

(157) 蒸気養生した早強型高流動コンクリートの諸特性について

福岡大学 土木工学科 ○添田 政司
 福岡大学 土木工学科 大和 竹史
 (株) 富士ピー・エス 本店技術部 正会員 徳光 卓
 (株) 富士ピー・エス 福岡支店技術部 正会員 左東 有次

1. はじめに

粉体を比較的多量に用いた高流動コンクリートは、高性能AE減水剤を用い、水結合材比が小さいため、圧縮強度は一般に従来の普通コンクリートに比べ大きい傾向にある。そのため、高強度を必要とするPC用工場製品にこれを用いることは有効であると考えられる。さらに、施工の合理化や省力化を図るためにもこれを用いることは効果的と考えられる。そのため筆者らは、すでにPC中空桁の打設実験を行い、充填性や強度発現性⁽¹⁾さらには硬化時の発熱特性⁽²⁾について検討を行ってきた。しかし、PC用工場製品は一般に生産性の観点から、早期強度が要求されるため蒸気養生が行われているが、粉体量や高性能AE減水剤を多用化した高流動コンクリートの蒸気養生方法について十分に検討していないのが現状である。

そこで、本研究では早強性を有し、高強度・高流動コンクリートの強度発現に対する蒸気養生後の養生方法の影響を検討するとともに、これらの乾燥収縮やクリープおよび耐凍害性について従来の普通コンクリートと比較検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

高流動コンクリートの結合材には、早強ポルトランドセメント(比重3.14、比表面積4610cm²/g、略号:HP)と高炉スラグ微粉末(比重2.91、比表面積3830cm²/g、略号:BS)を容積比5:5で使用し、普通コンクリートのセメントには早強ポルトランドセメントを用いた。使用骨材は、福岡県甘木産の砕砂(表乾比重2.85、吸水率1.93%、実積率65.6%、粗粒率2.57)および福岡県八木山産の角閃岩砕石(表乾比重2.71、吸水率0.84%、実積率56.9%、最大寸法20mm)を使用した。混和剤は、高流動コンクリートにはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤(空気量調整剤混入、略号:SP)を使用し、普通コンクリートにはナフタレン系の高性能減水剤を使用した。

高流動コンクリートの配合は、水結合材比を28%から33%の5水準とし、スランプフロー60±5cm、Vローットの流下時間が30秒以下を目標とした試し練りにより決定した。また、比較用の普通コンクリートの配合は

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状

No.	種類	W/P (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						試験結果			
				結合材 P		水	細骨材	粗骨材	SP (Px%)	スランプ フロー (cm)	流下時間(秒)	空気量 (%)	
				HP	BS								
1	高 流 動	28.1	53.4	322	297	174	898	758	1.5	63	27	1.8	
2		30.5	49.1	304	281	178	836	839	1.5	50	23	1.8	
3		31.5	49.6	301	278	182	856	828	1.7	70	24	1.9	
4		33.1	51.3	295	273	188	884	797	1.7	75	10	1.7	
5	普通	39.0	42.0	428	-	167	782	1080	1.2	8.5*	-	1.6	

*スランプ°

高流動コンクリートと同一強度が得られるように水セメント比を39%、目標スランプが 8 ± 5 cmになるように試し練りにより決定した。なお、高流動コンクリートと普通コンクリートともにNon-AEコンクリートである。その配合とフレッシュコンクリートの性状を表-1に示す。練混ぜ方法は、結合材、細骨材に対して30秒間空練りを行い、一次水(全量の90%)を投入し90秒間練った後、粗骨材と混和剤を含む残りの二次水を投入し、さらに90秒間練混ぜた。練混ぜには、二軸強制練りミキサ(容量50 ℓ)を用いた。養生方法は、配合No.4とNo.5については表-2に示すような5通りの養生条件で行った。なお、その他の配合は全て水中養生である。ここで、蒸気養生とは、プログラム蒸気養生槽により、前置き20 $^{\circ}$ Cを3時間、昇温勾配20 $^{\circ}$ C/時間、温度保持65 $^{\circ}$ Cを3時間、降温勾配5 $^{\circ}$ C/時間で行い、気中養生とは、温度20 $^{\circ}$ C、湿度70%の室内に放置して行ったものである。

表-2 養生条件

記号	養生条件
W	28日水中養生
S+W	蒸気養生+27日水中養生
S+A	蒸気養生+27日気中養生
S+7W+A	蒸気養生+7日水中+20日気中
S+14W+A	蒸気養生+14日水中+13日気中

2.2 試験方法

(1) クリープ試験：クリープ試験に用いた供試体は15 \times 15 \times 50 cmの角柱供試体を用い、図-1に示すように直列に2本連結した。載荷荷重の導入は、供試体中心部に埋設したPC鋼棒(SBPR 95/110, ϕ 26)を緊張させ、両端においた支圧盤を介して作用させる方法とし、載荷荷重は全ての供試体とも $\sigma_p=15$ N/mm 2 と一定とした。試験開始材齢は材齢1日(蒸気養生後)と各養生後28日目の2材齢とし、温度 $20 \pm 2^{\circ}$ C、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿内に静置した。クリープひずみの測定は、内部に埋設した鉄筋に1供試体あたりひずみゲージを4枚貼付し測定を行った。

(2) 乾燥収縮試験：乾燥収縮に用いた供試体は、10 \times 10 \times 40 cmの角柱を用い両側面にガラス板を貼付してダイヤルゲージにて測定を行った。なお、供試体は各3本作製し、重量および長さ変化を測定した。試験開始材齢は、所定の養生条件終了後に直ちに開始した。

(3) 圧縮強度試験：圧縮強度試験(JIS A 1108)は、 Φ 10 x 20 cmの円柱供試体を用いて、材齢1日および28日にそれぞれ行った。また、凍結融解試験後の圧縮強度試験は、凍結融解試験終了後の供試体を曲げ試験した後に、加圧板(10 x 10 cm)を用いて供試体中央部に載荷して行った。

(4) 気泡分布の測定：硬化コンクリートの気泡分布の測定は、それぞれの供試体(10 x 10 x 40 cm)の中央部分を切断して、入念に研磨した後に、ASTM C 457のリニャトラバース法に準じて、気泡数、分布、気泡間隔係数を調べた。供試体内部のひび割れ測定方法は、気泡分布測定に用いた供試体および顕微鏡を用いて行った。なお、ひび割れ本数は骨材界面から発達した連続したものをひび割れ発生数とした。

(5) 細孔径分布測定：細孔径分布の測定は、供試体中央部のコンクリートから採取した2.5 - 5 mmのモルタル部分について水銀圧入式ポロシメータを用いて、細孔半径 75 - 75000 \AA の全細孔量、細孔径分布の測定を行った。

(6) 凍結融解試験：凍結融解試験に用いた供試体は、10 x 10 x 40 cmの角柱で、脱型後材齢28日まで所定の養生を行った後に、ASTM C 666 A法に準じて一日7~8サイクルの水中凍結水中融解試験を行った。凍結融解サイクルに伴うコンクリート供試体の劣化を評価するため、たわみ振動による一次共鳴振動数および質量を測定した。

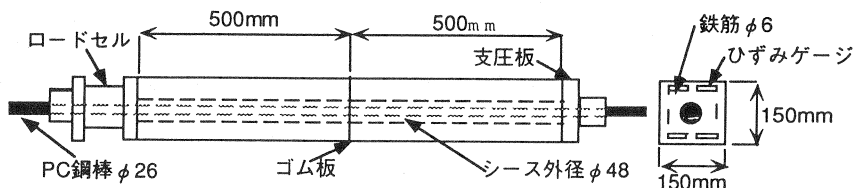


図-1 クリープ試験供試体形状

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2は、高流動コンクリートの水結合材比と圧縮強度の関係を示したものである。図より、水結合材比33%で高炉スラグ微粉末を50%置換した場合でも、蒸気養生を行った材齢1日強度は、プレストレスを導入するために必要な目標値35N/mm²を十分に満足し、早期強度が得られた。また、水結合材比を30%以下にすることによって、材齢28日で100N/mm²程度の超高強度が得られた。図-3は養生方法の影響を検討するため、普通コンクリートと高流動コンクリート(W/P=33.1%)の養生方法と圧縮強度(材齢28日)の関係を示したものである。水中養生の場合、普通コンクリートも高流動コンクリートもほぼ同程度の強度を示しているが、蒸気養生後の養生方法によって著しい差が認められる。特に、蒸気養生後に気中養生を行った場合が著しく、水中養生と比較すると普通コンクリートで約8%の低下に対して、高流動コンクリートでは約24%低下している。これは、高流動コンクリートの場合は粉体量が多く高炉スラグ微粉末を50%添加しているため、水和に必要な水分の補給が十分行われないことにより、強度の発現性が低下したものと考えられる。

3.2 クリープおよび乾燥収縮

図-4はクリープ係数と試験材齢の関係を示したものである。なお、図中の実線は最小自乗法により求めた $\phi_t = t / (a + b t)$ の実験値である。さらに表-3にそれらの定数a、bと $t \rightarrow \infty$ における ϕ_t の推定値(最終クリープ係数、 $t=360$ 日)を示す。図より、クリープ係数は水中養生した高流動コンクリートの場合が他の配合および養生方法に比べて小さくなった。これは、試験開始材齢が水中養生28日後であるため、載荷時の強度が大きく影響しているものと考えられる。さらに、表-3の計算値で求めた最終クリープ係数と比較すると蒸気養生した高流動コンクリートの方が普通コンクリートよりも若干大きな値を示す傾向にあった。しかし、クリープ係数は高流動コンクリートにおいても、 $\phi_t = t / (a + b t)$ にかなりよく表されることが確認され、いずれの配合のコンクリートにおいても、最終クリープ係数は2.0以下になることが明らかとなった。

図-5に乾燥収縮試験結果を示す。乾燥収縮ひずみは乾燥日数10日まではすべての配合において顕著な差は認められないが、乾燥日数50日以降だと著しい差が生じ普通コンクリートよりも高流動コンクリートの方が若干小さくなる傾向にあった。また、養生条件の影響では、水中養生を行った方が蒸気養生を行った場合よりも100 μ 程度小さくなっている。これは、重量減少率も水中養生の方が小さかったことなどから、スラグの長期にわたる水和反応によってペースト部分の組織が緻密になり、そのため変形が生じにくくかつ水分が逸散しにくくなった⁽³⁾ものと考えられる。

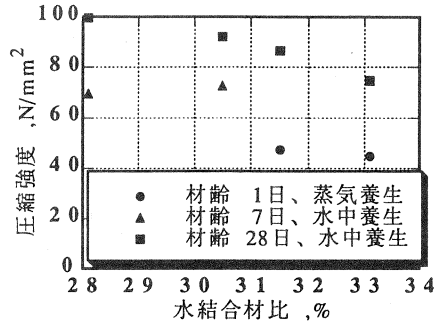


図-2 圧縮強度と水結合材比の関係

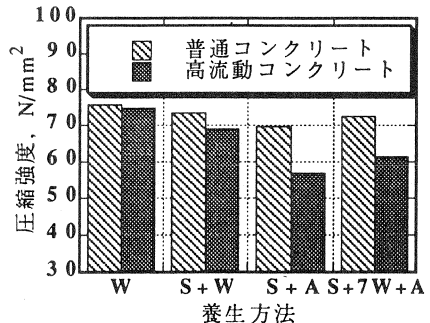


図-3 養生方法と圧縮強度の関係

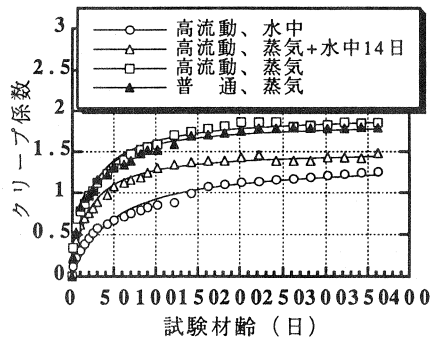


図-4 クリープ係数と試験材齢の関係

表-3 クリープ係数および実験定数

配合の種類	クリープ係数		定数 a	定数 b
	ϕ_t	ϕ_∞		
高流動, 水中	1.22	1.37	36.276	0.722
高流動, 蒸+水 14	1.44	1.51	12.466	0.660
高流動, 蒸気	1.86	1.95	10.403	0.510
普通, 蒸気	1.78	1.86	9.523	0.536

3. 3 凍結融解試験

水結合材比の異なる水中養生を行った高流動コンクリートの相対動弾性係数とサイクル数の関係を図-6(a)に示す。いずれの水結合材比の場合もNon-AEコンクリートであるにもかかわらず、凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の低下は認められず十分な耐凍害性を示している。たとえば、W/P=30.5%の場合は1000サイクルに至っても相対動弾性係数の低下は認められず、質量変化においても同様で、スケーリングもほとんど認められなかった。次に、養生方法の影響を調べるために普通コンクリートと対比して検討した。その結果を図-6(b)に示す。普通コンクリートの場合は、養生方法による差は認められるものの、いずれの養生の場合も早いサイクルで相対動弾性係数は低下し、耐凍害性に劣る結果となった。一方、高流動コンクリートの場合は、水中養生と蒸気養生後に水中養生を行ったものは、300サイクル終了後においても十分な耐凍害性を示しているが、蒸気養生後に気中養生を行ったものは、いずれも普通コンクリートと同様に早いサイクルで相対動弾性係数は低下している。これらのことから、蒸気養生後に気中養生を行った場合は、普通コンクリートも高流動コンクリートも耐凍害性は著しく劣りその差はほとんどないが、十分な水中養生を行った場合は、同程度の強度を有し、Non-AEコンクリートであるにもかかわらず、普通コンクリートよりも高流動コンクリートの方が耐凍害性に優れることが明らかになった。これらの要因を調べるため次ぎに気泡組織について検討を行った。

3. 4 気泡組織

図-7は気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示したものである。一般に、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下であれば凍結融解抵抗性に優れていると言われている。普通コンクリートの場合はNon-AEコンクリートであるため気泡間隔係数はいずれも $350\mu\text{m}$ 以上となり、耐久性指数は60以下を示している。しかし、水中養生を行った高流動コンクリートの場合は、気泡間隔係数が $300\mu\text{m}$ 前後であるにも拘わらず耐久性指数は80以上を示している。また、気泡間隔係数は、普通コンクリートよりも高流動コンクリートの方が若干小さくなる傾向にあった。そこで、次に気泡分布に着目して検討を行った。図-8は蒸気養生後に水中養生を行ったものとその後気中養生を行ったときの高流動コンクリートと普通コンクリートの気泡分布を示したものである。図より、いずれの養生条件においても、高流動コン

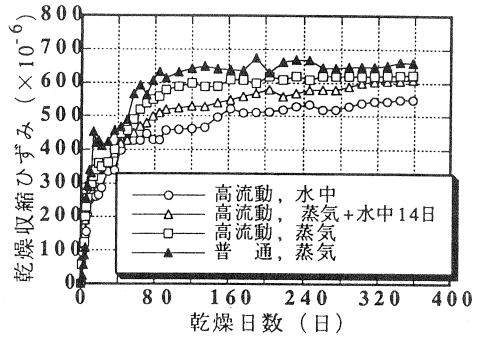


図-5 乾燥収縮試験結果

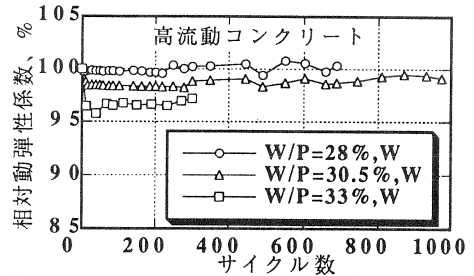


図-6 (a) 凍結融解試験結果

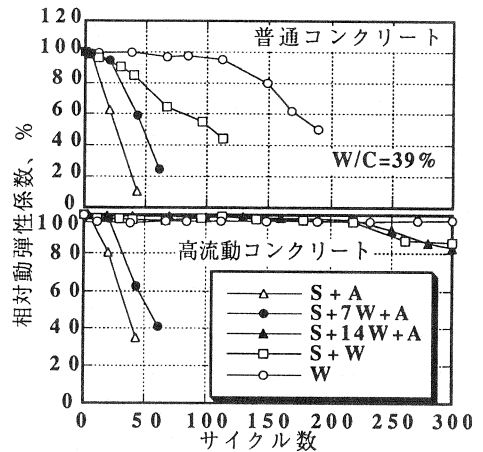


図-6 (b) 凍結融解試験結果

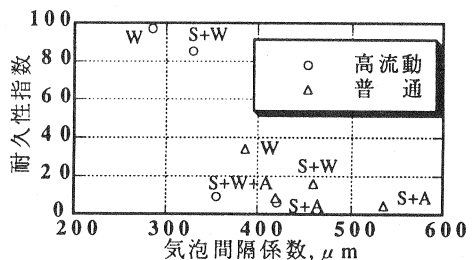


図-7 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

クリート方が普通コンクリートよりも気泡弦長 $100\mu\text{m}$ 以下の微細な気泡の割合が多くなる傾向にあった。このような傾向に関して権ら⁽⁴⁾も、高炉スラグ微粉末を用いた水結合材比35%以下の高強度コンクリートの場合に $0.03\sim 0.1\text{mm}$ 程度の微細な気泡割合が増加したと報告している。したがって、本実験の高流動コンクリートには粉体として高炉スラグ微粉末を使用しているため、高炉スラグ微粉末の混入により気泡径分布の改善が行われ、水中養生した高流動コンクリートの方が普通コンクリートよりも高い耐久性指数が得られたものと考えられる。しかしながら、高流動コンクリートの場合でも蒸気養生後に気中養生したときの耐久性指数は著しく低下していることから、次に細孔構造に着目して検討を加えた。

3.5 コンクリートの細孔構造と強度

図-9は、養生方法の相違による高流動コンクリートの細孔径分布を示したものである。この図からも明らかのように、総細孔容積(T.P.V)は、水中養生を行った方が最も小さく、蒸気養生後に気中養生を行ったものに比べ半減している。また、細孔径分布では細孔径 430\AA 付近の細孔量が著しく増加する傾向にあった。図-10は凍結融解試験前後における細孔径分布を示したものである。水中養生の場合は凍結融解試験前後における総細孔容積の変化は小さく、細孔径分布の変化もほとんど認められなかった。一方、蒸気養生後に気中養生を行った場合は、細孔径のピークは 430\AA 付近に認められるが、総細孔容積は3割程度小さくなっている。これは試験中も高炉スラグ微粉末の水和が進行したことによるものと考えられる。次に、凍結融解試験後の総細孔容積と圧縮強度の関係を示したものが図-11である。図より、総細孔容積が大きいかほど圧縮強度は小さくなる傾向にある。また、いずれの養生の場合においても普通コンクリートよりも高流動コンクリートの方が総細孔容積は小さくなる傾向にあった。これらのことから、蒸気養生後に気中養生を行った場合は、十分な水和が行われなため細孔半径 430\AA 以上の粗大径の細孔量が増加し、強度の発現性も低下したため耐凍害性に劣ったものと考えられる。

3.6 顕微鏡観察

高強度コンクリートでは養生が不十分な時にプラスチック収縮ひび割れが発生し、その結果耐凍害性が著しく低下したという報告⁽⁵⁾がある。そこで、気

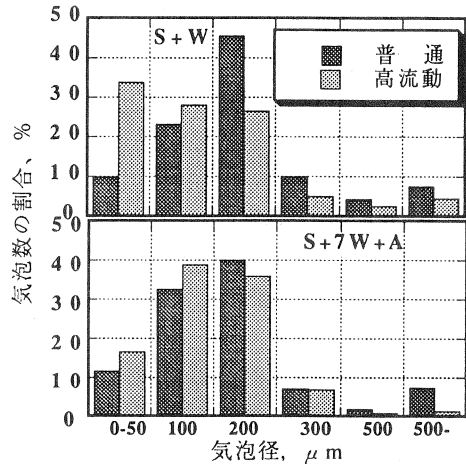


図-8 気泡分布性状

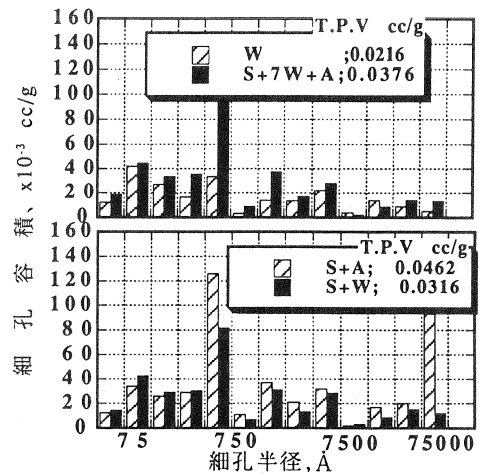


図-9 養生条件の相違による細孔径分布

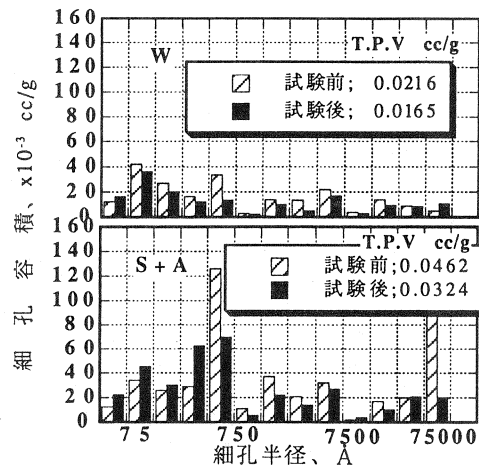


図-10 凍結融解前後における細孔径分布

泡分布測定に用いた供試体で供試体内部のひび割れについて観察した。その結果を表-4に示す。ひび割れは全般的に普通コンクリートよりも高流動コンクリートの方が多く見受けられた。これは高流動コンクリートの方が粉体量が多いことによるものと思われる。養生方法の相違では、水中養生したものより蒸気養生後に気中に放置したものの方がひび割れは多くなる傾向にあった。そのひび割れの発生状況は骨材界面に沿ったひび割れおよび骨材より発達したモルタルにひび割れが多く観察された。したがって、養生方法の相違によって高流動コンクリートの耐凍害性が著しく異なった要因としては、養生不足によるプラスチック収縮ひび割れやその後の乾燥により発生したひび割れが初期欠陥としてコンクリート中に内在したことによるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で次のようなことが明らかになった。

- (1) 蒸気養生した高流動コンクリートの材齢1日強度は目標値35N/mm²を十分に満足したが、その後に気中養生を行った場合の材齢28日強度は、水中養生に比べ著しく低下した。
- (2) 水中養生した高流動コンクリートのクリープ係数は、普通コンクリートや蒸気養生した高流動コンクリートよりも著しく小さくなった。
- (3) 高流動コンクリートの乾燥収縮は養生条件によって異なり、水中養生を行った方が蒸気養生を行った場合よりも小さくなる傾向にあった。
- (4) 水中養生した低水結合材比の高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートは、1000サイクルの凍結融解に対しても十分な耐凍害性を示した。一方、蒸気養生後に気中養生を行った場合は、普通コンクリートと同様に早いサイクルで相対動弾性係数は低下した。
- (5) 高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの方が普通コンクリートに比べ、気泡弦長100μm以下の微細な気泡割合が増加する傾向にあった。
- (6) 蒸気養生後に気中養生を行った場合は水中養生に比べ細孔径430Å付近の細孔径が増加し、総細孔容積も増加する傾向にあった。
- (7) 供試体内部のひび割れ発生数は、高流動コンクリートの方が粉体量が多いため増加する傾向にあり、特に、蒸気養生後に気中に放置したものの方がひび割れ発生数は多くなる傾向にあった。

参考文献

- (1) 左東有次、添田政司、大和竹史、成富勲公：プレテンション用高流動コンクリートに関する実験的研究、プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集、pp.275-280、1995
- (2) 左東有次、添田政司、大和竹史、徳光卓：早強性高流動コンクリートの発熱特性、プレストレストコンクリート技術協会第6回シンポジウム論文集、pp.653-658、1996
- (3) 米倉亜州夫、田中敏嗣：高炉スラグ微粉末の使用がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム、pp.99-106、1987
- (4) 権寧龍、千歩修、鎌田英治：微粉末系の高流動コンクリートの気泡組織と耐凍害性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.207-212、1994
- (5) 鳥居和之、川村満紀、三原守弘：シリカフェームを用いた高強度コンクリートの細孔構造と耐久性との関係、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.14、No.1、pp.837-842、1992

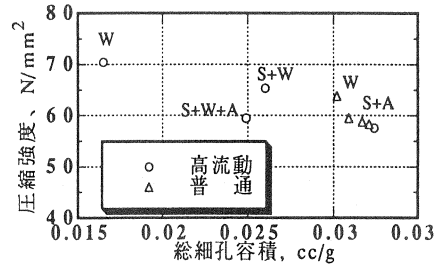


図-1 1 圧縮強度と総細孔容積の関係

表-4 ひび割れ発生数

種別	養生方法	ひび割れ本数		
		A	B	C
高流動	W	1	1	1
	S+W	1	5	1
	S+A	4	10	7
	S+7W+A	2	9	2
普通	W	0	1	1
	S+W	0	1	1
	S+A	1	5	2
	S+7W+A	0	2	4

A; 0.1mm以上、B; 0.01~0.1、C; 0.001~0.01