

論文

養生条件が中性化速度式に及ぼす影響と評価方法の検討

豊村 恵理^{*1}， 伊代田 岳史^{*2}

Effect of Different Curing Conditions on Carbonation Ratio of Concrete

Eri TOYOMURA ^{*1} and Takeshi IYODA ^{*2}

要旨：本研究では，中性化速度式に養生条件による影響を反映させるために，養生方法および期間を変動させた供試体を用い，中性化促進試験を行った．その結果，養生条件の相違により，中性化深さは異なるが，中性化速度係数は水セメント比に大きく依存することが確認された．そこで，養生条件によって異なると考えられる中性化深さに着目することで，中性化予測式に養生条件を反映できる可能性が示唆された．また，中性化深さは養生条件だけでなく，セメント種類や水セメント比の影響を受けるため，養生条件が，材料・配合に与える影響を把握する必要があると考えられる．

キーワード：養生方法，養生期間，中性化速度式，セメント種類，水セメント比

1.はじめに

鉄筋コンクリート構造物の長寿命化およびライフサイクルコストを低減するためには，配合や施工要因が耐久性に及ぼす影響を把握した劣化予測式の確立が求められる．現在，構造物の劣化現象の1つである中性化に関して，材料や周辺環境等の影響を考慮した様々な劣化予測式が提案されている¹⁾．土木学会コンクリート標準示方書²⁾における中性化の鋼材腐食に対する耐久性照査では，コンクリートの表層と内部を一律のものととらえ，セメント種類と水セメント比を変数とした中性化速度式が与えられている．しかしながら，劣化因子の侵入経路である表層コンクリートの品質は配合要因だけでなく，施工要因である養生等によって大きく左右し，中性化に対する抵抗性に大きな影響を及ぼすことは多く知られている^{3) 4)}．また，養生条件が中性化に及ぼす影響は材料や配合によってその程度が異なること⁵⁾も明らかになっている．一方，養生が施工計画通り実施されたかどうか現

場ごとの自主管理に基づき確認が行われている程度であり，養生を定量的に表わすことができない．このため，竣工後のコンクリート構造物の表層品質を確認するまでに至っていない．そこで，本研究では中性化予測式に養生の影響を組み込むことを目的とし，養生条件の変動が中性化速度に及ぼす影響の定量化，ならびに評価方法を検討した．

2.実験概要

2.1 供試体諸元

供試体配合を表-1に示す．配合はセメント種類を普通ポルトランドセメント(以後 OPC と示す)，高炉セメント B 種(以後 BB と示す)の2種類とし，水セメント比 30, 45, 60%に変動させた供試体(100×100×400mm)を作製した．養生条件は封緘，気中，水中，養生期間は1, 3, 5, 7, 28日で行った．

養生条件，実験工程を表-2，図-1に示す．供試体は翌日に脱型し，打設面と底面を含む4側

*1 芝浦工業大学院 理工学研究科 建設工学専攻

*2 芝浦工業大学 工学部 土木工学科 准教授

表-1 供試体配合

セメント 種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	水 (kg/m ³)	普通ポルトランド セメント (kg/m ³)	高炉スラグ微粉末 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
OPC	30	47	172	573	-	752	867	22.0	5.3
	45	50		382	-	881	900	13.0	4.5
	60	51		287	-	939	923	10.5	3.6
BB	30	46	172	287	287	727	872	24.0	5.0
	45	49		191	191	856	911	10.5	4.5
	60	50		143	143	916	936	14.0	4.8

表-2 養生条件

セメント 種類	水セメント比 (%)			養生方法	養生期間 (日)					
OPC	30	45	60	気中	1	3	5	7	28	
	30	45	60	封緘	1	3	5	7	28	
BB		45		水中				7	28	

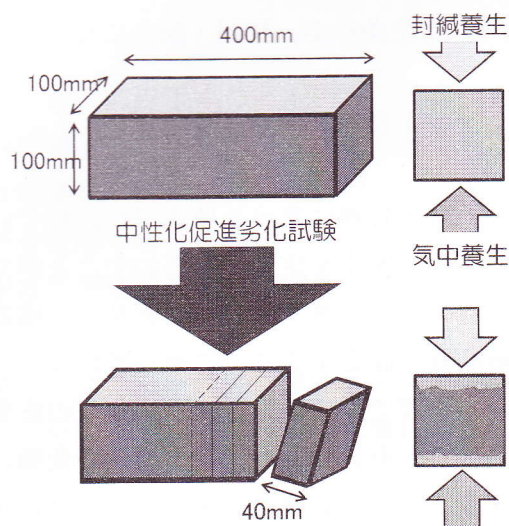


図-1 実験工程

面をシールした。養生条件として、上面を封緘養生、下面を気中養生した供試体と両面を水中養生した供試体を用意し、所定の期間養生を行った後、試験に供した。

2.2 コンクリートの中酸化促進試験

試験は JIS A 1153:2003 に基づき、温度 20℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 5.0%とした。供試体は所定の劣化促進期間（1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15 週）において 40mm 間隔で割裂し、断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。中酸化深さの測定は JIS A 1152:2003 に基づき測定を行った。

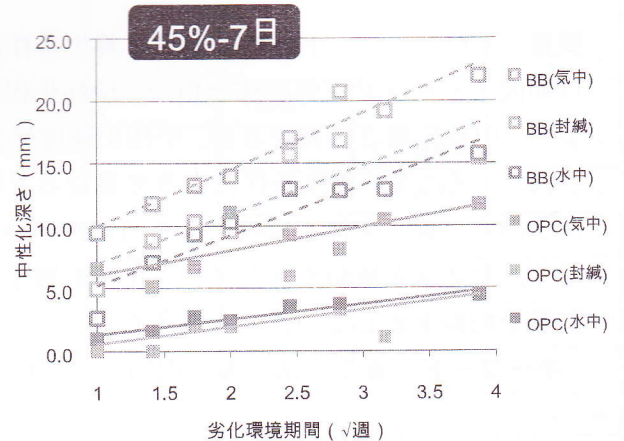
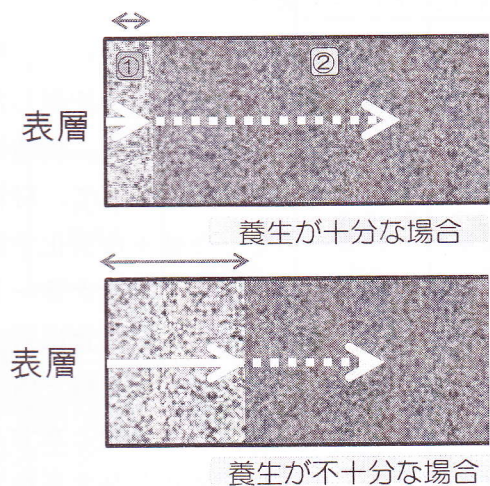


図-2 養生方法と中酸化深さの関係



- ① 養生不足によって水和反応が滞っている領域
- ② 養生によらず水和が進行している領域

図-3 養生条件による水和進行度合いの概念図

3. 実験結果および考察

3.1 養生方法と中酸化深さの関係

各セメントにおける水セメント比 45%の封緘養生 7 日と中酸化深さの関係を図-2 に示す。中酸化深さは封緘、水中養生に比べ、気中養生は顕著に大きくなった。しかしながら、傾き（中

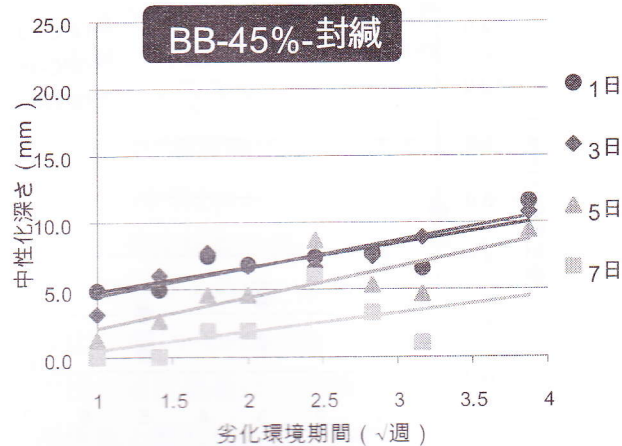
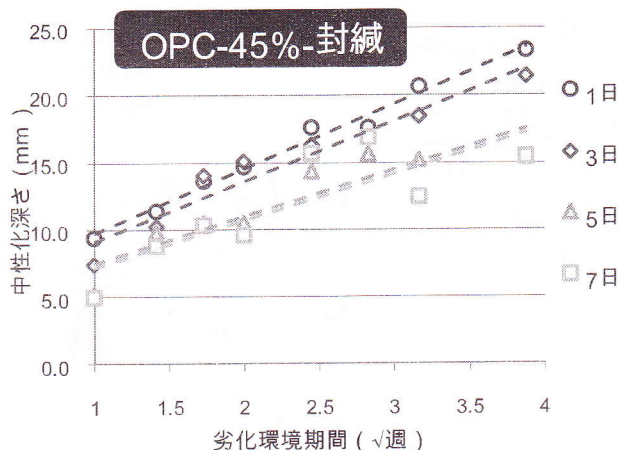


図-4 養生期間と中性化深さの関係 (左: OPC, 右: BB)

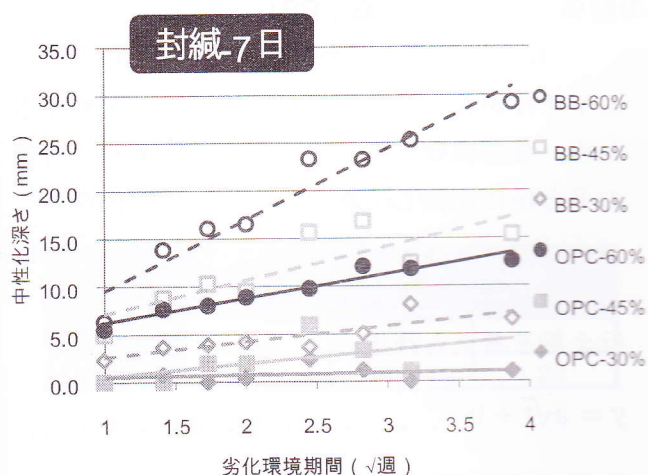
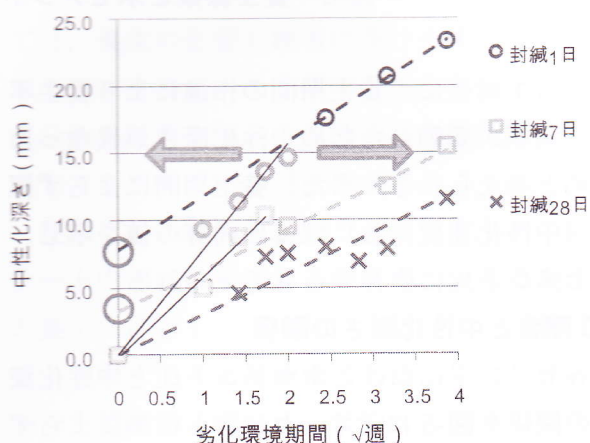


図-5 水セメント比と中性化深さの関係



← 水セメント比に依存していない領域のデータを除く
 → 残りのデータで近似式を算出する
 ○ 養生係数 (Y切片)

図-6 養生係数の算出方法

性化速度係数) はセメント種類ごとに養生方法によらずほぼ同等であった。

これは、図-3 に示すように、養生方法によって、コンクリートの表層部分において養生の影響による水和反応の進行度合いが異なり、養生に良否によってその領域も異なる。また、養生不足によって水和反応の進行していない領域において二酸化炭素進行程度も大きい⁶⁾ことから、気中養生では中性化深さが大きくなったと考えられる。このことによって、養生方法ごとに中性化深さは異なったが、その後の挙動は水セメント比に依存すると考えられる。

3.2 養生期間と中性化深さの関係

普通ポルトランドセメント (OPC) と高炉セメント (BB) の水セメント比 45% の封緘養生における養生期間と中性化深さの関係を図-4 に

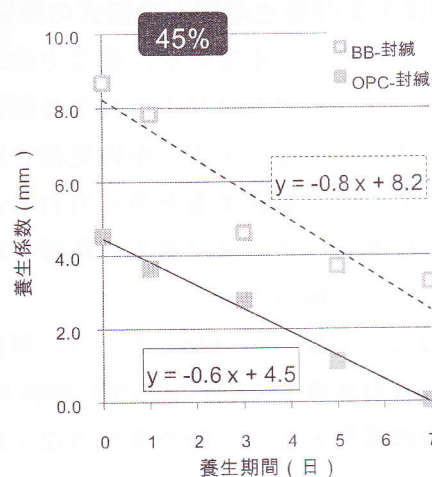


図-7 封緘養生期間と養生係数の関係

示す。各セメント種類ごとに、中性化深さは養生期間の増加に伴い減少する傾向を示した。こ

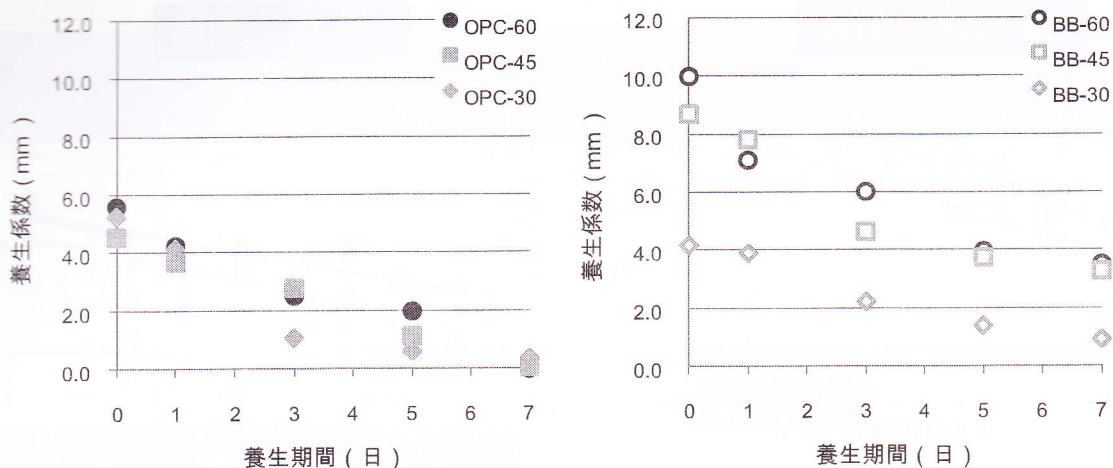


図-8 養生係数と水セメント比の関係（左：OPC，右：BB）

れは 3.1 同様に、養生期間の相違により養生不足の領域が変動したため中性化深さが異なるとめと考えられる。また、養生期間によらず傾き（中性化速度係数）はほぼ同等の値を示し、水セメント比に依存すると考えられる。

3.3 配合と中性化深さの関係

各セメントにおける水セメント比と中性化深さの関係を図-5 に示す。セメント種類によらず水セメント比の増加に伴い中性化深さは増加する傾向を示した。BB（破線）は OPC（実線）に比べ傾きが大きく、また水セメント比の増加につれ、その傾きも増加することを確認した。

3.4 養生方法および養生期間と速度式の関係

3.2, 3.3 より中性化速度係数は養生方法および期間の影響より、水セメント比による影響が卓越すると考えられる。一方、中性化深さは養生条件により大きく依存すると考えられる。そこで、中性化進行の予測式に養生の影響を組み込むために以下の検討を行う。

本実験における、養生がおおよそ十分にされたと考えられる封緘養生 28 日のものを基準となる中性化速度係数とした。他の養生方法・期間のものは図-6 に示すように養生条件によって異なる養生不足と考えられる初期のデータ（点線と実線の交点まで）を除き、残りのデータで近似式を算出する。これにより基準の中性化速度係数により近づけた。この際、中性化速度式

の Y 切片が養生終了時の良否に応じて変動するため、養生係数と定義した。これにより、時間の平方根に比例し予測されている中性化深さ（ $\sqrt{t}$ 則）に、式（1）のように養生係数を加えることで、養生条件を考慮した中性化予測が行えると考えられる。

$$y = a\sqrt{t} + b \quad \dots \dots \dots (1)$$

y：中性化深さ（mm） a：中性化速度係数（mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ） t：中性化期間（年） b：養生係数（mm）

ここで、定義した養生係数と養生期間との関係を図-7 に示す。セメント種類によらず封緘養生期間の増加に伴い、養生係数が減少する傾向を示した。また、各セメントの近似式より、BB が OPC と同等の養生係数を得るには、OPC より 3~4 日長く養生を行う必要があると推定することができる。

3.5 養生係数と材料・配合の関係

3.4 同様に、セメント種類と水セメント比を変化させた試験結果を用い、水セメント比ごとに養生係数を算出し比較を行った。養生係数と水セメント比の関係を図-8 に示す。両セメント種類において、3.4 同様に封緘養生期間の増加に伴い養生係数が減少する傾向を示した。また、OPC は水セメント比によらず、各養生期間において養生係数はほぼ同等となった。このことから、養生不足によって水和反応が滞っている領

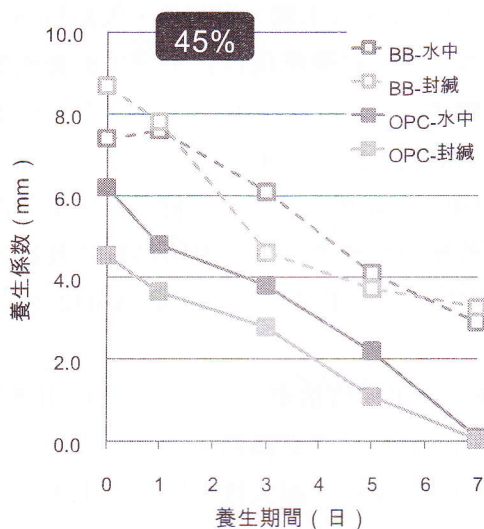


図-9 基準の相違による養生係数

表-3 中性化速度係数の比較
(水セメント比 45%)

セメント 種類	中性化速度係数		
	封緘28日	水中28日	示方書式
OPC	0.52	0.42	0.48
BB	1.05	1.26	1.20

域は水セメント比によらず封緘養生期間に依存すると考えられる。一方、BB は水セメント比 30%と 45, 60%で差が見られた。このことから、45, 60%では養生不足による影響を顕著に受けやすいという可能性が示唆された。また、BB は水セメント比を小さくすることで OPC と同等の養生係数を得ることができると考えられる。

3.6 中性化速度係数の相違による養生係数

前述したとおり、中性化速度係数の算出には、十分に養生され、コンクリート内部の品質はある程度均一であると予想されるものを基準とする必要がある。そこで、水セメント比 45%における封緘養生 28 日（中性化速度係数 OPC:1.5, BB:3.0）と水中養生 28 日（中性化速度係数 OPC:1.2, BB:3.6）を基準として算出した、それぞれの養生係数を図-8 に示す。各セメント種類において、養生期間の増加に伴い養生係数が減少する傾向を示すが、基準とする中性化速度係数が異なることによって養生係数が異なる

値を示した。このことから、養生係数を算出する際に、養生条件の相違が中性化速度係数の算出結果に与える影響を検討する必要がある。

ここで、本実験で得られた封緘養生 28 日と水中養生 28 日、コンクリート標準示方書における中性化速度係数を表-3 に示す。中性化速度係数は、炭酸ガス濃度と屋内暴露との比の換算より算出した⁷⁾。OPC, BB とともに、示方書における中性化速度係数は、実験より得られた中性化速度係数と概ね同程度であり、封緘養生 28 日と水中養生 28 日の間の数値であることが確認できる。このことから、示方書の耐久性照査においては、養生の影響も顕著に受けやすい表層と内部のコンクリートを一律のものととらえ、表層部分から材料と配合の要因から中性化深さを算出してしまっている可能性がある。

長期にわたり養生を行うことにより、コンクリート内部の品質はある程度均一となるが、どの養生条件をもって内部の品質が均一状態であると定義することは困難である。また、コンクリート標準示方書によって OPC と BB の湿潤養生期間が異なるため、同じ方法および期間で養生を行ったコンクリートでは品質の差が生じる可能性がある。このため、養生条件から基準となる中性化速度係数の設定をすると、セメント種類ごとの適切な評価ができない可能性がある。このことから、中性化予測式に養生条件を反映させるためには、材料・配合ごとの中性化速度係数の基準を設け、水セメント比に依存する領域の中性化速度係数を明確にする必要があると考えられる。

4. 結論

本試験で得られた結果を以下に示す。

- 1) 各セメントの中性化速度係数は水セメント比に依存することを確認した。また、養生方法および期間により表層からの養生不足によって水和反応が滞っている領域が異なり、中性化深さが異なると考えられる。
- 2) 養生方法および期間は、中性化速度式の Y

- 切片を養生係数と定義することで、中性化速度式に反映できる可能性が示唆された。しかしながら、基準とする中性化速度係数によって養生係数が異なるため、基準となる中性化速度係数を検討する必要がある。
- 3) 中性化予測式に養生条件を組み込むためには、養生条件によって異なる養生終了時における水和反応の進行していない領域が中性化速度に及ぼす影響だけでなく、材料・配合が養生に与える影響を把握する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会，構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.80
- 2) 土木学会，2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2007
- 3) 岡崎慎一郎・八木翼・岸利治・矢島哲司，養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究，セメント・コンクリート論文集，V60/227-234，2006
- 4) 白根勇二・船橋政司・松尾健二，施工条件や養生条件がコンクリートの表層品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol32, No.1，2010
- 5) 檀康弘・伊代田岳史・大塚勇介・佐川康貴・濱田秀則，高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係，土木学会論文集，Vol65, No.4, pp.431-441，2009
- 6) 石井祐輔・李春鶴・半井健一郎・帯刀寿人，初期養生条件がセメント硬化体の水和挙動および物質移動抵抗性に与える影響，第 35 回土木学会関東支部技術発表会講演概要集，V-058
- 7) H. J. Wiering, Longtime Studies on the Carbonation of Concrete under Normal Outdoor Exposure, Proceedings of the RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, pp. 239-249, 1988