

論文

[1016] シリカフェームコンクリートの諸性質に関する実験的研究

正会員 丸山武彦 (日本コンクリート工業)

正会員 土田伸治 (日本コンクリート工業)

正会員 河野 清 (徳島大学工学部)

1. はじめに

超微粒子であるシリカフェームの利用は、北欧・北米を中心にコンクリートの耐久性改善や高強度化を目的として実用化されている。我国でも、ここ数年来、シリカフェームに関する研究が盛んに行われており、その特性は明かにされつつあるが、まだ本格的な実用化には至っていないのが現状である。筆者らも、既往の報告^{1) 2)}のように一般に入手できる砕石および砕砂を使用し、シリカフェーム、高性能減水剤およびオートクレーブ養生(以下、AC養生)を組み合わせることで、圧縮強度1500kgf/cm²以上の超高強度コンクリートを得る要因と水準を実験計画法により選定した結果、最高強度1870kgf/cm²の超高強度コンクリートが得られた。本報告はシリカフェームを用いた超高強度コンクリートに関し、強度レベルで2種類(円柱供試体φ10×20cmで1800kgf/cm²程度と1500kgf/cm²程度)選定し、比較用として、現在実用化されているシリカフェームを用いていない高強度コンクリート(円柱供試体φ10×20cmで800kgf/cm²程度、遠心供試体φ20×30cmで1000kgf/cm²程度)を加え、合計3種類のコンクリート配合により、それらの諸性質(強度に関する諸数値・乾燥収縮・中性化・耐薬品性・細孔径分布等)を実験的に比較検討したものである。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合: セメントシリカフェーム、細・粗骨材、混和剤などの主な物性値を表1に、シリカフェームの化学成分を表2に示す。また、3種類の圧縮強度レベルによるコンクリートの配合表を表3

表1. 使用材料と主な性質

使用材料	主 な 性 質
セメント	普通ポルトランドセメント, 比重 3.16, ブレーン値 3200cm ² /g
シリカフェーム	ノルウェー産、比重 2.20、比表面積 200,000cm ² /g
細骨材	岩瀬産硬質砂岩砕砂、比重 2.63、粗粒率 3.02
粗骨材	岩瀬産硬質砂岩砕石、比重 2.63、最大骨材寸法 15mm
混和剤	β-ナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤、比重 1.20

表2. シリカフェームの化学成分 (%)

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	H ₂ O	lg. loss
94.0	0.3	0.3	0.2	0.5	0.4	0.8	1.0	0.5	1.5

に示す。シリカフェームはセメントの外割りとする。

(2) 練り混ぜ方法、供試体の作製および養生方法: コンクリートの練り混ぜ

表3. コンクリートの配合表

配合NO	目標強度レベル kgf/cm ²	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	単位体積重量 C kg/m ³	細骨材率 s/a (%)	シリカフェーム混入率 (%)	高性能減水剤混入率 (%)
1	1,800	8±2	3±1	24.6	500	42.0	30.0	5.0
2	1,500	8±2	2±1	27.6	500	42.0	20.0	3.0
3	800	8±2	2±1	33.9	440	44.0	-	1.5

には容積 100ℓの強制練りミキサーを用い、練り混ぜ方法はセメント、シリカフェームおよび細・粗骨材を投入して空練りを1分行い、水および混和剤を投入してから配合NO.1,2に関しては3分、配合NO.3に関しては1分行った。なお、この方法は配合NO.1,2に関しては前回の実験にて求めた方法であり、また、配合NO.3に関しては現在行われている方法である。練り混ぜ後、スランブの試験を行い供試体成型型枠にコンクリートを打設した。供試体の作製はφ10×20cmの円柱および10×10×40cmの角柱についてはJIS A 1132に準じ、φ20×30cm およびφ20×120cmの遠心供試体についてはJIS A 1136に準じて作製した。なお、遠心供試体の壁厚はどちらも4cmとした。

養生方法は水中養生28日、同91日、蒸気養生およびAC養生の4種類とした。水中養生はコン

クリートの打設後、環境温度20℃の恒温室に静置して翌日脱型後に水温20℃の水中にて養生を行った。蒸気養生はコンクリートを打設後、養生槽に入れ前置き2時間、昇温20℃/時間、最高温度65℃で保持時間4時間、降温20℃/時間とした。AC養生は蒸気養生後の供試体をひきつづき180℃・10気圧まで3時間で昇温、保持時間3時間、その後徐冷とした。

(3) 実験方法：

表4. 実験項目（実験はすべて3配合について行う）

試験項目	供試体	養生方法	実験方法および実験本数
シリカフェームコンクリートの物性試験の項目、供試体の形状と寸法、養生方法、実験方法および実験本数を表4に示す。なお、実験は3配合すべてにつ	圧縮強度 弾性係数 ポアソン比	φ10x20 φ20x30	AC養生 蒸気養生 水中28日 水中91日
	φ10x20 φ20x30	AC養生 蒸気養生 水中28日 水中91日	JIS A 1108、1136。φ10→各養生12本。φ20→各養生6本 弾性係数はJIS原案に準ずる。 ポアソン比は最大荷重の1/3に相当する応力時のひずみの比とする。
	10x10x40 φ20x120	同上	10x10x40→JIS A 1106（各養生12本）。φ20x120→支持スパン1m、載荷スパン30cmの2点載荷（AC養生2本のみ）
	φ10x20	同上	JIS A 1113に準ずる。各養生方法12本
	φ10x20 φ20x30	AC養生	表乾状態の供試体の気中および水中重量を測定する。その後、絶乾状態の供試体の重量を測定して求める。
	10x10x40 φ20x30	AC養生	蒸気養生脱型後を基長、AC養生後までJIS A 1129。以後、π型ゲージを用いてπ-加ガ-による自動計測。
	同上	AC養生	JIS原案に準ずる。但し、φ20x30は縦六分割とする。
	同上	AC養生	炭酸ガスによる中性化促進試験を行う。
	同上	AC養生	JIS原案に準ずる。但し、φ20x30は縦方向に三分割、横方向二分割した合計六分割した供試体による。
	φ10φ20	AC養生	圧縮試験後の破片を水銀圧入法により行う。

いて行ったものである。以下に実験方法の概略を述べる。

・圧縮試験は圧縮強度のバラツキを確認するためにも、1回のコンクリートの打設で4養生条件について円柱(φ10x20cm)を各3本、遠心(φ20x30cm)を各3本作製し、打設日を変えて必要本数分を作製した。また、曲げ強度試験および引張強度試験も同様の方法とした。

・弾性係数の測定は、JIS原案「コンクリートの静弾性係数試験方法(案)」に準じて行った。また、ポアソン比は弾性係数測定時に採取したデータをもとに、最大荷重の1/3に相当する応力時の縦ひずみに対する横ひずみの割合とした。

・比重および吸水率試験は、本実験のコンクリート内部が緻密であることを考慮して、20℃の水中に7日間浸漬により吸水させ、乾燥には110℃の乾燥炉に3日間入れ測定した。

・乾燥収縮試験の基長は、蒸気養生後に供試体を脱型した時点とした。AC養生後までの測定方法は、JIS A 1129の角柱(10x10x40cm)ではダイヤルゲージ法により、遠心(φ20x30cm)ではコンタクトゲージ法により行った。AC養生後に上記によって計測した後、環境温度20℃・湿度60%の恒温恒湿室に静置した。その後は供試体にπ型ゲージ(標点間200mmおよび100mm)を取り付け、データロガーの自動計測によりデータを取り込みパソコンで処理した。

・凍結融解試験は、JIS原案「コンクリートの凍結融解試験方法(案)」(水中凍結融解試験方法)に準じて行った。試験は凍結融解を300サイクルまで行い、動弾性係数の測定および重量変化の測定間隔は36サイクルを越えない範囲で行った。なお、30サイクル毎の動弾性係数の相対動弾性係数が60%以下になった場合は、その時点で試験を中止した。

・中性化試験は、AC養生後の供試体を相対湿度90%以上、炭酸ガス濃度18vol%の湿空箱に入れ、炭酸ガスによる中性化促進試験を行った。供試体が試験材令に達したとき断面を切断し、1%フェノールフタレイン・メタノール溶液を噴霧して、中性化した部分の深さを求めた。なお、試験材令は1, 2, 4週および2, 3, 6カ月とした。

・耐薬品性試験は、JIS原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)」に準じ、4試薬(塩酸・硫酸・硫酸ナトリウム・硫酸マグネシウム)について行った。

・細孔径分布試験は、水銀圧入法により行った。

3. 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリート：配合NO.1,2はシリカフュームが多量(セメントの外割で30,20%)に混入しているため、粘性が高くワーカビリティが悪いコンクリートであった。従って、実用に際してはスランブを大きくする必要があると思われる(本実験ではスランブは 8 ± 2 cm)。配合NO.3の場合は通常の作業方法で支障はない状態であった。シリカフュームコンクリートはブリージング水が出な

表5. 強度試験結果一覧表 (kgf/cm²) 実験個数は6-12個

配合NO	養生方法	圧縮強度				曲げ強度	引張強度		弾性係数 ($\times 10^5$)	
		$\phi 10 \times 20$		$\phi 20 \times 30$			$\phi 10$	弾性係数		
		平均	CV	平均	CV	10x10		$\phi 10$	$\phi 20$	
1	蒸気	1193	5.80	969	4.86	103.4	48.6	3.85	3.99	
	水28	1285	2.20	1117	3.47	115.9	49.0	3.92	3.95	
	水91	1430	4.11	1393	2.55	134.5	53.2	3.77	4.19	
	AC	1701	5.75	1541	3.15	124.4	60.9	3.74	4.05	
2	蒸気	1017	3.28	859	2.58	98.8	57.3	3.68	3.76	
	水28	1227	2.41	984	5.36	122.4	56.9	3.91	4.01	
	水91	1336	6.77	1182	4.99	130.2	56.3	4.23	4.11	
	AC	1430	6.63	1269	3.27	122.1	61.3	3.78	4.29	
3	蒸気	425	3.24	542	2.56	46.8	31.2	3.51	3.24	
	水28	783	3.24	744	1.27	70.9	49.2	4.16	4.07	
	水91	897	5.40	841	3.64	72.7	55.2	4.49	4.30	
	AC	804	10.43	1066	2.88	83.3	58.3	4.49	3.70	

注)CV→変動係数、10x10→10x10x40、 $\phi 10$ → $\phi 10 \times 20$ 、 $\phi 20$ → $\phi 20 \times 30$

ったが、コンクリートの粘性が高いこと、単位水量が少ないこと等の影響であると考えられる。

(2) 圧縮試験結果(図1)：強度試験結果の一覧表を表5に示す。過去の実験による配合NO.1,2 AC養生の強度は1800,1500kgf/cm²程度であったが、本実験では平均で1701,1430kgf/cm²の強度となった。しかし、最高強度ではそれぞれ1846,1547kgf/cm²であった。これはシリカフュームコンクリートの粘性が高く供試体作製時に巻き込んだ気泡が抜けにくかったために強度の低い供試体が存在したからであると考えられる。また、変動係数が円柱より遠心供試体の方が小さい値となっているのは、遠心締固めの高重力により気泡が抜けやすくなり強度のバラツキが小さくなったものと思われる。

シリカフュームコンクリートの遠心供試体の強度は円柱より小さく、シリカフューム無混入の場合は遠心供試体が円柱と同等かもしくは高い強度を示している。これはシリカフュームの多量使用による遠心成形時の分離と、高強度域における供試体の形状寸法の影響が考えられる。また、本実験では水中養生91日の測定であるが、もっと長期間の水中養生を行えばボゾン作用による強度の伸びが十分に期待できるものと思われる。

(3) 弾性係数およびポアソン比(図2)：シリカフュームコンクリートの弾性係数は超高強度の割には低く $3.7 \sim 4.3 \times 10^5$ kgf/cm²程度であった。これはシリカフュームの混入率が多く、従って、セメントペースト量が多いためと考えられる。同じ配合のコンクリートでも配合NO.1,2では円柱の方が遠心供試体より弾性係数が高く、配合NO.3では逆の結果となった。これは、図9からもわ

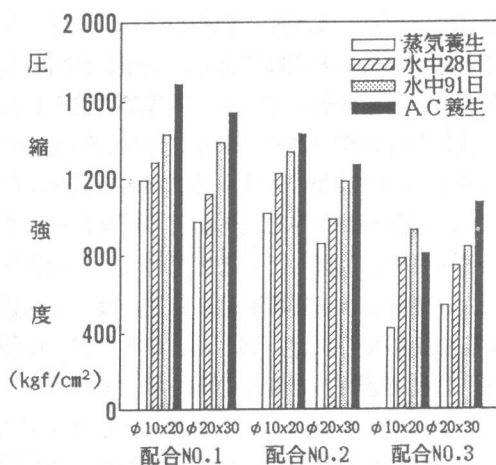


図1. 圧縮強度試験結果

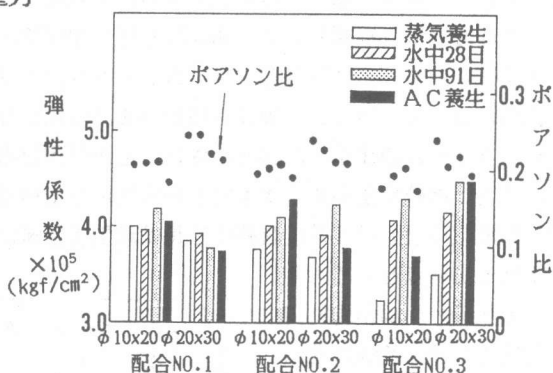


図2. 弾性係数・ポアソン比試験結果

かるように、細孔容積が配合NO.1,2では円柱(φ10x20cm)の方が少なく配合NO.3では逆に遠心供試体の方が少ない結果であることから、細孔容積の相違が弾性係数の大きさに影響をおよぼしたものと考えられる。ポアソン比は0.2程度と一般のコンクリートと大差ないものであった。一軸圧縮での破壊ひずみは、シリカフュームコンクリート(配合NO.1,2)で、 $3700\sim 4300\times 10^{-6}$ 程度となり、シリカフューム無混入コンクリートより高い値であった。また、シリカフュームコンクリートの破壊性状は超高強度コンクリートであることより、破壊時点では内部にたまったエネルギーが一度に解放されるため爆裂を起こす脆性破壊となった。従って、超高強度シリカフュームコンクリートを実構造物に使用する場合には脆性破壊を防ぐ意味からも拘束鉄筋等の必要が考えられる。

(4) 曲げ強度および引張強度(図3, 4)：シリカフュームコンクリートの曲げ強度は $120\sim 130\text{kgf/cm}^2$ と非常に高い値を示しており、本実験の範囲ではシリカフュームの混入率による差はないと判断できる。破壊した断面を観察すると骨材自体も破断しており、本実験に使用した骨材では限界に近い強度と思われる。また、角柱(10x10x20cm)の方が遠心供試体(φ20x120cm)よりも強度が高い結果となったが、これは供試体断面が矩形と円形による形状の差および寸法の相違によることに起因していると思われる。引張強度は曲げ強度以上に骨材による影響が強いと思われ、圧縮強度が 800kgf/cm^2 位以上の場合には、ほとんどかわらず、引張強度は 60kgf/cm^2 程度で頭打ちとなる傾向を示している。

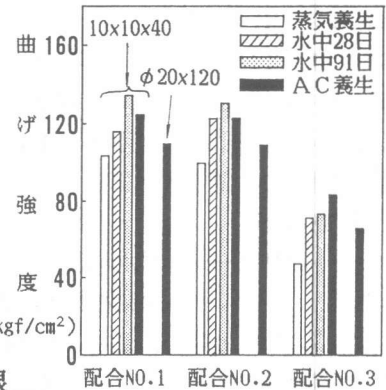


図3. 曲げ強度試験結果

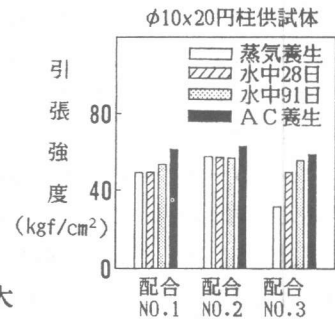


図4. 引張強度試験結果

(5) 比重・吸水率(表6)：シリカフュームコンクリート(配合NO.1,2)の円柱の表乾比重は無混入(配合NO.3)の場合に比べて大きい、配合NO.3では逆に遠心供試体の方が大きくなっている。これは遠心成形した場合、配合NO.3は粘性が比較的小さく気泡が多く抜けやすいのに対して、シリカフュームコンクリートでは気泡が抜けにくいこと、細孔容積があまり変化しないこと、シリカフュームの比重が2.20と小さいことが原因と考えられる。また、絶乾比重や吸水率も同じ傾向を示している。

表6. 比重・吸水率の試験結果

配合NO	表乾比重		絶乾比重		吸水率(%)	
	φ10	φ20	φ10	φ20	φ10	φ20
1	2.46	2.48	2.42	2.44	1.79	1.84
2	2.46	2.48	2.41	2.43	2.00	2.03
3	2.44	2.50	2.34	2.42	4.04	3.29

注) φ10→φ10x20、φ20→φ20x30

(6) 乾燥収縮(図5)：乾燥収縮の基長は蒸気養生後に供試体を脱型した時点としており、AC養生後、恒温恒湿室での初期における乾燥収縮の増大は、まだその時点において供試体に十分水分が残っていたためであると考えられる。シリカフュームコンクリートの乾燥収縮はシリカフューム無混入とはほぼ

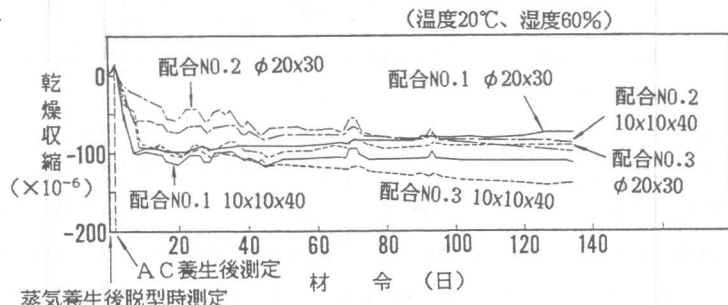


図1. 乾燥収縮試験結果

ほぼ同じ程度の値(約 $150\sim 230\times 10^{-6}$)を示しており、大差はないものと思われる。これはシリカフュームを混入すると図9のように細孔容積が減少すると共に微細な細孔の割合が多くなり強度が増大するが、反面、微細な細孔は毛細管張力が大きくなる。この両者のバランスにより、シリカフュームコンクリートの乾燥収縮はセメントペーストの増大にも関わらず高強度のシリカフューム無混入コンクリートと同等と考えられる。

(7) 凍結融解試験(図6、7)：シリカフュームコンクリート(配合NO.1,2)の凍結融解抵抗性は、図6の相対動弾性係数に示すように無混入コンクリート(配合NO.3)より優れていることがわかる。また、遠心供試体の方が角柱供試体より優れている結果となり、これは、シリカフュームコンクリートそのものおよび遠心成形法ともに組織が緻密になり強度が増大したこと、細孔径がきわめて小さくなり細孔中の水分の凍結温度が低下したことによるものと考えられる。

(8) 中性化試験：本実験の配合では中性化促進試験による中性化の進行は全く認められなかった。これは、シリカフュームコンクリートにおいてセメントが水和すると $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が生成するが、可溶性シリカとオートクレーブ養生による水熱反応の結果、結晶性の高いカルシウムシリケート水和物(主としてトバモライトグループの水和物)が生成され、セメント水和物の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がほとんど残らなくなるが、反面、コンクリートの組織が緻密になるために炭酸ガスの浸透が極めて少なく、中性化が殆ど生じないことを示していると考えられる。

(9) 耐薬品性試験(図8)：耐薬品性試験の結果、本実験の配合では4試薬中の塩酸(2%溶液)、硫酸ナトリウム(10%溶液)、硫酸マグネシウム(10%溶液)の3試薬についてはほとんど重量変化がなく、これらの試薬に対する抵抗性は十分にあると考えられる。硫酸(5%溶液)に対する侵食経過日数と重量変化を図8に示す。これより、配合による差はあまりないものと思われるが、遠心供試体が角柱供試体よりも重量の減少量が少ない結果となった。これは、遠心成形時に遠心供試体表面(遠心型枠面)には微粒子が集まり、薄い緻密な層がつくられることから侵食を受けにくいと考えられる。

(10) 細孔径分布(図9)：本実験の配合によるコンクリートはよく締固められており、通常のコンクリートの全細孔容積 $T.P.V=0.6\sim 1.3\text{cc/g}$ に比べて、いずれも全細孔容積は小となっている。特に水セメント比が小さくシリカフューム混入量が多い配合NO.1においては、円柱・遠心共に全細孔容積が最も小さくなっている。これは、水セメント比が小さいこと、微粒子であるシリカフューム混入によるマイクロフィラー効果によりよく締固まること、さらにポゾラン反応によって硬

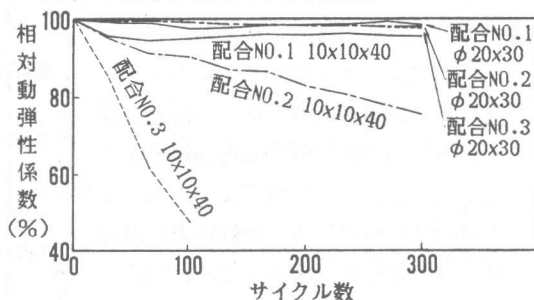


図6. 凍結融解試験(相対動弾性係数)

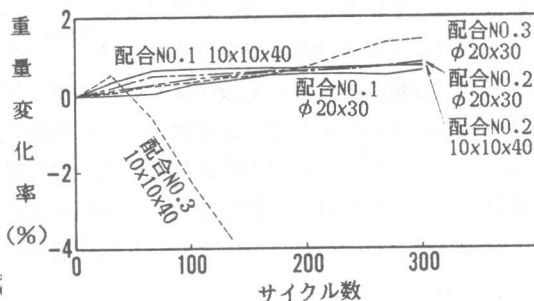


図7. 凍結融解試験(重量変化率)

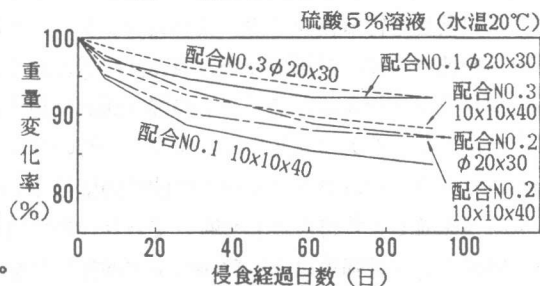


図8. 耐薬品性試験結果

化体組織が緻密化したこと等の効果であると考えられ、特にマクロポアの細孔容積の減少が著しい。シリカフューム無混入コンクリート(配合NO.3)については、水セメント比が高いことも影響しているが、シリカフュームを混入していないこともあって、比較的全細孔容積が大きくなり、細孔半径が大きい140~600Å付近の分布が最も多くなっている。また、シリカフュームコンクリート(配合NO.1,2)では、円柱の方が遠心供試体よりも全細孔容積が小さく、締固め効率が良い。本実験ではシリカフュームを多量に混入しているため、遠心成形によってシリカフュームが分離しやすいこと、マイクロポアは遠心力によって抜けにくいことが考えられる。これに対して、シリカフューム無混

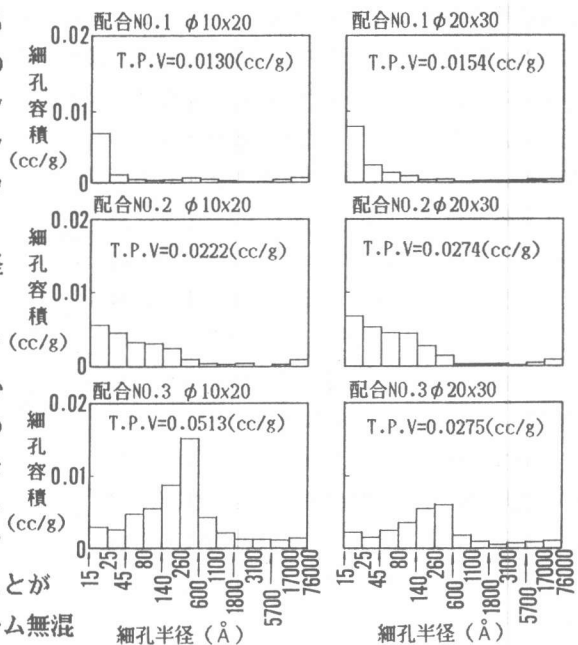


図9. 細孔径分布図

入コンクリート(配合NO.3)の場合は逆に遠心の方が全細孔容積は小さく、マクロポアは遠心力によって抜けやすいことが考えられる。これらの全細孔容積および細孔径分布の相違はコンクリートの強度等の性状にも影響をおよぼしていると考えられる。

4. まとめ

本実験で行った試験結果をまとめると次のようになる。

- (1) AC養生を行ったシリカフュームコンクリート(配合NO.1,2)の圧縮強度は、それぞれ平均で1701、1430kgf/cm²、最高で1846、1547kgf/cm²となり、超高強度コンクリートを得ることができる。
- (2) シリカフュームコンクリートの弾性係数は超高強度の割には低く3.7~4.3×10⁵kgf/cm²程度である。また、ポアソン比は0.2程度と一般のコンクリートと大差ない値である。
- (3) シリカフュームコンクリートの曲げ強度は120~130kgf/cm²と非常に高い値を示した。また、破壊断面を見ると骨材自体も破断しており、本実験に使用した骨材では限界に近いものと思われる。同様に、引張強度は60kgf/cm²位で頭打ちとなる傾向を示している。
- (4) シリカフュームコンクリートの乾燥収縮はシリカフューム無混入コンクリート(配合NO.3)とほぼ同じ程度の値(約150~230×10⁻⁶)を示しており、大差はないものと思われる。
- (5) 本実験の配合における、凍結融解抵抗性はシリカフュームコンクリートの方が優れており、また、遠心成形法による供試体も優れた結果を示す。
- (6) 本実験の配合で中性化促進試験を行った結果、中性化の進行は全く認められない。
- (7) 塩酸、硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウムの3試薬に対する抵抗性は十分にあると考えられる。硫酸に対する抵抗性は多少劣るが配合による差はほとんどないものと思われる。
- (8) シリカフュームコンクリートは通常のコンクリートに比べて細孔容積は少ない結果となる。また、シリカフューム無混入でも遠心成形をすることにより細孔容積が減少する。

【参考文献】1)丸山、土田、河野：シリカフュームを用いた高強度オートクレーブ養生コンクリートの研究、第43回土木技術大会、1989、pp.518~523 2)丸山、土田、他：シリカフュームを用いた超高強度コンクリートの研究(その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989、pp.195~200