

論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化評価に関する研究

加古 裕之*1・土屋 直子*2・Sungchul Bae*3・兼松 学*4

要旨：本研究では、養生水準およびスラグ置換率の異なる高炉コンクリートの中性化効果について、構造体コンクリートを模擬した試験体と角柱および円柱試験体を用い、主として促進中性化試験により評価を行った。その結果、C種相当のコンクリートについても、一定の圧縮強度を確保することにより中性化抵抗性を確保できること、夏季、冬季に打込みする際は水和進行に伴う中性化抵抗性の変化は普通コンクリートに比して小さいこと、脱型日が3日以降であれば、中性化速度係数に大きく影響しないこととの結果を得た。

キーワード：高炉セメント、中性化速度係数、圧縮強度、養生条件、構造体コンクリート

1. はじめに

我が国における温室効果ガスの総排出量のうち、約4%に相当するCO₂をセメント産業が排出しており、2020年温室効果ガス削減目標に対応した温暖化対策として、非エネルギー起源の二酸化炭素を削減する施策として、各種の工業副産物や再生材料を混和材料に用いた混合セメントの利用拡大が織り込まれている。こうした中で、混合セメントの一種である高炉セメントについて、建築分野においても、躯体製作の低炭素化を図るため利用促進が望まれており、使用拡大の余地とその意義は大きい。

しかしながら、副産材料や再生材料を使用したコンクリートは一般のコンクリートに比して中性化抵抗性が低いとされており、旧来より建築学会指針等に高炉スラグ微粉末の品質基準や使用基準が定められているが建築物への適用は進んでいない。

高炉セメントを用いたコンクリートの中性化抵抗性については、これまでに多くの研究がなされており、普通コンクリートと同一強度であれば、その中性化速度係数は同等であるとすることや、中性化促進試験では普通コンクリートに対して中性化の進行が著しく速く評価されること、高炉セメントを用いたコンクリートは初期の養生に強く影響を受けることなどが指摘されている¹⁻⁵⁾。しかしながら、既往の研究の多くは実構造物とは条件が異なるテストピースを試験体として用いたものであり、実構造体コンクリート、または、これを模擬した実大試験体を用いた研究は少ない。また、A種、C種の高炉セメントを用いた高炉コンクリートの知見が少ないことも現状である。

そこで本研究では、各種高炉セメントを用いたコンクリートの中性化特性の評価を目的とし、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換することで

高炉セメントに代え作製した高炉コンクリートと普通コンクリートについて、スラグ置換率、打込み時期、初期養生条件が異なる試験体の他、構造体コンクリートを模擬した試験体を作製し、中性化速度係数などの評価を行うことで、包括的な検討を行った。

2. 研究概要

2.1 試験体概要

(1) 材料・調合

使用するコンクリートはプラント練りのレディーミクスドコンクリートとし、時期による差を考慮し、冬季(2月)、標準期(5月)、夏季(8月)それぞれに打込みを行った。使用骨材の主要項目を表-1に、冬季、標準期、夏季打込み試験体の調合表の主な項目を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、高炉セメントA種(20%)、B種(45%)、C種(65%)相当となるよう普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換した。また比較のため高炉スラグによる置換を行わない水準(N)を設けた。

各セメント種において水結合材比は55%を標準とし、C種相当の試験体については今後の利用拡大を考慮して、水結合材比を3水準(55%、48%、38%)とした。

(2) 試験体作製方法および養生方法

冬季(2月)、標準期(5月)、夏季(8月)それぞれの打込み時期において、乾燥条件が最も厳しい部材である壁、並びに構造体コンクリートを想定した試験体を作製した。

壁を想定した試験体は、φ100×200mmの鋼製モールドを使用し、打込み締め後、鋼板およびビニルシートとビニルテープにて封緘し、ただちに横置きして20℃の屋内に静置した。以降に示す中性化試験に備え、脱型後、

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 博(工) (正会員)

*3 漢陽大学 工学大学 建築工学部 助教 博(工) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部 准教授 博(工) (正会員)

円断面を中性化暴露面とし、円柱側面をシーリングして各種養生を行った。シーリングはエポキシ樹脂またはアルミテープによった。脱型後、JIS A 1153 に準拠して材齢 56 日まで 20°C60%RH の標準気中養生とした。材齢は打込み後の日数とする。なお、試験体数の確保のため、材齢 28 日から 56 日の間に試験体を φ100×100mm に分割した。以降、当該試験体をシリンダーと称する。また、以降全ての試験体について冬季、標準期、夏季の各打込み時期の差異を述べる場合、試験体名の前半に打込み時期を記す(例:夏季シリンダー)。

夏季シリンダーのみ、養生方法が高炉セメントを用いたコンクリートの中性化特性に及ぼす影響を明らかにするため、日本建築学会の JASS5⁶⁾ に規定される養生期間である 3 日、5 日、7 日、10 日を脱型水準とした。また、脱型後から材齢 28 日までの養生方法を標準水中(20°C水中)養生(W)、標準気中(20°C60%RH)養生(S)、屋内養生(I)、屋外養生(O)の4種用意した。

表-1 骨材主要項目

	砂	砕砂	砕石
最大寸法(mm)	-	-	20.0
粗粒率	2.10	3.40	-
絶乾密度(g/cm ³)	2.54	2.61	2.68
実積率(%)	-	-	60.0

以降、この養生別における差異を述べる場合、試験体名前半に養生種を記す(例:標準水中養生シリンダー)。

また、夏季シリンダーについては養生期間を1年間としたシリーズも別途設けた。以下、1年シリンダーと記す。夏季打込みの試験体について、養生スケジュールを表-3に示す。これに加え比較のため、夏季打込み試験体作成時に JIS A 1153 に準拠した試験体寸法 100×100×400mm の試験体を用い、標準水中養生(W)に合わせた試験水準を作製した。以降、当該試験体を JIS 試験体と称する。

構造体コンクリートを想定した試験体は、試験体寸法 600×600×900mm の実大柱模擬試験体を作製し、打込みから 3、5 日で脱型した後、直径 φ80mm のコアを長さにして 100~200mm の範囲で採取した。その後 JIS A 1153 に従い材齢 56 日まで気中養生し、上記同様のシーリング後、促進中性化試験を実施した。コア採取位置は試験体を長手方向に立て、実大柱模擬試験体の上部中央及び側面からとした。以降、各採取位置より採取した試験体をそれぞれ柱中央コア、柱サイドコアと記す。また、冬季、標準期打込み試験体の柱中央コアについてはコア採取までの期間を 91 日間としたシリーズも別途設けた。以降これを 91d 柱中央コアと記す。

表-2 調合表主要項目

記号	高炉スラグ置換率(%)	水結合材比(%)	細骨材率(%)			単位水量(kg/m ³)			Air(%)		
			冬季	標準期	夏季	冬季	標準期	夏季	冬季	標準期	夏季
N55	0	55	47.1	46.5	45.9	174	179	184	5.5	4.5	4.7
BA55	20	55	48.1	47.6	47.2	172	176	180	5	4.5	5
BB55	45	55	48.2	47.8	47.6	170	173	175	4.5	4.5	4.6
BC55	65	55	48.1	47.6	47.1	159	163	167	4.5	4.5	5
BC48	65	48	46.5	45.8	45.3	162	167	171	4.4	4.5	4
BC38	65	38	41.2	40.6	39.8	174	178	182	4.3	-	4.8

表-3 夏季打込み試験体養生スケジュール

脱型日数	養生方法	材齢 0 日	材齢 3 日まで	材齢 5 日まで	材齢 7 日まで	材齢 10 日まで	材齢 28 まで	材齢 56 日目	材齢 84 日目	材齢 112 日目	材齢 147 日目	材齢 238 日目	
							材齢 1 年まで	材齢 1 年 +28 日目	材齢 1 年 +56 日目	材齢 1 年 +84 日目	材齢 1 年 +119 日目	材齢 1 年 +210 日目	
3	W	打込み	脱型	標準水中養生				標準気中	中性化促進 4 週目測定	促進 8 週目測定	促進 13 週目測定	促進 26 週目測定	
5	S		20°C封緘	脱型	標準気中養生								
	I				屋内養生								
	O				屋外養生								
7	S		20°C封緘	脱型	標準気中養生								
	I				屋内養生								
	O				屋外養生								
10	S		20°C封緘	脱型	標準気中養生								
	I				屋内養生								
	O				屋外養生								

表-4 各材齢における圧縮強度

冬季	材齢(日)			
	7	28	56	91
N55	27	34	38	36
BA55	31	43	46	48
BB55	31	43	45	48
BC55	27	37	38	42
BC48	31	42	43	48
BC38	39	50	51	55
標準期	材齢(日)			
	7	28	56	91
N55	31	38	40	43
BA55	26	36	38	41
BB55	29	39	39	43
BC55	26	34	36	38
BC48	34	42	44	47
BC38	43	49	51	54
夏季	材齢(日)			
	7	28	56	91
N55	28	35	37	38
BA55	28	37	40	42
BB55	24	33	35	39
BC55	22	29	31	33
BC48	27	37	38	41
BC38	38	50	50	53

(N/mm²)

表-5 材齢 28 日の圧縮強度を 100 とした強度比

冬季	材齢(日)			
	7	28	56	91
N55	78	100	112	105
BA55	72	100	107	113
BB55	72	100	104	111
BC55	72	100	102	112
BC48	73	100	101	113
BC38	79	100	102	111
標準期	材齢(日)			
	7	28	56	91
N55	81	100	105	111
BA55	74	100	106	116
BB55	75	100	101	112
BC55	76	100	106	111
BC48	82	100	106	112
BC38	87	100	104	111
夏季	材齢(日)			
	7	28	56	91
N55	80	100	108	111
BA55	74	100	109	114
BB55	75	100	107	118
BC55	78	100	106	114
BC48	73	100	103	111
BC38	76	100	101	106

(%)

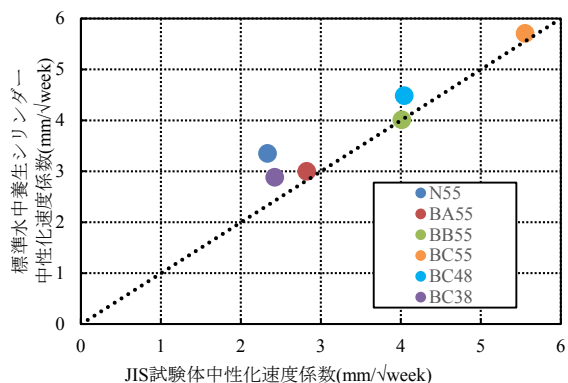


図-1 JIS 試験体と夏季標準水中養生シリンダーの中性化速度係

2.2 試験項目

各試験体において、中性化特性の評価を目的に促進中性化試験、所定材齢における圧縮強度試験を行い、各種条件の試験体に対し、どのように影響を与えるかを検証した。

2.3 試験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度の試験方法は各試験体と同条件で作製したφ100×200mmの圧縮試験体を用い、JIS A 1108に準拠して行った。ただし圧縮試験体の養生方法は標準水中養生のみとし、脱型時、材齢7、28、56、91日において圧縮強度を測定した。

(2) 中性化促進試験

試験体を所定の養生を施した後、中性化促進試験はJIS A 1153に準拠し、20℃、60%RH、二酸化炭素濃度5%の環境下にて静置し、4、8、13、26週目にて中性化深さの測定を行った。中性化深さの測定は、各測定材齢時に試験体をアムスラーにて割裂し、断面に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、デジタルノギスにて測定を行った。

中性化速度係数は、中性化促進試験より得られたすべての測定材齢の中性化深さを用いて v_t との関係から最小2乗法により求めた。1年試験体については、その促進前養生期間が相対的に長いことから、材齢1年時の中性化深さを中性化促進試験開始時におけるイニシャル値としている。なお、1年試験体ならびに標準期試験体の中性化速度係数については材齢の都合上、中性化促進期間13週までに得られた中性化深さより暫定的に算出している。

3. 実験結果・考察

3.1 圧縮強度と中性化速度係数

標準水中養生シリンダーと同条件で養生した圧縮強度試験体の各材齢(7、28、56、91日)で得られた圧縮強度を表-4に、材齢28日の圧縮強度を基準とした各材齢時の強度比(%)を表-5に示す。

同一水結合材比の試験体に着目した場合、C種相当調合水準の試験体を除き、冬季、夏季打込みの試験体でも標準期打込みの試験体に対して遜色ない強度発現が見られる。

各材齢時の強度比で見ると、普通コンクリート、高炉コンクリートの冬季、夏季打込みの試験体の材齢28日以降から91日までの強度増進について、おおむね全ての水準において、普通コンクリート、高炉コンクリートの別無く冬季打込みの試験体のほうが強度は伸びている。

高炉セメントC種相当の調合水準に着目すると、水結合材比が小さくなるほど打込み時期による強度発現への影響を受けにくいのが分かる。

表-6 夏季打込み試験体圧縮強度

標準水中養生	28日圧縮強度 (N/mm ²)	
	シリンダー	柱中央コア
N55	39.1	24.1
BA55	39.6	30.0
BB55	37.7	31.3
BC55	32.7	32.1
BC48	39.4	37.1
BC38	52.1	40.7

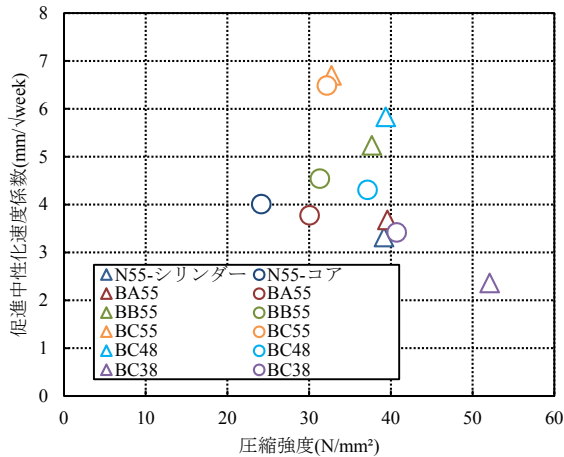


図-2 圧縮強度と中性化速度係数

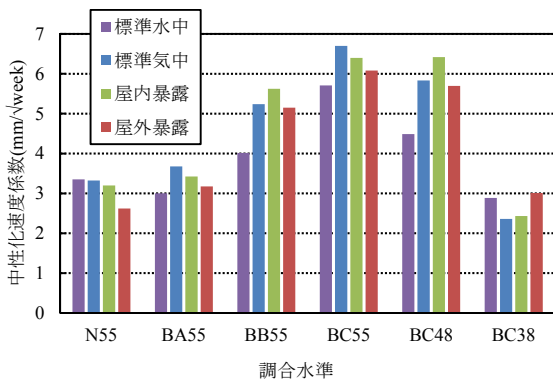


図-3 養生種別と中性化速度係数

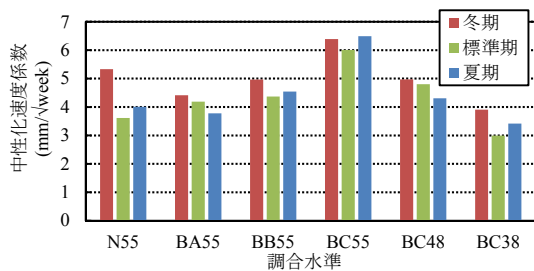


図-4 打込み時期と中性化速度係数

JIS 試験体と夏季標準水中養生シリンダーの中性化速度係数の関係を図-1 に記す。本研究において通常の中性化促進試験と異なり円断面の試験体を用いているが、各条件を揃えた通常の高型試験体とシリンダーの中性化速度係数は N55 を除き近い値を示した。また N55 についてもその中性化速度係数差は大きなものではない。よって本研究では夏季標準水中養生シリンダーの中性化速度係数を JIS 試験体と同様な物とみなす。

夏季シリンダー、並びに夏季柱中央コアと同条件で養生した圧縮強度試験体の 28 日圧縮強度を表-6 に、それぞれ中性化速度係数との関係を図-2 に記す。

柱中央コアはシリンダーに比して全体的に強度が伸びない結果となったが、中性化速度係数にはそれほど大きな差は見られなかった。

シリンダー、柱中央コア共に圧縮強度の上昇に伴い、中性化速度係数はおおむね低下する傾向を示した。既往の研究では同一の置換率および養生方法の場合、水結合材比が大きいものほど、中性化速度係数は大きくなるとされている³⁾。また、同一の水結合材比および養生条件であれば混和材の置換率が大きいものほど中性化速度係数は大きくなるという傾向が指摘されている。夏季打込み試験体に限らず、いずれの打込み時期においてもシリンダー、柱中央コア全てに既往の研究³⁾とおおむね同様の傾向が見られ、水結合材比が大きいものほど中性化速度は大きくなることが確認できた。C 種相当の水準についても強度を高くすることで普通コンクリート相当の中性化抵抗性を担保できると言える。

3.2 養生種別と中性化速度係数

夏季シリンダーの各調合水準と養生条件ごとの全脱型材齢の中性化速度係数の平均値との関係を図-3 に記す。

N55 と BC38 を除くすべての調合水準で、標準水中養生に比し、他の養生条件にて静置した試験体の方が、中性化速度係数が増加しているのが分かる。養生条件により生じた試験体表面の乾燥状態の差によるものであり、既往の研究⁴⁾同様、より湿潤な条件ほど中性化速度係数は低い。屋外養生試験体の中性化速度係数が屋内養生試験体に比べ低い値を示しているが、これは屋外養生試験体については雨がかりによる水分の供給があったためと思われる。

なお、N55 と BC38 において、暴露環境下における中性化速度係数が、標準水中養生の試験体の中性化速度係数より大きくなった点は、本研究の範囲では原因の特定に至らなかった。

3.3 打込み時期と中性化速度係数

柱中央コアの各調合水準、打込み時期ごとの中性化速度係数を図-4 に記す。

冬季打込み試験体の中性化速度係数が若干大きくなる傾向が見られたものの、レディーミクストされた高炉コンクリートに対する、打込み時期の違いによる中性化速度係数への影響について傾向は見られなかった。これはシリンダー、柱サイドコア共に同様であった。

3.4 コア採取材齢と中性化速度係数

それぞれのコア採取材齢の柱中央コアの圧縮強度の変化と中性化速度係数の変化の関係を図-5 に記す。図中

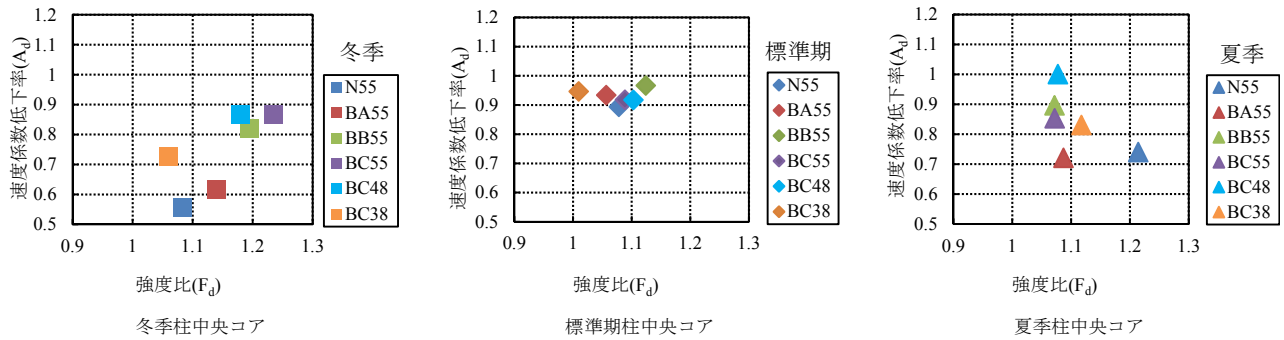


図-5 中性化速度係数比と強度比の関係

の中性化速度係数比（中性化速度係数の変化）と強度比（圧縮強度の変化）は以下の式(1)、式(2)に定義する。

$$A_d = \frac{A_{91}}{A_{28}} \quad (1)$$

$$F_d = \frac{F_{91}}{F_{28}} \quad (2)$$

なお、

A_d ：中性化速度係数比

A_{91} ：91d 柱中央コアの中性化速度係数

A_{28} ：柱中央コアの中性化速度係数

F_d ：強度比

F_{91} ：91d 柱中央コアの圧縮強度

F_{28} ：柱中央コアの圧縮強度

標準期柱中央コアについて、強度比の増加にかかわらず、中性化速度係数比はほぼ一定だが、夏季、冬季試験体については、普通コンクリートに比べ高炉コンクリートは中性化速度係数比が低い。夏季、冬季に打込みする際は、強度増進による中性化抵抗性の向上があまり見込めないことが分かる。

3.5 脱型時期と中性化速度係数

夏季打込みの試験体について脱型時期が中性化抵抗性に及ぼす影響について傾向を分析するため養生条件を区別せずに平均値による傾向分析を行った。そこで本論分では、同一脱型時期における平均値として同水準のその他の養生方法の平均の中性化速度係数を求め、これを一般的な JIS 試験体と同等と見積もれる 3 日脱型の標準水中養生シリンダーの中性化速度係数で除すことで中性化速度係数比 A' を式(3)のように求めた。なお、コア試験体についてはコア試験体の中性化速度係数を同調合の水中養生試験体の中性化速度係数で除した値を中性化速度係数比とする。

$$A' = \frac{A_s + A_i + A_o}{3A_w} \quad (3)$$

なお、

A' ：中性化速度係数比

A_s ：標準気中養生試験体の中性化速度係数

A_i ：屋内養生試験体の中性化速度係数

A_o ：屋外養生試験体の中性化速度係数

A_w ：3 日脱型標準水中養生試験体の中性化速度係数

夏季、1 年シリンダー、夏季柱サイドコアの中性化促進試験における中性化速度係数比と脱型日の関係をそれぞれ図-6 に記す。

夏季シリンダー、夏季柱サイドコア、1 年柱サイドコア試験体について、C 種相当の試験体も含め、脱型日の延伸に伴う中性化速度係数比の低下は大きくは見られなかった。

ここで、1 年シリンダーについて図中のグラフ外形が他と大きく異なり B 種相当コンクリート以外において脱型材齢を伸ばすに従い中性化速度係数比が上昇している。また、BC55、BC38 については中性化速度係数比の値そのものが他水準に比べ大きい。これらについて本研究の範囲では原因の特定に至らなかった。しかし、上昇前後の中性化速度係数比の値の差分は大きな物ではなく、シリンダーのみならず構造体コンクリートを模擬したコア試験体においても脱型時期が 3 日以降であれば、脱型時期が中性化速度係数に与える影響は大きくなかった。

また、既往の研究³⁾より、高炉コンクリートの養生日数と中性化速度係数の関係において、養生日数が延びるに連れ中性化速度係数は低下し、より湿潤な環境に置かれた試験体の値に近付くものの、一定の差が残ることが示唆されており、本研究においても中性化速度係数比が脱型時期を伸ばすに従い下降している試験体に関しても、その値はほぼ一定となることが確認された。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 高炉スラグ置換率の高い構造体コンクリートについても、一定の圧縮強度を確保すること中性化抵抗性を確保できる。
- (2) 打込み時期の違いによる中性化速度係数への影響は大きくはない。
- (3) 普通コンクリートに比べ、夏季、冬季に打込みをす

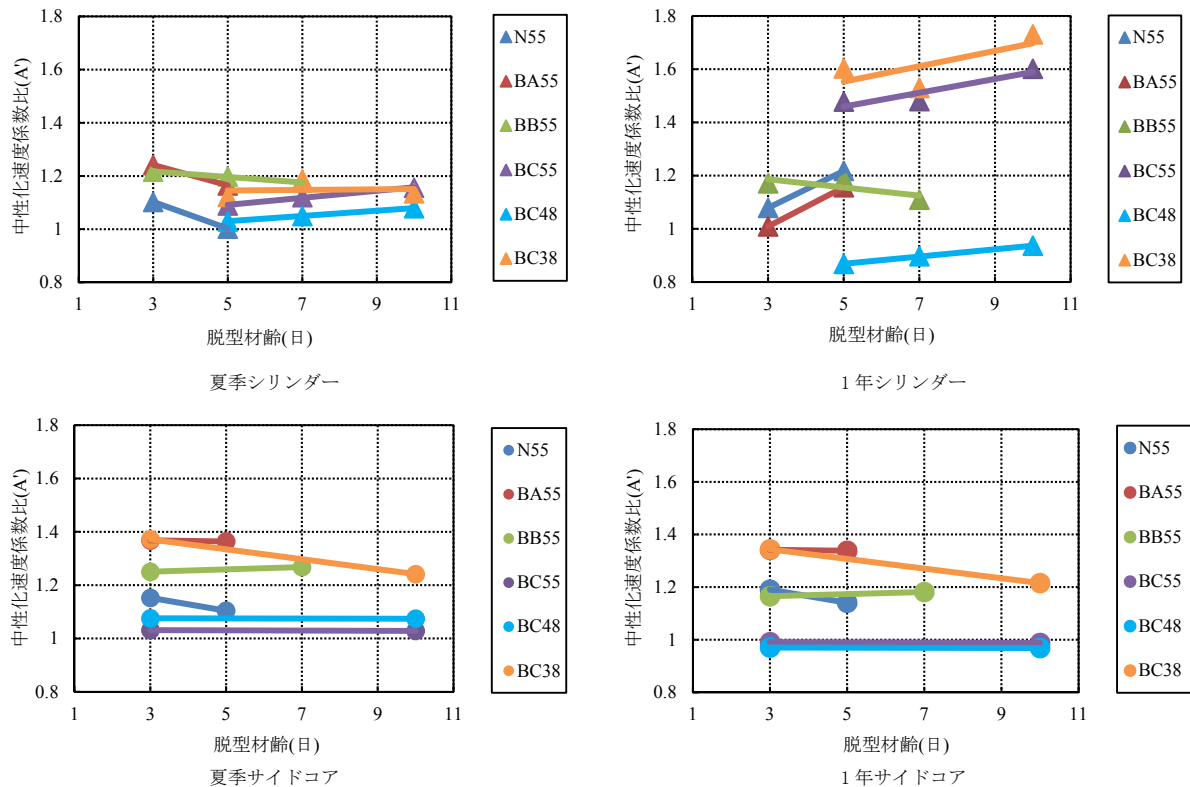


図-6 中性化速度係数比と脱型日

る高炉コンクリートでは、水和進行に伴う中性化抵抗性の向上が大きくない。

- (4) 脱型時期に対する中性化速度係数の感性について、構造コンクリートにおいても脱型日が3日以降であれば、中性化速度係数に大きく影響しない。

謝辞

本研究は、建築振興協会「高炉スラグ微粉末・高炉セメントを使用するコンクリート研究小委員会」の一環として実施した。また、本研究を進めるに当たり、東京都市大学の佐藤幸恵博士、東京理科大学の浅見俊介氏、また(株)東陽コンサルタント様より多大なるご助言、ご助力を頂きましたことを、ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 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, 鉄道総研報告, Vol.34, No.1, pp.118-123, 2012

- 2) 上原元樹, 鶴田孝司, 佐藤隆垣: 実環境を考慮した高炉セメントコンクリートの中性化速度評価, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.11-16, 2015.4
- 3) 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感性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.111-116, 2008
- 4) 林瑞紀, 兼松学, 白瀬晴基, 白石聖: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.856-861, 2014
- 5) 中村英佑, 石井豪, 渡辺博志: 暴露試験と促進試験に基づく混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.97-102, 2015
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015