

論文 高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性

伊代田 岳史^{*1}・檀 康弘^{*2}・川端 雄一郎^{*3}・濱田 秀則^{*4}

要旨：コンクリート構造物が所要の強度・耐久性を保持するためには養生が必要であることは周知の事実である。しかし、養生に関する研究データの多くは圧縮強度に対する検討であり、耐久性についてはあまり論じられていない。近年の環境問題を考慮すれば、今後一層混合セメントの使用の増加が予測されることから、ここでは高炉セメントを使用したコンクリートにおける養生条件と耐久性の関係を実験的に整理した。その結果、高炉セメントコンクリートは普通セメントコンクリートと比べ養生に対して敏感であること、ならびに表層コンクリートへの養生の重要性について整理できた。

キーワード：高炉セメント，養生，透気係数，真空吸水試験，中性化速度係数

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の寿命予測や耐久設計が提案されつつあり、良質な材料選択や施工が行われた場合にはある程度の精度で予測できるようになってきた。しかしその一方で、構造物の品質は材料の選択と施工の組み合わせによっては性能を発揮できないことも想定される。現在、コンクリートの品質を代表するために汎用的に利用されている指標は圧縮強度である。しかし、圧縮強度は構造性能に対しては非常に重要な特性であるが、耐久性は塩分浸透や中性化抵抗性といったコンクリート中の物質移動特性を表しており、圧縮強度とは一義的な関係にはない¹⁾と考えられる。特に、良好な養生すなわち湿潤状態に近い状態での養生を施されたコンクリートにおいては、水和反応とともに圧縮強度や耐久性が向上すると考えられるが、養生が不足した場合、特に初期材齢時に乾燥の影響を大きく受けた場合には構造物の耐久性にも影響があると考えられる。

一方で地球環境を考えた場合、高炉スラグやフライアッシュ等の利用は重要な課題であり、今後増加すると考えられる。混合セメントの使用においてはそのセメントの性質と強度発現の観点から、初期の養生期間を確保することが土木学会のコンクリート標準示方書ならびに日本建築学会のJASS5にも明記されている。しかし混合セメントを用いた場合における養生と強度ならびに耐久性を調査した結果は少なく^{2,3)}、今後のコンクリート構造物を考えたときには、養生方法やその期間と耐久性について整理しておくべき課題であると考えられる。

本研究では高炉セメントを使用したコンクリートを対象として養生方法とその期間を要因とした耐久性について普通ポルトランドセメントを使用したコンクリ

ートと比較し養生の影響を評価することを目的に実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験水準と使用材料

実験は、普通ポルトランドセメント[N](密度 3.14g/cm³、粉末度 3150cm²/g)と、高炉セメント B 種を模擬して前述した普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末(密度 2.91g/cm³、粉末度 4000cm²/g)を 50%置換した[BB]の 2 種類のセメントを用いてコンクリート試験体を作成し実施した。コンクリートは、細骨材として海砂(密度 2.58g/cm³、吸水率 1.52%、単位容積質量 1.65kg/L)を、粗骨材として門司産砕石 2005(密度 2.72g/cm³、吸水率 0.36%、単位容積質量 1.56kg/L、F.M.6.69)を用いて作成した。配合は表-1 に示した通りであり水結合材比は 45,55,65%の 3 配合とした。

試験体には、試験・評価に汎用性・簡便性を持たせることも視野に入れ、φ100×200mm の円柱試験体を用い、打込み直後からの乾燥を防ぐために打込み面にベニヤ合板を被せて蒸発を防いだ。養生は、(1)打込み翌日に脱型して乾燥までの間、湿らせた麻布にて試験体を包含する湿布養生を実施した C シリーズ、(2)型枠のまま封緘養生しその後乾燥させた S シリーズ、(3)打込み翌日に脱型後、水中にて養生を実施した後に乾燥させた W シリーズの計 3 種類で実施した。なお、養生番号の数字は前記 3 水準の養生を施した期間を示している。試験はすべて 20℃で実施し、乾燥環境(D)は相対湿度 60%に制御した室内とした。試験水準を表-2 に材齢と試験体の状況を図-1 にまとめた。なお、W/C=45,65%では D1,CD3,CD7,W28 の 4 養生方法に限定して実施した。

*1 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター マネージャー	博士(工学)	(正会員)
*2 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター グループリーダー		(正会員)
*3 九州大学大学院 工学研究院 日本学術振興会特別研究員 PD	博士(工学)	(正会員)
*4 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 准教授	博士(工学)	(正会員)

表-1 コンクリートの配合とフレッシュ性状

記号	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
				W	C	BFS	S	G	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上温度 ()
N45	N	45	45.5	175	389	-	770	976	10.5	4.2	23.3
BB45	BB				194	194	764	969	11.5	4.2	22.4
N55	N	55	47.5		318	-	832	973	10.5	4.2	20.9
BB55	BB				159	159	827	967	13.5	4.8	23.1
N65	N	65	49.5		269	-	887	857	10.0	4.5	22.4
BB65	BB				135	135	882	952	11.5	5.5	22.2

表-2 試験水準一覧

養生期間	養生方法		
	(1)湿布 C	(2)水中 W	(3)封緘 S
1	D1	-	-
3	CD3	WD3	S3
5	CD5	WD5	-
7	CD7	WD7	S7
28	C28	W28	S28

2.2 試験項目とその方法

試験は、圧縮強度をはじめとして透水、透気、中性化などの物質移動性について測定し、NとBBの差ならびに養生の影響を調査した。なお、今回の試験においては、試験体内における差は大きくないと仮定して、試験体サイズで実施できる簡易試験として検討した。

(1) 質量変化

養生環境による乾燥ならびに吸水の状況を調査するために、試験体脱型後の質量変化を材齢 28 日まで継続して測定した。

(2) 圧縮強度・静弾性係数・割裂引張強度

これらの試験は JIS に準拠して測定し、材齢は 7, 28, 91 日とした。なお、割裂引張強度試験においてもφ100×200mmのものを使用した。

(3) 透気試験

図-2 に示すように材齢 28 日経過時に試験体を厚さ 50mm に切断し側面をエポキシ樹脂によりコーティングして透気性を遮断したうえで、一定圧力にて送気できる試験機にセットした。なお、透気に使用した気体はコンクリート中の水和物等にできるだけ影響を与えないように窒素ガスを用い、試験体の上面から 0.4MPa の空気圧を与えてコンクリート中を通して下面から排出されたガスを、水中で回収することで透気速度を計測してダルシー則より透気係数を算出した⁴⁾。

(4) 真空吸水試験

前述した(3)透気試験の試験体を用いて、バットに試験体が半分漬かるように水を張り、真空試験槽へ投入して脱気を行った。ポンプでの吸引時間を 1 時間、真空保持を 3 時間実施した後、試験体を割裂し水分の吸い上げられた領域を確認した。測定には、画像解析を用いて、試験体全体の断面積(50×100mm)に対する水分が上昇した面積割合を算出し真空吸水面積率として求めた。

(5) 透水試験

図-2 に示すように材齢 28 日経過時に試験体を厚さ 100mm に切断し、型枠底板側の試験体を用いて透水試験を実施した。試験はインプット法とし、試験体上面から 1MPa となるように水圧を与え、真空吸水試験の結果を

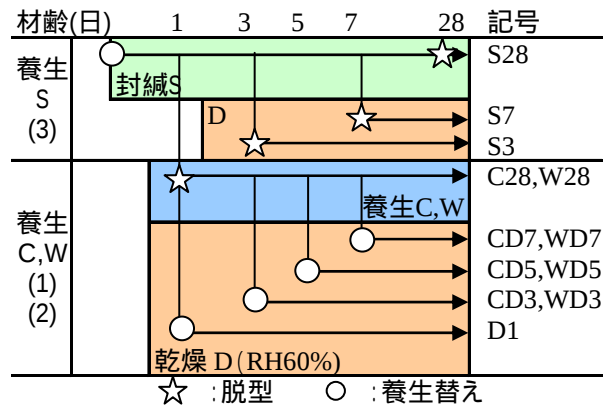


図-1 材齢と試験体の状況

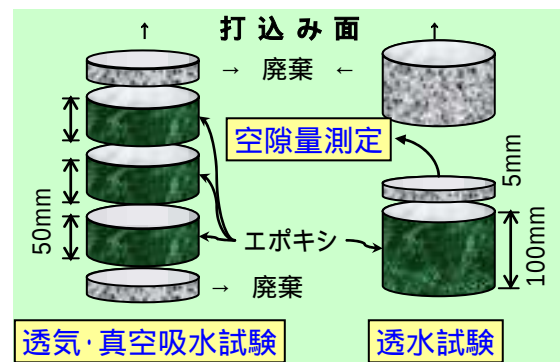


図-2 試験体の切断・処理方法

見ながら加圧時間を変化させて、浸透深さを測定した。水の拡散係数はフーリエの熱伝導方程式の温度を水圧に置き換えた村田の提案した式⁵⁾を利用して算出した。

(6) 促進中性化試験

材齢 28 日経過時に試験体を促進中性化試験装置(温度 20℃, 相対湿度 60%, CO₂ ガス濃度 5%)に静置して、促進中性化を実施した。中性化材齢 2,4,13,26w にて試験

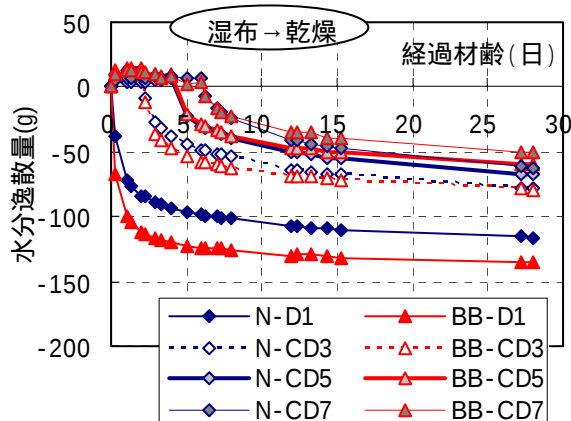


図-3 水分逸散量の経時変化(湿布養生)

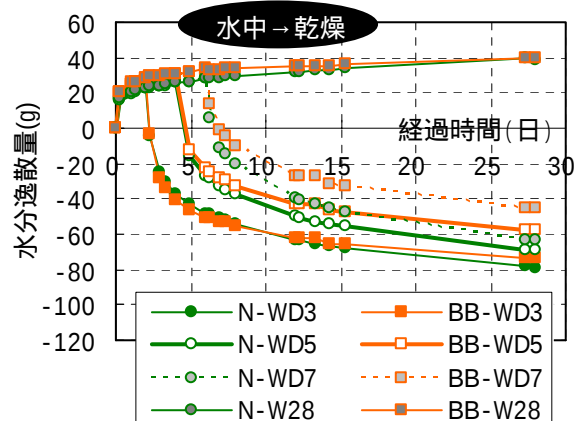


図-4 水分逸散量の経時変化(水中養生)

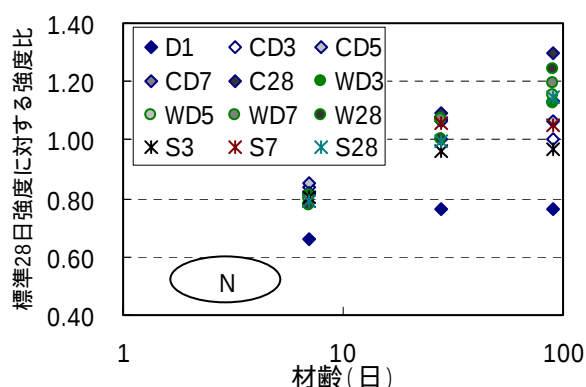


図-5 標準養生に対する強度比(N)

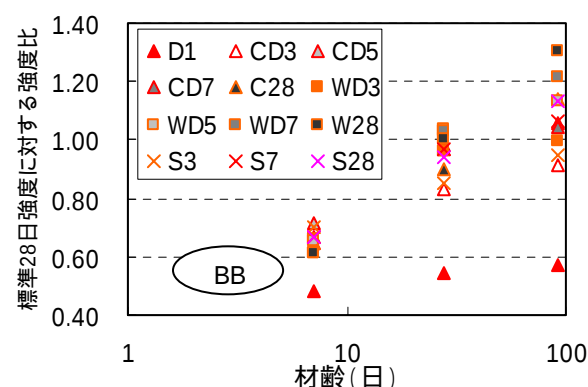


図-6 標準養生に対する強度比(BB)

体を取り出し、割裂してフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧して非呈色部の深さを測定した。求めた中性化深さから $\sqrt{t}$ 則による中性化速度係数を算出した。

(7) 空隙量測定

水銀圧入式ポロシメータを用いて、試験体断面の平均化した空隙構造を測定した。指標に用いた平均細孔直径は全細孔容積を細孔比表面積で除したものである。

3. 試験結果

3.1 質量変化試験

W/C=55%の試験体において乾燥ならびに吸水による試験体の質量経時変化を図-3,4に示す。図-3は湿布養生C後に、図-4は水中養生W後に乾燥させた乾燥開始材齢の異なるNとBBを示している。これより、D1,CD3のように乾燥開始時期が早い場合にはBBの水分逸散量が大きくなった。さらにその影響は乾燥開始直後の極初期において大きく、養生の重要性が質量変化においてもわかる。しかし、CD5以降ならびにWDでは、NとBBの差はほとんど見られず、むしろ材齢28日においてはBBの方が水分逸散量が少なくなる結果であった。

3.2 強度特性

図-5,6は標準養生材齢28日の圧縮強度に対する強度

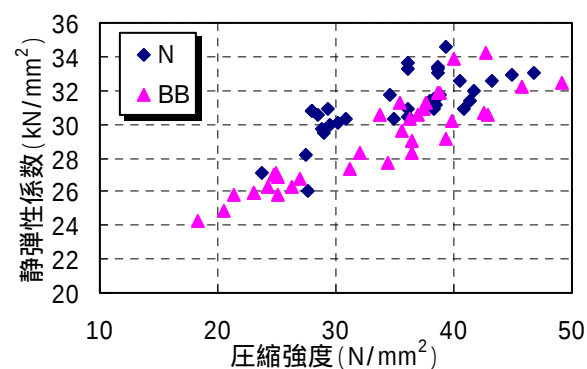


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

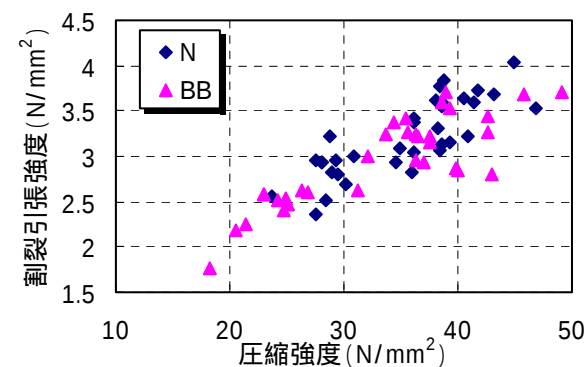


図-8 圧縮強度と割裂引張強度の関係

比を N と BB で示したものである。これより、従来の知見同様⁶⁾に材齢初期において乾燥環境に暴露される D1 では強度発現が停滞し、その影響は BB の方が大きい。また、CD3 や S3 においても強度発現が遅く、標準養生の強度を上回ることがないが、WD のように水中養生を施せば強度発現が増進する。

図-7.8 はそれぞれ圧縮強度と静弾性係数、割裂引張強度の関係をセメント種類ごとに整理したものであり、セメント種類ならびに養生条件によらないといえる。

3.3 耐久性評価

(1) 透気試験・真空吸水試験

セメント種類ごとに養生方法と透気試験結果を図-9 に示す。湿布養生後に乾燥させた C は、BB で養生を長期間実施しても N より大きくなった。このことは、封緘養生後に乾燥させた S でも同様であった。また、N と BB における透気係数の差は養生日数を増加させても変わらなかった。一方、水中養生を施した後に乾燥させた W では、養生期間が 3 日では BB の方が透気係数が大きいものの、5 日以降では N よりも小さくなっており、養生時の水分供給による水和反応で耐透気性が高まることを示唆している。

同様に真空吸水試験の結果を図-10 に示す。N と BB を比較して、C では養生 1 日では BB の面積率が大きくなっているが、3 日以降でその差は小さい。また W では養生日数 3 日の段階から BB の面積率が小さくなっており、吸水しにくい構造となっている。この試験は今後検証が必要であるが、水の移動経路であるコンクリート中の空隙特性（緻密性や連続性）を評価できると考えられ、セメント種や養生の差を示しているものと考えられる。

(2) 透水試験

N と BB における透水試験の結果を図-11 に示す。養生日数が短い場合には、BB は水の拡散係数が大きいですが、養生を実施することで、水の拡散係数は回復し CD7 や W28 では N と同等以下となった。

(3) 中性化速度

図-12 は促進中性化試験の結果から算出した中性化速度係数の変化を示す。高炉セメントコンクリートは元来、コンクリート中のアルカリが低下していることや $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が少ないことにより中性化しやすく、全体的に中性化速度係数は大きな値となる⁷⁾。N、BB とともに養生方法によらず、養生日数が長くなれば中性化速度係数を抑制することができるが、N が養生方法間で差が小さいのに対し、BB においては W で C、S では中性化速度係数の抑制の程度が異なる。C で養生日数 1, 3 日では中性化速度係数は大きくなっているが、材齢 5 日以上養生を実施することで N との差はほぼ一定となっており、中性化抵抗性には養生日数の確保が必要であるといえる。

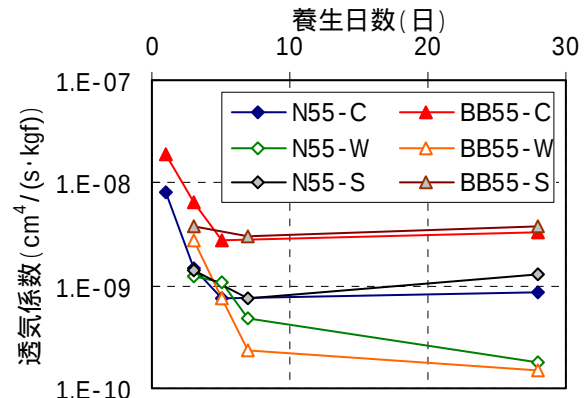


図-9 養生日数と透気係数の関係

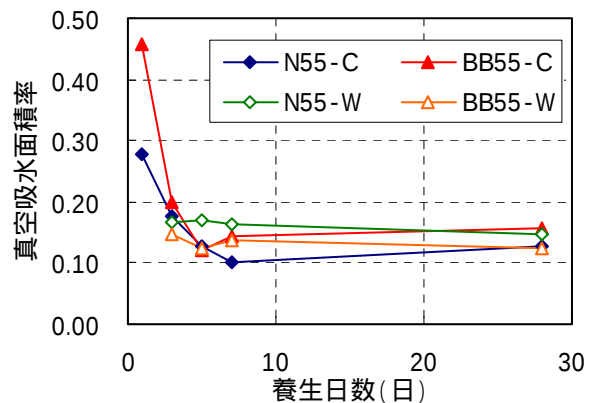


図-10 養生日数と真空吸水面積率の関係

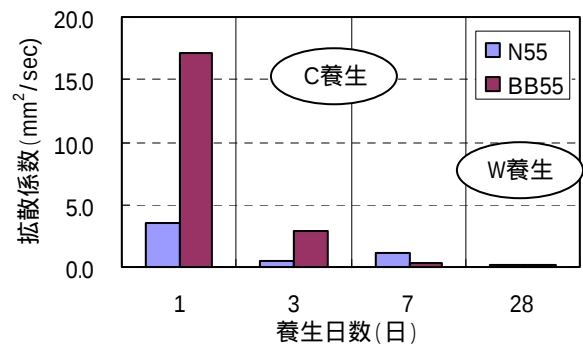


図-11 養生日数と水の拡散係数の関係

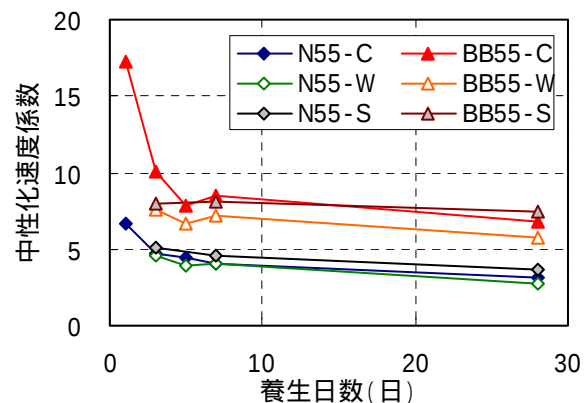


図-12 養生日数と中性化速度係数の関係

(4) 細孔径分布

図-13 は水銀圧入式ポロシメータにより求めた平均細孔直径を養生方法別に示している。Nと比較してBBは全体的に平均細孔直径が小さくなっており、高炉スラグ微粉末を使用することによる空隙の緻密化が認められる。その傾向はCにおいても認められ、前述の耐久性結果と直接的に関係していない。ただし、Cの養生1日におけるBBはNよりも大きな細孔直径となり、水和不足により大きな空隙を残存することが推測できる。

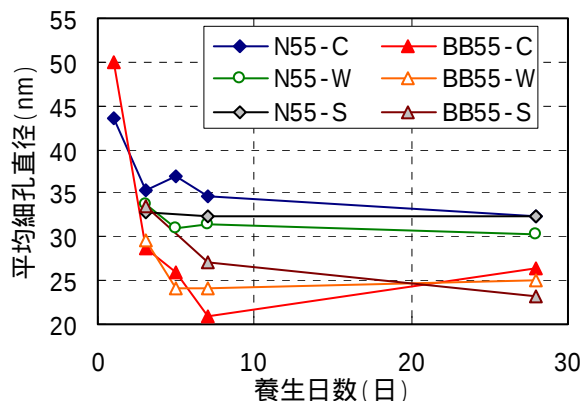


図-13 養生日数と平均細孔直径の関係

4. 水結合材比の影響と実験結果の関連性

4.1 耐久性評価における水結合材比の影響

図-14 は水結合材比を 45,55,65%とした N, BB の透気・透水・中性化速度係数を比較したものである。全体的に水結合材比が大きくなるといずれの耐久性においても低下し、その傾向はどの指標でもある程度直線的である。またいずれの水結合材比においても養生が長くなることで耐久性も向上している。さらに養生 C では BB は N よりも耐久性は低下するが、養生 W では同程度以上に向上することがわかる。中性化速度係数では BB は N を下回るが、養生を長くしたり水結合材比を小さく設定したりすることで同程度となっている。

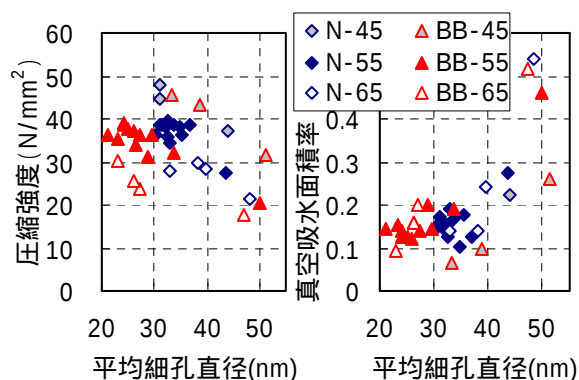


図-15 平均細孔直径と圧縮強度・真空吸水面積率

4.2 平均細孔直径と強度・真空吸水面積率との関係

図-15 は平均細孔直径と圧縮強度・真空吸水面積率との関係を示したものである。空隙径が大きくなると強度が低下し、真空吸水面積率が増加する傾向にはあるものの、一概に関係性があるとは言い難い。このことから、平均細孔直径では強度や耐久性を論ずることは困難であり、空隙径の構成や連続性を評価する必要があると考えられる。

4.3 圧縮強度・真空吸水面積率と耐久性の関係

図-16 に圧縮強度ならびに真空吸水面積率と各耐久性の結果を整理した。ここで、前述したが真空吸水面積率は、空隙の連続性を評価しているものと考え、物質透過

性と相関が得られると推測される。

透気係数と圧縮強度には、おおむね相関関係が認められており、強度発現とともに耐透気性の向上が認められる。しかし、水中養生で長期間養生を実施した場合には、養生 C とは異なり、強度の割に耐透気性が向上する結果となることから、7 日以上水中養生で緻密化が進むこと、さらにその傾向は BB で顕著となると推測できる。圧縮強度と水の拡散係数では、強度が高くなることで拡散係数は抑えられている。さらに、圧縮強度と中性化速度係数では、従来からいわれている⁷⁾ように、養生方法

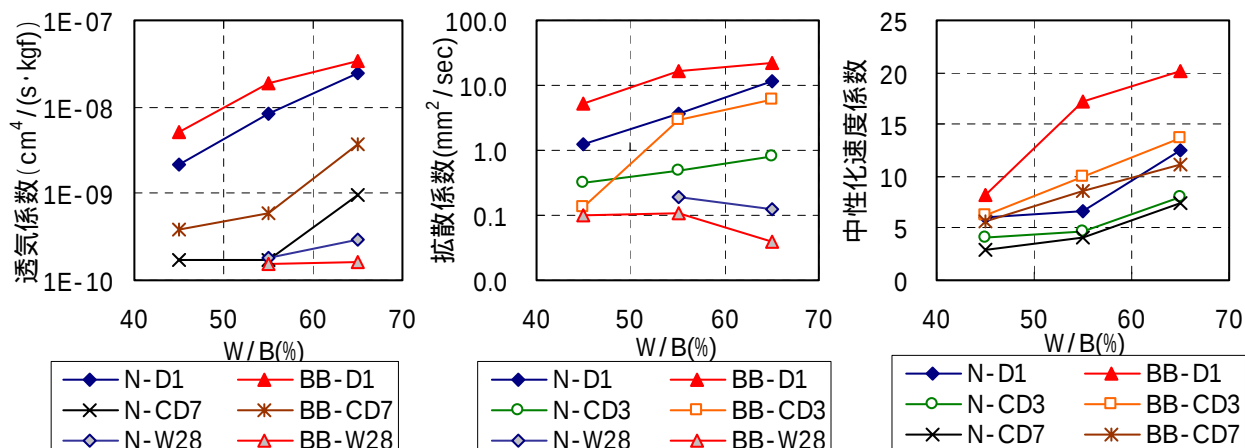


図-14 水結合材比と各種耐久性の関係

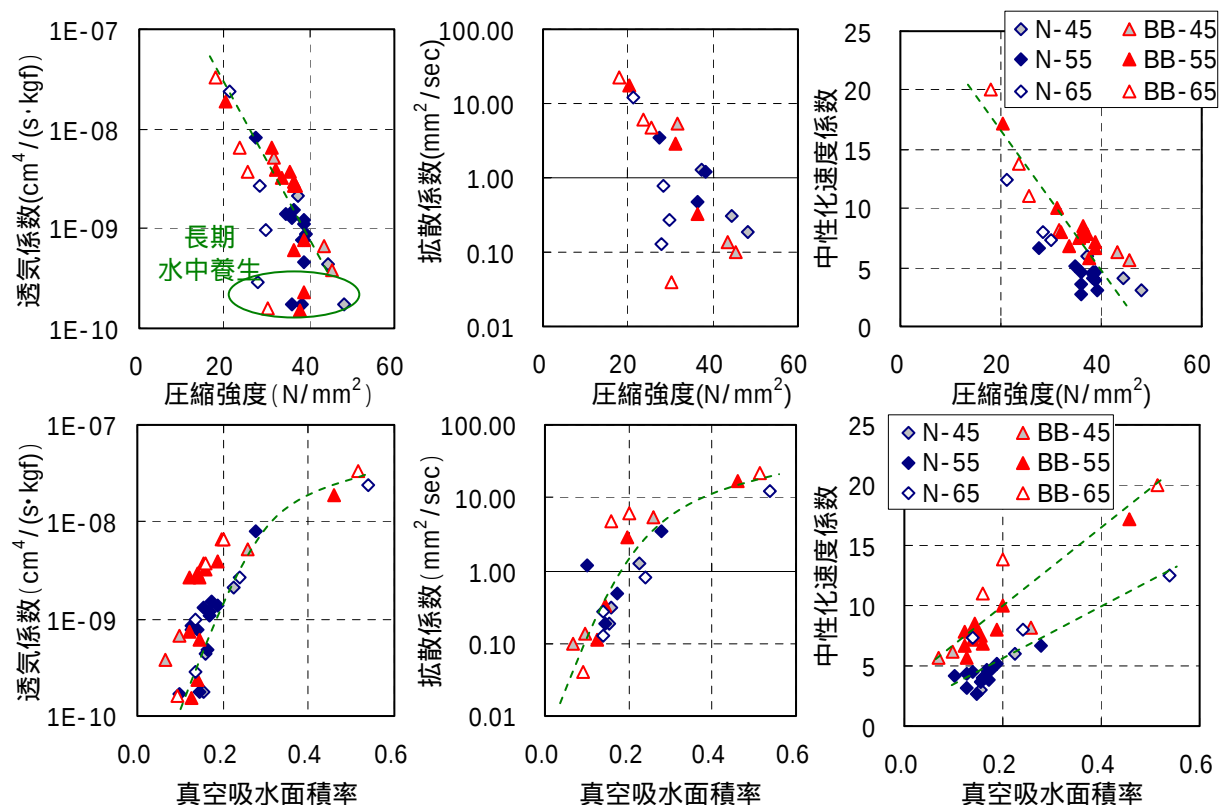


図-16 圧縮強度・真空吸水面積率と各種耐久性の関係

や結合材の種類によらず、圧縮強度が高ければ中性化速度係数を抑制できるといえる。このことは、BB であっても N と同程度の強度であれば、おおむね中性化速度は同程度であることを示している。

真空吸水面積率と透気係数ならびに拡散係数では、一定の関係が認められ、真空吸水面積率が耐久性の指標として捕らえることができる。また中性化速度係数との関係では、N と BB で二つの直線関係が見られ真空吸水面積率の表す同一の空隙連続性であっても、セメントの種類により中性化速度係数が異なることがわかる。

5. まとめ

N とそれをベースセメントとして試製した BB の養生方法と養生日数に関する物理性質と物質移動特性について検討した一連の結果で得られたことを以下に記す。

- (1) 養生方法と乾燥開始材齢を変化させた圧縮強度の発現性は水分供給が多いほど発現性が高い。
- (2) BB は N に比べ養生の影響を大きく受ける。その傾向は強度・物質移動特性の両者に共通している。
- (3) 圧縮強度ならびに真空吸水面積率と耐久性には関係がみられ養生の影響を試験体レベルで整理できた。

今後は、コンクリート内部の不均一性を考慮し湿度分布や構造体での検討を実施するとともに、混和材係数（各種性能に対してセメントを 1 としたときの混和材の効果）の定量化を目指していきたい。

謝辞：本検討の一部は九州工業大学の工藤幸太君ならびに九州大学卒論生の関康博君にご助力いただいた。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 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，No.60，pp.227-234，2006
- 2) 国府勝郎・滑川和臣・宇治公隆・上野敦：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質に対する置換率および養生条件の影響，コンクリート工学論文集，Vol.14，No.2，pp.79-86，2003.5
- 3) 佐藤幸恵・丸山一平・樹田佳寛：脱型時期がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，2007
- 4) 笠井芳夫・池田尚治編著：コンクリートの試験方法下，技術書院，1993
- 5) 村田二郎：コンクリートの水密性の研究，土木学会論文集，第 77 号，pp.69-99，1961.11
- 6) 伊代田岳史・魚本健人：若材齢時の水分履歴がセメント硬化体の内部組織構造形成と物理特性に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，Vol.15，No.2，pp.25-34，2004.5
- 7) 日本建築学会：高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2001.7