

論文 フライアッシュを使用するコンクリートの資源循環性評価に関する検討

錦木 健二*1・道正 泰弘*2

要旨: フライアッシュ(FA)の使用がコンクリートの環境性能に及ぼす影響を評価することを目的に、文献調査により、FA がコンクリートの性能に及ぼす影響について確認し、資源循環性の評価方法を検討した。その結果、FA 総体積とコンクリートの性能の関係から FA の使用量によるコンクリートの性能への影響を整理することで、性能改善効果を定量化し、資源循環性をコンクリートの配(調)合から評価できることが判明した。

キーワード: フライアッシュ, コンクリート, 資源循環性, 環境性能

1. はじめに

2016年3月に経済産業省が取り纏めた「セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査-混合セメント普及拡大に関する検討-報告書」¹⁾では、混合セメント利用普及拡大に向けてのロードマップが示されている。2030年に向けて、混合セメント利用の普及・啓発、混合セメントの環境価値を評価する仕組みづくり、供給側が混合セメントを供給しやすい環境づくり、混合セメントの普及拡大に向けた基盤整備が示されている。混合セメントに使用されるフライアッシュ(FA)は、粒子が球形であること、ポゾラン活性があること等の特性があり、これらの特性を活かし、コンクリート用混和材に使用することを一層進めることが重要である。JASS 5(2022)²⁾に示される環境性のうち、天然資源使用量の削減や副産物・廃棄物の有効利用を評価する資源循環性は、FAの使用によるコンクリートの性能改善効果とFAを含む再生材料使用量の両面から評価することが適切と思われる。構造物に使用するコンクリートの性能を改善することは、耐久性をはじめとする建築物の性能を向上させ、長寿命化することにより、良質なストックを確保することにより、社会的な資源循環性を高めることに繋がる。また、再生材料を積極的に使用することにより、廃棄物削減と天然資源の採取量削減を図ることが可能となる。

著者らは、FAを使用することによるコンクリートの性能改善効果に対する評価および再生材料の使用量による評価により、FAの使用に対する資源循環性の評価点を試算し、定量的に評価する方法を提案した³⁾。この評価方法は、資源循環性を定量的に評価することは可能であるが、コンクリートの性能への改善効果(性能改善効果)をより明確に評価するためには、性能改善効果に対する評価をコンクリートの要求性能ごとに、より詳細な重みづけをし、資源循環性の評価点を検討する必要がある。

本論文では、FAの使用がコンクリートの環境性能に及ぼす影響を評価することを目的に、文献調査により、FA

の使用がコンクリートの性能に及ぼす影響について確認し、資源循環性の評価方法を検討した。

2. コンクリートの性能について

資源循環性の評価方法として、FAの使用による性能改善効果を評価するにあたり、コンクリートの諸性能に対する重みづけとして重要度を設定した。

表-1にコンクリートの性能に対する重要度を示す。鉄筋コンクリート造建築物の構造体および部材に要求される基本的な性能から、圧縮強度および静弾性係数、中

表-1 コンクリートの性能に対する重要度²⁾

性能	概要	重要度
圧縮強度および静弾性係数	圧縮強度は、コンクリートに要求される最も基本的な性能の1つであり、コンクリートの全体的な品質およびほかの性能と密接に関連している。静弾性係数は、建築物の固有周期、柱・梁などの軸方向の変形および曲げ・せん断変形などを算定する場合に必要とされる部材合成を決定する物性である。	3
中性化および鉄筋腐食抵抗性	鉄筋コンクリート構造物の寿命は鉄筋が腐食した時期とされており、その評価方法として中性化深さが鉄筋位置に達した時期とされている。	
ASR抑制効果	反応性シリカを含む骨材とセメントなどに含まれるNa ⁺ およびK ⁺ のアルカリ金属イオンが反応してアルカリケイ酸塩を生成し、これが水分の存在下で膨張してひび割れ、ポップアウトを生じさせる。	2
流動性	フレッシュコンクリートの移動・変形を伴う作業の容易さと、それらの作業によってもコンクリートの均一性が失われないということを表す総合的な性質である。	
空気量	AE剤、AE減水剤を用いてコンクリート中に微細な空気泡を連行すると、単位水量の低減、ワーカビリティの向上および凍結融解作用に対する抵抗性の改善が可能となる。	1
塩分浸透抵抗性	一定量以上の塩化物が存在すると、塩化物イオンの作用によって不動態被膜が破壊され、鉄筋が腐食する。	
温度ひび割れ低減効果	コンクリートの硬化過程における、部材断面内の不均一な温度分布、または拘束された部材において時間とともに変化する温度とそれによって生じる変形によってひび割れが生じる。	1
乾燥収縮ひび割れ抑制性能	コンクリートのポテンシャルの1つと位置付けられ、コンクリートに含まれる水分その表面から蒸発・逸散することによって生じる収縮である。	
凍結融解作用抵抗性	凍結融解作用を受けると、組織脆弱によるひび割れが生じ、より進行した段階で、その部分のコンクリートが崩壊する。	

*1 名城大学 理工学研究科社会環境デザイン工学専攻 修士(工学) (正会員)

*2 名城大学 理工学部環境創造工学科 教授 博士(工学) (正会員)

性化および鉄筋腐食抵抗性, アルカリシリカ反応(ASR)抑制効果をコンクリート構造物の構造安全性を確保する上で必要な最低限度の性能とした。流動性および空気量はコンクリートの施工性に必要な性能である。塩分浸透抵抗性, 温度ひび割れ低減効果, 乾燥収縮ひび割れ制御, 凍結融解作用抵抗性は, 部材あるいは使用箇所によって性能への影響を考慮しなくてよい。これらから, 重要度は, 圧縮強度および静弾性係数, 中性化および鉄筋腐食抵抗性, ASR抑制効果を3, 流動性, 空気量, 塩分浸透抵抗性を2, 温度ひび割れ低減効果, 乾燥収縮ひび割れ制御性能および凍結融解作用抵抗性を1と設定した。

3. FAの使用によるコンクリートの性能への影響

表-1に示した重要度について, FAの使用が圧縮強度および静弾性係数, 中性化および鉄筋腐食抵抗性, ASR抑制効果, 流動性, 空気量, 塩分浸透抵抗性, 温度ひび割れ低減効果, 乾燥収縮ひび割れ制御性能, 凍結融解作用抵抗性に及ぼす影響について検討した。

3.1 FAを使用したコンクリートの文献調査方法

(1) 調査データ

調査データの抽出方法を図-1に示す。2005~2019年刊行の日本建築学会学術講演梗概集材料施工分野, コンクリート工学年次論文集, 日本建築学会技術報告集, 日本建築学会構造系論文集に対し, 検索キーワードを一つ以上含む文献を対象とし, データを抽出した。

(2) 評価方法

評価は, コンクリート 1m³あたりに使用されたFAの絶対容積の合計(FA総体積)(m³/m³)とコンクリートの性能との関係から行った。

3.2 調査結果

コンクリートの諸性能に対し, 文献調査を行った。

(1) 圧縮強度および静弾性係数

図-2にFA総体積と圧縮強度の関係を示す。FAを使用したコンクリートの圧縮強度は, 材齢28日まではFAを使用しないものを下回る傾向にある。材齢91日における圧縮強度は, 同程度となっていることから, 長期材齢になると圧縮強度は大きくなる傾向がみられた。FAを使用しないコンクリートがW/B=60%以上であるため結合材量が少ないもの⁴⁾, FA置換率が40%以上⁵⁾であるものは, 材齢56~91日においてFAを使用しないものの最小値を下回った。

図-3にFA総体積と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数は, 圧縮強度と同様, 材齢28日まではFAを使用しないものを下回った。一方, 材齢91日ではFAを使用しないものを超えるデータもあり, 長期の材齢で静弾性係数が大きくなる傾向がみられた。FA置換率が40%以上のもの⁶⁾は, 材齢91日においてFAを使用しないコン

クリートの最小値を下回った。

(2) 中性化および鉄筋腐食抵抗性

図-4にFA総体積と材齢26週時促進中性化深さの関係を示す。促進中性化深さは, FA混入量の影響がみられ, FA総体積が0m³/m³では, 高耐久RC造設計施工指針(案)⁷⁾における目標品質である25mmをすべて下回るが, FA総

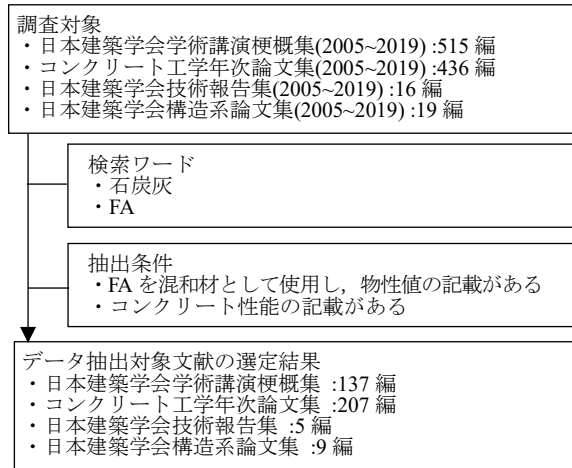


図-1 調査データの抽出方法

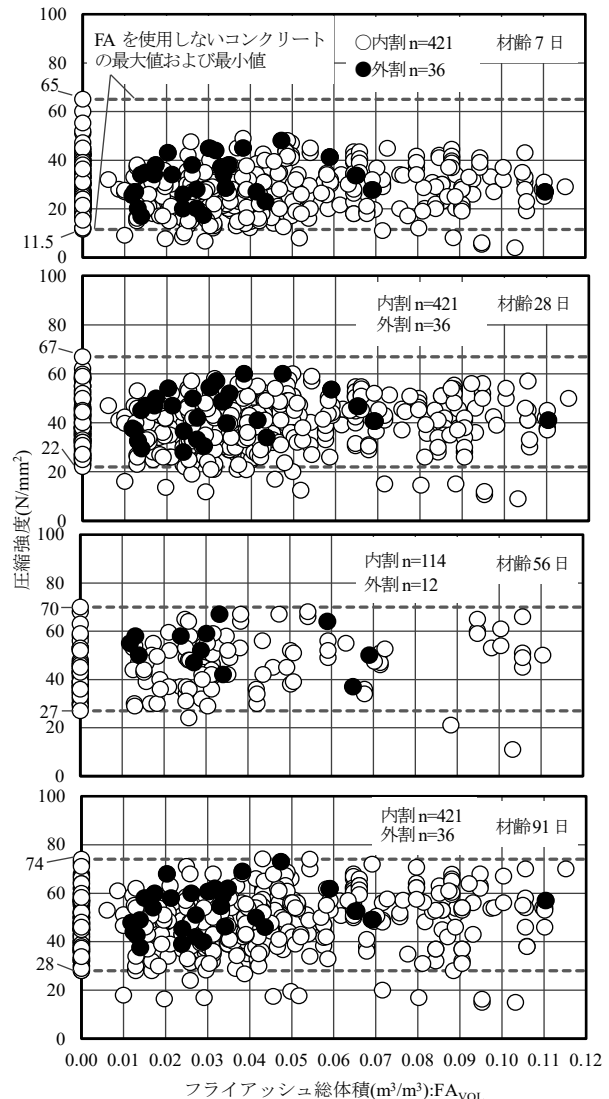


図-2 FA総体積と圧縮強度の関係

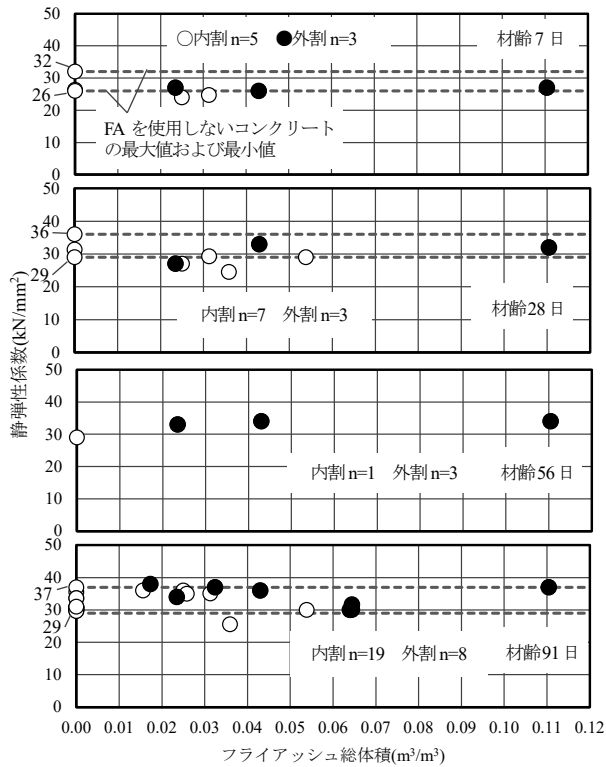


図-3 FA 総体積と静弾性係数の関係

体積が $0.04\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上になると 25mm を超えるデータが多くなる。FA 総体積が $0.01\sim 0.03\text{m}^3/\text{m}^3$ では、 $W/B=60\%$ の場合、促進中性化深さはすべて $25\sim 30\text{mm}$ となった⁸⁾。また、FA 総体積が $0.04\sim 0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ では、 $W/B=40\%$ 以下の場合 $4\sim 11\text{mm}$ となった⁸⁾。FA 総体積が大きい場合でも、 W/B を小さくするなど、コンクリートの強度を増加することで、中性化を抑制することができる。鉄筋腐食抵抗性は、呼び強度が同一の配(調)合において、FA を使用したコンクリートは、FA を使用しないものより鉄筋腐食までの時間が長く、FA は腐食に対する抵抗性が大きくなる⁹⁾。

(3) ASR 抑制効果

図-5 に FA 総体積とモルタルパー法(JIS A 1146)による膨張率の関係を示す。膨張率は、FA 総体積がセメント置換(内割)で 20% に相当する約 $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上で 0 となる。

(4) 流動性

図-6 に $18\pm 2.5\text{cm}$ の FA 総体積とスランプの関係を示す。FA の使用による影響はみられず目標範囲にあった。

(5) 空気量

図-7 に $4.5\pm 1.5\%$ の FA 総体積と空気量の関係を示す。FA の使用による影響はみられず、概ね目標範囲にあった。空気量は、FA の混入量が多くなった場合でも、化学混和剤の使用によって目標値の範囲で調整が可能である。

(6) 塩分浸透抵抗性

図-8 に FA 総体積と塩化物イオン実行拡散係数の関係を示す。FA 総体積が内割で 15% 以上に相当する $0.02\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上使用したものは、塩化物イオン実行拡散係

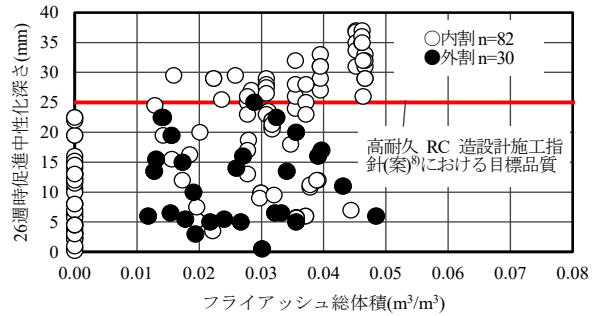


図-4 FA 総体積と促進中性化深さの関係

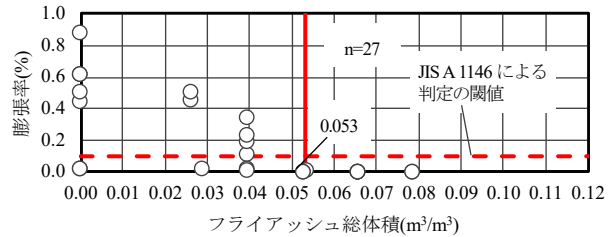


図-5 FA 総体積と膨張率の関係

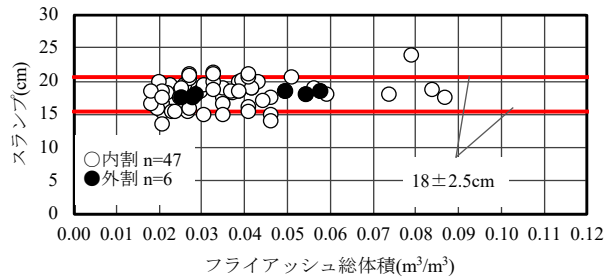


図-6 FA 総体積とスランプの関係

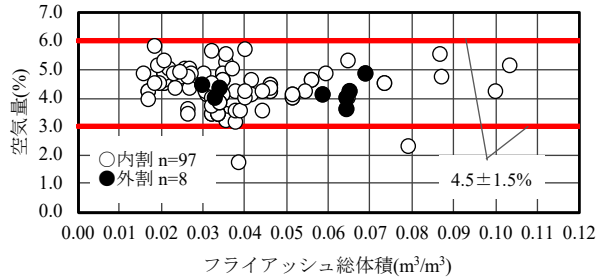


図-7 FA 総体積と空気量の関係

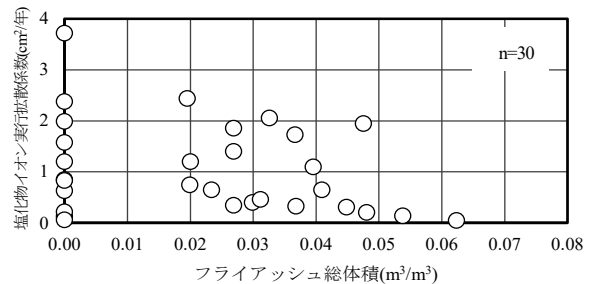


図-8 FA 総体積と塩化物イオン実行拡散係数の関係

数は小さくなり、 $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上で 0 となる。

(7) 温度ひび割れ低減効果

図-9 に FA 総体積と終局断熱温度上昇量の関係を示す。FA 総体積が内割で 15% に相当する $0.02\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上使用したコンクリートは、FA 使用しないものと比べると終局断熱温度上昇量は小さくなる傾向がみられた。

(8) 乾燥収縮ひび割れ制御性能

図-10 に FA 総体積と乾燥収縮率の関係を示す。FA を

使用したコンクリートにおいて、FA 総体積で $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上使用した場合は、すべて 8×10^{-4} 以下となり、FA を使用しないものと比べると、乾燥収縮率は若干小さくなる。

(9) 凍結融解作用低抵抗性

図-11 に空気量と耐久性指数の関係を示す。FA の使用に係わらず、JASS 5 (2022)²⁾による凍結融解作用を受けるコンクリートの目標空気量の範囲である $4.0\sim 6.0\%$ とすることで、耐久性指数は、ほぼすべての供試体が 60 を超え、特記のない場合の相対動弾性係数に対応する 85 以上を満足する供試体が多くなった。

4. 資源循環性の評価方法

4.1 評価方法

著者らは、資源循環性の評価方法として式(1)を提案している³⁾。資源循環性の評価点 Pr は、FA の使用によるコンクリートの性能改善効果に対する評価点 Qr と再生材料使用量に対する評価点 Ar を掛け合わせたものである。本論文においても同様な評価を行った。ただし、Qr, Ar は表-1 に示した重要度と 3. 文献調査の結果から新たに設定した。この Pr が大きくなるほど、再生材料を多く使用した良質なコンクリートを生産したことになる。

等級 0 : $0 \leq Pr \leq 0.5$

等級 1 : $0.5 < Pr \leq 1$

等級 2 : $1.0 < Pr \leq 1.5$

等級 3 : $1.5 < Pr \leq 2$

等級 4 : $2.0 < Pr$

$$Pr = Qr \cdot Ar \quad (1)$$

ここに、Pr : 資源循環性の評価点

Qr : FA の使用によるコンクリートの性能改善効果に対する評価点

Ar : コンクリートの再生材料使用量に対する評価点

コンクリートに FA を使用することによる性能改善効果の指標となる評価点 Qr の算出方法を表-2 に示す。

FA 総体積とコンクリートの諸性能との関係は、比較的明確な関係が確認できたことから、FA 総体積をコンクリートの性能改善効果の評価指標とした。内割、細骨材の一部として置換(外割)といった FA の使用方法を含め、FA 使用量として、単位 FA 量(kg/m^3)を FA 総体積に換算して FA による性能改善効果として評価点 Qr に反映する。Qr の基準となる評価点は 1.0 とし、評価点加点の対象となる条件を満たすことにより評価点を加点して算出する。評価点加点の対象となる条件は、必要条件として、

3. 文献調査の結果から設定した。材齢 91 日の圧縮強度および静弾性係数、空気量、凍結融解作用抵抗性については、FA を使用しないコンクリートと明確な差異がみられなかったため、FA を使用しないものと同等とし、加点はしないこととした。また、中性化抵抗性および鉄筋腐

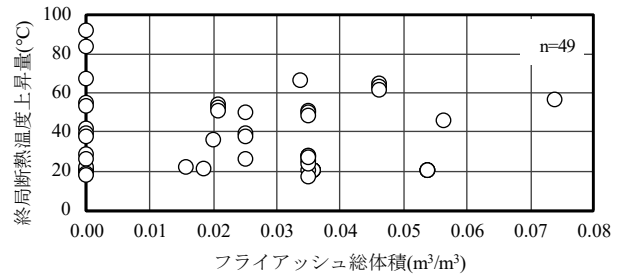


図-9 FA 総体積と終局断熱温度上昇量の関係

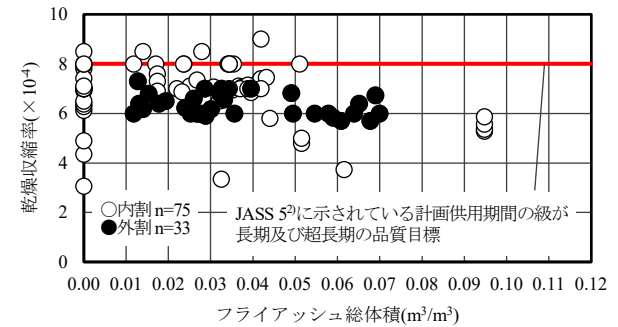


図-10 FA 総体積と乾燥収縮率の関係

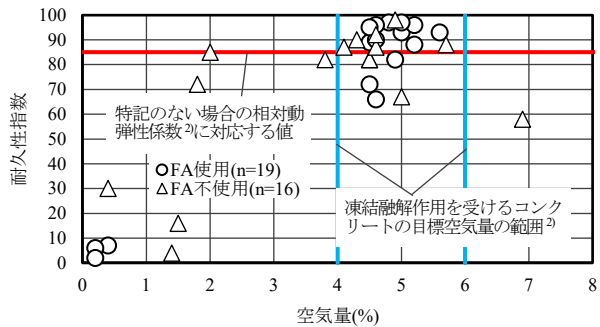


図-11 空気量と耐久性指数の関係

食抵抗性に対して悪影響がみられた場合、評価点の減点を $0.2(-0.2)$ とした。また、流動性、塩分浸透抑制効果、温度ひび割れ低減効果、乾燥収縮ひび割れ制御は、FA の使用による性能改善効果がみられた場合、評価点の加点を $0.1(+0.1)$ とした。例えば、FA の使用により、①、②、③の性能改善効果が期待される場合、評価点 Qr は 1.2 となる。なお、①、②については流動性の増大によって両者の条件を同時に満たすことが考えられるため、両者の改善効果がみられても $+0.1$ とした。FA の使用により、フレッシュコンクリートに対して、①あるいは②の性能改善効果を期待する場合、内割あるいは外割により $0.01\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上の FA 総体積となる場合が多い¹⁰⁾。硬化中のコンクリートに対して、③、④の性能改善効果を期待する場合には、FA 総体積が $0.03\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上とすることが目安となる。FA 総体積を $0.04\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上とすることにより、⑤乾燥収縮率の低減が期待できるが、⑥中性化抵抗性の低下の可能性が高くなる。また、硬化コンクリートが ASR 反応抑制効果を十分に発揮するためには、内割あるいは外割で使用することがあり¹⁰⁾、FA 総体積が $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上となる場合が多い。したがって、コンクリートの性能への影響を FA 総体積ごとに確認することで、FA の使用量

表-2 評価点 Q_r の算出方法

FA 総体積(m ³ /m ³)	単位FA量(kg/m ³)	評価点 Q _r	評価点の対象となる条件*
0	0	1.0	FA を使用しない場合
0.01 以上	30 以上	+0.1	① 流動性増大と粘性増大によるワーカビリティ改善が認められる場合 ② 流動性増大に伴う単位水量の低減が認められる場合
0.03 以上	60 以上	+0.1	③ 塩分浸透抑制効果が認められる場合
	80 以上	+0.1	④ 水和熱低減による温度ひび割れの制御が認められる場合
0.04 以上	70 以上	+0.1	⑤ JASS 5 ² より計画供用期間の長期および超長期の級である乾燥収縮率 8×10 ⁻⁴ が認められる場合
	90 以上	-0.2	⑥ 中性化抵抗性の低下の危険性が認められる場合
0.05 以上	100 以上	+0.1	⑦ ASR 抑制の効果が認められる場合

※ここに示されていない内容については、別途実験により評価点の対象となる条件を確認し、評価点を決定する。

表-3 配(調)合概要^{11), 12), 13)}

配(調)合 No.	参考文献	配(調)合条件		絶対容積(L/m ³)*									
		W/B(%)	s/a(%)	W	C	FAII	NS	CS	FNS	CUS	RLS	NG	RLG
1	11)	55	44	165	95	0	64	240	0	0	0	374	0
2		50	39	175	85	37	0	63	191	0	0	398	0
3	12)	55	50	175	101	67	232	0	0	0	0	310	0
4		55	50	175	101	67	0	0	0	0	266	0	337
5	13)	5	47.8	176	87	31	0	253	0	63	0	345	0

※文献 11), 12), 13)では単位量(kg/m³)で示されているが、絶対容積(L/m³)に換算した。

による評価に加えて、性能改善効果への評価を行うことが可能となり、評価点 Q_r を用いることで、要求性能を満足した上で資源循環性を有するコンクリートの配(調)合を FA の使用量からの設定が可能となる。ただし、FA を外割で使用する場合、コンクリート中の結合材料が増えるため、①~⑦のすべてに該当する可能性が考えられる。コンクリートは、それぞれの構成材料で、副産物・廃棄物の利用が可能である。水にはレディーミクストコンクリート工場において副産される回収水、結合材にはセメントの一部に混和材として FA 等の副産物、骨材には再生骨材、回収骨材、各種スラグ骨材等の副産物・廃棄物を利用できる。これらの使用は、コンクリートの再生材料使用量に対する評価点 Ar に反映され、式(2)により算出する。ただし、本論文では、環境への影響が大きいとされるセメント、細骨材、粗骨材の影響のみを反映した。なお、再生材料使用量は、絶対容積によることとした。

$$Ar = \frac{rVc}{Vc} + \frac{rVs}{Vs} + \frac{rVG}{rVG} \quad (2)$$

ここに、Ar:コンクリートにおける再生材料使用量に対する評価点

rVc:単位結合材量のうちセメントの再生材料使用量(L/m³)

Vc:単位結合材(L/m³)

rVs:単位細骨材量のうち細骨材の再生材料使用量(L/m³)

Vs:単位細骨材量(L/m³)

rVG:単位粗骨材量のうち粗骨材の再生材料使用量(L/m³)

VG:単位粗骨材量(L/m³)

資源循環性の評価点 Pr を計算するために、Q_r と Ar を掛け合わせることで再生材料使用量による評価に性能に対する評価を加えることができ、配(調)合からコンクリートへの再生材料の使用による資源循環性の評価を容易

表-4 資源循環性の評価点の試算結果

No.	評価点			等級
	Q _r	Ar	Pr	
1	1.0	0	0	0
2	1.3	1.06	1.38	2
3	1.3	0.40	0.52	1
4	1.3	2.40	3.12	4
5	1.3	0.46	0.60	1

に行うことが可能となる。このため、コンクリートの資源循環の促進を図ることができると考えられる。

4.2 試算

(1) 試算対象の概要

試算は、FA の使用方法、骨材に使用する再生材料の種類が異なる配(調)合を対象に行った^{11), 12), 13)}。

試算の対象とした配(調)合の概要を表-3 に示す。細骨材には砕砂(CS)、陸砂(NS)、フェロニッケルスラグ細骨材(FNS)、銅スラグ細骨材(CUS)および再生細骨材 L(RLS)を用いた。粗骨材には砕石(G)および再生粗骨材(RLG)を用いた。なお、FA は、No.2 では施工性の改善、凍結融解抵抗性や乾燥収縮の改善、No.3~4 では圧縮強度や塩分浸透抑制効果を目的に外割の使用となっており、No.5 では施工性の改善を目的に内割の使用となっていた。

(2) 試算結果

表-4 に資源循環性の評価点の試算結果を示す。再生材料を使用していないコンクリート(No.1)は、Q_r=1.0 となり、Ar=0 となる。本配(調)合におけるコンクリートの再生材料使用量に対する資源循環性の評価点 Pr は 0 と算出されるため等級 0 となる。再生材料を使用したコンクリート(No.2)は、表-2 より、Q_r は単位 FA 量が 37L/m³ であるため、①流動性増大と粘性増大によるワーカビリティ改善、②流動性増大に伴う単位水量の低減、③塩分浸透抑制効果、④水和熱低減による温度ひび割れの制御に該当するため、Q_r=1.3 となった。本配(調)合では、FAII および FNS を再生材料として使用している。本配(調)合のコンクリートの再生材料使用量に対する評価点 Ar, Pr

は以下の通りに算出され、等級は Pr が 1.0 を超えているため、等級 2 となった。

$$Ar = \frac{37}{85+37} + \frac{191}{63+191} = 1.06$$

$$Pr = Qr \cdot Ar = 1.3 \times 1.06 = 1.38$$

これらと同様の方法で No.3~5 を試算した結果、No.1~5 は、それぞれ等級 0、等級 2、等級 1、等級 4、等級 1 となり、配(調)合のうち、No.4 は骨材をすべて再生材料に置換していることから、Ar が最も大きくなったため、Pr が大きくなり、資源循環性の高い配(調)合と評価された。

以上から、FA 総体積からコンクリート性能改善効果を評価し、コンクリートの配(調)合から再生材料使用量を算出することで資源循環性を評価することが可能である。

5. まとめ

文献調査により、FA の使用がコンクリートの性能に及ぼす影響について確認し、資源循環性の評価方法を検討した。その結果、以下のようなことがいえる。

- (1) FA 総体積とコンクリートの諸性能との関係は、比較的明確な関係が確認できたことから、FA 総体積は性能改善効果の評価指標として有効である。
- (2) 資源循環性の評価点 Pr を計算するために、Qr と Ar を掛け合わせることで再生材料使用量による評価に性能に対する評価を加えることができ、配(調)合からコンクリートへの再生材料の使用による資源循環性の評価を容易に行うことが可能となる。
- (3) コンクリートの配(調)合から算出した資源循環の評価点 Pr が大きな値であるほど、再生材料を多く使用して良質なコンクリートを生産したことになる。

以上から、FA 総体積とコンクリートの性能の関係から FA の使用量によるコンクリートの性能への影響を整理することで、性能改善効果を定量化し、資源循環性をコンクリートの配(調)合から評価することが可能となる。

謝辞

本検討の一部は、日本建築学会「フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針改定小委員会(主査：野口貴文 東京大学大学院教授)」の活動で実施した。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP 21K04362 の助成を受けた。本論文は、文献を多数引用したため、文献名は割愛した。執筆者の方々に敬意を表するとともに、多数の貴重な研究が公表されていることに謝意を表す。

参考文献

- 1) 経済産業省：セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査－混合セメント普及拡大に関する検討－報告書，2016.3

- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2022，2022.11
- 3) 道正泰弘，山岸英輝，本間大輔，野口貴文：フライアッシュを使用するコンクリートの資源循環性評価に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.3-4，2022.7
- 4) 石川潤，湯浅昇，三浦彰吾：フライアッシュを内割混合したコンクリートの表層から内部にわたる不均質性(その 4. 材齢 91 日における細孔径分布)，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.587-588，2012.7
- 5) 細川大介，室野井敏之，竹内直也，溝渕利明：フライアッシュ多量添加によるコンクリートの水和熱抑制効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33 No.1，pp.179-184，2011.6
- 6) 原孝志，石川嘉崇，木下茂，井元晴丈：C-S-H 系早強剤を用いたフライアッシュコンクリートの強度発現性および耐久性，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.31-32，2016.6
- 7) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説，1991.1
- 8) 岡田裕ほか 4 名：フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性に関する研究(その 1.促進中性化深さ試験結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.233-234，2014.7
- 9) 開洋介，関谷美智，齋藤敏樹：中性化した鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.29-30，2017.7
- 10) 土木学会：コンクリートライブラリー132，循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術-利用拡大に向けた設計施工指針試案，2009.1
- 11) 佐藤辰輝，黒田保，金氏裕也，野原秀彰：フェロニッケルスラグ細骨材とフライアッシュを多量に使用したコンクリートのフレッシュ性状と硬化後の性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1043-1048，2021.6
- 12) 松坂祐介，宮崎健治，横井克則，上田隆雄：低度処理骨材を用いた再生コンクリートの性能向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33 No.1，pp.1565-1570，2011.6
- 13) 山田藍ほか 5 名：暑中期におけるコンクリートの圧送性に関する研究(その 18.銅スラグ細骨材およびフライアッシュを用いたコンクリートの寒中期実施工と標準期および暑中期実験における圧送性の比較)，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.461-462，2017.7