

有機短繊維と高炉スラグ微粉末がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響

井上真澄^{*1} 森将^{*2} 岡田包儀^{*3}

^{*1} 北見工業大学 工学部社会環境工学科(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

^{*2} 北見工業大学 大学院工学研究科(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

^{*3} 北見工業大学 技術部(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

要旨：有機短繊維と高炉スラグ微粉末がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、有機短繊維と高炉スラグ微粉末をそれぞれ単独および併用したコンクリート供試体を作製し、その凍結融解抵抗性について実験的検討を行った。その結果、淡水による凍結融解作用下では、繊維混入率および高炉スラグ微粉末の有無がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響は小さく、極めて良好な耐凍害性を示した。一方、海水による作用下では、高炉スラグ微粉末を混入することで耐久性指数が大きくなる傾向を示した。また、有機短繊維と高炉スラグ微粉末を併用した場合にはスケールが抑制される傾向を示すことがわかった。

キーワード：有機短繊維、高炉スラグ微粉末、耐凍害性、耐久性指数、質量減少率、スケール

1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物は、凍害単独および凍害と塩害との複合劣化の被害を受けやすい非常に厳しい環境下に曝されている。そのためコンクリート自体には高い耐久性が求められる。

コンクリートの品質を向上させる手段の1つとして、短繊維の利用が挙げられる。最近では、従来主流であった鋼繊維に比べて密度が小さく軽量でコンクリートに混入した際に流動性への影響が少ない、施工性に優れた有機短繊維が注目されており、これを混入したコンクリートに関する研究が数多く進められている¹⁻⁵⁾。例えば、各種の有機短繊維を少量混入(0.06~0.20 %程度)することによりコンクリートの剥落防止効果が得られること¹⁾や、コンクリートの収縮ひび割れの抑制効果があること²⁾が明らかにされている。しかし、有機短繊維がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響については報告例^{3,6)}が少なく、未だ不明な点が多い。

一方、コンクリートは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業廃棄物を混和材として使用し、廃棄物の削減に以前から大きく貢献してきたが、資源の保全、エネルギーとCO₂の削減や廃棄物の削減が必要な時代を迎え、産業副産物からなる混和材を積極利用していくことが一層強く求められている。既報告では、比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を使用した場合にコンクリートの耐凍害性に対して良好な結果^{7,8)}が報告されており、寒冷地環境下におけるコンクリートへの利用拡大が期待される。

そこで本研究では、有機短繊維と高炉スラグ微粉末が

コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、有機短繊維と高炉スラグ微粉末をそれぞれ単独および併用したコンクリート供試体を作製し、その凍結融解抵抗性について実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

有機短繊維は、ビニロン繊維(繊維長：12mm、径：40 μ m、密度：1.30g/cm³、標準混入率：0.075vol%)を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm³、記号：C)を使用し、混和材として高炉スラグ微粉末 6,000(密度：2.89g/cm³、比表面積：6,200 cm²/g、記号：BS)を使用した。粗骨材には、北見産砕石(表乾密度：2.88g/cm³、吸水率：1.30 %、F.M.：6.36、記号：G)、細骨材は幕別町産陸砂(表乾密度：2.61g/cm³、吸水率：1.69 %、F.M.：2.54、記号：S)を使用した。混和剤には高性能減水剤(主成分：スルホン化メラミン縮合物、記号：Ad₁)、AE 剤(主成分：天然樹脂酸塩、記号：Ad₂)を使用した。

2.2 コンクリートの配合

Table 1 にコンクリートの配合を示す。配合条件は、繊維および混和材以外の因子がコンクリートの性質に及ぼす影響をできるだけ小さくするため、水結合材比 55 %、細骨材率 41.1 %、単位水量を 173kg/m³の一定とし、繊維は外割で混入(体積比)した。繊維の混入率は、コンクリートの剥落防止や収縮ひび割れ抑制を目的として使用する場合の混入率を想定し、0.000 %、0.075 %、0.150 %、0.200 %、0.350 %の5水準とした。また、

Table 1 Mix proportions of concrete

Symbol	Fiber content (%)	W/(C+BS) (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)					Ad ₁ (C×%)	Ad ₂ (C×%)	Slump (cm)	Air (%)	Compressive strength (N/mm ²)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)
				W	C	BS	S	G						
N-0.000	0.000	55	41.1	173	315	-	732	1,158	-	0.025	6.0	5.2	38.6	31.8
N-0.075	0.075								0.4	0.030	6.5	4.8	37.2	29.5
N-0.150	0.150								0.7	0.025	6.5	4.6	36.8	31.6
N-0.200	0.200								1.0	0.025	6.0	5.2	44.2	32.7
N-0.350	0.350								2.3	0.053	7.0	5.0	43.0	31.2
BS-0.000	0.000				126	189	721	1,140	-	0.038	7.5	4.8	32.8	28.8
BS-0.075	0.075								0.7	0.035	6.5	5.0	35.8	30.4
BS-0.200	0.200								1.2	0.040	9.0	4.7	44.1	33.2
BS-0.350	0.350								2.0	0.065	12.5	4.5	43.8	29.5

高炉スラグ微粉末の置換率はセメントの内割で 60 % とした。目標スランプ値は 8.0 ± 2.0 cm、目標空気量は 5.0 ± 0.5 % とし、配合試験から混和剤の添加量を決定した。なお、試験の結果、配合 BS-0.350 において空気量は目標値を満たしたが、スランプは目標値より若干大きくなった。しかし、繊維の分散性や流動性は良好であり耐凍害性への影響は小さいと判断し供試体を作製した。

2.3 練混ぜおよび供試体作製方法

練混ぜにはパン型強制練ミキサーを用いた。コンクリートの練混ぜ方法は、細骨材、粗骨材を加えて 30 秒間の空練りの後、セメント、水、混和剤を加えて 90 秒間練混ぜた。さらに、繊維を混入する配合の場合は、その後繊維を混入して 120 秒間練混ぜた。供試体の作製は打設後、恒湿恒温室 (20 ± 1 °C、 85 ± 5 % RH) で 1 日保管した。その後、脱型を行い、材齢 28 日まで標準水中養生 (20 ± 1 °C) を行った。

2.4 試験項目および試験方法

(1) フレッシュ試験

スランプは、JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」、空気量は JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法-空気室圧力方法」に準拠して測定した。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に、静弾性係数は JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して行った。各試験とも供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を用いた。

(3) 凍結融解試験

JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」における水中凍結融解試験方法(A 法)に準拠して行った。 $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱供試体を用い、材齢 28 日まで水中養生を行った後、淡水および海水を試験水として凍結融解試験を開始した。試験開始前および凍結融解の繰返し 36 サイクル以内に 1 回の間隔で、融解行程終了後に供試体の質量およびたわみ振動による一次共鳴振動数の

測定を行った。

(4) 硬化コンクリートの気泡間隔係数測定

硬化コンクリートの気泡組織は、 $10 \times 10 \times 40$ cm 供試体を用い、打設面に対して垂直に 2 cm の厚さに切断し測定面を研磨した後、ASTM C 457 に準拠してリニアトラバース法により測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

Fig. 1 に繊維混入率と圧縮強度の関係を、Fig. 2 に繊維混入率と静弾性係数の関係を示す。材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度は、繊維混入率の増加に伴い、増加傾向にあるものの、その差は大きいものではない。また、高炉スラグ微粉末混入の影響は小さいものであり、普通セメント使用時と同程度の強度発現が確認された。一方、静弾性係数は、繊維混入率および高炉スラグ微粉末の影響はほとんどなく、同程度の値を示した。

3.2 相対動弾性係数

Fig. 3 および Fig. 4 に凍結融解試験結果として凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。試験水として淡水を用いた場合は、すべてのケースにおいて凍結融解 300 サイクル終了時の相対動弾性係数が 90 % 以上を示しており、繊維混入率および高炉スラグ微粉末置換の有無に関わらず、極めて良好な耐凍害性を示した。一方、試験水として海水を使用した場合、繊維混入率や高炉スラグ微粉末の有無によって相対動弾性係数に変化が観察され、淡水の場合に比較すると全体的に相対動弾性係数が低下する傾向にある。しかし、いずれの配合においても 80 % 以上の相対動弾性係数を示しており、耐凍害性は良好であると判断される。

Fig. 5 および Fig. 6 に繊維混入率と凍結融解 300 サイクル終了時の耐久性指数の関係を示す。淡水の場合では、高炉スラグ微粉末の混入の影響はほとんど観察されない。繊維混入率 0.350 % 時に耐久性指数の低下は見られるものの、その差は小さいものであり、繊維混入率

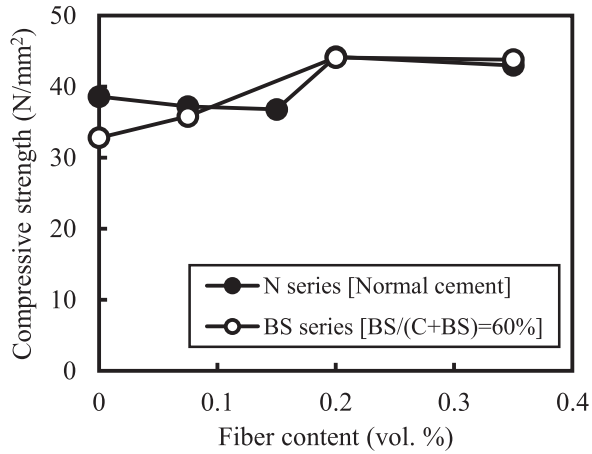


Fig. 1 Compressive strength (28 days)

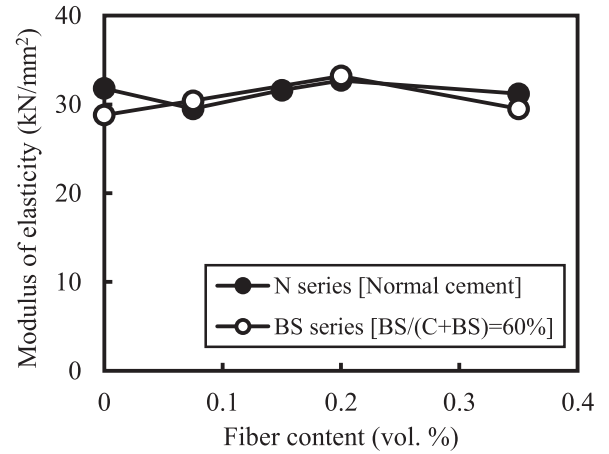


Fig. 2 Modulus of elasticity (28 days)

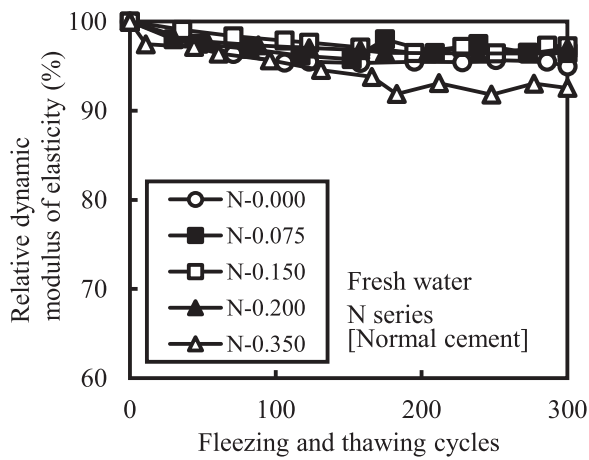


Fig. 3 Results of freezing and thawing test (Fresh water)

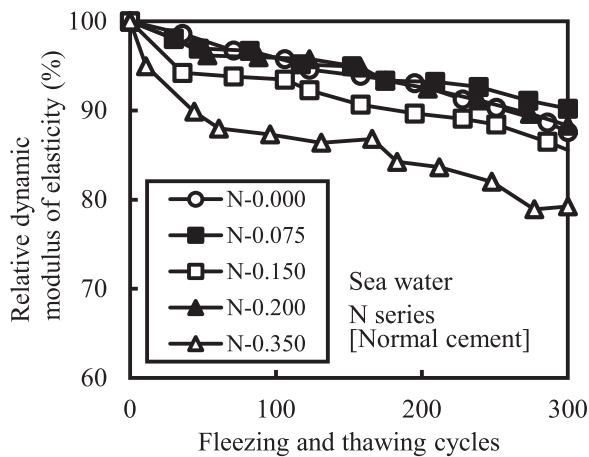
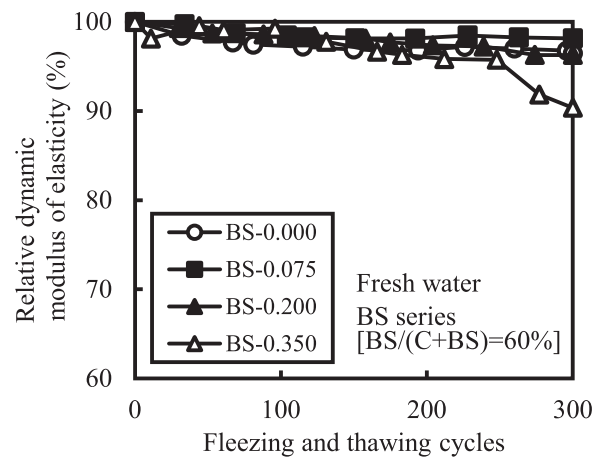
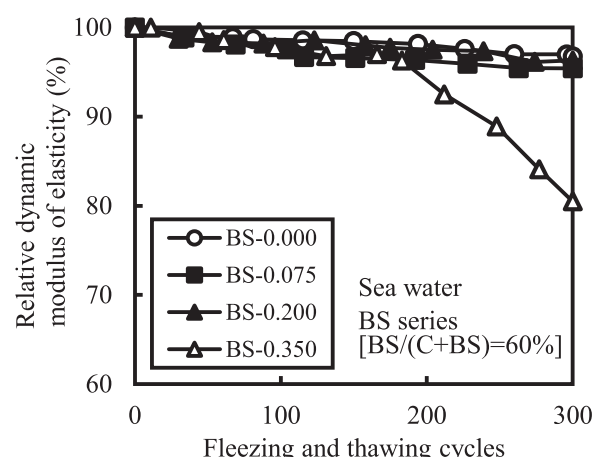


Fig. 4 Results of freezing and thawing test (Sea water)



が耐凍害性に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

海水の場合では、高炉スラグ微粉末の混入の有無で傾向が異なる。繊維混入率が 0.200 % 以下の範囲で同一繊維混入率の耐久性指数を比較すると、BS-0.000 が +9.2、BS-0.075 が +5.7、BS-0.200 が +8.0 高くなった。

このように海水作用下では、高炉スラグ微粉末を混入した方が普通ポルトランドセメントのみを用いた場合に比較して耐久性指数が増加する傾向を示しており、高炉スラグ微粉末による耐凍害性の向上が図られたと考えられる。既往研究⁷⁾によると、高炉スラグ微粉末の混入によ

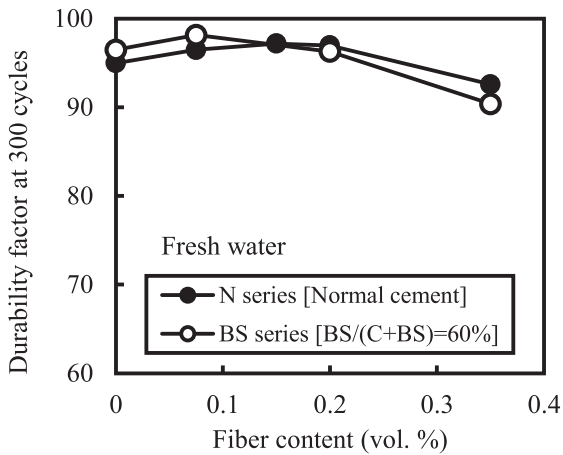


Fig. 5 Relationship between durability factor at 300 cycles and fiber content (Fresh water)

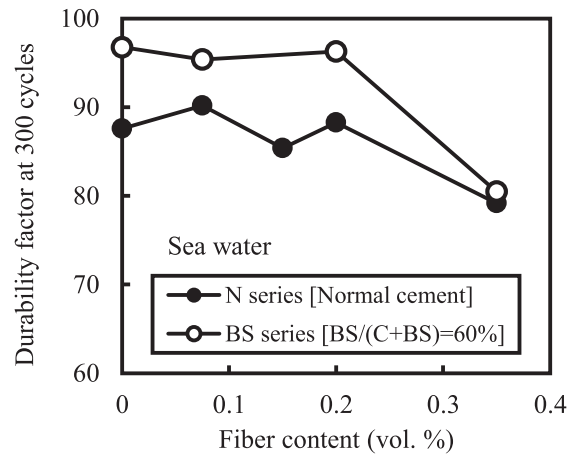


Fig. 6 Relationship between durability factor at 300 cycles and fiber content (Sea water)

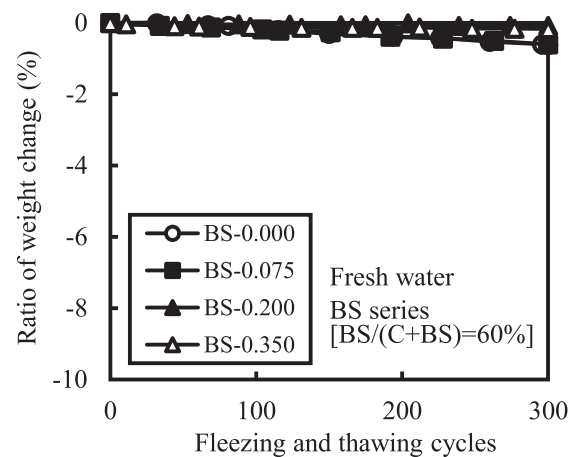
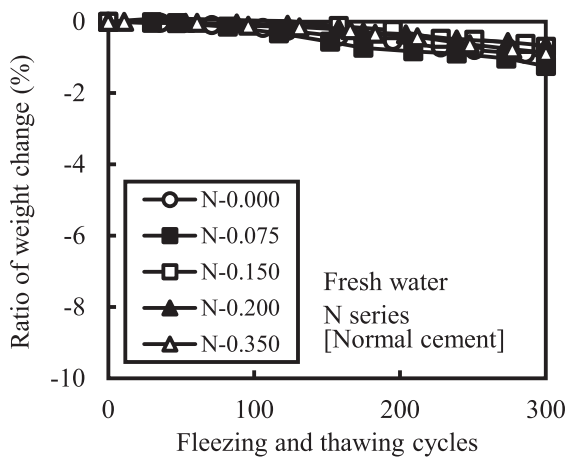


Fig. 7 Ratio of weight change (Fresh water)

りコンクリートの耐凍害性が向上し、その比表面積が大きいほどその効果が大きいことが報告されている。本実験では、比表面積 $6,200\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いており、高炉スラグ微粉末の混入によりコンクリート中の水和物の組織が緻密化したことで耐凍害性の向上につながったものと推察される。

なお、いずれのケースにおいても繊維混入率 0.350 % の場合において凍結融解 300 サイクル終了時点の耐久性指数が低下する傾向を示したことから、繊維混入率 0.200 % と 0.350 % の配合を対象に硬化コンクリートの気泡間隔係数の測定を行った。その結果、高炉スラグ微粉末無混入の N-0.200 は $201\mu\text{m}$ 、N-0.350 は $179\mu\text{m}$ 、高炉スラグ微粉末混入の BS-0.200 は $200\mu\text{m}$ 、BS-0.350 は $227\mu\text{m}$ であった。いずれのケースも一般にコンクリートの耐凍害性確保に必要とされる $200\sim 250\mu\text{m}$ 以下の範囲にあること、また配合間の気泡間隔係数の差異も小さいものであり、気泡間隔係数がコンクリートの耐凍害性低下に与えた影響は小さいものと考えられる。この点については、凍結融解作用下でのスケーリング性状との関連も考えられることから、次節にて詳述する。

3.3 質量減少率およびスケーリング性状

Fig. 7 および Fig. 8 に凍結融解サイクル数と質量減少率の関係を、Fig. 9 および Fig. 10 に繊維混入率と凍結融解 300 サイクル終了時の質量減少率の関係を示す。淡水を用いた場合、凍結融解 300 サイクル終了時の質量減少率は、繊維混入率に関わらずほぼ同程度であった。また、高炉スラグ微粉末を混入したケースの方が若干ではあるが質量減少率が小さくなる傾向を示した。

海水を用いた場合では、耐久性指数と同様で高炉スラグ微粉末混入の有無により傾向が異なる。高炉スラグ微粉末を混入したケースでは、繊維混入率の増加に伴い質量減少率が明確に低下する傾向を示した。また、外観観察からも繊維無混入のコンクリートに比較してスケーリングの程度は軽微であった。これは、繊維の架橋効果により表層部のスケーリングが抑制されたことと、さらに高炉スラグ微粉末と併用したことでセメント水和物の組織が緻密化し、繊維とセメントマトリックスとの付着性が向上したことに起因するものと推察される。一方、Fig. 6 に示す繊維混入率 0.350 % 時の耐久性指数は低下している。したがって、繊維の架橋効果等による影響に

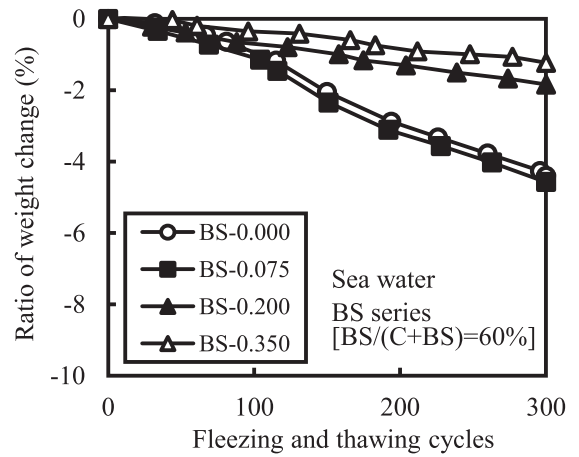
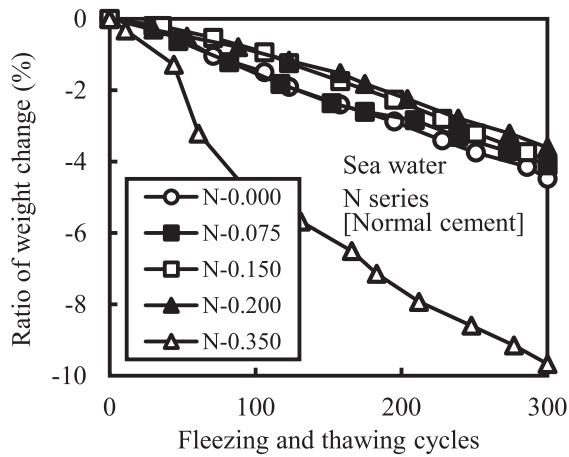


Fig. 8 Ratio of weight change (Sea water)

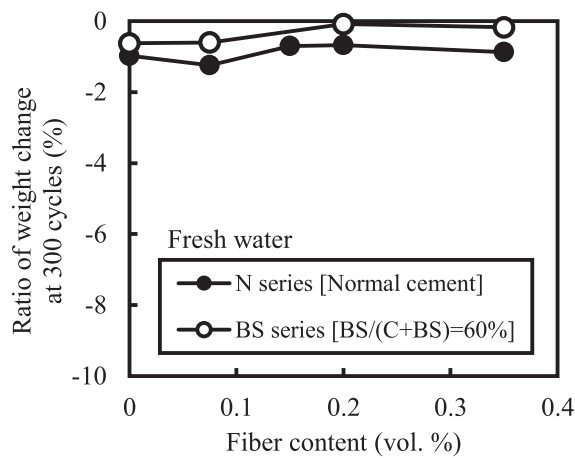


Fig. 9 Relationship between ratio of weight change at 300 cycles and fiber content (Fresh water)

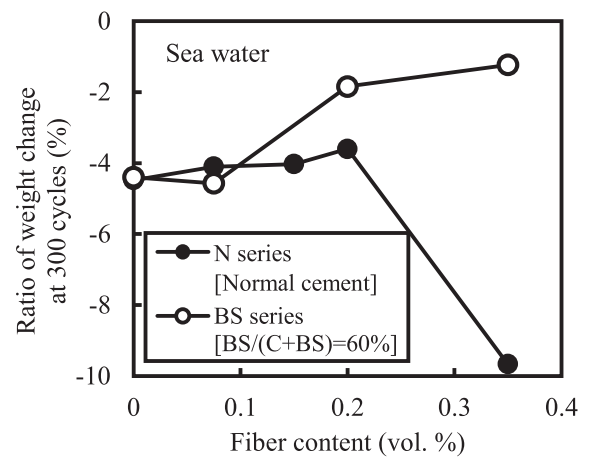


Fig. 10 Relationship between ratio of weight change at 300 cycles and fiber content (Sea water)

より外観上の変状は小さいものの、コンクリート表層部には微細なひび割れが発生しており組織の緩みが生じている可能性がある。

高炉スラグ微粉末無混入(N 配合)のケースでは、繊維混入率 0.200 % 以下の範囲では若干ではあるが質量減少率は低下するものの、高炉スラグ微粉末混入時に比べるとその変化は小さなものである。逆に繊維混入率 0.350 % では質量減少率が著しく大きな値を示した。この原因については現時点では定かでないが、繊維混入率 0.200 % と 0.350 % では、前述した硬化コンクリートの気泡間隔係数測定結果から気泡間隔係数に大きな差異はないことから気泡組織の影響によるものとは考えにくい。一方で、繊維混入率が多くなるとコンクリート中の空隙の連結性が増加し、海水による凍結融解作用下では塩化物イオンの拡散や透水性が増加したことによりスケリングの進行を助長し、相対動弾性係数の低下にも影響を与えたのではないかと考えている。今後、繊維混入率を増加させたケースについて、コンクリートの透水性や塩化物イオンの浸透性の両面から詳細な検討が必要となる。

4. まとめ

本研究では、有機短繊維と高炉スラグ微粉末がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、有機短繊維と高炉スラグ微粉末をそれぞれ単独および併用したコンクリート供試体を作製し、その凍結融解抵抗性について実験的検討を行った。本研究の範囲で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 試験水によりコンクリートの耐凍害性の傾向は異なる。試験水に淡水を用いた場合では、繊維混入率および高炉スラグ微粉末混入の有無が凍結融解 300 サイクル終了時点の耐久性指数および質量減少率に及ぼす影響は小さく、本実験の混入率の範囲であれば概ね同程度の耐凍害性を有するものと考えられる。
- (2) 試験水に海水を用いた場合、高炉スラグ微粉末を単独および繊維と併用したコンクリートでは、耐久性指数が向上する傾向が認められた。これは、高炉スラグ微粉末によるコンクリート組織の緻密化が原因と考えられる。
- (3) 試験水に海水を用いた場合、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートでは繊維混入率の増加に伴い質

量減少率が低下し、スケーリングが抑制される傾向が認められた。ただし、繊維混入率が多くなると、逆に質量減少率が大きくなり激しいスケーリングを生じるケースもあった。

謝辞：

本研究を行うにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究 B、課題番号：23760400、研究代表者：井上真澄)の交付を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献：

- 1) 上田賢司ほか：短繊維補強コンクリートの強度特性と乾燥収縮ひび割れ、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23、No. 2、pp. 211-216 (2001)
- 2) 細田暁ほか：合成短繊維添加によるコンクリート片の剥落対策、コンクリート工学年次論文集、Vol. 25、No. 1、pp. 275-280 (2003)
- 3) 住学ほか：ビニロン繊維補強コンクリートに関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 25、No. 1、pp. 257-262 (2003)
- 4) 細田暁ほか：少量の合成短繊維による収縮ひび割れの抑制機構、コンクリート工学年次論文集、Vol. 28、No. 1、pp. 299-304 (2006)
- 5) 黒野薫ほか：合成短繊維混入コンクリートの靱性評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 28、No. 1、pp. 419-424 (2006)
- 6) 石田裕哉ほか：鋼繊維混入による軽量コンクリートの耐凍結融解性能の改善、第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 237-240 (1985)
- 7) 権寧璫ほか：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの気泡組織と耐凍害性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 605-606 (1996)
- 8) 吉田行ほか：各種結合材を用いたコンクリートのスケーリング抵抗性、土木学会第 61 回年次学術講演会概要集、pp. 779-780 (2006)

INFLUENCE OF ORGANIC SHORT FIBER AND GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG ON FROST DAMAGE RESISTANCE OF CONCRETE

Masumi INOUE^{*1}, Sho MORI^{*2} and Kaneyoshi OKADA^{*3}

^{*1} KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Department of Civil and Environmental Engineering (165, Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido 090-8507, Japan)

^{*2} KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Graduate School of Engineering (165, Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido 090-8507, Japan)

^{*3} KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Technical Division (165, Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido 090-8507, Japan)

ABSTRACT : The purpose of this study is to clarified the influence of organic short fiber and ground granulated blast furnace slag on frost damage resistance. Fleezing and thawing tests of concrete by using organic short fiber and ground granulated blast furnace slag were examined. In the case of fresh water, the influences of fiber content and ground granulated blast furnace slag on frost damage resistance of concrete appear relatively small. Within the range of replacement ratio used in this study, the frost damage resistance was remarkably high. On the other hand, the durability factor of concrete increases with the replacement of ground granulated blast furnace slag in the case of sea water, and the scaling of concrete decreases by using organic fiber in combination with ground granulated blast furnace slag. However, the scaling increases remarkably in the case of large replacement ratio of fiber.

KEY WORDS : Organic short fiber, Ground granulated blast furnace slag, Frost damage resistance, Durability factor, Ratio of weight change, Scaling