論文 シリカフュームを用いた高強度コンクリートの強度特性に関する研 究

菅田 紀之^{*1} ・寺澤 貴裕^{*2} ・田中 健司^{*3}

要旨:水結合材比が 25 %である高強度コンクリートのシリカフューム置換率を変化させて 凝結試験および強度試験を行い,次の結果を得た。凝結の始発,終結時間および強度の発生 時期は、シリカフューム置換率が大きいほど遅くなる。材齢 24 時間までの圧縮強度は、シ リカフューム置換率が大きいほど小さく、材齢 7 日以後の圧縮強度は置換率 10 %の場合に 最大になる。圧縮強度と引張強度、圧縮強度と弾性係数の関係はシリカフューム置換率によ らず、一つ曲線で近似できる。また、圧縮強度とポアソン比の関係は直線になる。 キーワード:高強度コンクリート、シリカフューム、強度、弾性係数、ポアソン比

1. はじめに

近年, 圧縮強度が 80 N/mm²を超えるような高 強度コンクリートの実用化が進められている。 しかしながら,このような高強度コンクリート を構造物の建設に用いた場合、自己収縮量が大 きいこと "および水和発熱量が多いことに起因 するひび割れの発生が問題になることがある。 このようなひび割れの発生を解析的に精度良く 予測するためには、コンクリートの収縮特性お よび発熱特性のほか、若材齢時からのクリープ 特性や強度特性が明らかになっていなければな らない。高強度コンクリートの若材齢時からの クリープに関する研究としては、シリカフュー ムの影響を検討した著者らの研究^{2),3)}や小澤ら の研究⁴⁾,伊藤らの研究⁵⁾がある。また,若材 齢時からの強度特性に関する研究としては、 著 者らによる材齢1日までの高強度コンクリート の強度特性を検討した研究^{6),7)}や材齢28日まで の高強度モルタルの強度発現特性を検討した研 究⁸⁾がある。しかしながら、精度良いひび割れ 解析のためには更にデータの蓄積が必要である。

高強度コンクリートには,空隙充填効果を持 つシリカフュームが使用されることが多い。シ リカフュームを使用した場合,ポゾラン反応等 の影響により強度特性に影響を及ぼすことが知 られている。そこで本研究では、シリカフュー ム置換率の異なる高強度コンクリートを作製し、 凝結試験および終結直後からの強度試験を行い、 凝結特性、強度発現特性、圧縮強度と引張強度 の関係、圧縮強度と弾性係数の関係、圧縮強度 とポアソン比の関係等について検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

本研究に用いた高強度コンクリートの製作に 使用した材料および配合を表-1および表-2

表一1 使用材料

材 料 (記号)	性質等			
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15 g/cm ³			
シリカフューム	比表面積: 230,000 cm ² /g			
(SF)	密度: 2.2 g/cm ³			
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度: 2.69 g/cm ³			
粗骨材 (G)	砕石 2005 表乾密度: 2.65 g/cm ³			
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系			

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 博(工) (正会員)

*2 北海道開発局 札幌開発建設部 修(工)(正会員)

*3 北海道開発局 旭川開発建設部

W/B	SF/B	s/a	単位量 (kg/m ³)					
(%)	(%)	(%)	W	С	SF	S	G	SP
25	0	41.7	140	560	0	749	1032	4.4
25	5	41.7	140	532	28	744	1025	5.3
25	10	41.7	140	504	56	740	1019	7.0
25	20	41.7	140	448	112	731	1007	7.8
$\mathbf{P} = \mathbf{C} + \mathbf{S}\mathbf{E}$								

表-2 コンクリートの配合

B = C + SF

に示す。結合材には普通ポルトランドセメント およびシリカフュームを用いた。水結合材比 (W/B) は 25 %であり、シリカフューム置換率 (SF/B, 結合材中の質量比) は0%(無混入),5%, 10 %, 20 %の 4 種類である。単位水量は 140 kg/m³, 細骨材率は 41.7 % で一定とした。目標 スランプフローは 60 cm, 目標空気量は 1.5 %で ある。実際のスランプフローは53 cmから67 cm, 空気量は1.2%から1.8%であった。

2.2 凝結試験

凝結試験は JIS A 1147 に規定されているプロ クター貫入抵抗試験により行った。貫入抵抗値 が 3.5 N/mm² になるまでの練混ぜ時からの経過 時間を始発時間とし, 28.0 N/mm² になるまでの 経過時間を終結時間として検討している。試験 環境は、20 ℃±1 ℃に制御された室内である。 2.3 強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に, 引張強度試験 は JIS A 1113 に従い行った。試験に用いた供試 体は直径 100 mm, 高さ 200 mm の円柱供試体で あり、3体の平均値で強度等の検討を行っている。 圧縮強度試験用の供試体の中央軸方向にゲージ 長 120 mm の埋込み型ひずみゲージを,半径方向 にゲージ長 30 mm の埋込み型ひずみゲージを配 置し、ひずみ測定結果から静弾性係数およびポ アソン比を算定した。静弾性係数の算定は JIS A 1149 に準じて行った。試験材齢は終結直後(終 結後1~2時間),12時間,16時間,24時間,3 日,7日および28日である。また,材齢24時間 までは 20±1 ℃に制御された室内において封緘 養生し、それ以降は、20±1 ℃で制御された水

表-3 凝結試験結果

SF/B (%)	始発時間	終結時間
0	4:23	6:41
5	5:25	7:04
10	6:50	8:17
20	7:27	8:51

中で養生を継続した。供試体の端面処理は、材 齢16時間までは硬質石膏を用いたキャッピング, 材齢24時間からは研磨機を用いた研磨により行 った。

試験結果および考察

3.1 凝結試験結果

凝結試験の結果を表-3に示す。高性能 AE 減水剤による凝結遅延作用が影響しているもの と考えられるが、シリカフューム置換率 (SF/B) が多くなるほど始発時間が遅くなっていること がわかる。また、終結時間についても同様にシ リカフューム置換率が多くなるほど遅くなって いる。次に、始発から終結までに要する時間に ついて検討を行う。始発から終結までに要する 時間は、シリカフューム置換率 (SF/B) が0%の 場合に2時間18分,置換率が5%,10%および 20%の場合に1時間30分前後であり、シリカフ ュームを使用した場合に始発から終結に要する 時間が短くなっていることがわかる。

3.2 圧縮強度

図-1に材齢24時間までの材齢と圧縮強度の 関係を示す。また,図-2に終結後の時間と圧 縮強度の関係を示す。まず、材齢と圧縮強度の 関係について検討を行う。図より、シリカフュ



ーム置換率 (SF/B) が大きいほど圧縮強度が小 さくなっていることがわかる。セメントペース トの硬化および強度の発現が終結付近からであ る仮定すると、シリカフューム置換率が大きい ほど終結時間が長く、それが圧縮強度の発現に 影響した結果であると考えられる。次に、終結 後の時間と圧縮強度の関係について検討を行う。 図より、終結を基点に取ると強度の発生時期が そろっており、強度発現が終結から1時間程度 で開始していることが確認できる。しかしなが ら、シリカフューム置換率が大きいほど圧縮強 度が小さいという傾向は、材齢24時間までの範 囲では変わっていない。これより、シリカフュ ーム置換率が大きいほど、材齢24時間までの強 度増加が小さいことがわかる。

図-3に材齢28日までの材齢と圧縮強度の関係を示す。材齢3日においてシリカフューム置換率が0%の圧縮強度と5%の強度がほぼ等しくなっていることがわかる。材齢7日および28日では、シリカフューム置換率10%の強度が最も大きく、次いて0%、5%、20%の順となっている。しかしながら、シリカフューム置換率0%の圧縮強度、5%の強度および10%の強度の間の差は小さい。以上より、シリカフューム置換率が5%および10%の場合、材齢1日までの強度増加は小さくなるが、材齢1日を経過すると強度増加が大きくなることがわかる。

材齢と圧縮強度の関係を表す式として,



CEB-FIP Model Code 1990⁹⁾に次の式がある。

$$f_{c}'(t) = f_{28} \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_{1}}\right)^{1/2}\right]\right\}$$
(1)

ここで、f₂₈: 材齢 28 日の圧縮強度、s: セメント種類の影響を考慮する係数、t:
材齢(日)、t₁:1日

強度発現は**図-2**で示したように終結直後から であるが,式(1)では凝結の影響が考慮されて いない。凝結の影響を考慮するために式(1)を 修正した次の式が自己収縮研究委員会報告書¹⁰⁾ にある。

$$f_{c}'(t) = f_{28} \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28 - t_{s}}{t - t_{s}}\right)^{1/2}\right]\right\}$$
(2)

ここで, t_s: 凝結時間の影響による係数 (日) そこで本研究では, 式 (2) のt_sを終結時間とし

表-4 式 (2) のt_sおよびsの値

SF/B (%)	t_s (\exists)	S					
0	0.279	0.190					
5	0.294	0.198					
10	0.345	0.209					
20	0.369	0.211					

て、係数sを最小二乗法により求めた。その結果 を表-4に示す。係数sはシリカフューム置換率 が大きいほど大きくなっており、シリカフュー ムの影響が認められる。この式による回帰結果 を図-4に示す。図より、高強度コンクリート の強度発現を表す式として有効であるといえる。 3.3 応力-ひずみ関係

図-5にシリカフューム置換率 (SF/B) が 10%の場合の応力--ひずみ曲線の例を示す。な お、ひずみはクリープの影響を排除していない 全ひずみである。図からわかるように、材齢に より応力--ひずみ曲線の形状は大きく異なって いる。全体としていえることは、材齢が若いほ ど非線形性が強いということである。また、若 材齢ほど弾性係数が小さいということも明らか である。材齢 10.5 時間から 24 時間の応力-ひず み曲線に関しては, 傾きが大きく変化する箇所 が存在していることがわかる。材齢 10.5 時間の 場合,最大応力度の 50 %程度の応力度で,傾き が非常に小さくなり 5000 μ程度のひずみで応力 度が最大になっている。材齢12時間の場合,最 大応力度の30%程度の応力度で若干傾きが小さ くなり、さらに80%程度の応力度で傾きが小さ くなっている。また, ひずみが 3000 μから 5000 μ の間では、ほぼ一定の応力度を保っていること がわかる。材齢 16 時間の場合,最大応力度の 70%程度の応力度から傾きが小さくなり始め, 3000 u程度のひずみで応力度が最大になってい る。材齢24時間の場合,最大応力度の90%程度 の応力度から傾きが小さくなり始め,4000 µ程度 のひずみで応力度が最大になっている。材齢3

日以降の応力-ひずみ曲線に関しては、曲線の

傾きが大きく変化する箇所は無く,応力度の増



加に伴って傾きが小さくなり最大応力度に達し ていることがわかる。

3.4 引張強度

図-6は圧縮強度と引張強度の関係を示して いる。図中の実線は、土木学会コンクリート標 準示方書の式¹¹⁾,破線はACI 363 委員会の式¹²⁾ を示している。図より, 圧縮強度と引張強度の 関係はシリカフューム置換率の影響を受けてお らず、一つの曲線で表すことが可能であるとい える。実験結果と土木学会コンクリート標準示 方書の式を比較すると、圧縮強度 10 N/mm²以下 では良く一致していることがわかる。圧縮強度 10 N/mm²から 40 N/mm²の間では実験結果が若 干大きめであるが、50 N/mm²以上では比較的良 く一致している。このことから、本実験の結果 は、コンクリート標準示方書の式を用いて表せ るものと考えられる。実験結果と ACI 363 委員 会式との比較では,実験結果が全強度域におい て小さくなっていることがわかる。

3.5 弾性係数

図-7は圧縮強度と静弾性係数の関係を示し ている。図中の白抜きマーク付の実線は、コン クリート標準示方書の値¹¹⁾,破線はACI 363 委 員会の式¹²⁾を示している。圧縮強度と静弾性係 数の関係は、圧縮強度と引張強度の関係と同様 に、シリカフューム置換率の影響を受けておら ず、一つの曲線で表すことが可能であるといえ る。実験結果と各式等の値を比較すると、実験 結果は土木学会コンクリート示方書の値および ACI 363 委員会の値より小さくなっていること がわかる。また、ACI 363 の曲線を縦軸方向に 5 kN/mm² 程度平行移動した分布になっているこ とがわかる。図中の実線は実験結果を最小二乗 法により近似したものであり、近似曲線式は次 のようになる。

$$E_c = 3.60 f_c^{\prime \ 0.505} \tag{3}$$

3.6 ポアソン比

図-8は、圧縮強度とポアソン比の関係を示 している。図より、低強度域においてポアソン



比のばらつきが大きくなっていることがわかる。 これは、荷重載荷軸直角方向のひずみレベルが 小さいことにより、測定誤差の影響が大きく現 れたためであると考えられる。図中の直線は、 実験結果を最小二乗法により近似したものであ り,次のようになる。

$$v = 0.207 + 0.000393 f'_c \tag{4}$$

この圧縮強度とポアソン比の関係式 (4)は, 図の ように強度が大きくなるに従いポアソン比も若 干大きくなるというものである。圧縮強度が 0 N/mm²に近い場合のポアソン比は 0.21 程度, 圧 縮強度が 100 N/mm²程度の場合のポアソン比は 0.25 程度である。

4. まとめ

本研究では、水結合材比 25 %の高強度コンク リートのシリカフューム置換率を変えて終結直 後から材齢 28 日までの強度特性に関する検討を 行った。本研究から得られた結果をまとめると、 以下のようになる。

- (1) 凝結の始発,終結および強度発生時期は, シリカフューム置換率が多いほど遅い。
- (2) 材齢1日までの圧縮強度は、シリカフュー ム置換率が大きいほど小さい。材齢7日以降における圧縮強度はシリカフューム置換率が10%の場合に最も大きい。
- (3) 材齢が若いほど応力-ひずみ曲線の非線形 性が強い。
- (4) 圧縮強度と引張強度の関係は、土木学会コンクリート標準示方書の式を用いて表すことができる。
- (5) 圧縮強度と静弾性係数の関係は、次の式を 用いて表すことができる。

$$E_c = 3.60 f_c^{\prime \ 0.505} \tag{5}$$

(6) ポアソン比は圧縮強度が大きくなると大き くなる傾向にあり、次の式を用いて表すこ とができる。

$$\nu = 0.207 + 0.000393f_c' \tag{6}$$

参考文献

 田澤栄一・宮沢伸吾・重川幸司:水和反応に よる硬化セメントペーストのマクロな体積 収縮,セメント・コンクリート論文集, No. 45, pp.122-127, 1991.12

- 2) 菅田紀之・佐藤克俊:シリカフュームを用いた若材齢高強度コンクリートの圧縮クリープ、コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp.387-392, 2002.6
- (3) 菅田紀之・寺澤貴裕:若材齢高強度コンクリートの圧縮クリープに及ぼすシリカフュームの影響,コンクリート工学年次論文集,Vol. 25, No. 1, pp.425 – 430, 2003.6
- 4) 小澤満津雄・国森亮平・車戸勝巳・森本博昭: 若材齢高強度コンクリートのクリープ特性 に関する基礎的研究,コンクリート工学年次 論文集, Vol. 22, No. 2, pp.631 – 636, 2000.6
- 5) 伊藤秀敏・田澤栄一・米倉亜州夫・大島邦裕: 高強度コンクリートの若材齢引張クリープ, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.635 - 641, 1999.12
- 6)河合哲志・菅田紀之:若材齢時における高強 度コンクリートの強度特性,土木学会第57 回年次学術講演会講演概要集,第V部, pp.935-936,2002.9
- 7) 菅田紀之・寺澤貴裕・河合哲志:若材齢時に おけるシリカフュームを用いた高強度コン クリートの強度特性,土木学会第58回年次 学術講演会講演概要集,第V部, pp.437 – 438,2003.9
- 8) 菅田紀之・寺澤貴裕:高強度モルタルの凝結 および強度発現に及ぼすシリカフュームと 高性能 AE 減水剤の影響,コンクリート工学 年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp.1311 – 1316, 2004.6
- 9) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990, CEB, pp.51 52, 1993
- 10)日本コンクリート工学協会:自己収縮研究委員会報告書、コンクリート工学協会、 pp.93 95,1996.11
- 11) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編],土木学会, 2002
- 12) ACI Committee 363: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI, 1992