

[討議・回答]

岩本 勲
嵯峨山剛 共著
眞嶋光保

“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”への討議・回答

(土木学会論文集 No.538/V-31 1996年5月掲載)

► 討議者 (*Discussion*) —

佐伯 昇（北海道大学）

Noboru SAEKI

1. はじめに

本研究に対する評価は、纖維補強コンクリートを対象として凍結融解作用を受けた場合の、劣化挙動を相対動弾性係数、曲げ強度、じん性、細孔径分布、ミクロ的観察によって丹念に調べ、劣化現象を把握した点であり、多くの貴重な結果に対して敬意を表する。

鋼纖維コンクリートは他のガラス、アラミド、ビニロン纖維コンクリートに比べて凍結融解に対する抵抗性が高く、その理由として纖維の構造形態、いわゆる鋼纖維は0.6 mmと比較的太く、単纖維で用いられるのに対して他のガラス、アラミド、ビニロン纖維は $12\sim16 \mu\text{m}$ と、鋼纖維に比して $1/40\sim1/50$ 程度と細く、また収束タイプとして用いられる形態の違いを挙げている。また、ひび割れの抑制効果として弾性係数の違いを挙げている。劣化のメカニズムを解明することも研究目的の一つに入れていることを考えると、これらの要因と劣化メカニズムを結びつけるには上に述べているような測定方法のみでは難しく、測定方法および種類について、さらに工夫が必要と考えられる。また、纖維コンクリートの凍結融解作用による劣化現象を把握する実験を主体としているため、現象のメカニズムを解明するに至らなかつたことが残念である。

纖維コンクリートの劣化現象が明らかにされたこと自体には有意義であるが、これに対する実際の構造物に対する有用性は、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」は凍結融解作用に対する抵抗性を調べるものであることを考えると、論文の力学特性はこの試験方法における環境条件における値であり、実構造物に対する有用性を重視する実験であれば、実環境に対応する水環境の差異の影響、温度勾配の影響などを着目して実験を行うべきである。劣化現象のメカニズム解明を主体にするか、有用性を重視するかのポイントがはっきりしていない点が残念である。

2. 実験方法に対する意見

論文由に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、とあるのでこれに従って実験方法の意見を述べる。

(1) Powers の水圧理論の凍害劣化

Powers の水圧理論によれば水から氷に変化する時の9%の体積膨張が基本となって、水圧が生じ水の移動がDarcy 法則に従って起こる。この時の水圧は

$$p = \frac{\eta}{3} \left(1.09 - \frac{1}{s} \right) \frac{uR}{K} \phi(L)$$

ここで、 η = 水の粘性係数、 s = 飽和度

y = 凍結水の増加 / °C, R = 温度の低下速度

K =透水性に関する係数

$\phi(L)$ = 気泡間隔係数 L の増加関数

となる。この場合には細孔径分布よりも、気泡間隔係数が問題であり、図-9のガラス纖維混入に見られるように収束纖維の場合、収束纖維近傍と纖維未混入のマトリックス部分の差異が気になる。纖維未混入部分のマトリックスおよび纖維近傍の気泡間隔を測定する必要がある。空気量は4.2%~5.0%であることから全体として空気が入っているが、鋼纖維の場合ほぼ均一にマトリックス中に気泡が分布していると考えられるが、その他の纖維は収束タイプのため纖維の近傍に気泡が集まり、纖維未混入のマトリックス中の気泡が少なく均一でないことが考えられる。特に纖維混入によりマトリックスのスランプ20cmから0~8cmに低下した点において施工上における空気運行の不均性が気になる。気泡の分布挙動を調べる必要がある。

水の移動を考えると鋼纖維の熱伝導率から鋼纖維の近傍から凍り、水の移動は鋼纖維からマトリックスに向かう。この場合マトリックス中に所定の空気量があれば問題がないと考えられる。一方収束タイプの場合は纖維近傍に空気が集まり、相対的に纖維が未混入のマトリックスの部分の空気量が少なく、その部分のマトリックスの劣化が起こる。このことは図-3の相対動弾性係数がプレーンコンクリートと収束タイプの纖維コンクリートと同程度の低下が見られることから考えられる。一方、収束纖維近傍では空気量が確保され、纖維との近傍のマトリックスの付着劣化が少ないとから図-4の曲げ強度、

図-6の曲げじん性の低下があまりないと考えられる。

次に R は温度の低下速度であるが熱伝導率は鋼纖維補強コンクリートが高いことから、普通の AE コンクリートより圧力 P は高いことが考えられる。この場合鋼纖維の場合は弾性係数が他の纖維に比して大きい（鋼纖維 1 に対してガラス、アラミド、ビニロンの弾性係数は各々 0.38, 0.36, 0.13）ため、クラックアレスターとしての効果が他の纖維より大きいため、比較的大きな水圧が鋼纖維コンクリート場合に生じても、融解とともに弾性的に内部ひずみが元に戻り、残留ひずみが少ないことが考えられる。この内部挙動を調べるために凍結融解中の膨張挙動をひずみ、伸びなどによって測定する必要がある。

以上のことから次の測定が必要である。

(1) マトリックスと収束纖維近傍のマトリックスの気泡間隔係数
(2) 凍結融解時のひずみあるいは伸び

(2) Grübl による線膨張係数差による氷圧理論

氷の線膨張係数は硬化セメントペーストの 5 倍とされ、凍結時に氷がマトリックスより収縮し未凍結水がその空隙に侵入し、凍結する。融解になると氷の線膨張係数がマトリックスより大きいためにマトリックスの周囲に大きな引張応力が生ずる。その応力は氷を球状のモデルとすると次のようになる。

$$\sigma_i = (\alpha_i - \alpha_c) \Delta T \cdot f$$
$$f = E_c (2\beta + 1) / [\{(2\beta + 1) - \nu_c (4\beta - 1)\} + 2n(1 - 2\nu_i)(1 - \beta)]$$

ここで、 $\beta = r^3/R^3$, $n = E_c/E_i$

R , r : モデルにおけるセメントペーストおよび氷半径

E : ヤング率, ν : ポアソン比

α : 線膨張係数

i : インクルージョン

c : 硬化セメントペースト

線膨張係数を見ると、セメントコンクリート、鋼纖維、ガラス纖維、アラミド纖維およびビニロン纖維でおよそ $7 \sim 13 \times 10^{-6}$, 12×10^{-6} , $9 \sim 10 \times 10^{-6}$, $-6 \sim -2 \times 10^{-6}$ および $-1 \sim 2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。

これから鋼纖維、ガラス纖維による応力はあまり生じ

►回答者 (Closure) ————— 岩本 勲 (近畿コンクリート工業)・嵯峨山剛 (石川島播磨重工業)・眞嶋光保 (大阪市立大学)

Kaoru IWAMOTO, Takeshi SAGAYAMA and Mitsuyasu MASHIMA

まず初めに、著者らの研究に対して多大の興味をお持ちいただき、貴重なご討議を賜ったことに対して、討議者ならびに論文集編集委員会に感謝の意を表します。

本研究は、纖維補強コンクリートの凍結融解抵抗性について、力学特性の変化と微視的な構造の変化から、そ

ないが、アラミド纖維およびビニロン纖維は凍結時に大きな引張応力が生ずることになる。

図-3 の相対動弾性係数の低下を見ると、鋼、ガラス、ビニロン、アラミドの順に低下が大きく、線膨張係数の順になっている。図-4 の曲げ強度にもほぼ同じ傾向が見られる。線膨張係数も劣化に対して、このような 2 次的な劣化の影響が考えられる。このことから次の測定が必要である。

(3) 前述の (2) 同じように凍結融解時の内部変形挙動

(4) 纖維の線膨張係数

3. 細孔径分布による評価の疑問

図-8 に示す細孔径分布において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後における細孔径分布に大きな差が見られないということを基本として纖維補強コンクリートのマトリックス部分の細孔構造は凍結融解作用によってプレーンコンクリートと同程度に劣化しているとしているが、図-3 の相対動弾性係数、図-4 の曲げ強度、図-6 のじん性挙動に対して矛盾を感じないのか疑問である。あるいは耐凍害性に関係するのは細孔径が $10^2 \sim 10^3 \text{ nm}$ として、プレーンコンクリートにおいてこの分布挙動が見られないということはどういう評価するのか。鋼纖維 AE コンクリートに対して、マトリックスの劣化があるとは考えにくい、この評価に対してはさらに実験が必要と考える。

あとがき

纖維コンクリートの耐凍害性挙動あるいは現象を把握し、貴重なデータが把握されている。さらにこの現象のメカニズムを解明するためには一步踏み込んでこの現象の把握からある仮定を設定し、新しい実験を組み込んでデータを収集し、劣化現象の仮定あるいは主要因との確認を取りながらメカニズムを構築することが重要と考えられる。

(1996.11.28 受付)

の抵抗メカニズムについて検討したものである。ご指摘のように、纖維補強コンクリートの有用性を確かめるために、凍結融解による劣化現象および力学特性の変化を把握する実験を主体としているため、抵抗メカニズムの解明については、深く踏み込めなかった点は否めない。

しかし、従来この問題を追求した研究事例が少なかったことを考へると、抵抗メカニズム解明のための足掛かりを作ったものと考えている。纖維補強コンクリートの凍結融解に対する抵抗メカニズムを解明するために、本研究をさらに進めなければならないことを認識しているが、同時に、アラミドやビニロン纖維補強コンクリートでは、凍結融解特性だけでなくその他の力学特性も当初期待していたほどの値を示さないことが明らかにされ^{1),2)}、少なからぬ失念を抱かされたことも事実である。

討議者は、抵抗メカニズムの解明のために、更に3項目の測定が必要であるとされているが、まず纖維の無いマトリックス部と収束纖維近傍のマトリックスの気泡間隔係数の測定については次のように考へている。討議者は、鋼纖維補強コンクリートでは気泡がマトリックス中に均一に分布しており、収束タイプの纖維補強コンクリートでは、気泡が纖維近傍に集中していると指摘されている。これに対して著者らは、気泡の分布は鋼纖維でもストランド纖維でも、界面領域において両者とも不活性という状況に変わりではなく、基本的に差がないと考えている。ただし、ストランド纖維ではブリージングによる影響が予測されるが、これは界面の問題であり纖維近傍におよぶものではない。纖維の混入によるスランプ変化のために、マトリックスコンクリート全体としての空隙ないし気泡構造の変化は予測できるが、空気量および細孔径分布の測定結果からは明確な差異は認められない。一方、スランプの変化によるものかどうか判断できないが、ストランド纖維では塩化物イオンの浸透量が鋼纖維より大きく、また中性化深さも若干大きいという報告がある³⁾ので、更なる検討が必要である。

次にご指摘の、凍結融解時のひずみあるいは伸びの測定も、目的からすると纖維そのもの、纖維近傍のマトリックス、纖維の無い部分のマトリックスのそれぞれの挙動を把握する必要があると思われる。それぞれが単体で同条件の温度変化を受ける場合と、複合体として温度変化を受ける場合の差異から内部応力を特定できると思われるが、極めてミクロなレベルでの測定が必要であり、装置開発を含めた測定方法からの検討が必要であろう。何らかのご教示を賜れば幸いである。

3番目に指摘されている纖維の線膨張係数については、纖維メーカー等の測定値があるので、コンクリートとの膨張係数の差が凍結融解の繰り返しによって、どれだけの影響を及ぼすかを把握する必要がある。この現象は繰り返し疲労、すなわち残留ひずみと残留応力の蓄積に基づくもので、いわゆる繰り返し応力と破壊回数(S-N)との関係が成り立つことが考えられる。この現象を解明するためには、凍結融解ではなく純粹に温度変化により、その温度差による応力と破壊回数との関係を求めていく体系だった研究が必要であると考える。著者らは、

連続纖維補強材について、線膨張係数の差に着目して、凍結融解による付着劣化について実験をした結果^{4),5)}、鋼材や炭素と比較してアラミド纖維の付着力が低下するという結論を得た。このことからも、線膨張係数の差が付着劣化に結びつき、纖維補強コンクリートの凍結融解抵抗性に関与することは充分考えられるが、それを定量化するには至っていない。

最後に討議者は、細孔径分布による評価の疑問として、プレーンコンクリートの細孔径が10²~10³nmに分布していないことを指摘されているが、本研究のプレーンコンクリートはAEコンクリートであるので、このような細孔径分布となったものと考えている。また、纖維補強コンクリートもプレーンコンクリートも、マトリックス部分はミクロ的には凍結融解前も凍結融解後も両者に大きな差がないと思われる。すなわち、纖維混入によるマトリックスの改質効果はないものと判断した。凍結融解作用によって、マトリックス部分の細孔構造は、プレーンコンクリートも鋼を含めた纖維補強コンクリートも同程度に劣化していると考える。ただし、鋼纖維補強コンクリートは、主にその弾性係数の大きさによってマトリックスのひびわれ発生を防止し、他の纖維はひびわれ発生の防止までには至らないが、ひびわれを分散させることによるひびわれ幅の減少、そして纖維がひびわれの橋渡しとなることによって曲げ強度やじん性の低下を防止していると考えている。

参考文献

- 岩本勲、阿河俊夫、打田靖夫、吉川太：鋼代替纖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。
- 岩本勲、下村一誠、酒井研二、打田靖夫：アラミドおよびビニロン纖維補強コンクリートの耐衝撃摩耗特性、平成4年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、pp.V19-1~19-2、1992年。
- 眞嶋光保、宮川豊章、小林茂広、角田忍：纖維補強コンクリートの海洋暴露試験結果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.1003~1008、1997年。
- Mashima, M. and Iwamoto, K. : Bond Characteristics of FRP and Concrete after Freezing and Thawing Deterioration, Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures Int. Symp. ACI (SP-138), pp.51~69, 1993年。
- 森内和也、眞嶋光保、岩本勲：凍結融解作用によるコンクリートとFRPロッドとの付着劣化に関する研究、平成5年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、pp.V11-1~11-2、1993年。

(1997.6.17受付)