

論文 混和材を高含有したコンクリートの中性化に関する一考察

小林 利充*1・竹田 宣典*2・片野啓三郎*3・一瀬賢一*4

要旨：本研究は、混和材を高含有したコンクリートの中性化性状を把握することを目的に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を結合材に使用し、水結合材比および結合材の組合せをパラメーターに、JISによる促進中性化試験および屋外暴露試験を実施し、それぞれの中性化について検討している。その結果、実環境（暴露試験）による中性化深さは、促進中性化試験の結果と相関が得られることを確認した。また、既往の文献による手法をもとに、中性化深さを推定した場合の妥当性について検討している。

キーワード：環境配慮、混和材、圧縮強度、中性化、促進試験、暴露試験

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産業副産物に置換する研究が多数報告されている¹⁾⁴⁾。前述した材料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、セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュに置換した場合、同一の水結合材比では中性化の進行が速いと言われている。依田らは、暴露試験⁵⁾や実大構造物⁶⁾による中性化の進行状況を報告しているが、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耐久性を評価するためには、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、水結合材比および結合材の組合せをパラメーターに、JISによる促進中性化試験を実施するとともに、日本国内の3ヶ所に供試体を屋外環境下に暴露し、それぞれの中性化について検討している。併せて、それらの相関性についても検討している。また、筆者らは、混和材を高含有した領域においても、中性化速度係数は、圧縮強度と高い相関性があることを報告しており⁷⁾、その手法をもとに、コンクリートの中性化の評価手法について検討している。なお、本論における高含有とは、混和材含有量が結合材に対して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、結合材は、セメントと混和材を組み合わせたものとした。混和材の品質を表-2に示す。

2.2 調合

コンクリートの調合を表-3に示す。混和材を高含有したコンクリートは、結合材に対するセメントの混合割合を25および15%とし、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、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

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(S) (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)	
		②AE減水剤(高機能型)(HWR)	
		③高性能AE減水剤(SP)	
		④AE助剤(AE)	

[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 副課長 博士(工学) (正会員)

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

*3 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任 (正会員)

*4 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 部長 博士(工学) (正会員)

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%の調合は、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%の調合は、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

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、圧縮強度試験用供試体(φ10×20cm)、促進中性化試験用供試体(10×10×40cm)および暴露試験用供試体(10×10×20cm)を作製した。その後、材齢 2 日で脱型し、所定の材齢まで 20℃水中で養生した。

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準じて行った。一方、暴露試験用供試体は、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ゴム系被覆材を用いて被覆した。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暴露した。暴露概要を表-4 および図-1 に示す。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度(標準養生強度)

各材齢における標準養生強度を図-2 から図-4 に、強度増進比率(材齢 28 日標準養生強度に対する各材齢における強度の増進割合とする)を図-5 に示す。この結果から、標準養生強度は、いずれも結合材水比の増加に伴って増大する傾向にあり、同一の水結合材比 35% (結合材水比 2.9) で強度を比較すると、C15BSFA < C25BSFA < C25BSSF < C100 の順に概ね高くなる傾向にある。また、材齢 28 日の標準養生強度を基準に強度発

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⁸⁾

表-3 コンクリートの調合

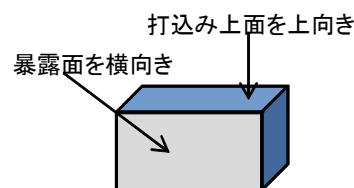
No	W/B (%)	単位量(kg/m ³)						
		W	C	BS	FA	SF	S	G
1	35.0	160	114	343	0	5	705	968
2	42.0	160	95	286	0	5	771	968
3	50.0	160	80	240	0	5	824	968
4	35.0	155	111	288	44	0	726	968
5	42.0	155	92	240	37	0	792	968
6	50.0	155	78	202	31	0	844	968
7	35.0	150	64	279	86	0	738	968
8	35.0	165	471	0	0	0	712	968
9	42.0	165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

[注] No.1~No.3 : C25BSSF, No.4~No.6 : C25BSFA
No.7 : C15BSFA, No.8~No.10 : C100
(記号中の数値は結合材に対する混合割合を示す)

表-4 暴露状況

< 沖縄 >	
暴露地: 沖縄県大宜味村	
試験期間: 92 週	
平均気温: 23.3℃	
平均湿度: 75.5%	
月平均降雨量: 194.5mm	
< 新潟 >	
暴露地: 新潟県上越市	
試験期間: 94 週	
平均気温: 14.8℃	
平均湿度: 77.3%	
月平均降雨量: 230.0mm	
< 茨城 >	
暴露地: 茨城県つくば市	
試験期間: 98 週	
平均気温: 15.3℃	
平均湿度: 72.9%	
月平均降雨量: 122.8mm	

[注]試験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 HP のデータを引用した。



暴露面以外の5面を被覆

図-1 暴露用供試体の概要

現性を比較すると、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比率は高い傾向にあるが、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増進比率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、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日までは従来のコンクリートよりも強度発現は低いが、材齢2年のような長期材齢になると強度発現比率は大きく伸びる傾向にある。

3.2 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増大する傾向にある。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増大する傾向にあり、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、7.8mm/√週と速くなる。ここで、既往の文献では^{7),9)}、コンクリートの中性化速度は、圧縮強度と相関があり、圧縮強度の逆数でプロットすると一次式で表現できると考える。したがって、本実験で得られた28日標準養生強度の逆数を指標に、促進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に示す。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、水結合材比で比較した場合よりもその差異は小さくなるものの、セメントの混合割合に依存する傾向にある。

3.3 暴露試験による中性化

暴露場所ごとに、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-8から図-10に示す。この結果から、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中性化速度係数は0であるが、C25シリーズは水結合材比の増加に伴って増大する傾向にある。また、同一の水結合材比35%で比較すると、C100は前述したように0である。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、0.55mm/√週程度であった。これは、3.2に記載した促進試験による中性化速度係数の結果と同様の傾向が得られた。

また、結合材のタイプおよび水結合材比における暴露

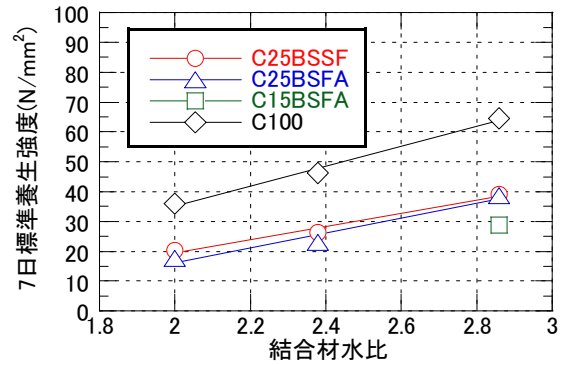


図-2 結合材水比と7日標準養生強度の関係

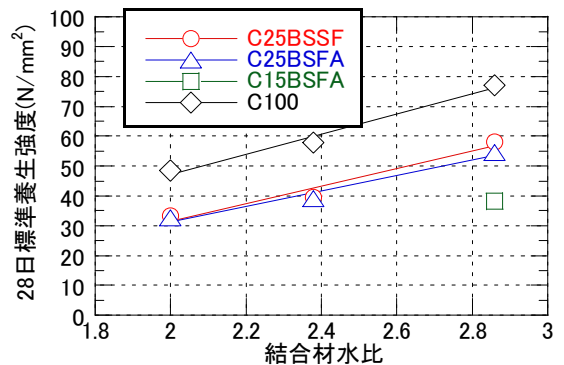


図-3 結合材水比と28日標準養生強度の関係

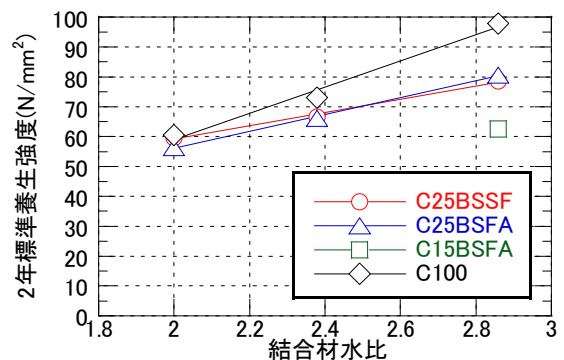


図-4 結合材水比と2年標準養生強度の関係

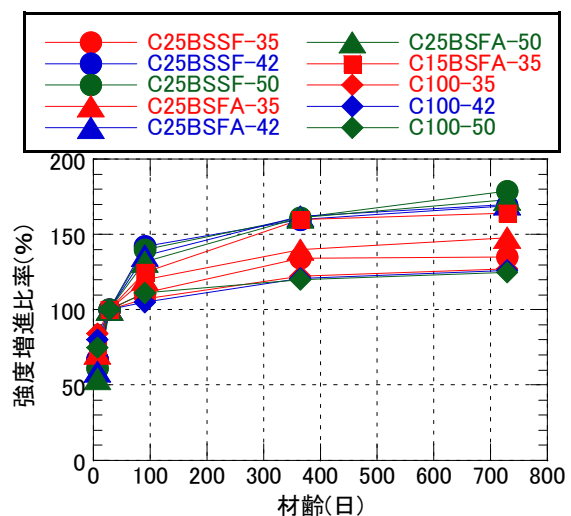


図-5 材齢と強度増進比率の関係

[注] 凡例の35, 42, 50はW/Bを示す

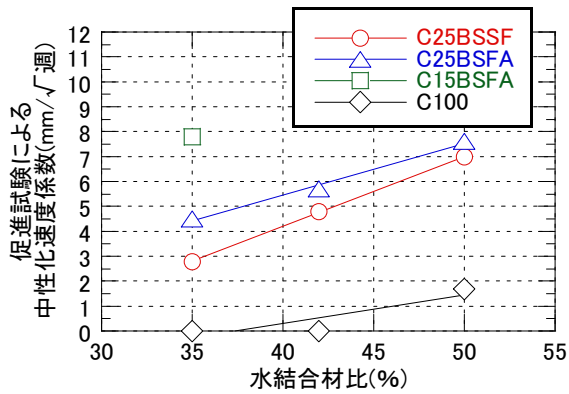


図-6 水結合材比と促進による中性化速度係数の関係

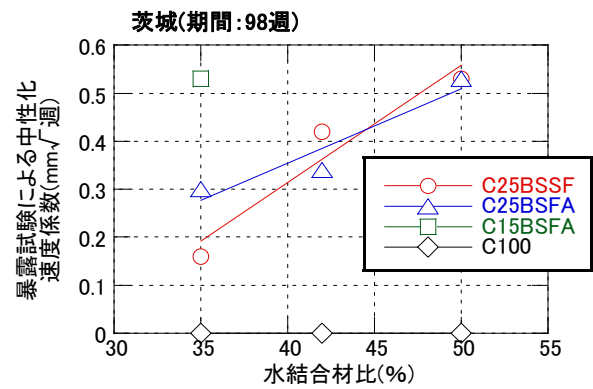


図-10 水結合材比と暴露試験による中性化速度係数の関係 (茨城)

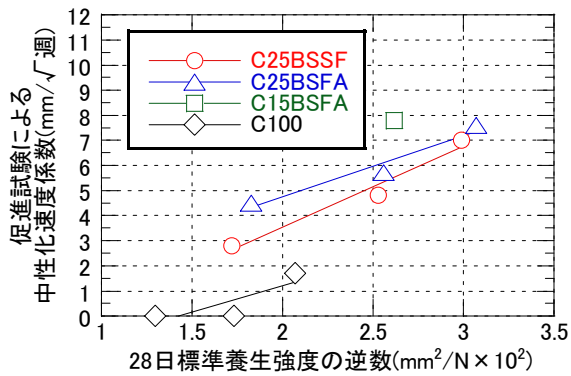


図-7 28日標準養生強度の逆数と促進試験による中性化速度係数の関係

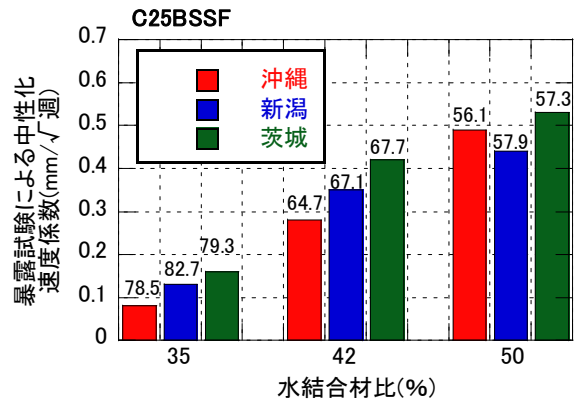


図-11 地域別の暴露試験による中性化速度係数 (C25BSSF)

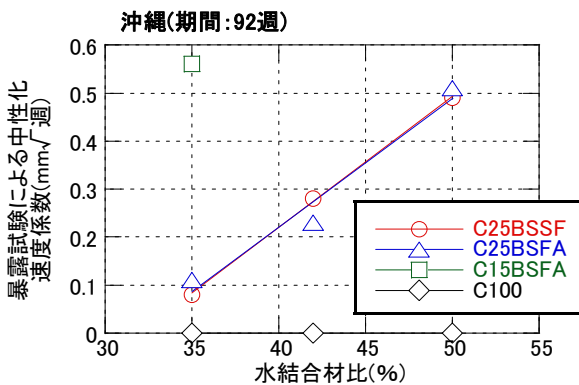


図-8 水結合材比と暴露試験による中性化速度係数の関係 (沖縄)

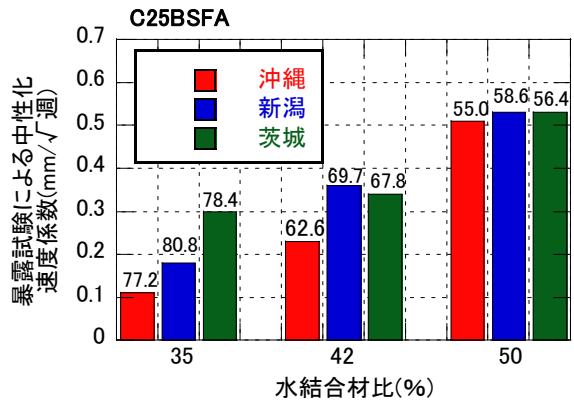


図-12 地域別の暴露試験による中性化速度係数 (C25BSFA)

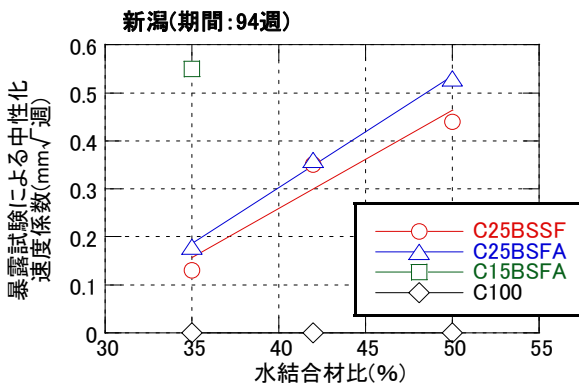


図-9 水結合材比と暴露試験による中性化速度係数の関係 (新潟)

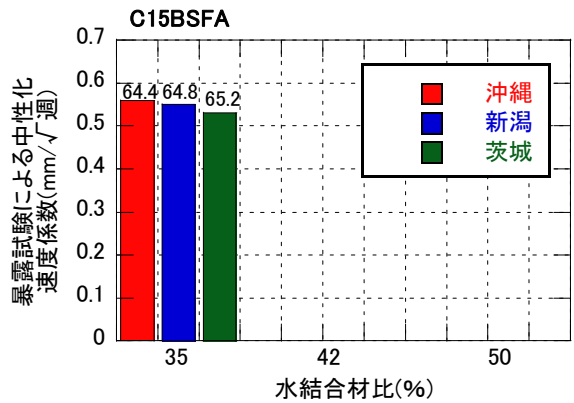


図-13 地域別の暴露試験による中性化速度係数 (C15BSFA)

場所ごとの中性化速度係数を図-11 から図-13 に示す。暴露場所の影響として、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、その傾向は水結合材比が小さいものほど顕著である。一方、C15BSFA は水結合材比が 35%と小さいのに、暴露場所による差異はほとんど見られない。また、C100 については、いずれの暴露場所においても中性化速度係数は 0 であった。地域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 濃度などの環境条件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。ここで、中性化速度係数と圧縮強度の関連性として、暴露後の強度データを図中（数値の単位：N/mm²）に示すが、今回の実験からは、その相関性は確認できない。

3.4 促進試験と暴露試験の関係

促進試験による中性化深さと暴露試験による中性化深さの関係を図-14 から図-16 に示す。なお、両者の比較を行うために、促進試験の結果から実環境における中性化深さを算定する手法としては、日本建築学会の指針¹⁰⁾をもとに、以下の式により求めた。なお、材齢は、表-4 に示す試験期間とした。

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

ここに、C：中性化深さ (mm)

A：中性化速度係数 (mm/√週)

本実験で得られた促進試験の結果を使用

CO₂：炭酸ガス濃度 (0.03%)

t：材齢 (週) 表-4 による

この結果、促進試験と暴露試験による中性化深さは相関性が高いことがわかる。また、暴露場所および結合材のタイプにかかわらず、促進試験から算出した中性化深さの方が、暴露試験による中性化深さよりも 1 点を除いて大きくなる。したがって、限られたデータではあるが、促進中性化試験による結果で評価しても安全側の評価が可能であることを示唆するものである。

3.5 既往のデータによる評価

前述したように、混和材を高含有した場合においても、中性化の評価は、促進中性化試験でも可能であることを示した。ただし、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もあるため、簡便な中性化の評価手法として、既往の文献（促進中性化試験による手法）⁷⁾をもとに中性化深さを算出し、暴露試験の結果と比較検討を行った。検討手法としては、文献による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 28 日標準養生強度の関係から中性化速度係数を求め、得られた中性化速度係数と材齢 65 年(65×52=3380 週)を式(1)に代入し、実環境での中性化深さを求めた。なお、材

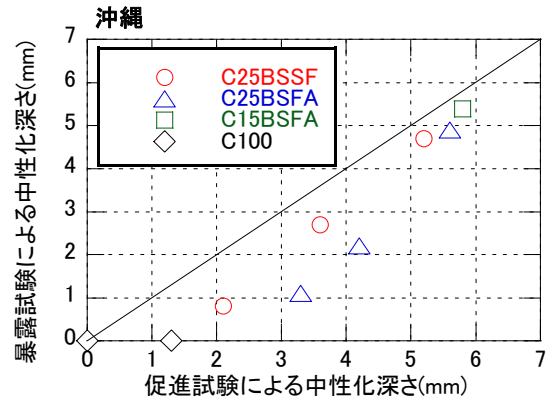


図-14 促進試験と暴露試験による中性化深さの関係（沖縄）

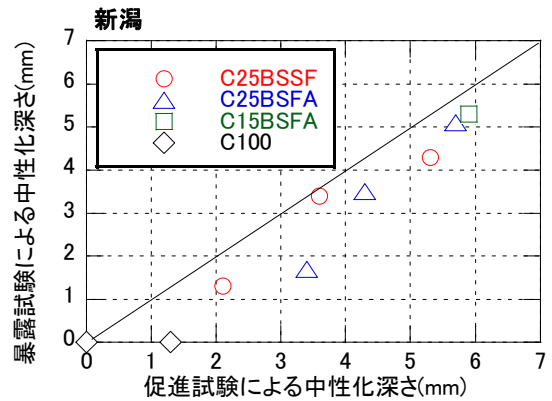


図-15 促進試験と暴露試験による中性化深さの関係（新潟）

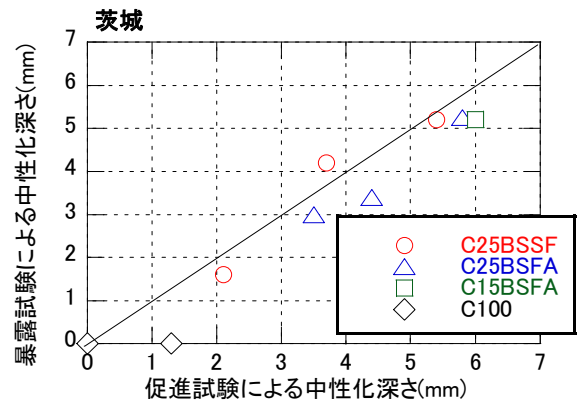


図-16 促進試験と暴露試験による中性化深さの関係（茨城）

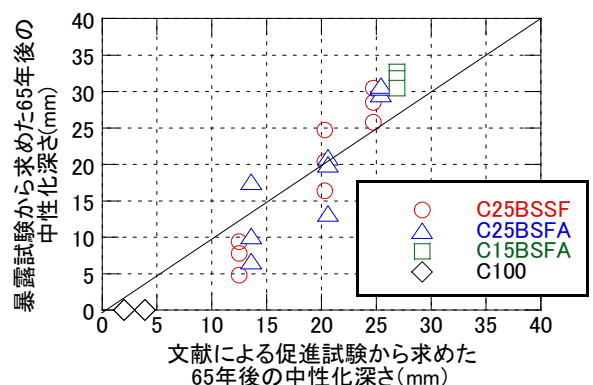


図-17 文献と暴露試験から求めた場合の中性化深さ

齢 65 年とは、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事における計画供用期間を「標準」とした場合を想定した。比較した結果を図-17 に示す。その結果、本実験の範囲においては、結合材のタイプにかかわらず、65 年後の中性化深さは 35mm 以下であった。したがって、かぶりを調整することで、耐久性を確保できると考える。また、既往の文献を用いた手法と暴露試験の比較として、中性化深さが比較的大きい場合やセメントの混合割合が少ない場合において、既往の文献から求めた中性化深さよりも暴露試験より求めた中性化深さの方が 5mm 程度大きい結果となった。したがって、この手法を用いる場合は、限られたデータでの評価となるため、誤差として安全率（例えば 10mm）を考慮して中性化深さを評価すれば、簡便に中性化を評価する手法の一つになると考える。

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、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) 強度増進という観点から考えると、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 日までは従来のコンクリートよりも強度発現は低い、材齢 2 年のような長期材齢になると強度発現は大きく伸びる傾向にある。
- (3) 促進試験および暴露試験による中性化速度係数は、セメントの混合割合の減少に伴って増大する傾向にある。
- (4) 強度と中性化速度係数は相関関係にあるが、中性化速度係数は、セメントの混合割合に依存する傾向にある。
- (5) 促進試験と暴露試験による中性化深さは相関性が高い。また、限られたデータではあるが、促進中性化試験による結果で評価しても安全側の評価が可能であることを示唆している。
- (6) 簡便に中性化を評価する手法として、既往の文献から求めることも可能であると考え、その場合、安全率を考慮する必要がある。

<謝辞>

本研究は、独立行政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) 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™」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, pp.1-8, 2011.11
- 2) 辻大二郎ほか: 高炉スラグ高含有セメントを用いた 100N/mm² 級超高強度コンクリートの研究 (その 1 からその 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.169-174, 2013.8
- 3) 吉田 泰, 山本佳城, 陣内 浩: 環境配慮型超高強度コンクリートに関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, V.77, No.672, pp.135-142, 2012.2
- 4) 斎藤 淳, 堺孝司, 鈴木康範, 福留和人: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, V.35, No.1, pp.1537-1542, 2013.7
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 日本フライアッシュ協会: 石炭灰ハンドブック, pp. IV44-IV46, 2010
- 9) 和泉意登志, 嵩 英雄, 押田文雄, 西原邦明: コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調査, 養生条件の影響について, 第 7 回コンクリート工学会年次講演会論文集, pp.117-120, 1985
- 10) 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