循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの利用促進に向けて

前 川 宏 一*

概 要 本文は塩化物イオンの浸透、中性化、アルカリ骨材反応、ひび割れに対するフライアッシュコンクリートの抑制効果と施工性能に関する評価手法を提案するものである。あわせて、フライアッシュの結合材としての役割と微粒分としての働きを同時に考慮する配合設計と、設計施工計画の一連の流れを提示した。

キーワード：フライアッシュ、環境負荷、資源有効利用、設計施工、耐久性、ひび割れ

1. はじめに

土木学会コンクリート委員会では、日本フライアッシュ協会、石炭エネルギーセンター、電力各社の委託を受け、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を目指して、2007年に調査研究を開始した。フライアッシュの有効利用は、施工性の向上、ひび割れの抑制、耐久性の向上、長期強度の増進、アルカリ骨材反応の抑制など、コンクリートに品質向上をもたらすのみならず、温室効果ガス排出の低減や骨材事情の悪化に伴う細骨材の代替利用などの利点も兼ね備えている。3年の調査研究の後、本年2月に利用促進に向けた技術提案を、土木学会コンクリートライブラリー¹⁾（以下、ライブラリー）として出版した。本書は系統的な実験研究と調査に基づき、有効利用技術を報告するものであるが、土木学会コンクリート標準示方書^{2),3)}とフライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）⁴⁾を補完する形で、計画、設計、施工段階ごとの実務に適用することができる。筆者はこれに小委員会委員長として関与する機会を得たので、委員各位を代表してここに要点を概説したい。

2. フライアッシュコンクリートの品質の定量化

フライアッシュは、コンクリートに混和することで①環境負荷の低減、②施工性能の改善、③コンクリートの長期強度の増進、④コンクリート構造の耐久性向上、⑤コンクリートの体積変化の抑制、⑥アルカリ骨材反応の抑制等の効果が期待できる。これらは既存の知見であるが、性能設計に活かすレベルまで定量化されるに至っていない。我が国で流通している外国産の石炭に由来するフライアッシュに関して、小委員会では、コンクリート標準示方書に基づく設計・計画段階で不十分であった

事項を重点的に検討した。ライブラリーの2章は10ページ弱にまとめられ、この章のみで要点を理解できるように編集されている。本文も2章の構成に従って解説を加えたものである。より詳細な情報が必要な場合には、以後の章を参照する出版形態とした。これは発注-受注者間での技術協議を容易にすることを意図したものである。図-1と図-2が当ライブラリーの全体概要であり、黒枠で囲った部分が本調査研究の結論と成果であって、コンクリート標準示方書を補完する、具体的な技術提案である。図中の章番号はライブラリーを構成する各章に対応している。

2.1 環境負荷低減とフライアッシュの有効利用計画

構造計画は要求性能、施工、維持管理、環境および景観、経済性を考慮し、総合的な観点に立つて行うことが肝要である。一連の建設プロジェクトで排出される温室効果ガスは、主に材料の製造段階に発生する。産業副産物であるフライアッシュの使用は、それ自体、資源循環と温室効果ガスの排出削減に寄与するものであり、計画段階でその効果を積極的に考慮するのが循環型社会において相応しい。現在の電力需要、石炭灰の処理量に関する将来予測から、フライアッシュを100万t規模で有効活用することを想定し、その観点からフライアッシュの有効利用方法が検討された。現状では、石炭灰は主にセメント原料として活用されているが、その他の有効利用を促進し、セメント原料への他産業からの廃棄物利用の余地を増やすことで、一層の社会的役割を果たすことができる。ライブラリーではフライアッシュのインベントリーデータを掲載するとともに、製造現場までの輸送に伴う環境負荷量の算定を行った。

コンクリート構造物が周辺環境に影響を与える可能性のひとつに、フライアッシュ中に根源的に含まれる微量成分の溶出が考えられる。このため、フライアッシュを用いた硬化コンクリートならびにモルタルからの微量成分溶出についても検討がなされた。溶出試験法としては、

* まえかわ・こういち／東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授（正会員）

図-1 コンクリートの設計・施工計画の流れと技術提案事項¹⁾

Promotion of Fly Ash Concrete in Sustainable Society

By K. Maekawa

Concrete Journal, Vol.48, No.6, pp.3~8, Jun. 2010

Synopsis Here presented is the resistance of fly ash concrete against chloride ion penetration, carbonation, alkali-aggregate reaction and cracking, and the evaluation method for workability is proposed. Based upon this knowledge, a new mix design recommendation is made by explicitly taking into account fly ash additive as hardening binder and fine powders, and the procedure of design and construction planning is summarized.

Keywords : fly ash, environmental burden, efficient use of resources, design and construction, durability, crack

図-2 配合設計の流れと技術提案事項¹⁾

利用有姿で浸せき試験を行う JIS K 0058-1 (スラグ類の化学物質試験方法 第1部: 溶出試験方法) が適用された。環境基準に抵触することなく、ほとんど検出困難なレベルに留まっている。セメント硬化体に強固に固定、取り込まれるゆえんである。フライアッシュ単体の地表面近傍での貯蔵、廃棄とは根本的に環境負荷の程度が異なるのである。

2.2 設 計

フライアッシュは、コンクリートに混和することでコンクリートの長期強度や組織の緻密化などの増進が期待でき、構造物の耐久性の向上やひび割れの抑制といった効用をコンクリートに与えることができる。フライアッシュ

を用いたコンクリートの良好な品質は、一般に材齢 28 日を超えて徐々に発現される。早期に高い物性が発現されるものではない。この遅咲きの特性を活かして適材適所に活用することが合理的である。しかし、現実には普通コンクリートと同様に、材齢 28 日における圧縮強度で品質が規定される場合が多く、フライアッシュコンクリートの品質保証方法として適切とは言い難い。28 日以降 91 日までの圧縮強度を指標とした品質の規定で構造設計と耐久設計を行うことが、フライアッシュコンクリートの高い品質を有効に活用する直接的な方法である。

近年のコンクリート用細骨材の枯渇や品質低下から、細骨材の代替材としてフライアッシュを使用して良い成

績を納めた事例がある。この場合もフライアッシュの使用量や品質等を考慮すれば、コンクリートのフレッシュ性状の改善だけでなく、耐久性の向上等の特性をも併せて付与することができるのである。このように、フライアッシュを混和する場合には、フレッシュ性状や硬化後の特性等、コンクリートに付加したい性能を踏まえて使用方法或使用量を設定するのがよい。ライブラリーではコンクリートの性能照査に基づく材料設計を前提に、フライアッシュによりコンクリートに付加できる種々の性能を、設計施工段階で使用できるように定量評価する試案を提示した。

(1) 強度

フライアッシュを用いたコンクリートは長期材齢での強度増加が見込まれることから、構造物の特性を踏まえて保証材齢に応じた配合設計をするのが適切である。例えば、建設プロジェクトで初期段階に建設され、供用されるまでに現場内で養生され得る場合には、保証材齢を長く設定することで、必要にして十分な品質を得ることができる。このような場合を想定して、フライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度発現を、「セメント有効係数 k_1 値」の概念を導入して評価できるようにした。「セメント有効係数 k_1 値」は、フライアッシュの結合材としての強度発現への寄与を、セメントの強度発現に対する比率として定義している。図-1中の圧縮強度推定式において、全国のフライアッシュ供給元の違いによる強度特性の差異はほとんどみられなかった。換言すれば、品質を規定する材齢を56日や91日に設定しても、およそ材齢28日の試験結果から推定することが可能である。今回の調査・試験結果に基づいて評価すると、材齢91日の圧縮強度は材齢28日の圧縮強度の約1.25倍となった。この結果を基に、設計におけるコンクリート強度の特性値の基準材齢を91日とする場合の考え方をまとめ、現行の品質保証の枠組みのなかで有効に利用する手だてを提示した。フライアッシュによる中長期の品質向上を見込むことが可能となり、効用に対するコストを下げる実質的に可能となることを指摘しておきたい。

(2) 中性化速度係数

フライアッシュを用いたコンクリートの中性化予測には、コンクリート示方書〔設計編〕²⁾の中性化速度係数の予測式を準用できることが確認できた。現行の示方書の式では、混和材の種類により定まる定数 k_2 は(図-1の中段)、安全をみてフライアッシュの場合 $k_2=0$ と設定されている。フライアッシュを用いたコンクリートでは、中性化の進行が速いとされているためである。しかし、この k_2 値は養生条件や環境条件によって異なることが認められている。本調査研究の成果から、 k_2 値に与える養生・環境条件の影響を取り入れた評価式を提案するに至った。中長期材齢で品質の向上が期待できるフライアッシュコンクリートでは、比較的、材齢初期で実

施される促進中性化試験では、実環境下にある構造物中のかぶりコンクリートの正しい姿を評価しにくい。事実、条件によっては、促進中性化試験では相対的に中性化しやすいと判定されるにもかかわらず、実構造物のかぶりコンクリートでは中性化の進行が十分に抑制される場合がある³⁾。さらに長期にわたり、中性化抵抗性が向上し続けることが期待できる。今回の提案式は安全の余裕代を多く見込んだものともいえる。フライアッシュコンクリートの中長期の実力が、今後の研究によって定量的に解明されることを期待したい。それまでは当面の安全側の措置として、図中の k_2 値が提案されている。

(3) 塩化物イオン拡散係数

実環境下にある実構造物の塩化物浸透に関する調査より、フライアッシュを用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数と水結合材比との関係の回帰式を検討した。図-3に示すとおり、フライアッシュを用いたコンクリートの回帰式は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に記載されている高炉スラグ・シリカフェームを用いた場合の回帰式と比較しても下方に位置することが認められた。同一水結合材比でも、フライアッシュを用いたコンクリートにおける塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さくなることから、フライアッシュを用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数と水結合材比の回帰式として、高炉スラグ・シリカフェームを用いた場合の式を適用すれば、少なくとも安全側の評価ができることが分かった。ボゾラン反応に伴う微細組織の緻密化などによる効果と考えられる。

コンクリート標準示方書〔設計編〕では、塩化物イオンの浸透に関する照査式に線形拡散式を準用し、見掛けの拡散係数で特性を表現しているが、これはあくまで当面の移行措置である。フライアッシュに限らず、高炉スラグや低水セメント比コンクリートでは、イオンの吸着、連続空隙構造の時間的变化、水分移動の非可逆性などの非線形現象が顕著となり、線形拡散式を当てはめること自体、困難となってくる。条件によっては、浸透が停止

図-3 フライアッシュコンクリートの見掛けの拡散係数¹⁾

するとみられる状況が報告されつつある。この領域では一層、ポゾランの有利性が際立ってくるものと推定される。当ライブラリーではここまで踏み込むことができなかった。研究の一層の進展を望みたい。

(4) 初期ひび割れ

コンクリート標準示方書〔設計編〕では、初期ひび割れ抵抗性に関する物性値は、実験あるいは既往のデータに基づいて定めることを原則としている。ライブラリーでは、中小規模程度の構造物を想定し、完全拘束条件下でひび割れ発生に要する時間を用いて抵抗性を評価した。その結果、従来からの知見¹⁾と同様に、普通ポルトランドセメントや他の混和材を用いたコンクリートに比べて優位性が認められた。また、収縮ひび割れに対する抵抗性を収縮応力試験や自由収縮試験で評価した結果（外部に設置した鋼材で拘束）、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートと比較しても、優位性が認められた。ただし、初期養生が十分でない場合には、普通コンクリートよりも収縮が大きくなる場合も見出された。初期ひび割れ抵抗性を期待する場合には、初期養生に十分注意する必要があることが確認された。

一方、RC部材では（コンクリート内部に設置した鉄筋と付着でコンクリートを拘束）、上記の条件下でも、ひび割れ発生に要する時間が伸びることが確認された。すなわち、無筋コンクリートでの特性試験では、フライアッシュコンクリート構造のひび割れ抵抗性を過小評価する傾向にあることが認められた。安全側の評価を与えるという意味では、無筋拘束試験の評価は当面の措置として適当と考えられるが、構造材料としてのより適正な評価方法の開発を、今後に求めたい。

2.3 施 工

(1) 配合設計の考え方

一般にフライアッシュは結合材の一部とみなして使用する場合（内割）と、細骨材の一部とみなして細骨材補充材として使用する場合（外割）がある。両者の違いは既往の普通コンクリートに適用される配合設計において、フライアッシュを結合材として表記するかどうかにかかわらず、細骨材の補充材として使用したとしても、フライアッシュは長期強度の増進に確実に寄与する。1足す1は2以上なのである。ライブラリーでは、フライアッシュの多面的な特性を直接、実務に反映させるように、新しい配合設計の試案を提案している。

新しい配合の考え方を図-4に、また、表-1～表-2に配合設計およびフライアッシュ品質レベルとコンクリート品質の関係を示す。フライアッシュの結合材としての性質と、砂の細粒分の一部としての役割をそれぞれ設計に反映させることができる。使用目的に応じたフライアッシュ使用量は、単位セメント量や単位水量など、その他の材料との配合比によって変わるのである。フライアッシュの種類²⁾および置換率の選定については、フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針³⁾にも記載があるので参考にされたい。

(2) 施工性能の向上

一般に、フライアッシュを用いたコンクリートの流動性は向上するため、その単位水量は同一スランプの普通コンクリートに比べて少なくすることができる。一方で単位粉体量が多い配合では、コンクリートの粘性がかって増大するため、流動性が低下する場合も考えられる。ワーカビリティの改善を目的に利用する場合には、両者を考慮することが肝要である。ライブラリーでは、コンクリートのワーカビリティのうち、充てん性（流動性と材料分離抵抗性に関連）とポンプ圧送性に関して、フライアッシュコンクリートの特性を評価した。

フライアッシュを用いたコンクリートは減水効果が期待できるとともに、振動に対する材料分離抵抗が向上す

従来の配合の考え方

図-4 新しい配合設計の概念¹⁾

表-1 フライアッシュコンクリートの配合設計¹⁾

区分	項目	指標	目安および傾向
配合設計	フライアッシュ混和量 [*]	単位フライアッシュ量 (kg/m ³)	推奨混和量 20~120 kg/m ³
	基準材齢・基準強度	91日材齢までの強度の伸びを勘案した新たな28日材齢強度設計	耐久性の観点から、水結合材比 W/(C+F) 条件を守ることが前提として、表-2の発注強度とする。
施工	養生	養生日数	初期の強度発現は水和反応の他、粉体充てん効果によることもあるため、示方書を参考に適切な養生日数を設定する。
	施工性能	性能図	通常の締固めにおいて施工性能は向上する。(図3.7.1)

※表-2に示す傾向を参考にフライアッシュ単位量を選定するとよい。

表-2 フライアッシュの品質がコンクリートの品質に与える影響¹⁾

コンクリート品質	影響項目	フライアッシュ品質レベル		
		I 種	II 種	IV 種
フレッシュ性状 (指標 ⁶⁾) ・ブレン比表面積 ・単位フライアッシュ量	スランプとして評価	II 種と同等若しくは若干増加 $\geq$	【基準】 ブレンコンクリートと比較 して減水効果が得られる $\geq$	II 種と同等若しくは若干低下 $\geq$
	単位フライアッシュ量として評価	II 種と同等 $\approx$		II 種と同等若しくは減少 $\geq$
	【備考】	・IV 種フライアッシュについてはデータが十分ではないので、実際に用いるフライアッシュによりコンクリートとしての性能評価をすることが望ましい。 ・使用骨材に応じた試験練りを前提として決定 ・空気量 (AE 助剤量) に関しては、図 3. 6. 12 を参考とすればよい。		
強度発現性 (指標 ⁶⁾) ・ブレン比表面積 ・SiO ₂ 含有量 ・単位フライアッシュ量	28 日材齢強度	II 種と同等若しくは若干増加 $\geq$	【基準】 ブレンコンクリートと比較 し、28 日で低下傾向、91 日 で同等の強度が得られ、長期 強度増進に優れる $\geq$	II 種と同等 $\approx$
	91 日材齢強度	II 種と同等若しくは若干増加 $\geq$		II 種と同等若しくは減少 $\geq$
	28 日から 91 日までの 強度の伸び	II 種と同等 $\approx$		II 種と同等若しくは減少 $\geq$
	【備考】	・IV 種フライアッシュについてはデータが十分ではないので、実際に用いるフライアッシュによりコンクリートとしての性能評価をすることが望ましい。 ・使用骨材に応じた試験練りを前提として決定		

※1 フライアッシュ表面積総和 (ブレン比表面積×単位フライアッシュ量)

※2 フライアッシュ表面積総和 (ブレン比表面積×単位フライアッシュ量), あるいは SiO₂ 総和 (SiO₂ 量×単位フライアッシュ量)

る。このため、材料分離抵抗性、振動締固め性に関する単位粉体量の適正範囲が広がることになる (図-2)。

ただし、振動締固め時のエネルギーが過大な場合には、スランプが小さい領域でフライアッシュコンクリートの充てん性が劣る危険性もあることが指摘されている。

(3) アルカリシリカ反応の抑制

フライアッシュのアルカリ骨材反応の抑制効果が多く研究成果により示されている。2002 年には、国土交通省から通達「アルカリ骨材反応抑制対策」が出され、「抑制効果のある混合セメント等の使用」としてフライアッシュが指定され、JIS A 5308 の附属書 2 においては、フライアッシュセメント B 種もしくは C 種の使用やフライアッシュを混和材として使用する場合には、ポルトランドセメントとの組み合わせにおいて、ASR 抑制効果があると確認された単位量で用いることとしている。

アルカリ骨材反応の抑制対策は、対象地域の骨材事情や構造物の重要性などにより異なることが想定されるが、本ライブラリーで、アルカリ骨材反応の抑制に関してフライアッシュの品質に応じた対策レベルごとの置換率を、内割、外割に関係なく包括的な置換率として提示した。また、電気化学的補修工法等を想定した高アルカリ環境下におけるフライアッシュの抑制効果についても検討した。反応性が非常に高い骨材と高アルカリ環境の組み合わせにおいては、フライアッシュのみでは膨張を抑制しきれない場合があるものの、多くのケースに対して、フライアッシュによって十分に反応抑制が達成されることが示唆された。

(4) 技術資料と試験方法

フライアッシュのボゾラン反応の活性度を判定する API 法⁷⁾など、コンクリートの中で発揮される特性を早期に得ることも可能となってきた。ライブラリーでは近年、開発されてきた有力と思われる特性試験方法をまとめ、フライアッシュコンクリートの実施工事例を技術資料として取りまとめた。有効利用の一助になれば幸いである。

3. ま と め

国分正胤博士のフライアッシュコンクリートの一連の研究に対して、平成 3 年に日本学士院賞が与えられた。過去半世紀に渡り、授賞は土木建築分野では稀である。この分野を先人達がリードし、高品質なコンクリートの供給と産業副産物の有用利用を通じて社会に貢献した。電力事業を中心に展開してきたフライアッシュは今日、一般のコンクリート構造の品質向上に資する資源と再認識されるに至っている。これを普及させてユーザーの利益に資するものとするには、本紙で述べた技術事項のみならず、社会の中に実装定着させるための社会システムの再設計が不可欠である。これは産業副産物の有用利用に関して共通の課題でもある。複数の事業主体が関与する中で、すべての構成員が何らかの形で利益を得る仕組み作りの一助になれば幸いである。

最後に当ライブラリーの出版編集にご尽力頂いた坂井悦郎幹事長、金津努幹事、中井裕之幹事殿他、すべての委員各位に厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：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—、コンクリートライブラリー 132 号
- 2) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 [設計編]、2007
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 [施工編]、2007
- 4) 土木学会コンクリート委員会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案)、1999
- 5) Tetsuya ISHIDA, Koichi MAEKAWA, and Masoud SOLTANI: Theoretically Identified Strong Coupling of Carbonation Rate and Thermodynamic Moisture State in Micropores of Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2(2) pp.213-222, 2004
- 6) 財団法人規格協会：JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ、1999
- 7) 山本武志・金津 努：フライアッシュのボゾラン反応性とアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究—促進化学試験法 (API 法) の適用性評価—、電力中央研究所研究報告 No.U 00034, 2001 年 3 月