

論文 高炉セメントコンクリートの中性化評価に関する実験的研究

林 瑞紀^{*1}・兼松 学^{*2}・百瀬 晴基^{*3}・白石 聖^{*4}

要旨：本研究では、高炉セメントを使用したコンクリートの中性化抵抗性の評価を目的とし、特に、構造体コンクリートとテストピースの相違および促進中性化試験と曝露試験の違いを明らかにすることを目的とした一連の実験的検討を行った。中性化促進試験および曝露試験ならびに実大曝露模擬試験を行い、中性化抵抗性に及ぼす各種要因について、2年目までの実験結果について検討を行った結果、いずれの水準においても高炉セメントを用いたコンクリートのほうが普通コンクリートと比べて中性化速度係数は大きくなったが、その差は初期養生条件や曝露環境の乾燥環境の差に比して小さい結果となった。

キーワード：高炉セメント、中性化速度係数、圧縮強度、初期養生条件、環境条件

1. はじめに

建築分野において副産物である高炉スラグ微粉末を使用した高炉セメントは、CO₂排出抑制効果、石灰石資源の節約、省エネルギー効果などの観点からその有効利用が古くから模索されてきた。国や地方自治体でも、グリーン購入法の指定やCASBEEでの加点点など利用拡大が促進されている。近年では、また、都市の低炭素化の促進に関する法律(平成24年施行 通称：エコまち法)のなかで、建築物の低炭素化の促進のために誘導すべきその他の基準(経済産業省・国土交通省・環境省告示第119号)としてフライアッシュセメントとともに高炉セメントもその主要構造体への利用が謳われるなど、今後具体の利用に向けた技術情報の集約が望まれている。

一般に、高炉セメントは、普通ポルトランドセメントに比べてCa(OH)₂生成量が少ないことに起因して、同一水セメント比で比較した場合には中性化速度は大きくなるとされている。また、高炉セメントを用いたコンクリートの中性化抑制効果は、高濃度のCO₂環境下で行う促進中性化試験においては悪く出る場合があることも指摘されており、実環境下における中性化の予測に促進中性化試験の評価をそのまま用いることにはなお慎重にならざるを得ない。このことは、促進環境においてはCaCO₃の生成形態が異なることが報告¹⁾されていることから、促進中性化試験の劣化促進メカニズムが構造物の通常使用環境下の劣化メカニズムと異なる可能性があること示唆している。

一方で、実構造物あるいは実大曝露試験などの構造体コンクリートにおいては、同等の中性化深さとなるとの報告も散見される^{2),3)}。特に、40年に及ぶ実曝露試験に基づき高炉セメントと普通ポルトランドセメントの中性

化が同程度となること実験的に示している依田らの一連の研究^{2)ほか)}のもつ意義は大きい。しかしながら、実構造物の中性化調査は、調査部位の正確な調(配)合や当初の品質が不明瞭な場合が多く、同品質であっても曝露環境の影響を受けて結果が大きくばらつくことから、建築物の上部構造の耐久性評価の精度向上にはさらなる情報蓄積が必要と考える。

このような背景から、高炉セメントを用いたコンクリートの実環境における中性化特性を明確にするには、促進中性化試験と実曝露環境下にある構造体コンクリートの違いを適切に検証することが必要不可欠と考え、これらを明らかにすることを目的とした一連の実験的検討を行った。特に、高炉セメントの品質は養生の影響を強く受けることが指摘されている⁴⁾ことから、調(配)合に加えて初期養生条件(温度・脱枠時期)を水準とし、標準水中養生試験体と構造体コンクリート、促進試験と曝露試験ならびに実大曝露模擬試験、材齢圧縮強度と28日圧縮強度といった観点から多角的に検証を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料・調合・水準

試験体の調合およびフレッシュコンクリートの性状を表-1に、使用材料を表-2に示す。また、試験体屋外曝露状況を写真-1に示す。

セメントは、普通ポルトランドセメント(以下、普通セメントと表記する)と高炉セメントB種の2種類とし、水セメント比は45, 55および65%の3水準とした。BAは高炉セメントA種相当の置換率(20%)となることを目標に普通セメントと高炉セメントを混合した。

シリーズVの柱模擬試験体(600×600×900mm) 下面

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻

(正会員)

*2 東京理科大学 理工学部 准教授 博士(工学)

(正会員)

*3 鹿島建設技術研究所 建築生産グループ 主任研究員 博士(工学)

(正会員)

*4 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻

(学生会員)

表-1 試験体の調合およびフレッシュコンクリートの性状

記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)								AE減水剤 (C×%)	高性能AE減水剤 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
		水	普通セメント	高炉セメントB種	(S1)	(S2)	(G1)	(G2)	(G3)					
N45	45	175	389	—	546	234	288	384	288	—	1.10%	18.0	5.1	33.5
N55	55	175	319	—	603	258	281	374	281	—	1.20%	18.5	6.0	34.1
N65	65	184	284	—	617	264	276	368	276	0.95%	—	17.0	3.9	33.9
BB45	45	175	—	389	537	230	288	384	288	—	1.00%	20.5	5.2	25.6
BB55	55	175	—	319	595	255	281	374	281	—	1.10%	18.5	4.3	25.8
BB65	65	184	—	284	612	262	276	368	276	0.85%	—	20.0	4.1	25.2
BA55	55	175	160	159	598	257	281	374	281	—	1.10%	19.0	4.7	27.1



写真-1 試験体屋外曝露状況

から 300mm の高さにおいて、かぶり厚さが 10, 20, 30 および 40mm となるように鉄筋を配置して打設した。

現時点で得られた材齢 2 年までの試験体養生方法の概要を表-3 に、圧縮強度、中性化深さの測定材齢を表-4 に示す。ここで、曝露環境はシリーズⅠ・Ⅱは促進中性化環境、シリーズⅢは屋内曝露環境、シリーズⅣ・Ⅴは屋外曝露環境である。

また、高炉セメントの品質確保のためには、適切な養生期間の確保が重要であることから、初期養生条件の影響を検討するため、材齢 1, 5, 10 日脱型の水準に加え、28 日まで水中養生の 4 水準を設けた。

2.2 測定項目

2.2.1 中性化深さの測定

中性化深さの測定は JIS A 1152 に従った。シリーズⅠからⅣは、所定の養生後、試験体の打ち込み面と底面を材齢 7 週にシールした φ10cm の試験体を所定の材齢で約 5cm の厚さで割裂して、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して呈色しない部分を中性化深さとして測定を行った。材齢につき試験体は 2 本として中性化深さを平均した。

また、シリーズⅤは、所定の材齢で柱模擬試験体側面部から φ10×200mm のコアを湿式で採取して中性化深さを測定した。すべて材齢につき試験体は各方位 2 本ずつ 8 本とし、方位による傾向がみられなかったため、8 本の中性化深さを平均した。

表-2 使用材料

項目	材料	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
	高炉セメントB種	3.04
細骨材	砕砂 (S1)	2.62
	山砂 (S2)	2.56
	砕石 (G1)	2.65
粗骨材	砕石 (G2)	2.70
	砕石 (G3)	2.71
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物	—
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル	—

表-3 材齢 2 年までの試験体養生方法の概要

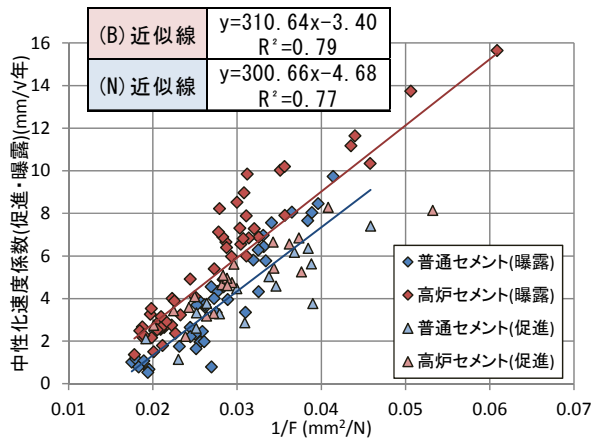
シリーズ	記号	1日	5日	10日	28日	56日	91日	0.5年	1年	2年
Ⅰ 促56	(W)	脱型	20°C水中	20°C60%気中						
Ⅱ 促1Y	(W)	脱型	20°C水中	20°C RH60%気中						
	(1)	脱型	20°C RH60%気中							
	(5)	20°C封	脱型	20°C RH60%気中						
	(10)	20°C封	脱型	20°C RH60%気中						
Ⅲ 屋内	(W)	脱型	20°C水中	屋内曝露						
	(1)	脱型	屋内曝露							
	(5)	20°C封	脱型	屋内曝露						
	(10)	20°C封	脱型	屋内曝露						
Ⅳ 屋外	(W)	脱型	20°C水中	屋外曝露						
	(1)	脱型	屋外曝露							
	(5)	20°C封	脱型	屋外曝露						
	(10)	20°C封	脱型	屋外曝露						
Ⅴ 柱 促2Y	(5)	20°C封	脱型	屋外曝露						

表-4 測定材齢

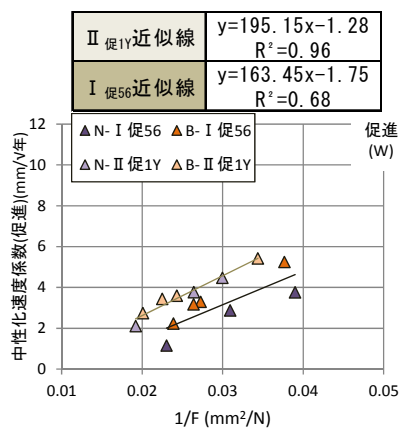
シリーズ	強度測定	促進開始	中性化深さ測定
Ⅰ 促56	28日, 56日	56日	1, 4, 8, 13, 26週
Ⅱ 促1Y	1年	1年	1, 4, 8, 13, 26週
Ⅲ 屋内	91日, 2年	—	0.5, 1, 2年
Ⅳ 屋外	91日, 2年	—	0.5, 1, 2年
Ⅴ 促2Y	0.5, 1, 2年	2年	所定材齢
Ⅴ 柱	—	—	0.5, 1, 2年

2.2.2 曝露中性化速度係数

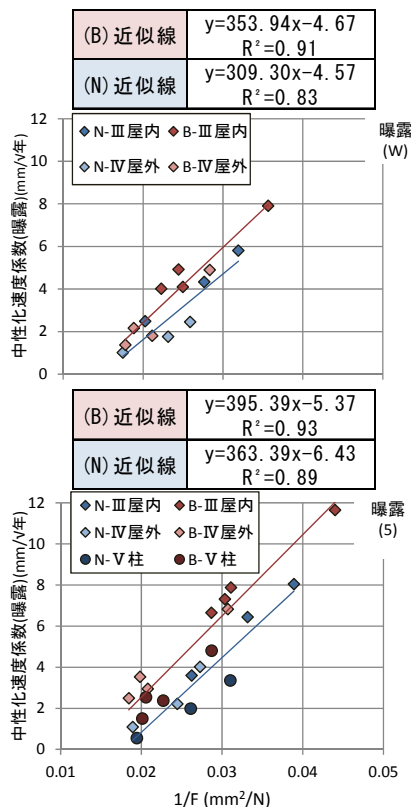
シリーズⅢ, Ⅳ, Ⅴを以下, Ⅲ_{屋内}, Ⅳ_{屋外}, Ⅴ_柱と表記する。曝露試験体の中性化速度係数は、中性化深さは時間の平方根に比例するという、セメント種類、調合、気温、湿度、CO₂濃度等の影響を含んだ速度式 $\sqrt{t}$ 則を仮定した。得られたコンクリート表面からの中性化深さと所



図－1 1/F と中性化速度係数(促進・曝露)の関係



図－2 1/F₅₆, 1Y と中性化速度係数(促進)の関係



図－3 1/F_{2Y} と中性化速度係数(曝露)の関係

定の材齢(半年、1年、2年)の平方根の関係を直線回帰し、中性化速度係数を算出した。なお、材齢と中性化速度係数の関係は原点を通るものと仮定した。曝露の場合の中性化速度係数を中性化速度係数(曝露)と示す。

曝露環境の CO₂ 濃度計による CO₂ 濃度実測値は、Ⅲ_屋内は 408.6ppm、Ⅳ_屋外、Ⅴ_柱は 412.1ppm とほぼ同等であった。すなわち、屋内外の環境の違いは、雨がかりおよび日射の有無による。また、屋内外の曝露環境の CO₂ 濃度による補正は行わなかった。

2.2.3 促進中性化速度係数

シリーズⅠは、JIS A 1153 に従い温度 20℃、湿度 60% RH、CO₂ 濃度 5%で材齢 56 日より促進を開始した。一方、シリーズⅡは、シリーズⅠと同様に所定の養生後、材齢 1 年より促進中性化養生を開始した。以下、Ⅰ_{促56}、Ⅱ_{促1Y}と表記する。また、シリーズⅤは JIS A 1153 に準じて、材齢 2 年のコアの中性化促進養生を開始し、コア側面からの中性化深さを所定の材齢で割裂またはカットにより測定した。以下、Ⅴ_{促2Y}と表記する。

中性化速度係数は曝露試験体と同様に、促進材齢のコンクリート表面からの中性化深さと材齢の平方根の関係を原点を通る直線となると仮定して直線回帰し、中性化速度係数を算出した。

促進試験体の中性化速度係数は、促進試験環境下において中性化速度は CO₂ 濃度の平方根に比例するとされており、中性化速度係数は CO₂ 濃度で中性化速度式(1)⁵⁾により補正し、屋外曝露で得られた中性化速度係数と比較した。

$$A_{CO_2} = \sqrt{CO_2 / 5.0} \quad (1)$$

ここで、A_{CO₂}は CO₂ 濃度 5%の場合に対する中性化速度係数の比、CO₂は CO₂ 濃度(実測に基づき屋外 0.041%)である。促進の場合の中性化速度係数を中性化速度係数(促進)と示す。

2.2.4 圧縮強度試験

JIS A 1108 に従い、所定の材齢時に圧縮強度試験を行った。上面仕上げおよびコア両端面の仕上げは、湿式で研磨またはカットを行い 1 日乾燥の後に試験を実施した。高さと直径の比が 1.90 より小さい場合は、補正を行った。なお、圧縮強度試験の材齢は促進中性化養生の場合、促進開始材齢 56 日(Ⅰ_{促56})および 1 年(Ⅱ_{促1年})で行い、それぞれ材齢圧縮強度を F₅₆、F_{1Y}と表記する。また、曝露試験の場合は、材齢 91 日(Ⅲ_屋内、Ⅳ_屋外)および材齢 2 年(Ⅲ_屋内、Ⅳ_屋外、Ⅴ_柱)の材齢圧縮強度を F₉₁、F_{2Y}と表記する。

3. 材齢 2 年までの実験結果と考察

3.1 材齢圧縮強度と中性化速度係数

各材齢の圧縮強度の逆数と中性化速度係数(促進・曝露)の関係⁶⁾について、すべての曝露環境(促進・曝露)、およびすべての水準の初期養生条件の測定結果を図－1 に示す。

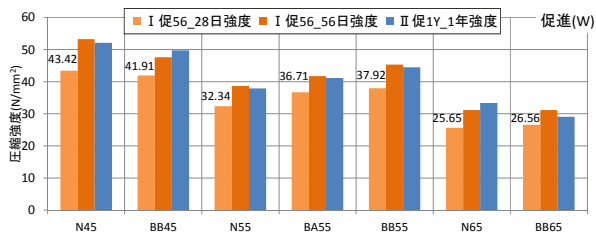


図-4 促進(W), 28, 56 日および 1 年強度

表-5 中性化速度係数比

初期養生：(W)を1とした場合の(1)の比、

セメント種類：Nを1とした場合のBB, BAの比

初期養生	Ⅲ _{屋内}	Ⅳ _{屋外}	初期養生	Ⅲ _{屋内}	Ⅳ _{屋外}	セメント種類	Ⅲ _{屋内}	Ⅳ _{屋外}	Ⅲ _{屋内} (W)	Ⅳ _{屋外} (W)
N45	1.84	0.78	BB45	2.46	1.93	45	1.62	1.35		
—	—	—	BA55	2.45	1.80	55(BA)	0.94	1.03		
N55	1.74	1.33	BB55	2.07	1.79	55	1.13	1.24		
N65	1.68	1.76	BB65	1.98	1.46	65	1.36	1.99		

促進中性化養生は、 F_{56} , F_{1Y} , 曝露試験は、 F_{2Y} とした。セメント種類、養生条件に関わらず、圧縮強度の逆数と中性化速度係数(促進・曝露)の関係は線形関係にあり強度が大きくなると中性化速度は小さくなった。しかし、セメント種類別に評価すると、より強い相関が認められた。また、同一強度で比較した場合、すべてのシリーズで普通セメントは高炉セメントより、中性化速度係数(促進・曝露)は小さく、中性化抵抗性が優位である。

促進中性化環境の標準水中養生 28 日(W)の F_{56} , F_{1Y} の逆数と中性化速度係数(促進)の関係を図-2 に示す。

Ⅱ_{促1Y} の場合はセメントの種類に関わらず線形関係を示したが、Ⅰ_{促56} の場合は相関が低く、促進開始材齢により強度と中性化速度の関係は一意ではない結果となった。また、同一強度で比較した場合、Ⅱ_{促1Y} はⅠ_{促56} より中性化速度係数は、大きい結果となった。これは、Ⅱ_{促1Y} の 1 年間の気中養生により試験体の乾燥が促進され、中性化抵抗性が下がったものと考えられる。

また、Ⅰ_{促56} からⅡ_{促1Y} への中性化速度係数(促進)の増大傾向は、普通セメントより高炉セメントのほうが小さい結果となった。これは、乾燥に伴い中性化は進展するが、図-4 に示すように強度の増進に伴い細孔構造が緻密化し炭酸ガスの浸透を抑制するという長期の強度発現と試験体の乾燥の相反する要因の影響によるものと考えられるが、相対的には高炉セメントのほうが長期材齢で乾燥に伴い中性化抑制効果が落ちずに中性化抑制効果が改善している結果であると言える。

曝露環境の場合の初期養生条件が標準水中養生 28 日(W)と 20℃封緘 5 日脱型後気中養生(5)の F_{2Y} の逆数と中性化速度係数(曝露)の関係を図-3 に示す。

曝露環境の場合は、セメントの種類、養生条件に関わらず F_{2Y} の逆数と中性化速度係数(曝露)の関係は線形関係を有し、セメント種類別に評価すると、より強い相関

が認められた。また、20℃封緘 5 日脱型後気中養生(5)より標準水中養生 28 日(W)は、 F_{2Y} は大きく中性化速度係数(曝露)は小さい結果となり、初期養生条件が中性化の速度に影響を及ぼすことが示された。

また、Ⅲ_{屋内} よりⅣ_{屋外} の方が F_{2Y} は大きく、中性化速度係数(曝露)は小さい結果となった。これは、主に屋外曝露環境下では雨水の供給を受け含水率を高め強度増進し、中性化を抑制したと考えられる。Ⅲ_{屋内} の F_{2Y} の増進がみられなかった要因として、雨水の供給がないためⅣ_{屋外} と比べて乾燥が進んだと考えられる。

一方、Ⅴ_柱 は、Ⅳ_{屋外} より F_{2Y} は小さく中性化速度係数(曝露)は小さい結果となった。これは、コア試験体はシリンダーと比べ試験体表面の水が逸散しにくいことにより、表面の含水率を高め CO_2 の侵入を抑制したと考えられ試験体形状が中性化の速度に影響を及ぼすことが示された。

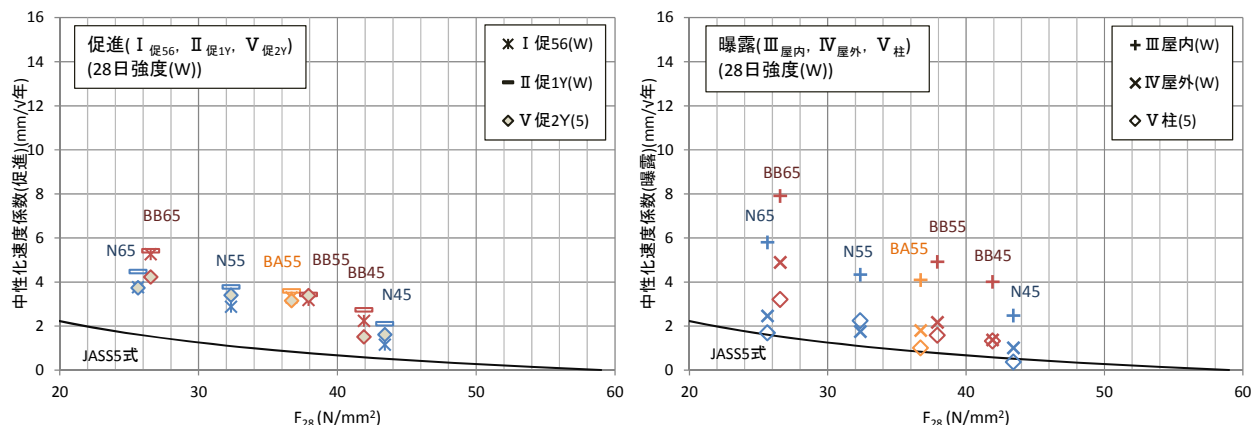
また、表-5 に示すように、Ⅲ_{屋内} はⅣ_{屋外} より、標準水中養生 28 日(W)と 1 日脱型(1)の中性化速度係数の差はセメント種類の差とより大きい結果となった。雨水の供給のない屋内曝露環境の乾燥の影響を普通セメント、高炉セメントともに受け、特に高炉セメントは初期養生条件生条件の影響が大きい結果となった。

3.2 水セメント比・養生条件ごとの材齢圧縮強度と中性化速度係数(促進と曝露)

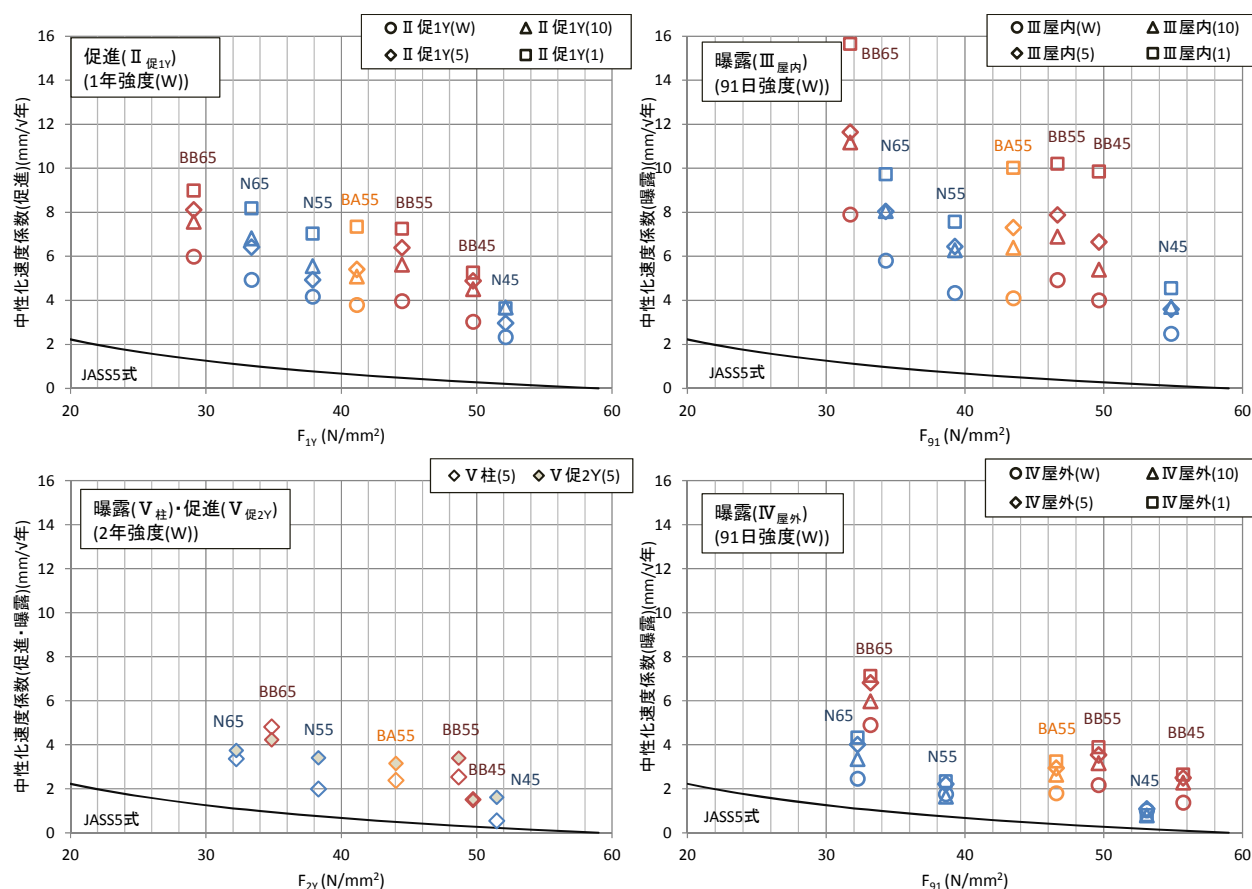
図-5 に水セメント比・養生条件ごとに促進中性化環境下、曝露環境下の標準水中養生 28 日圧縮強度と中性化速度係数(促進)および中性化速度係数(曝露)の関係を示す。また、参考として日本建築学会標準仕様書 コンクリート工事(JASS5)に示される JASS5 (長谷川) 式を示す。本式は、普通セメントコンクリートの屋外曝露試験のデータに基づいた式であり、供用期間は 15 年、地域は北海道、水セメント比は 55%、養生方法は 14 日 20℃水中養生、試験体形状は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ が多数であり、標準水中養生 28 日圧縮強度を指標としたものである⁷⁾。

標準水中養生 28 日強度の場合、水セメント比 55%、65%において圧縮強度は、高炉セメントが普通セメントより大きい、中性化速度係数(促進)および中性化速度係数(曝露)とも、普通セメントは高炉セメントより小さい結果となった。これに対し、水セメント比 45%の場合は、高炉セメントよりも普通セメントのほうが強度は大きく中性化速度は小さくなる傾向となった。

また、材齢 2 年のコアの促進中性化試験の場合、Ⅴ_{促2Y} の中性化速度係数は、Ⅴ_{促2Y} の型枠存置期間がⅠ_{促56}, Ⅱ_{促1Y} より短いにも関わらずⅡ_{促1Y} より小さく、Ⅰ_{促56} に近い値を示した。これは、Ⅱ_{促1Y} およびⅠ_{促56} の試験体が雨がかりの無い気中環境で乾燥が進んだのに対し、Ⅴ_{促2Y} は雨がかりのある環境下で供用されたため、相対的に乾燥が抑えられたことに起因すると考えられる。



図－5 水セメント比・養生条件別の 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係(促進と曝露)



図－6 水セメント比・養生条件別の材齢圧縮強度と中性化速度係数(促進と曝露)の関係

なお、曝露環境の場合も、 $V_{柱}$ は $IV_{屋内}$ の結果と近い値を示し、中性化速度係数(促進)より小さい結果となった。

図－6 に水セメント比・養生条件ごとの、各シリーズの材齢圧縮強度と中性化速度係数(促進と曝露)の関係を示す。圧縮強度の材齢は、材齢圧縮強度すなわち、 $II_{促1Y}$ は F_{1Y} 、 $III_{屋内}$ 、 $IV_{屋外}$ は F_{91} 、 $V_{柱}$ 、 $V_{促2Y}$ は F_{2Y} で示した。

初期養生条件別に比較すると、促進環境、曝露環境に関わらず、型枠存置期間が長いほど中性化速度係数(促進)および中性化速度係数(曝露)とも、小さい結果となり初期養生条件の影響は大きい結果となった。

$III_{屋内}$ の場合、標準水中養生 28 日(W)と 20℃封蔵 1 日脱型後気中養生(1)の中性化速度係数の差は大きく、水セ

メント比が大きいほどその傾向がみられた。普通セメント、高炉セメントともに雨水の供給のない屋内曝露環境の乾燥の影響を受けており、また、特に高炉セメントは初期養生条件と調合の影響が大きい結果となった。

また、図－5 に示した $V_{促2Y}$ に対する、中性化速度係数は、促進期間 14～17 週までの結果であるが、 CO_2 濃度補正後の $V_{促2Y}$ は $V_{柱}$ より中性化速度係数は上回るのに対し、 $V_{促2Y}$ は、等水セメント比では普通セメントと高炉セメントがほぼ同程度の値を示した。また、普通セメント、高炉セメントともに中性化速度係数が JASS5 式より大きくとなった理由として、中性化は材齢初期に急速に進み、長期になるほど速度は緩やかになることから、

材齢 2 年では、十分に強度発現しているものの、中性化速度が大きく評価されたためであると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) セメント種類、養生条件に関わらず、材齢圧縮強度の逆数と中性化速度係数(促進・曝露)の関係の線形関係にある。また、同一強度で比較した場合、すべてのシリーズで普通セメントは高炉セメントより、中性化速度係数が小さい結果となった。

(2) 促進環境において、材齢 56 日 ($I_{促56}$) から材齢 1 年 ($II_{促1Y}$) への中性化速度係数の増大傾向は、高炉セメントが普通セメントより小さい結果となった。長期の強度発現と試験体の乾燥の相反する要因の影響によるものと考えられるが、相対的には、高炉セメントのほうが長期材齢で中性化抑制効果が改善している(乾燥に伴い中性化抑制効果が落ちない)結果となった。

(3) 初期養生条件、型枠存置期間が中性化の速度に影響を及ぼすことが確認された。

(4) 雨がかりのある環境下で供用された構造物の材齢 2 年コアの促進試験結果の場合、促進環境における標準水中養生 28 日の $I_{促56}$ の結果と同等の評価ができるといえる。曝露環境の場合も、 $V_{柱}$ は $IV_{屋内}$ の結果と近い値を示し中性化速度係数(促進)より小さい結果となった。

(5) $III_{屋内}$ の場合、普通セメント、高炉セメントともに雨水の供給のない屋内曝露環境の乾燥の影響を受けており、特に高炉セメントは初期養生条件と調合の影響が大きい結果となった。

(6) $V_{促2Y}$ は $V_{柱}$ より中性化速度係数は上回るのに対し、 $V_{促2Y}$ は、等水セメント比では普通セメントと高炉セメ

ントがほぼ同程度の値を示した。

材齢 2 年では、十分に強度発現しているものの、中性化速度が大きく評価されたためであると考えられる。

本稿で報告した内容は、実曝露が 2 年と短く、今後長期にわたる試験結果による分析が必要である。今後も継続して検討を進めたい。

参考文献

- 1) 豊村 恵理, 伊代田 岳史: 異なる二酸化炭素濃度環境下における炭酸化メカニズムに関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.769-774, 2013
- 2) 依田彰彦: 40 年自然曝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.56, pp.449-454, 2002
- 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) 伊代田 岳史, 檀康弘, 川端 雄一郎, 濱田 秀則: 高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.111-116, 2008
- 5) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 日本建築学会, 2004
- 6) 和泉意登志他: コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調査, および養生条件の影響について, 第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.117-120, 1985
- 7) 長谷川拓哉, 千歩修: 文献調査に基づく屋外の中性化進行予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.665-670, 2006