

混和材を用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究

学生氏名 朴 松哲

指導教授 小玉 克巳

高炉スラグ微粉末,フライアッシュ及びシリカフューム等は元々産業副産物であり,コンクリートの混和材として多用されている。一方,セメントの原材料となる石灰石の大量使用によって資源が年々減少するばかりか自然環境悪化も招いているのが現状である。従って,産業副産物である混和材の大量利用は,環境保全及びマスコンクリートのひびわれの対策面でも大いに期待されている。しかし,現在混和材の有効利用は大量置換までは至っていない。原因としては,混和材を大量置換した場合,未明な点が多いからである。そこで,本研究は混和材の大量置換に着目し,混和材を用いたコンクリートの諸性状及び耐凍害性について研究を行った。その結果として高炉スラグ微粉末とフライアッシュは材齢と養生条件を変えることによって良好な耐凍害性を示すことが確認されたが,シリカフュームの場合は耐凍害性に劣っていることが確認できた。

Key Words :ground granulated blast-furnace slag , fly ash , silica fume , freeze-thaw resistance , durability factor

1. 研究背景と目的

高炉スラグ微粉末,フライアッシュ及びシリカフューム等の混和材は水和熱の低減効果,或は強度向上等の効果があるため,ダム等の水和熱による温度ひび割れの影響を大きく受けるマスコンクリート,あるいは超高強度コンクリートなどに多用されている。

一方,セメントの原材料となる石灰石の大量使用によって資源が年々減少するばかりか自然環境悪化も招いていくのが現状である。従って,産業副産物である混和材の大量利用は環境保全及びマスコンクリートのひびわれ対策の面でも大いに期待されている。しかし,現在混和材の有効利用は大量置換までは至っていないのが現状である。原因として上げられるのは高炉スラグ微粉末,フライアッシュ等を大量に置換した場合,初期強度が低く,強度発現が遅い,あるいはシリカフュームの場合,乾燥収縮及びプラスチックひび割れの増加などがある。特にダムをはじめ,その水路構造物は山岳地帯に多いため気象条件も厳しく,コンクリートの凍害を受ける程度も激しいが,混和材を大量に置換した場合の耐凍害性に関する研究は未だに少なく,未明な点が多いからである。

そこで,本研究では既往の研究で明確にされてない混和材の大量置換に注目し,標準養生,連結養生,などが混和材を用いたコンクリートの諸性状及び耐凍害性に及ぼす影響について試験をし,検討を行った。また,普通コンクリートについて同様な試験を行い,それらと比較検討した。

2. 実験概要

(1) 試験材料

a) セメント: JIS R 5210 に規定している普通ポルトランドセメントを使用した。(表 2.1)

表 2.1 セメントの物理的試験結果

試験項目	比重	粉末度 cm^2/g	全アルカリ%
試験成績	3.16	3280	0.56

b) 高炉スラグ微粉末: JIS A 6206 に規定している粉末度が4000のものを使用した。(表 2.2)

表 2.2 高炉スラグ微粉末の物理的試験結果

試験項目	比重	粉末度 cm^2/g	塩基度
試験成績	2.9	4640	1.9

c) フライアッシュ: JIS A 6201 に規定したものをを使用した。(表 2.3)

表 2.3 フライアッシュの物理的試験結果

試験項目	比重	粉末度 cm^2/g	$\text{SiO}_2\%$
試験成績	1.97	3360	60.97

d) シリカフューム: JIS A 6207 に規定したものをを使用した。(表 2.4)

表 2.4 シリカフュームに物理的試験結果

試験項目	比重	粉末度 cm^2/g	$\text{SiO}_2\%$
試験成績	2.2	200,000	93.8

e) 細骨材: 相模原産川砂を使用した。(表 2.5)

f) 粗骨材: 八王子産砕石を使用した。(表 2.6)

表 2.5 細骨材の物理的試験結果

試験項目	比重	粗粒率	吸水率%	実積率%
試験成績	2.51	2.97	3.5	64.3

表 2.6 粗骨材の物理的試験結果

試験項目	比重	粗粒率	吸水率%	実積率%
試験成績	2.69	7.2	0.45	59.6

g) 混和剤 : AE助剤 , AE減水剤を使用した .

②) 配合

本研究ではコンクリートの空気量を約 5% に設定し測定方法は JIS A 1128 に準拠して行った . スランブは約 12cm に設定し測定方法は JIS A 1101 に準拠して行った . 水と結合材 (セメント+ 混和材) 比は 0.55 に設定して試験を行った .

a) 混和材の置換率

既往の研究⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾では高炉スラグ微粉末を 50% 程度 , フライアッシュを 20% 程度 , シリカフュームを 15% 程度までについて研究が行なわれていた . 本研究では混和材の置換率を表 2.7 のように設定した .

表 2.7 混和材の配合置換率

混和材	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	シリカフューム
置換率	70%	40%	30%

b) 養生方法

養生方法は標準養生と連結養生を行った . 連結養生とは , ある期間標準養生をした後 , 恒温恒湿室で空中養生をしたもので , 次のように連結させた . すなわち , 21 日水中 + 7 日空中 (呼び名は 2107) , 14 日水中 + 14 日空中 (呼び名は 1414) , 7 日水中 + 21 日空中 (呼び名は 0721) の養生を行い , 合計材齢 28 日を試験開始材齢とした .

c) 材齢

本研究ではコンクリートの標準養生材齢を 14 日 , 28 日 , 91 日に分けて試験を行った .

③) 実験方法

a) 凍結融解試験方法

本研究での凍結融解試験は ASTM C 666 A 法の水中凍結水中融解試験に準拠して行った⁽⁶⁾ . 凍結融解に伴うコンクリートの組織の緩みを相対動弾性係数でとらえ , 次式から求めた .

$$P = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\%$$

p : 相対動弾性係数 (%)

f_0 : 0 サイクルでのたわみ振動の一次共鳴振動数

f_n : n サイクルでのたわみ振動の一次共鳴振動数

また , ASTM の標準試験方法試案では , 試験は相対動弾性

係数 P が 60% に低下するまで , 低下しない場合は 300 サイクルまで行うことを規定している . 従って試験したサイクル数を加味して , コンクリートの耐凍害性を耐久性係数 DF として表した . 耐久性係数は次式から求めた .

$$DF = \frac{P \times N}{M}$$

DF : 耐久性係数 (%)

P : N サイクルでの相対動弾性係数 (%)

N : 試験終了所定サイクル数または P が 60% まで低下した時のサイクル数

M : 所定のサイクル数 (300 サイクル数)

b) 硬化コンクリートの気泡間隔係数と空気量

本研究では試験の結果で異常がある供試体について硬化コンクリートの気泡間隔係数と空気量を測り , 原因の解明に加えた .

c) 圧縮強度試験方法

圧縮用の試験体として円柱 (10 × 20cm) を JIS A 1132 に準拠して作製し , 圧縮強度試験は凍結融解試験開始直前に JIS A 1108 に準拠して行った .

d) 自由水減水率測定方法

本研究で連結養生を行うが , 水中養生を行った後空中養生を行うことによってコンクリート中の毛細管空隙中の自由水が失われていく . その水分の損失が凍結融解に及ぼす影響を検討するために次式のように水分の損失を自由水減水率として捉え , その影響を検討した .

$$m_f = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100 \quad (\%)$$

m_f : 自由水減水率 (%)

m_w : 水中養生直後の重量

m_d : 空中養生直後の重量

3 混和材の大量置換率がコンクリートの諸性状に及ぼす影響 (試験開始材齢 14 日)

3章は混和材を大量置換したものについて ASTM C 666 A 法の水中凍結水中融解試験に準拠して試験を行い , 混和材の大量置換率がコンクリートの諸性状に及ぼす影響について述べると同時に普通コンクリートに対して同じ試験を行い , それらと比較し検討を行ったものである . それらを試験したコンクリートの配合及びスランブ , 空気量の結果を表 3.1 に示した . 表 3.1 での供試体の呼び名は次のように設定した . つまり , Op_c は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート , B70 は高炉スラグ微粉末を 70% 置換したコンクリート , F40 はフライアッシュを 40% 置換したコンクリート , S30 はシリカフュームを 30% 置換したコンクリート , そして , そ

表 3.1 材齢 14 日での各混和材を大量置換したコンクリートの配合

供試体名	水セメント比	細骨材率 s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位珪砂量 (kg/m ³)	単位細骨材量 (kg/m ³)	単位粗骨材量 (kg/m ³)	スラブ (cm)	空気量 (%)	AE助剤 (cc/mm ³)	AE減水剤 (cc/mm ³)	コンクリート単位容積質量 (t/m ³)
Opc-14	0.55	46	176	320	0	777	977	14	5.5	3200	2000	2.23
B70-14	0.55	47	177	97	225	791	940	16	5	12400	3600	2.23
F40-14	0.55	46	176	192	128	748	942	14	5.1	17500	2500	2.25
S30-14	0.55	46	176	224	96	761	958	12	5.6	14500	32500	1.79

の後の数値は標準養生材齢を示した。例えば B70 14 とは高炉スラグ微粉末を 70%置換したコンクリートで、試験開始養生材齢を 14 日したものを言う。

(1) 圧縮強度

混和材の大量置換率がコンクリートの圧縮強度に及ぼす結果を図 3.1 に示した。

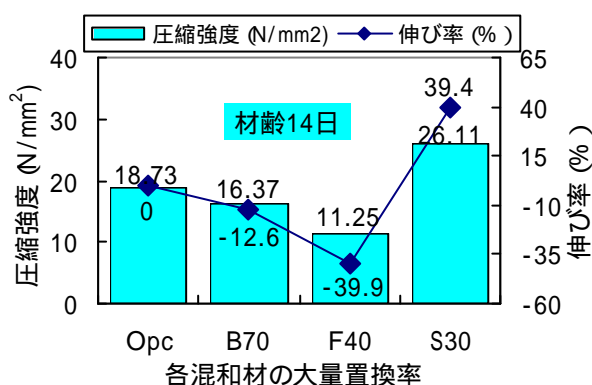


図 3.1 各混和材の大量置換率と圧縮強度との関係

図 3.1 から見られるように、高炉スラグ微粉末置換率 70% では置換率が大きいいため初期強度が小さく特徴が表れ、普通コンクリートより強度が低い。普通コンクリートの圧縮強度に対する伸び率を見ると B70-14 で 12.6% を示していた。フライアッシュ 40% の場合は他と比べてかなり低い値を示していることがわかる。また、Opc に対する伸び率を見ると 39.9% にもなっていることが分かる。しかし、シリカフューム 30% の場合は短い材齢にもかかわらず普通コンクリートより大きいことがわかる。伸び率を見ると 39.4% も伸びていることが分かる。

原因としては、高炉スラグ微粉末 70% は置換率が多いため初期段階で高炉スラグ微粉末の潜在水硬性が完全に発揮せず強度が低いと考える。また、フライアッシュ 40% では置換率がフライアッシュセメントの C 種の上限值 30% を超えているので、ポゾラン反応が遅く、14 日では完全に発揮せず強度が低いと考える。シリカフューム 30% の場合はシリカフュームの粒子が非常に細かいため非常に速い材齢よりポゾラン反応が生じるとともにセメント粒子の間隙に進入することができる。そのため、シリカフュームをセメントに一部置換したコンクリートは、普通コンクリートに比べてセメント硬化体により緻密になり⁽⁷⁾、強度の増加がより著しくなるのである。

(2) ASTM C 666 A 法による耐凍害性

混和材を大量置換したコンクリートの耐凍害性に関して実験した結果を図 3.2 と 3.3 に示した。

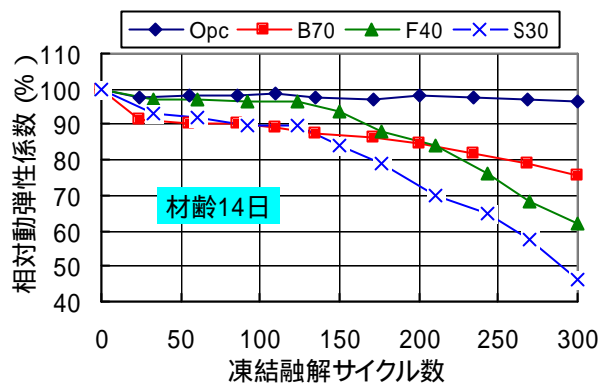


図 3.2 材齢 14 日での各混和材を置換したコンクリートの相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

図 3.2 の材齢 14 日での混和材の置換率が耐凍害性に及ぼす影響を見ると、普通コンクリートは 300 サイクルまで高い相対動弾性係数を示しているが、高炉スラグ微粉末 70% では最初から急激に低下し、300 サイクルでは 75% 付近まで低下した。フライアッシュ 40% の場合では最小の段階では普通コンクリートのように低下が見られなかったが 120 サイクル前後から急激に低下しはじめ 300 サイクルでは 60% まで低下した。シリカフューム 30% は強度が一番高いにもかかわらず相対動弾性係数の低下が一番激しくなっている。260 サイクルで既に 60% を下回っていた。

原因としては、高炉スラグ微粉末を 70% 置換した場合は材齢 14 日では強度が低く、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性が十分に発揮してないためコンクリートの内部に凍結し得る自由水が多いので耐凍害性が低いと考える。フライアッシュ 40% の場合もその置換率がフライアッシュセメントの C 種の上限值 30% を超えていて最初からその強度は低く、フライアッシュのポゾラン反応が不完全でコンクリート中の自由水が多く存在したので耐凍害性に劣ったと考える。シリカフューム 30% の場合ではその原因を探るために S30 の硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数を測って見た。その結果として空気量が 4.5% で気泡間隔係数が 247 であった。既往の研究によると⁽¹⁾⁽²⁾耐凍害性に有効な空気量は 3% 以上、気泡間隔係数は 250 μm 以下である。つまり、本研究でシリカフューム 30% の場合の空気量と気泡間隔係数が有効値に達していることが分かる。従って、S30 が耐凍害性に劣っ

ている原因としてはシリカフェームの超微粒子に在ると考えられる。圧縮強度で述べたようにシリカフェームがセメント硬化体を緻密にさせ、微細な毛細管空隙を造るのである。しかし、その緻密さが凍結融解では逆効果を招いたと考えられる。凍害というのは凍結時水の膨張による自由水の移動による静水圧^②によって生じるもので、その自由水が移動する毛細管空隙が余り微細なため水分の移動が生じにくく⁽³⁾、普通コンクリートの毛細管空隙を通る時より非常に大きい静水圧が生じるからであると考えられる。

図 3.3 での耐久性係数を見ると、普通コンクリートは 96.5%、高炉スラグ微粉末 70% は 75.8%、フライアッシュ 40% は 61.9%、シリカフェーム 30% は 52% であり、混和材を大量置換したコンクリートは材齢 14 日では耐凍害性に劣っていることがわかる。

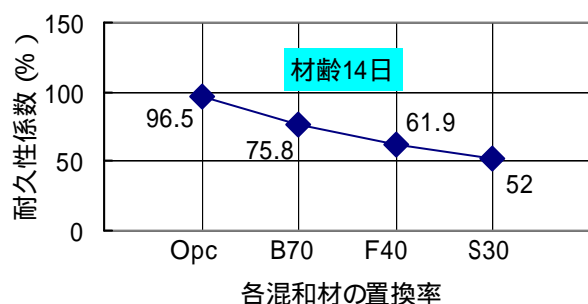


図 3.3 材齢 14 日での各コンクリートの耐久性係数

4. 標準養生材齢と混和材を用いたコンクリートの諸性状

3章では混和材を大量置換したコンクリートに対して ASTM C 666 A 法に準拠して耐凍害性試験を行い、検討した。試験の結果からみると、高炉スラグ微粉末 70% で若干低い耐凍害性を示し、フライアッシュとシリカフェームでは耐凍害性が得られなかった。ASTM C 666 A 法による供試体を材齢 14 日で直ちに試験を開始するのであり、初期強度が低い混和材に対して非常に厳しい条件であると考えられる。そこで、4章では混和材を大量に置換したコンクリートを ASTM C 666 A 法で規定した材齢より長い材齢を取り、材齢の変化に伴う耐凍害性について試験を行い、検討を加えた。混和材を大量に置換したコンクリートの材齢の影響を試験したコンクリートの配合及びスランプ、空気量の

結果を表 4.1 に示した。本章は養生材齢を 28 日、91 日取り、3章での材齢 14 日の結果も加えながら検討を行った。

(1) 標準養生材齢と高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの諸性状

a) 圧縮強度

標準養生材齢が高炉スラグ微粉末コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を試験した結果を図 4.1.1 に示した。

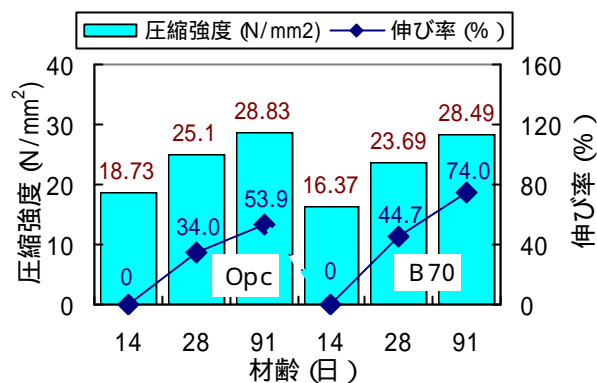


図 4.1.1 高炉スラグ微粉末 70% の材齢と圧縮強度との関係

図 4.1.1 からみると、高炉スラグ微粉末を 70% 置換したコンクリートは材齢 28 日での圧縮強度の伸び率が大きく、普通コンクリートの 28 日での圧縮強度と左程の差はなかった。91 日での圧縮強度を見ると、伸び率は大きく普通コンクリートの 91 日の圧縮強度とほぼ同程度の値を示していた。高炉スラグ微粉末は置換率が多いのが原因でスラグの潜在水硬性が完全に発揮せず、91 日での強度が普通コンクリートを上回ってないと考えられる。既往の研究によると^②普通コンクリートは材齢 91 日以後が余り強度の変化が見られないが、高炉スラグ微粉末 70% の場合は 91 日過ぎても強度の増加がみられる^②ことから高炉スラグ微粉末 70% 置換した場合の長期強度は 91 日以後だと考える。

b) 耐凍害性

高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートの標準養生材齢が耐凍害性に及ぼす影響を試験した結果を図 4.1.2 と 4.1.3 に示した。

図 4.1.2 からみると、材齢 28 日と 91 日が最初の 20 サイクル数前後まで急激に 90% まで低下し、その後はほぼ平行線を保ち、相対動弾性係数の低下が見られてなかった。

表 4.1 材齢 28 日、91 日での各混和材を用いたコンクリートの配合

供試体名	水セメント比	細骨材率 s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	単位セメント量 (kg/m³)	単位混和材量 (kg/m³)	単位細骨材量 (kg/m³)	単位粗骨材量 (kg/m³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	AE 助剤 (cc/mm³)	AE 減水剤 (cc/mm³)	コンクリート単位容積質量 (t/m³)
Opc-28	0.55	46	176	320	0	777	977	13	5.5	6000	4000	2.22
Opc-91	0.55	46	176	320	0	777	977	12	5.3	6000	4000	2.24
B70-28	0.55	47	177	97	225	791	940	13	5.9	15000	4000	2.26
B70-91	0.55	47	177	97	225	791	940	12	5.8	15500	4000	2.2
F40-28	0.55	46	176	192	128	748	942	14	5.3	16346	2212	2.16
F40-91	0.55	46	176	192	128	748	942	12	5.5	17500	2500	2.26
S30-28	0.55	46	176	224	96	761	958	12	5	12500	25625	2.24
S30-91	0.55	46	176	224	96	761	958	13	5.2	12500	27500	2.31

これから分かるように高炉スラグ微粉末 70% は材齢 14 日では若干低い耐凍害性を示しているが材齢 28 日からは十分な高い耐凍害性を示していることが分かる。原因としては充分養生することによるコンクリートの強度の増加とコンクリート内部の自由水の減少に在ると考える。

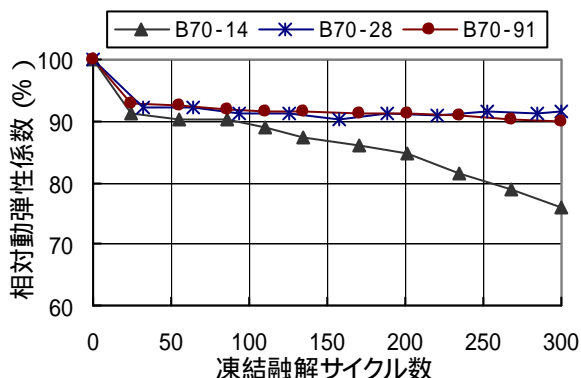


図 4.1.2 高炉スラグ微粉末 70% の各材齢での相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

図 4.1.3 の耐久係数を見ると高炉スラグ微粉末を 70% 置換したコンクリートは普通コンクリートに比べると低い材齢 28 日からは良好な耐凍害性を示していることが分かる。

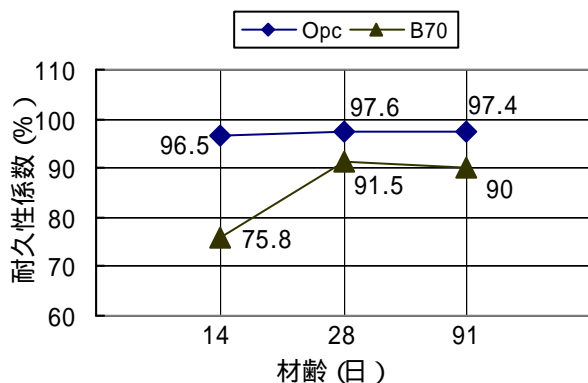


図 4.1.3 高炉スラグ微粉末 70% の各材齢での耐久係数

(2) 標準養生材齢とフライアッシュコンクリート諸性状

a) 圧縮強度

標準養生材齢がフライアッシュコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を試験した結果を図 4.2.1 示した。

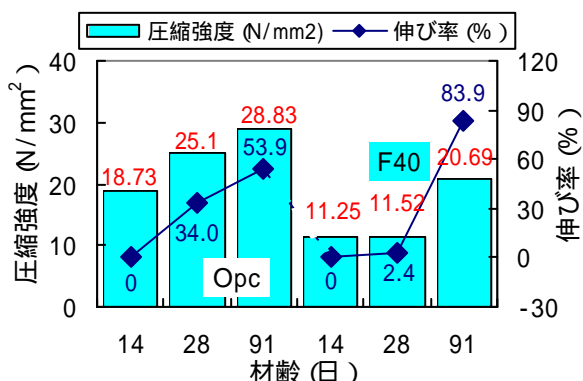


図 4.2.1 フライアッシュ 40% の各材齢での圧縮強度

図 4.2.1 でのフライアッシュ置換率 40% にしたコンクリートの圧縮強度を見ると、材齢の変化に伴う強度の増加は最初の段階では見られず F40-14 に対する圧縮強度の伸び率は 2.4% でほぼ停止状態である。F40-91 での伸び率を見ると 83.9% で 28 日からの強度の増加が大きいことが分かる。しかし、91 日までの強度の増加が大きいとしても普通コンクリートの 91 日での圧縮強度に比べるとその差は大きく、しかも材齢 14 日での普通コンクリートの圧縮強度に近い値を取っていることがわかる。いずれにしてもフライアッシュ置換率を 40% にしたコンクリートの圧縮強度は低く、強度効果が得られないことがわかる。特にフライアッシュを 40% と大量に置換すると材齢 28 日まで強度発現が遅いことが分かる。これはフライアッシュの置換率がフライアッシュセメントの C 種の上限值 30% を超えていることが原因だと考える。

b) 耐凍害性

フライアッシュを置換したコンクリートの標準養生材齢が耐凍害性に及ぼす影響を試験した結果を図 4.2.2 ~ 4.2.3 に示した。

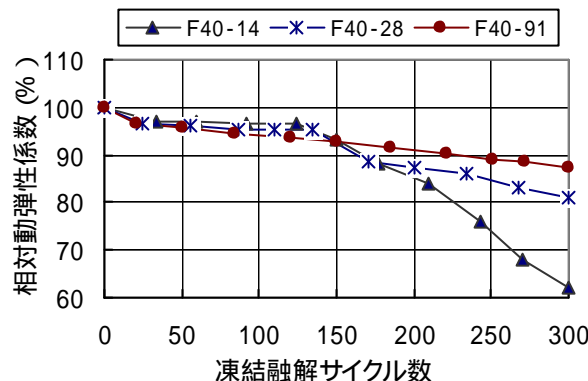


図 4.2.2 フライアッシュ 40% の各材齢での相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

図 4.2.2 から明らかなように、材齢 14 日、28 日、91 日の何れもサイクルの最初段階で良好な傾向が見られたが材齢 14 日と 28 日は 130 サイクル数前後で急激に低下した。その低下の程度を見ると材齢 14 日のほうが激しく 300 サイクルでは相対動弾性係数が 60% まで低下し低い耐凍害性を示していた。材齢 28 日では 130 サイクルで急激な低下をしたが 175 サイクルからはまた緩やかな低下傾向を示し、300 サイクルでの相対動弾性係数は 80% で止まった。材齢 91 日は最初から安定した低下を示し、300 サイクルでは 87% まで低下し、良好な耐凍害性を示した。材齢が長くなるにつれて耐凍害性が強くなるのは圧縮強度が大きくなることと材齢の増加とともに内部の自由水が減少したのが原因だと考える。

図 4.2.3 での耐久係数関係を見ると、普通コンクリートより耐凍害性が低い材齢の増加に伴い耐凍害性も向上している。フライアッシュを 40% 置換すると圧縮上効果が得られないが耐凍害性では材齢 28 日さえ取れば十分な凍結抵抗性を得ることが出来る。

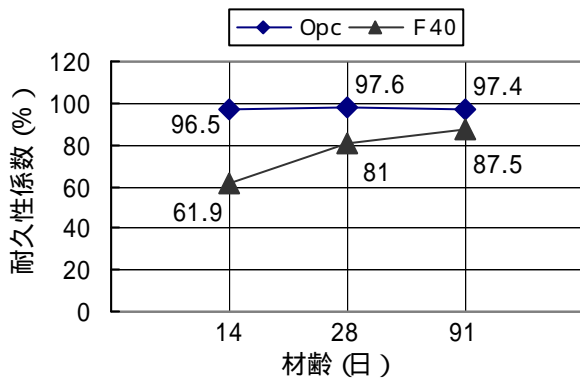


図 4.2.3 フライアッシュ40%の各材齢での耐久性係数

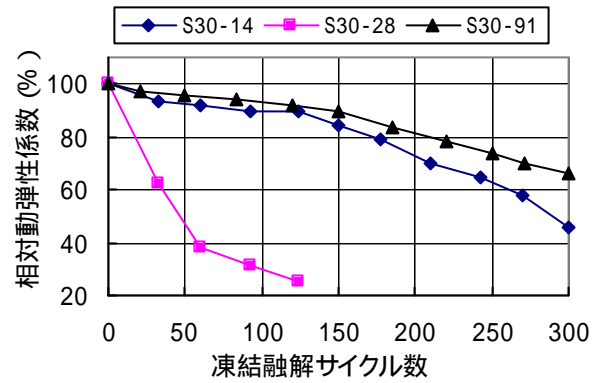


図 4.3.2 シリカフーム30%の各材齢での相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

(3)標準養生材齢とシリカフームコンクリート諸性状

a) 圧縮強度

水中標準養生材齢がシリカフームコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を試験した結果を図 4.3.1 に示した。

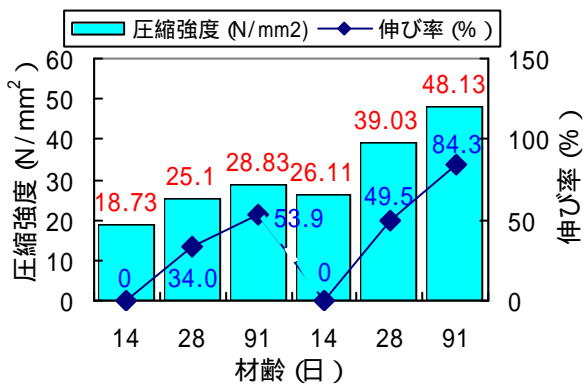


図 4.3.1 シリカフーム30%の材齢と圧縮強度の関係

図 4.3.1 から見ると、シリカフームを30%置換したコンクリートの圧縮強度は初期強度から高い値を示し、またその伸び率も高いことが分かる。つまり、S30-14の圧縮強度に対する伸び率はS30-28では49.5%、S30-91では84.3%である。原因としては第三章でのシリカフームで述べたので省略する。

b) 耐凍害性

シリカフームを混和材として置換したコンクリートの水中標準養生材齢がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を試験した結果を図 4.3.2, 4.3.5 に示した。

図 4.3.2 を見ると、強度が高いにもかかわらず非常に低い耐凍害性を示していた。材齢28日での結果を見るとNon AEコンクリートのように凍結融解サイクル数30で既に相対動弾性係数が60%を下回っていた。他の材齢14日と91日では材齢28日のように速くは低下してないが最終的には60%を下回る、或いは60%付近まで低下していた。

原因としては第三章で述べたシリカフームを用いたコンクリートの緻密さにあると考える。また、S30の硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数を測って見た。その結果を図 4.3.3 と 4.3.4 に示した。図から見て分かるように供試体に

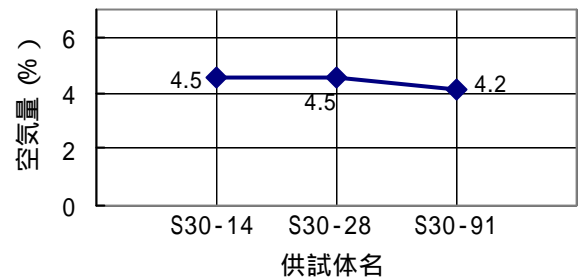


図 4.3.3 硬化コンクリートの空気量

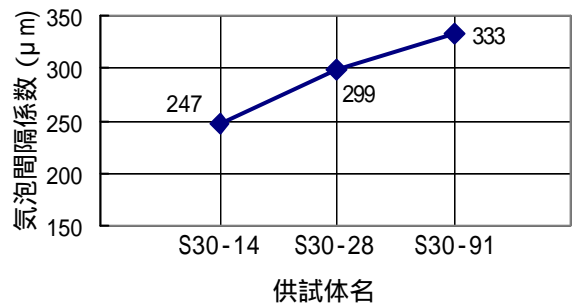


図 4.3.4 硬化コンクリートの気泡間隔係数

空気量は入っていたがS30-28とS30-91の気泡間隔係数が大きいことが分かる。第三章でも述べたように耐凍害性に有効な気泡間隔係数は250μm以下である⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。つまり、本研究でシリカフーム30%の場合の気泡間隔係数が大きいのが耐凍害性に劣った原因の一つだと考える。このように結果が出たのは表 4.1 でも分かるように普通コンクリートと同様な空気量を得るために大量なAE助剤を使用したゆえに空気量は出たが大きい空気泡ばかり出たので気泡間隔係数が大きくなったと考える。もし、高性能AE剤などを使用して空気量を大きくし、気泡間隔係数を充分小さくすれば耐凍害性が得られると考える。従って、施工時の注意が必要である。材齢14日では材齢が短いと毛細管空隙の緻密さが材齢28日より低かった事と気泡間隔係数が小さかったため比較的よい結果を示したと考える。材齢91日ではコンクリートの毛細管空隙が緻密になっても強度が余り高く、コンクリートの劣化に抵抗があったと考える。でもこれも最終的に凍結抵抗性が劣っていることが確認できた。

図 4.3.5 の耐久性係数の関係から見ると、シリカフェュームを 30%置換したコンクリートの耐凍害性が非常に劣っていることが分かる。つまり、S30 28 での耐久性係数は 7%で、S30 91 では 66.1%、S30 14 では 52%を示していた。

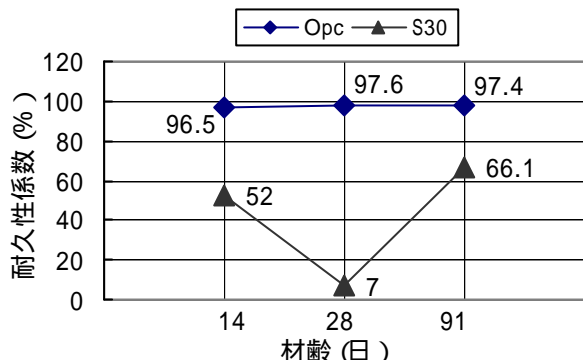


図 4.3.5 シリカフェューム30%の各材齢での耐久性係

5. 連結養生がコンクリートの諸性状に及ぼす影響

3章と4章では水中養生のみの影響に関して試験を行ったが材齢 91 日でも耐凍害性が劣っているものが在った。従って、養生方法を変えることによってコンクリート内部の自由水等の変化がコンクリートの諸性状にどのような影響があるかを明らかにするために第 5章では水中養生と空中養生を併用した連結養生が混和材を大量置換したコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響に関して実験を行い検討した。試験の配合及びスランブ、空気量の結果を表 5.1 に示した。

(1) 連結養生と高炉スラグ微粉末コンクリートの諸性状

a) 圧縮強度

高炉スラグ微粉末をセメントの代わりに大量置換したコンクリートの連結養生が圧縮強度に及ぼす影響に関して試験した結果を図 5.1.1 に示した。

図 5.1.1 を見ると高炉スラグ微粉末 70%の場合は空中養生をすることで強度が低下していることが分かる。その低下の程度を見ると空中養生が長くなるほど大きく、伸び率から見るとB70-2107 では 2.9%、B70-1414 では 3.3%、

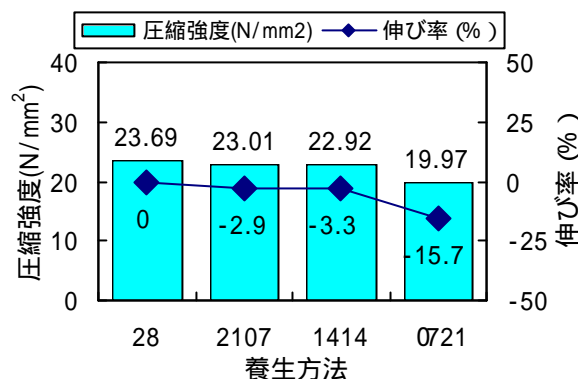


図 5.1.1 高炉スラグ微粉末70%の連結養生と圧縮強度

B70-0721 では 15.7%を示していた。このことから高炉スラグ微粉末を大量に置換した場合には連結養生により強度が低下して行くことが分かる。原因としては空中養生を行うことによってコンクリート内部の自由水が蒸発して行き、セメントの水和反応を妨げてからと考えられる。

b) 耐凍害性

高炉スラグ微粉末をセメントの代わりに置換したコンクリートの連結養生が耐凍害性に及ぼす影響を試験した結果を図 5.1.2 と 5.1.3 に示した。

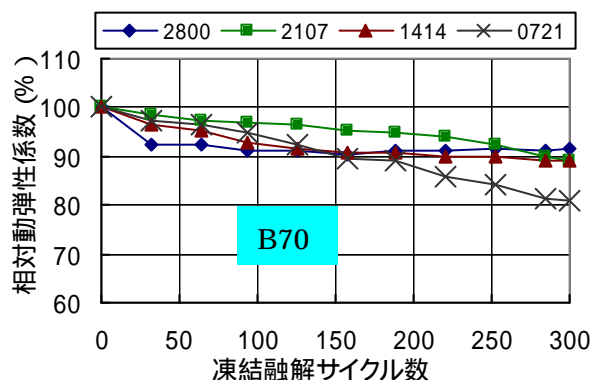


図 5.1.2 連結養生をした高炉スラグ微粉末コンクリートの相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

図 5.1.2 は高炉スラグ微粉末を70%置換したもので、図から見ると分かるように高炉スラグ微粉末を70%置換した場

表 5.1 連結養生を行った各混和材を用いたコンクリートの配合

供試体名	水セメント比	細骨材率 s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位混和材量 (kg/m ³)	単位細骨材量 (kg/m ³)	単位粗骨材量 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	AE助剤 (cc/mm ³)	AE減水剤 (cc/mm ³)	コンクリート単位容積質量(t/m ³)
B70-0721	0.55	47	177	97	225	791	940	13	6	15000	4000	2
B70-1414												
B70-2107												
B70-28												
F40-0721	0.55	46	176	192	128	748	942	14	5.3	16346	2212	2.16
F40-1414												
F40-2107												
F40-28												
S30-0721	0.55	46	176	224	96	761	958	12	5	12500	25625	2.24
S30-1414												
S30-2107												
S30-28												

合はサイクル数の進むに伴って四つとも低下して行くことがわかる。B70-28 は最初の30 サイクル数まで急激に低下し、その後からは低下する傾向が見られずむしろ若干の増加が見られた。B70-2107、1414、0721 は最初から急激な低下が見られず緩やかに低下し、最終的には B70-28 を下回って行く。その程度は空中養生時間が長いほど大きく、B70-0721 は80%まで落ちていた。

図5.1.3での耐久性係数を見るとB70-28では91.5%、B70-2107とB70-1414では89%、B70-0721では80.7%を示していた。空中養生時間が長いほど耐凍害性が低下していた。

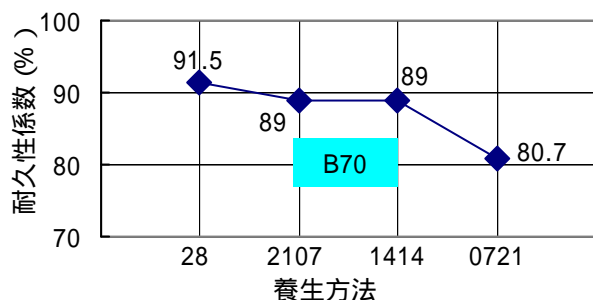


図5.1.3 高炉スラグ微粉末70%コンクリートの連結養生による耐久性係数

(2) 連結養生とフライアッシュコンクリートの諸性状

a) 圧縮強度

フライアッシュをセメントの代わりに置換したコンクリートの連結養生がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を試験した結果を図5.2.1に示した。

図5.2.1から見ると、フライアッシュを40%置換したコンクリートは連結養生を行ったほうが水中養生のみ行ったものより圧縮強度が増加していることが分かる。F40-28に対する伸び率を見るとF40-2107では5.8%、F40-1414では16.7%、F40-0721では24.9%を示していた。既往の研究によると普通コンクリートの場合水中養生から空中養生を行うことにより強度が一時増加する現象があると報告されている。本研究での結果も乾燥による一時強度増加と考える。

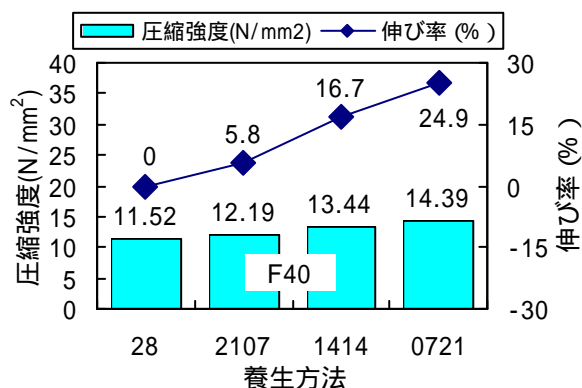


図5.2.1 フライアッシュコンクリートの連結養生と圧縮強度との関係

b) 耐凍害性

フライアッシュをセメントの代わりに置換したコンクリートの連結養生が耐凍害性に及ぼす影響を試験した結果を図5.2.2と5.2.3に示した。

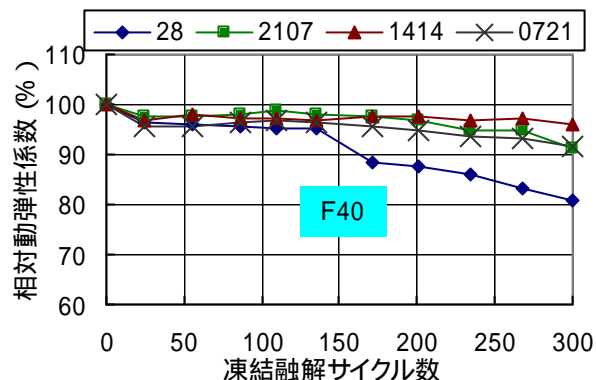


図5.2.2 連結養生を行ったフライアッシュコンクリートの相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

図5.2.2はフライアッシュを40%置換したもので、図から見ると四つともサイクル数に伴って低下が見られた。F40-28の場合では130 サイクル付近で大きな低下現象がみられ300 サイクル数では80%まで低下していた。連結養生を行ったコンクリートは最初から緩やかな低下現象を示して300 サイクル数では90%以上の相対動弾性係数を示していた。F40の場合では連結養生を行うことによって耐凍害性が増加することが明らかである。

また、図5.2.3の耐久性係数関係を見ると、F40-28では81%、F40-2107では91.2%、F40-1414では95.9%、F40-0721では91.4%で連結養生を行ったコンクリートの耐凍害性が良好なことが分かる。

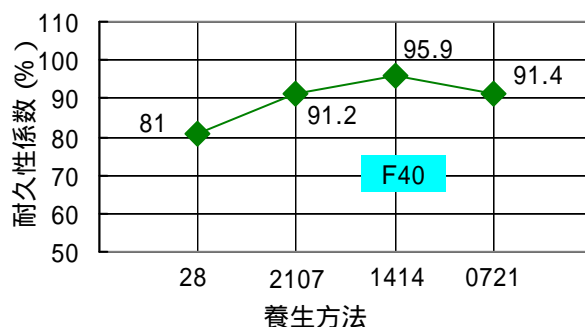


図5.2.3 フライアッシュ40%コンクリートの連結養生による耐久性係数

原因としてはコンクリートを空中養生させることによりコンクリート中の自由水が蒸発して行き、その蒸発量も空中養生期間が長いほど多い。その関係は図5.2.4の連結養生条件と自由水減水率との関係を見ると明らかである。表5.1の配合表を見るとコンクリート中の水の百分率は7.8%であり、空中養生をすることによってコンクリート中の自由水の12%~45%が蒸発していくことが分かる。F40の場合は自由水

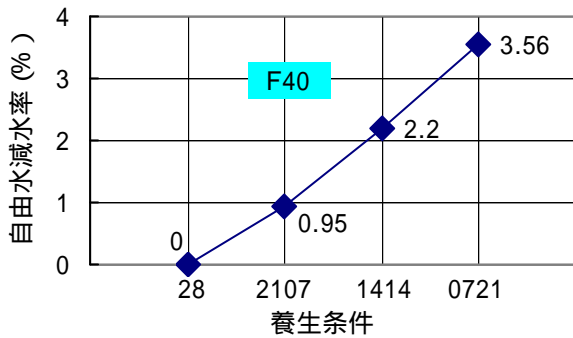


図 5.2.4 フライアッシュ 40%コンクリートの連結養生による自由水源水率

減水率が高いことは強度の面でも述べたように材齢 28 日までフライアッシュのポズラン反応が十分ではないのでコンクリート中の自由水量が多いことから蒸発した自由水も多いと考える。それが凍結融解を受けると同時に急激に吸水され、融解時にセメントの水和反応とフライアッシュのポズラン反応を活発にさせ、それによる圧縮強度の増加が相対動弾性係数の低下に抵抗したと考える。F40 の場合は自由水減水率大きい、従って自由水が蒸発する時コンクリート内部から外へ形成された毛細管空隙も大きく、凍結時に吸収される水も多いがそれでも完全には吸収されない^①。その吸収されてない空になっている毛細管空隙が凍結融解時に生じる膨張による静水圧を緩和されるのである。また、なくなった分だけ凍結し得る水も少ないので空中養生をさせることによって耐凍害性が大きくなる。その関係を図 5.2.5 に示した。図から見られるようにフライアッシュを 40%置換したコンクリートは連結養生を行うことによってコンクリート内部の自由水が蒸発していくがそのことにより耐凍害性が増加して行くことが明らかである。

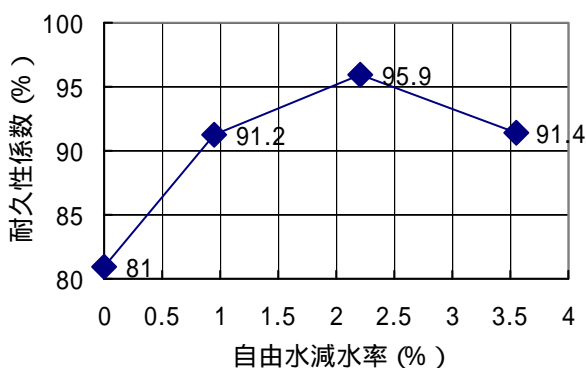


図 5.2.5 フライアッシュ40%のコンクリートの自由水減水率と耐久性係数との関係

(3) 連結養生とシリカフュームコンクリートの諸性状

a) 圧縮強度

シリカフュームをセメントの代わりに置換したコンクリートの連結養生がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を試験した結果を図 5.3.1 に示した。

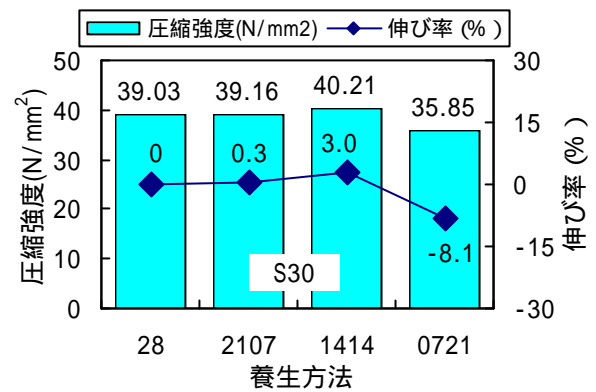


図 5.3.1 シリカフューム30%コンクリートの連結養生と圧縮強度との関係

図 5.3.1 から見ると分かるように、シリカフュームを 30%置換したコンクリートに連結養生をさせることによる圧縮強度の増加は一部しか見られなかった。つまり、空中養生が一番長い S30-0721 が伸び率を 8.1%を示し、ほかのものは強度の増加を示していたもののその増加がわずかであり、S30-2107 で 0.3%、S30-1414 で 3.0%を示していた。

b) 耐凍害性

シリカフュームをセメントの代わりに置換したコンクリートの連結養生が耐凍害性に及ぼす影響を試験した結果を図 5.3.2 と 5.3.3 に示した。

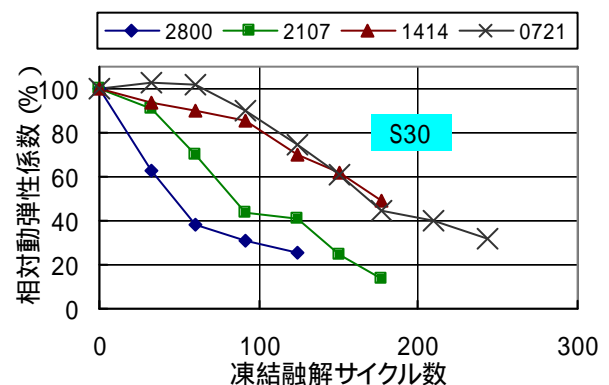


図 5.3.2 シリカフューム30%コンクリートの連結養生による相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

図 5.3.2 から見ると、シリカフュームを 30%置換したものは圧縮強度が大きいにもかかわらず水中養生のみ行ったものでも連結養生を行ったものでも耐凍害性に非常に劣っていることが分かる。S30-28 はわずか 40 サイクル前後で既に相対動弾性係数が 60%を下回っていて non AE コンクリート^①と同様な結果を示していた。また、S30-2107 は 70 サイクル前後で、S30-1414 では 150 サイクル前後で、S30-0721 では最初では相対動弾性係数が 100%以上になる増加現象がみられたが 70 サイクル前後で急激に低下しはじめ 150 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回っていた。

図 5.3.3 での耐久性係数の関係を見ると、S30-28 で 7%、S30-2107 で 14%、S30-1414 で 31%、S30-0721 で 30%を

示し、非常に耐凍害性に劣っていることが分かる。

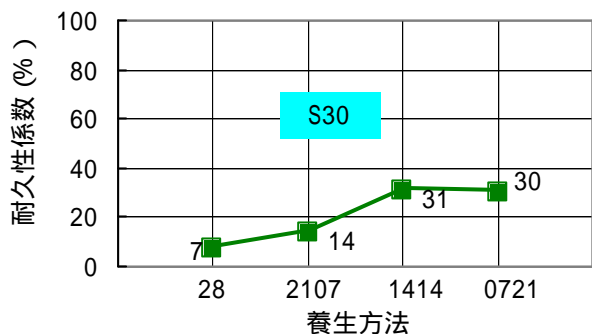


図5.3.3 連結養生によるシリカフューム30%の耐久性係数

原因としてはやはり第3章の3節でのシリカフュームの影響で述べたようにシリカフュームの超微粒子によるセメント硬化体の緻密さにあると考える。また、S30の硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数を測って見るとの空気量は4.5%で気泡間隔係数は299μmであった。凍結融解に有効な気泡間隔係数は250μm以下である。本試験での気泡間隔係数が大きいのが耐凍害性に劣っているもう一つの重要な原因であると考えられる。本研究でシリカフュームを置換したコンクリートの気泡間隔係数が大きくなった原因としては練り混ぜ時のAE助剤の量にあると考える。空気量を得るために余り大量のAE助剤を入れたゆえに空気量は出したけど大きい気泡ばかり出来たので気泡間隔係数が大きくなったと考える。しかし、連結養生を行うことにより耐凍害性が水中養生より向上していることが分かる。それは図5.3.4のように連結養生をすることによる自由水の減少にあると考える。つまり、自由水の減少によるコンクリート内部の空になった空隙が吸水だけでは完全に飽和されないがその飽和されてない部分が凍結時の静水圧を緩和させるので耐凍害性が少し向上したと考える。図5.3.5は自由水減水率と耐久性係数との関係を示している。図から見られるように自由水の減少により耐凍害性が増加していることが分かる。

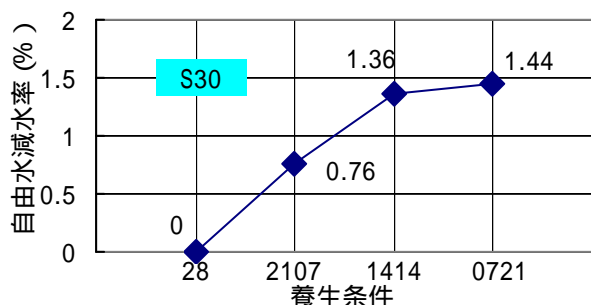


図5.3.4 S30の養生条件と自由水減水率との関係

表5.2 シリカフューム30%コンクリートの配合

供試体名	水セメント比	細骨材率 s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位混和材量 (kg/m ³)	単位細骨材量 (kg/m ³)	単位粗骨材量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	AE助剤 (cc/mm ³)	AE減水剤 (cc/mm ³)	コンクリート単位容積質量 (t/m ³)
S30-2800	0.55	46	176	224	96	761	958	12	5.4	8824	19400	2.22
S30-2107												
S30-1414												
S30-0721												

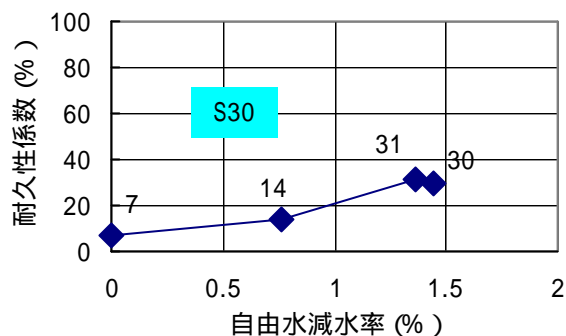


図5.3.5 シリカフューム30%コンクリートの連結養生による自由水減水率と耐久性係数との関係

(4) 連結養生がシリカフュームコンクリートの諸性状に及ぼす影響 (再試験)

シリカフュームの大量置換率の影響を試験した結果耐凍害性に非常に劣っていることが判明された。その原因の一つとして AE 助剤の大量使用による硬化コンクリートの空隙分布の不良にあると考えて連結養生がシリカフュームコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響について再試験を行った。再試験での配合及び空気量、スランプを表5.2に示した。表5.1と表5.2から分かるように再試験ではAE助剤を少なめに調節し、気泡間隔係数の改善を図った。

耐凍害性

シリカフュームをセメントの代わりに置換したコンクリートの連結養生が耐凍害性に及ぼす影響を試験した結果を図5.4.1と5.4.2に示した。

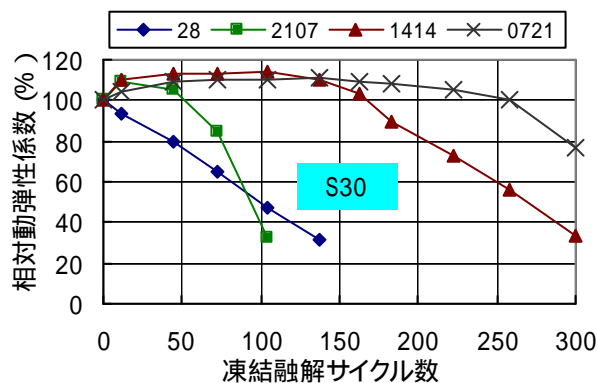


図5.4.1 連結養生によるシリカフューム30%コンクリートの相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

図5.4.1から見ると、シリカフュームを30%置換したものは前回の試験結果と比べて見ると少なくとも改善されている

ことがわかる。水中養生のみ行ったものはサイクル数の初期段階で既に60%まで低下していくが、連結養生を行ったものは空中養生を長くするほど耐凍害性に優れていることが分かる。図5.4.2での耐久性係数から見るとS30-28では16.2%、S30-2107では17.4%、S30-1414では50%、S30-0721では76.5%を示し、前回に試験結果を比べると耐凍害性が向上されていることが分かる。

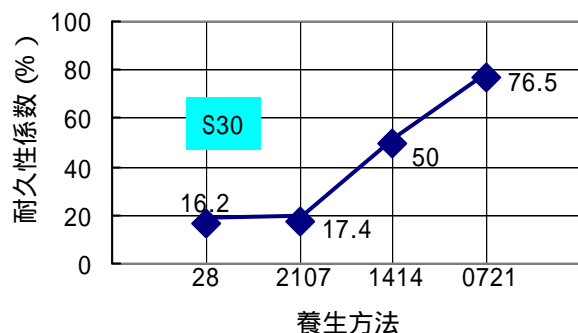


図5.4.2 シリカフューム30%の連結養生での耐久性係数

再試験のほうが前回の試験結果より良好な傾向を示した原因としては再試験でのAE助剤の調節による細孔分布の改善にあると考える。また、空中養生による自由水減水率が図5.4.3から見ると分かるように最大で前回は1.44%に比べ、再試験では3.34%であり、自由水がかなり蒸発していることが分かる。そのことにより凍結によって生じる静水圧を緩和させる空になった毛細管空隙が多いと考える。

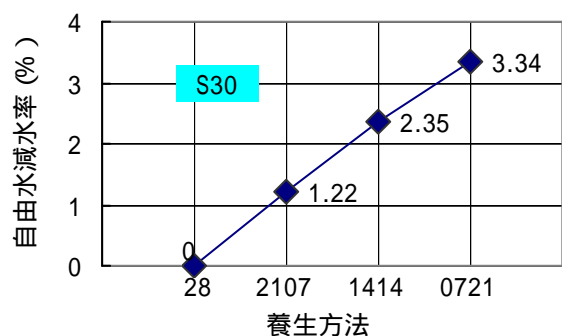


図5.4.3 シリカフューム30%コンクリートの連結養生による自由水減水率

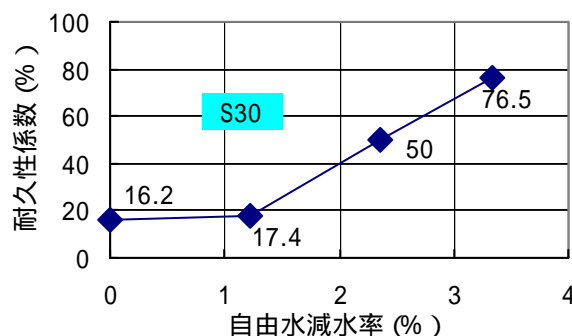


図5.4.4 連結養生による自由水減水率と耐久性係数との関係

図5.4.4は自由水減水率と耐久性係数との関係を示している。図から分かるように自由水減水率の増加に伴い耐久性係数が増加することがわかる。

6. 結論

実験から得られた結論は次の様である。

(1) ASTM C 666 A法による試験結果からみると

ASTM C 666 A法に基づいて行った試験結果を見ると、高炉スラグ微粉末70%では耐凍害係数が75.8%を示して善い耐凍害性を示したが、フライアッシュ40%とシリカフューム30%は耐凍害性に非常に劣っていることが明らかである。

(2) 標準養生の影響を試験した結果から見ると

高炉スラグ微粉末70%では材齢14日からは耐凍害性の面で良好な傾向を示した。ゆえに、高炉スラグ微粉末を大量70%置換した場合は少なくとも14日間充分な養生をした後凍害を受けさせるのが善いと考える。

フライアッシュを40%置換した場合、圧縮強度の面では材齢28日まで強度初減が遅くかなり低い値を示し、91日では強度は得られるが普通コンクリートの比べると弱かった。耐凍害性の面でも材齢14日ではかなり低く、材齢28日ではある程度得られるが比較的弱かった。材齢91日では充分な耐凍害性が得られた。従って、ダムなどの強度要求がない構造物は温度ひび割れを避けるためにフライアッシュを40%まで置換しても、28日以上充分な養生をすれば耐凍害性が得られると考える。

シリカフュームを30%置換した場合は材齢14日から91日に渡り非常に高い強度を示していたし、その伸び率も高く順調であった。しかし、強度が高いにもかかわらず耐凍害性が非常に低い。それはシリカフュームを置換したコンクリートの毛細管空隙の細かさにも充分原因があると考えられる。また、本研究で作成した供試体の気泡間隔係数が大きいのも原因であると考えられる。本研究でシリカフュームコンクリートを作製する際大量のAE助剤を入れたのが故に空気量は出たが大きい気泡ばかりで、気泡間隔係数が大きくなったと考えるので、凍害を受ける構造物にシリカフュームを大量に使うならば空気量を多くし高性能AE剤などを使用して気泡間隔係数を充分小さくすれば耐凍害性が得られると考える。

(3) 連結養生の影響を試験した結果からみると

高炉スラグ微粉末を70%置換したコンクリートでは連結養生による強度増加効果が見られなかった同時に耐凍害性の向上効果も得られなかった。

フライアッシュ40%の場合強度の増加が得られても全体的強度が低く、28日の材齢では強度が期待できないことが

明らかである。耐凍害性から見ると、連結養生をすることによって耐凍害性が大いに改善されることが明らかである。従って、実際の構造物でフライアッシュを大量に使用した場合、ある一定時間水中養生をした後凍害を受けるまで空中養生をさせた方が耐凍害性を向上させる。

シリカフューム30%を置換した場合、水中養生をしたものは早いサイクルで相対動弾性係数が60%を下回り耐凍害性が得られなかった。しかし、空中養生をすることによる耐凍害性の向上が見られた。また、配合の調節により耐凍害性が充分改善されていた。従って、実際の凍害を受ける構造物にシリカフュームの大量置換が設ける時配合上空気量を大きくし、高性能AE剤などの使用により硬化コンクリートの気泡組織を改善させることと凍害を受けるまでに充分な空中養生を行うことにより良好な耐凍害性が得られると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたって、本学構造材料研究室の小玉克巳教授、吉川弘道教授、栗原哲彦講師、斉藤秀夫技師、仲宗根茂技師に終始温かいご指導、ご助言を頂きました。ここに慎んで御礼申し上げます。また、硬化コンクリートの細孔分布を測るにあたって株式会社八洋コンサルタントの浅野研一所長、真間隆弥さんの多大なご協力を頂き、本研究を進めることができました。心から御礼申し上げます。

そして、平成14年度の凍結融解班の塚谷宣武、池田健司及び構造材料研究室のメンバーに深く感謝致します。

参考文献

- (1) 永倉 正 :コンクリートの凍結抵抗性に関する研究
- (2) 小林一輔 :コンクリート工学 第四版 p21-22

- (3) 吉越盛次 :混和材としてのフライアッシュに関する研究, 土木学会論文集, 第31号, 1955年11月
- (4) 長滝, 米倉, 横田 :高温養生したコンクリートの力学性状におよぼす活性シリカ効果, セメント, コンクリート No. 387, 1978年5月
- (5) 土木学会 :コンクリート標準示方書 規準編, 平成14年度版
- (6) 土木学会 :コンクリート標準示方書 規準編, 平成8年度版
- (7) 土木・建築技術者のための「最新 コンクリート材料・工法ハンドブック p56~63
- (8) 「コンクリートの実像 - その性能と性状」, 理工図書
- (9) Powers, T. C. : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Journal of ACI Vol. 16, NO. 4, pp. 245~272, 1945.
- (10) Powers, T. C. : "Void Spacing as a Basis for producing Air-entrained Concrete of Concrete", ACI Journal, Feb. 1945, Proc. Vol. 41 p. 245.
- (11) 後藤幸正他 :ネルビのコンクリートの特性, 技報堂 p. 359
- (12) Cordon, W. A., D. Merrill: Requirements for Freeze-and-Thawing Durability for Concrete, Proc. ASTM, Vol. 63, 1963, pp. 1026~1036
- (13) 小林一輔, 和泉意登志, 出頭圭三, 睦好宏史 :コンクリート辞典[図解], p7~63

EFFECTS OF MIXING METHOD ON FREEZE-THAW RESISTANCE OF CONCRETE CONTAINING MINERAL ADMIXTURES

SONGZHE PIAO

Blast-furnace slag, fly ash and silica fume were common mineral admixtures of concrete. The aim of this study was to determine the effects of these admixtures on the property and freeze-thaw resistance of concrete.

As results, a good freeze-thaw resistance was confirmed by changing age and curing condition with blast-furnace slag and fly ash, conversely, in the case of silica fume, the freeze-thaw resistance was inferior.