

論文 超高強度コンクリートの基礎的性状について

横室 隆^{*1}・宮澤 祐介^{*2}

要旨: 本研究は普通ポルトランドセメントにシリカフェームをプレミックスした, シリカフェームセメントに高炉スラグ微粉末を 20%置換し, 各種骨材を用いた超高強度コンクリートの圧縮強度をはじめ引張強度, 曲げ強度, 付着強度, 乾燥収縮率および耐凍害性などの諸性状について検討した。その結果, 圧縮強度をはじめとする各強度は, 骨材強度の高いものほど高い強度が得られ, 石灰石を用いたコンクリートの乾燥収縮率は, 小さくなることが明らかとなった。さらに, 耐凍害性については, 骨材による影響はみられないことなどを明らかにした。

キーワード: 超高強度コンクリート, シリカフェームセメント, 高炉スラグ微粉末, 圧縮強度, 乾燥収縮率

1. はじめに

近年, コンクリート構造物の大型化および高層化に伴ない, 超高層鉄筋コンクリート造建物に使用されるコンクリートの高強度化が進み, 設計基準強度 F_c 100N/mm² を超える高強度コンクリート (以下超高強度コンクリートとする) が使用され, コンクリートの高性能化を図ることが要求されている。このような高強度領域では, ワーカービリティや強度発現性状の改善を図るためシリカフェームなどが用いられている。従って, これらのコンクリートの性能を確保するためには, シリカフェームをはじめとする高炉スラグ微粉末などを混合した, 高強度混和材などが重要視されている^{1) 2)}。

この高強度コンクリートは単位結合材量が多く, コンクリートの組織構造が緻密であるため, 種々の性質が異なることが指摘されている³⁾。また, 高強度コンクリートでは, 粗骨材の違いがコンクリートの圧縮強度に大きく影響すること, さらには粗骨材が硬化後の力学特性に及ぼす影響は, セメントペーストの圧縮強度が高くなるほど顕著となることなどが指摘されている⁴⁾。また, 最

近では超高強度コンクリートに適した粗骨材の選定方法の提案⁵⁾ もなされているが, 超高強度コンクリートの諸性状については, 未だ十分に明らかにされていないのが現状である。

本研究は, シリカフェームセメントに高炉スラグ微粉末を 20%置換し, 各種骨材を用いた超高強度コンクリートの基礎的な諸性状について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは, 普通ポルトランドセメントにシリカフェーム (置換率 10%) をプレミックスした, シリカフェームセメント (記号 SFC) (密度 3.08g/cm³, 比表面積 6100cm²/g) を用いた。

(2) 混和材

使用した混和材は, 高炉スラグ微粉末 (記号 BF) (密度 2.92g/cm³, 比表面積 10800cm²/g, ガラス化率 98%) を用いた。

表-1 使用した骨材の品質

骨材種類		原石		絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	破砕値 (%)	Gmax 又はf.m.
		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)					
玄武岩	砕砂	93.0	44.0	2.51	2.20	71.8	—	3.1
	砕石			2.66	0.67	60.5	24.0	20
	微粉碎粉末			2.72	2.90	60.3	—	—
石灰岩	砕砂	133.0	53.0	2.62	2.20	64.1	—	3.3
	砕石			2.70	0.55	60.2	17.9	20
	微粉碎粉末			2.72	2.90	57.0	—	—
ドロマイト	砕砂	183.0	59.0	2.64	2.90	63.5	—	3.3
	砕石			2.89	0.66	60.2	13.0	20
	微粉碎粉末			2.72	2.10	62.1	—	—

*1 足利工業大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 足利工業大学 工学部建築学科非常勤講師

(3) 細・粗骨材

細・粗骨材は、玄武岩砕砂・砕石（記号 B）、石灰岩砕砂・砕石（記号 L）およびドロマイト砕砂・砕石（記号 D）を用いた。また、同様に玄武岩、石灰岩およびドロマイトのものを 74 μ m 以下に微粉碎した粉末を細骨材に対して 5%置換したものをを用いた。これら使用した骨材の品質を表-1 に示す。

(4) 化学混和剤

化学混和剤は、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（PZ 社）を用いた。なお、化学混和剤の使用量は C \times 1.8%添加した。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの強度は材齢 28 日で圧縮強度 100N/mm² を超える強度を目標とした。そのため、試し練りによって調合を定めた。

そのコンクリートの水結合材比 (W/ (C+BF)) は 18% と一定にし、スランプフローは 60 \pm 5cm、空気量は 2 \pm 1%を目標とした。なお、これら実際に得られた超高強度コンクリートの調合を表-2 に示す。

2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、容量 100 ℓ の一軸強制ミキサーに微粉碎した粉末を含んだ細骨材、結合材としてのシリカフェームセメントと高炉スラグ微粉末の順に投入し、30 秒間空練りし、そこに水と高性能 AE 減水剤を加えて 1 分間、その後、粗骨材を投入し合計 3 分間練り混ぜた。

2.4 実験項目および試験方法

(1) フレッシュコンクリートの試験方法

- 1) ブリーディング量は JIS A 1123 によった。
- 2) コンクリートの練り上がり温度の測定は棒状温度計を用い、コンクリートの温度を測った。

(2) 硬化コンクリートの試験方法

- 1) 圧縮強度・静弾性係数およびポアソン比
コンクリートの圧縮強度試験は JIS A 1108 により、標準養生（20 $^{\circ}$ C 水中）し、強度試験をおこなった。なお、材齢は、7 日、28 日、91 日、1 年および 5 年で試験した。また、現場水中養生および現場封かん養生のものは、材

齢 7 日まで 20 $^{\circ}$ C 水中養生した後、現場水中養生（温度 4.5 \sim 30.2 $^{\circ}$ C 平均 17.4 $^{\circ}$ C）および現場封かん養生（温度 4.5 \sim 30.2 $^{\circ}$ C 平均 17.4 $^{\circ}$ C）し、同様の材齢で強度試験をおこなった。

また、圧縮強度時にコンプレッソメータを用いて、ひずみを測定し、最大荷重の 1/3 の静弾性係数およびポアソン比を求めた。

2) 引張強度試験

コンクリートの引張強度試験は 10 ϕ \times 20cm の供試体を用い、JIS A 1113 の割裂引張試験により 20 $^{\circ}$ C 水中養生した、材齢 28 日のみ試験した。

3) 曲げ強度試験

コンクリートの曲げ強度試験は 10 \times 10 \times 40cm の供試体を用い、JIS A 1106 により 20 $^{\circ}$ C 水中養生した、材齢 28 日のみ試験した。

4) コンクリートと鉄筋との付着強度試験

コンクリートと鉄筋との付着強度試験は 10 ϕ \times 10cm の供試体の中心部に D16 の異形鉄筋を埋め込み、ASTM C 234（Standard Method of Test for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel）に準じ、引抜法によりコンクリートと鉄筋の付着強度試験をおこなった。なお、20 $^{\circ}$ C 水中養生した、材齢 28 日のみ試験した。

5) 乾燥収縮率試験

コンクリートの乾燥収縮率試験は JIS A 1129-1 のコンパレータ法により、乾燥期間 5 年までの長さ変化を測定した。なお、基長は材齢 7 日とし、その乾燥収縮率を求めた。

6) 凍結融解作用に対する抵抗性

凍結融解作用に対する抵抗性試験は ASTM C 666 A 法（Resistance of Concrete rapid Freezing and the wing）により、300 サイクルまでの相対動弾性係数を測定した。

7) 中性化深さ

中性化深さ試験は 10 \times 10 \times 40cm の供試体を用い、10%CO₂促進槽（温度 20 $^{\circ}$ C・湿度 60%）に 12 ヶ月間促進させたコンクリートの中性化深さについて試験した。なお、中性化深さの測定は、長手方向に 10cm 厚に切断・

表-2 超高強度コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの結果

コンクリート種類	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	結合材量 (kg/m ³)		細骨材量 (kg/m ³)		粗骨材量 (kg/m ³)	フレッシュコンクリートの結果			
				SFC	BF	砕砂	微粉碎粉末		スランプフロー (cm)	空気量 (%)	練り上がり温度 (°C)	最終ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
B	18	40	155	689	172	541	27	911	61 \times 62	2.1	27.0	0
L	18	40	155	689	172	511	26	836	58 \times 60	2.2	27.0	0
D	18	40	155	689	172	531	26	870	60 \times 62	2.3	27.0	0

清掃し、その断面にフェノールフタレインアルコール溶液（1%）を噴霧し、両側面計 20ヶ所をノギスを用いて測定し、平均中性化深さを求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) ブリーディング量

各種骨材を用いたコンクリートのブリーディング量を表-2 に示す。ブリーディング量は水結合材比が小さく、さらには高性能 AE 減水剤を用いたため、いずれのコンクリートともブリーディング量は認められなかった。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

各種骨材を用いたコンクリートの圧縮強度結果を図-1 に示す。例えば、標準養生（20℃水中）した玄武岩砕砂・砕石コンクリート（以下、B コンクリートと略す）をみると材齢 28 日の圧縮強度は 95.7N/mm²、石灰岩砕砂・砕石コンクリート（以下、L コンクリートと略す）は 101.0N/mm²、およびドロマイト砕砂・砕石コンクリート（以下、D コンクリートと略す）は 110.1N/mm² となっている。同様に、現場水中養生および現場封かん養生したコンクリートの材齢 28 日強度をみると、いずれの養生方法でも 100N/mm² を超えているコンクリートは D コンクリートのみである。さらに、長期材齢である 5 年の標準養生した圧縮強度では、B コンクリートは 135.3N/mm²、L コンクリートは 140.3N/mm² および D コンクリートは 165.3N/mm² となっており、いずれの養生方法でも、ドロマイト砕砂・砕石コンクリートが最も高い強度が得られている。この理由としては、各種骨材の原石の圧縮強度をみると、玄武岩<石灰岩<ドロマイトの順に高い圧縮強度が得られており、骨材強度の高いものほど圧縮強度が高くなっており、骨材が圧縮強度に影響したものと考えている。また、いずれのコンクリートとも異なる養生方法でも、材齢の経過に伴ない強度は増進している。

20℃水中養生と現場水中養生の圧縮強度の関係を図-2 に示す。同様に、20℃水中養生と現場封かん養生の圧縮強度の関係を図-3 に示す。この図から 20℃水中養生したものは、現場水中養生および現場封かん養生した圧縮強度の関係は高い相関が認められた。

次に、20℃水中養生に対して、同一材齢における圧縮強度で除した材齢 5 年の圧縮強度比をみると、現場水中養生したその値は、0.95~0.98 倍、現場封かん養生したその値は 0.94~0.97 倍となっており、標準養生より 2~6%程度小さい値となっている。これは、屋外放置のため水分の供給条件が異なること、およびコンクリート内部温度の影響もあり、長期で水和があまり進行しなかったものと考えられる。

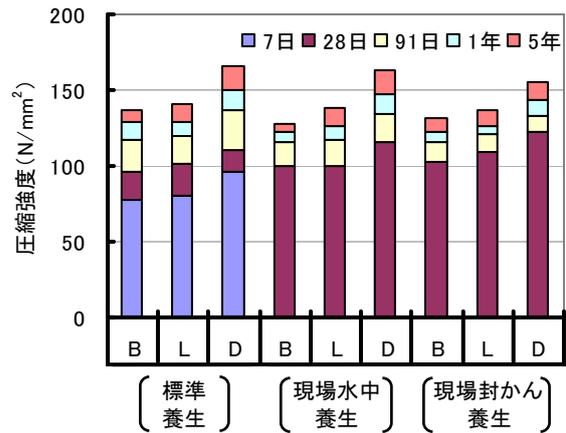


図-1 各種骨材を用いたコンクリートの圧縮強度

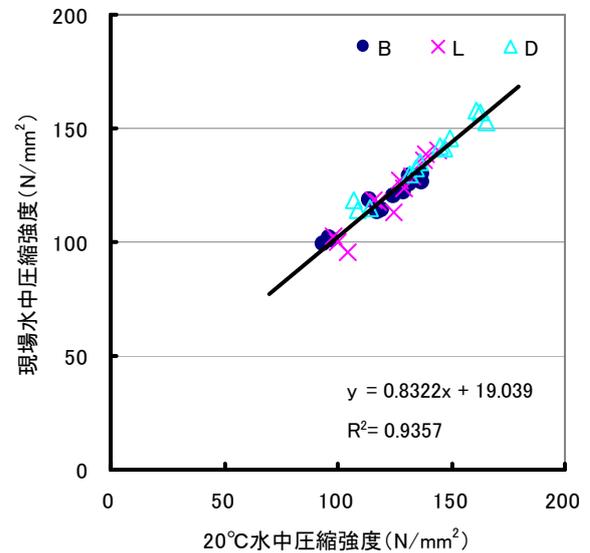


図-2 各養生と圧縮強度の関係 (1)

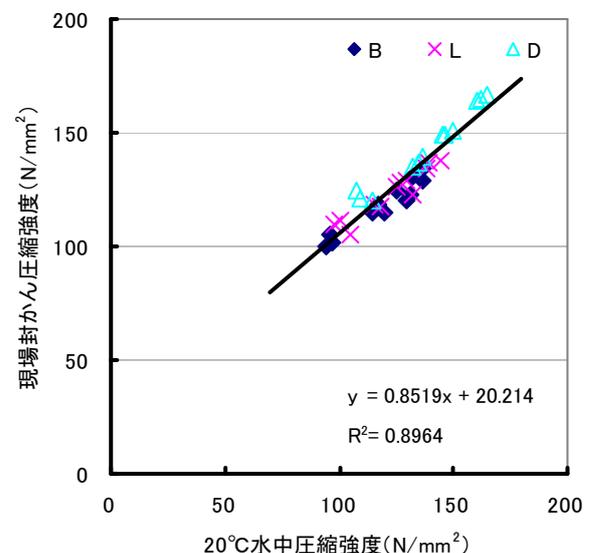


図-3 各養生と圧縮強度の関係 (2)

(2) 静弾性係数およびポアソン比

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4に示す。また、圧縮強度とポアソン比の関係を図-5に示す。高強度コンクリートの静弾性係数は図-4に示した通り、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に示されている高強度コンクリートの式をいずれのコンクリートとも上回っており、問題はない。一般に、コンクリートの静弾性係数はコンクリートの圧縮強度および使用する粗骨材ならびに混和材の種類に影響され、強度が高いほど静弾性係数は大きな値を示すと考えられている⁶⁾。

本実験での静弾性係数は 37.0~47.8kN/mm² の範囲にあり、圧縮強度が高いほど静弾性係数は大きい値となっているが、シリカフェームを用いた高強度コンクリートは、静弾性係数の増加よりも圧縮強度の向上が卓越しているため、コンクリートの静弾性係数の増加割合は若干小さい値となっている。従って、静弾性係数は骨材の影響はあるものの静弾性係数の大小だけから、骨材の優劣を判断することは難しいと考える。

次に、圧縮強度の1/3の点における各種骨材を用いた、コンクリートのポアソン比の値は0.21~0.34の範囲(図-5参照)にあり、材齢の経過に伴ない圧縮強度と同様に、強度が高いほどポアソン比も大きな値を示している。

従って、圧縮強度と同様に骨材強度の高いものほどポアソン比も高くなっている。

(3) 引張強度・曲げ強度およびコンクリートと鉄筋との付着強度

各種骨材を用いた超高強度コンクリートの引張強度、曲げ強度およびコンクリートと鉄筋との付着強度を表-3に示す。材齢28日における圧縮強度に対する各強度比を求めると、引張強度比は0.06および曲げ強度比は0.10と一定している。また、コンクリートと鉄筋の付着強度比は0.19~0.21の範囲にある。一般に、普通コンクリートの引張強度比は0.06~0.10の範囲、および曲げ強度比は0.10~0.18の範囲にあるが、低水セメント比の場合、水セメント比が小さく、圧縮強度が高いコンクリートほど、引張強度比および曲げ強度比は小さくなり、一定値に収れんする傾向にある。また、コンクリートと鉄

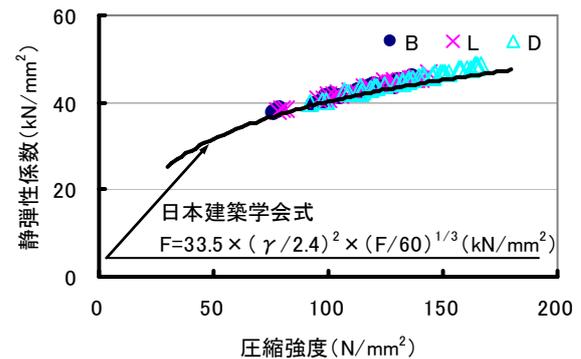


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

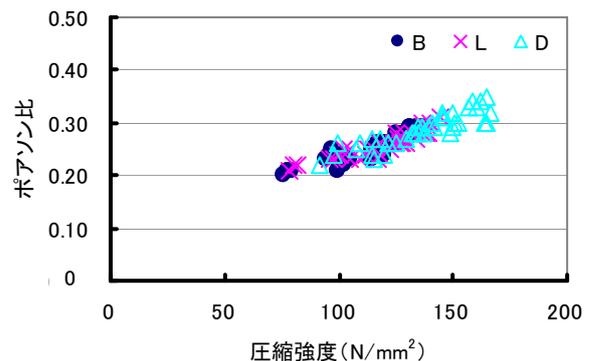


図-5 圧縮強度とポアソン比の関係

筋との付着強度は、低水セメント比のものはブリーディングがないため、コンクリートと鉄筋がよく付着するため、付着強度が大きくなると考えられている。また、異形鉄筋を用いた場合では、コンクリートのせん断強度に支配されるため、低水セメント比のコンクリートは圧縮強度の増加ほどせん断強度が大きくなることから、付着強度はそれほど大きくなっていない。従って、圧縮強度の増加ほど引張強度、曲げ強度およびコンクリートと鉄筋の付着強度は圧縮強度との比率は高強度になるほど小さくなる。

(4) 乾燥収縮率

各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率を図-6に示す。この図から、例えば、乾燥期間5年のBコンクリートは 4.2×10^{-4} 、Lコンクリートは 2.9×10^{-4} およびDコンクリートは 3.0×10^{-4} となっており、いずれのコンク

表-3 超高強度コンクリートの各強度および中性化深さ

コンクリート種類	材齢28日(20℃水中養生)						CO ₂ 促進12ヶ月の 中性化深さ (mm)
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	コンクリートと 鉄筋の付着強度 (N/mm ²)	
B	95.7	38.9	0.22	5.9	9.9	20.4	0
L	101.0	40.6	0.24	6.1	10.4	20.6	0
D	110.1	41.9	0.26	6.3	11.5	21.1	0

リートとも材齢の経過に伴ない収縮は大きくなっている。また、骨材の影響をみると $B > D > L$ の順に、収縮率は小さくなっており、特に石灰石を用いた高強度コンクリートの乾燥収縮率は最も小さい値となっている。従って、石灰石骨材がコンクリートの収縮を低減させることは本実験からもわかるが、そのメカニズムについては、今後検討したいと考えている。

(5) 凍結融解作用に対する抵抗性

各種骨材を用いたコンクリートの 300 サイクルまでの相対動弾性係数を図-7 に示す。この図から、B コンクリートは 95%、L コンクリートは 96%および D コンクリートは 97%となっている。また、空気量の影響についてみると、空気量が多いほど相対動弾性係数は大きくなっているが、高強度コンクリートの場合、圧縮強度が 60N/mm^2 以上であれば凍害に対して空気量が影響しないとも考えられている。さらに、骨材の影響はみられなく、いずれのコンクリートとも同程度の結果が得られている。

(6) 中性化深さ

10%CO₂ に 12 ヶ月促進させた、各種コンクリートの中性化深さを表-3 に示す。これは、低水セメント比のため、いずれのコンクリートとも中性化深さは認められない。

4. まとめ

シリカフェームセメントに高炉スラグ微粉末を置換し、各種骨材を用いた超高強度コンクリートの基礎的性状について検討した結果、次のようなことが明らかとなった。

- (1) 各種骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、骨材強度が高いものほど、高い強度が得られる。また、標準養生に比して、現場水中養生および現場封かん養生の圧縮強度は若干小さくなる。
- (2) 静弾性係数およびポアソン比は、圧縮強度が高いほど大きな値を示すが、シリカフェームを用いた高強度コンクリートの静弾性係数の増加割合は、若干小さい値となる。
- (3) 引張強度、曲げ強度およびコンクリートと鉄筋の付着強度は圧縮強度が高いほど、各強度は高くなるが、一定値に収れんする傾向にある。
- (4) 乾燥収縮率は、石灰石を用いたコンクリートのそれはいずれも小さい。
- (5) 耐凍害性は骨材種類による影響はみられず、いずれのコンクリートとも同程度である。
- (6) 12 ヶ月間 CO₂ に促進した、中性化深さは認められない。

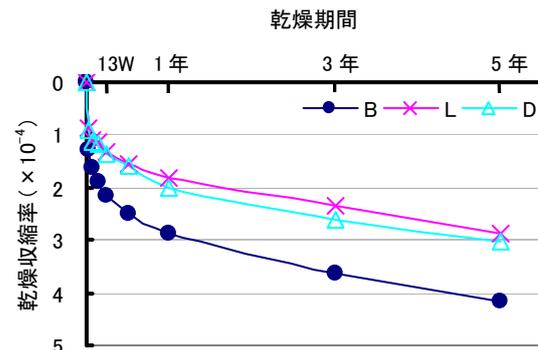


図-6 乾燥収縮率

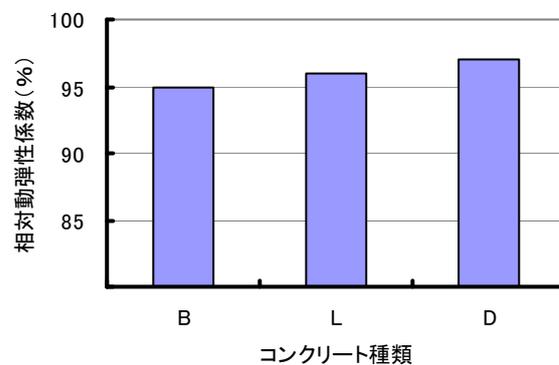


図-7 凍結融解作用に対する抵抗性

参考文献

- 1) 久保田賢ほか：高強度混和材を用いた高強度コンクリートの耐久性に関する研究，セメント・コンクリート用混和材料およびそれらの基準化に関する技術の現状と論文集，pp.11-16，2006.9
- 2) 富岡秀樹ほか：高強度混和材を用いた高強度コンクリートの生コン工場での実製造，日本建築学会大会学術講演概要集（九州），pp.69-70，2007.8
- 3) 李榮蘭，榊田佳寛，河上浩司，鄭尚鎮：膨張材および収縮低減剤を使用した超高強度コンクリートの強度および収縮特性，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.941-942，2009.8
- 4) 真野孝次，飛坂基夫，川崎三十四，中川雄二：高強度コンクリート用骨材の選定方法に関する一実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.769-770，1991.9
- 5) 陣内浩ほか：設計基準強度 150N/mm^2 の高強度コンクリートの強度管理手法の検討と品質管理結果，日本建築学会技術報告集 Vol.13, No.25, pp.7-12, 2007.6
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5, 2009

