
混和材	・フライアッシュI種 (比重=2.41,比表面積=5,900 cm^2/g ,強熱減量=2.1%) ・フライアッシュII種 (比重=2.30,比表面積=3,350 cm^2/g ,強熱減量=1.6%) ・フライアッシュIV種 (比重=2.27,比表面積=3,630 cm^2/g ,強熱減量=1.6%) ・高炉スラグ微粉末 8,000 (比重2.9,比表面積 8,360 cm^2/g ,強熱減量 0.16%)
混和剤	・高性能減水剤、・フライアッシュ用 AE 剤
細骨材	・岩種:砂岩 (比重=2.58,吸水率=2.14%,粗粒率=2.91)
粗骨材	・岩種:砂岩 40~30mm(比重=2.68,吸水率=0.37%)使用割合:20.00% 40~30mm(比重=2.70,吸水率=0.45%)使用割合:32.50% 40~30mm(比重=2.69,吸水率=0.51%)使用割合:23.75% 40~30mm(比重=2.67,吸水率=0.79%)使用割合:23.75%

表-2 配合条件

粗骨材最大寸法	40mm
目標スランプ値	4 \pm 1cm
目標空気量	4 \pm 1%
細骨材率	40%
高性能減水剤	(C+混和材)の1.0%
フライアッシュ用 AE 助剤	目標空気量を満足する量

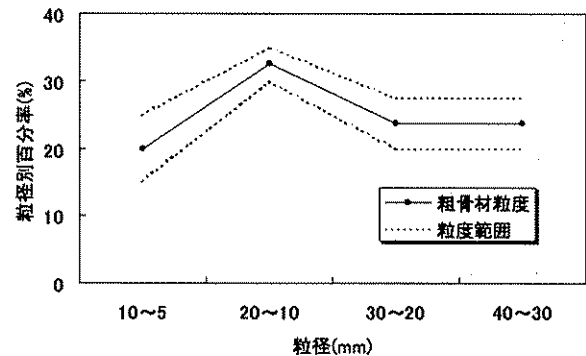


図-1 粗骨材粒度分布

表-3 試験ケース

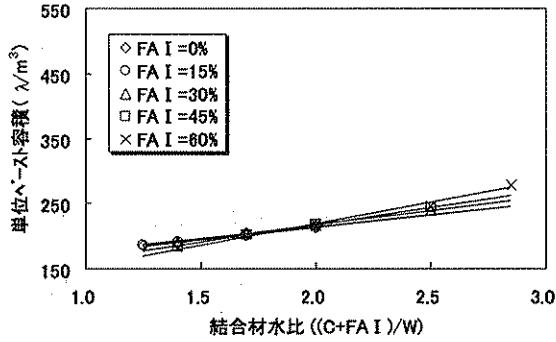
混和材	混和材置換率 混和材/(混和材+C)	結合材水比 (C+混和材)/W
FA I	0	1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	15	1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	30	1.40, 1.70, 2.00, 2.50
	45	1.40, 1.70, 2.00, 2.50
	60	1.70, 3.00, 3.50, 2.85
FA II	0	1.10, 1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	15	1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	30	1.40, 1.70, 2.00, 2.50
	45	1.40, 1.70, 2.00, 2.50
	60	1.70, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75
FAIV	0	1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	15	1.40, 1.70, 2.00, 2.50
	30	1.40, 1.70, 2.00, 2.50
	45	1.40, 1.70, 2.00, 2.50
	60	2.00, 2.50, 3.00
BF	0	1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	45	1.10, 1.40, 1.70, 2.00
	60	1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	75	1.25, 1.40, 1.70, 2.00
	90	1.70, 2.10, 2.50, 2.75

3. 試験結果

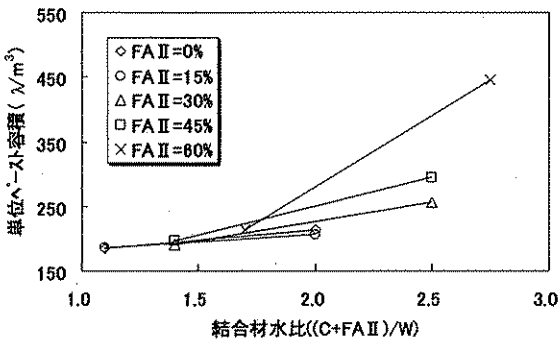
3.1 結合材水比と単位ペースト容積の関係

各混和材に設定した5ケースの混和材置換率ごとに、表-2に示されるフレッシュ性状（目標スランプ値、目標空気量）を満足する結合材水比(C+混和材)/Wと単位ペースト容積の関係を図-2に示す。図によると、各混和材置換率とも、結合材水比に比例して上記性能を満足する単位ペースト容積は直線的に増加しており、混和材置換率が高くなるほど結合材水比

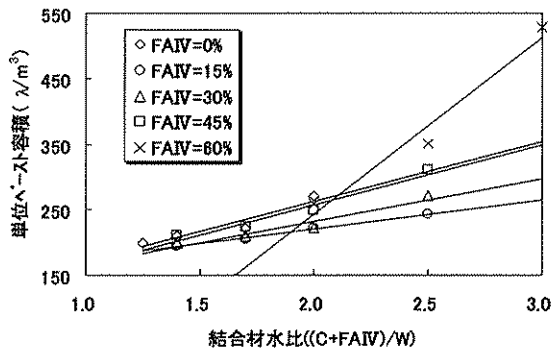
に対する単位ペースト容積の増加割合が増加し、結合材水比が単位ペーストに及ぼす影響が大きくなることがわかる。FAについて着目すると、FAがI種からIV種へと品質が低下するに従いこの影響が強くなってきている。



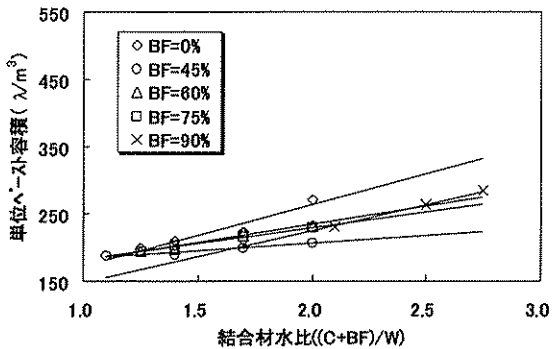
(a) FA I



(b) FA II



(c) FA IV

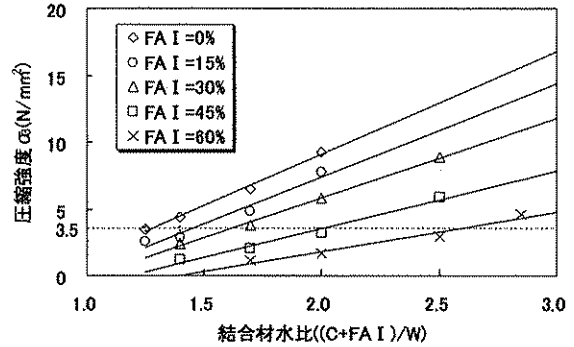


(d) BF

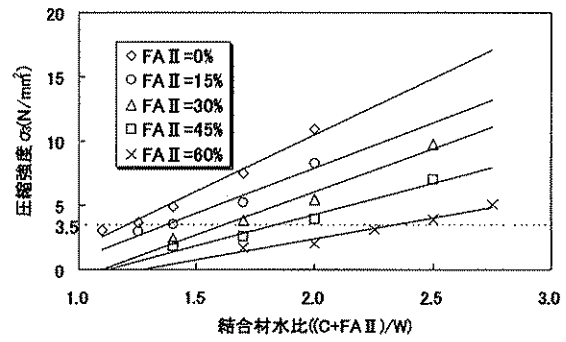
図-2 結合材水比と単位ペースト容積の関係

3. 2 結合材水比と圧縮強度の関係

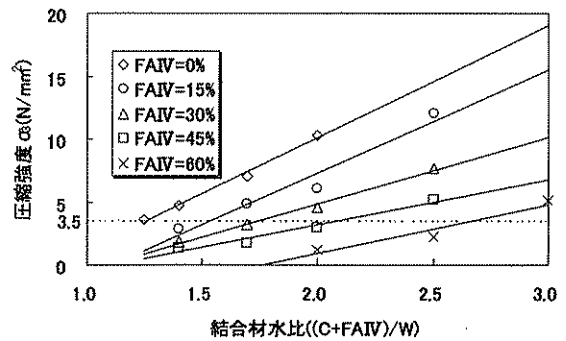
各混和材に設定した5ケースの混和材置換率に対して、結合材水比と圧縮強度 σ_3 の関係を図-3に示す。同一の水結合材比のもとでは、混和材置換率の増加に伴い、圧縮強度が低下する傾向が認められる。ま



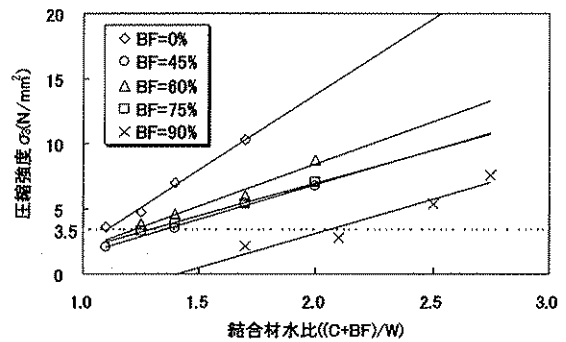
(a) FA I



(b) FA II



(c) FA IV



(d) BF

図-3 結合材水比と圧縮強度 σ_3 の関係

た、結合材水比と圧縮強度の関係をみると、混和材置換率が高くなるほど結合材水比の増加に対する圧縮強度の増加割合が小さくなるのがわかる。

圧縮強度の結果から種々の混和材置換率に対し、所要の圧縮強度を満足する結合材水比を求め、さらに所要のフレッシュ性状を満足する単位ペースト容積を求め、混和材置換を行わない場合と比較したセメント単体の低減率を算出した。混和材置換率と単位セメント量低減率の関係を図-4 に示す。図中矢印はセメント量低減率が最大となる混和材置換率を表す。これにより、単位セメント量が最小となるのは、FAI、FAII、FAIV及びBF置換において、それぞれ60%、45%、30%、90%置換時であることがわかる。

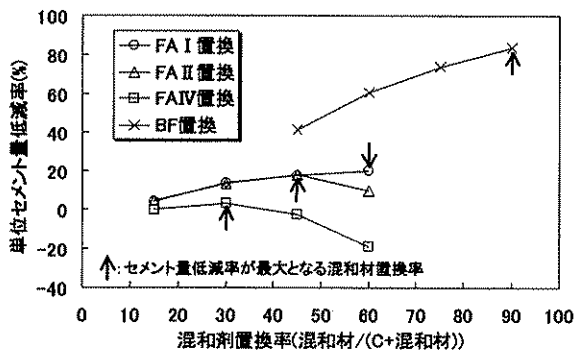


図-4 混和材置換率とセメント量低減率の関係

3. 3 凍結融解試験結果

FAIIについて、結合材水比 2.0 における各置換率の水中条件による凍結融解試験結果を図-5 に示す。試験結果より、水中条件ではFA置換率が0%においても所要の耐久性条件を満足することができず、相対動弾性係数の低下は混和材置換率が高くなるほど早期にはじまることがわかる。

次に、FAIIにおいて、結合材水比 2.0 における各置換率の気中条件による凍結融解試験結果を図-6 に示す。この図より気中条件では、最大の60%置換においても、耐久性に全く問題はみられない。

他の3種類の混和材(FAI, FAIV, BF)について、水中条件で行われた凍結融解試験結果を図-7 に示す。この3種類の混和材料については、FAIV、BF、FAIの順で耐久性の低下が大きいことがわかる。なお、最も品質の高いFAIについては、水中条件で、置換率60%においても最終的に80%以上の相対動弾性係数を有しており、外部コンクリートとしても十分な耐久性を有していることがわかる。

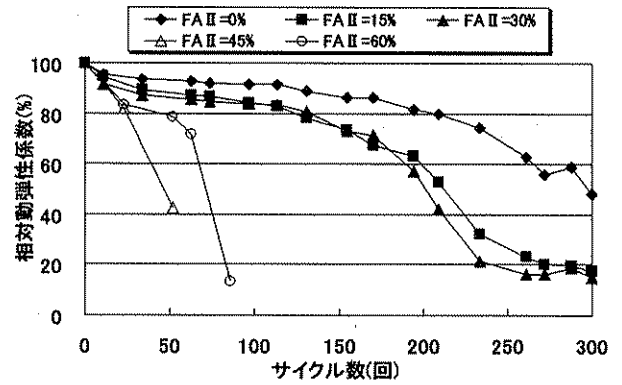


図-5 FAIIにおける凍結融解試験結果(水中条件)

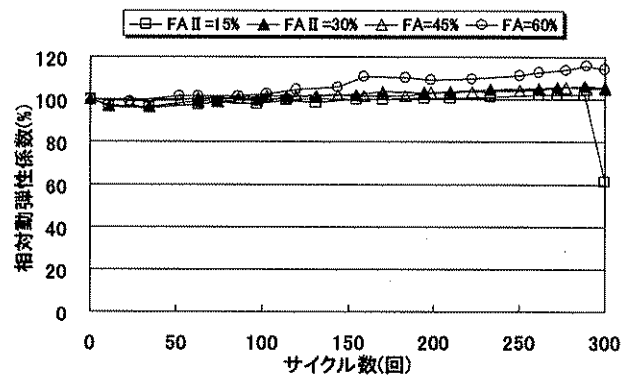


図-6 FAIIにおける凍結融解試験結果(気中条件)

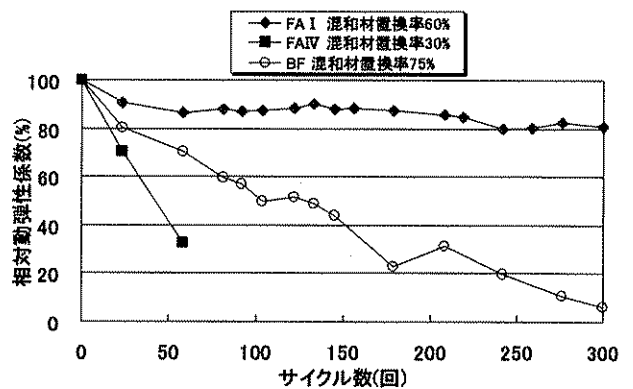


図-7 各混和材における凍結融解試験結果(水中条件)

4. コンクリートダム建設工事におけるCO₂削減効果の検討

所要のフレッシュ性状と脱型時の圧縮強度を満足する範囲内で、セメントの一部を混和材で置換した場合の単位セメント量をもとに、コンクリートダム建設工事全体でのCO₂排出量の削減可能性を試算した。なお、試算は、当チームが所有する「コンクリートダム建設に伴って発生する二酸化炭素量の分析方法」²⁾によった。

4. 1 試算条件

堤高 100m、堤体積約 51 万 m³ の重力式コンクリートダムをモデルとして、CO₂ 排出量を試算した。表-4 は、比較に用いたモデルダムの入力データのうち、ダム諸元およびコンクリート関係に関する主なものを示す。また、図-8 および図-9 は、それぞれ工種別 CO₂ 排出量の内訳、コンクリートに係わる CO₂ 排出量の内訳を示す。これらの図から、ダム工種別ではコンクリート工が、また、コンクリートの中ではセメントが CO₂ 排出量の大半を占めていることがわかる。

4. 2 試算結果

モデルダムを柱状工法で施工した場合、ダム工事全体での CO₂ 総排出量は 36,100C-t、堤体積 1 m³ あたりの排出量は 71.1C-kg、コンクリート 1 m³ あたりの排出量は 63.4C-kg となる。なお、C-kg は炭素換算 kg を表わし、1C-kg は 3.67kg の CO₂ に相当する。

なお、フライアッシュは石炭火力発電所等における微粉炭を燃焼したあと、その残渣として発生した石炭灰である。高炉スラグ微粉末は溶鉱炉で銑鉄と同時に生成される高炉水砕スラグを乾燥・粉砕したものである。そのため本論文では、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用することによる CO₂ 排出量の増加はないものと考えた。

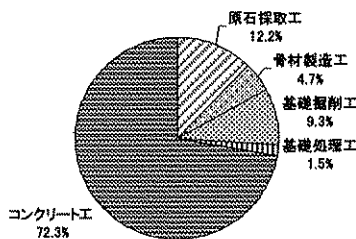


図-8 工種別 CO₂ 排出量の内訳

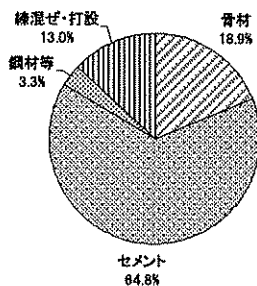


図-9 コンクリートに係わる CO₂ 排出量の内訳

表-4 主な計算条件

項目	単位	数量	
ダム諸元	堤高	m	100
	堤頂長	m	250
	堤体積	m ³	508,000
	鋼材量 (対堤体積)	%	0.5
コンクリート関係	単位セメント量	kg/m ³	210(外部) 140(内部)
	単位骨材量	kg/m ³	2,100(外部) 2,180(内部)
	外部コンクリート厚	m	2.0
	リフト厚	m	1.5

4. 3 CO₂ 排出量の削減効果の試算

いま、FA I を対象に、フライアッシュ置換率 0% の場合と、単位セメント量が最小となるフライアッシュ置換率 60% の場合の CO₂ 排出量を比較することにより削減効果を試算した。試算に用いた単位セメント量の低減率は、3 章で得られた 20% とした (図-4 参照)。

1) セメント低減後のコンクリート 1 m³ あたりの排出量:

$$63.4^{(*)1} - (63.4^{(*)1} \times 64.8^{(*)2} / 100 \times 20^{(*)3} / 100) = 55.2 \text{ C-kg}$$

ただし、※1: コンクリート 1 m³ あたりの排出量 (C-kg)

※2: コンクリートに係わる CO₂ 排出量に占めるセメントの占める割合 (%) (図-9 参照)

※3: セメントの低減率 (%)

2) セメント低減後の総排出量

$$55.2^{(*)1} / (12.2^{(*)2} + 4.7^{(*)2} + 72.3^{(*)2}) \times 100 \times 508,000^{(*)3} \approx 31437 \text{ C-t}$$

ただし、※1: 削減後のコンクリート 1 m³ あたりの排出量 (C-kg)

※2: 総排出量に占めるコンクリートの製造・打設等に関する工種の占める割合 (%) (図-8 における原石採取工、骨材製造工、コンクリート工)

※3: 堤体積 (m³)

3) 以上より、単位セメント量を 20% 低減した場合に削減可能な CO₂ 排出量は下記のとおりとなる。

表-5 各混和材におけるダム工事全体のCO₂削減率

項目	単位	低減前	低減後			
			FA I	FA II	FAIV	BF8000
置換率	%	0	60	45	30	75
単位セメント量低減率	%		20	17	3	74
コンクリート1m ³ あたりの排出量	C-kg	63.4	55.2	56.7	62.2	33.0
総排出量	C-t	36,100	31,437	32,287	35,423	18,794
削減されたCO ₂ 排出量	C-t		4,663	3,813	677	17,306
削減率	%		12.9%	10.6%	1.8%	47.9%

削減可能なCO₂排出量 = 36,100 C-t

- 31,437 C-t = 4,663 C-t (全体の約 12.9%)

これより、CO₂全排出量の約 12.9%の削減が可能となった。

以上は FA I について試算を行ったものであるが同様の検討を同じ手法によって FA II、FAIV、BF について実施した。試算結果を表-5 に示す。

5. まとめ

ダムコンクリートのセメントの一部を混和材で置換した場合に、所要のフレッシュ性状と脱型時圧縮強度を満足する範囲内で置換率をどの程度上げることができ、それにより単位セメント量がどの程度低減可能かを実験により確認した。さらに、その結果を用いてダム工事におけるCO₂排出量の削減可能量を試算した。得られた結果をとりまとめると以下のとおりである。

- ① 所要のフレッシュ性状を満足する単位ペースト容積は、いずれの混和材置換率においても、結合材水比に比例して直線的に増加した。また、混和材置換率が高くなるほど結合材水比に対する単位ペースト容積の増加割合が増加した。また、フライアッシュの種類について着目すると、フライアッシュが I 種から IV 種へと品質が低下するに従いこの影響が強くなった。
- ② 同一の水結合材比のもとでは、混和材置換率の増加に伴い、圧縮強度が低下する傾向が認められる。また、混和材置換率が高くなるほど結合材水比の増加に対する圧縮強度の増加割合が小さくなる。
- ③ 凍結融解試験の結果、ダムコンクリートとして一般に用いられているフライアッシュに相当する FA II では、結合材水比 2.0 では置換率によらず、外部コンクリートとしての耐久性を満足しなかったが、内部コンクリートとしては置換率 60%でも十分な耐久性を有することが分かった。

④ 最も品質の高い FA I については、水中条件で、置換率 60%においても水結合材比 2.58 の条件下では最終的に 80%以上の相対動弾性係数を有しており、外部コンクリートとしても十分な耐久性を有していることがわかる。

⑤ 堤高 100m、堤体積約 51 万 m³の重力式コンクリートダムをモデルとして検討を行った結果、FA I でセメントを置換した場合に所要の脱型時圧縮強度と所要のフレッシュ性状を満たす単位セメント量の最大低減率を 20%として、ダム工事全体で発生するCO₂総排出量の約 12.9%を削減できる可能性がある。同様に FA II、FAIV、BF については単位セメント量の低減率は 17%、3%および 74%となり、CO₂総排出量の削減は 10.6%、1.8%および 47.9%のCO₂総排出量の削減が出来る可能性があるとして試算できた。

これらの成果よりCO₂総排出量削減の定量的な評価が可能となったほか、省エネルギー型セメントを用いたダムコンクリートの配合設計を提案することができた。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会 ダム編改訂部会:[平成 8 年制定]コンクリート標準示方書 ダム編,1996
- 2) 永山功、宮内茂行:コンクリートダム建設に伴って発生する二酸化炭素量の分析,土木技術資料,Vol41, No11 1999.11