

論文 シリカフュームコンクリートの養生方法が強度および耐久性に及ぼす影響

添田政司*1・大和竹史*2・江本幸雄*3

要旨：本研究は、養生方法の相違がシリカフュームコンクリートの強度や耐久性に及ぼす影響を検討したもので、まず、養生温度と強度の関係からシリカフュームを混和した場合にも、湿潤養生時のコンクリート強度は「積算温度」を利用できることを示した。つぎに、気中養生時強度と水中養生時強度との比と材齢の関係は直線で回帰できることを示し、シリカフュームを混和した方は無混和のコンクリートよりも強度発現性が低下することを明らかにするとともに、所要の強度を得るための最小湿潤養生期間について検討・考察を加えている。

キーワード：圧縮強度、養生期間、養生温度、積算温度、シリカフューム

1. はじめに

コンクリートにとって養生は最も重要であることは言うまでもない。そのため、土木学会標準示方書には「コンクリートは、打込み後、硬化に必要な温度および湿度条件を保ち、有害な作用の影響を受けないように、十分これを養生しなければならない。」とあり、養生の重要性から湿潤養生期間が定められている。

シリカフュームを混和したコンクリートの強度性状に関しては、これまでも数多くの研究が報告され、初期養生の重要性に関しては指摘されている [1] - [3] が、強度の発現性に及ぼす養生方法の影響から適切な養生期間について系統的に論じられた研究はほとんど公表されていない。

そこで、本研究では、シリカフュームを用いたコンクリートの養生温度や養生条件の相違が強度や中性化および塩分浸透等の耐久性に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、養生条件と強度の関係式から、所要の強度を得るための最小湿潤養生期間について考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには、普通ポルトランドセメント（略号：OPC）を用い、シリカフュームは粉末状（略号：SFA）と顆粒状（略号：SFB）の2種類を用いた。また、低熱型のボ

表-1 セメントおよびシリカフュームの物理的性質および化学成分

項目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	比重	比表面積 (cm ² /g)
	(%)					
OPC	22.5	5.7	2.9	63.6	3.16	3260
SFA	92.29	0.65	0.57	0.22	2.21	203000
SFB	89.29	0.35	3.52	1.11	2.10	-
SFC	28.57	4.90	2.71	57.21	3.09	6120

- *1 福岡大学助手 工学部土木工学科、(正会員)
 *2 福岡大学教授 工学部土木工学科、博士(工学) (正会員)
 *3 福岡大学助教授 工学部土木工学科、博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

種類	SF %	W/ (C+SF),%	S/a %	単 位 量 kg/m ³					混和剤 %	スランプ cm	空気量 %
				C	W	SF	S	G			
無混和	0	35	41	450	153	0	725	1095	1.0	15.0	1.3
SFA	10	35	40	405	150	45	707	1113	1.6	17.5	2.2
SFB	10	35	41	405	149	45	725	1095	1.9	13.5	1.5
SFC	0	35	40	450	154	0	702	1106	0.7	13.0	1.2

ルトランド系セメントと粉末状シリカフュームを9：1の割合でプレミックスされたシリカフュームセメント（略号：SFC）も使用した。セメントおよびシリカフュームの物理的性質および化学成分を表-1に示す。使用骨材は、福岡県粕屋産の海砂（比重：2.57、吸水率：1.32%、粗粒率：2.65）および福岡県若杉山産の角閃岩碎石（比重：2.87、吸水率：1.31%、最大寸法：20 mm）である。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用した。コンクリートの配合は、水結合材比を35%と一定にし、シリカフュームをセメント重量の内割で10%混入した。その配合とフレッシュコンクリートの性状を表-2に示す。練混ぜ方法は、セメント、シリカフュームおよび細・粗骨材により30秒間空練りを行い、高性能AE減水剤を含んだ一次水（全量の70%）を加えて30秒間練り混ぜ、残りの二次水を添加した後に3分間練り混ぜた。練混ぜには、パン型強制練りミキサ（容量100ℓ）を用いた。

2. 2 試験項目および試験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験には、 $\Phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体を用いた。養生方法は、水中養生の場合は、脱型後10℃、20℃、40℃の水中で養生を行い、気中養生の場合は、温度20℃、湿度70%の室内に放置して行った。試験材齢は、材齢3日、5日、7日、28日、56日、91日の6材齢である。

(2) 中性化促進試験

供試体には10 x 10 x 40 cmの角柱供試体を用い、所定の水中養生期間（材齢0、3、5、7、28日）終了後促進装置内に設置した。促進条件は温度40℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%とした。促進試験期間は、2、4、6および8週間行なった。中性化深さの測定は、所定の材齢で供試体の端部10cmを割裂し、その断面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して未着色部分を中性化領域と判定し、平均中性化深さを画像解析によって求めた。

(3) 塩水噴霧試験

塩水噴霧試験はJIS Z 2371に準拠し、3%NaCl水溶液をミストマイザーを介し、噴霧塔方式によって装置内に塩水を噴霧した。なお、装置内の温度は40℃で一定とし所定期間（2、4、6および8週間）連続塩水噴霧を行った。塩素イオンの浸透深さの測定は、切断した供試体表面に0.1%フルオレセインナトリウム水溶液と0.2%硝酸銀水溶液を噴霧し、発色部分の深さを画像解析によって求めた。

(4) 細孔径の測定

細孔径（43~75000Å）の測定には水銀圧入式ポロシメータを用いて行った。試料は、圧縮強度試験終了後の円柱供試体を粉碎し、中央部から2.5~5mmのモルタル部分を試験に供した。

3. 実験結果および考察

3.1 養生温度の影響

図-1は、水中養生を行った無混和とシリカフューム (SFA) を用いた場合の、コンクリートの圧縮強度と積算温度の関係をそれぞれ示したものである。なお、積算温度は次式で計算した。

$$M = \int_0^t (T+10)dt \quad (1)$$

ただし、M：積算温度 (℃日)、

T：養生温度 (℃)、t：養生期間 (日)

これらの図より、シリカフュームの有無に拘わらずコンクリートの強度と (σ) と積算温度 (M) の関係は1000℃日まではほぼ直線になることが認められる。そこで1000℃日までの積算温度と強度の関係を求めると次のようになる。

無混和： $\sigma = 32.63 \log(M) - 24.59$ (2-a)

SFA： $\sigma = 30.12 \log(M) - 13.15$ (2-b)

SFB： $\sigma = 36.41 \log(M) - 28.47$ (2-c)

SFC： $\sigma = 36.72 \log(M) - 33.61$ (2-d)

これらの結果より、シリカフュームを混入した方は、無混入に比べ、強度発現が早く、やや勾配が異なるが、ほぼ同様な傾向を示していることがわかる。一方、積算温度が1000℃日以降になると、直線から外れてくる。この傾向は、シリカフュームを混入した方が顕著に認められ、シリカフュームコンクリートは、養生温度の影響を強く受けることがこの図からも認められる。

3.2 養生条件の影響

図-2は、養生温度20℃における水中養生での圧縮強度と積算温度の関係を示し、図-3は気中養生を行った場合を示したものである。水中養生を行った場合は、シリカフュームの有無に拘わらず直線で回帰でき、シリカフュームの強度発現性が良好であることが明らかに認められる。一方、気中養生を行った場合は、いずれの配合も曲線で示され、強度の発現性は水中養生に比べ著しく劣り、シリカフュームの種類によっては無混和のもの

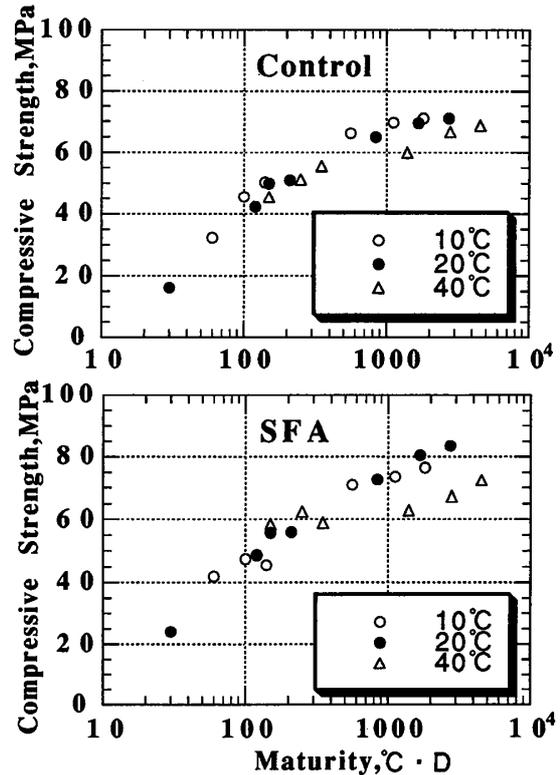


図-1 積算温度と圧縮強度の関係

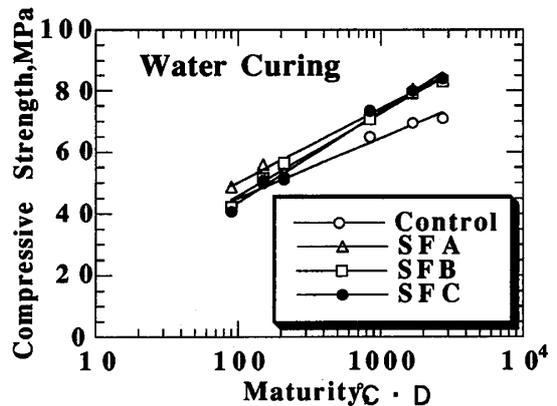


図-2 水中養生の圧縮強度と積算温度の関係

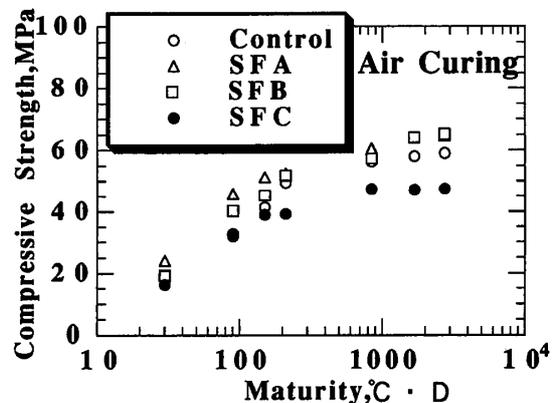


図-3 気中養生の圧縮強度と積算温度の関係

のよりも低下した。次に、初期の水中養生期間が強度に及ぼす影響を調べるために、養生期間を変化させて検討を加えた。

図-4は、気中養生時強度と水中養生時強度との比と材齢の関係を初期水中養生期間ごとに示したものである。この図から明らかのように、いずれの配合の場合も、初期水中養生期間が短くなるほど気中養生したコンクリートの強度発現性は低下し、材齢の経過に伴ってほぼ直線的に強度比が減少している。そこで、水中養生期間0日の直線を回帰[3]すると次のようになる。

無混和： $P = 1.009 - 0.144 \log(t)$ (3-a)

SFA： $P = 0.964 - 0.111 \log(t)$ (3-b)

SFB： $P = 0.963 - 0.158 \log(t)$ (3-c)

SFC： $P = 0.823 - 0.137 \log(t)$ (3-d)

ただし、 P ： σ_A / σ_W 、 t ：材齢

σ_A ：気中養生時強度

σ_W ：水中養生時強度

このように水中養生を全く行わない場合には、得られた回帰式からも明らかのように、シリカフェームを混入した方が、無混和よりも強度発現性は悪くなることが判明した。この点をさらに明確にするために、活性度指数で評価してみた。図-5に、各材齢におけるそれぞれの養生方法での活性度指数を示す。なお、活性度指数は、水中養生した無混和のコンクリート強度に対するそれぞれの養生におけるシリカフェームを混入したコンクリートの強度比である。図より、水中養生を行った活性度指数は、材齢の経過とともに増加し、材齢28日で約110%以上になっている。一方、養生を全く行わない場合の活性度指数は、材齢の経過とともに低下する傾向にあり、養生が不十分であれば、シリカフェームを混入しても強度改善効果を発揮しないことがこの結果からも明確に判断できる。

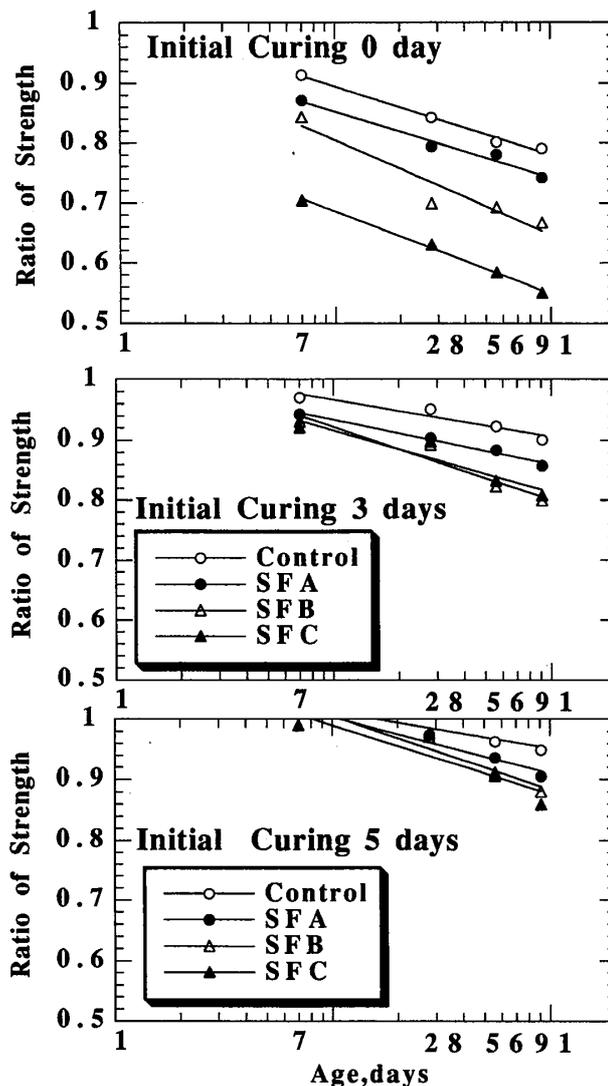


図-4 初期養生期間の異なる圧縮強度比と材齢

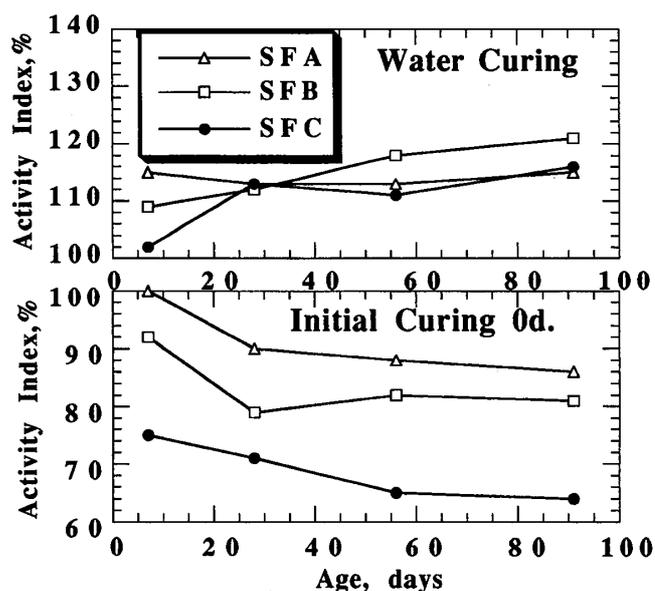


図-5 水中養生と気中養生の活性度指数

3. 3 コンクリートの細孔構造と強度

気中養生した場合の強度の低下要因を確かめるため、コンクリートの細孔構造に着目して検討を加えた。図-6は、材齢28日における水中養生と気中養生を行った場合の細孔径分布の一例を示したものである。この図からも明らかなように、気中養生の総細孔容積(T.P.V)は、水中養生に比べ約2倍程度増加し、特に、細孔径430Å付近の細孔量が著しく増加している。この傾向はいずれの配合の場合も同様であった。そこで、各配合の材齢28日までの圧縮強度と総細孔容積の関係を養生方法別に示したものが図-7である。図より、強度が小さいほど総細孔容積は大きくなる傾向にあるが、気中養生の場合の方が水中養生に比べ、その傾向は大きくなっている。このように、気中養生の場合は内部組織がポーラスになるため、強度の発現性が著しく低下したものと考えられる。

3. 4 養生と中性化および塩分浸透深さ

図-8は、中性化期間8週における初期養生期間と中性化深さの関係を示したものである。中性化深さは、初期養生期間が短い場合は、シリカフェームの有無に拘わらず大きいですが、養生期間の経過とともに小さくなる傾向が認められる。したがって、シリカフェームを用いた場合でも、初期の水中養生期間が強度ばかりでなく中性化深さ[4]にも大きく影響を及ぼすことが確認された。

図-9は、塩水噴霧期間8週における初期養生期間と塩分浸透深さの関係を示したものである。図より塩分浸透深さは、中性化深さと同様に、水中養生の経過に伴い低下する傾向が認められる。例えば、材齢28日では、無混和に比べシリカフェームを混入した方が塩分浸透深さは半減されており、シリカフェームの塩分抑制効果[5]が認められる。一方、養生期間が短い場合は、その差が明瞭でなくなることから、シリカフェームの効果を十分に発揮するためには、初期の水中養生を十分に

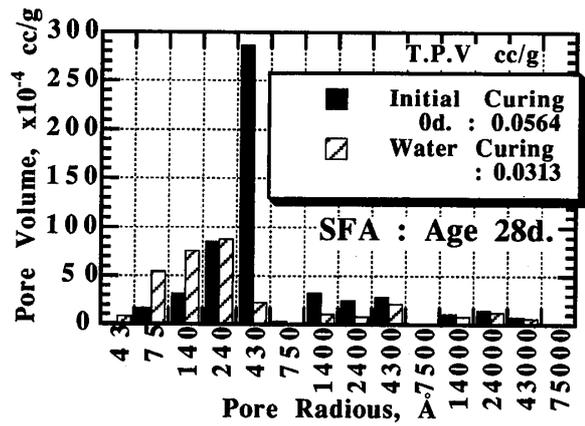


図-6 SFAの細孔径分布

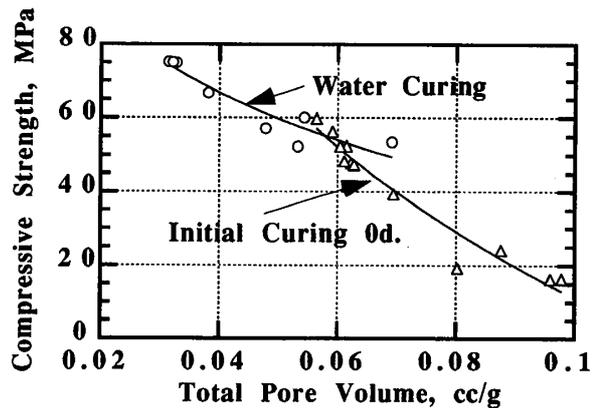


図-7 圧縮強度と総細孔容積の関係

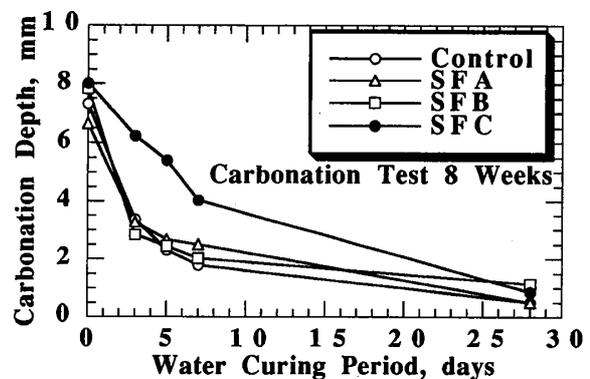


図-8 初期養生期間と中性化深さの関係

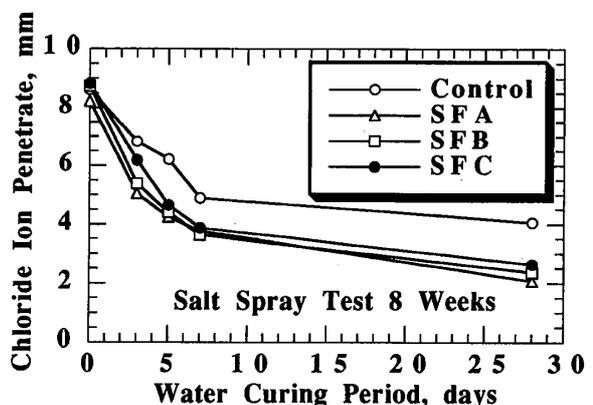


図-9 初期養生期間と塩分浸透深さの関係

確保することが必要であると思われる。

3. 5 初期湿潤養生期間

これまでに、初期養生の重要性は強度ばかりでなく、中性化や塩化物の浸透などの耐久性にも及ぼすことを述べてきた。そこでより簡単に初期養生の影響を示すために、ある一定の強度（ここでは、無混和の場合 40MPa、SFの場合は材齢28日の活性度指数112%を考慮して45MPaとした。）を得るのに必要なコンクリートの初期湿潤期間と養生温度の関係を式（2）と式（3）を組み合わせて計算により求めた。その結果を図-10に示す。図

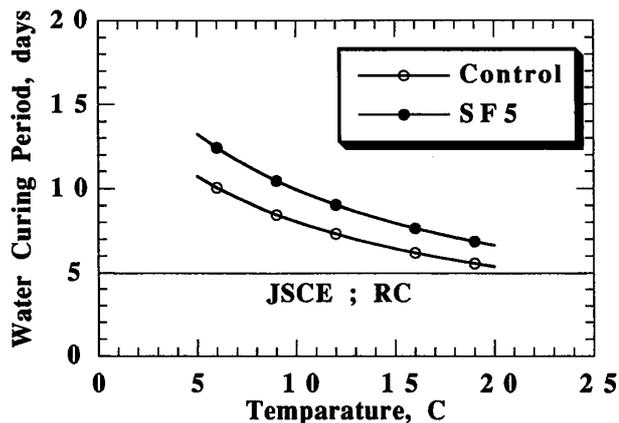


図-10 所要の強度を得るために要する初期湿潤養生期間と温度の関係

より、いずれの配合の場合も、養生温度が低い場合は、初期の湿潤養生期間を長く必要とし、養生温度が高くなるにつれて湿潤養生期間は短くなる結果となった。さらに、無混和よりもシリカフュームを混入した方が初期の湿潤養生期間を多く必要とし、たとえば、養生期間中の気温が17℃の場合は、シリカフュームを混入した場合で7.3日、無混和で5.6日必要になることが計算結果から得られた。これらのことから、シリカフュームを用いる場合には、初期湿潤養生の重要性は普通ポルトランドセメントに比べ重要であることが分かった。

4. まとめ

本実験の範囲内で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) シリカフュームの混和した場合でも、湿潤養生時のコンクリート強度は「積算温度」で示すことができ、その強度と積算温度は1000℃日までは直線で回帰できる。
- (2) 気中養生した場合の強度発現性は水中養生に比べ著しく劣る。この傾向はシリカフュームを混和した方が無混和よりも大きい。
- (3) 初期水中養生期間が短くなるほど気中養生したコンクリートの強度発現性は低下する。
- (4) 水中養生の活性度指数は110~120%程度であるが、気中養生の場合は90%以下になる。
- (5) 気中養生の総細孔容積は、水中養生に比べ2倍程度増加する。
- (6) 中性化深さや塩分浸透深さは、初期の水中養生期間が短いほど大きくなる。
- (7) 初期の湿潤養生期間は気温が17℃の場合、無混和で5.6日、混入した方は7.3日必要となり、シリカフュームを混入した場合の方が初期の湿潤養生期間を長く必要とする。

参考文献

- 1) 橋 大介、山崎康行、今井 実：シリカフュームを使用した高強度コンクリートの物性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.117 - 122、1990
- 2) 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性状に関する検討、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.9、No.1、pp.51 - 56、1987
- 3) T.Uomoto, K.Kobayashi, : Effect of Curing Temperature and Humidity on Strength of Concrete Containing Blast Furnace Slag Admixture, ACI SP-114, Vol.2, pp.1345 -1359, 1989
- 4) O.E.Gjorv, : Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume, ACI SP-79, Vol. 2, pp.695 - 708, 1986
- 5) 添田政司、大和竹史、江本幸雄：中性化と塩水の複合作用によるコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.745 - 750、1992