

論文 養生条件の異なる高強度コンクリートの強度特性について

相澤 義徳*1・菅田 紀之*2

要旨：シリカフュームを用いた高強度コンクリートの強度試験を水中養生，封緘養生および気中養生条件下で行った。コンクリートの水結合材比は，20%，25%および30%である。その結果，水結合材比が小さいほど強度発現に及ぼす養生条件の影響が少ないこと，封緘養生および気中養生を行った場合の引張強度は小さくなること，弾性係数およびポアソン比に及ぼす養生条件の影響は少ないこと，気中養生を行った場合の最大応力発生時の縦ひずみが大きくなることが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート，養生，圧縮強度，引張強度，弾性係数，ポアソン比

1. はじめに

近年，シリカフュームや高性能 AE 減水剤などの新たな混和材料の使用によりコンクリートの高強度化技術が一般化してきている。この技術はコンクリート構造物の軽量化や建設コストの低減につながることで，高強度化に伴う耐久性の向上による長寿命化と，それによる構造物周辺環境に対する負荷の低減が期待できることなどにより，高強度コンクリートの諸性質に関する研究が盛んに行われるようになってきている。高強度コンクリートの強度特性に及ぼす養生条件の影響を検討した研究として，シリカフューム混入コンクリートにおいて初期養生の重要性を指摘し，気中養生を行った場合の強度が水中養生に比べ著しく劣ることを示したもの^{1),2)}，乾燥の影響で強度が低下することを示したもの³⁾，養生時の相対湿度が低いほど強度が小さくなる

ことを示したもの⁴⁾などがある。また，著者らは若材齢時からの高強度コンクリートの強度特性に関する研究^{5),6)}を行ってきたが，養生条件として主に水中養生を採用してきた。このように，各種強度特性に及ぼす養生条件の影響については十分明らかにされていると言えない。しかしながら，実際の構造物では封緘状態あるいは気乾状態に置かれることが多く，強度特性に及ぼす養生条件の影響を明らかにすることは重要である。

そこで本研究では水中養生，封緘養生，気中養生という養生条件の違いが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及ぼす影響について検討を行った。検討内容は強度発現性状，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，および応力-ひずみ関係に及ぼす養生条件の影響

表-1 コンクリートの配合

実験 ケース	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	SF	S	G	SP
20-10	20	10	41.7	140	630	70	678	958	10.85
25-10	25	10	41.7	140	504	56	729	1031	7.56
30-10	30	10	41.7	140	420	46	763	1079	5.85

$$B = C + SF$$

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

*2 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)

表-2 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: 3.16 g/cm ³
シリカフューム (SF)	比表面積: 230,000 cm ² /g 平均粒径: 約 0.2 μm 密度: 2.2 g/cm ³
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度: 2.65 g/cm ³
粗骨材 (G)	碎石 2005 表乾密度: 2.68 g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

響についてである。

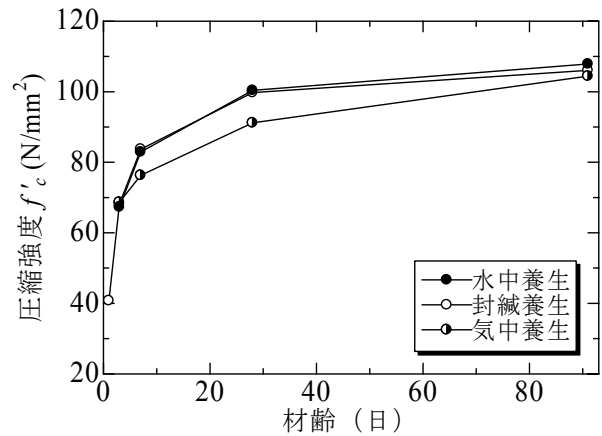
2. 実験の概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

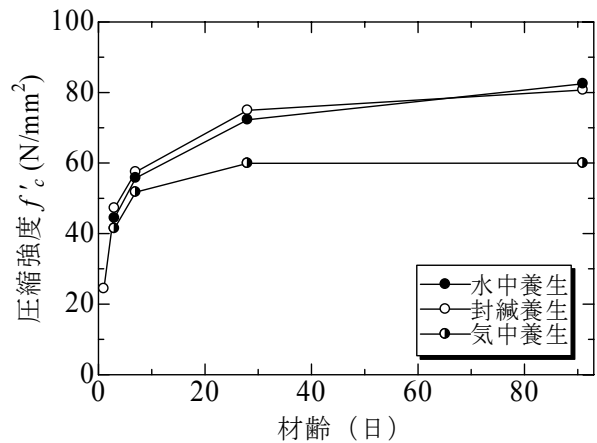
本研究における高強度コンクリートの配合および製作に使用した材料を表-1および表-2に示す。結合材には普通ポルトランドセメント (C) およびシリカフューム (SF) を用いた。シリカフュームはノルウェー産の粉体状のものである。細骨材 (S) には陸砂、粗骨材 (G) には碎石 2005、高性能 AE 減水剤 (SP) にはポリカルボン酸系のもを用いた。シリカフューム置換率 (SF/B, 結合材中の質量比) は 10% であり、水結合材比 (W/B) は 20, 25, 30% の 3 種類である。また、細骨材率を 41.7%, 単位水量を 140 kg/m³ とした。目標スランプフローは 60 cm, 目標空気量は 3.5% である。実際のスランプフローは 55 cm から 67 cm, 空気量は 4.2% から 6.7% であった。

2.2 強度試験

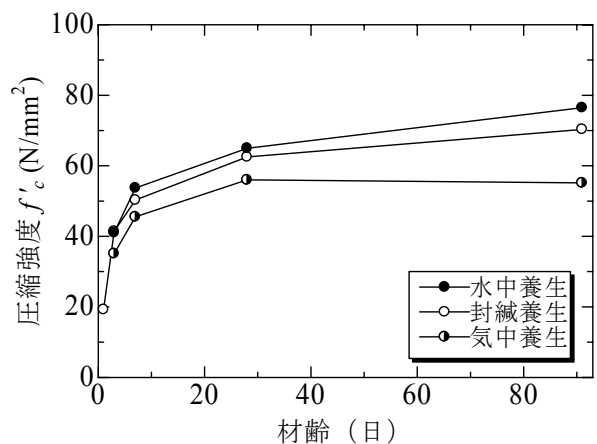
圧縮強度試験は JIS A 1108 に、引張強度試験は JIS A 1113 に従って行った。試験に用いた供試体はφ100×200 mm の円柱供試体であり、3 体の平均値で強度等の検討を行っている。圧縮強度試験用の供試体の中央軸方向にゲージ長 120 mm の埋込み型ひずみゲージを、半径方向にゲージ長 30 mm の埋込み型ひずみゲージを配置し、ひずみ測定結果から静弾性係数およびポアソン



(a) W/B=20 %



(b) W/B=25 %



(c) W/B=30 %

図-1 材齢と圧縮強度の関係

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 1 日, 3 日, 7 日, 28 日および 91 日である。

養生については、材齢 1 日までは型枠に入れた密封状態で 20 ± 1 °C に制御された室内に静置し、封緘養生の場合には、それ以降も型枠に入れたまま 20 ± 1 °C に制御された室内で養生を継続した。水中養生および気中養生では材齢 1 日で型枠から取り外し、温度 20 ± 1 °C の水中、あるいは室温 20 ± 1 °C、相対湿度 60 ± 5 % に制御された室内において養生を行った。全ての供試体の端面処理は、研磨機を用いた研磨により行った。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1 は材齢と圧縮強度の関係を示したものである。図(a) は水結合材比 20 % の実験結果、図(b) は水結合材比 25 % の実験結果、図(c) は水結合材比 30 % の実験結果をそれぞれ示している。図(a) において水結合材比 20 % の水中養生と封緘養生の圧縮強度を比較すると、材齢 3 日ではほぼ等しく、材齢 7 日では封緘養生の強度が、材齢 28 日および 91 日では水中養生の強度が大きくなった。しかしながら、水中養生と封緘養生の強度はほぼ等しく、その差は最大で 1.9 N/mm^2 である。水中養生と気中養生を比較すると、材齢 3 日では気中養生の強度が若干大きいですが、材齢 7 日以降の強度は小さくなっている。その強度差は材齢 7 日で 7 N/mm^2 、材齢 28 日で 9 N/mm^2 、材齢 91 日で 2 N/mm^2 であり、材齢 91 日における差が小さくなっている。図(b) において水結合材比 25 % の場合における水中養生と封緘養生の強度を比較すると、材齢 3 日から 28 日では封緘養生のほうが水中養生の強度よりも 2 N/mm^2 程度大きかった。しかしながら、材齢 91 日では水中養生の強度が封緘養生の強度よりも 2 N/mm^2 大きくなった。水中養生と気中養生の強度を比較すると、気中養生の強度は、材齢 3 日では水中養生の強度より 2 N/mm^2 小さく、材齢 7 日では 4 N/mm^2 、材齢 28 日では 12 N/mm^2 、材齢 91 日では 20 N/mm^2 小さくなった。材齢を経るに従い圧縮強度の差が大きくなっている。

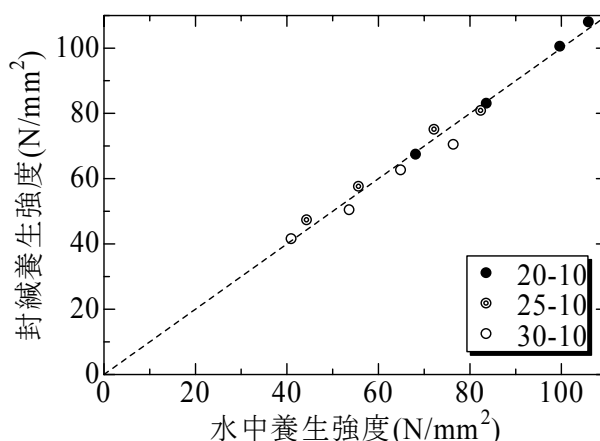


図-2 水中養生強度と封緘養生強度の関係

また、気中養生において材齢 28 日から材齢 91 日の強度増加はほとんどないことがわかる。図(c) において水結合材比 30 % の水中養生と封緘養生の強度を比較すると、封緘養生の強度は、材齢 3 日で水中養生とほぼ等しく、材齢 7 日および材齢 28 日で 3 N/mm^2 、材齢 91 日では 6 N/mm^2 水中養生よりも小さくなっている。材齢を経るに従い強度差が大きくなっている。水中養生と気中養生の強度を比較すると、気中養生の強度は、材齢 3 日では水中養生の強度よりも 6 N/mm^2 小さく、材齢 7 日では 8 N/mm^2 、材齢 28 日では 9 N/mm^2 、材齢 91 日では 21 N/mm^2 小さくなった。水結合材比 25 % の場合と同様に材齢を経るに従い強度差が大きくなっている。水結合材比 30 % では封緘養生の圧縮強度は水中養生の強度より小さくなったが、水結合材比 20 % および 25 % ではほぼ等しくなった。また、水中養生と気中養生の圧縮強度の差は、水結合材比が小さいほど小さくなった。これらのことから水結合材比が小さいほど養生条件の違いによる影響は少ないものと考えられる。

図-2 は水中養生を行った場合の圧縮強度と封緘養生を行った場合の圧縮強度の関係を、図-3 は水中養生を行った場合の圧縮強度と気中養生を行った場合の圧縮強度の関係を示したものである。図中の破線はそれぞれの強度が等しいところを表したものである。図-1 では水結合材比により水中養生と封緘養生の強度の差が

示されたが、全データを用いて示すと水中養生強度と封緘養生強度の差はほとんどなく、破線上に分布していることがわかる。図-3の水中養生強度と気中養生強度の関係から、図-1で示したように気中で養生を行った場合の圧縮強度が水中で養生を行った場合の圧縮強度より小さくなっていることがわかる。

3.2 引張強度

図-4は圧縮強度と引張強度の関係を示したものである。実線は土木学会コンクリート標準示方書の式⁷⁾、破線はACI363委員会の式⁸⁾を示している。これらの式の適用範囲は28日強度が20~80 N/mm²程度である。図より、水中養生を行った場合の引張強度はコンクリート標準示方書の曲線とACI363委員会の曲線の間分布していることがわかる。封緘養生を行った場合および気中養生を行った場合の引張強度については、圧縮強度が60 N/mm²以下のときにはコンクリート標準示方書の曲線とACI363委員会の曲線の間分布しており、60 N/mm²以上のときにはコンクリート標準示方書の関係よりも小さくなっていることがわかる。また、圧縮強度が50 N/mm²以下では養生条件の違いによる引張強度の差はみられないが、圧縮強度が50 N/mm²以上では封緘養生および気中養生の引張強度が水中養生よりも小さくなっている。

3.3 静弾性係数

図-5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⁷⁾、破線はACI363委員会の式⁸⁾であり、適用範囲は28日強度が21~83 N/mm²である。水中養生および封緘養生の弾性係数は気中養生の場合より若干大きくなっているが、圧縮強度と弾性係数の関係は一つの曲線で表すことが可能であるといえる。実験結果を最小二乗法で近似した近似曲線は次式(1)のようになる。

$$E_c = 5.244 f'_c{}^{0.413} \quad [\text{kN/mm}^2] \quad (1)$$

図より、実験結果はコンクリート標準示方書の

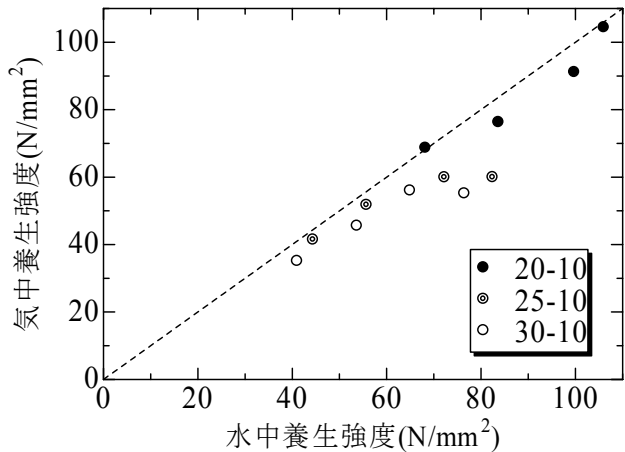


図-3 水中養生強度と気中養生強度の関係

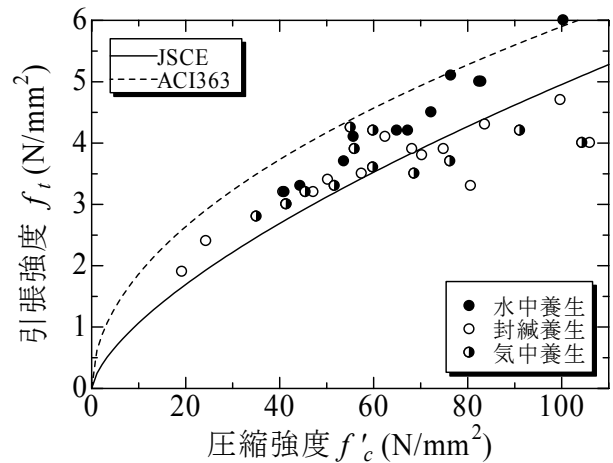


図-4 圧縮強度と引張強度の関係

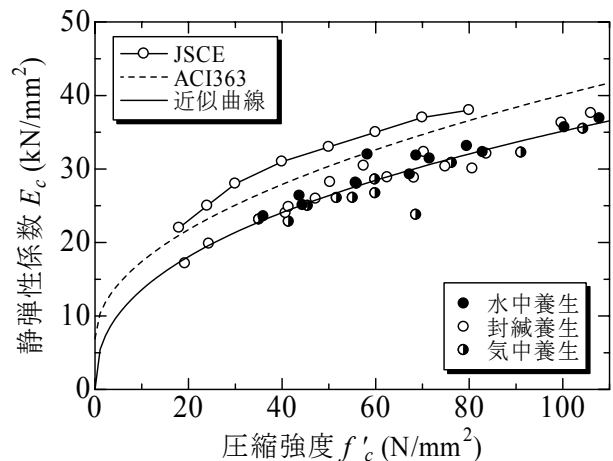


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

値およびACI363委員会の式よりも小さくなっていることがわかる。また、近似曲線はACI363委員会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。

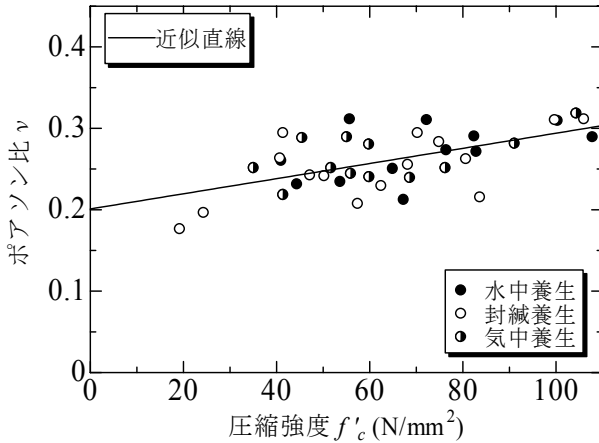
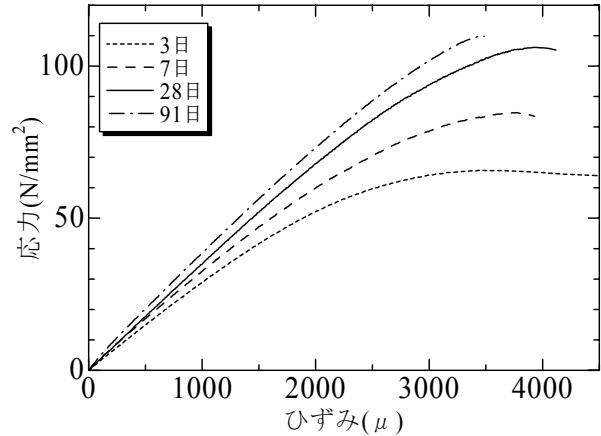


図-6 圧縮強度とポアソン比の関係



(a) 水中養生

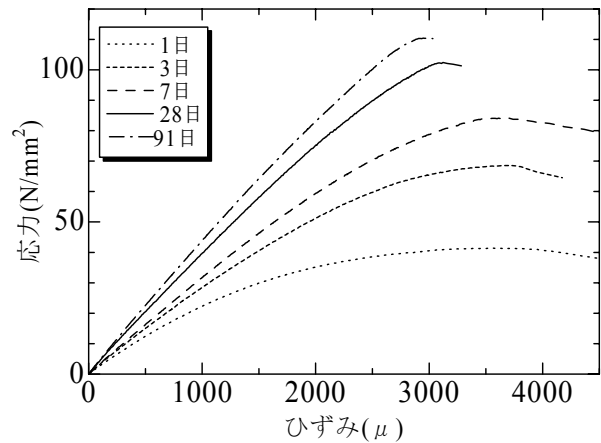
3.4 ポアソン比

図-6は圧縮強度とポアソン比の関係を示したものである。ポアソン比は養生条件の違いによる差はほとんどなく、圧縮強度の増加に伴い、大きくなっており、直線近似すると次式(2)のようになる。

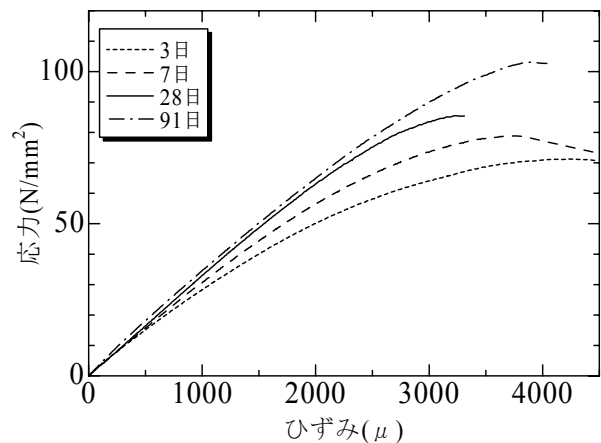
$$\nu = 0.201 + 0.00093 f'_c \quad (2)$$

3.5 ひずみ

図-7は水結合材比 20 %の場合における応力-ひずみ曲線である。図(a)は水中養生を行った場合の応力-ひずみ曲線、図(b)は封緘養生を行った場合の応力-ひずみ曲線、図(c)は気中養生を行った場合の応力-ひずみ曲線を示している。養生条件に関係なく材齢が進み強度が増加するにつれ傾きが大きくなり直線的になっていることがわかる。このことより、強度が大きくなると弾性係数が大きくなっていることがわかる。また、若材齢の場合ほど非線形性が強く、最大応力近傍の小さな傾きの範囲が広がっている。



(b) 封緘養生



(c) 気中養生

図-7 応力-ひずみ曲線

図-8は圧縮強度と最大応力作用時における縦ひずみの関係を示している。最大応力作用時の縦ひずみは、圧縮強度が大きくなるに従い大きくなっていることがわかる。これを養生条件別に近似直線で示すと、実線が水中養生の場合、破線が封緘養生の場合、点線が気中養生の場合

の結果になる。この近似直線により養生条件による比較を行うと、水中養生を行った場合の最大応力作用時の縦ひずみと封緘養生を行った場

合の縦ひずみはほぼ等しくなっており、気中養生を行った場合の縦ひずみは他の養生条件の場合よりも 400 ~ 500 μ 大きくなっていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、シリカフューム置換率 10%，水結合材比 20%，25%，30% の高強度コンクリートの養生条件を変えて材齢 1 日から材齢 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) 水結合材比が小さいほど、強度発現に及ぼす養生条件の影響は少ない。
- (2) 圧縮強度と引張強度の関係において、封緘養生および気中養生を行った場合の引張強度は、水中養生を行った場合の引張強度より小さい。
- (3) 圧縮強度と静弾性係数の関係において、弾性係数に及ぼす養生条件の影響は少なく、弾性係数は次式(3)

$$E_c = 5.244 f'_c{}^{0.413} \quad [\text{kN/mm}^2] \quad (3)$$

で求めることができる。

- (4) 圧縮強度とポアソン比の関係において、ポアソン比に及ぼす養生条件の影響は小さく、ポアソン比は次式(4)

$$\nu = 0.201 + 0.00093 f'_c \quad (4)$$

で求めることができる。

- (5) 応力-ひずみ関係は材齢が若いほど非線形性が強い。
- (6) 圧縮強度と最大応力時における縦ひずみの関係において、気中養生を行った場合の縦ひずみは、水中養生および封緘養生を行った場合の縦ひずみより 400 ~ 500 μ 大きい。

参考文献

- 1) 中根淳・久保田昌吾・一瀬賢一：シリカフューム混入コンクリートの強度特性に関する

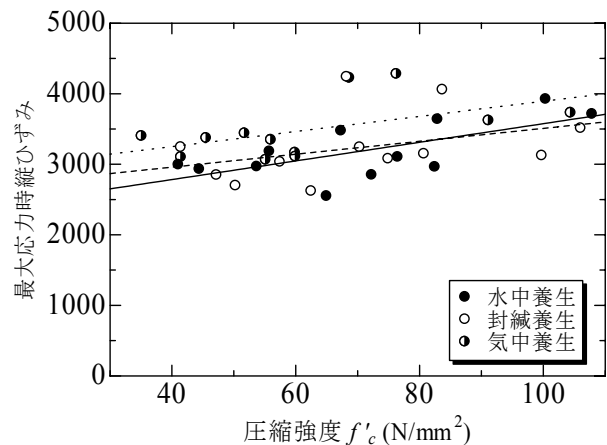


図-8 圧縮強度と最大応力時縦ひずみの関係

- 検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 9, No. 1, pp.51 - 56, 1987.6
- 2) 添田政司・大和竹史・江本幸雄：シリカフュームコンクリートの養生方法が強度及び耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 17, No. 1, pp.369 - 374, 1995.6
- 3) 鎌田英治・桂修・長谷川寿夫・今井敬：高強度コンクリートの強度性状把握のための柱モデル実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 13, No. 1, pp.237 - 242, 1991.6
- 4) 佐藤幸恵・梶田佳寛・中村成春・鹿毛忠継：高強度コンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp.409 - 414, 2001.6
- 5) 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
- 6) 菅田紀之・寺澤貴裕・田中健司：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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp.1069 - 1074, 2005.6
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会, pp.28 - 29, 2002.3
- 8) ACI Committee 363: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI, 1992