

平成15年度  
第4回 建設事業の技術開発に関する支援事業

成果報告集

平成17年6月

社団法人 沖縄建設弘済会  
沖縄ピーシー株式会社

# 技術開発成果報告書

沖縄循環型社会システムを目指すフライアッシュ利用  
促進による構造物の高耐久性化に関する技術開発

沖縄ピーシー株式会社

# 目 次

## 第1章 序論

1.1 背景	1
1.2 技術開発の目的	1
1.3 研究概要	2

## 第2章 フライアッシュコンクリートの性状に関する試験およびその結果

2.1 フライアッシュコンクリートの性質	3
2.2 使用材料	5
2.3 配合の検討	7
2.4 コンクリートの練り混ぜ工程	10
2.5 フレッシュコンクリートの試験	10
2.6 圧縮強度試験	11
2.7 試験結果および考察	11

## 第3章 塩化物イオン浸透促進試験およびその結果

3.1 はじめに	17
3.2 実験概要	17
3.3 試験結果および考察	20

## 第4章 フライアッシュコンクリートの耐久性に関する検討

4.1 はじめに	26
4.2 塩水促進試験にもとづく拡散係数	26
4.3 フライアッシュコンクリートの耐久性評価モデルの提案	29
4.4 算定結果および考察	30

## 第5章 結論

謝辞	42
----	----

参考・引用文献	42
---------	----

# 第1章 序論

## 1.1 背景

沖縄県は島国で構成され、その全域が亜熱帯海洋性気候に属し、高温・多湿の環境と、厳しい塩害環境下にあるため、コンクリート構造物の早期劣化が著しい。そのため、このような環境に適した耐久性を有するコンクリート構造物の品質確保が急務となっている。また、今後の社会基盤整備においては、公共投資縮減の見地から判断し、コンクリート構造物の建設に際しては、地域の特性を考慮し、耐久性に優れた構造物の構築を行う必要がある。さらに、構造物の初期建設コストから維持管理コストまでを含めたライフサイクルコストを低減する技術開発が益々重要な課題となっている。

コンクリート構造物の設計施工に関する基準である土木学会コンクリート標準示方書（2002年制定）は、従来の仕様規定から性能規定へと設計の手法が移行された。その耐久性照査によれば、本県のような厳しい塩害環境下では、設計耐用期間（100年以上）の構造物に要求される性能を満足させることは、適切に維持管理を行った場合でも極めて困難であることが明らかになっている。

一方、社会資本整備においては、環境問題への取り組みが重要な課題とされ、ゼロエミッションを始めとする循環型社会システムの構築が早急に求められている。建設事業においては、建設廃棄物の排出量低減に向けたコンクリート塊などの再資源化や、建設汚泥などの有効利用など多くの取り組みを行っている。

沖縄県においては、多くの電力は石炭火力発電所に依存しており、石炭燃焼時に排出される石炭灰が大量に発生し、その処理が深刻な環境問題となっている。その石炭灰の発生量は、金武火力発電所の本格稼働などにより年々増加し、2004年度には約23万トンを超える見込みである<sup>1)</sup>。電力業界、セメント・コンクリート業界および建設業界においては、産業副産物の有効利用の拡大策のひとつとしてこれら石炭灰の再資源化に取り組んでいる。しかし、今後石炭灰の増加に伴い現在の埋め立て処理場が2008年度には満杯となることが予想されていることを鑑み、その有効利用の促進および新たな用途開発の研究が必要である。

## 1.2 技術開発の目的

石炭灰は、微粉碎した石炭をボイラ内で燃焼させたあとに、電気集塵装置で集められたフライアッシュ（85%～95%程度）と、ボイラ底部で回収されるクリンカーアッシュ（5%～15%程度）とに大別される<sup>2)</sup>。その大部分を占めるフライアッシュは、コンクリート用混和材として適切に有効利用することにより、コンクリートの耐久性を向上させることが既往の研究により知られている<sup>3)</sup>。

循環型社会システムの構築を目的として進められている『ゼロエミッション・アイランド沖縄』構想の具体的実現策のひとつとして、建設分野へフライアッシュの有効利用促進を図り、同時に構造物の高耐久性化の技術的検討を進めることが本技術開発の目的である。

本技術開発では、フライアッシュの有効利用法として、近年進めているフライアッシュの細骨材との代替利用に着目し、これまで研究の行われていないプレストレストコンクリート（以下、PCと称す）構造物に用いる高強度コンクリートを対象としている。

性能照査型設計に対応し、コンクリート構造物の耐久性能向上の主要な要因として考えられるコンクリートの配合とかぶりについて、フライアッシュを利用したコンクリートを用いて検討を行う。ここでは、種々の配合とかぶりの組み合わせによる耐久性能向上の効果を検討すると同時に、それらのコスト比較を行い、耐久性に優れたコンクリート構造物の配合設計手法を確立する。

### 1.3 研究概要

本技術開発は、海洋環境下において緊急に開発が要求されている塩害に強いコンクリート構造物を構築するため、先に述べた耐久性能を向上させる主要因を対象に、以下の3点について研究・開発を実施する。

- (1) フライアッシュを細骨材の代替として利用を図る場合のコンクリートのフレッシュ性状と強度発現性状を、フライアッシュの混入量やセメントの減少割合から検討する。
- (2) フライアッシュコンクリートの施工性を考慮した配合設計法を確立する。
- (3) 塩水促進試験により算出された見かけの拡散係数を用いて、フライアッシュコンクリートの耐久性評価モデルを提案する。そのため、塩水促進試験により各配合のコンクリートについて、試験経過時間に伴ってコンクリート内部に浸透する塩化物イオン量を求める。その結果から見かけの拡散係数を算出し、フライアッシュコンクリートの遮塩性能の評価を行う。

## 第2章 フライアッシュコンクリートの性状に関する試験およびその結果

### 2.1 フライアッシュコンクリートの性質

JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」には、フライアッシュの品質規定が次の4種類（I種～IV種）に分類されている。表2-1にフライアッシュの品質規格を示す。

表 2-1 フライアッシュの品質規格（JIS A 6201，コンクリート用フライアッシュ）

品 質		単位	フライアッシュ I 種	フライアッシュ II 種	フライアッシュ III 種	フライアッシュ IV 種
二酸化けい素	%		45.0 以上			
湿 分	%		1.0 以下			
強 熱 減 量	%		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0
密 度	g/cm <sup>3</sup>		1.95 以上			
粉末度	45 μmふるい残分 (網ふるい方法)	%	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積 (ブレーン方法)	cm <sup>2</sup> /g	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上
フロー値比			105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 %	材齢 28 日		90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	材齢 91 日		100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

沖縄県内におけるフライアッシュの発生状況は、統計実績によれば、JIS A 6201に規定されているII種からIV種およびJISの基準に適合しない非JISのフライアッシュに分類される<sup>1)</sup>。JIS I種のフライアッシュは、輸入原料炭や燃焼条件などの関係で全国的にも殆ど発生しないのが現状となっている<sup>4)</sup>。

フライアッシュをコンクリートの混和材として用いたときの特性としては、既往の研究、文献などによると以下のことなどが挙げられる<sup>5)6)7)</sup>。

- (1) ワーカビリティーの改善
- (2) 断熱温度上昇と温度上昇速度の低減
- (3) ポズラン反応による長期強度の伸びが大きい
- (4) アルカリ骨材反応の抑制
- (5) 水密性、遮塩性の向上

フライアッシュを使用することにより、上記(1)～(5)などの特性が得られ、コンクリートの耐久性を改善する効果が期待できる。しかし、フライアッシュがコンクリートに及ぼす影響は利点ばかりではない。フライアッシュがコンクリートに及ぼす諸問題について、既往の研究、文献などから代表的なものを以下に挙げる。

- ① 所要の空気量を連行するために必要なAE（空気連行）剤の増加
- ② 所要のワーカビリティを得るために必要な減水剤の増加
- ③ 普通セメントよりも初期の強度発現が遅い
- ④ 強度・スランプ等のばらつきが大きい

このような諸問題があるため、フライアッシュがコンクリートの混和材として一般的にこれまで実用化されなかった経緯がある。しかし、フライアッシュの使用用途、使用量および配合等を考慮することにより、上記の諸問題を解決する事が出来る。

本技術開発において、具体的な上記①～④の問題解決に向けた取り組みを以下に記述する。

上記①『所要の空気量を連行するために必要なAE（空気連行）剤の増加』の問題が表れる要因として、フライアッシュ中に含まれる未燃カーボンの影響が最も大きい。JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」では、普通コンクリートの所要の空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ となっているが、この基準は主に、凍結融解の繰返し作用によってコンクリート中に含まれている水分の膨張およびそれに伴う水分の移動を空気泡（エントレインドエア）が緩和し<sup>8)</sup>、水圧によるコンクリート内部の破壊を防止するために定められた基準である。しかし、沖縄県全域は亜熱帯海洋性気候下に属するため、凍害によるコンクリート構造物の劣化の心配は全く無い。従って、凍害の影響が考えられない沖縄県においては、空気量の基準を満たす必要性は無いものと考えられる。むしろ、空気量の減少によるコンクリート強度の増加、水密性および遮塩性の向上など、コンクリートに与えるメリットの方を、沖縄県の自然環境下においては優先すべきだと考えられる。

よって、本技術開発では、沖縄県の環境条件を考慮した上で、空気量の設計値を $2.0 \pm 1.5\%$ とし、フライアッシュコンクリートの各種試験について検討を行った。

上記②『所要のワーカビリティを得るために必要な減水剤量の増加』の問題に対しては、本実験の試験練りにおいて、 $1 \text{ m}^3$ 当たりの単位フライアッシュ量を $100 \text{ kg/m}^3$ 以下とすれば、スランプの低下は殆ど見られず、大幅な減水剤使用量の増加は必要でなかった。このことは、今回使用したフライアッシュの未燃カーボン量が非常に少なかったことに起因している。表2-2品質試験結果に示すように、本実験で用いたフライアッシュの強熱減量（未燃カーボン量）は3%であり、JIS I種の規格値相当であった。そのため、フライアッシュ粒子のボールベアリングの働き<sup>8)</sup>によって流動性が向上したのと考えられる。

高品質のフライアッシュ（JIS II種相当品）を使用し、且つ単位フライアッシュ量を $100 \text{ kg/m}^3$ 以下とすれば、上記②の問題は解決できるものと考えられる。

上記③『普通セメントよりも初期の強度発現が遅い』の問題に関しては、一般的に知られている性状である。しかし、フライアッシュはポゾラン活性を有しており、普通セメントと比較すると、長期強度が増加する性質を持っており<sup>8)</sup>、その性質を利用すべきである。

プレテンションPC桁のような材齢1日で所定の圧縮強度を必要とするコンクリート製品に関しては、単位セメント量を減らさずに細骨材に代替する混和材として配合設計を行い、初期強度に影響を及ぼさない配合を考える。また、初期強度を必要としないコンクリート製品に関しては、セメントの一部として代替し混入する事により、コンクリートの水和熱の低減、水密性の向上およびアルカリ骨材反応の抑制などのメリットが得られるものと考えられる。

上記④『圧縮強度・スランプ等のばらつきが大きい』の問題は、フライアッシュが、原料である

石炭の産地や燃焼炉の運転条件および微粉炭の粉砕度合いなどによって品質が大きく異なることに起因している<sup>1)</sup>。良質でバラツキの少ないフライアッシュを製造するためには、製造過程において粒度調整を行う分級器などを利用し、品質管理に努めることが不可欠となる。

現在、石川石炭火力発電所（電源開発㈱）では、フライアッシュを分級器によって粒度調整し、JISⅡ種灰を人工的に製造できる設備を有している。本技術開発では、石川石炭火力発電所にて製造されたJISⅡ種のフライアッシュを使用し、強度・スランプ等のばらつきなどを極力抑えた上でコンクリートの各種実験を行い、上記④の問題に対応している。

## 2.2 使用材料

### 2.2.1 フライアッシュ

本技術開発で使用するフライアッシュの品質を表2-2に示す。

石川石炭火力発電所（電源開発㈱）で発生したフライアッシュを分級機により粒度調整したもので、比較的安定した品質を有する。JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」で規定するⅡ種に該当する。

表 2-2 フライアッシュ品質試験結果

品 質		JIS A 6201 規格値（Ⅱ種）	試 験 値
二酸化けい素	%	45.0 以上	56.1
湿 分	%	1.0 以下	0.2
強 熱 減 量	%	5.0 以下	3.0
密 度	g/cm <sup>3</sup>	1.95 以上	2.23
粉 末 度	45 μ mふるい残分 (網ふるい方法)	%	40 以下
	比 表 面 積 (ブレーン方法)	cm <sup>2</sup> /g	2500 以上
フ ロー 値 比		95 以上	102.9
活性度指数 %	材 齢 28 日	80 以上	84.3
	材 齢 91 日	90 以上	98.9

### 2.2.2 セメント

セメントは普通ポルトランドセメント（琉球セメント㈱製造品）を使用した。その物理的性質および化学成分を表2-3に示す。

表 2-3 セメントの物理的性質

比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結時間 (h-min)		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			化学成分 (%)				
		始発	終結	3日	7日	28日	強熱 減量	SO <sub>3</sub>	MgO	Cl <sup>-</sup>	全アル カリ
3.16	3260	2-17	3-37	27.8	46.3	63.6	1.61	1.89	1.22	0.006	0.58

### 2.2.3 細骨材

細骨材は海砂（沖縄県東村新川沖産）と石灰石砕砂（沖縄県本部産）を混合して用いる。混合比率（容積率）は、海砂6：砕砂4で、その物理的性質を表2-4に示す。

表 2-4 細骨材の物理的性質

砂の種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	NaCl (%)	ふるいに留まる試料の質量百分率 (%)						粗粒率 (F. M.)	最大 寸法 (mm)
				5.0 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm		
海砂	2.60	2.22	0.008	0.0	4.0	12.0	33.0	67.0	93.0	2.09	2.5
砕砂	2.65	1.01	—	2.0	18.0	45.0	71.0	89.0	97.0	3.22	5.0

### 2.2.4 粗骨材

粗骨材は石灰石砕石（沖縄県本部産）を使用した。その物理的性質を表2-5に示す。

表 2-5 粗骨材の物理的性質

種類 (区分)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	NaCl (%)	ふるいに留まる試料の質量百分率 (%)						粗粒率 (F. M.)	最大 寸法 (mm)
				25 mm	20 mm	15 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm		
砕砂 (2005)	2.71	0.37	—	0	6	36	74	97	100	6.77	20

## 2.2.5 化学混和剤

化学混和剤は高性能減水剤（竹本油脂㈱製造品、チューポールHP-11に消泡剤を添加）を使用した。コンクリート用化学混和剤の試験結果を表2-6に示す。

表 2-6 化学混和剤の試験結果

項 目		JIS A 6204 による規定値	試 験 値		
			スランプ8cm	スランプ12cm	
フ レ ッ シ ユ コ ン ク リ ー ト	減 水 率 %	4 以上	1 1	1 2	
	ブリーディング量の比 %	1 0 0 以下	3 9	4 0	
	凝結時間の差 min	始 発	- 6 0 ~ + 9 0	+ 5	± 0
		終 結	- 6 0 ~ + 9 0	+ 1 0	± 1 0
	経時変化量	スランプcm	—	—	—
		空気量 %	—	—	—
硬 化 コ ン ク リ ー ト	圧縮強度比 %	材齢 3日	1 1 5 以上	1 4 3	1 4 5
		材齢 7日	1 1 0 以上	1 3 5	1 3 7
		材齢28日	1 1 0 以上	1 2 3	1 2 6
	長 さ 変 化 比 %	1 2 0 以下	9 7	9 7	
	凍結融解に対する抵抗性 (相対動弾性係数 %)	—	—	—	

## 2.3 配合の検討

### 2.3.1 プレテンションPC桁の配合

プレテンション方式PC桁（以下、プレテン桁と称す）に使用するコンクリートの配合を表2-7に示す。本技術開発で対象とする基準のコンクリート（50N-F0）は、一般的にPC桁に使用する高強度コンクリートとし、設計基準強度は50N/mm<sup>2</sup>を目標とした。水セメント比35.0%、細骨材率38.0%とし、また、フライアッシュの混入量を0, 50, 75kg/m<sup>3</sup>の3種類に設定した。

沖縄県におけるコンクリートの細骨材には、一般的に砕砂と海砂を混合して使用している。プレテン桁のコンクリート配合（以下、プレテン配合と称す）では、単位セメント量を減らさずにフライアッシュを細骨材に代替する配合を考えている。そのため、粒子の細かいフライアッシュ添加によるコンクリートの粘性増加が考えられる。その対策として、微粒分の多い海砂をフライアッシュで代替し、コンクリートに及ぼす粘性増加およびそれに伴う作業性の低下を軽減している。

近い将来、環境保全により海砂の採取規制が沖縄全域で予想されることから、海砂をフライアッシュで代替することは、環境保全全面においても非常に重要な役割を担っている。

表 2-7 プレテン配合（圧縮強度50N/mm<sup>2</sup>）

配合番号	ス ラ ン プ	空 気 量	水セ メン ト比	細骨 材率	単位 水量	単位セ メント 量	単位細 骨材量		単位粗 骨材量	フライ アッシ ュ量	高性能 減水剤
			W/C				(s+F)/a	海砂			
	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(C×%)
50N-F0	18 ±2.5	2.0 ±1.5	35.0	38.0	165	471	398	270	1119	0	0.80
50N-F50							340	270		50	0.73
50N-F75							309	270		75	0.73

※ 配合番号は以下による  
 設計基準強度－フライアッシュ混入量  
 （例：50N/mm<sup>2</sup>－F75kg/m<sup>3</sup>）

### 2.3.2 ポストテンションPC桁の配合

ポストテンション方式PC桁（以下、ポステン桁と称す）に使用するコンクリートの配合（以下、ポステン配合と称す）として3種類を考えている。第1番目の配合をポステン配合①とし、表2-8に示す。ここでは、プレテン配合と同様にフライアッシュを海砂代替として用いている。設計基準強度は、ポステン桁の箱桁タイプで一般的に使用されている36N/mm<sup>2</sup>を目標とした。水セメント比39.5%、細骨材率42.0%とし、また、フライアッシュの混入量を0, 50, 100kg/m<sup>3</sup>の3種類に設定した。

表 2-8 ポステン配合①（圧縮強度36N/mm<sup>2</sup>）

配合番号	ス ラ ン プ	空 気 量	水セ メン ト比	細骨 材率	単位 水量	単位セ メント 量	単位細 骨材量		単位粗 骨材量	フライ アッシ ュ量	高性能 減水剤
			W/C				(s+F)/a	海砂			
	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(C×%)
36N-F0	12 ±2.5	2.0 ±1.5	39.5	42.0	175	443	435	296	1046	0	0.48
36N-F50							378	296		50	0.48
36N-F100							318	296		100	0.51

表2-9にポステン配合②を示す。上記の配合①との違いは、フライアッシュのポゾラン反応の特性を生かし、単位セメント量を5%低減して、配合設計を行った。

水セメント比41.6%、細骨材率42.0%とし、また、フライアッシュの混入量を0, 50, 100kg/m<sup>3</sup>の3種類に設定した。

表 2-9 ポステン配合② (圧縮強度36N/mm<sup>2</sup>, 5%単位セメント量低減)

配合番号	ス ラ ン プ	空 気 量	水セ メン ト比	細骨 材率	単位 水量	単位セ メント 量	単位細 骨材量		単位粗 骨材量	フライ アッシ ュ量	高性能 減水剤
			W/C				(s+F)/a	海砂			
	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(C×%)
36N-F0-5	12 ±2.5	2.0 ±1.5	41.6	42.0	175	421	440	299	1057	0	0.43
36N-F50-5							383	299		50	0.43
36N-F100-5							323	299		100	0.46

※ 配合番号は以下による

設計基準強度－フライアッシュ混入量－セメント低減率

(例：36N/mm<sup>2</sup>－F100kg/m<sup>3</sup>－5%)

表2-10にポステン配合③を示す。上記の配合②同様、フライアッシュのポズラン反応の特性を生かし、単位セメント量を10%低減した配合設計を行っている。水セメント比43.9%、細骨材率42.0%とし、また、フライアッシュの混入量を0, 50, 100, 125kg/m<sup>3</sup>の4種類に設定した。

表 2-10 ポステン配合③ (圧縮強度36N/mm<sup>2</sup>, 10%単位セメント量低減)

配合番号	ス ラ ン プ	空 気 量	水セ メン ト比	細骨 材率	単位 水量	単位セ メント 量	単位細 骨材量		単位粗 骨材量	フライ アッシ ュ量	高性能 減水剤
			W/C				(s+F)/a	海砂			
	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(C×%)
36N-F0-10	12 ±2.5	2± 1.5	43.9	42.0	175	399	445	302	1068	0	0.42
36N-F50-10							387	302		50	0.42
36N-F100-10							328	302		100	0.48
36N-F125-10							299	302		125	0.51

※ 配合番号は上記表2-9に準じる

## 2.4 コンクリートの練り混ぜ工程

コンクリートの練り混ぜ工程を図2-1に示す。練り混ぜには水平2軸型強制練りミキサー（容量：50リットル）を使用し、1回の練混ぜ量は40リットルで常に一定とした。

フライアッシュを入れることにより、コンクリート中の紛体量が増加するため、練り混ぜ時間を長くする必要がある。細骨材、セメント、フライアッシュ、粗骨材の順で材料をミキサ内に投入し、30秒間空練りし、続いて水と化学混和剤（高性能減水剤）を投入した。練り混ぜ時間は、フライアッシュ50kg以上、100kg未満の配合で120秒間、フライアッシュ100kg以上の配合で150秒間の設定を行い、材料が均一になるように留意した。普通コンクリート（フライアッシュ無混入）の配合は、90秒間の練り混ぜ時間とした。

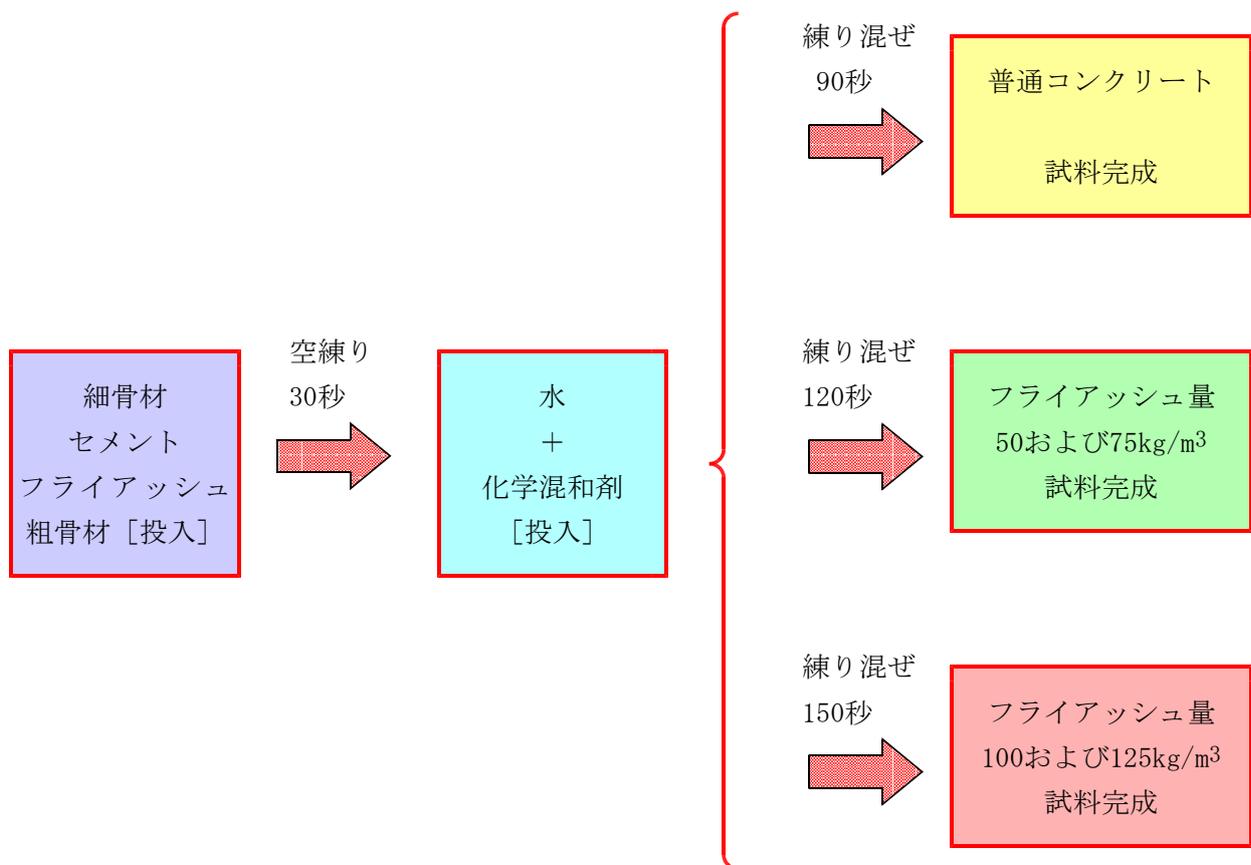


図 2-1 コンクリートの練り混ぜ工程

## 2.5 フレッシュコンクリートの試験

フレッシュコンクリートの性状に関しては、施工性の指標となるスランプおよび空気量を対象に試験を実施した。スランプ試験はJIS A 1101-1998「コンクリートのスランプ試験方法」に準じ、空気量試験は、JIS A 1128-1999「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」に準じて行った。また、フライアッシュコンクリートの粘性増加の問題に対しては、目視やスコップでの練り返しなどにより確認した。また、打設の状態、表面コテ仕上げ性能などに関しては、実際の施工性を考慮して確認作業を行った。

## 2.6 圧縮強度試験

### 2.6.1 試験の概要

圧縮強度試験にはφ100×200mmの円柱供試体を用い、試験方法は、JIS A 1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。

工場で製作されるコンクリート製品は、型枠の回転率を高めて生産性を向上させるために蒸気養生を行い、早期に強度発現を得る必要がある。また、プレテン桁は、プレストレスを与えるときの圧縮強度がJIS A 5373-2000「プレキャストプレストレストコンクリート製品」(付属書2)で35N/mm<sup>2</sup>以上と規定されていることから、材齢1日の強度確認が重要な意味をもっている。一般の工場製品では蒸気養生を行うため、強度発現が早いことから、材齢14日における強度試験値によって設計基準強度管理を行っている<sup>9)</sup>。

以上のことから、圧縮強度試験材令を1日、14日(2週)、28日(4週)、91日(13週)とし、短期および長期の強度発現特性を確認した。

一方、ポステン桁に使用するコンクリートは、主に現場養生のため強度発現が徐々に表れる性質を考慮し、プレストレス導入日を概ね4日と設定している。そのため、圧縮強度試験材齢は4日、14日(2週)、28日(4週)、91日(13週)とした。

### 2.6.2 養生方法

コンクリート供試体の養生方法に関しては、2002年制定コンクリート標準示方書[施工編](15.2.2.3)において、工場製品と同等の締固めおよび養生の条件で製造することを原則とすると規定している。そのため、工場で製作されるプレテン配合(50N/mm<sup>2</sup>)に関しては、実際のPC桁の製作工程に準じてコンクリート打設終了後、約3時間の前置きをした後、蒸気養生を8時間行い、その後は現場気中養生を行った。

一方、主に現場で製作されるポステン配合(36N/mm<sup>2</sup>)の供試体の養生条件に関しては、通常は標準水中養生を主体としている。しかし、フライアッシュのポゾラン反応の発現状況を確認するため、標準水中養生ではなく、構造物と同じ条件下で養生した。そのことにより、構造物における実際のコンクリート強度と供試体との強度の差を極力小さくし、型枠の取外し時期およびプレストレス導入時期の判断をより安全に行うことに配慮した<sup>9)</sup>。そのため供試体の養生は、実際の施工手順を想定し7日間は湿潤養生を行い、その後は現場気中養生に移行し、コンクリート供試体の強度発現特性を確認した。

## 2.7 試験結果および考察

### 2.7.1 スランプ

図2-2および表2-11に試験練りで得られたスランプ試験結果を示す。全体的な傾向として、フライアッシュを混入することによりコンクリートの粘性は増加するが、大きなスランプ低下は36N-F50-10、36N-F100-10を除いては見られなかった。逆にプレテン配合およびポステン配合①に関しては、フライアッシュを混入することによりスランプが増大する傾向を示した。しかし、フライアッシュを100kg/m<sup>3</sup>以上と大量に混入した場合には、スランプ自体は特に問題なかったが、コンクリートの粘性が非常に大きく増加し、実際の施工性に際して、打設、締固めおよび表面コテ仕上げ作業などが非常に困難になると考えられる。その対応策としては、粘性増加の特性を利用し、紛体系の

高流動コンクリートとして使用することを提案する。そうすることにより、生コンの材料費が多少上がっても、締固めに要する人件費の削減や工期の短縮に繋がり、むしろトータルコストのダウンに繋がる可能性も考えられる。従って、フライアッシュを100kg/m<sup>3</sup>以上と大量使用する場合には、コンクリートの作業性の判断をスランプ試験ではなくスランプフロー試験で管理し、高流動コンクリートとして使用するなどの対策を講じれば、実用化に大きく前進できると考えられる。

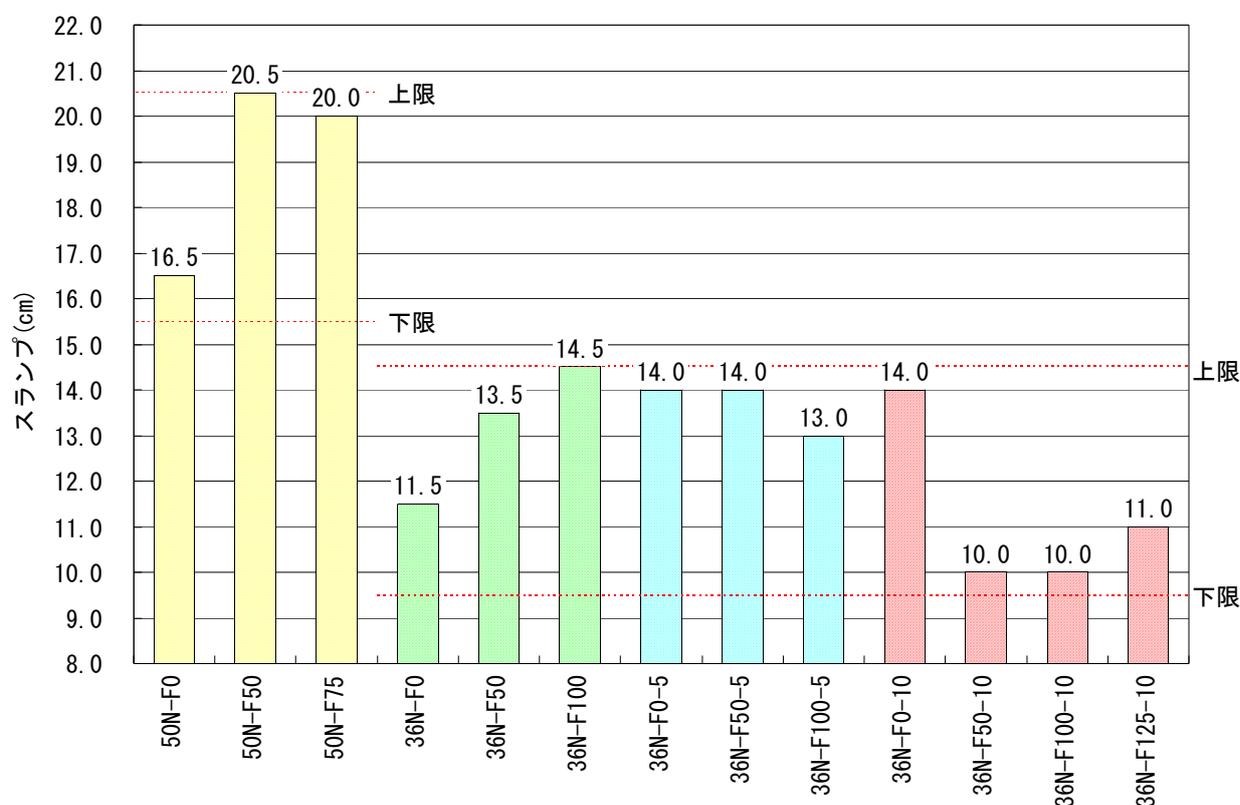


図 2-2 スランプ試験結果

表 2-11 スランプ試験結果

プレテン配合		ポステン配合①		ポステン配合②		ポステン配合③	
配合番号	スランプ	配合番号	スランプ	配合番号	スランプ	配合番号	スランプ
50N-F0	16.5cm	36N-F0	11.5cm	36N-F0-5	14.0cm	36N-F0-10	14.0cm
50N-F50	20.5cm	36N-F50	13.5cm	36N-F50-5	14.0cm	36N-F50-10	10.0cm
50N-F75	20.0cm	36N-F100	14.5cm	36N-F100-5	13.0cm	36N-F100-10	10.0cm
—	—	—	—	—	—	36N-F125-10	11.0cm

### 2.7.2 空気量

図2-3および表2-12に空気量の試験結果を示す。今回の試験練りでは上記2.1で述べたとおり、亜熱帯海洋性気候下という沖縄特有の環境条件を考慮し、空気量の設計値を2.0±1.5%と設定し、空気連行剤 (AE剤) を使用していない。全体の傾向としては、フライアッシュを混入することにより空気量が若干減少する傾向を示しているが、1.0%~2.0%の範囲内に全て収まっており、特にフライアッシュが空気量に及ぼす影響はないと判断できる。

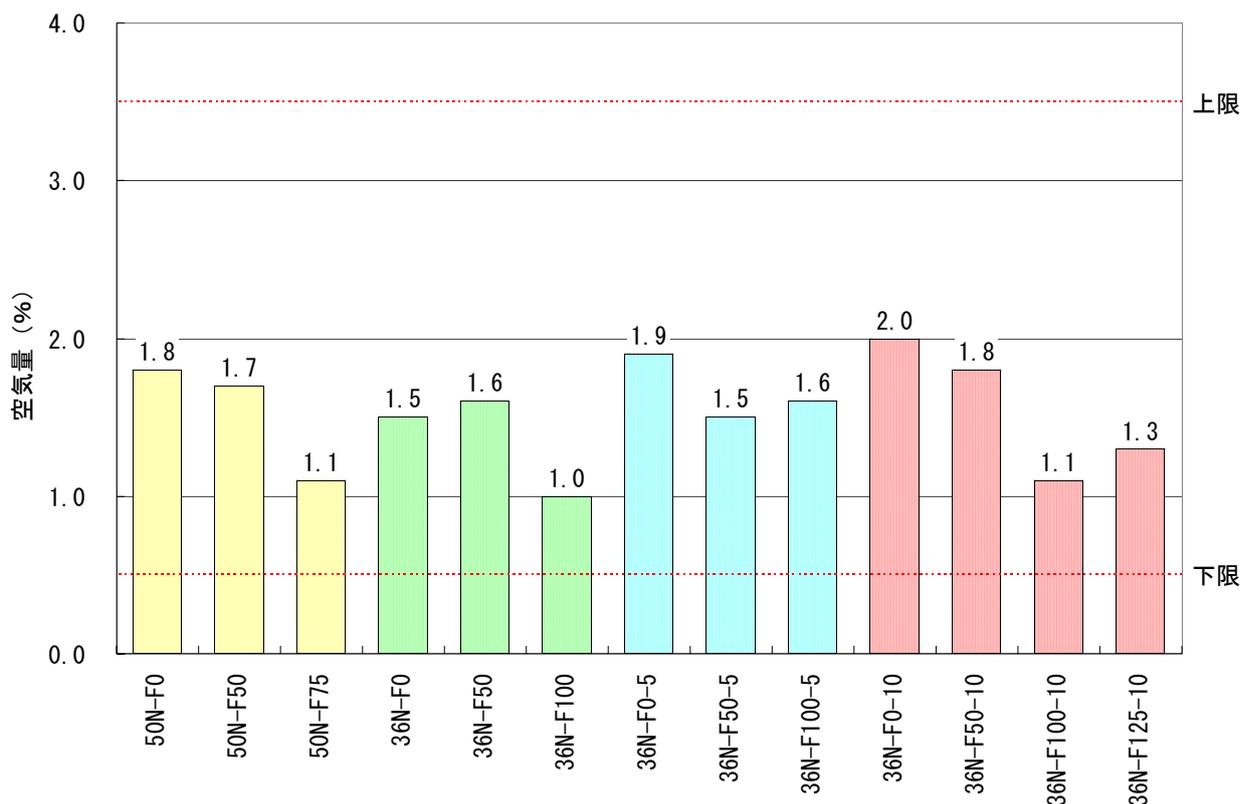


図 2-3 空気量試験結果

表 2-12 空気量試験結果

プレテン配合		ポステン配合①		ポステン配合②		ポステン配合③	
配合番号	空気量	配合番号	空気量	配合番号	空気量	配合番号	空気量
50N-F0	1.8%	36N-F0	1.5%	36N-F0-5	1.9%	36N-F0-10	2.0%
50N-F50	1.7%	36N-F50	1.6%	36N-F50-5	1.5%	36N-F50-10	1.8%
50N-F75	1.1%	36N-F100	1.0%	36N-F100-5	1.6%	36N-F100-10	1.1%
—	—	—	—	—	—	36N-F125-10	1.3%

### 2.7.3 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図2-4および表2-13に示す。全体的な傾向として、フライアッシュを混入した配合では、材齢91日におけるコンクリートの圧縮強度の伸びが大きく表れている。また、フライアッシュを混入することにより、長期的な強度の増加だけでなく、初期の強度においても増加する傾向を示している。これは、フライアッシュをセメント代替ではなく、細骨材と代替しているため、紛体量が多くなり、コンクリートの組織を緻密にする効果が表れているものと思われる。

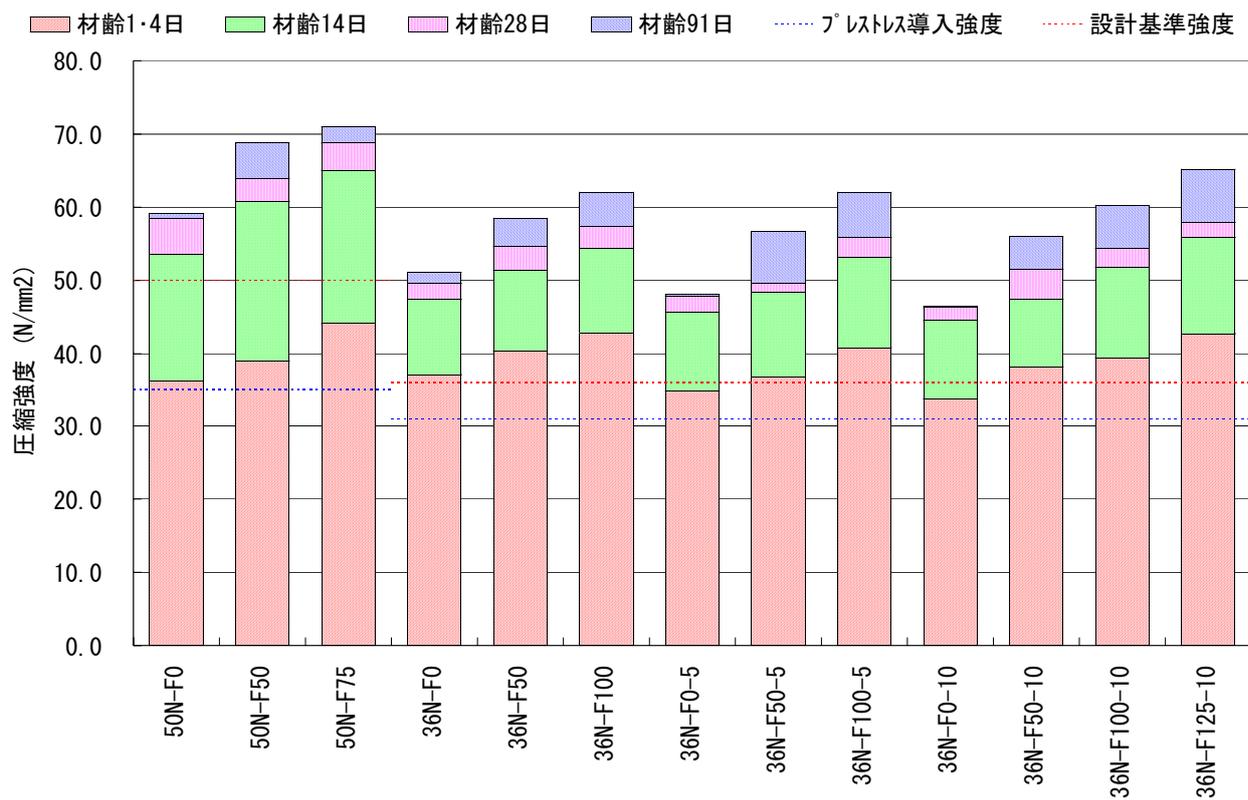


図 2-4 圧縮強度試験結果

表 2-13 圧縮強度試験結果 (単位 : N/mm<sup>2</sup>)

プレテン桁配合	試験材齢 (設計基準強度50N/mm <sup>2</sup> )			
	1日	14日	28日	91日
50N-F0	36.2	53.5	58.4	59.1
50N-F50	39.0	60.8	64.0	68.8
50N-F75	44.0	65.1	68.7	70.9
ポステン桁配合 ①・②・③	試験材齢 (設計基準強度36N/mm <sup>2</sup> )			
	4日	14日	28日	91日
36N-F0	37.0	47.4	49.5	51.1
36N-F50	40.3	51.3	54.6	58.4
36N-F100	42.8	54.4	57.3	62.0
36N-F0-5	34.9	45.6	47.8	48.0
36N-F50-5	36.8	48.3	49.5	56.7
36N-F100-5	40.8	53.1	55.8	62.0
36N-F0-10	33.7	44.4	46.2	46.4
36N-F50-10	38.1	47.4	51.5	56.0
36N-F100-10	39.4	51.7	54.4	60.2
36N-F125-10	42.7	55.9	57.9	65.2

以上の試験結果から、ポステン配合においては、フライアッシュを混入することにより、プレストレス導入時強度および設計基準強度を大きく上回る結果となり、単位セメント量低減の可能性を示している。また、設計基準強度の管理材齢を28日（4週）とするのではなく、それ以上に伸ばすことが可能であれば、単位セメント量を低減することができ、コンクリートの水和熱の低減、水密性の向上およびアルカリ骨材反応の抑制などに大きく繋がると考えられる。

プレテン配合においては、フライアッシュを混入することにより、設計基準強度を大きく上回る結果となった。しかし、単位セメント量を減らすとプレストレス導入時強度が基準値を下回る可能性が考えられる。従って、単位セメント量を減らすためには、高流動コンクリート化によるフライアッシュの大量混入や蒸気養生時間の延長および早強セメントの使用などの対策を取ることが必要である。

#### 2.7.4 コンクリート材料費の検討

図2-5および表2-14に各配合ごとのコンクリート材料費を示す。プレテン配合では、フライアッシュ量の増加に対応してコンクリート材料費も増加する傾向を示す。ポステン配合においては、フライアッシュを混入することにより圧縮強度が増加し、単位セメント量の減少が可能となったので、単位セメント量の10%を低減し、フライアッシュ50kg/m<sup>3</sup>を混入した配合（36N-F50-10）では、従来のフライアッシュを用いない配合（36N-F0）よりも3%程度コンクリートの材料費が安くなる結果が得られた。圧縮強度試験結果から、ポステン配合では10%以上単位セメント量を低減することができる結果が得られているため、フライアッシュを100kg/m<sup>3</sup>程度混入しても、コンクリートの材料費には影響がないとの結論が得られた。

フライアッシュがコンクリート材料費に及ぼす影響を述べた。現在、フライアッシュとセメントの単価は、ほぼ同程度であり、セメントをフライアッシュで代替しても大きなメリットを得ることが出来ない。今後フライアッシュを市場に確実に定着させるためには、更なるフライアッシュのコストダウンが必要であるかと考えられる。

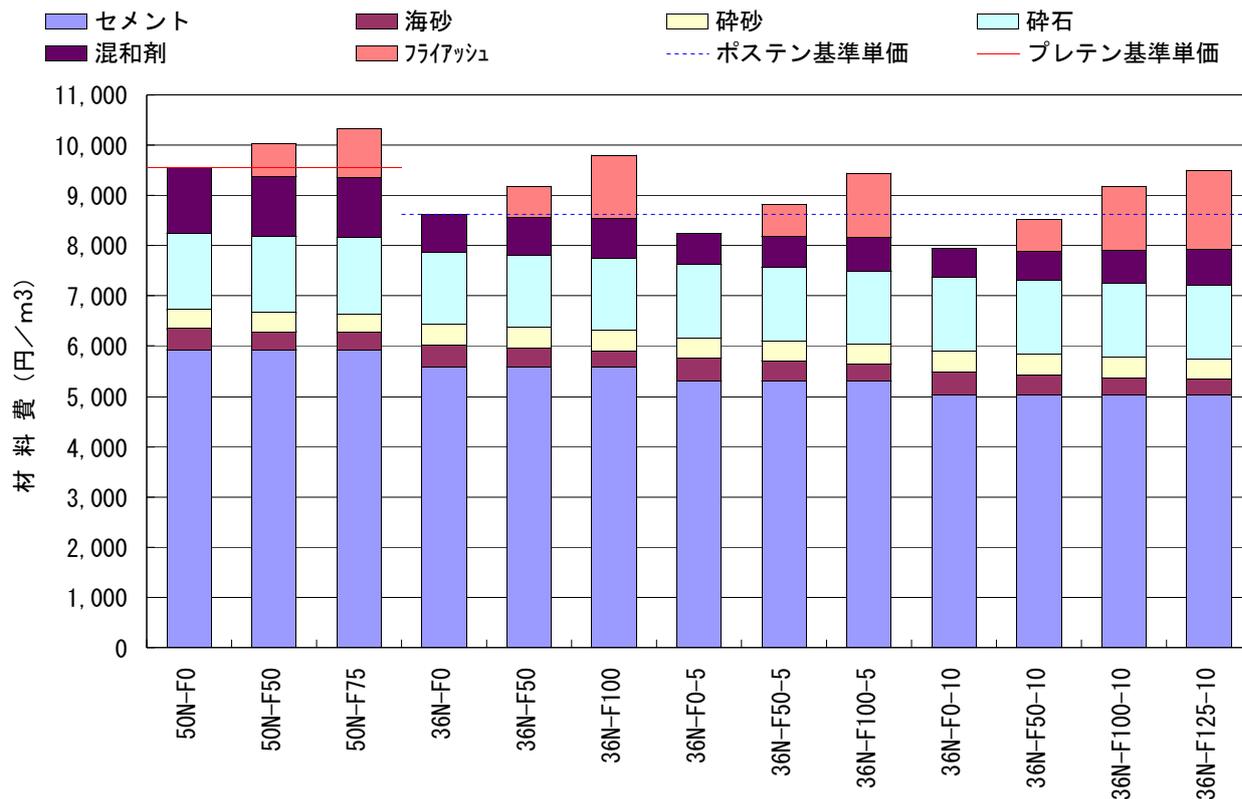


図 2-5 各配合とコンクリート材料費

表 2-14 各配合とコンクリート材料費

名 称	材 料 費 (円/m³)							合計	増減比
	セメント	海砂	砕砂	砕石	混和剤	フライアッシュ			
50N-F0 (基準単価)	5,935	418	369	1,528	1,319	0	9,568	100%	
50N-F50	5,935	357	369	1,528	1,203	635	10,027	105%	
50N-F75	5,935	324	369	1,528	1,203	953	10,312	108%	
36N-F0 (基準単価)	5,582	457	405	1,428	744	0	8,615	100%	
36N-F50	5,582	397	405	1,428	744	635	9,190	107%	
36N-F100	5,582	334	405	1,428	791	1,270	9,809	114%	
36N-F0-5	5,305	462	409	1,443	634	0	8,252	96%	
36N-F50-5	5,305	402	409	1,443	634	635	8,827	102%	
36N-F100-5	5,305	339	409	1,443	678	1,270	9,443	110%	
36N-F0-10	5,027	467	413	1,458	587	0	7,952	92%	
36N-F50-10	5,027	406	413	1,458	587	635	8,526	99%	
36N-F100-10	5,027	344	413	1,458	670	1,270	8,183	107%	
36N-F125-10	5,027	314	413	1,458	712	1,588	9,512	110%	

注) 材料単価は建設物価、積算資料2005年2月号を採用。

ただしフライアッシュの単価は物価資料にないため、琉球セメント㈱の販売価格を採用。

### 第3章 塩化物イオン浸透促進試験およびその結果

#### 3.1 はじめに

フライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抑制効果を確認するために、乾湿繰返しによる塩化物イオン浸透促進試験（以下、塩水促進試験と称す）を行った。本試験は沖縄職業能力開発大学校の実験設備を用いて、280日間（20サイクル）に渡り行った。

本試験の特徴は、熱風乾燥、塩水浸漬を繰り返すことにより、短期間でコンクリート中へ塩化物イオンの浸透を促進し、フライアッシュの遮塩性効果を確認することである。しかし、本試験と自然環境下の塩化物イオンの浸透メカニズムには違いがあり、また、試験日数と自然環境下での日数の相関関係等についても、まだ解明されない不明確な点も多い。

本章では、塩水促進試験によって得られた塩化物イオンの濃度分布および経過日数の関係に着目し、フライアッシュコンクリートの遮塩性能の評価を確認する。

#### 3.2 実験概要

##### 3.2.1 試験体製作および塩水促進試験方法

試験体製作から塩水促進試験開始までの流れを図3-1および写真3-1に示す。本実験で使用する試験体の寸法は、15×15×53cmで、試験練りを行った13種類の配合の中から後述の図3-2～3-11に示す9種類を選択して製作を行った。試験体打設終了後、13日目に底面と打設面を除く4面をエポキシ樹脂で4日間に渡り塗装し、その後、塗装乾燥期間を設け、材齢28日目に塩水促進試験を開始した。

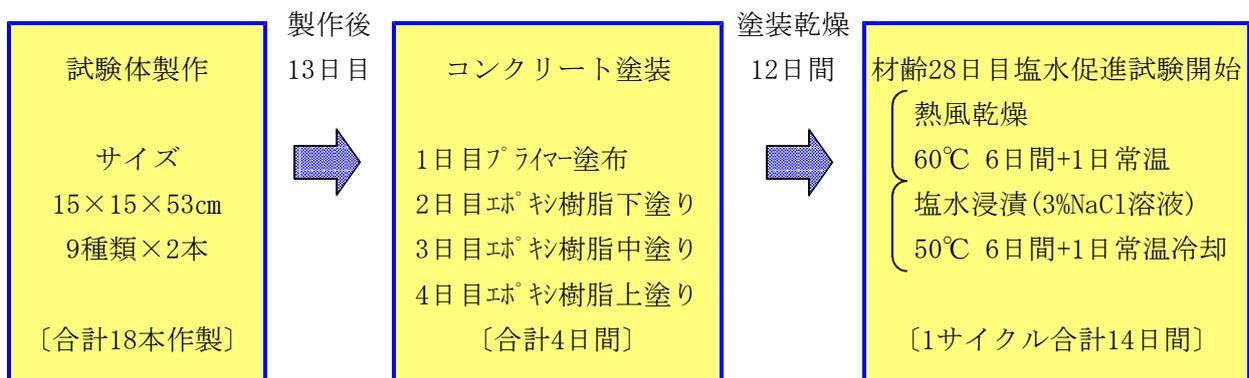


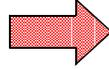
図 3-1 試験体製作から塩水促進試験開始までの流れ

写真 3-1 試験体製作から塩水促進試験開始までの流れ

①コンクリート練混ぜ(2軸強制ミキサ)



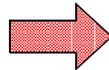
②スランプ試験



③試験体バイブレータ締め



試験体製作  
後13日目



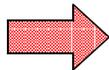
④プライマー塗布・表面整正



⑤エポキシ樹脂塗装(下塗り)



1日1工程  
計4日塗装



塗装終了後  
乾燥12日間

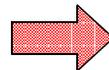
⑥エポキシ樹脂塗装(中・上塗り)



⑦熱風乾燥(60℃)



6日熱風乾燥  
6日塩水浸漬



それぞれ1日  
常温冷却

⑧塩水浸漬(3%NaCl溶液50℃)



### 3.2.2 塩化物イオン分析方法

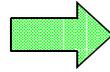
塩水促進試験により試験体内部に浸透した塩化物イオンの分析は、(社)日本コンクリート工学協会(JCI)基準(案)「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(1987)」に準拠して行った。本試験は琉球大学地域共同研究センターにて行った。分析の手順および様子を写真3-2に示す。

写真 3-2 塩化物イオン分析状況

①試験体コア抜き(φ7.5×15cm)



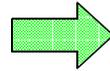
②コンクリートカッターにより1cm刻みにスライス



③ハンマーによる粗粉碎



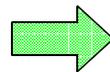
④粉碎機による微粉碎



⑤40 g 試料採取



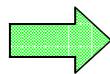
⑥硝酸溶液で軽く攪拌し煮沸5分



⑦冷却後、吸引ろ過



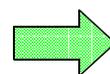
⑧500ml定容・試料分取



⑨電位差滴定法(硝酸銀滴定法)



⑩硝酸銀滴定状況拡大図



上記①～⑩の全塩分分析法でコンクリート中に含まれる塩化物イオンの分析試験を行い、各配合における塩化物イオンの浸透量および分布状況を確認した。分析試験回数は、5・10・15・20サイクル時（70・140・210・280日）の4回について実施した。

### 3.3 試験結果および考察

電位差滴定法により求められた各サイクル毎の塩化物イオン濃度分布結果を図3-2～3-9に示す。全体的な傾向として、サイクル（時間）が経過するにつれて塩化物イオンは内部へ大きく浸透している。また、フライアッシュを混入したコンクリートは、フライアッシュ混入量の増加に伴って塩化物イオンの内部浸透量が少なくなっている。このことは、フライアッシュのポズラン反応により細孔組織が緻密化され、遮塩性が向上したものと考えられる。打設面においては、ブリーディングの影響によりコンクリートの水密性が低下するため、塩化物イオンの浸透量が底面に比較して全体的に大きくなっている。

最終の20サイクル後の深さ3.5cmの位置におけるコンクリート中の塩化物イオン量を図3-10、3-11に示す。全ての配合において、フライアッシュを混入することにより遮塩性の著しい向上が表れている。

以上の結果より、フライアッシュの塩化物イオン浸透に対する抑制効果は大きいということが明らかになった。

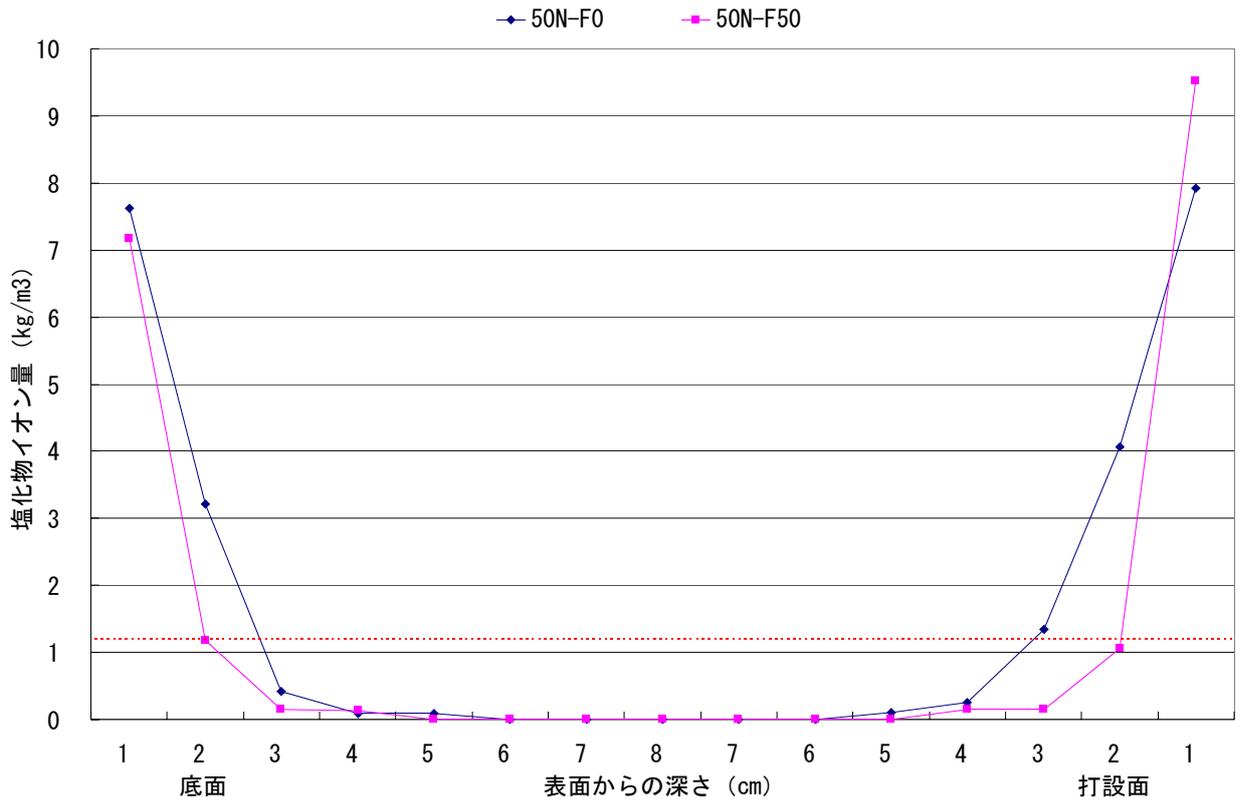


図 3-2 5サイクル時の塩化物イオン濃度分布（プレテン配合）

※ --- は鉄筋の腐食発生限界濃度(1.2kg/m<sup>3</sup>)を示す。

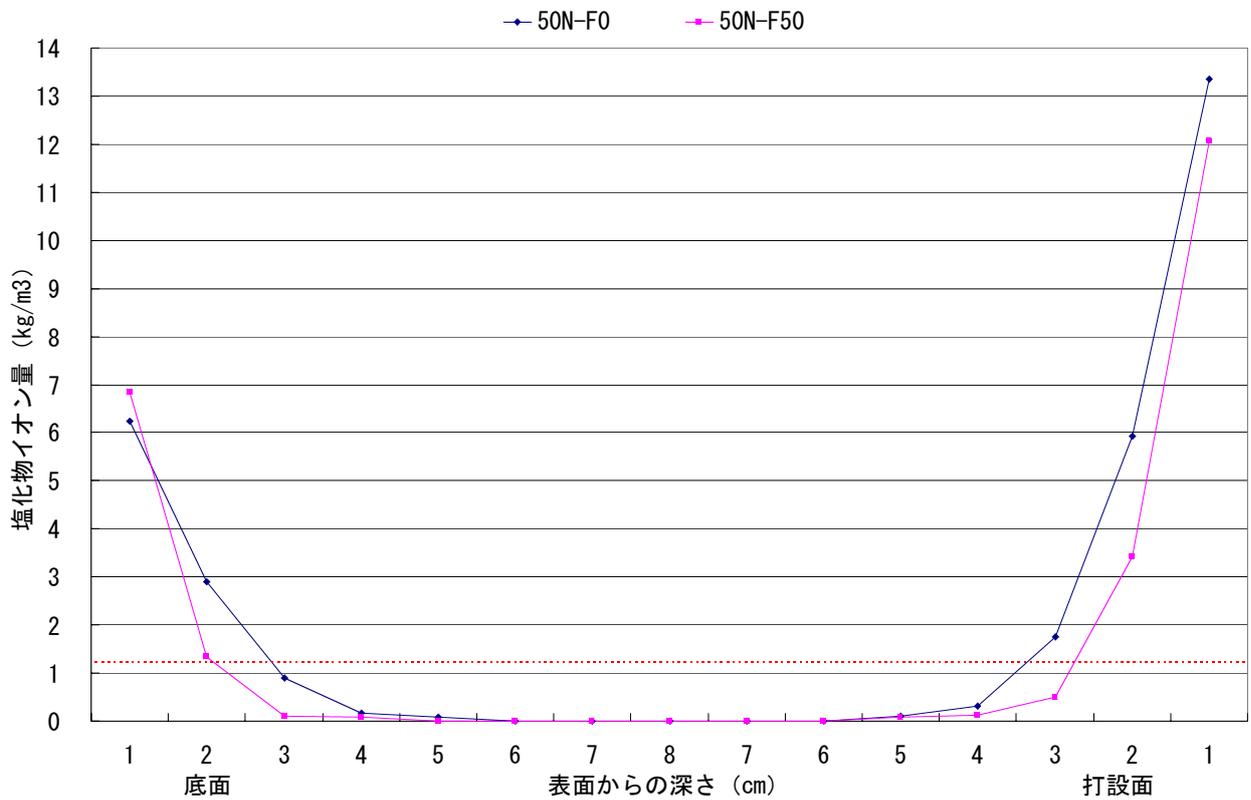


図 3-3 10サイクル時の塩化物イオン濃度分布（プレテン配合）

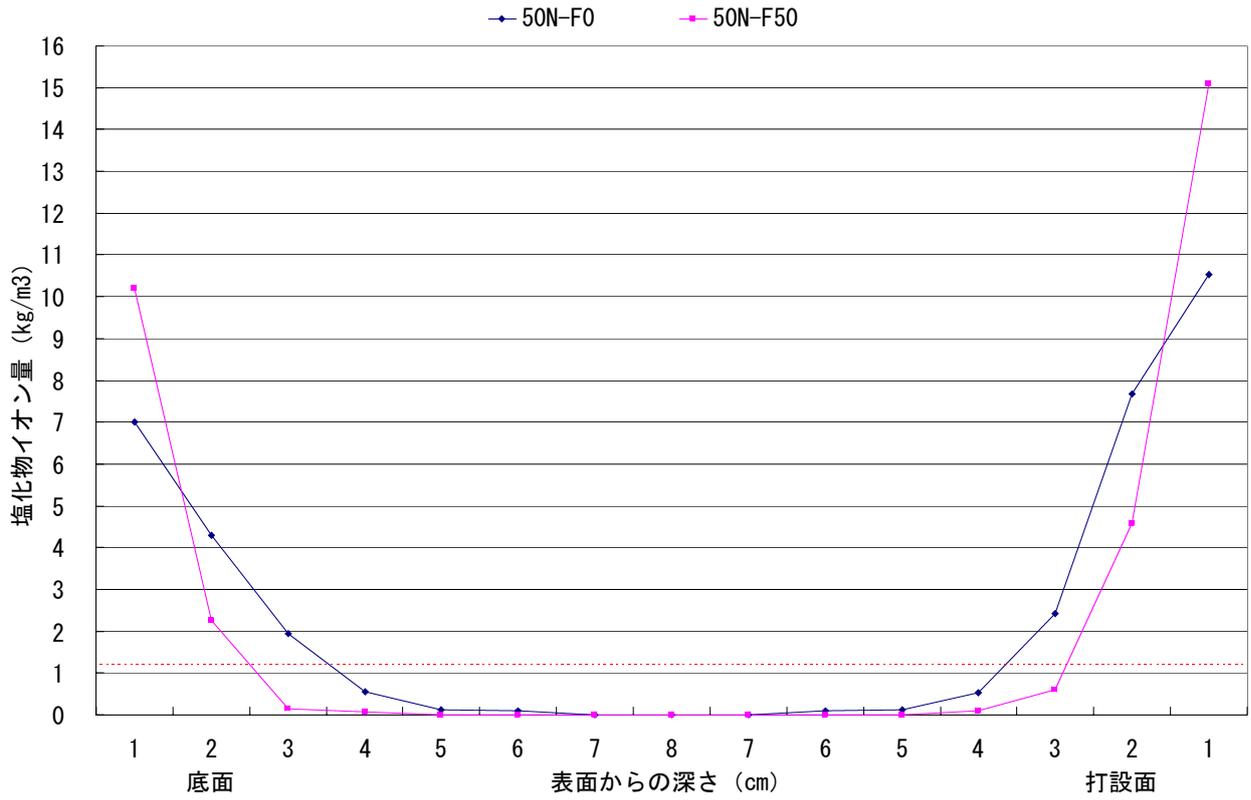


図 3-4 15サイクル時の塩化物イオン濃度分布（プレテン配合）

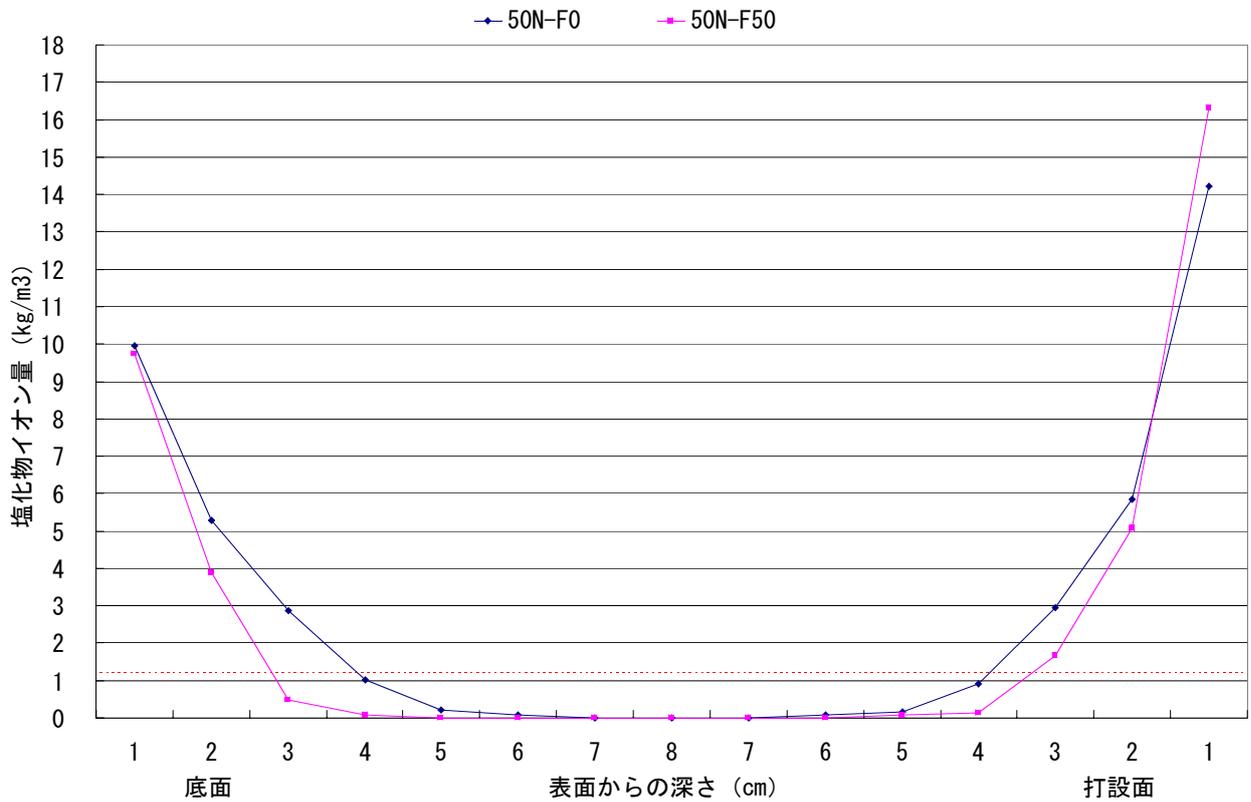


図 3-5 20サイクル時の塩化物イオン濃度分布（プレテン配合）

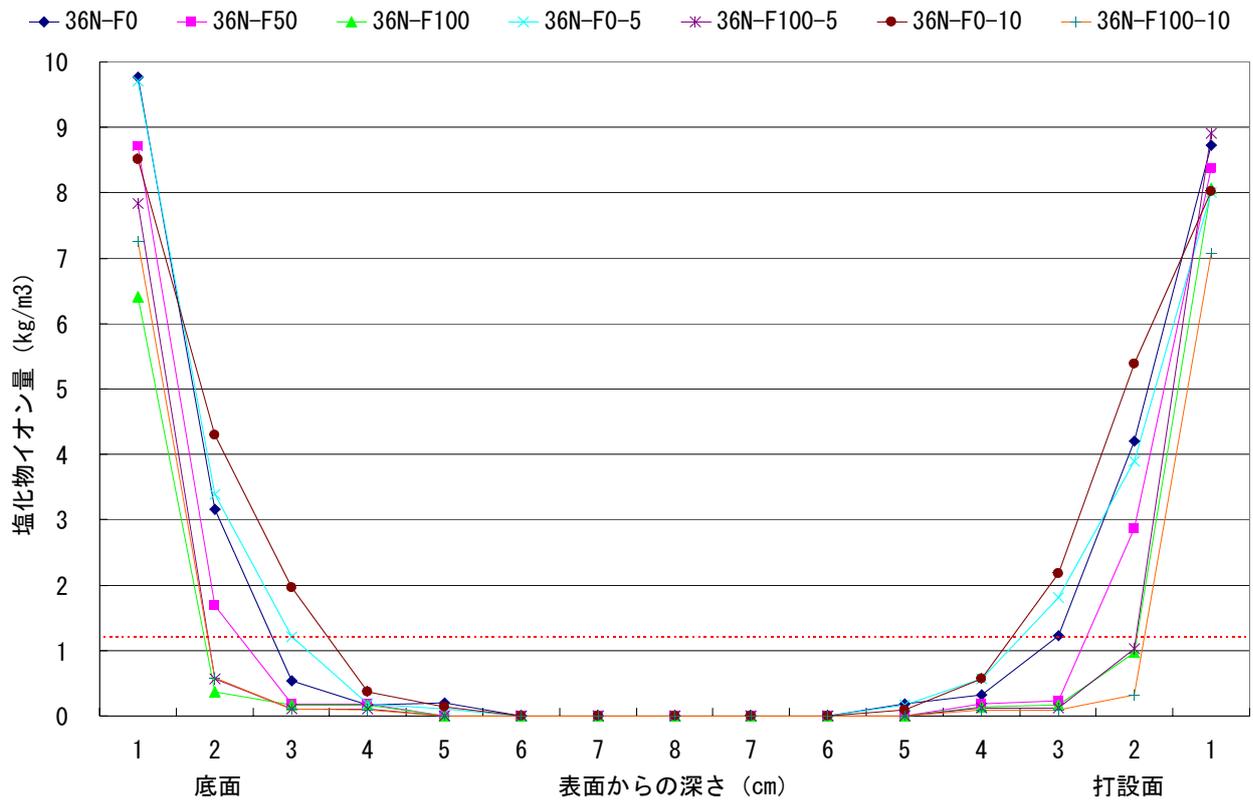


図 3-6 5サイクル時の塩化物イオン濃度分布 (ポステン配合)

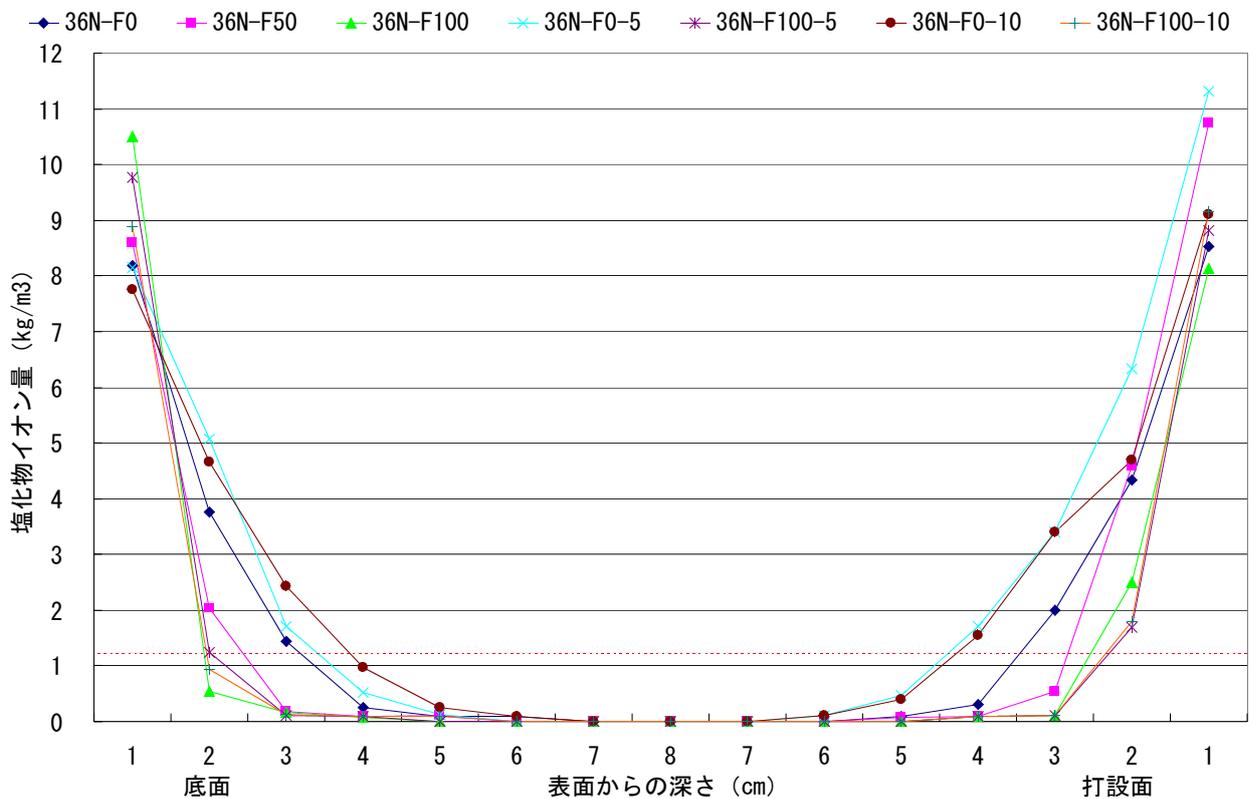


図 3-7 10サイクル時の塩化物イオン濃度分布 (ポステン配合)

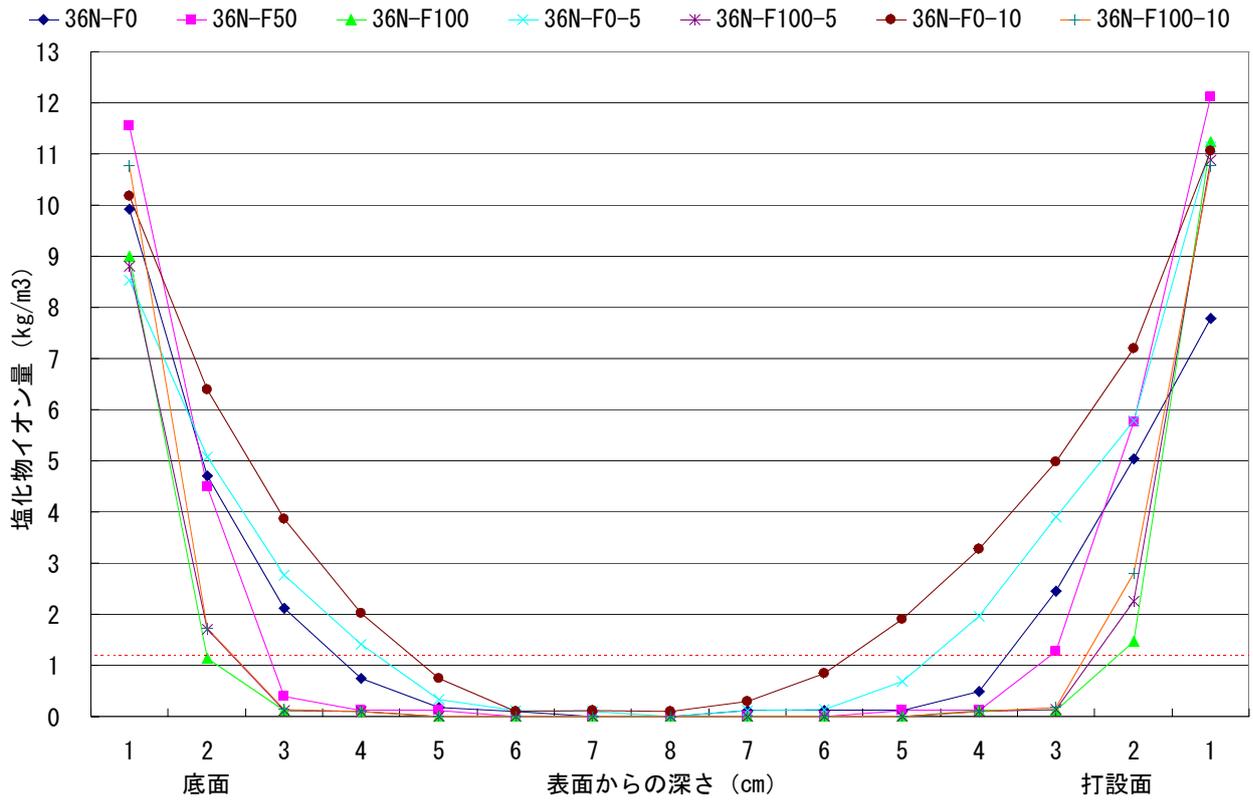


図 3-8 15サイクル時の塩化物イオン濃度分布 (ポステン配合)

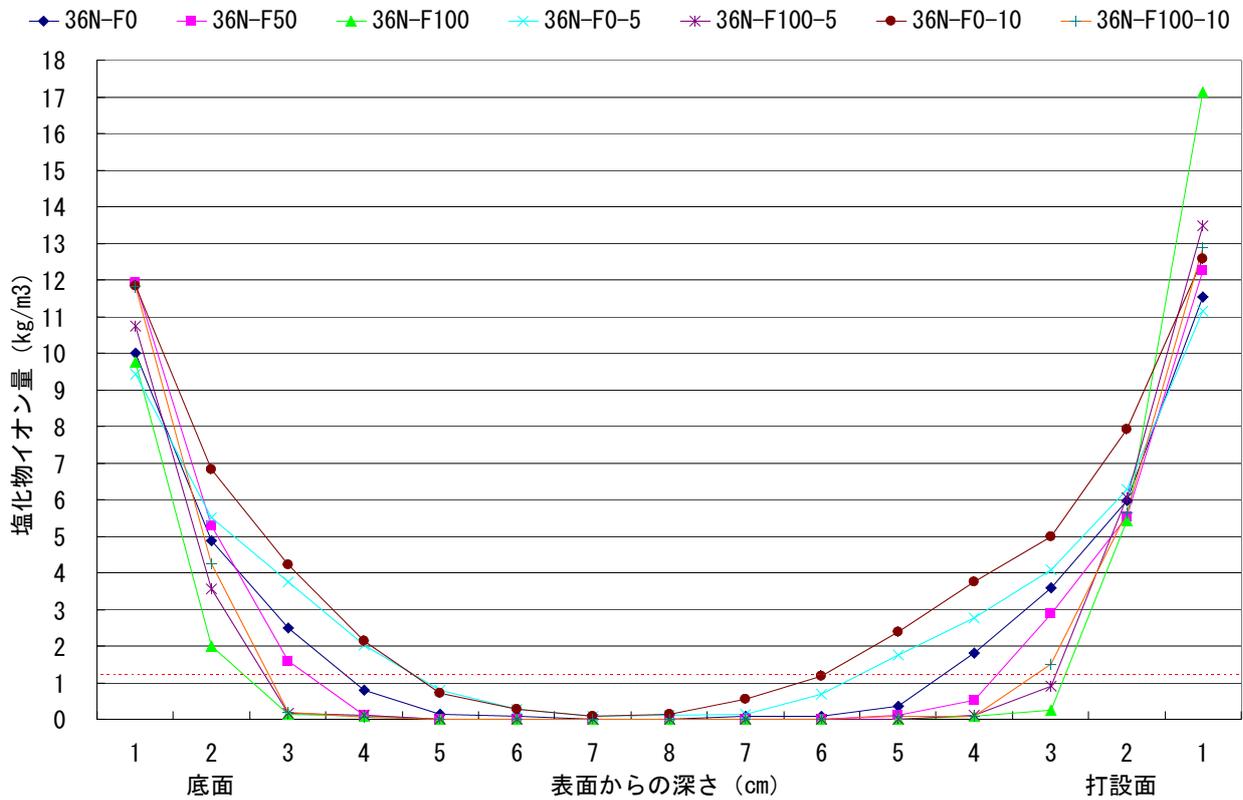


図 3-9 20サイクル時の塩化物イオン濃度分布 (ポステン配合)

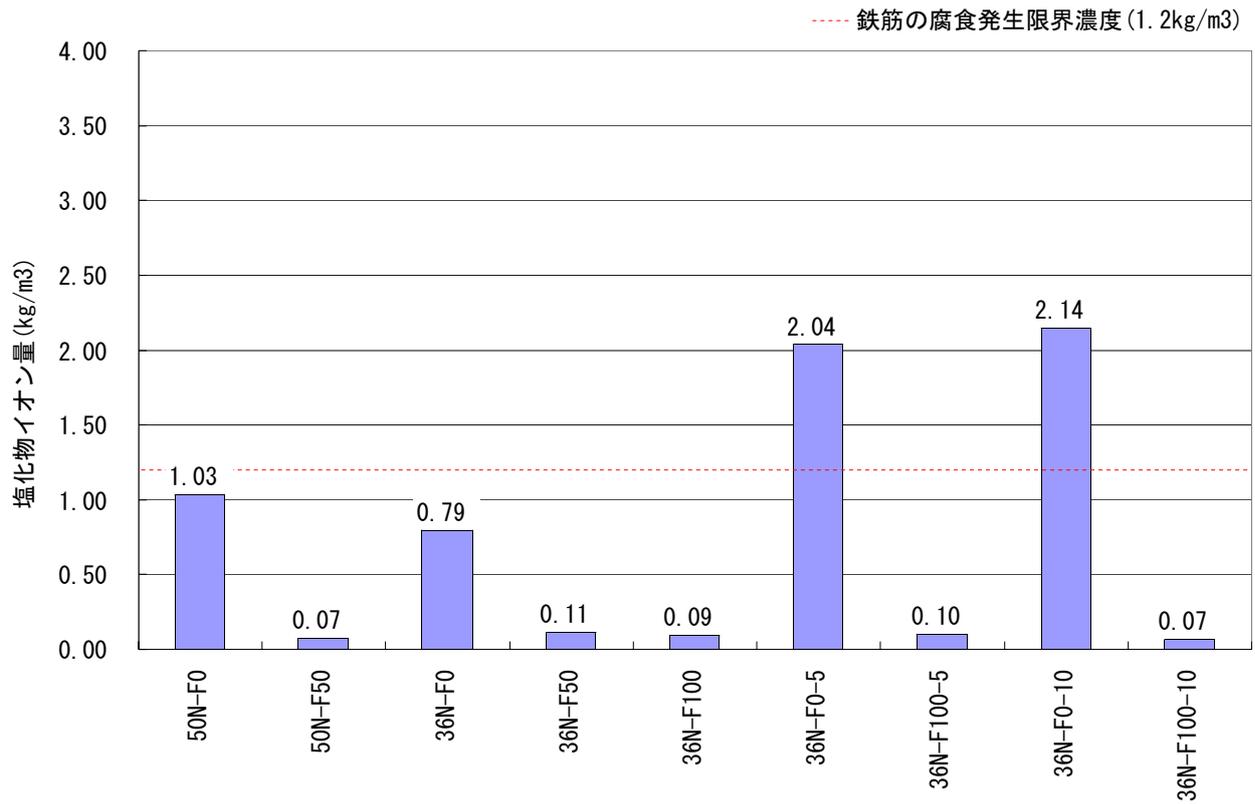


図 3-10 深さ3.5cm位置での塩化物イオン量 (20サイクル, 底面)

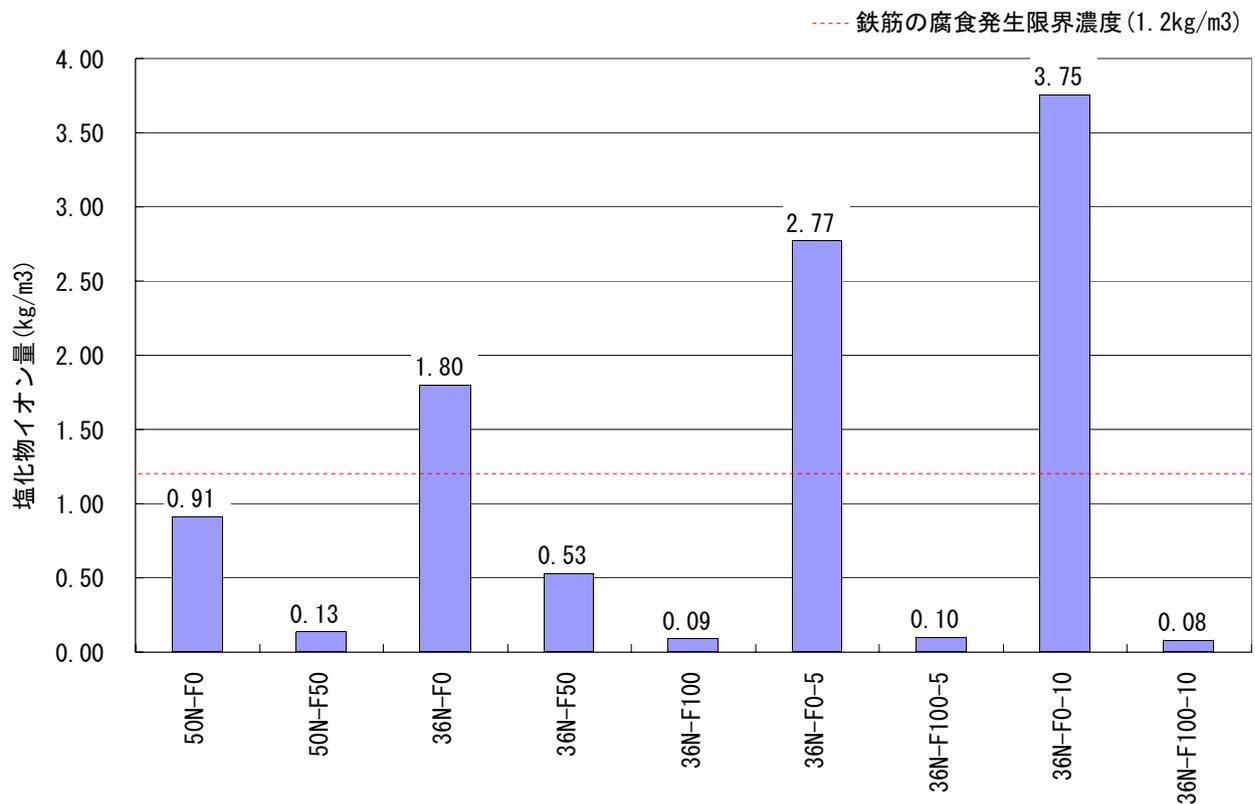


図 3-11 深さ3.5cm位置での塩化物イオン量 (20サイクル, 打設面)

## 第4章 フライアッシュコンクリートの耐久性に関する検討

### 4.1 はじめに

塩化物イオンの浸透性状を表すフィックの拡散法則では、拡散の速さを規定する係数として拡散係数を用いている<sup>9)</sup>。この拡散係数の値が小さいほど、コンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性が大きくなり、塩害に対する耐久性が高くなる。また、上記法則の解が塩化物イオンの浸透性を評価する際に用いられているが、その解には拡散係数、コンクリート表面における塩化物イオン濃度（環境条件）および時間（供用日数）等の要因が影響する。

塩水促進試験によって得られた経過日数（サイクル）と塩化物イオン濃度分布の関係をもとに、フィックの第2法則として知られる拡散方程式を、仮定した境界条件<sup>10)</sup>に基づいて、見かけの拡散係数（以下、拡散係数と称す）を修正シンプレックス法<sup>11)</sup>により各配合について同定した。ここで得られた各配合の拡散係数を基準となるフライアッシュ無混入の配合（50N-F0、36N-F0）と比較して増減比率を求めている。その増減比率を用いて、フライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透による劣化メカニズムを明らかにし、耐久性評価モデルを提案する。

### 4.2 塩水促進試験にもとづく拡散係数

塩水促進試験によって得られた拡散係数を図4-1、4-2に示し、拡散係数とその増減比率を表4-1、4-2に示す。全体的な傾向として、サイクル数が進むに伴って拡散係数の値が小さくなる。このことは、サイクル（時間）が増加するに伴いフライアッシュのポゾラン反応およびセメントの水和が進み、コンクリートの細孔組織が緻密化され、塩化物イオンの浸透を抑制しているものと考えられる。フライアッシュの混入量に関しては、その混入量の増加に伴って拡散係数の値が小さくなっている。底面と打設面を比較すると、塩化物イオンの浸透量が多い打設面の方が全体的に拡散係数の値も大きくなっている。なお、表4-1、4-2に示す増減比率とは、基準配合（50N-F0、36N-F0）の拡散係数に対する各配合における拡散係数の割合を示すもので、表4-1の注1)に算定例を示す。この値を用いて、本技術開発の耐久性評価モデルを次節において提案する。

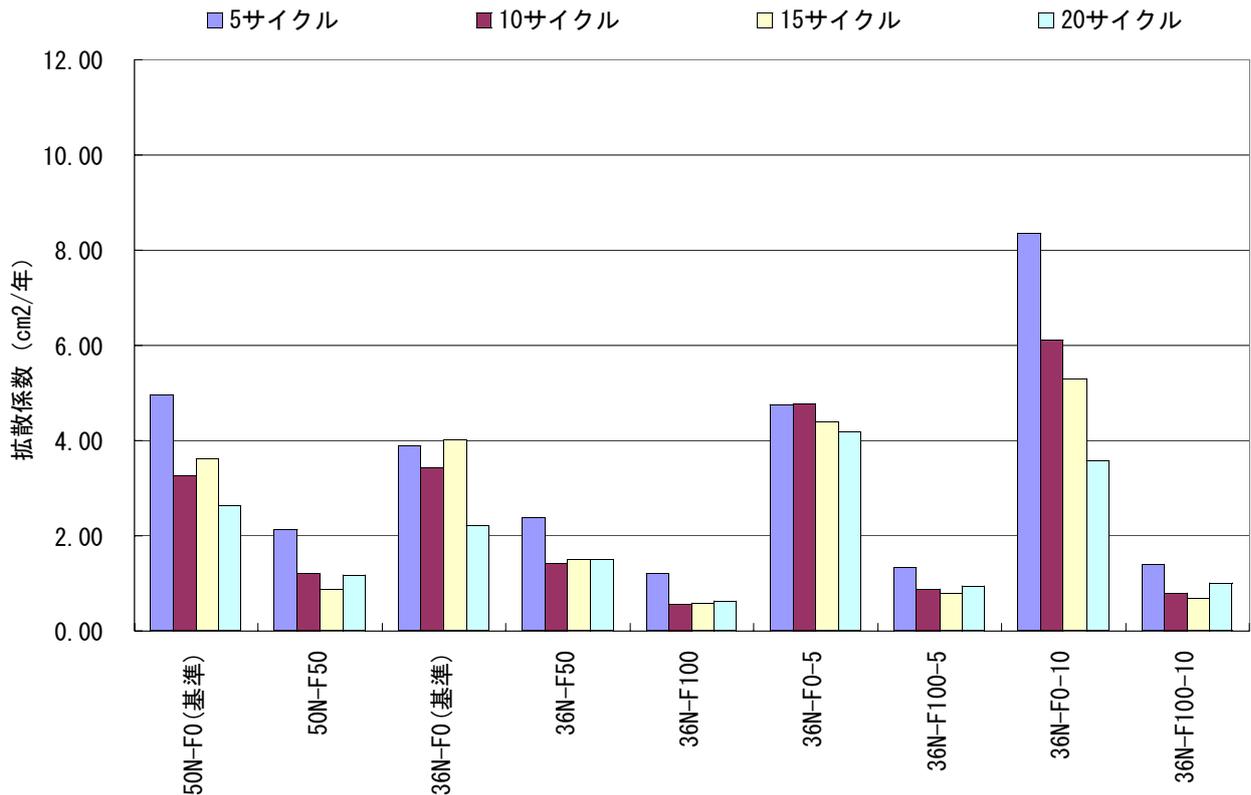


図 4-1 サイクルごとの拡散係数（底面）

表 4-1 サイクルごとの拡散係数と増減比率（底面）

名 称		塩水促進試験により算出した拡散係数一覧表								
		5サイクル		10サイクル		15サイクル		20サイクル		増減比率
		拡散係数	増減比率	拡散係数	増減比率	拡散係数	増減比率	拡散係数	増減比率	平均値
底 面 の 拡 散 係 数	50N-F0 (基準)	4.98	100%	3.26	100%	3.62	100%	2.63	100%	100%
	50N-F50	2.12	43%	1.20	37%	0.88	24%	1.17	45%	37%
	36N-F0 (基準)	3.90	100%	3.43	100%	4.02	100%	2.22	100%	100%
	36N-F50	2.39	61%	1.40	41%	1.49	37%	1.50	68%	52%
	36N-F100	1.20	31%	0.57	17%	0.59	15%	0.62	28%	23%
	36N-F0-5	4.75	122%	4.77	139%	4.40	109%	4.19	189%	140%
	36N-F100-5	1.32	34%	0.89	26%	0.79	20%	0.94	42%	30%
	36N-F0-10	8.36	214%	6.10	178%	5.30	132%	3.59	162%	171%
	36N-F100-10	1.39	36%	0.80	23%	0.69	17%	1.01	46%	30%

注1) 増減比率計算例 (5サイクル, 50N-F50の場合)  $2.12 / 4.98 \times 100 \div 43\%$

増減比率計算例 (5サイクル, 36N-F50の場合)  $2.39 / 3.90 \times 100 \div 61\%$

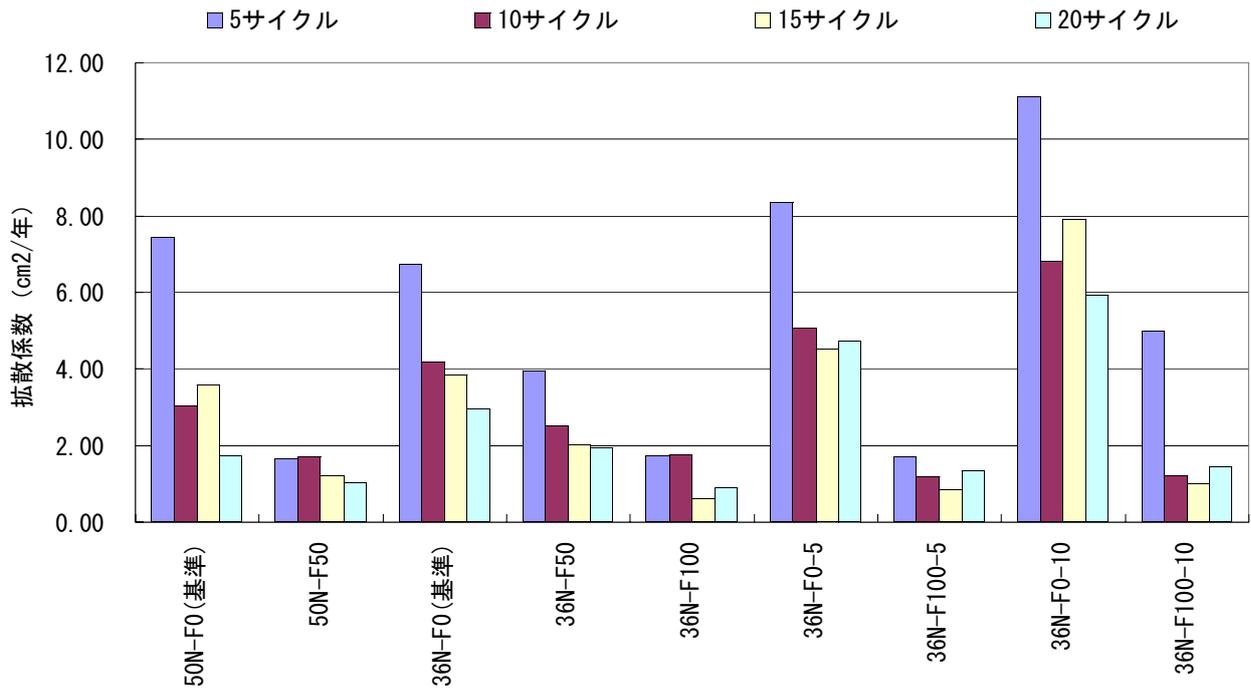


図 4-2 サイクルごとの拡散係数（打設面）

表 4-2 サイクルごとの拡散係数と増減比率（打設面）

名 称		塩水促進試験により算出した拡散係数一覧表								
		5サイクル		10サイクル		15サイクル		20サイクル		増減比率
		拡散係数	増減比率	拡散係数	増減比率	拡散係数	増減比率	拡散係数	増減比率	平均値
打 設 面 の 拡 散 係 数	50N-F0(基準)	7.45	100%	3.03	100%	3.59	100%	1.74	100%	100%
	50N-F50	1.65	22%	1.69	56%	1.19	33%	1.01	58%	42%
	36N-F0(基準)	6.73	100%	4.18	100%	3.86	100%	2.95	100%	100%
	36N-F50	3.95	59%	2.50	60%	2.03	52%	1.93	65%	59%
	36N-F100	1.73	26%	1.74	42%	0.60	16%	0.90	30%	28%
	36N-F0-5	8.36	124%	5.06	121%	4.51	117%	4.71	159%	130%
	36N-F100-5	1.69	25%	1.17	28%	0.83	22%	1.35	46%	30%
	36N-F0-10	11.11	165%	6.82	163%	7.91	205%	5.92	201%	183%
	36N-F100-10	4.98	74%	1.20	29%	1.01	26%	1.43	49%	44%

ここで得られたサイクル毎におけるフライアッシュコンクリートの拡散係数は、基準コンクリート（50N-F0、36N-F0）に比較して著しく減少している。その減少の割合は、フライアッシュ混入量と対応し、20サイクルの底面において50N-F50、36N-F50、36N-F100で各々45%、68%、28%となっている。また、サイクルを増加させるに従って、各配合ともに拡散係数は小さくなっている。このことは、経過日数に伴って減少し、ある一定の値に収束する可能性を示唆している。ここで得られた拡散係数の値を自然環境下で適用することは出来ない。しかし、増減比率に注目してみると、環境条件と経過日数が同一の条件であり、増減比率の差異はコンクリートの性状に対応していると評価することができる。従って、今回得られた結果は次節の耐久性評価に重要な意味を持つものである。

### 4.3 フライアッシュコンクリートの耐久性評価モデルの提案

今回の試験によって、フライアッシュの混入量と拡散係数の関係が確認できた。しかし、塩水促進試験日数と自然環境下での日数が環境の違いにより異なるため、自然環境下でのフライアッシュコンクリートの寿命予測が、本試験の結果だけでは行えない。しかし、4.1で述べたように、塩化物イオンの浸透に関係する主な要因には、拡散係数、表面における塩化物イオン濃度および時間である。今回の塩水促進試験では、表面濃度および時間は全ての配合で同一条件によって試験をしているため、拡散係数の違いにより塩化物イオン浸透量の差異が、それぞれの配合で生じている。塩水促進試験で求められた拡散係数は、自然環境下での値に換算はできないが、各配合における拡散係数の増減比率に関しては、時間に関係なく、そのコンクリートの特性を示すもので、常に一定になると考えた。従って、今回の提案モデルにおいては、実験から自然環境下における拡散係数の予測を行わずに、ここで得られた増減比率のみに注目している。自然環境下での基準コンクリート(50N-F0、36N-F0)の拡散係数は、示方書<sup>9)</sup>の拡散係数予測回帰式(以下、予測回帰式と称す)を用いて求められる。また、フライアッシュコンクリートの拡散係数については、基準コンクリートの拡散係数に増減比率を乗じて得られた値を、その配合の拡散係数として採用している。これらの拡散係数を用い、塩化物イオンが鉄筋の腐食発生限界濃度(1.2kg/m<sup>3</sup>)に到達するまでの予測年数の算出を行った。以下に、耐久性評価モデルの具体的な計算手順を示す。

#### 【計算手順】

①基準配合である36N-F0の水セメント比39.5%より、予測回帰式を利用し、拡散係数予測値(D<sub>p</sub>)を求める。

$$\log D_p = -3.9 \times (0.395)^2 + 7.2 \times (0.395) - 2.5 \approx 0.544 \dots\dots (\text{解 4.1})$$

②解4.1で算出した拡散係数予測値に表4-1、4-2に示す底面および打設面の増減比率の平均値を乗じ、拡散係数を算出する。

③フィックの第2法則の解4.2を利用し、鉄筋のかぶり位置である7cm<sup>12)</sup>の深さに塩化物イオン量が鉄筋の腐食発生限界濃度(1.2kg/m<sup>3</sup>)に到達するまでの年数を算出する。なお、拡散係数の安全係数はコンクリート標準示方書<sup>9)</sup>より1.2とし、表面における塩化物イオン濃度は飛沫帯環境下を想定し13.0kg/m<sup>3</sup>とした。

$$C(x, t) = C_o \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{D_p \cdot \gamma_p \cdot \gamma_z \cdot t}} \right) \dots\dots (\text{解 4.2})$$

C(x, t) : 深さx(鉄筋かぶりの7cm)、時刻t(年)における塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>o</sub> : 表面における塩化物イオン濃度(飛沫帯を想定し13.0kg/m<sup>3</sup>を採用)

D<sub>p</sub> : 塩化物イオンの拡散係数

erf : 誤差関数

γ<sub>p</sub> : 拡散係数の予測値の精度に関する安全係数(1.2を採用)

γ<sub>z</sub> : 増減比率の平均値(表4-1、4-2の平均値)

以上の計算を行うことにより、コンクリート表面から深さ7cmの位置に塩化物イオンが1.2kg/m<sup>3</sup>に到達する年数(t)は求められる。

#### 4.4 算定結果および考察

表4.3および図4-3～4-13に、解4.2を用いて算出した飛沫帯環境下での鉄筋の腐食発生限界濃度(1.2kg/m<sup>3</sup>)に到達するまでの予測年数(以下、到達年数と称す)結果を示す。この結果から、フライアッシュを混入したポステン配合では、基準である36N-F0配合と比べて最大4倍から1.8倍程度の到達年数の増加が見られる。また、プレテン配合に関しては、フライアッシュを50kg/m<sup>3</sup>混入することにより、基準配合50N-F0の約2.5倍の到達年数増加が確認できた。

現在は、フライアッシュを用いたコンクリートの予測回帰式がないため、上記4.3の手順によりフライアッシュコンクリートの塩害に対する耐久性能を評価したが、この方法では塩水促進試験によって、拡散係数の増減比率を求めなければならないため、多くの時間、労力を必要とする。今後、更に多くの実験データの積み重ねを行い、早急にフライアッシュを用いたコンクリートの耐久性評価モデルを提案することが必要だと考えられる。

表 4-3 増減比率を用いて算出した到達年数 (かぶり7cm)

名 称	増減比率 底面・打設面 平均値(γz)	増減比率を用いて 算出した拡散係数 Dp × γz (cm <sup>2</sup> /年)	①増減比率を 用いて算出した 到達年数(年)	塩化物 イオン 到達年数比	備考
50N-F0(基準)	100%	0.349 × 1.00 = 0.349	18.0	100%	W/C35.0%
50N-F50	40%	0.349 × 0.40 = 0.140	45.0	250%	
36N-F0(基準)	100%	0.544 × 1.00 = 0.544	11.5	100%	W/C39.5%
36N-F50	55%	0.544 × 0.55 = 0.299	21.0	183%	
36N-F100	25%	0.544 × 0.25 = 0.136	46.0	400%	
36N-F0-5	135%	0.544 × 1.35 = 0.734	8.5	74%	
36N-F100-5	30%	0.544 × 0.30 = 0.163	38.5	335%	
36N-F0-10	177%	0.544 × 1.77 = 0.963	6.5	57%	
36N-F100-10	37%	0.544 × 0.37 = 0.201	31.0	270%	

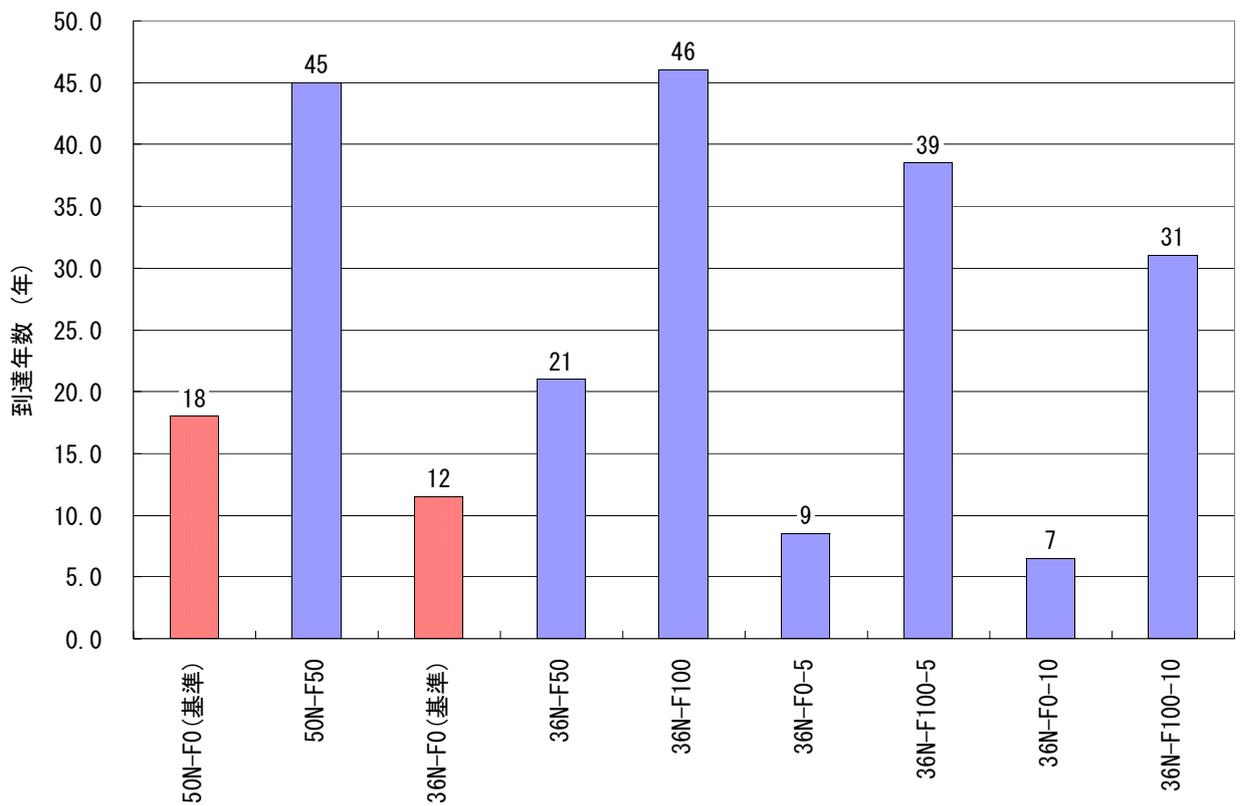


図 4-3 塩化物イオン到達年数

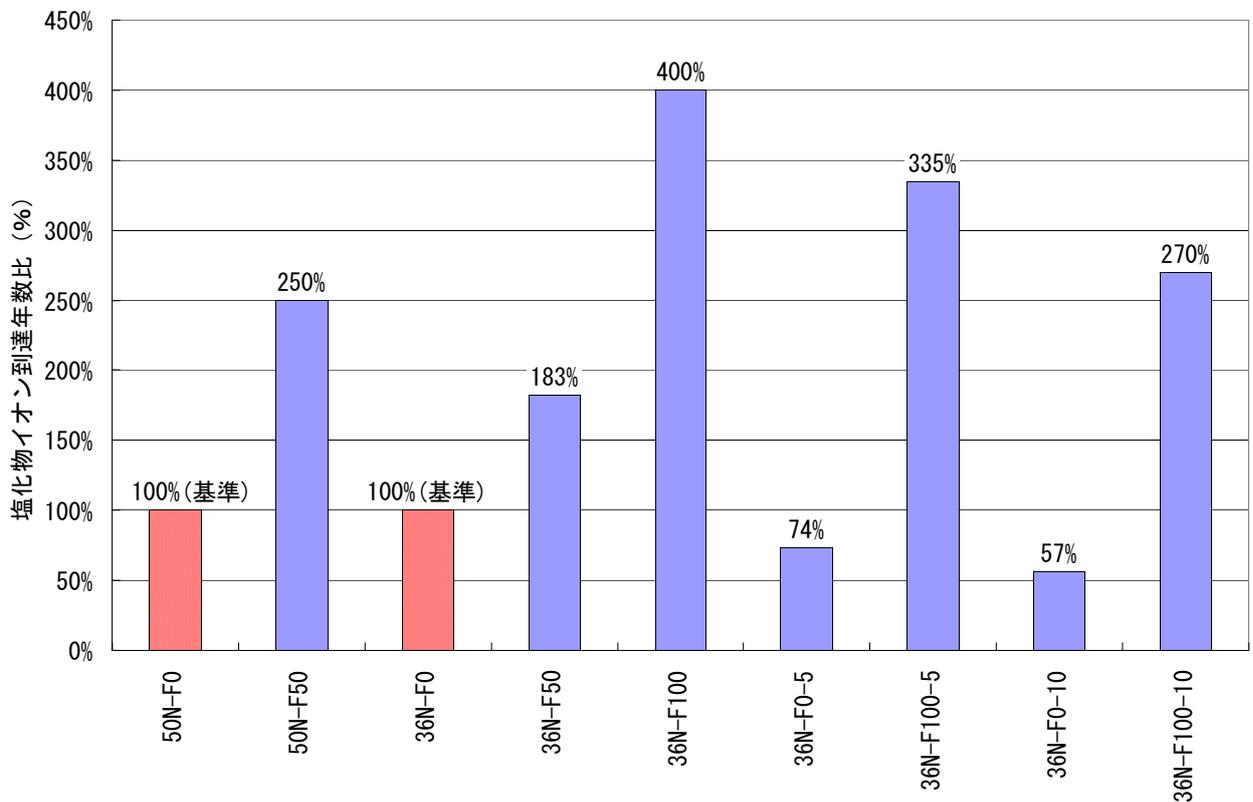


図 4-4 塩化物イオン到達年数比

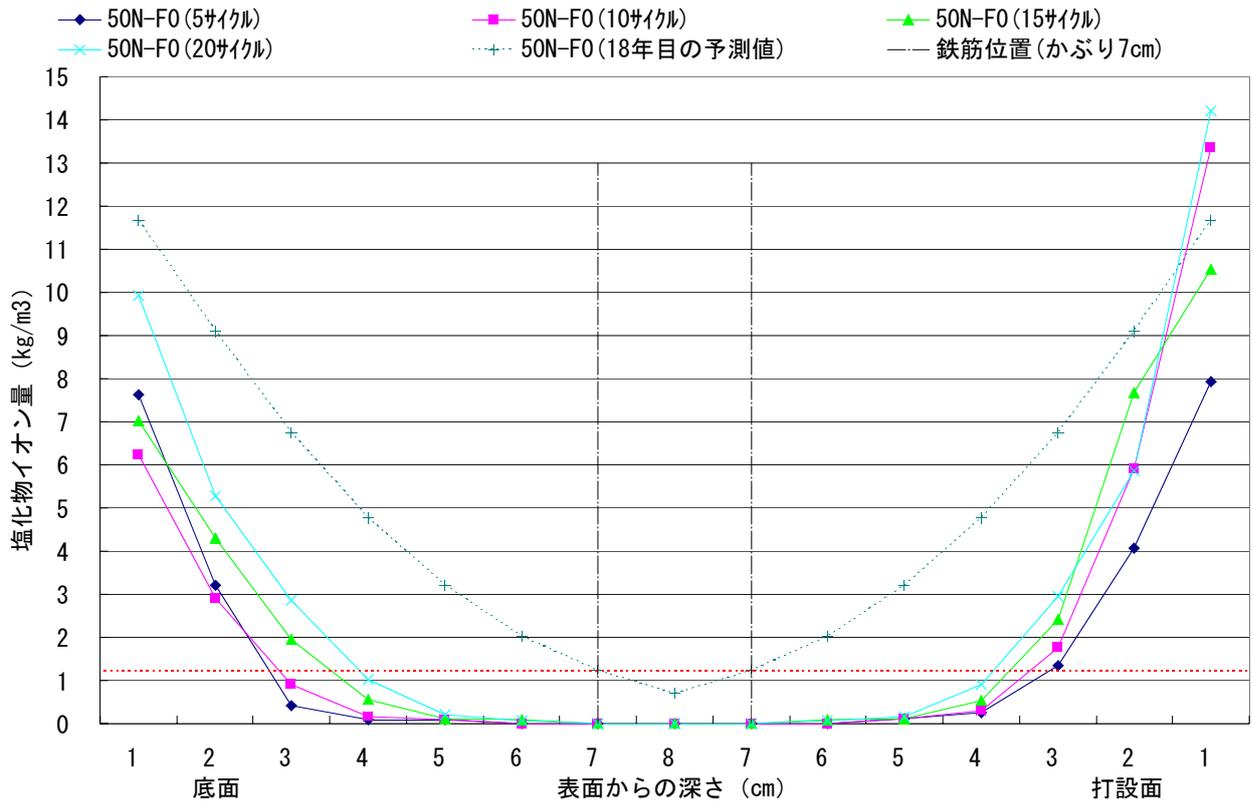


図 4-5 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (50N-F0)

※ --- は鉄筋の腐食発生限界濃度(1.2kg/m<sup>3</sup>)を示す。

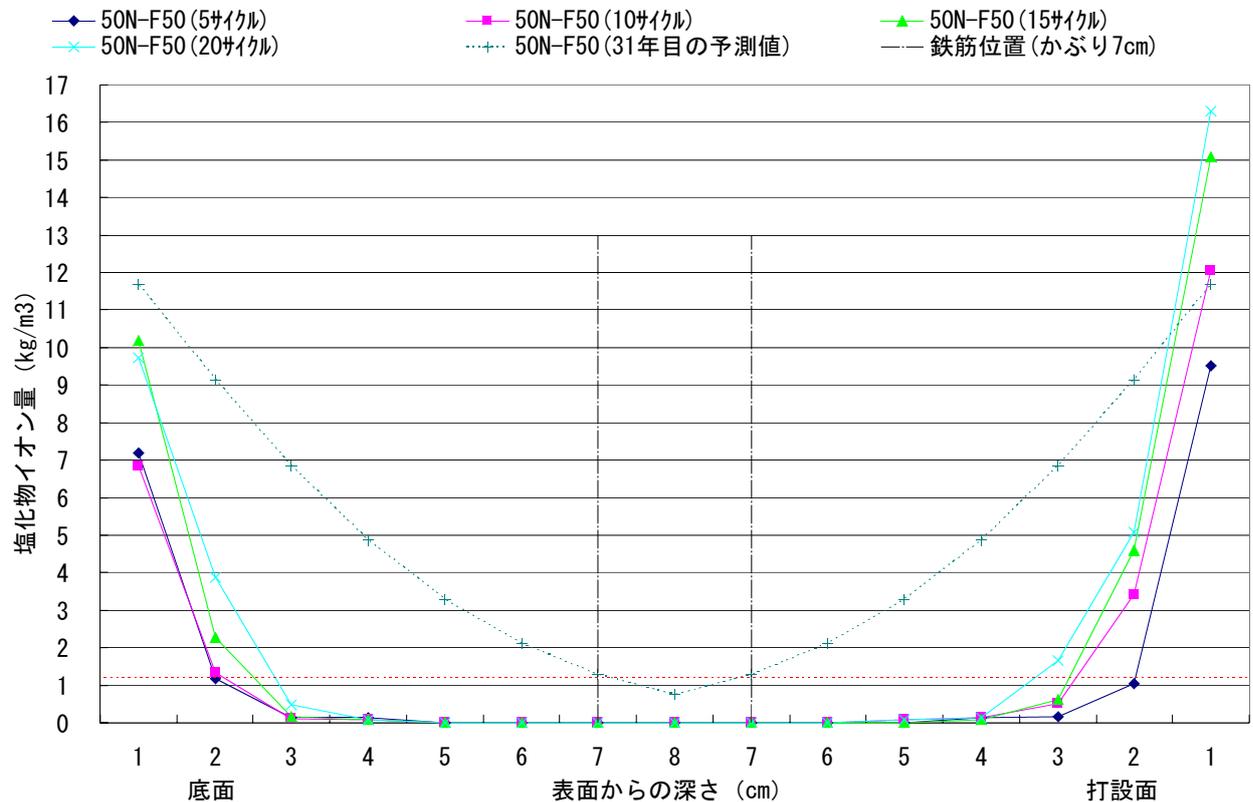


図 4-6 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (50N-F50)

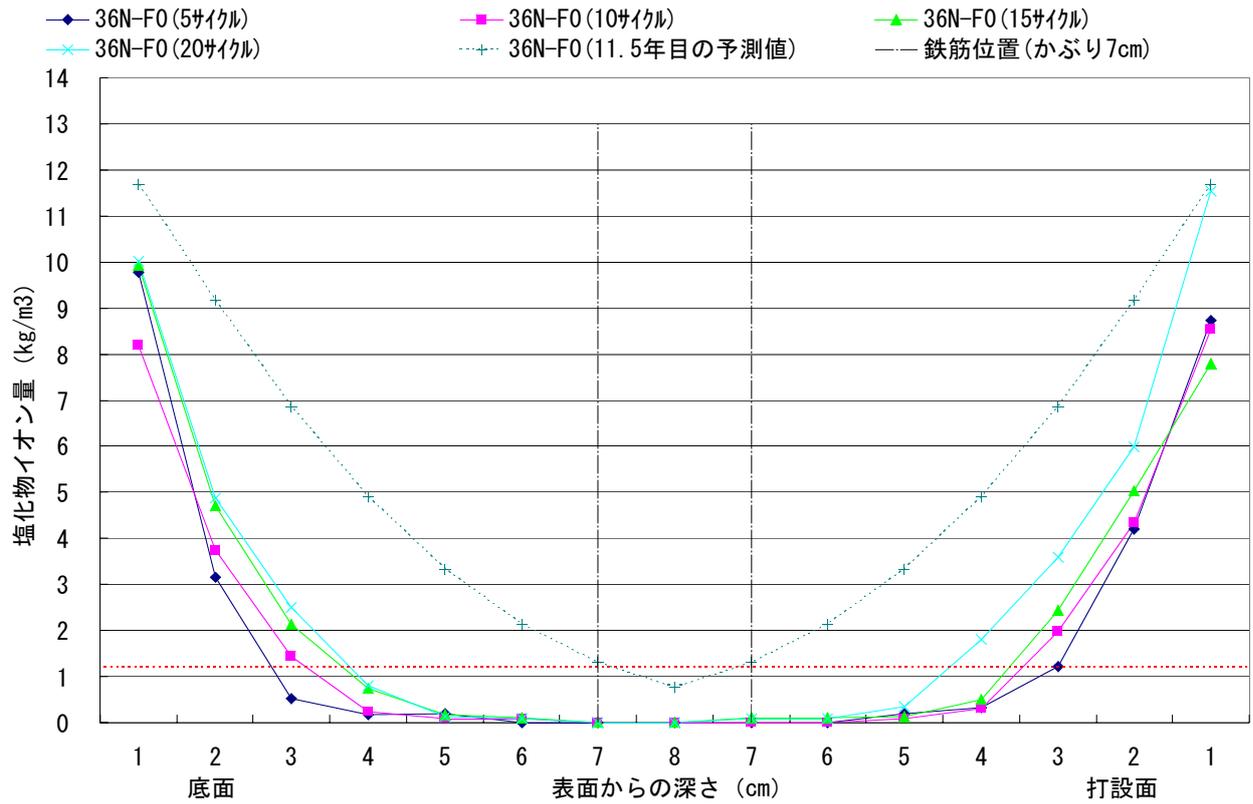


図 4-7 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (36N-F0)

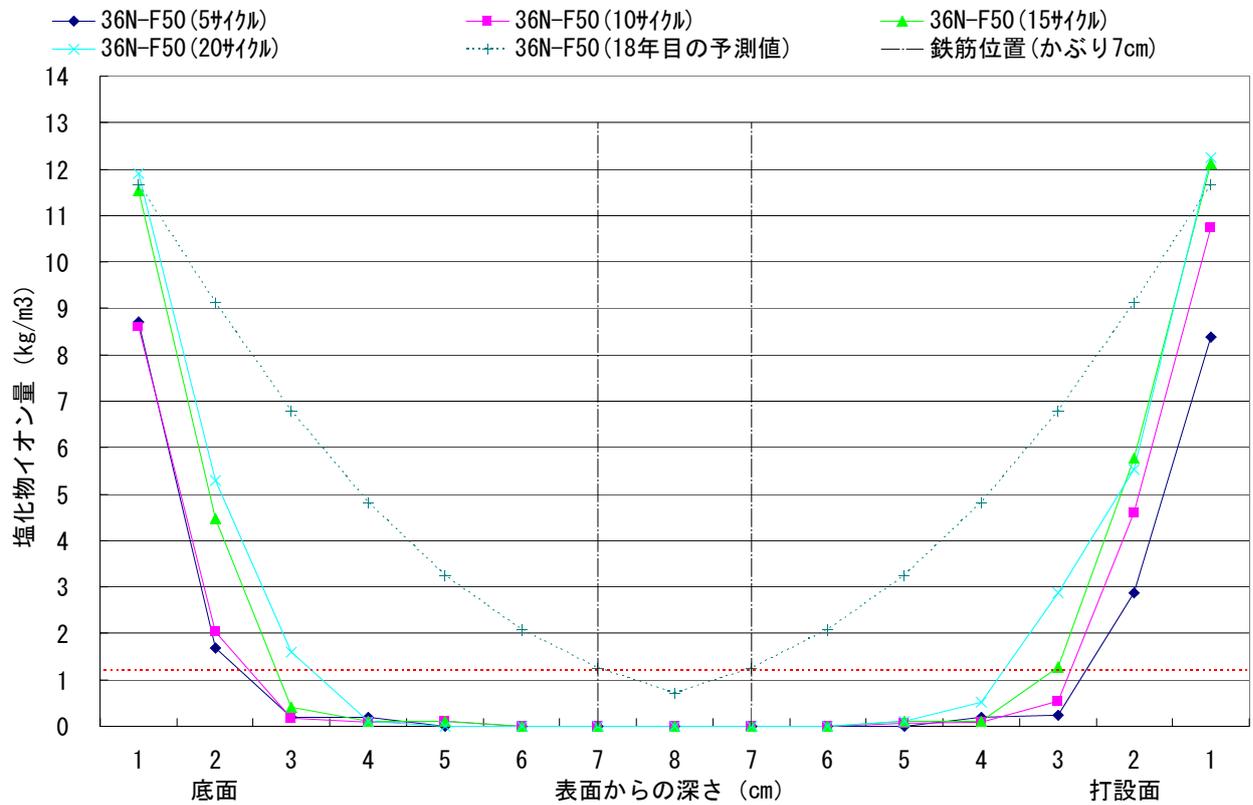


図 4-8 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (36N-F50)

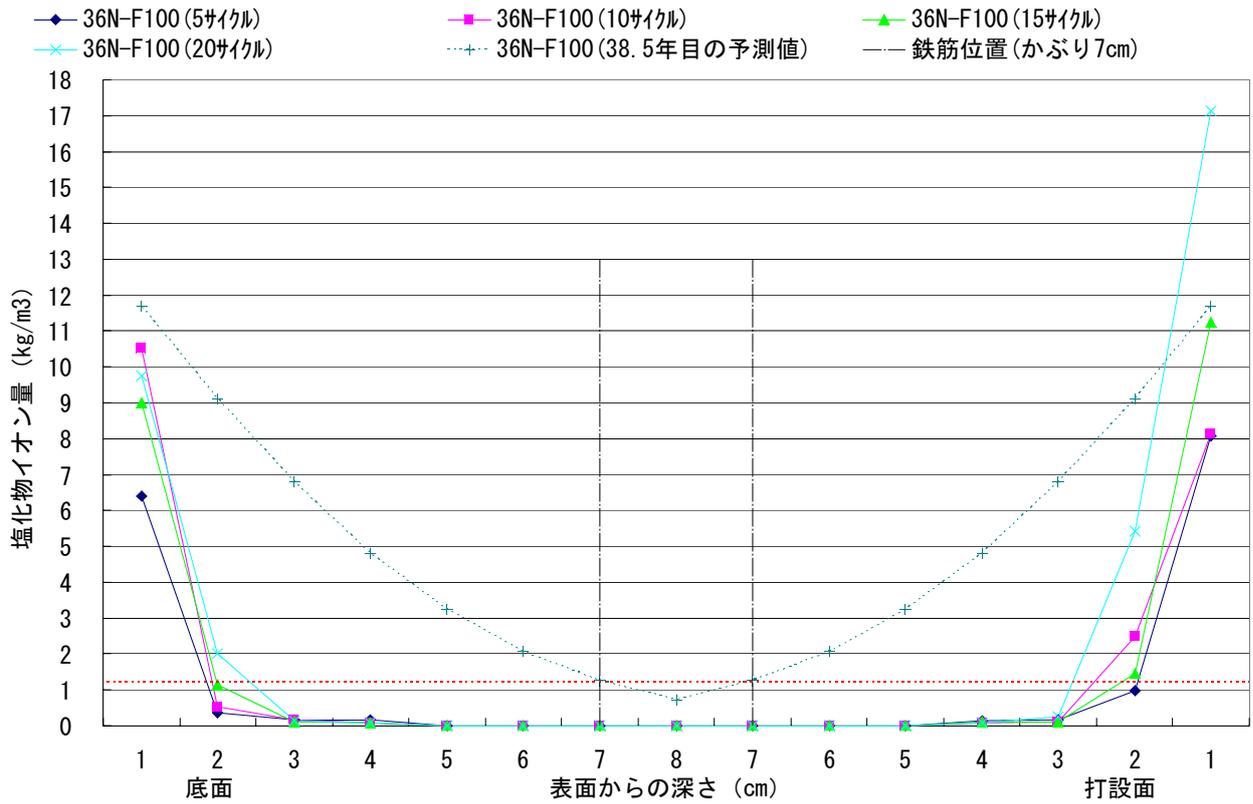


図 4-9 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (36N-F100)

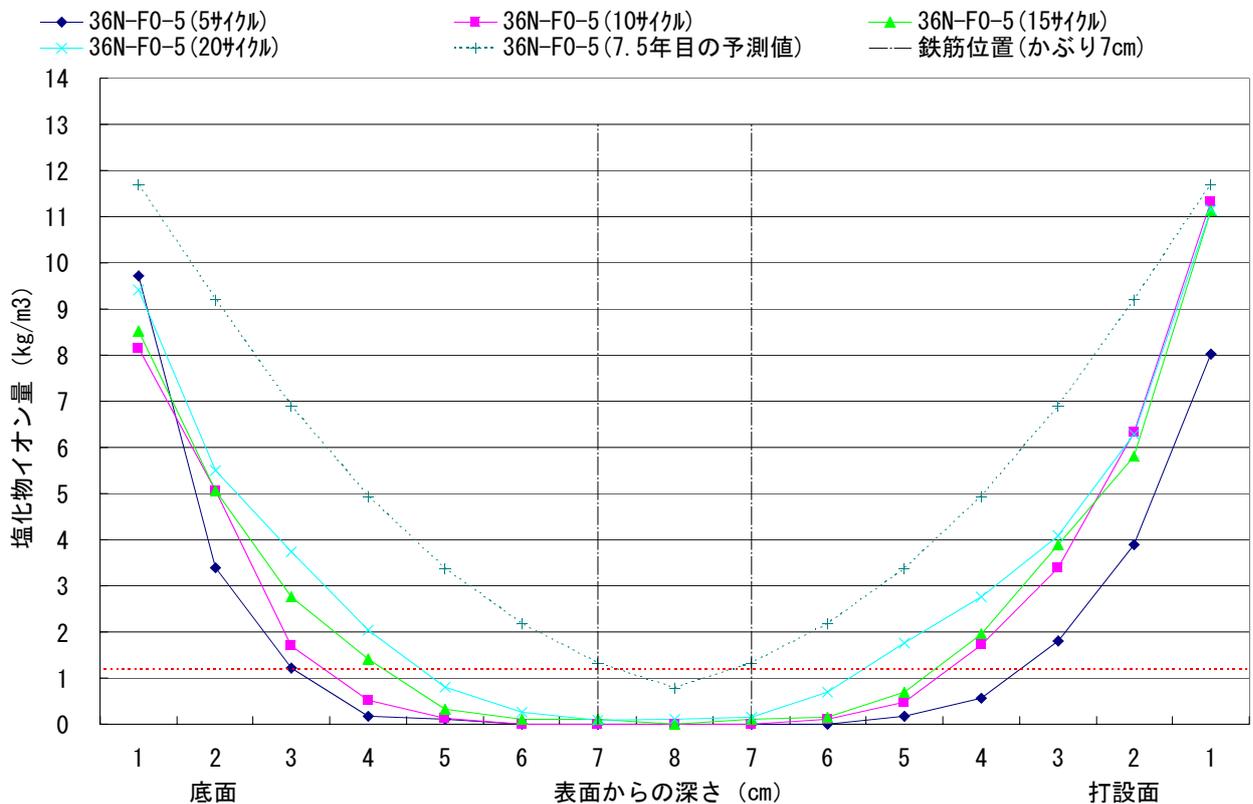


図 4-10 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (36N-F0-5)

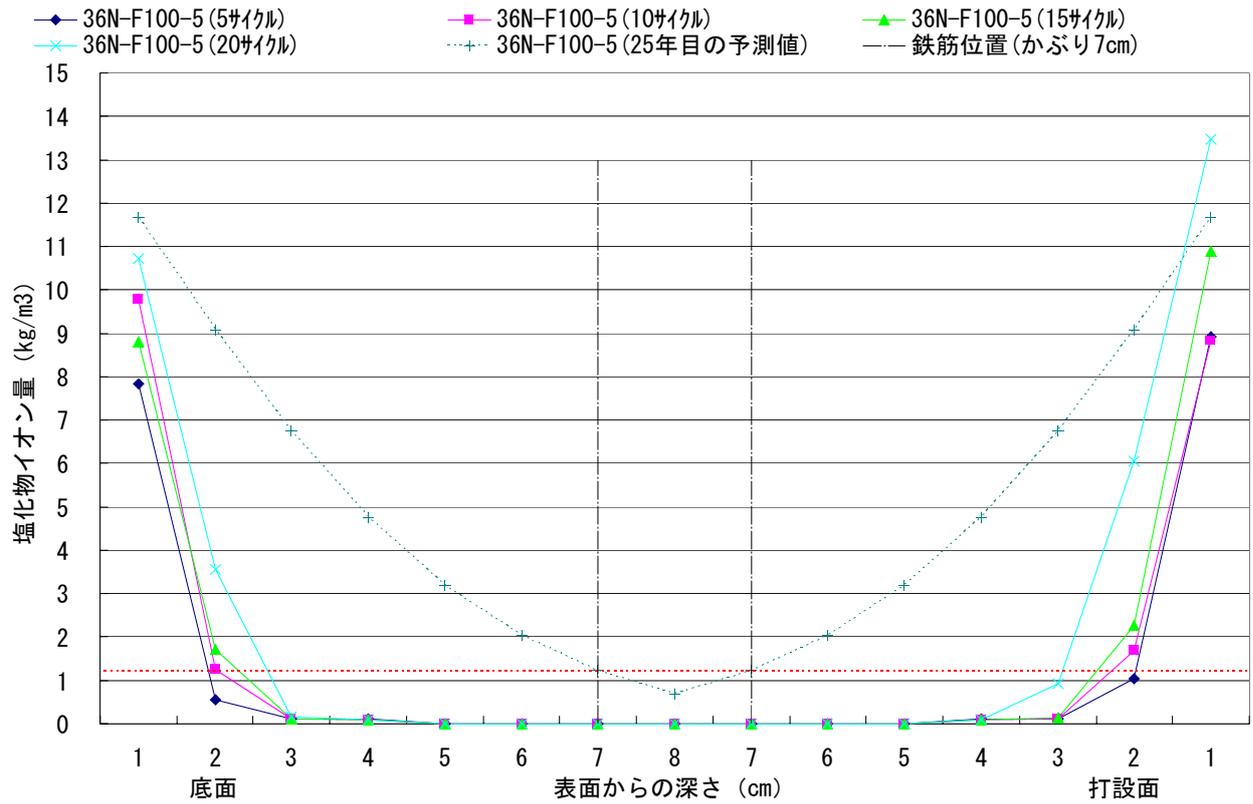


図 4-11 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (36N-F100-5)

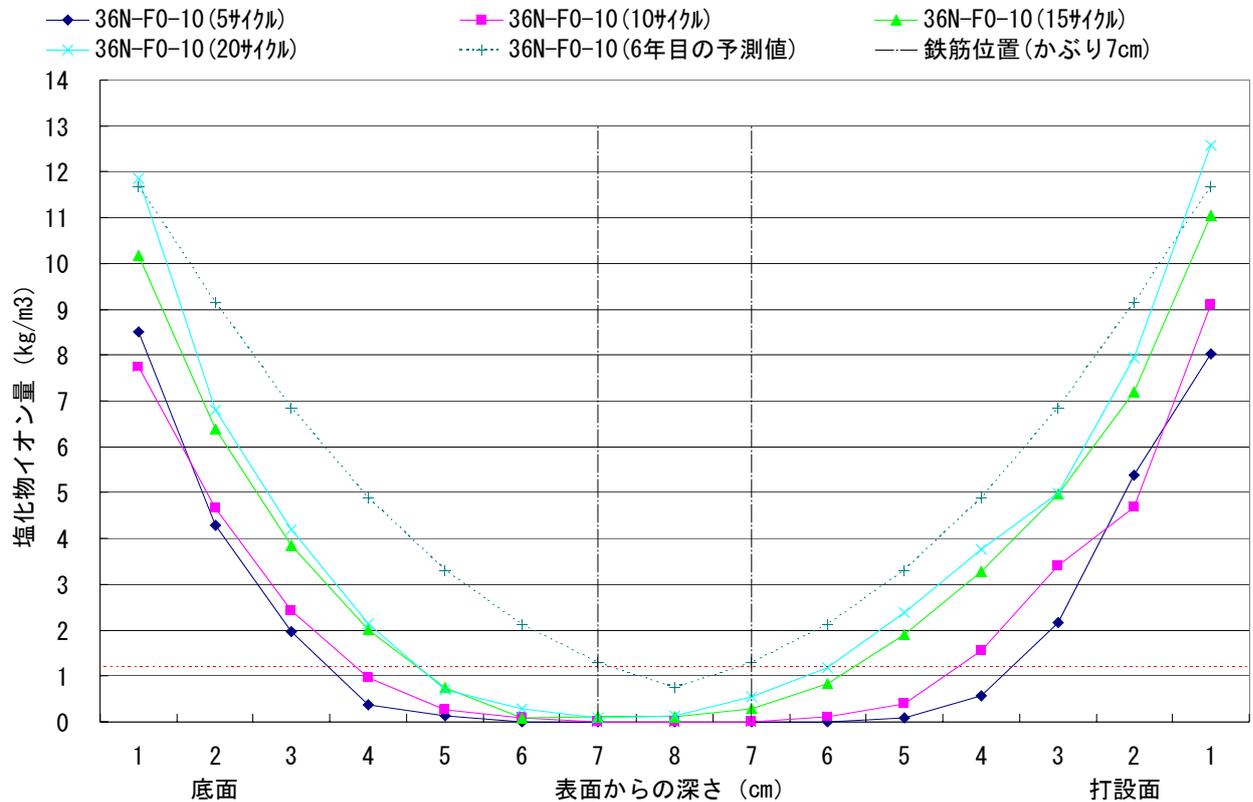


図 4-12 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (36N-F0-10)

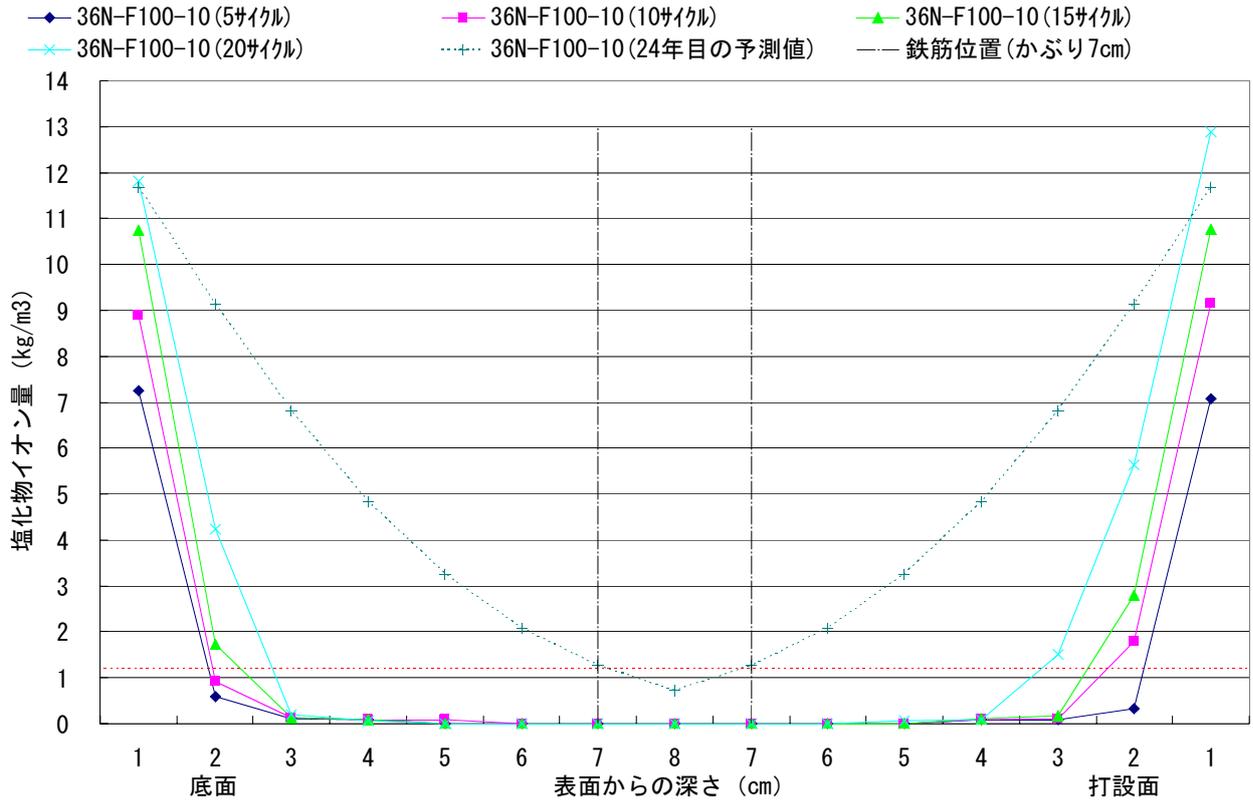


図 4-13 鉄筋の腐食発生限界濃度に到達するまでの予測年数 (36N-F100-10)

図4-14～4-22に、増減比率を用いて算出した、10年後から100年後までの塩化物イオン濃度の分布予測を示す。

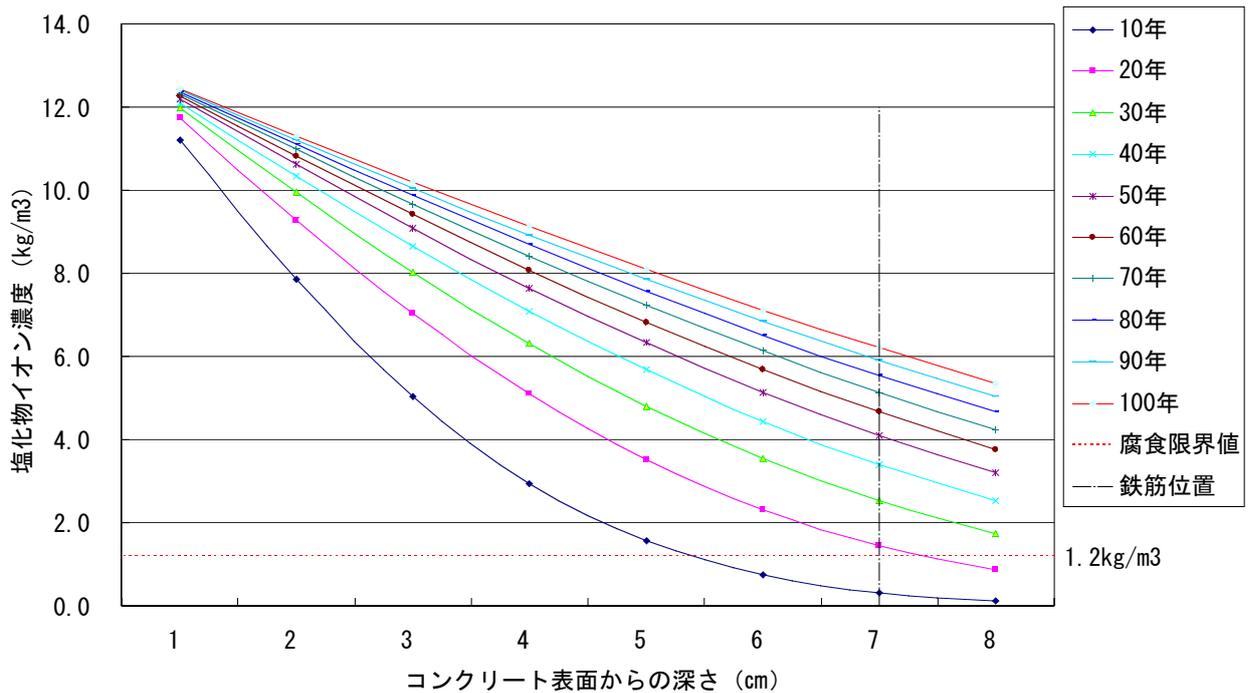


図 4-14 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (50N-F0)

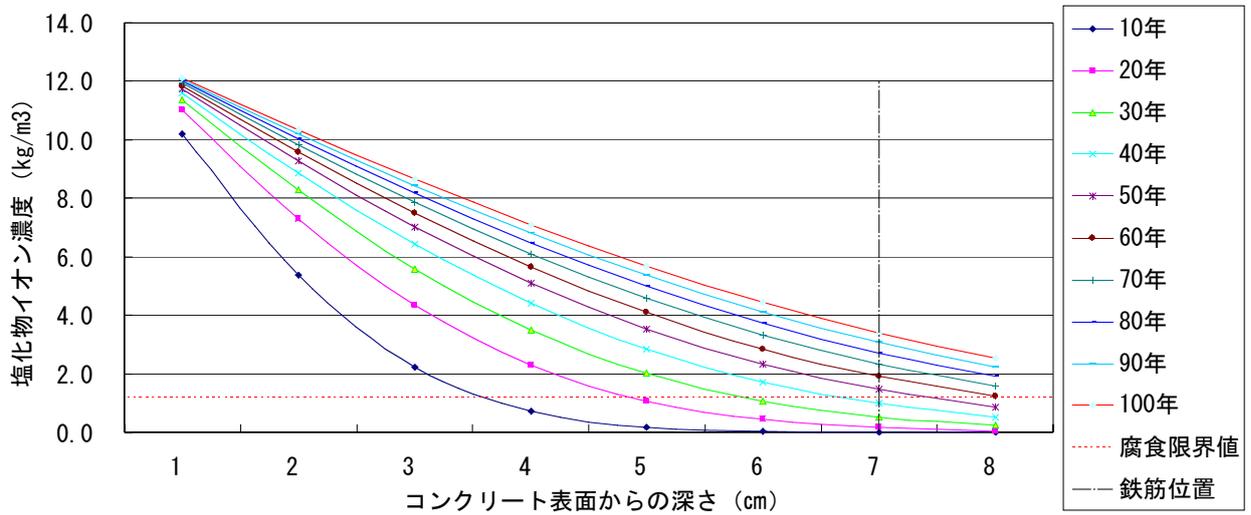


図 4-15 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (50N-F50)

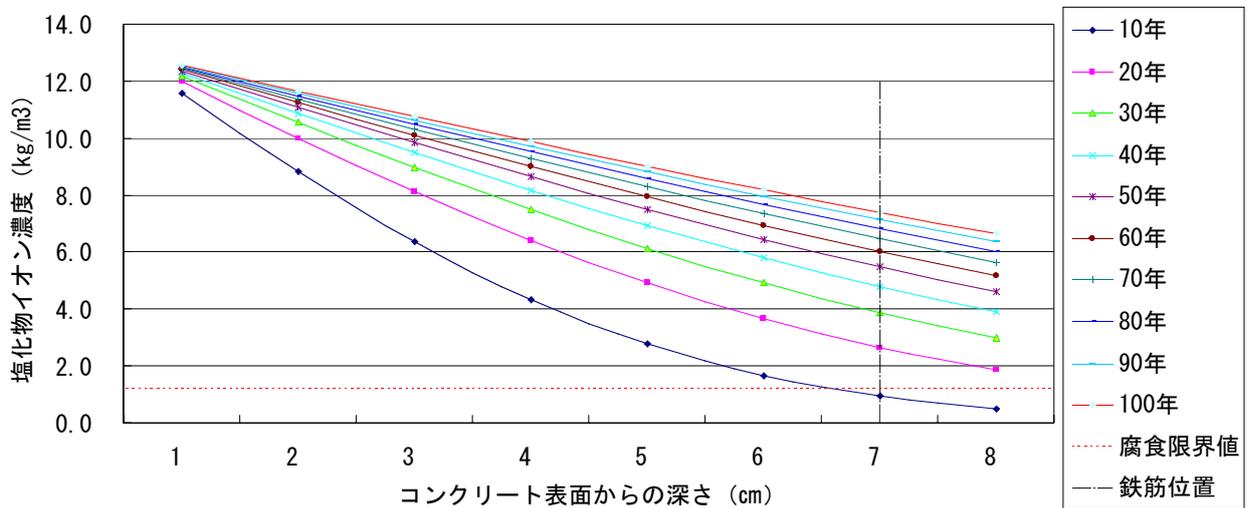


図 4-16 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (36N-F0)

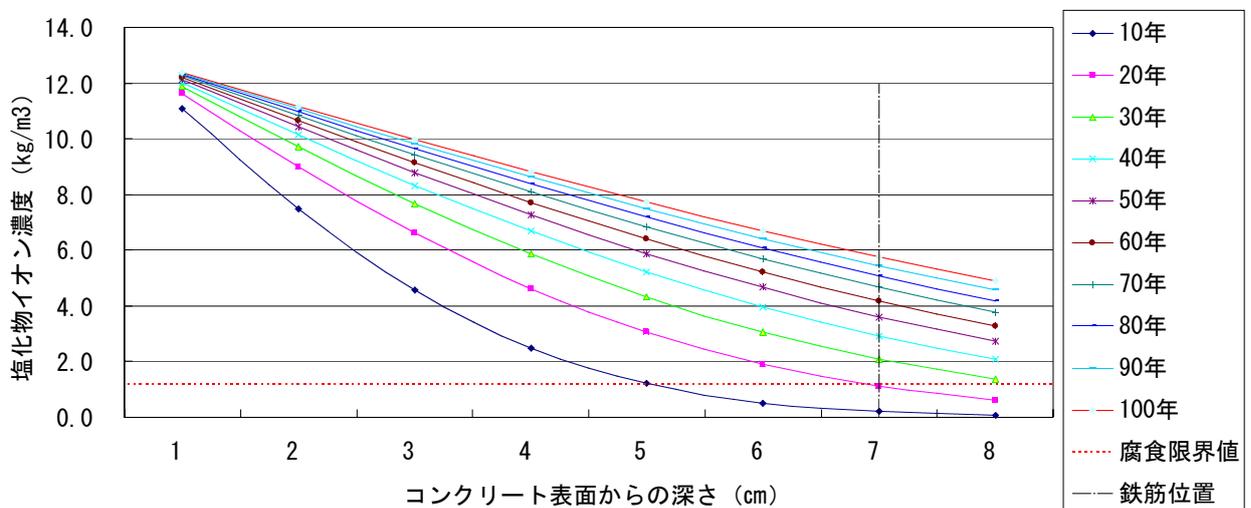


図 4-17 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (36N-F50)

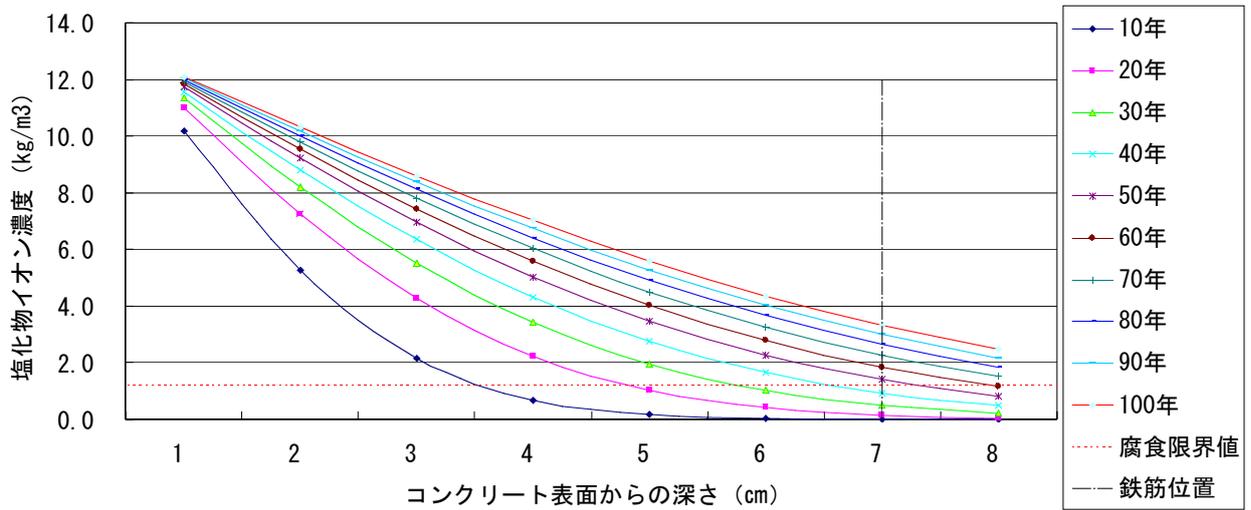


図 4-18 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (36N-F100)

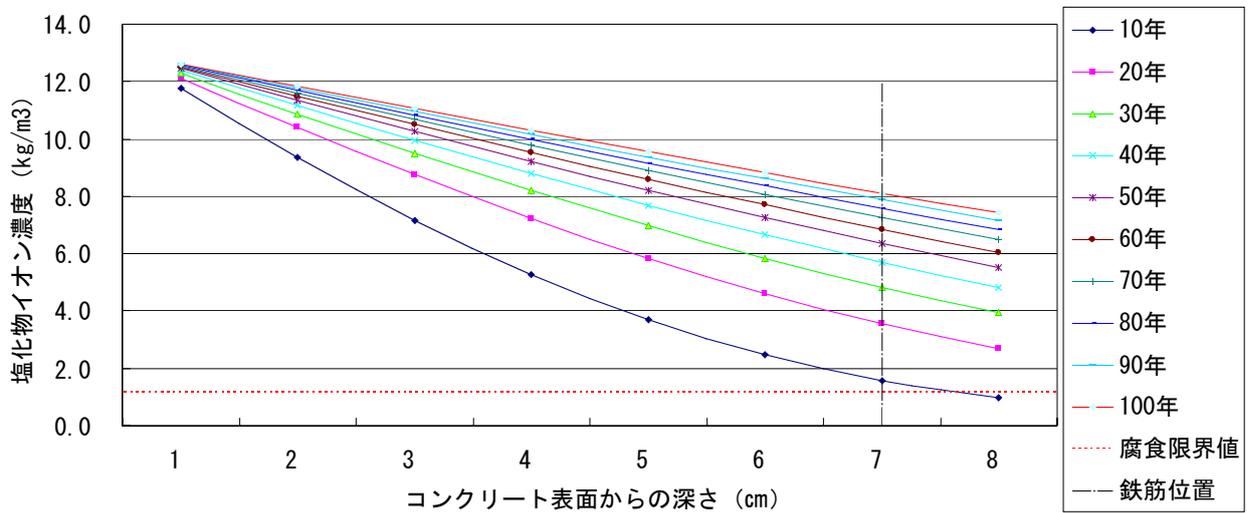


図 4-19 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (36N-F0-5)

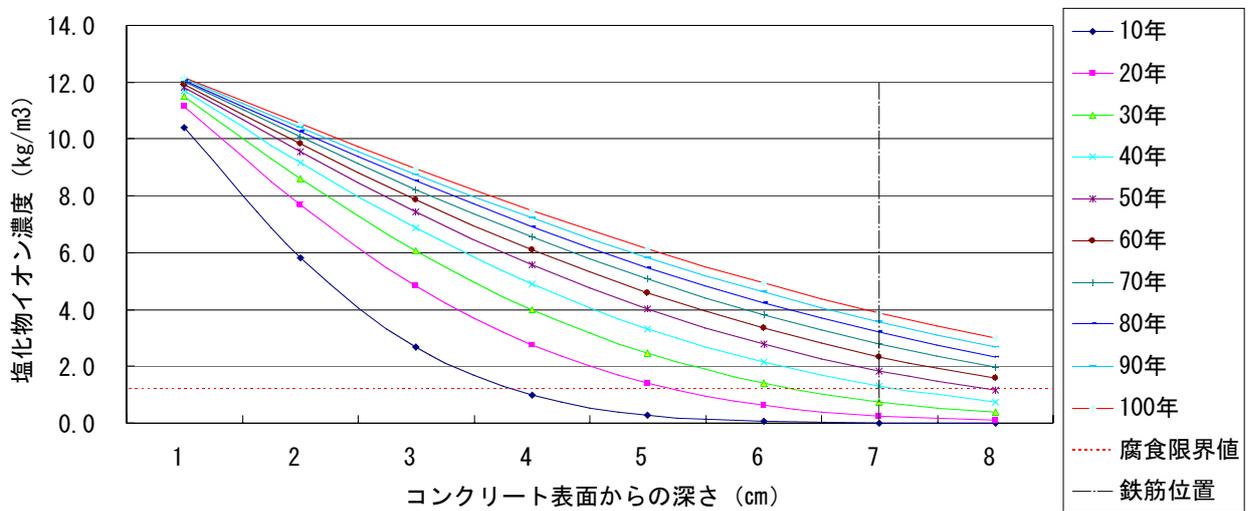


図 4-20 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (36N-F100-5)

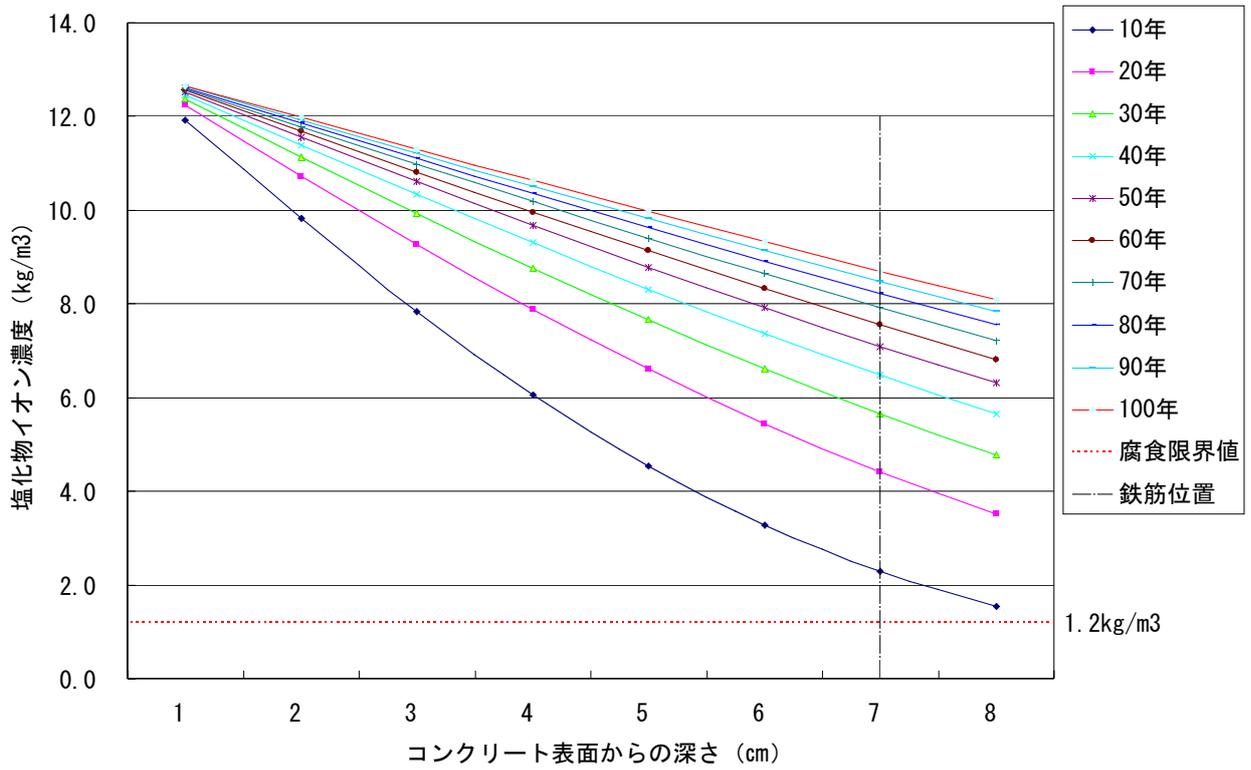


図 4-21 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (36N-F0-10)

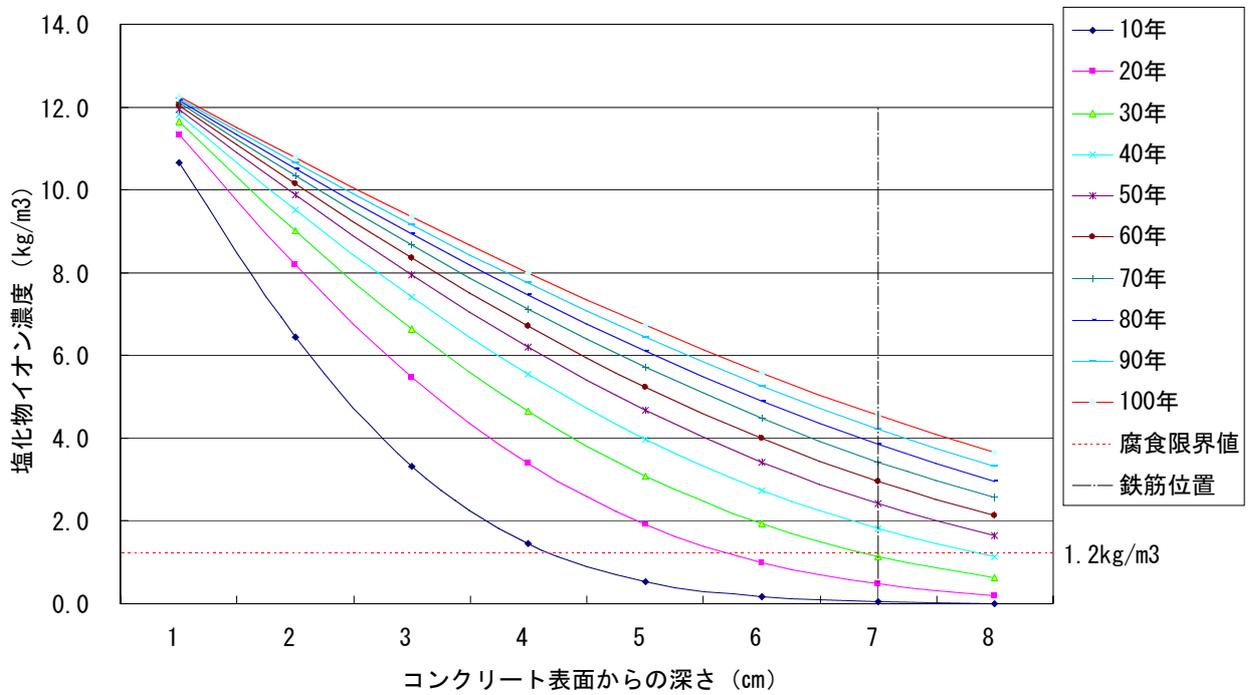


図 4-22 10年毎の塩化物イオン濃度分布予測 (36N-F100-10)

## 第5章 結論

本技術開発は、亜熱帯海洋性気候に属し、厳しい塩害環境下に位置する沖縄県での高耐久性を有する高強度コンクリートの開発を目的としている。その材料としては、本県の環境問題として大きく取り上げられているフライアッシュを用い、その有効利用法と高耐久性化の2つの課題について技術開発を行った。

以下に、本技術開発の知見をまとめ、各章ごとに記述する。

**第1章「序論」**では、沖縄県におけるコンクリート構造物の早期劣化の問題やその背景について記述した。また、環境問題として挙げられているフライアッシュの発生現状や有効利用拡大の必要性についても記述した。

**第2章「フライアッシュコンクリートの性状に関する試験およびその結果」**では、フライアッシュを混入したコンクリートの諸問題を取り上げ、その解決に向けた具体的な取り組みの方針を記述した。また、施工性、実用性および生コン材料費などを考慮してコンクリートの配合設計を行い、コンクリートのフレッシュ性状および強度管理などの検討を行った。ここで得られた知見を以下に記述する。

①フレッシュ性状を確認した結果、JISⅡ種相当のフライアッシュを使用し、100kg/m<sup>3</sup>程度の混入量であれば著しいスランプの低下は見られない。しかし、フライアッシュ混入量の増加に伴って、コンクリートの粘性が増加する傾向が見られた。従って、現場での施工性を考慮した場合、プレストレストコンクリートでは、粘性の大きいコンクリートを打設することが、かなり困難な作業となる。そこで施工性の観点から、フライアッシュコンクリートを使用するためには、コンクリートを高流動化し、高流動コンクリートとして使用することなどの対策が必要であると考えられる。そのことにより、ジャンカやコールドジョイントを防ぎ、耐久性のあるコンクリート構造物の構築が可能となる。

②圧縮強度試験の結果、フライアッシュ混入量の増加に伴って圧縮強度は増加している。従って、圧縮強度だけに着目すれば、フライアッシュの混入量の増加に伴いセメントの量を低減させることができるという結果を得られた。

③生コンの材料費に関しては、フライアッシュの現在の単価がセメントとほぼ同程度であり、海砂にフライアッシュを代替した場合には、フライアッシュの混入量に対応して生コンの材料費は増加する。従って、今後フライアッシュの需要を市場に定着させるためには、フライアッシュの単価を下げる努力が関係業者間で必要であると思われる。

**第3章「塩化物イオン浸透促進試験およびその結果」**では、熱風乾燥、塩水浸漬をコンクリート試験体に繰り返し行うことにより、強制的にコンクリート内部に塩化物イオンを浸透させた。サイクルの増加に伴って浸透する塩化物イオン濃度分布を確認した。その結果、フライアッシュの塩化物イオン浸透に対する抑制効果は非常に大きいことが明らかになった。

一方、前章でフライアッシュ混入量により圧縮強度が増加するとの結論を記述した。しかし、塩

水促進試験から評価される塩害に対する耐久性については、コンクリート中の単位セメント量を低減させることは、耐久性の低下に繋がることが示された。従って、フライアッシュを混入する場合には、海砂とフライアッシュを代替し、単位セメント量は減らさないことが塩害環境下では重要であると考えられる。

第4章「フライアッシュコンクリートの耐久性に関する検討」では、塩水促進試験で得られた塩化物イオンの浸透量および時間の関係から見かけの拡散係数を同定した。しかし、同定された拡散係数の値は、短期間の強制的な塩水促進試験での環境下で得られたものであり、自然環境下での性状とは大きく異なることが予想される。自然環境下での値は、塩水促進試験結果の値よりも更に小さくなることが予測される。従って、示方書<sup>9)</sup>に示されている拡散係数の予測回帰式を基準コンクリート（50N-F0、36N-F0）に適用し、拡散係数の基準値を求めた。さらに、フライアッシュコンクリートの拡散係数については、ここで得られた各配合の増減比率を拡散係数の基準値に乘じ、見かけの拡散係数とした。その結果、厳しい塩害環境下である飛沫帯のコンクリート構造物においては、フライアッシュを海砂と代替することにより、プレテン配合では、基準配合の2.5倍、ポステン配合では、基準配合の最大4倍、鉄筋の腐食発生限界濃度に塩化物イオンが到達するまでの時間の増加が確認できた。しかし、飛沫帯環境下に位置するコンクリート構造物においては、フライアッシュを使用するだけでは設計耐用期間100年を満足することは、適切に維持管理を行った場合でも極めて困難であるということが本技術開発で明らかとなった。このような環境下では、フライアッシュコンクリートを使用し、且つエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用やコンクリート表面被覆塗装などを併用するなどの対策が<sup>12)</sup>、設計耐用期間を満足させる上で必要不可欠であると考えられる。

現在は、フライアッシュを用いたコンクリートの予測回帰式がないため、塩水促進試験で求められた拡散係数の増減比率によりフライアッシュコンクリートの塩害に対する耐久性能を評価した。今後、更なる実験データの積み重ねを行い、早急にフライアッシュを用いたコンクリートにおける耐久性評価モデルの提案が必要である。

## 謝辞

本報告書をまとめるにあたり、多くの方々にご指導とご協力を頂きました。

琉球大学名誉教授、沖縄職業能力開発大学校 校長の大城武先生には、多くのご指導と貴重なご助言を頂きました。ここに心より感謝の意を表します。

本技術開発の実験にあたり、材料のフライアッシュは、電源開発(株)および琉球セメント(株)からご提供頂きました。塩水促進試験は、沖縄職業能力開発大学校住居環境科 助教授 成底佐一郎先生のご協力を頂きました。塩化物イオン分析試験は、琉球大学工学部環境建設工学科 助教授 山田義智先生のご協力を頂き、塩化物イオンの分析およびデータの取りまとめについては、(株)沖縄構造設計ゾーン ウィーラ様のご指導を頂きました。

最後に、本技術開発は、社団法人 沖縄建設弘済会 技術開発支援事業により支援を受けて行いました。ここに記して深く感謝の意を表します。

## 参考・引用文献

- 1) 森繁司：石炭灰の有効利用可能性の検討，沖縄建設弘済会技術環境研究所，平成16年度研究発表会論文集
- 2) 日本フライアッシュ協会ホームページ、石炭灰ができるしくみ  
(<http://www.japan-flyash.com/japan-flyash/sikumi.html>)
- 3) 例えば，SORN VIRA：フライアッシュを細骨材の一部として代替したコンクリートの遮塩性と防食性能に関する研究，琉球大学大学院理工学研究科，学位論文，2002年度
- 4) 国土交通省港湾局ホームページ，港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針について  
(<http://www.mlit.go.jp/kowan/recycle/2/09.pdf>)
- 5) 例えば，土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案），2003年3月
- 6) 例えば，琉球セメント(株)：沖縄県産フライアッシュセメントを用いたコンクリートの基本性能，2003年3月
- 7) 例えば，大賀宏行：フライアッシュや石炭灰を用いたコンクリート，(社)日本コンクリート工学協会ホームページ ([http://www.jci-net.or.jp/frm/info/forum\\_report01/no07.pdf](http://www.jci-net.or.jp/frm/info/forum_report01/no07.pdf))
- 8) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'03，2003年9月
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，2002年制定
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001年制定
- 11) 山田義智，大城武，谷川伸，伊部博：飛来塩分量とコンクリート中への塩分浸透過程に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17, No. 1, 1995
- 12) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編・Ⅲコンクリート橋編，平成14年3月