

## V-5

## 若材齢におけるハイブリッド繊維補強コンクリートのひび割れ抵抗性

北海道大学大学院 学生員 金 南旭

北海道大学工学部 天野 明子

北海道大学工学部 フェロー 佐伯 昇

北海道大学工学部 正会員 堀口 敬

## 1. はじめに

プレーンコンクリートに比べて繊維補強コンクリート(以下、FRC と呼ぶ)の利点は、曲げおよび引張強度の増加、靱性の改善、ひび割れの分散などの物性の向上である。FRC の力学的特性については研究も多く行われ、その優れた性質が確認されている。これまでの FRC は、マトリックスに鋼繊維、ガラス繊維、炭素繊維などの一つの繊維で補強されたことが一般的であるが、最近異なる2種類以上の長さの異なる繊維を用いたハイブリッド繊維補強コンクリート(以下、HFRC と呼ぶ)の研究が注目されている。

ハイブリッド繊維補強の特徴は、繊維の適当な組み合わせによる単一繊維補強では得られない補強効果があり、適切な繊維の種類と混入率などが重要な研究の一つとなる。

本研究は、長さ 30mm の鋼繊維を共通として、鋼繊維 6、12mm とポリプロピレン繊維(以下、PP 繊維と呼ぶ)6、12mm から4つのシリーズの HFRC について、特に温度ひび割れの制御が最も重要な材齢である若材齢(2、3、5日)の時、内部温度の上昇から発生する温度応力によって起こるひび割れに抵抗するためのミクロおよびマクロ繊維の補強による抵抗効果について検討したものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験計画

本研究は、ミクロ繊維の補強効果を調べるために4つのシリーズを計画した。各シリーズは、鋼繊維 30mm を共通として、S-S6 シリーズは鋼繊維 30mm と鋼繊維 6mm、S-S12 シリーズは鋼繊維 30mm と鋼繊維 12mm、S-P6 シリーズは鋼繊維 30mm と PP 繊維 6mm、そして S-P12 シリーズは鋼繊維 30mm と PP 繊維 12mm との混合であり、鋼繊維 6mm と PP 繊維 12mm のほうは直径 20  $\mu$ m 以下のミクロ繊維を用いた。繊維の混入率は、鋼繊維 30mm は 1.0% と一定し、鋼繊維 6、12mm、PP 繊維 6、12mm は 0.1、0.3、0.5% とした。

一方、HFRC の作業性を確保するため、高性能減水剤を用いて、スランプが  $10 \pm 2$ cm になるように調整した。表-1、2 は本実験に用いた繊維の物性と配合表を示す。

表-1 使用した繊維の物理的性質

| Types of fiber | Length (mm) | Longitudinal profile | Cross-section shape | Diameter         | Tensile strength (Mpa) |
|----------------|-------------|----------------------|---------------------|------------------|------------------------|
| Steel fiber    | 3           | Flat                 | Circular            | Under 20 $\mu$ m | 1037                   |
|                | 6           | Flat                 | Circular            | Under 20 $\mu$ m | 1037                   |
|                | 12          | Crimped              | Circular            | 0.25mm           | 1115                   |
|                | 30          | Crimped              | Circular            | 0.6 mm           | 1198                   |
| PP fiber       | 6           | Flat                 | Circular            | Under 20 $\mu$ m | 760                    |
|                | 12          | Flat                 | Circular            | Under 20 $\mu$ m | 760                    |

Crack Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Early Age

by Nam-Wook KIM, Akiko AMANO, Noboru SAEKI, and Takashi Horiguchi

表-2 ハイブリッド繊維補強コンクリートの配合

| Specimen | W/C (%) | S/a (%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |        |      |                  |               |      |       |     |
|----------|---------|---------|-----------------------------------|--------|------|------------------|---------------|------|-------|-----|
|          |         |         | Water                             | Cement | Sand | Coarse Aggregate | Water reducer | SF-I | SF-II | PPF |
| SS6-01   | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1051 | 696              | 1.16          | 78.5 | 7.85  | --- |
| SS6-03   | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1040 | 688              | 1.66          | 78.5 | 23.55 | --- |
| SS6-05   | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1059 | 700              | 2.66          | 78.5 | 39.25 | --- |
| SS12-01  | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1066 | 706              | 1.33          | 78.5 | 7.85  | --- |
| SS12-03  | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1063 | 703              | 1.99          | 78.5 | 23.55 | --- |
| SS12-05  | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1058 | 700              | 2.99          | 78.5 | 39.25 | --- |
| SP6-01   | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1068 | 706              | 0.99          | 78.5 | ---   | 0.9 |
| SP6-03   | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1066 | 705              | 1.49          | 78.5 | ---   | 2.7 |
| SP6-05   | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1062 | 703              | 2.32          | 78.5 | ---   | 4.5 |
| SP12-01  | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1067 | 706              | 1.10          | 78.5 | ---   | 0.9 |
| SP12-03  | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1063 | 704              | 1.33          | 78.5 | ---   | 2.7 |
| SP12-05  | 50      | 60      | 166                               | 332    | 1059 | 701              | 2.49          | 78.5 | ---   | 4.5 |

\*SF-I : 鋼繊維 30mm \*SF-II : 鋼繊維 6, 12mm PPF : ポリプロピレン繊維 6, 12mm

(例) SS6-01 : SF30mm( $V_f$ 1.0%)+SF6mm( $V_f$ 0.1%), SS12-05 : SF30mm( $V_f$ 1.0%)+SF12mm( $V_f$ 0.5%)

SP6-03 : SF30mm( $V_f$ 1.0%)+PP6mm( $V_f$ 0.3%), SP12-01 : SF30mm( $V_f$ 1.0%)+PP12mm( $V_f$ 0.1%)

## 2.2 実験準備

本研究は実構造物の状態、特にひび割れの制御が最も重要な若材齢(材齢: 2、3、5日)のマスコングリートの内部温度変化をシミュレートするため、マスコングリートの温度履歴を適用した。すなわち、供試体は打ち込み時に25℃を維持し、その後最大温度60℃に設定した。打ち込み時に供試体の内部に熱電対を埋め込み、各状態の温度測定を実施し、確認した。供試体の乾燥収縮を防止するため、脱型した供試体にポリマー系被覆材を二度塗りし、ラップで巻いた状態を保った。

## 2.3 実験方法

本研究は100×100×400mmの角柱供試体を用い、静的4点曲げ試験(スパン: 300mm)を実施した。供試体には衝撃を与えないように一定変位速度で荷重を加えた。最大荷重までの載荷速度はJIS A 1106に準じ、スパンの1/1500、今回の場合、0.2mm/minとした。変位は供試体の中央点のたわみをLVDT(Linear Variables Differential Transducer)を用いて測定した。供試体の中央部に切り欠き(深さ/桁高=0.3)を入れ、クリップゲージとナイフエッジを用いてひび割れ開口変位(CMOD)を測定した。LVDTを用いて測定した曲げ試験の荷重-たわみの曲線からひび割れ発生荷重、ひずみエネルギー解放率を求めるとした。

一方、荷重-たわみ曲線から決定されるひび割れ発生荷重を実測値と比較するため内視鏡を使うことを計画し、供試体の切り欠きに内視鏡のレンズを付け、ひび割れ発生荷重を実測した。

本実験で用いた内視鏡付き供試体の寸法を図-1、実験全景を写真-1に示す。

## 3. ひび割れ抵抗性に関する検討

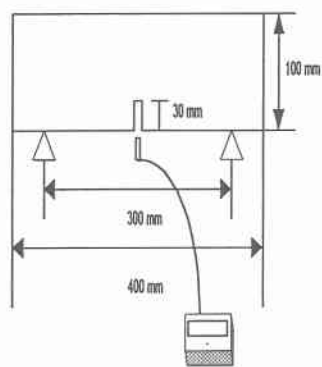
### 3.1 温度ひび割れの発生

部材断面の大きいコンクリート構造物、すなわちマスコングリートはセメントの水和熱が蓄積されて内部温度がかなり上昇する。従って、内部温度の上昇ならびに以後の冷却によって、マスコングリートには応力が発生し温度ひび割れが生じやすい。

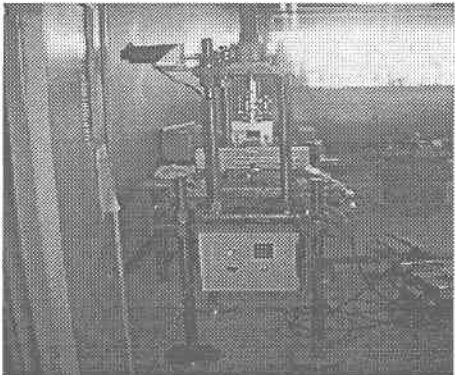
このようなマスコングリートの温度ひび割れ発生原因は、内部拘束作用と外部拘束作用と大別されている。内部拘束ひび割れはコンクリートの内部と表面との温度差によって生じる。セメントの水和熱によって内部は温度が上がるが、表面は大気によって冷却され、その温度差がひび割れの発生原因となる。すなわち、相

対的に温度が低い表面部分のコンクリートが収縮する時、温度が高い内部のコンクリートが拘束し、表面部に引張応力が作用し、ひび割れが発生する。表面と内部の温度差は、材齢 1~5 日の間にコンクリート内部温度がピークに達する時、最大値となり、その時期が最も温度応力に対するひび割れが発生しやすい。

一方、外部拘束ひび割れは、新設コンクリート全体の温度が低下するときの収縮変形が既設のコンクリートや岩盤等によって拘束され、発生する。



図ー1 供試体の寸法及び内視鏡観察の概要



写真ー1 実験全景

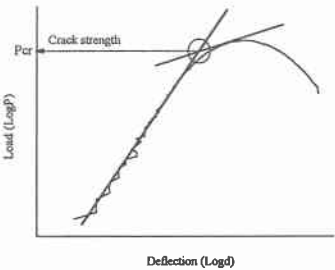
### 3.2 ひび割れ発生荷重の決定方法

ひび割れ発生荷重は、荷重－たわみ曲線で最初に傾きが変化する点であり、ASTM C 1018 からの定義では 非線形の開始する点で、その傾き 5%以上離れることおよび最大荷重の 45~70%の範囲とあるとしている。従って、ひび割れ荷重を決めるのは難しい面をもっている。

本論文は、荷重－たわみ曲線のデータを用い、Log P－Log  $\delta$  の曲線から図-2 に示すように 2 つの直線との交点を求め、一致する点をひび割れ発生荷重と考えた。

この考えは物質がひび割れなどによって別の状態に変る時、変曲点を示すことを用いたものである。

一方、荷重－たわみ曲線から決定されたひび割れ発生荷重と内視鏡からの測定値との比較をした結果を表-3 に示す。内視鏡からの測定は、供試体のびひび割れの発生開始点を探するのが極めて難しいが、表-3 にまとめたように LogP-Log  $\delta$  法と内視鏡観察値はほぼ対応していた。



図ー2 LogP-Log  $\delta$  法による  
ひび割れ発生荷重の決め方

表ー3 LogP-Log  $\delta$  法によるひび割れ発生荷重と内視鏡による観察値との比較

| Specimen No. | LogP－Log $\delta$ method (kgf) | Scope observation (kgf) |
|--------------|--------------------------------|-------------------------|
| SS6-01-32    | 405                            | 435                     |
| SS6-03-51    | 467                            | 426                     |
| SS6-05-33    | 568                            | 554                     |
| SS12-03-53   | 434                            | 448                     |
| SS12-05-22   | 395                            | 388                     |

### 3.3 本研究の検討方法

温度ひび割れ対策の基本的な考え方は次の3つに要約できる。すなわち、コンクリート温度上昇を小さくすること、発生する温度応力を小さくすること、発生する温度応力に対して抵抗性を向上させることである。

本研究は、コンクリートに温度ひび割れに対する抵抗性をつけるために繊維の補強によるマトリックスの性能向上を図った。従って、繊維の混入率、長さなどを変化した HFRC を用い、ひび割れ荷重を求め、そのことから次の公式を利用し、温度応力に対するマトリックスのひび割れ抵抗性に関する評価とした。

$$G_c = \{ \alpha (1 - \nu^2) / E \} \times (\sigma^2 \pi a) \quad (1)$$

ここに、 $G_c$ ：限界ひずみエネルギー解放率

$\alpha$ ：ひび割れ深さによる係数

$\nu$ ：ポアソン比 (ここは0.2)

$\sigma$ ：ひび割れ発生応力

$a$ ：ひび割れ深さ

材料の潜在的な欠陥に外力や温度勾配などの外的・内的作用が働くことによって、ひび割れが発生し伝播する。ひずみエネルギー解放率が、限界ひずみエネルギー開放率( $G_c$ )を超えるとひび割れ発生・伝播する可能性が生じる。従って、 $G_c$ を基準にしてひび割れ抵抗性を評価することが有効であると判断される。

## 4. 実験結果

### 4.1 ひび割れ発生荷重

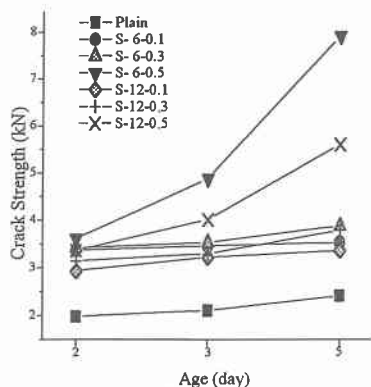
各シリーズについて、図-2のようなひび割れ発生荷重の決定方法からの結果を表-3および図-3に示す。すべてのシリーズの結果から、繊維の混入率が増えるほど、プレーンコンクリートよりひび割れ発生荷重が増進された。プレーンコンクリートと一番効果的である S-S6 シリーズ( $V_f$ : 1.0+0.5%の場合)との結果を材齢の経過によって比較すると、材齢 2 日は 1.8 倍、3 日は 2.3 倍、5 日では 3.2 倍である。

表-4 各シリーズのひび割れ発生荷重の結果

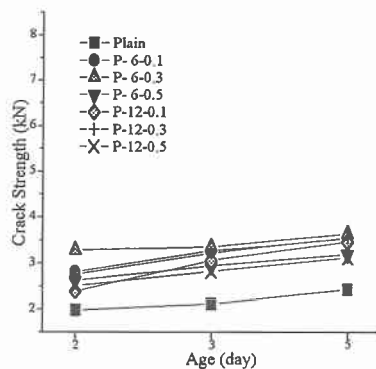
| 混入率<br>(%) | 材齢 2 日<br>(kN) |       |      |       | 材齢 3 日<br>(kN) |       |      |       | 材齢 5 日<br>(kN) |       |      |       |
|------------|----------------|-------|------|-------|----------------|-------|------|-------|----------------|-------|------|-------|
|            | SS-6           | SS-12 | SP-6 | SP-12 | SS-6           | SS-12 | SP-6 | SP-12 | SS-6           | SS-12 | SP-6 | SP-12 |
| 1.0+0.1    | 3.37           | 2.94  | 2.81 | 2.39  | 3.46           | 3.22  | 3.26 | 3.05  | 3.54           | 3.37  | 3.52 | 3.46  |
| 1.0+0.3    | 3.42           | 3.15  | 3.28 | 2.75  | 3.54           | 3.30  | 3.34 | 3.21  | 3.88           | 3.79  | 3.63 | 3.55  |
| 1.0+0.5    | 3.62           | 3.37  | 2.62 | 2.50  | 4.88           | 4.01  | 2.93 | 2.81  | 7.92           | 5.61  | 3.19 | 3.11  |
| プレーン       | 1.98           |       |      |       | 2.11           |       |      |       | 2.42           |       |      |       |

### 4.2 ひずみエネルギー開放率

各シリーズに対し、式(1)を用いて計算したひずみエネルギー開放率の結果を表-5および図-4に示す。この結果から考察すると、各のシリーズは材齢の経過および繊維混入率の増加によって、そのひずみエネルギー開放率が増加した。プレーンコンクリートに比べて HFRC のほうに増進が見られ、マトリックスに温度応力に対するひび割れ抵抗性の増進が認められた。特に S-S6 シリーズほうが最も効果的であり、そのシリーズとプレーンコンクリートを比較すると、2 日は 3 倍、3 日は 4.5 倍、そして 5 日は 8.9 倍となり、材齢の経過によって、その増加率が高くなった。



(a)S-S6, S-S12 シリーズ



(b)S-P6, S-P12 シリーズ

図-3 ひび割れ発生荷重

一方、PP 繊維で補強させた S-P6、S-P12 シリーズは PP 繊維が 0.3% までにはひずみ-エネルギー値が繊維の混入率によって増加したが、PP 繊維の混入率がその以上をこえると、ひずみ-エネルギー開放率が減少し、1.0+0.3% のほうが最適値となった。

一方、マイクロ繊維の添加による効果は、S-S6 対 S-S12 シリーズと S-P6 対 S-P12 シリーズの比較から判るように、両シリーズともにマイクロ繊維の添加による効果が判った。

この理由は、供試体が荷重を受け、初期段階に発生する微細ひび割れを主としてマイクロ繊維が抵抗するものと考えられる。このため、マイクロ繊維の添加により細微ひび割れの伝播が抑制され、ひび割れ発生荷重が高くなり、結局ひび割れに対する抵抗性が向上すると考えられる。

表-5 各シリーズのひずみ-エネルギー開放率

| 混入率<br>(%) | 2 日<br>G(N/mm) |       |       |       | 3 日<br>G(N/mm) |       |       |       | 5 日<br>G(N/mm) |       |       |       |
|------------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
|            | SS-6           | SS-12 | SP-6  | SP-12 | SS-6           | SS-12 | SP-6  | SP-12 | SS-6           | SS-12 | SP-6  | SP-12 |
| 1.0+0.1    | 0.019          | 0.015 | 0.016 | 0.013 | 0.020          | 0.016 | 0.020 | 0.019 | 0.021          | 0.017 | 0.022 | 0.021 |
| 1.0+0.3    | 0.020          | 0.015 | 0.019 | 0.016 | 0.021          | 0.016 | 0.021 | 0.020 | 0.042          | 0.020 | 0.036 | 0.025 |
| 1.0+0.5    | 0.021          | 0.017 | 0.016 | 0.015 | 0.036          | 0.022 | 0.018 | 0.017 | 0.089          | 0.041 | 0.018 | 0.018 |
| ブレーン       | 0.007          |       |       |       | 0.008          |       |       |       | 0.010          |       |       |       |

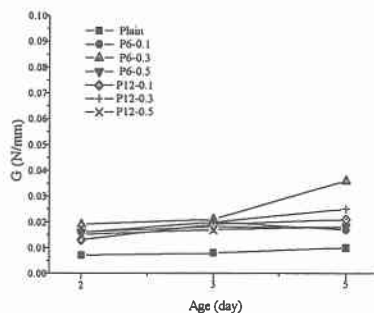
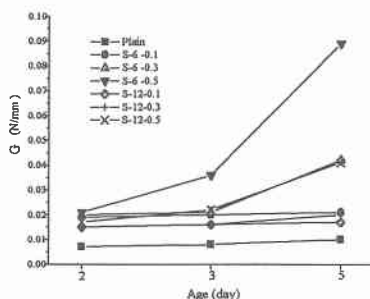


図-4 各シリーズのひび割れ抵抗性

今回は温度ひびわれの解析の初期段階として実験結果から求めたひずみエネルギー開放率を用い、各シリーズの温度ひび割れに対する抵抗性の評価基準としたが、今後は、FEM シミュレーションによって、その供試体の内部の温度応力分布を計算し、実験値と比較したひび割れ指数を求める予定である。

## 5. まとめ

本研究はマイクロ繊維の混入による HFRC の温度ひび割れに対する初期材齢のひずみエネルギー開放率からひび割れに対する抵抗性を検討したもので、次の結果を得られた。

- 1) ひずみエネルギー解放率の結果から、一番効果的である S-S6 シリーズとプレーンコンクリートを比較すると、2 日-3 倍、3 日-4.5 倍、5 日-8.9 倍などプレーンコンクリート比べ HFRC の温度ひび割れに対するひび割れ抵抗性効果が認められた。
- 2) HFRC は、材齢および繊維の混入率が増加するほど、抵抗性が増進する傾向であるが、PP 繊維では 0.3% の時が最適混入率となった。
- 3) SS-6、SP-6 シリーズのほうが SS-12、SP-12 シリーズよりひずみエネルギー開放率が増加した結果からマイクロ繊維の混入による増進効果が認められた。

## 【参考文献】

- 1) 日本土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）
- 2) 長瀧重義、佐藤良一：マスコンクリートにおける温度ひび割れ制御の動向、コンクリート工学、Vol.26、No.5、1988、pp.4-11
- 3) 金南旭、佐伯昇、堀口敬：ハイブリッド繊維補強コンクリートのひび割れ抵抗性、第 52 回セメント技術大会年次講演会、セメント協会、May 1998、pp.396-397