

報告 強さクラス 32.5 セメントを使用したコンクリート壁供試体の屋外暴露 10 年の評価結果

小早川 真^{*1}・鬼丸 宣貴^{*2}・森下 重和^{*2}

要旨：日本の普通セメントは、EN 規格（197-1）の強さ 52.5 クラスのセメントに相当する高強度型である。施工や耐久性の面からは適度に富配合のコンクリートとなる低強度のセメントが良いとされる。そこで欧州で普及している強さ 32.5 クラスの混合セメント 2 種を試製し、それらを用いて生コンクリートを製造し評価を行った。更に 10 年間屋外暴露した壁供試体よりコアを採取し、強度、中性化、透水試験を実施し、セメントの反応率や空隙構造を比較した。その結果、強さの低い 32.5 クラスの混合セメントを用いたコンクリートは強さの高い普通セメントや高炉 B 種セメントを用いた場合とコンクリートとして遜色ないことを確認した。

キーワード：屋外暴露、石灰石粉、高炉スラグ微粉末、耐久性、透水性、中性化、空隙径分布

1. はじめに

近年、強さが高いセメントが好まれる傾向によって、コンクリートが貧配合となり易い状況にある。一方欧州では、セメント強さによる分類が用いられ、強さ 32.5・42.5 クラスの日本より低い強さのセメントが普及している。長期間供用されるコンクリートにとってどのようなセメントが相応しいか議論が進んでいるところである¹⁾。

筆者らは、強さクラス 32.5 セメントの構成材料の評価^{2), 3)}やフレッシュ性状や材料分離抵抗性の評価を実施し^{4), 5), 6)} 耐久性等^{7), 8)} その性状を明らかにしてきた。しかし長期の材齢を経たコンクリートの耐久性に関しては情報が得られていない状況にあった。

本報告は、32.5 クラスセメント活用を目的に材料構成が異なる 4 種類のセメントについて、呼び強度 18、スランプ 18cm のコンクリートを実機プラントで製造し、フレッシュ性状、施工性における差を検証した。またさらに壁状の供試体を打設し、屋外で 10 年に渡り暴露したもののについて行った評価結果を報告するものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントは比較用に N（普通）と BB（高炉 B 種）を使用し、32.5 クラスのセメントとして BL（スラグ微粉末、石灰石微粉末混合セメント）ならびに LS（石灰石微粉末混合セメント）を使用した。N、BB は市販品を用いた。BL、LS は N をベースに混合設備において混合を行い、一連の基礎検討（表-1）を行った。ただし本報告の生コンクリート製造時には、プラント常備の N、BB を使用し、BL、LS については、構成材料（表-2）をミ

キサーに別々に投入して実験を行った。

コンクリートに使用した骨材を表-3 に示した。

2.2 生コンクリートの概要

生コン工場の示方配合を元に、BL、LS の配合を試験

表-1 セメントの物性

種類 強さクラス	密度 (g/cm ³)	ブレーン 比表面積 (cm ² /g) (生コン製造時)	凝結 (h-m) 始発 終結	モルタル強さ (N/mm ²)				
				2d	3d	7d	28d	91d
N 52.5N	3.15	3390 (3200)	2-35 4-00	20.9	26.6	43.2	59.5	67.4
BB 42.5N	3.02	3890 (3700)	3-05 4-15	15.6	19.8	33.8	58.0	74.3
BL 32.5R	3.00	4210	2-25 3-35	14.1	19.6	31.8	46.8	56.2
LS 32.5R	3.00	4200	2-25 3-35	14.6	20.3	31.6	41.0	47.0
BL (N:スラグ微粉末:石灰石微粉末=0.65:0.15:0.2)								
LS (N:石灰石微粉末=0.7:0.3)								

表-2 32.5 セメント構成混和材の物性

種類	密度 (g/cm ³)	ブレーン 比表面積 (cm ² /g)	31 μm 残分 (%)	活性度			フロー 値比 (%)
				7d	28d	91d	
スラグ微粉末	2.89	4220	11.2	66	91	109	100
石灰石微粉末	2.72	5400	9.9	-	-	-	-

表-3 生コンクリート製造に用いた骨材

種類	産地	密度 (g/cm ³)	粗粒率
細骨材 海砂	長崎県壱岐郡郷ノ浦沖合	2.58	2.02
細骨材 砕砂	北九州市小倉南区産	2.70	3.21
粗骨材 (G) 2005	北九州市門司区産砕石	2.74	6.44

*1 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第 1 研究部 セメント技術チーム 工博（正会員）

*2 株式会社太平洋コンサルタント 西日本コンクリート試験センター

練りによって定めた（表-4）。試験室のミキサー練りにおける材齢 28 日の圧縮強度は 32N/mm²であった。

混練時間については N, BB は通常通りであるが, BL, LS では攪拌しながら材料を手投入したことにより N, BB に比べ著しく長くなった。

プラントミキサーは 2m³の強制二軸式であり, 1m³を 2 バッチ練り混ぜ, アジテータ車で運搬した。

2.3 屋外暴露供試体概要

出荷時と荷卸時のフレッシュ性状を確認し, 運搬されたコンクリートは, 打設用ホッパを用い, 型枠に投入した。パイプレータと木槌により締固めを行った。壁供試体はセメント種類毎に二体打設し, 施工の影響を検討するために, それぞれパイプレータによる締固め時間を, 標準的な時間（壁 A）と 2 倍の時間（壁 B）に変えた。その他評価用に, 円柱・角柱供試体を同時に成型した。

壁供試体は, 図-1 のように評価を計画し, 材齢 28 日に鉄筋引き抜き試験やコア採取によるパイプの付着評価, 凍結融解試験, 促進中性化試験を実施し, その後は, 壁を写真-1, 図-2 の様に水平に倒し屋外暴露を継続した。材齢 10 年目に採取したコアの用途も図中に記した。

2.4 試験方法

（1）フレッシュ性状

セメント強さが異なるため, 構成材料の相違, また配合面の違いによりフレッシュ性状に生じる変化を確認するために, 製造したコンクリートは表-5 に示す項目について評価を行った。

（2）施工性に関する評価

施工性に関する評価として, 材料側のブリーディング, 材料分離, 充填性等の違い, また施工側の締固めによる影響が生じると考えられる鉄筋の付着状況を確認した。

壁供試体（A, B）の高さ 23cm と 98cm の位置に設置した異型鉄筋（D19）を材齢 28 日に土木学会基準の引き抜き試験に従って引き抜き荷重を計測した。

また同じ高さに鉄筋を模擬して塩ビパイプ（φ20mm）を設置し, パイプを中心にコアを採取し, コアを輪切りにして複数断面の未付着率⁶⁾を計測した。

（3）圧縮強度

標準養生供試体の強度試験は, JIS A 1108 に準拠し, コアの強度は, JIS A 1106 に準拠して行った。

（4）耐久性

壁供試体の耐久性については, 材齢 28 日のコアを用いて, 促進中性化試験と凍結融解抵抗性試験を行った。また屋外暴露 10 年を経た壁のコアを用いて透水試験, 中性化試験を実施した。長さ変化, 材齢 28 日の透水試験は円柱供試体を用いた。測定条件等を表-6 に示した。

（5）硬化体性状

硬化体の性状を把握するために, 壁供試体の材齢 28

日, 材齢 10 年のコア試料の空隙径分布を測定した。また, 材齢 10 年のコア試料についてセメントの未水和率を測定した。測定条件を表-7 に示した。

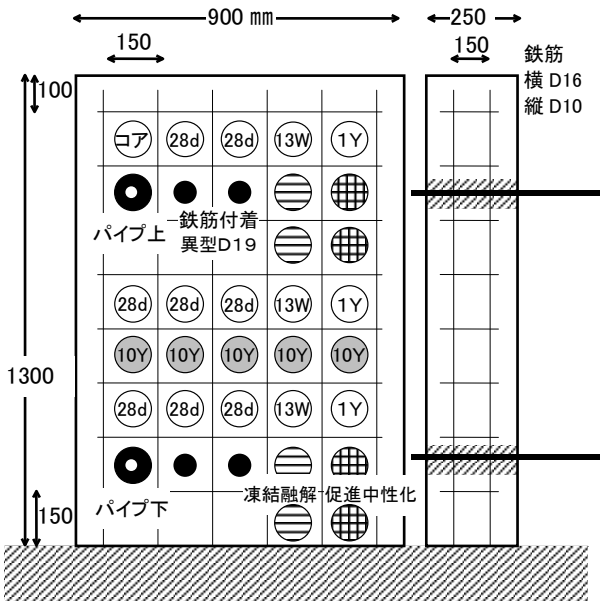


図-1 壁試験体の概要（壁 A）



写真-1 暴露供試体 5 年目の状況

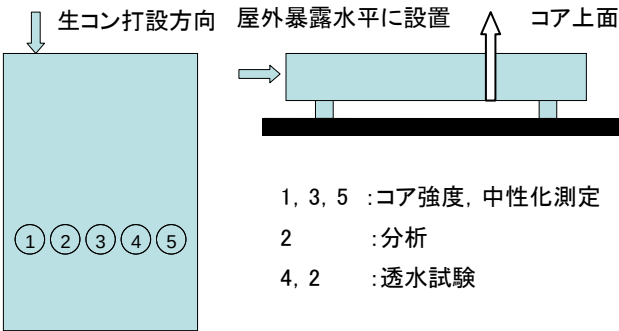


図-2 屋外暴露 10 年目のコア試料採取位置

表-4 生コンクリートの配合

呼び強度 スランブ 空気量	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						減水剤※
				W	C	海砂	砕砂	G		
18 18±2.5cm 4.5±1.5%	N	64.9	46.9	183	282	571	257	987		C× 0.25%
	BB	64.9	46.5	181	279	566	255	993		
	BL	53.4	44.3	181	339	523	235	1001		
	LS	48.4	43.2	181	374	501	225	1003		

※リグコンスルホン酸化合物とポリオール複合体

表-5 フレッシュ性状の評価方法

試験項目	試験方法
スランプ/エア	JIS A 1101/JIS A 1128
DIN 拡がり	DIN1048 試験台上で、高さ 20cm のコーンにコンクリートを詰め、コーン引上げ後、試験台の一边を 4cm 持ち上げて落下を 15 回繰り返して、フローを測定。
加圧ブリーディング	JSCE F 502-1990、およびコンクリートのポンプ施行指針
ブリーディング	JIS A 1123
凝結	JIS A 6204 付属書 1

表-6 耐久性評価の測定方法

試験項目	試料調整と測定法
透水試験 インプット法 ⁹⁾	(1) $\phi 15 \times 30\text{cm}$ を標準水中養生 4 週間後、打設方向上中下に 3 分割し、60% RH 乾燥 4 週間を経て、5 気圧の水を 1 週間間断して割裂面の透水深さを測定。 (2) 壁供試体材齢 10 年のコア $\phi 10\text{cm} \times 25\text{cm}$ を半分の長さで切断し、暴露上面、下面と内面を試験面とした。コア採取後 60% RH 乾燥 4 週間を経て、同上の試験を実施。
長さ変化 JIS A 1129	屋外暴露： $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円柱。5 d 脱型後屋外暴露 測定は 20℃室内に移動し 6 時間後に実施。
促進中性化	材齢 28 日コア($\phi 10\text{cm} \times 25\text{cm}$)採取後直ぐに試験実施。促進条件 20℃、RH60%、CO ₂ 濃度 5%。
暴露中性化	壁 A コア($\phi 10\text{cm} \times 25\text{cm}$)
凍結融解抵抗性	土木学会基準 JSCE-G501-1999、JIS A1127 に準拠。壁 A コア($\phi 10\text{cm} \times 25\text{cm}$)採取後直ぐに実施。

表-7 硬化性状性の測定方法

試験項目	試料調整
空隙径分布 水銀圧入式ポロシメータ	コア $\phi 10 \times 25\text{cm}$ の中心部。材齢時：8mm 大のサイコロ状に切断し、D-乾燥に調整した。
未水和率 電子顕微鏡 画像解析	コア試料より 8mm 角の小片を切り出し、研磨したものを 500 倍の倍率で BSE 像を観察し、画像解析により算出。

表-8 フレッシュ性状

種類	出荷			荷卸し			
	温度 (℃)	スランプ (cm)	エア (%)	温度 (℃)	スランプ (cm)	エア (%)	DIN 拡がり (mm)
N	18.0	17.3	4.9	21.0	17.0	5.5	560
BB	19.0	18.7	4.5	19.0	15.0	4.6	525
BL	19.0	17.0	4.8	18.0	20.3	5.2	550
LS	17.5	20.7	4.3	18.0	20.2	4.8	545

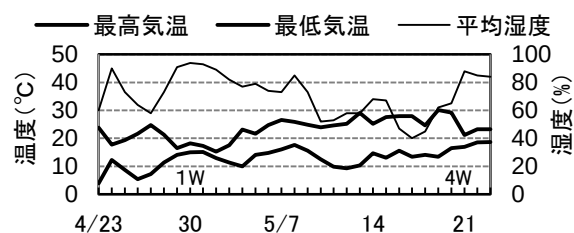


図-3 打設後 1 ヶ月間の気象データ (2001 年)

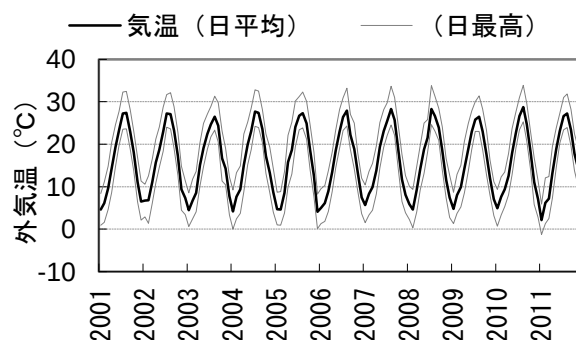


図-4 暴露期間中の近傍の気象データ

3. 暴露期間の気候

生コンクリート製造は 4 月下旬に行った。打設時の外気温は図-3 に示す様に 20℃程度であったが、打設翌日より雨天となり材齢 1 週迄の外気温変化は大きかった。図-4 に示す近傍の気象データより、その後 10 年間の気温は 0～30℃、また平均湿度は 60～80%、最低湿度は 9～45%の範囲であった。凍害を受けるような気象条件ではなかった。

4. 評価結果と考察

4.1 フレッシュ性状

出荷時と荷卸し時にフレッシュ性状を確認した(表-8)。N、BB に比べ BL、LS は若干スランプが大きい結果となったが、スランプに衝撃を与えた DIN 拡がりとは同等でありやや粘性の高いコンクリートであった。

図-5 に示すブリーディングでは浮き水の発生が N、BB では早くかつ累計量も多い傾向であり、32.5 クラスセメントは良好であった。ところが図-6 に示す加圧ブリーディングでは、N の脱水量が最も小さく、BB と LS はポンプ圧送時には脱水量が多くなることが分かった。セメントの構成材料の影響を受けていると推定され、より高強度の先行評価⁷⁾と異なり最適化の余地があった。

表-9 に示したように凝結時間は従来のセメント N、BB と 32.5 クラスセメント BL、LS での顕著な差はなかった。

4.2 施工性評価

壁供試体 A、B の打設時の締固め条件を変えた結果、図-7 に示すようにパイプの未付着率に違いが生じた。

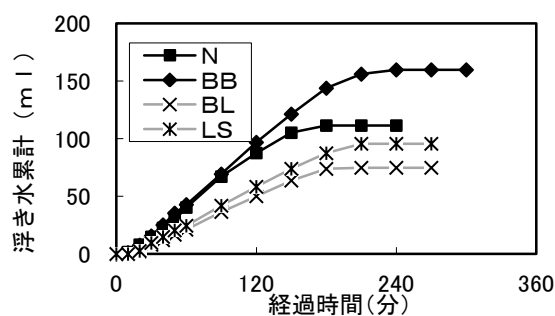


図-5 ブリーディング

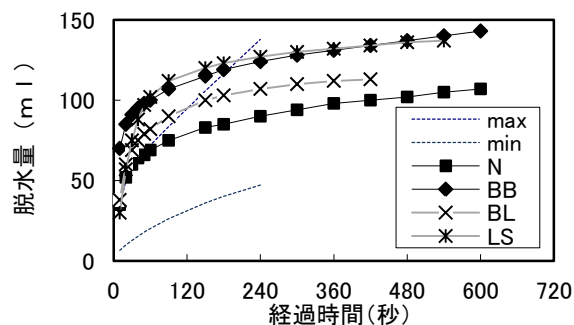


図-6 加圧ブリーディング

上部では下部に位置したパイプより未付着率が大きかった。この差異は、沈下やブリーディング，流動性に関連すると考えられる。粘性が高めであった BL，LS の上部の場合，過剰な締固めの影響は受けにくいものの，充填性はむしろ低い結果であった。下部でのセメント間の差は小さかった。施工性についてはスランプ 12cm で行った N と BL に関する先行評価⁶⁾では，締固め時間によらず BL の方が未付着率が N よりも少なかったが，それとは異なる傾向であった。

パイプの未付着率と鉄筋の引き抜き荷重には図-8 に示す様に強い負の相関があった。

4.3 凍結融解抵抗性

壁供試体 A から材齢 28 日に採取したコアを用いて凍結融解抵抗性試験を行った。BL，LS は N，BB に比べて良好な結果であった。

4.4 強度

圧縮強度は 32.5 セメントでは初期の強度が若干低目となるがコンクリートとしては表-10 に示すように N，BB と遜色のない強度発現であった。

壁 A 供試体の強度は (図-10)，コアの位置によって若干違いがあり，下段の強度が高い傾向であった。材齢 10 年の強度は，材齢 182 日より増加しており，N よりも 32.5 クラスの BL の方が高強度となった。LS は強度自体は N を下回ったが強度増進はむしろ大きい結果であった。

4.5 中性化

促進中性化により求めた中性化速度係数は，表-11 に示す様に壁の上部の方が下部より大きな値となった。BL，LS は N と BB の中間値であり遜色なかった。この係数からは材齢 10 年の中性化深さは 160mm～240mm といった大きな値が予想される。ところが表-12 に示す様に，屋外暴露 10 年を経た試料の中性化深さは 10mm にも至らなかった。暴露後の中性化深さは，日射や雨水の影響があった上面側の方が大きい傾向にあった。上面側では N が最も中性化深さが小さかった。しかし，下面側の結果では N，BB に比べ BL，LS の方が中性化深さが小さい傾向にあった。

表-9 凝結

セメント		N	BB	BL	LS
凝結	始発	6:09	7:15	6:45	7:20
	終結	8:48	10:44	9:55	10:05

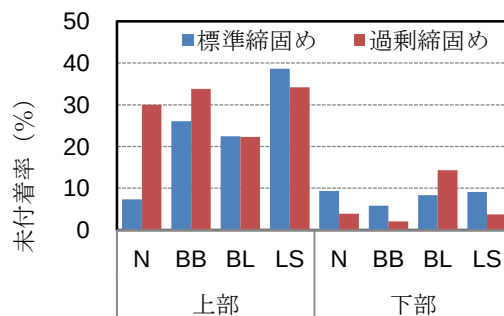


図-7 パイプ未付着率に及ぼす施工の影響

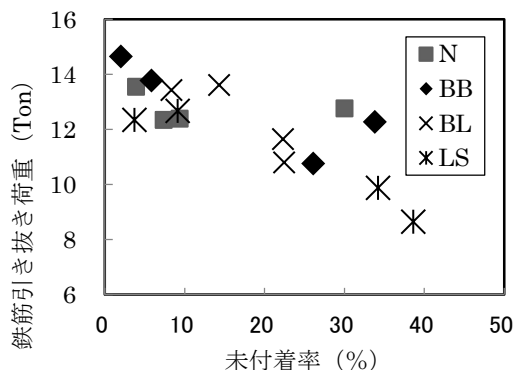


図-8 パイプ未付着率と鉄筋引き抜き荷重の関係

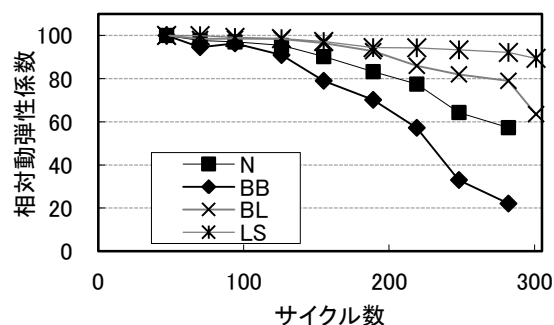


図-9 凍結融解抵抗性 (壁 A コア 28d)

表-10 標準養生供試体の強度発現

	1d	2d	7d	14d	28d	91d	182d
N	4.3	8.8	16.8	21.3	23.7	26.7	28.3
BB	2.5	6.4	15.3	21.1	26.9	31.6	34.9
BL	2.3	6.5	15.7	19.6	24.5	29.2	31.2
LS	2.6	7.1	16.3	19.0	22.3	25.6	26.5

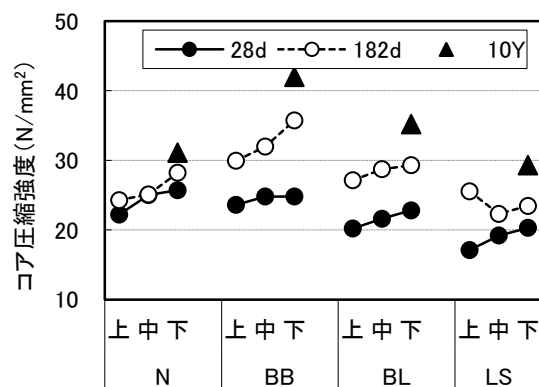


図-10 屋外暴露 壁供試体コアの強度

4.6 透水性

透水試験によって拡散係数を求めた。暴露後の結果は図-11に示す様に上面側の方が下面側より拡散係数が大きい傾向にあった。LSに関しては上面、下面と内部の差がなく他の水準と異なっていた。BBの拡散係数は、上面・下面ともNやBLよりも小さい結果であった。

材齢28日の標準養生供試体と屋外暴露10年を経たコアの下面を図-12に比較した。LSを除き、10年と28日の拡散係数は近い値を示していた。上面・下面の差から推定して上面の拡散係数は環境の影響を受けていることが明らかと思われる。上面においてもBL、LSはNと遜色ない値を示した。

4.7 長さ変化

円柱供試体を屋外暴露して長さ変化を測定した。その結果を図-13に示す。初期にはBL、LSの収縮が大きい傾向があったが、長期ではBBの収縮が大きくなった。しかしいずれも収縮量に著しい違いはなかった。

4.8 空隙径分布

空隙径分布を材齢28日と10年のコアについて比較した(図-14)。N、LSは50nmより大きい粗大側の空隙が多い傾向にあった。BBはそれらが少なかった。いずれのセメントでも材齢10年では3~10nmの小さな空隙が増加しておりC-S-H水和物が増加したためと考えられる。

4.9 反応率

材齢10年を経た試料の電子顕微鏡写真を写真-2に示す。LSは空隙が他より多かった。このような複数視野の画像を基に未水和セメントの量を求めた(表-13)。その結果未反応のセメントはいずれの水準でも残存していた。

表-11 促進中性化速度係数(材齢28dコア)

	水準	壁上部	壁下部
促進中性化速度係数 (mm/√日) 中性化深さ=係数×√日	N	3.2	2.7
	BB	3.9	3.4
	BL	3.5	2.9
	LS	3.9	3.0

表-12 中性化深さ(屋外暴露10年コア)

	水準	常時上面	常時下面
中性化深さ (mm)	N	5.9	7.2
	BB	9.3	7.5
	BL	7.3	4.8
	LS	6.4	5.5

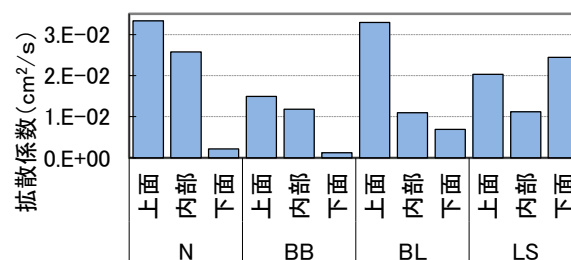


図-11 透水拡散係数(屋外暴露10年)

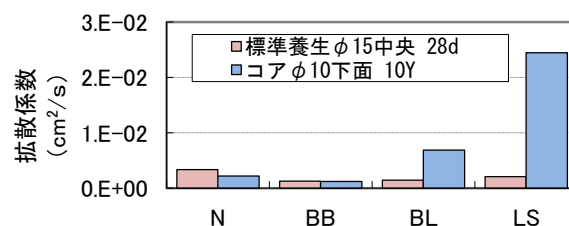


図-12 透水拡散係数(標準養生28日との比較)

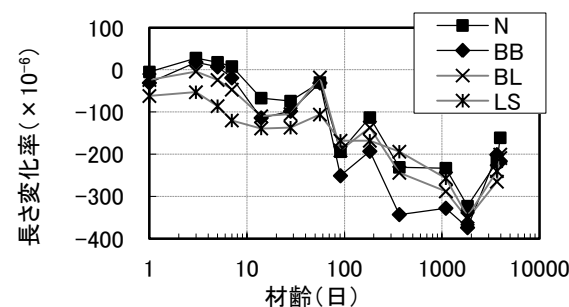


図-13 屋外暴露円柱供試体の長さ変化

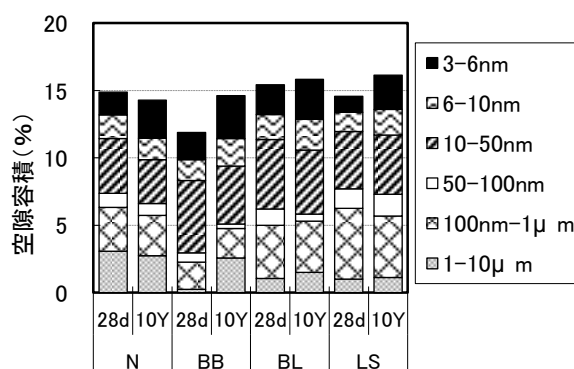


図-14 空隙径分布(屋外暴露28dと10年の比較)

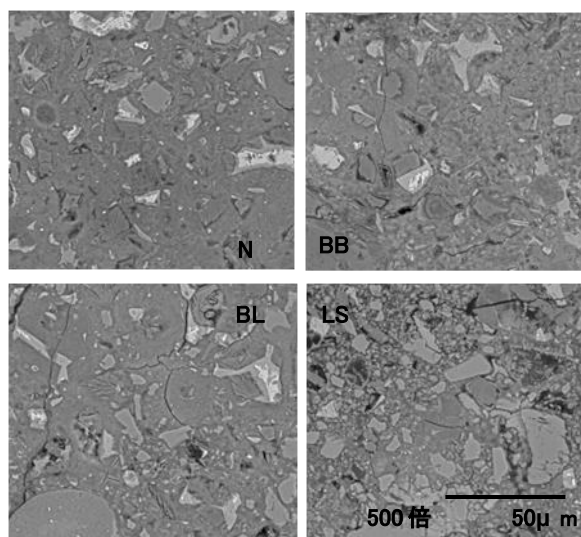


写真-2 材齢 10 年の水和状況（研磨面 BEI）

表-13 画像解析で求めた水和率*

種類	視野に占る面積(%)			ペースト部分の 未水和セメント (%)	コンクリート 1m ³ 中の 未水和 N セメント量
	未水和 セメント	空 隙	骨材・ 気泡		
N	0.9	11.3	10.4	3.1	8.6kg
BB	0.5	9.4	6.1	1.7	4.6kg
BL	0.5	9.5	20.0	1.8	6.0kg
LS	0.5	15.7	16.1	1.3	4.9kg

*) 混和材の反応は未考慮。混合セメント中の N のみを測定。

5. まとめ

32.5 クラスのセメント (BL, LS) を使用してコンクリートを製造打設して評価を行い、屋外暴露 10 年を経た壁供試体について評価検討した結果以下のことが分かった。

- (1) フレッシュ性状は、32.5 クラスセメントを使用したコンクリートは、粘性がやや過剰に増加するものの、現在の汎用セメント (N, BB) と遜色なかった。
- (2) 施工性について、鉄筋の付着を検討した所、32.5 クラスセメントの方が付着が低い結果であり、粉体量増加により材料分離抵抗性は増加するが、充填性の面では施工上の改善が必要であった。
- (3) 強度発現は、32.5 クラスセメントを使用したコンクリートでも N, BB と遜色はなかった。屋外暴露 10 年迄強度は増加しており、N と遜色がなかった。
- (4) 耐久性については、屋外暴露 10 年を経た中性化は N, BB よりも BL, LS の方が小さい結果であり、促進中性化試験で予想した値よりもはるかに小さい値であった。長さ変化はセメント間でもほぼ同等であった。透水試験では暴露状態の影響が大きい結果であった。BL は N, BB と遜色ないが、石灰石微粉末を混和した LS は傾向が異なった。耐久性や強度に関連する空

隙構造もセメント間で極端な相違はなかった。

- (5) 未水和のセメント量を屋外暴露 10 年を経た試料で測定した。いずれのセメントでも 4.6-8.6kg/m³ の未水和セメントが存在した。
- (6) 総合的に判断すると、本報告で検討した 32.5 クラスの混合セメント BL, LS はコンクリートとして N, BB と遜色ないことが確認された。個々の物性には変化があるものの N と BB の範囲を逸脱してなかった。セメント強度は低くともコンクリートとしては、同等といえる結果であった。

参考文献

- 1) 山岸千丈：強度の高いセメントは良いセメントか，技術革新と社会変革，第 1 巻，第 1 号，pp.21-32，2008
- 2) 鳥居南康一，小早川真，山田一夫：強さクラス 32.5 セメントのコンクリートによる評価，土木学会第 56 回年次学術講演会，V-291，pp.582-583，2001
- 3) 小津博，山田一夫，市川牧彦，小早川真：養生期間が三成分系混合セメントモルタルの中性化速度に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.56 pp.463-470，2002
- 4) 三谷裕二，小早川真，大森啓至，山田一夫：強さクラス 32.5 セメントを使用した汎用コンクリートのフレッシュ性状および材料分離抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.879-884，2002
- 5) 小早川真，三谷裕二，山田一夫，大森啓至：コンクリート配合条件とフレッシュ性状に及ぼす強さクラス 32.5 セメントの影響，土木学会第 57 回年次学術講演会，V-713，pp.1425-1426，2002
- 6) 三谷裕二，小早川真，大森啓至，山田一夫：強さクラス 32.5 セメントを使用したコンクリートの充填性評価，土木学会第 57 回年次学術講演会，V-712，pp.1423-1424，2002
- 7) 小早川真，三谷裕二，山田一夫，大森啓至，市川牧彦，鬼丸宣貴：強さクラス 32.5 セメントを試用した汎用コンクリートのフレッシュ性状および耐久性，太平洋セメント研究報告，第 142 号，pp.5-21，2002
- 8) 小早川真，三谷裕二，大森啓至，山田一夫：強さクラス 32.5 セメントを使用した汎用コンクリートの耐久性評価について，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.627-632，2002
- 9) 岡田 清：コンクリートの耐久性，朝倉書店，1996