

論文 混和材を高含有したコンクリートの中性化抵抗性に関する一考察

小林 利充^{*1}・片野啓三郎^{*2}・竹田 宣典³・中村 英佑^{*4}

要旨：本研究は、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を高含有したコンクリートの中性化抵抗性を把握することを目的に、屋外暴露試験および JIS による促進中性化試験を行い、中性化抵抗性を検討している。その結果、暴露試験および促進中性化試験による中性化速度係数は、セメントの混合割合の増加および水結合材比の低下に伴って小さくなる。中性化速度係数は強度と相関関係にあるが、セメントの混合割合に依存する傾向にある。実環境下での中性化は、促進中性化試験により安全側の評価が可能である。

キーワード：混和材, 圧縮強度, 中性化, 屋外暴露試験, 促進中性化試験

1. はじめに

近年、コンクリート分野においても、環境負荷を低減する取組みが積極的に行われている。なかでも、コンクリートの低炭素化や副産物の有効利用を目的に、セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物に置換する研究が多数報告されている^{1),2)}。これらの副産物をコンクリートに使用した場合、一般的にはコンシステンシーの改善, 水和熱の低減, アルカリ骨材反応の抑制や塩化物イオンの浸透低減などの性能向上に効果がある。一方、耐久性上のデメリットとして、中性化の進行が速いと言われている。したがって、混和材を高含有したコンクリートを構造物に適用する場合、中性化の進行を推定し、かぶり厚さとの関係を精査する必要がある。松田らは³⁾、実環境下における構造物の中性化に関する調査を行った結果、普通ポルトランドセメントを使用した場合の中性化深さと高炉セメントを使用した場合の中性化深さを比較するとその差は小さい。一方、実環境下の構造物からコアを採取し、促進中性化試験を行った結果、実環境下とは異なり、高炉セメントを使用したコンクリートの中性化深さの方が大きいことを報告している。現在、中性化抵抗性を評価する試験としては JIS A 1153 による促進中性化試験が広く採用されているが、実環境下との条件が異なるため中性化が適切に評価されていない可能性がある。また、依田らは暴露試験や実大構造物による中性化の進行状況を報告しているが^{4),5)}、高炉セメント C 種までの領域であり、JIS の範疇を超えた置換率の領域について検討した事例は少ない。したがって、混和材を高含有したコンクリートの中性化抵抗性を評価するためには、実環境下における中性化の進行状況に関するデータを蓄積する必要がある。

本研究では、混和材を高含有したコンクリートについて、結合材の組合せおよび水結合材比を要因に、日本国内の 3 箇所に供試体を屋外環境下に暴露するとともに、JIS による促進中性化試験を実施し、それぞれの中性化抵抗性について検討している。また、実環境下での中性化の予測手法として、暴露による実測値と促進中性化試験や既往の予測手法と比較検討し、中性化の評価について検討している。なお、本論における高含有とは、混和材の混合割合が結合材に対して 70%以上の領域とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント(C)を使用した。また、混和材は、JIS A 6206 に規定される高炉スラグ微粉末 4000(BS), JIS A 6201 に規定されるフライアッシュ II 種(FA)およびジルコニア起源のシリカフェーム(SF)を使用した。なお、混和材の品質を表-2に示す。

表-1 使用材料

分類		種類	
結合材(B)	セメント	普通ポルトランドセメント(C)	(3.16g/cm ³)
	混和材	①高炉スラグ微粉末(BS)	(2.89g/cm ³)
		②フライアッシュ(FA)	(2.30g/cm ³)
		③シリカフェーム(SF)	(2.22g/cm ³)
水(W)		上水道水(東京都清瀬市)	
細骨材(S)		静岡県掛川産陸砂 (2.56g/cm ³)	
粗骨材(G)		①茨城県笠間産 5 号砕石(G1)	(2.67g/cm ³)
		②茨城県笠間産 6 号砕石(G2)	(2.67g/cm ³)
混和剤(Ad)		①AE 減水剤(標準型)(WR) No.3,6,10	
		②AE 減水剤(高機能型)(HWR) No.2,5,9	
		③高性能 AE 減水剤(SP) No.1,4,7,8	

[注] G1:G2=50:50(質量比)

*1 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任 (正会員)

*3 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 上席技師 博士(工学) (正会員)

*4 (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 工修 (正会員)

2.2 調査

コンクリートの調査を表-3に示す。混和材を高含有したコンクリートは、低炭素化を考慮して結合材に対するセメントの混合割合を25% (C25) および15% (C15) とし、高炉スラグ微粉末、フライアッシュまたはシリカフェーム(外割)を混合した。比較用として、セメントのみを使用したコンクリート (C100) についても実験を実施した。また、水結合材比(W/B)は、35.0、42.0 および50.0%とし、混和材を高含有したコンクリートの単位水量は、セメントのみを使用したコンクリートと同程度の流動性を得るために、5 から 15kg/m³ 低減した。また、水結合材比35.0%の調査は、スランブフローの目標値を50cmとし、水結合材比42.0 および50.0%の調査は、スランブの目標値を10から18cmとし、空気量の目標値は一律4.5%とした。

2.3 実験方法

(1) 供試体の作製

コンクリートは、20℃の恒温室内において、強制練りミキサーにより練混ぜ、所定のフレッシュ性状であることを確認し、圧縮強度試験用および中性化試験用供試体を作製した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験用供試体 (φ10×20cm) は、所定の材齢まで20℃水中で養生し、JIS A 1108による圧縮強度試験を実施した。また、暴露環境下にも供試体を静置し、所定の材齢で同様に圧縮強度試験を実施した。

(3) 中性化試験

暴露試験用供試体 (10×10×20cm) は、材齢28日まで20℃水中で養生し、1面(打込み側面)を暴露面とし、それ以外の面をクロロプレングム系被覆材で被覆し中

表-2 混和材の品質

項目	BS	FA	SF
密度(g/cm ³)	2.89	2.30	2.22
比表面積(cm ² /g)	4400	4280	—
平均粒径(μm)	—	—	1.81
活性度指数(%)	7日	71	—
	28日	95	82
	91日	107	105
フロー値比(%)	104	109	—
酸化マグネシウム(%)	5.99	0.9	—
三酸化硫黄(%)	2.19	0.4	—
二酸化けい素(%)	—	56.0	95.3
強熱減量(%)	0.17	2.7	—
塩化物イオン(%)	0.008	—	—
塩基度	1.91	—	—
MB吸着量(mg/g)*	—	0.59	—
pH	—	—	2.9




[注]*: 電発法による測定⁶⁾

表-3 コンクリートの調査

No	W/B (%)	単位量(kg/m ³)						Ad (%)	
		W	B				S		G
C	BS		FA	SF					
1	35.0	160	114	343	0	5	705	968	0.7
2	42.0	160	95	286	0	5	771	968	1.0
3	50.0	160	80	240	0	5	824	968	1.0
4	35.0	155	111	288	44	0	726	968	0.8
5	42.0	155	92	240	37	0	792	968	1.0
6	50.0	155	78	202	31	0	844	968	1.0
7	35.0	150	64	279	86	0	738	968	0.7
8	35.0	165	471	0	0	0	712	968	1.3
9	42.0	165	393	0	0	0	776	968	1.0
10	50.0	165	330	0	0	0	827	968	1.0

[注] No.1~No.3: C25BSSF, No.4~No.6: C25BSFA
No.7: C15BSFA, No.8~No.10: C100
(記号中の数値はセメントの混合割合を示す)

表-4 暴露試験の概要

<沖縄>	
暴露地: 沖縄県大宜味村	
暴露期間: 183週	
平均気温: 24.8℃	
平均湿度: 74.6%	
月平均降雨量: 188.7mm	
<新潟>	
暴露地: 新潟県上越市	
暴露期間: 181週	
平均気温: 15.2℃	
平均湿度: 75.9%	
月平均降雨量: 240.2mm	
<茨城>	
暴露地: 茨城県つくば市	
暴露期間: 179週	
平均気温: 15.5℃	
平均湿度: 72.0%	
月平均降雨量: 92.6mm	

[注]暴露期間は暴露試験まで室内保管した期間も含めた。気温はデータログによる結果を示し、それ以外の気象データは気象庁HP⁷⁾のデータを引用した。

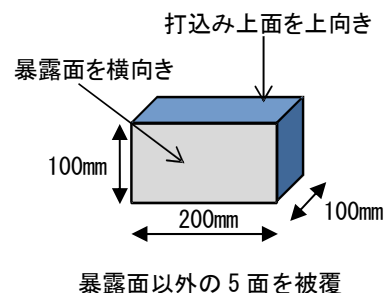


図-1 暴露試験用供試体の概要

性化の進行を防止した。その後、沖縄県大宜味村および新潟県上越市の沿岸部、茨城県つくば市の内陸部に約180週間暴露した。なお、いずれの暴露地も雨掛り環境である。暴露試験の概要を表-4および図-1に示す。

促進中性化試験用供試体(10×10×40cm)は、JIS A1153にしたがい、材齢28日まで20℃水中で養生し、供試体の2側面以外をエポキシ樹脂で被覆した後、材齢56日まで気中養生し、促進中性化試験を開始した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度(標準養生強度)

材齢28日標準養生強度を図-2に、各調合の強度増進割合[材齢28日標準養生強度に対する各材齢(7, 28, 91日, 1年および2年)における強度の増進割合]を図-3に示す。本実験では、4種類の結合材の組合せ(C25BSSF, C25BSFA, C15BSFA, C100)について検討を行っているが、C15BSFA以外は、結合材水比の増加に伴って増大する傾向にあり、同一の結合材水比2.9(水結合材比35%)で圧縮強度を比較すると、C15BSFA < C25BSFA < C25BSSF < C100の順に高くなり、セメントの混合割合に依存する傾向にある。また、材齢28日標準養生強度を基準に各材齢の強度を比較すると、C25BSSFは材齢7日で61から67%、材齢2年で135から179%、C25BSFAは材齢7日で54から71%、材齢2年で148から173%、C15BSFAは材齢7日で76%、材齢2年で164%になり、水結合材比35%で比較すると、C15BSFAが最も強度が増進する傾向を示した。一方、C100は、材齢7日で75から84%と混和材を高含有したコンクリートに比べて強度発現性は高いが、材齢2年では125から127%と、混和材を高含有したコンクリートに比べて強度発現性が低い結果であった。したがって、標準養生による強度増進という観点から考えると、本実験において、結合材の70%以上を混和材で置換したコンクリートは、材齢7日まではC100よりも強度増進割合は小さいが、材齢2年のような長期材齢になると強度増進割合は大きく伸びる傾向にある。

3.2 暴露試験による中性化

暴露環境ごとに、水結合材比と暴露試験による中性化速度係数の関係を図-4に示す。なお、暴露期間は暴露環境によって異なるが179週から183週である。結果として、中性化速度係数を水結合材比で比較すると、C100についてはいずれの水結合材比でも0mm/√週であるが、C25シリーズは水結合材比の増加に伴って大きくなる傾向にある。また、同一の水結合材比35%で中性化速度係数を比較すると、C100は前述したように0mm/√週である。

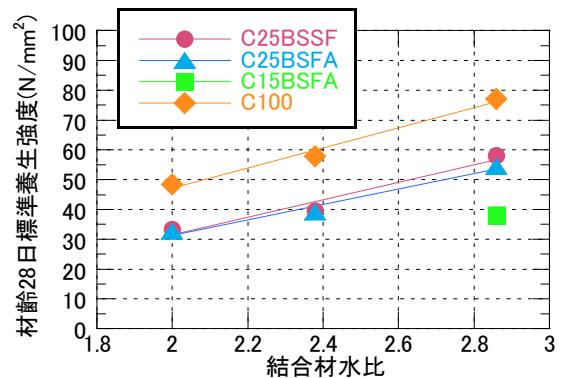


図-2 結合材水比と材齢28日標準養生強度

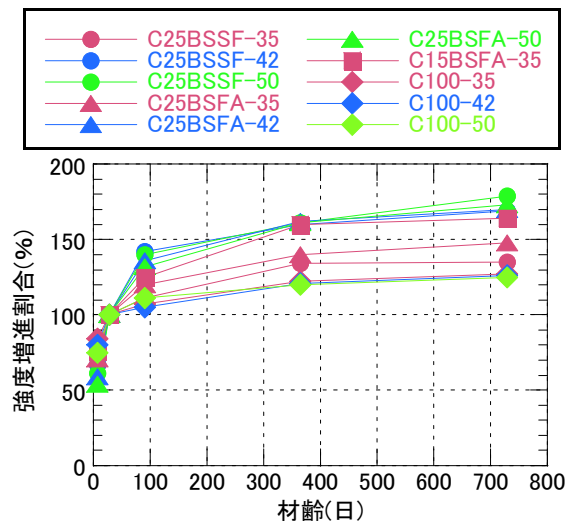


図-3 材齢と強度増進割合

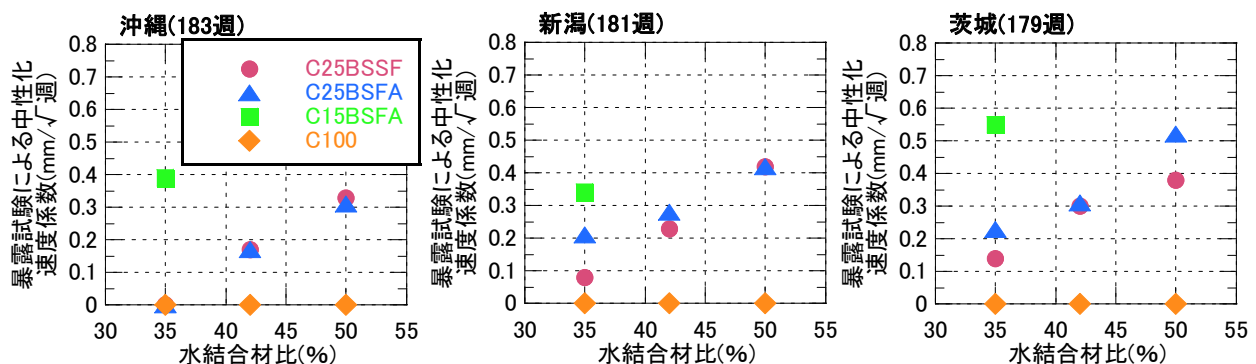


図-4 水結合材比と暴露試験による中性化速度係数(暴露環境)

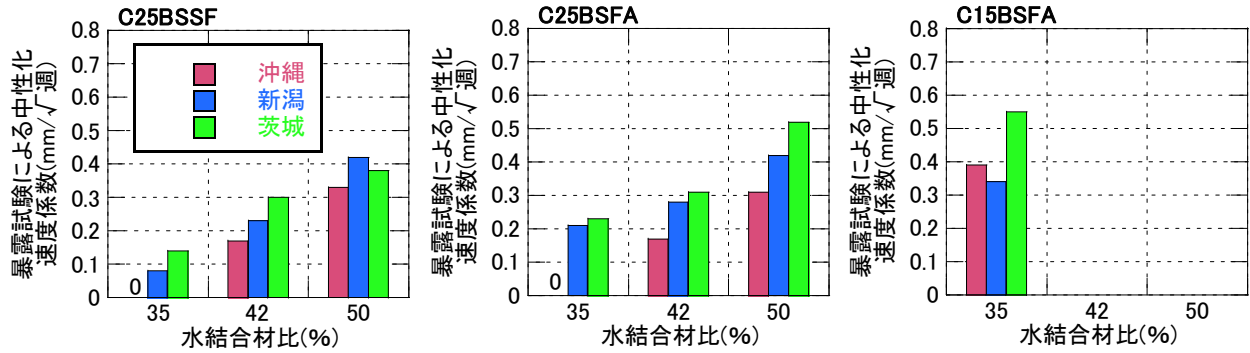


図-5 水結合材比と暴露試験による中性化速度係数 (結合材のタイプ)

一方、混和材を高含有したコンクリートの中性化速度係数として、C25BSSFはC25BSFAと同程度または小さく、C15BSFAの中性化速度係数が最も大きくなり、3.1に記載した圧縮強度と同様にセメントの混合割合に依存する傾向が得られた。また、結合材のタイプごとに水結合材比と暴露試験による中性化速度係数の関係を図-5に示す。暴露環境の影響として、C25シリーズの中性化速度係数は、沖縄が小さいのに対して茨城が大きく、その差は最大で0.23mm/√週である。一方、C15BSFAは水結合材比35%での比較であるが、新潟<沖縄<茨城の順に中性化速度係数が大きい。また、C100については、いずれの暴露環境においても0mm/√週である。暴露環境による中性化速度係数の差異としては、温度、湿度(降雨量)、CO₂濃度などの条件が複合的に影響されるとともに、強度や表層構造にも影響されると考える。

3.3 促進試験による中性化

結合材のタイプ別にプロットした水結合材比と促進試験による中性化速度係数の関係を図-6に示す。いずれのタイプも水結合材比の増加に伴って中性化速度係数は大きくなる傾向にある。また、結合材のタイプの影響を水結合材比35%で比較すると、C100<C25BSSF<C25BSFA<C15BSFAの順に中性化速度係数は大きくなる傾向にあり、セメントを15%まで低減すると、促進中性化試験による中性化速度係数は、本実験では7.8mm/√週と大きくなる。これは、3.2に記載した暴露試験による中性化速度係数の結果と同様の傾向が見られた。

3.4 中性化の評価

(1) 中性化速度係数と圧縮強度の関係

本実験で得られた標準養生強度または暴露試験による圧縮強度の逆数を指標に、促進試験または暴露試験による中性化速度係数の関係に整理した結果を図-7および図-8に示す。いずれの場合も、圧縮強度の逆数と中性化速度係数は概ね相関関係が見られ、圧縮強度が小さいほど、中性化速度係数は大きくなる傾向にあり、混和材を高含有したコンクリートにおいても、その中性化速度係数は、圧縮強度を指標に考えることができる。また、

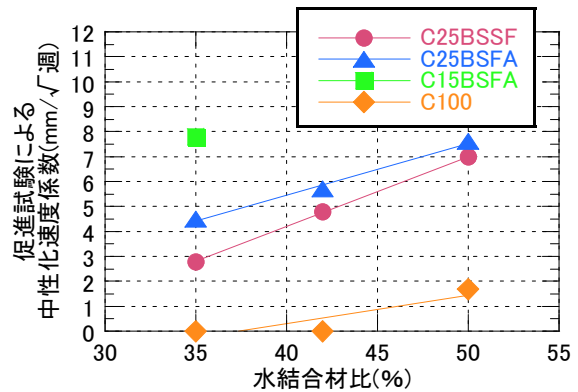


図-6 水結合材比と促進試験による中性化速度係数

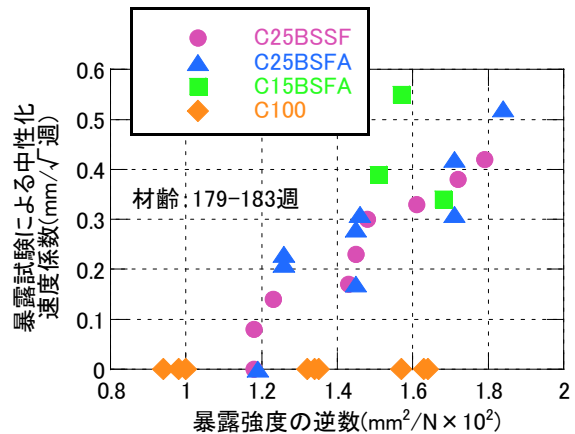


図-7 暴露強度と暴露試験による中性化速度係数

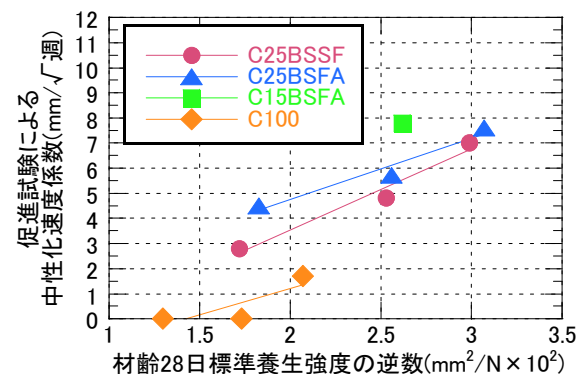


図-8 標準養生強度と促進試験による中性化速度係数

同一の圧縮強度で結合材のタイプごとに中性化速度係数を比較した場合、セメントの混合割合が小さいほど暴露試験および促進試験ともに中性化速度係数が大きくなり、セメントの混合割合に依存する傾向にある。依田⁴⁾らは、長期暴露試験の結果、圧縮強度が同等であれば高炉スラグ微粉末の混合の有無にかかわらず中性化抵抗性は同程度になると報告しており、本実験と符合しない。これは、本実験の混和材の混合割合が前述した報告よりも多いため、結果に差が生じたものと推察されるが、今後データを蓄積し、検討する必要がある。

(2) 中性化の予測

混和材を高含有したコンクリートを構造物に適用する場合、中性化の進行を予測し、かぶり厚さとの関係を精査する必要がある。ここでは、本実験で得られた暴露環境下での中性化深さの実測値と、3種類の中性化予測手法を比較検討する(図-9)。具体的な予測手法を以下に示す。

①促進中性化試験による予測手法

本実験で得られた促進試験による中性化速度係数をもとに、日本建築学会の耐久性指針(案)に記載されている式(1)⁸⁾により中性化深さを算出した。

$$C = A \times \sqrt{CO_2/5} \times \sqrt{t} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、C: 中性化深さ(mm), A: 中性化速度係数(mm/√週), CO₂: 炭酸ガス濃度(0.03), t: 材齢(週) 表-4による

②既往の文献による予測手法

文献⁹⁾に記載された結果をもとに、本実験によるセメントの混合割合と材齢28日標準養生強度の関係から中性化速度係数(促進試験)を求め、式(1)により中性化深さを算出した。

③土木学会による予測手法

土木学会の中性化予測手法¹⁰⁾をもとに、式(2)により中性化深さを算出した。また、中性化速度係数は、有効水結合材比をもとに式(3)により算出した。

$$Y_d = \gamma_{cb} \times \alpha_d \times \sqrt{t} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、Y_d: 中性化深さ(mm), γ_{cb}: 安全係数(1.15),

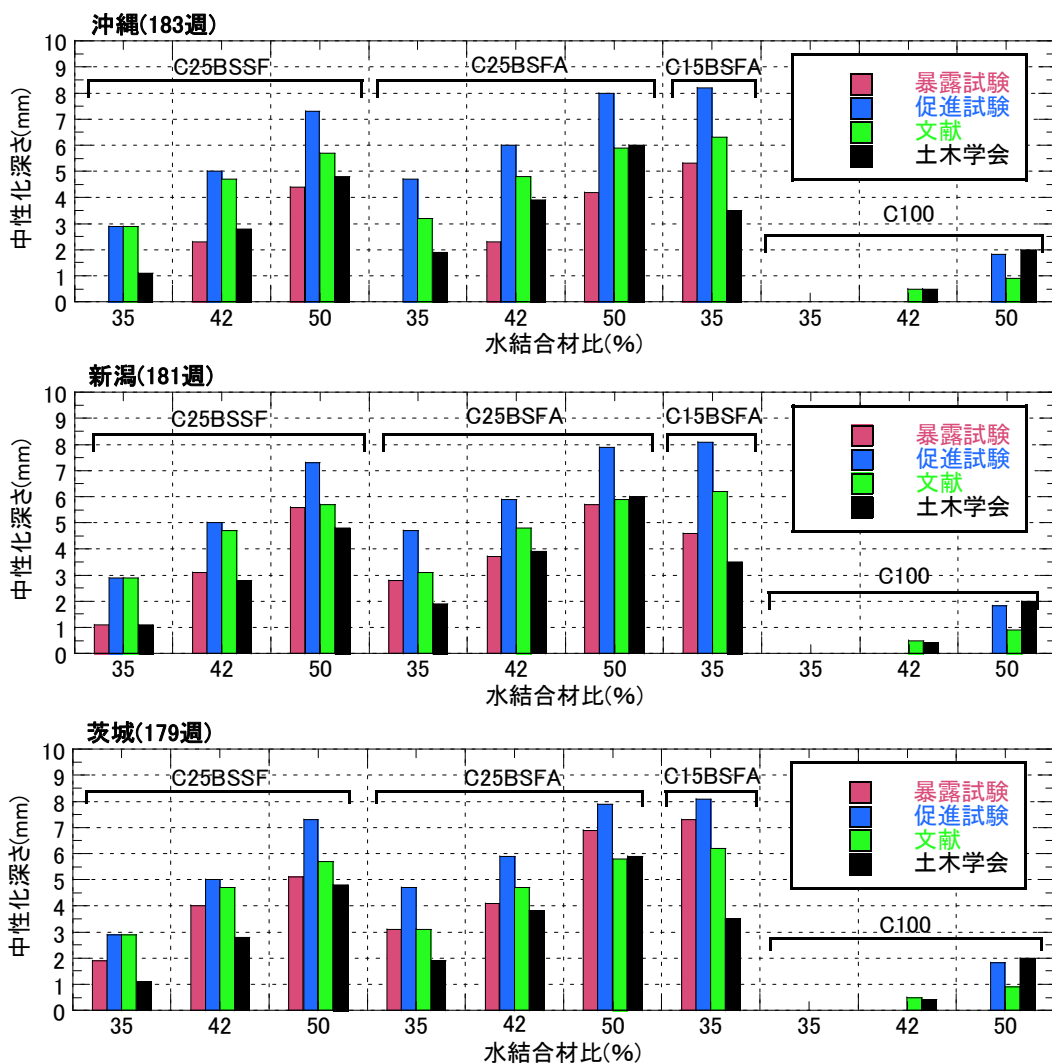


図-9 中性化深さの比較検討

αd : 中性化速度係数の特性値 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$),

$$\alpha d = \alpha k \times \beta e \times \gamma c$$

αk : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$), βe : 環境係数 (乾燥しにくい環境 : 1.0), γc : 材料係数 (1.0), t : 材齢 (年) 表-4 による (1年=52週)

$$\alpha k = -3.57 + 9.0 W/B \dots \dots \dots (3)$$

ここに, αk : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$), W : 単位水量 (kg/m³), B : 単位有効結合材量 (=C+k×A) (kg/m³), C : 単位セメント量 (kg/m³), k : 混和材の種類により定まる係数[高炉スラグ微粉末=0.7, フライアッシュ=0, シリカフェーム=0 (FA と同じに設定)], A : 単位混和材量 (kg/m³)

図-9 の結果から, 本実験で得られた実測値と促進中性化試験による推定値を比較すると, いずれの暴露環境においても中性化深さは推定値の方が 1.3 から 2.0 倍程度 (暴露環境ごとの平均値) 大きく, 安全側の評価となる。次に, 本実験で得られた実測値と既往の文献 (促進中性化試験) により求めた推定値を比較すると, 推定値の方が 1.1 から 1.6 倍程度 (暴露環境ごとの平均値) 大きくなり, 前述した促進中性化試験よりも小さいが, 安全側の評価となる。一方, 本実験で得られた実測値と土木学会式から求めた推定値を比較すると, 推定値の方が 0.7 から 1.2 倍 (暴露環境ごとに平均値) となり, 本実験の限りでは暴露環境によっては危険側の評価となる。これは, 本実験では複数の混和材を高含有していることや k 値の設定方法に検討の余地があることなどが原因であると推定される。なお, いずれの推定方法も水結合材比が小さい場合により安全側になる傾向にある。以上のことから, 実環境下における中性化深さを促進中性化試験から推定する場合, 安全側の評価が可能であると考え。また, 実務の中で, 促進中性化試験で評価することが困難な場合, 既往の文献をもとに中性化深さを推定することが考えられるが, この場合でも中性化を評価する一つの手法になると考える。

4. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 標準養生強度を同一の水結合材比で比較した場合, ポルトランドセメントの混合割合が小さくなると強度も小さくなる。
- (2) 暴露試験および促進中性化試験による中性化速度係数は, ポルトランドセメントの混合割合の増加お

よび水結合材比の低下に伴って小さくなる傾向にある。

- (3) 暴露環境の影響として, 同一の調査を地域ごとに比較すると, 沖繩<新潟<茨城の順に中性化速度係数は概ね大きくなる傾向にある。
- (4) 中性化速度係数は強度と相関関係にあるが, 中性化速度係数は, ポルトランドセメントの混合割合に依存する傾向にある。
- (5) 中性化の評価手法として, 実環境下での中性化深さを推定する手法としては, 促進中性化試験を用いることで安全側の評価が可能である。

<謝辞>

本研究は, 国立研究開発法人土木研究所との共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の成果の一部である。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会 : 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム論文集, 184p, 2011.12
- 2) 小林利充, 溝渕麻子, 近松竜一, 一瀬賢一 : 低炭素型のコンクリート「クリーンコンクリートTM」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, pp.1-8, 2011.11
- 3) 松田芳範, 上田 洋, 石田哲也, 岸 利治 : 実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.629-634, 2010
- 4) 依田彰彦 : 30年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.552-557, 1992
- 5) 依田彰彦, 横室 隆, 小椋由之 : 高炉セメント C 種を用い, 42年経過した RC 造社宅の耐久性調査試験, セメント・コンクリート論文集, V.58, pp.262-267, 2004
- 6) 日本フライアッシュ協会 : 石炭灰ハンドブック, pp. IV44-IV46, 2010
- 7) 気象庁ホームページ : 気象統計情報
- 8) 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, pp.86-88, 1991
- 9) 小林利充, 溝渕麻子, 近松竜一, 一瀬賢一 : 混和材を高含有したコンクリートの強度発現および促進中性化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, V.34, No.1, pp.118-123, 2012.7
- 10) 土木学会 : 2012年制定コンクリート標準示方書 (設計編), pp.145-147, 2012