

氏 名	錦 木 健 二
国 籍 ・ 本 籍	石川県
学 位 の 種 別	博士（工学）
学 位 の 番 号	甲392
学位授与の日付	令和8年3月17日
学位授与の要件	名城大学学位規程第 3 条第 3 項該当
学 位 論 文 題 目	フライアッシュを使用するコンクリートの環境性評価に基づく調合設計法に関する研究
論文審査委員	主 査 道 正 泰 弘
	副 査 西 山 桂
	副 査 岩 下 健太郎

論文内容の要旨

1. はじめに

1.1. 研究の背景

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た。具体的には、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、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の方向性が示された。石炭灰の一種であるフライアッシュ(FA)は、セメント混合材またはコンクリート混和材として使用することで、セメントの製造時に生じる二酸化炭素(CO₂)の削減に繋がり、環境負荷低減が期待できる。また、長期強度の増進、アルカリシリカ反応の抑制、水和熱低下などコンクリートの性能を改善する効果があり、建築物の長寿命化が可能となり、社会的な資源循環性を高めることに繋がる。

1.2. 研究の目的

本研究は、FA コンクリートの利用拡大を目的に、k 値に基づく FA コンクリートの強度発現、耐久性を考慮した圧縮強度推定および環境性評価を組合せた FA コンクリートの調合設計法を構築した。

1.3. 本論文の構成

本論文は、8章より構成されている。本論文の構成と検討の流れを図1.1のフロー図に示す。

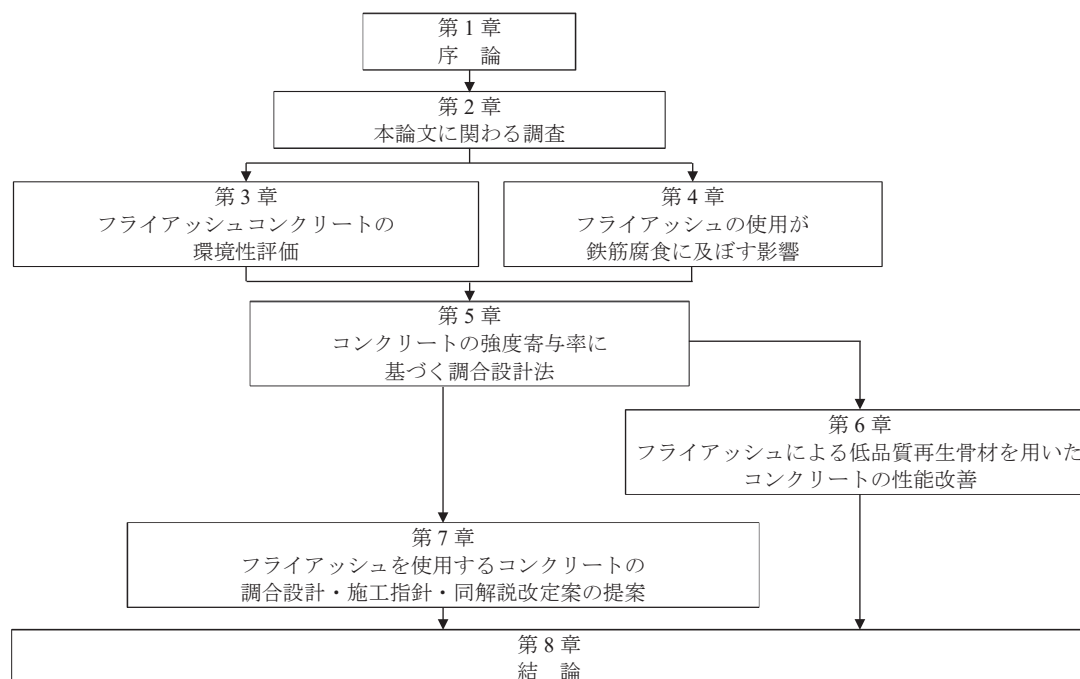


図 1.1 本研究のフロー図

第1章では、本研究の背景と目的について示した。

第2章では、本論文に関わる調査および既往研究の概要について示した。調査として、石炭火力発電の状況、FAの発生と利用状況、FAコンクリートの調合設計・環境性評価、FA使用量によるコンクリートの性能に及ぼす影響について調査した。

第3章では、FAを使用するコンクリートの環境性評価について示した。環境性評価のうち資源循環性の評価において、FAの使用による性能改善効果の明確な評価方法を提案した。

第4章では、FAの使用が鉄筋腐食に及ぼす影響について示した。FAの内割、外割および内割と外割の併用によるFAの使用方法が、鉄筋腐食に及ぼす影響を実験的に検討した。

第5章では、コンクリートの強度寄与率(k値)に基づく調合設計法について示した。FAの使用方法および高炉スラグ微粉末(GGBFS)との組合せが、k値に及ぼす影響を実験により明確化することで、環境性に配慮したFAコンクリートの調合設計法を提案した。

第6章では、FAによる低品質再生骨材(再生骨材L)を用いたコンクリートの性能改善について示した。FAの外割使用による再生骨材Lを用いたコンクリートの性能改善効果について実験的に検討した。

第7章では、日本建築学会「FAを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」²⁾への改定案を提案した。

第8章では、本研究の取り纏めた結論を示した。

2. 本論文に関わる調査

2.1 調査資料および文献リスト

本論文に関わる調査として、地球環境問題、FA の現状、FA に関わる法律関係について既往研究や文献を調査した。また、FA の使用によるコンクリートの性能に及ぼす影響について文献の実験結果から解析した。参考として調査した文献資料、実験や解析の実施や検討に際して、研究資料を 437 編調査した。

2.2 海外の状況

FA コンクリートの調合設計検討のため、CO₂ 排出上位 3 か国(中国・インド・アメリカ)の FA の規格、品質、再利用の状況および k 値とライフサイクルアセスメント (LCA) による環境評価に関する研究動向を調査した。中国・インド・アメリカにおいても FA の大量使用および有効利用について研究されている。

2.2.1 FA の規格

中国、インド、アメリカでは FA の規格が異なり、それぞれ ISO や ASTM を基にしている。中国は GB, インドは IS, アメリカは ASTM を使用。中国は FA の発生量が多いものの再利用率は低く、インドは再利用率が高いがセメント利用が中心である。アメリカでは、FA を化学組成でクラス C と F に分類し、用途を分けており、クラス C は早期強度、クラス F は長期強度の発現が特徴である。

表 2.1 フライアッシュの規格と品質

国		中国		インド, アメリカ		日本
項目		ISO 22904		ASTM C618 Type F	ASTM C618 Type C	JIS A 6201 FAII
化学的要素	SiO ₂ (%)	≥70 % by mass		≥70 % by mass	≥50 % by mass	≥45
	Al ₂ O ₃ (%)					-
	Fe ₂ O ₃ (%)					-
	CaO(%)	≤10		≤10	≤30	-
	MgO(%)	≤5.0		≤5.0	≤5.0	-
	SO ₃ (%)	≤3.0		≤5.0	≤5.0	-
	P ₂ O ₅ (%)	≤5.0		-	-	-
	強熱減量 (%)	Category A	≤5.0	-	-	≤5.0
		Category B	≤7.0			
		Category C	≤9.0			
	湿分 (%)	≤1.0		≤3.0	≤3	≤1.0
	アルカリ全量 (%)	≤5.0		≤1.5	≤1.5	-

2.2.2 研究動向

k 値の研究について、中国において、Huang ら²⁾は、FA を使用するコンクリートに対して、適切な水とセメント質材料の比(W/C_m)の予測のために、FA の k 値を用いた強度の予測式を提案している。

インドにおいて、Babu ら³⁾は、材齢の経過に依存する k_e 値と FA の置換率に依存する k_p 値の合計を k 値としている。W/B を k 値によって補正することで、FA コンクリートの圧縮強度推定式を提案している。

アメリカにおいて、Bhat ら⁴⁾は、FA のポズラン反応により生成される水和物の体積から圧縮強度を推定している。FA のポズラン反応により生成される水和物の体積率の推定に k 値を使用する研究例が

ある。

LCA による環境性評価について、中国およびアメリカでは、LCA による環境性評価は、セメント製造から出荷までの環境負荷の基準値を温室効果ガス排出量やエネルギー使用量として評価する事例がある^{5), 6)}。

2.3 FA を使用したコンクリートの文献調査

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検討した結果、FA の使用による改善効果は長期強度の増進、乾燥収縮の低減およびアルカリシリカ反応の抑制がみられた。一方で、FA の使用量の増加に伴い中性化抵抗性が低下する傾向がみられた。

3. FA コンクリートの環境性評価

2022 年度の JASS 5⁷⁾の改定により、従来のコンクリートの性能に加え、環境性は新たに追加の評価項目となった。環境性は、低炭素性、環境安全性、資源循環性により評価される。資源循環性の評価(P_r)は、FA の使用による性能改善効果に対する評価(Q_r)と再生材料の使用量(A_r)によって定量的に評価される。

$$P_r = Q_r \times A_r \quad \text{式(3.1)}$$

ここに、 P_r :資源循環性の評価点

Q_r :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

A_r :コンクリートの再生材料使用量に対する評価点

FA による性能改善効果と FA の使用量の関係から、 Q_r の算出方法をコンクリート性能の重みづけによって再分類した。評価点 Q_r の算出方法を表 3.1 に示す。FA の使用方法や骨材種類が異なる調査に対して試算した結果、提案した Q_r の算出方法により、FA による性能改善効果を明確に評価することが可能であった。

表 3.1 評価点 Q_r の算出方法

単位 FA 量 (kg/m ³)	評価点 Q_r	評価点の対象となる条件※
0	1.0	FA を使用しない場合
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、または ② 流動性増大に伴う単位水量の低減が認められる場合 あるいはその両方の効果が認められる場合
60 以上	+ 0.1	③ 塩分浸透抑制効果が認められる場合
70 以上	+ 0.1	④ JASS 5 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
80 以上	+ 0.1	⑤ 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
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
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。

4. FAの使用が鉄筋腐食に及ぼす影響

本章では、結合材種類、中性化、外部からの水分供給の条件を変化させたモルタルにより検討を行った。

鉄筋腐食は、鉄筋位置まで中性化し水分供給がある条件の供試体は鉄筋腐食の進行が速く、いずれか一方の条件のみの供試体では、遅くなる傾向がみられた。

5. コンクリートの強度寄与率に基づく調合設計法

OPC および BB に対して、FA の内割、外割および内割と外割を併用した FA コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に関する実験的検討の結果から、FA の組合せごとに k 値を検討した。さらに、環境性のうち、資源循環性について、FA による性能改善効果を明確に評価し、低炭素性、環境安全性とともに評価を行った。これらから、環境性に配慮した FA コンクリートの調合設計法を構築した。

5.1. k 値の検討

図 5.1 に示すコンクリートの実測値と予測値の関係より、圧縮強度の予測値と実測値の間には、明確な相関がみられた。このことから、 k 値を用いた FA コンクリートの推定式は、全ての組合せにおいて高い精度で推定が可能である。

図 5.2 に示す材齢と k 値の関係から、 k 値は全ての組合せにおいて、材齢の経過に伴い大きくなる傾向がみられた。 k 値を組み込んだ推定式によって、管理材齢における圧縮強度の推定が可能である。

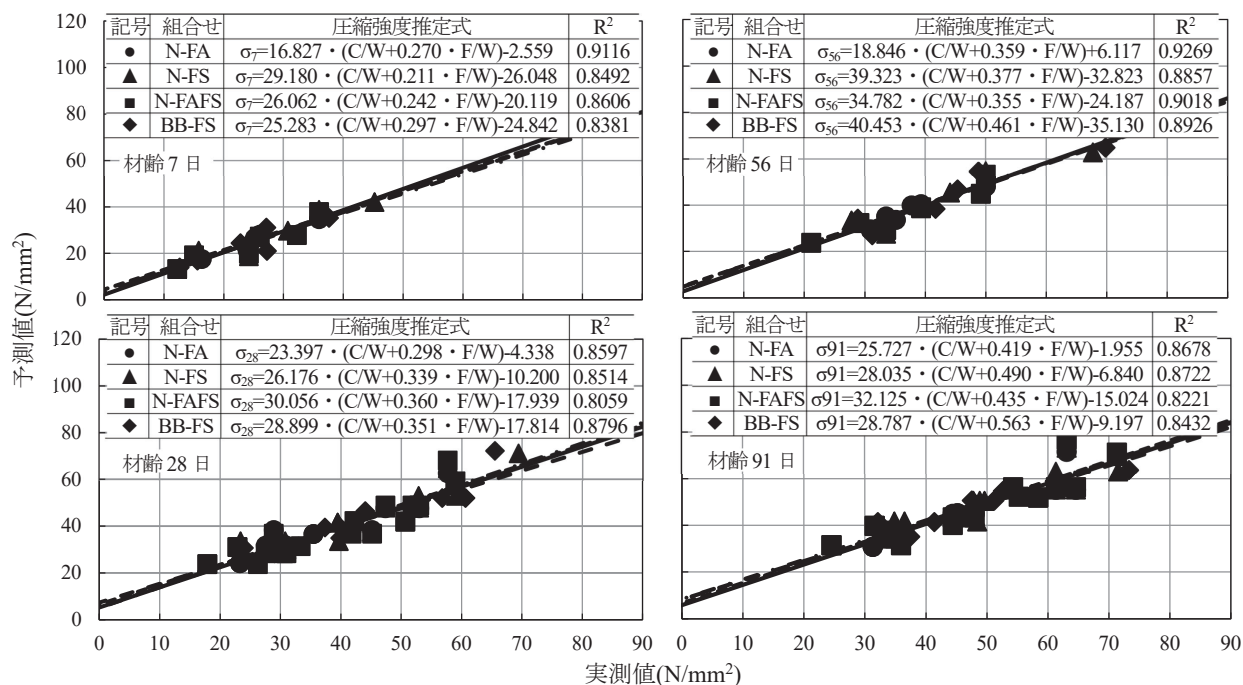


図 5.1 実測値と予測値の関係

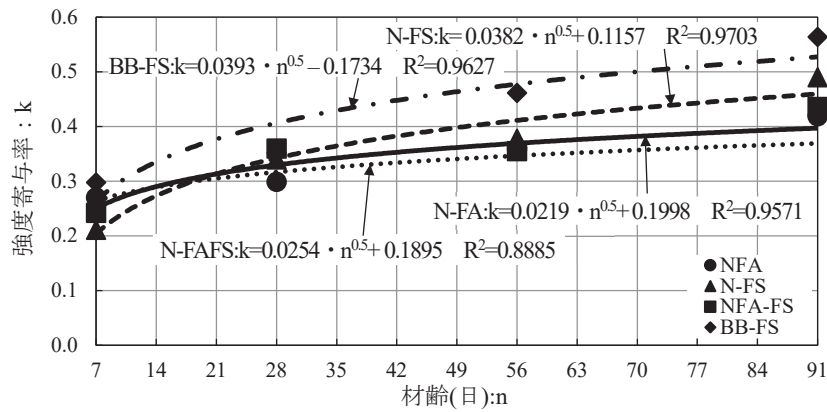


図 5.2 材齢と k 値の関係

5.3. 調合設計フロー

図 5.3 に k 値に基づく調合設計のフローを示す。

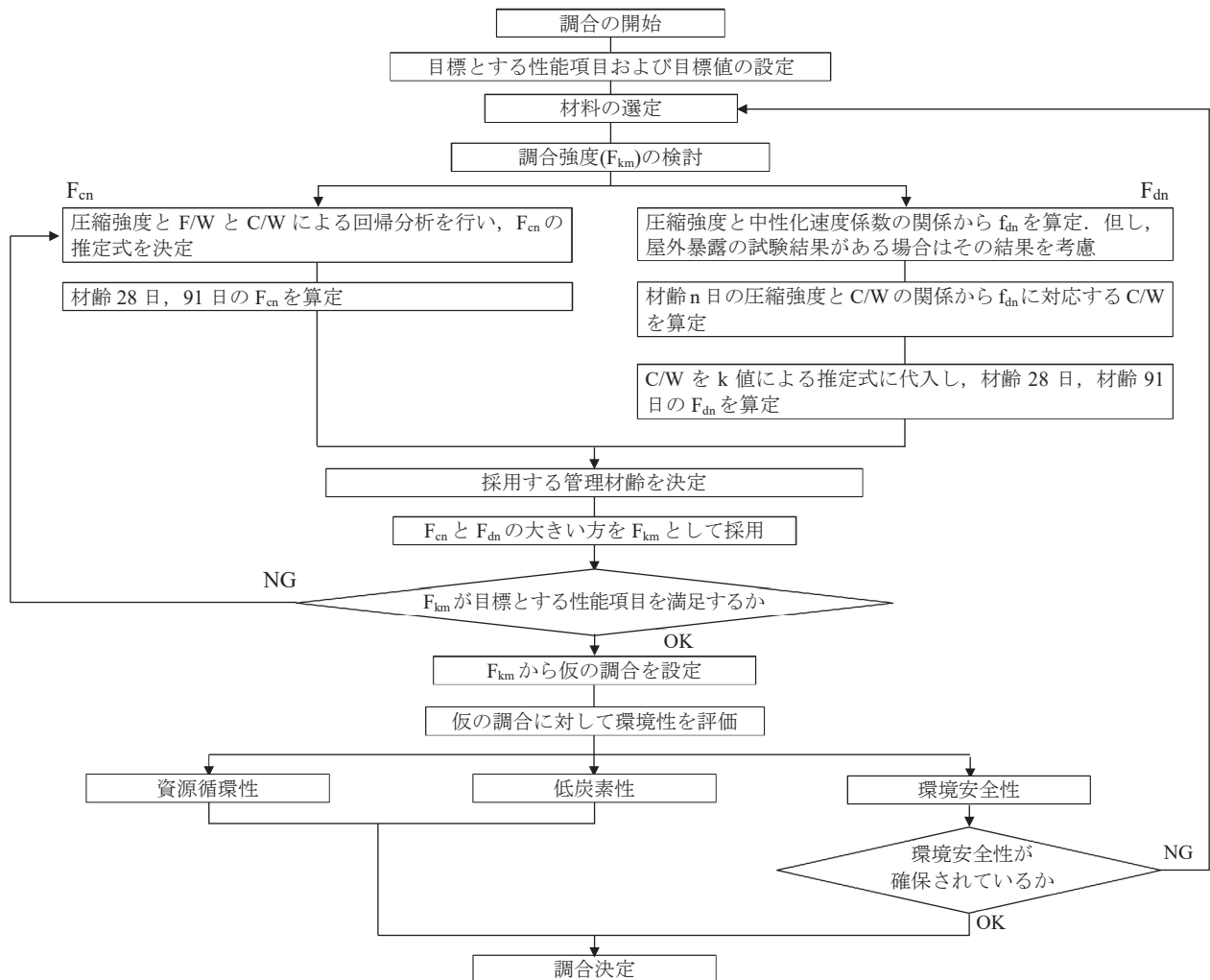


図 5.3 k 値に基づく調合設計のフロー

6. FAによる低品質再生骨材を用いたコンクリートの性能改善

本章では、FAの外割使用による再生骨材 L を用いたコンクリートの性能改善効果について実験的検討を行った。FAの外割使用により、目標とする性能を得ることが可能となる。

7. FAを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説改定案の提案

2024年に発刊された日本建築学会「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・同解説」⁸⁾について、FAの使用によるコンクリートの品質改善に対する評価点 Q_r の算出方法および単位FA量の決定における方法について改定案を提案した。

8. 結論

以上から、 k 値を用いた推定式により、FAの組合せに対応した設計強度が得られ、環境性として資源循環性、低炭素性を明確に評価できることから、提案した調合設計法により、環境性に配慮した適切な調合設計が可能となる。

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) Huang C. H., Lin S. K., Chang C. S. and Chen H. J.: Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash, *Construction and Building Materials*, Vol.46, pp. 71-78, 2013.11 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.016>)
- 3) Babu K. G. and Rao G. S. N.: Efficiency of fly ash in concrete with age, *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.3, pp.465-474, 1996
- 4) R. Bhat et al.: A comprehensive analysis of hydration kinetics and compressive strength development of fly ash-Portland cement binders, *Journal of Building Engineering*, Vol.88, pp.1-26, 2024.7 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109191>)
- 5) Ma F., Sha A., Yang P. and Huang Y.: The Greenhouse Gas Emission from Portland Cement Concrete Pavement Construction in China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol.13, Issue 7, 2016.6 (DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>)
- 6) Hottle T. et al.: Environmental life-cycle assessment of concrete produced in the United States, *Journal of Cleaner Production*, Vol.363, 2022.8 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131834>)
- 7) 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
- 8) 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・同解説，2024