

論文 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と強度特性

金南旭*1・佐伯昇*2・堀口敬*3

要旨：低レベル放射性廃棄物の埋施設などにおいて、ひび割れのない高耐久性の構造物が要求されている。本研究では若材齢時のマスコンクリートの温度応力などによるひび割れ発生に対する抵抗性を高めるため、長短の繊維を混入したハイブリッド繊維補強コンクリートを用い、ひび割れの制御が重要な時期である若材齢時のコンクリート物性およびひび割れに対する抵抗性について検討したものである。実験に用いた繊維は鋼繊維とポリプロピレン繊維を用い、その長さは6, 12, 30mmのもので、特に6mm以下の場合をマイクロ繊維、それ以上をマクロ繊維と呼び、その補強効果について検討した。

キーワード：若材齢、マスコンクリート、温度ひび割れ、ハイブリッド繊維補強

1. はじめに

1970年代以来、繊維補強コンクリートの研究がさかんとなり、建設現場にも適用されている。

これまで一般的な繊維補強コンクリートは、鋼繊維、ガラス繊維、炭素繊維などの一種類の繊維で補強されているが、最近、異なる2種類以上の繊維を用いたハイブリッド繊維補強コンクリート(HFRC)の研究が注目されている⁽¹⁾。

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っている。

本研究は、長さ30mmの普通の鋼繊維を共通として、鋼繊維6, 12mmとポリプロピレン(PP)繊維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重要な若材齢2, 3, 5日を取り上げ、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性能を調べるため、マイクロおよびマクロ繊維の補強による効果についてモデル実験によっ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、長短繊維の混入によるハイブリッドの補強効果を調べるために4つの組合せを計画した。鋼繊維30mmを共通として、S-S6シリーズは鋼繊維6mm、S-S12シリーズは鋼繊維12mm、S-P6シリーズはPP繊維6mm、およびS-P12シリーズはPP繊維12mmと混合したものである。繊維の混入率は、鋼繊維30mmは1.0%と一定とし、鋼繊維およびPP繊維6, 12mmは、それぞれ0.1, 0.3, 0.5%とした。

一方、各々繊維の特徴を調べるため、繊維混入率を変化させ、マイクロ繊維のみ、マクロ繊維のみも製作した。

セメントは比重3.14のポルトランドセメント用い、砂と砂利は、比重がそれぞれ2.67と2.65で、それぞれ川砂と砕石を用いた。水セメント比は50%で、s/aは60%と一定とした。HFRCの作業性を確保するため、高性能減水剤を用いて、スランプは 10 ± 2 cm、空気量は5%になるように調整した。表-1は本実験に用いた供試体の種類を示す。

*1 北海道大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 工修 (正会員)

*2 北海道大学教授 工学部 土木工学専攻 工博 (正会員)

*3 北海道大学助教授 工学部 土木工学専攻 工博 (正会員)

2.2 若材齢の温度管理

材齢 2, 3, 5 日のマスコンクリートの内部温度変化をシミュレートするため、図-1 のような実際のマスコンクリートの温度履歴を適用し、実験供試体では打ち込み時に 25°C を維持し、3 日後に最大温度 60°C に設定した。対象構造物は紋別港第 3 防波堤であり、その寸法は、高さ 3m、幅 2m、厚さ 2m の 1 ブロックである。温度履歴の測定部位はブロックの中心部、すなわち表面から 1m である。

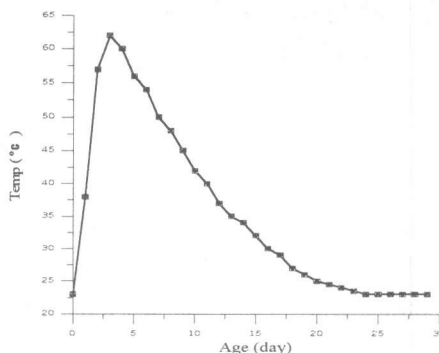


図-1 マスコンクリートの温度履歴

表-1 供試体の種類

Series	Specimen	Fiber Content		Fiber Content	
S-S6	S-S6-01	SF30 ¹⁾	1.0%	SF6 ²⁾	0.1%
	S-S6-03	SF30	1.0%	SF6	0.3%
	S-S6-05	SF30	1.0%	SF6	0.5%
S-S12	S-S12-01	SF30	1.0%	SF12 ³⁾	0.1%
	S-S12-03	SF30	1.0%	SF12	0.3%
	S-S12-05	SF30	1.0%	SF12	0.5%
S-P6	S-P6-01	SF30	1.0%	PP6 ⁴⁾	0.1%
	S-P6-03	SF30	1.0%	PP6	0.3%
	S-P6-05	SF30	1.0%	PP6	0.5%
S-P12	S-P12-01	SF30	1.0%	PP12 ⁵⁾	0.1%
	S-P12-03	SF30	1.0%	PP12	0.3%
	S-P12-05	SF30	1.0%	PP12	0.5%

主) SF30¹⁾, SF6²⁾, SF12³⁾: 鋼繊維 30, 6, 12mm
PP6⁴⁾, PP12⁵⁾: PP 繊維 6, 12mm

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行い、確認を行った。一方、供試体の水分蒸発を防止するため、脱型後、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

100×100×400mm の角柱供試体を用い、静的 4 点曲げ試験(スパン: 300mm)を行った。

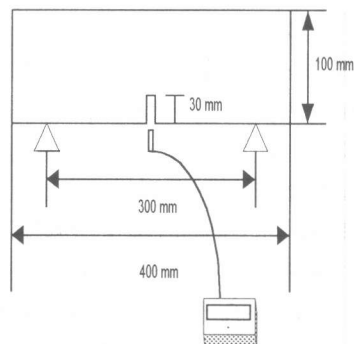
供試体には衝撃を与えないようにし、一定変位速度で荷重を加えた。最大荷重までの載荷速度は JIS A 1106 に準じ、スパンの 1/1500、今回の場合、0.2mm/min とした。

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、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た。

一方、荷重-たわみ曲線から求めるひび割れ発生荷重を実測値と比較するためファイバースコープを切り欠き部に入れ観察した。

本実験に用いた供試体の寸法を図-2に示す。



ファイバースコープ →

図-2 供試体の寸法

3. 実験結果および考察

3.1 ハイブリッド繊維補強の効果

マクロ繊維のみ、マイクロ繊維のみおよび 2 つの繊維を混入したハイブリッド繊維補強について、合計の混入率 V_f を一定としてハイブリッド効果を調べた。 $V_f=1.5$ と 2.0% のそれぞれの荷重変形を図-3 に示す。

まず、マクロ繊維のみとマイクロ繊維のみで補強された曲線を比較すると、マイクロ繊維は初期ひび割れを増加させる傾向を示し、初期段階に発生する微細ひび割れをマイクロ繊維が抵抗するものと考えられる。

一方、マクロ繊維のみの補強では、マイクロ繊維補強より多少初期ひび割れ荷重は低いが、マクロ繊維の特徴である最大荷重後の靱性が大きいことがわかる。また、マクロとマイクロ繊維で補強されたハイブリッド繊維補強は、マクロとマイクロ繊維の特徴である初期ひび割れと靱性がともに増進され、ハイブリッド化による補強効果が表れ、繊維種類と混入率の適切な組み合わせによって、ハイブリッド繊維補強化効果により高性能コンクリートになると思われる。

3.2 曲げおよび圧縮強度

(1) 強度特性

材齢 2～5 日の曲げ強度、圧縮強度実験結果を表-2, 3 に示す。材齢 2 日のマチュリティ(M)は $321^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ であり、材齢 3 日、5 日はそれぞれ $M=654^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、 $M=1234^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ である。

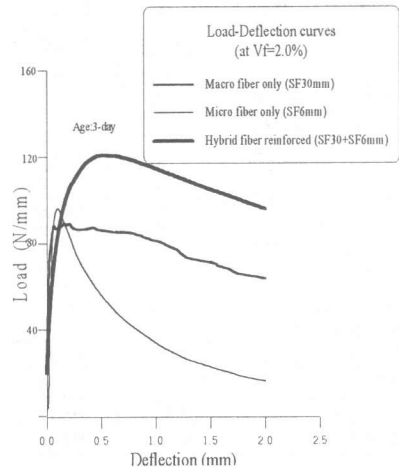
曲げ強度は、材齢および繊維混入率の増加によって、プレーンに比べ向上し、その強度増加率は、一番効果的である材齢 5 日で 繊維混入率 1.5%とプレーンを比較すると、約 3.6 倍となっている。

マクロとマイクロ繊維を混入した S-S6、S-P6 シリーズのほうがマクロ繊維のみ補強された S-S12、S-P12 より増加した。

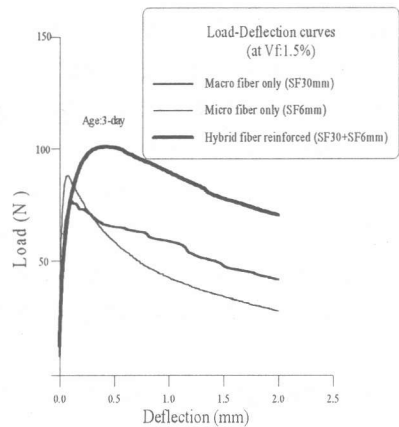
PP 繊維を入れたシリーズの場合、PP 繊維の混入率が 0.3%を超えると、強度の減少が見られた。これは、PP 繊維は鋼繊維に比べ、**fibeball** ができやすいためであると思われる。

一方、圧縮強度は、曲げ強度に比べ、強度の増加率が低く、プレーンコンクリートより低い場合もあり、大きな補強効果はあまりなかった。繊維による補強効果については、マトリックスと繊維の体積率による複合則が用いられる。

$$\sigma_c = \alpha_1 \sigma_m V_m + \alpha_2 \sigma_f V_f / d \quad (1)$$



(a) $V_f : 1.5\%$



(b) $V_f : 2.0\%$

図-3 各々繊維補強の挙動の比較

表-2 HFRC の曲げ強度の結果

specimen	Flexural strength (N/mm ²)		
	2-day	3-day	5-day
Plain	2.07	2.26	2.53
S-S6-01	4.31	4.55	5.43
S-S6-03	4.53	4.56	5.73
S-S6-05	5.31	7.18	9.11
S-S12-01	3.78	3.92	5.02
S-S12-03	4.66	5.36	5.91
S-S12-05	4.73	5.90	9.63
S-P6-01	3.69	4.54	4.94
S-P6-03	3.89	4.58	5.81
S-P6-05	3.17	3.16	3.54
S-P12-01	3.17	4.07	4.68
S-P12-03	3.68	4.32	5.02
S-P12-05	2.65	2.93	3.35

表-3 HFRC の圧縮強度の結果

specimen	Compressive strength (N/mm ²)		
	2-day	3-day	5-day
Plain	10.20	10.96	13.56
S-S6-01	10.73	12.21	16.42
S-S6-03	12.85	16.15	17.67
S-S6-05	13.92	15.67	18.21
S-S12-01	10.33	13.76	16.89
S-S12-03	12.66	15.51	18.64
S-S12-05	14.85	16.85	20.92
S-P6-01	9.12	10.70	12.31
S-P6-03	9.80	11.14	12.86
S-P6-05	6.69	8.55	11.27
S-P12-01	6.69	8.78	10.06
S-P12-03	7.61	9.47	10.99
S-P12-05	6.79	8.02	10.67

ただし、 σ_c 、 σ_m 、 σ_f は、各々複合体、マトリックス、繊維の応力であり、 d は繊維の直径、 V_f は繊維の混入率で、 V_m は $1-V_f$ と表現できる。R.N.Swamyらは、繊維の混入率、形状、養生方法およびセメントの種類を変化させた様々な実験データから回帰分析によって、引張強度について、それぞれ、 $\alpha_1=0.97$ 、 $\alpha_2=3.41$ を提案している⁽²⁾。 α_1 はR.N.Swamyらの値を用いることとし、実験データから最小2乗法を用い、ハイブリッド繊維補強に適用できる次のような式を求めた。

$$\sigma_{cu} = 0.97 \sigma_m V_m + 3.75 V_f (l/d) + 2.19 V_f (l/d) \quad (2)$$

式(2)を用いて、S-S6 シリーズについて計算し、その結果を図-4に示す。結果から判るように実験値と計算値はほぼ対応している。

本実験の場合、全体の繊維の混入率が2.5%を超えると、強度が低下する傾向があり、混入率3.0%のほうが2.5%より低い。繊維の混入率が10%以上でも強度の増進が現れることも報告されており⁽³⁾、もっと性能が優れる減水剤などを添加することにより、繊維の増加率を上げても強度の増進が図れると思われる。

(2) ひび割れ発生荷重

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るが、ひび割れ荷重を決めるのは難しい面もっている。

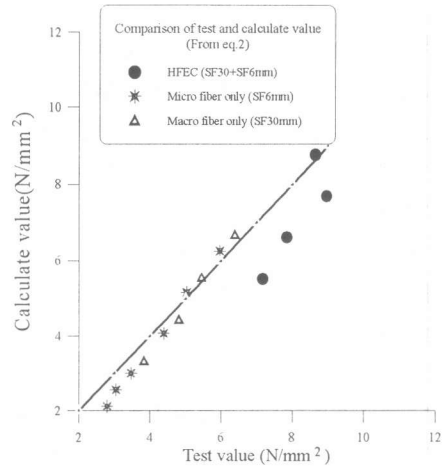


図-4 算定値と実験値との比較 (eq.2)

荷重-たわみ曲線のデータを用い、Log P-Log δ の曲線から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。

LogP-Log δ 方法から求めたひび割れ発生荷重とファイバースコープからの測定値の比較をした結果を表-4に示し、ファイバースコープを用いて撮影したひび割れを写真-1に示す。

表-4 各々方法によるひび割れ発生荷重

Specimen	LogP- Log δ (N)	Scope observation (N)
S-S6-01	41.3	44.3
S-S6-03	47.6	43.4
S-S6-05	57.9	56.5
S-S12-03	44.2	45.7
S-S12-05	40.3	39.5

ファイバースコープからの測定は、供試体のひび割れの発生開始点を探するのが遅れがちになるが、ここに挙げたものは、確認されたものをまとめたもので、実験データとファイバースコープ観察値はほぼ対応していた。

一方、ひび割れ発生応力についても、式(1)を用い、マトリックスの係数 $\alpha_1=0.843$ は

R.N.Swamy らのものを適用し、最小 2 乗法を用いて、次のようなひび割れ発生応力式を求めた。

$$\sigma_{cf} = 0.843 \sigma_m V_m + 2.67 V_f (l/d) + 1.88 V_f (l/d) \quad (3)$$

算定値と実験値の比較した結果を図-5 に示す。

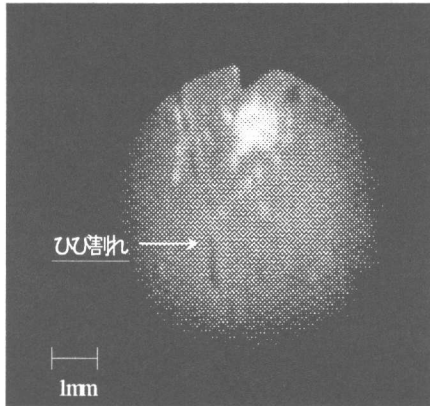


写真-1 ひび割れの様子
(ファイバースコープ撮影)

3.3 温度ひび割れに対する検討

(1) 限界ひずみエネルギー解放率

若材齢時のコンクリートの温度ひび割れに対する抵抗性を向上させるために繊維補強による性能向上を考えた。

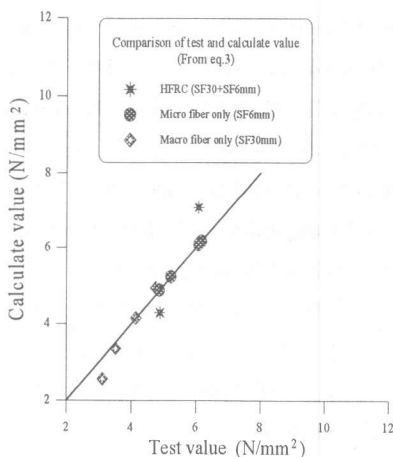


図-5 算定値と実験値との比較 (eq.3)

繊維の混入率、長さなどを变化した HFRC を用い、ひび割れ荷重を求め、下式の式(4)を用い、若材齢時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をした。

$$G_c = \alpha \{ (1 - \nu^2) / E \} \times (\sigma^2 \pi a) \quad (4)$$

ただし、 G_c は、限界ひずみエネルギー解放率、 α はひび割れ深さ/桁の高による係数で、この場合 1.122 である。 ν はポアソン比、 σ はひび割れ発生応力、 a はひび割れ深さである。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解放率(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。

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解放率の結果(3本の平均値)を表-5 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、ひずみエネルギー解放率が増加した。プレーンコンクリートに比べて HFRC の方が大きな増加が見られ、温度応力に対するひび割れ抵抗性の向上が認められた。特に S-S6 シリーズが最も効果的であり、こ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。

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、ひずみエネルギー解放率が減少し、S-P6-03 の方が高い値となった。

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。

(2) 温度ひび割れ抵抗性

温度ひび割れ抵抗性としては一般に温度ひび

表-5 ひずみ-エネルギー解放率

Specimen	Strain-energy release rate (N/mm)		
	2-day	3-day	5-day
Plain	0.007	0.008	0.010
S-S6-01	0.019	0.020	0.021
S-S6-03	0.020	0.021	0.042
S-S6-05	0.021	0.036	0.089
S-S12-01	0.015	0.016	0.017
S-S12-03	0.016	0.017	0.020
S-S12-05	0.017	0.022	0.041
S-P6-01	0.016	0.020	0.022
S-P6-03	0.019	0.021	0.036
S-P6-05	0.016	0.018	0.018
S-P12-01	0.013	0.019	0.021
S-P12-03	0.016	0.020	0.025
S-P12-05	0.015	0.017	0.018

割れ指数が用いられるが、ここではひび割れの発生、伝播挙動を支配するひずみ-エネルギー解放率(G_c)を用い検討した。この温度応力解析には JCI のマスコンクリートの温度・応力計算プログラムを使用し、多少計算を加えて G を求めた。対象構造物は紋別港第3防波堤で、親水施設として、用いられる。

マスコンクリートとして施工するにあたって、温度ひびわれの制御を考慮して設計・施工され、かなりの品質向上が計られたが、いくつかのひび割れが生じるようになった。図-6 は温度ひび割れが生じた部位で、プレーンコンクリートではひび割れが生ずることが判る。ハイブリッド繊維補強を用いた場合、 G_c が構造物に生ずる G より大きくなり、温度ひび割れを制御することが可能であることが判った。

4. まとめ

今回の研究で得られた主な知見をまとめると以下のようである。

- (1) 曲げ強度およびひび割れ荷重を体積率による複合則より算定した結果、ほぼ適用が可能であることが判った。
- (2) 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 日マチュリティ

(M)は $321^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ で 3 倍、3 日 ($M=654^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) で 4.5 倍、5 日 ($M=1234^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) で 8.9 倍などプレーンコンクリート比べ HFRC の温度ひびわれに対するひび割れ 抵抗性効果が認められた。

(3) プレーンコンクリートでは温度ひび割れを制御しにくい場合において、繊維補強コンクリートを用いることによって温度ひび割れを制御することが可能である。

(4) 鋼繊維では、混入率が 0.1~2.5%と繊維の混入率が増加するほど、ひび割れ抵抗性が増進する傾向にあるが、PP 繊維では 0.3%の時のひび割れ抵抗性に対してピークの混入率となった。

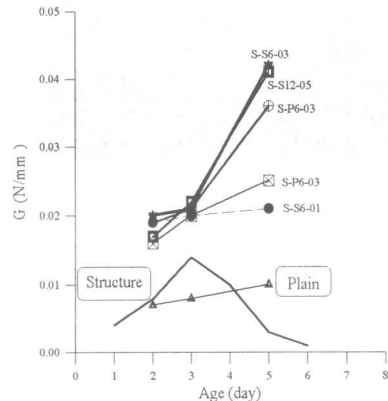


図-6 HFRC の実構造物への適用

【参考文献】

- 1) P.Rossi : High Performance Multinodal Fiber Reinforced Cement Composites, ACI Materials Journal, Vol.94, No.6, pp.478-483, Nov/Dec. 1997
- 2) R.N.Swamy : The Mechanics of Fiber Reinforced of Cement Matrices, SP44-1, ACI, pp.1-28
- 3) B.Mobasher : Mechanical Properties of Hybrid Cement Based Composites, ACI Materials Journal, Vol.93, No.3, pp.284-292, May/June 1996
- 4) 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, pp.396-397, 1998. 5