

# 論文 [1002] 低熱ポルトランドセメントを用いた超高強度コンクリートの特性

田中 恭一\*1・佐藤 孝一\*2・菅 一雅\*3・斉藤 力\*4

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化や建築物の高層化にともない、コンクリートの高強度化が進められており、その要求に応える材料・施工法の研究が盛んに行われている。最近では、設計基準強度が1000kgf/cm<sup>2</sup>以上の超高強度コンクリートの実大施工実験も行われており、実用化に向けて問題点が克服されつつあるが[1][2]、超高強度コンクリートは、セメント量が多いため温度ひびわれの発生、長期強度の伸びが小さい等の問題点が指摘されている。このような問題点に対して、材料面からのアプローチとして、低発熱セメントの開発・実用化が進められている。

本論文は、高ビーライト型低熱ポルトランドセメントに着目し、設計基準強度が1000kgf/cm<sup>2</sup>を越える超高強度コンクリートへの適用の可能性について検討したものである。試験は高ビーライト型低熱ポルトランドセメントを用いたフレッシュコンクリートの性状、硬化コンクリートの性状、熱的性質等について確認するとともに、普通ポルトランドセメントとの比較および粗骨材が強度におよぼす影響についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用セメントの化学成分および物理的性質

表-1および表-2に使用したセメントの化学成分と物性値を示す。使用した低熱セメントは、スラグ、フライアッシュ等の混和材を混合せずにC<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AFおよびC<sub>3</sub>Sを低減し、C<sub>2</sub>S量を増加した一成分系のセメントで、中庸熱セメントの規格(JIS R 5210)に適合しており、中庸熱セメントより更に水和熱を低減したセメントである。

### 2.2 使用材料およびコンクリートの調合

粗骨材は、コンクリートの圧縮強度に影響を与える指標として、骨材の物性に着目し、比重および破砕値の異なる石巻産砕石および青梅産砕石の2種類を選んだ。細骨材は浜岡産川砂を使用した。表-3に骨材の種類と物性値を示す。超微粉結合材には非造粒のシリカフューム(SF)(平均粒径; 0.15μm, 真比重; 2.20, 比表面積; 200,000 cm<sup>2</sup>/g)を用いた。なお、シリカフューム

表-1 セメントの化学成分

記号	ポルトランドセメント種類	化学成分(%)					構成化合物(%)			
		ig. loss	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
L	低熱	0.8	0.7	2.3	0.52	0.004	27	58	2	8
N	普通	1.3	1.6	2.1	0.63	0.006	51	24	9	9

表-2 セメントの物性値

記号	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結時間		モルタル圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				水和熱 (cal/g)		
			始発 (h-m)	終結 (h-m)	3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
L	3.22	3410	2-35	4-05	76	118	317	580	48.3	63.3	74.6
N	3.16	3390	2-20	3-25	164	265	415	—	77.0	89.3	—

\*1 藤沢薬品工業(株) 筑波コンクリート研究所, 主任研究員(正会員)

\*2 (株)熊谷組 技術研究所, 主任研究員(正会員)

\*3 (株)熊谷組 技術研究所, 研究員(正会員)

\*4 藤沢薬品工業(株) パリック部技術課, 係長(正会員)

の置換率は結合材 (C+SF) に対し、10%とした。混和剤はアミノスルホン酸系高分子を主成分とした高性能AE減水剤を用いた。コンクリートは、目標スランプフロー 600±50mmの単位水量一定のNon AEコンクリートとし、水結合材比は27%、23%、20%とした。表-4にコンクリートの調合を示す。

表-3 骨材の種類と物性値

骨材	種類	産地	Gmax (mm)	比重	吸水率 (%)	粗粒率 (%)	実績率 (%)	破砕値* (%)
粗骨材	硬質砂岩碎石	青梅	20	2.63	0.80	6.68	60.2	9.7
			13	2.63	0.80	6.29	57.7	
粗骨材	輝緑岩碎石	石巻	20	2.96	0.62	6.80	57.7	12.3
			13	2.96	0.62	6.27	56.5	
細骨材	川砂	浜岡	5	2.61	1.61	2.74	68.9	—

\*B. S. 812 に準拠

### 2.3 試験方法

試験方法は表-5に示す通りである。フレッシュコンクリートの経時変化の測定は練り上がり直後、30分後、60分後および90分後に行い、各測定時刻までは傾斜角30°に固定した100ℓ可傾式ミキサに試料を投入し2rpmで攪拌した。硬化コンクリートの養生は20℃の標準養生と試験体を形枠毎、ビニール袋で封緘した封緘養生の2種類である。

表-5 試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
スランプフロー	土木学会基準
空気量	JIS A 1128
ブリージング	JIS A 1123
凝結	JIS A 6204 (付属書1)
圧縮強度	JIS A 1108 (材令7, 28, 91日)
割裂引張強度	JIS A 1113 (材令28日)
静弾性係数	抵抗線ひずみゲージを用いて測定 (材令28日)
ポアソン比	
断熱温度上昇	空気循環方式 (50ℓ容)

## 3. フレッシュコンクリートの性状

### 3.1 練り混ぜ性能

一般に、水結合材比の低い超高強度コンクリートは、単位セメント量が多いためコンクリートの粘性が高く、普通コンクリートに比べ練り混ぜに要する時間を長くする必要があるとされている。そこで本実験を実施するに際し、必

表-4 コンクリートの調合およびフレッシュコンクリートの性状

No.	記号	使用粗骨材 Gmax	W C+SF (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					高性能AE減水剤 (%/C+SF)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	ブリージング量 (cc/cm <sup>3</sup> )	凝結時間 (h-m)		
					W	LC	OPC	SF	S						G	始発	終結
1	L-20	青梅碎石 20mm	27	44.2	165	550	—	61	723	918	2.70	25.7	64.5	0.4	0	16-27	18-18
2			23	40.9		646		72	632		2.70	24.9	61.0	0.9	0	17-31	19-30
3			20	37.5		742		82	545		3.10	24.1	63.5	0.8	0	24-03	26-22
4	N-20	青梅碎石 20mm	27	44.0	165	550	—	61	715	918	2.40	26.1	64.5	0.3	0	14-17	15-59
5			23	40.6		646		72	624		2.60	25.8	62.5	0.7	0	15-06	17-05
6			20	36.9		742		82	532		3.10	25.2	57.5	1.0	0	17-53	20-35
7	L-13	青梅碎石 13mm	27	46.5	165	550	—	61	760	881	2.60	25.7	58.5	0.6	0	15-26	17-20
8			23	43.3		646		72	668		2.90	26.0	63.5	0.8	0	20-19	22-40
9			20	40.0		742		82	582		3.30	26.7	65.0	0.9	0	27-05	29-35
10	L-20	石巻碎石 20mm	27	46.5	165	550	—	61	760	992	2.50	26.5	63.0	0.1	0	16-16	18-11
11			23	43.3		646		72	668		2.80	25.5	59.5	0.8	0	19-08	21-25
12			20	40.0		742		82	582		3.30	25.0	64.0	0.6	0	24-49	27-07
13	N-20	石巻碎石 20mm	27	46.2	165	550	—	61	752	992	2.50	26.5	64.5	0.1	0	14-32	16-24
14			23	43.0		646		72	660		2.80	25.5	61.0	0.5	0	15-42	17-09
15			20	39.4		742		82	569		3.20	26.0	61.0	0.8	0	18-26	20-37
16	L-13	石巻碎石 13mm	27	47.6	165	550	—	61	778	971	2.60	25.5	61.0	0.4	0	16-00	18-18
17			23	44.5		646		72	686		2.80	25.8	64.0	0.7	0	19-18	21-01
18			20	41.2		742		82	600		3.20	26.5	63.5	1.0	0	23-42	26-08

要な練り混ぜ時間を把握する目的で練り混ぜ中のミキサの消費電力の測定を行った。練り混ぜは、100ℓの強制二軸ミキサを用い、1/2細骨材、セメント、シリカフェーム、1/2細骨材を順に投入し、空練り30秒後に注水を行った。図-1に注水後のミキサの消費電力の結果を示す。図より使用した粗骨材およびセメントの種類に関わらず、ほぼ同じ測定結果となった。また、練り混ぜ時間は、低熱セメントを用い、270秒練り混ぜを行ったものが、210秒以降はほぼ一定の消費電力の値を示しているため、練り混ぜに必要な時間を210秒と判断した。したがって、本実験における練り混ぜ時間はすべて210秒とした。

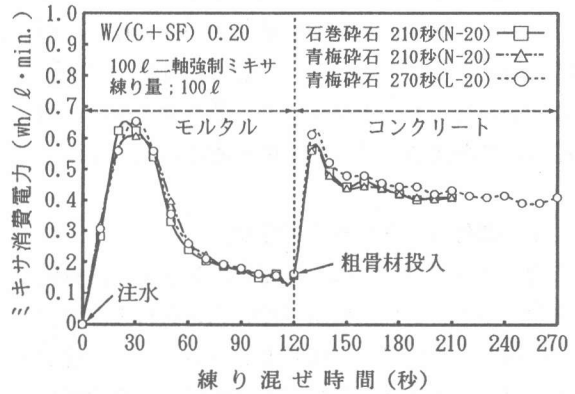


図-1 ミキサの消費電力

### 3.2 スランプフローの経時変化

図-2にスランプフローの経時変化の結果を示す。図に示すように、低熱セメントを用いたものは90分までいずれの調査も大きなフローの低下は認められず、普通セメントと同様、良好な状態であった。また、水結合材比 27, 23%に比べて、水結合材比20%では練り混ぜ直後に比べ90分後にフローがやや増大する傾向を示しているが、これは高性能AE減水剤の添加量が多くなった影響と考えられる。

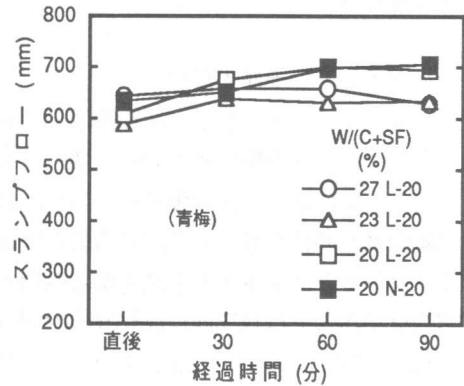


図-2 スランプフローの経時変化

### 3.3 ブリージング、凝結時間および高性能

#### AE減水剤の使用量

表4に示すように、ブリージングは本実験の範囲ではいずれの調査でも認められなかった。

図-3に各調査の凝結時間を示す。水結合材比が小さくなる程、凝結は遅延する。低熱セメントは普通セメントに比べて凝結が遅れる傾向にある。低熱セメントは普通セメントに比べて水結合材比 27, 23%では始発で1.5~2時間程度、水結合材比20%では6時間程度と水結合材比が小さくなる程遅延が大きくなる傾向が認められた。図-4に高性能AE減水剤の添加量と凝結始発時間の関係を示す。凝結時間は高性能AE減水剤の添加量と高い相関が認められる。低熱セメントと普通セメントを比較した場合、低熱セメントの方が普通セメントに比べて同一添加量に対して凝結が大きく遅延する傾

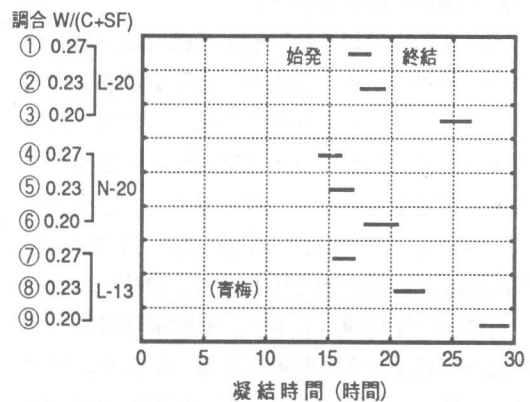


図-3 各調査における凝結時間

向を示している。これは、セメントの成分のうち、間隙相(C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF)が混和剤をよく吸着することが知られているが、低熱セメントは普通セメントに比べてこれらの含有量が少ないため、間隙相への高性能AE減水剤の吸着量が少なくなり、凝結に影響を与えるC<sub>3</sub>Sへの高性能AE減水剤の吸着量が多くなることによって、低熱セメントの凝結の遅れが大きくなったものと考えられる[3]。

#### 4. 硬化コンクリートの性状

硬化コンクリートについては圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、引張強度の測定を行ったが、圧縮強度については、特にセメントの種類の違い、粗骨材の最大寸法(20mm, 13mm)の違い、養生条件(標準, 封緘)の違いが強度におよぼす影響について検討を行った。

##### 4.1 セメントの種類の違い

図-5にセメントの種類と圧縮強度の関係を示す。低熱セメントを用いたものは、普通ポルトランドセメントに比べ、初期強度は低いが、材令28日以降の強度の伸びは大きく、材令91日では普通ポルトランドセメントよりも高くなる傾向を示し、水結合材比20%では1476kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮強度が得られた。一方、普通ポルトランドセメントでは、水結合材比20%、材令28日では、1245kgf/cm<sup>2</sup>の強度が得られたが、それ以降の強度の伸びはほとんど認められなかった。

##### 4.2 粗骨材の種類の違い

図-6に粗骨材の種類別に圧縮強度と結合材水比の関係を示す。青梅碎石と石巻碎石を使用したコンクリートを比較した場合、石巻碎石を使用したコンクリートの圧縮強度は青梅碎石を使用した場合に比べてかなり低く、水結合材比23%の場合、材令28日で182kgf/cm<sup>2</sup>、材令91日で256kgf/cm<sup>2</sup>低い値を示した。石巻碎石は青梅碎石に比べて比重は大きく、破碎値は青梅碎石に比べて若干大きい程度であり、破碎値だけではこの原因を説明できないが、圧縮強度試験体の破断面を観察すると、骨材の割れ方が層状で方向性が認められた。これらのことが強度が低い原因と考えられる。

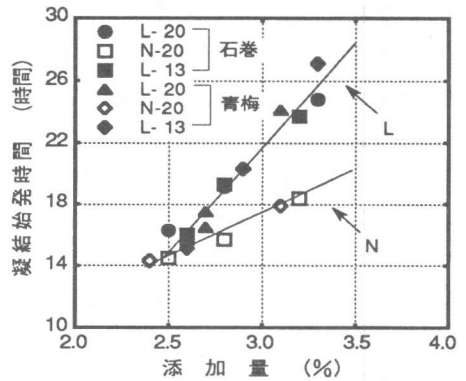


図-4 高性能AE減水剤の使用量と凝結始発時間

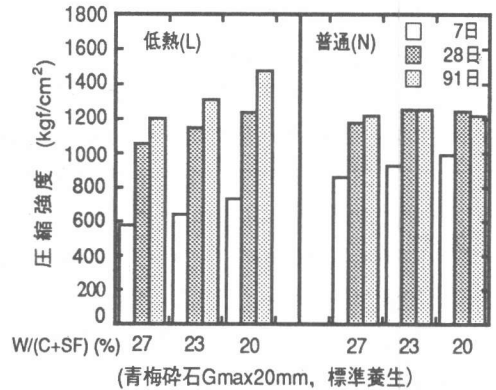


図-5 セメントの種類と圧縮強度

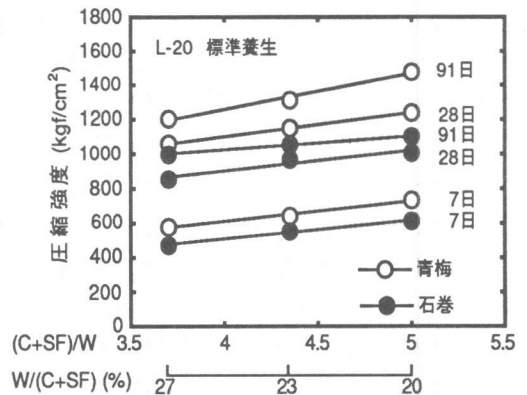


図-6 粗骨材の種類と圧縮強度

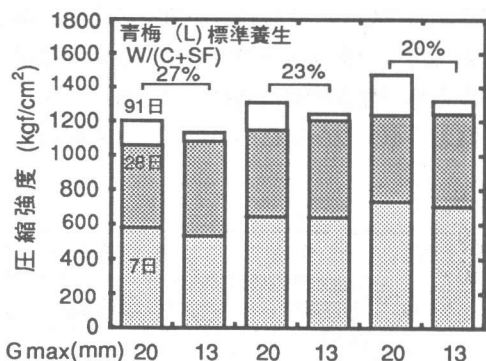


図-7 粗骨材の最大寸法と圧縮強度

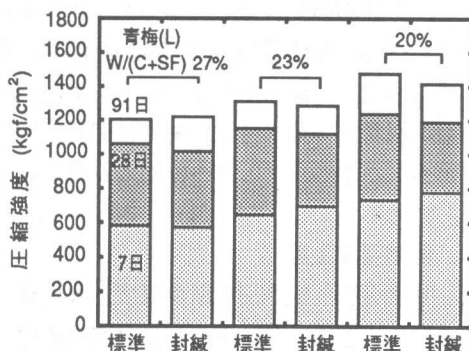


図-8 養生条件と圧縮強度

### 4.3 粗骨材の最大寸法の違い

図-7に標準養生を行った場合の粗骨材の最大寸法と圧縮強度の関係を示す。材令28日までの圧縮強度は粗骨材の最大寸法が異なっても大きな差はないが、材令91日の13mmの圧縮強度は20mmの90~95%程度である。13mmの28日から91日の強度の伸びが低かった原因は明らかではない。なお、封緘養生では粗骨材最大寸法の影響は認められなかった。

### 4.4 養生条件の違い

図-8に養生条件と圧縮強度の関係を示す。材令7日では、標準養生に比べて封緘養生の方が強度が若干高いが、材令28日以降は逆転し、標準養生の方が高くなる。材令91日の標準養生に対する封緘養生の強度は、水結合材比が小さくなるほど若干低くなるが、概ね95~100%の範囲である。

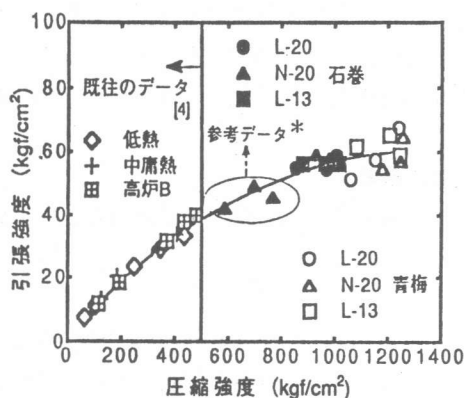
### 4.5 引張強度

図-9に圧縮強度と引張強度の関係を示す。なお、圧縮強度が500kgf/cm<sup>2</sup>以下は既往のデータをプロットしたものである[4]。

圧縮強度が500 kgf/cm<sup>2</sup>以下では圧縮強度に対する引張強度の比は約1/12であり、圧縮強度が大きくなるに従って引張強度は直線的に増加するが、その後、圧縮強度に対する引張強度の割合は低下し、1000kgf/cm<sup>2</sup>付近では1/18程度となり引張強度のバラツキも大きくなる。図に示すようにセメントの種類の影響は認められない。

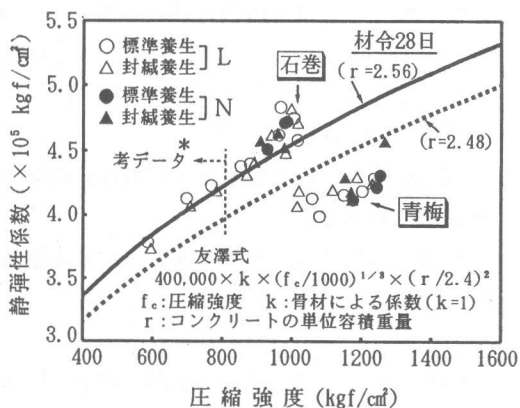
### 4.6 静弾性係数

図-10に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の線は高強度でよく使用されている友澤式に本実験のコンクリートの単位容積重量を代入して求めたものである。石巻碎石の場合、青梅碎



\*石巻碎石を用いた予備実験結果 (W/C: 0.35, 0.31, 0.27)

図-9 圧縮強度と引張強度



\*石巻碎石を用いた予備実験結果 (W/C: 0.35, 0.31, 0.27)

図-10 圧縮強度と静弾性係数

石に比べて圧縮強度は低いが静弾性係数は高い結果を示している。これは、粗骨材の比重が青梅碎石に比べて石巻碎石の方が大きいために、石巻碎石使用コンクリートの方が、単位容積重量が大きくなったことによるものである。また、圧縮強度と静弾性係数の関係においては、セメントの種類、粗骨材の最大寸法の影響は認められない。なお、ポアソン比については、本実験の範囲では調査にかかわらず0.20~0.24の範囲であった。

### 5. 断熱温度上昇

図-10に調合No3とNo6の断熱温度上昇試験結果を示す。普通セメントの最高温度到達材令は4.5日、最高温度上昇量が68.4℃であるのに比べ、低熱セメントは最高温度到達材令は5.5日、温度上昇量が56.8℃であり、温度上昇量を大幅に低減できる。また、温度上昇勾配も若干低熱セメントの方がゆるやかである

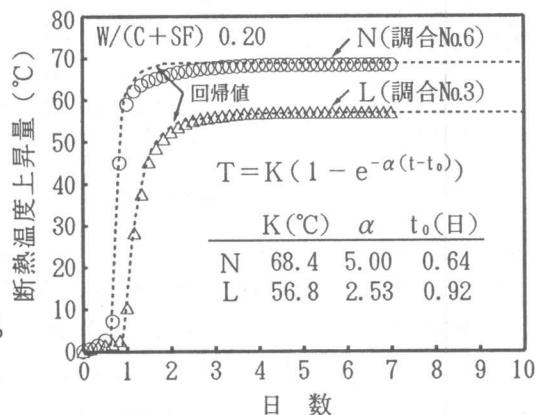


図-11 断熱温度上昇

### 6. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) フレッシュコンクリートの性状のうち、低熱セメントを使用した場合のミキサの消費電力は、普通セメントの場合と同様である。低熱セメントは普通セメントに比べて、高性能AE減水剤の添加量に対する凝結の遅延が大きくなる傾向を示す。
- (2) 粗骨材の選定には比重、破砕値等のほかに、骨材の破壊性状にも留意する必要がある。本実験の範囲では、粗骨材の最大寸法を小さくしても、高強度を得るのに有利にはならなかった。
- (3) 低熱セメントは普通セメントに比べて、長期強度の伸びが大きく、水結合材比20%では材令91日で約1500kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮強度が得られた。封緘養生での強度は標準養生の95~100%である。引張強度は圧縮強度1000kgf/cm<sup>2</sup>に対して1/18程度である。静弾性係数は粗骨材の比重が大きいものの方が大きくなる。
- (4) 低熱セメントの断熱温度上昇量は普通セメントに比べて低く、高強度コンクリートの温度上昇低減に有効である。

これらの結果より、低熱セメントは超高強度コンクリートに十分適用可能であると考えられる。

### 【参考文献】

- [1] 岡本公夫・上村克郎・友澤史紀ほか：NewRC実大施工実験，日本建築学会学術講演梗概集，pp.299~360，1992
- [2] 中根淳・久保田昌吾ほか：RC超高層建物用コンクリートに関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.471~476，1992
- [3] 内川浩・羽原俊祐ほか：初期材令におけるセメントと有機混和剤との相互作用，コンクリート工学論文集Vol.4，No.1，pp.91~101，1993
- [4] チチブ低熱ポルトランドセメント，秩父セメント(株)技術資料