論文　各種低発熱型セメントを用いたコンクリートの長期耐久性

神崎　隆男[*1]・廣島　明男[*2]・依田　彰彦[*3]・横室　隆[*4]

要旨：高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメント（以下，二成分系）および高炉スラグ微粉末とフライアッシュと普通ポルトランドセメント（以下，三成分系）ならびに低熱セメントを用いたコンクリートについて，目標強度別に材齢５年までの中性化深さや塩分浸透深さ等を究明した。その結果，中性化深さは目標強度が大きいほど小さく，塩分浸透深さは低熱セメントに比して二成分系・三成分系セメントは極めて小さかった。

キーワード：低発熱型セメント，高炉スラグ微粉末，目標強度，中性化深さ，塩分浸透深さ

1. はじめに

近年，環境問題が広く取り上げられ，97 年 12 月に京都において開催された地球温暖化防止国際会議において CO_2 削減に向けての具体的な数値目標が示された。セメント・コンクリート産業において材料面から CO_2 の削減に向けて取り組むべき課題の一つとして，高炉スラグやフライアッシュなどの産業廃棄物利用の拡大が挙げられる。

そこで本研究では，環境負荷低減効果が大きい高炉スラグ分量の多い高炉セメント(二成分系セメント)とこれにフライアッシュを添加した三成分系セメントを用いたコンクリートの材齢 5 年までの耐久性について検討した。また，比較として低熱ポルトランドセメントについても同様に行った。

2. 実験

実験に用いたセメントを**表－1** に示した。コンクリートの配合を**表－2** に示した。細骨材は表乾

表－1　使用セメントと目標強度

セメント No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
セメント略号	B4	B6	B4F20	B6F20	L	B4	B6	B4F20	B4	B4F20	L
目標強度(N/mm^2)	27					35			45		
セメントの種類	二成分系		三成分系		低熱	二成分系		三成分系	二成分系	三成分系	低熱
高炉スラグ微粉末置換率（%） ブレーン(cm^2/g)	60 4000	60 6000	48 4000	48 6000	－	60 4000	60 6000	48 4000	60 4000	48 4000	－
フライアッシュ置換率（%）	－	－	20	20	－	－	－	20	－	20	－

B4, B6･･･二成分系ブレーン 4000cm^2/g, 6000cm^2/g, B4F20･B6F20･･･三成分系ブレーン 4000cm^2/g, 6000cm^2/g

*1　（株）デイ・シイ（旧第一セメント）　セメント事業本部営業部営業技術課試験係長　(正会員)
*2　（株）デイ・シイ（旧第一セメント）　セメント事業本部営業部次長　(正会員)
*3 足利工業大学　工学部　建築学科　教授　工博　(正会員)
*4 足利工業大学　工学部　建築学科　教授　博士(工学)　(正会員)

表－2　コンクリート配合

セメントNo	セメント略号	目標強度 (N/mm²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³) 水	結合材	細骨材	粗骨材	混和剤
1	B4	27	15	4.5	59.4	45.7	152	256	852	1045	0.640
2	B6										
3	B4F20				52.6	44.3	151	287	807	1050	0.718
4	B6F20										
5	L				60.0	46.0	162	270	848	1030	0.675
6	B4	35			47.4	43.4	156	329	778	1045	0.823
7	B6					43.7	154	325	787		0.813
8	B4F20				40.4	42.2	148	366	742		0.915
9	B4	45	スランプフロー 60		37.8	42.3	155	410	729	1030	6.97
10	B4F20				33.0	39.3		470	645		7.05
11	L				46.4	45.0		334	815		5.68

密度 2.60g/cm³，吸水率 1.70%,粗粒率 2.67 の君津産山砂、粗骨材は最大寸法 20mm 表乾密度 2.69g/cm³，吸水率 0.51%，粗粒率 6.79 の北海道産石灰岩質砕石，水は上水道水を用いた。材齢 91 日での目標強度 27，35N/mm² のコンクリートは, スランプ 15±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%とし，リグニン系 AE 減水剤を使用した。目標強度 45N/mm² のコンクリートはスランプフロー60±5cm，空気量 4.5±1.5%とし，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

中性化深さは, 供試体寸法を 20×20×30cm とし打ち込み後 91 日間標準養生した。この供試体を, 屋外および地面より 1m の深さの土中に材齢 1,3,5 年まで暴露した。暴露後, 直径 10cm 高さ 20cm コア供試体を採取後,供試体を割裂した。割裂した断面にフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して中性化深さを測定した。

塩分浸透深さは，中性化深さと同様な供試体を 91 日間標準養生を行い川崎市運河にて干満潮を繰り返す場所に材齢 1,3,5 年まで浸漬した。浸漬後, 直径 10cm 高さ 20cm コア供試体を採取後，割裂した。割裂した断面にフルオレセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液を噴霧して白色部を測定した。塩化物イオン濃度は，表面より 1，3，5cm 付近を採取し測定した。

凍結融解試験は，コンクリートの打ち込み温度を 10℃とし, JIS A 6204 付属書により行った。断熱温度上昇試験は空気循環式の試験装置を用いて試験した。なお，低熱セメントについてはセメント協会コンクリート専門委員会 [1)]の提案式より求めた。乾燥収縮は JIS A 1129 のコンタクトゲージ法により材齢 1 年まで行った。自己収縮については JCI 法により材齢 91 日まで行った。耐薬品性試験は目標強度 27N/mm² について 91 日水中養生後に 0.1%塩酸，0.09%硫酸，8%ぼ

表－3　断熱温度上昇試験結果

目標強度	セメント略号	単位セメント量 kg/m³	K	α
27N/mm²	B4	256	34.7	0.644
	B4F20	287	29.5	0.560
	L	270	39.2	0.300
45N/mm²	B4	410	55.2	0.789
	B4F20	470	54.9	0.761
	L	334	44.8	0.390

表－4　凍結融解，耐薬品性，ひび割れ発生試験結果

セメントNo	セメント略号	相対動弾性係数(%) サイクル 64	133	200	300	耐薬品性(強度比%) 塩酸 0.1%	硫酸 0.09%	ぼう硝 8%	ひび割れ発生状況 発生日数	幅 (mm)
1	B4	99	98	92	72	88	97	94	39	0.01～0.02
2	B6	99	98	96	91	92	83	100	42	0.01～0.02
3	B4F20	96	95	89	80	74	90	97	43	0.01～0.02
4	B6F20	99	99	95	85	94	107	97	－	－
5	L	100	97	90	84	94	109	129	39	0.01～0.02
9	B4	100	100	95	88	－	－	－	20	0.01～0.04
10	B4F20	100	98	94	90	－	－	－	20	0.01～0.06
11	L	94	20	Out	Out	－	－	－	22	0.02～0.04

う硝溶液に 1 年間浸漬し水中養生時の圧縮強度に対する割合で評価した。ひび割れ発生試験は**表－1** の No 1, 2, 3, 5, 9, 10, 11 について建材試験センターの方法によりひび割れが発生した日数とひび割れ幅を測定した。

3. 実験結果と考察

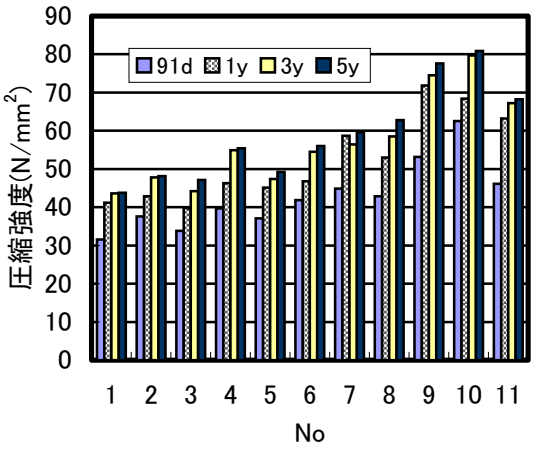
3.1 標準養生したコンクリートの各種試験結果

図－1 に圧縮強度試験，**図－2** に静弾性係数の結果を示す。いずれも材齢 91 日で目標強度以上の強度を示している。また，ブレーン 6000cm^2/g の高炉スラグ微粉末の方が 4000cm^2/g より高い強度を発現し，目標強度にバラツキが生じた。静弾性係数は低熱セメントが二成分系・三成分系セメントより低い傾向を示した。**表－3** に断熱温度上昇の結果を示す。**表－3** 中の K，αは式(1)の定数である。

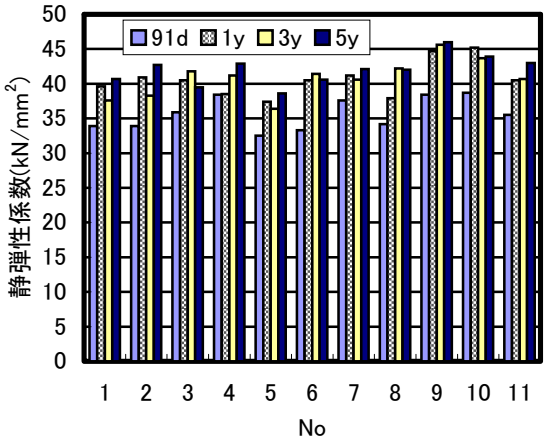
$$T=K(1-\exp(-\alpha t)) \qquad (1)$$

目標強度 27N/mm^2 のときは K 値は三成分系セメントが最も低く，次いで二成分系，低熱の順である。しかし、目標強度 45N/mm^2 になると低熱が最も低く，三成分系，二成分系は同程度である。また α値は，目標強度に関係なく，低熱が最も小さく次いで，三成分系，二成分系の順である。

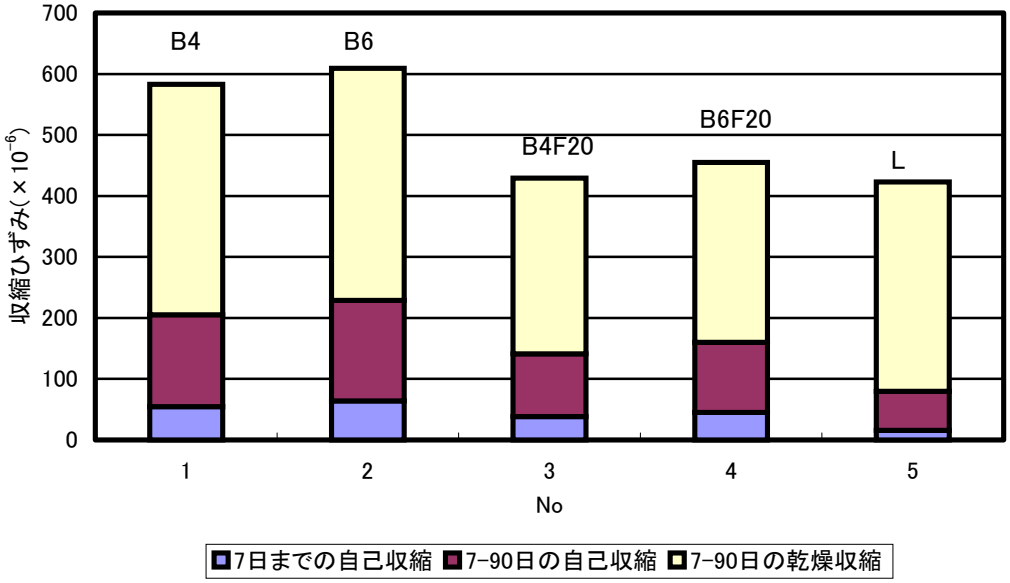
表－4 に凍結融解，耐薬品性，ひび割れ発生試験結果を示す。相対動弾性係数は，200 サイクルまでほぼ差がなく 300 サイクルでは高炉スラグ



図－1　圧縮強度(標準養生)



図－2　静弾性係数(標準養生)

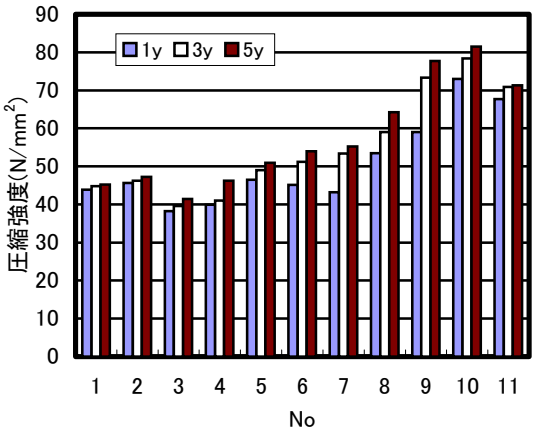


図－3　乾燥収縮と自己収縮を合わせた全収縮

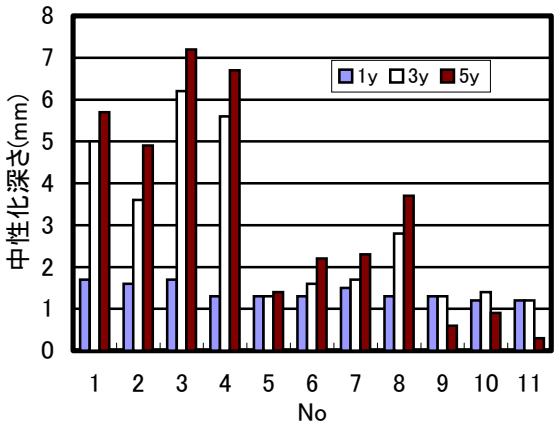
微粉末ブレーン 6000 cm^2/g の二成分系・三成分系セメントが低熱セメントと同等であった。目標強度 45N/mm^2 の低熱セメントでは 200 サイクルで崩壊したが，空気量が 4.2%，凍結融解試験開始時(14 日)の強度が 26.9N/mm^2 であり特に異常はないが，混和剤添加量が多いために凝結時間が遅くなりブリーディング量が多かったことが崩壊の一因と考えられる。

耐薬品性は，低熱セメントが二成分系・三成分系セメントと比べてやや優れた傾向であった。ひび割れ発生試験結果はセメントの種類によらなかったが，目標強度 45N/mm^2 の方がひびわれ発生日数が短く，かつ，ひびわれ幅が大きかった。

図－3 に乾燥収縮と自己収縮を合わせた全収縮結果を示す[2)]。乾燥収縮では二成分系セメントが大きくなった。三成分系・低熱セメントは 180 日まで変わらないが，それ以降三成分系高炉スラグ微粉末ブレーン 4000，6000 cm^2/g，低熱の順に大きくなった。自己収縮は，低熱セメントが最も小さい。高炉スラグ微粉末の粉末度が自己収縮に及ぼす影響は小さく，フライアッシュの添加により自己収縮が抑制される。乾燥収縮と自己収縮を合わせた全収縮は二成分系・三成分系セメントと低熱セメントは同程度であった。



図－4　圧縮強度（屋外暴露）



図－5　中性化深さ（屋外暴露）

このことは，ひび割れ発生試験結果がセメントの種類によらないことからもいえる。

3.2 中性化深さ

図－4 に屋外暴露時の圧縮強度，**図－5** に屋外暴露時の中性化深さの結果を示す。圧縮強度は標準水中養生と変わらず，屋外暴露による圧縮強度の低下は認められなかった。中性化深さについて，目標強度 27N/mm^2 では三成分系，二成分系，低熱の順に小さくなる。高炉スラグ微粉末のブレーンは 4000 cm^2/g よりも 6000 cm^2/g の方が中性化深さが小さくなる。目標強度が 35，45N/mm^2 と高くなるにつれて中性化深さが小さくなる。目標強度 45N/mm^2 では二成分系・三成分系セメントでも中性化深さが低熱セメントと同程度の結果となった。

なお，**表－5** に示すように材齢 5 年までの土中暴露では中性化深さは認められなかった。

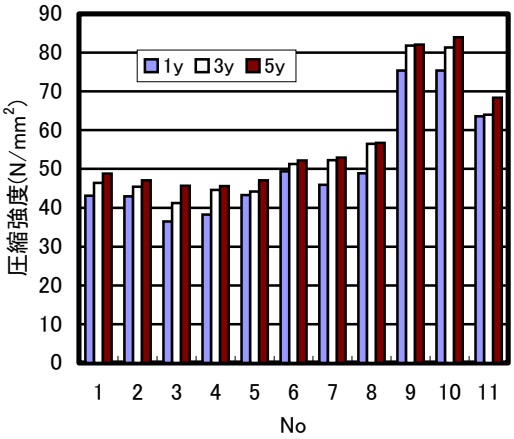
3.3 塩分浸透深さ

図－6 に海水暴露時の圧縮強度，**図－7** に海水暴露時の塩分浸透深さの結果を示す。圧縮強度は標準水中養生と変わらず，海水暴露による圧縮強度の低下は認められなかった。塩分浸透深さは中性化深さと逆に低熱セメントが二成分系・三成分系セメントより大きい。目標強度が大きくなると二成分系・三成分系セメントでは塩分浸透深さが小さくなる傾向を示した。しかし，低熱セメントでは，目標強度が 45N/mm^2 でも塩分浸透深さは目標強度 27N/mm^2 とほとんど同じであった。この理由の詳細は今後の検討課題である。

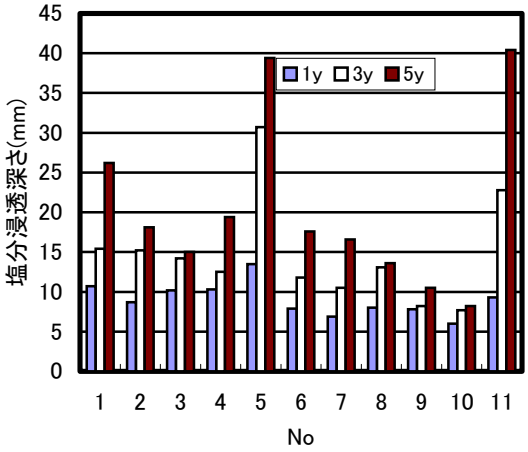
図－8 に海水暴露 5 年におけるコンクリート表面から 5cm までの塩化物イオン濃度を示す。二成分系・三成分系では表面から 3cm では海水に由来する塩化物イオンの浸透は認められないが，低熱セメントでは 5cm まで塩化物イオンが浸透

表－5　土中暴露の結果

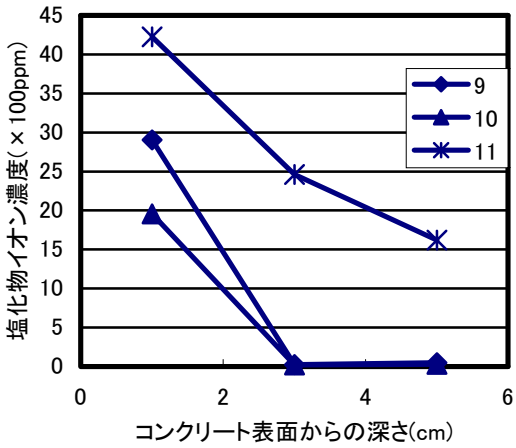
セメント	圧縮強度(N/mm2)			中性化深さ(mm)		
No.　略号	1 年	3 年	5 年	1 年	3 年	5 年
1．　B6	40.1	41.0	42.0	0	0	0
4 .B6F20	39.2	39.5	40.0	0	0	0
9.　B4	63.7	66.7	73.6	0	0	0



図－6　圧縮強度（海水暴露）



図－7　塩分浸透深さ



図－8 塩化物イオン濃度（目標強度 45N/mm^2）

している。

中性化深さでは目標強度の上昇に伴い減少したが，塩分浸透深さではとくに低熱セメントにおいて目標強度 45N/mm^2 でも減少しなかった。塩化物イオンの浸透は細孔量だけではなく細孔構造または塩化物イオンと水和物との反応によると考えられるが詳細な検討が必要である。

3.4 環境影響評価

表－6 に試験で使用したセメント 1t あたりおよびコンクリート 1m^3 あたりの CO_2 排出量を土木学会の報告書[3)]を用いて算出した。二成分・三成分セメントの高炉スラグ微粉末のブレーンは 4000sm^2/g を使用した。低熱セメントは普通セメントと同じ値を使用した。二成分系・三成分系セメントを用いたコンクリートの CO_2 排出量は，目標強度 27N/mm^2 の場合低熱セメントの約 40%，目標強度 45N/mm^2 の場合低熱セメントの約 50% である。

4. まとめ

二成分系・三成分系セメント，低熱セメントを用いたコンクリートの目標強度 27，35，45N/mm^2，高炉スラグの粉末度 4000，6000cm^2/g で材齢 5 年までの中性化深さ，塩分浸透深さ等を検討した。本研究において以下の結論が得られた。

表－6　環境影響評価結果

目標強度 (N/mm^2)	セメント略号	セメントの CO_2 排出量 (kg/t)	コンクリートの CO_2 排出量 (kg/m^3)	コンクリートの CO_2 排出量 (低熱 100)
27	B4	302.5	83.3	40
	B4F20	239.5	74.5	35
	L	757.9	210.5	100
45	B4	302.5	129.5	50
	B4F20	239.5	117.7	45
	L	757.9	258.9	100

(1)強度は標準水中養生と比べて，屋外暴露，海水暴露ともに大差はなく，強度の低下は認められなかった。

(2)断熱温度上昇は，目標強度 27N/mm^2 では二成分系・三成分系セメントの方が低熱セメントより小さいが，目標強度 45N/mm^2 では低熱セメントの方が小さい。 α値は強度に関係なく低熱セメントの方が小さい。

(3) 乾燥収縮と自己収縮を合わせた全収縮は二成分系・三成分系セメントと低熱セメントは同程度であった。

(4)中性化深さは二成分系・三成分系セメントが低熱セメントより大きい。しかし，目標強度を 45N/mm^2 になるとセメントの種類によらず小さくなり，セメントの種類によらず 1mm 程度であった。

(5)高炉スラグ微粉末のブレーンを 4000 から 6000cm^2/g にすると二成分系・三成分系セメントで中性化深さが小さくなる。

(6)塩分浸透深さは二成分系・三成分系セメントが低熱セメントよりも極めて小さかった。

(7)二成分系・三成分系セメントでは，目標強度が大きくなると塩分浸透深さが小さくなるが、低熱セメントでは目標強度によらなかった。

(8) 二成分系・三成分系セメントを用いたコンクリートの CO_2 排出量は低熱セメントの約 35～50%である。

なお, 本研究は材齢 20 年まで行う予定である。

参考文献

1) セメント協会コンクリート専門委員会：各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇，セメントコンクリート，No.672，pp38-45，2003.2
2) 宮沢伸吾、松村仁夫：低発熱セメントを用いたコンクリートの収縮，コンクリート工学論文集，Vol.19，No1，pp739-744，1997
3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 44，コンクリートの環境影響評価，pp87，2002