

による物理的な機構によって強度発現性のみならず発熱特性も変わるものであり、その相関性には若干の違いが認められる¹⁾。そこで、これらの混和材をセメントに対し多量に使用する範囲において、その適当な組合せが、より流動性に優れ、より低発熱でかつ十分な強度発現を示す可能性を実験により確認し、低発熱水中不分離性コンクリートを提唱することにした。

以下にこれらの実験結果を示す。

3. 実験概要

3.1 実験目的

低発熱水中不分離性コンクリートの開発理念に基づき高炉スラグ微粉末やフライアッシュを多量に混和した結合材の組合せにおいて、フレッシュコンクリートの試験により、流動性(施工性)、凝結性状、水中分離抵抗性を比較し、さらに硬化後のコンクリートについては強度、弾性係数、および断熱温度上昇特性を把握し、温度ひびわれ抵抗性の高い低発熱水中不分離性コンクリートとするための材料、配合の組合せを把握し、最適な低発熱水中不分離性コンクリートを開発することを目的とした。

3.2 使用材料および配合

(1) 低発熱性結合材

低発熱性結合材は、ベースセメントのクリンカーとしては、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントとし、それらに高炉スラグ微粉末を20~90%の比率で混合し、さらにフライアッシュを0~60%の比率で混合したものとした。実験に用いた

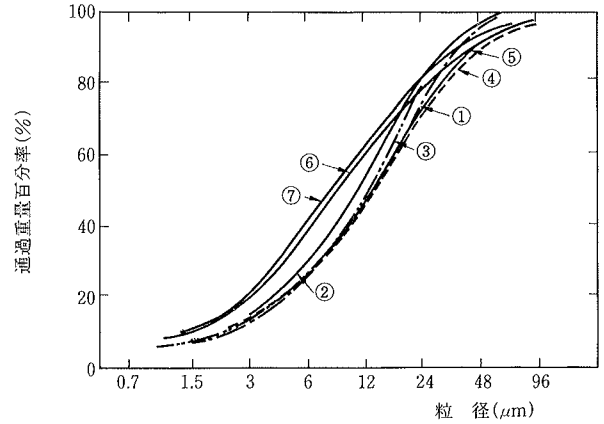


図-1 結合材の粒度曲線

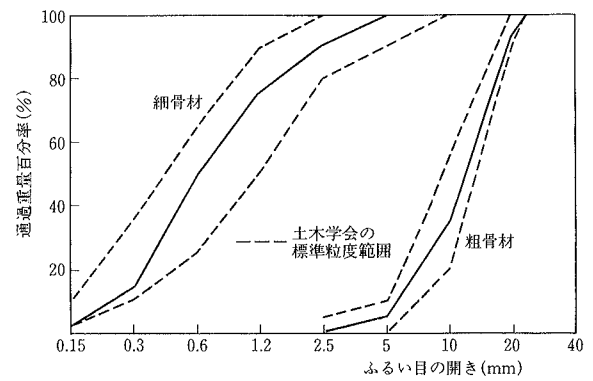


図-2 骨材の粒度曲線

表-1 使用セメントの化学分析結果

No.	セメントの種類	略号	結合材比率(%)			化学成分(%)									アルカリ量 R ₂ O (%)
			P	B	F	強熟減量	不溶残分	二酸化ケイ素	酸化アルミニウム	酸化第二鉄	酸化カルシウム	酸化マグネシウム	三酸化硫黄	合計	
1	普通系二成分	NB50	50	50	0	1.2	0.1	28.0	10.2	1.3	50.8	5.0	1.6	98.2	0.41
2		NB90	10	90	0	0.8	0.2	31.2	13.4	0.8	43.1	6.1	2.0	97.6	0.34
3	中庸熱系三成分	MB40-F20	40	40	20	0.4	16.2	23.4	8.4	1.8	42.8	3.4	2.0	98.4	0.47
4		MB25-F50	25	25	50	1.7	37.9	17.2	6.9	2.0	29.0	2.3	1.5	98.5	0.43
5		MB20-F60	20	20	60	2.3	45.9	14.8	6.5	2.2	23.6	2.0	1.4	98.7	0.39
6	早強系三成分	HB60-F25	15	60	25	0.5	19.1	24.2	10.3	1.1	36.3	4.5	1.9	97.9	0.52
7		HB48-F40	12	48	40	1.2	29.7	21.1	8.6	1.5	30.3	3.9	1.8	98.1	0.49

P:ポルトランドセメント, B:高炉スラグ, F:フライアッシュ, N:普通セメント, M:中庸熱セメント, H:早強セメント

表-2 セメントの物理試験結果

セメントの略号	比重	比表面積 ブレン (cm ² /g)	フロー 値 (cm)	曲げ強さ (kgf/cm ²)		圧縮強さ (kgf/cm ²)		水和熱 ²⁾ (cal/g)		
				28日	91日	28日	91日	7日	28日	91日
NB50	3.03	3,460	251	68	75	319	465	52.6	64.0	70.6
NB90	2.93	3,500	272	54	61	209	296	33.3	36.6	42.7
MB40-F20	2.85	3,550	282	60	65	316	470	50.0	64.9	66.8
MB25-F50	2.63	3,520	281	40	48	183	286	43.9	50.3	51.7
MB20-F60	2.56	3,510	280	35	46	139	223	28.8	42.9	44.8
HB60-F25	2.77	4,660	276	67	71	343	444	40.8	47.8	56.0
HB48-F40	2.67	3,900	281	54	59	269	350	37.6	46.5	54.4

表-3 使用材料の性質

	細骨材	粗骨材
産地	香川県 広島沖海砂	兵庫県 赤穂産砕石
最大寸法(mm)	5	20
表乾比重	2.57	2.64
吸水率(%)	1.70	0.51
粗粒率(%)	2.72	6.70

結合材の比率および化学成分を表一1に示す。また、物理試験結果を表一2に示すとともに結合材の粒度曲線を図一1に示す。

(2) 骨材および混和剤

水中不分離性コンクリートをマスコンクリートとして使用するの、海洋環境であることが多く、また、最近の骨材事情を考えると海砂の使用が一般的であると思われ、使用骨材は海砂および碎石とした。表一3に使用骨材の性質を示す。海砂は水洗いをするため、0.15 mm以下の細粒分が少なく(図一2)、本実験では石灰石粉を30 kg/m³海砂に対して置換し使用した。これは、骨材中の微粉分の不足を補い、コンクリート中のモルタルの流動性および分離抵抗性を増加させることを目的とするものである。石粉の性質を表一4に示す。

混和剤は、リグニンスルホン酸とポリオール複合体を主成分とするAE減水剤標準形と高縮合トリアジン系の流動化剤、水溶液セルロースエーテル系の水不分離性混和剤(以下分離低減剤と称す)を用いた。水中不分離性混和剤の性質を表一5に示す。

(3) コンクリートの配合

配合条件は、目標スランプフローを50 cm、目標空気量を4%、単位結合材量を330 kg/m³とし、骨材の最大寸法は水中で締固めなく流動させることを考慮し、20 mmとした。

表一4 石粉の性質

比重	水分 (%)	石灰純度 (%)	ふるい目通過重量百分率 (%)			
			0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.075mm
2.73	0.1	91	100	100	93	80

表一5 水中不分離性混和剤の性質

項目	内容
主成分	セルロースエーテル
外観	白色粉末
水分	3.7%
粘度	50,000cps (2%濃度水溶液)
粒度	350μm5%以下

なお、通常マスコンクリートでは粗骨材の最大寸法が大きい程、単位水量・単位セメント量を低減できるため、できるだけ大きくするものであるが、水中不分離性コンクリートでは、単位水量・単位セメント量の低減効果は比較的小さいことがすでに確認されている³⁾。これらの条件で各々の結合材を用いたコンクリートの配合を試験により求めた。その結果は、表一6に示す通りとなった。細骨材が海砂の単味使用のため、石粉なしの練上り状態は、若干粘性にかけたパサパサした状況となった。そのため、本研究では全ての配合で石粉を細骨材に対し内割で30 kg/m³使用することにした。コンクリートの練上り温度は海水中の年平均水温を想定して15°C~18°Cで行ない、試験は全て練上り後と同温条件とした。

3.3 試験方法と測定項目

コンクリートの練りまぜは、二軸強制練りミキサーを用い、空練り30秒、混練り60秒とした。練上ったコンクリートについては練上り直後からのスランプフローの経時変化、空気量、水中分離抵抗性、凝結時間を測定し、硬化後は水中作成供試体および気中作成供試体によって圧縮強度、静弾性係数を測定した。また、断熱温度上昇特性についても試験した。試験は、原則として、特殊水中コンクリート・マニュアル⁴⁾の品質試験方法に準じて行なった。(同特殊水中コンクリート・マニュアルは平成元年12月に水中不分離性コンクリート・マニュアル⁵⁾と改名され改訂された。)

試験項目と方法を表一7に示す。

表一7 試験項目と方法

	試験項目	試験方法
フレッシュ	スランプフロー試験	特殊水中コンクリート・マニュアルに準拠
	空気量試験	JIS A 1128に準拠
	練上り温度測定	棒状アルコール温度計で測定
	単位容積質量試験	JIS A 1116に準拠
	凝結試験	JIS A 6204
硬化	水中落下試験	特殊水中コンクリート・マニュアルに準拠
	圧縮強度	特殊水中コンクリート・マニュアルに準拠
	静弾性係数	ASTM C 469 (KODAN) ⁶⁾
	断熱温度上昇試験	マルイ製空気循環式試験装置

表一6 コンクリートの配合

No.	セメントの略称	w/c (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
				W	C	S ₁ ¹⁾	S ₂ ¹⁾	G	AE減水剤	流動化剤	SCA ^{*2)}
1	NB50	65.2	40	215	330	30	624	1,008	C×0.25%	C×2.0%	2.3
2	NB90	62.1	40	205	330	30	630	1,018	C×0.25%	C×2.0%	2.3
3	MB40-F20	63.6	40	210	330	30	622	1,005	C×0.25%	C×2.0%	2.3
4	MB25-F50	62.1	40	205	330	30	616	995	C×0.25%	C×2.0%	2.3
5	MB20-F60	62.1	40	205	330	30	612	989	C×0.25%	C×2.0%	2.3
6	HB60-F25	62.1	40	205	330	30	623	1,005	C×0.25%	C×2.0%	2.3
7	HB48-F40	62.1	40	205	330	30	617	997	C×0.25%	C×2.0%	2.3

*1 S₁は石粉、S₂は碎石JIS2005

*2 SCA: 水中不分離性混和剤(分離低減剤)

4. 実験結果および考察

4.1 フレッシュコンクリートの性質

各配合とも目標スランプフローを得るのに必要な単位水量は205~210 kg/m³と、従来タイプの高炉セメントB種の215 kg/m³より若干少なくできる。これは高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの減水効果によるものと思われるが、大差ではなく、単位水量は主として混和される分離低減剤の量に影響されると考えられる。

フレッシュコンクリートの試験結果を表-8に示す。図-3に示すようにスランプフローの経時変化は長時間に渡り少ないことが確認された。しかし、高炉スラグの二成分系結合材では、スランプフローロスが早く生じ、スランプフローが5 cm低下するまでの時間は4~5時間であった。これに対し、三成分系の結合材はスランプフローの保持時間が長く、スランプフローが5 cm低下するのは練上り後7~11時間となる。フライアッシュの混入が長時間の流動性を保たせる効果をもたらすものと考えられる。凝結時間は図-4に示すように高炉B種の始発が19時間20分であるのに対し、他の低発熱性結合材では25時間10分~41時間20分と凝結遅延し、分離低減剤の遅延効果を助長する。凝結時には、ポルトランドセメントの種類、スラグ、フライアッシュなどの品質や、その粉末度および結合材としての混合比率などの要因と特殊混和剤の特性などが互いに影響しており、概して、スランプフローロスの小さい配合のものが凝結は遅かった。

水中にコンクリートを落下した時の水中分離抵抗性を示す水のpHおよび懸濁物質は結合材の種類との相関が認められず、ほとんどpHが8.6~9.6、懸濁物質が75~149 ppmであり、いずれもコンクリート用水中不分離性混和剤規準の基準値を満足するものであった。

4.2 硬化コンクリートの性質

圧縮強度試験結果を表-8および図-5に示す。各配合とも単位結合材量および目標スランプフローを一定とした

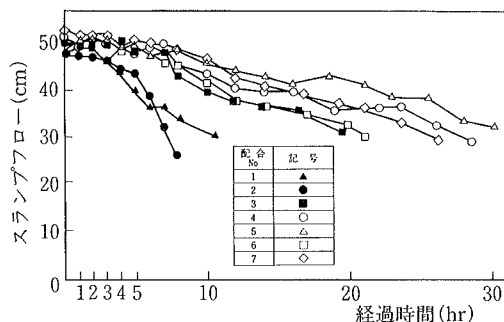


図-3 スランプフローの経時変化

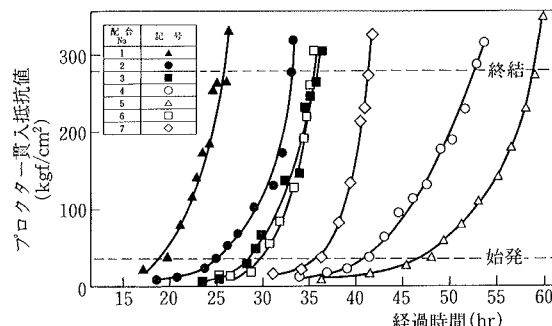


図-4 プロクター貫入抵抗試験結果

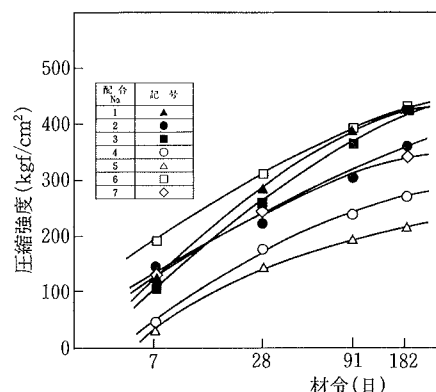


図-5 圧縮強度の発現性状

表-8 フレッシュ・硬化コンクリートの試験結果

No.	セメントの略号	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)	単位容積質量 (kg/l)	凝結時間 (h-m)		水中落下試験 pH	懸濁物質 (mg/l)	圧縮強度 (kgf/cm ²)				静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)					
						始発	終結			7日	28日	91日	182日	コア*2	7日	28日	91日	182日	コア*2
1	NB50	48.5×47.0	3.1	15.2	2.24	19-20	25-50	9.6	86	129	288 (253)	389 (346)	420	313	1.67	2.90 (2.69)	3.52 (3.25)	3.66	3.21
2	NB90	47.0×49.0	3.2	15.5	2.25	25-10	33-10	8.6	90	134	220 (192)	302 (268)	357	293	1.91	2.78 (2.45)	3.23 (2.87)	3.17	3.32
3	MB40-F20	51.5×49.5	3.4	17.5	2.23	29-00	35-50	9.5	83	104	260 (225)	361 (321)	422	298	1.66	2.70 (2.53)	3.38 (3.15)	3.64	3.33
4	MB25-F50	52.0×52.0	4.3	17.5	2.19	41-20	52-50	9.4	83	45	173 (156)	233 (209)	267	233	1.36	2.47 (2.31)	2.59 (2.40)	2.87	2.83
5	MB20-F60	50.0×50.0	4.3	16.8	2.17	47-00	58-50	9.3	75	31	141 (112)	186 (152)	213	191	1.14	2.15 (1.88)	2.25 (2.06)	2.53	2.40
6	HB60-F25	52.0×50.5	3.5	17.0	2.22	30-00	35-20	9.4	148	192	308 (271)	385 (336)	425	343	2.46	2.83 (2.64)	3.42 (3.12)	3.49	3.11
7	HB48-F40	55.0×52.0	4.0	16.8	2.19	36-00	41-10	9.1	68	130	246 (205)	304 (261)	337	293	2.05	2.71 (2.41)	3.16 (2.82)	3.29	3.05

M:中熱クリンカー, N:普通クリンカー, H:早強クリンカー, B:高炉スラグ, F:フライアッシュ

*1 ()内は水中作成供試体 *2 試験材令は91~94日

ため、結合材の種類により単位水量が異なり、若干水セメント比に違いが生じたが、62.1~65.2%とほぼ近い値となった。しかし、圧縮強度は、結合材の種類によって大きな差があり、材令91日において186 kgf/cm²~389 kgf/cm²となった。強度発現性の小さいのは中庸熟系ベースセメントでかつフライアッシュの混合率が大きい場合 (MB20-F60)、(MB25-F50)であり、早強セメントをベースとする三成分系結合材 (HB60-F25) では混合材率が85%以上でも高炉 B 種と同等の強度が得られた。混和材添加率が約90%の二成分系結合材 (NB90) および早強ベース三成分系結合材 (HB48-F40) は高炉 B 種と比較して材令91日で約20%小さい強度となった。この値は、設計基準強度で200 kgf/cm²に相当するもので、十分に実用的な強度と考えてよい (下式参照)。

さらに、混和材を多量に含むことから、長期的な強度の増加も期待できるため、材令91日より長期の管理材令を設定することによって、より高い設計基準強度とみなすことも可能である。

$$f'_{ck} = f'_c \times \alpha \div \beta = 300 \times 0.8 \div 1.2 = 200$$

ここで α : 水中強度低減率

β : 変動に伴う割増し係数

f'_{ck} : 設計基準強度 (kgf/cm²)

f'_c : 圧縮強度 (kgf/cm²)

断熱温度上昇試験を行なった供試体から採取したコア強度は、高い温度履歴を受けているため、標準養生供試体の強度より低くなる。この傾向は、履歴温度が高い程大きく、NB50、HB60-F25のコア強度は標準養生供試体強度の約80%で、NB90、MB25-F50、MB20-F60、HB48-F40はほぼ同等の値となった。水和熱の高い結合材ほど、温度履歴の影響により強度低下が認められ、有効なコア強度を得るには、低発熱性の結合材の利用が好ましい。なお、水中作成供試体の気中作成供試体に対する強度比は低発熱性結合材を用いた場合も高炉 B 種セメントと同等で約90%であった (図-6)。

細骨材に石粉を添加しないコンクリートについては、石粉を用いたコンクリートとほぼ同等の強度特性を示し、石粉の強度に及ぼす影響はほとんど認められなかった。また、圧縮強度と静弾性係数の関係は図-7に示すように一般的なコンクリートの性質と同様強度によって推定でき、結合材の種類による影響は認められなかった。

4.3 温度上昇特性

各配合のコンクリートの断熱温度上昇特性を図-8に、近似式を表-9に示す。混和材混入率の小さい、NB50、MB40-F20の順に温度上昇量は大きくなり、混入率の多いコンクリートほど断熱温度上昇量が小さい傾向を示す (図-9)。

温度上昇の勾配は、中庸熟系がゆるやかで、早強系結合材が初期に早く温度上昇する傾向があるが、これは、結合材の粉末度との関係もあり必ずしもクリンカーの性質だけでは判断できないと思われる。

圧縮強度と断熱温度上昇量の関係をみると、図-10に示

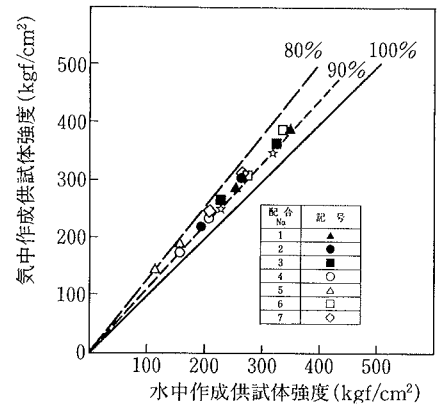


図-6 気中作成供試体強度と水中作成供試体強度

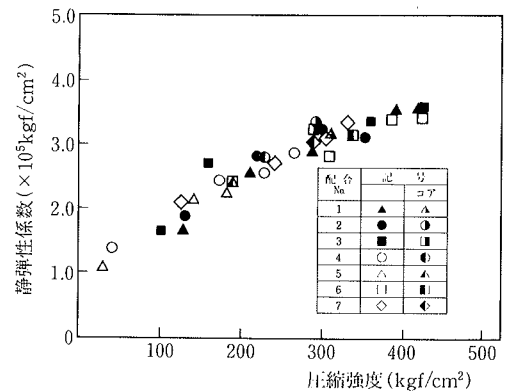


図-7 圧縮強度と静弾性係数

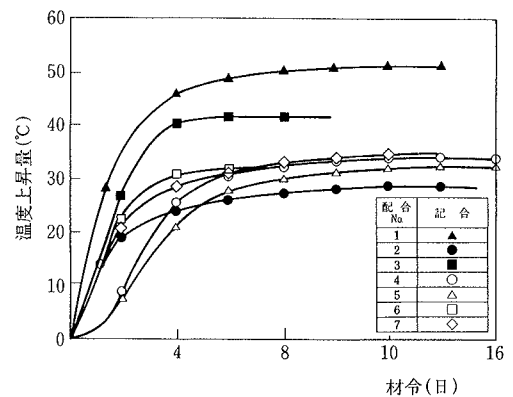


図-8 断熱温度上昇特性

表-9 断熱温度上昇試験結果

配合	近似式	T=K(1-e ^{-αt})		T=K{1-(1+αt)e ^{-αt} }	
		K	α	K	α
1	NB50	51.9	0.43	50.6	0.95
2	NB90	27.7	0.47	27.1	1.04
3	MB40-F20	43.1	0.48	41.4	1.13
4	MB25-F50	36.7	0.25	34.3	0.61
5	MB20-F60	36.7	0.20	33.3	0.52
6	HB60-F25	34.2	0.46	32.0	1.18
7	HB48-F40	33.6	0.45	32.7	1.03

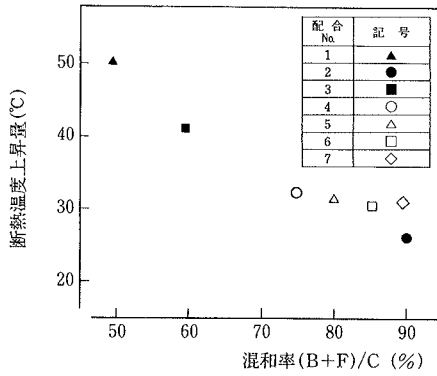


図-9 混和材置換率と断熱温度上昇量

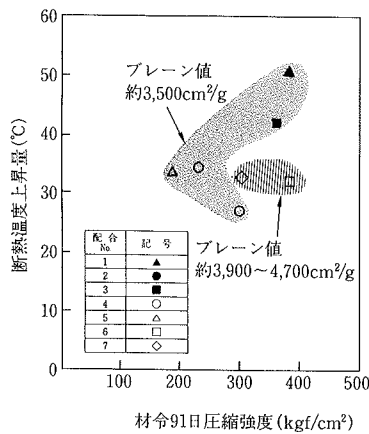


図-10 圧縮強度と断熱温度上昇

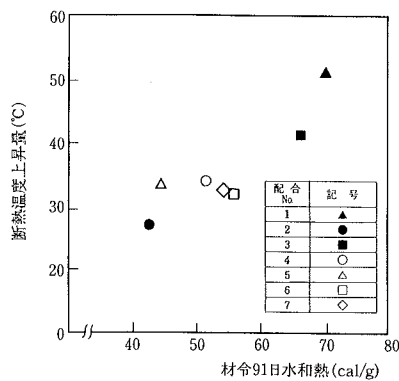


図-11 セメントの水和熱と断熱温度上昇量

すように、必ずしも相関性はなく、このことは、温度ひびわれ低減に有効なセメントすなわち、発熱が少ないが強度の高い結合材があることを示唆する。結合材の水和熱と断熱温度上昇量との関係は図-11に示すように正の相関ではあるが相関性は比較的小さく、結合材の水和熱によるコンクリートの断熱温度上昇量の評価は適切でなく、セメントの品質管理のためには、モルタルあるいはペーストを用いる簡易断熱試験の必要性が認められる。

4.4 まとめ

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを多量に添加した低発熱性結合材を水中不分離性コンクリートに適用するに際して、フレッシュコンクリートの性状、硬化後の強度

発熱特性などについて検討した結果、以下のことが明らかとなった。

混和材添加率の増加に伴い断熱温度上昇量は小さくなる。強度と断熱温度の関係は強い相関が認められず、強度発現性が良く、発熱の小さい混合セメントがあるものと考えられる。これは、結合材の粒度分布の違いなどに影響されているためと推定される。フライアッシュを多量に混合しすぎると強度が低下する。また、高炉スラグ微粉末が多すぎるとスランプロスが大きくなる。すなわち、異種混和材を適当な比率で混合することが好ましい。

一方、高い温度履歴を受けたコンクリートのコア強度は、標準養生供試体より強度が小さくなり、実際の構造物で強度を得るには、温度上昇をできるだけ低減することが好ましい。また、気中供試体強度に対する水中養生供試体強度の比はセメントが低発熱性の結合材であっても特に小さくなるものではなく、水中落下時の分離抵抗性も特に低下しない。凝結は低発熱にすることで遅れる傾向を示すが、始発は25~41時間の範囲である。また、スランプロスが5 cm 低下するのは二成分系で練上り後4~5時間で、三成分系で7~11時間である。なお、石粉はワーカビリティを若干改善するが、強度への影響は小さい。以上の結果、低発熱性水中不分離性コンクリートに用いられる結合材は高炉スラグ微粉末を60%程度とし、フライアッシュを約25%、ベースセメントは早強ポルトランドセメントが好ましく、その混合比を約15%程度とすることが好ましい。

5. あとがき

本研究では限定された材料を用いて行なった実験の結果より、温度ひびわれ抑止効果のある低発熱水中不分離性コンクリートを提案したが、使用材料によっては、さらに効果のある組合せも考えられる。今後は、さらに結合材の粒度分布を定量評価することも必要であり、かつ、結合材の総量によっても、より効率の良い組合せが考えられ、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 金沢, 他: 超低発熱セメントの橋りょう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. 27, No. 5, p. 31~37, (1989)
- 2) フライアッシュセメントの水和熱測定方法(溶解熱方法); セメント協会標準試験方法, (1975)
- 3) 十河, 竹田, 他; 特殊水中コンクリートの分離抵抗性について, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 9, No. 1, p. 247~252 (1987)
- 4) 特殊水中コンクリート・マニュアル(設計・施工); (財)沿岸開発技術研究センター, (財)漁港漁村建設技術研究所, (1986)
- 5) 水中不分離性コンクリート・マニュアル(設計・施工); (財)沿岸開発技術研究センター, (財)漁港漁村建設技術研究所, (1990, 12)
- 6) 日本道路公団; 日本道路公団土木工事試験方法, (1976, 4)