

論文 10 年曝露した FAⅢ種コンクリートのコア供試体の強度特性及び中性化性状

岡野 智久^{*1}・山地 功二^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート用骨材の代替としてフライアッシュⅢ種を置換率 0 から 20%まで混入したコンクリート曝露供試体の材齢 10 年目までの耐久性について検討を行った。曝露供試体は打ち込み時期を変えて作製し、生コンプラント敷地内の野外に 10 年間放置したものからコア供試体を採取して、経年変化が強度と中性化深さに与える影響について検討した。その結果、単位セメント量を確保することによって、無混入の普通コンクリートと比較してフライアッシュⅢ種コンクリートは、打ち込み時期による強度発現の違いがあるものの長期強度の増進割合が大きく、中性化に対する抵抗性が高いことが明らかになった。

キーワード：中性化深さ、経年変化、フライアッシュⅢ種、打ち込み時期、コア抜き

1. はじめに

電力需要の堅調な伸びに伴い石炭火力発電は重要な位置づけとなっており、副産物である石炭灰の発生量もより一層増加する傾向にある。また、“再生資源の利用促進に関する法律”の制定（指定副産物としての石炭灰有効利用の促進）等の社会情勢から、フライアッシュのセメント・コンクリート分野への用途を拡大し、その使用量を増加させることが緊急の課題となっている。

一方、他の地域と比較してコンクリート用骨材としての海砂への依存が高い瀬戸内海地域は、近年、生態系や環境保全の観点から海砂の供給が規制されている。安定的な供給が可能な海砂代替骨材の 1 つとして、フライアッシュの利用、特に、JIS A 6201 “コンクリート用フライアッシュ”として規格化されたフライアッシュ（以下、FA）Ⅲ種の利用が期待されている。

筆者らは、平成 10 年度に、細骨材の一部に代替使用した FAⅢ種混入コンクリートを生コンプラントで製造し、普通コンクリートとほぼ同等のフレッシュ性状、初期強度の確保、長期材齢に対する強度の増進および耐久性の向上等の優れた品質改善効果を確認した¹⁾。また、現場施工への適用性について検討を行い、置換率 20%程度であれば普通コンクリートと同等の施工性であると確認した²⁾³⁾。現在、91 日、1 年、3 年、5 年目までの曝露供試体による長期耐久性について継続的に検討しており、10 年目である本研究が最終である。

本研究では、材齢 10 年目における FAⅢ種混入コンクリートの耐久性として、強度特性と中性化深さの調査研究を取りまとめたものである。すなわち、生コンプラント敷地内の野外に 10 年間放置した、夏期（9 月）、秋期

（11 月）、および冬期（2 月）の打ち込み時期を変えて作成した曝露供試体から採取したコア供試体を用いて、打ち込み時期および 10 年間の経年変化が硬化性状に与える影響について検討した。

なお、FA は、コンクリート用混和材として JIS では位置づけされており、細骨材代替で置換率 20%以内であれば、結合材の一部として見なすとセメント内割りで 30%程度である。しかしながら、著者らは従来の FA の研究とは異なり、FAⅢ種の多量使用として 20%以上の細骨材置換率の可能性を検討している³⁾。その結果、結合材の一部というセメント内割り置換で 35%となり、結合材としての限界置換率 30%を大きく超えるため、FAⅢ種を細骨材代替として位置づけることにした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³）を使用した。

(2)FA および骨材

FA は、FAⅢ種（密度：2.19g/cm³，比表面積：4490cm²/g，強熱減量：6.45%，フロー値比：99%）を使用した。FAⅢ種は、四国電力火力発電所から副産されるもので、FAⅡ種を強熱減量の規格値 5%で分別される際に産出されるものである。

骨材は、粗骨材に最大寸法 25mm（密度：2.62g/cm³，吸水率：0.83%）と最大寸法 40mm（密度：2.62g/cm³，吸水率：0.75%）の徳島県阿南市下大野町産玉砕石を使用した。細骨材には、徳島県阿南市下大野町産川砂（密

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育学部 知的力学システム工学専攻（正会員）

*2 日本興業(株) 開発部 土木開発設計室（正会員）

*3 徳島大学 ソシオテクノサイエンス部教授 工博（正会員）

*4 徳島大学 ソシオテクノサイエンス部助教授 博士（正会員）

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							高性能AE 減水剤		AE剤
			水 W	セメント C	細骨材			粗骨材		夏期	秋期・冬期	
					FA	川砂	海砂	25-5mm	40-20mm			
18-8-40(0)	62.0	42.7	146	235	0	573	246	775	332	C×1.0%*		4.5A
18-8-40(10)	66.4	40.7	154	232	65	487	209	794	340	C×1.6%		13A
18-8-40(20)	66.5	38.7	151	227	124	414	117	826	354	C×2.1%	C×1.9%	15A
21-8-25(0)	56.0	43.2	153	273	0	565	242	1069	0	C×1.0%*		3.5A
21-8-25(10)	59.8	40.2	158	264	63	437	203	1122	0	C×1.5%		15A
21-8-25(20)	59.7	40.2	160	268	125	419	179	1177	0	C×2.0%		15A

注) *印は、AE減水剤

度：2.63g/cm³，吸水率：1.73%，粗粒率：3.11）と愛媛県越智郡伯方町東風浜産海砂（密度：2.58g/cm³，吸水率：2.20%，粗粒率 1.93）を 7：3 の割合で混合したものを用い、海砂は粒度調整用とした。

(3)混和剤

普通コンクリートには実機プラントで使用実績のあるリグニンスルホン酸系の AE 減水剤および AE 剤を使用し、FAⅢ種混入コンクリートにはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤およびアルキルカルボン酸系の AE 剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

本研究で使用したコンクリートの示方配合を表-1 に示す。今回使用したコンクリートの配合は、擁壁工事等を対象に生コン工場で最も出荷実績の多い普通コンクリートの配合を基本に呼び強度 18 および 21N/mm²，粗骨材の最大寸法 40 および 25mm，目標スランプ 8±2.5cm，目標空気量 4.5±1.5%とした。細骨材に代替使用した FAⅢ種の置換率は全細骨材容積に対し，0，10，および 20%とした。置換率 0%は，FAⅢ種を用いない普通コンクリートを意味する。以下，配合名は“呼び強度－目標スランプ－最大骨材寸法（FA 置換率）”と略記する。

なお，高性能 AE 減水剤の使用量は，現場到達時でのスランプロスを考慮してプラント製造時の目標スランプを設定し，この目標スランプが得られるように決定した。

2.3 曝露供試体の作製及び曝露方法

曝露供試体は，900mm×600mm×200mm のスラブ型供試体であり，写真-1 のように高さ 10 cm のスペーサーを挟み重ねてある。また，3 年周期で上下に移動させている。曝露供試体製作日と練混ぜ直後から 60 分間のコンクリート温度を表-2 に示す。また，表-2 での*印は練上り直後から 60 分経過時点の最大と最小を意味する。曝露供試体は，同一配合にて 5 体作製し，製作した徳島県阿南市生コンプラントのフィールド内の野外に曝露した。供試体の曝露状況を写真-1 に示す。供試体は同一配合毎にまくら木を敷いて積み重ねた。本研究で

コア供試体を採取した曝露供試体はそのうちの 1 体である。

表-2 曝露供試体製作日とコンクリート温度

配合名	時期	実施日	C-T*(°C)
18-8-40(0)	夏期	H. 10/9/17	26.0～26.0
18-8-40(10)		H. 10/9/9	26.5～26.5
18-8-40(20)		H. 10/9/11	27.5～29.0
21-8-25(0)		H. 10/9/14	28.0～28.0
21-8-25(10)		H. 10/9/3	28.5～29.0
21-8-25(20)		H. 10/9/7	26.5～27.0
18-8-40(0)	秋期	H. 10/11/25	13.0～15.0
18-8-40(10)		H. 10/11/13	15.5～17.0
18-8-40(20)		H. 10/11/17	19.5～21.0
21-8-25(0)		H. 10/11/19	12.0～13.0
21-8-25(10)		H. 10/11/9	18.0～19.0
21-8-25(20)		H. 10/11/11	16.0～17.0
18-8-40(0)	冬期	H. 10/2/18	9.5～11.0
18-8-40(10)		H. 10/2/10	9.0～11.0
18-8-40(20)		H. 10/2/12	7.0～9.0
21-8-25(0)		H. 10/2/15	6.5～9.0
21-8-25(10)		H. 10/2/2	9.0～11.0
21-8-25(20)		H. 10/2/8	7.0～9.5



写真-1 スラブ供試体の曝露状況



写真-2 コア供試体採取前の曝露供試体

2.4 コア供試体の採取及び各種試験項目

(1) コア供試体の採取及び強度試験

本実験では、硬化性状の経年変化を調査するために、 $\phi 100\text{mm}$ のコンクリート用ドリルを用いて、「コンクリートからのコア採取方法及び圧縮強度試験方法（JIS A 1107：2002）」に準じて、コア供試体を採取し圧縮強度を求めた。曝露供試体にコンクリート用コアドリルをセットした状況を写真-2に示す。また、「コンクリートの割裂引張強度試験方法（JIS A 1113：2006）」に準じて、コア供試体を用いて引張強度を求めた。さらに、割裂引張強度試験を行ったあとの供試体を用いて中性化深さの測定を行った。

圧縮強度試験と割裂引張強度試験は、ともに打込み時期が夏期、秋期および冬期のコア供試体について実施した。ただし、3年目の強度試験結果は夏期および秋期のみである。

(2) コア供試体の中性化試験

中性化深さ測定は、「コンクリートの中性化深さの測定方法（JIS A 1152：2002）」に準じて、割裂引張試験実施後の半円形断面のシリンダー供試体割裂面にフェノールフタレイン 1%溶液を散布し、ただちに未着色部分を中性化部分として供試体の上下端面のコンクリート表面からの中性化深さを 0.1mm 単位まで計測した。計測対象断面においてシリンダー直径 10cm を等間隔に 5~7 箇所の位置で個々の中性化深さを計測し、上下端面で 10 箇所以上の中性化深さの平均値をもってコア供試体の中性化深さとした⁴⁾。

また、参考として、本実験の中性化深さと比較するために下記の直線回帰式(1)、(2)による中性化深さの予測値を算出した⁵⁾。本回帰式は、セメント量が 330~175kg/m³、FA 量が 0~99kg/m³ の FAⅡ種を用いた材齢 20 年間の曝露実験に基づくものである。

(a) FA を混入しない場合

$$y = (-0.383 + 0.010 (W/C))\sqrt{t} \quad (1)$$

(b) FA を混入した場合

$$y = (-0.442 + 0.0014 (W/(C+F))\sqrt{t} \quad (2)$$

ただし、 y ：コンクリートの中性化深さ(cm)、 W/C ：水セメント比(%)、 $W/(C+F)$ ：水粉体比(%)、 t ：コンクリートの材齢(年)

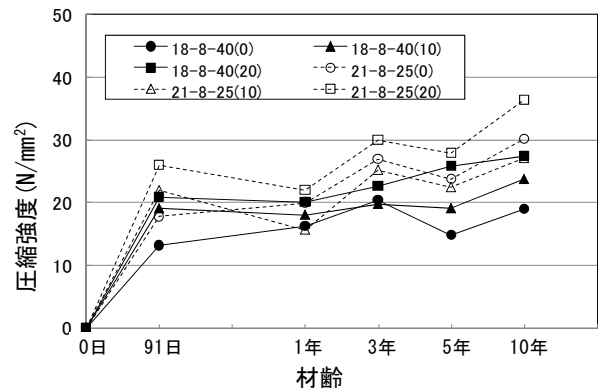


図-1 夏期打設の圧縮強度の経年変化

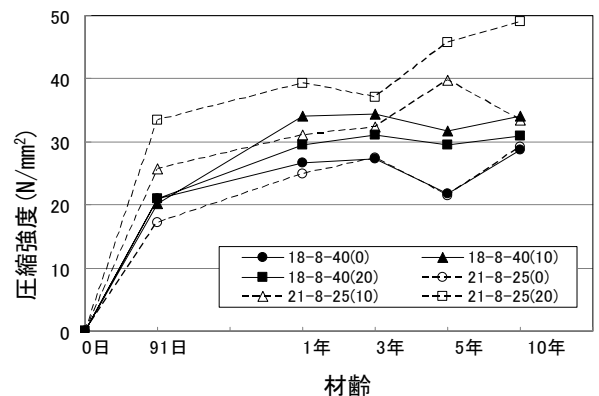


図-2 秋期打設の圧縮強度の経年変化

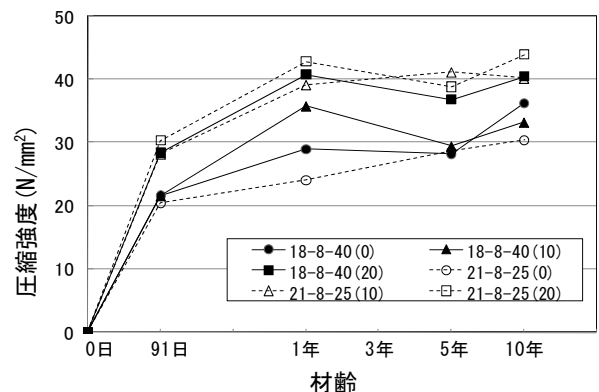


図-3 冬期打設の圧縮強度の経年変化

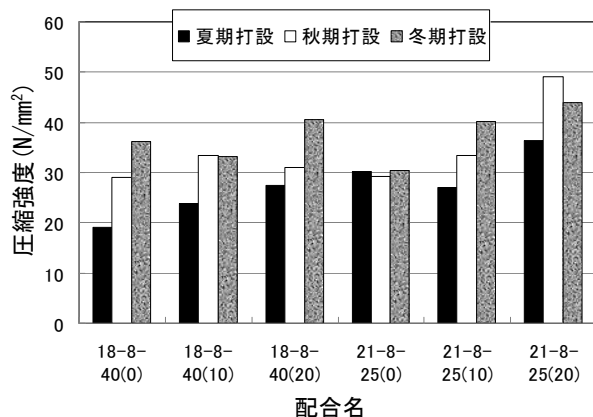


図-4 材齢 10 年のコア供試体の圧縮強度

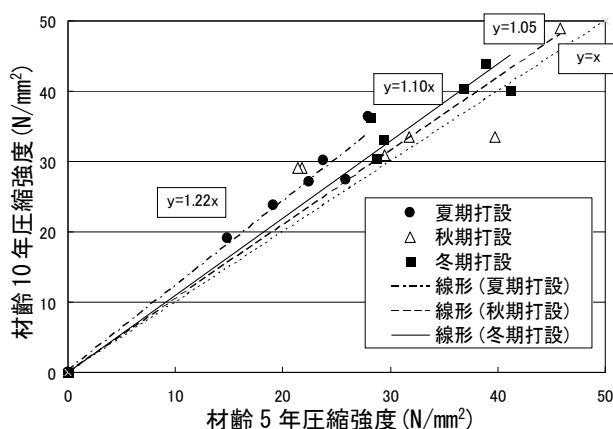


図-5 材齢 10 年と 5 年での圧縮強度の関係

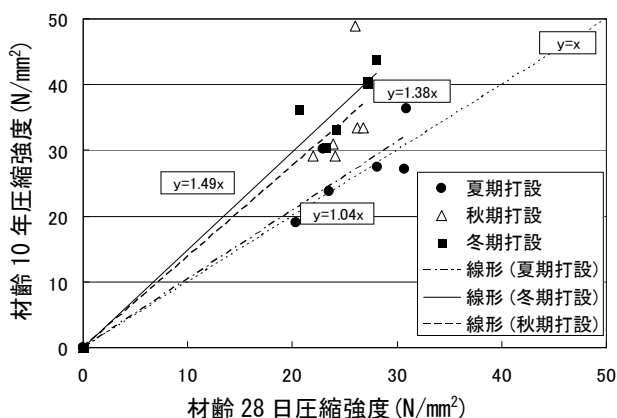


図-6 材齢 10 年と 28 日での圧縮強度の関係

3. 試験結果及び考察

3.1 コア供試体の圧縮強度の経年変化

夏期打設、秋期打設と冬期打設に関して、材齢 91 日、1 年、3 年、5 年目および 10 年目の圧縮強度の経年変化を図-1、図-2 および図-3 に示す。一般的に圧縮強度は、コア供試体 3 本以上の平均であり、測定者が同一でないことによる人為的誤差が生じるため、単調な強度増

加とはなっていない。打設時期や FAⅢ種混入の有無に拘わらず、すべての配合で、材齢 10 年目のコア供試体の圧縮強度は、呼び強度を満足する結果となった。また、打設時期に関係なく、FAⅢ種混入コンクリートの強度は、無混入コンクリートと比較して FAⅢ種の置換率と材齢が増加するに従って高くなる傾向にある。これは FAⅢ種の微粉末効果とポズラン反応による強度増進が打設時期に依存しないことを示している。材齢 1 年までの強度増進と比較して、わずかではあるが、材齢 10 年目においても強度は増加傾向にあると言える。ただし、秋期打設で、配合名 21-8-25(10)の材齢 10 年の強度が材齢 5 年の強度より低下した。

夏期打設は、秋期打設および冬期打設と比較して、全体的に低い強度を示した。一般的に、高温時に打設されたコンクリートの長期強度は、低温時に打設された場合よりも低いとされており、本研究の FA 混入コンクリートにおいても同様の結果となった。したがって、FAⅢ種を細骨材代替として使用する場合、暑中コンクリートの養生には十分な注意が必要である。

3.2 コア供試体の圧縮強度の比較

材齢 10 年のコア供試体の圧縮強度試験結果を図-4 に示す。材齢 10 年と材齢 5 年の圧縮強度の関係、材齢 10 年と材齢 28 日標準養生の圧縮強度の関係を、それぞれ図-5、図-6 に示す。材齢 10 年と材齢 5 年の圧縮強度を比較すると、材齢 5 年での圧縮強度が高い配合は材齢 10 年での圧縮強度も高い値であり、相関関係が成り立つ。グラフ上の $y = x$ の直線より、若干上側にデータ群が位置する。材齢 5 年から材齢 10 年までの強度の増進を意味し、打設時期に関係なく強度増進が認められる。また、材齢 28 日と材齢 10 年の圧縮強度の比較においても同様な結果であるが、 $y = x$ の直線と比較すると、夏期打設は、材齢 28 日標準養生の強度からの増進はほとんどない。これに対して、秋期打設と冬期打設は強度増進が認められる。特に、冬期打設は、約 1.5 倍である。一般にコア供試体の強度は、シリンダー強度の 0.8 倍程度である。従って、冬期打設では、材齢 28 日の強度に対して材齢 10 年の強度は 1.8 倍以上の強度増進があったことになる。

配合種別や FA 置換率に関係なく、3 つの打設時期のうち、冬期打設の圧縮強度が他より少し高く、夏期打設の圧縮強度が最も低い値を示した。これは、夏期や秋期打設と比較して、初期の硬化が遅い冬期打設の方がポズラン反応による長期強度の増進には有利であるからではないかと考えられる。

一般に養生温度が高いほど、FA のポズラン反応は促進されるが、初期養生のみに限定すると、必ずしも初期の

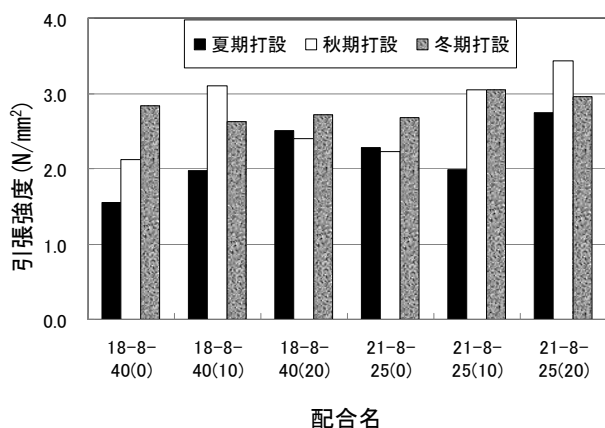


図-7 材齢 10 年のコア供試体の引張強度

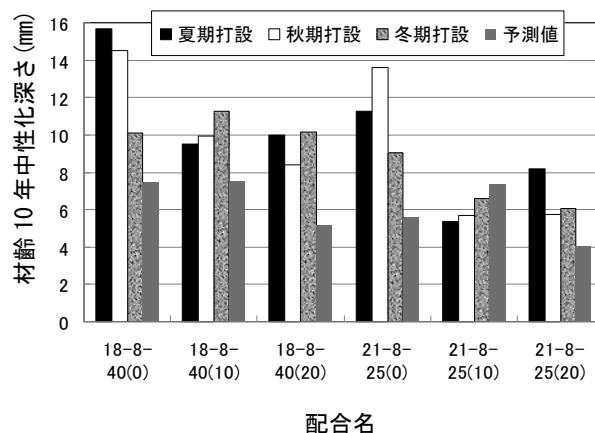


図-9 材齢 10 年のコア供試体の中性化深さ

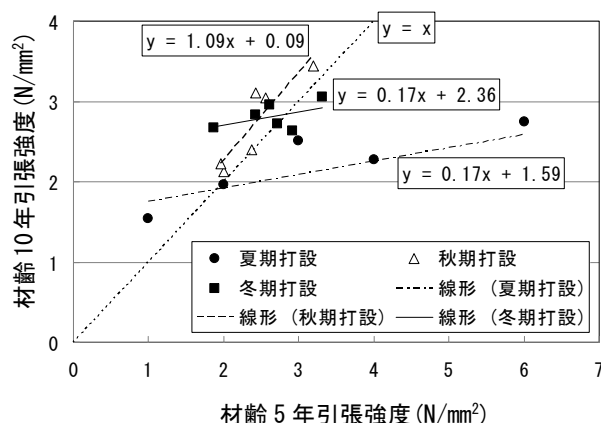


図-8 材齢 10 年と 5 年での引張強度の関係

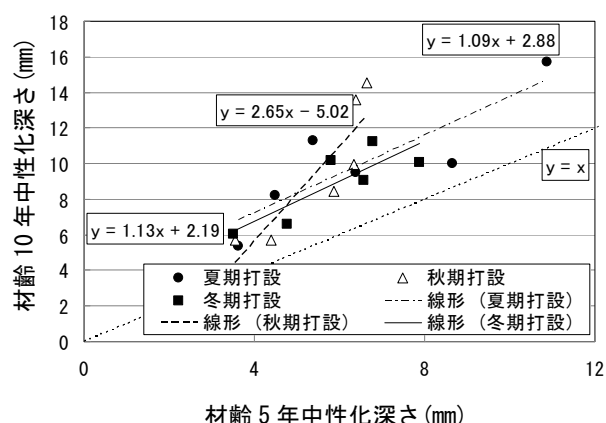


図-10 材齢 10 年と 5 年での中性化深さの関係

養生温度が高い方がその後の長期のボゾラン反応が促進されるとは限らないと考えられる。

3.3 コア供試体の引張強度の比較

材齢 10 年のコア供試体の引張強度試験結果を図-7 に示す。また、材齢 10 年と材齢 5 年の引張強度の関係を図-8 に示す。圧縮強度と同様に引張強度も FAⅢ種置換率の増加とともに高くなる。また、図-8 から、材齢 10 年と材齢 5 年での引張強度には相関関係が認められるが、夏期打設の引張強度は、 $y=x$ の直線より下回っており、材齢 5 年から材齢 10 年までの引張強度増進はないと判断できる。

3.4 中性化深さ試験結果

材齢 10 年目における中性化深さ試験結果を図-9 に示す。また、材齢 10 年と材齢 5 年の中性化深さの関係を図-10 に示す。FA 混入コンクリートと無混入を比較すると、打設時期に関係なく中性化深さが小さい値であった。FA をセメントの内割りとして混入するのではなく、単位セメント量を確保して細骨材代替として FAⅢ種を混入すれば、打ち込み時期に関係なく中性化に対する抵抗性は無混入よりも増大した。配合では、単位セメント量の多い呼び強度 21N/mm² の配合の方が、呼び強度 18N/mm² の配合より中性化深さは小さい値であった。

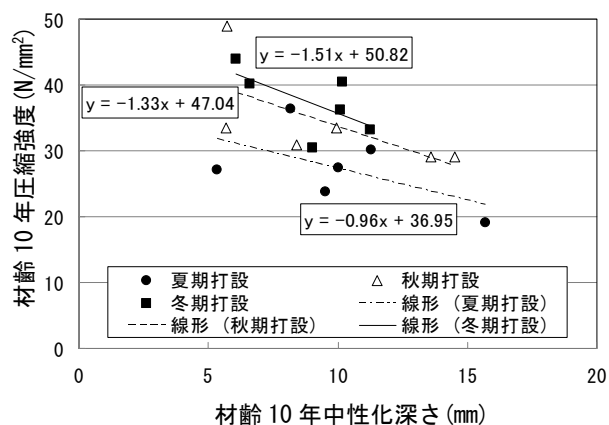


図-11 材齢 10 年での圧縮強度と中性化深さの関係

また、すべての値が、予測値よりも相当大きい。本実験の曝露した地域は、阿南市の海岸から 1km 程度で、近くに製紙工場等があり夏場での光化学スモッグの発生や酸性雨の問題が指摘される地域であった。

よって、中性化に対する環境は非常に厳しい地域と考えられ、中性化を促進しているものと思われる。

一方、中性化の抵抗性は増大したものの、材齢 5 年から 10 年目では中性化が進行していた。打設時期に関係なく、すべてのデータが $y=x$ の直線より上回っており、材齢 5 年から材齢 10 年で中性化が進んでいる。

秋期打設が最も中性化の進行が大きく、夏、冬期の順である。打設時期は、コンクリート表面からの中性化速度に影響を及ぼさないといえる。

図-11 は、材齢 10 年の中性化深さとコア供試体の圧縮強度の関係を示す。

中性化深さと圧縮強度には相関があり、強度が小さいほど中性化が進行するという結果となった。興味深い点は、打設時期によって強度が大きく異なるにも関わらず、中性化深さは、5mm～15mm の範囲にある。

一般に強度が大きい方が中性化に対する抵抗も大きい。しかしながら、打設時期が異なることにより初期材齢と長期材齢の強度発現が逆転することにより、この一般的傾向が成立しなくなると考えられる。

FA コンクリートは、中性化に対する抵抗性が普通コンクリートに比較して小さく、鉄筋腐食の観点から RC 構造物への FA コンクリートの適用に対して懸念が指摘されている。しかしながら、本研究の結果では、材齢 10 年で、中性化深さが、FA 無混入の普通コンクリートよりも小さく、5mm～10mm の範囲であった。FAⅢ種は、FAⅡ種と比較して強熱減量が 5.0%以上であり、FA の品質としては最も劣る。この FAⅢ種を細骨材代替として 20% 置換し、単位セメント量を確保することにより、同一単位セメント量の普通コンクリートよりも中性化深さを抑制できるという事実は、前述した懸念を払拭するものと思われる。

図-12 は、材齢 10 年での中性化深さと材齢 28 日圧縮強度の関係を示したものである。打込み時期に関係なく、中性化深さと圧縮強度には直線関係がある。したがって、材齢 28 日標準養生の圧縮強度から材齢 10 年目の FAⅢ種コンクリートの中性化深さをある程度予測することが可能である。

4. まとめ

本研究範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) 打設時期に関係なく、FAⅢ種コンクリートは、材齢 10 年目においても強度が増加し、FA 無混入のコンクリートと比較して高い強度を示す。ただし、打込み時期が夏期の場合、秋期や冬期と比較して、同一長期材齢における強度が小さく、暑中コンクリートの養生には十分な注意が必要である。
- (2) 冬期打設では、材齢 28 日の標準養生供試体の圧縮強度に対して材齢 10 年のコア供試体の強度は 1.5 倍程度の増進が認められた。また、材齢 10 年の強度特性と材齢 28 日の強度特性には強い相関関係があり、材齢 28 日強度特性を用いて、長期の強度を予測することができる。

- (3) 打込み時期に関係なく、単位セメント量を確保して細骨材代替として FAⅢ種を混入すれば、材齢 10 年目での中性化に対する抵抗性は、無混入の場合より

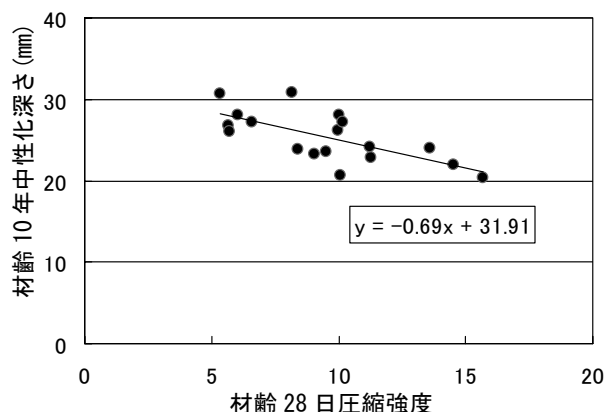


図-12 材齢 10 年の中性化深さと材齢 28 日圧縮強度の関係

も高い。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会平成 20 年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)(課題番号 20360193, 研究代表者: 橋本親典)に基づき実施されたものである。また、本研究で使用したフライアッシュⅢ種は、曝露供試体製作当時、四国電力から提供していただいたものである。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋本親典, 加藤誠三, 黒田 力: 生コン工場で製造したⅢ種フライアッシュ混入コンクリートの諸性質, 第 10 回(1999 年)生コン技術大会研究発表論文集, pp.17-22, 1999.4
- 2) 橋本親典, 山地功二, 横手晋一郎: Ⅲ種フライアッシュを用いたコンクリートの実構造物施工, 第 10 回(1999 年)生コン技術大会研究発表論文集, pp.23-28, 1999.4
- 3) 馬越唯好, 橋本親典, 山地功二: Ⅲ種フライアッシュを多量に用いたコンクリートの実構造物施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.139-144, 1999.6
- 4) (社)日本コンクリート工学協会: 4.8 鉄筋腐食 4.8.1 中性化深さ (はつり法, コア法), コンクリート診断技術 '02[基礎編] pp.149-155, 2002.1
- 5) 土木学会: フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究 (最終報告), コンクリートライブラリー No.24, pp.21-51, 1988.3