

報告

[1153] 超低発熱型セメントを用いたコンクリートの諸性状

正会員 杉田 英明 (九州電力 総合研究所)
 正会員 平野 利光 (九州電力 総合研究所)
 正会員 ○ 永松 武教 (西日本技術開発 調査部)
 正会員 熊谷 秀春 (西日本技術開発 調査部)

1. はじめに

コンクリートの温度ひびわれの抑制対策としては、コンクリートの温度上昇量を小さくすることが基本的なものと考えられ、従来から多くの工事で取り入れられている。また、最近では、中庸熟ポルトランドセメントにフライアッシュや高炉スラグ微粉末を混合した三成分系セメントの開発も行われており、断熱温度上昇量の大幅な低減等が明らかにされている。¹⁾

本実験は、三成分系の超低発熱型セメント3種と普通ポルトランドセメント1種を用いたコンクリートの配合、強度特性、熱特性、変形特性及び耐久性等の諸性状を把握する目的で行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用した材料は、表-1に示すようにセメント4種、細骨材2種、粗骨材1種とした。ただし、セメントの種類は、以下表中の()内の記号で表す。

表-1 使用材料

区 分	種 別
セメント	普通ポルトランドセメント(N):比重3.15, プレーン3240cm ³ /g 中庸熟ポルトランドセメント+フライアッシュ+高炉スラグ(MFB) (混合比3:2:5, 比重2.89, プレーン3790cm ³ /g) 超低発熱型セメント(HLA):比重2.79, プレーン5100cm ³ /g 超低発熱型セメント(HLO):比重2.71, プレーン5470cm ³ /g
骨 材	粗粒海砂(西ノ浦産):比重2.55, 吸水率1.81% 細粒海砂(津屋崎産):比重2.55, 吸水率1.61% 玄武岩碎石(葛蒲産, 20~5mm):比重2.77, 吸水率2.14%
混 和 剤	AE減水剤(リグニンスルホン酸系) AE補助剤(アルキルアルリルホン酸系) 流動化剤(メラミンスルホン酸系)

2.2 配合条件

コンクリートの配合は、4種のセメントについてそれぞれ水セメント比を50,55,60%に変化させ、練り上がり温度20℃を基本としたが、水セメント比55%の配合についてのみ、寒中、暑中コンクリート(練り上がり温度を8℃と35℃)を考慮し、合計20配合とした。なお、コンクリートの目標スランプは、ベースコンクリートを7cm、流動化後を12cm、目標空気量を4%とした。

2.3 実験項目及び方法

コンクリートの練り混ぜには、180ℓ練りの可傾式ミキサを使用し、コンクリート1回当たりの練り混ぜ量を120ℓとした。練り混ぜ時間は、ベースコンクリートを3分

表-2 供試体の形状寸法及び養生条件

間、流動化剤添加後を1分間とした。フレッシュコンクリートの性状試験は、スランプ、空気量、ブリージング及び凝結試験を実施した。硬化コンクリートの試験は、圧縮強度、断熱温度上昇量、乾燥収縮、クリープ及び中性化の各試験を実施した。各試験に用いた供試体の形状及び養生条件を表-2

試験項目	供試体寸法(cm)	養 生 条 件
圧縮強度	直径10×高さ20 (円柱供試体)	① 標準水中養生(材令3,7,28,91日) ② 断熱温度履歴養生(材令3,7日) ③ 断熱温度履歴後の標準水中養生(材令28,91日) ④ " の気中封かん養生(材令28,91日)
断熱温度上昇	直径40×高さ40 (円柱供試体)	空気循環式(7日間の測定)
乾燥収縮	15×15×25 (角柱供試体)	標準水中養生(材令28日まで) 室内気乾養生(温度20℃, 湿度60%; 試験時)
クリープ	直径15×高さ30 (円柱供試体)	密封式銅板型枠使用(室内温度20±3℃) 載荷時材令28日
中性化	直径10×高さ20 (円柱供試体)	標準水中養生(材令28日まで) 促進養生(炭酸ガス濃度5%, 温度40℃, 湿度80%)

に示す。試験方法は、JIS及び各関連規格に準じて行った。以下、主要項目について記述する。①圧縮強度試験は、図-1に示すように、標準水中養生、断熱温度履歴養生（以下、断熱養生と記す）及び断熱養生後の水中と気中封かん養生に区分した。断熱養生については、鋼製型枠にコンクリートをつめた後直ちにブリキ製容器に入れ、断熱温度に追従が可能な可変恒温恒湿室で養生した。ただし、断熱養生の期間は、現場等におけるマスコンクリートが最高温度に到達する2〜3日程度を考慮して²⁾3日間とし、その後7日まで同室内

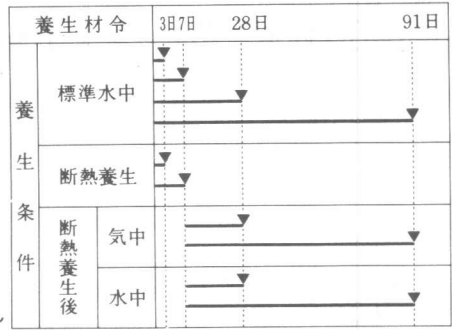


図-1 養生条件の概要

で自然冷却させた。②断熱温度上昇試験は、コンクリートをブリキ製容器(40×40cm)に詰めて密封した後、直ちに断熱温度上昇測定装置にセットしてコンクリート温度の測定を開始した。③乾燥収縮試験は、材令28日まで標準水中養生を行った後室内気中養生（恒温恒室内20度、湿度60%）に移し、それ以降におけるコンクリートのひずみを供試体中心に埋設したひずみ計で測定した。④クリープ試験は、厚さ0.3mmの密封式銅板型枠にコンクリートを打設してキャッピング後に完全密封し、材令28日まで室内気中養生（温度20℃）後に100kgf/cm²の荷重を載荷した。載荷後のひずみは、供試体の中心に埋設したひずみ計によって行った。⑤中性化試験は、材令28日までの標準水中養生後2週間の室内自然乾燥（温度20℃、湿度60%）を行った後、中性化促進試験装置による促進養生（CO₂濃度5%、温度40℃、湿度80%）を実施した。中性化深さの測定方法は、供試体の片方を厚さ2cm程度に切断し、その切断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して赤紫色に変色しない部分を中性化領域と判定し、その平均中性化深さを求めた。

3. 実験結果

3.1 配合試験結果

コンクリートの配合及びフレッシュコンクリートの性状試験結果を表-3に示す。

表-3 配合試験結果

セメントの種類 (配合名)	目標の上り温度 (℃)	水・セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)										フレッシュコンクリートの性状									
				水				細骨材				混和材		混和剤				スランパ (cm)	空気量 (%)	練り上り温度 (℃)	ブリーディング率 (%)	凝結試験	
				W	C	S	G	高炉スラグ M	フライアッシュ F	A	E	A	E	流動化剤 G	減水剤 S	調整剤 %	調整剤 %					調整剤 %	調整剤 %
普通ポルトランドセメント (N配合)	20	50	44.0	153	306	797	1102	—	—	0.765	0.0061	1.530	7.4→13.5	5.8→4.7	20.1→20.2	6.03	7-03	9-33	—	—			
	8	44.0	151	275	810	1120	—	—	0.688	0.0055	1.375	7.0→12.0	5.3→4.7	7.5→8.0	—	—	—	—	—				
	20	55	44.0	151	275	810	1120	—	—	0.688	0.0055	1.375	7.0→11.0	3.9→3.6	19.0→19.5	7.12	7-26	10-08	—	—			
	35	44.0	151	275	810	1120	—	—	0.688	0.0055	1.375	7.5→11.0	4.2→3.8	35.0→34.0	—	—	—	—	—				
中層熱ポルトランドセメント + フライアッシュ + 高炉スラグ (MFB配合)	20	60	45.5	159	265	832	1082	—	—	0.670	0.0053	1.340	7.7→12.0	5.7→4.9	20.1→20.5	6.23	7-35	10-35	—	—			
	8	44.0	136	74	827	1144	124	49	0.618	0.0124	1.235	6.5→11.2	3.6→3.5	9.5→10.0	—	—	—	—	—				
	20	55	44.0	136	74	827	1144	124	49	0.618	0.0148	1.235	6.5→11.5	3.7→3.3	21.0→21.0	7.68	19-30	25-04	—	—			
	35	44.0	136	74	827	1144	124	49	0.618	0.0124	1.235	8.0→12.5	3.9→4.0	37.0→34.5	—	—	—	—	—				
超低発熱型セメント (HLA配合)	20	60	45.5	142	71	853	1110	119	47	0.593	0.0127	1.185	7.6→12.6	6.0→4.6	19.5→19.5	7.97	19-48	24-30	—	—			
	8	46.0	149	298	826	1054	—	—	0.745	0.0209	1.490	7.0→12.0	3.6→3.1	20.9→21.2	4.61	21-00	25-36	—	—				
	20	50	47.0	150	273	853	1046	—	—	0.683	0.0191	1.365	8.9→12.5	5.3→3.3	6.5→9.1	9.46	45-45	67-30	—	—			
	20	55	47.0	150	273	853	1046	—	—	0.683	0.0191	1.365	7.0→12.5	4.8→3.6	21.5→22.0	5.53	22-12	27-24	—	—			
超低発熱型セメント (HLO配合)	35	47.0	150	273	853	1046	—	—	0.683	0.0191	1.365	6.1→11.5	3.6→3.1	35.2→34.0	7.09	11-15	21-15	—	—				
	20	60	47.5	151	252	871	1046	—	—	0.630	0.0176	1.260	7.0→11.5	3.2→3.5	19.6→20.0	5.82	23-30	28-30	—	—			
	20	50	46.0	149	298	822	1050	—	—	0.745	0.0477	1.490	7.0→11.6	3.5→3.0	19.5→19.5	3.61	12-30	17-06	—	—			
	8	47.0	150	273	851	1042	—	—	0.683	0.0437	1.365	7.9→12.3	4.5→3.1	8.0→10.5	5.68	25-30	39-00	—	—				
超低発熱型セメント (HLO配合)	20	55	47.0	150	273	851	1042	—	—	0.683	0.0328	1.365	7.3→12.2	3.1→3.0	21.0→21.0	3.29	12-36	17-36	—	—			
	35	47.0	150	273	851	1042	—	—	0.683	0.0437	1.365	6.3→11.5	3.4→3.1	34.3→33.0	3.06	8-00	10-30	—	—				
	20	60	47.5	151	252	867	1042	—	—	0.630	0.0403	1.260	7.7→12.1	5.1→3.0	20.0→20.0	6.73	13-06	18-00	—	—			

単位水量は、N配合(W/C50~60%で153~159Kg/m³)に比べてMFB配合では15~17Kg/m³, HLAとHLO配合では4~8Kg/m³程度少ないものであった。これは、超低発熱型セメントに使用されているフライアッシュや高炉スラグの影響と判断される。

各配合におけるブリージング率は、N, MFB配合が6.2~8.0%程度であるのに比べ、HLA, HLO配合は3.2~6.7%程度となり超低発熱セメントの方が小さい傾向にある。これは、N, MFBのセメントに比べてHLA, HLOのセメントは粉末度が高いためと考えられる。

凝結時間は、水セメント比が大きくなると遅くなる傾向にある。また、N配合の凝結時間(始発7~7.5時間, 終結9.5~10.5時間)に比べてMFB配合では2.5~2.8倍, HLA配合では2.7~3.1倍, HLO配合では1.7~1.9倍程度となった。さらに、練り上がり温度が8℃になると超低発熱型セメントの凝結時間は、練り上がり温度20℃の約2~2.5倍程度遅れることが判明した。すなわち、これらの超低発熱型セメントを寒中コンクリートとして使用する場合には、養生及び型枠の脱型時期等を十分配慮する必要がある。

3.2 圧縮強度試験結果

コンクリートの圧縮強度試験は、4種のセメントについて水セメント比、練り上がり温度及び養生方法等の要因を変化させて実施した。その結果を表-3と図-2~4に示す。

図-2は、標準水中と断熱養生との養生条件の異なる強度比較を示したものである。この図よりコンクリートの圧縮強度は、断熱養生を受けると標準水中養生に比べて初期材令(3,7日)で大きく、長期材令(28,91日)で小さくなる傾向が認められる。ちなみに、断熱養生を受けたコンクリートは、標準水中養生に比べると材令3日で約1.5~2.0倍、材令7日で約1.0~1.5倍程度となるが、材令28日と91日では10~30%程度の低下となる。図-3は、セメント種別をパラメータとして、セメント水比と圧縮強度の関係を材令毎に示したものである。この図より、圧縮強度は、いずれの配合においてもセメント水比が大きくなると高くなる一般的傾向が認められる。また、超低発熱型セメントを用いた配合は、いずれの材令においてもN配合を下回っている。さらに、HL

表-4 強度性状試験結果

セメントの種類 (配合名)	配合番号	水・セメント比 W/C (%)	練り上がり温度 (℃)	圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)											
				標準水中養生				養生条件							
								断熱養生				断熱養生後			
								気中封かん				標準水中			
				3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	28日	91日		
普通ポルトランドセメント (N配合)	N 5020	50	20	181	265	362	446	285	310	363	387	330	382		
	N 5508		8	168	245	343	399	188	258	332	382	326	367		
	N 5520	55	20	153	214	335	409	210	239	287	330	276	323		
	N 5535		35	165	221	346	408	231	245	280	289	262	272		
	N 6020	60	20	133	198	278	342	191	222	270	287	250	304		
中庸熱ポルトランドセメント + フライアッシュ + 高炉スラグ (MFB配合)	MFB 5020	50	20	67	140	292	402	145	197	248	328	264	346		
	MFB 5508		8	42	126	293	391	109	213	283	313	273	328		
	MFB 5520	55	20	51	117	272	393	125	188	244	304	244	307		
	MFB 5535		35	58	137	279	370	180	212	236	258	234	266		
	MFB 6020	60	20	36	94	220	296	62	145	200	278	211	266		
超低発熱型セメント (HLA配合)	HLA 5020	50	20	134	216	278	305	195	212	230	254	223	243		
	HLA 5508		8	10	154	230	263	135	180	208	233	201	222		
	HLA 5520	55	20	112	181	255	281	172	192	202	217	204	219		
	HLA 5535		35	173	199	231	258	190	216	216	222	218	218		
	HLA 6020	60	20	85	161	231	250	143	165	177	195	173	183		
超低発熱型セメント (HLO配合)	HLO 5020	50	20	113	196	293	333	204	228	251	274	241	262		
	HLO 5508		8	63	189	275	328	166	168	218	250	219	238		
	HLO 5520	55	20	90	171	258	305	177	192	208	228	209	229		
	HLO 5535		35	152	180	224	259	191	198	201	218	198	208		
	HLO 6020	60	20	79	146	227	277	168	175	184	202	182	193		

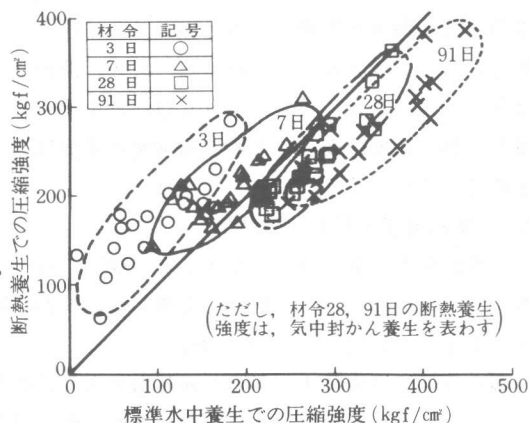


図-2 養生条件の異なる強度比較

A, HLO 配合では、水セメント比及び材令にかかわらずN配合の圧縮強度の60~80%程度を示す。しかし、MFB 配合の圧縮強度は材令で異なり、初期材令(3,7日)ではN配合の約30~60%程度、長期

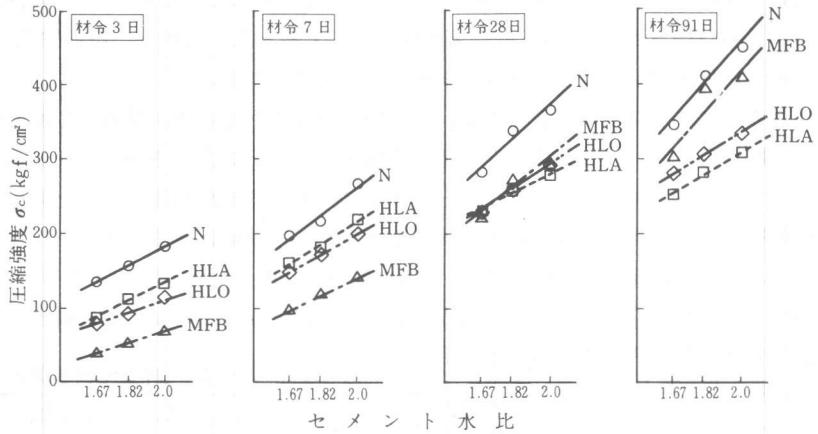


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係(標準水中養生)

材令(28, 91日)ではN配合の約70~90%程度となる。この結果MFB 配合の初期強度は、HLA, HLO 配合に比べて小さくなった。これは、MFB の粉末度(3790cm²/g)がHLA, HLO の粉末度(5100, 5470cm²/g)に比べて小さく、初期材令での水和熱速度が遅れたためと推察される。

図-4は、材令をパラメータとして練り上がり温度と圧縮強度の関係をセメント種別毎に示したものである。この図より材令3日では、練り上がり温度が低いものほど小さな値を示し、材令7日になるとほぼ同等、材令28日以降になると一部特異点はあるもののおおむね練り上がり温度が低いものほど高い値を示した。すなわち、コンクリートの圧縮強度は、練り上がり温度に大きく影響され、その温度が低い場合初期強度は小さく長期強度の伸びは大きい。これは、文献3)と良く一致するものであった。また、断熱養生に着目すると、HLA, HLO 配合の場合、練り上がり温度の変化による圧縮強度の差異は極めて小さい。

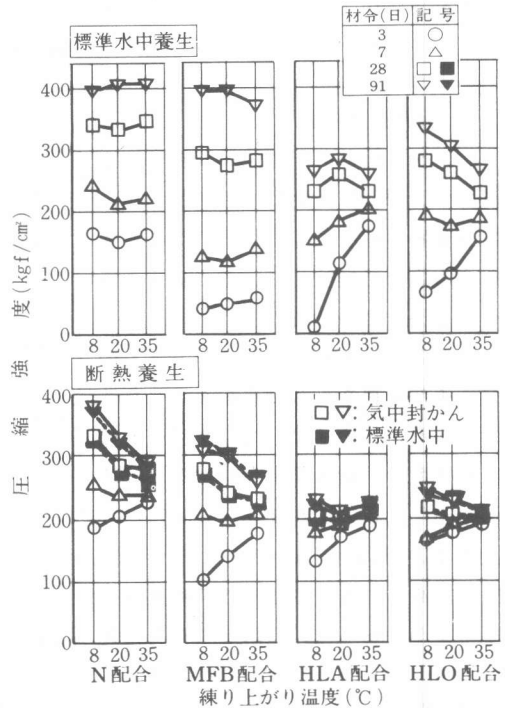


図-4 練り上がり温度と圧縮強度の関係

3.3 断熱温度上昇量試験結果

断熱温度上昇量試験は、セメントの種別、単位セメント量及び練り上がり温度等による影響を把握するためにすべての配合で実施した。なお、断熱温度上昇量の測定は、温度上昇がほぼ安定するまでの1週間(7日)とした。

図-5は、単位セメント量と断熱温度上昇量の関係を示したものである。この図より、各種セメントのいずれも単位セメント量と断熱温度上昇量との間には高い相関性が認められ、図中に示す一次回帰式で表される。また、同一単位セメント量における温度上昇量は、N 配合が最も大き

く、以下MFB (Nの約70~90%), HLO (Nの約55~60%), HLA (Nの約50~60%) 配合の順である。

図-6は、練り上がり温度とその温度を加算した断熱温度上昇(以下、累加断熱温度上昇と言う)の関係を示す。累加断熱温度上昇は、いずれのセメントも練り上がり温度が高くなると大きくなる傾向にある。ちなみに、練り上がり温度が10℃から35℃の25℃の上昇でコンクリート温度は、N, MFB, HLA, HLO配合でそれぞれ24, 25, 17, 16℃程度の上昇となる。

3.4 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験は、4種のセメント(N, MFB, HLA, HLO)についてそれぞれ水セメント比を50, 55, 60%に変化させた12配合で行い。測定経過日数210日の結果を図-7に示す。乾燥収縮ひずみは、一般に水セメント比が大きくなると増大するとされているが本試験結果については、その傾向が認められない。ただし、コンクリートの乾燥収縮は、骨材/セメントの重量比によって大きく影響されると言われており⁴⁾、本試験結果についてもその影響が表れたものと判断される。また、セメントの種類で比較すると乾燥収縮ひずみは、N配合が最も大きく(約 630×10^{-6})、以下、MFB (Nの約70%), HLO (Nの約55%), HLA (Nの約50%) 配合の順である。すなわち、超低発熱型セメントはフライアッシュ等微粉末の混入で、空隙の微細化による長期的な組織の密実化が顕著に表れたものと判断される。

3.5 クリープ試験結果

クリープ試験は、乾燥収縮試験と同様に12配合について実施した。載荷日数120日における単位応力当りの弾性ひずみとクリープひずみの和をセメント種別毎に図-8に示す。この図から弾性ひずみとクリープひずみの和は、セメント種別による明確な差異は認められない。なお、各配合のクリープ係数を図中に示すが、その値は、いずれのセメントも水セメント比が大きくなるにしたがって増加する傾向が認められた。

3.6 中性化試験結果

中性化試験は、炭酸ガス濃度5% (温度40℃, 湿度80%) の条件で促進養生させた。それらの結果を図-9と10にそれぞれ示す。図-9より、中性化の進行速度は、N配合が最も遅く、以下、

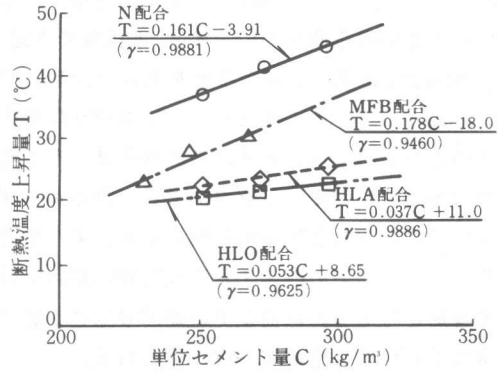


図-5 単位セメント量と断熱温度上昇量の関係(練り上がり温度20℃)

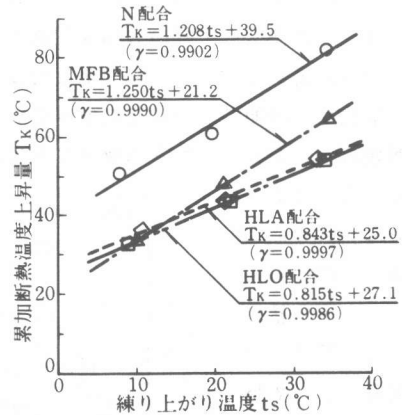


図-6 練り上がり温度と累加断熱温度上昇量の関係

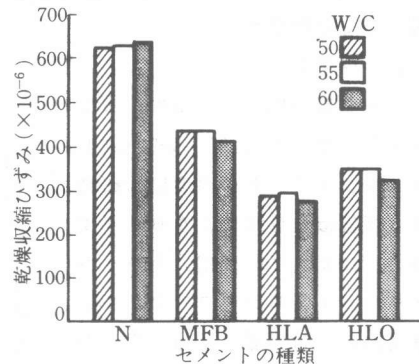


図-7 各配合の乾燥収縮ひずみ(経過日数210日)

MFB(Nの2.5~4倍), HLO(Nの3.5~6.5倍), HLA(Nの5~8倍)配合の順であった。ちなみに, N配合(W/C:50%)の中性化深さを岸谷式⁵⁾による中性化曲線上に示すと, 本試験での促進養生材令30, 60, 90日は, それぞれ約3, 16, 19年に相当する。したがって, 他の配合についても同様に経過したもとして図-10に示す。この図を基にして経過年数50年での中性化深さを求めると, 最も進行速度の早いHLA配合で約60mm程度となる。すなわち, 中性化による鉄筋の腐食または構造物の耐用年数を50年程度と考えると鉄筋までのかぶり厚さを約7cm程度にすれば耐久性の確保は可能となる。

4. まとめ

超低発熱型セメント3種を用いたコンクリートの諸性状試験結果について記述した。その結果, 単位水量の減少, 断熱温度上昇の大幅な低減及び乾燥収縮の減少等に優れていることが判明したが, 凝結時間, 強度及びその伸び, 中性化に対する抵抗性等に問題が残る。しかし, これらのセメントは, まだ開発途上のものであり, 今後更に品質の向上が望めるものと考えられる。本実験結果がそれらの品質向上の技術資料として役立てば幸いである。

<参考文献>

1) 金沢, 二宮, 十河, 新開: 超低発熱型セメントの橋梁マスコ

ンクリート構造物への適用性, コンクリート工学 Vol.290 No5, 1989, 2) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書: 日本コンクリート工学協会 1985, 3) 岡田, 六車: コンクリート工学ハンドブック, 1981, 朝倉書店, 4) 後藤, 尾坂: ネビルのコンクリートの特性, 1979, 技報堂, 5) 岸谷: 鉄筋コンクリートの耐久性, 鹿島建設技術研究所出版部, 昭和32年12月

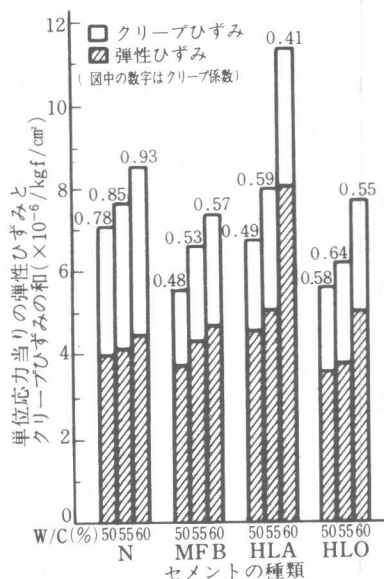


図-8 クリープ試験結果 (載荷材令120日)

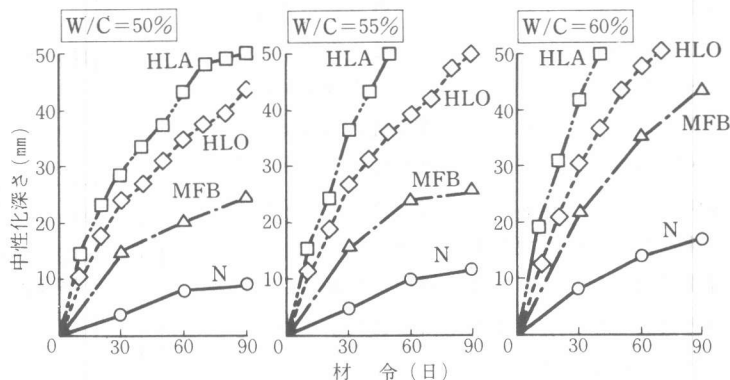


図-9 材令と中性化深さの関係

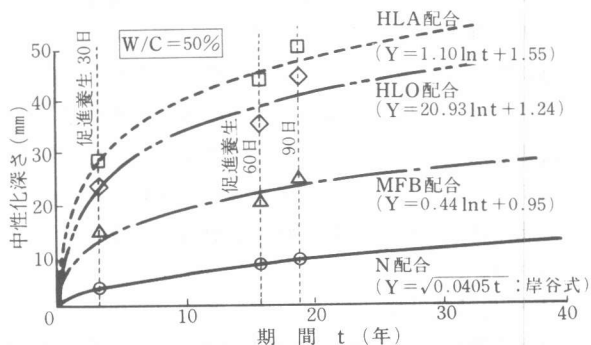


図-10 中性化速度曲線