論文　高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの促進中性化試験結果に関する一考察

坂田　昇[*1]・林　大介[*2]・橋本　学[*3]・米澤　敏男[*4]

要旨：高炉スラグ高含有セメント（BC）を土木および建築構造物に適用することを想定し，水セメント比 40%～60%，単位水量 135 kg/m^3～200 kg/m^3 の範囲の促進中性化試験データを収集した結果，単位水量と中性化速度係数に相関があることが確認された。この理由として，BC を用いるとブリーディングが増加するために供試体表面の水セメント比が高くなるという機構を推察した。また，既往の研究にも同様の傾向が示唆される試験結果が示されていることを確認した。以上のことより，特に BC を用いる場合には，ブリーディングを抑制できる配（調）合を選定し，中性化に対する抵抗性を高めることが必要であることを考察した。

キーワード：高炉スラグ微粉末，高炉スラグ高含有セメント，中性化速度係数，単位水量

1. はじめに

著者らは，環境負荷低減の観点から，セメント製造時の二酸化炭素発生量およびエネルギーの削減に有効な高炉スラグ高含有セメント（以下 BC と表記）[1)] に関する検討を進めている。BC は，高炉スラグ微粉末を 60%以上含むセメントであり，高炉スラグ微粉末の粉末度やセメントクリンカー中の SO_3 量の調整によって，高炉セメントの課題であるコンクリートの初期強度発現や収縮などの特性が改善されている[2), 3)]。

高炉セメントを用いると，スラグの反応によってカルシウムシリケート水和物やカルシウムアルミネート水和物が生成されてコンクリートが緻密になり，普通ポルトランドセメントを用いる場合よりも，塩化物イオンなどの劣化因子の侵入を抑制することが可能となる[4)]。

その一方で，普通ポルトランドセメントよりも水酸化カルシウムの生成量が少なくなるため，中性化が進行しやすくなる傾向がある[4)]。特に，BC のように，高炉スラグ微粉末を多く含むセメントを適用する場合には，中性化に対する耐久性の確保について十分な検討が必要とされる。このため，BC を用いたコンクリートの中性化については，土木および建築構造物を用途として想定し，様々な試験を実施してきた[3), 5)]。例えば，BC を土木構造物に適用することを想定し，高炉セメント B 種と比較した試験では，BC の方が高炉セメント B 種よりも中性化が進行する結果となったものの，水セメント比を 5%程度低減させた配合を選定することにより，高炉セメント B 種と同等の中性化速度係数が得られることが確認されている[5)]。また，BC を建築構造物の高強度コンクリートに適用することを想定し，高炉セメント B 種と比較した試験においても，土木構造物を想定した試験と同様，水セメント比を低減することにより，BC を実構造物に適用できる可能性が示されている[3)]。これらの検討により，BC を用いたコンクリートは，適切に配（調）合を選定することによって，中性化に対する抵抗性を確保できることが明らかにされている。

ところで，BC の適用対象としている土木構造物と建築構造物では，一般に目標スランプが異なり，結果としてコンクリートの配（調）合，特に単位水量に違いがある。例えば，土木コンクリートの場合，スランプ 8～12cm が用いられることが多く，単位水量は原則として 175kg/m^3 以下である[6)]。それに対して，建築コンクリートの場合，スランプ 18cm 以下を標準としているものの，調合管理強度が 33N/mm^2 以上の場合にはスランプ 21cm とすることができ，単位水量は 185kg/m^3 以下との規定がある[7)]。

コンクリートの中性化に関しては，これまでに多くの研究がされており，様々な試験結果を基に，種々の中性化速度式が提案されているが[8)]，上記のような土木コンクリートと建築コンクリートの配（調）合の違いを踏まえた包括的な検討がされたことは，ほとんどないものと考えられる。BC については，土木構造物および建築構造物に適用することを想定して，幅広い範囲の配（調）合条件のコンクリートを対象とした促進中性化試験結果が蓄積されている。

本論文では，これらの試験におけるコンクリート配（調）合と中性化速度係数の関係を整理することによ

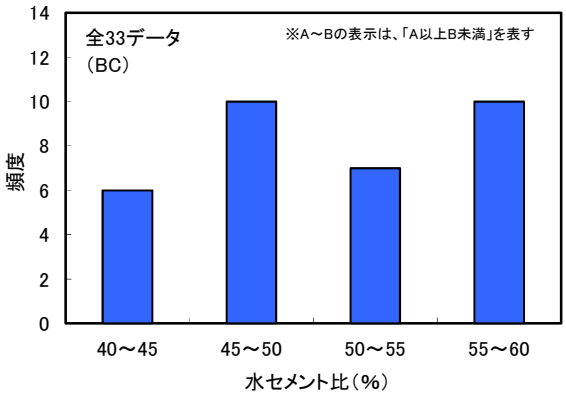
*1 鹿島建設(株)　土木管理本部　土木技術部長　博士（工学）　（正会員）
*2 鹿島建設（株）　技術研究所　土木材料グループ　主任研究員　博士（工学）　（正会員）
*3 鹿島建設（株）　技術研究所　土木材料グループ　主任研究員　工修　（正会員）
*4（株）竹中工務店　技術研究所　リサーチフェロー　Ph.D　（正会員）

り，BC を用いたコンクリートの中性化に顕著な傾向を明らかにし，さらに得られた知見からコンクリートの配（調）合が中性化の進行に及ぼす影響について考察することを試みた。

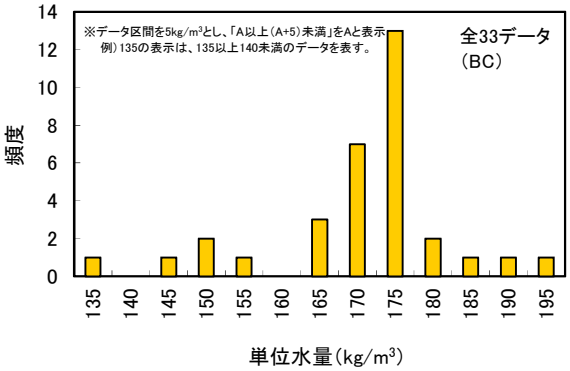
2. 促進中性化試験の概要

2.1 実施概要

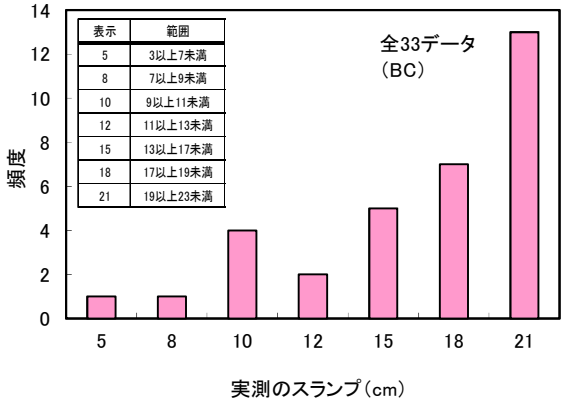
本検討では，BC を用いたコンクリートについて，33 配（調）合のデータを収集した。その内訳は，東京都内および千葉県内の研究施設において取得した計 15 配（調）合のデータと，関西地方で稼動する 6 箇所のレディミクストコンクリート工場において取得した各 3 配（調）の計 18 配（調）合のデータである。



図－1　水セメント比の分布



図－2　単位水量の分布



図－3　実測のスランプの分布

表－1　使用材料

項目	記号	供試体 No.	摘要
水	W	1～15,31～33	上水道水
		16～18,28～30	回収水（上澄水）
		19～27	工業用水
ｾﾒﾝﾄ	C	1～33	高炉ｽﾗｸﾞ高含有ｾﾒﾝﾄ（BC），ｽﾗｸﾞ含有率 60～65%，密度 2.98g/cm³，SO_3 量 3.60%
		34～39	高炉ｾﾒﾝﾄ B 種（BB），密度 3.04 g/cm³
細骨材	S1，S2	1～9,34～37	S1；東京都八王子産砕砂，表乾密度 2.64g/cm³，吸水率 0.98%，粗粒率 3.04 S2；千葉県君津産山砂，表乾密度 2.61g/cm³，吸水率 1.35%，粗粒率 1.44
		10～15,38～39	S1；千葉県君津産山砂，表乾密度 2.62g/cm³，吸水率 1.28%，粗粒率 2.62
		16～18	S1；佐賀小川島沖産海砂，表乾密度 2.57g/cm³，吸水率 1.43%，粗粒率 2.60 S2；兵庫家島町西島産砕砂，表乾密度 2.58g/cm³，吸水率 1.84%，粗粒率 3.01
		19～21	S1；佐賀小川島沖産海砂，表乾密度 2.57g/cm³，吸水率 1.74%，粗粒率 2.64
		22～24	S1；大分津久見産砕砂，表乾密度 2.65g/cm³，吸水率 1.03%，粗粒率 2.90 S2；兵庫家島町西島産砕砂，表乾密度 2.57g/cm³，吸水率 1.66%，粗粒率 2.90
		25～27	S1；兵庫家島町西島産砕砂，表乾密度 2.58g/cm³，吸水率 1.75%，粗粒率 2.84 S2；福岡県北九州産砕砂，表乾密度 2.69g/cm³，吸水率 0.72%，粗粒率 2.45
		28～30	S1；兵庫赤穂産砕砂，表乾密度 2.59g/cm³，吸水率 1.68%，粗粒率 2.85 S2；大分津久見産砕砂，表乾密度 2.67g/cm³，吸水率 0.72%，粗粒率 2.80
		31～33	S1；賀唐津産海砂，表乾密度 2.57g/cm³，吸水率 1.72%，粗粒率 2.82 S2；兵庫県家島町西島産砕砂，表乾密度 2.60g/cm³，吸水率 1.15%，粗粒率 3.00
粗骨材	G1，G2	1～9,34～37	G1；東京都奥多摩産砕石，表乾密度 2.65g/cm³，吸水率 0.60%，粗粒率
		10～11	G1；東京都八王子産砕石，表乾密度 2.67g/cm³，吸水率 0.72%，粗粒率 6.63
		12～15,38～39	G1；東京都八王子産砕石，表乾密度 2.66g/cm³，吸水率 0.63%，粗粒率 6.58
		16～18	G1；兵庫県赤穂産砕石，表乾密度 2.62g/cm³，吸水率 0.95%，粗粒率 6.68
		19～21	G1；高知県鳥形山産砕石，表乾密度 2.70g/cm³，吸水率 0.28%，粗粒率 6.63
		22～24	G1；兵庫県家島町西島産砕石，表乾密度 2.62g/cm³，吸水率 0.92%，粗粒率 6.70
		25～27	G1；兵庫県家島町西島産砕石，表乾密度 2.62g/cm³，吸水率 0.92%，粗粒率 6.70 G2；山口県美祢産砕石，表乾密度 2.70g/cm³，吸水率 0.39%，粗粒率 6.52
		28～30	G1；兵庫県相生産砕石，表乾密度 2.63g/cm³，吸水率 0.86%，粗粒率 6.63
		31～33	G1；兵庫県家島町西島産砕石，表乾密度 2.63g/cm³，吸水率 0.75%，粗粒率 6.59
混和剤	Ad	1～9,25～33	AE 減水剤（多機能ﾀｲﾌﾟ，標準形）；変性ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物とﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸系化合物の複合体
		10～24	高性能 AE 減水剤（標準形）；ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸ｺﾎﾟﾘﾏｰ
		34～39	AE 減水剤（標準形）；変性ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物とﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸系化合物の複合体

表－2　コンクリート配合

供試体 No.	ｾﾒﾝﾄ 種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³） W	C	S1	S2	G1	G2	Ad C×%	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)
1	BC	20	45	43.6	135	300	662	166	1075	-	2.00	4.0	4.6
2		20	45	42.1	148	330	619	155	1068	-	1.10	11.5	4.8
3		20	50	43.1	150	300	641	160	1062	-	1.00	9.0	5.0
4		20	50	43.1	150	300	641	160	1062	-	1.00	9.0	5.0
5		20	50	48.9	170	340	343	515	913	-	1.10	17.5	4.8
6		20	52	43.5	156	300	642	160	1045	-	0.80	12.5	4.1
7		20	55	43.6	165	300	635	159	1030	-	0.20	7.0	4.0
8		20	55	44.1	165	300	642	161	1021	-	0.10	9.5	4.0
9		20	55	44.1	165	300	642	161	1021	-	0.10	9.5	4.0
10		20	50	49.2	165	330	872	-	925	-	0.55	19.0	4.4
11		20	50	49.2	165	330	872	-	925	-	0.55	20.5	5.0
12		20	45	47.8	170	378	825	-	913	-	0.72	18.3	4.5
13		20	45	47.8	170	378	825	-	913	-	0.72	18.3	4.5
14		20	50	48.8	170	340	858	-	913	-	0.72	18.0	4.5
15		20	55	49.6	170	309	885	-	913	-	0.72	17.0	4.6
16		20	40	45.0	175	438	514	219	911	-	0.60	19.5	4.3
17		20	47	47.5	175	372	560	240	901	-	0.70	19.0	4.0
18		20	57	50.1	175	307	609	263	885	-	0.80	19.5	4.3
19		20	40	45.0	175	438	732	-	940	-	0.28	19.5	4.2
20		20	47	47.5	175	372	799	-	929	-	0.28	19.0	4.5
21		20	57	50.1	175	307	871	-	913	-	0.33	20.0	4.9
22		20	40	46.4	175	438	233	529	888	-	0.80	20.5	4.7
23		20	47	48.8	175	372	254	576	878	-	0.95	20.0	4.2
24		20	57	51.4	175	307	276	627	862	-	0.95	18.5	4.5
25		20	43	43.7	180	419	437	303	477	491	0.40	16.0	4.5
26		20	49	44.7	179	365	452	314	473	487	0.45	17.5	4.6
27		20	57	47.0	178	312	489	340	467	481	0.45	16.5	4.8
28		20	43	43.8	180	419	500	224	933	-	0.40	15.5	3.9
29		20	49	45.8	179	365	538	240	927	-	0.40	16.5	4.4
30		20	57	47.3	178	312	572	256	927	-	0.35	15.5	4.2
31		20	43	41.7	195	453	455	197	928	-	0.45	20.0	4.5
32		20	49	44.1	191	390	502	218	928	-	0.42	19.0	4.3
33		20	57	45.9	189	332	540	234	928	-	0.45	19.5	4.1
34	BB	20	45	43.6	135	300	664	166	1078	-	2.00	3.0	4.3
35		20	50	43.6	150	300	650	163	1056	-	1.20	6.5	4.7
36		20	55	43.6	165	300	637	159	1033	-	0.30	9.0	4.7
37		20	55	43.6	165	300	637	159	1033	-	0.30	8.0	4.5
38		20	55	49.7	170	309	891	-	913	-	0.30	16.5	4.5
39		20	55	49.7	170	309	891	-	913	-	0.30	16.5	4.5

また，比較対象として，高炉セメントB種を用いたコンクリートについても，6 配（調）合のデータを収集した。これらのデータは，前述の東京都内および千葉県内の研究施設において取得したものである。

BC を用いたコンクリートの配(調)合条件について，水セメント比および単位水量のヒストグラムを，それぞれ**図－1** および**図－2** に示す。

同図に示すように，水セメント比については，40%から 60%の範囲で，ほぼ均等に分布するデータとなっている。また，単位水量については，135 kg/m³ から 200 kg/m³ までの広範囲にデータが存在し，特に 165kg/m³ から 185kg/m³ のデータが数多く存在している。

実測のスランプのヒストグラムを，**図－3** に示す。スランプについては，3.0cm から 20.5cm の範囲に分布し，特に 13cm 以上のデータが多くなっている。

以上のように，土木および建築コンクリートを幅広く網羅する配（調）合条件のコンクリートについて，促進中性化試験結果を収集した。

2.2 コンクリート材料および配（調）合

コンクリートの材料および配（調）合を，それぞれ**表－1** および**表－2** に示す。ここで，**表－2** に示すスランプおよび空気量については，フレッシュコンクリートの実測の値を示している。

2.3 促進中性化試験方法

JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて，100×100×400mm の供試体を，各配（調）合について 3 体ずつ作製し，促進材齢 13 週における中性化深さを測定して 3 体の平均値を算出した。

その後，試験によって得られた中性化深さが促進期間の 0.5 乗に比例すると仮定した場合の比例定数である中性化速度係数（mm/√週）を算出した。

ここで，東京都内および千葉県内の研究施設における供試体作製では，100L 練り強制二軸ミキサを用い，練混ぜ量を 60L とした。また，レディミクストコンクリート工場における供試体作製では，50L もしくは 60L 練り強制二軸ミキサを用い，練混ぜ量を 40L とした。

3. 試験結果および考察

3.1 BCの促進中性化試験結果および考察

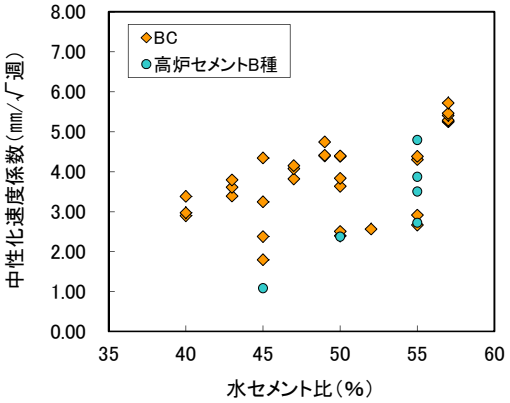
既往の研究により，中性化速度係数と水セメント比の間には相関が認められることが明らかとなっている[8)]。このことを踏まえ，本検討で収集したBCおよび高炉セメントB種の全データについて，水セメント比と中性化速度係数の関係を**図－4**に示す。

同図より，BCのデータは，全体的に水セメント比が高くなるに従って中性化速度係数が大きくなる傾向を示しているが，ばらつきが大きい結果となっている。

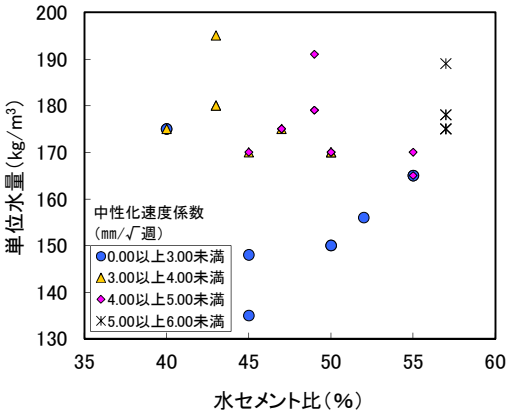
また，高炉セメントB種と比較すると，同一の水セメント比において，BCの方が，中性化速度係数が大きい傾向が認められるものの，水セメント比が50%以上の範囲ではほとんど差異が認められない。

この結果は環境条件を同一とした促進試験によって得られたものであるため，同図に認められたばらつきの要因は，コンクリート材料にあることが推察される。そこで，BCのデータを中性化速度係数によって分類し，水セメント比と単位水量の関係上にプロットした。その結果を**図－5**に示す。

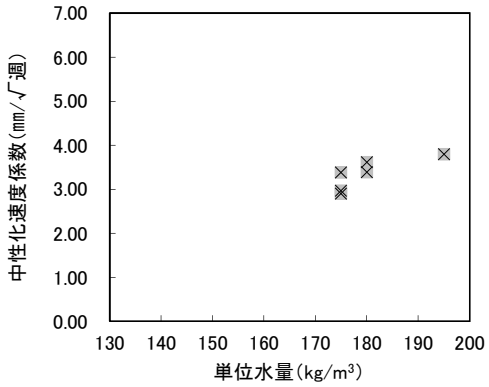
同図より，単位水量が165kg/m^{3}よりも少ない範囲では，水セメント比によらず中性化速度係数が 3.00mm/√週未満の小さな値となることが確認される。それに



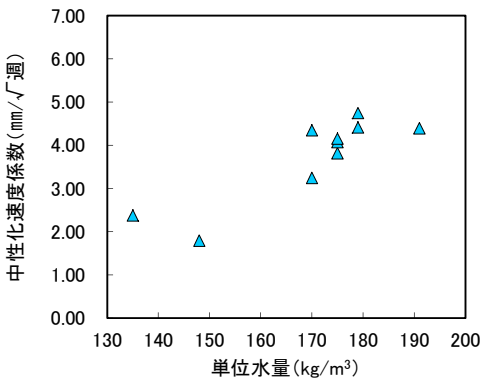
図－4　水セメント比と中性化速度係数の関係



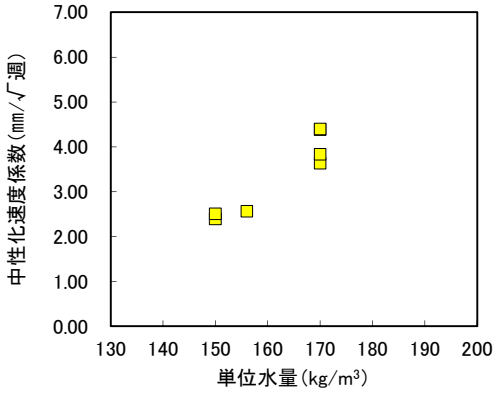
図－5　水セメント比と単位水量の関係



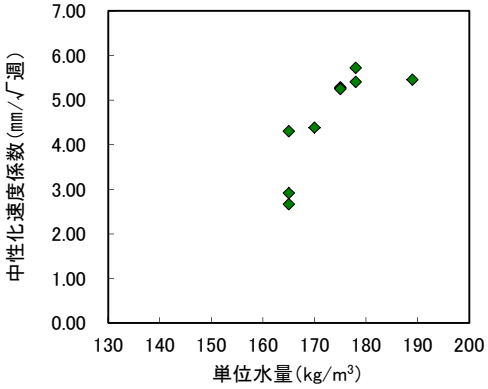
(a) 水セメント比 40%以上 45%未満



(b) 水セメント比 45%以上 50%未満



(c) 水セメント比 50%以上 55%未満



(d) 水セメント比 55%以上 60%未満

図－6　単位水量と中性化速度係数の関係

対し，単位水量が 165kg/m^3 以上の範囲では，ほとんどのデータの中性化速度係数が 3.00mm/√週以上となっており，BC の中性化速度係数には，水セメント比のみでなく単位水量も影響を及ぼす可能性があることが推察される結果が得られた。

このことを踏まえ，単位水量と中性化速度係数の関係上に，水セメント比によって分類したデータをプロットした結果を**図－6** に示す。

同図より，単位水量が多くなるほど中性化速度係数が大きな値となる傾向が認められる。また，単位水量が同程度であれば，水セメント比が高いほど中性化速度係数が大きくなる傾向が確認される。

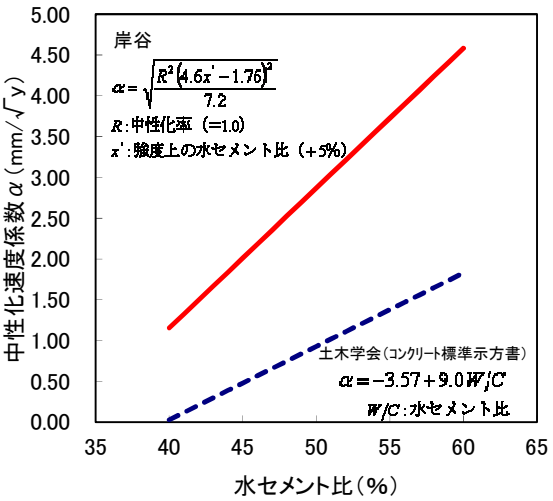
以上の結果より，BC の水セメント比と中性化速度係数の関係に認められたばらつきの要因の一つは，単位水量であることが推察される。BC を用いたコンクリートにおいて，単位水量が多いほど中性化速度係数が大きくなる理由については，以下のように推察することができる。

BC のように高炉スラグ微粉末で置換されたセメントを用いると，コンクリートの凝結が遅くなることがあるため，ブリーディングが発生しやすくなることがある [9]。BC については，ブリーディングを抑制するための配（調）合選定などについても検討が進められているが [9]，単位水量が多くなればブリーディングも増えていくことが考えられる。既往の研究 [10] において，ブリーディングが多くなると，型枠と接する面に水が滞留し，表層部の水セメント比が高くなるような現象が起こることが確認されており，結果として中性化が進行しやすくなる可能性がある。また，ブリーディングがコンクリート中を移動する際，連行された気泡が変化することが明らかにされており [11]，表層付近の気泡が多くなって中性化が進行しやすくなることも考えられる。

3.2 ブリーディングが中性化の進行に及ぼす影響

単位水量が中性化に影響を及ぼす傾向は，普通ポルトランドセメントよりもブリーディングが発生しやすい BC を対象として，単位水量が 135 kg/m^3 から 200 kg/m^3 までの広い範囲のデータを収集した結果，明確になったものであるが，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにも BC を用いたコンクリートと同様の傾向が認められないか，既往の試験データに基づいた考察を試みた。

まず，土木学会のコンクリート委員会フライアッシュ研究小委員会が実施した試験のデータ [12] を確認した。ここで得られたデータを基に提案された中性化速度係数の推定式はコンクリート標準示方書〔設計編〕に採用されている。この試験では，普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントを用いた 17 種類のコンクリートの暴露試験を行っており，単位水量については，160kg/m^3 前後を中心として 143kg/m^3～177kg/m^3 の範囲に選定されている。この研究では，ブリーディングの影響による品質のばらつきについても検討されており，供試体作製時の上面と下面を比較した結果，上面の方が，中性化が進行している傾向が認められたものの，その差は 1mm 前後であり，考慮する必要があるほどではないことが結論付けられている。



図－7　土木学会および岸谷の推定式

次に，岸谷が実施した試験のデータを確認した [13]。岸谷が提案した中性化速度係数の推定式は，最も汎用されている推定式の一つになっている。この研究では，多くの試験がされており，単位水量については，ほとんどが 200kg/m^3 以上である。

一連の促進試験の中で，普通ポルトランドセメントを用い，水セメント比を 60%，単位水量を 210kg/m^3 として，化学混和剤を用いずに細骨材率の調整によってスランプ 21cm および 10cm の 2 種類に設定したケースがある。この結果をみると，スランプ 21cm および 10cm の中性化深さの平均値が，それぞれ 10.0mm および 2.5mm となっている。水セメント比および単位水量が同一のコンクリートにおいて，材料分離抵抗性が低いスランプ 21cm のコンクリートの方が大きな値を示したことは，前述の BC の試験結果の考察と同様，ブリーディングがコンクリートの中性化に影響を及ぼす可能性があることを示唆している。

以上の 2 つの研究を基に提案された推定式を**図－7** に示す。ここで，岸谷の推定式には強度上の水セメント比が用いられている。本検討では， AE コンクリートを対象とした場合の水セメント比として，強度上の水セメント比に 5%を加えた値を用いた。

同図に示すように，土木学会の推定式の方が，岸谷

式よりも，同一の水セメント比に対する中性化速度係数が小さくなることが分かる。また，水セメント比が高くなるほど，これらの式の差が大きくなることが確認される。これらの推定式は，回帰の基となる試験条件が異なるため，一概には言えないものの，単位水量が多く，ブリーディングが発生しやすいコンクリート供試体を用いた試験に基づいた推定式の方が大きな中性化速度係数を与えることは, BC のデータを収集して得られた傾向と一致する。

BC のブリーディングが, 普通ポルトランドセメントよりも多くなる傾向があることは前述のとおりであるが，依田らは，細骨材の粗粒率を小さくすることや，単位水量および単位セメント量の選定によって, BC を用いたコンクリートのブリーディングを減少できることを確認している [9)]。依田らの検討の対象は場所打ち杭であるため，中性化を念頭に置く必要はないが，このような知見を活かし, BC を用いる場合でもブリーディングが少ないコンクリートとすることが，中性化の進行を抑制し，耐久性の向上に有効であることが示唆される。

4. まとめ

BC を用いたコンクリートの促進中性化試験結果を収集し，配（調）合条件との相関を検討した結果，以下の考察が得られた。

1) BC を用いたコンクリートの中性化速度係数は，水セメント比のみでなく, 単位水量とも相関があることが確認された。
2) BC を用いたコンクリートの中性化速度係数と単位水量に相関が認められる理由として，BC の凝結が遅いためにブリーディングが多くなり, 供試体表面の水セメント比が高くなりやすいことが考えられた。
3) BC を用いたコンクリートに認められた単位水量と中性化の相関について, 土木学会と岸谷の試験データを確認したところ, 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにも，BC を用いたコンクリートと同様の傾向が認められた。
4) 以上の結果より，BC を用いたコンクリートで検討されているブリーディング抑制対策が, 中性化を抑制する上でも必要とされる可能性があることを考察した。

謝辞：本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（ＮＥＤＯ）の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/実用化開発/エネルギー・CO2 ミニマム（ECM）セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として，共同研究者である東京工業大学坂井悦郎教授をはじめ，（株）デイ・シイ，日鉄住金高炉セメント（株），太平洋セメント（株），日鉄住金セメント（株）および竹本油脂（株）と実施したものです。本研究に関わられた関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

1) 米澤敏男，坂井悦郎，鯉渕清，木之下光男，釜野博臣：エネルギー・CO_2 ミニマム（BC）セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, 48 巻, 9 号，pp.69-73，2010.9
2）二戸信和，大澤友宏，鯉渕清，宮澤伸吾：高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と SO_3 の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.121-126，2008
3）和地正浩，米澤敏男，三井健郎，井上和政：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす SO_3 量の影響, コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.203-208，2011
4）鐵鋼スラグ協会：鐵鋼スラグの高炉セメントへの利用（平成 17 年度版），2003
5）室野井敏之，坂井吾郎，井上和政，齊藤和秀：高炉スラグ高含有セメントを用いた土木用コンクリートの基礎物性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集，Vol.35，pp.193-198，2013.7
6）土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, 2013.3
7）日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説　JASS5 鉄筋コンクリート工事，2009.2
8）和泉意登志，喜多達夫，前田照信：中性化，技報堂出版，1986.8
9）依田和久，新谷彰，青木雅路，齊藤和秀：高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ち杭用コンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.223-228，2013
10）三田勝也，加藤佳孝：ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1385-1390，2011
11）坂田昇，菅俣匠，林大介，作榮二郎：コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2，pp.59-69，2012.5
12）土木学会：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究（最終報告），コンクリート・ライブラリー第 64 号，1988.3
13）岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，1963.2