

論文 蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの促進中性化深さに関する検討

片山 強^{*1}・佐々木 謙二^{*2}・柏尾 和麻^{*3}・原田 哲夫^{*4}

要旨: 本研究では、九州地区のプレキャストコンクリート (PCa) 製品を想定し、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの中性化特性に及ぼす養生条件と結合材種類および水結合材比の影響を実験的に検討した。また、同程度の設計基準強度を想定した試験体として、現場打ちコンクリート想定試験体と PCa 製品想定試験体を設定し、促進中性化試験による中性化深さの比較を行った結果、コンクリートの圧縮強度と中性化との関係が明らかとなり、同じかぶり、同じ設計基準強度であれば、PCa 製品は現場打ちと同程度の耐久性を有していることが分かった。

キーワード: 蒸気養生, プレキャストコンクリート製品, 耐久性, 中性化, 高炉スラグ微粉末

1. はじめに

コンクリートの各種性能は、材料や配合のみならず、施工の良し悪し、養生条件の影響を大きく受ける。その点を考慮すると、現場打ちコンクリート（以下、現場打ち）よりも工場で製造される PCa 製品の方が品質は安定しており、施工の面においても工期短縮や省力化が可能である。このような利点のある PCa 製品ではあるが、その利用は拡大されていない。現在の社会状況（建造物の長期利用のための高耐久・高品質化、環境負荷抑制、副産資源の活用、熟練労働者の不足）を考慮すると、今後、PCa 製品が社会状況を改善する方法として利用される機会は多いと考えられる¹⁾。

本研究では、PCa 製品の品質化、環境負荷抑制、副産資源の有効活用の観点から、九州地区にて高炉スラグ微粉末の使用が広がりつつある現状を踏まえ、各種結合材と養生条件の組合せ、及び水結合材比が中性化特性に及ぼす影響を系統的に把握することを目的に、PCa 製品の製造において一般的に採用される蒸気養生を施したコンクリートの中性化特性に及ぼす養生条件と結合材種類

および水結合材比の影響を実験的に検討した。また、同程度の設計基準強度を想定した試験体として、現場打ち想定試験体と九州地区での PCa 製品想定試験体 (Non-AE で比較的低水結合材比の蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリート) を設定し、促進中性化試験による中性化深さの比較を行い、耐久性照査項目の一つとして中性化に対する比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

実験に用いた結合材は、普通ポルトランドセメント [N]、N と高炉スラグ微粉末 6000 (JIS A 6206) の混合系 (65% : 35%) [NB] の 2 種類とした。九州地区での PCa 製品の実情を踏まえて、細骨材は海砂、粗骨材は砕石を用いた。また、混和剤として PCa 製品を想定した Non-AE コンクリートでは高性能減水剤を、現場打ちを想定した AE コンクリートでは AE 減水剤を用いた。表-1 に使用材料を示す。コンクリートの練上り温度が全ての場合に

表-1 使用材料

項目	種類	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3240cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 5920cm ² /g
細骨材	海砂	密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.87%, 粗粒率 2.47
粗骨材	砕石 (安山岩)	密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 0.69%, 粗粒率 6.66
混和剤	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体

*1 (株)ヤマウ 技術本部 開発・設計部 開発 G 課長 (正会員)

*2 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門助教 博 (工) (正会員)

*3 長崎大学 大学院工学研究科総合工学専攻 (学生会員)

*4 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門教授 工博 (正会員)

表－2 示方配合

配合記号	結合材種類	想定設計基準強度 (N/mm ²)	実測空気量 air	水結合材比 W/B	細骨材率 s/a	単位量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	混和材 SCM	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD
N30	N	—	1.9%	30%	45%	165	550	—	738	972	2.75 ^{*3}
NB30	NB	—	1.7%				358	193	732	964	2.75 ^{*3}
N35	N	—	2.0%	35%	36%		471	—	613	1175	1.41 ^{*3}
NB35	NB	—	2.1%				306	165	609	1168	1.41 ^{*3}
N40	N	30 ^{*1}	2.4%	40%	37%		413	—	648	1189	0.83 ^{*3}
NB40	NB	30 ^{*1}	1.9%				268	145	644	1183	0.83 ^{*3}
N45	N	—	2.1%	45%	38%		367	—	680	1195	0.37 ^{*3}
NB45	NB	—	1.6%				239	128	676	1190	0.37 ^{*3}
N55	N	30 ^{*2}	5.0%	55%	40%		300	—	711	1151	0.75 ^{*4}
NB55	NB	30 ^{*2}	4.7%				195	105	709	1146	0.75 ^{*4}

*1 蒸気養生材齢 14 日の場合 *2 標準養生材齢 28 日の場合 *3 高性能減水剤 *4 AE 減水剤

表－3 養生条件

養生条件記号	養生方法	前置時間 (h)	昇温速度 (°C/h)	最高温度 (°C)	最高温度保持時間 (h)	降温速度 (°C/h)	後養生方法 (材齢1日以降)
【A-D】	蒸気養生	3	20	65	4	4.5	気中養生 (20°C, R. H. 60%)
【S28】	28日間標準養生(20°C水中養生)→気中養生 (20°C, R. H. 60%)						
【S7】	7日間標準養生(20°C水中養生)→気中養生 (20°C, R. H. 60%)						

において 20°C一定となるように、各材料を恒温室に保管し、一定の温度とした後に練混ぜを行った。

(2) 配合

表－2 にコンクリートの示方配合を示す。PCa 製品を想定した Non-AE コンクリートでは、目標空気量 2.0% とし、水結合材比を 30%, 35%, 40%, 45%と変化させ、細骨材率をそれぞれ 45%, 36%, 37%, 38%とした。現場打ち (土木構造物) を想定した AE コンクリートでは水結合材比 55%, 細骨材率 40%, 目標空気量 4.5%とした。いずれにおいても単位水量は 165kg/m³ 一定とし、目標スランプ 8cm (水結合材比 30%では目標スランプフロー 650mm) となるよう適宜混和剤の添加量を調整した。

2.2 養生条件

表－3 に養生条件を示す。蒸気養生条件は、前置時間は3時間、降温速度は4.5°C/h、後養生方法は気中養生(気温 20°C, 湿度 60%)とした。なお本研究では、恒温恒湿槽 (湿度 90~95%) において所定の温度履歴を与えることにより蒸気養生を模擬した。また供試体からの水分逸散を防ぐために、供試体をビニールで密封した状態で温度履歴を与えた。すべての養生条件において、練混ぜから 24±0.5 時間後に脱型を行い、所定の養生を行った。蒸

気養生に対する比較用試験体として、材齢 4 週まで標準養生 (20°C水中養生) を行い、その後材齢 8 週まで気中養生した【S28】試験体、および実際の現場打ちの養生条件を想定して材齢 1 週まで標準養生を行い、その後材齢 8 週まで気中養生した【S7】試験体を作製した。

なお、本研究では試験体名を「配合記号【養生条件記号】」で表す。

2.3 同程度の設計基準強度を想定した現場打ち想定試験体と PCa 製品想定試験体の設定

筆者らの従前の研究^{2), 3)}で示す通り、蒸気養生されたコンクリートは標準養生されたコンクリートより同じ結合材種類、同じ水結合材比では圧縮強度が劣る。このため PCa 製品業界では蒸気養生による強度低下を補うため、水結合材比の小さいコンクリートで製造を行うのが従来から一般的である。従って、同じ設計基準強度のコンクリート構造物であっても、現場打ちにより製造されたコンクリート構造物 (JIS A 5308 レディーミクストコンクリート) と PCa 製品工場で製造されたコンクリート構造物の使用されたコンクリートの水結合材比は大きく異なる。筆者らの従前の研究^{2), 3)}によれば、PCa 製品として想定される蒸気養生を施した水結合材比 40%の Non-AE

コンクリート（管理材齢 14 日）と、標準養生で水結合材比 55%のコンクリートの強度がほぼ同等であり、設計基準強度 30N/mm²程度のコンクリートに該当する。また、実際の土木構造物では湿潤養生期間は 7 日程度（日平均気温 15℃以上、混合セメント B 種）であるため⁴⁾、水結合材比 55%で養生条件【S7】のコンクリート（管理材齢 28 日）を現場打ちと想定し、同じ強度レベルの PCa 製品想定試験体との比較を行うこととした。

2.4 実験項目

(1) 圧縮強度

圧縮強度は、JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従い測定した。供試体の寸法は、φ100×200mm とした。

(2) 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153:2012「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠し測定したが、同一条件の試験に対する供試体個数は 2 個とした。また、測定は促進試験開始後、促進期間が 1, 2, 4, 8, 13, 26 週になったときに行った。供試体の寸法は、100×100×400mm とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

表-4 に、それぞれの配合・養生条件における直近の圧縮強度測定結果を示す。恒温恒湿槽の最大容量など実

験上の都合で、圧縮強度の試験体は促進中性化試験と同一バッチのものではないが、セメント、骨材などは同一ロットのものを使用している。一般に材齢 28 日で管理される現場打ちと異なり、PCa 製品の標準管理材齢は 14 日である⁴⁾。このため、PCa 製品想定配合・養生条件は管理材齢 14 日での圧縮強度試験結果を示し、現場打ち想定配合・養生条件は管理材齢 28 日での圧縮強度試験結果を示した。直近の圧縮強度測定結果は、設計基準強度 30N/mm²に対して N40【A-D】および NB40【A-D】が高めの結果となり、比較基準用の N55【S28】および NB55【S28】が低めの結果となった。

3.2 促進中性化試験による中性化深さ

表-4 に、促進期間が 1, 2, 4, 8, 13, 26 週になったときの中性化深さおよび薄赤紫色の部分までの距離の測定結果を示す。水酸化カルシウムと炭酸カルシウムが混在する部分中性化領域が薄赤紫色に呈色するが⁵⁾、部分中性化領域の幅は水結合材比が大きい方が、標準養生より蒸気養生の方が、部分中性化領域の幅は大きくなった。密実なコンクリートほど部分中性化領域の幅は小さいと考えられる⁶⁾。写真-1 に部分中性化領域の幅が比較的大きかった N40【A-D】の中性化深さ測定結果を示す。

(1) 水結合材比の影響

図-1 に、結合材種類ごとに、蒸気養生コンクリート【A-D】の促進中性化試験による中性化深さに及ぼす水

表-4 圧縮強度と中性化深さおよび薄赤紫色の部分までの距離

配合・養生 条件記号	想定 試験体種別	圧縮強度 (N/mm ²)		中性化深さおよび薄赤紫色の部分までの距離 (mm)					
		測定材齢 (日)		測定週 (週)					
		14	28	1	2	4	8	13	26
N30【A-D】	PCa製品想定	54.9	—	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
NB30【A-D】	PCa製品想定	54.6	—	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.5 (0.0)	1.0 (0.0)
N35【A-D】	PCa製品想定	46.5	—	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.5 (0.0)	0.5 (0.0)	1.0 (0.5)	1.5 (0.0)
NB35【A-D】	PCa製品想定	50.0	—	1.0 (0.0)	1.0 (1.0)	1.5 (0.0)	1.5 (0.5)	1.5 (0.0)	2.0 (0.5)
N40【A-D】	PCa製品想定	37.1	—	2.0 (0.0)	2.5 (1.0)	3.0 (0.0)	5.0 (0.0)	8.0 (0.0)	8.0 (1.5)
NB40【A-D】	PCa製品想定	40.1	—	3.0 (3.0)	3.5 (2.5)	3.5 (1.0)	5.0 (3.5)	5.5 (3.0)	6.0 (4.0)
N45【A-D】	PCa製品想定	30.6	—	2.0 (2.0)	3.0 (1.0)	5.0 (2.0)	6.5 (1.5)	7.0 (1.0)	7.5 (2.0)
NB45【A-D】	PCa製品想定	35.3	—	4.5 (4.5)	7.0 (6.0)	8.0 (6.5)	8.5 (5.0)	10.5 (6.5)	14.5 (7.5)
N40【S28】	比較基準用	53.2	58.9	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.0 (1.0)	1.0 (0.5)	1.0 (0.0)
NB40【S28】	比較基準用	45.5	56.3	0.5 (0.0)	0.5 (0.5)	0.5 (0.0)	1.5 (1.0)	1.5 (1.0)	3.0 (2.5)
N55【S28】	比較基準用	26.0	29.7	5.0 (5.0)	6.5 (6.5)	8.5 (8.5)	9.0 (6.5)	10.5 (8.0)	13.5 (11.5)
NB55【S28】	比較基準用	22.9	30.8	6.5 (6.5)	7.5 (7.5)	8.5 (8.5)	10.5 (9.5)	12.5 (12.5)	15.0 (15.0)
N55【S7】	現場打ち想定	—	29.1	4.0 (4.0)	5.5 (5.5)	6.5 (6.5)	7.5 (7.5)	8.0 (7.5)	8.0 (8.0)
NB55【S7】	現場打ち想定	—	26.7	9.0 (9.0)	12.5 (12.5)	14.5 (14.5)	19.0 (19.0)	19.5 (19.5)	24.5 (24.5)

*表中 () 内の値は薄赤紫色の部分までの距離

結合材比の影響を示す。いずれの結合材においても水結合材比が大きくなるほど中性化深さが大きくなっており、また結合材はNよりNBの方が中性化深さは大きい。岸谷の実験⁷⁾では結合材Nを使用した標準養生コンクリートでは、水セメント比38%以下になると、炭酸化速度は零に近くなるとしているが、蒸気養生コンクリート【A-D】でも同様の傾向が認められ、水セメント比35%と40%では、中性化深さに大きな差が認められる。

(2) 養生条件と水結合材比の影響

図-2に、結合材種類ごとに、促進中性化試験による中性化深さに及ぼす養生条件と水結合材比の影響を示す。同じ結合材種類、同じ水結合材比では標準養生よりも蒸気養生の方が中性化深さは大きい、図-1より、水結合材比を小さくすることにより蒸気養生コンクリート【A-D】の中性化深さを改善出来ることが分かる。また、結合材NB、水結合材比55%では養生条件【S7】と【S28】で大きく結果に差が生じ、結合材NBの比較的大きな水結合材比領域(55%程度)では、材齢28日までの水分供給状況が中性化深さに大きく影響する可能性があることが分かった。

(3) 結合材種類の影響

図-3に、各水結合材比別、各養生条件別に、促進中性化試験による中性化深さに及ぼす結合材種類の影響を示す。水結合材比が40%以下、あるいは標準養生条件の密実なコンクリートであれば結合材種類が中性化深さに与える影響は小さく、水結合材比の影響の方が大きいといえる。

3.3 中性化速度係数

(1) 中性化速度係数の算出方法

中性化速度係数の算出方法として、①零を切片に取り、促進中性化期間(week)の平方根の関数とした直線近似式を求め、その傾きから中性化速度係数(mm/week^{0.5})を求める方法と、②切片は任意とし、同様な直線近似式の傾きから中性化速度係数を求める方法、の2種類が考えられた。図-4に、それぞれの方法で算出した中性化速度係数と水結合材比の関係図を示す。中性化の期間をtとし、中性化速度が \sqrt{t} の法則に完全に従うとした場合、図-1、図-2から、試験体条件によっては促進試験開始前の8週までの気中暴露において既に中性化進行が起こっていた可能性が推測出来る⁸⁾。したがって、促進開

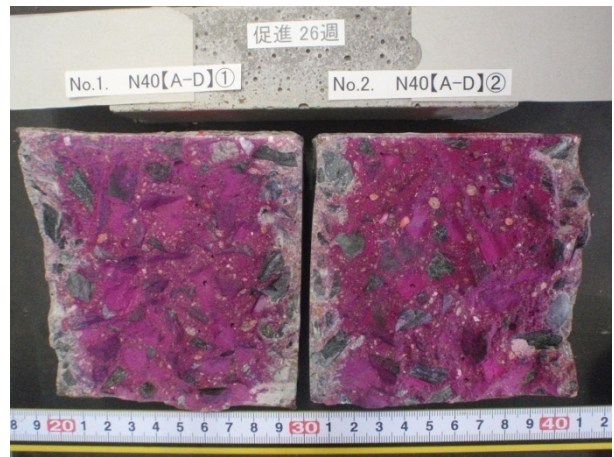


写真-1 N40【A-D】の中性化深さ測定結果

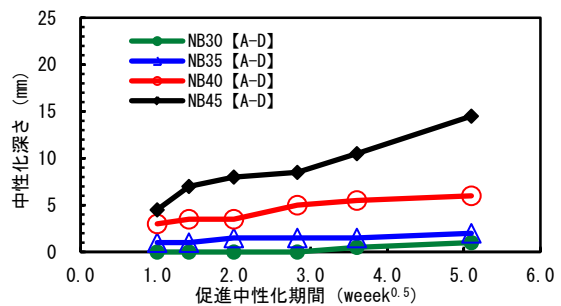
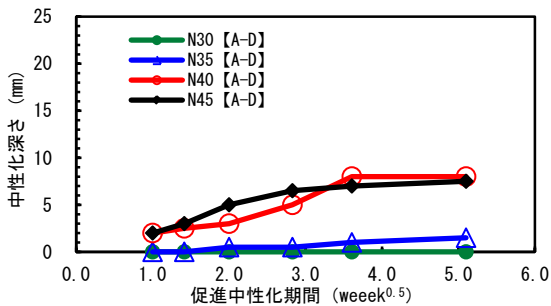


図-1 促進中性化試験による中性化深さに及ぼす水結合材比の影響

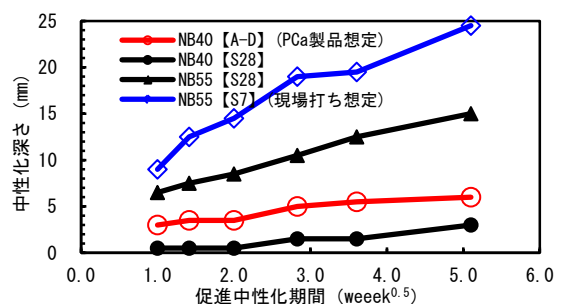
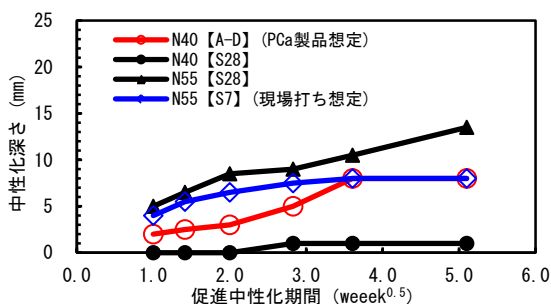


図-2 促進中性化試験による中性化深さに及ぼす養生条件と水結合材比の影響

始時の中性化深さを切片にとり、促進中性化期間の平方根の関数とした直線近似式を求め、その傾きから中性化速度係数を求める方法が中性化速度係数の算出方法として最も望ましいと考えられたが、今回は JIS A 1153:2012 「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠し測定を行ったため、促進開始時の中性化深さの測定を行っていない。今後の補完試験によって促進開始時の中性化深さについては確認試験を行う予定であるが、標準養生試験体も促進試験開始前に中性化進行が起こっていた可能性も図-2から読みとれるため、JIS A 1153の今後の改訂において、促進開始時の中性化深さの測定について、注記に明記されることが望ましいと考えられる。

(2) 水結合材比や結合材種類との関係

中性化速度係数は水結合材比または結合材水比の指数関数として近似できる可能性があるが、本研究ではデ

ータ数が少ないこともあり確認は出来なかった。また、水結合材比が40%以下になると、結合材種類が中性化速度係数に与える影響が小さいことは図-4から確認出来る。さらに、中性化速度係数は養生条件の影響を受けるが、水結合材比を小さく設定することにより改善可能なことも図-4から確認でき、蒸気養生【A-D】の場合は水結合材比30%以下になると中性化速度は零に近くなることが分かった。

(3) 中性化速度係数と圧縮強度の関係および現場打ち想定試験体とPCa製品想定試験体との比較

図-5に中性化速度係数（零を切片とした場合）と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係を示す。中性化速度係数は圧縮強度が小さくなるにつれて、急激に増加することがわかる。また、コンクリートの圧縮強度と中性化係数の関係についてはこれまで多くの知見が

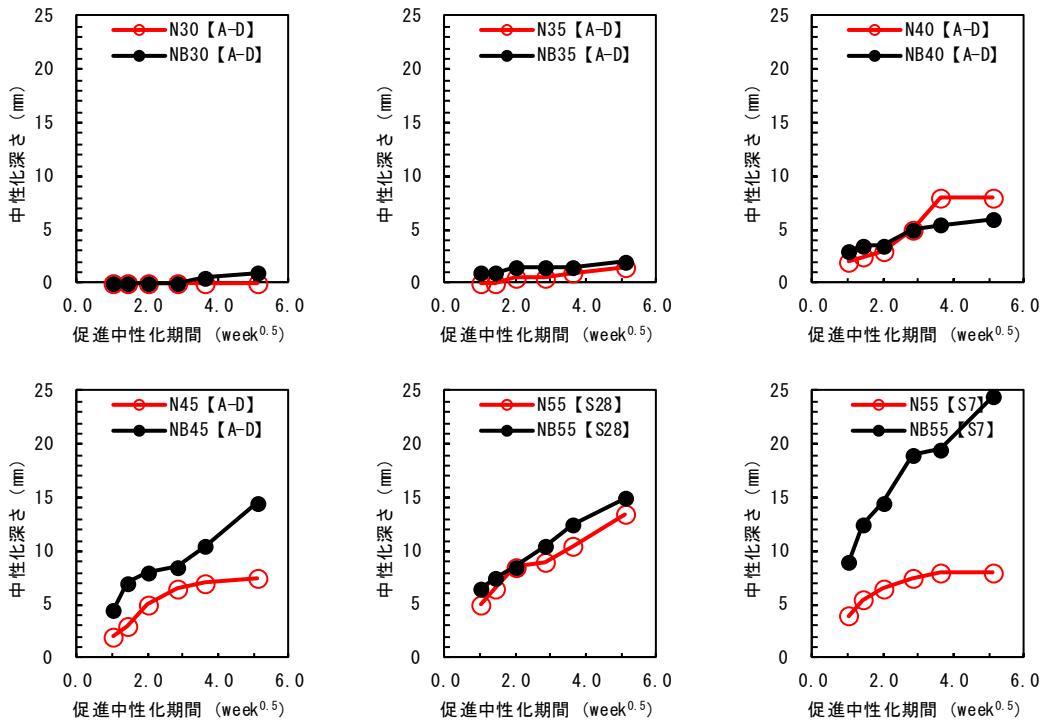


図-3 促進中性化試験による中性化深さに及ぼす結合材種類の影響

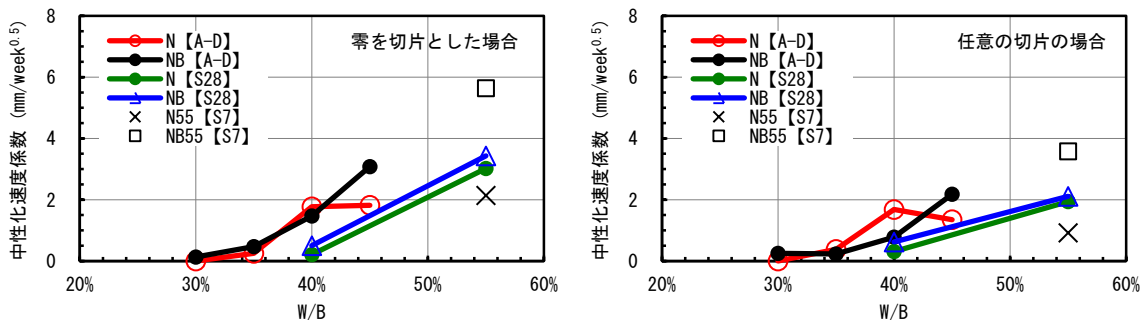


図-4 水結合材比と中性化速度係数の関係

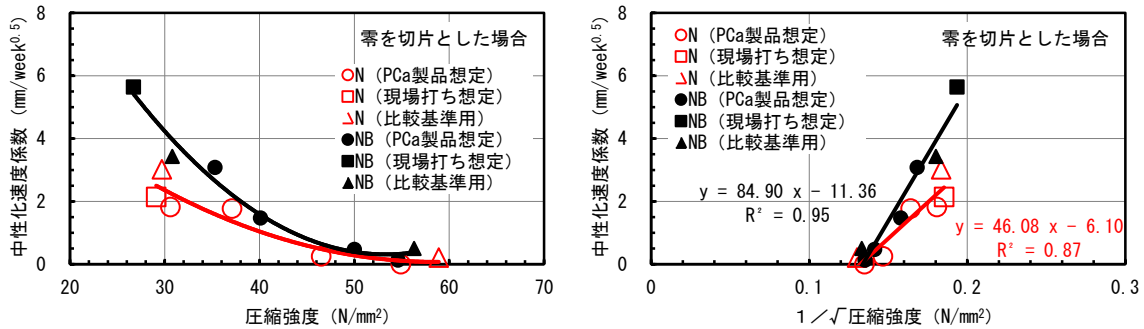


図-5 中性化速度係数と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係

得られているが、本研究においては、中性化速度係数は圧縮強度の平方根の逆数と直線的な関係⁹⁾にあり、最も強い相関関係にあった。

現場打ち想定試験体 (55【S7】) と PCa 製品想定試験体 (40【A-D】) を比較すると、図-2 から PCa 製品想定試験体の方が中性化深さは小さいことが分かるが、その差は試験体作成の際の圧縮強度のばらつきによる差であり、図-5 から試験体の圧縮強度が同じであれば中性化速度係数も同じであったと考えられる。即ち、「同じ結合材種類であり、同程度の圧縮強度を有するコンクリートであれば、養生条件によらず同程度の中性化速度係数を有する」ということがいえるため、同じかぶり、同じ設計基準強度であれば、PCa 製品は現場打ちと同程度の耐久性を有しているといえる。

4. まとめ

本研究により、以下のことが明らかとなった。

- (1) コンクリートの圧縮強度と中性化の関係が明らかとなり、同じかぶり、同じ設計基準強度であれば、PCa 製品は現場打ちと同程度の耐久性を有していることが分かった。
- (2) 水結合材比が 40%以下、あるいは標準養生条件の密実なコンクリートであれば結合材種類が中性化深さに与える影響は小さく、水結合材比の影響の方が大きいことが分かった。
- (3) 中性化速度係数は養生条件の影響を受けるが、水結合材比を小さく設定することにより改善が可能であり、本研究における蒸気養生条件では水結合材比 30%以下になると中性化速度は零に近くなることが分かった。

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業(科学研究費補助金(基盤研究(B))、課題番号:24360168、研究代表者:佐伯竜彦新潟大学准教授)の補助を受けて実施したことを付記し、謝意を表します。

また、本研究の実施にあたり多大なご協力を頂きました日鉄住金高炉セメント株式会社に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書，2009.8
- 2) 佐々木謙二，片山強，原田哲夫，永藤政敏：蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの力学的性質に及ぼす養生条件と結合材種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.359-364，2011.7
- 3) 岡野耕大，佐々木謙二，片山強，原田哲夫：PCa 製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの力学的特性に及ぼす結合材種類と養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1534-1539，2012
- 4) 2012 年制定コンクリート標準示方書[施行編]，土木学会，p.122，pp.346~359，2013
- 5) 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 付1 コンクリートの促進中性化試験方法(案)，pp.179~184，1991.7
- 6) 武高男，中山信雄，森永繁：X線回折法を用いたコンクリートの炭酸化深さの判定方法(フェノールフタレイン溶液呈色法とX線回折法との比較)，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.177-178，1982.10
- 7) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，pp.165-167，鹿島建設技術研究所出版部，1963
- 8) 蔵重勲，廣永道彦：コンクリートの中性化抵抗性と表層透気係数の関連分析に基づいた品質検査判定基準の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.718-723，2012
- 9) 島添洋治，麻生実，白川敏夫：モルタル・コンクリートの中性化速度に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.14，No.1，pp.895-900，1992