

# 凍結融解作用を受けた纖維補強コンクリート の力学特性と微視的構造の変化

岩本 勲<sup>1</sup>・嵯峨山 剛<sup>2</sup>・眞嶋光保<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 近畿コンクリート工業(株)開発部 (〒530 大阪市北区西天満5丁目14-10)

<sup>2</sup>正会員 工修 石川島播磨重工業(株) (〒235 横浜市磯子区新中原町1番地)

<sup>3</sup>正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3丁目3-138)

纖維補強コンクリートの凍結融解作用による劣化のメカニズムを解明するために、(1)相対動弾性係数の測定、(2)剛性載荷曲げ強度試験、(3)細孔径分布の測定、(4)電子顕微鏡による観察を行った。その結果、以下のこととが明らかとなった。

ガラス、アラミドおよびビニロン纖維補強コンクリートでは、凍結融解作用によりマトリックスコンクリート中にひびわれが発生し、剛性低下を生じる。しかし、纖維がそのひびわれの橋渡しとなることにより、曲げ強度はあまり低下しない。一方、鋼纖維補強コンクリートは、凍結融解作用によるマトリックスのひびわれ発生は少なく、曲げ強度や剛性の低下も殆どない。

**Key Words:** fiber reinforced concrete, flexural strength, freezing and thawing, pore structure, SEM observation, toughness

## 1. はじめに

元来コンクリートは脆性材料であり、じん性を改善することの重要性が指摘されている。鉄筋コンクリート構造物では、耐震安全性を確保するために、部材が充分な塑性変形能を持つことが必須の条件である。また、素材としてのコンクリートのじん性能を積極的に活用する分野も広がりつつある。じん性の増加は、コンクリートの脆性的な破壊を改善することができ、設計上考慮していた荷重を上回る外力が作用した場合に、変形能に基づいた付加的な耐力が期待できる。このような背景から、普通コンクリートに纖維を分散混入させることにより、従来のコンクリートでは見ることのできなかった特性を引き出せる、纖維補強コンクリートが着目されている。纖維補強コンクリートにおけるコンクリートの改善は、主として次の3点が挙げられる。すなわち、(1)曲げおよび引張強度の増加、(2)じん性の改善、(3)ひびわれの分散である。

纖維補強コンクリートの力学的な性状については研究も多く行われ<sup>1),2)</sup>、その優位性は確認されているものの、長期的な耐久性については研究例も少なく、この方面的の検討が望まれている。

## 2. 繊維補強コンクリートの凍結融解抵抗性

鋼纖維補強コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性として、小林らは次のように述べている<sup>3)</sup>。鋼纖維補強コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗は、コンクリート中の連行空気の影響が大であるが、所定の空気量を連行させた場合には、鋼纖維の混入によって抵抗性は大幅に改善され、しかもその程度は、纖維量とともに著しくなる。また、この理由として、(1)鋼纖維補強コンクリートは熱伝導率が大きい(鋼纖維を2%混入したモルタルで約30%大きくなる)、(2)纖維の網状構造による補強効果、としている。

ガラス、アラミド、ビニロン纖維と鋼纖維補強コンクリートの凍結融解抵抗性については、次のような報告がある<sup>4)</sup>。(1)鋼纖維補強コンクリートは、曲げ強度や相対動弾性係数等において、凍結融解による劣化は殆どなかった。(2)他の纖維補強コンクリートでは同配合のプレーンコンクリート程ではないが、曲げ強度等が低下した。(3)マトリックスコンクリートの品質の影響については、異なる水セメント比のAEコンクリートと非AEコンクリートについての検討結果、何れの水セメント比、空気量においても纖維を混入することによって、曲げ強度および曲げじん性が向上した。

また、アラミドおよびビニロン纖維補強コンクリートにおいて、纖維混入率を1, 2, 3%と変化させた結果、

繊維の種類により差があるものの、繊維の混入率の増加に伴って、凍結融解に対する抵抗性が増大する<sup>5)</sup>。しかし、これらの研究では、繊維補強コンクリートの凍結融解抵抗性が増大するという結論が得られているものの、抵抗のメカニズムについての報告はみられない。

本研究では、繊維補強コンクリートの長期耐久性のうち凍結融解抵抗性について、従来の相対動弾性係数の変化だけでなく力学特性の変化、微視的な構造の変化についても検討し、その抵抗メカニズムについて検討したものである。

補強に用いた繊維は、従来から使用実績のある鋼繊維とガラス繊維に加えて、近年特に繊維自体の耐腐食性や軽量であることなどが注目されているアラミド繊維とビニロン繊維とした。凍結融解による繊維補強コンクリートの耐久性評価としては、質量減少率と相対動弾性係数の変化ならびに曲げ強度と曲げじん性の変化について検討した。また、細孔径分布の計測と走査型電子顕微鏡観察により、繊維補強コンクリートの微視的な構造変化についても検討した。

プレーンコンクリートでは、これまでの数多くの研究により相対動弾性係数とコンクリートの劣化度が関係づけられており、相対動弾性係数から決定される耐久性指数により、破壊試験を行うことなくコンクリートの凍結融解に対する抵抗性が評価される。ところが、繊維補強コンクリートにおいては、凍結融解による複合体としての劣化機構が解明されているとは言えず、相対動弾性係数だけで凍結融解の抵抗性が評価できない可能性もある。そこで、本研究では相対動弾性係数により劣化程度を評価するとともに、破壊試験としての曲げ試験を実施して強度および曲げじん性の変化を調べ、劣化程度ならびに相対動弾性係数との関連性について検討した。

### 3. 実験概要

#### (1) 供試体

補強に用いた繊維は上述したように、従来から使用実績のある鋼繊維とガラス繊維に加えて、アラミド繊維とビニロン繊維である。鋼繊維は直径 0.6 mm、繊維長 30 mm のインデントタイプで、ガラス繊維は直径 13 μm、繊維長 25 mm の収束タイプ耐アルカリガラス繊維である。また、アラミド繊維は直径 12 μm、繊維長 30 mm、ビニロン繊維は直径 16 μm、繊維長 24 mm であり両者とも収束タイプである。マトリックスコンクリートの配合は表-1に示すように、水セメント比を 60% とし、高性能 AE 減水剤を用いて空気量は 5% とした。空気量の実測値は、概ね 4.2~5.0% であった。マトリックスの配合は変えずに、何れの繊維も体積比の外割で 1.5% 混入した。スランプは、マトリックスコンクリートで約 20

表-1 マトリックスコンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比(%)	細骨 材率 (%)	単位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE減水剤
10	60	60	195	325	995	677	4.875

cm、繊維補強コンクリートでは繊維の種類により変化したが 0~8 cm の範囲であった。

供試体は 10×10×40 cm の角柱で、打設後 24 時間で脱型し、材令 14 日まで水中養生を行った。材令 7 日における圧縮強度および静弾性係数は、プレーン（マトリックス）コンクリートが最も大きく、それぞれ 32.9 MPa, 24.9 GPa、ついで鋼繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維、ガラス繊維の順に小さくなり、ガラス繊維補強コンクリートでは、それぞれ 27.2 MPa, 21.6 GPa であった。

#### (2) 凍結融解試験

供試体の水中養生終了後、すなわち材令 14 日経過後直ちに凍結融解試験を開始した。凍結融解試験は、JIS A 6204-1987 の附属書 2 に規定されている「急速水中凍結融解方法」に準じており、供試体の中心温度が +5 °C から -18 °C の凍結融解サイクルを 3~4 時間で繰り返した。凍結融解サイクルは 300 サイクルまで実施し、50 サイクル終了ごとに非破壊試験として質量減少率と相対動弾性係数を測定し、破壊試験として、剛性載荷曲げ試験を実施した。

質量減少率は次式により算定した。

$$W_n = (w_0 - w_n) / w_0 \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $W_n$ ：凍結融解 n サイクル後の質量減少率(%)、 $w_n$ ：凍結融解 n サイクル後の供試体の質量(g)、 $w_0$ ：凍結融解試験前の供試体の質量(g)

相対動弾性係数は次式により算定した。

$$P_n = f_n^2 / f_0^2 \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $P_n$ ：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数(%)、 $f_n$ ：凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)、 $f_0$ ：凍結融解試験前のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

#### (3) 曲げ強度および曲げじん性

凍結融解に伴う繊維補強コンクリートの曲げ強度と曲げじん性の変化を検討するために、剛性載荷曲げ試験を実施した。支持スパン 30 cm、載荷スパン 10 cm の 3 等分点 2 点載荷とし、たわみは中央点たわみの測定値に破壊位置の影響を考慮して補正することとし、次式により算定した<sup>6)</sup>。

$$\delta c' = \ell \times \delta c / (\ell/2 \times \ell_1) \quad (3)$$

ここに、 $\delta c'$ ：たわみの補正值(mm)、 $\delta c$ ：スパン中央

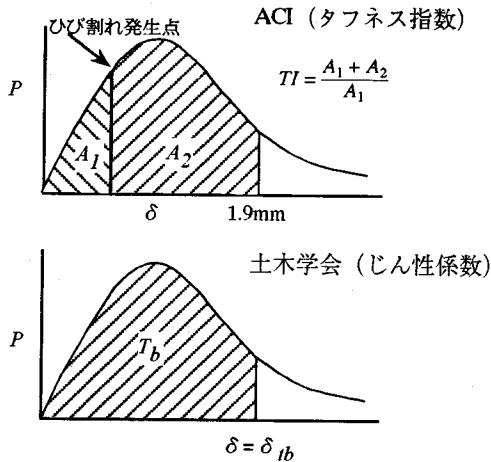


図-1 曲げじん性の評価方法

でのたわみ(mm),  $\ell$ :支持スパン(mm),  $\delta_1$ :支持点から破壊位置までの距離(mm)

曲げ強度は弾性解に基づき次式により算定した。

$$f_b = (P \times \ell) / (b \times h^2) \quad (4)$$

ここに,  $f_b$ :曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>),  $P$ :最大荷重(N),  $b$ :破壊断面の幅(mm),  $h$ :破壊断面の高さ(mm)

曲げじん性係数の評価方法はいくつか提案されており, ACIによるタフネス指数<sup>7)</sup>, 小林らによるタフネス係数<sup>8)</sup>, 小柳らによる方法<sup>9)</sup>, 土木学会による曲げじん性係数<sup>10)</sup>等がある。本研究では, ACIによるタフネス指数と土木学会による曲げじん性係数とで評価した。ここに, タフネス指数とは, 基準たわみ量(1.9 mm)までの曲げ荷重一たわみ曲線下の面積を初ひびわれ荷重までの曲げ荷重一たわみ曲線下の面積で除したものである。一方, 曲げじん性係数は, 供試体の載荷点のたわみがスパンの1/150に達するまでの吸収エネルギーであり, 次式により算定した。

$$\sigma_b = (T_b / \delta_{tb}) \cdot (\ell / b h^2) \quad (5)$$

ここに,  $\sigma_b$ :曲げじん性係数(N/mm<sup>2</sup>),  $T_b$ :たわみがスパンの1/150となるまでの荷重一たわみ曲線下の面積(N/mm),  $\delta_{tb}$ :スパンの1/150のたわみで曲げスパンが300 mmの場合2 mm

#### (4) 微視的構造の観察

コンクリートは, 凍結融解を受けることによって内部構造の組織に緩みが生じ, その緩みは微細ひびわれの発生と進行などによる細孔構造の変化に起因すると考えられている<sup>11)</sup>。したがって, 凍結融解前後のコンクリートの細孔構造の変化を調べることによって, 凍結融解に対する繊維補強コンクリートの抵抗性が評価できると考えた。

方法として, 一つは走査型電子顕微鏡(Scanning Elec-

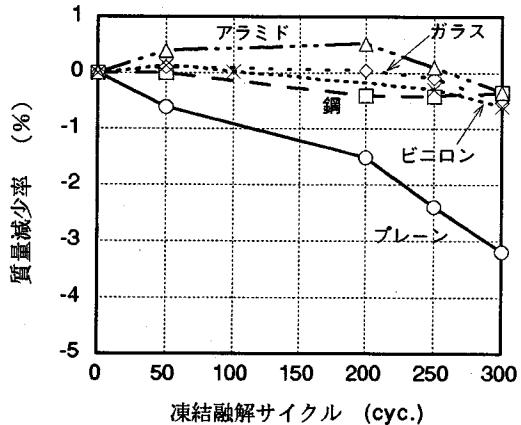


図-2 質量減少率の変化

tron Microscope, SEM)により, 凍結融解を受ける前後の微視的構造変化を観察した。もう一つは, 水銀圧入ポロシメータにより, 凍結融解を受ける前後の細孔径分布を測定した。細孔径は, 水銀の圧入力から次式により求めた。

$$r \cdot P = -2\gamma \cdot \cos \theta \quad (6)$$

ここに,  $r$ :細孔半径(cm),  $P$ :印加圧力(dyne),  $\gamma$ :水銀の表面張力(484 dynes/cm),  $\theta$ :水銀の接触角(130°)

## 4. 実験結果と考察

### (1) 質量減少率

図-2は, 凍結融解サイクルに伴う質量減少率の変化を示したものである。プレーンコンクリートでは, 凍結融解サイクルの初期の頃から表面の劣化が認められた。凍結融解サイクル数の増加に伴ってプレーンコンクリートの表面状態は, ピーリングからスケーリング<sup>12)</sup>へと進行し, 300サイクル終了時には供試体3体のうち1体が崩壊した。300サイクル終了後の質量減少率は, 約3%であった。

繊維補強コンクリートでは, 繊維の種類にかかわらず, 300サイクルの凍結融解作用を受けても質量は0.5%程度しか減少しなかった。特に鋼纖維補強コンクリートでは, 300サイクルを終了しても端部でスケーリングが認められる程度で, 概ね健全な状態を保っていた。ガラス, アラミド, ピニロン繊維補強コンクリートでは, 凍結融解に伴って徐々に表層のペースト部分がピーリングしていき, 300サイクル終了時点では繊維や骨材が露出した。しかし, プレーンコンクリートと比較すると, 明らかに劣化程度は異なり, それが質量減少率の差として現れた。このことは, 繊維にはスケーリング(はげ落ち)しようとするペーストやモルタルをつなぎとめる効果があると

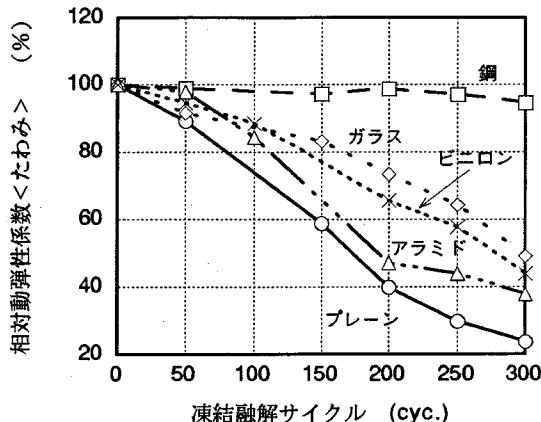


図-3 相対動弾性係数の変化

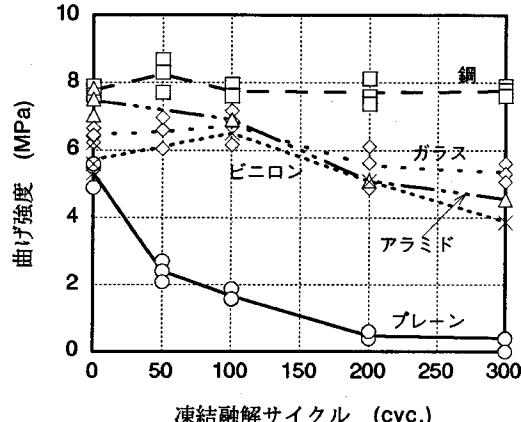


図-4 曲げ強度の変化

考えられる。

## (2) 相対動弾性係数

図-3は、凍結融解サイクルに伴うたわみ方向の相対動弾性係数の変化を示したものである。プレーンコンクリートでは、凍結融解サイクル数の増加に伴って相対動弾性係数は減少し、150サイクルで60%となり300サイクルでは30%を下回り、次式により求めた耐久性指数は30となった。

$$DF = P \times N / M \quad (7)$$

ここに、 $DF$ ：耐久性指数、 $P$ ： $N$ サイクルの時の相対動弾性係数(%)、 $N$ ：相対動弾性係数が60%になるサイクル数、又は300サイクルのいずれか小さい方、 $M$ ：300サイクル

鋼纖維補強コンクリートでは、本実験の範囲内では凍結融解サイクルの増加に伴ってもほとんど相対動弾性係数は減少しておらず、このことは小林ら<sup>3)</sup>の実験結果と一致しており、耐久性指数は約95であった。またこの結果は、供試体表面の劣化状態や質量減少率の変化ともよく合致している。ガラス、アラミドおよびビニロン纖維補強コンクリートの相対動弾性係数は、プレーンコンクリートに近い程度まで低下し、質量減少率の変化とは異なった様相を呈している。また耐久性指数は、アラミドが33、ビニロンが46、ガラスが53となった。

相対動弾性係数から評価すると、鋼纖維を除く纖維補強コンクリートとプレーンコンクリートのマトリックス部分には、表面劣化のみならず内部にもひびわれが進行していることが予測される。そして、ガラス、アラミドおよびビニロン纖維補強コンクリートの内部ひびわれは、纖維によって繋ぎ止められている状態であると考えられる。一方、鋼纖維補強コンクリートでは、他の纖維補強コンクリートと同じマトリックスであるにもかかわらず、マトリックス部分はそれほど劣化していないと考えられる。

えられる。両者の違いは纖維の種類による差違であることから、劣化程度の差は補強纖維の構造形態、弾性係数または熱膨張係数に起因するものと思われる。纖維の種類による影響については、後章において顕微鏡観察結果と併せて考察する。

## (3) 曲げ強度による評価

図-4は、凍結融解サイクルに伴う曲げ強度の変化を示したものである。プレーンコンクリートでは、曲げ強度は凍結融解サイクル数の増加に伴って低下し、50サイクルで凍結融解前の約1/2に低下した。また、200サイクルを越えると、コンクリートは著しい劣化状態となり、強度もほとんど測定できなかった。本研究では、纖維の補強効果を見るために、水セメント比を60%としたために、このような早い劣化を示したものと思われる。プレーンコンクリートの相対動弾性係数の変化と曲げ強度の変化とを比較すると、相対動弾性係数は300サイクルまでほぼ直線的に低下しているのに対して、曲げ強度は50から100サイクルで極端に低下し、下に凸の曲線となっている。このことより、プレーンコンクリートにおいては、相対動弾性係数の低下よりも曲げ強度の低下の方が大きいといえる。

鋼纖維補強コンクリートでは、凍結融解300サイクル後でも曲げ強度はほとんど低下することなく、これは先の質量の変化、相対動弾性係数の変化と良く一致した結果となった。これより、鋼纖維補強コンクリートの凍結融解による劣化の程度は、相対動弾性係数の測定等の非破壊試験により評価できるものと考えられる。すなわち、本研究の範囲では、鋼纖維補強コンクリートの凍結融解に対する抵抗性は非常に高く、マトリックスにひびわれが発生することなく力学的性質もほとんど劣化していないと判断される。

ガラス、アラミドおよびビニロン纖維補強コンクリー

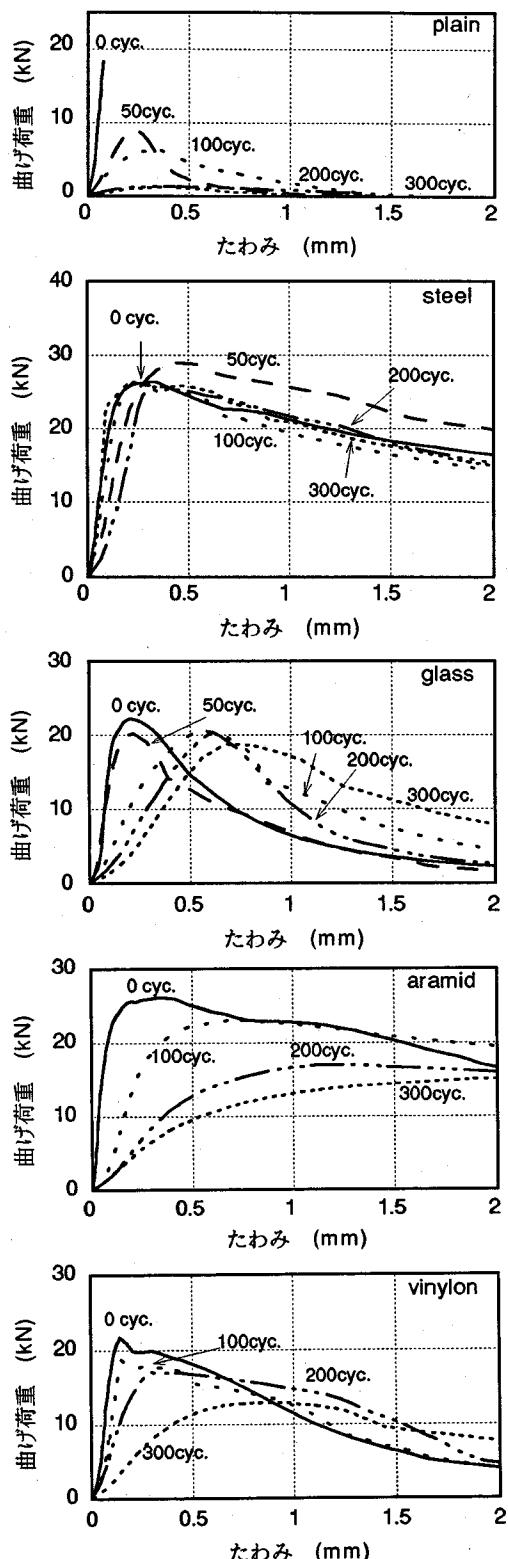


図-5 荷重一たわみ曲線

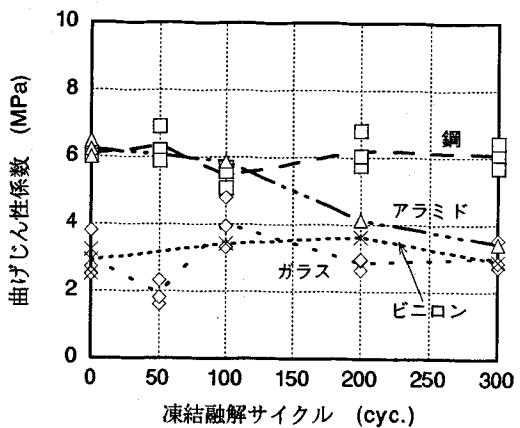


図-6 曲げじん性係数の変化

トの曲げ強度は、何れも 100 サイクル程度まではあまり低下せず、100 サイクルを越えてからはほぼ直線的に低下した。300 サイクル終了時の曲げ強度は、凍結融解開始前の 70% 程度の値を示した。相対動弾性係数の変化と曲げ強度の変化との相関性は、プレーンコンクリートよりは良かったが、プレーンコンクリートとは逆に、相対動弾性係数の方が曲げ強度に比較して小さな値を示している。このことは、これらの繊維補強コンクリートにおいては、マトリックスはひびわれが発生してかなり劣化しているために相対動弾性係数が低下したが、繊維がそのひびわれの橋渡しをすることによって曲げ強度を保持していると想像される。

#### (4) 曲げ剛性による評価

凍結融解に伴う、繊維補強コンクリートの曲げ荷重一たわみ曲線の変化を図-5 に示す。荷重一たわみ曲線の傾きは曲げ剛性を示しているが、鋼繊維補強コンクリートでは、曲げ剛性はほとんど低下していない。しかし、他の繊維補強コンクリートならびにプレーンコンクリートでは、凍結融解サイクルの増加に伴って剛性が低下している。低下度合いは、相対動弾性係数の変化や曲げ強度の変化と同じように、プレーンコンクリートが最も大きい。また、曲げ強度よりも曲げ剛性の方が相対動弾性係数との相関性が良い。これは、動弾性係数の測定が供試体の初期剛性を評価していることによると考えられる。相対動弾性係数の変化および曲げ剛性の変化から、鋼繊維補強コンクリートにはひびわれが発生していないが、それ以外の供試体のマトリックスには、ひびわれが発生していると考えられる。

#### (5) 曲げじん性による評価

図-6 に凍結融解に伴う曲げじん性係数(土木学会)の変化を示す。曲げじん性係数は、供試体が基準たわみ

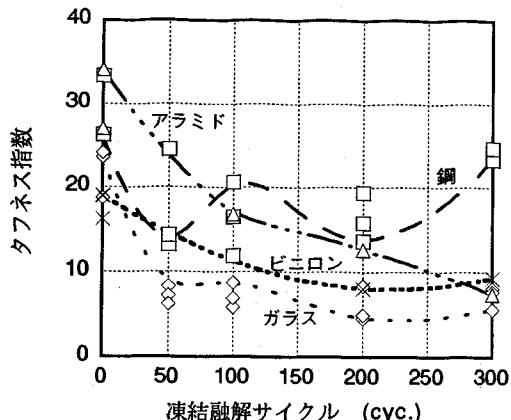


図-7 タフネス指数の変化

(スパンの 1/150, スパン 300 mm の場合 2 mm) に達するまでの吸収エネルギーである。鋼纖維補強コンクリートでは、図-5 に示すように、凍結融解を受けても荷重一たわみ曲線が殆ど変化しないため、曲げじん性係数は 300 サイクル後でも低下しなかった。

アラミド纖維補強コンクリートでは、100 サイクルを越えたあたりから曲げじん性係数が低下し、300 サイクル後では凍結融解前の 60% 程度にまで低下した。凍結融解前の荷重一たわみ曲線は、鋼纖維補強コンクリートのそれとほぼ同様の形状を示したが、凍結融解作用後は初期の立ち上がりが鈍くなり、曲げじん性係数の低下へと結びついた。

ガラスおよびビニロン纖維補強コンクリートでは、凍結融解により曲げじん性係数はあまり変化せず、鋼纖維補強コンクリートの 1/2 程度の値を保った。しかし、鋼纖維補強コンクリートのように荷重一たわみ曲線の形状が変化しないわけではなく、曲げ剛性が低下し全体としてたわみが増加する方向に移動した。ところが、凍結融解前から鋼纖維やアラミド纖維補強コンクリートと比較して曲げじん性係数が半分程度と小さいので、凍結融解による変化がタフネスを示す数値として現れにくい。このように、曲げじん性係数では補強纖維の種類によっては、凍結融解による曲げ一荷重たわみ曲線の変化を表すことが困難な場合がある。

図-7 に凍結融解に伴うタフネス指数(ACI)の変化を示す。タフネス指数は、ひびわれ発生までのタフネスと中央点たわみが 1.9 mm に達するまでタフネスの比であるので、凍結融解による曲げ荷重一たわみ曲線の、立ち上がり部分の変化も指標として含まれると考えられる。図-7 によると、タフネス指数は鋼纖維補強コンクリートにおいてはあまり低下していないが、他の纖維補強コンクリートにおいては低下傾向にある。このように、前述の曲げじん性係数では表せなかった曲げ剛性の低下

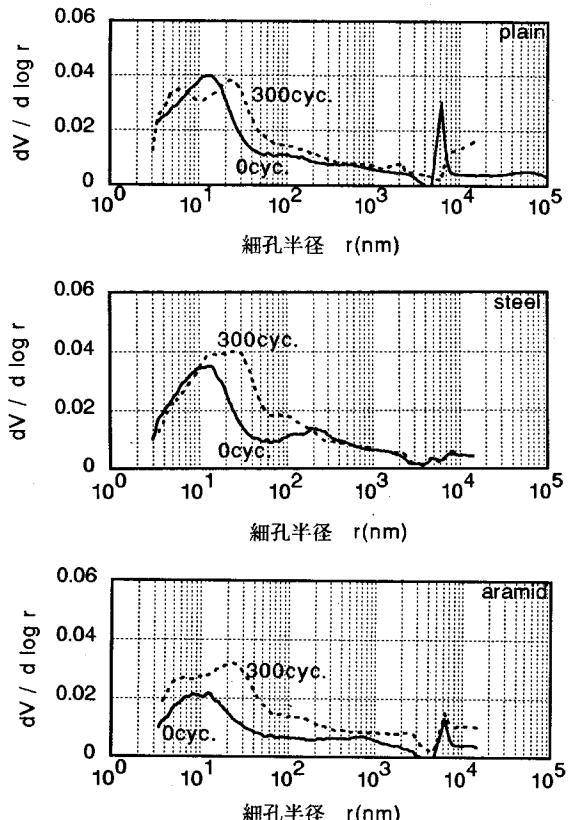
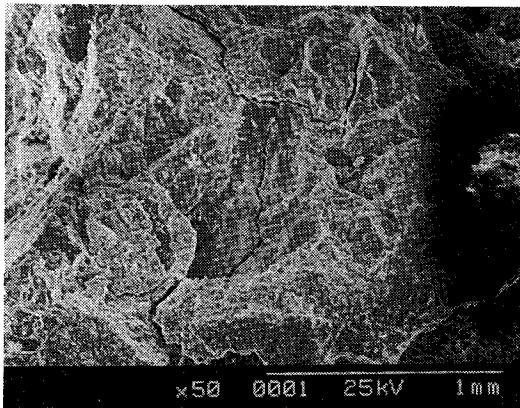


図-8 細孔径分布の変化

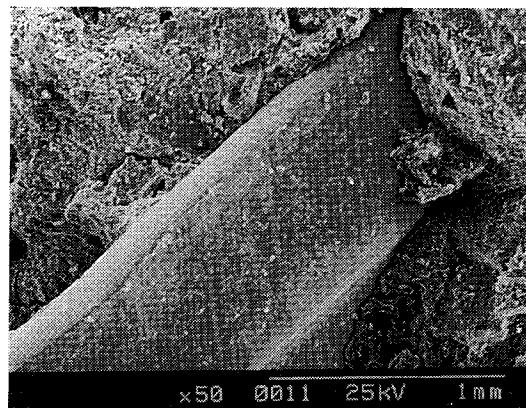
が、タフネス指数を用いることによって表されることがわかった。凍結融解による曲げじん性の変化を評価する場合、曲げじん性係数よりもタフネス指数の方がより的確に評価できると考えられる。しかし、タフネス指数は初ひびわれ荷重を正確に定義する必要があるので、ばらつきが多いことが指摘されており<sup>13)</sup>、本研究においても、かなりばらつきのある値となった。

#### (6) 細孔径分布による評価

水銀圧入法により測定した供試体の細孔径分布を図-8 に示す。鋼纖維を含めた纖維補強コンクリートとプレーンコンクリートとの、凍結融解前および凍結融解後における細孔径分布に大きな差は見られない。何れの供試体においても、凍結融解前は 10 nm 付近にピーク値を持つが、凍結融解後は全体に細孔半径が大きくなる方向に移動しており、ピーク値も 20~30 nm 付近に移動している。また、凍結融解抵抗性の劣るコンクリートは、10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup> nm 付近にピーク値を持つという報告があるが<sup>14)</sup>、本実験の範囲では凍結融解の前でも後でも、その付近にピーク値は認められなかった。これらのことから、纖維の混入はミクロ的にはマトリックスコンクリートを改質



プレーン 300 サイクル後



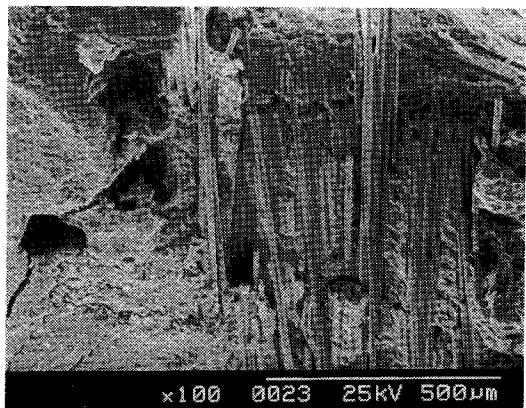
鋼纖維 300 サイクル後

するまでには至らないと考えられる。前述のとおり、曲げ強度や相対動弾性係数の変化からは、繊維補強コンクリートはプレーンコンクリートよりも凍結融解抵抗性が優れていると判断できる。そのメカニズムとして繊維を混入することによるマトリックスの改質、すなわち細孔径分布の変化を考えたが、そのような繊維の混入効果はないものと思われる。つまり、鋼纖維を含めた繊維補強コンクリートにおいても、マトリックス部分の細孔構造は、凍結融解作用によりプレーンコンクリートと同程度に劣化しているものと考えられる。

#### (7) 走査型電子顕微鏡観察による評価

図-9は、凍結融解300サイクル後の供試体の顕微鏡写真である。プレーンコンクリートにおいては、写真に示すようにひびわれが数多く観察された。凍結融解前には、これほどはっきりとした大きなひびわれが観察されないことから、これらのひびわれは、凍結融解作用により発生したと考えられる。すなわち、プレーンコンクリートにおいては、表層部だけでなくコンクリートの内部においても劣化が進行してひびわれが発生しており、このことにより、曲げ強度の低下や相対動弾性係数の低下を招くものと考えられる。

ガラス、アラミドおよびビニロン繊維補強コンクリートでも、マトリックス部分にひびわれが認められた。SEM観察では定量的な判断はできないものの、ひびわれの本数と幅とは、プレーンコンクリートよりは少ないようであり、しかも複数のひびわれが複数の繊維によって橋渡しされている。観察した限り、繊維自身は表面に損傷などが認められず、凍結融解作用に対して健全であることが確認された。したがって、これらの繊維はひびわれ発生に対する抑止効果はあまり期待出来ないものの、ひびわれの拡幅を抑えたり分散させる効果があると期待される。また、マトリックスにひびわれが発生しても、そのひびわれを繊維が橋渡しとなることにより、凍



ガラス繊維 300 サイクル後

図-9 凍結融解後の電子顕微鏡写真

結融解作用を受けても曲げ強度や曲げじん性はあまり低下しないこととなる。ただし、マトリックス部分にはひびわれが発生していることから、相対動弾性係数や曲げ剛性は低下すると考えられる。

鋼纖維補強コンクリートにおいては、やはり定量化するまでには至らなかったものの、マトリックス部分のひびわれ本数やひびわれ幅は、他の繊維補強コンクリートよりもさらに少ないようと思われた。鋼纖維は他の繊維よりも、マトリックスのひびわれ発生の抑制にも役立っているようである。マトリックス部分にひびわれが少ないことから、他の繊維補強コンクリートと比較して、曲げ強度および曲げ剛性の低下や動弾性係数の低下が大きく生じない結果につながったものと考えられる。

鋼纖維と他の繊維との違いは、弾性係数と構造形態(単繊維と収束タイプとの差)とが考えられる。アラミド繊維等の収束タイプの繊維では、コンクリート混練り中ににおいてストランドが解きほぐれて、その中にペーストが浸入している。凍結融解前には、このことが繊維とマト

リックスとの付着を強固にする作用をする。ところが、凍結融解作用を受けることにより、繊維ストランドに入り込んだペーストにもひびわれが発生し、繊維とマトリックスとの付着劣化に結びついている。一方、鋼繊維は単繊維であるので、このような作用はなく付着強度が低下しない。また、鋼繊維の弾性係数が高いことが、凍結融解に伴う水の膨張圧によるマトリックスの引張ひびわれ発生を抑制する効果があるとも考えられる。

## 5. 結論

本研究では、繊維補強コンクリートの凍結融解作用による劣化のメカニズムを解明するために、凍結融解に伴う相対動弾性係数による評価、剛性曲げ試験による曲げ強度、曲げ剛性および曲げじん性による評価、マトリックス部分の細孔径分布による評価、走査型電子顕微鏡観察を実施した。その結果、以下のような知見が得られた。

(1) 鋼繊維補強コンクリートは、凍結融解 300 サイクル後でも質量減少率、相対動弾性係数、曲げ強度、曲げ剛性、曲げじん性とも低下せず、鋼繊維による補強効果がみられた。

(2) ガラス、アラミドおよびビニロン繊維補強コンクリートにおいては、曲げ強度および曲げじん性はあまり低下しないものの、相対動弾性係数および曲げ剛性はプレーンコンクリートに近い程度まで低下した。

(3) マトリックスの細孔構造は、繊維を混入したことによる改質等の差は認められず、マトリックス部分は、ミクロ的には繊維補強コンクリートもプレーンコンクリートと同程度の劣化状態にあると判断される。

(4) マクロ的にみると、鋼繊維補強コンクリートはマトリックス中のひびわれが最も少なく、繊維とマトリックスとの付着劣化が生じていない。このことが、曲げ強度をはじめ剛性の低下も生じない理由と考えられる。

(5) ガラス、アラミドおよびビニロン繊維補強コンクリートにおいては、プレーンコンクリートほどではないがマトリックス中にひびわれが発生し、繊維とマトリックスとの付着劣化も生じた。しかし、繊維は健全でありひびわれの橋渡しとなっていることが、曲げ強度とじん性はあまり低下しなかったが剛性が低下した理由であると考えられる。

(6) 鋼繊維補強コンクリートとその他の繊維補強コンクリートとに凍結融解抵抗性に差が生じた理由として、繊維の構造形態の違いと弾性係数の差があげられる。

アラミド繊維のような収束型繊維では、繊維ストランド中に浸入したセメントペーストに発生したひびわれが、繊維とマトリックスとの付着劣化の原因となっているものと考えられる。また、鋼繊維の弾性係数の高いことが、凍結融解に伴う水の膨張圧によるマトリックスの引張ひびわれ発生を抑制する効果があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 岩本勲、阿河俊夫、打田靖夫、吉川太：鋼代替繊維補強コンクリートの強度特性、土木学会第 44 回年次学術講演会概要集, pp.298-299, 1989 年。
- 2) 三瀬貞、眞嶋光保：各種繊維補強コンクリートの比較試験、第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 321-324, 1984 年。
- 3) 小林一輔、森時昭：鋼繊維補強コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性、セメント技術年報, No. 30, pp. 447-449, 1976 年。
- 4) 嶋嶋山剛、眞嶋光保、岩本勲：凍結融解を受ける繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げ靭性、セメントコンクリート論文集, No. 46, pp.784-789, 1992 年。
- 5) 岩本勲、酒井研二、眞嶋光保、嶋嶋山剛：アラミドおよびビニロン繊維補強コンクリートの耐凍結融解特性、土木学会第 47 回年次学術講演会概要集, pp.434-435, 1992 年。
- 6) 小林一輔、魚本健人、趙力采：繊維補強コンクリートの力学的性質の試験方法、生産技術研究所報告, Vol.31, No. 1, pp.14-26, 1984 年。
- 7) ACI Committee 544: Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, *Journal of ACI*, Vol.75, No. 7, pp.283-289, 1978 年。
- 8) 小林一輔、梅山和成：繊維補強コンクリートの引張靭性の一評価方法、コンクリート工学, Vol.20, No. 8, pp. 85-96, 1982 年。
- 9) 小柳治、六郷恵哲：コンクリートの破壊と破壊靭性評価、コンクリート工学, Vol.20, No. 4, pp.8-14, 1982 年。
- 10) 土木学会コンクリートライブライ第 50 号：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), pp.58-61, 1983 年。
- 11) 堀宗朗、斎藤裕、三浦尚：細孔構造の変化に着目したコンクリートの凍害劣化の診断法に関する研究、土木学会第 47 回年次学術講演会概要集, pp.436-437, 1992 年。
- 12) 洪悦郎：コンクリートの凍害、コンクリート工学, Vol. 13, No. 3, pp.33-44, 1975 年。
- 13) 小林一輔、田澤栄一：最新コンクリート技術選書 9、繊維補強コンクリート・ポリマーコンクリート, p.58, 1980 年。
- 14) 鎌田英治：凍結作用を受けたコンクリートの挙動と細孔構造、セメントコンクリート, No.460, pp.28-34, 1985 年。

(1995.2.17 受付)

# CHANGE IN DYNAMIC CHARACTERISTICS AND MICROSCOPIC STRUCTURE OF FIBER-REINFORCED CONCRETE SUBJECTED TO FREEZING AND THAWING

Kaoru IWAMOTO, Takeshi SAGAYAMA and Mitsuyasu MASHIMA

To explain the mechanisms of the deterioration of fiber-reinforced concrete caused by freezing and thawing, observation has been made with such experimentals as : (1) Metrology of dynamic modulus of elasticity. (2) Rigidity flexural strength tests. (3) Measurements of pore structure distribution. (4) SEM observation. As a result of the attempt, the following has been made clear.

With the concrete reinforced with glass, aramid and PVA fiber, freezing and thawing are liable to give rise to cracks in the matrix concrete, resulting in inferiority in rigidity. Despite the above, none of drastic lowering of flexural strength is to be seen, which might be derived from the reason that fibers play a role of bridging the cracks. On the other hand, generation of cracks in the matrix owing to freezing and thawing seldom occur with the steel-fiber reinforced concrete. Furthermore lowering in bending strength or rigidity is hardly caused.