

報告 屋外に 90 か月暴露した混和材を多量に用いたコンクリートの中性化抵抗性

櫻庭 浩樹*1・古賀 裕久*2

要旨: 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた置換率の異なるコンクリートを屋外に 90 か月暴露した後の中性化深さを測定し、実環境下での中性化抵抗性を検討した。その結果、混合セメント C 種の上限よりも置換率を高くした配合においても、雨掛かりのある屋外では中性化の進行が遅くなることを示した。中性化深さは、置換率が C 種の上限を超えると大きくなる傾向にあったが、水結合材比 50%と 35%の場合を比較すると後者の方は置換率の影響が小さくなった。また、既存の有効水結合材比の計算方法を修正した有効水結合材比と中性化深さの関係を検討し、混和材の種類によらず中性化抵抗性の大小を推定できることを示した。

キーワード: 低炭素型コンクリート, 混和材, 中性化抵抗性, 暴露試験, 置換率, 含水状態

1. はじめに

低炭素社会の構築に向けた取り組みが進められており、二酸化炭素排出量が多いセメント単味のコンクリートの代替として、混和材を多量に用いた低炭素型コンクリートが検討されている。このようなコンクリートの実用化には、実環境下での中性化抵抗性の評価方法の確立が不可欠である。

混和材を用いたコンクリートの実環境下での中性化抵抗性を明らかにするため、様々な暴露試験が行われてきた¹⁾³⁾。しかし、過去の暴露試験の多くは、高炉スラグ微粉末の置換率を JIS R 5211 の高炉セメント C 種の上限值 (70%) あるいはフライアッシュの置換率を JIS R 5213 のフライアッシュセメント C 種の上限值 (30%) までとしたものであり、混和材の置換率を各混合セメントの C 種の上限值よりも高くしたコンクリートを対象としたものではなかった。また、実環境での中性化の進行は、水分の供給によって鈍化することが従来から知られているが^{4,5)}、そのような現象が置換率を各混合セメントの C 種の上限よりも高くした場合に生じるかは必ずしも明確ではない。

こうした背景のもと、著者らは、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を各混合セメントの C 種の上限值よりも高くした供試体も含めて、混和材の置換率、セメントの種類、水結合材比 (W/B) が異なる供試体を製作して暴露試験を行っている。本報告は、過去の屋外暴露 40 か月後までの結果^{6,7)}に、屋外暴露 90 か月の結果⁸⁾および屋内暴露 136 か月の結果⁹⁾を加えて、屋外における中性化抵抗性を検討したもので、雨掛かりのある屋外において、混合セメント C 種の上限值よりも置換率が高い場合に注目してとりまとめた。

2. 暴露試験による中性化抵抗性の検討方法

2.1 コンクリートの配合

コンクリートの配合と基礎物性を表-1 に示す。配合は 12 種類で、1)普通ポルトランドセメントのみを用いた配合 (N50, N35), 2)高炉スラグ微粉末を用いた配合 (配合名称に B50, B70, B85 を含む), 3)フライアッシュを用いた配合 (配合名称に F20, F30, F40 を含む) がある。高炉スラグ微粉末の置換率は 50%, 70%, 85%の 3 水準、フライアッシュの置換率は 20%, 30%, 40%の 3 水準とした。これらは、混和材の置換率が「B 種相当」, 「C 種相当」, 「C 種を超えるもの」となるように設定したものである。W/B は、50%を基本とし、W/B の違いによる影響を検討するために、35%に低減した配合も含めた。

すべての配合に対し、材齢 28 日、91 日および 3 年まで、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を測定した。材齢 28 日までは水中養生とし、材齢 28 日から 91 日は実験室内での気中養生を行った。材齢 91 日以降は、つくば市 (土木研究所構内) の雨掛かりのある屋外に暴露した (写真-1)。

2.2 中性化に関する暴露試験

暴露供試体の形状を図-1 に示す。供試体は 100×100×200mm の角柱である。材齢 28 日まで水中養生を行った後、屋内に保管して、コンクリート打込み方向に対して片側の側面 (暴露面, 100×200mm) 以外を塗装材料でシールし、材齢 42~69 日で暴露を開始した。

暴露環境は、雨掛りのある屋外 (沖縄県国頭郡大宜味村) と土木研究所の屋内執務室である。各暴露環境における暴露供試体の状況と気象データを写真-1 に示す。室内の CO₂ 濃度は、約二年半の間、30 分~1 時間毎に記録したデータの平均値である。なお、土木研究所構内での屋外暴露試験も実施していたが、中性化の進捗度合いは

*1 土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員 博(工) (正会員)

表－1 コンクリートの配合と基礎物性

配合 名称	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)	
		W	B			S				G
			OPC	BFS	FA					
N50	50	165	330(100%)	—	—	827	968	14.0	5.2	44.9
N50B50			165(50%)	165(50%)	—	815		13.5	4.3	36.3
N50B70			99(30%)	231(70%)	—	810		12.5	4.5	30.5
N50B85			50(15%)	281(85%)	—	806		11.5	4.0	21.2
N50F20			264(80%)	—	66(20%)	807		11.5	4.4	37.4
N50F30			231(70%)	—	99(30%)	797		11.0	4.6	30.0
N50F40			198(60%)	—	132(40%)	787		14.5	4.0	22.9
N35	35	165	471(100%)	—	—	713	968	14.5	4.7	67.7
N35B50			236(50%)	236(50%)	—	695		14.5	4.3	55.8
N35B85			71(15%)	401(85%)	—	682		12.5	5.1	34.3
N35F20			377(80%)	—	94(20%)	684		12.0	3.5	59.3
N35F40			283(60%)	—	189(40%)	655		14.5	4.5	41.6

※W：上水道水，B：結合材，OPC：普通ポルトランドセメント（密度=3.16g/cm³，比表面積=3,300cm²/g），BFS：高炉スラグ微粉末 4000（密度=2.89g/cm³，比表面積=4,400cm²/g，SO₃=2.19%（無水せっこう添加）），FA：フライアッシュ II 種（密度=2.30g/cm³，比表面積=4,280cm²/g），S：細骨材（密度=2.56g/cm³，吸水率=2.23%），G：粗骨材（砕石 6 号（密度=2.67g/cm³，吸水率=0.43%）と砕石 5 号（密度=2.67g/cm³，吸水率=0.46%）を均等に混合，最大寸法=20mm），※単位量の百分率は結合材に占めるセメントと混和材の質量%を表示

沖縄と同程度であったことから⁹⁾，本報告では屋外での暴露期間が最も長い沖縄での結果を示す。

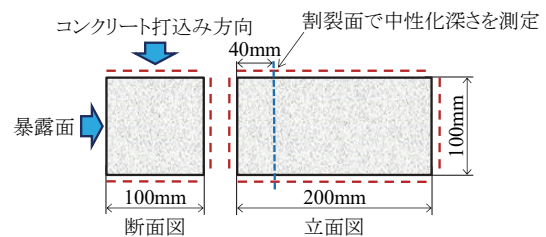
暴露期間は，屋外が 20 か月，40 か月および 90 か月，屋内が 20 か月，40 か月および 136 か月である。暴露後に供試体を回収し，供試体端部から約 40mm の位置を割裂して，中性化深さを測定した（図－1 参照）。中性化深さは，JISA1152 を参考として，割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し，供試体表面から赤紫色を呈した部分までの距離を等間隔に 9 点で測定し，これらの平均値とした。なお，暴露後の中性化深さの測定にはそれぞれ異なる供試体を用いている。

3. 中性化抵抗性の検討結果と考察

本報告では，屋外での中性化進行に影響を及ぼす要因として，圧縮強度を指標とした硬化体の緻密さおよび含水状態の影響に着目して整理する。その後，コンクリートの配合（混和材の置換率および有効水結合材比）と実環境下での中性化深さについて検討した結果について述べる。

3.1 中性化深さと暴露期間の関係

屋内と屋外での中性化深さと暴露期間の関係を図－2 に示す。横軸は暴露期間の平方根とし，つくば屋内および沖縄屋外の結果の凡例にはそれぞれ，T および O を付



図－1 暴露供試体の形状



【沖縄屋外】
沖縄県国頭郡大宜味村
沿岸部(海岸線付近)
平均気温: 22.4℃
平均湿度: 74.6%



【つくば屋内】
土木研究所
執務室
平均気温: 24.4℃
平均湿度: 37.1%
CO₂ 濃度: 0.051%



【つくば屋外】
茨城県つくば市
内陸部
平均気温: 13.9℃
平均湿度: 71.8%

※気象データ：屋外では暴露場の最寄りの気象観測地点での測定値，屋内ではデータロガーによる測定値

写真－1 暴露供試体の状況と気象データ

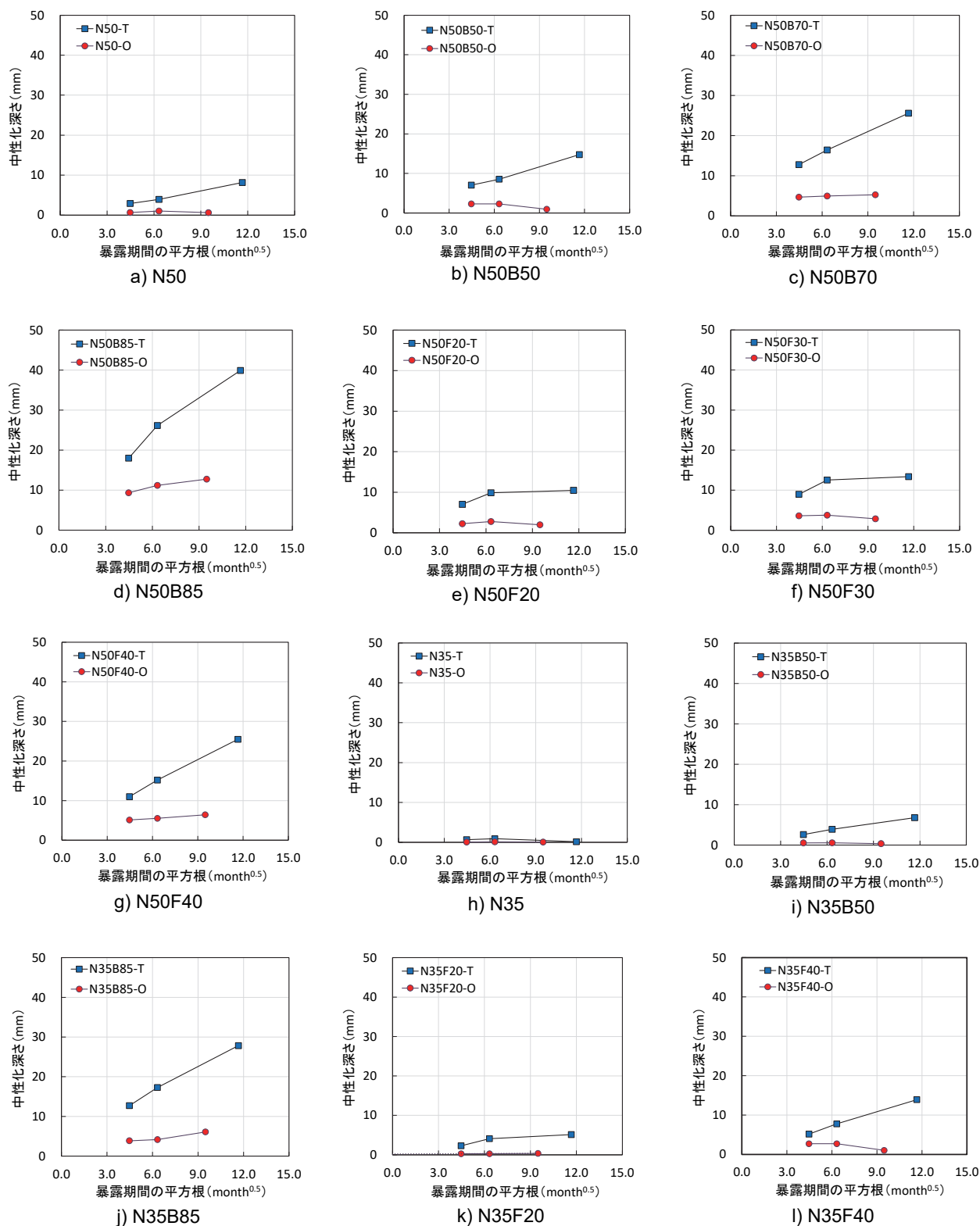


図-2 中性化深さと暴露期間の関係

記して区別している。中性化深さが全シリーズのなかで最も大きかった N50B85 供試体の中性化の状況を写真-2 に示す。

全体の傾向として、屋内では、中性化深さと暴露期間の平方根は概ね線形関係にあり、 $\sqrt{t}$ 則によることがあらためて確認された。一方、屋外での暴露では、屋内の

結果と比較して暴露 20 か月、40 か月、90 か月の中性化深さが横ばいであり、経年による中性化の進行は緩慢である。

3.2 圧縮強度との比較

材齢3年までの圧縮強度と材齢の関係を図-3 に示す。いずれの供試体の場合も、材齢の経過とともに圧縮強度

が増加していることがわかる。W/B50%で材齢 3 年の場合、圧縮強度は 33～62N/mm²であり、混和材の置換率が高いほど圧縮強度は低くなっている。W/B35%で材齢 3 年の場合、圧縮強度は 53～87N/mm²であり、W/B50%の場合と同様に混和材の置換率が高いほど圧縮強度は低くなっている。材齢 91 日時点の強度を基準とした材齢 3 年時点の圧縮強度の増加割合を図-4 に示す。普通ポルトランドセメント単味の場合と比較して、混和材を用いた場合は材齢 91 日以降の強度発現の割合が大きい。以上の結果から、屋外暴露において中性化の進行が緩慢になったのは、水和反応が継続し、硬化体が緻密になった影響が考えられる。

3.3 含水状態の影響

コンクリートの中性化進行は含水状態と密接な関係があり、雨掛かりがある場合に中性化の進行が遅くなることが指摘されている^{4,5)}。佐伯らは、普通ポルトランドセメントを用いた W/C45～75%のモルタル供試体において、配合によらず、同量の水が蒸発したときの中性化深さは同一であることを示している¹⁰⁾。片平らは、100×100×400mm 供試体 (W/C=85%) の下部 100mm を水中に浸漬して屋外に 1 年暴露した事例を報告している¹¹⁾。日照を直接受けない条件では水面から 50～100mm 程度露出した部位でも中性化深さはほぼ 0mm であったことが示されており、水分の供給により湿潤状態が保たれる部位では中性化の進行は抑制されると考えられる。また、伊代田らは、実構造物から採取したコアの中性化深さと含水率の調査を行い、中性化部分に対して未中性化部位の含水状態は明確に高いことを示している¹²⁾。以上のことから、本研究で屋外に暴露した供試体で中性化の進行が横ばいとなったのは、前節で述べた水和反応が継続したことに加えて、横ばいとなった深さまではコンクリートが比較的乾燥していたが、それよりも内部では湿潤状態が保たれた可能性がある。屋内に暴露した供試体については、雨掛かりがないために内部まで乾燥が進行し、中性化深さも経時的に進行したと推察される。今後の暴露試験において、含水状態にも着目した試験を実施して検証したい。

3.4 混和材置換率の影響

図-2 に示したとおり、屋外での中性化進行は、屋内での中性化進行と比較して鈍化した。このため、混和材の置換率が C 種を超えるような場合にも、水分の供給によって中性化の進行は鈍化すると考えられる。

屋外 90 か月時点の中性化深さと混和材の置換率の関係を図-5 に示す。図中の凡例は、混和材の種類と W/B で区別している。W/B50%の場合、置換率が高くなるにつれて中性化深さは大きくなっており、置換率が C 種相当を超えると C 種相当以下の場合よりも中性化深さが大き

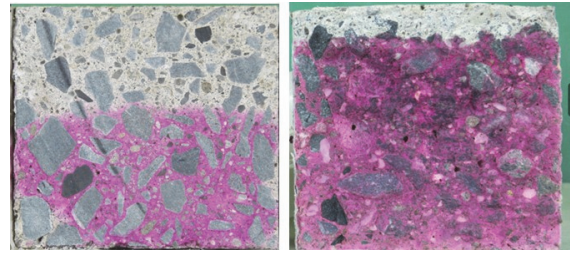
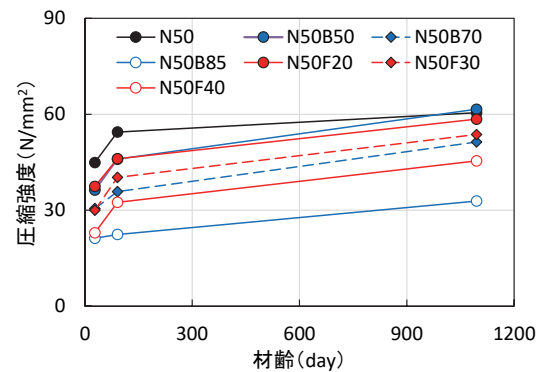
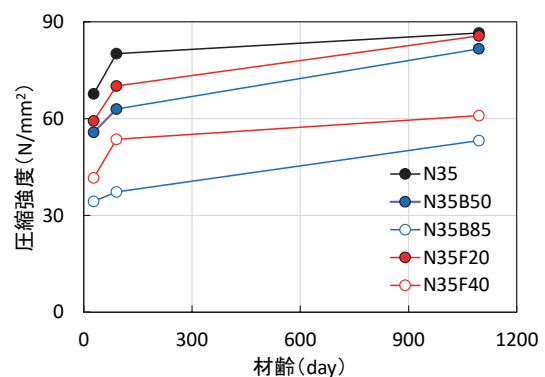


写真-2 N50B85 供試体の中性化の状況
(左：屋内 136 か月，右：屋外 90 か月)



a) W/B50%



b) W/B35%

図-3 圧縮強度と材齢の関係

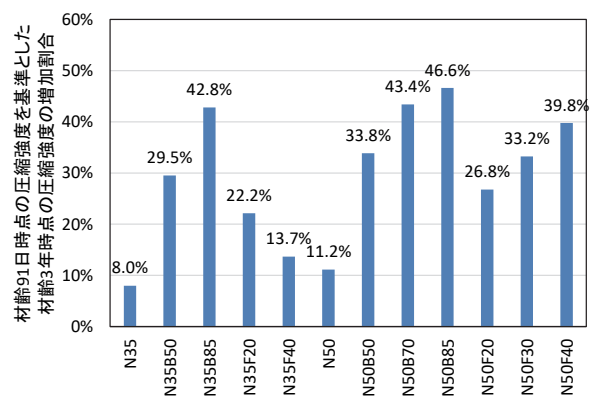


図-4 材齢 91 日時点圧縮強度を基準とした材齢 3 年時点の圧縮強度の増加割合

い傾向にある。W/B35%の場合、置換率が高くなるにつれて中性化深さは大きくなる傾向は同様であるが、W/B50%の場合と比較するとその影響は小さい。なお、W/B35%で置換率85%(N35B85)とW/B50%で置換率70%(N50B70)の中性化深さが比較的近い値を示しているが、いずれも材齢3年時点で圧縮強度50N/mm²程度であり、硬化体の緻密さが同程度であったことが要因として考えられる。

3.5 有効水結合材比を用いた比較

本節では、混和材の種類によらずに整理できる指標として有効水結合材比を用い、中性化抵抗性の比較を行う。

コンクリート標準示方書[設計編]¹³⁾では、屋外暴露試験の結果に基づいた中性化速度係数と有効水結合材比の算定式を示している。過去の検討において、中村らは、複数地点での暴露40か月時点の暴露試験の結果に基づき、有効水結合材比を修正して算定する方法を提案している⁷⁾。具体的には、高炉スラグ微粉末の置換率を70%以上とした場合の高炉スラグ微粉末のk値の設定方法を式(1)のとおり提案している⁷⁾。この式は、単位セメント量以下の質量の高炉スラグ微粉末に対しては土木学会式と同様にk値を0.7、単位セメント量を超える質量の高炉スラグ微粉末に対してはk値を0.3として修正有効水結合材比を求めるものである⁷⁾。

$$W/B' = W/(C + k' \cdot A) \quad (1)$$

ここで、k'：混和材の種類によって定まる定数(高炉スラグ微粉末=単位セメント量以下の質量に対して0.7、単位セメント量を超える質量に対して0.3、フライアッシュ=0)、A：単位混和材量(kg/m³)である。

屋外暴露90か月時点の中性化深さと有効水結合材比の関係を図-6 a), b)に示す。比較のため、有効水結合材比の修正の有無を区別して示している。図-6 a)より、修正有効水結合材比が増加するにつれて屋外暴露90か月時点の中性化深さは大きくなることを確認できる。置換率がC種相当を超える配合であるN50B85、N50F40およびN35B85の修正水結合材比は、それぞれ、1.08、0.83および0.75であり、修正水結合材比0.8程度以上の場合、中性化深さが6mm程度以上と大きかった。修正水結合材比が0.8程度の配合のうちN50F40、N50B70、N35B85は同程度の中性化抵抗性であった。以上の結果から、修正有効水結合材比を用いることで、混和材の種類によらず、中性化抵抗性の大小を推定することができると考えられる。

図-6 b)には、土木学会式の有効水結合材比を用いた場合の結果を示す。置換率がC種相当を超える配合かつ有効水結合材比の修正対象となるN50B85とN35B85の有効水結合材比は、それぞれ、0.67および0.47と計算され、高炉スラグを多量に用いた配合について、中性化抵

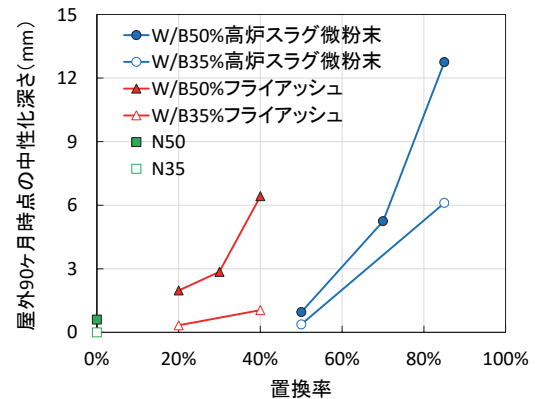
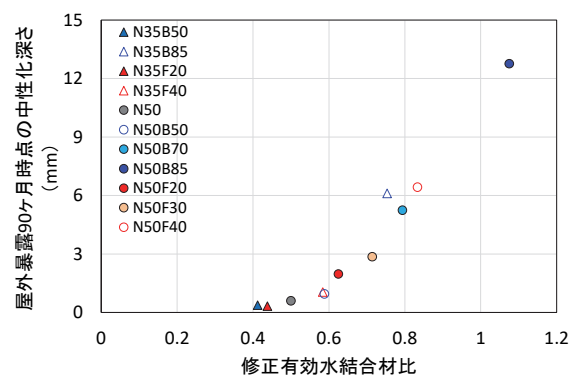
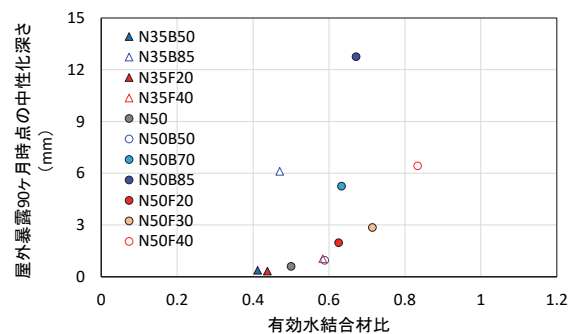


図-5 屋外暴露90か月時点の中性化深さと置換率



a) 修正有効水結合材比の場合



b) 有効水結合材比の場合

図-6 屋外暴露90か月時点の中性化深さと有効水結合材比の関係

抗性を適切に評価できてない。

4. まとめ

本研究では、混和材の置換率が混合セメントのC種相当以上の場合を含めた12配合の供試体を用い、実環境下での暴露試験結果に基づいて中性化抵抗性を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 屋外と屋内での中性化深さと時間の関係を検討した結果、混合セメントC種の上限よりも置換率を高とした配合においても、雨掛かりのある屋外では中性化の

進行が横ばいになることが示された。一方で、屋内の環境では、中性化深さと時間の平方根は線形関係となり、 $\sqrt{t}$ 則によることがあらためて確認された。

- 2) 材齢 3 年までの圧縮強度試験の結果、屋外に暴露した供試体はいずれの配合でも圧縮強度が増進していた。屋外での中性化の進行が緩慢になった要因として、水和反応が継続し、硬化体が緻密になった影響が考えられた。
- 3) 屋外に暴露した供試体で中性化の進行が横ばいになったのは、水和反応が継続したことに加えて、横ばいとなった深さ以降では湿潤状態が保たれたためと推察された。
- 4) 屋外暴露における中性化深さは、置換率が C 種の上限を超えると中性化深さが大きくなる傾向にあった。水結合材比 50%と 35%の場合を比較すると後者の方は置換率の影響が小さかった。
- 5) 屋外暴露 90 か月時点の中性化深さと修正有効水結合材比の関係を検討した結果、修正有効水結合材比が大きくなるにつれて中性化深さは大きくなり、混和材の種類によらず中性化抵抗性の大小を推定できることを示した。

なお、本研究は、国立研究開発法人土木研究所と国内 8 機関とで実施された共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の成果の一部であり、実環境での長期的な性状を追跡調査した結果をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 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64, 1988
- 2) 橋本学, 倉田和英, 大塚勇介, 檀康弘：41 年経過した高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの長期耐久性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.30, pp.77-484, 2019
- 3) 佐川孝広, 植木康知, 閑田徹志, 米澤敏男, 坂井悦郎：高炉セメント C 種を用い 52 年経過した構造物の長期耐久性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.28, pp.47-59, 2017
- 4) 佐伯竜彦, 長滝重義, 大賀宏之, 高見浩之：降雨により水分供給を受けるコンクリートの中性化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.609-614, 1991
- 5) 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, 2010.7
- 6) 中村英佑, 石井豪, 渡辺博志：暴露試験と促進試験による混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.202-207, 2014.7
- 7) 中村英佑, 栗原勇樹, 古賀裕久：暴露 40 ヶ月後の混和材を多量に用いたコンクリートの中性化抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.171-176, 2016.7
- 8) 櫻庭浩樹, 中村英佑, 鈴木雅博, 古賀裕久：浸せき試験および暴露試験による混和材を用いたコンクリートの塩分浸透抵抗性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.161-166, 2020.7
- 9) 櫻庭浩樹, 古賀裕久：複数の暴露環境と促進環境における中性化進行の比較, コンクリート工学, Vol. 61, No. 9, pp.800-805, 2023. 9
- 10) 佐伯竜彦, 大賀宏之, 長滝重義：コンクリートの中性化の機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.563-568, 1989
- 11) 片平博, 古賀裕久：コンクリートの中性化に関する全国暴露試験, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 19 巻, pp.161-166, 2019.10
- 12) 伊代田岳史, 本名英理香：コンクリート構造物の炭酸化進行における雨係掛り等の環境条件の影響とその進行メカニズムの検討, コンクリート工学論文集, Vol.28, pp.113-122, 2017
- 13) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.163-164, 2023