

論文 生コン工場で製造した高炉スラグ微粉末を用いた高強度 コンクリートについて

横室 隆*¹・依田彰彦*²・木村正尚*³・島崎信明*⁴

要旨：資源の有効利用および地球温暖化の原因である炭酸ガスの発生を抑制する観点から生コン工場で製造した高炉スラグ微粉末を混入した高強度コンクリートの基本的性質について究明し、無混入コンクリートに比して高炉スラグ微粉末コンクリートは粉末度の細かいもののほど圧縮強度をはじめ、引張・曲げ・鉄筋に対するコンクリートとの付着強度・耐熱性・耐薬品性・長さ変化率および凍害性などが向上することを生コン工場で練り混ぜた実験・検討した結果から明らかにした。

キーワード：省資源、高炉スラグ微粉末、生コン工場、高強度コンクリート

1. はじめに

JIS A 6206 により制定された高炉スラグ微粉末は比表面積に応じて3種類の品質(4,000、6,000、および8,000)が規格化されている。また、最近では粉体技術の発達により、粉末度 10,000cm²/g を超え品質が安定している高炉スラグ超微粉末の供給体制が整いつつある状況にある。そこで筆者らはこの高炉スラグ超微粉末を混入したコンクリートの付加価値の大きい活用と資源の有効利用と CO₂ 発生抑制の観点から、生コン工場で練り混ぜた高強度コンクリートの基本的性質について究明した。併せてシリカフュームおよび無混入コンクリートについても行い、比較検討に供した。

2. 実験計画

2.1 使用材料

a. セメント：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、K₂₈ 59.9N/mm²）

b. 混和材：高炉スラグ微粉末の密度は、全て 2.92g/cm³ である。①高炉

スラグ微粉末 4,400cm²/g（平均粒径 10 μm）、②高炉スラグ微粉末 8,000cm²/g（5 μm）、③高炉スラグ微粉末 10,000cm²/g（4 μm）、④高炉スラグ微粉末 15,000cm²/g（2 μm）、⑤シリカフューム 200,000cm²/g（0.1 μm）密度 2.20g/cm³

〔注〕比表面積はフレンツ法、平均粒径はレーザー回折法によった。

c. 化学混和剤：主成分がポリカルボン酸エーテル系複合体の高性能 AE 減水剤（Poz 社）

d. 細骨材：川砂 70 %（思川産）・砕砂 30 %（栃木県安蘇郡田沼産）の混合砂

e. 粗骨材：石灰岩質砕石 2005（葛生産）

f. 付着強度用鉄筋：D16（SD295A）

g. 水：地下水

使用材料の品質は JIS および JASS 5 の品質規定値を満足している。

2.2 目標としたコンクリートの調合¹⁾

a. 材齢 28 日の強度・水結合材比：60N/mm²・30 %、72N/mm²・25 %、84N/mm²・20 %

表1 使用した骨材の品質

骨 材	f.m. Gmax	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	骨材の微粒分量方法 で失われる量 (%)	安定性 (%)	破砕値 (%)
混合砂	3.03	2.56	1.46	62.0	1.90	—	—
砕 石	20	2.71	0.58	56.3	0.40	2.3	20.1

*1 足利工業大学助教授 工学部 建築学科（正会員）

*2 足利工業大学教授 工学部 建築学科 工博（正会員）

*3 日立セメント(株) 研究開発部長（正会員）

*4 住金鹿島鉱(株) 技術営業担当部長（正会員）

- b. スランプフロー：60 ± 5 cm
 c. 空気量：2 %以下
 d. コンクリートの種類および混和材の置換率：高炉スラグ微粉末の粉末度が細かいものは置換率を少なくし粉末度の粗いものは置換率を多く混入し同一の強度が得られるように調整し、またシリカフュームは10 %とした（表2）。

2.3 生コン工場での練り混ぜ：実験室であらかじめ試し練りによりコンクリートの調合を決めた。コンクリートの投入順序は（細骨材＋セメント＋混和材）を10秒空練り、その後（水＋高性能AE減水剤）を加え水結合材比（30 → 25 → 20 %）により練混ぜ時間（90 → 105 → 120秒）を変え、その後、粗骨材を投入し、合計6分間練り混ぜた。輸送はアジテータトラックで20分程度要する実験室へ運搬した。

2.4 実験の項目と方法

- a. ワーカビリティ：スランプ試験におけるコンクリートのくずれ方の状態から判断した。
 b. スランプフローロス：JIS A 1101（コンクリートのスランプ試験方法）に準じ直後、20分後、40分後のスランプフローを測定した。
 c. 空気量：JIS A 1128（フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気

室圧力方法）によった。

- d. プリーディング：JIS A 1123（コンクリートのプリーディング試験方法）によった。

- e. 凝結：ASTM C 403（Time of setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance）によって測定した。

- f. 圧縮強度：JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）によった。供試体は10φ × 20cm 円柱供試体を用い、翌日にキャッピングを施し、翌々日に脱型し、所定の材齢で試験した。なお、養生方法は標準養生（20℃水中）と5℃水中養生の2水準とした。また、模擬柱（70 × 70 × 70cm）および模擬梁（45 × 45 × 240cm）の合板型枠中に鉄筋を配筋し、打込み当初から屋外で施工した。材齢28日と材齢1年のコア強度試験はJIS A 1107（コンクリートからのコアおよびはりの切り取り方法ならびに強度試験方法）によって行った。

- g. 引張強度：JIS A 1113（コンクリートの引張強度試験方法）によった。なお、供試体の直径は10cmである。

- h. 曲げ強度：JIS A 1106（コンクリートの曲げ強度試験方法）によった。なお、供試体は10 × 10 × 40cmである。

表2 コンクリートの種類とフレッシュコンクリートの結果

目標強度 (N/mm ²)	水結合材比 (%)	No	混和材 種類	置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	粗骨材のかさ容積 (m ³ /m ³)	高性能AE減水剤の使用量 ⁽¹⁾ (%)	フスロラン プ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	プリーディング量 (cm ³ /cm ²)	凝結 (h-m)		デワイ ー カ ビ リ
													始 発	終 結	
60	30	1	無混入	0	44.8	160	0.629	2.0	56	0.9	24.0	0	5-25	7-10	良
		2	4400	40	44.8	160	0.626	1.7	61	1.7	24.0	0	4-10	5-20	良
		3	8000	30	45.0	160	0.624	1.7	56	1.3	23.0	0	4-10	5-40	良
		4	10000	20	45.1	160	0.624	1.7	64	1.2	23.5	0	4-30	5-40	良
		5	15000	10	45.2	160	0.624	1.8	66	1.2	25.0	0	4-30	5-40	良
		6	シリカフューム	10	44.8	160	0.623	2.8	59	1.5	25.5	0	4-50	6-15	良
72	25	7	無混入	0	41.8	160	0.629	2.3	69	1.5	24.5	0	5-50	7-20	良
		8	10000	20	42.1	160	0.624	1.7	63	1.9	24.5	0	3-50	5-10	良
		9	15000	10	42.2	160	0.624	1.7	61	1.0	25.5	0	3-20	4-40	良
		10	シリカフューム	10	41.5	160	0.624	3.0	64	1.6	26.5	0	5-30	6-20	良
84	20	11	15000	10	40.9	160	0.612	2.5	70	0.9	26.0	0	6-00	7-25	良
		12	シリカフューム	10	39.3	160	0.619	4.7	68	1.4	27.0	0	9-40	10-40	良

〔注〕(1)単位結合材量に対する主剤のみの添加率を示す。

i. 付着強度：供試体（10 φ）の中心部に D16 の鉄筋を埋め込み2.4 f. と同様に脱型し ASTM

C 234 (Standard Method of Test for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel) に準じ、引抜法によるコンクリートと鉄筋の付着強度を測定した。

j. ヤング係数：圧縮強度試験と併せてコンプレッソメータを用いて歪みを測定し、最大荷重の 1/3 の点の値を求めた。

k. 長さ変化率：コンクリート供試体（10 × 10 × 40cm）は打込み後、材齢 1 週まで 20 °C 水中に養生した後、20 °C・60 % RH の恒温恒湿室に放置した。JIS A 1129（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法）のコンパレータ方法によって長さを測定し、材齢 1 週を基長とした場合の変化率を算出した。

l. 質量変化率：0.1 g まで測定できる直示天秤を用い上記 k. の供試体の質量を測定し材齢 1 週を基長とした場合の変化率を算出した。

m. 耐薬品性：供試体（10 φ 20cm）は円柱供試体を用い材齢 7 日まで 20 °C 水中養生した後、材齢 28 日まで 20 °C・80 % RH 室に放置し、材齢 28 日から 2 % 塩酸（記

号 HCl）、5 % 硫酸（記号 H₂SO₄）、10 % 硫酸ナトリウム（記号 Na₂SO₄）の各溶液（20 °C）と、20 °C・80 % 湿空中とのくり返しを 7 日間ごとに延べ 1 年間実施し、同一期間 20 °C 水中養生した圧縮強度と比較検討した。なお、溶液はいずれも 7 日ごとに新しいものと取りかえた。

n. 耐熱性：上記 m. と同様の初期養生を施した後、加熱は材齢 28 日から 100 °C、200 °C および 300 °C の電気乾燥炉へ 1 年間にわたってさらし、圧縮強度を測定した。なお、昇降温度勾配は 0.5 °C/hr とした。

o. 凍結融解作用に対する抵抗性：ASTM C 666 A 法 (Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing) によって 500 サイクルまでの相対動弾性係数を求めた。

表 3 硬化コンクリートの強度性状

目標強度 (N/mm ²)	水結合材比 (%)	No	混和材 種類	置換率 (%)	圧縮強度	曲げ強度	引張強度	付着強度	ヤン係 グ数	質量減少率 (52W) (%)	
					20℃水中養生						
					材齢 28 日						
					(N/mm ²)			(kN/mm ²)			
60	30	1	無混入	0	75.2	13.1	3.1	9.8	38.1	0.86	
		2	4400	40	74.9	13.6	3.8	9.5	42.0	0.80	
		3	8000	30	79.5	13.8	4.0	9.7	42.2	0.73	
		4	10000	20	83.8	14.4	4.1	9.8	42.3	0.66	
		5	15000	10	82.6	14.7	4.9	9.9	42.1	0.72	
		6	シカフューム	10	80.5	14.3	4.6	10.3	36.0	0.89	
72	25	7	無混入	0	92.5	14.5	7.5	10.0	45.3	0.58	
		8	10000	20	92.6	14.4	7.5	9.4	46.2	0.46	
		9	15000	10	94.7	16.4	7.8	10.2	45.6	0.50	
		10	シカフューム	10	106.6	14.3	8.2	9.2	46.0	0.65	
84	20	11	15000	10	86.2	18.5	4.6	10.1	46.3	0.41	
		12	シカフューム	10	111.7	16.1	5.4	9.9	47.0	0.49	

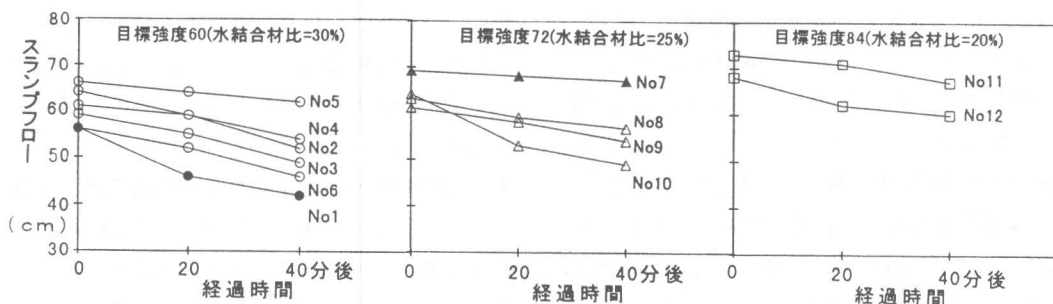


図 1 経過時間に伴うスランプフローの変化

2.5 実験結果と検討

実験結果を表 2～3 および図 1～6 に示し、以下に検討する。

a. ワーカビリティ：あらかじめ試し練りを行ったので全てのコンクリートとも目標としたコンクリートの調合範囲にあり良好と判断した。

b. スランプフロー：図 1 に示した通り時間の経過に伴い、スランプフローは低下する。無混入コンクリートに比して、高炉スラグ微粉末を混入した場合、水結合材比の大きいものほど低下は大きい。

また、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは流動性が増すため、所要の同一のスランプフローを得るには高性能 AE 減水剤の使用量が 10 % 程度少なくてすむ。

c. ブリーディング：いずれのコンクリートともゼロであった。

d. 凝結：無混入コンクリートに比して、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを混入したコンクリートは始発時間（平均 100 分）、終結時間（平均 75 分）はともに早まる傾向にある（表 2）。特に粉末度の細かいものほどその傾向は早まる。

e. 圧縮強度：20℃・5℃水中養生した場合の圧縮強度は全てのコンクリートとも材齢 28 日で目標強度を上廻っている。20℃水中養生した場合の高炉スラグ微粉末コンクリートは粉末度の細かいものでは、材齢 3 日ですでに目標強度をほぼ満足している。5℃水中養生したコンクリートは、初期材齢強度は 20℃水中養生に比較して強度は低いが、材齢 7 日ですでに目標強度を満足している。しかし、模擬の柱・梁については、材齢 28 日でも目標強度を下廻っているものがあるが、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは材齢 1 年では、粉末度の細かいものほど強度は大きい

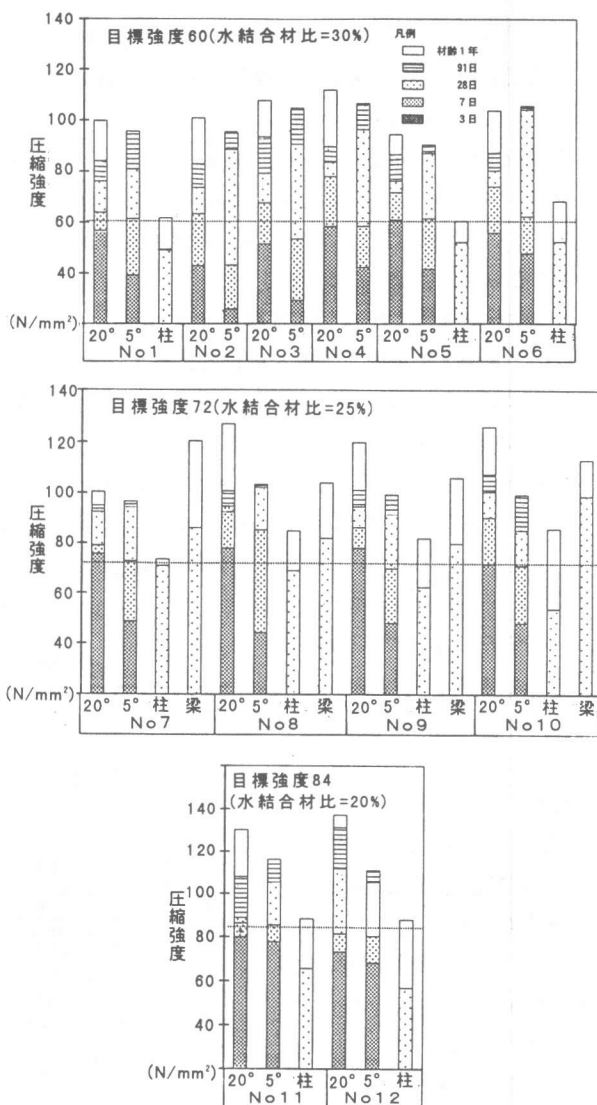


図 2 硬化コンクリート（20℃水中・5℃水中・模擬柱および模擬梁）の圧縮強度

傾向にある。これは、はじめから屋外に放置したため材齢 28 日までに時折の雨が降る程度なので水和があまりなされなかったものと思われる（図 2）。

f. 引張強度・曲げ強度および鉄筋に対するコンクリートの付着強度：材齢 28 日における各強度性状は、無混入コンクリートに比して、高炉スラグ微粉末が細かいものほど、引張強度で平均 1.24 倍、曲げ強度で平均 1.06 倍、付着強度で平均 1.05 倍と大きくなる（表 3）。

g. ヤング係数：20℃水中養生した材齢 28 日のヤング係数を表 3 に示す。無混入コンクリートとほぼ同程度であり、目標強度の大きいものほど、ヤング係数は多少大きい。

h. 長さ変化率：水結合材比別でみると明らかに水結合材比の小さいものほど長さ変化率は小さい。また、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは粉末度が細かいものほど収縮率は若干大きくなる傾向にあるが無混入コンクリートと比較するといずれのコンクリートとも小さい。また、シリカフュームを混入したコンクリートは高炉スラグ微粉末コンクリートに比して収縮率は 50×10^{-6} 程度大きくなる (図 5)。

i. 質量変化率：上記 h. の長さ変化率の傾向と似ている。目標強度の大きいものほど質量減少率は小さく、無混入コンクリートに比して高炉スラグ微粉末コンクリートは質量減少率が小さい (表 3)。

j. 耐薬品性：同一期間の 20℃水中養生を 100 とした場合の圧縮強度比を図 3 に示す。2%塩酸溶液、5%硫酸溶液および 10%硫酸ナトリウム溶液に 1 年間浸漬した場合、高炉スラグ微粉末コンクリートは無混入コンクリートに比して強度の低下が少ない。特に高炉スラグ微粉末の細かいものほど効果が大きい。

k. 耐熱性：同一期間の 20℃水中養生を 100 とした場合の圧縮強度比を図 4 に示す。高温になるほど当然だが強度の低下は大きい。また、無混入コンクリートと比較すると高炉スラグ微粉末コンクリートは粉末度の細かいものほど強度の低下が少ない。

l. 凍結融解作用に対する抵抗性：高炉スラグ微粉末コンクリートを用いた凍害性について 500 サイクルまで行った結果を図 6 に示す。水結合材比 25、20%については、いずれのコンクリートとも JASS 5 の目標値 (300 サイクル) は満足しており問題はないが、水結合材比 30%では、無混入コンクリート (No

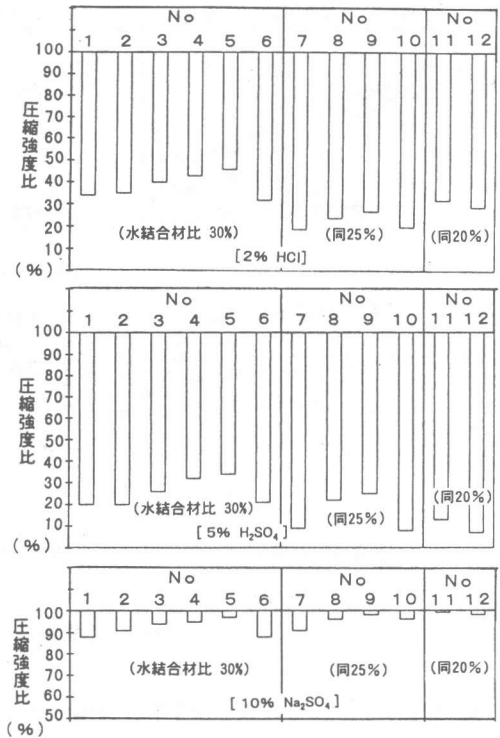


図 3 耐薬品試験における圧縮強度比

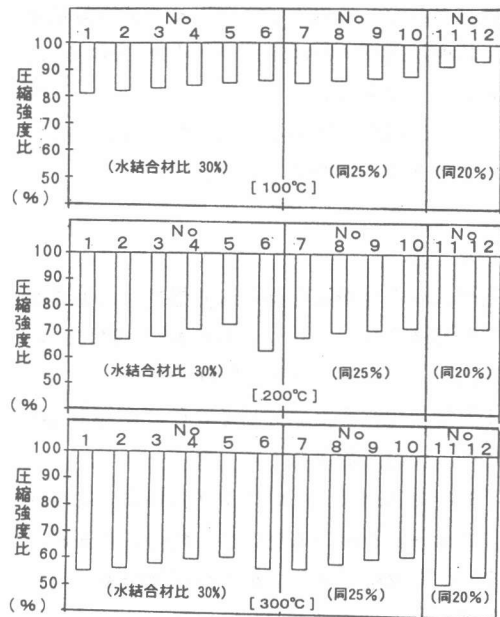


図 4 耐熱試験における圧縮強度比

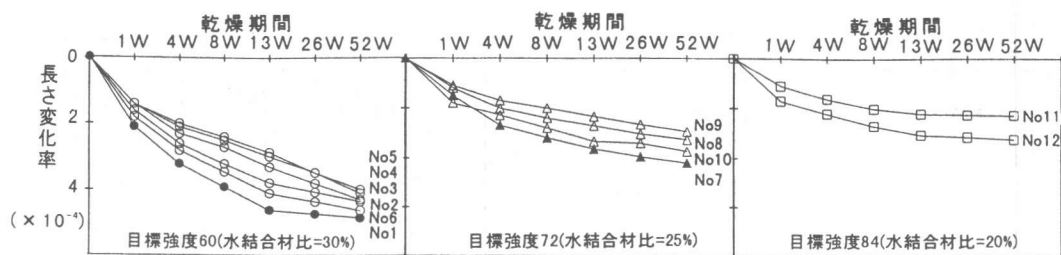


図5 長さ変化率

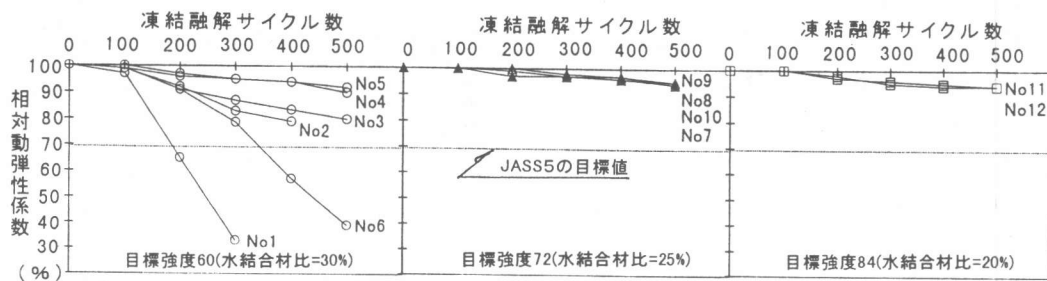


図6 凍結融解作用に対する抵抗性

1) は 300 サイクルで大きく低下し、目標値を下廻った。また、シリカフュームを混入したコンクリート (No 6) は 400 サイクルで大きく低下しているが 300 サイクルの目標値は満足しているため影響はないと思われる。今回の実験では空気量を 2 % 以下にしているため空気量を 5 % 程度に調整すれば 500 サイクルの凍害性は問題ないとする。

m. 中性化試験も実験しているが、現在のところゼロであることを付記する。

3. まとめ

高炉スラグ微粉末を混和して生コン工場で練混ぜた高強度コンクリートの基本的性質について無混入コンクリートと比較検討した。

(1) 所要のスランプを得るには、高性能 AE 減水剤の使用量が少なくてすむ。

(2) 凝結時間は、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを用いると始発、終結が早まる。

(3) 初期材齢でも、高炉スラグ微粉末の粉末度の細かいものを混入すれば目標とした圧縮強度が得られる。しかし、屋外に放置した擬模の

柱・梁などは、ち密すぎるので初期養生をよく施し水和が進行するような措置をとるとよい。

(4) 引張・曲げ・付着強度は、高炉スラグ微粉末の粉末度の細かいものほど強度は大きい。

(5) 長さ変化率は、高炉スラグ微粉末の粉末度の細かいものほど収縮率は若干大きくなるが、無混入コンクリートに比して小さい。質量変化率も似たような傾向が認められた。

(6) 耐薬品性・耐熱性は、高炉スラグ微粉末が細かいものほどその効果が大きい。

(7) 凍結融解作用に対する抵抗性は、高炉スラグ微粉末を混入した方が大きい。

本研究は足利工業大学、住金鹿島鉱化(株)、日立セメント(株)との共同研究として実施した。また、実験には(株)ポリス物産のご協力を得た。ここに付記して謝意を表する。

参考文献

1) 依田彰彦・横室 隆：超高強度コンクリートの性質に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 vol.11、No1、pp.539～544、1989